

医療用 RI 製造に向けた e-/γコンバータの構造最適化

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF e-/γ CONVERTER FOR MEDICAL RI PRODUCTION

森川祐^{#, A)}, 阪井寛志^{A)}, 高野直樹^{B)}, 大家哲郎^{B)}

Yu Morikawa^{#, A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Takano Naoki^{B)}, Oya Tetsuro^{B)}

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

^{B)} Faculty of Science and Technology, Keio University

Abstract

In the production of medical RI using an electron beam accelerator, electron beam is converted into gamma rays, and the desired RI is produced through photonuclear reactions. A converter is often used for e-/γ conversion, and by installing a converter before the RI sample, unnecessary heat load on the RI sample can be avoided. On the other hand, since the converter is exposed to electron beam irradiation, the cooling capacity of the converter is directly linked to the acceptable electron beam intensity. After modeling the basic structure of a water-cooled converter, we attempted to improve the acceptable electron beam intensity of the converter by optimizing the irradiated part structure and the cooling water path structure. In structural optimization of irradiated part, topological optimization and additive manufacture method were employed. For the cooling water path structure, designs incorporating venturi structures and vortex generators were created. These optimizations are expected to improve acceptable electron beam current by approximately 70%.

1. はじめに

電子線加速器による医療用 RI 製造では電子線(e-線)をγ線に変換し、γ線の光核反応により目的の RI を製造する。e-/γの変換にはコンバータを利用することが多く、RI 製造試料の前段にコンバータを設置することで、RI 製造試料に不要なe-線による熱負荷を避けることができる。一方でコンバータは e-線の照射に曝されるために、コンバータの耐熱性能が受容可能な e-線強度に直結する。水冷式コンバータの基本構造を作成した上で、基本構造における被照射部位と冷却水導入構造の最適化を進めることでコンバータの受容可能 e-線強度の向上を図った。

1.1 加速器による医療用 RI 製造

放射性同位体元素(Radio Isotope: RI)は、その放出粒子の物理特性を活かし、「病巣部の特定(核医学検査)」や「病巣部の選択的治療(核医学治療)」に利用される。核医学検査の中でもγ壊変核種を用いた「SPECT(シングルフォトン断層撮影)」の利用が最も多い[1]。図 1 に示すように SPECT 用の核種の中でも Tc-99m の利用が最も多く、国内の核医薬品流通量の約 72%を占める。

1.2 コンバータ方式

Tc-99m/Mo-99 等の医療用 RI の商業規模生産に向けて、電子加速器による RI 製造に必要な装置である e-/γコンバータの基本設計案を作成した。図 2 に基本設計案のコンバータモジュールの概要を示す。コンバータと RI 製造試料は可能な限り近づける必要があるため、1つのモジュールとして組み合わせている。モジュールは上部のフランジにより照射容器に接続される。また、このフランジに吊り具を付けることで上方へ引き抜きできる。

図 3 にコンバータの構造を示す。コンバータの主材料

は銅合金プレートとし、冷却方法は冷却水直冷としている。電子線のエネルギーが 20 MeV の時は、コンバータとして厚み約 6 mm の銅合金プレートが必要である。また、熱負荷分散の観点から、厚み方向に複数枚に分割したプレートスタック構造とした。20 MeV の典型例では、最外面のケース部は厚み 1.5 mm であり、内蔵部の銅合金プレートスタック部は厚み 0.5 mm×7 枚となる。電子線のエネルギーを変える際には枚数や厚みの調整が必要になる。上部には冷却水配管が出ており、コンバータモジュールを照射容器接続後に冷却水系に接続される。必要な冷却水流量は 150 L/min 程度、水圧は最大 1 MPa を想定している。

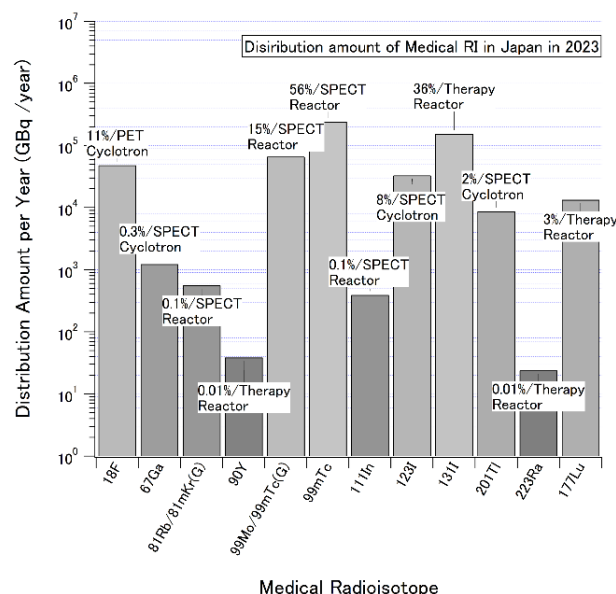


Figure 1: Distribution volume of medical RI. [1]

