

[P7-31]

PRESENT STATUS OF SUPERCONDUCTING CAVITY DEVELOPMENT FOR HIGH INTENSITY PROTON LINAC AT JAERI

J. Kusano, N. Ouchi, N. Akaoka, E. Chishiro, K. Hasegawa, M. Mizumoto, S. Noguchi*, K. Saito*, H. Inoue*, M. Ono*, E. Kako*, T. Shishido*, Y. Yamazaki*, K. Mukugi**, O. Takeda***

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan

Abstract

A development of 600MHz superconducting(SC) linac has been continued for the high intensity proton accelerator aiming to Neutron Science Project at JAERI. The development is in progress with fabrication of multi cell cavities and measurements of RF characteristics for the cavities. This paper describes the fabrication and the measurements of the cavities, an improvement of the high pressure rinsing system for 5-cell cavity and the preparation of multi cell cavity experiment.

原研・大強度陽子加速器用超伝導加速空洞開発の現状

1. はじめに

原研の中性子科学研究計画(NSP)^[1]に用いるビーム出力 8MW の大強度陽子加速器ではリニアック高エネルギー加速部 (0.1 ~ 1.5GeV) に 600MHz の超伝導加速空洞の使用を予定し、そのための開発を 4 年前から KEK と共同で進めてきた。昨年半ばからの KEK の JHF 計画との施設統合計画により加速器全体の構成は変更となるが、NSP の消滅処理技術開発研究用のビームラインは統合計画の第 1 期から採用される予定である。また、将来の加速器駆動型消滅処理システムに必要とされる超伝導加速器を目指した開発は継続することから、加速共振周波数、陽子エネルギー領域は変更されるが、開発のペースは従前の予定よりも早まる見通しとなった。開発の目標としてこれまでは、(1)安定加速電界性能の確保、(2)機械的荷重に耐える構造、(3)製作手法の確立を掲げ、(4)2K 液体ヘリウム取扱いに関連する周辺技術の確立も重要な項目であった。更に、統合計画の加速器システム^[2]では初期の Duty 数 % から第 2 期での最大 Duty ~ 20% までのパルス運転とする予定であり、特に 3GeV、25Hz のシンクロトロンへのビーム入射を想定した超伝導加速空洞のパルス運転特性の見通しを得ることが重要な課題として挙げられており、これまでの超伝導空洞開発目標に加えてパルス運転特性評価について精力的な検討を進めている。

空洞の開発は KEK トリスタンの超伝導空洞開発の経験を基に空洞形状の検討、空洞構造強度の検討、ビームダイナミクスの検討等を行うと共に $\beta=0.5$ 、 $\beta=0.805$ 、 $\beta=0.89$ の単セル空洞の製作と性能評価試験を行い、そのプロセスの妥当性確認を図ってきた。本報告はこれらの現状報告として空洞試験で得られた性能と 5 連セル空洞試験の準備状況について、および、超伝導空洞特有のパルス運転特性について検討の概要および現状を述べる。

* KEK:High Energy Accelerator Research Organization
** Mitsubishi Electric Corporation
*** Toshiba Corporation

2. 単セル空洞の製作と試験

空洞開発の第 1 ステップとして単セル空洞の試作と性能評価試験を行ってきた。低 β 側の単セル空洞 ($\beta=0.5$) は、その扁平な形状による電界制限が懸念されたが、既に報告したように設計目標の 16MV/m を上回る 44MV/m の最大表面電界強度を達成した^[3]。今回新たに製作した高 β 側の空洞 ($\beta=0.886$) では加速空洞性能と製作工程の確認を主目的として空洞試験を実施した。一方、 $\beta=0.805$ の空洞は主にヨーロッパで実用化された「無酸素銅空洞内面へのスパッタによるニオブ層成膜」技術を用いた空洞で、陽子加速器への適用性についての知見を得る目的で三菱電機(株)との共同研究として製作・試験を行った。この銅-ニオブ空洞の諸特性については本研究会に別報告がある^{[4],[5]}。

2-1. $\beta=0.886$ の単セル空洞の製作と試験

空洞は高純度ニオブ板の成形加工により製作し、製作工程の大部分は KEK の工作センターで実施した。図 1 に $\beta=0.886$ 単セル空洞の設計形状を示す。3mm 厚のニオブ板を 500 ton プレス機の深絞り加工でハーフセルに成形し、電子ビーム溶接でセル赤道部、ビームパイプ、フランジを溶接して、所定の形状に仕上げた。空洞材料は東京電解製の RRR200 以上 (ロール後に 750°C アニール処理) の板材を用いた。

