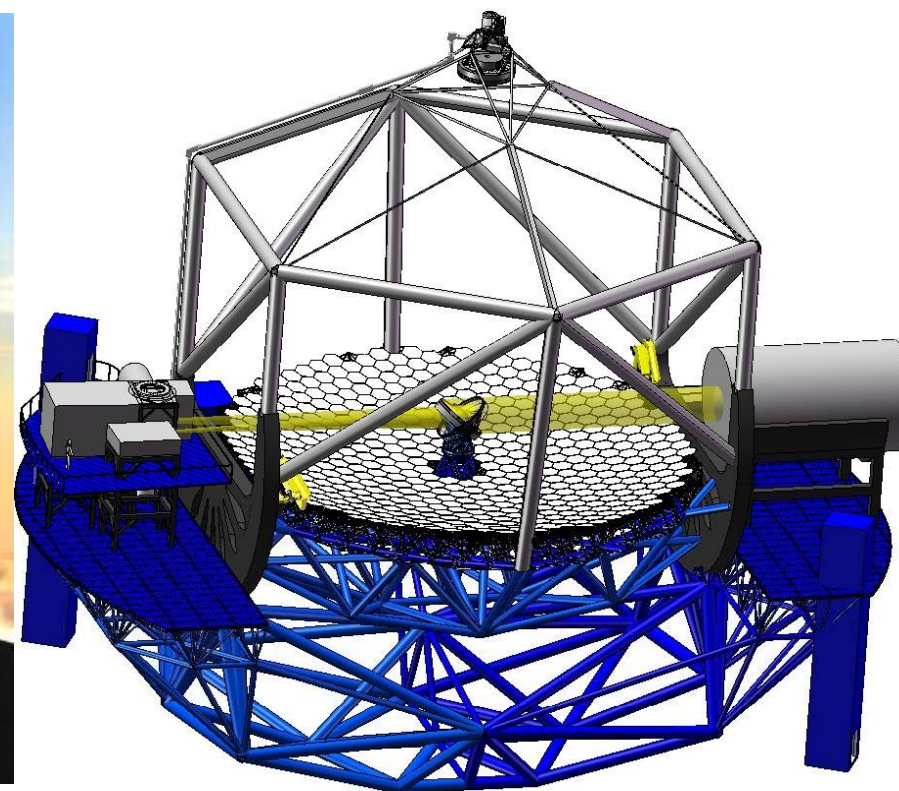


# TMTの概要と日本のセグメント主鏡 開発状況

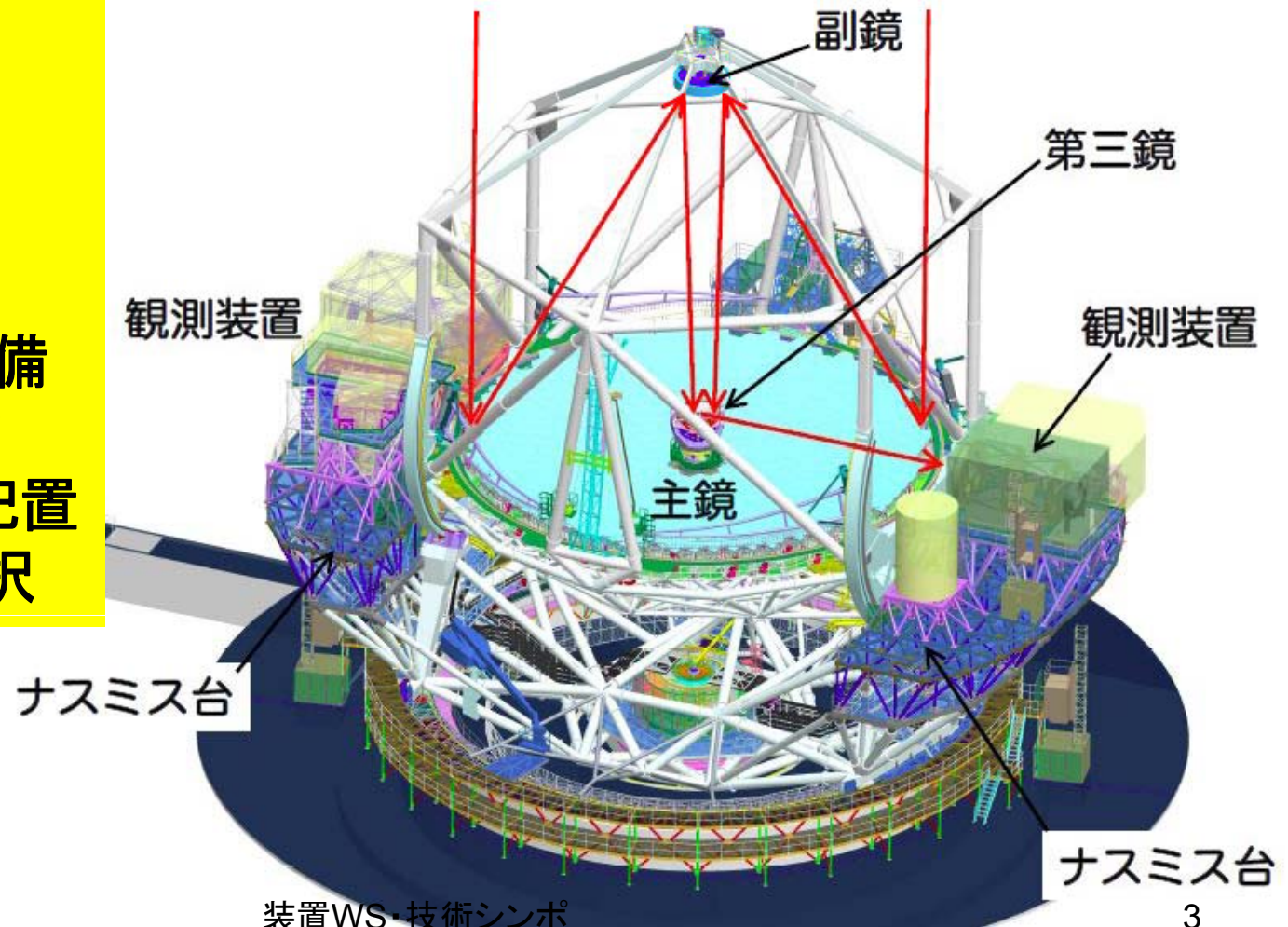


国立天文台・TMT推進室  
山下卓也

# TMTの概要

# TMTの構造の特徴

- ・主鏡直径：**30m**
- ・492枚分割鏡で軽量化
- ・口径比1.0でコンパクト化
- ・レーザーガイド補償光学を装備
- ・観測装置は全てナスミス台に配置
- ・第3鏡で装置選択



