

PERFORMANCE TEST OF LOW BETA SUPERCONDUCTING TWIN QUARTER WAVE RESONATOR

Hiroshi Kabumoto, Suehiro Takeuchi, Nobuhiro Ishizaki, Makoto Matsuda, Yoshinori Otokawa
Japan Atomic Energy Agency, Tokai Research and Development Center, Nuclear Science Research Institute,
Tandem Accelerator Section
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195, Japan

Abstract

JAEA and KEK have started acceleration of Radioactive Nuclear Beam (RNB) and Stable Nuclear Beam (SNB) from TRIAC¹ (Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex) in FY2004. RNB and SNB are accelerated by SCRFQ and IH linac up to the energy of 1.1MeV/u. We were planning to re-accelerate the beams in the future by superconducting booster up to energy of 5-8MeV/u. In order to inject the beams into superconducting booster, we need a pre-booster which is capable of acceleration from 1.1MeV/u to 2.0MeV/u. We have started development of low beta superconducting twin quarter wave resonator (Twin-QWR), and have fabricated a prototype Twin-QWR in FY2005. We have carried out performance test of prototype Twin-QWR in FY2006.

Low β 超伝導加速空洞の性能試験

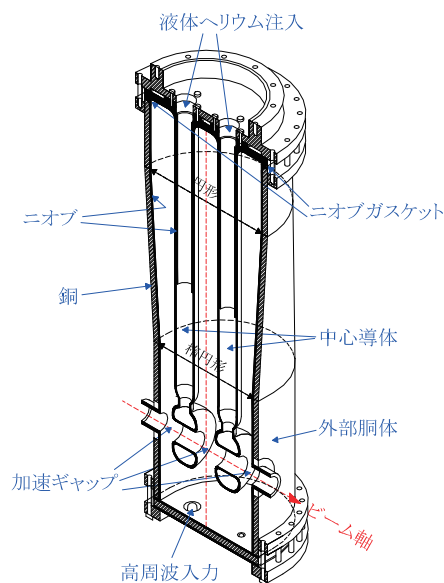
1. はじめに

原子力機構 東海タンデム加速器では安定核・短寿命核ビームを発生するJAEA・KEK共同研究施設 TRIAC¹ (Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex) の建設を終了し、2004年度からウラン標的による短寿命核の加速を開始した。現在はイオンのエネルギー1.1MeV/uで実験を行っているが、将来的にはイオンを超伝導ブースターで再加速しクーロン障壁を越える約5~8MeV/uのビームを得る計画を進めている。イオンを超伝導ブースターで効率よく加速するためには1.1MeV/uのビームを2.0MeV/uまで加速する前段加速器が必要であり、その候補としてLow β 超伝導加速空洞(Twin-QWR)の開発を進めている。2005年度にプロトタイプ空洞を製作し、2006年度には空洞の性能試験を行ったのでその結果を報告する。

2. 超伝導ブースターと開発中の空洞

20MVタンデム型静電加速器の後段には超伝導ブースターが設置されており、質量数70を超えるようなイオンで核反応を起こすためのエネルギーが不足するときを使用している。超伝導ブースターは40個の加速空洞で構成されるリニアックで、合計の加速電圧は30MVとなっている。空洞は2ギャップの同軸1/4波長型共振器(Quarter Wave Resonator)で、共振周波数は129.8MHz、最適ビーム速度 β_{opt} は光速の10%に設計されている。液体ヘリウム温度4.2Kにおける加速電界 E_{acc} は平均的な空洞で4~5MV/m(RF入力4W時)となっている。この超伝導ブースターの前段から4~8個の空洞を開発中のLow β 超伝導加速空洞に置き換える計画を立案している。

図1に開発中のLow β 超伝導加速空洞を示す。空洞は3ギャップの2芯1/4波長型空洞共振器(Twin Quarter Wave Resonator)で、共振周波数は現在の超伝導ブースター(QWR)と同じ129.8MHzである。中心導体は超伝導体のニオブでできており、4.2Kの液体ヘリウムにより直接冷却される。外部胴体はニオブと銅を爆発圧着して製作したクラッド板でできており、銅の高い熱伝導率を利用して間接的に液体ヘリウム温度まで冷却される。また中心導体と外部胴体はニオブ製のガスケットで接続される構造になっている。



