

## 極低温用温度計の低温試験

### LOW TEMPERATURE TESTS OF THERMOMETER FOR VERY LOW TEMPERATURE USE

清水 洋孝<sup>#</sup>, 小島 裕二, 仲井 浩孝, 中西 功太, 原 和文, 本間 輝也  
Hirotaka Shimizu <sup>#</sup>, Yuji Kojima, Hirotaka Nakai, Kota Nakanishi, Kazufumi Hara, Teruya Honma  
KEK, High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

We will report the progress of trial manufacture of a cryogenic thermometers for very low temperature use currently in development at KEK. At the accelerator facilities in KEK, like SuperKEKB and other cERL and STF accelerators use the superconducting acceleration scheme. The electron beam is being accelerated by the superconducting accelerating cavities produced by Niobium which has a high transition temperature. Even though the Niobium's transition temperature is rather high, it is necessary to cool down to a temperature below 9 K. To achieve this low temperature, we have to provide 4 K liquid helium for SuperKEKB accelerator and 2 K super fluid for cERL and STF accelerators to make the cavities superconducting state. For stable operation of each of the above accelerator facilities, temperatures must be accurately measured in such a cryogenic environment, and feed back to the cryogenic control systems. So the thermometers which can work in the cryogenic environment are essentially necessary, and to develop those thermometers is the main task of this research. This thermometer consists of a temperature detection part using an optical fiber material and its jig part as a device to maintain the sensitivity in the extremely low temperature range. We are trying to utilize the fact that the specific heat of the metal crystal becomes extremely small, as suggested by Debye's model. We have examined the low-temperature characteristics of optical fibers with Bragg gratings and have confirmed the reflected light wavelength was changed according to the environmental temperature. By testing the actual combinations of bimetal alloys that assists the wavelength change in a low temperature environment, we aimed to put the thermometer into practical use. We will report the results of the ongoing tests.

#### 1. はじめに

現在開発を進めている、極低温用の温度計の開発について、進捗を報告する。KEK における加速器施設では、SuperKEKB をはじめとし、cERL や STF の各加速器において、超伝導加速方式が採用されており、ニオブによって製作された超伝導加速空洞による電子線の加速が行われている。転移温度が高いニオブを用いているとは言え、超伝導加速空洞を使用するためには、9 K 以下の温度にまで冷却する必要がある。この目的を達するために、SuperKEKB においては 4 K の、cERL と STF では 2 K の液体ヘリウムを寒剤として用いる事で、空洞の超伝導化を図っている。上記各加速器施設の安定な運転には、このような極低温環境の温度を正しく計測出来る温度計の存在が必須であり、この点が本研究の開発目標となっている。開発を進めているこの温度計は、光ファイバ素材を用いた温度検知部分と、その治具部分からなり、極低温域での感度の維持のための工夫として、デバイの模型によって示唆される様な、金属結晶の比熱が極端に小さくなる事実を利用しようと考えている。これまでに検討を行ってきた、ブラッググレーティング付き光ファイバの低温特性と、その波長変化を低温領域で補助するバイメタル合金の組み合わせを、実際に低温環境で試験する事で、温度計の実用化に向けた検討を進めている。この点に関して、現在行っている試験の結果を報告

