

# KAGRA

## 低温重力波検出器~~ICGT~~の制御

グローバルな宇宙天文観測研究会@ 国立天文台  
2012/2/21(月) 東大宇宙線研 宮川 治

# 小川洋子さんらによる愛称の決定

## 東大宇宙線研HPより



図 2 小川様による愛称公表の瞬間



かぐら (KAGRA) の「か (KA)」は建設地である「神岡」の頭文字と「ぐら (GRA)」は重力波である Gravitational Wave の先頭の Gra を合わせたものです。この愛称が、広く世界に浸透し、世界の最先端観測拠点になることを願っています。

愛称公表式では、小川委員長から愛称の公表があり、4人の命名者に記念品が贈呈され、江川雅子東京大学理事が祝辞を述べられました。

愛称公表式終了後、柏キャンパス内のレストランで関係者のみによる祝賀会が開催され、磯田文雄東京大学理事から祝辞を頂きました。また、小川さんや命名者から再び挨拶を頂戴し、盛況のうちに

# 天体現象による重力波源

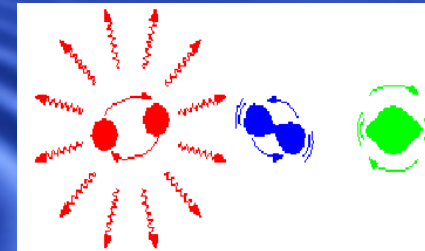
アインシュタインの予言:

非対称な質量の急激な変化による、波として光の速度で伝わる時空のひずみ

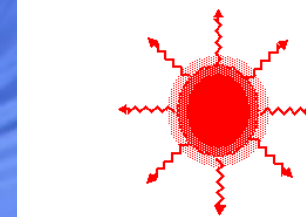


重力波が存在する!!

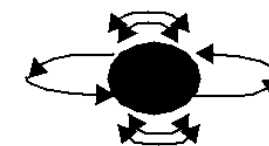
連星中性子や  
ブラックホールの合体



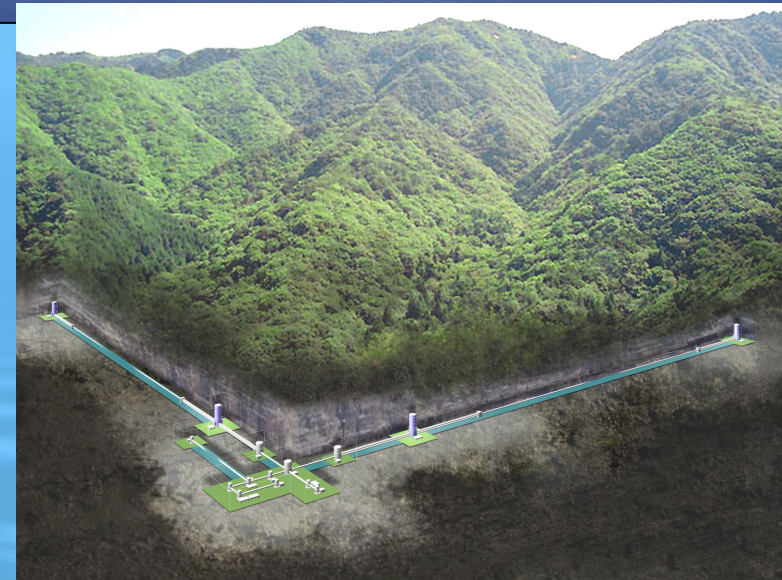
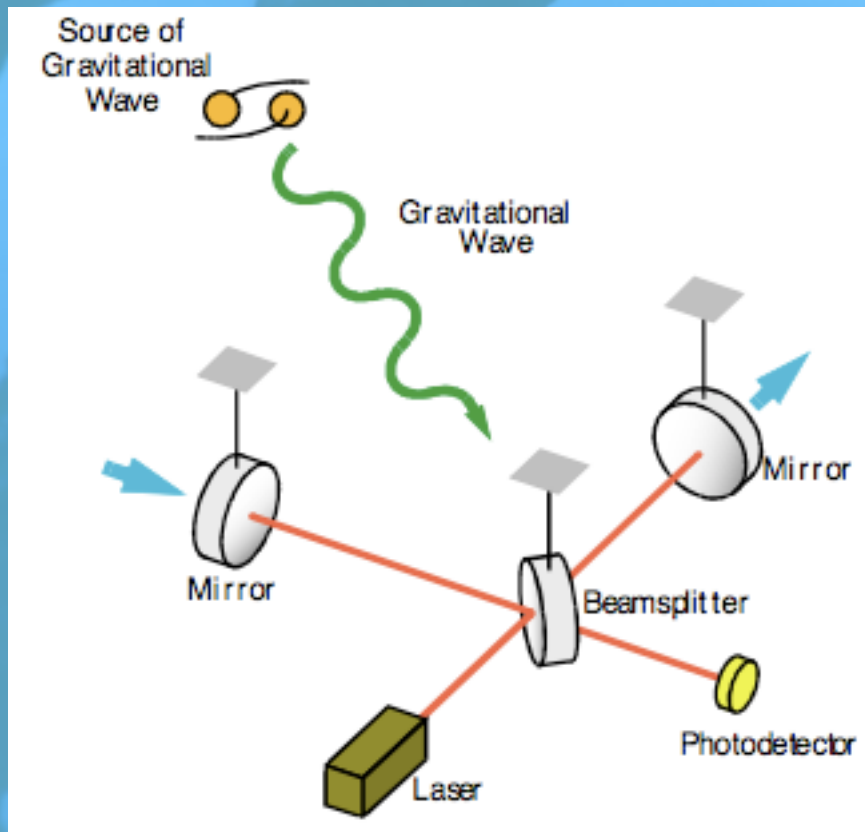
超新星爆発



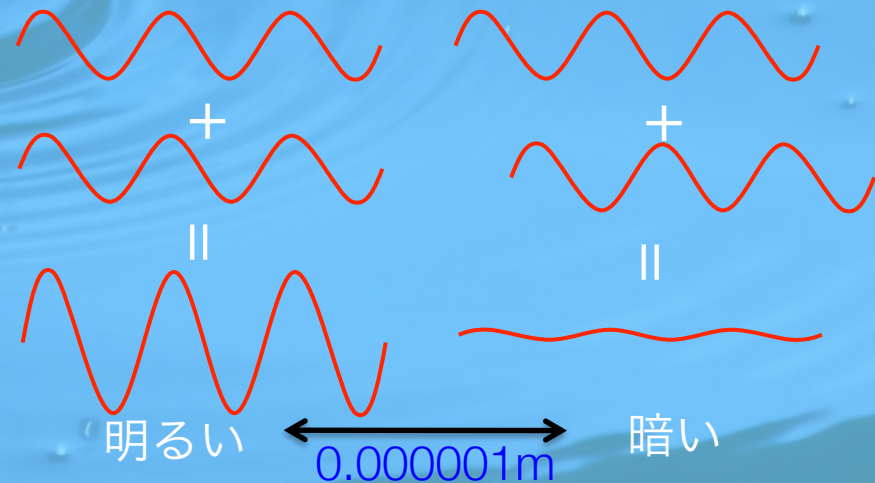
パルサー



# レーザー干渉計を使った重力波検出



光の重ね合わせ(干渉)

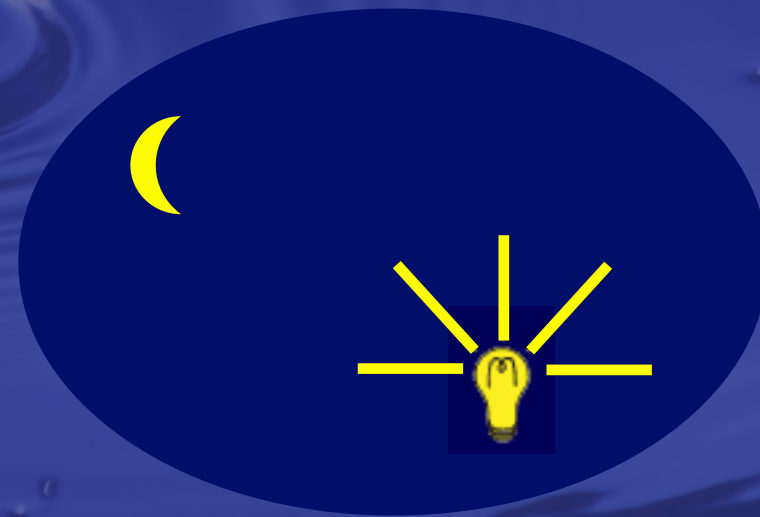
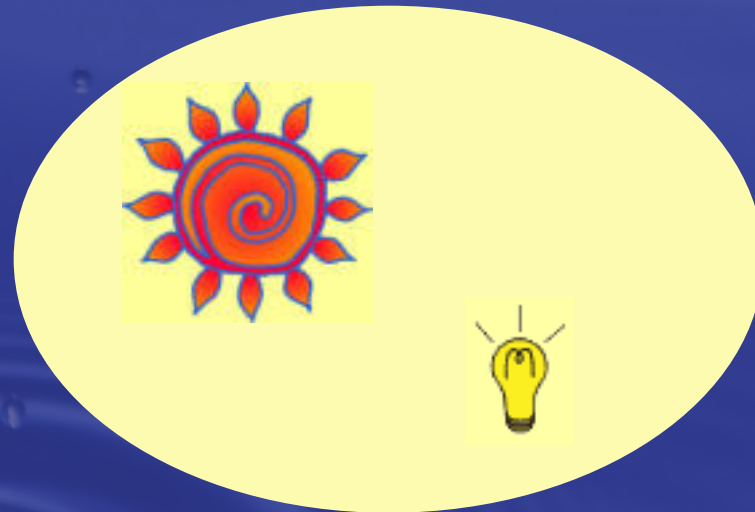
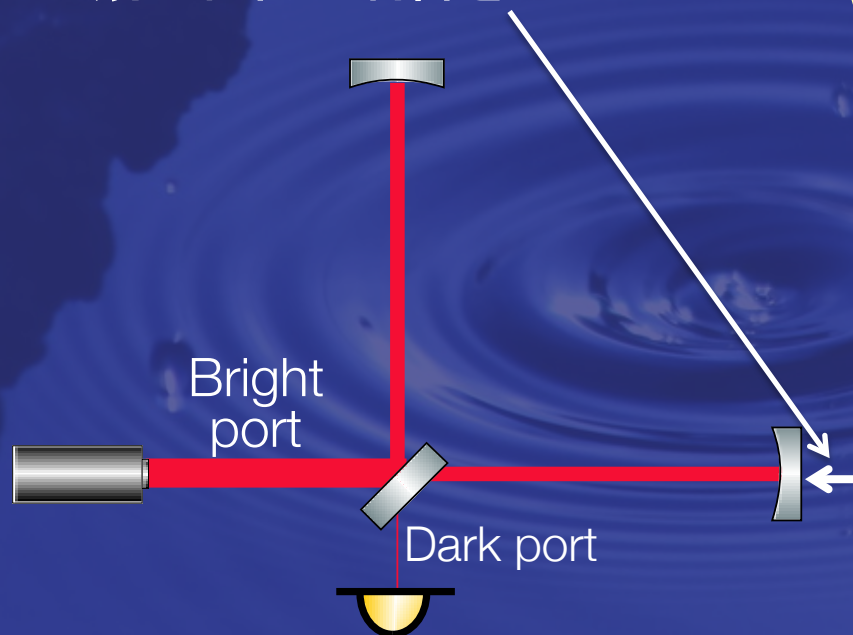


