

PF-AR に新設する測定器開発テストビームラインの熱解析 THERMAL ANALYSIS OF THE NEW TEST BEAM LINE AT PF-AR

佐々木洋征[#], 本田融

Hiroyuki Sasaki[#], Tohru Honda

KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

A test beamline for the development of a measurement device to supply electrons of GeV-order is currently developed at the KEK synchrotron radiation source ring PF-AR. A target wire is inserted into the AR accelerator and gamma-rays produced by bremsstrahlung of electrons at the halo. They are converted into electron-positron pairs by oxygen-free copper converters placed at the end of the ring bending magnet chamber. These electrons are utilized as a test beam. In this process, the synchrotron radiation generated in the ring irradiates the target and the converter, so it is essential to simulate the appropriate cooling and temperature distribution. In this presentation, the temperature distribution of the target wire, copper alloy absorber, and oxygen-free copper converter due to the irradiation and cooling of the synchrotron radiation is simulated, using the finite element analysis software ANSYS. In addition, the heat generation, cooling and temperature distribution of the entire new bending magnet chamber were also estimated. These results will be reported comprehensively.

1. はじめに

現在、KEK の放射光源リング PF-AR において、GeV オーダーの電子を供給する測定器開発用テストビームライン建設計画が進行している[1]。加速器リング内において電子ビームのハロー部までターゲットワイヤーを挿入することで、制動放射によりガンマ線が生成される。これを、リング偏向電磁石チャンバーの端部に配置した無酸素銅製コンバーターで電子・陽電子対に変換し、電子テストビームを生成する。この際リングで発生した放射光がターゲット及びコンバーターに照射されるため、適切な冷却およびその温度分布のシミュレーションが不可欠である。本論文では、有限要素法解析ソフトウェア ANSYS[2]を用いて、本計画におけるターゲットワイヤー、銅合金製アブソーバー、銅合金製コンバーターへの放射光照射と冷却機構による温度分布をシミュレーションした。各コンポーネントの配置を Fig. 1 に示す。

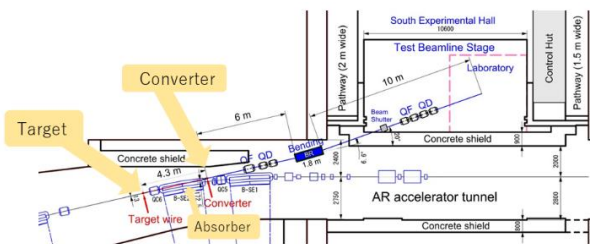


Figure 1: Configuration of test-beamline at the PF-AR.

2. 計算の条件と準備

各コンポーネントの温度分布は、有限要素法解析ソフトウェア ANSYS Workbench (ANSYS 社製)を用いた。伝熱計算に用いる 3D モデルは、各設計図面から、

[#] hiroyuki.sasaki@kek.jp

Fusion360 (Autodesk 社)[3]を用いてモデリングした。

放射光照射による発熱について、一般に放射光リング全周の放射パワーは、

$$P [\text{kW/turn}] = 88.5 \frac{E [\text{GeV}]^4 \times I [\text{A}]}{R [\text{m}]} \quad (1)$$

で与えられる。PF-AR の運転で想定される各パラメータ、 $E = 6.5 \text{ GeV}$, $I = 0.05 \text{ A}$, $R = 23.708 \text{ m}$ を用いると、軌道角 1 rad あたりの放射パワーは 53.0 W である。

本稿では各コンポーネントの配置から見込まれる軌道角から、入熱エネルギーを見積もった。

3. 各コンポーネントの温度分布

3.1 ターゲット

本装置においては、加速器の電子ビームの裾(ハロー部)にターゲットを配置し、制動放射によりガンマ線を発生させる。このときワイヤーには放射光が照射され加熱されるため、放射光の吸収が少ない原子量の小さな物質が有利である。一方、原子量の大きな物質ほど制動放射によるガンマ線の発生確率が増す。真空中でガス放出が小さく、化学的に安定で、物理的に適切な強度をもつことも当然要求される。以上を勘案し、ターゲット物質として炭素を選定した。炭素には黒鉛、炭素繊維、ダイヤモンドなど様々なマテリアルが存在する。また、実際に設置するにあたり、強度のみならず屈曲性も必要であり、さらに不純物がなく炭素のみで構成されている必要がある。そこで本研究では、CNT(カーボンナノチューブ)ヤーン及びグラファイトシートを選定した。

CNT ヤーン(村田機械[4])は、基板上にサブミリ単位の長さで成長させた CNT を、分子間力で紡いで糸状にしたマテリアルである(Fig. 2(a))。一般的なセルロースの糸と同様に、結んだり編んだりできるほど屈曲性が高く、また機械的な強度を有する。熱伝導率も鉄と同等の値を

もつ。繊維ではあるがバインドレスであり、炭素の純度は99%以上である。本研究では製造装置の上限に近い、太さ0.1 mmのものを使用した。

グラファイトシート(カネカ「グラフィニティ」[5])は、グラフェン(1原子の厚さの sp^2 結合炭素原子のシート状物質)を積層して作製された、シート状の材料である(Fig. 2(b))。こちらも機械的な強度に優れると同時に、1万回以上の折り曲げテストをクリアしている。さらに、面内の熱伝導率が、1500 W/(m・K)とグラファイトの上限に近い値であり、放熱の面で有利と言える。一方、面直方向の熱伝導率は5 W/(m・K)と非常に小さく、熱伝導においても異方的な性質を示す。炭素の純度は99%以上である。今回、厚さ0.04 mmのシートを2 mm幅程度でカットしたものを、二つ目のターゲットとして選定した。



Figure 2: Carbon materials used as targets.