する。

#### 2. 極低温環境で使える温度計の必要性

KEK の加速器研究施設では、SuperKEKB 加速器、STF 加速器、cERL 加速器の3つの施設において、加速器に併設された大型冷凍機を使った空洞の冷却が行われている。SuperKEKB では 4 K 液体ヘリウムが、STF と cERL では 2 K 超流動ヘリウムが空洞にそれぞれ供給されるが、空洞の発熱によって蒸発したヘリウムは、熱交換器を経由して寒冷が回収され、再び圧縮機に戻される事で、閉じたサイクルの中を周回する事になる。つまり、超伝導空洞の冷却に用いられる大型冷凍機は、単純な液化の作業を行っている訳では無く、空洞やそれに至る各種容器を含めた、大きなサイクルの中を、寒剤としてのヘリウムを循環させる制御系を構成している。この循環系の中を、過剰な圧力上昇や温度変化、閉塞・間歇などを発生させる事無く、液体窒素や液体ヘリウムをうまく行き渡らせるためには、圧力や温度のモニタを効果的に配置して、寒冷の流れを監視する事が重要となる。両方のモニタにとって重要な点は、極低温環境での指示値を、常温環境の記録装置まで、信号として取り出して送る必要がある点である。例えば圧力測定器の場合では、所謂サーマルオシレーションと呼ばれる現象により、正しい圧力が読み取れないだけではなく、常温部分の熱がヘリウムガスの気柱振動によって極低温部分にまで高効率で運び込まれる事で、その低温性が損なわれてしまう事例が簡単に起こってしまう[1]。温度計測の側においても、

<sup>#</sup>hirotaka@post.kek.jp

測定点を増やす事で金属信号線が常温から極低温域まで持ち込まれるため、計測のために熱の通り道を導入する結果となる。また、個々の温度計は非常に高価であるために、測定点数を増やす事と引き換えに、設備投資が高額になる問題が生じる。

極低温環境の温度を、複数の異なる点で、安価に正確に測りたいと言う希望は、加速器の分野に止まらず、ヘリウムを寒剤として用いる多くの実験環境での共通の要望である。我々は、この問題に対する一つの解決の試みとして、磁気浮上式鉄道に用いられる超伝導電磁石のコイルの温度を、複数点に渡り監視し続けるための光ファイバを用いた温度計[2]を原案とした、独自の温度計の開発を進めている[3,4]。以下では、その主要構成要素である、光ファイバ部分と補助治具のバイメタルに関して、現在行っている開発の進捗について詳しく述べる。

### 3. FBG 付きファイバの各種低温試験

開発中の温度計は、通常温度計の検温素子部分とそれに至る金属信号線の部分を、全て光ファイバに置き換えた構成になっており、極低温領域へと導入する必要があるのは光ファイバだけである。図 1 に具体的な温度計の配置とその動作原理を示す。光ファイバにはブラッググレーティングと呼ばれる周期的に屈折率が大きく異なる構造が書き込まれており、この周期的な配列が、特定の波長の光に対して、高い反射率の鏡の役割を果たす事が知られている。この特徴を利用して、入射した白色の光の中から、特定の波長の光の反射光を得る事が出来るが、ブラッググレーティングの記された部分の環境温度が変化することで、選択的に反射される光の波長が、グレーティングの間隔の変化に伴って変化する。この変化の様子を観察することで、グレーティング部分が置かれている環境温度の変化の様子を知る事が出来る。グレーティング部分で反射されなかった光は、そのまま光ファイバの中を直進する為、異なる周期を持つグレーティングを1本の光ファイバ上に複数点用意しておく事で、異なる場所の温度を1度に測定する事が可能となる。この事によって、金属信号線の導入の必要や、検温部分に対して駆動電流を流す必要のない、光ファイバと白色光のみを用いる、新しい方式の温度計を構成できる事が解る。

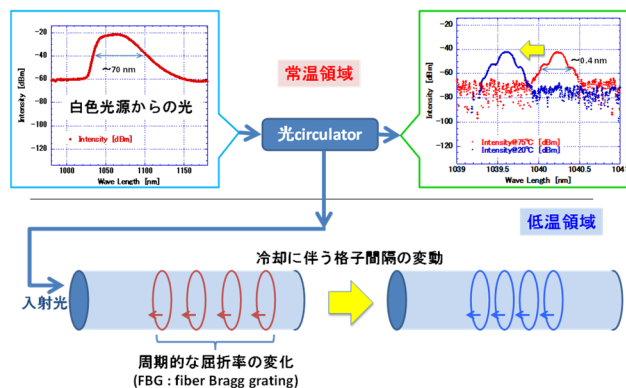


Figure 1: Fiber Thermometer system.

