

小型高輝度硬 X 線源開発 - (2) S バンド線形加速器システム -

平野耕一郎^{1,A)}、野村昌弘^{A)}、山崎良雄^{A)}、酒井いずみ^{B)}、高野幹男^{B)}、
奥木敏行^{A)}、明本光生^{A)}、早野仁司^{A)}、浦川順治^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器開発機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1 - 1

^{B)}放射線医学総合研究所

〒263-0024 千葉県稲毛区穴川 4 丁目 9 - 1

概要

高輝度硬 X 線生成とその利用の可能性を実証するため、小型電子蓄積リングと光蓄積装置^[1]でレーザーコンプトン散乱により超高輝度硬 X 線源開発を計画している。この入射器として S バンド小型線形加速器を現在製作している。本報告では、マルチバンチフォトカソード RF 電子銃^[2]及び 2 本の高加速勾配型加速管を用いたコンパクトな線形加速器で、電荷量 2nC/bunch の 20 バンチビーム (2.8nsec bunch spacing) をビームエネルギー 200MeV まで加速して、0.3% のエネルギー拡がりのできる f 方式によるマルチバンチエネルギー補正システムについて報告する。

1. はじめに

S バンドリニアックは、RF 電子銃及びその高周波源、並びに、2 本の加速管及びそれらに RF を供給する高周波源とで構成される。図 1 に S バンドリニアックの構成図を示す。クライストロン出力 RF パワ 85MW、パルス幅 4.5 μ sec を SLED で 5 倍以上に増幅させ、400MW 以上の約 1 μ sec の RF パルスを形成し、2 分割して各加速管に供給する。S バンドリニアックで電荷量 2nC/bunch の 20 バンチビームを 200MeV まで加速する場合、3% 程度のエネルギー幅が生じる。このエネルギー幅が小さいほど、トランスポート系の電磁石の小型化、放射化の低減、ビーム入射の高

