

# 実用 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製造用 35MeV/35kW 小型 S バンド電子ライナック $\gamma$ 線源の設計

## DESIGN OF COMPACT S-BAND ELECTRON BEAM LINAC AND GAMMA RAY SOURCE FOR PRACTICAL $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ PRODUCTION

尾関 政文<sup>#,A)</sup>, ジャン ジェウン<sup>A)</sup>, 上坂 充<sup>A)</sup>, 山本 昌志<sup>B)</sup>

Masafumi Ozeki<sup>#,A)</sup>, Jaewoong Jang<sup>A)</sup>, Mitsuru Uesaka<sup>A)</sup>, Masashi Yamamoto<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> University of Tokyo

<sup>B)</sup> Accuthera Inc.

### Abstract

In order to supply  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  stably, we have designed a 35 MeV/35 kW compact S-band linac for gamma-ray source. For the beam tracking simulation in cylindrical coordinates of  $(r, \theta, z)$ , three kinds of codes were used. SUPERFISH and POISSON was used for electromagnetic field calculation, and GPT (General Particle Tracer) derived the result of beam tracking. This design uses Cannon's E37307 klystron which has 5MW output but it was calculated with an assumption of 6.5 MW. The accelerating structure is a 2/3 mode traveling wave accelerating type. The system consists of two klystrons and two accelerating structures. As a result of simulation, the electron energy is 35 MeV, and the maximum output is about 50 kW. The output of 5.5 MW per one Klystron can achieve 35 kW / 35 MeV. The entire system was optimized including the  $^{100}\text{Mo}$  target design and yield calculation of  $^{99}\text{Mo}$ .

### 1. はじめに

近年、放射線診断、核医学診療、放射線治療など、放射線の医学応用の需要が高まっている。その中で、核医学診療の推定実施件数は、日本国内で約 70 万件に達する[1]。テクネチウム- $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) は、乳がん・前立腺がんなどの骨転移、心筋、またアルツハイマー病の診断のための脳血流など、様々な SPECT 検査に用いられるため、安定した供給が必要な核種である。しかし、2008 年に主要な輸入先である、カナダの原子力公社 (AECL) の原子炉の停止トラブル[2]など、海外の原子炉由来の RI 輸入は供給が不安定化する場合がある。そこで、原子炉に依存しない新しい  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  製造法の確立が求められており、加速器利用による製造が期待されている。

$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  の製造に有用な核反応は様々である。例えば  $^{100}\text{Mo}(p, pn)^{99}\text{Mo}$ 、 $^{100}\text{Mo}(d, p2n)^{99}\text{Mo}$ 、また  $^{100}\text{Mo}(p, 2n)^{99\text{m}}\text{Tc}$  などを利用する例がある。特に、サイクロトロンによる陽子ビームを用いて  $^{100}\text{Mo}(p, 2n)^{99\text{m}}\text{Tc}$  反応を起こし、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  を直接生成する手法には、多くの研究者が関わっている[3, 4]。また 2009 年には、サイクロトロンによる重水素ビームをカーボンターゲットに照射し、中性子源とすることで、 $^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$  反応から  $^{99}\text{Mo}$  を製造する手法が発表され、研究が続けられてきた[5, 6]。

一方で、今回用いる手法は、 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$  反応を利用して  $^{99}\text{Mo}$  を製造する。電子ビームをタングステンターゲットに照射し、得られる制動放射線を利用する。

電子ライナックを用いる利点として、第一に、人体に投与するために安全な  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  の生産が可能となる点が挙げられる。核反応を考えると、陽子サイクロトロンが有利に思える。しかし、陽子サイクロトロンによる  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  製造では、不要な核種の生成によって医療の現場では使用することができない。第二に、照射の際に発生する放射線の遮

蔽が比較的容易であることが挙げられる。また他にも、ターゲットを損傷させ、 $^{99}\text{Mo}$  の粉塵が飛散する危険性が低い点や、安価で小型化が可能となる点が挙げられる。これらの理由から、 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  製造の実用性に適う手法として、電子ライナックの設計を行った。

