

ESTIMATION OF HOM-BBU THRESHOLD CURRENT FOR AN ENERGY RECOVERY LINAC

Ryoji Nagai^{1(A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Masaru Sawamura^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Hokuto Iijima^{A)}, Nobuhiro Kikuzawa^{A)}, Eisuke Minehara^{B)}

^{A)}Energy Recovery Linac Development Group, Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

^{B)}Advanced Photon Source Development Unit, Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

A collaborative project towards an ERL light source has been launched in Japan. In this project, the superconducting cavity is optimized for a high-average current beam. The latest design is a 9-cell cavity of 1.3 GHz with enlarged beam pipes and on-axis HOM absorbers. In this paper, beam breakup instabilities for the newly designed cavity is investigated. Threshold current of beam breakup at a 5-GeV ERL and possible extension to multi-turn configuration is presented.

エネルギー回収型リニアックにおけるHOM-BBU閾値電流の評価

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック(ERL)は大電流、超低エミッタンス、超短パルスの電子ビームを加速可能なことから次世代放射光源用の加速器として期待されている。ERLは電子ビームを周回させ超伝導リニアックで加速・減速することで大電流を可能にしたリニアックである。即ち、リニアックで加速された質の高い(超短パルス、超低エミッタンス)電子ビームが放射光に利用できるということである。

この加速器の特有の問題としてHOM-BBUと呼ばれるビーム不安定性がある^[1]。超伝導加速空洞内に電子ビームにより高調波モード(HOM)が励起され、超伝導加速空洞であるためにHOMに対しても比較的大きなQ値をもっているために、周回する電子ビームの条件によってはHOMが大きく励振されてしまう。このHOMによって電子ビームがキックされ、加速できなくなってしまう現象がHOM-BBUと呼ばれる。大電流加速を実現するためにはHOMをいち早く減衰できる超伝導加速空洞の開発が肝要である。この超伝導加速空洞開発の指針を得るためにも、HOM-BBU閾値電流の評価は必要である。

本稿では5GeVのERLについて行ったHOM-BBU閾値電流の評価について報告する。

2. 評価方法

HOM-BBUの閾値電流は加速空洞が1つだけの場合は解析的に求められる^[1]が、加速空洞が複数ある場合にはシミュレーション・コードに頼らざるを得ない。ここでは閾値電流を評価するためのシミュレーション・コードとしてはCornell大で開発された

BIと原子力機構で開発されたBBU-Rの2つを用いた。この2つのコードは同じアルゴリズムを基にした粒子追跡コードであるが、それぞれに違った特徴を持つものである^[2]。シミュレーション・コードの基本的アルゴリズムは加速空洞の中心をずれて通るビームによりHOMが励起され、この励起されたHOMによりビームがキックされる様子をバンチ当りの電荷量を変えながら繰返し計算しHOM-BBUの閾値電流を算出するものである。

超伝導加速空洞についてのパラメータはKEK、東大物性研、原子力機構の共同で開発を進めている大電流加速に最適化した加速空洞(1.3GHz、9-cell)のパラメータを用いた。この加速空洞の特徴はビームパイプ径を大きくすることでHOMをビームパイプから逃がしてやり、高周波吸収体でHOMを吸収し熱に変えるというものである。また、この加速空洞ではDipole-modeのHOM成分に加えて、Quadrupole-modeのHOM成分も減衰するように設計されている^[4]。残念ながら、ここで用いているシミュレーション・コードではDipole-modeによるHOM-BBUしか計算されていない。この加速空洞の有用性を示すためにも、Quadrupole-modeのHOMまで含めたシミュレーションを行う必要がある。評価に用いたこの加速空洞のHOMのパラメータを表1にまとめて示す。ただし、各HOM成分についてx、y方向に励起されるものとし、x、y方向間のHOMの結合はないものとして計算した。

ERLの構成は5GeVのERLを仮定し、図1に示すようにクライオ・モジュール1台当り8空洞でその間にQuadrupole-Tripletを配置する構成とし、周回数については3回周回する構成(同じ加速空洞で3回加速その後3回減速)までについて検討した。加速空洞1台

