

メタルシールを用いた重イオン線形加速器の開発

DEVELOPMENT OF HEAVY ION LINEAR ACCELERATOR USING METAL SEAL

森上ゆりあ^{#, A)}, 村田亜希^{A)}, 林崎規託^{A)}, 竹内猛^{B)}, 山口晶子^{B)}, 岡屋慶子^{B)}, 中山光一^{B)}

Yuria Morikami^{#, A)}, Aki Murata^{A)}, Noriyosu Hayashizaki^{A)}, Takeshi Takeuchi^{B)},

Akiko Yamaguchi^{B)}, Keiko Okaya^{B)}, Koichi Nakayama^{B)}

^{A)} Tokyo Institute Technology

^{B)} Toshiba Energy System & Solutions Corporation

Abstract

Tokyo Institute of Technology and Toshiba Energy Systems have collaborated on a heavy particle linear accelerators. It is important to optimize the construction and maintenance cost of the accelerator when it is introducing into the facility for particle radiotherapy from now on. In order to keep good RF and vacuum performance for long period, we have developed heavy ion linear accelerator that use metal seals instead of using O-ring seal. We will present the construction of the test cavity with metal seal and low level RF results of using this cavity.

1. はじめに

東工大と東芝エネルギーシステムズはがん治療のための重イオン線形加速器に関する共同研究を進めている。これまでに、RFQ (Radio Frequency Quadrupole) 線形加速器を、銅削り出しの 3 体加工で製作した実績があり、実際に重粒子の炭素ビームの加速に成功している[1, 2]。

3 体加工の RFQ 線形加速器では、組み立て工程が容易で銅メッキが不要となる利点がある。山形大学の R&D 向けに制作した RFQ 加速器では、本体を一体化するために、Oリングを用いていた。しかし、Oリングは真空排気するとガスを放出し、到達圧力が改善されない原因となる。さらに経年劣化に対する維持管理が課題となっている。

そこでOリングと比べ、真空排気をしてもガス放出が少なく、また経年劣化しづらいメタルシールを実装した RFQ 線形加速器の開発に取り組んでいる。しかし、メタルシールを用いた場合は Oリングと比べ、銅製の空洞側を傷つける可能性があり、メタルシールのつぶれ具合を慎重に決める必要があるため、実機に実装する前にテスト空洞を用いて高周波性能および真空性能について試験する必要がある。

そこで今回テスト空洞を設計製作し、Oリングとメタルシールを装着して RF 性能と真空性能について試験を行っている。低電力高周波試験の結果について報告する。

2. 真空・高周波試験装置

2.1 測定装置

Figure 1 に試験装置の概略図を、Fig. 2 に装置全体の写真を示す。テスト空洞の上部 2 か所のピックアップ電極を同軸ケーブルでネットワークアナライザに接続し、共振周波数と無負荷 Q 値の測定を行った。ピックアップ電極 (Fig. 3) は $\phi 2.5$ mm の銅線をループ状としたものであり、

その取り付けはネットワークアナライザが示す Q 値が最大になるように合わせて固定した。真空排気は排気速度が 252 L/min のドライポンプ (DP) と排気速度が 260 L/s のターボ分子ポンプ (TMP) を、真空ゲージはクリスタルイオンゲージを設置した。また排気ポートの枝管に四重極型質量分析計 (Q-mass) も設置した。

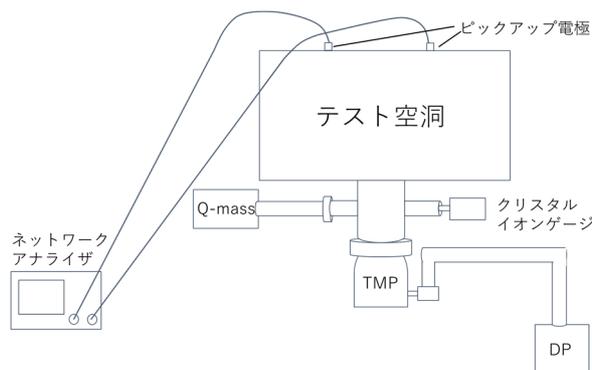


Figure 1: Schematic drawing of experimental setup.

