

光ファイバー温度分布測定装置を用いた 広域設備監視技術*

川崎製鉄技報
26 (1994) 1, 44-50

Wide Area Plant Monitoring Technique Using Fiber-Optic Distributed Temperature Sensor



飯田 修

Osamu Iida
水島製鉄所 プロセス
開発部制御開発室 主
査(課長)



岩村 忠昭

Tadaaki Iwamura
水島製鉄所 プロセス
開発部長



廣永 俊彦

Toshihiko Hironaga
川鉄電設(株) 第一事
業本部水島事業部 技
術室



橋場 圭一

Keiichi Hashiba
日立電線(株) 高砂工
場監視システム部



大澤 晋

Susumu Osawa
日立電線(株) 高砂工
場監視システム部 主
任技師

要旨

光ファイバー温度分布測定装置は、1本の光ファイバーを敷設するだけで、光ファイバーに沿った温度分布を測定することが可能であり、広域温度監視に非常に有効な測定方法である。川崎製鉄と日立電線は光ファイバー温度分布測定装置の鉄鋼製造設備の広域温度監視への適用を目的として、測温範囲の拡大や利用技術の開発を進めてきた。その結果 $-200\sim 500^{\circ}\text{C}$ の広範囲にわたる温度分布測定が可能となり、施工方法などの利用技術を確立することができた。光ファイバー温度分布測定装置は熱風炉の鉄皮温度監視に適用されており、広域温度監視に効果を上げている。

Synopsis:

A fiber-optic distributed temperature sensor makes it possible to measure the temperature distribution along the fiber path by laying an optical fiber, and is effective in monitoring temperatures in a wide area. Kawasaki Steel Corp. and Hitachi Cable, Ltd. have been expanding the measuring range of the sensor and developing utilizing techniques for applying the sensor to temperature monitoring in steel plants. As the result of this effort, temperature distribution measurement of -200 to 500°C has become possible, and the utilizing techniques have been established. A fiber-optic distributed temperature sensor is used for temperature monitoring of the steel shell on the hot stove, and is very useful for monitoring temperatures in the plant.

1 緒 言

鉄鋼製造設備における設備監視は、設備を常に正常な状態に維持し安定な操業を継続していくために非常に重要な技術である。特に設備が大規模になり、運転員が少なくなってくると、広域の監視を行なうためのセンサーがとりわけ重要になってくる。

光ファイバー温度分布測定装置は、光ファイバー中に光を入射した際に発生するラマン散乱光の強度が光ファイバーの温度に依存することを利用した温度測定方法で、1本の光ファイバーを敷設するだけで、光ファイバーに沿った温度分布を測定することができるセンサーであり、広域温度分布監視に威力を発揮する。本論文では光ファイバー温度分布測定装置を鉄鋼製造設備の広域温度監視に適用するために開発した技術と、その適用例である熱風炉温度分布監視システムについて述べる。

2 鉄鋼プラントにおける広域設備監視とその問題点

鉄鋼プラントは製鉄、製鋼、圧延、表面処理などの複数の製造設備から成り立っている。安定な操業を行うためには、これらの設備を常に監視し、最適な状態に保つための設備の保全を行う必要がある。そのため各設備には状態を監視するためのセンサーが設置され、さまざまな物理量を測定することによって監視が行われている。特に製鉄、製鋼などの上流工程では高温の溶鉄や溶鋼を扱うことから、設備の温度を監視することが非常に重要となっている。

一般に温度の測定には熱電対などの接触式の温度計が用いられるが、これらは特定個所の点測定を行うものであり、広域の温度測定に適用する場合、監視すべき範囲に多数点の温度計を設置する必要がある。そのため監視能力を高めようとした場合、膨大な数のセンサーが必要となり非常にコストが高くなってしまふ。また逆にセンサーの点数を減らすと十分な監視能力を得ることができなくなる。このような問題点を解決するために、広域温度監視用の低コストでかつ監視機能の高いセンサーと監視システムの開発が望まれていた。

* 平成5年10月15日原稿受付

Fig. 1 Principle of fiber-optic distributed temperature sensor

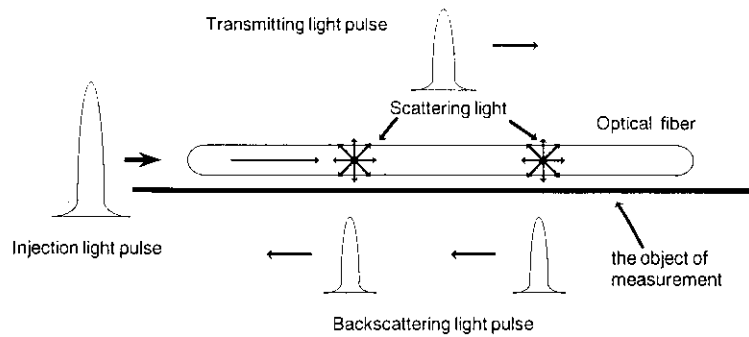


Table 1 Specifications of conventional fiber-optic distributed temperature sensor

