

論文内容の要旨

論文題目 光技術を用いた原子力計測の研究

氏 名 木 村 敦

1.はじめに

近年、光技術を用いた計測技術は大幅に進歩し多くの優れたセンサが開発されている。特に光ファイバを用いた、光ファイバセンサは、軽量性、絶縁性、電磁障害雑音の無誘導性、信号伝送の広帯域・低損失性などの数々の優れた特性を有し、従来の電気式のセンサに代わり得る新たなセンサとして広く研究されている。これらの光ファイバセンサを原子力プラントに適用することはプラント保守・制御の点から見て、非常に意味のあることと考えられる。しかしながら、光ファイバを放射線環境下で使用した場合、原材料のガラスにカラーセンターが形成され、その結果、光ファイバの組成、温度、線量率、照射線量、波長などに依存する複雑な伝送損失増加現象が生じるという短所がある。この伝送損失の増加が原因で、光ファイバ型センサは測定結果に誤差を生じる。よって、原子力プラントなどの放射線環境下に光ファイバ型センサを適用するためには、測定誤差の評価を行い、その補正法を検討する必要がある。

本研究においては、ラマン散乱型光ファイバ温度分布センサ (Raman Distributed Temperature Sensor : RDTS)、イメージガイド (Image Guide : IG) などを取り上げ、原子力プラントへの適用性を評価することを目的とした。そのため、光ファイバの耐放射線性を評価するとともに、RDTS の高速実験炉「常陽」への適用実験、IG の ^{60}Co γ 線源による照射実験を行い、放射線による測定誤差の評価と、測定誤差の補正法の検討を行った。

2. 放射線誘起伝送損失の解析

光ファイバを強い放射線環境下で利用する際に一番問題となるのは、光ファイバの着色により光の吸収が生じ、伝送損失が増加する事である。この伝送損失増加現象は、放射線によるイオン化や原子のはじき出しにより原材料であるガラスに格子欠陥生じ、この格子欠陥が電子やホールを捕捉してカラーセンタを形成する事により発生する。カラーセンタは、特定の波長の光を吸収するために、光ファイバは着色し放射線誘起伝送損失が発生する。一般的にカラーセンタによる光子の吸収は、それぞれに固有の吸収エネルギーを中心としたガウス分布になると考えられる。このとき、可視域～近赤外域に生じるカラーセンタに

は、紫外域にピークを持つE'センタ、630nm にピークを持つ非架橋酸素センタ(NBOHC)、その他に添加剤のF(500nm 付近)、Ge に起因するピーク等がある。ここでは、それぞれのカラーセンタについて放射線誘起伝送損失をガウスフィッティングすることにより、各カラーセンタの放射線環境下での挙動の解析を行う。

F ドープ光ファイバ(SI、コア径 50 μ m、クラッド径 125 μ m、照射長 10m)及び Ge ドープ光ファイバ(GI、コア径 50 μ m、クラッド径 125 μ m、照射長 5m、一般に利用される物)の二種類の光ファイバを「弥生」や⁶⁰Co ガンマ線源により照射試験を行った。光源としては白色光源を利用し、400~1000nm の透過光をスペクトルアナライザで測定した。その後、UV-tail、NBOHC と F に起因するピークの 3 つをもちいて解析を行った。

図 1 に⁶⁰Co からの γ 線を線量率 62[Gy/h]で照射した場合の Ge ドープ、F ドープ光ファイバの伝送損失を示す。測定の結果、Ge ドープ光ファイバに比べて F ドープ光ファイバは NBOHC の吸収ピークが 2 桁以上減少し、その結果耐放射線性がよくなることが確認された。

図 2 に F ドープ光ファイバの出力 1.2[kW]の時の吸収ピーク値の変化を示す。(中性子 3.4 $\times 10^{11}$ [cm⁻²s⁻¹kW⁻¹] (1.7 $\times 10^3$ [Gy h⁻¹kW⁻¹])+ γ 線 1.4 $\times 10^3$ [Gyh⁻¹kW⁻¹])

γ 線照射時には伝送損失は飽和傾向、線量率依存性を示すのに対し、中性子照射時には損失が直線的に増加していることが確認された。又、中性子フラックス(出力)を変化させてもその吸収ピークに大きな変化が見られず、線量率依存性がないことも確認された。以上の実験の結果、F ドープ光ファイバの耐放射線性の高さが確認された。また、 γ 線照射時には放射線誘起伝送損失は飽和傾向を示すが、中性子照射時には損失は直線的に増加することが確認された。これらのことから、中性子を含む環境で光ファイバーを使用する場合には、放射線誘起伝送損失に大きな注意を払う必要がある。

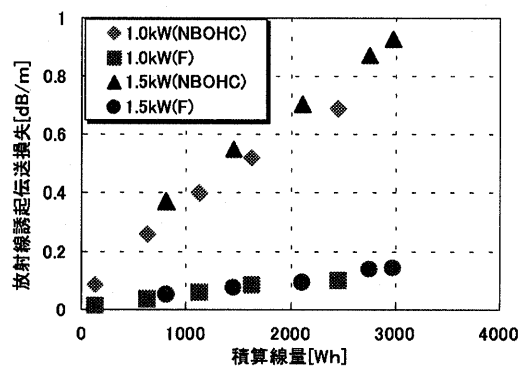
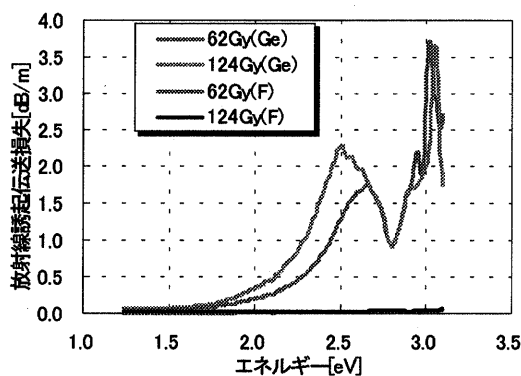


