

EUV 光源加速器に適した9セル超伝導空洞の RF 設計

RF DESIGN OF THE 9-CELL SUPERCONDUCTING CAVITY FOR EUV LIGHT SOURCE ACCELERATOR

許斐太郎^{#, A)}, 梅森健成^{A)}, 加古永治^{A)}, 阪井寛志^{A)}, 久保毅幸^{A)}, 太田智子^{B)}, 沢村勝^{C)},
Taro Konomi^{#, A)}, Kensei Umemori^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Takayuki Kubo^{A)},
Tomoko Ota^{B)}, Masaru Sawamura^{C)}

^{A)} KEK: High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} TOSHIBA: Toshiba Corporation

^{C)} QST: National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

KEK has been designing the 10 mA class ERL-EUV light source accelerator. The main linac uses 9-cell superconducting cavities with beam line HOM dampers. The target accelerating gradient is 12.5 MV/m. The 9-cell cavity was designed from experience of the KEK compact ERL (cERL) main linac. The cERL main linac was designed to suppress the HOM-BBU with beam current of 100mA by enlarging the iris diameter to 80 mm. This resulted into the high ratio of the peak surface electric field and the accelerating field (E_p/E_{acc}) of 3. The accelerating gradient was limited from 8.5 to 10 MV/m during the CW beam operation due to field emission. The EUV can accept lower BBU limit than cERL because the target beam current of the EUV is 10 mA. The iris diameter is set to 70 mm to lower the E_p/E_{acc} around 2. The target accelerating gradient can be achieved if the surface peak electric field is equal to cERL. The end cells of the 9-cell cavity for EUV were designed to minimize HOM Q factor in the above condition. The optimal shape was designed by matching HOM frequencies of the both end cells and center cells calculated individually. The heat absorption by HOM damper is estimated to about 10 W. The AIN is planning to be used as HOM damper material because it has high RF absorption at 80 K.

1. はじめに

極端紫外線(EUV)を用いた次世代リソグラフィ用光源として ERL 型 FEL 加速器が注目されている。KEK では ERL 加速器の実証機である cERL の運転結果を基として産業利用を目的とした EUV-FEL 光源の設計検討を進めている[1,2]。光源として要求される性能は波長 13.5 nm、FEL 出力 10kW 以上である。また、極めて高い信頼性と安定性が要求される。加速器に要求されるビームパラメータを Table 1 に示す。主超伝導加速空洞は cERL の実績を基に EUV に適した再設計を行う。cERL の主超伝導加速空洞は 100 mA の HOM-BBU に対応するための設計がなされ、アイリス直径を 80mm とした 9-cell 空洞とビームライン HOM ダンパーから構成されている。最大表面電界と加速電界の比(E_p/E_{acc})は 3 である。cERL の運転ではアイリスからのフィールドエミッションにより加速電界が 8.5 から 10 MV/m に制限されている[3]。最大表面電界はアイリス径に最も影響を受けるパラメータである。EUV では目標ビーム電流値が 10mA 級であり、BBU に対する要請が緩和される。このため、アイリス直径を 70mm に変更して E_p/E_{acc} を 2 に下げる。フィールドエミッションが発生する最大表面電界が cERL のままであっても目標加速電界 12.5 MV/m を達成できる。cERL では Model-1 空洞としてアイリス径を 70mm にした空洞が検討されていた[4]。Model-1 空洞は TESLA 空洞の片側ビームパイプを直径 108mm の大口径ビー

ムパイプに変えた空洞である。HOM は 片側ビームパイプ上に配された RF 吸収体で吸収される。Model-1 空洞を EUV-FEL 加速器に用いる場合の BBU 閾値は 195 mA であり、目標ビーム電流を十分に満たしている[5]。

Table 1: Target of EUV-FEL Light Source

Wavelength	13.5 nm
FEL Power	10 kW
Bunch Charge	60 pC
Beam Energy	800 MeV
Eacc of SC cavity	12.5 MV/m
Number of SC cavity	64 cavities
Beam Repetition Frequency	162.5 MHz
Average Beam Current	9.75 mA