Measurement distance	2 km
Distance resolution	1 m
Temperature accuracy	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Temperature resolution	0.1°C
Temperature range ^a	$-50 \sim 150^{\circ}\text{C}$
Wavelength of laser	900 nm
Wavelength of Stokes light	940 nm
Wavelength of anti-Stokes light	870 nm

^a Using conventional fiber

3 光ファイバー温度分布測定装置

光ファイバー温度分布測定装置は光ファイバーに沿った温度分布の測定、すなわち点測定ではなく線測定が可能な温度センサーである。

このセンサーは Fig. 1 に示すように、測定対象に沿って光ファイバーを敷設し、ファイバー中にレーザー光パルスを入射して、光ファイバー中で散乱されて入射点に戻ってくる後方散乱光を測定する。後方散乱光中には光ファイバーを構成する物質と相互作用してエネルギーが変化したラマン散乱光と呼ばれる特定の散乱光が含まれている。その二つの成分であるストークス光、アンチストークス光の強度は物質の温度と (1) 式の関係がある¹⁾。

$$I_a/I_s = \frac{(\nu_0 + \nu_k)^4}{(\nu_0 - \nu_k)^4} \exp(-hc\nu_k/kT) \quad (1)$$

ν_0 : 入射光波数	(m^{-1})
ν_k : シフト波数	(m^{-1})
h : プランク定数	($\text{J}\cdot\text{s}$)
k : ボルツマン定数	($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$)
c : ファイバー中の光速	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
T : 絶対温度	(K)
I_a : アンチストークス光強度	($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$)
I_s : ストークス光強度	($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$)

光ファイバー温度分布測定装置は、ラマン散乱光の 2 成分の強度を測定することによって、散乱光が発生している光ファイバーの部位の温度を求める。光ファイバーの各点から発生する散乱光はその発生位置によって装置に到達するまでの時間が異なるため、各部位から散乱されるラマン散乱光の強度を、OTDR (optical time domain reflectometry) 法を用いて時分割して測定すれば、光ファイバーに沿った温度分布を測定することができる。

本装置は数年前に実用化されたものであり、主として電力ケーブルの広域温度監視用に開発された^{2,3)}。Table 1 に現在一般的に使用されている光ファイバー温度分布測定装置の測定仕様を示す。しかし本装置を製造設備の温度分布監視に使用した例はほとんどなく、その応用は遅れていた。その主な原因は装置の測定温度範囲が狭いことであり、Table 1 の仕様である $-50 \sim 150^{\circ}\text{C}$ の測温範囲では、鉄鋼製造プラントの温度分布測定はもちろんのこと、温度監視が必要となるような製造プラントに使用することは困難であった。また測温方法が従来の方と全く異なるため、精度よく測定を行うためのセンサーの設置方法や、測温値の評価方法が明確でないこともこの測定装置の適用拡大を妨げていた一因である。

当社では光ファイバー温度分布測定装置の広域温度監視センサーとしての有用性にいち早く着目し、鉄鋼製造設備への適用を可能と

するために測温範囲の拡大や、施工技術の開発などを積極的に進めてきた。

4 測定温度範囲の拡大

鉄鋼プラントの温度監視の場合、広い測温範囲が要求される。例えば高炉の炉体温度監視の場合、 300°C を超えることがあり、逆に空気分離プラントの場合には液体窒素レベルの極低温の監視が必要となる。

光ファイバー温度分布測定装置をこれらに適用するために、まず測温範囲を拡大するための開発に着手し、以下に述べるように $-200 \sim 500^{\circ}\text{C}$ の範囲の温度分布測定を可能とした。

4.1 高温測定

光ファイバー温度分布測定装置を高温環境で使用するために解決すべき点は以下の 2 つである。

- (1) 高温下でも光の伝搬特性が変化しない光ファイバーの開発と伝搬特性の変動に影響を受けにくい装置の開発。
- (2) 高温下で光ファイバーを機械的、化学的に保護することができるシース方法の開発。

まず、(1) 項については高温測定用光ファイバーを試作し、高温での損失特性や温度測定能力の調査、検証を実施した。また光ファイバー仕様の改良に合わせて、装置自体の仕様変更を行った。

光ファイバーは一般に Fig. 2 (a) に示すような構成になっており、コアやクラッドの材質、被覆材の特性などによってその性質が変化する。一般的な光ファイバーの場合、高温環境で使用すると光の伝送損失が大きくなり測温用には使用できなくなる。

高温測定用に開発した光ファイバーの仕様を Fig. 2 (b) に示す。母材中の不純物によって OH 基の吸収帯に起因する伝送損失が発生するのを防止するため、母材として不純物の極めて少ない石英を使用し、被覆材も高温での劣化、分解の少ないカーボン系、セラミック系のものを使用した。高温測定用光ファイバーの損失特性を

