

ニオブスズ超伝導空洞を用いた材料照射用大強度電子ビーム加速器の設計開発

DEVELOPMENT OF HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM ACCELERATOR USING Nb₃Sn SUPERCONDUCTING RF ACCELERATOR FOR VARIOUS MATERIALS

阪井寛志^{#, A)}, 山本将博^{A)}, 本田洋介^{A)}, 梅森健成^{A)}, 山田智宏^{A)}, 清水洋孝^{A)}, 森川祐^{A)},
神谷幸秀^{A)}, 田中織雅^{A)}, 中村典雄^{A)}, 原田健太郎^{A)}, 東直^{A)}
Hiroshi Sakai^{#, A)}, Masahiro Yamamoto^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Tomohiro Yamada^{A)},
Hirotaka Shimizu^{A)}, Yu Morikawa^{A)}, Yukihide Kamiya^{A)}, Olga Tanaka^{A)},
Norio Nakamura^{A)}, Kentaro Harada^{A)}, Nao Higashi^{A)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Various irradiation beam experiments such as RI production, material irradiation for asphalt modification, nanocellulose production are conducted by using CW beam accelerator based on the superconducting cavity in Compact ERL (cERL) from 2019. For these applications, higher-current beam irradiation is needed. However, a compact accelerator is desired for general-purpose irradiation beams. For this purpose, we designed a compact accelerator by using superconducting cavities. A 10 MeV, 50 mA high-current beam source was designed for practical wood irradiation from nanocellulose production experiments. Recently, Nb₃Sn cavities were developed instead of the Nb superconducting cavity used in the cERL accelerator at KEK. In this paper, we will present the design of this high-current compact accelerator based on Nb₃Sn superconducting cavities. We estimated how to compact and power saving by using a new Nb₃Sn cavity.

1. はじめに

電子ビーム照射による需要は、医療応用、滅菌等多岐にわたる。これらのさらなる応用展開で特に大強度ビームの利用の需要を満たすために、KEK では、超伝導空洞加速器を用いた様々な照射実験を行ってきた。具体的には 2019 年から cERL の超伝導空洞加速器で照射ビームラインを建設し、99Mo などの RI 製造、アスファルトの改質実験、また、木材に電子ビームを照射し、ナノセルロースの高効率生成実験を行ってきた[1]。CW でビームが照射可能な超伝導加速器はこれらの応用展開で大強度化にむけて非常に有用であることが分かったうえで、次の開発はこれらの加速器をいかに大強度で汎用な加速器として展開可能であるかということが次の課題であることが分かった。

現在、電子ビーム照射に用いられている汎用型照射用加速器としては、医療用の常伝導空洞を用いた線形加速器があり、さらには近年 RI 生成用としても開発が進められている[2]。線形加速器を用いることで、エネルギーを数 MeV から 40 MeV 程度まで幅広くエネルギーを可変に変更可能であることがメリットである一方、高加速勾配では空洞壁のロスが大きく、上記のように高繰り返しおよび CW 運転を必要とする大強度電子ビームの生成に対しては、照射型加速器としては、非常に難しい。一方、10 MeV 以下では滅菌用の加速器としてロードロン加速器が、用いられている[3]。このような加速器は 10 mA 以上でも運転可能であるが、エネルギーが固定であり、10 MeV 以上では大電流を実現できないのも現状である。

超伝導空洞を用いることで大電流ビームの加速は実現できる。特に cERL での実験で数 MeV~数 10 MeV

程度の様々なエネルギーの利用があるニーズにこたえるためにエネルギー可変でかつ大電流を満たすことができる超伝導空洞を用いた加速器は、非常に将来望まれるものであるが、汎用の照射ビームとしては、小型の加速器が望まれる。

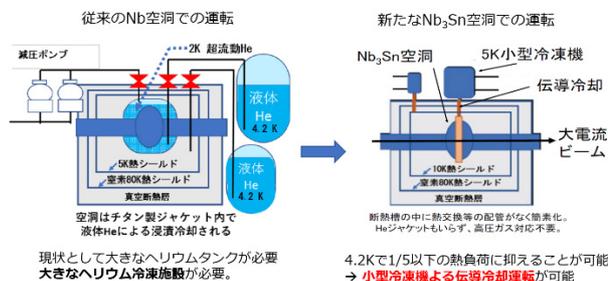


Figure 1: Comparison between Nb cavity cryomodule and Nb₃Sn cryomodule.