2. EUV 空洞の設計目標

EUV 空洞は Model-1 空洞を基に両側のビームパイプ径を大口径にして HOM に対して最適化を行う。空洞形状の設計では加速モード、Monopole HOM、Dipole HOM に着目する。加速モードは先に述べたように目標加速電界 12.5 MV/m を達成できるように E_p/E_{acc} を 2 程度にする。Monopole HOM はダンパー発熱の主要因となる。cERL 主空洞の HOM ダンパーはフェライト吸収体を銅に HIP され、80K サーマルアンカーに接続され

[#] konomi@post.kek.jp

ている。現在の設計では 10W 程度であれば、大きな温度変化無く発熱を吸収できると見積もられている[6]。EUV 空洞では HOM による発熱を 10W 程度に抑えるために各 Monopole HOM のシャントインピーダンス $(R/Q) \cdot Q_{\text{ext}}$ を $2.5 \times 10^4 \Omega$ 以下にする。ここで、ERL ではビームが同じ空洞を 2 回通過することを考慮に入れている。Dipole HOM は BBU 閾値を決定しており、Model-1 空洞と同じ横方向シャントインピーダンス $(R_t/Q) \cdot Q_{\text{ext}}/f$ $5.5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2/\text{GHz}$ を目標と設定する。これにより 10mA 級の加速が可能である。

3. センターセルの特性

EUV 空洞では 9-cell 空洞であり、同一形状のセンターセル 7 つとエンドセルから成る。空洞両端には Euro-XFEL に用いられている窒化アルミ RF 吸収体を設置する[7]。この吸収体は EUV 空洞の設計と並行して KEK と東芝で RF 特性測定と接合方法の開発が行われている[8]。ただし、HOM についての空洞形状の設計では、理想的な状態、ビームパイプと異なるインピーダンスを持つ RF 吸収体は無く、等しいインピーダンスで終端されている条件で外部 Q 値 Q_{ext} を計算する。

センターセルの形状には長年研究され、高電界での実績が多くある TESLA 空洞形状を用いる。Figure 1 に TESLA 形状のセンターセルが無限に連続した場合の主要な HOM のパスバンドを示す。パスバンドと光速の直線が交差するモードのインピーダンスはビームと同期するため大きくなる。9 セルのうち 7 つのセンターセルを同一形状とするため、パスバンドの周波数分布を大幅に変更することは難しく、 R/Q 又は R_t/Q の変化は小さい。EUV 空洞では Q_{ext} を下げることで、HOM のインピーダンスを下げる方法をとる。このため、各 HOM のセンターセルとエンドセル間のインピーダンス、つまり周波数を合わせる事がパワーの流れを妨げずに外部に取り出す最適な方法である。

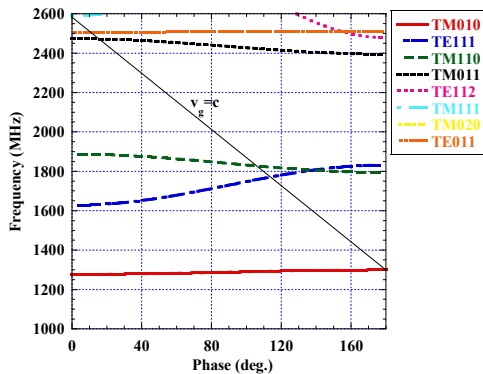


Figure 1: Dispersion relation of TESLA center cell.

4. ビームパイプ径

エンドセルとセンターセルの周波数を合わせる事が、EUV 空洞を設計するための目標であるが、製作する上で、高次の HOM 周波数を目標値に合わせて決めることは難しく、多少の製作誤差で大きく変化する。そこで、調節の容易な低周波の HOM、TE111 と TM110、TM011

にのみ着目する。これ以外の HOM はビームパイプに引き出しやすい特性もあることから、両端のエンドセル形状を異なる形にして、積極的に非対称性を持たせることで分布の偏りを作ることとする。

