

## 大強度陽電子生成標的の開発

### DEVELOPMENT OF HIGH INTENSITY POSITRON PRODUCTION TARGET

森川祐<sup>#, A)</sup>, 榎本嘉範<sup>A)</sup>, 福田将史<sup>A)</sup>

Yu Morikawa<sup>#, A)</sup>, Yoshinori Enomoto<sup>A)</sup>, Masafumi Fukuda<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

Development of a high-intensity positron production target has been carried out for future electron-positron linear colliders such as the ILC. The target is designed to withstand a 74 kW, 3 GeV drive electron beam, corresponding to a deposited heat load of 18.8 kW. To survive under such heat load conditions, a rotating target has been developed. Main technical challenges are rotary seal mechanism and fabrication of a 500 mm-diameter rotating tungsten-copper alloy (W/Cu) disk. A rotary vacuum seal based on a narrow-gap structure combined with differential pumping was developed and enables stable rotation under ultra-high vacuum ( $\sim 10^{-6}$  Pa). In fabrication of rotating disk, the tungsten ring is shrink-fitted to a copper alloy disk to achieve high thermal conductivity without high-temperature joining process. Heat load tests up to 20 kW demonstrated good thermal contact performance, with a measured contact heat transfer coefficient of  $8.5 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup>K. This paper reports the design, fabrication, and performance tests of the prototype rotating target toward realization of a positron source for future accelerators.

#### 1. はじめに

国際リニアコライダー(Inter Linear Collider; ILC)等の将来加速器に向けた電子駆動陽電子源の開発を進めている[1]。具体的には Fig. 1 に示す陽電子源試作機を製作し、テストスタンドにて性能評価を行うことを目指している。電子駆動方式では電子ビームをタングステンなどの重金属に照射し、材料内で生じた電磁シャワーから陽電子を取り出す。通常、より大強度の電子ビームを照射するほどより多くの陽電子が得られる。本開発が想定している駆動電子ビームの強度は約 74 kW (3 GeV × 24.7 μA) であり、陽電子源の駆動電子ビームとしては過去最大強度である。なおこれまでの最高強度の陽電子標的は Stanford Linear Collider で運用された陽電子標的であり、駆動電子ビームは約 27 kW であった。74 kW の電子ビームを受けるには従来の固定標的では不可能であるため、熱負荷を分散させる為の回転機構を導入した回転標的を開発した。本開発の主な技術課題は“回転機構の真空シール”と“直径 φ500 mm-タングステン/銅合金製回転ディスク”の 2 つが挙げられる。真空シールは従来の磁性流体等のシールは使わず、狭小隙間と差動排気の組合せによる真空シール機構を実現した。回転ディスクではタングステンと銅合金の接続が課題であったが、冷やし嵌めによる接続を採用した。ここでは回転標的の設計、製造、運用試験の結果を報告する。

#### 2. 設計概要

回転標的への主要機械的設計要求は下記である。

- 回転ディスク部の真空度は約  $1 \times 10^{-6}$  Pa
- 回転ディスクの回転速度は約 225 rpm
- 回転軸を通した回転ディスクへの冷却水導入
- タングステン部は外径 500 mm × 厚み 15.7 mm

これら設計要求を満たすべく設計、製造した回転標的の 3D モデルを Fig. 2 に示す。主軸回転はチェーンを介したモーター駆動とし、遮蔽機構の導入やモーター交換が容易になるよう配慮した。回転主軸は外径 φ70 mm であり、φ35 mm 冷却水路を内蔵している。更にもう 1 本の管を主軸内部に通すことで冷却水の往路復路としている。回転ディスクの取り外しが可能となるように、回転主軸先に回転ディスクをボルト締結するよう設計した。

##### 2.1 回転機構の真空シール

真空中の回転体に冷却水を通す場合、真空外から回転軸に冷却水を通すことになる。この時、回転主軸に真空シールが必要となるが、先行事例では真空シールに磁性流体や O リングなど有機物を用いた真空シールが用いられている。ただし、これら真空シールは耐放射線や対応真空度の制限があり、可能であれば使用を避けたいところである。この代替策として、2 段の差動排気と狭小隙間の組合せで真空シールとなる構造を開発した。大気/真空のシールにはメカニカルシールを用い、2 段の差動排気部は片側隙間 100 μm × 長さ 95 mm と片側隙間 40 μm × 長さ 120 mm の狭小隙間で接続した。狭小隙間による真空コンダクタンスを抑制した領域を設けることで真空シール替わりの役割を持たせた。この狭小隙間により差動排気室間で 8 桁の差圧をつけることができる。この構造を実現するためには、十分な加工技術をもつ会社の選定と、軸受けの締め代/各部の嵌め合いの管理、製作物の公差解析が重要である。

