

ドリフトチューブ線形加速器の省電力化に関する要素技術開発

COMPONENT TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR ELECTRIC POWER SAVING WITH A DRIFT-TUBE LINAC

山本和男[#], 永山貴久
 Kazuo Yamamoto [#], Takahisa Nagayama
 Mitsubishi Electric Corporation

Abstract

A drift-tube linac has been employed for a low energy region of a hadron accelerator, and the application diverges into many branches from investigation to an industrial use. One of the biggest problems of this system is enlargement of a power supply system for it needs several hundred kW at a peak to operate. The power consumption of a drift-tube linac is estimated as sum of a wall loss, which is proportional to resonator surface resistance including contact region, and a beam loading. Therefore we tried to apply a cryogenic apparatus to reduce wall loss which is correlated with temperature. We manufactured several prototype drift-tube cavities, consisting 2 cells, and applied 30 K approximately. Then the Q-factor, which is inversely related with wall loss, was measured. The prototype cavity which has edge shape contact shows more than 2 times Q-factor which means we would be able to reduce power consumption to half.

In this paper, we report the structure characteristic of the prototype drift-tube cavities and the temperature dependence test result of the Q-factor .

1. はじめに

ドリフトチューブ線形加速器は、ハドロン加速器の低エネルギー部分に使用され、用途は研究用から産業用まで多岐にわたる。ドリフトチューブ線形加速器を運転するには、ピークで数百kWの高周波電力量を必要とする^[Ref.1-2]ため、電源システムの肥大化が課題である。

高周波電力は、ドリフトチューブ電極 (DT) 間に加速電界を発生させるため共振器へ供給される。その量は共振器での消費電力量と加速ビームによるローディング量で決まる。上記共振器での消費電力量は、共振器内の接触抵抗と表面抵抗による量である。

そこで、上記課題に対し、低温状態で物質の抵抗値が減少する物理現象を、ドリフトチューブ線形加速器の共振器に適用し、上記共振器での消費電力量を低減させることで、電源システムを小型化する要素開発を実施している。

表面抵抗を削減するためには、残留応力ひずみによる接触抵抗の増加のほか、動作温度点でのQ値変動が問題となる。上記らは消費電力量が増加する要因であるが、低温状態でのDT位置の変動も、加速器としての性能を劣化させる要因となる。また、共振器構造の製造技術として、たとえば拡散接合方式^[Ref.3]を用いるとメンテナンス性が低下することも問題である。

本開発では、製作が容易で低コストに消費電力量を半減される低温ドリフトチューブ線形加速器の基礎検討として、セル数 2 からなる IH 型共振器を、

冷凍機により最大 30 K まで冷却する特性評価機を試作した。

本発表では、特性評価機の構造特徴と、特性評価機を用いた Q 値の温度依存性試験結果について報告する。

2. 特性評価機の設計

2.1 共振器形状設計

図 1 に特性評価機用共振器の寸法図を示す。共振器構造としてIH型を採用し、DT形状は外径φ30 mm内径φ12 mmを採用した。DT長は2本とも50 mm、ギャップ長は25 mmに固定し、共振周波数が400 MHz程度になるよう3次元電磁界解析ソフトSOPRANO^[Ref.4]を使用して空洞径を設計した。その結果、空洞径はφ229 mmにて共振周波数400.88 MHz、Q値7073が得られた。

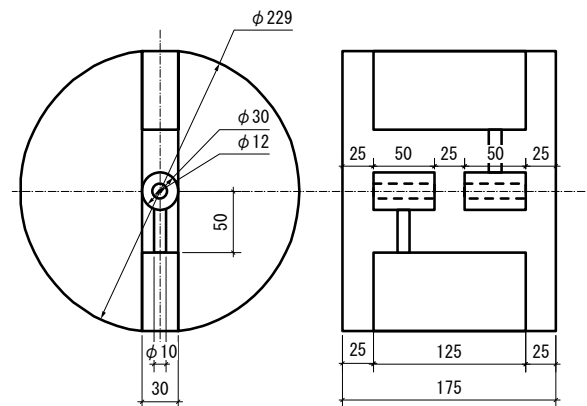


Figure 1: Dimensional outline drawing of the resonator.

