

# エネルギー回収型加速管内の ビーム-ビーム相互作用の数値解析による評価

増田 開<sup>1</sup>、松村 慎也、紀井 俊輝、大垣 英明、山崎 鉄夫、吉川 潔  
京都大学大学院エネルギー科学研究科  
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

## 概要

エネルギー回収型線形加速器において使用済み電子ビームのより低エネルギーまでの減速を可能とするために有力であると期待される対向再入射方式について、対向しすれ違うビーム同士の相互作用によるビーム特性劣化を数値シミュレーションにより評価した。

## 1. はじめに

電力効率の向上、並びに、ビームダンプでの放射線量率の低減に非常に有効であり、例えば自由電子レーザーなど、加速器の工業利用のために理想的な技術であるSame-cellエネルギー回収型線形加速器<sup>[1,2]</sup>において、より低いエネルギーまでの回収を行う場合には、入射器より入射され加速される電子ビームと再入射され減速される使用済みビームとの速度差が無視できなくなる<sup>[3]</sup>。一方で、この効果が打ち消される対向方向からの使用済み電子ビームの再入射方式<sup>[4]</sup>においては、対向しすれ違う電子ビーム同士の相互作用のビーム特性への影響が無視できなくなる<sup>[3]</sup>。本研究ではこのビーム同士の相互作用の影響を数値シミュレーションにより評価した。

## 2. 方法

数値シミュレーションには、軸対称二次元時間依存の粒子コード<sup>[5]</sup>を用いた。電子軌道の計算には空間電荷力と空胴高周波電磁界が考慮され、空胴電界から電子ビームが受ける電力を計算することで、各空胴でのビーム負荷が計算される。空胴電圧は一定とし、すなわち、ビーム負荷の各空胴間の不均一性による空胴電圧の変動は無視した。

図1に、対向方向からの再入射、並びに、従来の

再入射方法（以後並走再入射と呼ぶ）によるSame-cellエネルギー回収の概念図を示す。まず、これらの再入射方式による出力ビーム特性や空胴毎のビーム負荷の違いを、以下の方法で評価した。

電子銃は、2.856 MHz、4.5空胴の熱陰極型高周波電子銃（AET社MG-500、5.5 MeV）<sup>[6-8]</sup>、並びに、これと空胴形状は同一で空胴数の少ない1.5空胴（1.0 MeV）の二通りにつき、上記粒子コードで出力電子ビーム特性を計算、低エネルギー成分を除いて、後段加速管への入力条件として用いた（表1）。加速管は、対向再入射、並走再入射のいずれの場合も、20空胴（約1m）の定在波型とした（表2）。

電子銃と加速管以外では電子軌道は追わず、ビームは常に軸対称であるとした。使用済み電子ビームの加速管への再入射においては、アンジュレータでの輝度劣化を模擬するため、ビームの径方向（ $r$ - $dr/dz$ ）と進行方向（ $t$ - $E_k$ ）位相平面において、全ての電子について $r$ 、 $dr/dz$ 、 $E_k$ 、 $E_k$ をそれぞれ定数倍することで、エミッタンス増加、エネルギー広がり、平均エネルギーの低下を導入した。

次に、図2に示したような、対向・並走再入射を組み合わせる方式についてシミュレーションを行った。すなわち、従来の並走再入射方式では両ビームの速度差が問題となるような低エネルギー部のみ対向再入射方法を、高エネルギー部にはビーム同士の相互作用によるビーム特性劣化の少ない並走再入射方式を採用する。

