

高速炉高温構造物の健全性モニタリングのための耐熱 FBG センサの開発

Development of heat-resistant FBG sensor for high temperature structures monitoring

(独)日本原子力研究開発機構	増住 考志	Takashi MASUZUMI	Non Member
(独)日本原子力研究開発機構	月森 和之	Kazuyuki TSUKIMORI	Non Member
(独)日本原子力研究開発機構	島田 幸洋	Yukihiro SHIMADA	Non Member
(独)日本原子力研究開発機構	西村 昭彦	Akihiko NISHIMURA	Non Member

Strain sensors, which can be used for integrity monitoring of plant components and piping during the operation period continuously, are effective from the point of view of proactive maintenance. FBG (Fiber Bragg Grating) sensor is one of the expective sensors and is used in various plants and civil engineering and construction fields except for high temperature service. In order to apply to the component and piping of fast reactor, heat resistance is an indispensable feature of the sensor. In this study, we tried to improve heat resistance of FBG by using femtosecond laser in the process. The heat resistance at the FBGs was examined experimentally and the results compared with those of ordinary FBGs.

Keywords: Fast Reactor, High temperature, Condition monitoring, FBG, Strain sensor

1. 緒言

原子力発電プラント等においては、安全性を確保すると同時により高度な信頼性を維持するために、時間基準保全 (TBM) だけではなく、予防保全あるいは予知保全の導入が求められている。特に環境・エネルギー問題の観点から、原子力発電設備の稼働率向上、長寿命化は重要な課題であり、安全・安定運転を支える保全技術発展への期待は大きいといえる。軽水炉発電プラントではすでに保全の高度化への取組みが始まっている。今後、新検査制度が導入されると、リスク情報の活用や状態監視技術の積極的活用が重点事項のひとつであることから、このような動きはますます加速されるものと考えられる。ただし、現在の発電用原子炉施設の保守管理においては、動的機器の振動監視などは既に行われているが、静的機器に対しては運転温度、流量の情報を用いて機器・配管等に発生する応力を計算、評価するシステムによる状態監視が一部のプラントで行われている程度である。高速増殖炉は将来の実用化を目指して開発段階にあるが、実用化に際してはより合理的な保全実施計画が求められると考えられるし、またこの要求に応えられなければ競争力を失うことに繋がると考えられる。

このような背景から、筆者らは予防保全技術開発のひとつとしてリスクベース保全手法の検討を実施しているところであり、高速増殖炉の主要機器を対象とし

て定性的リスクマトリックスの試評価を行い^[1]、さらにリスク低減方策を検討している。運転状態において機器・配管等に発生するひずみを長期にわたって測定・監視する合理的な手段があれば、着目する機器・配管の経路するひずみを継続的に測定でき、状態監視のみならず、予防保全、リスク低減の観点からきわめて有効な手段となる。

機器・配管のひずみを測定・監視する方法としては、平成 17 年度福井県における高経年化調査研究会において調査されている^[2]。長期的な連続モニタを考えると、光ファイバーを利用する方法が有望である。着目する部位が予め決まってい、局所的なひずみを捕らえるには FBG (Fiber Bragg Grating) センサが効果的と考えられる。土木建築分野では FBG センサにより温度・ひずみを測定し構造健全性を監視する「構造ヘルスマニタリング」が実用化されている^[3]。原子力発電所の保全の高度化研究を行った「原子力発電プラント・フレキシブルメンテナンスシステム (FMS)」開発プロジェクトにおいてもプロセス量多地点計測センサに FBG を採用し、漏洩箇所と同様に用いるシステムを示している^[4]。しかしながら、高速炉機器・配管のひずみモニタ用として FBG を実用化するためには高温での耐久性、耐放射線性が十分でなければならない。光ファイバーそのものについては 600°C 以上の使用に耐えられる製品が出ているが、局所的な温度・ひずみ測定が出来る FBG は常温 (100°C 程度) 用のものしか

連絡先:増住考志、〒919-1279 福井県敦賀市白木 1 丁目、日本原子力研究開発機構、電話: 0770-39-1031、e-mail: masuzumi.takashi@jaea.go.jp

