

電力用構内光伝送システムの開発

Development of Intra-station Optical Data-transmission System for Electric Power Systems

近年、電力系統の制御の分野でも、各種のコンピュータをはじめとするデジタル機器の進出が著しい。これらのデジタル機器間の情報伝送路には、電力系統からの誘導障害を受けない伝送システムが必要となるため、東京電力株式会社の指導のもとに、日立製作所及び日立電線株式会社では共同して短距離・中容量の構内光伝送システムを開発した。

この光伝送システムは、発光ダイオード、ポリマクラッドファイバ、pin形ホトダイオードを用いており、2 km、2 M bps までの伝送が可能である。このシステムの工場試験及び超高压変電所での現地試験の結果、優れた耐雑音性と目標を上回る符号誤り率(10^{-11} 程度)を達成した。この結果により、水力発電所や工場内通信など多くの分野への応用の道が開かれた。

この論文は、開発した光伝送システムの概要並びに工場試験、現地試験及び応用システムについて述べたものである。

黒岩 豊利*	Kuroiwa Toyotoshi
三木 義照**	Miki Yoshiteru
立川 真**	Tachikawa Makoto
工藤 博之***	Kudô Hiroyuki
佐野 和汪***	Sano Yoshihiro
田中 満雄****	Tanaka Mitsuo
御子柴 晃一*****	Mikoshiba Kôichi

1 緒 言

最近の電力需要の増大及び系統規模の拡大に伴い、発電所や変電所などでは各種のコンピュータをはじめとするデジタル制御機器を導入し、省力化や自動化が進められている¹⁾。この場合、制御機器間の情報の伝送を電磁誘導障害の大きな電気所の構内、又は電気所間で行なう必要があり、誘導雑音のために高信頼度な伝送が難しくなった。

光ファイバ通信方式は、絶縁性や耐雑音性の点で電力用通信方式に適している²⁾。東京電力株式会社及び関西電力株式会社は、都市部電気所間の制御情報の伝送に光ファイバ通信方式を適用し、地下洞道内の電力ケーブルと併設するための実用化システムを日立製作所及び日立電線株式会社と共同して開発した³⁾。しかし、電気所間光伝送が中継を必要とする長距離・大容量の伝送系であるのに対し、電気所構内伝送は短距離で伝送容量も比較的少ないなど、システム条件や構成要素が異なるため新たな開発を必要とした。

この論文は、電気所構内伝送をはじめとする短距離・中容量の伝送に応用できる光伝送システムの開発と、工場試験、超高压変電所での現地実証試験及び応用システムについて述べたものである⁴⁾。

2 電気所構内伝送方式

2.1 光ファイバ通信方式適用の必要性

電力系統のデジタル制御方式の一例として、超高压変電所構内のデジタル伝送路に光伝送方式を適用した例を図1に示す。変電所では、

- (1) 電力系統や設備の異常の有無など運転状態の監視
- (2) 監視結果に基づく適切な制御や操作(系統制御)
- (3) 事故発生時の異常状態の検出及び事故の迅速な除去と局限化(系統保護)

などに必要なデータを、構内の送電線や母線などから伝送している。この構内伝送路の担う責務は大きく、落雷やサージ

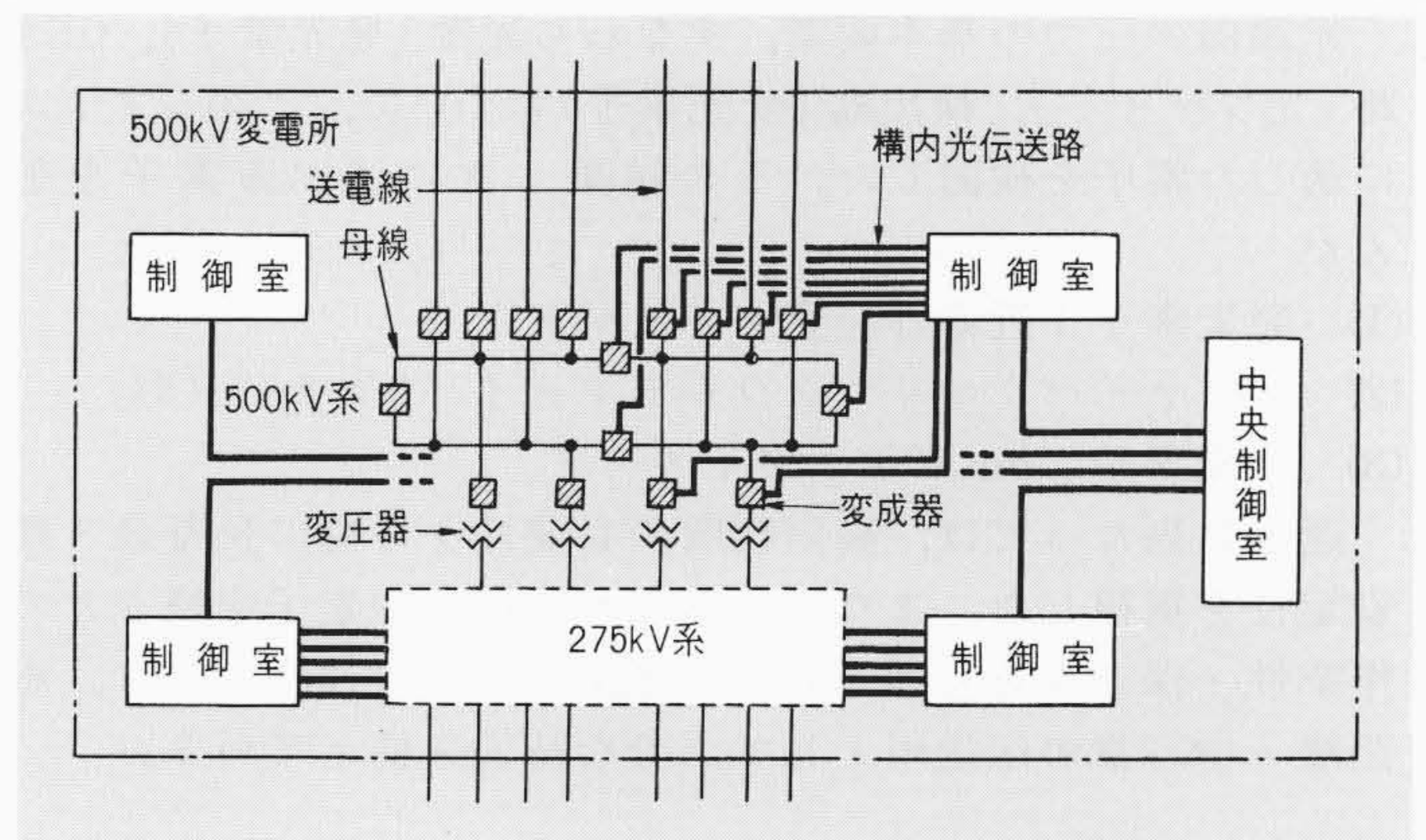


図1 デジタル制御方式と構内伝送 系統側で制御情報をデジタル量に変換して伝送するため、電磁誘導雑音の影響を受けにくい構内伝送方式が望まれていた。

雑音、電磁誘導などの妨害があっても、制御情報が絶対に途絶しないよう十分に高信頼度な伝送を行なう必要がある。

一方、これまでの電気所間光伝送方式の検討から誘導障害を受けない光ファイバ通信方式の有用性が確認されたので、これらの基盤技術をもとに電気所構内伝送をはじめとする短距離・中容量の伝送に適用できる光伝送システムの開発に着手した。

2.2 システム仕様

電力用構内光伝送システムに必要なシステム条件を総合的に検討し、開発する光伝送システムの基本仕様を次のように定めた。

- (1) 最長伝送距離：2 km、無中継

発電変電所構内の伝送路は600 m以下であり、工場内通信、その他への応用を考えても大半のものは2 km以下のシステム

* 東京電力株式会社技術開発研究所 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所日立研究所 **** 日立製作所中央研究所
***** 日立電線株式会社研究所 工学博士

である。

(2) 最大伝送速度：2 M bps

電力用通信の場合、表示や監視用の低速伝送系と保護や制御用の高速系とがある。これらのシステムの伝送量(情報の種類・数)、品質(量子化ビット数)、頻度(サンプリング周波数)などから、2 M bps あれば多くのシステムに適用できることが分かった。

