

OITDA規格

TP

Technical Paper

TP（技術資料）

プラグ形固定光減衰器のハイパワー信頼性
に関する調査

(Technical paper of investigation of high-power reliability
for plug-style fixed optical attenuators)

公表 2010 年 3 月

取纏委員会

S プロジェクト重点フォローアップ委員会
及び 光受動部品標準化委員会

OITDA

発行：財団法人 光産業技術振興協会

Optoelectronic Industry and Technology Development Association (JAPAN)

これは、光産業技術振興協会の標準に関する TP（技術資料）である。TP（技術資料）は、規格になる前段階、標準化の技術的資料、規格を補足する などのために公表するものである。

まえがき Background

近年、超長距離伝送への要求、光ファイバアンプの CATV への適用等を背景に、光伝送出力の増大が進んでいる。これら光通信システムの伝送媒体である光ファイバ、光コネクタおよび光受動部品には、ハイパワー光の洩れによる人体への損傷や、部品の溶融、損傷による火災の危険性も指摘されている。

2005 年度から 2007 年度まで、光受動部品のハイパワーに対する信頼性および安全性に関し調査を行った。この調査では、光スプリッタ、光アイソレータ及び固定光減衰器のハイパワー信頼性に関する実験及び熱シミュレーションを行った。その結果をまとめ、2008 年 8 月に、TP04/SP・PD-2008「通信用光受動部品のハイパワー信頼性に関する調査」を発行した。調査の結果、これらの光受動部品のハイパワー入射時の故障モードは、いずれも光を吸収することによる温度上昇とそれによる熱歪であると想定された。また、評価及び熱シミュレーションの結果、ハイパワー信頼性に関し新たな知見が得られた。これらの知見を活用し、特にハイパワー耐力が比較的弱いプラグ形固定光減衰器の追加調査を行うこととした。

今回の調査は、固定光減衰器のハイパワー信頼性に特化し、劣化モードの特定及び長期信頼性を確保するための限界パワーの導出を目的として行った。

(財) 光産業技術振興協会が発行する OITDA 規格類 (TP を含む) は、工業所有権 (特許, 実用新案など) に関する抵触の有無に関係なく制定・公表されています。

(財) 光産業技術振興協会は、この規格類の内容に関する工業所有権に対して、一切の責任を負いません。

プラグ形固定光減衰器のハイパワー信頼性に関する調査

（英語題名： Technical paper of investigation of high-power reliability for plug-style fixed optical attenuators）

序文

この技術資料は、2008年度及び2009年度の2年間、経済産業省基準認証研究開発事業「ブロードバンド FTTH 時代に向けた高品位光伝送システム用光部品・モジュールの安全性及び信頼性の標準化」（Sプロジェクト）重点フォローアップ委員会（日本規格協会が受託）において行われたプラグ形固定光減衰器のハイパワーに関する評価結果をまとめたものである。

1. 適用範囲 Scope

この技術資料は、プラグ形固定光減衰器のハイパワー信頼性に関する評価結果および調査検討結果をまとめたものである。SCプラグ形固定光減衰器のハイパワー評価結果、熱シミュレーション結果、劣化メカニズムの推定、長期信頼性を確保するための限界パワーの導出結果が記載されている。

2. はじめに Introduction

近年、超長距離伝送への要求、光ファイバアンプのCATVへの適用等を背景に、光伝送出力の増大が進んでいる。これら光通信システムの伝送媒体である光ファイバ、光コネクタおよび光受動部品には、ハイパワー光の洩れによる人体への損傷や、部品の溶融、損傷による火災の危険性も指摘されている。

2005年度から2007年度まで、光受動部品のハイパワーに対する信頼性および安全性に関し調査を行った。この調査では、光スプリッタ、光アイソレータ及び固定光減衰器のハイパワー信頼性に関する実験及び熱シミュレーションを行った。その結果をまとめ、2008年8月に、TP04/SP・PD-2008「通信用光受動部品のハイパワー信頼性に関する調査」を発行した。調査の結果、これらの光受動部品のハイパワー入射時の故障モードは、いずれも光を吸収することによる温度上昇とそれによる熱歪であると想定された。また、評価及び熱シミュレーションの結果、ハイパワー信頼性に関し新たな知見が得られた。これらの知見を活用し、特にハイパワー耐力が比較的弱いプラグ形固定光減衰器の追加調査を行うこととした。

今回の調査は、固定光減衰器のハイパワー信頼性に特化し、劣化モードの特定及び長期信頼性を確保するための限界パワーの導出を目的として行った。

3. TP04/SP・PD-2008における固定光減衰器のハイパワー信頼性に関する調査研究結果の概要

TP04/SP・PD-2008「通信用光受動部品のハイパワー信頼性に関する調査」では、固定光減衰器、光アイソレータ、光スプリッタの3種の代表的な光受動部品のハイパワー評価および熱シミュレーションを行い、劣化メカニズムを推定している。以下に、TP04における、固定光減衰器に関するハイパワー信頼性についての調査結果の概要を述べる。

減衰量10 dB, 20 dB, 30 dBのSCプラグ形固定光減衰器にハイパワーを入射させた評価を行った。評価環境は、通常使用温度の上限を想定して70℃とした。評価は段階的にパワーを上昇させるステ

ップストレス試験とした。評価の結果、サンプルでの個体差はあったが、約2 W (1.4~2.3 W) の入射パワーにおいて、反射減衰量が10 dB以上低下する不良となった。試験中の減衰量変動は0.3 dB以下であった。試験前後に、常温において減衰量及び反射減衰量を測定した。その結果、これらの特性変動は測定精度範囲内であり、劣化は見られなかった。試験後に、ファイバ端面の状態を観察したところ、光ファイバの突き出しまたは引き込みが見られた。

一方、熱シミュレーションを行い、減衰量10 dBのプラグ形固定光減衰器では、2W入射時に内部最高温度が300℃以上となると見積もられた。

さらに、固定光減衰器の500 hrの長期信頼性評価を実施した。評価条件は、入射パワー1W、環境温度70℃とした。評価の結果、反射減衰量は低下しなかったが、試験後に光ファイバの引き込みまたは突き出しが観察された。

このことから、反射減衰量低下のメカニズムは、金属ドープ光ファイバとフェルルールを固定する接着剤が、吸収光による温度上昇で軟化し、光ファイバが引き込み、その結果、PC (Physical contact) はずれが起きることであると推定した。このことから、長期信頼性を確保するためのハイパワー条件は、内部最高温度が接着剤のガラス転移温度を超えない範囲であると推定された。熱シミュレーションの結果、減衰量10 dBのSCプラグ形固定光減衰器では、環境温度50℃において、入射パワー500 mWが限界であると推定された。

4. 固定光減衰器のハイパワー信頼性に関する課題

TP04 にまとめた固定光減衰器のハイパワー信頼性に関する調査結果では、劣化モードの推定及び信頼性を確保するハイパワー限界値の推定を行うことができた。しかしながら、以下に示す課題が残った。

- ・ 熱シミュレーション結果の実温度の再現性
- ・ プラグ形固定光減衰器の PC はずれは、製品のばらつき及びかん合相手の光コネクタプラグの寸法対する依存性の考慮
- ・ 光ファイバ引き込みが起こるメカニズムの特定
- ・ 湿度環境を考慮した長期信頼性の確認

5. 固定光減衰器の熱シミュレーション結果の整合性

前節で述べたように、TP04 の報告では、固定光減衰器の熱シミュレーションの結果、減衰量 10 dB の SC プラグ形固定光減衰器では、70℃の環境下、2 W 入射時に、内部最高温度が 300℃を超えると見積もられた。この熱シミュレーション結果を元に、内部最高温度が光ファイバとフェルルールを固定する接着剤のガラス転移温度を超えない範囲が長期信頼性を確保するハイパワー限界値であると推定した。熱シミュレーションが実温度を再現していることが極めて重要である。

