

TMTの技術概観

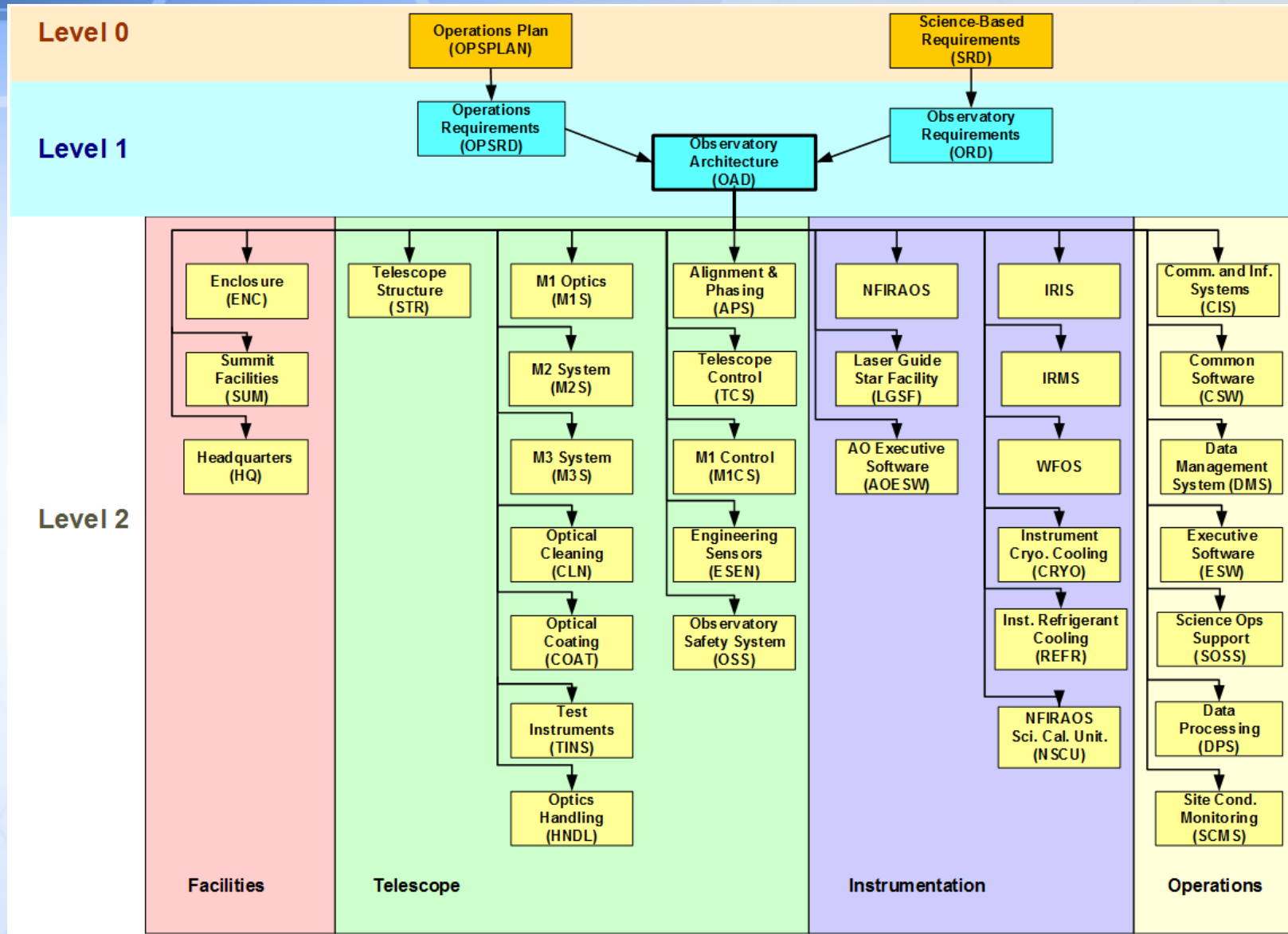
自然科学研究機構 国立天文台
総合研究大学院大学

早野 裕

山下卓也、TMT主鏡チーム、齋藤正雄、TMT-STRチーム、IRISチーム

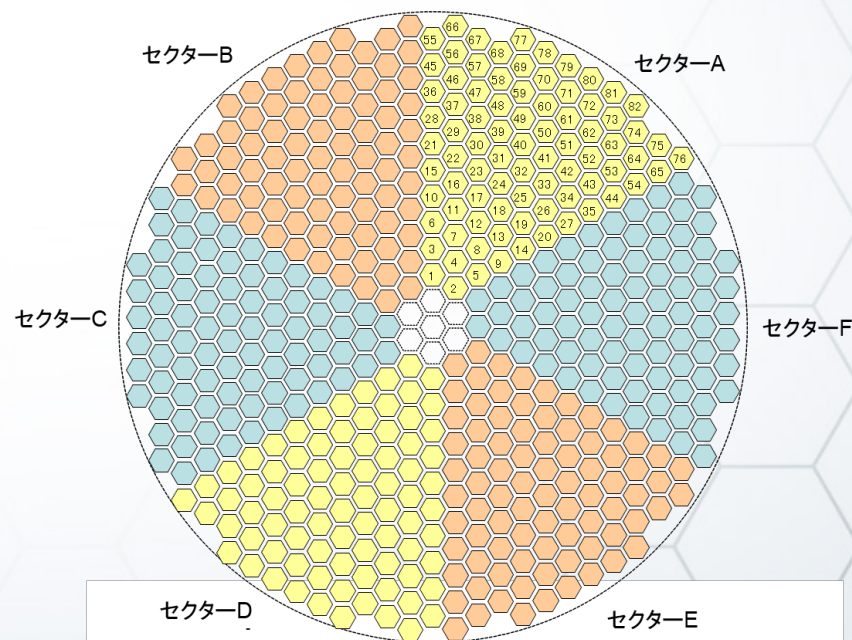
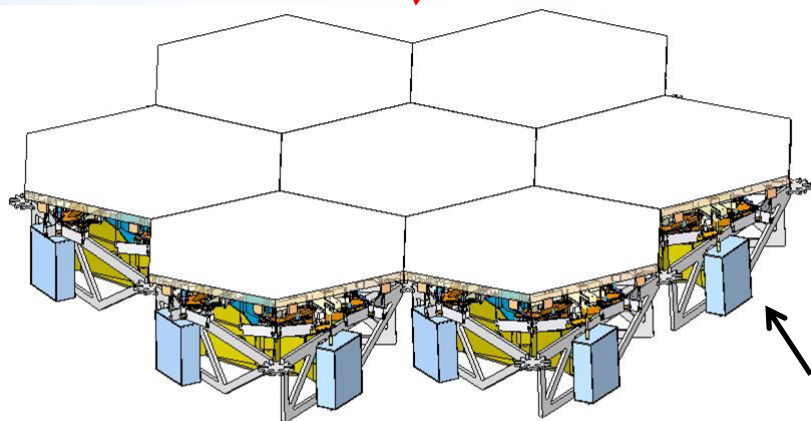
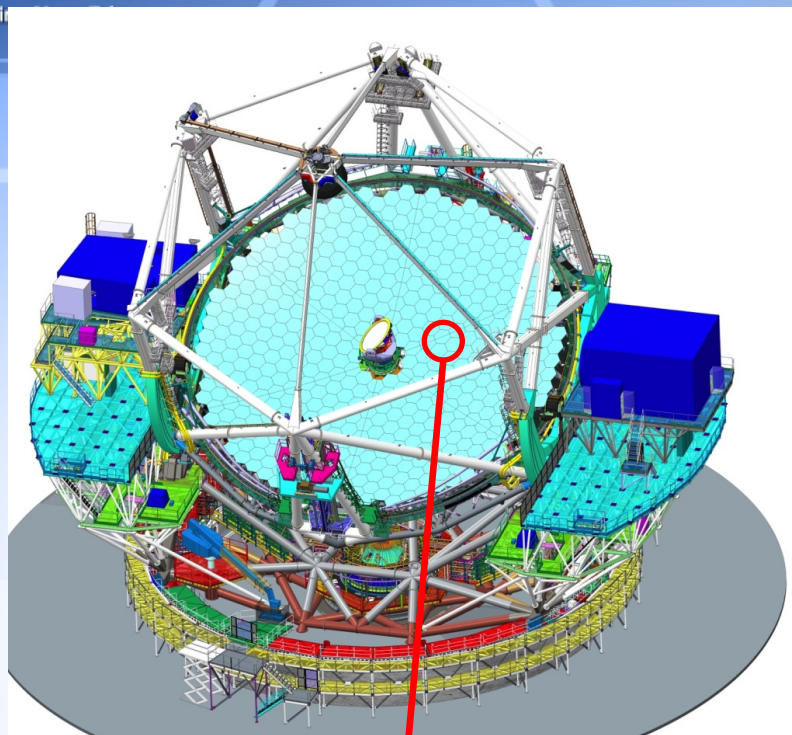
- はじめに
- 主鏡 [山下]
- 望遠鏡構造 [齋藤]
- 観測装置
 - 第1期観測装置: IRIS (早野)
 - 第1期観測装置: WFOS (尾崎)、MODHIS (小谷)
- まとめ