TMT

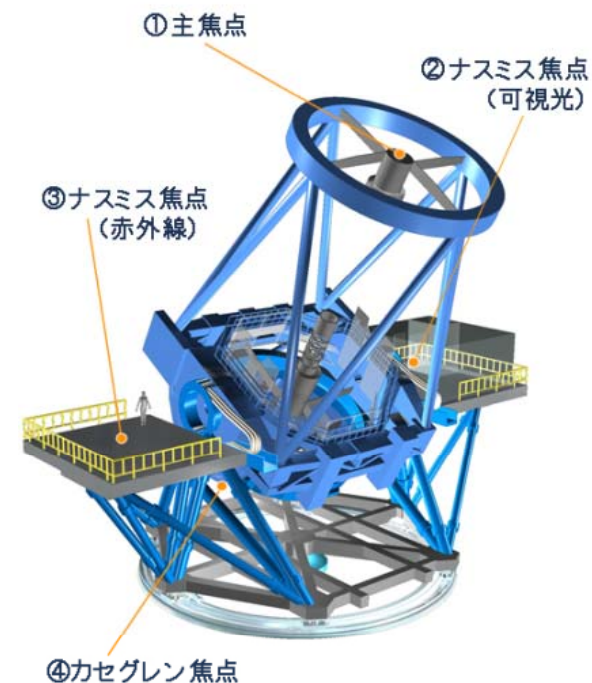
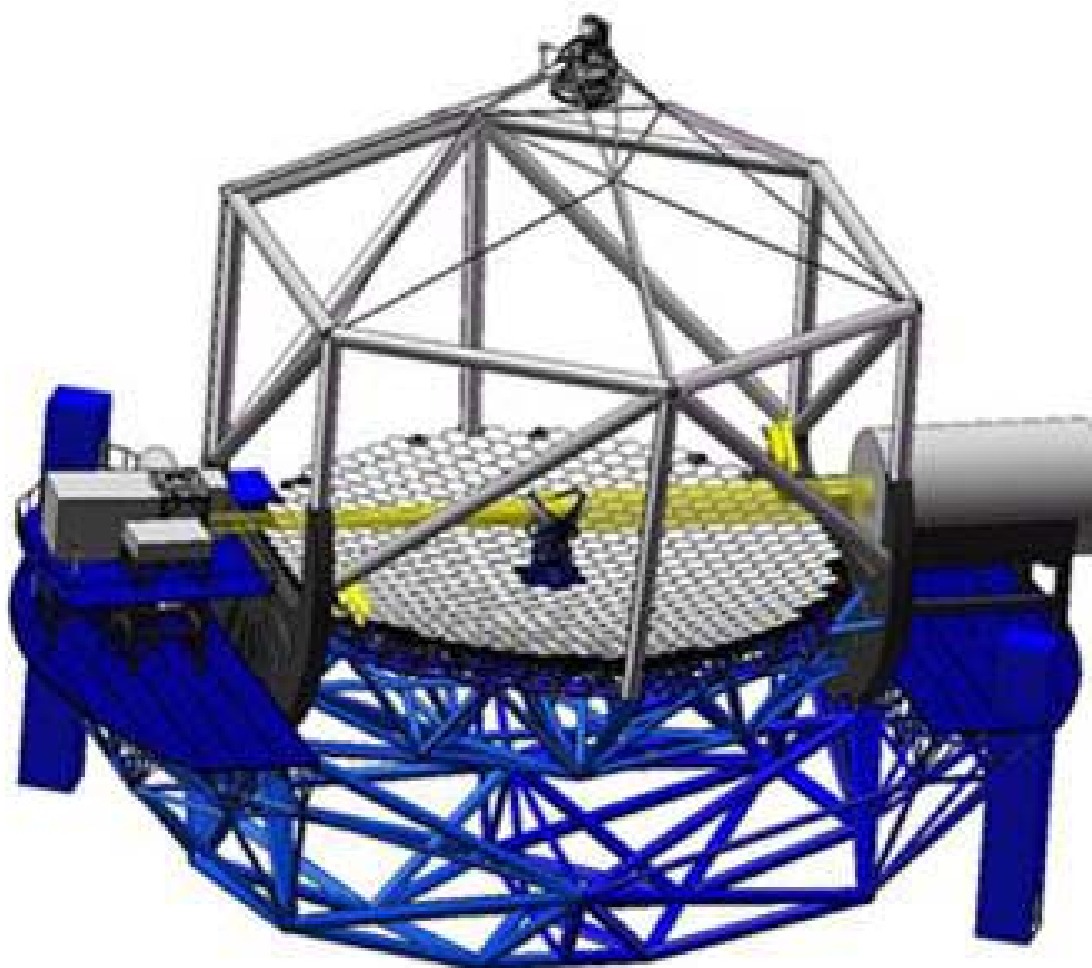
幅 60m

