

光ファイバー分布センシングの
放射線装置への適用

高田 英 樹

光ファイバー分布センシングの
放射線環境への適用

高田 英治

目次

I 序論	1
1 はじめに	2
1.1 背景	2
1.2 本研究の目的と内容	3
2 光ファイバーの特性と放射線との相互作用	4
2.1 石英光ファイバー	4
2.1.1 材料・製法	4
2.1.2 伝送特性	4
2.1.3 放射線照射の影響	6
2.2 プラスチック光ファイバー (POF)	22
2.2.1 POF の特徴	22
2.2.2 POF の種類	22
2.2.3 POF の耐放射線性	23
2.3 シンチレーティング光ファイバー	24
2.3.1 一般的特性	24
2.3.2 PSF 中の放射線誘起損失	24
II 光ファイバーによる放射線分布測定	27
3 低線量率領域用システム	28
3.1 プラスチックシンチレーティング光ファイバーによる放射線分布測定法	28
3.1.1 PSF による放射線計測	28
3.1.2 Time of Flight 法による放射線分布測定法の原理	29
3.1.3 システム特性	29
3.1.4 PSF による長距離型放射線分布測定システムの検討	32
3.1.5 長距離型光ファイバーシステムによる放射線分布測定模擬実験	37
3.1.6 PSF-TOF 法の適用対象	39
3.1.7 まとめ	45
3.2 PSF-TOF 法以外の低線量率領域用光ファイバー型放射線分布測定法	46
3.2.1 シンチレータ塗付光ファイバーによる放射線分布測定	46
3.2.2 導波路型シンチレータによる多点型離散分布測定法	48
3.3 低線量率領域用システムに関するまとめ	49

3.3.1	各手法の特徴の比較	49
3.3.2	耐放射線性の比較	50
4	高線量率領域用システム - 長波長発光利用システム -	52
4.1	はじめに	52
4.2	希土類ドープシンチレータからの赤/近赤外発光	52
4.2.1	希土類イオンからの発光特性	53
4.2.2	γ 線照射時の発光スペクトル測定結果	54
4.2.3	測定される発光スペクトルに対する放射線誘起損失の影響	55
4.2.4	近赤外発光の放射線計測への適用性検討	56
4.3	OTDR法による放射線誘起測定誤差の補正	57
4.3.1	実験体系	58
4.3.2	実験結果	58
4.4	分布測定手法の検討	60
4.4.1	近赤外発光に基づく放射線分布測定法の概念	60
4.4.2	分布測定模擬実験	60
4.4.3	近赤外光利用システムの適用可能範囲	64
4.5	高線量率領域用ガラスシンチレーティング光ファイバーに関する基礎研究	67
4.5.1	希土類イオンの検討	67
4.5.2	母材ガラスの検討	68
4.5.3	今後の課題	69
4.6	まとめ	70
5	光ファイバー放射線分布測定法に関するまとめ	71
5.1	原子カプラント	71
5.2	加速器施設	74
5.3	放射性廃棄物処理施設	75
III	光ファイバーセンサーによるプラントモニタリングに関する検討	76
6	一般的検討	77
6.1	検討に当たっての考え方	77
6.2	検討結果	78
6.2.1	中性子計装	78
6.2.2	プロセス計装	78
6.2.3	破損燃料検出系	80
6.2.4	安全保護計装	80
6.2.5	炉心内計装	80
6.3	一般的検討のまとめ	81
7	実機への適用性検討-1-ラマン散乱型温度分布センサーの原子カプラントへの適用-	84
7.1	目的	84
7.2	RDTSの原理	84

7.3	放射線照射による RDTs 法への影響	86
7.3.1	放射線誘起誤差の定式化	86
7.3.2	放射線誘起誤差の例	87
7.4	放射線誘起誤差の補正法に関する検討	90
7.4.1	熱電対の測定に基づく補正手法	90
7.4.2	ループ型の光ファイバー設置による補正手法	91
7.5	実際の原子力プラントへの適用	96
7.5.1	放射線によって生じた温度測定誤差	96
7.5.2	熱電対の測定結果を用いた誤差補正	99
7.6	RDTs のプラントモニタリングへの適用性に関する考察	102
7.6.1	適用可能線量率範囲	102
7.6.2	今後の課題	103
8	実機への適用性検討-2-ブリュアン散乱型歪み分布測定手法の原子力プラントへの適用	104
8.1	ブリュアン散乱型歪み/温度分布測定法の原理	104
8.2	想定する適用先	107
8.3	放射線環境下への適用性検討	108
8.3.1	実験の概要	108
8.3.2	COTDR モードによる測定結果	108
8.3.3	照射下歪み測定実験	110
8.4	実機配管系での歪み測定実験	112
8.4.1	実験体系	112
8.4.2	実験結果	112
8.5	BOTDR のプラントモニタリングへの適用性に関する考察	116
IV	結論	117
	謝辞	120
	APPENDIX	127
A	原子力プラント計装の現状	127
A.1	中性子計装 (核計装)	127
A.1.1	起動系	128
A.1.2	中間出力系	128
A.1.3	出力系	128
A.2	プロセス計装	130
A.2.1	温度測定	131
A.2.2	圧力測定	131
A.2.3	流量測定	132
A.2.4	液体レベル測定	133

A.2.5	その他のプロセス計装	134
A.3	破損燃料検出系	137
A.4	安全保護計装	138
A.5	炉心内計装	140
B	原子力プラント計装への光ファイバーセンサーの適用性検討	142
B.1	検討に当たっての考え方	142
B.2	中性子計装への光ファイバーセンサーの適用性	143
B.2.1	炉心内中性子計装	143
B.2.2	炉心外中性子計装 (PWR)	144
B.2.3	中性子計装に関するまとめ	146
B.3	プロセス計装への光ファイバーセンサーの適用性	148
B.3.1	温度計装	148
B.3.2	圧力計装	153
B.3.3	流量計装	159
B.3.4	液体レベル計装	159
B.3.5	その他のプロセス計装	161
B.4	破損燃料の検出系	162
B.5	安全保護計装	163
B.6	炉心内計装	163



I. 序論

第 1 章

はじめに

1.1 背景

原子力プラント、核融合炉、加速器関連施設など、多くの施設で放射線が使用され、エネルギー安定供給、学術研究等に貢献している。これらの施設では、プラントの状態把握、安全モニタリングのために放射線測定を行う必要性が高く、これまでに多くの研究が行われて来た。また、同時に温度、圧力等のプラントパラメータの測定も求められ、これらを対象として計測システムについても研究開発が行われて来た。

従来の計測システムでは、電気信号に大きく依存する測定原理が採用されている。豊富な信号源や伝送速度の速さ、高性能なデバイスなどの多くの長所を持っており、今日の電気信号の広範囲な使用は、これらの長所に負うところが大きい。しかし、このような電気信号に基づくシステムでは解決すべき点も少なくなく、それらの点を克服することが可能な、電気信号に代わり得る計測手段が模索されている。

一方、光通信分野を中心に光ファイバーの使用が進められ、レーザー等の高性能な光源の開発もあいまって、信号の大量伝送媒体として光ファイバーは欠くことのできない存在となっている。また、信号伝送手段としてのみならず、計測分野においても光ファイバーの実用性は高まってきた。何らかのセンサー部からの信号を伝送するシステムとともに、光ファイバー自体をセンサーとする手法も開発され、温度、歪みなどの物理量分布を長距離にわたって一度に測定可能なシステムが実用化段階にある。

しかしながら、これらのシステムを放射線の存在する施設に適用しようとする場合には、放射線照射によって光ファイバー中に生成される損失増加が問題となる。そのため、これまでのところこれらプラントへの光ファイバー利用計測の適用は進んできていない状況にあった。

このような状況を打破するため、光ファイバーの耐放射線性向上のための研究が光ファイバーメーカー、原研、大学等により継続的に行われ、近年開発されたフッ素ドープ石英コア光ファイバーでは、従来の耐放射線性光ファイバーに比べ飛躍的に耐放射線性が高いものが得られている。従って、このような光ファイバーの使用を前提とすれば、放射線関連施設への光ファイバーセンサーの適用を検討するに値する時期に来ているものと考えられる。

1.2 本研究の目的と内容

本研究においては、光ファイバーの持つ耐電磁環境特性、形状の変異性などの長所を活かした、放射線関連施設モニタリング手法を開発することを目的とした。100m以上の長距離にわたる分布を、通常、モニタリングに用いられている放射線検出器の大きさ(数cm~数10cm)程度の空間分解能で測定することを目指した。

また、放射線以外を対象とした光ファイバーセンサーが開発されていることから、これらも含めた光ファイバーによる原子力プラントモニタリングについて可能性の検討を行った。連続分布測定が可能なシステムでは、レーザーのパルス幅等の分解能劣化要因のため、空間分解能は数m程度である。しかし、数100m~数kmにわたる分布を1本の光ファイバーで測定できることから、これまでのシステムでは不可能な新しいモニタリングが可能となり、プラントの安全性向上に貢献することが期待できる。

光ファイバーの放射線環境への適用を考える場合、損失の増加特性が特に重要である。しかし、ここではセンサーとしての適用性検討を中心に考え、損失の増加メカニズムやその予測手法にはついては深く掘り下げることを取ってしなかつた。むしろ、現在入手可能な光ファイバーに関する特性評価結果に基づいた寿命予測や、寿命延長のための誤差補正手法の検討に重点をおいた。

章立てとしては、I.において光ファイバーの一般的特徴を整理するとともに、各種光ファイバーに放射線を照射した場合の損失増加特性についてまとめた。

次に、II.では、プラスチックシンチレーティング光ファイバー(PSF)による長距離型放射線連続分布測定法について研究を行うとともに、これまでに提案されている光ファイバー型放射線分布測定法について整理、比較を行った。また、高線量率領域にも適用可能なシステムを目指し、従来用いられていなかった800nm以上の長波長発光を使用する手法について検討を行った。

III.では、II.で検討した放射線分布測定法を含め、光ファイバーセンサーによる原子力プラントモニタリングの可能性について検討した。まず、現状のモニタリングシステムや光ファイバーセンサーの開発状況についてのサーベイを行い、光ファイバーセンサーによる原子力プラントモニタリングの可能性について一般的な検討を行った。その後、光ファイバーセンサーの長所である連続分布測定が可能な2手法(ラマン散乱型温度分布センサー、ブリュアン散乱型温度/歪み分布センサー)について、 γ 線源を用いた実証試験を行うとともに、高速実験炉「常陽」での測定実験によって適用可能性の検討を行った。

実際に運転中のプラントで使用する場合には、本研究で行った検討以外にも多くの点について考慮することが必要であろう。しかし、ここで行った研究をもとに改良が行われ、プラントの安全性向上、運転条件の改善等に貢献できれば幸いであると考えている。

第2章

光ファイバーの特性と放射線との相互作用

2.1 石英光ファイバー

2.1.1 材料・製法

石英を材料とする光ファイバーの場合、コアの屈折率をクラッドの屈折率よりも大きくするために、ドーパント(添加物)をコアやクラッドに添加して屈折率を上げたり、下げたりすることが必要である。屈折率を高めるためのドーパントとしては GeO_2 や P_2O_5 が、また屈折率を小さくするためのものとしては、 B_2O_3 や SiF_4 等が用いられる。

これらの酸化物はハロゲン化合物 (GeCl_4 , POCl_3 , BCl_3) として気体状態として取り扱われ、不純物を取り除いた後、熱酸化反応でドーパントを含んだ石英系ガラスが合成される。これらの原料は半導体工業で使用されていることもあって高純度な原料が市販されており、ガラス合成中の機密性に注意すれば、不純物の非常に少ない石英系ガラスが得られる。

石英系ガラスの製造方法としては、MCVD法(Modified Chemical Vapor Deposition法)、OVD法(Outside Vapor Deposition法)、VAD法(Vapor-phase Axial Deposition法)の3つの方法が主に用いられている。特に大量生産用としては、日本以外ではOVD法、日本ではVAD法がよく用いられる。また、ロッドインチューブ法(Rod in Tube法)もコア材とクラッド材の選択の自由度が高いことからよく用いられている。三菱電線(株)によって開発されたMRT法(Modified Rod in Tube法)では、損失面でもOVD法に匹敵するものが得られる。[1]-[3]

2.1.2 伝送特性

光ファイバーの損失要因は、吸収損失、散乱損失及び放射損失に分類することができる。それらの損失を生じさせる原因をまとめると、表2.1が得られる。

材料固有の吸収損失は、紫外吸収(電子遷移吸収)と赤外吸収(分子振動吸収)に分けられる。紫外吸収は、光ファイバーの主成分である SiO_2 の電子エネルギーバンド間の遷移による紫外線領域における吸収のことである。ドーパントの組成が変わると若干変動するものの、材料固有の損失なので取り除くことはできない。一方、 SiO_2 の分子振動による吸収は赤外線領域にあるために赤外吸収と呼ばれる。この吸収のため、石英ガラスでは、波長 $2\mu\text{m}$ 以上で 1dB/km 以下に損失を下げることは不可能である。

不純物による損失は、以前は遷移金属イオンによるものとOH基によるものの、2種類に分類されていた。しかし、近年の製造法の改良により、遷移金属イオンによる吸収は問題となら

なくなってきた。一方、OH基が光ファイバー中に存在すると、OH基の分子振動に起因する強い吸収が現れる。波長 $2.73\mu\text{m}$ の基本振動以外にも、第2、第3高調波振動が $1.38\mu\text{m}$ 、 $0.95\mu\text{m}$ にあり、これらの波長において大きな吸収損失を起す原因となっている。

散乱による損失には、光ファイバー中に波長よりも十分に小さいオーダーで屈折率ゆらぎが生じて起こるレイリー散乱と、光ファイバーの構造不均一性から発生する散乱とがある。レイリー散乱は石英ガラス中に含まれるGe、P、B、Fなどのドーパントのミクロな組成変動によって生じる、 λ^{-4} に比例する材料固有の損失であって、避けることはできない。一方、構造不均一性に起因する損失は、コア-クラッド界面での構造不完全性、微小な曲がり(マイクロバンド)、微小気泡や微結晶等の散乱中心によって生じ、製造技術の改良によって低減が可能である。

また、放射損失は、曲率半径の大きな曲げによる損失で、急激な曲げ以外に対しては、あまり大きな損失とならないように光ファイバーを設計すれば、問題は解決される。

図2.1は、石英系光ファイバーの主な損失について図にしたものであり、損失を波長の関数として表すと、

$$\alpha = A\lambda^{-4} + B + C(\lambda) + \alpha_{IR}(\lambda) + \alpha_{UV}(\lambda) \quad (2.1)$$

- A: レイリー散乱係数
- B: 構造不均一性に起因する損失
- C(λ): 不純物の吸収による損失
- $\alpha_{IR}(\lambda)$: 赤外吸収による損失
- $\alpha_{UV}(\lambda)$: 紫外吸収による損失

のように表せる。[1]-[3]

表 2.1 光ファイバーの伝送損失要因 [1]

損失の種類	損失要因	
吸収損失	材料固有の吸収	紫外吸収 (電子遷移吸収) 赤外吸収 (分子振動吸収)
	不純物による吸収	遷移金属イオン (Cu, Fe, Cr) OH基
散乱損失	材料固有の散乱	レイリー散乱 (Rayleigh scattering) (ミクロな組成変動による屈折率ゆらぎ)
	構造の不均一による散乱	構造の不均一性による散乱 (マイクロバンド、構造の不完全)
放射損失	曲率の大きな曲がり	

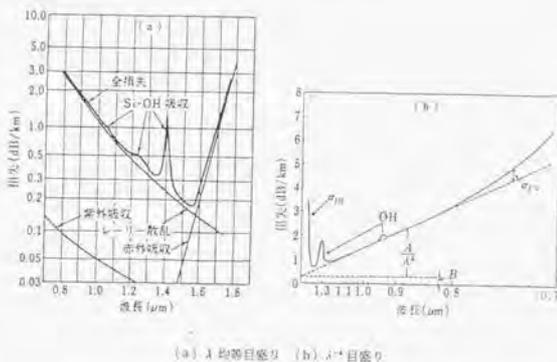


図 2.1 石英系光ファイバーにおける一般的な損失 [1]

2.1.3 放射線照射の影響

(1) 光ファイバー種類と耐放射線性

石英系光ファイバーは通信分野で中心的な位置付けにあることもあって、放射線照射時の挙動や耐放射線性の向上のための研究が継続的に行われてきた。そのような研究は、光学的な測定や Electron Spin Resonance (ESR) 法によっており、伝送損失増加をもたらすカラーセンターの特定や、特性評価が行われた。[4]-[25]

石英系光ファイバーを分類すると、次の 3 種類が挙げられる。

- マルチモード (MM)、ステップインデックス (SI) 型
- マルチモード (MM)、グレーデッドインデックス (GI) 型
- シングルモード (SM)

これらのうち、MM-GI 型においては、コア中に屈折率分布をつけるため、Ge 等がドーブされている。放射線を照射すると、コア中の Ge に起因するカラーセンターが生成されるため、MM-SI 型に比較して耐放射線性は低くなる。また、SM 型は一般の情報通信において最も用いられているものである。多くの場合にはコアには Ge 等がドーブされたものが用いられるが、SI 型のように純粋に近い石英を用いることもできる。しかし、センサーへの適用という観点から見ると、光ファイバーによって伝送可能なモード数が少ないために、検出効率や S/N の観点から劣る場合が多い。最後に SI-MM 型は、伝送可能なモード数が多く、しかも純粋に近い石英をコアに用いていることから、放射線レベルの高い場所でセンサーとして使用する場合に最も適したタイプであるということができる。

(2) 一般的に見られるカラーセンター

図 2.2 は、純粋石英コア光ファイバーに白色光を入射させながら γ 線を照射した際の、照射前、照射中の透過スペクトルの変化の一例を示している。

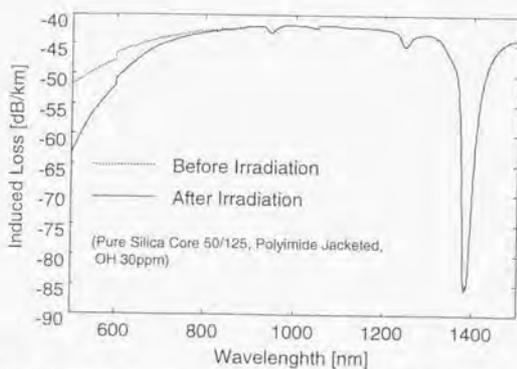


図 2.2 純粋石英コア光ファイバーにγ線を照射した際の透過スペクトルの変化

放射線計測、温度等の物理量計測においては、主に可視～近赤外の光が使用されているが、このような領域における主なカラーセンターには、表 2.2 のようなものが挙げられている。[13]

表 2.2 純粋石英コア光ファイバー中で重要なカラーセンターの例 [13]

カラーセンターの波長域	考えられている原因
紫外域からの吸収テール	E' センター、塩素不純物
610nm～630nm 程度の吸収ピーク	非架橋酸素センター (NBOHC)
670nm, 770nm の弱い吸収	
赤外域からの吸収テール	SiO ₂ の格子振動による吸収

また、これらのカラーセンター間の関係についてまとめたものを、図 2.3 に示す。

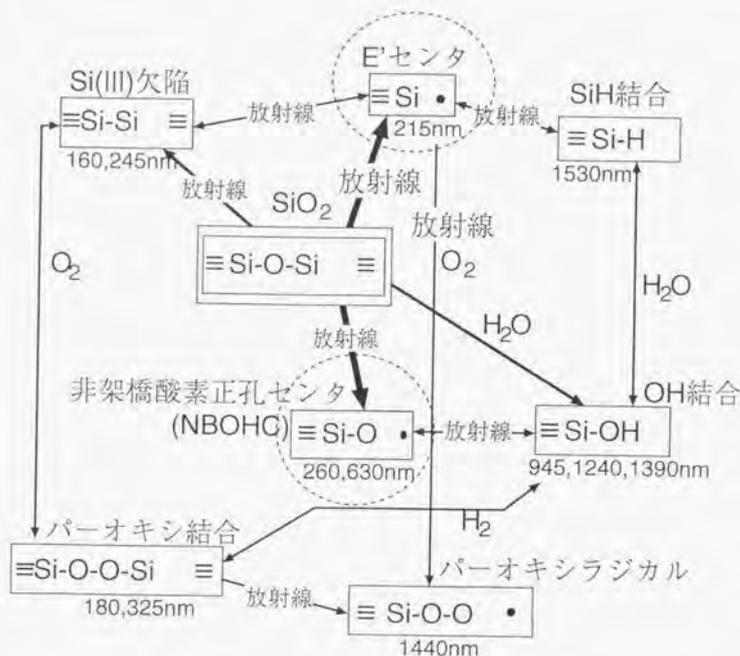


図 2.3 純粋石英中に生成されるカラーセンターの関係

(3) 光ファイバーの耐放射線性向上策

光ファイバーのコア材の違いによる耐放射線性の違いについては、次のような点が初期の研究によって示された。

- 純粋石英コア光ファイバーに比べ、コアにドーパントを大量に含む光ファイバーの耐放射線性は低い。例えば、以前用いられた P(リン) を含む光ファイバーは非常に放射線に弱い。現在でも GI 型光ファイバーで用いられている Ge(ゲルマニウム) をドーブした光ファイバーも、Pドーブのものよりは強いが、耐放射線性は低い。
- 多成分系の光ファイバーも耐放射線性は低い。

その後、純粋石英コア光ファイバーの耐放射線性の向上が検討され、次のような手法の効果が確認されている。

1) OH 基の導入

光ファイバーのコア中に OH 基を導入すると、放射線誘起損失が小さくなる現象が 1970 年代に発見され、現在まで継続して採用されている。どのような過程によってこの効果が現れて

いるかは解明されていないが、OH基の存在によってカラーセンターの回復速度が向上するものと考えられている。しかし、OH基には放射線のない状態でも945nm、1385nm等に吸収ピークがあるという短所があり、長距離の光ファイバーを用いる場合や長波長で使用する場合には問題が生じる可能性がある。また、630nm近辺の吸収の原因と考えられているNBOHCが、OH基の存在によって生成されやすくなるとの研究もある。[15]-[17]

2) Cl(塩素)の除去

コア中のCl含有量の耐放射線性への影響についても研究が行われて来た。[18]-[19]その結果、

- 出発原料としてClを含まない有機シラン($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$)を使用する。
- 製造時に脱Cl処理を十分に行う。

という方法でCl含有量を減らすことにより、耐放射線性の向上が実現できることが示された。

OH含有量の低い光ファイバーは主にプラズマ法と呼ばれる工程で製造されたが、高いOH含有量を目指した工程(ダイレクト法)による場合に比べCl含有量が多く、これが原因で耐放射線性が低い、という主張もある。

3) 水素処理

10気圧程度の水素中に光ファイバーをおくことにより、NBOHCやE'センター等による光吸収を抑えることが可能であることが示された。水素処理によってコア中に入り込んだ水素分子が、放射線によって生成したカラーセンターと結合する過程を通して、回復速度が速まるものと考えられる。[7]

4) F(フッ素)添加

1980年代のOH基導入に関する研究から現在に至るまで、耐放射線性の向上のためにはOH基を添加する、という方法が一般的に用いられて来た。一方で、F(フッ素)をコア中に導入すれば耐放射線性が向上する、との結果が、三菱電線工業によりイメージガイドについて示されている。また、最近になって、Fドープ光ファイバーの高い耐放射線性について、 γ 線源、原子炉での照射実験を通して示す実験結果が主にわが国において発表されている。OH基による従来の光ファイバーと比べ、桁違いの耐放射線性を示すものもあり、今後、高い放射線場への光ファイバーの適用を考えるにあたっては、最有望の選択肢ということが出来る。[22]-[28]

5) 中空光ファイバーの利用

光ファイバー中の放射線誘起損失は、主にコア材中にカラーセンターが生成されることによって生じる。従って、コア材が空気であれば放射線の影響を受けにくいものと期待される。

通常、中空光ファイバーは特定の波長で空気よりも屈折率が低くなる異常分散を示す物質をクラッド材として作成される。しかし、これらの中空光ファイバーはほとんどが中-遠赤外領域を対象としたものであり、ここで使用を検討している可視から近赤外の光を導波するものは開発されていない。

異常分散を用いずに中空光ファイバーを構成するためには、何らかの材質で作られた中空管の内表面に反射効率の高い物質を蒸着する等の方法が取られる。現在までのところ、このようにして作成された中空光ファイバーも赤外領域対象のもので、可視域や近赤外域で使用可能かどうかについては確認されていない。原子炉炉心内のような非常に高い放射線環境への光ファイバーセンサーの適用性を検討するためには、今後、このような光ファイバーの可能性について検討することが必要である。

(4) 各種光ファイバーの照射結果

1) Al 被覆純粋石英コア光ファイバー (OH、F ともに Free)

図 2.4 に、Al 被覆純粋石英コア光ファイバー (50/125) に対し、10℃、80℃ の温度条件でそれぞれ γ 線照射を行った場合の損失スペクトルの変化を示す。[70] (10℃ のデータの 500nm ~ 600nm の部分の不規則な損失の形状は、光強度が小さくなりすぎたために S/N が悪化し、十分な測定ができなかったために生じたものである。) 損失の大きさは、10℃ の方が特に短波長側で大きく、80℃ では小さくなっていることが分かる。また、10℃ では、紫外域からの裾引きの影響が大きいが、80℃ では 610nm 程度の NBOHC に起因する損失がかなりの部分を占めることが分かる。従って、紫外域からの裾引きは、熱ブリーチングを受けやすいが、NBOHC は受けにくいといえることができる。このように、放射線誘起損失量、及びその波長依存性は、温度に大きく依存することから、光ファイバーを用いる測定システムの寿命を考える際には、設置場所の温度が重要なパラメータとなる。

また、線量率: $1.9 \times 10^3 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)$ で $2.6 \times 10^4 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)$ まで照射した場合の、854nm、1047nm における放射線誘起損失を、表 2.3 に示す。[70]

表 2.3 Al 被覆純粋石英コア光ファイバーに対し γ 線を照射した際の放射線誘起損失 [70]

温度 [°C]	波長 [nm]	
	854	1047
10	+79.7 dB/km	+28.1 dB/km
80	+9.5 dB/km	-2.5 dB/km
300	+8.1 dB/km	+9.1 dB/km

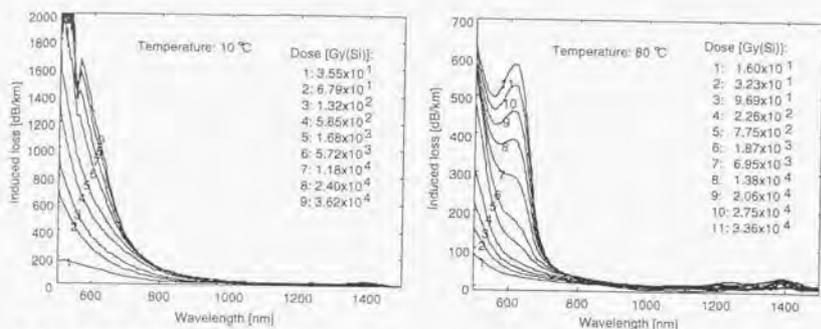


図 2.4 放射線誘起損失の温度依存性 [70] (Aluminium jacketed pure silica core fiber, 50/125)

2) ポリイミド被覆 OH ドープ石英コア光ファイバー

ポリイミド被覆 OH ドープ石英コア光ファイバーに対し、 ^{60}Co γ 線を照射した場合、及び高速中性子源炉「弥生」において γ 線と中性子を同時照射した場合の損失増加特性を、図 2.5 に示す。[70] γ 線照射の場合には、この図に示されているように、照射開始後に速やかに損失が増加し、ある程度増加した後は増加速度が小さくなることが知られている。これに対し、中性子照射時にはこのような傾向が見られておらず、20000[Gy(SiO₂)]照射後もリニアに近い形で損失が増加していることがわかる。放射線照射時に生成されるカラーセンターは、生成後、何らかの時定数で消滅していく。中性子照射時にはこの緩和時定数の長いカラーセンターが多く生成されるということが出来る。従って、光ファイバーを中性子の混在する領域に適用しようとする場合には、低中性子束であっても、損失の蓄積に十分に注意を払う必要がある。

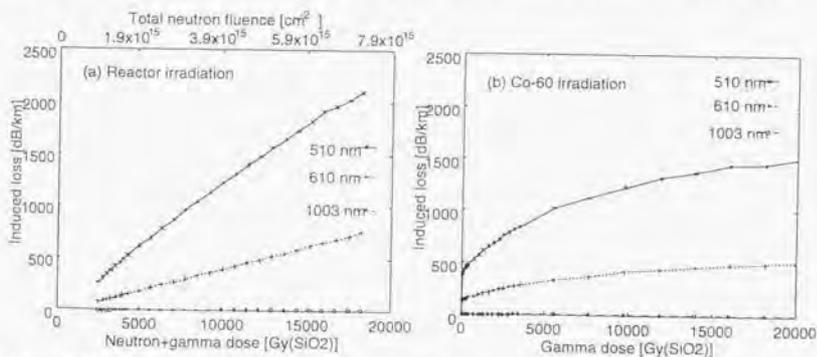


図 2.5 放射線照射時の伝達損失増加特性 (Polyimide jacketed pure silica core fiber, 50/125)[70]

また、線量率: 1.9×10^3 Gy(SiO₂) で 2.6×10^4 Gy(SiO₂) まで照射した場合の、854nm、1047nm における放射線誘起損失を、表 2.4 に示す。[70]

表 2.4 ポリイミド被覆純粋石英コア光ファイバーに対しγ線を照射した際の放射線誘起損失 [70]

温度 [°C]	波長 [nm]	
	854	1047
10	+199.3 dB/km	+58.2 dB/km
80	+30.5 dB/km	+31.5 dB/km
300	+11.1 dB/km	+12.7 dB/km

3) フッ素ドープ石英コア光ファイバー

フッ素ドープ石英コア光ファイバーに対し、 ^{60}Co γ線をいくつかの線量率で照射した際の、500nm、800nm、1100nm、1550nmにおける損失増加特性を、図 2.6 に示す。温度は 20°C 程度であった。図 2.6 と表 2.3、表 2.4 を比較すると、フッ素ドープ石英コア光ファイバーが他の 2 種類のものに比べ、飛躍的に耐放射線性が高いことが分かる。特に、800nm、1100nm においては、照射開始直後に損失が急激に増加するが、その後はむしろ減少傾向が観測された。γ線照射時の損失の減少については、これまでもいくつかの報告が成されている。生成されたカラーセンターが温度に依存した速度で回復し、生成速度と回復速度の相対的な関係により損失の増加、減少特性が決まるものと考えられる。放射線の照射とともに損失が飽和、あるいは減少する傾向は、光ファイバーの放射線環境への適用を考える上では有利である。

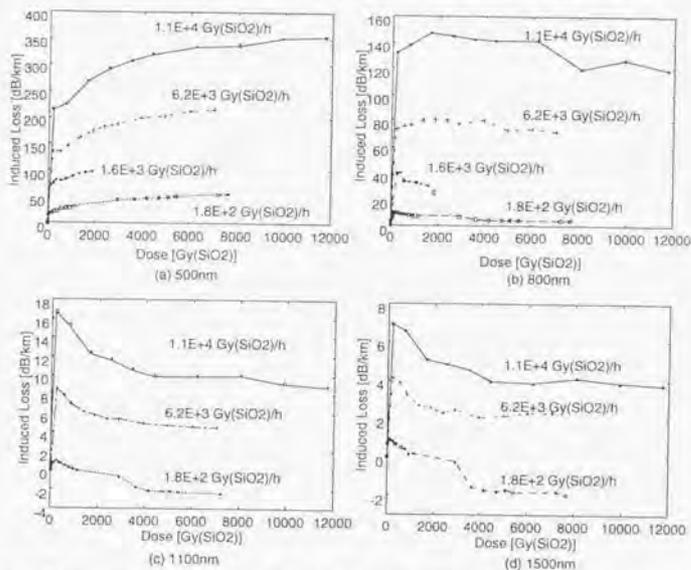


図 2.6 フッ素ドープ石英コア光ファイバーにおける放射線誘起損失増加特性 (UV/50/125/200)

^{60}Co γ 線を照射した場合、及び弥生において γ 線+中性子を照射した場合の特性を比較し、図2.7に示す。500nmについては、OHドープ石英コア光ファイバーの場合と同様に、中性子照射時には損失の飽和傾向が観測されなかった。また、弥生の各出力において照射した場合の、500nmにおける線量-損失の関係、を、図2.8に示す。図2.6の γ 線照射の場合と異なり、線量率(炉出力)を変えても線量-損失関係には大きな変化が生じていないことが分かる。

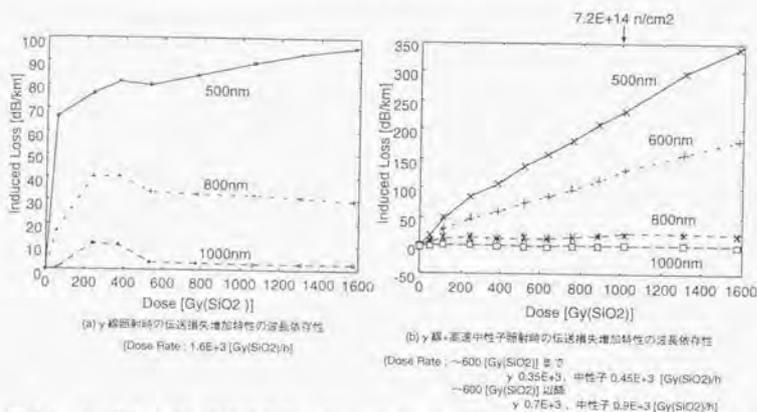


図2.7 フッ素ドープ石英コア光ファイバーにおける γ 線照射、 γ 線+中性子照射の場合の損失増加特性の比較(UV/50/125/200)

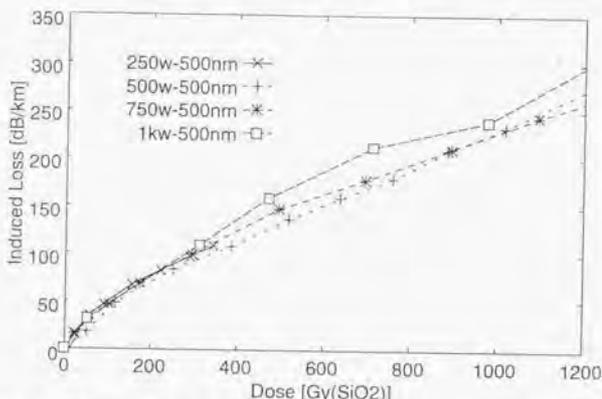


図2.8 フッ素ドープ石英コア光ファイバーに対し γ 線+中性子を照射した場合の500nmにおける損失増加特性(出力依存性)(UV/50/125/200)

一方、中性子照射時の800nmにおける損失増加特性を拡大してみると(図2.9)、 γ 線照射時と同様に照射開始後ある程度時間がたつと、損失の増加速度が小さくなっていることが分かる。さらに、600 Gy(SiO₂)程度で線量率(出力)が2倍に増えているが、それに伴って損

失の大きさも大きくなっていることが見てとれる。すなわち、800nm においては、500nm で見られたような中性子線量にのみ依存する特性が見られないと言うことができる。

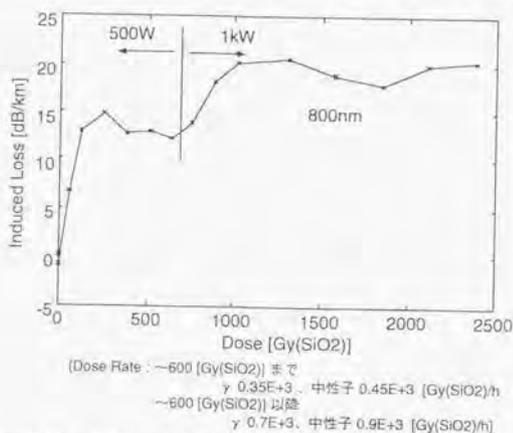


図 2.9 フッ素ドープ石英コア光ファイバーに対し γ 線+中性子を照射した場合の 800nm における損失増加特性 (UV/50/125/200)

γ 線のみを照射した場合と γ 線+中性子を照射した場合の、放射線誘起損失の波長依存性を比較し、図 2.10 に示す。ともに、照射線量が 1573 Gy(SiO₂) の時点での損失スペクトルである。 γ 線+中性子を照射した場合の方が、700nm 以下の波長域で損失が非常に大きくなっていることが分かる。図 2.7 に示されたような、飽和傾向のない損失増加によるものと考えられる。一方、700nm 以上では損失スペクトルの形状には大きな差が見られず、長波長領域では中性子の影響が小さいことが示された。

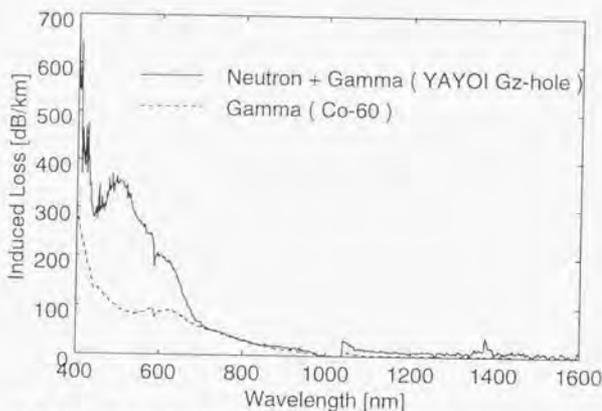


図 2.10 γ 線のみを照射した場合、及び γ 線+中性子照射した場合の放射線誘起損失スペクトルの比較 (F-doped Silica Core/UV Jacketed/50/125/200)

一方、800nm 以上での損失増加量の波長依存性には、次のような傾向がある。

- 常温・短時間の γ 線照射時には、図 2.6 に示すように 1.5 μm 程度までは波長は長いほど損失は小さい。
- 高温・長時間での γ 線照射時には、1 μm 前後を底として、それよりも長波長側では徐々に損失量が大きくなる。(図 2.11 は、フッ素ドープコア光ファイバーに対し、50 $^{\circ}\text{C}$ 、線量率:約 $2 \times 10^4 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ で 10 日間照射を行った結果。)
- 高温・長時間の中性子+ γ 線照射時にも、同様に 1 μm 以上の損失は波長とともに増加した。(図 2.12)

従って、高温・長時間の使用では、波長が長い方が良いわけではなく、1 μm 程度の最も損失の小さい波長を選択して使用することが必要である。また、常温と 50 $^{\circ}\text{C}$ での、800nm における損失の大きさを比較すると、50 $^{\circ}\text{C}$ の方が 100dB/km 近くも小さく、長時間照射後も 40dB/km 程度に留まっていることが分かる。

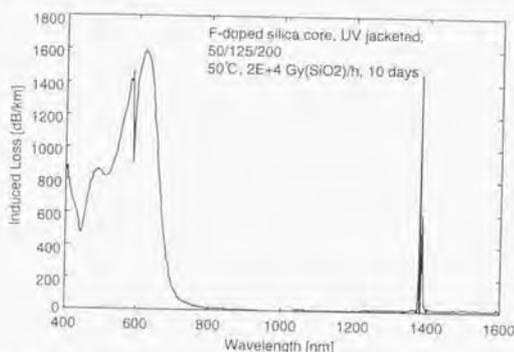


図 2.11 フッ素ドープコア光ファイバーへの γ 線照射時の損失スペクトル (温度 50 $^{\circ}\text{C}$ 、線量率 $2 \times 10^4 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ で約 10 日間照射)

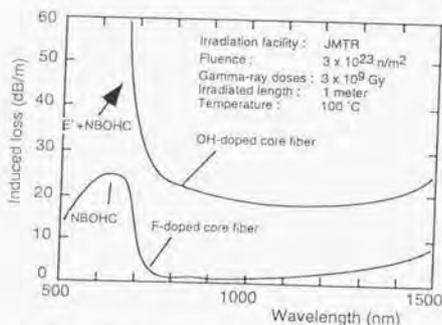


図 2.12 フッ素ドープ、及び OH ドープコア光ファイバーに対する JMTR での照射結果 [26]

(5) 損失増加特性の定性的整理

光ファイバー中の損失増加特性を定性的にはあるが理解するため、図 2.13 に示すような簡単なモデルをもとに整理を行った。ここで損失の原因となるカラーセンターはそれぞれの前駆体 (Precursor: P) から速度定数: k_1 で生成され、速度定数: k_2 で回復するとした。また、前駆体が何らかの構造 (例えば石英の $\equiv \text{Si-O-Si} \equiv$ 結合など) から放射線によって生成される場合と、前駆体の新しい生成は無く、既に存在した限られた数の前駆体からのみカラーセンターが生成される場合に分類して考えた。また、まず定線量率での γ 照射時について考え、中性子照射時の影響についてはその違いについて考察した。



図 2.13 カラーセンターの生成、回復を表すモデル

1) 前駆体が放射線によって生成される場合 (モデル A)

前駆体密度を N_p 、カラーセンター密度を N_c とすると、これらについて次のような微分方程式が成り立つ。[20][21] ただし、前駆体は放射線によってカラーセンターに変化する以外のプロセスによって消滅することはないという仮定を設けた。

$$\frac{dN_c}{dt} = k_1(N_{p0} + k_0 N_0 t - N_c) - k_2 N_c \quad (2.2)$$

ここで、

- N_{p0} : 照射開始前の前駆体密度
- N_0 : 前駆体の前駆体 (A) の密度 (非常に多く一定であるとした。)
- k_0 : A から前駆体が生成されるプロセスの速度定数
- k_1 : 前駆体からカラーセンターが生成される速度定数
- k_2 : カラーセンターが回復する速度定数

上の微分方程式を解くと次のような式が得られる。[20][21]

$$N_c = \frac{k_1}{k_1 + k_2} \left(N_{p0} - \frac{k_2 N_0}{k_1 + k_2} \right) [1 - \exp\{-(k_1 + k_2)t\}] + \frac{k_1 k_2 N_0 t}{k_1 + k_2} \quad (2.3)$$

上式の第 1 項は照射開始とともに速やかに増加し、長時間経過後には一定値で飽和するような挙動を示す。一方、第 2 項は照射線量に比例して損失が増加するという挙動を示す。

2) 前駆体の新たな生成はないと仮定した場合

a) 前駆体の数が多く一定とみなせる場合

カラーセンター密度: N_c に関し、次のような微分方程式が成り立つ。

$$\frac{dN_c}{dt} = k_1 N_{p0} - k_2 N_c \quad (2.4)$$

これを解くと、 N_c について次式が得られる。ここで、 N_{p0} は十分に数が多く、一定であると考ええる。

$$N_c = \frac{k_1 N_{p0}}{k_2} \{1 - \exp(-k_2 t)\} \quad (2.5)$$

従って、このモデルに従うようなカラーセンターによる損失は、次のような挙動をとる。

- k_2 が大きい場合:
飽和型の指数関数で表され、時間の経過とともに一定値に近づく。(モデル B-1)
- k_2 が非常に小さい場合:
飽和型の挙動を示すのは非常に長時間経過した後であり、かなりの照射量まで損失は線量とリニアに近い形で増加する。(モデル B-2)

b) 前駆体の数が少なく、照射とともに密度がゼロに近づく場合 (モデル C)

