

日本ボイラ整備据付協会 30周年記念 特別講演

光ファイバ開発余話

2013.11.19(火) 16:00-17:00

熱海 大観荘 平安Bの間

眞鍋 豊孝

<http://www.paa.gr.jp/~pa19/131119boil/131119boil.html>



T.Manabe, 大観荘, 2013.11.19

自己紹介

1966(昭41)年3月 北大大学院工学研修課電子工学専攻(修士課程) 修了
学位: ガーネット系酸化物磁気光学材料の基礎的研究とその応用(1978 北大工博)

職歴:

24才: 1966(昭41)年4月～1990(平2)年3月 **独創・協創←行為的直観**

NTT電気通信研究所(1981光部品研究室長、最終:基礎研究所研究企画部長)
磁気光学材料、赤外ファイバ(1979)、非晶質金属など通信用材料の研究に従事

48才: 1990(平2)年4月～1997(平9)年3月

新日鐵先端技術研究所 未来領域研究センター所長
酸化物超電導材料など

55才: 1997(平9)年4月～2002(平14)年3月【新日鐵から出向】 **監督力**

(財)神奈川科学技術アカデミー(KAST) 教育交流部長
社会人再教育事業

60才: 2002(平14)年4月～2004(平16)年3月 NTT_AT(株) 担当部長

63才: 2005(平17)年4月～2009(平21)年3月 北大学大学院工学研究科 特任教授
双峰型教育用eラーニングシステムの構築 **本物とは?**

現職: NPO団体パワードエイジ協会理事 Web Seminar企画 <http://www.paa.gr.jp/~pa19/>

講演目次

1. 光ファイバとは？

2. VAD光ファイバ製造法の開発 ～死の谷を越えた足跡:低損失化競争～

3. 結び

独創・協創←行為的直観
監督力
本物とは？

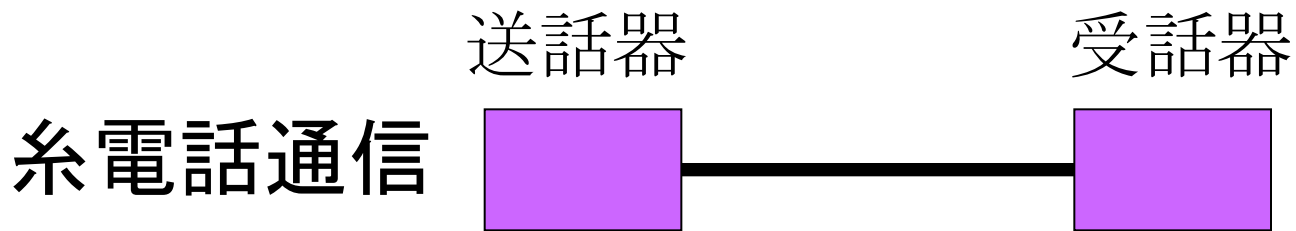
追補:ポストVAD光ファイバ

↳...全光ネットワーク構築と次世代への胎動

- 4. 1 超低損失光ファイバと直接増幅
- 4. 2 PLC(平面光回路)への展開
- 4. 3 敷設光ファイバケーブルの損失増

<http://www.paa.gr.jp/~pa19/> : 「光ファイバ開発余話」

光ファイバ通信と糸電話



光ファイバ通信



符号化、多重化、辞書

光ファイバの基本特性

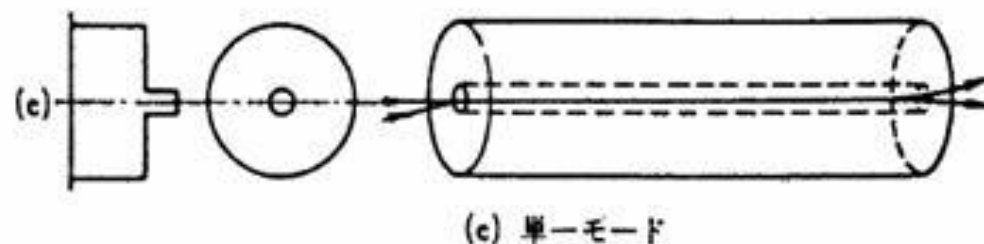
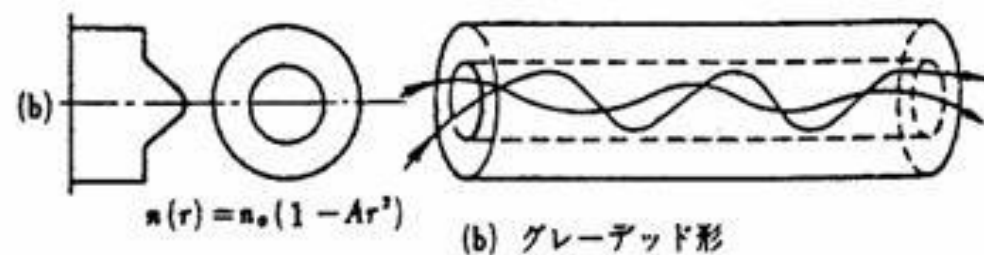
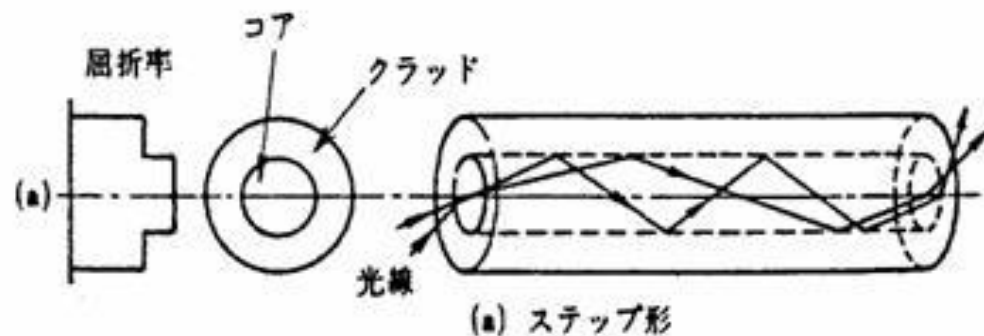
光ファイバの基本特性

- ・光損失(伝送損失の決定要因)
不純物吸収、紫外吸収、赤外吸収、
水分(OH基)による吸収、レーリ散乱 など。
- ・分散(伝送帯域特性の決定要因)
モード分散、材料分散、構造分散、偏波分散。

光ファイバ=コア・クラッド構造を持つ石英(SiO_2)ガラス
水=OH(H、 H_2O が混同使用される)
損失低減:脱OHが鍵
帯域拡大:単一モード光ファイバで解決

