

シングルモードファイバの放射線耐性を高めるフッ素ドープコア

ショーン・フォーリー

線形加速器や原子炉などの高放射線環境下の信頼できる光ファイバ通信は、最適化されたフッ素ドープコアをもつシリカファイバにより可能となる。

近年は光ファイバの放射線耐性の改善に対する関心が再び高まっている。最初に関心を示したのは線形加速器や粒子加速器の研究者たちであり、高エネルギー粒子の相互作用に関する情報を遠隔測定して伝送することの必要性を認識したことがきっかけだった。これらの加速器はトンネルが非常に長く、電磁場が強いため、この情報を中央制御室にまで伝送するには、ガラス光ファイバが最適の物理的媒質になる。

原子力発電所ではITおよびセキュリティネットワーク用の光ファイバケーブルの採用が増加してきたが、これらのネットワークに使われる光ケーブルは、一般に理論上の事故条件であっても、高い放射線レベルに曝露されることはなかった。しかしながら、この状況には変化が起き始めている。既設の原子炉設備の制御システムはアナログからデジタルへ移行し、新しい原子力発電所の設計では光ファイバの膨大な帯域幅を利用して、全体のケーブルインフラの簡素化を進めている。このような新しい用途の光ファイバは、少なくとも想定される故障条件において(原子炉設備内部の高放射線領域に使われるとすれば通常の動作条件であっても)、放射線条件のもとでの信頼性のある動作が必要になる。

放射誘起エージング

シリカ系の光ファイバは放射線に曝

されると、ファイバ内部のすでにある構造欠陥の場所にはさまざまな色中心が誘起される(LFWJ 2009年1月号p.62 または www.laserfocusworld.com/articles/343756 を参照)。これらの色中心の生成は光吸収の増加をもたらし、伝送損失が増加する。この効果は放射線誘起エージングとして知られている(RIA, p.39の「RIAに影響を与えるいくつかの要因」を参照)。

ある方式の光ファイバのRIAは、多数の変数(温度履歴、線量率、総線量および低線量または無線量の期間)に依存するため、想定した事故の前後のファイバに起こり得る状態を確実に予測することは難しい。とはいいながら、新

しい光ファイバの開発によって、RIAに影響を与える変数のいくつかの効果は著しく減少したため、原子炉設備の安全関連対策に使用する光ファイバの適性を判断することの複雑さも軽減された。

新しい光ファイバの開発

フジクラは放射線耐性をもつ光ファイバのR&Dを20年以上にわたり続けてきた。標準のシングルモードファイバはゲルマニウムをドープしたコアと純粋シリカのクラッドを使用して製造されるが、純シリカコア(PSC)ファイバは純粋のシリカコアとフッ素ドープクラッドから製造される(www.laserfocus

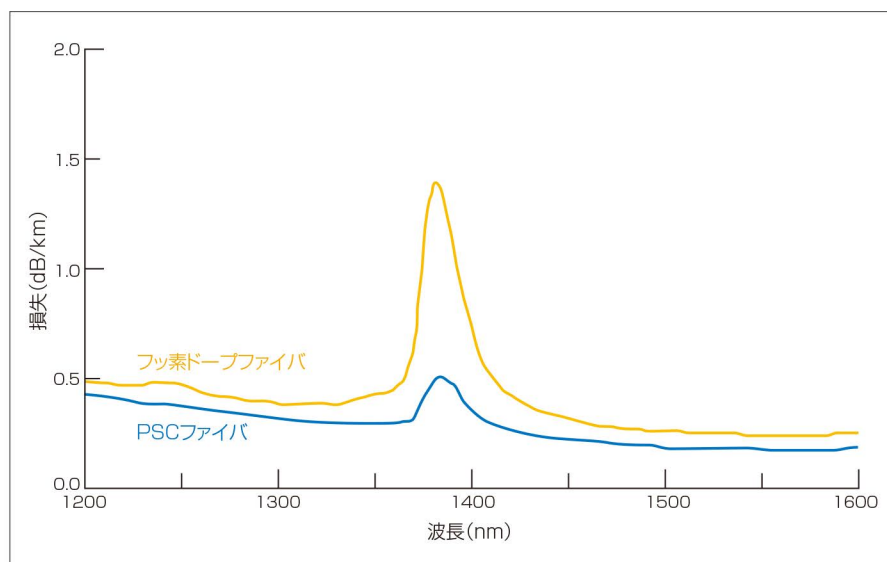


図1 新開発のフッ素ドープファイバと通常のPSCファイバのスペクトル損失曲線を比較して示している。フッ素ドープファイバは0.8重量%のフッ素がコアにドープされ、1310nmや1550nmなどの通信波長においてPSCファイバと実質的に同等の伝送損失が得られる。

world.com/articles/351437を参照)。最近、われわれはもう一つの選択肢として、フッ素ドープコアの放射線耐性シングルモードファイバを開発した。このファイバはコアのフッ素濃度が0.8重量%に最適化されている(図1)。

