レーザー解説

石英系ファイバ스코プの現状

内 海 厚*

(1984年11月14日 受理)

Present State of Silica Glass Fiber Scope

Atsushi UTSUMI*

(Received November 14, 1984)

1. まえがき

昭和54年7月、世界で初めて、石英系イメージガイドの製造技術が大日日電線(株)によって実用化され、翌年1月に東京で開催された第1回エレクトロ-optics/レーザー展に30mの工業用純石英コア・ファイバ스코プが出展され、内外から注目された。その後参入社も増え、一般にも認識が高まりはじめた。また、登場後4年間の技術的進歩も著しく、メーカ側の技術紹介^{1~8)}やユーザ側の適用による成果報告^{9~14)}も数を見るようになってきた。

いうまでもなく、ファイバ스코プ自体は新しいものではなく、昭和30年代から医療用スコプとして登場し、医療の分野で確固たる地位を築いている¹⁵⁾。また40年代からは産業の分野でも使用が始まり、非破壊検査機器として重要な役割を担ってきている。しかしそれらのファイバ스코プはイメージバンドルの材質(光学用多成分ガラス)及び製法(積層法, 酸溶出法)に由来するいくつかの制約(長さ3m以内, 使用温度100℃以下, 累積放射線量 10^2 rad以下な

ど)があり、産業分野での用途も限定された範囲のものであった。一方40年後半から50年代前半にかけて、産業界では省エネルギー化, エネルギー代替化, 省力化, 安全・防災対策などの動きが活発になり、これらの技術革新の動きに合せて、監視・点検するための目として従来のスコプではカバーしきれないニーズも高まってきた。石英系ファイバ스코プはこれらの技術革新の流れのなかで、時代の要請に沿って開発されたものといえよう。

実用化以来、既に相当数の石英系ファイバ스코プが内外の産業の分野で使用されているが、今のところ我国以外のメーカがこの種のスコプを実用化したという情報は得ておらず、我国が全く先行する光ファイバの技術分野であり、我々は石英系ファイバの応用分野の1本の柱として大きな期待を寄せている。

本稿では、前半では石英系イメージガイド及びファイバ스코プの構造と特性について概説し、後半で代表的ないくつかの適用例を紹介する。

* 大日日本電線株式会社光・電子事業部 (〒664 伊丹市池尻4-3)

* Dainichi・Nippon Cables, Ltd. Electronics & Optics Div. (Ikejiri, Itami, 664)

2. 石英系イメージガイドの構造と特性

石英系イメージガイドの主たる製法はマルチファイバ法である。これは所定の線径に線引したファイバを所定の本数束ね、整配列し、これを再度溶融線引して、全長に亘って正確な画像配列を持つ溶融一体化した構造のイメージガイドを製造する方法である。

素材となるファイバには純石英ガラスをコアに用いたものと、酸化ゲルマニウムなどを添加したドープトシリカガラスをコアに用いたものがある。それらの断面構造をFig.1に、その諸元をTable 1に示す。

イメージガイドの他の製法はモノファイバ積層法であるが、これは従来の多成分ガラスイメージガイドの配列方法と同じように、ファイバリボンを多数枚積層して作る方法である。この方法によればよりフレキシビリティに富むイメージガイドを得ることができるが、製法的に長尺化が困難であり、現在のところ長さは数mどまりである。

上記製法はメーカー各社にそれぞれノウハウがあり詳細は公表されていないが、カタログ、技術資料から推定するとTable 2のようになる。ドープトシリカを用いたイメージガイドの特性については情報が少ないので記述は最小限にとどめ、ここでは純石英コアイメージガイドであるダイヤガイドIG（ダイヤガイドは大日日電線

Table 1 Dimension of silica glass image guide.