[#] Yamamoto.Kazuo@bc.MitsubishiElectric.co.jp

Table 1: Specification of the resonator

共振周波数	400 MHz
Q 値	7000
共振器全長	175 mm
共振器内径	φ 229 mm
ドリフトチューブ電極数	2 本
ドリフトチューブ電極長	50 mm
ドリフトチューブ電極形状	外径 φ 30 mm 内径 φ 12 mm
リッジ長	125 mm

2.2 共振器構造設計

共振器構造は、製作の容易さと DT 同士の同軸度確保のため、DT とリッジを有する構造体を DT ユニットとし (図 2(a))、それに半円筒形状の銅板を取り付ける構造とする。通常のドリフトチューブ線形加速器では、銅板が真空容器を兼ねていたため、強度・気密の観点から、一体物として削り出していた。しかし、特性評価機における共振器構造では、断熱の必要性から、ビーム通路を除く共振器全体を断熱材で覆い、断熱材ごと真空容器に格納する必要がある。そのため、銅板に要求される機能は、冷却時の DT ユニットとの接触抵抗が低く、ある程度の位置精度が確保できることである。そのため、銅板を側部と胴部とに分け、端部と側部との間には RF コンタクトを使用する薄板接続構造を採用した。

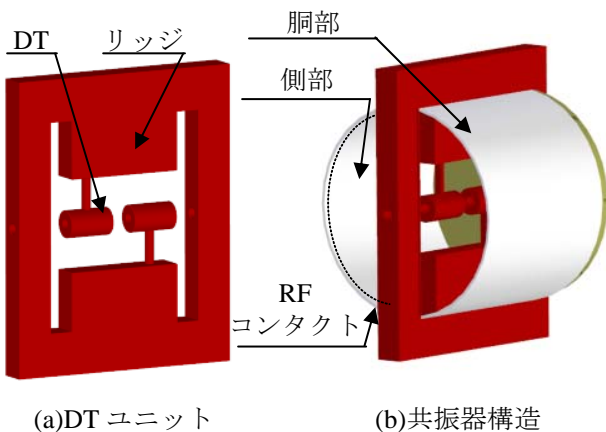


Figure 2: Schematic drawings of the resonator.

3.2 全体設計

図 3 に特性評価機の全体構成図を示す。前項の 400 MHz 共振器と、最大 20 K まで冷却可能な冷凍機と、低温状態を保持する真空容器、および冷凍機と共振器を連結する伝熱性部材、共振器を真空容器

内に固定する支持部材から構成される。超電導空洞に使用される液体ヘリウムや液体窒素などの液体媒体は用いず、冷凍機のみで冷却する構造とした。

冷凍機からの低温状態を共振器に伝熱する伝熱性部材形状および共振器を真空容器内に固定する支持部材形状は、入熱と冷凍機特性から検討した。輻射に対しては、外部からの輻射による伝熱の抑制に 20 層の Multi Layer Insulator (MLI: 輻射 4 W/m² 以下) を採用し、輻射による伝熱を 2.8 W に抑えた。また、伝熱に対しては、共振器を容器内に固定する支持部材としてガラエポ樹脂を採用し、支持部材の形状を強度的に必要な最小限としたことから、入熱 3.1 W に抑えた。その結果、外部からの入熱は 5.9 W と見積もったが、実際には、これに Q 値測定用アンテナからの熱流入、测温抵抗からの入熱などが加わり 10 W 程度になると想定している。