スイスにある欧州原子核研究機構(CERN)と独フラウンホーファー研究所の研究グループは、光ファイバをスイスのジュネーブにある大型加速器に使用することの可能性を調べ、フジクラのファイバが最適であると判定した⁽¹⁾。この評価試験はフジクラの新しいファイバがもつ二つの重要な能力を明らかにしている。第1に、1310nmの波長では、毎時1Mradまでの線量率から誘起される伝送損失は54dB/kmを超えなかった。同時に評価が行われた2番目に優れた性能をもつファイバの誘起損失は約18dB/kmを示した。第2に、高い線量において誘起される損失は飽和し、総累積線量とは無関係であった。その他のファイバの多くは、フジクラ

のファイバが安定化した後も、長期にわたりRIAの増加を示した。

もう一つの注目すべき点はPSCファイバとの比較試験の結果である。72KRadの線量率で行われたスクリーニング試験において、最良のPSCファイバは、中間の線量であっても、フジクラの放射線耐性シングルモードファイバの2～6倍のRIA損失を示した。ゲルマニウムドープファイバはフジクラのファイバよりも一桁高いRIA損失を示した(図2)。

復活する原子力産業への適用性

放射線耐性をもつシングルモードファイバの開発は、長い線形加速器にとっては非常に有用だと考えられるが、このファイバは小規模の原子力発電所にも役立つだろうか？

原子力設備の多くは、シングルモードファイバがネットワークやセキュリティの用途に使用され、発電所構内の建物間の接続やセキュリティネットワークとの接続に使われている。また、シ

ングルモードファイバがサブステーション間を接続する管理制御やデータ取得の用途に使われる場合もある。これらの用途の多くでは、理論上の事故の場合も含め、原子力発電所の安全性や放射線曝露への利用は含まれていない。

代表的な産業用イーサネットや構内の用途では、まず多数の場所からのデータがスイッチやプログラマブル論理制御器(PLC)を用いて収集され、次に、上り回線を通してサーバに伝送され、あるいは別のスイッチによるデジチェーン方式を使用して接続される。スイッチやPLCはファイバの上り回線が内蔵され、あるいは電気信号を光信号へ変換するメディアコンバータを通してネットワークに接続される。このような構内リンクの用途、とくに伝送距離が1000フィート以下の場合の光学媒体は、マルチモードファイバを使用する場合が多い。

構内の用途にマルチモードファイバが選好されるのは、リンクの全体コストが安くなるからだ。光リンクのコストには、トランシーバ、接続、光ケーブルのコストが含まれる。一般に、シングルモードファイバはマルチモードファイバよりもケーブル敷設のコストが低くなるが、シングルモードファイバ用に設計されたトランシーバはマルチモードトランシーバに比べて価格が50～200%も高くなる。短距離の場合は、トランシーバの高いコストがシングルモード光ファイバケーブルの低いコストを上回る。

デジタル制御システムへの移行と新しいプラント設計の登場によって、光ファイバシステムの信頼性に対する放射線の影響の可能性が大きな注目を集めている。短距離リンクの用途であっても、放射線耐性をもつシングルモードファイバが最適の選択になるが、そ

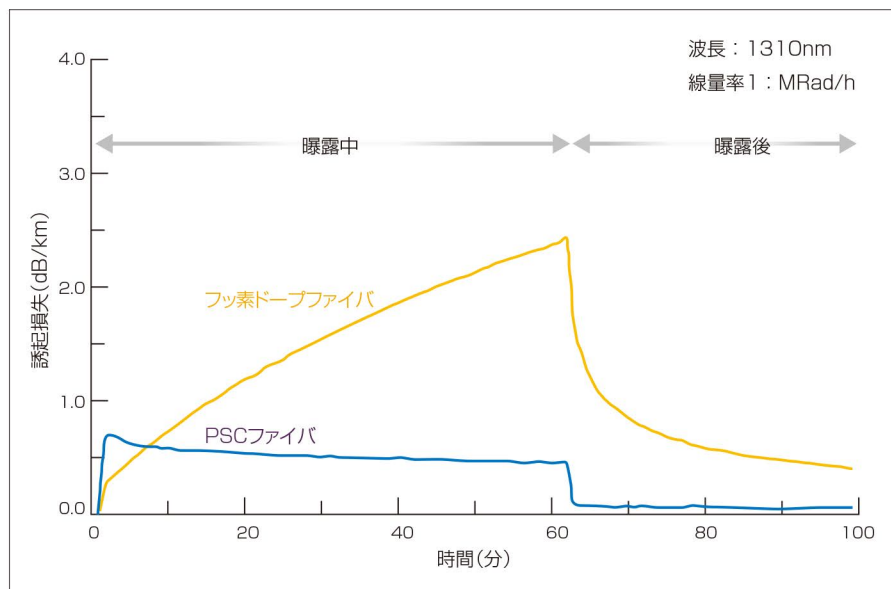


図2 新しい放射線耐性シングルモードファイバを用いて、RIAの大幅な低減が実現された⁽²⁾。このファイバは1 Mrad/hの高い放射線量率に曝されると、Fドーパントにより生成されたネットワーク欠陥が多いため、そのRIAが当初はPSCファイバよりも急速に増加する。しかし、フッ素濃度を最適化することで、色中心の修復率が生成率を上回り、あるいは補償されて、RIAは急速に安定化される。

