

# 安定化レーザー光源

電気通信大学レーザー新世代研究センター

武者満 末正有

第12回DECIGO-Workshop 2013/10/27@本郷

# 本発表

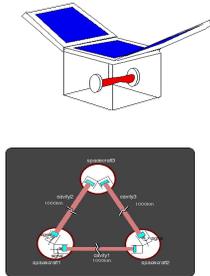
---

- DECIGO/DPF用光源の開発
- DPFのための周波数安定化光源
- DPF用光源(BBM2)の概要
- 周波数安定度評価システム
- DECIGOのための技術開発(MOFPA)

# DECIGO/DPF用光源の開発

衛星環境で動作する高安定・高出力光源の開発

\*要求値\*



	波長	周波数安定度	相対強度安定度	出力
DPF	1 $\mu$ m	0.5Hz/Hz <sup>1/2</sup> @1Hz	1x10 <sup>-8</sup> 1/Hz <sup>1/2</sup> @1Hz	0.02W
DECIGO	0.5 $\mu$ m	1 Hz/Hz <sup>1/2</sup> @1Hz	1x10 <sup>-8</sup> 1/Hz <sup>1/2</sup> @1Hz	10W

- ・機械的安定性 (衝撃・長期)
- ・自動(遠隔)動作
- ・信頼性
- ・小型・高効率(電源・排熱)
- ・耐宇宙線被曝

## 光源開発G

電通大レーザー研

武者 満 **末正有**

情報通信研究機構

細川瑞彦  
長野重夫 李瑛

NASA

沼田健二

# 光源の開発の歩み

## ○ DPF用光源 [小出力・高安定光源]

- 周波数基準の選定

- 周波数安定化

- 強度安定化

- 小型・省電力化

- 自動化

- 周波数安定度評価  
& 要求値達成

TTM : I<sub>2</sub>-Nd:YAG laser (1064nm)

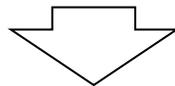
11<sup>th</sup> DWS ↓  
BBM1 : I<sub>2</sub>-Yb:YAG laser (1030nm)

BBM2 : I<sub>2</sub>-Yb:fiber DFB laser

BBM2S:

EM

FM



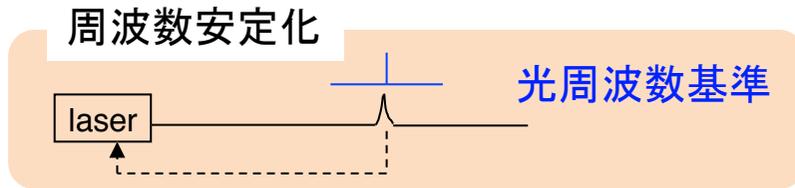
## ○ DECIGO用光源 [高出力・高安定光源]

- ・出力増強 (fiber-MOPA)

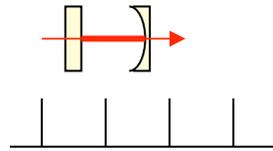
- ・高効率・高出力第2高調波発生

- ・周波数・強度安定化

# 周波数基準の選定

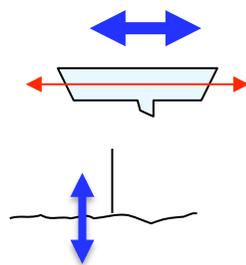


• F.P. 光共振器

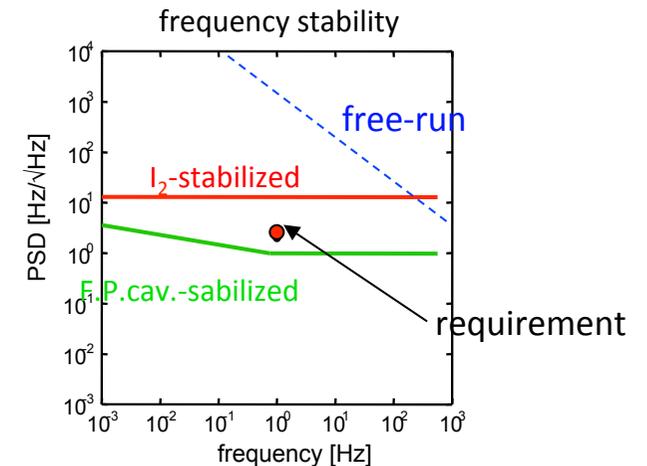


- 短期安定度
- 外部擾乱に敏感
- アラインメントに敏感

• 原子・分子の共鳴



- 長期安定度
- 外部擾乱に比較的鈍感
- 信号のSNRで安定度が制限



衛星搭載: 外乱に強い、腕の長さの基準となる ⇒ 分子の共鳴

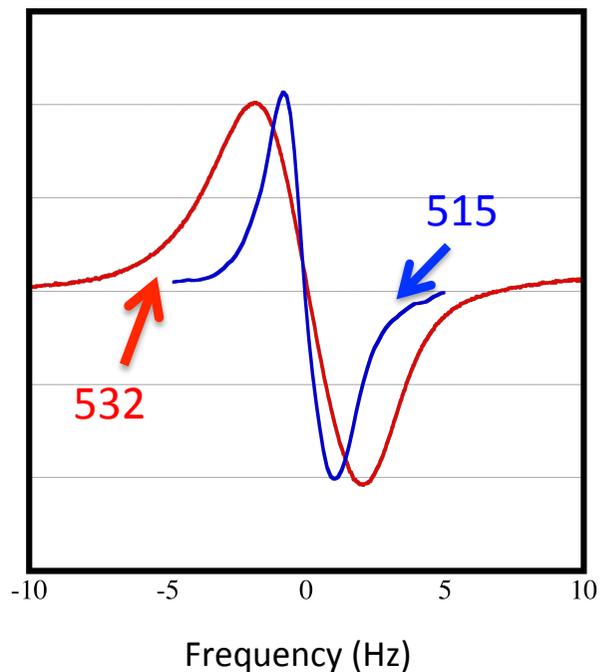
$I_2$ -安定化 Nd:YAG laser( $\lambda=1064\text{nm}$ ) ( $I_2$  の  $532\text{nm}$  の飽和吸収に安定化)

-- 光周波数標準として開発が進められている --

要求値より1桁以上安定度が悪い (飽和吸収線のSNRできまる)

