

光ファイバーブラッググレーティング による原子炉計装の研究

(核燃料サイクル公募型研究に関する共同研究報告書)

2004年4月



東　京　大　学
核燃料サイクル開発機構

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

東京大学 (The University of Tokyo)

2004

光ファイバーブラッググレーティングによる原子炉計装の研究

(核燃料サイクル公募型研究報告)

雨宮邦招*、中澤正治*、有吉昌彦**、伊藤敬輔**

要 旨

温度、歪み、振動に感度を有する光ファイバーブラッググレーティング(FBG)をセンサ要素とした新しい原子力プラントモニタリングシステムの開発を行った。FBG の放射線照射試験の結果、 1.4MGy 程度の γ 線吸収線量、および 10^{14}n/cm^2 程度の高速中性子フルエンスにも反射波長は影響されないことが分かった。温度に感度を持たず振動の測定のみを調整なしに行うことのできるシステムを構築し、 100kGy までの γ 線吸収線量があっても問題なく動作することを確認した。さらに複数の点における振動を同時に測定できるシステムの設計および構築を行い動作することを確認した。このシステムを東大弥生炉の冷却系に適用し、運転状態の監視が可能であることを実証した。その上で「常陽」一次冷却系へ敷設し実証試験を行った。その結果、原子炉起動前にはナトリウム流量と振動状態の相関が確認できたものの、起動後には反射光が減衰し測定できなくなった。原因を調査したところ、FBG センサ自体の問題ではなく伝送用の光ファイバーの接続部分の損失の影響が大きく改善は十分に可能であることが分かった。

* 東京大学大学院工学系研究科

** 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部技術課

JNC TY9400 2004-008
April, 2004

Study of an instrumentation system for a nuclear reactor plant
based on optical fiber Bragg gratings

(Document on Collaborative Study)

Kuniaki Amemiya*, Masaharu Nakazawa*, Masahiko Ariyoshi**, Keisuke Itoh**

Abstract

A new monitoring system of nuclear reactor plants by means of optical fiber Bragg gratings (FBGs) was developed which have sensitivity in temperature, distortion and vibration. The reflective wavelength of FBGs was not influenced by gamma-ray irradiation up to 1.4MGy and by exposure to fast neutrons in excess of $10^{14}n/cm^2$. A temperature-insensitive vibration sensing system was constructed and operated with no trouble in gamma-ray environments up to 100kGy. Furthermore, a multiple point vibration sensing system was designed and constructed. The system was successfully demonstrated on a cooling system at the "Yayoi" reactor.

Thus, we tried to apply the monitoring system to a primary loop area of JOYO to confirm the applicability of FBG sensors for the commercial power reactors. Although a correlation of sodium flow in side pipes and vibration measured by FBG sensors was found before starting of the reactor, it became impossible after starting operation of the reactor because of a decline of signal amplitude. Investigating the reason, it was mainly caused by significant transmission losses at the splicing point and there were no problems with FBG sensors. Various methods, for example, using a more powerful light source and changing the splicing method, may be used to improve it in the future.

* Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

** Experimental Reactor Division, Irradiation Center, Oarai Engineering Center, JNC

目 次

1. はじめに	1
2. 耐放射線性の検討	2
2.1 FBG の耐放射線性	2
2.2 高速中性子を含む放射線場における FBG の挙動	5
2.3 光ファイバーの放射線誘起伝送損失	6
3. 測定システムの開発	7
3.1 振動測定の原理	7
3.2 パイプ表面の振動測定	8
3.3 多点測定システムの構築と実証	10
4. 「常陽」への適用に向けた振動測定予備実験	12
4.1 γ 線環境下における振動測定	12
4.2 東大弥生炉冷却系における振動測定	14
4.2.1 実験体系	14
4.2.2 実験結果	16
5. 「常陽」 1 次冷却系への設置	19
5.1 概要	19
5.2 設置概要	19
5.3 原子炉起動前の測定結果	20
5.4 「常陽」起動後の測定	24
5.4.1 「常陽」 MK-III 性能試験中における FBG 実験日程及び原子炉熱出力	24
5.4.2 MK-III 性能試験中における FBG 反射強度測定	24
5.4.3 FBG センサの反射ピーク波長と雰囲気温度の関係	26
5.4.4 FBG1 (ライン A) における振動スペクトル測定	27
6. 「常陽」性能試験後の FBG 測定系の調査	37
6.1 ファイバーセンサ系設置場所周辺の線量	37
6.2 MK-III 性能試験後における FBG 測定系の健全性調査	37
6.3 振動スペクトル測定について	41
6.4 まとめと今後の課題	42
7. おわりに	42
8. 参考文献	44

表リスト

表1 FBG 実験日程及び原子炉熱出力-----24

図リスト

図 1 光ファイバーブラッググレーティングの概念図	1
図 2 γ 線照射実験体系	3
図 3 各吸収線量における反射波長	4
図 4 γ 線照射前後の温度感度	5
図 5 高速中性子照射下の光スペクトル	5
図 6 高速中性子照射下の光ファイバー透過スペクトル	6
図 7 振動一光量変換原理	7
図 8 パイプ表面振動測定システム	8
図 9 FBG 設置の様子	9
図 10 鉄パイプを殴打した瞬間の電圧の変化	9
図 11 鉄パイプ振動時の電圧の変化	9
図 12 信号の周波数スペクトル	10
図 13 多点測定システム概念図	11
図 14 オシロスコープで計測された信号	11
図 15 2つのFBGセンサによって得られた周波数スペクトル(1)	12
図 16 2つのFBGセンサによって得られた周波数スペクトル(2)	12
図 17 温度に影響を受けない振動測定システム概念図	13
図 18 照射開始直後の周波数スペクトル	14
図 19 積算吸収線量 100kGy 時の周波数スペクトル	14
図 20 「弥生」測定システム概略図	15
図 21 消音器支柱に設置したFBGの周波数パワースペクトル	16
図 22 消音器胴体に設置したFBGの周波数パワースペクトル	17
図 23 消音器支柱に設置したFBG および加速度計の周波数パワースペクトル	17
図 24 消音器胴体に設置したFBG および加速度計の周波数パワースペクトル	17
図 25 「常陽」1次主冷却系とFBG設置箇所及び光ファイバーカット箇所	21
図 26 FBGセンサ設置箇所	21
図 27 ポンプ流量が変更時の周波数スペクトル(A-1)	21
図 28 ポンプ流量が変更時の周波数スペクトル(A-2)	22
図 29 ポンプ流量が変更時の周波数スペクトル(D-1)	22
図 30 FBGセンサ及び加速度計によって測定された周波数スペクトル(A-1)	22
図 31 FBGセンサ及び加速度計によって測定された周波数スペクトル(A-2)	23

図 32 FBG センサ及び加速度計によって測定された周波数スペクトル(D-1)	23
図.33 2-A 位置の FBG センサで計測されたポンプ流量と周波数スペクトル.....	23
図 34 FBG センサからの反射波長スペクトル.....	25
図 35 (a)「常陽」性能試験中の FBG センサ 1 からの反射強度、(b)測定時の「常陽」原子炉熱出力.	26
図 36 (a)「常陽」性能試験中の FBG センサ 1 (ライン A) の反射ピーク波長、(b)測定時の FBG センサ 1 周辺の温度.....	27
図 37 「常陽」性能試験中の FBG センサ 1(ライン A)による振動スペクトル測定結果.....	28-36
図 38 ファイバーライン C の OTDR 測定結果.....	38
図 39 ファイバーライン C 終端からの OTDR 測定結果.....	38
図 40 ファイバーライン B 切断箇所(1)以降の反射強度スペクトル.....	40
図 41 ファイバーライン C 切断箇所(2)以降の反射強度スペクトル.....	40
図 42 ファイバーライン C 切断箇所(3)から上流の反射強度スペクトル.....	40
図 43 図 40,42 の縦軸を拡大したもの.....	41
図 44 性能試験前のファイバーA ライン FBG1 からの反射光を光学フィルタに通した際の反射強度 スペクトル.....	41
図 45 性能試験後のファイバーA ライン FBG1 からの反射光を光学フィルタに通した際の反射強度 スペクトル.....	42

1. はじめに

近年ますます原子力の安全性への社会的な関心が寄せられるようになっている。このため、原子力プラントの安全性を更に高め、より大きな安心が得られるようにする努力が求められており、従来とは異なる新しいモニタリングシステムを模索することは意義深いと考えられる。

光ファイバーは開発されて以来、不純物の除去、欠陥の制御、製造方法の改良などの透明度を高める努力が精力的になされ、通信分野における長距離の無中継伝送などの成果となって顕われている。開発過程において放射線を光ファイバーに照射して欠陥を導入し、そこに形成されるカラーセンターの吸光スペクトルを取得することによって欠陥を同定するという手法も大いに利用された。このように光ファイバーと放射線の関わりは古くから注目され、カラーセンターが形成されることによって透明度が低下し伝送損失が大きくなる（放射線誘起伝送損失）にもかかわらず分布測定の容易性、軽量性、可撓性、電磁誘導雑音の無誘導性などの特長から原子力プラントモニタリングに光ファイバーを用いようとする研究も広く行われてきた。^[1-3]

一方、近年急速に開発の進められた光ファイバーセンサの一種である光ファイバーブラッググレーティング^[4]（Optical Fiber Bragg Grating、以下 FBG）は、光ファイバーのコアの長手方向に屈折率の変調を付与したものであり、 $\lambda = 2 n \Lambda$ を満たす波長 λ の光を選択的に反射させる特性を持つ。ここで n は実効屈折率、 Λ は屈折率の変調周期である。 n 、 Λ は温度、歪みなどによって変化し、その結果それらの物理量を反射波長 λ の変化として観測することができる。

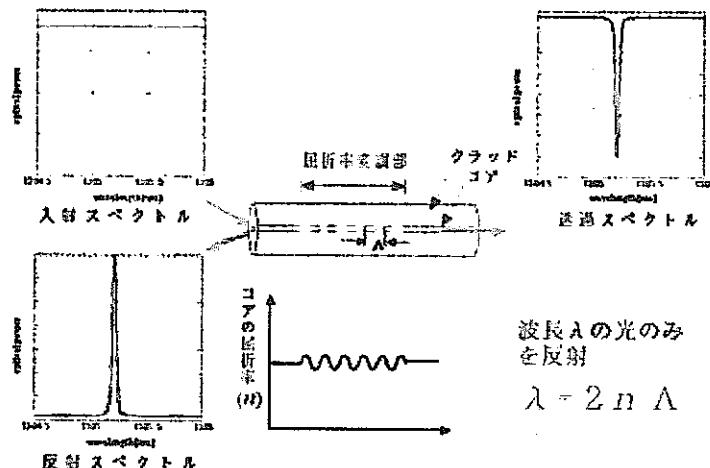


図1 光ファイバーブラッググレーティングの概念図

また、一本の光ファイバー上に複数個配置することが可能であり、多点のマルチパラメータの取得を単一の光ファイバーで行うことができる。このため、従来は困難であった狭隘部での測定が可能となりより死角のない計測が可能になる上、電源不要のパッシブなセンサであることから安全性が求められる原子力施設への FBG の適用性を検討することは有意義であると考えられる。

そこで本研究では放射線場における FBG をセンサ要素としたモニタリングシステムの開発を行うこととした。最終的に高速炉「常陽」一次系に敷設して原子炉への FBG の適用を実証することを目標とし、まず FBG および光ファイバーの耐放射線性の評価から始め、測定システムの構築とその動作確認、さらに放射線場での測定の実証と研究炉の冷却系における検証を行うというプロセスを経ることとした。

2. 耐放射線性の検討

原子力プラント特有の特徴として放射線の存在が挙げられる。このため FBG を用いた測定系が放射線によってどのような影響を受けるかを調査した。FBG 自体の放射線照射効果はこれまでいくつか報告されているが^[5,6]、FBG の製作時の条件、組成によって挙動は一定ではない。そこで本研究では FBG の放射線照射の影響を調査から始めることとした。

一方、FBG は通常 Ge ドープ石英ガラスのもつフォトリフラクティブ効果によって屈折率の変調を設けている。つまり、紫外光を照射すると屈折率が変化する性質を利用して、光ファイバー上で干渉縞ができるように紫外レーザーを照射することで製作されている。このため、一般的に FBG は F ドープや OH ドープあるいは純粋石英のコアをもつ光ファイバーに比べて放射線誘起伝送損失が大きい Ge ドープ光ファイバーに形成されることになる。複数の FBG の間を F ドープファイバーなどで伝送することによって放射線誘起伝送損失を低減するという方法も考えられるが、光の伝送路であるコアの大きさや屈折率が異なった場合、接続箇所での伝送損失が大きく総合的な伝送損失は悪化する可能性もある。このため、本研究で使用する FBG の反射波長である 1300nm 程度の波長の光は放射線を被曝した光ファイバーでも比較的よく透過することができるこことを鑑み、伝送にも Ge ドープファイバーを用いることとした。

よって、まず FBG 自体の γ 線および高速中性子照射による反射波長への影響を検証し、さらに FBG への入射および反射光の導波路として不可欠な光ファイバーへの影響を評価した。光ファイバーは放射線を照射すると光の透過率が低下する現象が知られており、これが大きくなると観測される FBG からの反射光強度が低下し測定誤差の増加、さらには測定不能になる可能性もある。このため今回使用する FBG の反射波長である 1300nm 近傍の放射線誘起伝送損失の測定を行った。

2.1 FBG の耐放射線性

光ファイバーは放射線の照射を受けるとコアなどにカラーセンターが生じることが知られている。一方、特定波長の光に対する屈折率はその物質の全ての波長域にわたる吸光度に影響を受け、例えば、カラーセンターによって紫外域で急峻な吸収ピークが生じると 1300nm の光に対する屈折率が変化する。従って、FBG の反射波長は屈折率に比例する関係があるため、放射線の影響により反射波長が変化することが予想される。しかしながら、吸収ピークは光ファイバーの組成、不純物の量、プレカーサの多寡などによって多大な影響を受けるため、放射線による波長変化を理論的に求めるのは困難である。実際に既往研究でも論文によって反射波長の変化の方向(長波長側へ移動するか、短波長側か)や変化量が異なっており、ある程度条件を固定しない限りセンサとしての用途には適さないと考えられる。従って、本研究では研究期間を通じて同じメーカーで作られた FBG を使用することにし、放射線照射条件下の波長変化に関するデータを取得した。

また、一般的な光ファイバーはコア及びクラッドとその保護被覆層で構成されている。被覆には樹脂やナイロンなどの有機系材料が用いられることが多いため、放射線によって原子の結合状態が変化し、体積の膨張や収縮、あるいは機械的な脆化は石英で形成されるコアおよびクラッドよりも大きいと考えられる。被覆が劣化すると応力に対して非常に脆くなるため、光ファイバーの敷設時には一般的に注意が必要とされる。加えて FBG については、素材である光ファイバーに紫外線を当てて屈折率変調加工を行うが、被覆に紫外線が吸収されないようにするために加工前に被覆を除去し、加工後にリコートしている。そのため、FBG 部は特に機械的に脆いと予想されるため、曲げ方向に応力がかからないような設置方法を検討するとともに、被覆の体積変化に伴うマイクロペンドの発生の有無、あるいは機械的強度が保持されるかを確認する必要がある。そこ

で、被覆のない状態および紫外線硬化型樹脂をリコートした状態の FBG を、それぞれ線量率 300Gy/h 及び 600Gy/h で照射してその影響を調査した。

γ 線照射実験は東京大学原子力研究総合センターのコバルト 60 照射装置を用いて行った。コバルト 60 線源からの距離を変えることによって線量率を変化させた。照射は室温で断続的に行い、反射波長は照射中に取得した。実験体系を図 2 に示す。スーパールミネッセントダイオード(SLD、NTT エレクトロニクス、NTL200-SLD) からの半値幅が約 50nm の広帯域光を 2×2 カプラを通して FBG 部に入射させ、反射光を再び 2×2 カプラを通して光スペクトラムアナライザ(安藤電気、AQ6317) へと導き反射スペクトルを取得した。また、照射室外に参照用の FBG を設置して測定系に由来する誤差の補正を試みた。ただし、それぞれの FBG を設置した場所では温度の変化は同程度で、歪みは一定であると仮定している。

照射中に測定された FBG の反射波長 λ は次のような成分に分けられる。

$$\lambda = \lambda_{\text{ini}} + \Delta \lambda_{\text{rad}} + \Delta \lambda_{\text{mea}}$$

右辺のそれぞれの項は未照射時に測定された反射波長、放射線によるシフト量、測定系由來の波長の揺らぎを示す。

一方、照射をしていない参照用 FBG の反射波長 λ_{ref} は以下のようになる。

$$\lambda_{\text{ref}} = \lambda_{\text{ref_ini}} + \Delta \lambda_{\text{ref_mea}}$$

右辺の項はそれぞれ初期の反射波長、測定系由來の波長の揺らぎを示す。

$$\Delta \lambda_{\text{mea}} = \Delta \lambda_{\text{ref_mea}}$$

を仮定すると放射線による波長のシフト量のみを内包した反射波長 $\lambda_{\text{corrected}}$ は

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{corrected}} &= \lambda_{\text{ini}} + \Delta \lambda_{\text{rad}} \\ &= \lambda \cdot \Delta \lambda_{\text{ref_mea}}, \end{aligned}$$

となる。

このような補正を行った結果を図 3 に示す。計測された反射波長の揺らぎは補正前には $\pm 0.4\text{nm}$ 程度であったが、補正後には $\pm 0.2\text{nm}$ 程度に抑えられることができたことが確認された。つまり、波長の揺らぎの大半は波長の測定に使用した光スペクトラムアナライザの波長再現性に大きく依存しており、モニタリングに同様の装置を使用する場合には留意が必要であろう。