item	pure silica core image guide	doped silica core image guide
N. A.	0.2	0.2~0.4
O. D. of fiber(μm)	10~15	5~10
O. D. of core(μm)	6~10	3~7
packing density (%)	30~50	30~60
No. of Picture element fiber	3,000~30,000	3,000~80,000
length possible to be manufactured (m)	~100	~100

Table 2 Core material and manufacturing

maker	core material	manufacturing method
Dainichi-Nippon	pure silica doped silica	multi fiber
Sumitomo	doped silica pure silica	multi fiber
Furukawa	doped silica	multi fiber mono fiber
Fujikura	doped silica	multi fiber
Hitachi	doped silica	multifiber

の光ファイバ製品の総称商品名、IGはイメージガイドの略)の特性を主に述べる。

Fig.2はダイヤガイドIGの光透過率の波長依

Pure silica core image guide

Doped silica core image guide

Fig.1 Cross section of silica glass image guide.

Fig. 2 Light transmission efficiencies of Diaguide IG.

Table 3 Radiation resistance of various glass fibers.

	Core glass	
		Loss increase ($\lambda = 0.8\mu\text{m}$) dB/km/rad
Multi component glass	Pb flint	4.4 ~ 6.3
	Ba crown	3.2
	Zn(0.3% Ce) crown	0.27
Silica glass	GeO ₂ doped SiO ₂	0.001
	SiO ₂	<0.00001

存性を示したものである。光透過率の絶対値が高いことと同時に可視光帯で波長による変化が小さく、色調の再現性に優れていることを示している。光透過率が高く長尺で使用できるということは石英系イメージガイドに共通する最大の特長である。

石英系イメージガイドに共通する第2の特長は耐熱性である。通常、機械強度を高め、フレキシビリティを持たすためにプリコートと称する樹脂被覆を施しているが、その場合はプリコートの耐熱性によってイメージガイドの耐熱性が決まる。プリコートのないイメージガイド自体は曲げると折れやすいので、直線上で使う事を前提としているが、耐熱性は高い。Fig. 3はダイヤガイドIGを高温で保持した場合の分解能と加熱経過時間の関係を示したものである。1000℃では100時間程度で分解能は $\frac{1}{2}$ 以下に低下してしまうが、850℃では劣化の進行は遅く使用可能範囲とも云える。しかしながらスコープを構成する他の材料の耐熱性が通常、イメージガイドのそれを上まわることは期待できず、現状では他の材料の耐熱性に合せて最高使用温度を決めている。

溶融一体化した石英系イメージガイドは、形的には、ファイバというよりむしろ、細いガ

Fig. 3 Relation between aging period and resolution power of Diaguide IG.

Fig. 4 Bending fracture properties of silica glass image guide length of specimen 300mm.

ガラス棒状であるが適切な樹脂被覆を施したイメージガイドは相当小さな直径まで曲げ得る。Fig. 4 に石英系イメージガイドの短尺ピースの屈曲破断特性を示す。イメージガイドの破断はガラス表面の傷によって支配されるので、長尺で用いる場合には、屈曲破断外径に安全率として10~15倍を掛け、許容屈曲外径としている。品質保障の実際面では許容屈曲半径の $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ の屈曲プルーフテストを全製品について行っている。ドーフトシリカコアイメージガイドはNAを大きくとれるので画素ファイバ径を純石英コアイメージガイドより小さくすることができるので、耐屈曲性の点で有利である。

純石英コアイメージガイドの優れた耐放射線性⁴⁾は長尺性に劣らぬ大きな長所である。

Table 3 に代表的なガラスファイバの耐放射線性を示す¹⁶⁾。純石英コアファイバは他のガラスファイバに比べ圧倒的に優れた耐放射線性を有する。更に純石英コアファイバのなかでも製法により大きな差異があることが知られている^{17,18)}。Fig. 5 に純石英コアイメージガイドの⁶⁰Co γ 線照射前後の損失波長特性を示す。

ダイヤガイドスコープは既に国内外で 10^5 R/Hの高線量下で用いられ実績を数多く有するがこれ迄のところイメージガイド自体の劣化が問題になったケースは少ない。米国のコンパッ

Fig. 5 Spectral loss characteristics of pure-silica core image guide.

