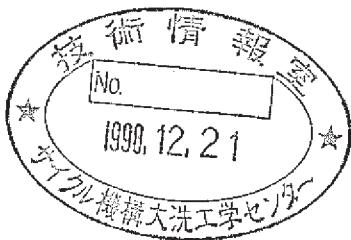


区分変更	
変更登録番号	12345
決裁年月日	平成10年7月31日

高速炉プラントへの光ファイバ温度計適用試験



1998年9月



動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

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。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松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, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



社内資料
PNC TN9430 98-008
1998年9月

高速炉プラントへの光ファイバ温度計適用試験

住野公造*、市毛聰*、深見明弘**、前田幸基*、鈴木惣十*

要旨

光ファイバ温度計（ラマン散乱型温度分布センサー）は、光ファイバに入射したレーザー光の後方散乱光のうち、2つのラマン散乱光の強度比が散乱点の温度に依存する特性を利用したもので、長距離に亘る温度分布を迅速かつ簡便に精度良く測定することができるシステムである。

本技術の高速炉プラントの1次系機器・配管への適用性を評価するために、高速実験炉「常陽」1次主冷却系配管の外管の外装板表面に約100mの光ファイバを50cmピッチで螺旋状に巻き付け、100MW第30～32サイクルの定格運転3サイクルに亘り温度分布測定試験を実施した。また、この試験で見られた周期性を持った温度分布の原因を検討するため、主に施工状況による温度測定への影響に着目し、2次主冷却系配管を用いた補助試験を実施した。

この結果、以下の成果を得た。

- (1) 高速炉実機の放射線環境下における最大積算照射線量 3×10^7 Rまでの光ファイバ温度計の使用実績を得るとともにその間の温度データを取得した。
- (2) γ 線照射による伝送損失が積算照射線量に対し一定となる特性を有する等、放射線環境下での光ファイバの特性を明らかにした。
- (3) 複数の校正用熱電対の測定データを用いた伝送損失補正法が適用できることを確認し、光ファイバ温度計により高速炉1次主冷却系配管の外管の外装板表面の温度分布を ± 3 ℃の精度で測定できることを実証した。
- (4) 光ファイバや保温材の施工条件が、温度測定に与える影響の程度を把握した。

* 大洗工学センター 実験炉部 技術課

** 原子力システム(株)



OFFICIAL USE ONLY
PNC TN9430 98-008

September, 1998

Applicability Test of the Raman Distributed Temperature Sensor for FBR plant instrumentation

Kozo SUMINO*, Satoshi ICHIGE*, Akihiro FUKAMI**
Yukimoto MAEDA* and Soju SUZUKI*

ABSTRACT

The Raman Distributed Temperature Sensor (RDTS) based on the Raman Scattering Phenomena in the optical fiber is a system, which can easily measure the accurate temperature distribution.

In order to evaluate the applicability of RDTS for FBR plant instrumentation, a temperature distribution measurement using RDTS was performed in the primary cooling system of JOYO. By using two optical fiber sensors, which were installed spirally around the primary piping, the temperature distribution on the primary piping was measured from the 30th through the 32nd duty cycle.

In addition, the same test was carried out in the secondary cooling system of JOYO in order to test the measurement data from the primary cooling system.

The main results were as follows;

- (1) The temperature data in the primary cooling system was acquired over 180EFPDs of operation at JOYO (accumulated dose : 3×10^7 R).
- (2) The characteristics of FTR in the high dose rate nuclear plant environment was confirmed.
- (3) The radiation induced temperature errors were calibrated successfully by using thermocouple readings. The accuracy of the temperature after calibration was approximately $\pm 3^\circ\text{C}$.
- (4) It was confirmed that different fiber and insulator settings on the piping cause temperature changes.

* Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Oarai Engineering Center

** Nuclear Engineering Service Incorporated

目次

1. 緒言	1
2. 光ファイバ温度計（R D T S）の概要	2
2.1 測定原理	2
2.2 システム構成	3
2.3 放射線誘起損失	4
3. 1次系での温度分布測定試験	7
3.1 試験装置の仕様	7
3.2 試験の実施	8
4. 1次系での温度分布測定試験結果	14
4.1 温度測定結果	14
4.2 伝送損失の算出	15
4.3 温度誤差の補正（損失補正法の適用）	16
4.4 フォトブリーチング効果	16
4.5 周期性を持つ温度分布の原因検討	17
5. 温度分布の原因検討のための2次系での補助試験	24
5.1 試験装置の仕様	24
5.2 試験の実施	24
5.3 試験結果	25
6. 今後の計画	30
6.1 放射温度計を用いた1次主冷却系配管外装板表面温度分布の現場調査	30
6.2 光ファイバ往復設置による損失補正法の適用性検討	30
7. 結言	32
8. 謝辞	33
9. 参考文献	34

図リスト

図 2.1	ラマン散乱光の発生メカニズムとラマンスペクトル	5
図 2.2	R D T S のシステム構成	6
図 3.1	1 次主冷却系配管（ホットレグ配管）の施工図	10
図 3.2	1 次主冷却系配管への光ファイバと熱電対の敷設概略図	11
図 3.3	光ファイバと熱電対の敷設状況	12
図 3.4	データ処理・収録装置の設置状況	13
図 4.1	光ファイバによる 1 次主冷却系配管外装板表面の温度分布測定結果 (100MW第 31 サイクル運転中)	19
図 4.2	光ファイバと熱電対による温度測定値の比較 (100MW第 30~32 サイクル)	20
図 4.3	TC-3 と TC-1 間の光ファイバの伝送損失の推移 (100MW第 30~32 サイクル)	21
図 4.4	フォトブリーチング効果の有無による温度測定値の比較	22
図 4.5	原子炉停止時の光ファイバによる温度分布測定値の推移	23
図 5.1	2 次主冷却系配管（コールドレグ配管）の施工図	27
図 5.2	2 次主冷却系配管外装板表面の温度分布と周辺機器等との位置関係	28
図 5.3	光ファイバと配管間の隙と温度の関係	29

1. 緒 言

光ファイバ温度計（R D T S : Raman Distributed Temperature Sensor）は、光ファイバに入射したレーザー光の後方散乱光のうち、2つのラマン散乱光の強度比が散乱点の温度に依存する特性を利用して温度分布を測定する装置であり、-200～500℃の範囲について最大 20km の連続した温度分布を最高精度±1℃、位置分解能約 1 m で 1～2 分程度の時間応答特性により測定できる。R D T S は、受電・変電設備の温度上昇や蒸気配管の蒸気漏れの検知など一般プラントでの使用に加え、比較的 γ 線量率の低い P W R 原子炉格納容器内の雰囲気温度監視など原子力プラントにも使用され、その実績が積まれてきている⁽¹⁾⁽²⁾。

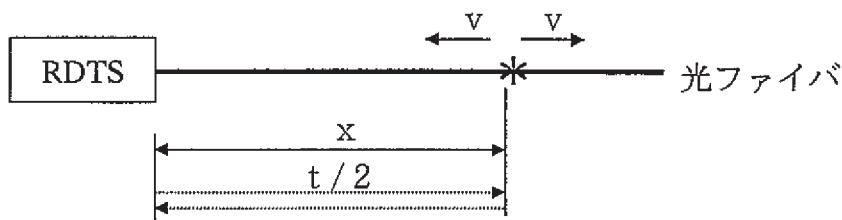
この技術を高速炉プラントの1次系機器・配管に適用するためには、冷却材ナトリウムからの γ 線照射に対する伝送損失（放射線誘起損失）を把握し、その補正手法を確立すると共に光ファイバの耐放射線性を評価する必要がある⁽³⁾。

これらの課題を解決するため、高速実験炉「常陽」1次主冷却系配管の外管の外装板表面に約 100m の光ファイバを 50cm ピッチで螺旋状に巻き付け、100 MW 第 30～32 サイクルの定格運転 3 サイクルに亘り温度分布測定試験を実施した。また、この 1 次主冷却系配管での測定試験で見られた周期性を持った温度分布の原因を検討するため、100MW 第 32 サイクルに 2 次主冷却系配管で光ファイバを用いた補助試験を実施し、光ファイバや保温材の施工状況による温度測定への影響を調査した。

2. 光ファイバ温度計 (R D T S) の概要

2.1 測定原理⁽⁴⁾

光ファイバに沿った温度分布を得るには、光ファイバ長手方向の各位置とその位置での温度の二つの情報が必要である。このうち、各点の位置は次の方法により求められる。光ファイバにレーザ光（光パルス）を入射するとこのレーザ光は、各通過位置で微弱な散乱光を生成しながら、真空中よりやや遅い約 $200 \text{ m}/\mu\text{s}$ の速度 v で光ファイバ中を伝搬していく。発生した散乱光の一部は、後方散乱光として再び $200 \text{ m}/\mu\text{s}$ の速度で入射端に戻ってくるので、下図に示すようにレーザ光を入射してから後方散乱光が戻ってくるまでの遅延時間 t からその後方散乱光の発生位置 x ($= v \cdot t / 2$) を知ることができる。



一方、各位置での温度は、後方散乱光に含まれるラマン散乱光強度から求められる。後方散乱光は入射レーザ光と同じ波長のレイリー散乱（弾性散乱）光とその前後の波長を持つラマン散乱光の主として 2 種類から成る。ラマン散乱光は入射光がガラスの格子振動と非弹性衝突することにより発生し、格子振動と入射光の間でエネルギーの授受が行われる。図 2.1 に示すように振動数 ν_0 の入射光がガラスの格子振動に作用すると、格子振動は瞬時、仮の高エネルギー状態に励起され、再び元の状態に戻るが、このとき初めに基底状態にあったものが 1 単位だけエネルギー準位の高い励起状態に落ちてくると、入射エネルギーは $h\nu$ (h : プランク定数、 ν : 格子振動数) 分減少し、この結果、散乱光の振動数は $(\nu_0 - \nu)$ となり、入射光より低くなる（ストークス光）。逆に、初め励起状態にあった格子振動が入射光との衝突過程で基底状態に落ちると、散乱光は $h\nu$ 分だけエネルギーが増加して、その振動数は入射光より高い $(\nu_0 + \nu)$ となる（アンチストークス光）。

光ファイバのラマンスペクトルを図 2.1 に示す。ガラスの固有振動数（波数で約 400 cm^{-1} ）だけシフトした位置にラマン散乱光の 2 成分であるストークス光とアンチストークス光のピークが確認できる。ラマン散乱光の強度は、レイリ

一散乱光の約 10^{-3} 程度、また入射レーザ光の約 10^{-8} 程度ときわめて微弱であるが、温度に依存するので温度情報源として優れている。アンチストークス光とストークス光の強度比は下式⁽⁵⁾で表わされ、入射レーザ光波長 ($\lambda = 1 / c \cdot \nu_0$) とガラスの組成 (入射レーザ光からのシフト波数 ν) が決まれば、理論的に温度だけに依存する。

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{(\nu_0 + \nu)^4}{(\nu_0 - \nu)^4} \exp\left(-\frac{h c \nu}{k T}\right)$$