製品化されておらず、海外の一部の研究室において600°C以上での使用を可能とするFBGが研究されている段階である^{[5][6]}。

そこで本研究開発では、高温・放射線環境下で使用可能なFBGを開発し、高速炉プラントの機器・配管の構造健全性モニタリングシステムのひずみセンサとして適用できることを実証することを目的とし、その第1段階として、耐熱性向上のためにフェムト秒レーザーを使用した光ファイバーへの格子加工を試み、加熱試験を行い、FBGの耐熱性向上の可能性検討を行った。

2. FBG センサの利点と現状

2.1 保全におけるリスク低減方策

リスクは「破損の起こり易さ」と「被害の大きさ」の積で求められるため、「破損の起こり易さ」と「被害の大きさ」のどちらかまたは両方を小さくすることでリスクを低減できる。高リスクと評価された部位に対してリスクを下げる方法としては以下の対策が考えられている^[7]。

○破損の起こり易さを低減する対策

- ・ より精密な検査の実施
- ・ 負荷のかからない条件での運転
- ・ オンラインモニタリングの実施
- ・ 検査間隔の変更

○被害の大きさを低減する対策

- ・ オンラインモニタリングの実施
- ・ 被害の拡大防止設備の設置

「精密な検査」は信頼性向上、損傷の正確な把握に、「負荷のかからない条件での運転」は安全裕度の向上に、「検査間隔の変更(短縮)」は異常の早期発見に、「被害の拡大防止設備」は文字通り被害拡大抑制に、また、「オンラインモニタリング」は異常の早期発見、さらにそれによる適切な処置につながると言える。また、オンラインモニタリングは運転を止める必要がない、つまり稼働率を低下させずにすむという利点がある。ただし、高速増殖炉の機器センサに適用するためには、600°C近くの高温と放射線環境下での耐性が求められる。

2.2 オンラインモニタリングセンサとしてのFBGと高温適用の課題

本研究においては、オンラインモニタリングに有効なセンサとして、電磁氣的ノイズの影響を受けない、耐久性が比較的高い、コンパクトであり遠隔・集中監

視が容易であるなどの優れた特性から光ファイバーセンサ、とりわけ局所的な温度、ひずみを精度良く捉えることができるとされるFBGに着目した。

FBGは、ビル、橋、航空機の翼、石油パイプライン等に貼り付け巡らせることにより、ひずみ、温度などを連続的に測定し構造物の健全性を診断する構造ヘルスマニタリングシステムのセンサとして実用化が進められている^[3]。高速炉の放射線環境下でのFBG適用研究としては高速実験炉「常陽」における1次冷却系配管サポートの変位・振動測定があり、積算線量約 7×10^4 Gyにおいても健全性が維持されたとの報告がある^[8]。しかし、一般産業界で実用の域にあるFBGは専ら常温での使用を対象としており、600°C近い高速炉の高温機器での適用は困難である。これは、一般のFBGがUltra-Violet(UV)レーザーで光ファイバー中に高屈折率の線返し構造(BG)を形成しているために高温においてこの構造が著しく劣化するという本質的な問題による。

高温での使用を目的としたFBGに関しては、カナダのCRCやイギリスのASTON大学などから研究報告が発表されている^{[9][10]}。CRCカナダは2006年5月、Measurement Science and Technologyに1,000°C耐熱試験に関する論文を発表し、広報誌に高温センサに適したFBG製造法を開発したと紹介している^[5]。本論文のFBGはInfrared(IR)レーザーで製作されている。上記論文発表に先立ち、2003年には120-fsレーザーで300°C、2週間、2004年には950°Cまでの試験についてOptics Letters等に公表している^[11]。

フェムト秒レーザーはそのパルス幅が 10^{-15} 秒台で光のエネルギーが超短時間に凝縮されているため、パルス先端で高いピークパワーを稼ぐことが出来る。このためガラスを傷つけることなく屈折率変化部を書き込むことが可能であることから熱的に安定と考えられており、耐熱性の飛躍的向上の可能性がある。

2.3 耐熱FBGのグレーティング作製技術

耐熱FBGのグレーティング作製にはCRC、ASTON大ともフェムト秒レーザーを使用している。CRCは一般のFBG作製に用いられている位相マスクを使用しているのに対し、ASTON大はPbP(point-by-point)法を用いている。他に一般のFBG作製では干渉露光法が用いられているが、この方法を用いた耐熱FBGの報告は見当たらない。2007年9月にカナダで開催された米国光科学会主催の国際会議(BGPP)において発表され

