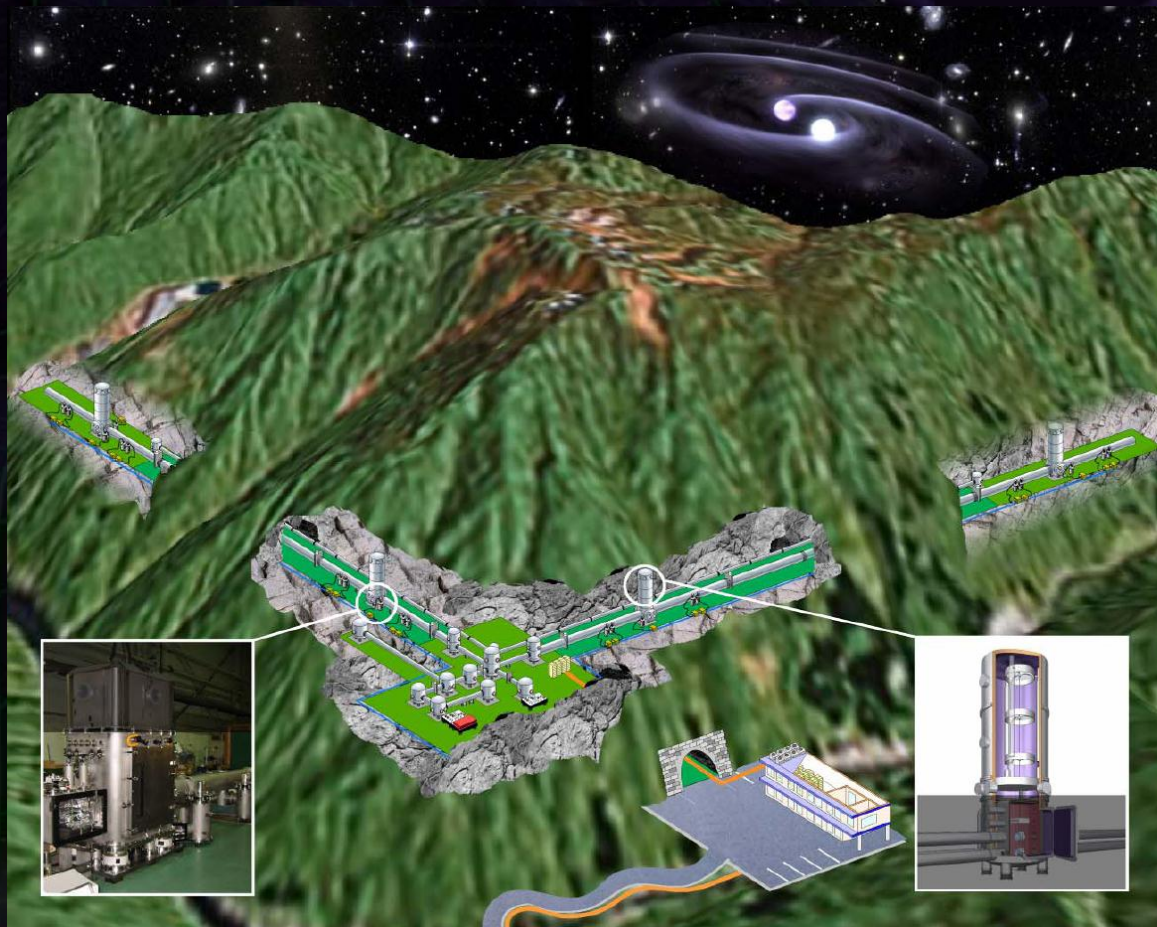


# 大型低温重力波望遠鏡KAGRA



**安東 正樹**

(国立天文台 重力波プロジェクト推進室)

On behalf of  
the KAGRA Collaboration



## 大型低温重力波望遠鏡 かぐら (KAGRA)



- 基線長3kmレーザー干渉計
- 地下サイトに建設。  
→ 長期安定動作.
- 鏡を20Kに冷却  
→ 熱雑音を低減.



年間1回以上の重力波  
イベントの観測を見込む.



# 新しい天文学を切り拓く

地上重力波望遠鏡 -- 10Hz – 1kHz の観測周波数帯

⇒ コンパクト天体, 高エネルギー天体現象

中性子星

ブラックホール

初期宇宙

パルサー

超新星爆発

連星合体

背景重力波

軟ガンマ線リピーター

EMRI

電磁波  
ニュートリノ  
高エネルギー宇宙線

星の  
振動  
モード

長ガンマ線  
バースト

短ガンマ線  
バースト

準固有  
振動

同時観測  
数値相対論

高エネルギー天体  
現象の総合的理解

高密度天体の状態方程式  
原子核物理

相対性理論の検証  
強い重力場での物理法則

現在の検出器 --- 近傍銀河までの観測範囲を持つ

ただ... そのような重力波イベントは稀 ( $10^{-4}$ - $10^{-2}$  event/yr)

