

## 極低温温度計用 FBG 及びバイメタルの性能評価

### PERFORMANCE TEST OF FBG AND BIMETAL FOR VERY LOW TEMPERATURE THERMOMETER 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

Hiroataka Shimizu<sup>#</sup>, Yuji Kojima, Hiroataka Nakai, Kota Nakanishi, Kazufumi Hara, Teruya Honma

KEK High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

In accelerator institutes which adapt superconducting acceleration scheme, several refrigerants, like liquid helium, are involved in its operation. For the accelerator's stable operation, it is necessary to control all refrigerant's flow condition by monitoring temperatures with thermometers. For this purpose, the thermometer must be possessed an ability to correctly measure the very low temperature. A new idea to construct the thermometer for very low temperature measurements was proposed and now its R&D activities are undergoing. Important constituents of the new thermometer are FBG which equipped gratings on the fiber core region and bimetal. So far, each component has been evaluated own mechanical or optical properties in various environment. In this report, several obtained results are described.

#### 1. はじめに

超伝導加速方式を用いる加速器施設では、液体ヘリウムなどの寒冷を用いた極低温温度環境での運転が行われる。加速器の安定な運転の為に、温度計を用いた寒冷の循環全体を制御する必要がある。このような用途に用いる事が出来る温度計の特徴として、絶対零度に近い様な極めて低い寒冷の温度を、正確に測定出来る事が挙げられる。現在用いられている一般的な温度計としては、半導体の性質を利用した物が市販されているが、従来の温度計とは異なる、新しい測温機構を備えた温度計の開発を行っている[1,2]。この温度計の主な構成要素としては、コア部分にブラッググレーティング処理を施した、FBG と呼ばれる光ファイバとバイメタルを想定している。この2つの構成部品の性質を組み合わせる事で、極低温域での温度測定を目指すため、現在それぞれの部品の低温特性や光学的特性について、性能評価を進めている。今回の報告では、これ迄に得られた評価の結果について報告する。

#### 2. FBG の特性

##### 2.1 低温での波長の変化

これまでに報告してきた様に、FBG を使った温度計測の手法では、光ファイバのコア部分に施された、ブラッググレーティング(Bragg grating)の格子間隔の温度変化を、その格子領域において反射されて戻って来る光の波長の変化として読み取る事で検知している[1,2]。現在開発を進めている、極低温域での利用を目的とする温度計の場合も基本的には同じ測定を行う事になる。もし極低温域(ここでは一般的な加速器施設で使用される液体ヘリウム温度を一つの指標として考え、4K 以下の温度域を極低温域と呼ぶ事にする)において、ブラッググレーティングの波長変化が十分に活発で、反射される光の波長変化が明瞭に読み取れる場合、特に何の細工を施す必

要も無く、その FBG は極低温域用の温度計として使用する事が出来る。しかし先行の研究においても知られている様に、実際には 20K 程度の温度域まで降温を進めると、FBG の温度に依存する波長変化量が著しく低下し、温度計としての機能を果たさなくなる事が知られている [3]。

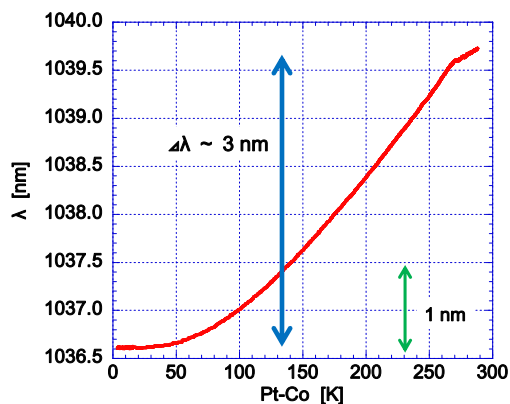


Figure 1: Temperature dependence of reflected light wavelength from FBG.