重力波が到達すると朝夕力として鏡を揺らす  
両腕の微小距離の変化を光の明暗で測定

期待される重力波の大きさは非常に小さく：  
 $1 \times 10^{-19} \text{m}$ 程度

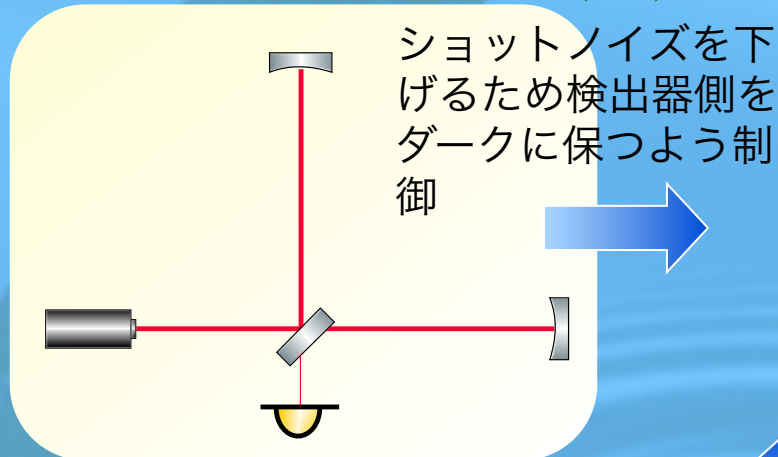
# さらに感度を上げるために

戻ってくる光が、測定側で  
常に暗く(Dark port)なるように  
鏡の位置に制御をかける

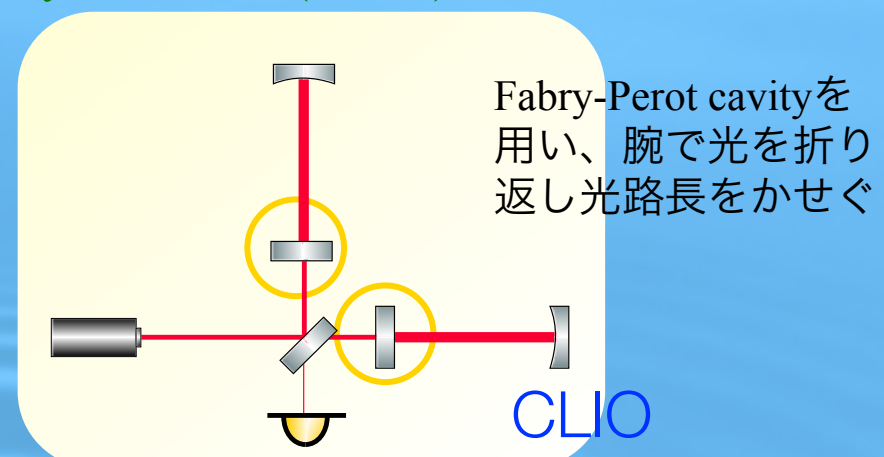


# 干渉計光学設計の発達

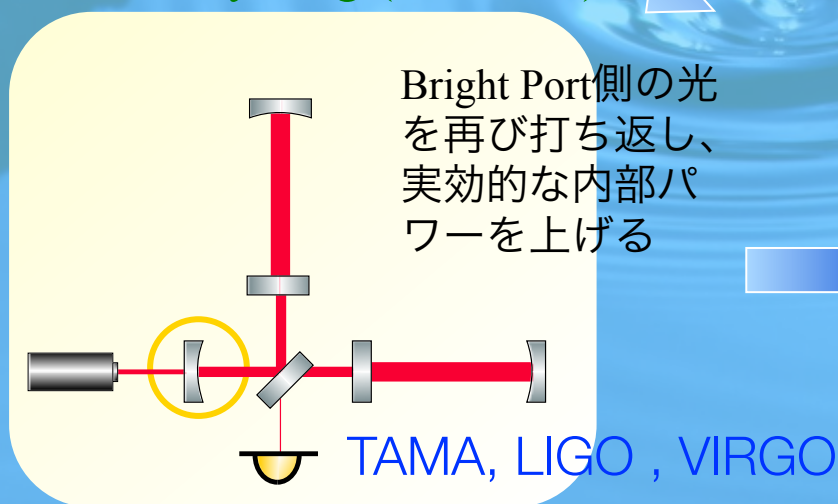
## Michelson interferometer (MI)



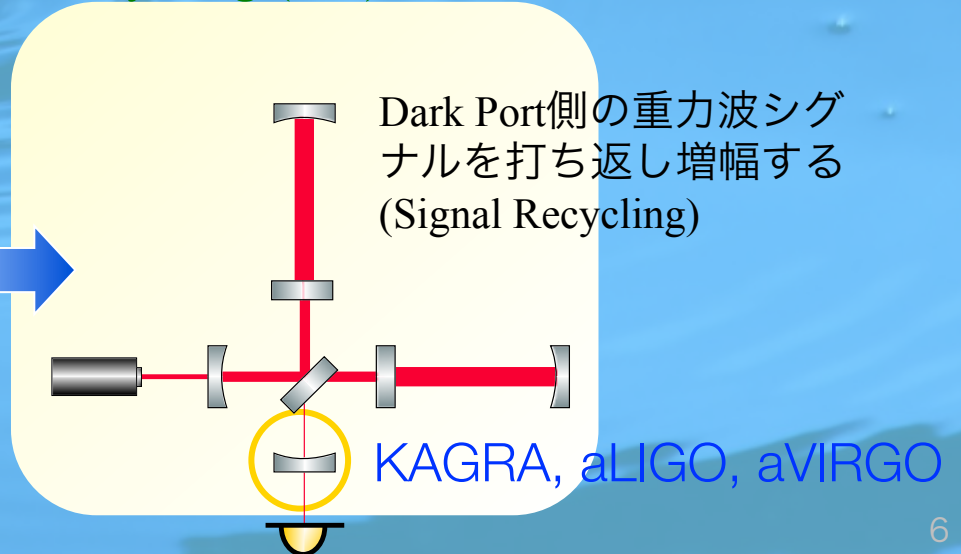
## Fabry-Perot MI (FPMI)



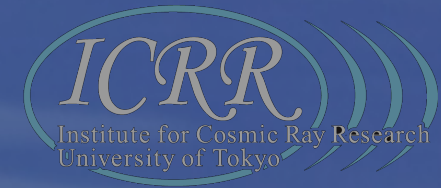
## Power recycling (PRFPMI)



## Dual recycling (DR)



# 日本の主力重力波検出器

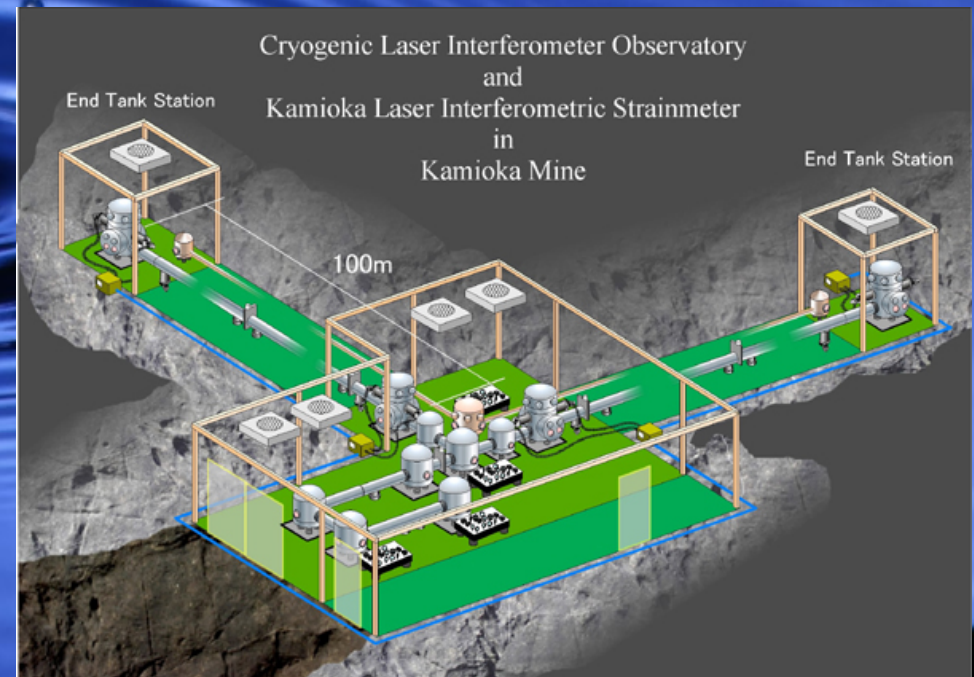


## TAMA300

- 基線長 300m、国立天文台三鷹キャンパスに建設
- 銀河近傍で発生する重力波イベントを検出可能な**実証型検出器**の建設
- 将来の km 級干渉計のための**技術開発**

## CLIO

- 基線長100m、神岡鉱山内に設置
- KAGRAの要素技術のひとつ**低温動作**の検証



# KAGRAの建設予定地

Gifu Pre.  
Hida-city  
Kamioka ▲  
Ikenoyama mt.