##### 2.2 タングステン/銅合金製回転ディスク

タングステンと銅合金では熱膨張率が 4 倍程度異なり、そもそも大型形状では構造的に高温プロセスが難しい。タングステン/銅の接合ではロウ付けや熱間等方圧加圧による先行事例があるが、いずれも 900°C 以上の高温プロセスである。φ460 mm の径を 900°C に上げるとタングステンは 1.8 mm 程度しか伸びないが、銅は 7.3 mm 程度伸びる。この時、塑性変形を無視するとタングステン側に

<sup>#</sup> yu.morikawa@kek.jp

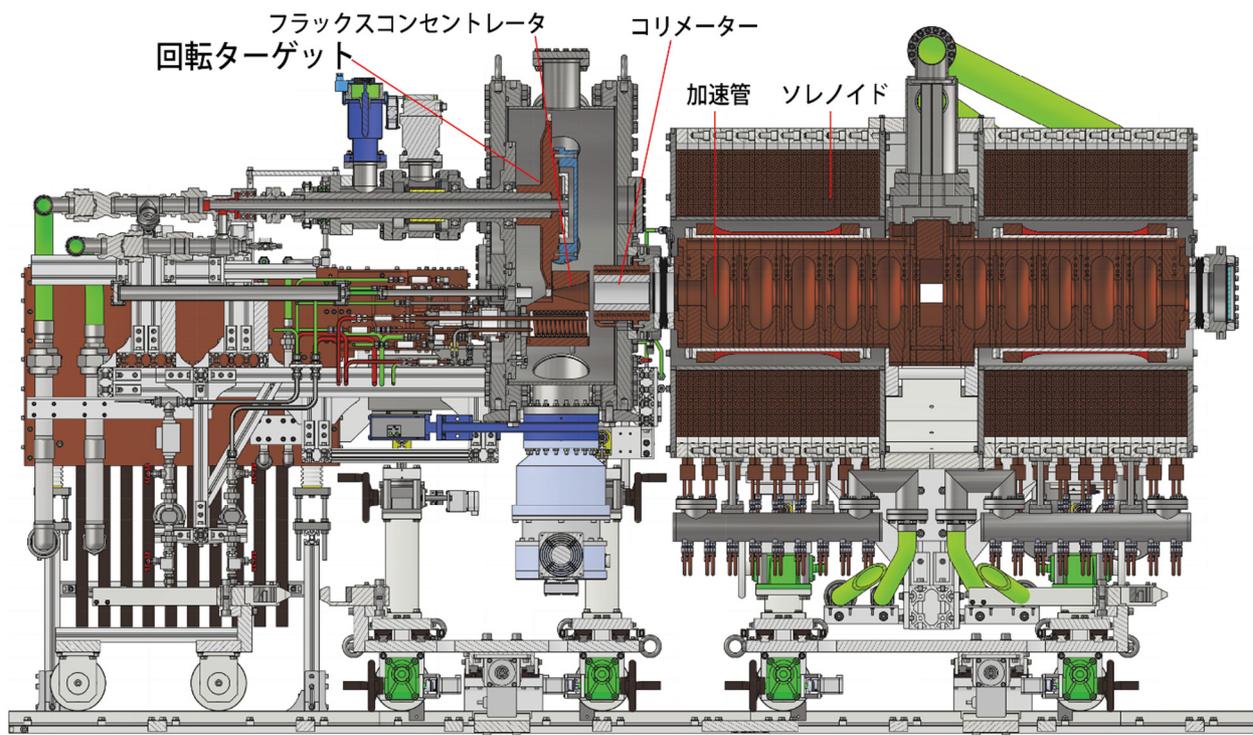


Figure 1: Overall view of the positron source prototype.

【特徴】

- ✓  $\phi 500 \times t15.7$ mm タングステンリング
- ✓  $\phi 460$ mm 銅合金製ヒートシンク
- ✓  $\phi 70$ mm 回転軸 - 冷却水路内蔵
- ✓ 主軸回転: チェーン駆動
- ✓ 回転速度: 225 (rpm)
- ✓ 冷却水流量: 70 (L/min)
- ✓ 要求真空度:  $10^{-6}$  (Pa)
- ✓ 2段差動排気
  - 狭小隙間, メカニカルシール

