

核医学用 RI 製造に用いる大強度4K ニオブスズ超伝導電子線形加速器の検討 INVESTIGATION OF HIGH-POWER 4 K Nb₃Sn SUPERCONDUCTING RF ELECTRON LINAC FOR PRODUCTION OF MEDICAL RADIOISOTOPES

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 Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

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

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

Abstract

Currently, various types of radioisotopes (RIs) are used in the field of nuclear medicine for diagnosis, such as PET and SPECT. In recent years, RIs are applied to therapy of cancer 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-intensity beam in accelerators. In the case of an electron accelerator, a photonuclear reaction is used in the RI production process. We have started research and development of a 4 K niobium-tin (Nb₃Sn) superconducting electron accelerator system for RI production, which can be operated with a compact conduction cooling system and does not require a large-scale cooling system. As a first step, we plan to develop a single-cell Nb₃Sn superconducting cavity and a cryomodule to cool it, and to demonstrate its performance by beam acceleration experiments. In this presentation, we report the basic design and R&D schedule of the 35 MeV superconducting linac for the RI production.

1. はじめに

現在、核医学において放射性同位元素 (Radioisotope: RI) は、PET や SPECT など核医学検査で幅広く利用されている。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」と新たな展開をみせている。中でも、アルファ線放射体 RI であるアクチニウム 225 (²²⁵Ac) を用いた核医学療法が、進行がんへの治療法として世界で注目されている[1]。しかし現在、²²⁵Ac はドイツ、米国、ロシアの研究機関で、トリウム 229 からの放射壊変により年間 100 GBq 以下しか製造することができない。1 人の患者の治療 (3 回投与) に約 20 MBq 必要であるため、現在の生産量では世界で本格的な治療を展開することは困難である。医療用 RI 製造の方法には、放射壊変の他に、原子炉を用いた方法や粒子加速器を用いた方法がある。特に、加速器を用いた RI 製造は、必要な時に必要な量を生産することが可能であるといった特長をもつ。陽子ビームを使った ²²⁶Ra(p, 2n)²²⁵Ac 反応による ²²⁵Ac 製造の場合には、陽子ビームはターゲット中での飛程が短く、ビーム量やターゲット量 (厚さ) を増やすことで製造量を増やすことができない。一方、電子ビームを使った光核反応 (γ, n) による ²²⁵Ac 製造では、制動放射 (γ 線) を発生させる電子ビームの電流量やターゲット量を増やすことで RI の製造量を増やすことができ、また不純物 (不必要な同位体) が少ないといった特長をもつ (Fig. 1)。

我々は、電子加速器による核医学用 RI の大量生産を実現するため、大電流ビーム加速が可能な 4 K ニオブスズ超伝導電子線形加速器の開発研究をスタートさせた。米国・日本における、これまでの超伝導 RF 空洞の開発

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、バルクのニオブ超伝導空洞を 2 K まで冷却したときと、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[2]。ニオブスズ超伝導空洞では、大規模な冷却システムを必要としないため、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、最初のステップとして、単一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を製作し、ビーム加速実験によりその性能を実証することを計画している。本発表では、RI 製造に用いる 35 MeV 超伝導リアックの基本設計やニオブスズ超伝導空洞を用いたビーム加速計画について報告する。

2. 電子加速器を用いた医療用 RI 製造

電子加速器を用いた RI 製造では、光核反応を利用する。電子ビームを白金 (Pt) やタンタル (Ta) などの重金属に入射し、制動放射線を発生させターゲットの原子核へと照射する。巨大共鳴付近の 10~20 MeV の光子を原子核が吸収すると、核子の結合エネルギー (~7 MeV) を超えるため中性子や陽子を放出する核子放出反応が起こる[3]。

電子ビームを使った光核反応による ²²⁵Ac 製造では、

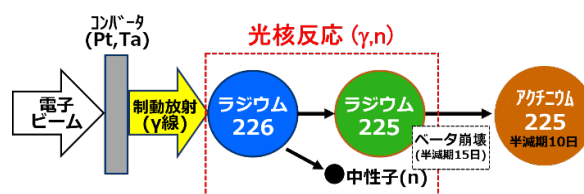


Figure 1: Actinium-225 production process.