前駆体密度 N_p 、カラーセンター密度 N_c に関する微分方程式は次の通りとなる。

$$\frac{dN_p}{dt} = -k_1 N_p \quad (2.6)$$

$$\frac{dN_c}{dt} = k_1 N_p - k_2 N_c \quad (2.7)$$

まず、 N_p については、次のような式が得られる。

$$N_p = N_{p0} \exp(-k_1 t) \quad (2.8)$$

これを N_c に関する微分方程式に代入し、解くことによって、 N_c について次のような式が得られる。

$$N_c = \frac{k_1 N_{p0}}{k_2 - k_1} \{ \exp(-k_1 t) - \exp(-k_2 t) \} + N_{c0} \exp(-k_2 t) \quad (2.9)$$

上式で $k_2 \gg k_1$ の場合には、上記のモデル B-1、B-2 に相当する。それ以外の場合には、 N_c は照射開始後に一度増加して最大値に到達した後、さらに照射を続けると減少して0になるという挙動を示す。

以上のようなモデルのもとでの損失増加特性は、模式的に図 2.14 に示されるような挙動を示す。

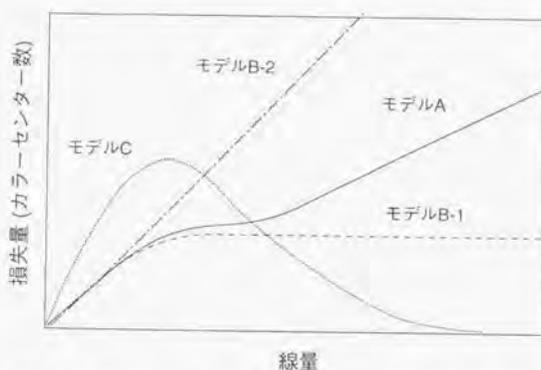


図 2.14 考えられるモデルのもとでの損失増加特性の模式図

3) 実際に観測される損失増加スペクトルとの関連性

カラーセンターには多くの種類があり、上で述べたようなモデルだけで全てを説明することは難しいが、ここでは実験によって得られている各波長領域での損失増加特性が、上のどのモデルに近いかを整理した。

a) 紫外～可視短波長領域 (400～500nm 以下)

- 紫外域からの吸収テールの影響が大きく、損失増加の飽和傾向が見られる。(モデル B-1)
- 長期間照射後は 610～630nm 程度の NBOHC の影響が支配的となり、照射とともに損失はリニアに近い形で増加する。(モデル A、モデル B-2)

b) 500～800nm 程度

- 照射開始直後に 650～800nm 程度で損失ピークが見られるが、さらに照射するとこのピークは減少する。(モデル C)
- 紫外域からの吸収テールの影響もある程度大きく、この成分は飽和型の挙動を示す。(モデル B-1)
- 長期照射後には NBOHC の影響が支配的となり、損失はリニアに近い形で増加する。(モデル A、モデル B-2)

c) 800～1100nm 程度

- 紫外域からの吸収テール、NBOHC の影響ともに小さく、放射線環境での使用に最も適した波長帯である。
- 照射開始直後は紫外域からの影響が大きく、飽和型の増加を示す。(モデル B-1)

- 長期間照射後はリニアに近い増加を示す(モデル A、モデル B-2)が、短波長側に比べて損失増加量は非常に小さい。

d)1100nm 以上

- 赤外域からの吸収テールの影響が大きい。この吸収は NBOHC のようにリニアに近い増加特性を示す。(モデル A、モデル B-2)

これらの関連づけは損失増加特性から定性的に考えて近いモデルを選択したものであり、本来ならば ESR 等の手法によって各カラーセンターの密度を求め、モデルとの比較を行うことが必要であろう。しかし、本研究の目的である光ファイバーのセンサー利用という観点から見ると、長期間使用の制約となるのは、モデル A あるいはモデル B-2 のような挙動を示すものであることが分かる。従って、可視から近赤外(1100nm 以下)の波長域を用いるとすれば、長期的には NBOHC に起因すると考えられる、線量とリニアに近い関係の損失増加に注意することが必要である。

また、フッ素ドープ光ファイバーに中性子を照射した場合には、500nm 程度の吸収ピークと NBOHC による吸収ピークがさらに大きくなる。特に 800nm 以下の波長域を用いる場合にはこれらの増加が寿命を決定することになる。

現状の光ファイバーの耐熱性が 250~300℃が上限であるため、損失増加特性の温度依存性についても、この温度以下のものしか得られていない。室温から 300℃の範囲で行ったこれまでの実験結果を見ると、次のようなことが分かる。

- 紫外域からの吸収テール:
温度の上昇とともに回復速度が大きくなり、損失の飽和値が低くなる。従って、高温での使用ではこの吸収テールの影響は小さくなる。
- NBOHC:
300℃での照射でも室温と同等程度の損失が発生した。従って、このカラーセンターの回復速度はこの程度の温度範囲であれば温度に依存しないのではないかと考えられる。
- 赤外域からの吸収テール:
この吸収については十分なデータは無いが、ポリイミド被覆 OH ドープコア光ファイバーでは 300℃の方が室温よりも損失が大きいという結果が得られている。高温での使用の際には、この成分の挙動に十分に注意を払う必要がある。

(6) 放射線照射時の挙動に関するまとめ

これまでに示した照射結果を見ると、光ファイバー中の損失増加特性は、一般的には次のようにまとめることができる。

- 可視から近赤外の領域で重要な吸収帯としては、
 - 紫外域からの吸収の裾引き
 - 610~630nm 程度の NBOHC に起因するとされる吸収
 - 650~800nm 程度の照射開始直後に見られる吸収

— 赤外域からの吸収の裾引き

の4つが挙げられる。

- 紫外域からの裾引きは γ 線照射時には照射とともに飽和傾向を示す。一方、NBOHCに起因する損失は回復速度が小さいために短期間の照射では飽和傾向が確認されず、照射とともに増加を続ける。
- 紫外域からの裾引きは温度上昇とともに回復速度が速くなり、高温時には寄与が小さくなる。一方、NBOHC等に起因するとされる吸収は回復速度が影響を受けにくい。(図2.4)従って、高温の場所で光ファイバーを長期間使用する場合、照射初期には紫外域からの裾引きが重要だが、照射とともにNBOHCによる吸収の占める割合が大きくなる。
- γ 線照射時には、照射開始直後は紫外域からの裾引きが大きく寄与し、損失は急に増加する。しかし、ある程度照射を継続するとこの成分はほとんど飽和に近い状態となり、その後は回復の遅いNBOHC等による損失が徐々に増加して行く。NBOHC等に起因する吸収は紫外域からの裾引きに比べると吸収スペクトルの幅が狭いため、近赤外域ではNBOHCの寄与が小さく、照射初期には紫外域からの裾引きの特性だけが明瞭に現れる。そのため、開始直後の損失の増加の後、損失が逆に減少する傾向が見られる。
- 中性子照射時には、 γ 線照射時よりもNBOHCに起因する損失が大きく現れる。(図2.10)しかし、近赤外域ではNBOHCの影響が小さいので、中性子照射時にも損失の飽和傾向が見られる。(図2.9)
- 高温での中性子照射時でも、照射開始後しばらくすると、800nm以上の波長における損失増加速度は小さくなる。それ以降は、NBOHC等の回復速度の遅いカラーセンターの影響により非常に遅い速度で損失が増加するものと考えられる。この特性により、近赤外光を利用すれば、原子炉容器周辺や炉心内のような中性子束の大きい場所でも、光ファイバーを長期間適用できる可能性がある。
- 高線量率領域で長時間使用する場合、実験結果では $1\mu\text{m}$ 程度の損失が最も小さくなる傾向があり、これを参考にして最適な波長を選択すべきである。 γ 線照射の場合には温度にもよるが、 $10^3\sim 10^4\text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 程度までであれば、かなり長時間使用可能である。

上のような特性を考慮しつつ、光ファイバーを原子炉容器内へ適用する場合を考える。高温高中性子束の環境であることから、紫外域からの裾引きの影響は小さく、800nm以上の近赤外域では非常に遅い速度で損失が増加するものと予想される。

原研JMTR炉心部でOHドープ光ファイバーを照射した結果を、図2.15に示す。[25]測定条件は以下の通りである。

- 温度:97℃
- 定格出力(50MW)時の中性子束: $1.9\times 10^{13}\text{ n/cm}^2/\text{s}$
- 同 γ 線量率: $6.8\times 10^6\text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$

起動時から定格出力に到達するまでの損失スペクトルの変化を図 2.15 に示す。可視域からの裾引きが小さく、相対的に NBOHC に起因する損失が大きいことが分かる。また、800nm 以上における損失は非常に小さいことがわかる。また、図 2.16 には、照射量と 850nm における損失の関係を示す。 10^{17} n/cm²、 10^7 Gy(SiO₂) 程度までは損失が 0.1dB/m=100dB/km 以下であるが、 10^{19} n/cm² 付近では損失の増加速度が大きくなっていることが分かる。従って、800nm 以上の発光を用いれば、かなり高い中性子束、線量率の場所へも適用可能だが、ある程度以上の積算照射量においては損失の増加速度が大きくなるものと考えられる。

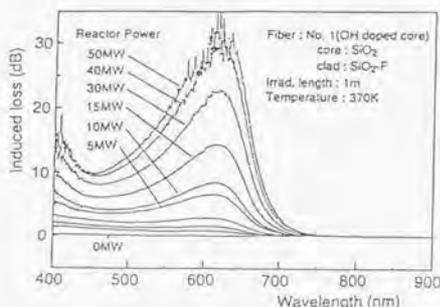


図 2.15 OH ドープ石英コア光ファイバーに対する JMTR での照射結果 (定格出力到達までの損失スペクトルの変化)[25]

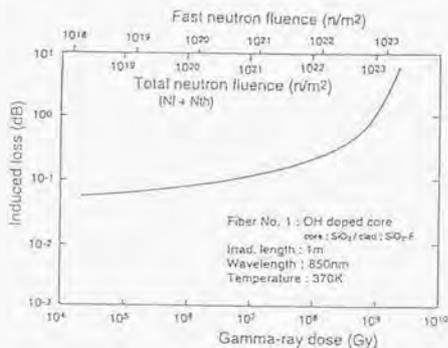


図 2.16 OH ドープ石英コア光ファイバーに対する JMTR での照射結果 (照射量と 850nm における損失量の関係)[25]

2.2 プラスチック光ファイバー (POF)

2.2.1 POF の特徴

POF には石英コア光ファイバーと比較して、次のような長所がある。[27]

- 材料自体が柔軟であるため、直径を 1mm としても取扱が非常に容易である
- コアに比較してクラッドがコア占積率が高い
- 開口数が大きく、伝搬可能なモード数が多い

これらの長所のため、指向性が低い外部光源からの光を効率よく光ファイバーによって導きたい場合や、ごく微弱の発光を測定したい場合に適している。

他方、短所としては次のようなものが挙げられる。

- 石英コア光ファイバーに比べ伝送損失が大きい
- 耐熱性が低い

従って、POF は長距離の伝送を行う用途や、高い温度条件となる場所での使用には適さない。

2.2.2 POF の種類

現在市販されている POF のコア材料は、透光率や機械特性などの特性が良好なポリメチルメタクリレート (PMMA) が大部分であり、一部の特殊用途向けにポリスチレン (PS) が用いられている。また、耐熱 POF のコア材料としてはポリカーボネート (PC) が主である。透光性の向上を目指し、コア材の水素原子の一部を重水素で置き換える試みもなされている。主なコア材料の特徴は以下の通りである。[27],[28]

(i) PMMA コア

- 透光性、機械的強度が良好であり、これまで広く用いられている
- 屈折率が小さく (1.49 程度)、クラッド材の選択の幅が狭い

(ii) PS コア

- 屈折率が大きい (1.59 以上)
- ドーパントを含まない PS コア POF は、PMMA コアのものと同様の用途に用いられる
- ドーパントを添加することにより蛍光ファイバー、シンチレーティングファイバーとして用いられる

(iii) PC コア

- ガラス転移温度が 145 °C であり、PMMA (110 °C 程度) よりも高い
- 透光性等の光学特性は PMMA に劣る

(iv) 重水素コア

- PMMA に比べ、長波長側の透光性が高い
- 製造コストが高い
- 水分の吸収により、近赤外領域での透光度の劣化が生じる

また、クラッド材料としては、屈折率、透光率、コア材料に対する密着性などの点から、一般にフッ素系ポリマー共重合体が主に使用されている。

現在市販されている POF は、ほとんどが SI 型光ファイバーに属している。GI 型は、フックシミリや通信用への適用を目指し、近年開発段階にある。

2.2.3 POF の耐放射線性

PMMA コア POF に ^{60}Co γ 線を照射し、放射線誘起損失を測定した結果を図 2.17 に示す。[30] 石英コア光ファイバーに γ 線を照射した場合と同様に、照射開始直後に損失がある程度大きくなった後、飽和傾向を示す。しかし、さらに照射を続けていくと、損失増加速度が大きくなる減少が見られる。

図 2.17 の POF(No-2) を用い、680nm の光を伝送する場合について考える。光ファイバー中の損失によって光強度が 0.5 倍となる時点を経済寿命と考えると、光ファイバー長と最大線量、及び 10 年間で単純平均をとった場合の適用可能線量率は次のように求まる。

表 2.5 POF の適用可能線量率

POF 長 [m]	損失量 [dB/km]	積算線量 [Gy]	適用上限 [mGy/h]
100	30	100	1
50	60	600	6
20	150	2000	20

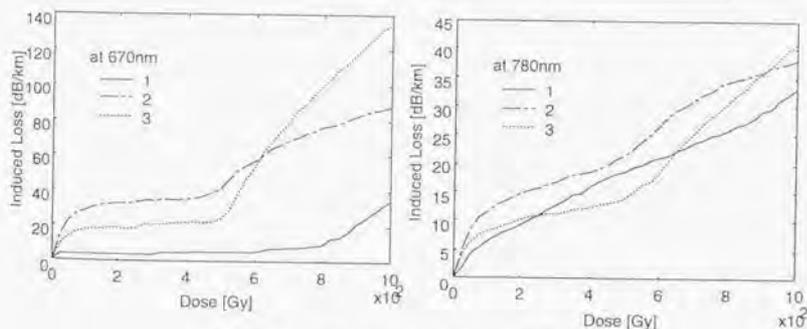


図 2.17 POF の放射線誘起損失測定結果 [30]

2.3 シンチレーティング光ファイバー

2.3.1 一般的特性

シンチレーティング光ファイバーとは、光ファイバーコア中に放射線を感じるシンチレータを添加したものである。[31] コア中に入射した放射線によりシンチレーション光子が発生し、そのうちの一部がコア中にトラップされ、両端に向けて伝搬する。トラップ率は開口数:NAによって決定され、コア屈折率:1.60、クラッド屈折率:1.49という条件のもとでは、約3.4%程度である。

これまでに市販され、主に用いられてきたシンチレーティング光ファイバーはプラスチックコアのものがほとんどである。メーカーとしては、クラレ、Bicron等のものがよく用いられている。Bicron製プラスチックシンチレーティング光ファイバー(PSF)を表2.6に示す。どのタイプもnsecオーダーの減衰時間を示しており、時間分析型の測定に適している。一方、1/e減衰距離は2~3m程度と短く、10m以上の長距離にわたる使用は困難である。

表 2.6 Bicron 製 PSF の特性 [31]

品名	中心波長 (nm)	減衰時間 (nsec)	発光量 (photons/MeV)	1/e 減衰距離 (m)
BCF-10	432	2.7	~8000	1.9
BCF-12	435	3.2	~8000	2.2
BCF-20	492	2.7	~8000	>3.5
BCF-60	530	7	~7100	>3.5

2.3.2 PSF 中の放射線誘起損失

PSFに放射線を照射した際の伝送損失の増加を評価するため、⁶⁰Co γ 線源を用いた照射実験を行った。5m長のPSFを2000 Gy(SiO₂)/hの線量率の位置に設置し、両端に通常の光ファイバーを接続した。通常の光ファイバーの一方に白色光を入射させ、もう一方を光スペクトラムアナライザに接続して γ 線照射中の透過光スペクトルの測定を行った。

図2.18に、照射開始前、及び2900 Gy(SiO₂)照射時の透過光スペクトルを示す。また、図2.19には、2900 Gy(SiO₂)照射時の損失分布を示す。石英コア光ファイバーと同様に低波長側の損失増加が大きいことがわかる。

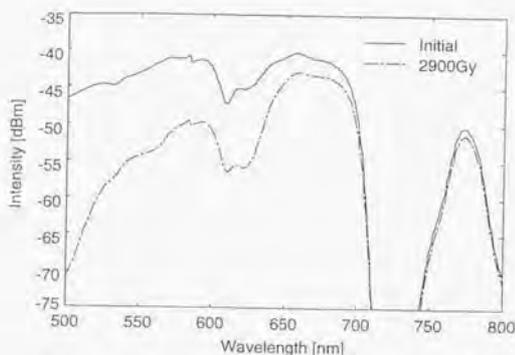


図 2.18 γ 線照射時の PSF の透過スペクトルの変化

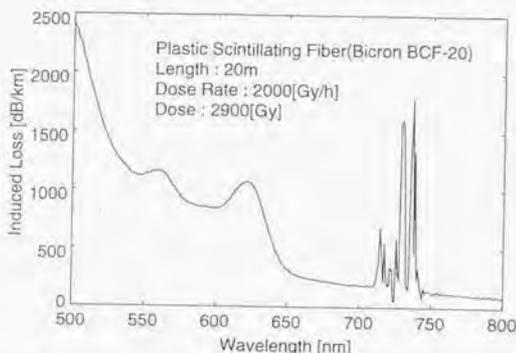


図 2.19 γ 線照射時の PSF の放射線誘起損失スペクトル (2900 Gy(SiO_2))

実際の使用にあたっては、PMT と組み合わせて使用されることが多いと予想される。そこで、放射線照射時の発光を PMT で測定し、強度変化の測定を行った。 ^{60}Co γ 線量率が 2800 Gy(SiO_2)/h の位置に 1m 長の PSF を設置し、片端に接続した通常の光ファイバーを PMT(浜ホト R1635-02) に接続した。照射開始後の PMT からの出力を、デジタルボルトメータによって測定した結果を、図 2.20 に示す。

照射開始直後に約 23 mV であった出力が、照射とともに低下していることがわかる。また、通常の POF における測定例と同様に、一度飽和傾向を見せた後、ある程度以上では再び出力の低下が速まっていることがわかる。

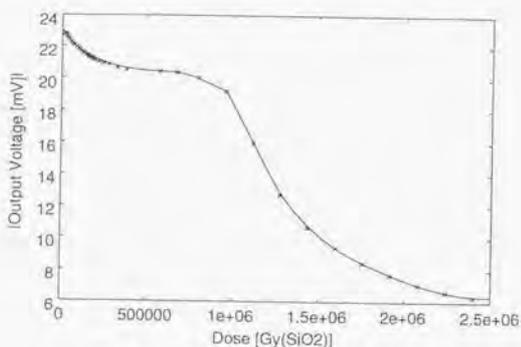


図 2.20 γ 線照射時の PMT 出力の変化

PSF からの出力低下の原因としては、発光効率、及び伝送効率の低下が考えられる。ここでは、PSF を使用する場合の指標とするため、発光効率は変化しないという前提のもとで、伝送効率の変化を求めた。2800Gy(SiO₂)/h の線量率で⁶⁰Co γ 線を照射した際の損失の変化を図 2.21 に示す。例えば 5m 長の PSF が照射を受け、5m で 0.5 倍に減衰するような放射線誘起損失が生じた時点で交換が必要であるという設定では、伝送損失が約 600dB/km に到達した時点で交換を行うことになる。従って、図 2.21 より、線量の上限は約 6000Gy(SiO₂) と求められる。今回は、2800Gy(SiO₂)/h という非常に高い線量率で実験を行っており、線量率が低い場合には寿命はもう少し長いものと考えられるが、石英コア光ファイバーと比較すると非常に耐放射線性が低いことが示された。

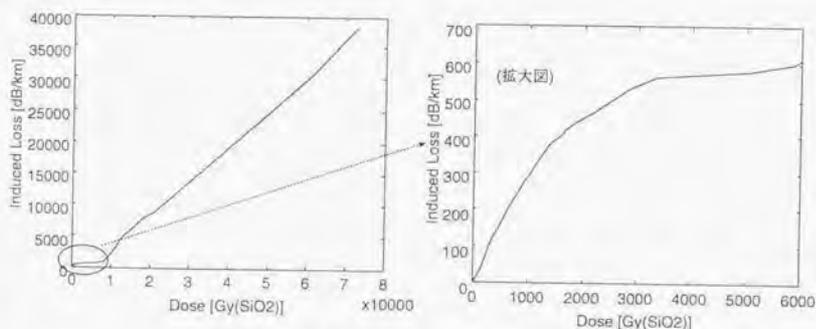


図 2.21 γ 線照射時の実効的な伝送損失の変化



II. 光ファイバーによる放射線分布測定

第 3 章

低線量率領域用システム

放射線関連施設の安全性向上や放射線作業時の被曝低減に寄与することを目的とし、プラスチックシンチレーティング光ファイバー (PSF) を用いる長距離型放射線分布測定システムについて研究を行った。[40],[41] PSF によるシステムの適用対象の一つとして、2次元平面内での放射線分布測定を考え、非侵襲型のモニタリングシステムとしての可能性を、高速中性子を用いた模擬実験によって評価した。

また、可視域を利用するシステムは他の研究機関でも提案されてきており、ここでは、

- シンチレータ塗付光ファイバーによる放射線分布測定法 (名古屋大学) [36],[37]
- 導波路型シンチレータによる放射線分布測定法 (東芝)[38]

をとりあげ、これらの特徴をサーベイするとともに、PSF を用いるシステムとの比較を行った。

3.1 プラスチックシンチレーティング光ファイバーによる放射線分布測定法

序論において示したように、プラスチックシンチレーティング光ファイバー (PSF) は、耐放射線性という点からは石英光ファイバーに劣っている。しかし、高い開口数 (NA)、形状のフレキシビリティが高い等の長所をもつため、放射線計測への適用検討が行われてきた。[32]-[35]

3.1.1 PSF による放射線計測

PSF は、プラスチック光ファイバーのコア部分にシンチレーション物質が添加された構造となっている。γ線が入射した場合には、コンプトン効果等を通じて生成された電子がコア中にエネルギーを付与し、シンチレーション光子が発生する。また、中性子入射時には、弾性散乱によってプラスチック中の陽子が反跳され、その際に得た運動エネルギーを付与する。陽子に対するエネルギー阻止能の方が電子に対するものよりも小さいため、同じ形状の PSF を用いた場合には陽子の方が光子生成数が多い。

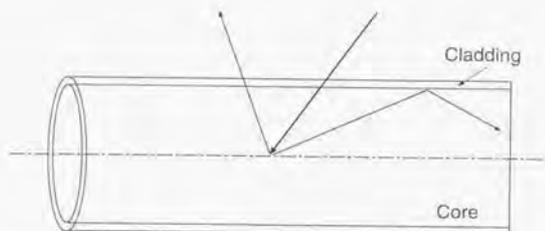


図 3.1 PSF 中でのシンチレーション光子の伝搬原理

通常のプラスチックシンチレータと同様に、PSF 内で発生するシンチレーション光子も速い減衰時間を持つ。例えば、市販の BCF-20(Bicron 社)では、約 2.4nsec の減衰時間を示しており [31]、時間分析型の測定原理を適用するのに適している。

3.1.2 Time of Flight 法による放射線分布測定法の原理

PSF 中で発生したシンチレーション光子の一部は、PSF の両端に向けて伝搬する。従って、両端に光検出器を接続し、両端への到達時間差を測定すれば光子の発生位置を知ることができる。(PSF-TOF 法)[34]

測定システムの例を図 3.2 に示す。シンチレーション光子は両端の光電子増倍管において電気信号に変換され、その後、プリアンプで処理された後、Constant Fraction Discriminator(CFD)で波高弁別を受けるとともに時間信号を生成する。CFD からの 2 つの時間信号の時間差を Time to Amplitude Converter(TAC)によって波高に変換し、最終的には Multi Channel Analyzer(MCA)によって解析する。

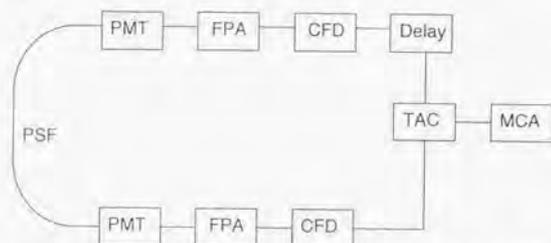


図 3.2 TOF 法による放射線分布測定における測定システム例

3.1.3 システム特性

使用したシステム要素は表3.1の通りである。PMT、プリアンプの時定数はそれぞれ0.8nsec、1nsec以下であり、CFDのTime Walk:<75psec、TACの時間分解能:<10psecという性能を考えると、処理回路の時間分解能として1~2nsec以下が期待できる。

表3.1 測定に使用したシステム要素

測定要素	製品名	メーカー
PSF	BCF-20	Bicron
Normal Fiber Optics	ST-SY1000	Mutsubishi Cable
Photomultiplier	R1635-02	HAMAMATSU
Pre-Amplifier	VT-120	ORTEC
Constant Fraction Discriminator	583	ORTEC
Time to Amplitude Convertor	567	ORTEC

また、使用したBCF-20の特性を、表3.2に示す。

表3.2 BCF-20の特性

Items	Properties
Length	2.5m
Refractive Index of the Core	1.60
Total Diameter (Core + Cladding)	1.0mm
Numerical Aperture (NA)	0.58
Trapping Efficiency	3.44%
Peak Emission Wavelength	492nm
Decay Time of Scintillation Photons	2.7nsec
1/e Attenuation Length	> 3.5m

このようなシステムを用い、2.5m長PSFの中央部分に高速中性子ビームを入射させた場合の測定スペクトルを図3.3に示す。[40]実験は高速中性子源炉「弥生」Fast Columnからの直径5cmの高速中性子ビームを、図3.4に示すようにPSFに入射させて行った。測定場所での中性子エネルギースペクトルは、図3.5に示す通りである。PMTゲイン: 6×10^5 、CFDディスプレイレベル:0.8Vという設定での空間分解能は約16cm(FWHM)、測定効率は 1.3×10^{-4} [counts/incident neutron into PSF core]であった。

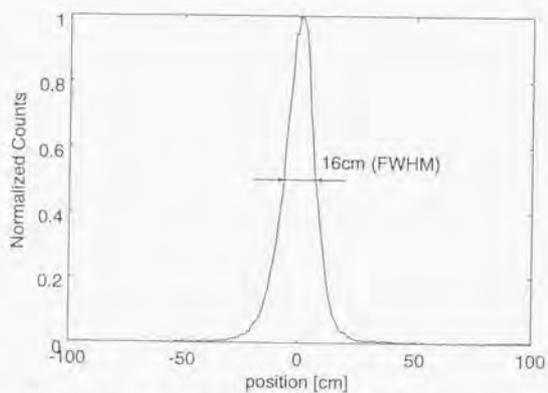


図 3.3 2.5m 長の PSF のみを用いた場合の測定スペクトル

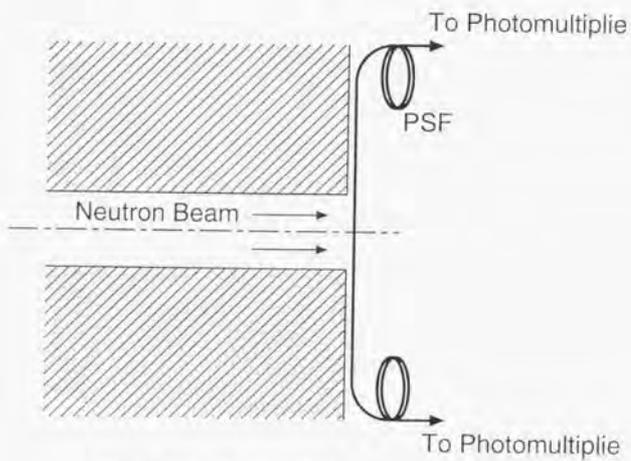


図 3.4 高速中性子源炉「弥生」を用いた実験体系

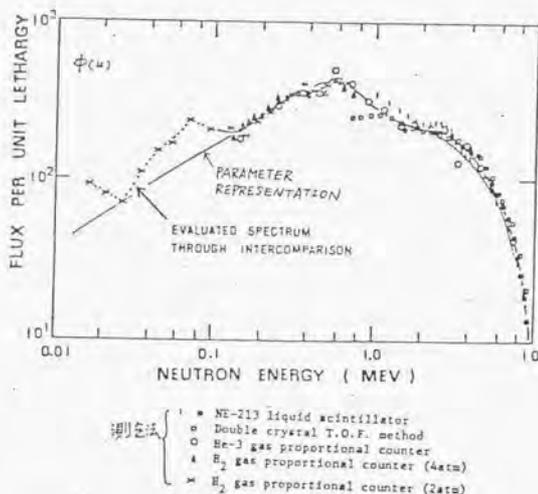


図 3.5 高速中性子源炉「弥生」Fast Column からの漏洩中性子ビームのエネルギースペクトル

3.1.4 PSF による長距離型放射線分布測定システムの検討

PSF-TOF 法によれば PSF に沿った連続放射線分布が測定可能であるが、PSF 中の光の減衰が大きいため、最長でも 10m 程度までしか長くできないという問題点がある。そこで、本研究においては PSF の両端に通常の石英コア光ファイバーを接続し、長距離にわたる分布測定を行うシステムについて検討を行った。PSF 以外の部分は放射線に感じないが、図 3.6 に示すように PSF の部分をずらしたものを多数束ねることにより、100m 程度の長距離にわたる放射線分布を一度に測定可能なシステムを目指した。

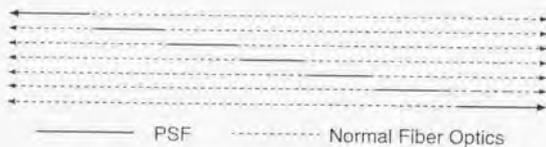


図 3.6 長距離型放射線分布測定概念 [40]

(1) 長距離型システムの特性評価

波長 500nm における減衰が 20dB/km の石英光ファイバー (三菱電線、ST-SY1000) を PSF の両端に接続して測定を行った。使用した石英光ファイバーの主要特性は、表 3.3 の通りである。ここでは図 3.7 に示すように、2本の 50m 長石英光ファイバー、及び PSF の長さ (2.5m) を

合わせ、全長102.5mのシステムとした場合の特性評価を行った。PSFと石英光ファイバーにはFCコネクタを装着し、アダプタを介して接続を行った。

表 3.3 使用した石英光ファイバーの特性 (三菱電線、ST-SY1000)

Items	Properties
屈折率分布	Step Index
コア部の屈折率	1.462
コア径	1.0mm
開口数 (NA)	0.20
500nm における 1/e 減衰長	220m

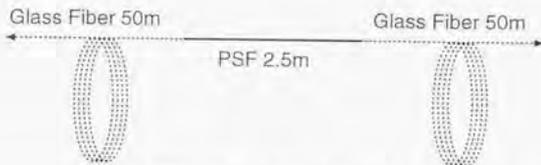


図 3.7 測定に用いた光ファイバーシステム

1) 測定効率及び空間分解能

弥生FCからの高速中性子ビームをPSFの中央部に入射させた場合に測定された分布を、石英光ファイバーなしの場合と比較して図3.8に示す。

CFDのディスクリレベルを1.5Vに設定した状態で、空間分解能は60cm程度であった。また、測定効率は、このような低ディスクリレベルにおいても 3×10^{-4} [counts/incident neutron into PSF core]であった。ここで用いた測定システムにおいては、

- (i) PSF中央部から石英光ファイバーとのコネクタまでの間(1.25m)の損失:1.5dB
- (ii) 主にNAの違いに起因する、PSFと石英光ファイバーの接続損失:10dB
- (iii) 50mの石英光ファイバー中での損失:1dB

というような損失が生じているものと考えられ、(ii)、(iii)はPSFのみのシステムでは考慮する必要がなかったものである。従って、これらの影響により、低いCFDレベルでも効率が低くなったものと考えられる。特に光ファイバー同士の接続点での損失が非常に大きいため、受け側の石英光ファイバーの方が大きい径のものをを用いるというような改良が必要である。

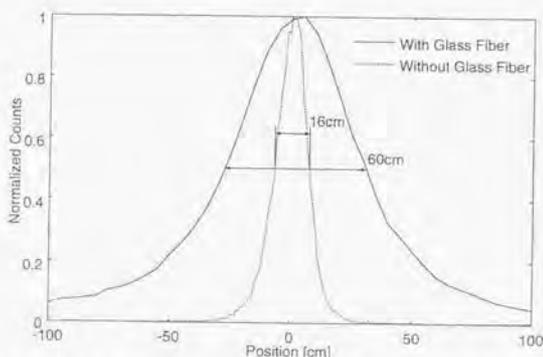


図 3.8 石英光ファイバーあり、なしの場合の測定スペクトルの比較

空間分解能の向上を図るため、CFD のディスクリレベルを 0.3V まで高くすることを試みた結果を図 3.9 に示す。ディスクリレベルを高くすることによって、空間分解能は約 50cm まで改善されているが、他方、測定効率は 4×10^{-5} [counts/incident neutron into PSF core] まで悪化し、CFD が 0.15V であった場合の 1/8 まで低下した。

長距離システムにおいて分解能を決定する要因としては、

- (i) シンチレーション光の発生時間分布: BCF-20 における減衰時間 2.4nsec
- (ii) 測定系の時間分解能: 1-2nsec 以下
- (iii) 光ファイバー中での時間分散: 50nm \times 2 本の石英光ファイバー中で 3.7nsec

等が考えられる。(iii) の分散や、上に示したような損失の影響により、PMT からの出力パルスが大きさが小さくなり、CFD のディスクリレベルを上げて空間分解能はそれほど向上しなかったものと考えられる。

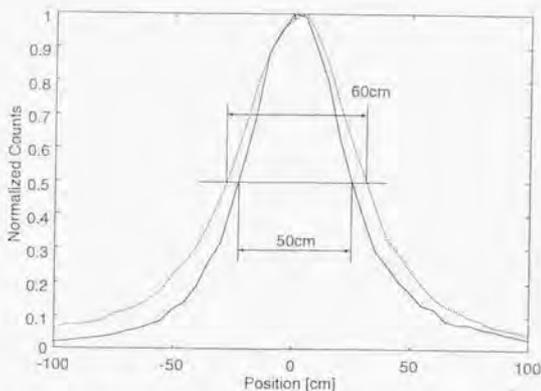


図 3.9 CFD のディスクリレベルを変化させた場合の比較

2) Linearity

本システムの放射線測定への適用性を評価するため、

- (i) 中性子束と測定されたピーク面積
- (ii) 中性子ビーム入射位置と測定されたピーク位置

の2つの関係について、線形性の評価を行った。図3.10、及び図3.11に測定結果を示す。

中性子束とピーク面積、及び入射位置とピークチャンネルの間に良好な線形性が成り立っていることがわかる。従って、ここで検討した長距離型システムを放射線分布測定に用いることの可能性が実証できた。

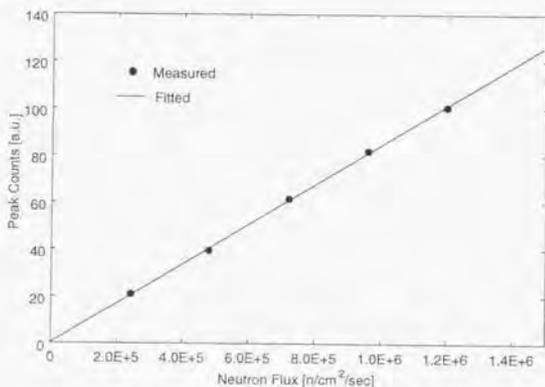


図 3.10 中性子束とピーク面積の関係

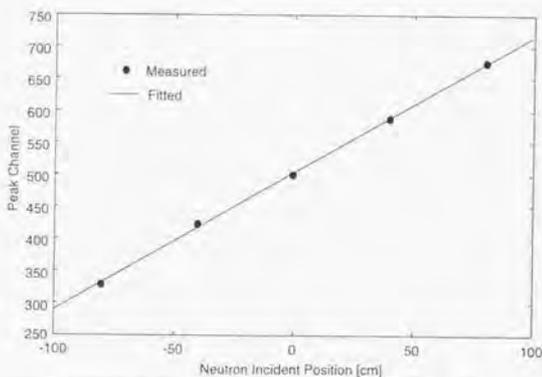


図 3.11 中性子入射位置とピークチャンネルの関係

(2) 分解能補正法の検討

先述のように、本システムによる空間分解能は、PSFのみを用いる場合に比べ非常に劣っている。そこで、ここでは測定された応答関数をもとに、長距離システムの分解能補正を行うことを試みた。

1) 応答関数の作成

PSF上の各点に中性子ビームを入射させながら測定を行えば、本システムの応答関数を得ることができる。しかし、実験に必要な時間を考えると全ての点に入射した場合の応答関数測定は、非現実的である。そこで、本研究においては、測定結果をよく再現するフィッティング式を用い、限られた測定結果をもとに必要な応答関数を近似することを検討した。

ここで用いたフィッティング関数は以下に示すようなものである。

$$f(x) = A \exp(-Bx^2) + C \exp(-D|x|) \quad (3.1)$$

ここで、 A 、 B 、 C 、 D はそれぞれフィッティング定数を表し、 x がPSFに沿った位置を表す。PMT、CFD等の測定系における時間分解能は、式3.1のガウス関数部分で表現されている。また、式3.1の第2項は、シンチレーション光子の発生時間分布を指数関数で近似した。また、光ファイバー中の時間分散は、空間分解能に大きな影響を及ぼすが、その影響は測定結果全体を一様にブロードにする方向に働き、フィッティング関数の関数形自体に影響するものではない。そこで、ここではその効果をあらかじめ式に含めず、フィッティング結果を通してその影響を表現することとした。

中央に中性子ビームが入射した場合の測定結果に対し、フィッティングを行った結果を、図3.12に示す。式3.1により測定結果がよく表現されていることがわかる。

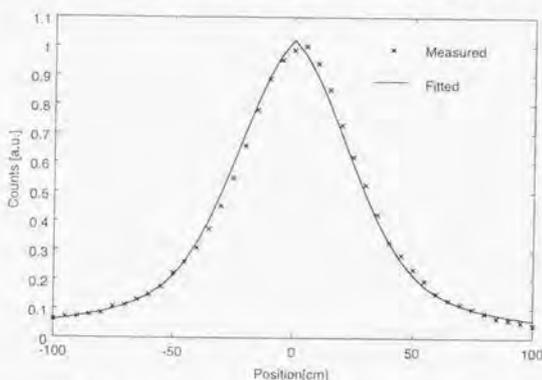


図 3.12 フィッティング式によるフィッティング結果

2) 分解能補正

分解能補正は、エネルギースペクトルアンフォールディングに用いられる SAND-II 法に基づいて行った。式 3.2 に、補正に用いた式を示す。

$$\ln \left(\frac{\phi_g^{k+1}}{\phi_g^k} \right) = \frac{\sum_i w_{ig}^k \ln \left(\frac{S_i}{S_i^k} \right)}{\sum_i w_{ig}^k} \quad (3.2)$$

ここで、

$$S_i^k = \sum_g R_{ig} \phi_g^k$$

$$w_{ig}^k = \frac{R_{ig} \phi_g^k}{S_i^k}$$

i, g : 空間メッシュの番号

S_i : 測定スペクトル

ϕ_g^k : 分解能補正後のスペクトル

k : 繰り返し回数

R_{ig} : 応答関数マトリックス

分解能補正結果を図 3.13 に示す。分解能補正を行うことによって、長距離型光ファイバーシステムの測定結果が、PSF のみによる測定結果とほぼ同程度まで改善されていることがわかる。SAND-II 法による処理は非常に単純なものであり、他の補正手法の適用により、さらに空間分解能の改善が可能であるものと期待される。

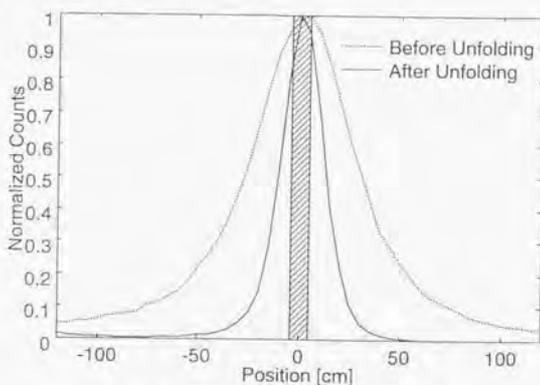


図 3.13 応答関数を用いた分解能補正の結果

3.1.5 長距離型光ファイバーシステムによる放射線分布測定模擬実験

長距離型システムによる分布測定可能性を実証するため、 ^{252}Cf 中性子源を用いた模擬実験を行った。図 3.14 に示すように PSF と ^{252}Cf 中性子源を配置し、PSF に沿って 3 つの中性子束ピークをつくり出した。

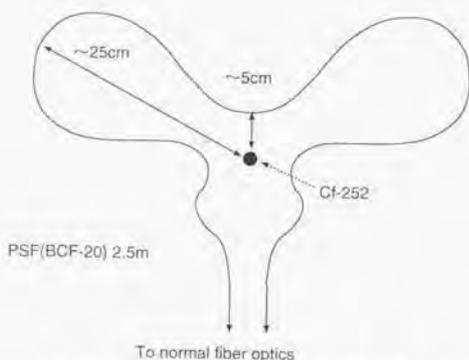


図 3.14 中性子分布測定模擬実験に用いた配置

図 3.15に、測定結果を示す。ここでは、PSFに基づく長距離型システムによる測定結果を、市販のSvカウンター(富士電機、NSN10001)を移動させながら測定した結果と比較した。中性子束ピークの位置については両者の測定結果はほぼ一致したが、長距離型システムの空間分解能が悪いため、ピーク/ボトムのコントラストが明瞭でないことがわかる。しかし、前節で示したような空間分解能補正手法を適用することにより、Svカウンターによるものとはほぼ同等の分解能が得られている。従って、分解能補正を併用することにより、本手法は点状の中性子検出器を多数配置するのと同等の性能を持っていることが示された。

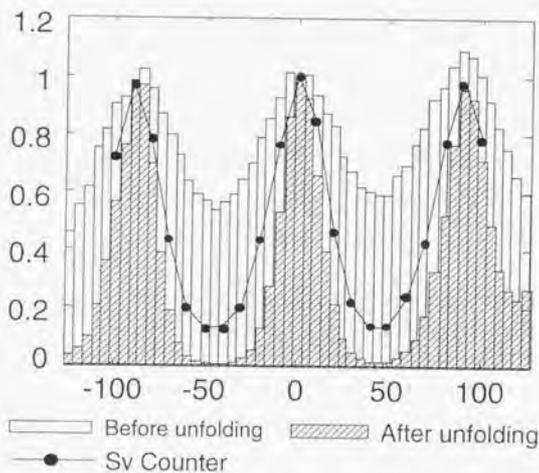


図 3.15 中性子分布測定模擬実験結果

1本のPSFのみを用いて測定を行う場合、PSF中に生じる電子の飛程が中性子によって生成される反跳陽子の飛程よりも大きいため、 γ 線測定時のPSF端からの射出光子数は小さい。

