

S バンドニオブスズ超伝導高周波空洞を用いた電子ビーム加速 DEMONSTRATION OF ELECTRON BEAM ACCELERATION USING AN S-BAND Nb₃SN SUPERCONDUCTING RF CAVITY

柏木茂^{#,A)}, 梅森健成^{B)}, 菊池章弘^{C)}

Shigeru Kashiwagi^{#,A)}, Kensei Umemori^{B)}, Akihiro Kikuchi^{C)}

^{A)} Research Center for Accelerator and Radioisotope Science (RARiS), Tohoku University

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} National Institute for Materials Science (NIMS)

Abstract

High-current electron beams are used in various fields, including medicine, industry and basic science research. Various types of radioisotope (RI) are used in the field of nuclear medicine for diagnosis, such as PET and SPECT. In recent years, the medical RIs have been applied to cancer therapy, and the Ac-225 has been confirmed to be effective in the treatment of advanced cancer. One of the promising RI production methods for medical application is the use of high-current beams of accelerators. A photonuclear reaction is used in the RI production process using electron beam. We have started research and development of a 4K niobium-tin (Nb₃Sn) superconducting electron accelerator system for RI production, which can be operated with a compact conduction cooling system. As a first step, we start to develop a single-cell Nb₃Sn superconducting cavity and a cryomodule. and to demonstrate the superconducting cavity performance the beam experiment will be performed. We will report on the development of Nb₃Sn cavity and design studies for a superconducting linac for the RI production.

1. はじめに

我々の研究グループ(東北大学、KEK、NIMS)では、4K ニオブスズ(Nb₃Sn)超伝導電子加速器の研究開発を開始した。Nb₃Sn 超伝導高周波空洞は、大量の液体ヘリウムを必要とせず、GM 冷凍機による伝導冷却で到達可能な4Kで運転できるため、大学等の小規模施設においても超伝導高周波加速器システムの構築が可能である。現在、我々は4K Nb₃Sn 超伝導電子線形加速器によって大強度電子ビームを実現し、医療用放射性同位元素(RI)製造や水質浄化などへの応用を検討している。その実現に向けた第一歩として、S バンド(2856 MHz)のシングルセル Nb₃Sn 空洞を製作し、東北大学先端量子ビーム科学研究センターにおいてビーム加速実証実験を実施することを計画している。本発表では、ビーム加速実証実験の計画および Nb₃Sn 超伝導空洞冷却用クライオモジュールの試験冷却実験などについて報告する。

2. 電子加速器による放射性同位元素製造

現在、核医学において放射性同位元素 (RI: Radioisotope) は、PET や SPECT などの核医学診断に広く利用されている。近年では、RI を用いた内用療法(核医学療法)が進行がんに対して有効であることが確認され、医療用 RI の利用は診断から治療へと新たな展開を見せている。東北大学先端量子ビーム科学研究センター・三神峯事業所では、電子加速器の大強度ビームを用いて核医学治療用 RI の製造を行っている。現在は基礎研究段階にあるが、将来的には電子加速器の大電流化により、商業ベースでの核医学用 RI 製造への展開を目指している。

電子加速器による RI 製造では、白金(Pt)やタンタル(Ta)などの重金属ターゲットに電子ビームを照射し、巨大双極子共鳴(Giant Dipole Resonance, GDR)付近の10~20 MeV の制動放射(Bremsstrahlung)を発生させ(Fig. 1)、光核反応によって RI を生成する。Table 1 に代表的な光核反応を示す。光核反応を用いる RI 製造の利点として、不要な RI (不純物)の生成が抑えられること、また生成量が電子ビームの電流量に比例して増加することが挙げられる。我々はこの特長を活かし、超伝導加速器による大電流ビーム加速を用いて医療用 RI の大量生産を実現する。

