

# 高温超電導磁石用の光ファイバ温度センサの 低温特性向上と実用性検証

杉野 元彦\* 水野 克俊\* 小方 正文\*

## Improvement of the Sensitivity at Cryogenic Temperature of the Optical Fiber Sensor and Its Durability Evaluation

Motohiko SUGINO Katsutoshi MIZUNO Masafumi OGATA

To put the high-temperature superconducting (HTS) magnets to practical use, it is effective to detect a sign of failures by the temperature monitoring. It should be noted that the quench protection of HTS magnets is difficult. Temperature is distributed over HTS magnets when they are cooled by conduction cooling. Therefore, reliable multipoint temperature monitoring method is necessary. Unlike the conventional resistance temperature sensor, the optical temperature sensor can measure multipoint temperatures with a single fiber. The optical fiber is not affected by the fluctuation of the magnetic field and has low heat intrusions. A Fiber Bragg Grating (FBG) is a type of the optical fiber temperature sensor, but its accuracy of the measurement decreases at cryogenic temperature. Therefore, it has been proposed to coat the FBG sensor with a metal or a resin to increase the accuracy at cryogenic temperature.

Zinc is suitable for the coating material, because it has a high thermal expansion rate and its coating process is simple. Three types of zinc coating methods were evaluated in this research: sputtering zinc, electroplating zinc after sputtering titanium and copper, electroplating zinc after electroless nickel plating.

The FBG sensors coated by these zinc coating methods were compared with respect to the sensitivity at cryogenic temperature, the durability against vibration and thermal shock, and the repeatability of the cooling cycle. We report these results.

キーワード：光ファイバ，極低温機器，温度測定，希土類系高温超電導，クエンチ保護

### 1. はじめに

超電導磁石を用いた装置として、超電導磁気浮上式鉄道<sup>1)~4)</sup>、磁気軸受<sup>5)~7)</sup>、モータ<sup>8)~10)</sup>等が世界の多くの研究グループにより実用化に向けて開発されている。鉄道総研では、希土類系高温超電導線材の浮上式鉄道への応用を目標として、希土類系高温超電導コイルの開発と伝導冷却方式による高温超電導コイル冷却方法の研究を進めている。

超電導コイルは、温度上昇により超電導状態を維持できなくなる場合があるため、機能維持のために温度監視が必要である。従来の冷媒冷却方式では超電導コイルは冷媒に浸漬されるため、コイルの温度を冷媒温度で均一にしやすい、冷媒の蒸発量、再液化量を監視することで温度上昇の傾向を監視しやすいというメリットがあった。これに対し伝導冷却方式は冷媒を使用しない

ため、冷媒状態監視に替わる新たな温度監視方法が必要となる。

超電導磁石に故障が発生してその機能を喪失すると、システム全体に大きな影響を及ぼすため、温度監視による異常検出が重要である。さらに、高温超電導コイルを伝導冷却すると、内部の温度分布の把握のため、多くの測定点の温度測定が必要となる。

しかし、熱電対、セルノックス、白金抵抗温度センサ等の従来の抵抗温度センサでは、多点測定のためには多

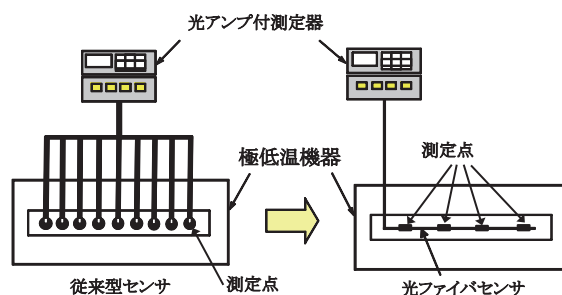


図1 多点温度測定のプロット

\* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

数のセンサ及び計測線が多数必要となり、計測線からの熱侵入量が増大する課題がある。

この課題に対して、近年開発が進んでいる光ファイバ温度センサは1本の光ファイバで多点測定ができるというメリットがある(図1に多点測定のイメージを示す)。

このほかにも、光ファイバは非磁性体のため磁界の影響を受けない、熱伝導率が小さく熱侵入が少ないなど、超電導コイルの温度計測に適した特性を持つ。

室温で使用される光ファイバ温度センサはすでに市販されているものがあるが、我々は、50K (-223℃)程度以下の極低温で光ファイバを温度センサとして使用する研究を行ってきた。