2002年に柳らが MU プラグ形固定光減衰器のハイパワー入射時の上昇温度の測定を実施している^[1]。山口らは、同様な評価系にて、SC プラグ形固定光減衰器の評価を行った^[2]。山口らの評価系を図 1 に、評価結果を図 2 に示す。評価は、SC プラグのハウジングは取り付けずに行っている。割りスリーブの外側に熱電対を取り付け、温度をモニタしている。環境温度は 23℃で行った。評価は、減衰量 1, 3, 5, 10, 15, 20 dBで行っている。図 4 には、減衰量 5, 10, 15, 20 dBの結果を示している。温度上昇は、入射パワー500 mWまではほぼ直線であり、その後、温度上昇率が低下する傾向が見られた。なお、減衰量 10 dB, 500 mWでの温度は、75℃であり、環境温度 23℃

からの温度上昇は 52℃であった。

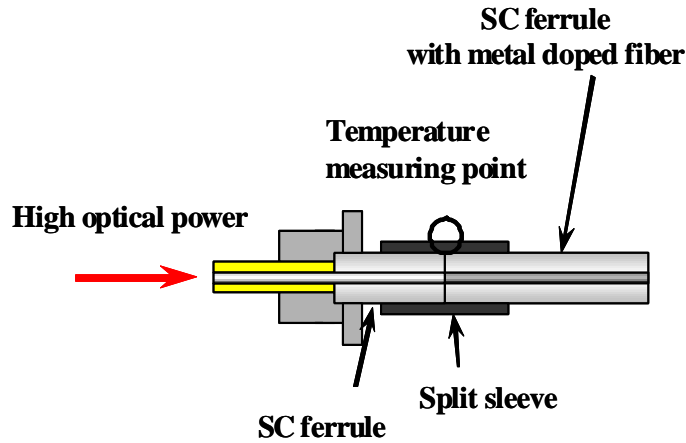


図 1 山口らによる SC 固定光減衰器のハイパワー入射時の割リスリーブ表面温度測定系

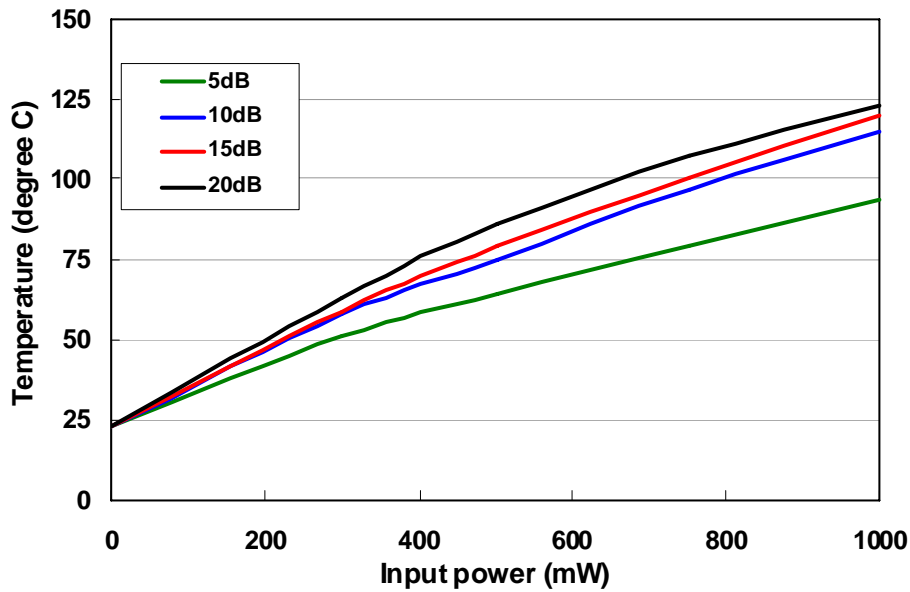


図 2 山口らによる SC 固定光減衰器のハイパワー入射時の割リスリーブ表面温度測定結果

一方、TP04 では、固定光減衰器の熱シミュレーション結果を報告している。TP04 には示していないが、2007 年度に行った熱シミュレーションでは、ハウジングなしの条件で、割リスリーブ外周の温度の入射パワー依存性を求めている。そのシミュレーション結果を図 3 に示す。減衰量 10dB の SC プラグ形固定光減衰器の場合、割リスリーブ外周部の温度上昇は、 $0.1169 \times$ (入射パワー (mW)) で表されることが分かった。また、TP04 の報告にて、温度上昇の環境温度依存性は小さくなく、25℃と 70℃において、減衰量 10 dB の SC 固定光減衰器に 1000 mW の光パワーを入射した場合、温度上昇はそれぞれ 129.1℃、128.3℃と大きな違いは無かった。

山口らの評価結果では、減衰量 10 dB の固定光減衰器へ 500 mW の光パワーを入射した際、52℃の温度上昇が見られた。図 3 に示す熱シミュレーション結果によると、温度上昇は、 $0.1169 \times 500 = 58.45$ ℃である。このことから、熱シミュレーション結果は、500 mW 以下の入射パワー

の条件では、実温度を再現していると言うことができる。図2において、500 mW以上の入射パワーの条件では温度上昇率が低下する傾向がある。これは、割りスリーブ外周から外気への熱伝達によるものと推定される。

なお、減衰量 10 dB の SC 固定光減衰器の内部温度上昇は、ハウジングありの場合、 $0.1337 \times$ (入射パワー(mW)) と計算されている。

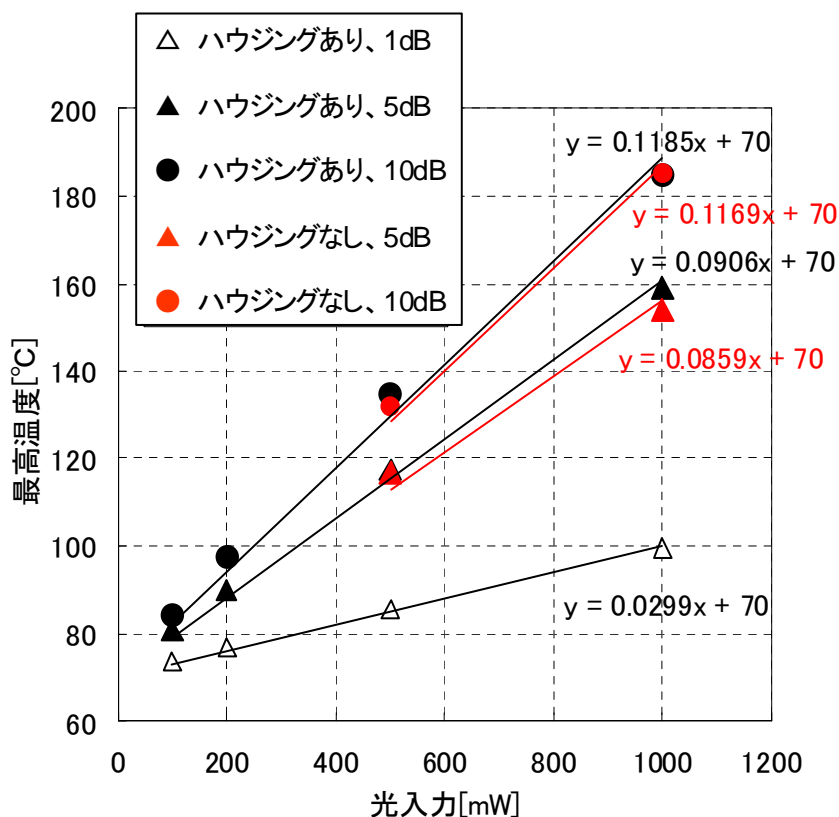


図3 ハウジングなし SC プラグ形固定光減衰器の割りスリーブ外周部温度の入射パワー依存性

6. 固定光減衰器の反射減衰量低下評価

TP04にて、固定光減衰器のハイパワー入射時の反射減衰量低下の原因は、金属ドープ光ファイバの光吸収による温度上昇により、金属ドープ光ファイバとフェルール間の接着剤が軟化し、光ファイバが引き込みことによると推定してきた。そこで、反射減衰量の低下をモニタしつつ評価することとした。