(外形寸法 : 0.67m × 0.24m × 0.26m)

図1 Low β 超伝導加速空洞の断面図(Twin-QWR)

¹ URL <http://triac.kek.jp/>

表1 空洞のパラメータ

| 形式 | | Twin-QWR | QWR |
|---|-----------------|------------------|---------|
| 最適ビーム速度 | β_{opt} | 0.06×光速 | 0.10×光速 |
| 共振周波数 [MHz] | f_0 | 129.8 | 129.8 |
| 高周波蓄積エネルギー [Joule/(MV/m) ²] | U_0/E_{acc}^2 | 0.039 | 0.046 |
| 最大表面電界 [MV/m/(MV/m)] | E_p/E_{acc} | 4.2 | 4.6 |
| 最大表面磁界 [mT/(MV/m)] | H_p/E_{acc} | 12.3 | 7.5 |
| 加速ギャップ [mm] | L_g | 17.5, 35.0, 17.5 | 40, 40 |
| 加速長 [mm] | L | 150 | 150 |
| 加速電界(RF入力4W時) [MV/m] | E_{acc} | 5.8 | 4~5 |

3. 空洞の開発

3.1 電磁界分布の測定・解析

空洞の形状を検討するためにアルミニウムで1/1スケールのモデル空洞を製作し、ビーズプル法を用いて電磁界分布を測定した。また、電磁界解析ソフトMAFIAを用いて電磁界分布を計算し、モデル空洞の測定値と比較して空洞のパラメータを決定した。MAFIAで計算により求められた共振周波数は測定値よりも0.8%ほど低い値となったが、電磁界分布は良く一致していた。表1にTwin-QWRとQWRの主要なパラメータを示す。

図2は入射イオンの速度に対する空洞の加速効率を示す通過時間因子(Transit Time Factor)である。Twin-QWRは入射イオンの速度が光速の3.3% (0.5MeV/u)以上であれば加速が可能で、最適ビーム速度 β_{opt} は光速の6% (1.7MeV/u)となっている。TRIAICからのビーム $\beta=4.8\%$ (1.1MeV/u)に対してはTwin-QWRのTransit Time Factorは0.7となっており、QWRの0.1と比べて効率よく加速することができる。

3.2 プロトタイプ空洞の製作

電磁界解析で得られたパラメータに基づいてプロトタイプのTwin-QWRを製作した。Twin-QWRは主に中心導体、外部胴体、ニオブガasketの部品で構成され、それぞれ機械加工をした後に表面処理として電解研磨を行った。中心導体と外部胴体は80~100 μ m、ニオブガasketは40~60 μ mの電界研磨を施した。

電界研磨によってニオブが水素吸蔵を起こすため、真空熱処理で水素ガスを追い出す必要がある。中心導体とニオブガasketについては600 $^{\circ}$ C、1時間半の真空熱処理を行った。外部胴体についてはニオブ・銅のクラッド板できているため、加工後に600 $^{\circ}$ Cの真空熱処理を行うことはできない。

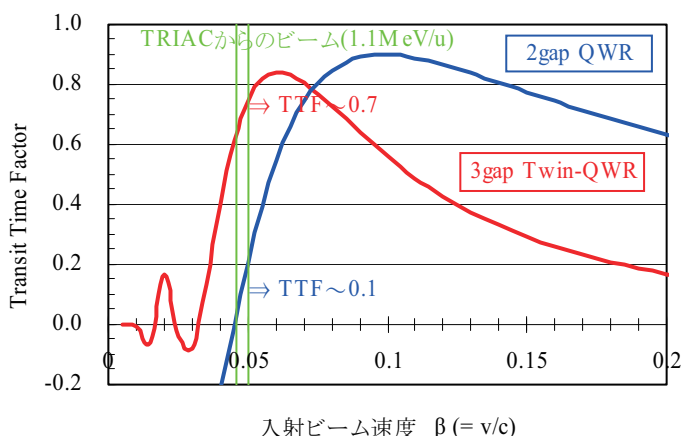


図2 トランジットタイムファクター

3.3 高圧純水洗浄とベーキング

超伝導空洞ではニオブ表面の清浄度が非常に重要であり、ゴミなどが混入すると電子の電界放出(フィールドエミッション)によって加速電界が制限される。そこで比抵抗18M Ω ・cmの超純水を6~8MPaまで加圧してニオブ表面に吹き付ける高圧純水洗浄を行い、その後に120 $^{\circ}$ C、2日間程度のベーキングを施すのが一般的になっている。