た最新情報^{[12][13]}を元に、パルスエネルギー $5\mu\text{J}$ 以下で書き込む PbP 法が有望との方針を得たことから本研究では、フェムト秒レーザーによる PbP 法で格子加工を行い、耐熱 FBG を作製することとした。

3. フェムト秒レーザーによる格子加工

3.1 FBG 模擬加工

はじめに、光ファイバーの材料である石英ガラスへフェムト秒レーザーで屈折率変化を起こせることを確認するため、まず石英ガラスの板状試料に対してフェムト秒レーザーを用いて非熱加工を行った。

加工に使用したフェムト秒レーザーは Clark 社 CPA-10 である。パルスエネルギーは $40\mu\text{J}$ 、繰り返し 10Hz 、パルス幅 100 フェムト秒の光を用いた。加工点の間隔は $5\mu\text{m}$ 、列の間隔 $10\mu\text{m}$ で 2mm 角の回折格子を石英ガラス板に作製した。Fig.1 の位相差写真において、レーザーパルス 1 ショットで加工された加工点が縦方向に $5\mu\text{m}$ 間隔の列となり、これが $10\mu\text{m}$ 間隔で規則的に並んでいる。

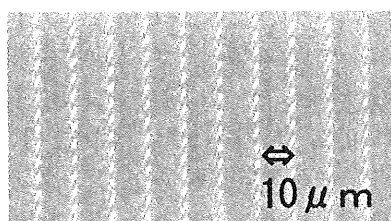


Fig.1 The phase microscope image of periodic refractive index structure in the silica glass

次に UV 樹脂被覆を持つ光ファイバーへの BG 構造の書き込みを行った。光ファイバーのコア径は約 $10\mu\text{m}$ 、外皮は $250\mu\text{m}$ 、加工に持った光強度は約 $2\mu\text{J}$ である。上記実験で使用した板状試料と異なり、光ファイバー等の円筒試料では光の入射面が曲面となり、内部観察及び加工のための集光が困難である。この問題を回避すべく、光ファイバーの周囲を屈折率: $n=1.516$ の屈折率整合液で充填し、観察及び加工を行う光の入射方向にはカバーガラスにて平行面を作り出した後にレーザー加工を行った。

Fig.2 に加工後の光ファイバーの位相差顕微鏡像を示す。当初光ファイバーの深さ方向に対して、加工点を中心からずれるという問題が発生した。この原因は

観察を行う可視光と加工を行う光の波長 (800nm) の相違により顕微鏡の色収差が発生し、観察光と加工光の焦点位置が異なる点にあった。そこで、コア内にレーザーが集光している時に光ファイバー端で白色光が計測されることを利用し、深さ方向についてもコア内に加工できるようにした。

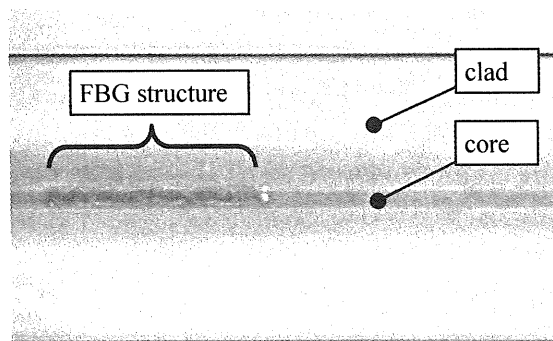


Fig.2 The phase microscope image of FBG structure in the optical fiber

製作した試作 FBG の反射波長スペクトルを測定した結果を Fig.3 に示す。反射波長約 1540nm の目標に対して、 1538nm に反射率 -23dB 程度の FBG 構造が計測され、ほぼ設計どおりの FBG 構造を加工できることが確認できた。

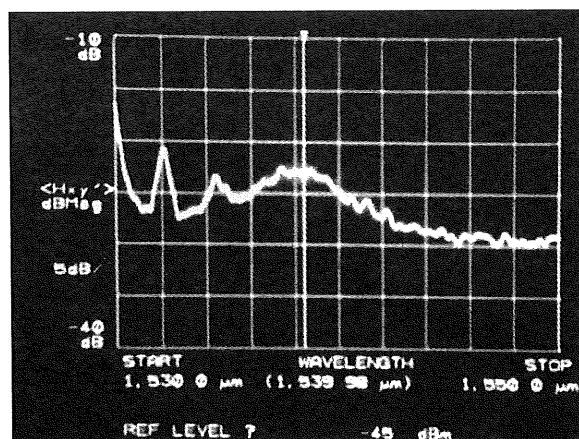


Fig.3 The reflection spectrum of the trial FBG (center wavelength ; 1538nm)