Figure 1 に、FBG を使って測定した温度変化に伴う波長の推移の様子を載せる。FBG としてはタツタ電線製の反射率 90%、常温での中心波長が 1040nm の物を使用した。白色光源としては PriTel の Yb-PMFA-33 を、反射光の測定器としては、Anritsu の光学スペクトラムアナライザ MS9710B を利用した。計測結果から、常温から極低温域までの温度変化に伴って、3nm 程度の波長変化が生じている。通常の長さ計測では 1nm の精度は非常に厳しい要求と思われるが、波長変化測定の場合では充分容易に検出出来る変化量である事が見て取れる。

##### 2.2 光ファイバの低温脆性

現在考えている温度計の構成としては、FBG をバイメタルに貼り付けて、その全体を極低温の領域に持ち込む

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

事を想定している。この際、常温環境下では変形が無かったバイメタルが、温度の降下に従って変形する影響を FBG が受ける事となる。より正確には、バイメタルを構成する異種金属の内の、低熱膨張率を持つ側に FBG を常温で貼り付ける予定であるので、低温への移行に伴って、FBG は引っ張る力を受ける事になる。この使用に FBG が耐え得るかどうかを検証するために、低温での引っ張り試験を行なう事で、その脆性を調べる事とした。

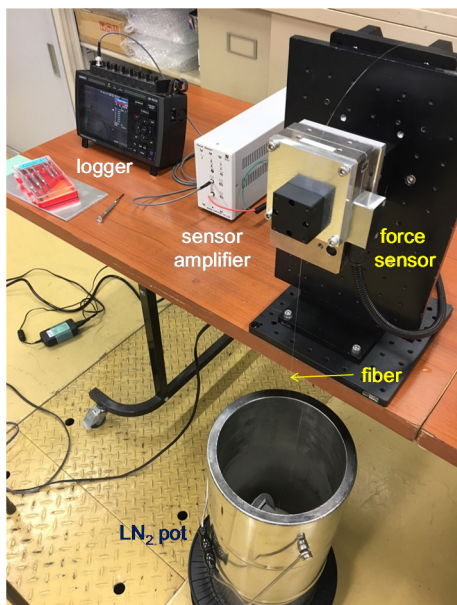


Figure 2: Set-up for tensile test in low temperature.

Figure 2 に FBG に対する引っ張り試験の準備の様子を載せる。破断すると予想される、grating の処理が施された部分が充分収まる高さの断熱真空容器を用意し、それを寒剤で満たす事で、低温の脆性が調べられると考えた。寒剤としては液体窒素を用いた。実際に FBG にかかっている張力を測定する道具としては、Nano-Control 社のご厚意により、高荷重センサ FS1H-100N を使用する事が出来た。寒剤用容器側の FBG 端は、充分に重い治具に固定されており動かない。反対側のファイバ端は荷重センサの上に固定されており、その荷重センサが手動ステージの上に固定されている。このステージを動かす事で、FBG にかかる荷重の大きさを変化させた。試験としてはステージ移動量とその時の荷重の大きさを記録した。以下に引っ張り試験の結果を載せる。

Figure 3 は容器に寒剤を満たさなかった場合の試験結果、即ち常温での引っ張り強さを調べた結果を表している。測定方法としては、手動ステージを 500 $\mu$ m ずつ移動させ、その時の荷重センサの値を記録する方法をとった。Figure 3 左側の図が階段状になって居るのは、この為である。荷重センサの移動量が 6mm の時に、FBG が破断している。荷重センサからの出力値を力の単位に変換すると、約 8.6N の負荷がかかったところで破断が起きている。

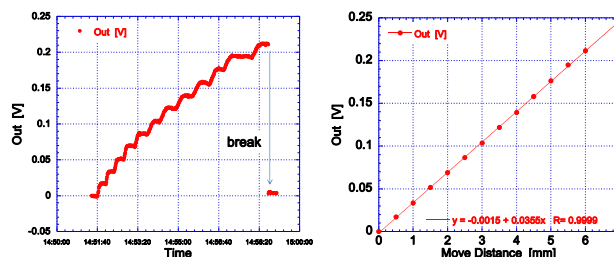


Figure 3: Tensile test results in room temperature.

Figure 4 に、破断した FBG の写真を載せる。赤く印されている部分が、Bragg grating 加工の際に剥いだ被膜を、再度膜付けした領域を表している。破断箇所は赤い印で挟まれた内側に位置しており grating 加工時に手を入れたファイバの領域で確かに破断が起きている事は確認されたが、決して中央部の grating が腐っている部分では無かった。



Figure 4: Breaking point of FBG after tensile test.