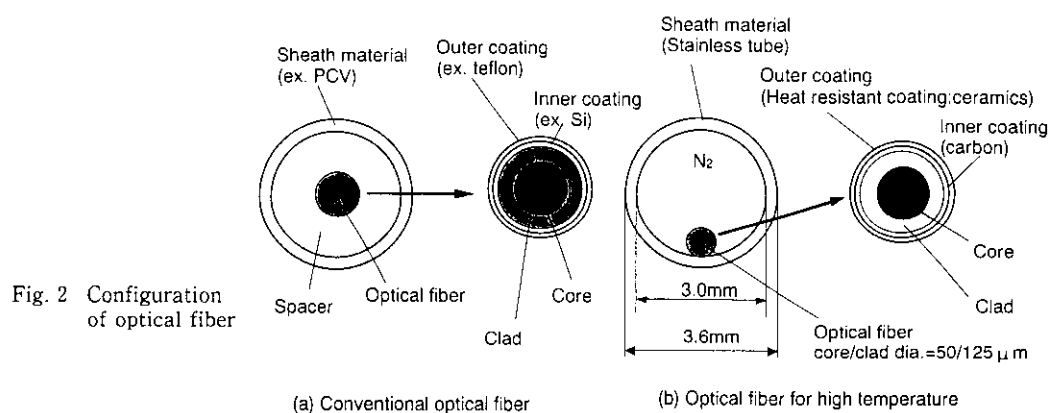


Fig. 3 に示す。300～500℃で損失がやや増大してはいるもののストークス光とアンチストークス光の損失増加量がほぼ等しいため、温度測定精度への影響はほとんどない。本光ファイバーによる测温精度は、0～500℃の範囲で±2℃以下である。

上記(2)項に関してはFig. 2 (b)に示すようにステンレスチューブをシース材として使用することで解決を図った。ステンレ

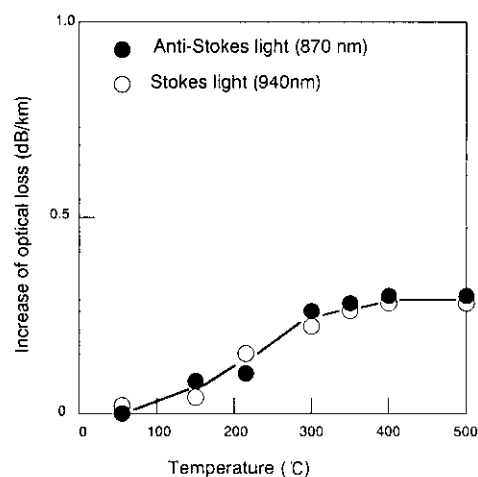


Fig. 3 Characteristics of optical loss in high temperature environment

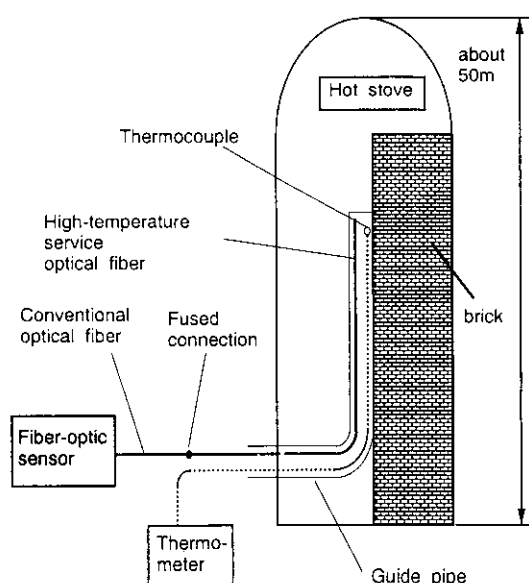


Fig. 4 Field test of high-temperature service optical fiber

ス自身の耐熱性は1000℃以上あり、十分満足できるものであるが、従来の樹脂性シース材と比較して、施工性が非常に悪いという欠点がある。そのため使用に当たってはその取り扱い方法について十分な注意が必要となる。

高温測定用光ファイバーをFig. 4に示すように高炉の付帯設備である熱風炉の蓄熱室内に設置して、高温下での測定精度と耐久性を確認するための実験を行った。本実験では蓄熱室内の環境温度が500℃程度となる位置に比較用熱電対を設置し、両者の测温値の比較を行った。

光ファイバー温度分布測定装置を用いて測定した温度分布の例をFig. 5に、熱電対の测温値との比較をFig. 6に示す。Fig. 6より光ファイバー温度分布測定装置の誤差は約5℃程度と評価できる。ただしこの誤差には熱電対の測定が点測定であり、光ファイバーによ

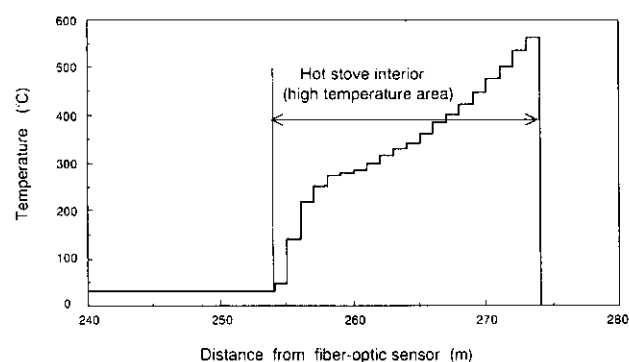


Fig. 5 Temperature distribution in hot stove measured by fiber-optic distributed temperature sensor