KEK では、今まで基礎研究用の大型加速器むけの開発を中心として、Nb(ニオブ)ベースの超伝導空洞開発を行ってきた。cERL でも Nb ベースの超伝導空洞(TESLA 空洞形状)を用いているが、この Nb 空洞では 2 K の減圧を行い、大型 He 冷凍機を用いる必要がある。一方、近年、Nb 加速空洞に変わる次世代加速空洞としてニオブスズ(Nb₃Sn)加速空洞が注目されている。Nb₃Sn は転移温度が 18.3 K と Nb の転移温度(9.2 K)と比べて高い。2010 年代半ばから後半に米国コーネル大での開発が進み、空洞の低損失が期待されている[4]。Nb₃Sn 空洞では 2 K への減圧を行わずに、4.2 K 運転が可能で、Nb に比べ、空洞での熱負荷を圧倒的に減らすことが可能である。近年では 15 MV/m~20 MV/m の性能を達成している。具体的には空洞冷凍負荷として 1/3~1/5 程度まで低減できることが期待される(図 1)。これにより、今までの大

[#]hiroshi.sakai.phys@kek.jp

型 He 冷凍機に代わり、簡易な小型冷凍機のみでビーム運転が可能となる。

本研究では、超伝導加速器のさらなる大強度化を見越した Nb₃Sn 伝導空洞を用いた小型汎用加速器の設計を行った。具体的には cERL で近年行った木材への電子ビーム照射に対して、ナノセルロースの製造の高効率生成実験結果を踏まえ、木材照射の実用化に向けた 10 MeV、50 mA の大電流ビーム源の設計を行った。加速器の全体設計を行い、電子銃、超伝導空洞、照射部の具体的な設計から、10 MeV、50 mA の大電流ビームが照射可能な設計を行った。特に KEK の cERL 加速器で使用した Nb 製超伝導空洞に対し、新たな Nb₃Sn 空洞を用いることで、小型化かつ省電力化がどれくらい可能かを見積もった。次節以降、全体の設計のもとに、電子銃、超伝導クライオモジュール、照射部の設計を紹介する。

2. Nb₃Sn 空洞を用いた加速器設計

2.1 全体設計

電子ビームは 10 MeV、50 mA を想定している。まずは全体の概要を図 2 に示す。加速を行う加速部(以後、超伝導クライオモジュール、もしくは、クライオモジュールと呼ぶ)については、既存の Nb 空洞を新たな Nb₃Sn 空洞を用い、全体の発熱を減らすと同時に伝導冷却により、He 冷凍施設のインフラを小さくし、小型で省電力の加速器設計を行った。クライオモジュール以外においては、既存の技術でできるレベルのものを並べる設計とした。

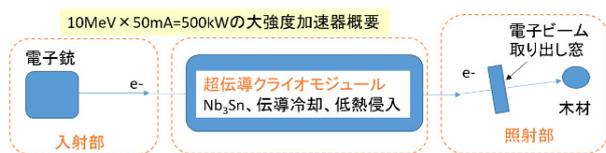


Figure 2: Conceptual design of 10 MeV, 50 mA accelerator based by using Nb₃Sn SRF cavities.

