

ニオブスズ超伝導電子加速器の開発へ向けた S バンドシングルセル 超伝導空洞伝導冷却システムの構築

CONSTRUCTION OF CONDUCTING COOLING SYSTEM FOR S-BAND SINGLE-CELL SUPERCONDUCTING CAVITIES TOWARDS THE DEVELOPMENT OF A Nb₃Sn SUPERCONDUCTING ELECTRON ACCELERATOR

安彦颯人[#], 柏木茂, 日出富士雄, 南部健一, 長澤育郎, 高橋健, 柴田晃太郎, 胡文卿, Kavar Anjali, 山田悠樹,
Kitisri Pitchayapak, 濱広幸

Hayato Abiko[#], Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Kenichi Nanbu, Ikuro Nagasawa, Ken Takahashi, Kotaro Shibata,
Wenqing Hu, Anjali Kavar, Hiroki Yamada, Pitchayapak Kitisri, Hiroyuki Hama
Research Center for Accelerator and Radioisotope Science, Tohoku University

Abstract

Recently, nuclear medicine therapy using radioisotopes (RI) is attracting attention. We are conducting research into the development of a Nb₃Sn superconducting electron accelerator capable of high-current beam acceleration to realize mass production of medical RI using an electron accelerator. Nb₃Sn superconducting cavities can be cooled down to 4 K by conduction cooling without liquid helium to achieve high RF performance, making it possible to construct superconducting accelerators in small facilities such as universities. Currently, we are constructing a cooling system for a 3 GHz single-cell superconducting cavity using a GM cryocooler and are designing a thermal link to conduct cooling from the cryocooler to the cavity. In this conference, we will report on cooling tests using a GM cryocooler and resonant frequency measurements of the superconducting cavity.

1. はじめに

現在、核医学において、様々な放射性同位元素 (RI) が医療検査に利用されている。近年、RI を用いた内用療法 (核医学療法) の進行がんへの有効性が確認されるなど、医療用 RI の利用は「検査から治療へ」と新たな展開を見せている。医療応用へ向けた RI 製造法の候補の一つとして、加速器からの高強度ビームを使った光核反応による製造があるが、超伝導電子加速器は大電流及び CW での運転が可能であるため、医療用 RI 製造への活用が期待されている。

我々は、電子加速器による核医学用 RI の大量生産実現のため、現在大電流ビーム加速が可能な 4 K ニオブスズ超伝導電子加速器の基礎研究を行っている。多くの研究施設で超伝導空洞として用いられているニオブ空洞は、高い Q_0 値を得るために、空洞を多層構造の冷却容器 (クライオモジュール) に入れ、超流動ヘリウムに浸漬することで 2 K まで冷却する必要がある。クライオモジュールは直径 1 m 以上の大型圧力容器で、さらに液体ヘリウムの超流動化にはポンプやコンプレッサーが必要となるため、全体として冷却設備は非常に大規模になる。大学などの小さな加速器施設ではこれらの大規模な設備の導入が困難であり、この現状が、超伝導加速器の開発や運転、大電流ビームの実現を阻む大きな要因の一つとなっている。そこで我々は、ニオブスズ超伝導空洞を用いた超伝導加速器実現へ向けた研究に取り組んでいる。これまでの超伝導空洞の研究開発から、ニオブスズ超伝導空洞の場合、伝導冷却で到達可能な 4 K まで空洞を冷却することで、ニオブ空洞を 2 K まで冷却した

時とはほぼ同等の空洞性能 (Q_0 値) が得られることが分かっている [1]。ニオブスズの冷却は伝導冷却で行うため、大規模な冷却機構を必要とせず、大学などの小規模施設でも超伝導加速器の建設が可能である。本研究では、ニオブスズ超伝導電子加速器の開発へ向けて、S バンドシングルセルのニオブスズ超伝導空洞およびそれを冷却する伝導冷却クライオモジュールの製作を行っている。本稿では、シングルセルの 3 GHz ニオブ空洞を用いた冷却システムの構築状況および冷却試験、共振周波数測定について報告する。