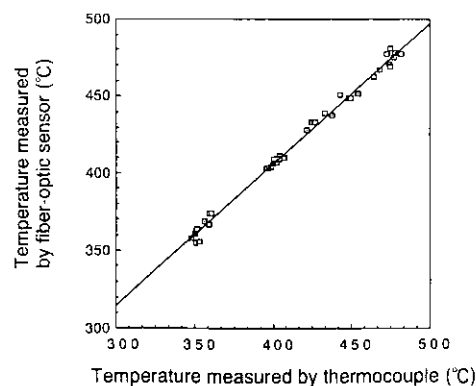


Fig. 6 Comparison of temperature data measured by fiber-optic sensor and thermocouple

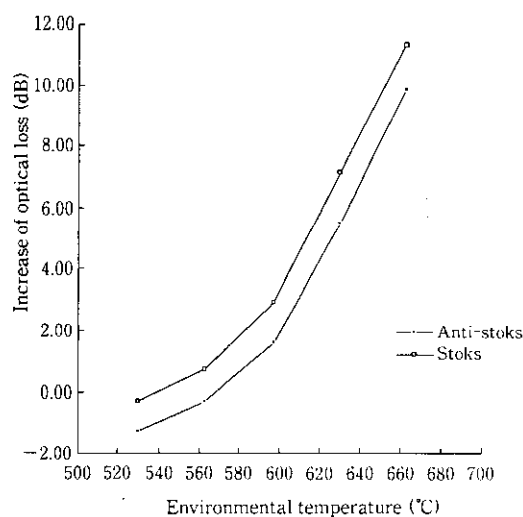


Fig. 7 Relationship between optical loss in optical fiber and environmental temperature (Increase of optical loss was measured 33 h after installing optical fiber)

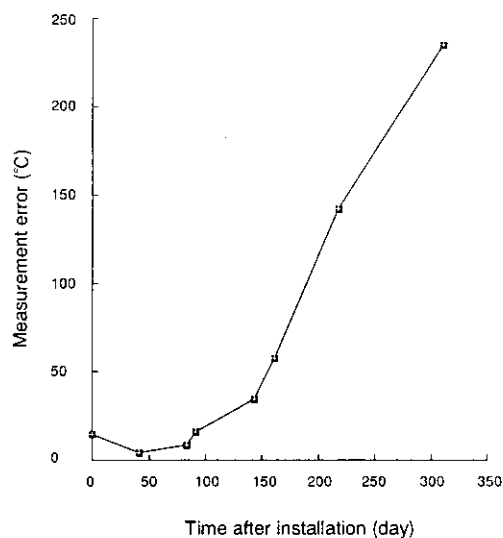


Fig. 8 Change of measurement error in high temperature environment of 500°C

る測定が1 mの範囲の平均値であることによる誤差を含んでいる。

光ファイバーを熱風炉内に設置してから33時間後の各環境温度における伝送損失の変化をFig. 7に示す。Fig. 7からわかるように600°Cを超える領域になると短時間で大きな損失が発生し測温不可能となる。この温度領域では被覆材等の影響と考えられる損失の発生が顕著であり、現状では安定な温度測定を行なうことは難しい。これに対して500°C前後では顕著な損失増加は生じておらず、この領域では連続的な測定が可能であることが明かとなった。

Fig. 8には本光ファイバーを数か月間蓄熱室中に設置し、連続測定を実施した場合の比較点での測温誤差の推移を示している。4箇月を超えると熱電対に比べて異常に高い値を示すようになるが、これは光ファイバーの被覆材が高温下で分解し、そこから発生した水素ガスが光ファイバー母材中に浸透してOH基を形成し、そのOH基の吸収帯によってストークス光の損失が徐々に増加したためと考えられる。

OH基の吸収に対する装置側の対策として、レーザ光の波長変更を行った。これはOH基の吸収帯が945 nm付近に存在しており、

Table 2 Optical loss according to the increase of OH radical in 3 months (dB/km)

	Use of 850 nm laser	Use of 900 nm laser
Stokes light	21.36	38.41
Anti-Stokes light	17.87	33.82

この吸収帯が940 nmの波長であるストークス光に影響を及ぼしているため、その影響を避けるためである。この結果、Table 2に示すように損失増加を半分程度に低減することができたため、高温測定用の装置には850 nmのレーザを使用することにした。

これらの実験結果より、今回開発した高温測定用の光ファイバー温度分布測定装置を使用すれば、500°C前後の環境下でも十分測定可能であることが確認できた^{5,6)}。

4.2 極低温測定⁷⁾

光ファイバー温度分布測定装置を用いて極低温を測定する場合、以下の点が検討のポイントとなる。

- (1) 低温での光伝搬特性、機械的特性が優れ、長期的に使用することができる光ファイバーの材質の選定。
- (2) 温度が低くなるほど微弱となるラマン散乱光の安定な検出。

