

電子光物理学研究センターにおける電子加速器を用いた RI 製造照射システムの開発

DEVELOPMENT OF THE TARGET IRRADIATION SYSTEM FOR RADIOACTIVE ISOTOPE PRODUCTION USING AN ELECTRON LINAC AT RESEARCH CENTER FOR ELECTRON PHOTON SCIENCE (ELPH), TOHOKU UNIVERSITY.

高橋健^{#, A)}, 三浦禎雄^{A)}, 菊永英寿^{A)}

Ken Takahashi^{#, A)}, Sadao Miura^{A)}, Hidetoshi Kikunaga^{A)}

^{A)} Research Center For Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

Abstract

We have produced radioactive isotope (RI) via photonuclear reaction using a 60 MeV electron linac at ELPH. Although RI production has been practiced for long time at ELPH, the current version of our irradiation system has room to be improved and problems to be solved such as reinforcement of RI production rate and minimization of radiation exposure risk at system maintenance. Therefore, we have developed new irradiation system which solves the both above problems. This paper reports about this irradiation system such as structure design, cooling system design, and simulated irradiation performance.

1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターでは電子ビームを用いた光核反応による放射性同位体(RI)製造を行っている。80 kV 熱電子銃から 300 pps で引き出した電子ビームを、S バンドの 1 m 加速管 8 本で 50 MeV まで加速する。ビーム偏向部を経て大気中に取り出した平均 120 μ A の電子ビームを、制動放射線のコンバータである白金に入射して、生成した制動放射線を標的に照射して RI を製造する(Table 1)[1, 2]。

これまでの照射システムでは、コンバータ手前で容器や冷却水によりビームロスが発生して標的への制動放射線を正確に見積ることが難しかった。また、標的と同じ冷却容器にコンバータがあり、標的交換時に被曝する問題点があった(Fig. 1)。

Table 1: Irradiation Parameters

Beam energy	20, 30, 40, 50 MeV
Average current	90, 110, 120, 120 μ A
Injection beam size	$\sigma = 3$ mm

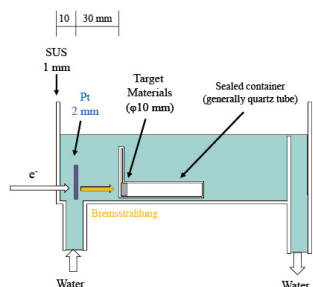


Figure 1: Layout of an old irradiation system.

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

今回、コンバータのタングステンをビームラインに直結して可能な限りビームロスを減少させて、コンバータでの制動放射線の生成量向上と標的照射の精度向上を図った照射システムを開発した。また、線量の高いコンバータと標的槽の冷却系を分離することで、これまでよりも被曝量の低減を図っている。

2. 照射システムの概要

開発した照射システムは、ビームラインにタングステンを固定して冷却するコンバータホルダーと、標的の搬入と冷却を兼ねたターゲットホルダーで構成する。ビームライン末端のチタン箔を通して電子ビームを真空から取り出した後、直ちにタングステンに入射する。ビーム軸上に並んだ 3 枚のタングステンで制動放射線を生成して、コンバータホルダーに当て止めたターゲットホルダー内の標的に照射する(Fig. 2)。

コンバータホルダーはビーム取り出し窓に直結とし、チ

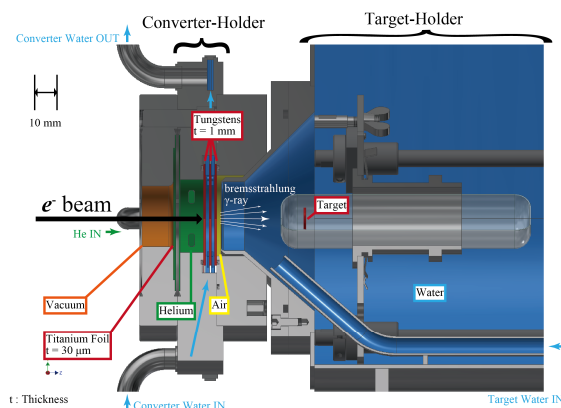


Figure 2: Cut model of new irradiation system assembly. A converter-holder is installed at the beam line end, and a target-holder which encloses a target would be inserted into irradiation position.

