



**透過光モニター用テレスコープ(bBRT)について**

# bKAGRA透過光モニターテレスコープの概要

## 1. 目的

- ・エンド透過光の取り出し(最大2W)と余計な光の熱への変換(波長1064nm)
- ・干渉計ロック補助用グリーン光の取り出し(532nm)
- ・ビームセンタリング信号取得
- ・干渉計アライメント信号取得

## 2. 設置場所

エンドマス真空槽の後ろに配置された専用真空槽

## 3. 数量

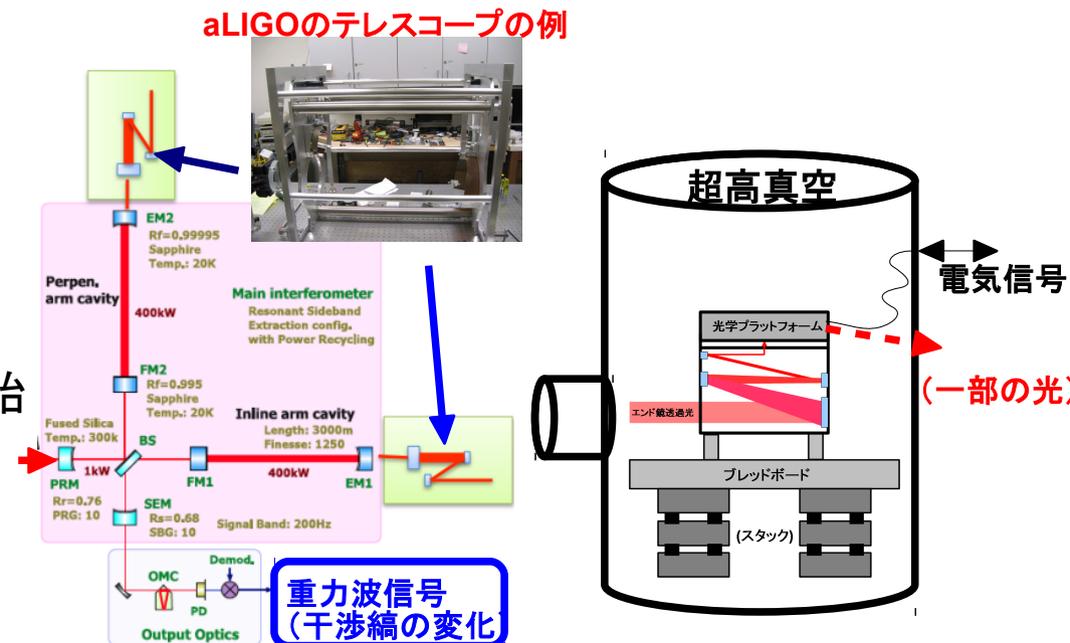
2台(干渉計各エンド(x2))

## 4. 予算

1500万円

## 5. 目標スケジュール

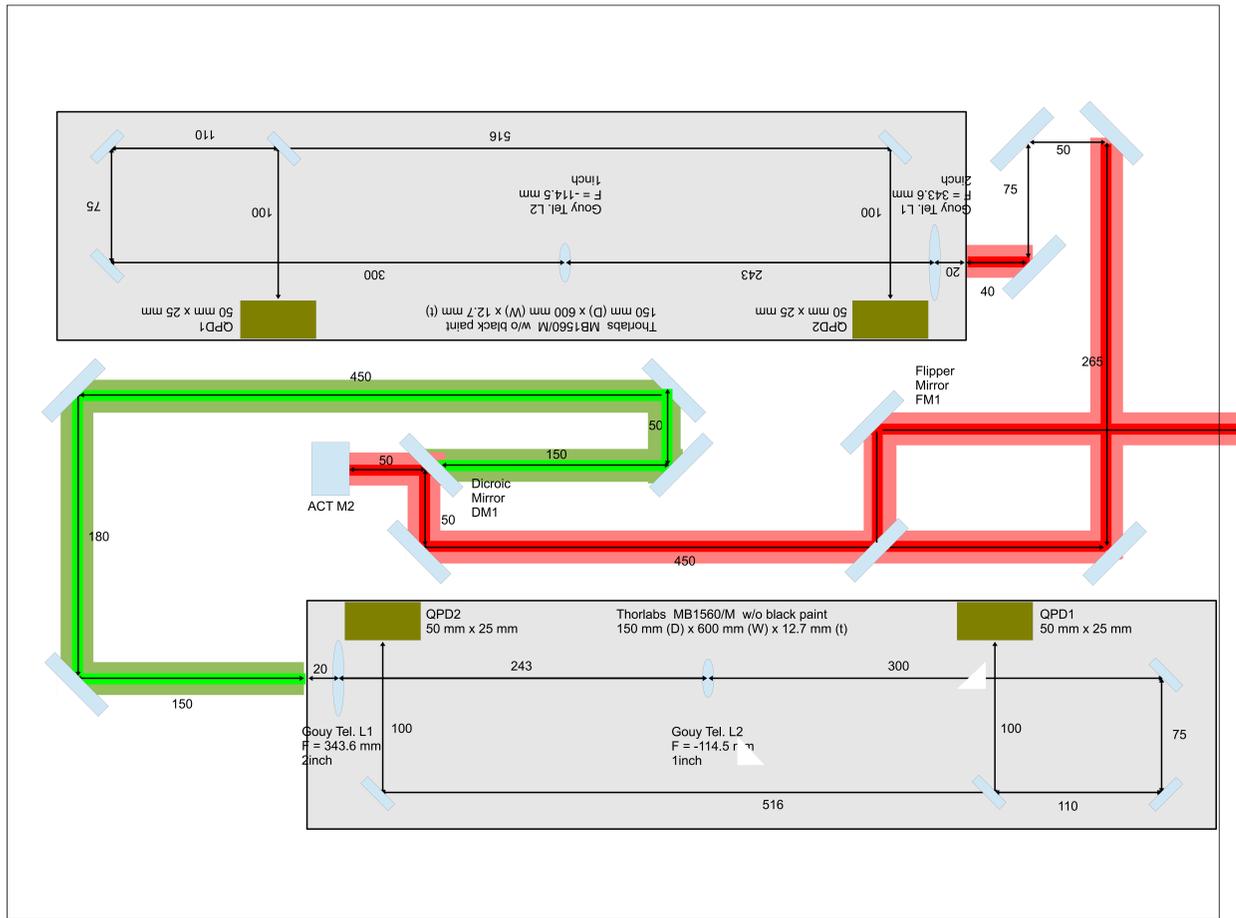
2016年Q1 KAGRAへインストール開始



## bKAGRA透過光モニター用テレスコープの仕様

---

- 球面鏡と折り返しミラーの組み合わせ
- ビーム径の大きなところで光から熱へ変換 → ビームダンパー(大型)は独立
- 低熱膨張材(インバー)での製作
- Gouyテレスコープを2台(1064nm, 532nm用各1台ずつ)装備
- 1um用4分割フォトディテクターを2台装備(ハイパワー2.5W/ローパワー25mW兼用)
- 532nm用4分割フォトディテクター2台を装備
- ビームモニター用CCDは非搭載
- 光軸調整のために真空用可動ミラーマウント装備
- 透過光取り出し用フリッパーミラー装備
- 光てこ用ミラーを装備
- BRT+光学プラットフォーム重量~100kg
- BRTの精密位置決めが必要(x,y,z,pitch,yawの5軸?)
- アライメント信号取得のために防振装置が必要?(散乱光雑音の観点からは不要)



Breadboard  
600 x 800  
X 12.7 mm)

•倍率 x10

•光学素子のパラメータ

BRT primary spherical M1 ROC = 4000mm  
 BRT secondary spherical M2 ROC = -400mm  
 ACT M1 ROC = -650mm (horizontal)  
 ACT M2 ROC = 1650mm (hol.)  
 Gouy tel. Plano-convex L1 f = 343.6mm  
 Gouy tel. Plano-convex L2 f = -114.5mm