⇒ 約1桁感度を向上した 第2世代の重力波望遠鏡

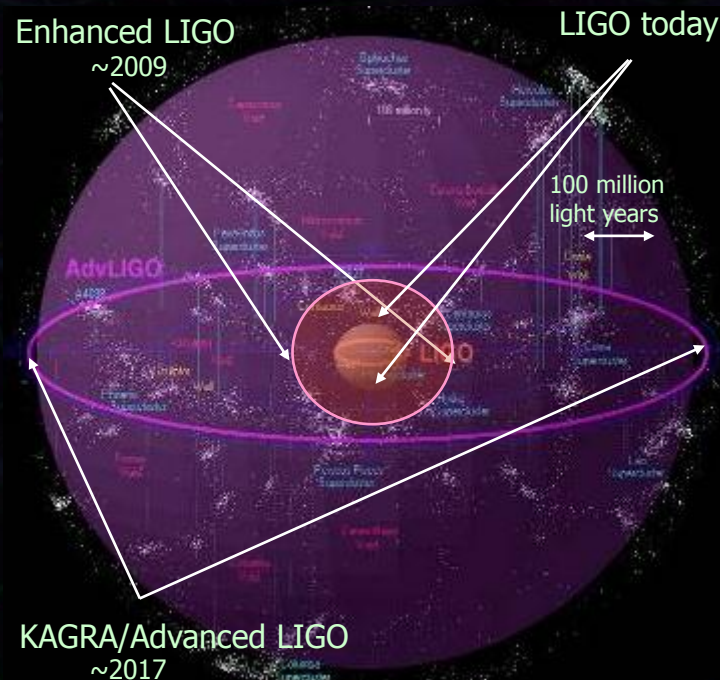
高感度化→より多くの銀河をカバー

(重力波の振幅)  $\propto 1/(\text{波源までの距離})$



感度が10倍向上

→ イベントレートは  $10^3$ 倍



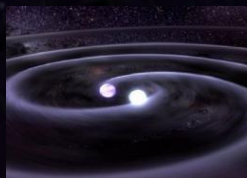
第2世代望遠鏡では、検出頻度  $\sim 10$  event/year



# 重力波望遠鏡の高感度化

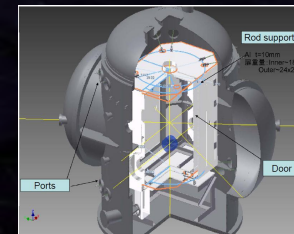
## ・重力波源の理解

理論・解析的計算  
数値相対論  
データ解析手法



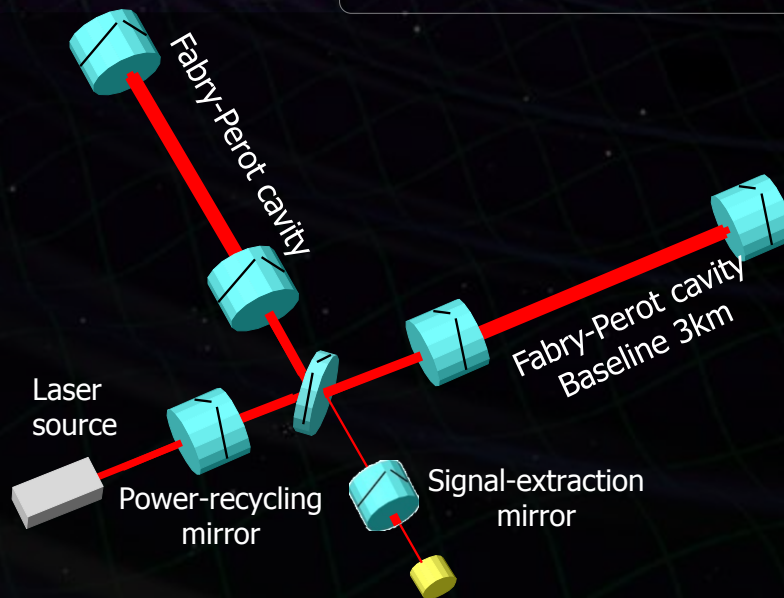
## ・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化  
材質の機械損失



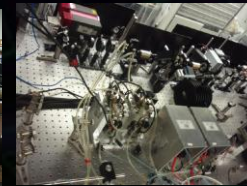
## ・地面振動の影響

静寂な地下サイト  
高性能防振装置



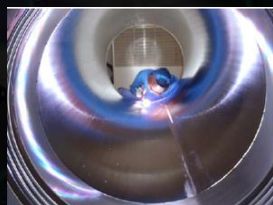
## ・光の量子雑音

大型干渉計  
干渉計方式の工夫  
高出力レーザー光源  
高性能鏡



## ・真空システム

光路長の揺らぎ  
音響雑音などの低減



## ・長期・連続観測

デジタル制御・データ取得系  
環境モニタ, データ保管・分配





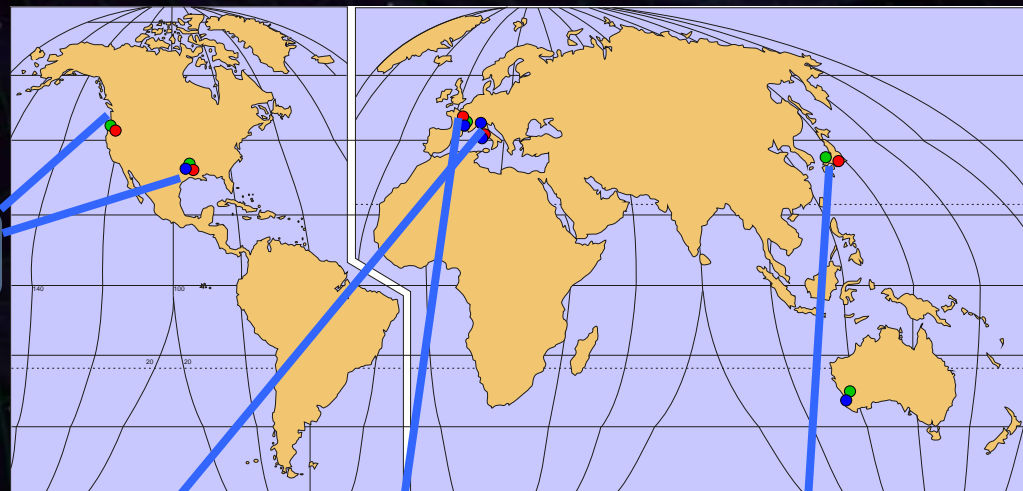
# 第2世代 重力波望遠鏡

国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 重力波天文学 (重力波の検出, 波源の情報, ...)



aLIGO (USA)  
4km x 2 (or3)