6.1 評価サンプル

評価サンプルは、PCはずれが最も起き易い設計最悪条件のものを用いることとした。図4に設計最悪条件のサンプルを示す。フェルールの先端加工が、球面の曲率半径 $r=25$ mm, 球面偏心率 $A=50$ μm , ファイバ引き込み量 $W=50$ nm が設計最悪条件である。接続する光コネクタプラグと球面偏心方向を一致させた場合が、PCはずれがもっとも起きやすい。評価する固定光減衰器オス側及びそれと接続する光コネクタプラグの両者に設計最悪条件のサンプルを用いた。球面の曲率半径を r , 球面偏心率を A , ファイバ引き込み量を W とした場合、両フェルールの接触面からの実効的なファイバ引き込み量 Δ は、下式で表させる。

$$\Delta = W + ((r^2 + A^2)^{1/2} - r) \sim W + A^2/2r \quad (\text{when } A \ll r).$$

Δを実効ファイバ引き込み量と定義した場合、上述した設計最悪条件での実効ファイバ引き込み量は片端で100 nm、両端で 200nmとなる。

SC 光コネクタの場合、かん合状態でのフェルール押し圧力は 7.8~11.8 N である。かん合時には、フェルール先端は、つぶされた形になり、実効ファイバ引き込み量が正であっても、光ファイバ同士は PC 接続する。PC はずれが起きる実効ファイバ引き込み量の限界値は、設計最悪条件から、さらに 50 nm の余裕を持って設計されている。

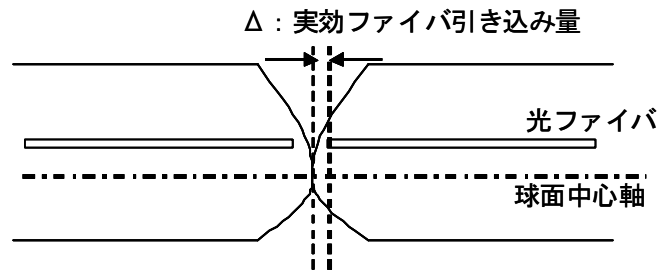


図 4 設計最悪条件のサンプル

6.2 固定光減衰器の評価系及び評価条件

固定光減衰器の評価系は、TP04 に示す評価系と同一とした。評価系を図 5 に示す。また、評価条件を表 1 に示す。

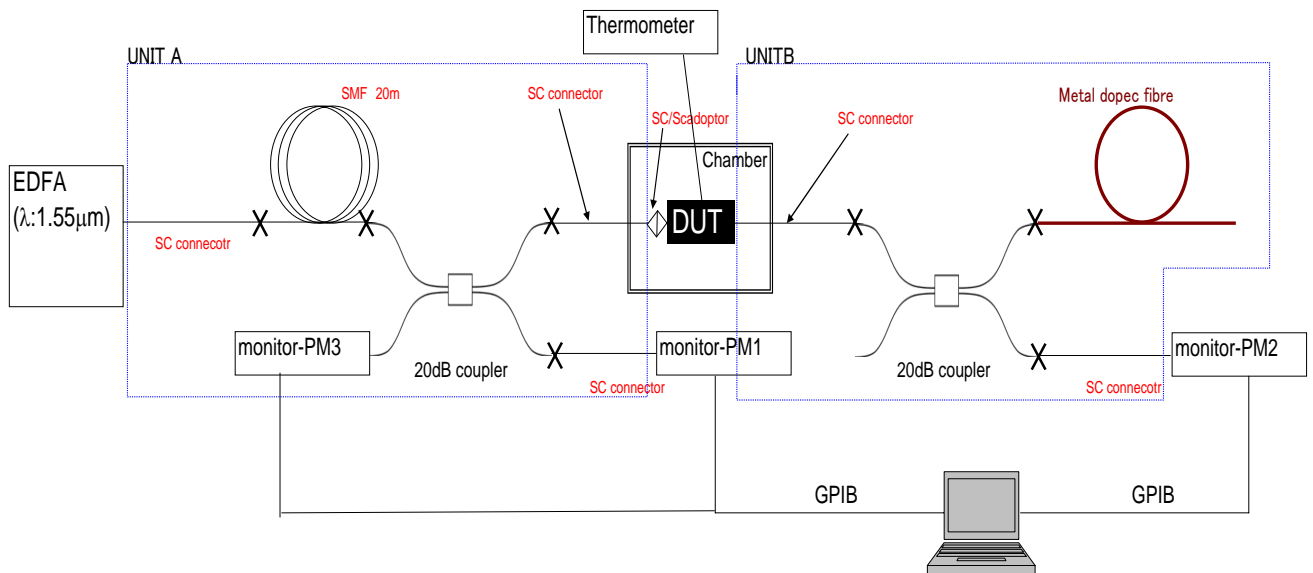


図 5 固定光減衰器のハイパワー入射時の反射減衰量モニタ評価系

表1 固定光減衰器の評価条件

項目	条件
対象評価サンプル	10 dB減衰量, SCプラグ形固定光減衰器
評価環境温度	50 °C~90 °C
光源	EDFA
入射波長	1.55 μm
入射光パワー	0.3 W~1.1 W

6.3 評価サンプルの組み合わせ選定と評価内容

(1) 評価サンプルの組み合わせ選定

固定光減衰器のオス側, および接続する光パッチコードの光コネクタプラグをそれぞれ, 設計最悪条件である, 球面曲率半径 $r=25\text{ mm}$, 球面偏心量 $A=50\text{ }\mu\text{m}$, ファイバ引き込み量 $W=50\text{ nm}$ を狙って作製した。製造ばらつきのため, 個々のサンプルでこれらの値が分布を持った。そこで, 固定光減衰器とパッチコードの実効ファイバ引き込み量がそれぞれ大きいもの同士, 小さいもの同士を組み合わせ, 両者の実効ファイバ引き込み量の合計値をばらつかせるようにサンプルを準備した。これにより, 実効ファイバ引き込み量の影響を評価できるよう工夫した。評価は14組のサンプルで行った。固定光減衰器と光コネクタプラグの実効ファイバ引き込み量の合計値は, 114 nm~289 nm (目標値200 nm) であった。

(2) 評価内容

評価は, ①環境温度と入射パワーを変えて, 反射減衰量の変化を観察する, ②入射パワーあるいは環境温度を段階的に上げていき反射減衰量の低下量の条件依存性を観察する, の2項目を行った。

6.4 評価結果と解析

(1) ハイパワー入射時の特性変動

環境温度70°Cで評価した際の減衰量, 反射減衰量のモニタ結果の一例を図6~7に示す。

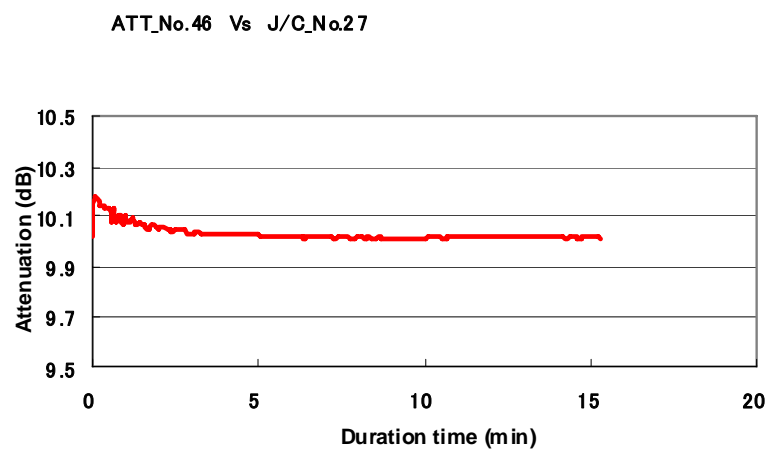


図6 固定光減衰器のハイパワー入射評価結果 (損失変動, 70 °C, 1 W入射時)

