

# グリーン用ファイバーの選定

---

***Green review***

**2018 / 03 / 28**

横川 和也

富山大学 理工学教育部 物理学専攻

レーザー物理学研究室

# Outline

---

## 1. 偏波保持シングルモードファイバー

- 偏波保持性の評価
- 出力光の強度安定度
- ファイバー出力ビームの波面
- 損傷閾値

## 2. ピグテール付き偏波保持ファイバー

- 出力光の強度安定度
- アダプタによるロスの評価

## 3. エンドキャップ付き偏波保持ファイバー

- 偏波保持性の評価
- 出力光の強度安定度
- 出力ビームのプロファイル

## 4. ファイバー選定

# Outline

---

## 1. 偏波保持シングルモードファイバー

- 偏波保持性の評価
- 出力光の強度安定度
- ファイバー出力ビームの波面
- 損傷閾値

## 2. ピグテール付き偏波保持ファイバー

- 出力光の強度安定度
- アダプタによるロスの評価

## 3. エンドキャップ付き偏波保持ファイバー

- 偏波保持性の評価
- 出力光の強度安定度
- 出力ビームのプロファイル

## 4. ファイバー選定

# 偏波保持ファイバーを使うに至った流れ

はじめにシングルモードファイバー( [P1-405B-FC-5](#) )を試した



透過光の偏光がまわってしまう



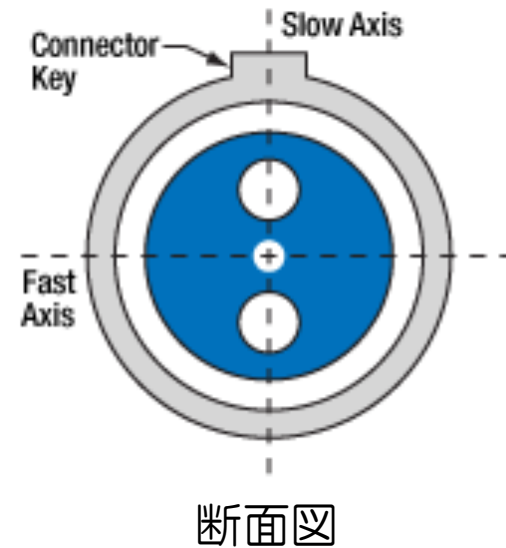
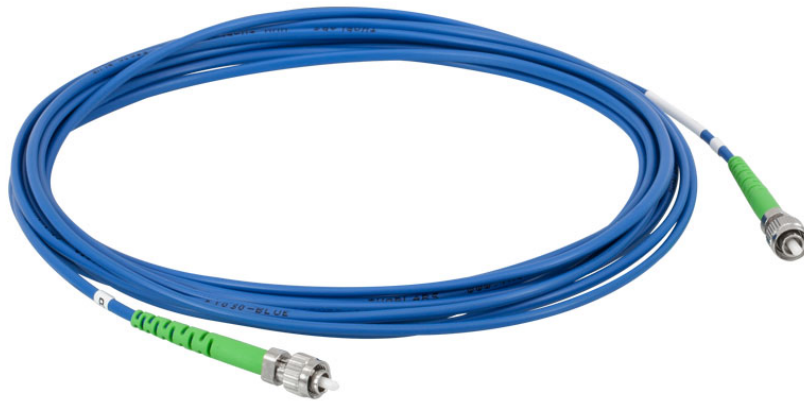
偏波保持ファイバー  
を使うに至った



シングルモードファイバーのスペック

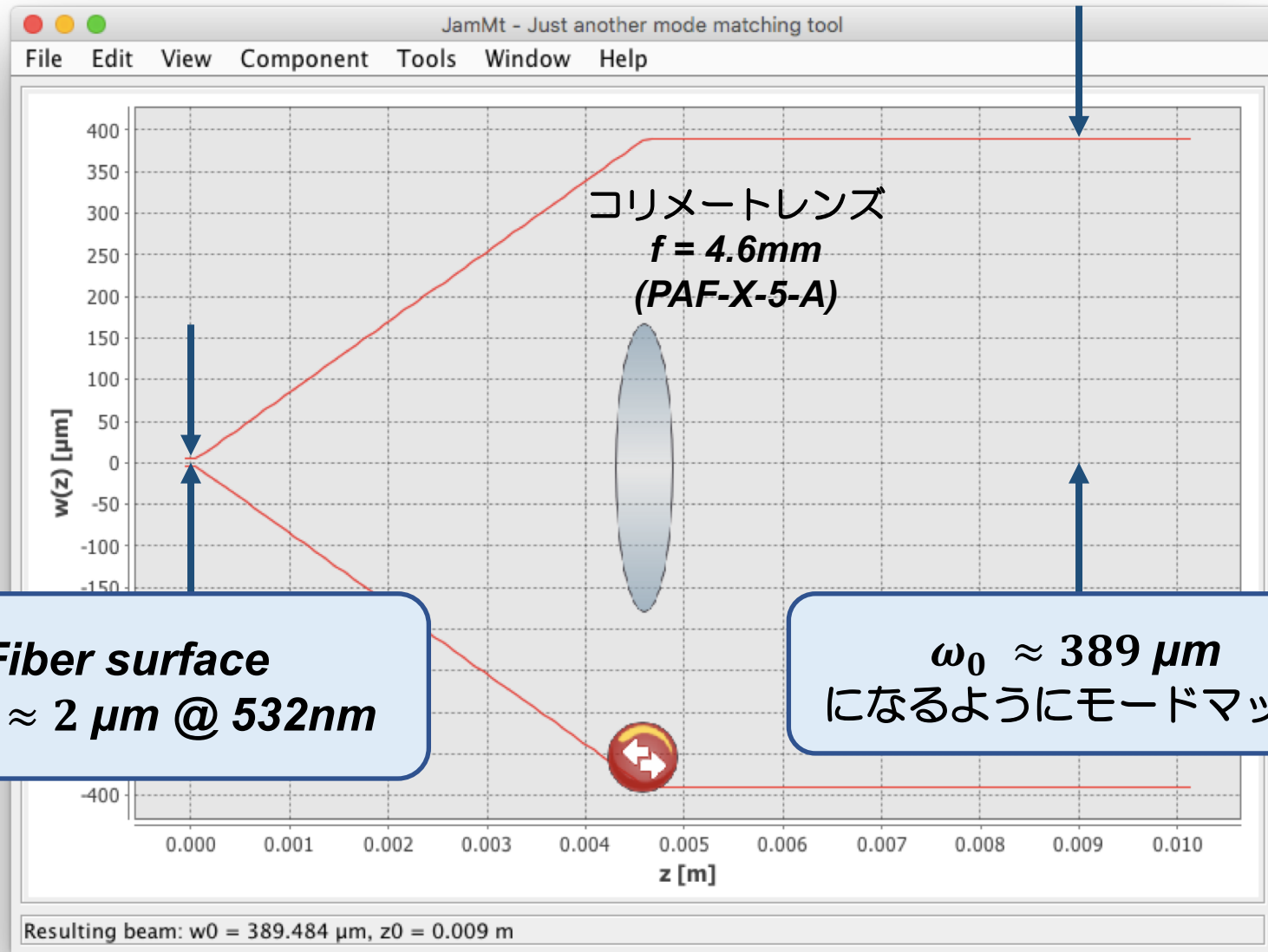
|                             |                            |
|-----------------------------|----------------------------|
| <b>Model</b>                | <b>P1-405B-FC-5</b>        |
| <b>Fiber type</b>           | <b>SM400</b>               |
| <b>Operating wavelength</b> | <b>405 – 532 nm</b>        |
| <b>MFD</b>                  | <b>2.5 - 3.4um @ 480nm</b> |
| <b>NA</b>                   | <b>0.12 – 0.14</b>         |
| <b>Connector type</b>       | <b>FC/PC</b>               |

# 偏波保持シングルモードファイバーのスペック

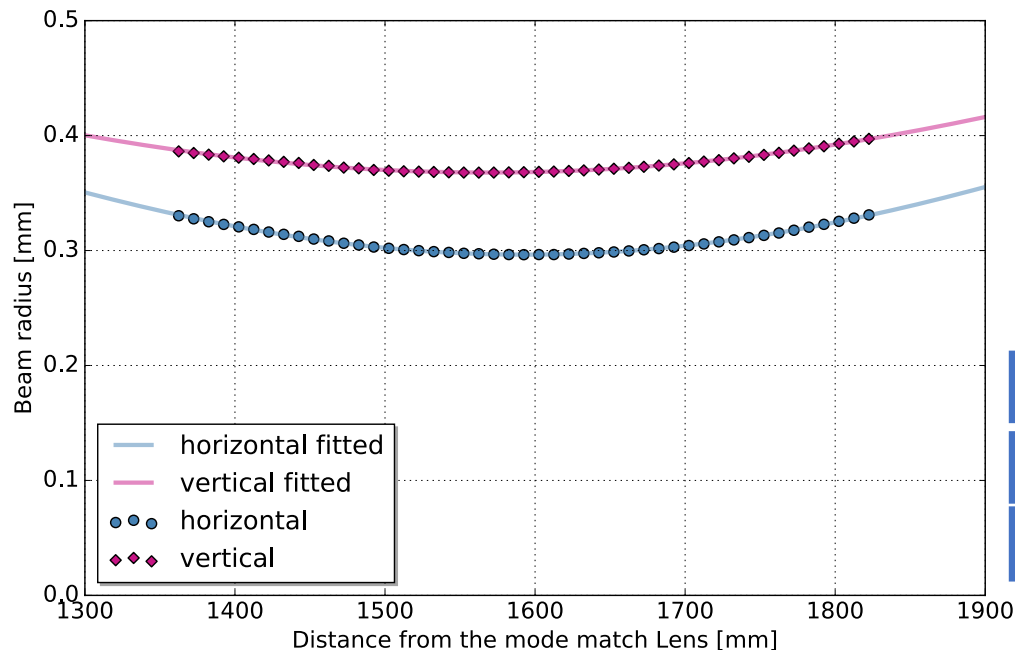
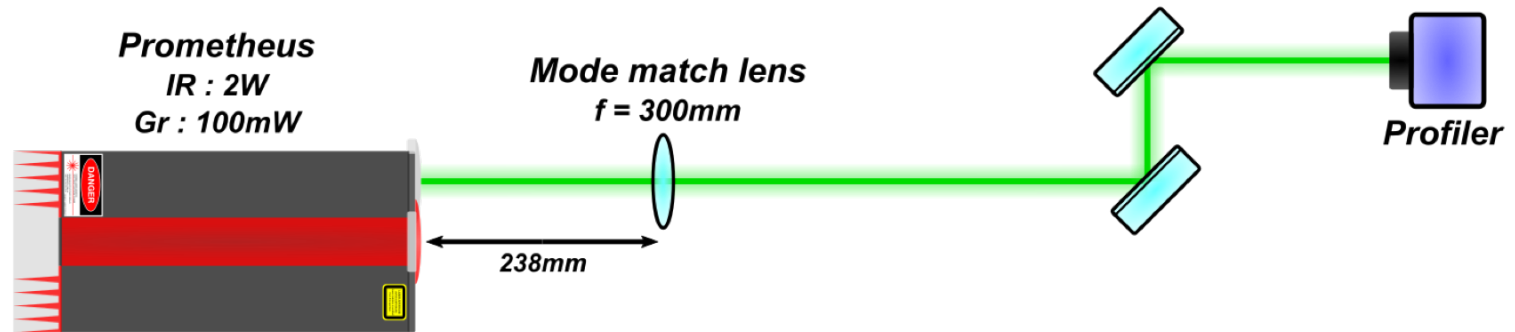


|                                   |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Model</b>                      | <b><i>P3-488PM-FC-5 (Panda)</i></b> |
| <b>Fiber type</b>                 | <b><i>PM460-HP</i></b>              |
| <b>Operating wavelength range</b> | <b><i>460 – 700 nm</i></b>          |
| <b>MFD</b>                        | <b><i>3.4um @ 488nm</i></b>         |
| <b>NA</b>                         | <b><i>0.12</i></b>                  |
| <b>Connector type</b>             | <b><i>FC/APC</i></b>                |

# ファイバーへのモードマッチ



# ファイバーへのモードマッチ



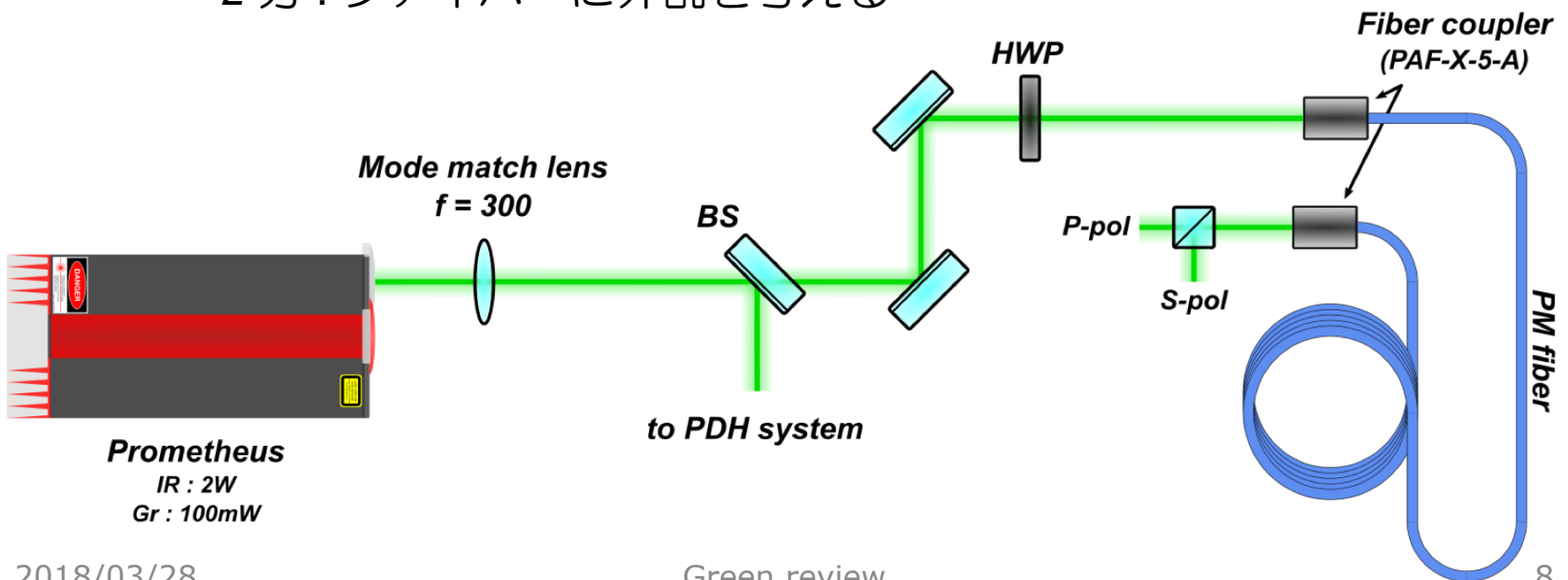
ファイバーカップリング率  
60% まで達成

| Direction  | $M^2$ | $\omega_0$ [mm] | $z$ [mm] |
|------------|-------|-----------------|----------|
| Horizontal | 1.117 | 0.296431        | 159.317  |
| Vertical   | 1.276 | 0.367859        | 156.860  |

