



FBG センサによる高温環境下原子炉配管変形計測用歪み・温度モニタリング技術の開発

Development of the FBG sensor for strain and temperature monitoring of high-temperature pipelines of nuclear power reactors

(株) オプテレ 小林 喬郎 Takao KOBAYASHI
 JAEA 猿田 晃一 Koichi SARUTA
 福井大原子力研 福元 謙一 Ken-ichi FUKUMOTO Member

Abstract : A new technique of temperature and strain measurement using fiber Bragg grating (FBG) optical fiber sensor at high temperature in irradiation environment was proposed, in which interrogation of FBGs is carried out based on optical time-domain reflectometry (OTDR). Heating test results showed that stable temperature measurement can be done at 600°C and the reflectance of FBG can be kept constant up to 1000°C. From the strain measurement test on a cantilever, multi-point strain measurement capability with high measurement accuracy was successfully demonstrated. Strain distribution mapping of a compressed elbow pipe and an observation of damping oscillation of a cantilever are also presented as practical applications of our technique. The FBG-OTDR optical fiber sensor will be a promising tool for inspection and diagnostics of material degradation in nuclear engineering applications.

Keywords: fiber Bragg grating (FBG) sensor, optical fiber, strain gauge, high speed strain measurement, on-line monitoring method,

1. はじめに

光ファイバセンサは、機器の歪みや温度、振動などの遠隔測定が可能である。また、電磁ノイズへの耐性と耐熱性が高く、多点計測または空間的に連続しての計測やファイバの低損失性から遠距離計測が可能など従来の電子センサと比べて多くの特長があり、原子炉や配管等への設置利用に関する基礎的な研究が長く行われてきた^[1-4]。しかしながら、現状の主なファイバセンサとしてのFBG（ファイバブラッググレーティング）センサは土木建築等の建造物の健全性の測定などに利用されているが、FBGセンサ部の耐熱温度が約300°C以下に限定されていることや、測定可能なセンサ数が数10点と少数に制限されていることなどのために原子力プラントなど高温で大規模な機器への利用には限界がある。

本研究は現状のFBGファイバセンサでは不可能な先進型軽水炉（第4世代原子炉）や高速炉などの原子力機器や冷却配管が使用される300°C以上の高温環境における耐熱FBGセンサの検討^[5]と新規なOTDR（Optical Time-Domain Reflectometry, 時間領域光反射法）の開発により、多点での歪と温度を短時間かつ高精度でオンライン計測可能な光ファイバモニタリングシステムの開発を目的とする。

2. ファイバセンサの原理と特徴

FBG（ファイバブラッググレーティング）は、外形が125μmシングルモード光ファイバの約10μmの径のコア部分にレーザ光により周期的な屈折率の変化構造を書き込んで回折格子（グレーティング）を形成したもので、特定の波長の光を選択的に反射または透過させることができる波長選択素子である。その構造をFig.1に示す。

FBGの光学的特性は書き込む屈折率の変化量、グレーティングの周期間隔 Λ 、及びグレーティング全体長で決定される。FBG反射スペクトルの中心波長はブラッグ波長と呼ばれ、その基本波長は次式で表される。

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad \text{—————(1)}$$

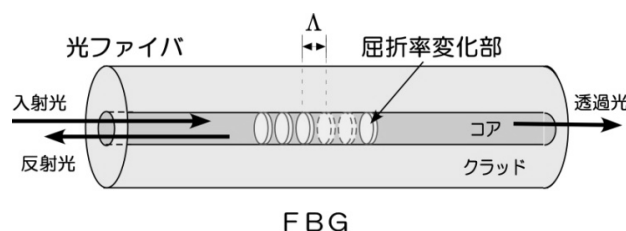


Fig.1 A schematic view of FBG sensor structure

連絡先:名前、〒914-0055 福井県敦賀市鉄輪町 1-2-4、
 福元謙一 所属先、福井大学附属国際原子力工学研究所
 E-mail: fukumoto@u-fukui.ac.jp

ここで、 n_{eff} はファイバの実効屈折率である。FBGの歪みや温度変化により屈折率とグレーティングの周期間隔が変化するため、 λ_B の変化量から歪みや温度を導出できる。