### 2. 加速器設計

ここで報告する電子ライナックの基本的動作は、次の通りである。まず、電子銃のカソードから放出された熱電子が、静電場によって加速される。その後、プリバンチャ、バンチャによってバンチングされ、マグネティックレンズによって収束される。各装置によって成型された電子ビームは、2 本の進行型加速管内で、高周波電磁場の波に乗り、35 MeV のエネルギーまで加速されて出力される。以下の節では、大出力を得るために重要となる加速管とクライストロンに焦点を当てる。

#### 2.1 加速管パラメータの計算

加速管は  $2\pi/3$  モードで使用するため、SUPERFISH を用いて、1.5セル分の計算領域を設定し、計算を行った。Figure 1 に加速管内の電磁場の計算例を示す。

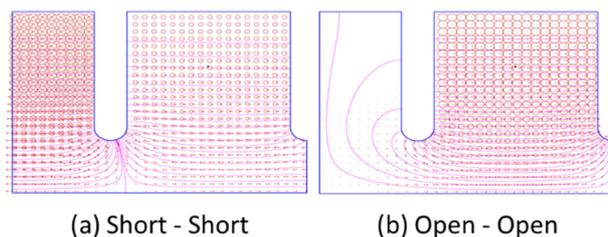


Figure 1: Example of Electromagnetic field calculation by SUPERFISH.

このときの境界条件は、両端が電氣的短絡面 (Short -

# ozeki.masafumi@nuclear.jp

Short)あるいは磁氣的短絡面(Open – Open)である[7]。また、Fig. 1 に示した 2 つの境界条件の SUPERFISH の結果を用いて、群速度を計算する。群速度が意味を持つ進行波は、Fig. 1 の (a)と(b)の重ね合わせである。重ね合わせる場合には、それぞれの蓄積エネルギー  $U$  を同一にする必要がある。両方の電磁場を重ね合わせにより得られた進行波の蓄積エネルギーは  $2U$  になる。

電磁場の蓄積エネルギー  $U$  と電磁場分布は、SUPERFISH にて計算できる。

Figure 1 で計算した 1.5 セルの加速管全長は、 $3D/2$  である。ここを群速度  $v_g$  の波が通過する時間  $\Delta T$  は、

$$\Delta T = \frac{3D}{2v_g} \quad (1)$$

となる。この時間は、これらの加速管の内部に電磁場がゼロの状態から、Fig. 1 の状態になるまでの時間と同じである。左端から流入する時間平均平均電力  $\langle P \rangle$  の RF が入り、 $\Delta T$  の時間を要して、蓄積エネルギー  $U$  となる。すなわち、

$$\langle P \rangle \Delta T = 2U \quad (2)$$

である。これらの式から、群速度  $v_g$  は

$$v_g = \frac{3\langle P \rangle D}{4U} \quad (3)$$

と求まる。ここで、時間平均の電力  $\langle P \rangle$  はポインティングベクトルから計算することができる。

$$\langle P \rangle = 2\pi \int \frac{\mathbf{E}_0 \times \mathbf{H}_s}{2} \mathbf{r} dr \quad (4)$$

加速管パラメータの計算結果を Fig. 2~5 と Table 1 に示す。

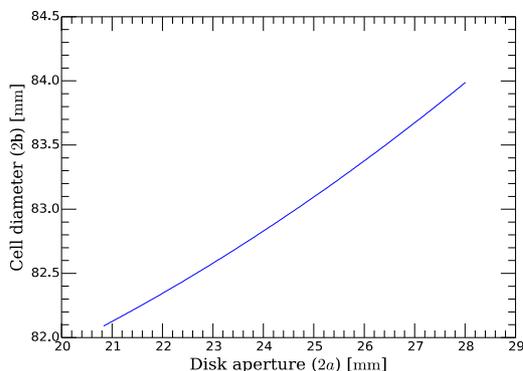


Figure 2: Acceleration cell diameter.