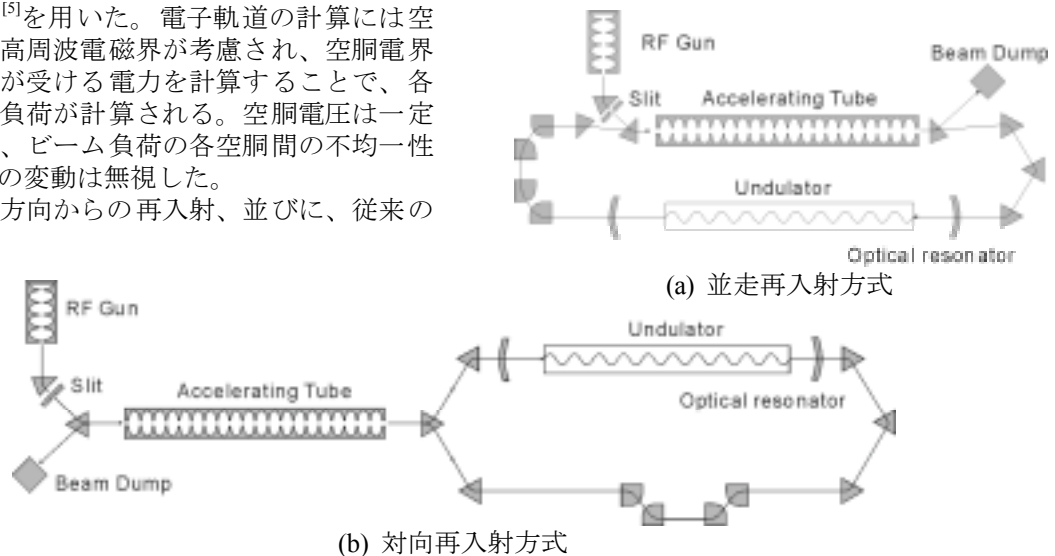


図1：エネルギー回収型線形加速器の概念図

<sup>1</sup> E-mail: masuda@iae.kyoto-u.ac.jp

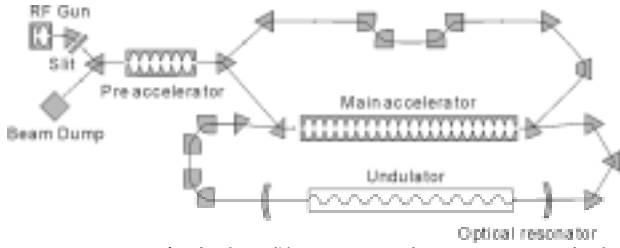


図2：両再入射方式を併用したエネルギー回収方式

電子銃は1.5空胴（1.0 MeV）、対向再入射方式の前置加速管は前述の1 m 定在波型、主加速管は同じく定在波型で空胴数80（4 m）とした。

まず、4 m 主加速管単独でシミュレーションを行って、使用済みビームによる出力ビーム特性への影響を調べた。次に、使用済みビームによる出力ビーム特性への影響の大きい1 m 前置加速管について、その影響は、再入射される使用済みビームの特性により異なることが予想される。したがって、使用済みビームに影響を受けた出力ビームが、再び使用済みビームとして再入射されることで、出力ビーム特性への影響がさらに大きく、あるいは、逆に小さくなる可能性がある。これを調べるため、前置加速管出力ビームのエミッタンスの時間発展を追った。

表1：高周波電子銃の出力ビーム特性

Number of cells	4.5	1.5
Averaged Energy [MeV]	5.5	1.0
Energy Spread [%]	2.6	7.6
Current [A]	0.25	0.56
Emittance [ $\pi$ mm mrad]	3.6	4.3

表2：加速管のパラメータ

	2.856	GHz
Frequency	20 / 80	
Number of cells	81.1	mm
Tube inner diameter	20.0	mm
Disk aperture diameter	49.5	mm
Disk spacing	3.00	mm
Disk thickness	7.0	MeV/m
Gradient (constant)	2.80	M $\Omega$ /cell
Shunt impedance per cell		

### 3. 結果

#### 3.1 入射エネルギーの比較（並走再入射）

電子銃からの入射エネルギー1.0、5.5 MeVそれぞれについて、並走方向再入射方式（図1(a)）で計算を行った。使用済み再入射ビームとしては、再入射ビームの無い場合の出力ビームを用いた。

図3に、空胴毎のビームによる消費電力の比較を示す。5.5 MeV入射の場合には空胴毎のビーム負荷は一律で、使用済み再入射ビームからの回収電力を差し引いた電力収支も全空胴で非常に小さくなっている。一方、1.0 MeV入射の場合には、予想通り両ビームの速度差の生じる管の両端の空胴において電力収支が0とはならず、例えば空胴のQ値を10000程度と考えた場合、wall loss よりも大きくなっている。