近年、ラジウム 226(²²⁶Ra)を原料として製造されるアクチニウム 225(²²⁵Ac)は、α線放射線治療に有望な RI として世界的に注目を集めている[1]。²²⁶Ra の光核反応断面積を Fig. 1 に示す。効率的な RI 製造には、反応断面積が最大となる 10~20 MeV 付近の制動放射を得る必要がある。Figure 1 は異なる電子ビームエネルギーにおける制動放射スペクトルを示している。高いエネルギーの電子ビームは GDR 付近でより多くのガンマ線を生成するものの、不要な高エネルギー光子も発生させ、主反応

Table 1: RI Production via Photonuclear Reaction

Target	Reaction	Radioisotope
¹⁰⁰ Mo	¹⁰⁰ Mo(γ, n) ⁹⁹ Mo, ⁹⁹ Mo → ^{99m} Tc + e	^{99m} Tc
⁶⁸ Zn	⁶⁸ Zn(γ, p) ⁶⁷ Cu	⁶⁷ Cu
⁷⁰ Ge	⁷⁰ Ge(γ, 2n) ⁶⁸ Ge, ⁶⁸ Ge → ⁶⁸ Ga + e	⁶⁸ Ga
²²⁶ Ra	²²⁶ Ra(γ, n) ²²⁵ Ra, ²²⁵ Ra → ²²⁵ Ac + e	²²⁵ Ac

[#] kashiwagi@raris.tohoku.ac.jp

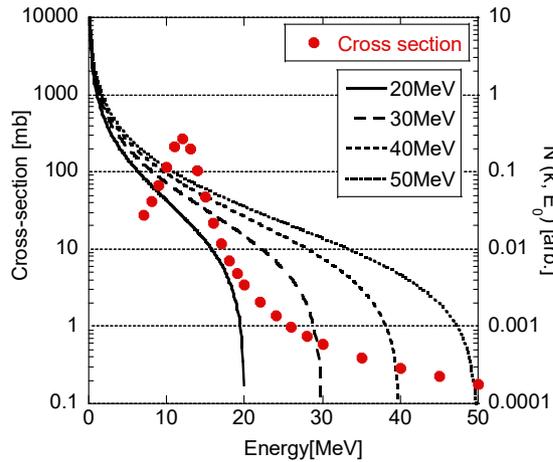


Figure 1: Cross-section of photonuclear reaction of $^{226}\text{Ra}(\gamma, n)^{225}\text{Ra}$ [2] and Bremsstrahlung spectrum with different electron beam energy [3].

以外の RI 生成を誘発する。そのため、光核反応による RI 製造には 35~40 MeV の電子ビームが最適とされる。

3. ニオブスズ超伝導電子線形加速器

大量の RI を製造するためには、35~40 MeV のエネルギーを持つ大電流電子ビームが必要である。常伝導電子リニアックでは、加速空洞内での高周波 (RF) 電力損失に起因する発熱のためパルス運転となり、加速空洞への RF 供給のデューティ比はおよそ 0.1% に制限される。この結果、平均ビーム電流は約 1 mA が上限となる。一方、超伝導電子リニアックでは、加速空洞の Q 値が 10^{10} のオーダーに達し、RF 電力損失による温度上昇が無視できるため、空洞に連続的に RF を供給する連続波 (CW) 運転が可能である。その結果、平均ビーム電流を比較的容易に 10 mA 以上に高めることができる。さらに、超伝導空洞への RF 供給は数 kW 規模で十分であり、クライストロンのような大規模 RF 源は不要であり、小型の固体増幅器で対応可能である。

現在、欧州・米国・中国の X 線自由電子レーザー加速器で広く使用されている 1.3 GHz ニオブ (Nb) 製超伝導空洞は、大量の液体ヘリウムを超流動化して 2 K まで冷却される。米国を中心とする先行研究では、ニオブスズ (Nb₃Sn) 超伝導空洞を 4 K まで冷却した場合、Nb 製空洞を 2 K まで冷却した場合と同等の Q 値 ($= 10^{10}$) が得られることが報告されている[4]。4 K 冷却は GM 冷凍機のような小型冷凍機で達成可能であり、液体ヘリウムを必要としない。このため、液体ヘリウム供給の制約を回避でき、大学などの小規模研究施設においても超伝導加速器システムの構築が可能である。