以上の実験結果からフェムト秒レーザーと顕微鏡加工技術の組み合わせにより、耐熱 FBG センサの試作が可能であることを実証できた。

3.2 加熱試験

(1) 石英ガラス板の加熱試験 1

回折格子の高温特性の評価のため、アルミナ坩堝とタングステンヒーターを用いてガラス製真空容器内で1時間の加熱試験を実施した。電気炉は6V、30Aの電力で約20分間の加熱により945℃まで昇温することが出来た。加熱試験に先立って回折格子にHe-Neレーザーを透過させ、回折像 (Fig.4) の計測とピンホールによる0次光と1次光及び2次光の切り出しを行い、これら回折光の相対強度比を測定した。0次光に対する1次光の強度比は、0.016(加熱前)、0.016(530℃)、0.021(845℃)、0.014(945℃)となった。高温ガス炉炉心出口温度相当の945℃でも回折格子にほとんど劣化が見られないことから、本手法による有効性を確かめることができた。

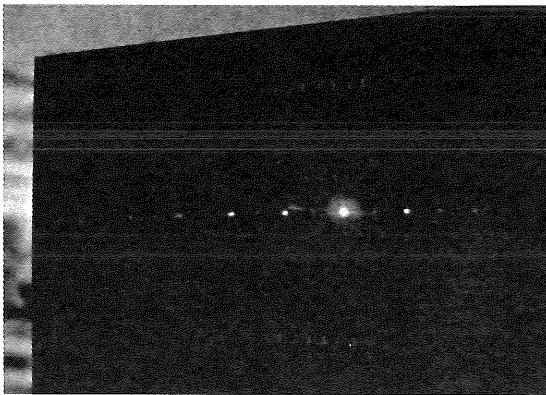


Fig.4 The diffraction image from periodic refractive index structure in the silica glass

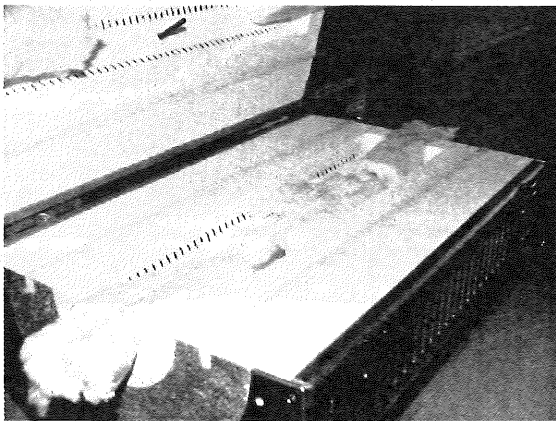


Fig.5 Heat test equipment

(2) 石英ガラス板の加熱試験 2

開閉式電気管状炉を用いた加熱試験装置により、より長時間の加熱試験を実施した (Fig.5)。

格子加工を施した石英ガラス板を1000℃で168時間加熱した。Fig.6は石英ガラス板内の回折格子に回折格子にHe-Neレーザーを透過させて観察した干渉像の加熱前後の様子である。図のとおり、1000℃で168時間加熱した後でも、回折パターンに明らかな劣化は見られない。

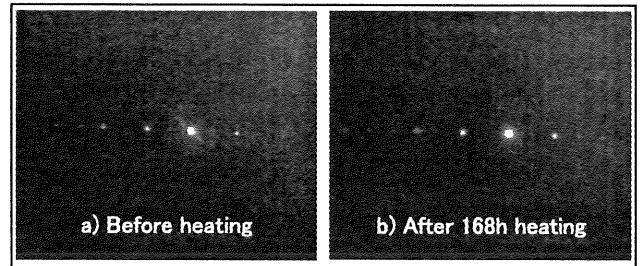


Fig.6 Comparison of the diffraction images before and after heat test of a silica glass

(3) 一般のFBGの加熱試験

一般に市販されているFBG付光ファイバー (一般FBGと呼ぶ) の加熱試験を行い、反射特性の変化を調べた。試験に使用した一般FBGは、FBG長10mm、中心波長約1530nm、反射率92%のものを用いた。

