

# 光エレクトロニクスの原子力プラントへの適用に関する研究

## Research on the Application of Optoelectronics to Nuclear Power Plants

白崎 秀和 (Hidekazu Shirosaki)\* 光田 弘道 (Hiromichi Mitsuda)\* 倉田 敏一 (Toshikazu Kurata)\*  
空本 誠喜 (Seiki Soramoto)<sup>†</sup> 前川 立行 (Tatsuyuki Maekawa)<sup>†</sup>

**要約** 半導体レーザ, 光ファイバなどの技術を基盤とした光エレクトロニクスは, 光ファイバー通信, コンパクトディスクなどの分野では実用化の域に達している。また, 原子力分野におけるウラン濃縮法の一つであるレーザ濃縮法も, 光エレクトロニクスの産物といえる。この光エレクトロニクスは, 今後ともあらゆる分野への応用が進められて行くものと考えられ, 将来の実用化をめざし, コヒーレント光通信, 光集積回路や光コンピュータ等の研究もなされている。

一方, 原子力発電所においてはデジタル式制御装置等が導入され, 光ファイバを使用した情報伝送が一部実施され始めているが, 今後, 更に光エレクトロニクスを適用し, プラントの信頼性向上を図れる可能性があると考えられる。

そこで, 本研究では, 光エレクトロニクスに関する技術を調査・検討し, 光スイッチを適用した手動弁の遠隔監視システムを提案した。更に, 提案したシステムについて, 原理の検証試験を行い, 原子力発電所への適用に関するフィージビリティ・スタディを実施した。その結果, 提案したシステムは有効であり, 弁開閉監視システムとして実現できる可能性のあることが確認された。

**キーワード** オプトエレクトロニクス, 弁, 監視, オンラインシステム, 光スイッチ, 光ファイバ, 半導体レーザ, 光分岐器

**Abstract** Optoelectronics, which is based on technologies such as laser diodes and optical fibers, is approaching the realm of practical application in the fields of optical fiber communications and compact disks etc.. In addition, laser enrichment, a type of uranium enrichment technique used in the nuclear field, can also be regarded as a product of optoelectronics. Application of optoelectronics in a wide range of fields is likely to continue in the future, and research is being conducted on coherent optical communication, optical integrated circuits, optical computers and other subjects in hopes of attaining practical application of these technologies in the future.

On the other hand, digital control equipment and other related devices have been installed and data transfer using optical fibers has been implemented on a partial basis at nuclear power plants, and optoelectronics is anticipated to be applied on an even broader scale in the future, thereby creating the potential for improving plant reliability.

In this research, we conducted an investigative study of technologies relating to optoelectronics, and proposed a remote monitoring system for manually operated valves that employs optical switches. Moreover, we conducted theoretical verification tests on the proposed system and carried out a feasibility study relating to application to nuclear power plants. As a result, the proposed system was found to be effective, and confirmed to have the potential of realization as a valve switching monitoring system.

**Keywords** optoelectronics, valve, monitoring, on-line system, optical switch, optical fiber, laser diode, optical splitter

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

<sup>†</sup> (株)東芝 原子力技術研究所

## 1. はじめに

近年、レーザなどを応用する光技術とエレクトロニクスの最新技術を駆使する光エレクトロニクスとよばれる新しい学問、産業分野が発展しつつあり、例えば、光ファイバー通信、コンパクトディスクなどの光電子機器は実用化の域に達している。また、原子力分野におけるウラン濃縮法の一種であるレーザ濃縮法も、光エレクトロニクスの産物といえる。

さらに、半導体レーザ、光ファイバ、光部品などの要素技術を基盤とした光エレクトロニクスは、今後もあらゆる分野への応用が進められて行くものと考えられ、将来の実用化をめざし、コヒーレント光通信、光集積回路や光コンピュータ等の研究がなされている。

一方、原子力プラントにおいてはデジタル式制御装置等が導入され、光ファイバを使用した情報伝送が一部実施され始めているが、今後、さらに光エレクトロニクスを適用し、プラントの信頼性向上を図れる可能性があると考えられる。

