

[13P-13]

DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING CAVITY FOR HIGH POWER PROTON ACCELERATOR ; CHARACTERISTICS OF MULTI-CELL CAVITIES

J. Kusano, N. Ouchi, N. Akaoka, O. Takeda*, M. Matsuoka**,
K. Saito***, S. Noguchi***, H. Inoue***, K. Mukugi****, M. Mizumoto,

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 cavity has been continued for the high intensity proton accelerator at JAERI. The development is in progress with fabrication of multi-cell cavities and measurements of RF characteristics. This paper describes the design, the fabrication and the measurements for two kind of 5-cell cavities with $\beta=0.5$ and $\beta=0.89$.

大強度陽子加速器用超伝導空洞の開発 ; 多連セル空洞特性

1. はじめに

大強度陽子加速器計画^[1]用の超伝導加速空洞開発を原研ではKEKと共同研究として開始し、4年を経過した。これまでに陽子エネルギー領域として150MeV 近辺： $\beta=0.5$ および1GeV 近辺： $\beta=0.89$ の2種類の単セル空洞各2個ずつ計4個の試作・試験を行い、所期の最大表面電界強度 ($E_{sp} \Rightarrow 16\text{MV/m}$) の2倍以上の E_{sp} を観測し、再現性の良い製作プロセスの見通しを得た。その後、より実機に近い多連セル空洞の試作開発を開始し、1999年から2000年前半にかけて $\beta=0.5$ および $\beta=0.89$ の5連セル空洞についての性能試験を行ったので報告する。

2. 5連セル空洞の設計と製作

5連セル空洞の製作に当たり、各セル形状は基本的には単セル空洞の設計製作指針^[2]を踏襲している。 $\beta=0.5$ および $\beta=0.89$ の5連セル空洞断面形状を図-1、図-2に示す。セル形状は共振周波数600MHzで機械的強度を考慮したセル部傾斜角と、空洞内表面の電解研磨の作業性を考慮したビームパイプ径 $\phi 150$ とし、5連セルでの各セルに於ける電界分布を同じようにするために、端セル部での電界の低下を補償する目的で中央3セル部と端セルの形状を変えた。具体的には、セル赤道部直径、セル部傾斜角は共通にし、セル赤道部ビーム軸方向直線部分の長さを変え電界分布が平均化するようにした。尚、今回の2種類の5連セル空洞とも、高周波の導入はビームパイプフランジ部からの同軸アンテナ方式として

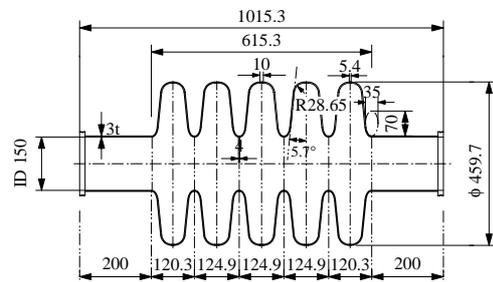


図-1 600MHz, $\beta=0.5$, 5連セル空洞の設計断面形状

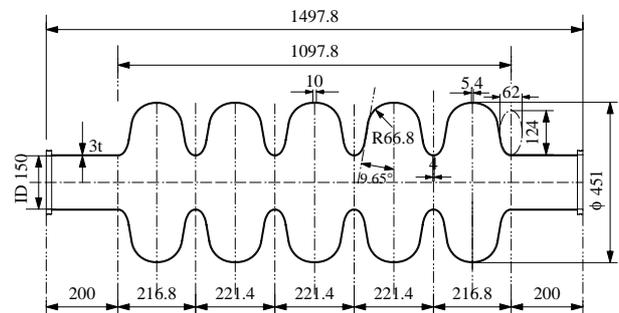


図-2 600MHz, $\beta=0.89$, 5連セル空洞の設計断面形状

あり、実機に設けるビームパイプ直角方向の専用RFカップポートおよびHOMカップポートは無いシンプルな形状の5連セル空洞である。

空洞材料には従来と同様にRRR200の高純度ニオブ3mm厚の板を採用し、空洞の製作は深絞りプレス成形によるハーフセル製作、電子ビーム溶接によるハーフセル、ビームパイプ接合で5連セル形状に成形した。その後、プリチューニング装置により、周波数調整および各セル間の電界分布の平均化を図った。 $\beta=0.5$ の空洞(識別名: J5003)は製作工程途中において一部のアイリス部直線長が短くなってし