検出能力は測定可能距離と測定精度に影響を与える。

極低温測定に使用した光ファイバーには低温での特性変化の少ないポリマー被覆を用い、測定装置は一般用の900 nmのレーザ光を用いたものを使用した。この装置による液体窒素温度レベルの測定精度は1300 mの距離において±2°C程度であった。

本装置を用いて希ガス製造設備の保冷槽中の温度分布の長期測定を行った。この場合も、環境温度が-178°C前後となる位置に比較用の測温抵抗体を設置し、定点での測温値の比較を行った。

Fig. 9に温度分布測定例として保冷槽が極低温から常温に昇温された場合の温度分布変化を示す。また6箇月間にわたる比較点の温度の誤差は±2.2°Cであり、オンラインでも十分な測温精度が得られることが確認できた。また光ファイバーの耐久性も問題のないことがわかった。

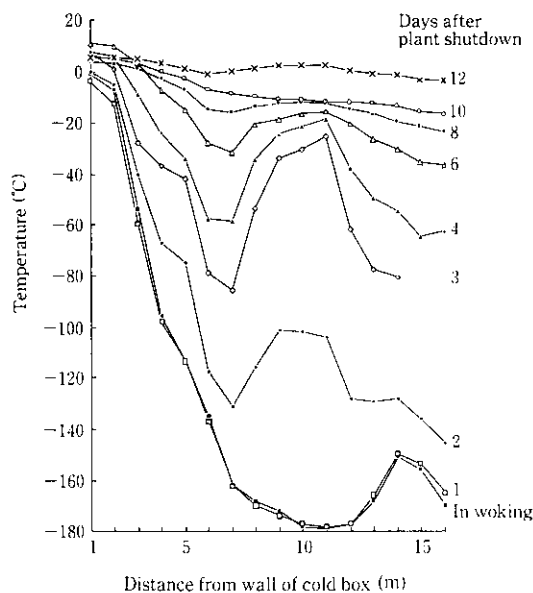


Fig. 9 Change in temperature distribution in cold box during stopping plant operation

5 光ファイバー温度分布測定装置のプラント温度監視への適用技術

光ファイバー温度分布測定装置を用いて設備の温度監視を行う場合、これまでの温度センサーと測温形態がかなり異なるため、その測温値の評価方法（装置を用いて測定した温度が監視すべき温度を正確に表しているかどうか）や光ファイバーの施工方法の確立が必要となるため、これらに関する検討を行なった。

5.1 測定温度の評価

5.1.1 温度分布測定値の評価

本装置の特徴は分布測定であるため多点での評価が重要となる。
Fig. 10 に高炉炉底レンガ内の温度分布測定値を熱電対による温度

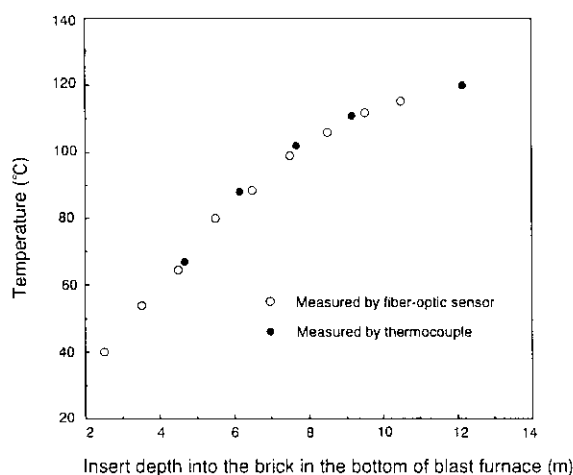


Fig. 10 Temperature distribution measurement

分布測定値と比較した例を示す。この場合の誤差平均は -1.8°C 、誤差のばらつきは 2.6°C であった。線平均の温度を測定する光ファイバー温度分布測定装置と点測定である熱電対とを比較した場合当然誤差が生じるが、広域の温度分布の測定が目的となる場合には特定のポイントにおける精度はあまり要求されないため、この精度は実用上十分なものと考えられる。

また Fig. 11 には温度分布がステップ状に変化する測定対象の温度分布測定結果を示す。ステップ的な温度分布が与えられた場合に、測温値が真温度を示すまでの距離を距離応答性と称するが、その90%応答が2 m程度となっており、装置の空間分解能が1 mであることを考慮すると温度分布が急変する設備の温度監視にも十分使用できる値であると評価できる。

しかし、逆に温度が低温方向にステップ状に大きく変化する場合、応答距離は5 mとかなり大きな値になる。これは極低温領域で散乱光が急激に減少した場合に、光電変換素子の出力が追従できないためと考えられ、改善の必要があるといえる。

5.1.2 監視能力の評価

これまでの性能評価は、センサーである光ファイバーと測定対象とが温度平衡に達していることを前提としている。しかし測定対象や施工方法によっては同じ温度にならない場合がある。Fig. 12 は後述する熱風炉の鉄皮温度測定に適用した場合に発生する温度誤差を評価したものである。測定対象との接触状態や光ファイバーの保護パイプ内の位置によって 30°C 以上の誤差が生じる場合があり、測定対象や測定目的によって慎重に温度評価を行う必要があることを示している。