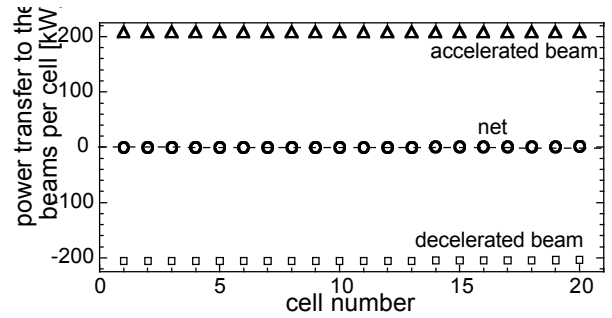
この並走再入射方式では、いずれの入射エネルギー

においても、使用済みビームによる出力ビーム特性への有意な影響は見られなかった。

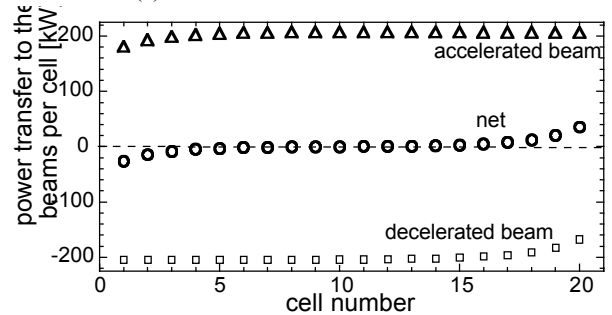
#### 3.2 並走と対向再入射方式の比較

電子銃からの入射エネルギー1.0 MeVの場合について同様に計算を行い、並走、対向再入射方式を比較した。図4に対向再入射における空胴毎のビームによる消費電力を示す。期待通り、消費電力と回収電力が各空胴で打ち消し合い、並走再入射の場合（図3(b)）と比較して電力収支は全空胴に渡って小さくなっている。

表3に、並走再入射、対向再入射、再入射を行わない場合の、出力ビーム特性の比較を示す。対向再入射では、使用済み再入射ビームとの相互作用により、エミッタンスが約2倍になっている。エネルギー広がりには影響は見られなかった。



(a) 入射エネルギー5.5 MeV



(b) 入射エネルギー1.0 MeV

図3：空胴毎のビームによる消費高周波電力（並走再入射方式）

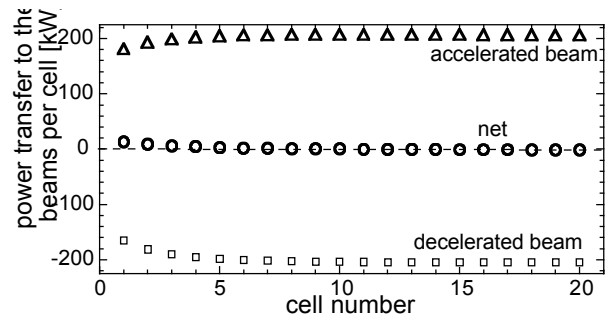


図4：空胴毎のビームによる消費高周波電力（対向再入射方式、入射エネルギー1.0 MeV）

表3：再入射方式によるビーム特性の比較

Reinjection Scheme	orthodox	counter	w/o reinjection
--------------------	----------	---------	-----------------

Averaged Energy [MeV]	8.2	8.2	8.2
Energy Spread [%]	2.1	2.1	2.1
Beam Diameter [mm]	3.6	4.7	3.6
Emittance [ $\pi$ mm mrad]	2.8	5.7	2.8

### 3.3 主加速管でのビーム特性変化

図2の方式において、まず主加速管単独で計算を行い、ビーム特性変化を調べた。前置加速器から主加速管への入射ビームは、1.5空胴電子銃、前置加速管（再入射ビーム無し）の計算結果を用いた。ただし、エネルギースリットでの許容エネルギー幅は3.1、3.2節の場合の約半分とした。また、アンジュレータの影響は無視して、主加速管の出力ビームそのものを使用済みビームとして再入射した。

表4に示したとおり、使用済みビーム再入射の有無による出力ビーム特性の変化は見られなかった。また、エネルギー回収により減速された後の使用済みビームは、前置加速管からの入射ビームと比して、特性に大きな変化はない。すなわち、期待通り、並走入射方式の4 m主加速管内では、両ビームの相互作用は極めて弱いことが分かった。