¹ E-mail: nagai.ryoji@jaea.go.jp

当りのエネルギー・ゲインを20MVとして、1-loop、2-loop、3-loopの際のモジュール数はそれぞれ31、15、10として最終エネルギーがおよそ5GeVになるようにした。入射およびダンプのエネルギーは10MeVとした。

表 1 : 加速空洞のHOMに関するパラメータ

f [GHz]	R/Q [Ω/cm^2]	Q_L	$(R/Q)Q_L/f$ [$\Omega/\text{cm}^2/\text{GHz}$]
4.011	3.210	11410	9.131×10^3
1.856	7.311	1698	6.689×10^3
2.428	6.800	1689	4.730×10^3
4.330	0.018	60680	2.523×10^3
3.002	0.3250	29990	3.247×10^3

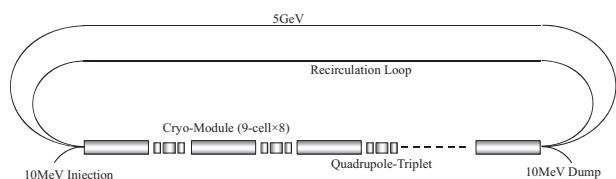


図 1 : 閾値電流評価モデルERL

単一空洞モデルの閾値電流の解析解^[1]では、閾値電流は輸送行列に依存しているため、加速空洞の性能による閾値電流の評価を行うには収束系の最適化が必要である。定性的には電子ビームが加速空洞でキックされても加速空洞の中央に戻ってくるような輸送行列の収束系(R12およびR34がゼロ)であればHOMを励振しないので、HOM-BBUは起こらない。現実には全ての加速空洞についてそのような収束系はありえないので、シミュレーテッドアニーリング^[5]を用いて次のようにして収束系の最適化を行った。まず、リニアックへの入射および再入射のTwiss-Parameter、Quadrupole-Tripletの強度、多重ループの際は加速時のループのPhase-Advanceをビームサイズが小さくなるように最適化し、つづいて最外周のループのPhase-AdvanceをR12およびR34が小さくなるように最適化した。この結果得られたBeta-FunctionとQuadrupole-Tripletの強度を図2と図3にそれぞれ示す。図2は上から順に1-loop、2-loop、3-loop構成のERLについてである。また図中一点鎖線で示している部分が周回loop部である。Quadrupole-Tripletの強度は最もエネルギーの低いビームに対しての強度である。図3において、Quadrupole-Tripletの強度はほぼ平坦であり、これはGraded-Gradient Focusing^[6]と呼ばれる収束系に近い結果となっている。本稿では詳細は述べないがGraded-Gradient Focusingで収束系を最適化してもほぼ同じ閾値電流が得られている^[7]。

ここで得られた輸送行列を用いてBIおよびBBU-Rで閾値電流を算出した。参考文献[2]ではBBU-Rは単一ループにしか対応していなかったが、多重ループにも対応できるように改良した。実際の加速空洞では工作のばらつきのために、HOMの周波数は個々の空洞ごとに数MHz程度のばらつきをもつ。個々のHOMの周波数に対して無相関にばらつきを与え、閾値電流の評価を行った。