タン箱、コンバータ、標的それぞれに冷却システムを設けた。ビーム取り出し窓のチタン箱はタングステンまでの空間を流路とするヘリウムで、コンバータの発熱はタングステン板間の隙間を流路とする純水で、石英管に封入した標的は直下から流入する純水で冷却する。

3. コンバータホルダーの設計

コンバータホルダー内のため、タングステン板のみ配置し、冷却水流路を 3 枚のタングステン板で構成した。コンバータを利用しない電子線利用者向けにコンバータは簡単に取り外せる構造とした。

3.1 コンバータ部の構造設計

コンバータホルダーと押さえカバーで 3 枚のタングステン板を挟んでシールする構造とし、板間に挟んだスペーサーの切り込み入りからタングステン中心に冷却水を流す。金属リングの締付力は高く、3 つのシールリングを同時に締め付けるため、スペーサーを挟んだタングステン部、コンバータホルダー、押さえカバーについて応力解析を行い、スペーサーやタングステン板の歪みと、コンバータホルダーや押さえカバーの厚みと締付け具を検討した(Fig. 3)。

タングステンの円盤 3 枚の間に切り込み入りのシムを

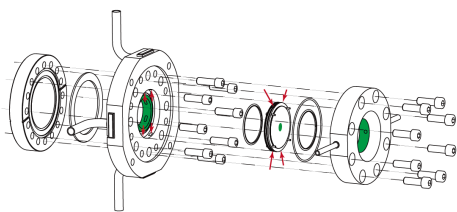


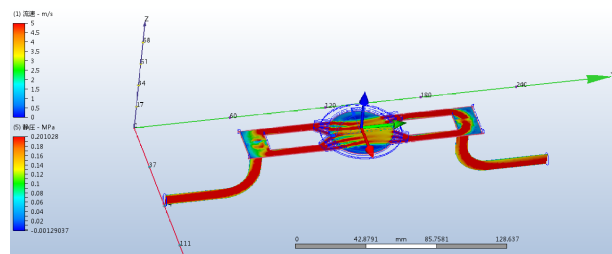
Figure 3: Assemble of a converter-holder. Stressed areas found by simulation are pointed by red arrow, and parts displaced by stress are highlighted by green.

2 枚挟んだタングステン部は、シール接触面に締付け力を与えて応力を計算した。最大応力はスペーサー櫛歯部に生じ、181 MPa と 0.2%耐力以下であった。タングステン板の変位は 2 μ m と小さい。ホルダーは内側と外側のシール接触面それぞれに締付け力を与えた。最大応力は 110 MPa と小さく、シール面は約 10 μ m の変位であった。押さえカバーは内側と外側のシール接触面それぞれに締付け力を与えて応力を計算し、応力の最大は 40 MPa と小さく、開口部の変位は約 11 μ m であった。

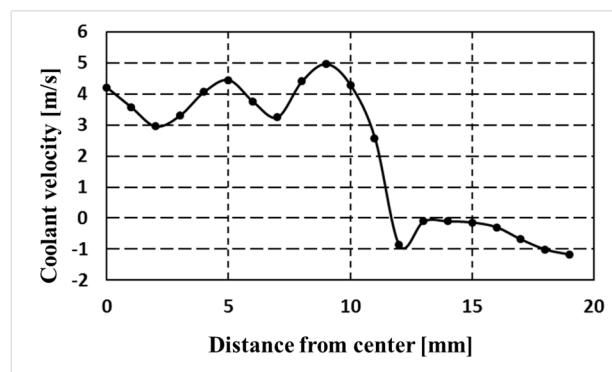
3.2 タングステン表面の冷却水流速

制動放射線の生成場所を一箇所に集約するためタングステン板間の隙間は 1.5 mm と狭い。そこで、Autodesk CFD の流体解析でコンバータホルダー冷却水流路の圧損を 0.2 MPa に設定して、タングステン板間に流れる冷却水の流速を見積もった(Fig. 4)。物質の厚みのみ考慮した単純な系の GEANT4 シミュレーションで得

られた厚さ 1 mm のタングステンの発熱量はおよそ 300 W で、3 枚の全体の発熱量は 900 W とした。冷却水の温度上昇は 15 L/min の流量で約 1 度と見積もっている。



(a)



(b)

Figure 4: (a) A velocity contour map of coolant inside the converter-holder. (b) A plot of coolant velocity along distance from center to outer radius of tungsten plate.