我々はこれまでに、医療用 RI 製造を目的としたビームパワー 350 kW (35 MeV, 10 mA) の電子線形加速器の概念設計を行った[5]。本加速器は、熱陰極電子銃、低ベータ 3 セルバンチャー空洞、3 セルブースター空洞、そして主加速部で構成される。線形加速器のすべての RF 加速空洞には、3 セルの 1.3 GHz の Nb₃Sn 製超伝導空洞を採用する。この線形加速器の RF 源や冷凍機など全てを含めた電力効率は、およそ 40% である。

4. ニオブスズ空洞ビーム加速試験

我々の研究グループでは、ニオブスズ (Nb₃Sn) 超伝導高周波空洞の製造技術として、蒸着拡散法[6]およびブロンズ法[7, 8]の 2 つの方法について研究を進めている。今回は、KEK を中心に開発が進められている蒸着拡散法を用いて S バンド Nb₃Sn 超伝導高周波空洞を製作し、東北大学先端量子ビーム科学研究センター・三神峯事業所の試験加速器 (t-ACTS) においてビーム加速実験を行う。

4.1 t-ACTS におけるビーム加速試験

ビーム加速試験を実施する t-ACTS は、フェムト秒時間幅の極短電子ビームを用いた高輝度テラヘルツ光源の開発を目的に建設された加速器である。加速器は、熱陰極独立 2 空洞型高周波電子銃、アルファ電磁石、3 m 長 S バンド加速管、45 度エネルギー測定用偏向部で構成されている。本研究では、加速器最下流の 45 度偏向部の直前に S バンド Nb₃Sn 超伝導空洞を格納したクライオモジュールをインストールし、偏向部でビームエネルギーを計測することにより、ビーム加速を実証する。t-ACTS の主 RF 周波数が 2856 MHz であるため、製作する単セル Nb₃Sn 超伝導空洞の共振周波数 (f_{RF}) も同一の 2856 MHz に設定する。t-ACTS のビームパラメータを Table 2 に示す。

熱陰極高周波電子銃で生成される電子ビームは、バンチ間隔が 2856 MHz の 1 周期に相当する約 350 ps、ビーム繰り返し (f_{rep}): 1 Hz、ビームマクロパルス幅 (T_b): 100 ns、マイクロバンチ電荷量 (Q_b): 1 pC である。そして、ビーム電流は、 $I_{\text{peak}} = 2.86$ mA、 $I_{\text{ave}} = 286$ pA である。本実験は、ビーム加速実証が目的であるため、ビーム繰り返しや電荷量は低く設定した。

空洞の無負荷 Q 値、R/Q、加速勾配は、それぞれ $Q_0 = 1.0 \times 10^{10}$ 、 $R/Q = 110$ 、 $E_{\text{acc}} = 10$ MV/m とした。このとき、空洞長 (L_c)、空洞電圧 (V_c) は、それぞれ $L_c = 0.052$ m、 $V_c = 0.52 \times 10^6$ V となる。また、超伝導 RF 空洞の安定動作に向けて共振帯域幅をひろげることを目的に、結合度 ($\beta = 330$) は大きく設定した。このときの負荷 Q 値と帯域幅、フィリングタイムはそれぞれ $Q_L = 3 \times 10^7$ 、 $\Delta f = f/Q_L \sim 95$ Hz、 $T_f = 2Q_L/\omega_{\text{RF}} \sim 3.4$ ms となる。

次にビームによる空洞内の電圧降下 (V_{beam}) を考える。空洞内の蓄積エネルギー約 0.14 J であり、100 ns 時間幅のビームが V_c の電圧で加速されるのに消費されるエネルギーは約 0.15 mJ である。よって、空洞内の蓄積エネル