LIGO-Australia  
in proposal

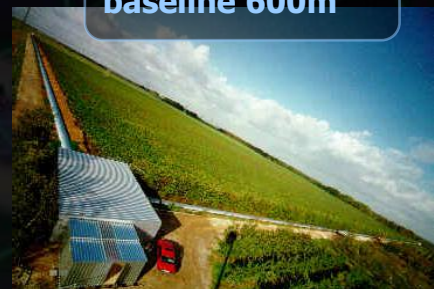


LIGO-India  
in proposal

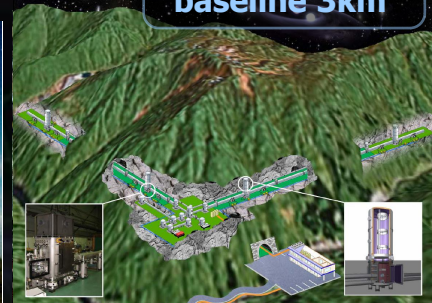
Adv. VIRGO (ITA-FRA)  
baseline 3km



GEO-HF (GER-UK)  
baseline 600m



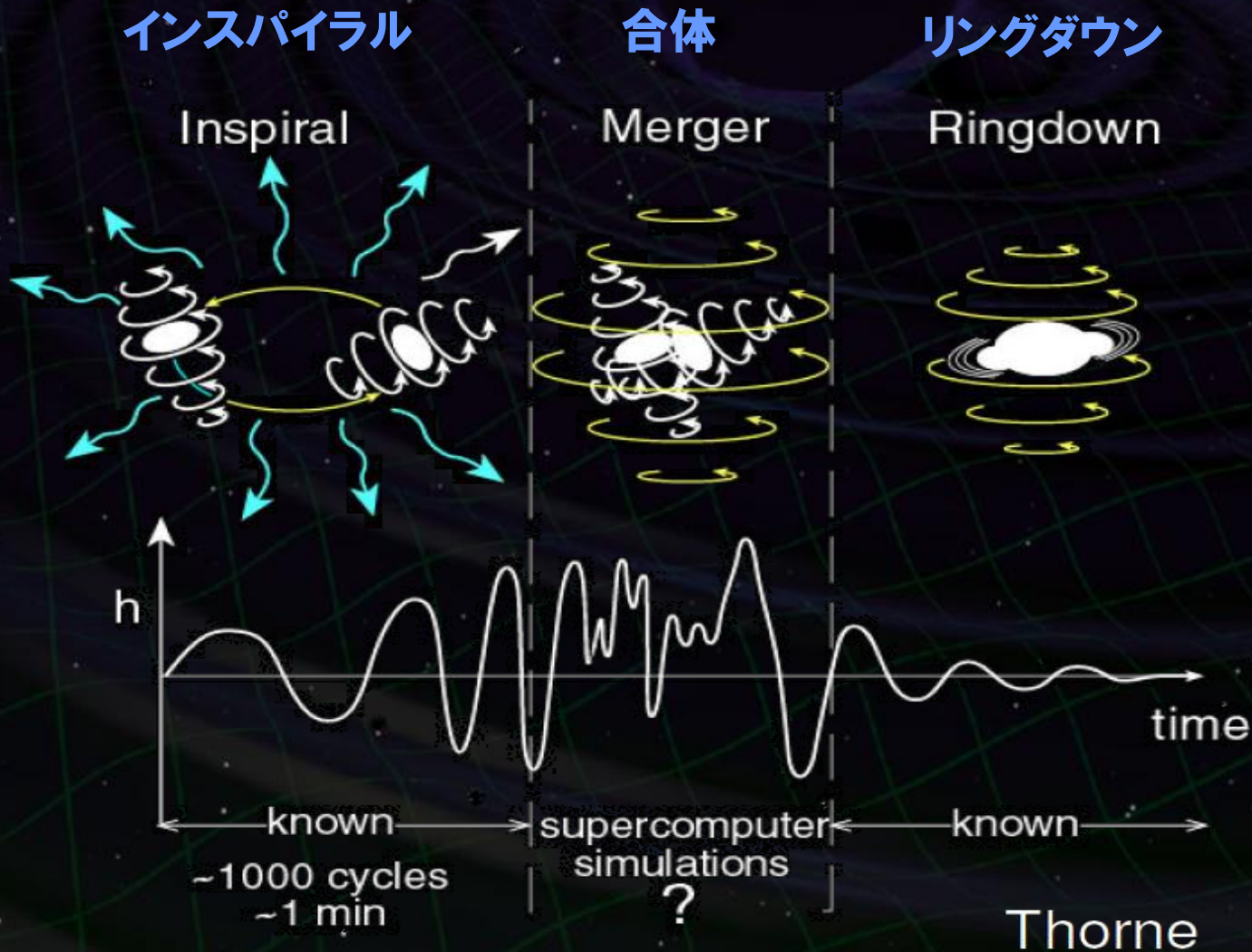
KAGRA (JPN)  
baseline 3km





# 連星合体現象からの重力波

## ・観測の第一ターゲット：連星中性子星合体現象



## • 重力波の初検出

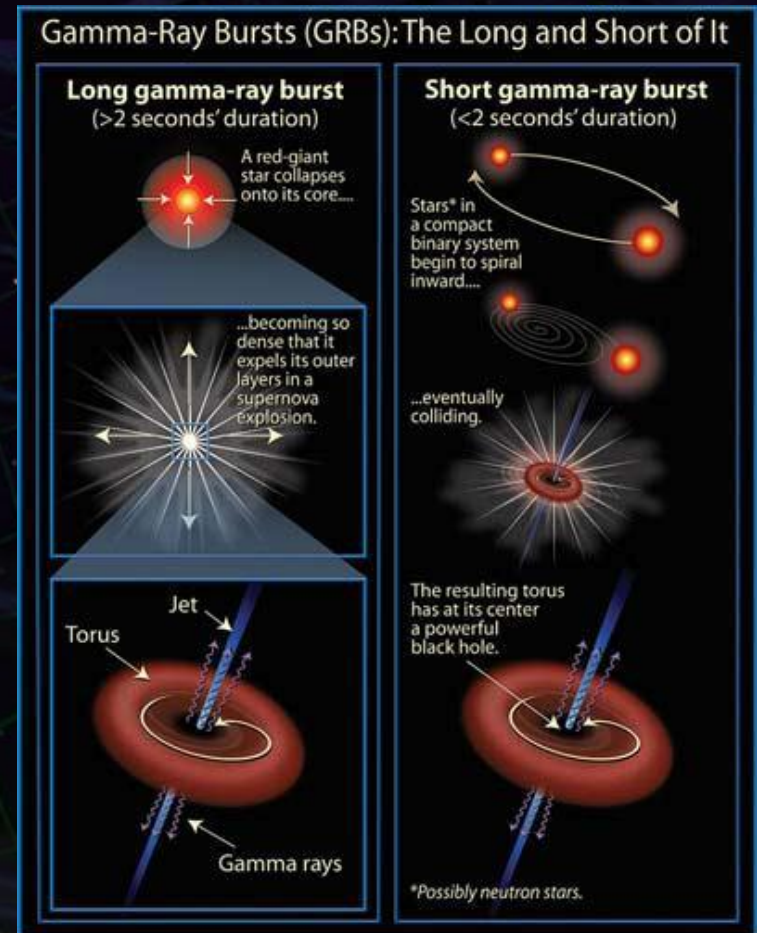
- 連星中性子星：存在が確実，波形が予測できる。
- 相対性理論/重力法則の検証。
- 新しい天文学の創生，
- ガンマ線バーストの起源，未知の発見。

## • 高密度核物質の直接探査

- 中性子星の状態方程式の情報。
- 潮汐変形/破壊，HMNSの形成など。

## • 宇宙論・銀河形成史に対する知見

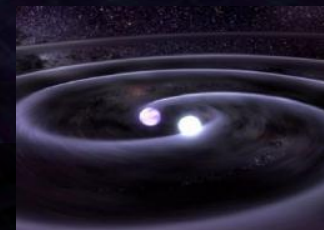
- 宇宙論パラメータへの制限。
- 超巨大ブラックホールの形成過程
- 連星の進化や分布の情報。



From encyclopedia of science



第一目標: **連星中性子星合体**からの重力波の検出



観測レンジ

感度曲線 → 観測可能距離 270 Mpc

