

## Development of Superconducting Twin Quarter Wave Resonator for Acceleration of Low Velocity Heavy Ions

Hiroshi Kabumoto<sup>1</sup>, Suehiro Takeuchi<sup>1</sup>, Makoto Matsuda<sup>1</sup>, Akihiko Iijima<sup>2</sup>, Takahiro Yoshida<sup>2</sup>,  
Takahiro Usami<sup>2</sup>, Tetsushi Hida<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency, Tokai Research and Development Center, Nuclear Science Research Institute,  
Tandem Accelerator Section  
<sup>2</sup>Atox Co.

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195, Japan

### Abstract

JAEA and KEK have started acceleration of radioactive nuclear beam (RNB) and stable ion beam (SNB) from Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex<sup>3</sup> (TRIAC) in 2005. 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 an 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 superconducting twin quarter wave resonator (Twin-QWR), and have fabricated a prototype Twin-QWR in FY2005.

## 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

### 1. はじめに

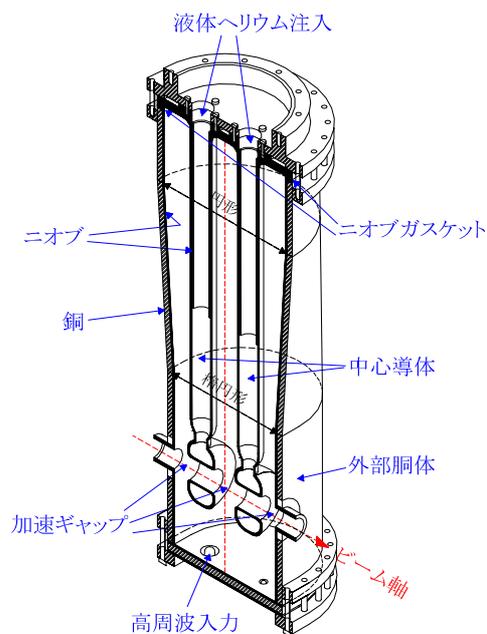
原子力機構 東海タンデム加速器では安定核・短寿命核ビームを発生するJAEA・KEK共同研究施設 (TRIAC) の建設を終了し、昨年度からウラン標的による短寿命核の加速を開始した。当初はイオンのエネルギー1.1MeV/uで運転を行うが、将来的にはイオンを超伝導ブースターで再加速しクーロン障壁を越える約5~8MeV/uのビームを得る計画を進めている。イオンを超伝導ブースターで効率よく加速するためには1.1MeV/uのビームを2.0MeV/uまで加速する前段加速器が必要である。その候補として低速度重イオン加速用超伝導空洞共振器(Twin-QWR)の開発を進めており、2005年度に空洞の試作を行った。

### 2. 超伝導ブースターと開発中の空洞

現在の超伝導ブースターは共振周波数129.8MHzの超伝導リニアックで、40個の加速空洞から構成されている。空洞は2ギャップの同軸1/4波長型共振器 (QWR: Quarter Wave Resonator) で、最適ビーム速度 $\beta_{opt}$ は光速の10%に設計されている。空洞の加速電界を5MV/mとしたときの加速電圧は合計で30MV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QWRを開発中の低速度重イオン加速用超伝導空洞共振器に置き換える計画を立案している。

図1に開発を進めている空洞の概観図を示す。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 Twin-QWRの概観図

<sup>3</sup> URL <http://triac.kek.jp/>

### 3. 空洞の電磁界分布

設計の検討を行う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を用いて空洞の電磁界分布を計算し、モデル空洞の測定値と比較した。図2にビーム軸上の電界分布を示す。Twin-QWRは中心導体が2本あるため、中央に高い電界を発生する逆位相モードと中央の電界が打ち消しあう同位相モードが存在する。加速に使用する逆位相モードの共振周波数は測定値、計算値とも同位相モードよりも約1MHz高かった。また、MAFIAで計算した共振周波数は測定値よりも0.5~0.8%ほど低い値となった。表1にTwin-QWRとQWRの主要なパラメータを示す。

図3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 $\beta_{opt}$ は光速の6%(=1.7MeV/u)となっていることが分かる。TRIAcからのビーム(~1.1MeV/u)に対してはTTF=約0.7となっており、QWRのTTF=約0.1と比べて効率よく加速することができる。