(3) 符号誤り率 $<10^{-9}$

電力用通信系の伝送品質は、一般伝送系より高い品質が要求される。そこで、光伝送路の符号誤り率は最も高い信頼度を必要とする超高压系主保護継電器のロック率($>10^{-8}$)より良い 10^{-9} 以下とした。

(4) 耐候性：温度 $-20\sim+70^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $40\sim100\%$ (屋外装置)

電気所の構内伝送装置は、寒暑の厳しい屋外に設置されることもある。更に、光ケーブルについては水没することも考慮した。このほか、耐震性、塩害対策なども考慮した。

(5) 作業性：現行方式と同程度であること

光ケーブルの場合、布設、接続、配線など保守・点検の難しさが懸念される。そこで、実作業に必要な引張強度や曲げ半径を十分考慮した構造とし、屋外配線用と屋内配線用を用意した。

2.3 光伝送素子の選定

光通信の三つの基本要素、すなわち光源(発光素子)、伝送路(光ファイバ)、検出器(受光素子)について、このシステムに適した素子を検討した。その結果、次に述べる素子を選んだ。

- (1) 発光素子：近赤外発光ダイオード
- (2) 光ファイバ：ポリマクラッドファイバ(多モード形)
- (3) 受光素子：pin形ホトダイオード

選定に当たっては、高信頼度の必要性から特に長寿命・高安定性を重視した。また、ファイバの接続や素子交換などの作業性・保守性をも考慮した。光出力や応答速度なども、短距離・中容量の伝送用として十分な特性を備えている。

3 実証試験システム

このシステムの応用例の一つとして、電力系統の中でも高い信頼度を必要とするデジタル保護継電装置と組み合わせ、超高压変電所の構内に設置して高信頼性を実証した。その概要を次に述べる。

3.1 伝送フォーマットとデータ誤り制御

伝送する信号は以下に述べる3種であり、光ケーブルは予備を含め4心としている。

- (1) サンプリング同期信号(制御室 → 送電線側信号変換盤)
- (2) 電圧瞬時値 } (信号変換盤 → 制御室)
- (3) 電流瞬時値 } (信頼度配分のため別送する)

電圧・電流瞬時値は、サンプリング同期信号に従い600 Hzでサンプリングされ、図2に示す伝送フォーマットによって54k bpsで光ファイバ内を時分割サイクリック伝送される。

光伝送路の回線品質は、符号誤り率 10^{-9} 以下を目標としているが、更に伝送の信頼度を向上するため、次に述べるようなデータ誤り制御を行なっている。

- (1) データに巡回符号検定ビットを付加し、誤りを検出する。
- (2) 零相量を照合し、入力部の回路故障を検出する。
- (3) 同期不良・回路不良フラグを伝送し、受信側に報知する。
- (4) 符号誤り監視のため、固定ビットを伝送し、照合する。

巡回符号の採用により、1ビット誤りの見逃し誤り率を回線誤り率の3乗程度に小さくし、大幅に信頼度を向上できる。

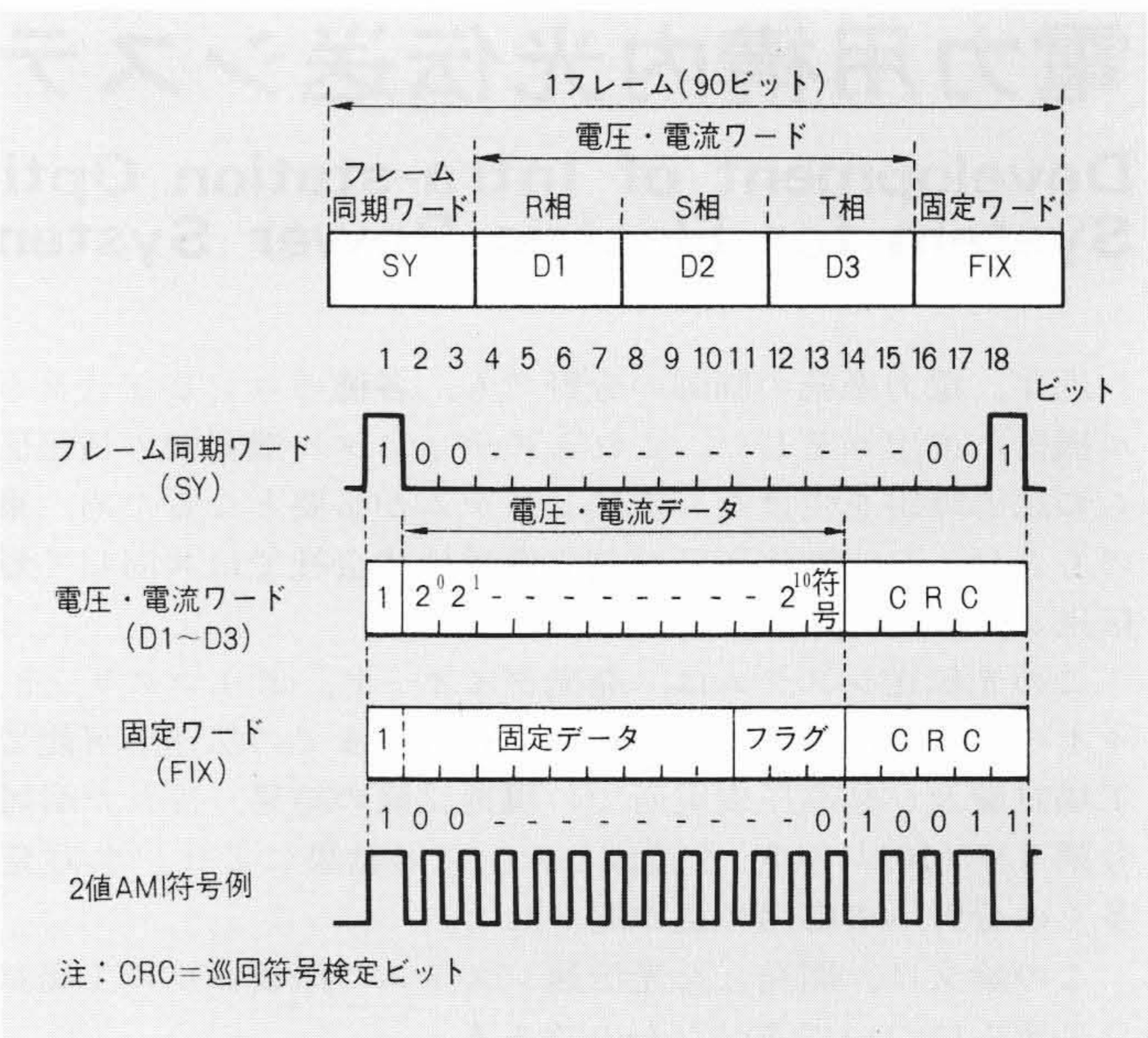


図2 伝送符号フォーマット 電圧データと電流データは、信頼度向上のため別送する。固定データは、回線品質の常時監視に用いる。

また、零相照合は電圧又は電流の三相量の和と零相量とを比較する方法で、電力情報の特性を利用している。

符号誤り監視機能については、これまで構内伝送に光伝送方式を適用した例がないため、光伝送路の回線品質を常時評価できるように付加した。

このほか、符号形式に2値 Alternate Mark Inversion (AMI) 符号を採用した。この符号形式は、マーク率変化やレベル変動に強いなどの特長がある³⁾。

表1 電気所構内光伝送システムの性能諸元 54k bpsで光伝送される電圧・電流データをMINIDIC30Eに入力し、保護継電器として系統事故を監視するとともに、光伝送路の符号誤りを分析し、その集計結果を1日2回タイプライタに出力している。