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

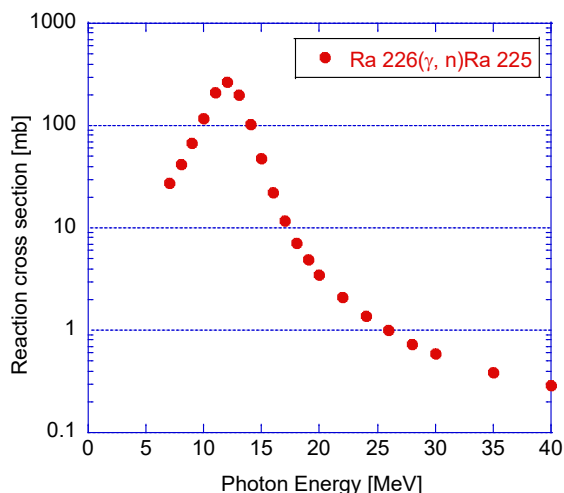


Figure 2: Cross section of photonuclear reaction $^{226}\text{Ra}(\gamma, n)^{225}\text{Ra}$ [4].

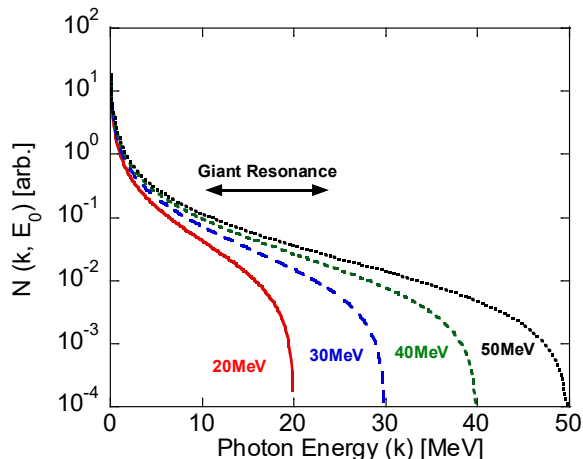


Figure 3: Bremsstrahlung spectrum with different electron beam energy [5].

ラジウム 226 (^{226}Ra) に制動放射線を照射し、光核反応によりラジウム 225 (^{225}Ra) を製造した後、そのベータ崩壊により ^{225}Ac が生成される。 ^{226}Ra の光核反応断面積を Fig. 2 [4] に示すが、効率良く RI 製造を行うためには 10~20 MeV 付近(巨大共鳴)の制動放射線を電子ビームにより大量に生成する必要がある。Figure 3 に異なるエネルギーの電子ビームによる制動放射線スペクトルを示す。電子ビームのエネルギーが高い方が、巨大共鳴付近の制動放射をより多く生成することができるが、高エネルギーの制動放射線により、主反応ではない不要な反応が生じるため、35~40 MeV の電子ビームが光核反応による RI 製造には適している。

電子加速器により約 100 kW の電子ビーム (35 MeV, 3 mA) を ^{226}Ra (4.33 g) に 20 時間照射した場合、1 回で約 230 GBq (約 1 万人分) の ^{225}Ac を製造することが可能であり、医療用 RI の多量生産・安定供給へと繋がる。

3. ニオブズ超伝導電子リニアック

3.1 超伝導電子リニアック

大電力の電子ビームを作り出すためには、平均電流の高いビームを必要なエネルギーまで加速する必要がある。常伝導の電子線形加速器(リニアック)では、ビーム加速に用いる高周波源や加速空洞での電力損失によりパルス運転となるため、ビームおよび加速管に供給される RF のデューティサイクルは 0.1% 程度に制限される。そのため、常伝導電子リニアックで加速できる平均ビーム電流は 1 mA 程度が限界であり、ビームパワーも 35 MeV, 1 mA で 35 kW 程度が最大出力と考えられる。