2. ニオブスズ超伝導空洞

一般的な超伝導加速器で用いられる超伝導空洞はニオブであるが、本研究では超伝導加速空洞にニオブスズを用いることを計画している。ニオブの臨界温度が 9.2 K であるのに対し、ニオブスズは 18 K で超伝導状態に転移する。そのためニオブスズは、ニオブより高い温度で超伝導状態を維持することができる。先行研究から、ニオブを用いた空洞では 2 K まで冷却しなければ得られなかった性能が、ニオブスズの場合は 4.2 K にまで冷却するだけで同等の空洞性能 (Q_0) を得ることができることが分かっている [1]。つまりニオブスズを使えば、液体ヘリウムを使わずに、大学などの小規模施設でも簡易な小型冷凍機を用いた伝導冷却によって超伝導加速器の運転の実現が期待できる。ニオブスズ超伝導空洞の製作については、ニオブ空洞の内面に蒸発させたスズを熱拡散させ成膜する蒸着熱拡散法 [1]、ニオブに直接ブロンズをメッキするメッキ法 [2]、そしてニオブ表面にブロンズと銅をメッキするブロンズ法 [3] などがある。本研究では、今後 KEK の蒸着設備を利用し、蒸着熱拡散法により S バンド (2856 MHz) ニオブスズ超伝導空洞を製作する予

[#] abiko.hayato.p6@raris.tohoku.ac.jp

定である。

製作したニオブスズ空洞は最終的に、東北大学先端量子ビーム科学研究センターの試験加速器(t-ACTS)のビームラインにシングルセルを導入し、ビーム加速試験を行う予定である。冷却には住友重機械工業製の GM 冷凍機 RDK-408D2 を使用する。この冷凍機の冷却能力は 4.2 K において 1 W の熱負荷を取り除くことができる。RF 源には最大出力 2 kW、パルス幅 3 ms の半導体アンプを使用する。S バンド (2856 MHz) の半波長 (L_{acc}) は、 $L_{acc} = c/2f_0 = (3 \times 10^8)/(2 \times 2856 \times 10^6) \approx 53 \text{ mm}$ となり、これが 1 セルの加速長となる。加速勾配 (E_{acc}) は 10 MV/m とすると、空洞 1 セル分の加速電圧は $V_c = 0.53 \text{ MV}$ となる。また、この時空洞の Dynamic loss は、以下の式で求めることができる。

$$P_c = \frac{V_c^2}{(R/Q) \cdot Q_0} \quad (1)$$

ここで、 $Q_0 = 1.0 \times 10^{10}$ 、 R/Q は空洞長に比例すると仮定して、9 セルの TESLA 空洞の値 (=1000) から $R/Q = 111$ とすると、 $P_c = 0.25 \text{ W}$ となり、今回用いる GM 冷凍機で十分冷却できることが分かる。

3. クライオモジュールの冷却試験

3.1 冷却システムの構築

S バンドシングルセルのニオブスズ空洞の冷却システム構築に先立って、KEK で製作された 3 GHz (3074 MHz) のニオブ空洞を冷却するシステムの設計と構築を行った。今後 S バンド (2856 MHz) のニオブスズ空洞とクライオモジュールの製作を行う予定である。伝導冷却には、住友重機械工業製の 4 K GM 冷凍機 RDK-408D を使用した。今回用いた GM 冷凍機は、二段の冷却ステージを備えており、第一ステージでは 40 K、第二ステージで 4 K まで被冷却体を冷やすことができる。そのため、空洞を 4 K に保ち、その周囲を 40 K の構造物で覆うシステムを構築した。4 K ステージには銅の天板を取り付け、サーマルリンクで空洞のビームダクトをホルドすることで伝導冷却を行った。この空洞を含む 4 K ステージに連結された構造体を囲うように熱シールドボックスを作成し、40 K ステージに取り付けた。冷却に際し、熱の流入に気を付けなければならない。温度差のある物体同士の接触による熱伝導はもちろん、数 100 度の温度差がある場合は輻射熱の影響も考慮する必要がある。輻射エネルギーは温度差の 4 乗に比例するためである。室温 (約 300 K) からの 40 K シールドボックスへの輻射熱を抑制するために、熱シールドボックス全体を断熱材 (スーパーインシュレーター) で囲っている。さらに、気体分子の対流による熱の流入を抑えるために、クライオモジュールを真空引きしてから冷凍機を動作させた (Fig. 1)。

