

JAERI-Tech
2002-019



JP0250144



光技術による原子炉計装系の研究
(原子力基礎研究 H10-041)
(委託研究)

2002年 3月

中沢 正治*・高橋 浩之*・福田 大治*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

光技術による原子炉計装系の研究

(原子力基礎研究 H10-041)

(委託研究)

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

東京大学大学院工学系研究科

中沢 正治*・高橋 浩之*・福田 大治*

(2002年1月18日受理)

新しい光技術の原子力計測への適用性を評価するために、基本となるフッ素ドープファイバの放射線誘起伝送損失の評価を行うとともに、以下の二種類のファイバセンサ(ファイバ・プラッグ・グレーティング(FBG)、ラマン散乱型温度分布センサ(RDTS))について、測定精度、時間応答性、放射線環境下での寿命評価などの基礎的特性の評価を行った。

フッ素ドープファイバの放射線誘起伝送損失を測定した結果、ガンマ線照射では放射線誘起伝送損失は飽和傾向を示すのに対し、中性子照射では伝送損失は飽和傾向を示さず、原子炉で利用する場合はこの点に注意をしなければならないことが確認された。RDTSを弥生炉に1年以上にわたり適用した結果から、雰囲気温度の測定や異常監視系としてRDTSが十分に適用可能であることが確認された。FBGの高速中性子線・ガンマ線照射試験を行い、基礎的な評価を行った結果、配管領域では十分に利用が可能であることが確認された。

これらの結果から、これらのファイバセンサを原子力プラントに適用することにより、原子力プラントの安全性の向上に寄与できるものと期待される。

本研究は、日本原子力研究所の平成10、11、12年度「原子力基礎研究推進制度」の支援により実施した研究の成果である。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

東京大学：〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

* 東京大学大学院工学系研究科

Research on Nuclear Reactor Instrumentation System Using Optical Technology
(JAERI's Nuclear Research Promotion Program, H10-041)
(Contract Research)

Masaharu NAKAZAWA*, Hiroyuki TAKAHASHI* and Daiji FUKUDA*

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

Graduate School of Engineering
The University of Tokyo
Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received January 18, 2002)

To apply optical fiber sensing technique to nuclear measurements, we have irradiated the F-doped optical fiber and experimented with two optical fiber sensors: Raman Distributed Temperature Sensor (RDTs) and Fiber Bragg Grating (FBG).

We have irradiated F-doped optical fiber, which has high radiation resistivity, with a ^{60}Co gamma source and fast neutron source reactor YAYOI. Although the radiation induced loss with gamma source showed saturation tendency, the loss with YAYOI showed linear loss increase.

RDTs has been installed at YAYOI with the correction techniques. During the continuous measurements more than 1 year, the feasibility of RDTs for remote inspection and surveillance was demonstrated.

From the result of irradiation experiments on FBG, FBG has high radiation resistivity for a temperature or strain monitor in nuclear plants.

For these results, optical fiber sensing can be expected as nuclear measurements.

Key words : Optical Fiber Sensor, Radiation Induced Loss, Raman Distributed Temperature Sensor, Fiber Bragg Grating, Nuclear Facilities, YAYOI, F-doped Optical Fiber

This Research was Supported by the JAERI's Nuclear Research Promoting Program (JANP) from 1998 to 2000.

* The University of Tokyo

目 次

1. 研究の目的	1
2. フッ素ドープファイバの照射試験	1
2.1 ファイバの伝送損失	1
2.2 フッ素ドープファイバの照射実験	4
3. FBG の照射試験	5
3.1 研究の目的・意義	5
3.2 FBG の原理・製作方法	5
3.3 γ 線照射実験	6
3.4 弥生での高速中性子照射実験	6
3.5 FBG のまとめ	6
4. RDTs の弥生炉への適用	6
4.1 RDTs の概要	6
4.2 原理	7
4.3 OTDR 法による位置の導出	9
4.4 放射線誘起伝送損失	12
4.5 弥生炉への設置	18
4.6 測定結果	18
4.7 照射孔を用いた加速試験	19
4.8 RDTs のまとめ	19
5. 研究のまとめ	19
参考文献	20

Contents

1. Introduction -----	1
2. Irradiation Experiment of F-doped Optical Fiber -----	1
2.1 Transmission Loss -----	1
2.2 Irradiation Experiment of F-doped Optical Fiber -----	4
3. Irradiation Experiments of FBG -----	5
3.1 Significance of FBG Irradiation Experiments -----	5
3.2 Principle of FBG -----	5
3.3 γ -ray Irradiation -----	6
3.4 Fast Neutron Irradiation Experiment -----	6
3.5 Conclusion of FBG Irradiation Experiments -----	6
4. Application of RDTs to YAYOI -----	6
4.1 Significance of Application Experiment -----	6
4.2 Principle of RDTs -----	7
4.3 Principle of OTDR -----	9
4.4 Effect of Radiation Induced Loss -----	12
4.5 Experimental Method -----	18
4.6 Results -----	18
4.7 Accelerating Experiment -----	19
4.8 Conclusion of RDTs Application Experiment -----	19
5. Conclusion -----	19
References -----	20

1. 研究の目的

ファイバセンサは、使用するファイバが、軽量で、絶縁性、電磁ノイズの無誘導性、伝播光の広帯域性、信号伝送の低損失性などの多くの優れた特徴を有していることから、従来の電気式のセンサに代わり得る新たなセンサとして広く研究が進められている。これまでにも、多くの優れたセンサが開発されており、これらのファイバセンサを原子力プラントに適用することは、プラントの状態監視・異常検知の観点から有意である。

一方で、ファイバを放射線環境下で使用した場合、原材料のガラスにカラーセンタが形成されることにより、ファイバの組成、温度、線量当量率、照射線量、伝播光の波長などに依存する複雑な伝送損失増加現象が生じるという欠点もある。この伝送損失の増加が原因で、ファイバセンサで得られる測定結果には誤差が生じる。従来のファイバはこの放射線誘起伝送損失が大きく、放射線環境下での利用には適さなかった。しかし、近年、東大、原研、メーカーなどにより、フッ素ドープファイバ等の耐放射線性ファイバが開発され、原子炉の放射線環境下にファイバセンサを適用する事が可能になりつつある。

このような技術的背景のもとに、新しい技術である光技術を用いて、従来考えられた事の無い「光技術による原子炉計装系」の研究を進め、どこまで実際に可能であるのかを具体的に東京大学所有の中性子源炉「弥生」炉を用いて明らかにする事を目的とする。

本研究では、以下の二種類のファイバセンサ(ファイバー・ブレーリング・グレーティング (FBG)、ラマン散乱型温度分布センサ (RDTs))について、測定精度、時間応答性、放射線環境下での寿命評価などの基礎的特性の評価を行った。また、ラマン散乱型温度分布センサについては、平成11年度後期から、「弥生」炉を用いた実験を、弥生炉実験計画委員会に諮りながら実施し、高速中性子照射下での影響評価を行った。

これらの実験の結果を用いて、ファイバセンサの核計装、プロセス計装、安全系に適用するための検討を行うことを目的とする。

2. フッ素ドープファイバの照射試験

2.1 ファイバの伝送損失

2.1.1 一般の伝送損失

ファイバの伝送損失は、コア材料である石英ガラスの本質的な損失の他に、構造的欠陥や不純物等による吸収や散乱によるもの、またファイバの曲げなどによる漏光によるものなどが考えられる。

石英ガラス特有の吸収損失は、紫外吸収と赤外吸収が存在する。紫外吸収は石英ガラスの主成分である SiO_2 の電子エネルギーバンド間の遷移における紫外線波長領域における吸収であり、また赤外吸収は SiO_2 の分子振動によって起こる赤外波長領域での吸収である。これらは材料固有のものであるため取り除くことは不可能である。

不純物による損失は、鉄や銅などの遷移金属イオンによる吸収と OH 基（水分）による吸収とが存在したが、これらは半導体技術を用いることで共に製造段階で取り除くことが可能となっている。

また散乱による損失は、ファイバガラスの中に波長よりもミクロな屈折率揺らぎなどがあり、レイリー散乱とよばれる散乱が起こる。レイリー散乱は波長 λ の4乗に反比例するため波長が長いほどその影響は少ない。そして散乱の大きさはモードやコア径によるものでなく、材料固有のものであるので避けることはできない。

構造不均一性による損失は、コアとクラッドの境界面の凹凸や微小な曲がり（マイクロペンド）によるモード変換や放射損失であるが、これらはコア径を大きくしたり、境界面における光の強度を下げるためにコアに屈折率分布をつけたりすることにより、避けることができる。

最後にファイバの曲げによる漏光であるが、通信用途に用いられる波長 1500nm 付近の光の場合、曲率半径が数mm以下の急激な曲げでない限り損失は問題とならない。

Table 1 は、石英系ガラスファイバの主な伝送損失について表にしたものである。また損失を波長の関数で表すと、

$$\alpha = A\lambda^{-4} + B + C(\lambda) + \alpha_{IR}(\lambda) + \alpha_{UV}(\lambda) \quad (1)$$

- A : レイリー散乱係数
- B : 構造不均一に起因する係数
- C : 不純物の吸収による損失
- α_{IR} : 赤外吸収による損失
- α_{UV} : 紫外吸収による損失

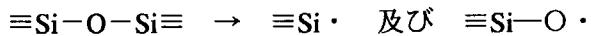
のように表せる。

2.1.2 放射線誘起伝送損失

ファイバを放射線下で用いるときに最も大きな課題となるのがカラーセンタの形成である。カラーセンタとは、その名のとおり放射線を照射するとファイバの中心が着色して、伝送損失が増加していく現象である。カラーセンタ生成の要因は大別して 2 つに分けられる。1 つは放射線照射により、ファイバを構成するガラスや高分子材料（プラスチック）の化学結合が切断され電子のはじき出しが起こり、それによりラジカルが生成され電荷捕獲がおこるためである。もう 1 つは放射線照射によって発生した電子・正孔対の多くは短時間のうちに再結合によって消滅するが、残った電子・正孔対は線引きなどにより生まれる不完全構造により捕獲され、それによりカラーセンタが生じる。カラーセンタになる前の不完全構造は前駆体と呼ばれている。

これまでのカラーセンタの研究により、いくつかの一般的なカラーセンタの存在が示されている。放射線計測や、物理量の計測などにおいて主に用いられる可視～近赤外の波長領域における代表的なカラーセンタを Table 2 に示す³⁾⁻⁵⁾。

SiO_2 ガラス結合 ($\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$) は放射線によって、



として、2 分される。 $\equiv\text{Si}\cdot$ が E' センタであり、 $\equiv\text{Si}-\text{O}\cdot$ が NBOHC である。E' センタは 215nm に吸収ピークを持ち、NBOHC は 260nm、630nm に吸収ピークを持つ。これらは先ほどの生成要

因の前者にあたり、これらの裾引きにより、紫外領域から可視領域に至る大きな吸収が現れると思われる。また生成要因の後者にあたるものとして、酸素欠陥 ($\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$)、非架橋酸素 ($\equiv\text{Si}-\text{O}$)、過酸化酸素 ($\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{O}-\text{Si}\equiv$)、水酸化基 (OH)、酸素分子及び水素分子の拡散、さらには、出発原料の四塩化炭素に起因する微量な不純物などにより、様々な不完全構造が導入される。これらの多くは、前駆体として電荷捕獲の準位となり、カラーセンタを形成する。Fig.1 に純粋石英中に生成されるカラーセンタの関係についてまとめたものを示す⁶⁾⁻⁸⁾。