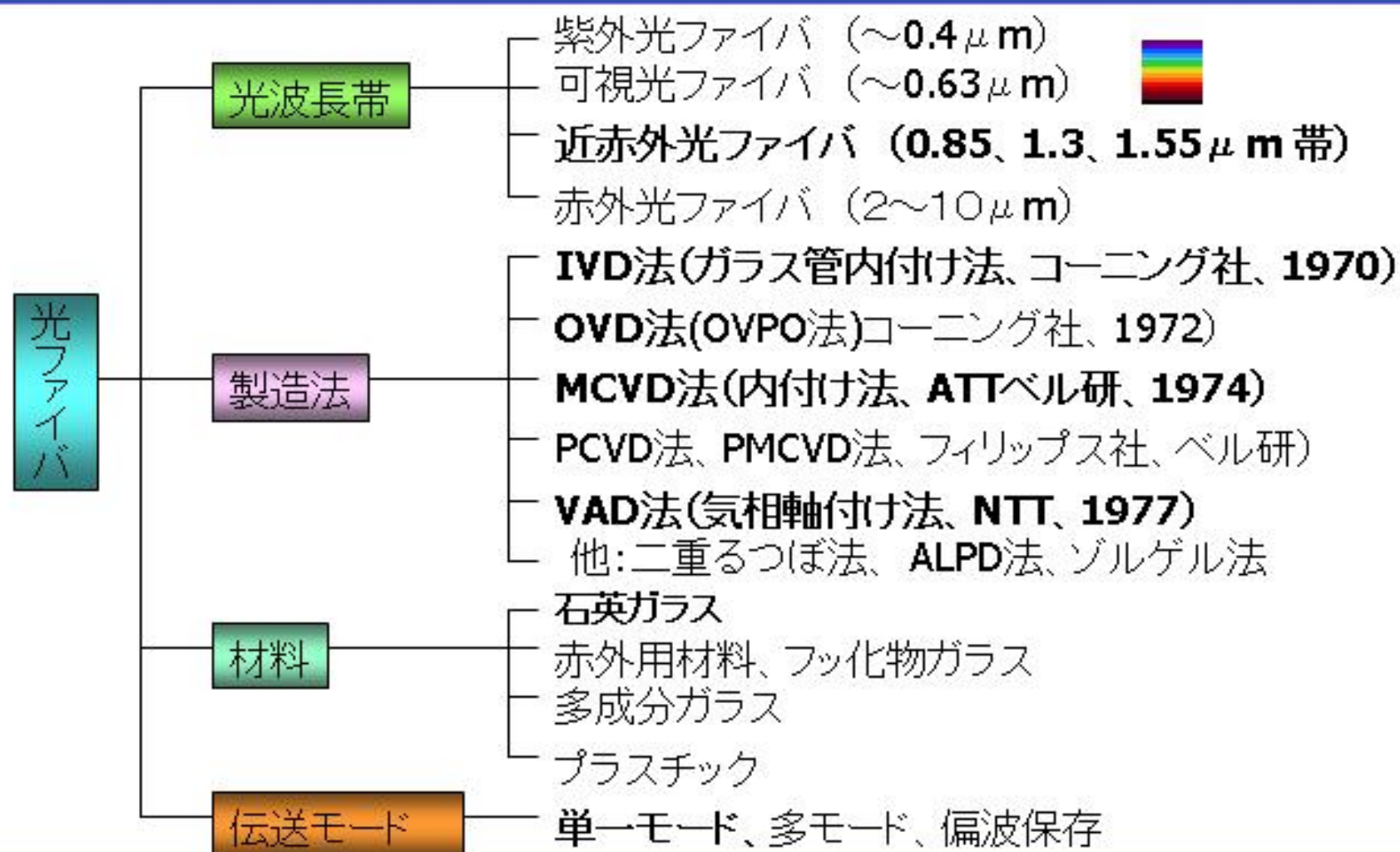
光ファイバの構造

光ファイバはコアの形状(ファイバ構造)で分類される。通信用光ファイバは単一モードが主流。

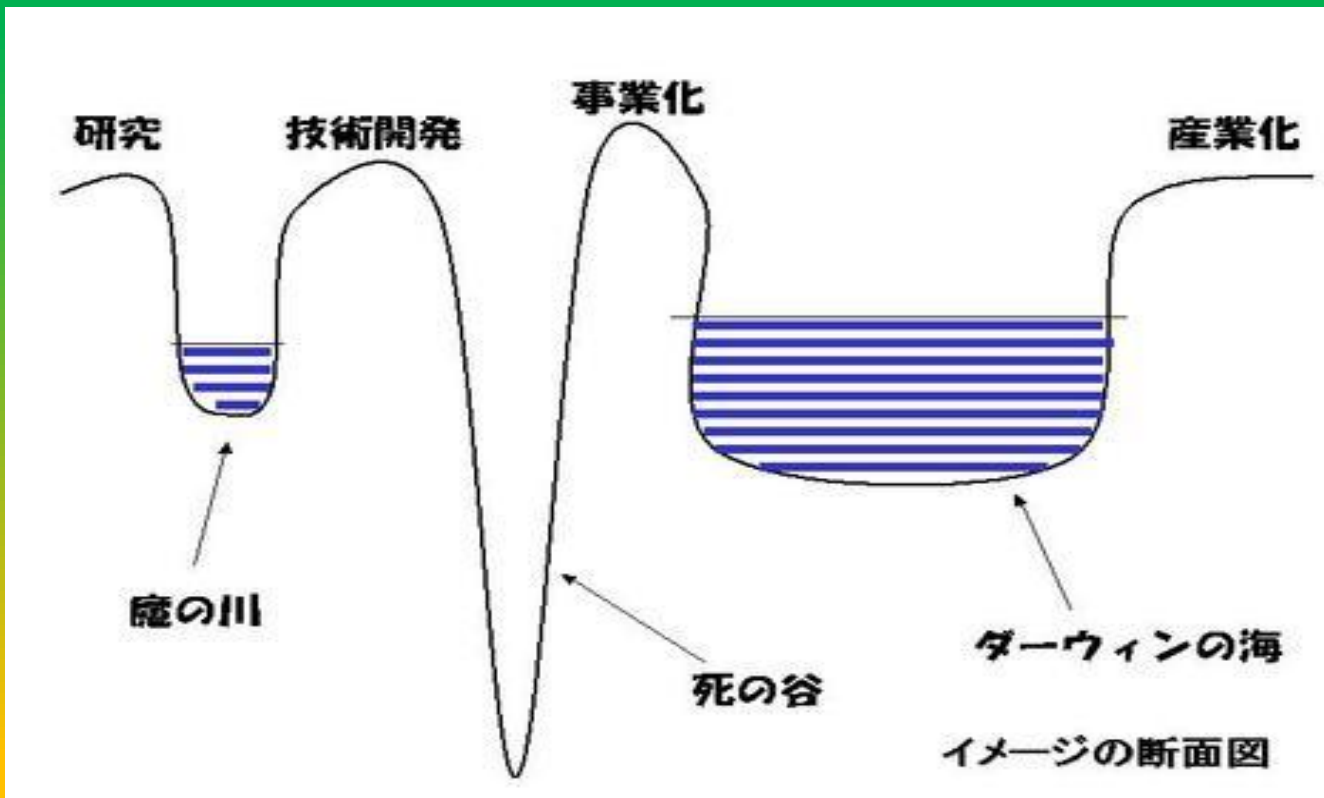


光ファイバの分類

太字は通信用



魔の川、死の谷、ダーウィンの海

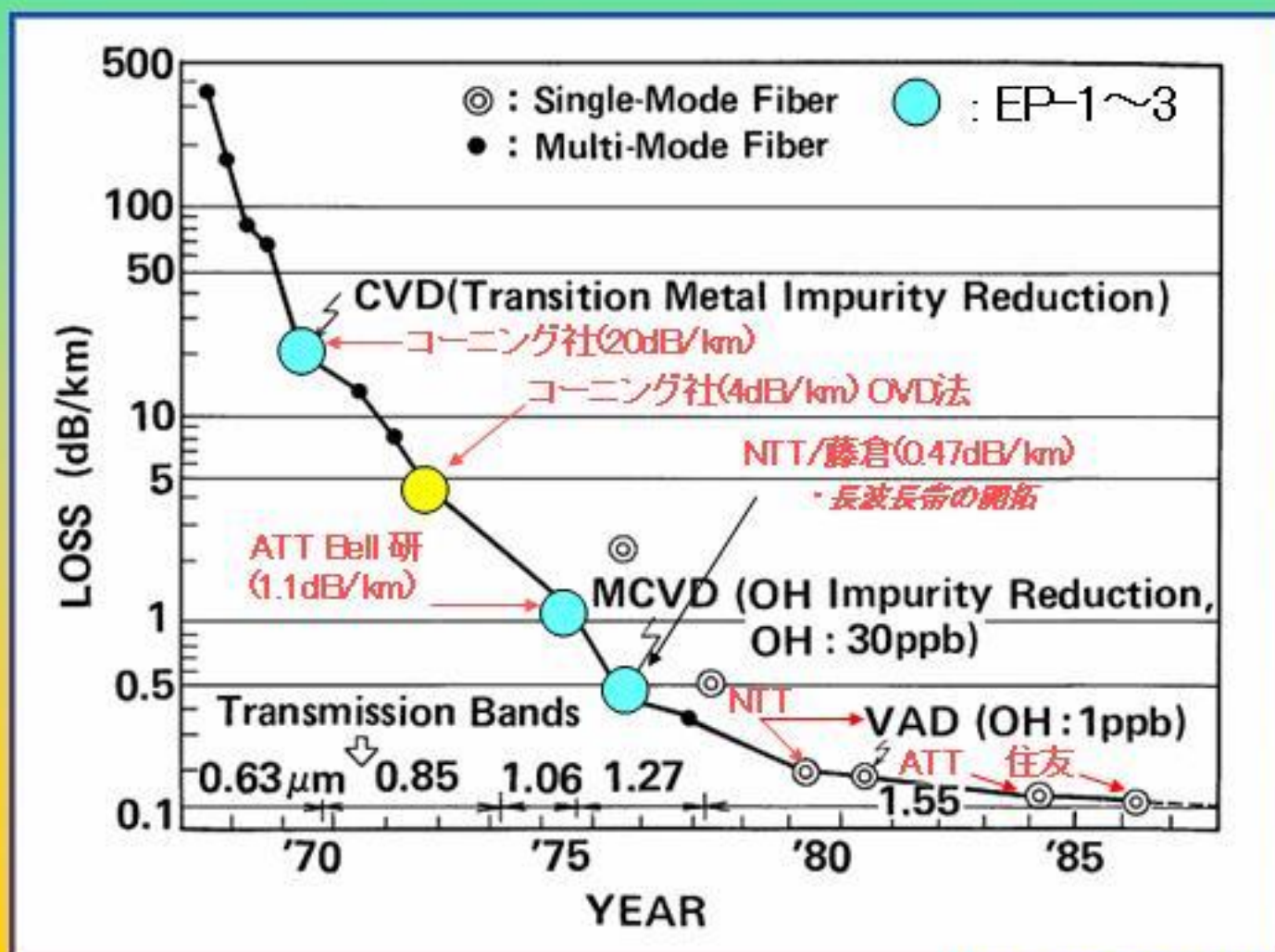


After T.Fujiwara http://www.jagrns.com/archives/2007/10/post_142.html

1. 独創と協創、行為的直観
2. 本物とは？

光ファイバ伝送損失の低減化経緯

Note : 光ファイバの開発競争は、伝送損失低減化の先陣争いでもあった。



光ファイバ開発の足跡(1)

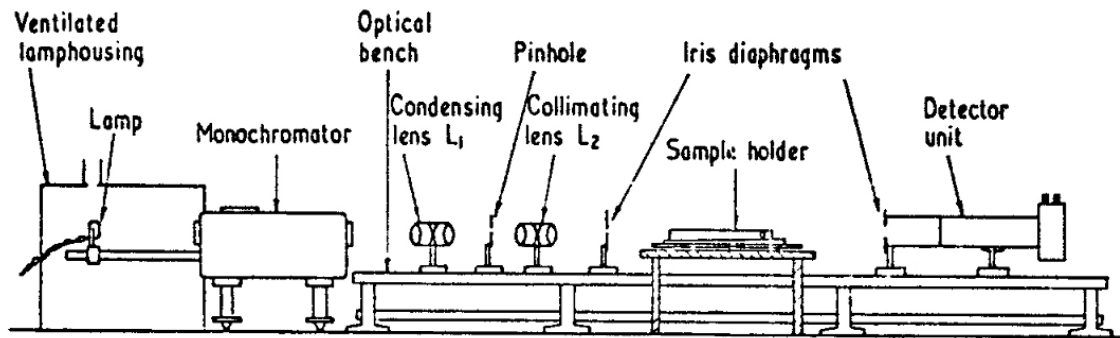
死の谷を乗り越えたエポック

- ・1966 KC.Kao博士の低損失光ファイバ実現を予測する先駆的研究
- ・1970 米国 コーニング社より、20dB/kmの光ファイバ発表 → EP-1
(光ファイバ通信技術のイメージ確立:「光ファイバ+半導体レーザー」)
同年、Bell研よりGaAs半導体レーザーの室温連続発信成功の発表
- ・1974 米国 ATT Bell研より、MCVD法の発表(1.1dB/km) → EP-2
(開発競争の促進と石英ファイバ物性解明の突破口を開く)
- ・1976 NTT/藤倉より、長波長帯極低損失光ファイバの発表(0.47dB/km) → EP-3
(長波長帯の開拓により、光ファイバ通信の研究を促進)
- ・1977 NTTより、光ファイバ母材製造法として、VAD法開発の発表 → EP-4
1981 極低損失OHフリー単一モード光ファイバの発表

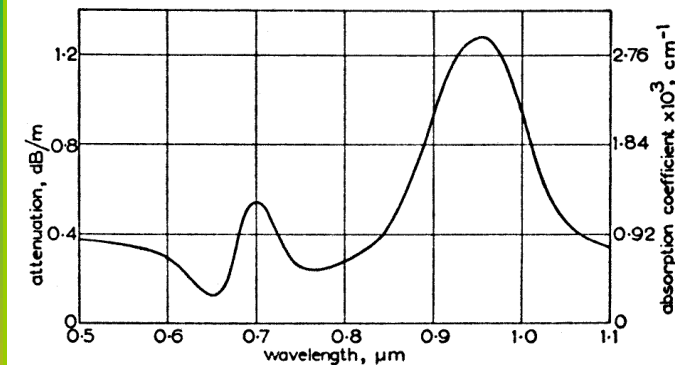
C.K.Kao博士の先見性



Note : K.C.Kao博士は、理論と実験の両面から、技術的に光ファイバの低損失化が、可能であるとの結論を導いた。



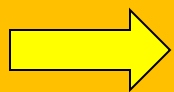
(バルクガラスの損失測定系)



(溶融石英の損失特性)

$$L(\text{dB/km}) = -10 \log(P/P_i)$$

例：バルクガラスの損失評価、解析等により



ガラス中の遷移金属(Fe、Co他)の低減により、20dB/km以下の低損失化が十分可能であることを提言した。

光ファイバ最初の一歩

Note : 1960年代光ファイバの損失は、数百~1000dB/kmで、到底通信に使える状況にはなかった。

-1966年 K.C.Kao and G.A.Hockhamは、低損失光ファイバ実現の可能性示唆する先駆的研究を発表した。

Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies

(論文抜粋)

K. C. Kao, B.Sc.(Eng.), Ph.D., A.M.I.E.E., and G. A. Hockham, B.Sc.(Eng.), Graduate I.E.E.

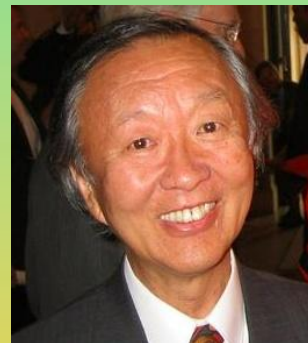
Synopsis

(England : Standard Telecommunication Labs. Ltd.)

A dielectric fibre with a refractive index higher than its surrounding region is a form of dielectric waveguide which represents a possible medium for the guided transmission of energy at optical frequencies. The particular type of dielectric-fibre waveguide discussed is one with a circular cross-section. The choice

owing to laser-glass requirements. It is foreseeable that glasses with a bulk loss of about 20dB/km at around 0.6 μ m will be obtained, as the iron-impurity concentration may be reduced to 1 part per million.

(20dB/kmの予測)



EP-1(1) 20dB/kmの光ファイバ実現

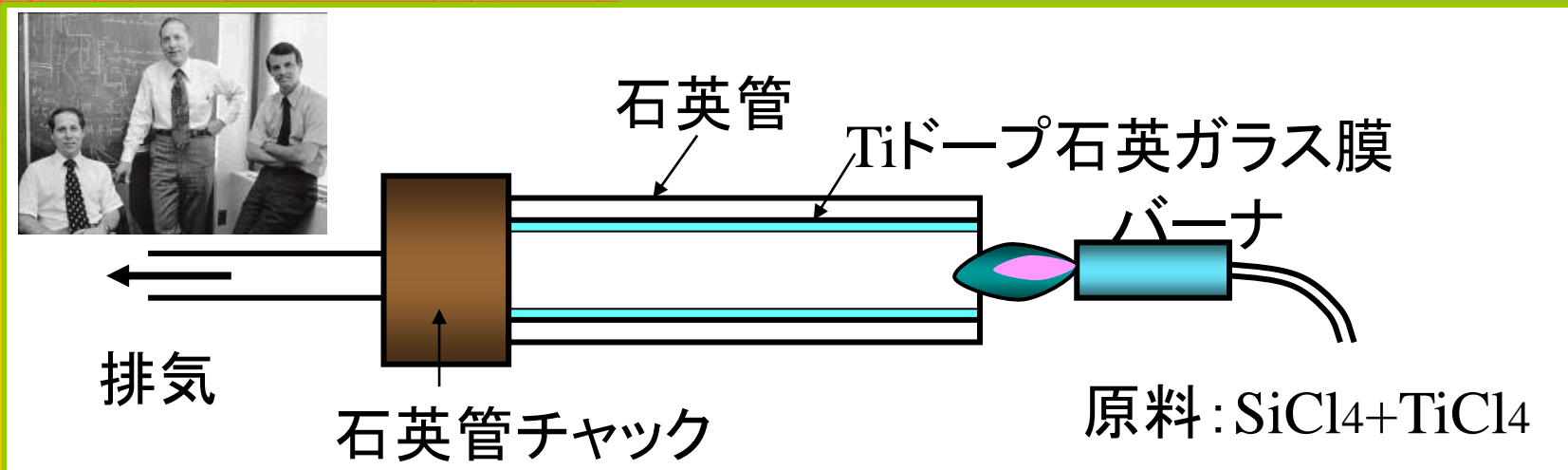
Note : 当時の技術レベルから、コーニングの発表は驚きをもって受け止められた。

- ・コーニング社は、Ti添加石英の合成基本技術があった(天体望遠鏡ミラー用)
- ・100年以上の歴史を持ち、特殊ガラス製造を得意とした。

- ・1970年 米国 コーニング社が、20dB/kmの単一モード光ファイバを発表した。
(光ファイバ通信の将来イメージを確立:「光ファイバ+半導体レーザ」)

注: 米国 Bell研より、GaAs半導体レーザの室温連続発信成功の発表

- ・製造法: 内付けCVD法 (IVD)