Table 2: Beam Parameters

Micro-bunch charge (Q_b)	1.0 [pC]
Beam pulse length (T_b)	100 [ns]
Number of bunches	~286 [bunches]
Beam repetition (f_{rep})	1 [Hz]
Energy	20 [MeV]

ギーのうちビーム加速に消費されるエネルギーの割合は約 0.1% 程度である。ビーム加速によって生じる電圧降下は約 250 V となり、 V_c に比べて小さい。CW の RF を空洞に供給した場合の空洞内表面での電力損失 (P_{loss}) は、次式によって与えられる。

$$P_{\text{loss}} = \frac{V_c^2}{(R/Q) \times Q_0} \sim 0.25 [\text{W}] \quad (1)$$

この熱量であれば静的な熱流入を加えても、現在所有している GM 冷凍機 (RDE-418D4, 1.8 W@4.2 K) の能力で冷却は可能である。

ここで、ビームを加速するのに必要な RF 源から空洞へ供給される電力 (P_g) を見積もる。ビーム加速により消費されるエネルギーは、前述したように空洞に蓄積されるエネルギーに比べ小さいため、ここでは無視する。RF 源からの供給電力は式(2)により求めることができる。

$$P_g = \frac{V_c^2}{4 \cdot (R/Q) \times Q_L} = 20.5 [\text{W}] \quad (2)$$

この時、 $Q_L = 3 \times 10^7$, $R/Q = 110$, $V_c = 0.52 \text{ MV}$ とした。式(2)で求まる電力であればケーブル損失などを考慮しても、半導体アンプを使い RF 空洞に電力を供給することができる。

ビーム加速実験は、45 度偏向部下流の分散関数 (η) が 0.4 m の位置でビーム位置の変化をスクリーンモニターで測定することにより行う。加速勾配が 10 MV/m のとき、1 セルあたりの最大エネルギー利得は約 0.52 MeV である。ビームの平均エネルギーが 20 MeV の場合、ビームエネルギー変化量 ($\Delta E/E$) は 2.6%、スクリーンモニターで約 10 mm の位置の変化として測定される。

4.2 クライオモジュール冷却試験

ビーム加速実験に向け、単セル S バンド超伝導空洞用のクライオモジュールの開発を東北大学で進めている。冷却には GM 冷凍機を使用し、伝導冷却方式により空洞を 4 K まで冷却する。現在は、KEK で製作された 3 GHz ニオブ空洞を用いて伝導冷却試験を行っている。

Figure 2 に S バンド SRF 空洞の冷却試験用クライオモジュールの概略図と写真、Fig. 3 に冷凍機の第 2 ステ

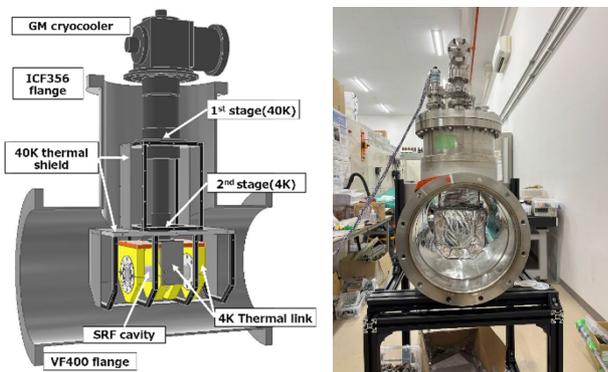


Figure 2: Test cryomodule of S-band superconducting cavity for conduction cooling.

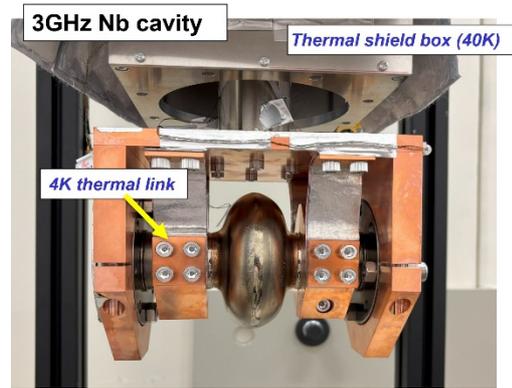


Figure 3: 3 GHz niobium cavity thermally linked to the 4 K second stage of a GM cryocooler.