従来のFBGセンサ法では広いスペクトル幅のSLD(スーパーミネッセントダイオード)光源を用いて光ファイバ中のFBGを照射し、多数の異なるブラッグ波長を持ったFBGからの反射光を分光器により測定する手法を採用している。すなわち、多数のFBGスペクトルを波長領域で多重化するWDM(Wavelength Division Multiplexing)法であり、標準的な方式として利用されてきた。この方式では測定可能な歪み率が約 $10^{-6}\epsilon$ の高精度で測定でき、測定時間が約1msと高速測定が可能であることなど、優れた特性がある。しかしながら、利用できるSLD光源のスペクトル幅の制限から1本のファイバに設置できるFBGセンサ数が一般的には数10点に制限されるため、測定対象が小型装置などに限定され大型装置や広域での数100点以上の多点測定には利用が困難であった。

そこで、本研究ではLD(レーザダイオード)光をパルス動作させて多数の同じ反射スペクトルを持つFBGからの反射光パルスの強度を時間的に分離して測定する手法として、FBG-OTDR法と呼ばれる技術について検討を行った^[6]。

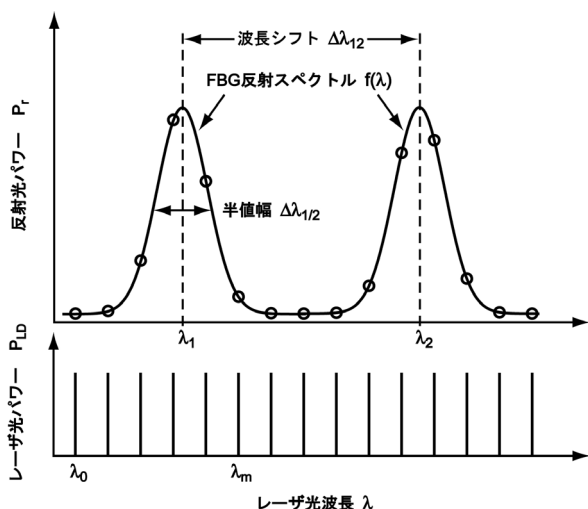


Fig.2 Reflected power as a function of Bragg wavelength shift and laser wavelength

Fig.2は、ブラッグ波長が λ_1 から λ_2 へ波長シフトした時、LD波長を微小波長間隔で変化させて測定したFBGからの反射光パワーの変化を模式的に示している。各LD波長に対する反射光パワーを測定すれば、FBG反射スペクトル $f(\lambda)$ がわかるので、その中心波長であるブラッグ波長が求まり、最終的に波長シフト $\Delta\lambda_{12}$ からひずみや温度を導出できる。

FBG-OTDR法では、FBGを照射する光がパルスであるため、各FBGからの反射光がFBG設置位置に対応した時間間隔で検出されることになり、各FBGの識別は時間領域で行われる。LDの発光タイミングをトリガ(時間0)として、FBG反射光の到達時間 t_d を測定すれば、各LDの設置距離Lは次式で求められる。

$$L = c t_d / 2 n_{eff} \quad \text{--- (2)}$$

ここで、cは光速である。

また、距離分解能は次式で与えられる。

$$\Delta L = c \tau / 2 n_{eff} \quad \text{--- (3)}$$

ここで τ はレーザパルス幅と測定系のパルス応答時間の和として与えられる。

さらに光源に使用するLDは、SLDに比べ2~3桁以上高いスペクトル輝度を持つため、FBGからの反射光を高い信号対雑音比で検出できる。したがって、雑音の影響が極めて小さくなり、高精度計測が可能である。

以上のようにFBG-OTDR法では、反射光パワーからブラッグ波長を導出し、各FBGの識別は時間領域で行うため、従来法のように光源スペクトル幅によって1本の光ファイバ中に設置するFBG数の制限がなく、計測点数を大幅に増加することが可能である。また分光を必要としないため、短時間で信号処理を行うことが可能であり、例えば地震などにおいて、基本波から高調波を含めた動的計測、解析が可能になる。測定精度は $10^{-6}\epsilon$ 程度と、従来法と同等の高精度が得られることから、FBG-OTDR法を用いることにより、高精度かつ短時間で、大規模な原子力プラントなどの構造物のモニタリングが実現できる。さらに本方式は分光器が不要で測定装置が簡素である、同一波長特性のFBGセンサを利用できるなど、従来のFBG法に比べて実用的にも利点がある。