センターセルのパスバンドより、HOM の最低周波数は $TE_{111-\pi/9}$ の 1628 MHz であり、高いインピーダンスを持つ HOM は $TE_{111-5\pi/9}$ の 1764 MHz から始まる事が分かる。積極的に両端セルに非対称性を持たせるために、インピーダンスが高く有害なモードは両側ビームパイプから取り除き、それ以下のモードは片側だけから取り除くよう、両方のビームパイプ直径を違う寸法にする。片側のビームパイプ直径を 110 mm、もう一方の直径を 100 mm とする。それぞれの TE11 モードのカットオフ周波数は 1597 MHz と 1757 MHz である。なお、モノポールモード TM01 モードカットオフ周波数はそれぞれ 2086 MHz と 2295 MHz であり、両方のビームパイプから HOM を取り除くことができる。

5. エンドセル形状の変形方法

エンドセルはビームパイプと結合しているため、固有周波数と外部 Q 値 Q_{ext} は CST を用いて同調曲線を計算する。Figure 2 にエンドセルの同調曲線の一例を示す。エンドセルのセンターセル側境界は Magnetic 境界としている。離調時短絡面も Magnetic 境界であるため、HOM の π モードが計算される。

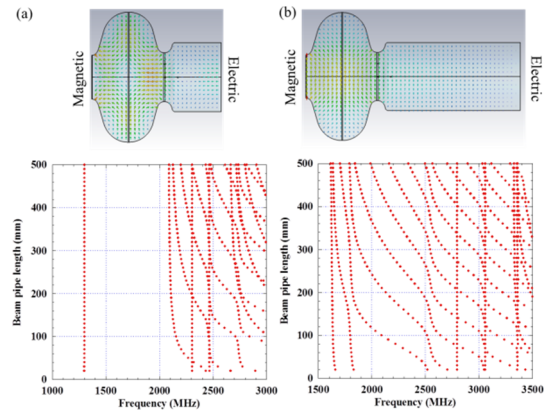


Figure 2: Tuning curves of end cell (a) 4th rotational symmetry (Monopole, Quad, etc.). (b) 2nd rotational symmetry (Dipole, Quad, etc.).

エンドセルの形状を変化させるため Figure 3 に示すよう、各寸法に名称を付ける。エンドセルのセンター側ハーフセルはハーフセルと同じ形状としている。t は溶接代のための直線部である。両側のセルのそれぞれの基準寸法から各寸法を変化させたときの HOM 周波数の応答を Figure 4 に示す。ビームパイプとセル間のアイリス径とセル長さを調節することで、各 HOM の周波数を変化させやすい事が分かる。変形を行う際は TM010、TE111、TM110、TM011 の 4 つの周波数に対して、Xlen と R1、A1、A2、B2 の 5 つの寸法を動かして調節を行う。しかし、現実的な寸法内では 4 つの周波数を同時に目的周波数に合わせることはできない。φ 100 mm BP 側エンドセルに対しては TM010 と TM110、TM011 の 3 つの周波数を調節し、φ 110 mm BP 側エンドセルに対しては

TM010 と TE111, TM011 の3つの周波数を調節することとする。また、 Q_{ext} についても検討を行うため、 X_{len} と $R1$ の2つを任意に動かし、 $A1, A2, B2$ の3変数で3つのモードの周波数を合わせる。Figure 5 は $\phi 100$ mm BP 側エンドセルとセンターセルの TE111 を除く各 HOM の π モード周波数差をゼロにするように調節した際の TM010 モードについての Q_{ext} の応答である。空洞形状がリエントラント形状とならないようにするため、 $X_{len}-A1-A2 > 0$ という条件と現実的な寸法になるよう基準寸法からの変化を 20 mm 以下にするという条件、寸法が 5 mm 以上である条件を入れている。 Q_{ext} は星で示した寸法で最小値を持つことが分かる。他のモードも同様の応答を示す。以下の計算では最小の Q_{ext} を持つ形状を使用して計算を行う。

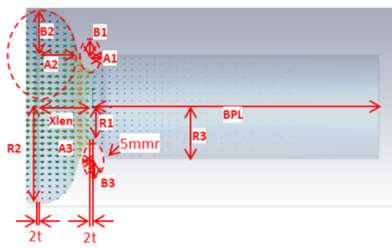


Figure 3: End cell shape parameters.