温度分布測定装置をプラント監視に利用する目的のひとつに、温度異常が発生した箇所の同定がある。Fig. 13 は空気分離プラントにおける極低温物質の漏洩が温度により検知可能かどうかを調べた実験結果であるが、漏洩が発生した個所の温度に局所的な変化が明確に現われており、本装置は優れた異常検知能力を備えていることが確認された。

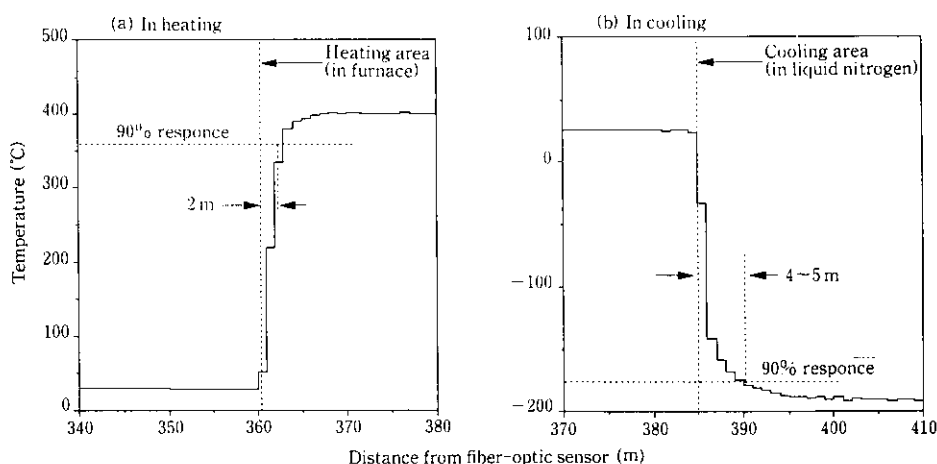


Fig. 11 Temperature distribution data in measuring objects with stepwise temperature change

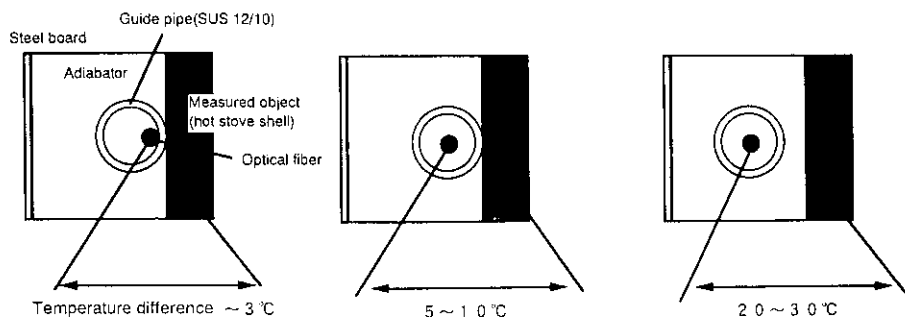


Fig. 12 Relationship between installation point of optical fiber and measurement error in measuring temperature of hot stove shell

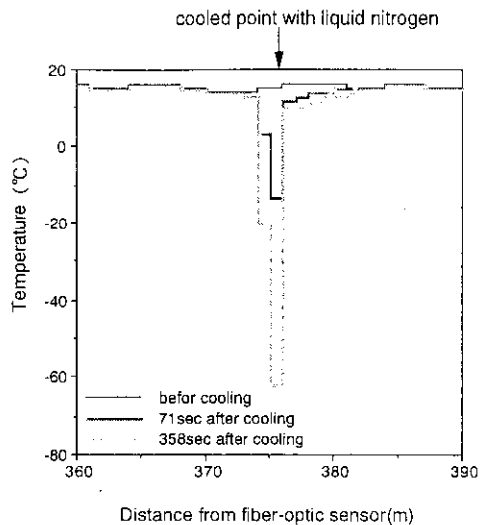


Fig. 13 Detection of liquid nitrogen leakage by fiber-optic distributed temperature sensor

5.2 施工技術

光ファイバー温度分布測定装置を用いて設備監視を行う場合、ステンレスチューブ入の特殊な光ファイバーをプラントに沿って敷設する必要がある。敷設方法によっては、测温値に影響がでたり、敷設作業自体が非常に困難になったりする場合がある。

5.2.1 光ファイバーの許容曲げ径

ステンレスチューブ入の光ファイバーはステンレスとファイバー素線との熱膨張率が異なるため、常温で施工した後に昇温あるいは降温されるとループ上に敷設された場合はファイバー素線がステンレス面に押しつけられ、光ファイバーにかかるストレスによってFig. 14に示すように損失増加が生じる。このストレスは施工するループの曲率によって変化する。したがって施工の曲率を十分考慮しないと施工後に测温誤差が生じたり、断線したりする場合があるため十分注意が必要である。

5.2.2 光ファイバー施工方法

光ファイバー温度分布測定装置を用いて温度分布を測定する場合、光ファイバーを対象物に密着させたほうが対象物の温度をより正確に測定することができる。しかし密着させるために光ファイバ