(SNR 8, 最適方向・偏波)

銀河の個数密度:

$$\rho = 1.2 \times 10^{-2} \text{ [Mpc}^{-3}\text{]}$$

R. K. Kopparapu et.al.,  
ApJ, 675 1459 (2008)

銀河あたりのイベントレート:

$$\mathcal{R} = 118_{-79}^{+174} \text{ [events/Myr]}$$

V. Kalogera et.al.,  
ApJ, 601 L179 (2004)



KAGRAの観測レート **9.8 events/yr**

(1年間の観測での検出確率 99.9%以上)

※感度設計は変更  
される可能性があります。

## • 重力波の検出と重力波天文学の創生

- 1年間の観測で複数回の重力波信号の検出が期待できる。  
→ 重力波天文学の幕開け, 相対性理論の検証.
- 国際観測網における重要な拠点  
波形, 偏波などの情報 → 天体现象の情報.  
波源の位置の特定 → 電磁波観測も含めた波源の理解.

## • 先進的な干渉計技術の実証

- KAGRAの特徴: 低温干渉計, 地下サイトに設置.  
→ 第3世代望遠鏡 (Einstein Telescope) に必須の技術.  
⇒ KAGRAには、第2.5世代の望遠鏡としての役割もある.



## 岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

Facility of the Institute of Cosmic-Ray Research (ICRR), Univ. of Tokyo.