今回、光ファイバ温度センサの実用性と性能向上の観点から、耐久性検証試験と改善した製法でのセンサ試作、評価試験を行ったので報告する。

## 2. 極低温用光ファイバ温度センサの開発経緯

### 2.1 散乱光方式の測定原理

光ファイバ温度センサは散乱光型とFBG(ファイバブラッグ格子)型に分けられる。

散乱光型は光ファイバ内の散乱光の波長変化をもとに光ファイバの熱収縮ひずみを測定する方式である。光ファイバ内を進む光は、一定の割合で散乱しながら進んでいく。この散乱光の周波数には温度依存性があり、この周波数変化を測定することで、温度を測定することが可能となる。この方式は測定する散乱光によりさらにブリルアン散乱光方式、レイリー散乱光方式、ラマン散乱光方式の三種類に分けられる。

これまでの検討において、ブリルアン散乱光型、レイリー散乱光型光ファイバ温度センサについて、極低温の測定試験を行い、両方の方式のセンサで、極低温で温度を測定することができた。これに対して、ラマン散乱光は極低温で測定できなくなることがわかった。しかし、散乱光型は、測定装置が数千万円クラスと高価であり、実用化する上でコスト面の難点がある。

### 2.2 FBG方式の測定原理

鉄道総研ではFBG方式を採用し、試験を行ってきた。

FBG方式の原理を図2に示す。まず光ファイバの任意の箇所に、レーザー光にてファイバブラッグ格子(FBG)加工を施す。この格子は光を反射するため、当該部では屈折率が局所的に変化して、特定の波長の光を反射する構造となる。

FBG部が冷却されると、熱収縮によりFBG部の屈折率が大きくなり、反射される光の波長は小さくなる。このため、波長の変化からFBG部の熱収縮量を測定し、温度変化を測定することが可能となる。

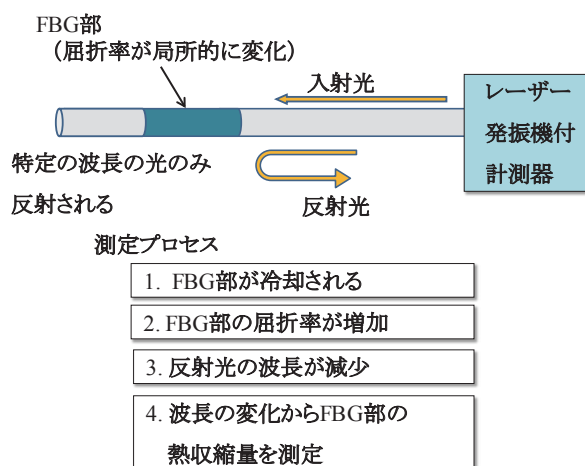


図2 FBG方式の測定原理

### 2.3 FBG方式の感度向上検討

光ファイバの主成分である石英は極低温で熱収縮率が低下する特徴があり、それにともない測定感度が極低温領域で低下する。そのため、光ファイバFBG部表面にコーティングを施し、そのコーティングの熱収縮により測定感度を向上させる方法が考案されてきた。

ステンレスチューブをFBG部に取り付けて接着する方法<sup>11)</sup>、アルミ、銅、鉛、インジウムといった金属をFBG部にコーティングする方法<sup>12) 13)</sup>、などが提案され、これらの中では、アルミとインジウムの二重コーティングで高い感度が得られている。

また、光ファイバをセンサとして用いる場合、測定値の安定性が必要である。我々は熱の伝達を良くするためにアクリル樹脂の上に金属をコーティングして試験を行った。その結果、測定値の安定性は向上したが、熱収縮率の低い金属がアクリル樹脂の熱収縮を妨げ、アルミ、インジウムとも感度は向上しなかった。

そのため、熱伝導率の大きい金属をコーティング材料に選んで試験を行ってきた。ニッケル、銅、銀で試験を行ったところ、ニッケル、銀はほとんど感度向上しなかったが、銅をコーティングすることで、コーティングなしの約1.8倍感度向上した<sup>14) 15)</sup>。

### 2.4 スパッタリング方式の開発

また、銅よりも熱膨張率が大きくコーティング加工が容易であるという点からコーティング材料として亜鉛を選定して研究を進めてきた<sup>14) 15) 16)</sup>。