今回、これらのターゲットについて、銅製の取り付け治具に装着した状態で伝熱解析し、温度分布を見積もった(Fig. 3)。CNT ヤーンについては、最高温度は285℃となり、CNTの分解および昇華温度に比べて十分低い。グラファイトシートについては、面内の高い熱伝導率を反映して温度は低く見積もられ、最高35℃となった。今回、面直方向の低い熱伝導率も計算に取り込んでいるが、放射光の照射による発熱の深さ分布などが影響している可能性がある。さらなる計算による確認が必要であろう。

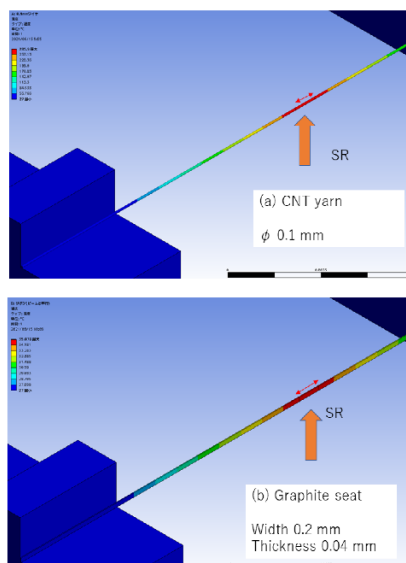


Figure 3: Temperature distributions of carbon targets. (a) CNT yarn and (b) Graphite seat.

3.2 クロッチアブソーバー

偏向電磁石内のチェンバー(B チェンバー)の内部に

は、強力な放射光からチェンバーやベローズ部分を守る、アルミナ分散銅製のクロッチアブソーバーが装着されている。今回、ターゲット部で発生したガンマ線を通させるために、切り欠きが設けられたものに交換される。この切り欠き部は当然放射光も通過させる。各部に照射される放射光の強度分布を見積もり、ANSYS 伝熱解析により計算した温度分布を Fig. 4 に示す。このとき、アブソーバー内部の冷却水による熱伝達係数は、Dittus-Boelter の式を用いて見積もった[6, 7]。冷却水路の形状や流量によっては、さらに拡張された、Petukhov の式や Gnielinski の式も必要となる場合もあるが、本稿の計算では、Dittus-Boelter の式で記述できる範囲であることを確認している。計算された最高温度は319℃であり、これは交換前のアブソーバーと同様、十分冷却できているものと見積もられる。

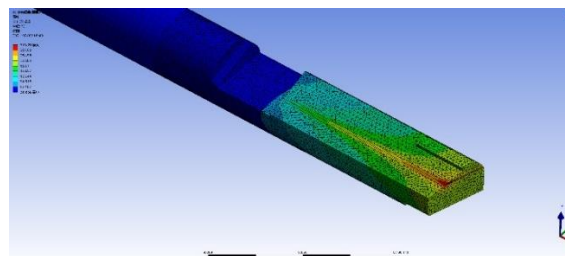


Figure 4: Temperature distribution of the absorber.

3.3 コンバーター

最後に、ターゲット部で発生し、クロッチアブソーバー部を通過したガンマ線を、電子-陽電子対に変換するコンバーター部について述べる。コンバーターにて発生し、大気中に放出された電子と陽電子は、電子輸送系にて電子のみが測定ビームラインへと導かれる。材質はアルミナ分散銅である。クロッチアブソーバー部の切り欠きを通過した放射光により加熱されるが、その入射パワー分布に基づいた計算結果を Fig. 5 に示す。外側の凹部分は冷却水路の壁面である。最高値は47℃であり、この設計で十分な冷却が行われているといえる。

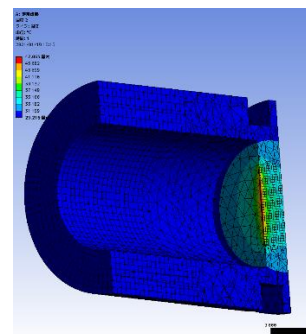


Figure 5: Temperature distribution of the converter.

3.4 その他

今回の建設で新規に製作されたコンポーネントに加え、旧来の偏向電磁石や四極電磁石用の真空ダクトの冷却と温度分布についての解析も進めている。解析の一例を Fig. 6 に示す。現時点の計算結果では、従来の設計で

各部分が十分冷却されているものと思われる。

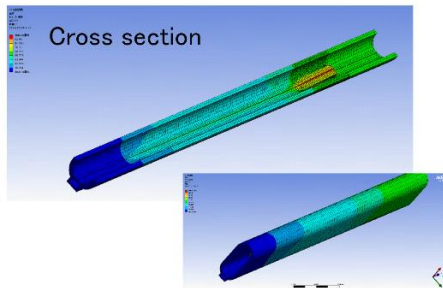


Figure 6: Temperature distribution of a typical Q-duct.

4. まとめ

KEK の放射光源リング PF-AR において、建設されている測定器ビームラインにおいて、新たに作製される各コンポーネントについて、有限要素法解析ソフトウェア ANSYS の伝熱解析を用いて、その温度分布を見積もった。それらの結果から、これらのコンポーネントは十分冷却されていると見積もられる。

参考文献

- [1] T. Honda *et al.*, 第 18 回日本加速器学会年会, MOP049.
- [2] <https://www.ansys.com/>
- [3] <https://www.autodesk.co.jp/products/fusion-360/>
- [4] <https://www.muratec.jp/>
- [5] <https://www.kaneka.co.jp/>
- [6] “伝熱工学”, 日本機械学会, 2008.
- [7] “演習伝熱工学”, 日本機械学会, 2008.