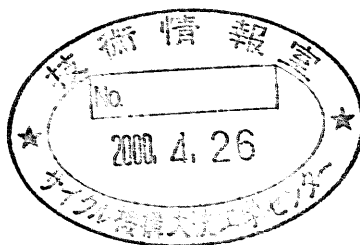


光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定方法の評価  
(共同研究報告書)

1999年12月



東京大学  
核燃料サイクル開発機構

本資料は、先行基礎工学分野に関する研究として、東京大学と核燃料サイクル開発機構との共同研究の成果として作成されたものです。

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

**Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:**

**Technical Cooperation Section,**

**Technology Management Division,**

**Japan Nuclear Cycle Development Institute**

**4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,**

**Japan**

© 核燃料サイクル開発機構(Japan Nuclear Cycle Development Institute),  
東京大学 (The University of Tokyo)  
1999

# 光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定方法の評価

## (共同研究報告書)

木村 敦\*、 中澤 正治\*  
市毛 聡\*\*

### 要 旨

光ファイバセンサは、使用する光ファイバが、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おり、これらの光ファイバセンサを原子力プラントに適用することは、プラントの状態監視・異常検知の観点から、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、光ファイバを放射線環境下で使用した場合、原材料のガラスにカラーセンタが形成されることにより、光ファイバの組成、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、光ファイバセンサで得られる測定結果には誤差が生じることから、原子力プラントなどの放射線環境下に光ファイバセンサを適用するためには、光ファイバに発生する放射線誘起伝送損失の評価を行い、それにより発生する測定結果の誤差を補正する方法を確立する必要がある。

ここでは、光ファイバ温度センサ(Raman Distributed Temperature Sensor :以下 RDTS)の高速炉プラントへの適用性を評価することとし、高速実験炉「常陽」を用いて、放射線環境下で光ファイバに生じる伝送損失の評価と、二種類の誤差の補正法(ループ型補正法、伝送損失一定の仮定を用いる補正法)の検討を行った。

試験の結果、光ファイバの放射線誘起伝送損失の増加現象により、測定される温度分布にずれが生じ、積算照射線量  $8 \times 10^3 [\text{C/kg}] (3 \times 10^7 [\text{R}])$  に及ぶ連続測定のなかで、この温度のずれは一定となる傾向を示した。この温度のずれは上記補正法を用いることにより除去され、フッ素ドープ光ファイバを用いた結果では、両補正法共に 1~2 度の精度で被測定箇所の温度が再現でき、両補正法の有効性を確認することができた。

以上のことから、高速炉等の放射線環境下にあっても RDTS は十分に適用可能であることが確認された。

---

本研究は、先行基礎工学分野に関する研究として、東京大学と核燃料サイクル開発機構との共同研究として実施したものである。

研究協力テーマ： 光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定法に関する研究

\*東京大学大学院 工学系研究科システム量子工学専攻

\*\*大洗工学センター 照射施設運転管理センター実験炉部技術課

# Evaluation of Temperature Distribution Sensing Method for Fast Reactor Using Optical Fiber

Atsushi KIMURA\*, Masaharu NAKAZAWA\*  
Satoshi ICHIGE\*\*

## Abstract

Optical fiber sensors (OFSs) have many advantages like flexible configuration, intrinsic immunity for electromagnetic fields, and so on. For these reasons, it is very useful to apply OFSs to fast reactor plants for remote inspection and surveillance.

However, under irradiation, because of radiation-induced transmission loss of optical fibers, OFSs have radiation-induced errors. Therefore, to apply OFSs to nuclear facilities, we have to estimate and correct the errors.

In this report, Raman Distributed Temperature Sensor (RDTS; one of the OFSs) has been installed at the primary coolant loop of the experimental fast reactor JOYO of JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute). Two correction techniques (correction technique with two thermocouples and correction technique with loop arrangement) for radiation-induced errors have been developed and demonstrated.

Because of the radiation-induced loss, measured temperature distributions had radiation-induced errors. However, during the continuous measurements with the total dose of more than  $8 \times 10^3$  [C/kg] ( $3 \times 10^7$  [R]), the radiation induced errors showed a saturation tendency. In case of the temperature distributions with fluorine doped fiber, with one of the correction techniques, the temperature errors reduced to 1~2 °C and the feasibility of the loss correction techniques was demonstrated.

For these results, it can be said that RDTS can be applied as a temperature distribution monitor in harsh radiation environments like fast reactor plants.

---

\* The University of Tokyo

\*\* Experimental Reactor Division, Irradiation Center, Oarai Engineering Center, JNC

## 目次

1.	はじめに	1
2.	光ファイバ温度分布センサの概要	2
2.1	概要	2
2.2	原理	2
2.2.1	ラマン散乱現象を用いた温度の導出	2
2.2.2	OTDR法による位置の導出	4
2.2.3	温度計測のアルゴリズム	4
2.2.4	システム構成	6
2.3	光ファイバの放射線環境下での特性	6
2.3.1	放射線による伝送損失	6
2.3.2	耐放射線性	8
2.4	放射線誘起伝送損失	8
2.4.1	放射線誘起伝送損失の影響	8
2.4.2	放射線誘起伝送損失の補正法	10
3	試験内容	23
3.1	光ファイバの一方方向敷設による温度分布測定試験	23
3.1.1	試験装置	23
3.1.2	試験方法	23
3.2	光ファイバの往復敷設による温度分布測定	24
3.2.1	試験装置	24
3.2.2	試験方法	24
4	結果	31
4.1	光ファイバ一方方向敷設	31
4.1.1	温度分布測定結果	31
4.1.2	伝送損失補正結果	33
4.2	光ファイバ往復敷設	33
4.2.1	温度分布測定結果	33
4.2.2	伝送損失補正結果	35
4.3	光ファイバ温度測定結果にみられた周期的温度分布の原因の検討	35
4.3.1	2次系での補助試験	35
4.3.2	1次系での現場調査結果	36
4.3.3	光ファイバの機能確認	37
5	おわりに	55
6	今後の課題	55
	参考文献	56

表リスト

表 2-1	媒質中に生じる散乱の種類	15
表 2-2	純粋石英コア光ファイバ中で発生する代表的なカラーセンタの例	15
表 3-1	SI 型光ファイバと GI 型光ファイバの違い	26
表 3-2	使用した光ファイバの仕様	26
表 3-3	測定装置の基本仕様	27
表 3-4	「常陽」の運転サイクル	27
表 3-5	第 33 運転サイクル中の測定期間	27
表 4-1	「常陽」一次系配管表面での線量率測定結果 <sup>[40]</sup>	38
表 4-2	光ファイバ等の施工状態調査結果	39

## 図リスト

図 2-1	ラマン散乱光発生メカニズム	16
図 2-2	OTDR 法の原理	17
図 2-3	RDTs のシステム構成	18
図 2-4	純粋石英 F-doped コア光ファイバの $60\text{Co}\gamma$ 線照射時の特性変化	19
図 2-5	純粋石英中に形成されるカラーセンタの関係	20
図 2-6	石英光ファイバの耐放射線性改善方法	21
図 2-7	伝送損失一定の仮定を用いる補正法の原理図	22
図 2-8	ループ型補正法の原理図	22
図 3-1	一次主冷却系配管の施工図	28
図 3-2	一方向敷設時のセットアップ	29
図 3-3	光ファイバ往復敷設時のセットアップ	30
図 4-1	第 30 運転サイクル出力上昇時の温度分布	41
図 4-2	各運転サイクル(第 30~32 サイクル)起動前、及び停止直前の温度分布	41
図 4-3	TC-1 及び TC-3 位置における熱電対と RDTs の測定温度の変化 [第 30~32 サイクル]	42
図 4-4	TC-1 と TC-3 位置における熱電対と RDTs の測定温度の差 [第 30~32 サイクル]	42
図 4-5	TC-1 と TC-3 の間のストークス光とアンチストークス光の伝送損失	43
図 4-6	第 30 サイクル運転停止時の原子炉出力と線量当量率の関係	43
図 4-7	伝送損失一定の仮定をした温度補正結果	44
図 4-8	TC-1, TC-3 の熱電対を用いた伝送損失一定の仮定による温度補正の結果と TC-2 熱電対の温度との差	44
図 4-9	第 33 サイクル出力上昇前と出力上昇後、停止直前の RDTs による温度測定結果	45
図 4-10	第 33 サイクル出力上昇前と出力上昇後、停止直前の RDTs による温度測定結果 (折り返し表示)	45
図 4-11	フッ素ドープ光ファイバと OH 基ドープ光ファイバの温度分布比較	46
図 4-12	第 33 サイクル出力降下時における温度分布	46
図 4-13	第 33 サイクル出力降下時における RDTs (往路・復路) と熱電対による温度測定結果、 及びループ型補正法による補正結果 [RDTs から 111m の位置]	47
図 4-14	RDTs と熱電対による温度測定結果 [第 33 サイクル原子炉停止後 17 日目及び原子炉起動前]	47
図 4-15	RDTs から 40~111m の間でのアンチストークス光とストークス光の損失の時間変化	48
図 4-16	第 34 サイクル中の 111(129)m 位置における熱電対と RDTs による温度の経時変化	48
図 4-17	RDTs と熱電対による温度測定結果、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる 補正法による補正の結果 [第 33 サイクル出力上昇前]	49
図 4-18	RDTs と熱電対による温度測定結果、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる 補正法による補正の結果 [原子炉停止前(出力上昇後 68 日目)]	49
図 4-19	RDTs と熱電対による温度測定結果、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる 補正法による補正の結果 [第 33 サイクル原子炉停止後の系統降温時]	50
図 4-20	RDTs と熱電対による温度測定結果、及び、ループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる 補正法による補正の結果 [第 33 サイクル原子炉停止後 17 日目]	50
図 4-21	RDTs と熱電対による温度測定結果、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる 補正法による補正の結果 [第 33 サイクル出力降下時における 100m 位置]	51
図 4-22	RDTs と熱電対による温度測定結果、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる 補正法による補正の結果 [第 33 サイクル出力降下時における 75m 位置]	51
図 4-23	光ファイバと配管の間隙と測定温度との関係 (2 次系)	52
図 4-24	配管の位置と測定温度との関係 (2 次系)	52
図 4-25	光ファイバの配管外装板表面からの浮き上がり距離と 原子炉運転中の光ファイバ温度分布との関係	53
図 4-26	配管及び保温材の施工状態	53
図 4-27	第 12 回定検中の RDTs、熱電対、及び接触式温度計によるファイバの表面温度の測定結果	54

## 1. はじめに

光ファイバセンサは、使用する光ファイバが、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。これまでも、多くの優れたセンサが開発されており、これらの光ファイバセンサを原子力プラントに適用することは、プラントの状態監視・異常検知の観点から、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、光ファイバを放射線環境下で使用した場合、原材料のガラスにカラーセンタが形成されることにより、光ファイバの組成、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、光ファイバセンサで得られる測定結果には誤差が生じることから、原子力プラントなどの放射線環境下に光ファイバセンサを適用するためには、光ファイバに発生する放射線誘起伝送損失の評価を行い、それにより発生する測定結果の誤差を補正する方法を確立する必要がある。

ここでは、光ファイバ温度センサについて、高速炉プラントへの適用性を評価することとし、高速実験炉「常陽」を用いて、放射線環境下で光ファイバに生じる伝送損失の評価と、誤差の補正法の検討を行った。



## 2. 光ファイバ温度分布センサの概要

### 2.1 概要

光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、光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。<sup>[1]-[9]</sup> これらの多くの優れた特徴を持つ RDTS を高速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、高速炉の安全性・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、光ファイバには、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ー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、光ファイバの組成、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、 $\gamma$ 線照射実験により光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が、当時の光ファイバは、現在より耐放射線性が大きく劣っていたこともあり、吸収線量率の上限は 10 [Gy(SiO<sub>2</sub>)/h]程度に止まっていた<sup>[4],[5]</sup>。

これまでの原子力プラント実機への適用例では、日本原子力発電株式会社東海第二発電所の原子炉格納容器内の雰囲気温度測定系(線量当量率が低い領域での運用)としての活用が挙げられる<sup>[7],[8]</sup>。また、誤差の補正手法では、後述する光ファイバを往復(ループ状に)敷設する方法(ループ型補正法)についても机上検討はされてきているものの、試験による検証の例はない<sup>[6]</sup>。

そこで、RDTS の高速炉への適用性を検討するため、高速実験炉「常陽」の一次冷却系配管領域に光ファイバを敷設し、長期照射による影響の評価、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。

### 2.2 原理

光ファイバに沿った温度分布を得るには、被測定点での光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。

#### 2.2.1 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、光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視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。

表 2-1 に光ファイバで生じる散乱の種類を示す。<sup>[9]-[10]</sup>

図 2-1 に示すように、波数  $\nu_0$  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こされ、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、 $\nu_r$ :ラマン散乱による波長シフト量)分励起こされた状態に移移すると、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。<sup>[11]</sup>

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

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

式 2-1

$$K(T_f) \propto kT_f$$

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]

$\nu_0$ : 入射光の波数 [ $\text{m}^{-1}$ ]

$\nu_r$ : ラマン散乱による波長シフト量  $4.18 \times 10^4 [\text{m}^{-1}]$   
(光ファイバの素材の組成により変化)

$n$ : 光ファイバの屈折率 1.45  
(光ファイバの素材の組成、対象波長により変化)

$K(T_f)$ : 光ファイバの組成に依存する項

$T_f$ : 光ファイバの場合仮想温度 1700[K]

$k$ : ボルツマン定数  $1.38 \times 10^{-23} [\text{J/K}]$

$N_i$ : 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

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。

$$\frac{N_E}{N_S} = \exp\left(\frac{-h\nu_r}{kT}\right) \quad \text{式 2-2}$$

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

但し、 $h$ : プランク定数  $6.63 \times 10^{-27} [\text{J}\cdot\text{s}]$

$T$ : 光ファイバの絶対温度 [K]

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

式 2-1、式 2-2 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。<sup>[12]</sup>

$$\frac{I_A}{I_S} = \frac{(\nu_0 + \nu_r)^4}{(\nu_0 - \nu_r)^4} \exp\left(\frac{-h\nu_r}{kT}\right) \quad \text{式 2-3}$$

この強度比は、光ファイバ材料の組成(入射レーザー光からのシフト波数 $\nu$ )と入射レーザー波長( $\lambda = 1/c\nu_0$ )が決まれば、理論的に温度のみに依存する。よって、光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、比を取ることで温度を知ることができる。

## 2.2.2 OTDR 法による位置の導出

OTDR(Optical Time Domain Reflect-meter)法は、光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、表 2-1 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、光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。

図 2-2 に OTDR 法の原理を示す。OTDR 法では、パルスレーザを光ファイバに入射させ、光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光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光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。<sup>[13],[14]</sup>

$$L = \frac{tc}{2n} \quad \text{式 2-4}$$

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 2-4 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。<sup>[15]</sup>

## 2.2.3 温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光ファイバに入射し、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 2-4 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 2-3 を用いて光ファイバ上の温度分布を計算する事ができる。<sup>[12]</sup>

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 2-3 より、以下の式で表される。

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{hcv_r} \left\{ 4 \ln \left( \frac{\nu_0 + \nu_r}{\nu_0 - \nu_r} \right) - \ln \left( \frac{I_{AA}}{I_{AS}} \right) \right\} \quad \text{式 2-5}$$

$$\frac{1}{\theta} = \frac{k}{hcv_r} \left\{ 4 \ln \left( \frac{\nu_0 + \nu_r}{\nu_0 - \nu_r} \right) - \ln \left( \frac{I_{RA}}{I_{RS}} \right) \right\} \quad \text{式 2-6}$$

但し、 $\theta$ : 基準点温度 [K]

$T$ : 被測定点温度 [K]

$I_{AA}$ : 位置 X でのアンチストークス光強度

$I_{AS}$ : 位置 X でのストークス光強度

(添字)<sub>A</sub>: 被温度測定点 (位置)(添字)<sub>R</sub>: 基準点 (位置)

式 2-5 及び式 2-6 より、被測定温度の測定位置は以下の式で表される。

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\theta} - \frac{k}{hcv_r} \ln \left( \frac{I_{AA}/I_{AS}}{I_{RA}/I_{RS}} \right) \quad \text{式 2-7}$$

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。<sup>[10]</sup> 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、光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。光ファイバは、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、光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。

$$10 \times \log \left( \frac{I'_{AA}}{I_{AA}} \right) = -(l_{SAA} + l_{SAR}) \quad \text{式 2-8}$$

$$10 \times \log \left( \frac{I'_{AS}}{I_{AS}} \right) = -(l_{SAS} + l_{SAR})$$

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)<sub>S</sub>: 測定装置の受光素子のある位置(添字)<sub>A</sub>: 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。

$$10 \times \log \left( \frac{I'_{RA}}{I_{RA}} \right) = -(l_{SRA} + l_{SRR})$$

$$10 \times \log \left( \frac{I'_{RS}}{I_{RS}} \right) = -(l_{SRS} + l_{SRR})$$

式 2-9

但し、(添字)<sub>R</sub>: 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。

$$l_{SAA} = l_{SRA} + l_{RAA}$$

$$l_{SAS} = l_{SRS} + l_{RAS}$$

式 2-10

上記式 2-8,9,10 を式 2-7 に代入することで、被測定点 A の温度は次式で表される。

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

式 2-11

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  $\theta$ 、基準点と被測定点の間の初期損失  $l_{RAA}$ 、 $l_{RAS}$  が求め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、光ファイバの初期の伝送損失は光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、補正値を求める必要がある。

## 2.2.4 システム構成

図 2-3 に RDTS のシステム構成を示す。システムは光ファイバと RDTS 本体(検出装置)からなる。光ファイバは、一方を RDTS 本体に接続しもう一方を開放した状態で、測定対象位置に沿わせて敷設する。RDTS では、レーザダイオード(LD)、もしくはパルスレーザから高出力のパルス光を、光カプラを介して光ファイバに入射する。(ここでは、入射光源として波長 1047[nm] の LiYF<sub>4</sub> パルスレーザを用いた場合について述べる。) 光ファイバ内を進むパルス光は光ファイバ各所でラマン散乱を発生させ、その一部は後方散乱光として RDTS 本体に戻ってくる。戻ってきたラマン後方散乱光は光カプラを通して二つに分けた後、ストークス光の成分(波長:1095[nm])とアンチストークス光の成分(波長:1003[nm])を光フィルターによって分離する。こうして分離した各々の成分をそれぞれ APD で光電変換する。さらに、後段の平均化処理回路で多数回平均化処理することにより、S/N 比の改善を行う。温度分布は、RDTS 内部に束ねられた光ファイバ位置を基準点に、同位置の熱電対を基準温度として、式 2-11 を用いて計算する(前述の光ファイバ、熱電対はともに装置内蔵のもの)。

## 2.3 光ファイバの放射線環境下での特性

### 2.3.1 放射線による伝送損失

光ファイバを強い放射線環境下で使用すると、伝送損失が増加する。この伝送損失増加現象は、光ファイバ内の電荷捕獲準位が、電子や正孔を捕捉してカラーセンタ(着色中心:光ファイバ着色による光の吸収)を形成することにより発生する。図 2-4 にフッ素ドープ純粋石英コア光ファイバに  $\gamma$  線を照射した際の、透過スペクトル、及び放射線誘起伝送損失の一例を示す。フッ素ドープ

光ファイバの場合、400~1000nm の波長領域で、紫外域 (215nm E' センタ) からの裾引き、及び 480nm 付近 (フッ素に起因するものと考えられる) と 610nm 付近 (NBOHC による) に明確な伝送損失のピークを確認することができる。

放射線による光ファイバのカラーセンタ生成の要因は、大別して二つに分けられる。

一つは、原材料である SiO<sub>2</sub> ガラス結晶の構造欠陥(不完全構造)による電荷捕獲である。放射線の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。しかし、その一部がこれらの不完全構造に捕獲され、カラーセンタとなる。前駆対と呼ばれるこれらの不完全構造は、コア材に添加した不純物や、線引き(屈折率の分布をつけた直径数~十数 cm のガラスの棒を加熱しながら引っ張って直径数百 μm の裸の光ファイバを作成する過程)などの光ファイバの製造過程により生成されると考えられている。<sup>[19]</sup>

もう一つの要因は、放射線環境下での化学結合の切断や原子のはじき出し現象による、新たな電荷捕獲準位の形成である。光ファイバの素材として用いられるガラスや高分子材料(プラスチック)の化学結合は、放射線によって容易に切断され、新たな電荷捕獲準位を形成する。この電荷捕獲準位に電子・正孔が捕獲されてカラーセンタが形成される。

いずれの現象も、電離性の放射線場でごく普通に起こる電荷捕獲作用であり、これが、光ファイバの特性上重要な伝送損失に大きな影響を与える。

放射線計測や、物理量の計測などにおいては、主に可視 (380nm) ~近赤外 (1500nm) の光が利用される。この領域における純粋石英コア光ファイバの代表的なカラーセンタを表 2-2 に示す。

また、これらのカラーセンタの形成メカニズムを図 2-5 に示す。<sup>[16]~[18]</sup>(純粋石英コア光ファイバで発生するカラーセンタを対象としたもので、添加不純物である塩素やゲルマニウム(Ge)による前駆対については記述していない。)

純粋石英系光ファイバは、線引きなどの製造過程で、O 原子の欠落した Si(III)欠陥(≡Si-Si≡)、雰囲気中の水素と結合した SiH 結合(≡Si-H)、水分と結合した OH 結合(≡Si-OH)、酸素と結合したパーオキシ結合(≡Si-O-O-Si≡)等の不完全構造を持つ。これらの不完全構造は、放射線環境下において前駆対として作用し、カラーセンタを形成する。

一方、ガラス結合(≡Si-O-Si≡)は放射線によって切断され、主に、



と二つのラジカルを形成する事である。これらの多くは再結合するが、極一部のラジカルは電子・正孔を捕獲してカラーセンタを形成する。前者の電荷捕獲が E' センタ(≡Si•: カラーセンタはラジカルが電荷捕獲したものでありラジカルではないが、容易にラジカルを再形成するので一般にラジカルとして表記する)と呼ばれ、215[nm]に吸収のピークを持つ。後者の電荷捕獲は非架橋酸素正孔センタ NBOHC(≡Si-O•)と呼ばれ、260,610[nm]に吸収ピークを持つ。また、これらの裾引きにより、紫外領域から可視領域の短波長側に至る大きな吸収を生じる。

これらのカラーセンタの形成は光ファイバを使用する上で避けることのできない現象であり、放射線場での光ファイバの利用において解決すべき最も重要な課題である。従って、光ファイバの耐放射線性の向上には、カラーセンタ生成の要因となる欠陥形成の機構解明と、その生成を抑制する技術開発が重要であり、そのための研究が継続的に行われてきた。<sup>[16]~[39]</sup>

放射線誘起伝送損失には、以下のような特徴がある。<sup>[19]~[27]</sup>

- 700~1100nm の波長域では、長波長側のほうが損失は小さい。
- 同一の線量当量では、線量当量率の小さいほうが損失は小さい。
- 線量当量率、線量当量が同じ場合、温度が高いほうが損失は小さい。
- ガンマ線照射の場合、照射終了後、損失はある程度回復する。
- ガンマ線照射の場合、損失は時間とともにある程度の飽和 (生成・消滅がバランス) 傾向をしめす。
- 中性子照射においては、伝送損失は直線的に増加する。

## 2.3.2 耐放射線性

前項2.3.1にも示したように、カラーセンタ生成の要因として、SiO<sub>2</sub> ガラス結晶の不完全構造と、放射線による化学的結合の切断や原子のはじき出しが考えられる。よって、耐放射線性を高める方法としては、以下の二つの方法が考えられる。

### 1) カラーセンタの前駆対となる初期の不完全構造を排除する方法

コア材の SiO<sub>2</sub> ガラスに不完全構造があると、それは前駆対となりカラーセンタを形成するため、放射線に強い光ファイバとするには、コアの組成構造が単純で、不純物の少ない素材で製造することが肝要である。つまり、一般の通信用光ファイバに用いられる酸化ゲルマニウム(GeO<sub>2</sub>:添加することにより屈折率を上昇させる)等の添加物や、出発原料の四塩化珪素(SiCl<sub>4</sub>:光ファイバを作るために最初に使用する材料)に起因する Cl などの不純物を含まない、高純度石英ガラス(SiO<sub>2</sub>:≡Si-O-Si≡)を素材に用いる事が、耐放射線性の面からは有効であるといえる。<sup>[20]</sup>

しかし、前述したように、高純度石英ガラスでも、線引きなどの製造過程で、O 原子の欠落した Si(Ⅲ)欠陥、雰囲気中の水素と結合した SiH 結合、水分と結合した OH 結合、酸素と結合したパーオキシ結合等の種々の不完全構造が生成され、これらの多くは前駆対として電荷捕獲の準位となり、カラーセンタ形成の要因となる。したがって、単純に組成の純度だけで耐放射線性の良否を判断する事は難しい。また、光ファイバ製造時にできる初期構造欠陥の多少は、製造上のノウハウによるところが大きく、同一素材を用い同一工場で作成された光ファイバであっても、放射線誘起伝送損失が大きく異なる場合もある。

以上のことから、コア材の改良による耐放射線性の向上には限界があるといえる。

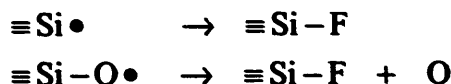
### 2) SiO<sub>2</sub> 結合の切断により生成されたカラーセンタを、添加した不純物と再結合させる方法