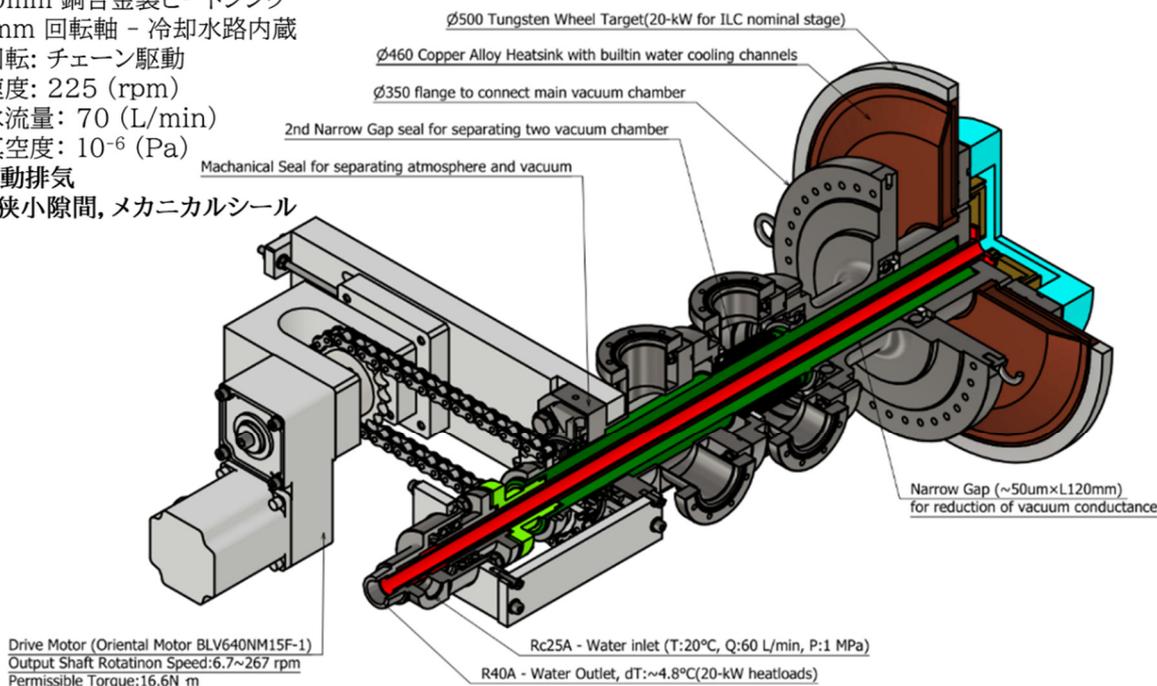


Figure 2: 3/4 cut model of rotating target.

は 3.2 GPa の引張応力が生じる。この問題を避けるためには部品を分割して小型化するか高温プロセスを避けることが考えられる。高温プロセスを避けるため、冷やし嵌めによるタングステン/銅合金の接続を選んだ。銅合金は

強度と熱伝導性を担保するために、NC50 というコルソン合金を選んだ。冷やし嵌めによる接続の場合、接触面間に熱抵抗が存在することが課題となる。この接触熱伝達率の評価には多くの経験式が存在し、いずれの場合に

においても接触面圧におおよそ比例することが知られている。本設計ではタングステンリング-内外径  $\phi 500/460$  mm  $\times$  厚み  $t15.7$  mm に外径  $\phi 460$  mm の銅合金ヒートシンクを冷やし嵌めた。タングステン/銅合金の締め代は  $400 \mu\text{m}$  程度であり、この時の面圧は約  $30 \text{ MPa}$  である。この面圧時に得られる接触熱伝達率は経験式から  $4.5 \times 10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$  と評価でき、冷却水の強制対流による熱伝達率よりも 1 桁程度高い値である。この接触熱伝達率の場合、 $20 \text{ kW}$  相当の熱流束時には接触部で  $20^\circ\text{C}$  の温度上昇があることになる。この程度の温度上昇に収まれば実運用でも問題はない。

### 2.3 熱構造解析

想定する駆動電子ビームは  $74 \text{ kW}$  であり、標的中には約 25% の  $18.8 \text{ kW}$  が熱負荷として吸収される。また ILC 仕様のビーム構造では、66 バunchのビームがタングステン上に同じ位置に照射され、最大の発熱密度は  $35.5 \text{ J/g}$  となる。これら熱負荷条件に基づく熱流体解析の結果を Fig. 3 に示す。タングステン部の平均温度は  $180^\circ\text{C}$  であり、ビーム入射直後の最大温度は  $430^\circ\text{C}$  である。銅合金部の最高温度は  $130^\circ\text{C}$  である。また構造負荷の観点では、最大相当応力はタングステン部の約  $300 \text{ MPa}$  であった。これはビーム熱由来ではなく締め代によるフープ応力に由来する。温度、応力共に問題のない範囲に収まっている。