TMT system diagram



TMTの主鏡セグメント(分割鏡)

- ◆ 492セグメント(+蒸着交換用82枚)
- ◇ 82種類 × (6 (+1)枚)

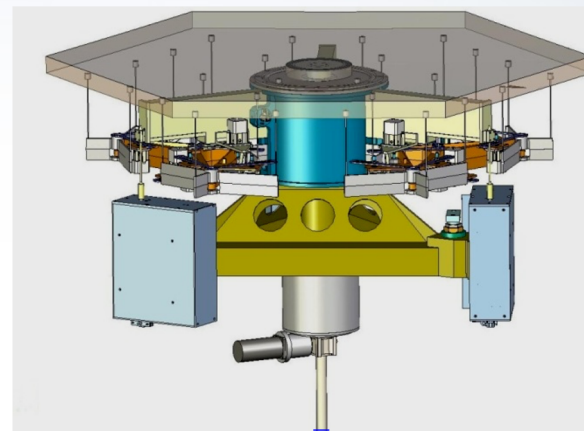


アクトエーター

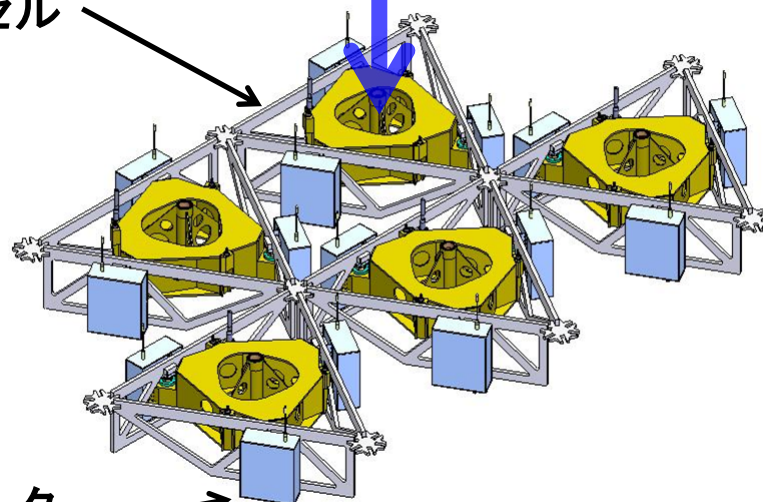
TMTの主鏡セグメント(分割鏡)

- 単体のセグメント鏡
 - ◇ 対角長: 1.45m、**厚さ 45mm**
 - ◇ 仕上げ面精度:
 - 30nm程度

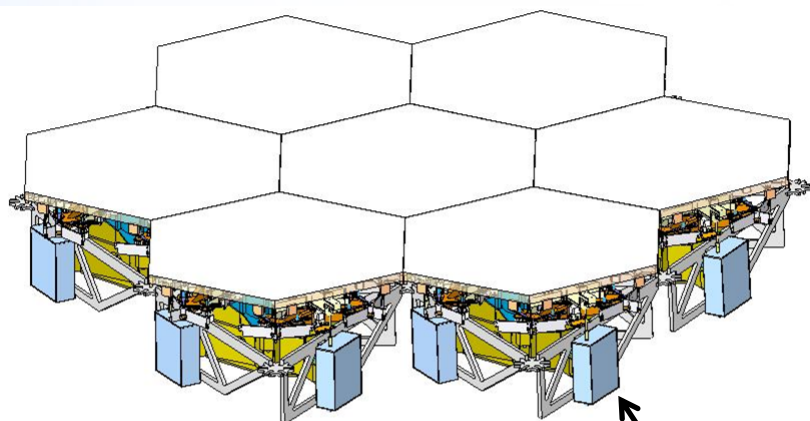
セグメント鏡＋支持機構



主鏡セル



アクチュエーター



セグメント鏡の特有の問題点

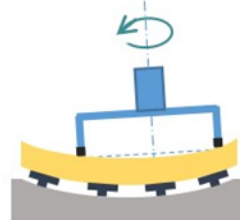
- 全体で1枚の鏡である
- “ふち”問題
 - “ふち”が“ふち”でない
 - “ふち”まで完全に研磨
 - 研磨後、六角形に切断
 - 切断による変形 → 修正研磨
 - 六角形に切断後、研磨
 - “ふち”まで正確な研磨: “やとい”
- 曲率の一致問題
 - すべてのセグメント鏡の形状が連続的でなければならない。
 - 3次元計測器(非干渉計法)
 - 正確な曲率測定は得意