### 4. 空洞の試作と表面処理

2005年度にニオブでTwin-QWRの試作を行った。機械加工の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 $\mu\text{m}$ 、ニオブガスカートは40~60 $\mu\text{m}$ 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スカートについては600、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・銅のクラッド板でできているので加工後の熱処理を行うことはできない。

超伝導空洞の性能は表面の清浄度に大きく左右されるため、最終的な組み上げの後に表面洗浄を行う必要がある。ニオブ表面に付着している金属性のゴミや化学物質を除去するために高圧純水洗浄装置を製作した(図4)。これはイオン交換樹脂を通した超純水(比抵抗18M $\Omega \cdot \text{cm}$ 、流量6l/min)をコンプレッサーで6~8MPaまで加圧してニオブ表面に吹きつけ、ジェット洗浄するものである。ニオブサンプルの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。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したと考えられる。この現象は水に炭酸ガスを溶解させて比抵抗を0.04M $\Omega \cdot \text{cm}$ まで下げることにより抑えることができる。高圧超純水洗浄によるニオブ酸化が空洞の性能に対して影響するのかどうか調べるために予備のQWRを用いて 低い圧力での超純水洗浄 高圧炭酸水洗浄 高圧超純水

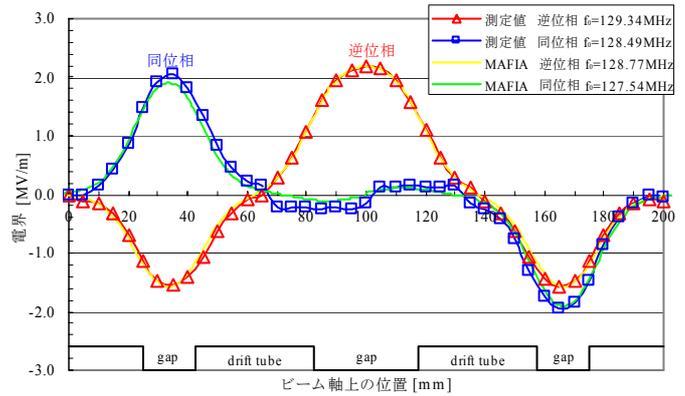


図2 ビーム軸上の電界分布

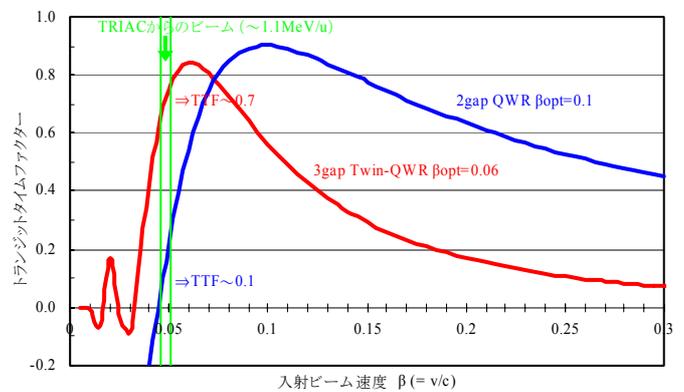


図3 トランジットタイムファクター

表1 空洞の主要なパラメータ

形式		Twin-QWR	QWR
最適ビーム速度	$\beta_{opt}$	0.06×光速	0.10×光速
共振周波数 [ MHz ]	$f_0$	129.80	129.80
高周波蓄積エネルギー [ Joule/(MV/m) <sup>2</sup> ]	$U_0/E_{acc}^2$	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 (4W消費時) [MV/m]	$E_{acc}$	5.0(目標)	4.5(平均)

洗浄の順に洗浄と性能試験を行った。試験結果を図5に示す。高圧炭酸水洗浄と比べて高圧超純水洗浄の時の $Q_0$ 値がわずかながら低下した。これが酸化による影響であるのか性能試験の誤差によるものかは今後、検討する必要がある。

### 5. オフライン性能試験

液体ヘリウム温度( $\sim 4.2K$ )でTwin-QWRのオフライン性能試験を行った。試験結果を図6に示す。 $Q_0$ 値は $2 \times 10^7 \sim 8 \times 10^7$ でオンラインのQWRと比べて一桁近く低い値となった。また、オンラインのQWRは冷凍機的能力から空洞1台あたりの消費電力を4Wとしており、その時の加速電界は平均的なもので4.0 $\sim$ 5.0MV/m(4W消費時)である。今回の試験ではTwin-QWRの加速電界は2.0MV/m(4W消費時)にとどまり、目標の5.0MV/mには届かなかった。ニオブガスキットの片側で局所的な温度上昇が観測されたことからニオブガスキットの接続が充分でなかった、またはニオブ表面の清浄度が充分でなかった可能性が考えられる。