次に容器を液体窒素で満たした場合の、低温引っ張り試験の結果について述べる。これに対応する結果を、Fig. 5 として載せる。

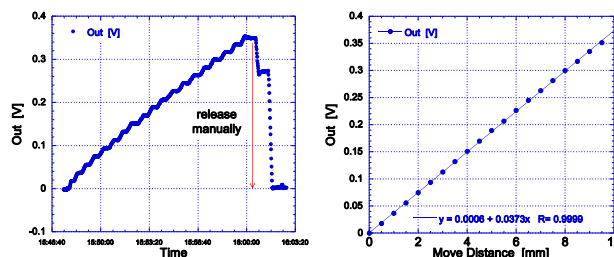


Figure 5: Tensile test results in low temperature.

測定の方法は、常温時の試験と同じ事を繰り返した。低温試験の結果として、常温時の結果と大きく異なった点は、手動ステージの移動可能距離 10mm を使い切った段階で、まだ FBG が破断し無かった点が挙げられる。Figure 5 左側の結果では、階段状に上昇した荷重センサの出力値が、約 14.3N に到達後、再び0に戻っているが、これはファイバの破断による力の解放では無く、手動ステージを再び開始位置まで手で戻した事による。引っ張り試験自体の検証として、ステージの移動距離とその時の荷重の関係を示す Fig. 5 右の結果を見る事が出来る。即ち、荷重を増加させる方向にステージを移動させて行く間、観測される荷重量は線形に増加しており、ファイバの滑りや、固定用の重りが浮いたりして居なかった事が確認出来る。素朴な結論として、低温脆性による FBG



の劣化の様子を確認する事が目的の引っ張り試験において、寒冷に浸漬された FBG が、寧ろ硬化している様な結果が得られた。この脆性を確かめる低温引っ張り試験に関しては、装置の構成も含めて再度検討する必要があると感じており、後ほどもう一度考察を行う。

### 2.3 クラッドモードの検討

現在の構想に基づく FBG の温度計への利用における、もう一つの重要な検証要素がクラッドモードの存在である。ここでは、Bragg grating 加工を施した事に伴って、光ファイバのコア部分から漏れ出して来る光の事として、クラッドモードを取り扱う事とする[4]。まず最初に、どの程度の光強度が grating 部分から漏れ出して来るかを確かめる為に、積分球を用いた測定を専門業者に依頼した。しかし積分球の感度閾値に満たない光量しか放出されていなかった為、有意な計測が出来なかったと返答を受けた。他に方法が無い為、手持ちの光学的パワーメータを用いて、独自に漏れ光の強度測定を行った。センサーヘッドは、Thorlabs 製の S121C を利用した。Figure 6 として、FBG の透過光の光強度の測定結果と、クラッドモードとして測定した漏れ光の強度の結果を載せる。

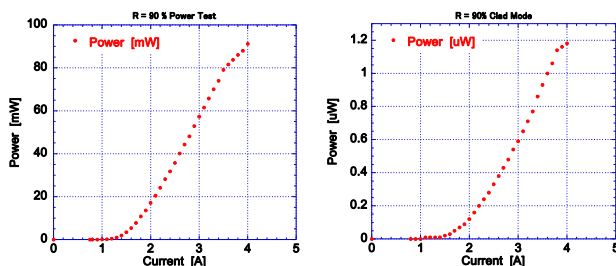


Figure 6: Transmitted and clad-mode power test plots.

FBG を通り抜けてきた白色光源からの光の強度を測定した結果が Fig. 6 左、Bragg grating 部分の直上にセンサーヘッドを被い被せる様に置き、漏れ光の強度を測定した結果が Fig. 6 右の結果である。共に横軸はレーザーダイオードへの通電量を表している。共にある閾値を越えたあたりから発振が始まり、同じ様に光の強度が増加して行く様子が観測されている。透過光強度の単位が mW であるのに対して、漏れ光強度の単位は uW となっている点が大きく異なる。ここで使用した FBG は、中心波長 1040nm、反射率が 90%の仕様のものである。当初予定していた、積分球を用いた光強度測定では、grating 部分から全方位に染み出した光を、全立体角を囲い込む事によって、余さず測定出来る事を期待していたが、今回行った測定では、平面状で受光部の小さい検出器が、光が漏れ出すと思われる領域の近くに置かれているだけの状態で、多くの光を取り溢している可能性が高い。その事実を踏まえても、測定された光強度が精々数 uW 程度しか無かった事から、クラッドモードをバイメタルの凍結された活性を回復させる機構として用いる当初の案は、再度検討される必要がある様に思われる。今後検証すべき事柄として、より多くの光(放射方向)を、余さず測定する様な方法の考案と、反射率がより高い FBG を用意した場合に、クラッドモードとして得られる光強度がどの程度増加するかの2点が挙げられる。