セグメント鏡加工工程

分割鏡材の製造と球面加工（日本が574枚すべてを担当）



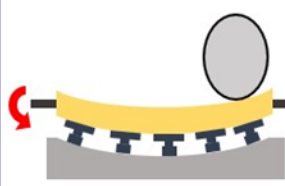
分割鏡材（平板）



球面研削

約7割は海外
（米国、中国、
インド）に供給

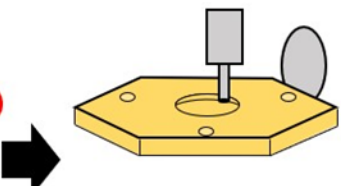
国内外で行われる非球面加工等（日本は約3割を担当）



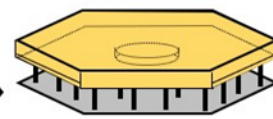
非球面研削
（曲げ研削）



非球面研磨
（曲げ研磨）



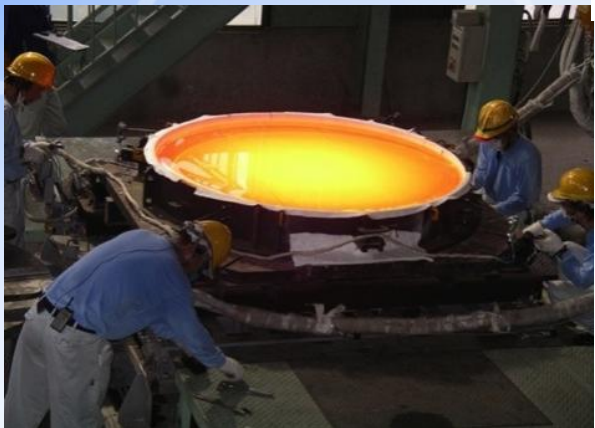
六角形カット
および 裏面加工



支持機構
への搭載

米国へ移送

鏡材製作

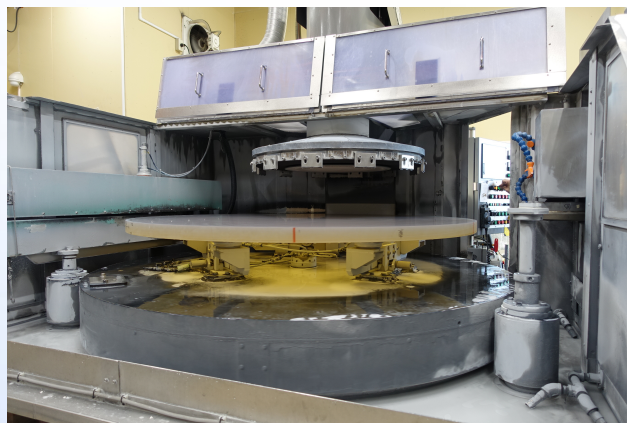


鏡材の製作工程

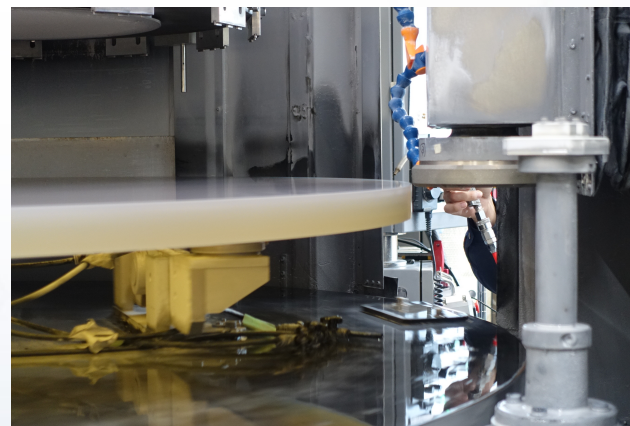


量産された鏡材

球面研削

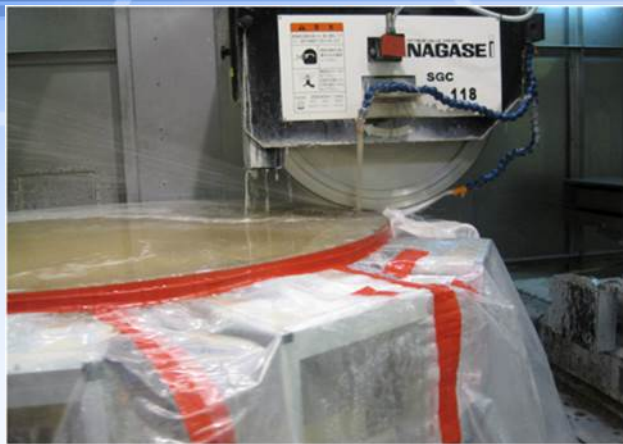


球面研削機上の鏡材

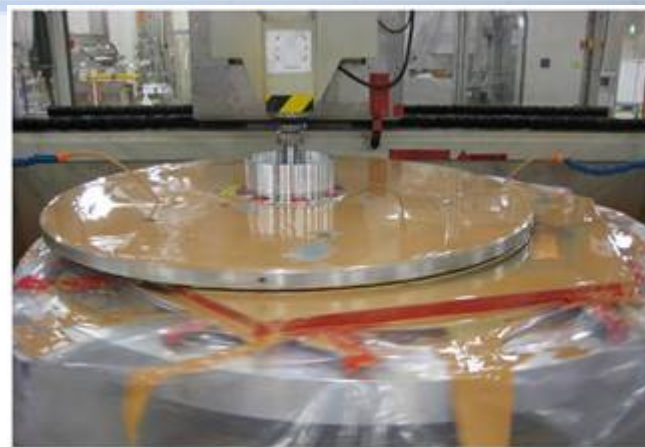


面取り工程

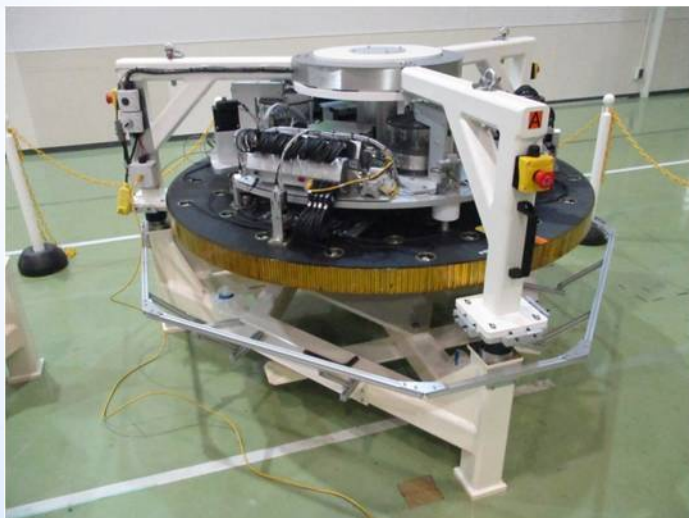
研磨工程



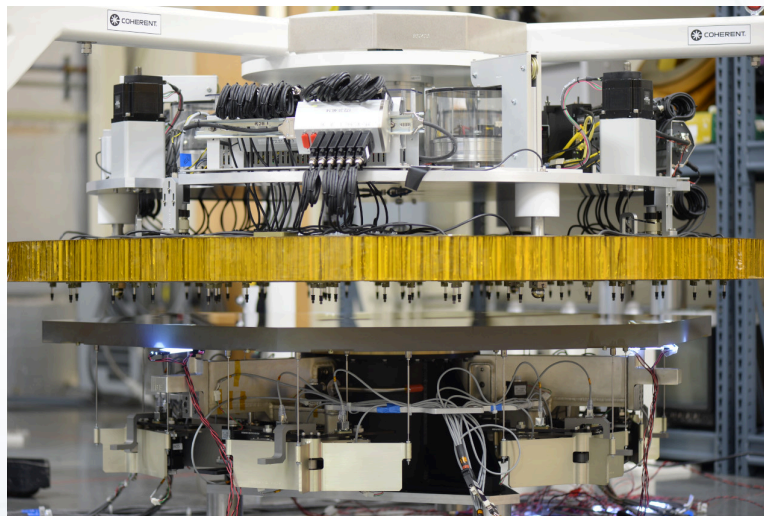
非球面研削加工



非球面研磨加工

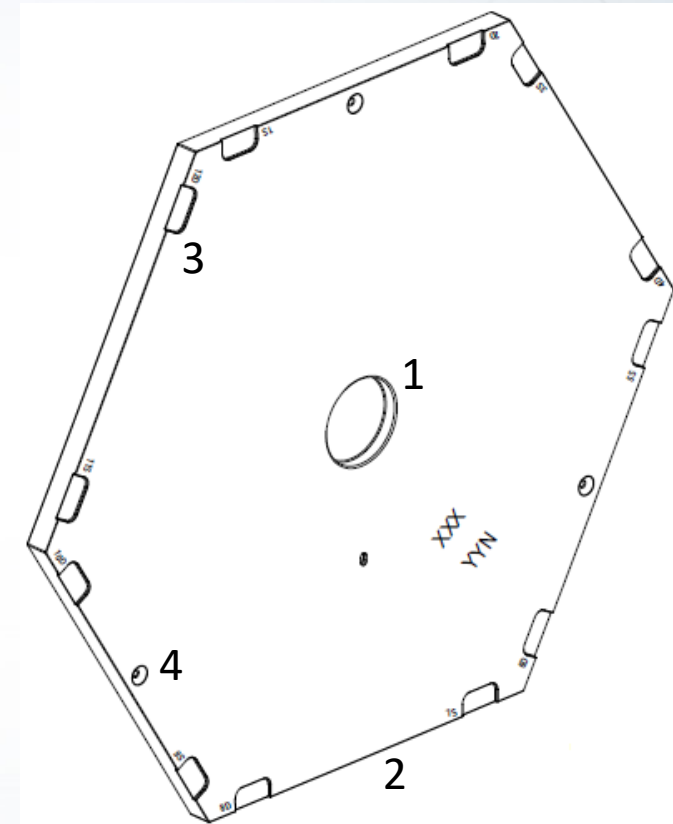


2Dプロファイロメーターによる鏡面測定

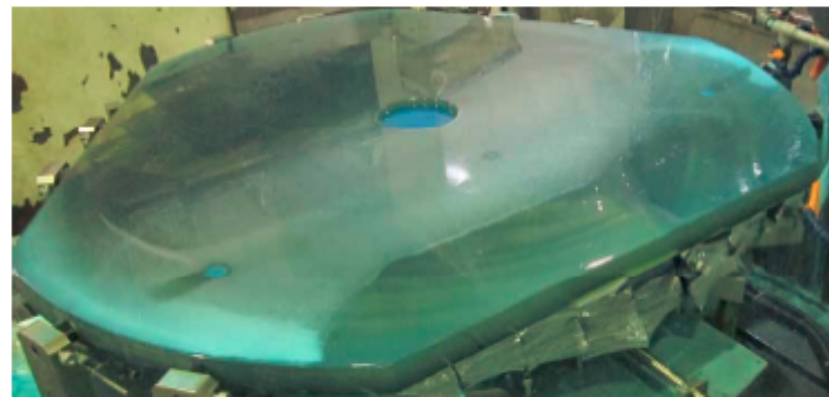
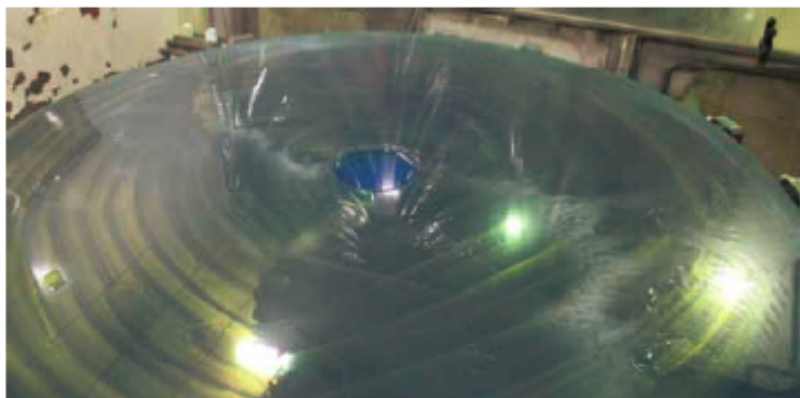