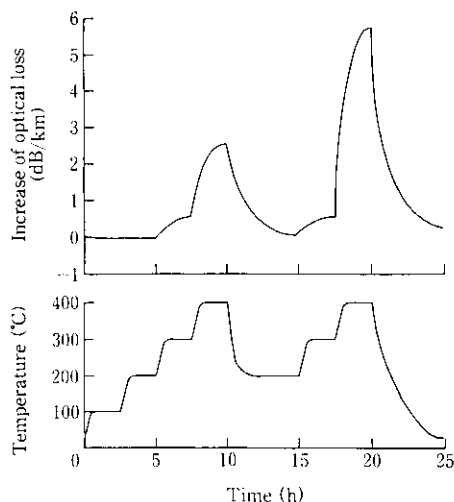


Fig. 14 Optical loss of optical fiber in stainless tube installed as loop

ーを埋め込むような施工方法を取った場合、光ファイバーが断線した際には再敷設が不可能になる。そのため、今回のオンライン測定実験ではガイドパイプを施工して、その中に光ファイバーを挿入する方式を採用した。このような施工を行う際にはパイプ中に押し込むためにステンレスチューブの径やガイドパイプの径、寸法、プルボックスの必要位置などの検討が重要となる。

6 熱風炉鉄皮温度測定への適用

以上述べた開発成果とプラント温度監視に適用するための知見をもとに、光ファイバー温度分布測定装置を熱風炉鉄皮温度監視に適用した。

熱風炉はその外面を鋼板製のシェル（鉄皮）で覆われているが、熱負荷が大きく、特に鋼板の溶接線部分については腐食割れなどがおこりやすいため、温度監視を行う必要がある。しかし熱風炉1基の溶接線の総延長は1000 m近くになるため、熱電対を使用して密度の濃い温度監視を行なおうとすると膨大な数の熱電対が必要となる。そのためFig. 15のように溶接線に沿って光ファイバーを敷設し、光ファイバー温度分布測定装置を用いて温度監視を行うことを計画した。

Table 3 に熱風炉鉄皮温度監視に使用した光ファイバーと装置の

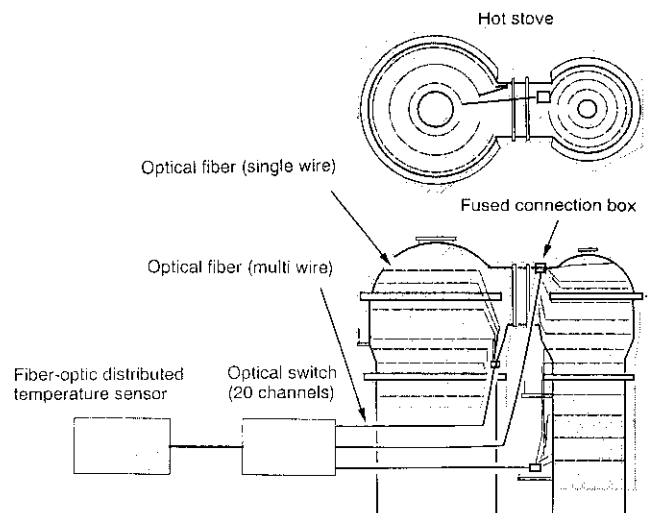


Fig. 15 Measurement system of hot stove shell temperature

Table 3 Specifications of optical fiber and fiber-optic distributed temperature sensor for hot stove shell monitoring

	SPEC
Fiber type	SI-50/125
Core	SiO ₂ 50±3 μm
Clad	SiO ₂ 125±3 μm
Coating material	Carbon, Polymer, Ceramics
Outside diameter	about 0.15 mm
Sheath material	SUS316
Sheath thickness	≒ 0.3 mm
Sheath outside diameter	≒ 3.6 mm
Measuring range	0~350°C
Accuracy	± 3 % FS
Measuring distance	1 km
Distance resolution	1 m
Measuring time	2 min/1 route

仕様を示す。鉄皮温度は 300°C を超える場合があるため、光ファイバーは高温測定用に開発したものを使用し、装置についても OH 基の吸収の影響の少ない 850 nm のレーザを使用した。

光ファイバーの敷設はステンレスチューブと素線の熱膨張の差による悪影響を考慮して、片端がフリーになるように 1 ループだけ熱風炉に巻く敷設方法を取り、全体で 20 ループの光ファイバールートを構成した。各ルートは光スイッチによって自動的に切り替えられて、温度分布の測定が行なわれる。光ファイバーは内径 10 mm のガイドパイプを鉄皮表面に密着させ、その中に挿入してい