一般FBGを加熱試験装置 (Fig.5) の電気炉内で各設定温度 (500℃、600℃、1000℃) まで昇温し、一定時間ごとに取り出して反射特性を測定した結果を Fig.7 に示す。一般FBGは600℃で加熱すると24時間で反射率が約半分に、約200時間で約1/20になることが分かった。

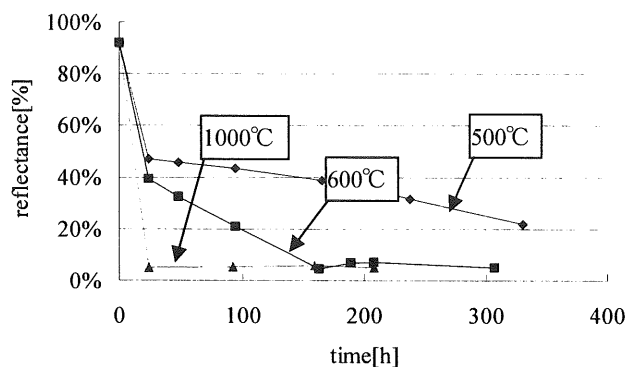


Fig.7 Reflectance change of the normal FBG by heat test

(4) 耐熱 FBG の加熱試験

3.1 節で試作した耐熱 FBG を上記と同様、Fig.5 の加熱試験装置で 600°C まで昇温し、24 時間保持したのち常温に戻して反射特性を測定した。Table 1 に示すとおり、24 時間後でも反射スペクトル特性はほとんど変化しなかった。

Table 1 Reflectance change of the heat-resistant FBG by heat test

	Before heating	After 24h heating
sample A	-25dB	-24.2dB

temperature ; 600°C
center wavelength ; 1538nm

高速炉を想定した 600°C でも反射特性に著しい劣化が見られないことから、本手法による有効性を確かめることが出来た。

4. 高速炉の状態監視保全への適用

ナトリウム漏えいに対するもんじゅの炉心安全は 1 次系についてはガードベッセルによる原子炉容器内ナトリウム液位確保、2 次系については漏えい監視による早期原子炉停止などによって確保されている。一方、発電用原子炉施設を対象とした新しい検査制度では、状態監視技術を積極的に活用することでプラントの安全・安定運転を確実なものにすることが求められる方向にあり、着目する機器・配管の経験するひずみを継続的に測定できれば状態監視によりその機器・配管の損傷を把握できるため、予防保全、リスク低減の観点からきわめて有効な手段となる。

現在、日本の原子力発電所で利用されているオンラインモニタリング技術は動的機器の振動監視、油分析、赤外線による異常温度診断が中心である。これらの状態監視技術は、平成 20 年度からの導入に向けて準備されつつある新しい検査制度における保全プログラムの中に位置づけられている^[14]。

高速炉の高温機器の中で相対的に熱荷重あるいは地震荷重の厳しい部位にひずみ・温度のモニタリング用の耐熱 FBG をきめ細かく配置し、集中監視することにより、いわば高感度で安定した光ファイバー神経網監視システムを構築することができる。これによりナト

リウム漏えいリスクを低減することが期待できる。

5. 結言

高速炉プラントの機器・配管の構造健全性モニタリングシステムのひずみセンサとして高温・放射線環境下で使用可能な FBG を開発することを目的とし、その第 1 段階として、本質的な課題である FBG の耐熱性向上の可能性検討を行った。

(1) 石英ガラス板にフェムト秒レーザーで格子加工を施し、約 1000°C までの加熱を行い、格子特性の劣化がほとんどないことを示した。これにより、フェムト秒レーザーによる非加熱加工で耐熱性が著しく向上することを実証した。

(2) 光ファイバーについて、PbP 法で試作した BG の反射スペクトルから、ターゲット波長にピークを確認した。さらに、試作した耐熱 FBG の加熱試験の結果、約 600°C で 24 時間加熱後においても、反射スペクトル特性の劣化がほとんどないことを示した。これにより、耐熱 FBG 製作の技術的見通しを得た。