● 外形加工等

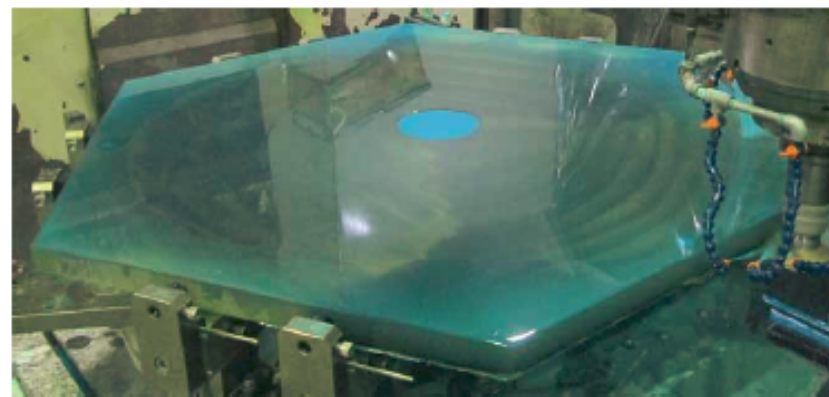
1. 中央のダイヤフラム穴(裏面)
2. 六角形に切断
3. センサーポケットの加工(裏面)
 - 鏡面に鉛直に: 12ヶ所
4. 位置決め形状(裏面)
 - 3つの円錐穴と1つの長円スロット
5. マーキング(裏面)
6. 各所にエッチング
 - ダイヤフラム穴、センサーポケット、パック接着面



外形加工試作

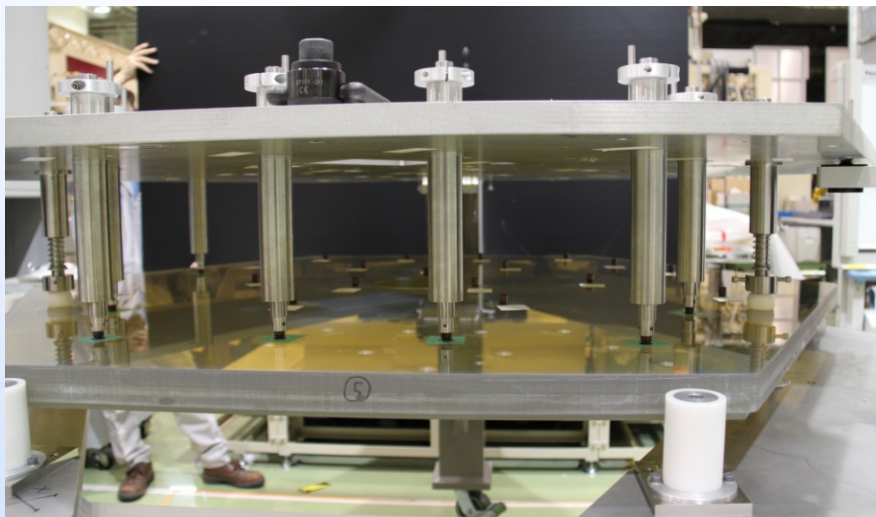
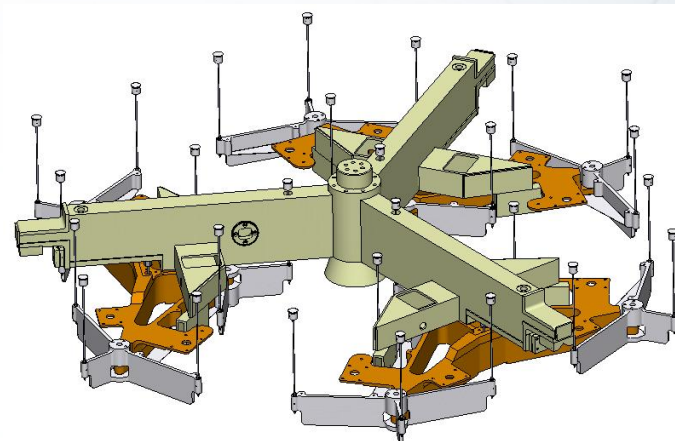


Hex cut加工

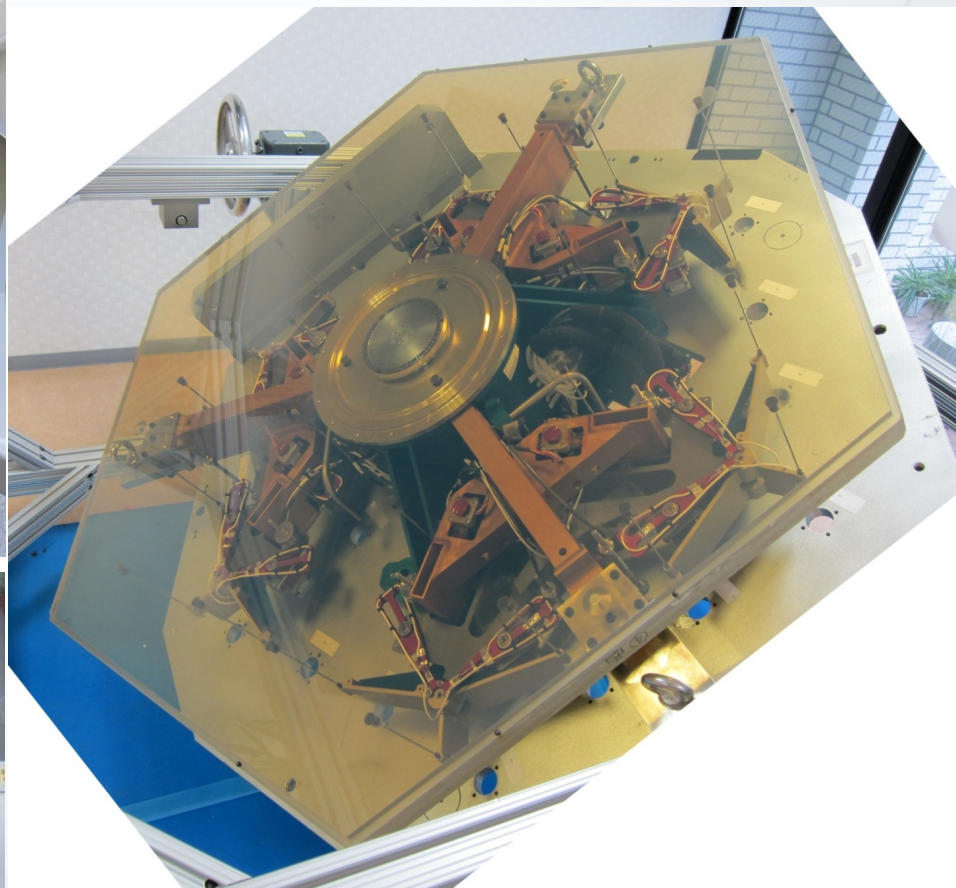
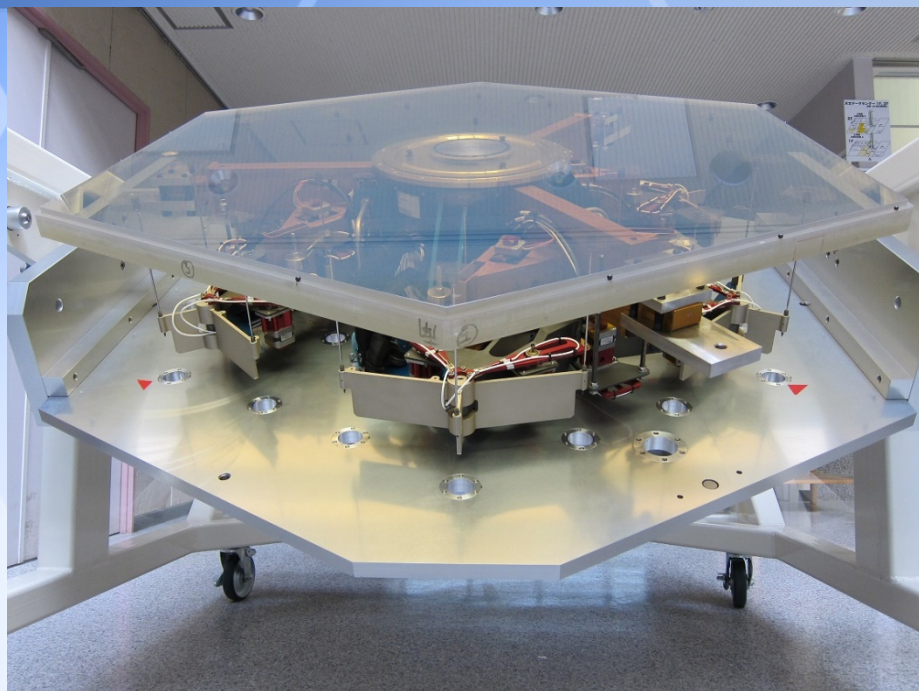