Ia : アンチストークス光強度

Is : ストークス光強度

ν_0 : 入射光波数

ν : 格子振動波数

h : プランク定数 = 6.63×10^{-34} J・s

c : 光速 = 3.0×10^8 /屈折率 = 2.0×10^8 m/s

k : ボルツマン定数 = 1.38×10^{-23} J/K

T : 絶対温度

したがって、光ファイバ各点からの後方散乱光のうちラマン散乱光の2成分を分光した後、その強度を計測し、比をとることにより各点の温度を知ることができる。

2.2 システム構成

R D T S は、図 2.2 に示すように光ファイバセンサ部、計測部本体および温度分布の演算・表示を行うパーソナルコンピュータによって構成される。

レーザ光源 (パルス半導体レーザ、波長: 1047nm) からの光パルスを光ファイバに入射すると、このレーザ光によって発生した散乱光の一部が近い方から順次入射端へ戻ってくる。後方散乱のうち、ラマン散乱光の2成分 (Ia: 1003nm, Is: 1095nm (レーザ波長 1047nm の場合)) を光学フィルタでそれぞれ分離し、アバランシェフォトダイオード (A P D) で光電変換した後、增幅回路で増幅し、この2成分の強度を計測する。各出力は平均化処理装置内で、サンプリング間隔 10ns 毎にデジタル信号に変換され、各サンプリング遅延時間 (10ns) すなわち 1 m 每の各位置に対応したメモリ内に収納される。散乱光は光ファイバの各位置から連続して発生するため、このサンプリング間隔により光ファイ

バの位置分解能は決められる。

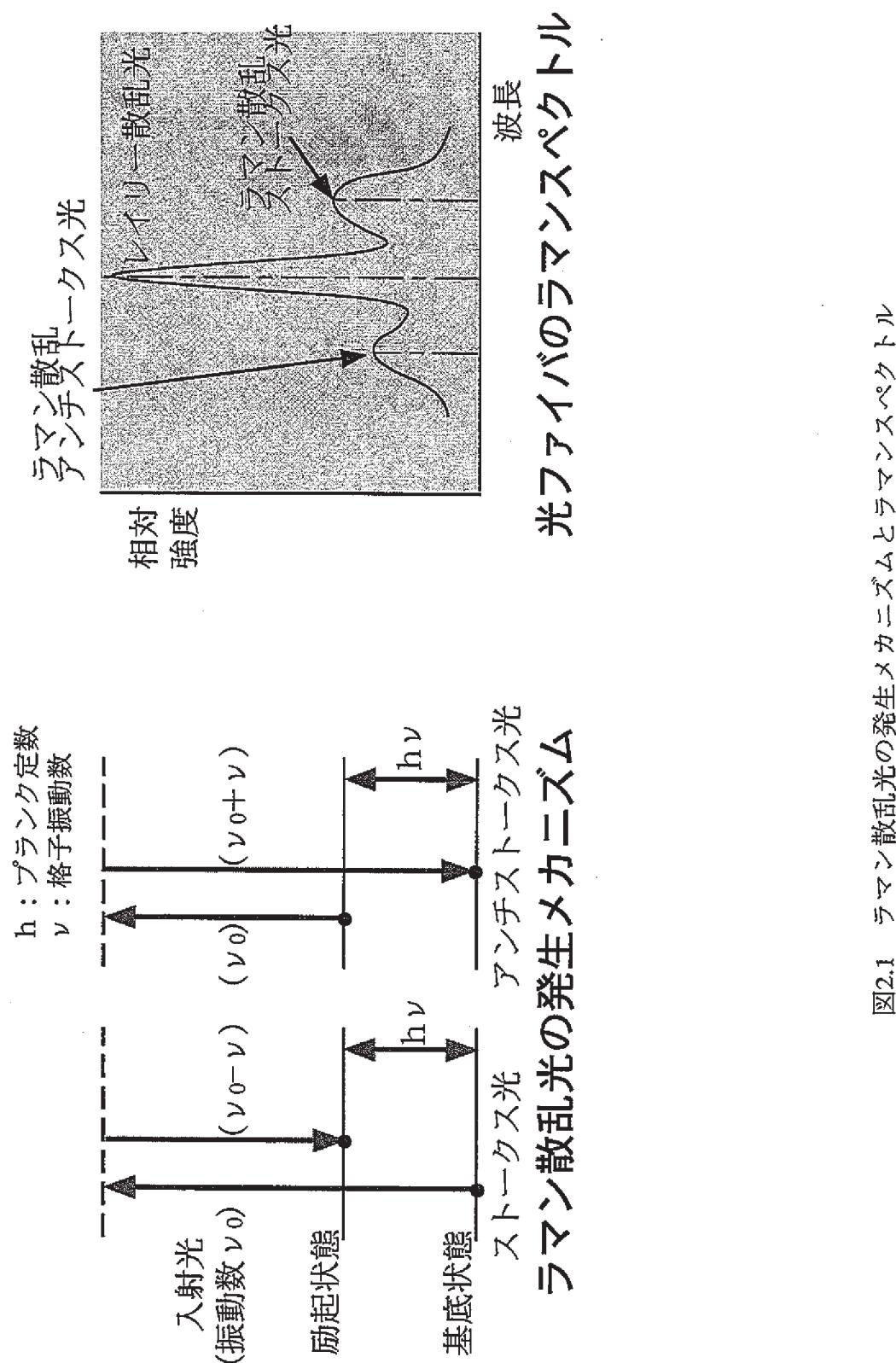
1パルス入射し、光ファイバからの後方散乱光がすべて戻り終わった後（光ファイバ長が100mの場合は約 $1\mu\text{s}$ ）、次のパルスが入射され、以降同様な処理が繰り返し行われる。各メモリのデータは処理が繰り返される毎に前回のデータと加算され、平均化される（1データのトータルサンプリング時間を100秒に設定することにより、約 1×10^8 ($100\text{sec}/1\mu\text{s}$) の光パルス分の信号を平均する）。この平均化処理を施すことにより、S/N比が改善され、非常に微弱なラマン散乱光の計測が可能になる。最終的に光ファイバの各位置に対応したアンチストークス光とストークス光の測定データを前式に従って演算し、光ファイバの伝送損失の補正を加えて、求める温度情報を得ることができる。

2.3 放射線誘起損失

光ファイバに放射線を照射した場合に生じる伝送損失は、光ファイバの種類、温度、線量当量率、線量当量、波長等に大きく依存する複雑な現象であり、欠陥の励起状態であるカラーセンターがその原因と考えられている。以下に伝送損失の一般的な特徴を示す。

- ・ アニーリングによる欠陥の消滅により、高温の方が伝送損失は小さくなる。
- ・ 中性子照射では伝送損失が直線的に増加するのに対し、 γ 線照射ではある値で一定となる傾向が見られる。
- ・ 波長800nm～1100nmの場合、長波長側の方が伝送損失は小さい。
(伝送損失の波長依存性)
- ・ γ 線照射では、照射後、伝送損失は時間経過と共にある程度回復する。
- ・ γ 線照射において、同一のファイバを2度照射した場合、2回目の照射による伝送損失は、はじめに照射した時の損失まで速やかに増加する。
- ・ レーザー光などを入射した場合、その光によって伝送損失が回復する。
(フォトブリーチング効果)

放射線環境下でR D T Sを使用した場合、伝送損失の波長依存性により、ストークス光とアンチストークス光の強度比が変化する。その結果、R D T Sの測定値と実際の温度の間に誤差が生じる。



センサ部
計測部

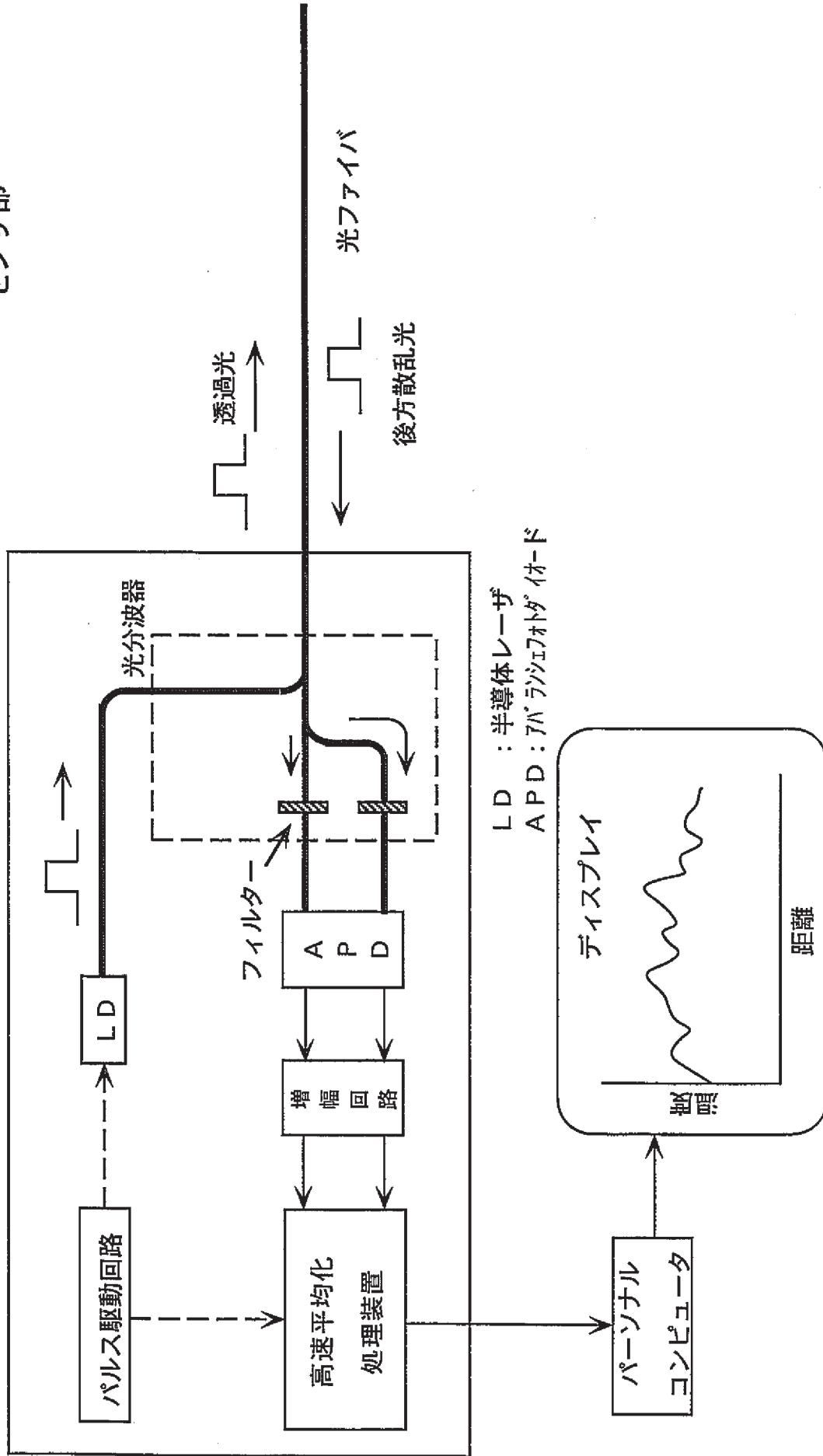


図2.2 RDTSSのシステム構成

3. 1 次系での温度分布測定試験

光ファイバの「常陽」1次主冷却系配管への敷設を平成9年2月に、同ファイバを用いた測定試験を「常陽」100MW第30,31および32サイクル（平成9年3月～平成10年3月）の定格運転3サイクルに亘り実施した。

3.1 試験装置の仕様

(1) 光ファイバ⁽⁶⁾⁽⁷⁾

光ファイバには、耐放射線用のステップインデックス（S I）型の光ファイバを用いた。S I型は一般通信用のグレーテッドインデックス（G I）型の光ファイバと異なり、ファイバコア部に屈折率分布を作る（光の軌道を少しずつ中心に向け、伝播時間差を減らす役目をする）ためのゲルマニウムがドープされていない。このためG I型に比べ位置分解能は悪くなるが、放射線環境下で不純物として作用する（欠陥となる）ゲルマニウムを使用していないことから、耐放射線性はG I型に比べ格段に優れている。また、高分解能を得るために、コア径が小さい（ $50\mu\text{m}$ ）のものを使用した。