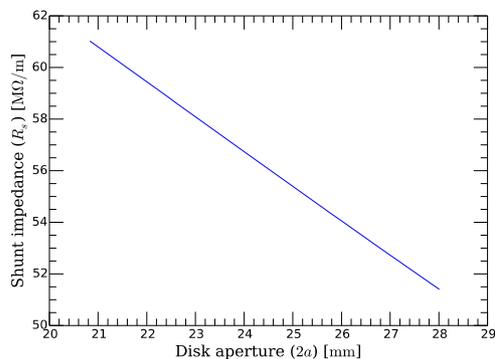


Figure 3: Shunt impedance.

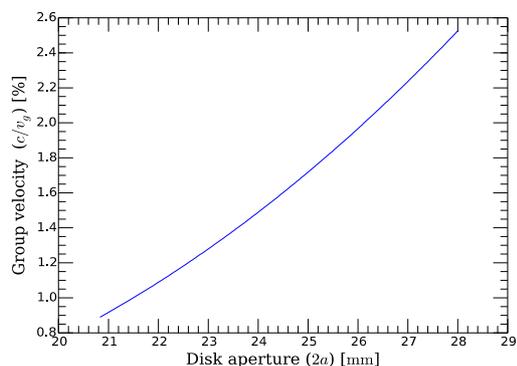


Figure 4: Group velocity.

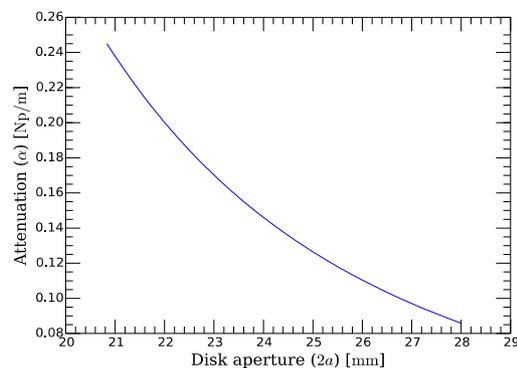


Figure 5: Attenuation constant.

Table 1: Acceleration Structure Parameter (Q=95%)

| 項目            | 記号       | 単位               | 値        |
|---------------|----------|------------------|----------|
| 加速モード周波数      | F        | [MHz]            | 2856     |
| 加速モード         | $\Phi$   | [rad/cell]       | $2\pi/3$ |
| 空洞数           | N        |                  | 79 + 2   |
| RF 部長さ        | L        | [mm]             | 2834.190 |
| 平均 Q 値        | $Q_0$    |                  | 13052.6  |
| 平均シャントインピーダンス | $R_s$    | [MΩ/m]           | 55.932   |
| 平均群速度         | $v_g/c$  | $\times 10^{-2}$ | 1.149    |
| 平均 $r/Q$      | $r/Q$    | [Ω]              | 112.453  |
| 平均減衰率         | $\alpha$ | [Np/m]           | 0.1997   |
| 減衰率           | T        | [Np]             | 0.5659   |
| ディスク孔径(入口)    | 2a       | [mm]             | 24       |
| ディスク孔径(出口)    | 2a       | [mm]             | 20.84    |
| フィリングタイム      | $T_f$    | [μs]             | 0.823    |

SUPERFISH の計算結果から得られるパラメータを Q 値 100%の理想的なデータとすると、実際には、表面が理想的でない、接合が完全ではない、などの理由から Q 値は 95%程となる。Table 1 には Q 値を 95%として補正後のパラメータを示した。