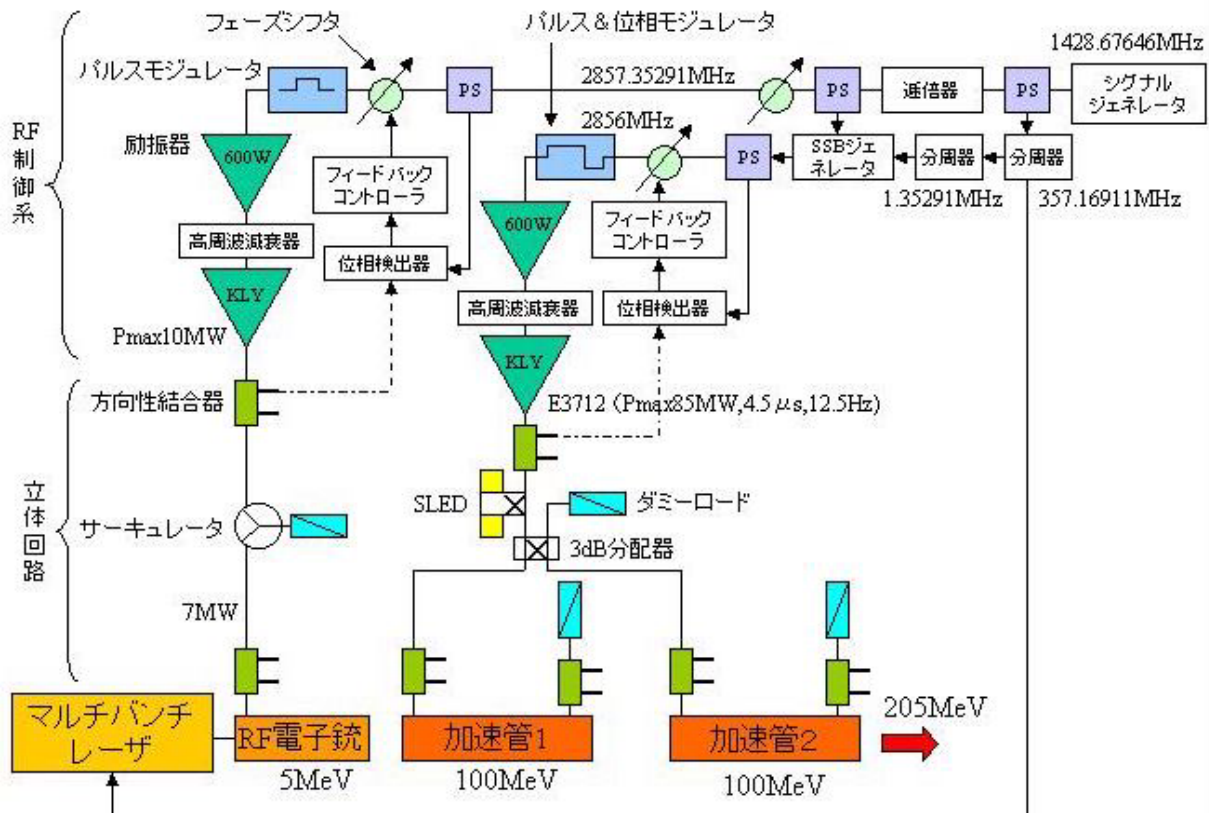


図 1 S バンドリニアック構成図

¹ E-mail: khirano@post.kek.jp

効率化を行うことができる。そこで、ビームエネルギーを補正するために、図2のようにRF電子銃から出力されるビームの周波数をメインの加速周波数2856MHzに対して $f = 1.35291\text{MHz}$ 変化させ、各バンチビームの加速位相をわずかずらし、20バンチビームの後段ほど加速電場が強くなるようにする。これにより、RFパワを最大限利用した状態で、ビームを加速しながらビームローディングによるエネルギー拡がり補正し、エネルギー幅を0.3%に低減させる。

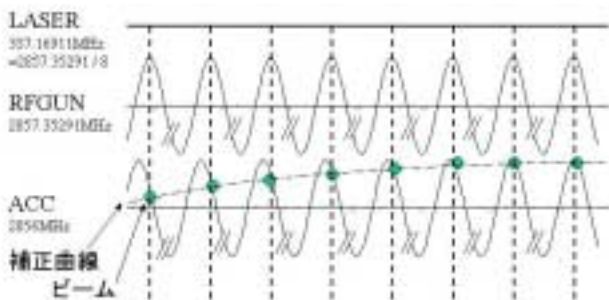


図2 RFとレーザーのタイミング関係

2. Sバンドリニアック

Sバンドリニアックの主な仕様を表1に示す。フォトカソードRF電子銃は1.6セル空洞BNLタイプである。フォトカソードにCs₂Teを使用し、励起光としてモードロックNd:YVO₄レーザーの4倍高調波を使用する。加速管は33MeV/mの平均高加速勾配で運転可能な長さ3mの定加速勾配型進行波加速管を採用する。Sバンドクライストロン電源には、インバータ方式の直流電源からパルス変調器に電力を供給させ、パルスストラスで1:16に昇圧させるコンパクトな電源システムを採用する。加速管、Sバンドクライストロン、集束コイル及び立体回路の冷却には、30.0±0.1の恒温度冷却水を使用する。

表1 Sバンドリニアックの主な仕様

加速管RF周波数	2856MHz
RF電子銃RF周波数	2857.35291MHz
加速管出口ビームエネルギー	200MeV
バンチ長	6psec
バンチ間隔	2.8nsec
電荷量	2nC/bunch
バンチ数	20
ビームマクロパルス幅	56nsec
最大繰返し	12.5pps
ビームパワー	100W
規格化エミッタンス	10 mm・mrad
クライストロンRF出力電力	85MW
クライストロン電源パルス幅	7.5 μ sec
クライストロンRFパルス幅	4.5 μ sec
SLED出力パルス幅	1 μ sec

3. タイミングシステム

電子蓄積リングを含めたSバンドリニアックのタイミングシステム^[3]を図3に示す。シグナルジェネレータから基準信号1428.67646MHzを出力し、2週倍した周波数2857.35291MHzをRF電子銃に用いる。基準信号の2分周信号714.33823MHzを電子蓄積リングのRF周波数として用い、4分周信号357.16911MHzをRF電子銃用レーザーの入力信号及びタイムディレイモジュール(TD4)のクロック信号として用いる。RF電子銃用のクライストロンやキャピティ等は既存コンポーネントを利用することを考えているため、RF電子銃の周波数は2856MHzから1.5MHz程度の離調範囲とした。RF電子銃から出射される2.8nsec間隔の20バンチビームはマイクロパルス幅10psecのレーザーをマイクロパルスの繰返し357.16911MHz、マクロパルス幅56nsecでカソードに打ち込むことによって作り出される。電源ラインに同期させたライン同期モジュールの出力信号はTD4を用いて357.16911MHzに同期をかけてジッターを低減させる。RFの繰返しは12.5Hzに固定し、レーザーのマクロパルスを12.5/2ⁿ Hz (n=1~3)の範囲内で変化させることによってビームの繰返しを調整する。