まず、ビーム輸送の計算を行うために、全体の入射部と超伝導クライオモジュールの設計を行った。電子銃は RF グリッド付きの 100 kV 熱 DC 電子銃で縦方向に固まったパルス(バンチ化した)電子ビームを繰り返し 650 MHz で発生する。その後、1 セルのバンチャー空洞でパルスビームをビーム方向に圧縮し、その後、1 セルの超伝導空洞 2 台、2セルの超伝導空洞を 5 台用いて 10 MeV まで加速することを想定した。なお、超伝導空洞部分の設計の根拠については、2.3 節で、詳しく述べるが、すべての空洞の RF 周波数は 1.3 GHz である。電子銃と超伝導クライオモジュールの間にはビームのプロファイル(横方向のビーム分布)の収束を行うため、ソレノイドを一台設置することで計算を行った。電子銃は 2.2 節で詳細を述べるが、大電流を実現可能な熱電子銃で安定な 100 kV の加速電圧を選んでいる。但し、ここからバンチャーを通ったのちに超伝導空洞で加速する際にいきなり、2セル空洞では、電子銃から出た直後では加速しない。これはビームが非相対論領域のエネルギーとなっており、ビームの速度が光速に近い速度になっていないからである。初期ビームが 100 keV の場合、2セルの空

洞では空洞セルの不整合の影響で、まともに加速せずエネルギーの取りこぼしが起きる。空洞の不整合をなくすために、2セル空洞を 1 セルずつ独立にし、ビームを少し加速する。その後2セル空洞を並べているのが本加速器のレイアウトになる。

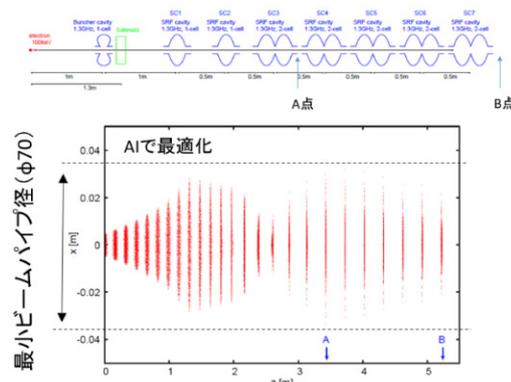


Figure 3: Simulation results of distribution of transverse beam profiles under beam acceleration in Nb₃Sn cavities designed above.

Table 1: Initial Parameters of Electron Beam

バンチ電荷	77 pC (650 MHz で 50 mA)
粒子数	1000000
電子源エネルギー	100 keV
電子源半径	5 mm (一様分布)
電子源発散角	5 mrad
初期電子バンチ長	15 mm (R.M.S) (gaussian, $\pm 3\sigma$)
最終エネルギー	10 MeV (kinetic energy)

この計算で電子銃の分布を入れて、図 3(上)に示すレイアウトでビーム輸送計算を行った[5]。計算には GPT を用いた。表 1 はビーム計算に用いた電子銃の初期分布と最終運動エネルギーの目標値である。1,000,000 個の粒子分布が表 1 に示す分布を持つときに、ビームの輸送上にあるソレノイドの磁場とバンチャーと超伝導空洞の加速電圧と位相を自由パラメータとして、ビーム輸送で粒子の損失がないような最適化計算を行った。図3(下)がその輸送中の横方向のビームプロファイルの計算結果である。ビームエネルギーが 10 MeV まで 2 セル 5 空洞でおよそ 1 空洞あたり 2 MV で加速する。加速勾配は 2.3 節で述べるように、Nb₃Sn で実現可能な 10 MV/m 以下となっている。AI でバンチャーと超伝導空洞の加速電圧と位相を最適化しているが、最初の空間電荷効果が大きくビームが発散するのをソレノイドで抑制している。計算結果は、ビームが 2 セルの 2 空洞目で一旦 focus する形で輸送することで、φ 70 のビームパイプに当たらずに輸送することが可能であった。なお、buncher についての計算

は次節でも追記するが、ここでの計算でもう一つ重要なことは buncher の位相の最適化および、1 セルの超伝導加速空洞 2 台での bunching の効果でロスが縦方向にももれていないことであることをここでは述べておく。

2.2 電子銃設計

電子銃は 10 mA 以上の大電流安定供給のため、熱電子銃を選択した。現状では熱陰極で発生した電子ビームをグリッドによってパルス化する手法が適しているといえる。1990 年代に 1 GHz の RF に同期させた高出力の熱電子銃の開発が行われ[6]、それを元に様々な用途・目的で高出力・高繰り返しの熱電子銃が海外でも進められている。グリッド付き熱電子源として例えば Y-845 は CPI 社より真空フランジに実装されたものが入手可能であり、JLAB, TRIUMF も Y-845 熱陰極を採用している[7, 8]。本計画の電子銃システムおよび入射部の基本設計は、それらの電子銃設計および compact-ERL 入射部設計[9]を参考に検討した。