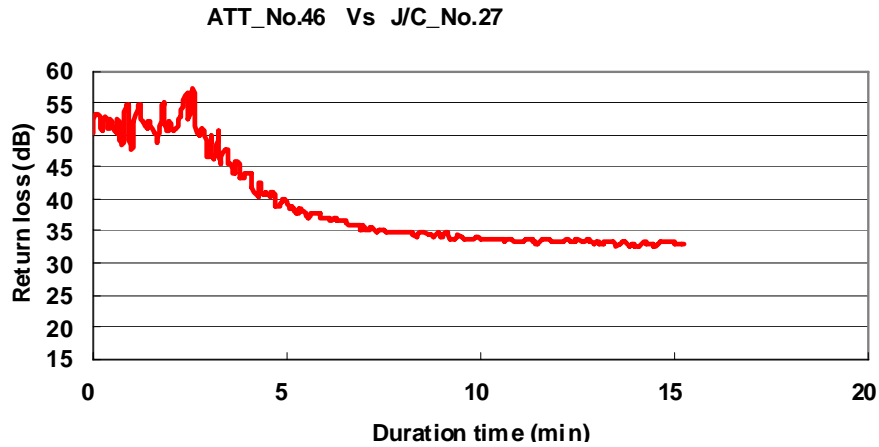


図7 固定光減衰器のハイパワー入射評価結果（反射減衰量の変化，70 °C，1 W入射時）

減衰量は0.2 dB低下し，10分経過後に安定化した。反射減衰量は3分後に低下を始め，15分後に33 dBで安定化した。

減衰量の低下は，温度上昇による金属による光の吸収率減少によるものと考えられる。一方，反射減衰量の低下は，光ファイバの引き込みによるものと推定できる。

薄膜の干渉による反射率 Rは，最も簡単な，単層で垂直入射の場合，下式で表される。

$$R = \frac{n^2(n_0 - n_s)^2 \cos^2 k\Delta + (n_0 n_s - n^2)^2 \sin^2 k\Delta}{n^2(n_0 + n_s)^2 \cos^2 k\Delta + (n_0 n_s + n^2)^2 \sin^2 k\Delta}$$

ここで， n_s は基板の屈折率， n は薄膜の屈折率， n_0 は3上層の屈折率， k は波数， Δ は薄膜の厚さである。石英 (n_0)，空気($n=1$)，石英($n_s=n_0$)の3層の場合，下式となる。

$$R = \frac{(n_0^2 - 1)^2 \sin^2 k\Delta}{4n_0^2 \cos^2 k\Delta + (n_0^2 + 1)^2 \sin^2 k\Delta}$$

波長が1.55 μm の場合，石英の屈折率は $n_0=1.44$ であり，その場合の反射減衰量(RL)と空気層の厚さ（ギャップ(nm)）の関係は，図8となる。

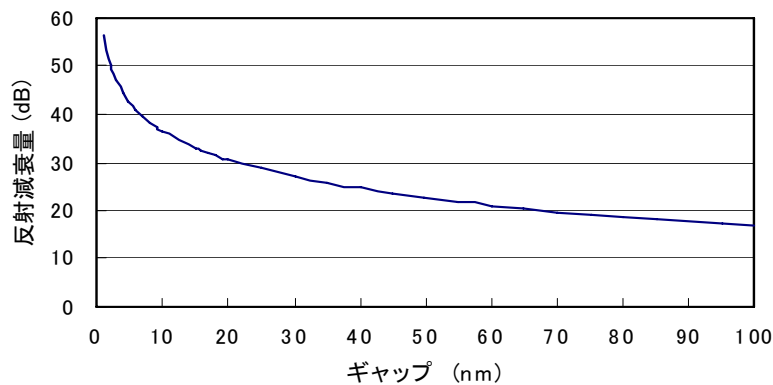


図8 ギャップと反射減衰量の関係

図7で、反射減衰量が33 dBで安定化している。これは、固定光減衰器と光コネクタプラグの両光ファイバ間のギャップ20 nmに相当している。

(2) ハイパワー評価後の光ファイバ引き込み量の観察

ハイパワー評価を行った後、固定光減衰器と接続する光コネクタプラグの光ファイバ引き込み量を3次元表面形状測定装置で観察した。端面の曲率半径、球面偏心量は、いずれも測定精度範囲内であった。フェルールの材料は ZrO_2 であり、200 °C程度の温度では変形するとは考えられない。一方、光ファイバの引き込み量は変化が見られた。図9に固定光減衰器と光コード側の光コネクタプラグの光ファイバの永久引き込み量の関係を示す。サンプル数は、10組、内70 °C、1 Wの条件が7組、70 °C、0.5 Wの条件が1組、50 °C、0.5 Wの条件が2組である。

横軸は固定光減衰器の光ファイバ引き込み量変化を、縦軸は光コネクタプラグの光ファイバ引き込み量変化を示している。

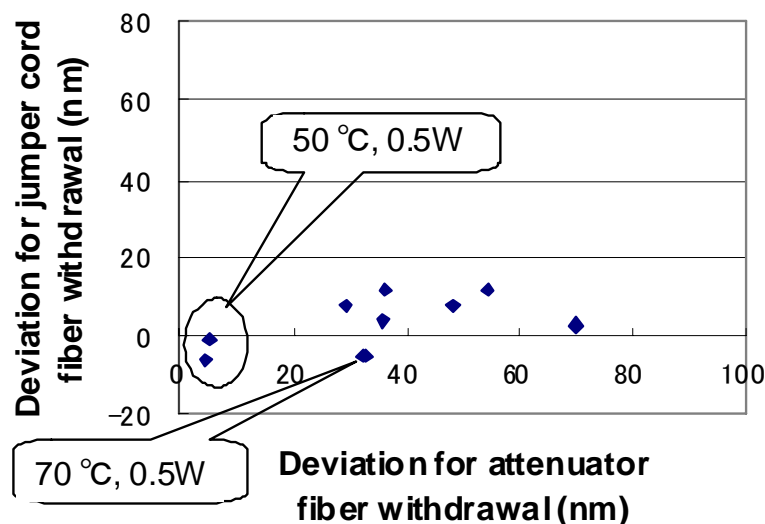


図9 固定光減衰器と光コネクタの光ファイバ引き込み量の分布図

固定光減衰器の光ファイバ引き込み量が10 nm以下の2点は、50 °C、0.5 Wの評価条件のサンプルである。70 °C、0.5 Wの条件のサンプルは、固定光減衰器と光コネクタプラグのファイバ引き込み量変化はそれぞれ、32 nm、-5 nmであった。その他は、70 °C、1 Wの条件で評価したサンプルのデータである。固定光減衰器の光ファイバ引き込み量変化が30 nm～70 nmで分布しているのに対し、光コネクタプラグ側は、最大でも12 nmの変化であり小さい。熱シミュレーションの結果によると、固定光減衰器の最高温度に対し、光コネクタプラグ側は、温度が低い。このことが両者の光ファイバ引き込み量変化の違いに関係していると考えられる。図10に熱シミュレーション結果で得られた中心軸上の温度分布を示す。