被覆については、格納容器床下の環境（温度：～100°C、 γ 線量率：約 $7.2 \times 10^3 (\text{R}/\text{h})/100\text{MW}$ ）を考慮し、耐熱性および耐放射線性の高いポリイミドを使用し、また、外力に対する保護および取扱い易さからステンレス保護管付きとした。以下に仕様を示す。

- ・ステンレス保護管付きポリイミド被覆石英光ファイバ：約100m 2本
- ・ファイバコア部： $\text{SiO}_2 + \text{OH}(30\text{ppm})$ 、コア径 $50\mu\text{m}$ 、クラッド径 $125\mu\text{m}$
- ・ステンレス保護管：SUS304、外径2.4mm／内径2.0mm

(2) 校正用熱電対

校正用熱電対には、「常陽」で各種温度測定にも使用されているJIS K-type 0.75級4本（1本は床下雰囲気温度測定用）を使用した。

(3) R D T S

R D T Sには、伝送損失の波長依存性を考慮して入射光波長1047nmの日立電線F T R 110（Fiber Optic Temperature Laser Radar 110：ピーク出力10W、パルス幅10ns）を使用した。F T R 110の基本性能を次頁に示す。

レーザー波長	1047 nm
測定距離	3 km (最大 20km)
サンプリング間隔	1 m
位置分解能	~ 3 m (ファイバの種類に依存)
温度精度	± 1 ~ 4 °C
測定時間	90 s (最小 7 s)

(4) データ処理・収録装置

R D T S 用にパーソナルコンピュータ (NEC PC-9801)、熱電対用にペンレコーダと零接点補償器を使用した。

(5) フォトブリーチング用レーザー

フォトブリーチング効果（常時、光が入射されていることによる放射線誘起損失の低減効果）を評価するため、C W (Continuous Wave) レーザーダイオード（波長 808nm、使用強度 約 0.5W）を使用した。

3.2 試験の実施

(1) 測定対象部

「常陽」格納容器内床下（主循環ポンプ(A)室）の A ループ側 1 次主冷却系配管のホットレグ配管を測定対象部とした。図 3.1 に測定対象部である 1 次主冷却系配管（ホットレグ配管）の施工図を示す。「常陽」の 1 次主冷却系配管は SUS304 の 2 重配管になっており、冷却材ナトリウムが内管（ホットレグ：20B 配管）内を流れ、外管（同：22B 配管）との間には予熱用窒素ガスが充填されている。外管の外側には、保温材がカポサイト (25mm 厚)、シリカライト (150mm 厚)、アスペストクロス (1.6mm 厚) の順で施工されており、最外部にはアルミニウムの外装板 (0.5mm 厚) が施工されている。

ナトリウム充填中（原子炉運転中を含む）、格納容器内床下は窒素雰囲気（酸素濃度 4 % 以下）に保持され、雰囲気温度は 60°C 以下に制御されている。定格出力 (100MW) 運転中のホットレグ配管のナトリウム温度は約 500°C であり、外装板表面では最高温度で 100°C 程度となる。また、γ 線量率は測定対象部で約 7.2×10^3 (R/h)/100MW となる。

(2) 光ファイバの敷設

格納容器内床下が空気雰囲気となる第 11 回定期検査期間を利用して、上記測定対象部の外装板表面に、約 80m 分の光ファイバ 2 本を束ね位置分解能を

向上するために約50cmピッチで螺旋状に敷設した（配管の直線距離にして約13m）。また、光ファイバ温度計の校正のために、熱電対をFTRの入射端から47m(TC-3)、62m(TC-2)、102m(TC-1)の3ヶ所のファイバ位置にファイバと同一点を測定できるように並べて設置した。測定対象部の配管外装板表面への光ファイバと熱電対の敷設状況を図3.2、3.3に示す。

(3) 床上・床下バウンダリーの光ファイバの通過

1次主冷却系配管に敷設した光ファイバにレーザを入射し、後方散乱光のデータを処理・収録するためには、FTR等のデータ処理・収録装置を運転中でも作業員が立ち入り可能なエリアに設置しなければならない。しかし、格納容器内床下の既設ケーブルルペネットレーションが電気信号専用であることから、光ファイバを用いた通信には適さない。そこで光ファイバの敷設にあたっては、原子炉運転中、窒素雰囲気でかつ γ 線量率が約 7.2×10^3 R/hとなる格納容器内床下と床上とのバウンダリーを形成する厚さ2mのコンクリート床を貫通させ、運転中でも作業員が立ち入り可能な格納容器内床上エリアにデータ処理・収録装置を設置することとした。

調査、検討を行った結果、床上・床下バウンダリー(2mのコンクリート)に未使用の予備貫通孔が存在したため、これをを利用して光ファイバを通過させた。具体的には、予備貫通孔に充填されていた鉛毛を除去し、光ファイバおよび校正用熱電対の補償導線を通過させ、その後、鉛粒を充填、貫通孔の上下にシールを施して再び床上・床下バウンダリーを形成した。

(4) 測定

光ファイバ及び校正用熱電対の補償導線を格納容器内床上エリアに設置したFTR等のデータ処理・収録装置に接続し、これにより「常陽」100MW第30,31および32サイクル中の測定を行った。データ処理・収録装置の設置状況を図3.4に示す。