一方、超伝導電子リニアックの場合は、加速空洞の電力損失の指標である Q_0 値が約 10^{10} であるため、高周波損失による空洞の温度上昇がなく、連続して高周波を空洞に供給する連続波(CW)運転が可能であり、比較的容易に平均電流を 10 mA 以上まで増やすことができる。また、超伝導空洞に供給する高周波電力は数 10 kW で十分であるため、クライストロンなどの大型高周波源で生成する必要はなく、小型の半導体アンプで十分である。

3.2 ニオブズ超伝導空洞

現在、米国を中心に世界で広く使用されているニオブ(Nb)の超伝導空洞は、ヘリウムを減圧し 2 K まで冷却してビーム加速に使用される。そのため、ヘリウムを減圧するための大型冷却システムや高圧ガス保安法の許認可が必要となり、大学などの小規模加速器施設では 2 K 運転の Nb 超伝導空洞の導入は困難である。我々は東北大学電子光理学研究センターにおいて、超伝導電子リニアックを用いた医療用 RI 製造を実現するため、大規模冷却システムが必要ない、ニオブズ超伝導空洞の開発を KEK と NIMS と連携し実施している。米国を中心とするニオブズ超伝導空洞に関するこれまでの先行研究から、ニオブズ超伝導空洞を 4 K まで冷却した時に、ニオブ超伝導空洞を 2 K まで冷却した時と同じ Q 値(= 10^{10}) が得られることが分かっている[2]。4 K ならば GM 冷凍機などの小型冷凍機で到達でき、また大量のヘリウムも必要ないことから、超伝導空洞の冷却のハードルが一気に下がる。この大きな利点をもつニオブズ超伝導空洞の製作方法には、蒸発拡散法[2,6]やニオブにブロンズを直接メッキする方法[7]やニオブ表面に銅、スズ、銅を三層メッキするブロンズ法[8]などがある。本研究では KEK の蒸着設備を利用し、蒸発拡散法によりビーム実験で用いる S バンド(2856 MHz) ニオブズ超伝導空洞を製作する。

3.3 35 MeV ニオブズ超伝導電子リニアック

RI 製造に用いるビームパワーが 100 kW を超える電子加速器 ($E = 35 \text{ MeV}$) の概念設計を行った。本加速器の全体構成を Fig. 4 に示す。

電子銃は、堅牢性や信頼性を重視しグリッド付き熱陰極電子銃を採用する。電子銃のカソードーアノード間には直流(DC) 100 kV を印可し、高速パルサーでグリッドを駆動する方式をとる。電子バンチの繰返しは、主加速部の RF 周波数 1300 MHz の 64 分周にあたる 20.3 MHz とし、バンチ電荷量は 500 pC、ビーム平均電流は約 10 mA である。35 MeV まで加速した時のビーム

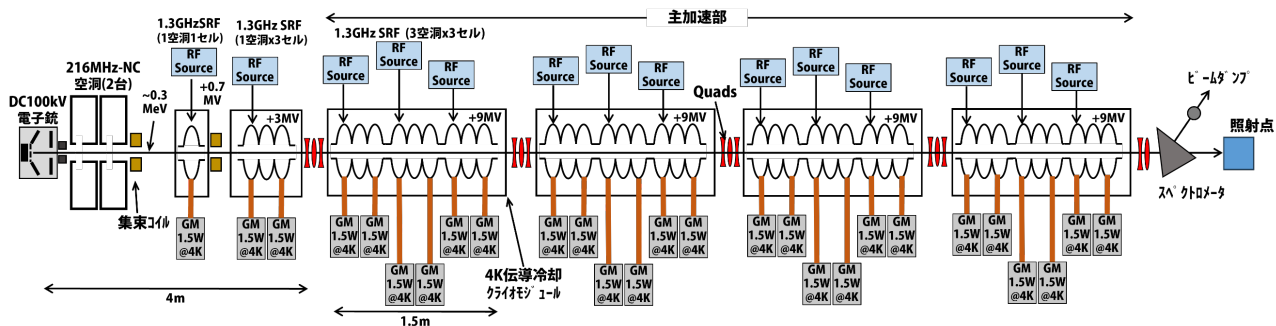


Figure 4: 35 MeV Superconducting RF linac for RI production.