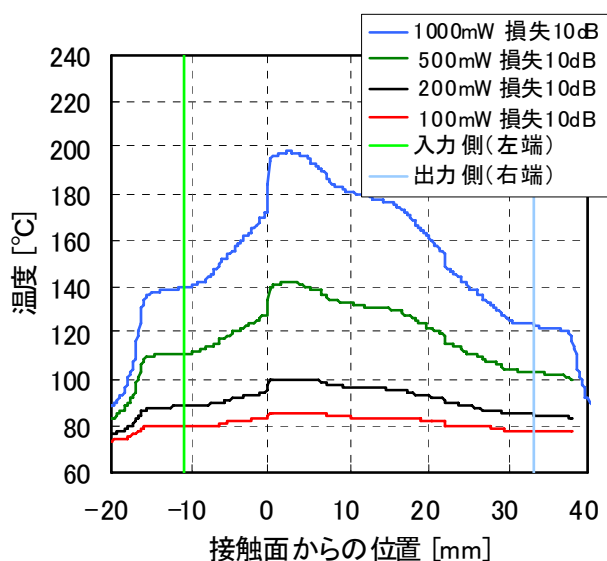


図10 熱シミュレーションによる中心軸上の温度分布（10dB固定光減衰器）

接触面からの位置の右側が固定光減衰器を示す。左側は光コネクタプラグである。1 Wの入射条件では、固定光減衰器の内部最高温度は200 °C近くであるのに対し、光コネクタプラグ内では140 ~ 170 °Cであり40 °C程度低い。これは、両フェルールの接触面積が直径200 μm程度と、フェルールの直径2.5 mmに比べ小さいため、熱伝導の影響があるためと考えられる。この温度差が、固定光減衰器側でのみ光ファイバが引き込んでいる要因と考えられる。

(3) 評価前後の光ファイバ引き込み量の変化と初期的な光ファイバ引き込み量の関係

図9にて、70 °C、1 Wの入射条件のサンプルにおいても、試験後の固定光減衰器の光ファイバ引き込み量は、30~70 nmとばらついていた。このばらつきは、初期的な光ファイバ引き込み量と関係があると思われる。図11に、70 °C、1 Wの条件で評価したサンプルの、固定光減衰器の初期の光ファイバ引き込み量とその変化量の分布図を示す。横軸は初期の光ファイバ引き込み量、縦軸は光ファイバ引き込み量変化を示す。

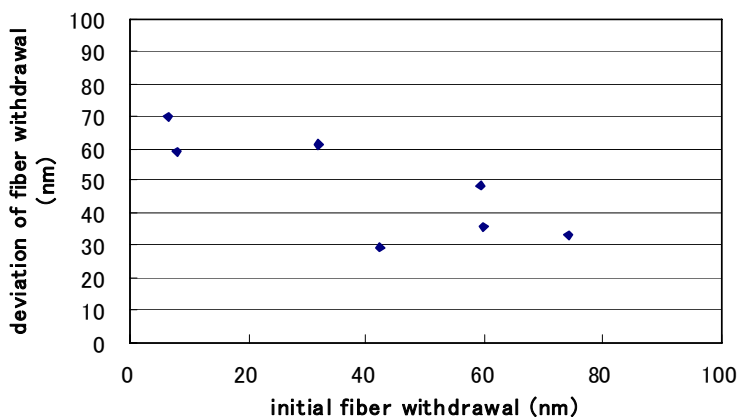


図11 固定光減衰器の初期光ファイバ引き込み量と光ファイバ引き込み量変化の関係（70°C、1Wの評価条件）

図11に示すように、両者には、緩く、逆の相関があるように見える。初期の光ファイバ引き込み量が小さい方が、引き込み量変化は大きい。これは、光ファイバへの圧縮応力が大きいことが関連していると思われる。

(4) 反射減衰量低下開始時間の分析

図7に示すように、反射減衰量は、3分程度で低下を開始した。表2に70℃、1Wの条件で評価したサンプル7組の反射減衰量RL=40 dBに至る時間をまとめた。反射減衰量RL=40 dBは、図8のグラフから、6 nmのギャップに相当する。PCはずれが起きてすぐの時間と考えられる。表に示すように、初期の光ファイバ引き込み量が反射減衰量RL=40 dBに至る時間に大きく影響していることが分かる。これは、初期光ファイバ引き込み量の合計が小さいと、光ファイバが引き込んで、PCはずれに至るまでの引き込み量に対し、余裕があるためと考えられる。

表2 初期光ファイバ引き込み量と反射減衰量低下時間の関係
(評価条件：光ファイバ70℃，1W)

サンプル番号	40dBに至る時間	初期光ファイバ引き込み量 (固定光減衰器と光コネクタプラグの合計)
ATT39/JC23	1分	143 nm
ATT46/JC27, ATT47/JC31, ATT42/JC17	4~7分	108~127 nm
ATT38/JC9, ATT49/JC7, ATT50/JC39	RLは低下せず (25分以上)	46~57 nm

(5) 反射減衰量の安定化時間

図7に示すように、反射減衰量は、光パワー入射から15分程度で一定値に安定化した。この安定化時間は、固定光減衰器の熱容量と熱コンダクタンス（熱伝導の性能）により決定される。TP04にて報告されている熱シミュレーションでは、内部最高温度の上昇は、20分程度で安定化するとの結果が得られている。熱シミュレーション結果を図12に示す。

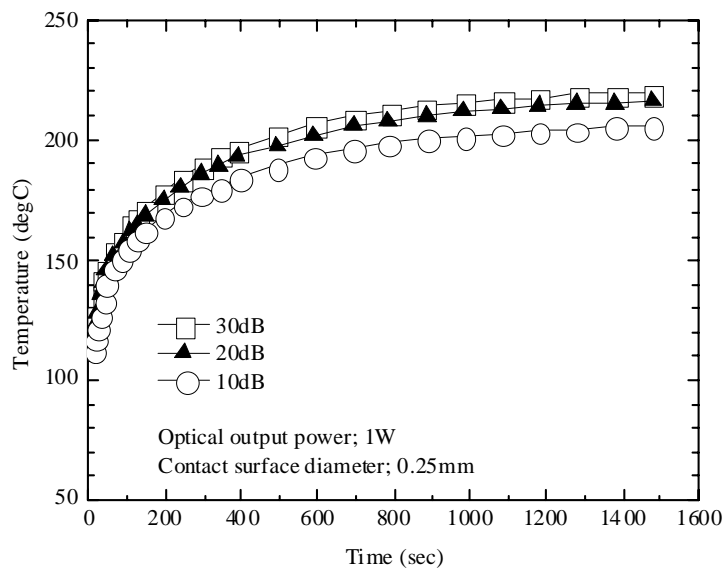


図12 固定光減衰器の熱シミュレーションによる最高温度の時間依存性

(6) 反射減衰量の安定化点と入射パワー及び温度の関係

反射減衰量の安定化点と入射パワーの関係をさらに詳細に調査するため、3 サンプルを用いて、異なる入射パワーまたは温度条件で、反射減衰量の変化を測定した。サンプル番号は、ATT39/JC23（初期実効ファイバ引き込み量合計：265 nm）、ATT44/JC35（同：156 nm）、ATT55/JC19（同：143 nm）である。評価結果の一例（サンプル番号：ATT44/JC35）を図 13 に示す。この評価では、試験温度を 70～90 °C、入射パワーを 0.5 W～1.1 W の条件で行った。図 13 から、試験温度および入射パワーに対し、反射減衰量の安定化点が異なるのが分かる。

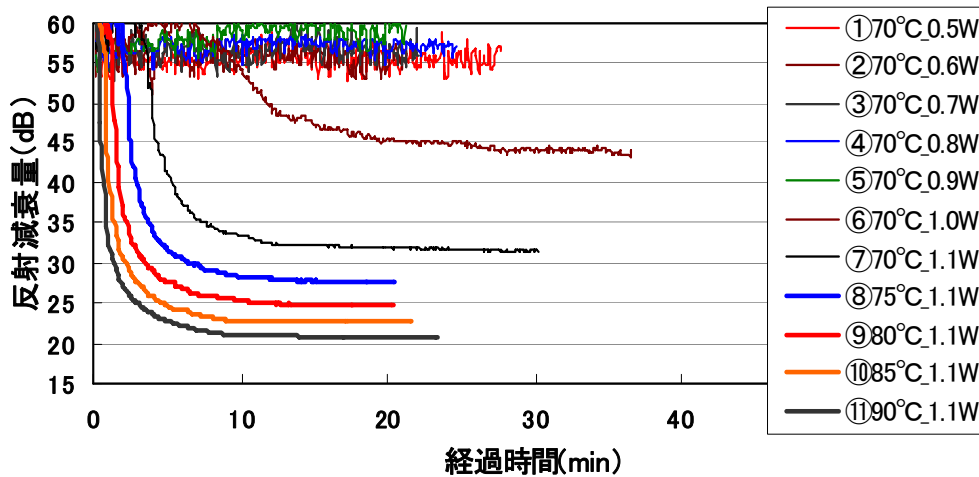


図13 種々の試験温度，入射パワーで評価した反射減衰量低下カーブ
（サンプル番号：ATT44/JC35）

試験温度と入射パワーから内部最高温度を熱シミュレーションにより求めることができる。図14に、図13と同一サンプルの内部最高温度と反射減衰量安定化点の相関図を示す。反射減衰量安定化点は、内部最高温度に対して明確な関係があるように見える。