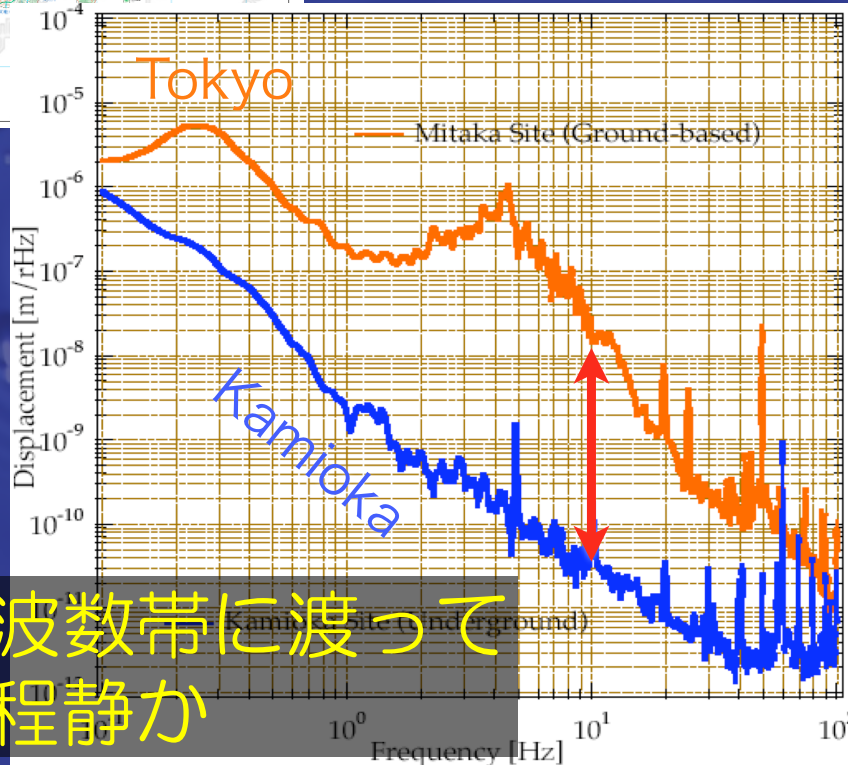
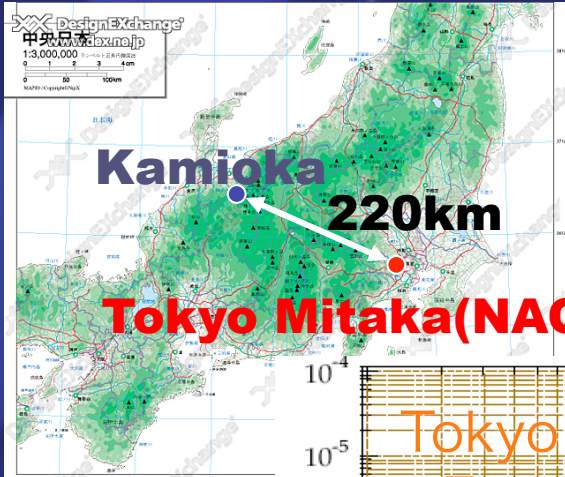
## KAGRAの3つの特徴