その後の空洞表面処理は粗研磨、電解研磨を野村鍍金(株)で行った。研磨量は粗研磨 (バレル研磨) で空洞赤道部平均 70 μ m、アイリス部平均 30 μ m、電

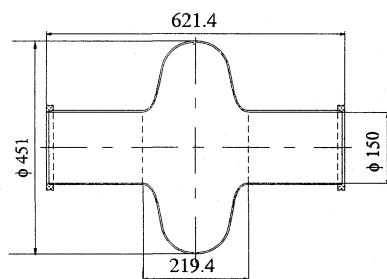


図 1 600MHz, $\beta=0.886$ 単セル空洞の断面形状

解研磨で平均 $35\mu\text{m}$ である。電解研磨の際に空洞ニオブ材へ吸蔵される水素を原研に設置した大型真空炉で $750^\circ\text{C}\cdot 3$ 時間の熱処理・脱ガスをした後、 $18\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ の超純水約1トンを用いた 8MPa の高圧水洗浄を施した。その後、直ちにクリーンルーム内で真空・RF系を組立て、真空引きの後、縦測定クライオスタットにてRF特性測定を行った。得られた最大表面電界強度はヘリウム温度 4.2K で $36\text{MV}/\text{m}$ 、 2K で $47.4\text{MV}/\text{m}$ と設計目標値の約3倍という良好な値であり、 $40\text{MV}/\text{m}$ を超える領域までX線の発生は見られず、この実験の時に得られた空洞表面残留抵抗は $9.1\text{n}\Omega$ であった。これらのことから、製作工程、表面処理および組立工程に至る一連のプロセスは適切であったと判断している。

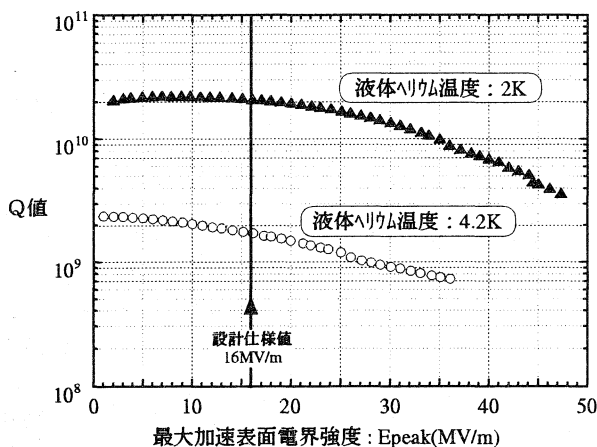


図2 600MHz, $\beta=0.886$ 単セル空洞のRF特性測定結果

2-2. ローレンツ変調

この空洞を用い空洞内部に発生する高電界による空洞の電磁力変形（ローレンツ変形）が与える共振周波数の変化を測定した。設計仕様の $16\text{MV}/\text{m}$ までの変化率は、加速電場の2乗に比例するが、変化量そのものはシミュレーションコードSUPERFISHおよびABAQUSを用いた予備解析結果との比較では測定結果の方が約30%ほど変化量が大い値となった。この原因について空洞形状精度の影響およびニオブ材空洞剛性を含め、検討を進めている。

3. 5連セル空洞試験の準備

開発の第2ステップとして5連セル空洞を試作し、単セル空洞試験で得られた性能との比較および多連セル空洞取扱の問題点の摘出を図る目的で5連セル空洞の設計検討・製作と試験用設備の対応について整備を進めている。準備作業の内容は(1). 多連セル空洞の製作、(2). プリチューニング装置の整備、(3). 空洞表面研磨処理用治具の整備、(4). 超純水高圧洗浄装置の改造、(5). 縦測定用空洞治具の整備および(6). クリーンルームの一部改造等である。製作を進

めた5連セル空洞の種類は $\beta=0.5$ および $\beta=0.886$ の2形状である。

3-1. $\beta=0.5$ 5連セル空洞のプリチューニング

扁平形状で構造的に弱い低 β 側空洞の試験のために $\beta=0.5$ の5連セル空洞の試作を行った後、表面処理に先立つプリチューニングを行った。図3に $\beta=0.5$ 、5連セル空洞の設計形状を示す。