ニオブのサンプル片を用いて洗浄試験を行ったところニオブが茶色~青色に酸化する現象がみられた。これは絶縁性の高い超純水を高圧で吹き付けるために静電気が発生してニオブが陽極酸化を起こすためである。この酸化は水に炭酸ガスを溶解させて比抵抗を0.04M Ω ・cmまで下げることで抑えられることが分かった。高圧純水洗浄によるニオブ酸化が空洞の性能に影響するのか調べるために予備のQWRを用いて試験を行った。①炭酸水洗浄 → ②超純水洗浄 → ③ベーキングの順に試験を行ったところ、炭酸水洗浄では Q_0 値が 8×10^8 であったが、超純水洗浄によって Q_0 値が 6×10^8 まで低下し、ベーキングを施すことによって Q_0 値の回復がみられた(図3)。Twin-QWRに対しては最終的な組み立てを行った後に高圧炭酸水洗浄と120 $^{\circ}$ C、2日間のベーキングを行った。

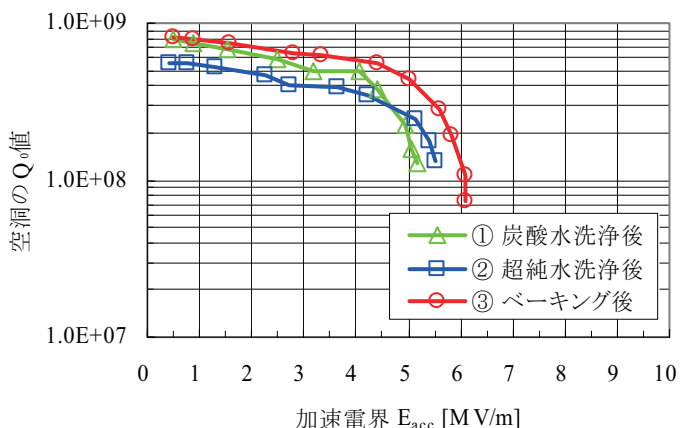


図3 高圧純水洗浄とベーキングの影響(QWR)

4. オフライン性能試験

液体ヘリウム温度4.2KにおいてTwin-QWRのオフライン性能試験を行った。試験結果を図4に示す。最初の試験では Q_0 値 $=2 \times 10^8$ 、加速電界 $E_{acc}=2.8$ MV/m (RF入力4W時)であった。ニオブガasketの周辺で温度上昇が観測され、低い加速電界から Q_0 値の低下がみられた。中心導体と外部胴体の接触が不十分であることが考えられたため、空洞を分解するとニオブガasketが0.4mmずれていたことが分かった。ニオブガasketを交換した後に性能試験を行ったところ、 Q_0 値 $=9 \times 10^8$ 、加速電界 $E_{acc}=5.8$ MV/m (RF入力4W時)まで性能が改善され、目標の5.0 MV/mを超える性能に到達した。

試験において6.0 MV/m付近からX線の発生なしで Q_0 値の急激な低下がみられ、到達できた最大の加速電界は6.5 MV/mであった。Twin-QWRの最大表面磁界は12.3 mT/(MV/m)とQWRの7.5 mT/(MV/m)よりもかなり高くなっている。また、機械的強度を確保するために中心導体の付け根付近が肉厚となっており熱伝導の面で不利なことから、高周波臨界磁場により Q_0 値低下が起こった可能性が考えられる。