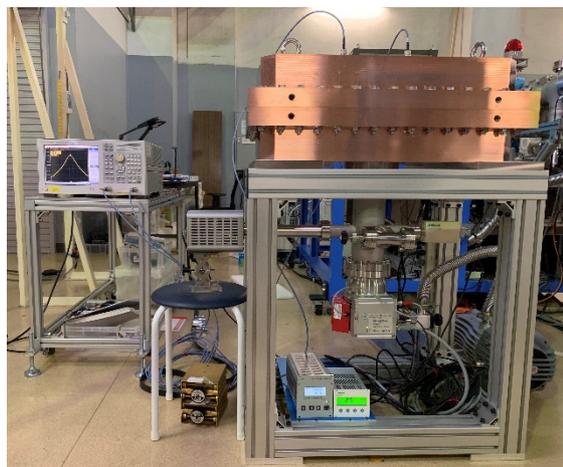


Figure 2: Experimental setup.

[#] morikami.y.aa@m.titech.ac.jp

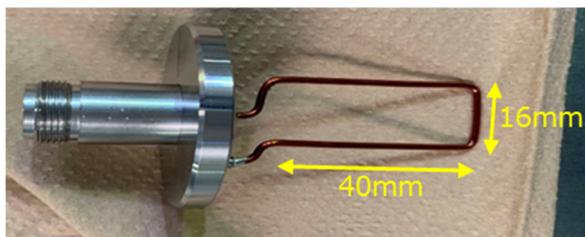


Figure 3: RF pick-up.

2.2 テスト空洞

テスト空洞の全長は実機の約 1/3 である 0.8 m で設計した。空洞内寸は Fig. 4 に示す通りで、高さは 220 mm である。上部と下部の 2 ピース構造で、どちらも無酸素銅削り出し加工による実機と同等の製作方法である。締付ボルトのピッチは必要な締付力が得られる 51 mm ピッチとし、ステンレス M12×120L のボルトを用いて締め付けた。メタルシール装着後の締付力はトルクレンチで管理した。

半割のテスト空洞の合わせ面には溝が 2 つある。外側にあるのが O リングまたはメタルシールを入れる溝で、幅は 10 mm、深さは 7 mm、コーナーの溝中心は R40 である。その内側にある溝は RF コンタクトを入れるための溝で、O リングを使用するときのみ使用する。RF コンタクトを入れるのは、電気的接触を得るためである。真空排気の穴の部分には銅のメッシュ (太陽金網:4CU-8-410) を用いた。

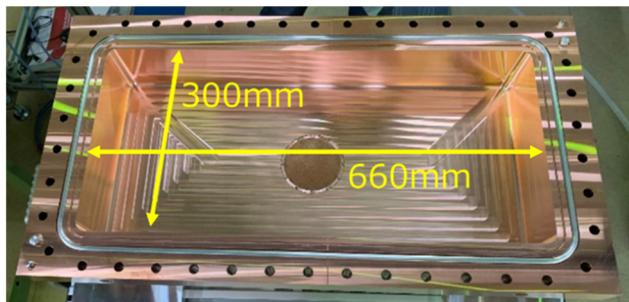


Figure 4: Main flange face of a test vacuum chamber.

2.3 メタルシール

白井国際産業株式会社製の U-TIGHTSEAL を使用した [3, 4]。メタルシールの構造を Fig. 5 に示す。中心部にはインコネルのコイルスプリングがあり、外被覆がアルミニウム、内被覆がステンレスの二重被覆がなされている。合わせ面用のメタルシールの外観を Fig. 6 に示す。

U-TIGHTSEAL 装着後に大気開放した場合、無酸素銅製のテスト空洞側に圧痕が生じてはならない。無酸素銅 C1020 の 0.2% 耐力は引張試験により 75 N/mm の結果が得られている。以上を満たすのに必要なメタルシールが有するバネの締付力は 290 N/mm であり、今回の試験では 200 N/mm の U-TIGHTSEAL を選択した。ピックアップ電極ポート (V70) と真空排気ポート (V120) も同様の計算結果より、締付力 100 N/mm の U-TIGHTSEAL を選択した。その寸法を Table 1 に示す。

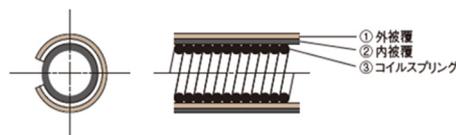


Figure 5: Cross-sectional view of metal seals [4].

