

ANALYSIS OF SASE-FEL AT ISIR, OSAKA UNIVERSITY WITH GENESIS

S.Umezono, R.Kato, G.Isoyama, S.Kashiwagi, T.Noda
Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

We are conducting experimental study of Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE) in the far-infrared region using the L-band linac at the Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University. Analysis using simulation code GENESIS can take account in some realistic effect which is ignored by one dimensional theory. In this paper, we will report the analysis of SASE-FEL at ISIR, OSAKA University with GENESIS.

GENESISを用いた阪大産研SASE-FELの解析

1. はじめに

阪大産研ではLバンド電子ライナックを用いて遠赤外域でのSASEの基礎研究を行っている^[1]。SASEの増幅過程は理想的な条件が成立する場合には、1次元モデルで理解できるが、その条件は必ずしも満たされるわけではない。そこで、電子ビームのベータatron振動等の現実的な効果を取り入れることができるシミュレーションコードGENESISを用い、このような効果を評価する。本稿ではGENESISについて述べた後、阪大産研で開発中edgefocus型のウィグラーによるSASE-FELシミュレーション結果について報告する。

2. シミュレーションコードGENESIS

シミュレーションコードGENESISでは電子を仮想的な粒子 (Macro Particle) とみなし、この粒子がアンジュレータ磁場と電磁場から力を受ける場合の運動方程式

$$\begin{aligned}\frac{d\theta}{dz} &= k(1 - \frac{1}{\beta_z}) + k_u \\ \frac{d\gamma}{dz} &= -\frac{k f_c a_r a_u}{\beta_z \gamma} \sin(\theta + \Psi) - E_z \\ \frac{dx}{dz} &= \frac{p_x}{\beta_z \gamma} \\ \frac{dp_x}{dz} &= -q_x x + b_x + \frac{s}{\gamma} p_y \\ \frac{dy}{dz} &= \frac{p_y}{\beta_z \gamma} \\ \frac{dp_y}{dz} &= -q_y y + b_y - \frac{s}{\gamma} p_x\end{aligned}$$

を数値的に解く事でSASEの光出力等を評価できる。ここで β_z は光速により規格化された電子の z 方向の速度、 k は電磁波の波数、 k_u はアンジュレータの波数、 f_c は結合定数、 a_r 及び a_u は電磁波及びアンジュレータ磁場の振幅、 Ψ は電磁波の位相、 b_x 及び b_y は偏向磁石の x 及び y 方向の磁場の強さ、 q_x

及び q_y は四極磁石の x 及び y 方向の磁場の強さである。また、GENESISでは電子のパンチを光の波長だけ離れたいくつかのスライスに分けることによって、時間に依存するシミュレーション (Time Independent Mode) も可能である。これによって光が電子ビームを追い越していく効果 (Slippage Effect) も取り入れる事ができる。これによりSASE-FELによる電子のビームサイズの変化や光の出力などを一次元モデルより詳細かつ現実的に求める事が可能である。

3. 阪大産研SASE-FELのシミュレーション

3.1. 阪大産研のSASE-FEL

阪大産研では、Lバンド電子ライナックと遠赤外FEL用のウィグラーを用いてSASEの発生実験を行っている。平成17年6月にウィグラーを以前の平面型から電子ビームに水平方向と鉛直方向の両方に集束力を与える事の出来る強集束型に交換した[2]。

今回SASE-FELのシミュレーションに使用した電子ビームとウィグラーの主要なパラメータを表1に示す。

表1：阪大産研SASE-FELの電子ビームとウィグラーの主要なパラメータ

電子ビーム		
electron energy	11.5MeV	
energy spread	1.0%(rms)	
charge per bunch	20nC	
bunch length	20ps	
peak current	1kA	
normalized emittance	150 π mmrad	
ウィグラー	平面型	強集束型
period length	0.06m	0.06m
No. of period	32	32
total length	1.92m	1.92m
peak field	0.37T	0.39T
field gradient	0T/m	2.7T/m
edge angle		5deg
No. FODO cell		4