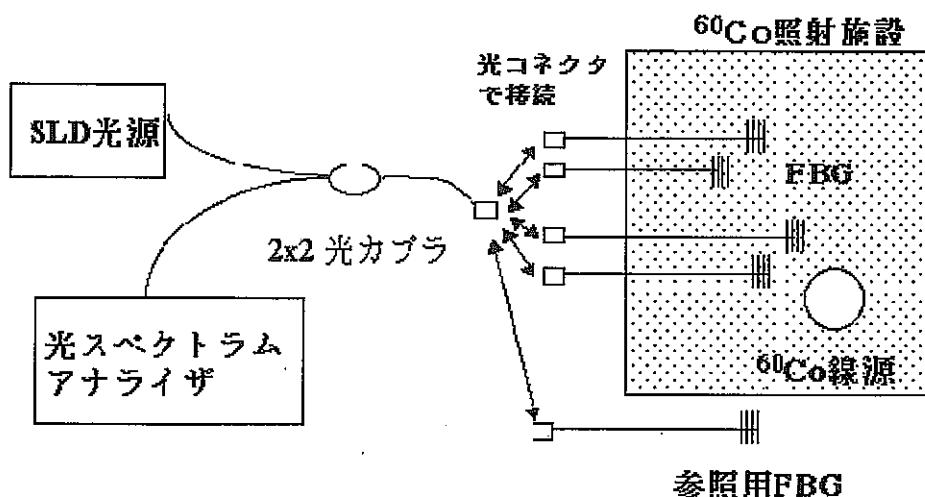


図 2 γ 線照射実験体系

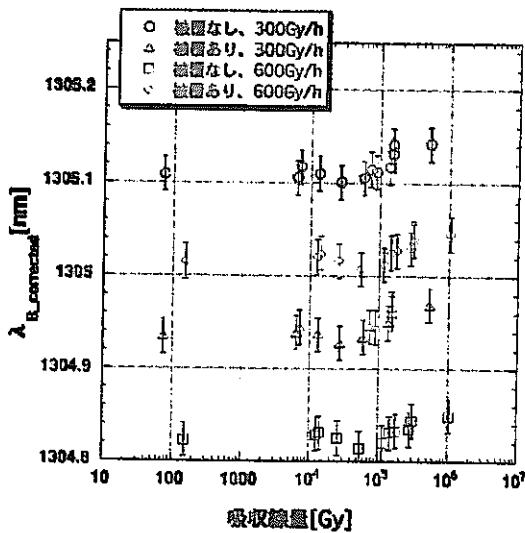
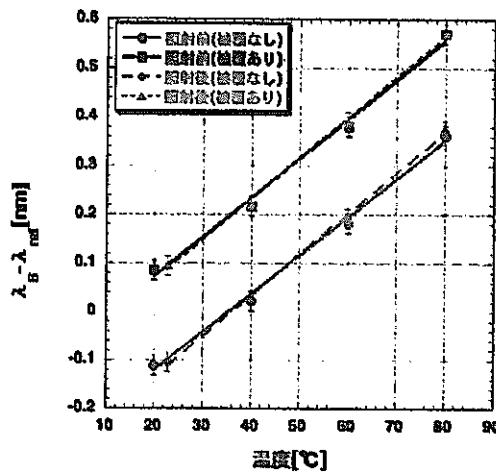


図 3 各吸収線量における反射波長

また、図 3 から 1MGy までの線量範囲ではすべての試料において波長のシフトは温度換算で土 2°C の範囲内に収まっていると結論付けられる。しかし、熱電対は約 1°C 程度の誤差で測定できるため、その代替とするには誤差が大きいと考えられる。とはいいうものの、測定は室温で行ったが照射施設全体を 3 ヶ月以上に渡る実験期間中常に一定に保つことが不可能であったため、補正用 FBG と照射用 FBG の置かれている環境温度の変化がこの誤差の要因と考えられる。上記の方法で補正を行って除去できるのは光スペクトラムアナライザの測定の再現性といった測定系由来の誤差である。また、補正用 FBG の温度と照射用 FBG の温度が同じだけ変化した場合にもそれらの効果は相殺されるが、補正用の FBG は分厚いコンクリート壁で隔てられた照射室外に設置されており必ずしも照射室内と同じ温度変化が生じているとは考えられない。このような環境温度の差異を含んでいつつも土 2°C という誤差範囲に収まっており実用上は問題ないと考えられる。このように十分に有意と言える反射波長への変化がないことから、積算線量で 1MGy までの範囲であれば放射線照射に起因する誤差はほとんどないと言える。さらに被覆をリコートしたことによる影響や、600Gy/h の線量率までの範囲では線量率依存性がないことが確認された。

また、300Gy/h で照射した試料の積算吸収線量が最大で 0.7MGy に到達した時点で照射施設から取り出し、照射後の温度感度を測定した。照射前後における温度と反射波長の関係を図 4 に示す。温度は室温から 80°C まで階段状に上昇させ、それぞれの温度における反射波長を測定した。図 4 中に示された直線はそれぞれの測定点を一次の関数でフィッティングして得られたものである。それらの直線が照射前後でほぼ一致しており、0.7MGy までの γ 線照射後でも温度感度はほとんど変化していないことが分かる。

図 4 γ 線照射前後の温度感度

2.2 高速中性子を含む放射線場における FBG の挙動

東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設の高速中性子源炉「弥生」のグレージング孔で照射を行った。前節と同様に光カプラを用いて反射光のその場測定を行ったが、試料として Innovative fibers 社製の紫外線硬化樹脂被覆の FBG を、光源は発光ダイオード(LED、安藤電気製 AQ4215(131))を使用した。反射スペクトル測定結果を図 5 に示す。

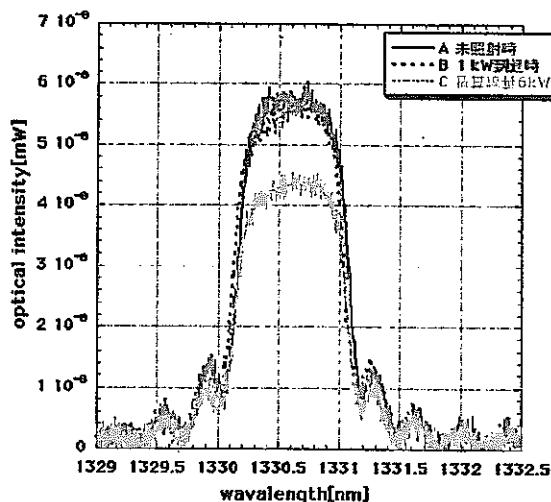


図 5 高速中性子照射下の光スペクトル

A は未照射時、B は弥生炉の出力が 1kW に達した時点、C は積算出力 6kWh 時に測定された反射スペクトルである。B 及び C は出力 1kW で運転中に測定した。C では反射光の減弱が見られるが、反射波長及びスペクトルの形状は変化がない。反射光の減弱も光ファイバー自身の放射線誘起伝送損失によるものが大きいと考えられる。正確な値は不明であるが、中性子フルエンスは 6kWh 時でおおよそ $3\text{--}6 \times 10^{14}\text{n/cm}^2$ と見積もられる。

運転前及び1kW出力運転中に温度測定を行ったところ、試料の温度は20°C前後で変化は見られなかった。この実験では前節で行ったような測定系の補正を行っておらず、波長の変化は誤差範囲内であるため、 $10^{11} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度の中性子フラックスの場でも反射波長に有為な影響はないと考えられる。

2.3 光ファイバーの放射線誘起伝送損失

三菱電線工業製紫外線硬化型樹脂被覆1300nm通信用Geドープシングルモード光ファイバーを前節と同様、「弥生」のグレージング実験孔で照射した。直径40mm程度のボビンに10mの光ファイバーを巻き付け、SLD(NT-L200-SLD)光源から光を入射し、その透過光を光スペクトラムアナライザ(AQ6317)で測定した。実験期間中に原子炉は4回起動し断続的に3日間照射を続行し、 $5 \sim 10 \times 10^{14} \text{n/cm}^2$ 程度のフルエンスまで達した。このとき、コネクタのつなぎ換えによる接続損失の変化がないよう、光スペクトラムアナライザと光ファイバーは接続した状態を保った。結果を図6に示す。1300nmの波長領域では放射線誘起伝送損失はすでに飽和傾向が観察されていることから10mで高々5dBの損失の光ファイバーを使用できることが分かった。なお、グレージング孔では高速中性子およびγ線が存在しておりγ線単独の照射よりも厳しい条件となっている。この条件で飽和傾向が見られたためγ線のみであればさらに誘起される伝送損失は低下すると予想されたのでγ線照射試験は省略した。

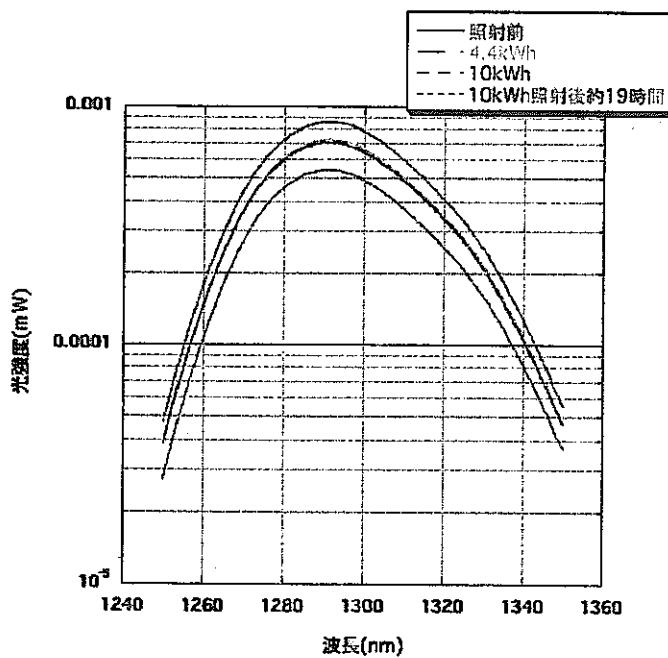


図6 高速中性子照射下の光ファイバー透過スペクトル

3. 測定システムの開発

3.1 振動測定の原理

本研究ではプラント機器の異常検知を目指すにあたり、振動を主な測定対象として想定している。振動は動的な歪みであり、FBG に振動が伝わった場合には反射波長への動的な変化として観察される。本研究では反射波長の変化を光の強度の変化に置き換えてから観測するという手法を採用することにした。この方式を採用することにより、比較的安価でありながら数 KHz 程度の振動まで測定できるシステムの構築が可能であると考えられる。

入の変化を光強度の変化へと変換する方法として、入射する光の波長によって透過率の異なるフィルタを通し、光の波長が異なっても感度が一定な受光素子によって光強度を測定するという方法が考えられる。この方法の原理図を図 7 に示す。この図において、入が長波長側にシフトすれば受光部での光強度は増加し、短波長側にシフトすれば減少する。スペクトルを取得して入を測定するのではなく、このような方法を用いることによってより高速に波長の変化を捉えることができる。

上記のようなフィルタの納品に時間がかかったため、4 節までの実験では波長一光量の変換にはセンサ用とは別の FBG を使用して行った。すなわち、反射波長がほぼ同じである 2 つの FBG をセンサおよびフィルタとして使用することを試みた。この方法の概念図を図 8 に示す。スーパーラミネッセントダイオード (SLD) からの広帯域光をセンサ用 FBG およびフィルタ用 FBG で 2 回反射させ、その光をフォトダイオードで受光した。この場合、センサ用およびフィルタ用 FBG の反射スペクトルの一部が重なるようなものを選択しており、振動によってセンサ用 FBG の反射波長がシフトするとその重なる部分の大きさが変化する。シフトによって完全に重なった場合にはフォトダイオードには最大の光量が入射し、重なりがなくなった場合には光は入射しない。その結果、上記の方法と同様に振動による反射波長の変化を光量の多寡に変換することが可能となっている。この手法ではセンサ用 FBG からの反射光をフィルタ用 FBG に入射し、その反射光をフォトダイオードへと導光する。ここでフィルタ用 FBG の透過光でも同様に光の強弱に変換することは可能であるが、光ファイバーの接続部分などで生じる入以外の波長の反射などによる S/N 比低下を避ける為に反射光を使用した。

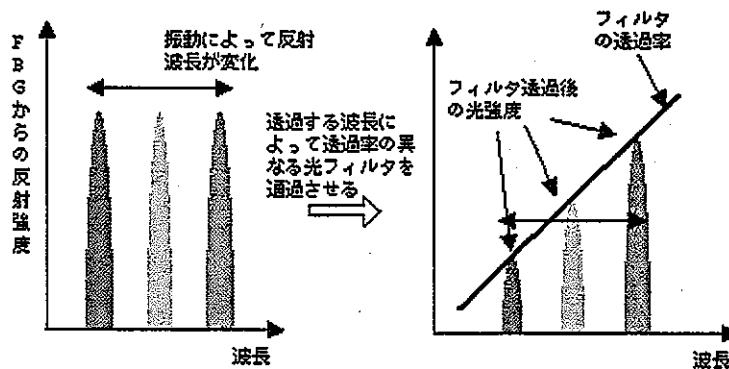


図 7 波長シフト一光量変換の原理

3.2 パイプ表面の振動測定

実際の配管への設置を想定してパイプ上のものの表面に敷設して振動の計測が可能かを調査するため、鉄パイプの表面に FBG を接着剤で貼り付けた状態での振動測定を試みた。測定システム及び設置の様子をそれぞれ図 8 および図 9 に示す。長さ 178cm、内径 47mm、肉厚 2mm の鉄パイプを使用した。表面にアルミテープを貼りその上に FBG を設置した。FBG の設置はまず片端を瞬間接着剤で接着し、充分に固まった後にもう片端を軽く引き張りしながら液体状の瞬間接着剤で固定した。接着剤はエポキシ系、瞬間接着剤（液体状）、瞬間接着剤（ゲル状）の三種類を試したが、液体状の瞬間接着剤でもっとも固定がうまく固定できることが分かった。

「常陽」一次系に設置する時には瞬間接着剤ではなくエポキシ系接着剤を使用する。しかし、本実験からエポキシ系接着剤、及びゲル状の瞬間接着剤は固まるのに時間がかかり、一定の力で引き張りを続けるのが困難であるため、最初に瞬間接着剤で仮止めした後にエポキシ系接着剤を使用するのが良いと考えられる。

測定系は 3.1 節の原理に基づいて 2 つの FBG を使用して構築した。鉄パイプをプラスチックのハンマーで殴打することによって振動を与えた瞬間のフォトダイオードからの電圧の変化を図 10 に示す。フォトダイオードからの信号を受けるオシロスコープは 25kS/sec のサンプリング周波数に設定して測定を行った。鉄管に振動が生じるとこの計測システムによってそれを検知することが可能であるということが確認できた。さらにハンマーで殴打した後、しばらく放置し、鉄パイプの振動の高次モードが減衰したころにオシロスコープで取得した電圧信号を図 11 に示す。鉄管の固有振動の低次モードと考えられる周期的な信号が取得できていることが分かる。また、ここで得られた信号に対して FFT による処理を行った結果を図 12 に示す。特定の周波数に明確なピークが現れており、対象物の振動周波数を取得できたと考えられる。このように配管などの振動も表面に FBG センサを貼付けるという簡単な設置方法で取得可能であることを示している。