2.1.3 ファイバの種類と耐放射線性

石英ガラスを使用したファイバにおいては、屈折率を高くするためには Ge やリン (P) などの酸化物を添加して、屈折率を低くするためには、ホウ素(B)の酸化物や F を添加する。これまで様々なドーパントのファイバが開発されており、それと同時に製造過程の改良が行われてきた。その中で耐放射線を考えるにあたっては、光の通過するコアのドーパントが重要となってくる。以下にコアのドーパントについて現在分かっている主なファイバとその耐放射線性について記す⁹⁾⁻¹⁵⁾。

(1) 純粋石英ファイバ

一般的にコアの組成は、構造が単純で共有結合が強く、不完全構造の少ない素材で製造することが好ましく、その点で純粋石英ファイバは有利である。SI 型や SM 型はコアに純粋に近い石英ファイバを使用することができる。しかし前者は伝送容量が少ない、後者はセンサへの適用を考えるとモード数が少ないためファイバへの信号光の結合効率が低くなり、光の強度が落ちるという欠点を有する。

(2) Ge ドープファイバ

ファイバのコアとクラッドの屈折率差をあたえるため Ge はコアの屈折率を高めるドーパントとして使用される。Ge ドープファイバは最も一般的に通信用に用いられている。しかし耐放射線性を考えると、純粋石英ファイバよりも劣るため適用は困難と思われる。

(3) OH 基の導入

ファイバのコアの中に OH 基を導入すると、放射線誘起伝送損失が小さくなることが発見されて以来、長い間これが有望視されてきた。しかし OH 基は先にも述べたように赤外領域 (945nm, 1240nm, 1390nm) に吸収ピークを持ち、伝送損失を増加させる働きがあり、利用する際波長領域に制約を与えることとなる。

(4) 塩素 (Cl) の除去

通常の製造過程において含まれる Cl 含有量を減らすことによって耐放射線性が上がることが知られている。そのため原料として、Cl を含まない有機シラン ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) を用いること、また製造時に脱 Cl 処理をすることなどが行われている。

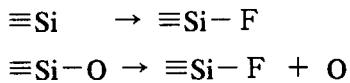
(5) 水素の添加

10 気圧程度の水素中にファイバを置くことにより、NBOHC や E' センタ等による光吸収が抑えられることが示された。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と結合することによりその増加を防ぐためと思われる。

(6) F ドープファイバ

通常 F は屈折率を下げるためクラッドにドープされるものであったが、これをコアにドープす

ることで、耐放射線性が飛躍的に伸びることが分かった。これは、 SiO_2 結合の切断により形成されたカラーセンタを、Fの拡散により、



と結合させることで、E'センタとNBOHCの生成を大幅に抑制する効果があるといわれている。また、ゲルマニウムとフッ素を共添加したプリフォームを形成し熱を加えた時に、フッ素を添加しない場合に比べてゲルマニウムの拡散が促進され原子の均質化が起こり易いという報告¹⁴⁾や、線引きの際に生じる紫外域の光吸収がフッ素の添加によって抑制されたという事実からフッ素の酸素空孔との結合を示唆する報告¹⁵⁾などがある。これらのことから、フッ素を添加することにより初期欠陥が減少し、カラーセンターの生成が抑制されるという影響も存在すると考えられる。一方でフッ素をドープすることにより 2.47eV 周辺に新たなカラーセンタが生成されるとい報告もある。しかしいずれにせよ、Fドープファイバが耐放射線性に格段に優れていることは実験的に証明されており、今後高い放射線環境下でのファイバの適用を考えるにあたっては、最有望の選択肢であると思われる。

Fig.2 にファイバの耐放射線性についてまとめたものを示す。

2.1.4 その他の放射線照射特性

(1) 回復特性

放射線照射によって増加した損失が、放射線の照射を止めた後回復傾向を示すことがある。これは、生成されたカラーセンタが回復特性をもつためであり、これは放射線照射中でも起こっている。つまり照射中の損失特性はカラーセンタの生成過程と回復過程との相互関係によるものであることができる。

(2) ラジエーションハードニング効果

純粹石英ファイバなどでは、放射線の線量の増加とともに損失増加が飽和傾向を示すものがあり、また、さらに照射を続けることで損失が減少する傾向を示すものもある。これはカラーセンタの回復量が消滅量と同じもしくは上回ることで起こる。これらはラジエーションハードニング効果とよばれており、ファイバの放射線環境下への適用にあたっては非常に有利な現象であるといえる¹⁶⁾。

(3) 温度・線量当量率特性

放射線誘起伝送損失は温度や線量当量率の違いによっても変わってくる。一般的に温度が高い程、また線量当量率が低い程伝送損失の増加は小さくなるといわれている。しかしカラーセンタには多くの種類があり、それぞれその温度・線量当量率特性は異なっている。そのためファイバの温度・線量当量率特性を知るためにには、それぞれのカラーセンタの温度・線量当量率特性を把握する必要があるといえる⁸⁾⁻¹²⁾。

2.2 フッ素ドープファイバの照射実験

フッ素ドープファイバを ^{60}Co γ 線源(照射ファイバ長 5m 線量率 $1.4 \times 10^6 [\text{R}/\text{h}]$)及び弥生炉のGz孔(照射長 10m 中性子 $3.4 \times 10^{11} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ ($1.7 \times 10^3 [\text{Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}]$) + γ 線 $1.4 \times 10^3 [\text{Gy}(\text{SiO}_2)/\text{h}]$)の二種類の施設を用いて照射実験を行った。

Fig.3 に γ 線源を用いた場合の放射線誘起伝送損失の波長依存性を、Fig. 4 に放射線誘起伝送損失の時間変化を示す。また、Fig. 5 に弥生炉で実験したときの放射線誘起伝送損失の波長依存性を、Fig. 6 にその時間変化を示す。

その結果、従来用いられている OH 基ドープファイバに比べて、特に可視域において、放射線誘起伝送損失が小さく、フッ素ドープファイバの耐放射線性の高さを確認することができた。また、 γ 線と高速中性子の照射結果を比較した場合、カラーセンタの発生傾向に差があり、高速中性子の場合は γ 線に比べて、500nm 弱の吸収が大きく、600nm 付近の吸収が小さくなつた。また、中性子照射の場合、 γ 線照射の場合と異なり、飽和傾向を示さないことが確認された。このことから、炉心近辺などの中性子フラックスが高い領域でファイバを利用するときは注意が必要なことが確認された。

3. FBG の照射試験

3.1 研究の目的・意義

FBG は、1978 年にその可能性が示された比較的新しい光学部品であり、一般には通信用フィルターとして用いられる。その原理は、ファイバのコアの進行方向に周期的な屈折率の変調(屈折率の強弱)を与え、特定の波長の光が反射するようにしたものである。この時の反射波長は、屈折率のピーク間隔によって決定される。そのため、振動・歪み・温度の変化などによりファイバが伸縮すると、屈折率のピーク間隔も変化するため反射波長が変化する。つまり、逆に、FBG の反射波長を測定することにより、振動・歪み・温度の測定をすることができる。

また、FBG による反射波長(屈折率のピーク間隔)は製造時に比較的任意に設定することができる。よって、反射波長の異なる複数の FBG を 1 本のファイバ上に多数製作することにより、多点の振動・歪み・温度を 1 本のファイバで測定することができる。

原子力施設への FBG の適用を考えた場合、放射線の影響を把握することが必要である。現在のところ、照射によって FBG の反射波長が変化するという報告^{17),18)}や、高線量の照射を行うとグレーティングが消失するという報告¹⁹⁾がなされているが、詳細な放射線に対する挙動は知られていない。前述のように、FBG は物理量を反射波長の変化として得るため、放射線照射によって誘起される反射波長の変化は測定に誤差を与える。しかし、照射による波長の変化が予め分かっていれば補正することは容易である。よって、本研究では放射線によって誘起される FBG の反射波長シフトの把握、及び適用可能な線量範囲の探索を行い、放射線環境下での FBG の適用可能性を検討することを目的とする。

3.2 FBG の原理・製作方法

FBG の作製方法ガラスの一部には紫外光を照射することによって、屈折率が変化するフォトリフレクティブ効果を示すものが存在する。通常、ファイバの構成材料として用いられるゲルマニウムをドープした石英ガラスもフォトリフレクティブ効果を示す。このため、紫外域のレーザーの干渉縞をファイバ上で形成することにより、周期的な屈折率変化を付与することができる。

ファイバ上に幅 Λ [m] の周期的屈折率変化があるとき、Bragg 反射条件、

$$\lambda = 2 n\Lambda \quad (2)$$

を満たす波長 λ [m] の光は選択的に反射される。ここで、 n は実効屈折率である。FBG の作製時に Λ を変化させておけば、それぞれの FBG での反射波長を区別でき、多点からの情報を容易に弁別可能である。さらに、 Λ はファイバの歪み、振動、熱膨張によって変化し、 n は温度によって変化するため、歪み、振動、温度といった複数の物理量の情報を入のシフトとして得ることが可能である。

3.3 γ 線照射実験

FBG の製法、組成などによる照射の影響を調べるために、FBG の γ 線照射実験を行った。東京大学の Co-60 線源を使用し、線量率 9.3×10^5 [R/h] で照射を行い、総線量が 1.3×10^8 [R] に達した時点まで 150°C まで、 1.7×10^8 [R] に達した時点で 400°C までの温度の昇降を行った。上記以外の時には温度は 45°C 程度に保った。

γ 線照射の結果 0.25nm 程度短波長側に反射波長がシフトし、放射線照射により、反射波長が変化することが確認された。また、照射によって温度に対する反射波長の傾きは変化するものの、線形性は維持している。

これらのことから、 γ 線環境下でもグレーティングの消失はなく、温度・歪に対し感度を持ち、補正によって、精度の高い測定が可能になると考えられる。

3.4 弥生での高速中性子照射実験

高速中性子の影響を評価するために、東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設の高速中性子源炉弥生のグローリ孔で照射した。今までに得られた、フルエンスと中心波長の関係を Table 3 に示す。 8×10^{16} [n/cm²] のフルエンスにおいて、反射波長は 0.13nm 長波長側にシフトするものの、文献にあるような反射率の低下やグレーティングの消失はこの線量では発生しなかった。

3.5 FBG のまとめ

ファイバセンサの一種であるファイバプラックグレーティング(FBG)の速中性子及び γ 線照射実験を行った。 γ 線照射環境下でも FBG の温度感受性が失われないことが示された。また、 1.7×10^8 [R] の γ 線照射後でも、温度、歪に対して感度があることが示された。

また、FBG の照射環境下での挙動は安定していたため、ガンマ線の場合 1.7×10^8 [R] まで、高速中性子の場合、 8×10^{16} [n/cm²] までの測定は容易に実施できることが確認された。

4. RDTs の弥生炉への適用

4.1 RDTs の概要

ファイバ温度分布センサ(ラマン散乱型温度分布センサ Raman Distributed Temperature Sensor : 以下 RDTs という)は、温度測定用として従来から用いられている熱電対などの電気式スポット型