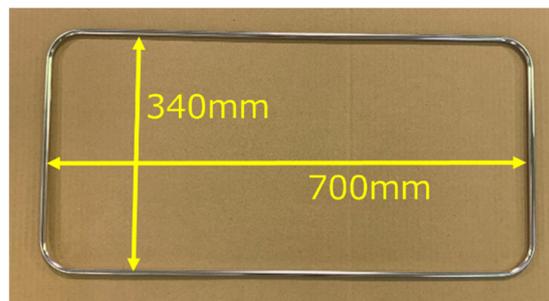


Figure 6: Metal seal used for the main flange face.

Table 1: Dimensions of the Metal Seals used for the Test Vacuum Chamber

取付部分	寸法 [mm]	
加速空洞本体	内寸	700×340×R36
	断面径	φ 8.0
ピックアップ電極	内径	φ 71.1 (V-70)
	断面径	φ 3.9
排気ポート	内径	φ 121.1 (V-120)
	断面径	φ 3.9

2.4 電磁場シミュレーション

テスト空洞の Q 値の計算をするにあたり、CST MW Studio を用いた。空洞内容積をポート無し、真空状態で 1 GHz までの周波数領域で 4 つのモードの共振周波数と無負荷 Q 値を算出した。各モードにおける Q 値の結果を Table 2 に、電場と磁場の解析結果を Fig. 7 に示す。

Table 2: Simulated Values of Resonant Frequency and Unloaded Quality Factor for Each Mode

共振モード	TE ₀₁₁	TE ₀₁₂	TE ₁₀₁	TE ₀₁₃
共振周波数 [MHz]	549	675	749	845
無負荷 Q 値	33475	40932	34204	49298

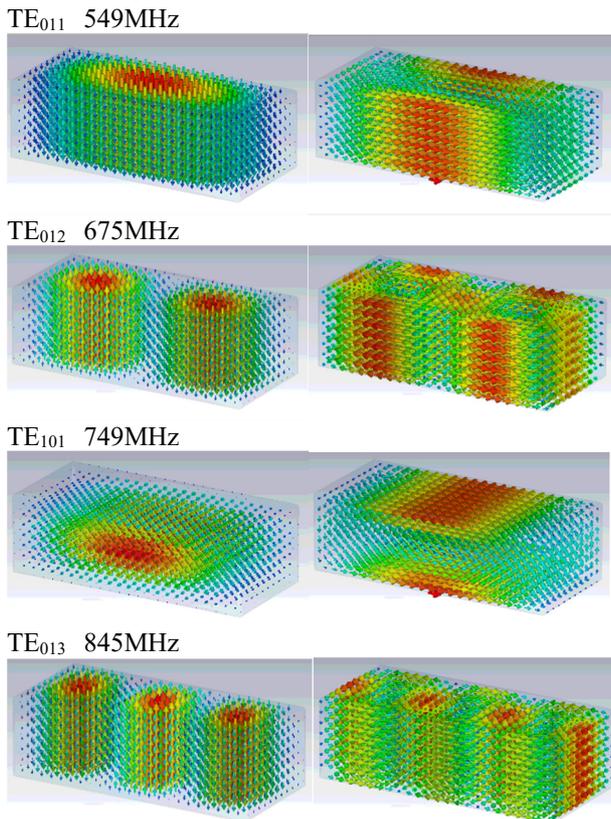


Figure 7: Simulated field distributions.
(Left: Electric field, Right: Magnetic field)

3. 試験結果

3.1 Oリング+RFコンタクトでの測定結果

到達圧力は 3.5×10^{-6} Pa であった。各モードにおける Q 値の測定値と計算値、それらの比を Table 3 に示す。電気的接触を得るために RF コンタクトを併用した。

Table 3: Measured Values of the Unloaded Quality Factor in the O-ring Test

共振モード	TE ₀₁₁	TE ₀₁₂	TE ₁₀₁	TE ₀₁₃
共振周波数 [MHz]	549	675	749	845
無負荷 Q 測定値	17052	13931	19587	36282
無負荷 Q 計算値	33475	40932	34204	49298
測定値/計算値 [%]	51	34	57	74

O リングとメタルシールを交換するときにテスト空洞の上部の合わせ面を見たところ、RF コンタクトの痕が一樣についていなかったため、均一に当たっていない可能性があることが分かった。

3.2 メタルシールでの測定結果

到達真空度は 5.1×10^{-5} Pa であった。最小の周波数である 549 MHz の場合の、増し締め時のトルク Q 値の時間変化を Fig. 8 に示す。グラフは縦軸が Q 値、横軸が経