•入射角

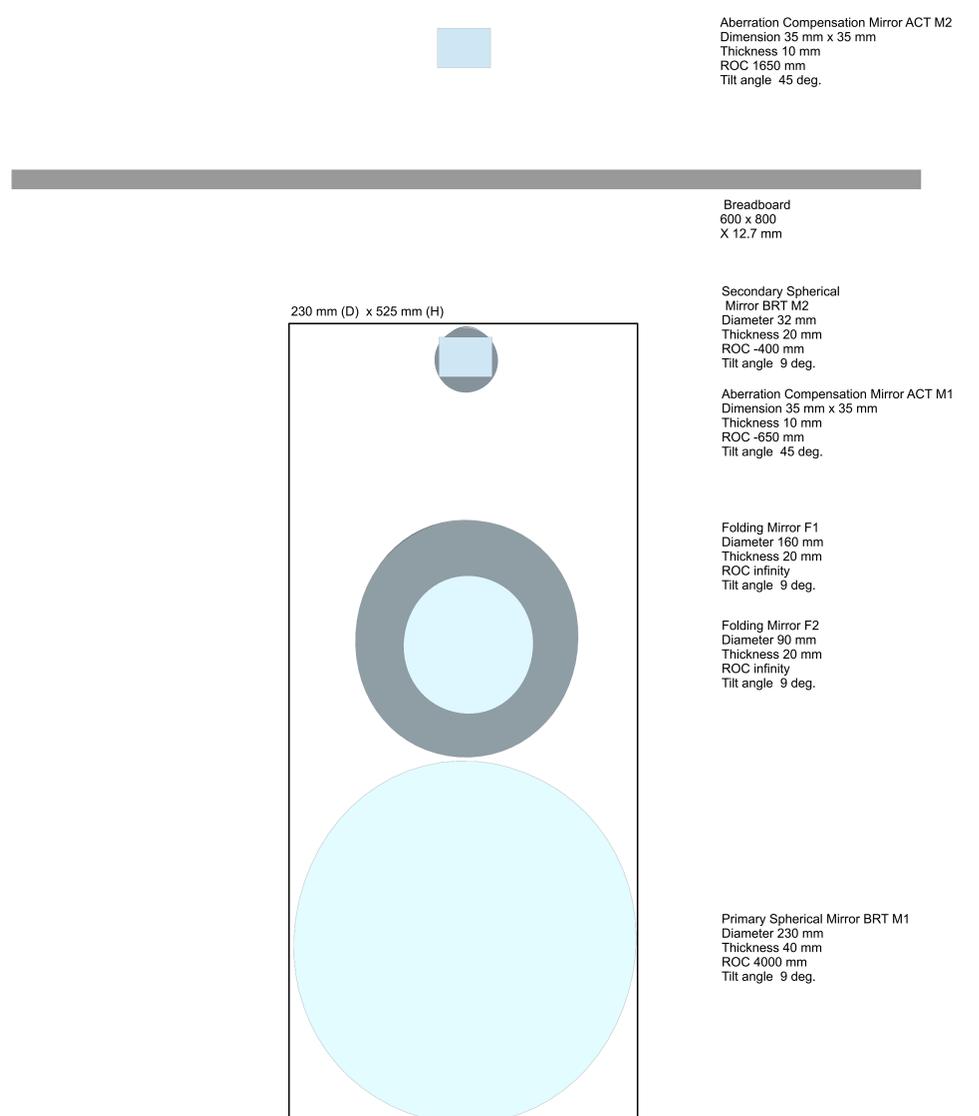
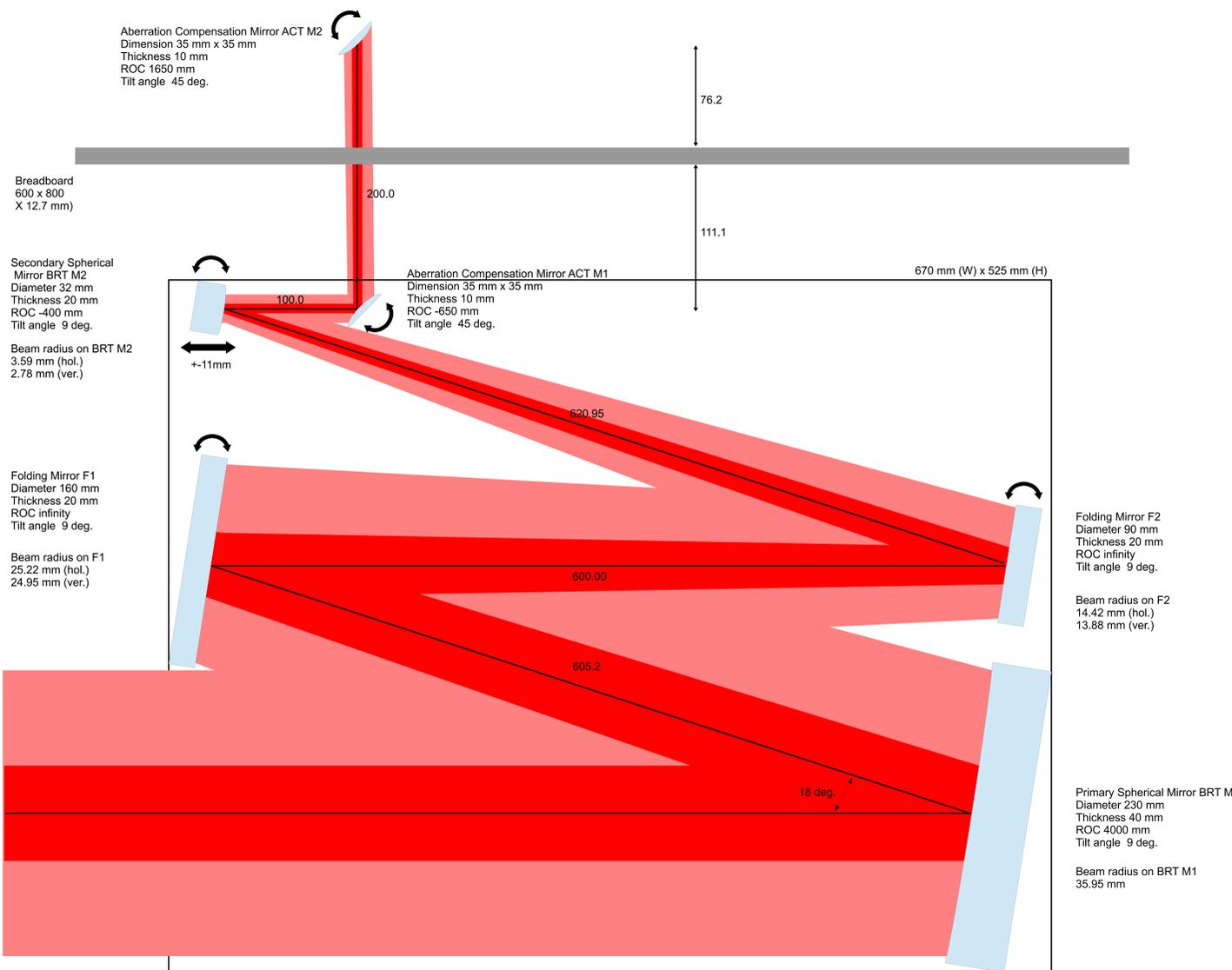
Incident angle to BRT M1, M2 9 deg.  
 Incident angle to ACT M1, M2 45 deg.

•光学素子間の距離

BRT M1 to M2 1826.2mm  
 BRT M2 to ACT M1 100mm  
 ACT M1 to M2 200mm  
 ACT M2 to Gouy L1 1000mm  
 Gouy L1 to L2 243mm  
 Gouy L2 to QPD1 585.7mm  
 Gouy L2 to QPD2 991.2mm  
 (Gouy L2 to beam waist 795mm (avg. of hor. and ver.))