3.3 タングステンの温度上昇と疲労破壊

6 kW の電子ビームを入射したタングステン中の発熱密度は入射する電子ビームサイズに依存し、構造上コンバータホルダーの冷却性能が限られている。引張強度がおよそ 2000 MPa のタングステンは、およそ 1000 度で脆化が起きる[3, 4]。そこで、本照射システムで受け入れ可能な電子ビームサイズを決定するため、ビームサイズ $\sigma=1$ mm と $\sigma=2.5$ mm の入射条件について、Fig. 4(b)の流速分布を用いてタングステンの温度上昇と熱応力を確認した。解析を進めていく上で、表面温度が使用圧力 0.2 MPa での水の沸点 120 $^{\circ}$ C を超える範囲があり、この範囲については壁面に水蒸気の気泡が残る条件を仮定して熱伝達係数を 0 とし解析を進めた。タングステンの温度と応力の結果を Table 2 に示す。

入射ビームサイズ $\sigma=1$ mm でもタングステンの一次再結晶温度である 1000 度付近には到達せず、脆化は起きない。また、ビームパルス幅 3 μ s 間の断熱入力も、タングステンの温度上昇は 64 度、10 度 ($\sigma=1$ mm, $\sigma=2.5$

Table 2: Temperature and Thermal Stress of Converters

e^- Beam size	$\sigma = 1$ mm	$\sigma = 2.5$ mm
Temperature	642 $^{\circ}$ C	335 $^{\circ}$ C
Thermal Stress	559 MPa	272 MPa

mm)となり脆化は起きないことが分かった。しかし、 $\sigma=1$ mm のビーム入射条件の応力 559 MPa は高サイクル疲労強度の 1/4 を超え危険な領域にある。気泡による熱伝達係数の低下を解消せずには開発した照射システムで 50 MeV, 120 μ A, $\sigma=1$ mm のビーム入射は運用が難しいことが分かった。

3.4 ヘリウムの温度上昇

コンバータホルダーにはヘリウム冷却材の流路を設けてあり、直結したビーム取り出し窓を冷却する。窓材のチタン箔は厚さ 30 μ m と薄く、50 MeV の電子ビームが通過しても発熱量は数 W 程度である。ヘリウムの温度上昇は主に 1 枚目のタングステンの発熱によるもので、CFD の解析ではヘリウム 30 L/min を流した時の温度上昇は 3.8 $^{\circ}$ C と見積もっている。

4. ターゲットホルダーの構造

コンバータをビームラインに固定し、ターゲットホルダーと冷却系を切り分けたことで、標的照射の自由度が飛躍的に向上した。石英管に封入した標的の照射を前提として新規ターゲットホルダーを設計した(Fig. 5)。

受け入れ標的のサイズをこれまでの $\Phi 10$ mm から $\Phi 25$ mm に拡張して、電子ビーム 50 MeV の照射と比較して制動放射線の発散角が大きい 20 MeV の照射でも、RI 製造量の向上を図っている。標的外に飛んだ制動放射線の減衰距離を稼ぐために、標的の大きさに対して比較的大きな容器で標的周辺に空間を確保した。標的交換の際は、冷却流路の一部に圧空を送りターゲットホルダー内を排水する。

5. 照射システムの照射性能見積

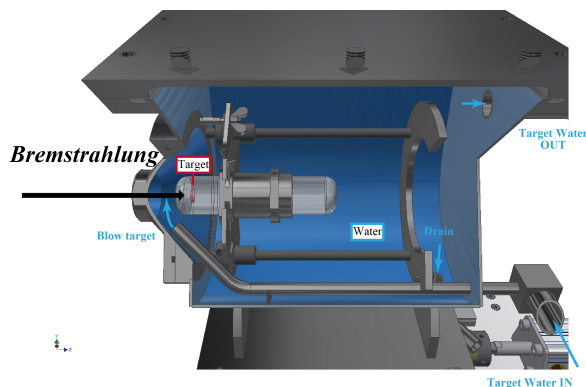


Figure 5: A cut model of a target-holder.

