

論文題目 光ファイバによる原子炉機器モニタリングの研究

藤田 薫

1、緒言

近年、原子力分野への不信感をもたらすような事件が相次いでいることによって、原子力の安全性への社会的な関心がますます寄せられるようになってきている。このため、更に安全性を高め、より大きな安心が得られるようにする努力が必要であり、新しいモニタリングシステムの構築を模索することは意義深いと考えられる。一方で、光ファイバセンサをセンシング要素とする光計測技術には従来使用されてきた電気式センサにはない優れた特長をもつものが数多くあり、分野によっては既に置き換わりつつある。しかしながら、プラントの状態監視において異常の早期発見につながる振動状態の測定システムは現在のところ開発が行われていない。そこで本研究では近年長足の進歩を遂げている光ファイバブラッググレーティングを用いた測定に注目し、放射線場において振動状態監視を行うことのできる光ファイバセンシングシステムの構成を考案し、その基本特性の測定を行うことを目的とした。そのためにFBGに対する照射効果の実験的な評価、及び核燃料サイクル開発機構所有の高速増殖炉「常陽」の1次系冷却配管近傍における実証を行い、光ファイバセンシングの適用可能性について検討した。

2、光ファイバブラッググレーティング(FBG)

通常、光ファイバの構成材料として用いられる Ge をドープした石英ガラスは紫外光の照射により屈折率が変化するフォトリフラクティブ効果を示す。このため、紫外域のレーザーの干渉縞を光ファイバ上で形成することにより、周期的な屈折率変化を付与することができる。

光ファイバのコアに数千から数万層の周期  $\Lambda$  の

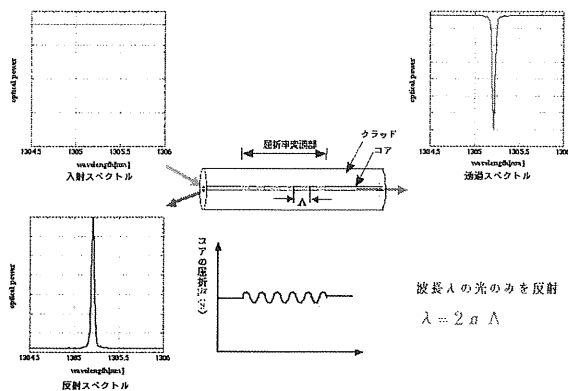


図1 光ファイバブラッググレーティングの概念図

屈折率の変化を与えることにより Bragg 条件

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (n_{\text{eff}}: \text{実効屈折率}),$$

を満たす波長  $\lambda_B$  の光を反射させる光ファイバブラッググレーティング(FBG)が開発され、すでに実用化されている(図1)。通信分野においては大容量伝送方式の一種である波長分割多重方式の波長選択フィルタとして、センサ分野では多点のマルチパラメータが測定可能なデバイスとしてFBGは大いに注目されている。温度や歪みなどによる  $n_{\text{eff}}$  もしくは  $\Lambda$  の変化は反射波長の変化となって現れる。よって情報が光の強度ではなく波長に含まれるため、放射線誘起伝送損失が問題となる原子力プラントにおいても伝送による情報の劣化が生じにくいという特長を有している。

さらにFBGは一本の光ファイバ上に複数個配置することが可能であるため、多点におけるマルチパラメータの取得を単一の光ファイバで行うことができる電源不要なインラインセンサとして期待されている。漏電による事故を危惧する必要もなく、従来は困難であった狭隙部での測定が可能であることから、FBGを設置し監視を行えばプラントの安全性の向上させることができると考えられる。

3、FBGの $\gamma$ 線照射効果

3.1 実験体系

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(試料1~4)を、それぞれ線量率300Gy/h及び600Gy/hで照射した。線量率は $^{60}\text{Co}$ 線源からの距離を変えることによって変化させた。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3に示す。スーパーミネセントダイオード(SLD)からの半値幅が約50nmの広帯域光を2x2カプラを通してFBG部に入射させ、反射光を再び2x2カプラを通して光ス

