

■光ファイバーで原子炉内を探る

量子計測研究グループ ■角 田 恒 巳■

New In-Core Monitoring Method Using Optical Fibers

Tsunemi KAKUTA

Research Group for Quantum Radiation Measurement

Highly radiation-resistant optical fibers having fluorine doped silica core have been developed. They can be used in the core region of nuclear reactor. Using the radiation-resistant optical fiber, some basic researches are made to develop in-core optical sensors for measurements of radiation, temperature, etc. An in-situ observation of materials and an in-core imaging guide system are also possible using the radiation-resistant optical fiber.

量子計測研究グループでは、レーザー光学技術や、発光・分光などの光学的手法を用いて、原子炉や核融合炉の炉心で起こる様々な事象の計測方法の研究開発を行っている。その一つとして、原子炉内で得られた光信号の伝送媒体に、また自身をセンサ要素として利用する光ファイバー技術の開発を試みている。光ファイバーは、単に信号伝送媒体としてだけでなく、可視～赤外領域に及ぶ幅広い光波長領域と低損失性や電磁的ノイズに影響されない耐環境性、さらに素材の持つ柔軟な特徴を利用して、あらゆる計測分野に利用されている。

光ファイバーを放射線下で使用するとき最も深刻な問題となるのは、着色により光の吸収が生じ、その透過性を悪化させることである。光ファイバーの素材であるガラス内で照射によるイオン化や原子のノックオンなどが生じ、これによる格子欠陥が電子やホールを捕捉しカラーセンターを形成することによるもので、ガラスの宿命ともいえる現象である。光ファイバーの耐放射線性とは通常この問題を指し、放射線環境下での実用において解決すべき最も重要な課題とされている。したがって、光ファイバーの耐放射線性の向上に

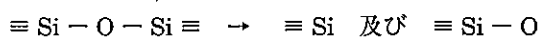
は、カラーセンターの原因となる欠陥形成の機構解明と、その生成を抑制する技術開発が重要な課題であり、量子計測研究グループでは中性子を含む重照射環境での照射試験を含め研究を進めてきた。

放射線によって生じる光の吸収の要因は、大別して二つある。一つは、光ファイバーを製造する際に導入されたガラスの不完全構造の多寡に依存する。放射線の照射によって生じる電子・正孔対の多くは短時間のうちに再結合し消滅するが、その一部が、これら前駆体と呼ばれるガラス内の不完全構造に捕獲され、新たな欠陥を生じカラーセンターとなる。他の要因は、放射線の照射によって生じるガラス結合の切断や原子変位に、新たな電荷捕獲単位が形成され、同様に吸収を生じることによる。したがって、放射線に強い光ファイバーは、組成構造が単純であるとともに共有結合性が高く不完全構造の少ないガラスを、まず第一に製造する事が肝要である。光ファイバーは、光を透過するコア部と光を反射させる周囲のクラッド層から成っているが、コア部に種々の添加物質（ドーパント）や不純物を含まない高純度の石英ガラス SiO_2 ($\equiv \text{Si}-\text{O}-\text{Si} \equiv$) を用いることが耐放射線性の点で優位性が

あるといえる^{1,2)}。

しかし、高純度石英ガラスといえども、光ファイバー製造の際に前駆体として、酸素欠陥(≡Si-Si≡)、非架橋酸素(≡Si-O)、水酸基(OH基)、過酸化酸素(≡Si-O-O-Si≡)、拡散酸素分子、拡散水素分子、あるいは光ファイバーの出発原料である四塩化珪素SiCl₄などに起因する微量な不純物により、種々の不完全構造が導入される。γ線や電子線照射では、結合の切断や原子変位よりも電荷捕獲が大きいため、これらの初期構造欠陥の多寡が耐放射線性の支配的要素となる。このように、組成の純度だけで耐放射線性の良否を判断することは難しく、初期構造欠陥の少ない光ファイバーを得るには、製造のノウハウに係わる部分も大きい。

良質な結合構造を持つ石英ガラスにおいて、放射線により新たに生成される欠陥は、SiO₂の結合構造からわかるように、



で、これに電荷捕獲されたカラーセンターとして、E'センター(≡Si·) 215 nm及び非架橋酸素正孔センターNBOHC(≡Si-O·) 260, 630 nmが圧倒的に多く、紫外領域から可視領域に至る短波長側に大きな吸収を生じる。

耐放射線性の改善策として、これらSiO₂の初期構造欠陥及び照射により生成する欠陥を、他の分子やイオンの結合によって埋め、電荷捕獲の抑制をはかる方法が考えられる。図1に、SiO₂ガラスにおけるE'センターやNBOHCの欠陥形成を、他の分子やイオンによって抑制する模式を示す。このうち、水酸基(OH)を光ファイバー内に拡散させる方法が良く知られており、10⁶Gy程度の照射に耐えることができ、原子力施設の放射線環境下での利用に道を拓いてき

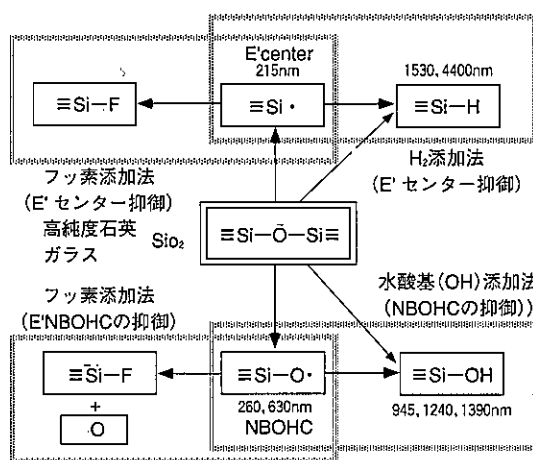
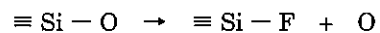
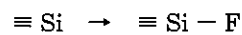