3. FBG-OTDR 測定器の構成と特性

本研究で試作開発したFBG-OTDR法の測定装置の構成をFig.3に示す。光源は2個のLDで、それぞれパルス光をシングルモード(SM)ファイバ中に送出する。センシングファイバには中心波長がほぼ等しい低反射率のFBGセンサが多数設置されており、それらの反射光をフォトダイオードで検出し電圧に変換する。デジタルオシロスコープでA/D変換信号処理を行い、信号電圧と到着時間から各FBGの位置と中心波長を求める。Fig.4に測定器の外観を示す。写真下部が測定器本体で上が小型のデジタルオシロスコープである。

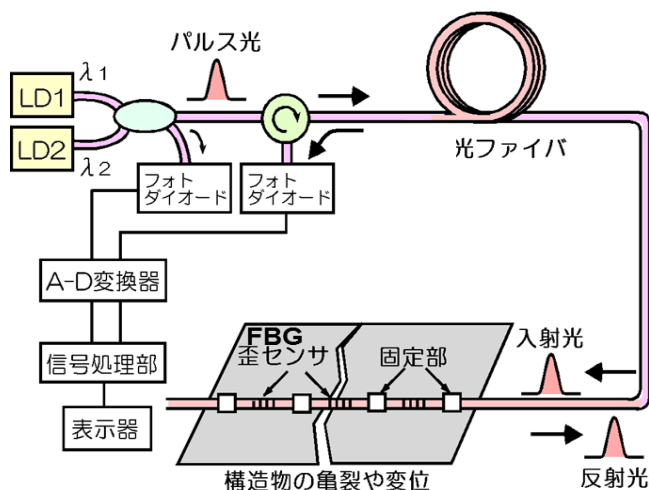


Fig.3 A schematic diagram of the FBR-OTDR setup



Fig.4 FBG-OTDR system with digital oscilloscope (upper)

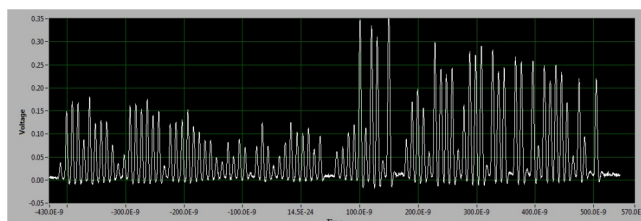


Fig.5 Signal pulse shapes for 2λ operation for high speed mode (100ns/div)

Fig.5にLDを2波長で交互に動作させた場合のFBG反射パルスの測定波形を示す。前半の40本の波形がLD波長 λ_1 (1550.1nm)、後半の40本が波長 λ_2 (1550.3nm)での各FBGからの反射パルス波形である。LDの波長を変化させて各FBGのピーク値の最大波長からFBG中心波長が導出され、歪み率と温度が求められる。測定器の制御と受信パルス波形の処理及び表示はソフトウェアにより行った。

FBGセンサ部の装着は、Fig.3に示すように、歪み率の測定の場合、FBG両端を被測定体へ接着剤で固定する。測定点の温度も変化する場合には歪みと温度の合成成分が測定される。そこで歪みと温度成分の分離のため、両

端固定のFBG近傍に別のFBGを片端のみを固定し、他端は自由端にして測定体の歪みが加わらないように設置することで温度のみを測定した。歪み率は前者の合成成分と後者の温度成分の差分値から求められる。

本装置では、LDの動作方式を切り替えることで、高速測定と大歪み測定を行うことができる。地震時など歪みが短時間で動的に変化する場合、2個のLDの波長 λ_1 、 λ_2 のパルス光を1ms以下の間隔で発生させることで、歪み率と温度を高速に計測することが可能となる。一方、大きな歪みや温度の測定時は、一方のLDのみを使用し、約10s以上の測定時間で波長を段階的に変化させることで可能となる。装置の動作特性を以下にまとめる。

(1) 基本特性

- ① FBGセンサの条件: 反射スペクトル幅0.08~2 nm, 反射率 $10^4 \sim 10^3$
- ② センサ数1~100個 (理論値、約1,000個も可能)
- ③ 最短FBG間隔20cm
- ④ 最大センサ距離30km

(2) 高速測定モードの特性

機能: 2個のLDから2波長パルス光を交互に発生させて歪み率と温度を高速で計測

特性:

- ① 測定時間: 約1 μ s
- ② 歪み率測定: 測定範囲 $10^{-3}\epsilon$ 、精度 $10^6\epsilon$
- ③ 温度測定: 測定範囲0-100 $^{\circ}$ C、測定精度約0.3 $^{\circ}$ C

(3) 大歪み率測定モードの特性

機能: LDの波長を段階的に変化させて大きな歪み率と温度を計測

特性:

- ① 測定時間: 1-10s (波長変化数に依存)
- ② 歪み率測定: 測定範囲 $10^2\epsilon$ 、精度 $10^6\epsilon$
- ③ 温度測定: 測定範囲0-600 $^{\circ}$ C、測定精度0.3-1 $^{\circ}$ C

4. 高温でのFBGセンサ特性の安定性向上

現状のFBGセンサは紫外域レーザー光を照射してファイバのコア部にカラーセンタ (色中心) と呼ばれる電子の励起状態を発生させ、フォトリフラクティブ効果によって屈折率を変化させて回折格子を形成している。そのため約300 $^{\circ}$ Cを超す高温域では電子の不安定性から生じるカラーセンタの減少により屈折率が低下してFBGの反射特性が消失する欠点がある。

一方、超短パルスレーザー光を用いてファイバのコア部に回折格子を書き込むPGP (Point by point) 法や干渉法に

よる作製法では超高強度のレーザー光が SiO₂ の石英ガラスを改質して Si や SiO 等に構造変化させるため、高温でも FBG の反射特性が持続可能であることが知られている^[7]。そのため、我々はフェムト秒域の超短パルスレーザー光を用いて PGP 法での FBG 作製装置を開発して FBG 反射率の温度変化特性を調べてきた^[5]。照射するレーザーは、波長 800nm でパルス幅 100fs (10⁻¹³ s) のチタンサファイアレーザーで、そのパルスエネルギーと照射光学系を最適化して FBG の作製を行った。FBG を書き込む光ファイバとして現在の光通信技術で最も低損失で安定性の高いシングルモードファイバである SMF-28(Corning 社製)と、最近開発されたシングルモードの耐放射線ファイバ RRRSMFB(フジクラ (株) 製)^[8]を用いて FBG を作製し、それらの温度特性を測定した。比較のため従来のナノ秒パルスの紫外域 KrF エキシマレーザー (波長 248nm) により作製した市販の FBG (UV-SMF)の測定も行った。

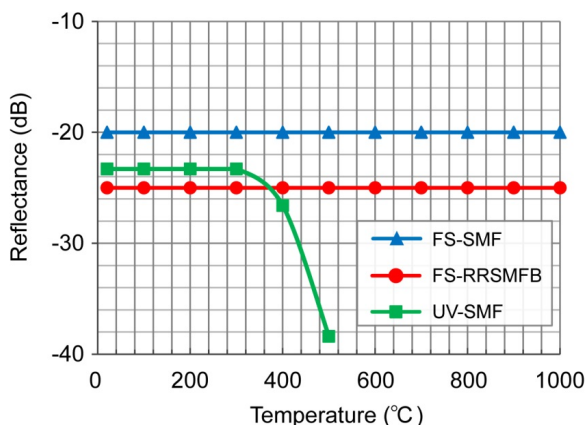


Fig.6 Temperature dependence of FBG reflectance for various laser pulse and optical fibers

Fig.6 に、フェムト秒レーザー作製のシングルモードファイバ FBG (FS-SMF) と耐放射線ファイバ FBG (FS-RRSMFB) 及び従来の UV レーザ利用の FBG (UV-SMF)のピーク反射率の温度による変化を比較した結果を示す。従来の UV-SMF ファイバでの FBG は 300°C 付近から反射率の低下が見られるが、フェムト秒レーザーによる FS-SMF と FS-RRSMFB の 2 種のファイバでの FBG では反射率の低下が 1000°C でも見られず、安定な値を保持することが判明した。この結果より、600°C 程度の高温になる高速炉においても、FBG センサの反射スペクトルと反射率は、長期間にわたり安定に維持されると推定される。しかしながら実用のための高精度な寿命時間のデータは高温での長期間の測定試験が必要である。