図 2-6に、本方法を用いた場合の、SiO<sub>2</sub> 光ファイバにおける E' センタと NBOHC の抑制法を示す。

SiO<sub>2</sub> ガラス結合(≡Si-O-Si≡)は、放射線によって二分され、E' センタ(≡Si•)及び NBOHC(≡Si-O•)の二種類のカラーセンタを形成する(図 2-5)。ここで、放射線により生成したカラーセンタ(≡Si• 及び ≡Si-O•)を、添加した他の原子やイオンと再結合させることにより消滅させ、耐放射線性を向上させる。

この方法では、以前から光ファイバ内に水酸化基(OH)や、水素分子(H<sub>2</sub>)を拡散させる方法<sup>[27]</sup>が提案されてきており、特に OH 基を添加する方法は広く用いられている。しかし、これらの不純物を添加することにより生成される結合(≡Si-H や ≡Si-OH)は、赤外域に光の吸収ピークを持ち、赤外域での利用には適さない。

また、1990 年代に入ってフッ素(F)をコア中に拡散させるという方法が提案されている。この方法では、SiO<sub>2</sub> 結合の切断により形成されたカラーセンタを、フッ素の拡散により、



と再結合させる。このフッ素ドーブ光ファイバは、従来の H・OH 基ドーブ光ファイバに比べ、E' センタ及び NBOHC 生成を大幅に抑制する事が出来、格段の耐放射線性を持つ。

<sup>[29]-[34]</sup>

以上のことから、高放射線環境下への光ファイバの適用を考える場合、フッ素ドーブ純粋石英光ファイバが現時点において最も有望な選択肢といえる。

## 2.4 放射線誘起伝送損失

### 2.4.1 放射線誘起伝送損失の影響

2.3 項に示したように、光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、光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 2-9 より、A 点における光の強度は以下の式で表される。

$$10 \times \log \left( \frac{I''_{AA}}{I'_{AA}} \right) = -(l'_{SAA} + l'_{SAR})$$

$$10 \times \log \left( \frac{I''_{AS}}{I'_{AS}} \right) = -(l'_{SAS} + l'_{SAR})$$

式 2-12

- 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)<sub>A</sub>: 被温度測定点 (位置)  
(添字)<sub>S</sub>: RDTS の受光素子のある位置  
(添字)<sub>R</sub>: 基準点 (位置)

基準点 R も同様にして、

$$10 \times \log \left( \frac{I''_{RA}}{I'_{RA}} \right) = -(l'_{SRA} + l'_{SRR})$$

$$10 \times \log \left( \frac{I''_{RS}}{I'_{RS}} \right) = -(l'_{SRS} + l'_{SRR})$$

式 2-13

となる。また、式 2-10 と同様に、放射線誘起伝送損失には次の関係がある。

$$l'_{SAA} = l'_{SRA} + l'_{RAA}$$

$$l'_{SAS} = l'_{SRS} + l'_{RAS}$$

式 2-14

上記式 2-12,13,14 を式 2-11 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。

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

式 2-15

また、RDTS で観測される温度  $T'$  [K] は式 2-15 より、

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

式 2-16

と表される。式 2-15,16 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。



$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T'} - \frac{k}{4.3hc\nu_r} (l'_{RAA} - l'_{RAS}) \quad \text{式 2-17}$$

一般に、光ファイバは 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 2-17 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。

## 2.4.2 放射線誘起伝送損失の補正法

### 2.4.2.1 伝送損失一定の仮定をした補正法

この補正法は、複数の熱電対の測定結果を基準値とし、さらにその間の放射線誘起伝送損失が位置によらず一定であると仮定して、被測定点の温度の補正を行うものである。図 2-7 に、伝送損失一定の仮定をした補正法の原理を示す。

ここでは、A 点及び B 点の温度が既知であり、AB 間の伝送損失は一定であると仮定して、任意の点 C の温度を補正することとする。

まず、A 点の熱電対による温度 (実際の温度)と RDTS で観測される温度の関係は、式 2-17 より、以下の式で与えられる。

$$\frac{1}{T_A} = \frac{1}{T'_A} - \frac{k}{4.3hc\nu_r} (l'_{RAA} - l'_{RAS}) \quad \text{式 2-18}$$

但し、 $T'_X$ : RDTS で観測される位置 X の温度[K]

$T_X$ : 位置 X の実際の温度(熱電対指示値)[K]

(添字)<sub>A</sub>: 被温度測定点 A (位置)

(添字)<sub>R</sub>: 基準点 (位置)

次に、B 点の場合、RDTS の基準点からの放射線誘起伝送損失は、式 2-10 と同じ理由で以下の式で表される。

$$\begin{aligned} l'_{RBA} &= l_{RAA} + d'_{ABA} \times L_{AB} \\ l'_{RBS} &= l_{RAS} + d'_{ABS} \times L_{AB} \end{aligned} \quad \text{式 2-19}$$

但し、 $L_{XY}$ : XY 間の距離[m]

$d'_{XYA}$ : XY 間のアンチストークス光の平均放射線誘起伝送損失[dB/m]

$d'_{XYS}$ : XY 間のストークス光の平均放射線誘起伝送損失[dB/m]

(添字)<sub>B</sub>: 被温度測定点 B (位置)

よって、B 点における RDTS による温度測定結果と実際の温度の関係は式 2-17,19 より、次式で与えられる。

$$\frac{1}{T_B} = \frac{1}{T'_B} - \frac{k}{4.3hc\nu_r} \{ (l_{RAA} - l_{RAS}) + (d'_{ABA} - d'_{ABS}) \times L_{AB} \} \quad \text{式 2-20}$$

最後に、C 点の場合、式 2-19 と同様に放射線誘起伝送損失は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} l'_{RCA} &= l_{RCA} + d'_{ACA} \times L_{AC} \\ l'_{RCS} &= l_{RCS} + d'_{ACS} \times L_{AC} \end{aligned} \quad \text{式 2-21}$$

(添字)<sub>C</sub>: 被温度測定点 C (位置)

また、仮定より、伝送損失は位置に因らずに一定とする。

$$\begin{aligned} d'_{ACA} &= d'_{ABA} \\ d'_{ACS} &= d'_{ABS} \end{aligned} \quad \text{式 2-22}$$

よって、C点においてRDTsで観測される温度と実際の温度との関係は、式 2-17,21,22より、次式で表される。

$$\frac{1}{T_C} = \frac{1}{T'_C} - \frac{k}{4.3hc\nu_r} \{ (l_{RAA} - l_{RAS}) + (d'_{ABA} - d'_{ABS}) \times L_{AC} \} \quad \text{式 2-23}$$

ここで、式 2-18 を用いて式 2-20,23 から  $l_{RAA}$  及び  $l_{RAS}$  を消去する。

$$\begin{aligned} \left( \frac{1}{T'_B} - \frac{1}{T_B} \right) - \left( \frac{1}{T'_A} - \frac{1}{T_A} \right) &= \frac{k}{4.3hc\nu_r} (d'_{ABA} - d'_{ABS}) \times L_{AB} \\ \left( \frac{1}{T'_C} - \frac{1}{T_C} \right) - \left( \frac{1}{T'_A} - \frac{1}{T_A} \right) &= \frac{k}{4.3hc\nu_r} (d'_{ABA} - d'_{ABS}) \times L_{AC} \end{aligned} \quad \text{式 2-24}$$

最後に、式 2-24 の 2 式を用いて、 $d'_{ABA}$  及び  $d'_{ABS}$  を消去する。

$$\left( \frac{1}{T'_C} - \frac{1}{T_C} \right) = \frac{L_{AC}}{L_{AB}} \left( \frac{1}{T'_B} - \frac{1}{T_B} \right) + \frac{L_{BC}}{L_{AB}} \left( \frac{1}{T'_A} - \frac{1}{T_A} \right) \quad \text{式 2-25}$$

式 2-25 は、すべて測定値もしくは定数で与えられるため、本手法を用いることにより、RDTs で観測される温度分布と熱電対による A, B 二点の既知の温度から、AB 間の補正した温度分布を求めることが可能である。

なお、本手法は二点間の伝送損失を一定と仮定しているため、温度が既知の点が多いほど、より真値に近づけることができる。

#### 2.4.2.2 ループ型補正法

前述の伝送損失一定の仮定をした補正法は、温度や線量当量率が一樣な場所に適している。それに対し、これらが一樣でない場合の補正法としてループ型補正法がある。図 2-8 にループ型補正法の原理図を示す。この補正法では、1本の光ファイバを往路・復路が同じ位置を辿るようにしてループ状に敷設する。この様に光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。図 2-8 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。<sup>16)</sup>

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、式 2-8 より以下の式であらわす事ができる。

$$\frac{I''_{DA}}{I''_{AA}} = 10^{-\frac{l'_{ADA} + l'_{ADR} + l_{ADA} + l_{ADR}}{10}} = \exp\left(-\frac{l'_{ADA} + l'_{ADR} + l_{ADA} + l_{ADR}}{4.3}\right) \quad \text{式 2-26}$$

但し、(添字)<sub>A</sub>: 被温度測定点A (位置)  
 (添字)<sub>D</sub>: 被温度測定点D (位置)  
 (添字)<sub>R</sub>: 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。

$$\frac{I''_{DS}}{I''_{AS}} = 10^{-\frac{l'_{ADS} + l'_{ADR} + l_{ADS} + l_{ADR}}{10}} = \exp\left(-\frac{l'_{ADS} + l'_{ADR} + l_{ADS} + l_{ADR}}{4.3}\right) \quad \text{式 2-27}$$

式 2-26,27 より、

$$\frac{\frac{I''_{DA}}{I''_{AA}}}{\frac{I''_{DS}}{I''_{AS}}} = \frac{\frac{I''_{DA}}{I''_{DS}}}{\frac{I''_{AA}}{I''_{AS}}} = \exp\left(-\frac{l'_{ADA} - l'_{ADS} + l_{ADA} - l_{ADS}}{4.3}\right) \quad \text{式 2-28}$$

となる。B,C点についても、同様に求める。

$$\frac{I''_{CA}}{I''_{BA}} = 10^{-\frac{l'_{BCA} + l'_{BCR} + l_{BCA} + l_{BCR}}{10}} = \exp\left(-\frac{l'_{BCA} + l'_{BCR} + l_{BCA} + l_{BCR}}{4.3}\right) \quad \text{式 2-29}$$

$$\frac{I''_{CS}}{I''_{BS}} = 10^{-\frac{l'_{BCS} + l'_{BCR} + l_{BCS} + l_{BCR}}{10}} = \exp\left(-\frac{l'_{BCS} + l'_{BCR} + l_{BCS} + l_{BCR}}{4.3}\right) \quad \text{式 2-30}$$

$$\frac{\frac{I''_{CA}}{I''_{BA}}}{\frac{I''_{CS}}{I''_{BS}}} = \frac{\frac{I''_{CA}}{I''_{CS}}}{\frac{I''_{BA}}{I''_{BS}}} = \exp\left(-\frac{l'_{BCA} - l'_{BCS} + l_{BCA} - l_{BCS}}{4.3}\right) \quad \text{式 2-31}$$

但し、(添字)<sub>B</sub>: 被温度測定点B (位置)  
 (添字)<sub>C</sub>: 被温度測定点C (位置)

ここで、式 2-10 と同様に、放射線誘起伝送損失には次の関係がある。

$$\begin{aligned} l'_{ADA} &= l'_{ABA} + l'_{BCA} + l'_{CDA} \\ l'_{ADS} &= l'_{ABS} + l'_{BCS} + l'_{CDS} \\ l_{ADA} &= l_{ABA} + l_{BCA} + l_{CDA} \\ l_{ADS} &= l_{ABS} + l_{BCS} + l_{CDS} \end{aligned} \quad \text{式 2-32}$$

また、ループ型補正法の場合、光ファイバの条件 (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。

$$\begin{aligned} l'_{ABA} &= l'_{CDA} \\ l'_{ABS} &= l'_{CDS} \\ l_{ABA} &= l_{CDA} \\ l_{ABS} &= l_{CDS} \end{aligned} \quad \text{式 2-33}$$

よって、式 2-32 は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 l'_{ADA} &= 2l'_{ABA} + l'_{BCA} \\
 l'_{ADS} &= 2l'_{ABS} + l'_{BCS} \\
 l_{ADA} &= 2l_{ABA} + l_{BCA} \\
 l_{ADS} &= 2l_{ABS} + l_{BCS}
 \end{aligned}
 \tag{式 2-34}$$

これを式 2-28 に代入すると、

$$\frac{\frac{I''_{DA}}{I''_{DS}}}{\frac{I''_{AA}}{I''_{AS}}} = \exp \left\{ -\frac{l'_{BCA} - l'_{BCS} + l_{BCA} - l_{BCS}}{4.3} + 2 \left( -\frac{l'_{ABA} - l'_{ABS} + l_{ABA} - l_{ABS}}{4.3} \right) \right\}
 \tag{式 2-35}$$

となる。(式 2-35)/(式 2-31)より、

$$\frac{\frac{\frac{I''_{DA}}{I''_{DS}}}{\frac{I''_{AA}}{I''_{AS}}}}{\frac{\frac{I''_{CA}}{I''_{CS}}}{\frac{I''_{BA}}{I''_{BS}}}} = \frac{\frac{I''_{DA}}{I''_{DS}} \frac{I''_{BA}}{I''_{BS}}}{\frac{I''_{AA}}{I''_{AS}} \frac{I''_{CA}}{I''_{CS}}} = \exp \left( -2 \frac{l'_{ABA} - l'_{ABS} + l_{ABA} - l_{ABS}}{4.3} \right)
 \tag{式 2-36}$$

となる。式 2-36 は、変形すると次のように表される。

$$l'_{ABA} - l'_{ABS} + l_{ABA} - l_{ABS} = -\frac{4.3}{2} \ln \left( \frac{\frac{I''_{DA}}{I''_{DS}} \frac{I''_{BA}}{I''_{BS}}}{\frac{I''_{AA}}{I''_{AS}} \frac{I''_{CA}}{I''_{CS}}} \right)
 \tag{式 2-37}$$

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 2-15 より、以下の式であらわされる。

$$\frac{1}{T_0} = \frac{1}{\theta} - \frac{k}{hcv_r} \ln \left( \frac{I''_{AA}/I''_{RA}}{I''_{AS}/I''_{RS}} \right) - \frac{k}{4.3hcv_r} (l'_{RAA} - l'_{RAS} + l_{RAA} - l_{RAS})
 \tag{式 2-38}$$

但し、 $T_0$ : A 点の実際の温度[K](既知)

同様に B 点の実際の温度(未知)は、

$$\frac{1}{T_1} = \frac{1}{\theta} - \frac{k}{hcv_r} \ln \left( \frac{I''_{BA}/I''_{RA}}{I''_{BS}/I''_{RS}} \right) - \frac{k}{4.3hcv_r} (l'_{RBA} - l'_{RBS} + l_{RBA} - l_{RBS})
 \tag{式 2-39}$$

但し、 $T_1$ : B 点の実際の温度[K](未知)

となる。また、式 2-34 と同様に、放射線誘起伝送損失には次の関係がある。

$$\begin{aligned}
 l'_{ABA} &= 2l'_{RBA} - l'_{RAA} \\
 l'_{ABS} &= 2l'_{RBS} - l'_{RAS} \\
 l_{ABA} &= 2l_{RBA} - l_{RAA} \\
 l_{ABS} &= 2l_{RBS} - l_{RAS}
 \end{aligned}
 \tag{式 2-40}$$

(式 2-39)–(式 2-38)の結果に式 2-40 を代入すると、

$$\frac{1}{T_1} = \frac{1}{T_0} + \frac{k}{hcv_r} \ln \left( \frac{\frac{I''_{AA}}{I''_{AS}}}{\frac{I''_{BA}}{I''_{BS}}} \right) - \frac{k}{4.3hcv_r} (l'_{ABA} - l'_{ABS} + l_{ABA} - l_{ABS})
 \tag{式 2-41}$$

となり、式 2-37 を式 2-41 に代入して、 $l'_{ABA}$ ,  $l'_{ABS}$ ,  $l_{ABA}$ ,  $l_{ABS}$  を消去すると、

$$\frac{1}{T_1} = \frac{1}{T_0} + \frac{k}{2hcv_r} \ln \left( \frac{\frac{I''_{AA} I''_{BA}}{I''_{AS} I''_{BS}}}{\frac{I''_{CA} I''_{DA}}{I''_{CS} I''_{DS}}} \right)
 \tag{式 2-42}$$

となる。式 2-42 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可能となる。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。

ただし、ループ型補正法は光ファイバを往復させて敷設するため、被測定距離の 2 倍の長さの光ファイバが必要となる。また、適用に際しては、光強度が低下したデータ(例えば、図 2-8 では、D 点は他の点より S/N 比が悪い)を使用することも考慮する必要がある。

表 2-1 媒質中に生じる散乱の種類

	散 乱 波 長	原 因
レイリー散乱	$\nu_0$	分子の揺らぎによる弾性散乱
ラマン散乱	$\nu_0 \pm \nu_r$	分子の振動・スピン波等の準粒子との非弾性散乱
ブリルアン散乱	$\nu_0 \pm 2nV_A\nu_0$	媒質の超音波振動に伴う屈折率の周期的分布による非弾性散乱

表 2-2 純粋石英コア光ファイバ中で発生する代表的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
480[nm]付近の吸収ピーク	Si-F結合? (理論として確立していない <sup>[33]</sup> )
260[nm], 610~630[nm]の吸収ピーク	非架橋酸素センタ(NBOHC)
670[nm], 770[nm]の弱い吸収	不明
赤外域からの吸収テール	SiO <sub>2</sub> の格子振動による吸収

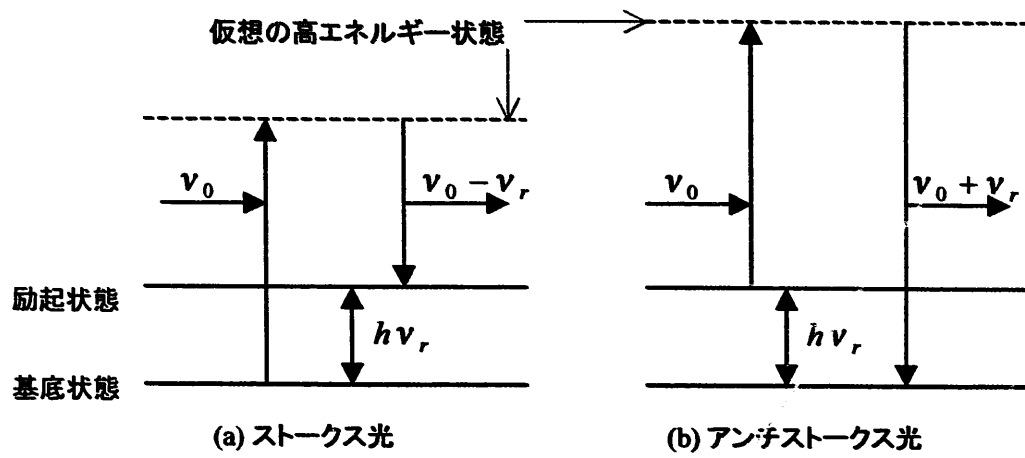


図 2-1 ラマン散乱光発生メカニズム

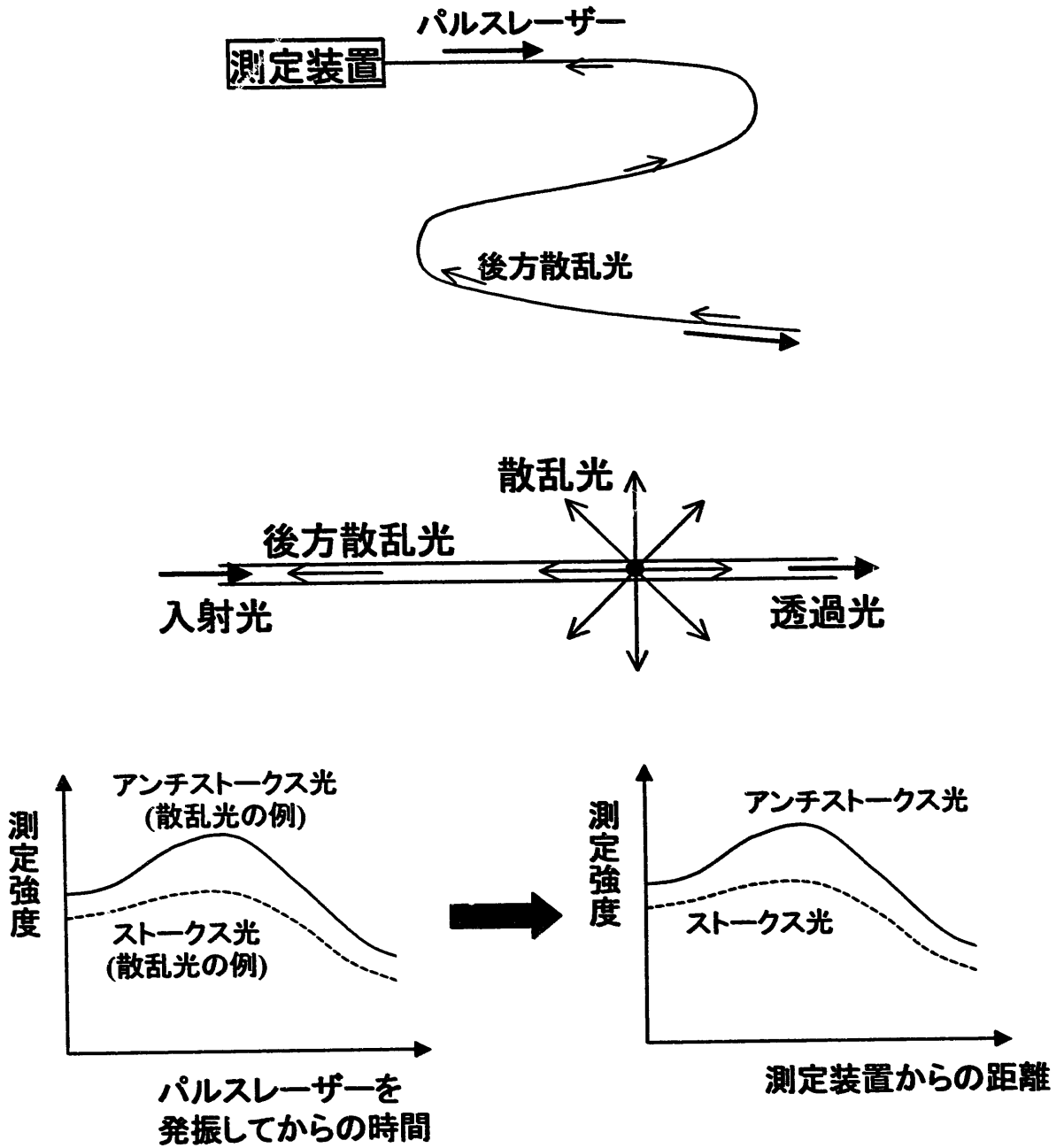


図 2-2 OTDR 法の原理



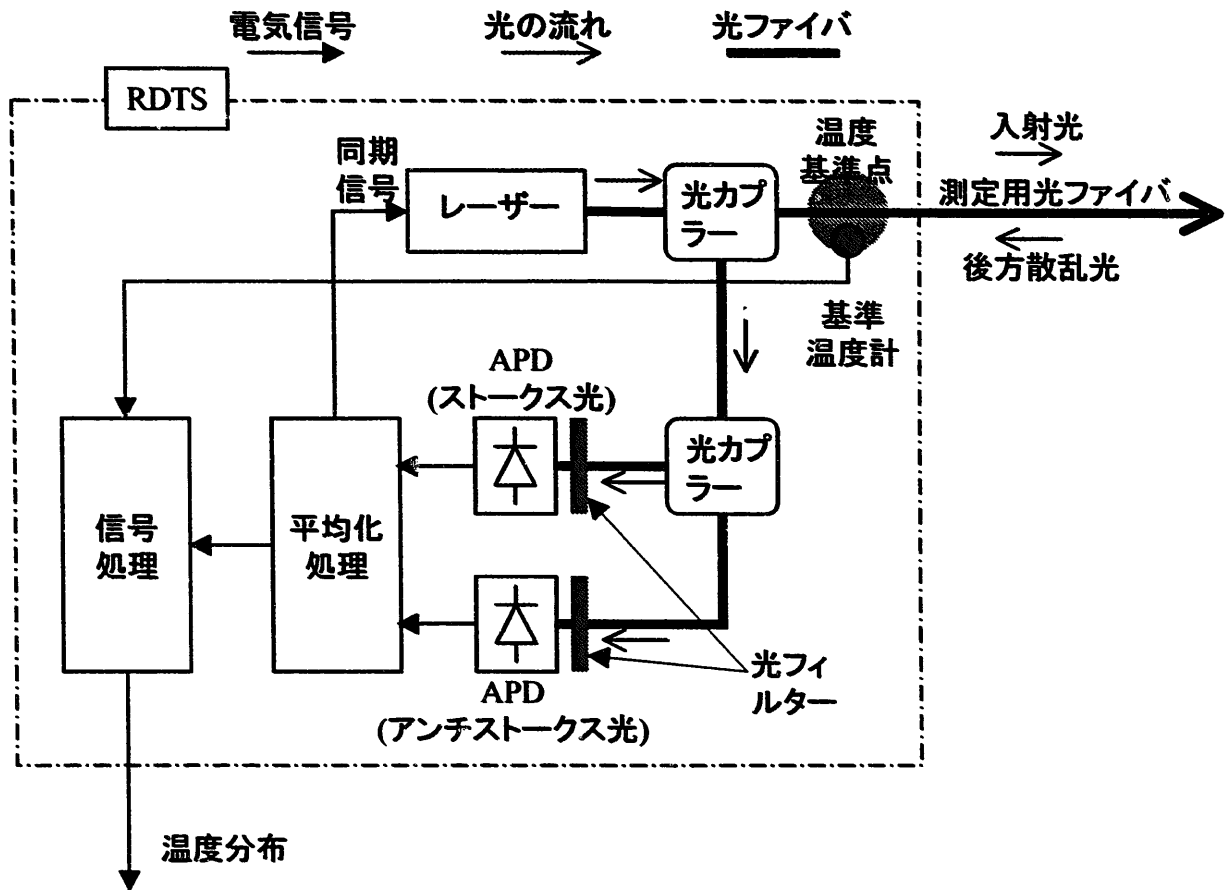
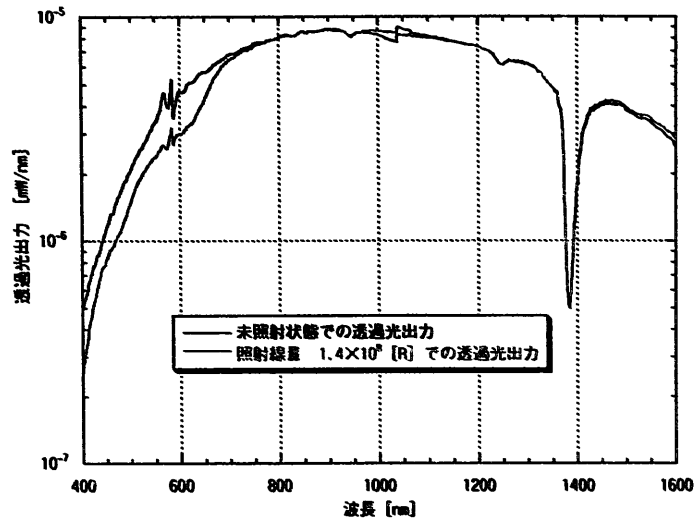
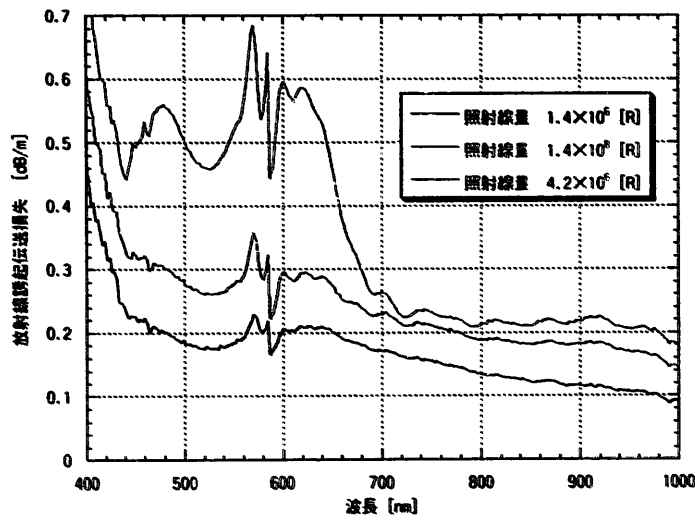