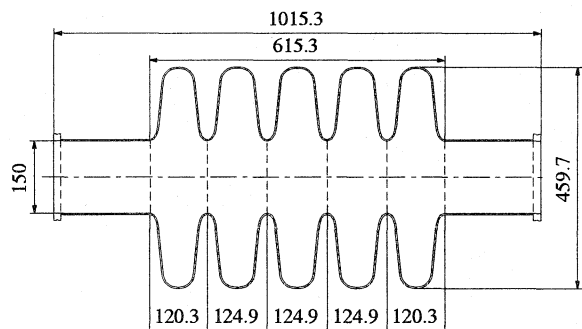


図3 600MHz, $\beta=0.5$ 、5連セル空洞の設計断面形状

銅のモデル5連セル空洞のプリチューニングでは製作時の形状精度が良かったため、プリチューニング後の電界強度の各セル間のズレ幅は0.7%以内と良好な結果を得た。ニオブの $\beta=0.5$ 、5連セル試作空洞は電子ビーム溶接工程における装置の不調により1セル分のアイリス部のセル間隔が狭い形状となって仕上がったため、この部分の修正を含めプリチューニングを試みた。間隔の狭いセル間に可動アームを押し込み修正を図ったが、結果として、初期の段階では空洞壁傾斜部の一部が座屈した。この異常変形を修正するために空洞全長を伸ばす方向で調整を試み、その後、真空収縮力を利用して全長短縮を図ったが、むしろ変形度合いが大きくなってしまった。この対策としてニオブ空洞を真空加熱炉で $730^\circ\text{C}\cdot 3$ 時間のアニールを施し、再度プリチューニングを行った結果、平均共振周波数 616MHz 、各セル間の一致度は2%以内となった。また、空洞表面

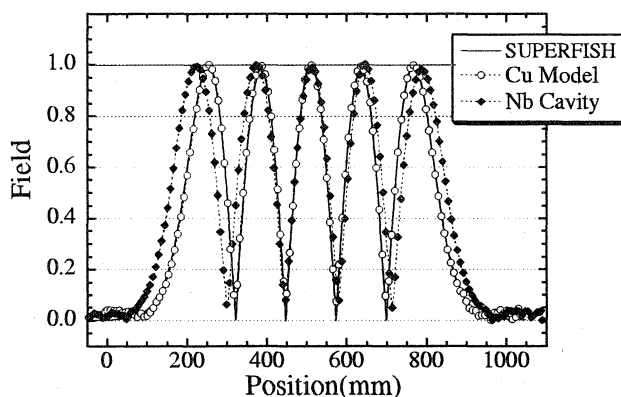


図4 600MHz, $\beta=0.5$ 、5連セル空洞(Cu, Nb)のプリチューニング後の中心軸上の加速電界分布(最大値を1に規格化している)

研磨処理用の治具との寸法取合が調整範囲に入る見通しとなったため、共振周波数を600MHzに近づける形状修正は打切り、プリチューニング以降の一連の表面処理と縦測定の準備に入っている。図4にプリチューニングの結果得られた $\beta=0.5$ 、5連セルの銅モデル空洞とニオブ試作空洞の加速軸上の電界強度分布をSUPERFISHの予備解析値と比較して示す。ニオブ製 $\beta=0.5$ 、5連セル試作空洞の縦測定は1999年夏に実施する予定である。 $\beta=0.886$ の5連セル空洞の製作等については本研究会に別報告^[6]がある。