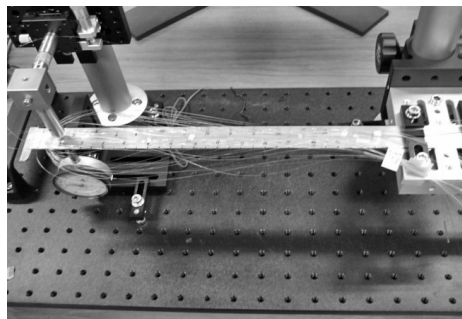
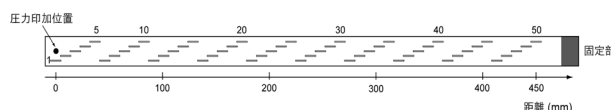


Fig.7 FBG set-up on the cantilever (upper) and a view of cantilever measurement system (bottom)

5. 梁の歪み率空間分布の測定

基本的構造体である金属の片持ち梁を測定用試験体として使い、一端を固定し他端に力を加えて曲げ、発生した歪み分布を測定することで、本ファイバセンサの空間分布測定特性を検討した。

Fig.7 の上図に測定した梁と FBG センサの配置図を示す。梁の材質は SUS304, サイズは 500mm x 25mm x 2mm、歪み印加長 460mm、測定長 450mm、FBG センサ数 50 点、梁上でのセンサ配置間隔 9mm である。また、標準的な歪みゲージを各点に貼り付けて歪み率を測定した。Fig.7 の下図に歪み測定系の外観を示す。

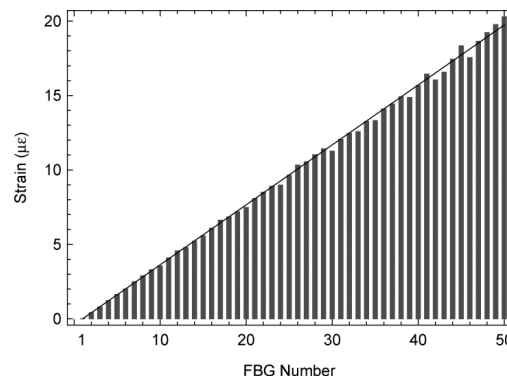


Fig.8 Comparison of strain distribution on the cantilever (vertical bar : FBG-OTDR and solid line : strain gauge)

Fig.8 に各センサ位置に対する歪み率の測定値と歪みゲージによる測定値 (実線) の比較を示す。50 点の空間分布計測が示され、理論から予想される位置に比例した歪み率の増大特性が見られた。また、Fig.9 に 50 番目の位置の歪みゲージ測定による歪み率に対する FBG センサ測定

による歪み率の関係とその偏差値を示す。その結果、FBG 測定値の標準偏差は歪み率が小さい領域では $1\mu\epsilon$ であり、現状の歪みゲージも $1\mu\epsilon$ の偏差値を示すことから、FBG-OTDR 法は歪みゲージと同程度の高精度特性を有することが確認された。

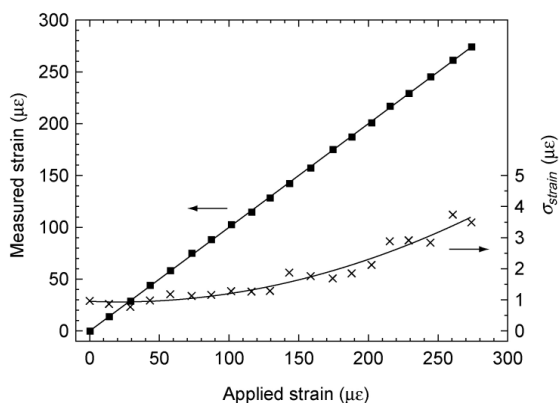


Fig.9 Measurement accuracy of FBG-OTDR sensor

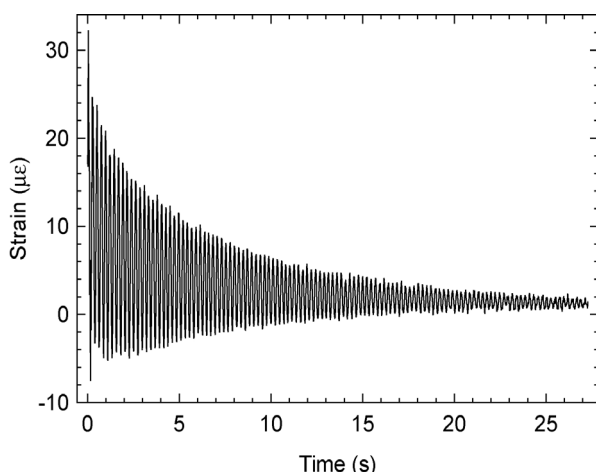


Fig.10 Damped oscillation of cantilever measured by FBG-OTDR sensor

また Fig.10 に片持ち梁への力を解放させた場合の自由振動による歪み率の時間変化波形の測定結果を示す。梁の自由振動の減衰特性が観測されている。波形のフーリエ解析によりその周波数スペクトル分布が求められ、構造体の共振特性や微細な状態の変化特性など詳細な解析の可能性が判明した。