れにはいくつかの理由がある。

第1に、原子炉設備のデジタル制御は、100Mbps イーサネットエレクトロクスとファイバリンクとの組合せが想定されるが、この組合せはダイナミックレンジが現在の「認定された」アナログ送信機と受信機の場合よりもはるかに狭くなる。このことは環境から生じる伝送損失増加の許容量が非常に小さくなくてはならないことを意味している。この許容量が信号再生に必要な距離あるいは使用するケーブルシステムへの放射線レベルの制約条件になる。

第2に、市販の100Mbps イーサネットトランシーバは、マルチモードとシングルモードの両方が量産され、比較的安価に入手できる。イーサネットのエレクトロニクスに必要となる安全関連対策の高いコストやトランシーバを放射線から遮蔽するコストは、トランシーバがシングルモードとマルチモードのいずれであってもユーザコストは等しくなるため、ケーブルと接続のコストが全体のコスト差の主因になる。結局のところ、帯域幅が広く、放射線誘起損失が少なく、コストの低いシングルモードファイバが選択されることになる。

第3に、原子力の安全性では信頼性が王様だ。われわれの放射線耐性をもつシングルモードファイバは従来の光ファイバでは及びもつかない放射線環境での安定性と一貫性が得られる。

第4に、多数の原子力施設は、安全関連の用途(計装と制御)と安全以外の用途(セキュリティとビデオ伝送)の両方に対して、同じ種類のケーブルを購入して使用したいと考える。マルチモードファイバでは高品質ビデオ監視に必要な帯域幅と伝送距離との組合せに対応できない施設もある。境界フェンス上に設置されてきた監視セキュリティシステムは振動センシングの方式に

RIA に影響を与えるいくつかの要因

RIAの過去の研究をレビューすると、いくつかの要因が明らかになる。RIAはシリカファイバのコアにドーパントを使用すると増加する。当然のことだが、ドーパントは光ファイバにとって基本的な材料であり、コアとクラッドの間には屈折率差が形成されて、光の内部全反射が可能になる。ほとんどの通信用ファイバは、コアにゲルマニウム(Ge)をドーパするため、放射線の影響を受ける。ここで紹介した新しいファイバが開発されるまでは、純粋シリカコア(PSC)をもつファイバが最低量のRIAを示していた。

また、ドーパントの種類と濃度レベルが等しくても、RIAはファイバの製造プロセスと不純物レベルの違いによる影響を大

きく受ける。高温はRIAに対して反作用をもたらし、ある程度の軽減効果が得られる。言い換えれば、放射線レベルと総線量が同じであっても、環境温度が非常に低ければ、RIAは一桁の増加を示すことがある。総線量が等しい場合は、線量率が高いほどRIAは高くなる。放射線がなくなると、RIAは低下して安定したレベルになる。この過程は「回復」と呼ばれるが、回復しても、RIAによる伝送損失はエージング前の基準線よりも高くなる場合が多い。さらに、高出力光源からの光を伝送すると、RIAは反転するが(「光退色」と呼ばれることが多い)、一般に、この反作用を受けない一部の残留RIAがあり、回復する量には一貫性が見られない。

移行しており、そこではシングルモードファイバに固有の特性が必要になる。

最後に、新しい原子力プラントは60年の設計寿命を持つ。将来において現在の100Mbpsシステムの拡張が必要になったとしても、シングルモードファイバの帯域幅は、少なくとも二桁ないしは三桁大きい大容量システムに十分に対応できる。

技術の導入

原子力施設内の安全関連対策に光ファイバケーブルを使用することは、もはや空想のことではない。少なくとも原子炉プラント供給企業の1社が新しい原子炉の設計において、中央制御ステーションとその他の発電設備との主要な通信媒体として、光ケーブルの利用を計画している。米IEEEはワーキンググループを設置して、原子力発電所で使用するクラス1E光ファイバケーブルと部品の認定のための標準化作業を進めている。

光ファイバケーブルが原子力産業に

完全に導入されるには、いくつかの果たすべきことが残されている。標準化の完了ばかりでなく、発生の可能性のある高い放射線レベルへの耐性と、60年のシステム寿命をもつケーブルとエレクトロニクスの開発および認定が必要である。苛酷な環境に耐えられる光ファイバとケーブルが開発されたことで、このような目標を満たすことは、もはや不可能ではなくなったと考えられる。極端な高温と圧力さらには化学的噴霧への曝露の可能性も含めた「汚染環境」での光ケーブルの使用も実現可能な領域に入っている。

参考文献

- (1) T.J. Wijnands et al., Topical workshop on Electronics for Particle Physics 2007, p.121 Sept.2007.
- (2) K. Aikawa et al., Fujikura Tech. Rev., 2008, p.9.

著者紹介

ショーン・フォーリー (Sean Foley) はAFLテレコミュニケーションズ社(AFL Telecommunications)の市場開発マネージャ。AFLテレコミュニケーションズ社はフジクラのアメリカ事業部門。

e-mail: sean.foley@afltele.com