### 6. まとめ

モデル空洞による測定とMAFIAによる計算でTwin-QWRの設計を検討し、空洞の各種パラメータを決定した。試作した空洞の性能試験を行ったところ4W消費時の加速電界は2.0MV/m(@4.2K)にとどまった。今後はニオブガスキットの接続やニオブ表面の清浄度が充分であることを検討し、再試験を行う予定である。また、外部からの振動やヘリウム圧力変動に対する周波数安定性も合わせて検討していく。

### 参考文献

[1] H. Miyatake, et al., "The KEK-JAERI joint RNB project", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 204 (2003) 746-751  
 [2] 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  
 [3] 仲野谷孝充 他, "TRIAEにおけるECRイオン源の現状", 第2回日本加速器学会年会 第30回リニアック技術研究会 報告集, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and The 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu Japan, July 20-22, 2005, pp729-730

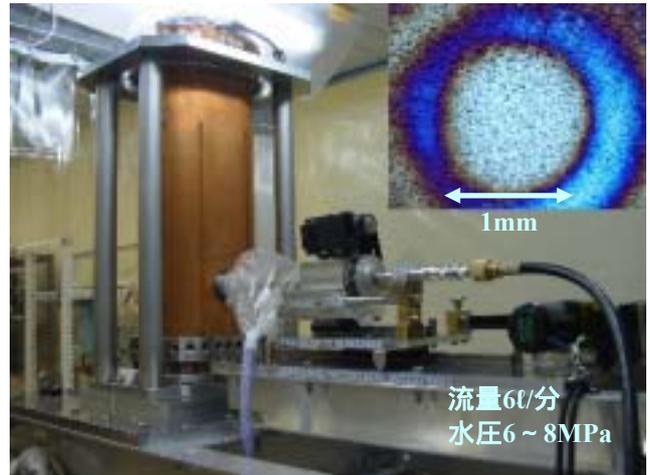


図4 高圧純水洗浄装置と酸化したニオブ

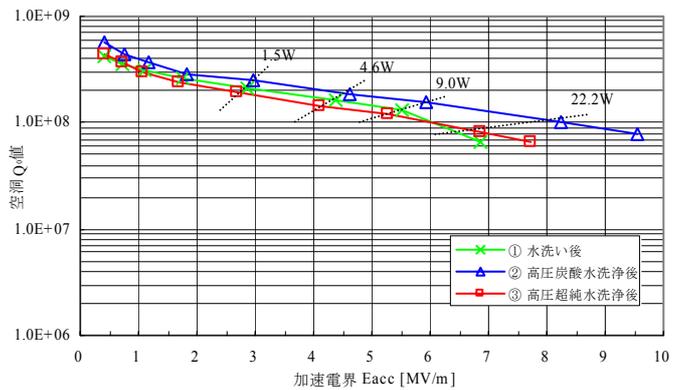


図5 高圧超純水洗浄による $Q_0$ 値への影響(QWR)

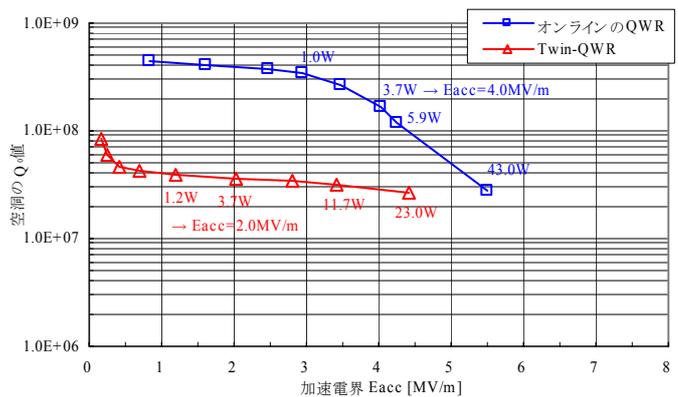


図6 Twin-QWRのオフライン性能試験結果