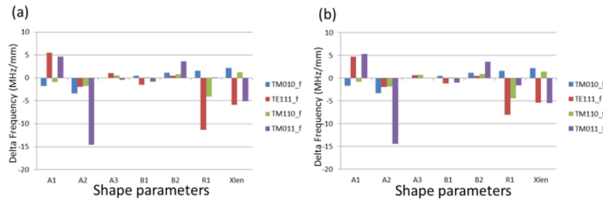


Figure 4: HOM frequency response (a) End-cell with $\phi 110$ mm BP. (b) End-cell with $\phi 100$ mm.

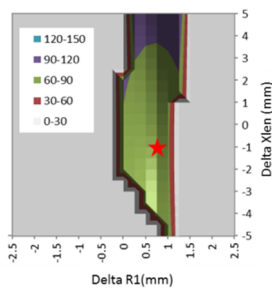


Figure 5: TE111 Q_{ext} of end-cell with $\phi 100$ mm BP.

6. HOM に対する最適化

エンドセルは各 HOM の π モードについてのみの計算となっているため、エンドセルとセンターセルのパスバンドを完全に一致させることはできない。しかし、センターセルの形状を変更してもパスバンドのバンド幅は大きく変化しないことから、エンドセルのバンド幅も大きくは変化しないと考えられる。エンドセルとセンターセルの各 HOM の π モード周波数差を目安に形状を变形する。9-cell 空洞の Q_{ext} は CST 内で VI-method を拡張して開発

された計算方法により算出している[9]。ビームパイプ長さにより、空洞とビームパイプの結合が変化するため、ビームパイプ長さを 50 mm から 300 mm まで変化させた時の最大値を空洞のインピーダンスとしている。しかし、CST の計算方法は Q_{ext} の高いモードはビームパイプ長さの変化に敏感であり、計算を失敗し Q_{ext} を低く見積もることがあるので、注意が必要である。

TE111 モードでは $\phi 100$ mm BP 側エンドセルを TM010, TM110, TM011 の π モード周波数をセンターセルに合わせた状態で $\phi 110$ mm BP 側エンドセルの最適形状の探索を行った。Figure 6 に TE111 の各パスバンドモードについてのシャントインピーダンスの変化を示す。凡例に示す添え字は TE111 モードの低い周波数側から何番目のモードであるかを示す。TE111 はビームパイプと強く結合しているため、11 個のモードが見られる。インピーダンスが不連続に変化するモードは Q_{ext} の計算を失敗しているものである。他のモードのこれらの不連続なモードは補完して考慮する必要があるが、全てのモードが目標値より十分に低いことが分かる。

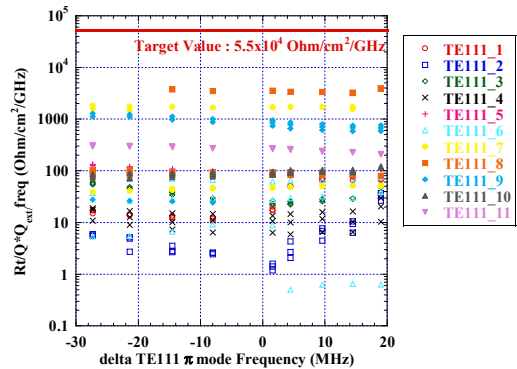


Figure 6: Shunt Impedances of TE111 pass band

TM110 は $\phi 110$ mm BP 側エンドセルを TM010, TE111, TM011 の π モード周波数をセンターセルに合わせた状態で $\phi 100$ mm BP 側エンドセルの最適形状の探索を行った。Figure 7 に TM110 の各パスバンドモードについてのシャントインピーダンスの変化を示す。凡例に示す添え字は TM110 モードの低い周波数側から何番目のモードであるかを示す。不連続なものは TE111 と同様に Q_{ext} の計算を失敗しているためであるが、補完することにより全てのモードが目標値より十分に低いことが分かる。