そこで、本研究では、光エレクトロニクスに関す

る技術を調査・検討し、原子力プラントへの適用性についてのフェージビリティ・スタディを実施したので報告する。

## 2. 光エレクトロニクス関連技術の調査

ここでは、光エレクトロニクスに関連する要素技術について調査し、原子力発電所への適用性の観点から整理した。但し、その際、既に原子力発電所へ適用されている技術は除いた。その結果、原子力発電所への適用が考えられる技術として16項目を抽出した。抽出した16項目を図1に示す。

さらに、各技術を原子力発電所へ適用した場合の適用効果・実現性・新規性等の観点から総合的に検討した結果、光のON/OFFを利用して手動弁の開閉状態を監視するシステムについて、今後研究を進めていくこととした。

## 3. システム概念の策定

まず、最初に、光のON/OFFを利用した手動弁の開閉監視システム（以下、弁開閉監視システムと

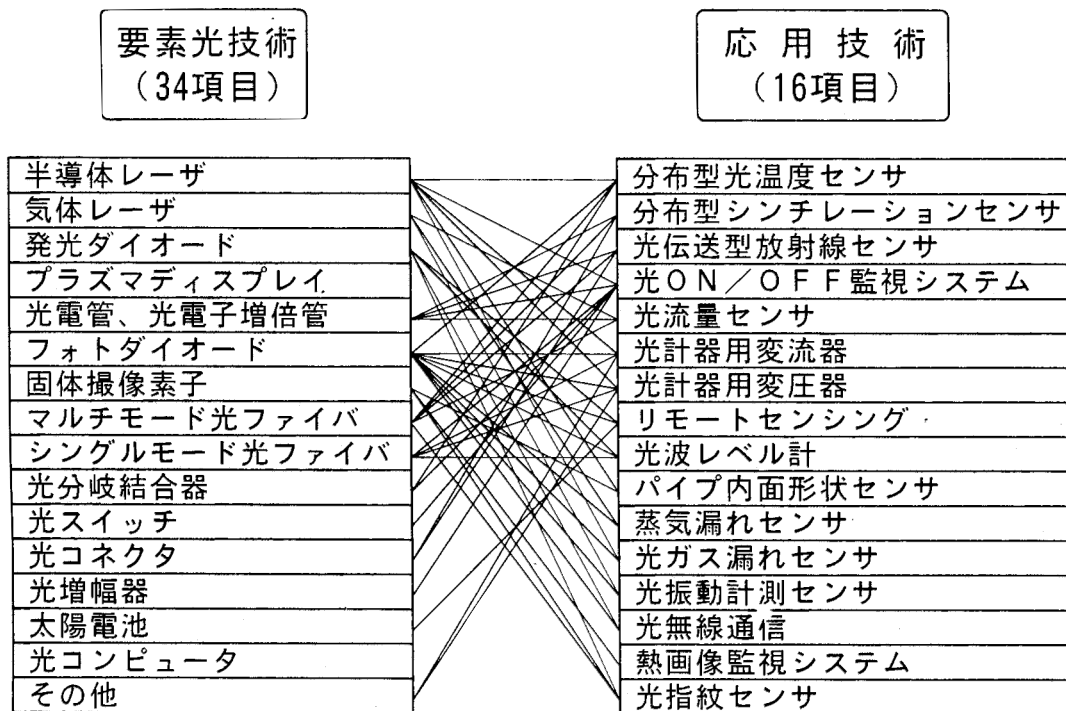


図1 原子力発電所への適用が考えられる光エレクトロニクス関連技術

いう)について、信頼性・保守性・経済性等の観点とセンシング手法の両面からの検討を行い、システム概念を策定した。

### 3.1 システムに対する要求事項の整理

弁開閉監視システムの概念を検討するにあたり、まずシステムに対する要求事項を信頼性、工事の容易性、保守性および経済性の観点から整理した。

- 信 頼 性：耐ノイズ性に優れていること  
 温度、湿度、放射線、振動など耐環境性に優れていること
- 工事の容易性：弁側の改造が少なく、敷設/設置工事の容易なこと  
 工事作業スペースをとらないこと
- 保 守 性：試験が容易にでき、異常発見が容易なこと  
 交換/点検が容易なこと  
 信号処理/データ処理が容易なこと
- 経 済 性：保守作業が安価なこと  
 ケーブル量の少量化