1. 神岡地下のサイト
2. 低温ミラー
3. 狭帯域可変干渉計



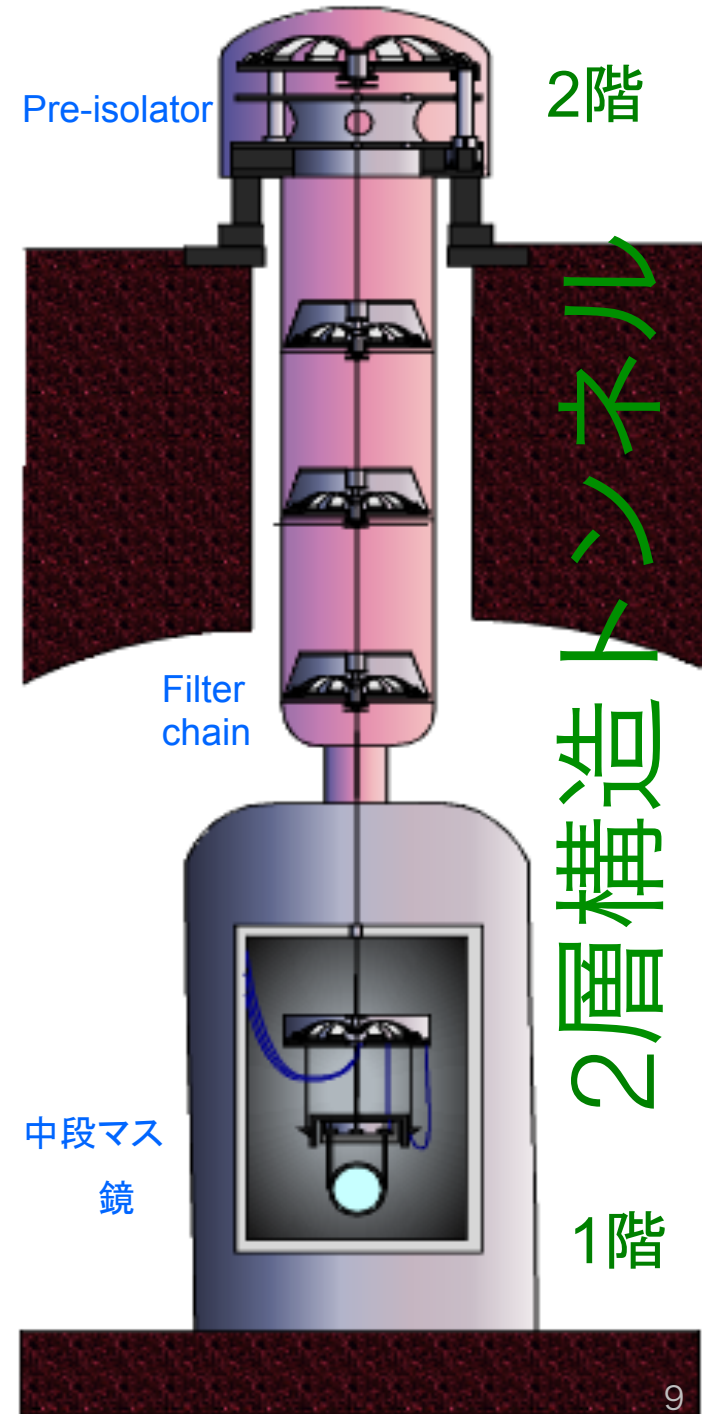


# 神岡地下サイト



広い周波数帯に渡って  
2-3桁程静か

Amplitude of seismic motion



2階

トンネル

2層構造

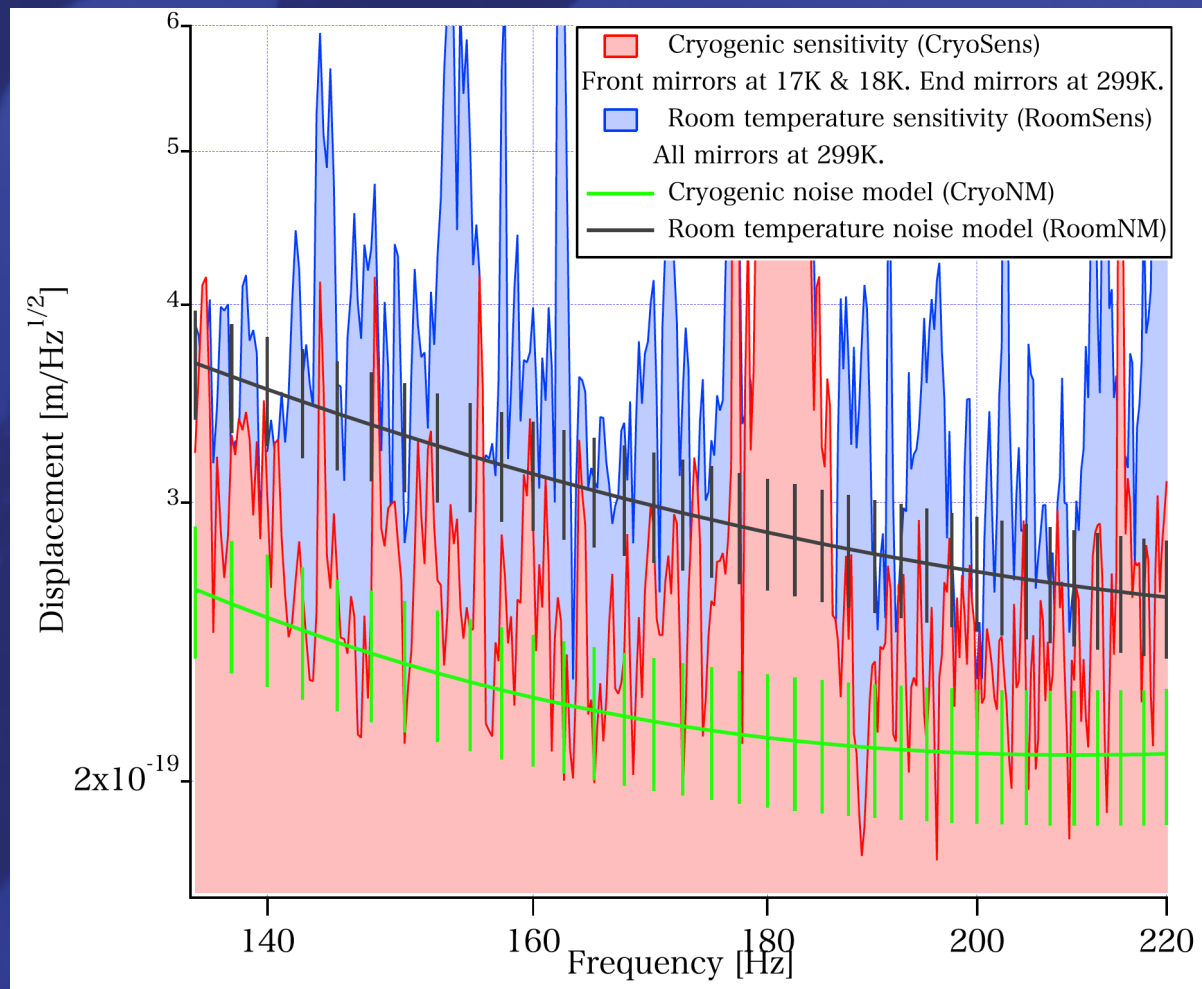
1階

Pre-isolator

Filter chain

中段マス鏡

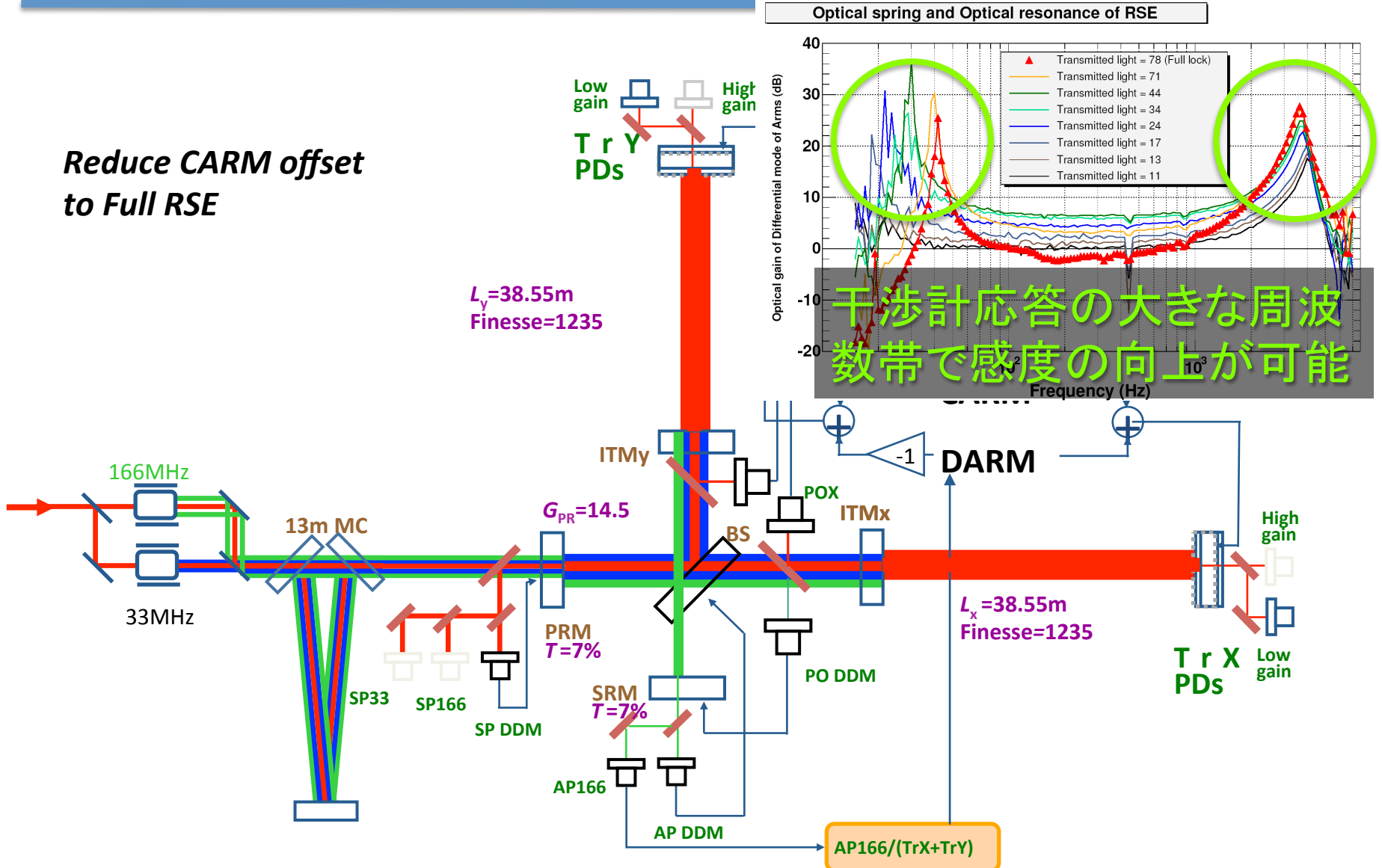
# 低温ミラーによる熱雑音の低減



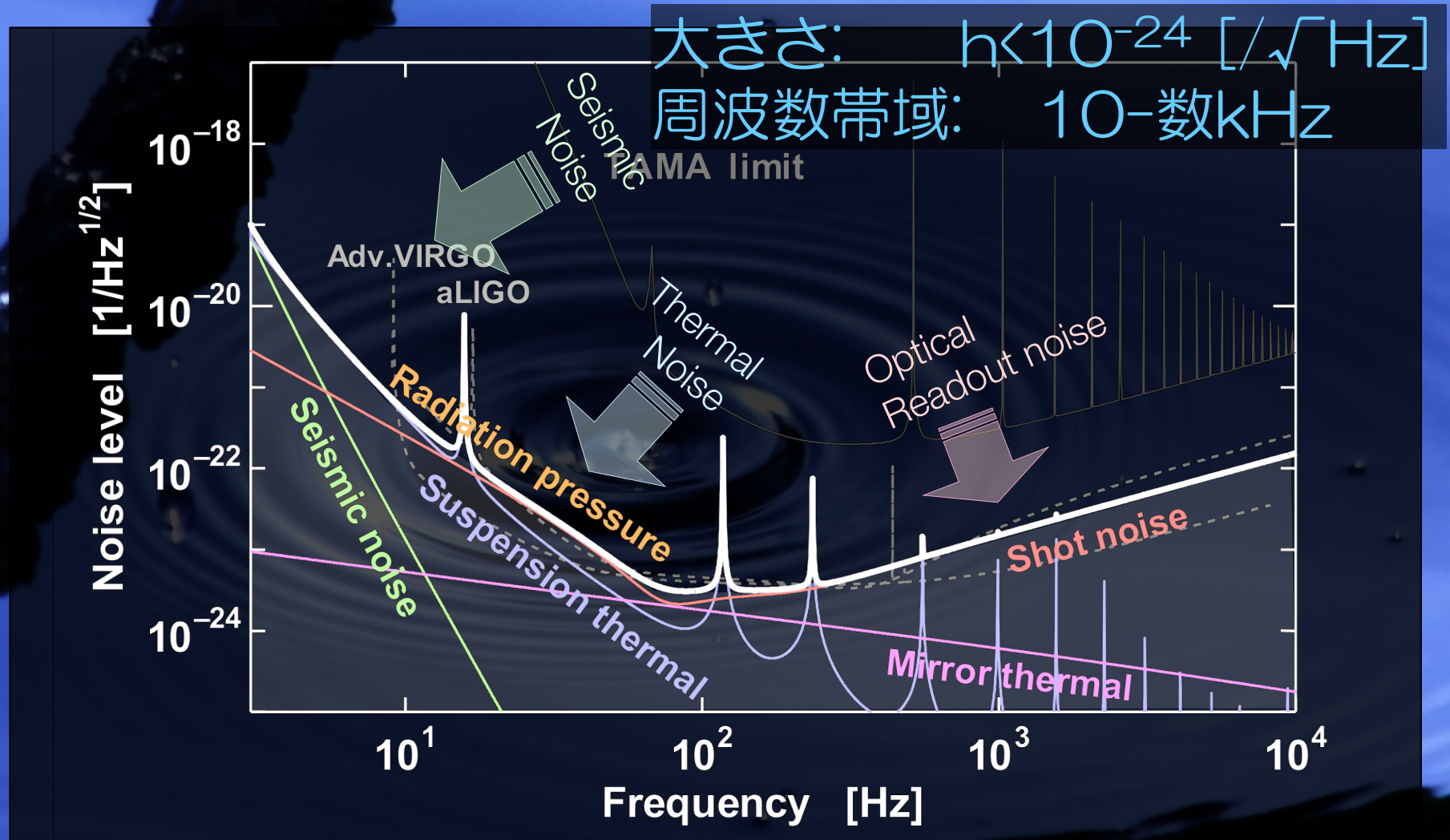
鏡を300Kから20K以下  
に下げることにより、実  
際に感度が向上した!

# Lock acquisition procedure towards detuned RSE

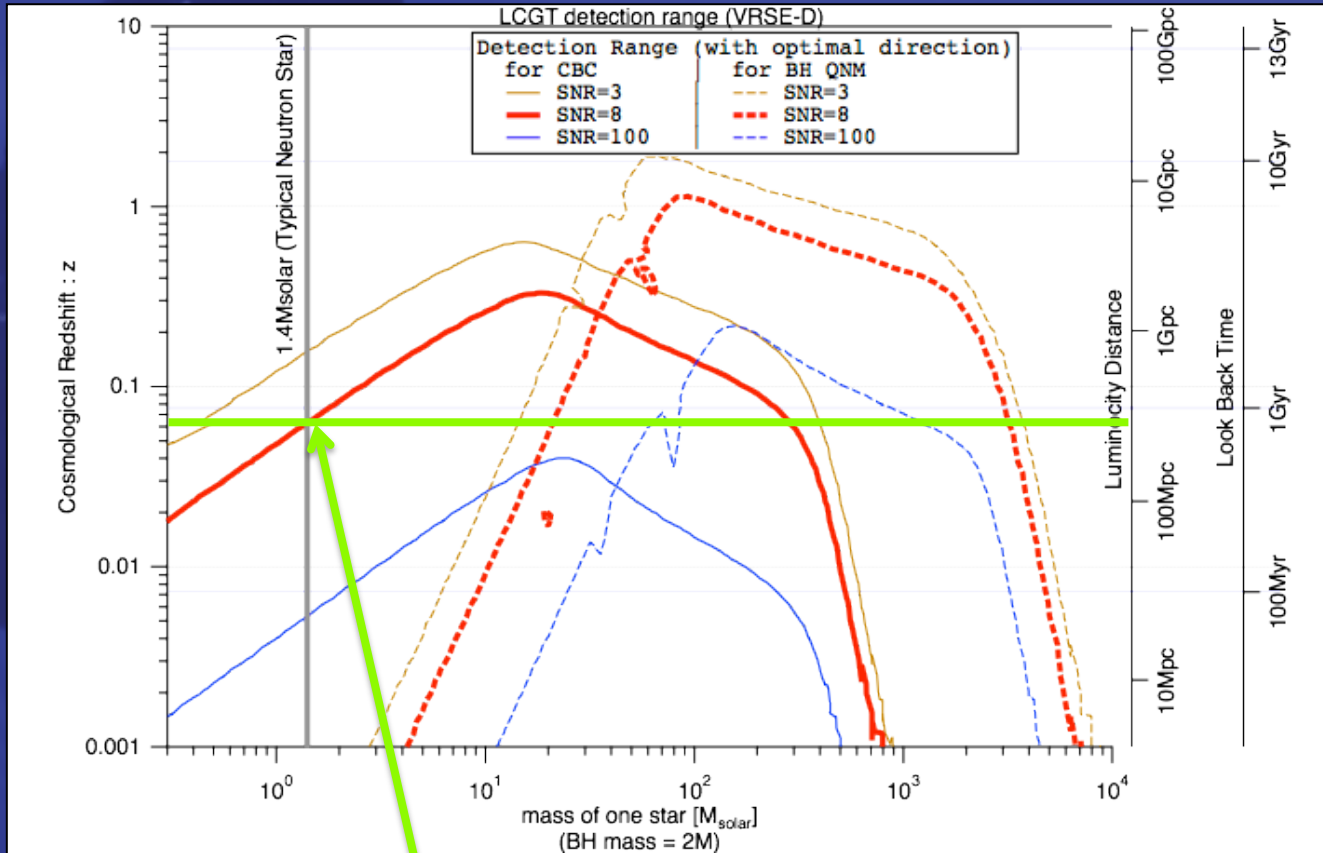
Reduce CARM offset to Full RSE



# KAGRAの感度



# KAGRAの観測範囲



8.2億光年先の中性子連星の合体

KAGRAのイベントレート:  $9.8_{-6.6}^{+14}$  /年

# 計算機を使った干渉計制御

LIGO control room



- 最近の重力波検出器では、制御、測定、チューニングなど、ほとんどのことがコントロールルームの計算機上でできる
  - » これはヒューマンノイズを避ける面からも重要である
- 優れたソフトウェアの開発が、感度向上など全体の進展に大きく関わる時代になっている



TAMA300 control panel

- ☑ CLIO用デジタルシステムのLIGOとの共同開発の準備
  - ☑ Requirements
  - ☑ MOU
- ☑ Real time systemの開発
  - ☑ 計算機のセットアップ
  - ☑ ADC/DAC/Binary output等の入出力カードの準備
  - ☑ 制御対象にあわせたReal time codeを書く(Matlab上)
  - ☑ MEDMIによるGUIでのヒューマンインターフェースの準備
- ☑ AA/AI/Whitening/Dewhitening回路の初期開発、テスト、デバッグ、量産体制
- ☐ Lock acquisition
  - ☑ 光路長制御のMass lockのループを完全にDigital制御で置き換え完了  
 信号→whitening→AA→ADC→Real time PC→DAC→AI→Dewhitening→Actuator
  - ☑ 線形化、入射パワーによる規格化などのAdvanced lock
    - ☐ MCロックアキュイジションのスキプト化
    - ☐ 一本目の腕まで含めた、フルオートロックシステム
- ☑ Calibration、常時感度モニタ
- ☑ Whitening/DewhiteningによるADC/DACノイズの低減
- ☑ CLIOレベルの感度で実用的に稼働可能かどうかのチェック
- ☐ アラインメント
  - ☑ Pico motor driverの開発
  - ☑ QPDオートセンタリングシステム
    - ☐ 初期フルアラインメントシステム(腕を含む)
- ☐ 温度、湿度、ダスト、音、地面振動などのSlow信号モニター(年単位のデータ蓄積)
- ☐ オートNoise Budge
- ☑ その他R&Dへの応用 → LSPIの制御にも使用