[#] yu.morikawa@kek.jp

1.3 構造最適化

被照射部位の最適化ではトポロジー最適化で得られる構造を経験的に想定し、当該構造の設計パラメータ最適化を進めた。冷却水導入構造においてはベンチュリ構造や渦発生器を導入し、水冷能力向上を目的とした構造最適化を進めた。

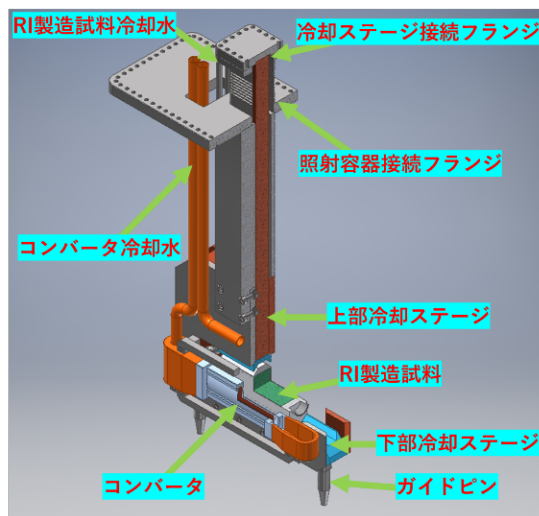


Figure 2: Converter module (3/4 sectional view).

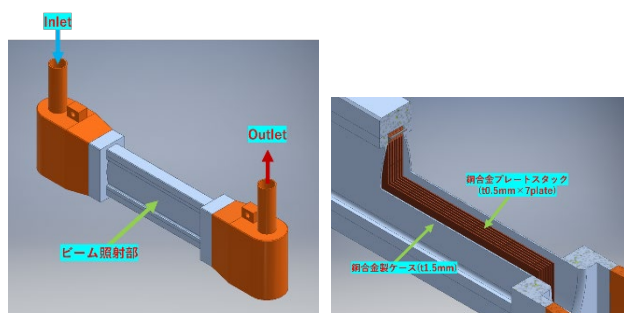


Figure 3: Converter body (left) overhead view, (right) 3/4 sectional view.

これら最適化の検討は株式会社アクセルレーターと慶應義塾大学、高エネルギー加速器研究機構との共同研究で行われた。本発表ではこれら構造最適化の概要とコンバータ性能向上の可能性について報告する。

2. コンバータ構造最適化と銅合金積層造形

2.1 コンバータ構造最適化

初期設計案では厚みのあるコンバータケース部の温度上昇が大きく、この表面部の剛性を損なわず薄肉化することが1つの課題であった。解決方法としてコンバータ内部プレートと表面部を結合させて剛性を維持しつつ表面部の薄肉化を図ることとした。また、内部プレートとの結合は表面部の熱輸送先が増えることになり、温度上昇を抑制する事に繋がる。表面部と内部プレートの結合構造はトポロジー最適化で得られる構造を半経験的に想定した上で、結合角度や厚み等を変数として最適化を進めた。図4(左)は最適化前後の構造と同じ熱負荷時を与えた際の温度分布を示している。表面部の温度低下が確認できる。図4(右)は構造最適化前後の構造に同

じ熱負荷投入時の温度変化を示している。最適化後は25.6%温度上昇を抑制できている。

2.2 銅合金積層造形による試作

最適化後コンバータ構造の製造方法として積層造形法を検討した。積層造形は内部構造の設計自由度が高く、また一体物製作が可能である等多くのメリットがある。一方で銅合金の積層造形は前例が少なく、母材強度や密度がどの程度あるか不明な点が多い。本共同研究では銅合金(CuCrZr)でのコンバータやダンベル試験片をレーザー粉末床熔融結合法[2, 3]により試作し、材料特性の評価を行った。図5は試作したコンバータ模型である。製作物の空隙率は0.0076%であり、内部空隙としては最大サイズ60 μmの物があると推定された。ダンベル試験片の引張試験では引張強度453 MPaが評価され、コンバータとしては十分な強度が得られた。その他、熱伝導率や比熱などの測定を行い、いずれも積層造形以外での製造された銅合金(CuCrZr)機械特性の報告例[4, 5]から外れたものはなく、コンバータ材として問題がないことが確認できている。