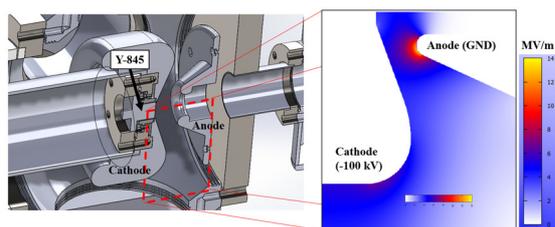


Figure 4: (left) Cross section of cathode of thermionic gun. (right) calculated electric field around cathode.

図 4(左)が電子銃の電極部の設計図である。ビームロスのない高周波加速を行うため、650 MHz の高繰り返し可能な熱陰極で発生した電子ビームをグリッドによってパルス化する手法を用いることとした。高圧部は大気中で安定に運用できるものとするため 100 kV 程度を想定。電極形状は cERL 電子銃の経験を生かし設計し、図 4 右にしめすように電極部で 10 MV/m を超えない設定とした。なお、材質は陰極、陽極の材質は、切削、機械研磨、化学研磨処理と精密洗浄を行った後の純チタンを用いることで、暗電流の発生などは抑えられると考えている。

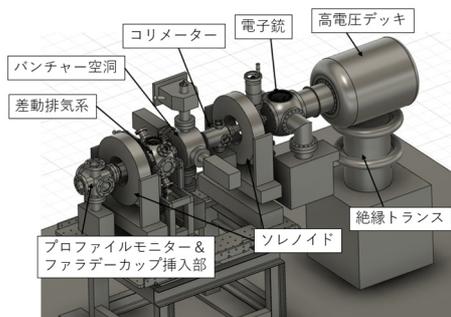


Figure 5: Conceptual design of injector part.

図 5 に入射部全体の設計図を示す。ソレノイドを電子ビームに速度変調を加え初段の超伝導加速空洞部でバンチ長を圧縮するためのバンチャー空洞 (1.3 GHz) および、ビームを収束するためのソレノイドコイルを設置。電

子銃と超伝導加速空洞の間の真空の圧力段差の形成およびビームサイズを制限し、超伝導加速空洞およびその下流においてビーム損失を抑えるためのコリメーターを設置した。また、ビームの形状を見るプロファイルモニター、ビーム電荷量を確認するためのファラデーカップをおいている。なお、この区間を超高真空に保つための排気系を適切に配置している。

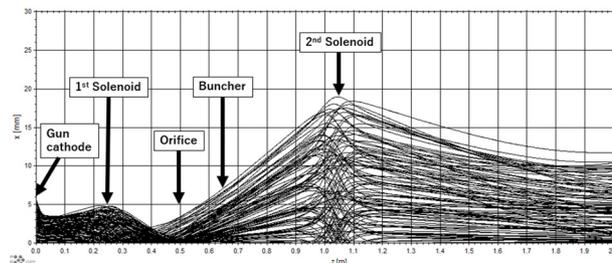


Figure 6: Simulation result of injector part.

図 6 は図 4 の電子銃の形状を入れてと図 5 の入射部を実際に配置した際のビーム輸送の横方向分布の計算結果である。バンチ長は上記 2.1 での計算の見積りでは約 63 ps であったが、文献[8]において実験的に得られているバンチ長は計算で得られているバンチ長よりも長いことから、入射部のみの計算ではさらに長いおよそ 100 ps と仮定し、計算を行った。

熱陰極の電子放出面は約 ϕ 10 mm、Mean transvers energy (MTE) は 0.5 eV の条件でビームを生成、電子銃出口でビーム径は最大部でおよそ ϕ 8 mm 程度となる。その後、最初のソレノイドでビームを収束し、コリメーター位置においてビーム径を ϕ 10 mm 以下に絞り、バンチャー空洞を経て広がるビームを 2 台目のソレノイドで再び絞る。2 台目のソレノイド部でビームサイズが最大の ϕ 40 mm 程度となるが、この場所でのビームパイプの内径 ϕ 60 mm に対して小さく、手前のコリメーターによりビームハロー部は十分除去された状態であることから、この場所でのビームロスは十分抑えられると推測できる。