過時間である。Fig. 8 より、Q 値は締め付後 1 時間程度してから安定することが分かる。Table 4 に、各モードにおける Q 値の測定値と計算値、それらの比を示す。いずれもトルク 100 Nm の場合である。Q 値は 845 MHz のときが最も高いが、Q 値の測定値と計算の比が高いのは 749 MHz だった。O リング同様、675 MHz のときが最も Q 値が低く、測定値と計算値の比も低い結果であった。

試験後にテスト空洞を開けてみると、合わせ面に使用したメタルシールの曲線部分はきれいに潰れていたが、短辺と長辺の直線部分は曲線部分ほど潰れていなかった(Fig. 9)。各部分において、目視で中心に当たるところの被膜の隙間をノギスで測定したところ、曲線部分は 3.50 mm、短辺部分は 4.28 mm、長辺部分は 4.28 mm で、約 0.78 mm の差があった。ピックアップ電極ポートと真空排気ポートに用いたメタルシールは均一に潰れていた。

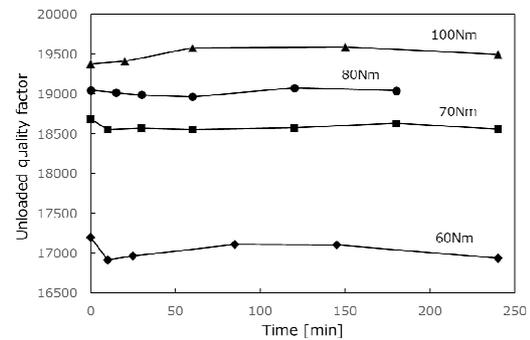


Figure 8: Bolt tightening torque dependence and time dependence of the unloaded quality factor.

Table 4: Measured Values of the Unloaded Quality Factor in the Metal Seal Test

共振モード	TE ₀₁₁	TE ₀₁₂	TE ₁₀₁	TE ₀₁₃
共振周波数 [MHz]	549	675	749	845
無負荷 Q 測定値	19493	11381	30869	39935
無負荷 Q 計算値	33475	40932	34204	49298
測定値/計算値 [%]	58	28	90	81

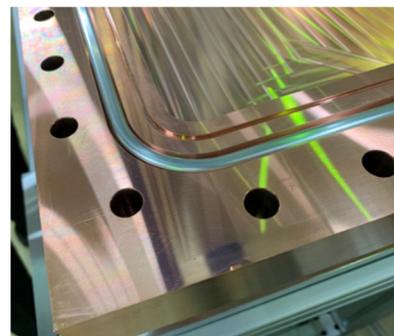


Figure 9: Deformation of a bending part of the metal seal on the main flange face.

4. まとめと今後の予定

3 体加工の RFQ 線形加速器にメタルシールを実装するため、本研究では O リングとメタルシールが装着可能なテスト空洞を試作して、高周波性能と真空性能を確認した。現在までの結果として、メタルシールを使用した場合の Q 値は、O リングを使用した場合よりも、749 MHz で約 1.6 倍、549 MHz、845 MHz で約 1.1 倍、675 MHz で約 0.8 倍となった。また、メタルシールのつぶれ具合が曲線部分と短辺・長辺部分で異なった。このことより、空洞合わせ面のメタルシールを最適化することで空洞全体の高周波特性の向上を期待できる。また、メタルシールを均一に締めるためには、トルク管理に工夫が必要であることがわかり、今後の設計・製作に生かしていく。

今後は締付力 300 N/mm に変えた試験や他の外被覆の材質を変えたメタルシールでも同様の試験を行う。今回はテスト空洞を用いて Q 値性能の試験を行ったが、次は真空性能の試験を本格的に行う予定である。

参考文献

- [1] T. Sako, *et al.*, “重粒子線がん治療装置用 C⁶⁺イオン源・高周波四重極線形加速器のビーム加速試験”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 179-181.
- [2] A. Yamaguchi, *et al.*, “Design of injector for carbon cancer therapy”, in *Proc. IPAC 2017*, Copenhagen, Denmark, May 2017, pp. 4704-4706.
- [3] N. Ueda, *et al.*, “Dependence of RF Contact on Tightening Force”, Proceedings of the 8th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokyo, Jul. 25-27, 1983, pp. 147-150.
- [4] 白井国際産業, U-TIGHTSEAL カタログ.