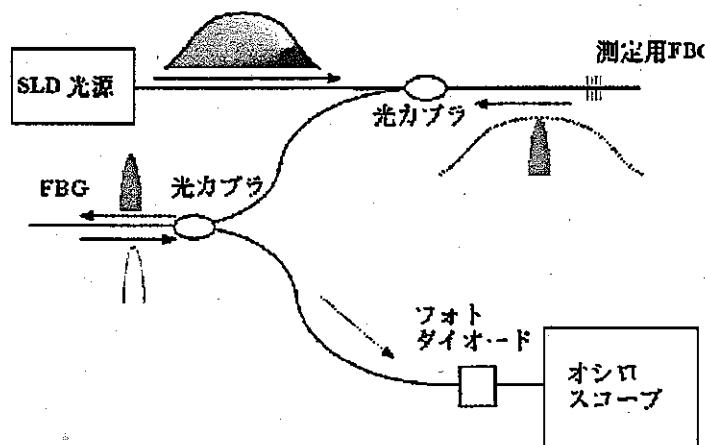


図 8 パイプ表面振動測定システム

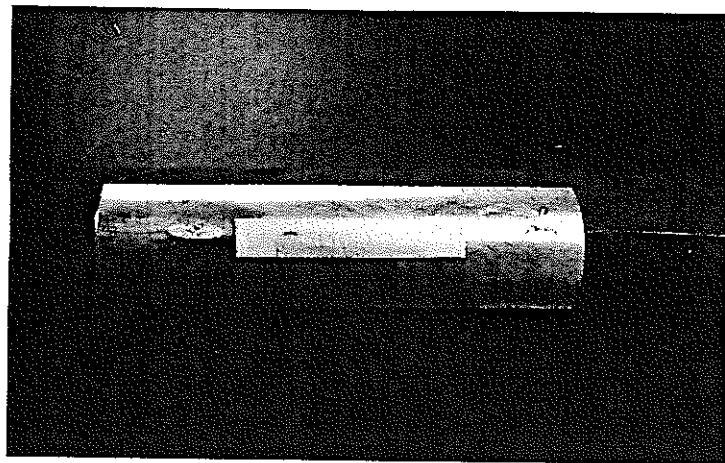


図 9 FBG 設置の様子

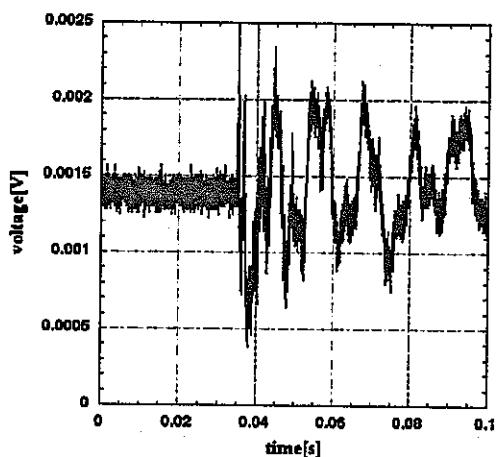


図 10 鉄パイプを殴打した瞬間の電圧の変化

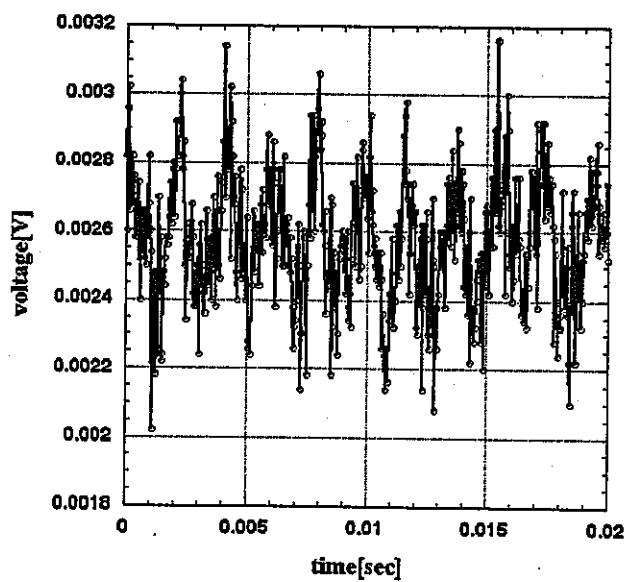


図 11 鉄パイプ振動時の電圧の変化

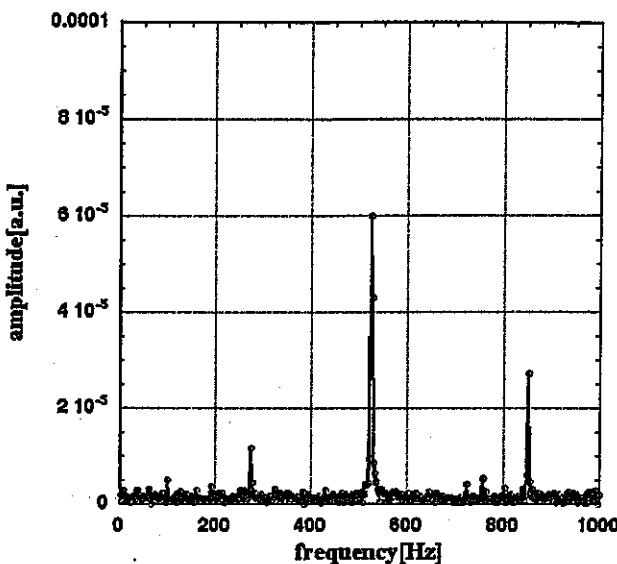


図 12 信号の周波数スペクトル

3.3 多点測定システムの構築と実証

FBG センサの特長の一つとして、1 本の光ファイバー上に直列に配置することによって多点分布測定が可能であるという点が挙げられる。このような利点を活かした測定システムの設計とその構築を行った。しかしながら振動計測においてこのような一本の光ファイバー上の多点測定は実施例が少なく、本研究で採用したシステムによる直列に接続した二点における振動測定の実証を試みた。

実証に用いたシステムの構成図を図 13 に示す。このシステムは 3.1 節に示したものと基本的な原理は同様である。変更された点は、センサ用 FBG (センサ①、②) を 2 つにして直列に接続し、それぞれに対応するフィルタ用 FBG (フィルタ①、②) に入射する前に光カプラを挿入して光路を 2 つに分岐させている点である。これによりそれぞれのフィルタ用 FBG に入射する光量は半減することになる。それぞれのセンサ用 FBG からの信号を区別するためにセンサ①とセンサ②で反射波長を大きく異なるものを使用し、それぞれフィルタ①、②の反射波長とほぼ同じものを用いた。それぞれのフィルタ用 FBG からの反射光をフォトダイオードで受けて電気信号に変換しオシロスコープで観察した。

フィルタ用 FBG から反射された光にはその反射波長と重なり合いをもつセンサ用 FBG の振動の情報のみを保持し、他の波長のセンサ用 FBG からの情報は含まれることはない。よって適当なフィルタ用 FBG を選択することによって直列に繋いだセンサ用 FBG 中から特定のものののみの振動情報を分離することが可能である。

振動源としてオーディオスピーカーを 2 個使用し、それぞれに周波数可変の発振器からの正弦波を入力した。このときセンサ用 FBG はメンディングテープで 0.2mm 厚の鉄の平板上に固定し、その平板をスピーカーの上に設置した。

本実験は以下の 2 点に注目して行った。

- (1) FBG を直列に接続した状態で振動が測定可能か。
- (2) それぞれのセンサ間のクロストークは存在するか。

オシロスコープで観察された波形を図 14 に示す。図 14 では、ノイズが大きいものの振動を最終的に電圧の高低に置き換えることに成功しており、また、2つの FBG を直列に接続しても同時に取得できていることが分かる。FFT プログラムを使用して得られたそれらの周波数スペクトルを図 15 に、センサ②を設置したスピーカーへの入力信号の周波数を変化させた時の周波数スペクトルを図 16 に示す。図 15、図 16 ともに明らかなピークが観察されており、FBG センサを用いて 2 点の振動周波数を同時に取得することが可能であることが分かる。また、図 15、図 16 においてセンサ①の周波数は変化していないのに対して、センサ②の周波数のみが変化していることから異なるセンサ間で独立に測定することが可能であることが証明された。

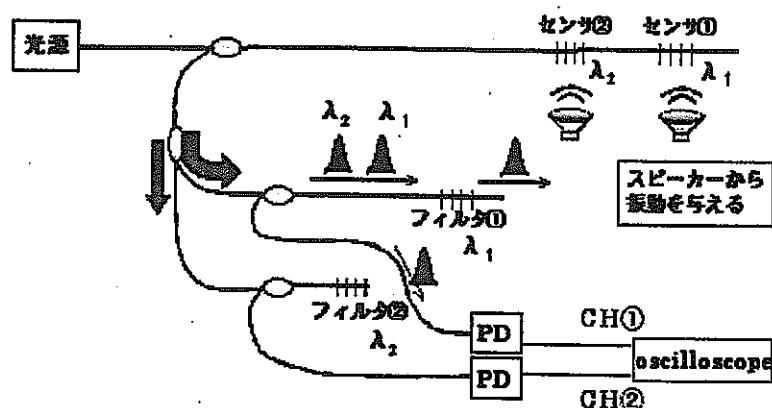


図 13 多点測定システム概念図

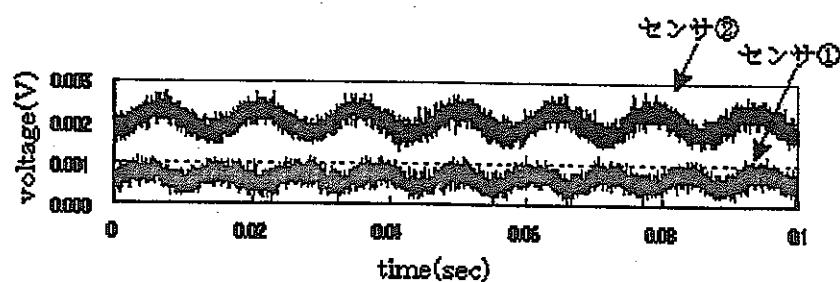


図 14 オシロスコープで計測された信号

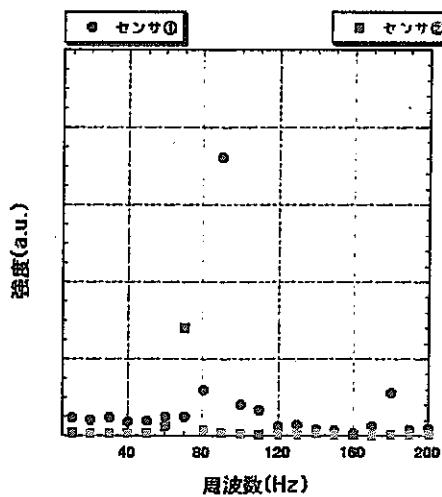


図 15 2つのFBGセンサによって得られた周波数スペクトル(1)

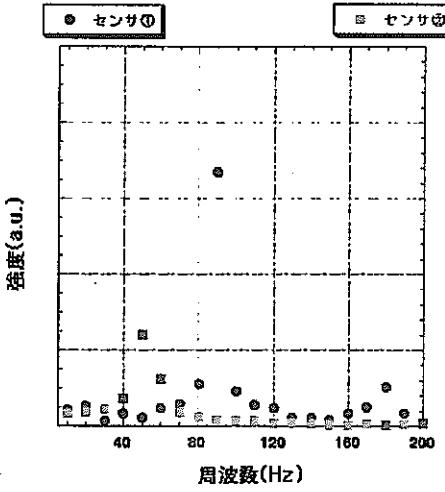


図 16 2つのFBGセンサによって得られた周波数スペクトル(2)

4. 「常陽」適用に向けた振動測定予備実験

4.1 γ 線環境下における振動測定

2.1 節において γ 線照射を行い、 γ 線環境下でも反射波長はほぼ一定であることが確認された。よってFBGセンサを「常陽」の一次系配管に適用して振動を測定する場合において、最も反射波長に影響を与えるのは温度の変化であると考えられる。そこで、温度が変化する状況下でも振動測定が可能なシステムを構築した^[7]。このシステムの概略図を図17に示す。

直列に繋いだ2つのFBGを厚さ0.2mmの鉄板に貼り付け、スピーカーで振動を与える。光源からの光はFBG①を通過したあとでFBG②に入射する。もし、FBG①と②の反射波長が同じ場合にはFBG②で反射すべき光はすでにFBG①によって反射されているため、FBG②からは光が反射されない。逆に、FBG①と②の反射波長が異なる場合には、それぞれから反射光が帰ってくるためフォトダイオードで受光する光量は大きくなる。つまり、FBG①はFBG②に対して一種の透過型フィルタとして機能する。本実験ではFBG①と②は歪みの無い状態で同じ反射波長を持つものを選択している。この状態で鉄板に曲げ応力が加わった場合、凸となる面に設置された

FBG は他方より強く引き張りされ反射波長が FBG①と②では異なるようになり、フォトダイオードに入射する光量が増大する。

この方法は 3.2 節で示した方法とは反射型のフィルタを別途に用いていない点で大きく異なっている。このように設置することによって 2 つの FBG はほぼ同じ環境に保持されるため、振動源近くの温度が変化した場合でも自動的に補償される。しかしながら、この手法ではフィルタも放射線環境下に存在するためメンテナンスが困難であり、また FBG①からの反射光が常にフォトダイオードに入射しており、ベースラインの高い状態で測定するため S/N 比が劣化する可能性があるという問題がある。

2.1 節と同様の施設で 50Gy/h の線量率で γ 線照射をしながら振動の測定を行った。3.2 節と同様にフォトダイオードからの出力をオシロスコープで取得し、FFT プログラムにより周波数スペクトルを取得した。照射開始直後と開始から約 100 日経過した時点での周波数スペクトルをそれぞれ図 18、19 に示す。それぞれの図において、スピーカーへの入力信号とフォトダイオードからの出力のそれぞれの周波数スペクトルを表示した。それぞれの図において、入力信号と出力信号のピーク周波数が一致しており、 γ 線環境下でも振動周波数の測定が可能であることを示している。また、照射下においてもスピーカーへの入力周波数が変化したときには FBG センサからの出力も追隨しており、振動状態の変化の捕捉が可能であった。

さらに図 18 と 19 から、長期間（100 日程度）の照射下でも安定に測定できることが示された。これは通常運転中は立ち入りのできない場所の多い原子力プラントの監視に有効な特長である。

ところで、図 19において入力信号にはない周波数ピークが FBG センサの周波数スペクトルに確認された。しかし、振動源からの音は単色ではなく雑音の混じって聞こえていたため、スピーカーの振動を鉄板に伝える時に余計な振動が発生したものと考えられる。よってこれは FBG センサに本質的な問題ではないが、実際に設置する場合において振動を正確に伝わるように設置するよう留意しなければならない。

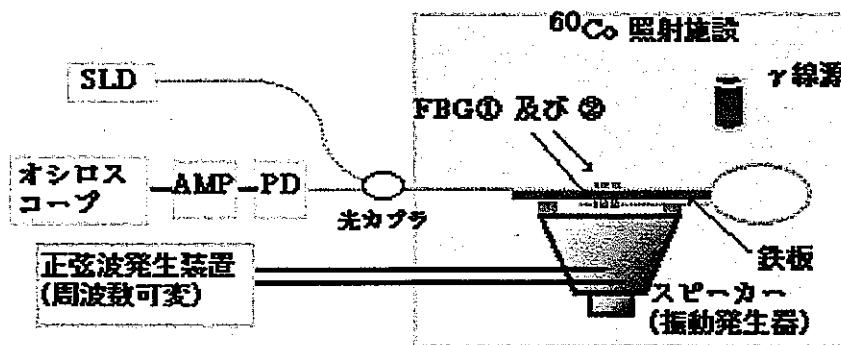


図 17 溫度に影響を受けない振動測定システム概念図

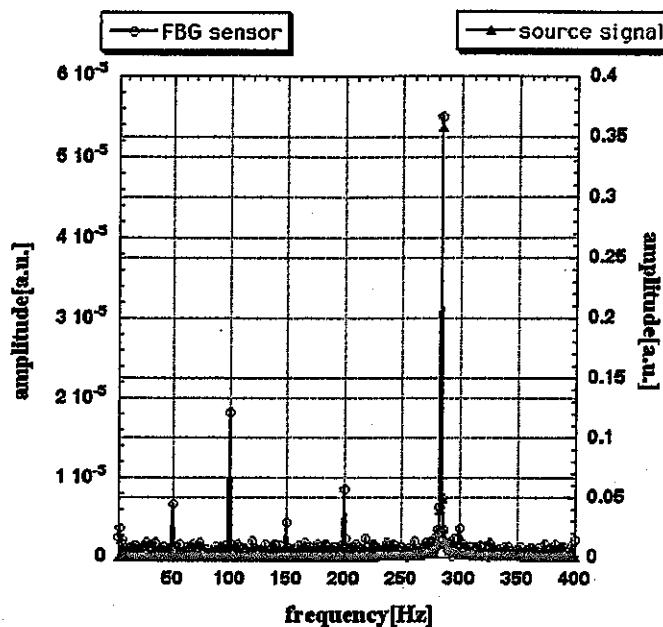


図 18 照射開始直後の周波数スペクトル

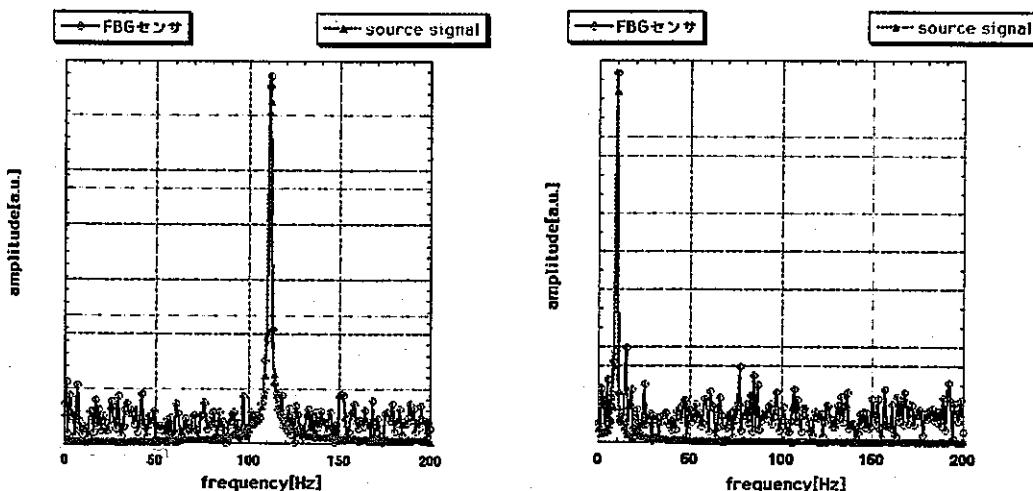


図 19 積算吸収線量 100kGy 時の周波数スペクトル

4.2 東大弥生炉冷却系における振動測定

多点における測定可能性の実証および設置方法の検討を、実機レベルの大きさの設備において行うために東京大学の高速中性子源炉「弥生」の冷却系排気プロワ近傍に設置し測定を試みた。ただし、「弥生」炉は冷却系が空冷であり放射線もほとんど存在しない点で大きく「常陽」とは異なっている。

4.2.1 実験体系

実機レベルの大型の構造物における適用性を検証するため、東京大学所有の高速中性子源炉「弥生」の冷却系排気プロワ近傍に FBG を設置し振動の測定を行った。実験体系を図 20 に示す。本実験の測定原理は 3.2 節のものと同様である。センサ用 FBG からの反射光をフィルタ用 FBG に

入射し、その反射光をフォトダイオードへと導光した。2つのセンサ用 FBG を直列に接続したものをプロワ近傍に設置し、フィルタ用 FBG を含むその他の計測機器は全て管理区域外に設置した。ここでセンサ用及びフィルタ用 FBG は常温でほぼ同じ反射波長のものを 2 組選択した。しかしながら、プロワ近傍は運転中に温度が上昇するため、センサ用 FBG とフィルタ用 FBG の反射波長が離れてしまい振動の測定が不可能になる。このためそれぞれのフィルタ用 FBG の温度を調節することによって、常に重なり合いを持たせてある程度の反射光がフォトダイオードに入射するようにした。