なお、フォトブリーチング効果を測定するため、東ねて敷設した光ファイバ2本のうちの1本にはCWレーザーを入射した。

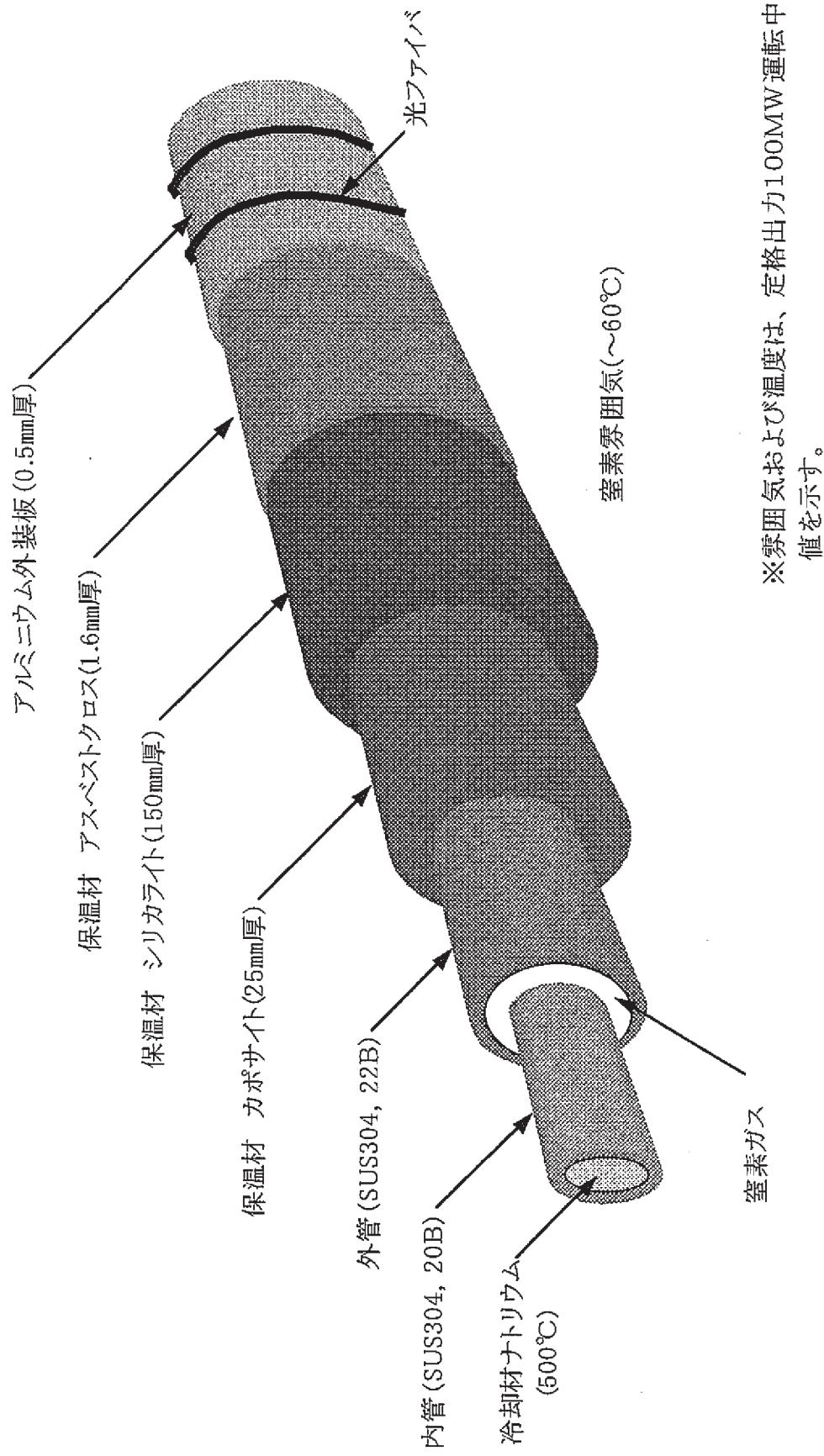


図3.1 1次主冷却系配管(ホットトレグ配管)の施工図

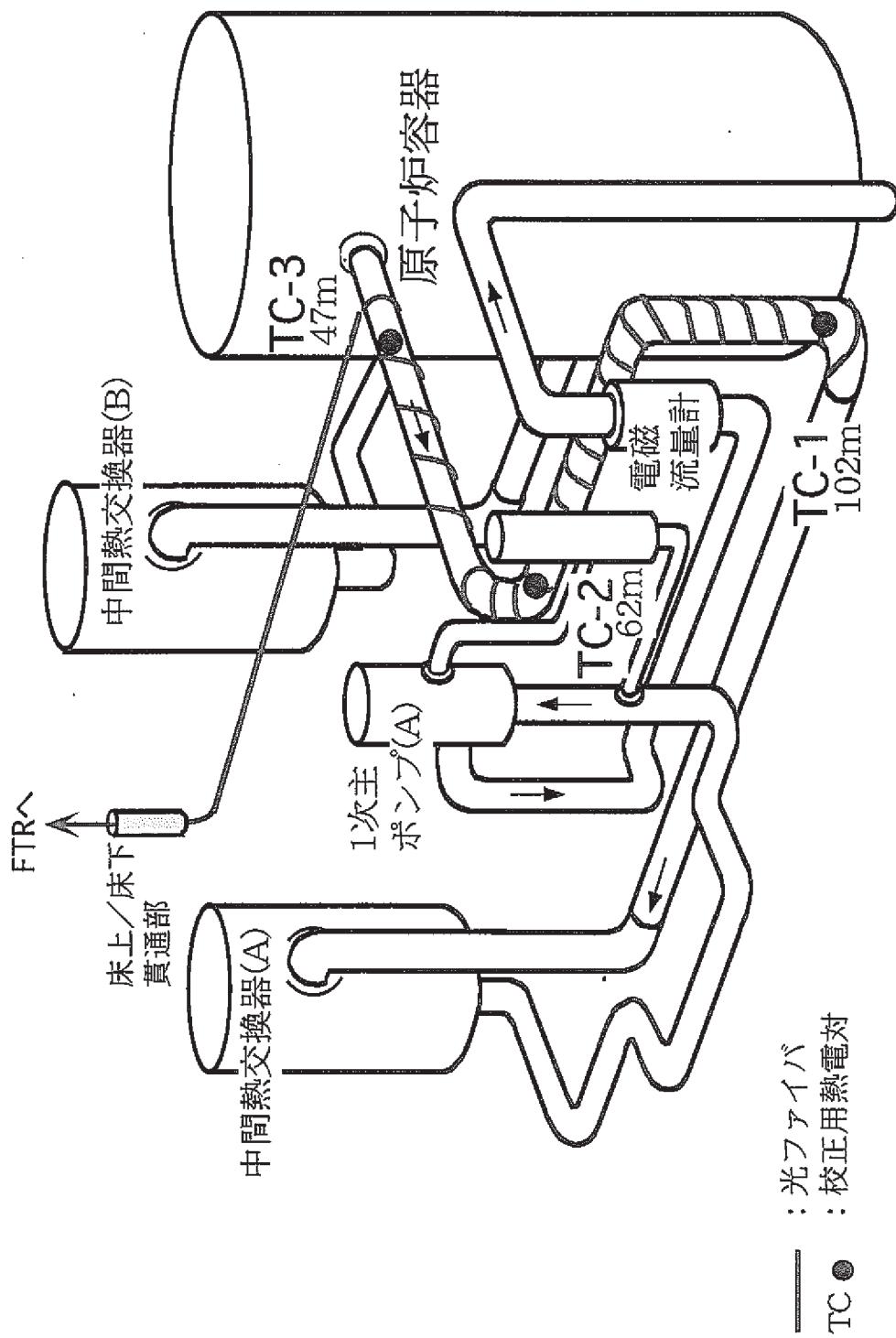
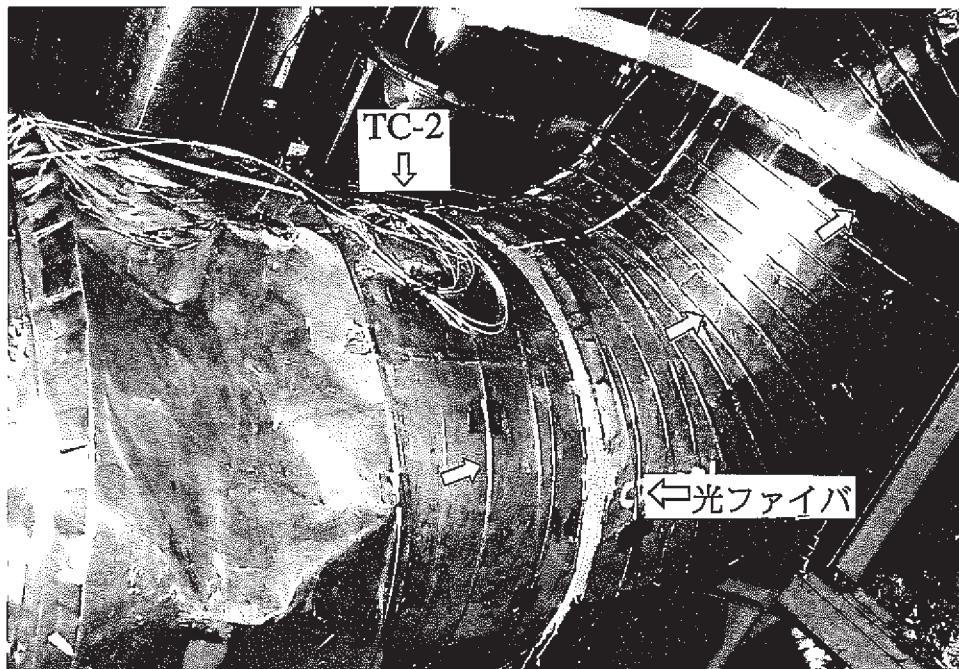
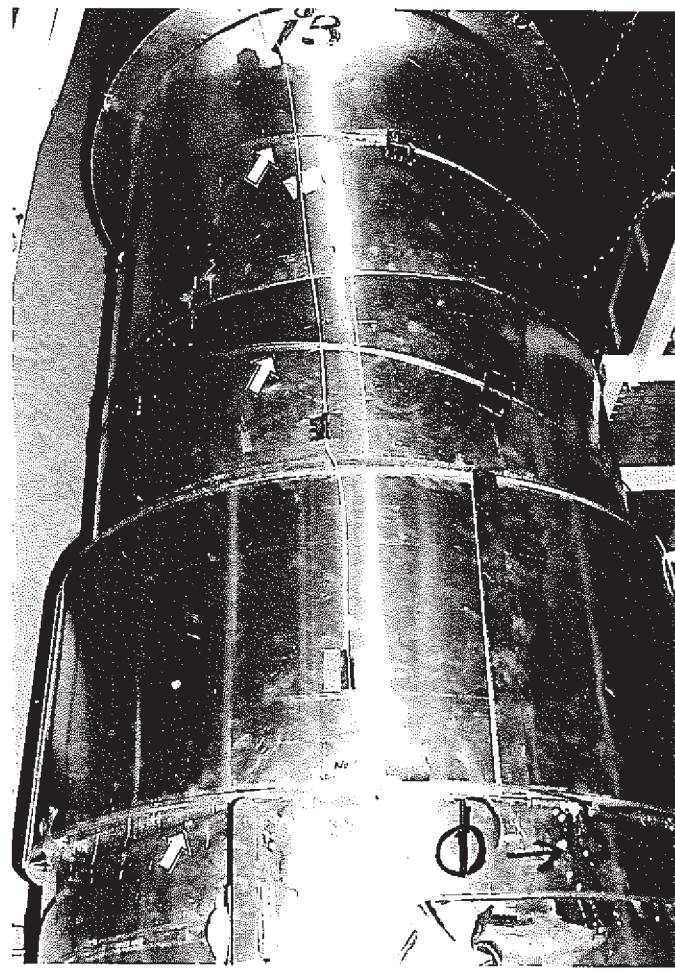


図3.2 1次主冷却系配管への光ファイバと熱電対の敷設概略図



(1) TC-2 とその近傍



(2) 垂直配管部 (FTR の入射端から約 90m の位置)

図 3.3 光ファイバと熱電対の敷設状況

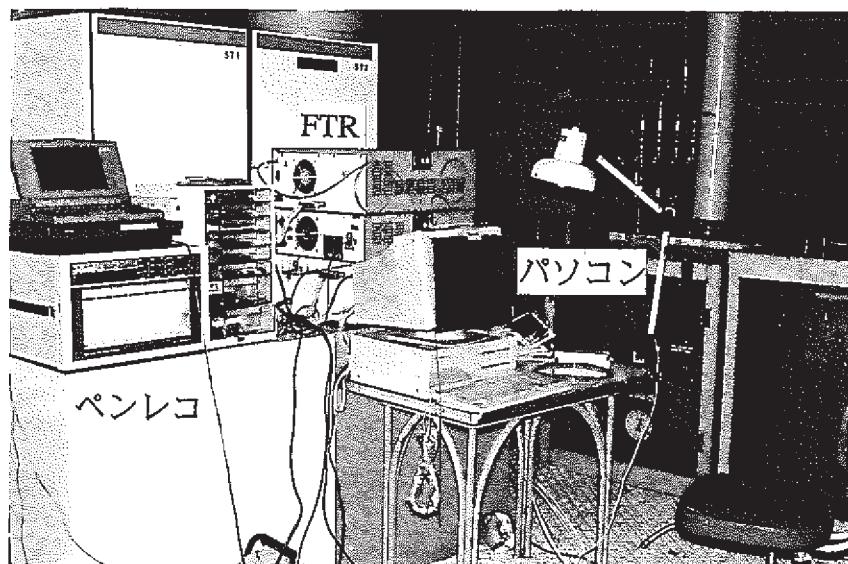


図 3.4 データ処理・収録装置の設置状況

4. 1 次系での温度分布測定試験結果

4.1 温度測定結果

(1) 温度分布

光ファイバによる1次主冷却系配管外装板表面の温度分布測定結果(100MW第31サイクル運転中)を図4.1(補正前)に示す。図よりFTRからの距離が長くなるに従い、γ線照射による伝送損失により熱電対の測定結果と光ファイバの測定結果の差(温度誤差)が拡がっていくのが確認された。また、当初、ほぼ一様と考えられていた配管外装板表面の温度分布に周期性を持つ山が確認された。この原因については、本章第5節で述べる。

(2) 热電対との比較

100MW第30~32サイクル間の光ファイバと熱電対による温度測定値の比較を図4.2に示す。光ファイバでは、第30サイクルに比べ第31サイクル以降で温度の揺らぎが小さくなかった。これは、第31サイクル開始前にFTRと光ファイバの接続部を調整したことにより光強度が増したことによるものである。

光ファイバと熱電対の温度誤差は、原子炉起動(照射開始)と共に増加し、時間の経過に伴って一定となる傾向が見られ、光ファイバの先端部(TC-1部)では約25°Cであった。この傾向は、照射による光ファイバ内の欠陥(カラーセンター)生成と雰囲気温度のアニーリングによる欠陥の消滅が時間の経過に伴ってバランスしていくことによるものである。なお、原子炉停止後は、カラーセンターの回復により温度誤差が減少する挙動が確認された。

光ファイバ敷設後、最初の起動となった第31サイクルにおいては、約25°Cまで序々に増加したのに対し、その後の起動時(第32, 33サイクル、電源喪失時)においては、速やかに25°C付近まで増加した。これは、原子炉停止時にカラーセンターは回復するが、不安定な状態にあるため再度照射を開始するとカラーセンターが回復前の状態に速やかに戻ることによるものと考えられている。

温度誤差は、光ファイバの伝送損失により発生するため、この伝送損失を算出し、温度補正方法の検討を行った。

4.2 伝送損失の算出

光ファイバ上のある二点A, B間の伝送損失は、伝送減衰の基本式⁽⁸⁾やボルツマンの法則を基に次式で表わされ、その被測定点の温度と散乱光強度を計測することにより求めることができる。

$$2LD_s = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{sA}}{I_{sB}} \frac{1 + n(\nu, T_B)}{1 + n(\nu, T_A)} \right)$$

$$2LD_a = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{aA}}{I_{aB}} \frac{n(\nu, T_B)}{n(\nu, T_A)} \right)$$

$$n(\nu, T) = \frac{1}{\{\exp(hc\nu/kT) - 1\}}$$

L : A, B間の長さ

D_s : A, B間のストークス波長と入射波長における伝送損失の平均値

D_a : A, B間のアンチストークス波長と入射波長における伝送損失の平均値

I_{sA} : A点でのストークス光強度

I_{sB} : B点でのストークス光強度

I_{aA} : A点でのアンチストークス光強度

I_{aB} : B点でのアンチストークス光強度

T_A : A点での絶対温度

T_B : B点での絶対温度

この式により計算したTC-3とTC-1間の光ファイバの伝送損失の推移を図4.3に示す。伝送損失も温度誤差と同様に原子炉起動と共に増加しはじめ、時間の経過により一定となる傾向が見られた。また、原子炉起動時の増加の傾向、原子炉停止後の回復する現象も温度誤差と同様であった。

原子炉停止時に一時的に伝送損失が増加する現象が確認された。これは、原子炉停止時において、伝送損失の変化は温度が低下する事による増加要因とγ線量率が低下することによる低下要因の二つが考えられ、原子炉停止時には温