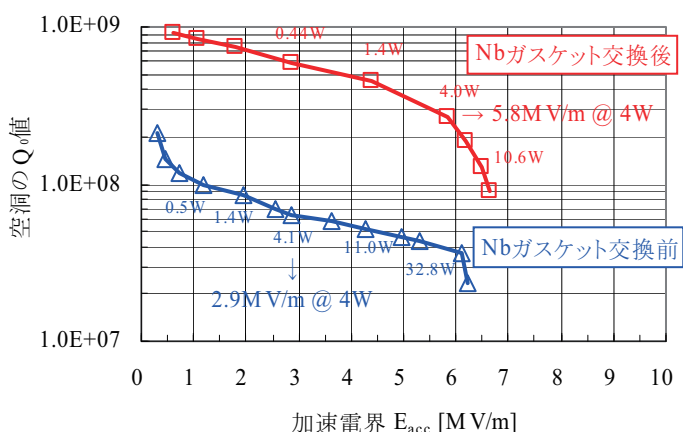


図4 Twin-QWRのオフライン性能試験結果

5. 周波数安定性の試験

Twin-QWRは細い中心導体が2本入る構造となっているため、超伝導ブースターのQWRよりも機械的強度が低く、周波数安定性が悪いと考えられる。この周波数変動は主に液体ヘリウム導入部(ヘリウムデューワー)で圧力変動が起こり、中心導体天板が変形することで引き起こされる。Twin-QWRは機械的強度を確保するために中心導体の付け根付近を肉厚とし、天板を押しネジと引きネジで固定して変形を防止する構造となっている。

図5はヘリウム圧力に対する共振周波数の変化である。Twin-QWRの周波数変動は 0.71 kHz/(kgf/cm²)であった。これはQWRの 0.27 kHz/(kgf/cm²)と比べて約2.6倍大きい値であった。QWRをオンラインで使用する際はRFカップラーの結合度を強め、バンド幅

を広げることで安定な運転が可能となっているが、Twin-QWRでも同様のことができるかどうか検討する必要がある。

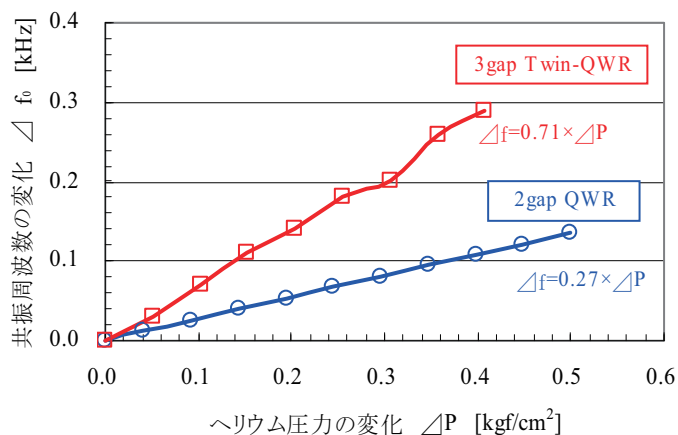


図5 ヘリウム圧力に対する共振周波数変化

6. まとめ

Twin-QWRのプロトタイプを製作し、オフライン性能試験において Q_0 値 $=9 \times 10^8$ 、加速電界 $E_{acc}=5.8$ MV/m (RF入力4W時)の性能を達成した。同時に周波数安定性の試験を行った。測定で得られたTwin-QWRのヘリウム圧力に対する共振周波数変化は 0.71 kHz/(kgf/cm²)であり、QWRと比べて約2.6倍大きい値であった。

また、高压純水洗浄とベーキングの試験を行った。超純水洗浄によってニオブの酸化が起こり、空洞の Q_0 値が若干低下した。その後120°Cのベーキングを施すことによって Q_0 値の回復がみられた。

参考文献

- [1] 株本裕史 他, “低速度重イオン加速用 超伝導2芯1/4波長型空洞共振器の開発”, 第3回日本加速器学会年会・第31回リニアック技術研究会 PROCEEDINGS, 819-821 FP26, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and The 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai Japan, Aug. 2-4, 2006, 819-821 FP26
- [2] 松田誠 他, “原子力機構-東海タンデム加速器施設の現状”, 第3回日本加速器学会年会・第31回リニアック技術研究会 PROCEEDINGS, 275-277 WP03, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and The 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai Japan, Aug. 2-4, 2006, 275-277 WP03
- [3] H. Miyatake, et al., “The KEK-JAERI joint RNB project”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 204 (2003) 746-751
- [4] S. Takeuchi, et al., “Acceleration of heavy ions by the JAERI tandem superconducting booster”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 382 (1996) 153-160