電子蓄積リングのHarmonic numberが66の場合、Revolution frequencyは10.82331MHzである。この8分周信号1.35291MHzはライン同期モジュールから出力されるリニアック及びリングの各機器の同期信号として用いるため、リニアックで加速したビームは電子蓄積リングへ入射できる。1.35291MHzは4N分周器で357.16911MHzを264分周させて作る。SSBジェネレータ^[4]を用い、2857.35291MHzと1.35291MHzとを合成して、加速管の加速周波数2856MHzを作る。

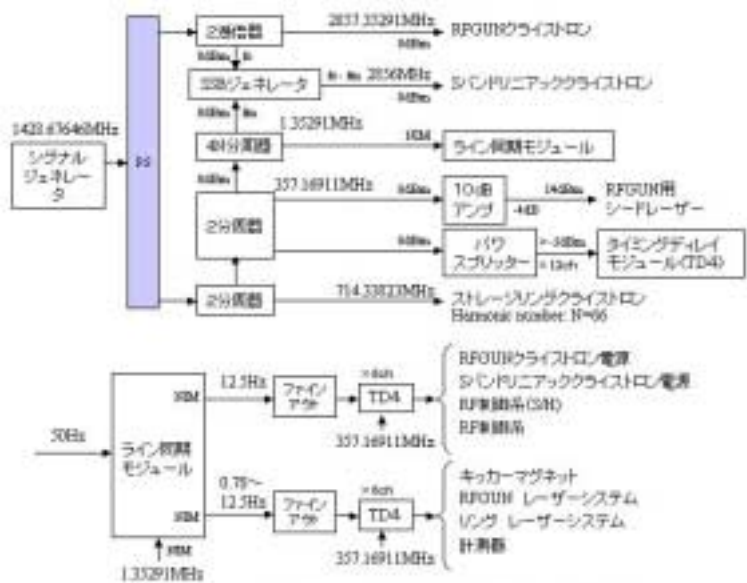


図3 タイミングシステム

4. ビームエネルギー拡がりの補正

SLED^[5]はSLACのリニアックのエネルギー増強に採用されたパルス圧縮法の一つである。クライストロン出力電力85MWは、SLED結合係数4.5、SLEDのフィリングタイム2.026 μ secの時、 $t_1=3.5\mu$ secの間、SLED空洞内に蓄積される。SLED空洞から放出されるRF電力は180°位相反転制御により400MW以上に増幅され、その後減衰しながら出力される。幅1 μ secの右肩下がりのRF電力は分配器で2分割され、加速管に投入される。加速管のエネルギーゲインは t_1 から加速管のフィリングタイム T_a までの間、図4のように増加して4.33 μ sec ($t_2=t_1+T_a$)の時に最大となる。ここで、Q値13000、減衰定数0.57の特性を有する加速管のフィリングタイム T_a は0.83 μ secである。加速管内の電界は郡速度の積分から求められる波の伝播時間を用いて与えられる。伝播時間を考慮すると、加速管内に不連続電界が発生する。この不連続電界の位置を考慮し、時間帯($t_1 < t < t_2$)間で加速管内の電界を加速管長3mで積分して加速管1本当たりのエネルギーゲイン^[6]を図4のように求めた。また、RF電子銃から出力される幅56nsecのマルチパンチのビーム電流714.3mAは一定として、過渡的なビームローディング^[7]を求めた。

$P_{kly}=85$ MW及び60MWの場合、1本当たりのエネルギーゲイン V_{acc} 及びビームの入射タイミング $t_{beam}=4.27\mu$ sec時のビームローディングを考慮したエネルギーゲインを図4に示す。このとき、 f_1 と f_2 の周波数差 $\Delta f=1.35291$ MHzによって作られる図2に示す補正曲線を用いて、ビームローディングによるエネルギー拡がりを補正する。また、ビームの入射タイミングを変化させ、エネルギーゲインの傾きを利用してビームエネルギーを補正する。これらのビームエネルギー補正結果を表2に示す。 f 方式によるエネルギー補正を行う場合、クライストロン出力電力が60MW以上あれば、加速管1本当たりのエネルギーゲイン99MeV以上で0.3%以下のエネルギー幅が得られる。RFGUNを含めた加速器全体では、200MeV以上のビームエネルギーが得られると推測さ