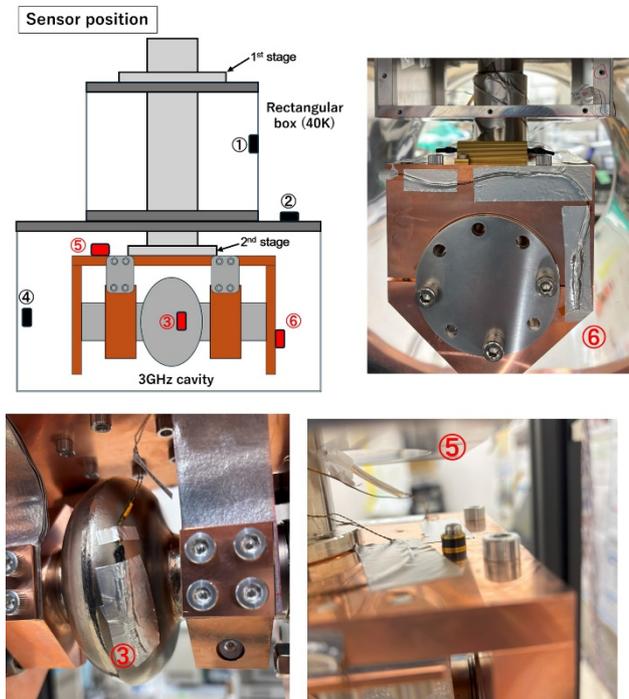


Figure 4: Cernox thermometers on the cavity and thermal link.

ジ (4 K) に取り付けられた 3 GHz ニオブ空洞の写真を示す。サーマルリンクは空洞部に直接接続せず、ビームダクトおよびフランジに接続した。また、空洞部および第 2 ステージへの熱侵入を防ぐため、第 1 ステージ (40 K) に接続されたアルミ製サーマルシールドボックスを空洞外側に設置し、さらに輻射による熱侵入を防ぐため 30 層のスーパーインシュレータで覆った (Fig. 2 右)。温度測定には 6 個のセルノックス温度計を使い、第 1 ステージと第 2 ステージにそれぞれ 3 個ずつ取り付けた (Fig. 4)。

冷却試験では、まずクライオモジュールをターボ分子ポンプで真空引きした。約 $2 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ に到達した時点で GM 冷凍機の運転を開始した。GM 冷凍機作動開始後のクライオモジュール内の温度変化を Fig. 5 に示す。約 7 時間で定常状態に達した。

各ステージの到達温度については、第 1 ステージでは冷却ヘッドから遠い位置ほど到達温度が高い傾向が見

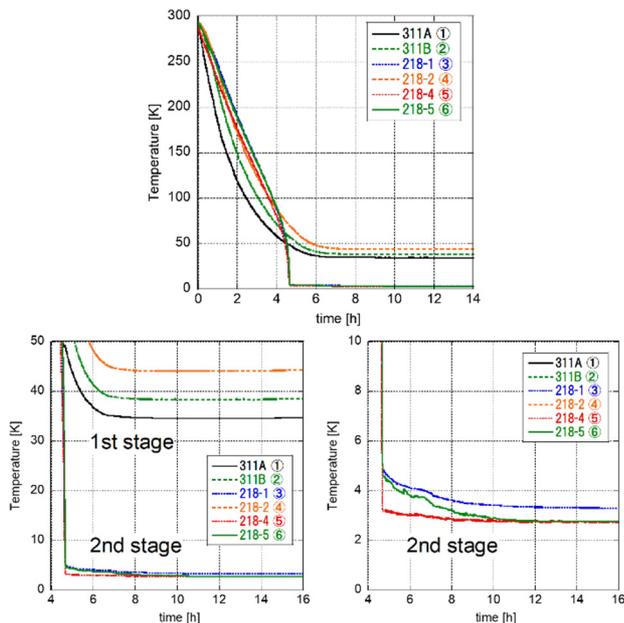


Figure 5: Temperature change at various positions inside the cryomodule measured with Cernox thermometers.