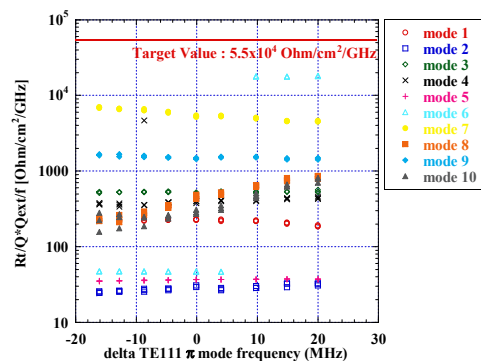


Figure 7: Shunt impedances of TM110 pass band

TE111 と TM110 のシャントインピーダンスはどちらも目標値を十分に下回っているため、エンドセルとセンターセルの TE111 と TM110 の π モード周波数差をゼロに設定して TM011 の調整を行う。TM011 のパスバンドでは $\pi/9$ モードのシャントインピーダンスが最も高くなる。Figure 8 は $\phi 100$ mm BP 側エンドセルと $\phi 110$ mm BP 側エンドセルの両方の TM011- π モード周波数差を調整した場合の TM011- $\pi/9$ モードの Q_{ext} を示す。目標値に届く解は得られないが、 $\phi 110$ mm BP を +8.2 MHz、 $\phi 100$ mm BP を +3.8 MHz とすることで、最小値を得られる。この TM011- $\pi/9$ モードについて最適化した形状を EUV 空洞とする。

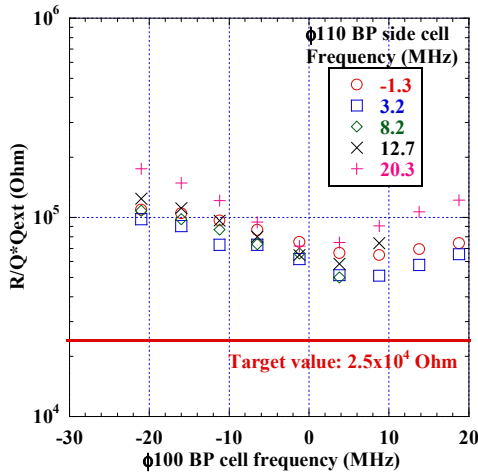


Figure 8: Shunt Impedances of TM011- $\pi/9$.

7. EUV 空洞のパラメータ

EUV 空洞の各セルの寸法と加速モードのパラメータを Table 2 と 3 に示す。加速モードのパラメータは比較のために TESLA 空洞と cERL で使われている Model-2 空洞を示す。

Table 2: EUV Shape Parameters (unit: mm)

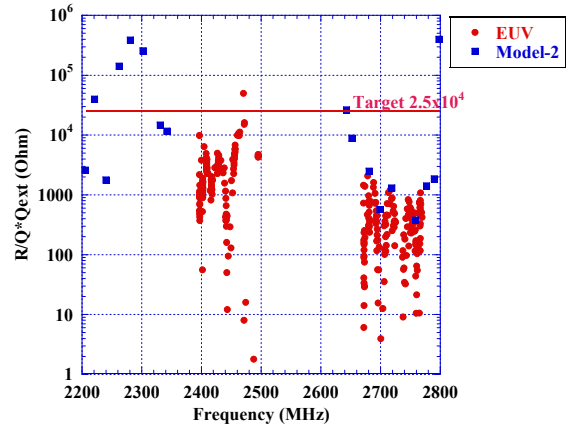
Shape Parameter	Center Cell	$\phi 100$ mm side End Cell	$\phi 110$ mm side End Cell
A1	11	8.968	9.981
A2	40.389	38.867	41.321
A3	/	10	10
B1	19	14	14
B2	42	41.995	49.485
B3	/	5	8
R1	25	39.75	40.75
R2	103.3	103.3	103.3
Xlen	55.652	52	52
t	1	1	1

Table 3: Accelerating Mode Parameters

Parameter	EUV	TESLA	Model-2
RF Frequency (MHz)	1300	1300	1300
R/Q (Ohm)	1009.2	1036	897
Geometrical Factor (Ohm)	269.2	270	289
Ep/Eacc	2.03	2.0	3.0
Hp/Eacc (mT/(MV/m))	4.23	4.26	4.35