3.2.平面型ウィグラーでのシミュレーション

ウィグラー内での電子ビームサイズの変化が光のパワーにどのような影響を与えるのか平面型ウィグラーでのシミュレーションを行った。

図1に水平方向のビームサイズと光のパワーを示す。水平方向では集束力は働かず、ビームはウィグラーを進むにつれて発散してしまう。図1に示す破線はビームサイズを一定に保ちながら、ビームのウェスト位置を変えたものであり、実線は最も小さくなるビームサイズを表したものである。この図より光のパワーはビームサイズに大きく依存し、小さければ小さいほど光のパワーは大きくなることが分かる。ビームサイズが最小になるのは図1の実線のようにウィグラーの中心付近にウェストが出来る時である。

また、破線同士を比較するとビームのウェスト位置がウィグラーの上流側にあるほうが光のパワーは大きくなることが分かる。この理由はウィグラーの上流でビームサイズを絞った方が電子のバンチングが進む為だと考えられる。

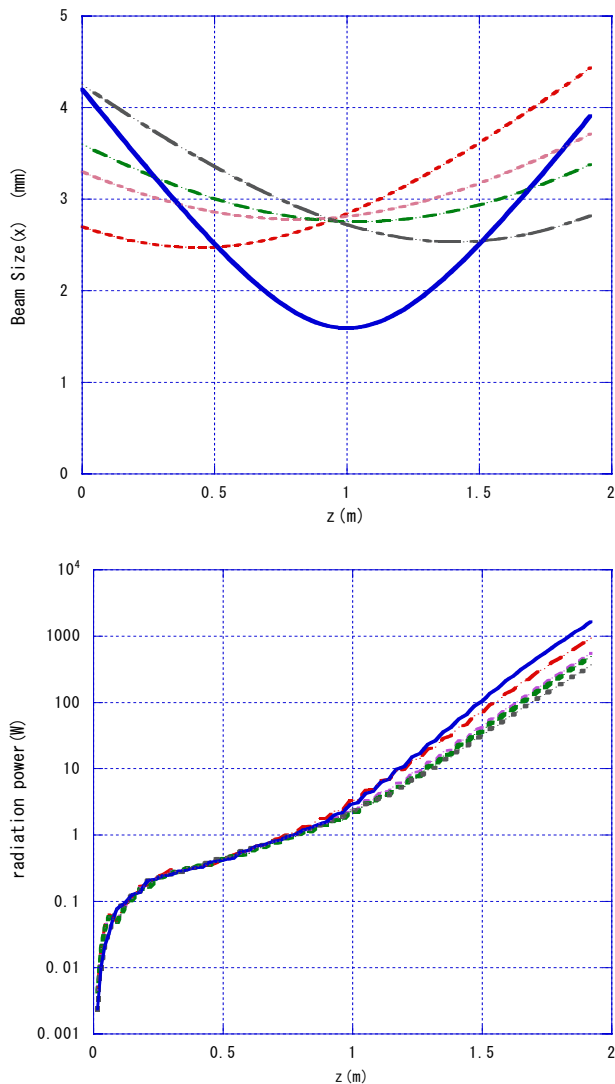


図1：水平方向のビームサイズ(上)と光のパワー(下)

図2に鉛直方向のビームサイズ及び光のパワーを示す。鉛直方向に対しては

$$k_0 = \frac{8-\pi}{3\pi} \left(\frac{e}{m_0 c} \right)^2 \left(\frac{B_0}{\gamma} \right)^2$$

の集束力が働く為、ビームサイズは振動する。ここでeは電子の電荷、 m_0 は電子の質量、cは光速、 B_0 はピーク磁場、 γ は電子の規格化エネルギーである。

これまではビームサイズの振動の振幅が小さければ小さい程、光のパワーは大きくなると考えられていたが、図から分かるようにシミュレーションからは全体を通してのビームサイズが多少大きくなったとしても、ウィグラーの入り口でビームサイズを絞った方が光のパワーが大きくなるという結果が出た。これは水平方向と同じように電子のバンチングが効いている為だと考えられる。