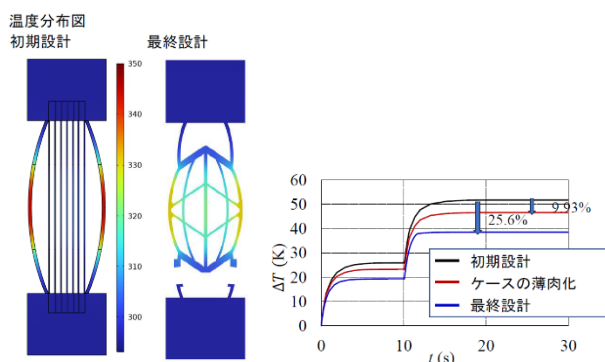


Figure 4: Temperature rise before and after converter structure optimization.

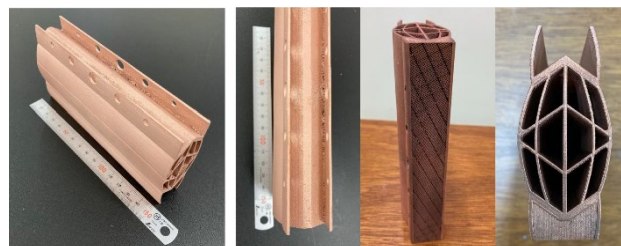


Figure 5: Converter model made by copper alloy additive manufacturing.

3. 水冷能率向上に向けたベンチュリ構造、渦発生器の導入検討

3.1 ベンチュリ構造の導入

コンバータ表面部は水圧/真空環境に耐えるために厚く設計する必要があり、また冷却水は片側しか接することができない為に最も温度上昇する部分になる。このケース部の温度上昇を抑えるためにベンチュリ構造の導入を検討した。ベンチュリ構造は流体の流れを絞ることで流速を増加させる構造である。ベンチュリ構造は流速増大に応じた水圧低下から流量を評価する為にも利用されて

いる。

図 6(下)は導入検討したベンチュリ構造案である。lxとlyはベンチュリ構造の寸法を示し、これを設計変数として最適化を行った。最適化後の温度分布を図 7 に示す。図 7(上)は初期設計での温度分布、図 7(下)はベンチュリ構造導入後の温度分布である。ベンチュリ構造により表面部への流速、流量が強化され、表面部の温度上昇

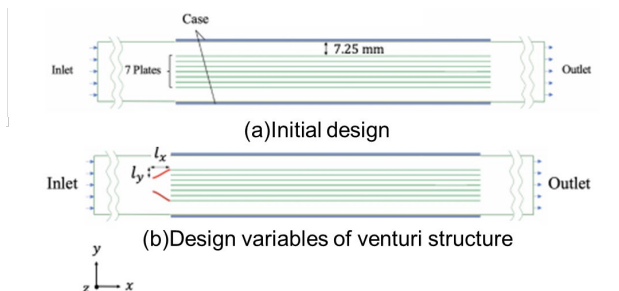


Figure 6: Venturi structure - (Top) Initial design, (Bottom) Venturi structure.

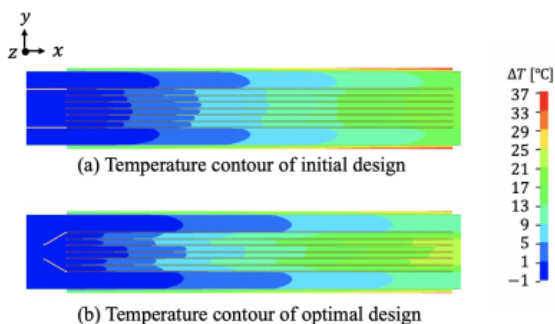


Figure 7: Temperature distribution when introducing the venturi structure - (top) initial design, (bottom) after introducing the venturi structure.



Figure 8: Fluid model tester at KEK.

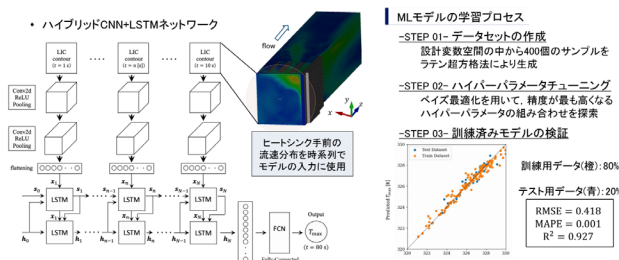


Figure 9: Machine learning-based surrogate model.