空洞数の 79+2 は、レギュラーセル 79 個と、加速管両端のカップラーセル 2 個から成るという意味である。

ディスク孔径が入口側(上流側)と出口側(下流側)で異なるのは、加速管がディスク 1 枚ごとに、孔径が 0.04 mm 小さくなる構造をしているためである。

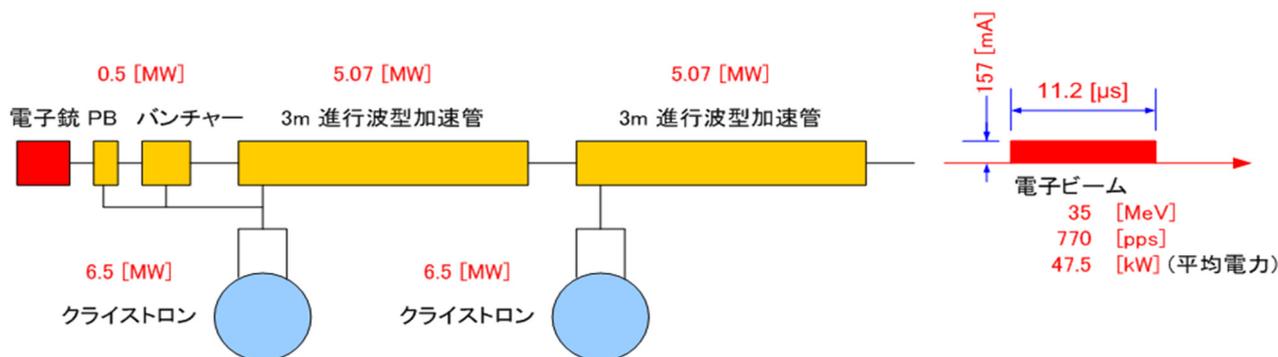


Figure 6: Maximum beam power 47.5kW linac.

## 2.2 ビームローディングカーブ

進行波型の加速管の加速電圧と粒子が得る加速エネルギーの関係は、以下の Eq. (5) によって評価できる [8].

$$V = \sqrt{R_s L P_0 (1 - e^{-2\tau})} - \frac{I_b R_s L}{2} \left[ 1 - \frac{2\tau e^{-2\tau}}{1 - e^{-2\tau}} \right] \quad (5)$$

ここで、 $P_0$ は加速管の入力 RF 電力、 $I_b$ はビーム電流である。その他のパラメータの記号は Table 1 に示したものである。計算結果を以下の Figure 7 に示す。

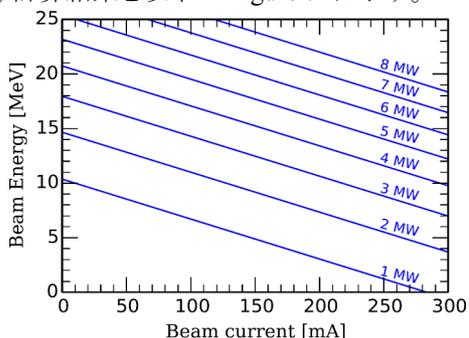


Figure 7: Beam loading curve.

## 2.3 クライストロン

クライストロンは、平均 RF 出力が最も大きい (60 kW) 「キャノン電子管 E37307」を使用する。35 MeV のビームエネルギーが必要な  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  製造用のライナックとしては、ピーク RF 電力が低いため、2 台用いることにした。Table 2 にクライストロンの主な性能を示す。

Table 2: Klystron (Cannon E37307)

| 項目         | 単位    | 値       |
|------------|-------|---------|
| 加速モード周波数   | [MHz] | 2856    |
| ピーク RF 電力  | [MW]  | 6.5     |
| 最大 RF パルス幅 | [μs]  | 12      |
| 最大繰り返し     | [pps] | 770     |
| デューティー比    |       | 0.00924 |
| 平均 RF 電力   | [kW]  | 60.03   |
| 動作電圧       | [kV]  | 150     |
| 動作電流       | [A]   | 105     |

## 2.4 設計結果

様々な体系で設計を試みたところ、 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  製造に対して要求されるライナックのビーム出力 (35 MeV、35 kW) を実現できるシステム構成は、クライストロン 2 台と加速管 2 本の構成であることが分かった [9]。システムの概要を、上部の Fig. 6 に示す。