測定は前に示した測定体系で行い、それぞれのセンサ用 FBG からの信号をフォトダイオード (PD、THORLABS 社、D400FC) で電気信号に変換した後、アンプを通して増幅しそれを FFT アナライザ (OROS 社、OR24J) で処理して周波数スペクトルを算出した。FFT アナライザのサンプリング周波数は 2kS/sec に設定して測定を行い、FFT 解析後の周波数分解能は約 0.31Hz であり 20 回の平均化処理を行った。また、比較のために電気式センサによる測定も行った。このときに使用したセンサはアンプが内蔵された ICP 規格の加速度計 (PCB 社、352C65) であり、信号は前述と同様の FFT アナライザで処理された。

FBG は両端をエポキシ系接着剤によって固定し、さらに FBG 部の上にアルミテープを貼付けて固定するという方法で直径約 1m の消音器の胴体部分に設置した。また、片端が固定端となっている場所に平行に設置すれば、光ファイバーの長手方向の伸縮が生じるために FBG の変位に対する感度が上昇するのではないかと考え、消音器を床に固定している支柱への設置を試みた。この位置への設置は NTT アドバンステクノロジ社によって加工された FBG を埋め込んだポリイミドフィルム（歪みゲージに使用されるものと同様のもの）をシアノアクリレートの瞬間接着剤で貼付けることによって行った。

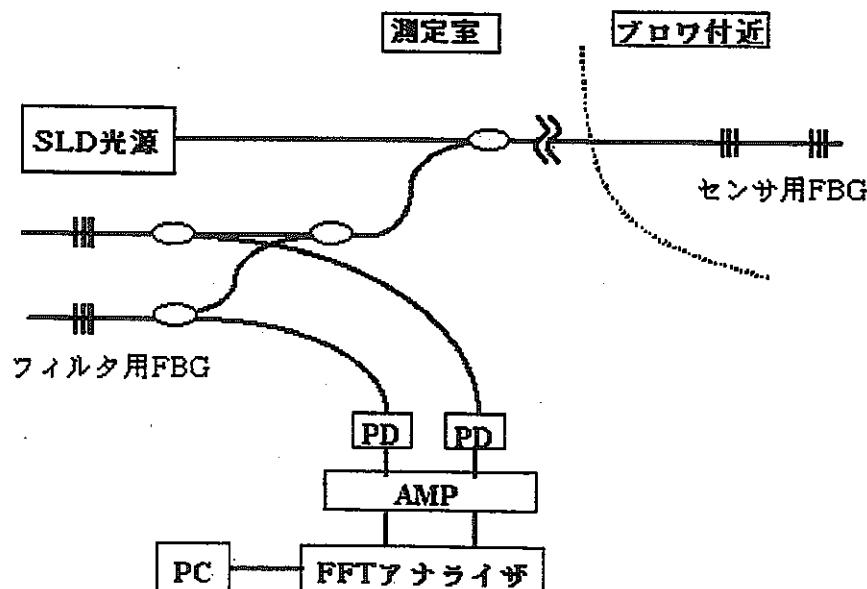


図 20 「弥生」測定システム概略図

4.2.2 実験結果

プロワの起動前後の支柱および胴体に貼付けた FBG センサからの信号の周波数パワースペクトルを図 21 および 22 に示す。冷却系のプロワを起動することによって消音器に振動が発生するが、図 21、22 から振動の発生を捕捉できていることが確認できる。

さらに比較のために FBG を設置した位置に加速度計を設置し、周波数パワースペクトルを取得した。消音器胴体、及び支柱における結果をそれぞれ図 23、24 に示す。ピークとなっている周波数はほぼ一致しており、さらに強度も傾向としてはほぼ同じである。ただし、FBG センサによって取得された信号は加速度計で取得したものに比べてかなり小さく、電源ノイズ (50Hz 及びその倍波) やベースラインのノイズが大きくなっている点に注意が必要である。これはフォトダイオードに入射する光量が微弱であったため信号の強度が十分に得られず、相対的にノイズが大きくなってしまったことが原因と考えられ、より強い光源の使用、光カプラに換えた光サーキュレータの使用、接続損失の低減などによって改善可能であると考えられる。また、消音器の胴体に敷設した FBG センサによって加速度計で測定した時とほぼ同じ周波数ピークが観測できたことから、大型の構造物に設置する場合においても片方を固定して FBG が伸縮する方向に振動を変換することなく測定可能であることが分かった。消音器胴体と支柱で得られたパワースペクトルにおいて、加速度計で測定されたピーク強度は高々 $1/3$ 程度の変化しかないにもかかわらず、FBG センサで測定されたピーク強度は $1/10$ 以下になっている。これは測定時に支柱に設置した FBG から反射してフォトダイオードに入射する光強度が $1/2$ 程度しか得られなかつたことが要因と考えられるが、支柱と FBG の間にある瞬間接着剤やポリイミドフィルムなどによって振動が吸収されたことも原因の一つであると考えられる。

しかしながら、実際に原子炉で使用されている機器の振動状態が FBG センサによって取得できること、さらに今回は 2 点であるものの直列に繋がれた FBG による同時計測が可能であることが本実験によって実証できた点は重要である。

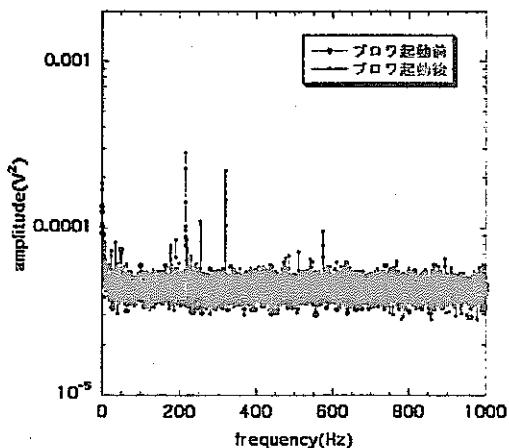


図 21 消音器支柱に設置した FBG の周波数パワースペクトル

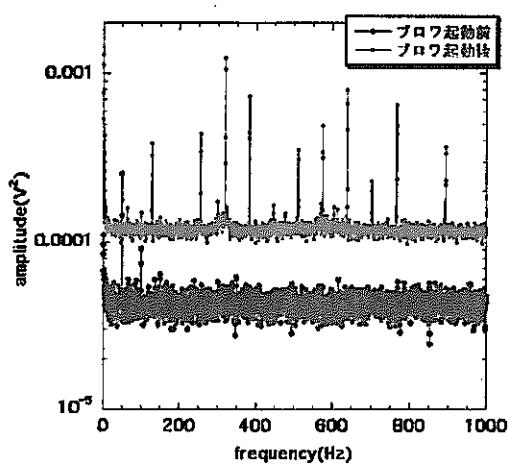


図 22 消音器胴体に設置した FBG の周波数パワースペクトル

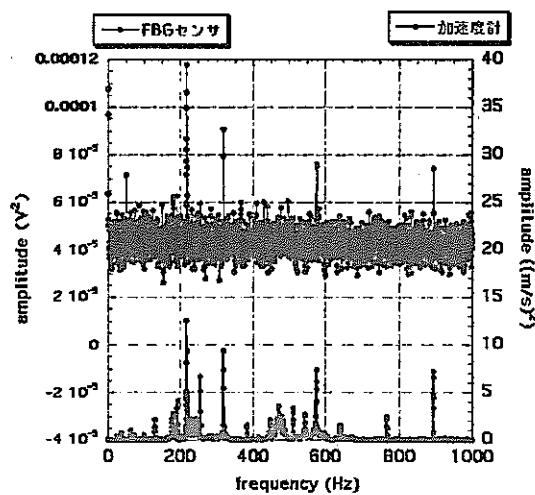


図 23 消音器支柱に設置した FBG および加速度計の周波数パワースペクトル

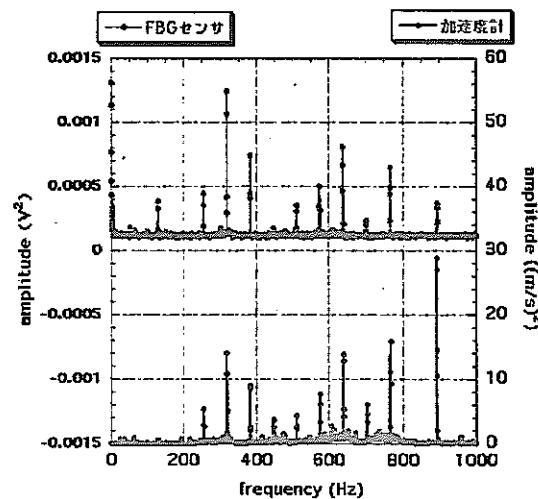


図 24 消音器胴体に設置した FBG および加速度計の周波数パワースペクトル

消音器支柱に設置する場合、両端を接着剤で固定、全体を接着剤で固定、ポリイミドフィルム加工をして貼付けのいずれの場合においても振動の検出は可能であったが、ノイズが比較的大きい点や設置場所が限定される点、測定対象に直接接触させていないのでその振動状態を反映できているかが確実ではない点などが問題点として挙げられる。一方、消音器胴体に設置する場合においては、FBG 部全体を接着剤で固定、あるいは両端を接着剤で固定したときには振動は測定できなかった。前者は FBG と測定対象の密着性が悪く、それらの間に接着剤が入りこんでしまい振動が吸収されたために測定不能であったと考えられる。後者は FBG 部の両端を接着剤で固定する際に引張られた状態を目指したが実際には弛んでしまっており振動による応力が FBG に掛からなかつた可能性や振動による変位が FBG 部を圧縮する方向に働いていた可能性などが考えられるが詳細は不明でありさらに検証を重ねる必要がある。しかし、FBG 部の上にアルミテープあるいはビニールテープを貼付けて測定対象との密着度を高めると、加速度計によって得られたパワースペクトルと比較して定量的な評価がある程度可能となるようなデータが得られた。振動測定の感度を高めるためにはこの固定方法が優れていると思われるが、大きな変位が負荷された時に FBG とテープの接着界面の一部が滑ってそのまま固定されてしまった状態から変位のない状態に戻る時に局所的に応力が集中して折れてしまう可能性もあり留意が必要である。

5. 「常陽」 1 次冷却系への設置

5.1 概要

「弥生」冷却系において振動測定が可能であることを実証できたことを踏まえて、核燃料サイクル開発機構の高速実験炉「常陽」の 1 次系配管へ設置し検証を行っている。より原子力発電プラントに近い規模の大きさであり、配管近傍は約 100Gy/h 程度の γ 線場という厳しい環境での使用が実証できれば、商業炉へのモニタリングへの適用の目処がたつと考えられる。

5.2 設置概要

「常陽」 1 次主冷却系と FBG 設置箇所の接続関係を図 25 に示す。FBG センサは光ファイバ A~C にそれぞれ 4 つずつ、光ファイバ D に 3 つの計 15 個接続した。FBG 部分と伝送用ファイバ部分とは、○で示した箇所で放電融着により接続されている。なお、図中に示されている未照射光ファイバ、切断箇所(1)~(4)からの矢印は、「常陽」性能試験後の光ファイバ系を検査するために行った実験時の情報である。詳しくは後述する。

FBG は温度、歪みに感度があるため温度や歪みのモニタリングの可能性を調査する予定であるが、原子炉起動前においてはほぼ雰囲気が室温程度で保たれているため温度や熱膨張による歪みなどの測定は不可能であった。その一方で、1 次系配管のポンプは運転を始めておりそれによって生じる振動の測定は可能であった。

本節における振動の測定はセンサとなる FBG によって反射された光を約 1nm の幅の透過ピークをもつフィルタに通し、波長のシフトを強度の変化へと変換することによって行った。複数の FBG が直列に接続されても、フィルタの透過ピークとほぼ等しい反射波長をもつ特定の FBG の信号のみが選択的にフォトダイオードに入射することになる。フォトダイオードで受光して以降、周波数測定に使用した機器は前節で使用したものと同様のものである。

A-1~A-4 は直列に接続され、それぞれ異なる箇所に設置されている。それぞれの FBG 部の両端はエポキシ系接着剤で測定対象物に固定されており、振動、歪み、温度に感度を持つように設置されている。B-1~B-4 および C-1~C-4 も同様に直列に接続され、A-1~A-4 の設置されたのと同じ 4 箇所に異なる固定方法で設置されている。また、これらの 4 箇所には参照のために熱電対を設置して温度測定を行っている。

B-1~B-4 は FBG 部の片端はエポキシ系接着剤で固定され、もう片端は自由に測定対象物から離れない程度に自由になるようにした。このような方法で固定することによって測定対象物に振動、歪みが生じても FBG に応力が掛からず、温度に対してのみ感度をもつようにした。

C-1~C-4 は参考用として測定対象物に接触せず、両端とも自由になるように設置した。これらは長期に渡って測定対象近傍に存在する放射線場によって FBG の反射波長が変化することがあった場合にそれを検出することを目的として設置した。

D-1'~D-3' はそれぞれ異なる箇所に異なる固定方法で設置した。D-1' はポリイミドフィルム加工を施した FBG で A-1~C-1 と同様の箇所に貼付けた。D-2' は両端を配管の外装板及びスプリングハンガーサポートに固定し、それらの間を架空させた状態とした。D-3' は外装板の表面に A-1~A-4 と同様に両端をエポキシ系接着剤によって固定した。

FBG を設置した箇所を図 26 に示す。A-1,B-1,C-1 および D-1' は 1 次系主循環ポンプ入口側配管のハンガーサポートに、A-2,B-2,C-2 は原子炉出口配管垂直部のハンガーサポートに、A-3,B-3,C-3 は原子炉出口配管垂直直管部外装板に、A-4,B-4,C-4 は原子炉出口配管垂直直管下エルボ部外装板にそれぞれ設置した。また、D-2' は 1 次系主循環ポンプ直下の入口側配管外装板とスプリングハンガーサポートの間、D-3' は 1 次系主循環ポンプ直下の入口側配管外装板エルボ部にそれぞれ設置した。また「弥生」炉において良好な結果が得られたので A-1、A-2、A-3、A-4、D'-3 位置の FBG には上からアルミテープの貼付けを行った。

5.3 原子炉起動前の測定結果

ポンプの流量が $252 \text{ m}^3/\text{s}$ 及び $1538 \text{ m}^3/\text{s}$ (ポンプ回転数は 20Hz 以下) において A-1、A-2、D-1' の FBG センサで取得した周波数パワースペクトルをそれぞれ図 27～29 に示す。敷設作業時に光ファイバーの接続部における伝送損失が大きくなり充分な光量が得られなかつたために、信号が非常に弱くなっている。このため 50Hz の電源ノイズが比較的大きく現れており、他の周波数ピークの強度が低くなっているものの、流量の変化によってスペクトルに変化が生じていることが確認できた。

さらに、ポンプの出力が 100% 時における A-1、A-2、D-1' の FBG センサとそれらと同じ場所で加速度計を用いて取得した周波数パワースペクトルの比較をそれぞれ図 30～32 に示す。これらの図で強度の大きなピークの周波数は加速度計と FBG センサで一致しており、FBG センサによってポンプの出力上昇に伴って冷却系に発生した振動を捕捉できることが実証された。

ポンプの出力を上昇させる試験運転が行われた時に取得した A-2 位置の FBG センサによる周波数パワースペクトルを図 33 に示した。ポンプの出力 (流量と比例) が 70% から 100% に変化させたとき $800\text{--}1000\text{Hz}$ の周波数領域に明らかな変化が生じていることが分かる。これは流量による配管近傍の振動状態の変化を捕捉したと考えられ、FBG による異常モニタリングの可能性が示されたと言える。

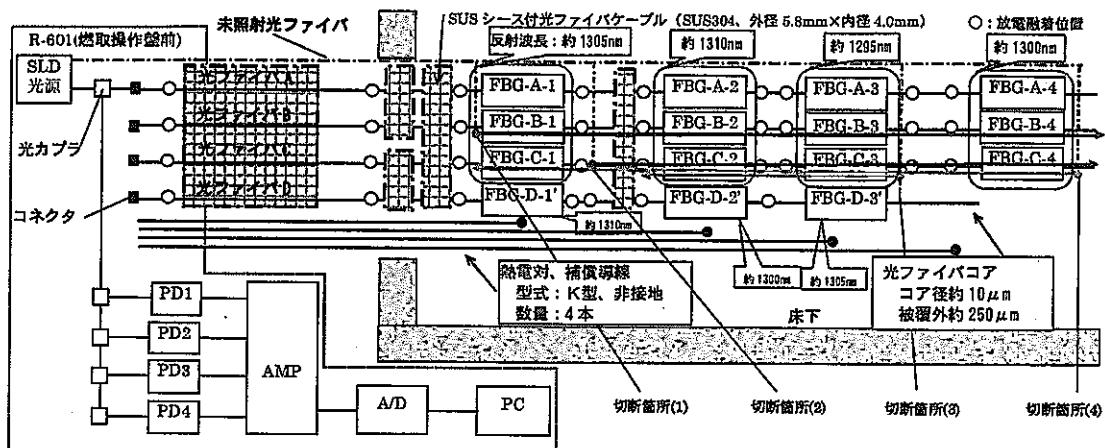


図 25 「常陽」 1 次主冷却系と FBG 設置箇所及び光ファイバー切断箇所

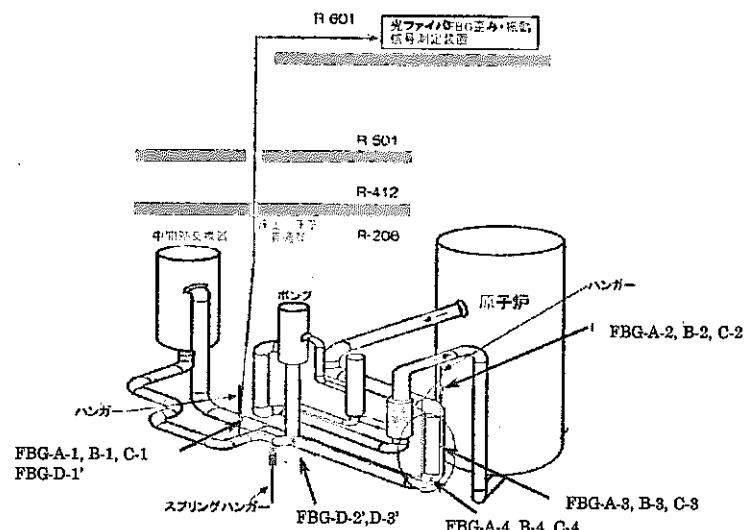


図 26 FBG センサ設置箇所

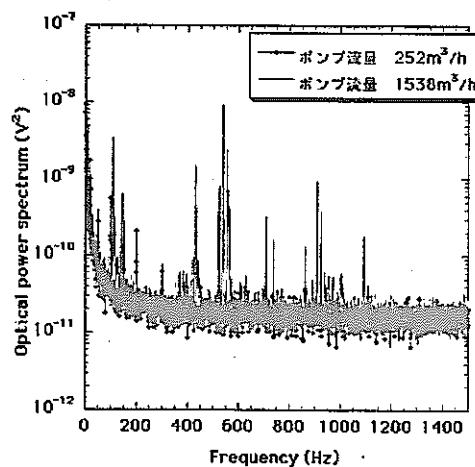


図 27 ポンプ流量が変更時の周波数スペクトル(A-1)