•Rayleigh長

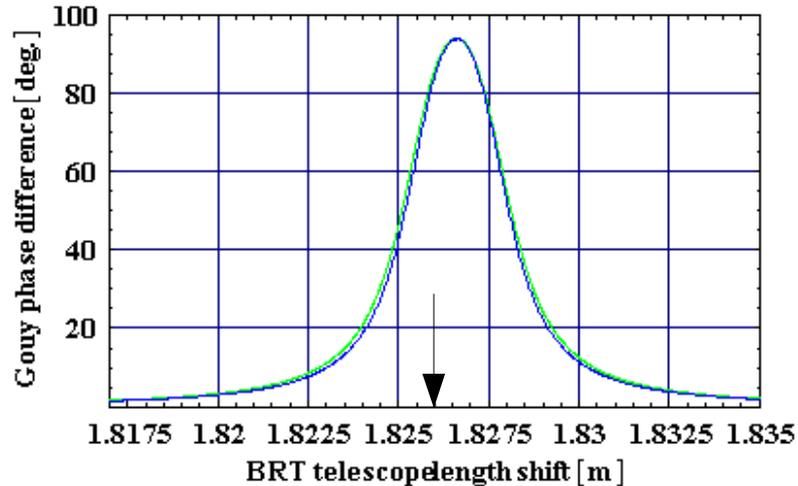
ACT直後 37991.5mm (hor.), 38135.3mm (ver.)  
 Gouy tel.後 204.8mm (hor.), 205.0mm (ver.)



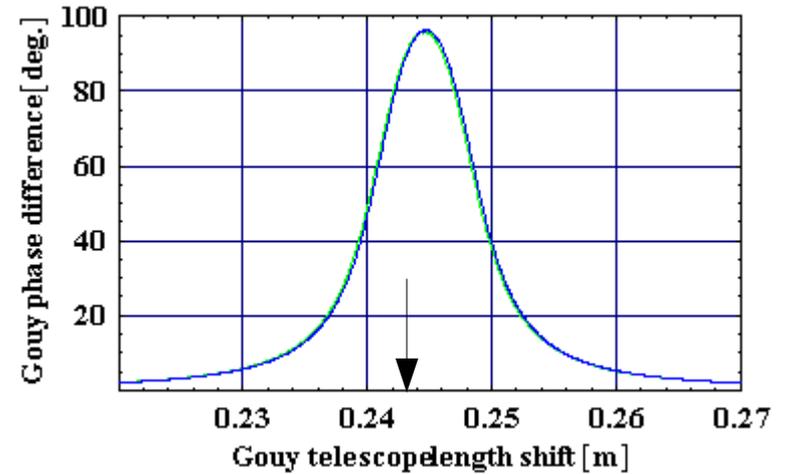
# テレスコープ長変化によるGouy位相差の変化

Gouy位相差90度からのずれが±45度まで許容できる場合

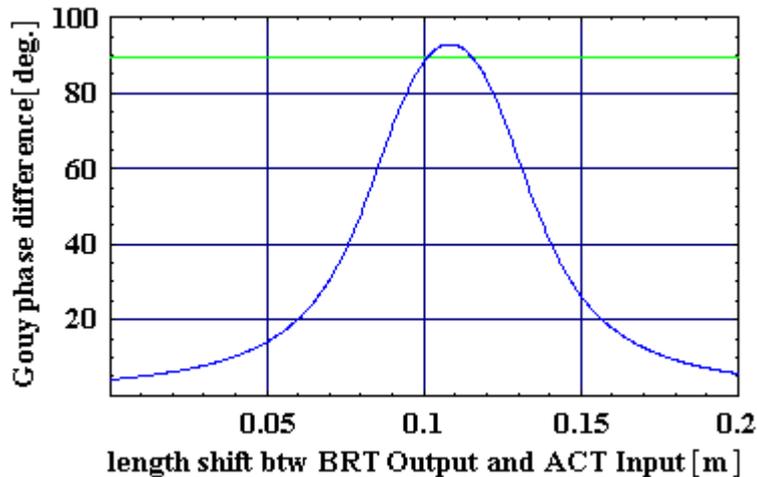
緑: 水平方向、青: 垂直方向



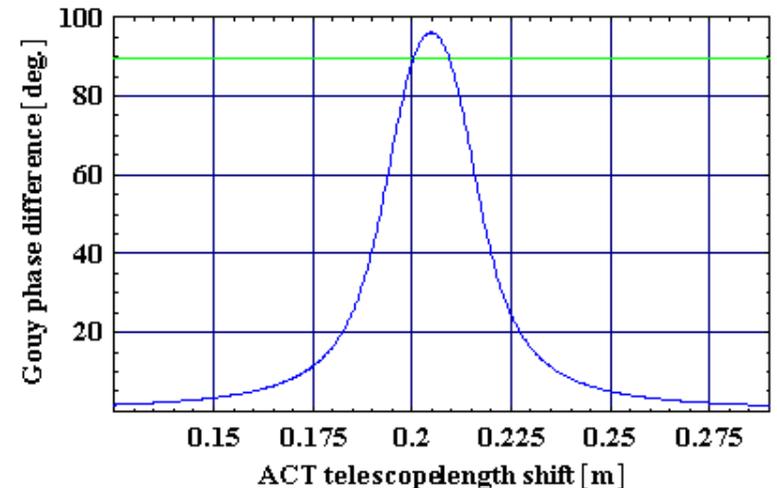
BRT長の調整許容誤差  $\delta z_{\text{BRT}} \sim -1.1\text{mm}, +2.0\text{mm}$



Gouy tel.長の調整許容誤差  $\delta z_{\text{Gouy}} \sim -3.0\text{mm}, +6.0\text{mm}$



BRT-ACT間隔の調整許容誤差  $\delta z_{\text{BRTtoACT}} \sim -22\text{mm}, +38\text{mm}$



ACT tel.長の調整許容誤差  $\delta z_{\text{ACT}} \sim -9.0\text{mm}, +19\text{mm}$

# BRTミラーの曲率誤差

## ● AdLIGO BRT Primary mirror M1

LIGO SPECIFICATION		E0900347 -V10	
		Drawing No	Vers.
		Sheet 1 of 4	
<b>ETM TELESCOPE PRIMARY PARABOLIC MIRROR ADLIGO</b>			
APPROVALS	DATE	REV	DCN NO.
AUTHOR: MICHAEL SMITH	01/05/11	V8	
CHECKED: K MAILAND	01/10/12	V9	
APPROVED:	05/15/12	V10	E1101192
DCC RELEASE			
<b>1 SCOPE</b>			
This is a specification for the ADLIGO ETM TELESCOPE PRIMARY PARABOLIC MIRROR. This concave parabolic mirror is part of an off-axis reflecting beam-reducing telescope.			
<b>2 APPLICABLE DOCUMENTS</b>			
LIGO-E1200321 Protected Silver High Reflectance Coating MIL-C-675C			
<b>3 REQUIREMENTS</b>			
<b>3.1 PERFORMANCE CHARACTERISTICS</b>			
<b>3.1.1 Mirror Fabrication</b>			
<b>3.1.1.1 Front Surface, S1</b>			
Effective focal length	2000 +/- 20 mm		
Conic constant	-1.000 +/- 0.002		
Tilt tolerance, reference to back surface (S2)	+/- 0.0083 deg		
Clear aperture diameter	190 mm		
Center displacement from optical axis	562.2 +/- 1 mm		
Diameter	230.0 +/- 0.0, -0.1 mm		
Minimum edge thickness	43 +/- 1 mm		
Surface irregularity	< 1/8 wave, peak to valley @ 633 nm over clear aperture		
Surface finish	60/40		
Surface roughness	< 100 Angstrom		
Chamfer edges	0.5-1.0 mm, 45 +/- 10 deg		
<b>3.1.1.2 Back Surface, S2</b>			
Surface quality	fine ground, > 300 grit		
Chamfer edges	0.5-1.0 mm, 45 +/- 10 deg		