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

まった。プリチューニング装置を用い各セル形状の修正・調整を繰り返した結果、電界分布の平均化は分布誤差2%以下となったが、空洞全長が約60mmほど長くなり、共振周波数は615.96MHzとなった。 $\beta=0.89$ の空洞(識別名: J8903)は設計形状に対し各部で最大寸法誤差が0.7mm以内と高精度に製作された。J8903のプリチューニングの結果は各セル間の電界分布誤差が2%以下、共振周波数は600.556MHzとなった。各空洞のプリチューニング前後の相対電界分布とSUPERFISHによる計算値のグラフを最大値を1に規格化して図-3、図-4に示す。

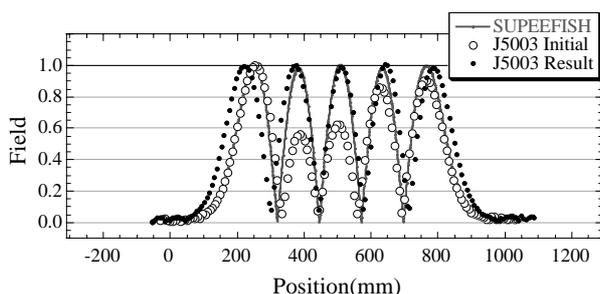


図-3 J5003 空洞プリチューニング前後の空洞中心軸上の加速電界分布(空洞全長が変化)

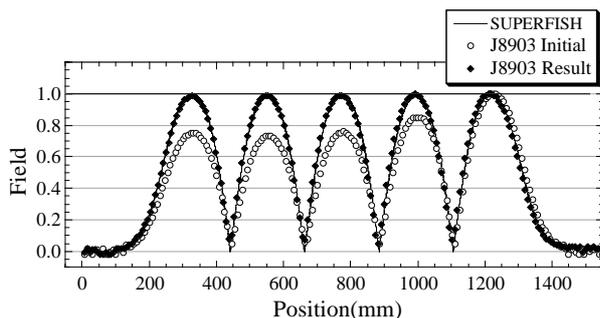


図4 J8903 空洞プリチューニング前後の空洞中心軸上の加速電界分布

3. 空洞の表面研磨と表面処理・実験系組立

プリチューニング後の両空洞とも表面研磨処理として粗研磨(パレル研磨[3])と電解研磨を行った。各研磨量はパレル研磨で空洞赤道部平均70 μm 、アイリス部平均30 μm 、電解研磨で平均35 μm である。この研磨方式では、パレル研磨は赤道部周辺が多く削られ、電解研磨はアイリス部およびビームパイプ部の研磨量がやや多くなる。研磨厚は研磨処理前後の超音波厚み計による空洞各部の肉厚測定値と電解研磨時の通電電流値から算出する研磨量の双方から得ている。J8903 空洞のパレル研磨、電解研磨での研磨量および全研磨量の分布を図-5に示す。各セル赤道部周辺の研磨量が多い状況が示されている。