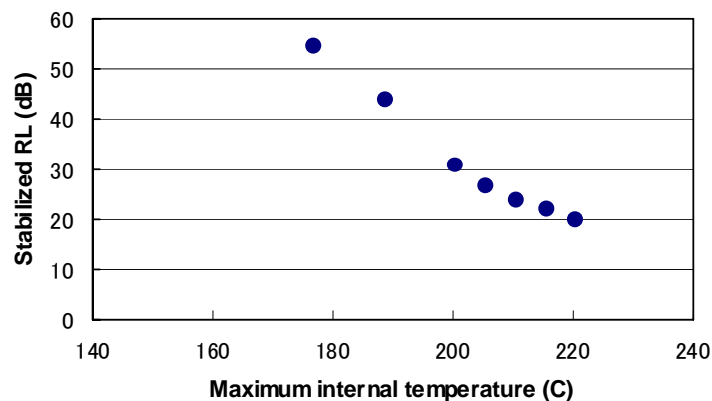


図14 種々の試験温度，入射パワーで評価したサンプルの
内部最高温度と反射減衰量安定化点の関係（サンプル番号：ATT44/JC35）

さらに、反射減衰量安定化点は図8に示す通り、両光ファイバ間のギャップに換算することが可能である。図14と同じサンプルの、内部最高温度と安定化後のギャップの関係を図15に示す。なお、

本サンプルの試験前の実効ファイバ引き込み量の合計が156 nmであり、PCはずれの設計限界値の250 nmに対し94 nmの余裕があることから、図15に、25 °C、-94 nmをプロットした。

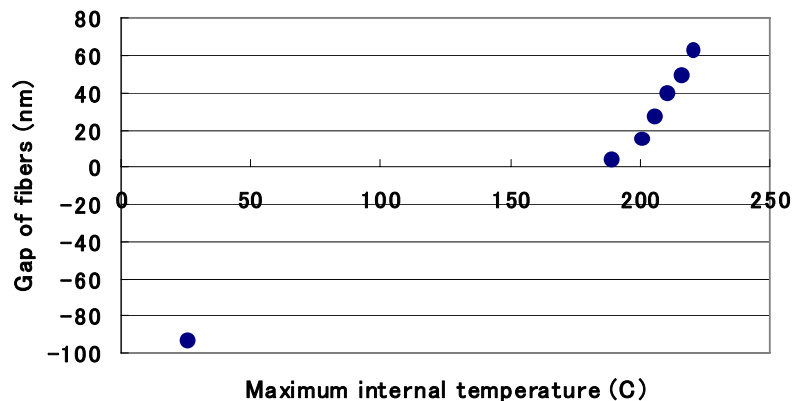


図 15 種々の試験温度、入射パワーで評価したサンプルの内部最高温度と反射減衰量安定化時のギャップの関係（サンプル番号：ATT44/JC35）

図 16 に、同様に評価した他の 2 サンプルを含む合計 3 サンプルの、内部最高温度と反射減衰量安定化時のギャップの関係を示す。

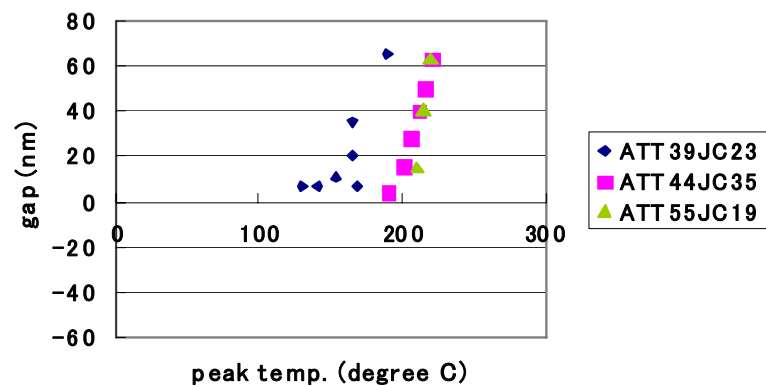


図 16 種々の試験温度、入射パワーで評価したサンプルの内部最高温度と反射減衰量安定化時のギャップの関係（3 サンプル）

7. 固定光減衰器のハイパワー入射時の光ファイバ引き込みのメカニズム

7.1 光ファイバ引き込みのメカニズム

図 15, 16 から、固定光減衰器の内部最高温度と光ファイバ間のギャップ、つまり、光ファイバ引き込み量に明確な関係があることが分かった。

光ファイバ（石英）とフェルール（ ZrO_2 ）、接着剤（エポキシ）の 3 層からなる構造体の温度が上昇した際、それらの膨張係数差、ヤング率、ポアソン比から内部歪が生じ、光ファイバが引き込むことが考えられる。計算に用いたモデルを図 17 に示す。

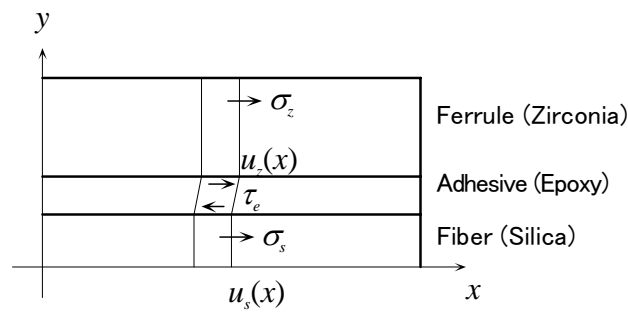


図 17 光ファイバ，接着剤，フェルールの熱歪の計算モデル

石英，エポキシ，ジルコニア材料のヤング率，ポアソン比及び線膨張係数を考慮して計算すると，光ファイバ引き込み量 δ は，温度変化 ΔT に対し，下式で表される。

$$\delta = 4.3 \times 10^{-4} \Delta T [\mu\text{m}].$$

これから，温度差 50°C では，約 20 nm の光ファイバ引き込みが起きることが分かる。

図 15 の各点を内挿した曲線（青の破線）を追加し，さらに 50°C ， 20 nm の直線（赤の破線）を加えたのが図 18 である。内部最高温度が 120°C 以下の領域までは，内部最高温度とギャップの関係は，この計算式に従うと考えられる。内部最高温度が 120°C を超えるあたりから，ギャップ量が計算よりも大きくなると考えられる。これは，接着剤がガラス転移温度の 120°C を超え，軟化し，ヤング率が低下し，ポアソン比が大きくなるからであると考えられる。