→ 2000 +/- 20 mm

## ● AdLIGO BRT Secondary mirror M2

LIGO SPECIFICATION		E0900349 V10	
		Drawing No	Vers.
		Sheet 1 of 3	
<b>ETM TELESCOPE SECONDARY PARABOLIC MIRROR ADLIGO</b>			
APPROVALS	DATE	REV	DCN NO.
AUTHOR: MICHAEL SMITH	01/05/11	V10	
CHECKED:			
APPROVED:			
DCC RELEASE			
<b>1 SCOPE</b>			
This is a specification for the ADLIGO ETM TELESCOPE SECONDARY PARABOLIC MIRROR. This convex parabolic mirror is part of an off-axis reflecting beam-reducing telescope.			
<b>2 APPLICABLE DOCUMENTS</b>			
MIL-C-675C			
<b>3 REQUIREMENTS</b>			
<b>3.1 PERFORMANCE CHARACTERISTICS</b>			
<b>3.1.1 Mirror Fabrication</b>			
<b>3.1.1.1 Front Surface, S1</b>			
Effective focal length	-100.0 +/- 1.0 mm		
Conic constant	-1.000 +/- 0.002		
Tilt tolerance, reference to back surface (S2)	+/- 0.0083 deg		
Clear aperture diameter	32 mm		
Center displacement from optical axis	28.1 +/- 0.3 mm		
Diameter	38.1 +/- 0.0, -0.1 mm		
Minimum edge thickness	21 +/- 1 mm		
Surface irregularity	< 1/8 wave, peak to valley @ 633 nm over clear aperture		
Surface finish	60/40		
Surface roughness	< 100 Angstrom		
Chamfer edges	0.5-1.0 mm, 45 +/- 10 deg		
<b>3.1.1.2 Back Surface, S2</b>			
Surface quality	fine ground, > 300 grit		
Chamfer edges	0.5-1.0 mm, 45 +/- 10 deg		

→ -100.0 +/- 1.0 mm

AdLIGOの軸外し放物面鏡の曲率半径の許容誤差 ±1%



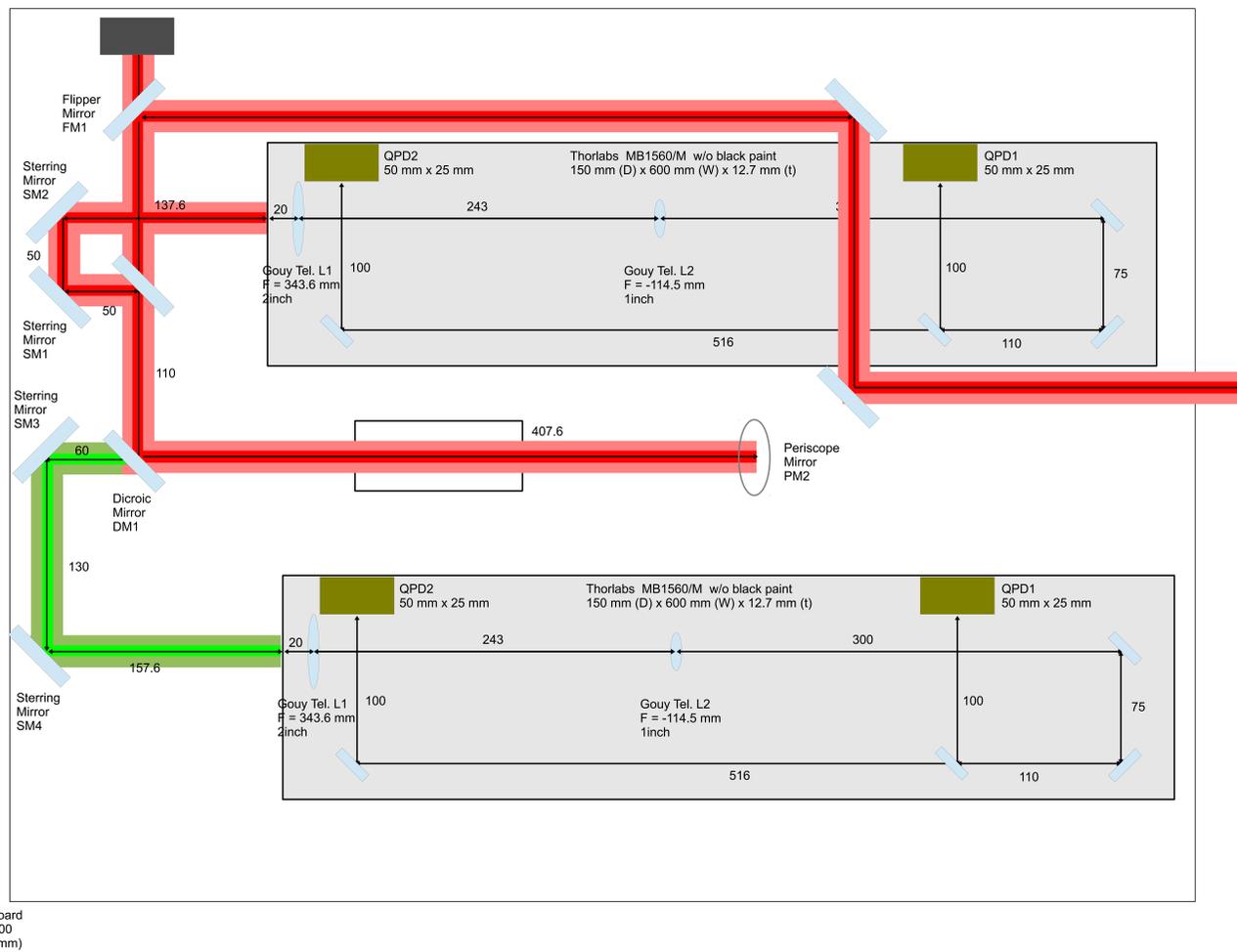
KAGRAのBRT用球面鏡でも同レベルの製造誤差が可能と仮定

# 基本設計1でミラー曲率に1%誤差を与えた場合

	初期状態			BRTミラーROC誤差 同相+1%			BRTミラーROC誤差 同相(-)1%			BRTミラーROC誤差 差動(+ )1%			BRTミラーROC誤差 差動(-)1%							
	Tolerance lower	Tolerance upper	Tolerance abs.	Tolerance lower	Tolerance upper	Tolerance abs.	lower	upper	Tolerance	Tolerance lower	Tolerance upper	Tolerance abs.	Tolerance lower	Tolerance upper	Tolerance abs.					
BRT Length [mm]	1826.15	-1.1	2	3.1	1844.22	-0.9	2.3	3.2	1808.07	-1.3	1.7	3	1804.07	-1.4	1.8	3.2	1848.22	-0.8	2.1	2.9
Gouy Tel. Length [mm]	243	-3.3	6.3	9.6	243	-2.7	7	9.7	243	-3.89	5.8	9.69	243	-3.5	5.3	8.8	243	-2.5	7.7	10.2
ACT Length [mm]	200	-9.5	19	28.5	203	-8	20.5	28.5	197	-11.5	16.5	28	210	-10.5	16.5	27	188	-7.5	22	29.5
BRT-ACT Length [mm]	100	-22	38	60	100	-19	43	62	100	-28	31	57	100	-28	38	66	100	-15	38	53
BRT M1 ROC [mm]	4000	-4	2.3	6.3	4040	-4.6	1.9	6.5	3960	-3.5	2.6	6.1	3960	-3.5	2.7	6.2	4040	-4.3	1.8	5.9
BRT M2 ROC [mm]	-400	-4.2	2.3	6.5	-404	-4.7	1.9	6.6	-396	-3.7	2.7	6.4	-404	-3.5	2.8	6.3	-396	-4.9	1.8	6.7
ACT M1 ROC [mm]	-650	-18	9	27	-650	-21	8	29	-650	-18	11.5	27.5	-650	-17	11	28	-650	-21	7	28
ACT M2 ROC [mm]	1650	-50	28	78	1650	-55	22	77	1650	-44	33	77	1650	-45	32	77	1650	-58	21	79
BRT M1 Inc. Angle [deg.]	9	-0.21	0.21	0.42	9	-0.18	0.17	0.35	9	-0.24	0.24	0.48	9	-0.25	0.25	0.5	9	-0.15	0.16	0.31
BRT M2 Inc. Angle [deg.]	9	-2.4	3	5.4	9	-1.9	2.5	4.4	9	-2.9	2.9	5.8	9	-3	2.7	5.7	9	-1.8	2.2	4
ACT M1 Inc. Angle [deg.]	90	-1.65	0.85	2.5	90	-1.85	0.72	2.57	90	-1.45	1	2.45	90	-1.55	0.97	2.52	90	-1.85	0.65	2.5
ACT M2 Inc. Angle [deg.]	90	-0.95	1.68	2.63	90	-0.8	1.85	2.65	90	-1.15	1.5	2.65	90	-1.05	1.5	2.55	90	-0.75	2	2.75

- BRT M1とM2に±1%の同相誤差、±1%の差動誤差を与え、BRT長とACT長を適当に変化させて、最適化。
- BRT長は±22mm、ACT長は±12mm程度の調整機構が必要。
- 各パラメータの許容値は、Gouy位相差90度からのずれが±45度以内の値を表している。
- BRT M1の設置角度の調整(~±0.15度以内)が厳しい\*。
- BRT長は約1800mmの長さ変化を~±1mm以内に保つ必要がある。

\*おそらく、BRT入射光軸に対する要求も同程度の厳しさになると思われる。



•倍率 x10

•光学素子のパラメータ

BRT primary spherical M1 ROC = 4000mm  
 BRT secondary spherical M2 ROC = -400mm  
 Gouy tel. Plano-convex L1 f = 343.6mm  
 Gouy tel. Plano-convex L2 f = -114.5mm

•入射角

Incident angle to BRT M1 9 deg.  
 Incident angle to BRT M2 27.95 deg.