支持機構搭載試作

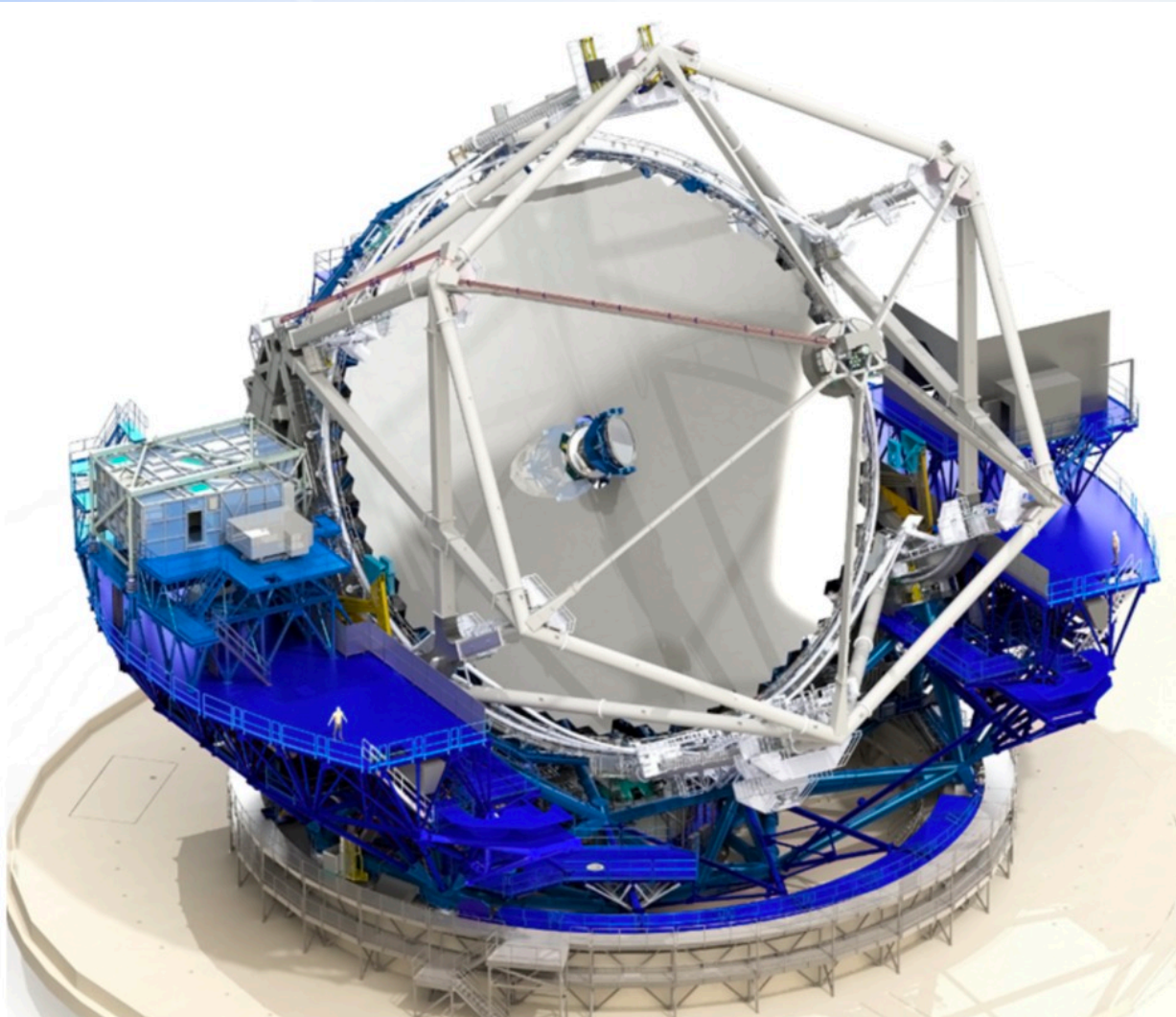
- 支持機構(SSA: Segment Support Assembly)
 - ◇ 米国TMT設計・製作
 - ◇ 量産はインド担当の予定
- 搭載には専用の治具を用いる
 - ◇ 位置精度・再現性



支持機構に搭載された プロトタイプセグメント鏡



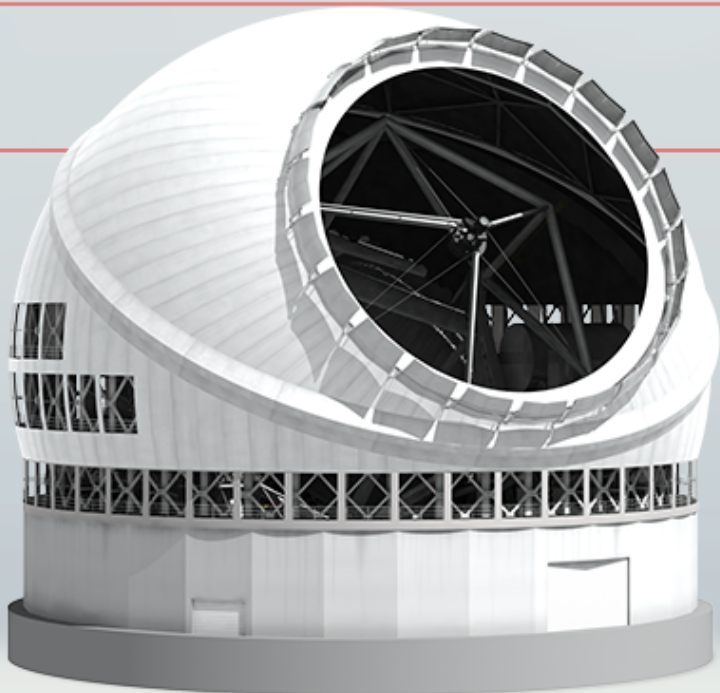
望遠鏡構造



軽量化という挑戦

重量を大きさの3乗とすると、TMTは $550 \times (30/8.2)^3 \sim 27000$ トン

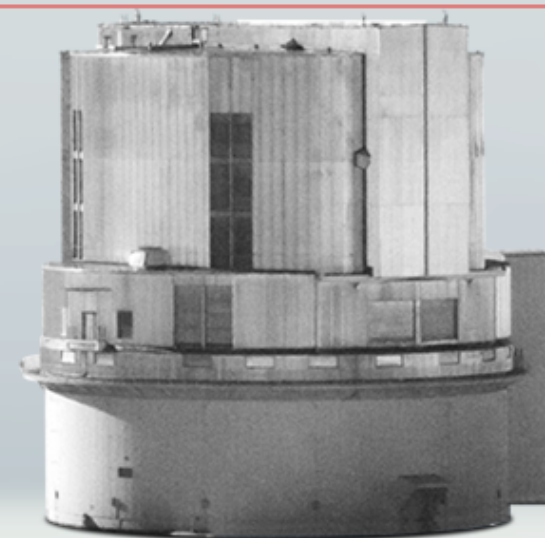
2600トン



TMT 56m

すばる望遠鏡 43m

550トン



TMTはすばる望遠鏡に比べて
口径が4倍近く大きいですが、ドーム
はひと回り大きいサイズにと
どまっている。

望遠鏡構造の主要技術仕様

● 環境条件

- 観測条件
- 生存条件(地震など)

● システム要件

- 重量
- 電力

● 指向追尾精度

- 指向精度
- 追尾精度

● 振動要求

- インタフェース (CS: control sys)
- ENC (Enclosure), SUM (Summit), NFIRAOS (AO), LGSF (Laser guide star facility), CRYO (Cryo cooling system), IRIS, WFOS
- M1 Optics, M2, M3, CLN (Cleaning), TINS (Test instrument), TCS (Telescope CS), M1CS, APS (Alignment and Phasing system), OSS (Observatory safety system), ESEN (engineering sensors)

望遠鏡構造の要求仕様(生存条件)

- ◆ 1000年に一度の地震が来ても復旧できる。
- ◆ 免震機構の試作(ある閾値で動作する)