No.	項目	特性	備考
1	入力データ量	電流4、電圧4	各三相分及び零相分
2	サンプリング周波数	600 Hz	
3	量子化ビット数	12ビット	符号1ビットを含む
4	符号方式	2値AMI符号	
5	発光素子	発光ダイオード	波長0.8 μm
6	受光素子	pin形ホトダイオード	
7	伝送速度	54k bps	最大2 M bps
8	受信電力範囲	-40~-20 dBm	符号誤り率 $<10^{-9}$
9	伝送損失	10 dB/km以下	
10	伝送距離	600 m	最大2 km
11	心数	4心	予備1心を含む
12	ファイバコア径	150 μm	
13	開口数	0.4	シリコン樹脂クラッド
14	引張強度	100 kg以上	
15	最小曲げ半径	10 cm	
16	温度	-20°C ~ +75°C	
17	演算処理装置	MINIDIC 30E	
18	保護継電要素	距離(モ-)要素	
19	フォルトロケータ	精度±5%	
20	符号誤り分析部	1~10ビット誤り計数	1日2回自動点検時出力

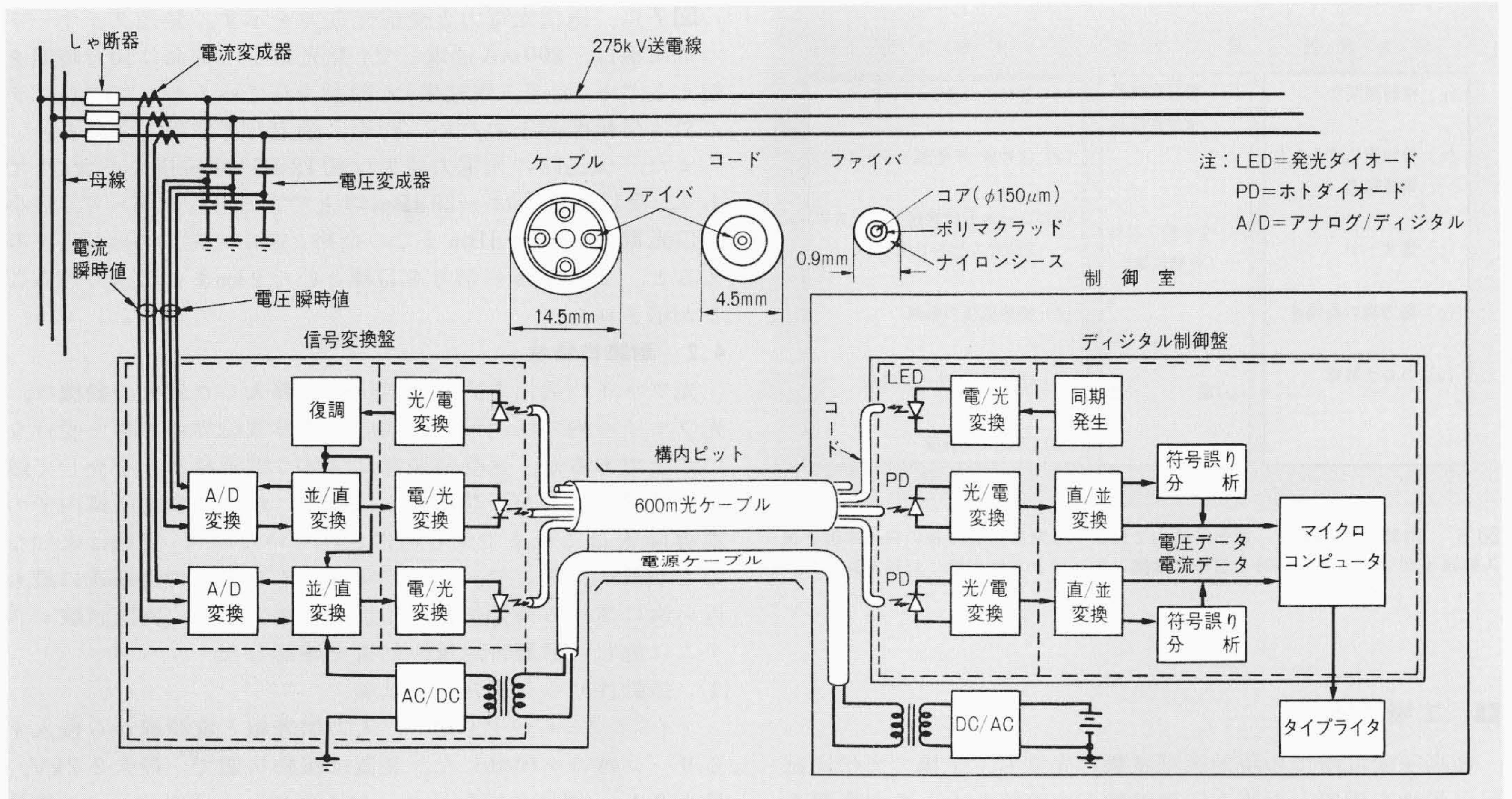


図3 システム構成 屋外に設置する信号変換盤と、光ケーブル及び制御室内のデジタル制御盤から成る。信号変換盤では、サンプリング同期信号に従って、電圧・電流データを光信号に変換して伝送する。

3.2 実証試験システムの構成

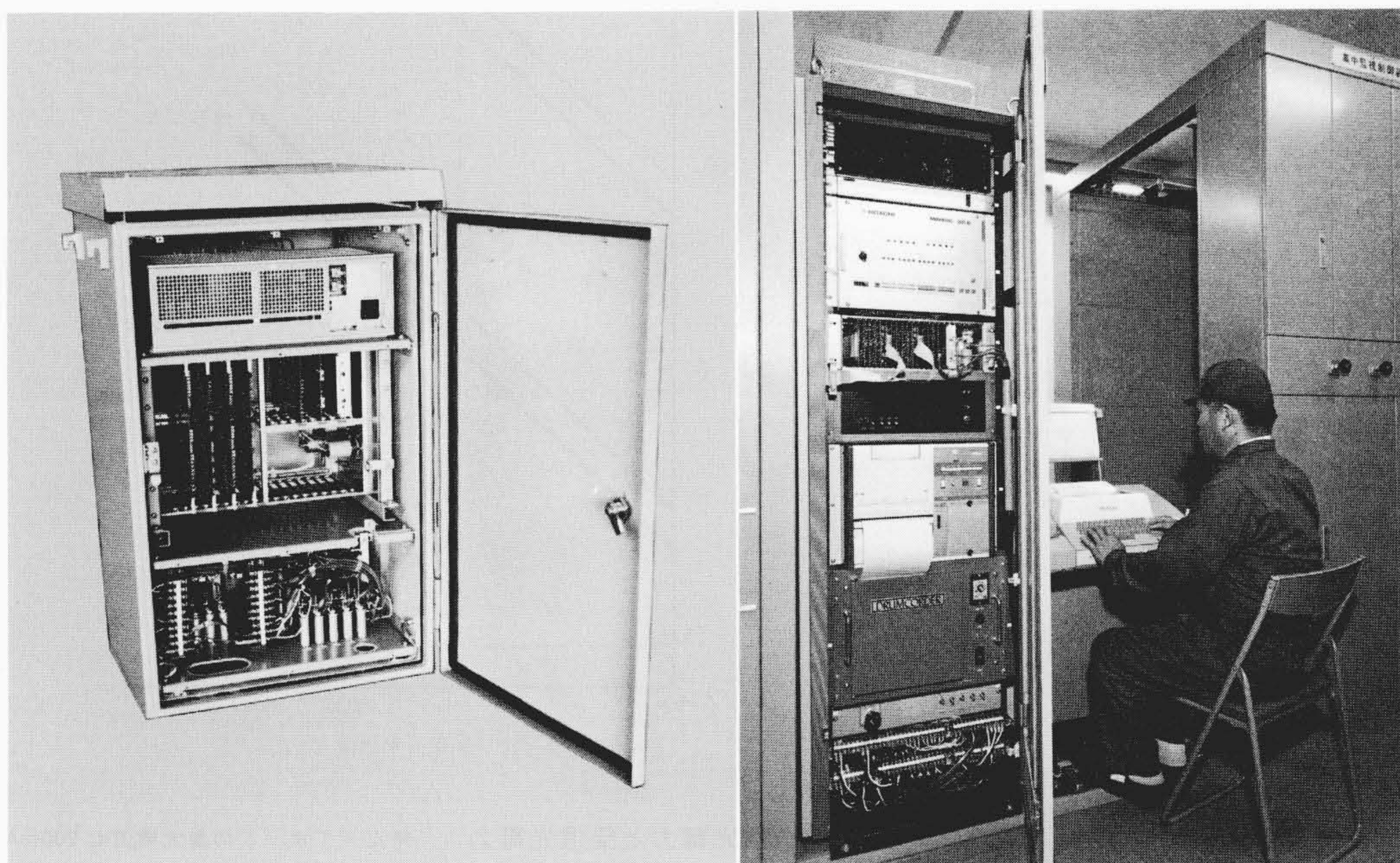
実証試験システムの構成を図3に、性能諸元を表1に示す。

このシステムは、屋外に設置する信号変換盤〔図4(a)〕と、制御室内のデジタル制御盤〔同図(b)〕及びこれらを結合する光ケーブルと電源ケーブルから成る。

電気所構内光伝送システムでは誘導障害の防止が大きな課題となるので、図5に示すように誘導雑音の侵入経路を想定し、それらのすべてに対し考えられる対策を、信号変換盤とデジタル変換盤の双方に施した。特に、最も誘導障害の厳