センサと比べて、軽量で省スペース化が容易であるとともに、絶縁性、電磁ノイズの無誘導性を持ち、ファイバに沿った数 km に及ぶ連続した温度分布の測定が可能などの長所を有している。そのため、火力発電所の配管の温度分布、送電線路の温度分布や高層ビルの外壁の温度分布などのモニタリング装置として適用されてきている²⁰⁾⁻²²⁾。これらの多くの優れた特徴を持つ RDTs を原子炉に適用することにより、冷却材漏洩時の位置検出や機器運転状態監視などのプラント監視をはじめ、保守・制御の観点からも、原子炉の安全性・信頼性の向上に大きく貢献できるものと期待される。

一方で、ファイバには、放射線環境下で使用した場合、原材料のガラスに生成されるカラーセンタにより伝送損失増加現象が生じるという欠点がある。また、この放射線誘起伝送損失は、ファイバの組成、温度、線量当量率、照射線量、波長などにより大きく変化する。このため、RDTs を放射線環境下で利用した場合、信号の減衰による S/N 比の悪化や、信号波形の変化により測定結果に誤差を伴うなどの問題点が発生する。これらの問題点は 1990 年ごろから指摘されており、 γ 線照射実験によりファイバセンサの吸収線量率に対する特性変化の確認・評価等が行われてきた。

そこで、RDTs の原子炉への適用性を検討するため、弥生炉の冷却系配管にファイバを敷設し、ファイバの設置方法や放射線誘起誤差の補正方法の検証・評価を行うこととした。

4.2 原理

ファイバに沿った温度分布を得るには、ファイバ長手方向の位置情報とその位置での温度情報の 2 つが必要である。ここでは、温度と位置の導出方法について述べる。

4.2.1 ラマン散乱現象を用いた温度の導出

ある媒質中に光を入射すると、レイリー散乱、ラマン散乱、ブリルアン散乱の 3 種の散乱が発生することが知られており、ファイバにおいても光の入射により同様の散乱が発生する。ラマン散乱は、このように媒質中で起こる 3 種類の散乱の一つであり、結晶構造などの各種結晶の微観的特性を測定する振動分光法として一般に広く用いられている。

波数 ν_0 の入射光が、ガラスの結晶構造の振動などと作用すると、格子振動は瞬時、仮想的な高エネルギー状態に励起され、再び元の状態に戻る。このときに、はじめに基底状態にあったものが、エネルギー $h\nu_r$ (h :プランク定数、 ν_r :ラマン散乱による波長シフト量) 分励起された状態に遷移すると、散乱光のエネルギーは入射光のエネルギーから励起エネルギー一分減少し、散乱光の波数は $\nu_0 - \nu_r$ となる。これをストークス光という。逆に、励起状態にあった格子振動が入射光との散乱過程で基底状態へと遷移すると、散乱光は $h\nu_r$ 分エネルギーが増加して、波数が $\nu_0 + \nu_r$ となる。これをアンチストークス光という。

一般に、観測されるラマン散乱強度は、状態が遷移してラマン散乱を起こす確率と、その遷移前の状態密度の積に比例する。よって、ストークス光、及びアンチストークス光におけるラマン散乱強度は次式で表される²⁶⁾。

$$I_S = I_I K(T_f) (\nu_0 - \nu_r)^4 (n^4 P_{SE})^2 N_s$$

$$I_A = I_I K(T_f) (\nu_0 + \nu_r)^4 (n^4 P_{ES})^2 N_E \quad (3)$$

$$K(T_f) \propto kT_f$$

但し、 I_S : ストークス光強度[W]

I_A : アンチストークス光強度[W]

I_I : 入射光強度[W]

ν_0 : 入射光の波数 [m⁻¹]

ν_r : ラマン散乱による波長シフト量 4.18×10^4 [m⁻¹]
(ファイバ材料の組成により変化)

n : ファイバの屈折率 1.45
(ファイバ材料の組成、対象波長により変化)

$K(T_f)$: ファイバの組成に依存する項

k : ボルツマン定数 1.38×10^{-23} [J/K]

N_i : 状態 i の状態密度

P_{ij} : 状態 i から状態 j への遷移確率

(添字)_E: 励起状態を表す

(添字)_s: 基底状態を表す

T_f : ファイバの場合仮想温度 1700[K]

ここで、基底・励起状態の状態密度はボルツマン分布で与えられる。また、通常、状態遷移によりストークス光及びアンチストークス光が発生する確率はほぼ等しい。

$$\frac{N_E}{N_s} = \exp\left(\frac{-hc\nu_r}{kT}\right) \quad (4)$$

$$P_{ES} = P_{SE}$$

但し、 h : プランク定数 $6.63 \times 10^{-23} [\text{J} \cdot \text{s}]$

T : ファイバの絶対温度 [K]

c : 真空中の光速 $3.00 \times 10^8 [\text{m}/\text{s}]$

式(3), (4)より、アンチストークス光とストークス光の強度比は、次式で表される。

$$\frac{I_A}{I_S} = \frac{(v_0 + v_r)^4}{(v_0 - v_r)^4} \exp\left(\frac{-hcv_r}{kT}\right) \quad (5)$$

この強度比は、ファイバ材料の組成(入射レーザ光からのシフト波数 ν)と入射レーザ波長($\lambda = 1/c\nu_0$)が決まれば、理論的に温度のみに依存する。よって、ファイバの後方散乱光のうち、ラマン散乱光の2成分の強度を計測し、比を取ることにより温度を知ることができる。

4.3 OTDR 法による位置の導出

OTDR(Optical Time Domain Reflect-meter)法は、ファイバ中で発生する散乱光の強度分布を測定する方法である。主に、OTDR 法は、に示す散乱のうち一番散乱強度の強いレイリー散乱を使って、ファイバケーブルの長さ、障害点(接続点)位置、伝送損失[dB/km]、接続損失[dB]等を測定するのに用いられている。

OTDR 法では、パルスレーザをファイバに入射させ、ファイバを伝播していく過程で発生するレイリー散乱のうち、180 度近くの散乱角をもつファイバを入射側に戻ってくる後方散乱光を使用する。散乱光は、光パルスが伝播するファイバ上で連続して発生するため、観測される後方散乱光は時間分布を持っている。ここで、ある点での散乱光について着目すると、装置から散乱点までの距離とパルスレーザを発振してから後方散乱光が観測されるまでの時間には以下の関係がある^{27),28)}。

$$L = \frac{tc}{2n} \quad (6)$$

但し、 L : 装置からの距離 [m]

t : 光パルスの伝播時間 [s]

(レーザを発振してから後方散乱光が観測されるまでの時間)

よって、後方散乱光強度の時間分布を測定することにより、式(5) から散乱光強度の位置分布を求めることができる。

この様に、測定器に戻ってくる後方散乱光の時間分布を測定することにより、後方散乱光の強度分布を求める方法を OTDR 法という²⁹⁾。

4.3.1 溫度計測のアルゴリズム

以上のように、RDTs では、OTDR 法による位置と、ラマン散乱光の強度比から計算した温度から温度分布を求めることができる。

まず、短パルスのレーザ光をファイバに入射し、ストークス光とアンチストークス光の強度の時間分布を測定する。次に、この時間分布から、式(6)を用いてストークス光とアンチストークス光の位置の分布に変換する。このようにして求めた散乱光強度分布から、式(5)を用いてファイバ上の温度分布を計算する事ができる³⁰⁾。

ここで、実際の測定を行う場合にはいくつかの技術的な課題もある。

第一に、実際の系では、後方散乱光の光電変換過程に用いるなだれ光ダイオード(Avalanche Photo-Diode : APD)の感度のばらつき、光フィルターの透過率のばらつき等の影響により、ストークス光とアンチストークス光の絶対強度を求めるのが困難なことである。

この場合、温度基準点を用いることにより、絶対強度を相対強度比で代用できることが知られている。温度基準点（温度は既知）を R 点、被温度測定点を A 点とすると、各点の温度は式(5)より、以下の式で表される。

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{hc\nu_r} \left\{ 4 \ln \left(\frac{\nu_0 + \nu_r}{\nu_0 - \nu_r} \right) - \ln \left(\frac{I_{AA}}{I_{AS}} \right) \right\} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\theta} = \frac{k}{hc\nu_r} \left\{ 4 \ln \left(\frac{\nu_0 + \nu_r}{\nu_0 - \nu_r} \right) - \ln \left(\frac{I_{RA}}{I_{RS}} \right) \right\} \quad (8)$$

但し、 θ : 基準点温度 [K]

T : 被測定点温度 [K]

I_{XA} : 位置 X でのアンチストークス光強度

I_{XS} : 位置 X でのストークス光強度

(添字)_A: 被温度測定点（位置）

(添字)_R: 基準点（位置）

式 (7)及び式 (8)より、被測定温度の測定位置は以下の式で表される。

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\theta} - \frac{k}{hc\nu_r} \ln \left(\frac{\frac{I_{AA}}{I_{AS}}}{\frac{I_{RA}}{I_{RS}}} \right) \quad (9)$$

よって、ストークス光とアンチストークス光について、被温度測定点と基準点での相対強度比が得られれば、被温度測定点の温度を求めることができる。²⁹⁾また同式は変形すると、アンチストークス光及びストークス光の強度についてそれぞれの比を取っている。このことは、測定部の

温度変化などによって、APD の光電変換の効率が変化しても安定した測定を行うことができる事を示している。

第二に、ラマン散乱光が入射光の約 10^{-8} 倍、レイリー散乱光の約 10^{-3} 倍と極めて微弱なことである。そのため、後方散乱光の測定信号を多数回加算平均して S/N 比を改善する必要がある。

第三は、ファイバが未照射状態でも伝送損失を有していることである。ファイバは、未照射状態においても不純物の影響やガラスの吸収スペクトルの影響により、波長に依存する伝送損失を持つ。そのため、ファイバ中を伝播する信号は、伝播距離が長くなるほど減衰していく。RDTsにおいても、入射光が散乱点に達するまでの間と、散乱点から RDTs に戻るまでの間でその影響を受ける。そのため、RDTs で観測される被温度測定点 A の散乱光の強度(未照射状態)は、伝送損失が無い場合の強度よりも弱くなり、その関係は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} 10 \times \log \left(\frac{I'_{AA}}{I_{AA}} \right) &= -(l_{SAA} + l_{SAR}) \\ 10 \times \log \left(\frac{I'_{AS}}{I_{AS}} \right) &= -(l_{SAS} + l_{SAR}) \end{aligned} \quad (10)$$

但し、 l_{XYA} : XY 間のアンチストークス光の初期伝送損失[dB]

l_{XYS} : XY 間のストークス光の初期伝送損失[dB]

l_{XYR} : XY 間の入射光の初期伝送損失[dB]

I'_{XA} : RDTs で観測される位置 X のアンチストークス光の強度
(未照射状態: 放射線誘起伝送損失なし)

I'_{XS} : RDTs で観測される位置 X のストークス光の強度
(未照射状態: 放射線誘起伝送損失なし)

I_{XA} : RDTs で観測される位置 X のアンチストークス光の強度
(全ての伝送損失なし)

I_{XS} : RDTs で観測される位置 X のストークス光の強度
(全ての伝送損失なし)

(添字)_s: 測定装置の受光素子のある位置

(添字)_A: 被温度測定点 (位置)