6. 今後の課題

今回、耐熱 FBG の製作について技術的な見通しを得たと考えるが、計測システムとしての開発、実用化の観点から今後の課題として次の点が挙げられる。

(1) FBG 性能の向上

今回、構築した格子加工システムの改良を図り、格子加工精度の向上による FBG 性能の向上を達成する。

(2) 耐放射線性の向上

一般 FBG であっても、実験炉「常陽」などでの実績からある程度の放射線環境下で使用可能であるとの見通しが得られている^{[8][15]}。また、JAERI 研究報告^[16]や JNC 研究報告^{[17][18]}などでは、「純粋石英コア-フッ素ドープ石英クラッド」の光ファイバーではさらに高い $1.4 \times 10^6 \text{Gy}$ まで影響ないことが確認されている^[18]。技術的に大きな問題はないと推察するが、実用化の観点から耐放射線性向上のための素材の検討も視野に入れる必要がある。

(3) 耐熱 FBG の接着方法

FBG を高温機器・配管のひずみ測定に用いる場合の課題として接着性があり、装着性についても米国ブリガム大学から論文が発表されている^[19]。先行実施例の

調査および接着方法およびその高温健全性にかかる基礎試験を行い、ひずみ測定用センサとしての技術的見通しを得る。

(4) ひずみ測定システムとしての性能

上記の基礎的特性試験結果を踏まえて、構造材料の温度・ひずみ測定システムとしての実用化の見通しを得る。そのために、温度変動下を含む温度補償方法の検討、他の計測方法との比較による測定精度の評価、長時間加熱試験を含むシステムの総合的な性能試験などを実施する必要がある。

謝辞

新型炉技術開発(株)土井基尾氏、福井大学大学院工学研究科特命教授小林喬郎氏、および(独)原子力研究開発機構青山卓史氏、松場賢一氏より貴重なご助言、ご協力を頂きましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 土井基尾、月森和之、渡士克己、“FBR を対象としたリスクベース保全検討について”、日本保全学会 第3回学術講演会 要旨集、2006、P-16.
- [2] 日本原子力研究開発機構、“平成 17 年度 福井県における高経年化調査研究 報告書”。
- [3] 清水建設(株)、ニュースリリース (2001.12.18) 等。
- [4] “フレキシブルメンテナンスシステム (FMS) その背景と構想および技術開発成果”、日本原子力学会誌、Vol.48、No.7、2006.
- [5] “Long-term thermal stability tests at 1000 of silica fibre Bragg gratings made with ultrafast laser radiation”, Meas. Sci. Technol.17, 2006, 1009-1013.
- [6] “Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask”, OPTICS EXPRESS 5377, Vol.13, No.14, 2005.
- [7] 財団法人機械システム振興協会、“機械システム等のメンテナンス最適化のための RBM 手法の開発に関するフィージビリティスタディ報告書—要旨—”。
- [8] 松場賢一、伊藤主税、川原啓孝、青山卓史、“光ファイバを用いた高速炉構造健全性監視技術の開発”、日本機械学会 第12回動力・エネルギー技術シンポジウム 講演論文集、2007、OS6-5.
- [9] “DIRECT FEMTOSECOND INSCRIPTION OF FIBER BRAGG GRATINGS”, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.850, 2005.
- [10] “Point by point Femtosecond Laser Inscription of Fibre and Waveguide Bragg Gratings for Photonic Device Fabrication”, PICALO 2006 Conference Proceedings, Page360-362.
- [11] “Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask”, OPTICS EXPRESS 5377, Vol.13, No.14, 2005.
- [12] Ian Bennion, Vladimir Mezentsev, Mykhaylo Dubove, David Nikogosyan, “Device Fabrication by Femtosecond Laser Inscription”, OSA BGPP 2007, BWB6.
- [13] Graham D.Marshall, Michael J.Withford, “Annealing Properties of Femtosecond Laser Inscribed Point by point Fiber Bragg Gratings”, OSA BGPP 2007, JWA30.
- [14] 原子力安全・保安院、“原子力発電施設に対する検査制度の改善について (案) ”、平成 18 年 9 月。
- [15] “光ファイバブラッググレーティングセンサのプラントモニタリングへの適用性”、保全学、Vol.3、No.3、2004.
- [16] “3.3 耐放射線ファイバによる放射線計測”、JAERI-Conf 98-011.
- [17] “光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定方法の評価”、JNC TY9400 2000-001.
- [18] “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 TY9400 2004-008.
- [19] “Packaging of Surface Relief Fiber Bragg Gratings for use as Strain Sensors at High Temperature”, Proc. of SPIE, Vol.6167, 2006.