バンチャー空洞で速度変調を受けたビームは最初の超伝導加速空洞位置 ($Z \sim 2.1$ m) において、バンチ長 (σt) は約 30 ps まで圧縮される。これは加速周波数 1.3 GHz に対して約 ± 14 度の位相幅に対応する。バンチ圧縮が RF 位相の非線形成分が 1.3 GHz で見られ、ロスの原因ともなりうる。これらのロスもコリメーターでハロー部分を削ることが可能であるが、今後、650 MHz の buncher 空洞を用いて改善を検討中である[10]。

2.3 Nb₃Sn 超伝導クライオモジュール

クライオモジュールの設計で重要となるのは、超伝導加速空洞の加速勾配及び熱負荷、そしてビーム加速に必要な入力カプラーへの最大パワーである。

1 空洞の加速電圧 (V_c) は、加速勾配 (E_{acc}) \times 空洞の長さ (L) で決定される。空洞 5 台で最大 10 MV を加速することを考えると 10 MV/5 台 = 2 MV の V_c が必要となる。我々の Nb₃Sn 空洞の実現レベルとしては現在の空洞性能の達成レベルを鑑み、10 MV/m 程度を具体的な加

速勾配とした。空洞1セルの共鳴長は 1.3 GHz の半波長である 115 mm である。1空洞は 2 セルとすることで、 $2 \text{ MV}/(0.115 \text{ m} \times 2 \text{ セル}) = 8.7 \text{ MV/m}$ となり、上記、 10 MV/m 弱の十分なマージンがあることがわかる。

空洞の性能を示す値では、加速勾配以外で、空洞壁の抵抗の逆数である Q 値 (Q_0) も重要なパラメータである。これが高ければ、高いほど、抵抗が小さく、熱負荷が小さくなり、空洞性能がよくなる。空洞の運転は CW 運転 (duty 100%) となる。上記の加速電圧と空洞の数から、空洞運転時の熱負荷 (dynamic loss) を計算した。空洞の 1 台あたりの熱負荷 (P_c) は計算式 $P_c = (V_c)^2 / (R/Q) / Q_0$ から導かれる。R/Q は shunt impedance と呼ばれる量であり、空洞形状で決定される。9 セルの TESLA 空洞の場合は、 $R/Q = 1000$ である。これを 2 セル換算すると長さに比例するため、 $R/Q(2\text{cell}) = 1000/9 \times 2 = 222$ となる。Nb₃Sn の特徴はこの Q_0 を 4 K で Nb の 2 K と同等の Q_0 が実現できることである。空洞一台あたりの熱負荷は $P_c = (2 \text{ MV})^2 / (222) / (1 \times 10^{10}) = 1.8 \text{ W}$ となり、空洞 5 台で $1.8 \text{ W} \times 5 = 9 \text{ W}$ の dynamic loss (4K) となる。2.1 節ではさらにこの 2 セル空洞以外に $\beta = 0.8$ の 1cell 空洞 2 台が追加される。こちらの発熱は初段の 2 つの空洞の電圧は設計では $0.4 \sim 0.5 \text{ MV}$ 程度であり、 2 MV の $1/4 \sim 1/5$ の加速電圧である。1セル空洞の発熱は 0.1 W 程度である。合計 10 W 程度の冷却が必要となる。

一方、ビームパワーは最大で $10 \text{ MeV} \times 50 \text{ mA} = 500 \text{ kW}$ となる。この加速に必要なビームパワーを、RF パワーで補うことになる。cERL 入射部超伝導加速空洞や、Cornell 大のカプラー開発では $35 \sim 60 \text{ kW}$ がある [11, 12]。これらの実績をもとに 2 つのカプラーを一つの空洞で運転とする。空洞 5 台運転にすることで $500 \text{ kW} \div 5 \text{ 空洞} \div 2 \text{ カプラー} = 50 \text{ kW/入力カプラー}$ を設計値とした。