3.2 冷却試験

冷却試験では、各測定点における温度変化を測定した。測定点は 40 K、4 K 合わせて 6 点ある (Fig. 1)。温度計には、極低温領域で感度の高いセルノックス温度計を用いた。4 K 側の温度測定には CX-1050、40 K 側の温度測定には CX-1070 を用いている。温度計 3 個

(331A、331B、218-2) を 40 K ステージに、他の 3 個 (218-1、218-4、218-5) を 4 K ステージにそれぞれ取り付けた。また冷却後に効率よく温度を上昇させるために、4 K および 40 K ヘッドに接触している天板に抵抗器を取り付けている。

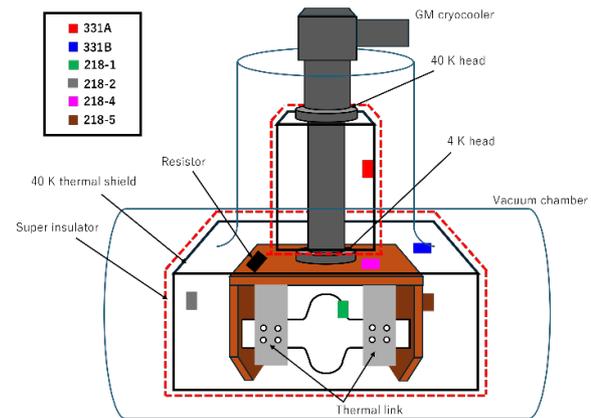


Figure 1: Cryomodule of 3 GHz single-cell Nb superconducting cavity.

測定結果を Fig. 2 に示す。結果から、それぞれのステージにおいて目標とする温度に近い値まで冷却されることが確認できた。冷却開始 5 時間後あたりで 218-5 の温度がステップ的に高くなっているのは、温度計と計測器の接続不良が起こっていたためである。218-2 は 44 K 程度と少し高い温度を維持していたが、これは 40 K ステージのヘッドから距離が離れているためであると考えられる (Fig. 3)。また、4 K 部分ではすべて 4 K 以下まで冷却できていることが確認できた (Fig. 4)。

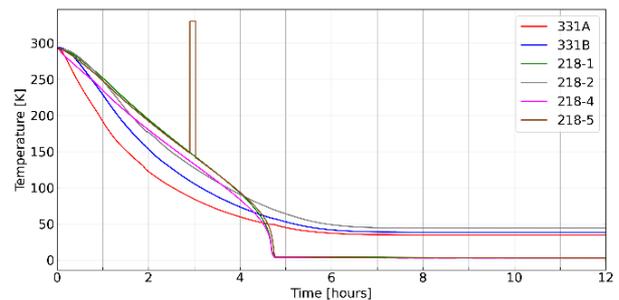


Figure 2: Temperature change during cooling test.

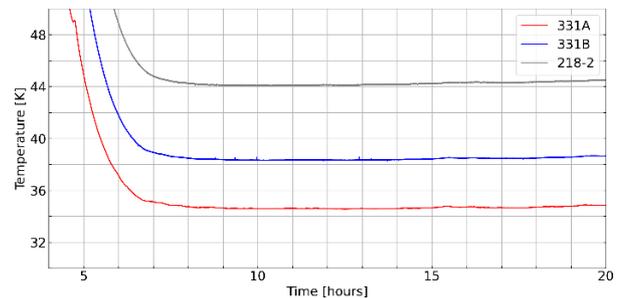


Figure 3: Temperature change during cooling test (1st stage, 40 K).

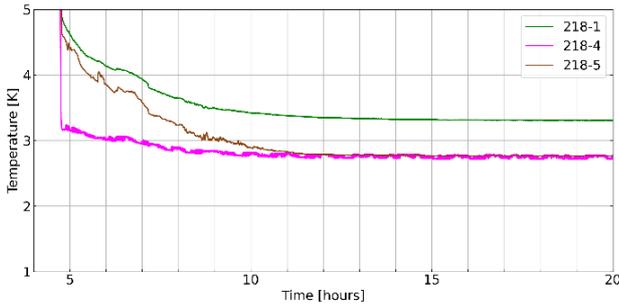


Figure 4: Temperature change during cooling test (2nd stage, 4 K).