# 515nm帯のヨウ素の吸収

ヨウ素の飽和吸収の微分曲線

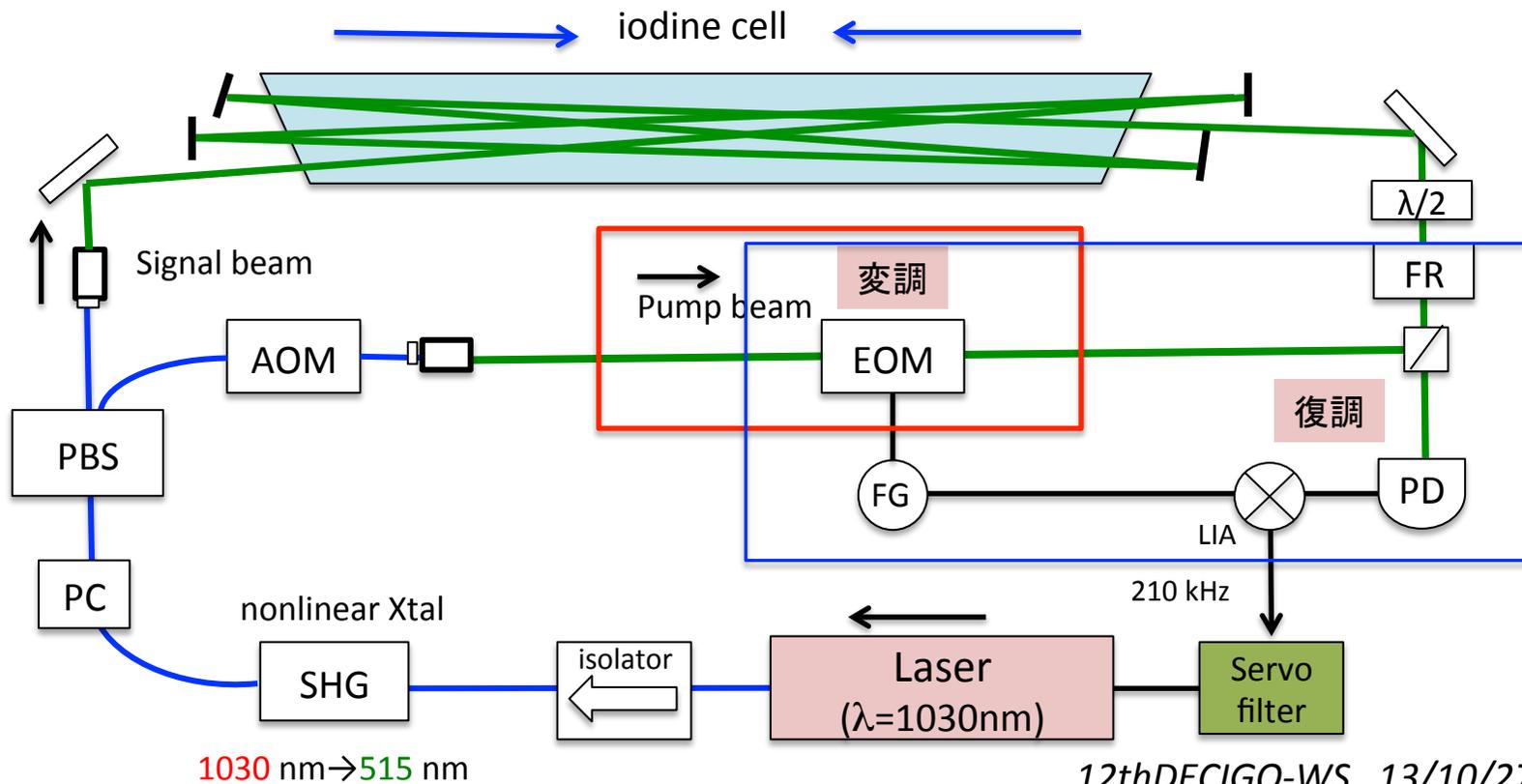


## 1064nmから1030nmへの変更

従来はヨウ素安定化 Nd:YAG laser  
(波長1064nm----ヨウ素の532nmの吸収)

⇒安定度を向上させるためにより細かい吸  
収線を使う  
(波長1030nm----ヨウ素の515nmの吸収)

# 飽和吸収

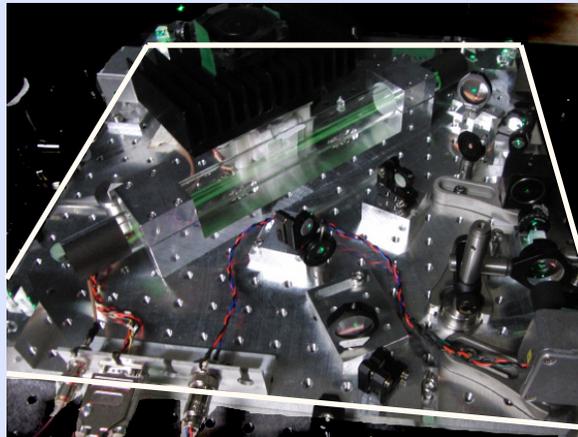


# BBM1とBBM2

## BBM1

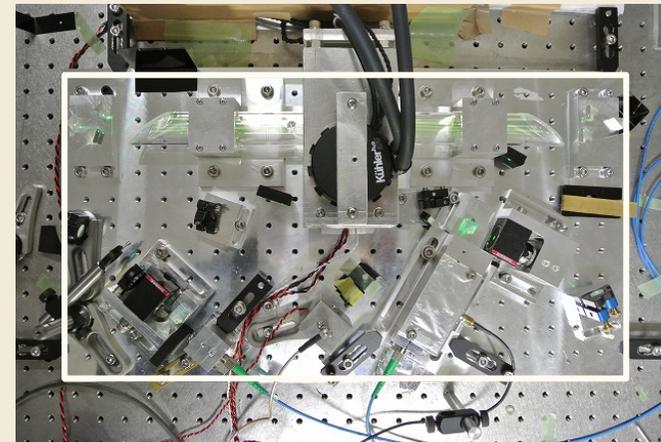
レーザー  
光源部  
信号取得部  
堅牢性

Yb:NPRO (YAG)  
自由空間光学系  
400x400mm



## BBM2

Yb:DFB laser  
all fiber光学系  
550x300mm  
改善  
(光軸を下げ可動部を減らす)



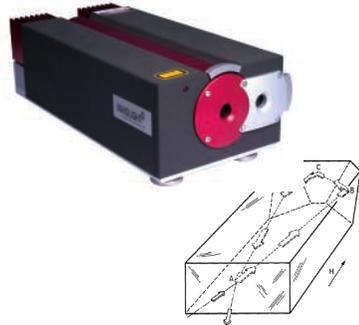
# BBM1とBBM2(光源)

