

FREE ELECTRON LASER WITH ENERGY RECOVERY FACILITY

I. Sato and *W. Yuan lin

National Laboratory for High Energy Physics, Tsukuba 305

* Nanjing University

ABSTRACT

A main problem for a free electron laser increases efficiency for converting of electron energy into photon energy. If the efficiency would be improved, however it will not be larger than 30 percent. It is an important problem for the development of free electron laser that the residual energy of electron beams reproduce for the electron beam acceleration. We investigated some energy recovery systems. This paper reports the results.

自由電子レーザーのためのエネルギー回復型加速器

1. はじめに

自由電子レーザーの特色の1つは自由な波長選択ができる事であるが、しかし、問題点の1つは、短波長になるほど電子ビームからレーザーへのエネルギー変換効率が低くなる事である。特に、電子線形加速器を利用した自由電子レーザーでは、電子ビームの使い捨てが多い。自由電子レーザーの今後の飛躍的な発展のためには、電子ビームから残留エネルギーを回収し、加速に再利用する方法を開発する事である。これは加速器にとって、最も重要な課題となる。直流加速器や高周波加速器等のエネルギー回復型の自由電子レーザーの開発は既に開始されている。我々は、電子線形加速器について2例のエネルギー回復方法を比較検討したので、ここに報告する。

2. 自由電子レーザーに於ける電子ビームのエネルギー損失

運動エネルギー E_0 の電子ビームが、磁束密度 B_0 で周期長 λ_w のアンジュレーターを通過する時に発生する光の波長 λ_p は、

$$\lambda_p = \lambda_w (1 + K^2) / 2 \gamma^2 \quad (1)$$

で表される。ここで、 γ はローレンツ因子で $\gamma = (E_0 + m_0 c^2) / m_0 c^2$ 、 m_0 は電子の静止質量、 c は光速、 K は $K = e B_0 \lambda_w / 2^{3/2} \pi m_0 c^2$ である。今、1個の電子が1個の光子のみ放射する場合、電子のエネルギー損失率 ζ は $\zeta = h c / \lambda_p E_0$ で表される。しかし、自由電子レーザーの場合、1個の電子が多数のコヒーレントな光を放射し、電子ビームの性質やレーザー装置の条件に依って電子ビームのエネルギー損失は大幅に異なる。自由電子レーザーが発振するためには、電子ビームが磁場アンジュレーターを1回通過する間に発生する光の電力量は光空洞を1回往復する間に減衰する光の損失電力の総量より大きくなければならない。レーザー光の電界増幅利得を G_0 とすると、小信号の光の電力利得 G は $G = (1 + G_0)^2 - 1$ で与えられ、又、 $G_0 < 1$ であるから、 $G \sim 2 G_0$ となる。その利得 G_0 を与えるの方程式は

$$G_0 = \frac{1}{2} F_0^2 \frac{\pi}{\sigma_r^2} \left(\frac{I}{I_A} \right) \frac{\lambda_w^2}{\gamma^3} K^2 N_w^3 \frac{d}{d\nu} \left(\frac{\sin \nu}{\nu} \right)^2 \quad (2)$$

で表される。ここで、 F_0 は $F_0 = [J_0(\xi) - J_1(\xi)]$ で表される関数で、 J_0 、 J_1 はベッセル関数である。又、 ξ は $\xi = [K^2 / 2 (K^2 + 1)]$ 、 σ_r はアンジュレ

一ター中のコヒーレントな光の平均半径， I は電子ビーム電流， I_A はアルフベン電流（17000A）， N_w はアンジュレーターの周期数， ν は共振角周波数 ω_0 で規格化した波長ズレ量で $\nu = -N_w \lambda_p (\omega - \omega_0) / 2c$ ， ω_0 は $\omega_0 \sim [4\pi\gamma^2 c / \lambda_w (1 + K^2)]$ ，をそれぞれ表している。又，関数 $d/d\nu (\sin \nu / \nu)^2$ は $\nu = -1.3$ で最大値（0.54）を与える。