同様に、RDTs で観測される基準点 R での散乱光の強度(未照射状態)と、伝送損失が無い場合の強度の関係は次式で表される。

$$\begin{aligned} 10 \times \log \left(\frac{I'_{RA}}{I_{RA}} \right) &= -(l_{SRA} + l_{SRR}) \\ 10 \times \log \left(\frac{I'_{RS}}{I_{RS}} \right) &= -(l_{SRS} + l_{SRR}) \end{aligned} \quad (11)$$

但し、(添字)_R： 基準点（位置）

また、ある区間におけるストークス光、アンチストークス光の伝送損失は、その区間を構成する複数の区間の伝送損失の和に置換えることができる。被測定点 A と受光素子 S の間の伝送損失は、(基準点 R を A-S 間に置いた場合、) A-R 間の伝送損失と、R-S 間の各伝送損失の和で表すことができる。つまり、伝送損失には次式の関係がある。

$$\begin{aligned} l_{SAA} &= l_{SRA} + l_{RAA} \\ l_{SAS} &= l_{SRS} + l_{RAS} \end{aligned} \quad (12)$$

上記式(10),(11),(12)を式(9)に代入することで、被測定点 A の温度は次式で表される。

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\theta} - \frac{k}{hc\nu_r} \ln \left(\frac{\frac{I'_{AA}}{I'_{RA}} / \frac{I'_{AS}}{I'_{RS}}}{\frac{I'_{AS}}{I'_{RS}}} \right) - \frac{k}{4.3hc\nu_r} (l_{RAA} - l_{RAS}) \quad (13)$$

上式より、RDTs で観測される被測定点 A 及び基準点 R における散乱光の強度 I'_{AA} , I'_{AS} , I'_{RA} , I'_{RS} 、基準温度 θ 、基準点と被測定点の間の初期損失 $l_{RAA} - l_{RAS}$ が求まれば被測定点の温度を計算することができる。実際の温度測定においては、初期損失 $l_{RAA} - l_{RAS}$ を予め求めておき、その他の値を計測することで温度を算出し分布が作成される。なお、ファイバの初期の伝送損失はファイバの組成によって大きく異なるため、被測定ファイバごとに、補正值を求める必要がある。

4.4 放射線誘起伝送損失

4.4.1 放射線誘起伝送損失の影響

ファイバは放射線環境下において、波長に依存する複雑な伝送損失増加現象が生じる。ここでは、ファイバの初期伝送損失が使用開始時の初期設定で補正されているものとして、放射線誘起伝送損失の影響についてのみ述べる。

先ず、被温度測定点を A、基準点を R とすると、式 5-9 より、A 点における光の強度は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} 10 \times \log \left(\frac{I''_{AA}}{I'_{AA}} \right) &= -(l'_{SAA} + l'_{SAR}) \\ 10 \times \log \left(\frac{I''_{AS}}{I'_{AS}} \right) &= -(l'_{SAS} + l'_{SAR}) \end{aligned} \quad (14)$$

- 但し、 I''_{XA} : RDTs で観測される位置 X のアンチストークス光の強度
 (放射線誘起伝送損失がある場合)
- I''_{XS} : RDTs で観測される位置 X のストークス光の強度
 (放射線誘起伝送損失がある場合)
- I'_{XA} : RDTs で観測される位置 X のアンチストークス光の強度
 (未照射状態：放射線誘起伝送損失なし)
- I'_{XS} : RDTs で観測される位置 X のストークス光の強度
 (未照射状態：放射線誘起伝送損失なし)
- l'_{XYA} : XY 間のアンチストークス光の放射線誘起伝送損失
- l'_{XYS} : XY 間のストークス光の放射線誘起伝送損失
- l'_{XYR} : XY 間のレイリー光の放射線誘起伝送損失
- (添字)_A: 被温度測定点 (位置)
- (添字)_s: RDTs の受光素子のある位置
- (添字)_R: 基準点 (位置)

基準点 R も同様にして、

$$\begin{aligned} 10 \times \log \left(\frac{I''_{RA}}{I'_{RA}} \right) &= -(l'_{SRA} + l'_{SRR}) \\ 10 \times \log \left(\frac{I''_{RS}}{I'_{RS}} \right) &= -(l'_{SRS} + l'_{SRR}) \end{aligned} \quad (15)$$

となる。また、式(12)と同様に、放射線誘起伝送損失には次の関係がある。

$$\begin{aligned} l'_{SAA} &= l'_{SRA} + l'_{RAA} \\ l'_{SAS} &= l'_{SRS} + l'_{RAS} \end{aligned} \quad (16)$$

上記式(14),(15),(16)を式(13)に代入することで、放射線誘起伝送損失と被測定点の温度の関係が得られる。

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\theta} - \frac{k}{hc\nu_r} \ln \left(\frac{\frac{I''_{AA}}{I'_{RA}} / \frac{I''_{AS}}{I'_{RS}}}{\frac{I''_{AS}}{I'_{RS}}} \right) - \frac{k}{4.3hc\nu_r} (l'_{RAA} - l'_{RAS} + l_{RAA} - l_{RAS}) \quad (17)$$

また、RDTs で観測される温度 T' [K] は式(13)より、

$$\frac{1}{T'} = \frac{1}{\theta} - \frac{k}{hc\nu_r} \ln \left(\frac{\frac{I''_{AA}}{I''_{RA}}}{\frac{I''_{AS}}{I''_{RS}}} \right) - \frac{k}{4.3hc\nu_r} (l'_{RAA} - l'_{RAS}) \quad (18)$$

と表される。式(17),(18)より、RDTs で観測される温度と実際の被測定点の温度との関係は以下の式で表される。

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T'} - \frac{k}{4.3hc\nu_r} (l'_{RAA} - l'_{RAS}) \quad (19)$$

一般に、ファイバは 800~1100[nm] の波長域では、波長が短いほど放射線誘起損失は大きく ($l'_{RAA} > l'_{RAS}$) なる。よって、式(19)より放射線環境下における RDTs の測定結果は、被測定点の実際の温度よりも小さくなる。

4.4.2 ループ型補正法

Fig.7 にループ型補正法の原理図を示す。この補正法では、1 本のファイバを往路・復路が同じ位置を辿るようにしてループ状に敷設する。この様にファイバを敷設した場合、得られるデータは、設置条件（温度、線量当量率等）を同じとする対（往路・復路）をなすデータの連続とみなすことができ、任意の 2 点間において往路と復路の伝送損失は同じ大きさになる。ここで、対となる二点の温度は同じであり、両点のストークス光、アンチストークス光の強度は伝送損失がなければ同じ大きさになる。また、予め熱電対等を用いてある一点の温度を求めておき、そこを基準点とする。Fig.7 においては、温度が既知な A(D) 点を基準点とし、B(C) 点を任意の測定点とする。

ここで、A 点と D 点での散乱光強度を比較すると、伝送損失の影響によりその強度は D 点のほうが小さくなる。この A 点と D 点で測定される散乱光強度の比から AD 間での伝送損失を求めることができる。同様にして、B 点と C 点の測定結果から BC 間の伝送損失を得ることが出来る。以上のようにして求めた AD 間、BC 間の伝送損失の差から、AB 間(CD 間)の伝送損失を得ることが出来る。従って、既知な A 点の温度と AB 間の伝送損失から任意な B 点の温度を求めることが出来る²³⁾。

この様に、本手法を用いることにより、伝送損失による温度のずれは理論的に補正する事ができる。

ここで、この補正手法の定式化を行う。RDTs の受光素子のある位置から A 点までの損失は、A 点の測定光、D 点の測定光共にこの間を通るため、両者の光強度の比をとることにより相殺することができる。よって、A 点と D 点でのアンチストークス光の比は、AD 間のみの損失に依存することになる。この時、A 点と D 点でのアンチストークス光測定強度の比は、以下の式であらわす事ができる。

$$\frac{I''_{DA}}{I''_{AA}} = 10^{\frac{l'_{ADA} + l'_{ADR} + l_{ADA} + l_{ADR}}{10}} = \exp\left(-\frac{l'_{ADA} + l'_{ADR} + l_{ADA} + l_{ADR}}{4.3}\right) \quad (20)$$

但し、(添字)_A：被温度測定点A（位置）

(添字)_D：被温度測定点D（位置）

(添字)_R：受光素子（位置）

ストークス光についても、同様に以下の式であらわす事ができる。

$$\frac{I''_{DS}}{I''_{AS}} = 10^{\frac{l'_{ADS} + l'_{ADR} + l_{ADS} + l_{ADR}}{10}} = \exp\left(-\frac{l'_{ADS} + l'_{ADR} + l_{ADS} + l_{ADR}}{4.3}\right) \quad (21)$$

式(20),(21)より、

$$\frac{\frac{I''_{DA}}{I''_{AA}}}{\frac{I''_{DS}}{I''_{AS}}} = \frac{\frac{I''_{DA}}{I''_{DS}}}{\frac{I''_{AA}}{I''_{AS}}} = \exp\left(-\frac{l'_{ADA} - l'_{ADS} + l_{ADA} - l_{ADS}}{4.3}\right) \quad (22)$$

となる。B,C点についても、同様に求める。

$$\frac{I''_{CA}}{I''_{BA}} = 10^{\frac{l'_{BCA} + l'_{BCR} + l_{BCA} + l_{BCR}}{10}} = \exp\left(-\frac{l'_{BCA} + l'_{BCR} + l_{BCA} + l_{BCR}}{4.3}\right) \quad (23)$$

$$\frac{I''_{CS}}{I''_{BS}} = 10^{\frac{l'_{BCS} + l'_{BCR} + l_{BCS} + l_{BCR}}{10}} = \exp\left(-\frac{l'_{BCS} + l'_{BCR} + l_{BCS} + l_{BCR}}{4.3}\right) \quad (24)$$

$$\frac{\frac{I''_{CA}}{I''_{BA}}}{\frac{I''_{CS}}{I''_{BS}}} = \frac{\frac{I''_{CA}}{I''_{CS}}}{\frac{I''_{BA}}{I''_{BS}}} = \exp\left(-\frac{l'_{BCA} - l'_{BCS} + l_{BCA} - l_{BCS}}{4.3}\right) \quad (25)$$

但し、(添字)_B：被温度測定点B（位置）

(添字)_C：被温度測定点C（位置）

ここで、式(12)と同様に、放射線誘起伝送損失には次の関係がある。

$$\begin{aligned}
 l'_{ADA} &= l'_{ABA} + l'_{BCA} + l'_{CDA} \\
 l'_{ADS} &= l'_{ABS} + l'_{BCS} + l'_{CDS} \\
 l_{ADA} &= l_{ABA} + l_{BCA} + l_{CDA} \\
 l_{ADS} &= l_{ABS} + l_{BCS} + l_{CDS}
 \end{aligned} \tag{26}$$

また、ループ型補正法の場合、ファイバの条件（温度、線量当量率）が往路・復路で同じになるように敷設してあるため、次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 l'_{ABA} &= l'_{CDA} \\
 l'_{ABS} &= l'_{CDS} \\
 l_{ABA} &= l_{CDA} \\
 l_{ABS} &= l_{CDS}
 \end{aligned} \tag{27}$$

よって、式(26)は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 l'_{ADA} &= 2l'_{ABA} + l'_{BCA} \\
 l'_{ADS} &= 2l'_{ABS} + l'_{BCS} \\
 l_{ADA} &= 2l_{ABA} + l_{BCA} \\
 l_{ADS} &= 2l_{ABS} + l_{BCS}
 \end{aligned} \tag{28}$$