図 2-3 RDTS のシステム構成



(a) F-dope コアファイバの  $\gamma$  線照射時における透過スペクトルの変化



(b) F-doped コアファイバの  $\gamma$  線照射時における放射線誘起伝送損失の波長依存性

図 2-4 純粋石英 F-doped コア光ファイバの  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線照射時の特性変化

(線量当量率  $1.4 \times 10^6 [\text{R/h}]$ )

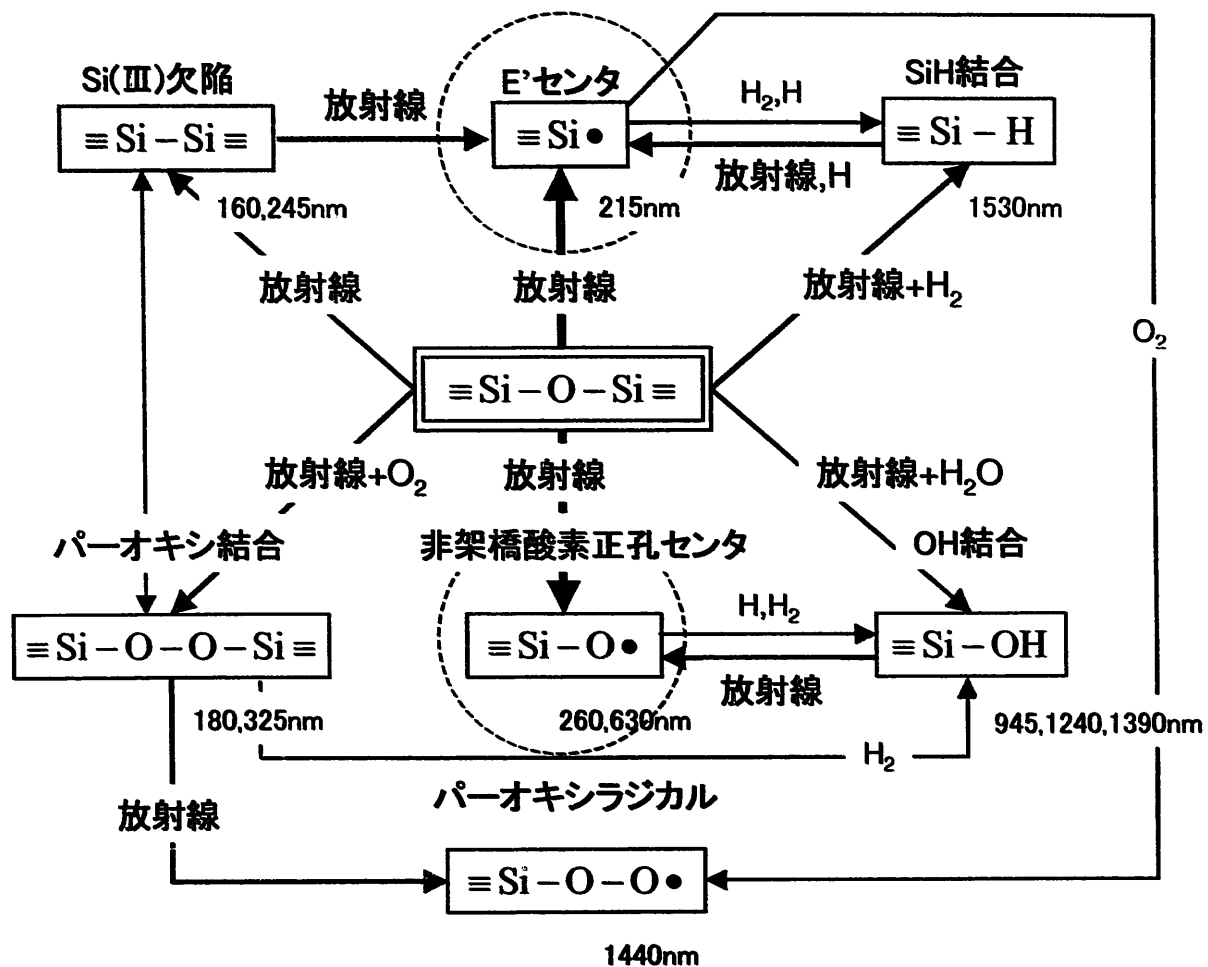


図 2-5 純粋石英中に形成されるカラーセンタの関係

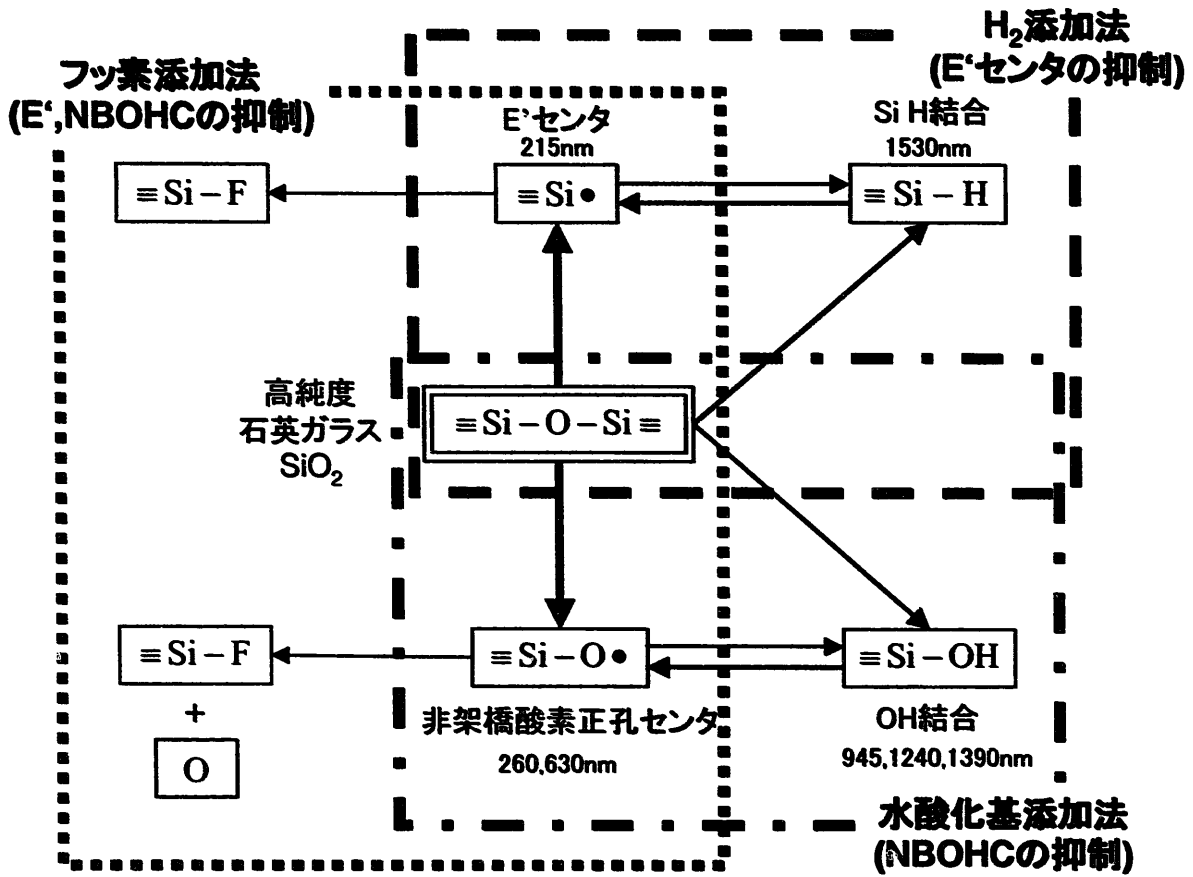


図 2-6 石英光ファイバの耐放射線性改善方法

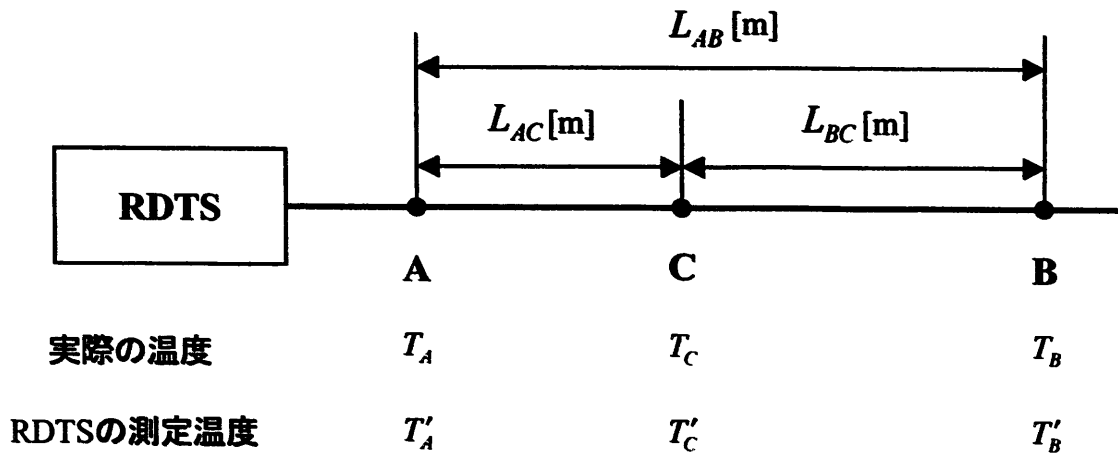


図 2-7 伝送損失一定の仮定を用いる補正法の原理図

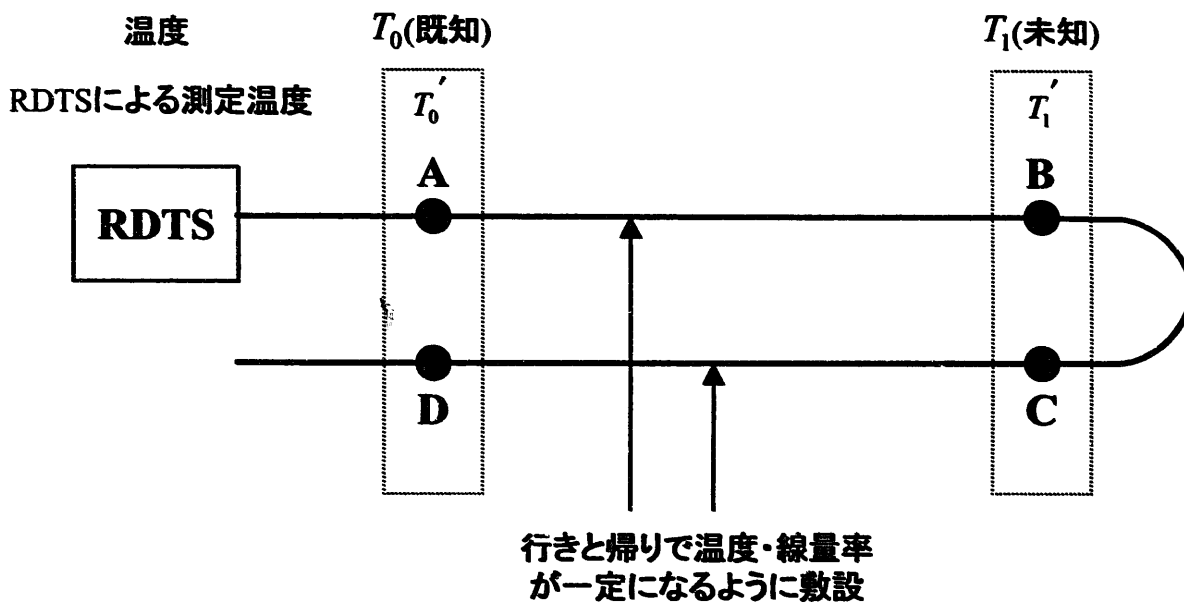


図 2-8 ループ型補正法の原理図

### 3. 試験内容

RDTS を高速炉プラントに適用するにあたっては、光ファイバの施工、周辺機器等による影響を把握するとともに、放射線環境下で長期使用した場合の特性変化、放射線誘起伝送損失による測定温度のずれの補正方法等を評価しておく必要がある。そこで、本研究においては、高速実験炉「常陽」を用いてこれらの検討を行った。

#### 3.1 光ファイバの一方向敷設による温度分布測定試験

光ファイバを放射線環境下で長期使用した場合の特性変化の確認、伝送損失を一定と仮定した補正法の評価を目的として、光ファイバを「常陽」一次系配管外装板表面に一方向に敷設し、RDTS を用いて温度分布を測定した。

##### 3.1.1 試験装置

###### 1) 光ファイバ

測定には、耐放射線光ファイバの一つであるステップインデックス(SI)型 OH 基ドープ純粋石英光ファイバ(日立電線社製)を用いた。この光ファイバは、表 3-1に示すように、一般の通信に使用されているグレーテッドインデックス(GI)型光ファイバに比べて、コアにゲルマニウム(以下、Ge)が添加されていないため耐放射線性は優れている。一方で、光の伝播に時間差が生じることから、位置分解能は劣る。そこで、本試験では、ある程度の位置分解能を確保するため、コア径の小さい(50 $\mu$ m)光ファイバを使用することとした。

また、同光ファイバについて、被覆材は 300 $^{\circ}$ C 程度の耐熱性を持つポリイミドを選定し、外力に対する保護及び設置作業時の取扱いやすさの観点からステンレス製の保護管に収納した。

表 3-2に使用した光ファイバの仕様を示す。

###### 2) 光ファイバ温度測定装置

光ファイバの放射線誘起伝送損失は、2.3 項で示したように、可視~近赤外の領域では波長が長いほど小さくなる。高層ビルなどの通常的环境では、一般に入射波長 854[nm]の測定装置が汎用品として用いられているが、本試験では、それに比べて耐放射線性の高い入射波長 1047[nm]の測定装置(FTR110:日立電線社製)を使用した。

FTR110 の基本性能を表 3-3に示す。

###### 3) 熱電対

校正及び比較のための温度測定用として、プラントの温度測定で一般的に使用される JIS k-type 0.75 級の熱電対を 4 本使用した。

##### 3.1.2 試験方法

###### 1) 測定対象

「常陽」格納容器内床下(主循環ポンプ(A)室)に配置される一次主冷却系(A ループ)のホットレグ配管を選定した。図 3-1に示すように、一次系配管は、Na 漏洩防止等の観点から二重配管となっている。また、保温施工として、放熱を抑えるための保温材が巻かれ、その外周はアルミニウム製の外装板で覆われている。本試験では、光ファイバの被覆材の耐熱性を考慮して外装板表面の温度を測定対象とした。

なお、「常陽」定格出力(熱出力 100[MW]) 運転時における当該 1 次系外装板表面の線量当量率は平均して 1.9[C/kg $\cdot$ h](7.3 $\times$ 10<sup>3</sup> [R/h])である。<sup>(40)</sup>

###### 2) 光ファイバの設置方法

測定対象部の外装板表面に、約 80[m]の光ファイバを、50[cm]ピッチで螺旋状にして一方向に敷設し、アルミニウムテープにより固定した。(配管の直線距離にして約 13[m]。)光ファイバの設置状況を図 3-2に示す。また、熱電対は、RDTS の温度校正用として 2 箇所(測定装置から 47m(TC-3)、102m(TC-1)の位置)、比較用として 1 箇所(測定装置から 62m(TC-2)の位置)にそれぞれ設置した。

### 3) 測定方法

RDTs による温度分布データ、APD データ(温度分布を計算するためのストークス光強度とアンチストークス光強度の分布データ)、校正用熱電対による温度データを 1 時間毎に測定した。表 3-3 に示すように、RDTs の計測時間は調整可能であるが、本試験では S/N 比を考慮(測定温度のばらつきは約 1℃を目途)して 180 秒(計測回数:  $16 \times 2^{16}$ )とした。

測定は、第 30 運転サイクルから第 32 運転サイクルの間の約 9000 時間について行った。表 3-4 に測定期間とプラントの状況を示す。

## 3.2 光ファイバの往復敷設による温度分布測定

ループ型補正法の評価を行うため、光ファイバを一方向に敷設して行った試験と同じ 1 次系配管外装板表面の位置に光ファイバをループ状にして往復敷設し、温度分布の測定を行った。

### 3.2.1 試験装置

#### 1) 測定用光ファイバ

測定には、3.1 項で用いた OH 基ドープ純粋石英光ファイバよりも耐放射線性に優れている、フッ素ドープ純粋石英光ファイバ(三菱電線工業社製)を用いた。光ファイバの仕様については、前項の試験と同様の理由から、SI 型でコア径 50[ $\mu\text{m}$ ] の光ファイバを用いることとし、ファイバ施工での損傷を考慮して、往復させた 2 対の光ファイバを同一の SUS 製保護管に入れたものを 2 組用意した。前述の試験結果から被測定箇所の最高温度は 120℃程度と予測されたことから、本試験においては、被覆材に取扱いが容易な UV 硬化樹脂(耐熱性 150℃程度)を用いた。

表 3-2 に、往復敷設した光ファイバの仕様を示す。光ファイバを往復させたループ形状にするため、折返し位置で 2 本の光ファイバの端部を接続し、成端箱に入れ接続点を保護した。以上の方法により、SUS 管内で往復させた全長 240[m] の光ファイバを形成した。

#### 2) 光ファイバ温度測定装置

1999 年 5 月 25 日から 7 月 14 日までの測定には日立電線社製 FTR150S を、8 月 31 日以降は 3.1 項の試験でも使用した日立電線社製 FTR110 を用いた。FTR150S の基本仕様を表 3-3 に示す。演算装置の性能が上がり計算速度が向上している他は、FTR110 とほぼ同様である。

#### 3) 熱電対

測定温度分布や温度分布の補正結果をより精度よく評価するため、本試験においては 3.1 項と同じ JIS k-type 0.75 級の熱電対を 7 本使用した。

### 3.2.2 試験方法

#### 1) 測定対象

3.1 項と同じく、「常陽」格納容器内床下(主循環ポンプ(A)室)の一次主冷却系ホットレグ配管について、その外装板表面の温度を測定対象とした。(図 3-3 参照)

#### 2) 光ファイバの設置方法

本光ファイバの施工にあたっては、3.1 項の試験と同一経路を辿るようにして光ファイバを往復敷設した。光ファイバの設置状況を図 3-3 に示す。なお、前項の試験で使用した光ファイバは、本試験のために往復敷設する光ファイバを格納容器内床下にアクセスさせる上で、既設貫通孔施工上の問題から撤去した。

また、RDTs との比較用として、測定装置から 10(230)m、40(200)m、100(140)m、111(129)m の 4 箇所に熱電対を設置した。(括弧内は復路の位置)

#### 3) 測定方法

RDTs による温度分布データ、APD データ(温度分布を計算するためのストークス光強度

とアンチストークス光強度の分布データ)、校正用熱電対による温度データを1時間毎に測定した。RDTSの計測時間は前項の試験と同様の180秒とした。

測定は、第33運転サイクルでは表3-5の期間について実施し、第34運転サイクルでは継続して行った。



表 3-1 SI型光ファイバとGI型光ファイバの違い

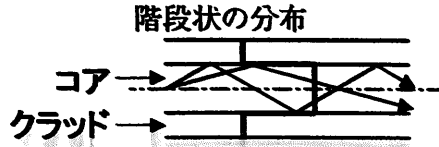

	ステップインデックス(SI)型 光ファイバ	グレーテッドインデックス(GI)型 光ファイバ
屈折率分布	階段状の分布 	伝播時間差がなくなるような分布 
伝播時間差	光の伝播の仕方により時間差(伝播時間差)が生じる。	屈折率の分布により伝播時間差は発生しない。
屈折率のつけ方	コアに Ge を一定量添加(屈折率上昇) AND/OR クラッドに F を添加(屈折率減少)	コアに Ge を所定の屈折率差がつくように添加

表 3-2 使用した光ファイバの仕様

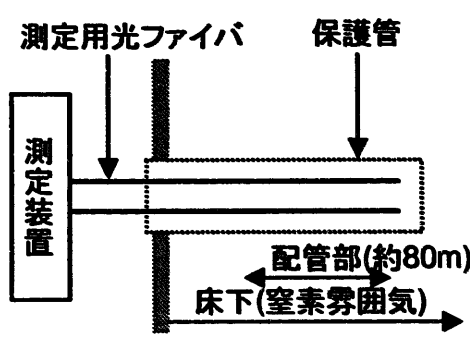
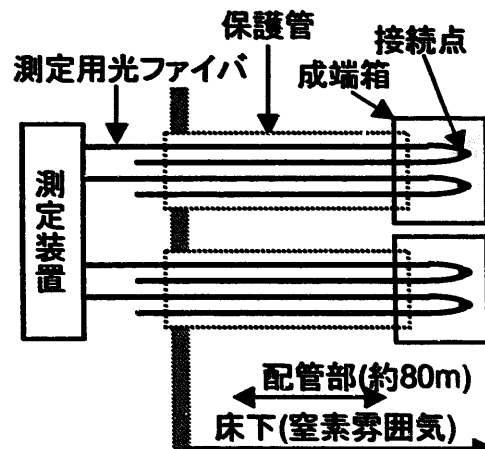
項目		一方向に敷設した 光ファイバ	往復させて敷設した 光ファイバ
光 フ ァ イ バ	コア材質	OH 基ドープ(30ppm)純粋石英	F ドープ純粋石英
	コア径	50[ $\mu\text{m}$ ]	50[ $\mu\text{m}$ ]
	クラッド径	125[ $\mu\text{m}$ ]	125[ $\mu\text{m}$ ]
	被覆	ポリイミド	UV 硬化樹脂
	保護管	SUS304(内径/外形 2.0/2.4[mm])	SUS304(内径/外形 2.0/2.4[mm])
	全長	100[m]	120[m]
	本数	2 (同一の SUS 管に格納)	8 (4 本ずつ 2 本の SUS 管に格納)
施工	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 保護管の先端は圧縮により密封</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 光ファイバは方端を 2 本ずつ接続し、成端箱内に格納</li> <li>● 保護管の先端は成端箱で密封</li> </ul> 	

表 3-3 測定装置の基本仕様

項目	一方向敷設	往復敷設
装置名	FTR110	FTR150S
レーザ波長	1047 [nm]	1047 [nm]
レーザ出力	10 [W]	10 [W]
レーザ光パルス幅	10 [ns]	10 [ns]
測定距離	最大 20[km]	最大 20[km]
サンプリング間隔	1 [m]	1 [m]
位置分解能	~3 [m] (光ファイバの種類に依存)	~3 [m] (光ファイバの種類に依存)
温度精度	±1~4 [°C] (測定時間に依存)	±1~4 [°C] (測定時間に依存)
測定時間	13 [s] ~ (調整可能)	11 [s] ~ (調整可能)

表 3-4 「常陽」の運転サイクル

測定期間	プラント状況
1997年 3/17~6/3 (5/13~5/15、5/23~5/27を除く)	第30サイクル 1997年 3/17 起動~5/19 停止
1997年 7/11~10/3 (7/25~7/28を除く)	第31サイクル 1997年 7/14 起動~9/11 停止 (落雷による原子炉運転停止 8/26~8/27)
1997年 12/5~1998年 3/20	第32サイクル 1997年 12/24 起動~1998年 2/24 停止