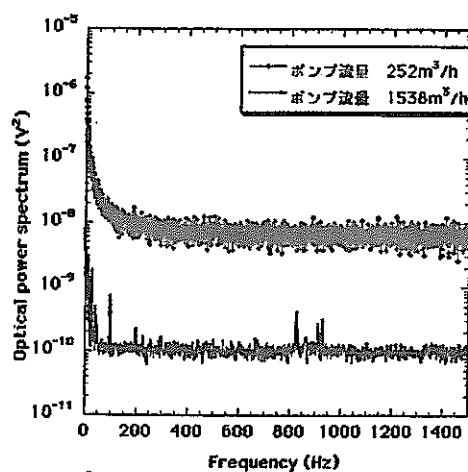


図 28 ポンプ流量が変更時の周波数スペクトル(A-2)

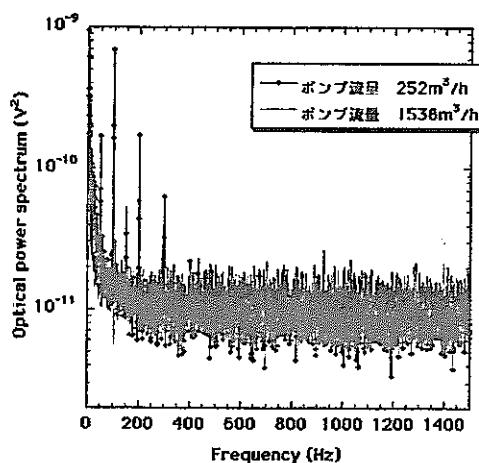


図 29 ポンプ流量が変更時の周波数スペクトル(D-1)

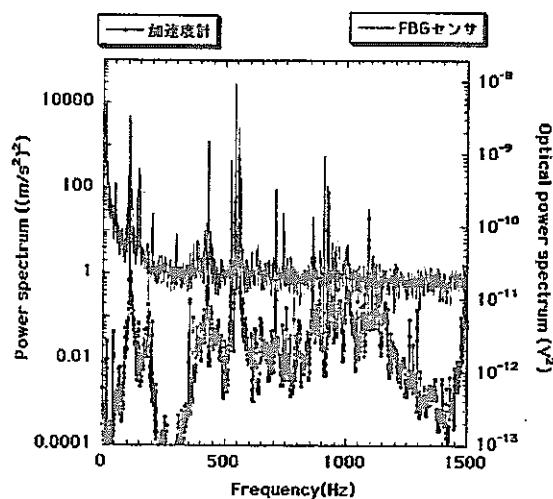


図 30 FBG センサ及び加速度計によって測定された周波数スペクトル(A-1)

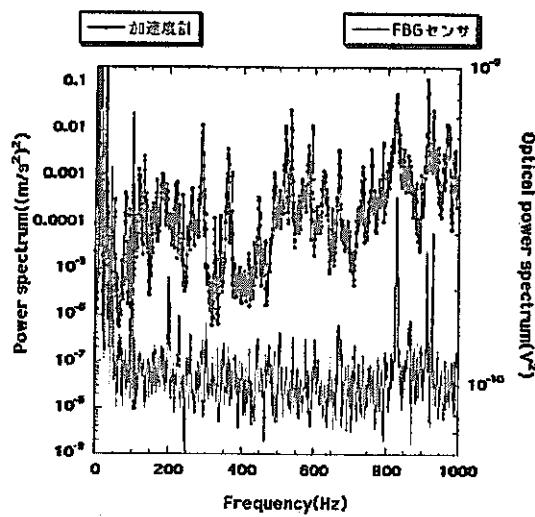


図 31 FBG センサ及び加速度計によって測定された周波数スペクトル(A-2)

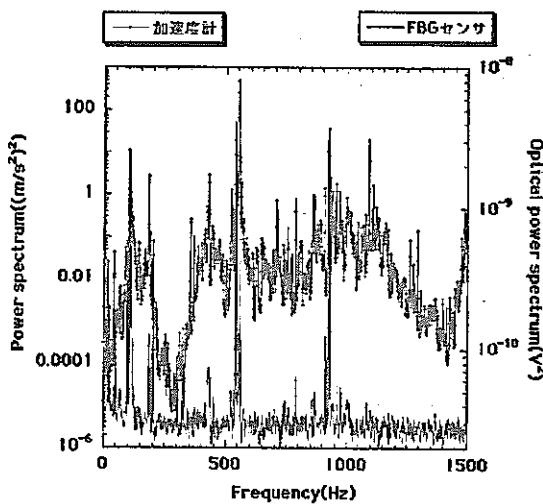


図 32 FBG センサ及び加速度計によって測定された周波数スペクトル(D-1')

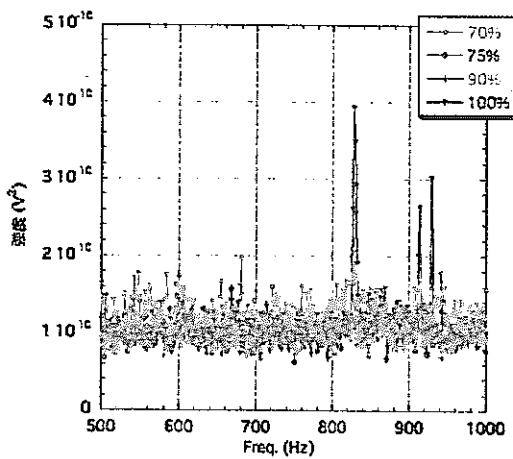


図 33 A-2 位置の FBG センサで計測されたポンプ流量別の周波数スペクトル

5.4 「常陽」起動後の測定

5.4.1 「常陽」 MK-III性能試験中における FBG 実験日程及び原子炉熱出力

測定を行ったときの日付、熱出力およびそれぞれの測定に対して番号を割り振ってまとめたものを表1に示す。

表1 FBG 実験日程及び原子炉熱出力

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
日時	9/26	10/7	10/8	10/9	10/10	10/14	10/15	10/16	10/17	10/17
出力(MW)	0	0	55	105	95	95	55	0	5	75
No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
日時	10/20	10/21	10/22	10/22	10/23	10/28	10/28	10/29	10/29	10/31
出力(MW)	75	75	75	125	125	125	140	140	130	140
No.	21	22	23	24	25	26	27	28		
日時	10/31	11/4	11/5	11/5	11/12	11/14	11/20	11/20		
出力(MW)	1	0	80	140	0	140	140	100		

5.4.2 MK-III性能試験中における FBG 反射強度測定

原子炉起動中の放射線環境下において、「常陽」1次主冷却系施設のFBGセンサからの反射強度を測定した。光源にはこれまで用いていたSLD光源を利用し、光スペクトラムアナライザにて反射波長スペクトルを取得した。図34に原子炉起動直後(9月19日起動・70MW)にて1週間運転後、9月26日に0MW)にあたる9月26日に測定した光ファイバーラインAからのFBG反射波長スペクトルを示す。図34には比較のため、性能試験前に取得した光ファイバーラインAからのFBG反射波長スペクトルも表示してある。原子炉起動直後にも関わらず、FBG1に相当する波長以外には反射ピークが認められず、またFBG1からの反射ピーク強度も大きく減少していることがわかる。A~Cいずれのラインにおいても同様の結果であった。放射線環境下における伝送損失が生じたためと考えられる。

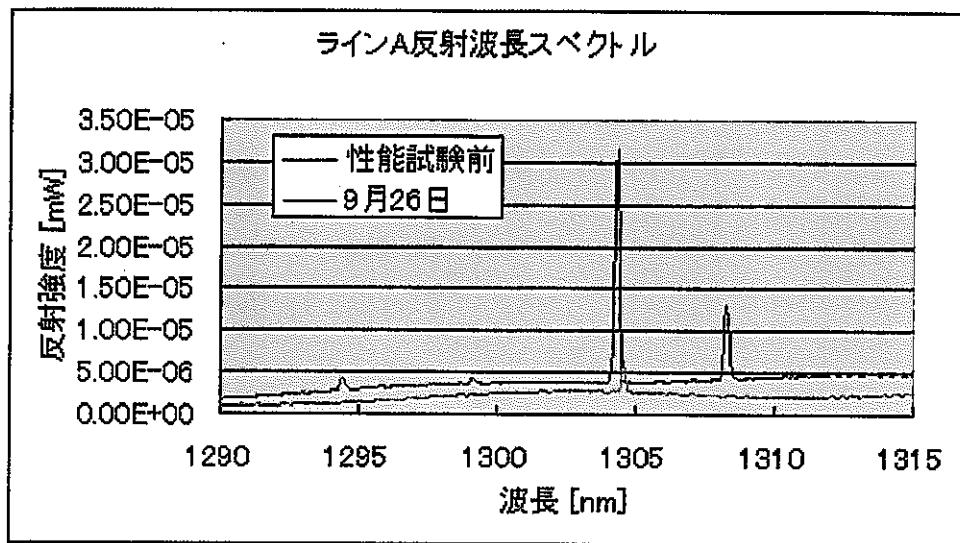
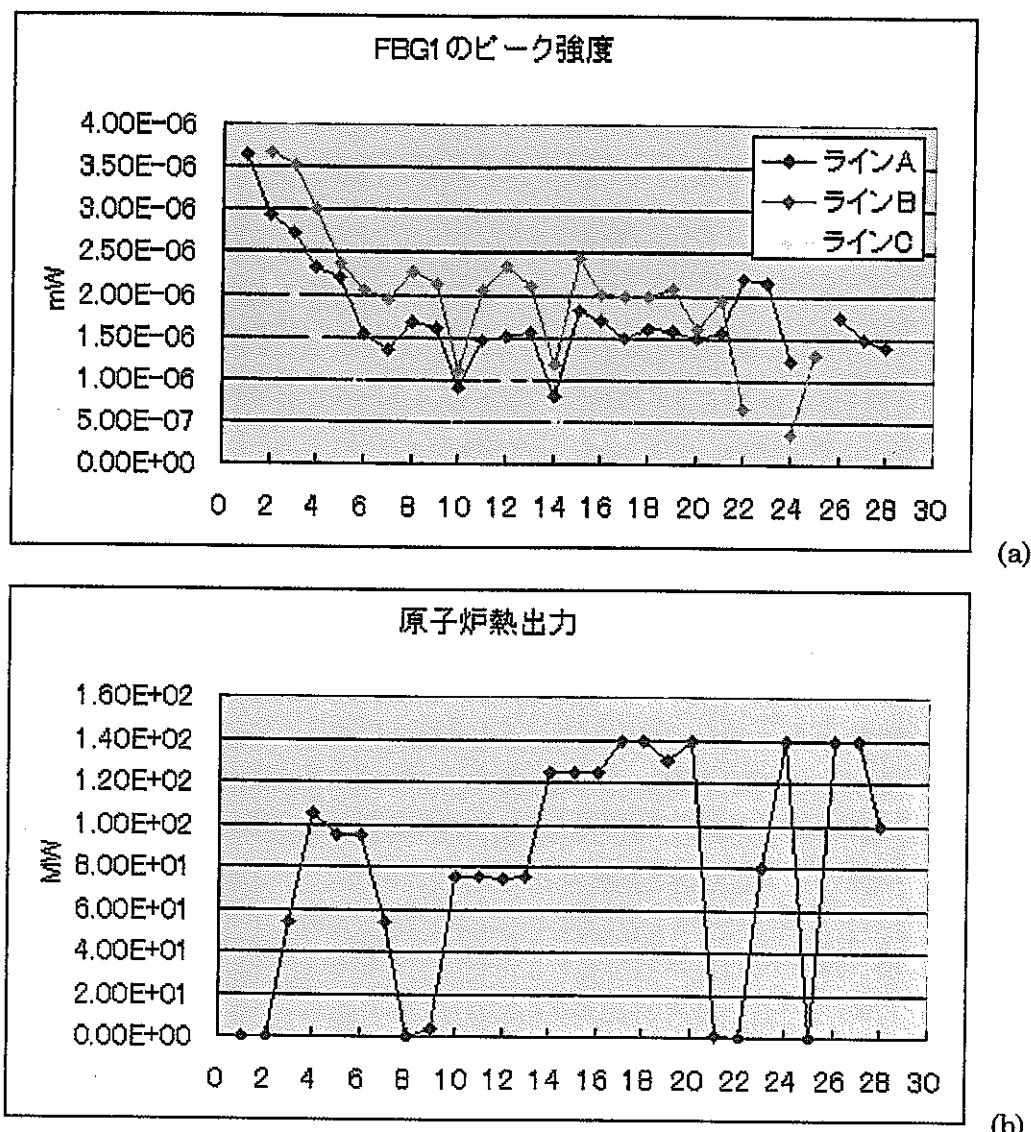


図 34 FBG センサからの反射波長スペクトル

その後の測定においては主に FBG センサ 1 について、反射強度や反射波長が原子炉熱出力・雰囲気温度によってどのように変化していくかを測定することとした。図 35(a)は、表 1 に示した日程において A~C 各ラインの FBG センサ 1 からの反射強度を測定した結果を時系列的に示したものである。横軸の番号は表 1 の No.に対応している。図 35(b)にはその時の原子炉熱出力を示した。図 35(a)を見ると、ファイバーA~C ラインいずれにおいても、原子炉起動からしばらくの間 FBG センサ 1 からの反射強度が漸減していくが、10 月 14 日（図中の番号では 6）の頃からは飽和状態を示しているのがわかる。また原子炉熱出力を急激に立ち上げた日（10 月 17 日：番号 9,10 及び 10 月 22 日：番号 13,14）を見ると FBG 反射強度は一時的に急減するが、その後しばらくの定常運転の間に飽和強度まで回復していることがわかる。以上を総合すると今回施設した FBG センサの測定系では（1）原子炉起動による放射線暴露により、FBG センサ系に伝送損失が生じ FBG センサからの反射強度が減少する、（2）反射強度はある程度の減少の後、飽和傾向を示す、ということが言える。



(a) 「常陽」性能試験中のFBGセンサ1からの反射強度、

(b)測定時の「常陽」原子炉熱出力

5.4.3 FBGセンサの反射ピーク波長と雰囲気温度の関係

図36(a)は、「常陽」MK-III性能試験時におけるファイバーラインAのFBGセンサ1反射ピーク波長を時系列的に示したものである。図36(b)は測定時のFBG1周辺の雰囲気温度を熱電対によって測定した結果である。横軸の番号は表1のNo.に対応している。FBG1の反射ピーク波長は原子炉運転中の放射線環境下においても雰囲気温度に追随して変化していることがわかる。すなわち、FBGセンサによる温度測定性能は、「常陽」運転中においても正常に機能しているといえる。

