

エネルギー回収型 FEL の HOM 特性

沢村 勝^{1,A)}、羽島良一^{A)}、岩下芳久^{B)}、永井良治^{A)}、西森信行^{A)}、菊澤信宏^{A)}、峰原英介^{A)}

^{A)} 日本原子力研究所 光量子科学研究センター 自由電子レーザー研究グループ

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

^{B)} 京都大学 化学研究所 原子核科学研究施設

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

概要

エネルギー回収型 FEL では高周波電力の増強なしに大電流の加速が可能で、大出力 FEL が期待できる。しかし、周回電子ビームが軌道中心からずれると横方向の高調波を励起し、周回ビームと高調波が同期してしまうと高調波が増幅され、電子ビームが横方向にキックされビームが不安定になる恐れがある。

そこで、原研超伝導リニアック FEL の HOM 特性を調べた。このパラメータを用いて横方向 HOM によるビーム不安定性を調べる数値解析コードを開発し、電流制限は数 A 以上と十分大きいことが分かった。

1. はじめに

超伝導リニアック駆動型自由電子レーザーにおいてエネルギー回収は、空洞での高周波損失がほとんどないという超伝導の特徴を最大に生かす方法である。加速位相で高周波電力からビームエネルギーに変換された電子ビームを減速位相で再入射することにより後続の電子ビーム加速に再利用する。超伝導の場合、FEL 発振後残ったビームエネルギーをほぼ 100% 高周波電力に変換できるので、主加速部分の高周波電力を増やすことなく、より大電流のビーム加速が可能になる。

しかし大電流加速のとき電子ビームが中心軌道を外れると様々な高調波モード (HOM) が励起される。この内、電子ビームを横方向にキックするモードが加速・減速ビームによって増幅されると電子ビームを安定に加速できなくなってしまう。

そこで原研超伝導リニアック FEL の HOM 特性を調べ、どの程度の電流が安定にエネルギー回収しながら加速できるかを調べた。

2. 横方向 HOM の空洞特性計算

原研超伝導リニアック FEL の横方向 HOM の共振周波数と電磁界分布の計算に PISCES を用いた[1]。PISCES は 2.5 次元の電磁界解析コードで、2 次元軸対称の空洞形状における非軸対称モードを求めることができる。各 HOM の横方向インピーダンス R は、軸上横方向の電界分布を $E_x(z)$ 、磁界分布を $B_y(z)$ として、次式のように定義する。

$$R = \tilde{V}^2 / 2P$$

$$\tilde{V} = \left| \int (E_x(z) + v_e \times B_y(z)) e^{jkz} dz \right|$$

ここで v_e は電子ビーム速度、 k は共振周波数の波数、 P は空洞損失である。 \tilde{V} は電荷を掛ければ電子ビームが空洞を通過する間に受ける横方向の力を表す。この R を用いて空洞の R/Q を定義する。

共振周波数および R/Q の計算結果を表 1 に示す。

3. 超伝導空洞の HOM 特性の測定

原研超伝導リニアック FEL のうちエネルギー回収に用いられるのは、共振周波数 499.8MHz の 5 連セルの主加速器 2 台である[2]。各主加速器には高周波入力用のメインカップラーと加速電界検出用のピックアップカップラーが各 1 つずつ、高調波モードの減衰用の HOM カップラーが 3 つ取付けてある。各 HOM の Q 値は HOM カップラーが取付けてあるため $10^3 \sim 10^4$ 程度の値になっている。各カップラーでの反射波をネットワークアナライザで測定することにより、各 HOM の周波数、負荷 Q 値の測定を行った。測定の結果を表 1 に示す。各モードは PISCES の計算結果から同定した。

4. 横方向 HOM 不安定性の数値解析

横方向 HOM 不安定性の解析モデルとして、各空洞におけるバンチの横方向変位を 1 つの値で代表させ、横方向 HOM の効果を単一キックで表現する Impulse model を採用した[3]。