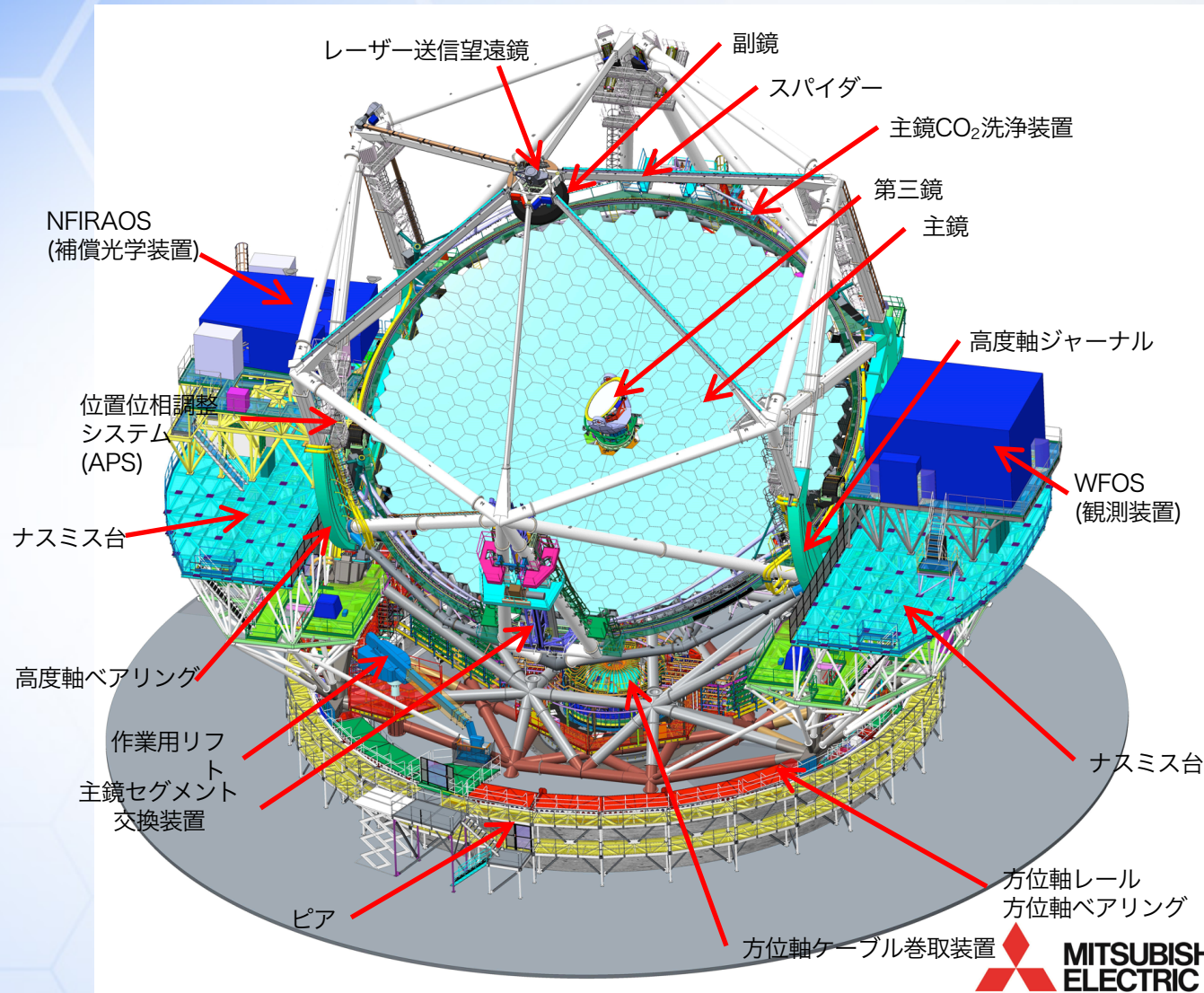


望遠鏡構造の要求仕様(追尾精度)

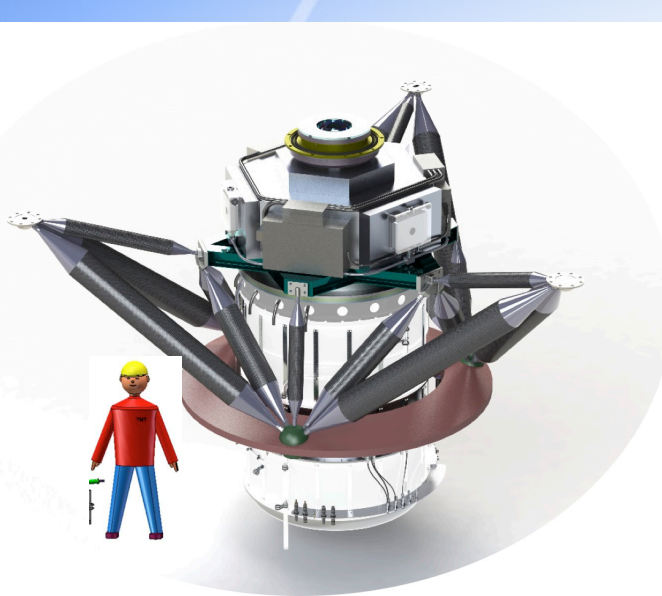
- 空間分解能はすばる望遠鏡の約4倍よいため、要求される追尾精度も約4倍よくする必要がある。
- 駆動機構にダイレクトドライブシステムを採用(リニアモーターカー方式)
- 試作をして、コギングトルクの評価。



その他の装置とのインターフェース



第1期観測装置

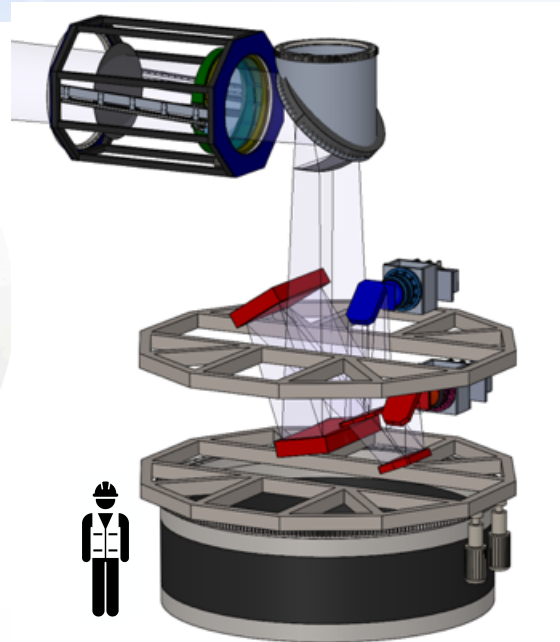


IRIS

(近赤外撮像分光装置)

日本(国立天文台)、UC・カルテク、カナダ(NRC)が分担して開発・製作

詳細設計中、日本は撮像部を担当するほか、全体のシステムエンジニアリングも担当している。

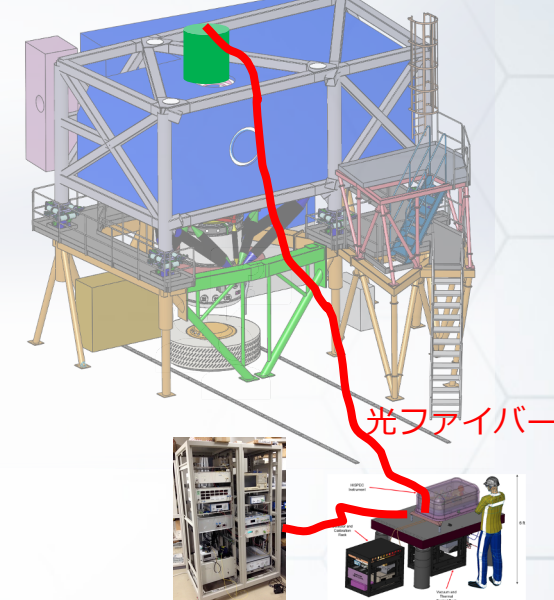


WFOS

(可視広視野多天体分光装置)

UCが中心となって概念設計を実施中
国立天文台は設計および要素技術開発に人的貢献を行っている。

補償光学装置 (NFIRAOS)



MODHIS

(多天体回折限界近赤外高分散分光装置)