表 3-5 第33運転サイクル中の測定期間

測定期間	プラント状況
1999年 5/25~27	起動前 一次系 Na 温度 200°C→250°Cへの上昇
1999年 6/14~16	起動前 一次系 Na 温度 250°C
1999年 7/14~15	定格運転中 (出力上昇後 21~22日)
1999年 8/25~26	定格運転中 (出力上昇後 51~52日)
1999年 8/31~9/17	定格運転→原子炉停止

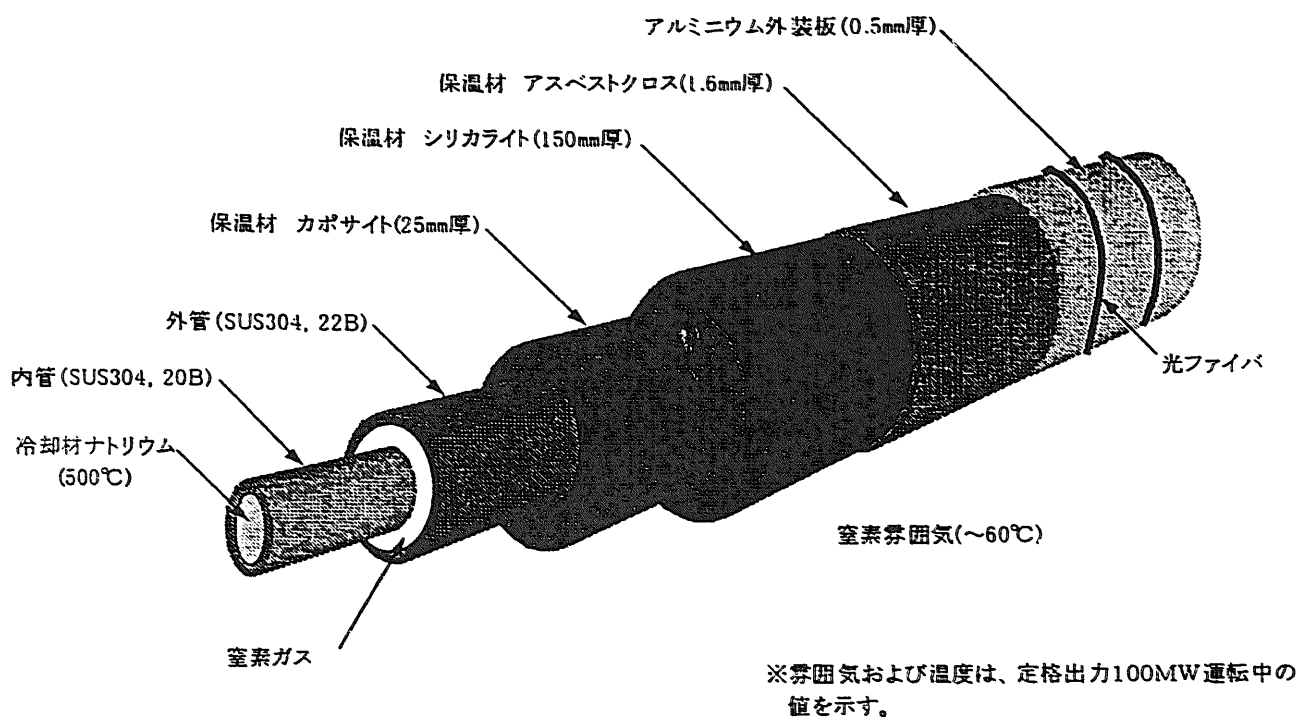


図 3-1 一次主冷却系配管の施工図

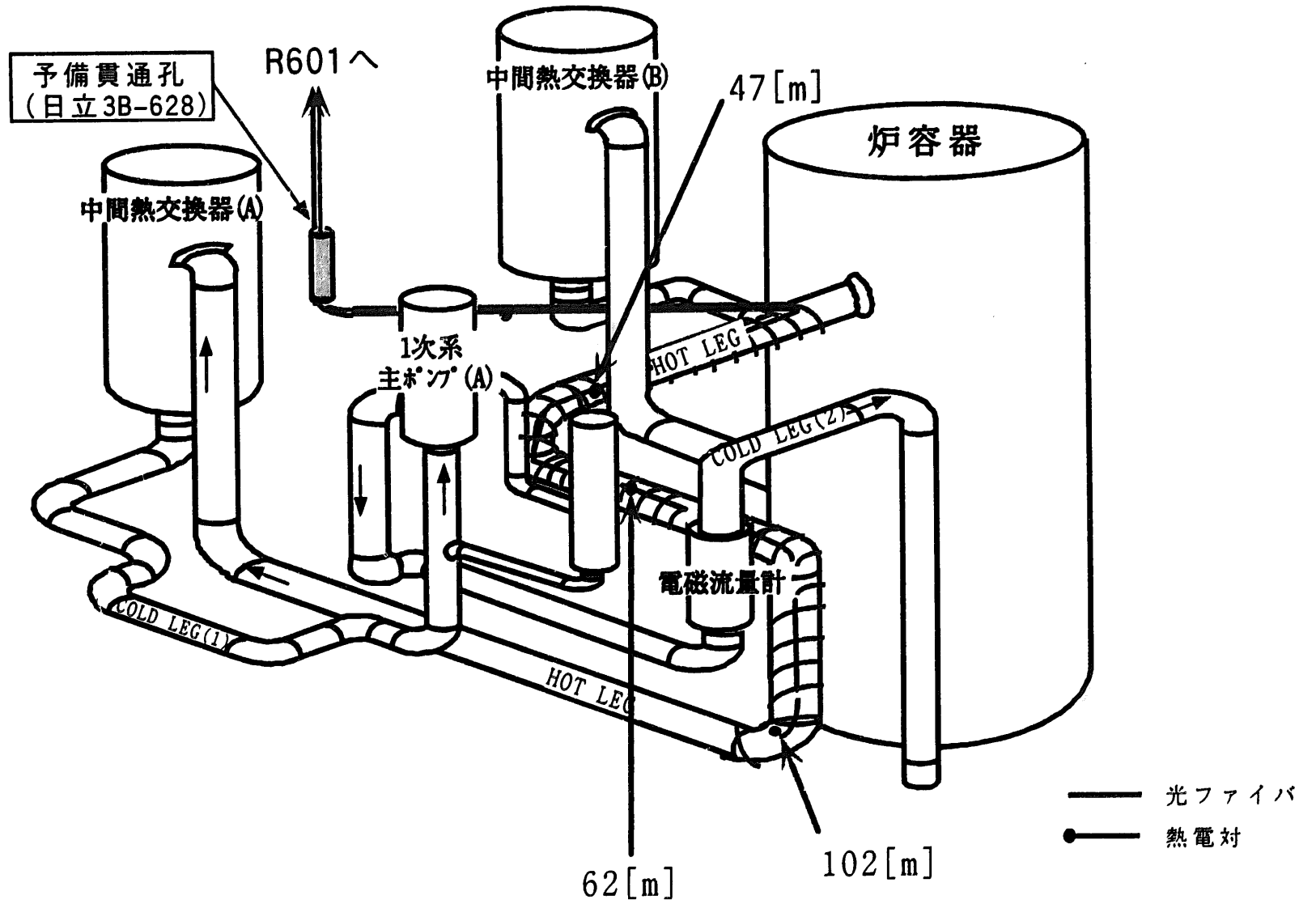


図 3-2 一方向敷設時のセットアップ

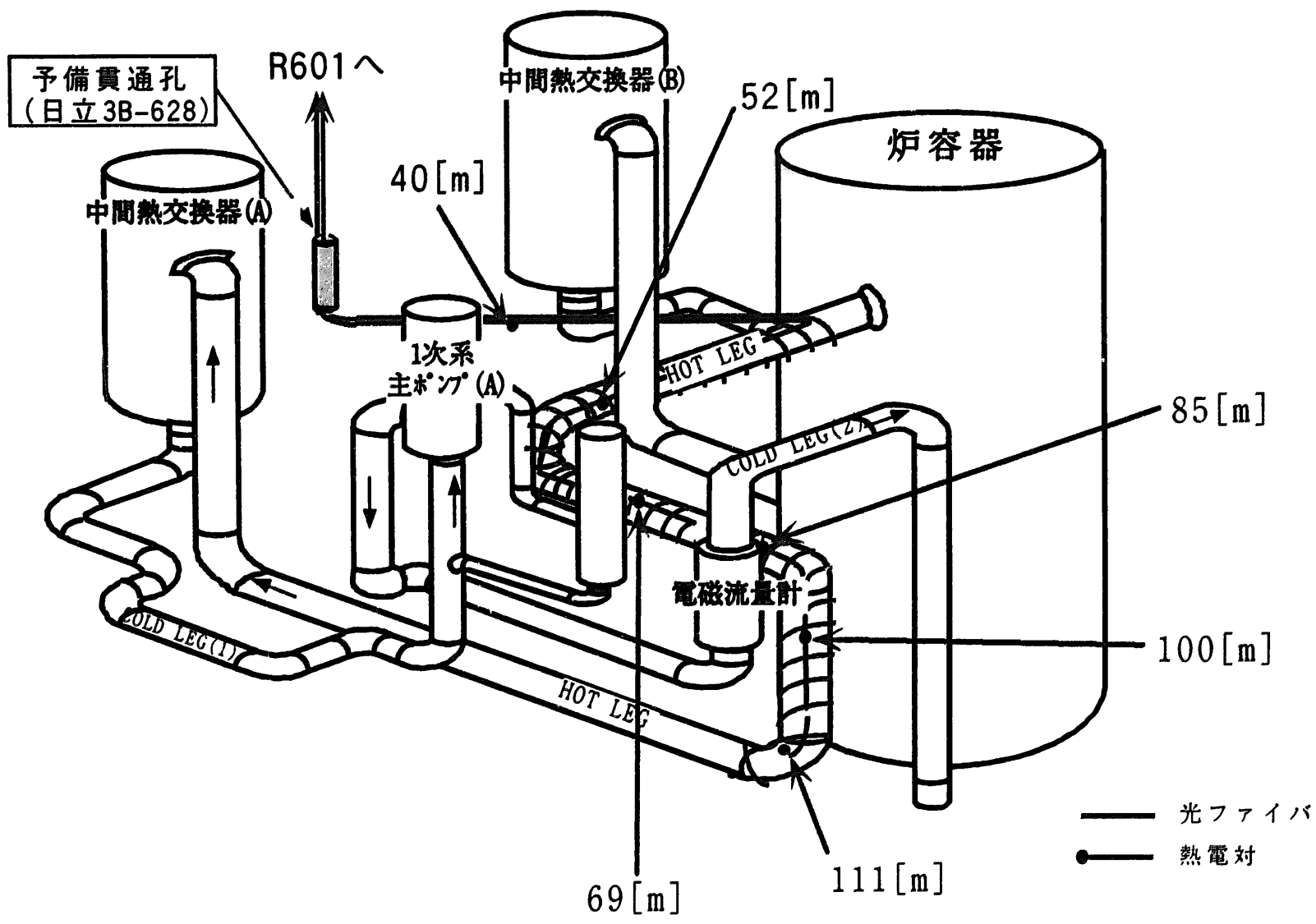


図 3-3 光ファイバ往復敷設時のセットアップ

## 4. 結果

### 4.1 光ファイバー方向敷設

#### 4.1.1 温度分布測定結果

##### 4.1.1.1 RDTS による温度分布測定結果

図 4-1に、第 30 サイクルの出力上昇時(1997 年 3 月 17 日 12:05 系統昇温開始、18 日 7:00 出力上昇操作開始、3 月 21 日 11:25 定格出力到達)の RDTS と熱電対とによる温度の推移を示す。出力上昇前(3 月 17 日)は熱電対と RDTS の測定値に大きな差は見られないが、出力が上昇するにつれて、熱電対と RDTS の測定結果の差は大きくなった。この温度のずれは、放射線により欠陥の生じた光ファイバを透過する伝播経路が長い (RDTS から遠い) ほど放射線誘起伝送損失による後方散乱光の減衰が大きくなるためによるものであり、その結果として、温度分布が右下がりの分布を示した。

また、当初、ほぼ同様であると考えていた配管外装板表面の温度分布に周期性が見られた。この温度分布の周期性の原因については、4.3 項で述べる。

##### 4.1.1.2 温度分布の時間変化

図 4-2 に各運転サイクルの原子炉起動前及び原子炉運転中 (停止直前) の RDTS と熱電対の温度分布を、図 4-3 に測定全期間を通じた TC-1,TC-3 の位置における RDTS 及び熱電対の温度の経時変化を、図 4-4 に TC-1,TC-3 の位置における熱電対と RDTS との温度差の経時変化を示す。

原子炉起動直後から RDTS と熱電対との温度の差は増加し、その後、時間の経過に伴って一定となる傾向が見られた。また、その大きさは、測定用光ファイバの先端付近に設置した熱電対 TC-1 の位置で、約 25℃を示した。この一定となる傾向は図 4-2 において各運転サイクルの EOC での温度分布がほぼ同じことから確認できる。

原子炉を停止すると温度のずれはある程度回復し、再び運転を開始すると温度のずれは原子炉停止直前の状態まで速やかに増加した。このことは、図 4-4 に示す各サイクルの原子炉運転開始時における TC-1 位置での温度のずれによく現れている。光ファイバ敷設後の最初のサイクルである第 30 サイクルでは温度のずれは徐々に増加するが、他の第 31・32 サイクルにおいては、温度のずれは速やかに増加している。

RDTS の結果が示すこれらの挙動は、2.3 項で示した光ファイバの放射線誘起伝送損失の挙動とよく一致している。このことは、「常陽」一次系配管領域における線量当量の大部分が  $^{24}\text{Na}$  からの  $\gamma$  線によるものである事からも裏付けられる。

また、第 31 サイクルにおいて温度のずれが徐々に減少している。これは、この時期に一次系配管領域の室温が上昇したため、放射線誘起伝送損失が減少したことによると考えられる。

##### 4.1.1.3 伝送損失の算出

ここでは、伝送損失と温度のずれの関係を明らかにするため、TC-1 と TC-3 間の伝送損失を計算する。

この時、TC-1 と TC-3 の位置での後方散乱光の強度は式 2-1 から、

$$\frac{I'_{1A}}{I'_{3A}} = \frac{N_{1E}}{N_{3E}} \times 10^{(A_{S1}-A_{S3})}$$

$$A_{S1} = -\frac{l_{S1A} + l_{S1R} + l'_{S1A} + l'_{S1R}}{10}$$

$$A_{S3} = -\frac{l_{S3A} + l_{S3R} + l'_{S3A} + l'_{S3R}}{10}$$
式 4-1

但し、 $l_{XYA}$ : XY 間の放射線がない状況でのアンチストークス光の伝送損失(初期損失) [dB]

$l_{XYR}$ : XY 間の放射線がない状況でのレイリー光の伝送損失(初期損失) [dB]

- $l'_{XYA}$ : XY間のアンチストークス光の放射線誘起伝送損失 [dB]
- $l'_{XYR}$ : XY間のレイリー光の放射線誘起伝送損失 [dB]
- $I''_{XA}$ : 位置 X での散乱光強度
- $N_{XE}$ : 位置 X における励起状態の状態密度
- $A_{XY}$ : XY間でのレイリー光とアンチストークス光の放射線誘起損失比 (対数をとったもの)
- (添字)<sub>1</sub>: TC-1 位置
- (添字)<sub>3</sub>: TC-3 位置
- (添字)<sub>S</sub>: RDTs の光検出器の位置

となる。ここで、 $\frac{N_{1E}}{N_{3E}}$  はボルツマン分布の仮定より、

$$\frac{N_{1E}}{N_{3E}} = \frac{n(\nu_r, T_1)}{n(\nu_r, T_3)}$$

$$n(\nu_r, T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{hc\nu_r}{kT}\right) - 1}$$

式 4-2

- 但し、 $\nu_r$ : ラマン散乱による波長シフト量 [1/m]
- $T_x$ : 位置 X の絶対温度[K]
- $n(\nu_r, T)$ : アンチストークス光強度の温度依存項
- $h$ : プランク定数 [J・s]
- $c$ : 真空中の光速 [m/s]
- $k$ : ボルツマン定数 [J/K]

と表される。<sup>19)</sup> ここで、2章で示したように、ある区間の伝送損失はその区間を構成する伝送損失の和で表すことができる。つまり、

$$l_{S1A} = l_{S3A} + l_{31A}$$

$$l'_{S1A} = l'_{S3A} + l'_{31A}$$

$$l_{S1R} = l_{S3R} + l_{31R}$$

$$l'_{S1R} = l'_{S3R} + l'_{31R}$$

式 4-3

となる。式 4-1,4-2,4-3 より、

$$l_{13A} + l_{13R} + l'_{13A} + l'_{13R} = 10 \log \left( \frac{I''_{1A} n(\nu_r, T_3)}{I_{3A} n(\nu_r, T_1)} \right)$$

式 4-4

となり、測定された散乱光強度と実際の温度から、アンチストークス光と入射光の損失の和が求まる。ストークス光と入射光の損失の和も同様にして、

$$l_{13S} + l_{13R} + l'_{13S} + l'_{13R} = 10 \log \left\{ \frac{I_{1A} (1 + n(\nu_r, T_1))}{I_{3A} (1 + n(\nu_r, T_3))} \right\}$$

式 4-5

となる。

式 4-4, 4-5 を用いて求めた、TC-1 と TC-3 間での、アンチストークス光と入射光の損失の平均値、及び、ストークス光と入射光の損失の平均値の経時変化を図 4-5 に示す。また、図 4-6 に、第 30 サイクル運転停止時の原子炉出力、原子炉出力を用いて算出した線量当量率、前述の線量当量率算出に用いた原子炉出力を示す。図 4-5 では、温度のずれと同じように伝送損失も時間経過とともに一定となる傾向を示し、アンチストークス光と入射光の平均で約 20[dB/km]、ストークス光と入射光の平均で約 15[dB/km] で一定となっている。また、放射線誘起伝送損失は、光ファイバ設置直後の第 30 サイクルの照射結果では徐々に増加するが、二回目以降の第 31・32 サイクルの照射結果では、第 30 サイクルで一定となった損失値まで速やかに増加する。これは、2.3 項に示した光ファイバの  $\gamma$  線照射試時の特性と一致する。なお、運転サイクルにより伝送損失の一定となる値が微妙に異なるのは、「常陽」の除熱システムが空冷式であり、外気温による冷却能力の差が系統内ナトリウム温度に現れているものと考えられる。

原子炉停止直後に伝送損失がどれも一時的に増加している。これは、図 4-6 にあるように、温度(出力)の降下速度に対して  $^{24}\text{Na}$  による  $\gamma$  線線量当量率の減衰速度が遅いことが原因と考えられる。

#### 4.1.2 伝送損失補正結果

「常陽」一次系配管領域の線量当量率を表 4-1 に示す。<sup>[40]</sup> 表 4-1 に示すように、 $\gamma$  線線量当量率は 1.67 から 1.98[C/kg·h]( $6.48 \times 10^3$  から  $7.69 \times 10^3$  [R/h]) の範囲にあり、この領域ではほぼ一様と仮定することができる。さらに、定格運転中は熱交換器(IHX)の上流である Hot Leg 内、下流である Cold Leg 内において各々の配管内冷却材温度の分布はほぼ一定であると考えられる。本試験では、Hot Leg 側に設置した光ファイバの温度分布をほぼ一定であると仮定した。以上から、光ファイバの伝送損失分布を一定と仮定した補正法の適用を試みた。

図 4-7 に、光ファイバで得られた補正前の温度分布と、熱電対 TC-1,3 の 2 点の温度を用いて補正を行った結果を併せて示す。TC-2 位置の熱電対と RDTs 補正前の温度の差は 8[°C]あったが、補正を行うことで約 2.5[°C]まで温度のずれが減少している。

また、図 4-8 に、TC-2 位置の熱電対と RDTs 補正後の温度の差を示す。本補正手法は温度が既知な 2 点の基準点の中心に近いほどその誤差は大きくなる。TC-2 位置は TC-1,3 間の中心ではないが、補正前に約 8[°C]あった温度のずれが補正は 2.5[°C]で一定しており、本手法が補正手法として有効であることが確認された。

但し、原子炉の運転停止直後は、温度のずれが大きくなっており補正法が機能していない。これは、図 4-5 に示すように、原子炉停止直後に伝送損失が一時的に増加したため、伝送損失一定の仮定が成り立たなくなったことによるものと考えられる。

## 4.2 光ファイバ往復敷設

### 4.2.1 温度分布測定結果

#### 4.2.1.1 第 33 サイクル出力上昇時の測定結果

図 4-9, 図 4-10 に、第 33 サイクル出力上昇前(1999 年 6 月 14 日;一次系ナトリウム温度 250°C)及び定格出力到達後 21 日目(1999 年 7 月 14 日)、68 日目(1999 年 8 月 30 日)の RDTs による温度分布測定結果、及び、比較用熱電対(10(230)m、40(200)m、100(140)m、111(129)m の 4 箇所に設置)の温度測定結果を示す。(図 4-10 の復路のデータは、RDTs の測定結果を光ファイバの中心位置(120m)で折り返したものである。)

出力上昇前の測定結果から、放射線誘起伝送損失のない状態では、往路・復路の温度分布は 1°C 程度で一致し、熱電対の測定結果とも 52m、85m 位置を除きほぼ一致した。しかし、原子炉運転中は、4.1 項に示した一方向敷設時と同様に、RDTs から遠くなるほど、放射線誘起伝送損失の影響を受けるため、温度のずれは大きくなった。その結果、光ファイバの末端(光ファイバの始点・終点)では、非放射線環境下にある 30m 位置で約 10°C に達した。この温度のずれは、定格出力到達後 21 日目と定格出力到達後 68 日目ともに同じ大きさであり、



経時変化は確認されなかった。これは、第 30~32 サイクルでの測定と同様、光ファイバに発生する欠陥の生成と消滅のバランスが取れ、放射線誘起伝送損失が一定となっている事によるものと考えられる。(図 4-9,10,14 の 8 月 30 日のデータ、図 4-12,18 の各データは FTR110 で採取したものであり、RDTS と光ファイバの接続部で入射光や散乱光の反射の影響を受け、他の FTR150 での測定結果に比べて RDTS から 25m 付近までの温度分布に乱れが生じた。)

#### 4.2.1.2 フッ素ドープ光ファイバと OH 基ドープ光ファイバの比較

図 4-11 に、第 33 サイクルで得られた温度(フッ素ドープ光ファイバ使用、1999 年 7 月 14 日；定格出力到達後 21 日目)を、第 30 サイクルのそれ(OH 基ドープ光ファイバ使用、1997 年 4 月 10 日；定格出力到達後 20 日目)と比較して示す。

放射線誘起伝送損失による温度のずれが、第 30 サイクルでは、光ファイバの終点で最大の約 25℃であったのに対し、第 33 サイクルでは、光ファイバの始点・終点で最大の約 10℃(光ファイバの長さは第 33 サイクル時の約 2 倍)と小さな値を示した。また、図 4-5 にあるように、定格運転時における放射線誘起伝送損失で比較すると、OH 基ドープ光ファイバではアンチストークス光と入射光の損失の平均が 18dB/km、ストークス光と入射光の損失の平均が 13dB/km であるのに対し、フッ素ドープ光ファイバでは、アンチストークス光と入射光の損失の平均が 4.2dB/km、ストークス光と入射光の損失の平均が 3.4dB/km であり、約 1/4 程度となっている。

以上のことから、フッ素ドープ光ファイバが OH 基ドープ光ファイバに比べて耐放射線性に優れている事が確認された。

#### 4.2.1.3 第 33 サイクル出力下降時の測定結果

図 4-12 に第 33 サイクル出力降下時の RDTS と熱電対とによる測定温度、図 4-13 に第 33 サイクル出力降下時における RDTS から 111m 位置での RDTS(往路 111m・復路 129m)と熱電対とによる測定温度、及びループ型補正法による補正結果の経時変化を示す。

これらの図から、出力降下・系統降温に伴い、RDTS による測定温度及び熱電対の測定温度が、温度分布の形状を保って、徐々に低下する事を確認した。

図 4-14 に第 33 サイクル原子炉停止後 17 日目(9 月 17 日 10:00)と起動前(6 月 14 日 17:01)の RDTS と熱電対による測定温度を、図 4-15 に RDTS から 40~111m の間でのアンチストークス光及びストークス光の各伝送損失と入射光の伝送損失との平均値の経時変化を示す。

図 4-14 から、原子炉停止後 17 日目と起動前の熱電対の温度測定結果はほぼ同じであることを確認した。一方、原子炉停止後 17 日目における RDTS の温度のずれは約 8℃と定格運転時よりも約 20%小さくなった。これは、図 4-15 にあるように、原子炉停止後、光ファイバに発生した欠陥が時間と共に一部消滅し、放射線誘起伝送損失がある程度回復したためである。しかし、第 30~32 サイクルに実施した一方向にファイバを敷設して測定した場合(OH 基ドープ光ファイバ：図 4-3 で温度ずれが約 25℃から約 10℃に減少)に比べ、温度のずれの減少幅が小さい。これは、コア材の組成(添加物)の違いにより、フッ素ドープ光ファイバのアンチストークス光波長とストークス光波長での伝送損失の回復量の差(0.2dB/km：図 4-15 参照)が、OH 基ドープ光ファイバ(3.2dB/km：図 4-5 参照)ほど大きくなかったためである。

#### 4.2.1.4 第 34 サイクル以降の測定結果

図 4-16 に 34 サイクル出力上昇時の 111(129)m の位置における RDTS(往路 111m・復路 129m)と熱電対による測定温度、及びループ型補正法による補正結果の経時変化を示す。