これまでに標的中に生成した RI の空間的な生成量分布測定と、照射条件を模した GEANT4 のシミュレーションを比較する取り組みを行っており、実際の空間的な RI 生成量分布をよく再現することを確認している[5, 6]。そこで、今回開発した照射装置についても GEANT4 を用いて制動放射線の生成量を確認した。シミュレーションに用いた各物質の配置を Fig. 6 に示す。 $\sigma=2.5$ mm でエミッタンスのない平行ビームを仮定した。

新旧の照射システムについて、シミュレーションで得られたコンバータに入射する電子ビームの平均エネルギーと、巨大共鳴領域(10 ~ 30 MeV)の制動放射線生成数と標的への入射光子数を Fig. 7 に示す。

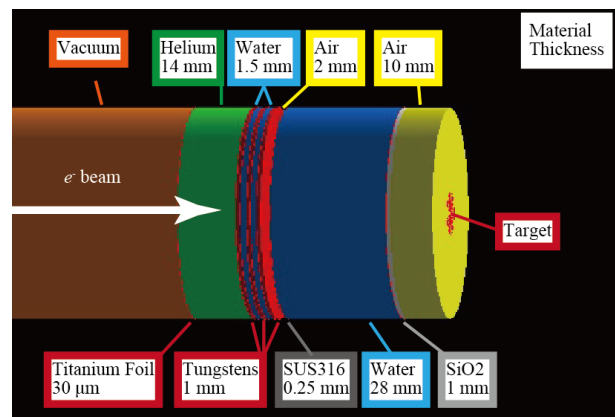
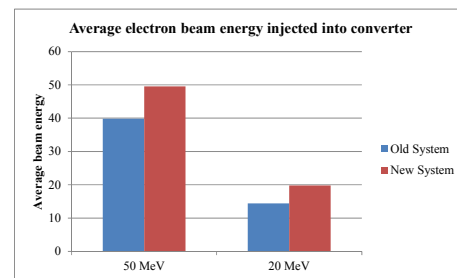


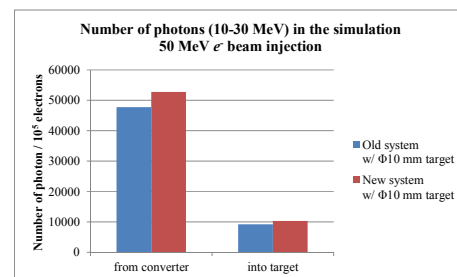
Figure 6: A Layout of GEANT4 simulation.

ビーム軸上の物質を極力減らした結果、ロスなく電子ビームをコンバータに入射し、コンバータの厚み増強と併せて、標的に入射する光子数が向上していることが分

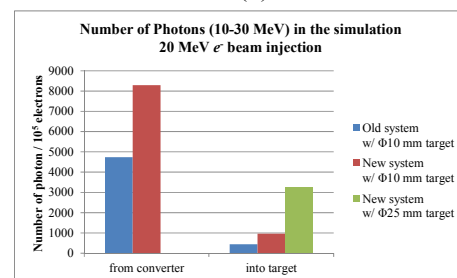
かる。図 7(a) は、50 MeV の電子ビームをコンバータに入射した場合の平均電子ビームエネルギーと、図 7(b) は、50 MeV の電子ビームをコンバータに入射した場合の 10-30 MeV の光子生成数、図 7(c) は、20 MeV の電子ビームをコンバータに入射した場合の 10-30 MeV の光子生成数を比較した結果を示している。



(a)



(b)



(c)

Figure 7: Comparison of old and new Irradiation system in GENAT4 simulation result (a) Average electron beam energy into converter (b) Number of produced photon in 50 MeV electron beam injection (c) Number of produced photon in 20 MeV electron beam injection.