### 3.2 センシング手法の調査・検討

ここでは、弁の開閉状態を監視するための検出方法および信号伝送方法について調査し、それらの適用性について検討した。

#### 3.2.1 検出方法

弁の開閉状態を検出する手法としては、次のような方法が挙げられる。さらに、弁の状態をセンシングし、出力する信号としては、電気信号、画像信号、光信号およびパトロール員による確認等がある。

- (1) 弁の開閉による外観的構造変化の検出・認識  
 電気信号：リミットスイッチ、近接スイッチ等  
 画像信号：TVカメラ  
 光信号：光スイッチ、光ファラデー素子  
 その他：パトロール員による確認
- (2) 流体の状態の変化の検出

電気信号：流量計、温度計

(3) 弁の内部構造の変化の検出

画像信号：X線、超音波

#### 3.2.2 信号伝送方式

検出した信号の信号伝送方式としては次の方法が考えられる。

- (1) 専用電気ケーブルによる伝送  
 (2) 光ファイバによる伝送  
 (3) 無線による伝送  
 (4) 光無線による伝送

専用電気ケーブルによる伝送は、これまで多くの計測信号の伝送手段として確立されている技術である。

光ファイバによる伝送は、電磁ノイズの影響を受けない、高速多重伝送に適しているなどの特質があり、プラント内データ伝送に使用されている。最近では光センシング技術の進展に伴い、光センサと光ファイバを組み合わせた計測システムの開発が進められている。

無線による伝送はケーブルを必要としないため、ケーブル量を削減でき、計装系へのノイズの影響を受けにくい伝送方式であるが、無線伝送では建屋の壁を超えた伝送は困難であり、中継局を設置する必要がある。

光無線方式は、電波に代わり光を媒体として伝送を行うものであり、ケーブルを必要とせず、無線に比べてもノイズ等の影響を受けないメリットがある。しかしながら、光の直進性から、送信局、受信局の設置位置の検討には無線方式以上の配慮が必要である。

#### 3.2.3 検出方法と信号伝送方式の組み合わせ

電気信号として検出された信号を電気ケーブルで伝送する場合や、光信号として検出された信号を光ケーブルで伝送する場合には、信号形態の変換のための装置が不要であるが、電気信号で検出された信号を光ファイバあるいは無線で伝送する場合には、電気/光、電気/電波等の変換が必要となる。さらに、電気信号として検出するためには、検出部分に電源が必要である。