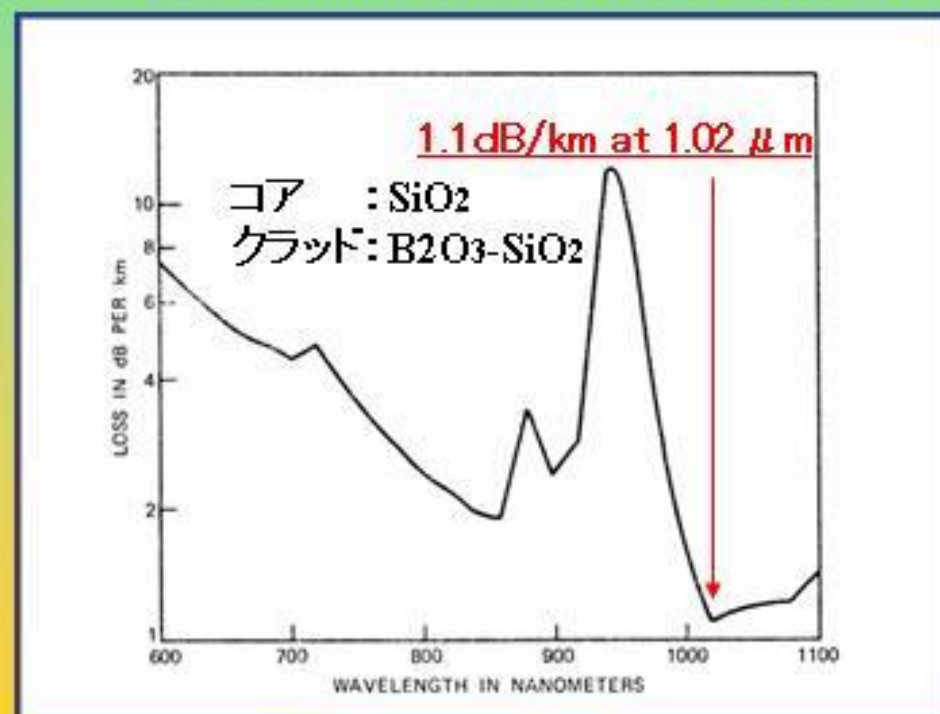
EP-1(2) 20dB/kmのインパクト

Note : コーニング社は、20dB/kmの結果のみの発表であった。製造法その他については、戦略的にその後も一切発表していない。したがって、製造法については特許の明細書等によるところが大きい。が、「20dB/kmの発表」は衝撃であった。

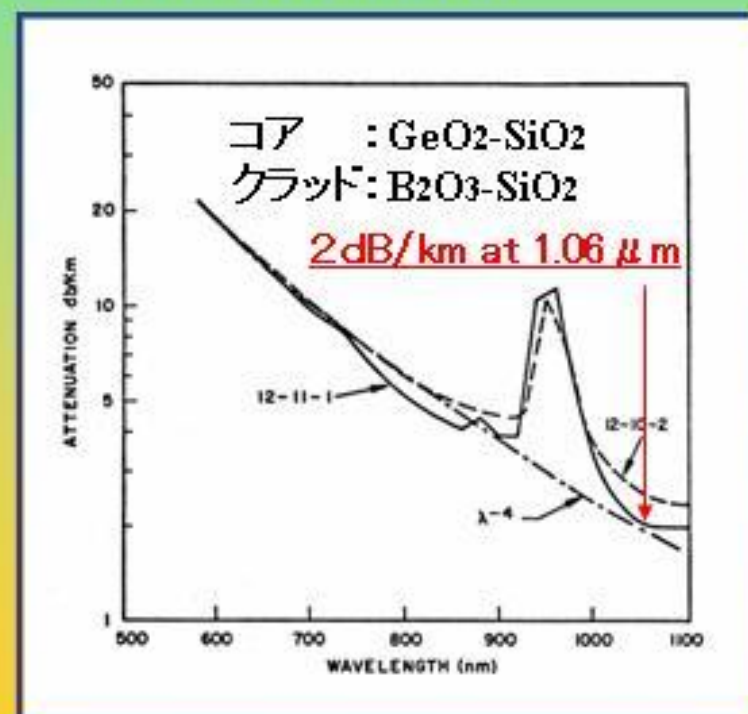
1. 同年に発表された、ATTの「GaAs半導体レーザーの室温連続発信成功」とあいまって、その後の「光ファイバ開発競争」のきっかけとなった。
2. 光通信の将来実現イメージは、「光ファイバ+半導体レーザー」であることを強烈にアピールした。
3. レーザの発明以来培われてきた、「レンズ列導波路通信」等の光通信技術の研究は、急激に衰退することとなった。同様に、ミリ波導波管の研究も収束に向かった（NTTは、1971年に至り、水戸～東海村間23kmのミリ波導波管敷設FRをほぼ終了している）。

EP-2(1)Bell研が、MCVD法を開発

Note: 1974年4月に、Bell研は、先ずBSTJ(社内発行誌)に低損失光ファイバを発表した。そのBSTJ誌が、日本に届く頃(1974年夏)京都で開催された第10回国際ガラス会議で、J.B.MacChesney等が製造法も含めた詳細な発表を行った。



(1) BSTJ誌掲載

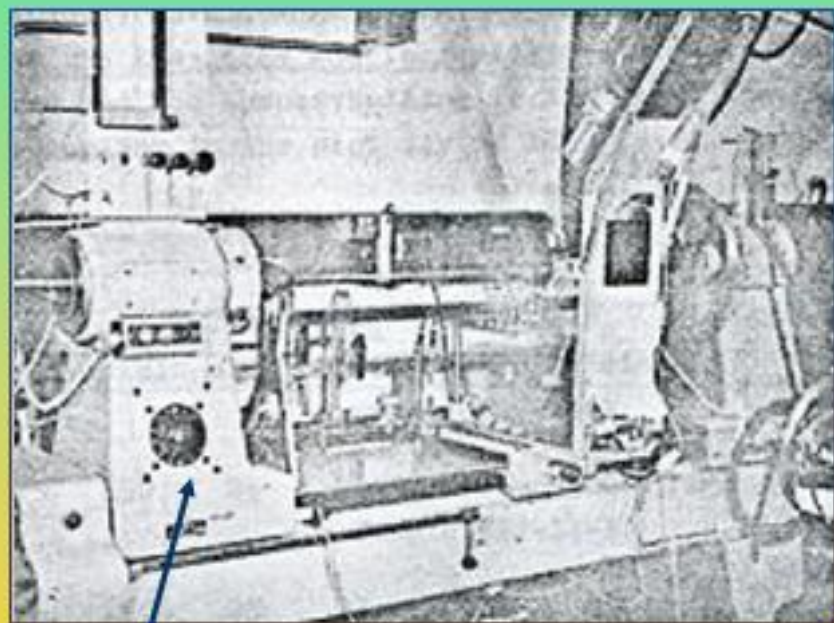


(2) 10th International Congress on Glass

After (1) J.B.Mac Chesney et al., 10th International Congr. Glass, No.6. Cera. Soc. Jpn pp6-40~6-45, July12, (1974),

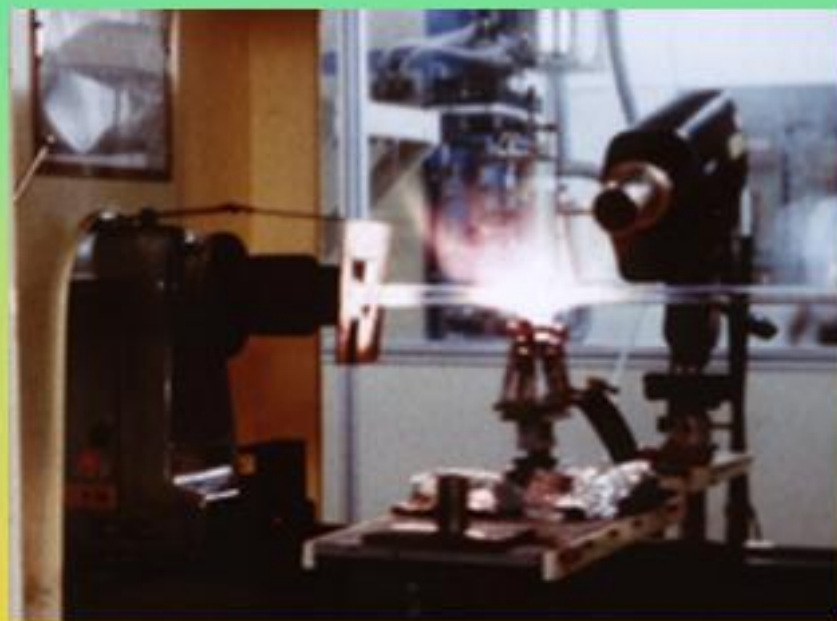
(2) W.G.French et al. BSTJ Vol53. 5. pp951-954. May-June. (1974)

EP-2(3)MCVD装置の概要



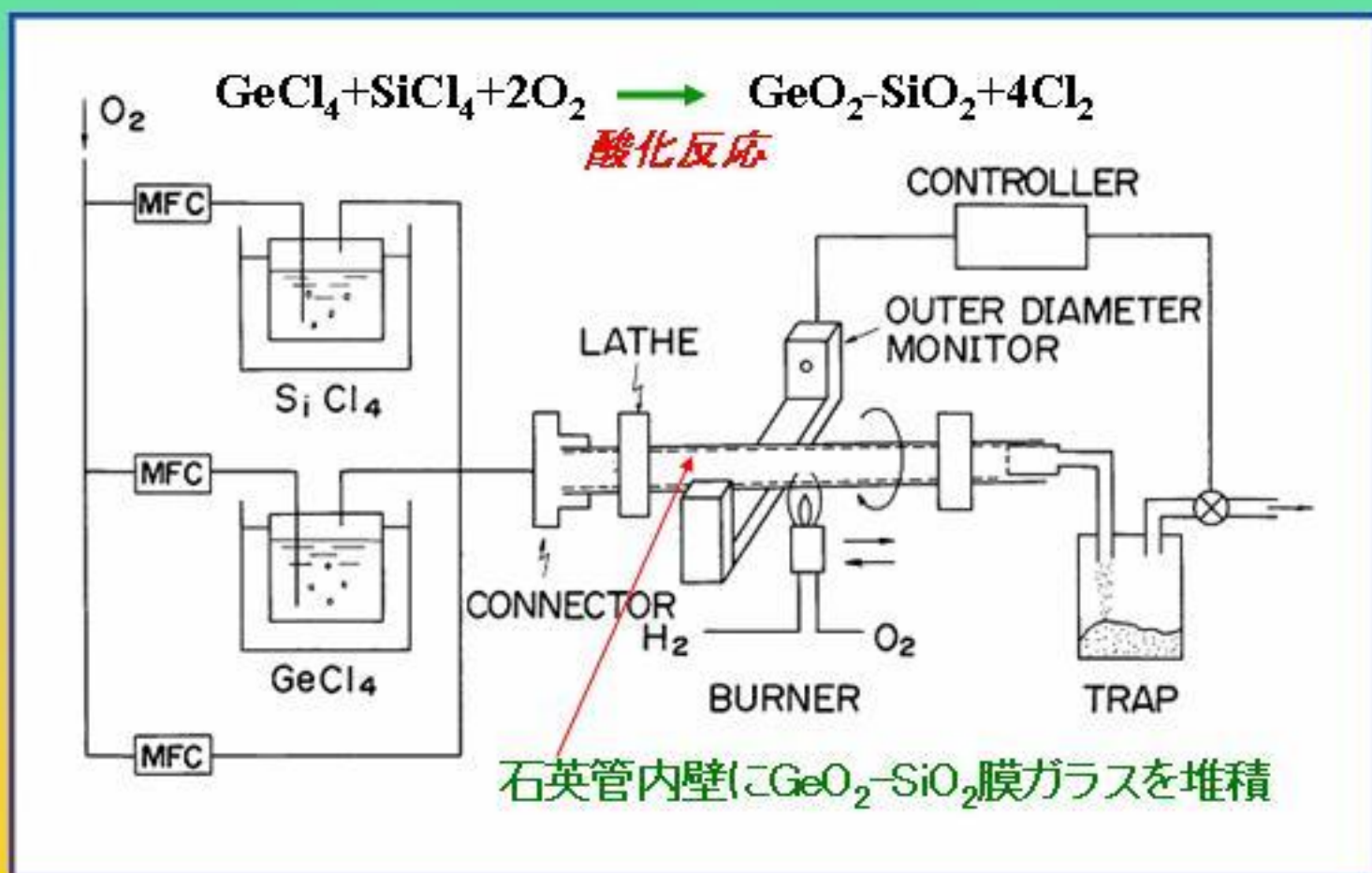
ガラス旋盤

J.B. MacChesneyのMCVD装置



MCVD装置の一例

EP-2(2)MCVD装置の構成例



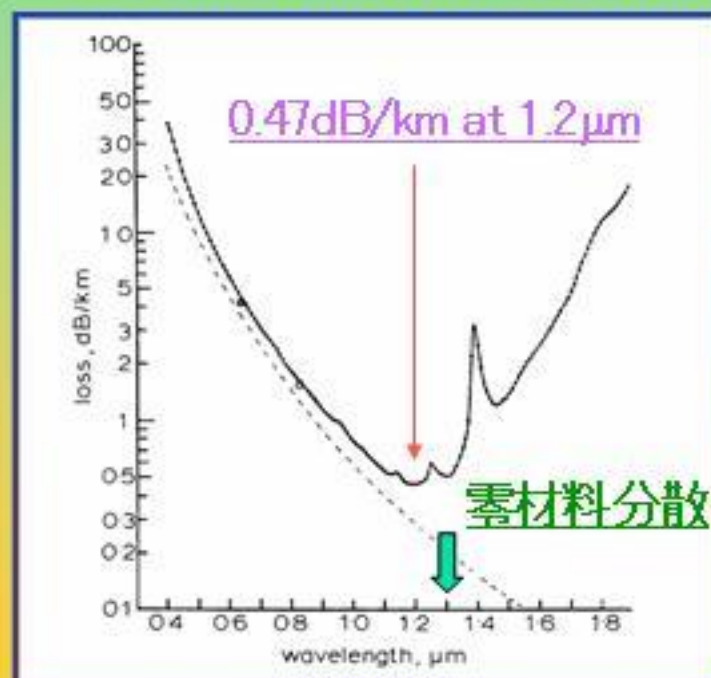
EP-2(4)MCVD法の貢献

Note : Bell研は、低損失光ファイバの特性のみならず、製造法の詳細についても発表した。これは、各研究機関が比較的容易に追試・確認できる内容のものであり、その後の研究開発に大きな影響を与えた。