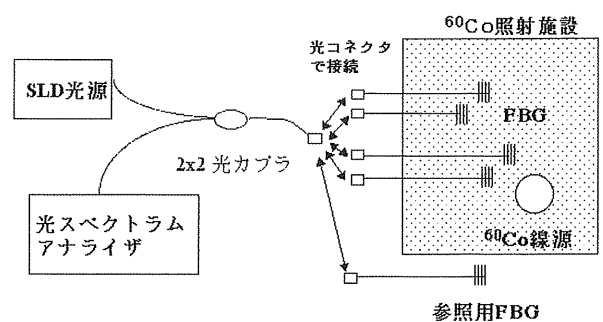


図2  $\gamma$ 線照射実験概要

ベクトラムアナライザへと導き反射スペクトルを取得した。また、照射室の外に参照用の FBG を設置して測定系に由来する誤差の補正を試みた。

### 3.2 実験結果および考察

図 3 に示されるように 1MGy までの線量範囲ではすべての試料において温度換算で  $\pm 2^\circ\text{C}$  の範囲内に収まっている。このように有為な反射波長  $\lambda_B$  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、試料 3 及び試料 4 の積算線量が 1.4MGy 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結果、1.4MGy までの  $\gamma$  線照射後も一定であることが分かった。

被覆材の有無による影響は確認されなかったことから、以降の実験で使用する FBG はより強度を増すために被覆材を除去せずに紫外レーザーを被

射する。もし、FBG①と②は反射波長が同じものを選択すると、FBG①によって反射されているため FBG②には光が届かず、歪みが加わった場合には場合にはそれぞれから反射光が戻ってくるようになるためフォトダイオード(PD)で受光する光量は大きくなる。このようにセンサとフィルタを同じ場所に置くことによって、環境温度が変化しても常に反射波長が重なるようにした。

$^{60}\text{Co}$  照射施設において 50Gy/h の線量率で  $\gamma$  線照射をしながら振動の測定を行った。照射開始から約 100 日経過した時点(積算線量 124kGy)で PD からの

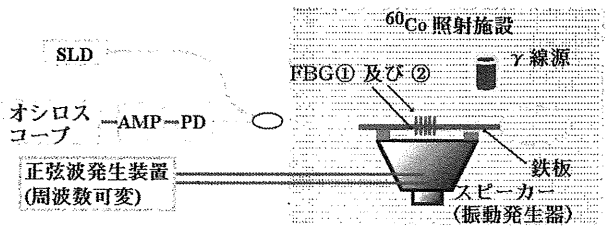


図 4  $\gamma$  線環境下における温度補償型振動測定体系

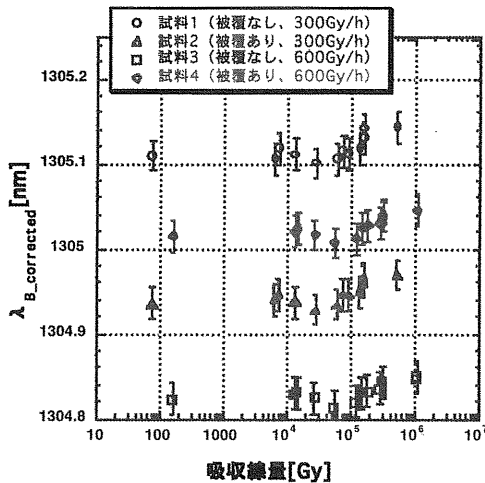


図 3  $\gamma$  線吸収線量とブラッグ反射波長の関係 (エラーバーは  $\pm 2^\circ\text{C}$  の範囲を示す)

覆材を透過させて照射して作製されたものを使用することとした。

### 4. $\gamma$ 線環境下における振動測定

$^{60}\text{Co}$  照射装置を使用して FBG センサによる  $\gamma$  線照射下での振動センシングの可能性を調査した。FBG がマルチパラメータに感度があるため、測定対象を限定した場合にそれ以外の物理量が誤差要因となってしまう。このため、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。このシステムの概略図を図 4 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、スピーカーで強制的に振動を与える。光源からの光は FBG①を通過したあとで FBG②に入

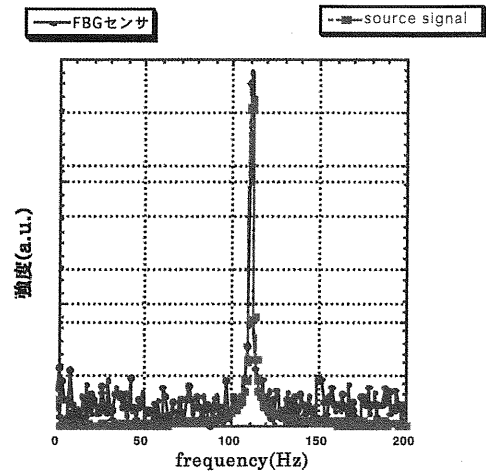


図 5 積算線量 124kGy における FBG センサとスピーカー駆動電圧の周波数スペクトル(1)