しい送電線やしゃ断器のごく近くに設置される信号変換盤に対しては、筐体を二重シールドするとともに、最も影響を受けやすい電気-光変換部を更に二重にシールドした。これらの効果の詳細については、後の4.2で述べる。

また、光ファイバは図3に示したように、屋外配線用の4心ファイバケーブルの両端に、盤内配線用の単心ファイバコードを熱融着して用いた。更に、電気-光変換回路とファイバとの結合は、コード先端のコネクタで容易に着脱できる。



(a) 信号変換盤

(b) デジタル制御盤

図4 実証試験装置の外観

信号変換盤は、耐雑音対策のため筐体を二重シールドしている。光ファイバとの結合は、ファイバコード先端のコネクタにより容易に送受信部と結合できる。

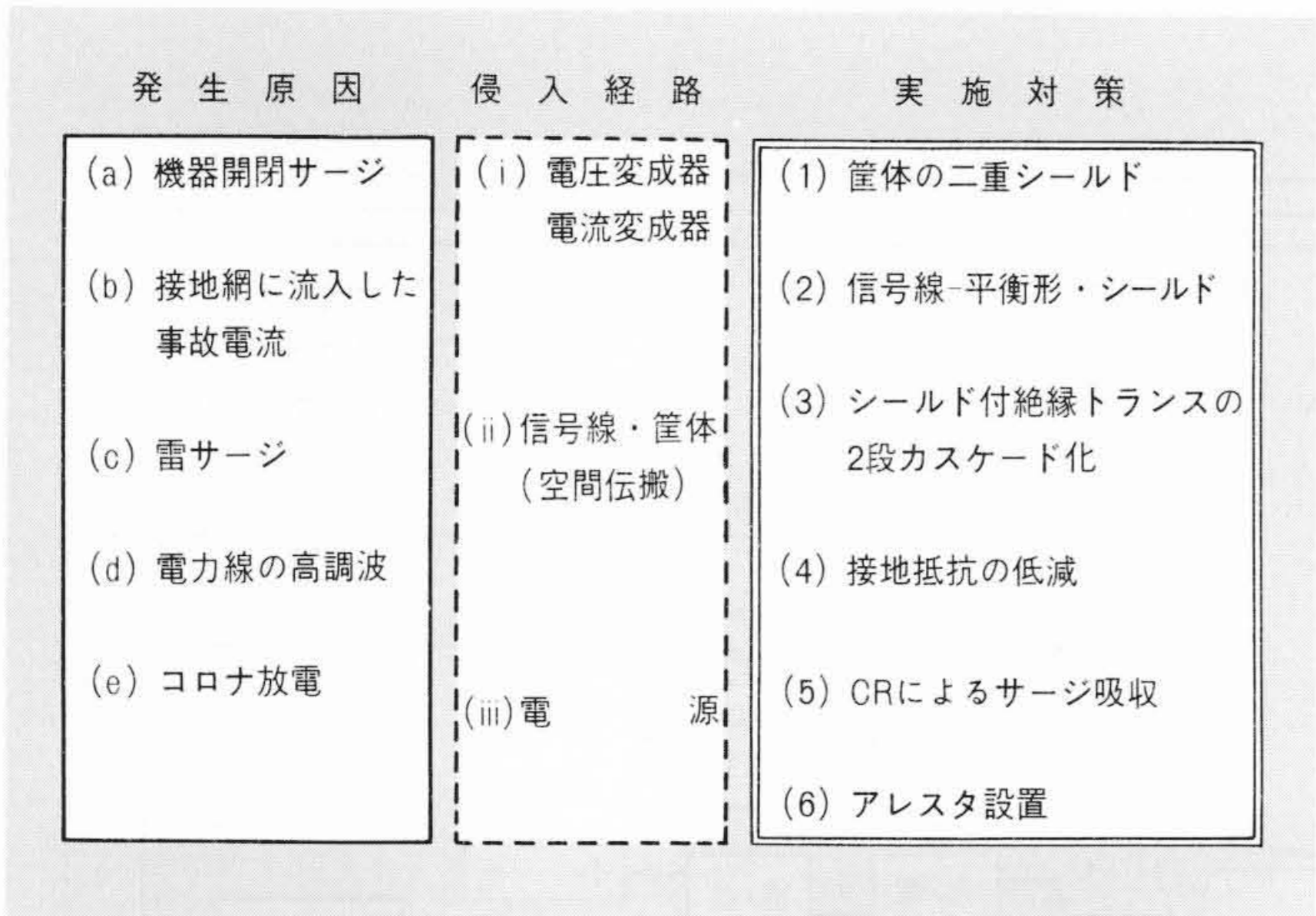


図5 耐雑音対策 電気所構内で発生する電磁誘導雑音の発生原因と侵入経路を想定し、各々に対し信号変換盤とデジタル制御盤に対策を施した。

4 工場試験

超高压変電所での現地実証試験に先立ち、工場で光伝送試験と現地を模擬した雑音印加試験とを実施した。その概要を次に述べる。

4.1 光伝送特性

図6は、平均受信光電力と符号誤り率との関係を擬似ランダム信号を用いて測定した結果を示すものである。受信帯域幅は約4MHzである。実測値から、目標誤り率の 10^{-9} 以下を達成するには、 -40.5 dBm (約 $0.09\mu\text{W}$)以上の光電力を受信する必要がある。