も抑えられていることが分かる。最適化の結果、温度上昇低減効果は 22%となった。

ベンチュリ構造最適化の高速化や設計変数を増やした場合の対応に向けて、物理シミュレーションを機械学習に代替するサロゲートモデルを構築し目的関数の計算時間を短縮した。開発における問題設定として KEK での流体模型試験器へのベンチュリ構造導入をテーマとした。図 8 に KEK 流体模型試験器の構造を示す。図 9 に本共同研究で試験したサロゲートモデル構築のワークフローを示す。KEK 流体模型試験器の発熱部手前での流速分布とその際の目的関数(最高温度、圧力損失)を学習データとしてサロゲートモデルを構築した。これによりマルチフィジクス解析で 1 条件当り 3~5 日掛かっていた計算が数 10 分程度で目的関数が得られるようになった。サロゲートモデルによる予測精度は高く、決定係数 R^2 は 0.927 となった。本サロゲートモデルを用いて 1 世代 50 個体、計 75 世代($50 \times 75 = 3750$ 条件)の最適化を行い、KEK 流体模型試験器におけるベンチュリ構造の最適解を検討した。

3.2 渦発生器の導入

流体中に乱流が生じると、流体中の熱攪拌の促進や、固体表面の流体境界層を乱流が破壊又はその形成を阻害するために熱輸送効率は向上する。この効果を期待して渦発生器を配置して意図的に乱流を生じさせることを検討した。コンバータ上流への渦発生器設置やコンバータ本体構造の変更を多数の構造で検証した。図 10 に渦発生器導入後のコンバータ温度分布を示す。検討では上流で生じた乱流の効果をコンバータ全域に有効化するためにはコンバータ本体構造を図 10 のように凹凸を付けることが有効であった。最も温度上昇を抑制できた構造案では初期設計に比べて 46%の低減効果があった。ただし、本検討ではコンバータ構造の変更を伴い、水圧/真空環境に耐える剛性を十分に備えているかの検討が残されている。

KEK での流体模型試験器に導入可能な形で渦発生器の導入検討も行った。この検討では渦発生器を発熱部の上流、下流、発熱部の 3ヶ所に設置して多数の構造案を検証した。図 11 は発熱部上流に渦発生器を設置した場合の温度上昇抑制効果を示している。図 12 は下流に設置した場合のものであり、上流下流どちらにおいても同等の温度上昇抑制効果を得られている。図 10 時点での検討では上流への渦発生器設置のみであったが、下流への設置で更なる性能向上の可能性がある。

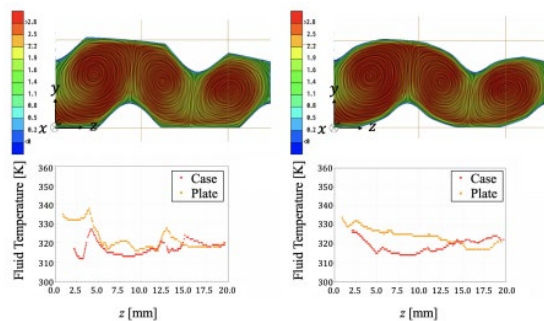


Figure 10: Converter temperature distribution after introducing vortex generator.

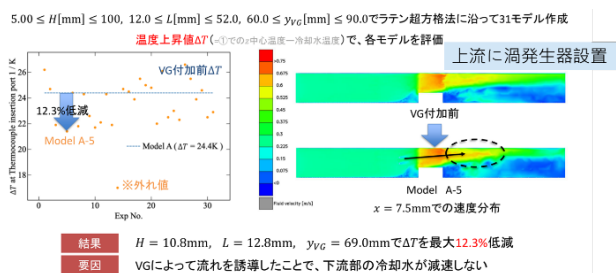


Figure 11: Temperature rise suppression when a vortex generator is installed upstream of the heated part.

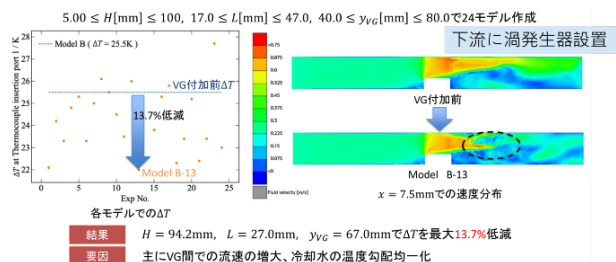


Figure 12: Temperature rise suppression when a vortex generator is installed downstream of the heated part.