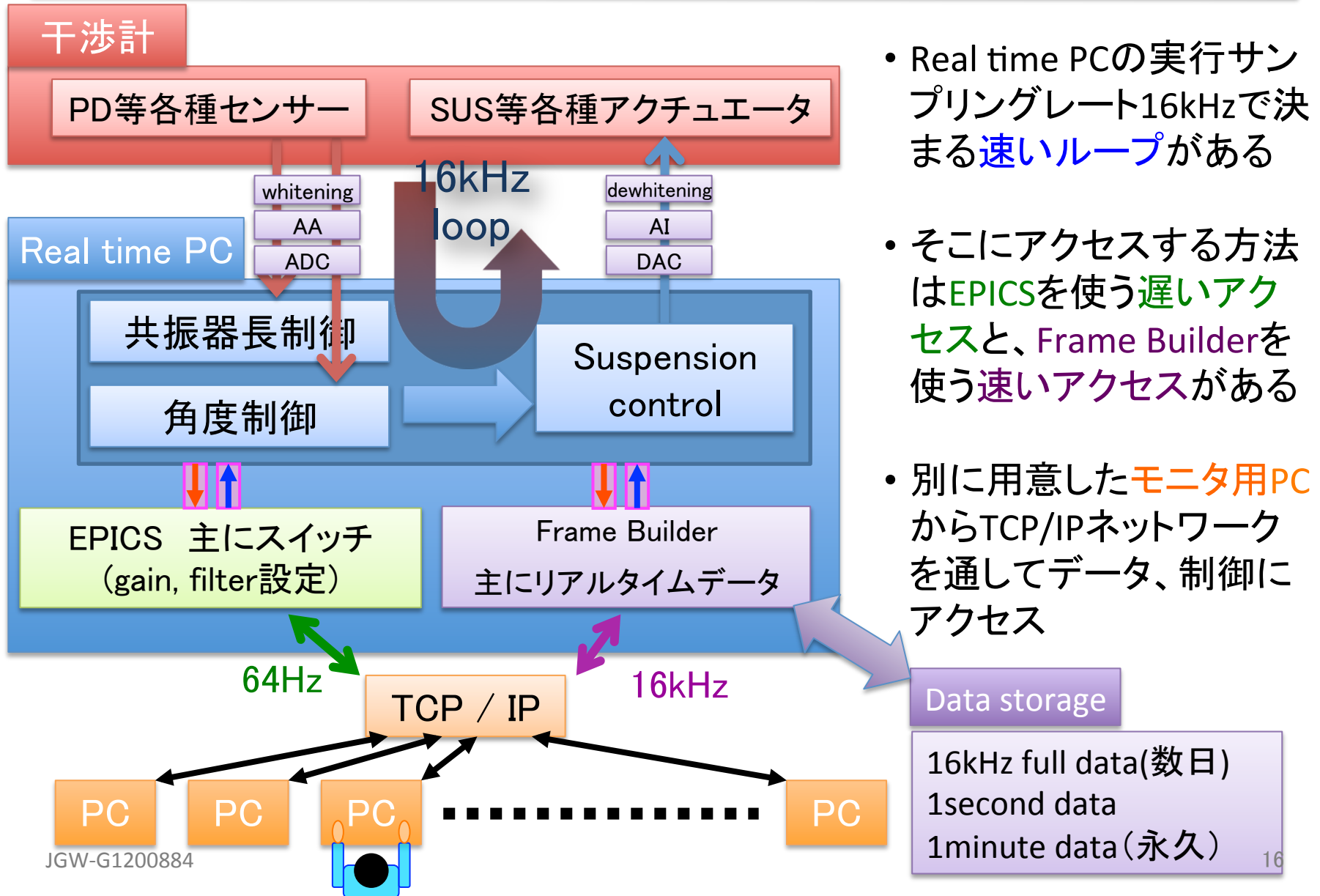
第0 phase  
準備

第1 phase  
ロック

第2 phase  
ノイズ

第3 phase  
拡張

# 重力波検出器のための 計算機によるリアルタイム制御の概念図



- Real time PCの実行サンプリングレート16kHzで決まる**速いループ**がある

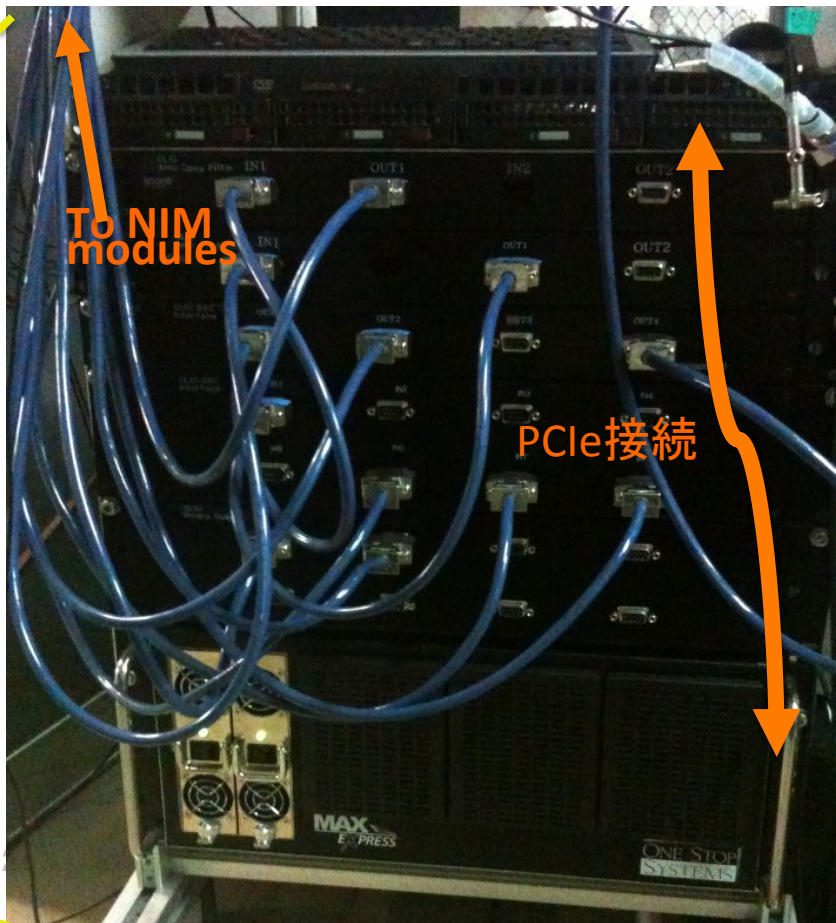
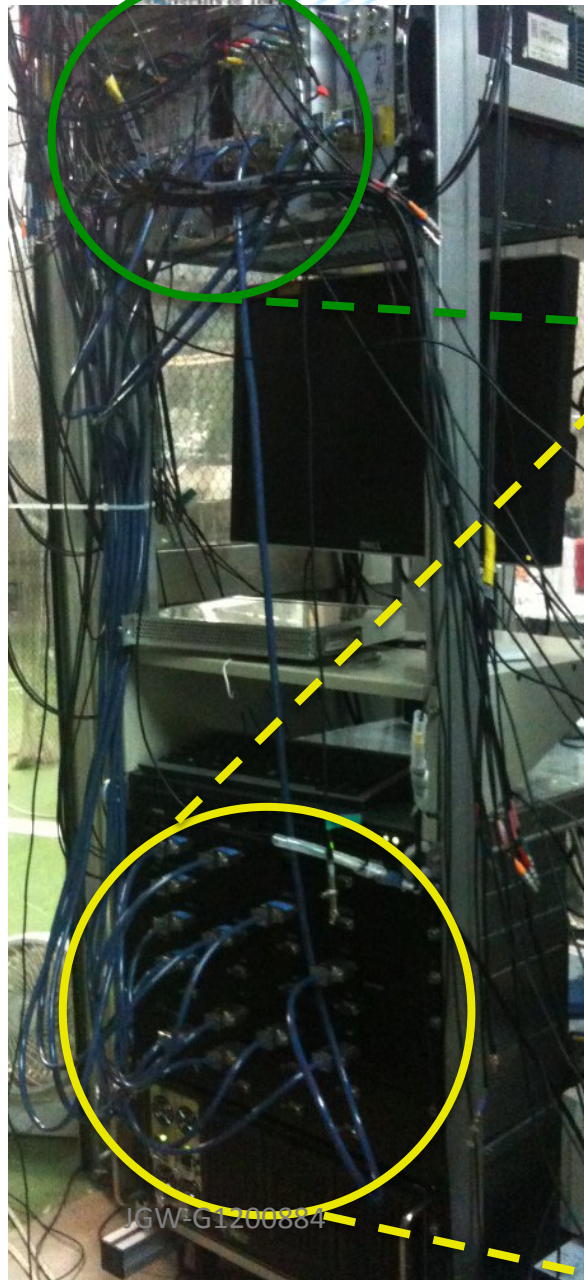
- そこにアクセスする方法はEPICSを使う**遅いアクセス**と、Frame Builderを使う**速いアクセス**がある

- 別に用意した**モニタ用PC**からTCP/IPネットワークを通してデータ、制御にアクセス





# Pictures



**Real time PC**  
CentOS 5.2+real time kernel  
4core x 2 Xeon

Anti Imaging filters  
Anti Alias filters

DAC adapter

ADC adapter

Binary output adapter

ADC/DAC  
In Expansion Chassis

ADC:32ch/枚、\$4K

DAC:16ch/枚、\$3.5K<sup>17</sup>

Binary Output:32ch/枚、\$250

# Client system

MEDMメニュー

DTTメニュー

オートロックスクリプト  
コントローラ(自動制御)

MEDM  
(マニュアル制御)

Dataviewer(オシロ)