Fig. 6 Relations between number of picture element and various visual resolutions.

ション・エンジニアリング社ではダイヤガイドスコープが 2.5×10^5 R/Hの線量率下(水中)で300時間使用された実例がある。

イメージガイドの画像特性評価上、最も重要な特性は分解能(解像力)である。分解能は画素ファイバの本数と太さと配列によって決められる。Fig. 6 に視野の直径を100 mmとした場合の画素数と分解能の関係を示す²⁾。

太さについては細くする程解像力は高くなるが光をコアに閉じ込めるクラッドには最小限必要な厚さがあり、結局、Table 1に示したようなところに落着く。配列については同一外径のファイバを最密充填した構造が最も多くのファイバを同一外径内に収容できるのでよいとされているが、最近、外径の異なるファイバを配列した構造も現れている。

3. 石英系ファイバ스코プの種類と構造

代表的な石英系ファイバ스코プの種類と構造、及び概略仕様をFig.7～9、Table 4に示す。

Fig.7 Diaguide Scope and Light source.

Fig.8 Various types of distal objective end.

Fig.9 Various types of proximal end.

4. 石英系ファイバ스코プの適用例

Table 6にダイヤガイドスコープの納入実績を示す。年毎に実績は急激に増え、分類別にみれば、原子力関係が過半数を占める。

尚、工業用ファイバ스코プは使用される環境、使用条件がそれぞれに異なるので、殆んどが客先仕様にもとづくオーダー・メイドである。従って固定的な標準仕様はなく、かなりの巾をもって運用されているのが現状である。

4.1 原子力関係での適用例

原子力関係において、石英系ファイバ스코プは従来直接観察の手段のなかったところから導入が始まっている。Fig. 10は加圧水型原子力発電の略図であるが、原子力格納容器内（1次系）の原子炉圧力容器、蒸気発生器、加圧器、

Fig.10 Schematic diagram of PWR.

Table 4-1 Specifications of Silica glass fiber scopes. (after maker's catalogue, 1983)

maker	Dainichi Nippon Cables										Sumitomo Electric					
brand name	Diaguid Scope										Sumi Scope					
series name	S					N					SS-100		SS-110		SS-200-X	
type	S006 MT-L	S012 MT-L	S020 MT-L	S030 MT-L	S-006 PT-L	NR17 D 30	NR17 C30	NS17 S30	NF24 C30/80		101	102 103	111	112 113	201-X 203-X	
No. of Pixel (×1000)	6	12	20	30	6	6.12										
O.D	6 ~12	8 ~12	10 ~15	10 ~15	3	1.7	1.7	1.7	2.4		12	12	12	12	16	16
insert.tube (mm)	6 ~12	8 ~12	10 ~15	10 ~15	3	1.7	1.7	1.7	2.5		11	11			15	15
focusing	fixed, adjustable					fixed					semi fixed		fixed		semi fixed	
angle of view (deg)	20 ~80					40					20 ~40	25 ~50	20 ~40	30 ~50	30	
direction of view	forward, side					forward oblique, side oblique					forward/side		forward		forward/side	
depth of field (mm)	1 ~∞					5 ~50, 10 ~∞					> 10		> 10		> 10	
illumination	L G					L G					none		none		L G	
Standard	< 80					< 150									—20 ~80	
heat resist	< 600														< 600	
cooling tube	< 2000															
radiation resist.	10 ⁷ rad/5 m															
bending radius	100	200	300	400	75	10										
Max. length	80	40	20	20	10											
insertion tube	plastic sheathed SUS flex. tube				plastic tube	rigid SUS tube		SUS flex		SUS flex tube				plastic sheath SUS flex.		