電解研磨後の空洞は大型真空加熱炉で750 \cdot 3時間の加熱脱ガス処理を施している。500以上の

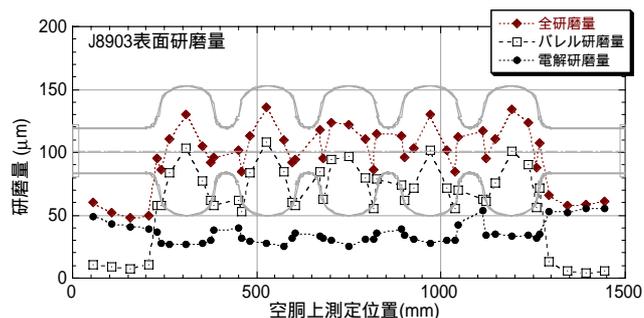


図-5 J8903 空洞表面研磨量の分布

温度から吸蔵水素の脱離が多く観測され、750 \cdot 3時間保持の後には、水素の分圧はほぼ一桁低下する。多連セル空洞はその体積が大きいため放出される水素ガスの量も多く、これまでの単セル空洞の加熱処理では頻度が少なかった昇温途中(500以上)の真空加熱炉内圧力上昇(設定値 6×10^{-2} Pa)によるヒーター断のインターロックがしばしば発生し、空洞温度昇降の多い熱処理となってしまった。熱処理の後、約1日を経て室温まで温度が下がった時の炉内真空圧力は 2×10^{-6} Pa程度である。

空洞の加熱処理の後、最終洗浄・清浄化処理として18M $\Omega \cdot \text{cm}$ の超純水約1.7トンを用い、8 MPaの高圧水噴射洗浄(HPR)を約2時間行った。クラス100のクリーンルーム内洗浄装置に空洞をセットし、噴射ノズルは固定で空洞を回転、昇降させ空洞内面全面を洗浄処理している。洗浄後の空洞は直ちにクリーンルーム内で真空・RF系を組立て、空洞のベーキングを行いながら真空引きを実施した。ベーキング条件は各セル赤道部を測温し、最高温で120程度の加熱を約30時間継続、その後、室温で排気を続け最終的に 10^{-8} Pa程度まで排気した。これら一連の前処理を終えた各空洞を縦測定クライオスタットに入れ性能試験を行っている。

4. 空洞性能試験

多連セル空洞の性能試験として、4.2Kと2.1Kの液体ヘリウム環境のそれぞれについて、(1)空洞Q値と表面電界強度(Esp)の関係(Q_0 -Esp特性)と、(2)4.2Kから2.1Kへの減圧降温プロセス中のQ値の変化から求める残留表面抵抗値(R_s)の測定(R_s 1/T特性)をそれぞれ測定した。図-6にはJ8903 空洞実験系セットアップをクライオスタットから引き上げた時の写真を示す。

R_s の測定ではJ5003、J8903の両空洞とも $\beta=0.5$ および $\beta=0.89$ 単セル空洞の実験値とは表面処理工程毎

のバラツキの範囲で一致した。図-7に得られたRs 1/T特性のグラフを単セル空胴の値と比較して示す。図-8に多連セル空胴のQ₀-Esp特性測定結果を示す。



図-6 J8903空胴実験系セットアップ

J5003空胴の最大表面電界強度(Esp)は19MV/m程度であり、所期目標値の16MV/mを超えているものの、これまでに得た単セル空胴の実験結果：40MV/m～のほぼ1/2程度であった。また、J8903空胴の1回目の測定では、空胴への導入RFパワーを徐々に上げて行く過程で、低いEspからX線の放出があり、Q値の低下が観測された。ここで、パルスRFパワー導入による表面エージング効果("Process":図-8中の白矢印部)を図った結果、Q値の回復が見られたものの、Espは4.2K、2.1Kの条件に抛らず

20MV/mに至らなかった。この原因として空胴表面が電解研磨処理以後のプロセス中に汚れたことを推定し、表面洗浄～実験系組立系機器の浄化を行う共に、J8903空胴を電解研磨で合計45μm追加研磨し、HPR洗浄の後、Q₀-Esp特性の再測定を行った。得られたRs 1/T特性は初回測定時と全く同じであったが、Espは4.2Kで23MV/m、2.1Kでは31MV/mと単セル空胴性能の平均的な値(40MV/m～)に近づき、かなり改善された。