度変化の方が γ 線量率の変化よりも早いことから、一次的に伝送損失が増加したものと考えられる。

4.3 溫度誤差の補正（損失補正法の適用）

放射線誘起損失による温度誤差の補正を行う方法（損失補正法）として、光ファイバと共に設置した複数の校正用熱電対の測定結果を真値と仮定し、その間の温度分布を補正する方法を用いた。損失補正法にはこの他に光ファイバ往復設置による方法等があるが、この内容については第6章にて述べる。

光ファイバ上のある二点A, Bにおいて、その被測定点の温度が計測されており、その間の伝送損失が位置によらず一定であると仮定する（実際には、線量分布および温度分布の影響により一定にはならない）と、その間のC点の温度は次式で計算することができる。

$$\left(\frac{1}{T_{ct}} - \frac{1}{T_{ce}} \right) = \frac{L_B - L_c}{L_B} \left(\frac{1}{T_{at}} - \frac{1}{T_{ae}} \right) + \frac{L_c}{L_B} \left(\frac{1}{T_{bt}} - \frac{1}{T_{be}} \right)$$

L_B : A, B 間の長さ

L_c : A, C 間の長さ

T_{ae} : A点での FTR による測定値

T_{at} : A点の実際の温度

T_{be} : B点での FTR による測定値

T_{bt} : B点の実際の温度

T_{ce} : C点での FTR による測定値

T_{ct} : C点の実際の温度

TC-1 と TC-3 の測定値を A 点、B 点での実際の温度として、補正を行った結果を図4.1（補正後）に示す。補正後の光ファイバの TC-2 位置の温度は、運転期間を通じて比較用熱電対 TC-2 の測定結果と約 3 °C 程度の差で一致した。この差は、熱電対や FTR の計器誤差や測定誤差、さらには配管外装板表面の線量分布や温度分布の影響により、前記仮定（位置によらず伝送損失が一定）を完全に満足していないこと等が原因と考えられる。

4.4 フォトブリーチング効果

フォトブリーチング効果を確認するために CW (連続波) レーザーを入射し

た光ファイバの測定結果と通常測定用の光ファイバ（パルス幅 10nsec、入射間隔 $1 \mu\text{sec}$ で光パルスを入射したファイバ）の測定結果を図 4.4 に示す。フォトブリーチング効果により、CWレーザーを入射した光ファイバの方が通常測定用の光ファイバよりも熱電対との温度差が小さくなっていることが確認された。

4.5 周期性を持つ温度分布の原因検討

第1節で述べたように、ほぼ一様と考えられていた1次主冷却系配管外装板表面の温度分布に約 10m 間隔の周期性を持った温度分布が確認された。この分布は原子炉運転中だけではなく、図 4.5 に示すように出力降下時においても同じ形状を保ったまま推移し、停止時においても同様の現象が確認された。このため、以下について原因の検討を行った。

(1) 保温材の施工による影響

安全容器出口-主中間熱交換器間のホットトレグ配管には保温材が厚さ 175mm に巻かれている（図 3.1 参照）。保温材繋ぎ目からの放熱による局所的な高温箇所の発生を考えた場合、実際に施工されている保温材 1 枚あたりの軸方向の長さは確認できなかったが同型保温材の標準長さは最長 610mm であり、実機に長さ 10m の保温材が施されて光ファイバ温度分布測定結果に 10m 周期の山が現われたとは考えにくい。なお、保温材の経年変化によって保温状態が変わる可能性は考えられる。

(2) 雰囲気の気流による影響

格納容器雰囲気調整系の給気口は、格納容器床下の主循環ポンプ(A)室の GL-15900 (フロアレベル) 付近に 4 箇所あり、何れも水平方向を向いて配置されている。GL-7200 から GL-13263 のレベルに敷設されている光ファイバは配管に凡そ 3 卷/10m の割合で敷設しているため、気流の影響を受けるとすれば約 3 m 毎に変化する温度分布も確認されると考えられるが、本測定結果ではそのような現象は見られない。また、給気口レベルに一番近い GL-13263 位置の光ファイバであっても、2 つの給気口との高低差が 2 m、距離が 10m 以上離れていることから気流の影響は小さいと考えられる。

(3) 隣接機器の影響

光ファイバによる温度分布測定結果から、熱電対 TC-3 と TC-2 位置の間に 1 つの温度の山、TC-2 と TC-1 位置の間に 3 つの温度の山があることが確認された。機器・配管の配置をみると、TC-3 と TC-2 位置の間に主ポンプ(A)が、

TC-2 と TC-1 位置の間には、近くにオーバフローカラム、電磁流量計が位置している。これら機器があるコールドレグの系統温度（370°C）は被測定部の系統温度（500°C）より低いが測定対象部の温度（最高 100°C）よりは高く、保温材も 25mm 薄く（主ポンプ：カポサイトボード 25mm+シリカライトボード 125mm、オーバフローカラム：シリカライトボード 150mm、配管部：カポサイトボード 25mm+シリカライトボード 125mm）施工されていることから、これらの機器・配管からの放熱の影響を受けた可能性が考えられる。

以上の検討結果を基に、2 次系配管でも確認できる光ファイバや保温材の施工による測定結果への影響について 2 次系で補助試験を行うことにした。

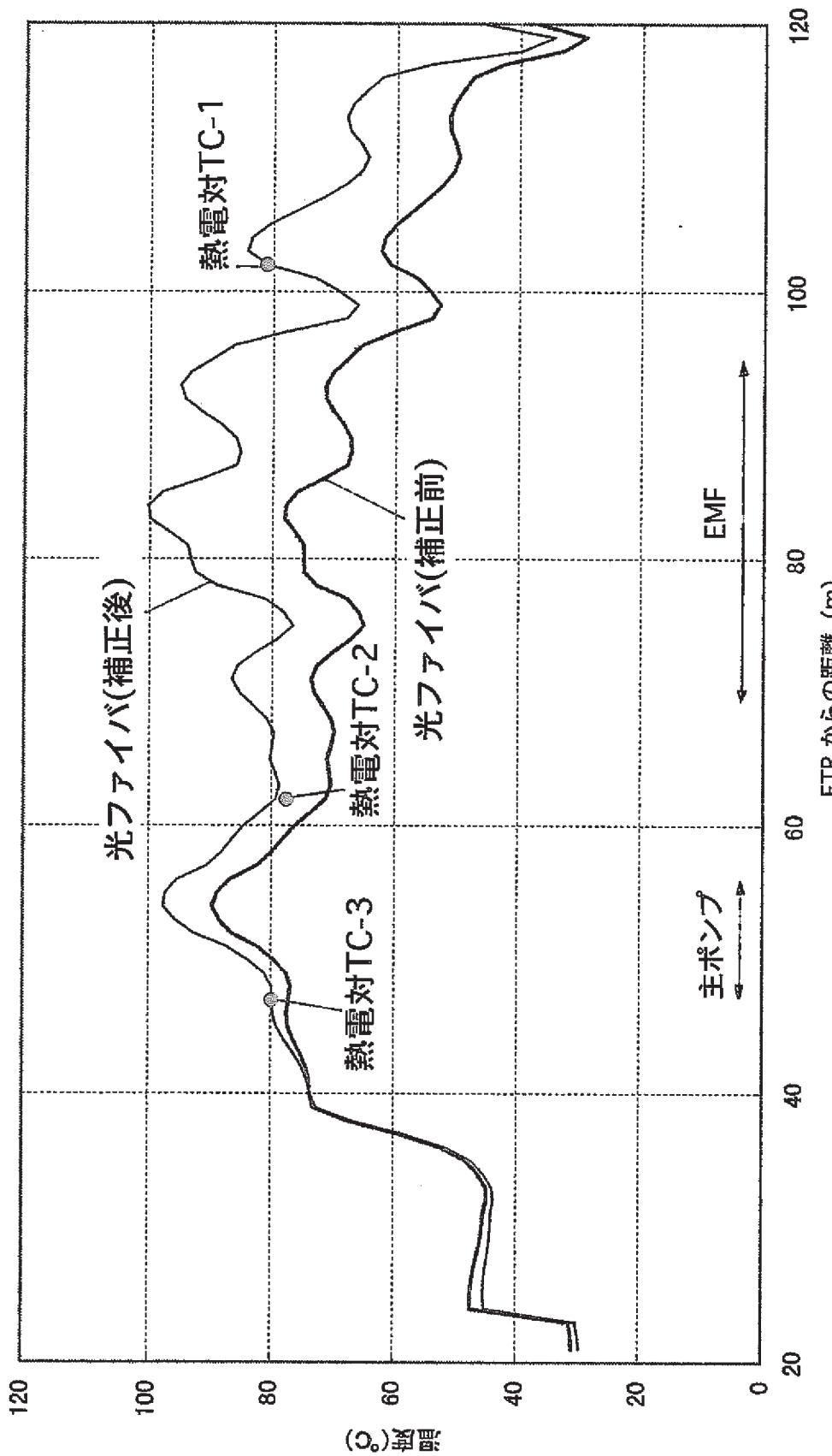


図 4.1 光ファイバによる 1 次主冷却系配管外装板表面の温度分布測定結果
(100MW 第 31 サイクル運転中)