•光学素子間の距離

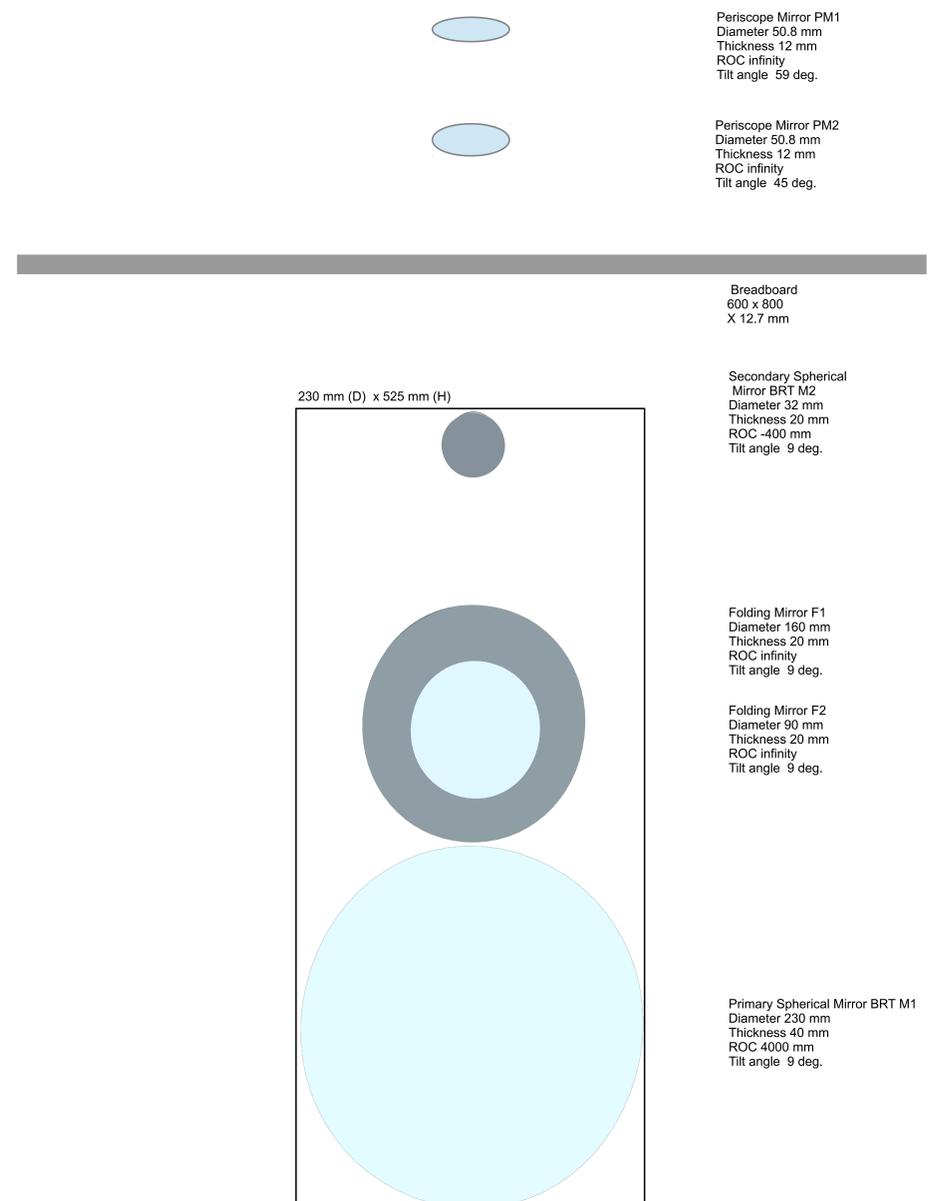
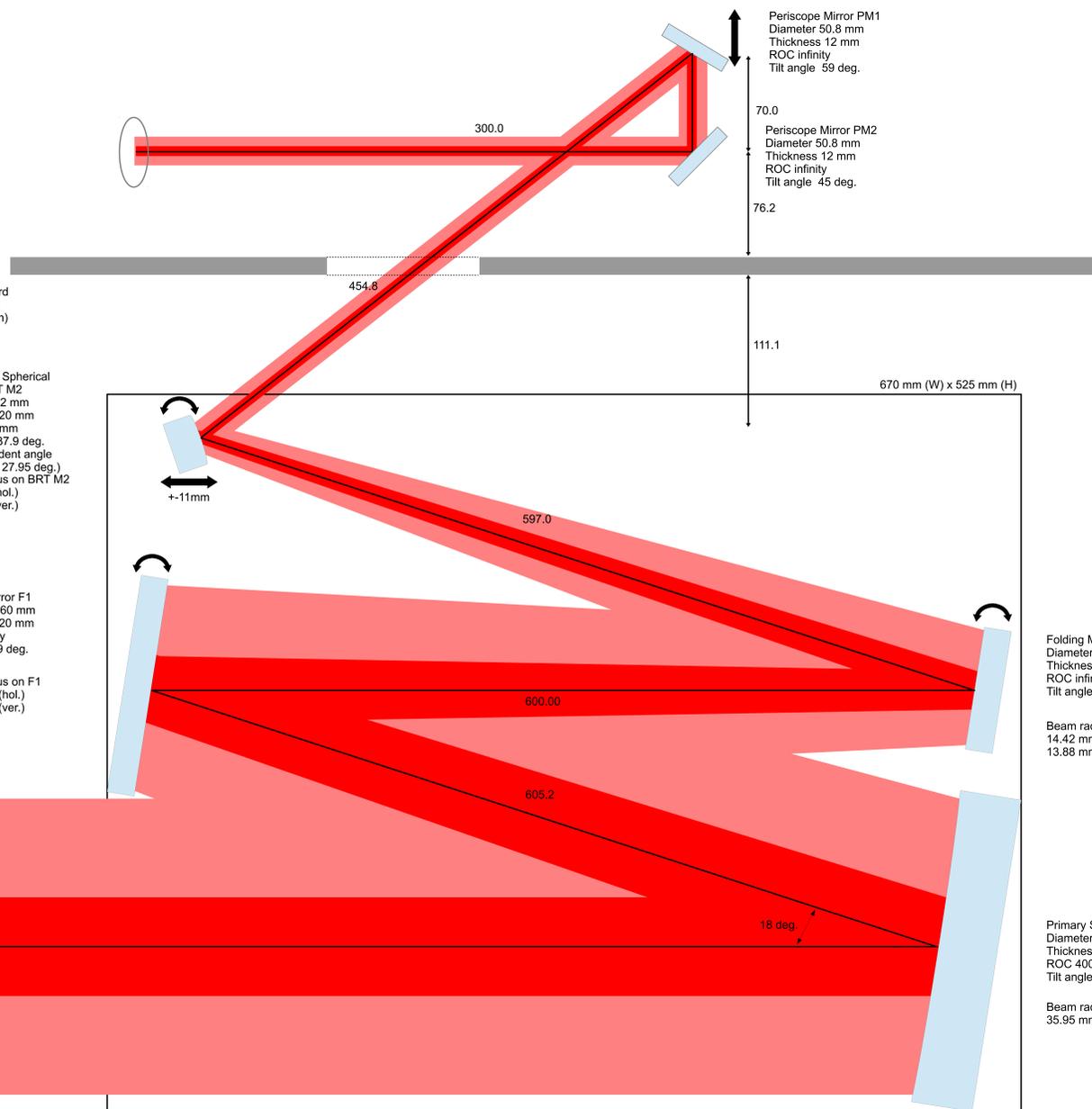
BRT M1 to M2 1802.2mm  
 BRT M2 to Gouy L1 1300mm  
 Gouy L1 to L2 243mm  
 Gouy L2 to QPD1 585.7mm  
 Gouy L2 to QPD2 991.2mm  
 (Gouy L2 to beam waist 797mm (avg. of hor. and ver.))