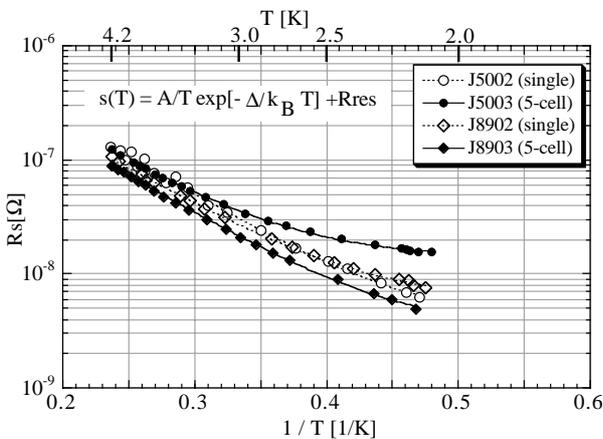


図-7 液体ヘリウム温度の逆数を関数とした空胴残留表面抵抗値の変化

しかし、この測定の時にも低いEspからX線の放出が持続したため、この原因を検討中である。

5. まとめと今後の予定

陽子加速器用超伝導加速器開発の第2ステップとして5連セル空胴2台の試作と性能試験を行った。単セル空胴の性能試験結果と比べると、Q値はほぼ同等で、得られた最大表面電界強度は16MV/mの所期目標値を超えているが、単セル空胴性能の平均的な値には至っていない。いくつかの性能低下原因が考えられるが、特に空胴の最終洗浄工程と真空排気工程について見直しを行っている。また、電解研磨後の水素脱ガス熱処理では真空加熱炉の排気能力不足が見られたため、クライオポンプを増設し、排気能力を8,000L/sから28,000L/sへ増力した。これらの改良結果は今後の多連セル空胴試験及びプロトタイプ機加速空胴試験に反映させ、空胴性能向上を図る。

本報告の5連セル空胴実験の継続と並行して、超伝導加速空胴のパルス運転特性詳細把握を主目的とする600MHzプロトタイプクライオモジュールの製作を進めている。また、陽子加速器実機で採用予定の972MHz空胴のR&D性能試験を2001年から行うために、空胴の設計検討[4]と試作準備を開始した。

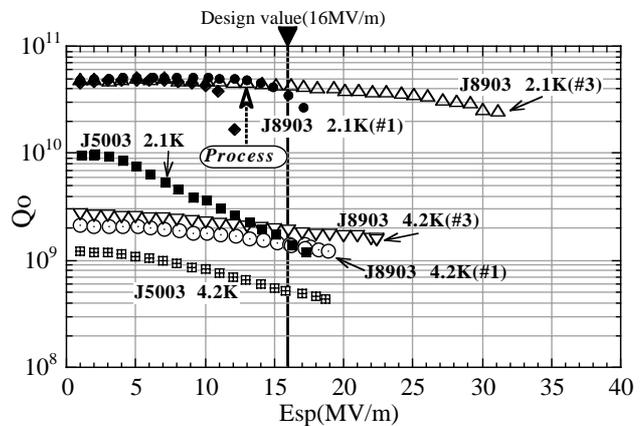


図-8 多連セル空胴のQ₀-Esp特性

参考文献

- [1] The Joint Project Team of JAERI and KEK, "The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators", JAERI-Tech, 99-056(1999).
- [2] N. Ouchi et al., "Development of Superconducting Cavities for High Intensity Proton Accelerator at JAERI", Proc. of 1998 Applied Superconductivity., PalmDesart, U.S.A., p.1030. (1998)
- [3] T. Higuchi et al., "Investigation on Barrel Polishing for Superconducting Niobium Cavities", Proc. of the 7th Workshop on RF Superconductivity, Gif-sur-Yvette, France, p.723 (1995).
- [4] E. Kako, "Cell Shape Design of 972 MHz Superconducting Cavities for High-Intensity Proton Linac", these proceedings.