

## Cavity Performance of 972MHz 9-cell Niobium Cavities for Proton Superconducting LINAC\*

K.Saito<sup>1,A)</sup>, H.Inoue<sup>A)</sup>, T.Higuchi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

<sup>B)</sup> Nomura Plating Ltd. Co., 20-12-5 Himejima, Nishiyodogawa-ku, Osaka-shi, 555-0033, Japan

### Abstract

Currently we are prototyping a 972MHz superconducting RF cryomodule, of which object is to demonstrate the key technology for ADS (accelerator driven system). KEK has been commissioned to fabricate some risky cavity parts for industrial production, and to make surface preparation and evaluate the cavity performance. In this paper these results are reported.

## 陽子超伝導リニアック用972MHz-9連ニオブ空洞の性能

### 1. はじめに

現在、日本原子力研究所は文部科学技術省の公募研究「革新的原子力システムの技術開発」の一テーマとして「加速器駆動核変換システムの技術開発等」を行っている。平成14～16年の3年計画である。加速器の研究は、原研が推進するADS (Accelerator Driven System) の要素技術の確立のために、超伝導陽子加速システムを試作することにある。1) 図1に示す9連ニオブ超伝導空洞 ( $Q=0.72$ ) を二台、2) それを収納する横クライオスタットを製作し、3) クライオモジュールでのHigh Powerテストを行う。空洞とクライオスタットは三菱重工・神戸造船所で製作した。我々は原研からの委託研究として、空洞の製作に関し、技術的リスクの大きい空洞関連部品の製作、空洞の表面処理と縦性能試験による空洞性能評価を請け負った。本報告では、それらの結果を報告する。

### 2. KEKが請け負った空洞関連部品製作

#### 2.1 ベースプレート

本超伝導空洞の周波数は972MHzである。空洞の運転は2Kで行われる。その際、使用液体ヘリウム量を減らすため、また、超流動液体ヘリウム (2K) の性質から、ポートのフランジシール部は、超流動ヘリウムに漬からない、すなわち真空断熱槽部にあるようにする事等から、空洞にヘリウム槽を溶接したジャケット方式となる。今回の空洞では、ニオブ

(Nb) と溶接性の良いチタン材でジャケットを製作することにした。空洞運転中、機械振動制御のためにビームパイプを介して外から空洞に力を加え変形を与える。ベースプレートが十分剛性を有しないとその力はそこに吸収されてしまう。十分な剛性確保のためにNbパイプ (5t) に肉厚30mmのチタンリングを電子ビーム溶接し、それを加工してベースプレートを製作する事にした。図1に、その断面図が示されている。厚肉チタンの溶接でNbパイプに予想外の熱歪みを生じ、その修正のためにベースプレートの内径が設計値より、0.5mm程度大きくなってしまったが、重工の奮闘により無事空洞に溶接できた。

#### 2.2 ポート付きビームパイプ

2K運転では、4.2Kの場合に比べQ値が10倍以上高く、空洞をクライオモジュールに組込む際、空洞内表面の汚染が性能劣化に著しい影響をもたらす。従来真空シールに使用して来たインジウムは、強くフランジ面にくっ付き、空洞分解時にフランジ面に残る。そのインジウムの除去作業中にインジウム破片による空洞汚染の可能性がある。したがって、シールをより硬性のある物に代える必要がある。欧米では、アルミ合金を使い始めている。この場合、フランジの硬度が要求される。Nbフランジは、高純度化が進み柔らか過ぎる (低RRRNb材は用途が少なく、メーカーでは製造しない)。したがって、高硬度異材フランジをニオブ空洞に接合する必要が生じる。本件では、Nbパイプとステンレスパイプ (SUS316L) の間に薄肉銅パイプを挟んだサンドイッチ構造パイプをHIP接合し、それからニオブ/

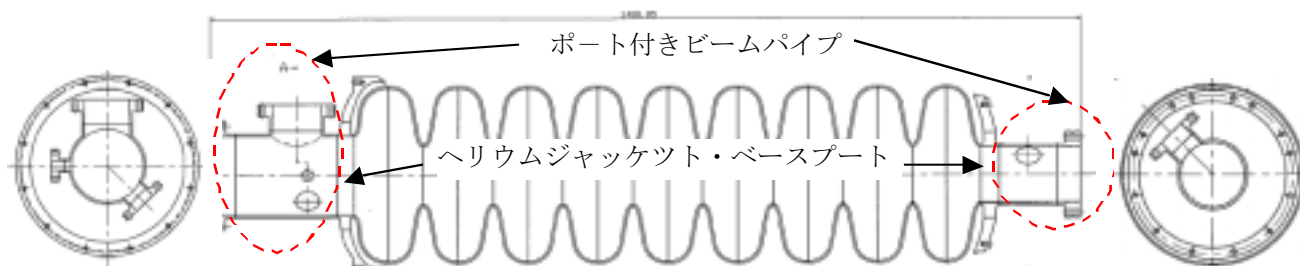


図1：本研究計画で製作した972MHz ( $Q=0.72$ ) 陽子加速用にニオブ製超伝導空洞

\* 文部科学技術省の「革新的原子力システム技術の開発」の一貫としての研究

<sup>1</sup> E-mail: ksaito@post.kek.jp

SUSフランジを加工し、さらにSUSを剥ぎ取り、Nb/Nbをビーム溶接して、フランジを空洞に接合することにした。この方法自体は、以前の研究で確認されている[1]。しかし、今回HIP接合後、銅/SUS間でリークが発生し、その方法を諦め、従来のNbフランジ方式に戻した。このリークの原因については、現在調査中である。