金属をコーティングする場合、金属の溶液中にコーティング対象物を浸し、電位差を与えて析出させる電気めっきが最もよく用いられる。

この方法は安価で、特別な設備を要しないというメリットがあるが、絶縁体へのコーティングは出来ないという欠点がある。

そのため真空容器内で対象金属に電子ビームを照射し、金属を蒸発させて対象物に蒸着させるスパッタリングと呼ばれる方法を用いた製法を考案した。

このスパッタリング製法で試験体を製作して試験を実施し、コーティング方法が感度に与える影響について評価したところ、形成された蒸着層は脆弱であり、スパッタリングした表面に触れると亜鉛が粉末状になりはがれてしまった。このことから、スパッタリング単体では亜鉛の表面が粗い多孔状になって剥離しやすくなっていると考えられる。

さらに測定試験の結果、コーティング前よりも感度が悪化するという結果となった。これは、測定時に界面剥離が発生して、剥離したコーティングがFBG部の熱収縮を阻害したためと考えられる。

### 2.5 電気めっき方式の開発

スパッタリング単体ではコーティングの効果が得られないことが分かったため、この方法を応用した電気めっき方式を考案した。

この方式では、まず亜鉛の光ファイバへの密着性を良くするためにチタンをスパッタリングし、電気めっきするための電極として銅をスパッタリングする。この銅を電極として用いて、電気めっきで亜鉛をコーティングするという方法を用いた。

この製法で試験体（図3）を製作して試験を実施し、コーティング方法が感度に与える影響について比較したところ、電気めっきした光ファイバはFBGシフト出力が安定し、かつ感度は銅コーティングよりも高く、コーティングなしに対して約3倍向上した。これはそれまで試験した光ファイバのコーティング材料の中で最も良い感度であった。本方式で性能向上した理由は、チタンと銅を重ねてスパッタリングすることで、コーティングの接着能力を確保できたためと考えられる。

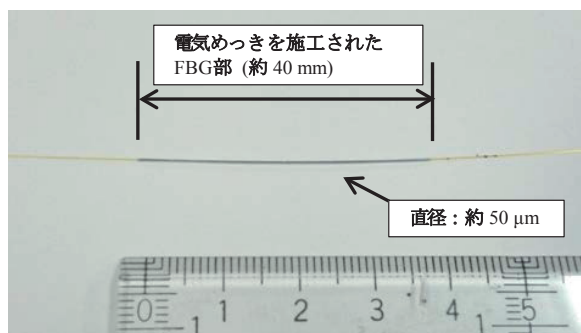


図3 電気めっき型光ファイバセンサ（測定部）

## 3. 耐久性検証試験

### 3.1 センサとしての耐久性評価

これまでの研究結果から、材料として亜鉛を、コーティング方法として電気めっき方式を用いることで、感度を向上できることが分かった。

しかし、実際に極低温環境下で計測に使用する場合、光ファイバは計測環境において十分な耐久性を持つ必要がある。

そのため今回、光ファイバの耐久性検証試験を行った。実際の使用を想定して検証項目の検討を行った結果、センサに対する外的擾乱要因として、ヒートサイクル、ヒートショック、振動が考えられる。これらを想定要因として選定し、耐久性検証試験を行った。

### 3.2 ヒートサイクル試験

実際の極低温用機器は、その都度、室温まで昇温して点検、調整等のメンテナンス作業を行っている。これらの機器に光ファイバセンサを用いた場合、昇温、作業、再冷却を繰り返すことで、既述したコーティングの剥離が進行し、波形出力が徐々に変化するという性能劣化が懸念される。

その検証として、電気めっき型光ファイバを冷却容器内の冷却板に設置し、室温から16Kまでの冷却を繰り返すヒートサイクル試験を行った。冷却、昇温のサイクルは、鉄道車両の点検サイクルを元に、年1回の検査を15年分として15回とした。