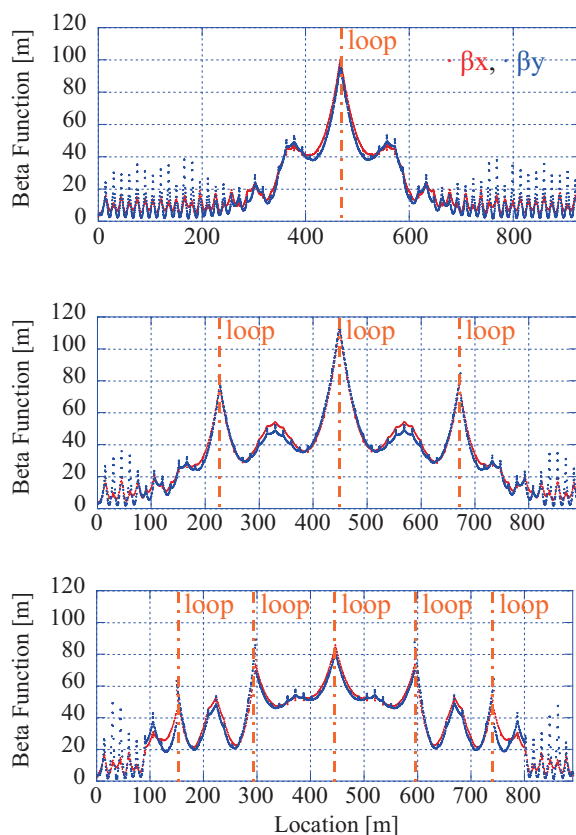


図 2 : 収束系を最適化後のBeta-Function

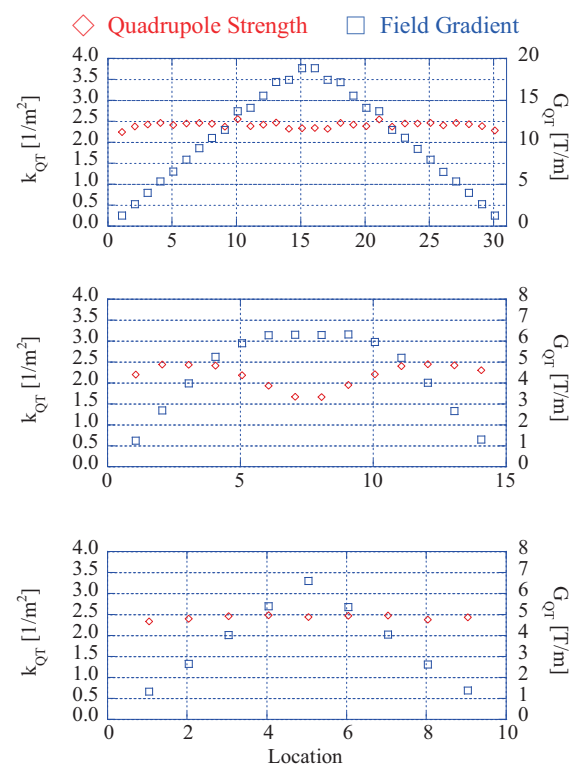


図 3 : 最適化したQuadrupole-Tripletの強度分布

3. 評価結果

それぞれの構成でのHOMの周波数のばらつきに対する閾値電流を図4に示す。ばらつきは正規分布乱数で与えており、図の横軸はその分散である。1つのばらつきについて10回計算し、その際の最大値、最小値、平均値を示している。二つのシミュレーション・コード、BIとBBU-Rでほぼ同じ結果が得られている。ばらつきが大きくなると閾値電流も大きくなっていく。電子ビームの周回周波数がHOMの周波数の分周にちょうど一致してしまうと、位置ずれした電子ビームによってHOMを強く励振してしまう可能性があるが、HOMの周波数にばらつきがあるとこの効果が薄れるために閾値電流が大きくなる。HOMの周波数ばらつき1MHzにおける、それぞれの構成の閾値電流は1-loopで1.5A、2-loopで0.45A、3-loopで0.25Aとなっている。この結果からは3-loop構成でもERL放射光源で目標とする100mAが達成できそうであるが、周回数を増やすとバンチあたりの電荷量が多くなるので、CSRによるエミッタンス増加、HOM吸収体への負荷の増加などの問題があるので、安易に周回数を増やすことはできない。しかし、周回数を増やすことで超伝導リニアックを短くでき、建設費、運転費が大きく削減できるので、多重ループ構成のERLについても十分に検討する必要があることをこの結果は示唆している。