Table 4-2 Specifications of silica glass fiber scopes

(after make's catalogue, 1983)

maker	Furukawa Electric						Fujikura Cables				Hitachi Cables		
brandname	Fitel Scope						Fine Scope				Hitachi Fiber Scope		
Series name				high flexibility									
type	5000	10000	30000	5000	10000	30000	3 C	10 C	15 C	30 C	HFS-10	HFS-20	HFS-30
No. of pixel (×1000)	5	10	30	5	10	30	3	10	15	30	10	20	30
objec. end (mm)	—			—			15				13		
O.D	—			—			10				13		
insert.tube (mm)													
focusing	semi fixed			semi fixed			—				fixed, adjustable		
angle of view (dey)	20, 35, 50			20, 35, 50			20~40				30	60	
direction of view	forward, side			—			forward				forward/side		
depth of field (mm)	10~∞			—			10~∞				—		
illumination	L G			none			L G				L G		
Temp. (℃)	standard	<80		—			—				<70		
	heat resist.	—		—			—				<600		
	cooling tube	—		—			—				<1500		
radiation resist	—			10~100 rad			—				—		
bending radius							150	300	350	500	200	250	300
Max length	60	60	30	5			100	50	30	10	50	30	20
insertion tube							plastic sheathed SUS flexible tube				plastic sheathed SUS flexible tube

Fig. 11 Inspection eye system for inside inspection of heat exchanger tube.

Table 5 Delivery results of Diaguide scope.

the year	No. of set	field	No. of set
80	3	nuclear	135
81	20	high temp.	47
82	83	needle scope	21
83	151	miscellaneous	54
Total	257	Total	257

及びこれらを結ぶ配管内は放射線量率が高く、従来のスコープでは殆んど使用に耐えなかった。勿論、十分な空間がある場所の点検には耐放射線性ITVカメラを遠隔操作して用いることができるが、狭くてカメラが入り込めない部分もあり、このような場所の点検にダイヤガイドスコープが使用されている。

Fig. 11は日揮によって開発された熱交換器チューブ内面検査用インスペクション・アイ・システム⁹⁾に用いられた例である。Fig. 12はセル内の脱塩塔に設置されている液面計の監視に用いられた例であり、厚い遮蔽壁を通して、スコープが布設されている。

Fig. 13は動力炉・核燃料開発事業団が開発した遠隔操作型発光分光分析装置¹⁰⁾にスコープが用いられた例である。セル内に置かれたプラズマ分析装置の発光部と分光器をダイヤガイドスコープで結び、最初にスコープとして用いて発光部の位置の同定を行った後、分光器に接続して、発光スペクトルのガイドとして用いている。

Fig. 12 Construction example of fiber scopes for monitoring liquid surface.

Fig. 13 Remote control type emission spectro chemical analyser.

動力炉・核燃料開発事業団や米国のバブコック & ウイルコックス社ではエア式側視回転型スコープが水中の管内観察に用いられた。更に米国の原子力関係エンジニアリング社では外径10～12mm、長さ5～15mのスコープが蒸気発生器の周辺で用いられており、外径5mm、長さ6mの

ライトガイド付スコープも細径管内観察に用いられている。

4.2 高温関係

Fig. 14は新日鉄空蘭製鉄所で高炉内観察¹¹⁾にファイバースコープ⁶⁾が用いられた例である。ス

Fig.14 Vertical type fiber scope system for observation inside blast furnace.