4. コンバータ性能向上について

慶應義塾大学との共同研究を通して以下の冷却性能向上(温度上昇抑制)の変更案が提示された。コンバータ構造の検討ではないが、下記以外に、下流への渦発生器導入など更なる性能向上の可能性も示されている。

- 1) コンバータ(本体)構造の最適化: 26%
- 2) ベンチュリ構造の導入 : 22%
- 3) 渦発生器の導入 : 46%

変更案 1), 2)は同時採用可能な構造である。3)は単独で高い性能向上が期待できるが、構造変更の程度が大きく、水圧/真空に耐える構造的剛性が確保されているかの検証が必要である。変更案から期待されるコンバータ受容可能電子線量の向上率を下記の通り評価した。

- 本体構造最適化&ベンチュリ導入:73%上昇
- 渦発生器導入:85%上昇

図 13 に基本設計での Mo-99 製造能力とコンバータ構造最適化とベンチュリ構造導入による Mo-99 製造能力を示す。製造能力はモンテカルロコード FLUKA[6]により計算した。渦発生器導入については成立性に関する検討課題が残されている為、図 13 には示していない。基本設計では e-線電流は 10 mA としているが、構造最適化後は 17 mA での RI 製造が可能である。構造最適化後の製造能力は、1 日 18 時間の e-線照射を想定すると、20 MeV の電子加速器 1 台-0.3 TBq/day となる。1TBq/day が日本需要量[1]とすると 4 台の電子加速器で賄えることになる。30 MeV の電子加速器であれば 1 台で賄えることになる。

5. まとめ

電子加速器による医療用 RI 製造では e-線をγ線に変換するコンバータを用いることが多く、コンバータの耐

熱性能が e-線の照射電流量を制限する。本研究では水冷式コンバータの基本構造を想定し、コンバータ本体部や冷却水導入方法の構造最適化を進めた。本体部の構造最適化ではトポロジー最適化と積層造形を駆使した構造案を作成した。冷却水導入方法ではベンチュリ構造や渦発生器を導入した構造案を作成した。これら構造最適化により約 70%の受容可能電子線量の向上が期待される。また、エネルギー20 MeV×17 mA の電子加速器で4台、エネルギー30 MeV×17 mA の電子加速器で1台を運用すれば日本需要級の Mo-99(1TBq/day)が製造可能である見込みが示された。

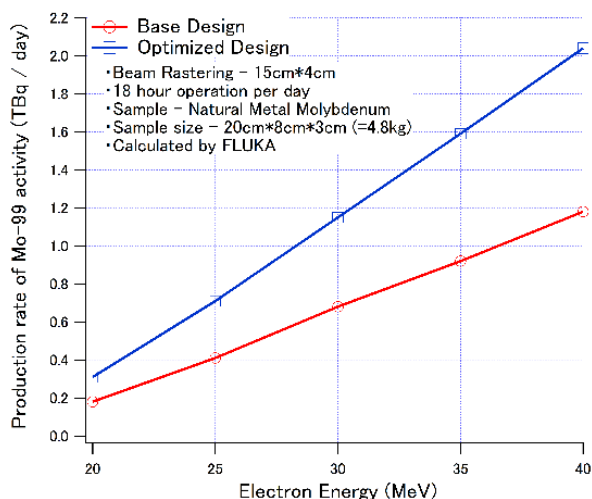


Figure 13: Production rate of Mo-99 by using the electron accelerator and converter target system.

謝辞

本共同研究は株式会社アクセルレーターの委託研究として行われた。研究の機会をいただき感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 公益社団法人日本アイントープ協会, アイントープ等流通統計 2023, <https://www.jrias.or.jp/report/cat1/toukei.html>
- [2] C. Salvan *et al.*, “CuCrZr alloy produced by laser powder bed fusion: Microstructure, nanoscale strengthening mechanisms, electrical and mechanical properties”, *Materials Science and Engineering: A*, volume 826, 5 October 2021.
- [3] X. Tang *et al.*, “A study on the mechanical and electrical properties of high-strength CuCrZr alloy fabricated using laser powder bed fusion”, *Journal of Alloys and Compounds*, volume 924, 30 November 2022.
- [4] D.J. Edwards *et al.*, “Development of the material property handbook and database of CuCrZr”, *Journal of Nuclear Materials*, volumes 367-370, Part B, 1 August 2007, pp 904-909.
- [5] K. Zhang *et al.*, “Development of the material property handbook and database of CuCrZr”, *Fusion Engineering and Design*, volume 144, July 2019, pp 148-153.
- [6] C. Ahdida *et al.*, “New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code”, *Frontiers in Physics* 9, 788253 (2022).