Table 3: Linac Parameter

| 項目        | 単位    | 値     |
|-----------|-------|-------|
| エネルギー     | [pps] | 35    |
| パルス幅      | [μs]  | 11.18 |
| 電流 (パルス内) | [mA]  | 157.6 |
| 平均電力      | [kW]  | 47.5  |

クライストロン 1 台あたりの RF 電力が 6.5 MW の時、ビーム出力は最大で 47.5 kW となった。クライストロンの RF 電力の 39.6% がビーム電力に変換されている。

Table 3 に示した平均ビーム電力 47.5 kW は、目標の 35 kW をはるかに超えているので、十分に余裕を持った運転が可能である。

## 3. ビームトラッキング結果

前章で構成したクライストロン 2 台と加速管 2 本のシステムで、GPT (General Particle Tracer) による粒子加速シミュレーションを行った。シミュレーション条件を Table 4 に示す。

Table 4: Simulation Conditions

| 項目        | 単位    | 値        |
|-----------|-------|----------|
| マクロ粒子数    |       | 50,000   |
| カソードピーク電流 | [mA]  | 230      |
| 電子銃電圧     | [keV] | 100      |
| プリバンチャー   |       | シングルギャップ |
| バンチャー     |       | サイドカップル型 |
| 加速管       |       | 進行波型     |

ビームトラッキングを Fig. 8 に、加速された電子のエネルギースペクトルを Fig. 9 に示す。収束電磁石は、バンチャー加速管前後の磁気レンズのみである。実機では、進行波型加速管の間に Q 磁石も必要である。

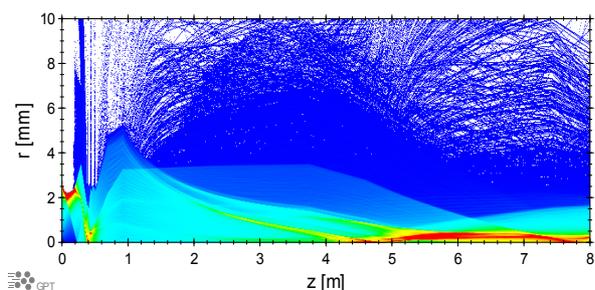


Figure 8: Beam tracking.

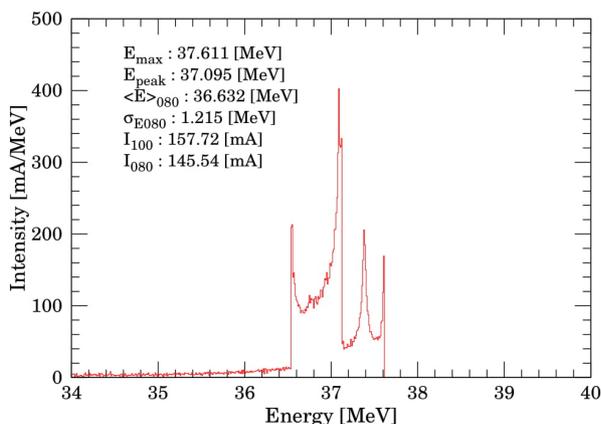


Figure 9: Energy spectrum of electron beam.

Figure 9 より Table 4 のシミュレーション条件によってビームエネルギーを 35 MeV 以上とすることができた。Figure 9 においてピークが 4 つ見られるのは、プリバンチャとバンチャにて電子ビームがバンチングされた影響によるものである。高周波電磁場によって電子ビームがバンチングされる際、前方の電子は減速、後方の電子は加速されて z 方向に電子ビームは圧縮される。二方向からの圧縮により、一回バンチングされると、2 つピークが生じる。今回の設計では、2 回のバンチングがあり、かつ磁石によって進行方向を変える部分も無いいため、4 つのピークが現れる結果となる。

ビームパルス幅は 11  $\mu$ s、平均エネルギーは 37 MeV、ビーム電流 145 mA が得られる。これらに、繰り返し 770 pps を乗じると、45.5 kW が得られる。これが、この電子ライナックが出力するビーム電力である。当初目指した 35 kW よりも、かなり大きな出力が得られることが分かった。