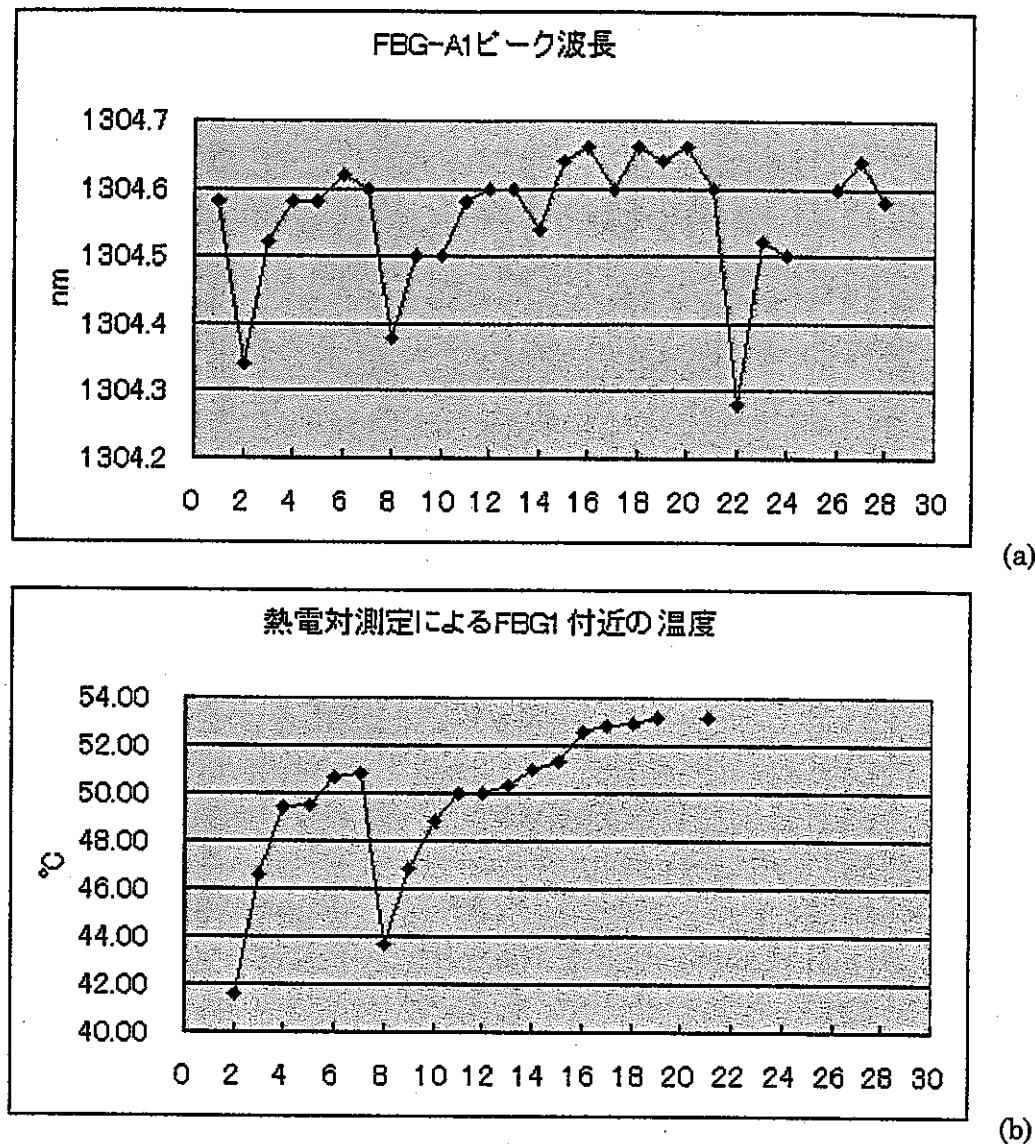


図 36 (a) 「常陽」性能試験中の FBG センサ 1 (ライン A) の反射ピーク波長、
(b) 測定時の FBG センサ 1 周辺の温度

5.4.4 FBG1 (ライン A) における振動スペクトル測定

「常陽」MK-III性能試験中に、ファイバーラインAのFBGセンサ1における振動スペクトルを測定した。ファイバーラインAからの反射光を波長フィルタを通してFBGセンサ1に相当する波長の反射光のみを取り出し、FFTアナライザを用いて振動スペクトルを取得した。図37は、表1に示した各日時における振動スペクトルを示す。性能試験前に得られていた振動ピークは消失していた。放射線環境下におけるFBG反射ピーク強度の減少により、振動スペクトルを取得するのに充分な光量が得られなくなつたためと考えられる。いくつかの日時においては50Hz, 100Hz, 300Hzといった振動数のところにピークを認めるが、いずれも50の倍数であり、ラインノイズもしくは測定環境付近の照明のチラツキなどが原因と考えられる。

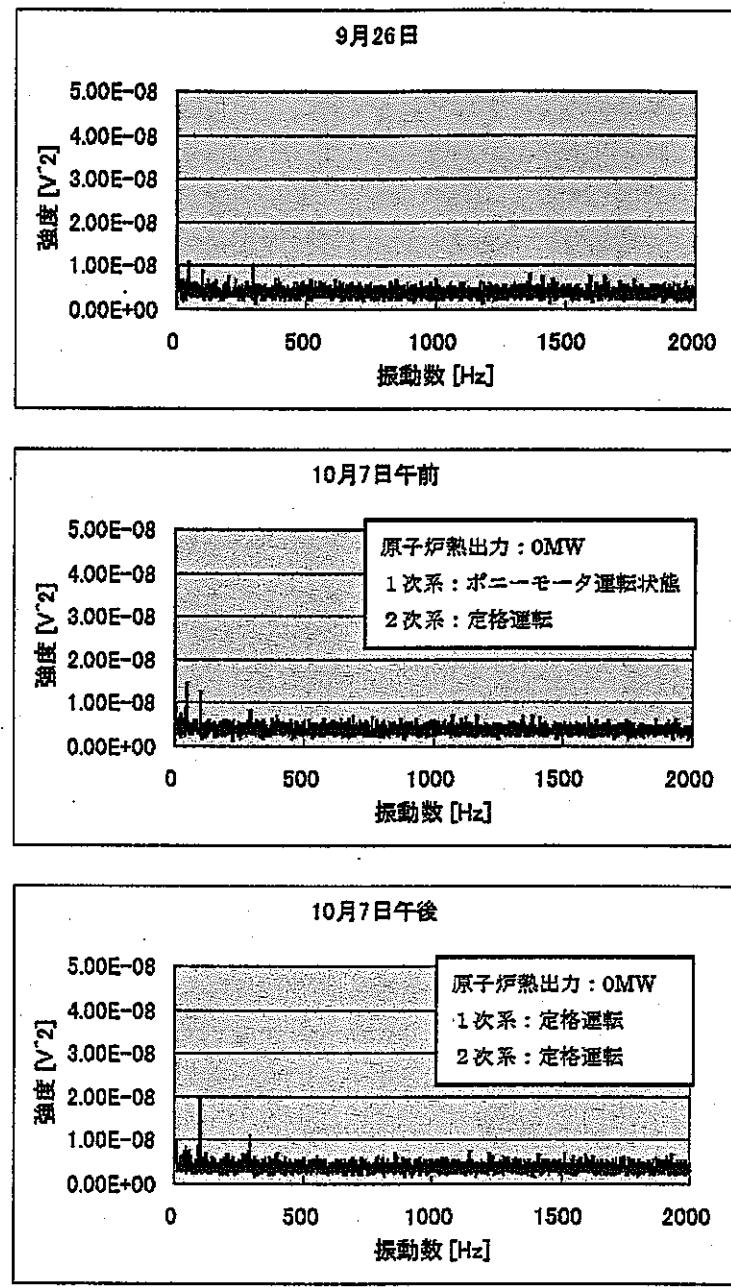


図 37 「常陽」性能試験中の FBG センサ 1 (ライン A) による
振動スペクトル測定結果

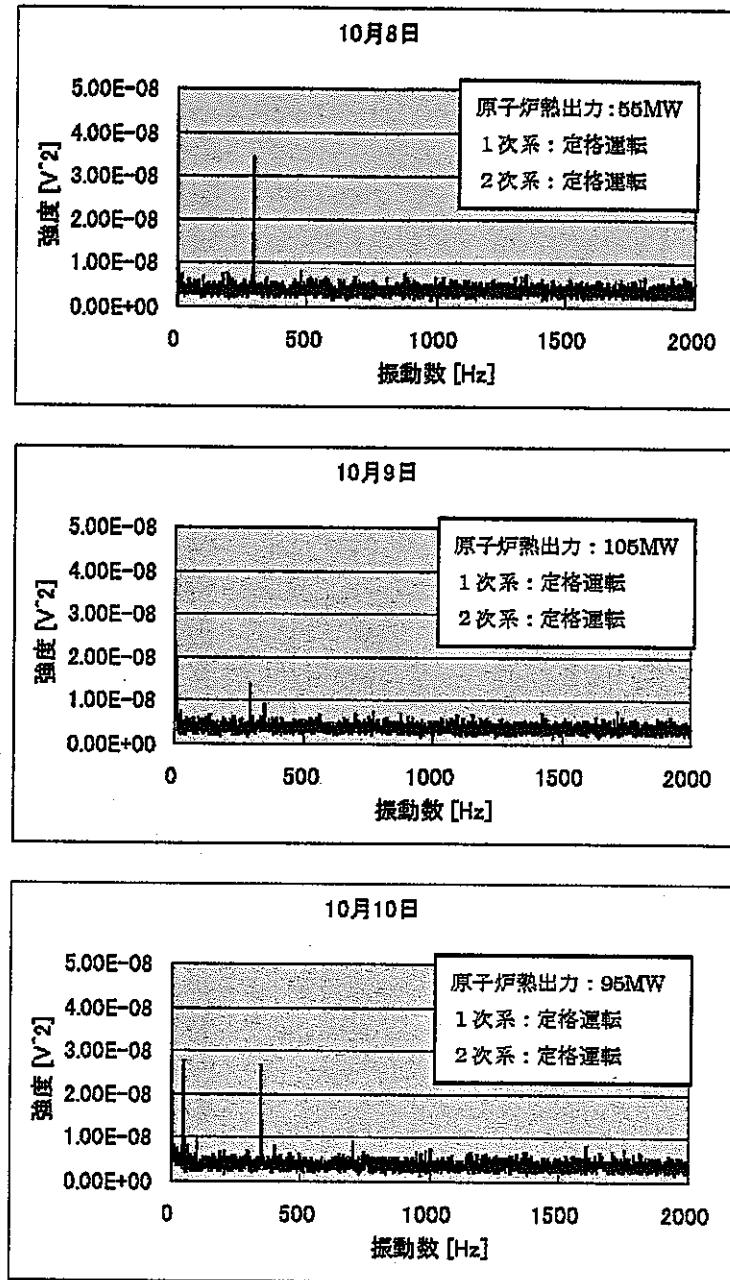


図 37 「常陽」性能試験中の FBG センサ 1 (ライン A) による
振動スペクトル測定結果

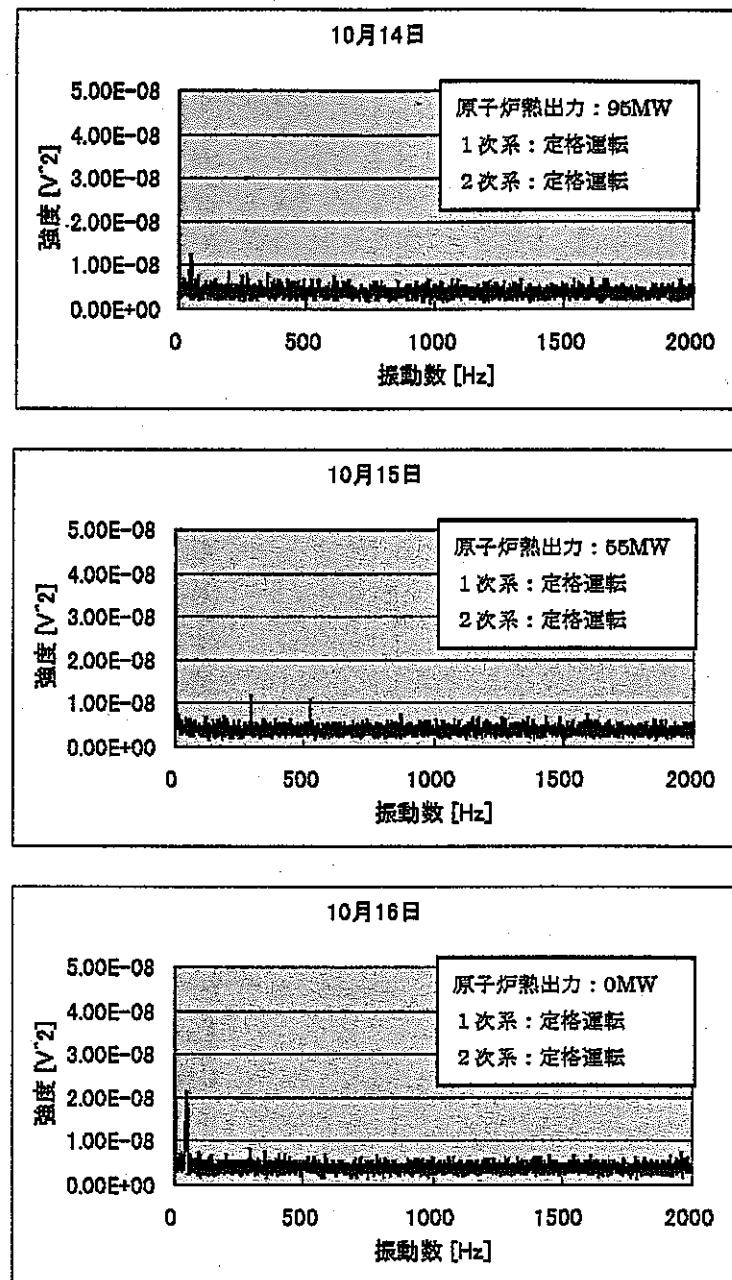


図 37 「常陽」性能試験中の FBG センサ 1 (ライン A) による
振動スペクトル測定結果

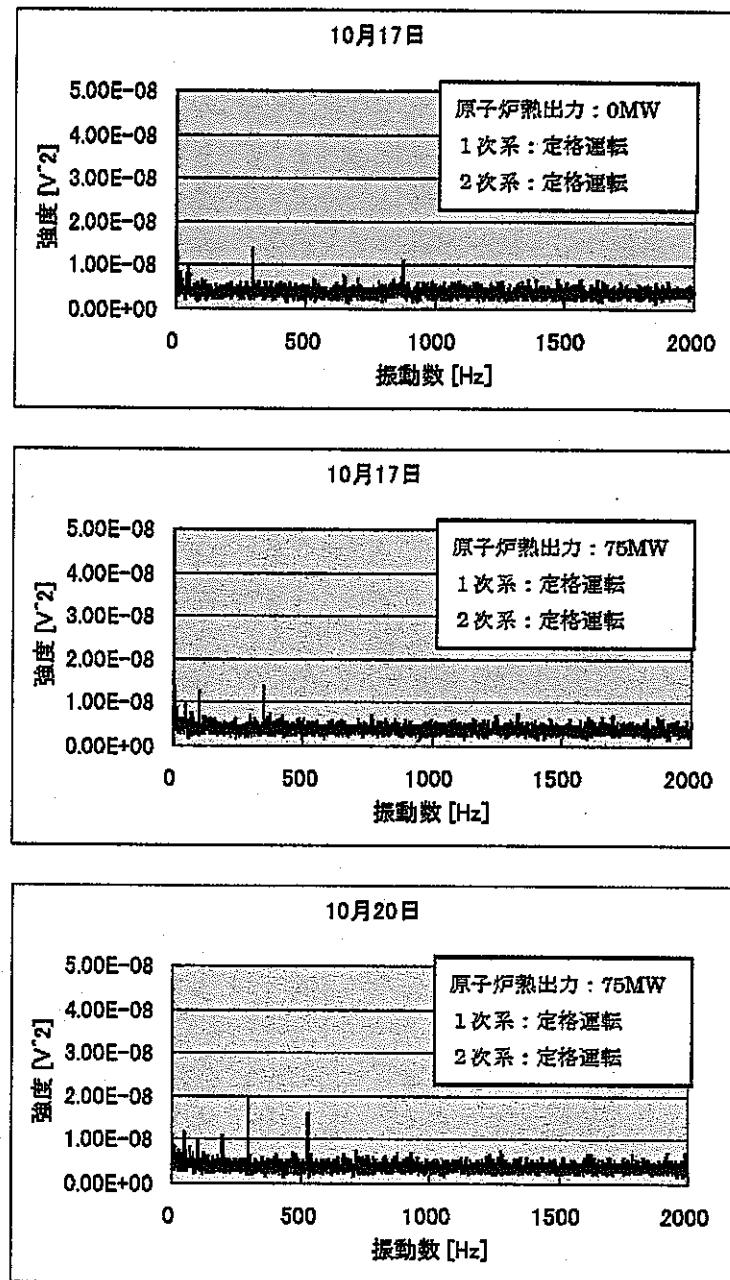
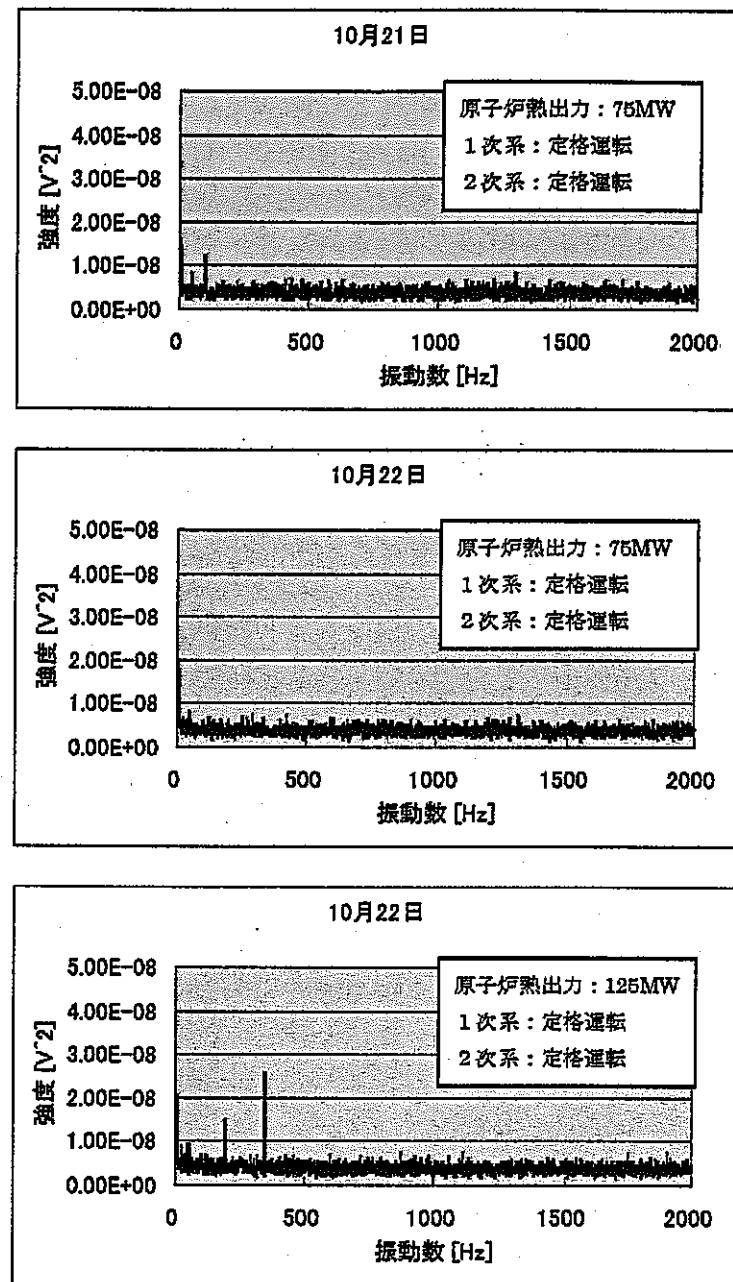