3-2. 超純水高圧水洗浄装置の整備

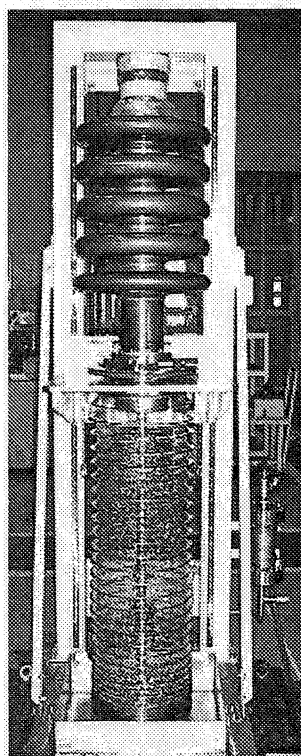


図5 5連セル空洞用超純水高圧洗浄装置

過去3年間使用してきた超純水高圧水洗浄装置は洗浄可能なストロークが約600mmで $\beta=0.886$ の単セル空洞までが使用限界であった。5連セル空洞実験のために長ストロークの洗浄装置を新たに製作した。完成した新洗浄装置の全景を図5に示す。主な仕様は最大ストローク1900mm、超純水最大圧力10MPa、最少回転数2rpm、搭載荷重最大80kgf、昇降速度0.2~0.5往復/分である。新装置の特徴として、回転台の昇降制御にステッピングモータを用い、任意の位置で洗浄範囲の選択と昇降速度を変えることが可能であり、多様な空洞形状の超純水高圧水洗浄に対応できる。また、この洗浄装置の整備に伴い、

作業エリアのクリーンルーム一部の改造と、超純水供給能力の増強を行った。これらの整備により $\beta=0.886$ の5連セル空洞までの高圧超純水洗浄処理が可能となった。

3-3. 高周波源の整備

今後の多連セル空洞・クライオモジュールのRF特性試験(横測定)を遂行するためには高出力の高周波源が必要となるが、1998年末にCW-35kW出力の600MHz高周波源(IOT出力管使用)を製作した。このIOT高周波源の諸特性については本研究会に別報告^[7]がある。この高周波源にはRF出力制御の精度を上げるためのFeedback-Feedforward機能を持たせたローレベル制御装置を附加する予定で現在、製作を進めている。

4. パルス運転特性の検討

現在開発中の超伝導加速空洞は統合計画の加速器では π モードのパルス運転を想定しているが、その実用運転に至るまでに克服しなければならない問題点が予測される。それらの主なものとしては(1)パルスビーム加速に対応するためのRF電場の立上げ・制御手法、(2)ローレンツ力による空洞変形の影響、(3)マイクロフォニック振動の影響、(4)ビームローディングに基づく電場の乱れ、(5)多連セル空洞内の高調波パワーの影響、および(6)空洞の高いQ値による狭いバンド幅等である。3GeV、25Hzのシンクロトロンへのビーム入射を想定すると空洞内RF電場制御の精度は1%、1%以内が要求されており、これらについての検討を数値解析、P-SPICEコードを用いたシミュレーション等による現象の解明と、空洞の機械強度の面からの振動応答検討、および、RF源制御側の立場からはFeedback-Feedforwardによる応答性の検討を進めている。

5. まとめ

陽子加速器用超伝導加速器開発の第1ステップの単セル空洞の試験では設計仕様を十分上回る最大表面電界が得られ、製作と表面処理のプロセスの妥当性が確認できた。第2ステップとして5連セル空洞の試作と関連機器整備を進めており、5連セル空洞実験への準備が進捗している。今後約1年の5連セル空洞実験の遂行と並行してプロトタイプのクライオモジュールの製作を予定しており、その設計検討を進めている。また、中性子科学研究計画・統合計画用の加速器における超伝導加速空洞のパルス運転を行うための検討を併せて進めている。

参考文献

- [1] M. Mizumoto et al., "A High Intensity Proton Linac Development for Nuetron Science Research Program "Proc. of the LINAC96, Geneva, pp662-664(1996).
- [2] M. Mizumoto and Y. Yamazaki, "Accelerator Complex for the Joint Project of KEK/JHF and NSP/JAERI", these proceedings.
- [3] N. Ouchi et al., "Development of Superconducting Cavities for High Intensity Proton Accelerator at JAERI", Proc. of 1998 Applied Superconducting Conf., PalmDesart, U.S.A., to be published.
- [4] Y. Kijima et al., "RF Performance of Nb Coated Copper Trial Superconducting Cavity for the High Intensity Proton Linac", these proceedings.
- [5] K. Mukugi et al., "Mechanical Characteristics of Nb Coated Copper Trial Superconducting Cavity for the High Intensity Proton Linac", these proceedings.
- [6] O. Takeda et al., "Fabrication of 600 MHz 5-Cell Superconducting Cavity at JAERI", these proceedings.
- [7] E. Chishiro et al., "Evaluation of Operating Characteristics of IOT RF Source", these proceedings.