これらの熱計算をもとに冷凍機や熱シールドなどを入れ、配置した、クライオモジュールの設計概念図と具体的な設計図を図 7 に示す。

Nb₃Sn 空洞では 4 K 運転では小型冷凍機を用いて冷却を実現できることが特徴である。各空洞の発熱が 2 W 程度であり、この空洞 1 つの冷却に対し、1 つの小型冷凍機を付けた形で設計を行う。具体的には、住友重機械工業 (株) 製 4K 冷凍機シリーズ (RDE-418ED4) を小型冷凍機として用いた場合を考える [13]。小型冷凍機は 2 段の冷却ポイントがついており、1 段目は数 10 K までしか下がらない。それに対し、先端の 2 段目は 4 K まで下がる。 4 K の冷凍能力が 2 W 程度あるのが特徴である。消費電力は常に $6 \sim 7 \text{ kW}$ となっている。メインの 2 段目を空洞冷却に用いる。これにより、非常に効率よく冷却が行われることになる。さらに入力カプラーからの入熱も問題である。1セル空洞に関しては、空洞本体の熱負荷がないかつ、入力カプラーのパワーも多くないため、入力カプラーの途中を熱シールドと同じく一段目の熱シールドと同じにすることで図 7(上)の水色に示すように、冷却を行うことが可能である。それに対し、2セル空洞では 2 つの入力カプラーから total 100 kW のパワーが空洞に入るためにそのカプラーの発熱による入熱を抑える必要がある。この入熱は 4 K で 10 W 程度となり、このカプラーのラインの入熱をとるために図 7(上)の緑のラインのように空洞の冷却と独立に 2 段目をカプラーの入熱を取るために

設け、伝導冷却ラインを設けることとする。この 1 段目は同じく熱シールドを冷やすために使用する。これによって、図 7(上)の紫の 2 W 冷凍機 5 個の 2 段目が空洞冷却のために十分使用可能となる。

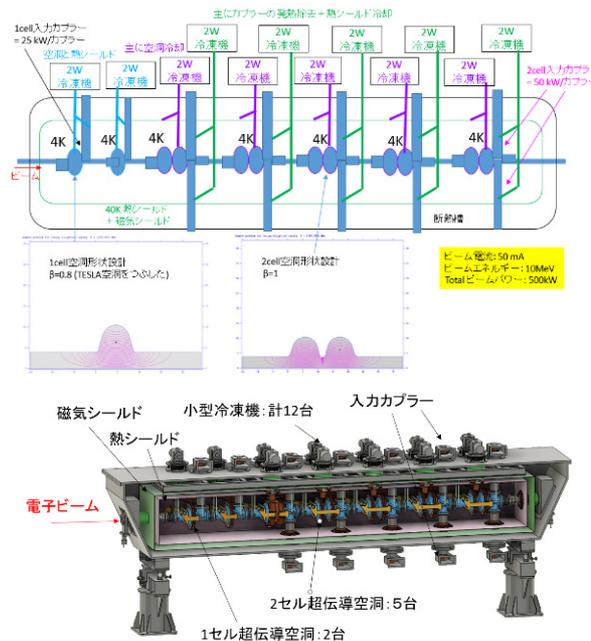


Figure 7: (upper) Schematic design of Nb₃Sn cryomodule. (Lower) conceptual design of Nb₃Sn cryomodule.

図 7(下)が実際の配置を考慮した具体的な設計図である。モジュールの天板に小型冷凍機を並べて設置する。2セル空洞と小型冷凍機の 2 段目 (4 K 部分) とは銅板もしくはアルミ板に空洞と接続し、伝導冷却を行う。また、同じく入力カプラーとも同様に伝導冷却を行う。図 7(下)のピンクが熱シールドとなり、熱シールドと 1 段目の小型冷凍機とは熱接触により接続される。また、磁気シールドはその外側におかれている。空洞や熱シールドなどはすべて断熱槽の天板から吊り下げられており、そこから全体が支えられている。空洞内と断熱槽は独立に真空ポンプによって真空排気される。特に空洞内部は高真空にひかれ、両端をゲートバルブによって開け閉めする構造となっている。