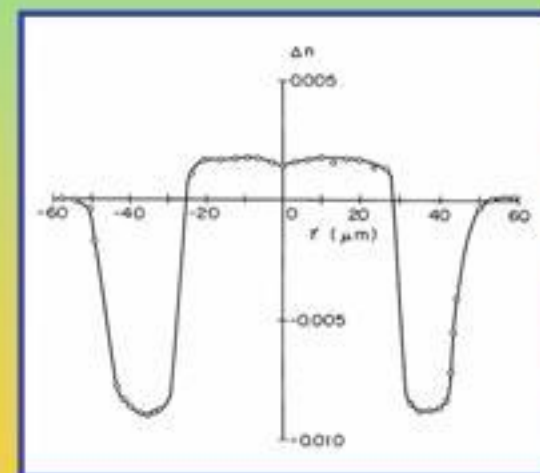
1. MCVD法は、装置構成が比較的簡易で、母材作製に必要な装置・部材も容易に入手できたため、瞬く間に世界中で追試が行われ、「低損失光ファイバの作製に極めて有効な製造法」であることが実証された。
2. この発表を契機に、多くの研究・開発機関が、低損失光ファイバを手にする事となり、「光ファイバ材料・物性研究や初期のシステム実験」の進展に大きく貢献した。
3. この結果、光ケーブル化など周辺技術を含めて、その後の世界各国における「光ファイバ通信の開発競争」に一段と拍車をかけることとなった。

EP-3(1)長波長帯の開拓

- Note: 1975年に日本電信電話公社(NTT)は、国内主要電線メーカー3社と「光ファイバと光ケーブルに関する共同研究」を開始した。1976年に、その成果の一つとして、MCVD法により「**極低損失光ファイバ(0.47dB/km at 1.2 μ m)**」の開発に成功した。
 ・この結果、石英材料固有の低損失領域(長波長帯)の存在が実証された。



光ファイバ断面の
干渉顕微鏡写真



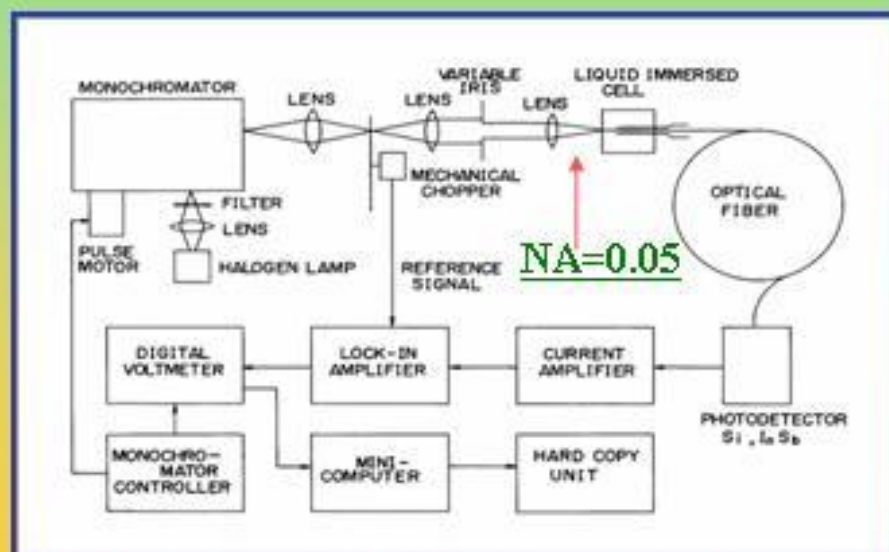
低損失光ファイバの屈折率分布

$\text{P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ コア/ $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ クラッドファイバ

EP-3(2)長波長帯の伝送損失測定

Note: 1970年代前半、光ファイバの損失測定用検出器には、Si系のPDが使われていた。また、光ファイバの損失も大きかったため、「波長 $1.1\mu\text{m}$ 以上の領域」の伝送損失評価は、ほとんど行われなかった。

- ・1975年9月ごろ、NTT茨城電気通信研究所でPbS検出器による損失測定実験が行われ、その後の「長波長帯の開拓」につながった。



測定波長域(InSb光検知器) $\lambda = 0.4 \sim 3.2\mu\text{m}$

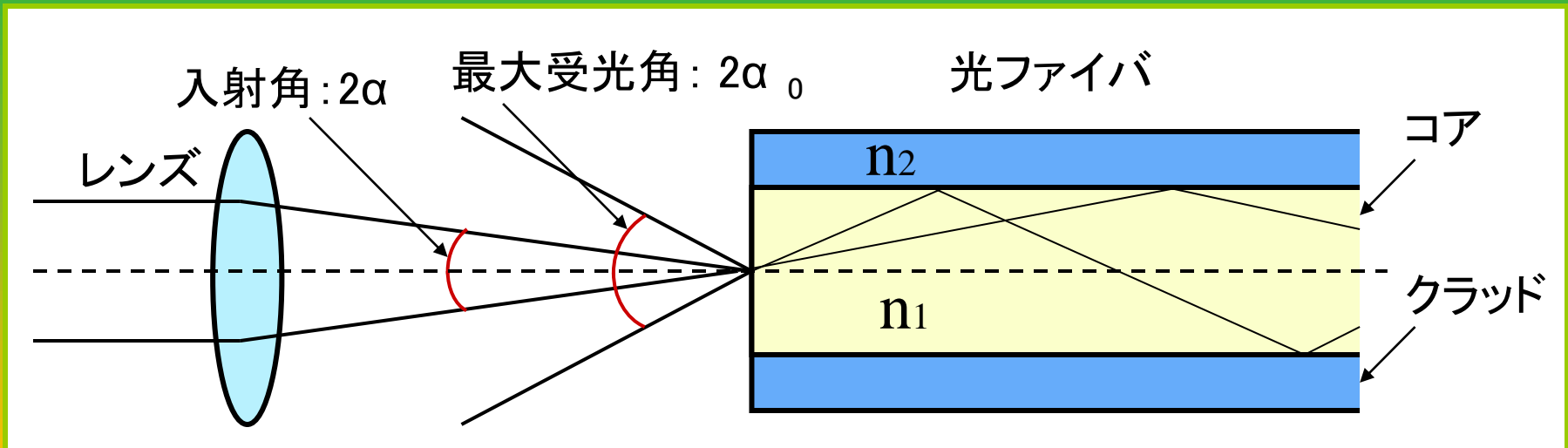
1975年当時の測定装置

“非常に小さな入射 $NA=0.05$ での損失評価が、ガラス固有の低損失領域を見出すKeyとなった”

Note:光ファイバの開口数とは？

入射 $NA = \sin\alpha$

$$\text{開口数 (NA)} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$



例 ・入射NA = 0.05とは？

$2\alpha = 5.7$ 度

・ファイバNAと最大受光角 ($\Delta = 0.8\%$)

NA=0.18 $2\alpha_0 = 14.4$ 度

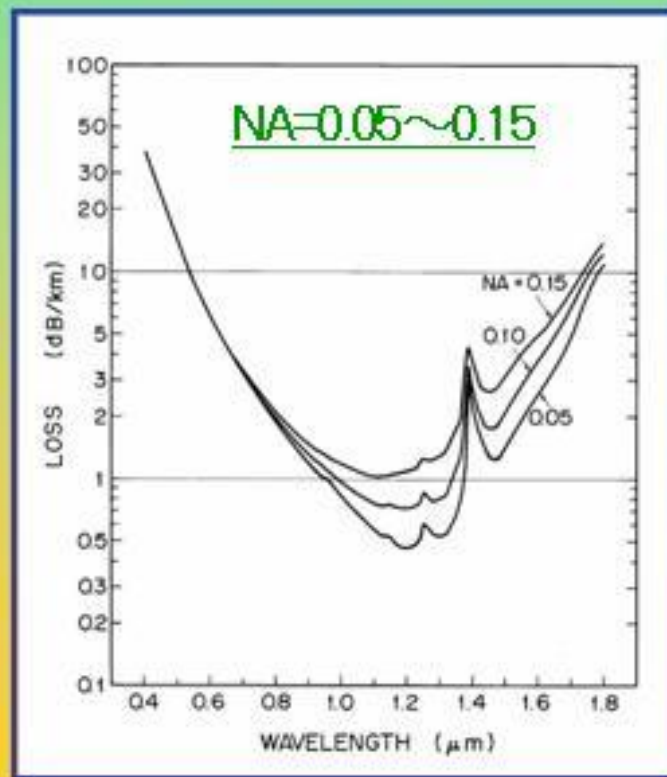
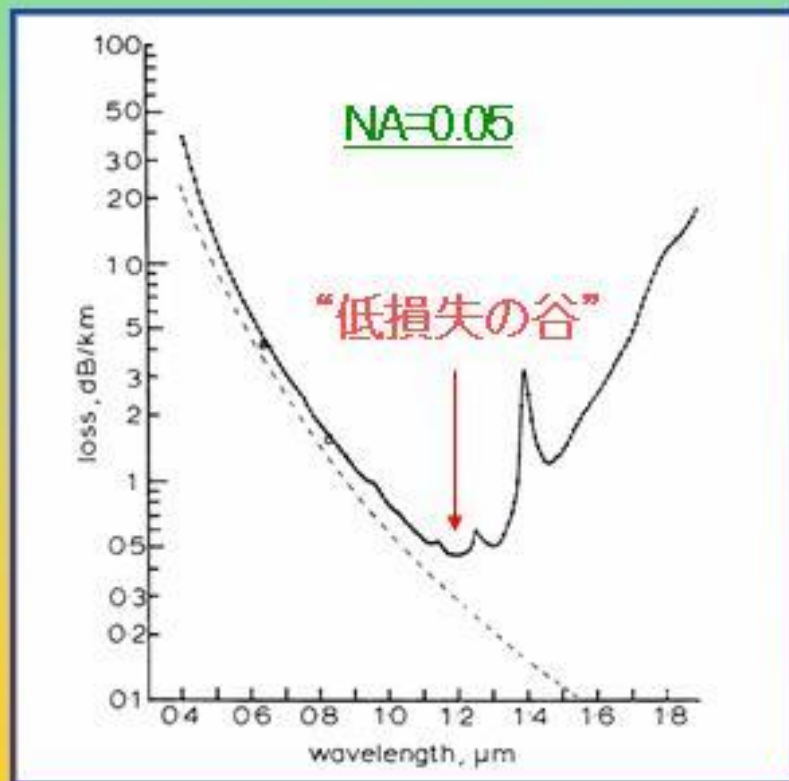
n_1 : コアの屈折率

n_2 : クラッドの屈折率

Δ : 比屈折率差

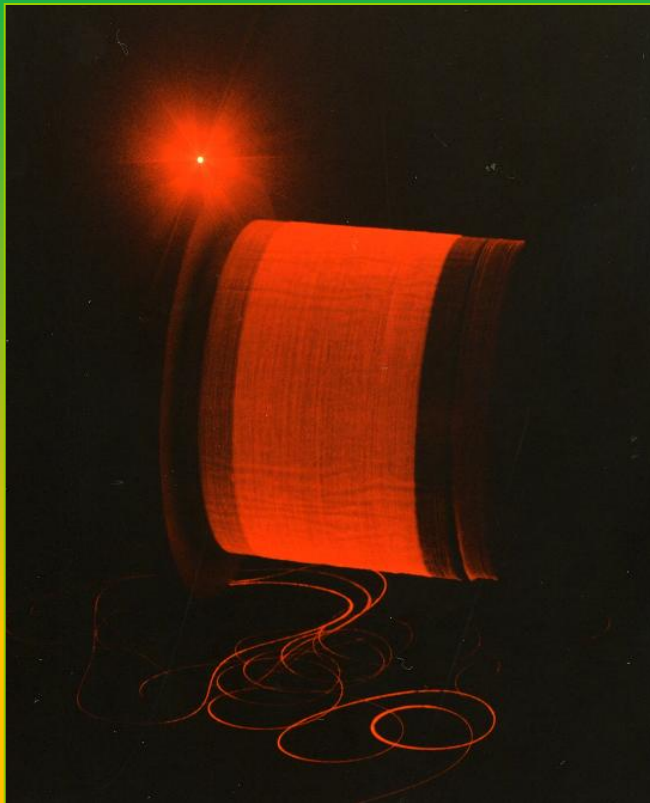
EP-3(3)伝送損失へのNAの影響

Note: 多モード光ファイバの伝送損失は、NA(開口数)に強く依存する。ここでは、石英ガラス固有の損失を明らかにするため、非常に小さな開口数(0.05)が測定に用いられた。その結果、初めて“**低損失の谷**”が見出された(TP)。