Neutrino

Super Kamiokande, Kamland

Dark matter

XMASS

Gravitational wave

CLIO, **KAGRA**

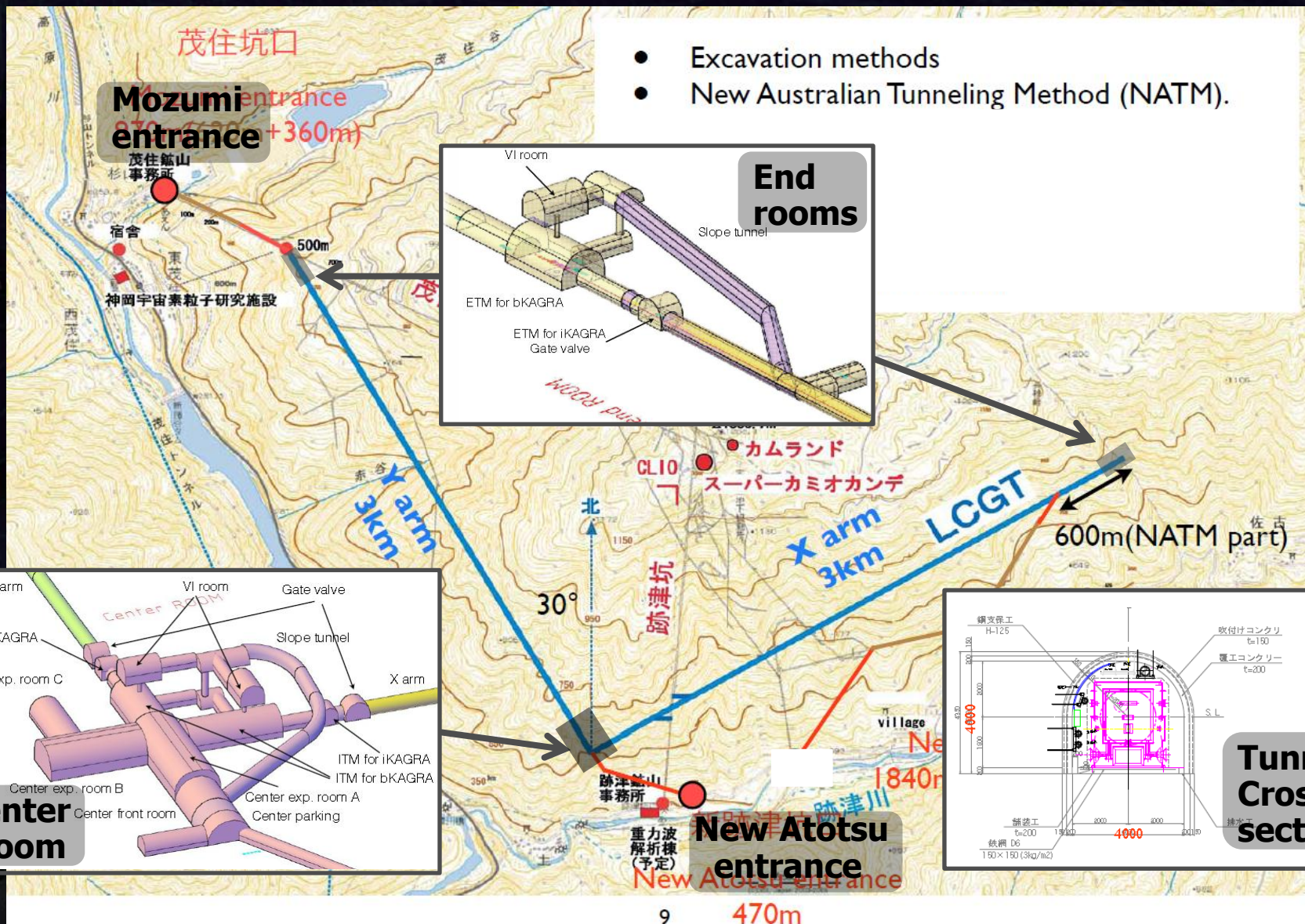
Geophysics

Strain meter

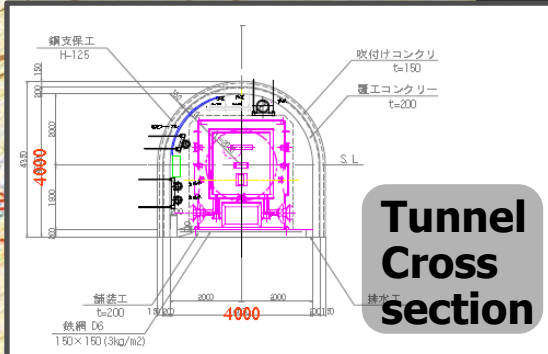
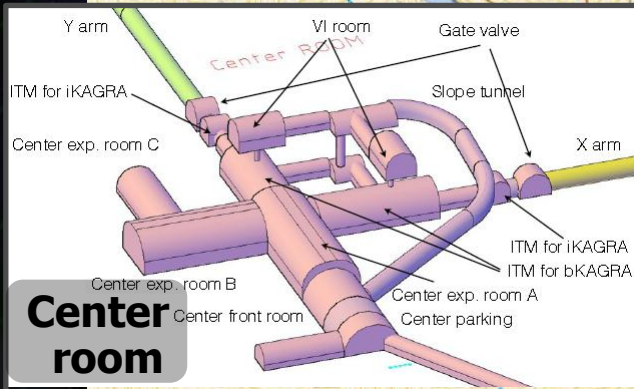
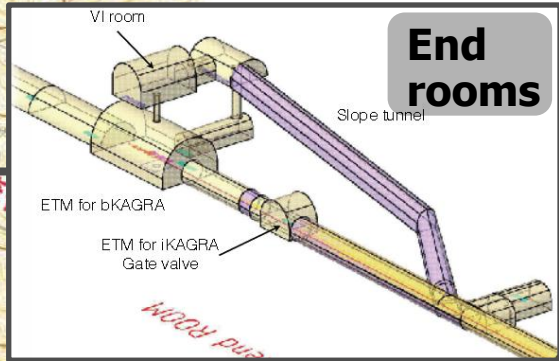
- 220km away from Tokyo
- 1000m underground from the top of the mountain. (Near Super Kamiokande)
- 360m altitude
- Hard rock of Hida gneiss (5 [km/sec] sound speed)



# KAGRAトンネル設計



- Excavation methods
- New Australian Tunneling Method (NATM).

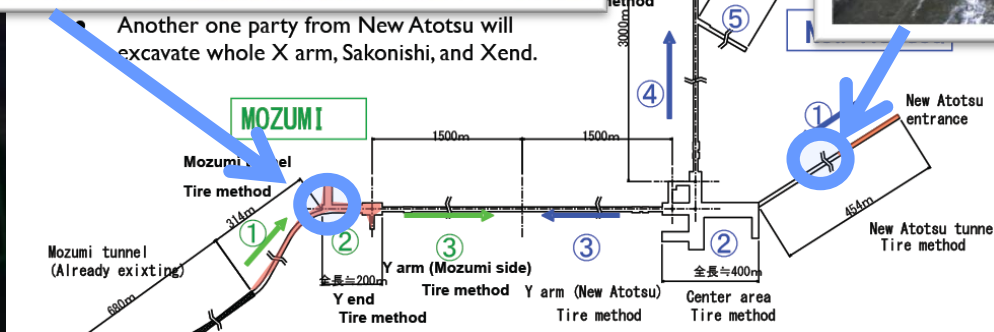




# 掘削工事の現状



茂住口：  
Yエンドルーム  
掘削中



新跡津口：  
アクセス坑道  
掘削中

# 研究拠点

地元の協力により北部会館(公民館)の一部(140m<sup>2</sup>)を無償貸与。  
→ 改築して、研究拠点(研究室4室, 実験室2室)として使用予定。



8月29日 内覧会  
地元の方々(茂住地区住民、  
飛騨市役所、飛騨市議会等)を招待。





# 真空ダクトの製作・現地納品

3km x 2本の真空ダクト : 12m,  $\Phi$ 800mm を478本接続.

→ 現在までに約7割が納品済.