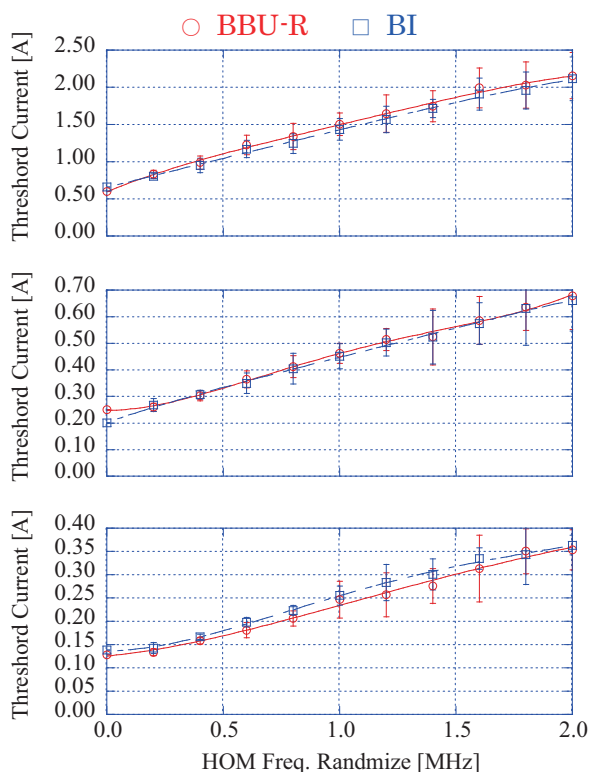


図4：HOM-BBU閾値電流

ここで用いている超伝導加速空洞はビームパイプ

上にHOM吸収体を配置しているの、通常のHOMカップラを使用する超伝導加速空洞に比べて、空洞間隔が長くなり、またQレンズの間隔も長くなるので、閾値電流が低下する可能性が考えられる。そこで空洞間隔が伸びることで、どの程度、閾値電流が低下するかを調べてみた。ただし、収束系についてはそれぞれの空洞間隔に応じて最適化をした。また、HOMの周波数ばらつきは1MHzとしている。図5にその結果を示す。空洞間のドリフト距離が伸びることで閾値電流がわずかに低下しているが、HOM周波数のばらつきによる誤差範囲よりも低下の量は少ないので、問題ないと言える。

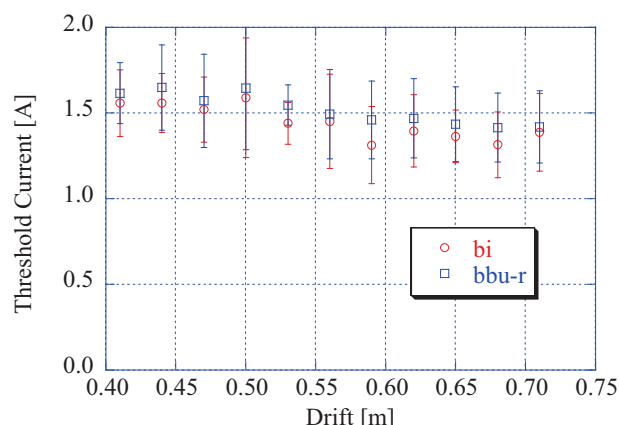


図5：空洞間隔と閾値電流の関係

4. まとめ

新しく開発した大電流加速用超伝導空洞を用いた場合の5GeV-ERLのHOM-BBU閾値電流についての評価を行った。その結果、単一周回構成のERLの閾値電流は1.5Aであり、目標としている100mAより1桁以上大きな値となっているので、この加速空洞を用いることで問題なく目標とする電流の加速ができることが分かった。また、多重周回構成のERLでも閾値電流は100mAを超えており、建設費、運転費削減のためにも多重周回構成についても十分に検討する必要があることが分かった。

参考文献

- [1] L. Merminga, et al., Proc of the 2001 PAC (2001) 173-175.
- [2] E. Pozdeyev, et al., Nucl. Instr. Meth. **A557** (2006) 176-188.
- [3] K. Umemori, et al., "Design of L-Band Superconducting Cavity for the Energy Recovery Linac", Proc of the 2007 APAC, to be published.
- [4] 沢村勝、他、"偏心フルートの高周波特性"、本論文集.
- [5] 永井良治、他、Proc. of the 1st Annual Meeting of Part. Acc. Soc. of Japan (2004) 420-422.
- [6] D. Douglas, JLAB-TN-00-027.
- [7] R. Hajima and R. Nagai, "Analysis of HOM-BBU with Newly Designed cavities for a Multi-GeV ERL Light Source", Proc. of the ERL07, to be published.