パワーは 350 kW となる。また、電子銃から出力される初期バンチ長は 150~180 ps(rms)とする、この短バンチ・高繰り返しビーム生成用のグリッドパルサーが課題であり、現在、高速 RF スイッチとステップリカバリーダイオードを用いた回路や高繰り返しパルス生成が可能な FET を使用した回路を開発中である。電子銃に続く、バンチ圧縮系の構成は、現段階では構成を確定できていないが、常伝導高周波空洞(216 MHz)とローベータの単セル超伝導空洞を使用することを検討中である。

主加速部では、3 セル空洞を 3 台格納するクライオモジュールを使用する。クライオモジュールの設計において、超伝導加速空洞の加速勾配、熱負荷、空洞の入力 RF カプラーのピーク電力を指標に、RF とビームのパラメータを決定することが重要である。今回は、1 セルあたりの加速電圧を 1 MV としてシステム設計を行った。1.3 GHz 空洞 1 セルの加速長は RF の半波長に相当する 115 mm であるので、加速勾配 (E_{acc}) は 8.7 MV/m である。

次に、3 セル 1 空洞あたりの熱負荷 (dynamic loss) を以下の計算式より求める。

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

ここで、加速電圧 V_c は 3 セルで 3 MV、 R/Q は空洞長に比例するとして 9 セルの TESLA 空洞の値 (=1000) から $R/Q = 333$ 、 $Q_0 = 10^{10}$ とした時、3 セル空洞 1 台あたりの熱負荷は $P_c = (3 \times 10^6)^2 / (333 \cdot 10^{10}) \approx 2.7$ [W] となる。例えば、この 2.7 W の熱を住友重機械工業 (株) の RDE-418D4 (4.2 K, 1.8 W) を使い冷却する場合、1 空洞あたり 2 台の冷凍機が必要となる。3 空洞が格納される 1 つのクライオモジュールでは、全部で 6 台の GM 冷凍機を取付ける (Fig. 4)。冷凍機の 1 段ステージ (50 K, 42 W) は、50 K 熱シールドやカプラーの冷却に利用される。GM 冷凍機 1 台あたりの消費電力は約 7.5 kW であるため、1 台のクライオモジュールの冷却に必要な電力は $7.5 \text{ kW} \times 6 = 45 \text{ kW}$ 、主加速部の 4 台のクライオモジュールでは 180 kW となる。入射器部のローベータ単セル空洞と 3 セル 1 空洞の冷却に必要な電力は、約 22.5 kW であるため、加速器全体のニオブスズ超伝導空洞の冷却には、約 200 kW の電力が必要となる。

また、大電流の超伝導 RF 加速器を検討する際には RF 入力カプラーの入力電力、つまり空洞に供給する電

カレベルも重要なパラメータの 1 つである。1 セルあたりのビーム加速電圧が 1 MV ($E_{acc} = 8.7 \text{ MV/m}$) 程度であっても、例えばビーム電流が 100 mA の場合には、100 kW の入力電力に耐える入力カプラーが必要になる。検討中のシステムでは、3 セル 1 空洞で 10 mA のビームを 3 MV 加速するため、空洞への入力 RF パワーは約 30 kW であり、既存の入力カプラーで対応可能である。入力電力が 50 kW を超える場合には、パワーを分割して空洞に電力を供給する必要があるのでシステムが複雑になる。

ここで、加速器システム全体の消費電力を考える。先に述べた様に空洞冷却には約 200 kW が必要である。RF 源については、半導体アンプの電力効率が 30% とした場合、最終的なビームパワーが 350 kW であるので、RF 源の電力は 1170 kW となる。その他、電子源、真空計、電磁石系、冷却水系などで 100 kW 程度の電力を消費すると仮定すると、全体で約 1.5 MW の電力が必要となる。

3.4 ニオブスズ超伝導空洞ビーム加速試験

東北大学電子光理学研究センターの試験加速器 (t-ACTS) において、ニオブスズ超伝導空洞のビーム加速試験を計画している。t-ACTS の RF 周波数が S バンドであるので、共振周波数が 2856 MHz の単セル・ニオブス