光による検出方法と光ファイバを組み合わせた方

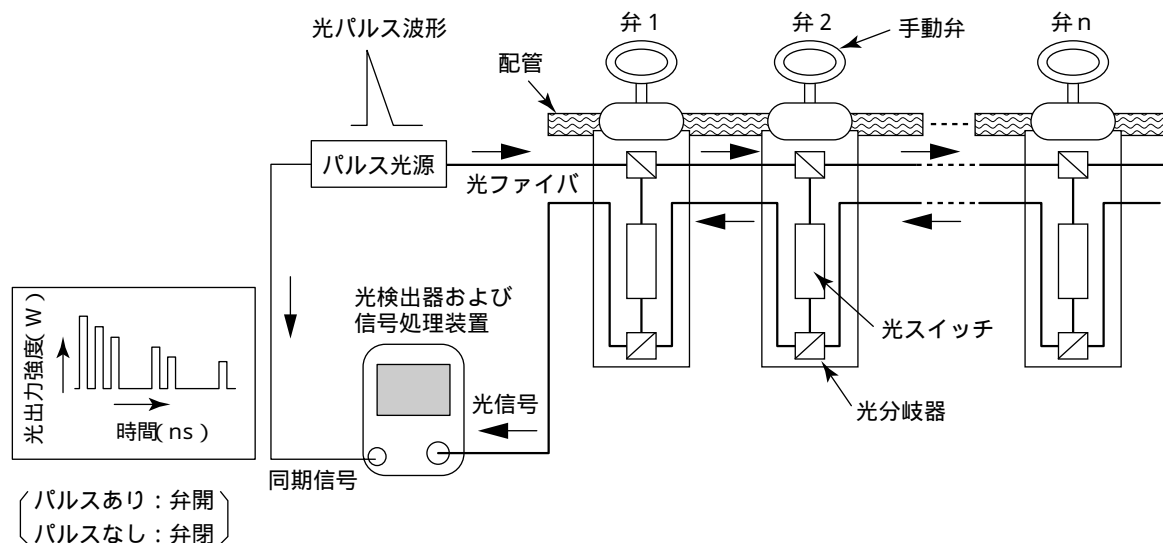


図2 弁開閉監視システムの概念図

式であれば、検出部分の電源が不要、少数の光ファイバによる多点の伝送が可能、信号形態の変換が不要という特質があり、現場設置機器が不要であること、ケーブル量が少量で済むなどの点で優れていると考えられる。

### 3.3 システム概念の検討

前節に示した数種類の異なるセンシング手法の調査・比較の結果、光信号による検出方法と光ファイバによる信号伝送方式の組み合わせが、弁開閉監視システムに対して有望であるという結果が得られた。そこで、この光ファイバを利用したセンシング手法について

- ・検出方法（光センサ）
- ・信号伝送方式（透過型／反射型）

の観点から検討を行い、図2のシステムを考案した。このシステムはパルス光を利用したもので、パルス光源、光検出器、光分岐器、光センサおよび光ファイバ等の光エレクトロニクス関連機器で構成される。

この光ファイバセンシング手法は、パルス光を光分岐器により各監視点に分岐し、各監視センサで変調を受けた光を光検出器で検出するもので、光検出部で得られる信号は、各監視点の状態を表すパルス光の時系列データとなっている。

本方法は、手動弁の開閉と光センサのON / OFFを連動させ、全ての手動弁の状態を遠隔で監視でき

るものである。このセンシングシステムは、センシングの全てを光信号で行い、信号伝送・監視センサ部を光ファイバ・光センサとしたものであり、このシステムの特徴としては、

- (1) 電磁気の影響が少ない
- (2) 化学的・腐食的雰囲気強い
- (3) 監視点で電源等の設備が不要
- (4) 2本の基幹信号ケーブルだけで多点監視が可能

が挙げられる。

次に、構成機器の基本性能について調査し、手動弁の開閉状態監視への適用可能性について検討した結果について報告する。

#### 光源：

光ファイバセンシングに対して適用が期待される光源としては、半導体レーザ（LD：Laser Diode）、固体レーザ、気体レーザ等が挙げられる。これらの光源をシステムに適用する場合に求められる性能としては、短パルス化、光強度、制御性、小型化および光ファイバ接続性が挙げられる。

LDは小型化／制御性において秀でた光源であり、光ファイバとの接続性においても、モジュール化が比較的容易であり、レンズ系を介して高い効率で光ファイバに投光可能で

ある。また、最近の光強度も飛躍的に増強されており、光ファイバセンシングに最適な光源と考えられる。

一方、固体レーザーや気体レーザーは、制御性や光ファイバとの接続性において課題を残しており、ここでの光ファイバセンシングには適用しづらい光源である。

#### 光検出器：

パルス測定に対応した検出器としてはフォトダイオード (PD : PhotoDiode), アバランシェフォトダイオード (APD : Avalanche PhotoDiode), 光電子増倍管 (PMT : PhotoMultiplier Tube), および光サンプリングオシロスコープ (OSO : Optical Sampling Oscilloscope) がある。

この中で、最も応答性に優れた検出器は、10psの時間分解能を有するOSOである。その他の光検出器もOSOの性能には及ばないものの、優れた応答性を有している。

感度においては、PMTやOSOは微弱光測定が可能な優れた光検出器である。またAPD, PDも暗電流で検出下限を制限されるものの、高速、高感度な検出器であり、赤外光には高い感度を有するものがある。

信号処理においては、OSOは、他の検出器とは異なり、検出信号波形の表示/出力機能を有した装置で、信号処理も最も容易に行える光検出器である。

#### 光ファイバ：

光ファイバは、マルチモード (MM : Multi Mode) とシングルモード (SM : Single Mode) の2種類に大別できる。マルチモードファイバはコア/クラッド径が50  $\mu\text{m}$  / 125  $\mu\text{m}$ , シングルモードファイバは10  $\mu\text{m}$  / 125  $\mu\text{m}$  の光ファイバである。