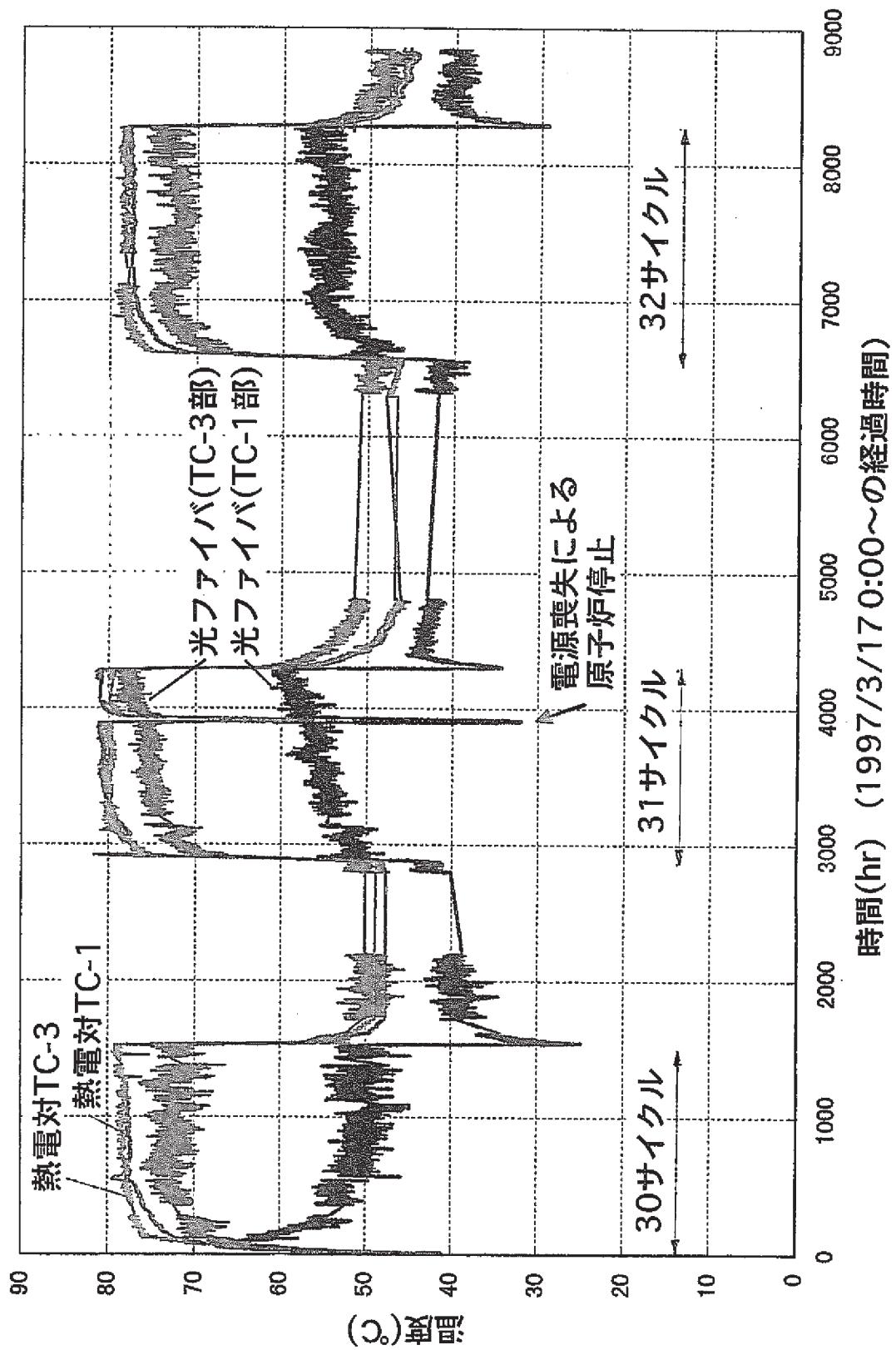
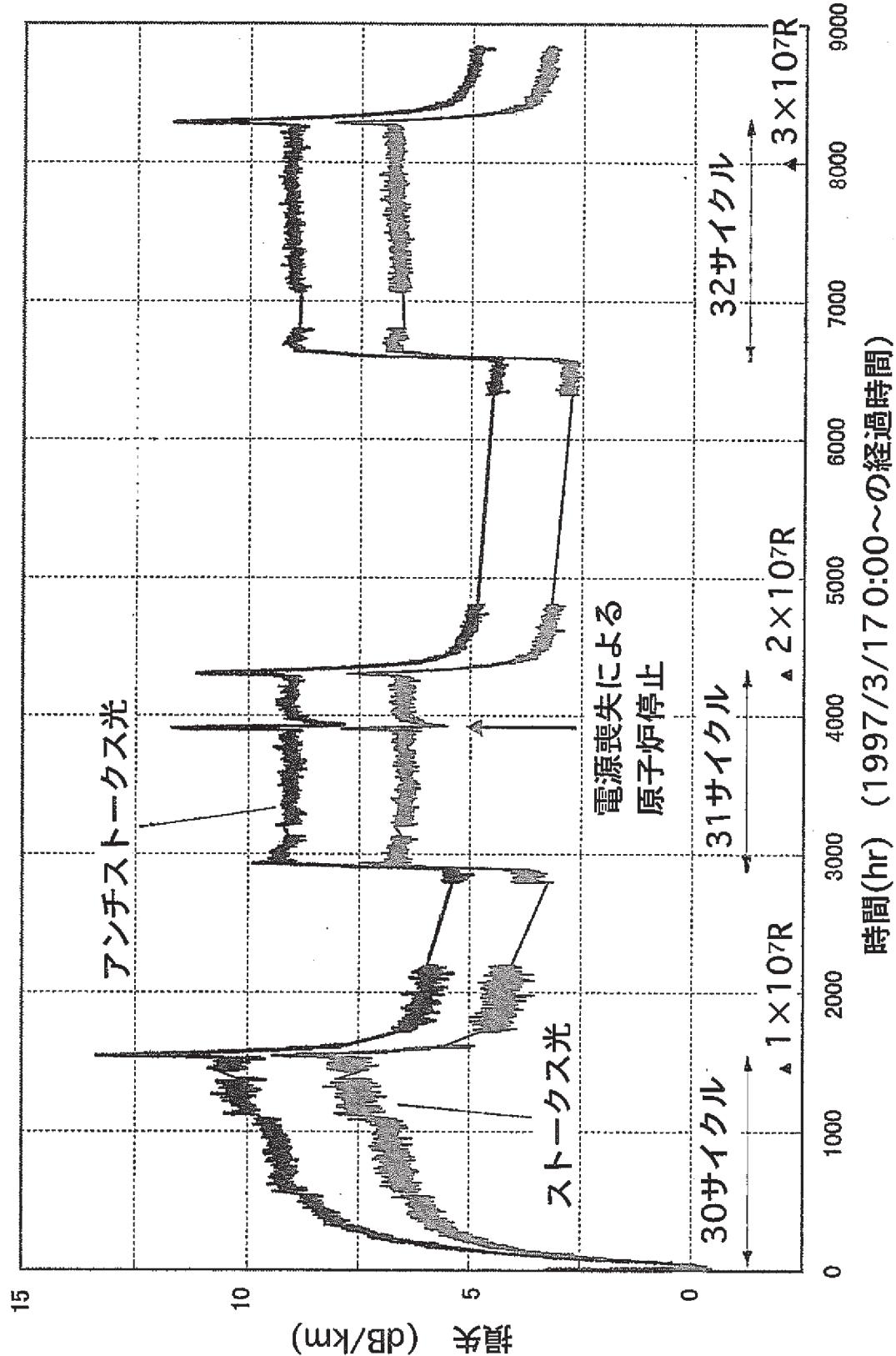


図 4.2 光ファイバと熱電対による温度測定値の比較
(100MW 第 30～32 サイクル)



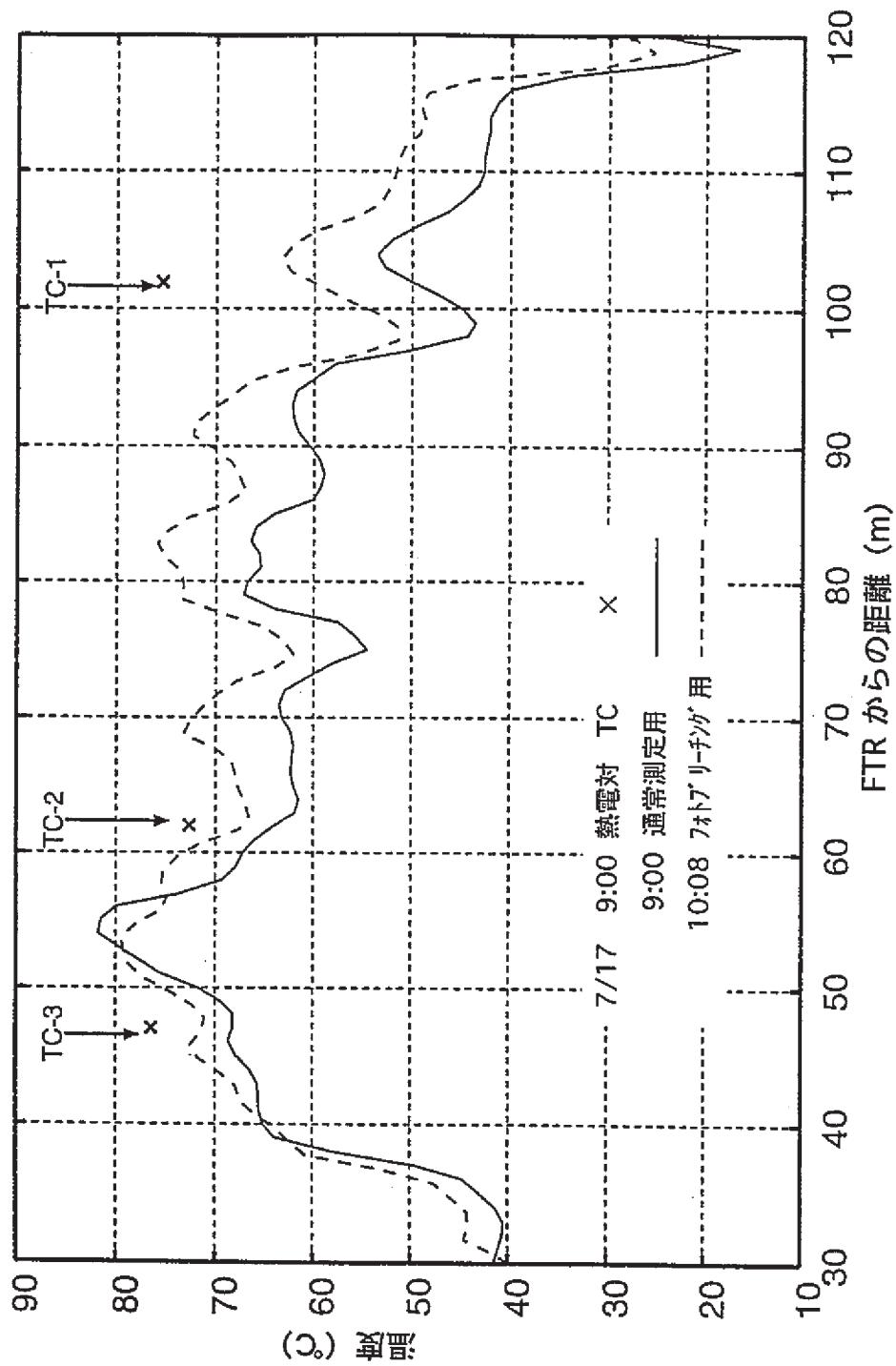


図 4.4 フォトブリーチング効果の有無による温度測定値の比較

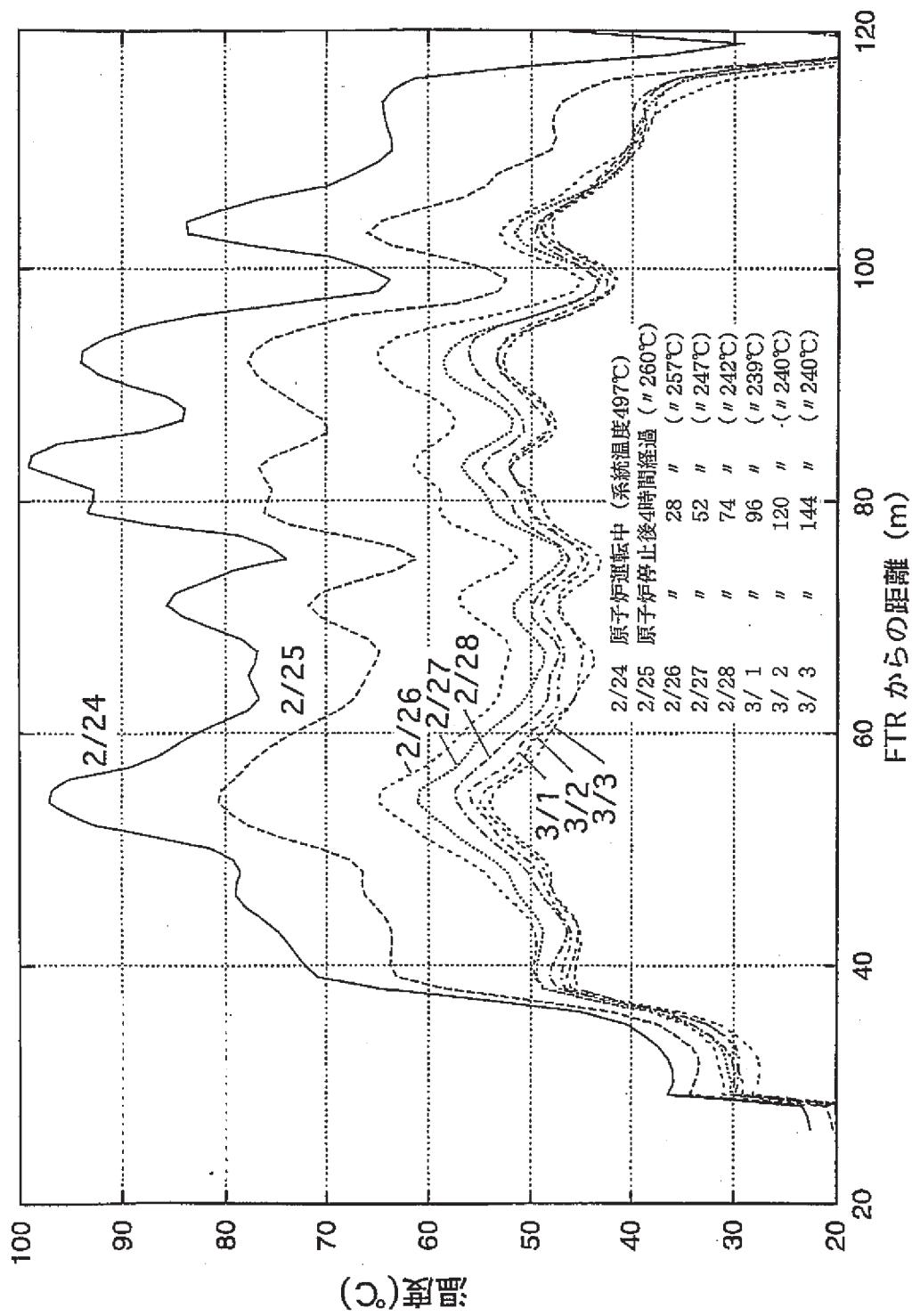


図 4.5 原子炉停止時の光ファイバによる温度分布測定値の推移

5. 温度分布の原因検討のための2次系での補助試験

第4章で述べた1次主冷却系配管外装板表面での周期性を持った温度分布の原因の検討を行うため、保温材および光ファイバの施工状況による温度測定への影響の調査を目的に100MW第32サイクルにおいて2次主冷却系配管で光ファイバを用いた補助試験を実施した。