P 周目、 n 番目空洞における M 番目バンチの x 方向位置と運動量を表すベクトルを $U_p(n, M)$ とすると、このベクトルは次式で計算される。

$$U_p(n, M) =$$

$$T_{n,n-1}^{pp} U_p(n-1, M) + I Z_{n-1} T_{n,n-1}^{pp} G \times \sum_{r=1}^{n_p} \sum_{k=1}^{M+(p-r)M_0-1} U_r(n-1, M+(p-r)M_0-k) s_k(\omega_n \tau)$$

ここで、 $T_{n,m}^{pq}$ は p 周目 n 番目空洞から q 周目 m 番目空洞にいたる輸送マトリックス、 I は平均電流、 G は

¹ E-mail: sawamura@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

表 1：原研超伝導リニアック FEL の HOM 計算ならびに測定結果

モード	計算		主加速器#1 測定			主加速器#2 測定		
	周波数 (MHz)	R/Q (Ω)	周波数 (MHz)	Qload	z''l (Ω/m ²)	周波数 (MHz)	Qload	z''l (Ω/m ²)
TE111 π/5	612.778	1.87E-01	608.200	4.45E+03	1.35E+05	608.868	2.66E+03	8.09E+04
TE111 2π/5	625.452	2.84E-01	628.975	1.89E+04	9.31E+05	630.382	8.45E+03	4.18E+05
			629.379	2.10E+04	1.04E+06	630.875	1.59E+05	7.88E+06
TE111 3π/5	644.085	1.85E+01	644.406	2.89E+03	9.76E+06	646.005	3.28E+03	1.11E+07
			645.074	4.37E+04	1.48E+08	646.725	1.77E+04	6.00E+07
TE111 4π/5	664.346	2.38E+01	662.091	1.59E+03	7.27E+06	663.385	2.36E+03	1.08E+07
			662.569	6.84E+03	3.14E+07	664.094	7.16E+03	3.30E+07
TE111 π	677.392	7.89E-01	680.312	2.95E+03	4.73E+05	681.630	3.25E+03	5.23E+05
			680.686	6.06E+03	9.71E+05	682.150	9.23E+03	1.49E+06
TM110 π	703.983	3.26E-02	702.721	2.85E+03	2.01E+04	702.824	2.20E+03	1.55E+04
			703.136	3.55E+03	2.51E+04	703.355	4.72E+03	3.34E+04
TM110 4π/5	715.373	1.80E+01	714.553	1.38E+03	5.55E+06	715.042	1.63E+03	6.56E+06
			715.063	5.96E+05	2.40E+09	715.444	1.14E+04	4.58E+07
TM110 3π/5	725.356	2.72E+01	724.798	3.27E+03	2.05E+07	724.943	3.52E+03	2.21E+07
			725.102	2.59E+04	1.62E+08	725.233	2.61E+04	1.64E+08
TM110 2π/5	731.969	4.56E+00	730.586	1.31E+04	1.40E+07	730.985	2.06E+04	2.20E+07
			730.822	8.88E+03	9.48E+06			
TM110 π/5	734.577	3.88E-01	733.699	1.36E+05	1.24E+07	734.201	3.02E+04	2.76E+06
			734.018	2.25E+04	2.06E+06			

先行バンチが後続バンチに対するキック効果を表し g_{21} 要素のみ 1 でそれ以外ゼロのマトリックスである。また

$$Z_n = \frac{Z_n'' l e}{2Q f_b}$$

$$Z_n'' l = (R/Q) Q k^2$$

と表せ、 f_b はバンチの周波数である。

$$s_k(\omega_n \tau) = \exp(-k \omega_n \tau / 2Q_n) \sin(k \omega_n \tau)$$

は HOM の位相と減衰を表す。 $\tau = 1/f_b$ はバンチ間隔である。

原研超伝導リニアック FEL のパラメータを使ってビームの横方向変位の変化を調べた。各主加速器の中央を横方向 HOM によるキックの基準とし、各主加速器間の輸送マトリックスは TRANSPORT を用いて計算した。電子ビームバンチの周波数は 10.4125MHz であり、499.8MHz の 48 周期間隔である。周回軌道長は RF 半周期の 131 倍である。