かる。20 MeV の電子ビーム入射ではその差が顕著で、受け入れ標的サイズを外径 25 mm に拡張したことで併せて、大幅な入射光子数の増加を見込んでいる。

6. 耐圧リーク試験

コンバータホルダーを製作後、タングステン冷却流路の 30 分耐圧試験とチタン箔冷却流路のヘリウムリークテストを行った。パッキンは金属中空リングの他にフッ素系の O リングにも対応することから、それぞれを用いて試験した(Fig. 8)。

フッ素系 O リングでは両方の試験を満たしたが、金属シールでは両方の試験を満たすことができなかった。今回使用したタングステン板は表面処理をしておらず、表面粗さは 1.6 Ra 程度あった。金属シール接触面の指定粗さは 0.8 Ra である。さらに、先に挙げたシミュレーションの結果から押さえとなるコンバータホルダーとカバー、タングステン板それぞれに締め付けによる歪みが多少発生していると想定される。また、粉末から鍛造圧延で製造したタングステンの表面は多孔質な構造となっていることも考えられる。現在、複数ある問題点の切り分けができていない。今後、表面処理を施したタングステン板を使用して、締め付けによる歪みが問題であるか確認する必要がある。



Figure 8: A photo of pressure test and helium leak test.

7. まとめ

電子光物理学研究センターでは電子ビームを用いた光核反応による放射性同位体(RI)製造を行っており、コンバータをビームラインに直結して可能な限りビームロス減少させた照射システムの開発を行った。タングステン部、コンバータホルダー、押さえカバーについて強度設計を行い、各部の歪みを最大で 10 μm 程度に抑えた。また、タングステンとチタン箔の熱解析を行い、開発した照射システムを $\sigma=2.5$ mm の電子ビーム入射で運用できることを確認した。しかし、 $\sigma=1$ mm の電子ビーム入射は高サイクル熱疲労についての課題が明らかになった。

各物質の厚みと配置を模した GEANT4 シミュレーションの結果、コンバータ手前でのビームロスが低減して、標的に照射する制動放射線の生成量と精度が共に向上

することが分かった。特に 20 MeV の電子ビーム入射ではビームによる熱負荷が少ないため $\Phi 25$ mm の標的が利用可能であり、従来比で約 7 倍の生成量を見込んでいる。

コンバータホルダー実機の耐圧試験と He リーク試験を行い、現在の仕様では金属パッキンを利用できないことが分かり、フッ素系 O リングを用いた運用で定期的にパッキンを交換する必要がある。

今後ビームラインにインストールして、これまでの照射システムと同様に、空間的な RI 生成量分布測定を通して GEANT4 シミュレーションとの比較を行う。また、金属シールを導入するためのコンバータ部改良の検討を行う。

謝辞

本開発は、国立研究開発法人科学技術振興機構産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムの助成を受け推進している。

参考文献

- [1] Hidetoshi Kikunaga, “制動放射線照射で製造できる RI”, 東北大学電子光物理学研究センター研究会「大強度電子ビームとその応用利用」, Mar. 16-17, 2015.
- [2] Shigeru Kashiwagi, “大強度電子加速器と RI 製造”, 東北大学電子光物理学研究センター研究会「大強度電子ビームとその応用利用」, Mar. 16-17, 2015.
- [3] 材料/タングステン;
<https://www.plansee.com/jp/%e6%9d%90%e6%96%99/%e3%82%bf%e3%83%b3%e3%82%b0%e3%82%b9%e3%83%86%e3%83%b3.html>
- [4] タングステンの粉体粉末冶金用語事典;
<https://www.nittan.co.jp/products/tungstenfunmatu.html>
- [5] K. Takahashi *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, TUPOW011.
- [6] K. Takahashi *et al.*, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan. August 1-3, 2017, Sapporo, Japan. PASJ2017 TUP008.