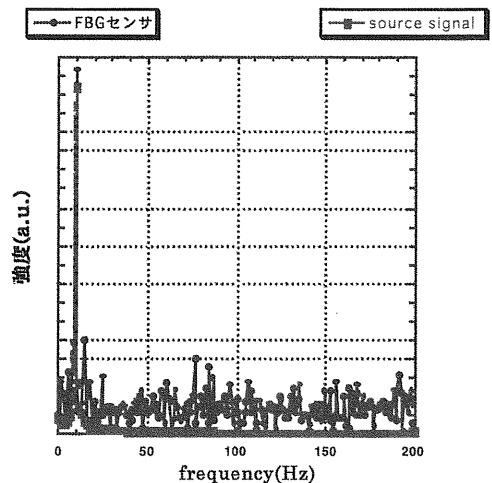


図 6 積算線量 124kGy における FBG センサとスピーカー駆動電圧の周波数スペクトル(2)

出力及びスピーカーへ与える電圧の信号をオシロスコープに入力し、FFT プログラムを使用して得られた周波数スペクトルを図 5、6 にそれぞれ示す。スピーカーの駆動電圧を変化させても入力信号と出力信号のピーク周波数が一致し、 $\gamma$ 線環境下でも振動周波数の測定可能性が実証できた。

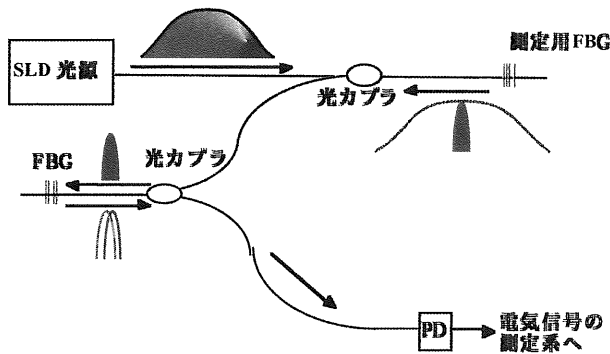


図 7 2つの FBG の反射光の重ね合わせを利用した振動測定体系

## 5、高速中性子源炉「弥生」冷却系の振動測定

### 5.1 振動測定原理

本節の実験では  $\lambda_B$  の変化を光強度の変化へと変換する方法として、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方法を試みた。この方法の概念図を図 7 に示す。この中で 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 PD で受光する。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り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、スペクトルを取得して  $\lambda$  を測定することなしに反射波長の変化を光量の多寡に変換することができる。

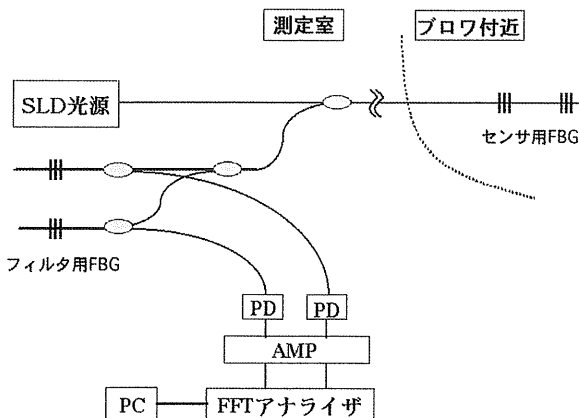


図 8 弥生冷却系の振動測定系統図

### 5.2 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、東京大学の高速中性子源炉「弥生」の冷却系排気ブロワ近傍に FBG を設置し振動の測定を行った。実験体系を図 8 に示す。ここでも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選択したが、ブ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