最初に $Z''l$ の一番大きい TM110 3 / 5 モードの場合について計算を行った。2 番目の主加速器における 2 周目の変位を図 1 に、HOM 電圧を図 2 に示す。バンチあたりの電荷量の増加にしたがって HOM 電圧が増幅し、ビーム変位の増加が見られる。2000nC を越えたあたりからビーム変位の振動が現れ、2300nC では、ビームが大きくキックされてしまう。バンチあたり 2000nC の電荷は 20A の平均電流に相当する。

また計算及び測定で求めた 10 個の HOM をすべて計算に組み込んだ場合の結果を図 3 に示す。単一 HOM のときに比べて小さな 650nC 程度の電荷で振動が起こりだしてきており、それぞれの HOM がお互いに影響しあって強めあうモードがあるものと考えられる。

5. まとめ

原研超伝導リニアック FEL の HOM の計算および測定を行い、横方向 HOM 不安定性の解析コードによるエネルギー回収時の電流制限について検討した。HOM が 10 個の場合でも、エネルギー回収時の電流制限が 6 A 程度となっている。この値は想定しているビーム電流よりはるかに大きな値であり、エネルギー回収においてビーム電流を増やしても HOM 横方向不安定性は問題ないものと考えられる。今後は、実際にエネルギー回収試験で横方向 HOM 不安定性の影響を調べていく予定である。

参考文献

- [1] Y.Iwashita, Computational Accelerator Physics, Williamsburg, VA, AIP conference proceedings No.361 Sept. 1996, pp119-124
- [2] 羽島良一 他, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001, pp61-63
- [3] J.Bisognano, et al. CEBAF-PR-87-007 (1987)

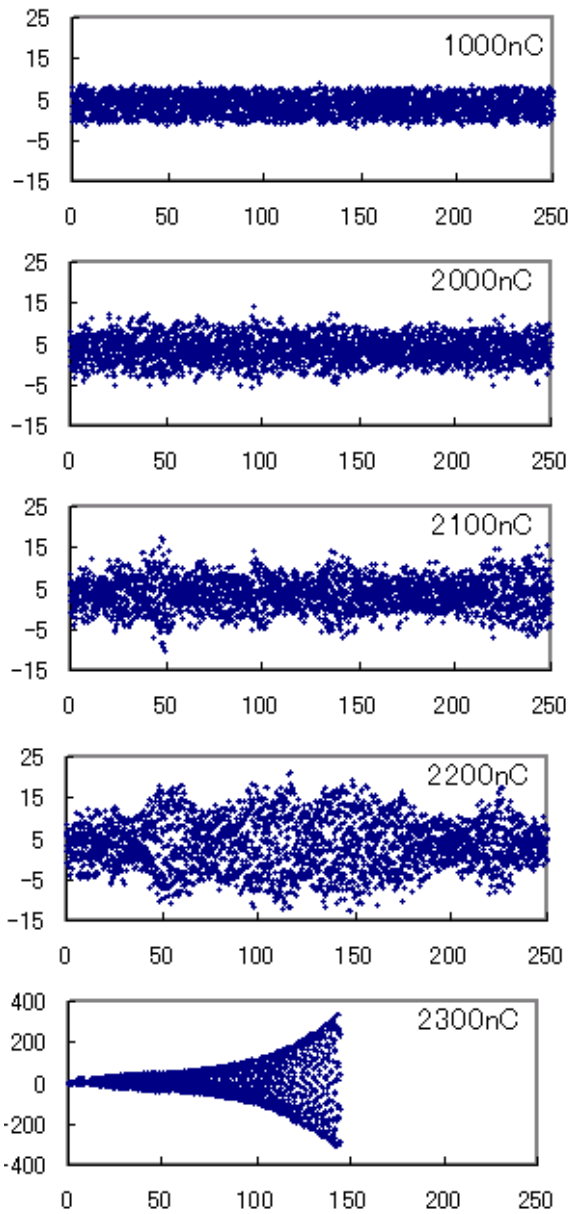


図1：単一 HOM による電子ビームバンチの変位。横軸は時間(μ sec)、縦軸は横方向変位(mm)。バンチ当たりの電荷は上から 1000nC、2000nC、2100nC、2200nC、2300nC である。