原子炉起動直後から RDTS と熱電対の測定結果の差は増加し、その後、時間経過に対して一定となる傾向が見られた。この一定な傾向は、図 4-10 において 1999 年 7 月 14 日と 8 月 30 日に測定した温度分布がほとんど同じことから確認できる。また、原子炉の運転停止後は、温度のずれはある程度回復し、再び運転を開始すると温度のずれは運転を停止する直前の状態まで急激に増加した。

これらの挙動は、4.1.1 項に示した一方向敷設時の測定結果の挙動とよく一致した。

## 4.2.2 伝送損失補正結果

### 4.2.2.1 補正結果

図 4-17～図 4-20 に、原子炉起動前(6月 14 日 17:01)、定格運転中(定格出力到達後 68 日目 8 月 30 日 18:00)、第 33 サイクル制御棒一斉挿入による原子炉停止操作後の系統降温中(8 月 31 日 21:59)、第 33 サイクル原子炉停止後 17 日目(9 月 17 日 10:00)の RDTS と熱電対による測定温度、及び、ループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる補正法による補正結果を示す。ここで、ループ型補正法を行うにあたっては、温度の基準として 40(230)m の位置に設置した熱電対の温度を用いた。また、伝送損失一定の仮定を用いる補正法では、40(200)m と 111(129)m の位置に設置した熱電対の温度を基準とした。

原子炉起動前では、補正前の往路・復路、及びループ型補正法による補正後の温度分布は 1℃程度のずれでよく一致している。しかし、原子炉の運転時間の経過に伴い RDTS による温度分布測定結果にはずれが生じ、111m の位置(ファイバの折返し点に近く、かつ温度分布が比較的平坦)で熱電対と RDTS の測定結果のずれは約 6℃となった。しかし、ループ型補正法を用いた伝送損失補正を行うことにより、111m の位置に設置した比較用熱電対との差は、図 4-13(出力下降時)にもあるように、測定した全期間(起動前、定格運転時、出力下降時)を通して 1～2℃程度に補正する事ができた。このことから、線量当量率や温度等の条件が比較的安定している定格運転時だけでなく、条件が変化する出力上昇・下降時等においてもループ型補正法が有効であることを確認できた。

### 4.2.2.2 伝送損失一定の仮定を用いる補正法との比較

図 4-21、図 4-22 に、第 33 サイクル出力下降時における 75m、100m 位置での温度測定結果、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる補正法による補正の結果を示す。なお、伝送損失一定の仮定を用いる補正法は 40m と 111m の位置に設置した熱電対の測定結果を基準として使用した。

フッ素ドープ光ファイバを用いた試験では、伝送損失を一定と仮定した補正結果と、ループ型補正法により補正した結果が、測定した全期間を通して熱電対の温度とよく一致した。また、伝送損失一定の仮定を用いる補正法では誤差が大きくなる中間点付近(75m)の位置での両補正法の差はほとんど無く、両補正法による補正結果はよく一致した。

一方、第 30～32 サイクルの OH 基ドープ光ファイバを用いた測定においては、出力降下時に、比較用熱電対と伝送損失を一定と仮定した補正結果との温度差が一時的に大きくなった。この違いは、4.2.1 項にあるように、この試験で使用したフッ素ドープ光ファイバでは、OH 基ドープ光ファイバに比べて放射線誘起伝送損失の大きさが小さく、原子炉停止時における伝送損失の一時的な増加の影響が小さいことによるものである。

以上のことから、既設フッ素ドープ光ファイバを用いた温度測定では、設置環境(温度、線量当量率分布、等に大きく影響されることなく上記両伝送損失補正法とも有効であることを確認できた。但し、伝送損失一定の仮定を用いる補正法では、温度の再現性が校正用熱電対の設置条件に大きく依存することから、多くの校正用熱電対を使用して補正することが必要である。

## 4.3 光ファイバ温度測定結果にみられた周期的温度分布の原因の検討

図 4-2 にあるように、光ファイバを用いた 1 次主冷却系配管外装板表面の温度測定において、約 10m 毎に周期性のある温度分布が見られた。そこで、この原因を検討するため、2 次系を用いて補助試験を行い、さらに、第 12 回定期検査期間中に 1 次系での現場調査を実施した。

### 4.3.1 2 次系での補助試験

周期的な温度分布の一つの原因として、光ファイバの施工による影響、配管及び保温材の施工による影響の二つが考えられる。ここでは、施工状況の確認が容易な 2 次主冷却系配管を用いた補助試験でこれらの影響を確認した。<sup>[41]</sup>

#### 4.3.1.1 光ファイバの施工による影響

図 4-23 に光ファイバを配管外装板表面に沿わせた場合と、表面から浮かせて設置した場合の温度分布を比較した結果を示す。光ファイバと配管外装板表面との隙間が広がるほど低い

温度分布（2mm程度の浮きでも温度は約5℃変化）を示すことが確認された。このことから、2次系配管外装板表面では、光ファイバの施工状態が光ファイバによる温度分布測定結果に影響を与えることがわかった。

#### 4.3.1.2 配管及び保温材の施工による影響

図4-24に2次主冷却系の水平に配置された配管に敷設した光ファイバのRDTSによる温度分布測定結果、及び、配管各位置での熱電対の測定結果を示す。配管の上側と下側では、外装板表面において3～5℃の温度差が確認された。また、保温材の境目部分、本設熱電対及びヒータの引出口では、熱の漏れ出しにより温度分布に正のピークがみられ、配管防振機構部の保温材が厚くなる部分では低い温度を示す傾向がみられた。これらのことから、配管保温材の施工状態が光ファイバによる温度分布測定結果に影響を与えることがわかった。

### 4.3.2 1次系での現場調査結果

第32サイクル運転終了後の第12回定期検査期間中に1次系配管が設置されている格納容器床下（配管コールド状態）に立入り、OH基ドープ光ファイバの施工状況等による温度分布測定への影響を調査した。ここでは、2次系の補助試験で得られた知見を踏まえて、光ファイバの配管外装板表面への密着度、光ファイバを敷設した位置の配管及び配管保温材の施工状態、光ファイバと隣接する機器との位置関係等の観点から、周期性を持った温度分布の原因を検討した。調査結果を表4-2に示す。また、本光ファイバは平成9年2月に設置して以来、1年の運転に供していることから、外観変化についても確認した。

#### 4.3.2.1 光ファイバの施工による影響

1次系に設置されている光ファイバの配管外装板表面からの浮き上がり距離をスケールで測定した（周方向4箇所×23巻）。本測定結果と原子炉運転中の光ファイバ温度分布との関係を図4-25に示す（本比較において、原子炉の運転中と停止中とでは、配管熱変位等により、計測位置にずれが生じると考えられるが、配管径方向の変化については保温材部で緩和され、配管軸方向の変化についてはファイバが螺旋状に敷設されていることと配管長が約10mと短いことから、その影響は小さいものとして考慮していない。また、配管外装板表面からの光ファイバの浮き上がり状態も変わると考えられるが、光ファイバの浮きが主に配管外装板等の凸部で支持されることにより生じるものであることから、その変化は小さいものとして考慮していない。以上の影響の程度については4.3.3項に記す。）。

本測定結果から、光ファイバの配管外装板表面からの浮きが部分的にみられたものの、その隙間と温度分布との相関をみいだすことはできなかった。2次系の補助試験では、光ファイバの浮いた部分で測定温度が外気の影響を受けたが、1次系では雰囲気の気流、温度外乱等の影響が小さいため相関がみられなかったものと考えられる。

#### 4.3.2.2 配管及び保温材の施工による影響

次に、光ファイバを敷設した1次主冷却系配管の形状、保温材及び外装板の変形等について、原子炉運転中のファイバ温度との関係を調査した。図4-26に配管及び保温材の施工状態を示す。

調査の結果、配管形状から、縦方向に配置された配管の上部エルボ部近傍に高い温度分布があることがわかった。原子炉運転中は、予熱窒素ガス系が停止し同系統はバルブで仕切られた状態となる。これにより、流れのない二重管内の窒素に温度分布が付き、その影響が保温材を介して現れたものと考えられる。

また、通常の保温材施工は、二重管外管を保温材（カボサイト+シリカライト+アスベストクロス）で包み、その外側をアルミニウム製の外装板で覆う形がとられているが、外装板が太径となっている箇所（この部分は配管ベローズとなっており、保温材施工が直管部と異なる材質/ファインフレックス+MGフェルトを使用）において高い温度分布を示していることがわかった。

なお、一部、水平に配置された配管の上側で保温材の圧縮された部分、外装板の剥離した部分が確認されたが、原子炉運転中のファイバ温度との相関はみられなかった。

#### 4.3.2.3 隣接機器による影響

2次系の補助試験では、配管に取付けられた熱電対引出口、配管防振機構部等で温度分布に顕著な変化が見られたことから、1次系についても主冷却系配管に取付けられた配管、機器等の隣接機器による影響を調査した。光ファイバに隣接する機器と原子炉運転中のファイバ温度との関係を図 4-26 に示す。光ファイバを敷設した区間の1次系配管には、予熱窒素ガス系配管が接続されているほか、10数台のハンガが取付けられている。また、主な隣接機器として、1次主循環ポンプ(A)が1mの距離、電磁流量計が20~70cmの距離、コールドレグ配管(系統温度370℃)が70cmの距離にある。しかし、機器・配管の配置と原子炉運転中のファイバ温度に有意な関係はなく、隣接する機器・配管からの放熱の影響は認められなかった。

#### 4.3.2.4 光ファイバの外観変化

感温部である光ファイバ自身は、保護管に取められておりそれを開放することができないため外観点検は実施していない。また、光ファイバを保護しているSUS管については、外観点検の結果、曲がり、外傷、表面の変色等、設置以降変化していないことを確認した。

#### 4.3.3 光ファイバの機能確認

現場調査に併せて、光ファイバを用いて温度分布測定を行った(1次系ナトリウムドレン中・予熱窒素ガス系停止中)。図 4-27 に、光ファイバによる温度計、R-206室1次主冷却系配管に敷設された熱電対(3点)の温度、及び接触式温度計によるファイバの表面温度(配管の上下、両側面の計4箇所×23巻)測定結果を示す。

得られた結果から、光ファイバによる温度測定値は、熱電対と1℃以内、接触式温度計と2℃程度でよく一致しており、光ファイバの温度測定機能が維持されていることを確認できた。

原子炉運転中に比べ、配管及び隣接機器からの放熱が少ない温度の低い状態での測定であったが、光ファイバの結果に温度測定装置側(炉容器出口側)に高くなる勾配を持った温度分布が見られた。これは、予熱窒素ガス系の停止時に、系統内の窒素がバルブによって仕切られることにより、流れのない二重管内の窒素に温度分布がついたためと考えられる。また、ここで測定された温度分布に周期性がなかったことから、運転中に見られた周期的温度分布の要因として、ファイバ固有の特性は含まれないものと考えられる。

原子炉運転中と停止中とで、配管熱変位等に伴い発生する光ファイバの圧縮伸長による計測位置のずれについては、図 4-25(運転中)と図 4-27(停止中)の光ファイバの測定範囲に違いがないことから、無視できる程度であることを確認した。

1次系での現場調査の結果、MK-II第30~32サイクルの光ファイバ温度測定結果にみられた周期的な温度分布の高温部が、保温材の施工方法(保温材の材質)が異なる配管ベローズ部や、二重管外管内で熱が溜り易いと考えられる縦方向に配置された配管の上部エルボ部位置とほぼ一致した。以上から、この温度分布の周期性は、配管及び保温材の施工状態が影響したものと考えられる。

表 4-1 「常陽」一次系配管表面での線量率測定結果<sup>(40)</sup>

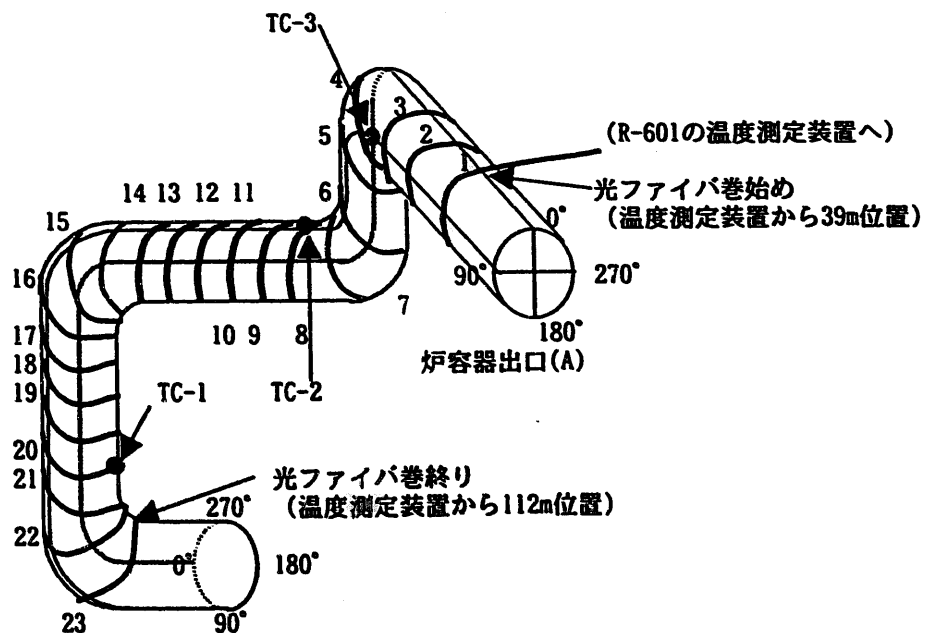
測定位置		$\gamma$ 線線量率 [C/kg·h/100MW] ([R/h/100MW])
G-1	Hot Leg	1.98 ( $7.69 \times 10^3$ )
G-2		1.67 ( $6.48 \times 10^3$ )
G-3		1.91 ( $7.40 \times 10^3$ )
G-4		1.90 ( $7.35 \times 10^3$ )
G-5		1.97 ( $7.64 \times 10^3$ )
G-6		2.50 ( $9.68 \times 10^3$ )
G-7	Cold Leg	2.00 ( $7.75 \times 10^3$ )
G-8		1.88 ( $7.30 \times 10^3$ )
G-9	Na ポンプ	1.97 ( $7.64 \times 10^3$ )
G-10	Cold Leg	1.53 ( $7.45 \times 10^3$ )
G-11		1.91 ( $7.40 \times 10^3$ )

表 4-2 光ファイバ等の施工状態調査結果

(1/2)

ファイバの位置		温度測定装置からの距離(m)	温度(℃) [接触式 温度計]	光ファイバの浮き (mm)	配管保温材の施工状態	隣接する機器・配管	備考 (熱電対位置)
1周目	0°	39.0	-	-		1-2周間にハンガ、 1周外側に予熱N2配管	
	90°	39.8	40	5	外径太 (配管ベローズ部)		
	180°	40.5	36	25		1-2周間にハンガ	
	270°	41.3	36	4			
2周目	0°	42.0	38	8			1-2周間にハンガ
	90°	42.8	36	5			
	180°	43.5	34	3		1-2周間にハンガ	
	270°	44.3	36	0			
3周目	0°	45.1	40	2		3-4周間に予熱N2配管	
	90°	45.8	37	2			TC-3
	180°	46.6	36	0			
	270°	47.4	36	2			
4周目	0°	48.2	43	0		3-4周間に予熱N2配管、 主ポンプから1m	
	90°	48.9	37	3			
	180°	49.7	35	12			
	270°	50.5	35	9	縦配管上部		
5周目	0°	51.2	36	0		主ポンプから1m	
	90°	52.0	35	2			
	180°	52.8	35	6			
	270°	53.7	35	5			
6周目	0°	54.5	35	0		主ポンプから1m	
	90°	55.3	35	10			
	180°	56.2	34	10			
	270°	57.0	35	2	6-7周間が外装板剥離		
7周目	0°	57.8	35	2	7-8周間が外装板剥離		
	90°	58.7	35	2			
	180°	59.5	34	7			
	270°	60.3	34	0	7-8周間が外装板剥離		
8周目	0°	61.2	34	5			
	90°	62.0	34	10	7-8周間が外装板剥離		TC-2
	180°	62.8	34	3			
	270°	63.5	34	0			
9周目	0°	64.3	34	0			
	90°	65.1	34	0			
	180°	65.8	34	0			
	270°	66.6	34	0			
10周目	0°	67.4	35	3	10-11周間が保温材圧縮		
	90°	68.2	34	8	外径太 (配管ベローズ部)		
	180°	68.9	34	0			
	270°	69.7	34	0			
11周目	0°	70.5	34	25	外径太 (配管ベローズ部) , 10-11周間が保温材圧縮		
	90°	71.2	34	5	外径太 (配管ベローズ部)		
	180°	72.0	34	3			
	270°	72.8	33	0			
12周目	0°	73.5	34	0		EMFから20cm	
	90°	74.3	34	6		コールドレグから70cm	
	180°	75.1	34	0			
	270°	75.8	33	0		EMFから70cm	
13周目	0°	76.6	33	3			
	90°	77.4	33	3			
	180°	78.2	33	2			
	270°	78.9	34	0			
14周目	0°	79.7	33	10	縦配管上部		
	90°	80.5	33	5			
	180°	81.2	32	10			
	270°	82.0	33	0			

ファイバの位置	温度測定装置からの距離(m)	温度(℃) [接触式 温度計]	光ファイバの浮き (mm)	配管保温材の施工状態	隣接する機器・配管	備考 (熱電対位置)
15周目	0°	82.8	32	0	縦配管上部	
	90°	83.7	32	10		
	180°	84.5	31	0		
	270°	85.3	32	0		
16周目	0°	86.2	33	8		
	90°	87.0	33	5		
	180°	87.8	32	0		
	270°	88.7	33	0		
17周目	0°	89.5	33	4		15-16周間にハンガ
	90°	90.3	33	0		
	180°	91.2	32	15		
	270°	92.0	32	20		
18周目	0°	92.8	33	7	外径太 (配管ベローズ部)	17-18周間にハンガ2本
	90°	93.7	33	0		
	180°	94.5	32	45		
	270°	95.3	32	20		
19周目	0°	96.2	32	13		17-18周間にハンガ
	90°	97.0	32	2		
	180°	97.8	31	2		
	270°	98.7	31	0		
20周目	0°	99.5	32	0		
	90°	100.3	31	0		
	180°	101.2	31	5		
	270°	102.0	31	0		
21周目	0°	102.8	31	5	外径太 (配管ベローズ部)	TC-1
	90°	103.7	31	0		
	180°	104.5	30	2		
	270°	105.3	30	40		
22周目	0°	106.2	31	17		21-22周間にハンガ
	90°	107.0	30	5		
	180°	107.8	30	0		
	270°	108.7	30	5		
23周目	0°	109.5	31	5		
	90°	110.3	30	0		
	180°	111.2	30	0		
	270°	112.0	30	6		



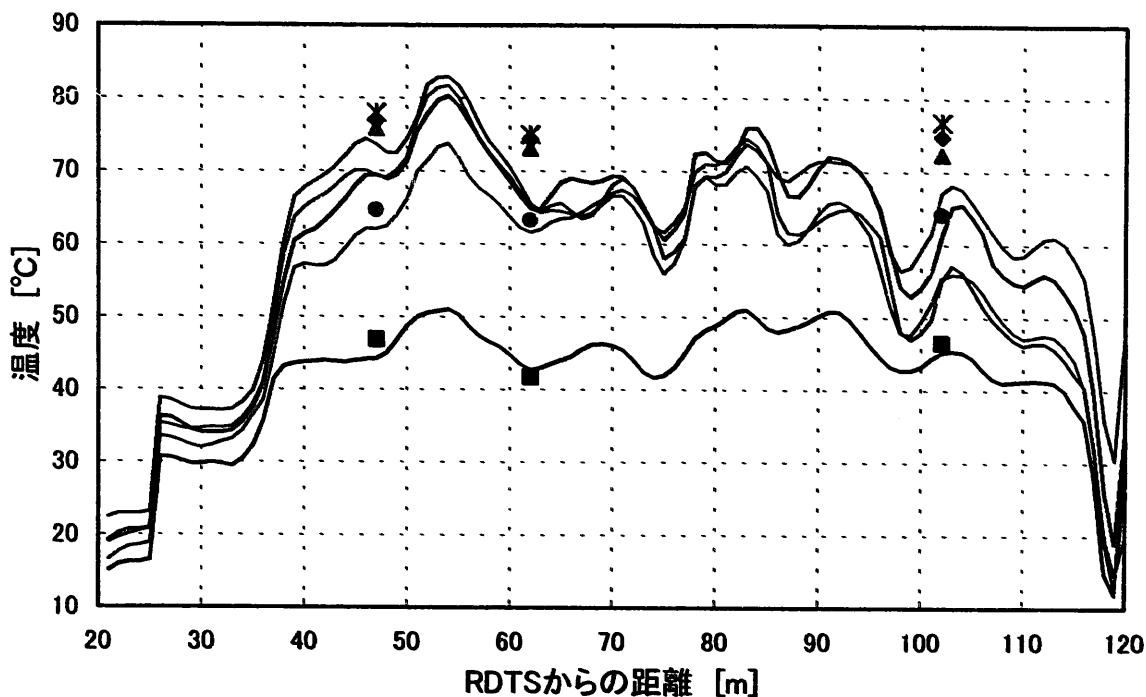
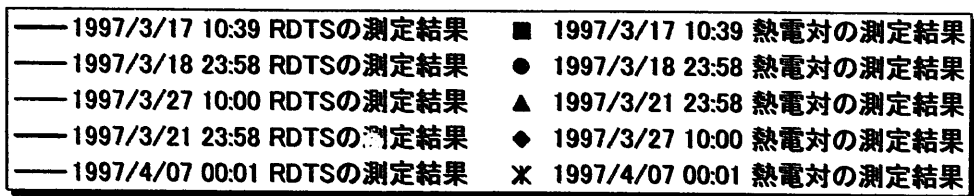


図 4-1 第 30 運転サイクル出力上昇時の温度分布

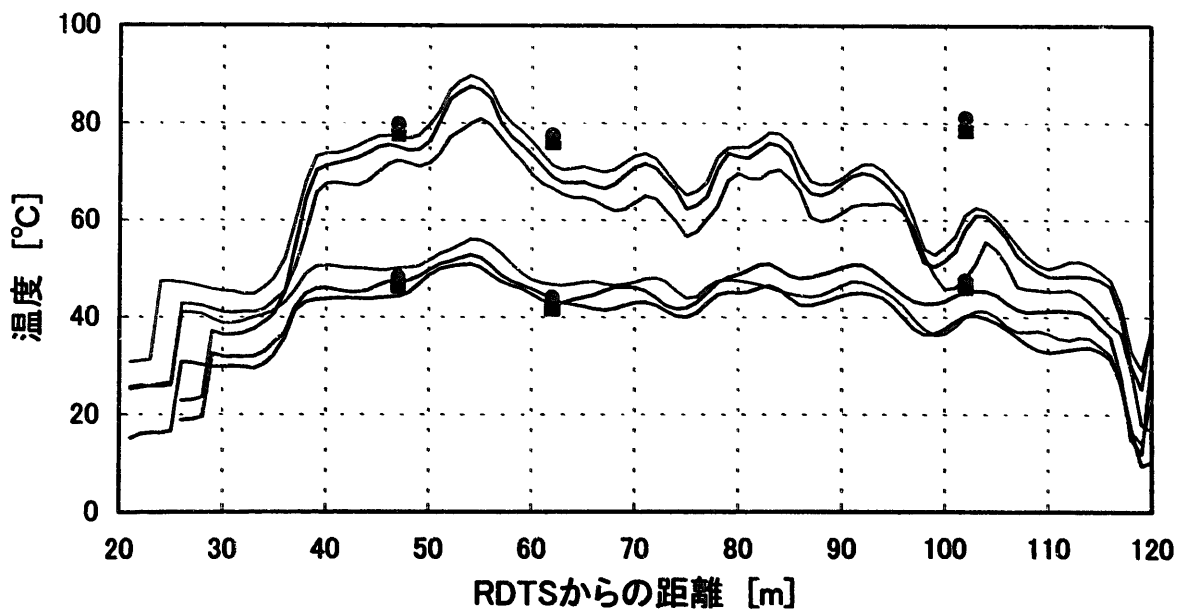
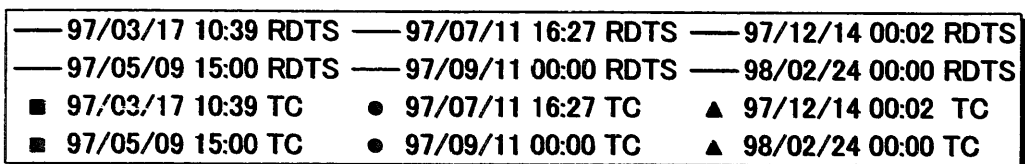