Yb:NPRO

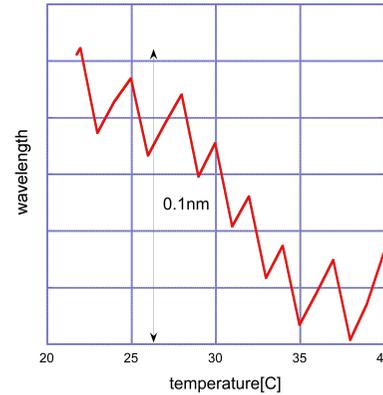
出力

掃引特性

周波数雑音



120mW

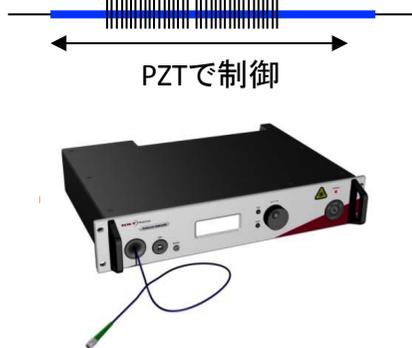


同程度

LD励起モノリシック型固体レーザー

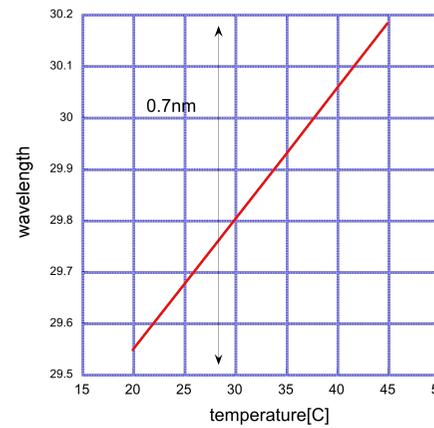
0.1nm mode-hop

Yb:fiber DFB laser

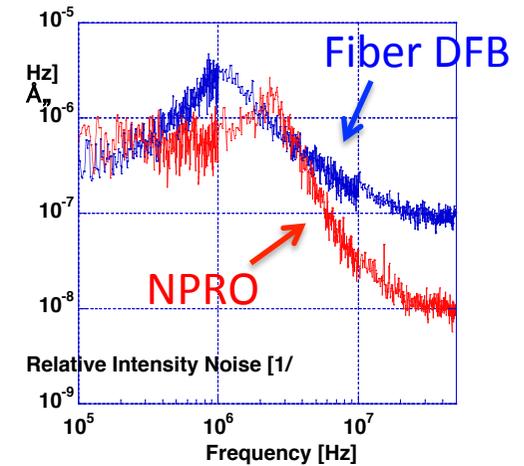


PZTで制御

20mW

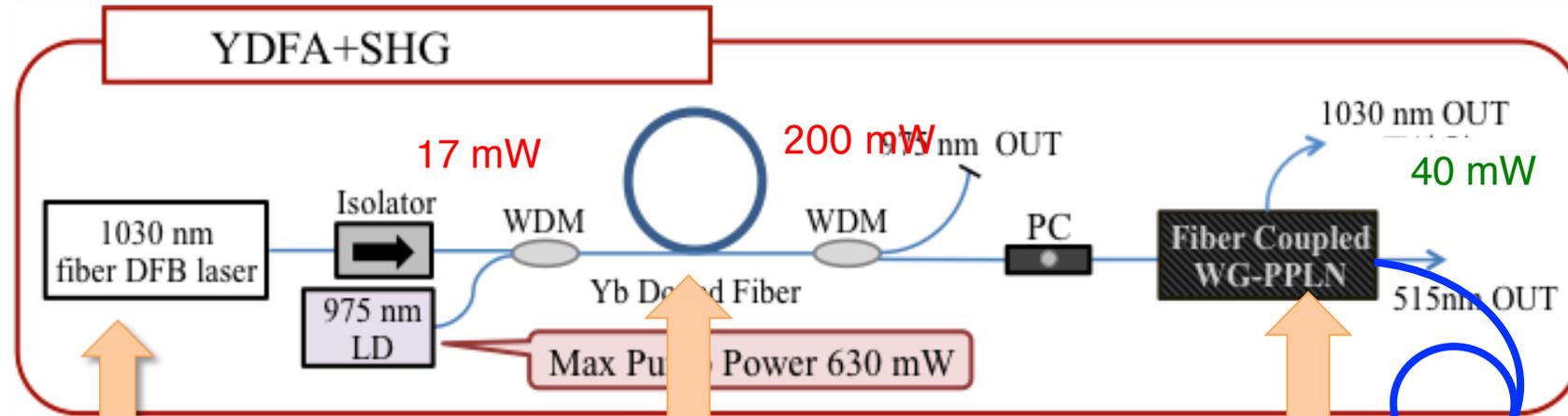


強度雑音

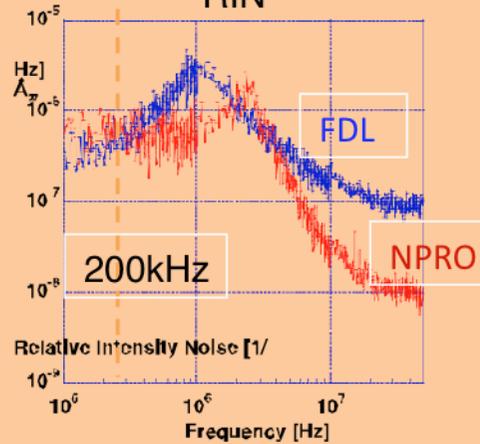


0.7nm mode-hop-free

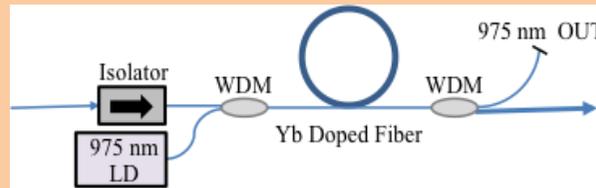
# BBM2の構成



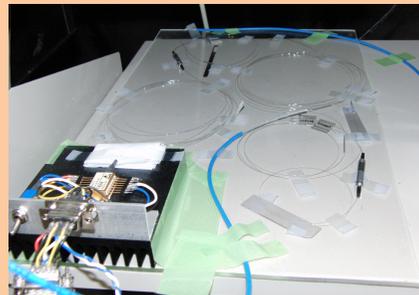
RIN



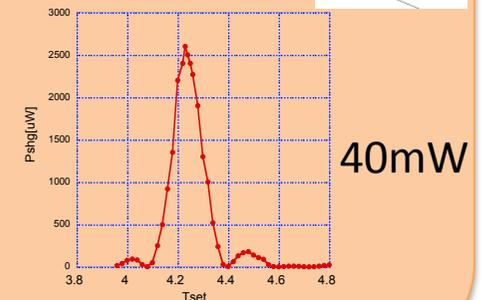
YDFA (Yb-doped fiber amplifier)