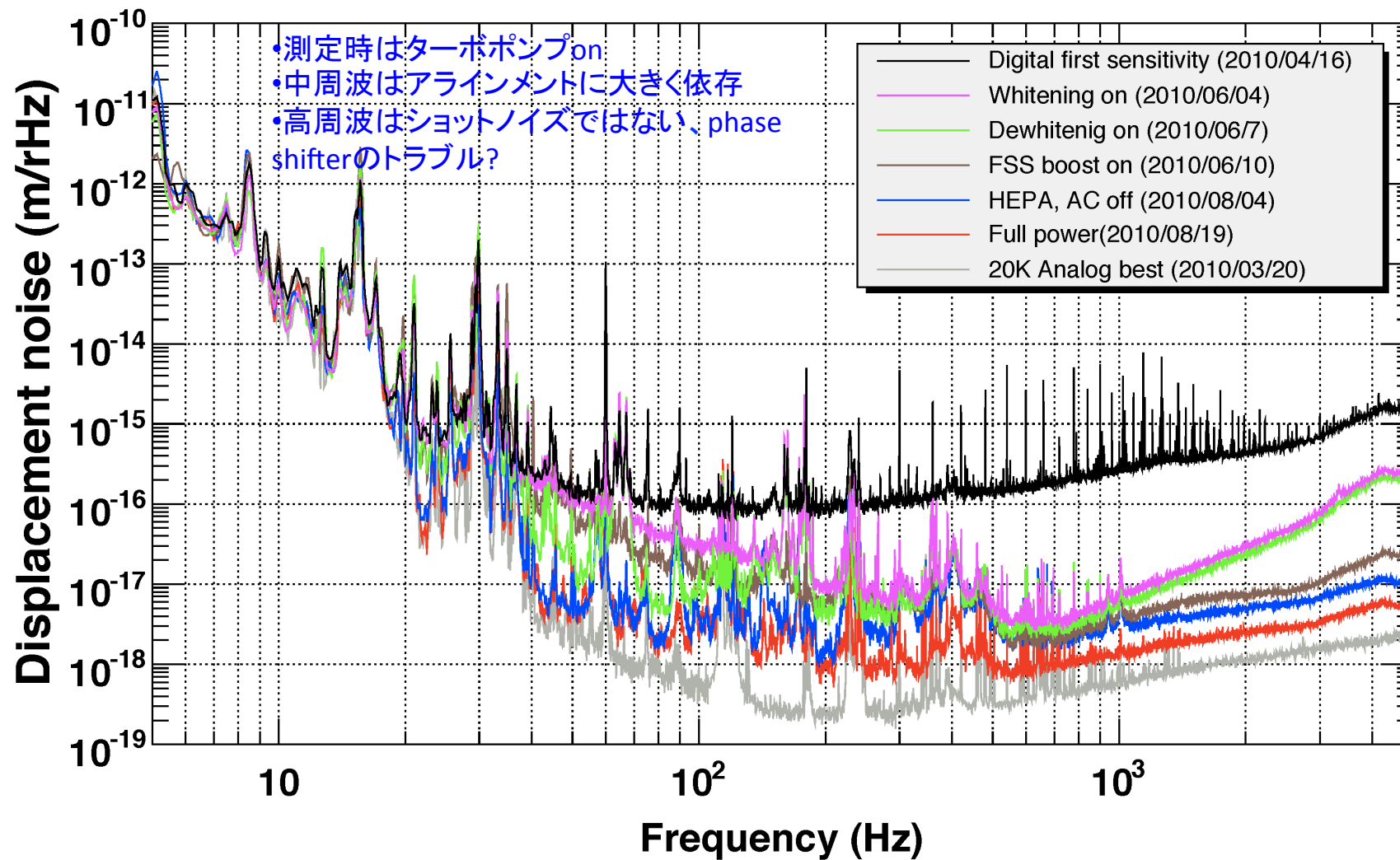
DTT (FFT)

DTT (Swept sine)

- 問題点:ADC (analog to digital converter), DAC (digital to analog converter)でのノイズが大きい
  - Analog  $\sim 1\text{nV}/\text{rHz}$
  - ADC/DACでのNoise  $\sim$ 数 $\mu\text{V}/\text{rHz}$
- Whitening filter, Dewhitening filter
  - 通常信号はDCで大きく、高周波で小さくなりノイズに埋もれる。
  - 単純にゲインを上げるとDCでサチるので、DCでのゲインを変えず、高周波でゲインを上げ、信号を平坦化 (Whitening) して、ADCに入れることにより、実施的にADCのノイズを回避する。
  - 逆に、DACから出た平坦な信号をもとのスペクトルに戻す (Dewhitening) ことにより、DACのノイズを回避する。