図 4-2 各運転サイクル(第 30~32 サイクル)起動前、及び停止直前の温度分布



— TC-1での熱電対の測定温度 — TC-3での熱電対の測定温度  
 — TC-1でのRTDSの測定温度 — TC-3でのRTDSの測定温度

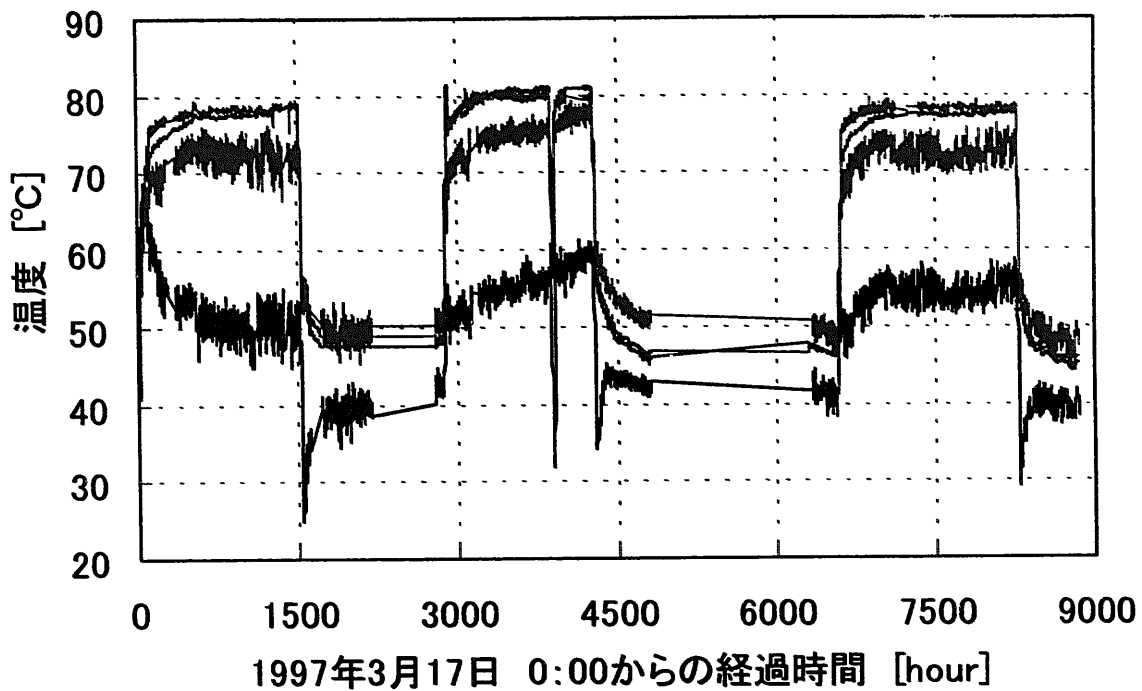


図 4-3 TC-1 及び TC-3 位置における熱電対と RTDS の測定温度の変化 [第 30~32 サイクル]

— TC-1での熱電対とRTDSの測定温度の差 — TC-3での熱電対とRTDSの測定温度の差

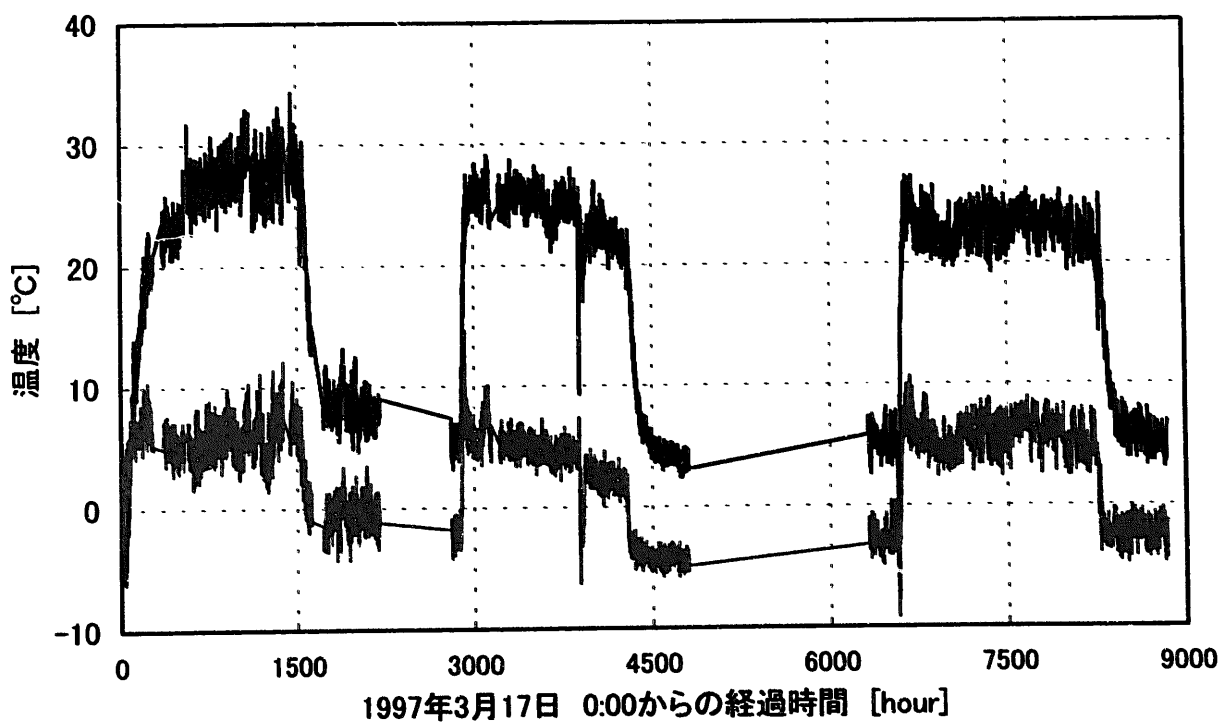


図 4-4 TC-1 と TC-3 位置における熱電対と RTDS の測定温度の差 [第 30~32 サイクル]

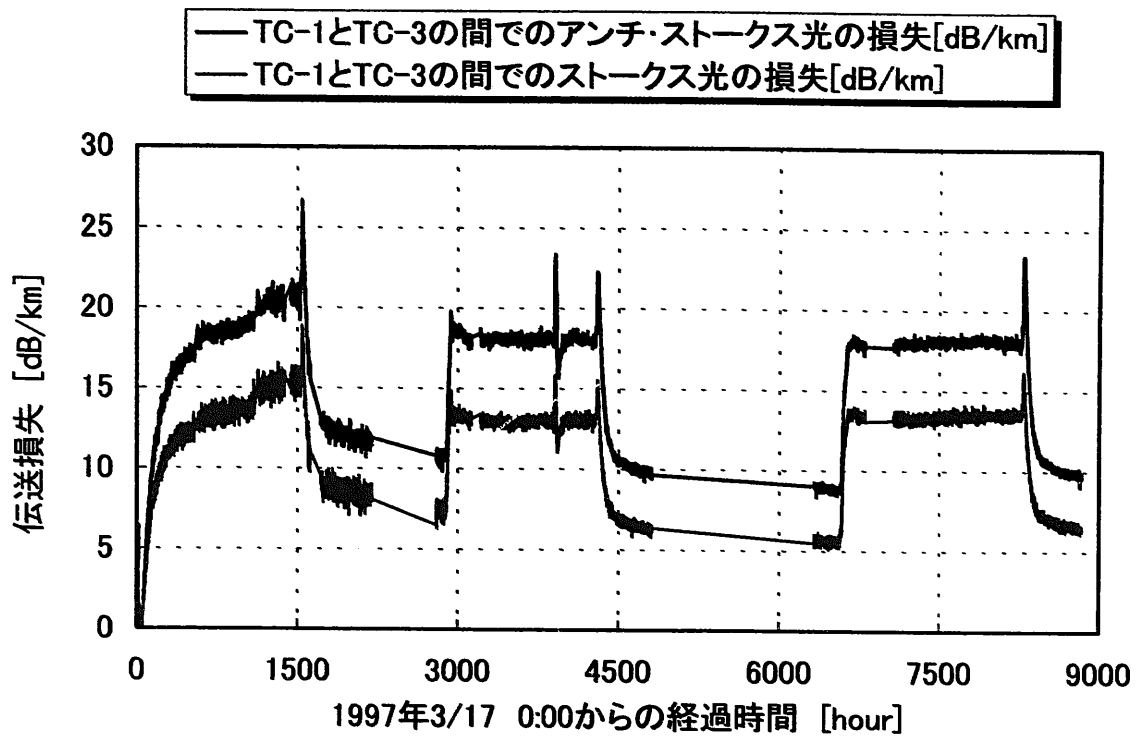


図 4-5 TC-1 と TC-3 の間のストークス光とアンチストークス光の伝送損失

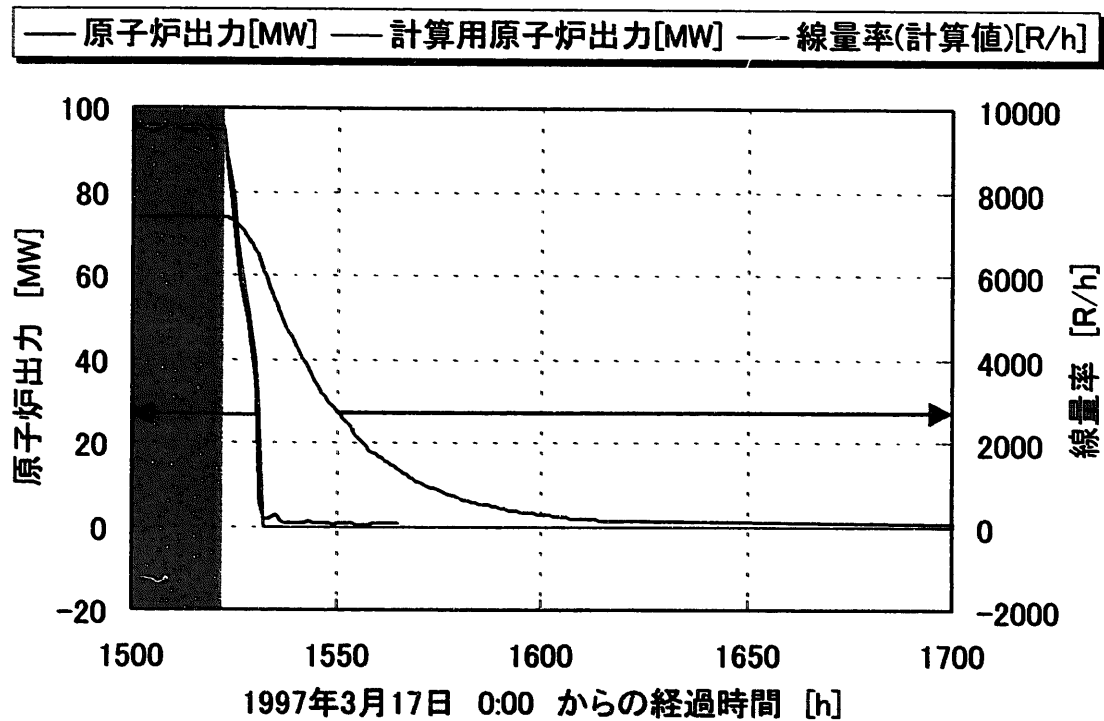


図 4-6 第 30 サイクル運転停止時の原子炉出力と線量当量率の関係

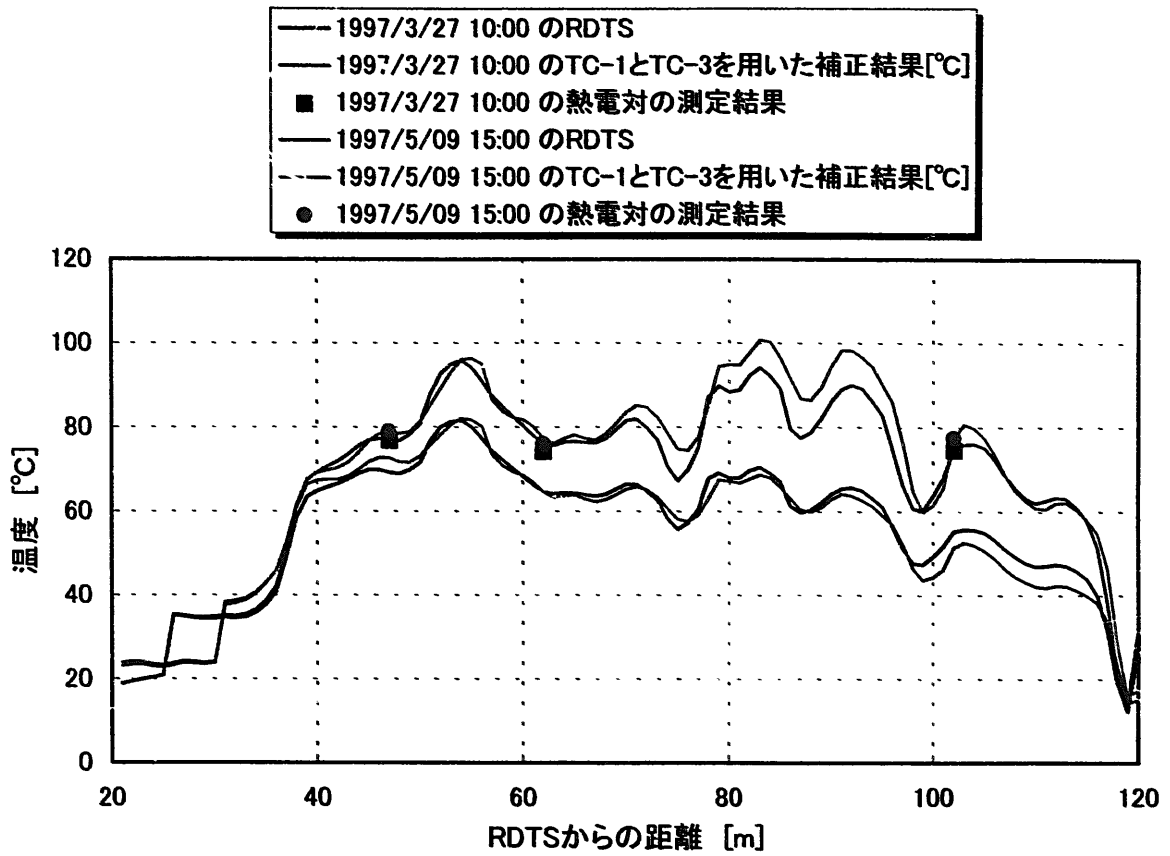


図 4-7 伝送損失一定の仮定をした温度補正結果

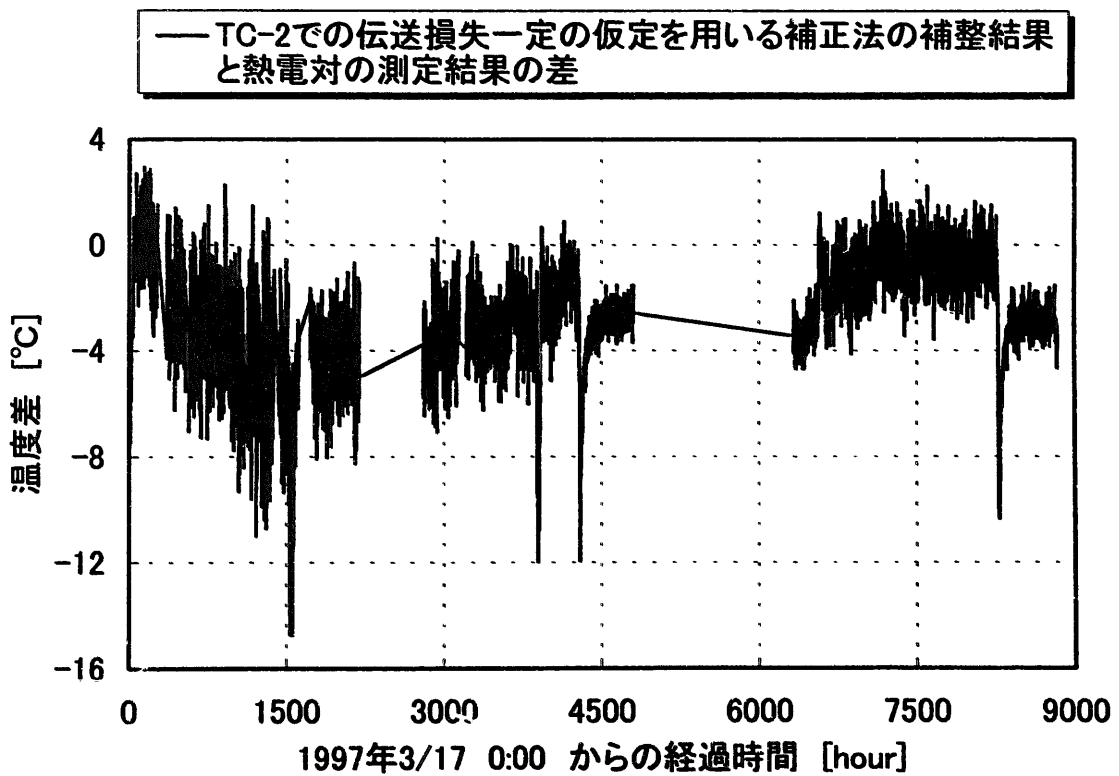


図 4-8 TC-1,TC-3 の熱電対を用いた伝送損失一定の仮定による温度補正の結果と TC-2 熱電対の温度との差

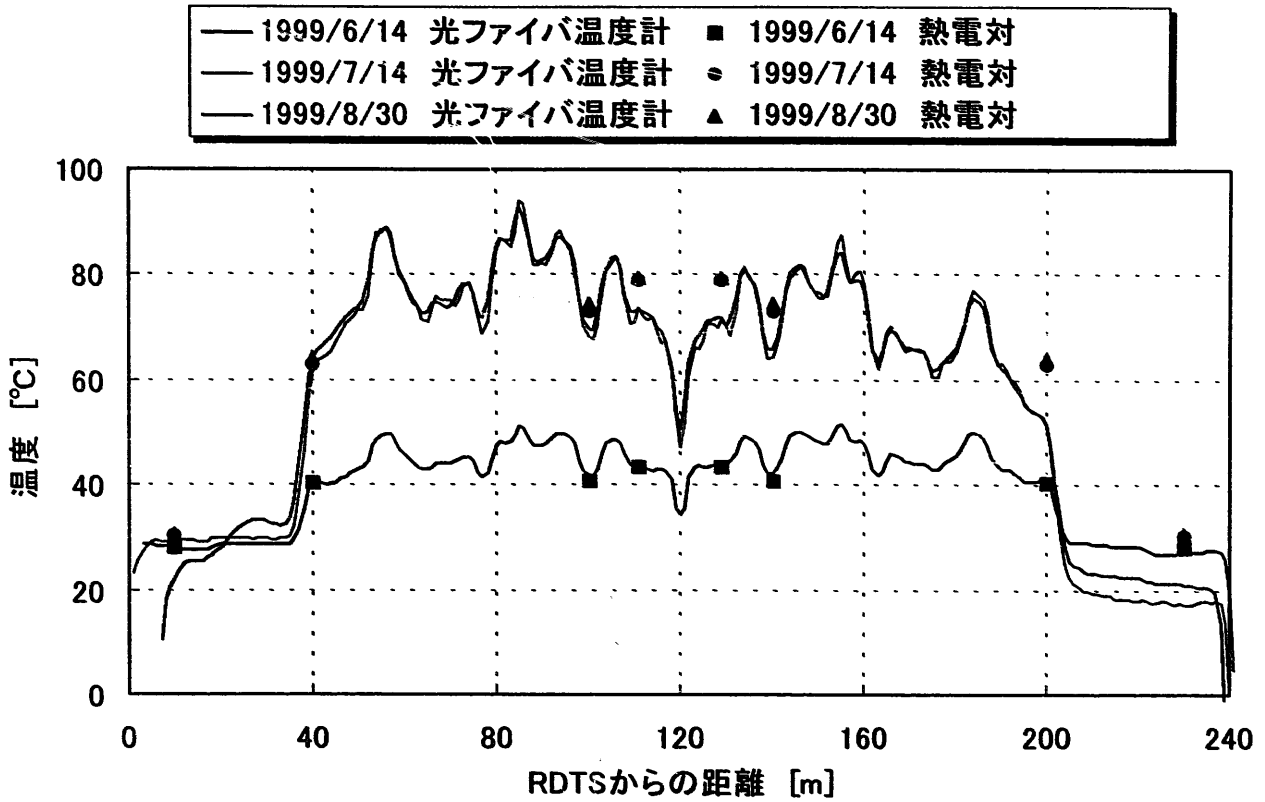


図 4-9 第 33 サイクル出力上昇前と出力上昇後、停止直前の RDTs による温度測定結果

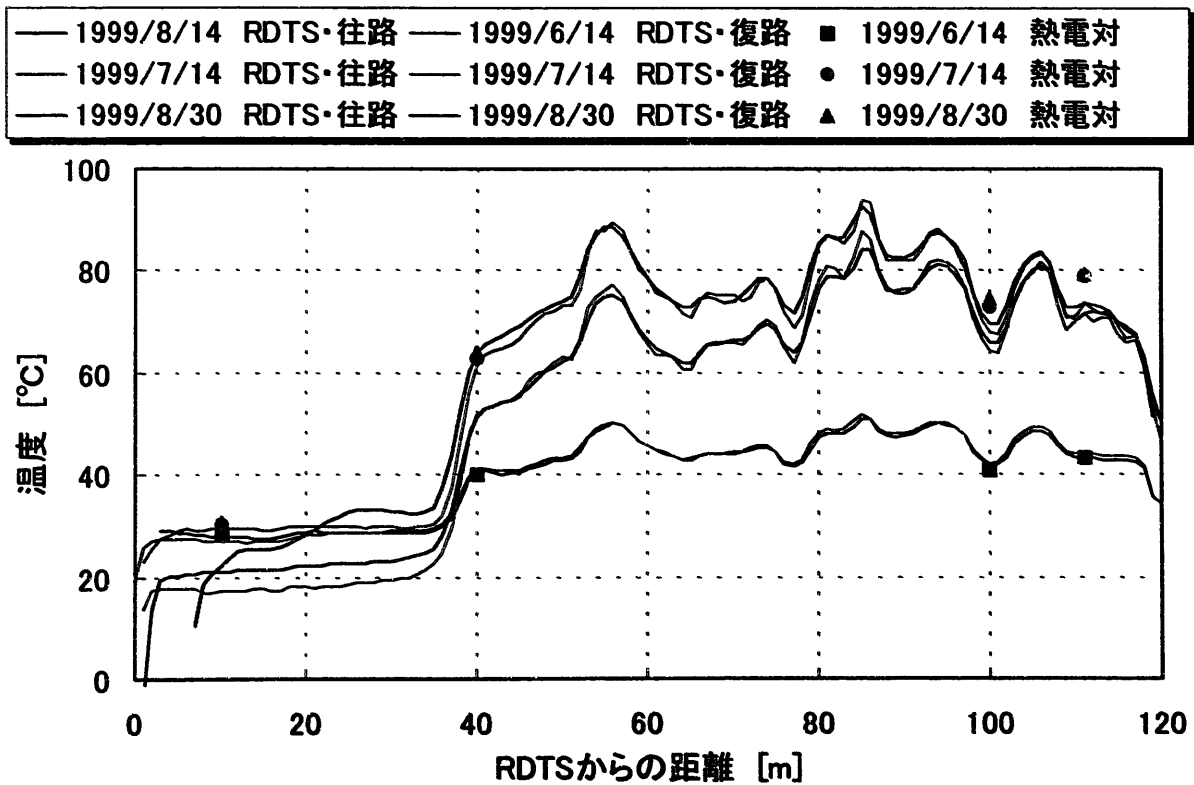


図 4-10 第 33 サイクル出力上昇前と出力上昇後、停止直前の RDTs による温度測定結果 (折り返し表示)