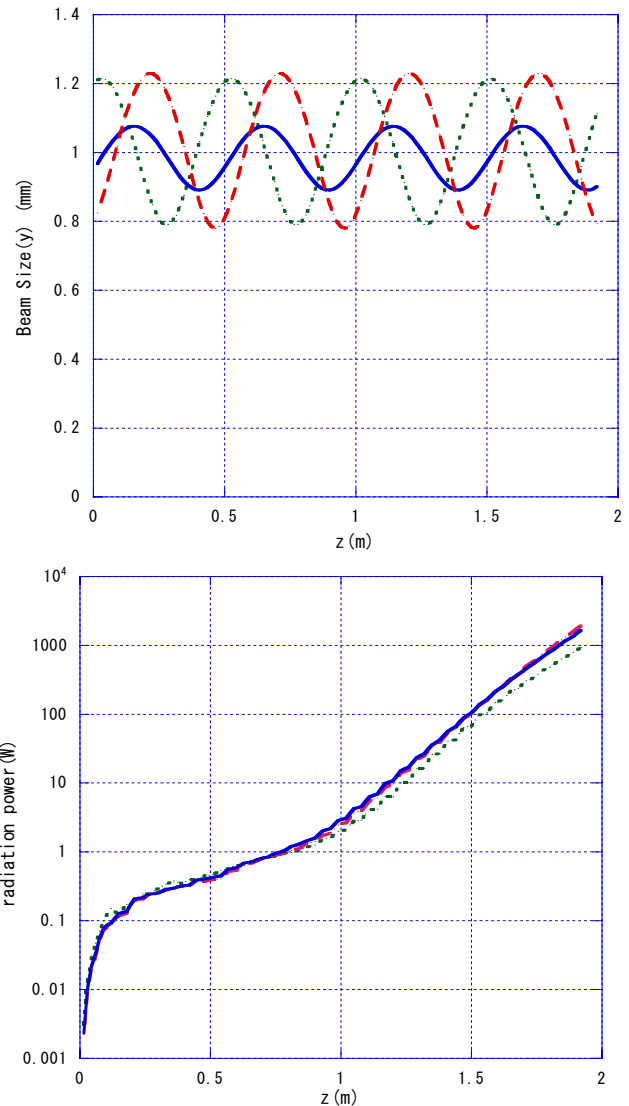


図2：鉛直方向のビームサイズ(上)と光のパワー(下)

3.3.強集束型ウィグラーでのシミュレーション

エッジ集束型ウィグラーは、平面型ウィグラーに用いられる長方形永久磁石に角度を持たせる事によって、水平方向の磁場勾配を発生させ、電子ビームに水平、鉛直両方向に

$$k_x = \frac{4e}{m_0 c} \frac{B_0}{\gamma} \frac{\varphi}{\lambda_u}$$

$$k_y = \frac{8-\pi}{3\pi} \left(\frac{e}{m_0 c} \right)^2 \left(\frac{B_0}{\gamma} \right)^2 - k_x$$

の集束作用を与えるものである。ここで φ はエッジ角である。

今回、阪大産研に導入した強集束型ウィグラーは平面型ウィグラーの間にエッジ集束型ウィグラーを挟み込む構造を持つ。このエッジ集束型磁石にはエッジ角の大きさは等しいがその正負が反対となっているものが交互に配置されている。これにより集束四極磁石と発散四極磁石を交互に並べたFODOラティスと同じ構造となるので、強集束の原理によって水平、鉛直両方向の同時集束が可能となる[3]。

シミュレーションによる強集束型ウィグラー中でのビームサイズ変化と光のパワーを図3に示す。図3から分かるように平面型では発散するばかりであった水平方向のビームサイズが強集束型ウィグラーでは、集束されていることが分かる。鉛直方向では強集束型のビームサイズは不規則に振動し、平面型ウィグラーよりも大きくなってしまっている。この事に関しては今後更なる検証が必要である。また、強集束型ウィグラーの方が平面型ウィグラーのそれよりも約4倍大きい出力が期待できるという結果が得られた。