Press to form a duct



Bellows for each duct



Baking at MIRAPRO Co.  
Noda/MESCO, Kamioka



Test at MIRAPRO Co. Noda



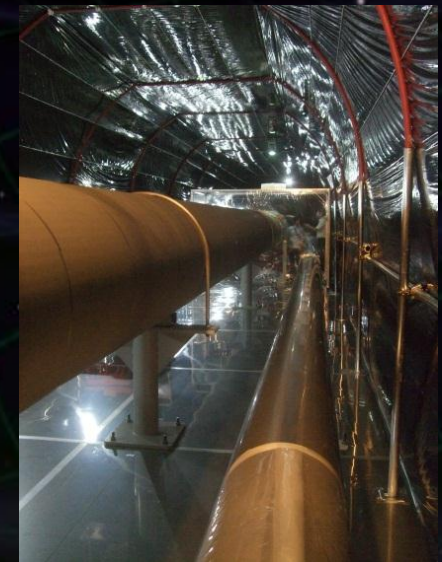
Transportation to Kamioka

Presentation  
By Y.Saito (KEK)



# 真空ダクト製作・設置試験

## KAGRA模擬トンネル・ビームライン設置試験場 (ミラプロ・野田工場)



June 28, 2012, Photo by Kamiizumi and Iwasaki (ICRR)



# KAGRA鏡懸架・冷却系

## 高性能防振装置 (Type-A SAS)

- 上層部の岩盤より懸架された多段の受動防振装置.
- 常温の真空槽内に収められる.



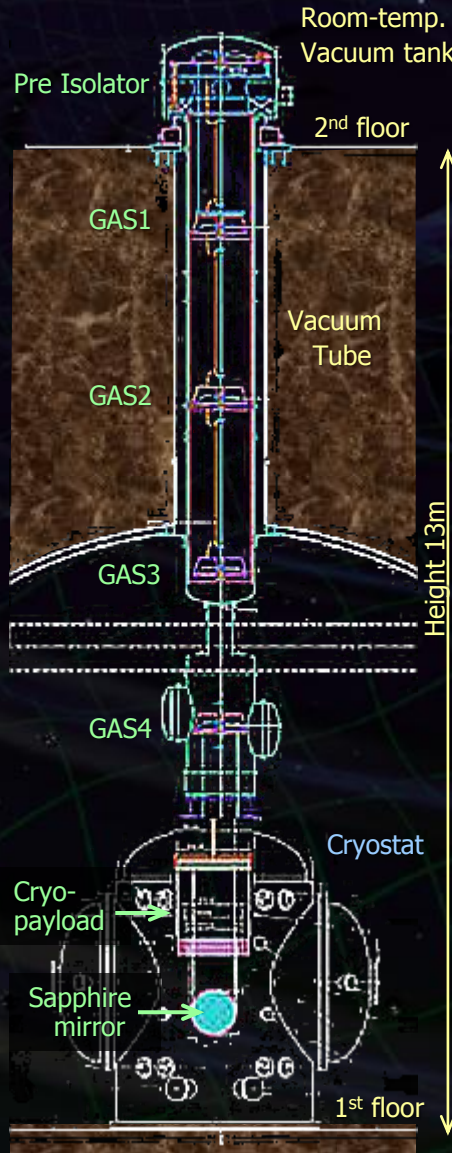
Pre Isolator



GAS filter

## 低温ペイロード

- サファイヤ鏡を懸架する2段振り子.
- 低温シールド部とヒートリンク接続.

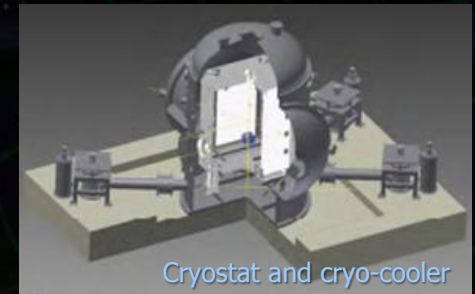


## トンネル : 2層構造

- 上部 高さ 7m
- 中間岩盤 厚さ 5m
- 下部 高さ 8m

## クライオスタット・冷却系

- 外形 :  $\Phi 2.4\text{m}$ , 高さ 3.8m
- 二重の輻射シールド (80K, 8K)
- 4台の低雑音PT冷凍機



Cryostat and cryo-cooler



# クライオスタット製作

Ribs inside cryostat



Pipes



Main body  
( $\Phi 2.4\text{m}$ , H3.8m)



Connection port  
to cryo-cooler unit



Photos from T.Suzuki's presentation  
at External Review (April 2012)

at Toshiba Keihin Factory

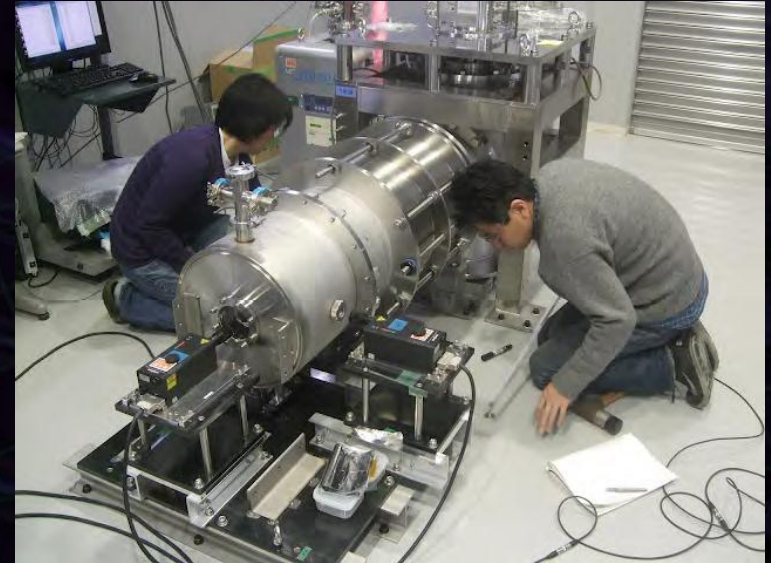


# 低振動型冷凍機

Cryo-cooler units at ICRR (Kashiwa)