高さ 51m

すばる望遠鏡

幅 27.2m

高さ22.2m



© MBTA Corporation Japan #150132

大きさ比べ

主鏡径 3.8倍

幅 2.2倍

高さ 2.3倍

重量比べ

2200t/550t 4倍

## TMTドーム

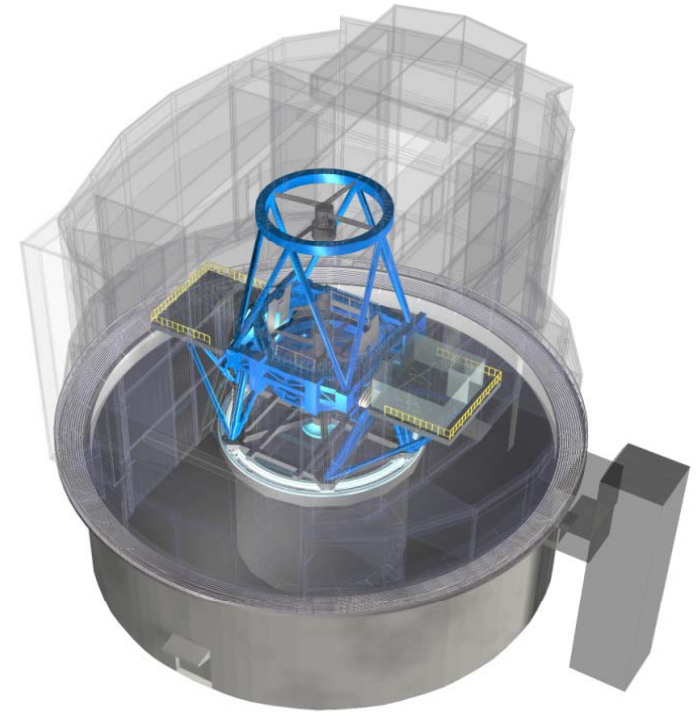
直径 66m

高さ 56m

## すばるドーム

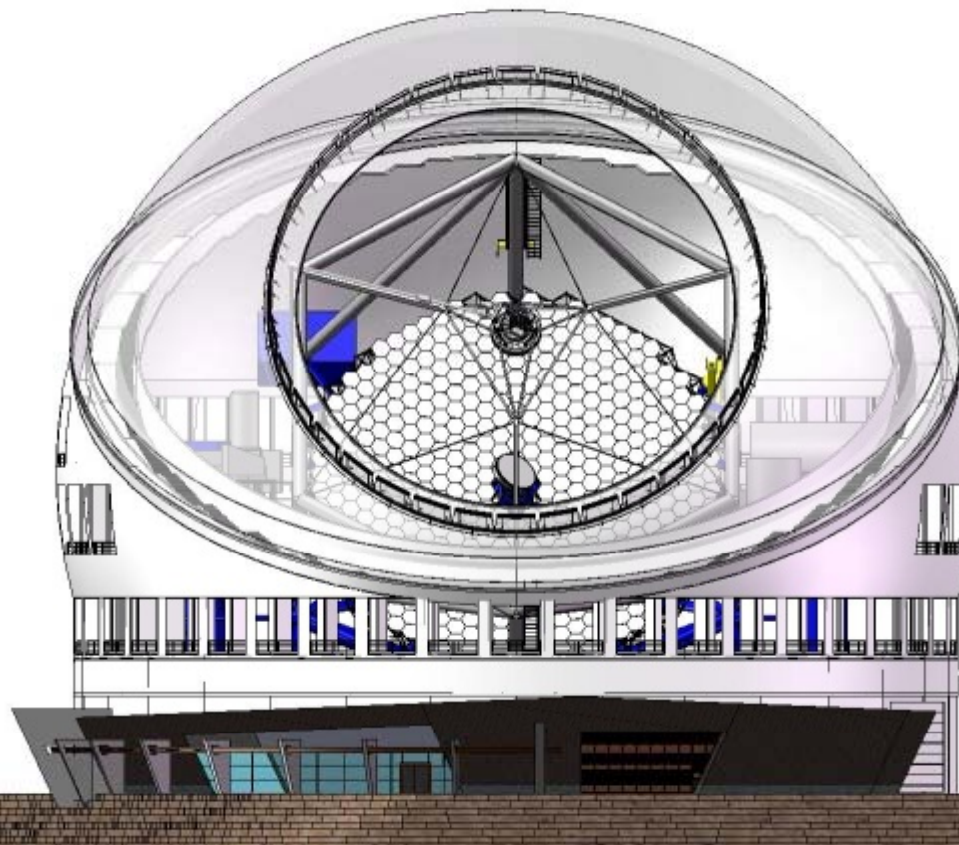
直径40m

高さ43m

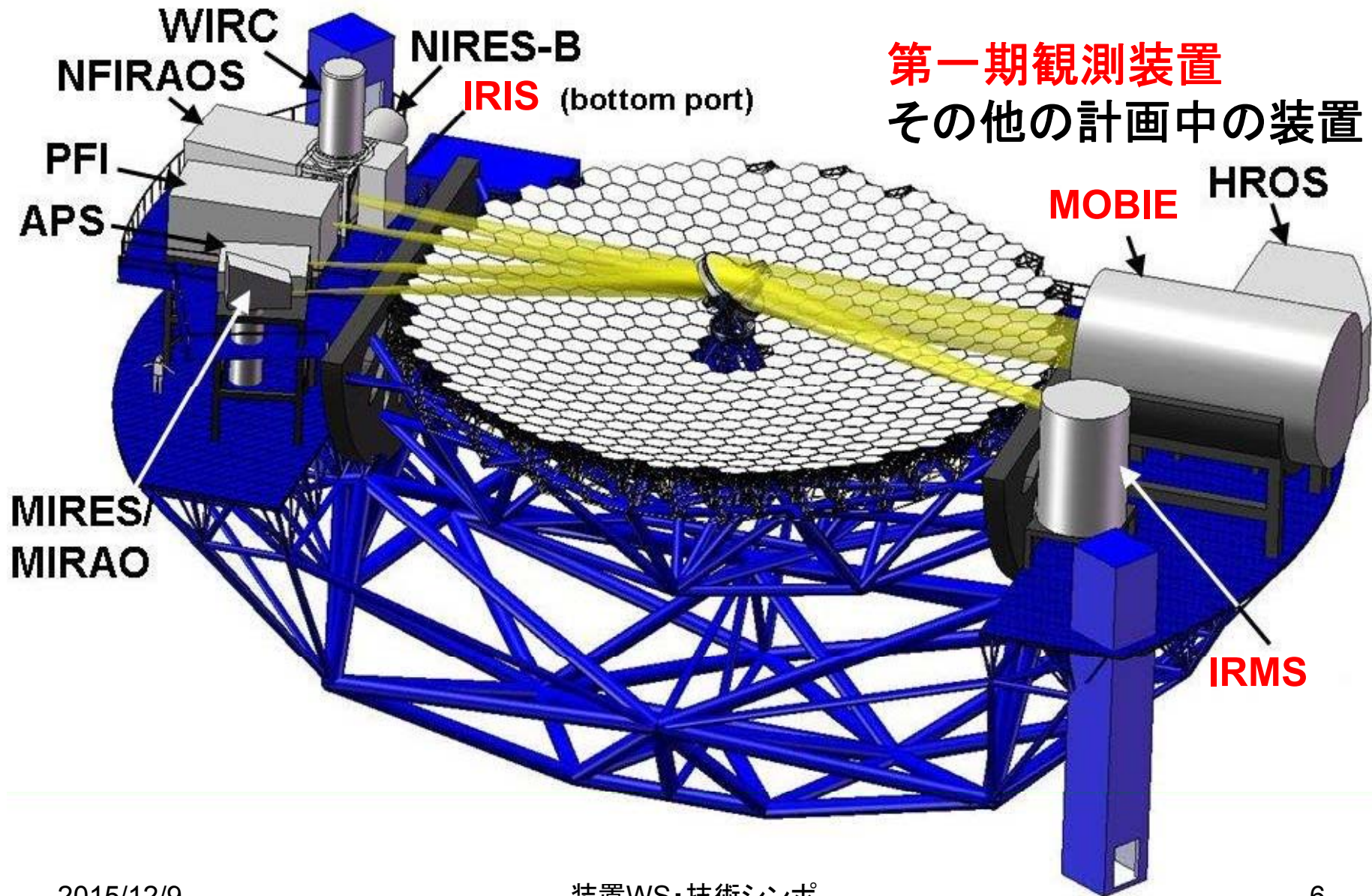


(c) 2003 META Corporation Japan #150102

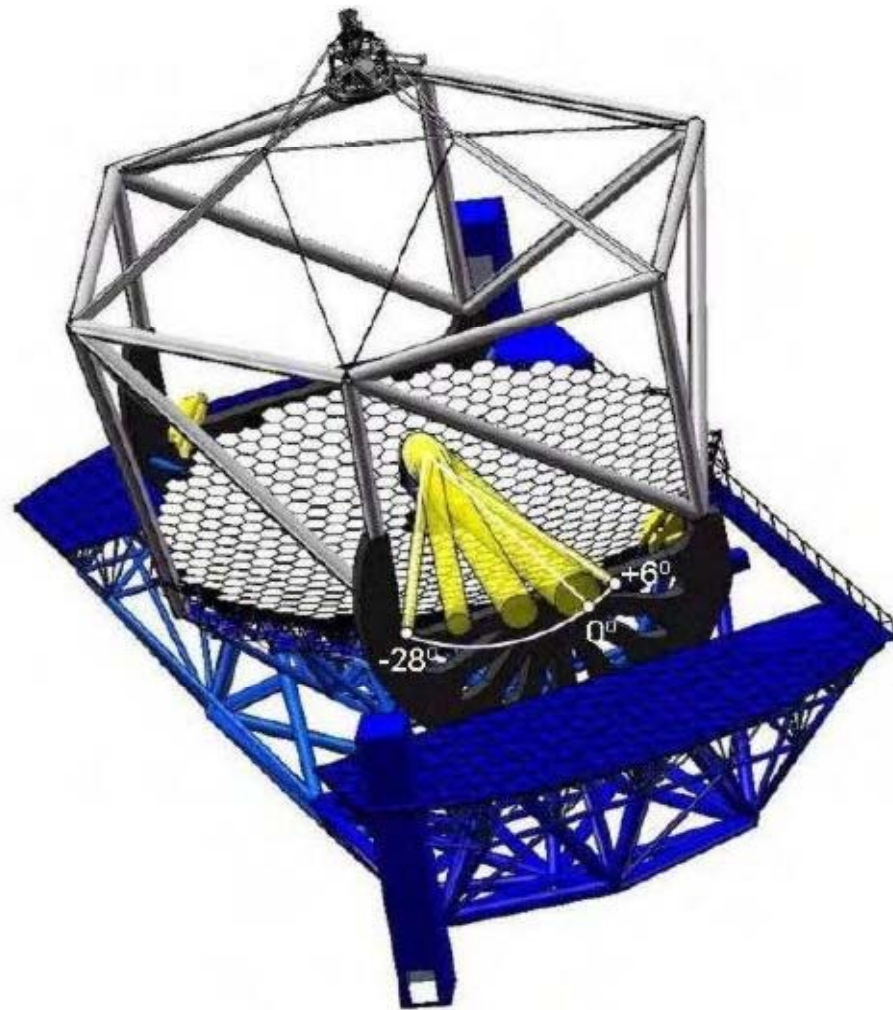
**大きさ比べ**  
**ドーム径1.7倍**  
**ドーム高さ1.3倍**



