

SASE - FEL入射器のビームシミュレーション

澤田 憲司^{A)}、渡川 和晃^{B)}、金 有鍾^{B)}、新竹 積^{B)}

^{A)} 住友重機械工業株式会社

〒792-8588 愛媛県新居浜市惣開町 5-2

^{B)} 理化学研究所播磨研究所

〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

概要

SPring-8 地区で開始された軟X線 SASE-FEL 計画 SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) では、エネルギー 1 GeV、ピーク電流 2~4 kA、規格化エミッタンス (RMS) 0.5~2 mm·mrad、パンチ長 (FWHM) 0.5 psec の電子ビームによる波長 2 nm の FEL 発振を最終目標としており、現在、その 1 期計画で、エネルギー 230 MeV により 40 nm の FEL 発振を目指している。この入射器は、熱カソード型電子銃から引き出される 500 kV の電子ビームを、2 台の 476 MHz シングルギャップ高周波空洞 (サブハーモニックバンチャとブースタ) によりバンチング及び予備加速を行い、全長約 1 m の Lバンド (1428 MHz) 加速管により 20 MeV に加速して、後段の Cバンド (5712 MHz) 加速管に入射する。本論文では、PARMELA により進めている入射器最適化の経過報告として、サブハーモニックバンチャ入口から Lバンド加速管出口のビームシミュレーションについて報告する。

このビームシミュレーションでは、始めに Lバンド加速管として定在波型を想定し、ほぼ目標に近い性能を確認した後、これと同じ加速勾配の進行波型のシミュレーションを行い、定在波型と同様の性能

が得られることを確認した。定在波型は比較的少ない高周波電力で高い加速勾配が得られる利点があるが、サーキュレータの開発が難点であり、現在、進行波型を採用する方向で詳細な検討を進めている。特に、今回得られた結果では、高周波電力が約 55 MW と大きいことと、パンチ長さ 12 psec が目標値の 4 psec に達していないことの 2 点が、今後の重要な課題である。

1. はじめに

近年、真空紫外から軟X線、さらにはX線領域の高輝度放射光源として SASE 型 (Self - Amplification of Spontaneous Emission) の FEL が注目を集めており、理化学研究所播磨研究所では、2001 年度から Cバンド加速管を主加速器とする SASE-FEL 計画 SCSS を開始した。2005 年度までの 1 期計画では、エネルギー 230 MeV、ピーク電流 2~4 kA、規格化エミッタンス 0.5~2 mm·mrad、パンチ長 (FWHM) 0.5 psec の電子ビームによる波長 40 nm の FEL 発振を目指している。昨年度の本研究会では、この入射器の設計として、2 次元 PIC コード EMSYS-BUNCH によって進

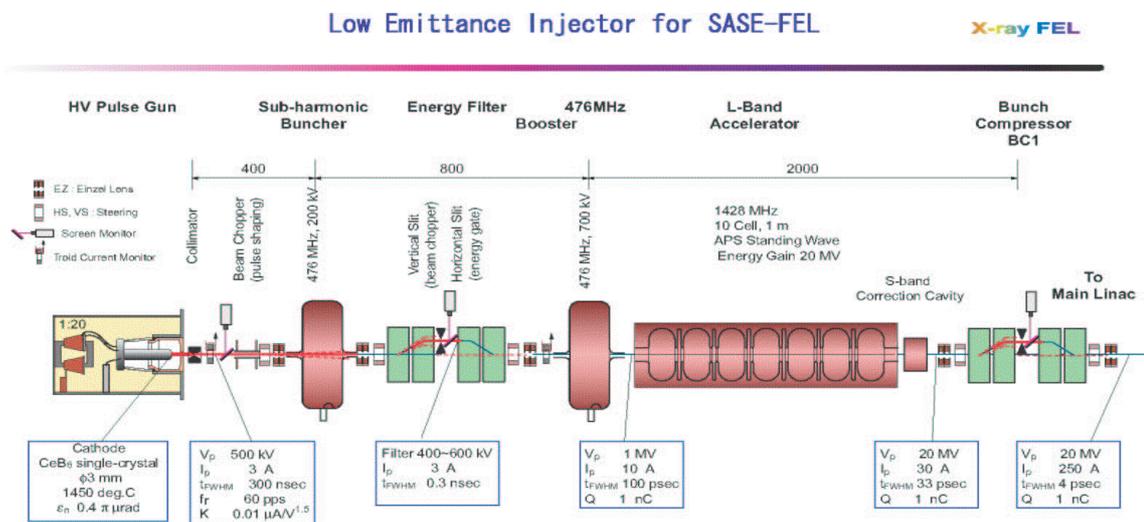


図 1 SASE-FEL 入射器の概念図 (検討中)

