

# J A E R I E R L - F E L の H O M 特 性

沢村 勝<sup>1</sup>、永井 良治、菊澤 信宏、羽島 良一、西森 信行、峰原 英介  
日本原子力研究所 量子科学センター 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2-4

## 概要

原研エネルギー回収型自由電子レーザーリニアック (ERL-FEL) において大電流加速のときに問題となる高調波モード (HOM) 不安定性を調べるため、電子ビーム加速時に空洞内で励起されるHOM電力を各HOMカップラーを通して外部に取出し、そのパワースペクトラムを測定した。HOM不安定性に対する各HOMのしきい値電流と比較を行った。

## 1. はじめに

原研超伝導ERL-FELは10kW級発振に向けて、必要な装置の開発整備が行われている。平均ビーム電流を増やすために、現在の電子銃の繰り返し周波数である10.4125MHzを2倍、4倍にするためのグリッドパルサーの開発を進めている。加速電流を増やした場合、エネルギー回収を行う主加速器の部分は高周波電力の増強は必要ないが、エネルギー回収と関係ない前段加速器の部分は加速電流の増加にともない高周波電源の増強が必要である。そのためにCPI EIMAC製IOTを用いた50kW出力高周波電源を整備した。

ERLにおいて加速電流を制限するものとしてHOM不安定性がある。軸上をはずれた加速ビームによって励起されたHOMが、周回して戻ってきた減速ビームによってさらに増幅される。そしてこの増幅されたHOMによりビーム軌道が横方向にキックされて、ビーム半径の増加をもたらし、最後にはビーム損失を引き起こす現象である。前回の第27回リニアック技術研究会において原研ERL-FELのHOM不安定性のシミュレーション結果を発表した<sup>[1]</sup>。今回は空洞内で励起されたHOM電力をHOMカップラーを通して外部に取出して、そのパワースペクトラムを測定し、シミュレーション結果と比較を行うことにより、HOM不安定性を調べる。

## 2. 各HOMモードのしきい値電流

前回開発したエネルギー回収時のHOM不安定性をシミュレーションする計算コードを用いて、原研ERL-FELの空洞で励起されるHOMのうち、周波数の低い10個のモードに関して、しきい値電流の計算結果を表1に示す。各モードのしきい値電流はそのモードのみが空洞内で励起されると仮定して計算を行ったものである。また10個すべてのHOMが励起される場合のしきい値電流もあわせて表1に示す。この表より全体のしきい値電流に大きく関与しているのはTE111 4 /5モード、TM110 3 /5モード、TM110

表1：各HOMのしきい値電流

No.	モード	周波数 (MHz)	しきい値電流 (A)
#1	TE111 $\pi/5$	608.200	666.40
#2	TE111 $2\pi/5$	628.975	487.31
#3	TE111 $3\pi/5$	644.406	34.36
#4	TE111 $4\pi/5$	662.091	10.74
#5	TE111 $\pi/5$	680.312	578.94
#6	TM110 $\pi$	702.721	32520.32
#7	TM110 $4\pi/5$	714.553	16.79
#8	TM110 $3\pi/5$	724.798	5.47
#9	TM110 $2\pi/5$	730.586	7.03
#10	TM110 $\pi/5$	733.699	1482.74
#1-#10	All modes	—	3.42

2 /5モードであることがわかる。

## 3. カップラー構成

原研ERL-FELに用いられる5連の超伝導空洞には5個のカップラーが取り付けられている(図1)。

- ・メインカップラー：ビーム加速に必要な高周波電力を供給するためのもので、各空洞に1個取り付けられている。
- ・ピックアップカップラー：空洞内の加速電界を検出するためのもので、各空洞に1個取り付けられている。
- ・HOMカップラー：空洞内のHOMを減衰させるためのもので、各空洞に3個取り付けられている。このうちの2個はTEモードのHOMを減衰させるためのもので、2つの直交成分を持つTEモードを効率よく減衰させるために70度離して取り付けられている。もう1個はTMモードを減衰させるためのものである。これらのHOMカップラーで吸収されたHOM電力はHOMカップラー内で損失されるだけでなく、一部はHOMカップラーの外に出力され、通常はクライオモジュールの外側の終端器によって吸収されている。このためHOMカップラーから出力されるHOM電力を直接観測することにより空洞内部でのHOMの励起状態を調べることができる。