このため、コネクタ部等での損失が大きい長距離型システムを γ 線測定に適用することは困難である。

しかし、動燃によって行われた通常の光ファイバーをつながない状態での実験では、多数本のPSFを束ねて使用すれば空間分解能が20cm程度であったという結果が得られた。我々が1本のPSFで高速中性子を測定した際の空間分解能は15~16cmであり、これらの2つの実験でPMTに到達する光子数はほぼ同程度であったものと予想される。従って、PSFを束ねて使用し、テーパ型光ファイバー等を用いて通常の光ファイバーに効率良く光子を導くことにより、長距離型システムによる γ 線測定も可能であろうと考えられる。

3.1.6 PSF-TOF法の適用対象

PSF-TOF法には、死角のない連続分布測定が可能であるという長所があるが、空間分解能や耐放射線性という点で制約があるため、適用可能な領域もある程度制限される。表3.4に、PSF-TOF法の適用先として考えられるものを列挙した。

表3.4 PSF-TOF法について考えられる適用先

適用対象施設	使用法	目的
原子力プラント	γ 線分布モニター	定検時の被曝低減
	中性子分布モニター	異常検出
放射性廃棄物 処理・処分施設	γ 線分布モニター	固化廃棄物の一様性確認
		処理プラント内での被曝低減
核融合炉システム	中性子分布モニター	運転条件最適化
	γ 線モニター	被曝低減
加速器施設	X線、 γ 線、荷電粒子分布測定	被曝低減
		ビームロスモニタリング

(1) 被曝低減のための放射線モニタリング

長距離型システムを前提とすれば、運転中の放射線関連施設の安全モニタリングに適用することができる。しかし、PSFの耐放射線性を考えると、通常時から線量率が高い場所への適用には適さない。

他方、停止中の施設での作業においては、各位置での線量率を連続的にモニタリングしておくことが非常に重要である。PSF-TOF法の適用によって、線量率分布をモニタリングすれば、被曝低減に貢献することが可能である。

動力炉・核燃料開発事業団の高速実験炉「常陽」においては、このような目的のためにPSF-TOF法を適用している。図3.16に示すように、従来、TDLやサーベイメータを移動させながら測定していた線量率分布が、本手法によって十分に測定可能であることを示している。[42]

ただし、ここでの実験は通常の光ファイバーを用いず、PSFを直接PMTに接続して行われた。そのため、測定に際してはPMTや高圧電源等の機器を狭隘な領域に持ち込むことが必要

であった。通常の光ファイバーを併用する長距離型システムを用いれば、対象領域へ光ファイバーだけを持ち込めばよくなることから、今後、このような対象に対して長距離型システムを適用する意味は大きいといえることができる。

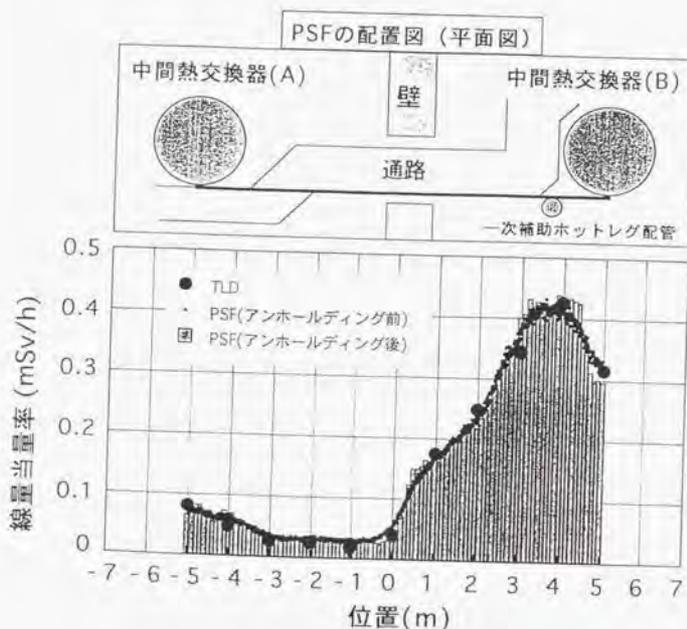


図 3.16 高速実験炉「常陽」における PSF-TOF 法による γ 線量率測定結果 [42]

(2) 非侵襲型線源分布モニタリング

PSF-TOF 法を非侵襲型の線源分布モニターとして使用できる可能性がある。この場合には、PSF を含む光ファイバーシステムを測定対象の表面に巻き付け、TOF 法によって表面上の線量率分布の測定を行う。測定対象としては、固化放射性廃棄物容器などが考えられる。また、核融合システムについては、大型炉は耐放射線性の観点から適用が困難であろうが、小規模な実験炉に対しては適用可能であることが期待される。

以下では、核融合中性子を対象にこのような非侵襲型の測定の可能性を検討した結果を示す。[41]

1) 14MeV 核融合中性子に対する応答特性

5m 長の PSF(Bicron, BCF-20) に対してコリメートした 14MeV 中性子を入射した際の、PSF-TOF 法による測定スペクトルを図 3.17 に示す。この時の測定条件は以下の通りである。

- PMT ゲイン: 6×10^5
- CFD ディスクリレベル: 1.5V

また、この時の空間分解能は約 15cm(FWHM)、測定効率率は 1.8×10^{-5} [counts/コア部への入射中性子] であった。

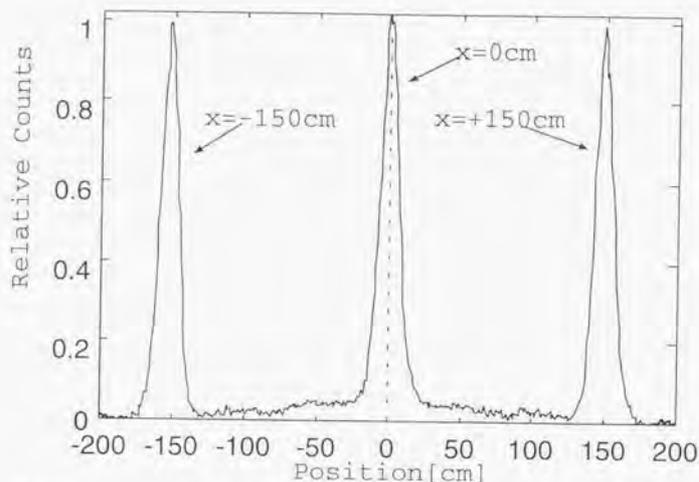


図 3.17 DT 核融合中性子が 5m 長光ファイバー上の 3 点に入射した場合の応答

2) 中性子発生プロファイル測定模擬実験

非侵襲型の中性子発生プロファイル測定の可能性を検討するため、加速器による DT 中性子源を用いて図 3.18 のような配置による模擬実験を行った。実験は東京大学工学部附属原子力工学研究施設ブランケット棟の 14MeV 中性子発生装置を用いて行った。

5m 長の PSF を直径 60cm の円形にし、DT 中性子源の周りにセットした。PSF を移動させ、PSF 環内での中性子源の位置を相対的に変化させながら測定を行った。

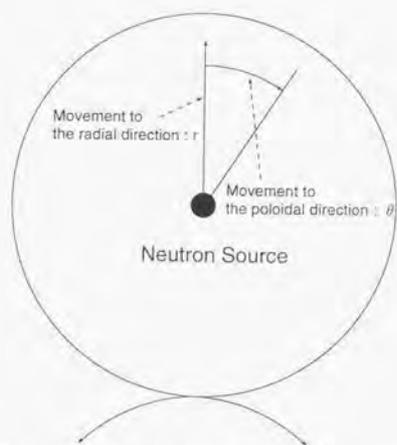


図 3.18 加速器 DT 中性子源による模擬実験体系

まず、角度 θ を一定とし、半径方向に線源の相対位置を移動させた場合の測定結果を、図 3.19に示す。図中には、比較のために立体角から計算されたスペクトルも同時に示した。計算においては、線源から PSF までの距離と、測定システムの立体角を考慮に入れてある。計算結果と測定結果がよく一致し、本システムにより、点状の線源の半径方向への移動が測定可能であることが示された。

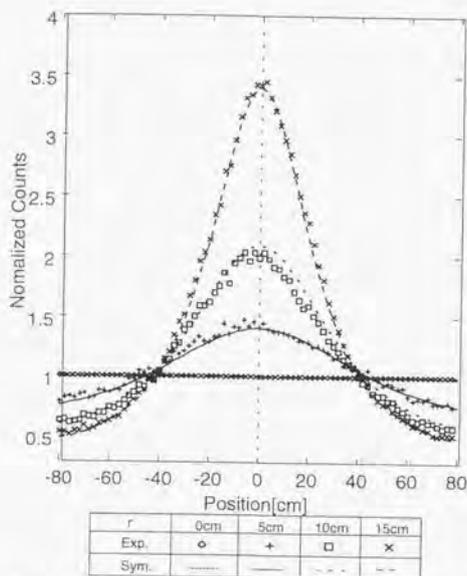


図 3.19 線源の相対位置を半径方向に移動させた場合の測定結果と計算結果の比較

また、半径方向の相対位置を一定とし、角度 θ を変化させた場合の測定結果を、図 3.20 に示す。図では、半径方向の相対位置を中心から 10cm に維持し、 θ を -40° 、 0° 、 $+40^\circ$ に変化させた場合のスペクトルの変化を示した。 θ の変化によってスペクトルのピーク位置が変化していることが確認できる。また、 θ とピーク位置の間には、図 3.21 のような良好なニアリティが確認できた。

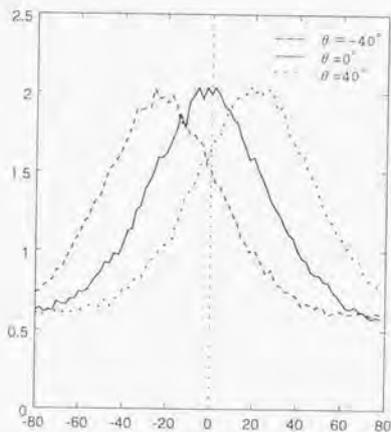


図 3.20 線源の相対位置を角度方向に移動させた場合の測定結果

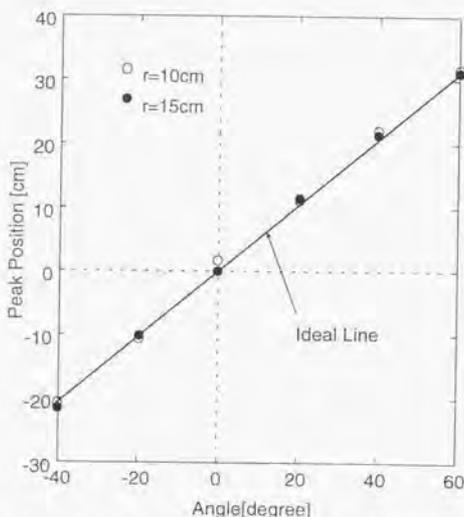


図 3.21 線源の相対位置を角度方向に移動させた場合の角度とピーク位置の関係

以上の結果より、対象領域を囲むように PSF をセットすることで、点状の高速中性子源の位置を測定可能であることが示された。3次元の形状を持つ線源の場合には、PSF を含む面の外側からの寄与が分解能劣化要因となる。従って、このような場合には、何らかのコレリメータを併用することが必要である。 γ 線を対象としても同様の測定を行うことが可能であり、固化された放射性廃棄物内容器内の線源分布の一樣性検査等に適用可能であるものと考えられる。

3) 加速器施設での使用

加速器施設における放射線モニタリングは、受動型と能動型の双方の測定器によって行われており、リアルタイムで測定を行う能動型システムには主に電離箱が適用されてきた。しかし、電離箱によって多くの点の放射線レベルを測定する場合、測定対象の各点に置かれた電離箱に対して高圧を供給し、さらに信号もそれぞれ独立したケーブルによって伝送する必要がある。[55],[56]

そこで、システムの簡略化を目指し、Pnophsky Long Ion Chamber (PLIC) と呼ばれるものが研究されてきた。PLIC は検出器としてガス充填型のケーブルを用いており、その片端からの信号と、加速器からのトリガー信号によって TOF 測定を行う。PLIC の構成を図 3.22 に示す。PLIC は、現在までのところ ATF (KEK) に PLIC に設置され、ロスモニターとして使用されている。[60]

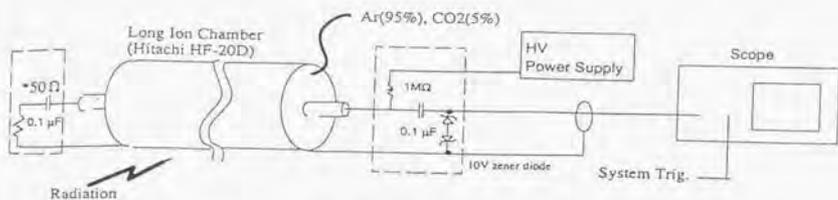


図 3.22 PLIC の構成 [60]

しかし、PLIC は外部から高圧を供給する必要がある上、加速器のような高い電磁環境の場所ではノイズが問題となる。そこで、これらの問題の小さい光ファイバーを用いる測定法が、取扱い性やS/Nの点から有利であるとの認識が高まりつつある。PSF-TOF法は光ファイバーを張っておくだけで放射線分布が測定できるという長所を持っており、将来的にPLICの代替物として使用されるものと期待できる。

3.1.7 まとめ

PSFと石英光ファイバーを併用する長距離型光ファイバーシステムに、TOF法を適用する手法について研究を行い、中性子分布測定システムとして有望であることを示した。50m長の石英光ファイバーを両端に接続することにより、空間分解能はPSFのみを使用する場合と比較して1/3程度まで悪化した。この原因は、主に光ファイバー中での時間分散によるものと考えられる。本システムによる中性子分布測定結果をSvカウンターを移動させながら測定した結果と比較した。分解能補正を行わない場合には本システムの測定は中性子束分布を明瞭に測定できなかったが、分解能補正手法を適用することにより、Svカウンターによるものとはほぼ同等の分解能で測定できることが示された。これらの結果により、本システムが原子力プラント等の狭隘な空間における長距離型放射線分布モニターとして有望であることが示された。

3.2 PSF-TOF 法以外の低線量領域用光ファイバー型放射線分布測定法

3.2.1 シンチレータ塗付光ファイバーによる放射線分布測定

光ファイバーの先端にシンチレータを塗付し、特別に開発した駆動装置によって光ファイバーを巻きとることによって位置分布を測定する方法である。名古屋大学のグループによって提案、開発され、いくつかの研究炉で中性子束分布を測定してその可能性を示した。[36],[37]

図 3.23 にシステムの概念を示す。シンチレータを移動させながら MCA(MCS モード) による測定を行い、あるディスクレベル以上の計数値の時間分布から放射線分布を測定する。

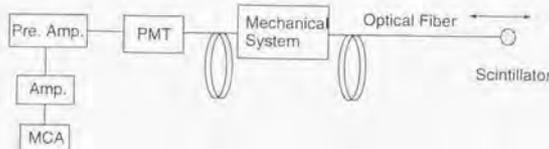


図 3.23 シンチレータ塗付光ファイバーによる移動型分布測定概念

シンチレータとしては、 ZnS(Ag) 、 CsI(Tl) 等が使用され、中性子を測定する場合には、 ZnS(Ag) 粉末に中性子コンバータとして ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^{232}\text{Th}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ を添加したものが用いられる。本システムの特徴は以下の通りである。

- 空間分解能: 駆動装置の精度に依存し、概ね 1mm 程度
- 測定効率:
光ファイバーのコア径と塗付されたシンチレータの体積によって決まり、大きな NaI(Tl) の結晶を用いるような一般的なシンチレーション検出器よりは低い。
- 時間応答特性:
位置分布をとるためには、対象領域に沿ってシンチレータを移動させることが必要であり、時間応答性は低いといえる。
- 耐放射線性:
用いられる光ファイバーの耐放射線性により決定される。耐放射線性の高い石英コア光ファイバーを用いれば、耐放射線性をかなり高くすることができる。

本手法によって京都大学臨界実験装置の熱中性子束分布を測定し、従来用いられてきた金線による測定結果と比較したものを、図 3.24 に示す。測定結果はよく一致しており、金線での測定に必要な時間、手間を考えると、本手法は非常に優れているといえる。

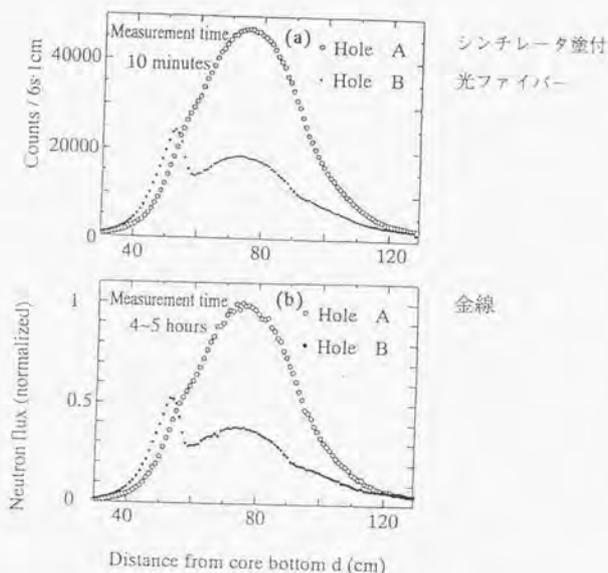


図 3.24 シンチレータ塗付光ファイバーによる熱中性子束分布測定結果 [37]

設置場所の状況が複雑なケースでは、移動測の適用は困難である。しかし、光ファイバーの先端にシンチレータを設置したものを複数本用意し、それぞれを測定対象の場所に設置すれば離散分布を測定することができる。シンチレータで発生した光子をそれぞれの光ファイバーで導き、マルチアノード型 PMT やイメージセンサーで測定すれば、1 個の検出器で離散分布の測定が可能である。

長距離にわたっての離散分布が測定したい場合には、移動型よりもこのような固定型の測定の方が適しているといえる。PSF, TOF 法や次に述べる導波路型シンチレータ法と比べて耐放射線性の低い構成要素がないことから、これらよりも高い放射線量率の場所に適用可能であろう。

3.2.2 導波路型シンチレータによる多点型離散分布測定法

複数の点における離散的な放射線分布を一度に測定するため、東芝によって提案された手法である。測定には、図 3.25 に示すように、ある程度の体積を持つシンチレータと波長シフト光ファイバー (WLSF) を併用する構造を用いる。シンチレータで発生したシンチレーション光は、WLSF 中で波長シフトを受けた後、WLSF に接続された通常の光ファイバー中を伝搬する。[38]

WLSF は通常の光ファイバーに比べて固有損失が大きいが、長さが数 cm 程度と短くその中の光の減衰は小さい。従って、このような構造を数珠つなぎにすることが可能であり、多くの点に有感部が存在する状態を実現できる。

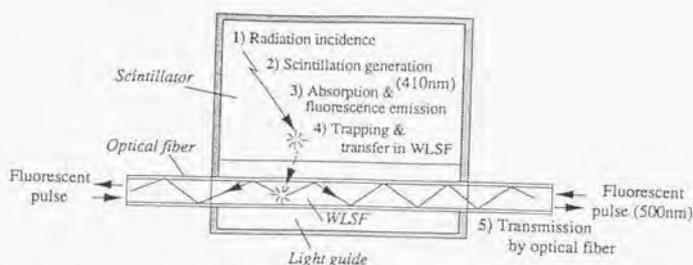


図 3.25 導波路型シンチレータの基本構造 [38]

位置分布の測定は、Time of Flight (TOF) 法を用いて行う。測定システムは、図 3.26 に示す通りである。数珠つなぎにした導波路型シンチレータからの光子を 2 つの光電子増倍管 (PMT) によって測定し、これらの時間差からどの導波路型シンチレータからの信号であるかを特定する。

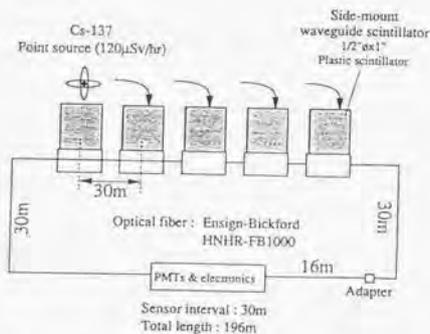


図 3.26 TOF 法による多点同時計測の概念 [38]

本測定手法の特徴は以下の通りである。

● 空間分解能:

TOF法を用いるため、シンチレータの発光時間分布によって空間分解能が決定される。例えばNaI(Tl)を用いる場合は減衰時間が $0.23 \mu\text{sec}$ と長いので、空間分解能は数10mとなる。プラスチックシンチレータを用いれば空間分解能は高くできるが、効率面でNaI(Tl)等の無機シンチレータに劣るという問題点がある。

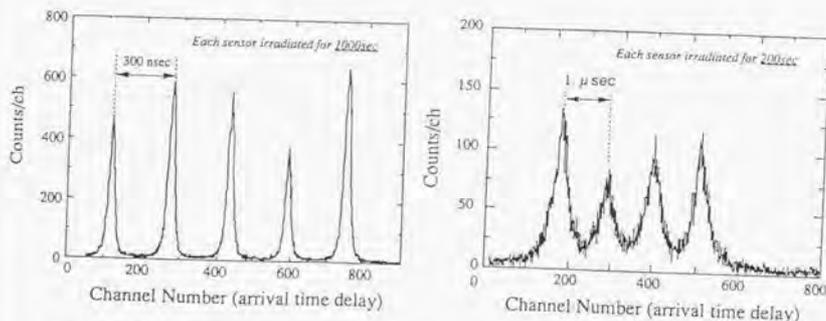
● 測定効率:

体積の大きいシンチレータで発生した光子をWLSFで集光する構造となっているため、光ファイバーだけで用いるよりも格段に測定効率は高い。

● 時間応答特性:

多数の点の放射線分布を一度に測定できるという点から、時間応答性は高いということが出来る。

5つのセンサーを用いた多点測定の結果を図3.27に示す。[38] (a)はプラスチックシンチレータを用いた場合、(b)はNaI(Tl)シンチレータを用いた場合をそれぞれ表す。(a)の方が各センサーからの信号の重なりが小さく、空間分解能に優れていることがわかる。一方、単位時間あたりの計数値は(b)の方が大きくなっており、測定効率はNaI(Tl)を用いた方が優れていることが示された。



(a) 有機シンチレータを用いた場合

(b) NaI(Tl)を用いた場合

図 3.27 導波路型シンチレータを用いた多点測定例 [38]

3.3 低線量率領域用システムに関するまとめ

3.3.1 各手法の特徴の比較

PSF-TOF法、及び上に述べた2つの分布測定手法の長短所を比較すると、表3.5が得られる。PSF-TOF法、及び導波路型シンチレータによる離散分布測定手法は、光ファイバーを設置しておけば放射線分布が一度に測定できるという長所を活かし、複雑な領域での長距離にわた

るモニタリングに適しているということが出来る。中でも、導波路型システムは、測定効率が高いことから、従来の原子力プラント内での環境モニタリングに置き換わることも可能であろう。

一方、PSF-TOF法は、効率こそ低いが、連続分布が測定可能であるという長所がある。従って、加速器でのビームロスモニターのように、より正確に放射線分布を測定したい場合に適している。また、形状的には導波路型システムよりもフレキシビリティが高いので、常陽において行われたような、狭い領域での分布測定に適しているということが出来る。

シンチレータ塗付光ファイバーによる移動型システムは、分布測定のために機械的に移動させなくてはならないという短所があるが、空間分解能が非常に高く、PSF-TOF法よりも短い距離での精密な分布測定に適している。また、シンチレータ塗付光ファイバーと二次元PMTのような光検出器を用いれば、固定型の長距離離散分布モニターも実現できる。

表 3.5 低線量率用放射線分布測定手法の比較

測定法	長所	短所
PSF-TOF 法	・連続分布の測定が可能 ・時間応答が速い	・1本だけでは測定効率が低い ・この3手法の中では、最も耐放射線性が低い
移動型分布測定	・空間分解能が高い(1mm程度) ・耐放射線性が高い	・分布測定のため、機械的な移動が必要 →時間応答性が低い
導波路型多点測定	・測定効率が高い ・移動を伴わない ・時間応答が速い	・空間分解能が低い ・死角が存在する

3.3.2 耐放射線性の比較

長期間連続使用を念頭に置いて適用可能な線量率の上限を検討した。使用期間は便宜的に10年間とした。

(1) シンチレータ塗付光ファイバー法

シンチレータ塗付光ファイバー法の場合は、使用される通常の光ファイバーの耐放射線性によって適用可能範囲が決定される。従って、ここでは耐放射線性が高いフッ素ドープ光ファイバーに対する照射実験の結果をもとに、線量率上限の概算を行った。

γ 線照射時の500nmにおける放射線誘起損失は、ある程度照射した後はNBOHCによるものが支配的となり、ほぼ一定の速度で増加するようになる。図2.6(a)によると、その速度は概ね 5×10^{-3} (dB/km)/Gy(SiO₂)程度である。そこで、100m中の損失が0.5倍になるまで(約30dB/km)使用できるとすれば、単純に割算をすると積算線量で6000 Gy(SiO₂)程度までとなる。従って、10年間を目安とすれば、線量率上限は約70 mGy(SiO₂)/hとなる。また、ここでは照射長を100mとしたが、これが短い場合には線量率範囲も広がる。

(2) PSF-TOF 法

PSF-TOF 法の耐放射線性を考える場合には、PSF 中の損失増についても考慮が必要である。図 2.21 の PSF への照射結果をもとにすると、1500 Gy の照射があった場合の PSF 中の損失は 400dB/km に達する。これは 0.6 倍/5m に相当する。一方、フッ素ドープ光ファイバーに 1500 Gy の照射があった場合の損失は、7.5dB/km 程度であろうと考えられ、これは 100m に換算すると 0.8 倍にあたる。従って、1500 Gy 照射時には、トータルで約 0.5 倍まで損失が生じることになる。そこで、10 年間の連続使用を念頭に置くと、1500 Gy は約 17 mGy/h に相当し、この程度の値が PSF-TOF 法の適用上限と考えられる。

(3) 導波路型法

導波路型法の耐放射線性は、WLSF 中の放射線誘起損失によって決定されるものと考えられ、開発者によると少なくとも 10^3 Gy 程度までは使用可能であるとされている。[39] しかし、PSF-TOF 法で用いられる PSF に比べて WLSF の長さが短いこともあり、PSF-TOF 法よりもや優れた耐放射線性を持つものと予想される。

第 4 章

高線量率領域用システム - 長波長発光利用システム -

4.1 はじめに

前章に示したように、いくつかの光ファイバーを用いる放射線分布計測手法が提案され、その可能性が示されてきた。しかし、これまで用いられてきたシンチレータは 400nm~500nm に発光ピークを持つため、光ファイバー中の放射線誘起損失の影響が大きく、適用可能な線量率の上限が低いという問題点があった。

本章においては、光ファイバーに基づく放射線測定システムを高線量率の場所に適用することを目指し、これまでよりも長波長の発光を利用する可能性について検討を行った結果を示す。長波長での発光はバンド間のエネルギー差が小さいため、非輻射遷移との競合が激しく、短波長発光に比べ発光強度が小さい傾向がある。しかし、ここでは従来の短波長システムでは対応が難しい高線量率領域への適用を念頭におき、強度は小さくとも長時間安定して測定できるシステムを目指した。

また、長波長発光を利用することの長所の一つに、従来、光分野で使用されている手法と波長域が同じであることが挙げられる。そこで、光ファイバー中の損失分布の測定に用いられている Optical Time Domain Reflectometry 法 (OTDR 法) に着目し、放射線誘起損失による測定結果への影響を補正することを試みた。

さらに、長波長の発光は発光の時定数が長い場合が多く、TOF 法による分布測定には適さない。そこで、N-MOS イメージセンサ、イメージインテンシフィアなどの光イメージセンサを用いて放射線分布を測定する手法について検討した。

4.2 希土類ドープシンチレータからの赤/近赤外発光

光通信分野においては、レーザーとしての使用を念頭におき、850nm 帯、1.3 μm 帯、1.5 μm 帯の発光について研究がなされてきた。しかし、このような長波長の発光を放射線計測に適用しようという試みは、これまでほとんど行われていなかった。[44] そこで、まず近赤外発光の探索を行うため、希土類イオンがドープされたシンチレータからの発光スペクトルを 1.1 μm までの範囲で測定した。希土類イオンはレーザー媒質において盛んに用いられ、適当な波長の励起光によって近赤外の発光をする例が多く報告されている。[45]

ここでは、 Gd_2O_3S を母材とし、 Pr^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} がドーブされたサンプルに γ 線を照射した場合の発光スペクトルの測定を行った。また、長時間放射線を照射した場合に、光ファイバー中の損失増による影響についても評価した。

4.2.1 希土類イオンからの発光特性

希土類元素とは、通常、La(原子番号57)からLu(原子番号71)までのランタノイド元素に、Sc(原子番号21)とY(原子番号39)を加えた17元素をいう。希土類元素の3価イオンのうち Ce^{3+} から Yb^{3+} に至るイオンは、1個~13個の4f電子を持ち、各イオンに特有のエネルギー準位をもつ。そのため、近紫外部から近赤外部にかけて、多彩な発光特性を示す。3価希土類イオンの4fⁿエネルギー準位を、図4.1に示す。[45]例えば、 Eu^{3+} は、発光準位から直下の準位までの幅が広く、発光の波長が長くても赤色程度である。一方、 Pr^{3+} や Yb^{3+} 等では、発光遷移におけるエネルギー差が小さいため、より長波長での発光が期待できる。

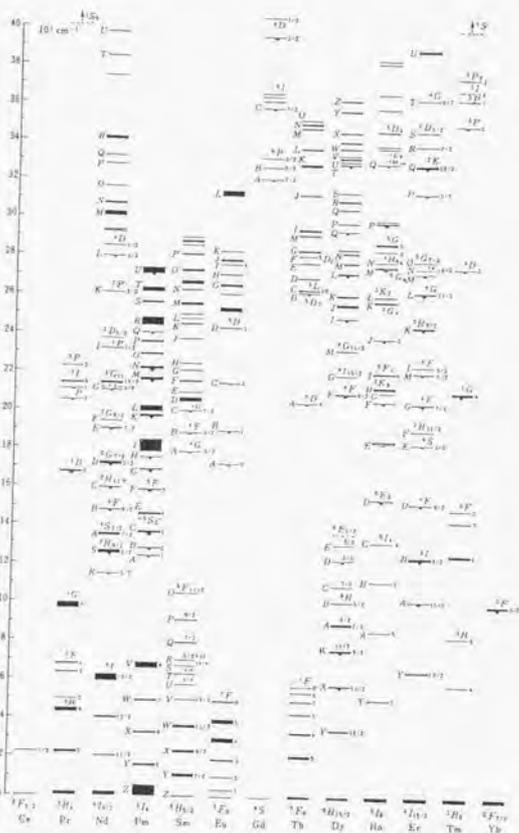


図 4.1 3 価希土類イオンのエネルギーレベル (出典:蛍光体ハンドブック、オーム社)[45]

4.2.2 γ 線照射時の発光スペクトル測定結果

コア径:600 μ m の石英光ファイバー (10m 長) の先端にシンチレータを設置し、 ^{60}Co γ 線照射下での発光スペクトルを測定した。スペクトルの測定には、簡易型の分光システム (Ocean Optics 社、S2000) を用いた。

測定された発光スペクトルを図 4.2 に示す。可視域において多くのピークが測定されているとともに、800nm 以上の近赤外領域に発光ピークが存在することが確認できた。

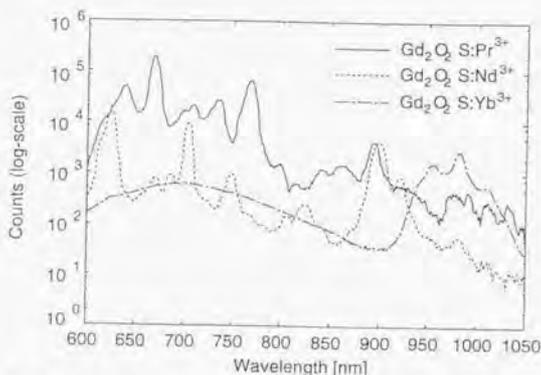


図 4.2 $Gd_2O_2S:Pr^{3+}$ 、 $Gd_2O_2S:Nd^{3+}$ 、及び $Gd_2O_2S:Yb^{3+}$ サンプルに ^{60}Co - γ 線を照射した場合の測定スペクトル

4.2.3 測定される発光スペクトルに対する放射線誘起損失の影響

長波長発光を利用することによる耐放射線性の向上を確認するため、 ^{60}Co γ 線源を用いた連続照射実験を行った。コア径:50 μm 、長さ 18m の光ファイバーの先端に $Gd_2O_2S:Pr^{3+}$ を密着させた状態でシンチレータから 10m の長さを束ね、 1.1×10^4 Gy(SiO_2)/h 場所にシンチレータとともに設置した。また、残りの 8m の部分を照射室外に導き、分光システムに接続した。測定は約 1.5 時間継続して行った。

照射を開始してから 1 分後、30 分後、及び 94 分後におけるスペクトル測定結果を、図 4.3 に示す。照射とともにスペクトルの形状が変化し、特に短波長領域のピークが急激に小さくなっていることがわかる。

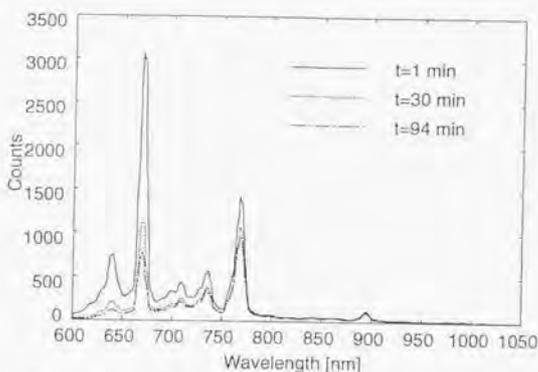


図 4.3 光ファイバーの先端に $Gd_2O_2S:Pr^{3+}$ を設置したサンプルにおいて測定される発光スペクトルの変化

また、図 4.4 に、(1)660nm~680nm、(2)750nm~780nm、(3)880nm~910nm のそれぞれのピーク面積の変化を示す。照射開始から 94 分後には、(1) のピークの面積は照射開始 1 分後の

約25%まで減少していることがわかる。一方、他の2つのピークの面積は、(1)のピークほど大きな影響を受けていない。この結果から、高線量率の領域で長時間の放射線測定を行う場合には、長波長発光を使用した方が有利であることが明らかに示された。実際のシステムを構築するにあたっては、

- 設置場所の線量率
- 光ファイバーの耐放射線性
- 発光強度

を考慮し、光波長フィルター等を用いることにより、使用する波長範囲を適宜選択することが求められる。すなわち、実際の測定に当たっては、光ファイバーで伝送した光子を光フィルターで選別した後、PMT等の光検出器で測定することになる。線量率が弱い場所では強度の大きい短波長側発光を主に利用し、線量率が高い場合には耐放射線性の高い長波長発光のみを利用するような選択を行えば、同様の測定系で広い範囲の線量率に対応できる。

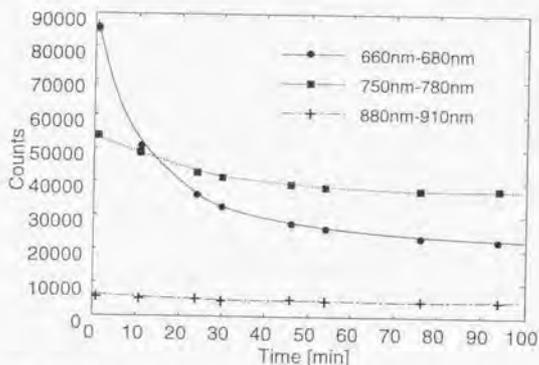


図 4.4 Gd₂O₂S:Pr³⁺からの3つの発光ピーク面積の測定結果の推移

4.2.4 近赤外発光の放射線計測への適用性検討

上に示したような近赤外発光の放射線計測への適用可能性を評価するため、まず線量率と発光強度の関係を測定した。焼結されたGd₂O₂S:Pr³⁺を600μmコア石英光ファイバーの先端に設置し、サンプルと⁶⁰Coγ線源の間の距離を変化させながら測定を行った。今回の測定では、各測定における照射時間が短い(数秒)こと、及び光ファイバーのうちごく先端部分のみが高い線量率にさらされていること、等の理由により、光ファイバー及びシンチレータに対する照射影響は小さいものと考えられる。

測定結果を図4.5に示す。ここでは880nm~910nmの発光ピークに着目した。線量率とピーク面積の間に良好な線形性が成り立っていることがわかる。従って、このような近赤外領域を放射線計測に適用することが可能であることが示された。

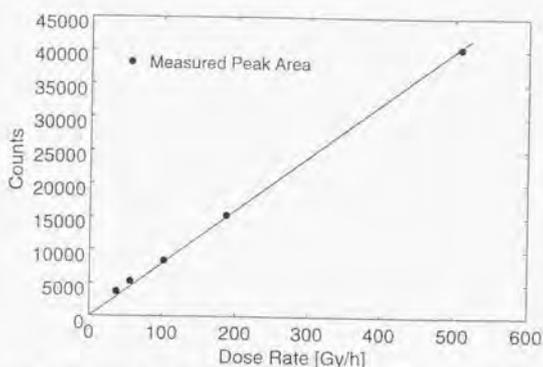


図 4.5 γ 線量率と $Gd_2O_3:Pr^{3+}$ からの 880nm~910nm のピーク面積との関係

4.3 OTDR 法による放射線誘起測定誤差の補正

近赤外領域における光ファイバー中の放射線誘起損失は、低波長領域におけるものよりも小さい。しかし、高い線量率の領域で長時間使用した場合には、徐々に損失が増加し、測定結果に影響を与える。そこで、ここでは、近赤外における損失増加による測定誤差を補正するため、Optical Time Domain Reflectometry 法 (OTDR 法) を適用することの可能性を検討した。

OTDR 法に基づくシステムにおいては、パルスレーザーが光ファイバー中に入射される。このレーザー光が光ファイバー中を伝搬すると、各点において散乱をうけ、その一部が入射側に向かって伝搬する。通常の OTDR 法では、最も散乱強度の大きいレイリー (Rayleigh) 散乱光を利用する。入射端におけるレイリー散乱光の時間分布は、次の式で表すことができる。[47]

$$P_1(x) = P_0 W \eta(z) \exp\left\{-\int_0^x \alpha_0(z) v_g dt\right\}. \quad (4.1)$$

ここで、

- P_0 : 入射光強度
- W : パルス幅
- v_g : 光の群速度
- $\alpha_0(z)$: 放射線誘起損失のない状態での損失分布
- $\eta(z)$: 後方散乱因子

をそれぞれ表す。パルス入射後の時間 t と距離 z の間には、 $z = v_g t / 2$ という関係がある。

光ファイバーが放射線照射を受けることによって光ファイバー中の損失分布が $\alpha_0(z) + \alpha(z)$ に変化した場合には、測定される光強度は次のようになる。

$$P_1(x) = P_0 W \eta(z) \exp\left\{-\int_0^x (\alpha_0(z) + \alpha(x)) v_g dt\right\}. \quad (4.2)$$

式4.1と式4.2を比較することにより、放射線によって増加した損失分布を知ることができる。

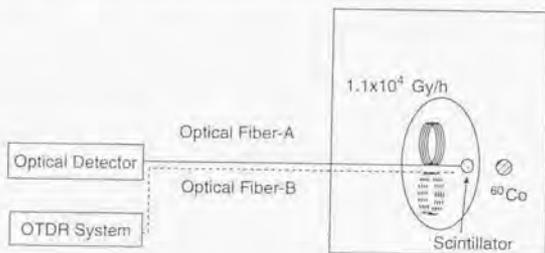
OTDR 法による測定自体を用いて照射線量分布を測定しようとする試みも行われたが、線量と損失増の関係は、温度、光ファイバー組成、光ファイバーの製造工程等の要因によって大きく変化する。従って、ここでは、OTDR 法をシンチレータによる測定結果の補正にのみ限定して使用することとした。

市販の OTDR システムでは、光通信分野での需要を反映して 850nm、1300nm、及び 1550nm のものが主に開発されている。そこで、ここでは 850nm の OTDR システムを用い、880nm～910nm の発光測定結果を補正する可能性について評価した。

4.3.1 実験体系

OTDR 法による補正手法の妥当性を評価するため、 ^{60}Co γ 線源を用いる模擬実験を実施した。実験体系を図 4.6 に示す。コア径 $50\mu\text{m}$ の石英光ファイバーを 18m 使用した。片端から 10m 分を束ねて $1.1 \times 10^4 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ の場所におき、先端に $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{P}_2^{3+}$ 設置した。残りの 8m を照射室外に導き、分光システムに接続した。

また、全く同じロットから 28m の光ファイバーを切り出し、片端から 20m 分を束ねて上記の分光測定用光ファイバーと同じ位置に設置した。また残りの 8m を照射室外に導き、波長 850nm の OTDR 装置(安藤電気 7140C)に接続した。これらの 2 つの光ファイバーは同じロットから切り出したものであり、照射時の挙動は同じであると考えられる。



(Optical Fiber-A and -B are from the same lot and their properties can be considered to be the same.)