図2は、溶接Nbパイプに各種ポートをバーリング加工で突出し、それにNbフランジを溶接したポート付きビームパイプの完成品（インプット側）である。片側のビームパイプも同様の方法で製作した。今回の空洞製作では、空洞組立てを簡単にするために従来と異なり、Nbフランジにボルト通し穴を設けた。図2に示すように空洞横組立て時、両空洞のインプットカップラーのフランジ面が基準面になり、特にフランジの回転（1度）、傾きの精度（0.5度）が要求される。本製作では、それらの精度は確保された。



図2：KEKが製作したポート付きビームパイプ（インプットカップラー側）

### 2.3 高精度のハーフセルプレス金型

陽子超伝導空洞では、電子の場合に比べて空洞各セルでのRFの電界強度のバラつき（1%以下）、位相の精度（一度以下）が厳しい。位相エラーの一度は、空洞セル長換算で0.62mmに対応する。我々の空洞製法では、ハーフセルをプレス成形し、正寸加工（トリム）した後、電子ビーム溶接して空洞を製作する。この過程で製作誤差が積み重なるが、本件では、ハーフセルの成形誤差を0.1mm以下に抑さえ

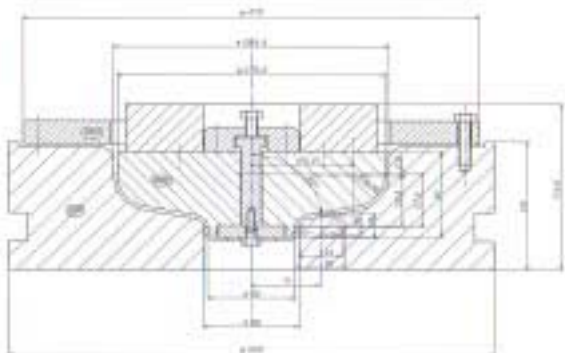


図3：KEKが製作したハーフセルプレス金型

込むために、成形後のスプリングバック等を考慮に入れた高精度のハーフセル金型（図3）を製作した。重工では、この金型を使って成形した。図4は、その金型を使って成形したハーフセルのトリム加工後の形状と設計形状との比較例である。アイリス部で誤差が若干多いが、その他の場所では、目標の0.1mm程度になっている。詳しくは論文[2]参照。

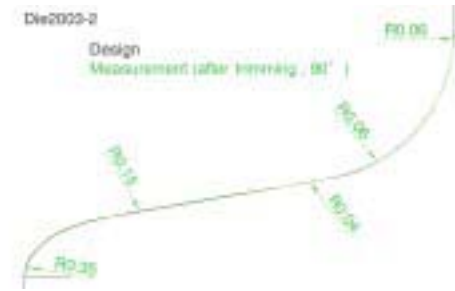


図4：ハーフセルの設計形状とトリム加工後の形状誤差

## 3. 表面処理

### 3.1 9セル用遠心バレル研磨装置の開発

ハーフセル、ベースプレート、ビームパイプを三菱重工で電子ビーム溶接し、空洞が完成した後、KEKはその空洞の表面処理及び、空洞性能評価を行った。表面処理は、機械研磨、電解研磨(EP)、真空熱処理からなる。これまで機械研磨としてバレル研磨を行ってきた。これは、空洞内に研磨石と研磨剤を封じて空洞を回転して機械研磨する方法である。しかし、この方法では研磨速度が遅く、処理時間に数週間要する。そこでその問題を解決する方法として、我々は空洞をテーブルの上で回転すると同時にテーブルを空洞と逆方向に回転する遠心バレル研磨をLバンド空洞で開発し、研磨時間を4時間に短縮することに成功した。本研究では、この方法を9セル空洞用に開発することを一つの目的とした。開発した装置を図5に示す。しかし、空洞製作スケジュールの急迫さと予算執行上の問題から本装置は空洞の処理に間に合わず、やむなく従来のバレル研磨に変えた。スケジュールの都合上、バレル研磨時間を一週間しか取ることが出来なかった。



図5：KEKが開発した9セル空洞用遠心バレル研磨装置

### 3.2 電解研磨及び真空熱処理

バレル研磨後、EPを100  $\mu\text{m}$ 施した。この工程で吸蔵した水素を脱ガスするために750°C 3時間の真空熱処理を行った。EPは、(株)野村鍍金、真空熱処理は原研・東海研で行った。その後、空洞のプリチューニングを行い、仕上げ研磨としてEP50  $\mu\text{m}$ を施した。EP後の水洗法は、最初はL-バンド空洞で確立した方法：一次洗浄、温水オーバーフロー洗浄、純水高圧洗浄(HPR)、超純水シャワー洗浄を行った。しかし、空洞性能上の問題が発生したので、その後色々変更した。問題が解決した現時点で考えれば、問題は水洗方法ではなく、新規に製作した水洗治具からの汚染にあった。