#### 4. 収量計算

放射線輸送コード PHITS を用いて、電子ビームをタンダステンターゲットに照射して $\gamma$ 線源とし、 $^{100}\text{Mo}$ がどれほど $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反応を起こすか計算した。得られる $^{99}\text{Mo}$ の放射能は以下のように計算できる。

$$B(t_{\text{irr}}) = [1 - \exp(-\lambda_b t_{\text{irr}})] \cdot v_{\text{tar}} I_b \int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \Phi_{\text{MC}}(E_\gamma) \Sigma(E_\gamma) dE_\gamma \quad (6)$$

PHITS では、放射線の種類や形状等、また空間領域と吸収物質、そして求める物理量の設定を行うことで、様々な放射線の挙動をシミュレートすることができる

(Table 5)。今回は、特定のエネルギーにおける光子フラックスのデータを取得し、 $\Phi_{\text{MC}}$ の値を算出するために用いた。

Table 5: Variables of Equation (6)

| 変数                  | 変数の説明                     |
|---------------------|---------------------------|
| $B(t_{\text{irr}})$ | 時間 $t_{\text{irr}}$ 後の放射能 |
| $\lambda_b$         | $^{99}\text{Mo}$ の崩壊定数    |
| $v_{\text{tar}}$    | $^{99}\text{Mo}$ ターゲットの体積 |
| $I_b$               | ビーム電流                     |
| $E_\gamma$          | $\gamma$ 線のエネルギー          |
| $\Phi_{\text{MC}}$  | $\gamma$ 線フラックス           |
| $\Sigma$            | $\gamma$ 線の巨視的断面積         |

ターゲットの構成の俯瞰図と、電子ビーム照射時のフルエンスをカラーバーで示したものを Fig. 10 に示す。また、電子、光子、中性子のエネルギーとフルエンスの関係を Fig. 11 に示す。

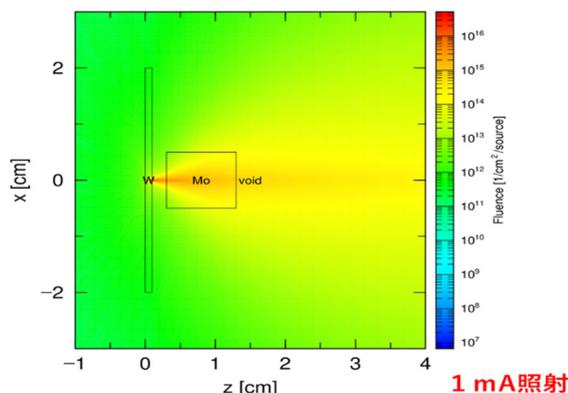


Figure 10: Top view of electron beam irradiation.

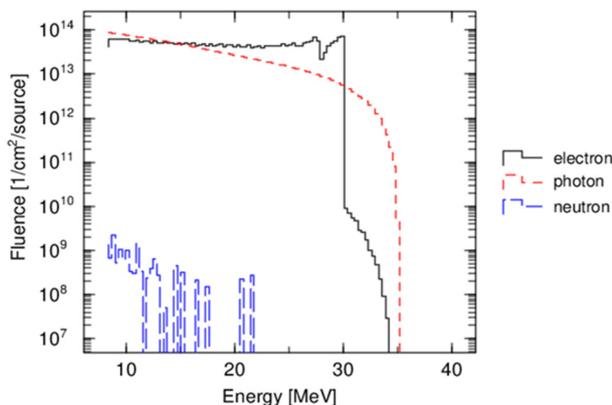


Figure 11: Energy - fluence curve of each particles.