### 3.4 前置加速管出力ビーム特性の時間発展

両ビームの相互作用の強かった対向入射方式の前置加速管について、その出力ビームのエミッタンスの時間発展を追った。すなわち、前置加速管の出力ビームに、2章に前述の方法でエミッタンス・エネルギー広がり増加を与え、さらに、主加速管の影響、ビーム走行時間に対応する遅延時間を与えて、前置加速管に対向方向から再入射し、これを、前置加速管の出力ビームのエミッタンスが収束するまで繰り返した。その結果を図5に示す。

約50周期の時刻で使用済みビームの先頭が再入射され、その影響で出力ビームのエミッタンスが上昇する。引き続き、さらに約50周期後に、エミッタンスの上昇したビームが使用済みビームとして再入射され、これに伴って、出力ビームのエミッタンスは僅かに低下している。さらに約50周期後に、僅かにエミッタンスの低下したビームが使用済みビームとして再入射されることにより、エミッタンスは再び上昇、これを繰り返してやがて収束している。

アンジュレータの影響を与えた場合、与えなかった場合（実線）と比べて、再入射ビームのエネルギー広がり2倍にした場合（点線）にはエミッタンスの収束値に大きな影響は見られないが、再入射ビームの発散角 $dr/dz$ を2倍（波線）、ビーム径 $r$ を2

倍（一点鎖線）にした場合には（共にエミッタンス2倍）、出力ビームの受ける影響が小さくなり、エミッタンスの収束値が小さくなっている。

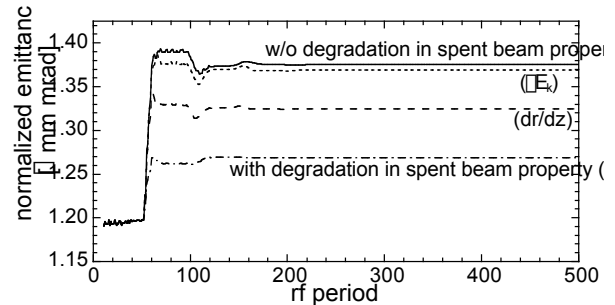


図5：前置加速管出力ビームエミッタンス時間発展

## 4. 結論

並走再入射方式で1 MeV程度の低エネルギーまでエネルギー回収を行う場合には、両ビームの速度差の影響が無視できなくなる。この影響は対向再入射方式により大幅に軽減されるが、これと引き替えに、使用済みビームとの相互作用により出力ビームのエミッタンスが増大する。

エミッタンスの増加を最小限に留めて、かつ、低エネルギーまでエネルギー回収する方法として、低エネルギー部には並走再入射方式を採用する併用方式が考えられる。また、対向再入射方式でのエミッタンス増加の割合は、使用済みビームの径を広げて再入射することで、小さく抑えられる可能性がある。

## 参考文献

- [1] G.R. Neil, et al., Nucl. Instr. Meth. A **445** (2000) 192.
- [2] R. Hajima, et al., Proc. of 27<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan (2002) 97.
- [3] K. Masuda, et al., "A simulation study on energy recovery from spent electron beams in an S-band linac", Nucl. Instr. Meth., in press.
- [4] E.J. Minehara, et al., Proc. of 22<sup>nd</sup> Int'l FEL Conf. (2001) II47.
- [5] K. Masuda, Ph.D. thesis, Kyoto University, 1996.
- [6] Y. Yamamoto, et al., Nucl. Instr. Meth. A **393** (1997) 443.
- [7] K. Masuda, et al., Nucl. Instr. Meth. A **483** (2002) 315.
- [8] T. Kii, et al., Nucl. Instr. Meth. A **483** (2002) 310.

表4：主加速管（並走再入射方式）によるビーム特性変化

	input beam	output beam		spent beam
		w/o reinjection	with reinjection	
Averaged Energy [MeV]	7.7	37.0	37.0	7.5
Energy Spread [%]	5.8	2.0	2.0	4.7
Emittance [ $\pi$ mm mrad]	1.2	1.7	1.7	1.3