Vibration measurement



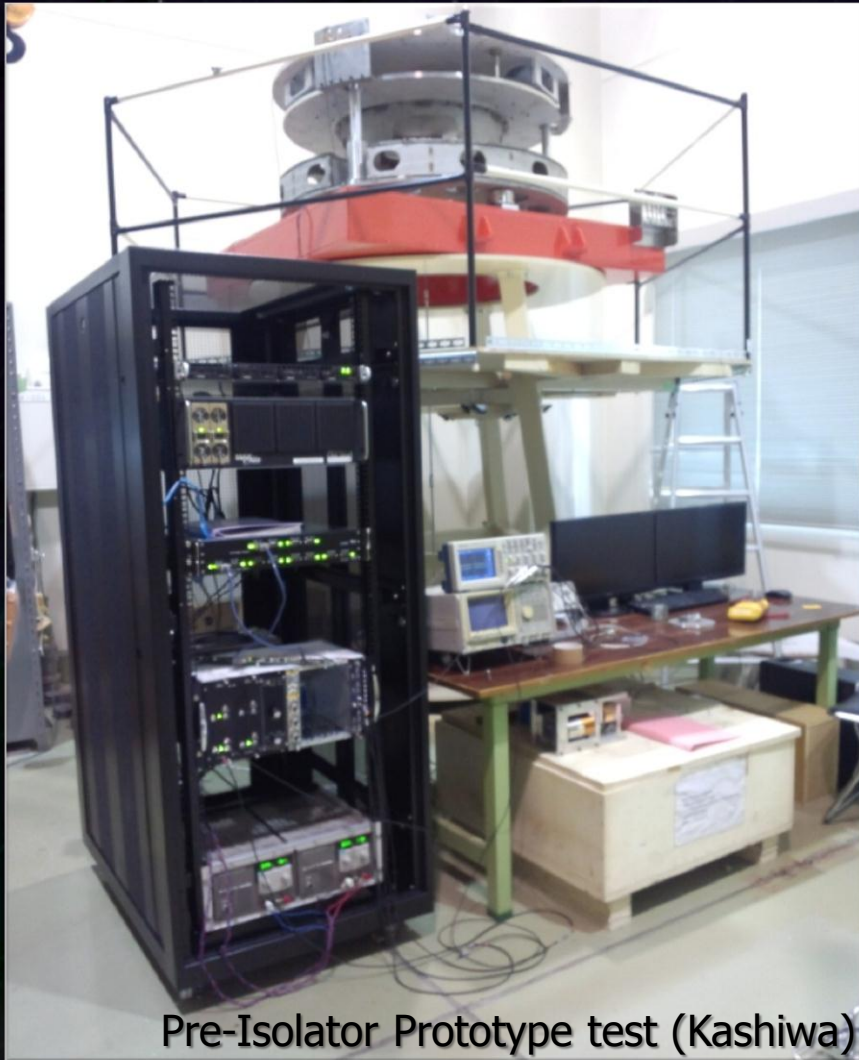
Storage at  
ICRR (Akeno)



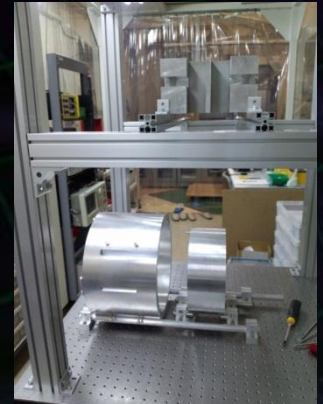
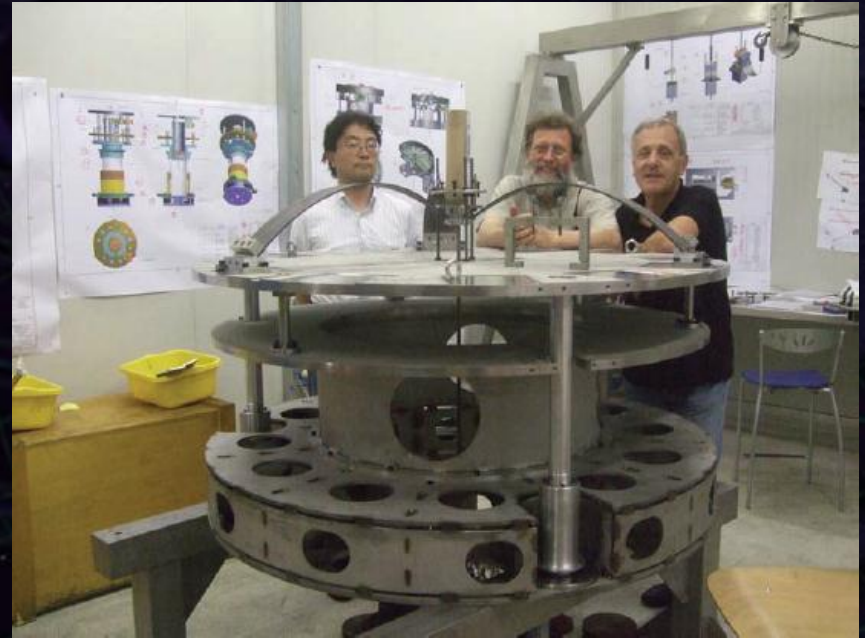
T.Suzuki at  
External Review  
(April 2012)