図 2 に、実際にブラッググレーティング付きの光ファイバを、室温から液体ヘリウム温度まで変化させた場合、観測される反射光の波長がどの様に变化したかを測定した結果を示す。

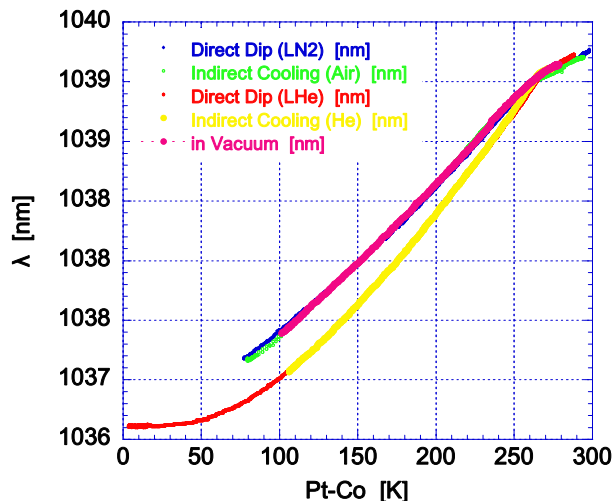


Figure 2: Grating fiber as a thermometer.

この結果から解る様に、FBG を備えた光ファイバを温度計として使った場合、室温から 20 K 付近までの温度変化を、反射光の波長変化として読み取る事が出来る事を示している。従って、液体窒素を用いる配管や 80 K 輻射シールドやコールドエバポレータに対しては、光ファイバ温度計が適用出来る事が解る。しかし 20 K 以下の温度域においては、環境温度の変化に対して、グレーティング間隔の変化が充分では無く、反射光の波長の変化が凍結している為、このままの状態では温度計としては利用する事が出来ない。この問題を克服するために、極低温域にまで、温度変化を波長の変化に変換する為に必要な活性を持ち込む手段として、バイメタルを補助治具として利用する方法を提唱してきた[3,4]。この方式では、バイメタルの低線膨張率側の面にグレーティング部分を含む光ファイバが固定され、環境温度が低温になるに伴い、引っ張り応力を受ける事になる。低温脆性に起因する光ファイバの破断の恐れを検証するため、窒素温度に冷やしたグレーティング部分の引っ張り試験を行った[5]。



Figure 3: Fiber recoated part.

結果としては、約 8.6 N の力を掛けた時に室温でファイバが破断したのに比べて、窒素温度まで冷やした場合は、約 14.3 N まで力を掛けても破断が起らなかった。この結果を検証するために、グレーティング部分の周辺を光学顕微鏡で撮影した結果を図 3 に示す。FBG の加工には何段階かの工程があり、ファイバの clad 部分と core 部分に直接グレーティングを描き込んだ後、再度アクリ

ル樹脂の被膜で、脆くなったグレーティング部分を覆う仕様になっている。図 3 から解る様に、確かにファイバ素線(図左側)に対して、補修用の樹脂が塗られた部分(図右側)の線形が太くなっている事が解る。この樹脂部分が低温域で硬化する事で、グレーティング部分の破断を防いでいた事が理解出来、低温引っ張り試験で得られた結果が妥当であった事が解る。

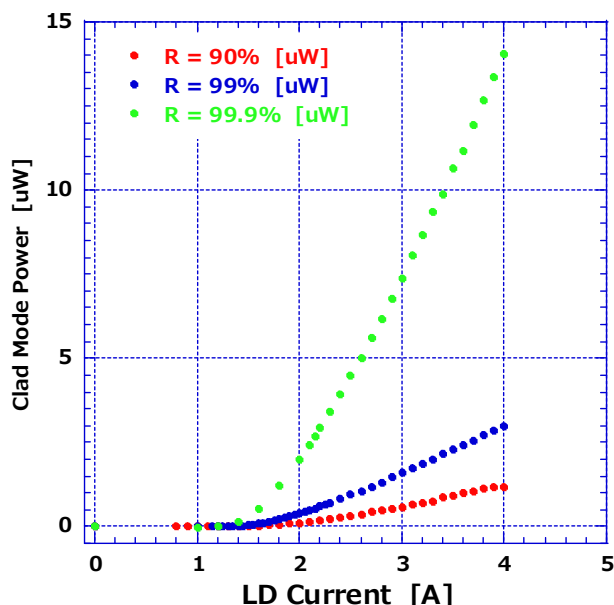


Figure 4: Current dependence of emitted clad mode.