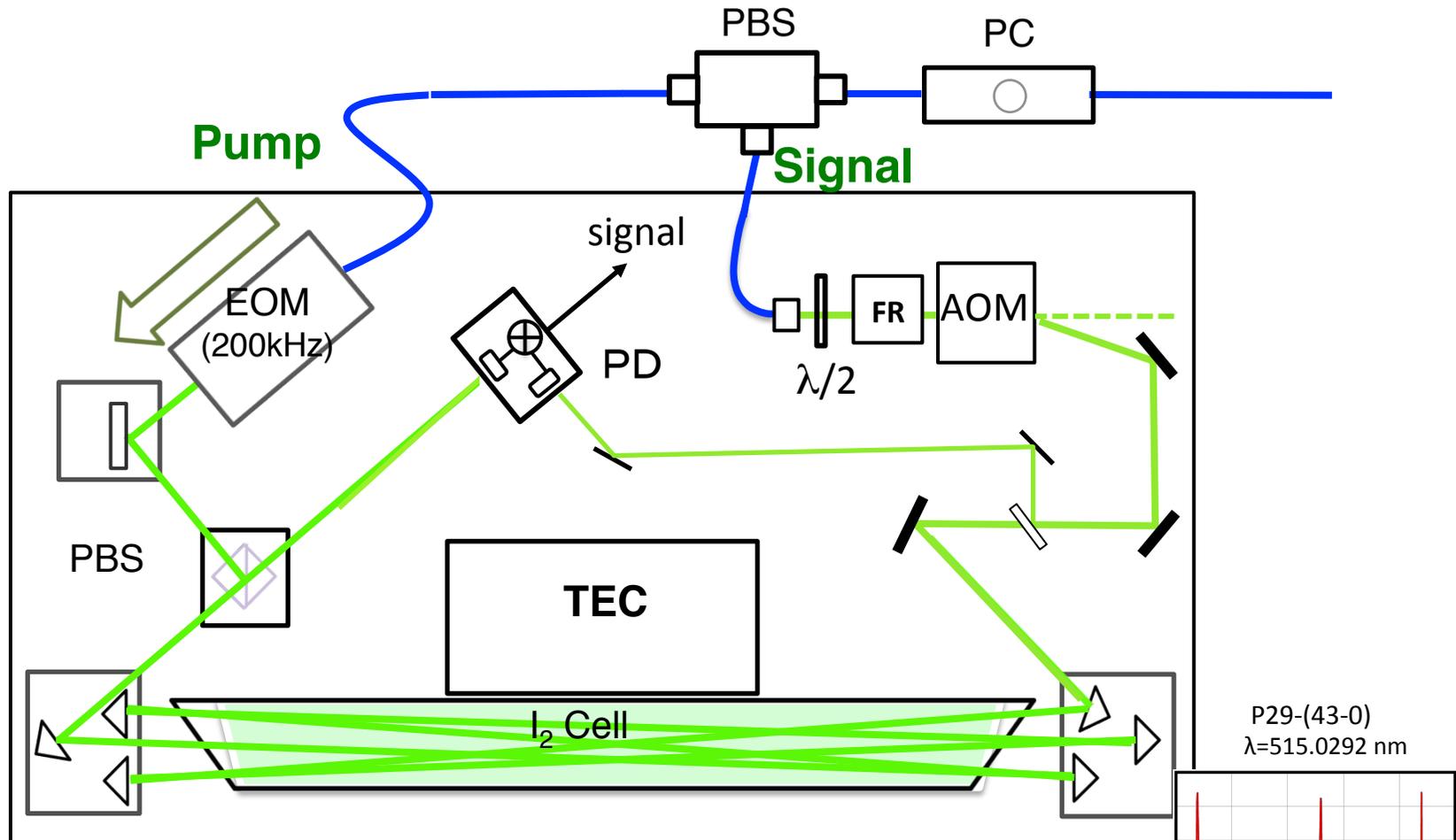
$P=250\text{mW}$



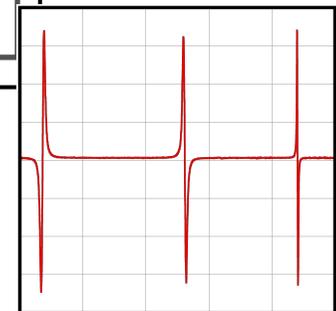
NEL RWG-PPMgOLN



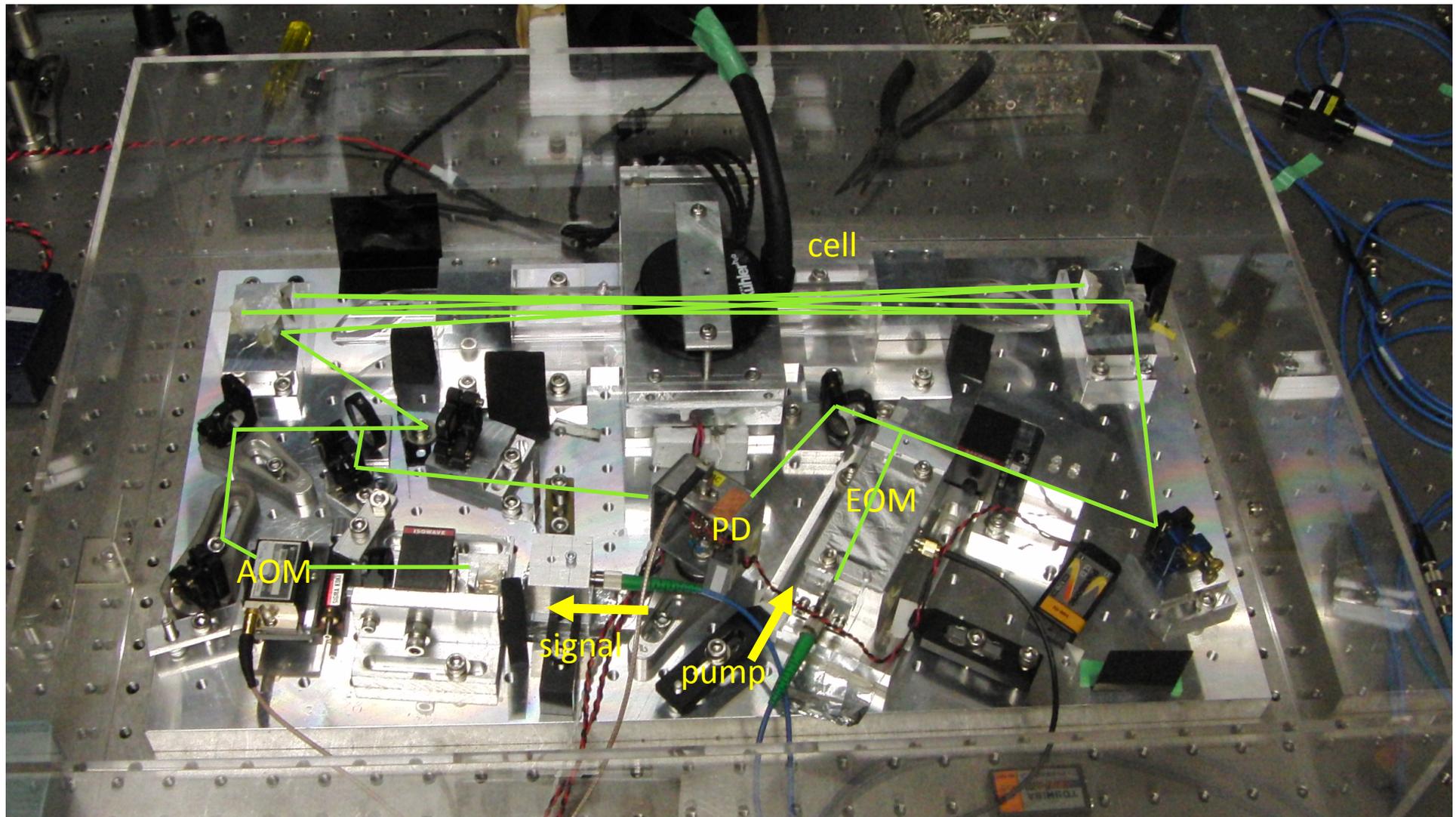
# 信号取得部



- ・ ヨウ素セル : 400mm x 5pass = 2000mm  
フィンガー部 : -10°C
- ・ FR+Brewster窓 : セルでの散乱低減
- ・ 差動受光 : コモンの強度雑音除去