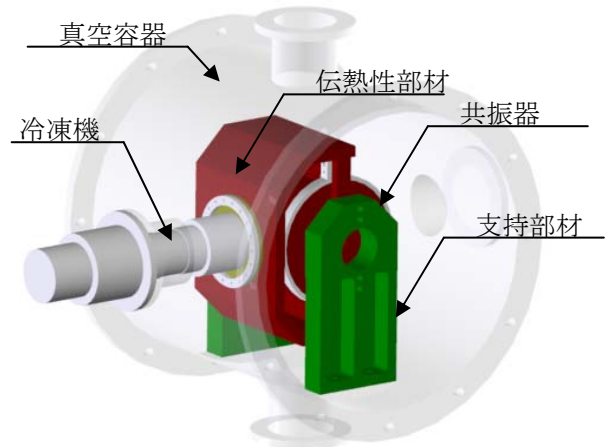


Figure 3: General drawing of the prototype cavity.

Table 2: Specification of the prototype cavity

共振器材質 (表面粗度)	銅 C1020 (▽▽)
冷凍機	SHI 製 CH-110
真空容器全長	750 mm
真空容器外径	φ 670 mm
冷凍機-共振器伝熱性部材	銅 C1020
共振器固定支持部材	ガラエポ樹脂
真空排気機器	ターボ分子ポンプ
ヒータ	HI-SD ROD
温度測定器	カートリッジヒーター 超低温用白金-コバルト 测温抵抗体

3. Q 値の温度依存性試験

図 4 に製作した特性評価機の全体図を示す。周辺機器として真空排気系と真空度計、温度上昇用のヒータが DT ユニットに、温度計は DT ユニットと銅板の側部に取り付けられている。Q 値はネットワークアナライザを用いて共振周波数とともに温度に対して測定を実施した。

図 5 に DT ユニットの温度と共振器の Q 値の測定結果を示す。共振器の構造は上述した薄板接続構造であり、DT ユニットと銅板との接触面には接触抵抗を削減するための RF コンタクトとしてインジウム線を取り付けている (図 6(a))。

図 5 より、インジウム接触の場合、60 K あたりで Q 値が一時低下する現象が再現性を持って測定された。これは、DT ユニットと銅板を構成する銅材 (C1020) 中に、熱収縮率の異なるインジウム線が入ることにより、一時的に接触面における接触抵抗が増加したと考えられる。

そこで、銅板胴部側の接触面構造をエッジ状にし、温度の低下とともに DT ユニットに銅板が食い込み接触抵抗がより低減する構造に改良した (図 6(b))。その結果、一時的に Q 値が低下する現象は解消され、100 K 程度で常温 Q 値の 2 倍、60 K 程度で 3 倍、30 K 程度で 3.8 倍まで Q 値を増加できることが実証できた。60 K 程度以下では理論値から外れていくが、銅の材料特性や表面粗度の影響と考察される。

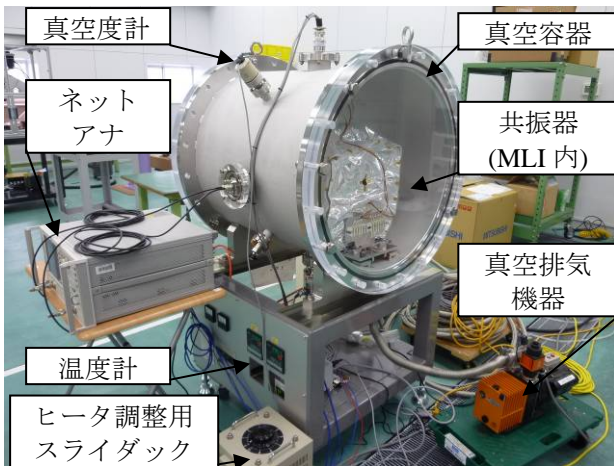


Figure 4: General view of the prototype cavity.