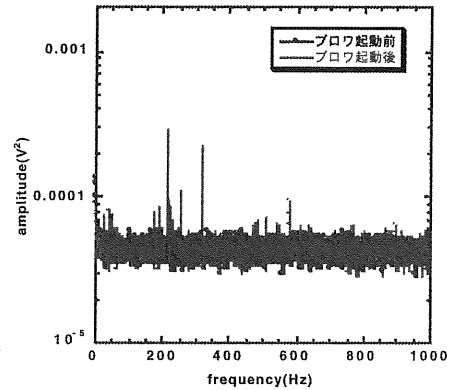


図 9 FBG センサで測定したブロワ起動前後の周波数パワースペクトル

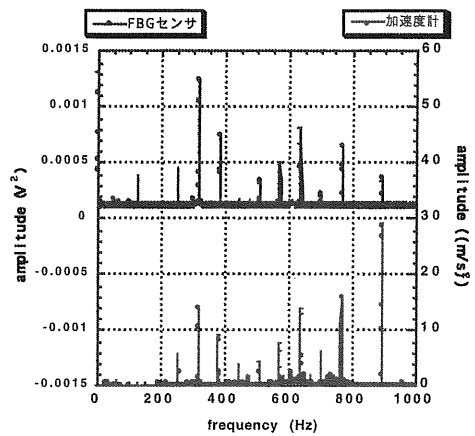


図 10 消音器胴体の周波数パワースペクトル

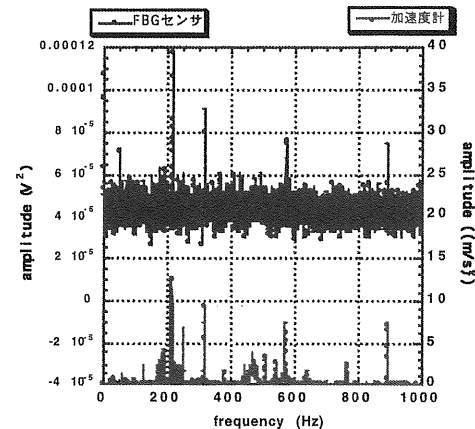


図 11 消音器支柱の周波数パワースペクトル

る。このためフィルタ用 FBG の温度を調節するによって、常に重なり合いを持たせてある程度の反射光が PD に入射するようにした。

測定は 5.1 節で示した測定体系で行い、PD で電気信号に変換した後、増幅した信号を FFT アナライザで処理してパワースペクトルを算出した。また、比較のために電気式加速度計による測定も平行して行い、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、さらにその上にアルミテープを貼付け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、消音器を床に固定している支柱への設置を試みた。この位置の測定は FBG を埋め込んだ歪みゲージなどに使用されるポリイミド箔を瞬間接着剤で貼付けて行った。

### 5.3 実験結果

ブロワの起動前後の支柱に貼付けた FBG センサのパワースペクトルを図 9 に示す。ブロワの起動によって消音器に振動が発生するが、図 9 からそれを捕捉できていることが確認できる。

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 10、11 に示す。ピークとなっている周波数はほぼ一致し、さらに強度も傾向としてはほぼ同じであるスペクトルが得られた。このように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が証明できた。

## 6. 高速実験炉「常陽」1 次系冷却配管への適用実験

### 6.1 実験概要

これまでの成果を踏まえ、より商業炉に近い規模をもつ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。「常陽」1 次系配管へ敷設時の系統図を図 12 に示す。外装板の上もしくは配管の重みを支えるハンガー部など 6 箇所のに合計 15 個の FBG を設置した。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も行う予定であるが、現在「常陽」は炉心の改造を行っており、雰囲気室温程度で保たれているため温度や熱膨張などの測定は不可能である。その一方で、1 次系配管のポンプは運転を開始しているため配管に生じる振動の測定を行った。

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 の透過ピークをもつフィルタを通すことによって、波長のシフトを強度の変化へと変換した。

### 6.2 実験結果

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 2-A 位置の FBG センサによる周波数パワースペクトルを図 13 に示した。ポンプの出力（流量と比例）が 60%及び 100%のときの比較では 800~1000Hz 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。これは流量の変化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。

## 7. 結論

光ファイバセンサの一種である光ファイバブラッググレーティングを用いた放射線環境下における振動モニタリングシステムの構築を目指し、 $\gamma$ 線照射効果の調査、測定システムの構築、原子炉における実証を行った。その結果、実際に振動状態の変化を捕捉でき、多点分布型の異常監視システムなどへの応用の可能性が示された。

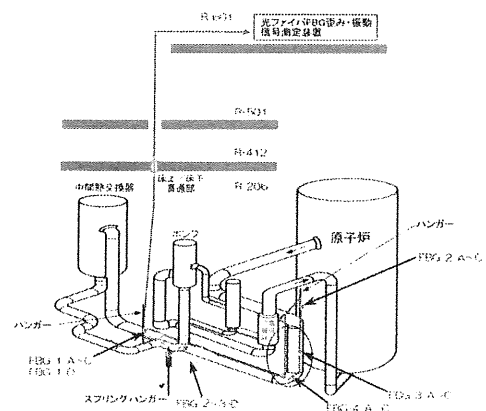


図 12 「常陽」一次系配管への FBG の敷設系統図

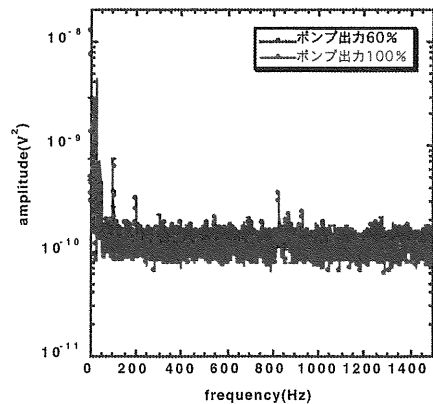


図 13 ポンプ出力による周波数スペクトルの変化