## 4. HOMスペクトラム

最初に各HOMカップラーからの出力を検波器を用いて観測した。パルス幅120  $\mu$  secのビーム加速にお

<sup>1</sup> E-mail: sawamura@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

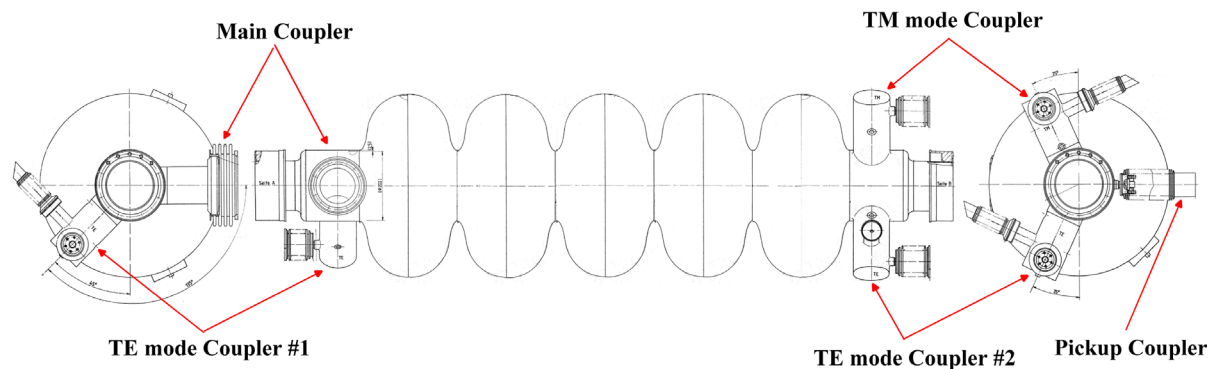


図1：原研超伝導空洞のカップラー配置

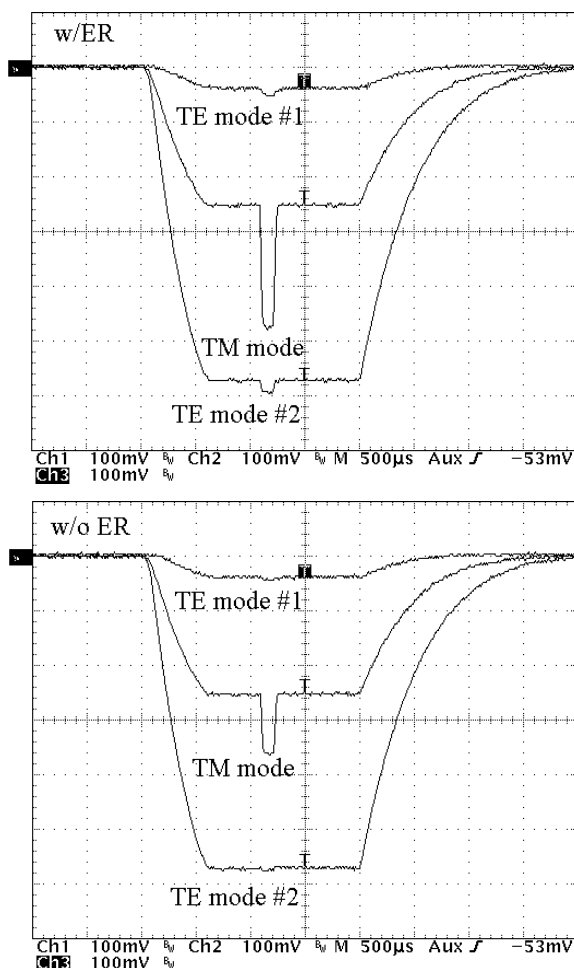


図2：HOMカップラーからの出力波形  
上：エネルギー回収を行った場合  
下：エネルギー回収を行わない場合

いてエネルギー回収を行ったときと行わないときの各出力を図2に示す。各カップラーとも出力はエネルギー回収を行ったときの方が大きくなっている。これはエネルギー回収によりHOMが励起されやすくなっているためと考えられる。またTEモードのHOMカップラーからの出力よりTMモードのHOMカップ