# Digital制御での現CLIO感度

## CLIO sensitivity



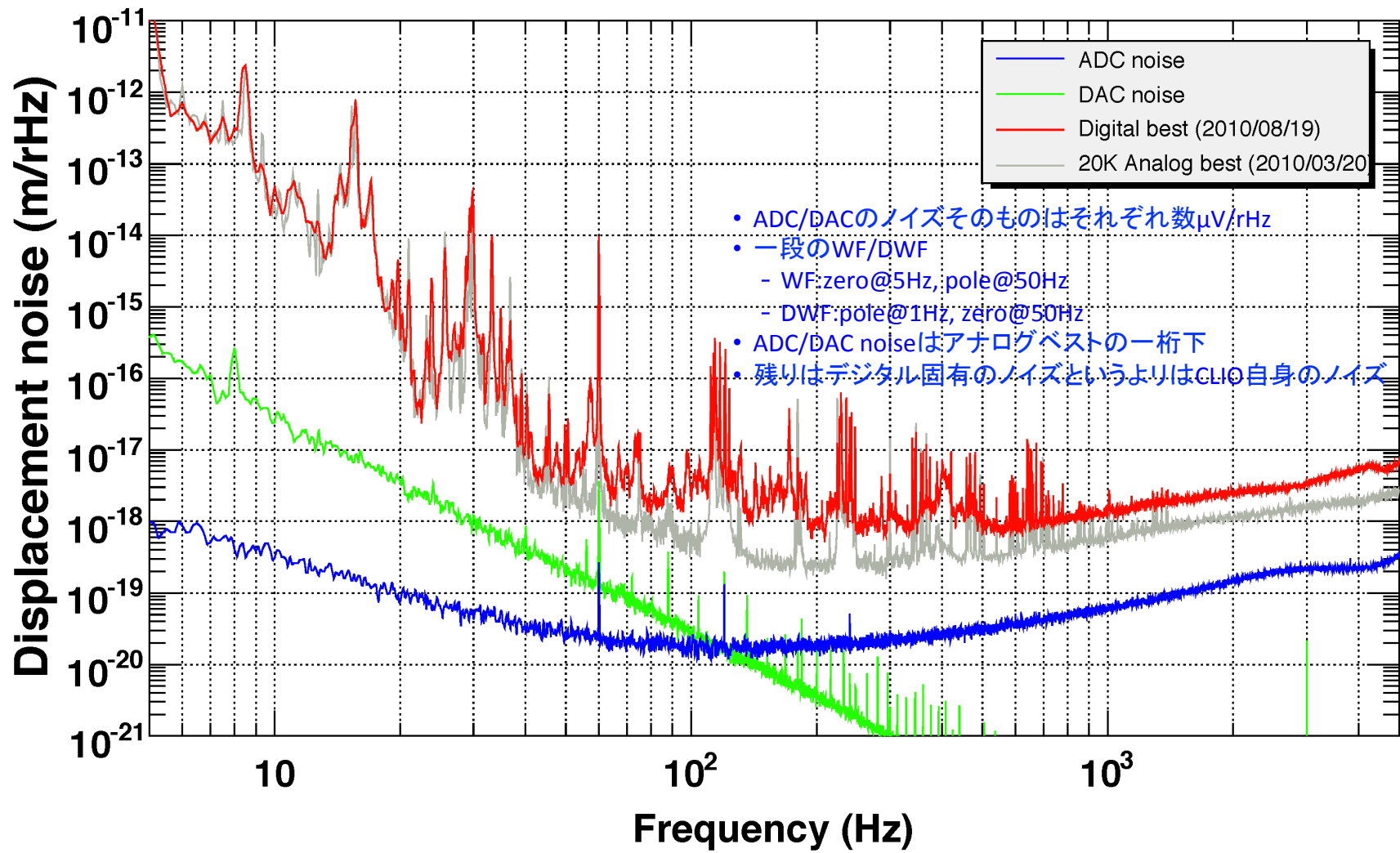
\*T0=16/04/2010 05:37:10

\*Avg=1/Bin=4L

\*BW=0.187493

# AD/DAC noise

## CLIO sensitivity



\*T0=08/09/2010 01:16:38

\*Avg=17/Bin=4L

\*BW=0.187493

# 組織的若手研究者派遣プログラム



2010/12/1-2011.1/31

1. カリフォルニア工科大学  
~1.5month

⇒ CLIO systemのアップグレード

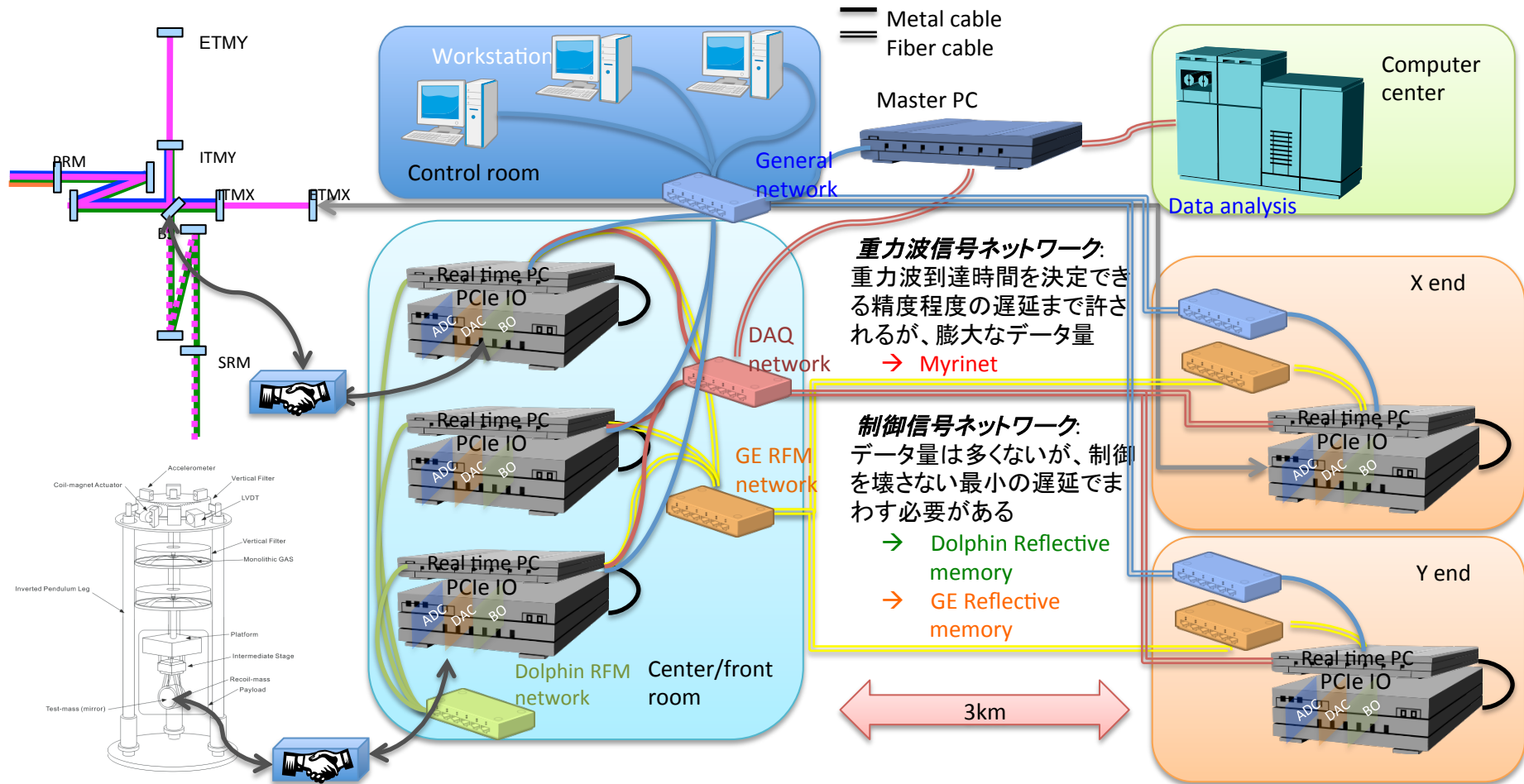
⇒ Real time OSの入れ替え

2. LIGO Hanford site  
~2weeks

⇒ 全体システムのデザイン

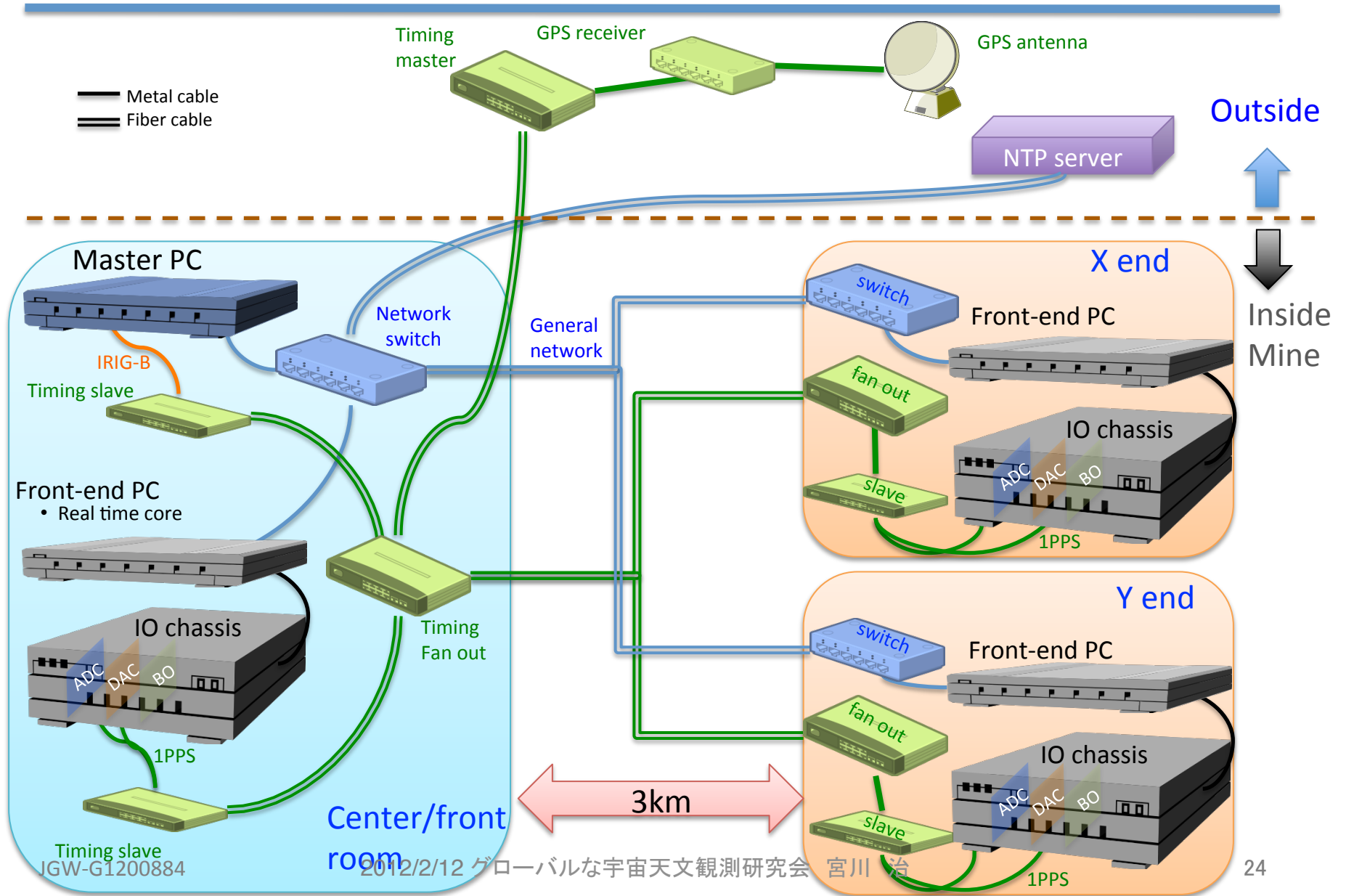


# Digital system Network design



計算機一台でのリアルタイム制御はそれほど難しくはない。  
 2台目以降を繋ごうとしたとたんに格段に難しくなる

# Timing Network

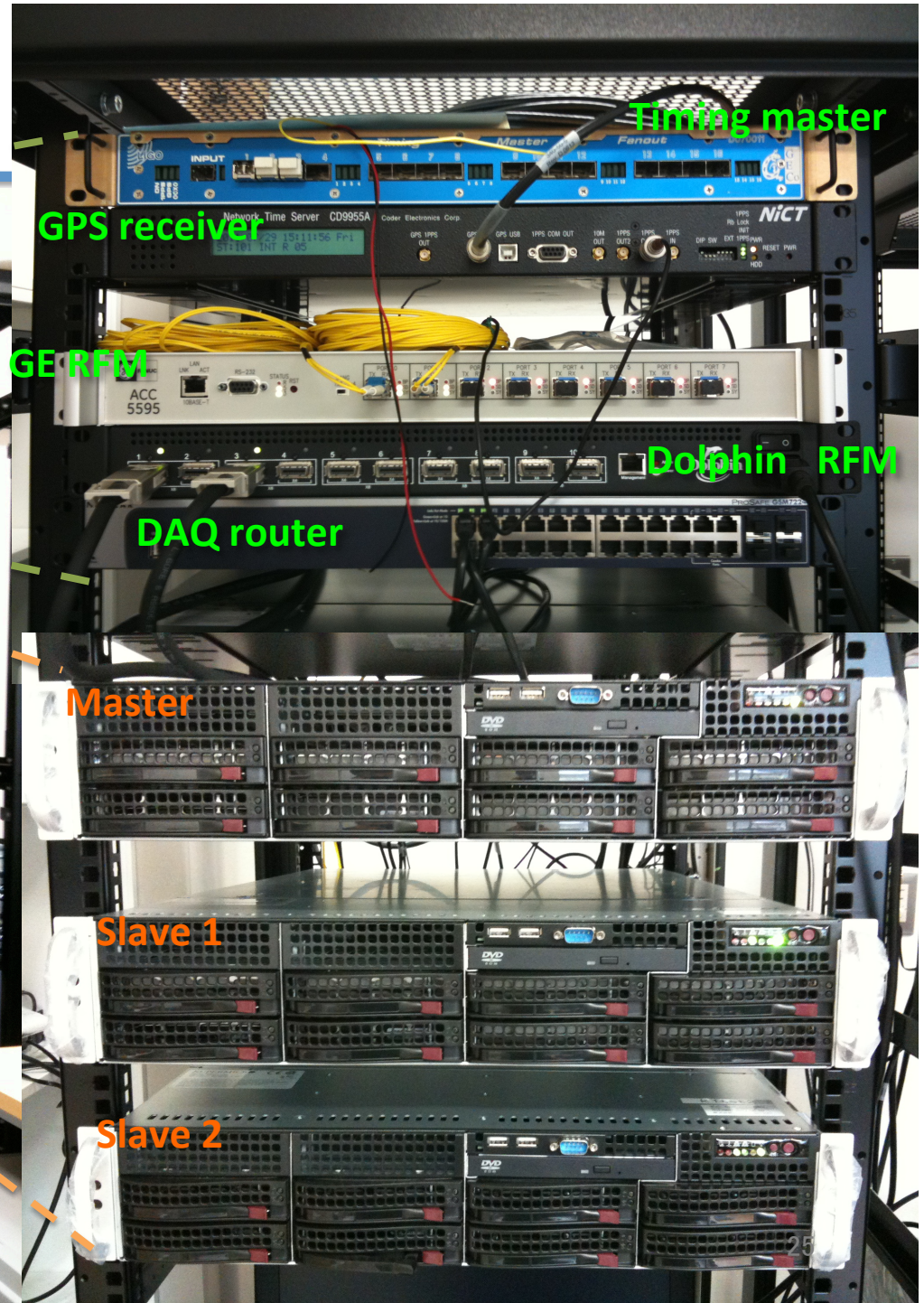


Timing slave  
JGW-G1200884

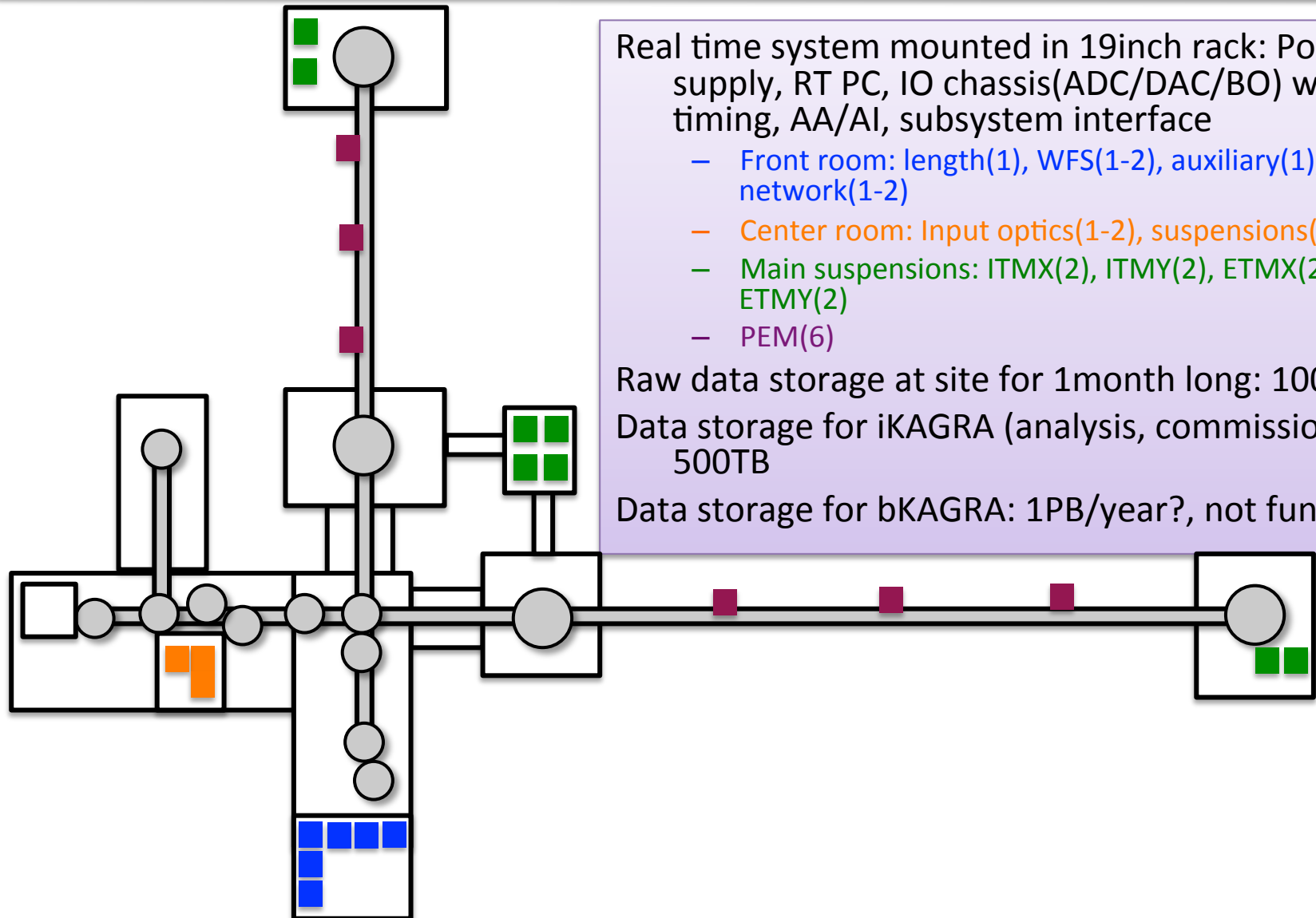




# Network test



# RT rack position



Real time system mounted in 19inch rack: Power supply, RT PC, IO chassis(ADC/DAC/BO) with timing, AA/AI, subsystem interface

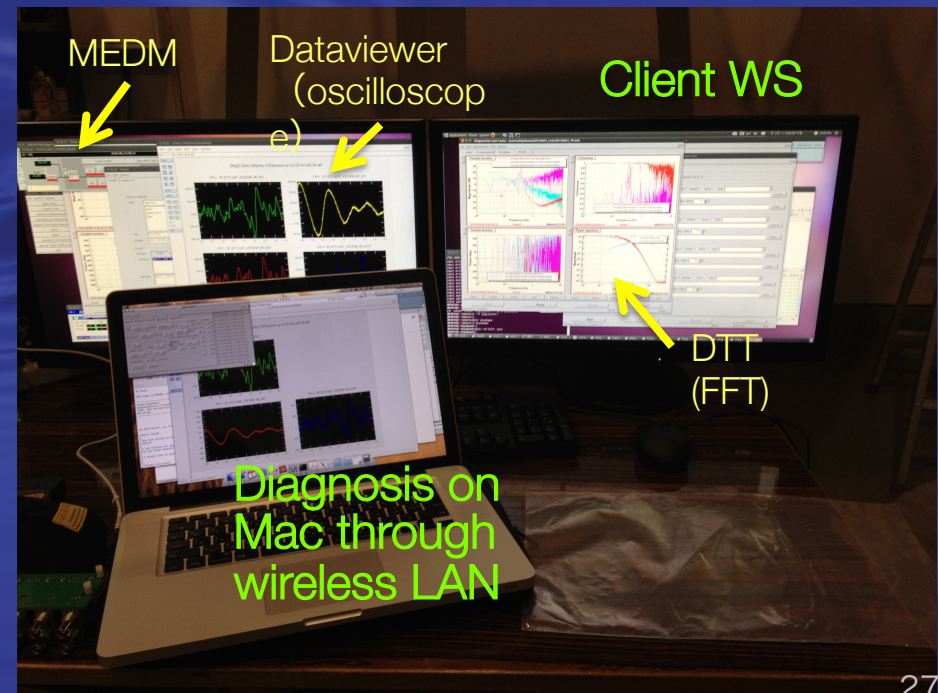
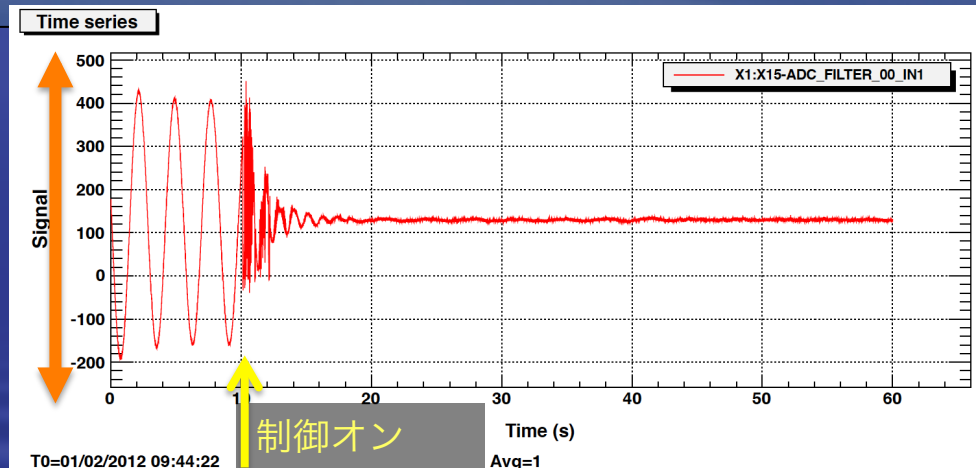
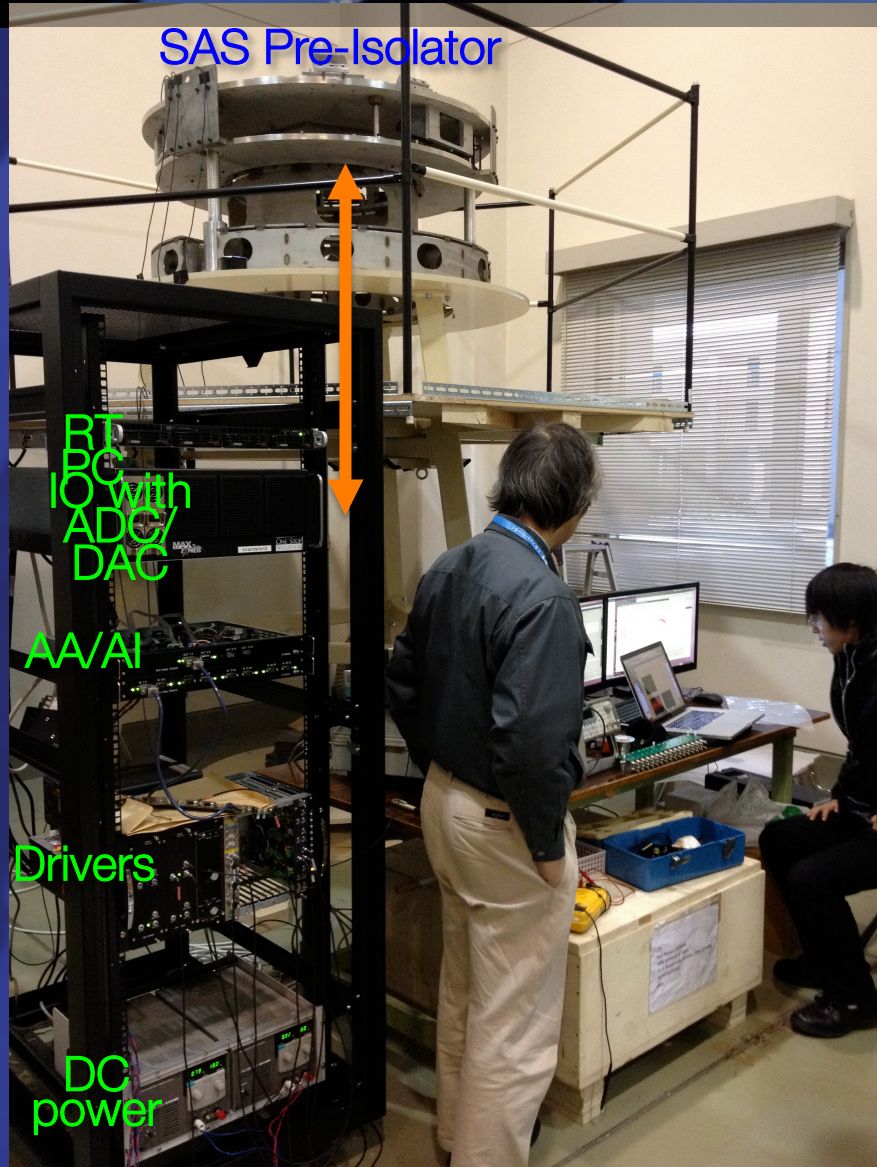
- Front room: length(1), WFS(1-2), auxiliary(1), network(1-2)
- Center room: Input optics(1-2), suspensions(1-3)