カルテク・UCが中心となって概念設計と実施中

国立天文台は人的貢献による設計・検討に参加している。

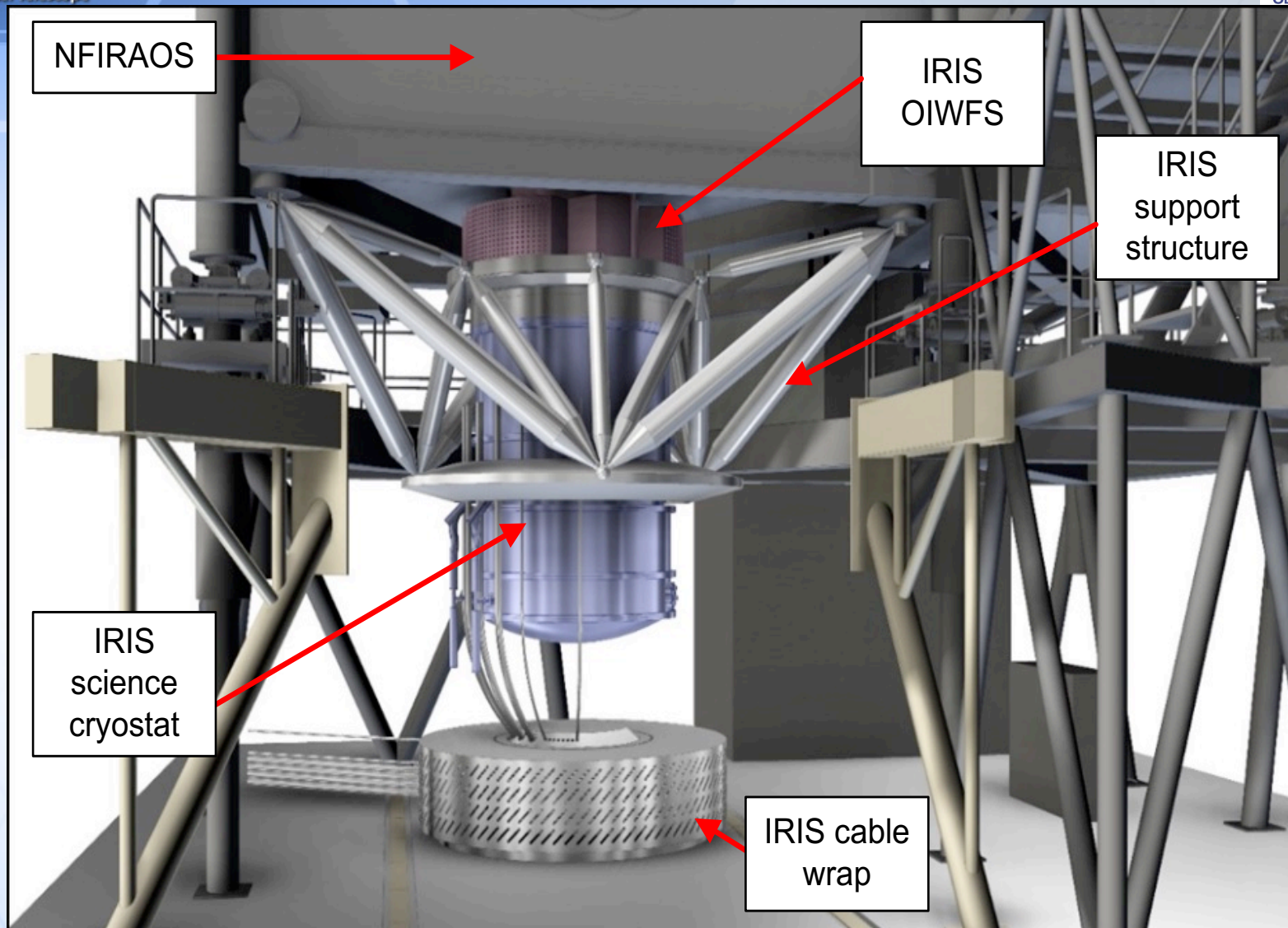
IRISの基本仕様

Requirement #	Description	Requirement
[REQ-1-OAD-3070]	Wavelength Range	0.84 – 2.4 μm
[REQ-1-OAD-3072]	Image quality	Aberrations uncorrectable by an order 60x60 AO system should not add wavefront errors larger than 40 nm RMS in imaging and fine IFU modes
[REQ-1-OAD-3074]	FoV, IFU	Up to 3 arcsec for integral field mode, in one spatial direction
[REQ-1-OAD-3076]	FoV, Imaging	>30x30 arcsec for imaging mode
[REQ-1-OAD-3078]	Detector Sampling, Imaging	0.004 arcsec per pixel (Nyquist sampled (1/2D)) over 4096 pixels for IFU)
[REQ-1-OAD-3080]	Spatial Sampling, IFU	Plate scale adjustable 0.004, 0.009, 0.025, 0.050 arcsec/spaxel for IFU
[REQ-1-OAD-3084]	Spectral Bandpass	Broad infrared bands in single exposure, but smaller wavelength coverage ($DI/I \leq 0.05$) is acceptable for area coverage equivalent to 100*100 spatial pixels.
[REQ-1-OAD-3086]	Spectral Resolution	R=4000 over Y,J,H,K bands, one band at a time R=5-100 for imaging mode
[REQ-1-OAD-3088]	Throughput	>30% for IFS, Not including telescope or NFIRAOS
[REQ-1-OAD-3089]	Throughput	>40% for imager, not including telescope or NFIRAOS
[REQ-1-OAD-3090]	Instrument background	The instrument should not increase the (inter-OH) background by more than 5% (TBC) over the sum of: inter-OH sky, telescope and NFIRAOS background.
[REQ-1-ORD-3092]	Instrument Background	In imaging mode the instrument should not increase the K-band background by more than 15% over natural sky.

IRIS modes

Capability mode	Spatial sampling (mas)	Field of View (arcsec)	Resolution (I/dI)	Min/Max wavelength (mm)	Bandpass ³
Imager	4 mas	34 x 34	Set by filter	0.84-2.4	60 filters BB ¹ and NB ²
Slicer IFS 88x45 Spaxels	50 mas	4.4 x 2.25	4,000, 8,000	0.84-2.4	20%,5%
	25 mas	2.2 x 1.125	4,000, 8,000	0.84-2.4	20%,5%
Slicer IFS 88x45 Spaxels	50 mas	4.4 x 2.25	4,000, 8,000	0.84-2.4	20%,5%, H+K
	25 mas	2.2 x 1.125	4,000, 8,000	0.84-2.4	20%,5%, H+K
Lenslet IFS 112x128 Spaxels	9 mas	1.01 x 1.15	4,000	0.84-2.4	5%
	4 mas	0.45 x 0.51	4,000	0.84-2.4	5%
Lenslet IFS 16x128 Spaxels	9 mas	0.144 x 1.15	4,000, 8,000	0.84-2.4	20%, H+K
	4 mas	0.064 x 0.51		0.84-2.4	20%, H+K

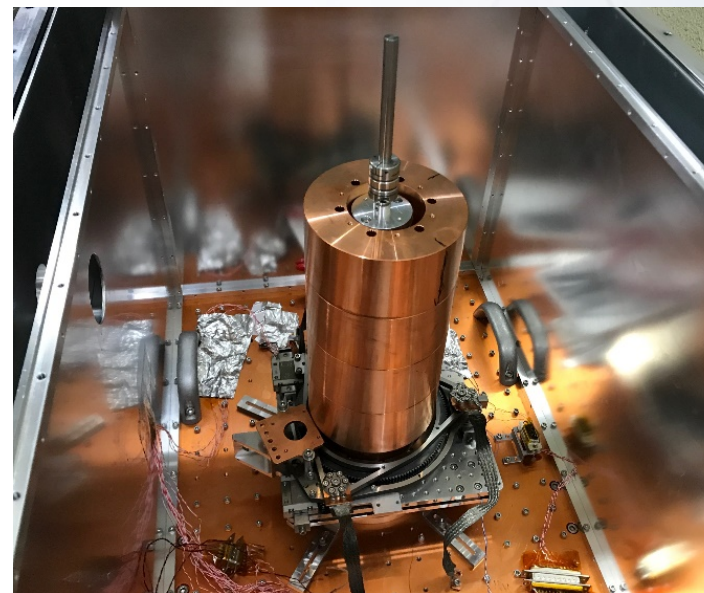
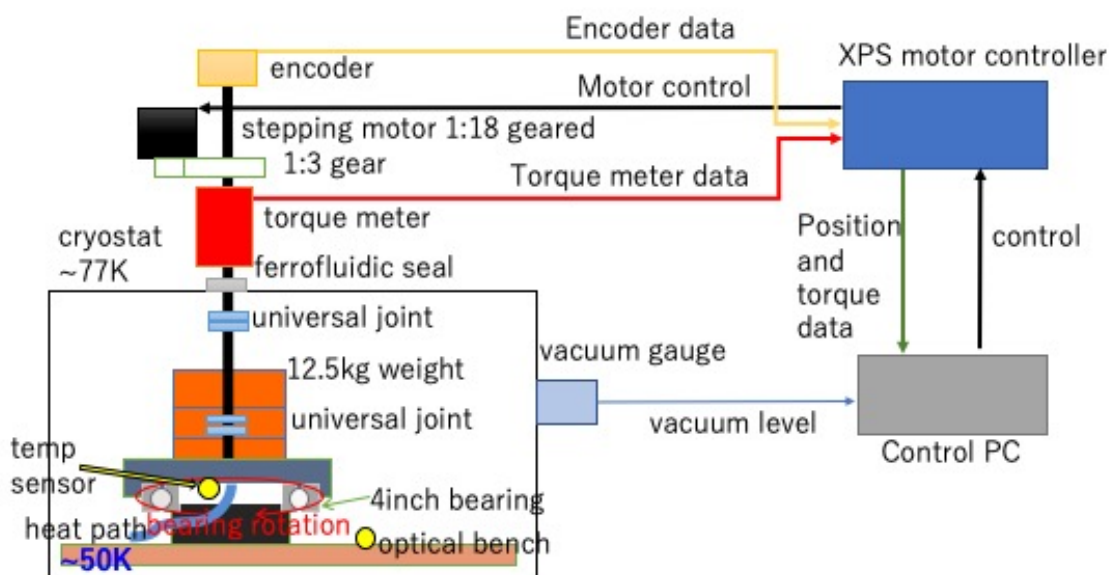
NFIRAOSに取り付けられたIRIS