35 MeV の電子ビームを $^{100}\text{Mo}$ に照射すると、光核反応である $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反応だけではなく、他の反応も起こる。 $^{99}\text{Mo}(n, \gamma)^{100}\text{Mo}$ 反応や $^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$ 反応がそれにあたる。しかし、これらの反応は反応断面積が小さい、あるいは中性子フルエンスが光子のフルエンスに対して十分に小さいなどの理由から、今回は支配的な光核反応のみを考慮して収量を計算した。理想的に 35 MeV/35 kW の条件下で照射が行われたと仮定すると、

ビーム電流は 1 mA となる。また、ビームの形状はガウシアンビームとした。タンダステンは厚さ 0.1 cm で半径 2 cm の円板、 $^{100}\text{Mo}$ ターゲットは長さ 1 cm の半径 0.5 cm の円柱として設定した。Figure 10、Figure 11 におけるフルエンスの値は、すでに 1 mA の電子ビームを想定して PHITS で計算された値であることに注意されたい。Equation (6)で必要となる核断面積の値は、TENDL-2017 を用いた。Equation (6)の積分値の計算を行う際は、核反応断面積の値を線形補間することによって、数値的に求めた。

器システムの検討. Technical Report EM-18034A (株)アキュセラ, 2018 (unpublished).

## 5. まとめ

ピーク出力 6.5 MW, 平均出力 60 kW のクライストロン二台と 3 m の進行波型加速管二本の電子ライナックシステムのビームトラッキング計算を行った。その結果、ビームエネルギー 37 MeV, 平均電力 45.5 kW が得られることが分かった。RF のトータル電力は 120 kW で、その 38% が電子ビームのエネルギーに変換される。もう少しピーク出力の高いクライストロンを使うと、この変換効率を上げることができる。電力コストの削減は必須であるから、もう少しピーク出力の高いクライストロンが望まれる。

Equation (6)にしたがって、 $^{99}\text{Mo}$ の放射能を計算したところ、24 時間のシステムの駆動によって、1.09 TBq の  $^{99}\text{Mo}$ が得られる計算となった。日本アイソトープ協会によると、2018 年度の in vivo 用  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の供給量は国内全体で約 293 TBqであった。一週間あたり、総計 72 時間分駆動できるとすると、1 年間で約 170 TBq 程度の供給が可能となるため、2 台のライナックで日本の  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の供給量を満たすことができると考えられる。

## 謝辞

今回の加速器学会の報告には、株式会社アキュセラの山本様に特にお世話になりました。また、上坂研究室内の先輩方や上坂先生にも多くの助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] (公社)日本アイソトープ協会医学・薬学部会 全国核医学診療実態調査専門委員会 “第 8 回全国核医学診療実態調査報告書” *RADIOISOTOPES*, 67,339-387(2018).
- [2] <https://www.innervision.co.jp/12SP/voice/interview/vol005>
- [3] A Celler *et al.*, “Theoretical modeling of yields for photon-induced reactions on natural and enriched molybdenum targets” *Phys. Med. Biol.* **56** 5459.
- [4] François Bénard *et al.*, “Implementation of Multi-Curie Production of  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  by Conventional Medical Cyclotrons”.
- [5] Yasuki Nagai *et al.*, “Generation of Radioisotopes with Accelerator Neutrons by Deuterons” *Journal of the Physical Society of Japan* **82** (2013).
- [6] Kazuaki Tsukada *et al.*, “ $^{99}\text{Mo}$  Yield Using Large Sample Mass of  $\text{MoO}_3$  for Sustainable Production of  $^{99}\text{Mo}$ ” *Journal of the Physical Society of Japan* **87** (2018).
- [7] 山本昌志, GPT(進行型加速管の計算方法); [http://www.yamamo10.jp/yamamoto/study/accelerator/GPT/TW\\_structure/index.php](http://www.yamamo10.jp/yamamoto/study/accelerator/GPT/TW_structure/index.php)
- [8] 山本昌志, 産総研の加速管の寸法と RF 特性. Technical Report EM-18025A (株)アキュセラ, 2018 (unpublished).
- [9] 山本昌志, 産総研の加速管の電子ビーム加速特性と加速