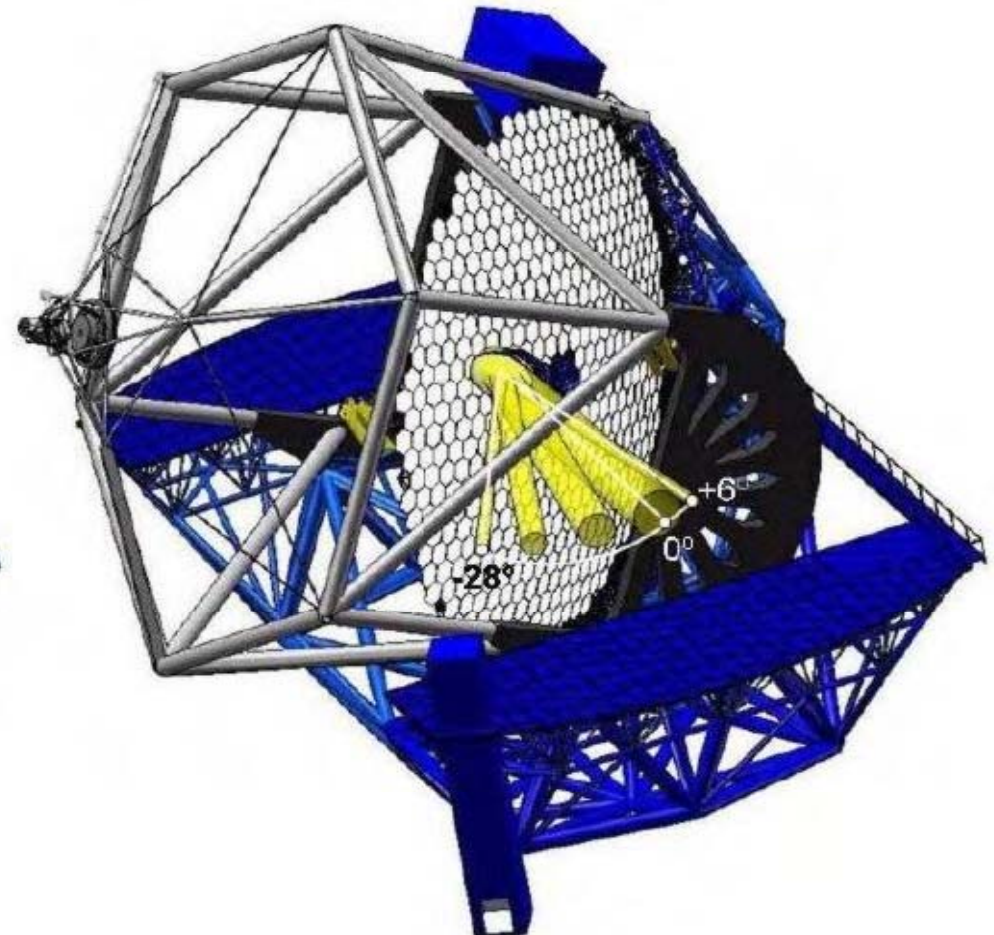
# 観測装置レイアウト



# 観測装置の切り替え

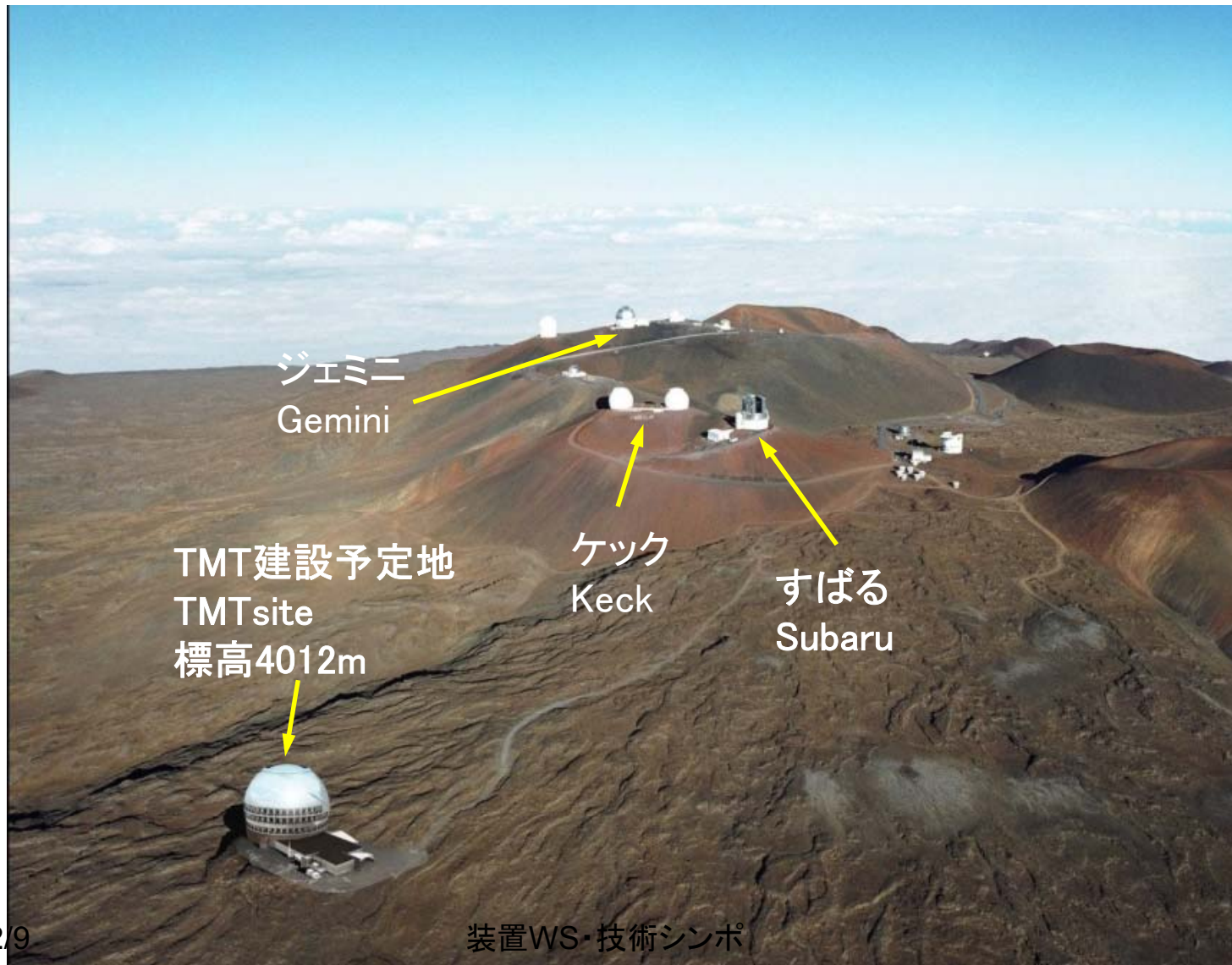


Zenith Pointing



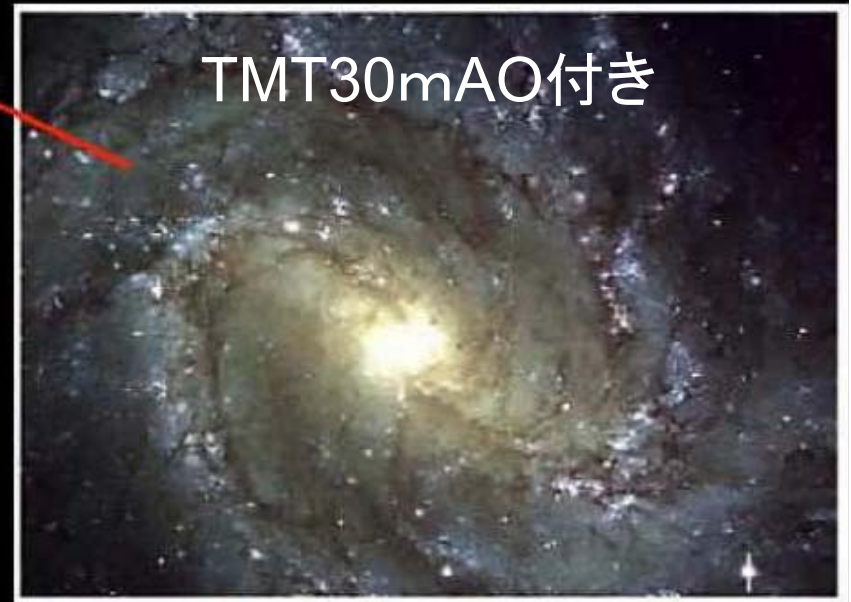
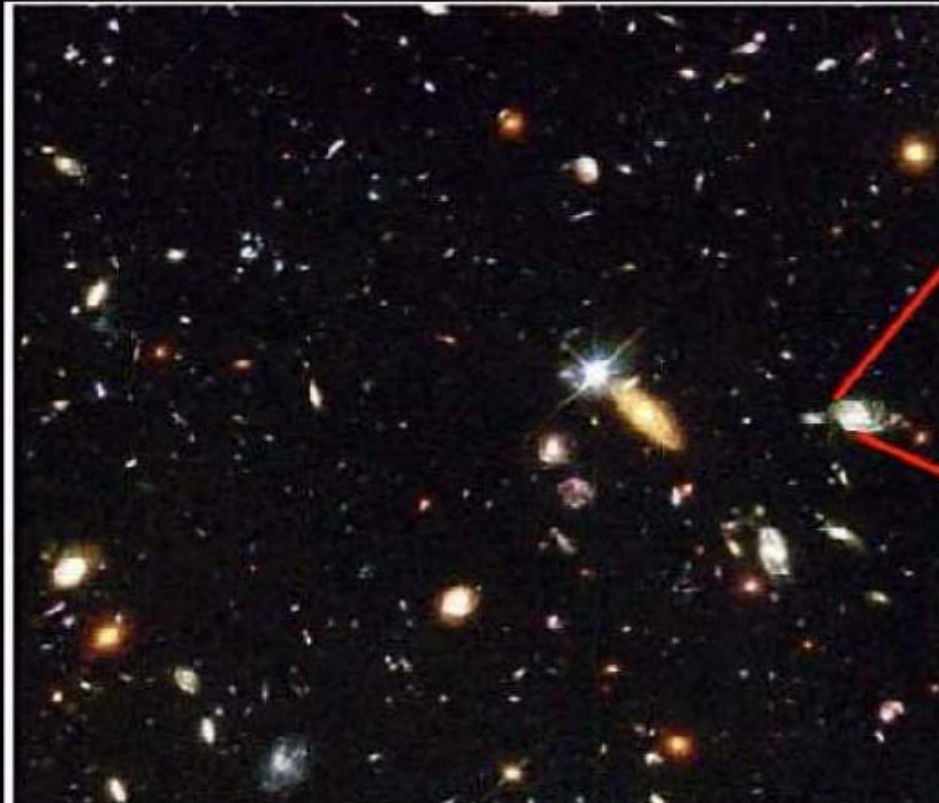
65° Pointing