マルチモードファイバは取り扱いが容易で、LD光源と高効率で結合できる。しかし、損失が大きく、曲げや振動に対して出力光強度の変動が見られる。

一方、シングルモードファイバはマルチモ

ードファイバよりも取り扱い性がやや劣るものの、曲げや振動の影響を受けにくく、また伝送損失も小さいという利点がある。

弁開閉監視に適用する場合、長距離に渡りセンシングする必要があり、伝送損失が小さく、振動、曲げなどの耐環境性に優れたものが適当である。以上を総合的に判断した場合、シングルモードファイバが適当と考えられる。

#### 光分岐器：

光分岐器の光ファイバセンシングへの適用に際して、光学面での重要な課題は損失特性である。候補として考えられる分岐器としては光ファイバ融着型、ミラー型、導波路型の3種類があり、最も損失の少ないものは光ファイバ融着型である。多数の点を1ラインの光ファイバで監視する必要があり、適当な分岐比で光をセンサ部に導く必要がある。

#### 光センサ：

手動弁を監視する光センサとしては、光スイッチの適用が見込まれる。

光スイッチは、機械式/非機械式のものに大別され、各々に対しても幾つかのタイプのもものが考えられている。機械式では、プリズム移動型、ロッドレンズ移動型、光ファイバ移動型、鏡回転型などが考案されており、この中でも制御性および接続損失において優れたものは、光ファイバ移動型である。一方、非機械式では、電気光学・磁気光学的な効果を利用したものがあり、これらは電気信号により駆動するものである。

弁開閉監視システムに適用する場合、保守性の面から考えると、非機械式は有利とはいえ、機械式のもの特に光ファイバ移動型が適当と考えられる。光スイッチを手動弁と連動させる方法としては、