# 信号取得部

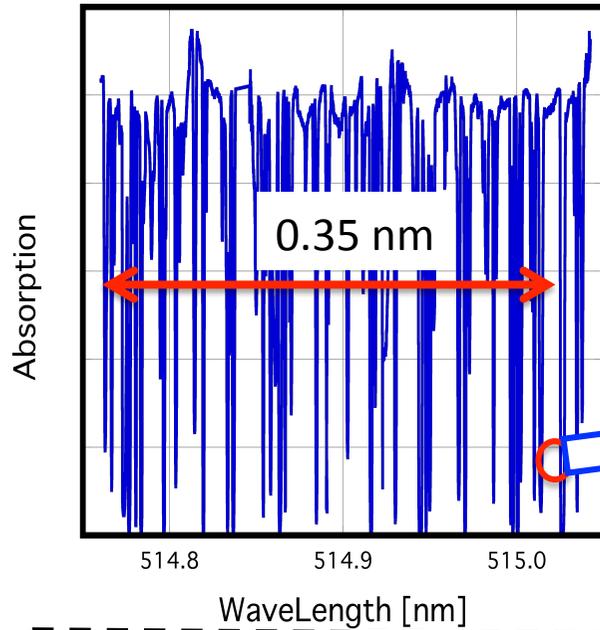


300x550x15 mm Al-breadboard

12thDECIGO-WS 13/10/27@本郷

# 線形吸収と飽和吸収

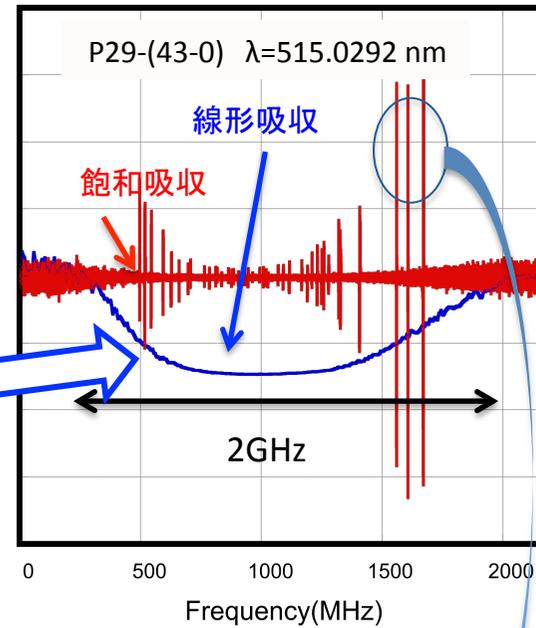
線形吸収



同調範囲(0.35nm)に  
約70本の線形吸収

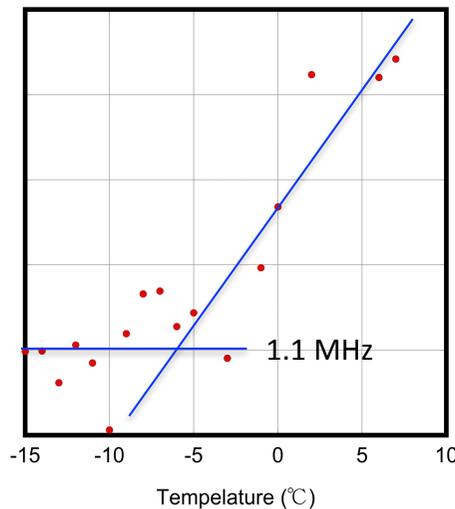
拡大

飽和吸収



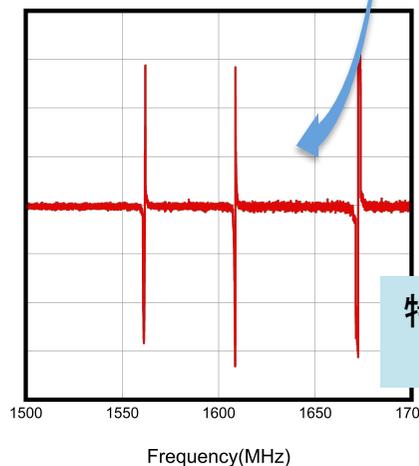
2GHz中に  
約50本

線幅の圧力拡がり



セルのフィンガーの温調  
で飽和蒸気圧を制御

衝突頻度の低減  
⇒線幅狭窄化

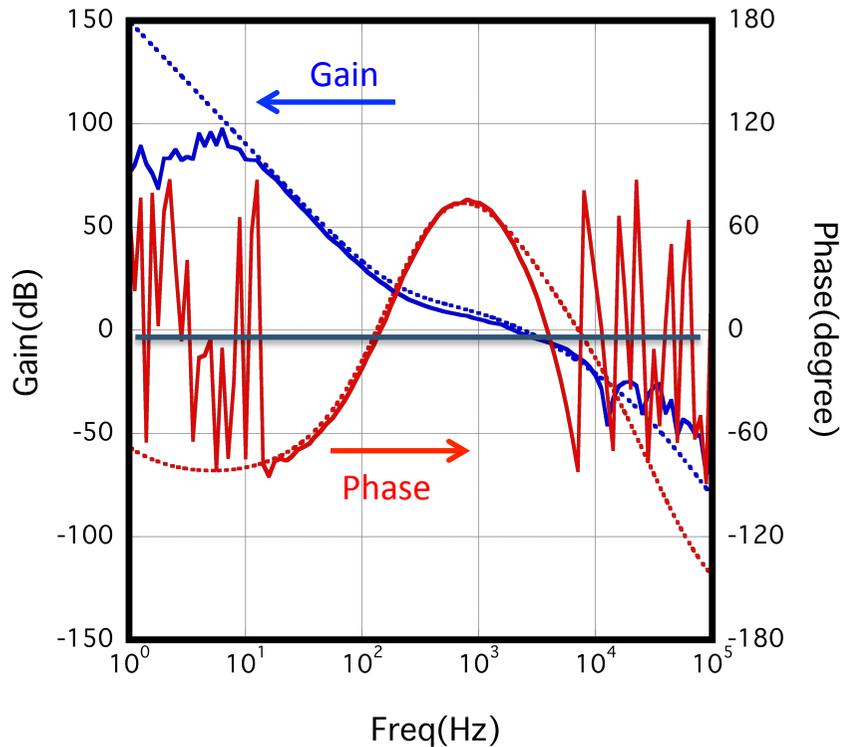


特にSNRの高い  
1本を選択

# サーボと誤差信号評価

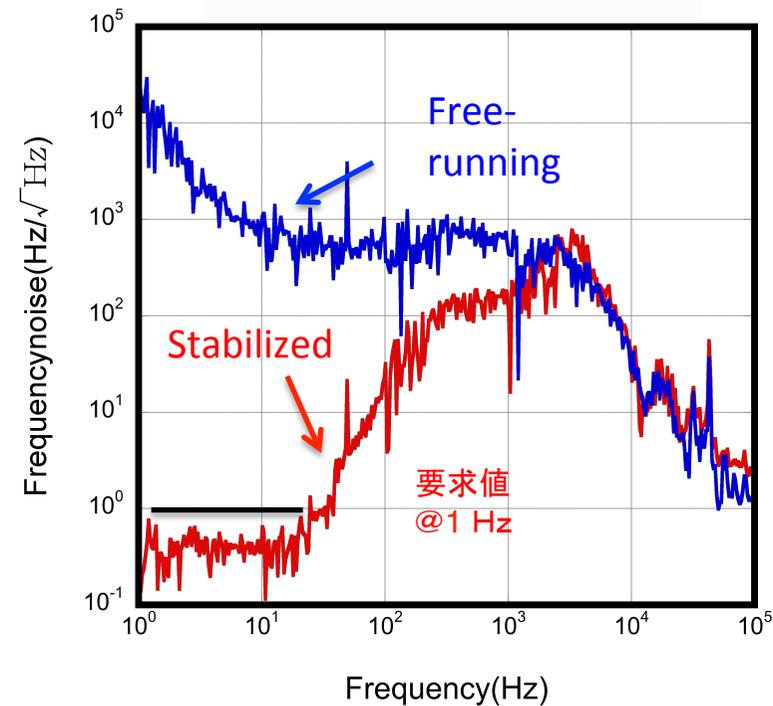
## Openloop 伝達関数

実線: 実測  
点線: simulation



- 帯域2 kHz (位相余裕  $> 30^\circ$ )
- Gain=150 dB (@1 Hz)

## 周波数雑音スペクトル (誤差信号)

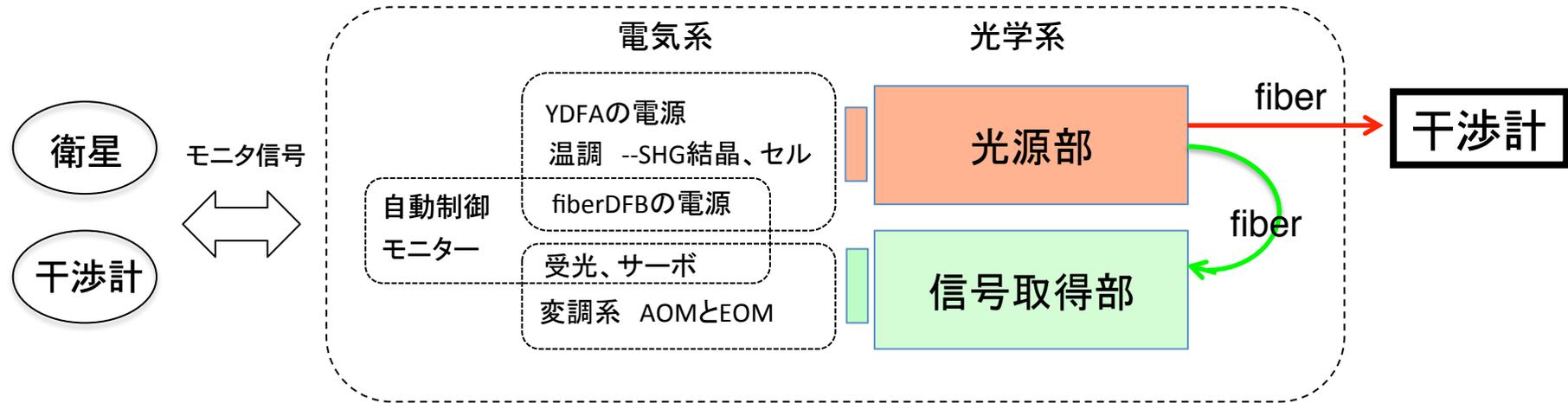


10 Hz以下で0.4 (Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ )を達成  
DPFでの要求値1 (Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ )を満たす

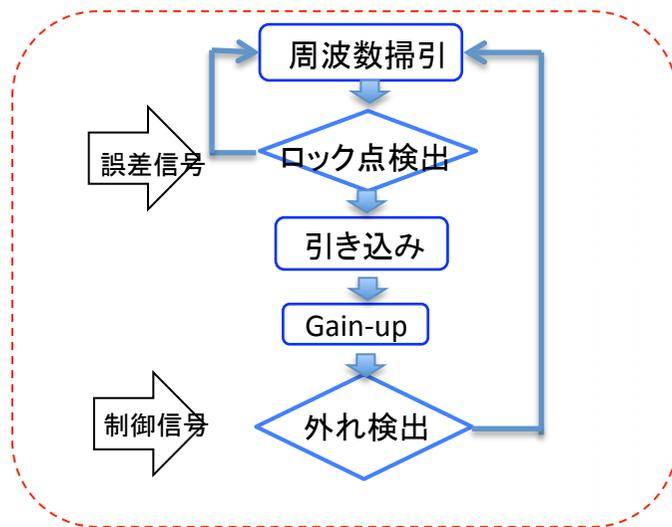
⇒ 絶対周波数安定度評価へ

# 自動制御

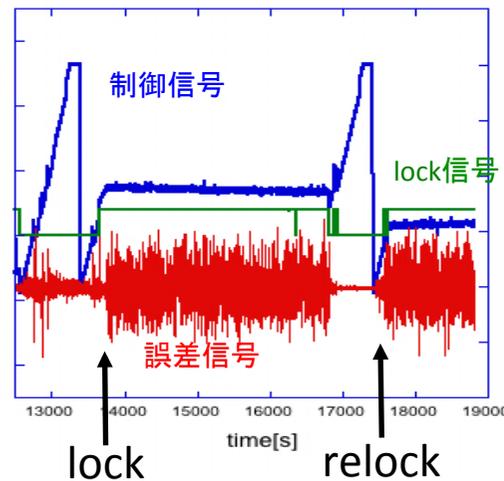
## 光源部だけで独立に制御



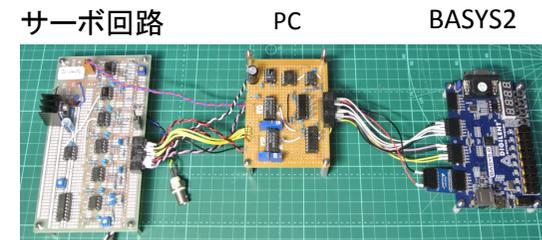
## 自動 lock & relock



制御sequence



FPGAによる制御系



シマフジボード



# DPFの現状

DPF搭載の条件	要求値	現状	評価
重量	15kg	13.5kg+1.5kg (BB部)	○
消費電力	25W	約68W	×
動作温度	10～60℃	セル温調の排熱が要検討	△
サイズ		500(W)x350(D)x82(H) mm	○
耐宇宙線被曝 堅牢性		今後検証 (セル・ファイバー)	△