•ビームサイズ

BRT直後 4.0mm (hor.), 3.8mm (ver.)

•Rayleigh長

BRT直後 47284.7mm (hor.), 30300.2mm (ver.)  
 Gouy tel.後 167.2mm (hor.), 255.7mm (ver.)



# 基本設計1と基本設計2、どちらが有利か？

- ・Gouy位相差90度からのずれを $\pm 45$ 度以内にするための各パラメータの許容値は、ほぼ同じ.
- ・BRTミラー曲率に1%誤差がある場合、調整すべきBRT長( $\pm 22$ mm)は同じ.

## 基本設計1の利点

- ・ACT出射後のビームプロファイルを円形にできる.
- ・各テレスコープBRT, ACT長を調整することで、最適化できる.

## 基本設計1の欠点

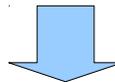
- ・ACT長は $\pm 12$ mm程度の調整機構が必要.
- ・ACTミラーが必要. もちろん、仕様要求値もあり.

## 基本設計2の利点

- ・ACTミラーが不要.
- ・BRTミラー2への設置角を調整( $\pm 0.4$ 度程度)することで、ミラー曲率1%誤差に対応できる.

## 基本設計2の欠点

- ・BRT出射光が楕円形(4.0mm (hor.), 3.8mm (ver.)). ただし、ほぼ収差なし.
- ・BRTミラー2の設置角度調整機構が必要



基本設計2のほうが素性は良さそうだが、テレスコープの初期アライメントをする際に煩雑になる。

# BRTフレームの材質

- ・Gouy位相差90度からのずれを±45度以内にするためには、BRT長変化を±1mm以内に抑圧する必要がある。

BRT長L~1800mm, 真空槽内温度変化 $\Delta T \sim \pm 2$ 度, 温度変動によるBRT長変化 $\Delta L$ を±10 $\mu$ m以内にする場合、フレーム材質に要求される線膨張係数 $\alpha$ は

$$\text{要求線膨張係数 } \alpha < \Delta L / L \cdot \Delta T \sim 2.8 \times 10^{-6}$$



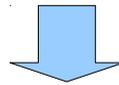
フレーム材質にはインバーが必要。

物質	温度 (°C)	線膨張係数 ( $\times 10^{-6}/K$ )	物質	温度 (°C)	線膨張係数 ( $\times 10^{-6}/K$ )
アルミ	20	23.0	チタン	25	8.6
ジェラルミン	20	21.6	インバー	20	1.2
鉄	20	11.8	スーパーインバー	25	0.5
SUS304	20	17.6	石英ガラス	20	0.41
銅	20	16.5	カーボン樹脂	25	-1.0~1.7
真鍮	20	17.5	マコールセラミック	25	0.93

# 光学プラットフォームに必要なものの見積もり

---

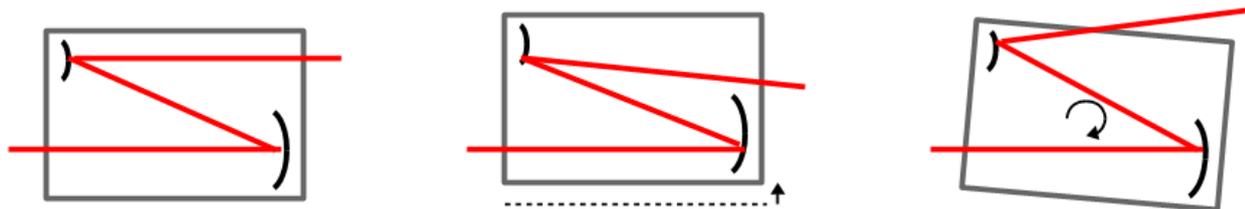
- ・腕共振器透過光量を最大で2.5Wと仮定.
- ・干渉計のハイ/ローパワーモードの光量比を100:1と仮定.
  - BRTのholding mirrorの中の1枚を反射率1.2%にすると、光学プラットフォームへの入射光量を、30mW(ハイパワーモード)/300uW(ローパワーモード)にできる.
  - 光量変化に対する複雑な演算は真空槽の外に置かれた回路で行うことにすれば、可変光アッテネータも必ずしも必要ではない.
- ・ミラー表面を見れるポートがあると仮定 .
  - 共振モードモニター用CCDカメラは不要.



- ・Gouyテレスコープ2台 (1064nm, 532nm用各1台ずつ)
- ・4分割フォトダイオード
- ・光軸調整用可動ミラーマウント (1064nm, 532nm用各2台ずつ)
- ・透過光取り出し用フリッパーミラー

## 未だ不明確な点（現在対応中）

- 入射ビームに対する、BRT本体の並進ずれと角度ずれの影響  
→ おそらく要求が厳しく、BRT本体（～100kg）の精密位置決めが必要。



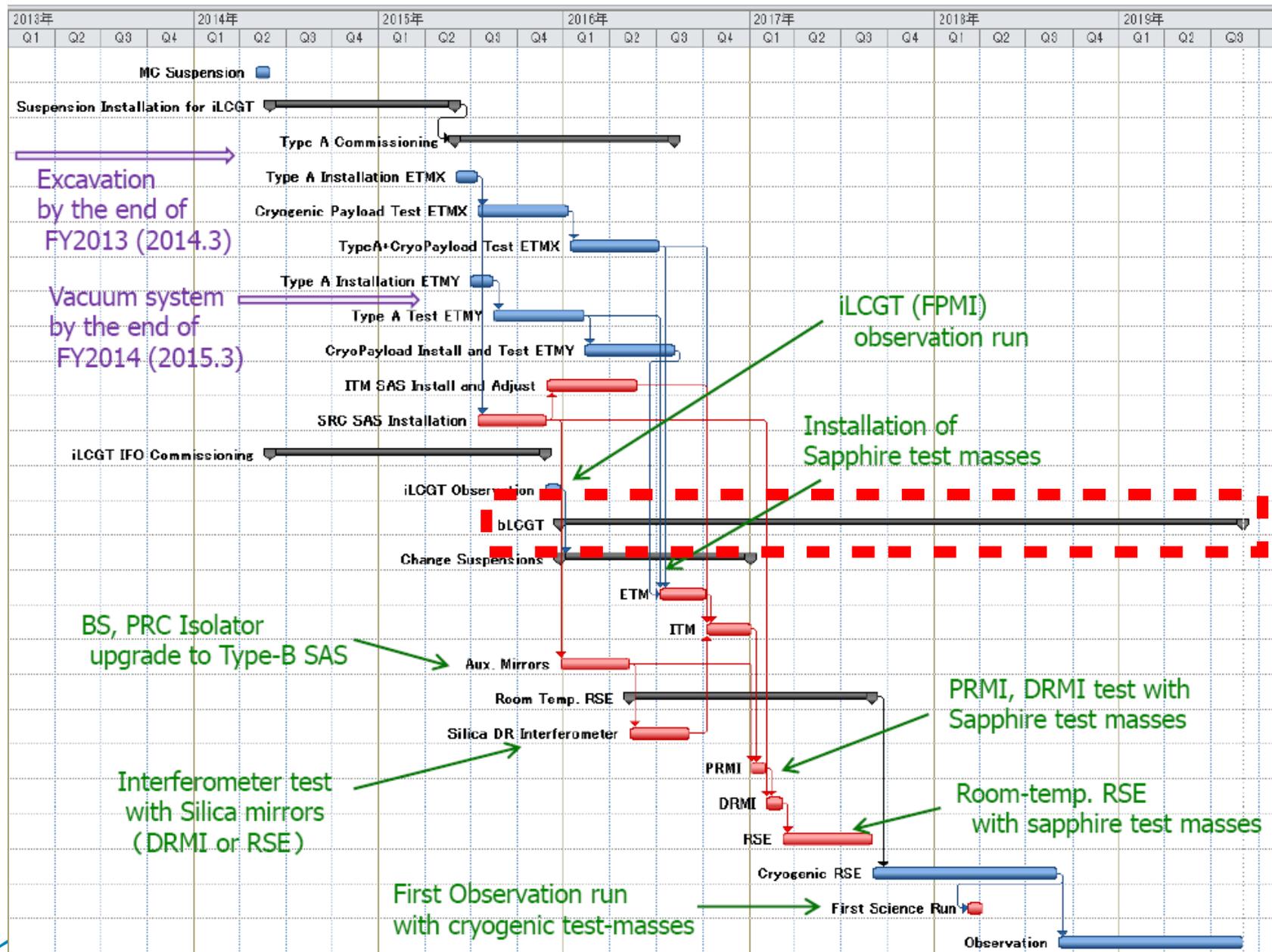
- 干渉計アライメント信号取得のための防振への要求  
ex. VIRGOの場合  
並進揺れ <  $2.1e-6$  m/rtHz (@>10Hz)  
角度揺れ <  $3.3e-15$  rad/rtHz (@>10Hz)