Rayleigh散乱

Note : レーリ(Rayleigh)散乱は、波長より小さい散乱中心による弾性散乱で、その強度は、波長の4乗(λ^{-4})に逆比例する。このため、波長の長いほどレーリ散乱の影響は小さくなる(青空の色の説明)。



HeNeレーザを入射した光ファイバからの光散乱

(レーリ散乱: λ^{-4} が主体)

$$I = (2\pi^2 V^2 / r^2 \lambda^4) \cdot \{(\epsilon - \epsilon') / \epsilon'\}^2 \cdot (1 + \cos^2 \theta)$$

I: 散乱光の強さ

θ : 観測の方向

r: 粒子から観測点までの距離

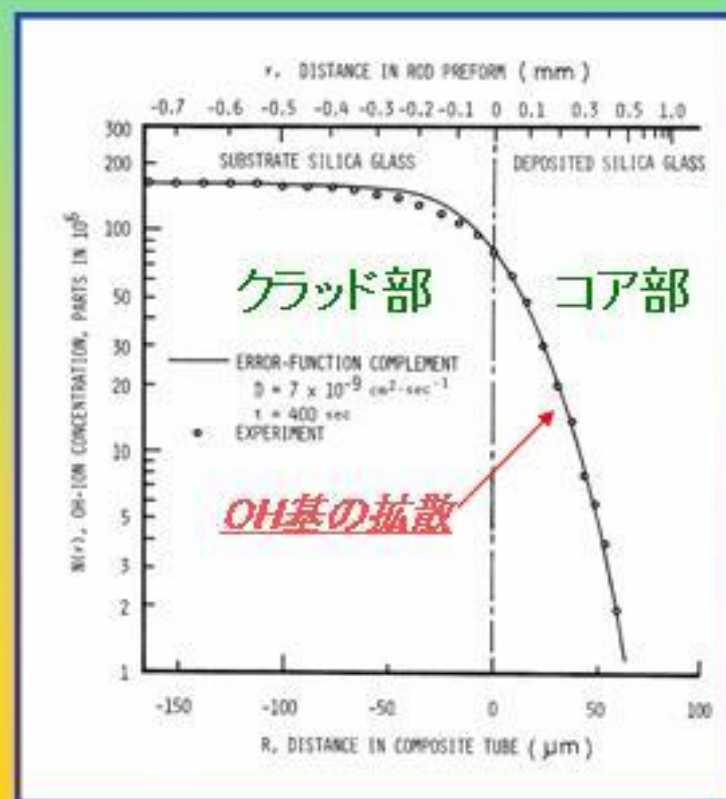
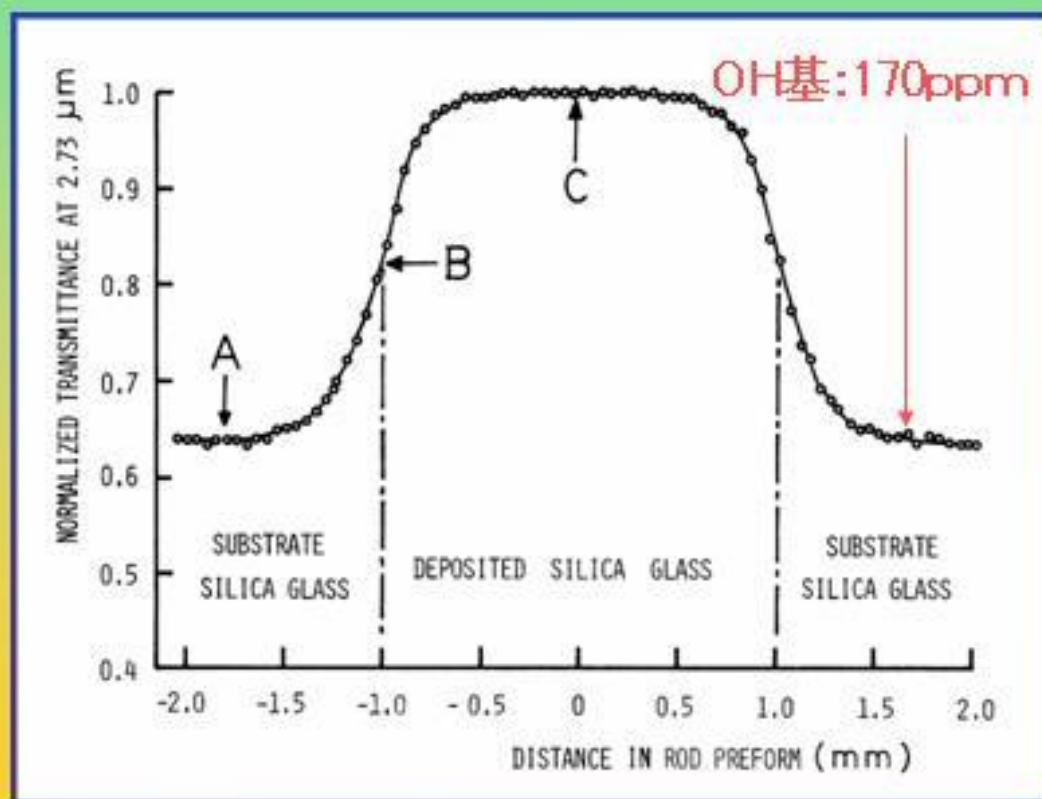
V: 粒子の体積

ϵ : 粒子の誘電率

ϵ' : 基質の誘電率

EP-3(8)出発石英管からのOH基の拡散

Note: 当時、MCVD法に使用されていた出発石英管中には、数百ppmのOH基が含まれていた。そのためバリア層が堆積されていたが十分ではなくコア部に深く拡散したOH基の汚染が存在した(EP)。

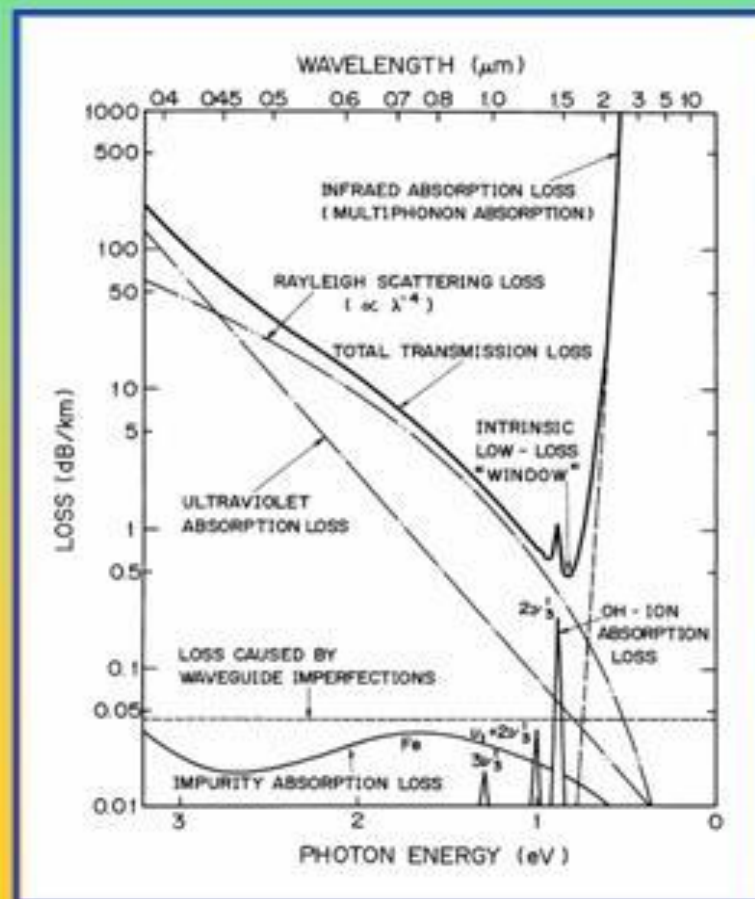


(波長 $\lambda = 2.73 \mu\text{m}$ でのMCVD母材断面の透過特性)

(OH基分布の理論曲線との比較)

EP-3(9)光ファイバの伝送損失機構

Note : ガラス中の不純物や構造上の欠陥が低減された光ファイバの伝送損失は、主にレーリ散乱、紫外吸収、赤外吸収によって決定されることが解明された。



After (1)堀口、高田、研究実用化報告、第27巻、第10号、pp.2267-2275(1978),

(2) M.Hriguchi, a thesis for the doctor's degree, no.5747(The University of Tokyo), (1981)

VAD製造法の原理と特徴

Note : MCVD法(熱酸化法)~1g/分
VAD法(火炎加水分解法)~5g/分

石英合成の化学反応 (GeO₂添加の場合)

(1) 熱酸化法 (Oxidation)



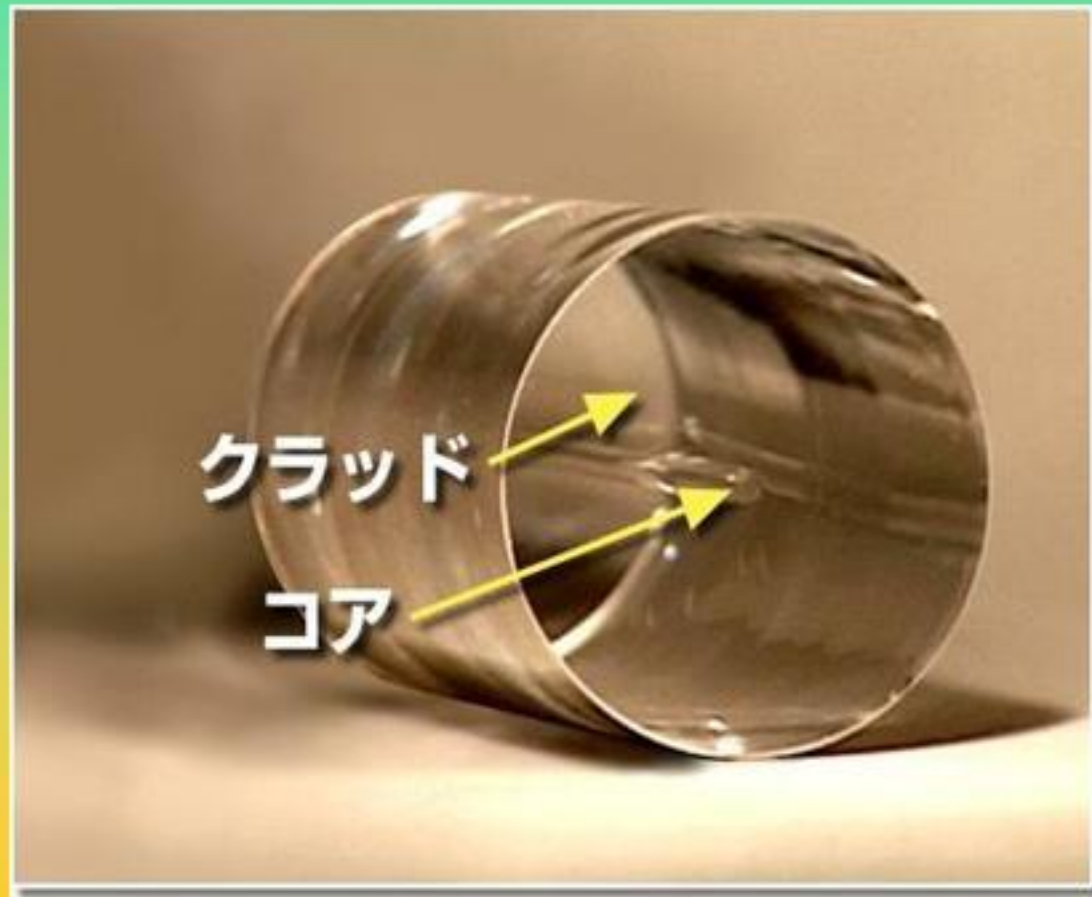
・対応する製造法 : MCVD法、PMCVD法、PCVD法

(2) 火炎加水分解法 (FHD: Flame Hydrolysis Deposition)