図 4.6 OTDR 法による損失補正模擬実験

4.3.2 実験結果

OTDR 法によって測定された、10m 中の放射線誘起損失量の推移を図 4.7 に示す。線量率が $1.1 \times 10^4 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ と非常に高いこともあり、照射開始直後の 5 分間程度で損失は急激に増加した。その後は、増加速度が小さくなり、 γ 線照射の場合にみられる損失の飽和傾向が確認されている。

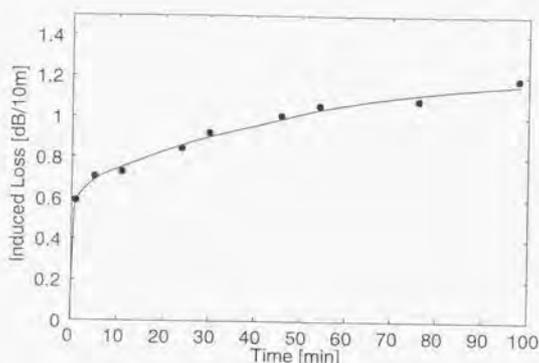


図 4.7 OTDR 法による損失測定結果

分光システムによって 880nm~910nm のピーク面積の推移を測定した結果を、図 4.8 に示す。図中の点線が OTDR 法による補正なしの場合を、実線が OTDR 法による補正を施した場合の結果を表す。照射開始直後のピーク面積の測定結果がないが、図 4.7 の結果を参考にすると、6200counts 程度であったものと考えられる。

補正なしの場合には 94 分後に約 4600counts 程度の測定結果となっており、面積の減少が 20% 以上に達していることになる。一方、OTDR 法による補正を施した場合には、測定を通じて 5% 以内の誤差でほぼ一定の測定結果が得られていることがわかる。

本補正手法においては、光ファイバー中の放射線誘起損失が補正対象であり、シンチレータ自体の発光量の低下は考慮されていない。従って、図 4.8 において徐々に強度が低下しているように観測されるのは、シンチレータに対する放射線照射の影響ではないと考えられる。

このような測定結果から、本補正手法を適用すれば、光ファイバー型放射線測定手法の適用可能範囲の拡大が可能であることが確認できた。

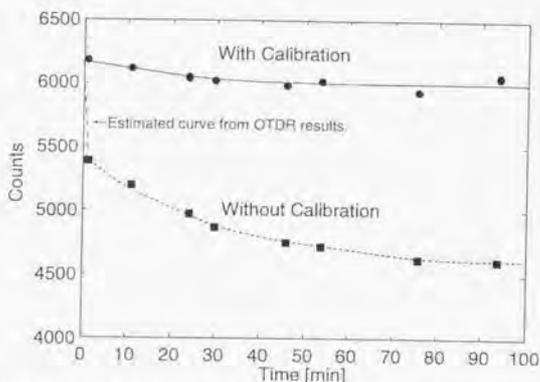


図 4.8 OTDR 法による補正手法を適用する場合としない場合のピーク面積測定結果の推移

4.4 分布測定手法の検討

4.4.1 近赤外発光に基づく放射線分布測定法の概念

ここで検討しているような近赤外域での発光は、可視域の光に比べて発光の減衰時間が長いという特徴がある。そのため、分布測定にあたって、TOF法の適用は困難である。

また、光ファイバーによる集光効率の悪さのため、発光のごく一部しか検出器に導けない上、減衰時間が長いために光子の到達時間分布がブロードになる。従って、従来の放射線計測システムで用いられているようなパルス法を適用しても、十分なパルス波高が得られない。このような点を考えると、長波長発光による放射線計測では、パルス計数法よりも直流法の方が適しているといえることができる。

そこで、近赤外発光を用いる分布測定システムとして、図4.9に示すようなものを考え、その可能性を検討した。本システムにおいては、複数本の光ファイバーの先端にそれぞれ近赤外で発光するシンチレータを設置し、測定対象とする場所に置く。その際、全ての光ファイバーが1本の経路上に存在するように配置する。光ファイバーはもう一方の端を束ね、光波長フィルターによって低波長側の成分を除いた後、CCDカメラ、MOSリニアイメージセンサー等のイメージセンサーに接続する。線量率が低い場所に設置する場合には、波長フィルターとイメージセンサーの間にイメージインテンシファイア(II)を挿入し、入射光を増倍した後、測定を行う。

また、同じロットから切り出した光ファイバーを、この経路に沿って同様に設置し、一端をOTDR装置に接続する。このような配置とすることにより、OTDR法によって測定された光ファイバー上の放射線線誘起損失分布から、全ての点での測定結果に対して補正を行うことが可能となる。

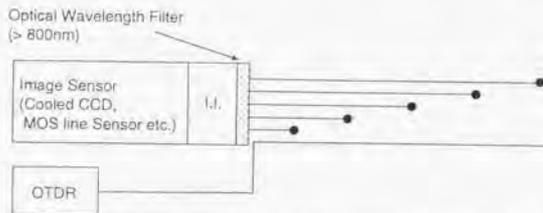


図 4.9 長波長発光に基づく放射線分布測定システムの概念

4.4.2 分布測定模擬実験

(1) リニアリティの確認

図4.9に示したようなシステムによる放射線分布測定の可能性を実証するため、 ^{60}Co γ 線源を用いた模擬実験を実施した。10m長の光ファイバー(コア径:200 μm 、純粋石英コアSI型)を4本用意し、それぞれの先端に $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Pr}$ シンチレータを設置した。各シンチレータを、 2.2×10^3 Gy(SiO_2)/h、 1.0×10^3 Gy(SiO_2)/h、 5.1×10^2 Gy(SiO_2)/h、及び 1.9×10^2 Gy(SiO_2)/hの線量率の場所にそれぞれ設置した。シンチレータをつけていない側の光ファイバー端は束ね、光波長フィルター(800nm以上を透過するタイプ)を介してN-MOSリニアイメージセンサーに接続した。今回は短時間の測定であったので、OTDR法による補正を行うためのセッティングは行わなかった。N-MOSリニアイメージセンサーによる測定結果を、図4.10に示す。

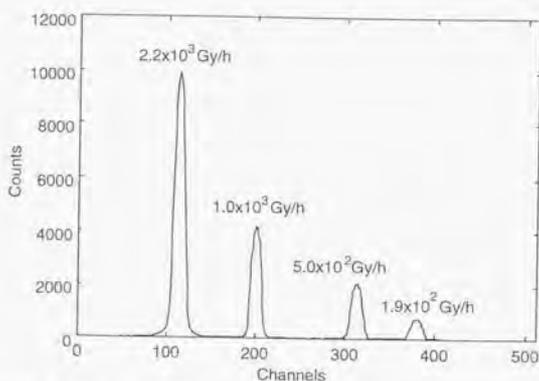


図 4.10 N-MOS リニアイメージセンサーを用いた放射線分布測定結果

また、4 点の全てを 1.0×10^3 Gy/h の場所に設置した場合の測定結果を、図 4.11 に示す。シンチレータからの発光の集光効率、イメージセンサーへの接続効率等の違いのため、若干のばらつきがあることがわかる。

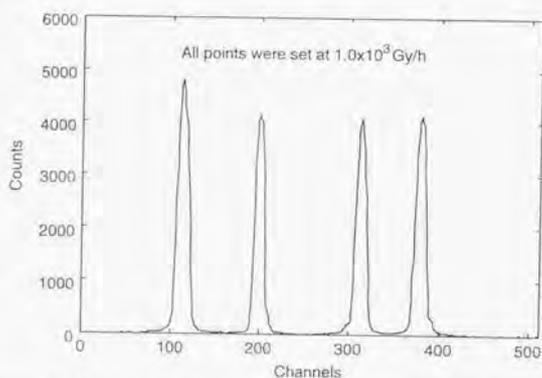


図 4.11 N-MOS リニアイメージセンサーを用いた放射線分布測定結果
(一様な線量率の場合)

図 4.11 から求められる各光ファイバシステムの効率分布をもとに、図 4.10 のピーク面積を校正し、線量率を横軸にとってプロットした結果、図 4.12 が得られた。線量率とピーク面積の間に良好なリニアリティが成り立っていることがわかる。このような結果から、本システムによる放射線分布測定可能性が実証できた。

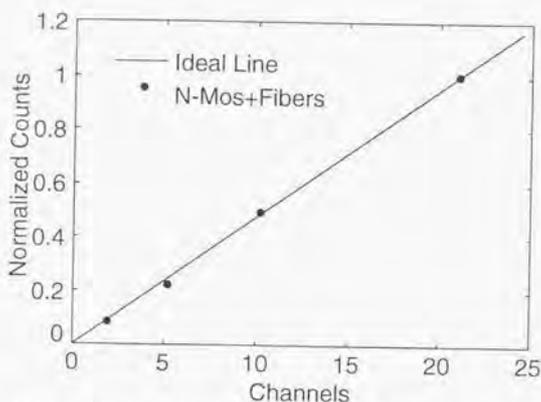


図 4.12 N-MOS リニアイメージセンサーを用いた放射線分布測定システムにおける線量率とビーク面積の関係

(2) OTDR 法による補正法の可能性実証

近赤外の発光を用いる光ファイバー型放射線計測システムでは、入射光波長の近い OTDR 法を併用することによって損失の補正が可能であることは、前述の通りである。そこで、ここでは OTDR 法による補正手法を、イメージセンサーを用いた分布測定へ適用した。

実験体系を図 4.13 に示す。センサーファイバーとしては、コア径:50 μm の Ge ドープ GI 型光ファイバーを用いた。シンチレータを設置した先端部は、全て線量率: $5 \times 10^3 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ の場所に置いた。3本のサンプル光ファイバーは、それぞれ次のような経路でセンサー部に導いた。

- No-1: 直接センサー部へ
- No-2: 5m 束ねたものを $1 \times 10^3 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ の場所に設置した後、センサー部へ
- No-3: 10m 束ねたものを $1 \times 10^3 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ の場所に設置した後、センサー部へ

また、同じロットから取り出した光ファイバーをサンプル光ファイバーに沿わせる形で設置し、一端を OTDR 装置 (入射レーザー波長: 850nm) に接続した。OTDR 用光ファイバーは、15m を $1 \times 10^3 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ の場所に置いた。

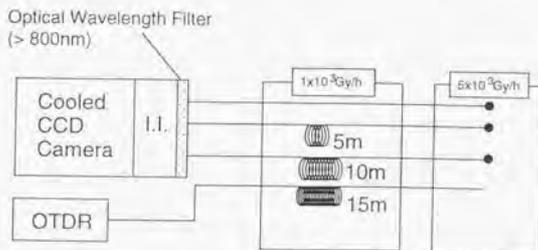


図 4.13 OTDR 法による損失補正法の可能性実証のための実験体系

OTDR 法による補正を行う前の、No-1~No-3のサンプルに関する測定結果(ピーク高さ)の推移を、図 4.14 に示す。照射開始 2 分後のピーク値によって各測定結果を規格化した。

800 Gy(SiO_2) 以上の照射後も、No-1 のサンプルについてはピーク値がほぼ一定であることがわかる。それに対し、No-2、及び No-3 のサンプルでは、照射とともにピーク値が減少し、特に No-3 のサンプルでは 75% 程度まで減少した。

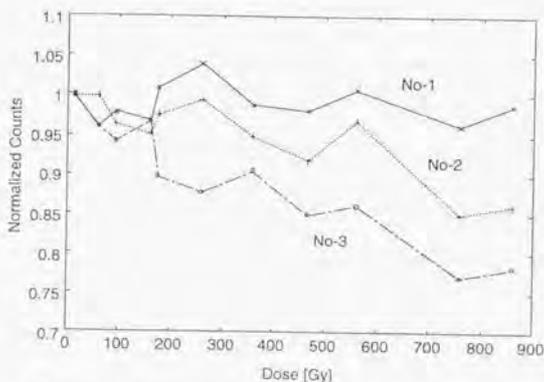


図 4.14 分布測定における測定結果の推移 (損失補正前)

次に、同時に行った OTDR 法による測定結果をもとに、No-2、No-3 のサンプルに関する測定結果を補正したものを、図 4.15 に示す。どちらの測定結果も $\pm 8\%$ 程度の範囲で一定値を示しており、本手法を適用することによって、分布測定でも放射線誘起損失の影響を補正できることが示された。

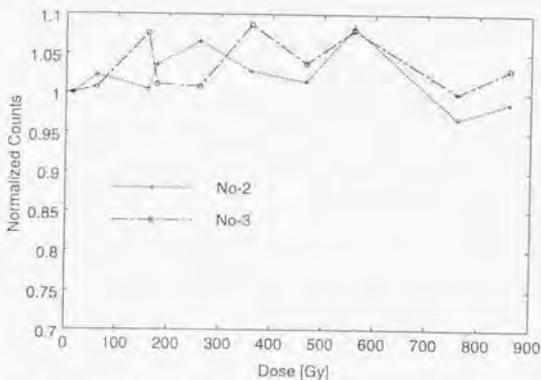


図 4.15 分布測定における測定結果の推移 (損失補正後)

図 4.14、図 4.15 のどちらを見ても、測定結果にかなりのばらつきがあることがわかる。これは、I.I. のピクセル間、あるいは時間的なゲインのばらつきによるものと考えられる。従って、I.I. を用いる場合には、測定精度がそれほど良くないことを認識しておく必要がある。

また、ここで行った実験では、実験時間の短縮を図るため、放射線に弱いGeドープコアGI型光ファイバーを用いている。実際に高線量率の場所へ適用する場合には、耐放射線性の高いSI型光ファイバーを選択すべきである。GeドープコアGI型光ファイバー、FドープコアSI型光ファイバーのそれぞれに対して、 ^{60}Co γ 線の照射を行った結果を比較して、表4.1に示す。すなわち、50m長の光ファイバーを使用する場合に、GeドープコアGI型で12.5 dB (0.06倍)の損失が生じている時点で、FドープコアSI型では1.7 dB (0.68倍)の損失増加に留まっていることになる。従って、FドープコアSI型を用いれば、放射線分布測定システムの耐放射線性を飛躍的に増加させることができる。

表4.1 FドープコアSI型光ファイバーとGeドープコアGI型光ファイバーの放射線誘起損失量の比較

種類	線量率 [Gy(SiO ₂)/h]	波長 [nm]	線量 [Gy(SiO ₂)]	損失増加 [dB/km]
FドープSI	1.6×10^3	800	533	34
GeドープGI	8.5×10^2	850	430	250

4.4.3 近赤外光利用システムの適用可能範囲

(1) 線量率上限に関する検討

前節までの検討から、近赤外光をイメージセンサーで測定するシステムにより、放射線分布測定が可能であることが示された。ここでは、その適用可能な線量率範囲について、概算的な検討を行った。

特に γ 線照射の場合には、線量率によって放射線誘起損失の大きさが異なる、という特徴があるため、適用可能範囲を評価するためには実際に用いられる場所での線量率を用いて評価することが必要である。しかし、実験時間等の制約のため、実際の評価にあたっては高い線量率での加速試験しか方法がない状況である。ここでは、 10^3 Gy(SiO₂)/h以上の線量率で照射を行った結果から、安全側の評価を行った。

図2.6を見ると、 1.6×10^3 Gy(SiO₂)/hで照射したケースでは、照射開始直後に損失が40dB/kmに達した後、30dB/km程度で安定していることがわかる。例えば、センサー用光ファイバーとして100mのものを用いる場合、30dB/kmは0.5倍まで強度が減少することを意味するが、OTDR法等による補正を行えば、十分に補正可能なレベルである。

10^3 Gy(SiO₂)/hで例えば10年間連続使用すると、積算線量は約 9×10^7 Gy(SiO₂)となる。図2.16の原研による実験結果を見ると、この程度の線量までは損失は非常に遅い速度で増加しており、急激に損失が増加することはないものと考えられる。また、図2.6は常温での実験結果であり、高線量率の領域では一般的に温度が高いという傾向を考えると、さらに適用範囲は広いものと考えられる。

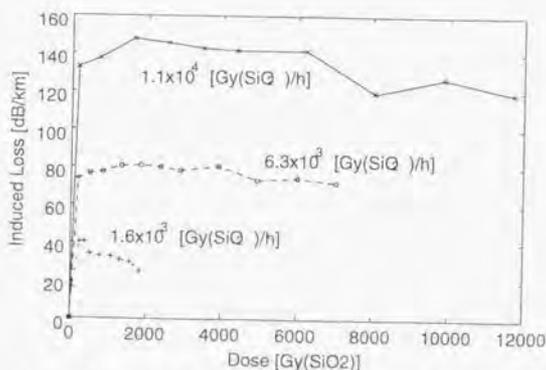


図 4.16 フッ素ドープ石英コア SI 型光ファイバーに γ 線を照射した際の 800nm における損失増加特性

(2) 線量率下限の検討

適用可能な線量率の下限は、光ファイバーからの出射光による信号と、CCD カメラや I.I. のノイズとの兼ね合いによって決定される。

ここでは、コア径:600 μ m、長さ:10m の光ファイバーの先端に $Gd_2O_3:S:Pr$ シンチレータを設置し、 ^{137}Cs γ 線源を用いて測定を行った。光ファイバーからの出射光のうち 800nm 以下の成分を波長フィルタで取り除き、I.I. で増倍した後、冷却 CCD カメラによって測定した。測定の際の CCD カメラの積算時間は 5 秒とした。

図 4.17 に線量率とピーク計数値の関係を示す。0.8 Gy(SiO₂)/h 程度まで十分にリニアリティが成り立っており、適用可能であることがわかる。安全モニターとして使用する場合には、5 秒という積算時間は長すぎると考えられるが、

- さらに大口径の (1mm 以上) 光ファイバーを用いる
- I.I. の増倍度を高くする

等の方法により、短い積算時間で測定可能となるものと考えられる。従って、測定下限としては、0.1 Gy(SiO₂)/h 以下とすることも期待でき、軽水炉一次系配管等への適用も可能であろう。

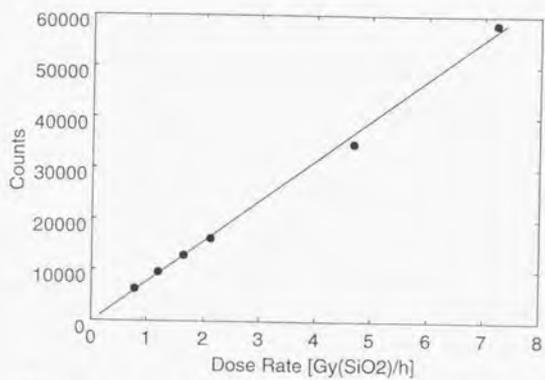


図 4.17 600 μ m コア光ファイバーを用いた場合の測定結果

4.5 高線量率領域用ガラスシンチレーティング 光ファイバーに関する基礎研究

現在までに開発、市販されているシンチレーティング光ファイバーはプラスチック性のものであり、発光波長も400nm~500nm程度にピーク波長をもつ。従って、シンチレーティング光ファイバー自体、及び長距離測定の場合には接続される通常の光ファイバーにおける放射線誘起損失により、高い線量率の場所への適用は困難であるという問題点があった。耐放射線性という観点からみると、放射線誘起損失の小さい赤や近赤外の波長域で発光するシンチレーティング光ファイバーが望ましい。また、序論において述べたように、石英光ファイバーとプラスチック光ファイバーを比較すると、石英光ファイバーの方が耐放射線性に優れている、という一般的な傾向がある。そこで、本研究においては、

- 発光イオンとしてレーザー等に用いられている希土類イオン
- 光ファイバーコア材料としてガラス

をそれぞれ選択し、放射線計測に適した新型シンチレーティング光ファイバーの開発を目指した。

4.5.1 希土類イオンの検討

ガラスシンチレーティング光ファイバーに適した発光イオンの選択を行うため、フッリン酸塩ガラスを母材として希土類イオンがソープされたサンプルを作製し、 γ 線照射時の発光スペクトルを測定した。ここで作製したフッリン酸塩ガラスの組成は、 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3 + \text{BaF}_2 + \text{SrF}_2 + \text{Ln}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2$ というものであり、Lnの位置にいくつかの希土類イオンが入る。

Eu^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Sm^{3+} 及び Tb^{3+} を発光イオンとしたサンプルを、コア径600 μm 、長さ6mの石英光ファイバーの先端に設置し、 ^{60}Co γ 線源近傍の、 $1.3 \times 10^3 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ の場所に置いた。もう一方の端からの出射光のスペクトルを分光システムによって測定した結果を、図4.18に示す。

650nm以下の波長域には多くのピークが観測されたが、700nm程度以上では、 Eu^{3+} をドープしたもののみが十分な発光強度を示した。従って、 Eu^{3+} がガラスシンチレーティング光ファイバー中の発光イオンとして、有望であることが示された。

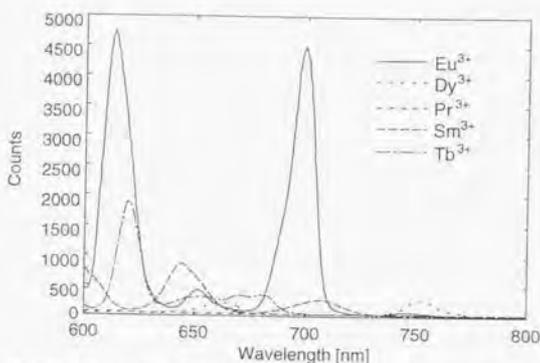


図 4.18 希土類をドーブしたフッりん酸塩ガラスからの発光スペクトル測定結果
 (^{60}Co γ 線源、 $1.3 \times 10^3 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$)

4.5.2 母材ガラスの検討

次に、光ファイバーのコア材として、どのようなガラスが適しているかについての検討を行った。Eu³⁺をフッりん酸塩ガラス (FP)、ZBLAN ガラス、石英ガラス (SiO₂) にドーブし、 ^{60}Co γ 線照射下での発光測定を行った。フッりん酸塩ガラスや ZBLAN ガラスは、発光効率の大きい母材ガラスであり、レーザー媒質に用いられている。石英ガラスよりも大きい発光効率を目指すために、ここで検討した。[48][49]

測定にあたっては、光ファイバーの先端にサンプルを設置した状態で照射し、もう一方の端からの出射光のスペクトルを測定した。図 4.19 に測定結果を示す。これを見ると、次のようなことがわかる。

- フッりん酸塩ガラスを母材としたサンプルの発光が最も大きく、ついで ZBLAN ガラス、石英ガラスの順である。
- 石英ガラスは他の 2 つの特殊なガラスに比べて強度は小さいものの、700nm 付近のピークで見て、1/2 弱程度には達している。

石英ガラスは他の 2 種類のものに比べて作製が容易であり、しかも通常の石英光ファイバーとの接続性が高い、という長所がある。従って、強度は 1/2 程度となっても、実用性を考えると石英ガラスを母材とするサンプルが有望であると考えられる。

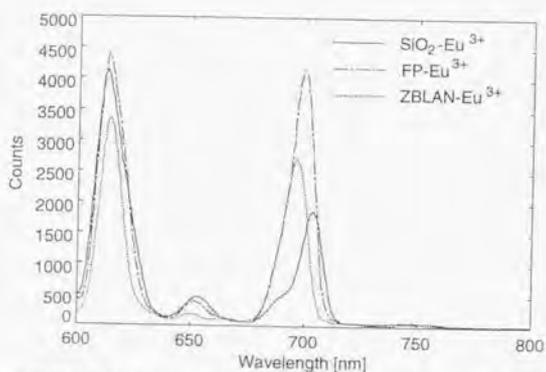


図 4.19 3種類の母材ガラスに Eu^{3+} をドープしたサンプルにおいて測定された発光スペクトル (^{60}Co γ 線源, $1.3 \times 10^3 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$)

4.5.3 今後の課題

ここでの検討により、現実的な材料としては、石英ガラスに Eu^{3+} イオンを添加したものが有望であることがわかった。700nm 程度に発光ピークがあることから、石英コア光ファイバーと組み合わせて用いれば、これまでの 400nm~500nm の発光を用いる場合に比べ、有利であると考えられる。

今後は、 Eu^{3+} の添加された石英ガラスの耐放射線性について評価し、センサーファイバー自体の劣化の程度を確認しておく必要がある。 γ 線照射実験等を通じ、添加量と発光量、及び放射線誘起損失量の関係の評価し、組成の最適化を行うことが必要である。

4.6 まとめ

光ファイバー型放射線測定システムの耐放射線性向上を目指し、近赤外域での長波長発光と光ファイバーを組み合わせた放射線計測システムについて検討を行った。線量率と計数値の間に良好なリニアリティが存在することを確認した。また、束ねたセンサー光ファイバーを冷却 CCD カメラや N-MOS リニアイメージセンサーに接続することにより、離散型の放射線分布測定システムが構築できることを確認した。線量率が低い場合には、CCD 等の前段に I.I. を設置することにより、適用可能な線量率の下限を引き下げることが可能であることを示した。

また、近赤外光を用いる場合でも光ファイバー中の放射線誘起損失は増加する。そこで、従来通信分野で主に用いられてきた OTDR 法によって損失の影響を補正する手法について検討し、その可能性を実証した。

近赤外域利用システムの適用可能範囲について検討を行った。線量率の上限は光ファイバー中の放射線誘起損失によって決定されるが、耐放射線性の高い光ファイバーを用いれば、 10^2 Gy(SiO₂)/h 程度までは数年の寿命で使用可能であるものと考えられる。また、線量率の下限は、光ファイバーのコア径と I.I. の増倍度によって決定される。コア径:1mm の光ファイバーを用い、 $10^3 \sim 10^4$ のゲインを持つ I.I. を併用すれば、0.1 Gy(SiO₂)/h 程度までは 1 秒程度の測定時間で測定できるものと考えられる。

高線量率領域への適用を念頭に置き、長波長発光型ガラスシンチレーティング光ファイバーについて検討を行った。製造の容易さ、取り扱い性等を考えると、石英ガラスに Eu³⁺ イオンをドープしたものが有望であることが示された。今後、光ファイバー化するとともに、発光量、放射線誘起損失量等を指標として、イオンドープ量の最適化を行う必要がある。

第 5 章

光ファイバー放射線分布測定法に関する まとめ

ここまで示したような数種類の光ファイバー型放射線分布測定手法は、それぞれの原理、システムにより、適用可能な放射線レベルが異なる。ここでは、特に原子力プラントの運転中、停止中について、どの手法が適用可能かについて整理した。また、加速器施設や放射性廃棄物関連施設についても、可能な範囲で整理を行った。

5.1 原子力プラント

原子力プラントの運転中、停止中の線量率レベルと、光ファイバーによる放射線分布測定法が適用可能な線量率範囲を整理すると、図 5.1 が得られる。図中の Zone 番号は、図 5.2のものに対応する。[50]

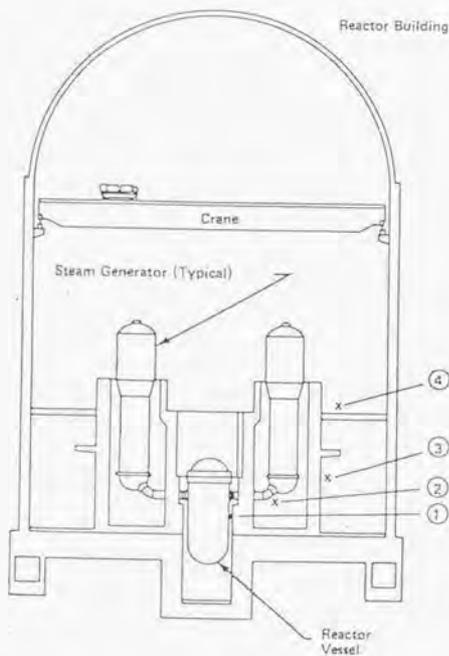


図 5.2 原子力プラント内の Zone 分類

導波路型シンチレータ、PSF-TOF 法の耐放射線性はほぼ同程度であり、上限は数 10mGy/h であろう。導波路型が 10mSv/h 程度まで、PSF-TOF 法はそれよりもやや低い線量率の領域まで適用可能であろう。従って、停止中であれば、一次配管領域でも長時間の使用が可能である。しかし、運転中に継続使用すると、一次配管領域の線量率の高まりとともに損失が大きくなり、影響が生じて来るものと考えられる。従って、これらの使用方法としては、

- 運転中にも継続使用する場合は、軽水炉一次配管領域外 (図 5.2 の Zone 3、4) でのみ使用
- 停止中の作業被曝低減のための短期間の使用に限定し、配管領域にも適用

という形が考えられる。停止中のみの短期間の使用であれば、原子炉容器周辺でも使用可能であるものと考えられ、システムの可搬性を高め、必要がある時にのみ使用する、という使い方が適しているであろう。最近ではマルチアノード型の PMT も開発され、複数系統の光ファイバーを一度に処理するシステムも構築できる。従って、複数系統分のファイバーを効率良く PMT に接続するためのコネクタを開発し、システムのフレキシビリティを高めることが求められる。

運転中の原子力プラントの、Zone 3、4 以外での放射線分布測定を行う場合には、導波路型法、PSF-TOF 法ともに寿命が短すぎるものと考えられる。一方、長波長発光を用いる方法は、

- 運転中の軽水炉の一次系配管領域 (Zone2)
- 運転中の高速炉の一次系配管領域

での長期使用が可能である。原子炉容器周辺や原子炉容器内への適用は今のところ困難だが、光ファイバー放射線分布測定法の適用範囲の拡大が可能であるものと期待される。

5.2 加速器施設

加速器施設内の線量率分布は、ビームラインや遮蔽との位置関係により、大きく変化する。管理区域内の人が常時立ち入る場所の線量率が障害防止法等によって制限されており、線量率はかなり低いといえることができる。[55]-[59] 従って、これらの場所に対しては、導波路型、PSF-TOF法を適用することが可能であろう。

一方、加速器では、運転中にビームのロスが生じるケースがあり、その近傍では線量率が高くなる。例えば、シンクロトロンにおけるビームロスには、次のようなものがある。[54]

- ビーム入射時のロス

入射時に失われるビームの多くは直接入射用セプタム電磁石をたたくか、あるいは数ターン間にセプタムに衝突するかして、セプタム付近で失われる。

- 加速時

加速中のビームロスは、シンクロトロン振動の安定領域から逸脱した粒子が軌道を外れることによるものと考えられる。運転調整を続けるうちに次第に改善されるが、経験的にシンクロトロンに入射捕獲されたビームの10~20%が加速途中で失われるとされている。

- ビーム取り出し時

ビームの取り出しには、キッカー電磁石とセプタム電磁石を用いる速い取り出し、共鳴現象を利用する遅い取り出しという方法があり、速い取り出しで90%、遅い取り出しで70~80%の取り出し効率が達成されている。また、内部ターゲットによって2次粒子を生成するケースでは、全ての加速粒子がリング内で失われる。

ビームロスに起因する線量の評価には、どの位置で、どの程度の損失が生じるかという情報が必要であるため、精度良い評価は難しい。米国ANLのAdvanced Photon Source (APS)について、ターゲットでのビーム損失に起因する線量率を計算によって評価した例では、ターゲット付近では56cm厚の遮蔽の外側でも最大500mrem/hに達するとの結果が得られている。[57]

また、CERNのLEP(Large Electron Positron collider)の加速トンネルのうち、直線部分の1つの終端部で測定された線量率の推移を図5.3に示す。図の右側の1995年11月2~4日のデータでは、運転中の線量率が100 mSv/hに達しており、放射線レベルがかなり高くなっていることが分かる。[58] 従って、PSF-TOF法、導波路法では長期間の連続使用は困難と考えられ、石英光ファイバーとシンチレータを組み合わせたシステムを適用することが必要である。

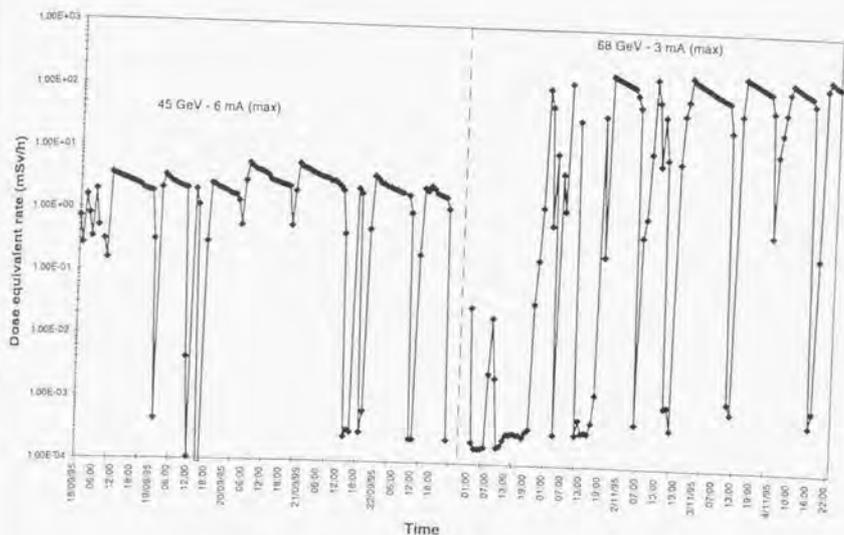


図 5.3 CERN LEP の直線部終端近傍での線量率測定結果 [58]

5.3 放射性廃棄物処理施設

放射性廃棄物処理施設でも、処理用タンクの放射能レベルは非常に高いが、壁を隔てたセル外では $10 \mu\text{Sv/h}$ まで線量率は低くなっている。従って、このような場所については、導波路法や PSF-TOF 法の適用が可能であろう。

一方、セル内の放射線レベルについては、新溶解槽据え付け工事の際の除染作業前の放射線レベルが公開されており、床面で数 10Sv/h であったとの情報が公開されている。また、タンク表面の線量率については、

- 高レベル廃液貯蔵タンク表面: $\text{max. } 1\text{e}16\text{Bq/m}^3 = 1000\text{Sv/h}$
- 中レベル廃液貯蔵タンク表面: $\text{max. } 1\text{e}12\text{Bq/m}^3 = 100\text{mSv/h}$

程度であろうとの概算結果がある。[61]-[65] 従って、セル内の放射線モニタリングに可視域のシステムを長期間使用することはかなり困難であるということができ、近赤外光を用いたシステムを適用すべきである。また、除染作業時のようなプラント停止時に使用する場合には、除染開始直後の高線量率状態では近赤外発光利用システムを用い、その後、レベルが低下した後は可視発光利用システムに切替えるという使用方法が適しているであろう。



III. 光ファイバーセンサーによるプラントモニタリングに関する検討

第 6 章

一般的検討

6.1 検討に当たっての考え方

II.においてみたように、光ファイバーを用いる放射線分布測定法について研究が行われ、長距離にわたる放射線分布が測定可能なシステムが開発されている。また、近赤外発光を用いる新しい方法により、従来よりも高い線量率の場所で長期間使用できるシステムの可能性が示された。このような状況から、光ファイバーを用いる放射線測定システムの原子力プラントへの適用は、かなり現実性を持ってきたものと考えられる。

一方、光ファイバーセンサーによる物理量測定法については以前から研究が進められており、温度、圧力、流量等の測定可能なセンサーが開発され、既に市販されているものも多い。

そこで、ここでは放射線以外の測定を対象とする光ファイバーセンサーも含め、光ファイバーセンサーによってプラントの計装・制御を行うことの可能性について検討を行った。プラントとしては、原子力プラントを対象とし、まず現在までに原子力プラント計装において用いられてきた測定手法を整理した (APPENDIX-A)。次に、これまで開発されてきた光ファイバーセンサー技術を整理するとともに、原子力プラント計装への適用性を概略的に検討した (APPENDIX-B)。

光ファイバーセンサーを原子力プラントへ適用しようとする試みは以前からなされているが、光ファイバーへの放射線照射実験の結果を踏まえ、どの技術が適しているかを検討した例は少ない。プラントへの適用に際しては、

- ベネトレーション部の構造をどうするか
- コスト的に見合うかどうか

というような現実的な問題の検討が今後必要ではあるが、ここでは将来的にこれらの問題点が克服されることを期待し、放射線誘起損失や時間応答性の観点から代替の可能性について検討した。

各センサー技術の耐放射線性検討に当たっては、第2章の図 2.6、図 2.7、図 2.15、図 2.16の結果を参考とした。図 2.6、図 2.7はフッ素ドープ石英コア光ファイバーに対し、 ^{60}Co γ線源、及び高速中性子源炉「弥生」を用いて照射実験を行った結果 (常温) である。一方、原研によって測定された結果で、図 2.15、図 2.16は OH ドープ石英コア光ファイバーを JMTR 炉心部に設置した場合の損失増加特性を表している。

6.2 検討結果

現状の原子力プラントモニタリングのサーベイと、現在までに開発されている光ファイバーセンシング手法の適用性検討を行った結果を APPENDIX A、B に示す。光ファイバーセンサーを電気式センサーと比較した場合の長所には、

- 分布測定が可能であること
- 1本の光ファイバーで多くの点の測定ができるものもあり、プラント内ケーブルの削減に貢献できること

などがあげられる。従って、光ファイバーセンサーによる代替を考える場合には、耐放射線性や時間応答性というような要求事項を踏まえた上で、可能な限り上記の長所を活かせる手法を採用すべきである。

原子力プラントにおける各計装を、光ファイバーで行うとした場合の基本的な考え方は、次のようにまとめることができる。

6.2.1 中性子計装

中性子が存在する領域に可視域の発光を利用するシステムを適用すると、図 2.7 に示すような損失の蓄積のため、長期間の使用は非常に困難である。特に BWR の中性子計装は炉心内で行われるため、起動系・中間系のように出力運転中は炉心下部の中性子束の低い場所で保護される場合でも使用は困難であろう。また、PWR の炉心外中性子計装に適用する場合でも、出力運転中の常時使用は困難であり、起動系・中間出力系としての使用となる。

一方、近赤外発光を使用するシステムでも、シンチレータに核分裂物質や¹⁰B 等の中性子に有感な物質を添加しておけば、中性子の測定が可能であるものと考えられる。近赤外発光を用いる場合には中性子の影響が可視域よりも小さいこともあり、炉心外中性子計装の起動系・中間出力系としての使用であれば、補正システム無しでも使用できるものと考えられる。しかし、出力系としての適用は現在のところ可能性を判断できる状況になく、今後、長期照射実験を通して評価していく必要がある。また、炉心内中性子計装については、起動系・中間出力系として用いる場合でも損失がかなり大きくなるものと考えられ、現状での適用可能性は非常に低い。

6.2.2 プロセス計装

⁶⁰Co γ 線源による実験や原研による JMTR による実験をもとに考えると、フッ素ドープ石英コア光ファイバーを用いれば $10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h の線量率の場所で 10 年以上の長期間の継続使用が可能であるものと考えられる。従って、プロセス計装で対象となるような場所は、耐放射線性という観点からは十分に適用可能であるといえる。従って、各対象に対して次のような方針で光ファイバーセンサーを適用すべきと考えられる。

(1) プロセス温度計装

ラマン散乱型温度分布センサー (RDTS) は、電気式センサーでは測定不可能な連続分布測定が可能であるという長所を有すうえに、同様に温度分布が測定可能なブリュアン散乱型温度/歪み分布センサー (BOTDR) よりもやや時間応答性が速いという特長がある。従って、RDTS

を時間応答性の許す範囲で積極的に適用すべきである。空間分解能は数 m 程度と悪いが、測定対象の場所に長距離 (5~10m) 束ねたものを設置しておけば、その点については正確な温度を測定できる。従って、

- 死角のない連続温度分布を測定するための光ファイバー
- 離散的に正確な温度を知るための光ファイバー

を併用することにより、モニタリング要求に合わせたシステムとすべきである。

一方、他の光ファイバー温度センサーの中では、Fiber Bragg Grating (FBG) を用いるものが1本の光ファイバーで離散分布が測定できるという長所を有す。時間応答性も RDTs よりは速く、耐放射線性の許す範囲 (10 Gy(SiO₂)/h 以下) で積極的に適用すべきである。

また、速い時間応答性と高い耐放射線性が同時に求められる場合には、輻射型、ファブリ・ペロー型のようなシングルポイント型のセンサーを適用することが必要である。

(2) プロセス圧力計装

圧力計装用の光ファイバーセンサーのうち、1本の光ファイバーで離散分布が測定可能なものとしてマイクロバンド型があげられる。OTDR 法を併用することで、ケーブルの削減に貢献することが可能である。従って、可能な範囲でマイクロバンド型圧力センサーを適用すべきである。

OTDR 法を用いては時間応答性が十分でないような対象に対しては、

- 高圧力領域: フォトニック型
- 低圧力領域: マイクロバンド型、ファブリ・ペロー型

というすみわけにより、シングルポイント型の各センサーを適用することが必要である。

(3) プロセス流量計装

プロセス流量計装で用いられるセンサーは基本的に上述の圧力センサーであり、ダイヤフラムのような適当な流量→圧力変換機構を用いることにより、代替することができる。

(4) 液体レベル計装

浮子法を用いれば、光ファイバー間の光の結合状態から浮子の位置を知るシステムを構築できよう。また、光ファイバーに特有のシステムとしてプリズムを用いるものがあるが、プリズムの耐放射線性について今後評価しておくことが必要である。

(5) その他のプロセス計装

1) 不純物測定

冷却材の pH を測定することにより、冷却材中への不純物の混入を検出可能である。光ファイバーと色素を用いる pH センサーが従来から開発されており、

- 測定対象の冷却材サンプルの温度を下げる

- 測定を行う場所を低線量率の場所とする

という条件を満たしてやれば適用可能である。

また、高速炉では従来からブラッキング法が用いられてきたが、ブラッキング法では圧力測定を通じて不純物の検出を行う。従って、上述の光ファイバー圧力センサーによる代替が可能である。

2) プロセス放射線計装

プロセス放射線計装で対象とする場所の線量率であれば、II. で示したような放射線分布測定法を用いることで網羅することが可能である。プラント内ケーブルの削減等の観点から、できるだけ PSF-TOF 法、導波路型シンチレータ法を適用し、線量率的にこれらが適用できない場所へは近赤外光を用いるシステムを適用すべきである。

6.2.3 破損燃料検出系

破損燃料検出系で用いられるセンサーには、高い検出効率が要求される。従って、大型のシンチレータと束ねた光ファイバーの組合せという構成が必要であろう。光ファイバーのフレキシビリティ等の長所は活かさないが、高圧ケーブルの引き回しが必要無くなる等の長所がある。

6.2.4 安全保護計装

安全保護計装は計測値が設定値から外れた場合に警報、スクラム等の信号を出すという役割があるため、速い時間応答が求められる。従って、分布測定手法よりはシングルポイント型の手法の方が適している。センサー技術としてはプロセス計装の項で説明したものを適用可能である。

6.2.5 炉心内計装

炉心内の放射線環境では、光ファイバーの長期間継続使用は今のところ困難であろうと考えられる。今後、中空光ファイバーの利用などの新しい方向性を検討すべきである。

6.3 一般的検討のまとめ

光ファイバーセンサーによる原子力プラントモニタリングの可能性について、文献情報、光ファイバー照射実験結果等から一般的に検討した結果を整理し、表 6.1～表 6.3に示す。

表 6.1 光ファイバーセンサーによる原子力プラント計装に関する検討結果のまとめ-1 (中性子計装)

計装項目	適用可能な光ファイバーセンサー	備考
炉心内中性子計装	・現状での適用性は非常に低い	
炉心外中性子計装 (PWR)	・起動系のみ限定すれば可視発光システムも適用可能 ・近赤外発光利用システムを用い、起動系のみ適用すれば補正が必要ない可能性がある ・近赤外発光利用システムの出力系への適用については、今後さらに評価が必要	・移動法、イメージセンサー法で離散分布測定が可能 ・可視域システムではパルス計数法が可能だが、近赤外域システムでは直流法を用いる。

表6.2 光ファイバーセンサーによる原子力プラント計装に関する検討結果のまとめ(2) (プロセス計装)