- Main suspensions: ITMX(2), ITMY(2), ETMX(2), ETMY(2)
- PEM(6)

Raw data storage at site for 1month long: 100TB

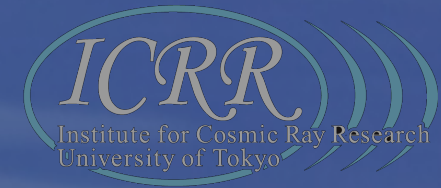
Data storage for iKAGRA (analysis, commissioning): 500TB

Data storage for bKAGRA: 1PB/year?, not funded

# Control for KAGRA Seismic Attenuation System using digital system at ICRR, Kashiwa



# KAGRA スケジュール



|                |                        |
|----------------|------------------------|
| 2012.4-2014.3  | トンネル掘削                 |
| 2014.4-2015.11 | 初期干渉計(iKAGRA)インストール・調整 |
| 2015.11        | iKAGRAによる観測            |
| 2015.12-2017.3 | 最終干渉計(bKAGRA)インストール    |
| 2017.3-2018.8  | bKAGRAによる観測・調整         |
| 2018.9-        | 本格的観測                  |

## TAMA

### 重力波検出技術開発

長基線干渉計稼動技術  
干渉計光学構成の研究  
重力波観測技術  
エレクトロニクス  
低周波防振技術・メカニクス

技術移転

## CLIO

### 神岡鉱山における低温鏡干渉計の開発

低温技術・鏡冷却技術  
神岡鉱山内における施設建設  
低周波帯(~100Hz)感度の向上

### 鏡低温化による感度向上実験

熱雑音感度の実現  
低温化による感度向上の確認

### 計算機を利用した干渉計制御

デジタル固有のノイズの同定  
柔軟なインターフェースの実現

技術移転

システム共通化・共同開発によるさらなる省力化・効率向上

国際協力  
aLIGO  
デジタル制御

Caltech 40m  
RSE制御の技術

VIRGO  
低周波防振

# KAGRA