# TMT建設地 TMT site ハワイ島マウナケア山 MaunaKea





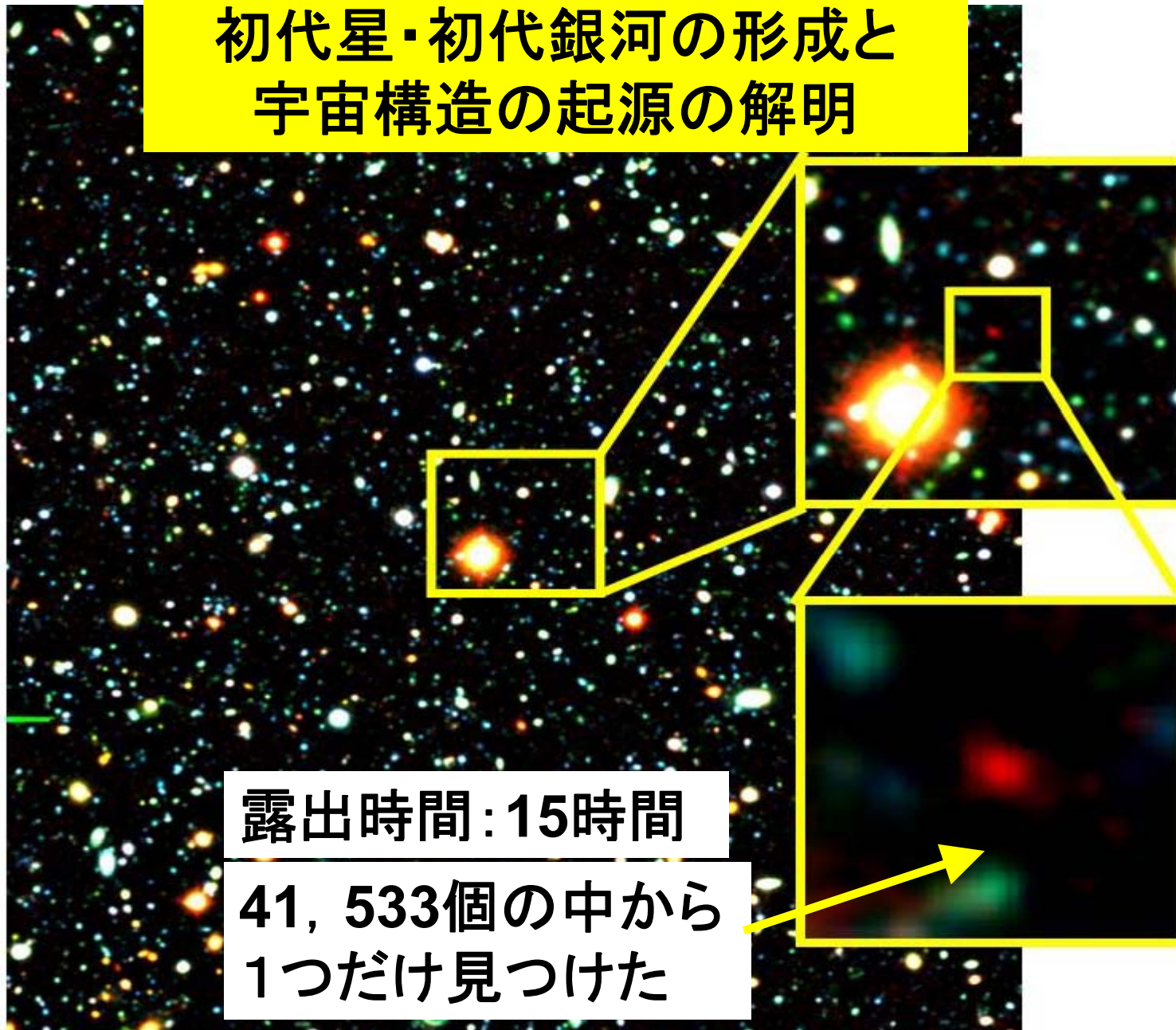
# TMTの威力： 大集光力と高解像度



TMTの解像度 = すばるの4倍  
TMTの感度 = すばるの14倍~200倍  
回折限界での効率 ~ 口径<sup>4</sup>

The same with a 30 meter telescope  
& Adaptive Optics

# 初代星・初代銀河の形成と 宇宙構造の起源の解明



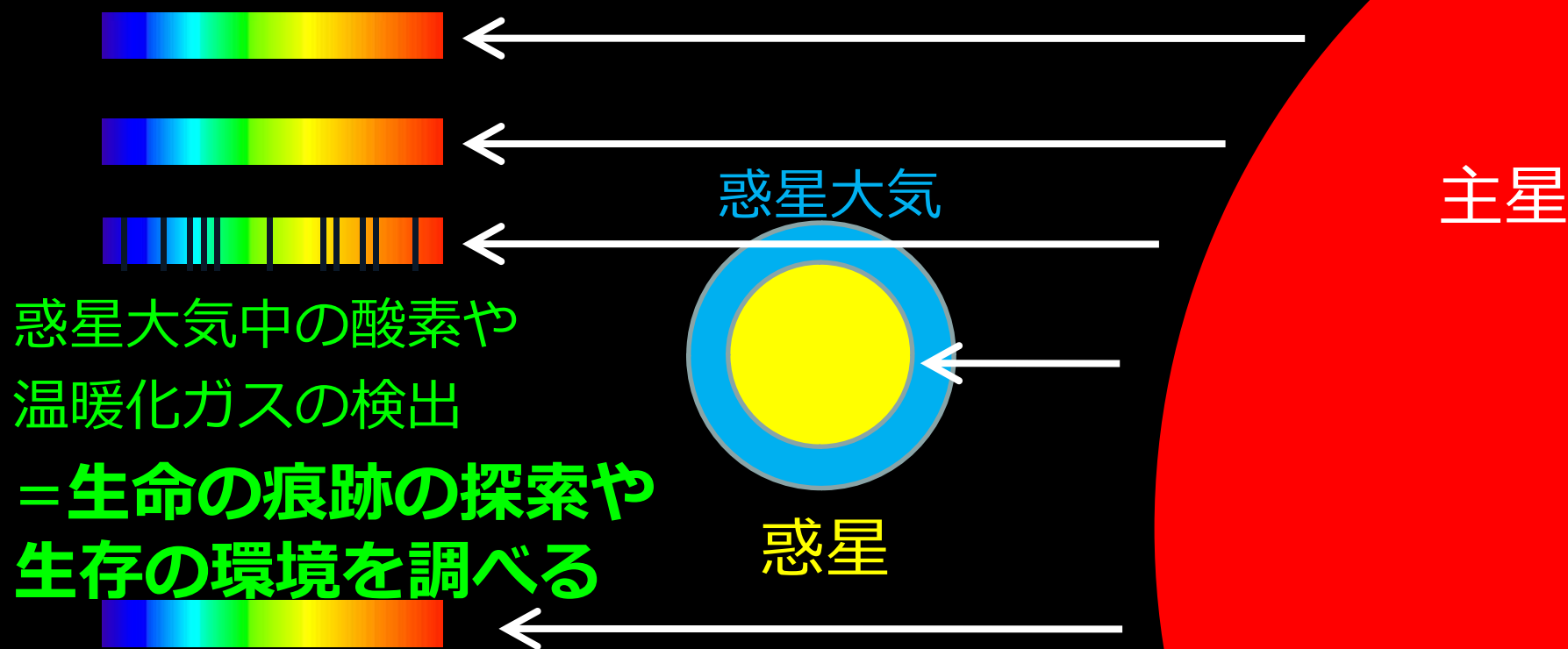
露出時間：15時間

41,533個の中から  
1つだけ見つけた

# TMTによる地球外生命探し

- TMTは系外惑星の大気を分光しその成分を調べることができる。
- 酸素などのバイオマーカー、および温暖化ガスが発見されれば、地球外生命の可能性も…

## 恒星のスペクトル

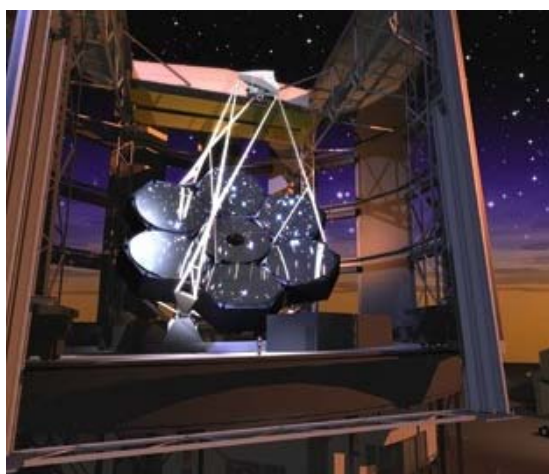


# 世界の次世代超大型望遠鏡計画

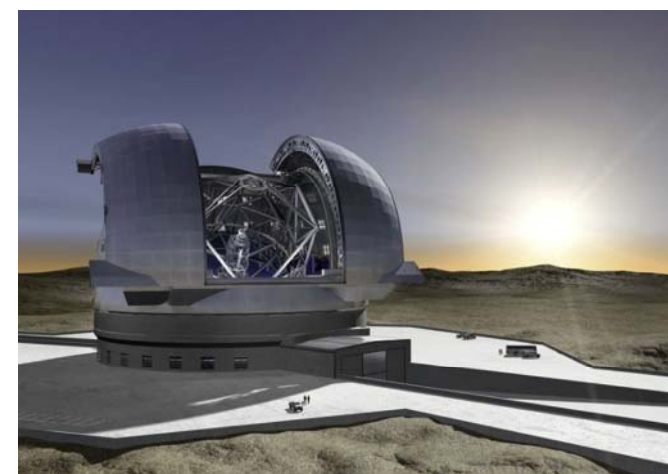
計画	TMT	GMT	E-ELT
直径	30m	22m(8.4mx7)	39m
建設地 (標高)	ハワイ:マウナケア (4050m) 北の宇宙	チリ:ラスカンパナス (2550m) 南の宇宙	チリ:セロアルマソネス (3060m) 南の宇宙
予算規模	1,500億円	1,100億円(推定額)	2,000億円(推定額)
完成予定	平成36年?	平成33年 (注:7枚の内、4枚で初期運用)	平成37年
メンバー	日本、米国、カナダ、 中国、インド	米国(カーネギー天文台、 ほか)、韓国、オーストラリア、 ブラジル・サンパウロ州	欧州南天天文台 (15ヶ国)