(1) 手動弁のストロークに連動させる

(2) 手動弁のハンドルの上下動に連動させるなどの方式が考えられる。

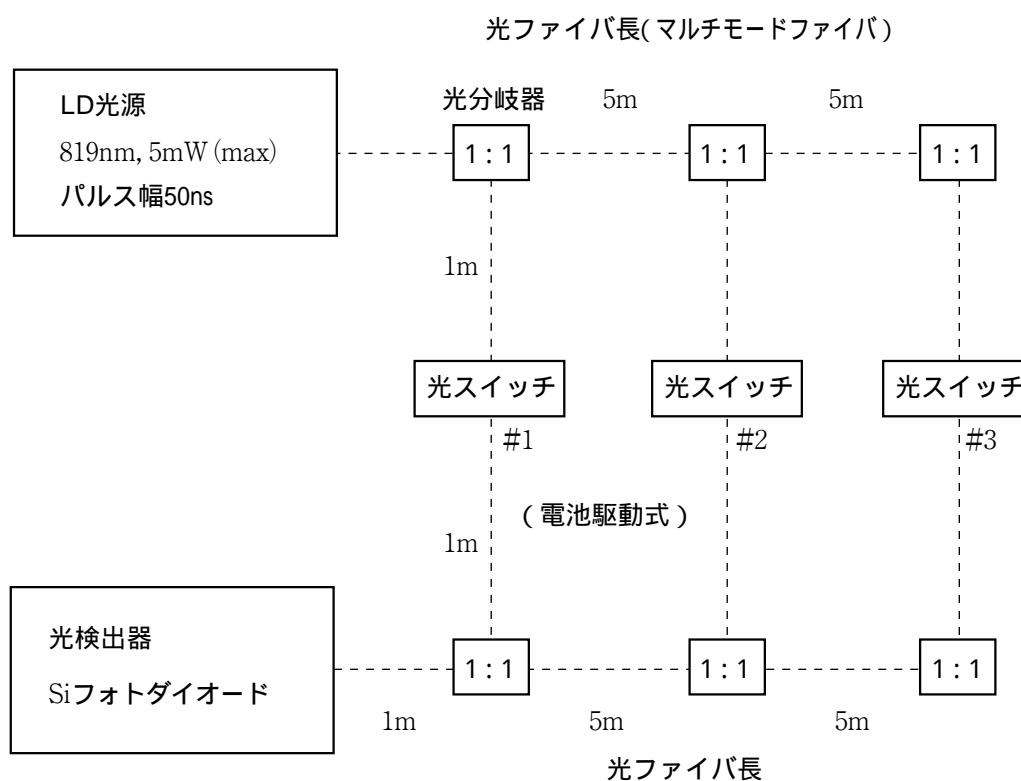


図3 原理検証に関する試験装置の概略図

#### 4. 光ファイバセンシングの原理検証試験

図2に示した弁開閉監視システムの実現可能性を評価するためには、原理的な可能性を検証するための基礎試験が必要である。そのためには、モデルシステムを製作し、これを用いて実際に基礎試験を実施することが望ましい。そこで、現在市販されている要素部品を用いて、簡単なモデルシステムを製作し、光スイッチを機器監視センサとした光ファイバセンシングの原理検証試験を行った。

##### 4.1 試験装置および試験方法

原理検証試験では、パルス幅50nsの半導体レーザ（波長819nm、ピーク強度5mW）を使用した。3個の光スイッチを5m間隔で配置し、光分岐器および光ファイバで並列に繋いで試験システムを組み上げ、パルス光を光検出器（PD）で検出した。さらに、得られたパルスの時系列データから光スイッチのON/OFF状態を判断した。なお、光スイッチは電池駆動式の光ファイバ移動型、光分岐器はミ

ラー型のものであり、光ファイバはマルチモードを使用した。試験装置の概略を図3、4に示す。

##### 4.2 試験結果

試験装置による測定結果を図5に示す。(a)は全弁開状態、(b)は弁2のみ閉状態を模擬した場合の結果である。この図からわかるように、光スイッチのON/OFF状態を光パルスの時系列データから確認することができた。

また、50nsのパルス光に対しては、監視点間隔（光ファイバ長）が5m以上あれば監視可能であることが確認された。

しかしながら、同時に次のような課題も明らかになった。

- (1) 監視点数を増加させるためのパルス光源の高出力化
- (2) 監視点間隔を縮めるためのパルス光源の短パルス化
- (3) 保守性を向上させるための光スイッチの電源フリー化