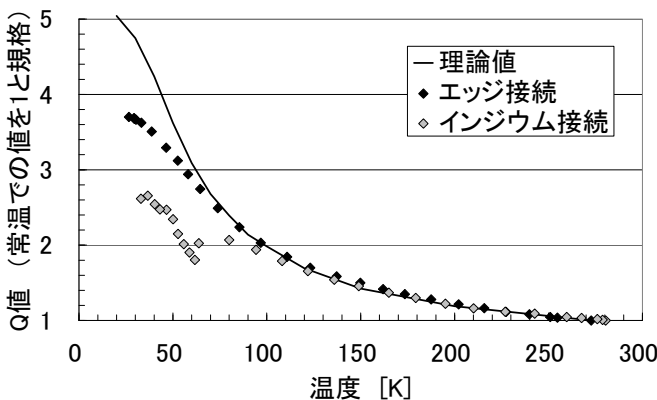
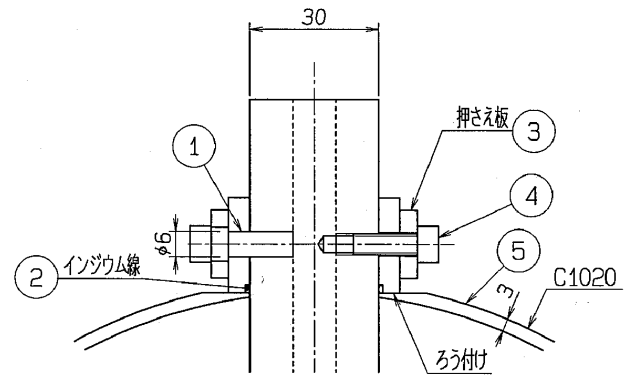
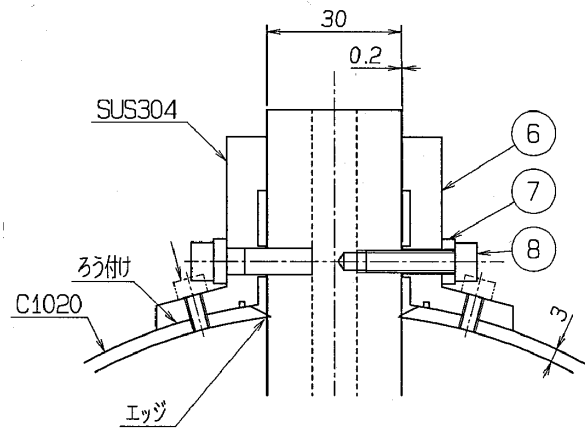


Figure 5: Measurement results.



(a) Connection with an indium.



(b) Connection with a sharp edge.

Figure 6: Partial view of the connection area.

4. まとめ

セル数 2 からなる IH 型共振器を用いた特性評価器を設計試作し、低温度に対する Q 値測定を行った。接触面にインジウムの RF コンタクトを用いた場合、低温過程にて接触抵抗が増加する現象が測定されたが、エッジ形状を用いた接触方式により改善された。C1020 の材質で表面粗度 $\nabla\nabla$ 程度の共振器にて、100 K 程度で Q 値が 2 倍になることから、高真空排気機器の代わりに冷凍機を採用し、かつ、液体媒体を使用しない伝熱性部材による冷凍構造を用いれば、低コストに消費電力を半減できるドリフトチューブ線形加速器を得る可能性が示唆された。

参考文献

- [1] K. Yamamoto, et. al., "Experimental verification of an APF linac for a proton therapy facility" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 269 (2011) 2875-2878.
- [2] Y. Iwata, et. al., "Performance of a compact injector for a heavy-ion medical accelerators" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572 (2007) 1007-1021.
- [3] Isamu Sato, et.al., "Development of the compact source of monochromatic coherent X-ray for cancer medical treatment" Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp219-223, August 4-6, 2010, Himeji, Japan
- [4] Cobham Technical Services, <http://www.cobham.com/>