2015/12/9



装置WS・技術シンポ

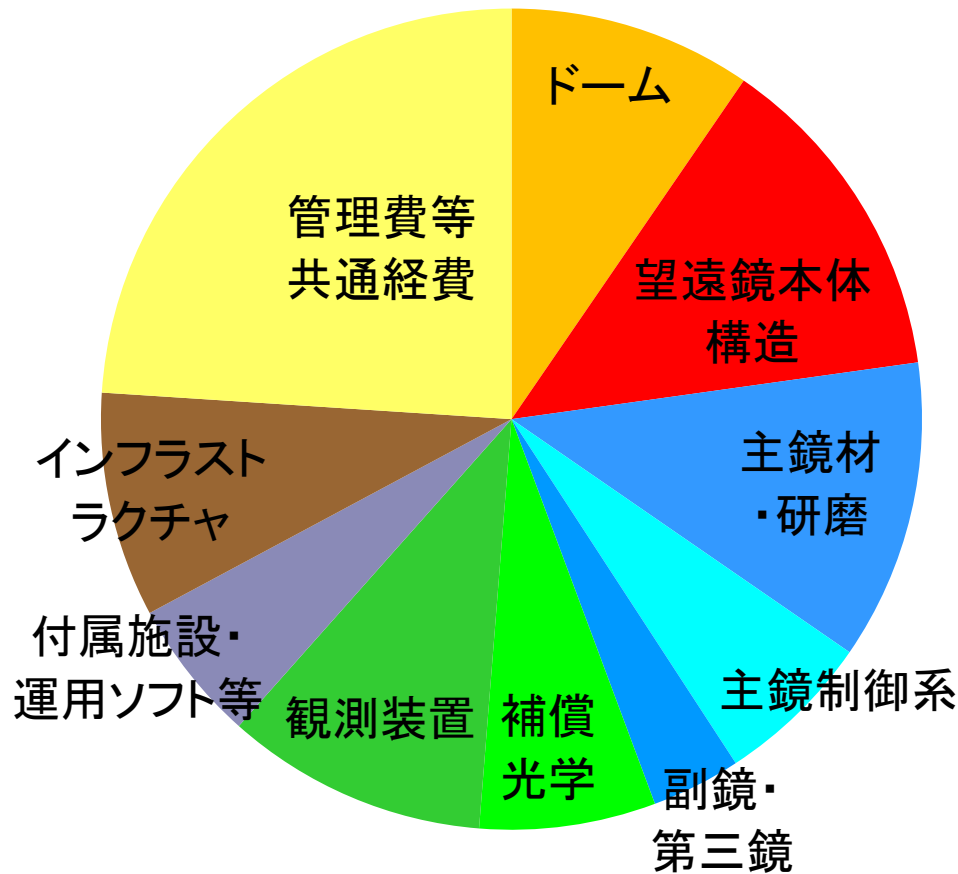


# 国際協力で実現

# 建設期経費の内訳と役割分担

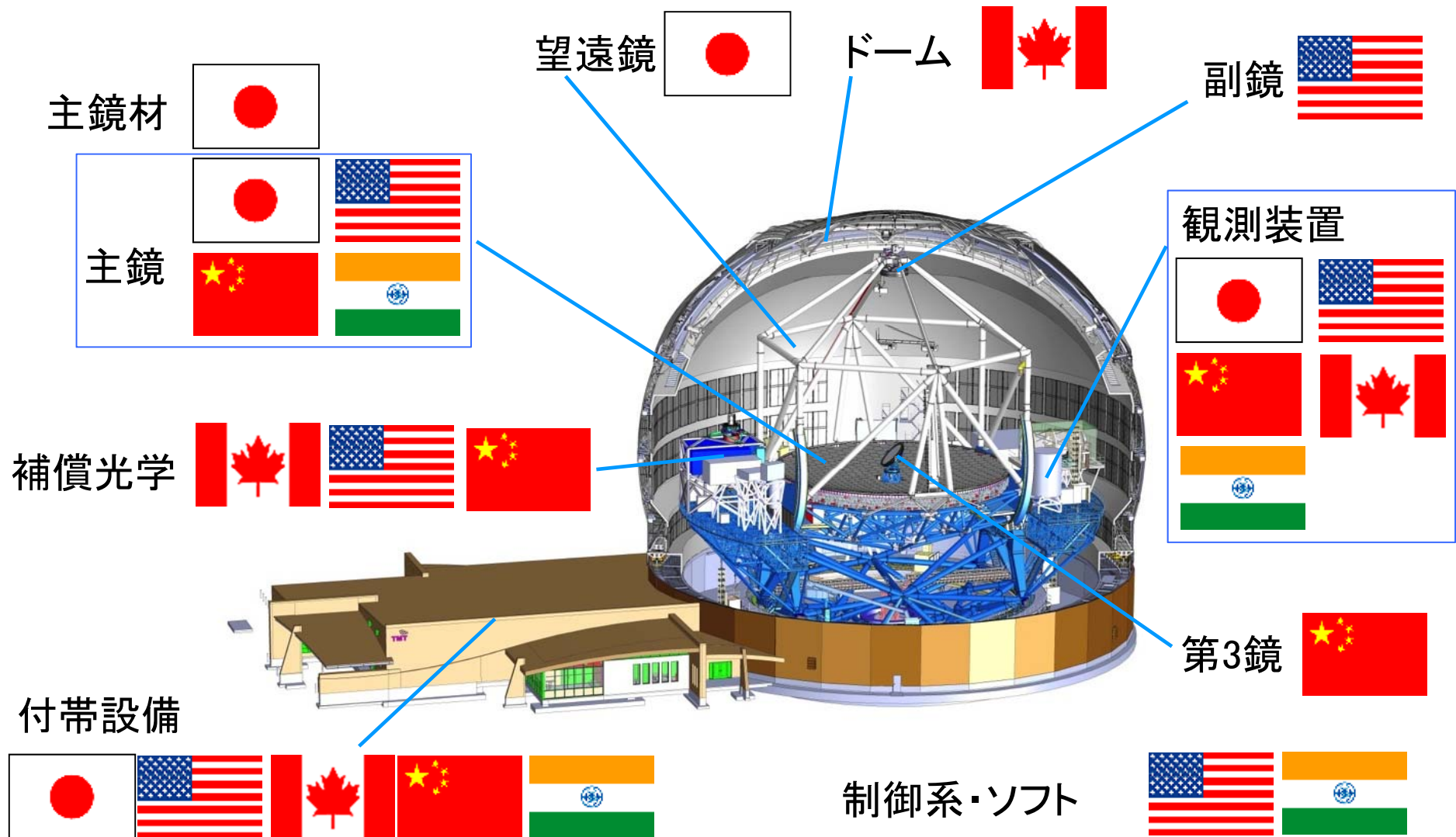
建設期経費(約1500億円)の内訳

建設における役割分担



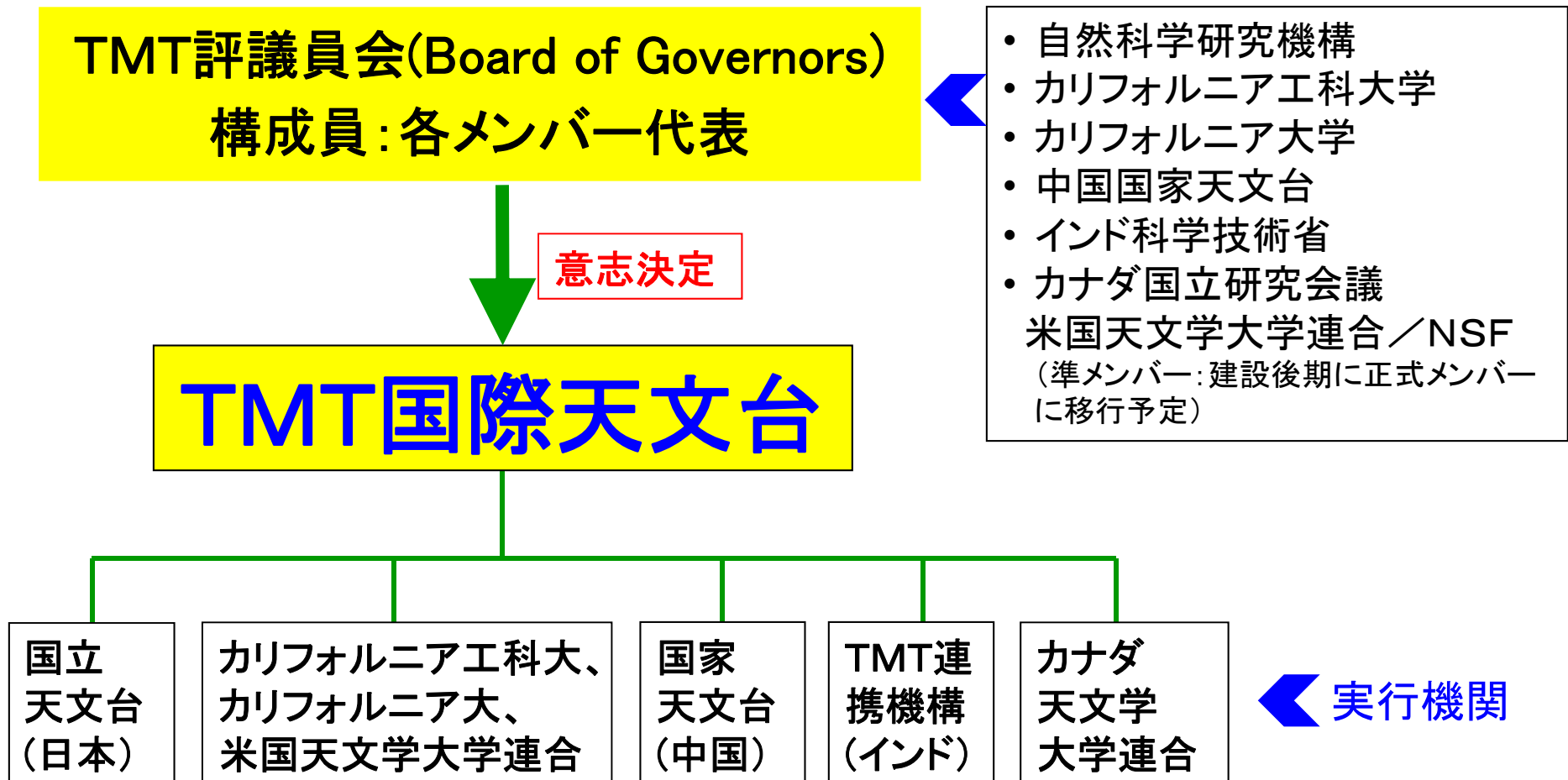
	日本	米国	中国	インド	カナダ
山頂施設	○	○	○	○	○
山麓施設	○	○	○	○	○
ドーム					○
望遠鏡製作・組立	○				
主鏡材	○				
主鏡研磨	○	○	○	○	
主鏡支持機構				○	
副鏡		○			
第三鏡			○		
鏡洗浄蒸着機構				○	
主鏡制御		○		○	
望遠鏡制御	○			○	
補償光学					○
レーザー			○		
観測装置	○	○	○	○	○
観測所人件費等	○	○	○	○	○