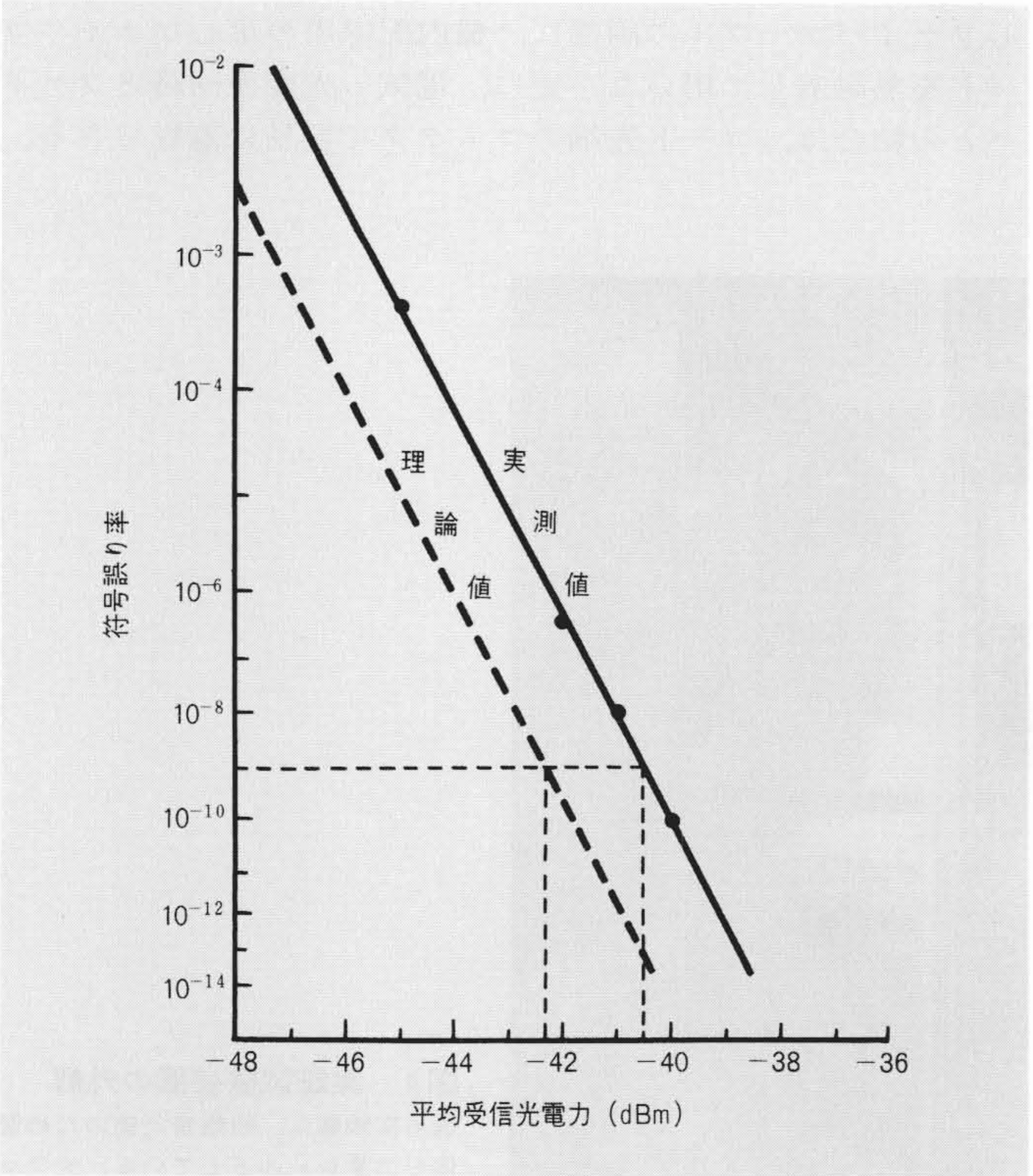


図6 符号誤り率特性 目標誤り率の 10^{-9} 以下を実現するには、 -40.5 dBm 以上の受信光電力を必要とする。

図7に、送信光電力と受信光電力を示す。発光ダイオードの電流値は、 200 mA 通電しても発光素子の寿命は10万時間を超えること(加速試験結果)が確認されているが、このシステムでは信頼度向上のため、約半に設定して使用している。

また、伝送路の光電力損失は約12dB(接続損失を含む)であり、受信光電力は -29 dBm 以上である。したがって、最小受信光電力 -40.5 dBm までの余裕と送信光電力の余裕とを考えると、 2 M bps の信号を目標とした2kmまで伝送できることが示された。

4.2 耐雑音特性

光ファイバ通信方式を構内伝送に導入した最大の動機は、光ファイバ内の伝送信号が構内の誘導電磁界の影響を受けないことであるが、送受信装置は筐体や電源線などを介して障害を受けることが予想される(図5)。超高压変電所構内での誘導障害はこれまでも報告されていたが⁵⁾、実態は未知なことが多い。そこで、工場で実施できる限りで実システムに最も近い次に述べる条件で雑音印加試験を実施し、実証試験システムに施した耐雑音対策の効果を確認した。

(1) 振動性サージ雑音印加試験

ノイズシミュレータを用い、入力信号線と電源線から侵入するサージ雑音を模擬した。装置は稼動状態で、最大 2.2 kV 、最小 $0.1\mu\text{s}$ 周期の振動性サージを印加し、受信データの符号誤りと保護継電器の出力を監視した。

(2) 電位上昇試験

雷撃による信号変換盤(屋外設置)の電位上昇を模擬するため、インパルス発生器を用い盤筐体とアース間に最大 4.7 kV まで、 $1\times 40\mu\text{s}$ のインパルス印加し、異常の有無を監視した。

(3) 高周波電磁誘導試験

開閉操作時に発生する高周波雑音の筐体への電磁誘導を模

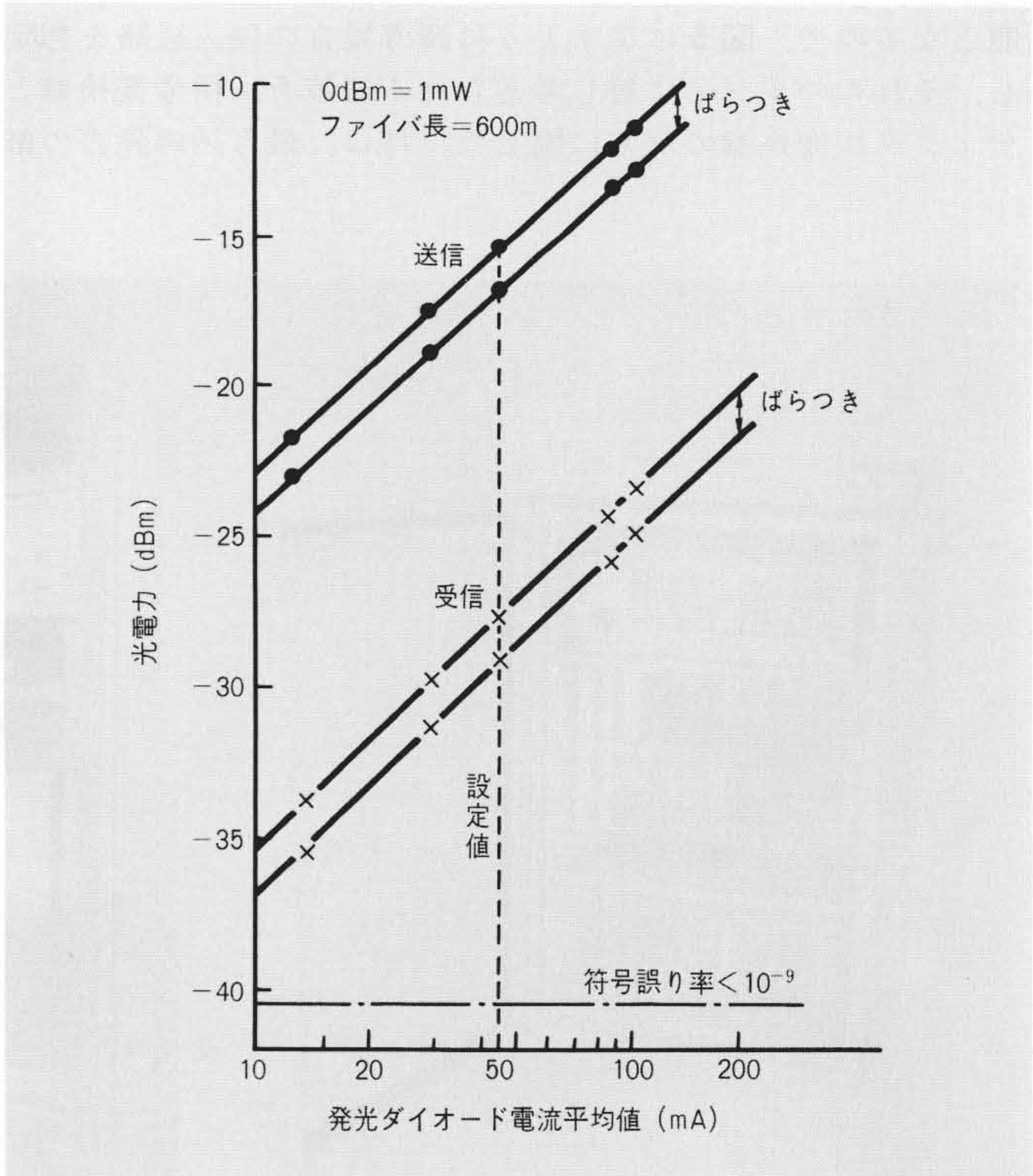


図7 送信光電力と受信光電力 発光ダイオードの最大電流は 200 mA であるが、信頼度向上のため 44 mA に設定して使用している。なお、ばらつきは素子と温度による。

擬するため、200kHz程度の振動性サージを次に述べる条件で装置に印加し、稼動中の装置への影響の有無を確認した。

- (a) 信号変換盤筐体に巻いた電線、又は筐体に雑音を印加
- (b) 誘導電磁界の方向は、水平・垂直・奥行の3方向
- (c) 筐体内部シールド板の有無による遮蔽効果の確認