6. 配管エルボの歪み率空間分布の測定

次に、試験体として配管の曲がり部分に用いられるエルボ構造体を使用して、歪み率の立体的な空間変化を測定した。Fig.11 に測定に用いたエルボの外観を示す。直径は 100mm、厚さ 1.0mm、曲がり角 90° 、材質は SUS304 である。表面に 10 点ずつ 10 列、合計 100 点の FBG センサ

部をエルボ表面に引いた線に沿ってコイル状に巻いて 10mm 間隔に接着剤で貼り付けエルボ周方向の歪み率を測定した。

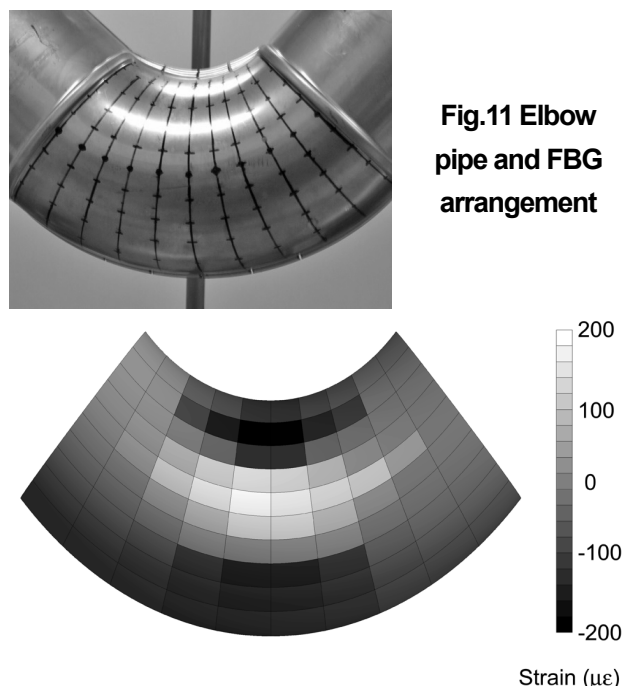


Fig.11 Elbow pipe and FBG arrangement
Fig.12 A strain map on elbow pipe in compression test measured by FBG-OTDR sensor

Fig.12 にエルボの曲り角度を 90° から 1° だけ狭める方向に力を加えて変形させたときの各点での歪み率変化を示す。板厚が 1mm と薄いため、前面の中央付近で約 $200\mu\epsilon$ の伸びとその外部で収縮による歪みが複雑に生じていることが分かる。今回はセンサの動作可能性の試験であったため歪み分布の精度に対する検討は行わなかった。また、この測定は高速測定モードで行われ、1 回の測定に要する時間は $2\mu\text{s}$ と超高速であり、地震やその他の振動による機器形状の変形や歪み率の時間経過も観測可能である。

これらの結果より、FBG-OTDR センサにより高温配管を模擬した試験体の歪み率と温度の高速での多点計測が可能なが示された。

7. 今後の検討課題

今後、高温環境下における原子力機器・配管の温度・歪みモニタリング法として、FBG-OTDR 法を開発し改良していく上で、次の課題が挙げられる。

- ① 放射線環境下における FBG センサの安定性の検証
- ② 長期間の高温環境下における光ファイバのクリープ変形が FBG センサに与える影響の評価

③ FBG センサの高温機器への安定な装着法の検討

既に③に関連しては、FBG 部を SUS304 のシート材で保護するホルダーを取り付け、それを被測定機器にセラミック系接着剤で接着することにより、数ヶ月間にわたるほぼ安定した歪み率測定の結果が得られている^{[9],[10]}。以上挙げた課題とともに計装実機環境で生じる多くの問題を克服しながら原子力機器・配管の温度・歪みモニタリング法としての FBG-OTDR 法を確立して行く予定である。