技術的なチャレンジ

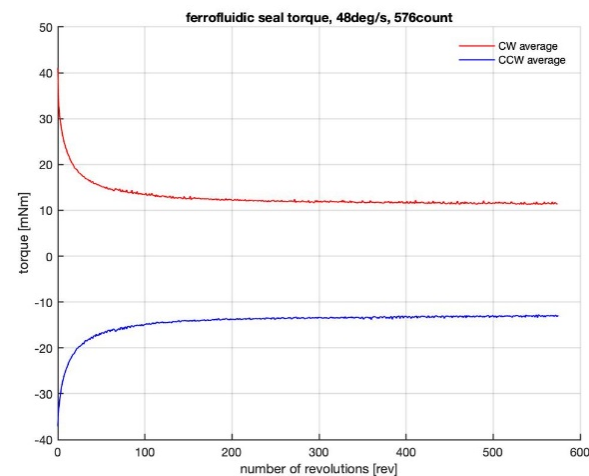
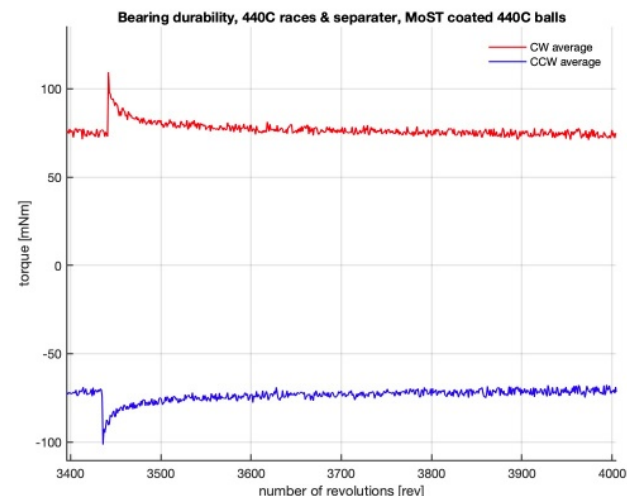
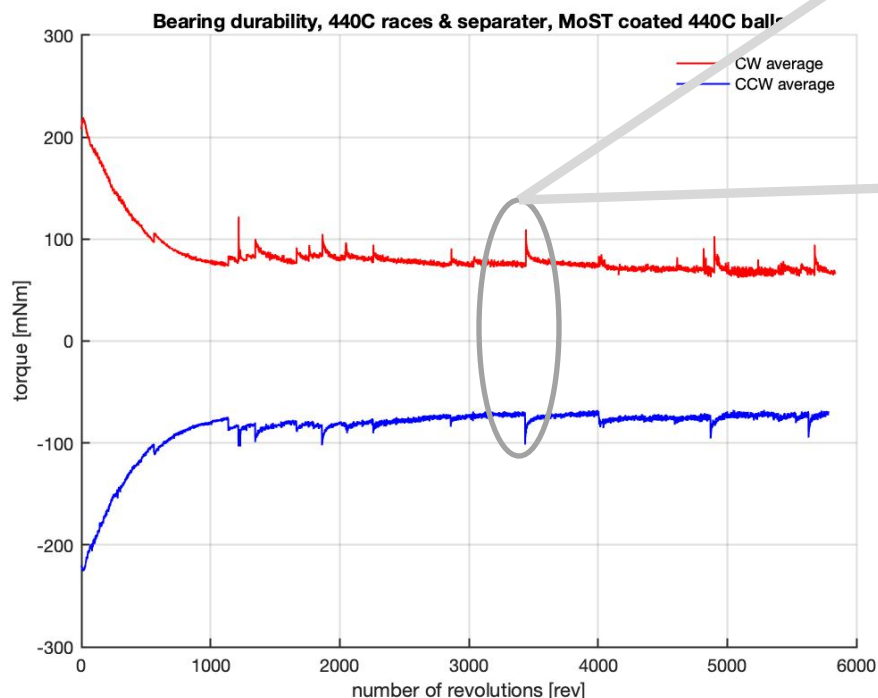
- 非常に小さい波面誤差 (40nm rms) を達成する光学系
 - ◇ 午後の発表
- 30マイクロ秒の相対アストロメトリ
 - ◇ これまでに達成されたことのない精度
 - ◇ 10マイクロ秒 = $1/400$ ピクセル = 38nmの精度で天体の位置を決定
 - ◇ 天体、大気、望遠鏡、AO、装置をキャリブレーション、補正
- 非常に安定したシステム
 - ◇ 高精度のアストロメトリを達成するために、5-10年間は装置を開けない
 - ◇ 高い機械的精度を長期間に渡って保持
 - ◇ 真空・冷却下の駆動系の長期耐久性が求められる。

ベアリング耐久試験



実験系の概略図と写真

ベアリング耐久試験結果



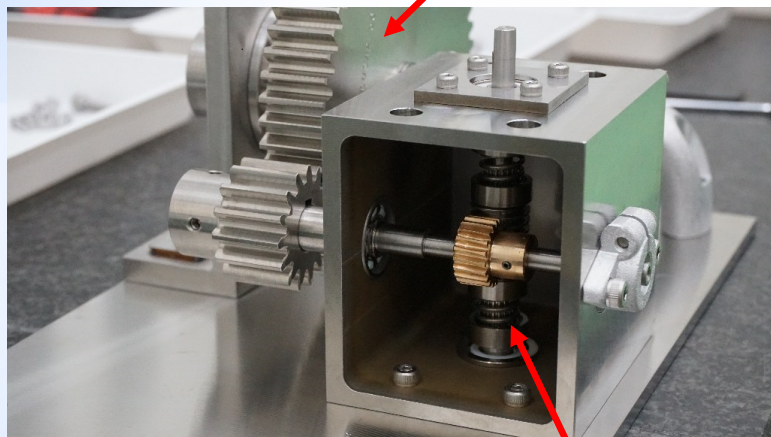
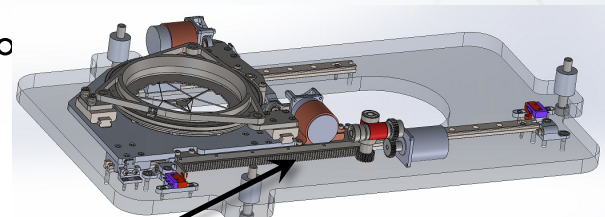
平均トルク。(磁性流体シールトルクと熱パスの屈曲復原力によるトルクを含む)

磁性流体シールトルク

ウォームギアドライブの耐久試験

- ◆ ダイクロナイトギアは12000サイクルの駆動に耐えたが激しく摩耗をした。
- ◆ 超高分子量ポリエチレンのギアに変更した。

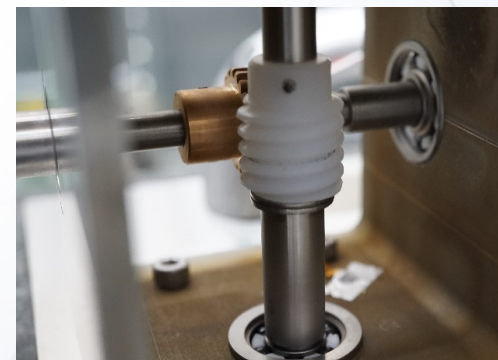
(UHMW-PE) Fly wheel



Spring supported
worm gear



damaged worm gear



worm gear (UHMW-PE)

その他の主要要素技術

- コーティング（高反射、AR）
- 冷却・排熱、熱構造解析
- 振動・固有振動数解析
- 遮光、ゴースト・迷光対策
- 電磁ノイズ対策

まとめ

- TMTセグメント鏡の加工工程、外形加工、支持機構試作。
- 望遠鏡構造のチャレンジングな要求仕様と試作による試験、複雑なインターフェース。
- 近赤外撮像分光装置IRISの要求仕様と技術課題。関連する主要な要素技術。