凡例の1つを表-1に示す。このパラメーターの自由電子レーザーの振幅利得を図1に示す。ここで， x は $x = \nu$ を意味する。この例では，光電界の振幅増幅利得が約0.17%であるから，波長1.85 μ mのレーザーが約70KW得られる。しかし，電子ビームから光に変換される電力効率率は約0.35%であり，電子ビームを使い捨てにすると，約20MWの電力が無駄になる。長波長の自由電子レーザーでも，電力変換効率を30%以上する事は非常に困難である。1回通過型の短波長自由電子レーザーの効率については，この研究会の他のセッションで取り扱う。(1)と(2)から明かな様に，波長が短くなる程，変換効率は低下する。短波長を発生させる自由電子レーザーでは，電子ビーム電力の再利用は重要な課題となる。

表-1 自由電子レーザーのパラメーター

電子エネルギー (MeV)	100
電子ビーム電流 (A)	0.2
電子ビーム径 (m)	0.01
バンチング (度)	5.0
ウィグラー長 (m)	5.0
ウィグラー周期長 (m)	0.1
ウィグラー磁場 (T)	0.1
ウィグラー周期数	50
K値	0.66
光電界振幅増幅利得	0.0017
レーザー波長 (μ m)	1.855

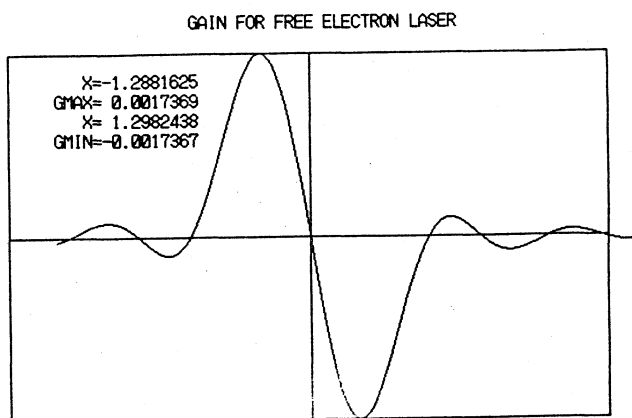


図1 自由電子レーザーの利得

3. エネルギー回復型電子線形加速器

図2には電子線形加速器を使った自由電子レーザーの基本型を示す。図3と図4にはエネルギー回復型加速機構の2例を示す。図3は2本の進行波加速管のそれぞれの入出力結合空洞を方向性結合器付き導波管でリング状に接合した回路を基本にしている。図4は1本の進行波加速管の入出力結合空洞を方向性結合器付き導波管でリング状に接合した回路を基本にしている。何れの回路も進行波型空洞共振器である。図3の加速機構は，同構造の加速管1本を定在波にして使用する場合と同程度の電力減衰率であるが，図4に示す加速機構は，加速管1本を定在波として使用する場合よりも電力減衰率は小さい。加速効率を高めるには加速管の壁で消費する高周波電力を小さくする必要がある。ここで，加速効率とは，供給電力 P_0 に対する電子ビームの電力 $I E_0$ の比率 $\eta = I E_0 / P_0$ を意味する。

図3の加速機構では，第1加速管で加速された電子ビームが自由電子レーザー発生装置を通過後に，第2加速管に輸送され減速位相に入射される。この機構では，加速管に放出された高周波電力は導波管を通じて再び第1加速管に戻りエネルギーが回復される。図4の加速機構では，加速された電子ビームが線形加速器を通過後に自由電子レーザー発生装置を進行しながら光を放射して，この加速器の上流に輸送され再

び加速管に入射される。もし、電子ビームが減速位相に戻る時はエネルギー回復となり、加速位相に戻る時は多重加速となる。図5と図6には、図3と図4の加速機構を直列に並べた場合の電子線形加速器と電子ビームのエネルギーの関係を示す。