# DPF光源の課題

---

- 周波数安定度の向上

ビーム径  
吸収線の選択  
パワー



より細かい線幅

noise低減---変調周波数でのRIN

- 機械的安定性の向上  
(BBM2S)

可動部の減少、簡素化  
カーボン製BB  
フィンガー保持部の改良

- 消費電力

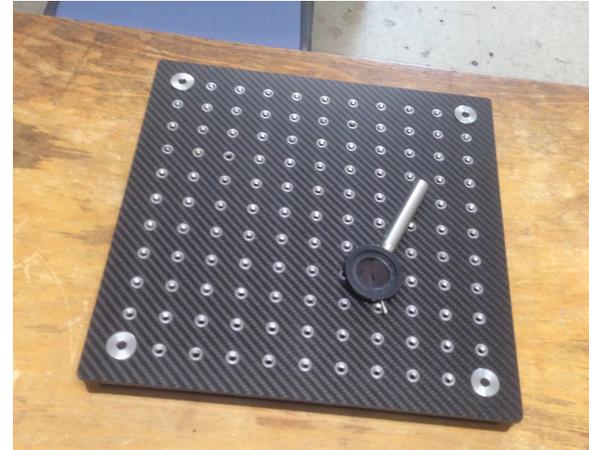
温調部の消費が多い

各部を専用回路に置き換える

# 各種対策

## カーボン製ブレッドボード

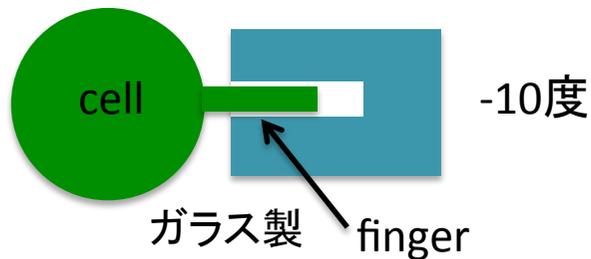
独CarbonVision GmbH社製ECI  
300x600x55mm  
両面CFRP(4.3mm)+アルミハニカム  
4.9kg (13.5kg)      ¥ 370k



AIと比較して

重さ            1/3  
熱膨張率      1/20 ( $2.5 \times 10^{-6}/k$ )  
ダンピング    2倍  
強度            ?

フィンガー支持部...保護方法を検討中

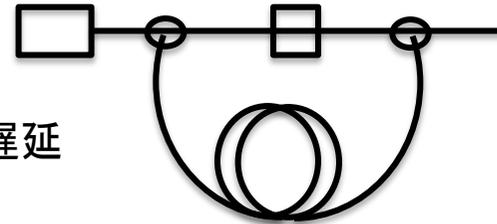


熱伝導ジェル  
金属製セル

# 絶対周波数安定度評価

## 1 自己遅延ヘテロダイン

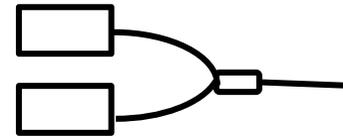
コヒーレンス長以上の遅延



1Hz  $\Rightarrow$   $3 \times 10^8$ m

## 2 独立・同安定度の光源比較

2台目の作成



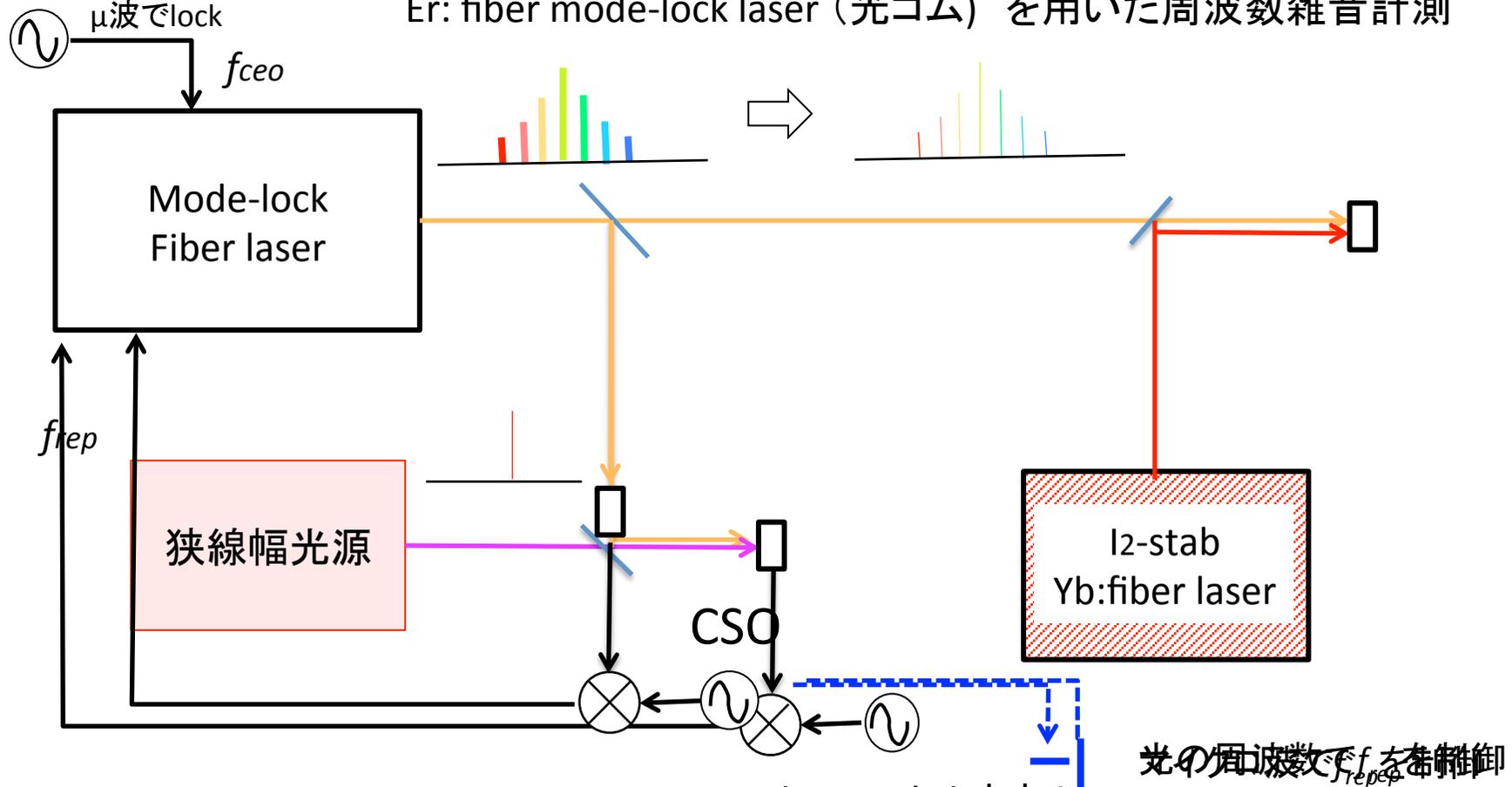
BBM2S

## 3 安定度の高い周波数基準との比較

- 同安定度の周波数基準 (周波数を一致させる必要がある)
- 超狭線幅光源+光コム

# 光コムによる周波数安定度評価

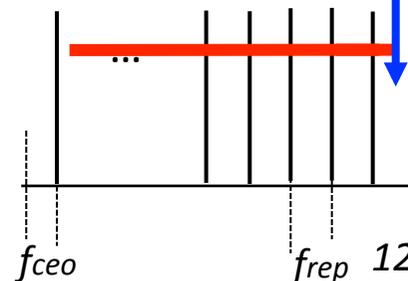
Er: fiber mode-lock laser (光コム) を用いた周波数雑音計測