### 3.3 ベーキング装置の製作

EP後のベーキングは、Q-slopeの問題[3]の解決に不可避である。そのためには、空洞を120°Cで48時間程度様にベーキングする必要がある。従来のようにガラステープヒーターを空洞に巻き付けるような方法は好ましくない。空洞全体が120°Cで安定にベークできる装置を製作した。図6はその写真である。



図6：972MHz 9-cellニオブ空洞用ベーキング装置

## 4. 空洞性能

### 4.1 コンタミネーションの問題

空洞の目標性能は、2Kで加速電界10MV/m、 $Q_0 = 1 \times 10^{10}$ である。図7は二台の空洞(L,R)の初期2～3回までの測定結果を示す。1回目の測定では、両空洞とも著しく性能が悪かった。超純水装置の更新工事(水質が工事の後保証されていない)、EP装置の長期休止状態によるメンテナンス不良、新作の表面処理ジグからの汚染等、多くの原因可が考えら

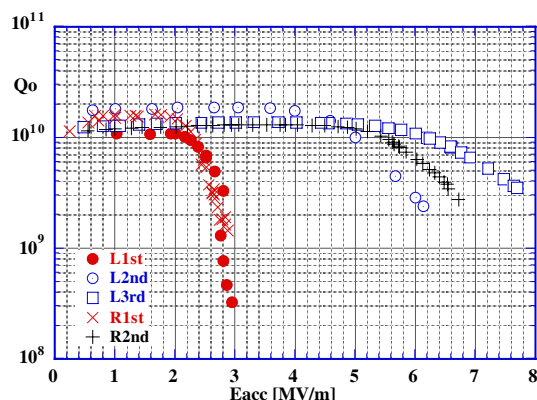


図7：初期2～3回の性能試験結果

れた。現象としては、図8に示すようにマルチパクタリングが電界を制限した。

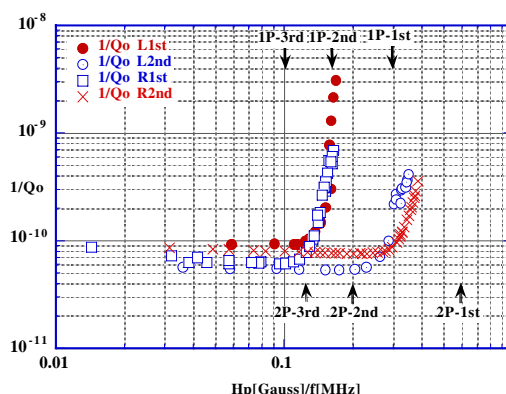


図8：マルチパクタリングの発生

### 4.2 最終空洞性能

マルチパクタリングを押さえるために、EPの一次洗浄の後に過酸化水素水洗浄(EP時のイオウ汚染対策)を追加し、さらにその洗浄時間を3時間まで長時間化し、また、HPRを10時間まで長時間化したが見られなかった。また、HPR室の清浄度環境測定を行いその改善策を講じたが、決定的解決に至らなかった。超純水にも疑いがあったのでその使用を止め、HPR(純水)上がりとした。こうした色々な試行錯誤の後、最終的に図7の低性能原因は空洞洗浄のために新築したシャワーパイプからの汚染にあることが分かった。図9は、こうした色々な対処の後に得られた空洞の最終性能である。第一次の2点マルチパクタリングによるX線の発生により測定を取り止めた結果(X線シールドの設備上の問題)、加速電界は11MV/mに制限されたが、目標性能を達成することが出来た。

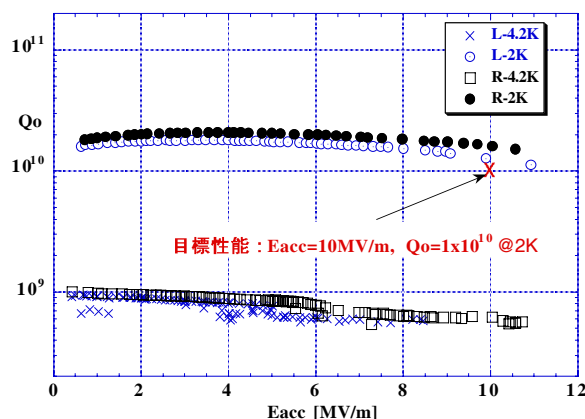


図9：空洞の最終性能(2K、4.2K)

### 参考文献

- [1] K.Saito et al., <http://srf2003.desy.de>, TuP39.
- [2] K.Saito et al., <http://srf2003.desy.de>, TuP41..
- [3] K.Saito, <http://srf2003.desy.de>, ThWG1.