# 偏波保持安定度の評価

## 条件

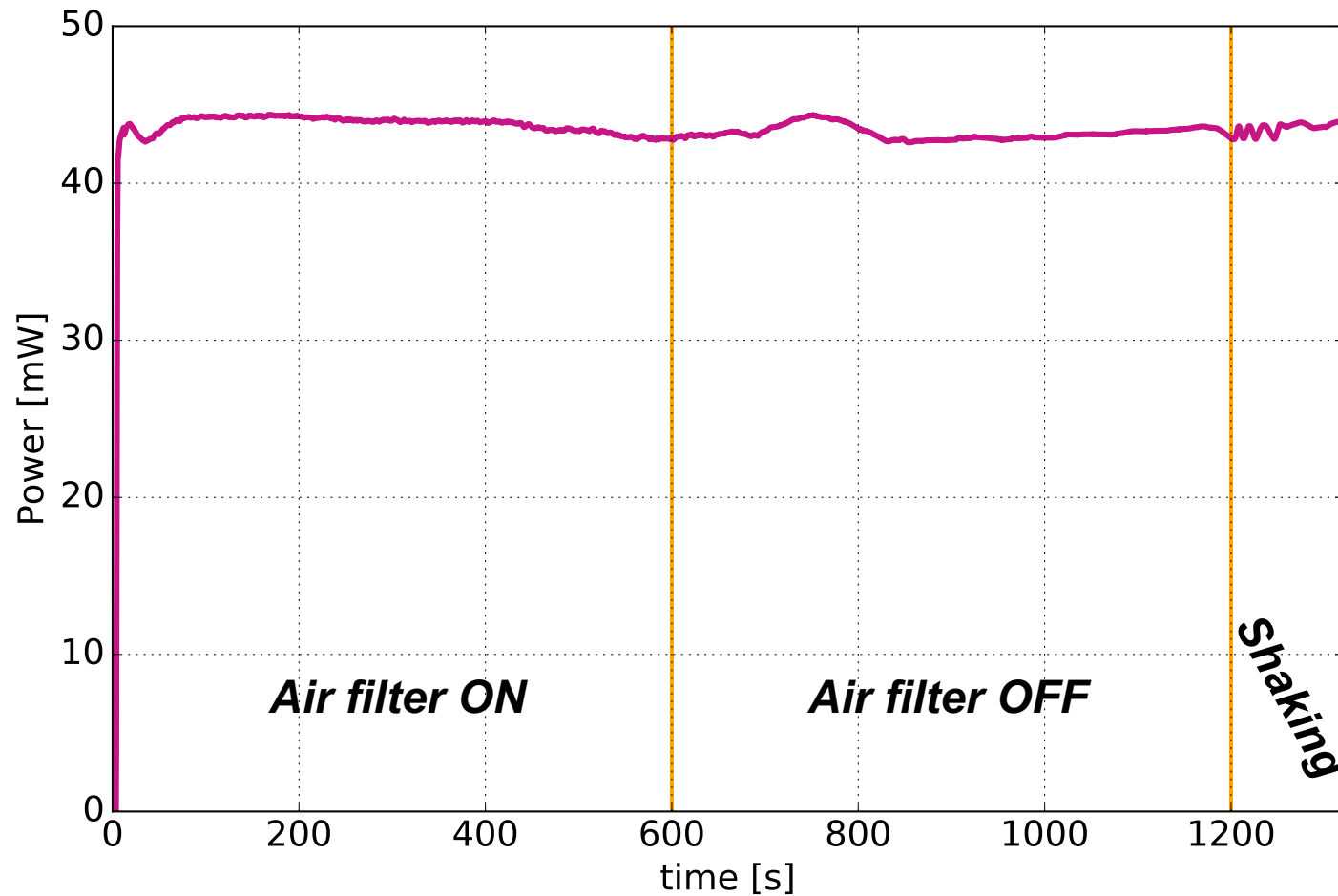
- ✓ カップリング率は約60%
- ✓ 入射側のHWPでファイバーに入射する光の偏光を調整
- ✓ 測定には **COHERENT Power Max PS19Q** を使用
- ✓ 測定方法
  - 10分 : *fan on*
  - 10分 : *fan off*
  - 2分 : ファイバーに外乱を与える





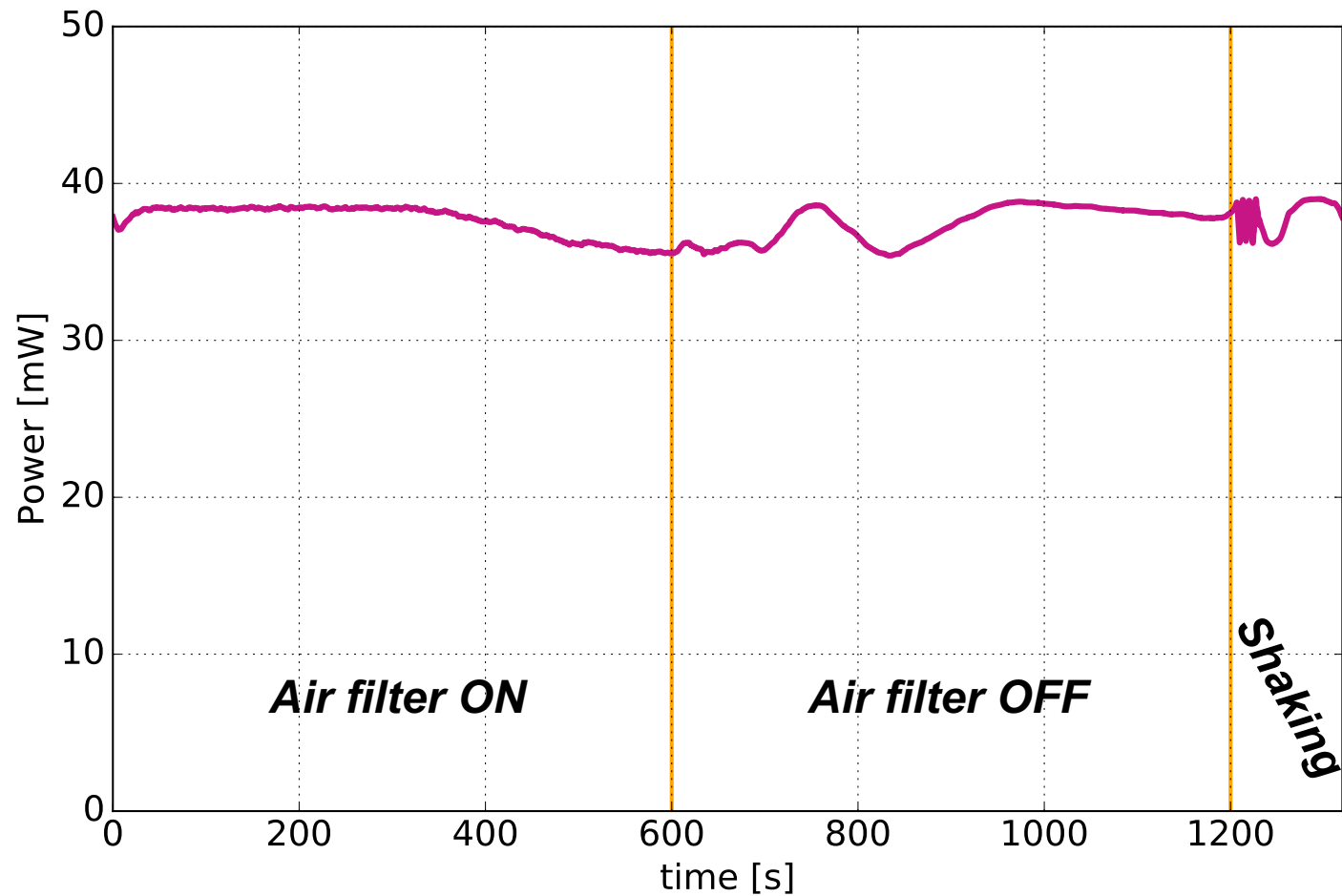
# 偏波保持安定度の評価

## ① P偏光(ファイバーキーに対して垂直方向)入射



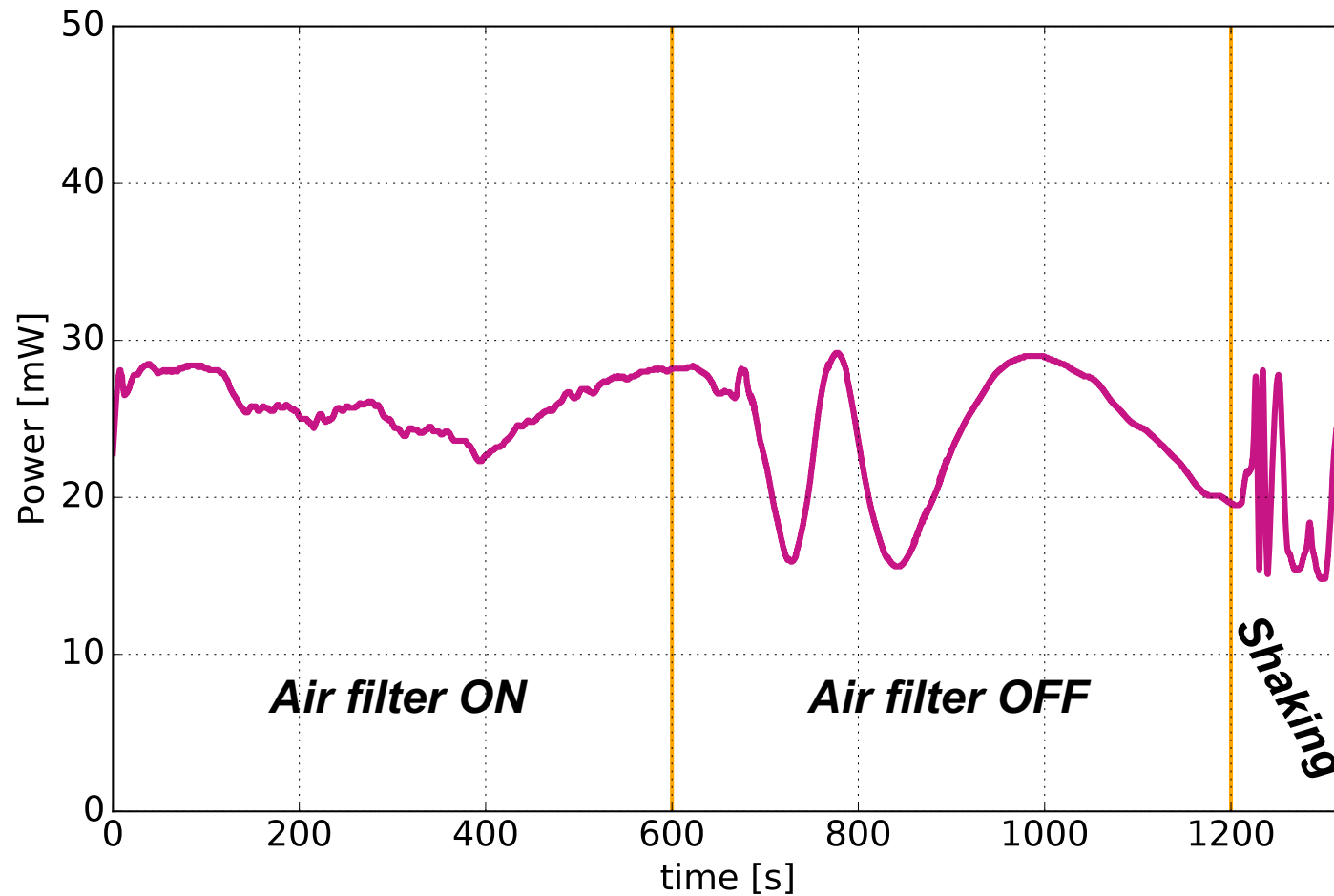
# 偏波保持安定度の評価

## ② S偏光(ファイバーキーに対して水平方向)入射



# 偏波保持安定度の評価

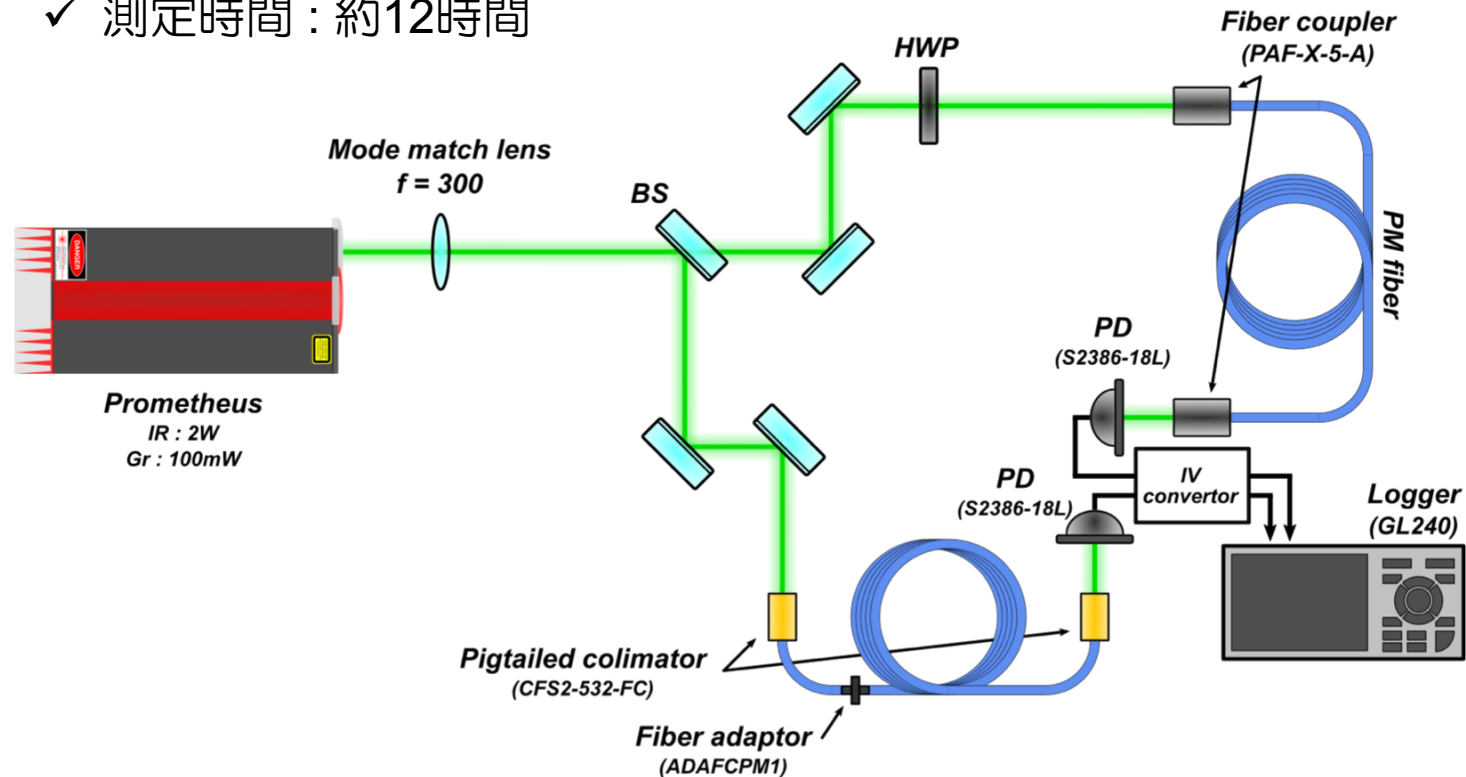
## ③ 斜め偏光入射



# ファイバー透過光強度の安定度の評価

## 条件

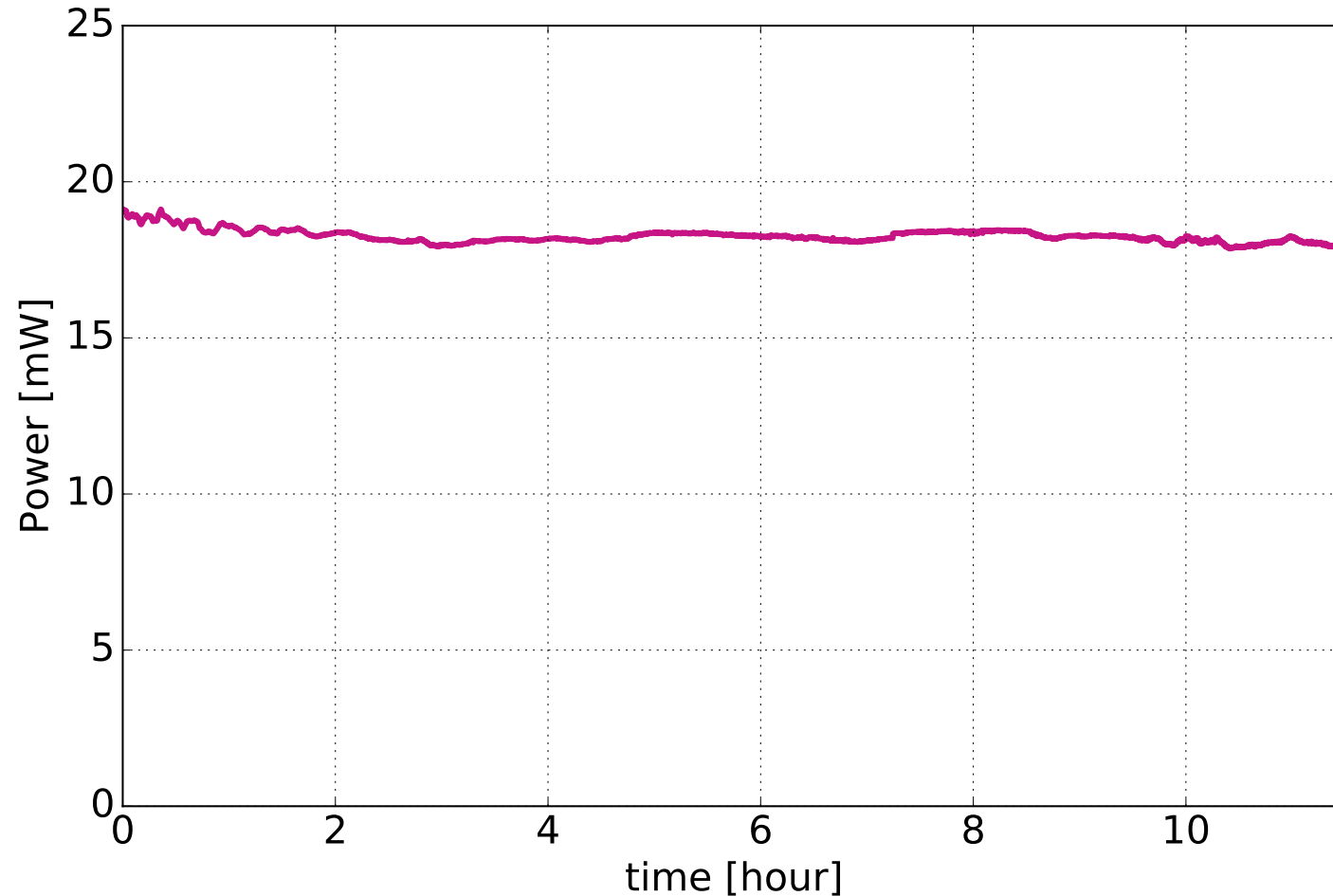
- ✓ ファイバー出力光をデータロガーを用いてモニター
- ✓ ファイバーにはP偏光の光を入射
- ✓ クリーンブースファン：OFF
- ✓ 測定時間：約12時間



# ファイバー透過光強度の安定度の評価

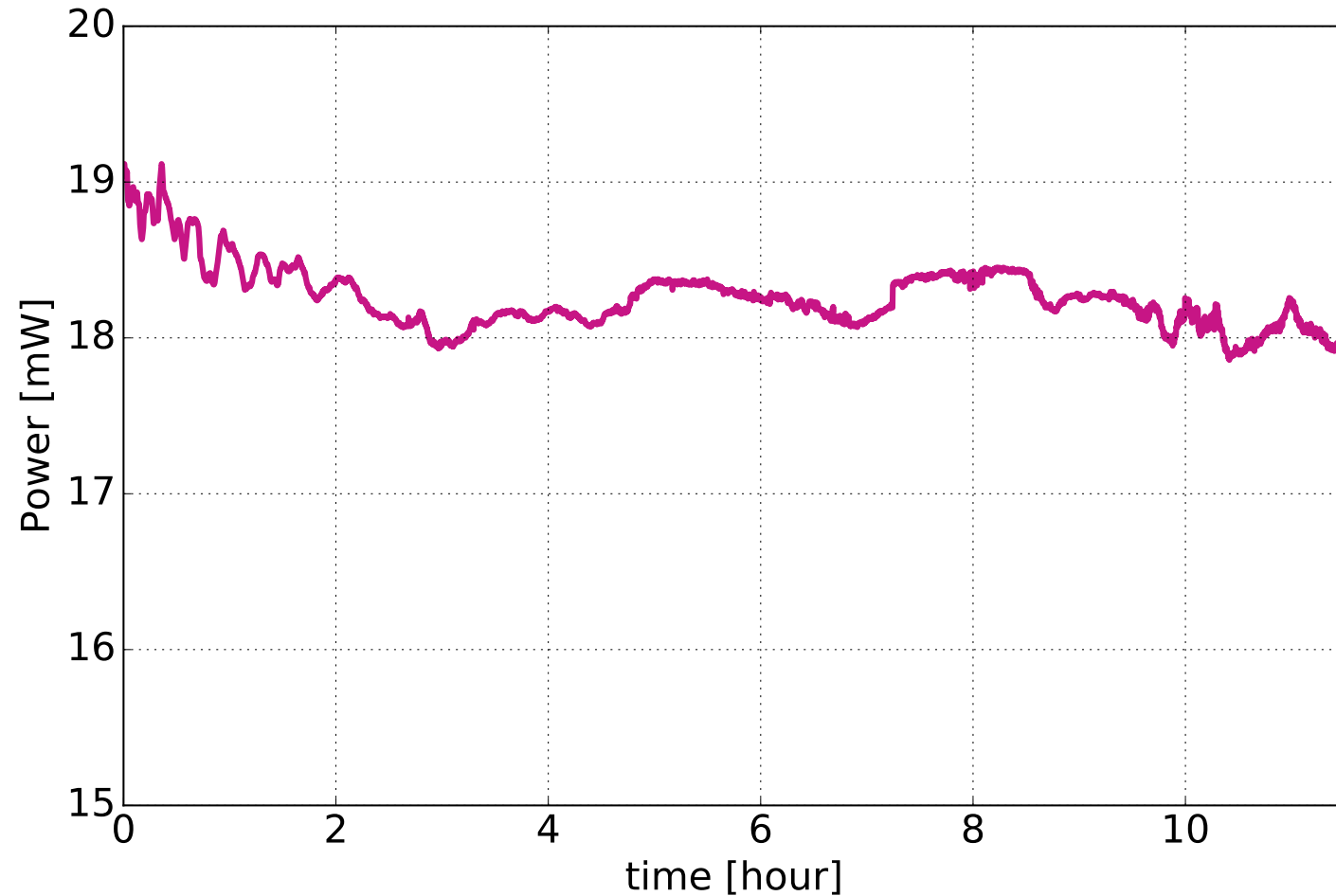
約30mW入射

カップリング率：約60%

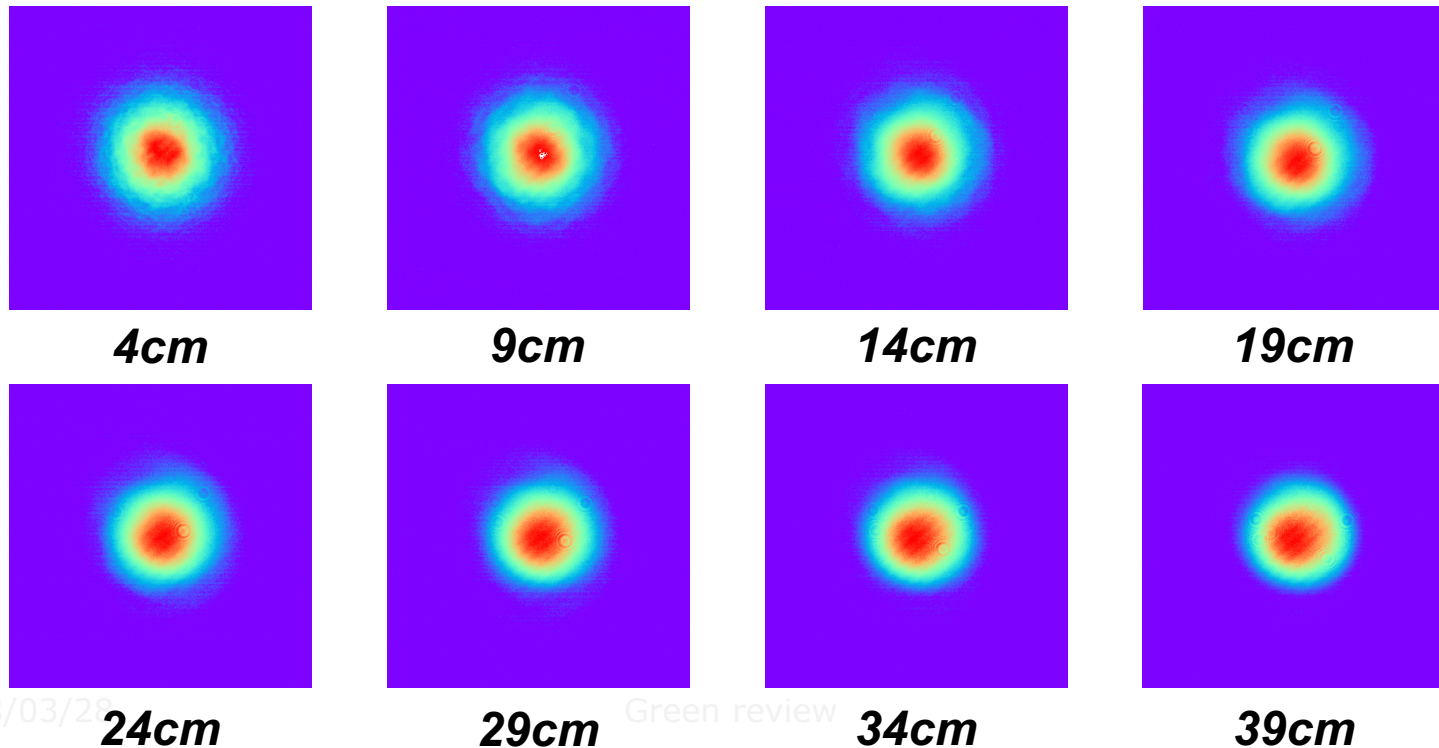
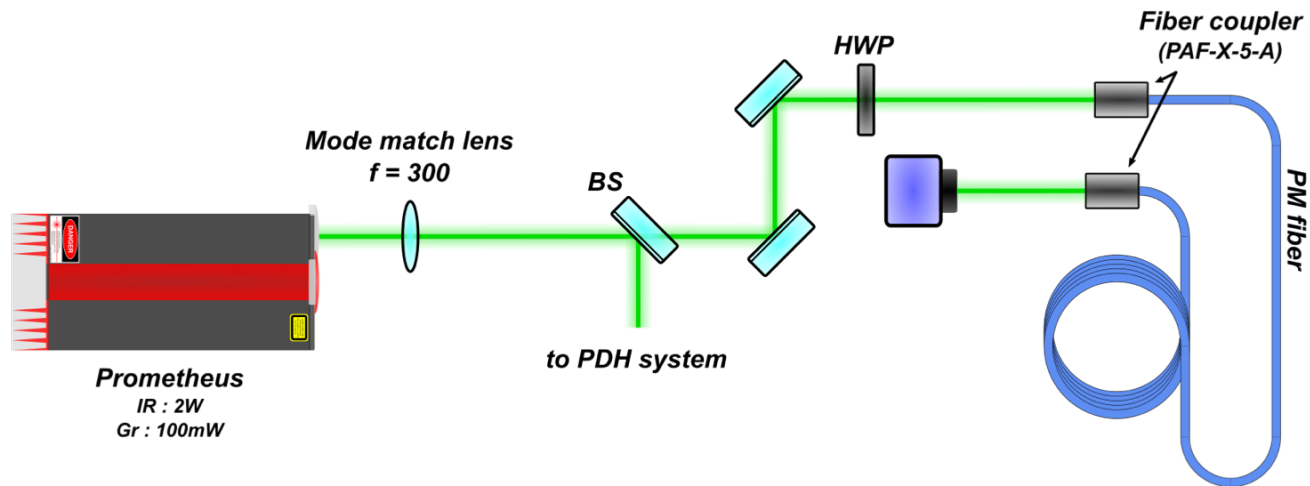


# ファイバー透過光強度の安定度の評価

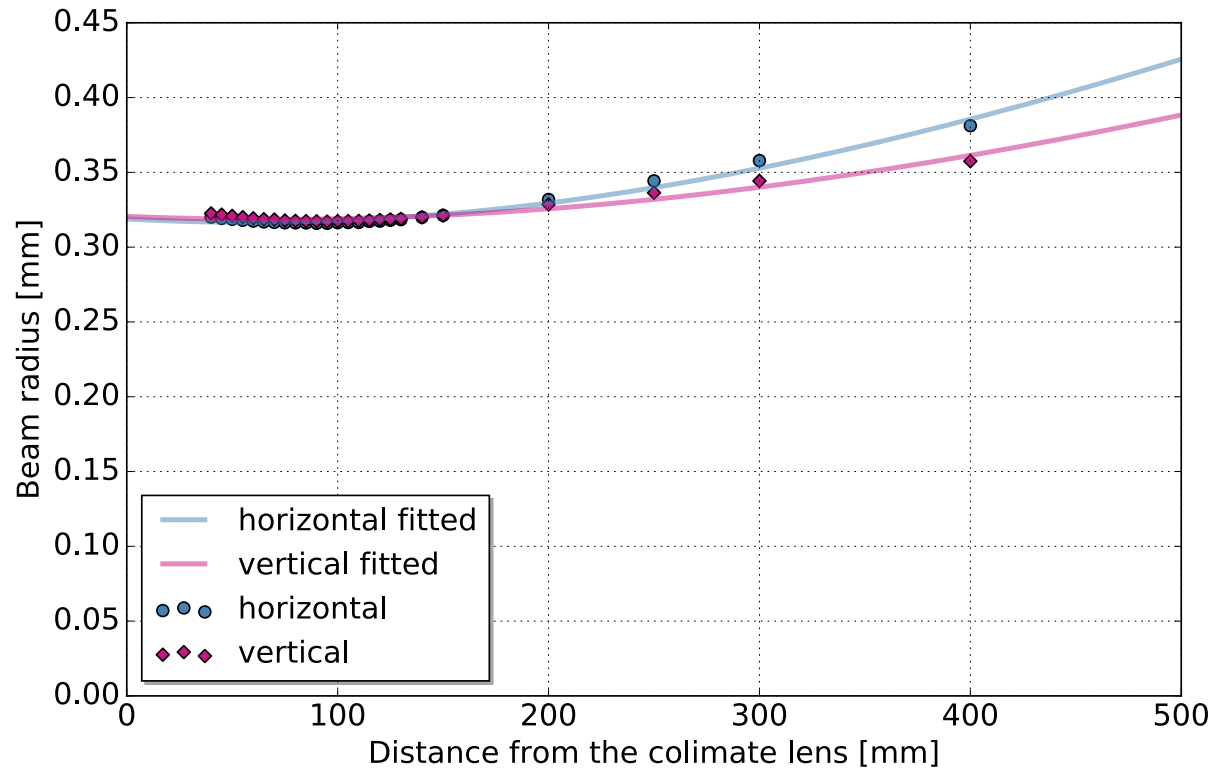
拡大図



# ファイバー出力ビームの波面



# ファイバー出力ビームのプロファイル



| Direction  | $M^2$ | $\omega_0$ [mm] | $z$ [mm] |
|------------|-------|-----------------|----------|
| Horizontal | 1.205 | 0.316603        | 58.672   |
| Vertical   | 0.969 | 0.318582        | 69.022   |



# 損傷閾値

---

## 損傷閾値の計算式

$$\text{理論的損傷閾値} : \pi \times \left( \frac{\text{MFD}}{2} \right)^2 \times 1 \text{ MW/cm}^2$$

$$\text{実効的安全マージン} : \pi \times \left( \frac{\text{MFD}}{2} \right)^2 \times 250 \text{ kW/cm}^2$$

(ソーラボジャパンHPより)

### **P3-488PM-FC-5** の場合 ...

$$\text{理論的損傷閾値} : \pi \times \left( \frac{3.4\mu\text{m}}{2} \right)^2 \times 1 \text{ MW/cm}^2 \approx 90.792 \text{ mW}$$

$$\text{安全マージン} : 90.792 \div 4 \approx \mathbf{22.698 \text{ mW}}$$

安全マージンが低く、ダークニングなどが起きる可能性が考えられる  
→ 敷設し直し

# 偏波保持シングルモードファイバー まとめ

---

## Good !!

- ✓ 偏波保持性を確認
- ✓ 出力ビームの安定度も問題なさそう
- ✓ 出力ビームのコリメーションも大丈夫

## Not good ...

- ✓ 損傷閾値の安全マージンが低いため、ダークニングなどにより壊れてしまう恐れがある

# Outline

---

## 1. 偏波保持シングルモードファイバー

- 偏波保持性の評価
- 出力光の強度安定度
- ファイバー出力ビームの波面
- 損傷閾値

## 2. ピグテール付き偏波保持ファイバー

- 出力光の強度安定度
- アダプタによるロスの評価

## 3. エンドキャップ付き偏波保持ファイバー

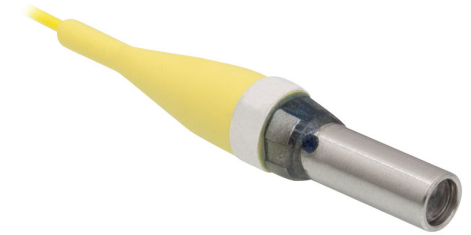
- 偏波保持性の評価
- 出力光の強度安定度
- 出力ビームのプロファイル

## 4. ファイバー選定

# ピグテール付き偏波保持ファイバーのスペック

## ピグテール付き非球面レンズコリメーター

|                                                |                    |
|------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Model</b>                                   | <b>CFS2-532-FC</b> |
| <b><math>1/e^2</math> output beam diameter</b> | <b>0.39mm</b>      |
| <b>Beam divergence</b>                         | <b>1.75 mrad</b>   |

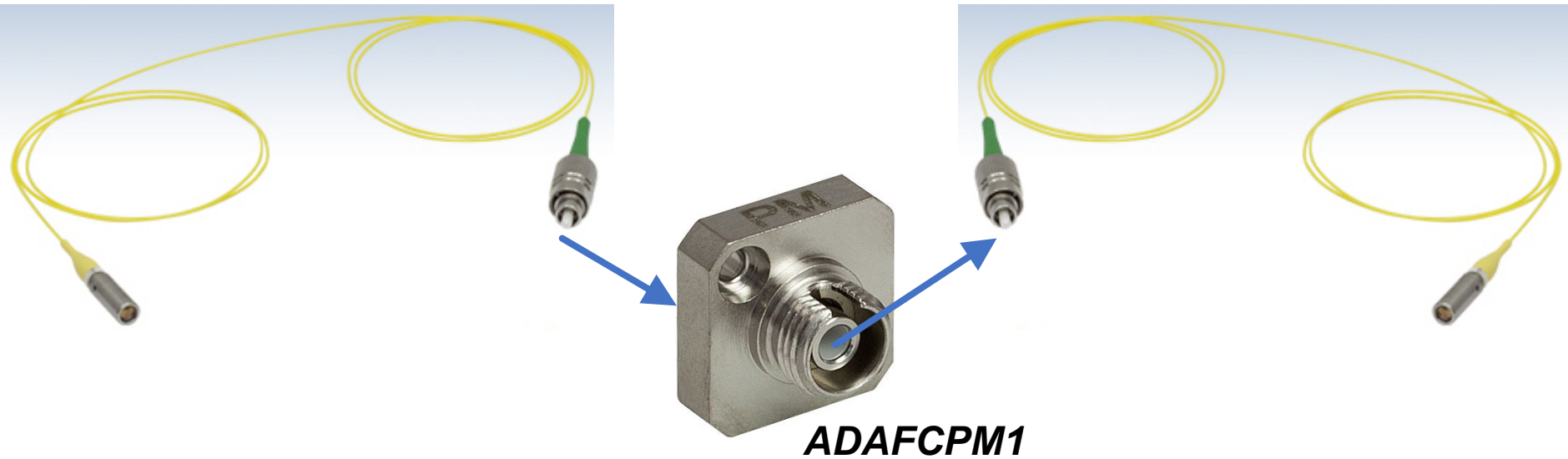


## ファイバー

|                   |                                                              |
|-------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Fiber type</b> | <b>PM460-HP</b>                                              |
| <b>MFD</b>        | <b><math>3.3 \pm 0.5 \text{ } \mu\text{m}</math> @ 515nm</b> |
| <b>NA</b>         | <b>0.12</b>                                                  |

# アダプタによるロスの問題

---



両端ピグテールにするために、FC/APC同士をアダプタで接続

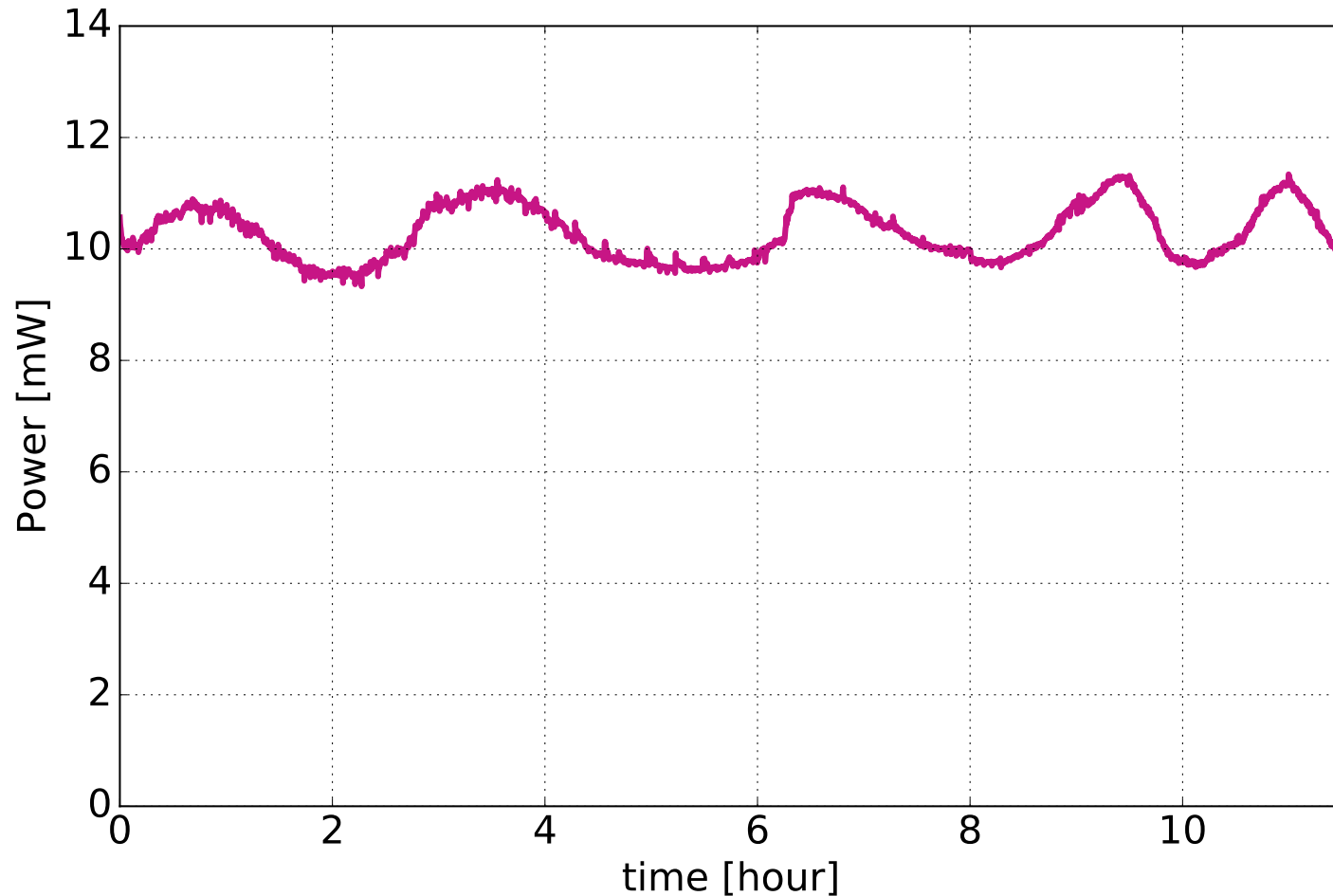


アダプタ部分で**50%以上のロスが生じた**  
しかも出力ビームのパワー揺らぎが大きい...

# ピグテール付きファイバーの透過光強度安定度

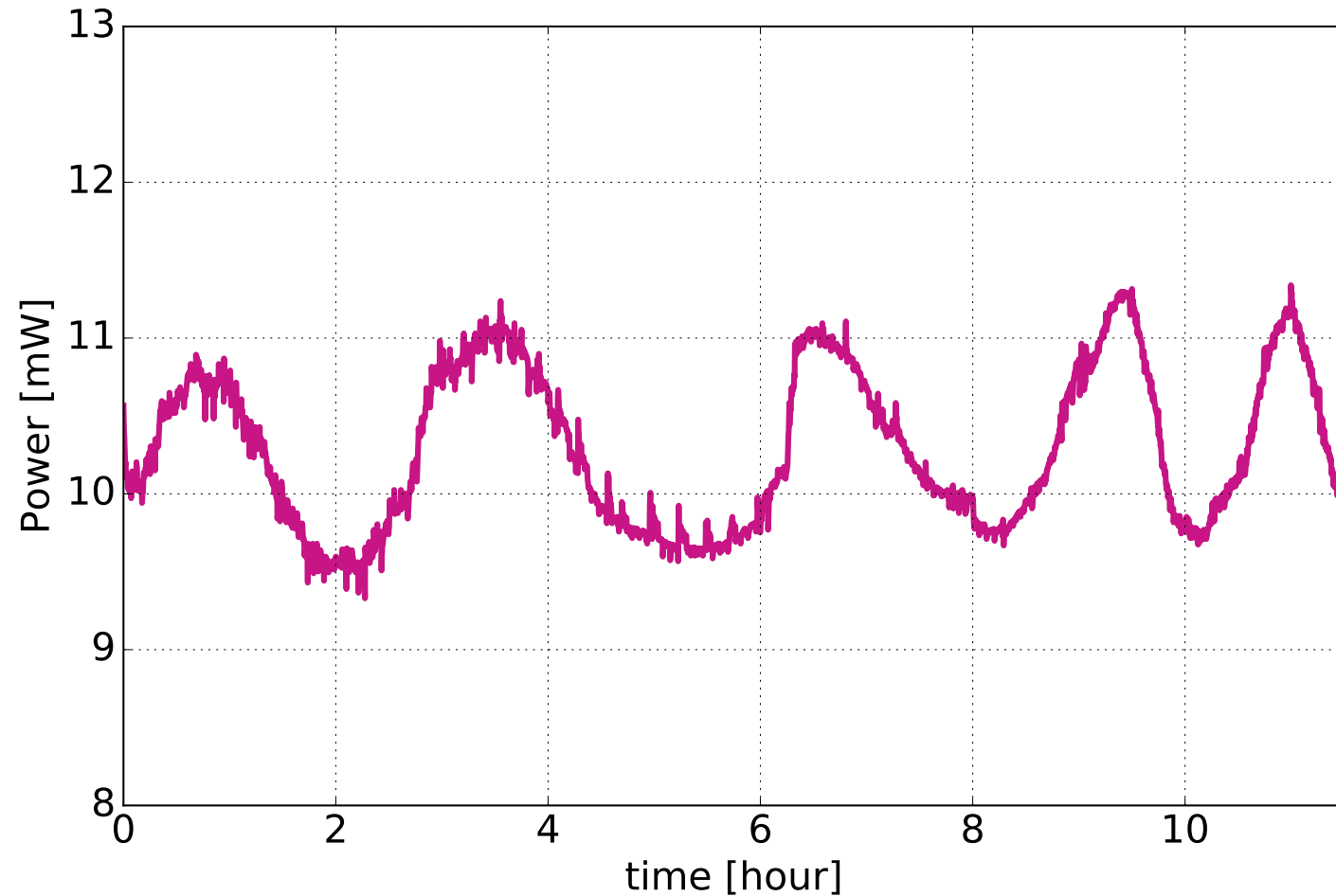
約50mW入射

アダプタのロスにより透過率は20%程度



# ファイバー透過光強度の安定度の評価

拡大図



# アダプタによるロスの評価

---

ピグテール付きPMファイバーとFC/APCのPMファイバーを  
アダプタで接続し、アダプタによるロス評価  
光はピグテール側から入射（ピグテールのカップリング率は70%程度）

## 条件

- ✓ ファイバー

ピグテール付き：[CFS2-532-FC-PM460-HP](#)

PMファイバー：[P3-488PM-FC-5](#)

- ✓ 使用したアダプタ以下の2種類

ワイドキー (2.2mm)：[ADAFCPM1](#)

ナローキー (2.0mm)：[ADAFCPM2](#)



# アダプタによるロスの評価

---

## 結果

- ✓ アダプタへの接続の仕方によって透過率が変化

### ワイドキー

最も良いときで 65.3%

最も悪いときで 50%

### ナローキー

最も良いときで 73.6%

最も悪いときで 45.8%

- ✓ クリーニングしても良くならなかった

ナローキーのアダプタの方が少し透過率が良くなるが  
それでも 30% 近くのロスが生じてしまう

# ピグテール付きファイバー&アダプタ まとめ

---

**Good !!**



**Not good ...**

- ✓ アダプタによるロスが大きい  
( 付け方によっても透過率が変化する )
- ✓ 出力ビームのパワー揺らぎが大きい
- ✓ 損傷閾値の安全マージンが低いため、ダークニングなどにより壊れてしまう恐れがある

※ アダプタでのロスが多いことと出力光のパワーの揺らぎも大きかったことなどから、出力ビームのプロファイル等は取らなかった。

# Outline

---

## 1. 偏波保持シングルモードファイバー

- 偏波保持性の評価
- 出力光の強度安定度
- ファイバー出力ビームの波面
- 損傷閾値

## 2. ピグテール付き偏波保持ファイバー

- 出力光の強度安定度
- アダプタによるロスの評価

## 3. エンドキャップ付き偏波保持ファイバー

- 偏波保持性の評価
- 出力光の強度安定度
- 出力ビームのプロファイル

## 4. ファイバー選定

# エンドキャップ付き偏波保持ファイバーのスペック

|                             |                                                                                    |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fiber type</b>           | <b>PM-S405-XP</b>                                                                  |
| <b>Operating wavelength</b> | <b>400 – 680 nm</b>                                                                |
| <b>MFD</b>                  | <b>3.3+/-0.5 <math>\mu</math>m @ 405nm<br/>4.6+/-0.5 <math>\mu</math>m @ 630nm</b> |
| <b>NA</b>                   | <b>0.12</b>                                                                        |
| <b>Connector type</b>       | <b>FC/APC</b>                                                                      |
| <b>Thick of the End-cap</b> | <b>0.33 mm</b>                                                                     |

## エンドキャップ付きファイバーを使うメリット

ハイパワーでもファイバーの端面の心配がない

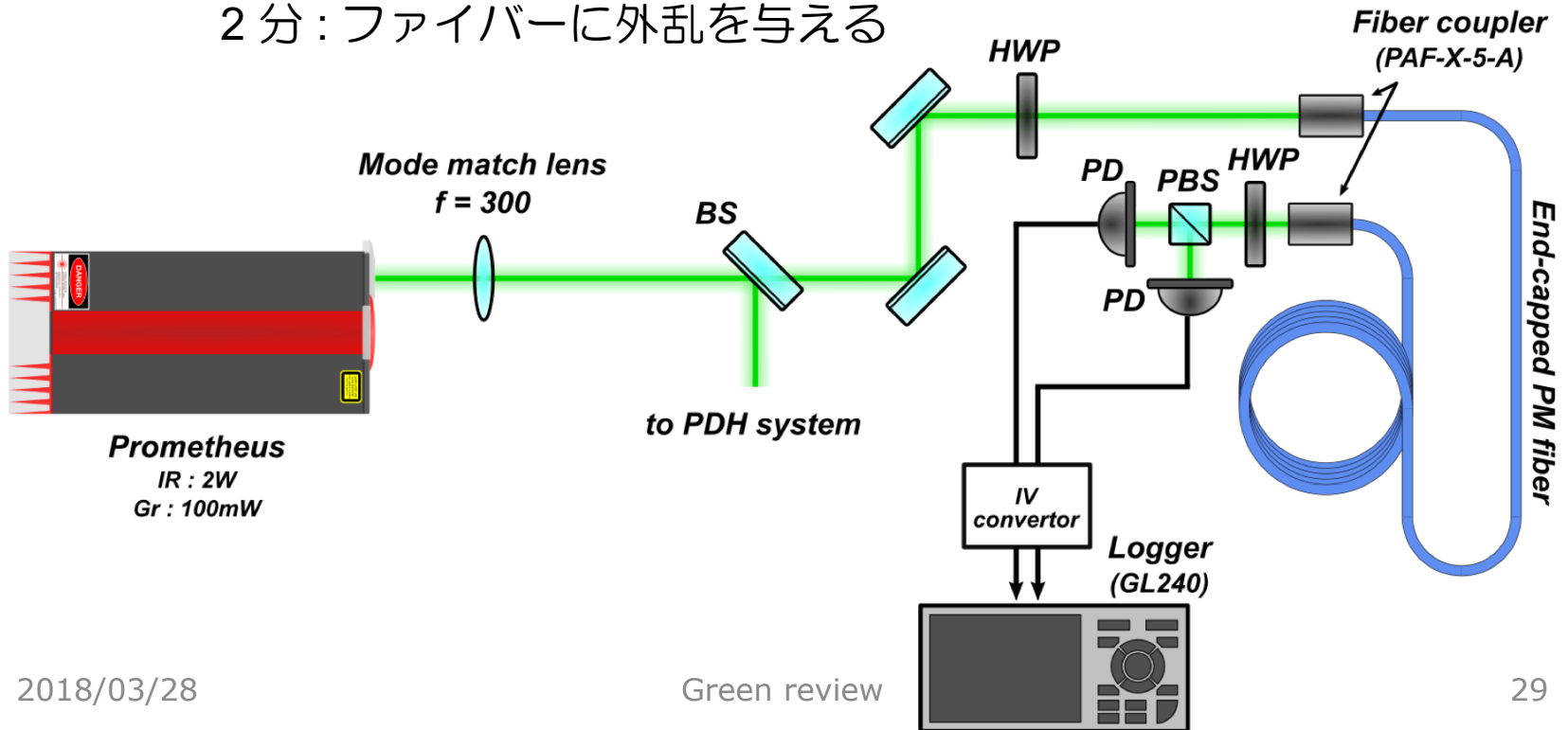
( 1.4Wくらいでも大丈夫 )

グリーンは最大100mWなので安心して使用できる

# 偏波保持安定度の評価

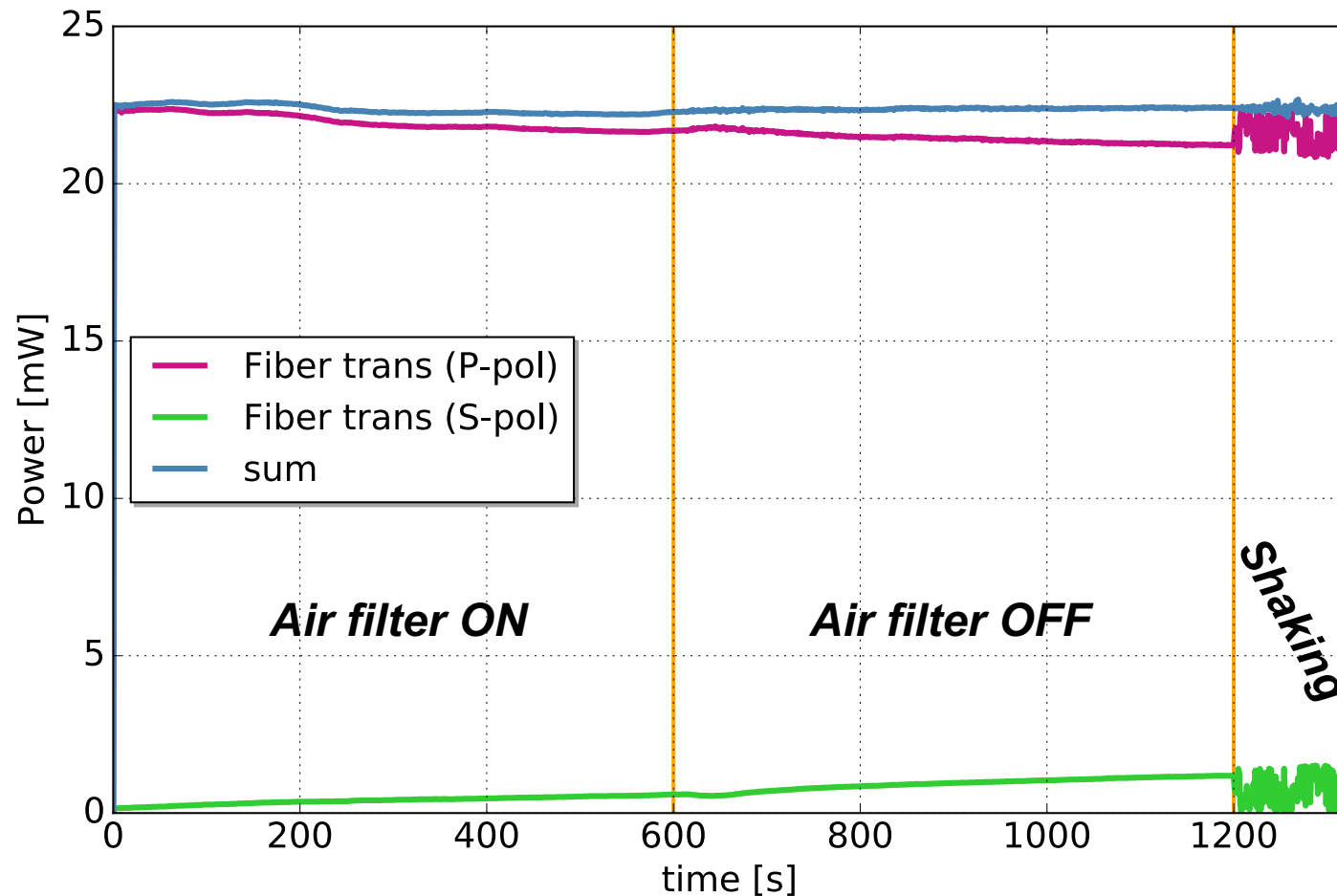
## 条件

- ✓ 入射側のHWPでファイバーに入射する光の偏光を調整
- ✓ 出射側のキー向きが正確ではないためHWPで定盤に対する偏光に調整
- ✓ 測定方法
  - 10 分 : fan on
  - 10 分 : fan off
  - 2 分 : ファイバーに外乱を与える



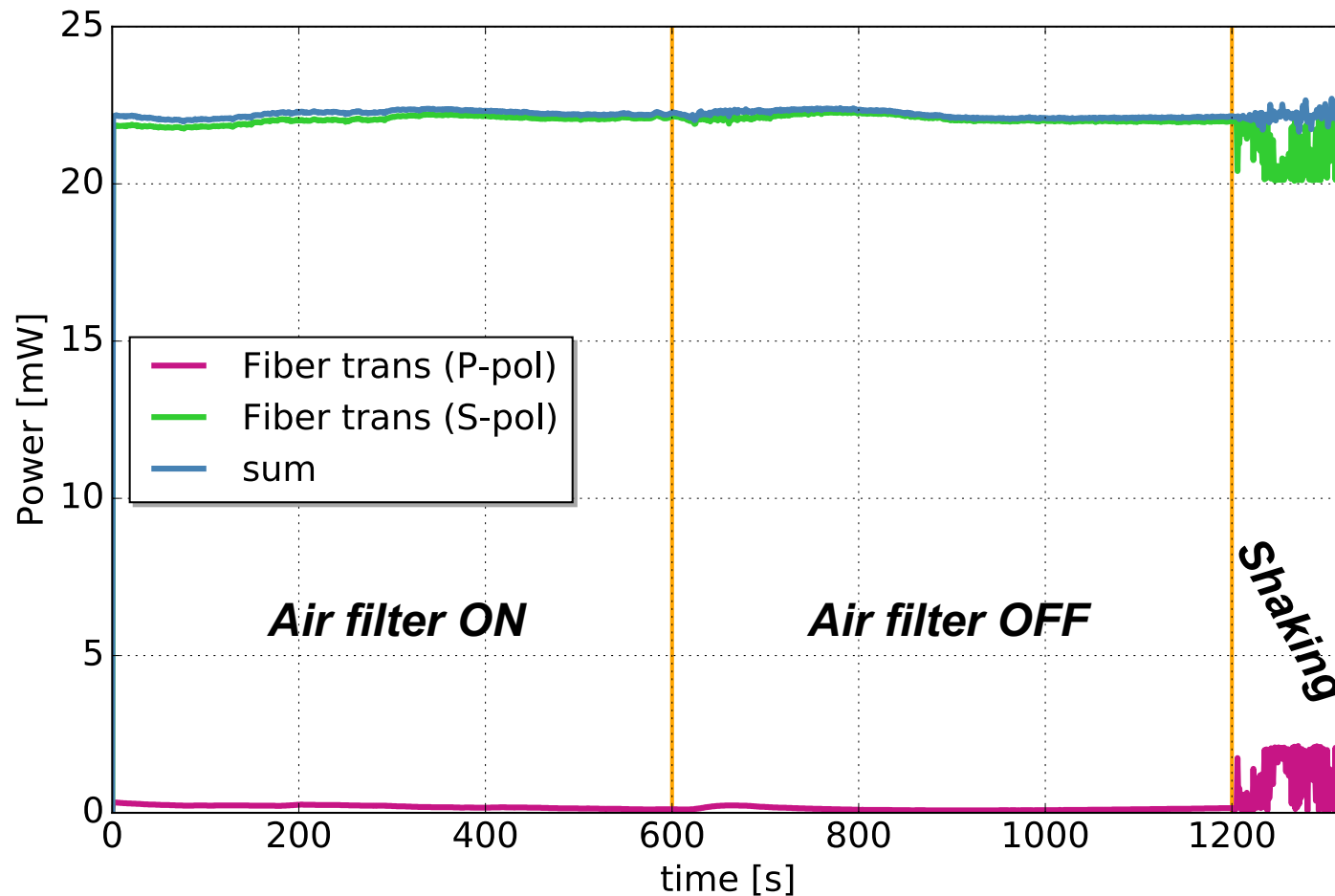
# 偏波保持安定度の評価

① P偏光(ファイバーキーに対して垂直方向)入射 (カップリング率：約70%)



# 偏波保持安定度の評価

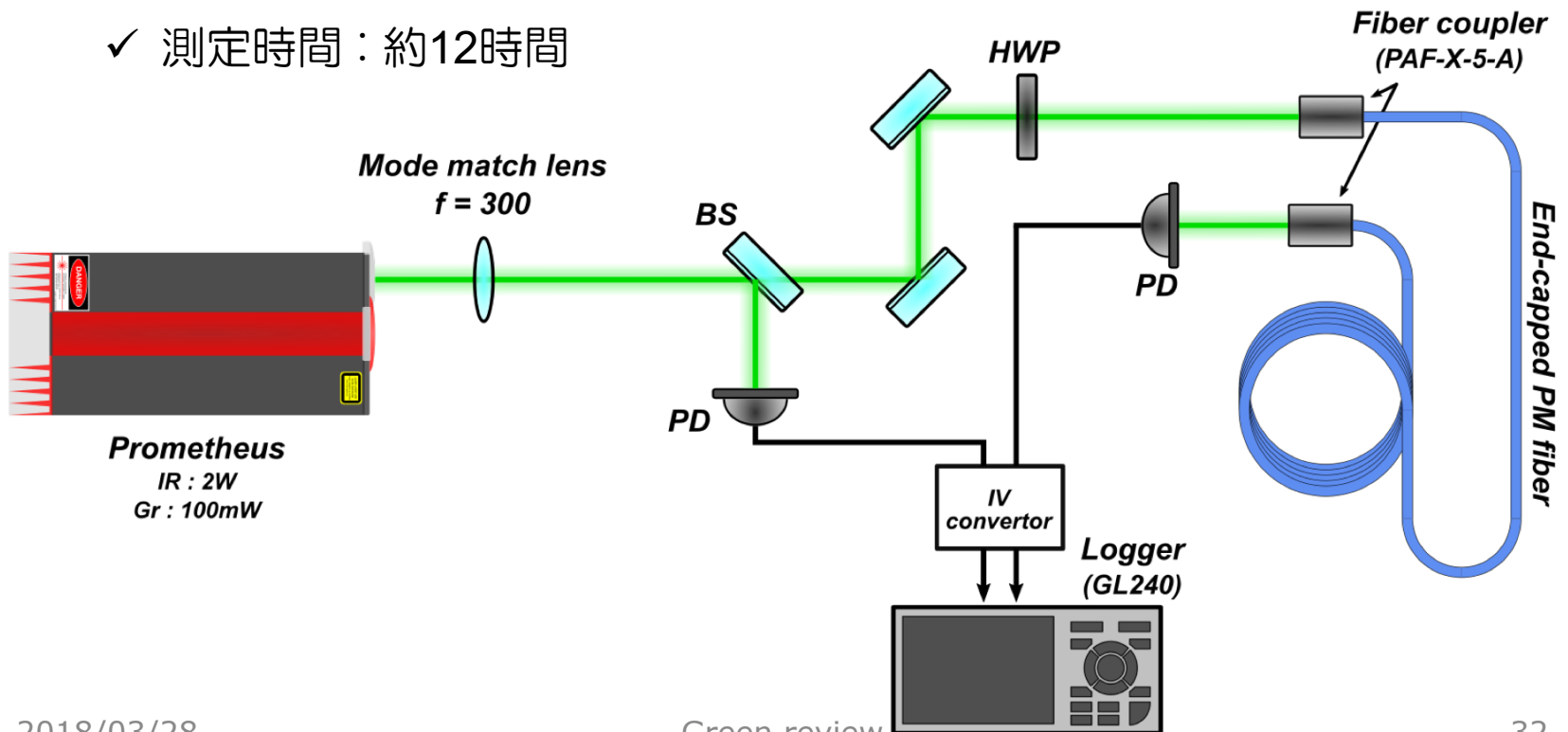
② S偏光(ファイバーキーに対して水平方向)入射 (カップリング率：約70%)



# ファイバー透過光強度の安定度の評価

## 条件

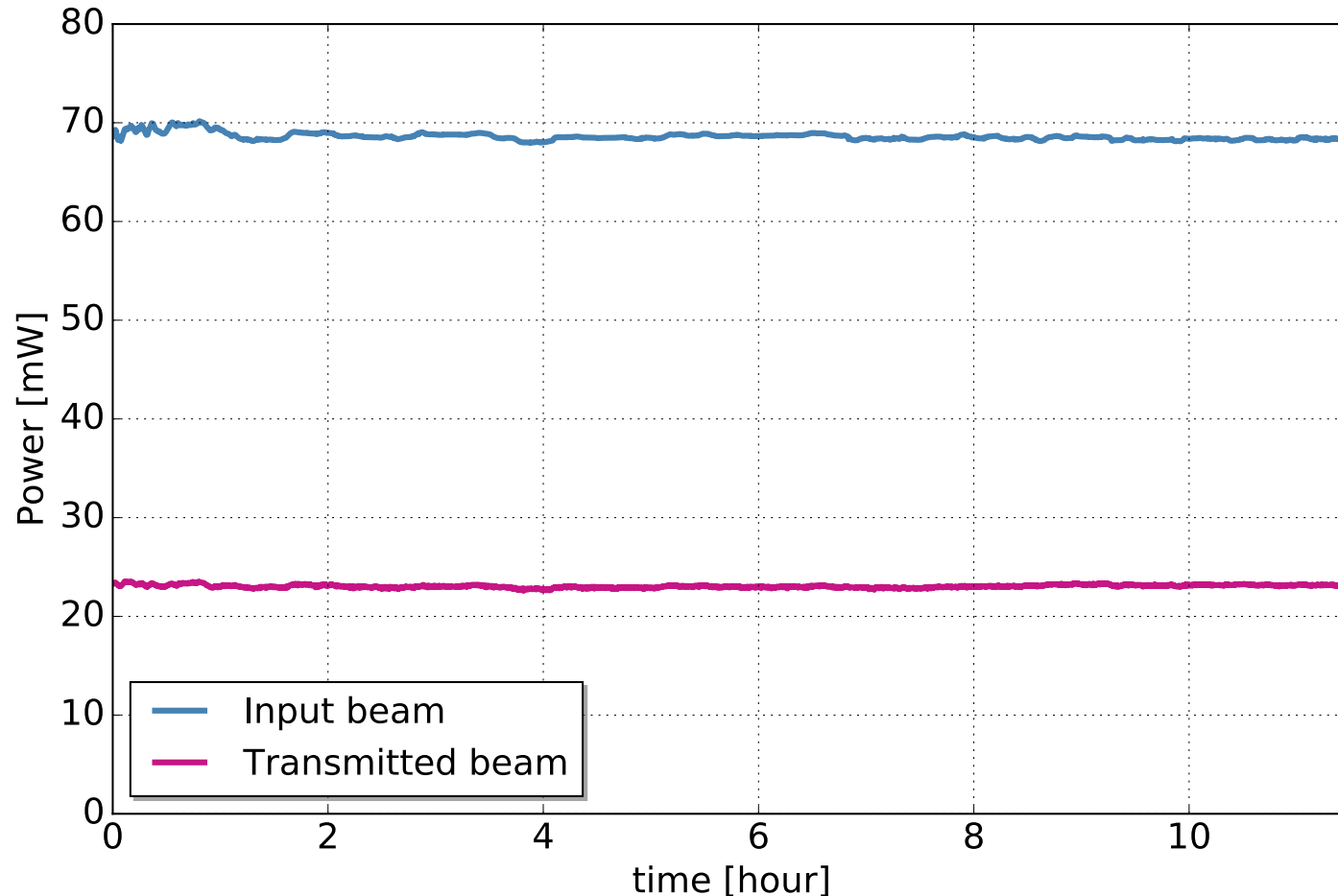
- ✓ ファイバー入射ビームをBSで分け一方をモニター
- ✓ もう一方はファイバーに入射し、ファイバー出力光をモニター
- ✓ ファイバーにはS偏光の光を入射
- ✓ クリーンブースファン：OFF
- ✓ 測定時間：約12時間





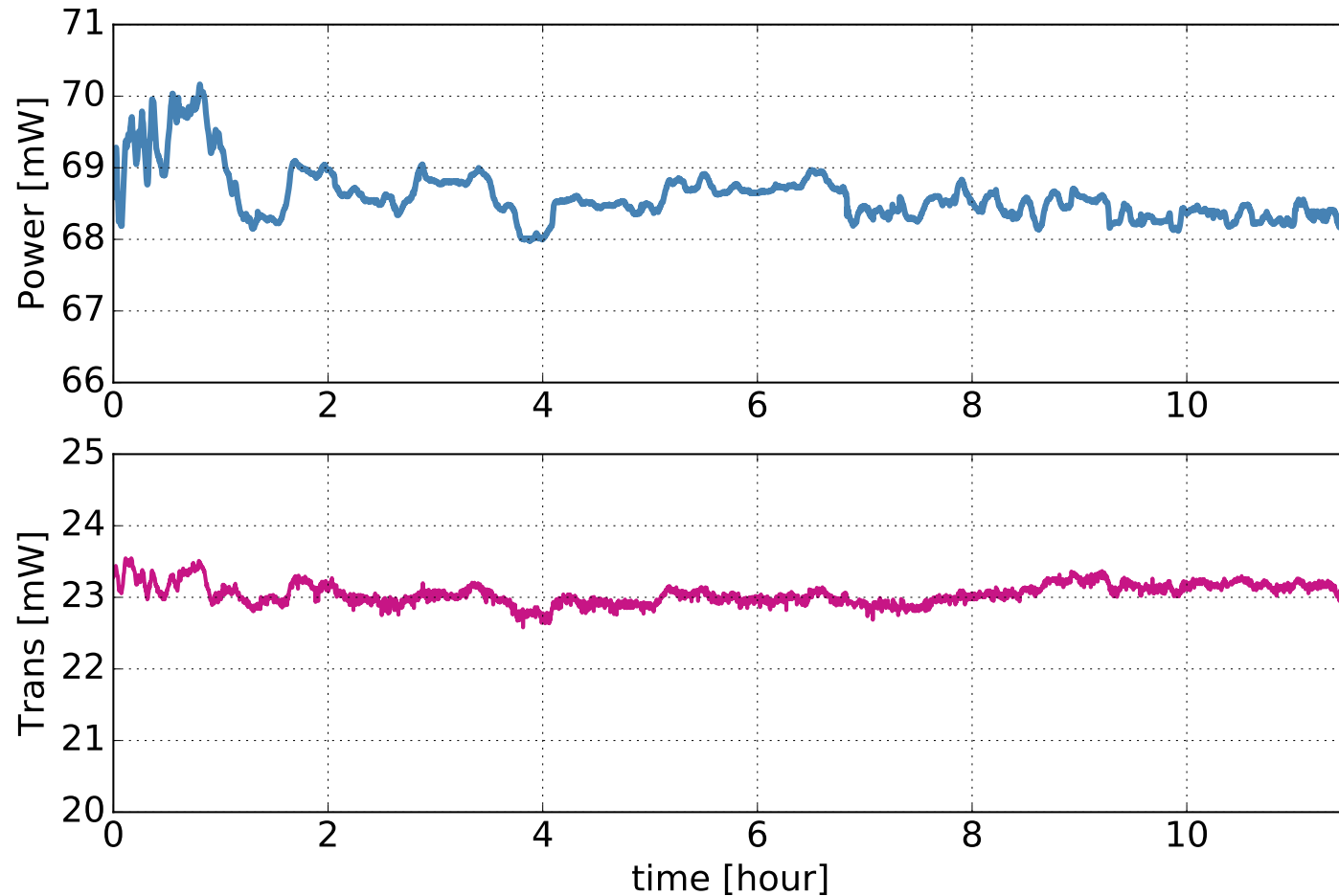
# ファイバー透過光強度の安定度の評価

約30mWのパワーがファイバーに入射  
カップリング率は約70%



# ファイバー透過光強度の安定度の評価

拡大図



# ファイバー出力ビーム

使用したコリメーター

|                                                  |                             |
|--------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Model</b>                                     | <b>PAF-X-5-A (Thorlabs)</b> |
| <b>Output <math>1/e^2</math> waist diameter*</b> | <b>0.75mm</b>               |
| <b>Max waist distance*</b>                       | <b>499mm</b>                |
| <b>Divergence*</b>                               | <b>0.761 urad</b>           |
| <b>Focal length of aspheric lens</b>             | <b>4.6 mm</b>               |



\* 波長450nmでの理論値

## 現状

**Good!**

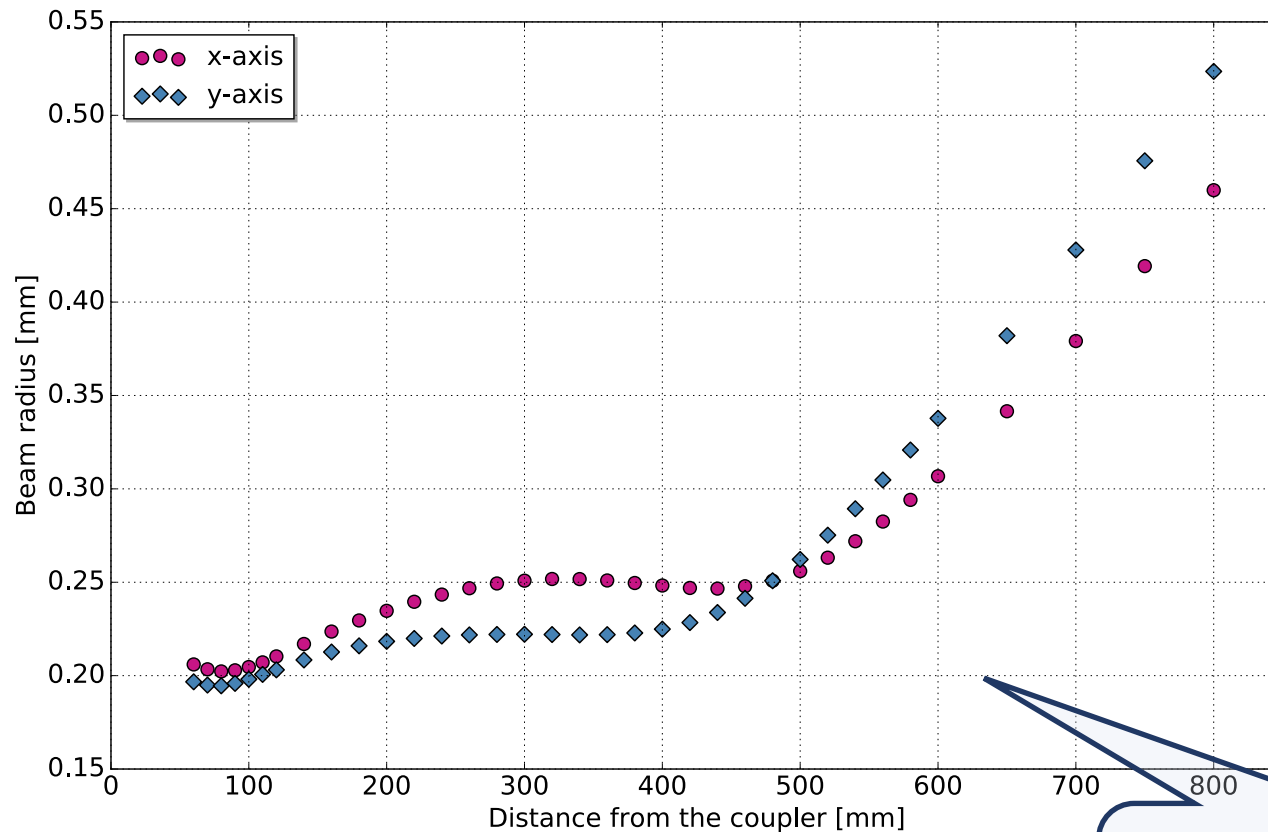
モードマッチレンズとコリメートレンズの位置を微調整することにより、カップリング率は80%まで達した。

**Not good . .**

出力ビームのプロファイルがおかしい  
コリメートできていない

# ファイバー出力ビームのプロファイル

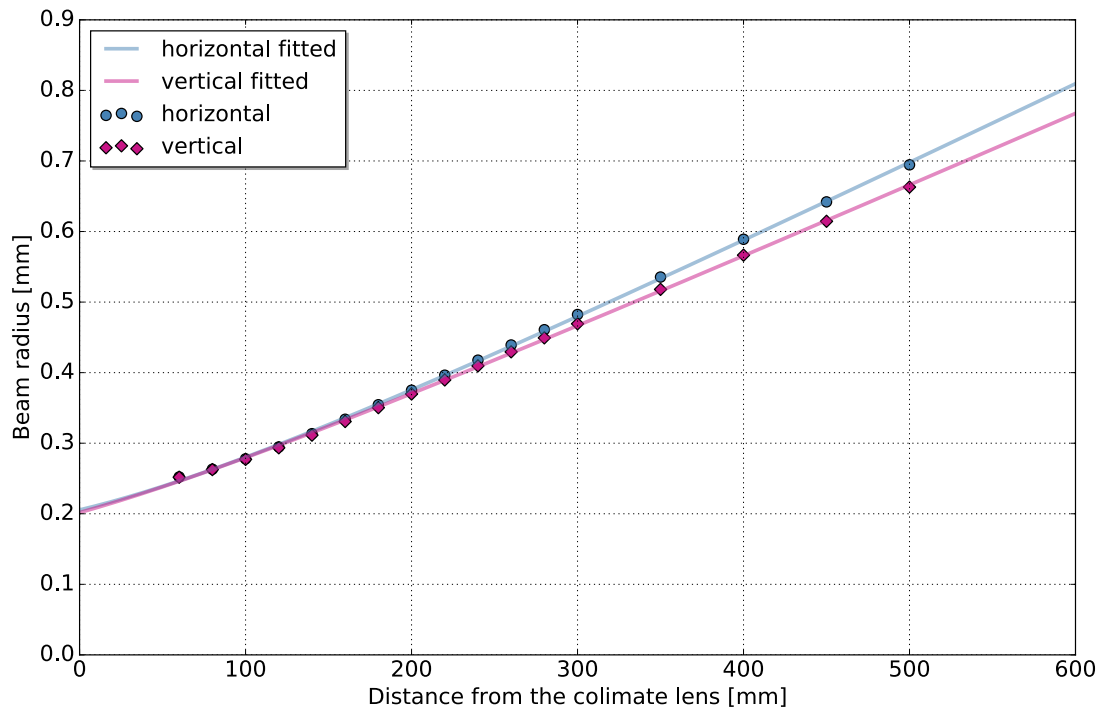
コリメートを試みたが ...



プロファイルが変  
現時点で原因は不明

# ファイバー出力ビームのプロファイル

- ① 入射側のコリメートレンズ位置をカップリング率80%になるよう調整  
→ カプラを入れ替え再び入射側でカップリング率80%になるよう調整

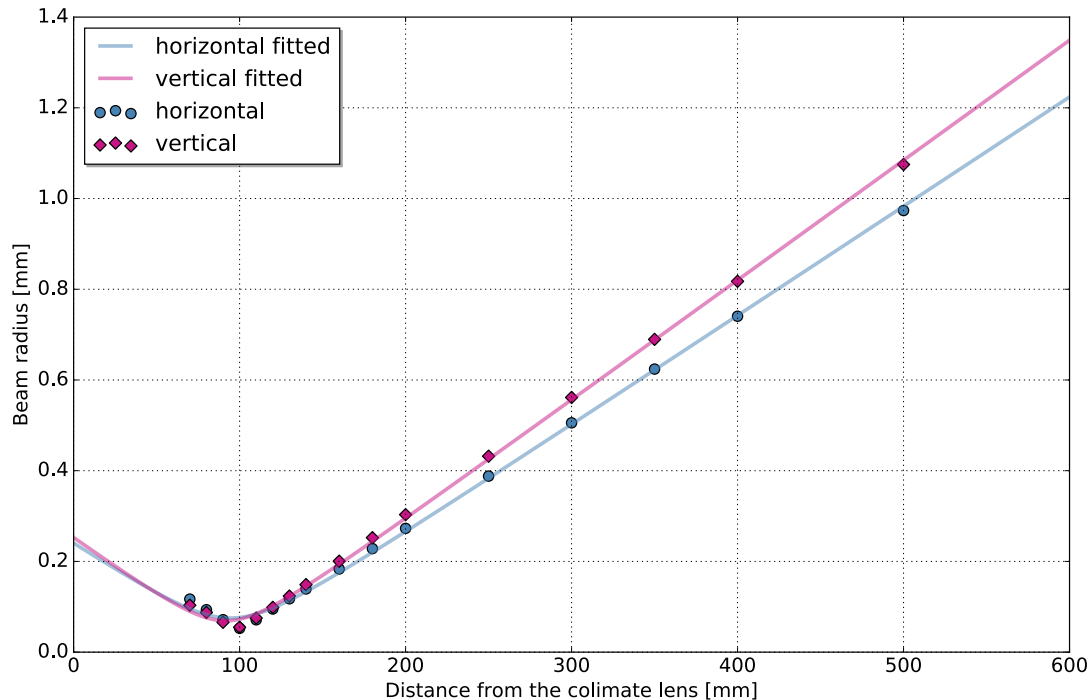


ウエストが  
ファイバー端面よりも  
内側きており、  
ビームが発散している

| <i>Direction</i>  | $M^2$        | $\omega_0$ [mm] | $z$ [mm]        |
|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|
| <i>Horizontal</i> | <b>1.215</b> | <b>0.179161</b> | <b>-87.579</b>  |
| <i>Vertical</i>   | <b>0.955</b> | <b>0.155694</b> | <b>-123.439</b> |

# ファイバー出力ビームのプロファイル

## ② コリメートレンズをファイバーから遠ざけた場合



コリメートはできていないが、今までで一番まっとう

$M^2$ も悪くない

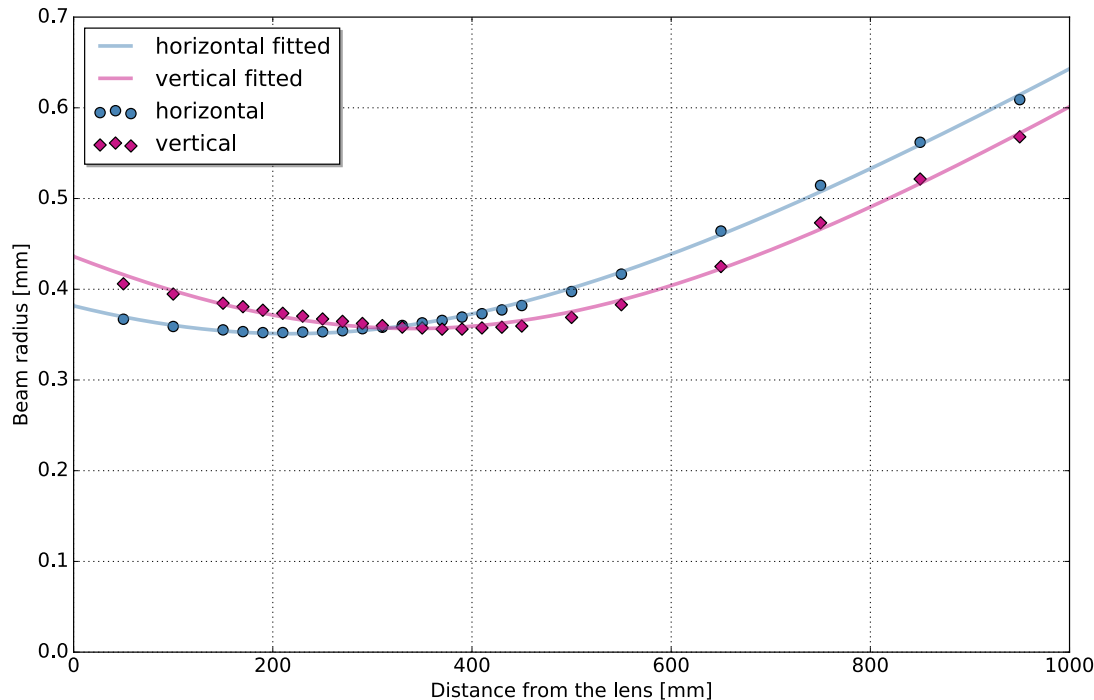


追加のレンズを置き、コリメートを試みた

| Direction  | $M^2$ | $\omega_0$ [mm] | $z$ [mm] |
|------------|-------|-----------------|----------|
| Horizontal | 1.073 | 0.075175        | 94.473   |
| Vertical   | 1.083 | 0.069209        | 91.677   |

# ファイバー出力ビームのプロファイル

③ ②の状態で $f = 150$ のレンズを1枚追加し、ビームをコリメートした場合



最初のような  
変なプロファイルは  
見られないが  
 $M^2$ が大きい...

| Direction  | $M^2$ | $\omega_0$ [mm] | $z$ [mm] |
|------------|-------|-----------------|----------|
| Horizontal | 1.428 | 0.351014        | 217.788  |
| Vertical   | 1.548 | 0.356667        | 341.511  |