$$f_n = f_{ceo} + n f_{rep}$$

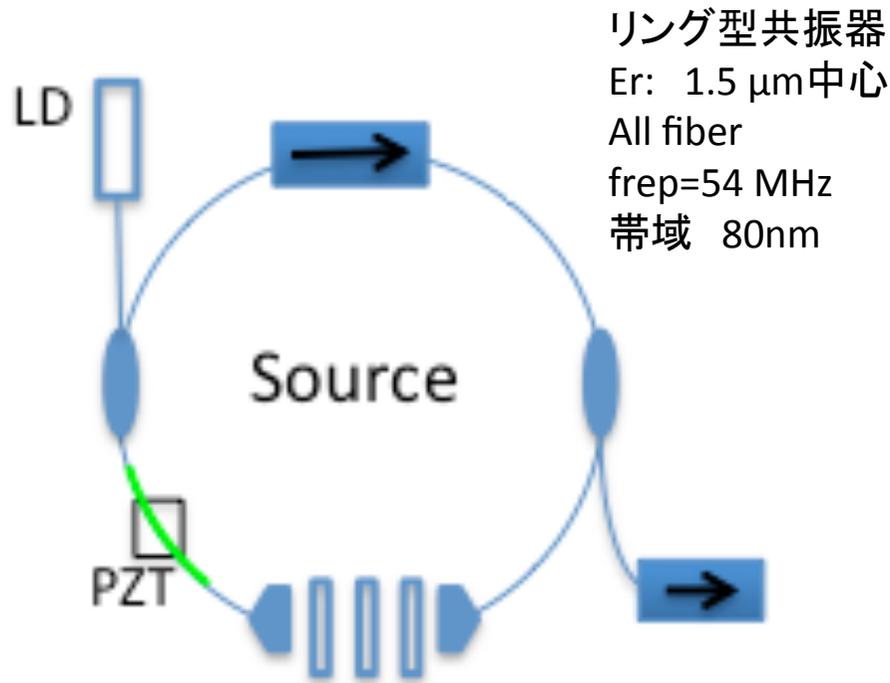
$f_{ceo}$  と  $f_{rep}$  の両方を安定化

$f_{rep}$  が光の安定度に直結

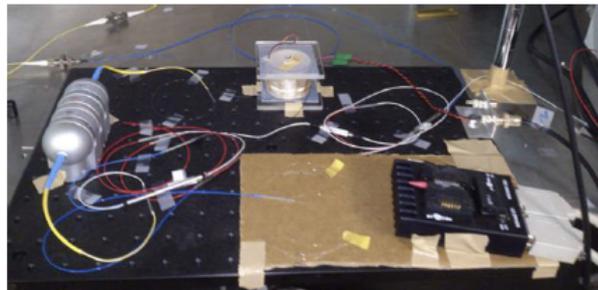


# Er: fiber mode-lock laser

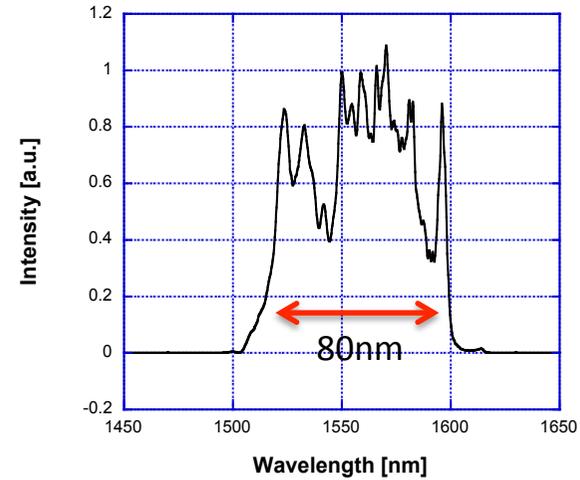
非線形偏光回転によるmode-lock動作



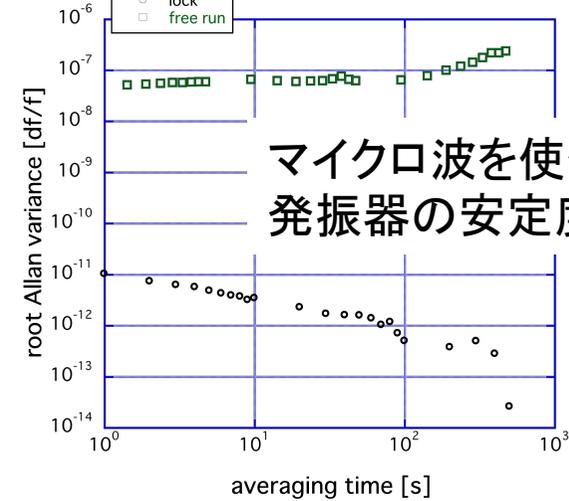
laser oscillator 全景



モードロック時のスペクトル

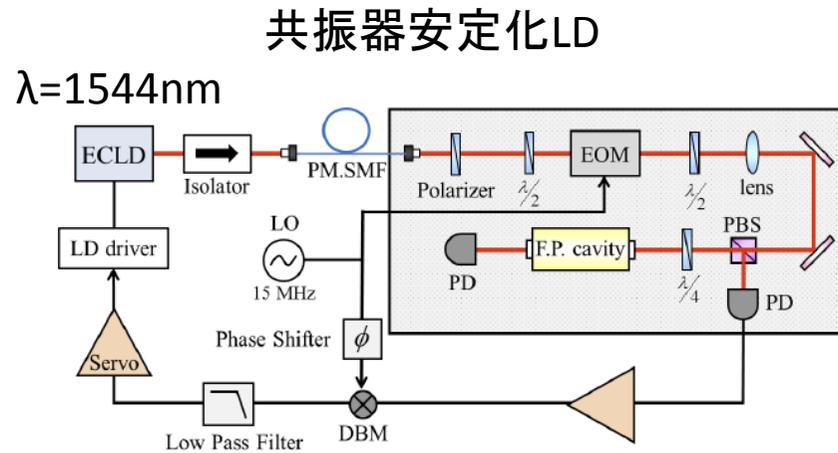


$f_{\text{rep}}$ のアラン分散

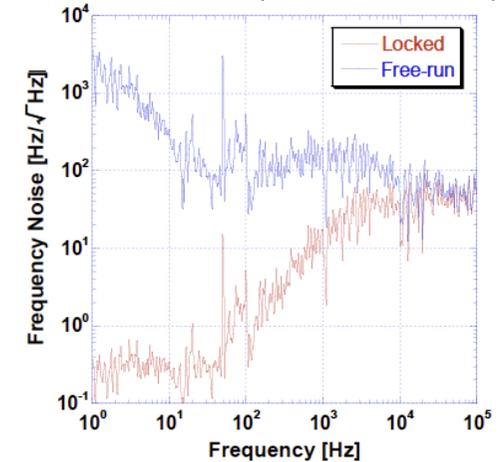


マイクロ波を使った $f_{\text{rep}}$ 安定化  
発振器の安定度で制限

# 超狭線幅光源



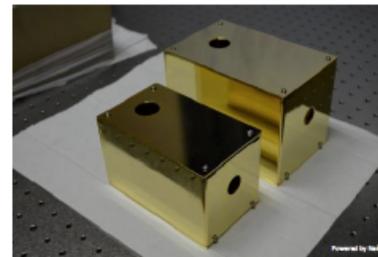
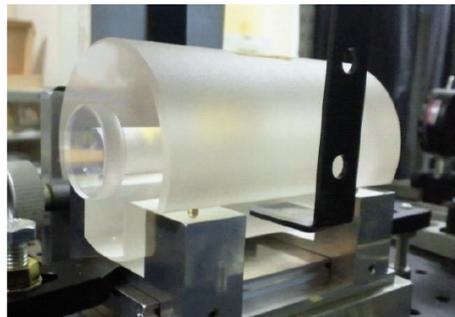
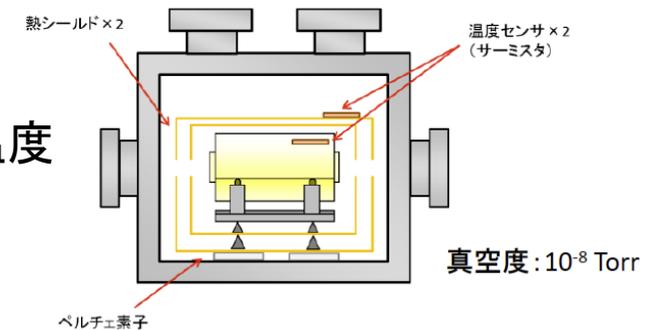
周波数雑音(誤差信号評価)