^AE-Mail: Kji_Sawada@shi.co.jp

めていた電子銃からLバンド加速管入口までのビームシミュレーションを報告した。本年度は、PARMELA を使って現在進めているサブハーモニックバンチャ入口からLバンド加速管出口までのビームシミュレーション及び、その結果に基づいて算出した高周波パラメータ等について報告する。

2. 入射器のレイアウト及び目標性能

図1に、SASE-FEL用に検討している入射器の概略図を示す。電子銃には直径3mmの単結晶CeB₆をカソードとする熱電子銃を用い、パルス高電圧を印加して時間幅(FWHM)約1.5μsec、3Aの電子ビームを引き出す。電子銃の直後に配置されたビームチョップには矩形波のパルス電圧を印加し、ここで電子ビームを476MHzの1周期に相当する2.1nsecに成形する。さらに、476MHzのサブハーモニックバンチャで約200kVのエネルギー変調を加え、ドリフトによりバンチングをはかりつつ、その後方のエネルギーフィルタで電子ビームの必要部分約300psecのみを切り出す。第2空洞であるブースタには、約700kVの高周波電圧を印加し、電子ビームを1MeVに加速して空間電荷力を緩和するとともに、電子間のエネルギー差を増大させることによって、Lバンド加速管までのドリフト領域でより一層のバンチングをはかる。また、Lバンド加速管までの横方向のビーム集束には、高いアラインメント精度を容易に実現できるアインツェルレンズを使用する。

定在波型Lバンド加速管は、当初、全長約1m、10セル程度のAPS構造を想定した。その理由は、APS構造は電場安定度が高く、製作・調整が容易であり、比較的少ない高周波電力で20MV程度の加速電場が得られること、この構造で電子ビームを安定に加速している実績があることなどである。

当初、Lバンド加速管から出射される電子ビームは、Cバンド・コレクションキャビティによって縦方向エミッタンスの分布形状を改善し、バンチコンプレッサによってバンチ幅を33psecから4psec(双方ともFWHM)に圧縮する方針であった。しかしながら、20MeV程度で偏向磁場を通過させると、コヒーレントシンクロトロン放射光と集束系の色収差によりエミッタンス増大が引き起こされることが明らかになったため、現在では、Lバンド加速管出口で4psec(FWHM)のバンチ幅が得られる入射器を設計するよう方針を変更した。従って、Lバンド加速管出口、即ち、入射器出口の目標性能を表1の通りとして、現在、機器構成・仕様の最適化に取り組んでいる。

表1 SASE-FEL 入射器終端の目標性能

ビームエネルギー	> 20 MeV
バンチ内電荷量	1 nC
規格化エミッタンス(RMS)	1~1.5 mm·mrad
バンチ長さ(FWHM)	4 psec

3. シミュレーション結果及び機器仕様

3.1 定在波型Lバンド加速管の場合

定在波型Lバンド加速管を使用する場合の入射器終端の縦方向・横方向エミッタンスを図2に、入射器終端のビームパラメータを表2に、各高周波空洞の主要仕様を表3から表5に示す。

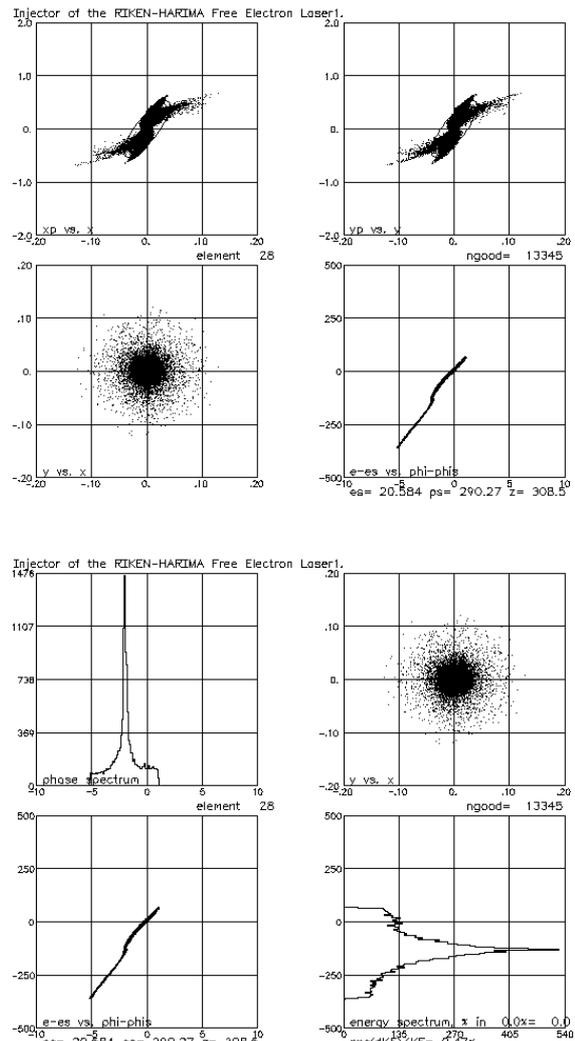


図2 定在波型Lバンド加速管を使用する場合の出射ビームエミッタンス(上図:横方向エミッタンス、下図:縦方向エミッタンス)