# TMTにおける国際協力



# TMT国際天文台(TIO)の設立

- 各メンバーの代表で構成されるTMT評議員会が意思決定を行う。
- 望遠鏡構造・主鏡等の製造はTIOとの契約の形で実施。

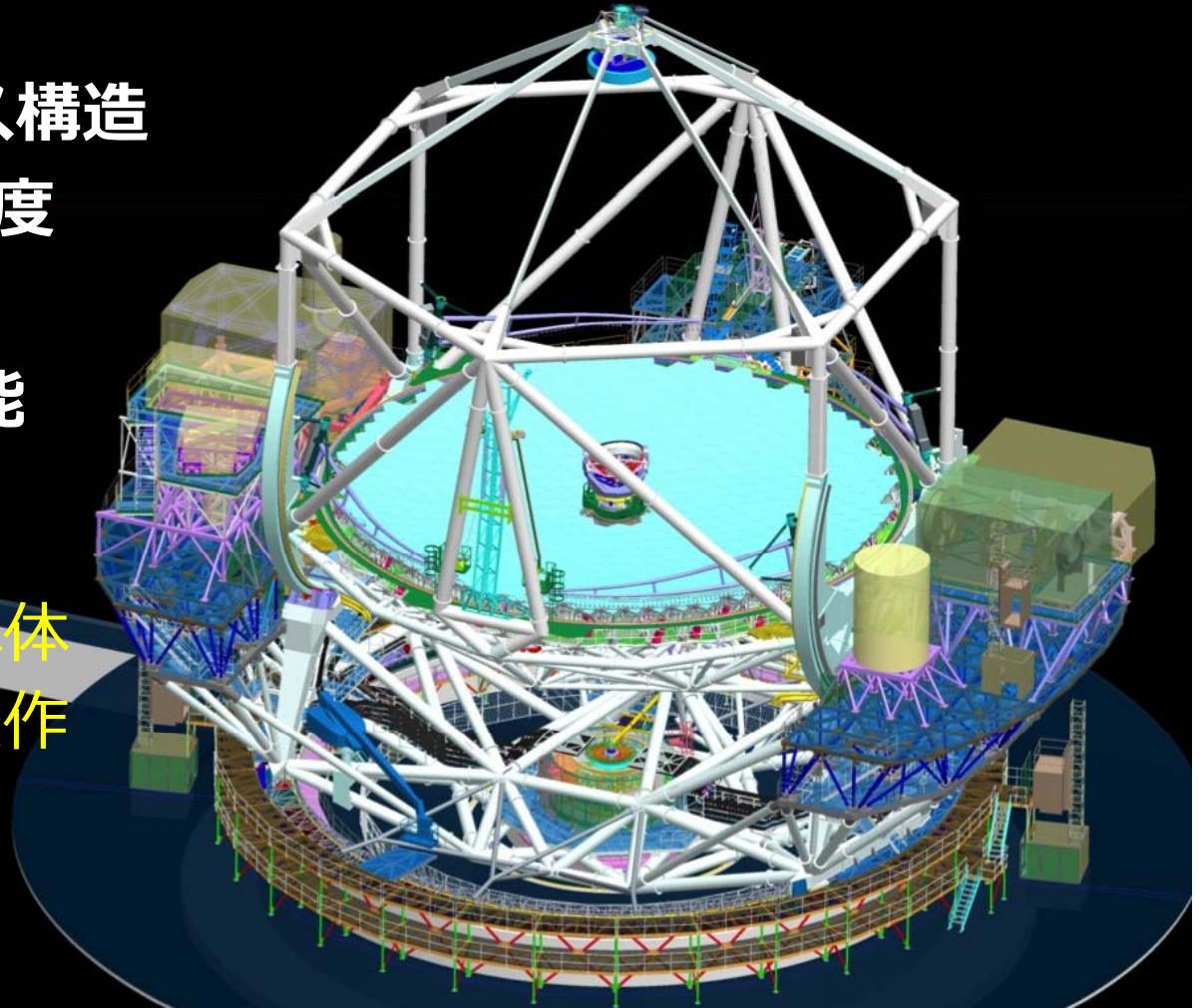




# 主鏡以外の 日本の主な貢献

# 日本の寄与：望遠鏡本体

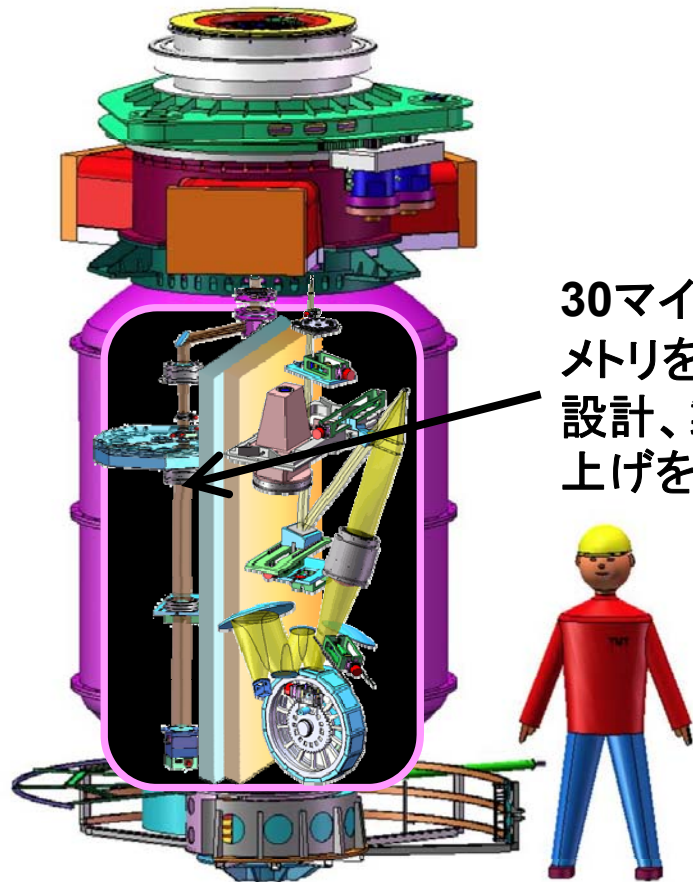
- すばる望遠鏡製作の実績を踏まえた各国の要請によるTMT望遠鏡本体構造および制御系の設計・製作・現地据付・試験
  - 軽量堅固なトラス構造
  - 高い追尾/指向精度
  - 主鏡着脱機能
  - 主鏡CO2洗浄機能
  - 免震安全機構
- 望遠鏡の要となる本体構造を日本が設計製作