図4に測定結果を示す。

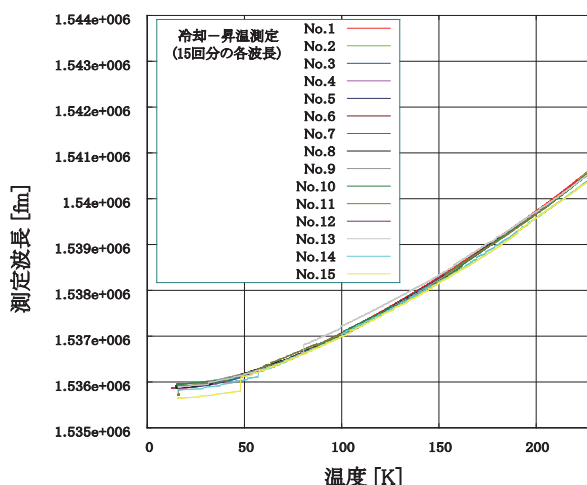


図4 ヒートサイクル試験結果

冷却、昇温を繰り返した場合、コーティング剥離が徐々に進行して温度に対する測定波長の変化が鈍化するという事象が想定される。その場合、グラフの曲線が徐々にフラットになっていくという変化が発生するが、

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

15回の試験を通して曲線は重なっており、感度低下は発生していない。これにより、繰り返しの冷却、昇温に対し、光ファイバ温度センサが性能を維持することが確認できた。

3.3 ヒートショック試験

次に、冷却された物体に接触するなど急激な温度変化があった場合、センサはヒートショックを受ける。このヒートショックに対する耐久性の検証として、室温の光ファイバを液体窒素に浸して室温から77Kまで急速冷却し、大気中で自然昇温させる試験を3回行った。

図5に測定結果を示す。

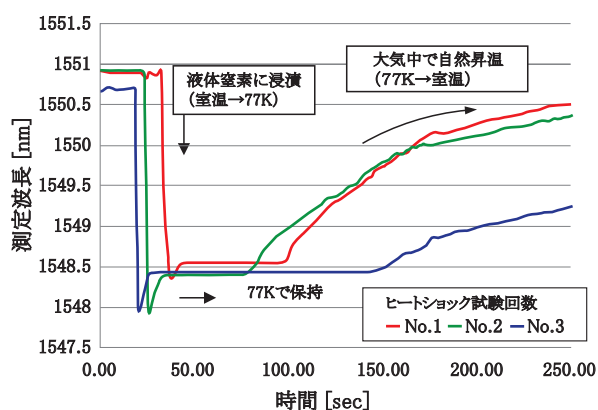


図5 ヒートショック試験結果

断線やコーティング剥離が発生した場合、表面の剥離や異常波長や出力断などの異常が発生するが、光ファイバは全ての過程で正常な出力を示した。また剥離などの外観上の異常もなかった。

これにより、ヒートショックに対して、光ファイバ温度センサが性能を維持することが確認できた。

3.4 加振試験

実際の機器で使用する場合、これらの熱負荷に対する耐久性に加えて、機械的な耐久性が必要となる。今回、実際の測定対象がさまざまな振動を受けることを考慮して、長時間の加振試験を行った。

試験においては、光ファイバを加振器の上に設置し、振動を加えた。加振条件は、15G、累積800時間とした。

加振試験を累積800時間行い、試験終了後、チェッカによる光ファイバの導通確認、外観検査による剥離の発生有無の確認、液体窒素による出力確認を行った。

その結果、光ファイバには出力異常や外観上の変化は発生せず、正常な出力を確認できた。

この結果から、繰り返しの冷却、急冷、振動を受けても、電気めっき型光ファイバセンサは温度センサとしての機能を維持することを確認した。

4. コーティング方法の改良

電気めっき方式による光ファイバセンサについて、実際の使用条件と同等の負荷を与える耐久性試験を行い、使用環境として想定される耐久性を有していることを確認できた。

しかしながら電気めっき方式は既述したとおり、真空容器内で対象金属に電子ビームを照射するための装置と、セットアップや蒸着時間などの工数を必要とする。

そこで、今回、耐久性評価と合わせて、製作コストを低減させるためのコーティング方法の改良について検討と試作評価を行った。

4.1 アルカリ性エッチング法の検討

光ファイバは絶縁体であるため、電解めっきをすることができない。そこで、還元剤にめっき対象物を浸し、酸化によって放出される電子によってニッケル皮膜を析出させる無電解めっき法をスパッタリングの代わりに使う複合めっき方式の製法評価を行った<sup>17)</sup>。