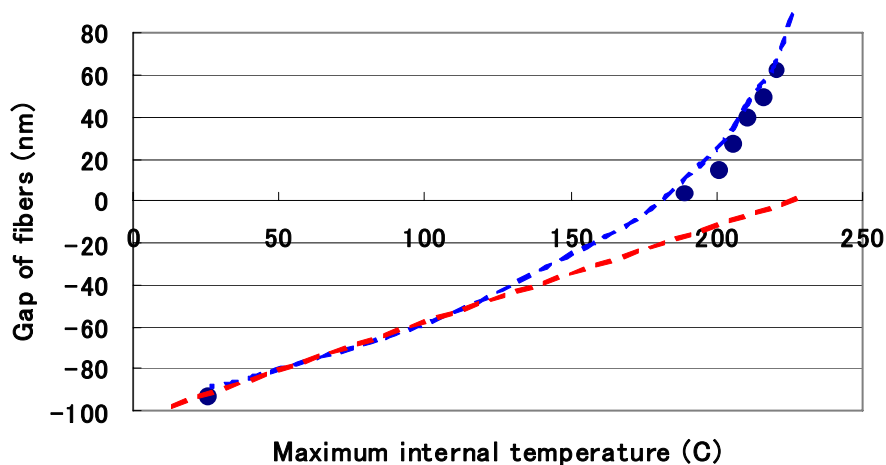


図 18 種々の試験温度，入射パワーで評価したサンプルの内部最高温度と光ファイバ間のギャップの関係に熱歪シミュレーション結果を重ねたグラフ

これらの結果から，ハイパワー入射時の反射減衰量低下の要因は，光ファイバが引き込み，PCはずれが発生し，その後，ギャップを作ること，また光ファイバの引き込みのメカニズムは，入射した光パワーを減衰ファイバが吸収することにより，内部温度を上昇させ，それが要因となる光ファイバ，エポキシ，フェルール間の熱応力による歪で，光ファイバが引き込んでいることであることが分かった。

7.2 繰り返し入射による光ファイバ引き込み量変化による裏づけ

70℃、1Wの条件では、反射減衰量は、15分程度で30 dB程度に低下し、安定となった。そこで、70℃、1W、30分の入射を3回繰り返し、光ファイバの引き込み量変化を確認する評価を行った。

光ファイバ引き込み量変化を図19に示す。サンプル2個の評価では、両者とも1回のハイパワー照射で60 nm程度の光ファイバ引き込み量変化があり、2回目、3回目の照射後は変化が小さい。これは、7.1節に記載したように、光ファイバ引き込みのメカニズムが、石英（光ファイバ）、エポキシ（接着剤）、ZrO₂（フェルール）の膨張係数差による熱応力であるため、可逆性があるからだと推定される。2回目、3回目の照射でさらに光ファイバの引き込みが見られるのは、70℃、1W入射の時の最高温度200℃は、エポキシのガラス転移温度を超えており、エポキシが軟化を繰り返しているからであると考えられる。

この評価により、光ファイバ引き込みは、接着剤のガラス転移温度を超えない範囲では、熱応力により、可逆的に変化することが、ほぼ確認された。

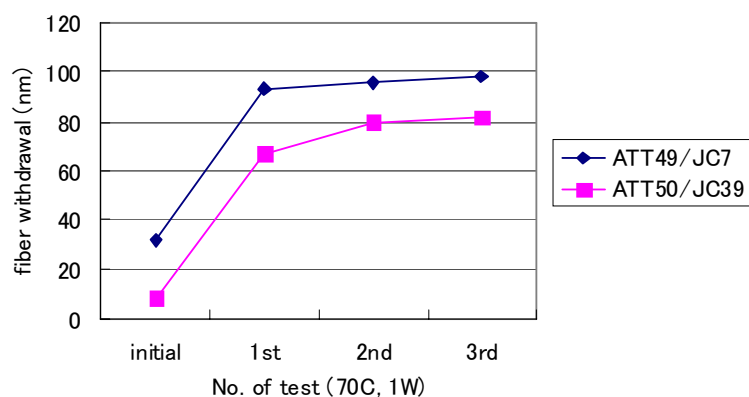


図19 固定光減衰器への繰り返し照射時の光ファイバ引き込み量変化
(70℃、1W、30分、繰り返し照射)

8. 長期信頼性評価

8.1 長期信頼性評価条件

固定光減衰器は光通信用伝送装置に用いられ、高い信頼度が求められる。通常7年から15年以上、連続で使用されるため、長期信頼性を考慮したハイパワー試験が必要である。

今までの評価及び熱シミュレーション結果から、光ファイバとフェルールを固定している接着剤（エポキシ）のガラス転移温度を超えない条件の入射パワーが限界であると考えられる。通常の使用温度範囲の上限である70℃の環境を想定した場合、減衰量10 dBの固定光減衰器の場合、300 mW入射時に、内部最高温度は110℃となり、これが限界パワーだと考えられる。

一方、長期信頼性を考慮する際、湿度の影響は無視できない。そこで、通常使用環境条件の上限である、70℃、85%RHで長期評価を実施した。評価条件を表3にまとめた。なお、評価系は、短期的評価と同一とした（図5参照）。

表 3 固定光減衰器のハイパワー長期試験の条件

項目	試験条件
評価サンプル	減衰量 10 dB, SC プラグ形固定光減衰器 設計最悪条件 (実効光ファイバ引き込み量 200 nm)
サンプル数	8 組
入射光源	1550 nm (外部共振器形レーザおよび EDFA), 300 mW
試験環境	70 °C, 85 %RH
試験時間	5000 hr
モニタ特性	反射減衰量

8.2 長期信頼性評価結果

(1) モニタ特性

図 20 に、固定光減衰器のハイパワー長期試験結果の一例を示す。8 組のサンプルともに反射減衰量の低下は見られなかった。反射減衰量が、52~60 dB で変動しているように見える。これは、光源に外部共振器形レーザと EDFA を用いたため、光源のコヒーレンス度が高いこと、さらに、試験系に含まれるカプラ、光パワーメータ等からの多重反射の干渉が影響していると考えられる。

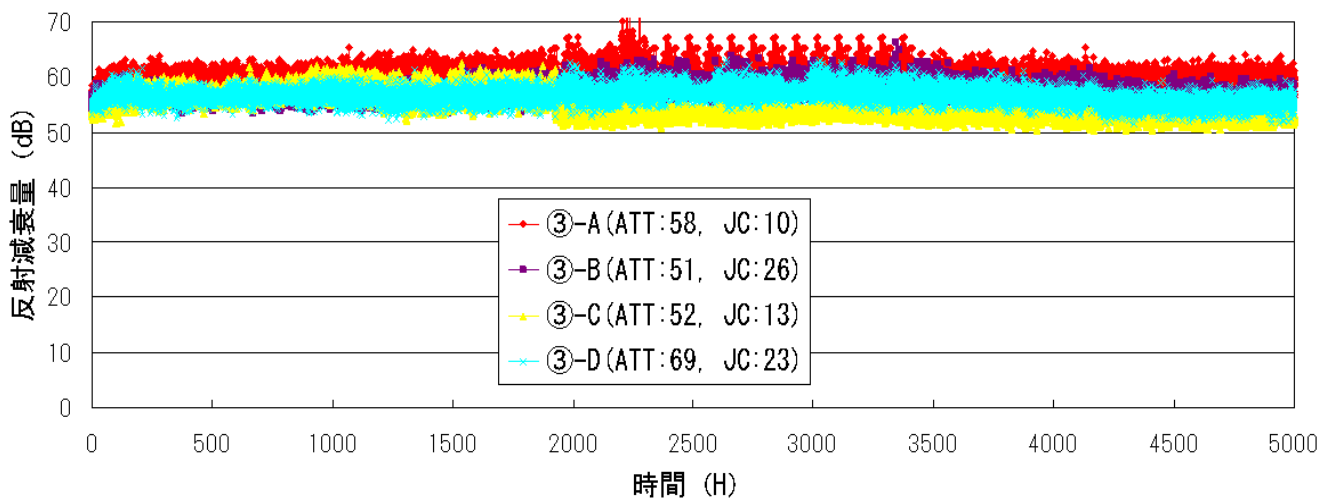


図 20 固定光減衰器のハイパワー長期評価結果 (一例)