FBG とバイメタルを用いた温度計の構成を考えるうえで、重要な性質の一つと考えているのが、クラッドモードと呼ばれるグレーティング部分から染み出す光の存在である。開発を進めている温度計の構想では、このクラッドモードによる微小な熱を引き金にして、動きが凍結されたバイメタルの熱収縮の再度活発にする事を目標としている。光ファイバに供給する白色光の強度は、レーザダイオードに供給する電流の量で制御出来るため、通電した電流あたりのクラッドモードも量が多い方が、バイメタルの熱収縮の再活性化が容易に行えると考えられる。この観点から、FBG の製作時の反射率と、クラッドモードの強度の相関を測定した。結果を図 4 に示す。FBG の製作を依頼しているタツタ電線[6]の仕様上、99.9 %の反射率が保証上限となっており、今回は 90 %から 99.9 %までの3種類の反射率を持つファイバを試した。得られた結果としては、99.9 %反射率のグレーティング部分からのクラッドモード強度が最も強く、現行の温度計構想に用いる場合、出来るだけ反射率の高い FBG を使用する事が望ましい事が解った。今後も供給元であるタツタ電線との協力関係の下で、より反射率の高い FBG の開発を進めていく予定である。

#### 4. クラッド材の開発

FBG の温度感受性を高める治具として用いる、クラッド材の開発を行っている。現在望ましいと考えている性質としては、極低温域での比熱が小さい事、高線膨張側と

低線膨張側の膨張係数の差が大きい事、特に極低温域でも湾曲による形状の変化が凍結されずに得られる事を念頭に考えている。より具体的には、環境温度の変化に伴って発生する熱応力  $\sigma$  と、温度変化によって誘起される歪み量  $\varepsilon$  を、極低温域において出来るだけ大きく保つ素材の組み合わせを考えている。上で述べたそれぞれの物理量は、熱膨張率  $\alpha$  と縦弾性係数  $E$ 、及び温度の変化  $\Delta T$  を用いて、下の様に表す事が出来る。

$$\sigma = -\alpha E \Delta T \quad (1)$$

$$\varepsilon = -\alpha \Delta T \quad (2)$$

極低温域での  $\sigma$  と  $\varepsilon$  の変化の大きさを担っているのは、クラッド材を構成する金属の熱膨張率と縦弾性係数の、極低温域での変化の割合である事が解る。ここでは比較的手に入りやすい一般的な金属製品の中から、無酸素銅とアルミニウムに注目して、 $E$  と  $\alpha$  の温度変化に伴う変化を、それぞれ図 5 と図 6 に示した[7]。

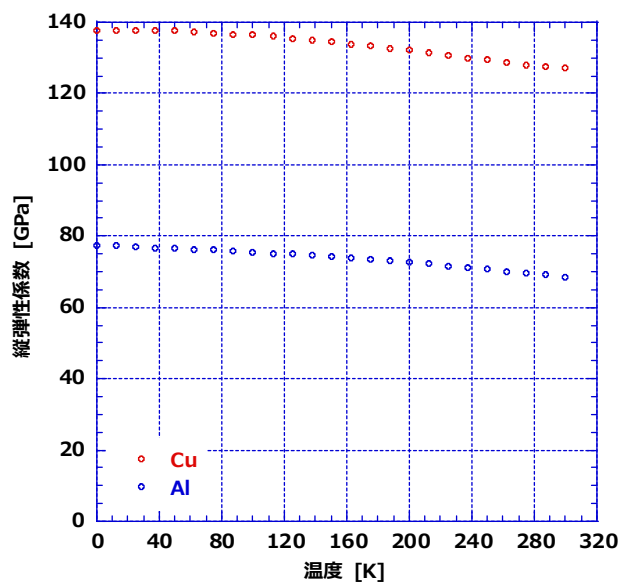


Figure 5: Temperature difference of Young's modulus.