その結果、本方式では表面処理が重要であり、表面処理なしで無電解めっきを行った場合、表面剥離が発生してしまうこと、エッチングによる表面処理を行うことで光ファイバ表面とめっきの定着度が向上し剥離を防止することが分かった。さらにアルカリ系、フッ素系、強アルカリ系の各々の溶液を用いて光ファイバ表面にエッチング処理を行った場合、溶液の種類が電気めっき後の表面状態にも影響を与え、強アルカリ系溶液によるエッチングが、コーティングの表面を最も滑らかにするという結果を得た。

しかし、光ファイバの主成分であるシリコンはアルカリに溶ける性質がある。FBG部を持たない光ファイバを用いてさらに試験を行った結果、この方法は光ファイバを浸食し細くしていることが分かった。さらに、溶液の濃度が濃い場合は光ファイバが溶けて消失するという結果も発生した。

FBG部が浸食を受けた場合、反射機能が影響を受け、設定した屈折率から乖離して測定不能となる、FBG部が機能を喪失してしまうなどの不具合が発生するおそれがあることから、アルカリ性エッチングによる製法は品質管理上実現が難しいと判断した。

4.2 酸性エッチング法の検討

次に、シリコンを浸食しない酸性溶液を用いてエッチング処理を行う方法を検討した。

酸性溶液はシリコンを浸食しないというメリットがある反面、エッチング処理効果が得にくいというデメリットがある。また、エッチング状態は亜鉛めっき後の表面状態にも影響を与える。

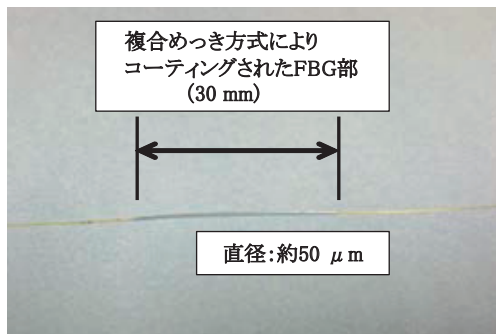


図6 複合めっき型光ファイバセンサ試作品

今回、アルカリ性溶液での経験から、エッチング処理溶液と無電解めっき処理の溶液を組み合わせ、評価試験を行った。FBG部を持たない光ファイバを対象に、18通りの組み合わせの試験を行った結果から、最も表面状態をよくできる配合を選定し、実際にFBG加工を施した光ファイバを用いた温度センサの試作品を製作した。(図6)

#### 4.3 複合めっき型試作品の評価試験結果

酸性エッチング処理を用いた無電解めっき方式によって製作した試作品の出力確認を行ったところ、エッチングで光ファイバが細くなったときに見られる波長のずれや機能低下などの異常は見られなかった。さらに液体窒素への浸漬によって、剥離などの外観上の異常や異常出力を生じることにはなかった。

次に、室温から16Kまで冷却し、波長の変化を測定した。図7に測定結果を示す。

試験結果から、試作した光ファイバ温度センサが250Kから16Kまでの温度を問題なく測定できることを確認した。

しかし、無電解めっきではニッケルの厚さが不均一になりやすいという課題がある。

今回の試作過程では、いくつかの試作品を製作し、最も均質にできたもので試験を行ったが、コーティングが不均一になり、品質検査で不合格としたものも数点発生した。しかしこれは、製造効率や歩留まりなどの製造上の品質管理に関する問題点であり、十分改善の余地がある。

今回の検討を通して、センサ製法としては一定の見込みが立てられた。今後は、今回採用した溶液配合をもとに、濃度および浸漬時間を調整して品質の改善に取り組み、改善した製法での試作と耐久性の評価を行う予定である。

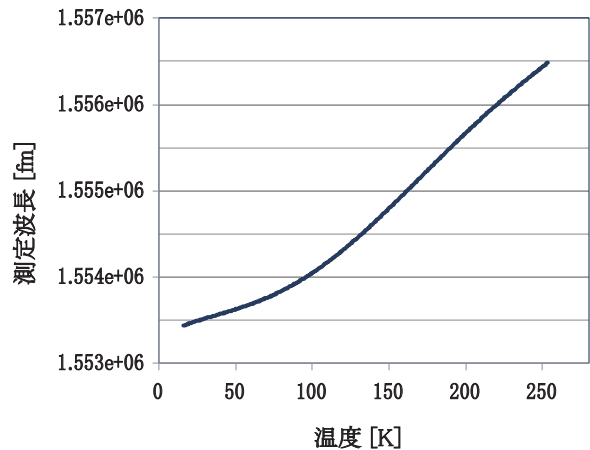


図7 複合めっき型光ファイバセンサ波長出力の温度依存性

## 5. まとめ

新たに開発した電気めっき方式にて製作した極低温用光ファイバセンサに実際の使用環境を模擬した熱変動、振動を加える耐久性試験を行った。センサは性能の劣化や損傷などの異常を生じることなく使用環境に対する耐久性を確認した。