図 37 「常陽」性能試験中の FBG センサ 1 (ライン A)による
振動スペクトル測定結果



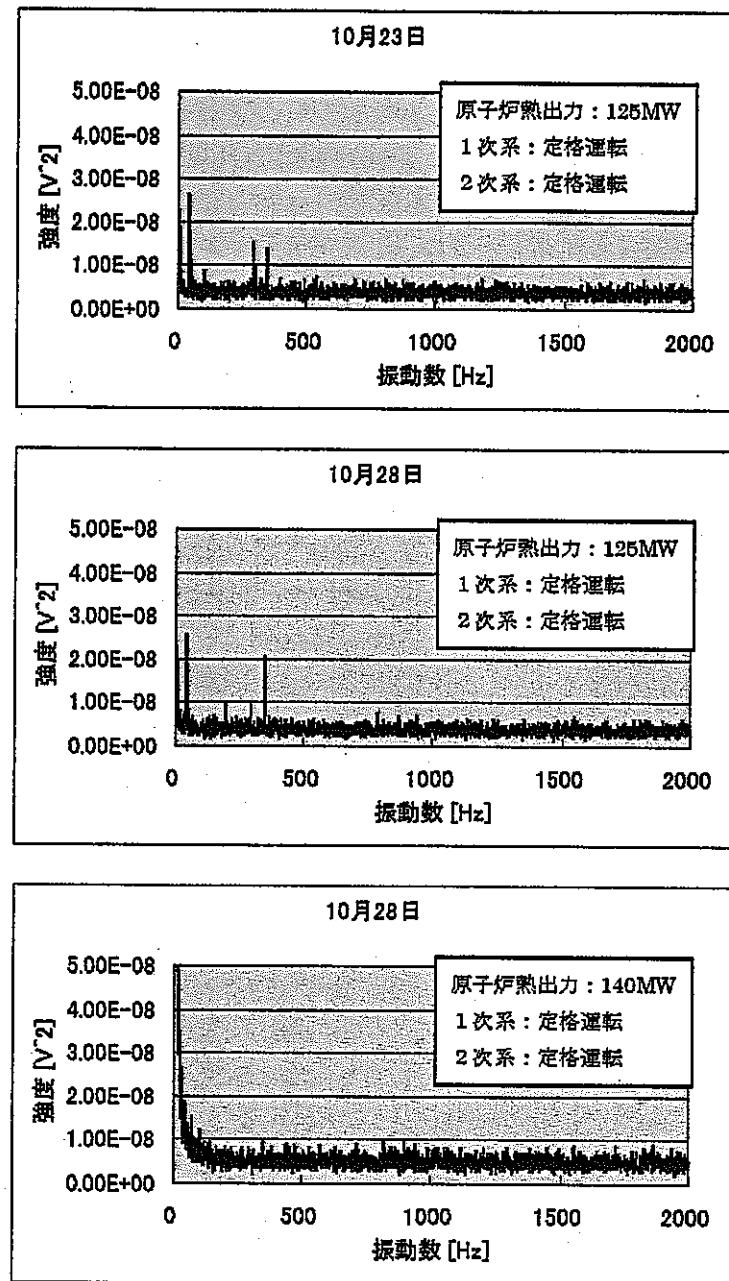


図 37 「常陽」性能試験中のFBGセンサ1(ラインA)による
振動スペクトル測定結果

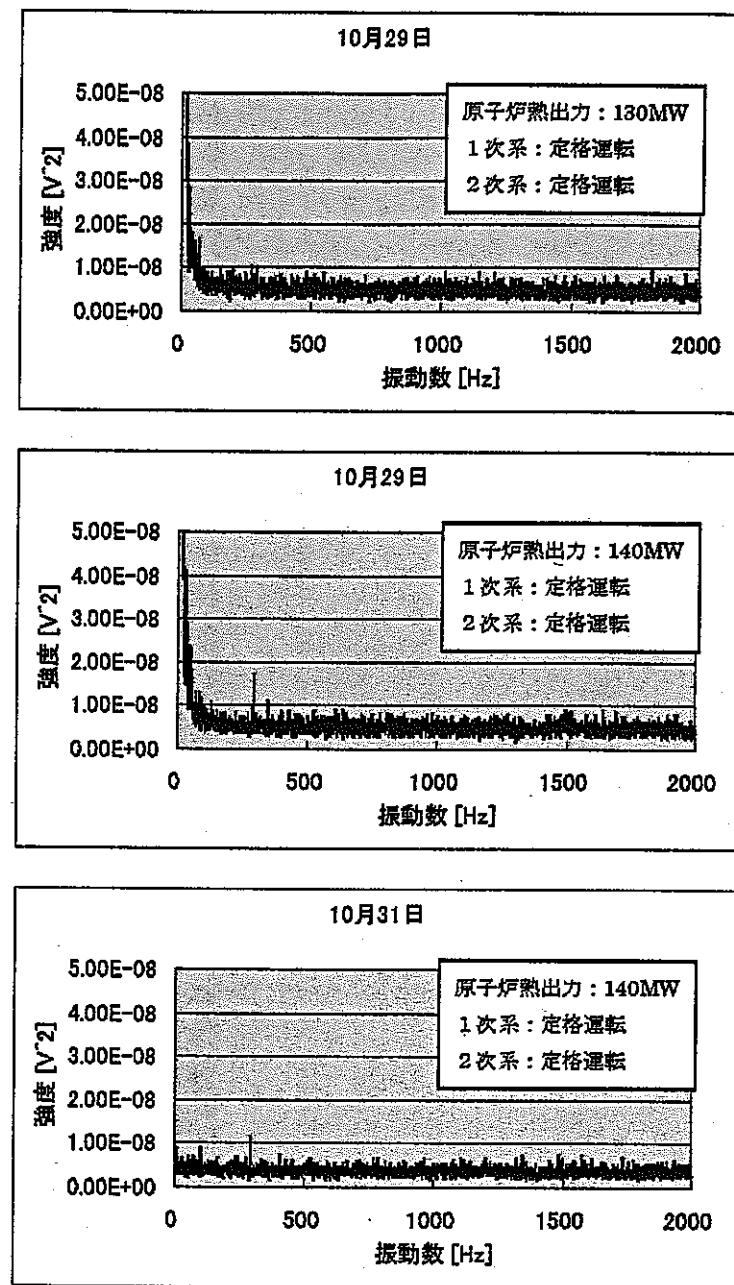


図 37 「常陽」性能試験中のFBGセンサ1(ラインA)による
振動スペクトル測定結果

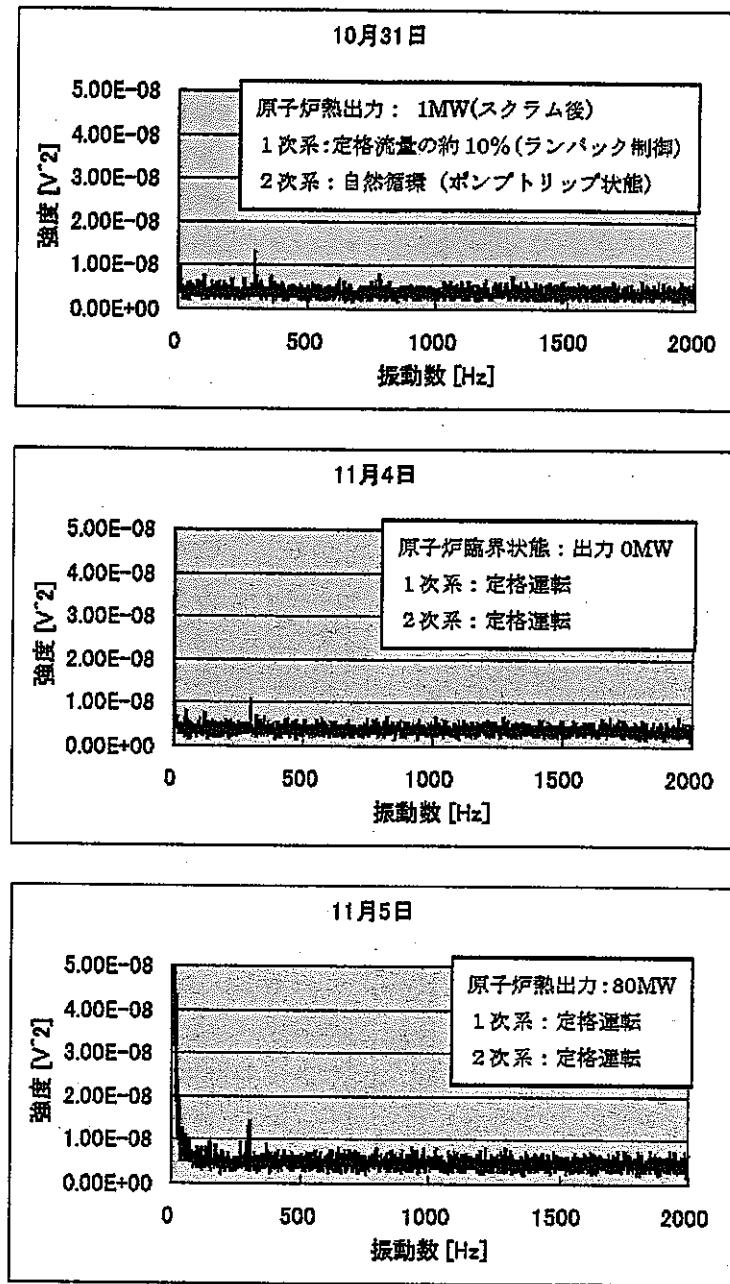


図 37 「常陽」性能試験中の FBG センサ 1 (ライン A) による
振動スペクトル測定結果

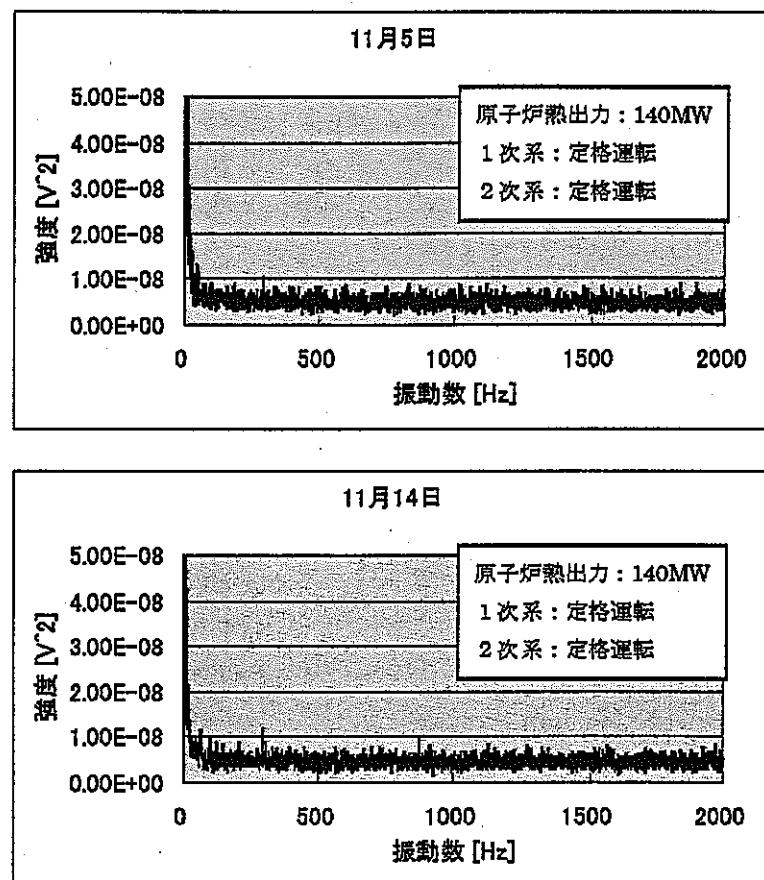


図 37 「常陽」性能試験中の FBG センサ 1（ライン A）による
振動スペクトル測定結果

6 「常陽」性能試験後の FBG 測定系の調査

これまで述べたように今回の「常陽」MK-III性能試験中における FBG 振動測定試験では FBG センサからの反射強度が急激に減少してしまい、原子炉運転中の放射線環境下における振動スペクトル取得には至らなかった。以下の節においては「常陽」性能試験後に原因調査を行った結果をまとめることとする。

6.1 ファイバーセンサ系設置場所周辺の線量

FBG センサ設置当初の予測では「常陽」1 次主冷却系配管近傍の放射線量は FBG センサ及び伝送用ファイバー (Ge ドープ) の健全性には影響を及ぼさない、というものであった。今回の性能試験中にはファイバー配線箇所における線量測定を行っていなかったが、以前「常陽」MK-II 炉心において線量測定を行った結果から推測すると、今回の MK-III 性能試験時の総照射線量はおよそ約 4.0×10^2 (C/kg)程度と予想される。事前検討では 3.4×10^4 (C/kg)にも及ぶ $^{60}\text{Co}\gamma$ 線環境化においても FBG センサからの反射強度、伝送用 Ge ドープ光ファイバーの伝送損失のいずれについても、振動スペクトル測定に支障を来たすほどの影響を認めなかつた。

また今回の MK-III 性能試験中のファイバー配線箇所における中性子量は 5.9×10^{11} (n/cm²) (全中性子量) と推定されている。2.3 節に示した通り Ge ドープ光ファイバーの高速中性子照射試験では入射光波長 1300nm における 伝送損失は東大弥生炉からの高速中性子 10^{14} (n/cm²)暴露においても多くとも -5 dB/10 m 程度であった。今回の MK-III 性能試験時の中性子量はこれよりも少なく、やはり FBG 測定系において振動スペクトル測定に支障を来たすほどの損失とは言えないと考えられる。

6.2 MK-III 性能試験後における FBG 測定系の健全性調査

「常陽」MK-III 性能試験終了後、FBG 測定系の健全性について各種の調査を行った。まず OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) を用いて施設ファイバーラインの測定を行った。OTDR は光ファイバーの片端から光を入射し、光ファイバー内で生じる後方散乱光や反射光により光ファイバーの破断点、損失などを測定する計測器で、主に距離、伝送損失、接続点損失、接続点の反射減衰量、全反射減衰量を測定できるものである。測定波長に用いた光源の波長は $1.31\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ である。図 38 にファイバーライン C における OTDR 測定結果を示す。横軸は OTDR からの距離 (10m/div)、縦軸は反射強度を dB 表示したものである。 $1.31\mu\text{m}$ を用いた測定では FBG1,2 に相当する反射ピーク (50m, 75m の位置) が認められる。これは使用した波長が FBG1,2 に対応しており、しかも光源強度が SLD 光源と比べて極めて強いため、先の光スペクトル測定では認められなかった FBG2 からの反射光も検出できる強度になったためである。ファイバーライン A,B についても同様の結果が得られた。従って放射線暴露により伝送損失は生じているものの、FBG2 までのファイバー系に機械的破断等などは生じていなかったと言える。また図 39 はファイバーライン C の終端部 (図 25 中の切断箇所(4)) にホットメルトコネクタを取り付け、ファイバーライン上流に向けて OTDR 測定を行った結果を示す。測定に用いた光源波長は $1.31\mu\text{m}$ である。なお本測定時において

は以下の節に示す目的で、図 25 の切断箇所(2)にあたる部分でファイバーラインを切断してある。従ってファイバーライン C の FBG2,3,4 を含む部分についての測定結果となる。図 39 ではファイバーライン C 終端から 10m のところに FBG2 からの反射ピークが認められる。つまりファイバーライン C については終端に渡るまで機械的破断等はなかったと結論付けられる。他のラインについても同様と考えられる。なお、今回の OTDR 測定においては FBG センサという擾乱要因が存在すること、FBG センサ系の伝送損失が大きすぎること、及び OTDR は今回のような短距離についての測定には不向きであることなどから、伝送損失の測定には至らなかった。

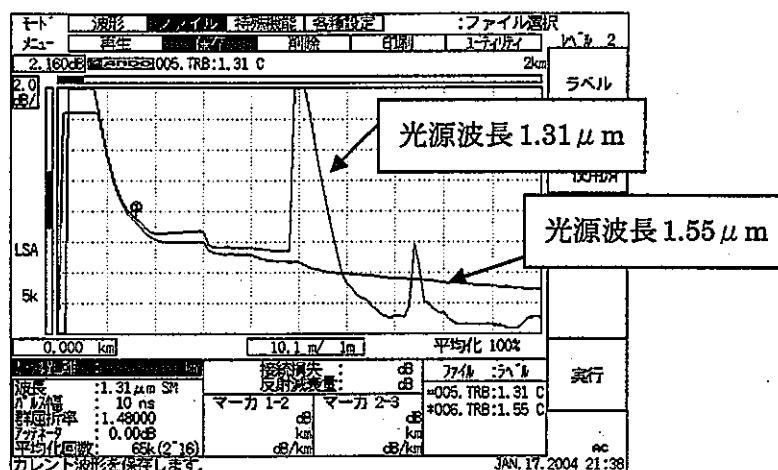


図 38 ファイバーライン C の OTDR 測定結果

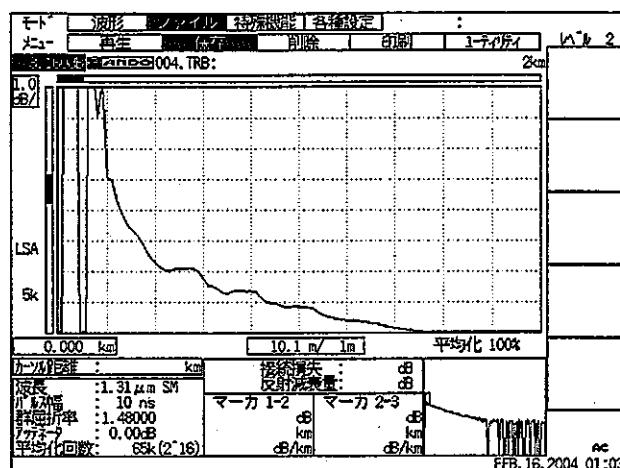


図 39 ファイバーライン C 終端からの OTDR 測定結果

OTDR では光源波長が $1.31 \mu m$ で固定なため、FBG3,4 の健全性については確認できない。性能試験中に放射線暴露されたファイバーライン系は伝送損失が大きく測定が阻害されている。そこで各 FBG の近傍でファイバーラインを切断し、新規の光ファイバー（放射線未暴露）

