

新博士紹介

氏名 ジャン ジェウン
張 幸雄*
(金属技研株式会社)

論文提出大学 東京大学

学位種類 博士(工学)

取得年月日 2019年9月13日

題目 Parametric analyses in electron linac production of $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$

1. 博士論文の概要

本博士論文は、電子リニアックを用いた $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製造手法における加速器パラメータ・化学パラメータについて解析を行い、有効かつ現実的なパラメータ値をまとめたものである。尚、マウスを用いて体内分布試験を行い、電子リニアック由来 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の薬学的有効性を調べた。

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ は世界で最も多く利用される診療用放射性同位元素であり、 ^{99}Mo を介して供給されている。近年、 ^{99}Mo を製造する研究炉の老朽化に伴い、電子リニアックと光核反応 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ を用いて ^{99}Mo を製造する研究が行われている。電子リニアック手法を実現するためには、(1) 製造した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ が医療現場で使えること、そして(2) ^{99}Mo 製造収率が高く、一定以上の ^{99}Mo 需要を賄えることが求められる。本研究は、パラメータ解析を用いてこれらの課題に取り組み、電子リニアック手法の向上に貢献することを目的とした。

電子リニアックとそのターゲットシステムにおいて重要なパラメータを図1¹⁾に示す。ビームエネルギー・平均電流・サイズ、そしてコンバータ厚さは、 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反応を引き起こす制動放射線の発生量に大きく影響する。また、ビームサイズ、およびコンバータ・Moターゲット間距離は、制動放射線とMoターゲットの反応効率に影響を与える。したがって、 ^{99}Mo 製造収率は電子ビームパラメータとターゲットパラメータに同時に依存することとなり、多変量解析的なパラメー

タ解析が必要となる。

ビーム・ターゲットのパラメータ解析のためにはPHITS等のモンテカルロコードが有効であるが、複数のパラメータを振って調べるのは容易でない。そこで本研究では、パラメータスイープによるPHITSシミュレーションを可能にするプログラム「phitar」を作成し、パラメータ解析を行った。その他にも、 ^{100}Mo の濃縮度が $^{92,94-98,100}\text{Mo}$ の核反応率に与える影響を計算するプログラム「enrimo」、加速器由来 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能を照射中・照射後処理・輸送・病院の時系列に分けて計算するプログラム「actdyn」をそれぞれ作成し、パラメータ解析に利用した(図1)。上記三つのプログラムは全てオープンソースソフトウェアとして公開している[†]。

ビームのパラメータ解析の結果、 ^{99}Mo 製造のためのビームエネルギーは35 MeV程度が適していることが分かった²⁾。72時間照射の場合、文献[2]の条件ではエネルギーが20 MeVから35 MeVに上がると平均電流当たりの ^{99}Mo 製造収率が約

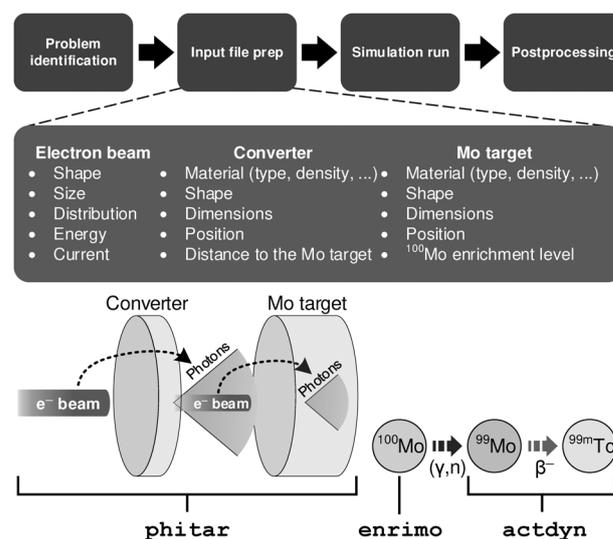


図1 主要パラメータおよび計算プログラム。

* 金属技研株式会社 Metal Technology Co. Ltd.