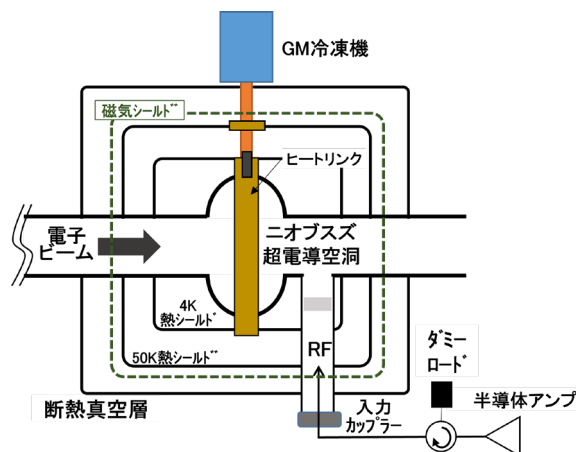


Figure 5: Cryomodule of Nb₃Sn superconducting RF cavities for beam experiment at t-ACTS, ELPH, Tohoku University.

ズ超伝導空洞を製作する。冷却には、住友重機械製の GM 冷凍機:RDK-408D2, 1.0 W@4 K を用いる。空洞の伝導冷却試験では、冷凍機の振動によるマイクロフォニックについて詳しく調査する予定である。また、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。加速勾配 (E_{acc}) は 10 MV/m、1 セル当たりの加速長 (半波長) 52 mm から、試験空洞 1 セルの加速電圧は $V_c = 0.52$ MV となる。ビーム試験では、約 20 MeV の電子ビームをニオブスズ超伝導空洞によって、約 0.5 MeV ($\Delta E/E: 2.5\%$) 追加速する。また、この時の空洞の dynamic loss を空洞パラメータ $Q_0 = 1 \times 10^{10}$ 、 $R/Q \sim 50$ から求めると、 $P_c = 0.55$ [W] となり、上記の GM 冷凍機で十分冷却することができる。Fig. 5 に現在検討中のクライオモジュールを示す。空洞と冷凍機の第 2 ステージ (4 K) の間のヒートリンクは、空洞の赤道部を固定する形をとる。RF カプラーについては、熱の流入や RF による加熱が空洞冷却の妨げにならない設計とし、セリジットの同軸ケーブルも候補として検討している。

まとめ

医療用 RI の大量生産を可能にする、超伝導大強度電子加速器 (35 MeV, 10 mA, 350 kW) の検討を開始した。常伝導電子リニアックでは平均電流: 1 mA 程度が限界であるため、ビーム出力は 50 kW 程度までに制限される。検討中のニオブスズ超伝導加速器は、電子源をグリッド付き熱陰極電子銃とし、加速空洞は大型冷却設備を必要としないニオブスズ超伝導 RF 空洞を伝導冷却により使用する。主加速部は、3 セル空洞を 3 台格納するクライオモジュール 4 台で構成され、ビームを 35 MeV まで加速する。また、令和 7 年度末までに S バンド (2856 MHz) のニオブスズ超伝導空洞 (1 セル) を製作し、伝導冷却クライオモジュールに格納したのち、東北大学電子光理学研究センターの t-ACTS においてビーム加速実証実験を実施する。

謝辞

本研究におけるニオブスズ超伝導空洞に関する研究は、TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」の支援のもと、2020 年度より KEK, NIMS, 東北大学の 3 機関で研究連携を開始しました。現在、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] Kratochwil, C. *et al.*, J Nucl. Med., 2016, 57:1941-1944.
- [2] S. Posen and D. L. Hall, Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 033004.
- [3] D.J.S. Findlay, Nucl. Instr. and Meth. B, **50**, 1990, pp.314-320.
- [4] https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/gamma_html/Ra/GammaRa226xs.html
- [5] M. Narita and Y. Ozawa, Bull. Fac. Eng. Hokkaido Univ. 66, 1973, pp.63-73.
- [6] S Posen *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 34 (2021) 025007.
- [7] Ming Lu *et al.*, Chinese Physics Letters 39 (2022) 115201.
- [8] H. Ito *et al.*, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, FROO07, pp.193-196.