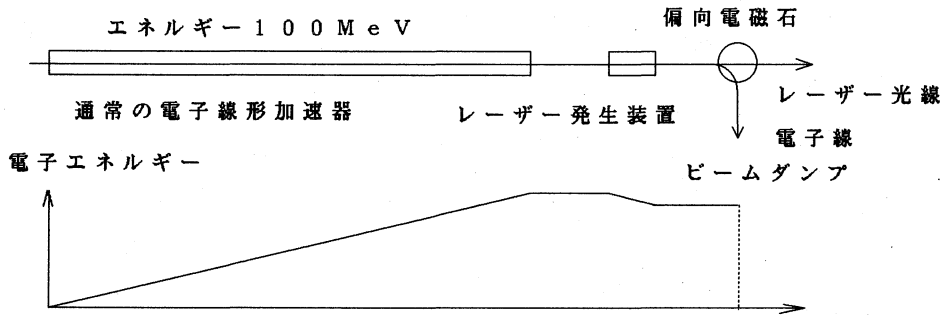


図2 自由電子レーザーの基本加速機構

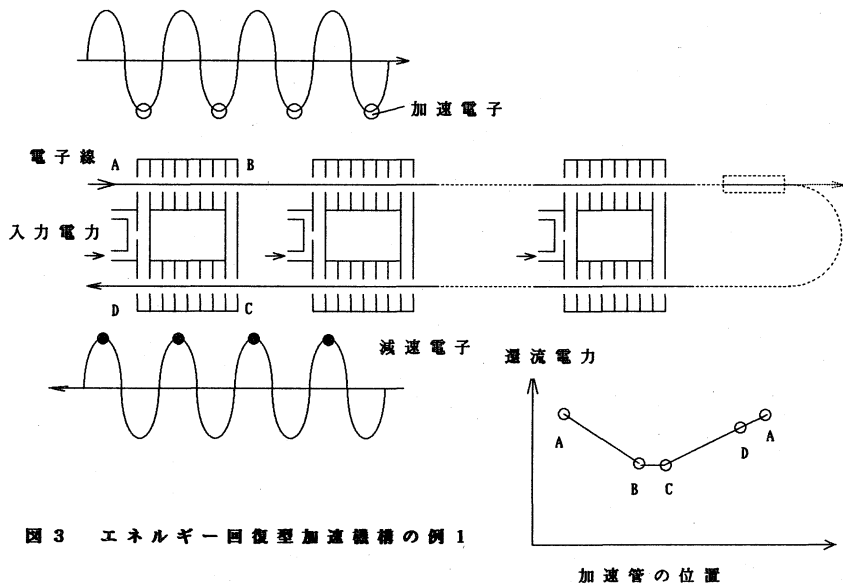


図3 エネルギー回復型加速機構の例1

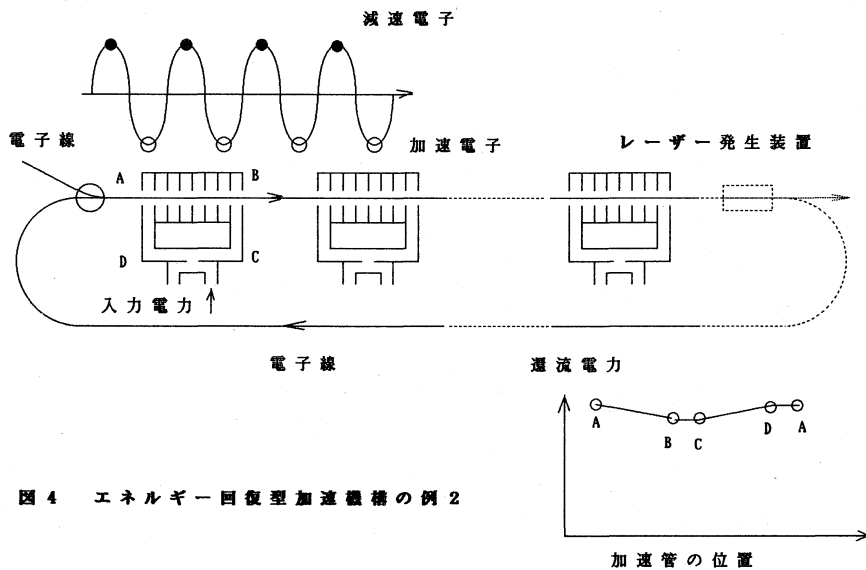


図4 エネルギー回復型加速機構の例2

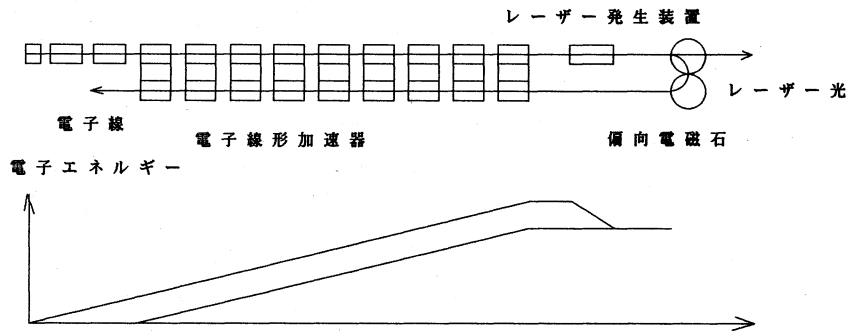


図5 エネルギー回復型電子線形加速器の例1

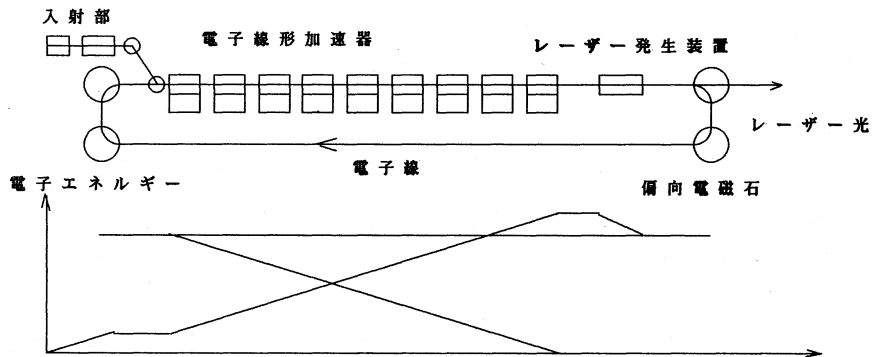


図6 エネルギー回復型電子線形加速器の例2

それぞれの加速機構の特徴を述べると表-2の如くなる。ここでの問題点は α 値(加速管の電界減衰量)を如何に小さくするかである。

表-2 加速機構の特徴

	例1	例2
エネルギー回復度	定在波加速管と同等	右より高い
高周波電力損失	$e^{-4\alpha L}$	$e^{-2\alpha L}$
エネルギー利得	$\int^L dz$	$\int^L (1 + e^{-\alpha z}) dz$
ビーム輸送	容易	複雑
コスト	高い	安い

4. おわりに

エネルギー回復のために使用される加速管はその電力減衰率が小さくなければならない。高いQ値を持つ超電導空洞の加速管が理想であるが、液体ヘリウムを製造するのに必要な電力や低温装置を維持する煩わしさや電子ビームの不安定性を考慮すると、必ずしも得策ではない。将来、安定な高温超電導物質が開発され電力損失の少ない空洞の製造が容易となれば、加速器の高周波源が半導体素子で動く可能性は高い。我々は、その代わりとして、常電導の加速空洞で形成される電力減衰の少ない加速構造(HELAS: high efficiency linear accelerator structure)を開発中である。これらの詳細は本研究会で述べる。