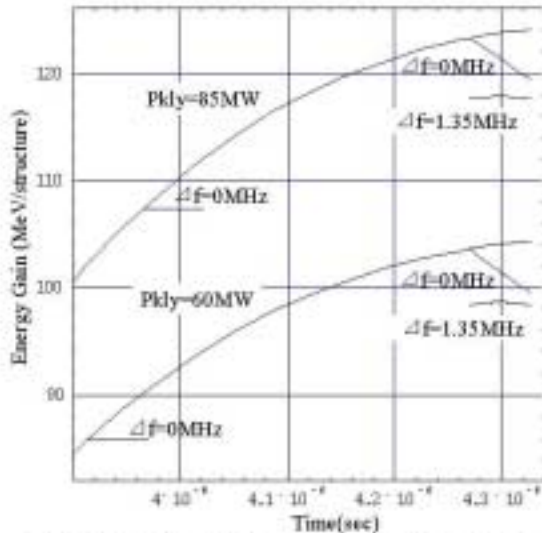


図4 加速管1本当たりのエネルギーゲイン

れる。ビーム入射タイミング調整によるエネルギー補正方法は容易であり、補正されたエネルギー幅は f 方式の1/5以下になるが、200MeV以上のビームエネルギーを得るにはクライストロン出力電力に十分な余裕がない。 f 方式の場合のエネルギーゲインはビーム入射タイミング調整の場合のエネルギーゲインより1割以上高い。このため、 f 方式によるエネルギー補正はパワを有効利用しながらエネルギーを補正できるシステムであるといえる。

表2 ビームエネルギー補正結果

P_{kly} (MW)	85		60			
	t_{beam} (μ sec)	4.27	3.97	4.27	3.91	
f (MHz)	0	1.35	0	0	1.35	0
V_{acc} (MeV/structure)	122	118	107	102	99	86
エネルギー幅(%)	3.3	0.22	0.04	3.9	0.33	0.04

5. まとめ

小型高輝度硬X線源の入射器としてSバンド小型線形加速のシステム検討を行った。2本の高加速勾配型加速管を用い、電荷量2nC/bunchの20パンチビーム(2.8nsec bunch spacing)を加速した場合、1.35291MHzの f 方式によるエネルギー補正を行うと、ビームエネルギー200MeV以上でエネルギー幅0.3%が得られる。RF電子銃から出力されたマルチパンチビームを安定に加速させることが課題であるため、今後はビーム電流の安定化及び補正方法を含めた検討が必要である。

6. 謝辞

加速器のシステム検討に関し、KEK、ATFグループの方々の協力に感謝します。エネルギー補正方法に関し、早稲田大学の柏木先生に協力頂きました。クライストロン等の検討に協力頂いたKEKの福田茂樹先生及び松本利広先生に感謝します。この研究開発は放医研・先進小型加速器計画として進めているもので、本推進委員会のご理解に感謝する。

参考文献

- [1] 野村 他, “小型高輝度硬X線源開発 - (3) 小型電子蓄積リング及び光蓄積装置”, 第27回リニアック技術研究会, 7P-6, 2002.
- [2] 山崎 他, “小型高輝度硬X線源開発 - (1) マルチパンチフォトカソードRFガン”, 第27回リニアック技術研究会, 7P-51, 2002.
- [3] 内藤 他, “ATFのタイミングシステム”, 第21回リニアック技術研究会, 1996, pp.171-173.
- [4] Edited by F.Hinode et. al., “ATF Accelerator Test Facility Design and Study Report”, KEK Internal 95-4, June 1995 A, pp.4-39.
- [5] 設楽 “高周波源”, OHO'90, 1990, 8-10.
- [6] Z. D. Farkas et. al., “SLED: A METHOD OF DOUBLING SLAC'S ENERGY”, SLAC-PUB-1453, Jun 1974.
- [7] 竹田 他 “高周波源”, OHO'95, 1995, 18-20.