これを式(22)に代入すると、

$$\frac{\cancel{\frac{I''_{DA}}{I''_{DS}}}}{\cancel{\frac{I''_{AA}}{I''_{AS}}}} = \exp \left\{ -\frac{l'_{BCA} - l'_{BCS} + l_{BCA} - l_{BCS}}{4.3} + 2 \left(-\frac{l'_{ABA} - l'_{ABS} + l_{ABA} - l_{ABS}}{4.3} \right) \right\} \tag{29}$$

となる。 (式(29)) / (式(26)) より、

$$\frac{\cancel{\frac{I''_{DA}}{I''_{DS}}}}{\cancel{\frac{I''_{AA}}{I''_{AS}}}} \frac{\cancel{\frac{I''_{CA}}{I''_{CS}}}}{\cancel{\frac{I''_{BA}}{I''_{BS}}}} = \frac{\frac{I''_{DA}}{I''_{DS}} \frac{I''_{BA}}{I''_{BS}}}{\frac{I''_{AA}}{I''_{AS}} \frac{I''_{CA}}{I''_{CS}}} = \exp \left(-2 \frac{l'_{ABA} - l'_{ABS} + l_{ABA} - l_{ABS}}{4.3} \right) \tag{30}$$

となる。式(30)は、変形すると次のように表される。

$$l'_{ABA} - l'_{ABS} + l_{ABA} - l_{ABS} = -\frac{4.3}{2} \ln \left(\sqrt{\frac{I''_{DA}}{I''_{DS}} \frac{I''_{BA}}{I''_{BS}}} \right) \quad (31)$$

従って、AB 間の損失は、A,B,C,D 各点のストークス光とアンチストークス光の強度から求めることができる。

ここで、A 点の実際の温度(既知)は式(17)より、以下の式であらわされる。

$$\frac{1}{T_0} = \frac{1}{\theta} - \frac{k}{hc\nu_r} \ln \left(\frac{I''_{AA}/I''_{RA}}{I''_{AS}/I''_{RS}} \right) - \frac{k}{4.3hc\nu_r} (l'_{RAA} - l'_{RAS} + l_{RAA} - l_{RAS}) \quad (32)$$

但し、 T_0 : A 点の実際の温度[K](既知)

同様にして B 点の実際の温度(未知)は、

$$\frac{1}{T_1} = \frac{1}{\theta} - \frac{k}{hc\nu_r} \ln \left(\frac{I''_{BA}/I''_{RA}}{I''_{BS}/I''_{RS}} \right) - \frac{k}{4.3hc\nu_r} (l'_{RBA} - l'_{RBS} + l_{RBA} - l_{RBS}) \quad (33)$$

但し、 T_1 : B 点の実際の温度[K](未知)

となる。また、式(28)と同様に、放射線誘起伝送損失には次の関係がある。

$$\begin{aligned} l'_{ABA} &= 2l'_{RBA} - l'_{RAA} \\ l'_{ABS} &= 2l'_{RBS} - l'_{RAS} \\ l_{ABA} &= 2l_{RBA} - l_{RAA} \\ l_{ABS} &= 2l_{RBS} - l_{RAS} \end{aligned} \quad (34)$$

(式(33))-(式(32))の結果に式(34)を代入すると、

$$\frac{1}{T_1} = \frac{1}{T_0} + \frac{k}{hc\nu_r} \ln \left(\frac{I''_{AA}}{I''_{AS}} \frac{I''_{BA}}{I''_{BS}} \right) - \frac{k}{4.3hc\nu_r} (l'_{ABA} - l'_{ABS} + l_{ABA} - l_{ABS}) \quad (35)$$

となり、式(31)を式(35)に代入して、 l'_{ABA} , l'_{ABS} , l_{ABA} , l_{ABS} を消去すると、

$$\frac{1}{T_1} = \frac{1}{T_0} + \frac{k}{2hc\nu_r} \ln \left(\begin{array}{c} I''_{AA} I''_{BA} \\ \hline I''_{AS} I''_{BS} \\ \hline I''_{CA} I''_{DA} \\ \hline I''_{CS} I''_{DS} \end{array} \right) \quad (36)$$

となる。式(36)の右辺は、全て測定項であり、各位置での光強度の実測値のみにより、伝送損失の影響を排除した温度分布を求めることができる。また、ループ型補正法は初期の伝送損失も排除するため、初期値の設定をする必要がない。

4.5 弥生炉への設置

2章で照射試験を行ったフッ素ドープファイバを弥生の冷却系配管に往復敷設した。RDTsの装置は制御室上部の測定室に設置し、炉心からそこまで約250m ファイバを敷設した。弥生炉は、炉心位置を動かすことができる特殊な原子炉である。そのため、核計装ケーブルや制御用ケーブルと干渉しないようにこれらのケーブルと同じ経路を通してファイバを敷設し、制御用集合体内にある冷却系配管にファイバを敷設した。また、ポンプなどは炉室から少し離れた暗渠に設置されている。その付近(ポンプよりも下流)の冷却系配管にらせん状にファイバを敷設した。設置状況の影響を考慮するため、一部の冷却系配管に断熱材を巻き霧囲気の影響を受けにくい部分を作成した。

参照用に熱電対を6箇所に設置した。

- 炉心近傍冷却系配管 120m
- 地下ピット霧囲気 95,149m
- 暗渠霧囲気 60,184mm
- 断熱材つき配管 41,203m
- 断熱材なし配管 37,207m
- 制御室霧囲気 1,243m

4.6 測定結果

Fig. 8 に RDTs の運転開始前、運転開始直後、運転開始3ヶ月経過後の温度分布を位置を示して示す。ポンプよりも下流域の冷却系配管の温度分布はポンプの断熱圧縮により、炉心近傍よりも温度が高くなっている。また、断熱材の有無で測定結果に約10度の差があり、霧囲気温度が配管表面の温度分布測定には大きな影響を与えていることがわかる。また、3ヶ月にわたる連続した測定においても温度が測定できており、本手法の長期安定性が確認された。

Fig. 9 に3ヶ月運転後の炉心近傍におけるRDTsと熱電対の測定結果、ループ型補正法を用いた補正結果を示す。運転に伴う放射線誘起伝送損失の影響により、3ヶ月で約2°Cのずれが発生している。しかし、補正を実施することにより、0.5°C以下のずれで温度分布を再現することができた。

Fig. 10 にRDTsと熱電対の補正結果と、排気温度(配管内部)、炉心温度(右側のY第2軸を利用)の運転に用いるデータとを比較したものを示す。測定位置の違いと炉心からの熱伝達により、

若干の差はあるものの挙動は時間遅れなく一致している。このことから、データ処理法の改良などにより RDTs の応答速度を改良する必要があるものの、異常監視系として有効であると考えられる。

Fig. 11 にポンプ排気温度(配管内部)と RDTs による測定結果との比較を示す。雰囲気の影響により、測定温度に差が出ているが、挙動が一致している。測定箇所は風がないが、風のある場所では保温材の効果がもっと大きく出ると考えられる。このことから、断熱材を設置するなどの対策をとることにより、配管表面の温度分布から配管内部の温度を推測できることが確認された。

4.7 照射孔を用いた加速試験

高速中性子の影響をもっとはっきりと見るために、弥生の実験孔 (Gz 孔 : 中性子 3.4×10^{11} [cm $^{-2}$ s $^{-1}$] (1.7×10^3 [Gy(SiO₂)/h]) + γ線 1.4×10^3 [Gy(SiO₂)/h]) を用いて加速試験を行った。運転は一日 5 時間 × 3 日行った。

Fig. 12 に熱電対と RDTs の測定結果を示す。放射線誘起伝送損失により、熱電対と RDTs の測定結果に誤差が生じる。運転を停止すると、一時的に誤差は小さくなるものの、飽和することなくその誤差は大きくなっていた。

Fig. 13 に補正後の結果を示す。補正を行うことにより、温度分布を再現することができ、 3.2×10^{15} [n/cm 2 /s] のフルエンスでも RDTs が利用可能であることが確認された。

4.8 RDTs のまとめ

前年度の評価委員会でご指摘のあったフッ素ドープファイバを弥生炉に敷設し、RDTs を用いて温度分布測定を行った。その結果

- 測定結果に誤差が出るもの、補正の結果、温度分布が長期にわたり再現できる
- 実際の計装に用いられている温度の傾向が時間遅れなく測定できる
- 実験孔を用いて加速試験を行った結果、 3.2×10^{15} [n/cm 2 /s] のフルエンスでも利用可能であることが確認された。

これらのことから、雰囲気温度の測定や異常監視系として RDTs が十分に適用可能であると考えられる。

5. 研究のまとめ

新しい光技術の原子力計測への適用性を評価するために、基本となるフッ素ドープファイバの放射線誘起伝送損失の評価を行うとともに、以下の二種類のファイバセンサ(ファイバ・ブラング・グレーティング (FBG)、ラマン散乱型温度分布センサ (RDTs))について、測定精度、時間応答性、放射線環境下での寿命評価などの基礎的特性の評価を行った。

初めに、フッ素ドープファイバの放射線誘起伝送損失を測定した。測定の結果、中性子照射では伝送損失は飽和傾向を示さず、原子炉で利用する場合はこの点に注意をしなければならないことが確認された。RDTs を弥生炉に適用した結果から、雰囲気温度の測定や異常監視系として RDTs が十分に適用可能であることが確認された。FBG の高速中性子線・ガンマ線照射試験を行

い、基礎的な評価を行った結果、配管領域では十分に利用が可能であることが確認された。

これらの結果から、これらのファイバセンサを原子力プラントに適用することにより、原子力プラントの安全性の向上に寄与できるものと期待される。

参考文献

- 1) 森下克巳著、「ファイバファイバ型光デバイス」、朝倉書店、(1993)
- 2) 飯塚啓吾著、「光工学」、共立出版、(1977)
- 3) 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, pp.2142-2155 (1996)
- 4) D.L.Griscom, "Radiation-induced defects in glasses", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.71, No.7, pp.1019-1022 (1993)
- 5) D.L.Griscom, "Fast-neutron radiation effects in a silica-core optical fiber studied by CCD-camera spectrometer", *Appl. Opt.*, Vol.33, No.6, pp.1022-1028, (1994)
- 6) 唐沢繁、羽鳥喜紀 他、「ファイバの熱中性子効果(IV)」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-87-147、(1987)
- 7) 長沢可也 他、「パーオキシ・ラジカルと水素との反応」電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-85-140、(1985)
- 8) 中居久典、徳永利秀 他、「石英系ファイバの γ 線照射特性」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-82-28、(1982)
- 9) 角田恒巳、若山直昭 他、「耐放射線ファイバについて」、JAERI-conf 95-002, p.28 (1995)
- 10) 平島利洋 他、「石英コアファイバの耐放射線性(効)」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-87-139、(1983)
- 11) 西村真雄 他、「ファイバの耐放射線性」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-82-27、1982
- 12) 平島利洋 他、「石英コアファイバの耐放射線性(効)」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-85-133、(1985)
- 13) K.Sanada, N.Sakamoto and K.Inada, "Radiation resistance of fluorine-doped silica-core fibers", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol.179, pp.339-344 (1994)
- 14) A. A. Abramov, M. M. Bubnov, E. M. Dianov, S. L. Semjonov, A. G. Shchebunjaev, A. N. Gurjanov, V. F. Khopon, "Fluorine's effect on fiber optical losses induced by drawing", OFC '94 : summaries of papers presented at the Conference on Optical Fiber Communication, pp. 2-3 (1994)
- 15) J. Kirchhof, S. Unger, B. Knappe, "Interaction of germanium and fluorine in the preparation of optical waveguides", OFC '94 : summaries of papers presented at the Conference on Optical Fiber Communication, pp. 34-35, (1994)
- 16) D.L.Griscom ' Radiation hardning of pure-silica-core optical fibers by ultra-high-dose γ -ray pre-irradiation", *J. Appl. Phys.*, Vol.77, No.10, pp.5008-5013, (1995)