計装項目	適用可能な光ファイバーセンサー	備考
温度計装	<ul style="list-style-type: none"> ・低線量率領域でFBG型の積極活用(光ファイバー本数の低減) ・高線量率領域では、 <ul style="list-style-type: none"> ・マイクロバンド型(高温用) ・ファブリ・ペロー型(低温用) ・ラマン散乱型を応答性の許容される範囲で積極活用 	<ul style="list-style-type: none"> ・マイクロバンド型、ファブリ・ペロー型は$10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h程度まで適用可能 ・FBG型は$\sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h程度まで適用可能 ・ラマン散乱型は$10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h程度まで適用可能 ・ラマン散乱型は数秒～数10秒の応答性
圧力計装	<ul style="list-style-type: none"> ・高圧力計測にフォトニック型、低圧力にマイクロバンド型、ファブリペロー型 ・数秒の応答性で十分な場所にはマイクロバンド型+OTDR法を適用 	<ul style="list-style-type: none"> ・3種類ともに$10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h程度まで適用可能 ・OTDR法以外でも、時間/周波数領域の多重化により離散分布が測定可能(OTDR法よりは応答性は高い)
流量計装	<ul style="list-style-type: none"> ・圧力の測定を通じて流量を測定するので、上記の圧力センサーの適用で代替可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・線量率範囲等も上記の通り。
液体レベル計装	<ul style="list-style-type: none"> ・差圧型では上記の圧力計装用センサーを適用可能 ・浮子型では光ファイバー間の光の結合を用い、浮子の位置を大まかに計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・差圧型の場合の耐放射線性は上記の圧力センサーと同じ ・浮子型の場合も$10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h程度まで ・プリズム型はプリズムの耐放射線性や時間応答性について評価が必要
不純物計装	<ul style="list-style-type: none"> ・冷却材サンプルを抽出し、低線量率領域へ導けば、色素法によるpH測定が適用可能 ・高速炉ではブラッキング法+圧力センサーの組合せを使用 	<ul style="list-style-type: none"> ・色素によるpH測定法は10^{-1} Gy(SiO₂)/h程度まで適用可能 ・導電率法を用いるには、ファラデー素子、ポッケルス素子の耐放射線性の評価が必要 ・ブラッキング法で用いる圧力センサーは上記の通り
放射線計装	<ul style="list-style-type: none"> ・低線量率領域はPSF、WLSFによる分布測定を積極的に適用 ・高線量率領域では石英光ファイバー+シンチレータの組合せを使用 ・原子炉容器近傍では近赤外発光利用システムを使用 ・TOF法、イメージセンサ法のような分布測定法をできるだけ活用 	<ul style="list-style-type: none"> ・PSF、WLSFは数10 mGy(SiO₂)/h程度まで適用可能 ・石英光ファイバー+可視発光のシステムは100 mGy(SiO₂)/h程度まで適用可能 ・石英光ファイバー+近赤外発光のシステムは10^3 Gy(SiO₂)/h程度まで適用可能

表6.3 光ファイバーセンサーによる原子力プラント計装に関する検討結果のまとめ-3 (破損燃料計装、安全保護計装、炉心内計装)

計装項目	適用可能な光ファイバーセンサー	備 考
破損燃料計装	・バンドル光ファイバー+大容量シンチレータの組合せ(高検出効率が必要される)	・形状のフレキシビリティ等の長所は活かしにくい
安全保護計装	・プロセス計装で使用する測定法を適用 ・ポイント型のセンサーを複数個並列して配置	・ポイント型の測定であれば十分な応答性を有す
炉心内計装 (流量等)	・長期間の使用は困難であり、現状での適用性は非常に低い	

第7章

実機への適用性検討-1

-ラマン散乱型温度分布センサーの 原子力プラントへの適用-

7.1 目的

ラマン散乱型温度分布センサー (Raman Distributed Temperature Sensor: RDTS) は、数 km にわたる長距離の温度分布を一度に測定できる長所を有しており、発電所や事務所ビル等の温度モニタリングに適用されてきた。[66]-[69] 前章での検討でも述べたように、原子力プラントへの適用が可能であれば、従来のセンサーでは不可能であった新しいモニタリング手法として安全性向上に貢献できるものと考えられる。

光ファイバー中の放射線誘起損失に起因する S/N 比の悪化や誤差の発生という問題点については以前から認識され、 γ 線照射実験を通じて寿命の評価が行われてきた。しかし、当時は光ファイバーの耐放射線性が現在のものよりも劣っていたこともあり、線量率が $10\text{Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 程度が適用可能な上限である、との結果が得られていた。[72],[73] また、誤差の補正手法として後述のようなループ型設置による方法が提案されていたにも関わらず [76]、実験的には実証されていなかったなど、高い放射線レベルの場所への適用は消極的にしか検討されていなかった。

原子力プラントへ適用された例としては日本原子力発電株式会社東海第一発電所において、雰囲気温度モニタリング系として実装されているものがあるが、線量率が低い領域のみの設置となっている。また、RDTS の特徴を活かせる対象としては、原子力プラントの配管領域が考えられるが、この測定システムは雰囲気測定に留まり、配管上への設置はなされていない。[74],[75]

本研究においては、RDTS の放射線関連プラントへの適用性を高めるために、放射線誘起誤差の補正手法について十分に検討を行うことを目的とした。また、実際の配管領域への適用可能性を検討するため、動力炉・核燃料開発事業団の高速実験炉「常陽」一次配管領域において温度モニタリング実験を実施し、問題点の抽出や長期連続使用の可能性検討を行った。

7.2 RDTS の原理

レーザー光のような高強度の光が光ファイバー中に入射すると、光ファイバー中の各点において後方散乱が生じ、入射側に散乱光が伝搬してくる。散乱光の波長スペクトルは、模式的には

図7.1のように表すことができる。散乱光の大部分は、図7.1の中央のレイリー散乱光であるが、その両側に少し波長が変化したラマン散乱光が見られる。ラマン散乱光は2成分から成っており、レイリー散乱光よりも長波長のものはストークス成分、短波長のものはアンチストークス成分と呼ばれる。[66]・[69] 石英光ファイバーを用いた場合、これらのラマン散乱光の波長シフトは、850nm 入射時に約30nm、1047nm 入射時に約40nmである。(波数にして $\Delta\nu=440\text{cm}^{-1}$ 程度。)

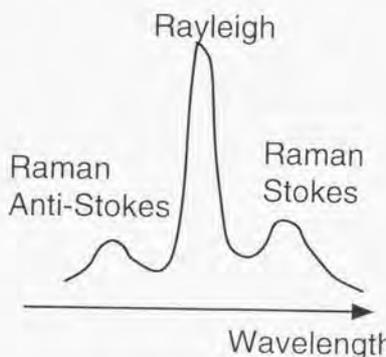


図7.1 散乱光の波長スペクトル

ストークス成分、アンチストークス成分の強度比は、温度と次のような関係にある。[69]

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_a}\right)^4 \exp\left(-\frac{hc\tilde{\nu}}{kT}\right) \quad (7.1)$$

ここで、

- λ_a, λ_s : アンチストークス、ストークス成分の波長
- $\tilde{\nu}$: 入射光からの波数の変化
- h : Planck 定数
- c : 光ファイバーコア中での光速
- k : ボルツマン定数
- T : 絶対温度

上式を用いれば、強度比から散乱点の温度を求めることができる。

一方、分布を測定するためには、Optical Time Domain Reflectometry 法 (OTDR 法) が用いられる。図7.2に示すように、OTDR 法ではパルスレーザー光を光ファイバーに入射させ、光ファイバー上の各位置からの後方散乱光を、入射側でカップラーを介して測定する。測定波形の時間を距離に変換することにより、レイリー散乱を用いる OTDR 法では、光ファイバー上の損失分布が測定できる。[69]

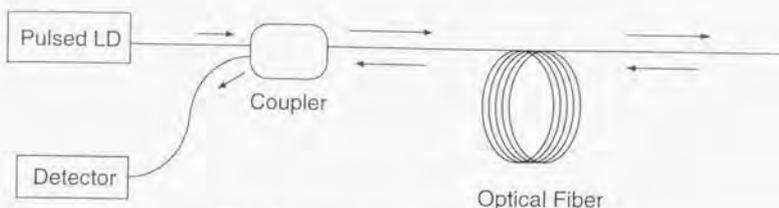


図 7.2 OTDR 法におけるセットアップ

ラマン温度分布測定では、図 7.3 に示すように、ストークス成分、アンチストークス成分を後方散乱光を波長多重化装置や波長フィルターによって分離し、光検出器によってそれぞれ測定する。通常の OTDR 法と同様に、測定波形の時間を距離に変換すれば、光ファイバー上の温度分布を一度に測定することが可能である。

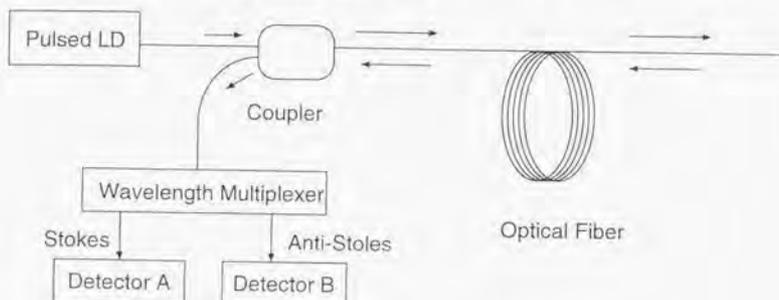


図 7.3 ラマン OTDR 法におけるセットアップ

7.3 放射線照射による RDTS 法への影響

7.3.1 放射線誘起誤差の定式化

先述のように、光ファイバーに放射線が入射すると、カラーセンターの生成により伝送損失が増加する。従って、検出器に到達する信号強度が低下し、S/N 比の劣化を招く。

また、RDTS では 2 つの波長の異なる成分の比をもとに温度を計算するため、放射線誘起損失の波長依存性の影響を受け、実際の温度とは異なる測定結果が得られる。通常、1100nm 程度までは低波長側ほど放射線誘起損失量が大きいため、波長の短いアンチストークス成分の方がより小さく測定される。従って、式 7.1 により、RDTS による測定結果は実際の温度よりも小さくなる。

まず、温度とストークス、アンチストークスの強度比の関係は、式 7.1 の通りである。放射線照射により、アンチストークス、ストークスの両波長にそれぞれ I_a [dB/m]、 I_s [dB/m] の損失増加が生じた場合について考える。照射前後の、位置 x に関する光強度の測定結果を次のように定義する。

	照射前	照射後
アンチストークス光	$I_{a0}(x)$	$I_a(x)$
ストークス光	$I_{s0}(x)$	$I_s(x)$

ここでは単純な例として、距離 x の間の放射線誘起損失量が一定である場合を考える。 $I_a(x)$ 、 $I_s(x)$ は、距離 x 分だけ放射線誘起損失の影響を受けることから、 $I_{a0}(x)$ 、 $I_{s0}(x)$ との関係は次の通りとなる。

$$10 \log \left(\frac{I_a(x)}{I_{a0}(x)} \right) = -l_a x \quad (7.2)$$

$$10 \log \left(\frac{I_s(x)}{I_{s0}(x)} \right) = -l_s x \quad (7.3)$$

従って、

$$\log \left(\frac{I_a(x)}{I_s(x)} \right) = \log \left(\frac{I_{a0}(x)}{I_{s0}(x)} \right) - 0.1(l_a - l_s)x \quad (7.4)$$

これらより、正しい温度分布 $T_0(x)$ 、及び測定によって得られる誤った温度分布 $T_1(x)$ の間の関係が、次の通り得られる。

$$T_1(x) = \frac{1}{\frac{1}{T_0(x)} + \frac{k(l_a - l_s)x}{4.343hc^2}} \quad (7.5)$$

$$= \frac{T_0(x)}{1 + \frac{k(l_a - l_s)T_0(x)x}{4.343hc^2}} \quad (7.6)$$

$$(7.7)$$

従って、例えばアンチストークス波長：817nm、ストークス波長：877nm のような場合には、 l_s のほうが l_a よりも大きく測定されるため、実際は一定の温度分布であっても右下がりの測定結果が得られる。

7.3.2 放射線誘起誤差の例

市販の RDTS システム (日立電線、FTR030) を用い、放射線照射下での温度測定実験を行った。日立電線では、ラマン散乱型温度分布センサーとして波長等を変化させた数種類のタイプを市販している。このうち、我々が借用した FTR030(854nm)、FTR110(1054nm) の仕様、測定性能等を表 7.1 に示す。

表 7.1 日立電線製 RDTs システムの仕様、性能

形式	FTR030	FTR110
測定距離	最長 2km	最長 10km
温度精度	±1°C	±1°C
温度分解能	0.1°C	0.1°C
測定可能温度範囲	-200~500°C (光ファイバー被覆材による)	

温度精度、空間分解能等は測定時の平均化回数により大きく変化する。また、同一の場所に光ファイバーを束ねた状態で設置し、測定結果の平均をとれば、その場所についての温度測定精度は向上する。単純に光ファイバーを長く引き回す設置を行った場合には、空間分解能は概ね次のような値となる。

- GI 光ファイバー (50/125) を用いる場合: 2~3m 程度
- SI 光ファイバーを用いる場合: 3~5m 程度

実験は高速実験炉「弥生」の Glory 孔を用いて行った。20m のポリイミド被覆 GI 光ファイバー (50/125 μ m) を束ねた状態で挿入し、出力を 500W から 2kW まで変化させながら FTR030 による測定を行った。Glory 孔は「弥生」炉心を貫通する実験孔であり、中性子束、 γ 線量率は次の通りである。

表 7.2 高速中性子源炉「弥生」Glory 孔の照射条件 (1W で規格化)

中性子束	3.8x10 ⁸ [n/cm ² /sec/W]
γ 線量率	700 [R/h/W]

測定結果を図 7.4 に示す。500W 程度までは、ほぼ一様の測定結果が得られているが、出力を上昇させるにつれて温度誤差が大きくなっていることが分かる。2kW 時の Glory 孔内の実際の温度は 80°C 程度であるが、この測定では最も測定値の高い部分でも 60°C 未満であり、20m の挿入部の先端付近では測定結果が 0°C 以下まで低くなっていることが分かる。

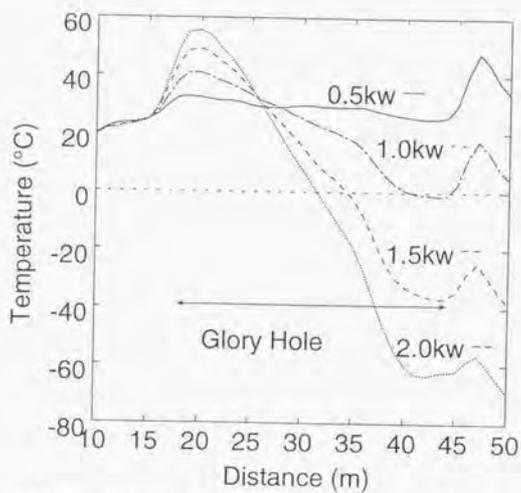


図 7.4 RDTS 法による「弥生」Glory 孔内温度測定結果
 (日立電線:FTR030、GI/50/125、ポリイミド被覆)

7.4 放射線誘起誤差の補正法に関する検討

RDTs の適用可能線量率領域の拡大、RDTs 用光ファイバーの寿命延長を目的として、放射線照射によって生じる誤差を補正する手法について検討した。

7.4.1 熱電対の測定に基づく補正手法

RDTs の測定対象候補の中には、高速炉プラントの一次冷却系のように、温度分布、及び放射線量率分布が一様に近い場所もある。このような場所での使用を念頭におき、2本の熱電対の測定結果をもとにその間の領域の誤差を平均的に補正する手法について検討を行った。

図 7.5 に、熱電対を用いる補正法におけるセットアップを示す。RDTs 用光ファイバーに沿って A 点、B 点に熱電対を設置し、これらの測定結果をもとに RDTs による A-B 間の測定結果を補正する。

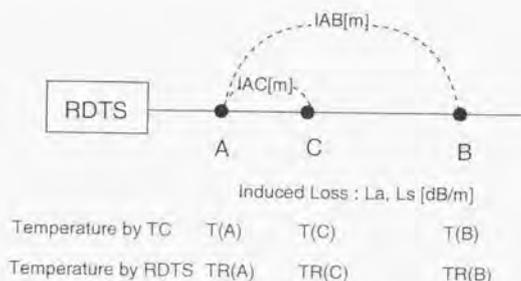


図 7.5 熱電対を用いる補正法におけるセットアップ

まず、式 7.1 を単純化するため、 $T_0 = hc\bar{\nu}/k$ とおく。すると、式 7.1 は次のように書ける。

$$\frac{I_{Aa0}}{I_{As0}} = \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s}\right)^4 \exp\left(-\frac{T_0}{T(A)}\right) \quad (7.8)$$

ここで、

$T(A)$: 点 A における熱電対による温度測定結果

I_{Aa0} : 放射線の影響がない状態で RDTs により測定される A 点に関するアンチストークス強度

I_{As0} : 放射線の影響がない状態で RDTs により測定される A 点に関するストークス強度

放射線照射時には、放射線誘起損失の影響により、A 点についての 2 成分の強度比は次のように測定される。

$$\log\left(\frac{I_{Aa}}{I_{As}}\right) = \log\left(\frac{I_{Aa0}}{I_{As0}}\right) - 0.1x(L_a - L_s)/A \quad (7.9)$$

l_A : RDTS と点 A の間の距離 [m]

L_a : アンチストークス波長に対する A-B 間の平均的な放射線誘起損失 [dB/m]

L_s : ストークス波長に対する A-B 間の平均的な放射線誘起損失 [dB/m]

TR(A) を RDTS による点 A に関する測定結果とすると、TR(A) とラマン 2 成分の測定結果の関係は次のように表される。

$$\frac{I_{As}}{I_{As}} = \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s}\right)^4 \exp\left(-\frac{T_0}{TR(A)}\right) \quad (7.10)$$

従って、次のような関係が得られる。

$$\log\left\{\left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s}\right)^4 \exp\left(-\frac{T_0}{TR(A)}\right)\right\} = \log\left\{\left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s}\right)^4 \exp\left(-\frac{T_0}{TR(A)}\right)\right\} - 0.1(L_a - L_s)l_A \quad (7.11)$$

以上のような式をもとに T_0 、 $TR(A)$ の関係を整理すると、次式が得られる。

$$\frac{T_0}{TR(A)} = \frac{T_0}{TR(A)} - \frac{0.1}{0.43}(L_a - L_s)l_A \quad (7.12)$$

点 B、点 C についても同様に、次の式が得られる。

$$\frac{T_0}{TR(B)} = \frac{T_0}{TR(B)} - \frac{0.1}{0.43}(L_a - L_s)l_B \quad (7.13)$$

$$\frac{T_0}{TR(C)} = \frac{T_0}{TR(C)} - \frac{0.1}{0.43}(L_a - L_s)l_C \quad (7.14)$$

従って、点 C の温度 $T(C)$ は次のように表せる。

$$\frac{1}{T(C)} = \frac{1}{TR(C)} + \frac{1}{T(A)} - \frac{1}{TR(A)} - \frac{l_{AC}}{l_{AB}} \left\{ \frac{1}{T(A)} - \frac{1}{T(B)} - \frac{1}{TR(A)} + \frac{1}{TR(B)} \right\} \quad (7.15)$$

ここで、

l_{AB} : A-B 間の距離

l_{AC} : A-C 間の距離

式 7.15 の右辺は全て測定によって求まる値である。従って、RDTS による測定結果と、点 A、点 B での熱電対による測定結果をもとに、A-B 間の温度を補正することが可能である。

7.4.2 ループ型の光ファイバー設置による補正手法

上述のような熱電対を用いる補正法は、温度や線量率が一樣に近い場所にしか適用できないという欠点がある。これらが一樣でない場所へ適用するための補正手法としては、ループ型の光ファイバー設置による方法が提案されていたが、これまでのところ実験的な実証はなされていない。[76] 本研究では、 ^{60}Co γ 線源を用いて照射実験を行い、本手法の妥当性を検証した。

(1) 補正原理

ループ型の設置を行う場合のセッティングの概念を図7.6に示す。この補正手法では、センサーファイバーをRDTSから対象領域の端まで設置し、その後、再びRDTSまで同じ経路で引き回す。このような設置により、光ファイバー上には温度、放射線の条件がほぼ同じ条件の点の対が生成される。図7.6においては、点Aと点D、点Bと点Cがそれぞれ同じ条件の対を成している。また、設置に当たっては、RDTSからA点、及びD点からRDTSまでの部分は放射線の無い環境に設置し、補正無しでA点の正確な温度を測定可能な状態とする。

定性的にいうと、本補正手法は次のような考え方に基づいている。まず、A点とD点の温度は等しいと近似できるので、A点、D点に関する測定結果の比較から、A-D間の放射線誘起損失の影響を知ることができる。また、同様にB点とC点に関する測定結果の比較から、B-C間の放射線誘起損失の影響を知ることができる。さらに、上で得られたA-D間、及びB-C間のそれぞれにおける放射線誘起損失の影響の比較から、A-B間(C-D間)の放射線誘起損失の影響を知ることができる。ここで、A-B間、C-D間はできるだけ近くに設置してあることから、この間の放射線誘起損失分布は等しいと考えることができる。RDTS-A間を放射線のない環境に設置すれば、A点の温度は補正無しでも正確に測定できる。従って、A-B間の損失の影響とA点の温度から、B点の温度を正確に求めることができる。

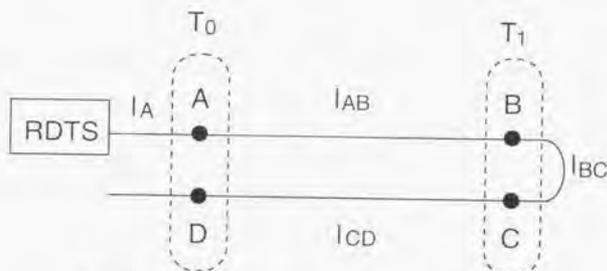


図7.6 ループ型設置を行う場合のセッティングの概念

ここで、上記のような補正原理の定式化を行う。点Bについては次のような式が得られる。ここで、照射前から光ファイバー中に存在する固有の損失については、あらかじめ補正されているものと仮定した。

$$\frac{I_{Ba0}}{I_{Bs0}} = \left(\frac{\nu_a}{\nu_s}\right)^4 \exp\left(-\frac{T_0}{T(B)}\right) \quad (7.16)$$

$$\log\left(\frac{I_{Ba0}}{I_{Bs0}}\right) = \log\left(\frac{I_{Ba}}{I_{Bs}}\right) - 0.1(L_{ABa} - L_{ABs})l_{AB} \quad (7.17)$$

ここで、 L_{XYa} 、及び L_{XYs} (X, Y は光ファイバー上の任意の点) はアンチストークス波長、ストークス波長に対する区間 XY での平均的な放射線誘起損失を表す。

点A、点Dに関しては、次式が成り立つ。

$$\log\left(\frac{I_{Aa}}{I_{As}}\right) = \log\left(\frac{I_{Aa0}}{I_{As0}}\right) - 0.1(L_{DAa} - L_{DAs})l_{DA} \quad (7.18)$$

$$\log\left(\frac{I_{D\alpha}}{I_{D\beta}}\right) = \log\left(\frac{I_{D\alpha 0}}{I_{D\beta 0}}\right) - 0.1(L_{O A_2} - L_{O A_1})l_{OA} - 0.1(L_{AB_2} - L_{AB_1})l_{AB} \\ - 0.1(L_{BC_2} - L_{BC_1})l_{BC} - 0.1(L_{CD_2} - L_{CD_1})l_{CD} \quad (7.19)$$

上の2式から、次の式が得られる。

$$\log\left(\frac{I_{D\alpha}}{I_{D\beta}}\right) - \log\left(\frac{I_{A\alpha}}{I_{A\beta}}\right) = -0.1(L_{AB_2} - L_{AB_1})l_{AB} - 0.1(L_{BC_2} - L_{BC_1})l_{BC} \\ - 0.1(L_{CD_2} - L_{CD_1})l_{CD}. \quad (7.20)$$

一方、点B、点Cの対に対しては、次のような関係が得られる。

$$\log\left(\frac{I_{C\alpha}}{I_{C\beta}}\right) - \log\left(\frac{I_{B\alpha}}{I_{B\beta}}\right) = -0.1(L_{BC_2} - L_{BC_1})l_{BC}. \quad (7.21)$$

これらの関係式より、次の式が得られる。

$$\log\left(\frac{I_{D\alpha}}{I_{D\beta}}\right) - \log\left(\frac{I_{A\alpha}}{I_{A\beta}}\right) = \log\left(\frac{I_{C\alpha}}{I_{C\beta}}\right) - \log\left(\frac{I_{B\alpha}}{I_{B\beta}}\right) - 0.1(L_{AB_2} - L_{AB_1})l_{AB} \\ - 0.1(L_{CD_2} - L_{CD_1})l_{CD} \quad (7.22)$$

$$= \log\left(\frac{I_{C\alpha}}{I_{C\beta}}\right) - \log\left(\frac{I_{B\alpha}}{I_{B\beta}}\right) - 2 \times 0.1(L_{AB_2} - L_{AB_1})l_{AB} \quad (7.23)$$

よって、

$$-(L_{AB_2} - L_{AB_1})l_{AB} = 0.5 \log\left(\frac{(I_{D\alpha}/I_{D\beta})(I_{B\alpha}/I_{B\beta})}{(I_{A\alpha}/I_{A\beta})(I_{C\alpha}/I_{C\beta})}\right). \quad (7.24)$$

従って、式7.17、式7.24より、 $I_{B\alpha 0}$ と $I_{B\beta 0}$ の関係は次のように得られる。

$$I_{B\alpha 0}/I_{B\beta 0} = I_{B\alpha}/I_{B\beta} \sqrt{\frac{(I_{A\alpha}/I_{A\beta})(I_{C\alpha}/I_{C\beta})}{(I_{D\alpha}/I_{D\beta})(I_{B\alpha}/I_{B\beta})}} \quad (7.25)$$

式7.25の右辺は、全て測定可能な量であるので、この式と7.16を用いれば、点Bについての放射線の影響を受けない温度を求めることが可能である。このような操作を光ファイバー上の各点について行えば、放射線誘起損失の影響を排除した温度分布を測定することができる。

本手法は、光ファイバー上に放射線分布や温度分布がある場合でもその影響を補正することができる。従って、ループ型の設置が可能な場所であれば、アンチストークス波長、ストークス波長における放射線誘起損失の差に起因する誤差は考慮に入れる必要がなくなる。一方、ループ型の設置とするためには通常の方法に比べて2倍の長さの光ファイバーが必要であり、放射線誘起損失による光強度の低下も大きくなる。このため、測定結果におけるS/N比は通常の場合よりも悪くなり、適用に際してはこのような観点からも検討を行うことが必要である。

(2) 実証実験

ループ型設置による補正手法の妥当性を評価するため、 ^{60}Co γ 線源を用いた模擬実験を行った。実験体系を図7.7に示す。120m長のサンプル光ファイバーを、20mずつ6個の部分に分割した(A-F)。各部分の温度、線量率の条件は、表7.3に示す通りである。センサーファイバー上で温度や放射線量率に変化した場合に対する適用性を見るため、ここでは3つの領域で温度、放射線条件の組合せを変化させた。

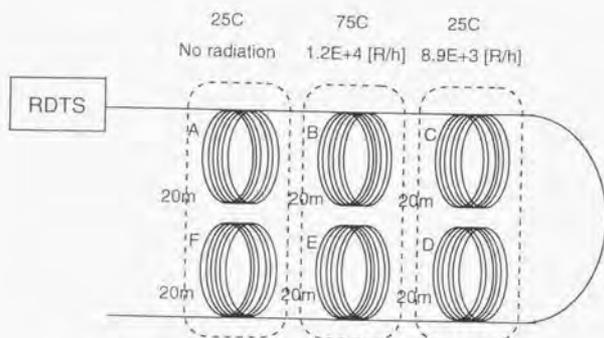


図 7.7 ループ型設置による補正手法の実証実験体系

表 7.3 ループ型設置模擬実験条件

部分	温度 [°C]	γ 線量率 [R/h]
A, F	25	0 (照射なし)
B, E	75	1.2×10^4
C, D	25	8.9×10^3

測定には入射波長:854nm の、日立電線製 RDTS(FTR030)を用いた。FTR030 は専用ソフトにより温度分布の測定、保存等が可能だが、ループ型の設置とし、補正を行うケースには対応していない。従って、ここでは APD から得られる生のデータを用い、測定後に別に用意したプログラムによって温度分布を計算した。

照射開始後、80 分経過した時点での測定結果を、図 7.8 に示す。ここでは、ループ型設置用の補正アルゴリズムによって処理した結果と、通常 FTR において用いられているプログラムによって処理した結果の両方を比較して示した。

これを見ると、補正を行わない場合には、先述のような放射線誘起誤差が顕著に現れ、60m 先では 25 °C 程度の負の誤差が生じていることがわかる。一方、補正アルゴリズムを用いた場合には、ほぼ実際の温度分布と同様の分布が測定できた。この結果より、本補正手法の妥当性が確認できた。しかし、先に述べたように、ループ型の設置の場合には先端部で S/N 比が悪化しやすいという短所がある。図 7.8 においても、センサー光ファイバーの先端にあたる 0m 近辺では、かなり測定結果の誤差が大きくなっていることがわかる。実際の適用にあたっては S/N 比の劣化に対する検討が重要である。

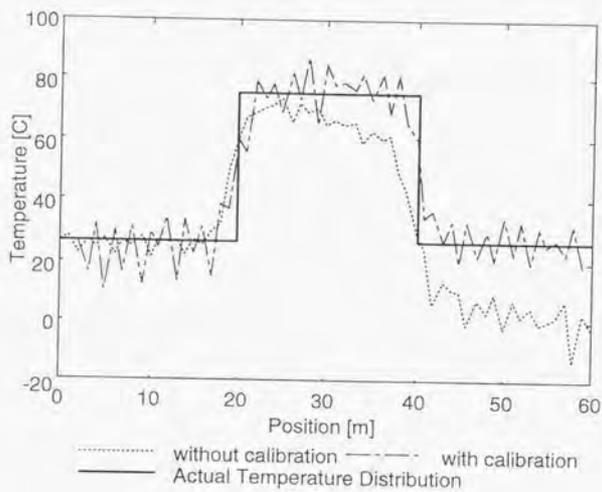


図 7.8 ループ型設置による実証実験結果

7.5 実際の原子カプラントへの適用

長期にわたって原子カプラントで使用した場合の影響評価、及び放射線誘起誤差補正手法の妥当性検討のため、高速実験炉「常陽」(動力炉・核燃料開発事業団)において実験を行った。図7.9に示す。測定には入射波長:1054nmの日立電線 FTR110 を用いた。使用したセンサー光ファイバーの仕様を表7.4に示す。光ファイバーは、常陽一次系配管の外装板表面に、約50cmピッチで螺旋上に巻き付けた上で、Alテープによって固定した。

光ファイバー上の3点に熱電対を設置し、FTRによる測定結果との比較を行った。FTRからの距離は、TC-1:102m、TC-2:62m、TC-3:47mである。測定は常陽の第30運転サイクル(1997年3月3日~5月20日)、第31運転サイクル(1997年7月14日~9月12日)を通して行った。

表 7.4 常陽一次系で使用した光ファイバーの仕様
(日立電線製)

コア径	50 μm
クラッド径	125 μm
被覆	ポリイミド
保護管	SUS

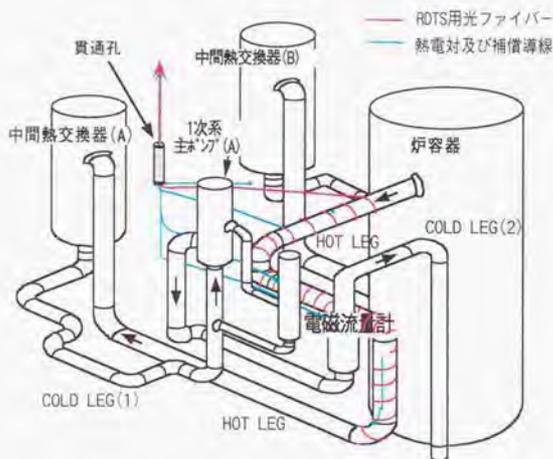


図 7.9 常陽一次系への光ファイバー及び熱電対の設置状況

7.5.1 放射線によって生じた温度測定誤差

第30サイクルにおいて出力上昇前(1997年3月17日)の温度測定結果と、第31サイクルの定常運転終了前(1997年9月11日)の測定結果を、図7.10に示す。出力上昇前には、FTRに

よる測定結果と熱電対による測定結果がよく一致していることがわかる。それに対し9月11日の測定では、放射線照射による負の温度誤差が明瞭に確認できていることがわかる。

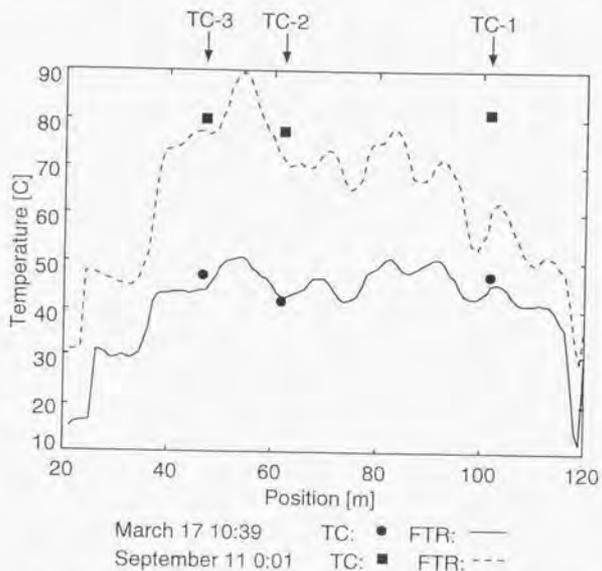


図 7.10 常陽における温度測定結果 (1997年3月17日、1997年9月11日)

図 7.11に、TC-1、TC-3 の位置に関する FTR 及び熱電対による温度測定結果の時間推移を示す。FTR から遠い位置ほど放射線誘起損失の影響を大きく受け、熱電対による測定結果との食い違いが大きくなっていることがわかる。

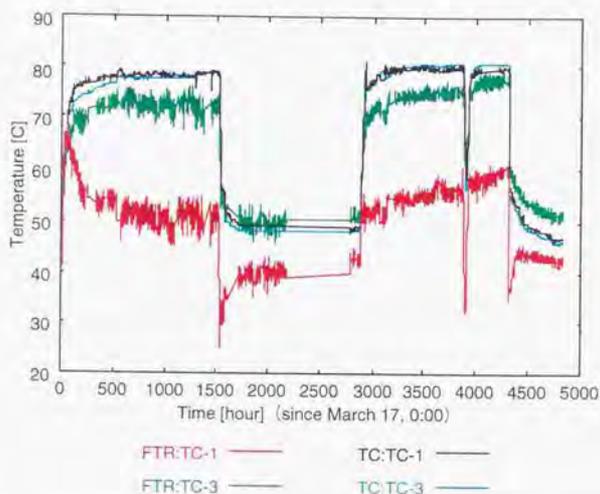


図 7.11 TC-1、TC-3 の位置に関する FTR、熱電対の測定結果の推移

TC-1、TC-3 の位置に関する FTR と熱電対の測定結果の違いを、図 7.12 に示す。TC-1 位置に関しては、第 30 サイクルの出力上昇時に急速に温度誤差が大きくなり、30℃近くに到達した。しかし、このような初期の増加の後には、放射線誘起誤差の飽和傾向が見られている。さらに、31 サイクルにおいては、誤差が徐々に減少する傾向が観測されている。これは、外気温の上昇に伴い、一次配管領域の室温が上昇したために、放射線誘起誤差が小さくなったためと考えられる。

また、図 7.12 の 4500 時間以降において TC-3 位置についての誤差がマイナスとなっているのは、光ファイバー設置時に設定した測定用定数に誤差が含まれていたためと考えられる。

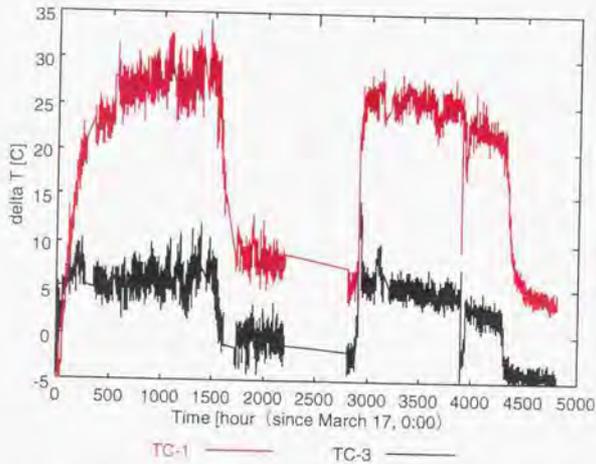


図 7.12 TC-1、TC-3 の位置に関する FTR、熱電対の測定結果の食い違いの推移

7.5.2 熱電対の測定結果を用いた誤差補正

常陽の一次配管領域の線量は、主に冷却材の液体 Na の放射化によって生成する ^{24}Na に起因する。配管表面での γ 線量率の測定結果を、図 7.13 及び表 7.5 に示す。[77]

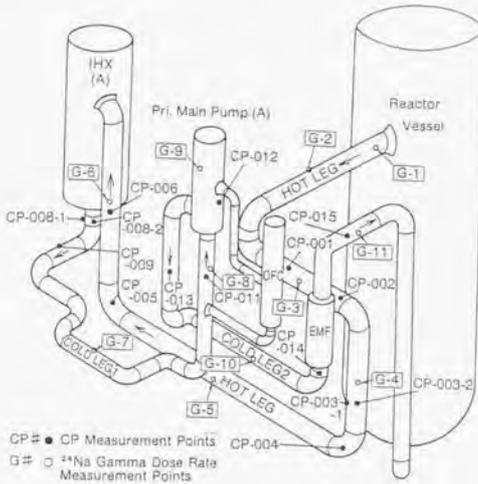


図 7.13 常陽一次系配管表面での γ 線量率測定点 [77]

表 7.5 常陽一次系配管表面での γ 線量率測定結果 [77]

Position (see Fig.8)		Gamma Dose Rate [R/h/100MWt]
G-1	Hot Leg	7.69×10^3
G-2		6.48×10^3
G-3		7.40×10^3
G-4		7.35×10^3
G-5		7.64×10^3
G-6		9.68×10^3
G-7	Cold Leg	7.75×10^3
G-8		7.30×10^3
G-9	Sodium Pump	7.64×10^3
G-10	Cold Leg 2	7.45×10^3
G-11		7.40×10^3

γ 線量率は $6.4 \times 10^3 \text{R/h}$ から $7.7 \times 10^3 \text{R/h}$ の間に収まっており、この領域ではほぼ一様と仮定できる。さらに、定常運転期間中には、配管表面の温度もほぼ一定に近いと考えることができる。従って、ここでは2つの補正手法のうち、熱電対による補正手法の適用を試みた。

TC-1 及び TC-3 による測定結果を用い、この2点の間に関する FTR による測定結果を補正した。1997年9月11日の測定結果に対して補正を加えた結果を、図 7.14 に示す。補正前には TC-2 位置での誤差は 8℃ に達していたが、補正を加えることにより、約 2.5℃ まで誤差が小さくなっていることがわかる。図 7.10 から判断すると、補正後も残っているこの誤差は、初期の較正誤差によるものではないかと考えられる。

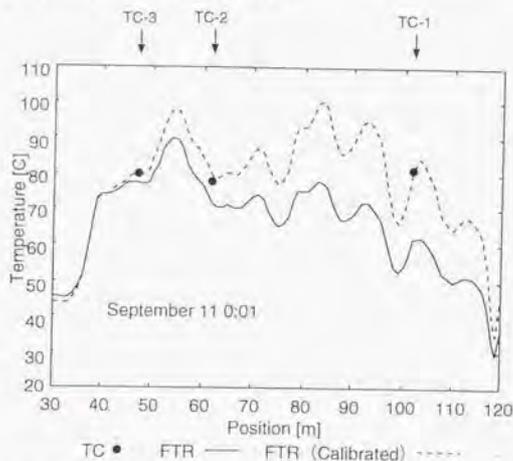


図 7.14 TC-1、TC-3 の測定結果を用いた誤差補正結果

また、TC-2 位置に関する補正後の FTR 測定結果と、熱電対による測定結果の差の推移を 図 7.15 に示す。本補正手法は TC-1 及び TC-3 の位置での熱電対による測定結果に基づいており、センサー光ファイバーの中間部に近いほど補正後の誤差は大きくなる。このような状況のもとで、TC-2 における補正後の温度誤差は約 2.5℃ でほぼ一定となっており、本手法の適用性はかなり高い。従って、このような単純な補正手法を併用することを前提に、RDTs による常備一次配管領域の温度分布モニタリングは十分に可能であるといえることができる。

しかし、図 7.15 の 4300 時間程度のサイクル終了による出力低下、及び 3900 時間程度における落雷による出力低下時には誤差が大きくなっており、このような定常時以外には補正法が十分に機能していない。これは、温度及び放射線の一様に関する仮定が成り立たなくなるためと考えられる。従って、今後はこれらの一様性を前提としない、ループ型の設置による補正手法の適用が求められる。

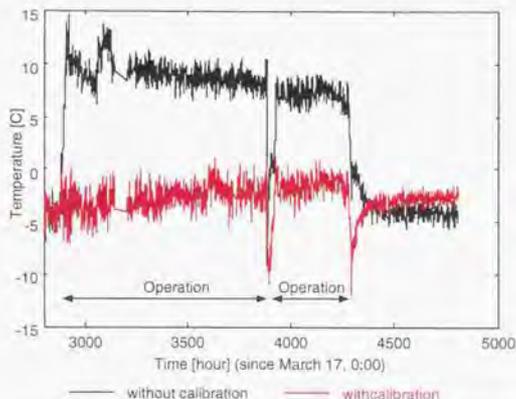


図 7.15 TC-2 位置での補正後の FTR 測定結果と熱電対測定結果の差の推移

7.6 RDTs のプラントモニタリングへの適用性に関する考察

7.6.1 適用可能線量率範囲

RDTs の適用可能な線量率範囲は温度にも依存するので、単純に「 γ R/h まで」と表現することは難しい。ここでは、常陽での長期測定の結果とフッ素ドープコア光ファイバーへの照射実験の結果等から、大まかな上限について検討した。

常陽での測定では、レイリー OTDR や白色光源を用いた損失測定は行わなかった。しかし、ラマン 2 成分のうち、ストークス光の強度の温度依存性は小さいことから、その強度分布をもとに第 30～第 31 サイクルを通じての照射による損失増加量を概算した。第 30 サイクル立ち上げ前 (3/17) と、第 31 サイクル終了間際 (9/11) におけるストークス光強度の時間分布の比から、光ファイバー上の損失分布を求めた結果を図 7.16 に示す。光ファイバーコネクタ部での損失が大きかったこともあって、かなり S/N 比は悪いが、損失値としては、概ね $0.75\text{dB}/80\text{m}=9\text{dB}/\text{km}$ であることがわかる。

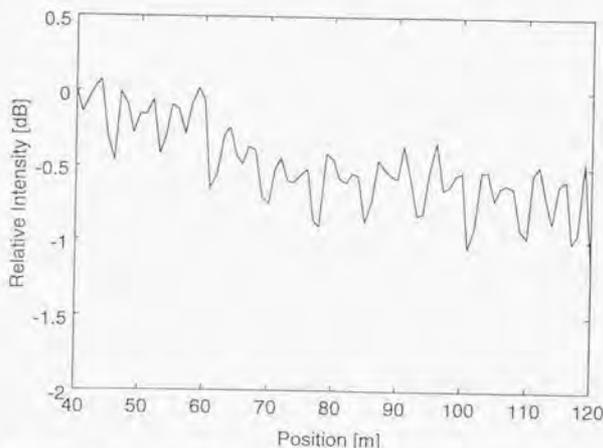


図 7.16 第 31 サイクル終了間際におけるストークス波長での損失分布

一方、フッ素ドープコア光ファイバーに対する γ 線照射実験の結果 (図 2.6) を見ると、フッ素ドープコア光ファイバーの耐放射線性は今回用いた OH ドープコアのものよりも非常に高い。紫外域からの裾引きの影響が小さいため、照射開始直後の損失の増加量が小さく、例えば 1100nm においては $10^4 \text{Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 、常温の上限でも $10\text{dB}/\text{km}(=2\text{dB}/200\text{m})$ に留まっている。長期照射の場合は回復速度の遅いカラーセンターの寄与により損失は徐々に増加するものと考えられるが、図 2.16 の原研による照射実験の結果を見ると、その増加速度は非常に小さい。従って、前章でも述べたように、 $10^3 \sim 10^4 \text{Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 程度までは十分に適用可能であろう。