8. まとめ

先進型軽水炉や高速炉などの高温下における原子力機器や冷却配管の歪みと温度を短時間かつ高精度でオンライン計測する光ファイバセンサとして、FBG-OTDR 方式による新規光ファイバモニタリング装置を開発し、その動作特性を明らかにした。

多点測定を行うため、ソフトウェアによる制御技術を採用して FBG-OTDR 測定器を開発した。その結果、FBG 数 100 個 (理論値 1,000 個) の測定を、高速測定モードでは、測定時間 1 μ s、歪み率測定範囲 $10^{-3}\epsilon$ (0.1%)、測定精度 $10^{-6}\epsilon$ 、温度測定範囲 0-100 $^{\circ}$ C、測定精度約 0.3 $^{\circ}$ C で実施可能であり、また大歪み率測定モードでは測定時間 1-10s、歪み率測定範囲 $10^{-2}\epsilon$ (1%)、測定精度 $10^{-6}\epsilon$ 、温度測定範囲 0-600 $^{\circ}$ C、測定精度 0.3-1 $^{\circ}$ C で実施可能である。また、最短 FBG 間隔は 20cm、最大センサ距離は 30km が可能である。

また、フェムト秒域の超短パルス幅のレーザ光を用いた FBG 作製装置を開発し、照射光学系などを最適化した。その結果 600~1000 $^{\circ}$ C の高温でも極めて安定な FBG センサ特性が実現された。

さらに、高温配管を模擬した試験体の歪み率の多点計測を実現するため、金属片持ち梁を用いて表面の歪み率の位置変化を 50 点の FBG センサで測定した。その結果、FBG 測定値の標準偏差は歪み率が小さい領域では $10^{-6}\epsilon$ となり歪みゲージと同程度の高精度特性であることが示された。また、配管のエルボ構造体を変形させて歪み率の立体的な空間変化を 100 点の FBG センサにより測定した。その結果、前面中央付近での伸びと収縮が複雑に生じている分布特性が可視化され、複雑な形状を持つ配管の歪み率に対する高速のオンラインモニタリングが可能なが示された。

本研究は、特別会計に関する法律 (エネルギー対策特別会計) に基づく文部科学省からの受託事業として、福井大学が実施した平成 21-24 年度「「もんじゅ」における高速増殖炉の実用化のための中核的研究開発」の成果の一部です。

参考文献

[1] R.M. Measures : “Structural Monitoring with Fiber Optic Technology”, Academic Press (2001).

[2] 中沢、高橋、福田 : “光技術による原子炉計装系の研究”、JAERI-Tech, 2002-019.

[3] 雨宮、中沢、有吉、伊藤 : “光ファイバブラッググレーティングによる原子炉計装の研究”、JNC 共同研究報告書、JNC-TY9400-2004-008

[4] K. Matsubara, C. Ito, H. Kawahara, T. Aoyama: “Development of Fast Reactor Structural Integrity Monitoring Technology using Optical Fiber Sensors”, Journal of Power and Energy System, Vol.2, No.2, pp.545-556 (2008).

[5] 島田、西村、猿田、月森、小林 : “フェムト秒レーザを用いた Point by Point 加工による耐熱 FBG の製作”、第 72 回原子力学会講演会予稿集、1123a (2009).

[6] 吉川、小林 : ”FBG-OTDR 方式光ファイバ歪みセンサにおける超多点計測”、光波センシング技術研究会予稿集、LST-41-12 (2008).

[7] H. Bartelt, K. Schuster, M. Rothhardt and I. Latka, “Single-pulse fiber Bragg grating and specific coatings for use at elevated temperatures”, Applied Optics, Vol.46, No.17, pp.3417-3424 (2007).

[8] T.J. Wijnands, K. Aikawa, J. Kuhnheim, D. Ricci, U. Weinand: “Radiation tolerant optical fibers : from sample testing to large series production”, Proc. IEEE, pp.788-798 (2011).

[9] 小林、勝山、栗原、猿田、月森 : “原子力プラント監視のための耐放射線・耐熱特性光ファイバセンサシステム”、応用物理関係学会春季連合大会予稿集 (2012) .

[10] 小林、勝山、猿田、月森 : “先進型高速炉実用化に向けた保全技術開発- FBG ファイバセンサによる歪み・温度モニタリングシステム開発”、日本原子力学会講演会予稿集(2013) .

(平成 25 年 12 月 19 日)

謝辞