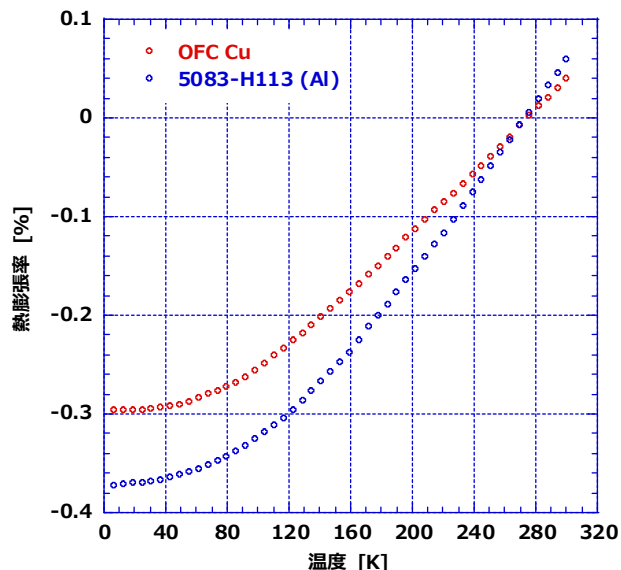


Figure 6: Temperature difference of thermal expansion coefficients.



銅とアルミニウムの縦弾性係数と熱膨張率の値を比較すると、縦弾性係数の比率で上回る銅を材料として使う事で、低温の領域でより望ましいクラッド材に仕上がる事が期待出来る。

しかし実際にクラッド材を作製する場合、一般には冷間圧延の手法が採られており、工業的に大量のクラッド材が作られている。これらの製品は、実際に使われた母材の種類では無く、20 °Cから100 °C程度の使用温度範囲での、湾曲係数の値で分類されるのが一般的である。即ち、市販の工業製品の中から、銅を含むクラッド材を特定したり、銅を含むクラッド材を試験的に少量だけ試作して貰う事は、費用的にも工程的にも難しい事が解った。この状況に反して最適なクラッド材を開発するために、現在金属技研株式会社の協力を得て、熱間等方圧加圧法 (Hot Isostatic Pressing : HIP) と呼ばれる加工法を採用する事とした[7]。比較的少量のクラッド材を試験的に作製する事が出来るため、上記無酸素銅とアルミニウムを母材としたクラッド材を現在作製中である。

## 5. まとめ

FBG とクラッド材を組み合わせた温度計の開発を進めている。これまでに行ってきた各種の低温試験の結果から、FBG とクラッド材のそれぞれに対して、最終的な使用に向けた、望ましい特性が明らかになってきた。それぞれの部品の作製において、協力会社の技術提供を受けながら、製品の作製とそれらを組み合わせた温度計の開発研究を進めている。最終的な極低温試験を経て、温度計としての機能の評価を行い、実用性や安定性に関して、改善出来る点などを見直していく予定である。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K04951 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 藤田耕治, "クライオスタットの構成要素", 低温工学 1993年 28 巻 9 号 pp. 492-503.
- [2] H. Yamada *et al.*, RTRI REPORT Vol.28, No.9, Sep. 2014.
- [3] H. Shimizu *et al.*, "熱収縮による波長の変化を用いた極低温用光ファイバ温度計の開発", Proceedings of the Particle Accelerator Conference(2016).
- [4] H. Shimizu *et al.*, "バイメタルを用いた極低温用光ファイバ温度計の開発", Proceedings of the Particle Accelerator Conference(2017).
- [5] H. Shimizu *et al.*, "極低温温度計用 FBG 及びバイメタルの性能評価", Proceedings of the Particle Accelerator Conference(2018).
- [6] <http://www.tatsuta.co.jp/products/optical/fbg/>
- [7] [https://www.kinzoku.co.jp/core\\_technology/hip.html](https://www.kinzoku.co.jp/core_technology/hip.html)