# 防振装置

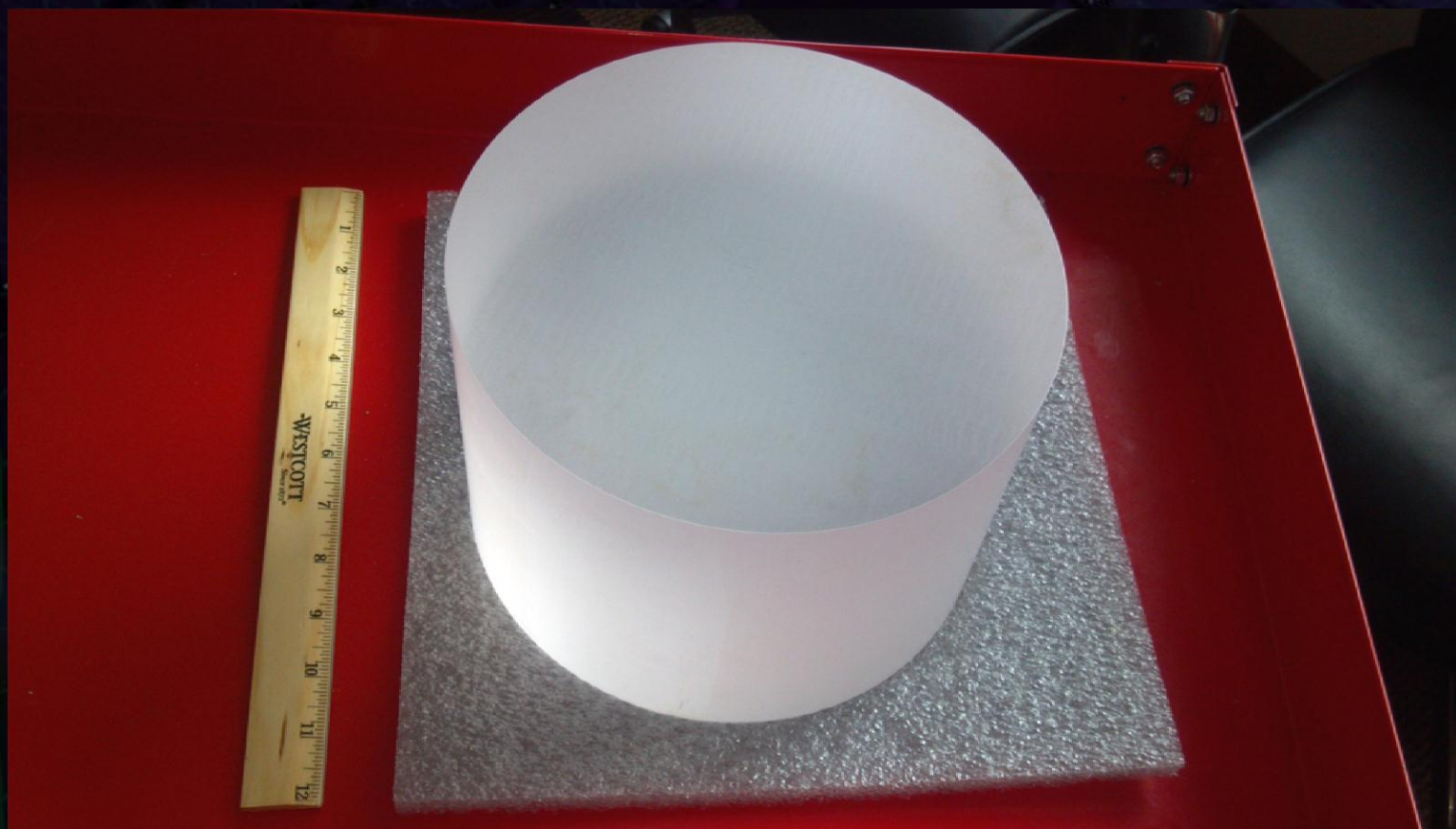


Pre-Isolator Prototype test (Kashiwa)





# サファイア鏡



納品されたサファイア結晶 ( $\Phi 220\text{mm}$ ,  $t 150\text{mm}$ , c-axis)



# KAGRA全体スケジュール

## iKAGRA (2010.10 – 2015.12)

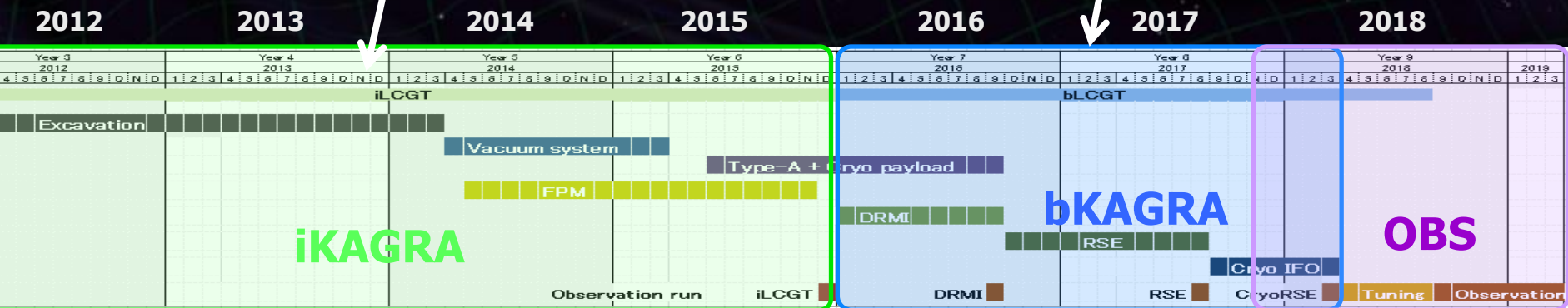
### 大型干渉計の安定動作を実現

- 基線長3kmの常温干渉計を動作.
- 比較的シンプルな光学系・防振系構成で総合システムとしての動作.

## bKAGRA (2016.1 – 2018.3)

### 最終構成での動作

- 干渉計構成, 防振系最終形
- 低温干渉計としての動作.



## OBS (2017 -)

長期間観測運転と干渉計チューニング.



## KAGRA : 本格的な建設が開始された！

- 観測可能距離 200Mpc以上 → 年間1回以上の重力波検出.
- 海外の望遠鏡とともに 第2世代の観測ネットワークを形成

⇒ 重力波天文学の分野を切り開く.

- KAGRAでは, 世界に先駆けて第3世代の技術も実証.  
低温干渉計技術, 地下サイト

## 設計と開発

- TAMA と CLIO などの経験・実績を生かして設計.
- 実機プロトタイプ試験, シミュレーションによる詳細設計・検討が進行中.

2010年代後半には、  
重力波天文学が幕を開けているだろう!



終わり