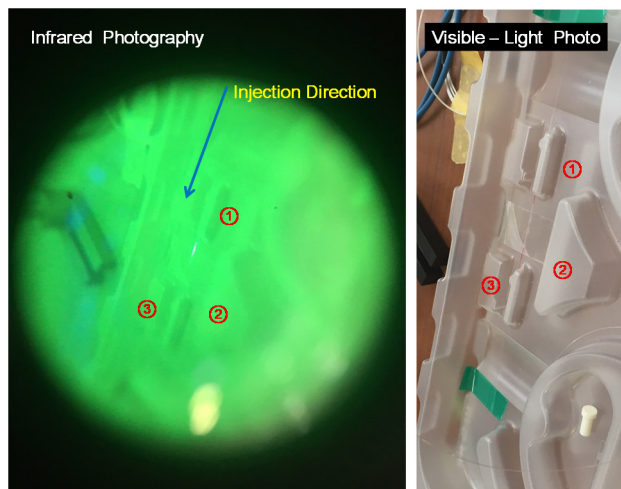


Figure 7: Infrared photograph of clad mode emission.

クラッドモードの光強度が測定出来た事から、確かに光が光ファイバのコア部分から漏れ出て来ている事が確認出来た。更に漏れ光の様子を詳しく調べる為に、赤外線カメラを用いて FBG 部分を観察した。Figure 7 に赤外線写真と通常の可視光写真の比較を載せる。それぞれの写真にふった番号は、対応する場所の目印となっている。①と③の中央に Bragg grating が位置している。これらの写真の比較から、クラッドモードの発光位置が、光が入射された側に寄っている傾向に気付く事が出来る。この傾向を確認する為に、クラッドモード強度のプロファイルを求める測定を行った。この結果を Fig. 8 に載せる。

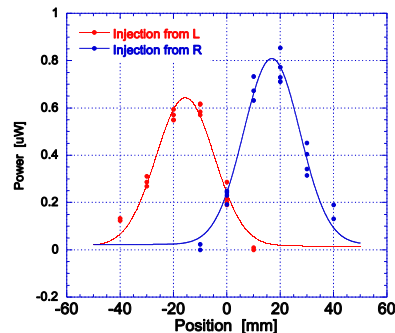


Figure 8: Intensity position scan results of clad mode.

Figure 8 の横軸の原点が Bragg grating の中央に対応している。FBG への光の導入方向が右からの場合が青色、左からの場合が赤色に対応している。測定方法は、漏れ光強度を測定したセンサーヘッドの位置を、ファイバに沿って左右に動かしながらそれぞれの位置での光強度を測定する方法をとった。Figure 7 の写真で見た様に、最も漏れ光の強度が強くなっている箇所は、FBG の中心からそれぞれ光の入射方向に少しずつれている様子が測定によっても確かめられた。これまでの素朴な予想として、クラッドモードの漏洩強度は、FBG の中央部分が最も強いと考えていたが、実際には入射方向に依存する強度分布となっている事が認識された。この入射方向依存性を正しく理解する為に、FBG の製作工程で生じる、重要と思われる各構造の配置について再度確認を行った。

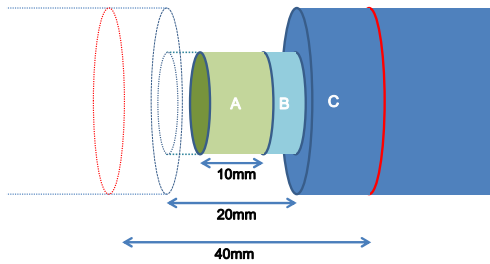


Figure 9: Reconsideration of grating area's structure.