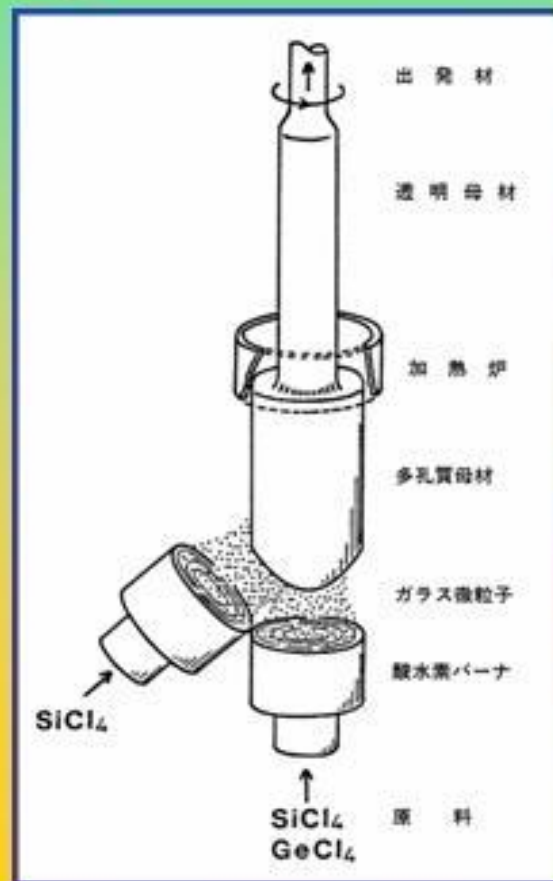
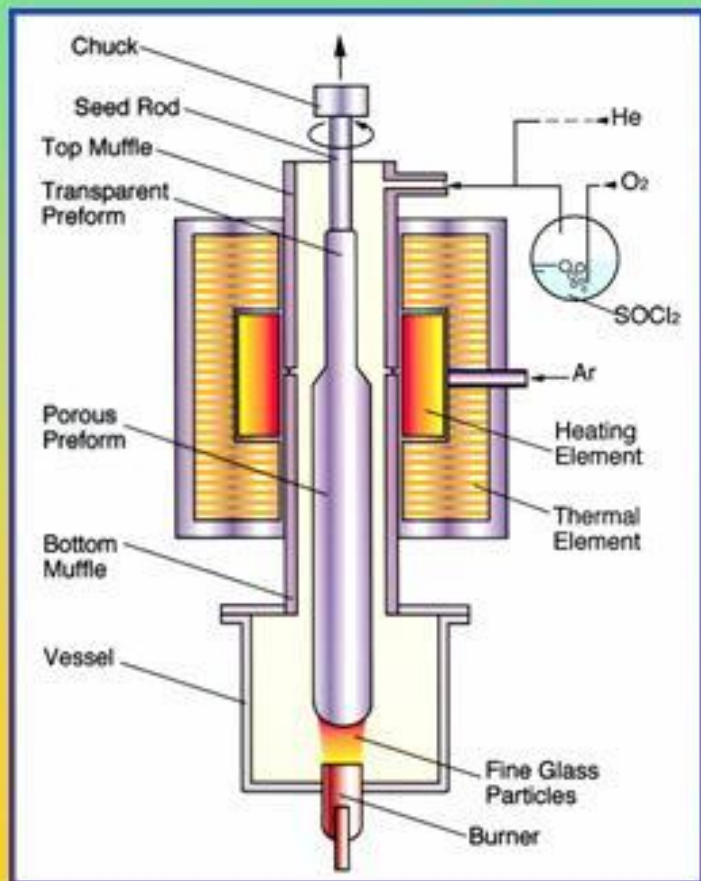
・対応する製造法(スートプロセス) : OVD法、VAD法

EP-4(6)光ファイバの構造(プリフォーム)



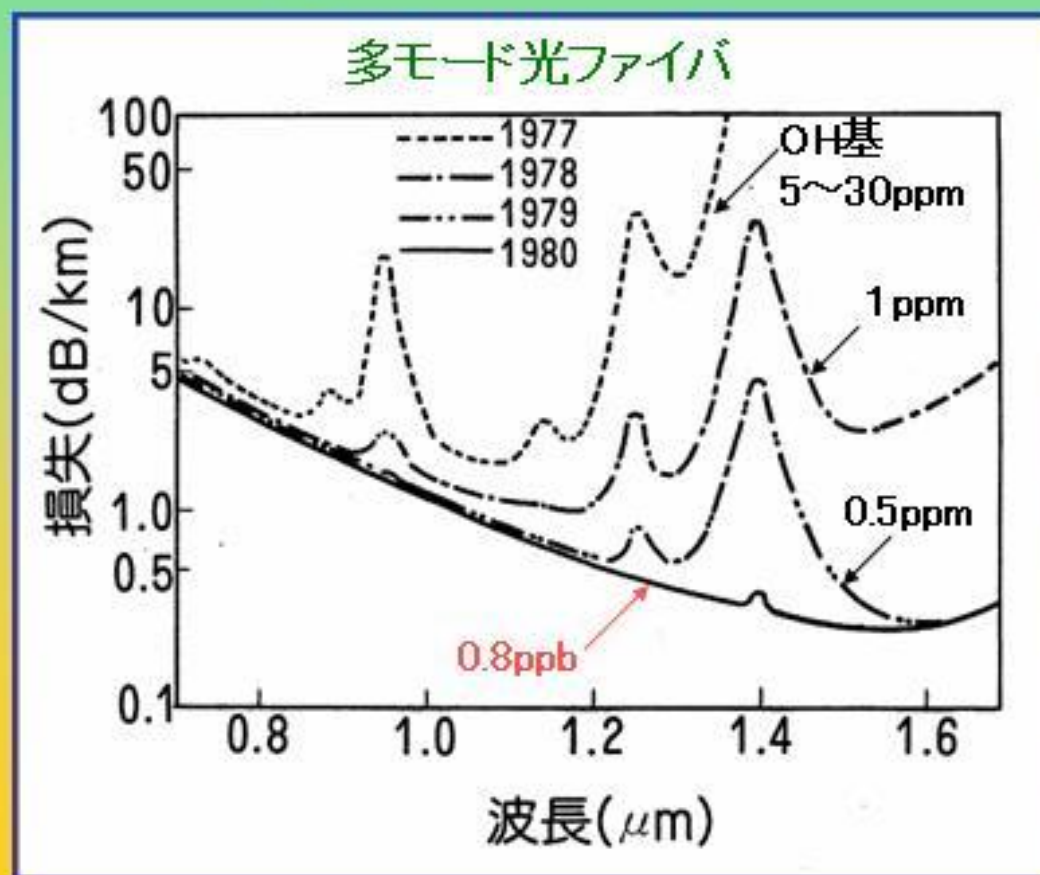
EP-4(1) VAD法の開発

Note : 1977年に日本電信電話公社(NTT)は、光ファイバ製造に関する国産の自主量産技術として、VAD法 (Vapor Phase Axial Deposition Method)を開発した。

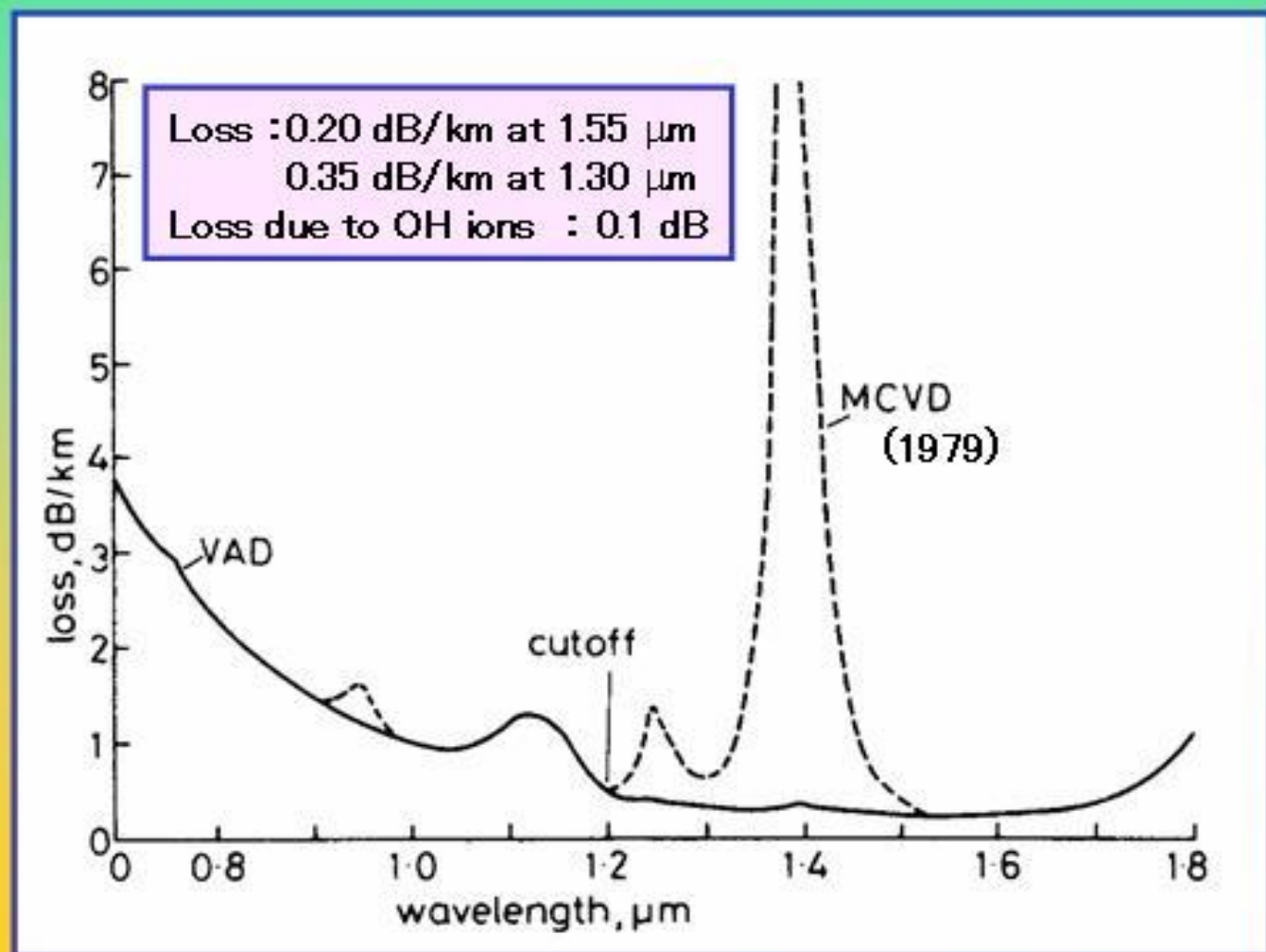


EP-4(2) VADファイバの性能向上

Note : VAD法による脱水(低OH基化)は、当初塩化チオニール(SOCl_2)が用いられたが、その後、塩素(Cl_2)による脱水技術が確立され、低損失化が進展した。



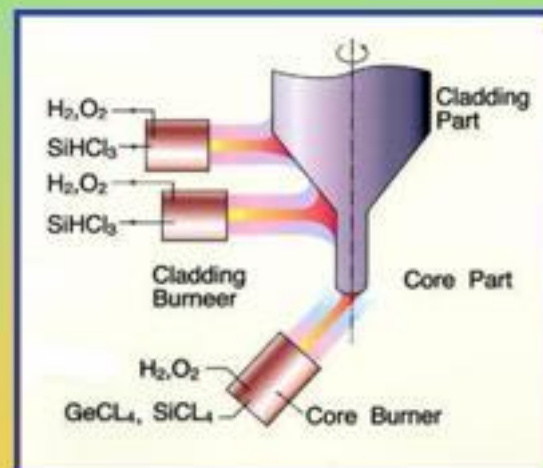
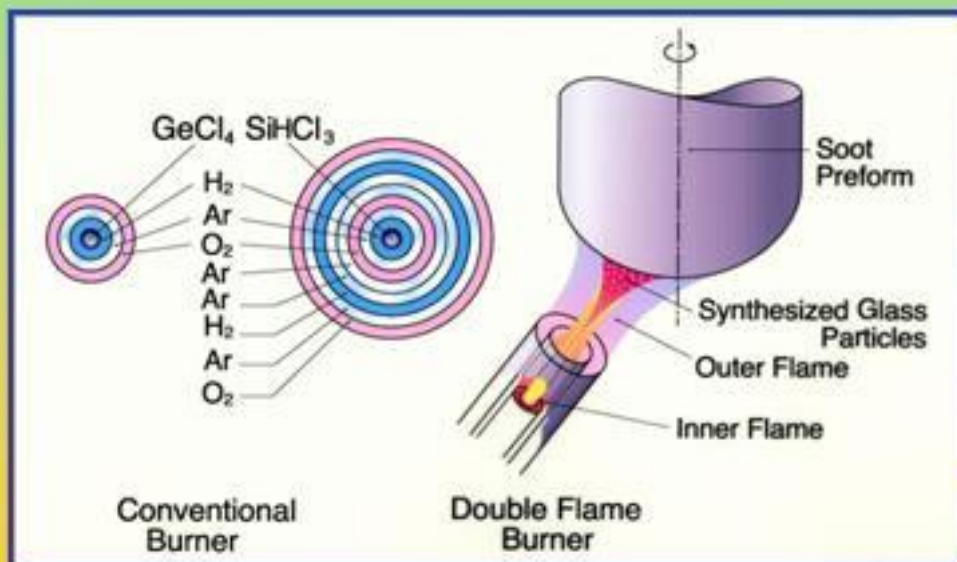
EP-4(3)VAD法による極低損失 単一モード光ファイバ