られた。第1ステージヘッドに最も近い40 Kのサーマルシールドボックスの位置では35 Kに到達したのに対して、空洞全体を取り囲む六角柱サーマルボックス下部では45 Kまでにしか冷却できなかった。一方、第2ステージでは全ての測定点で4 K以下に冷却できることを確認した。ただし、ニオブ空洞表面に取り付けた温度計③の到達温度は3.5 Kと、4 Kサーマルリンクに取り付けた温度計⑤、⑥よりわずかに高かった(Fig. 4)。

5. まとめと今後の予定

東北大学先端量子ビーム科学研究センター・三神峯の試験加速器(t-ACTS)において、2856 MHz超伝導RF空洞のビーム加速実験の検討を行った。 Q_0 値や加速勾配を仮定し、空洞での電力損失量などを見積り、現在、我々が所有するGM冷凍機で空洞冷却が可能であることを確認した。また、ビーム加速器に使用するRFアンプの仕様を検討し、空洞の結合度により必要なアンプ出力が変わるが、今回の見積りでは100 W以下のCW半導体アンプで十分実験が可能であることが分かった。

3 GHzのニオブ空洞を使った伝導冷却試験では、GM冷凍機を使いニオブ空洞を4 Kまで冷却できることを確認できた。次のステップとして空洞冷却中の共振周波数の変化を測定できるよう、RFアンテナ(カップラー)の準備を行う。また、今回は円筒形のクライオモジュールを使用した。今後、超伝導空洞の挿入が容易であることや作業性を考慮し、直方体型のクライオモジュールの検討も行う。そして、実際にクライオモジュールをビームラインへインストールするための詳細な手順や接続部コンポーネントの設計・製作を行っていく。

謝辞

本研究はJSPS科研費・基盤研究(A)23H00101の助成を受けて実施しています。

参考文献

- [1] C. Kratochwil *et al.*, “ ^{225}Ac -PSMA-617 for PSMA-Targeted α -Radiation Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer”, *J. Nucl. Med.*, vol. 57(12), pp.1941-1944, 2016. doi:10.2967/jnumed.116.178673
- [2] TENDL-2017 Nuclear data library, https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/gamma_html/Ra/GammaRa226xs.html
- [3] M. Narita and Y. Ozawa, *Bulletin of Fac. Eng. Hokkaido Univ.*, vol. 66, pp. 63-73, 1973.
- [4] S. Posen *et al.*, “Advances in Nb_3Sn superconducting radiofrequency cavities towards first practical accelerator applications”, *Supercond. Sci. Technol.* 34, 025007, 2021. doi:10.1088/1361-6668/abc7f7
- [5] S. Kashiwagi *et al.*, “Development of high-power 4K Nb_3Sn superconducting RF electron linac for medical radioisotope production”, 32nd Linear Accelerator Conference (LINAC2024), Chicago, USA, pp. 797-800.
- [6] H. Ito *et al.*, “Development of Nb_3Sn coating system and RF measurement results at KEK”, 21th Int. Conf. RF Supercond. (SRF2023), Grand Rapids, MI, USA, pp. 414-418.
- [7] Ming Lu *et al.*, “Development and Performance of the First Nb_3Sn Thin-Film Cavity via Bronze Process”, *Chinese Physics Letters* 39 115201, 2022. doi:10.1088/0256-307X/39/11/115201
- [8] H. Ito *et al.*, “ Nb_3Sn Formation Using Electroplating Method for 4 K HIGH-Q Operable SRF Cavity”, *Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, FRO07, pp.193-196, September 2020.