## bKAGRA透過光モニター用テレスコープの仕様(再び)

---

- 球面鏡と折り返しミラーの組み合わせ
- ビーム径の大きなところで光から熱へ変換 → ビームダンパー(大型)は独立
- 低熱膨張材(インバー)での製作
- Gouyテレスコープを2台(1064nm, 532nm用各1台ずつ)装備
- 1um用4分割フォトディテクターを2台装備(ハイパワー2.5W/ローパワー25mW兼用)
- 532nm用4分割フォトディテクター2台を装備
- ビームモニター用CCDは非搭載
- 光軸調整のために真空用可動ミラーマウント装備
- 透過光取り出し用フリッパーミラー装備
- 光てこ用ミラーを装備
- BRT+光学プラットフォーム重量~100kg
- BRTの精密位置決めが必要(x,y,z,pitch,yawの5軸?)
- アライメント信号取得のために防振装置が必要?(散乱光雑音の観点からは不要)

# KAGRAスケジュール



# bKAGRA透過光テレスコープの製作スケジュール

---

## 目標

**2016年始めにインストール(BSとPRCの防振系アップデートと同時)**

## 予定

2013年Q4 光学、機械、外部とのインターフェース設計完了 & 予算執行

2014年Q1~2015年Q2 試作機(1号機)製作・組み立て&光学、防振、真空性能テスト

2015年Q3~Q4 2号機製作・組み立て&各種テスト

2016年Q1 KAGRAへインストール開始

- 要求出しとそれに基づく概念設計、および性能試験はKAGRA(AOS)主導で実施。
- 光学・機械設計、および製作は天文台ATCに協力を仰ぐ。

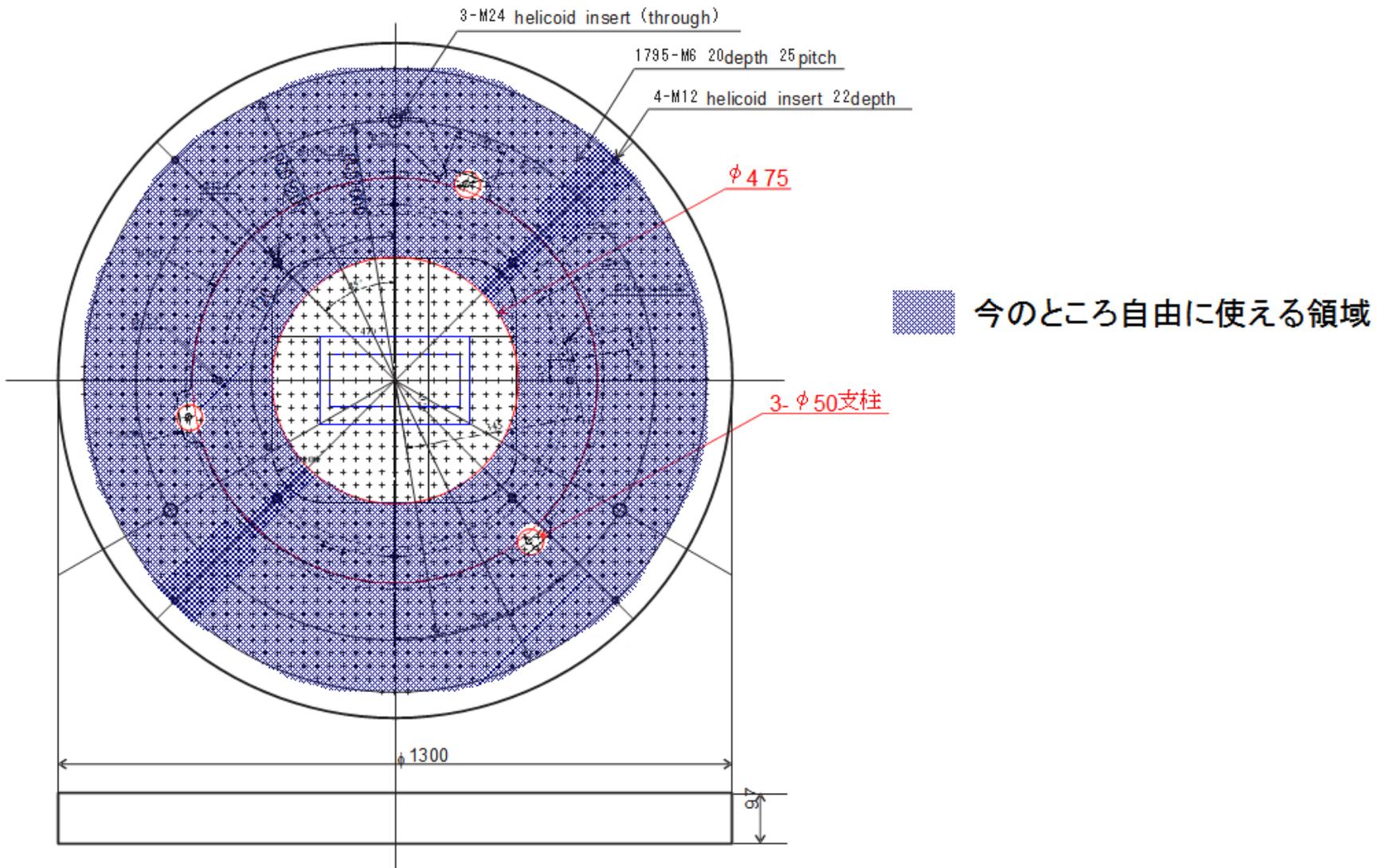
---

## 参考資料

# IKAGRAエンドマス用ブレッドボード

## AL bread-board for type-C system

Material : AL5052  
EL processing