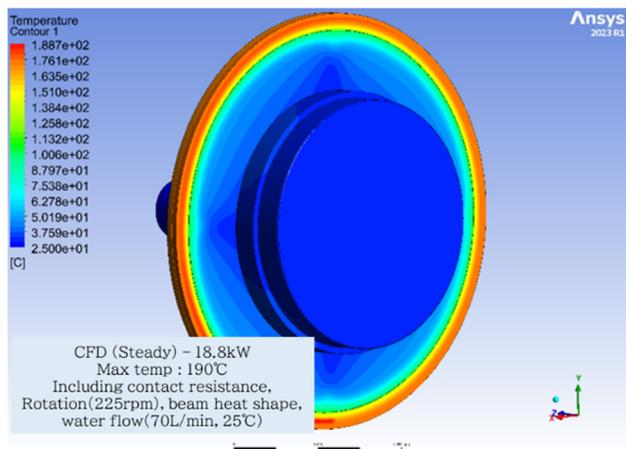


Figure 3: Temperature distribution of target disk simulated by ANSYS-FLUENT.

## 3. 実機試験

Figure 4 は製作した回転標的の動作確認中の写真である。2025年8月時点で本体は加速管以外全て製作完了している。本プロトタイプを用いて下記の真空試験や熱負荷試験を行った。

### 3.1 真空試験

標的を仕様規格より少し速い回転速度  $233 \text{ rpm}$  で回転させながらの真空試験を行った。回転ディスク部の真空度は  $1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$  程度まで到達した。既に1か月以上の連続試験は行ってきたが、現在は連続3か月の連続回転/真空試験を行っている。



Figure 4: Rotating target during rotation test.

### 3.2 熱負荷試験

回転ディスクの冷却性能、特にタングステン/銅合金接合部の熱特性を評価するために実機を用いた熱負荷試験を行った。Figure 5 は熱負荷試験のセットアップを示している。タングステン部に8個の無酸素銅製熱負荷治具を取り付け、この熱負荷治具にカートリッジヒーターを取り付けて熱負荷をかけた。カートリッジヒーターは合計160本あり、合計で  $20 \text{ kW}$  の熱負荷となる。また温度分布は赤外カメラにて測定した。また輻射率を均一かつ既知とするために回転ディスクは黒体塗料により黒体化した。Figure 6 は熱負荷試験中の温度トレンドである。赤線はヒーターパワーであり、青線は標的の冷却水の温度上昇から求めた標的への導入熱量である。ヒーターパワーは標的に全て吸収されるのではなく、70%程度しか吸収されていないことが分かる。今回の熱負荷試験では標的への最大熱負荷は約  $14 \text{ kW}$  であった。Figure 7 は赤外カメラより取得した標的の温度分布である。熱負荷治具とタングステンの接触が均一ではない為にタングステン内でも温度分布が出来ている。Figure 7 のHighとLowと記した2直線は特に温度が高い低い部分と回転ディスク中心を結んだ直線である。この2ラインの温度分布を Fig. 8 に示す。円筒形状の非発熱部については径方向温度勾配を下記の式(1)でフィッティングすることができる。また式(1)の係数  $B$  とタングステン厚み等の既知の数値を用いることで相当熱量を求めることができる。

$$T = A + B \times \ln(r) \quad (1)$$

$$B = P / 2\pi t \lambda \quad (2)$$

T: 温度( $^\circ\text{C}$ ), A, B: フィッティング係数  
r: 径方向位置(mm), P: 相当熱量(W)  
t: 厚み(mm),  $\lambda$ : 熱伝導率(W/mmK),

Figure 8 の2直線から得た相当熱量はHighで  $22 \text{ kW}$ , Lowで  $12 \text{ kW}$  であった。また接触部の温度上昇はHighで  $13^\circ\text{C}$ , Lowで  $5^\circ\text{C}$  であった。この相当熱量と接触部温度上昇から接触熱伝達率を評価することができる。このフィッティングを1つの熱負荷治具全域で行ったところ、

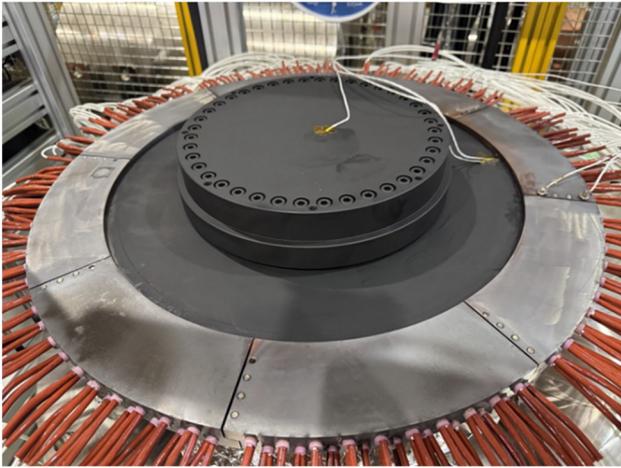


Figure 5: Setup of heat load test.