EP-4(4)量産化技術の進展

Note : VAD法は、性能確認後、量産化技術としての技術向上が図られた。具体的には母材の「高速合成技術」や関連技術として「高速線引き技術」が開発された。

多重火炎法による高速合成技術



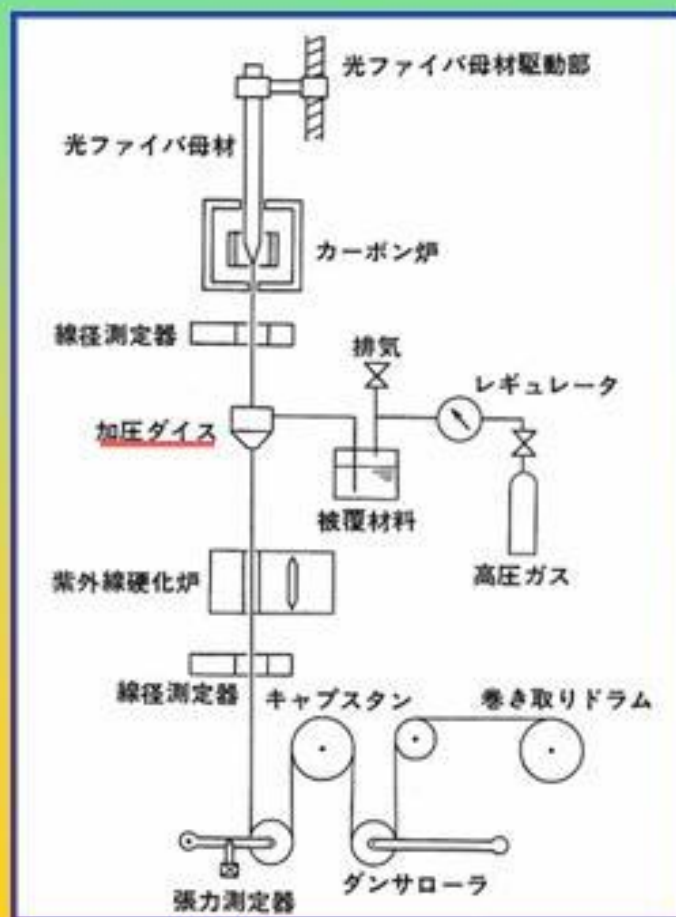
SMファイバーストプリフォームの全合成

EP-4(5)VAD法による多孔質母材



EP-4(7)量産化技術 高速線引き

Note: 大型母材の線引きに対応するため、「加圧ダイス方式による高速線引き技術」が開発された。最高線引き速度は、毎分1200mにまで到達した。



EP-4(8) VAD法のインパクト

Note : VAD法は、当初、低価格ファイバ合成の国産自主技術として開発されたが、OH吸収を極限的に低減することに成功し、今では、世界の光ファイバの大半を供給し、OVD法(コーニング社)、MCVD法(ATT)と共に世界の3大製法と言われる。

光ファイバの量産化と光産業界への貢献

- (1) VAD法による母材の量産化
- (2) VAD法による光ファイバ母材の大型化と高速製造技術
 - ・高速合成による～1000km相当母材
 - ・毎分500～1000mの高速線引き(関連技術)
- (3) 高性能化
- (4) 上記効果による抜本的経済化の達成(10円/mファイバ)
 - ・当初国内導入時(～1980年):～800円/m
 - ・現状:～3円/m(芯線)、～4円/m(光ケーブル)

結 び

1. 独創と協創、行為的直観

1. 1 MCVDの追試

- ・赤外の窓発見、低NA計測
- ・レイリー散乱: 研究と評価

1. 2 VAD法開発: OHフリー光ファイバ・3円/mの実現

- ・火炎加水分解(高速合成)→脱水技術→高速線引
- ・基礎研と茨城研究所

2. 監督力: 石英系に一本化、(平面光回路の研究体制)

3. 本物とは?

- ・Vacant Lab. NTT
- ・真のマジシャンは誰?(M.エンデ): 3億円/年予算獲得

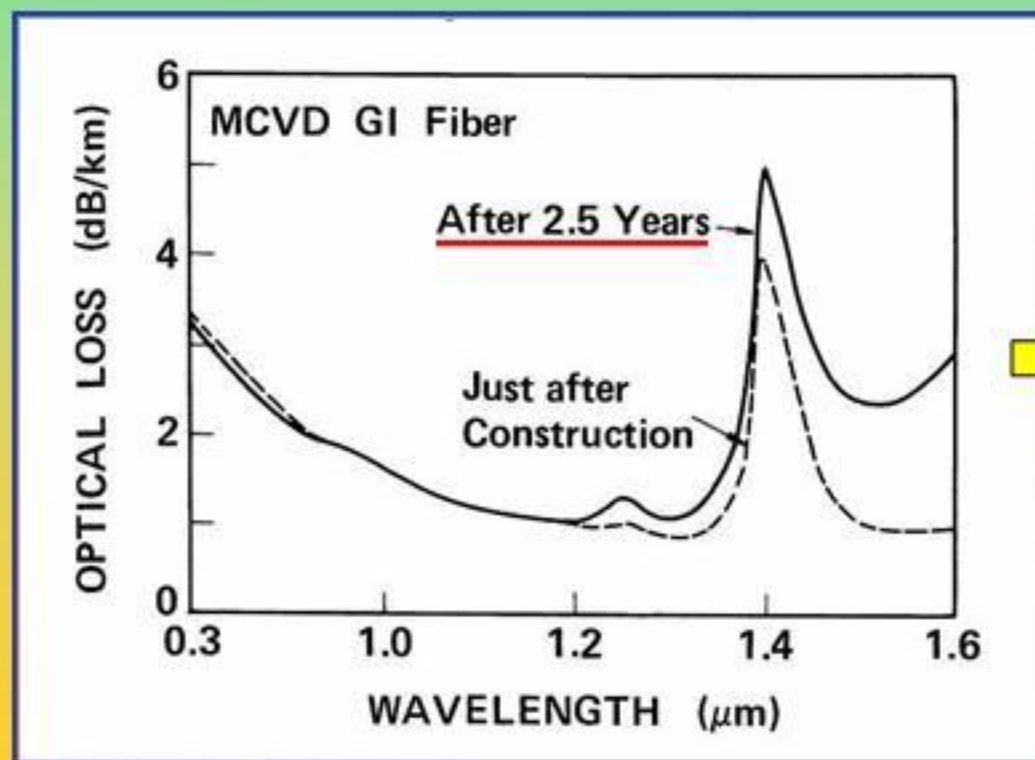
光ファイバ開発の足跡(2)

ダーウィンの海に浮かぶエポックと次世代への胎動

- ・ 1979 超低損失光ファイバへの挑戦
- ・ 1981 平面型光回路の探索研究開始 → EP-5
- ・ 1984 敷設光ファイバケーブル損失増問題の発生と解決
(光ファイバの長期信頼性問題を決着) → EP-6
- ・ 1986 高速線引きVAD光ファイバの発表
(光ファイバ量産技術の開発) → EP-4
- ・ 1987 英国サザンプトン大、Er添加光ファイバ増幅器の発表 → EP-7
- ・ 1998 世界的なIT革命の進展と、DWDMシステムの急速な普及 → EP-8
- ・ 2001 ITバブルの崩壊と今後の課題 → EP-9
- ・ 2003～ FTTH、FTTO、メトロ・・・→全光ネットワーク

EP-6(1):光ケーブルの損失増問題

Note : 1982年6月に日本電信電話公社(NTT)の茨城電気通信研究所が、「**布設された光ファイバケーブルに原因不明の経時的損失増加現象がある事実**」を発見した。以後、約2年半に及ぶ大規模な原因究明と対策研究が行われた。



Note: P_2O_5 の添加濃度と環境温度に強く依存することを実験室で再現した。

EP-6(3):光ケーブル損失増問題の解決

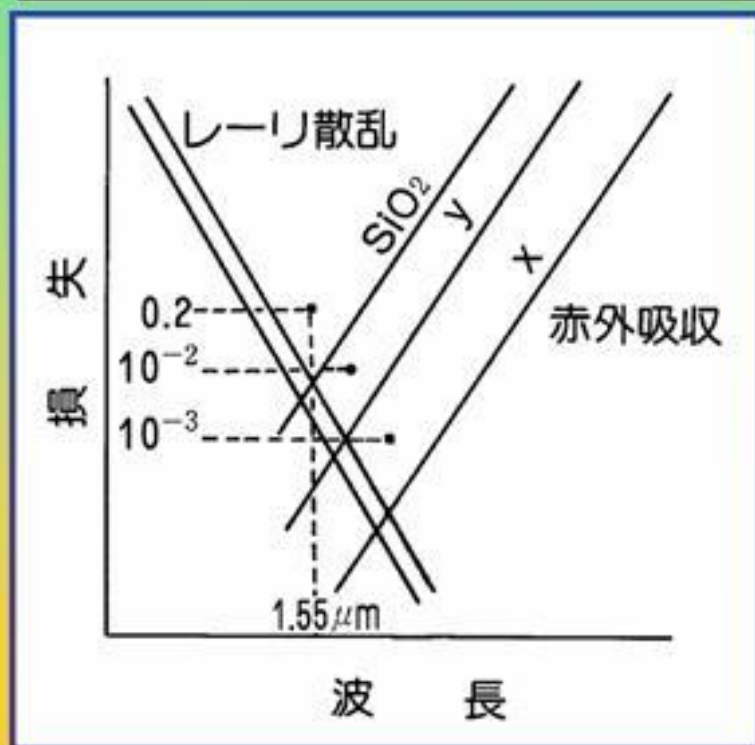
Note: 経時的損失増加現象は、発見当時は極めて深刻な事態であった。しかし、その原因が、光ファイバの外部から“拡散した水素”と光ファイバ中に添加されたドーパントとの相互作用で起こることから、光ケーブル製造に際し、総合的な対策が実施され、20年以上の長期信頼性が確保されるに至った。

対策

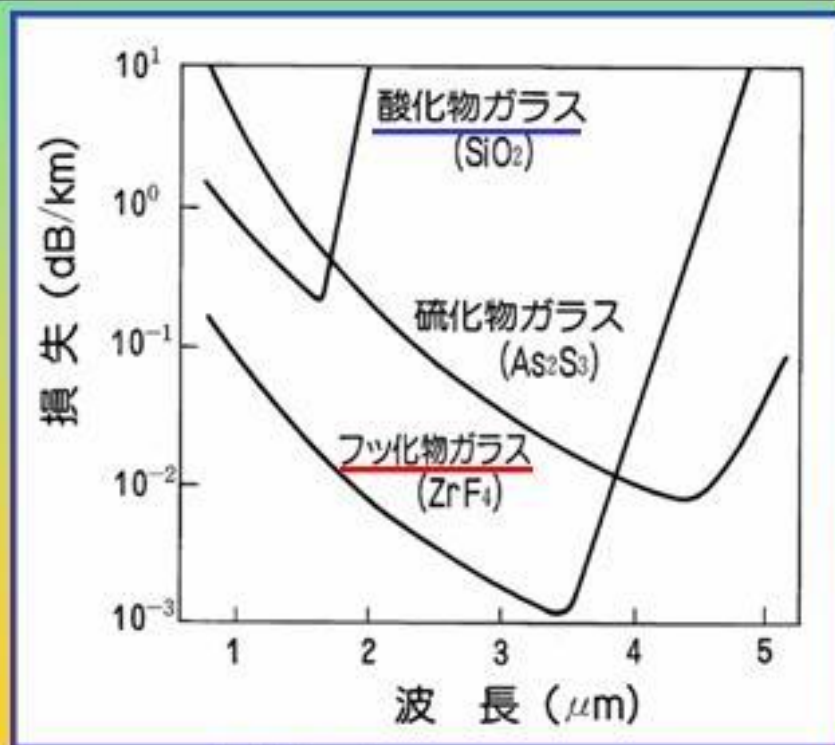
1. 光ファイバ周辺での水素(H_2)の発生の防止。
 - ・被覆材料の改良:水素発生量の極めて少ない材料(被覆材料樹脂)を選定、使用する。
2. ファイバ中の欠陥発生(多くはドーパントに起因)を防止する。
 - ・最も悪影響を及ぼす、 P_2O_5 を含まない光ファイバを使用する。
3. 水素が発生した場合、光ファイバへの侵入防止。
 - ・ガス保守または、水素発生量の少ないコンパウンドを使用する(海底ケーブルなど)。

EP-3(11)超長波長帯(赤外)光ファイバ

Note: 石英系光ファイバの長波長帯の開拓により、伝送損失機構が解明された。その延長として、赤外吸収を酸化物ファイバよりさらに赤外波長域にシフトさせる「超長波長帯低損失光ファイバ」の研究が行われた。



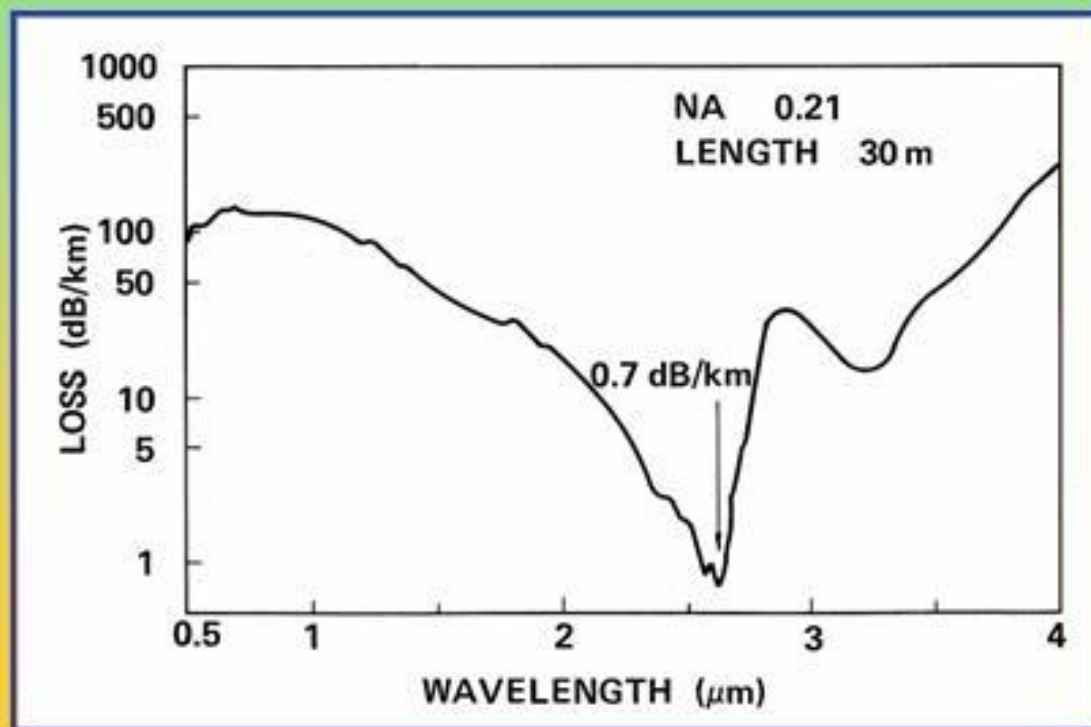
赤外ファイバの原理



伝送損失シュミレーション

EP-3(12)赤外光ファイバの技術展開

Note: 赤外光ファイバの低損失化は、フッ化物ガラスで研究が進められたが散乱損失の低減やガラスの超高純度化に技術的な障壁があり、最小損失は0.7dB/kmにとどまった。同技術はその後、「光ファイバ増幅器」のホストガラス(1.3 μ m、1.48 μ mなど)として、開花した。