- 17) A.I.Gusarov, A.Fernandez, F.Berghmans, et al. Effect of MGy dose level gamma-radiation on the parameters of FBGs written in a Ge-doped fiber. in: European Workshop on Optical Fiber Sensors. 1998. Peebles: SPIE.Late papers. (1998)
- 18) A.I.Gusarov, D.S.Starodubov, F.Berghmans, et al. Comparative of MGy dose level gamma-radiation effect on FBGs written in different fibres. in:13th International Conference on Optical Fiber Sensors. 1999. Kyongju, Korea: SPIE. Vol.3746 pp.608-611, (1999)
- 19) 角田恒巳, 山岸秀志, 岩村公道, 浦上正雄: 日本原子力学会 2000 年春の年会要旨集 第 II 分冊 p713
- 20) K. Ogawa, Y. Ozawa, et al. HITACHI CABLE REVIEW No. 9 pp.21~26 (1990)
- 21) F. B. H. Jensen, E. Takada, et al. "Distributed Raman temperature measurement system for monitoring of nuclear power plant coolant loops" Proc. of SPIE, Vol. 2895, pp132-143, (1996),
- 22) 小川勝徳, 小沢保夫, 川神裕志 他「ファイバ温度レーダーの開発」、日立電線、No.9, pp.7-12, (1990)
- 23) 特許出願公開番号 特開平 7-218354
- 24) 塩田孝夫「分布型ファイバセンサ」、応用物理学会 第3回光波センシング研究会、LST3-20 pp.133-140, (1998)
- 25) 坂東直人、井川耕司 他「ファイバ中のラマン散乱による温度計測と分布型温度センサシステム」、応用物理学会 第3回光波センシング研究会、LST3-22 pp.149-155, (1998)
- 26) Long, D.A. "Raman Spectroscopy" McGraw-Hill International Book Company, (1977)
- 27) 小川勝徳, 小沢保夫, 川神裕志, 筒井輝明 他「ファイバ分布型温度センサの開発」、応用物理学会 第3回光波センシング研究会、LST3-22 pp.141-148, (1998)
- 28) 田幸敏治、本田辰篤 編「光測定器ガイド」増補改訂版 オプトロニクス社 (1998)
- 29) 「図解・光デバイス辞典」オプトロニクス社、(1996)
- 30) J.P. Darkin, "The distributed fiber optic sensing handbook", IFS Publications, United Kingdom, (1990)
- 31) F. B. H. Jensen, E. Takada, et al. "Consequence of Radiation effects on pure-silica-core fibers used for Raman-scattering-based temperature measurements" IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 45, No.1, pp50-58, (1998)

Table 1 光ファイバの伝送損失要因

損失の種類		損失要因
吸収損失	材料固有の損失	紫外吸収、赤外吸収
	不純物による吸収	遷移金属イオンや OH 基による吸収
散乱損失	材料固有の散乱	レイリー散乱
	構造の不均一による散乱	コア・クラッド間の凹凸、マイクロペンド
放射損失		曲率の大きな曲がり

Table 2 純粋石英コアファイバ中で重要なカラーセンタの例

カラーセンタの波長域	考えられている原因
紫外域からの吸収テール	E`センタ 塩素不純物
630nm の吸収ピーク	非架橋酸素正孔センタ (NBOHC)
赤外域からの吸収ピーク	SiO ₂ の格子振動による吸収

Table 3 積算線量と反射波長の関係

フルエンス [n/cm ²]	反射波長 [nm]
0 (未照射時)	1330.62
8 × 10 ¹⁶	1330.75

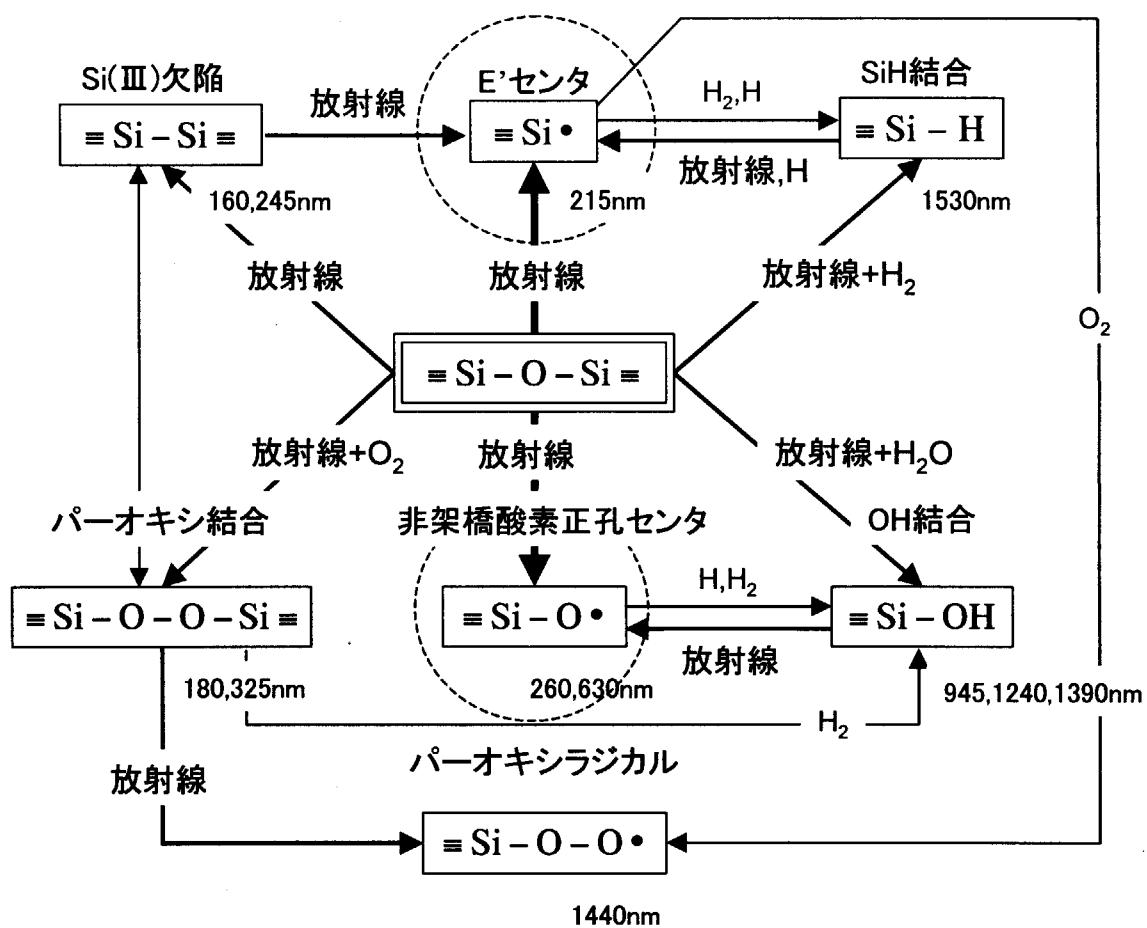


Fig. 1 純粋石英中に形成されるカラーセンタの関係

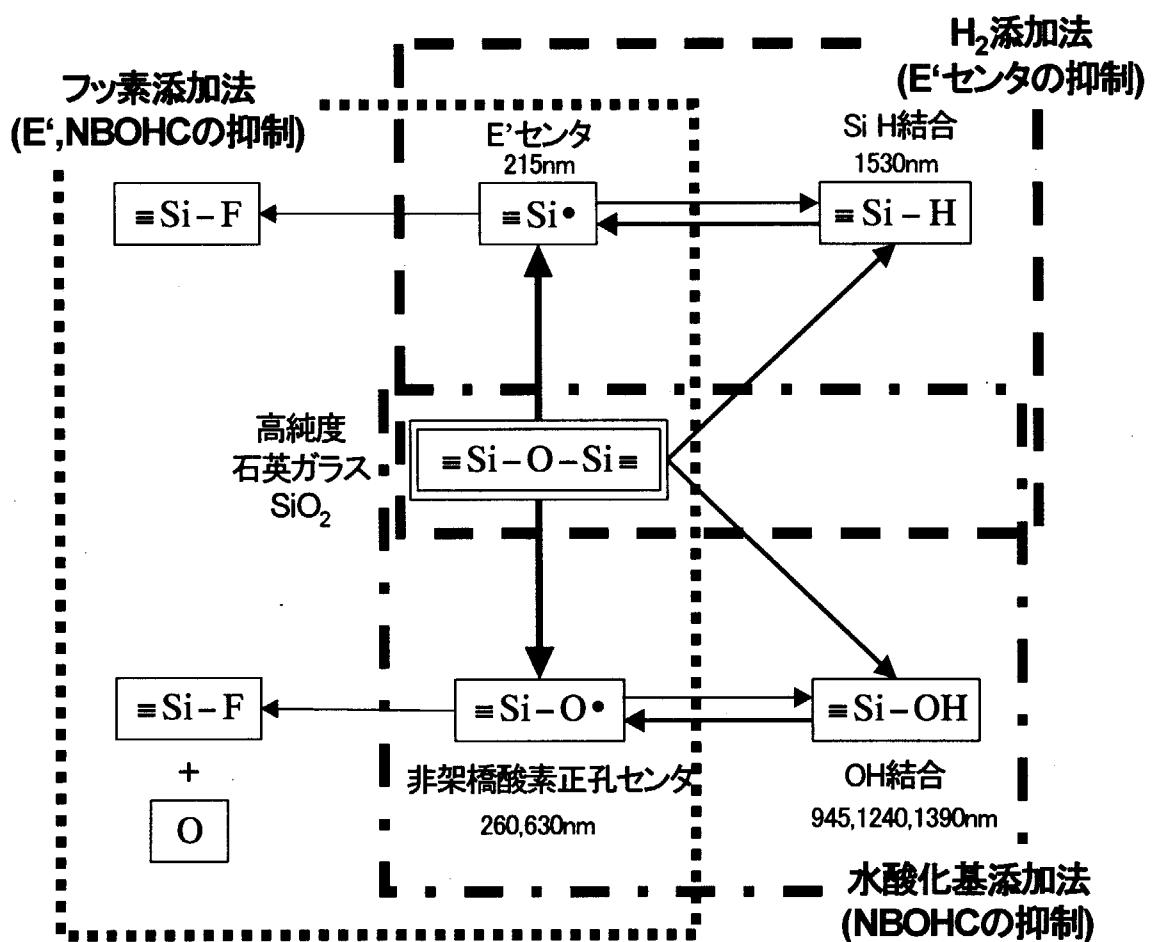
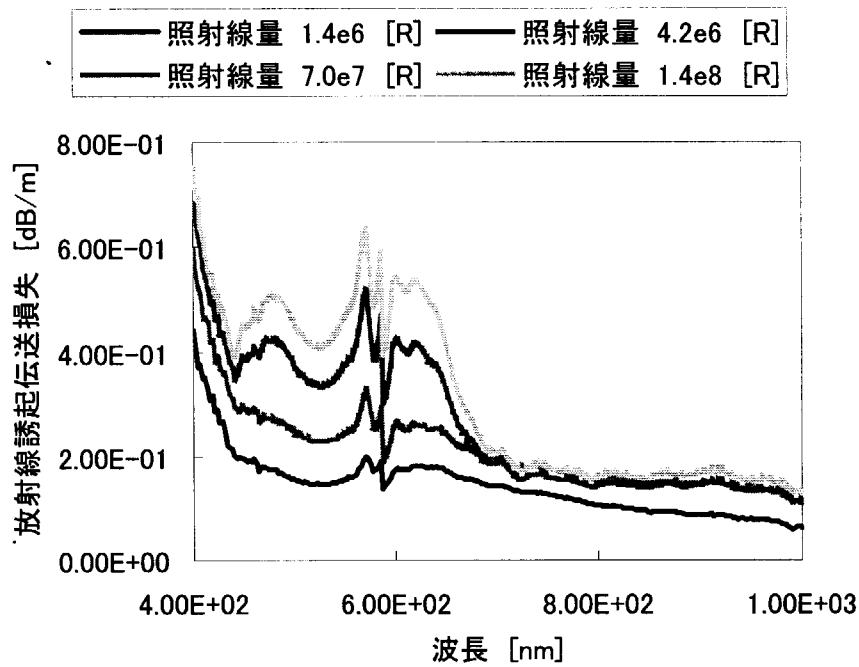
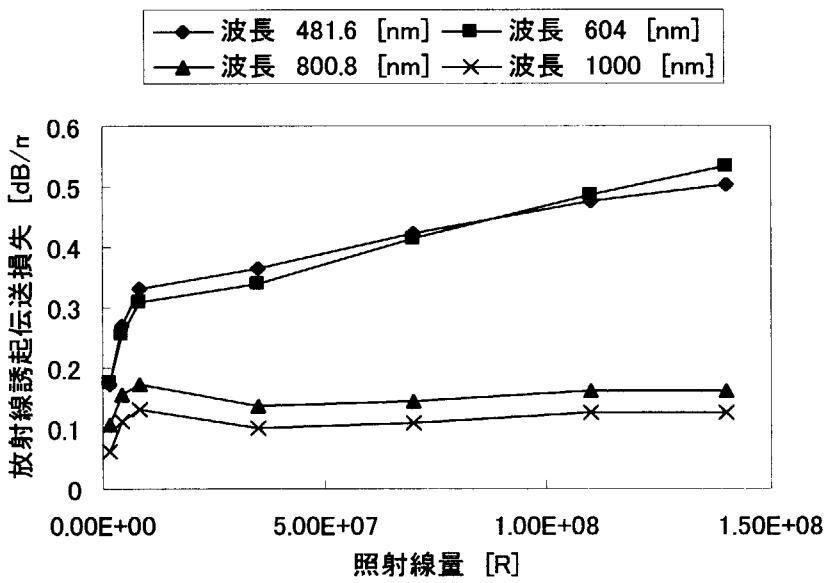