(4) 商用周波数電磁誘導試験

送電線や母線からの商用周波の電磁誘導を模擬するため、(3)と同じ方法で50Hz、200Vの商用周波を印加した。

以上の雑音印加試験の結果、表2に示すように通常の使用状態では、符号誤りも保護継電器出力の異常も全く発生しないことが分かった。

一方、信号変換盤の内部シールド板を取り外すと、1.5kVの振動性サージにより符号誤りを生じた。この結果、筐体の二重シールドの効果を確認することができた。もちろん、この場合も保護継電器の不正動作は全く生じなかった。

また、信号変換盤への電源線や信号線に発生する誘導電圧は、シールド付平衡ケーブルを使用しているので試験電圧の1/5程度と考えられる⁵⁾。これは、次の5章図9に示されている。

以上、雑音防止対策の効果と耐雑音性について確認することができた。

5 現地試験

工場試験により本装置の実用性を立証できたので、更に長期にわたる信頼性と現場での実用性を実証するため、昭和52年12月から1年間東京電力株式会社新栃木変電所の275kV系に設置し、現地試験を開始した。図8(a)に試験ルートの概略を、同図(b)に信号変換盤の設置状況を示す。

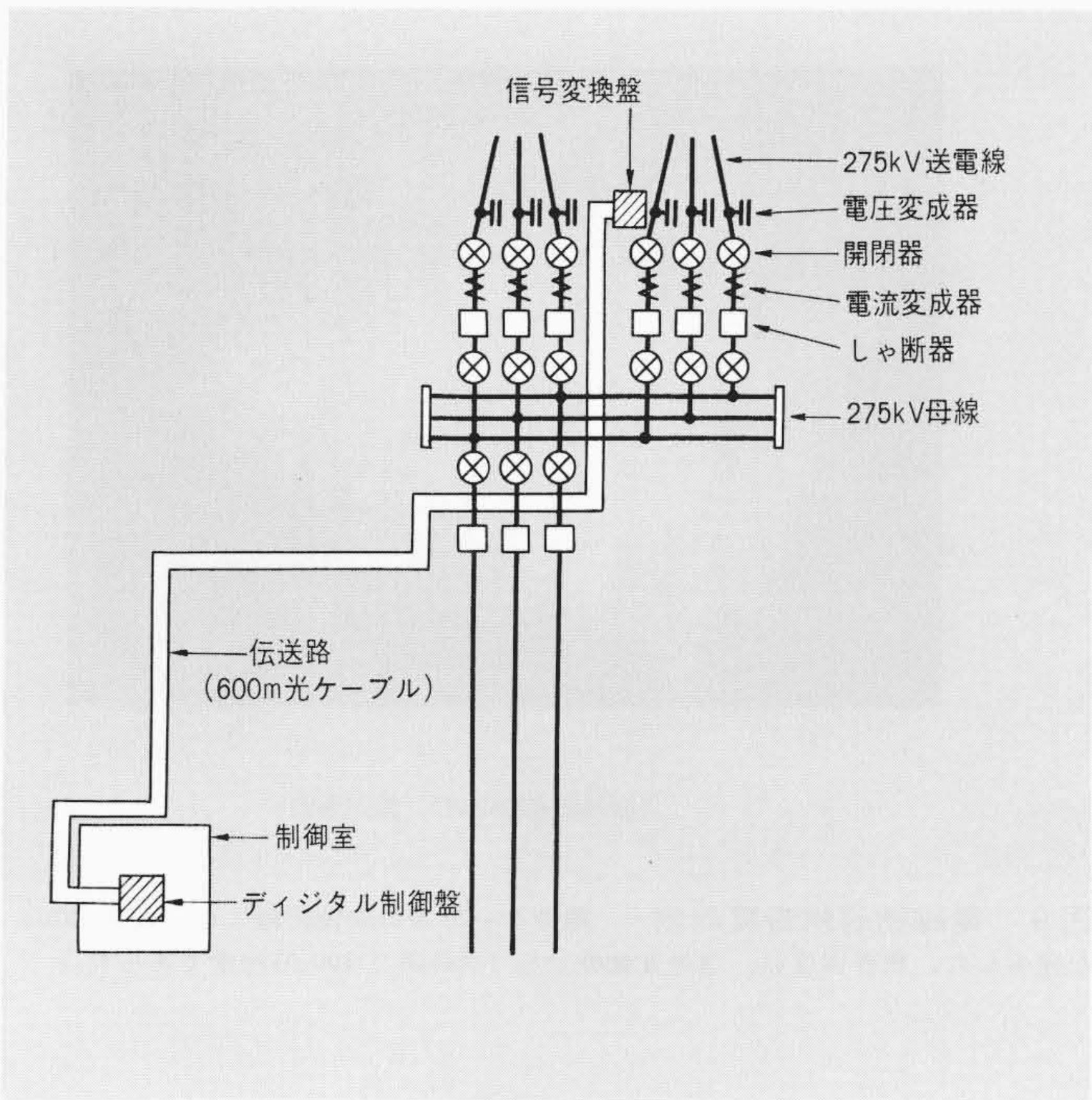
信号変換盤は275kV送電線の直下、開閉器から数メートルの位置に設置され、送電線の電圧・電流瞬時値を光信号に変換し伝送している。600mの光ケーブルは、電源ケーブルとともにデジタル制御盤まで160mの構内ピット内に折り返し布設された。布設作業は、従来工法で支障なく実施できた。

現地試験は昭和53年7月現在、約8箇月継続されているが、これまでに送電線の内部・外部事故共にないたため動作実績はないが、保護継電器の不正動作は全く発生していない。また、光伝送路の回線品質は、これまで電圧・電流伝送系とも符号誤り率 10^{-11} を達成し、目標仕様を十分に満たした。

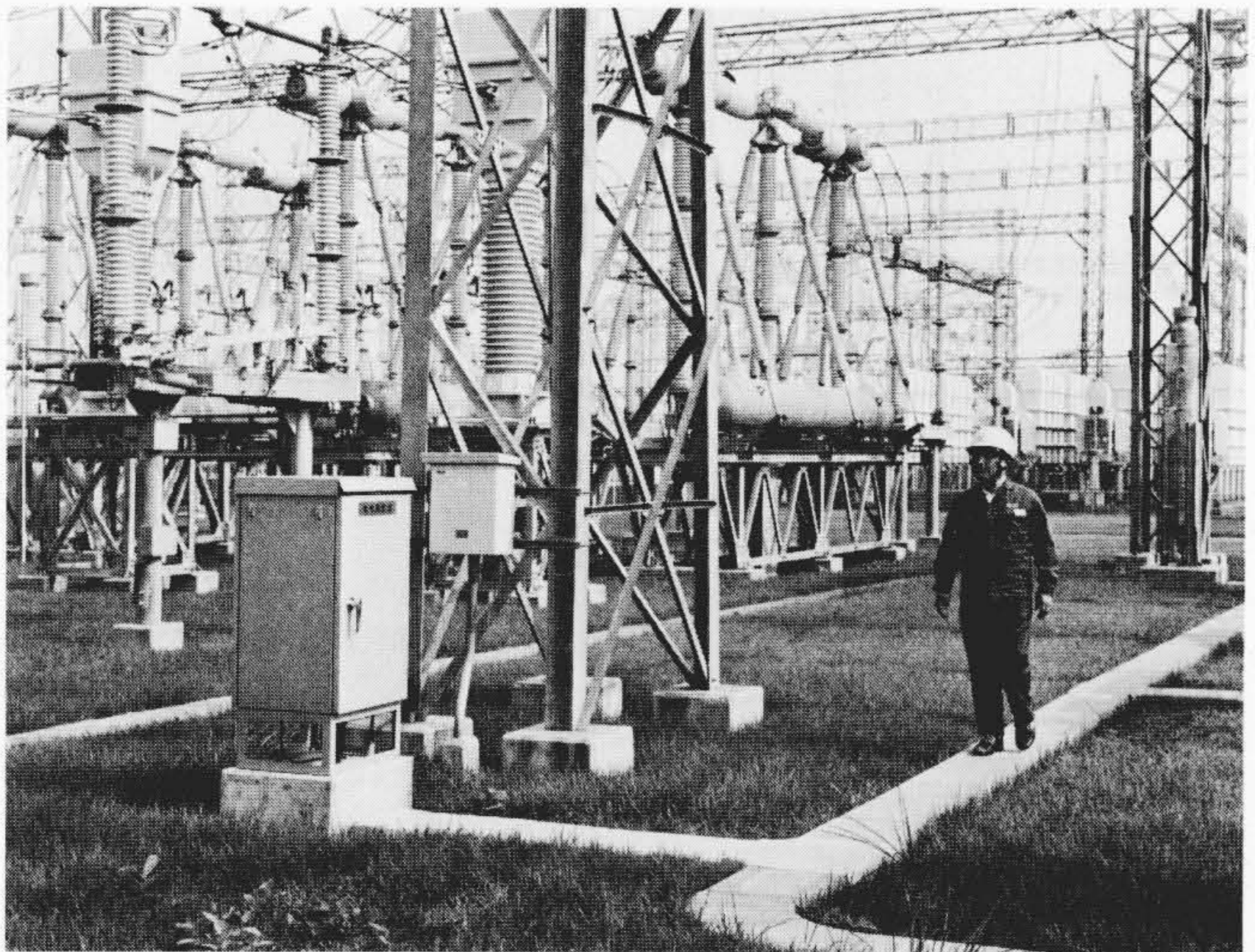
また、昭和53年1月末には信号変換盤に近接した275kV送電線2回線の両端のしゃ断器、開閉器を開閉し、実証試験シ