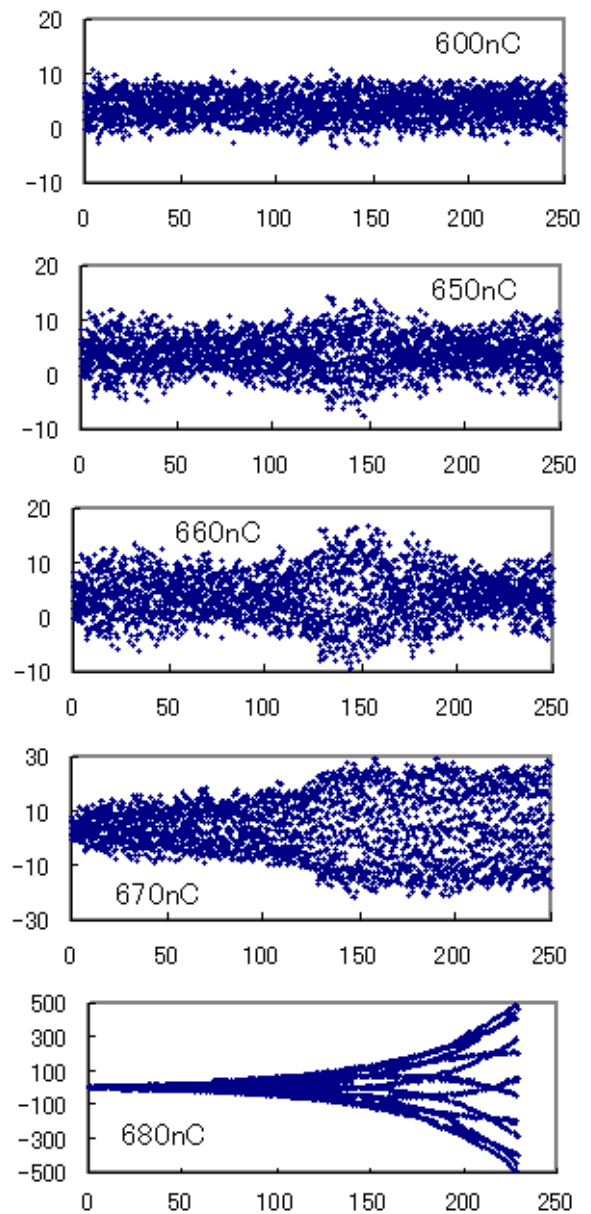


図3：10個の HOM による電子ビームバンチの変位。横軸は時間(μ sec)、縦軸は横方向変位(mm)。バンチ当たりの電荷は上から 600nC、650nC、660nC、670nC、680nC である。

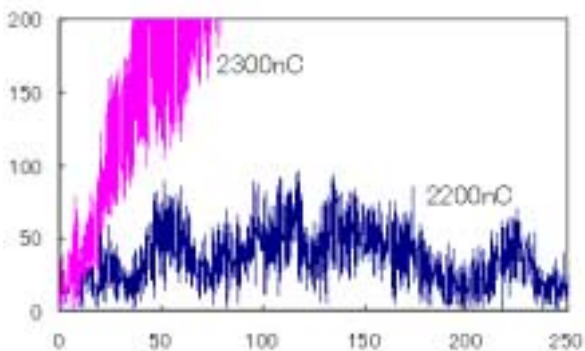


図2：単一 HOM による HOM 電圧の変化。横軸は時間(μ sec)、縦軸は HOM 電圧(kV)、図中の数字はバンチ当たりの電荷量。