7.6.2 今後の課題

RDTsをプラントモニタリングの手段として用いる際の問題点には、時間応答性が遅いという点があげられる。本研究において行った測定では、平均化回数を2²⁰回に設定したため、1データ取得のために約90秒が必要であった。このような状況で、進展の速い事故を検出することは困難である。従って、現状では、RDTsは定常時の監視システム、及び例えば小規模な冷却材の漏洩のような、比較的時間をかけて進展する事故のモニターとして考えることが必要である。

時間応答性を向上させるには平均化回数を減らすという方法があるが、その場合、S/N比は悪化する。S/N比を悪化させずに時間応答性を向上する方法としては、RDTsのパルスレーザの周波数を大きくすることが考えられる。近年のレーザー技術の発展は非常に速いこともあり、今後、時間応答性をかなり向上させることも可能であろうと考える。

また、今回借用したRDTs(日立電線FTRシステム)は、ソフトで処理対象とする光ファイバー長が数kmに設定されている。従って、使用する光ファイバーを数100mに制限し、ソフトの処理対象もこの程度の長さに制限すれば応答性の向上を図ることができる。さらに、今回の実験ではコア径50 μ mの光ファイバーを用いたが、より大口径コアの光ファイバーを用いれば、S/N比が改善されるために平均化回数を短くすることができ、応答性を向上させることが可能である。

RDTsをプラントモニタリングに適用するに当たっての他の問題点としては、空間分解能の悪さがあげられる。放射線に強いSI型光ファイバーを用いた場合には、空間分解能は少なくとも2~3mに達する。このため、数10cmというような非常に狭い領域で温度が変化すると、正確な温度の測定が困難となる。このような問題点の克服のための方策としては、光ファイバー設置法の改善が考えられる。光ファイバーをピッチを狭くして螺旋上に巻き付け、局所的な温度の変化が、できるだけ光ファイバー上の長い領域に影響を与えるようにすれば、測定性能が向上するものと期待できる。

常陽での実験では、温度、放射線の分布が一様に近かったことから、熱電対による補正手法を適用した。しかし、事故時には温度や放射線の一様性は成り立たなくなるので、安全モニターとしてRDTsを考える場合には、ループ型の補正手法の適用が必要である。しかし、熱電対による単純な補正法を用いる場合でも、光ファイバー上のどの位置で外乱が生じたかについての情報は知ることができる。従って、適用対象の温度/放射線条件や設置の容易性等を考え、どちらの補正法を適用するかを選択を行うことが必要である。

第 8 章

実機への適用性検討-2

-ブリュアン散乱型歪み分布測定手法の 原子カプラントへの適用-

8.1 ブリュアン散乱型歪み/温度分布測定法の原理

ブリュアン散乱は入射単色光が媒体中に生じる音波と相互作用し、媒質固有の周波数だけずれて散乱される現象である。この周波数の変化はブリュアン周波数シフト (ν_B) と呼ばれ、次式で与えられる。[78]-[81]

$$\nu_B = 2nV_A/\lambda \quad (8.1)$$

ここで、 n :光ファイバの屈折率、 V_A :音速、 λ :入射光の波長をそれぞれ表す。ブリュアン周波数シフトは $1.3 \mu\text{m}$ 帯で $\pm 13\text{GHz}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯で $\pm 10.9\text{GHz}$ 程度である。

図 8.1、及び図 8.2 に示すように、ブリュアン周波数シフトの変化は歪/温度の変化に比例し、その変化量は $1.3 \mu\text{m}$ 帯と $1.55 \mu\text{m}$ 帯において表 8.1 のようになる。[81]

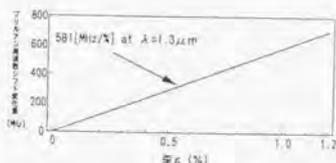


図 8.1 ブリュアン周波数シフト変化量の歪み依存性 [81]

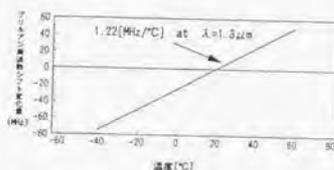


図 8.2 ブリュアン周波数シフト変化量の温度依存性 [81]

表 8.1 ブリュアン周波数シフト変化量の波長依存性 [81]

(UV被覆の光ファイバの例)

項目 \ 波長	1.3 μ m帯	1.55 μ m帯
温度依存 ($d\nu_B/dT$)	1.22MHz/°C	1MHz/°C
歪依存 ($d\nu_B/d\epsilon$)	581MHz/%	493MHz/%

ν_B : ブリュアン周波数シフト

T : 温度

ϵ : 伸び歪

ブリュアン周波数シフトの温度による変化量は、歪による変化量に対して極めて小さい (0.002%/°C)。従って、歪によるブリュアン周波数シフトの変化量を測定する上で $\Delta T < 5^\circ\text{C}$ の場合は温度の影響を無視できる。[81] しかし、例えば初期状態から数 10°C 以上も温度が変化するような場合には、温度変化によるシフト量への影響を補正しておく必要がある。このため、使用する光ファイバーを決定した段階で、歪み、あるいは温度のみを変化させて測定を行い、歪み係数、温度係数をできるだけ正確に求めておくことが必要である。

図 8.3 に BOTDR の基本構成と信号波形を示す。[81] BOTDR は、パルス光を被測定光ファイバーの片端から入射し、戻ってきた後方散乱光をローカル光と合波しコヒーレント検波回路に入射する。ブリュアン散乱光は、入射パルス光に対してブリュアン周波数シフト ν_B だけ周波数シフトしているため、パルス光 $\nu_0 + \nu_s$ とローカル光 ν_0 の周波数差をブリュアン周波数シフト ν_B に一致させることによりブリュアン散乱光のみを検出することができる。ここでパルス光の光周波数を掃引させると、各周波数差におけるブリュアン散乱光が測定でき、ブリュアン散乱光のスペクトラムを検出することができる。このスペクトラムの最大受光レベルの周波数がブリュアン周波数シフト ($\nu_B(\epsilon)$) である。

一方、ブリュアン周波数シフト ($\nu_B(\epsilon)$) は 図 2-2 の関係から光ファイバーに加わった歪を用いて次のような式で表すことができる。つまり、ブリュアン散乱光のスペクトラムからブリュアン周波数シフト ($\nu_B(\epsilon)$) を求めることで歪量が得られる。

$$\nu_B(\epsilon) = \nu_B(0)(1 + C\epsilon) \quad (8.2)$$

$\nu_B(\epsilon)$: 歪が生じたときのブリュアン周波数シフト

$\nu_B(0)$: 歪が零のときのブリュアン周波数シフト

C : 歪の比例係数

ϵ : 歪量

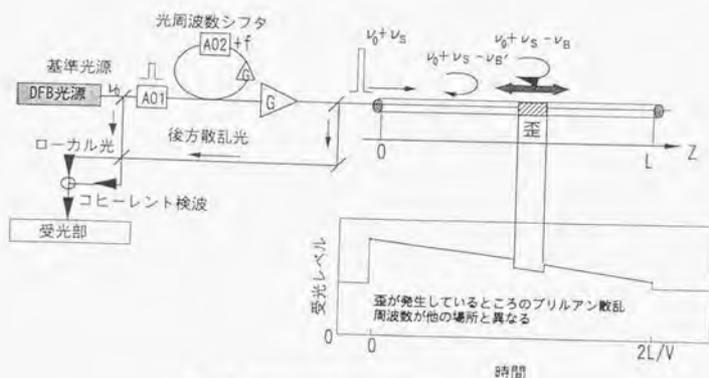


図 8.3 BOTDR システムの基本構成 [S1]

さらに、測定パルス光と検出時に使用するローカル光との周波数を一致させると、レイリー散乱光のみを検出することができる。従って、測定光パルスの光周波数を切り替えることにより、歪分布測定 (BOTDR)、損失分布測定 (COTDR) 双方の測定が可能となる。

8.2 想定する適用先

ブリュアン散乱法は、歪み分布とともに温度分布にも感度を持つが、温度分布については、前章に示した RDTS がかなり広い線量率領域で使用可能であることが示されている。そこで、ここではブリュアン散乱法による測定対象を歪みに限定して検討を進めた。

ブリュアン散乱型歪み分布測定法と従来の歪みゲージによる測定を比較すると、表 8.2 のように整理できる。従って、BOTDR 法によって歪みゲージの代替を考える場合には、

- 配管のような長い物体上の異常モニタリング
- 建屋、容器のような大規模構造物上の異常モニタリング

に適しているといえる。ただし、時間応答性の遅さもあり、モニタリング可能な異常は、長期間(数分～数十分)をかけて徐々に進行していくものに限られる。

表 8.2 歪みゲージ法、BOTDR 法の長短所の比較

測定法	長所	短所
歪みゲージ	・精度が良い ・時間応答性が速い	・連続分布が測定できない (死角がある)
BOTDR 法	・連続分布が測定可能 ・モニタリング範囲が広い	・時間応答性が良くない ・精度が良くない

8.3 放射線環境下への適用性検討

BOTDR の放射線環境下への適用性を評価するため、 ^{60}Co γ 線源を用いて長期間の照射実験を行った。

8.3.1 実験の概要

コア部に Ge のドープされたシングルモード (SM) 光ファイバー(約 120m を $1.1 \times 10^5 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ の線量率の場所に設置し、安藤電気 AQ8602 を用いて測定を行った。AQ8602 は、

- 入射波長をスキャンしながら歪み/温度分布を測定する BOTDR モード
- 入射波長を一定とし、光ファイバー中の損失分布を測定する COTDR モード

の2つの動作モードを有し、ここでは両方のモードでの測定を繰り返し、 γ 線照射の影響を見た。光ファイバー設置場所の温度は熱電対によってモニタリングを行ない、初期の状態 (35°C) を基準として校正を行なった。光ファイバーはできるだけ歪みの生じないような状態で Al 板に固定し、BOTDR モードによる測定結果の変化を測定した。

8.3.2 COTDR モードによる測定結果

積算線量: $5.5 \times 10^6 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)$ まで γ 線を照射した場合の、COTDR モードによる測定結果の推移を図 8.4 に示す。コネクタのつなぎ替え等に起因する変動は、40m の位置で規格化することにより補正した。約 40m の位置から先の部分で放射線誘起損失が増加し、傾きが徐々に大きくなっていることがわかる。

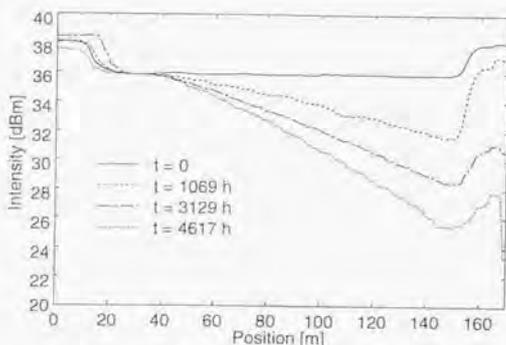


図 8.4 COTDR モードによる測定結果の推移

また、全体に生じた損失 ([dB/100m] に換算) の時間変化を、図 8.5 に示す。4615 時間 ($5.5 \times 10^6 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)$) の照射により、1550nm での放射線誘起損失が 10dB/km 程度に達していることがわかる。マルチモード光ファイバーの実験では、純粋石英コアの方が Ge ドープコアよりも耐放射線性が高いことが示されており、BOTDR 測定用のシングルモードファイバーでも純粋石英コアのものを用いるべきである。

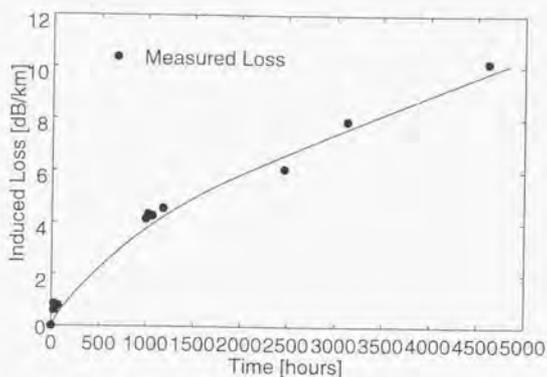


図 8.5 光ファイバー中に生じた放射線誘起損失量の推移

今回使用したシングルモード光ファイバーに対し、 2×10^3 Gy(SiO_2)/h で ^{60}Co γ 線を照射した際の、615nm、854nm、1550nmにおける放射線誘起損失の増加の様子を、図 8.6に示す。一方、純粋石英コアマルチモード光ファイバー(50/125、OHドーブ、ポリイミド被覆)に対して 3.6×10^3 Gy(SiO_2)/hの線量率で ^{60}Co γ 線を照射した場合の850nmにおける損失増加特性を、図 8.7に示す。

純粋石英コア光ファイバーの場合、Geドーブコアのものに比べ、850nm近辺での損失増加が1/3~1/4程度であることがわかる。コア径や被覆材も異なっているため単純な比較は難しいが、実際に純粋石英コアシングルモード光ファイバーを用いれば、図 8.4、図 8.5の値よりも大幅に小さいと考えることができる。

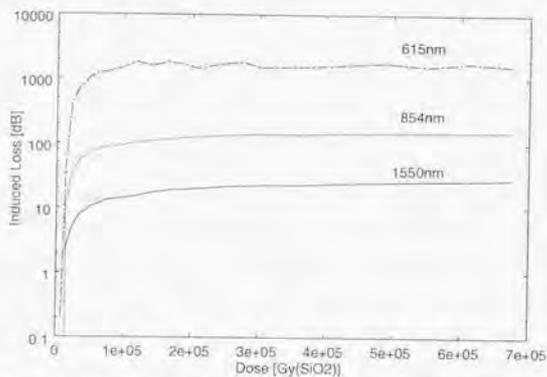


図 8.6 Geドーブコアシングルモード光ファイバーにおける損失増加特性

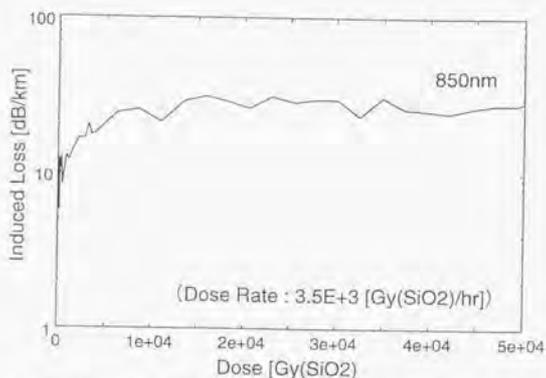


図 8.7 OH ドープ純粋石英コアマルチモード光ファイバーにおける損失増加特性

8.3.3 照射下歪み測定実験

照射を行ないながら、歪み測定結果がどのように変化するかを測定した。測定結果を図 8.8 に示す。放射線の照射によって歪み測定値が系統的に変化する現象は認められず、BOTDR の測定手法は原理的に放射線の影響を受けにくい、ということが出来る。

BOTDR から 120m 以上離れた部分では、ばらつきが大きくなっていることが分かる。図 8.4、図 8.5 に示したような損失の増加のため、S/N が悪くなったためと考えられる。

特に、4615 時間照射後の測定では、140m 以遠の部分では S/N が非常に悪くなっており、既に測定可能な限界を越えているということが出来る。今回使用した BOTDR 装置では、測定のダイナミックレンジは 8dB 程度とされており、光ファイバー先端部の損失がこれ以上に達したために、S/N が極端に悪くなったものと考えられる。

図 8.5 の損失増加特性から、100m 中の損失が 8dB に達する時間は、約 3000 時間である。それまでの照射量は、 3.6×10^5 Gy(SiO₂) であり、これは、

- 高速炉一次配管領域で約 150 日
- 軽水炉一次配管領域で 40 年以上

に相当する。従って、軽水炉の場合は、Ge ドープコアのものでも、十分な寿命を持っているということが出来る。また、光ファイバーを純粋石英コアのものに変更し、さらに寿命を延ばしてやれば、高速炉一次系でも数年の寿命で使用可能であるものと考えられる。

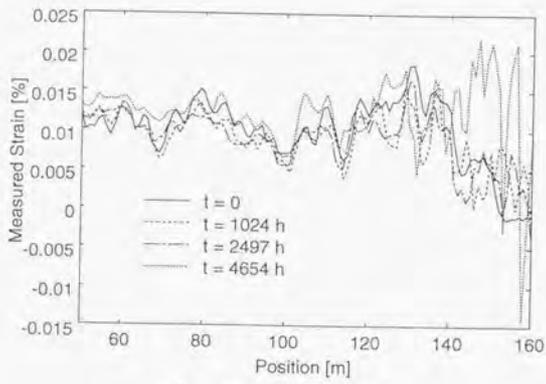


図 8.8 照射下歪み測定結果

8.4 実機配管系での歪み測定実験

8.4.1 実験体系

実機への適用性検討のため、高速実験炉「常陽」の二次系配管において、歪み分布測定実験を行った。実験は、主冷却器 (1B) への入口配管の外装板表面に光ファイバーを設置し、常陽の第32運転サイクル (1997年12月～1998年3月まで) の立ち上げ時、停止時において測定を行った。光ファイバーには、住友電工製の分散シフト型シングルモード光ファイバーを用いた。主冷却器入口付近での光ファイバー、及び歪みゲージの設置状況を、図 8.9 に示す。光ファイバーに沿った4点に歪みゲージを設置し (SG-1～SG-4)、測定結果を比較した。また、歪み測定用光ファイバーに沿わせる形でマルチモード光ファイバー (ナイロン被覆、GI、50/125/900) を設置し、測定領域における温度分布を前章でも用いた RDTs 装置 (日立電線、FTR030) によって測定した。

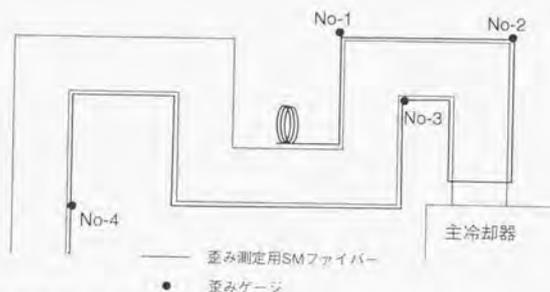


図 8.9 常陽主冷却器入口付近における歪み測定用光ファイバー、及び歪みゲージの設置状況

8.4.2 実験結果

第32サイクルの出力上昇前のBOTDR測定結果を初期値とし、最大出力時 (1997年12月17日15時14分) における測定結果の初期値からの変化を、図 8.10 に示す。SG-1、SG-4 よりも少し光ファイバーの先端側で大きな変化が生じていることがわかる。図 8.11 に変化の大きかった部分を網かけで示した。配管が90度曲がっている部分で、外側に張られた光ファイバーが伸びるような変形が生じたものと考えられる。

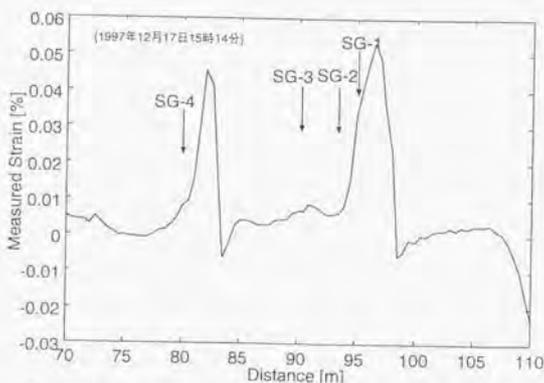


図 8.10 常陽主冷却器入口付近における BOTDR 測定結果
(最大出力到達後(1997年12月17日15時14分))

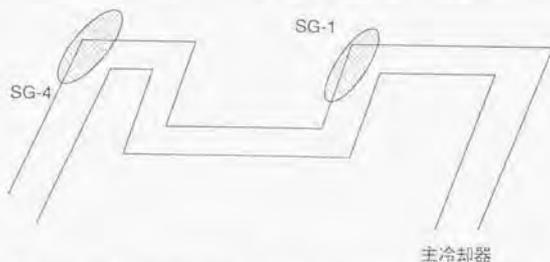
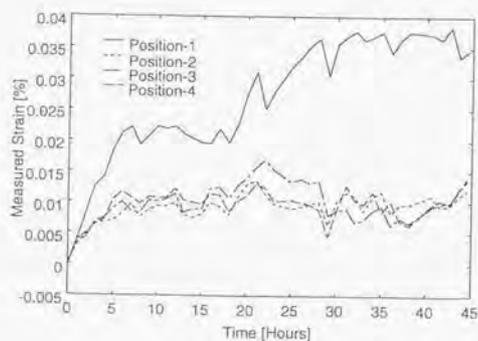


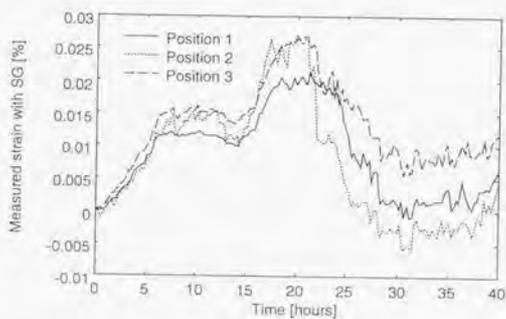
図 8.11 BOTDR 測定結果において歪みが大きく変化した部分

次に、SG-1～SG-3における歪みゲージによる測定結果と、SG-1～SG-4における、BOTDRによる測定結果を比較したものを、図 8.12に示す。歪みゲージによる測定結果は、全て測定開始後5時間で一定値に達した後、15時間～22時間程度にやや大きくなり、その後は測定値が小さくなっていることがわかる。BOTDRによる測定結果においても、SG-2～SG-4における測定結果は、これと同様の傾向を示している。図 8.13に、SG-1～SG-4の位置での温度の推移を示す。これを見ると、図 8.12における測定結果の推移は、各位置での温度変化に追従しており、熱歪みが現れているものと考えられる。

他方、SG-1の位置におけるBOTDRによる測定結果は、FTR、及び歪みゲージによる測定結果とは明らかに異なる傾向を示している。出力の上昇とともに配管全体が大きく移動し、歪みゲージによる局所的な測定では検出できないような長さの変化が生じたものと考えられる。



(a) BOTDR測定結果



(b) 歪みゲージ測定結果

図 8.12 BOTDR、及び歪みゲージによる測定結果の比較

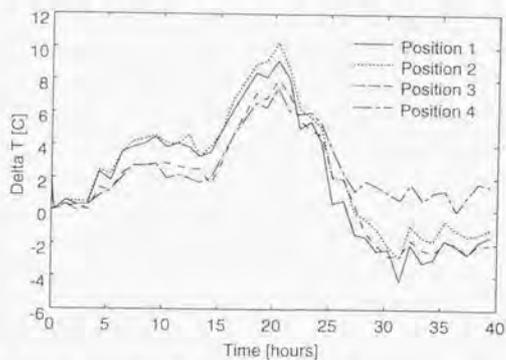
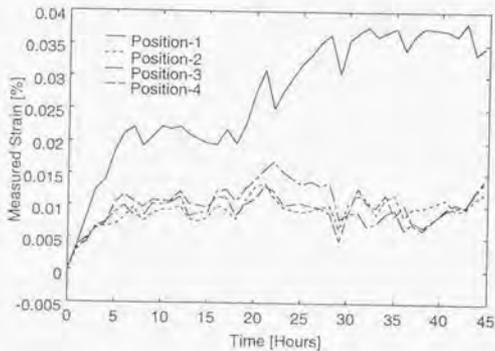
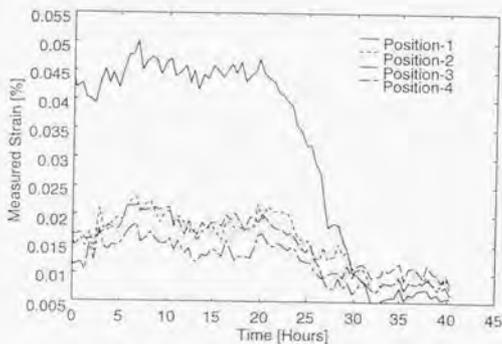


図 8.13 歪みゲージ設置位置における温度の推移 (FTR による測定結果)

また、第32サイクル出力上昇時、下降時の、SG-1～SG-4の位置でのBOTDR測定結果を図8.14に示す。停止時に十分出力が低下した後は、ほぼ出力上昇前に近い値まで戻っており、本測定の妥当性が確認できた。



(a) 起動時



(b) 停止時

図 8.14 第32サイクル出力上昇時、下降時におけるBOTDR測定結果の推移

8.5 BOTDR のプラントモニタリングへの適用性に関する考察

γ 線照射実験においても見たように、現在のBOTDR装置では、測定対象での放射線誘起損失が8 dB程度まで大きくなると、測定が難しくなる。従って、原子炉容器や、さらに線量率レベルの高い炉心内への適用は困難である。

例えば、

- 100m程度の光ファイバー長
- Geドープコア光ファイバーを使用
- 光ファイバーの取り換え間隔は少なくとも数年

という条件のもとでは、室温での線量率上限は、 $10^1 \sim 10^2$ Gy(SiO₂)/h程度であろうと考えられる。一方、光ファイバーとして純粋石英コアのものを用いれば、数倍～10倍程度まで適用対象は拡大できる。さらに、今後、フッ素ドープコアSM光ファイバーが開発されれば、 $10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h程度まで適用範囲は広がる可能性がある。

原子力プラント内でBOTDRが適用可能で、しかもその長所を有効に活用できる対象としては次のようなものが考えられる。

- 放射線レベルがBackground程度である場所での配管、大規模構造物のモニタリング
 - 二次系配管
 - 原子炉建屋
- 一次系配管の変形モニタリング
- 熱交換器、復水器等の大型機器内の各要素の変形モニタリング

原子炉容器自体や燃料の歪み計測は、放射線誘起損失が大きいために、今のところ困難な状況である。

また、BOTDRの測定は、入射光波長のスキヤニングを行う。そのため、時間応答性はRDTSよりもさらに劣っている。測定に要する時間は、

- 平均化回数
- 波長スキヤニングを行う波長範囲とステップ数
- 測定対象とする距離

等のパラメータによって決定される。従って、実際に適用対象を絞りこんだ時点で上記のパラメータの最適化を行い、できるだけ応答性の高い状態で測定を行うことが必要である。

以上のように、BOTDR法は、プラントモニタリング手法としてはかなり多くの課題を有したものである。しかし、例えば配管全体の変形を常時モニタリングすれば、大きな異常の兆候を検出することも期待できる。プラントに関する社会的受容性を考える上でも、適用検討に値する技術であると考えられる。



IV. 結論

光ファイバーを利用する放射線分布測定について検討を行うとともに、放射線以外を対象とする光ファイバーセンサーの原子力プラントモニタリングへの適用性について検討を行った。

まず、放射線分布測定法に関しては、PSF-TOF法の長距離化について検討を行い、全長で100m程度のシステムについて可能性を示した。連続分布が測定可能な長距離モニタリング手法として有用であると考えられる。また、PSF-TOF法の適用対象についても検討を行い、線量率分布モニター以外でも、非侵襲型の線源分布モニターとしての可能性を示した。これまでに提案されてきた、シンチレータ塗付光ファイバーによる移動型放射線分布測定法や導波路型シンチレータによる多点放射線分布測定法と比較を行い、それぞれに適した適用対象について検討を行った。

PSF-TOF法や、他の2手法のようなシステムでは可視域の発光を使用するため、高い放射線量率の場所では、放射線誘起損失のために長期間の継続使用が困難であるという短所があった。そこで、従来使用されていなかった、800nm以上の近赤外発光を用いる光ファイバー放射線分布測定システムについて検討した。波長フィルター、イメージインテンシファイア、イメージセンサー(冷却CCDカメラ、N-MOSリニアイメージセンサー等)の組合せにより、耐放射線性の高い分布測定システムが構築できることを示した。さらに、近赤外域でも、照射とともに損失は増加するが、その影響をOTDR法によって補正可能であることを示した。例えば、 $Gd_2O_2S:Pr$ からの880~910nmの発光を用いて放射線分布を測定する際に、市販の850nmにおけるOTDRシステムを用いて補正を行えば、かなり高い線量率まで適用可能であることを示した。

上記のような可視発光利用システム、及び長波長発光利用システムの、放射線関連施設への適用可能性について検討を行った。原子力プラントへの適用を考える場合には、例えば定検作業時のエリアモニタリングや、運転中の低線量率領域での分布測定には可視発光利用システムが適しており、運転中のプラントの一次系に対しては長波長発光利用システムが適用可能であることが示された。現在までのシステムでは、運転中の原子炉容器内での長期間使用は困難な状況にあり、今後、例えば中空光ファイバーの使用等によって、さらに耐放射線性の向上が求められる。

また、光ファイバーセンサーによる原子力プラント計装の可能性について、従来の計装手法との比較を通じて検討した。その際、光ファイバーセンサーに固有の分布測定法や、イメージセンサーを利用する離散分布測定法について、特に検討した。その結果、以下のようなことが示された。

- 炉心内外の中性子計装については、定常運転時に常時設置するような形では放射線照射の影響がかなり大きくなるものと考えられる。しかし、高温環境での損失は常温よりも非常に小さいことから、近赤外の発光を利用すれば、ある程度は使用できる可能性がある。今後、高温・高放射線の環境での照射実験により、改めて検討が必要である。一方、起動用系のセンサーとしてとらえ、定常運転時には格納するような使用法とすれば、十分に適用可能であると考えられる。分布測定を行うには、現在、プラントで採用されている移動型炉心内モニターのような測定を行うか、あるいは複数本の光ファイバーとイメージセンサーを利用する方法が考えられる。
- 既に市販されている温度、圧力等のセンサーは、フッ素ドープ石英コア光ファイバーのような耐放射線性の高いセンサーと併用することにより、 $10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO_2)/hの環境で、少なくとも数年~10年は使用可能であると考えられる。従って、プロセス計装について

は、十分に代替が可能である。それぞれのポイント型センサーからの出力用光ファイバーを束ね、イメージセンサーに接続すれば、最も単純な形で離散分布が測定できる。一方、光ファイバーセンサーの利点の一つに、時間、周波数領域を有効に活用してセンサーの多重化が容易であることが挙げられる。FBG、ラマン散乱型温度分布センサー等の分布センサーを積極的に活用すれば、プラント内のケーブルの削減に貢献できる上に、センサー間の死角をできるだけ小さくでき、安全性向上にも貢献できよう。

- 破損燃料の計測については、高い効率が求められるので、大型のシンチレータとバンドル型光ファイバーを併用するような構造が必要であろう。光ファイバーの適用に適した対象とは言えないが、PMT等の光検出器をシンチレータ設置場所から離れた場所に設置できるというメリットはある。
- 安全保護計装にも光ファイバーセンサーは上記の計装で用いられるものと同様のものが適用できる。しかし、時間応答性が重視されるので、分布測定よりもむしろシングルポイント型の測定を行うことが必要であろう。

光ファイバーセンサーのメリットを活かすためには、分布測定手法の積極活用が必要であることは上述の通りである。そこで、ラマン散乱型温度分布センサー(RDTS)及びブリュアン散乱型歪み分布センサーについて具体的な照射下測定実験、及び実機への適用を行った。

RDTSについては、放射線誘起誤差の補正手法を検討するとともに、高速実験炉「常陽」一次系において長期照射実験を行い、誤差補正手法の併用によって、少なくとも数年は継続使用が可能であることを示した。測定を通じての積算線量は、軽水炉一次系配管領域へ設置した場合の40年以上に相当しており、RDTSによる原子力プラント内配管領域での温度モニタリング可能性が実証された。連続分布測定を通じて冷却材漏洩モニターとして用いることも可能であり、動燃内での期待も高い。

また、ブリュアン散乱型温度/歪み分布センサーについては、 γ 線源を用いた実験により、測定原理自体がRDTSよりも耐放射線性が高いことが示された。原子力プラント一次系配管領域に適用する場合には、放射線に弱いGeドープコアSM光ファイバーを用いても、軽水炉で40年以上、高速炉でも150日程度の継続使用が可能であることを示した。純粋石英コア光ファイバーを用いれば、さらに耐放射線性の向上が期待できる。実機への適用性検討のため、常陽の二次系配管領域で測定を行い、起動、停止時の配管の変形をモニタリングできることを示した。この手法はRDTSにもまして時間応答性が遅いこともあり、どのような場所に適用するか、今後検討が求められるが、従来の計装では行われていなかった全く新しい計装として位置づけ、利用すべきと考えらる。

ここで検討した以外にも、光ファイバーイメージガイドを使用すれば、狭径部の直視型モニタリングが実現できるなど、光ファイバーを用いることにより革新的なシステムが構築できる可能性がある。また、原子力プラントでは従来からプラント内LAN用光ファイバーの敷設が進んでおり、モニタリング用光ファイバーとLAN用光ファイバーの兼用ができればケーブルの削減につながるものと期待され、今後、この方向での検討も必要であろう。現状では既往モニタリング手法の完全代替は困難であるが、光ファイバー分布センサーの得意な領域から採用を行い、長期的には光ファイバーセンサーによる運転制御までできるようになることを期待する。

謝辞

本論文をまとめるに当たっては、東京大学大学院工学系研究科 中沢正治教授、高橋浩之助教授に多くの御指導、御助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。また、細野技官には、実験装置の作製等の面で大変お世話になりました。ありがとうございました。

名古屋大学 井口教授には、特に論文の前半部分について、多くの助言、サポートを頂きました。大変ありがとうございました。

日本原子力研究所 角田課長代理には、原研 東海研究所での実験をはじめ、多くの場所でご一緒させて頂きました。氏の助けがなければ、この論文は書けなかったものと思います。心より、御礼申し上げます。

日立電線 山本副参事には、ラマン散乱型温度分布測定装置をお貸し頂くとともに、実験に必要な光ファイバーサンプルを御提供頂きました。自前で装置を組み上げようとして困難な状況にあった中で、氏の助けにより九死に一生を得た思いでした。大変ありがとうございました。

常陽での実験に当たっては、動力炉・核燃料開発事業団 実験炉部 技術課の皆様には便宜を図って頂きました。鈴木課長、前田課長代理、市毛様、住野様、長沖様、深見様ら、実験でご一緒させて頂いた皆様に御礼申し上げます。

年の離れた学生として大学に戻って以来、何人もの学生さんたちと一緒にすごさせていただきました。特に高田貴生君、井内悟朗君、イエンセン・フレデリッキ君、木村敦君とは、研究を協力して行うにあたり、貴重な経験を共有できたことをありがたく思っております。皆様の今後のご活躍を祈念致しております。

本論文をまとめるにあたって私の支えとなってくれた4人の両親と、祖父母たちに感謝しております。ようやく一つ、区切りをつけることができました。

最後に、常に支えてくれている妻に心からの謝意を表し、謝辞とさせていただきます。どうもありがとうございます。これからも宜しくお願いします。

1998年9月
高田 英治

参考文献

- [1] 小西良弘監修、「光ファイバー通新技術」、日刊工業新聞社、1995年。
- [2] 森下克己著、「光ファイバー-ファイバ型光デバイス-」、朝倉書店、1993年。
- [3] 飯塚啓吾著、「光工学」、共立出版、1977年。
- [4] E.J.Friebele, G.H.Siegel 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, 1978, pp.1261-1266.
- [5] E.J.Friebele, D.L.Griscom, "Color centers in glass optical fiber waveguides", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.61, 1986.
- [6] K.Nagasawa et. al., "Gamma-ray-induced absorption bands in pure-silica-core fibers", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.23, No.12, 1984, pp.1608-1613.
- [7] K.Nagasawa et. al., "Improvement of radiation resistance of pure silica core fibers by hydrogen treatment", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.24, No.9, 1985, pp.1224-1228.
- [8] K.Nagasawa et. al., "Radiation effects on pure silica core optical fibers by γ -rays: Relation between 2eV band and Non-Bridging Oxygen Hole Centers", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.25, No.3, 1986, pp.464-468.
- [9] D.L.Griscom, M.E.Gingerich and E.J.Friebele, "Radiation-induced defects in glasses: Origin of power-law dependence of concentration on dose", Physical Review Letters, Vol.71, No.7, 1993, pp.1019-1022.
- [10] D.L.Griscom and et al., "Fast-neutron radiation effects in a silica-core optical fiber studied by CCD-camera spectrometer", Applied Optics, Vol.33, No.6, 1994, pp.1022-1028.
- [11] D.L.Griscom, "Radiation hardening of pure-silica-core optical fibers by ultra-high-dose γ -ray pre-irradiation", Journal of Applied Physics, Vol.77, No.10, 1995, pp.5008-5013.
- [12] D.L.Griscom et al., " γ -radiation resistance of aluminum-coated all-silica optical fibers fabricated using different types of silica in the core", Applied Physics Letters, Vol.69, No.3, 1996, pp.322-324.

- [13] D.L.Griscom, " γ and fission-reactor radiation effects on the visible-range transparency of aluminum-jacketed, all-silica optical fibers", *Journal of Applied Physics*, Vol.80, No.4, 1996, pp.2142-2155.
- [14] D.T.H.Liu, A.R.Johnston, "Theory of radiation induced absorption in optical fibers", *Proc. of SPIE* Vol.2215, 1994, pp.58-63.
- [15] 西村真雄ら、「光ファイバの放射線特性」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-82-27、1982.
- [16] 中居久典、徳永利秀、石川一徳、「石英系光ファイバの γ 線照射特性」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-82-28、1982.
- [17] 平島利洋、田中祐幸ら、「石英コアファイバの耐放射線性(II)」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-83-22、1983.
- [18] 角田恒巳、若山直昭、真田和夫ら、「光ファイバの耐放射線特性(II)」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-84-29、1984.
- [19] 角田恒巳、若山直昭、真田和夫ら、「光ファイバの耐放射線特性(III)」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-85-30、1985.
- [20] 唐沢繁、羽鳥喜紀、高田達雄ら、「光ファイバの熱中性子照射効果(III) ^{60}Co γ 線照射との比較」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-87-6、1987.
- [21] 唐沢繁、羽鳥喜紀ら、「光ファイバの熱中性子照射効果(IV) ドープファイバの損失増加モデルの検討」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-87-137、1987.
- [22] K.Sanada, N.Shamoto and K.Inada, "Radiation resistance of fluorine-doped silica-core fibers", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol.179, 1994, pp.339-344.
- [23] T.Shikama, T.Kakuta and et al., "Behavior of radiation-resistant optical fibers under irradiation in a fission reactor", *Journal of Nuclear Materials*, Vol.212-215, 1994, pp.421-425.
- [24] T.Shikama, T.Kakuta and et al., "Optical properties in fibers during irradiation in a fission reactor", *Journal of Nuclear Materials*, Vol.225, 1995, pp.324-327.
- [25] T. Kakuta et al., "Development of In-core Monitoring System Using Radiation Resistant Optical Fibers", *Proc. of IEEE NSS*, November 1994.
- [26] T. Kakuta et al., "New optical methods of reactor dosimetry", *Proceedings of the ninth ASTM-Euratom Symposium*, 1996.
- [27] H. Hayami et al., "Radiation Resistivity of Pure-Silica-Core Image Guides", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.30, No.2, 1993, pp.95-106.
- [28] 速水弘之ら、「純石英コアイメージガイドの耐放射線性評価方法」、三菱電線工業時報、No.79、1990年、pp.1-8.
- [29] POF コンソーシアム編、「プラスチック光ファイバ」、共立出版、1997年.

- [30] 宮地 統一監修、「プラスチック光ファイバの応用技術」、電気書院、1988年。
- [31] J. Marcou, M. robiette and J. Bulabois, "Plastic optical fibers - practical application-", John Willey & Sons, 1997.
- [32] H.Henschel, O.Köhn and et al., "Radiation sensitivity of plastic optical fibers", proc. of POF '93, Hague, 1993.
- [33] "Scintillation roundtable update recors", BICRON.
- [34] G.B. Spector, T. McCollum and A.R. Spotwart, "Scintillator fiber optic long counter response to neutrons", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol.A346, 1994, pp.273-278.
- [35] P. Ottonello, G.A. Rottigni and et al., "Slow neutron imaging using scintillating glass optical fibers", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol.A349, 1994, pp.526-531.
- [36] S. Imai, S. Soramoto and et al., "New radiation detector of plastic scintillation fiber", Review of Scientific Instruments, Vol.62, No.4, 1991, pp.1093-1097.
- [37] B.Baumbaugh et al., "Scintillating and clear waveguide fibers read out with visible light photon counters", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol.A345, 1994, pp.271-278.
- [38] C.Mori, T.Osada, K.Yanagida, T.Aoyama, A.Uritani and H.Miyahara, "Simple and quick measurement of neutron flux distribution by using an optical fiber with scintillator", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.31, No.3, 1994, pp.248-249.
- [39] C. Mori, "Development and application of new position-sensitive radiation detectors", Memoirs of the School of Engineering, Nagoya University, Vol.8, No.2, March 1997.
- [40] T.Maekawa, M.Yoda, K.Tanaka, T.Masumaru and S.Morimoto, "Fiber-optic multipoint radiation sensing system using waveguide scintillators", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.33, No.5, May 1996, pp.381-389.
- [41] Dr. T. Maekawa, private communication.
- [42] E.Takada, K.Sugiyama, T.Iguchi, H.Takahashi and M.Nakazawa, "Neutron radiation distribution sensor using flexible plastic scintillating fiber combined with the Time-of-Flight technique", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.42, No.4, August 1995, pp.570-574.
- [43] E. Takada, T. Iguchi and et al., "Distributed sensing of fusion neutrons by plastic scintillating fibers", Fusion Engineering and Design, Vol.34-35, 1997, pp.591-594.
- [44] 江本武彦, 鳥居達男他, 「シンチレーションファイバーを用いた線量率分布測定」、PNC TN9410 96-299、動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター、1996年。

- [45] W.N. MacElroy et al., "A computer-automated iterative method for neutron flux spectra determination by foil activation", AFWL-TR-67-41, Vol.4, 1967.
- [46] H. Takahashi, D. Fukuda and et al., "Use of 1.5 μm infrared light from a cooled scintillator for optical fiber based system", Transactions on IEEE Nuclear Science, Vol.43, No.3, June 1996, pp.1321-1323.
- [47] 蛍光体同学会、「蛍光体ハンドブック」、オーム社、1987年、
- [48] E.Takada, Y.Hosono, H.Takahashi and M.Nakazawa, "Application of red and near infrared emission to radiation measurements based on optical fibers", to be published in IEEE Transactions on Nuclear Science, June 1998.
- [49] J.P. Darkin, "The distributed fiber optic sensing handbook", IFS Publications, 1990.
- [50] 山根正之他、「ニューガラス-その機能と応用-」、日本規格協会、1989年、
- [51] 川副博司、西澤紘一、「ニューガラス入門」、工業調査会、1991年、
- [52] J. Sejvar, "Normal operation radiation levels in pressurized water reactor plants", Nuclear Technology, Vol.36, 1977, pp.48-55.
- [53] J.A. Naber and N.A. Lurie, "Radiation qualification of nuclear reactor components", Nuclear Technology, Vol.36, 1977, pp.40-47.
- [54] M.J. Kolar and J.R.McCarty, "Post loss-of-coolant accident doses to pressurized water reactor equipment", Nuclear Technology, Vol.36, 1977, pp.74-78.
- [55] M.J. Kolar and N.C. Olson, "Calculation of accident doses to equipment inside containment of power reactors", Nuclear Technology, Vol.36, 1977, pp.56-64.
- [56] 中村尚史、「放射線物理と加速器安全の工学」、地人書館、1995年、
- [57] M.Plum, D. Brown and et al., "Ion-chamber beam-loss-monitor system for the Los Alamos meson physics facility", Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference, Vol.3, 1993, pp.2181-2182.
- [58] R.Ursic, K. Mahoney and et al., "CEBAF beam loss accounting", Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference, Vol.4, 1995, pp.2652-2654.
- [59] L. Emery, "Beam simulation and radiation dose calculation at the advanced photon source with shower, an interface program to the EGS4 code system", Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference, Vol.4, 1995, pp.2309-2311.
- [60] A. Fasso, J.C. Gaborit and et al., "Radiation levels in LEP, 1989-1995", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol.A384, 1997, pp.531-538.
- [61] H. Dinter, K. Tesch and D. Dworak, "Doses due to neutrons and charged particles in the angular range 10° to 170° behind concrete shield of high-energy proton accelerators", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol.A384, 1997, pp.539-543.