(2) 長期信頼性評価後の特性

5000 hr の評価後、減衰量および反射減衰量を測定した。対マスタの光コネクタプラグに対するかん合では、減衰量、反射減衰量ともに劣化は見られなかった。

8.3 長期信頼性に関する考察

長期信頼性評価では、70℃、85%RH、5000 hr の試験条件で、反射減衰量の低下は見られなかった。評価したサンプル数は8組であったが、評価に用いたサンプルは設計最悪条件の組み合わせである。光コネクタプラグおよび固定光減衰器のプラグ側が、曲率半径、球面偏心率、光ファイバ引き込み量のいずれも最悪条件になる確率は非常に小さいことから、評価サンプル数が少ないことは、問題にならないと言える。今回の評価結果により、減衰量 10 dB の SC プラグ形固定光減衰器の、長期信頼性を考慮した最大入射パワーは、300 mW であることが確認された。

なお、減衰量が異なる固定光減衰器の場合、TP04 に示した熱シミュレーションの結果から、固定光減衰器の内部最高温度を計算することで、最大入射パワーを求めることができる。例えば、減衰量 5 dB では 380 mW、減衰量 20 dB では 280 mW が上限となる。

9. まとめ

SC プラグ形固定光減衰器のハイパワー信頼性に関する評価およびシミュレーションを行った。財団法人光産業技術振興協会 技術資料 TP04/SD・PD-2008「通信用光受動部品のハイパワー信頼性に関する調査」の結果得られた知見を元に、固定光減衰器のハイパワー入射時の反射減衰量低下の評価および熱応力シミュレーションを実施した。

その結果、固定光減衰器のハイパワー入射時の反射減衰量低下のメカニズムは、固定光減衰器内部の金属ドープ光ファイバが光を吸収して発熱し、それによる温度上昇が、光ファイバ（石英）、接着剤（エポキシ）、フェルルール（ ZrO_2 ）からなる 3 層構造の材料特性の違いによる熱応力を生じ、光ファイバが引き込むことで、PC はずれが起こることであると分かった。

減衰量 10 dB の SC プラグ形固定光減衰器の長期信頼性を確保できる最大入射パワーは 300 mW であることを、70 °C, 85 %RH, 5000 hr の評価結果で確認した。

参考文献

- [1] 柳, 長瀬, 「MU形光固定減衰器のハイパワー特性」, 2002年電子情報通信学会総合大会, C-3-108。
- [2] 山口, 「金属ドープのハイパワー光入射時温度の測定結果報告 3 SC 社内向け」, 昭和電線社内報告書, 2002年4月3日。

近年、超長距離伝送への要求、光ファイバアンプの CATV への適用等を背景に、光伝送出力の増大が進んでいる。これら光通信システムの伝送媒体である光ファイバ、光コネクタおよび光受動部品には、ハイパワー光の洩れによる人体への損傷や、部品の溶融、損傷による火災の危険性も指摘されている。光通信用光受動部品について、調査研究を行い、その成果をまとめ、2008年8月、TP04/SP・PD-2008「通信用光受動部品のハイパワー信頼性に関する調査」を発行した。その際、光受動部品のハイパワー信頼性に関し、種々の知見が得られた。代表的な知見が、光受動部品のハイパワー入射時の代表的な劣化モードは、光を吸収し、内部の温度上昇、温度分布等による熱歪が、内部の材料を変質または変形させ、性能を劣化させるというものである。また、固定光減衰器では、反射減衰量低下が劣化モードであることが分かった。

これらの評価結果から得られた知見を生かし、今回、SCプラグ形固定光減衰器についてハイパワー信頼性の評価を行った。本評価の目的は、固定光減衰器の反射減衰量低下のメカニズムの特定、長期信頼性を考慮した最大入射パワーの導出である。

今回の調査研究により、固定光減衰器の反射減衰量低下のメカニズムを特定することができた。また、長期信頼性を考慮した最大入射パワーを求めることができた。

この技術資料は、2008年度及び2009年度の2年間、経済産業省基準認証研究開発事業「ブロードバンド FTTH 時代に向けた高品位光伝送システム用光部品・モジュールの安全性及び信頼性の標準化」(Sプロジェクト)重点フォローアップ委員会(日本規格協会が受託)及び財団法人光産業技術振興協会 光受動部品標準化委員会において行われた固定光減衰器のハイパワーに関する信頼性の調査研究結果をまとめたものである。なお、実際の固定光減衰器のハイパワー試験・評価にあたっては、固定光減衰器製造企業の方々に協力をお願いした。

Sプロジェクト重点フォローアップ委員会委員、ハイパワー評価担当者および TP 作成・検討メンバー

委員長	日本電気株式会社	渋谷 隆
委員	千葉工業大学	長瀬 亮
	昭和電線ケーブルシステム株式会社	高橋 徹
	株式会社精工技研	久保 大輔
	古河電気工業株式会社	奈良 一孝
	古河電気工業株式会社	松浦 寛
	財団法人光産業技術振興協会	増田 岳夫
	財団法人光産業技術振興協会	棚田 治良
	財団法人光産業技術振興協会	山岸 互
事務局	財団法人日本規格協会	太田 潤
	財団法人日本規格協会	伊藤 博
	財団法人日本規格協会	大芦 誠
	財団法人日本規格協会	蛭間 功

TP 承認

光受動部品標準化委員会 名簿

	氏名	所属及び期間
委員長	水本 哲弥	東京工業大学
委員	金子 明正	日本電信電話株式会社 (H20年10月まで)
	井上 靖之	日本電信電話株式会社 (H20年11月から)
	佐藤 文利	財団法人日本規格協会 (H21年10月まで)
	吉田 浩之	財団法人日本規格協会 (H21年11月から)
	福田 大治	独立行政法人産業技術総合研究所
	増田 岳夫	財団法人光産業技術振興協会
	小笹 健仁	経済産業省商務情報政策局 (H20年3月まで)
	松川 貴	経済産業省商務情報政策局 (H21年4月から)
	安部 健一	富士通株式会社 (H21年3月まで)
	大谷 俊博	富士通株式会社 (H21年4月から)
	鈴木 隆介	住友電気工業株式会社
	奈良 一孝	古河電気工業株式会社 (H21年1月まで)
	松浦 寛	古河電気工業株式会社 (H21年2月から)
	伊藤 拓	日本板硝子株式会社
	横山 純	santec 株式会社 (H21年3月まで)
	宮腰 泰平	santec 株式会社 (H21年4月から)
	上塚 尚登	日立電線株式会社
	太田垣文章	アンリツ株式会社
	加藤 隆司	F D K株式会社
	小林 善宏	京セラ株式会社 (H20年5月まで)
	奥田 通孝	京セラ株式会社 (H20年6月から H21年3月まで)
	駒田 大輔	京セラ株式会社 (H21年4月から)
	野極 誠二	横河電機株式会社 (H21年10月まで)
岩崎 隆志	横河電機株式会社 (H21年11月から)	
渋谷 隆	日本電気株式会社	
佐久間 健	株式会社フジクラ	
オブザーバ	金枝上敦史	経済産業省産業技術環境局
	磯野 秀樹	富士通株式会社 (H21年4月から)
事務局	村田 健治	財団法人光産業技術振興協会
	神山 泰三	財団法人光産業技術振興協会

禁無断転載

この OITDA 規格の TP (技術資料) は, 基準認証研究開発事業「ブロードバンド FTTH 時代に向けた高品位光伝送システム用光部品・光モジュールの安全性及び信頼性の標準化」(S プロジェクト) 重点フォローアップ委員会及び財団法人光産業技術振興協会光受動部品標準化委員会で審議・取纏めたものである。

この資料についてのご意見又はご質問は, 下記にご連絡ください。

OITDA 規格 TP (技術資料) :

プラグ形固定光減衰器受動部品のハイパワー信頼性に関する調査

(英語題名 Technical paper of investigation of high-power reliability for plug-style fixed optical attenuators)

TP 番号 : TP9/SP・PD-2010

第 1 版

公表日 : 2010 年 3 月 25 日

発行者 : 財団法人 光産業技術振興協会

住所 : 〒112-0014 東京都文京区関口 1-20-10 住友江戸川

橋駅前ビル 7F

電話 : 03-5225-6431 FAX : 03-5225-6435

e-mail : opt-st@oitda.or.jp (標準化室)