4. 共振周波数測定

超伝導空洞は Q 値が大きいので、周波数のわずかなずれで安定なビーム加速ができなくなってしまう。共振周波数は空洞のサイズに依存し、冷却による熱収縮で空洞が変形するため、温度変化に伴う共振周波数の変化を測定した。測定にあたって、空洞にはアンテナを取り付ける必要がある。アンテナは空洞のフランジからダイポールアンテナを挿入する方法をとっているが、深くまで挿入しすぎると振動を強く受け共振周波数が変動してしまうおそれがある。そのため冷却前に常温で、一度アンテナの長さごとに共振周波数および結合係数、 Q_0 値を測定した。空洞両側のフランジから同じ長さで揃えたアンテナを挿入し、各アンテナ長ごとの 2 Port での S_{21} を測定した。測定した結果は Table 1 のようになった。表から分かるように、アンテナ長 5.5 cm あたりから振動を強く受け、共振周波数が下がっている。また結合度 (β) は、アンテナを挿入していくと指数関数的に増加していき、6.0 cm を超えると一気に減少する結果となった。 Q_0 値についても挿入長が 6.0 cm を超えたあたりからは対向するアンテナが、直接結合して共振器をバイパスするような形となるため、結合度も Q_0 値も減少しているのかもしれない。この件については、今後も調査が必要であるが、今回は結合度が小さいアンテナ長 4.5 cm にセットして測定を行った。

共振周波数測定でもう一つ考慮しなければならない点は、測定ケーブルによる熱の流入である。高周波ケーブルは、室温の真空チャンバーからフィードスルーを介して真空中へと導入される。熱の流入を避けるため、室

Table 1: Resonant Frequency, Coupling Coefficient, and Q -value as a Function of Antenna Length

Antenna Length	f_0 [MHz]	β_1	β_2	Q_0
4.0 cm	3074.05	0.06422	0.06868	4839
4.5 cm	3074.03	0.1372	0.1358	6327
5.0 cm	3074.72	0.2443	0.2679	6230
5.5 cm	3072.46	0.8181	0.8915	5777
6.0 cm	3067.79	4.153	3.664	5908
6.5 cm	3052.16	2.736	2.736	799.0

温の真空チャンバーから 4K へと直接接続することはできない。40K と 4K の各ステージでそれぞれ熱アンカーをとるようにした。共振周波数測定では、空洞にケーブルを繋ぎ、クライオモジュールから出たケーブルをネットワークアナライザーに接続することで測定を行った。熱アンカーとった状態でのフル 2 Port のキャリブレーションが困難であったため、アンテナは空洞の片側のフランジにのみ取り付け、1 Port での S_{11} を測定した。

冷却前に空洞の共振周波数を測定したところ、3074.025 MHz であった。空洞が冷却によって一様収縮すると仮定した場合、共振周波数のずれは簡単に Eq. (2) のように与えられる。

$$\Delta f = -\alpha(T) \times f_0 \times \Delta T \quad (2)$$

$\alpha(T)$ は温度に依存する線膨張係数、 f_0 は共振周波数、 ΔT は変化した温度である。ニオブ空洞を用いて室温 (300 K) から 4 K まで冷却したとすると、共振周波数の変化は、 $\Delta f = -7.1 \times 10^{-6} \times 3074.025 \times (4 - 300)$ より 6.46 MHz と計算できる。実際に測定した結果、まず各地点の温度の変化は Fig. 5 のようになった。温度計の配置は先ほどの冷却試験のときと変わっていない。グラフから、ケーブルをつなげた状態であっても、ケーブルの熱アンカーをとるなどして全体的に目標とする温度まで冷却が行われたことが確認できた。しかし、空洞部分である 218-1 の温度は 4 K よりも少し高い値をとった (Fig. 6)。冷却試験では 4 K 未満に冷やされていたため、ケーブルからの熱流入によって冷却が十分に行われなかったと考えられる。そのため、熱アンカーを含めたケーブルの配置の見直しを行い、さらにより効率的に空洞を伝導冷却するためにサーマルリンクの形状と配置の再設計を行う必要がある。

次に、時間による温度変化と共振周波数変化の関係を Fig. 7 に示す。グラフから分かるように、冷却に伴って空洞が収縮し共振周波数は大きくなる方向へシフトしている。また、最終的に共振周波数は 3079.4 MHz へ変化しており、冷却前との差は 5.375 MHz であった。測定において空洞は 295.64 K から約 4.4 K まで冷却されているため、Eq. (2) を用いて共振周波数変化を再度計算す