図 1 Ge ドープと F ドープ光ファイバの比較

図 2 カラーセンタの中性子照射下での挙動

3. RDTS の原子炉への適用

ラマン散乱型温度分布測定装置(RDTS)は、従来から用いられている熱電対などの電気式スポット型センサと異なり、電磁障害雑音の無誘導性、光ファイバーに沿った数 km に及ぶ連続した温度分布の測定が可能などの長所を有しており、これを高速炉に適用することは、配管の冷却材漏洩位置

た赤外用 IG を開発し評価実験を行った。

(2)実験方法 耐放射線性評価のために ^{60}Co γ 線源を用いた照射実験を行った。開発した赤外用 IG (三菱電線社製：F ドープコア、画素数：12,000、全長：10[m]) の先端 5.4[m] を線量率 $3.9 \times 10^2 [\text{C/kg} \cdot \text{h}^{-1}]$ 、雰囲気温度 $50 [^\circ\text{C}]$ で照射した。光源としては波長 808[nm] の LD (CW) を使い、撮影には赤外用 CCD カメラを使用した。なお、可視光での測定と比較するために、可視用 CCD カメラでも同時に測定を行った。

(3)実験結果 可視画像について IG の RGB 各出力での放射線誘起伝送損失の増加を図 6 に示す。照射が進むにつれて、放射線誘起伝送損失の増加による各出力の低下が観測された。測定された損失は、積算線量 $4.1 \times 10^4 [\text{C/kg}]$ で青色の出力が約 $1.5 [\text{dB/m}]$ となっている。波長の長い赤色の伝送損失が最も小さいため、色彩全体が赤味を帯びる事が確認された。図 7 に赤外用 CCD で得られた放射線誘起伝送損失を示す。測定された画像は徐々に暗くなっていき、積算線量 $3.9 \times 10^4 [\text{C/kg}]$ で約 $0.8 [\text{dB/m}]$ となっている。これより、赤外光を利用することの優位性が確認された。

(4)寿命の評価 IG の寿命は、光源の最高出力などさまざまな要因に左右される。ここでは、単純に、放射線誘起伝送損失が $10 [\text{dB}]$ に達した時点で寿命に到達するものとして IG の寿命評価を行った。

可視光を用いた場合、青色の出力の伝送損失が最も大きく、色彩の補正などを行う場合の問題となる。よって、青色の損失が $10 [\text{dB}]$ に達した時点で寿命の評価を行った。本実験での、青色出力の伝送損失増加速度は図 6 に示すように $1.5 \times 10^{-6} [\text{dB} \cdot \text{kg/m} \cdot \text{C}]$ であった。これは、仮に 2.5m の照射長で照明光をライトガイドにより供給する場合、 $3.0 \times 10^4 [\text{C/kg}]$ までの利用が可能である。一方、赤外光の場合、照明光の 808[nm] の損失が $10 [\text{dB}]$ に達した時点で寿命の評価を行った。本実験での 808[nm] の伝送損失増加速度は図 7 に示すように、 $8.9 \times 10^{-6} [\text{dB} \cdot \text{kg/m} \cdot \text{C}]$ であった。可視光のシステムと同様の仮定の下で寿命は $4.5 \times 10^5 [\text{C/kg}]$ 程度であるとえられる。

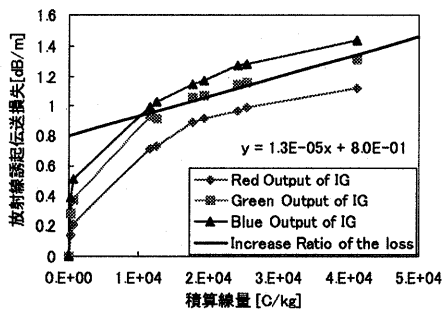


図 4 可視域でのイメージガイドの損失

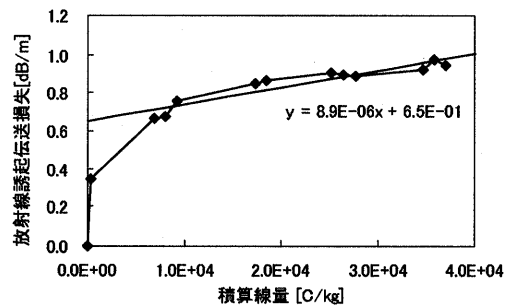


図 5 赤外域でのイメージガイドの損失

(5)まとめ 可視光を用いる場合、2.5m の照射長で線量率 $3.9 \times 10^2 [\text{C/kg} \cdot \text{h}^{-1}]$ の場合、 $3.0 \times 10^4 [\text{C/kg}]$ の耐放射線性を持つ。また、赤外光を用いて測定する場合、 $4.5 \times 10^5 [\text{C/kg}]$ までの利用が可能であることを示している。これらの結果は、従来の CCD カメラよりも 3 桁以上高く、原子力プラント等の高線量率環境でのプラント監視・保守・点検用に IG の適用が可能であると期待される。

5. 結論

RDTS と IG の二つの光ファイバセンサについて、放射線環境への適用性を評価するとともに放射線による測定誤差の補正法について検討を行った。その結果、耐熱性などの他の要因についての検討は必要であるが、放射線誘起損失の観点からは両センサとも十分に原子力プラントへの適用が可能であることが確認された。