表2 雑音印加試験結果 信号変換盤のシールド板を取り付けた状態では、符号誤りも保護継電器出力の異常も全くなかった。シールド板を外すことにより、その雑音防止効果を確認した。

No.	試験名	印加回路	印加電圧	シールド板	符号誤り	保護継電器出力
1	振動性サージ印加試験	信号線 ↔大地	2kV	あり	なし	異常なし
		電源線 ↔大地	2kV	"	"	"
2	電位上昇試験	筐体絶縁	4.7kV	"	"	"
		筐体接地	インパルス電流 1.5kA	"	"	"
3	高周波電磁誘導試験	筐体に 巻き付けた 誘導線	1.5kV	なし	あり	"
			2kV	あり	なし	"
4	商用周波電磁誘導試験	同上	定常電流 1.5kA	なし	"	"



(a) 光ケーブル布設ルート



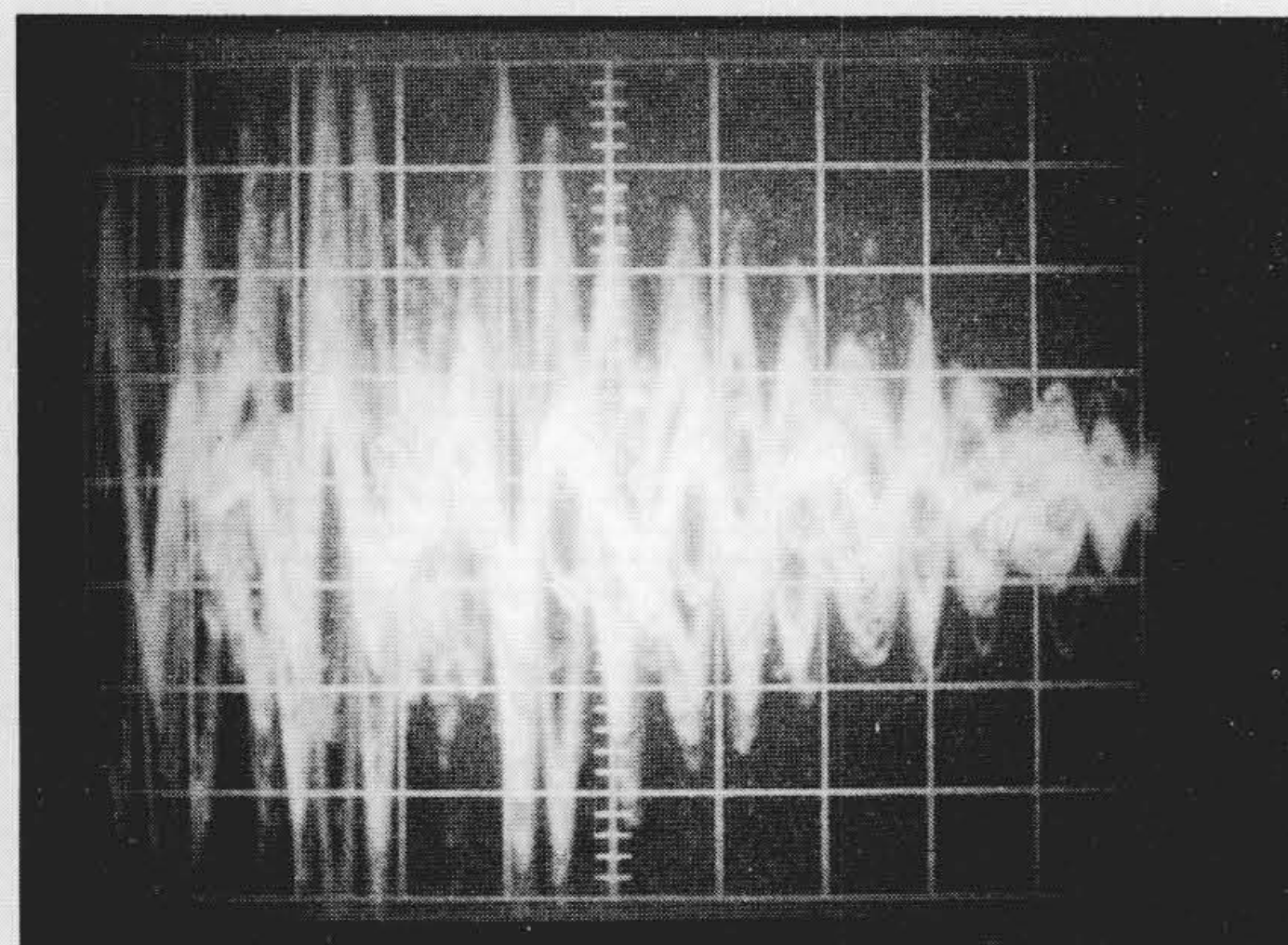
(b) 信号変換盤設置状況

図8 実証試験ルート概略図 信号変換盤で送電線の電圧・電流瞬時値を光信号に変換し、構内ピットに布設した光ケーブルによりデジタル制御盤まで伝送する。

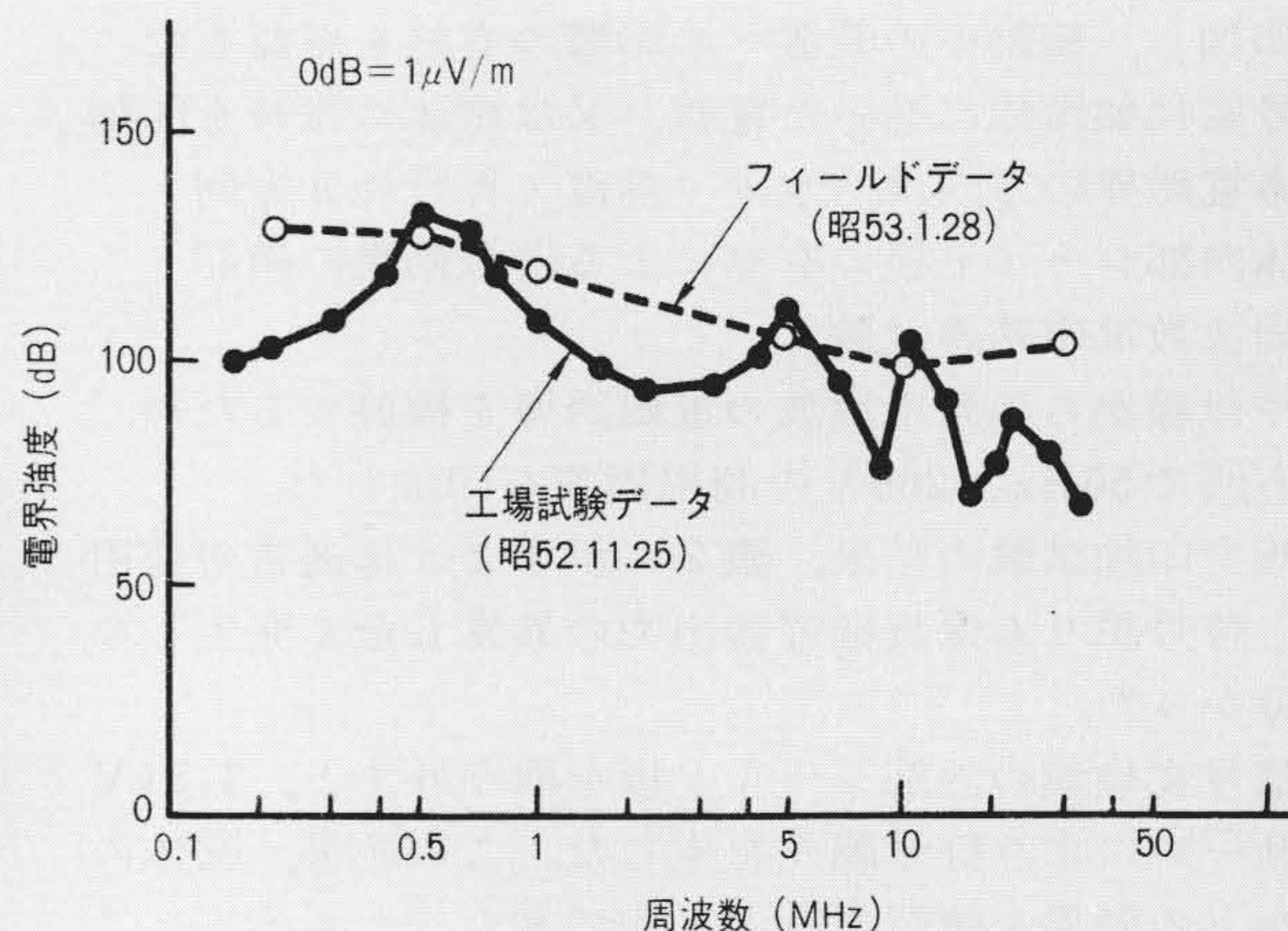
ステムに及ぼす影響をみた。図9(a)は電源ケーブル未使用線の制御室側で測定した誘導雑音を示すものである。波高値は最大200V_{p-p}程度、帯域は数十キロヘルツであった。同図(b)に、開閉試験時に信号変換盤から1mの所で測定した誘導電界強度(実線)と、工場での高周波電磁誘導試験での測定値(破線)を示す。この結果、工場試験が現地の状況をかなり良く模擬できていたことを確認した。なお、開閉試験では全く符号誤りも保護継電器の不正動作もなかった。

6 他システムへの応用

以上、光伝送システムを変電所の構内伝送に適用した例について述べてきたが、このほか多くの分野への応用も検討している。図10はその一例を示すもので、揚水発電所の地上一地下制御室間伝送への応用例である。この例では、両制御室



(a)誘導雑音観測波形(最過酷例)



(b)電界強度測定結果