# aLIGOテレスコープの概観

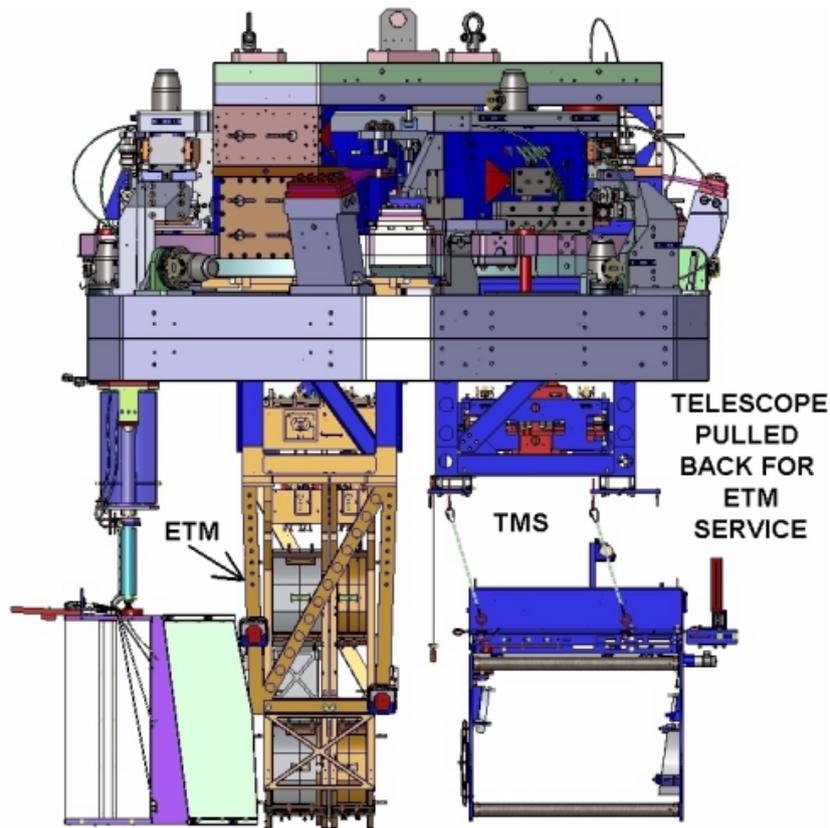


Figure 1 Transmission Monitor Suspension (TMS) BSC6

## TRANSMISSION MONITOR SUSPENSION (TMS)

Naming Conventions 5-20-2010

T0900488-v3

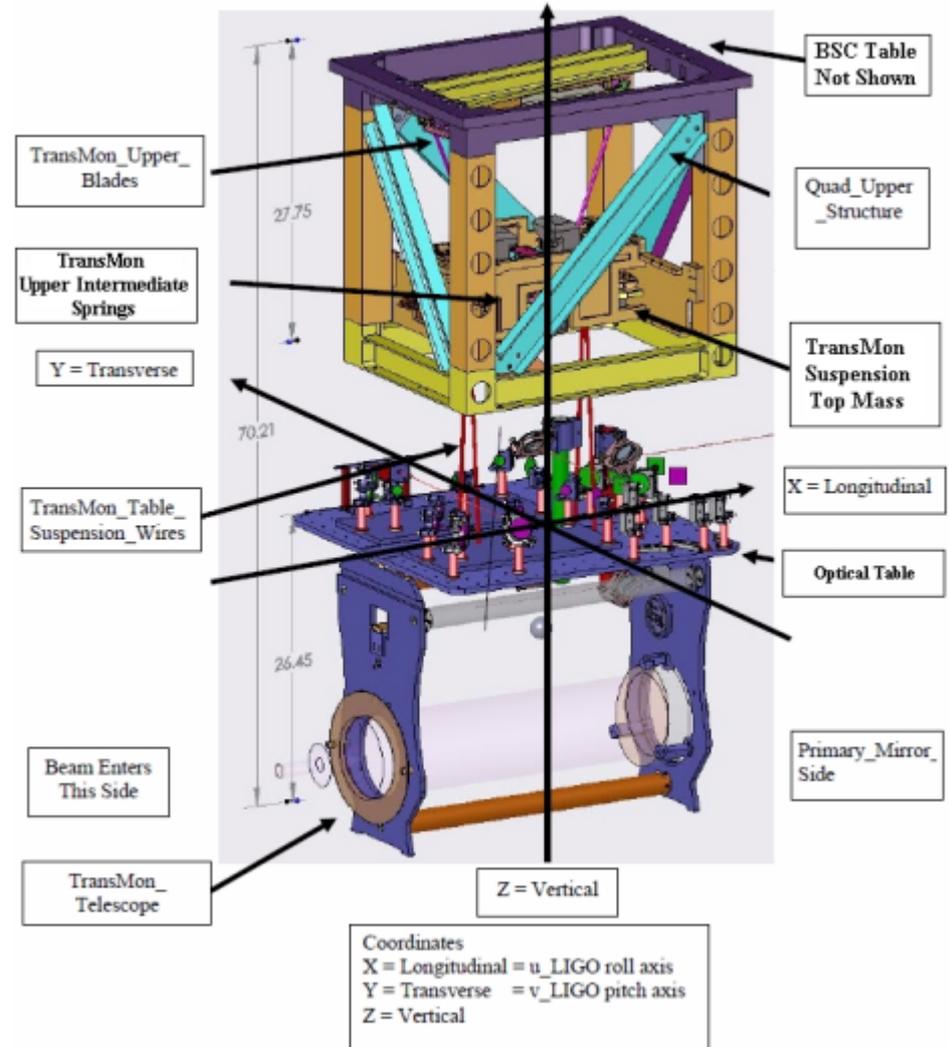


Figure 2 Naming Conventions

# 光学プラットフォーム上のデザインについて

- aLIGOの例

LIGO-T0900385-v07

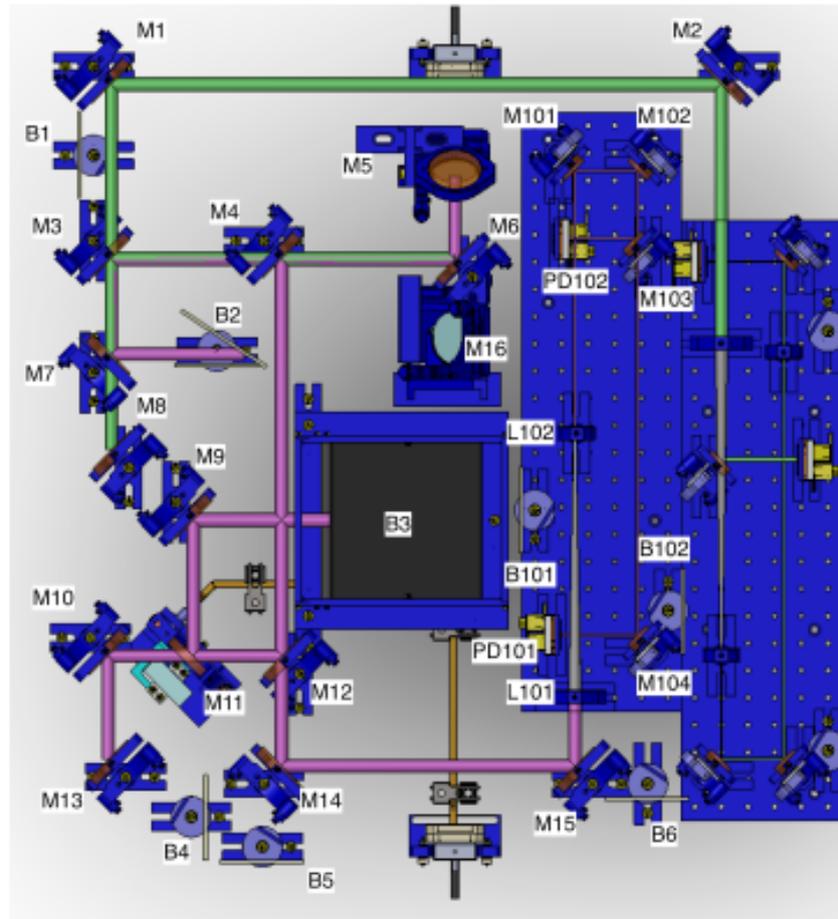


Figure 1: Annotated Transmon top view. In this view, the ETM is towards the bottom. This layout is for the H2 End Y station, so the not-shown beams exit to the left from M8, M13 and M16.

# KAGRAとaLIGOのテレスコープの比較

	KAGRA	aLIGO
目的	1. 干渉計センシングと制御(1064nm) 2. グリーンロック光取り出し(532nm)	1. 干渉計センシングと制御(1064nm) 2. グリーンロック光導入(532nm) 3. エンドマス曲率モニター(635nm) (4. アライメント信号取得?)
設置場所	エンドマスの後ろ(x2)	1. エンドマスの後ろ(x2) 2. BSチャンバー内?(x2)
構成	1. BTテレスコープ 2. 光学プラットフォーム 3. 電気回路(QPD等)	1. テレスコープ 2. 光学プラットフォーム 3. 防振システム 4. 電気回路(QPD等)
その他	倍率 = 1/10	・プラットフォーム寸法 70cm x 85cm ・倍率 = 1/20