また、コスト低減の観点から電気めっき方式を改良した複合めっき方式の製法について検討を行った。酸性エッチング処理を用いた複合めっき方式にて、実際に光ファイバ温度センサを試作し、温度計測が可能であることを確認した。ただしこの方式にはコーティング厚さが不均一になりやすい課題があるため、今回採用した溶液配合をもとに、濃度および浸漬時間を調整して改善に取り組み、本製法での耐久性の評価を行う予定である。

## 謝辞

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

## 文献

- 1) M. Iwamatsu et al., "Development of Superconducting Magnet for Simplified Ground Coils," Quarterly Report of RTRI, vol. 47, no. 1, pp. 12-17, 2006.
- 2) S. Kusada et al., "The Project Overview of the HTS Magnet for Superconducting Maglev," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, issue 2, pp. 2111-2116, 2007.
- 3) S. S. Kalsi et al., "The application of high temperature superconductors to Maglev magnets," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 3, issues 1-3, pp. 163-168, 1995.
- 4) G. D'Ovidio et al., "Comparison of maglev behavior of three

- inductors with static and dynamic field interacting with a HTC superconductor: Test and evaluation,” *Physica C*, vol. 449, issue 1, pp. 15-20, 2006.
- 5) K. Nagashima et al., “Superconducting magnetic bearing for a flywheel energy storage system using superconducting coils and bulk superconductors,” *Physica C*, vol. 469, issues 15-20, pp. 1244-1249, 2009.
- 6) F. N. Werfel et al., “Centrifuge advances using HTS magnetic bearings,” *Physica C*, vol. 354, issues 1-4, pp. 13-17, 2001.
- 7) M. Strasik et al., “Performance of a conduction-cooled high-temperature superconducting bearing,” *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 151, issue 3, pp. 195-198, 2008.
- 8) E. Watanabe et al., “Development of a superconducting claw-pole motor,” *Physica C*, vol. 468, issues 15-20, pp. 2087-2090, 2008.
- 9) T. Nakamura et al., “Novel rotating characteristics of a squirrel-cage-type HTS induction/synchronous motor,” *Supercond. Sci. Technol*, vol. 20, pp. 911-918, 2007.
- 10) D. U. Gubser, “Superconducting motors and generators for naval applications,” *Physica C*, vol. 392-396, part 2, pp. 1192-1195, 2003.
- 11) M. Frövel et al., “Multiplexable fiber Bragg grating temperature sensors embedded in CFRP structures for cryogenic applications,” 3rd Euro. Conf. Structural Health Monitoring, pp. 938, 2006.
- 12) R. Rajini-Kumar et al., “Performance evaluation of metal-coated fiber Bragg grating sensors for sensing cryogenic temperature,” *Cryogenics*, vol. 48, pp. 142-147, 2008.
- 13) R. Rajinikumar et al., “Design parameter evaluation of a metal recoated Fiber Bragg Grating sensors for measurement of cryogenic temperature or stress in superconducting devices,” *Cryogenics*, vol. 49, pp. 202-209, 2008.
- 14) H. Yamada et al., “Measurement and improvement characteristics using optical fiber temperature sensors at cryogenic temperatures,” *Physica C*, vol. 471, issue 21-22, pp. 1570-1575, 2011.
- 15) 山田秀之, 小方正文, 水野克俊, 長嶋賢: 光ファイバを用いた極低温機器の温度測定技術の開発, 鉄道総研報告, Vol. 26, No. 5, pp. 23-28, 2012
- 16) M. Sugino et al., “Improving the sensitivity of the optical fiber sensor at cryogenic temperature,” *Quarterly Report of RTRI*, vol. 56, no. 2, pp. 128-134, 2015.
- 17) 山田秀之, 小方正文, 水野克俊, 長谷川均: 光ファイバセンサの極低温特性 (第三報), 春季低温工学・超電導学会予稿集, 1P-p01, 2012