表2 定在波型Lバンド加速管を使用した場合の入射器終端のビームパラメータ

ビームエネルギー	20.6 MeV
バンチ内電荷量	0.93 nC
規格化エミッタンス(RMS)	X 1.34 mm·mrad
	Y 1.33 mm·mrad
バンチ長さ(FW)	12.7 psec

表3 サブハーモニックバンチャの主要仕様

周波数	476 MHz
全長	0.4 m
直径	482 mm
アパチャ径	20 mm
ギャップ電圧	202 kV
シャントインピーダンス	8.9 M /m
Q 値	23390
高周波時定数	7.8 μ sec
高周波電力	11.5 kW

表4 ブースタの主要仕様

周波数	476 MHz
全長	0.4 m
直径	482 mm
アパチャ径	20 mm
ギャップ電圧	700 kV
シャントインピーダンス	8.9 M /m
Q 値	23390
高周波時定数	7.8 μ sec
高周波電力	138 kW

表5 定在波型Lバンド加速管の主要仕様

周波数	1428 MHz
モード	/2 mode
全長	1.213 m
直径	174.5 mm
アパチャ径	48 mm
セル数	11
E ₀	22.8 MV/m
シャントインピーダンス	35.3 M /m
Q 値	14660
高周波時定数	1.63 μ sec
高周波電力	17.9 MW

表2に示す入射器終端のビームパラメータは、バンチ長さが目標性能に比べ長いこと以外は、ほぼ目標性能を満たしている。ただ、ここで問題となるのは、定在波型を採用する場合には、20 MW 近い高周波電力で使用できるサーキュレータを使用しなければならず、ここに少なからぬ開発要素が伴うことである。そこで、次に、Lバンド加速管を進行波型とした場合の検討を行うこととした。

3.2 進行型Lバンド加速管の場合

進行波型Lバンド加速管を使用する場合の入射器終端のビームパラメータを表6に、進行波型Lバンド加速管の主要仕様を表7に示す。入射器終端のビームパラメータは、定在波型と同等の値が得られていることから、定在波型と進行波型はビームダイナミクス上同等の性能を有しており、バンチ長さ以外は、ほぼ十分な性能が得られることが分かる。ただ、進行波型のシミュレーションでは、加速管の全長を定在波型と等しくするために加速勾配を 17.1 MV/m としており、この高い加速勾配を得るために 50 MW

を超える高周波電力が必要である。実際に使用する予定のクライストロンは最大出力 20 MW であり、今後、加速勾配を抑え全長を長くして高周波電力を 20 MW 以下に抑え、より短バンチの電子ビームが得られる機器構成を検討する方針である。

表6 進行波型Lバンド加速管を使用した場合の入射器終端のビームパラメータ

ビームエネルギー	20.7 MeV
バンチ内電荷量	0.93 nC
規格化エミッタンス(RMS)	X 1.33 mm·mrad
	Y 1.32 mm·mrad
バンチ長さ (FW)	11.7 psec

表7 進行波型Lバンド加速管の主要仕様

周波数	1428 MHz
モード	/2 mode
全長	1.208 m
直径	169.2 mm
アパチャ径	42 mm
セル数	22
E ₀	17.1 MV/m
シャントインピーダンス	28.8 M /m
Q 値	17220
群速度	0.98 %
フィリングタイム	41 nsec
高周波電力	54.4 MW

4 . おわりに

SASE-FEL 入射器を設計するため、PARMELA によるビームシミュレーションを、定在波型・進行波型の2通りのLバンド加速管に関して行い、ほぼ同等の加速性能を得た。また、入射器終端の目標性能のうち、ビームエネルギー・バンチ内電荷量・規格化エミッタンスはほぼ達成されているものの、バンチ長さ 4 psec は満たされておらず、この値の短縮が課題として残されている。今後は、機器の製作性や機器配置の自由度が高い進行波型加速管を使用する方針の元、一層の短バンチ化と、高周波機器仕様の最適化をはかる方向で検討を続ける予定である。