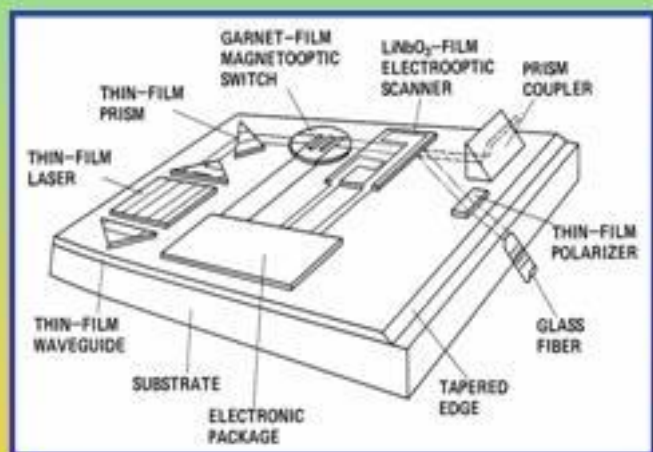


After (1) 真鍋, セラミックス, Vol17, No.4, pp271-277, (1982)

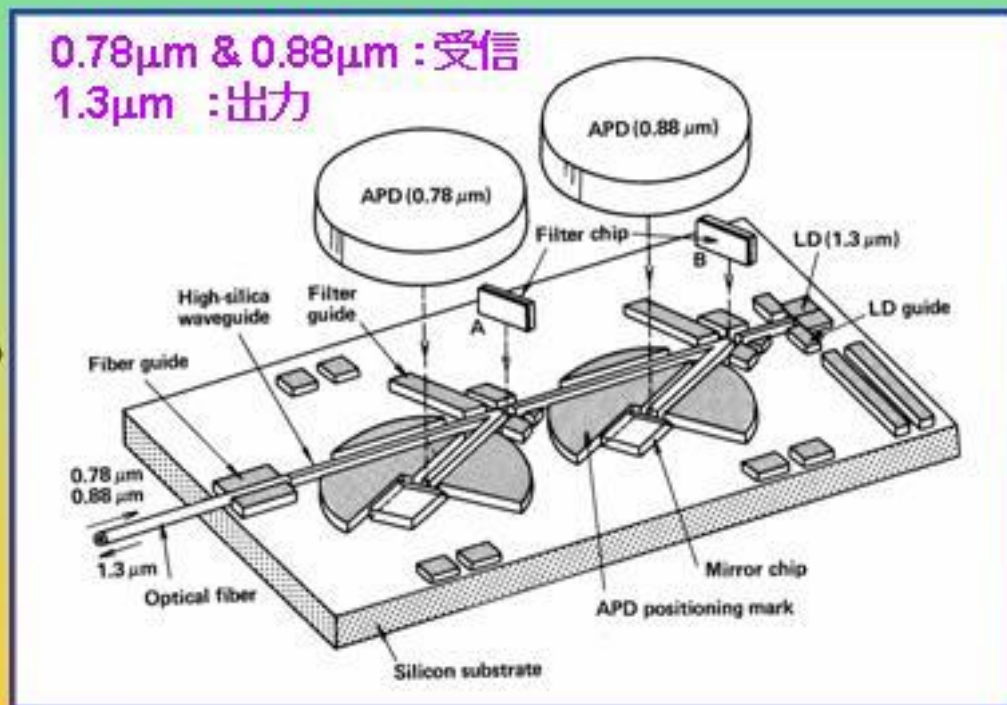
(2) T.Kanamori, a thesis for the doctor's degree (Nagoya University), (1988)

EP-5(1) : 初期の光導波回路

Note : 初期の光導波回路は、ハイブリッド集積技術が用いられたが、量産性に難点があった。以後、半導体プロセス技術を利用できるPLC技術の開発が進められた (NTT)。



光集積回路の提案 by P.K.Tien



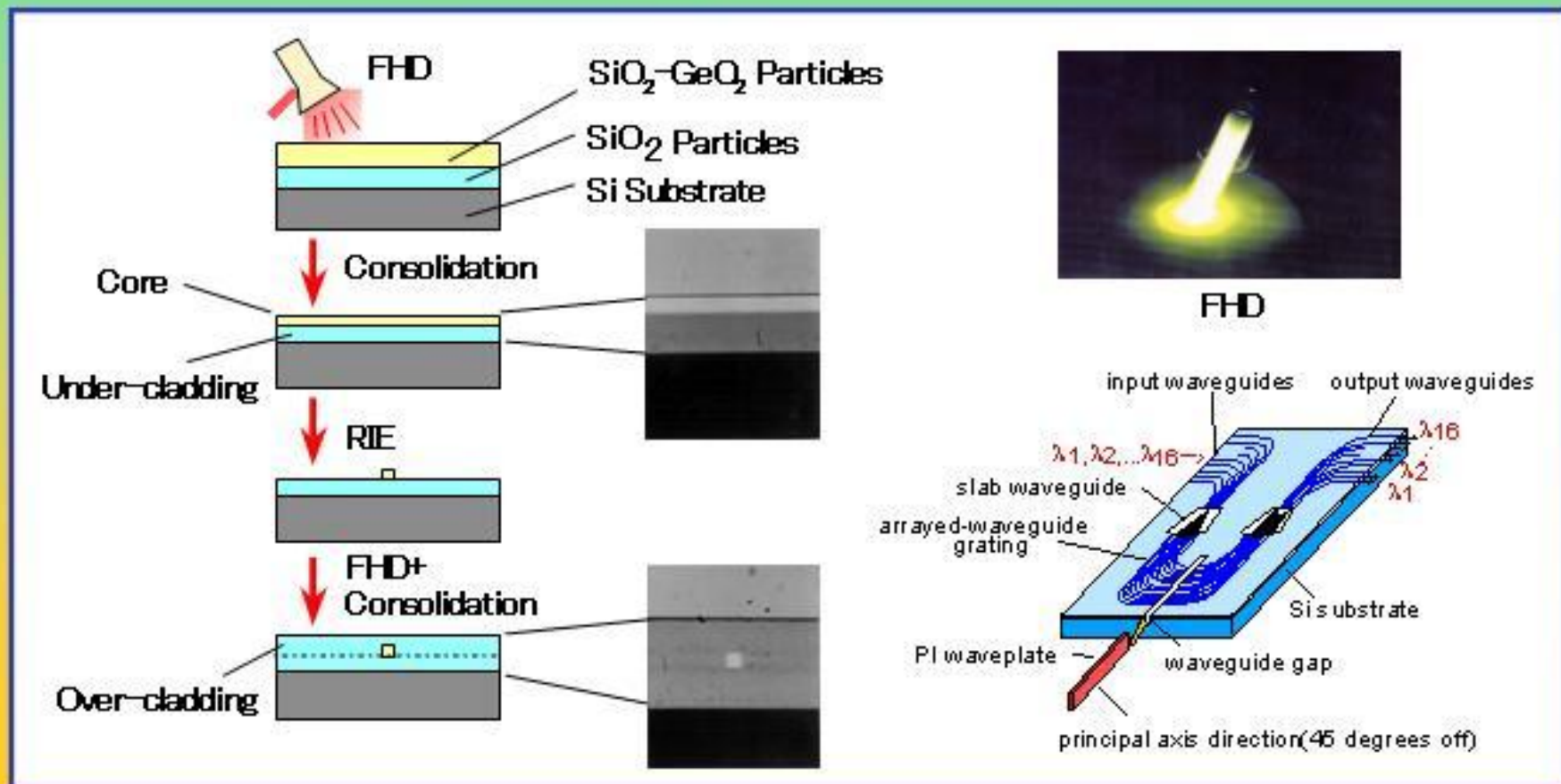
SCHMATIC ILLUSTRATION OF A HYBRID INTEGRATED GUIDED-WAVE OPTICAL CIRCUITS (MULTI/DEMULTIPLEXER)



EP-5(2) : PLC製造プロセスの開発

Note : PLC技術(Planar Lightwave Circuit)は、FHD技術を応用し光導波回路製造技術として確立された。同技術により、AWGが量産された。

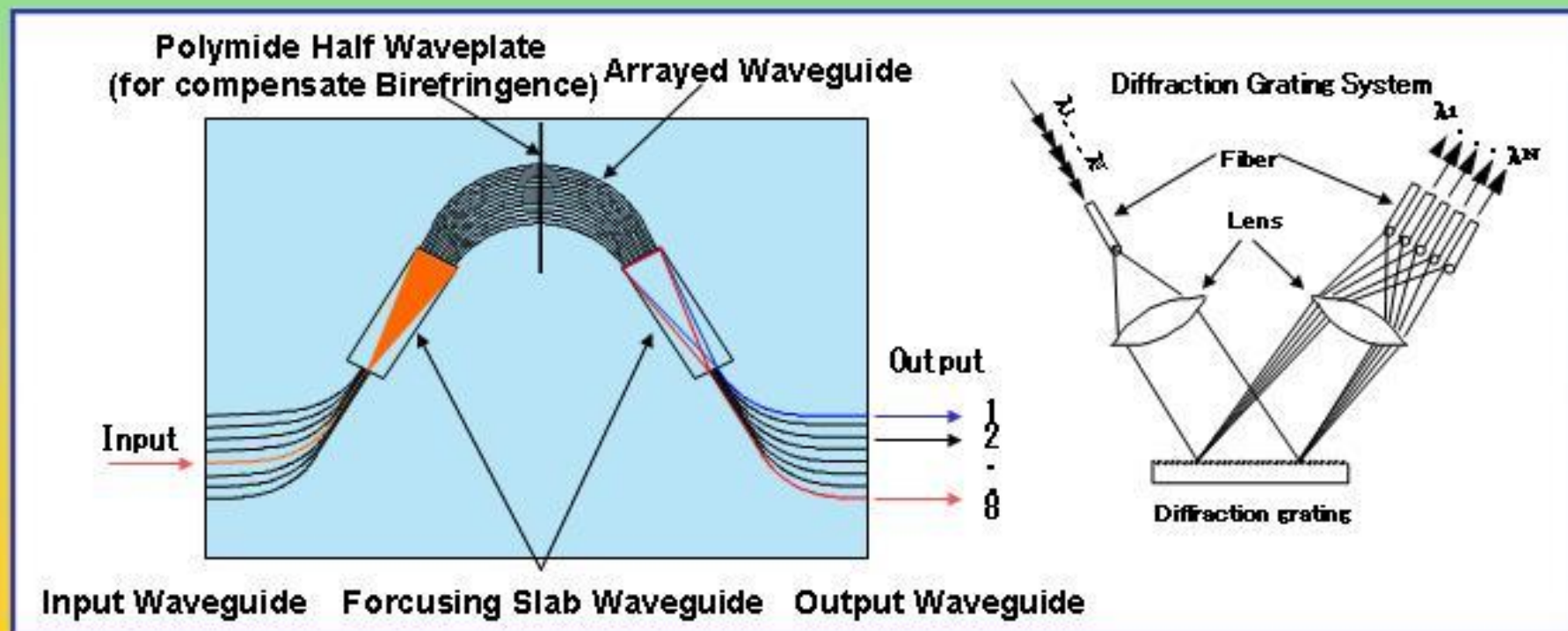
・技術としては、FHD技術、Si基板、半導体プロセスの適用が特徴である。



EP-5(3): DWDMのKey部品: AWG



Note: DWDMシステムの最重要部品のうち、AWG (Arrayed Waveguide Grating) の需要はいち早く高まり、NTTの開発したPLC技術によるAWG部品が、初期の段階から数多く導入された。



参考資料

1. PAA(パワードエイジ協会)ホームページ :
<http://www.paa.gr.jp/~pa19/131119boil/131119boil.html>
2. 河内正夫:石英系光ファイバの低損失化と量産製法(VAD法)の開発 NTT技術ジャーナル p.42 2013.3
3. 西澤紘一:巻頭言 NEW GLASS Vol. 22 No. 3 p.1 2007
4. 上山明博:プロパテント・ウォーズ(文春新書) 文春新書 680円＋税 平成12年5月20日第1刷
5. ジョン・ガートナー 著、土方 奈美 訳:世界の技術を支配するベル研究所の興亡 (文藝春秋・2520円)2013.6.30発行