図9 電磁誘導雑音実測例 電源ケーブルの未使用線には、最大200V_{p-p}数十キロヘルツ程度の誘導雑音が発生した。電界強度は、信号変換盤から1mの所で100dB程度であった。

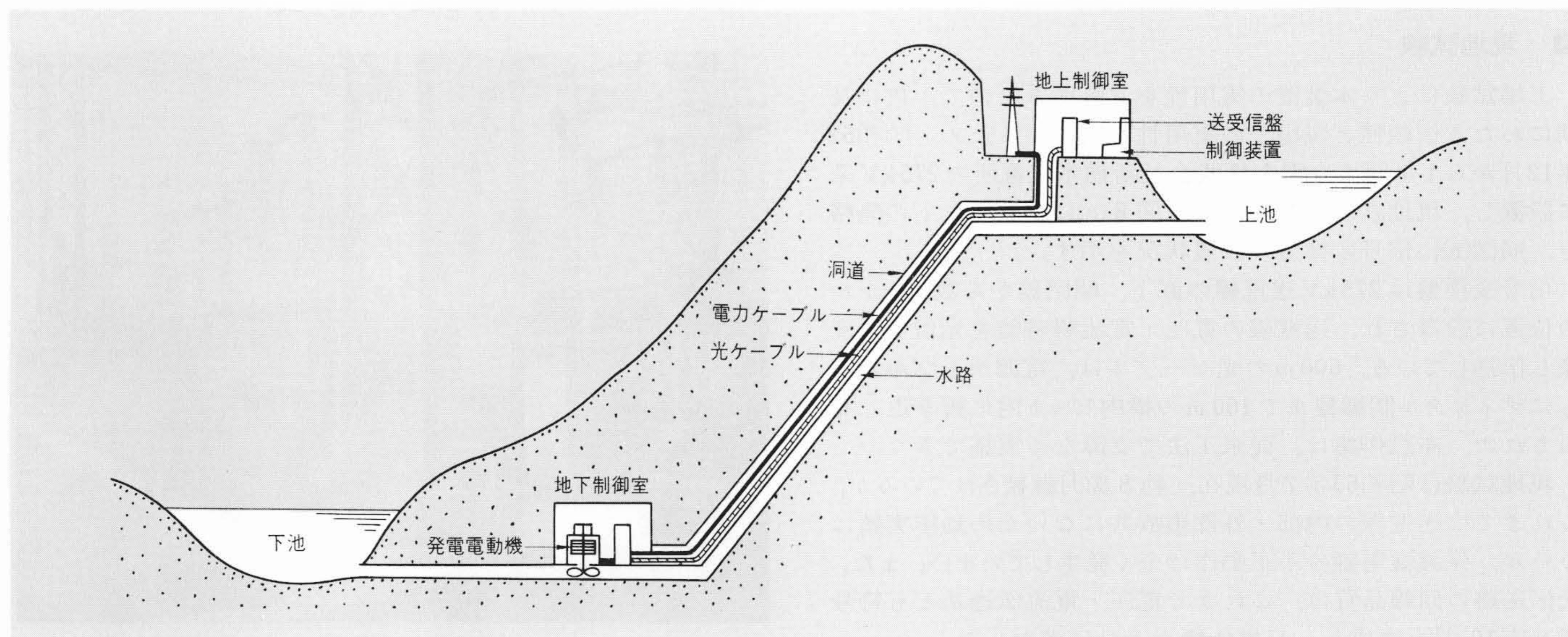


図10 揚水発電所への応用例 電力ケーブルと制御ケーブルとを同一の洞道に布設するため、絶縁性があり電磁誘導を受けない光ファイバ通信方式を制御情報伝送に適用することが考えられる。

間の大電流が流れる電力ケーブルと同一の洞道内に制御ケーブルを布設する要求があり、絶縁性と耐雑音性のある光伝送方式が必要となった。

このほか、雑音源の多い工場内での制御情報伝送用や、ガス絶縁電力設備の内部故障検出システムへの応用などを検討している。

7 結 言

東京電力株式会社の指導のもと、日立製作所及び日立電線株式会社では共同して、超高压変電所構内など、短距離・中容量の伝送に応用できる電力用構内光伝送システムを開発した。この構内光伝送装置とデジタル保護継電装置から構成した実証試験システムの工場試験、及び超高压変電所での現地試験の結果、

- (1) 伝送誤りなどによる制御装置の不正動作は全くない。
- (2) 符号誤り率は、目標を上回る 10^{-11} を達成することができた。

このシステムを開発し、高信頼性を実証できたことにより、多くの分野への光伝送システムの応用が可能になった。

終わりに、このシステムの開発及び実証試験に関して終始御指導、御協力いただいた関係各位に対し深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 国府田：電力系統における新しい制御方式，オートメーション，19，9，90～96（昭49-9）
- 2) 中村，ほか3名：特集光ファイバ・産業への応用，電学誌，97，11，980～987（昭52-11）
- 3) 青木，ほか6名：光ファイバ通信装置の開発，日立評論，59，3，229～234（昭52-3）
- 4) 黒岩，ほか5名：電気所構内光伝送装置の開発，昭和53年電気学会全国大会，No. 919（昭53-4）
- 5) 中西：電気事業における低圧制御回路の絶縁設計，電学誌，97，7，557～564（昭52-7）