Airy-point保持とminusKで防振

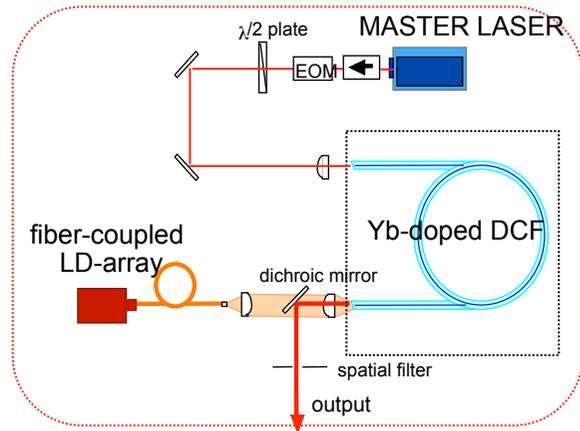
共振器  $F=500000$   
 $L=100\text{mm}$  (FSR=1.5GHz)

ゼロ膨張率温度  
 $29.57^\circ\text{C}$



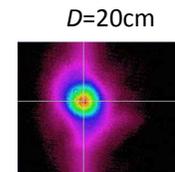
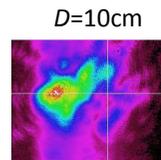
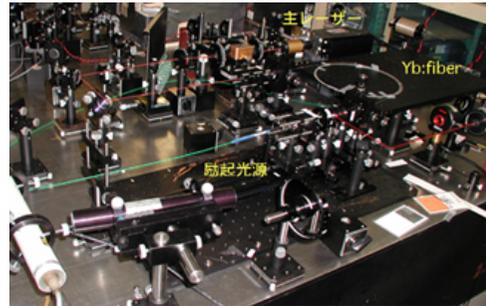
# DECIGO用Fiber MOPA

## ● 高出力Yb: fiber amplifier

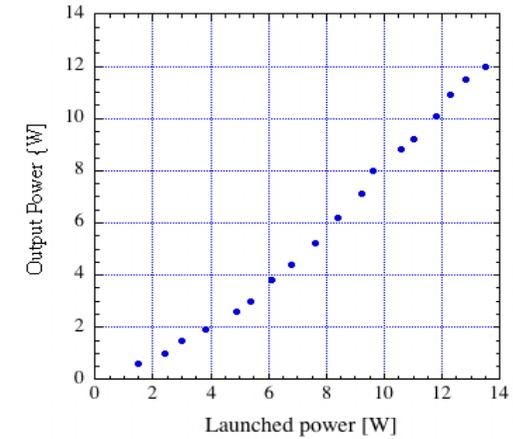


DCF (MMF)

曲げによる単一横モード化

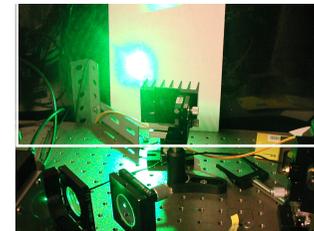
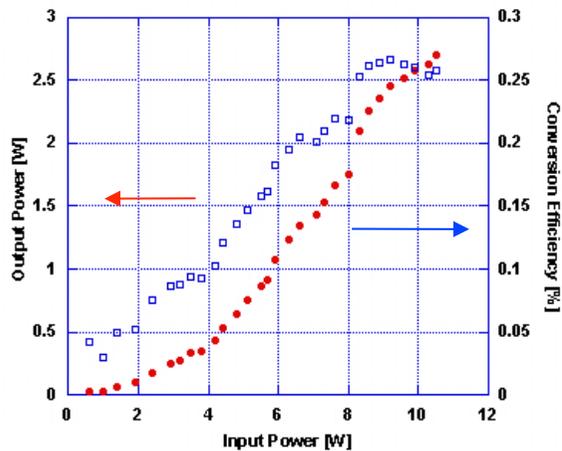


power evolution



**12W@14W**

## ● 高効率第2高調波発生



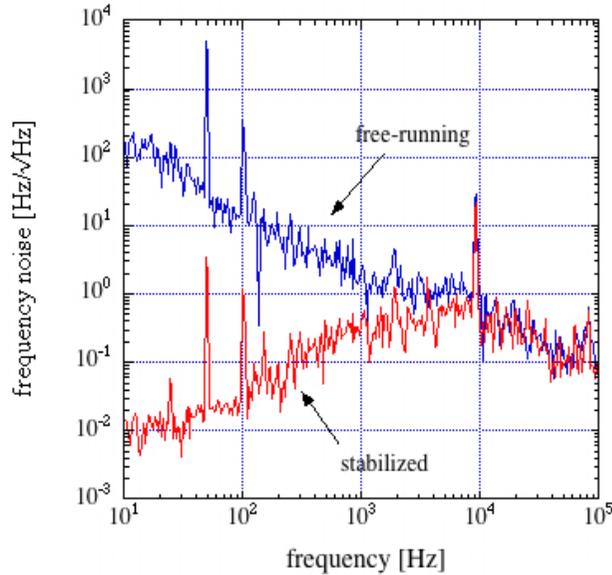
**2.7W@10.5W**

$$P_{SHG}/P_{fund}^2=0.0245$$

12thDECIGO-WS 13/10/27@本郷

# fiberMOPAの雑音特性

## 周波数雑音

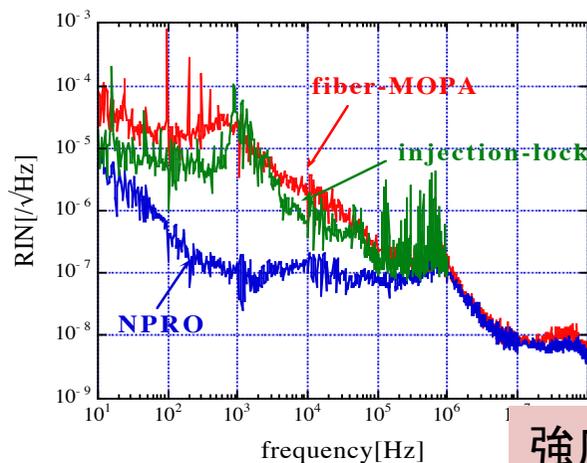


周波数雑音は  
主レーザーによって支配されている

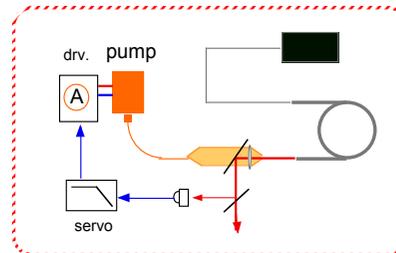
$$\delta f_{\text{MOFPA}} = \delta f_{\text{master}}$$

$$\Delta f = 10^{-2} \text{ Hz/Hz}^{1/2} @ 10\text{Hz}$$

## 強度雑音



int.noise suppression



$$\delta I/I = 2 \times 10^{-8} / \text{Hz}^{1/2}$$

強度雑音スペクトル



強度雑音はAmpによって支配されている

# まとめ

---

## DPF用にヨウ素安定化Yb: fiber laserを開発

周波数安定化 誤差信号評価  $5 \times 10^{-1}$  Hz/rtHz  
強度安定化 in-loop  $1 \times 10^{-8}$  /rtHz

## BBMの作成

小型・堅牢化、周波数安定化、自動制御

## 周波数安定度評価システムの開発

Er: mode-lock 光コム+狭線幅光源

## DECIGO用出力増強

Yb: fiber amplifier 周波数・強度特性の検証

## 今後の予定

- BBM2Sの作成
- 周波数安定度評価
- 強度安定化