Nb₃Sn 空洞を用いた場合の冷凍機にかかる総電力について見積もる。小型冷凍機で Nb₃Sn を冷却する場合は、 10 W で 4 K に冷却できる。上記で示した小型冷凍機を 5 台用いた場合が 10 W 冷却となるため、AC 電力としては、 $6 \sim 7 \text{ kW} \times 5 = 30 \sim 35 \text{ kW}$ 、平均して 33 kW の電力で済むことになる。一方 Nb 空洞で同じ Q 値は 2 K で達成される。これを用いた場合、He 冷凍機での運用が必要である。世界中で汎用に使われている 4.2 K で 10 W (蒸発潜熱換算) を持つ Linde L70 [14] などの小型の冷凍機を用いて運転すると考えると、その場合、 $10 \text{ W} @ 4.2 \text{ K}$ で運転したときに必要な電力は参考文献 [14] より、AC 電力で $42 \text{ kW} \sim 72 \text{ kW}$ (50 Hz) (平均 57 kW) であり、さらにこれを減圧し、 2 K 運転するため、実際には $\text{COP}(4\text{K})/\text{COP}(2\text{K}) = 3 \sim 5$ 倍の違いがあることから、平均で 4 K 運転に対し、 2 K 運転は 4 倍の電力がかかるものとする。 2 K の Nb 空洞と 4 K の Nb₃Sn 空洞では同じ Q

値をもつことから、10 W@2 K では AC 電力換算で $57 \text{ kW} \times 4 = 228 \text{ kW}$ の AC 電力が空洞の熱負荷を吸収するために必要となる。Nb₃Sn 空洞により、33 kW/228 kW = 14%程度までの大きな冷凍機の省電力化が可能となる。

2.4 照射部設計

図 8 に照射ビームラインの概要を示す。クライオモジュールから 2 極電磁石までは約 1.5 m ある。この区間には 2 連 4 極電磁石がありビームサイズを調整する。2 極電磁石によりビームは鉛直下方に曲げられて取出窓に到達する。2 極電磁石はビーム走査電磁石も兼ねており、ビームは 1 軸方向に走査される。取出窓では線状のビーム形状を広げることで取出窓のビーム発熱密度を低減させている。ビームは 1 軸方向に拡がりながら輸送されるために、このビーム形状に対応したビームパイプ(スキャンホーン)が必要となる。ビーム取出窓は真空と大気環境の仕切りになっており、ビームは取出窓を貫通して大気環境中の照射試料に到達する。

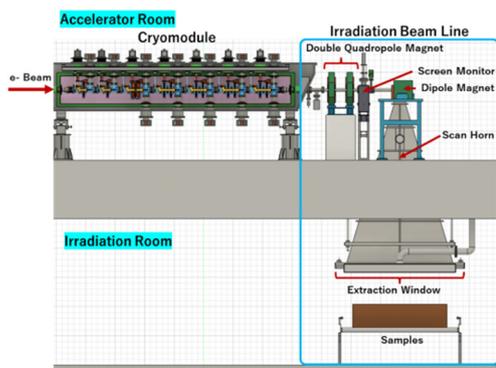


Figure 8: Conceptual design of irradiation parts.

取出窓はビームの直撃を受けるためビーム熱が生じる。窓材料がチタン合金かつビーム強度が $10 \text{ MeV} \times 50 \text{ mA}$ の場合、窓材料の厚み当たりの発熱量は $37 \text{ W}/\mu\text{m}$ となる。仮に厚み $30 \mu\text{m}$ のチタン合金を窓材料とすると、約 1.1 kW の発熱が生じることになる。このビーム熱を取り除く冷却機構が必要となる。また取出窓は真空と大気環境の仕切りでもあるため、窓に掛かる大気圧に耐える強度も必要である。そこで窓材料として軽量かつ高強度のチタン合金(Ti-6Al-4V)を想定した。チタン合金薄膜の厚みは $30 \mu\text{m}$ とし発熱量を下げる。また後段の熱解析よりビーム走査は 2 m 程度必要であることから、薄膜の長手方向の長さも 2 m とした。取出窓の冷却方法は空冷とした。窓側部の送風用ブローアから冷却空気が窓薄膜部に供給されることで冷却する。ブローアから供給される空気は体積流量 $15 \text{ m}^3/\text{min}$ 、静圧数 kPa とした。ブローアの断面積 $1 \text{ cm} \times 2 \text{ m}$ の吐出口がありここから冷却空気が供給される。これらの熱計算を行うことで、窓の温度上昇は $\Delta T = 285^\circ\text{C}$ に抑えることがわかった。