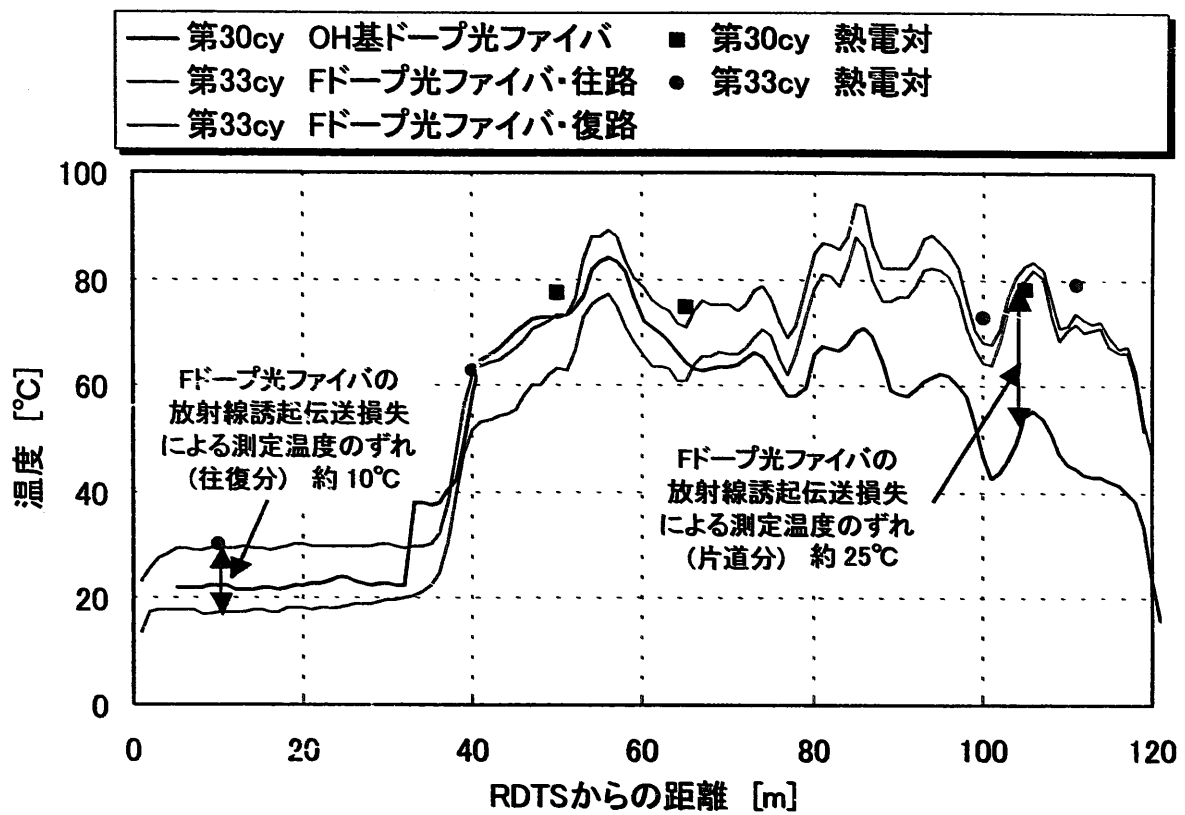


図 4-11 フッ素ドーブ光ファイバと OH 基ドーブ光ファイバの温度分布比較

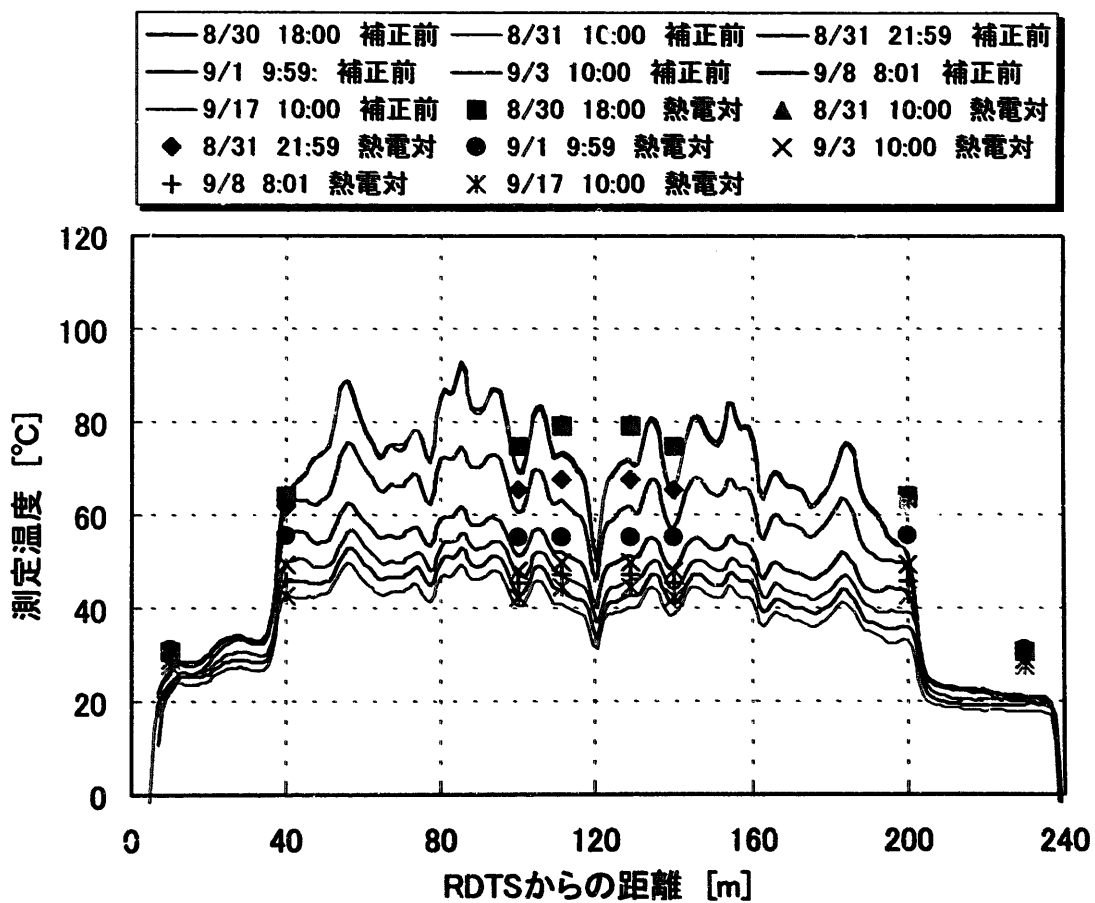


図 4-12 第 33 サイクル出力降下時における温度分布

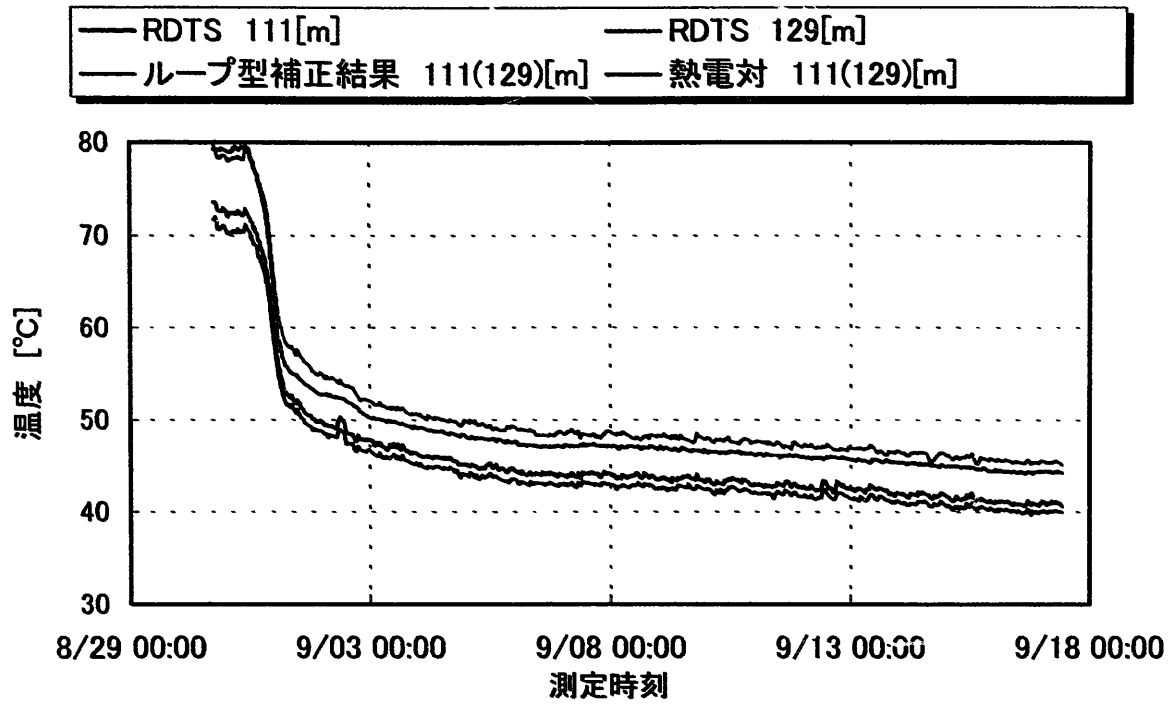


図 4-13 第 33 サイクル出力下降時における RDTS(往路・復路)と熱電対による温度測定結果、及びループ型補正法による補正結果 [RDTS から 111m の位置]

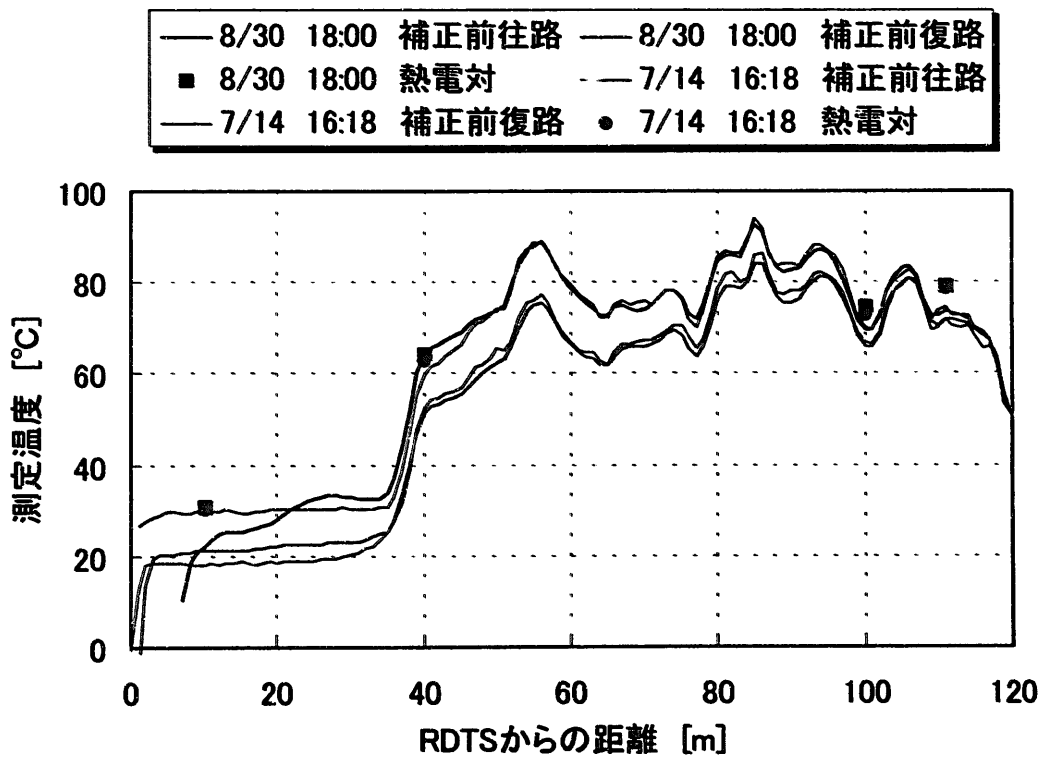


図 4-14 RDTS と熱電対による温度測定結果 [第 33 サイクル原子炉停止後 17 日目及び原子炉起動前]

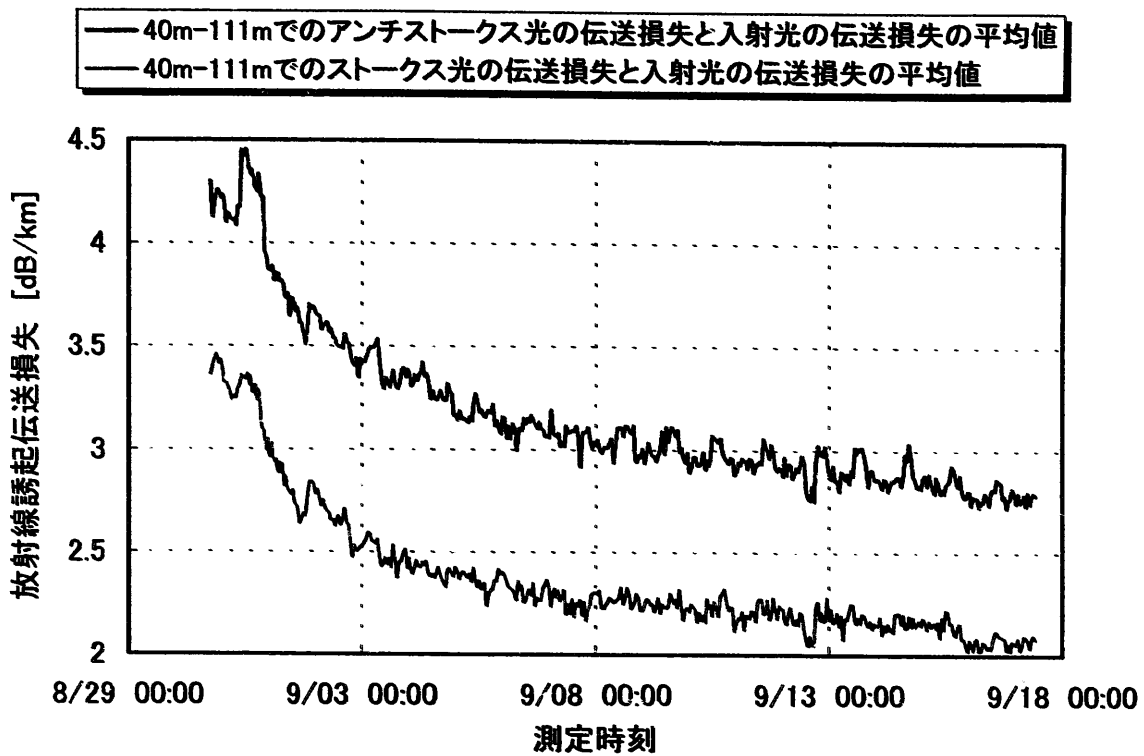


図 4-15 RDTS から 40~111m の間でのアンチストークス光とストークス光の損失の時間変化

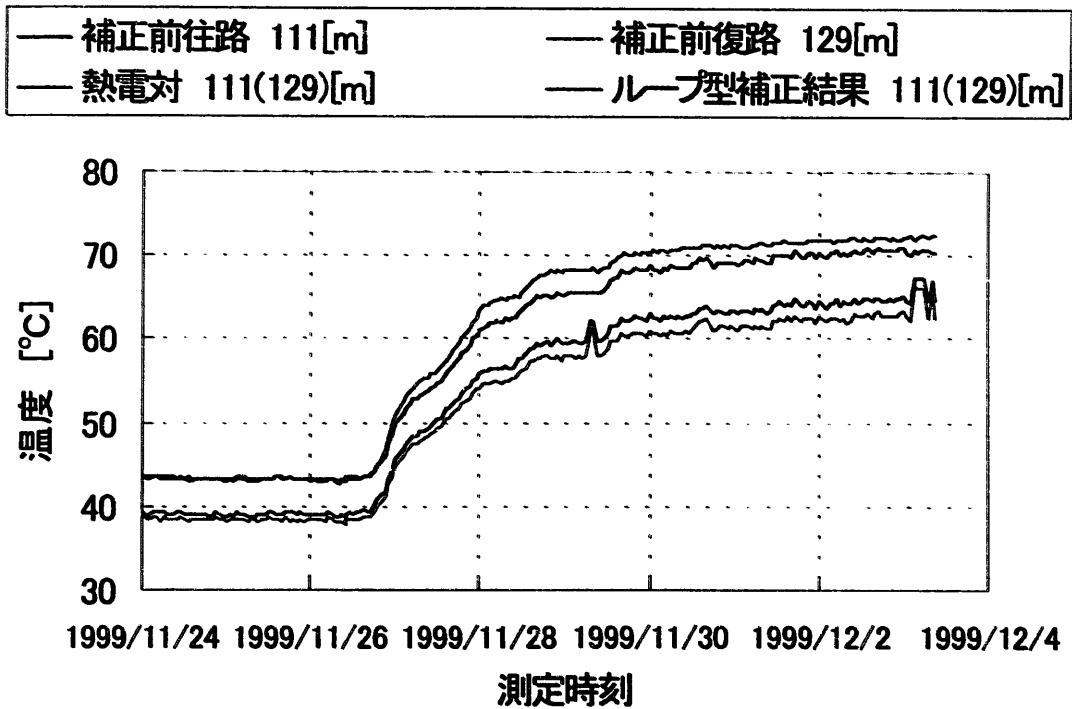


図 4-16 第 34 サイクル中の 111(129)m 位置における熱電対と RDTS による温度の経時変化

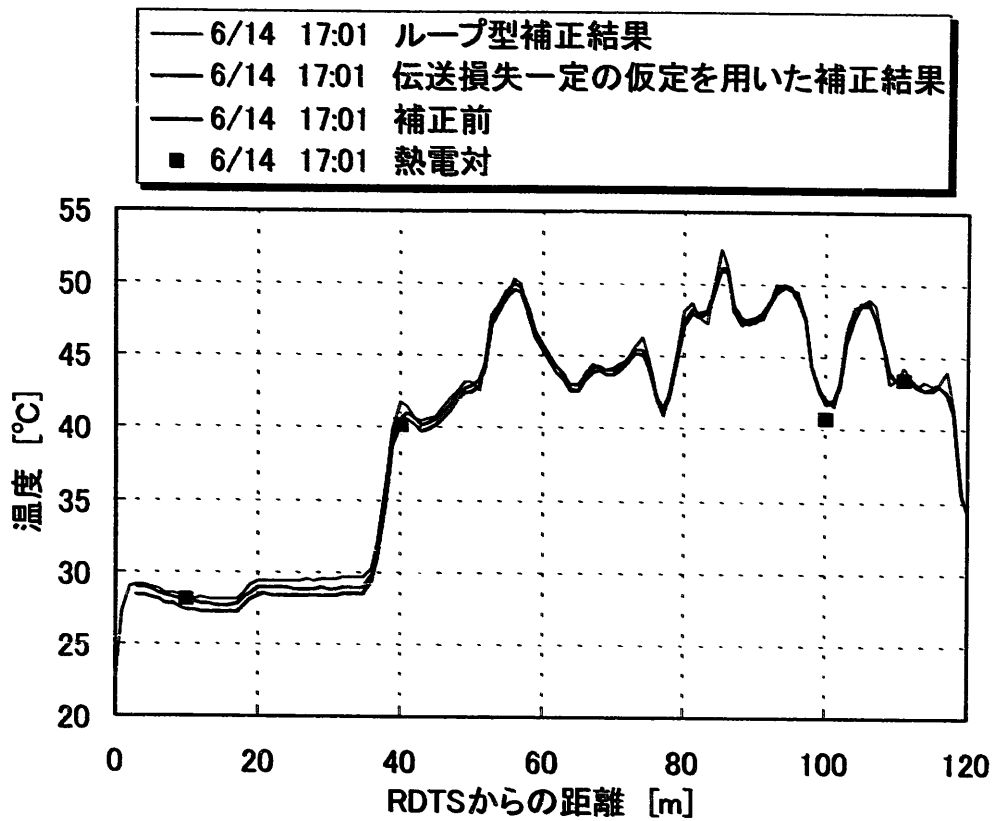


図 4-17 RDTs と熱電対による温度測定結果、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる補正法による補正の結果 [第 33 サイクル出力上昇前]

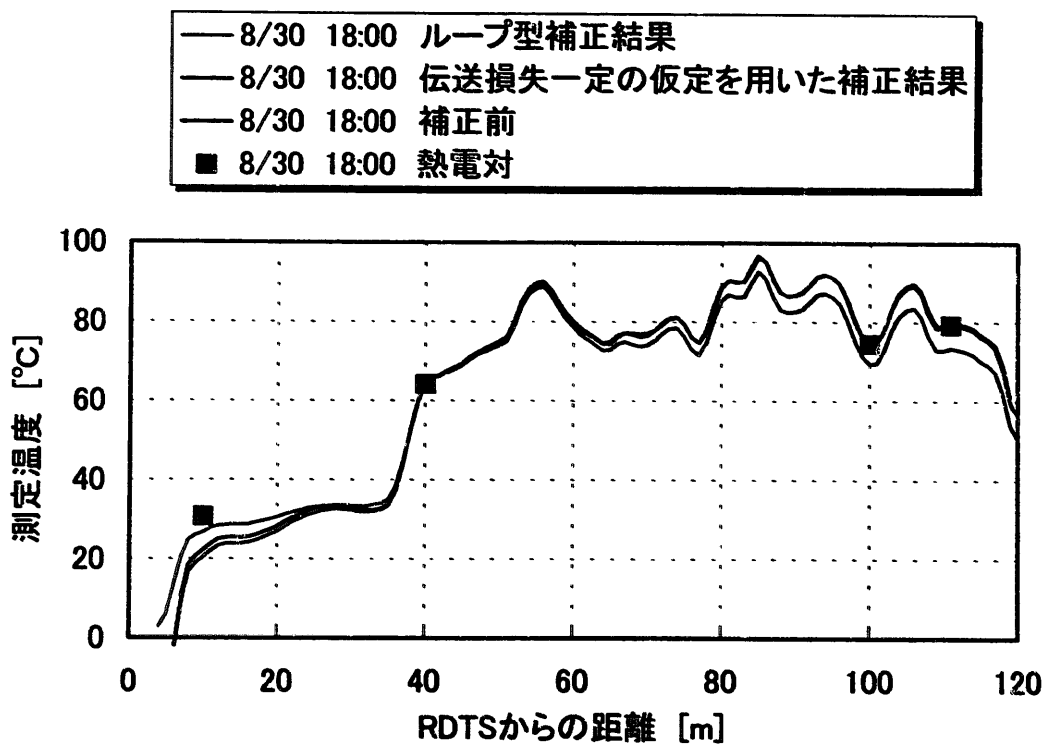


図 4-18 RDTs と熱電対による温度測定結果、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる補正法による補正の結果 [原子炉停止前(出力上昇後 68 日目)]



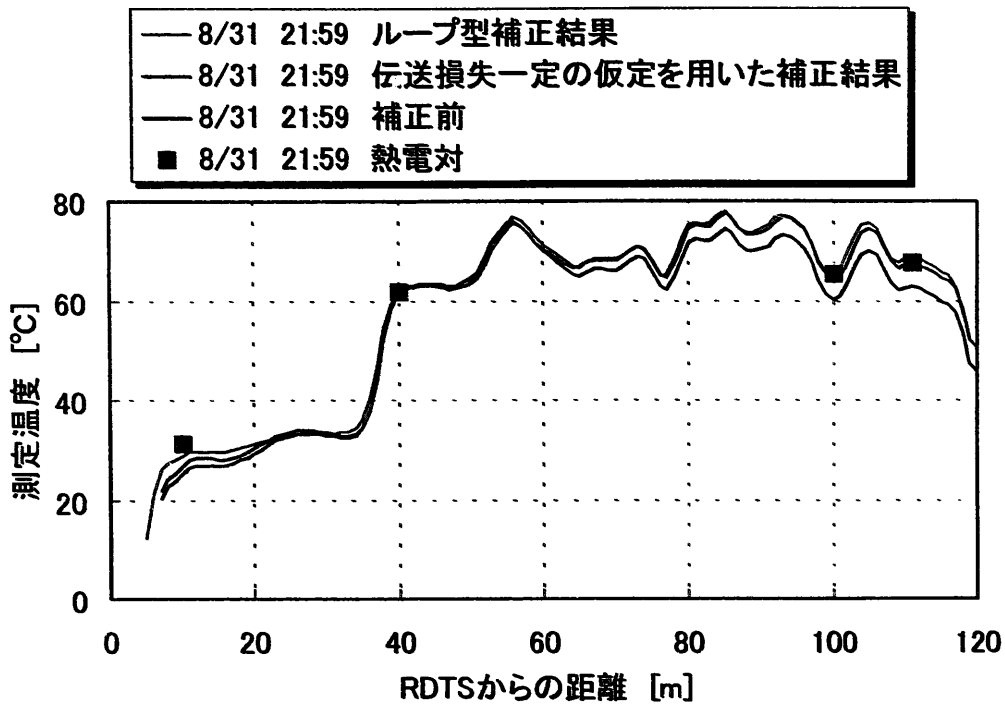


図 4-19 RDTS と熱電対による温度測定結果、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる補正法による補正の結果 [第 33 サイクル原子炉停止後の系統降温時]

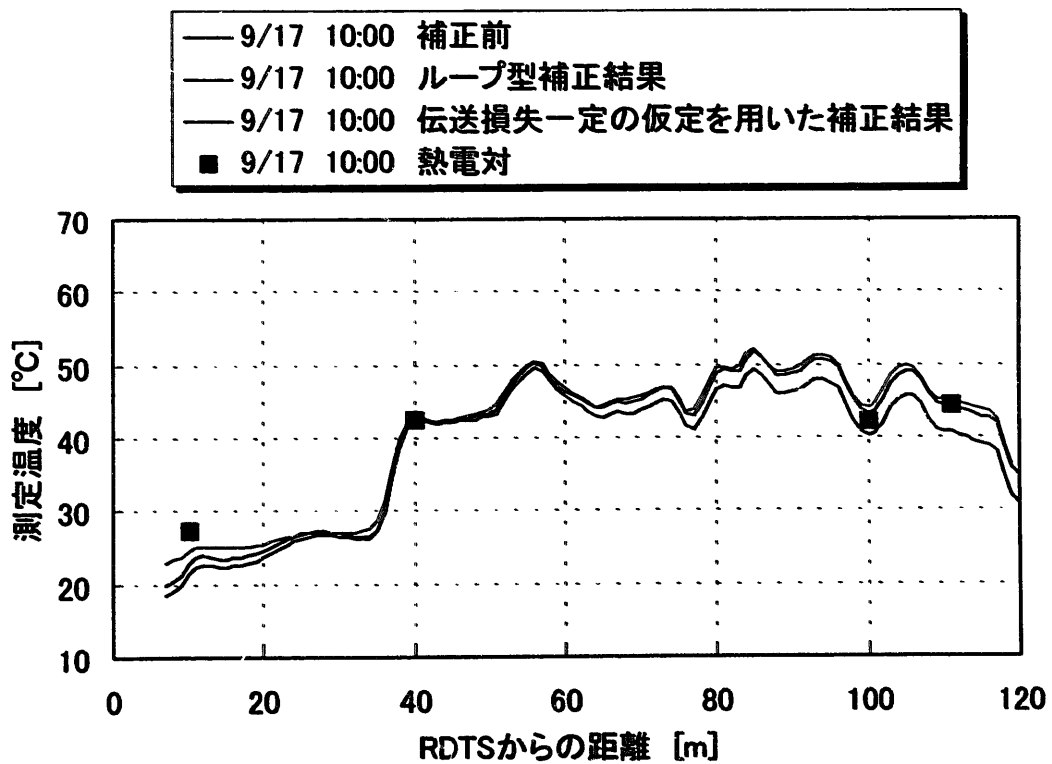


図 4-20 RDTS と熱電対による温度測定結果、及び、ループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる補正法による補正の結果 [第 33 サイクル原子炉停止後 17 日目]