ラーからの方が桁違いに大きな出力となっている。これはこの後のスペクトラムの解析により分かったことであるが、大部分は電子ビームが通過したときにHOMカップラー内に励起されるウェイクフィールドによるものと考えられる。

次にHOMカップラーからの出力のスペクトラム解析を行った。原研ERL-FELはパルス運転されているため、HOMカップラーからの出力スペクトラムを観測するためにリアルタイムスペクトラムアナライザを用いた。HOM出力が最大になったときの各スペクトラムを測定した。測定の結果HOMの周波数成分と思われるもの以外に、電子銃の繰り返し周波数である10.4125MHzの逡倍成分が多数観測された。空洞の遮断周波数以下の周波数成分も観測されているため、電子ビームによって空洞内に励起されたものではなく、HOMカップラー内に励起されたウェイクフィールドと考えられる。10.4125MHzの逡倍成分を取り除いた残りのHOMカップラーからのパワースペクトラムを図3に示す。

図3よりいちばん出力の大きなHOMはTE111モードでは3/5モード、TM110モードでは4/5モードであった。これらのモードのしきい値電流は計算によるとそれぞれ34.4A、16.8Aである。これらのしきい値電流は各モードの中では比較的小さい方であるが、最もしきい値電流の低いTE111 4/5モード(10.7A)やTM110 3/5モード(5.47A)は2番目の出力になっている。これは各モードに対するカップラーの結合係数が違うためと考えられる。

## 5. HOMカップラーの結合係数

各HOMカップラーから取出された電力をもとに空洞内のHOM電界を知るためには各HOMカップラーの結合係数を調べる必要がある。基本周波数の499.8MHzの無負荷Q値は $10^9$ 程度であるのに対して、HOMの共振周波数での無負荷Q値はHOMカップラーによる減衰のため $10^4 \sim 10^5$ 程度の値になっている。このためHOMのQ値測定のためにはネットワークアナライザを用いて、各カップラーでの周波数に対する反射係数を求めることにより無負荷Q値、負荷Q値、外部Q値を求める<sup>[2]</sup>。これらは現在測定中である。

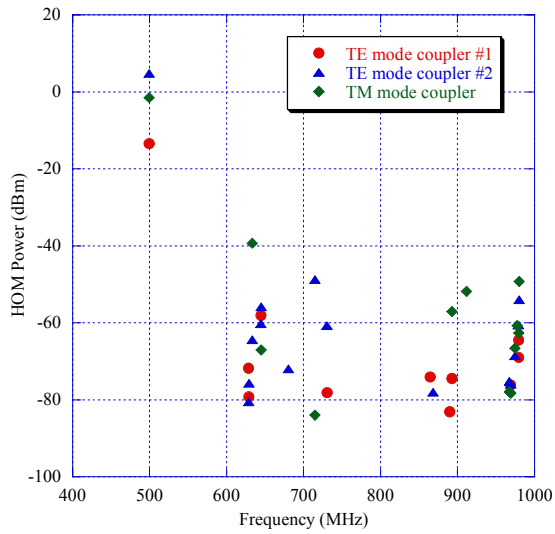


図3：HOMカップラーからのパワースペクトラム

## 6. まとめ

空洞内に励起されるHOMのスペクトラムの測定を行った。各HOMカップラーの結合係数を測定することにより空洞内で励起される各HOM電界を求めることができる。

今後各HOMスペクトラムの時間変化を調べることにより加速電流を増やしていったときに、問題となる可能性のあるHOM不安定性を調べることができる。

## 参考文献

- [1] M.Sawamura, et al., Proceedings of the 27<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9, 2002
- [2] L.Malter and G.R.Brewer, J. Appl. Phys., vol.20, no.10, pp918-925, 1949.