3. まとめ

上記の計算結果、および、入射部、Nb₃Sn クライオモジュール、照射部の設計を踏まえ、加速器全体の設計を行った。図 9 は今回の 10 MeV 、 50 mA の Nb₃Sn クライオモジュールを用いた照射型加速器の全体像である。これら全体の加速器の大きさは約 $8 \text{ m} \times$ 約 $1 \text{ m} \times$ 高さ 2 m

程度の大きさに抑えることが可能であった。

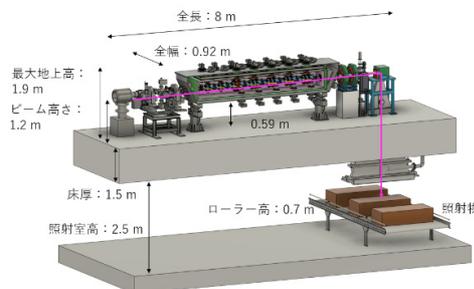


Figure 9: Conceptual design of 10 MeV 50 mA accelerator based on Nb₃Sn SRF cryomodule.

Nb₃Sn 空洞を用いることで、 10 MeV 、 50 mA をロスなく加速可能であるとともに、従来超伝導加速器に付随する He 冷凍機プラントなどがなくなり、非常にコンパクトな照射加速器を設計できた。さらに冷凍負荷は従来の Nb 空洞に比べ、数 10%程度まで削減が可能で設計であった。

謝辞

本研究に関し、cERL Collaboration の皆様に感謝いたします。本研究は「NEDO 先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/高効率ナノセルロース製造のための革新的量子ビーム技術開発」のサポートの元、行われました。

参考文献

- [1] 森川祐 他、「電子線加速器の産業応用に向けた cERL における照射実験」、presented at PASJ2022, Oct. 2022, TUP027.
- [2] 伊藤拓、「加速器による医療用 RI の商業生産」、加速器学会誌 Vol. 17, No. 3, 2020 (181-186).
- [3] M. Abs *et al.*, “The IBA rhodotron TT1000: a very high power E-beam accelerator”, Rad. Phys. and Chem., 71 (2004) 265-268.
- [4] R. D. Porter *et al.*, Proc. of LINAC2018, (2018).
- [5] 本田洋介 他、「超伝導線形加速器による大強度電子ビーム照射システムのビーム輸送シミュレーション」、本加速器学会 FRP017.
- [6] R.J. Bakker *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Research A 307, 543 (1991).
- [7] K. Fong *et al.*, “Design of an RF modulated thermionic electron source at TRIUMF”, Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC2018) THPMK095 (2018).
- [8] Stefani, Mark. “Commissioning & Characterization of Magnetized Gridded Thermionic Electron Source”, (2021). Doctor of Philosophy (PhD), Dissertation, Electrical & Computer Engineering, Old Dominion University.
- [9] M. Akemoto *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 877, 197-219 (2018).
- [10] O. Tanaka, private communication.
- [11] E. Kako *et al.*, “High Power Test of CW input couplers for cERL Injector Cryomodule”, Proc. of IPAC2012, (New Orleans, USA), p2230-2232 (2012).
- [12] R. Eichhorn *et al.*, “Input couplers for Cornell ERL”, Proc. of LINAC2014, (Geneva, Switzerland), p95-97 (2014).
- [13] <https://www.shicryogenics.com/product/rde-418d4-4k-cryocooler-series/>
- [14] https://www.koike-japan.com/jp/Product_Info/Lseries_L70_L140_L280