(Jaewoong Jang E-mail: jjang@kinzoku.co.jp)

[†] <https://github.com/jangcom>

2.8 倍向上するが、35 MeV を超えると ^{99}Mo 製造収率の向上率は段々小さくなる。そこで文献 [2] では、最大平均電流との兼ね合い・加速器のコストを考慮し、ビームエネルギーを 35 MeV に決定した。

ターゲットのパラメータ解析では、ターゲットシステムの基礎設計のための材料選定・寸法調整を行った。具体的には、熱特性を考慮してタングステンコンバータを、照射後処理を考慮して三酸化モリブデンターゲットを選定し、 ^{99}Mo 製造収率を向上できるコンバータ厚さを求めた。その後、東北大学電子光理学研究センター (ELPH) の S バンド電子リニアックを用いて照射実験を行い、解析結果が実験結果と合うことを確認した。

光核反応 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ のターゲット核種となる ^{100}Mo の天然存在比はおよそ 10% で、あとは $^{92,94-98}\text{Mo}$ が占めている。そのため、濃縮 ^{100}Mo を使用することで ^{99}Mo 製造収率を向上できる。その一方、 ^{100}Mo の同位体濃縮は $^{92,94-98}\text{Mo}$ の減少も意味するため、合わせて 7 種類の Mo 同位元素の核反応に影響が与えられる。 ^{100}Mo の濃縮度による各 Mo 同位体の核反応への影響を定量的に計算するため、density change coefficient (DCC) というパラメータを定義し、解析を行った³⁾。DCC は ^{100}Mo の同位体濃縮による ^{99}Mo 製造収率の変化を表すため、 ^{100}Mo の濃縮度を定める際に利用できる。

電子リニアックを用いた $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ 製造を実現するためには、低比放射能 ^{99}Mo から高放射能濃度の ^{99m}Tc を分離精製することが必要である。この問題に関しては ^{99}Mo の比放射能を上げる方法がよく研究されてきたが、本論文では ^{99m}Tc の放射能濃度に着目し、パラメータ解析を行った。その結果、 ^{99m}Tc 濃縮型ジェネレータを使うことで「低比放射能 ^{99}Mo 」課題を解決できることが分かった。その後、京都大学複合原子力科学研究所・(株)化研に協力いただき、L バンド電子リニアックで製造した ^{99}Mo から高放射能濃度の ^{99m}Tc を分離精製する実証実験を行った。

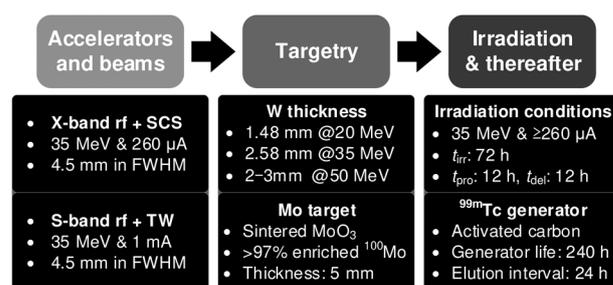


図2 本論文で決められたパラメータ値。

本論文で決められた主なパラメータ値を図2¹⁾にまとめる。これらのパラメータ値は絶対的な値ではなく、現実的な範囲で $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ 製造収率を向上できる値となっている。

最後に、電子リニアック手法の最終課題である「医療現場での有効性」を調べるため、マウスを用いて体内分布試験を行った。東北大学 ELPH の電子リニアックを用いて ^{99}Mo を製造し、(株)化研の活性炭装置を用いて ^{99m}Tc を分離精製した。この電子リニアック由来 ^{99m}Tc と市販の研究炉由来 ^{99m}Tc を過テクネチウム酸塩として Slc:ICR マウスに投与し、体内分布試験を行った。実験の結果、電子リニアック由来 ^{99m}Tc の薬学的有効性が確認できた。

2. 今後の抱負

博士号取得後、金属技研株式会社に入社し加速器関連事業に従事している。企業ならではの「ものづくり」に携わることができ、充実感を覚えている。今後、大学院での経験を活かし、加速器業界に役立つ製品を作っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) J. Jang: Parametric analyses in electron linac production of $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$. PhD thesis, University of Tokyo, Tokyo, Japan (2019).
- 2) J. Jang, M. Yamamoto and M. Uesaka: Phys. Rev. Accel. Beams **20**, 104701 (2017). doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.104701
- 3) J. Jang and M. Uesaka: J. Phys. Commun. **3**, 055015 (2019). doi: 10.1088/2399-6528/ab1d6b