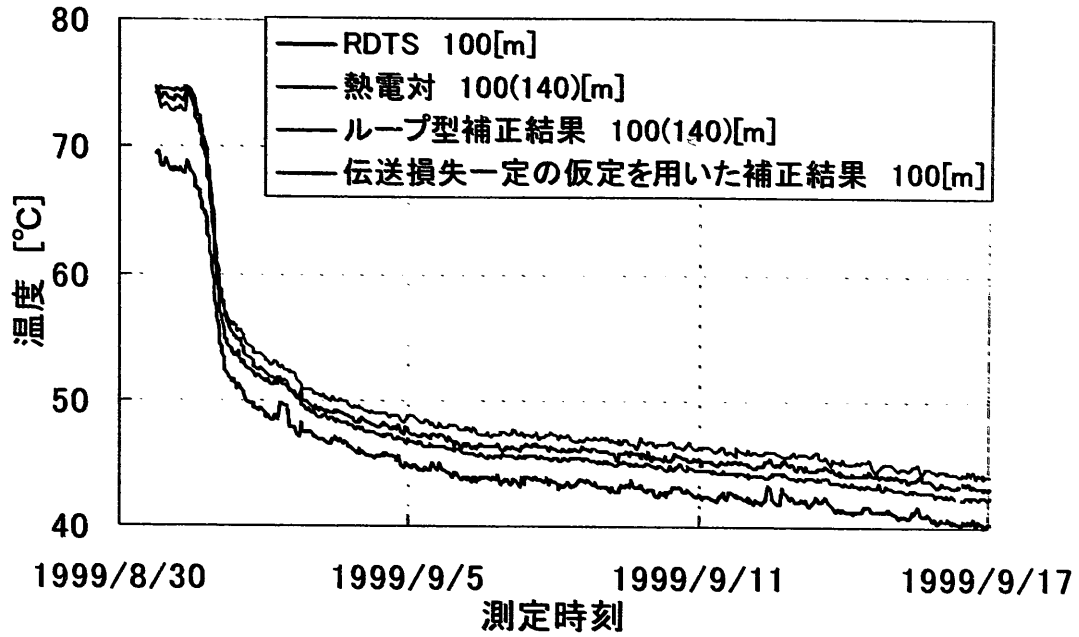


図 4-21 RDTS と熱電対による温度測定結果、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる補正法による補正の結果 [第 33 サイクル出力降下時における 100m 位置]

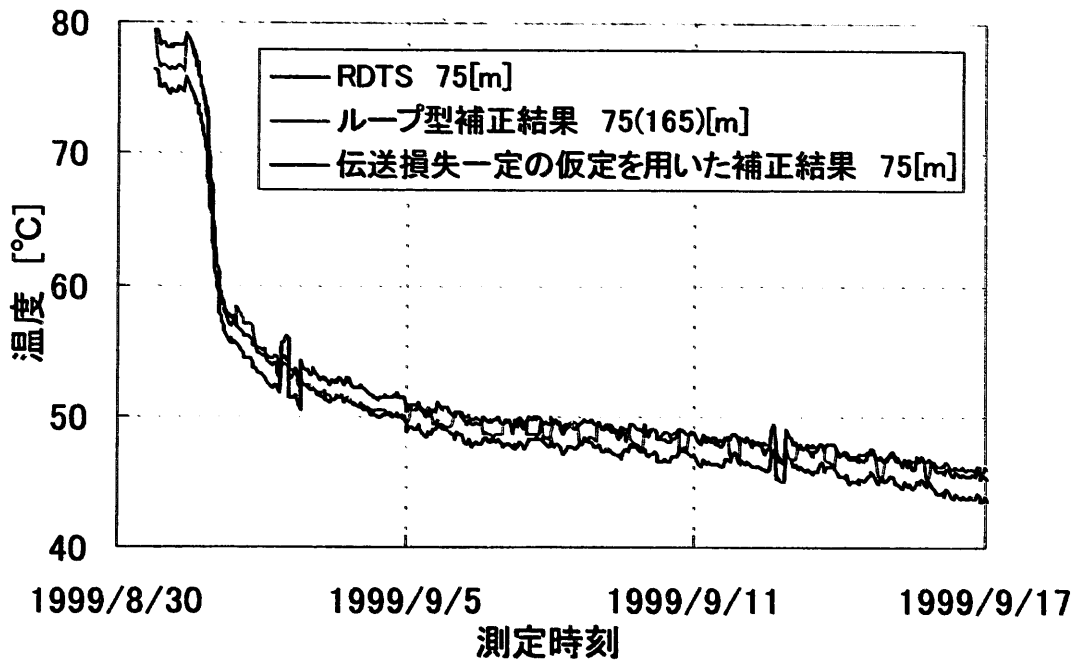


図 4-22 RDTS と熱電対による温度測定結果、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる補正法による補正の結果 [第 33 サイクル出力降下時における 75m 位置]

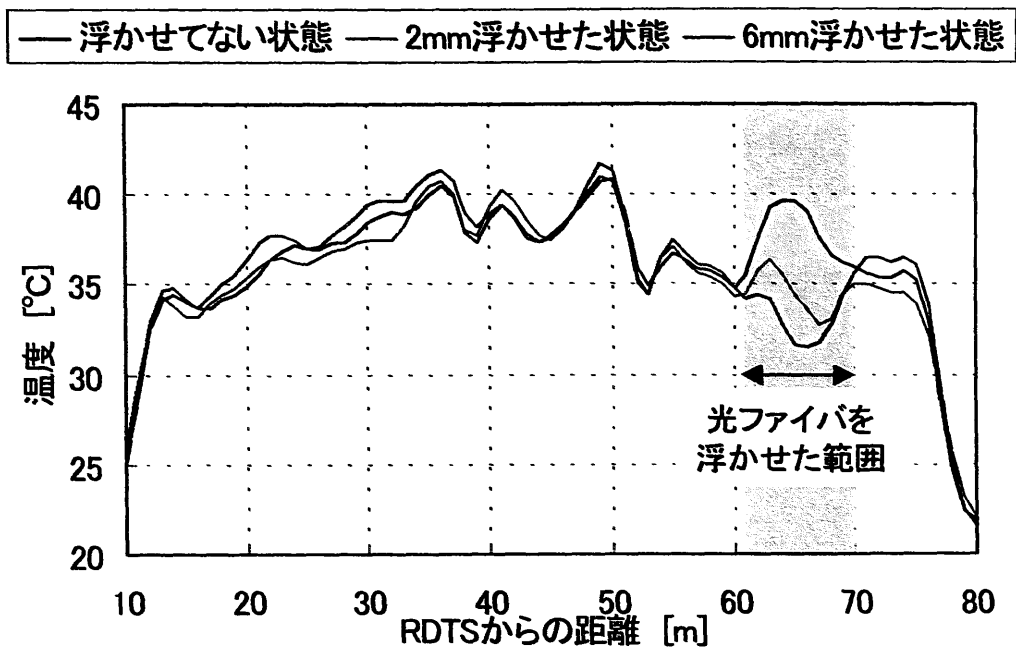


図 4-23 光ファイバと配管の間隙と測定温度との関係 (2次系)

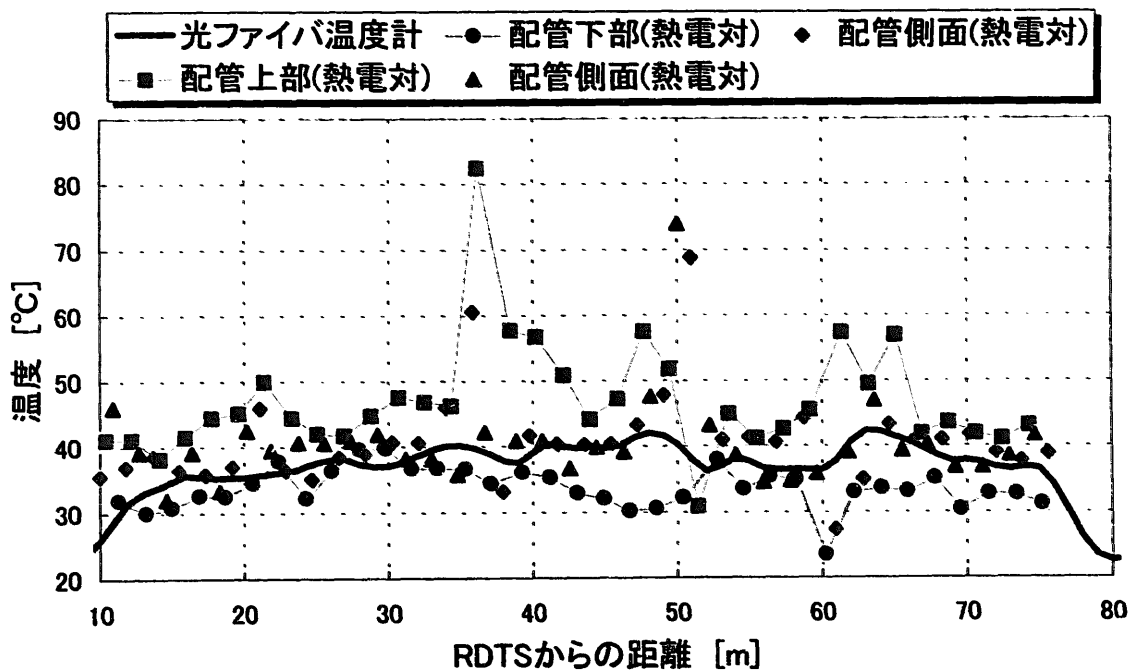


図 4-24 配管の位置と測定温度との関係 (2次系)

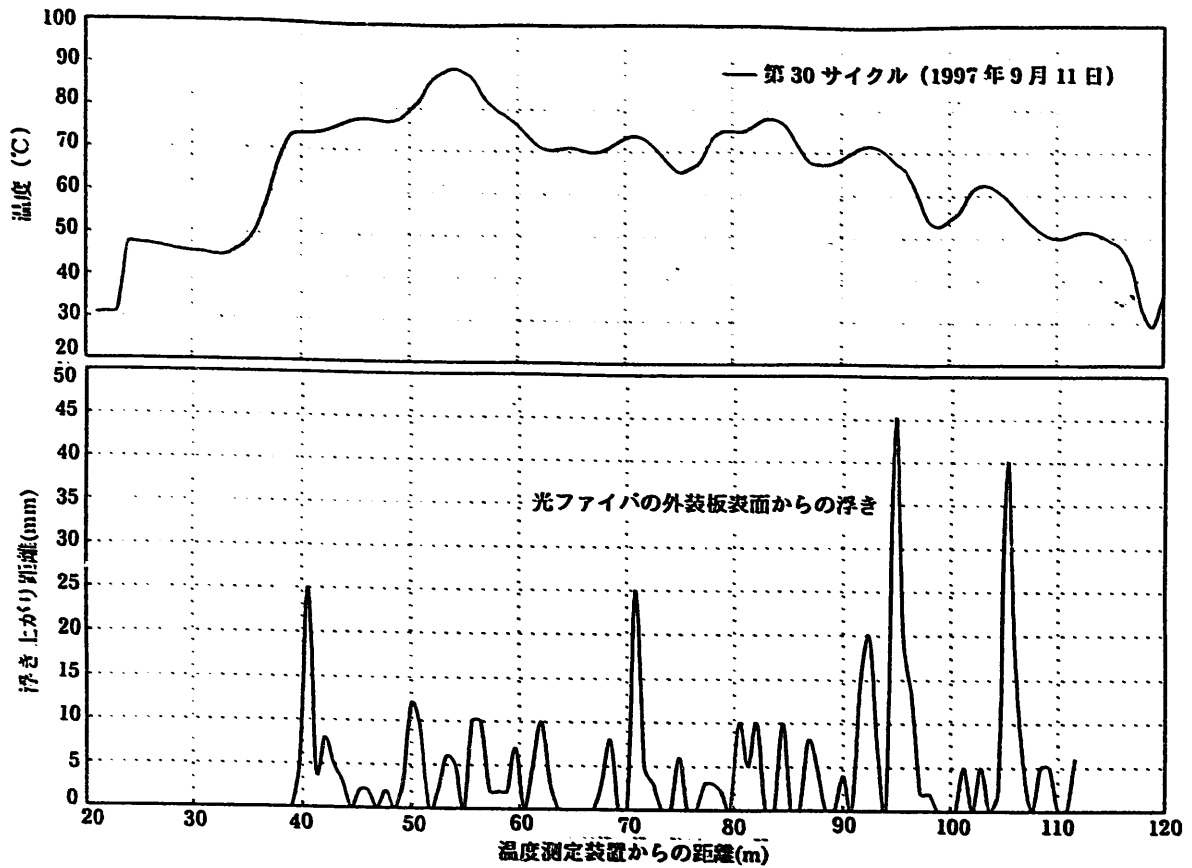


図 4-25 光ファイバの配管外装板表面からの浮き上がり距離と原子炉運転中の光ファイバ温度分布との関係

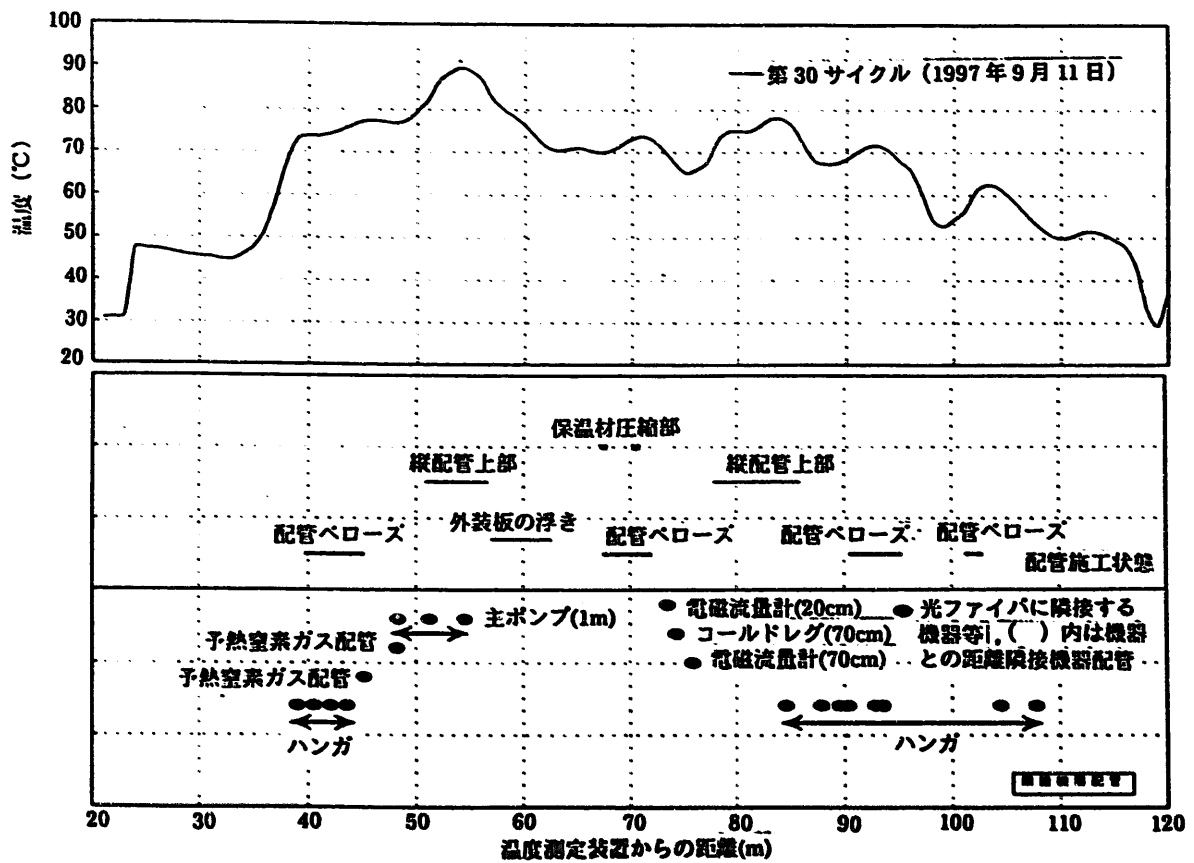


図 4-26 配管及び保温材の施工状態

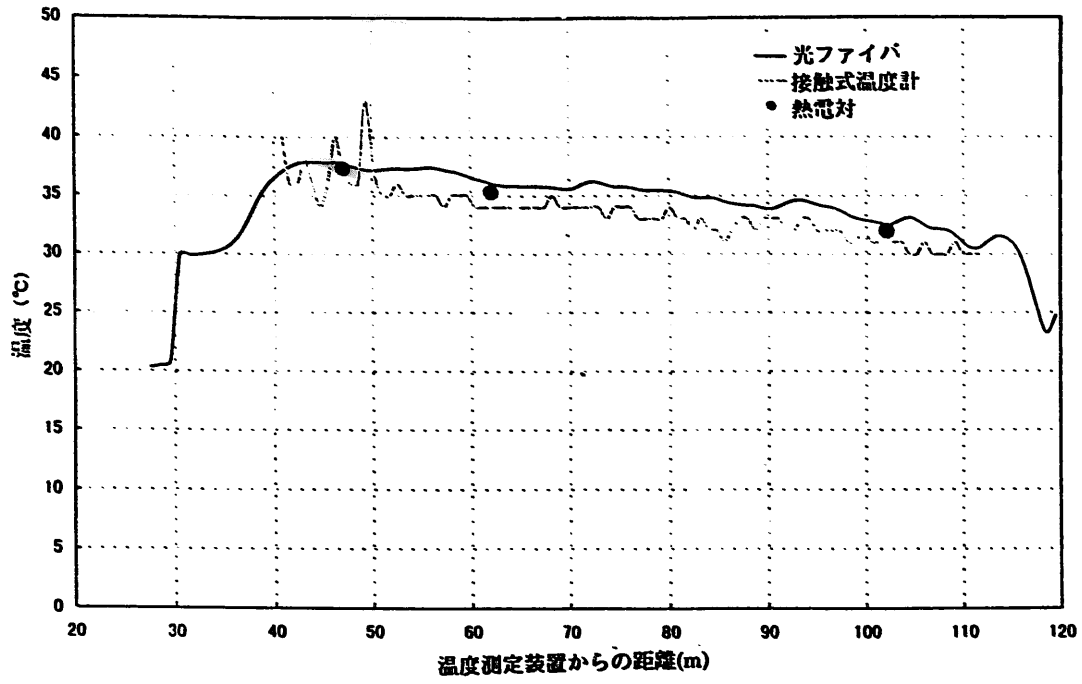


図 4-27 第 12 回定検中の RDTS、熱電対、及び接触式温度計によるファイバの表面温度の測定結果

## 5. おわりに

光ファイバセンサの中の温度センサについて、高速炉プラントへの適用性を評価するために、高速実験炉「常陽」の一次冷却系配管領域に光ファイバを敷設し、長期照射による影響の評価、放射線誘起誤差の補正方法の検証・評価を行った。

その結果、原子炉起動後の光ファイバの放射線誘起伝送損失の増加現象により、測定される温度分布にずれが生じた。しかし、積算照射線量  $8 \times 10^3 [\text{C/kg}] (3 \times 10^7 [\text{R}])$  に及ぶ連続測定において、ある一定の時間を経過すると光ファイバに発生する欠陥の生成と消滅のバランスが取れ、放射線誘起伝送損失が一定となることで、この温度のずれも一定となる傾向を示した。この温度のずれは、ループ型補正法や伝送損失一定の仮定を用いる補正法を用いることにより除去でき、フッ素ドープ光ファイバを用いた結果では、両補正法共に、測定した全期間を通して熱電対の温度と 1~2 度の差でよく一致し、両補正法の有効性を確認することができた。また、この試験で測定された温度分布には周期性が見られたが、これは配管及び保温材の施工状態が影響したものと考えられる。

フッ素ドープ光ファイバを用いた測定結果と OH 基ドープ光ファイバを用いた測定結果を比較すると、フッ素ドープ光ファイバの放射線誘起伝送損失は、OH 基ドープ光ファイバの約 1/4 程度であり、フッ素ドープ光ファイバが OH 基ドープ光ファイバに比べて耐放射線性に優れている事が確認された。

以上の結果から、高速炉等の放射線環境下にあっても RDTS は十分に適用可能であることが確認された。

## 6. 今後の課題

今回の試験では、測定の対象を「常陽」一次系配管外装板表面（断熱材の外側）としたため、系統温度約 500℃に比べると光ファイバの温度は 120℃以下と低い温度での測定となった。しかし、実際に、漏洩や各種プロセス量等の監視センサとして RDTS を使用する場合には、外装板表面ではなく二重配管表面や機器表面に直接敷設することも考えられ、この場合、敷設する光ファイバもこの温度に耐えるものでなければならない。現状では、この様な高温環境での光ファイバの適用例は少なく、さらに、200℃を越えるような環境での放射線誘起伝送損失の測定例はほとんど無い。<sup>142)</sup> よって、高温環境下に適用するためには、光ファイバの被覆材の耐熱性、300℃を超える高温での放射線誘起伝送損失の挙動について確認しておくことが必要である。

## 参考文献

- [1] K. Ogawa, Y. Ozawa, et al. HITACHI CABLE REVIEW No. 9 (August 1990) pp.21~26
- [2] 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, Nov. 1996, pp132-143
- [3] 小川勝徳, 小沢保夫, 川神裕志 他「光ファイバ温度レーダーの開発」、日立電線、No.9、1990、pp.7-12
- [4] 森田洋右, 山本哲, 福地佳介, 川神裕志 「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
- [5] 森田洋右, 山本哲, 福地佳介, 川神裕志 「光ファイバ温度分布センサの照射効果 (II)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-93-166
- [6] 特許出願公開番号 特開平 7-218354
- [7] 高橋康夫, 大曾根利光 他「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
- [8] 「東海第二発電所 光ファイバ温度監視装置 FOTMS」、日本原子力発電株式会社パンフレット
- [9] 塩田孝夫「分布型光ファイバセンサ」、応用物理学会 第 3 回光波センシング研究会、LST3-20 pp.133-140
- [10] 坂東直人、井川耕司 他「光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ーシステム」、応用物理学会 第 3 回光波センシング研究会、LST3-22 pp.149-155
- [11] Long, D.A. "Raman Spectroscopy" McGraw-Hill International Book Company, 1977.
- [12] 小川勝徳, 小沢保夫, 川神裕志, 筒井輝明 他「光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
- [13] 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 年
- [14] 「図解・光デバイス辞典」オプトロニクス社、1996 年
- [15] J.P. Darkin, "The distributed fiber optic sensing handbook", IFS Publications, United Kingdom, 1990
- [16] E. J. Friebele et al., "Color centers in glass optical fiber waveguide", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.61, 1986
- [17] K. Nagasawa et al., "Gamma-ray-induced absorption bands in pure-silica-core fibers", Japan. J. Appl. Phys., Vol.23, No.12, 1984, pp.1261-1266
- [18] D.L.Griscom et al., "Radiation-induced defects in glasses", Phys. Rev. Lett., Vol.71, No.7, 1993, pp.1019-1022
- [19] 牟田健一 他、「純粋石英における生成欠陥の制御」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-85-136、1985
- [20] 日比野喜典 他、「GeO<sub>2</sub> ドープ石英ガラスにおける GeO<sub>2</sub> 濃度に依存した欠陥形成機構」電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-87-133、1987
- [21] 角田恒巳 「光ケーブルの耐放射線性について」、電気学会原子力発電研究会資料、NE-85-12、1985
- [22] 角田恒巳、若山直昭 他、「光ファイバの耐放射線性(X)」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-91-124、1991
- [23] 平島利洋 他、「石英コアファイバの耐放射線性(V)」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-87-139、1983
- [24] 西村真雄 他、「光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
- [25] 中居久典、徳永利秀 他、「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
- [26] 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
- [27] 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, Feb. 1998, pp50-58

- [28] K. Nagasawa et al., "Improvement of radiation resistance of pure silica core fibers by hydrogen treatment", Japan. J. Appl. Phys., Vol.24 No.9, 1985, pp.1224-1228
- [29] 御前俊和 他、「石英コアファイバの耐放射線性(Ⅲ)」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-85-141、1985
- [30] K. Sanada et al., "Radiation resistance of fluorine-doped silica-core fibers", J. Non-Cry. Solides, Vol.179, 1994, pp.339-344
- [31] T. Shikata et al., "Behavior of radiation-resistant optical fibers under irradiation in a fission reactor", J. Nucl. Mat. Vol.212-215, 1994, pp.421-425
- [32] T. Kakuta et al., "Development of In-core Monitoring System Using Radiation Resistant Optical Fibers", 1994 IEEE Conf. Rec., Vol.1, NSS11-11, pp.371, 1994
- [33] 角田恒巳、若山直昭 他、「耐放射線光ファイバについて」、JAERI-conf 95-002, p.28 1995 年
- [34] 速水弘之 他、「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
- [35] 平島利洋 他、「石英コアファイバの耐放射線性(Ⅲ)」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-85-133、1985
- [36] 唐沢繁、羽鳥喜紀 他、「光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
- [37] D.L.Griscom et al., " $\gamma$  and fission-reactor radiation effects on the visible-range transparency of aluminum-jacketed, all-silica optical fibers", J. Appl. Phys., Vol.80, No.4, 1996, pp.2142-2155
- [38] D.L.Griscom et al., "Fast-neutron radiation effects in a silica-core optical fiber studied by CCD-camera spectrometer", Appl. Opt., Vol.33, No.6, 1994, pp.1022-1028
- [39] D.L.Griscom et al., "Radiation hardning of pure-silica-core optical fibers by ultra-high-dose  $\gamma$  -ray pre-irradiation", J. Appl. Phys., Vol.77, No.10, 1995, pp.5008-5013
- [40] S. Suzuki, K. Iizaka and et al., "Measurement and calculation of radiation sources in the primary coolant systems of JOYO", Proc. Int. Symp. Theory and Practices in Radiation Protection and shielding, Vol.2, 1987, pp. 363-376.
- [41] 住野公造、市毛 聡 他、高速炉プラントへの光ファイバ温度計適用試験、PNC PN9430 98-008
- [42] 黒沢芳宣、徳永利秀、橋場圭一 他、「高温用光ファイバの開発」、日立電線、 No.10、 1991、 pp.31-34