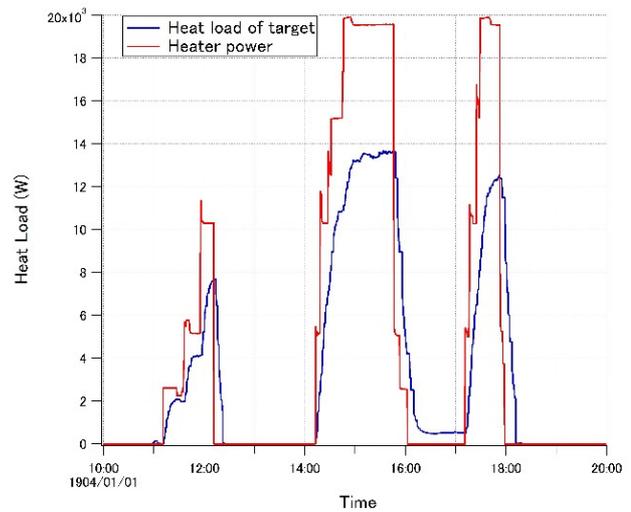


Figure 6: Temperature trend during heat load test.

Heater:20kW

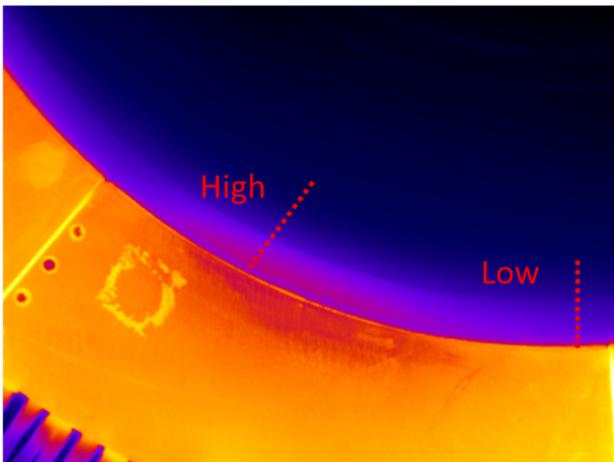


Figure 7: Temperature distribution measured by infrared camera.

接触熱伝達率の平均値は  $8.5 \times 10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$  となった。この値は事前の想定より高い値であり、運用上より安全である事になる。現在は熱負荷治具の改良を進めており、標的への導入熱量 18 kW 以上を目標にした熱負荷試験を計画している。

#### 4. まとめ

本開発では、将来加速器の陽電子源における回転標的を開発した。プロトタイプ製造は無事完了しており、実機試験では基本動作や真空性能、回転ディスクの冷却性能について良好な結果が得られている。引き続き長

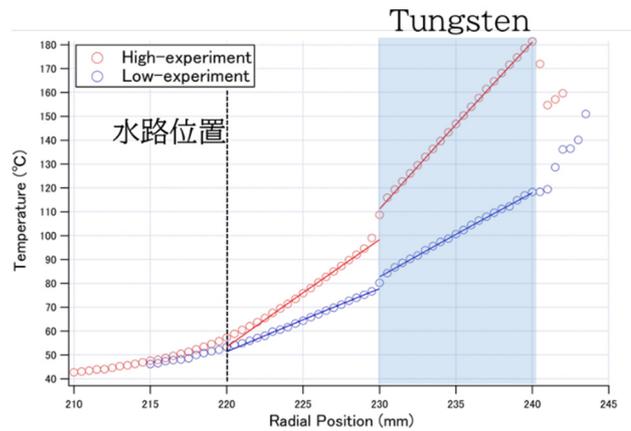


Figure 8: Temperature gradient of High and Low line of Fig. 7.

期試験や追加の熱負荷試験を行い、性能実証を進める。

#### 謝辞

本研究は文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業 (JPMXP1423812204) の助成を受けて実施した。

#### 参考文献

- [1] 榎本嘉範 他, “KEK iCASA における ILC に向けた陽電子源開発の現状と計画”, 第 20 回日本加速器学会年会, (2023).