Figure 9 に、Bragg grating 部分を含むファイバの構造と、その長さを示した図を載せる。図中に示される A の領域が Bragg grating が施された、実際に光の選択的反射が起こる領域で、約 10mm の長さを持っている。この中央部分が、Fig. 8 の原点に相当する。A の部分の両側に B 領域が位置しており、B-A-B の構造全体が約 20mm の長さを持っている。この 20mm に渡る領域は、grating 処理に必要な UV 光の照射の為に、光ファイバがもともと備えていたアクリルの被覆を剥がされている部分になる。アクリル樹脂の被覆を剥いだ状態では、光ファイバは非常に脆く、実用上扱い辛い為、grating 加工が終わった段階で、再び被覆の再取り付けが行われるのが通常である。この再被覆化の作業が及ぶ範囲が C 領域迄である。即ち、元々アクリル樹脂が剥がされていない C 部(左右各 10mm 程度)に重複して再被膜の処理が為されている。この再被膜処理の終端を示す為に、grating の中心からそれぞれ 20mm 離れた場所(C 領域の終端)に、赤い線が印として塗布されている。Figure 8 の強度分布と照らし合わせた場合、丁度 C 領域の終端より少し内側の辺りで、クラッドモードの光強度が最大となっている事が理解される。バイメタルの再活性化の道具としてクラッドモードを最大限利用する為には、光強度が最大となる位置が grating 中央では無いと言う事実の認識が非常に重要である。

### 3. バイメタルの特性

現在想定している極低温用温度計の主要な構成要素の一つである、バイメタルの低温での性質を調べた。具体的には、手に入れる事が出来た市販のバイメタル試験片を用意して、液体窒素温度に冷やす事で生じる、撓みの機械的な特性について測定を行った。今回使用したバイメタルの構成は、低膨張率側の金属として 36Ni-Fe 合金、高膨張率側の金属として 22Ni-4Cr-Fe 合金から成る合板となっている。液体窒素温度に冷やす事で得られた、最大の反り量(バイメタルの中央と端の高低差を指すものとする)は約 2mm であった。これは、バイメタルを熱湯に浸けた場合に得られた逆方向の反り量と、ほぼ同じ変化量であった。

最大限反った状態から、バイメタルの中央部を押す事で、反り量を強制的に 0 に戻す事を考える。この時に要する力の大きさが、バイメタル自身の反る力であると考えられる。簡易的なばね測りを用いて、この反る力の測定を行った。測定で得られた荷重 W は約 15.4N であった。

機械設計便覧によると、①板の形状、②撓み量、及び

③その撓みを発生させるのに必要な力が解れば、材質の縦弾性係数が計算出来る[5]。今回用いた試験片を例に取ってみると、板の形状としての断面 2 次モーメントは約  $47.3\text{mm}^4$ 、撓み量としての反り量が約 2mm、その撓みの発生に必要な力としての荷重が 15.4N に対応する。計算を行うと、今回用いたバイメタルの縦弾性係数が約  $20.8\text{ kgf/mm}^2$  と求まる。この値は、バイメタルの販売元が公開している値  $16.7\text{ kgf/mm}^2$  より少し大きな値となっているが、概ね良い一致を示していると考えられる。

今後はバイメタルの低温特性に注目しながら、用いる合金の組み合わせなどを含めて、どの程度必要応じた合板が作製可能かを中心に、検討を進めていく予定である。

### 4. まとめ

極低温温度計の開発の構想に沿って、主要構成要素となる予定の FBG とバイメタルのそれぞれについて、必要と思われる特性の試験を進めている。使用出来る予算の割り振りから、FBG の検討に重点を置き進めている。外部資金の助成が得られた事で、低温脆性を調べる為の引っ張り試験を行う事が出来た。しかし最初の試験結果としては、低温環境下でファイバが硬化している様な結果が得られた。低温引っ張り試験の定石として、破断させたい(強度を調べたい)部分のみを低温環境下で露出させ(機械的に支持されない状態に置き)、その強度を評価する必要があったが、今回行った引っ張り試験では、FBG 周辺が寒剤中に浸漬されてはいるものの、同じ様に露出されている常温のファイバ部分も約 450mm 存在しており、純粋な低温脆性の様子を調べるには不十分な装置であったと思われる。今後これらの点を改善する事で、より正確な情報の取得を行いたい。

### 謝辞

本研究は科研費[JSPS KAKENHI Grant Number JP18K04951] の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] H.Shimizu *et al.*, "R&D of optical fiber thermometer for very low temperature", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [2] H.Shimizu *et al.*, "R&D of optical fiber thermometer for very low temperature with bimetal", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [3] H.Yamada *et al.*, RTRI REPORT Vol.28, No.9, Sep. 2014.
- [4] Raman Kashyap, "Fiber Bragg Gratings", Academic Press 1999, ISBN-13: 978-0124005600.
- [5] 例えば丸善 "機械設計便覧".