を敷設し放電融着によって接続した後、各 FBG からの反射スペクトル取得を試みた。光源には SLD 光源を用い、反射光を光スペクトラムアナライザにて測定した。図 40 はファイバーライン B について、図 25 中の切断箇所(1)以降の反射強度スペクトルを測定した結果である。反射強度は放射線暴露されたファイバー系で測定したものと比べ、実に 5 倍もの強度で測定できた。これは性能試験前の反射強度に匹敵する。切断箇所(1)は FBG センサ 1 すぐ上流の放電融着部と FBG センサ 1 の間の部分に相当する。伝送用光ファイバー部分は今回の性能試験中の放射線暴露量では有意な伝送損失は認められないと考えられることから、放電融着部が放射線暴露によって大きな伝送損失を引き起こし、FBG センサからの反射強度低下をもたらしたと考えられる。図 41,42 はファイバーライン C について、それぞれ図 25 中の切断箇所(2)から下流について反射強度を測定した結果、切断箇所(3)から上流に向けて反射強度を測定した結果である。それぞれ FBG2,3 に相当する波長に反射ピークが認められた。すなわち、今回の放射線暴露においても FBG そのものの健全性は保たれていたと結論づけられる。図 43 は図 40,42 の縦軸のスケールを拡大したものを示す。いずれにおいても FBG2 に相当する波長に小さなピークが認められる。ライン B についての FBG2/FBG1 のピーク強度比はおよそ 1/1000、ライン C についての FBG2/FBG3 のピーク強度比はおよそ 1/160 であった。FBG1-2 間および FBG2-3 間にはそれぞれ放電融着部が 2 箇所存在する。すなわち、入射光が放電融着部を 1 往復するごとに 1/13~1/32 程度も強度が落ちていることがわかる。性能試験前の敷設ファイバーについては、隣り合う FBG 間の反射強度比は 1/2.5 であったことを考えると、今回の性能試験中の放射線暴露によってさらに 1/60~400 にまで減少してしまったことになる。これは放電融着部 1 箇所あたり往復で 1/8~20 もの伝送損失に相当する。このように放電融着部は非常に放射線暴露に敏感で、伝送部分があまり影響を受けない程度の放射線暴露によつても大きな伝送損失をもたらしてしまうことがわかった。

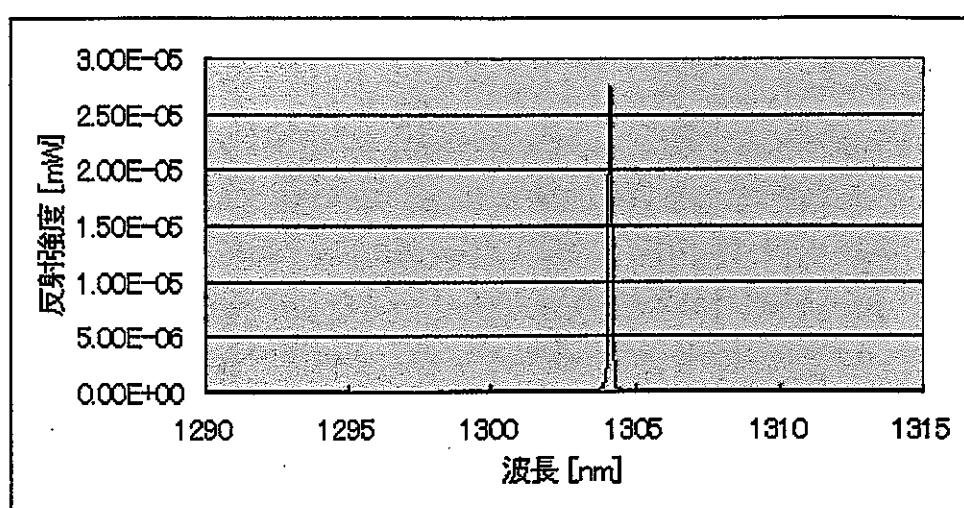


図40 ファイバーラインB 切断箇所(1)以降の反射強度スペクトル

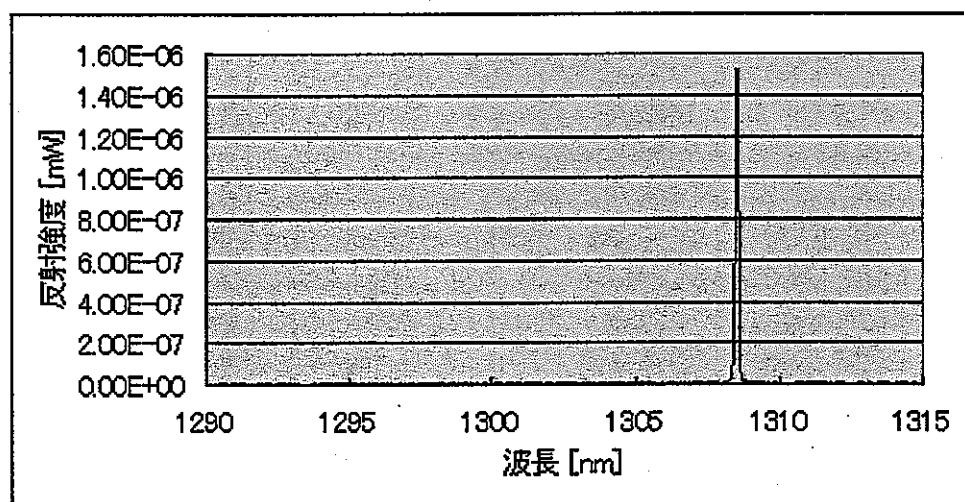


図41 ファイバーラインC 切断箇所(2)以降の反射強度スペクトル

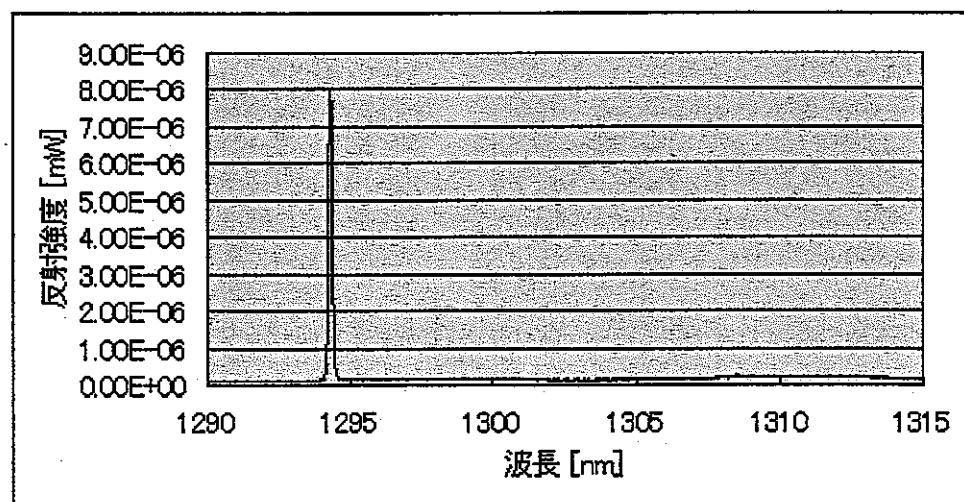


図42 ファイバーラインC 切断箇所(3)から上流の反射強度スペクトル

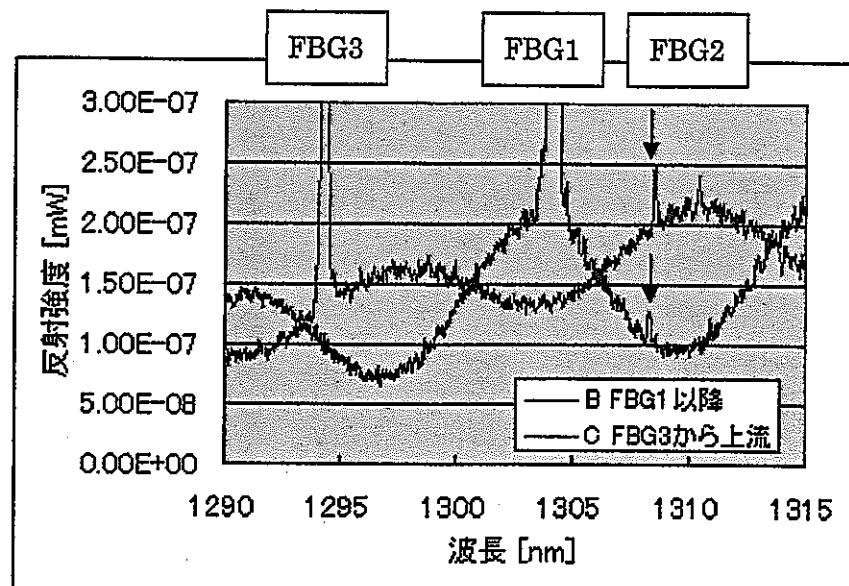


図 43 図 40,42 の縦軸を拡大したもの

6.3 振動スペクトル測定について

今回の「常陽」性能試験時における測定において、FBG1については反射ピークが得られていたが、振動スペクトルを得るには至らなかった。この原因について調査した。振動スペクトルを、FFT アナライザを用いて測定する際は、光学フィルタを用いて FBG 反射波長に相当する光のみを取り出している。性能試験前後において、フィルタ透過後の反射光を、光スペクトラムアナライザを用いて測定した結果を図 44,45 に示す。反射ピーク強度が、光学フィルタの透過波長から少しずれていたことがわかる。性能試験前は FBG1 からの反射ピーク強度が極めて強く、透過波長とずれていたにも関わらず充分な透過強度が得られていたが、放射線暴露によって反射ピーク強度が低下したため、性能試験中は振動スペクトルを得るのに充分な強度が得られなかつたと考えられる。

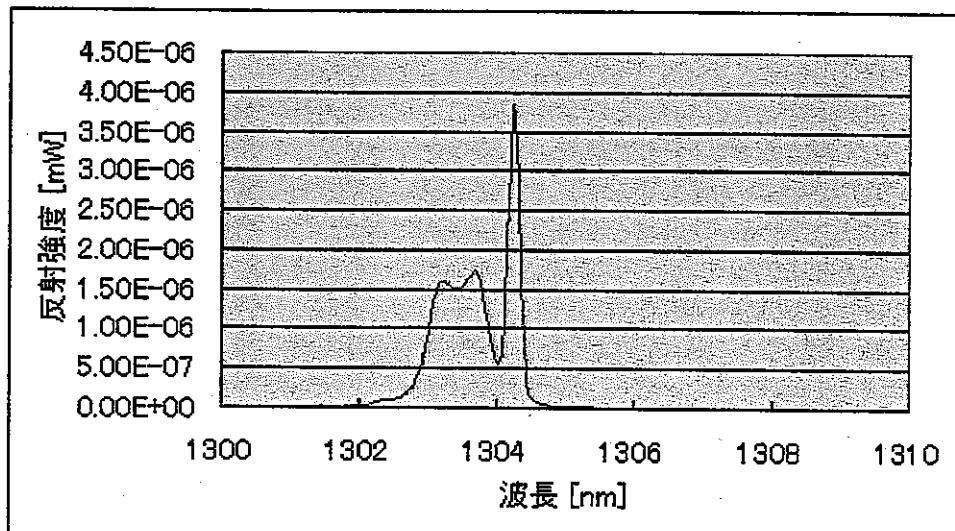


図 44 性能試験前のファイバーAライン FBG1 からの反射光を光学フィルタに通した際の反射強度スペクトル

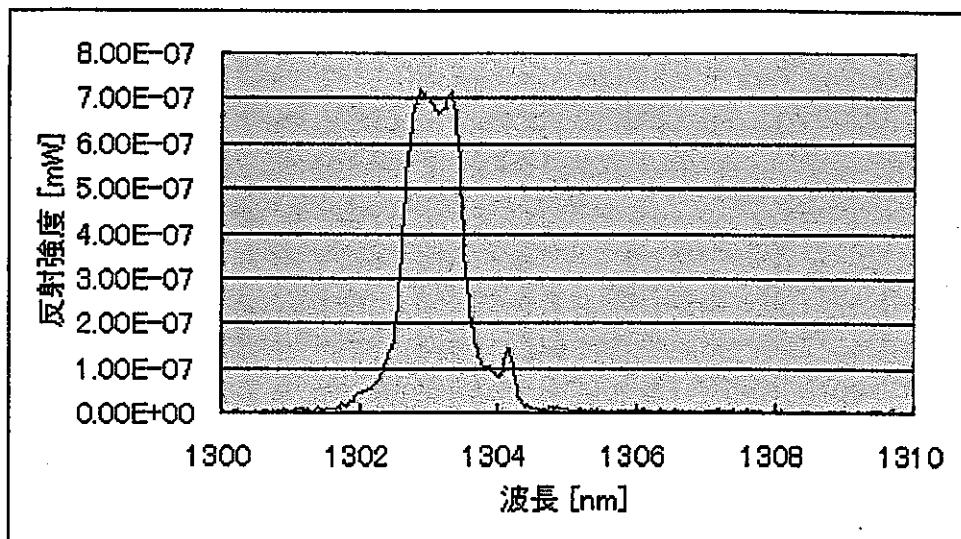


図45 性能試験後のファイバーAラインFBG1からの反射光を光学フィルタに通した際の反射強度スペクトル

6.4 まとめと今後の課題

「常陽」1次主冷却機器に取り付けたFBGセンサが原子炉運転中の放射線環境下でも動作することを確認するため、平成15年の「常陽」MK-III性能試験中にFBGセンサによる1次冷却系配管振動測定を行うこととした。残念ながらFBGと伝送用ファイバーを接続していた放電融着部における放射線暴露が予想を大きく上回る伝送損失をもたらしたため、多点振動測定を行うには至らなかった。しかしFBGセンサそのものは「常陽」性能試験中の放射線暴露程度では健全性を保っていたことから、放射線暴露部に放電融着部となるべく作らないことで、FBGによる多点振動測定は充分可能であると考えられる。技術的には1本の長い光ファイバーに多数のFBGを作成することは可能となっている。また、放電融着部だけでも鉛等で遮蔽することで、今回のような障害を極力抑えることも可能であろう。

さらに、光源についても今回使用したSLD光源よりも10倍以上強力なSLD光源やASE(Amplified Spontaneous Emission)光源が既に市販されており、それらを用いることによってより大きな反射光を得ることができる。あるいは波長当たりの強度がSLDに比べて遙かに高い波長可変レーザーを用いて直列につないだFBGの反射波長に順次波長を合わせて測定すればさらに大きな反射光量が得られるであろう。

7. おわりに

プラントのモニタリングに適した様々な特徴を有するFBGセンサを原子力施設への適用を想定し、耐放射線性の評価、測定システムの構築および実証から実際のプラントにおける検証までを行った。 γ 線吸収線量が1MGyを超えてセンサ自体に影響は見られず、伝送用の光ファイバーもある程度の線量以上では放射線誘起伝送損失に飽和傾向が観察されたため商用炉の一次系配管領域であれば少なくとも1年程度の運用は可能であると推定される。多点振動測定システムを構築し、「弥生」炉冷却系においてその実証を行いFBGセンシングシス

テムによって計測される振動周波数は電気式センサで計測されるものとよく一致することを示した。「常陽」一次冷却系における実証試験では多点の測定は不可能であったものの、その原因は敷設の方法の改善などによって解決できうる問題が大勢を占めており本質的な困難ではないと考えられ、FBG の原子力プラントへの適用の可能性は示すことができたと結論づけられる。

8. 参考文献

[1] E. J. Friebel, et al.

"Radiation response of fiber optic waveguides in the 0.4 to 1.7 μ region",
IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.25, No.6, p.1261-1266 (1978)

[2] T. Shikama, et. al.

"Optical properties in fibers during irradiation in a fission reactor",
Journal of Nuclear Materials, Vol.225, p.324-327 (1995)

[3] A.Kimura, et al.

"Application of a Raman distributed temperature sensor to the experimental fast reactor JOYO with correction techniques" , Meas, Sci. Technol. Vol.12, p.966-973 (2001)

[4] K. O. Hill, et al.

"Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication"
Appl. Phys. Lett. Vol.32, p.647(1978)

[5] A.I.Gusarov, et al.

"Comparative of MGy dose level gamma-radiation effect on FBGs written in different fibres",
13th International Conference on Optical Fiber Sensors, Kyongju, Korea, 1999: SPIE.
Vol.3746, p.608-611 (1999)

[6] A.I.Gusarov, et al.

"Effect of gamma-neutron nuclear reactor radiation on the properties of Bragg gratings writtenin photosensitive Ge-doped optical fiber", Nuclear Instruments and Method B,
Vol.187, p.79-86 (2002)

[7] Ka On Lee, et al.

"Temperature-insensitive fiber-Bragg-grating-based vibration sensor",
Optical Engineering, Vol.40, p.2582 (2001)