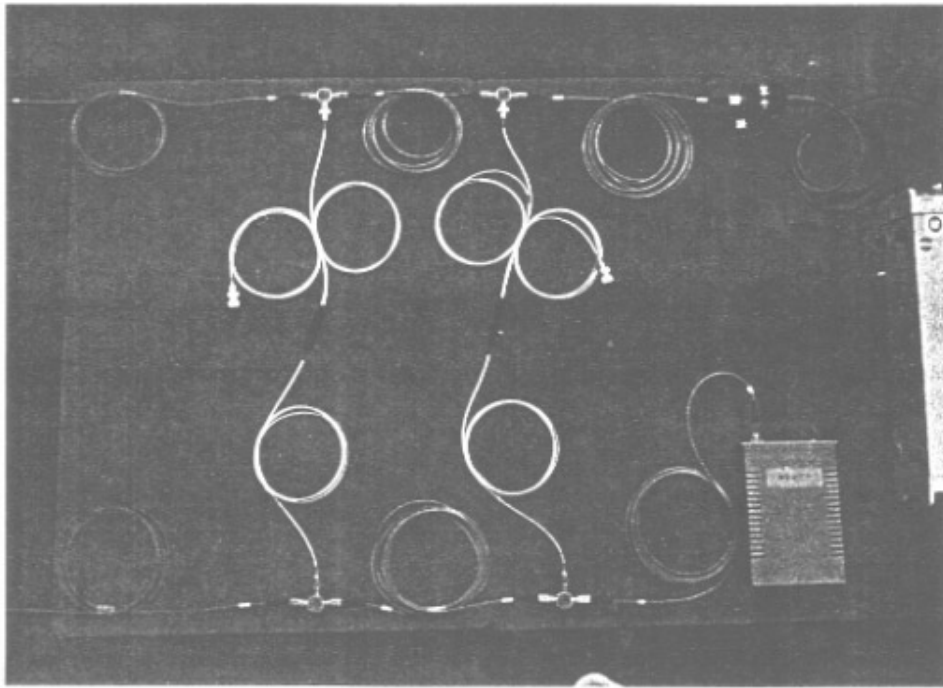


図4 試験装置の外観写真

- (4) 光分岐・接続損失を低減させるための光分岐器の融着接続方式化
- (5) 光パルスの伝送損失を低減させるためのシングルモード光ファイバの採用

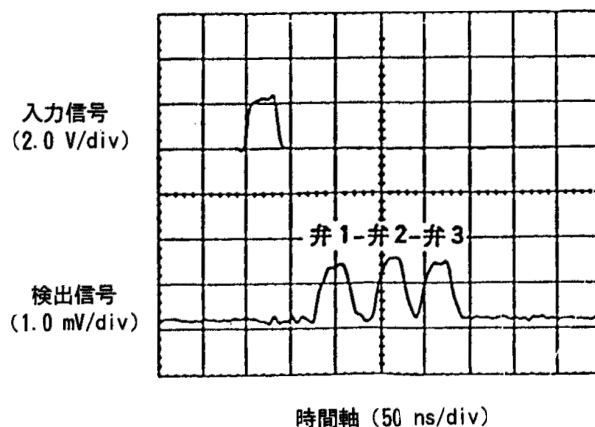
失化等の要素部品の改良・試作，ならびに，光スイッチの弁への取付方法について検討を実施していく予定である．

## 5. まとめ

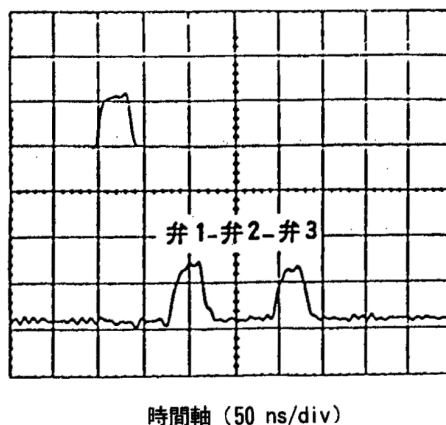
本報告においては，光エレクトロニクスに関する技術を調査・検討し，光スイッチを適用した手動弁の遠隔監視システムを提案した．さらに，センシング手法の調査・検討を実施したところ，光スイッチによる弁開閉状態の検出方法および光ファイバによる信号伝送方式が有望であるという結果を得た．

そこで，この方式を適用した弁開閉監視システムの概念を策定し，既存の光スイッチや光分岐器等の要素部品を用いて，システムとしての実現性可能性を検証をするべく基礎的な実験を行った．

その結果，考案したシステムは，手動弁等の弁の開閉監視に対して原理的に実現可能であることが確認された．しかしながら，同時に，システムを実用化するためには要素部品の改良が必要であることも判明した．今後は，パルス光源の高出力化・短パルス化，光スイッチの電源フリー化，光分岐器の低損



(a) 全井開状態



(b) 井2のみ閉状態

図5 原理検証に関する試験結果

### 参考文献

- (1) 左貝潤一 杉村陽, 光エレクトロニクス, 朝倉書店 1993
- (2) 野田健一 大越孝敬監修, 光エレクトロニクスハンドブック, 昭晃堂 1989
- (3) 応用物理学会 光学懇話会編集, オプトエレクトロニクス, 朝倉書店 1986
- (4) 大森豊明編集, センサ実用便覧, フジ・テクノシステム 1985
- (5) 青柳全 他, 光センサ・テクノロジー集成, オプトロニクス社 1990
- (6) 大久保勝彦, ISDN時代の光ファイバ技術, 理工学社 1991
- (7) 高原幹夫, 新技術シリーズ 光ファイバ, パワー社 1986
- (8) 浅見義弘監修, レーザ工学, 東京電機大学出版局 1988
- (9) 矢島達夫 他編集, 新版レーザハンドブック, 朝倉書店 1989
- (10) レーザ協会編集, レーザ応用技術ハンドブック, 朝倉書店 1991