4.まとめ

GENESISを用いたシミュレーションの結果、ビームサイズの変化及び電子ビームのバンチングがSASE-FELの光のパワーに大きな影響を与える事が分かった。また新しく導入した強集束型ウィグラーの性能の評価も行い、光の出力の増大が期待される事も分かった。今後は更にGENESISを用いた解析を進めると共に、6月後半から行われる強集束型ウィグラーを用いた実験との比較、及び考察を行う予定である。

参考文献

- [1] R.Kato, et al., Nucl. Instr. and Meth. A475 (2001) 334;
- [2] 柏木茂 他、本概要集
- [3] 野田孝典 他、本概要集

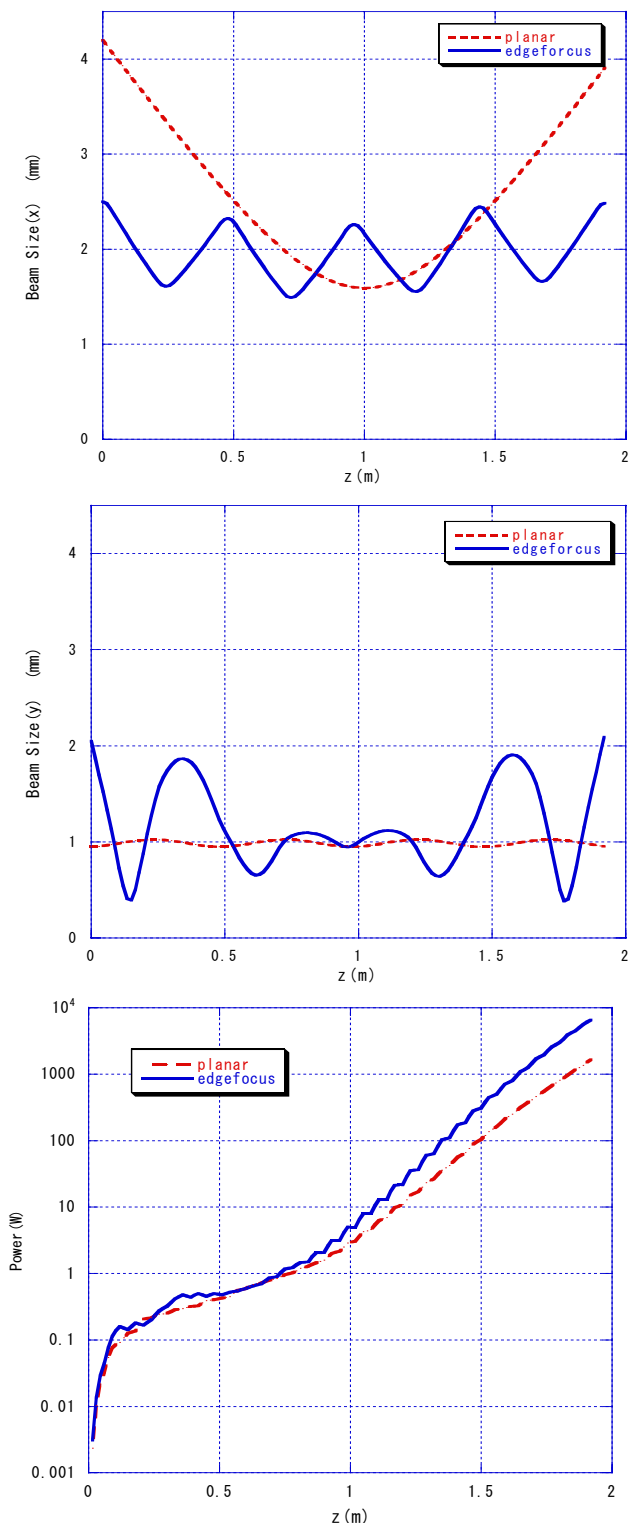


図3：強集束型ウィグラーでの水平方向（上）、鉛直方向（中）のビームサイズ及び光のパワー（下）