EUV 空洞ではアイリス径を絞ったことにより目標通り、高電界での運転実績が豊富な TESLA 空洞と同等の Ep/Eacc を実現できた。また、EUV 空洞と Model-2 空洞の HOM インピーダンスについて比較した図を Figure 9 に示す。EUV 空洞では Monopole HOM の最大インピーダンスは目標値の倍の 5×10^4 Ohm、Dipole HOM の最大インピーダンスは 3×10^4 と目標値を満たしている。EUV 空洞と Model-2 空洞を比較すると Monopole HOM では EUV 空洞のインピーダンスが低く、Dipole HOM では Model-2 空洞のインピーダンスが低い、これは Model-2 空洞が BBU を防ぐために Dipole HOM に特化して設計されたためである。

(a)



(b)

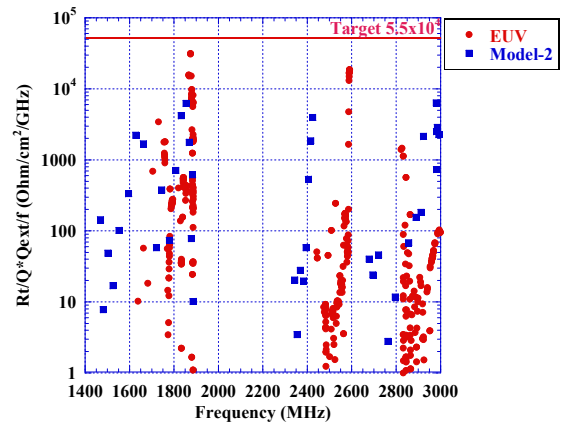


Figure 9: Shunt Impedance of EUV HOMs (a) Monopole HOMs, (b) Dipole HOMs.

8. まとめ

cERLの実績に基づき、10 mA級のEUV計画に適した超伝導空洞のRF設計を行った。Ep/Eaccを2、Monopole HOMのシャントインピーダンス $(R/Q)*Q_{ext}$ の最大値が $5 \times 10^4 \Omega$ 、Dipole HOMのシャントインピーダンス $(R/Q)*Q_{ext}/f$ の最大値が $2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2/\text{GHz}$ であるEUV空洞を設計した。Monopole HOMのシャントインピーダンスよりダンパーの発熱は最大で20 W程度になると想定される。これはcERL実機に用いられているフェライトHOMダンパーを単体試験した実績である30Wを下回るため、許容できると考えている。今後、このEUV空洞に最適な窒化アルミRF吸収体の形状を設計していく。

参考文献

- [1] N. Nakamura *et al.*, “Design work of the ERL-FEL as the high intense EUV light source”, Proceedings of ERL 2015, Stony Brook, NY, USA, 2015, MOPCTH010.
- [2] T. Miyajima *et al.*, “Design work of EUV-FEL light source based on energy recovery linac”, Proceedings of the 12th Particle Accelerator Society Meeting in Japan, Aug. 2015.
- [3] H. Sakai *et al.*, “Measurement of the cavity performances of compact ERL main linac cryomodule during beam operation”, Proceedings of SRF2015, Whistler, BC, Canada, TUPB021.
- [4] K. Umemori *et al.*, “Design of L-band superconducting cavity for the energy recovery linacs”, Proceedings of APAC2007, Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (RRCAT), Indore, India, THC2MA03.
- [5] S. Chen *et al.*, “Transverse multi-pass beam breakup simulation for KEK ERL light source”, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, MOPWA056.
- [6] M. Sawamura *et al.*, “主空洞 HOM ダンパー開発現状と今後”, cERL mini-Workshop, Tsukuba, 2014.
- [7] N. Mildner *et al.*, “A Beam Line HOM Absorber for the European XFEL Linac”, Proceedings of the 12th International Workshop on RF Superconductivity, Cornell University, Ithaca, New York, USA.
- [8] T. Ota *et al.*, “Development of HOM Dampers for Superconducting cavities”, MOP022, in these Proceedings.
- [9] P. Balleyguier, “A straightforward method for cavity external Q computation”, Particle Accelerators, (1997), vol.57, pp.113-127.