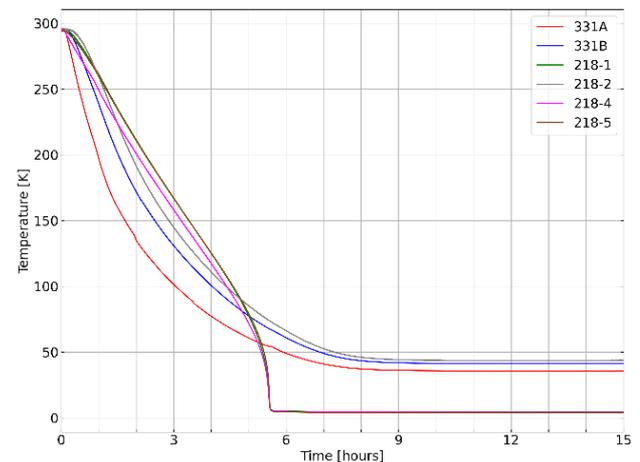


Figure 5: Temperature change during cooling test with resonant frequency measurement.

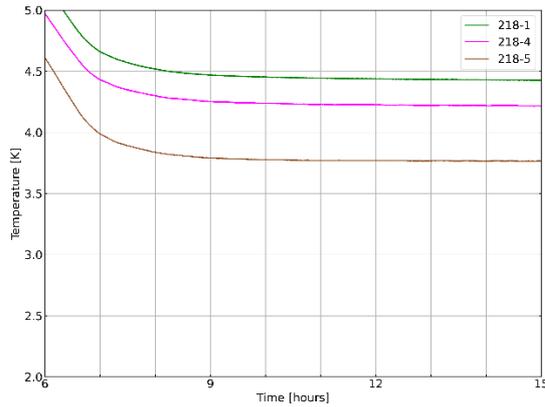


Figure 6: Temperature change during cooling test with resonant frequency measurement (2nd stage, 4 K).

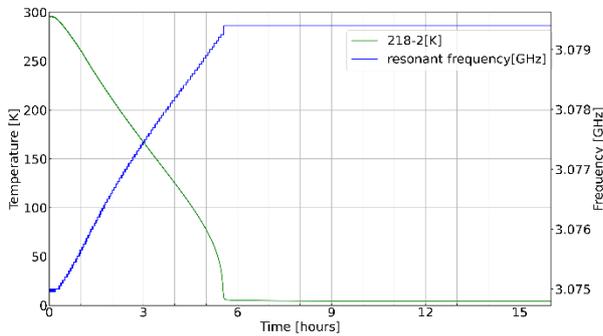


Figure 7: Cavity temperature change and resonant frequency variation.

ると 6.356 MHz となる。測定結果と計算値では約 1 MHz の差が見られた。共振周波数の変化を求める式(2)の中

の線膨張係数 $\alpha(T)$ は温度に依存する係数である。今回は、室温での線膨張係数 $7.1 \times 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ を使用したため、実際の測定と差異が生じたと考えられる。温度による共振周波数の変化を計算から正確に求めるのは困難であるため、超伝導空洞の共振周波数の変化量を実測して用いることとする。

5. まとめ

医療用 RI の大量製造が可能な高強度の超伝導電子線形加速器の研究を行っており、現在は、空洞冷却の基礎研究として、S バンドのニオブ超伝導空洞 (3 GHz) を GM 冷凍機を用いて冷却するクライオモジュールの開発を進めている。製作したクライオモジュールを用いた冷却試験では、空洞を目標の 4 K 以下へ冷却可能であることを確認できた。また、冷却下での共振周波数測定では、空洞の共振周波数が室温のときよりも 5.375 MHz 大きくなることが確認された。この値を参考に、ビーム加速する際はあらかじめ空洞の共振周波数を調整しておく必要がある。また、共振周波数測定において空洞は冷却されたものの、目標とする 4 K 以下にまでは冷却されなかった。そのため、今後はケーブルからの熱流入を抑えるためにケーブルの配置の見直しを行い、また、より効率的に空洞を伝導冷却するためにサーマルリンクの形状・配置の再設計を行う予定である。

参考文献

- [1] S Posen and D. L. Hall, Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 033004.
- [2] Ming Lu *et al.*, Chinese Phys Lett 39 (2022) 115201.
- [3] H. Ito *et al.*, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, FROO07, pp.193-196.