- [62] T. Naito, D. McCormick and et al., "Loss monitor for ATF", Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 1997, pp.332-334.
- [63] 金子洋光、関田英章ら、「溶解槽装荷セル (R131) 除染 (I) セル内の遠隔除染」、日本原子力学会、昭和 60 年 年会 H1、武蔵工業大学、1985 年 3 月。
- [64] 金子洋光、龍輪正彦ら、「溶解槽装荷セル (R131) 除染 (II) 燃料分配器の遠隔除染」、日本原子力学会、昭和 60 年 年会 H2、武蔵工業大学、1985 年 3 月。
- [65] 金子洋光、我孫子庄助ら、「溶解槽装荷セル (R131) 除染 (III) 遮蔽及び手除染」、日本原子力学会、昭和 60 年 年会 H3、武蔵工業大学、1985 年 3 月。
- [66] A. Makino, H. Ishiguro, A. Yamato and Y. Akatsu, "Experience in applying the ALARA principle to maintenance work in a nuclear fuel reprocessing plant", Proceedings of a Symposium on Optimization of Radiation Protection, Vienna, March 1986, pp.241-249.
- [67] T. Yamanouchi, H. Kaneko, H. Okamoto and S. Tashima, "Decontamination of the dissolver loading cell (DLC) in Tokai reprocessing plant", Proceedings of remote Systems and Robotics in Hostile Environments, Washington, March-April 1987, pp.593-598.
- [68] J.P. Darkin, D.J. Pratt and et al., "Distributed fiber Raman temperature sensor using semiconductor lightsource", Electronics Letters, Vol.21, 1985, pp. 569-570.
- [69] 小川勝徳、小沢保夫、川神裕志他、「光ファイバ温度レーダの開発」、日立電線、No.9、1990、pp.7-12.
- [70] K. Ogawa, Y. Ozawa, S. Yamamoto, H. Kawakami and T. Tsutsui, "Fiber optic temperature laser radar for distributed temperature measurement", Hitachi Cable Review, No.9, 1990, pp.21-26.
- [71] J.P. Darkin, "The distributed fiber optic sensing handbook", IFS Publications, UK, 1990, p.143.
- [72] F.B.H. Jensen, E. Takada and et al., "Consequences of radiation effects on pure-silica-core optical fibers used for Raman-scattering-based temperature measurements", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.45, No.1, February 1998, pp.50-58.
- [73] F.B.H. Jensen, E. Takada and et al., "Distributed Raman temperature measurement system for monitoring of nuclear power plant coolant loops", Proc. of SPIE, Vol.2895, November 1996, pp.132-143.
- [74] 森田洋右、山本哲、福地佳介、川上裕志、「光ファイバ温度分布センサの照射効果 (I) 波長及び照射温度の影響」、電気学会 誘電・絶縁材料研究会資料、DEI-93-166.
- [75] 森田洋右、山本哲、福地佳介、川上裕志、「光ファイバ温度分布センサの照射効果 (I) 照射下での寿命推定」、電気学会 誘電・絶縁材料研究会資料、DEI-93-167.
- [76] 高橋康夫、大曾根利光ら、「東海第二発電所における光ファイバ温度監視装置の開発」、火力原子力発電、Vol.46, No.8, August 1995, pp.851-860.

- [77] "東海第二発電所 光ファイバー温度監視装置 FOTMS"、日本原子力発電株式会社パンフレット。
- [78] 特許出願公開番号 特開平 7-218354(日本)。
- [79] S. Suzuki, K. Iizaka and et al., "Measurement and calculation of radiation sources in the primary cooling system of JOYO", Proc. Int. Symp. Theory and Practices in Radiation Protection and Shielding, Vol.2, 1987, pp.363-376.
- [80] K. Shimizu, T. Horiguchi and et al., "Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers", Journal of Lightwave Technology, Vol.12, No.5, May 1994, pp.730-736.
- [81] K. Shimizu, T. Horiguchi and et al., "Measurement of distributed strain and temperature in a branched optical fiber network by use of Brillouin optical-domain reflectometry", Optics Letters, Vol.20, No.5, March 1995, pp.507-509.
- [82] X. Bao, J. Dhliwayo and et al., "Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering", Journal of Lightwave Technology, Vol.13, No.7, July 1995, pp.1340-1348.
- [83] "ANDO Technical Journal", 安藤電気株式会社、1996年。
- [84] 荒克之、川口千代二、「原子炉の計測」、幸書房、1978年。
- [85] 石森富太郎、「原子炉工学高座6 計測制御」、培風館、1971年。
- [86] 住田健二、加藤利明、古川友三、「原子力計測」、日刊工業新聞社、1966年。
- [87] 浅田忠一ら監修、「原子力ハンドブック」、オーム社、1976年。
- [88] 日立製作所殿 Private communication.
- [89] B. Culshaw and J. Darkin, "Optical Fiber Sensors Volume 3", Artech House, Norwood, 1996.
- [90] B. Culshaw and J. Darkin, "Optical Fiber Sensors Volume 4", Artech House, Norwood, 1997.
- [91] E. Udd, "Fiber Optic Smart Structures", John Wiley and Sons, New York, 1994.
- [92] O.D.D.Soaes, "Trends in optical Fiber Metrology and Standards", Kluwer Academic Publishers, London, 1995.
- [93] 久間和生、布下正宏、「光ファイバセンサ」、情報調査会、1986。
- [94] 森治嗣、兼本茂、榎本光広、山本泰、江畑茂男、「中性子ゆらぎ信号を用いた炉心流量計測技術の開発」、日本原子力学会誌、Vol.39, No.9, 1997, pp.788-798.



APPENDIX-A

原子カプラント計装の現状

原子カプラント計装の分類のしかたには特に定められたものはないが、ここでは

- 中性子計装 (核計装)
- プロセス計装
- 破損燃料検出系
- 安全保護計装
- 炉心内計装

に分類して、使用されている検出器を整理した。また、高速炉においては軽水炉とは異なる特殊なモニタリング手法が用いられることもあり、それらについても適宜言及した。

A.1 中性子計装 (核計装)

中性子計装は、核分裂によって生じる中性子束を直接測定し、原子炉内燃料の核分裂反応の増減に関する情報を速やかに得ることを目的とする。中性子計装の特徴としては、計測範囲が非常に広く、8桁から12桁にもなることがあげられる。そのため1つの計装系での網羅は難しく、2~3の計装系に分け、それぞれの系をさらに2~8チャンネルの計装系からなるようにしている。代表的な中性子計装の構成例を図A.1に示す。

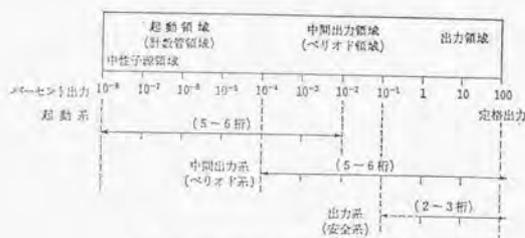


図 A.1 代表的な中性子計装の構成 [82]

起動系・中間出力系の検出器は、出力運転中は炉心底部の中性子束の低い場所まで連続的に引き抜いて保護される。一方、出力系の検出器は、運転中も位置は固定されている。BWR においては、中性子計装は炉内中性子計装によっており、炉外中性子計装は PWR に関するものと言うことができる。PWR における中性子計装の範囲を図 A.2 に示す。



図 A.2 中性子計装の計装範囲 [82]

A.1.1 起動系

BWR で用いられる中性子計装用検出器には、以下に示すようなものがある。

(1) 核分裂計数管

核分裂計数管は、構造などは比例計数管とはほぼ同じであり、電極に核分裂物質が塗布されたものである。核分裂によって生じる核分裂破片の電離作用を通じ、パルスを出力する。核分裂計数管の感度は BF₃ 比例計数管よりも 1 桁程度低いが、電荷収集時間が短く、中性子束の高い領域まで使用できる。

A.1.2 中間出力系

これらの領域で主に用いられるのは、核分裂電離箱である。センサー出力のゆらぎ成分の 2 乗平均値を測定し、この 2 乗平均値がセンサーに入力する単位時間当たりの中性子数に比例することを利用したものである。本来は中間出力領域で用いられるが、定格出力の範囲までカバーすることが多い。

A.1.3 出力系

出力系の目的は、定格出力付近の原子炉出力を精度よく計測するものである。また、原子炉の異常な出力上昇を感知し、原子炉の安全保護用の信号を得ることにある。動作範囲は定格出

力付近の約2~3桁であり、検出器には核分裂電離箱が用いられることが多い。 10^9 n/cm²/s 以上の中性子束の場所に常置されるため、かなり高い耐放射線性が要求される。

A.2 プロセス計装

プロセスとは、一般に「物質を何らかの方法で処理し、新たなものを生み出す製造工程」という意味で用いられており、従ってプロセス計装は「プロセスに参与している物質量を測定する計測システム」を意味する。原子炉のプロセス計装と言った場合には、広く解釈すれば原子力プラントにおける全ての計測システムがプロセス計装に含まれる。しかし、一般にはエネルギー製造プロセスに参与している計装から、中性子計装を除いたものをプロセス計装と呼ぶことが多い。図 A.3及び図 A.4に軽水炉の出力制御に関係するプロセス制御計装系の概念を示す。実際のプラントでは計測対象は非常に多く、大型プラントでは数万点にも達する。ここではその中から特に重要なものを取り上げ、整理する。

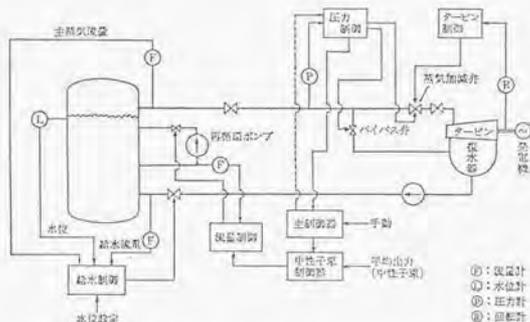


図 A.3 BWR プラントのプロセス計装制御系概略図 [82]

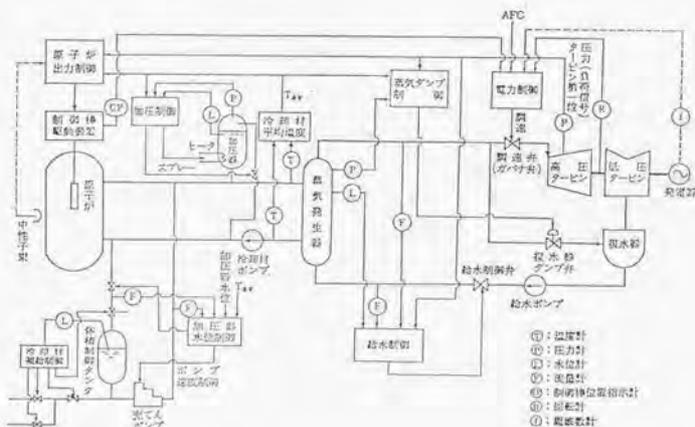


図 A.4 PWR プラントのプロセス計装制御系概略図 [82]

A.2.1 温度測定

温度の測定は、プラント計装の中でも特に重要なものである。BWRでは、原子炉の加熱・冷却の割合を一定に抑えるため、炉壁の数十個所で温度がモニタリングされ、压力容器の健全性確保に貢献している。表A.1に温度測定法の例を示す。一方、PWRでは冷却系の温度測定が制御のために重要な役割を担っている。

表A.1 各種温度測定法の比較 [83]

温度検出 法の種類	測 定 範 囲	測 定 精 度	説 明
熱 電 対	PR 0~1600°C	±0.5%	基準接点と測温接点間の温度差に比例して発生する mV を mV 計または電位差計で測定する。基準接点温度の補償が必要である
	K -200~1300°C	±0.75%	
	J -200~ 800°C	±0.75%	
	T -200~ 350°C	±0.75%	
測温抵抗体	Pt -200~ 500°C	±0.5%	温度により抵抗の劣化する金属膜を使用し、ニートストンブリッジにより抵抗を測定して温度を知る
	Ni -50~ 300°C	±0.5%	
Cu 0~ 130°C	±0.3%		
輻射式 発 信 器	500~2000°C	±1%	物体の放射をレンズによって受熱板に集光させ、受熱板上の熱電対によって mV に変換する。被測定物に接触しないで測定することができる
光高温計	700~2000°C	約5 deg (計器を併せ)	フィラメントに電流を流して加熱し、その色と被測定物の色が同じになったときの電流によって温度を測定する。よく校正したものは精度が高い
圧 力 式 温 度 計	液体式 -180~320°C	±0.6%	高測部の大きさが小さい(約10mmφ×60mm)。感度が高く、25 deg 程度の計器ができる
	ガス式 -130~540°C	±0.5%	高温測定が可能である
	蒸気圧式 -200~320°C	±0.5%	キャピラリーの周囲温度の影響を受けない。目盛は不均一になる。応答速度が早い
バイメタル	-40~350°C	±1%	温度によるバイメタルの反形で直線指針を動かすことができ、丈夫である
サーミスター	-50~300°C		温度が高くなると抵抗が下がり、温度係数が大きいので、狭バンドの計器をつくることができる

原子力プラントでは、主に熱電対が用いられており、場所によっては測温抵抗体及びサーミスターが用いられている。熱電対は、異種金属間の接触電位差から温度を求めており、原理、構造が簡単、低価格という長所を有す。JISによりいくつかの種類が指定されているが原子力プラントではK型が主に用いられる。測温抵抗体は、温度による抵抗の変化から温度を測定するものである。原子力プラントでは、温度が低く、かつ高精度が要求される場合に測温抵抗体が用いられる。

A.2.2 圧力測定

圧力センサーには次のような種類がある。

- (i) 測定しようとする圧力に対して既知の力をつり合わせる方法
- (ii) 圧力による物体の弾性変位量を測定する方法 (ブルドン管型、ダイヤフラム型、ペローズ型等)

(iii) 圧力の作用による電子物性値の変化を測定する方法

BWR においては、図 A.5 に示すように、ダイアフラムの弾性変位量を半導体型の歪みセンサーに伝達し、その測定値から圧力量を知るセンサーが主に用いられている。

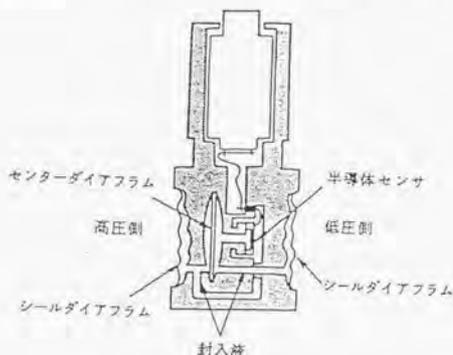


図 A.5 半導体式圧力センサーの概念

A.2.3 流量測定

流量計測のうち最も重要なのは1次系、2次系などの主ループにおける冷却材または蒸気の流量測定で、これらは原子炉プラントの安全運転と制御に欠かせない計測となっている。流量測定の方法にはいくつもの種類があるが、原子炉プロセス系では主に絞り流量計が用いられている。絞り流量計では、流路の途中に絞り機構を設け、その前後の差圧を測定することによって流量を知る。この他には面積流量計、超音波流量計、相関流量計、タービン流量計など多くの種類がある。また、高速炉においては、流量測定には主として電磁流量計が用いられている。

絞り流量計の構造の一例を図 A.6 に示す。流路に絞りを設けると、その前後の圧力 (P_1 , P_2) に差が生じ、その圧力差と流量の間に一定の関係があることを用いて流量を測定する。図 A.6 のような単純な構造では絞りの存在のためにうず流が生じ、流路が乱れることから、ノズルまたはフローノズルと呼ばれる構造が採用されることもある。絞り流量計で用いられる検出器は圧力及び差圧センサーであり、精度は、フルスケールの1~2%程度である。

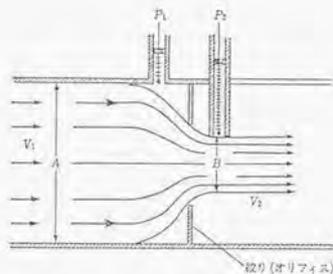


図 A.6 絞り流量計の原理 [82]

A.2.4 液体レベル測定

原子力プラントでの液体レベル計測は非常に重要であり、例えばBWRの压力容器内の水位測定、PWRの加圧器、蒸気発生器内の水位測定などは、プラントの安全運転に直接関係している。液体レベル測定にも多くの手法が用いられているが、主なものには差圧式レベル計、浮子式レベル計、超音波式レベル計等がある。差圧式レベル計は図A.7に示すように、容器の基準レベルの圧力と、液面より上のガス圧の差から液面を決定する方法である。

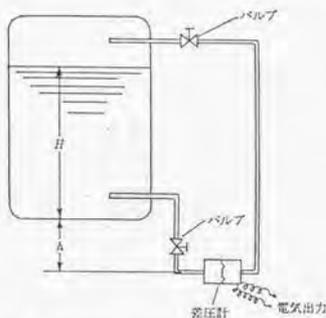


図 A.7 差圧式レベル計の概念 [82]

また浮子式では、液面にフロート (浮子) を浮かべその位置を検出することが行われる。浮子式レベル計の概念を図A.8に示す。フロートを容器内に置く (a) 方式と容器外の配管にフロートを置く (b) 方式がある。

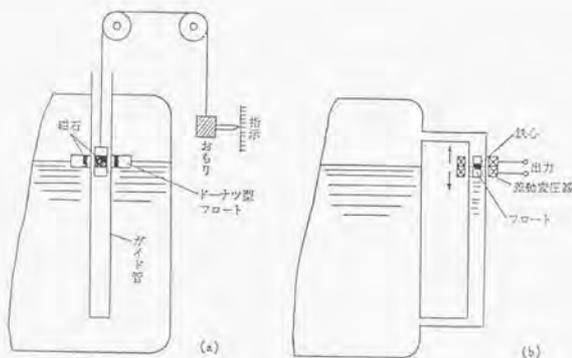


図 A.8 浮子式レベル計の概念 [82]

Na 冷却高速炉では抵抗プローブ型レベル計が用いられる。ステンレス製プローブを液体に挿入すると、Na に浸された部分は抵抗が短絡されるので、抵抗の変化をもとに液面の変化を測定することができる。実際の装置では定電流源を用い、電圧の変化を測定する。

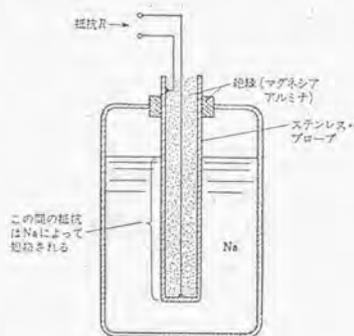


図 A.9 抵抗プローブ型 Na レベル計の原理 [82]

また、高速炉においては、抵抗プローブ型ナトリウムレベル計等が用いられる。

A.2.5 その他のプロセス計装

(1) 不純物の測定

水蒸気給水などの純度管理には導電率計 (電気伝導度計) がよく用いられる。不純物の混入による水の導電率の上昇を測定するもので、不純物の種類と量を測定することはできないが、簡便さから広く用いられている。実際の測定では白金電極を挿入し、交流電圧を印加した時の電流を測定する方法と、交流ブリッジ回路を構成し、電極間の抵抗を測定する場合がある。

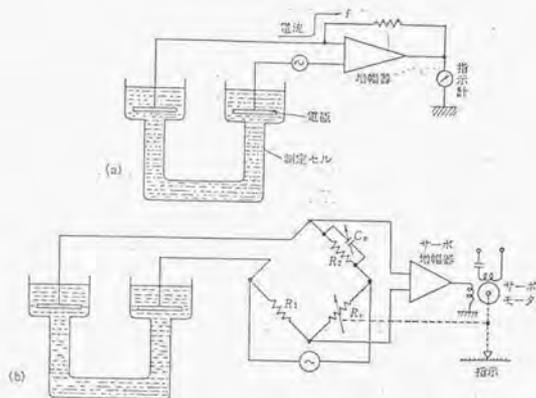


図 A.10 伝導度計の基本構成 [82]

また導電率計以外では、pH 計が水質測定によく用いられている。特定の電極 (主にガラス電極) を溶液中に浸した際の起電力を他の比較電極との電位差から測定する。

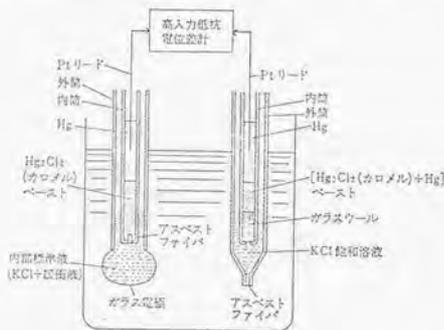


図 A.11 ガラス電極 pH 計の概念 [82]

Na 冷却高速炉における不純物の測定には、ブラッキング計が広く用いられている。ブラッキング計では、冷却材サンプルをクーラー及びオリフィスからなる構造に導き、徐々に温度を下げながらオリフィスを通過する流量を測定する。不純物の溶解度は温度低下とともに小さくなるので、不純物の種類に対応した温度まで低下したところで析出が生じ、流量が小さくなる。従って流量計の測定から不純物の種類、量を知ることが可能である。

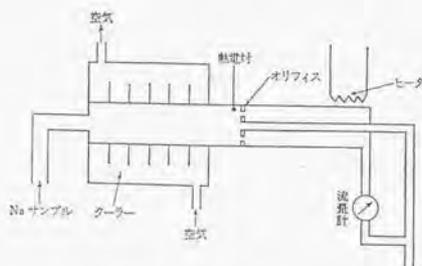


図 A.12 ブラッキング計の概略図 [S2]

Na 中の酸素は構造物や燃料被覆管の腐食の原因となるので、酸素濃度の監視も非常に重要である。酸素計の構造は pH 計と同様である。また、Na 中への水の混入は水素濃度測定を通じてモニタリングされる。水素透過性金属薄膜を用い、外側の圧力の上昇をもとに測定する手法が採用されている。

(2) プロセス放射線測定

作業員の被曝、環境への放射線物質の放出などを防ぐため、プロセス系での放射線モニタリングが行われている。例として BWR の場合では、(1) 主蒸気管モニター、(2) エアエジェクタ蒸気モニター、(3) 排気筒モニター、(4) 液体モニター、(5) 原子炉建家換気モニターよりなる。図 A.13 にその配置を示す。

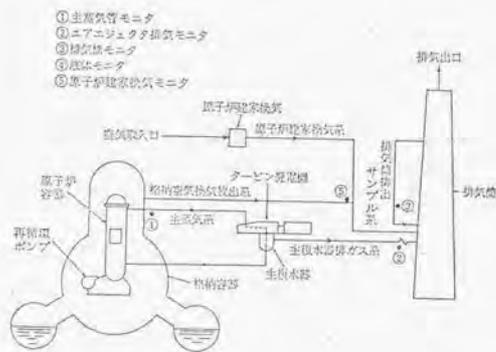


図 A.13 BWR のプロセス放射線モニター [S2]

放射線検出器としては、 γ 線電離箱、またはシンチレーション検出器が用いられる。軽水炉のプロセス放射線モニターの目的には、燃料破損発生の検出と配管からの冷却水リークの検出が含まれている。

A.3 破損燃料検出系

原子炉の安全確保目標の1つに、核分裂生成物(FP)の燃料被覆材の中への閉じ込めがある。しかし燃料関連技術が向上しても、現実には小規模のもれが生じることがあり、従って小規模漏えいをできるだけ早く検知し、大規模な事故に至る前に対策を講じることが必要である。そのためFFDL(Failed Fuel Detection and Location:燃料破損の検出と位置決め)のための測定が行われている。

軽水炉では燃料と水の間に反応が生じないことから、破損が生じても大事故につながる可能性は低いが、最近では破損の発生と位置を検知した後は直ちに運転停止・燃料交換が行われる。一方、高速炉では燃料ピンの間隔が狭く、線出力密度が大きいため被覆管の表面温度が高く、破損によって冷却材流路の閉塞が生じ、局所的な温度上昇が発生して破損の伝播が起こる可能性がある。このためFFDLが非常に重視される。FFDLの手法には次のようなものがある。

- 遅発中性子法(DN法)

DN法では、冷却材サンプルを測定用チェンバーに導き、FPからの遅発中性子(DN)を測定する。中性子検出器にはBF₃検出器、³He検出器が用いられる。

- プレシビテータ法

冷却材中に放出されたFPのうちKr、Xe等の希ガスはβ崩壊して正の電荷を持つRb、Csとなる。これを負に帯電したワイヤーまたはテープに吸着させ、Rb、Csがさらにβ崩壊する際に生じるβ線またはγ線を測定する。検出器としてはシンチレーション検出器が用いられる。最近ではGe検出器により、γ線スペクトルを測定する方法も開発されている。

- β線、γ線測定法

燃料破損による冷却材のβ、γ線レベルの上昇を測定する手法であるがバックグラウンドが高いためにS/N比が悪いという欠点がある。S/N比の向上のため、Ge検出器によってスペクトル測定が行われる。

- ダギング法

高速炉FFDLのために開発された手法で、各燃料ピンまたは集合体ごとに組成の異なる希ガスを入れておき、破損が生じた場合にカバーガスに移行したタグガスの分析を行い、破損燃料の位置決めを行う手法である。

- 中性子束傾斜法

炉心内で局所的に中性子を変化させ、それが破損燃料の近傍であればFP放出量が増加することを利用して、破損燃料の位置決めを行う手法。この手法だけでは十分な精度は得られないが、シッピング法を併用すれば確実な位置決めが可能である。

- シッピング法

炉停止期間中に燃料集合体を隔離箱に隔離し、一定期間後に隔離箱中の水またはガスを採取してFPの分析を行う。

A.4 安全保護計装

プラント運転中に計測値が設定値から外れた場合に警報、スクラム等の信号を出し、運転員の注意が喚起され安全操作が行われる。このような安全操作のための計装を安全保護計装という。安全保護計装では、フェイルセーフ、多重系、冗長系、分散、待機というような安全思想があり、それに基づいてシステムの設計がなされる。表 A.2 に ABWR (柏崎 6/7 号機)、表 A.3 に PWR の安全操作項目を示す。測定器自体については他の測定と同様なものが用いられる。

表 A.2 ABWR の原子炉スクラム信号

スクラム信号の種類	検出器		スクラム設定値
	種類	検出場所	
原子炉圧力高	圧力検出器	原子炉圧力容器	74.9kg/cm ² g
原子炉水位低	レベル検出器	原子炉圧力容器	セパレータ・スカー卜下層より 82cm L (レベル 3)
ドライウエル圧力高	圧力検出器	ドライウエル	0.14kg/cm ² g
中性子束高	平均出力領域モニタ	炉心内	定格出力の 15% 一定、120% 一定及び自動可変設定
原子炉周期短	起動領域モニタ	炉心内	10秒
中性子束計突動作不能	平均出力領域モニタ 起動領域モニタ		中性子束計突動作不能の場合
炉心流量急減	流量検出器	原子炉圧力容器	流量変化幅大
制御棒駆動機構 充てん水圧力低	圧力検出器	原子炉建屋 原子炉区域	130kg/cm ² g
主蒸気隔離弁閉	位置検出器	主蒸気隔離弁	開度 90%
タービン主蒸気止め弁閉	位置検出器	タービン主蒸気止め弁	開度 90%
タービン蒸気加減弁急速閉	圧力検出器 位置検出器	タービン蒸気加減弁 のパイロット弁	42.0kg/cm ² g
主蒸気管放射能高	ガンマ線モニタ	ドライウエル外側の 主蒸気管	通常の放射能の 10倍
地震加速度大	加速度検出器	原子炉建屋 原子炉区域	
手動	押しボタン・スイッチ	中央制御室	
モード・スイッチ(停止)	モード・スイッチ	中央制御室	

(注) 検出場所及びスクラム設定値は、詳細設計により決定する。

表 A.3 PWR の原子炉スクラム信号 [82]

項 目	備 考
起動時の原子炉起動率異常	5 DPM*
出力過大	115%
1次系圧力の異常低下, 異常上昇	
主冷却水入口温度の異常上昇	
蒸気発生器水位低下	
主冷却水流量低下	
制御棒ベターン異常	
制御棒温度異常上昇	
格納容器圧力異常	
圧水ポンプ流量低下	
電源喪失	
手動スクラム	
地震	原子力船になし
大傾斜	原子力船の場合

*印 デカード/min

A.5 炉心内計装

炉心内計装で重要なものには、BWRの流量計装がある。

BWRは飽和蒸気系であるため、原子炉压力容器圧力や主蒸気圧力の測定が重要であり、炉心内温度測定や炉心内圧力測定は行われていない。一方、炉心内流量測定は原子炉の炉心特性を知る上で流量測定は非常に重要であり、現在のところ、次のような方法で測定されている。なお、流量測定に使用されるセンサーとしては、先述の差圧センサーが用いられている。

- ディフューザ上下差圧測定
原子炉压力容器内に設置されている24本のジェットポンプのディフューザ上下差圧を測定し、合計したものをから流量を知る。
- 燃料下部・炉心支持板上部間差圧測定
ほう酸水注用用の二重配管を用い、燃料下部入口と炉心支持板上部の差圧を測定する。
- 炉心圧力損失測定 炉心支持板下部圧力とジェットポンプ吸入口の間の圧力損失を測定し、原子炉運転中の炉心内の水・蒸気の流動状態を知る。

また、最近のABWRにおいては、図A.14に示すように、

- 安全保護系用の炉心流量は炉心支持板差圧から測定
- 炉心監視用の炉心流量はインターナルポンプの差圧、及びインターナルポンプの回転数から測定

というような測定が行われている。

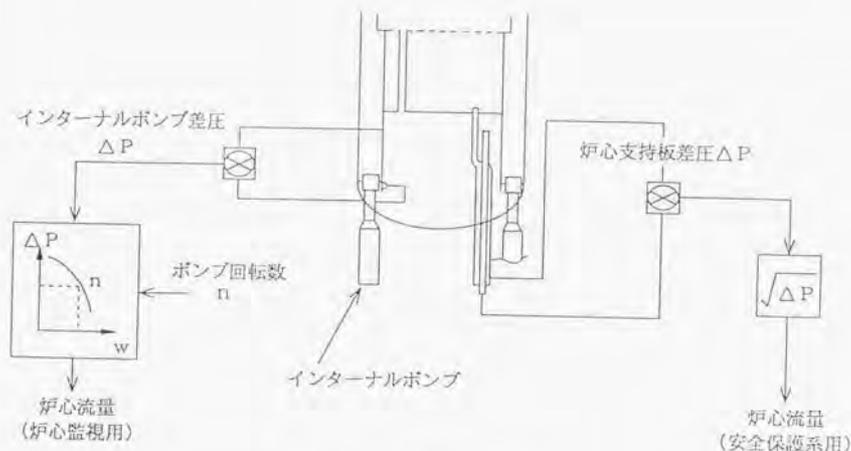


図 A.14 ABWRにおける流量計測法

さらに、炉心流量計測のための新しい試みとして、炉内中性子検出器 (LPRM) の揺らぎ信号を用いる方法が提案されている。1,100MWeBWR プラントの通常起動時に測定を行い、差圧に基づく測定結果と比較したところ、ほぼ5%の精度で一致することが示された。[92]

APPENDIX-B

原子力プラント計装への 光ファイバーセンサーの適用性検討

B.1 検討に当たっての考え方

光ファイバーセンサーについては以前から多くの研究がなされ、商品化されているセンサーも多い。ここでは、APPENDIX-Aで整理した原子力プラント計装項目のそれぞれに対応する光ファイバーセンサー技術についてまとめ、それらの中から原子力プラントへの適用に向いているものをピックアップする方法をとった。

原子力プラントへ光ファイバーを適用するに当たり、最も大きな障害となるのは放射線照射時の測定結果への悪影響である。そこで、これまでの照射実験の結果をもとに、各測定法がどの程度の線量率の場所へ適用可能かについて検討した。光ファイバー中の放射線誘起損失は設置場所の温度条件に大きく依存し、高温ほど熱ブリーチングによって損失量は小さくなる。しかし、ここでは安全側の評価のため、基本的に常温での照射実験の結果をもとに適用性の検討を行った。

また、照射長についても各測定対象で異なるため、正確な評価のためには各センサーに必要な光ファイバー長を調べておく必要がある。しかし、全てのセンサーについての情報を網羅するのは困難であり、ここでは便宜的に、

- 中性子計装については 10m
- 中性子計装以外の計装では 100m

の照射長を仮定した。

光ファイバーセンサーのコストは同じ物理量を測定可能な電気式センサーの 10 倍以上であることも多く、コストだけを考えれば電気式センサーの代替は現状では困難である。しかし、ここでは将来的なコスト低減に期待するとともに、システムとしての価格低減を目指して分布測定の可能性についても検討した。分布測定を行うと一般的に時間応答性が悪くなる傾向があるが、表 B.1 に示す現在のセンサーの応答性を参考とし、やや遅い応答性で十分な場所に対しては分布測定型手法の適用を積極的に検討した。

表 B.1 現在のプラント計装の時間応答性 [86]

分類	測定点	応答時間	備考
核計装	起動領域中性子計装 (中性子源領域モニター)	0.01sec 未満～50sec	レンジにより異なる
	起動領域中性子計装 (中間領域モニター)	90msec 以下	
	出力領域中性子計装 (平均出力領域モニター)	60msec 以下	
プロセス計装	温度伝送器	約 220msec	センサーのみ。 well こみで 2～4sec
	圧力伝送器	0.2～4.0sec	
	差圧伝送器	0.2～4.0sec	
安全保護計装	原子炉圧力高	0.5sec 以下	
	原子炉水位低	1.0sec 以下	
	Dry Well 圧力高	0.6sec 以下	
	スクラム排出容器水位高	1.0sec 以下	
燃料破損に 関わる計装	主蒸気放射線モニター	1.0sec 以下	
	オフガス系放射線モニター	1.0sec 以下	
炉心内計装	移動式炉心モニター (移動速度)	低速:4.6m/sec 高速:18.3m/s	
	移動式炉心モニター (応答時間)	仕様値無し	1sec 程度以下と 考えられる。

B.2 中性子計装への光ファイバーセンサーの適用性

B.2.1 炉心内中性子計測

炉心内のような高い中性子束の場所では、可視域の損失が非常に大きくなるため、可視発光利用型のシステムを用いることはできない。

一方、近赤外発光を利用するシステムにおいても、シンチレータに核分裂性物質や¹⁰B を含有させれば中性子にも感度を持たせることが可能であるものと期待される。可視域利用システムのようにパルス計数法に基づいてエネルギー弁別を行うことは難しいが、 γ 線のみを感じる

組成のシンチレータを参照用として用い、中性子に有感なシンチレータからの信号と比較すれば、中性子束に比例した出力が得られるものと期待される。

近赤外域の発光を用いれば、可視域よりは長い期間、測定を継続できる。しかし、図 2.16 に示すような損失増加特性を見ると、ある線量(ここでは γ 線量: 10^9 Gy(SiO_2), 中性子フルエンス: 10^{23} n/ m^2 程度)以上では損失の増加速度が大きくなっていることが分かる。近赤外光を用いても、この程度が限界である可能性が高い。

炉心内の中性子束レベルが $10^{12} \sim 10^{14}$ n/ m^2 であることを考えると、 10^{23} n/ m^2 (10^{19} n/ m^2)は 1.2~116 日に相当する。現状の炉心内中性子検出器が少なくとも数年の寿命を持っていることを考えると、常時炉心内に設置されるセンサーを光ファイバー法で代替することは困難であろう。起動系用のシステムは出力運転時には炉心下部の中性子束が低い場所で保護されるが、その位置でもかなり高い中性子束に長時間さらされることになり、現実的には適用は困難であろう。

B.2.2 炉心外中性子計装 (PWR)

PWR の炉心外中性子計装で対象とされる中性子束の範囲は次の通りである。起動系を対象とする検出器は出力上昇とともに外部に引き抜いて保護され、中間出力系、出力系を対象とする検出器は定常運転中も位置は固定で、反射体、遮蔽体の近くに置かれる。

- 起動系： $\sim 10^7$ n/ cm^2/s
- 中間出力系： $10^8 \sim 10^9$ n/ cm^2/s
- 出力系： $10^8 \sim 10^{11}$ n/ cm^2/s

(1) 中間出力系、出力系

中間出力系、出力系を対象とする検出器は定常運転中も固定されていることから、 10^{11} n/ cm^2/s の中性子束照射にさらされた状態でどのぐらいの期間使用可能であるかを検討する必要がある。

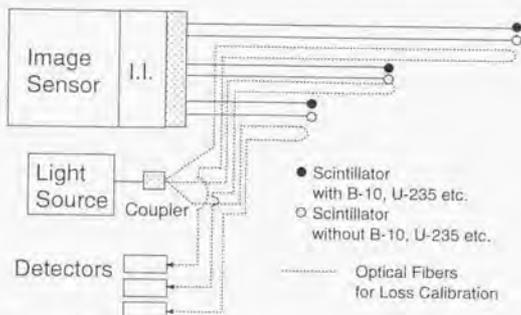
1) 可視発光利用システム

弥生での照射実験結果をもとに概算すると、例えば 500nm の発光を利用するシステムを、中性子束: 10^{11} n/ cm^2/s の場所に 1 年間設置する場合の放射線誘起損失量を計算すると 6×10^7 dB/km に達し、全く適用不可能であるという結果が得られる。原研による JMTR での実験では温度が高かったためこれよりも小さい損失増加となっているが、それでも可視域の損失増加は非常に大きいことが示された。従って、中間出力系、出力系へ可視発光を使用するシステムを適用することは、困難であるといえることができる。

2) 近赤外発光利用システム

850nm 程度の発光を利用するシステムを中性子束: 10^{11} n/ cm^2/s 、温度 100℃程度の場所に連続設置した場合の損失増加を、原研による測定結果から概算する。10 年間での中性子フルエンスは約 3×10^{19} n/ cm^2 となるが、図 2.16 の結果を見ると、850nm での損失増加は数 dB/m に達している。従って、 10^{11} n/ cm^2/s の場所での 10 年間の連続測定は、現状では困難であろう。

しかし、850nmでの損失増加に対する中性子照射の影響は小さく、むしろ γ 線量率で損失増加量が決定される可能性も高い。中性子計装用検出器の設置場所の線量率は 10^4 Gy(SiO_2)/h以下である場合が多く、温度も100℃程度と高い。 ^{60}Co γ 線源を用いた50℃における実験によると、紫外域からのテールによる損失は照射開始直後に急激に増加した後減少し、20 dB/km程度で落ち着いた。長期的にはNBOHC等の寿命の長いカラーセンターによる吸収が徐々に増加するものと考えられるが、図B.1のようなシステムによって損失の補正を行えば長期間にわたって使用可能である可能性もある。



図B.1 近赤外発光を利用する光ファイバー中性子計装の概念

しかし、中性子の影響は小さいとは言っても無視することはできず、現状では中間出力系、出力系への適用性は明確に判断することが難しい状況にある。炉心外中性子計装用検出器の設置場所に近い環境で光ファイバーの照射実験を行い、損失の増加挙動がどのようなものか、十分に評価することが求められる。

(2) 起動系

1) 可視発光利用システム

起動系に用いられる検出器は中性子束レベルで 10^7 n/cm²/s程度までを対象とする。出力上昇とともに外部に引き抜かれるため寿命の評価は難しいが、ここでは一定の中性子束の場所で1年間使用した場合の損失増加をもとに検討を行った。

弥生での照射結果をもとにすると、 10^4 、 10^5 、 10^6 、 10^7 n/cm²/sで1年間照射した場合の500nmにおける損失増加量は次のような程度となる。実際の設置場所の温度は常温よりもかなり高く、実際の損失量はこれよりも小さいものと考えられる。

表 B.2 起動系の中性子束レベルへ可視発光利用型
中性子測定システムを適用した場合の放射線誘起損失量 (1年間照射時)

中性子束 $n/cm^2/s$	500nm での損失増 [dB/km]	10m 中での影響
10^4	0.15	0.9997
10^5	1.5	0.997
10^6	15	0.97
10^7	150	0.71

従って、図 B.2 に示すような補正システムによって誤差を補正すれば、十分な寿命を持って使用することが可能であろう。名古屋大学による中性子分布測定システムと同様にパルスカウンティングを行うことにより、波高値をもとに γ 線弁別が行える。PMT 以降の処理回路に高速なものを使用すれば、十分な時間応答性が得られるものと考えられる。

分布測定のためには、名古屋大学方式のようにシンチレータ部を移動させる方法が考えられる。また、近年開発されたマルチアノード型 PMT を用いれば、測定対象の場所に設置した複数個のシンチレータからの発光を 1 個の PMT で処理することが可能であり、機械的な移動を伴わずに離散分布を測定可能である。

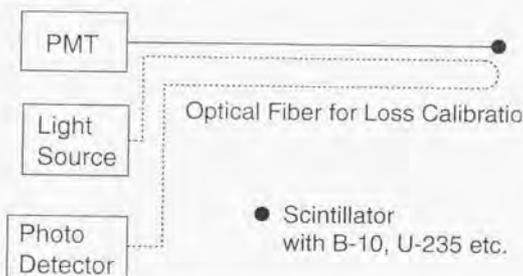


図 B.2 可視発光を利用する場合の中性子計装システム

2) 近赤外発光利用システム

中性子束と γ 線量率は単純な比例関係にはないものと考えられるが、ここでは $10^7 n/cm^2/s$ 時の γ 線量率が $10^{11} n/cm^2/s$ 時の 10^{-4} 倍であるものと仮定して検討する。この仮定のもとでは、 $10^7 n/cm^2/s$ 時の検出器位置での γ 線量率は $1 Gy(SiO_2)/h$ となり、850nm における損失量は非常に小さいものと考えられる。