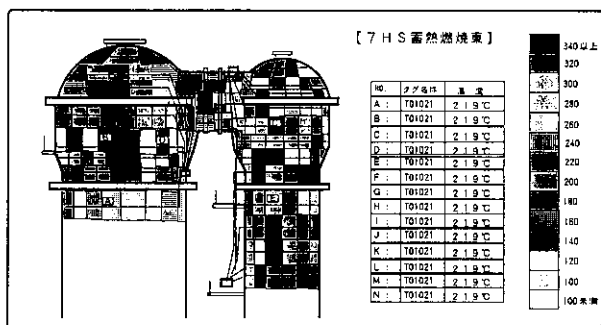


Fig. 16 CRT image of temperature distribution measurement in hot stove

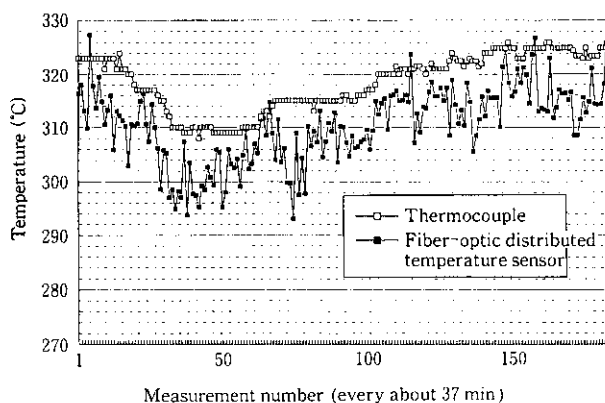


Fig. 17 Trend in values measured by fiber-optic sensor and thermocouple

る。また光ファイバールートの複数箇所には温度校正用の熱電対を設置している。ガイドパイプを含む鉄皮全体には、施工後保温材が巻かれた。

温度分布測定値はマイコンによって処理され、熱風炉の測温位置に対応する形で Fig. 16 のようにグラフィック表示される。Fig. 17 に特定箇所における熱電対測定値との比較を示す。前項に述べた理由により、比較用熱電対との差は生じてはいるものの、温度変化をよく捉えており、温度の異常上昇が生じている箇所を的確に捉えることが可能となった。

本装置は 1992 年 9 月に川崎製鉄水島製鉄所第 4 高炉 7 号熱風炉に最初に設置され、その後第 2 高炉 5 号熱風炉、第 4 高炉 6 号熱風炉に順次設置され、最終的には水島製鉄所の全熱風炉の温度監視用に設置される予定である。本装置の導入によって、熱電対を用いて同様の機能を実現する場合と比較して、設備費を $1/3$ 以下に低減することが可能となり、熱風炉の安定操業に寄与している。

7 結 言

光ファイバー温度分布測定装置を用いた広域設備監視技術について述べた。

- (1) 高温環境下での損失増加が少ない光ファイバーと、OH 基の吸収の影響を受けにくいレーザを用いた高温測定用光ファイバー温度分布測定装置を開発し、 500°C までの温度分布の連続測定を可能とした。また低温での特性変化の少ない被覆材を用いた光ファイバーを使用することによって、 -200°C の極低温までの測定が可能となった。
- (2) 光ファイバー温度分布測定装置を鉄鋼プラントの広域温度監視に適用するための必要となる測温精度評価、温度異常検出、光ファイバーの施工方法などの技術を確認した。
- (3) これらをベースに光ファイバー温度分布測定装置を熱風炉の鉄皮温度監視に適用し温度監視能力を格段に向上させると共に設備費を大幅に低減させることができた。

光ファイバー温度分布測定装置は従来の温度測定用センサーと全く異なる原理を応用した分布測定型のセンサーでありその応用範囲は広い。その反面、応用技術の開発が進んでいないためその能力をまだ十分に活用できていない面がある。今後も応用技術を中心に開発を進め、設備監視への利用を拡大していきたい。

参 考 文 献

- 1) D. A. Long: "Raman Spectroscopy", (1977), [McGraw-Hill International Book Co.]
- 2) 小川勝徳, 小沢保夫, 川神裕志, 筒井輝明, 山本 哲: 「光ファイバー分布型温度センサーの開発」, 第 3 回光波センシング技術研究会講演文集, (1989), 141-147
- 3) 飯田俊一, 松尾公義, 小沢保夫, 山本 哲, 山本 実: 「長距離型光ファイバー温度レーダの実用化」, 日立電線, (1992) 11, 1-4
- 4) G. W. Bryant, A. T. Paton, J. C. Scot, and A. D. Stuart: "Assessment of Special Fibers for Distributed Anti-Stokes Raman Ratio Thermometry", *International Journal of Optoelectronics*, 6 (1991) 1/2, 91-100
- 5) O. Iida, T. Iwamura, K. Hashiba, and Y. Kurosawa: "A Fiber-Optic Distributed Temperature Sensor for High-Temperature Measurements", 7th Symposium on Temperature, (1992), 745-749
- 6) 飯田 修, 岩村忠昭, 山本 哲: 「光ファイバー温度分布測定装置の測温範囲拡大と実プラントへの適用」, SICE 93, (1993), 323-324
- 7) 吉村耕三, 岡本和弘: 「光ファイバー温度分布計測システム - 163°C の温度が測定できる」, 高圧ガス, 29 (1992) 11, 776-779
- 8) 若見俊則, 岡本和弘, 米田英彦, 田中 茂: 「光ファイバー温度分布センサにおける局所温度上昇検出精度の検討」, OCS-92, (1992) 40, 51-56
- 9) 大場修幸, 野中敏光, 牟田敬一: 「分布型温度センサによる地域暖房配管の異常検知」, NKK 技報, (1992) 138, 70-77