Fig. 2 石英ファイバの耐放射線性改善方法

Fig. 3 γ 線による放射線誘起伝送損失Fig. 4 γ 線による放射線誘起伝送損失の線量依存性

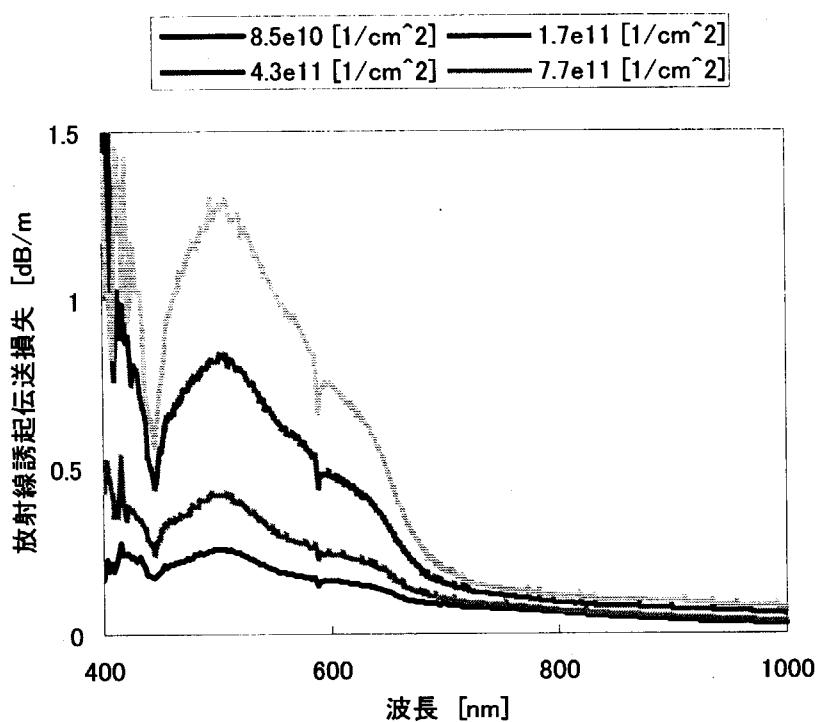


Fig. 5 中性子照射による放射線誘起伝送損失

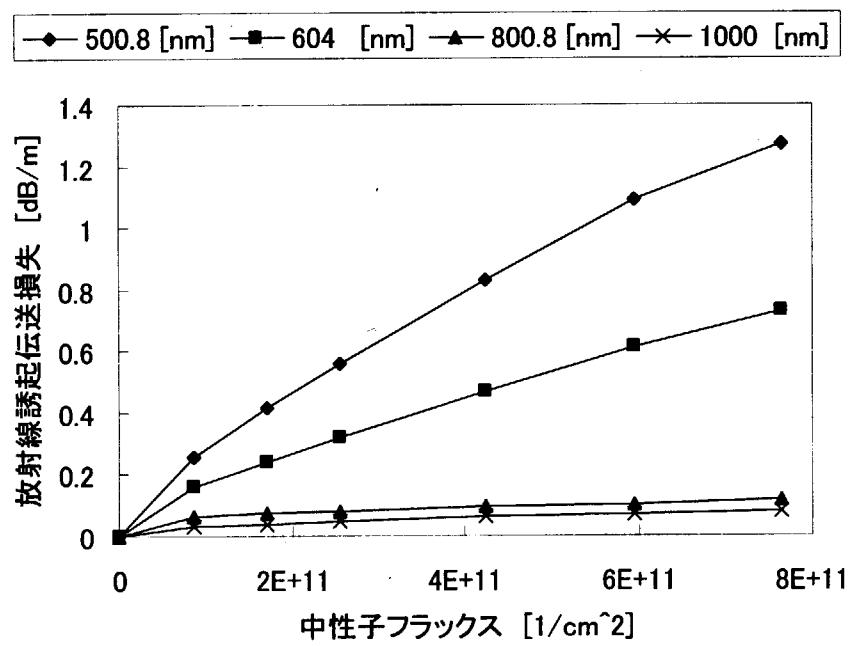


Fig. 6 中性子による放射線誘起伝送損失の時間変化

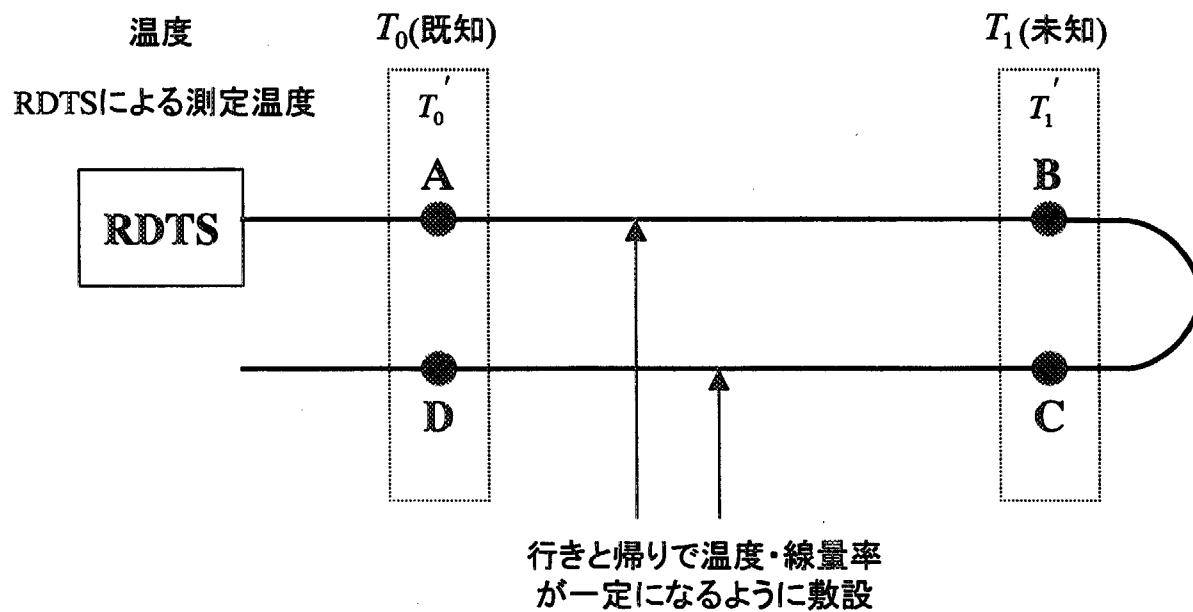


Fig. 7 ループ型補正法のセットアップ

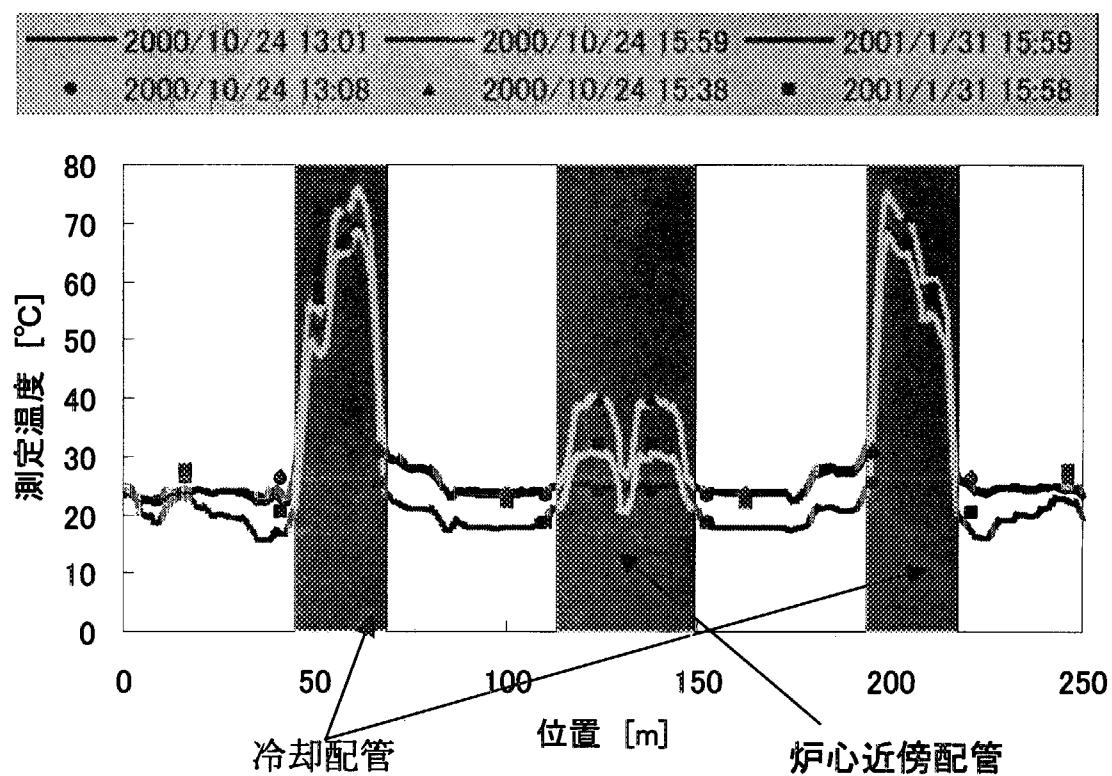


Fig. 8 RDTs の測定結果

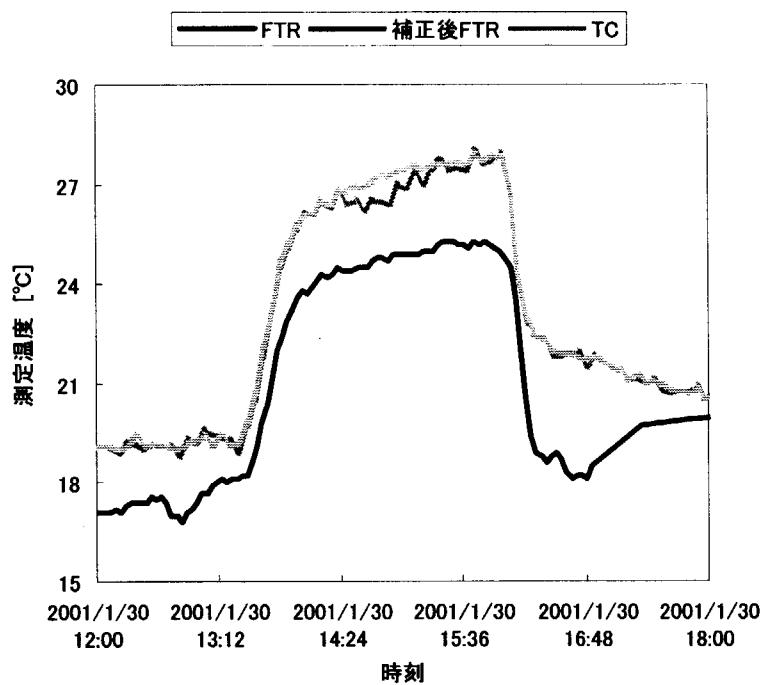


Fig. 9 炉心近傍での補正結果

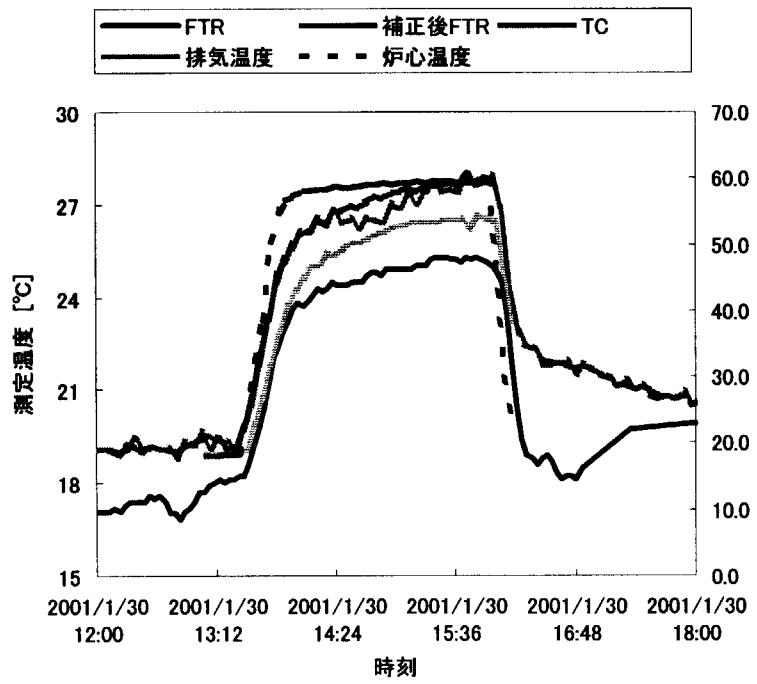


Fig. 10 実際に用いられる計装系との比較

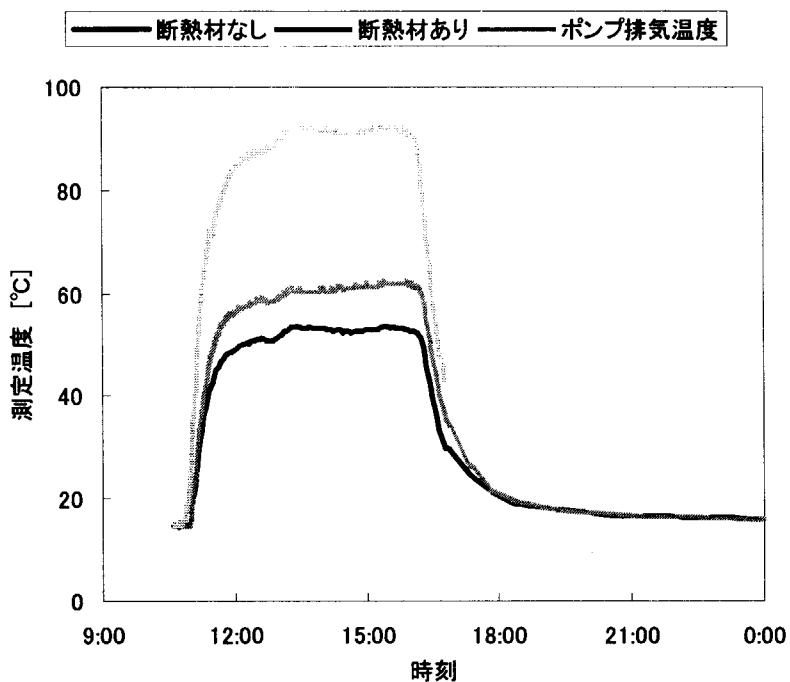


Fig. 11 霧囲気温度の影響

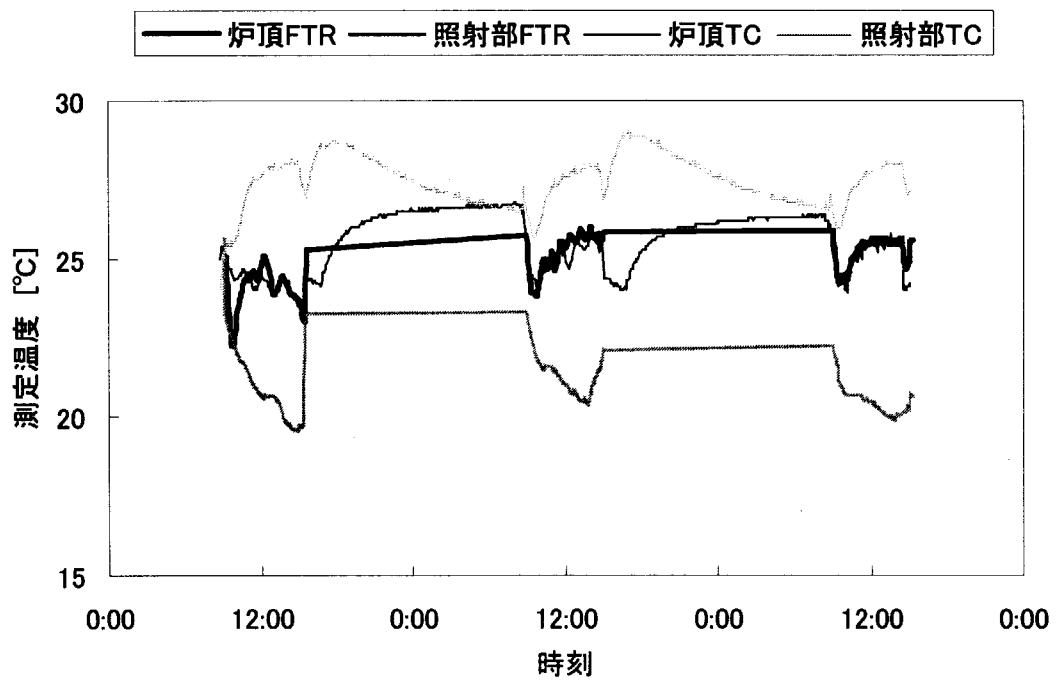


Fig. 12 Gz 孔での測定結果

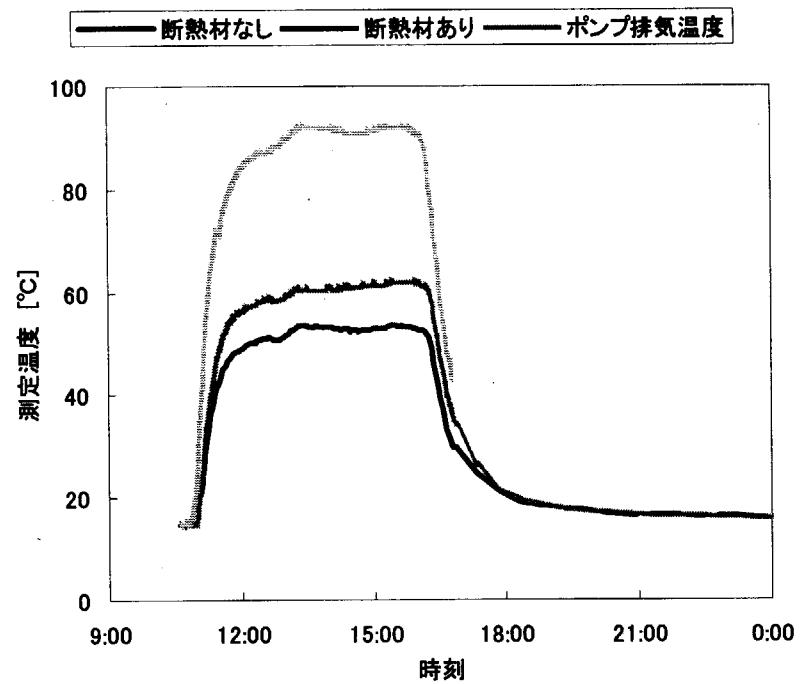


Fig. 13 Gz 孔での補正結果

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束照度	ルーメン	lm	cd·sr
放射能	ルクス	lx	lm/m ²
吸収線量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC開発理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ³ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)	
								= 4.184 J (熱化学)	
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸		
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (仏馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100		1	3876		1	100
	3.7 × 10 ⁻¹⁰	1		0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1

光技術による原子炉計装系の研究(原子力基礎研究H10041)(委託研究)



古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています