

# 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



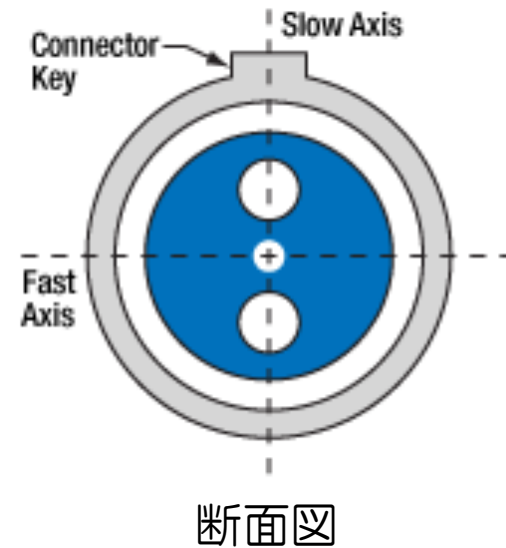
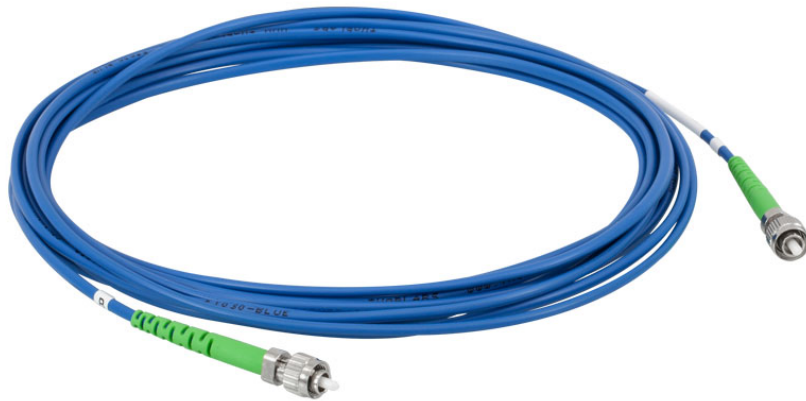
偏波保持ファイバー  
を使うに至った



シングルモードファイバーのスペック

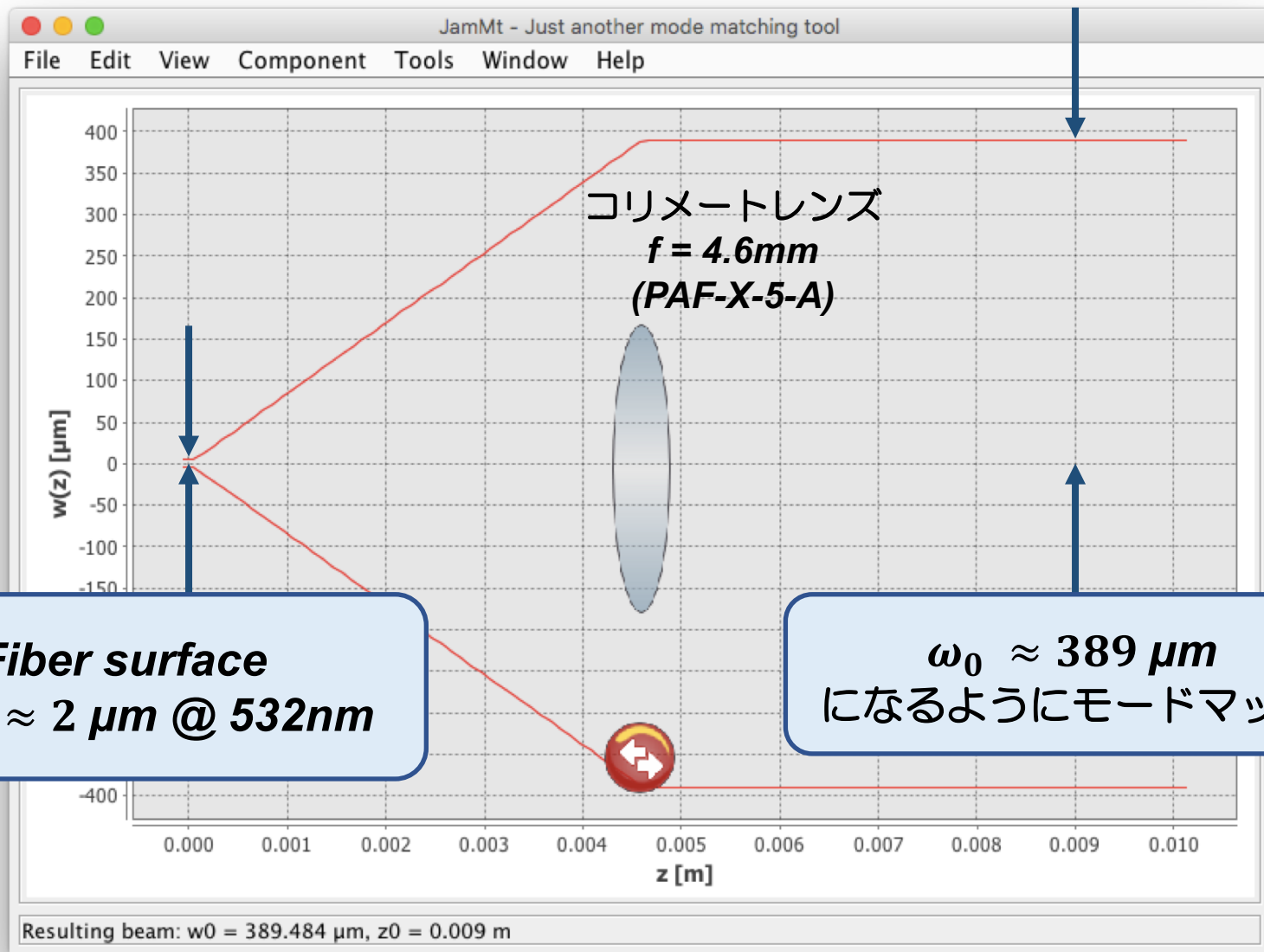
<b>Model</b>	<b>P1-405B-FC-5</b>
<b>Fiber type</b>	<b>SM400</b>
<b>Operating wavelength</b>	<b>405 – 532 nm</b>
<b>MFD</b>	<b>2.5 - 3.4um @ 480nm</b>
<b>NA</b>	<b>0.12 – 0.14</b>
<b>Connector type</b>	<b>FC/PC</b>

# 偏波保持シングルモードファイバーのスペック

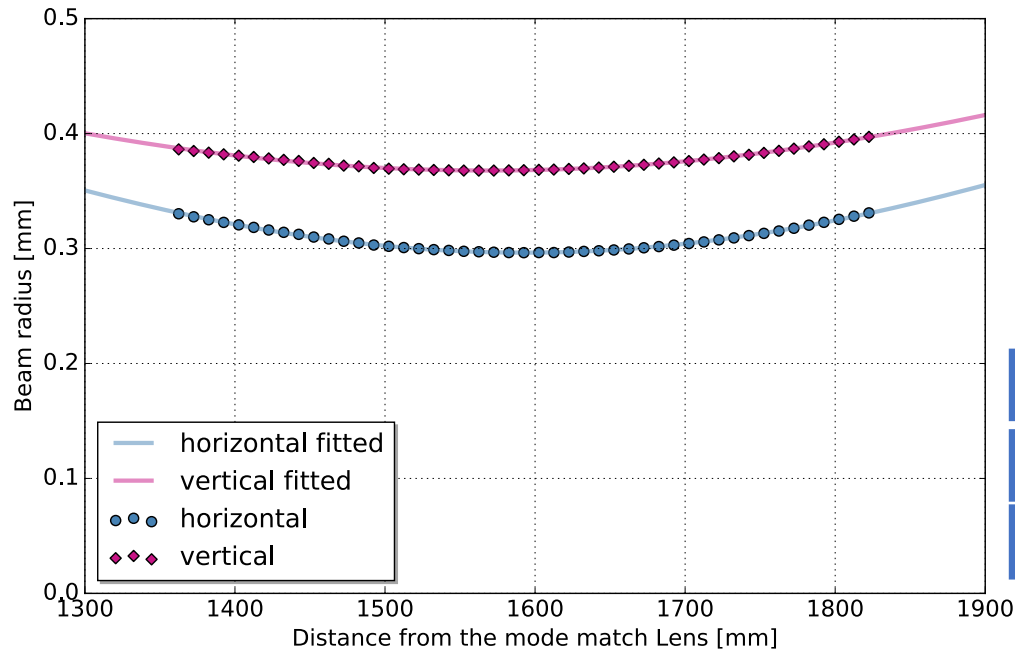
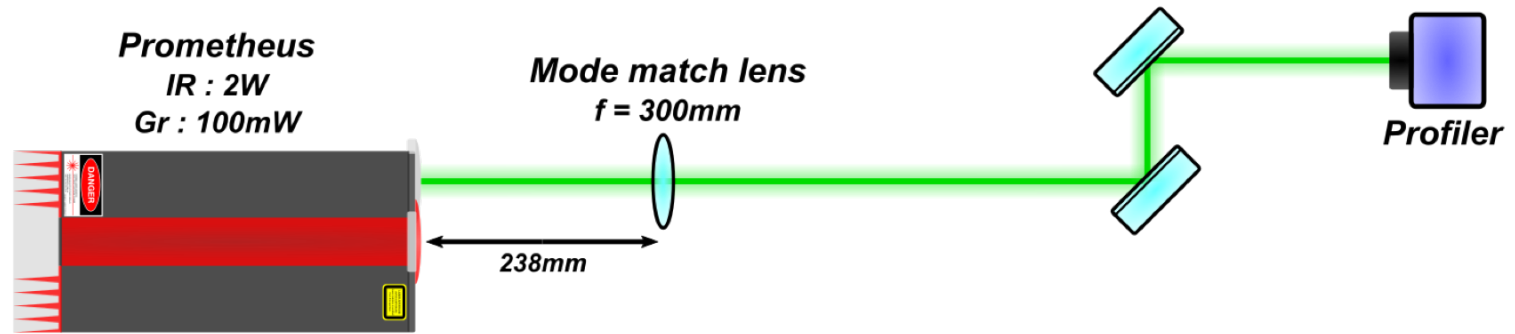


<b>Model</b>	<b><i>P3-488PM-FC-5 (Panda)</i></b>
<b>Fiber type</b>	<b><i>PM460-HP</i></b>
<b>Operating wavelength range</b>	<b><i>460 – 700 nm</i></b>
<b>MFD</b>	<b><i>3.4um @ 488nm</i></b>
<b>NA</b>	<b><i>0.12</i></b>
<b>Connector type</b>	<b><i>FC/APC</i></b>

# 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



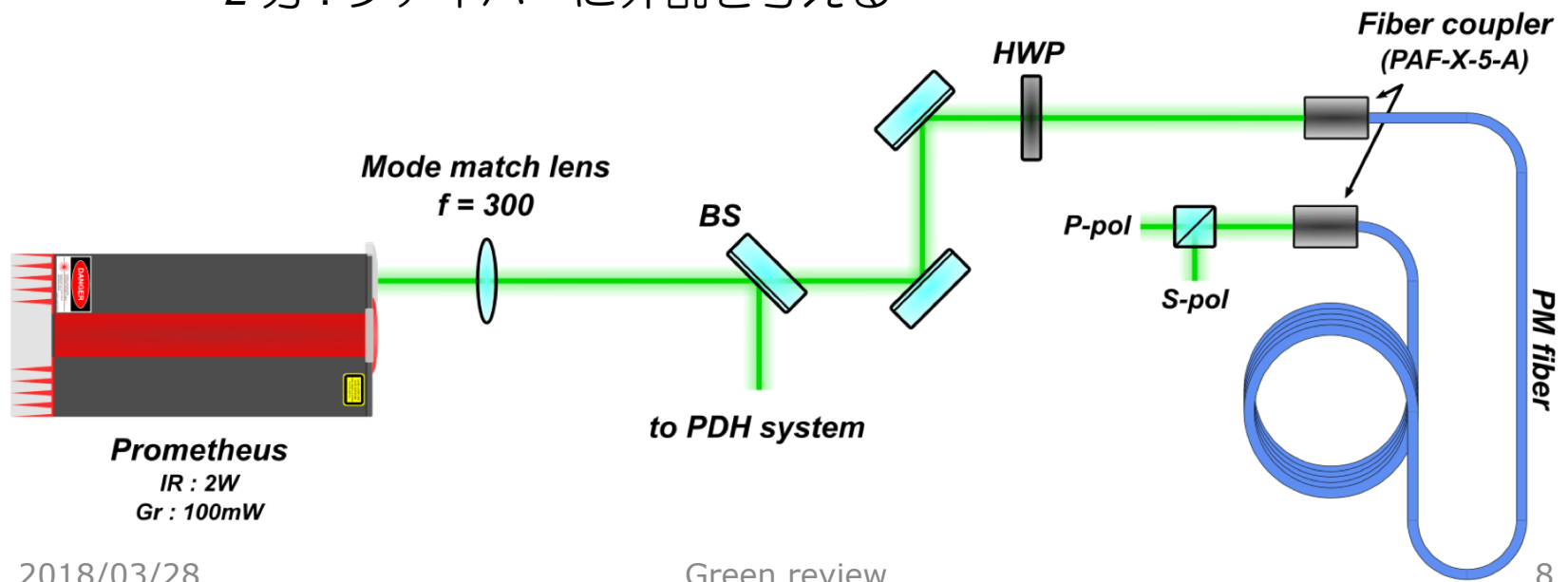
ファイバーカップリング率  
60% まで達成

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

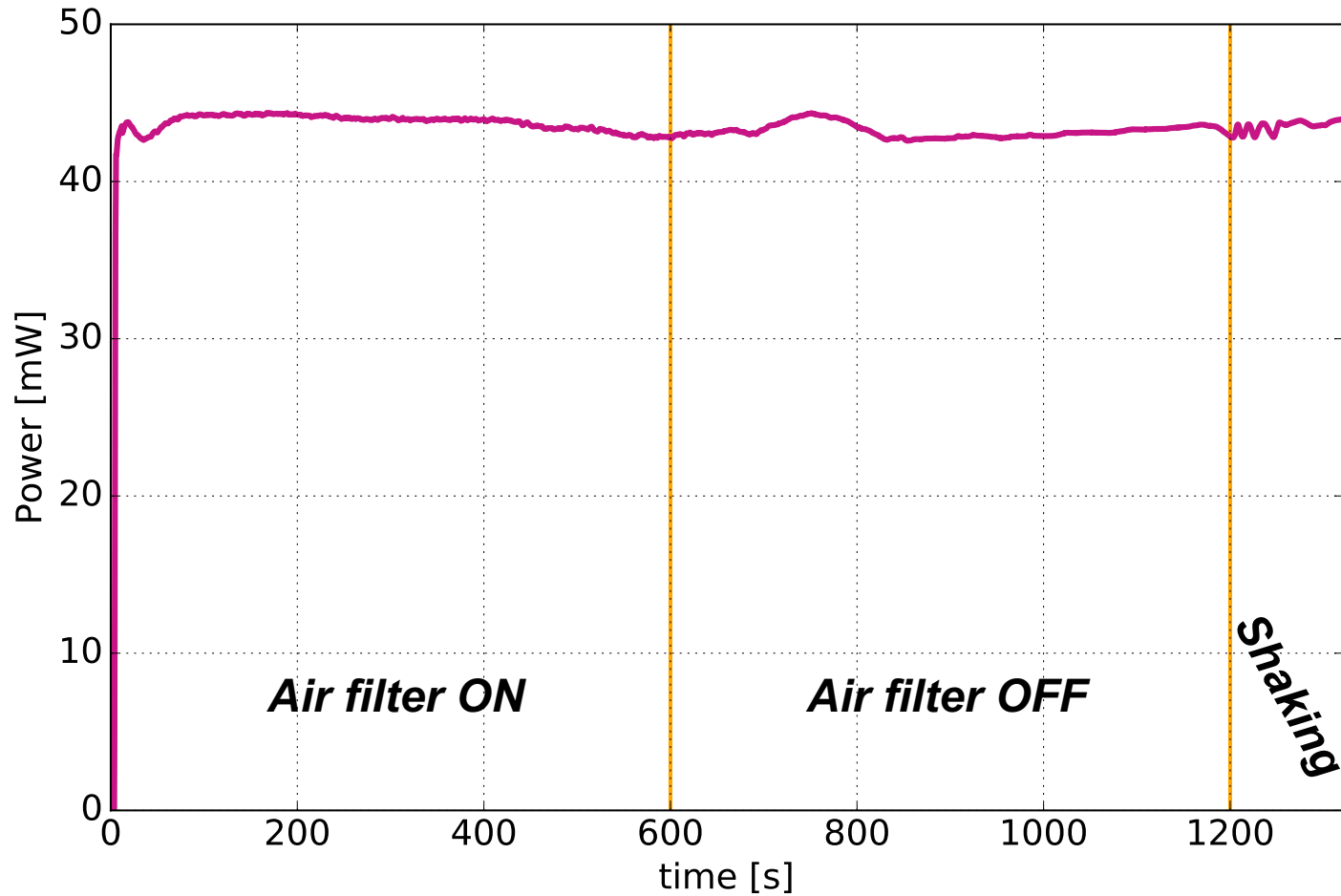
- ✓ カップリング率は約60%
- ✓ 入射側のHWPでファイバーに入射する光の偏光を調整
- ✓ 測定には **COHERENT Power Max PS19Q** を使用
- ✓ 測定方法
  - 10分 : fan on
  - 10分 : fan off
  - 2分 : ファイバーに外乱を与える





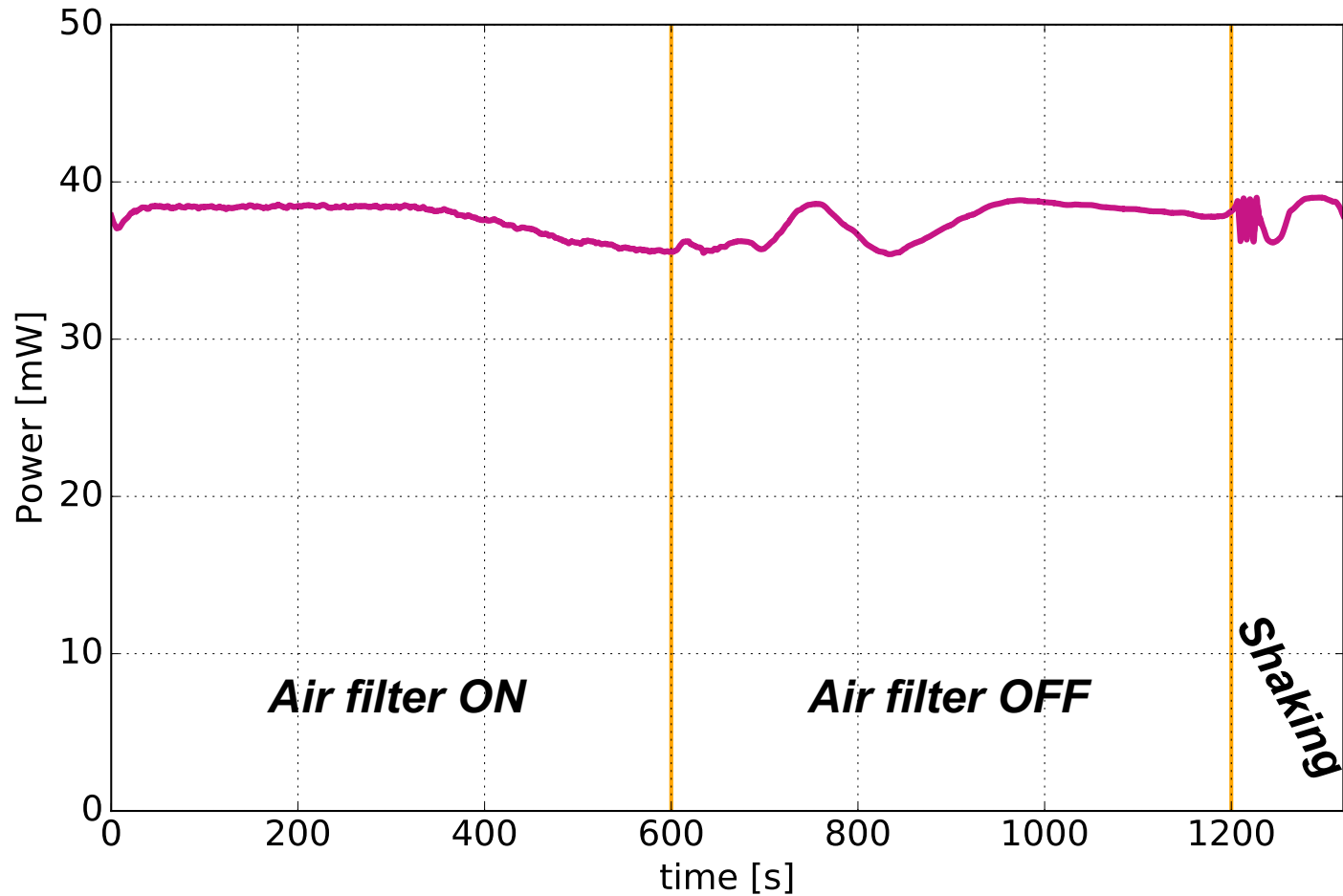
# 偏波保持安定度の評価

## ① P偏光(ファイバーキーに対して垂直方向)入射



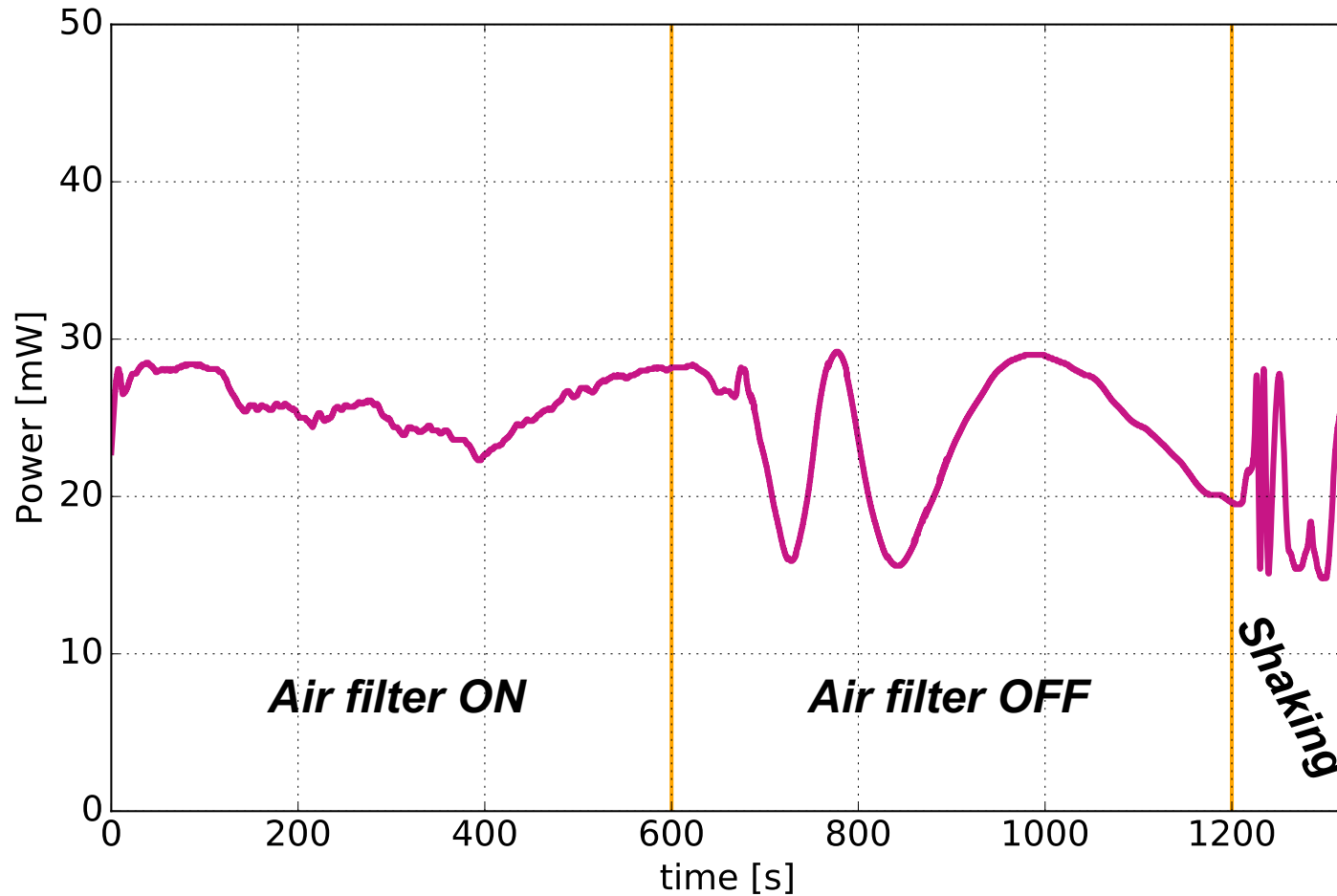
# 偏波保持安定度の評価

## 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

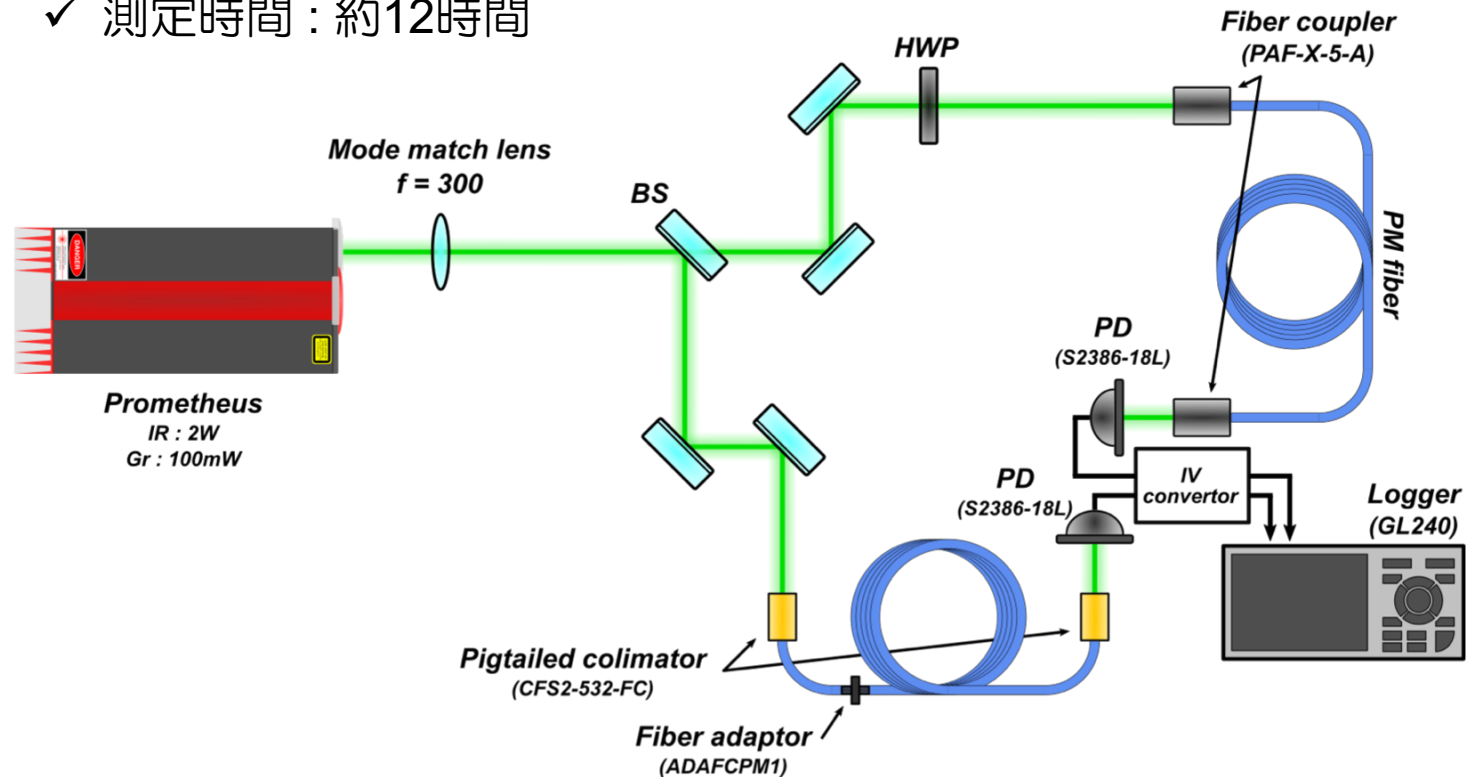
## ③ 斜め偏光入射



# ファイバー透過光強度の安定度の評価

## 条件

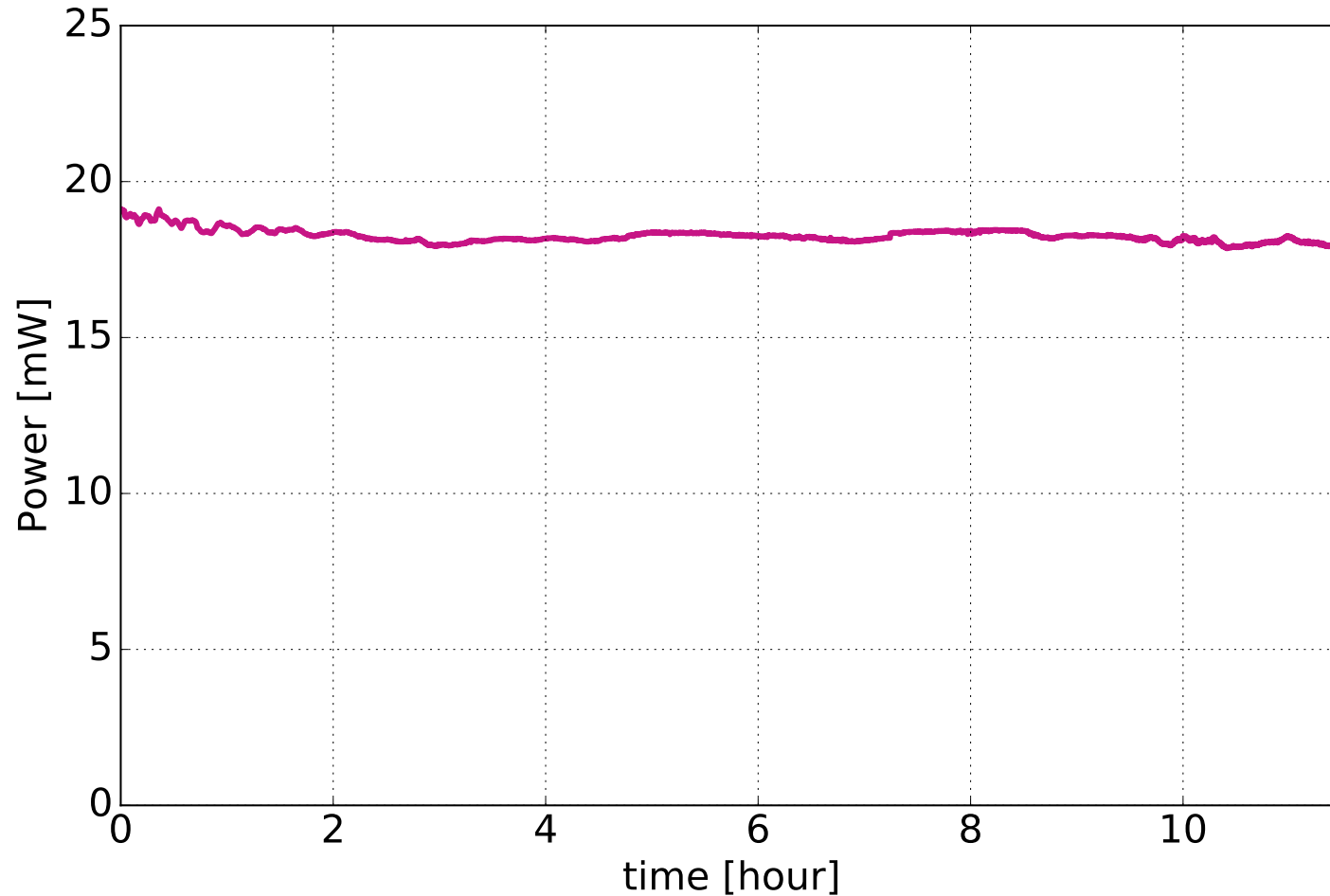
- ✓ ファイバー出力光をデータロガーを用いてモニター
- ✓ ファイバーにはP偏光の光を入射
- ✓ クリーンブースファン：OFF
- ✓ 測定時間：約12時間



# ファイバー透過光強度の安定度の評価

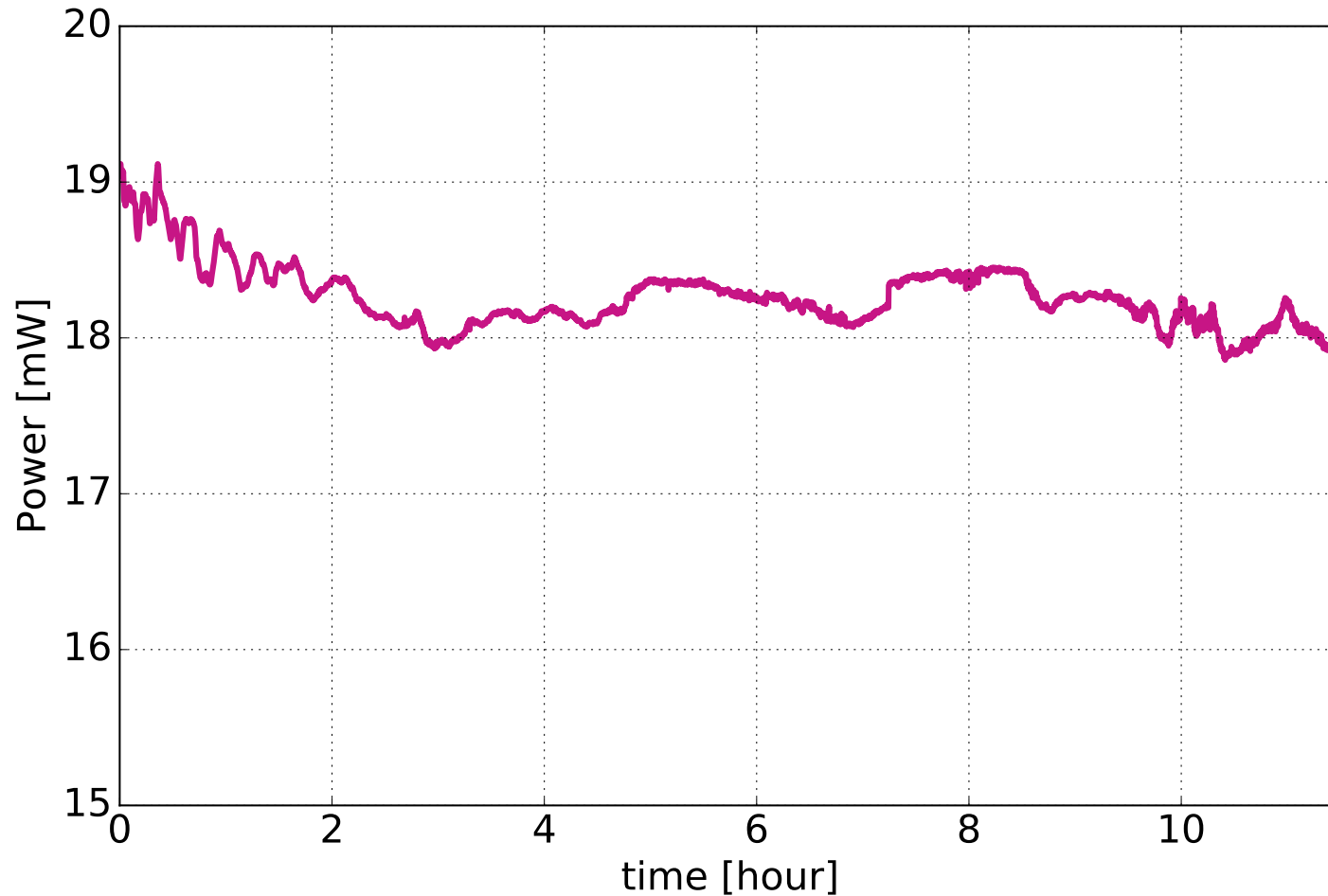
約30mW入射

カップリング率：約60%

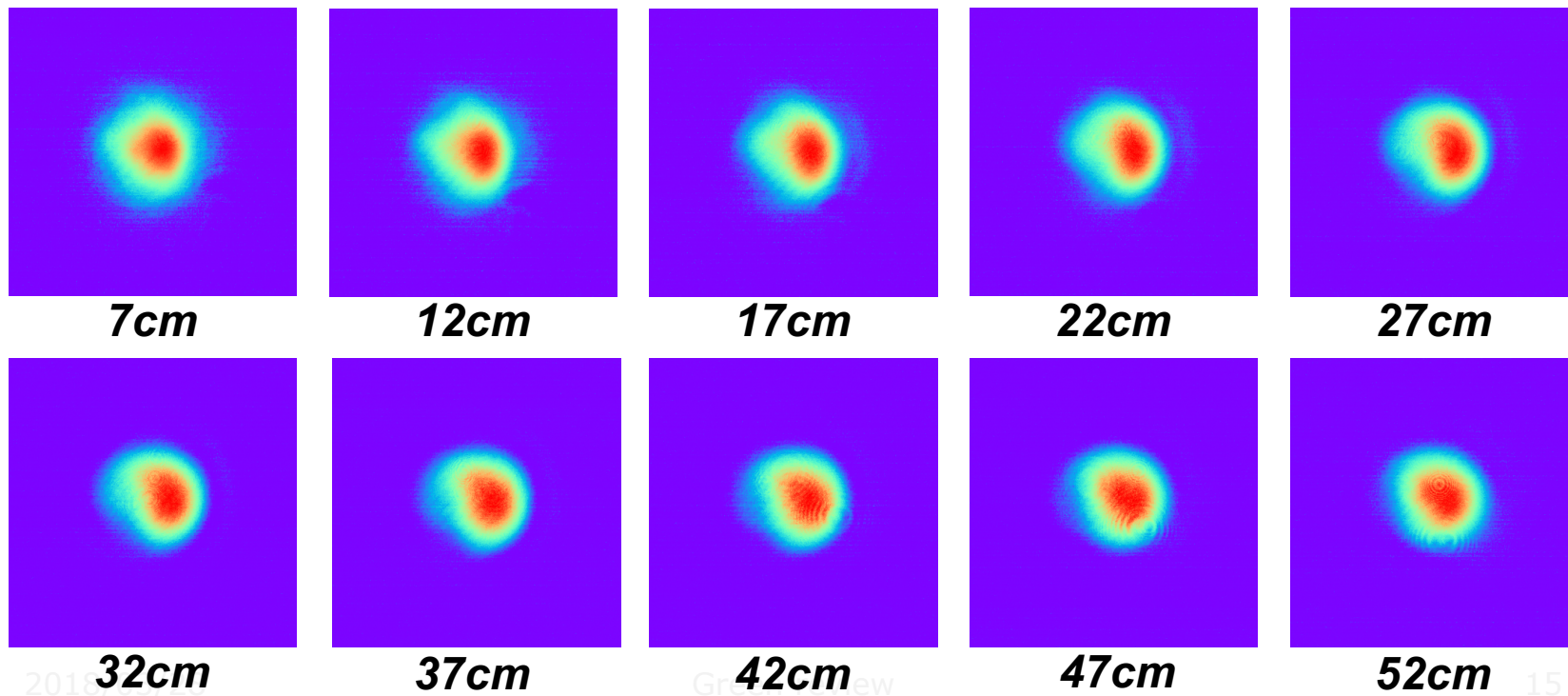
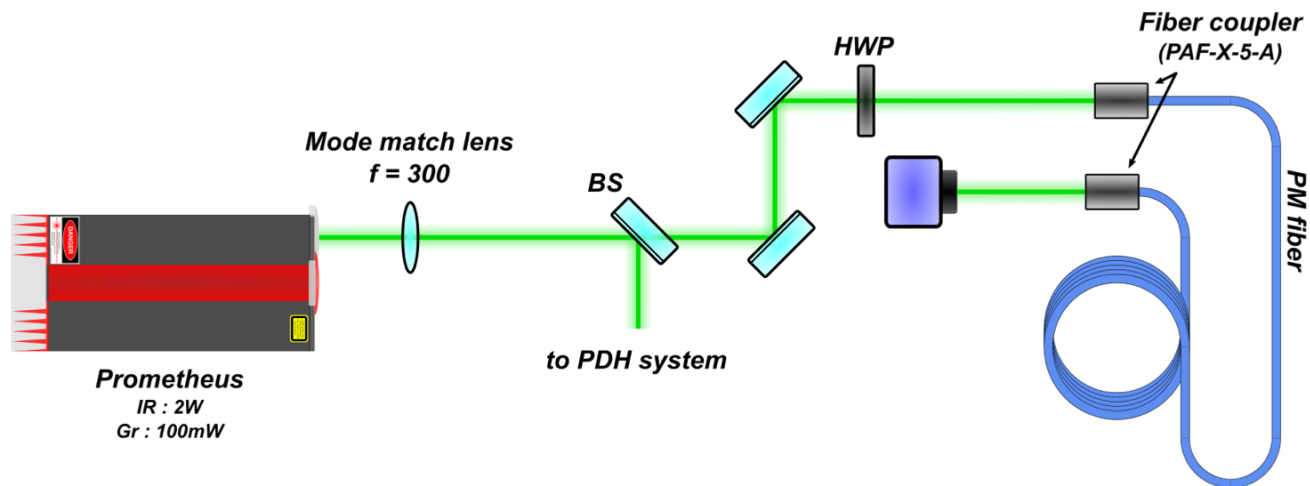


# ファイバー透過光強度の安定度の評価

拡大図



# ファイバー出力ビームの波面



# 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

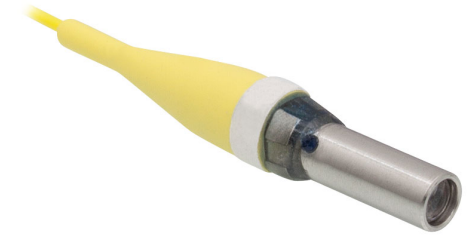
- 偏波保持性の評価
- 出力光の強度安定度
- 出力ビームのプロファイル

## 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>1/e<sup>2</sup> output beam diameter</b>	<b>0.39mm</b>
<b>Beam divergence</b>	<b>1.75 mrad</b>

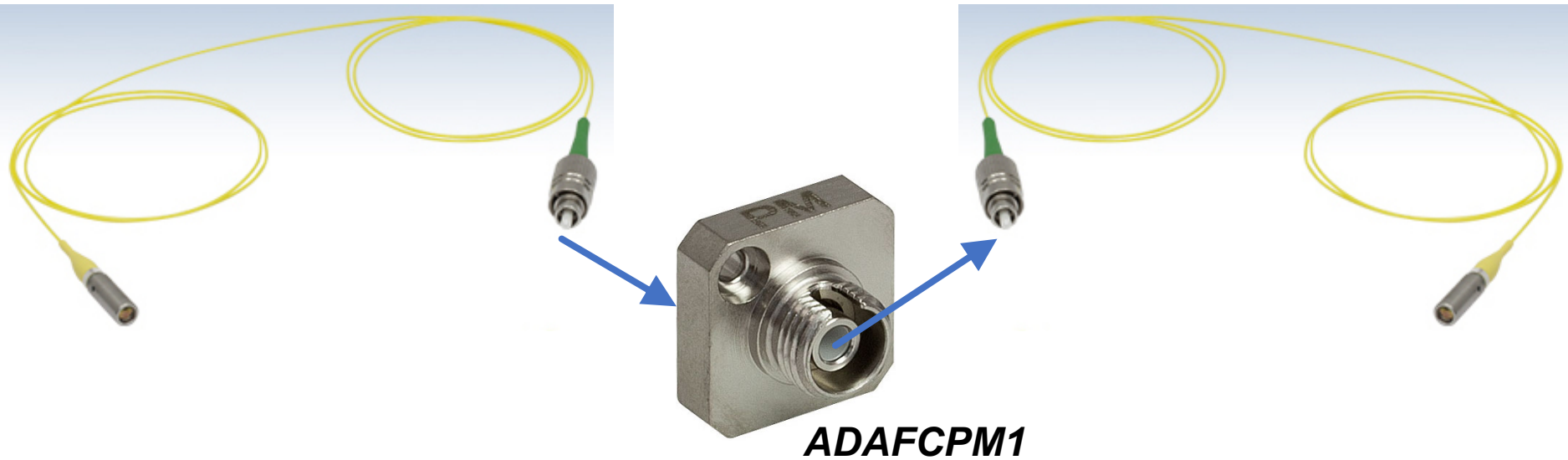


## ファイバー

<b>Fiber type</b>	<b>PM460-HP</b>
<b>MFD</b>	<b>3.3+/-0.5 um @ 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

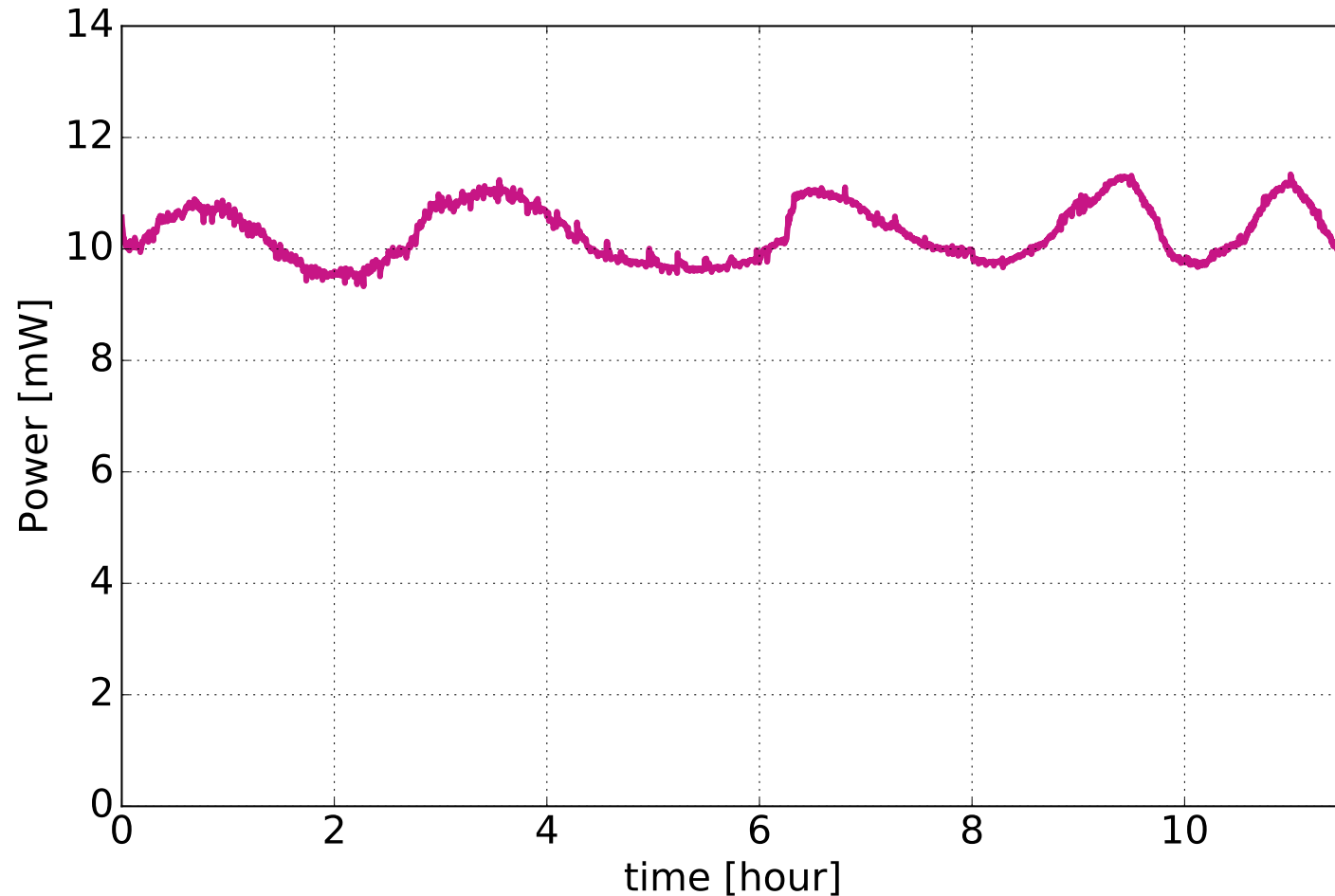


アダプタ部分で**50%以上のロスが生じた**  
しかも出力ビームのパワー揺らぎが大きい...

# ピグテール付きファイバーの透過光強度安定度

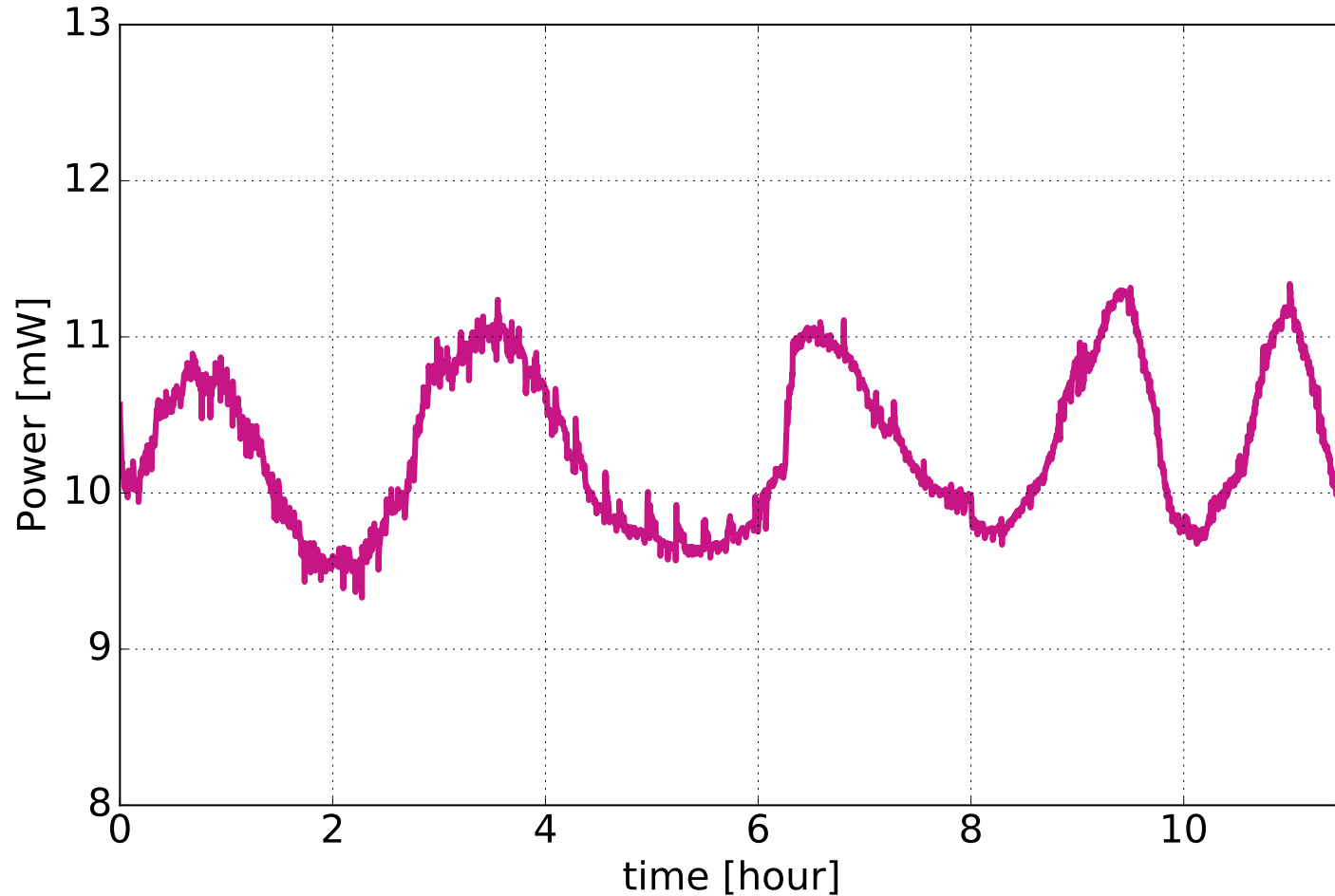
約50mW入射

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](#)

- ✓ 使用したはアダプタ以下の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 um @ 405nm</b> <b>4.6+/-0.5 um @ 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

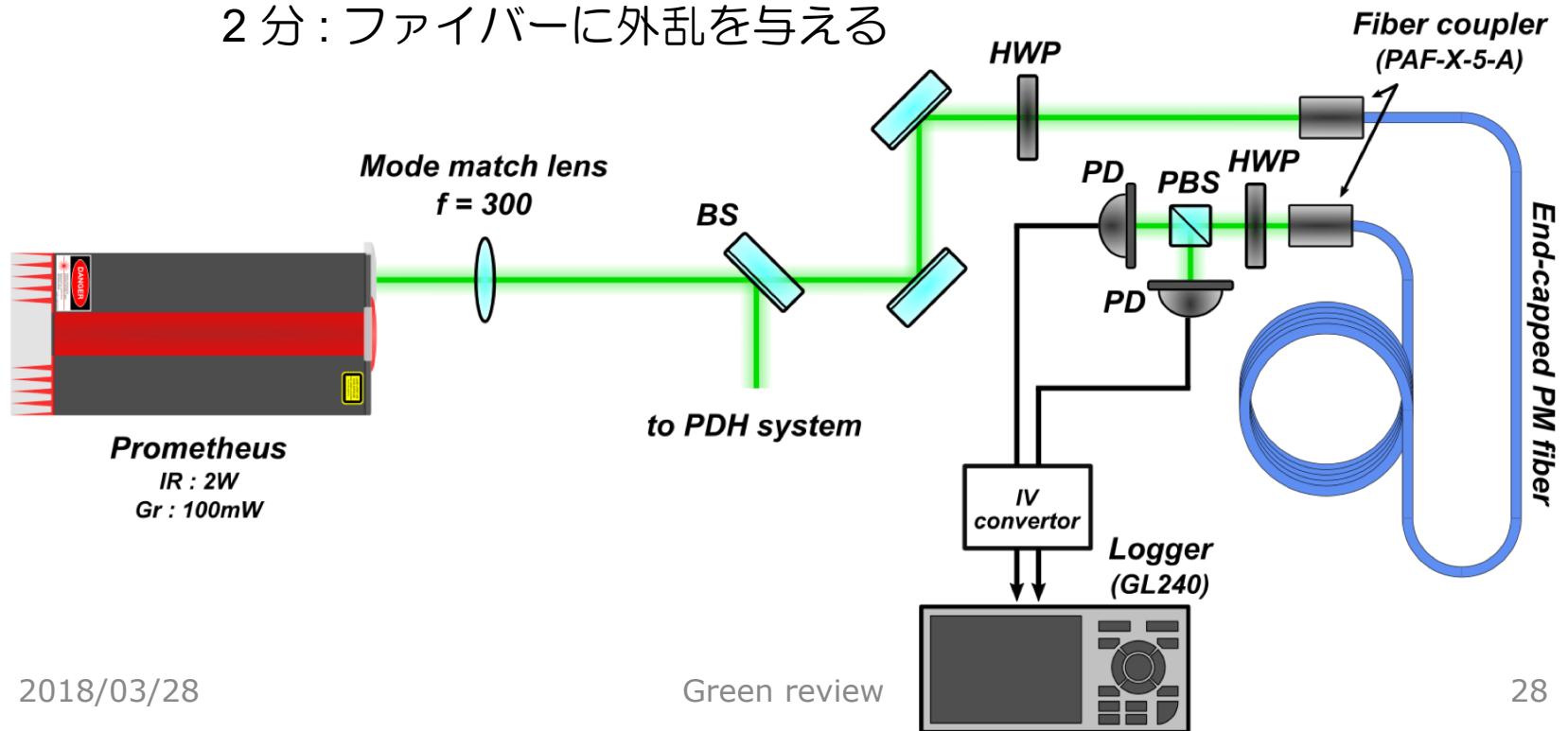
( 1.4Wくらいでも大丈夫 )

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

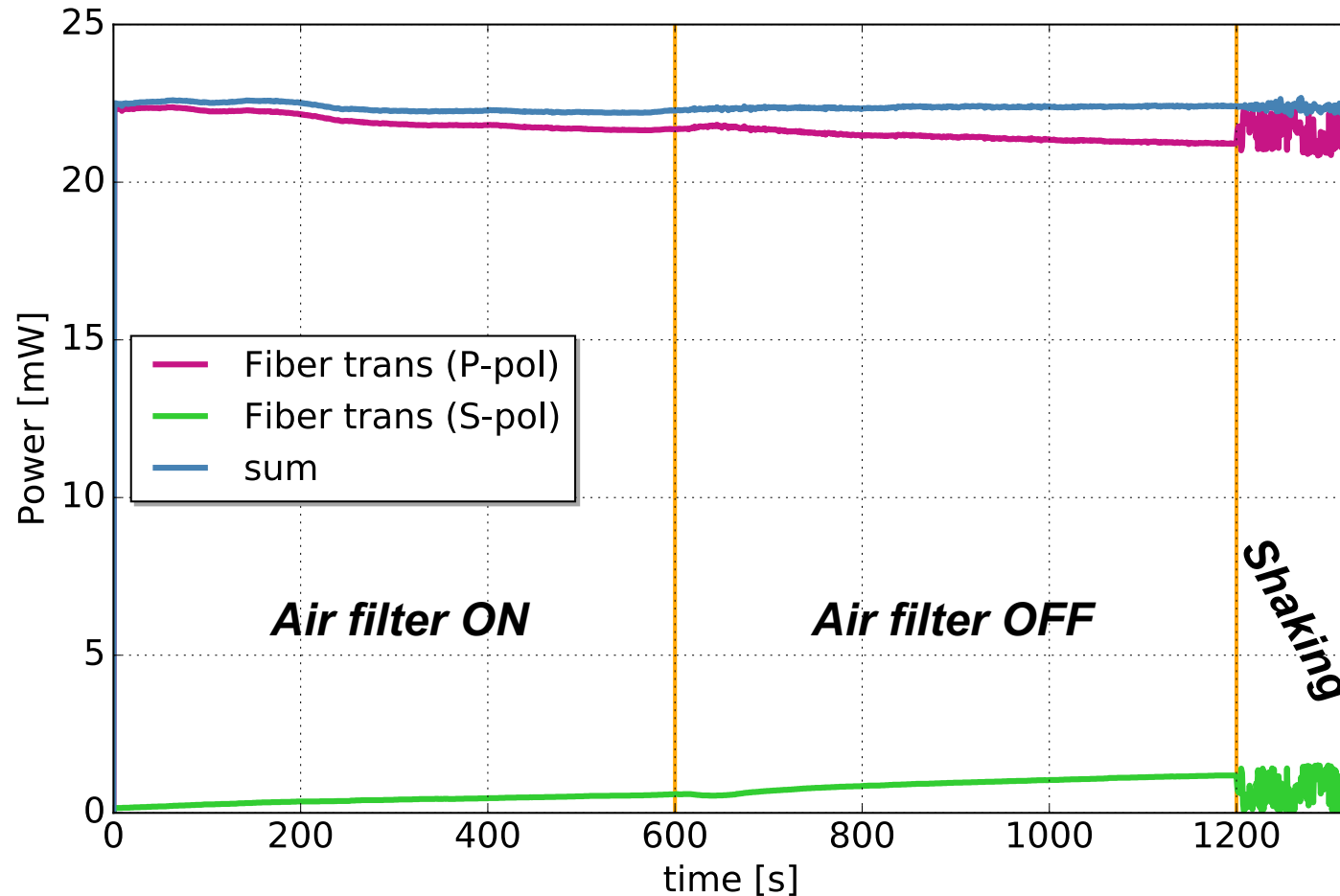
## 条件

- ✓ 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



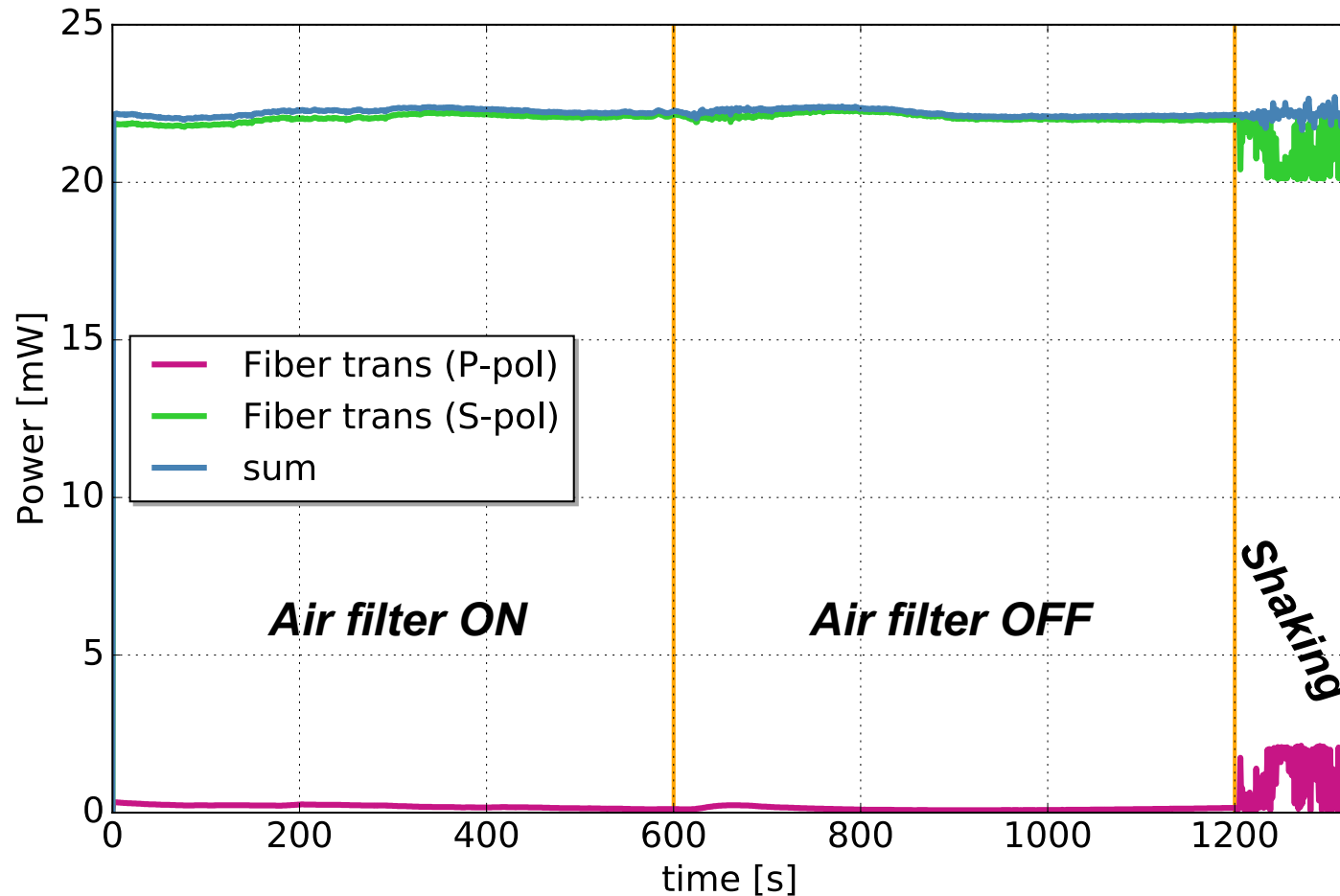
# 偏波保持安定度の評価

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

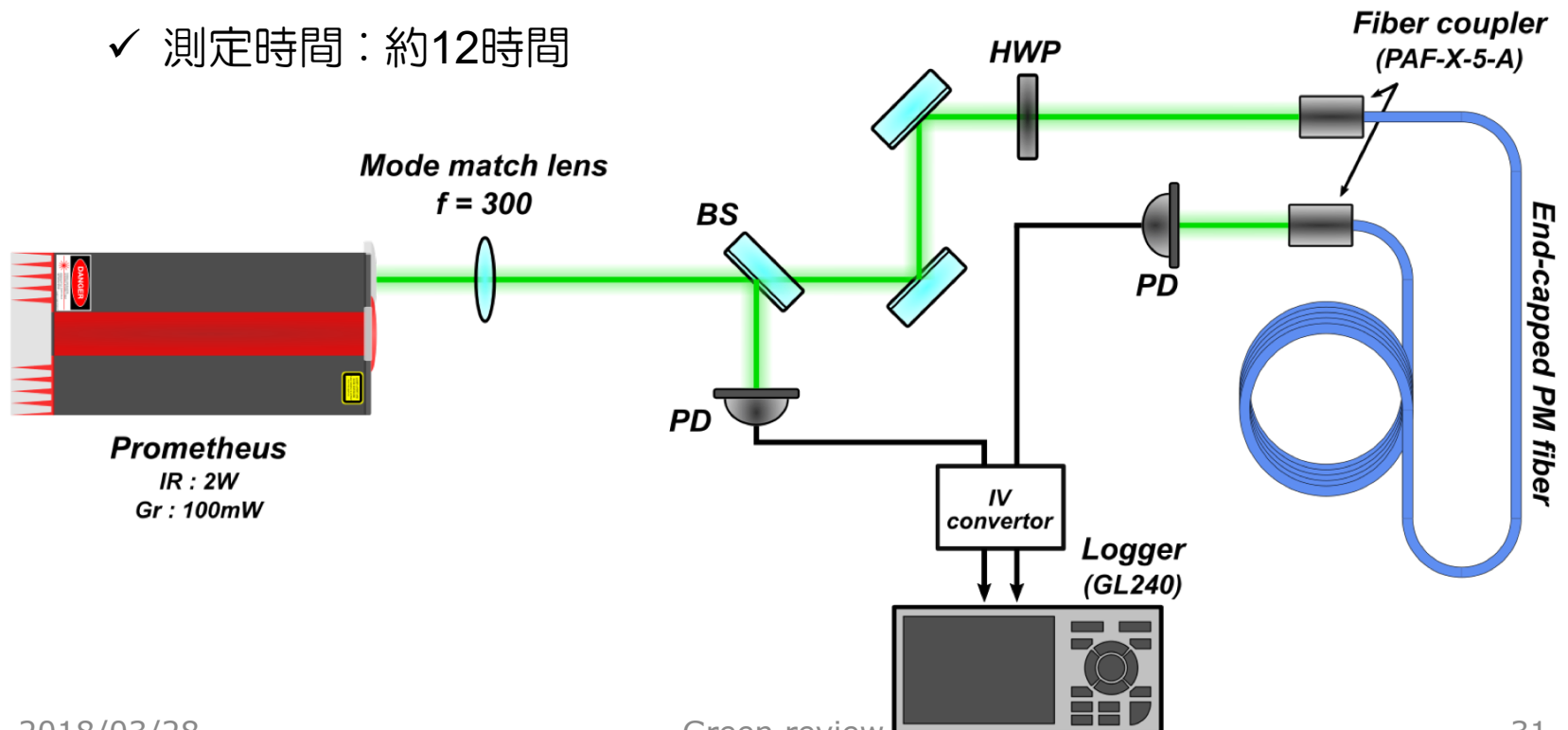
② S偏光(ファイバーキーに対して水平方向)入射 (カップリング率：約70%)



# ファイバー透過光強度の安定度の評価

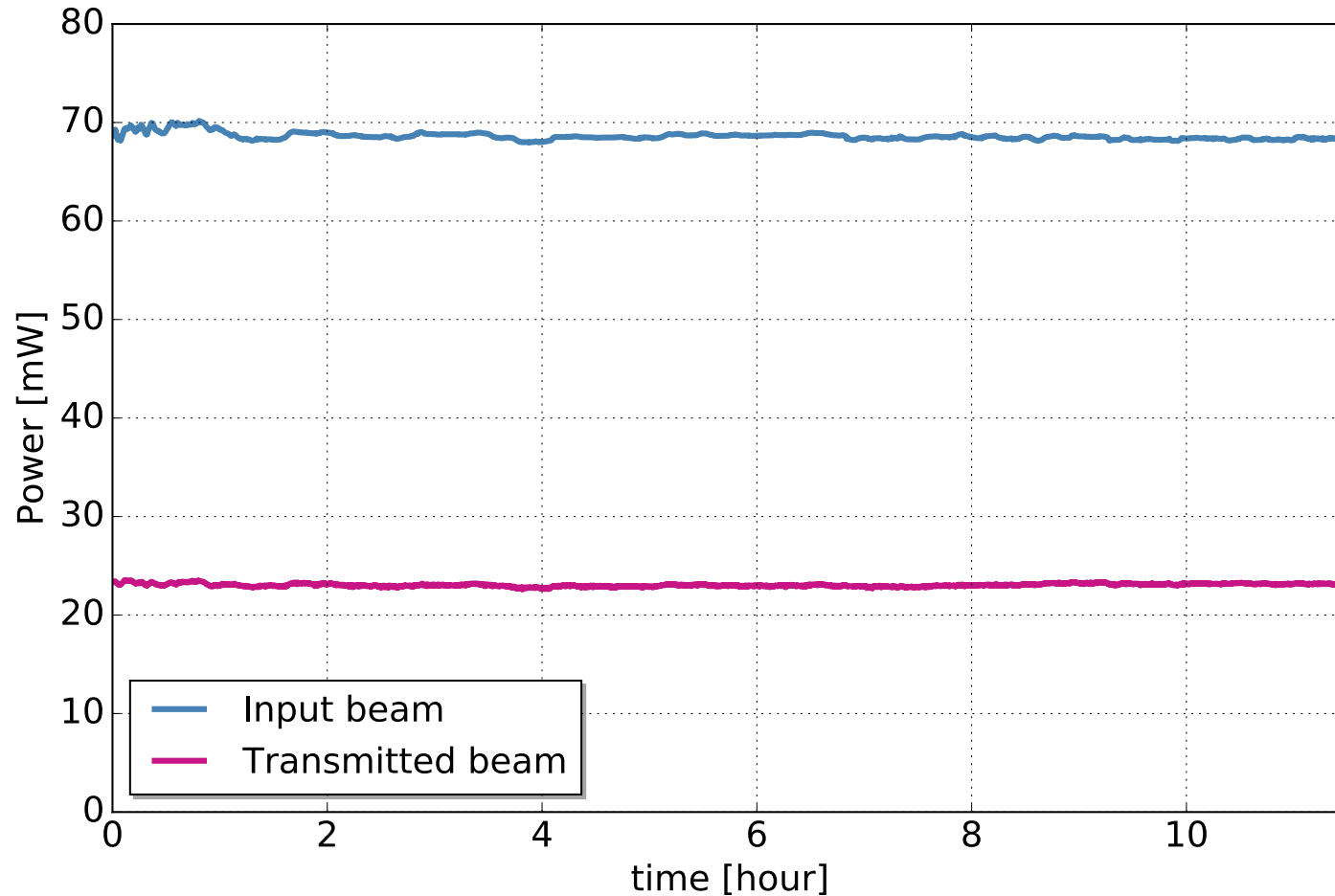
## 条件

- ✓ 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

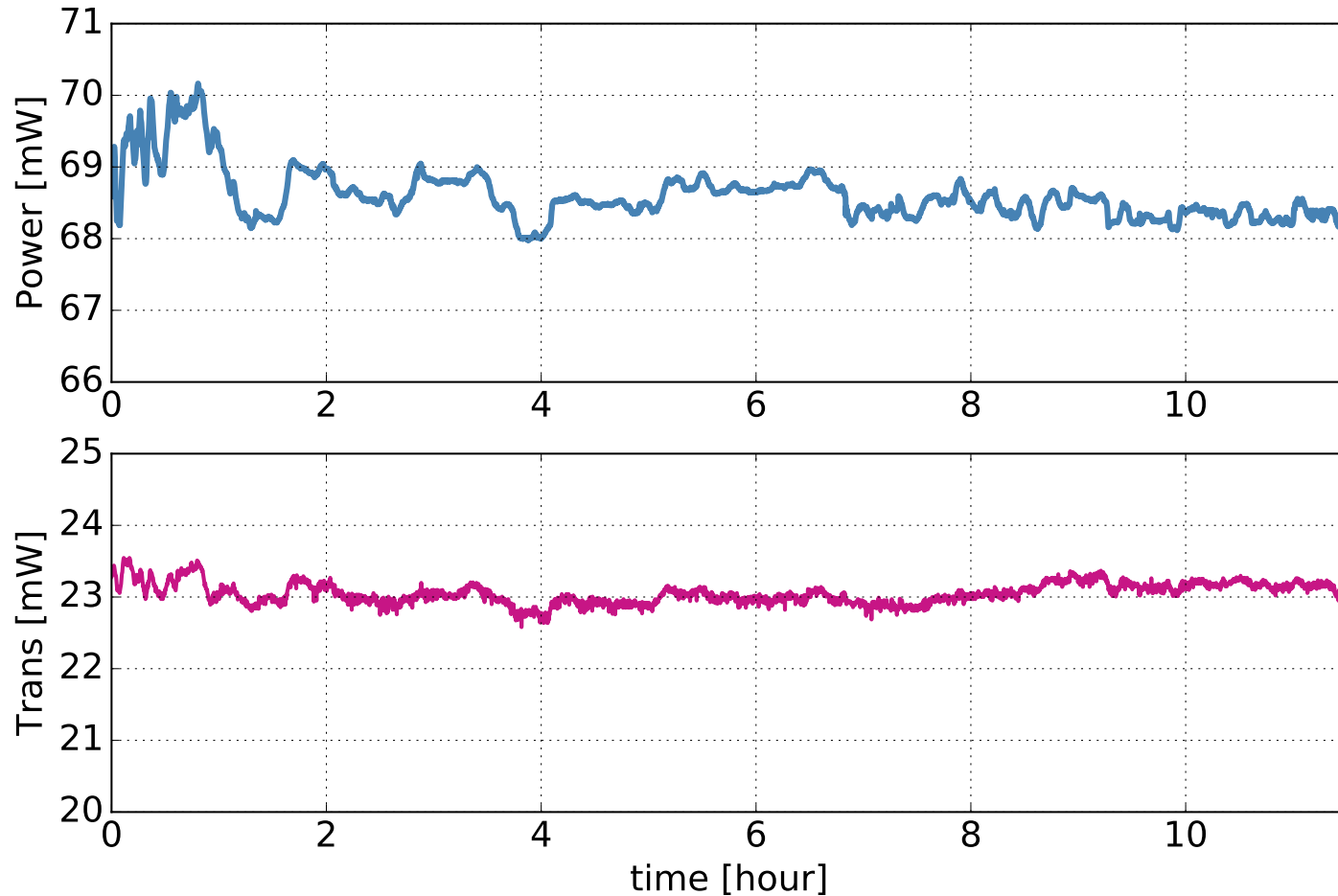
約30mWのパワーがファイバーに入射  
カップリング率は約70%





# 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!

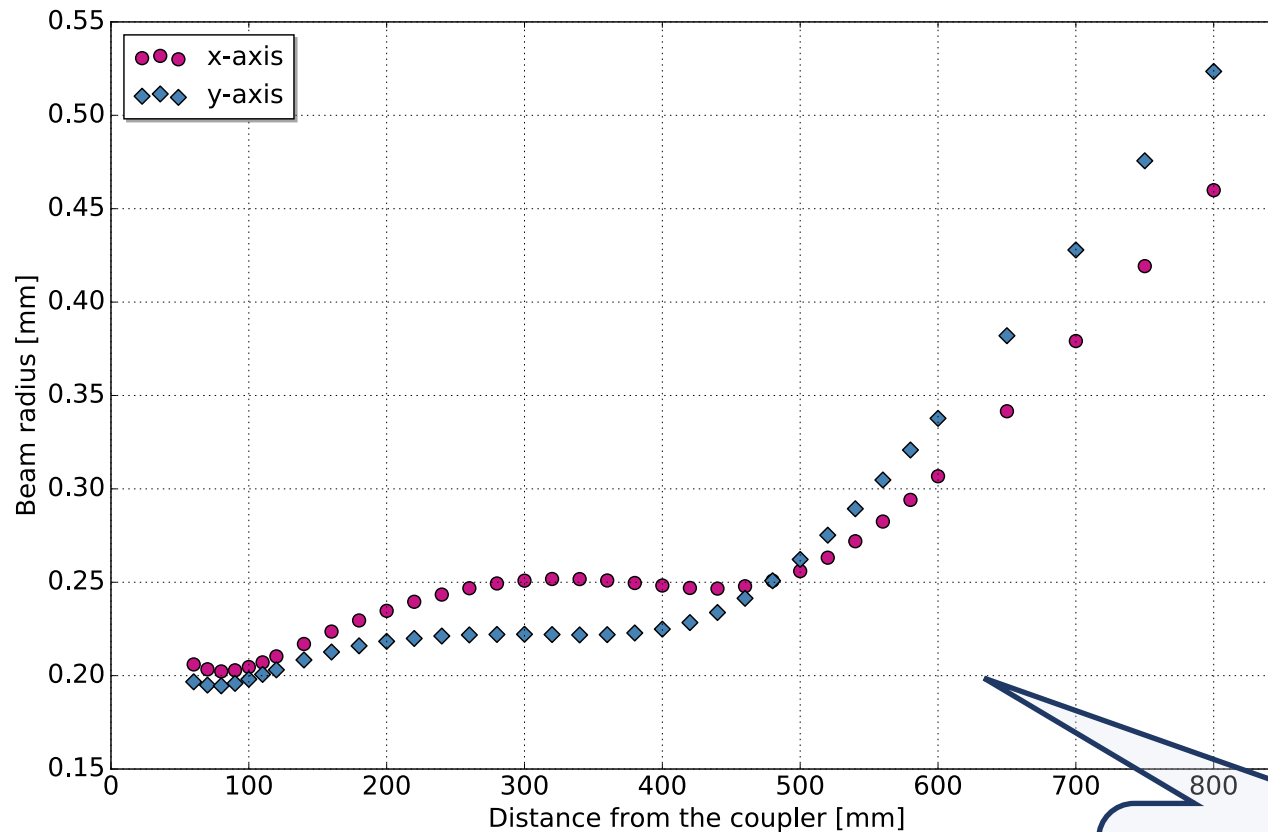
モードマッチレンズとコリメートレンズの位置を微調整することにより、カップリング率は80%まで達した。

### 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

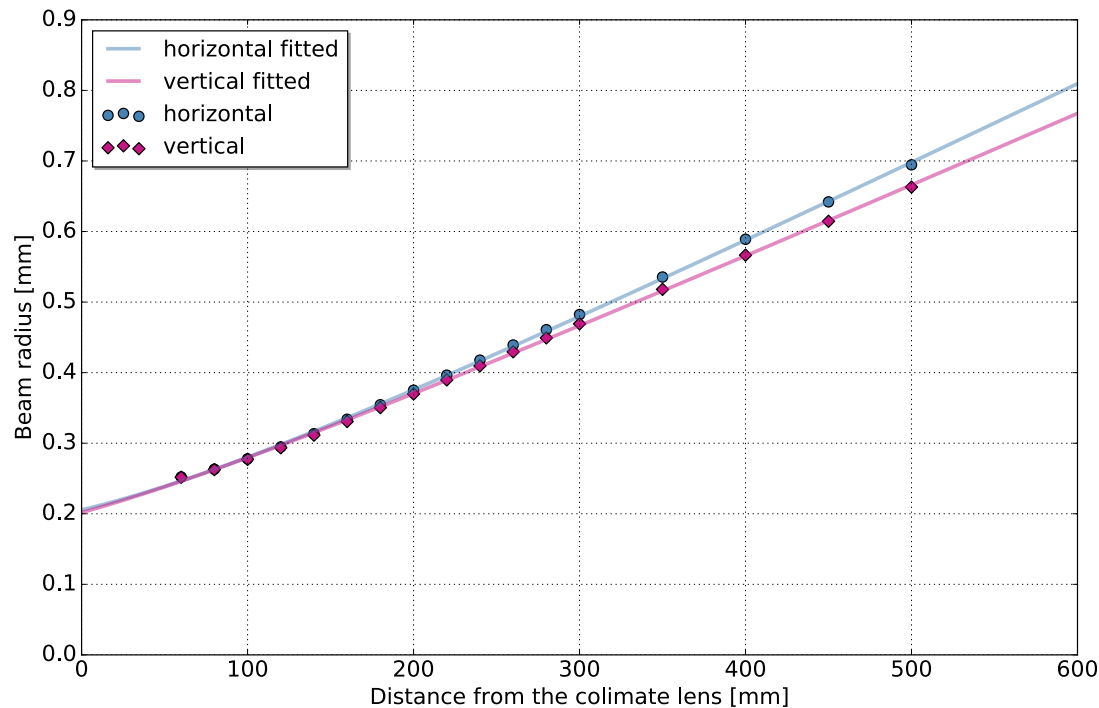
コリメートを試みたが ...



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

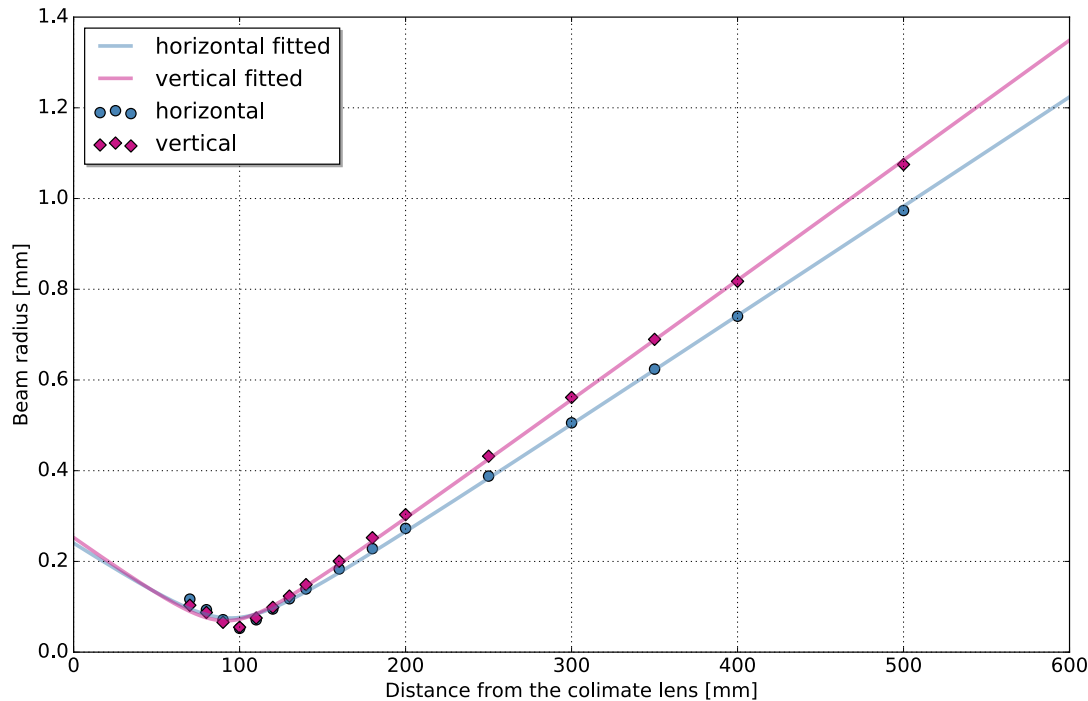


ウエストが  
ファイバー端面よりも  
内側きており、  
ビームが発散している

<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

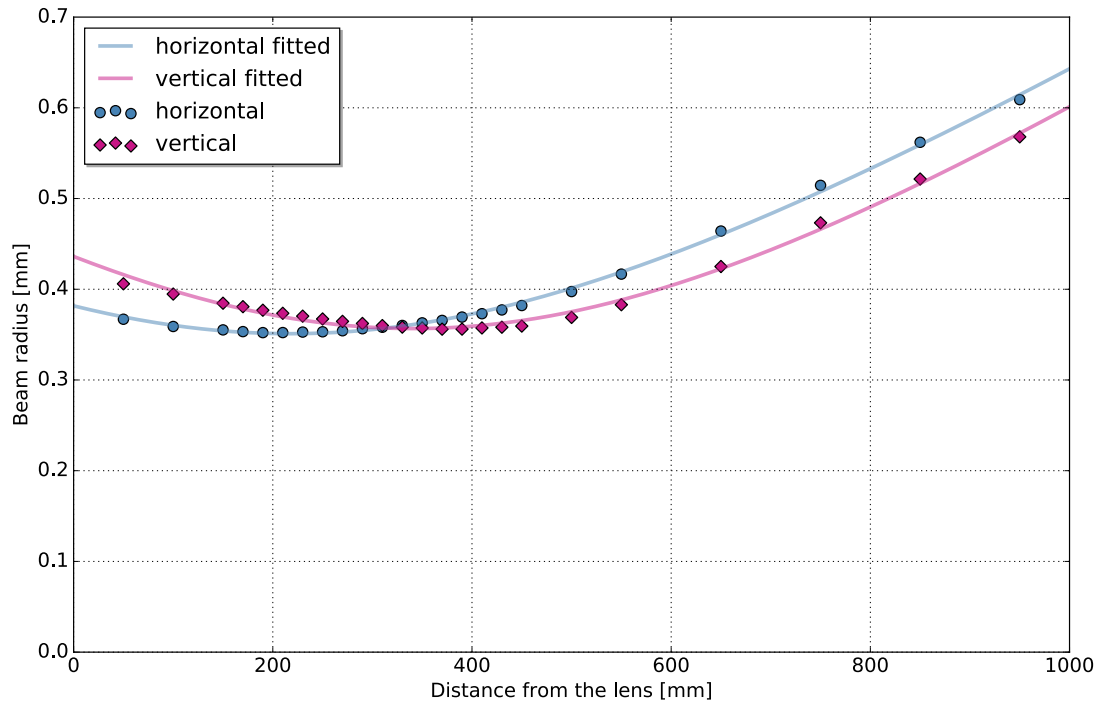


追加のレンズを置き、コリメートを試みた

<i>Direction</i>	$M^2$	$\omega_0$ [mm]	$z$ [mm]
<i>Horizontal</i>	<b>1.073</b>	<b>0.075175</b>	<b>94.473</b>
<i>Vertical</i>	<b>1.083</b>	<b>0.069209</b>	<b>91.677</b>

# 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...

<i>Direction</i>	$M^2$	$\omega_0$ [mm]	$z$ [mm]
<i>Horizontal</i>	<b>1.428</b>	<b>0.351014</b>	<b>217.788</b>
<i>Vertical</i>	<b>1.548</b>	<b>0.356667</b>	<b>341.511</b>

# 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

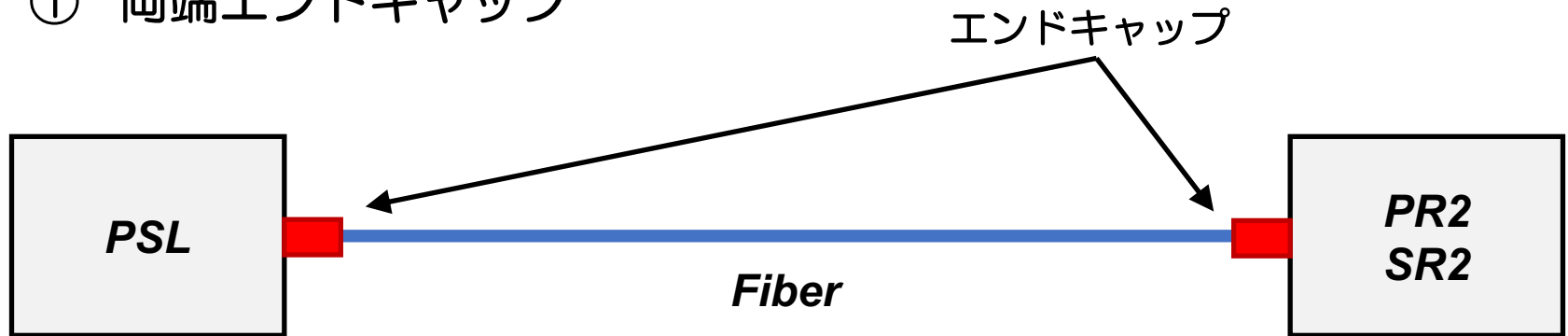
入出射両端に短いファイバーを接続

(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

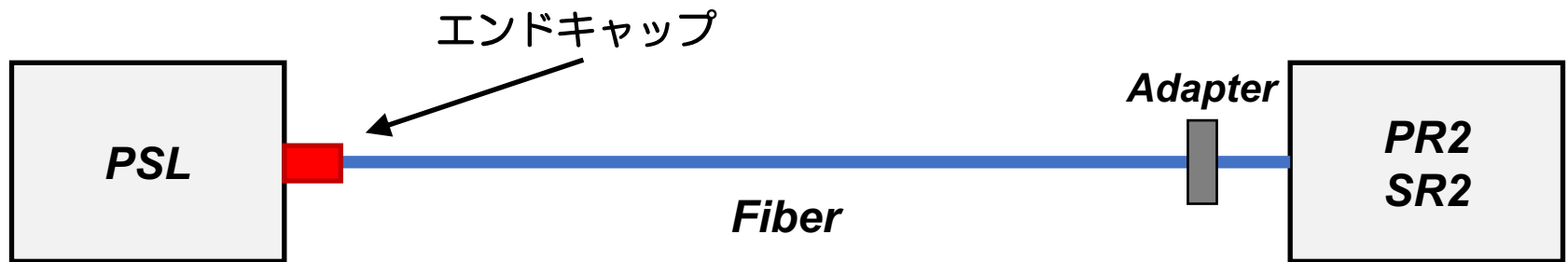
### デメリット

- 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はある。

# 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はある。