5.1 試験装置の仕様

1次系で使用したものと同仕様の装置を用いた。

(1) 光ファイバ

- S I型ポリイミド被覆石英光ファイバ2本
・ステンレス保護管入り光ファイバ：約90m
・ナイロン被覆光ファイバ：約90m

(2) 校正用熱電対

JIS K-type 0.75級5本

(3) R D T S

日立電線FTR110（入射光波長1047nm、ピーク出力10W、パルス幅10ns）

(4) データ処理・収録装置

R D T S用パソコン（NEC PC-9801）
熱電対温度測定用パソコン（NEC PC-9801）、零接点補償器

5.2 試験の実施

(1) 測定対象部

「常陽」主冷却建家（2次系コールドトラップエリア(B)室）の2次主冷却系配管のコールドレグ配管を測定対象部とした。図5.1に測定対象部である2次主冷却系配管（コールドレグ配管）の施工図を示す。2次主冷却系配管は1次主冷却系配管と異なり、2 1/4Cr-1Mo鋼(STPA24)の1重配管であり、配管の外側には予熱ヒータ、ステンレスシート、保温材のカボサイト(100mm厚)、亜鉛メッキ鉄板の外装板の順で施工されている。

2次主冷却系配管周りの雰囲気は空気雰囲気であり、定格出力（100MW）運転中のコールドレグ配管のナトリウム温度は約340°Cである。

(2) 光ファイバの敷設

上記測定対象部の外装板表面に、約65m分の光ファイバ2本（ステンレス保護管入り、およびナイロン被覆光ファイバ）を東ねて約25cmピッチで螺旋状に敷設した。

(3) 測定手法

光ファイバ及び熱電対の補償導線をFTR等のデータ処理・収録測定装置に接続し、「常陽」100MW第32サイクルに測定を行った。

配管の付帯設備（本設熱電対、配管防振機構等）の施工状態が配管外装板表面温度に与える影響を調査するために、光ファイバによる温度分布測定に加え、ファイバを敷設した全長に亘り熱電対を用いてファイバに添って配管周方向4ヶ所（90°毎）の外装板表面の温度を測定し、外装板表面の実際の温度が測定位置（配管軸方向および周方向）によってどの程度変化するかを確認した。

また、光ファイバを外装板表面に沿わせた場合と、外装板表面から浮かせて設置した場合とで温度測定を行い、敷設条件が測定値に与える影響を確認した。

5.3 試験結果

(1) 热電対との比較

光ファイバおよび熱電対による2次主冷却系配管外装板表面の温度分布測定結果（100MW第32サイクル運転中）を付帯設備の位置関係と合わせて図5.2に示す。図より光ファイバ温度計による測定結果では、光ファイバがもつ位置分解能（約1m）に起因して、熱電対の測定結果に比べて温度分布が平坦化されていることが確認された。ステンレス保護管入りの光ファイバとナイロン被覆の光ファイバによる温度分布測定結果には、大きな差異はなかった。

(2) 保温材の施工による影響

図5.2に示すように熱電対による温度分布測定結果の全域において約2m毎の周期的な温度分布が確認された。これは配管径方向の温度分布（山の部分が配管上部、谷の部分が配管下部）によるものであり、配管の上部と下部で約3～5°Cの温度差があることが確認された。

また、保温材の境目となる部分（図 5.2 中、*1, *2）や本設熱電対、ヒータの引出口では、温度分布に正のピークが見られ、逆に配管防振機構（ハンガ）部の保温材が厚くなる部分 (*3) では低い温度を示す傾向が見られた。これにより配管保温材の施工が、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。

(3) 光ファイバの施工による影響

ステンレス保護管入りの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測定結果を図 5.3 に示す。測定結果から光ファイバと配管外装板表面との隙間が拡がるに従い低い温度分布を示し、隙間が 2 mm 程度でもその差が明らかになることが確認された。これにより光ファイバの施工状況のわずかな差によっても温度分布測定結果に影響が出ることが明らかとなった。