従って、近赤外発光利用システムを用いるのであれば、起動系の中性子計装を補正無しで行うことが可能であるものと期待される。

B.2.3 中性子計装に関するまとめ

まず、炉心内中性子計装に関しては、現在のところ適用性は非常に低い。一方、炉心外中性子計装の可能性については、表 B.3 に整理することができる。

表 B.3 光ファイバー放射線センサーの炉心外中性子計装への適用性

使用波長域	ポイント/分布	適用可能領域	応答性	備考
可視域	ポイント	起動系	OK	・起動時以外は引き抜き ・分布測定は移動方式あるいはイメージセンサー方式
	離散分布	起動系	< 1sec	
近赤外域	ポイント	起動系は補正無しでも OK	OK	・ γ 線補償手法の確立が必要 光検出器は1つでよい
	離散分布	出力系はさらに検討必要	< 1sec イメージセンサーに依存	

B.3 プロセス計装への光ファイバーセンサーの適用性

B.3.1 温度計装

現在までに商品化されている光ファイバー温度センサーの例を表 B.4 に示す。(ここで示されている適用範囲はかなり理想的なものである。) これらは大まかに言うと次の 5 種類に分類できる。

- 輻射型
- ファブリ・ペロー型
- 蛍光型
- 分布センサー (ラマン散乱型、ブリュアン散乱型)
- Fiber Bragg Grating (FBG) 型

表 B.4 商品化されている光ファイバー温度センサーの例 [88]

Name	Measurement Technique	Range	Accuracy	Resolution
ACME Nanco ARI Industries Inc.	Remote IR detector Blackbody	350, 450, & 800°C 300°C to 2,000°C	1%	N/A
Balbeck & Wilcox Celest Electronics Ltd.	Remote pyrometry Remote pyrometer	120°C to 180°C 20% to 800°C	±1%	
Eriesson AB	Distributed : microdiem	40°C to 90°C		±1°C
Eriesson AB Fujikura G2 Systems Corp.	Distributed : Raman Distributed : Raman Distributed : Microdiem	-200→+1,100°C	±1% ±1% FS	1°C 1°C to 3°C
Himedri Lustron	Distributed : Raman Fluorescent decay time	-200→+1,100°C 2200°C to +50°C	±1% typ 0.2°C	±0.1°C typ 0.1°C
Lustron Mikron Instrument Co.	Blackbody Remote blackbody	150°C to 3,000°C	0.2%	0.00002°C
Nortech Fibronics, Optrel Inc.	Fluorescence Microdiemling	240°C to 250°C 0.3°C/mile to 11°C/min	±1% ±5% FS	±0.1°C 0.3°C/min
Optrand Inc. Photonics SA	Dual wavelength FP cavity spectral modulation	0°C to 700°C -240°C to 300°C	±1% ±1% FS	N/A
Pilkington Security Ltd.	Distributed : intensity	switch		
Rosenmund Inc.	Fluorescence decay time	260°C to 350°C	±0.5%	
Somitomo Electric USA	Distributed Raman backscatter	-200→+1,100°C	±1%	±3°C
Takaoka Electric Ltd.	CaAs fluorescence	0°C to 200°C	±1%	0.1°C
Vanzetti Systems Inc.	Remote pyrometry	50°C to 2000°C	±1%	±1°C
York Sensors	Distributed Raman	-200→+1,100°C	±0.3% typ	±0.1→+1°C typ

(1) 輻射型

輻射型は温度に依存して変化する輻射スペクトルの測定を行うもので、輻射強度の大きい高温測定に適している。センサー部の中に設置した光ファイバーによってセンサー内部で発生する輻射を集光し、その強度から温度を測定する。時間応答性は、例えば LUXTON 社の製品で 10kHz まで対応可能なものが販売されており、シングルポイント型の測定であればプロセス計装への適用は十分に可能である。また、耐高温性についても、LUXTON の製品で採用されているサファイアのセンサー部は長さ数 10cm のものも選択可能であり、この部分だけを高温の場所へ設置することにより、かなりの高温まで適用可能と考えられる。

放射線照射の影響については、例えば $1\mu\text{m}$ 程度のような長波長帯の輻射を利用すれば、損失量も小さく、かなり高い線量率でも長時間使用が可能である。図 2.6(d) の結果を見ると、フッ素ドープ石英コア光ファイバーの $1.1\mu\text{m}$ における損失は、 $10^{-4} \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ の線量率においても $10\sim 20 \text{ dB/km}$ 程度である。光ファイバーの照射長が 100m と仮定すれば、損失の影響は $0.6\sim 0.8$ 倍程度であり、図 B.3 に示すような参照用光ファイバーと白色光源を併用するシステムで誤差を補正すれば、長期間測定を行うことが可能である。長期間の照射時に徐々に損失が増加することを考えても、 $10^3\sim 10^4 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 程度までは適用可能であろう。

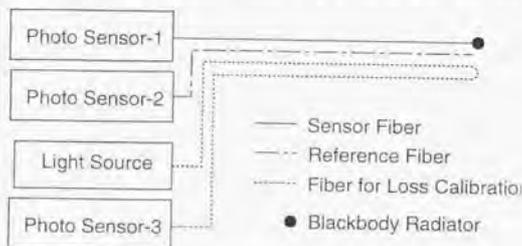


図 B.3 輻射利用型システムの概念

また、測定対象とする波長を市販 OTDR 装置に合わせておけば、白色光源を用いずに数箇所センサーに対する放射線誘起損失の補正を同時に行うことができる。時間応答性への要求が厳しくない場合には、この方法により必要な光ファイバーケーブル数の低減が可能である。

イメージセンサーによる分布測定を行う場合には、市販イメージセンサーの有感波長内の輻射を使用することが必要である。一般的な N-MOS ラインセンサーや CCD イメージセンサーは Si を用いており、 900nm 以上では効率が小さくなる。従って、市販 OTDR 装置の波長を考えると、 850nm 程度の輻射が適しているといえる。この場合には、線量率の上限は $10^3 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 程度となるものと考えられる。

(2) ファブリ・ペロー型

ファブリ・ペロー型は、光ファイバー先端部にファブリ・ペロー・エタロンを設置したもので、エタロンでの反射光スペクトルが温度に依存して変化するを利用して温度を測定する。測定対象の波長範囲を長波長側にセットしておけば、光ファイバー中での放射線誘起損失の影響は受けにくい。エタロン部は半透膜上に反射用の金属を蒸着する等の方法で作製されるが、この部分への放射線照射の影響について検討することが必要である。

光ファイバー中の損失だけを考えればかなり高線量率まで適用が可能であり、 $10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h 程度まで適用可能であるものと期待される。また、この手法では光の強度ではなく、波長のずれから温度を測定する。そのため、通常的手法よりも放射線の影響は小さく、補正システムもほとんど必要ないと考えられる。

photonetics 社の製品では遅くとも数 10msec 程度の応答性が得られており、時間的な応答性は十分である。しかし、これまでの製品ではセンサー部を通常の光ファイバーの先端に設置しており、耐熱性は光ファイバーの被覆材で決定される。従って、300℃以上の場所での長期使用に当たっては、被覆材について十分な検討が必要である。

波長の変化から温度を知るという点では後述の FBG 型と同様であるが、ファブリ・ペロー型では多数のセンサーを 1 本の光ファイバーでつなぐことができない上に、各センサー部からの信号を 1 個のイメージセンサーで検出することも難しい。従って、分布測定には向いていない手法と言うことができる。

(3) 蛍光型

蛍光型では、LED 等で蛍光体を励起し、発生する蛍光の強度や時間分布から温度を測定する。その際の励起光、蛍光ともに可視域での波長であることから、単純に強度のみを用いる方法では放射線の影響が非常に大きい。一方、蛍光寿命を用いる手法では、強度のみを用いる方法よりも影響は小さいものと考えられるが、例えば 600nm 前後の光を用いるとすれば NBOHC の影響を大きく受け、長期間使用する場合には 100 mGy(SiO₂)/h 程度が上限となるものと考えられる。

蛍光寿命を用いる方法では N-MOS 等のイメージセンサーを用いることは困難であり、1 本の測定に対して 1 個のセンサーを設置するか、マルチアノード型 PMT 等を用いることが必要である。

(4) 分布型

温度分布の測定可能な光ファイバーセンサーとしては、ラマン散乱型光ファイバー温度分布センサー (RDTS) が商品化されている。入射レーザー波長が 850nm 近辺のものと 1.1 μ m 近辺のものがあるが、耐放射線性を考えると 1.1 μ m 程度のものが望ましい。RDTS については次章において詳しく触れるが、光ファイバーのセッティングに工夫をこらすことにより、放射線誘起損失に起因する測定誤差を補正することが可能である。従って、適用可能性は損失増加による S/N 比の低下により決定される。

ここで、入射波長:1.1 μ m 程度の RDTS を用いるとし、照射を受ける距離を 200m とする (ループ型設置で測定距離:100m) と、図 2.6 より、 1.1×10^3 Gy(SiO₂)/h、及び 1×10^2 Gy(SiO₂)/h における損失は次のような値である。

- 1.1×10^4 Gy(SiO₂)/h: 3~4dB/200m
- 6.3×10^3 Gy(SiO₂)/h: 1~2dB/200m

長期照射時には損失は徐々に増加するが、 $10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h 程度の線量率であれば、現状の RDTS のダイナミックレンジ:5dB を越えるまでにかなり長期間使用することが可能であろう。

一方、RDTS 以外の連続分布測定法として、ブリュアン散乱を利用する歪み/温度分布センサー (BOTDR) がある。BOTDR では、光ファイバー上のブリュアン周波数シフト量分布を求

めるために入射波長をスキャンしながら OTDR 測定を行う。そのため、RDTS のように損失増加の波長依存性が顕著に現れることはなく、原理的に放射線照射に起因する誤差は小さい。Fドープコア光ファイバーの適用性は確認されていないが、使用可能であるとすれば RDTS と同様に $10^3 \sim 10^4 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 程度の領域までは適用可能であろう。

これらの分布型センサーは、連続分布測定によって安全性向上への貢献が可能であるという長所を有している。しかし、分布測定のため、必要な測定時間はポイント型の測定よりも長く、例えば 1sec 以下で測定を行う必要があるような場所への適用は困難である。従って、時間応答性への要求が緩い場所への適用か、あるいは他の測定器による測定を補完するための新しいモニタリング手法としてとらえた方がよいものとする。これらのシステムは、例えば冷却材の漏えいのような事故の際に、事故の発生点の測定に用いることができ、プラントの安全性向上に大きく貢献することが可能であろう。

(5) Fiber Bragg Grating 型

Fiber Bragg Grating (FBG) は SM 光ファイバー内に紫外線によって回折格子を切ったもので、光を入射することにより回折格子の幅に相当する波長の光を反射する。温度変化や歪みの発生によって格子間隔が変化すると、反射する光波長も変化し、これをもとに温度/歪み測定が可能である。現在のところ、FBG は Ge ドープコア光ファイバーにのみ作成可能であるため、Fドープコア光ファイバーを使用可能な手法に比べ耐放射線性は非常に低い。長期間使用可能な線量率の上限は $10 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 程度と考えられ、プロセス温度計装のうち、原子炉容器近辺への適用は困難である。

しかし、各 FBG の波長を少しずつずらすことで、多数の FBG の信号を 1 本の伝送用光ファイバーでセンサーに導ける、という長所がある。従って、輻射型、蛍光型のように 1 つのセンサーに対して 1 本の光ファイバーが必要なシステムと比較すると、プラント内ケーブルの削減にも有効である。全体の測定距離が長いほど時間応答性は悪くなるので、必要とされる応答性に応じてセンサーの多重化を行うことが必要である。離散分布測定に適した手法とすることができ、低線量率領域では積極的に使用すべきである。

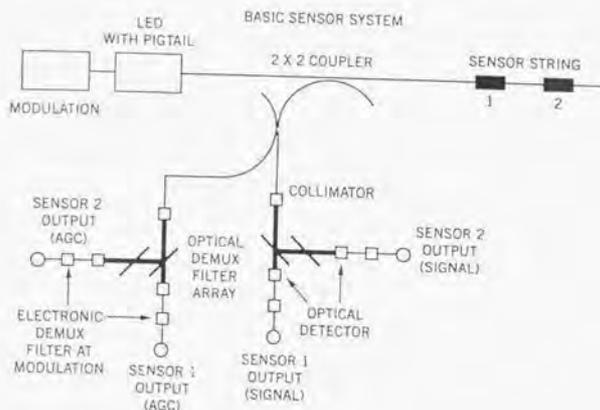


図 B.4 FBG による離散分布測定の基本構成 (2つの FBG を用いる場合) [89]

(6) プロセス温度計測に関するまとめ

以上の検討により、次のように整理することができる。

- 低線量率 ($10 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 以下) については離散分布測定に適した FBG 型
- 高線量率の場所へは輻射型あるいはファブリ・ペロー型 ($10^3 \sim 10^4 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 程度まで) ただし、ファブリ・ペロー型については、エタロン部の耐放射線性について今後検討が必要である。
- ラマン散乱型、及びブリュアン散乱型温度分布センサーも $10^3 \sim 10^4 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 程度まで適用可能。時間応答性に劣ることから、数秒程度の時間間隔 (RDTs の場合) での測定で十分な用途に限定される。漏えいモニターなどを旨とした新しい計装をしてとらえるべきである。

各測定法の適用可能な線量率範囲と時間応答性について表 B.5 にまとめた。

表 B.5 光ファイバー温度センサーの特性

タイプ	分布/ポイント	線量率上限 [Gy(SiO ₂)/h]	時間応答性	温度範囲 ℃	メーカー例
輻射型	ポイント	10 ³ ~10 ⁴	10kHz	150~1900	LUXTON 社
	離散分布	10 ² ~10 ³	Image Sensor に 依存 (< 1 秒)		
ファブリ・ ペロー型	ポイント	10 ³ ~10 ⁴ (ユタロンの照射 特性評価が必要)	< 0.1 秒	< 300	photonetics 社
蛍光型	ポイント (分布測定に 不向き)	10 ⁻¹	< 1 秒	< 300	LUXTON 社
ラマン 散乱型	連続分布	10 ³ ~10 ⁴	数秒~数 10 秒	< 300	日立電線
ブリュアン 散乱型	連続分布	10 ³ ~10 ⁴	数 10 秒~数 100 秒	< 300	安藤電気
FBG 型	ポイント	~10 ¹	OK	< 300	Elentro photonics 社
	離散分布	~10 ¹	OK		

(・輻射型、ファブリ・ペロー型の離散分布測定では、複数本の光ファイバーからの信号を 1 個のイメージセンサーで測定する。

・FBG 型では、複数個のセンサー部を 1 本の光ファイバーでつなぎ、カプラー等を介して複数個の光検出器で測定を行う。

・線量率上限の算定に際しては、常温で 100m の照射長を仮定した。)

B.3.2 圧力計装

市販の圧力測定用光ファイバーセンサーの例を表 B.6 に示す。主なものには

- ・マイクロバンド型
- ・フォトニック型

がある。これら以外にも、圧電素子を用いるものや複屈折性を利用するもの等があるが、センサー部が複雑であったり、光ファイバーの種類が特殊であったりして放射線環境への適用には不向きと考え、ここでは検討から除外した。

表 B.6 商品化されている光ファイバー圧力センサーの例 [88]

Name	Measurement Technique	Range	Accuracy	Resolution	Temp Range
Baleswick & Wilcox	Microbend	0 to 3,000 psi	$\pm 0.05\%$		
Dyniscoe Inc. FiberOptic Sensor Tech	Photonic Photonic	0 to 20,000 psi -50 to 250 mm/Hg	$\pm 0.5\%$ FS	$\pm 0.01\%$ FS	400°C max
FFPI	Fabry Perot cavity	0 to 2,500 psi	$\pm 2\%$		-50°C to 300°C
Fuji Electric Co. Ltd.	Capacitive sensor E/O converter	0 to 500 kg/cm ²	$\pm 0.1\%$		-30°C to 100°C
G2 Systems Corp.	Distorted microbend	2g to 3 kg			
Herga Electric Ltd.	Microbending	N/A	N/A	N/A	
Lucas Control Systems	Birefringence			0.025%	10°C to 35°C
Optech Inc. Optelecom	Microbend Wavelength modulation	Various	0.05% FS	0.003% FS	0°C to 60°C
Optramd Inc.	Photonic (Dial diaphragm)	0 to 500 psi	$\pm 0.25\%$		0°C to 650°C
Phonometrics SA	FP cavity spectral modulation	0 to 1,500 psi	$\pm 1\%$ FS	N/A	5°C to 50°C
Sensor Dynamics	Birefringence	0 to 20,000 psi	1 psi	< 0.1 psi	> 250°C

(1) マイクロバンド型

マイクロバンド型圧力センサーのセンサー部の概念を図 B.5 に示す。くし状のマイクロバンドに光ファイバーをはさんだ状態で設置し、圧力がかかった際に光ファイバーに生じる損失量から圧力を測定する。

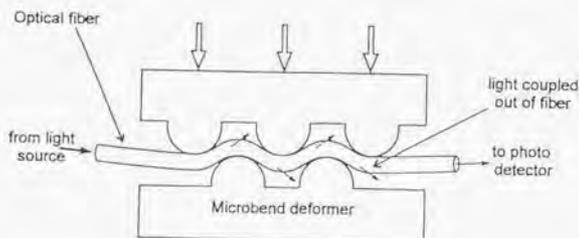


図 B.5 マイクロバンド型圧力センサーの概念 [88]

精度的には1% 以下が期待でき、これまでの圧力センサーと遜色はない。しかし測定範囲については従来のもの（ブルドン管型で数万 psi まで）よりも狭く、あまり大きな圧力の測定には適さない。

応答性を重視する場合には、図 B.6 に示すように各マイクロベンドに対して光検出器を 1 個対応させるシステムとする。この場合、損失補正用のシステムに必要な検出器も考慮すると、 N 箇所の測定点に対し、検出器、光ファイバーはそれぞれ $2N$ 個、 $2N$ 本必要である。

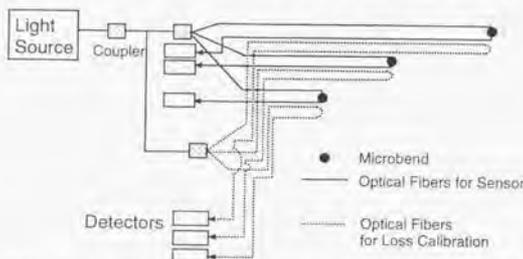


図 B.6 応答性を重視したマイクロベンド歪み測定システム概念

一方、上のような構造を図 B.7 に示すように数珠つなぎにし、OTDR 法によって一度に測定すれば、多数の圧力センサーの信号を 1 本の光ファイバーで処理することも可能である。光ファイバーに沿った放射線誘起損失も常時モニタリングでき、 S/N 比さえ保つことができれば誤差なく測定を継続することができる。何か所にマイクロベンドを設置し、また各点での圧力がどの程度かに依存するが、光ファイバーに F ドープコアのものを用い、 $1.0 \mu\text{m}$ 程度の放射線誘起損失の小さい波長を使用すれば $10^3 \sim 10^4 \text{ Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}$ 程度までは適用可能と考えられる。光ファイバーの長さにもよるが、数秒程度の応答性となるものと考えられ、応答性への要求が厳しい場所での使用には適さない。しかし、表 B.1 に示すように、現状のモニタリングでも 4 秒程度の応答性のももあり、このような場所への適用は積極的に行うべきである。

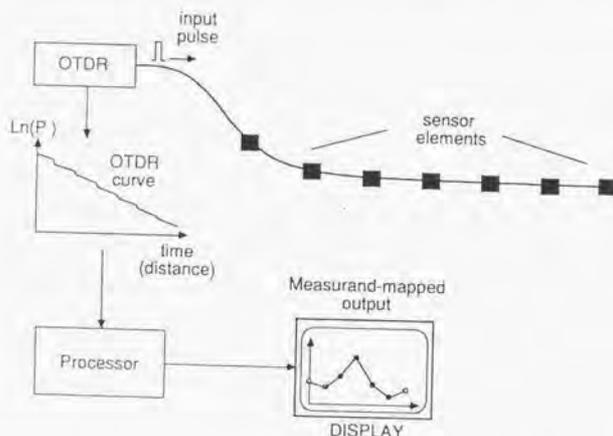


図 B.7 マイクロベンドと OTDR 法を用いた離散分布測定概念 [88]

(2) フォトニック型

図 B.8 に示すような構成により、圧力をダイアフラム等を用いて変位に変換し、2本の光ファイバー間の光の結合効率を変化させる。ダイアフラム等の構造を変化させることにより、感度は調整でき、20,000psi まで対応しているものもある。精度も 1% 以内が期待でき、従来の圧力測定手法を代替することが可能である。図 B.6 と同様に圧力の影響を受けない参照用システムを併置すれば、光源の揺らぎ等の誤差を補正できる上に放射線誘起誤差の影響を補正することが可能である。光ファイバーに耐放射線性の高いものを採用し、ファイバーの照射長を 100~200m と仮定すれば $10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO_2)/h 程度の線量率まで適用可能と考えられる。

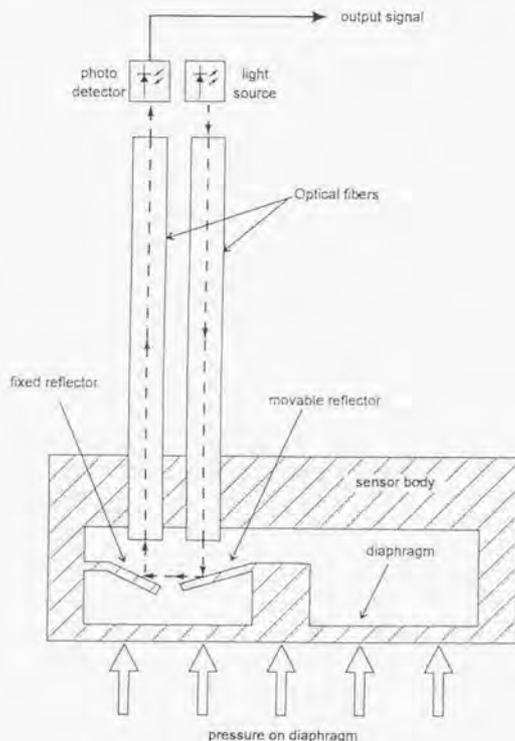


図 B.8 フォトニック型センサーの一例 [88]

一方、結合部での損失が大きいため、図 B.7 のような OTDR 法による離散分布測定は困難である。従って、図 B.9 に示すような時間領域を有効活用した手法や、図 B.10 のような周波数領域での多重化が必要である。これらは複数点の信号を時間的に順次処理するか、あるいは周波数領域でスキミングを行う必要があり、図 B.6 のようなシステムよりは応答性が悪くなる。従って、応答性への要求が厳しくない対象に限定して適用を行うべきである。

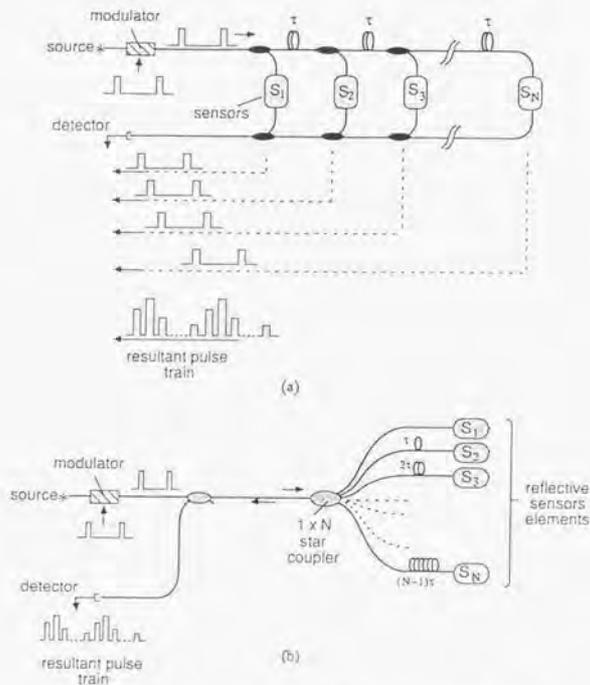


図 B.9 時間領域の活用による離散分布測定概念 [89]

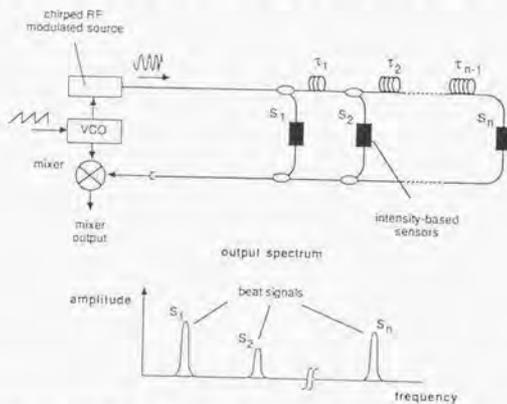


図 B.10 周波数領域の有効活用による離散分布測定概念 [89]

(3) ファブリ・ペロー型

ファブリ・ペロー型圧力計は、温度測定に用いられるものと同様のセンサー部により、圧力を計測する。例えば、photonics社のものは圧力が加わることによって反射スペクトルの波長が変化し、その変化分から圧力を求める。

測定範囲はマイクロバンド型と同様に数千 psi 程度までであり、大圧力を対象としたアプリケーションには向いていない。波長の変化を用いることから原理的に耐放射線性が高く、補正システム無しでも $10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO_2)/h 程度までは適用可能と考えられる。

(4) プロセス圧力計装に関するまとめ

マイクロバンド型、フォトニック型ともに耐放射線性としては $10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO_2)/h 程度までは適用可能と考えられ、プロセス圧力計装の適用対象は網羅しているといえることができる。適用に当たっては、測定可能な圧力範囲に基づいてすみ分けが行われ、マイクロバンド型、ファブリ・ペロー型を低圧力領域、フォトニック型を高圧力領域で適用することになる。

離散分布測定では、マイクロバンド型では OTDR 法の適用が可能であり、信号伝送路としての光ファイバーの本数を減らすことができる。ただし、OTDR 法によると応答性が悪くなるため、速い応答性が求められる場所では 1 個のセンサーに 1 本の光ファイバーを対応させ、それぞれに 1 個の光検出器を対応させるか、あるいはイメージセンサーによって測定するシステムとすべきである。

一方、フォトニック型、ファブリ・ペロー型では OTDR 法の適用は難しいと考えられ、1 個のセンサーに少なくとも 1 本の光ファイバーが必要である。

以上をまとめると、表 B.7 が得られる。

表 B.7 光ファイバー圧力センサーの特性

タイプ	分布/ポイント	線量率上限 [Gy(SiO_2)/h]	時間応答性	圧力範囲 [psi]
マイクロバンド型	ポイント	$10^3 \sim 10^4$	OK	0～数千
	離散分布	$10^3 \sim 10^4$	OTDR 法:数秒 イメージセンサー法:<1sec	
フォトニック型	ポイント	$10^3 \sim 10^4$	OK	0～数万
	離散分布	$\sim 10^3$	イメージセンサー法: <1sec	
ファブリ・ペロー型	ポイント	$10^3 \sim 10^4$	OK (< 0.1 秒)	0～数千

(・マイクロバンド型の離散分布測定では、複数個のマイクロバンドを 1 本の光ファイバーで数珠つなぎとし、OTDR 法による測定を行うことも可能である。)

(・フォトニック型、ファブリ・ペロー型では、1 個のセンサー部に 1 本の光ファイバーが必要であるが、複数個の光ファイバーからの信号を 1 個のイメージセンサーで処理することにより離散分布測定が可能である。)

B.3.3 流量計装

流量計装は、絞りなどの構造によって流量を圧力に変換し、圧力センサーによって測定が行われている。従って光ファイバーセンサーとしても、2.2.2で述べたような圧力センサーで十分対応が可能である。 $10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h 程度までならば代替できるものと考えられる。

B.3.4 液体レベル計装

(1) 現状のシステムを利用する方式

液体レベル計装では、差圧型、浮子型、抵抗プローブ型が主なものである。差圧型の場合は圧力差から液体レベルを測定していることから、電気式の圧力センサーを光ファイバー型に置き換えることにより代替が可能である。

また、浮子型では水位の変化を浮子によって容器外へ伝達し、最終的には位置の変化として測定を行う。図 B.11 のような単純な形で大まかな位置の測定が可能である。光源を放射線誘起損失の小さい波長のものとすれば、100~200m の照射長で $10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h 程度まで適用可能と考えられる。

これらの方法では、液体レベルを差圧、変位に変換する部分には従来の機構を用い、信号伝達等に光ファイバーを用いる。従って、時間応答性は現状のシステム並み以上となるものと考えられる。

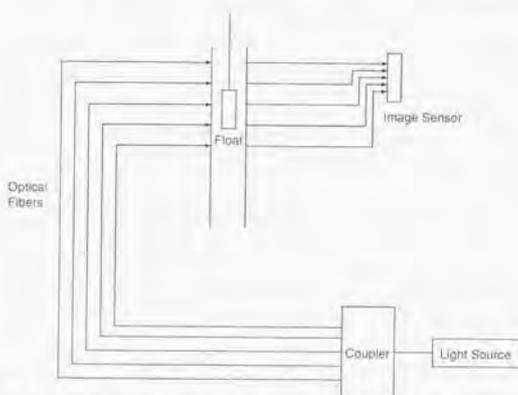


図 B.11 浮き子を利用する光ファイバー液面センサーの概念

一方、高速炉用の抵抗プローブ型では、抵抗値の変化を電圧として測定する。光ファイバーを用いる電界、電圧センサーには、ポッケルス素子中での偏光の変化を用いるものがあるが、偏光子、ポッケルス素子、検光子を放射線環境下に設置する必要があり、これらへの放射線照射の影響を十分に検討しておくことが必要である。

(2) プリズム型

光ファイバーに特有の液面センサー（スイッチ）として、図 B.12 に示すようなプリズムを用いるものがある。プリズムが液体中にある場合は片方の光ファイバーからもう一方への光の

結合ができないが、液体から出た状態では結合がうまくいき、検出器に光が導かれるというものである。表 B.8 に示すように多くの商品があるが、プリズムの耐放射線性や耐高温特性が不明確であり、現状での原子力プラントへの適用性評価は難しい。

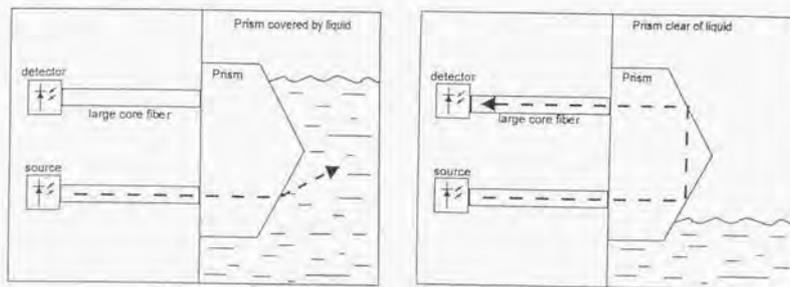


図 B.12 プリズムを用いる光ファイバー型液面スイッチの概念 [88]

表 B.8 商品化されている光ファイバー液面センサーの例 [88]

Name	Measurement Technique	Range	Accuracy	Resolution	Temp Range
Able Instruments & Controls Ltd.	TIR	switch			0°C to 65°C
Carlo Gavazzi Electronic	TIR	switch			-20°C to 60°C
Fuji Electric Co. Ltd.	Pressure E/O converter	0 to 32m H ₂ O	±0.25%		230°C to 100°C
Honeywell Inc.	Total internal reflection	±1 mm	1 mm	1 mm	-50°C to 125°C
IMO Industries	TIR	Switch			220°C to 80°C
Keyence Corp.	TIR	Switch			
Lucas Control Systems	Wavelength modulation - float gauge	270"	5% FS	2"	-20°C to 40°C
Phoenix Analytic	TIR	Switch	±0.5 mm		230°C to 95°C
Vickers Incorporated	TIR	N/A	N/A	N/A	240°C to 110°C

(3) 液体レベル計測に関するまとめ

以上をまとめると、表 B.9 が得られる。

表 B.9 光ファイバー液体レベルセンサーの特性

タイプ	センサー	線量率上限 [Gy(SiO ₂)/h]	時間応答性	備考
差圧型	圧力センサー (マイクロバンド型)	10 ³ ~10 ⁴	OK	
浮子型	図 B.11 のシステム	10 ³ ~10 ⁴	OK	精度は光ファイバーの本数に依存
抵抗プローブ型	ボッケルス素子、検光子の耐放射線性評価が必要			
プリズム型	プリズムの耐放射線性評価が必要			

B.3.5 その他のプロセス計装

(1) 不純物の測定

1) pH 測定

不純物の測定には、pH を指標とした水質測定がよく行われている。光ファイバーを利用する pH センサーとしては、図 B.13 に示すようなものがある。色素反応指示薬を浸透性のある外被チューブに収め、2 本の光ファイバーの先端に装着する。片方の光ファイバーを通して白色光をセンサー部に送り、その際の吸収、反射、散乱された光をもう一方の光ファイバーで受光してスペクトルを測定する。pH による吸収特性の変化をもとに、pH を測定することができる。

測定範囲は 7~7.4、精度は 0.001pH とされている。しかし、この手法を原子炉プラントに適用するに当たっては、pH 指示薬の耐熱性について十分評価し、冷却材サンプルをある程度冷却して使用することが必要であろう。また、可視光を用いる測定原理のため、長期間継続使用の可能な線量率は低く、10⁻³ Gy(SiO₂)/h 程度と考えられる。原子炉容器近辺での使用には向かず、できるだけ線量率の低い場所に設置することが必要である。

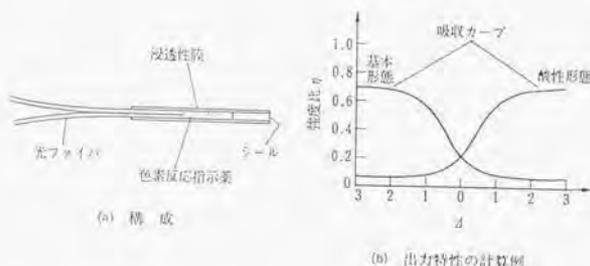


図 B.13 色素による光吸収を用いる光ファイバー pH センサーの概念 [91]

2) 導電率法

従来から用いられて来た手法に、導電率計を用いるものがある。電流、あるいは電圧測定を光ファイバーセンサーにより行うことが可能であるが、そこで用いられるファラデー素子、ポッケルス素子に対する放射線影響を評価することが必要である。また、測定のためには白金電極に電流または電圧を供給しなくてはならないことから、光ファイバー法で代替する意味は小さい。

3) ブラッキング法

高速炉の不純物計装にはブラッキング計がよく用いられ、不純物を流量に変換して測定することが行われて来た。流量測定にはマイクロバンド型、フォトリック型等の光ファイバー型圧力センサーが適用できる。これらの適用可能範囲は $10^3 \sim 10^4$ Gy(SiO₂)/h と考えられ十分な適用性を有していると言うことができる。

4) 不純物計装に関するまとめ

不純物計装への光ファイバーセンサーの適用性をまとめると、表 B.10 が得られる。

表 B.10 光ファイバーによる不純物測定に関するまとめ

タイプ	線量率上限 [Gy(SiO ₂)/h]	時間応答性	備考
pH センサー	10^{-1}	-	耐熱性の確認が必要
導電率法	-	OK	ポッケルス素子、ファラデー素子等の光学素子の耐放射線性の評価が必要 素子へ電圧、電流を供給する必要がある、代替の意味が小さい
ブラッキング法	$10^3 \sim 10^4$	OK	高速炉用

(2) プロセス放射線計装

PSF や波長シフト光ファイバーは耐放射線性がかなり低いことから、長期間使用する場合には $100 \text{ mGy(SiO}_2\text{)/h} \sim 1 \text{ Gy(SiO}_2\text{)/h}$ 程度が上限になると考えられる。従って、一次配管領域等に適用する場合には、石英光ファイバーの先端にシンチレータを設置する方法をとることが必要である。

光ファイバーに石英コアのものを用いれば、プロセス放射線計装で対象とする場所の多くは可視発光利用型のシステムで対応可能である。しかし、一次配管領域や原子炉容器周辺で長期間連続使用する場合には、近赤外発光を利用したシステムを用いるべきと考えられる。

B.4 破損燃料の検出系

破損燃料の検出法には

- 遅発中性子法
- プレシビテータ法
- 冷却材からの β 線、 γ 線測定法

などがある。これらの方法では、測定器を設置する場所の線量率はそれほど高くなく、放射線誘起損失の点からは光ファイバーを適用することに特に問題はない。しかし、微量の放射線の測定が必要なうえに応答性として1sec以内が求められることから、光ファイバー法でいかに効率を上げるかが問題となる。効率を十分高くするためには、大型シンチレータで発生するシンチレーション光をバンドル光ファイバーでPMTに導き、測定するシステムが考えられる。PMTを測定場所から離れたところに設置できるので外部から高圧を供給する必要がなくなる上、S/N比の向上も期待できるという長所がある。

B.5 安全保護計装

検出器自体は他の計装で用いるものと同じである。しかし、安全保護計装では運転員にできるだけ速く注意を喚起するため、シングルポイント型(1つのセンサーに1つの検出器、光源を対応させるもの)のシステムとし、時間応答性をできるだけ速くすることが必要である。従来のモニタリングでは、表B.1に示すように、0.5~1sec程度の応答時間で測定が行われている。光ファイバーセンサーでもシングルポイント型の手法であれば十分に対応でき、代替の可能性は高い。

光ファイバー法による分布測定法には1sec程度の応答時間を達成することが可能なものもあるが、安全保護系に対する多重性の要求を考えると、ポイント型のセンサーを複数個並列して設置することになろう。

B.6 炉心内計装

炉心内へ光ファイバーを挿入する場合、まず問題になるのが中性子照射による伝送効率への影響である。弥生、JMTRでの照射結果の例を見ても、可視域での損失増加は非常に大きく、長期間設置すると使用不可能となる。一方、近赤外波長については、弥生、JMTRのどちらの実験でも中性子照射の影響が小さいことが示されている。

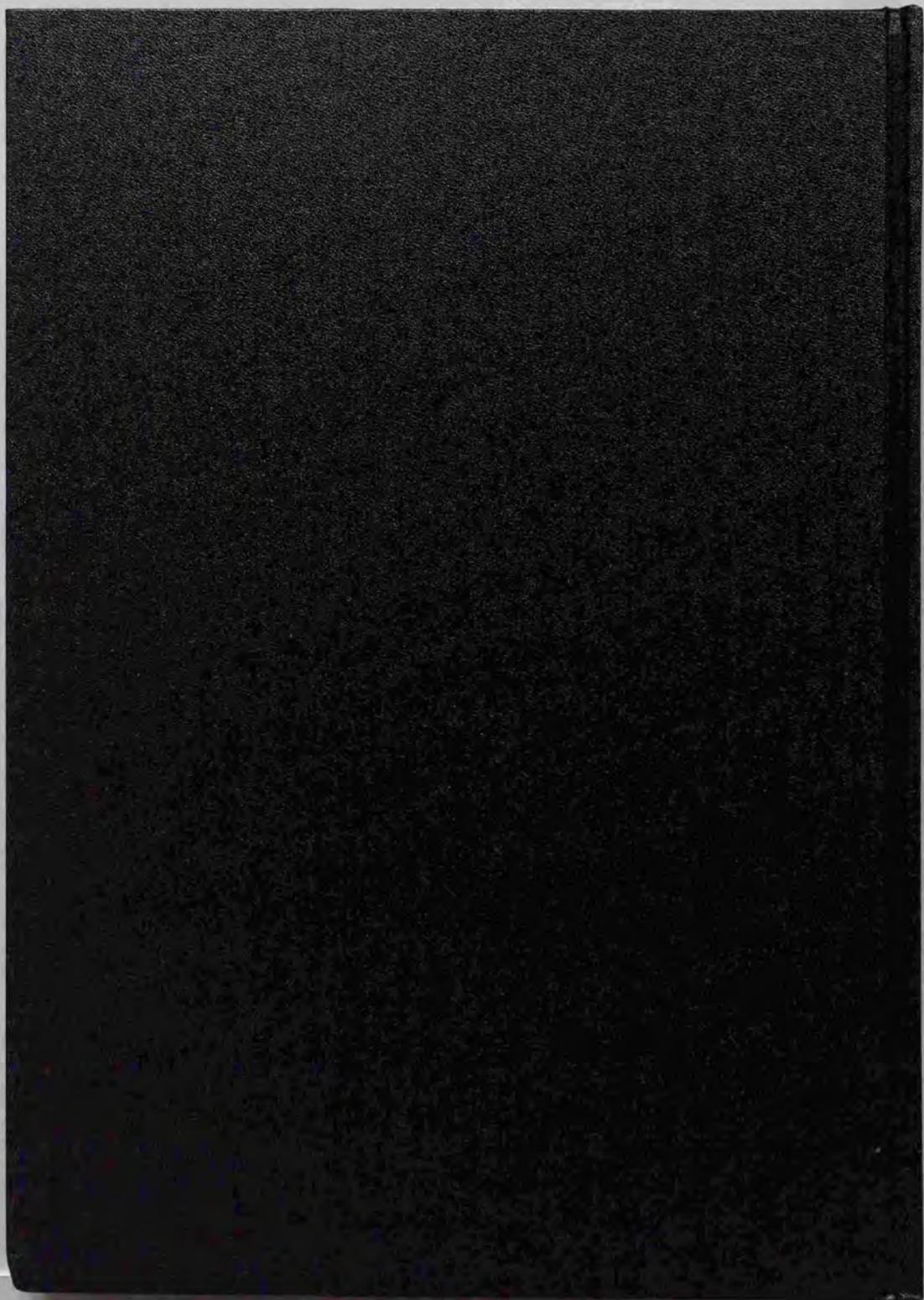
温度、圧力、流量、ボイド比、位置/変位を対象とするセンサーについては、中性子計測と違って使用する光波長を任意に選択することが可能である。従って、 $1\mu\text{m}$ 以上の波長の光を用いることにより、中性子計測よりは寿命を長くすることが可能である。炉心内でも、比較的低い中性子束、 γ 線量率の場所であれば、1年以上の寿命が得られる可能性はある。

しかし、どの程度継続使用できるかについて現段階で判断することは難しく、今後、高温高線量率(中性子+ γ 線)での照射実験を通して評価して行く必要があり、現状での代替は困難であると考えられる。

また、放射線以外の問題として、耐高温性が挙げられる。従来の樹脂被覆の光ファイバーでは、ポリイミドを用いた場合でも250℃程度が上限であろうと考えられる。耐熱性の要件を満たすためには、金属被覆等の新しい光ファイバーの開発が必要である。また、高温にさらされる部分だけを

- 中空ライトガイド
- サファイア単結晶光ファイバー

等で置き換えることも考えられ、今後検討が必要である。





Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

Kodak Gray Scale

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



© Kodak, 2007 TM, KODAK