図1 光ファイバーの耐放射線性改善法

た³⁾。しかし、OHの結合は945, 1240, 1390 nmなどの波長領域に大きな吸収を生じ、光ファイバーの特徴をより有効に利用するには制限があった。

量子計測研究グループでは、フッ素を光ファイバーのコア内に拡散させることによって、その電荷捕獲の抑制を図ることによって改善する方法を試みた。フッ素は活性度の高い元素で、光ファイバーの組成の一つとして耐放射線性に影響を持つ酸素と、イオン化エネルギー、原子半径、イオン半径などが共に近い。もともと光ファイバーのクラッド層の屈折率を変えるために使われる材料でありSiO₂との相性も良い。SiO₂の初期欠陥及び照射による新たな欠陥生成を、フッ素を拡散することにより、



の結合形態とし、E'センター及びNBOHC生成を大幅に抑制することができ、格段の耐放射線性を示す光ファイバーが得られるようになった。コアSiO₂に1.6 wt%、クラッドSiO₂に5.6 wt%のフッ素を拡散した光ファイバーは、中性子及びγ線が混在する原子炉炉心内で~10²⁴n/m²、~10⁹Gy以上の照射に耐えることが確認された⁴⁾。

耐放射線性の向上により、今まで不可能と考えられていた原子炉炉心内の光ファイバーの使用も可能になり、新しい利用展開が図られるようになった。原子炉内での照射により物性や機能を調べる in-situ 計測に、発光・分光などの光学的な手法を導入することもその一つである。原研のJMTR炉心において中性子及びγ線レベルが、それぞれ~10¹⁸n/m².s、~10³Gy/sの位置で照射中のアルミナ Al₂O₃からの発光を計測した例を図2に示す。Fセンターとして同定されている420 nm近傍の発光ピークを明瞭に捕らえ、不純物Cr³⁺による690 nmの発光ピークも観測している。また、温度と共に変動するFセンターの挙動も明確に計測できるなど、照射サンプルの機能変化を観察する新しい評価法として有効な手段となることを示している。さらに、アルミナ試料を黒体として波長1600 nmの熱放射信号により炉内温度を正確に計測することができ(図3)多機能でアクティブな炉内情報監視の可能性を示唆している。

光ファイバーの利用は、耐放射線性のさらなる進展に伴って、原子炉、核融合炉、加速器、核燃料サイクル施設などにおける計装システムを大きく変革する可能性を有している。例えば、炉心内や長い配管系に沿った温度、圧力、流量、放射線等の強度分布測定が1本の光ファイバーで可能となり、安全監視性能をさらに向上できる。また、逆に外部からレーザー光を導入

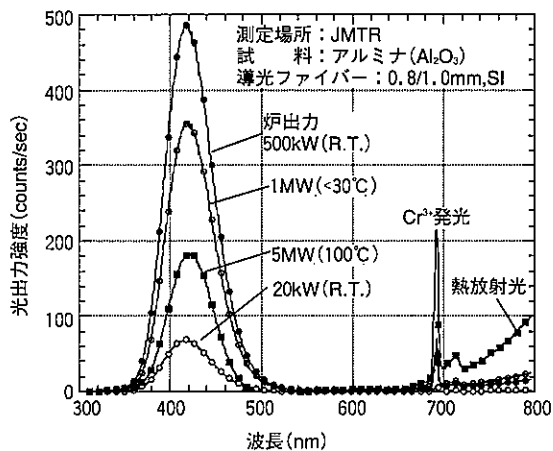


図2 JMTR炉心で照射中のアルミナ試料の発光を光ファイバーで測定

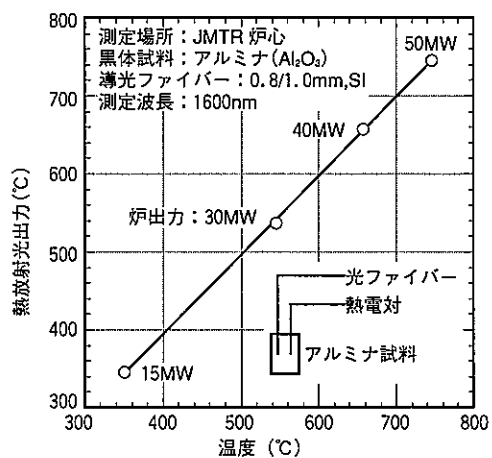


図3 アルミナ試料を黒体として熱放射光により温度を測定

したり、炉内を直接目視することが可能となる。上記光ファイバーの実現はその道を拓くものと考え

参考文献

1) E. J. Friebele and M. E. Gingerich : J. Non-

Cryst. Solids, 38 & 39. (1980)245

2) T. Kakuta, K. Sanada, et al. : J. Lightwave Technol., LT-4, No.8. (1986)1139-1143

3) 電気学会技報, (監)部 316号, (1989) 61 ~ 94

4) T. Kakuta, M. Nakazawa, et al : 1994 IEEE Conf. Record, Vol. 1. (1994)371-374