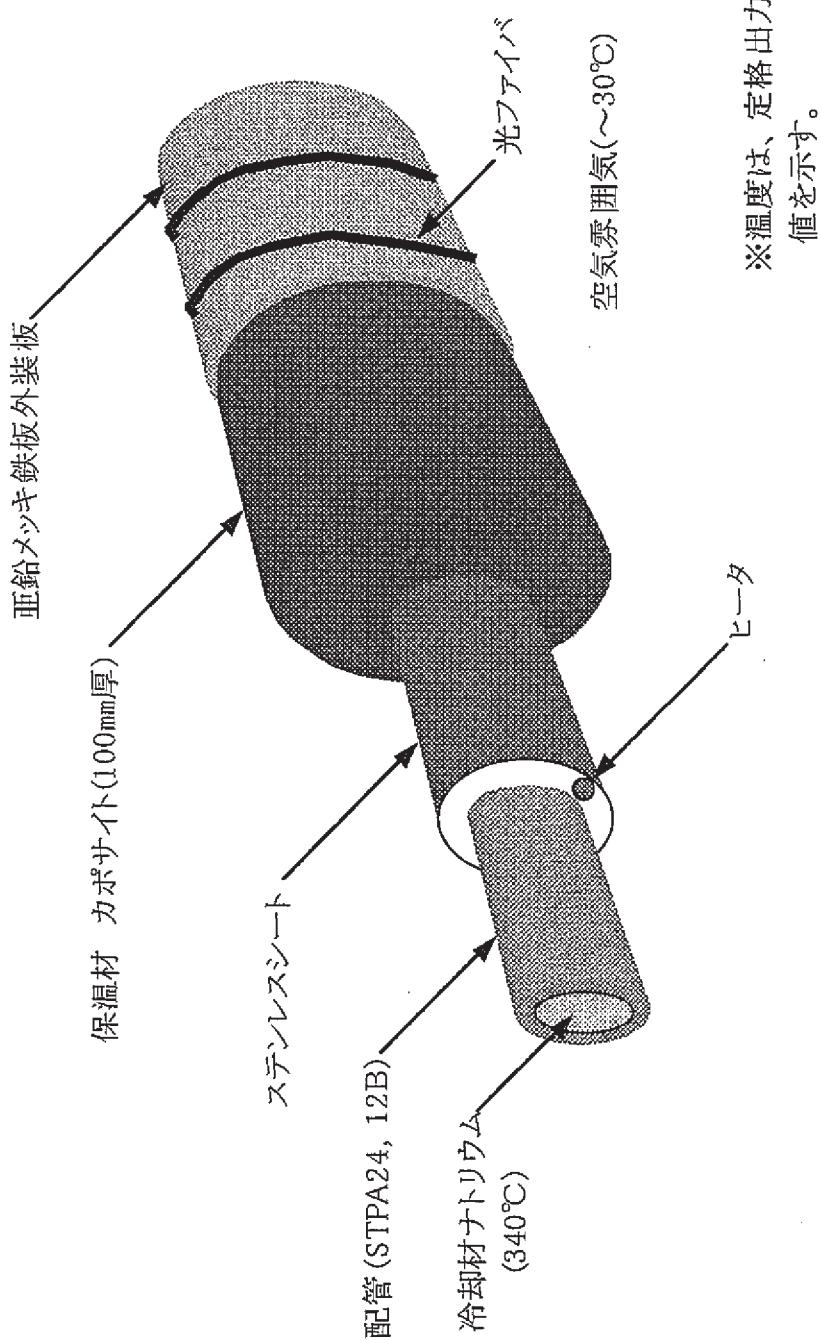


図5.1 2次主冷却系配管(コールドダクト配管)の施工図

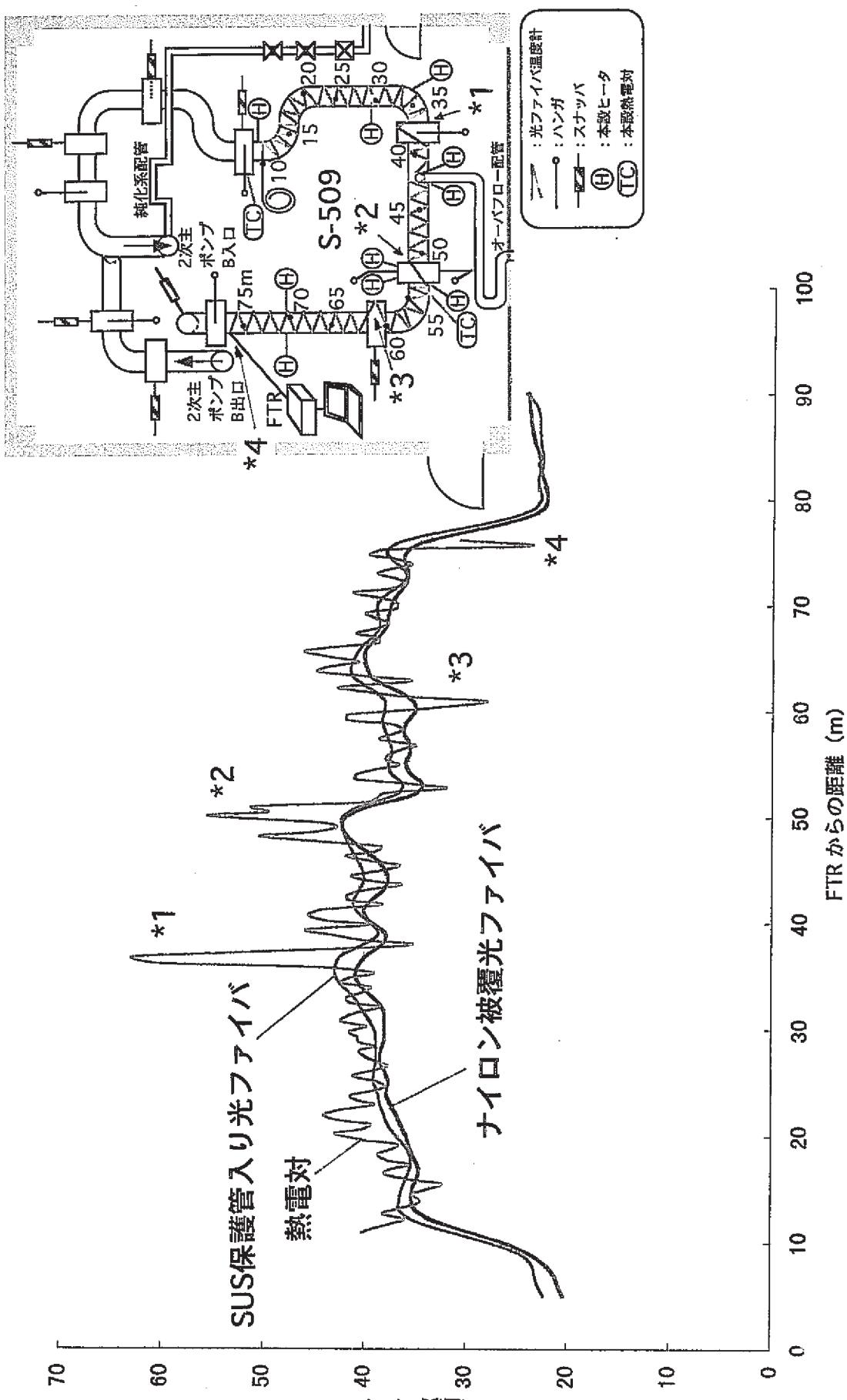


図 5.2 2 次冷却系配管外装板表面の温度分布と周辺機器等との位置関係

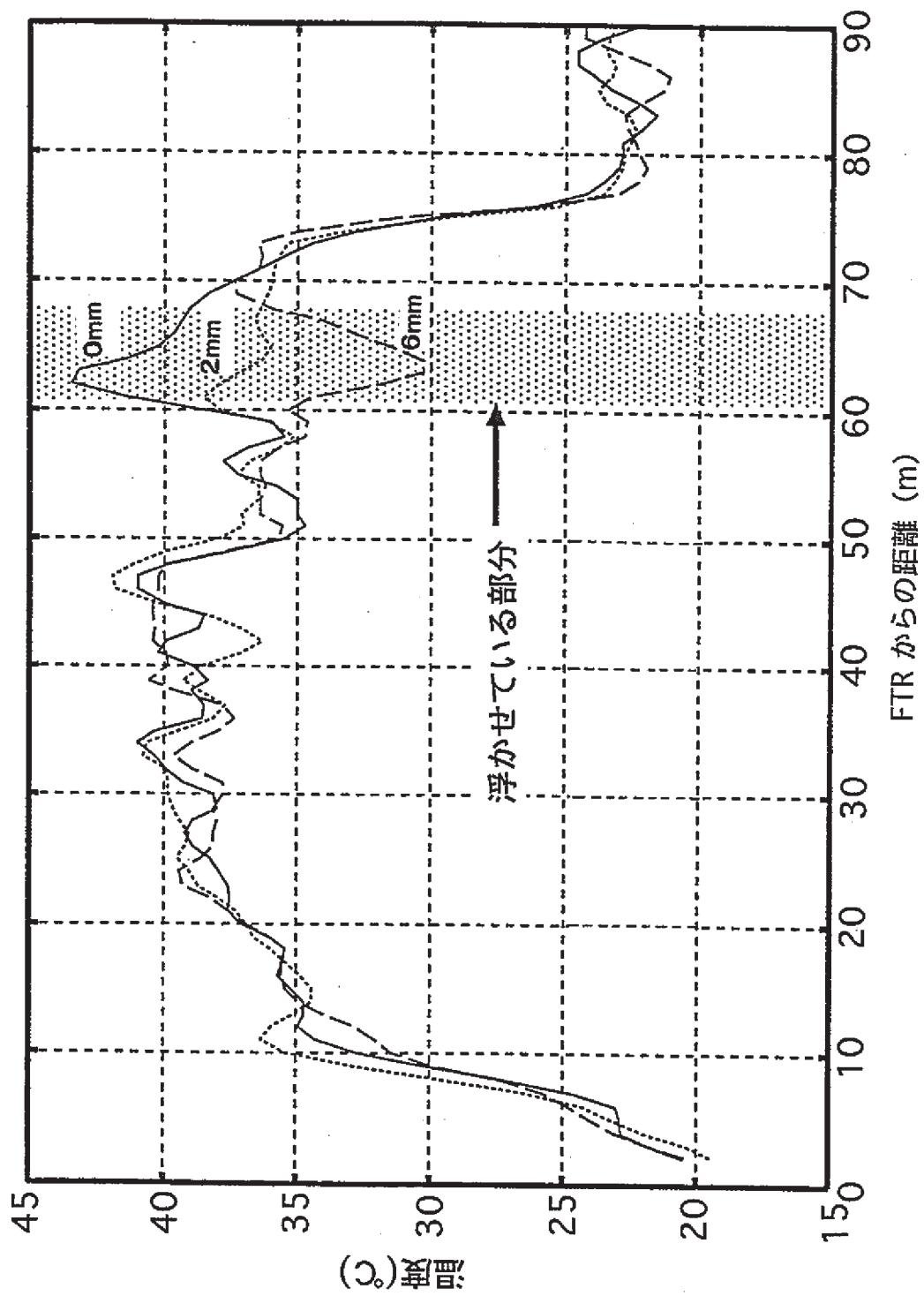


図 5.3 光ファイバと配管間の隙と温度の関係

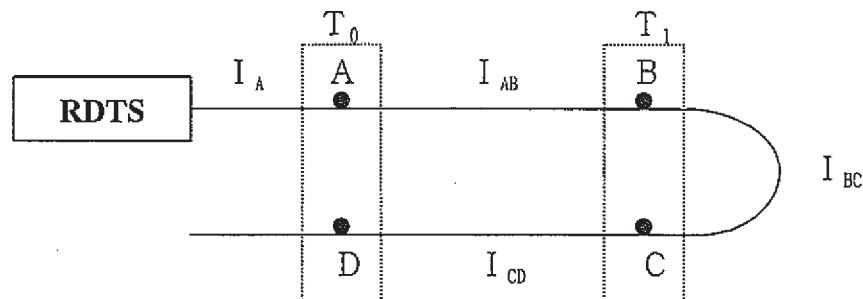
6. 今後の計画

6.1 放射温度計を用いた1次主冷却系配管外装板表面温度分布の現場調査

2次主冷却系配管で光ファイバを用いた補助試験を実施した結果、温度分布測定結果が、光ファイバや保溫材の施工の影響を受けること等が分かったが、1次主冷却系配管外装板表面で見られた周期性を持った温度分布の原因の特定には到らなかった。このため、1次系ナトリウムドレン中に「常陽」格納容器床下の光ファイバ敷設配管において、光ファイバの敷設状況の目視による再確認、および放射温度計を用いた配管外装板表面温度分布の調査を行う。これにより、1次主冷却系配管外装板表面で見られた周期性を持った温度分布の原因を明らかにするとともに、この結果を今後の光ファイバ敷設作業へ反映していく。

6.2 光ファイバ往復設置による損失補正法の適用性検討⁽⁹⁾

放射線誘起損失による温度誤差の補正を行う方法の一つとして、往復設置させた光ファイバの同一測定点での信号比較による補正方法が考えられている。補正方法の原理を下記に示す。



(補正原理)

往復設置によりA点とD点の温度は等しいと近似できるので、A点、D点の測定結果の比較から、A-D間の放射線誘起損失の影響を知ることができる。また、同様にB点、C点の測定結果の比較から、B-C間の放射線誘起損失の影響を知ることができる。

得られたA-D間、およびB-C間のそれぞれの放射線誘起損失の影響の比較から、A-B間（C-D間）の放射線誘起損失の影響を評価することできる。また、R D T S - A間を放射線のない環境に設置することにより、A点の温度

は補正なしでも正確に測定することができ、この結果、A-B間の損失の影響とA点の温度から、B点の温度を正確に求めることができる。

本手法の特長としては、温度補正用の熱電対が不要、光ファイバ上に放射線や温度が一樣でない場所でもその影響を補正できることが上げられる。一方、往復設置するため通常の設置方法に比べ、2倍の長さのファイバーが必要となり、放射線誘起損失による光強度の低下も2倍となるため、測定結果におけるS/N比は往復設置しない光ファイバに比べ悪くなるという欠点も有している。

本手法の実機プラントへの適用性を検討するため、現在1次主冷却系配管外装板表面に敷設してある光ファイバを撤去し、その後、新たに往復タイプの光ファイバ（ステンレス保護管内に往復2本の光ファイバを挿入）を螺旋状に敷設し、「常陽」100MW第33～35サイクルの間、1次主冷却系配管外装板表面の温度分布を測定する。測定結果を基に、損失補正法の適用性の評価を行う。

7. 結 言

光ファイバ温度計の高速炉プラントの1次系機器・配管への適用性を評価するため、高速実験炉「常陽」1次主冷却系配管の外管の外装板表面に光ファイバを敷設し、100MW第30～32サイクルの定格運転3サイクルに亘り温度分布測定試験を実施した。また、この試験で見られた周期性を持った温度分布の原因を検討するため、主に施工状況による温度測定への影響に着目し、2次主冷却系配管を用いた補助試験を実施した。

この結果、以下の成果を得た。

- (1) 高速炉実機の放射線環境下における最大積算照射線量 3×10^7 Rまでの光ファイバ温度計の使用実績を得るとともにその間の温度データを取得した。
- (2) γ 線照射による伝送損失が積算照射線量に対し一定となる特性を有する等、放射線環境下での光ファイバの特性を明らかにした。
- (3) 複数の校正用熱電対の測定データを用いた伝送損失補正法が適用できることを確認し、光ファイバ温度計により高速炉1次主冷却系配管の外管の外装板表面の温度分布を±3°Cの精度で測定できることを実証した。
- (4) 光ファイバや保温材の施工条件が、温度測定に与える影響の程度を把握した。

8. 謝 辞

本研究の実施にあたり、東京大学大学院工学系研究科中沢正治教授、高田英治助手、学生のイエンセン・フレデリッキ氏および木村敦氏には、測定手法についての適切な指導を頂くとともに測定および解析作業について多大な御協力を頂きました。

ここに深く感謝の意を表します。

9. 参考文献

- (1) 大沢 晋、「分布型光ファイバ温度測定装置の応用」：日刊工業出版「計測技術」第 24 卷第 9 号、p. 20~24 (1996 年 9 月)
- (2) 高橋康夫他、「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、p. 43~52 (1995 年 8 月)
- (3) M. Nakazawa et al., Some New Optical Techniques for Reactor Instrumentation : OECD/NEANSC INCORE-96, SESSION 5 (1996)
- (4) 小川勝徳他、「光ファイバ温度レーダの開発」：日立電線 No. 9、p. 7~12 (1990 年 1 月)
- (5) D. A. LONG, Raman Spectroscopy : McGraw-Hill (1977)
- (6) 黒沢芳宣他、「高温用光ファイバの開発」：日立電線 No. 10、p. 31~34 (1991 年 1 月)
- (7) F. Jensen et al., Development of a Distributed Monitoring System for Temperature and Coolant Leakage : OECD/NEANSC INCORE-96, SESSION 5 (1996)
- (8) 理化学辞典：第 4 版、岩波書店
- (9) E. Takada et al., Correction Techniques of Radiation Induced Errors for Raman Distributed Temperature Sensor and Experiment at the Experimental Fast Reactor:JOYO : Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 35, No. 8, pp. 547~553 (1998)