# エンドキャップ付きファイバー まとめ

---

## **Good !!**

- ✓ エンドキャップにより端面が保護され、パワーの面で安心
- ✓ 偏波保持性も確認
- ✓ 出力ビームのパワーの安定度も良い

## **Not good ...**

- ✓ 出力ビームのプロファイルがおかしい



# Outline

---

## 1. 偏波保持シングルモードファイバー

- 偏波保持性の評価
- 出力光の強度安定度
- ファイバー出力ビームの波面
- 損傷閾値

## 2. ピグテール付き偏波保持ファイバー

- 出力光の強度安定度
- アダプタによるロスの評価

## 3. エンドキャップ付き偏波保持ファイバー

- 偏波保持性の評価
- 出力光の強度安定度
- 出力ビームのプロファイル

## 4. ファイバー選定

# ファイバー選定

---

## ① 両端エンドキャップ

エンドキャップ付きの長いファイバーのみ

## ② 入射側のみエンドキャップ

出射側には短いファイバーを接続

## ③ エンドキャップなし

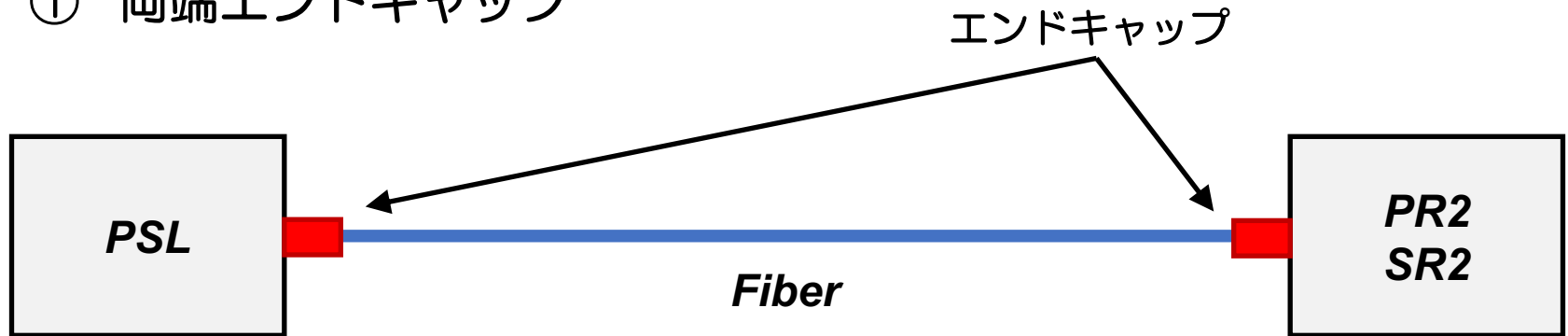
入出射両端に短いファイバーを接続

(道村さんメールより)

# ファイバー選定

---

## ① 両端エンドキャップ



### メリット

- 端面を保護できるのでハイパワーでも安心

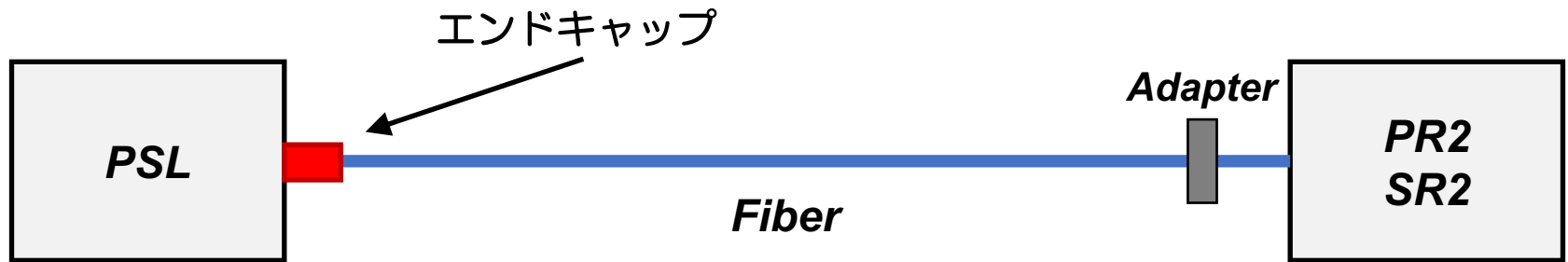
### デメリット

- 出射モードがおかしい測定結果が出ている。
- 両端に保険用の短いファイバを接続することができないので、万が作業中に両端付近を折ってしまったりしたら敷設し直し

# ファイバー敷設プラン

---

## ② 入射側のみエンドキャップ



### メリット

- 出射側に保険用の短いファイバを接続することが可能
- 出射モードも心配ない。

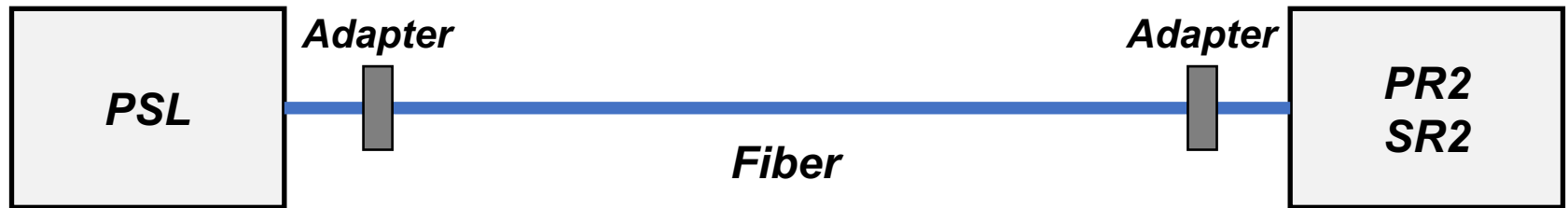
### デメリット

- 出射側に短いファイバをつける際の、コネクタ接続部分での損失やダークニングの可能性がある。

# ファイバー選定

---

## ③ エンドキャップなし



### メリット

- 出射モードも心配ない。
- 両側に保険用の短いファイバを接続することが可能で、コリメータ付近の作業で折ってしまったりしても安心。

### デメリット

- コネクタ接続部分での損失やダークニングの可能性がある。



shaping tomorrow with you

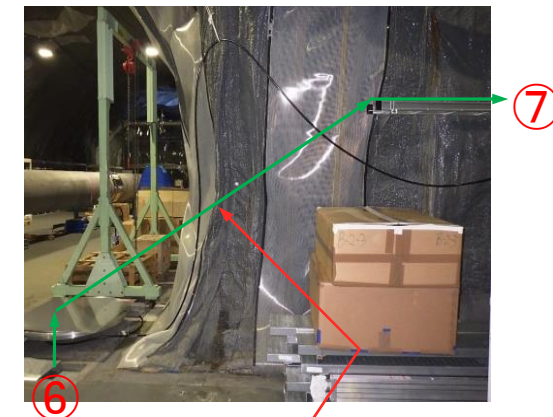
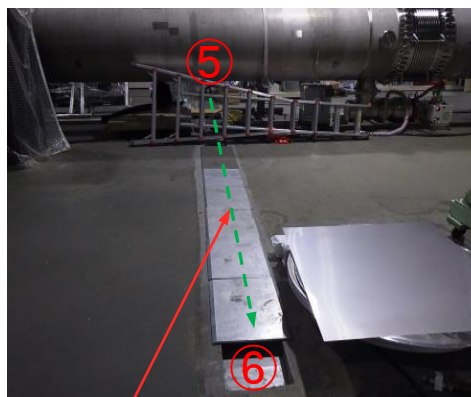
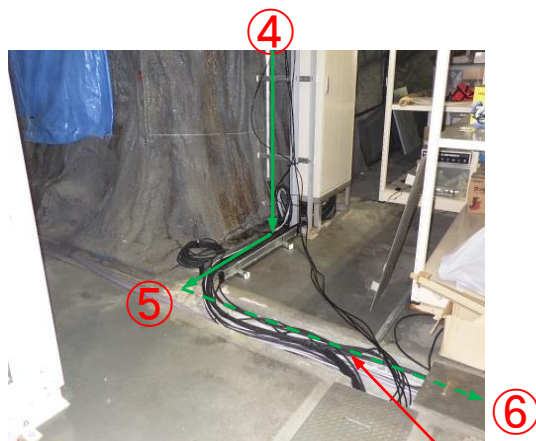
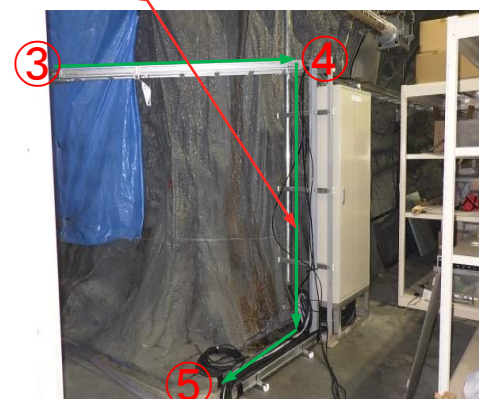
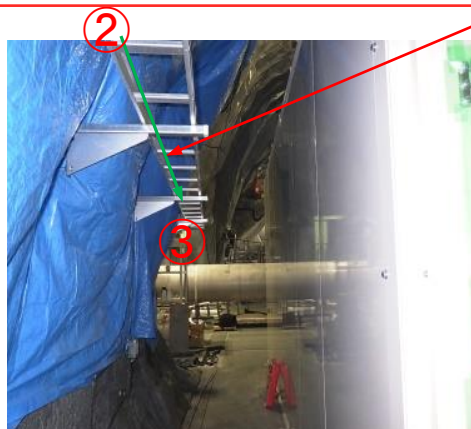
# KAGRAシングルモードファイバー敷設工事 打合せ資料

株式会社富士通エフサス  
2017年 8月18日

既設ラックを延長して  
壁側既設ラックに接続



既設ラック上にステンレス鋼製ケーブル保護材を  
取り付けて光ファイバーを保護する



床ピット内配線は合成樹脂可とう管22φで光ファイバーを保護する

既設ラックを延長して床ピットに接続し  
ステンレス鋼製ケーブル保護材で光ファイバーを保護する

# 光ケーブル配線概要(案)

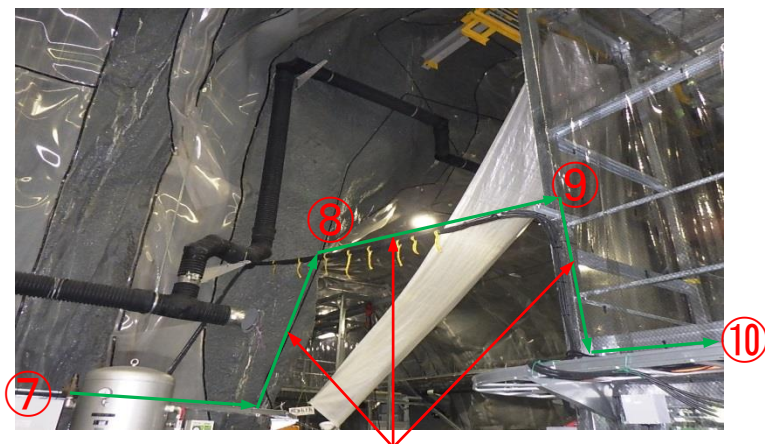
既設ケーブルラックを延長してラック間及び床ピットを接続して光ファイバコードを配線する。

ケーブルラック上の配線は、ステンレス鋼製ケーブル保護材で光ファイバコードを保護する。

ケーブル保護材内の光ファイバコードは緩衝材にて固定する。

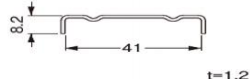
通路横断配線は4mの高さでステンレス鋼製ケーブル保護材を設置して保護する。

クリーンエリア内はPF管22φで光ファイバコードを保護する。PF管端部は不乾性シール材を埋める。

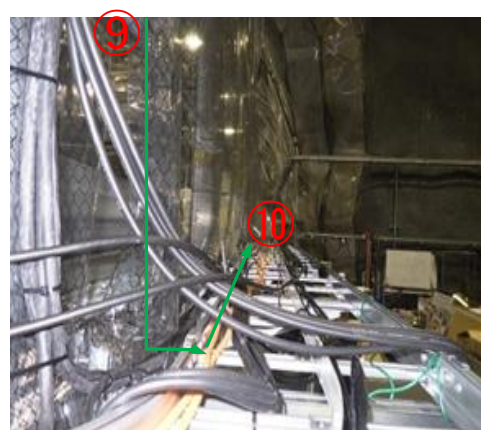
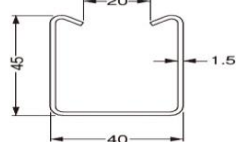


ステンレス鋼製ケーブル保護材

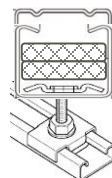
カバー



本体

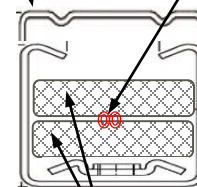


ケーブル保護材は  
ラック桁等に固定する



ステンレス鋼製ケーブル保護材

光ファイバコード×2本



光ファイバコード固定用緩衝材



# KAGRA中央エリア実験室 パンダ型偏波保持光ファイバーコード敷設概要

偏波保持光ファイバーコードx2本（ラック）

偏波保持光ファイバーコードx2本（ラック）

実験室B

ステンレス鋼製ケーブル保護材を取り付けて  
光ファイバーを保護する

PR2チャンバーの手前の柱の天井 際まで保護ケーシングを入れる。  
そこで5mほど輪にしてぶら下げる  
その先はフレキシブルで引き回す  
部屋の内部の配線は富山太が行う

高さ1.5mまで上げて  
通路を通る

クリーンブースのカーテン  
の隙間から内部へ?

クリーンブースのカーテン  
の隙間から内部へ?

偏波保持光ファイバーコードx2本（ラック）

偏波保持光ファイバーコードx2本  
（床ピット内配管）

SR2チャンバーの手前の柱の天井 際まで保護ケーシングを入れる。  
そこで5mほど輪にしてぶら下げる  
その先はフレキシブルで引き回す  
部屋の内部の配線は富山太が行う

防音室と重畳のラチ壁の100穴内側まで保護ケーシングを入れる。  
そこで5mほど輪にしてぶら下げる  
その先はフレキシブルで引き回す  
部屋の内部の配線は富山太が行う

## 敷設内容

既存ケーブルラック、床ピット内及び新設架線にて下記区間の配線を行う

防音室からPR2チャンバーに偏波保持光ファイバーコードx1本配線

防音室からSR2チャンバーに偏波保持光ファイバーコードx1本配線