コープは3万画素、23m、照明用ライトガイド、及び測温用ライトガイド付であり、ITVカメラ、光源装置と共に垂直ゾンデ（冷却保護管）に搭載されて炉頂部から高炉内に挿入され、約4ヶ月間に亘ってテストが続けられた。得られた炉内画像は地上のモニタ上に映し出され、ビデオに収録された。このファイバスコープ搭載型垂直ゾンデの開発により、稼動中の高炉で、炉内の垂直方向の変化状況が良好に観察され、焼結鉱の環状粉化の実態を把握できたと報告されている。

新日鉄大分製鉄所では水平型ゾンデにファイバースコープを塔載して高炉内を水平方向に観察するシステムを開発し¹²⁾、良好な結果を得たと報告されている。Fig. 15は炉内計測用ファイバースコープ観察システムの1例である。

Fig. 16はコークス炉内観察用スコープの例であり、Fig. 17の冷却管と共に納入された。

Fig. 18は日本鋼管京浜製鉄所により行われたファイバースコープによる焼結過程の直接観察の研究¹³⁾において用いられた例である。

Fig.15 Fiber scope system for observation and measuring inside furnace.

Fig.16 Construction of fiber scope for observation inside furnace.

Fig.17 Forward and side view type cooling tube for inspection of inside of coke oven.

Fig.18 Direct observation of sintering process by pure silica core fiber scope.

5. おわりに

石英系ファイバ스코ープの特性と構造について現状を概説し、ダイヤガイド스코ープの適用例を紹介した。今後、前述した種々の工業分野の適用に加え、明日村の亀虎古墳の観察例など、その適用範囲はますます拡大してゆくものと考えられる。

参考文献

- 1) 伊藤, 内海: “石英ファイバ스코ープの現状と動向” 計装, Vol. 24, No.12, p.1981
- 2) 内海他: “100m長でも使用できる新しい工業用ファイバ스코ープ, ダイヤガイド스코ープ”, 大日本電線時報, No.68, 1982
- 3) 鈴木, 内海: “光ファイバによる画像直接伝送システム”, 電気計算, Vol. 50, No. 9, 1982
- 4) 伊藤, 佐藤, 内海: “石英系イメージガイドの耐放射線性”, 電気学会絶縁材料研究会, EIM-82-30, 1982
- 5) 内海: “石英系イメージガイドの現状”, 第13回画像工学コンファレンス, 1982
- 6) 井原他: “スミスコープ開発”, 住友電気, p.116, No.130, 1982
- 7) 吉村: “石英イメージファイバとその応用”, レーザー研究, Vol. 11, No.10, p. 732, 1983
- 8) 石橋, 松田, 清水: “高温炉内監視用石英ファイバ스코ープ”, 電気現場技術, No.10, 1983
- 9) 佐々木, 平野, 西田, 小沢: “管内部遠隔操作検査技術”, Vol. 2, 1983
- 10) 大西, 管沼: “遠隔操作型発光分光システムの開発”, 計装, Vol. 8, 1983
- 11) 奥野, 入田, 須沢, 松岡, 磯山, 南外: “ファイバ스코ープ搭載型垂直ゾンデの開発”, 鉄と鋼, Vol. 69, No. 4 ('83-S84) 1983
- 12) 和果, 金森, 樋口, 土井, 宮辺: “光ファイバによる高炉融着帯観察及び放射测温”, 鉄と鋼, Vol. 69, No. 4 ('83-S83) 1983
- 13) 斉藤, 中野, 谷中, 黒沢, 竹本: “ファイバ스코ープによる焼結過程の直接観察”, 鉄と鋼, Vol. 69, No. 10 ('83-S720) 1983
- 14) 山口, 津田, 白川, 小林, 中込: “ファイバ스코ープ炉内観察による装入物降下挙動の測定”, 鉄と鋼, Vol. 69 ('83-S869) 1983
- 15) 竹森忠良, 川井啓市編: “消化器内視鏡検査のトピックス”, 医学図書出版, 1978
- 16) G. H. Sigel, Jr., IEEE, Vol. 68, No.10, p. 1236, 1980
- 17) 田中, 平島, 新谷: “石英系ファイバの耐放射線性”, 大日本電線時報, No.69, p. 23, 1983
- 18) E. J. Friebele, “Radiation-Resistant Low OH Content Silica Core Fibers”, J. of Lightwave Technology, Vol. LT-1, No., Sep. 1983