この図の副鏡・第三鏡・観測装置以外を担当

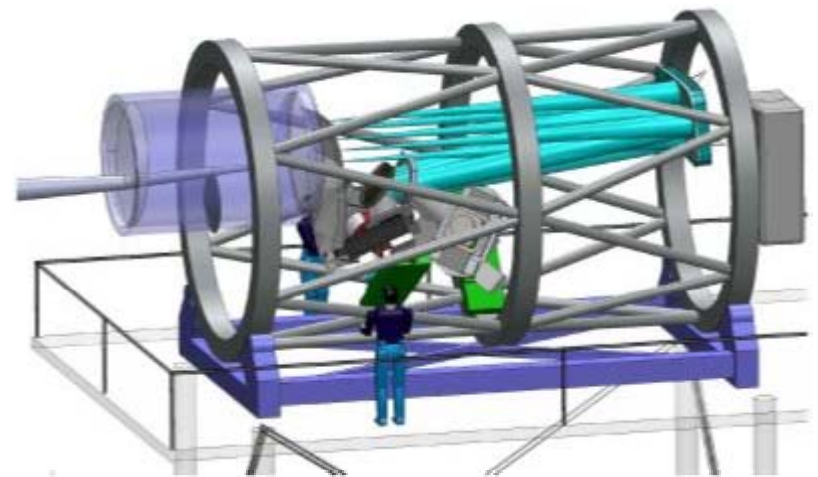
# 第一期観測装置開発

- 1) 近赤外線撮像分光装置の撮像系
- 2) 可視多天体分光装置のカメラシステム



30マイクロ秒のアstrometriを目指す撮像系の設計、製作、評価、立ち上げを日本が担当

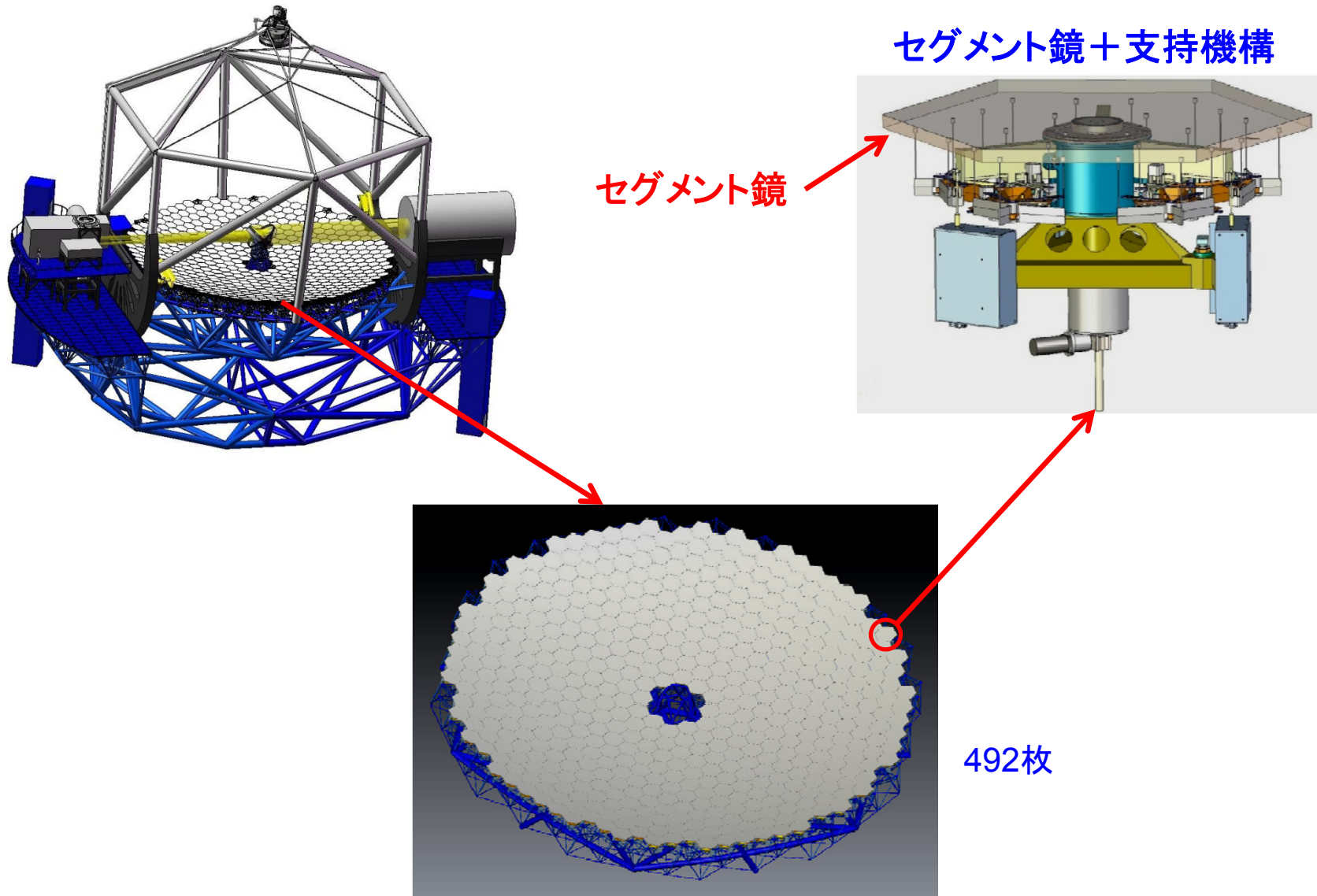
近赤外線撮像分光装置



可視多天体分光装置

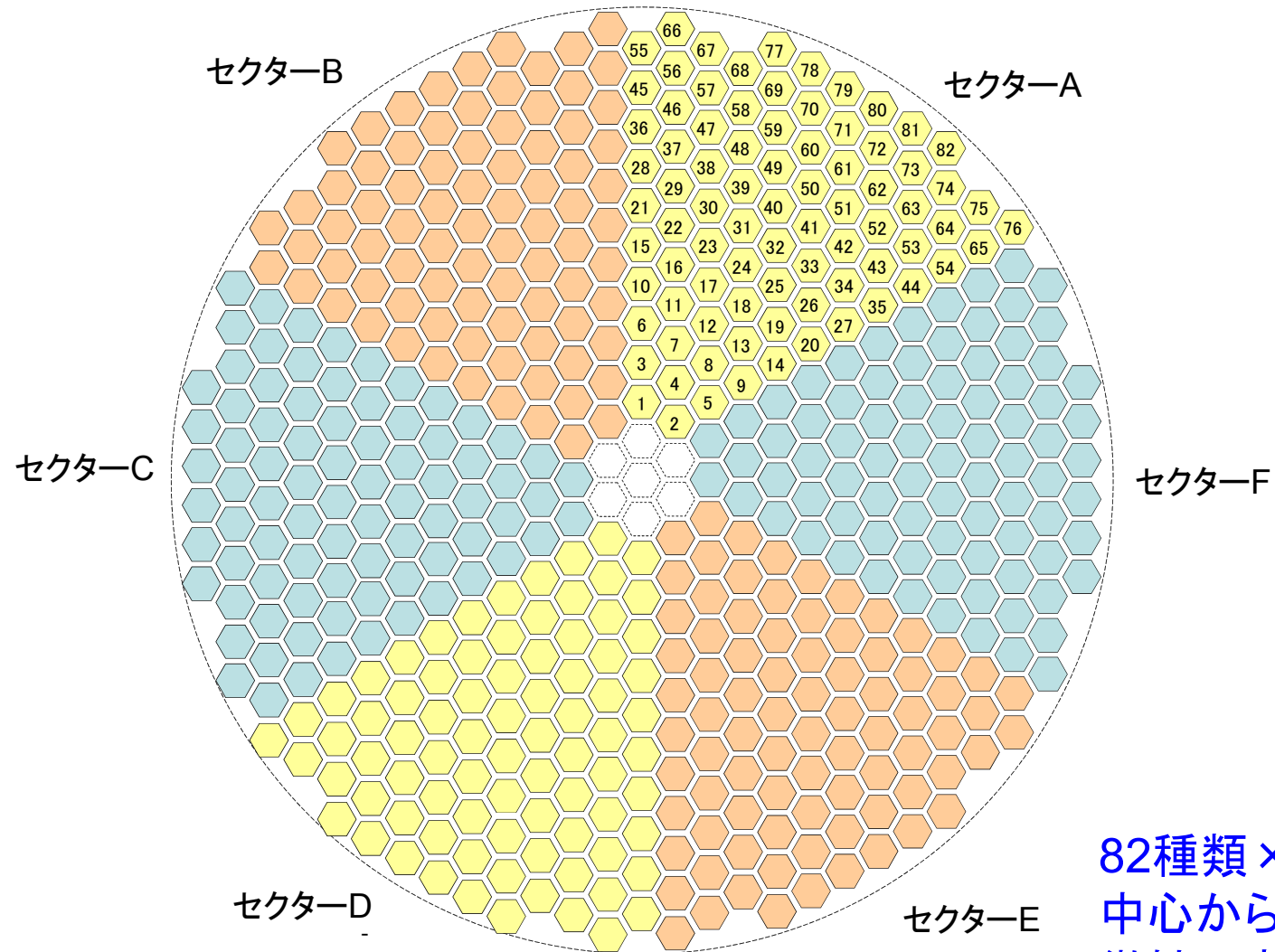
# TMTの主鏡

# TMT望遠鏡のセグメント主鏡(分割鏡)



TMT望遠鏡の30m主鏡

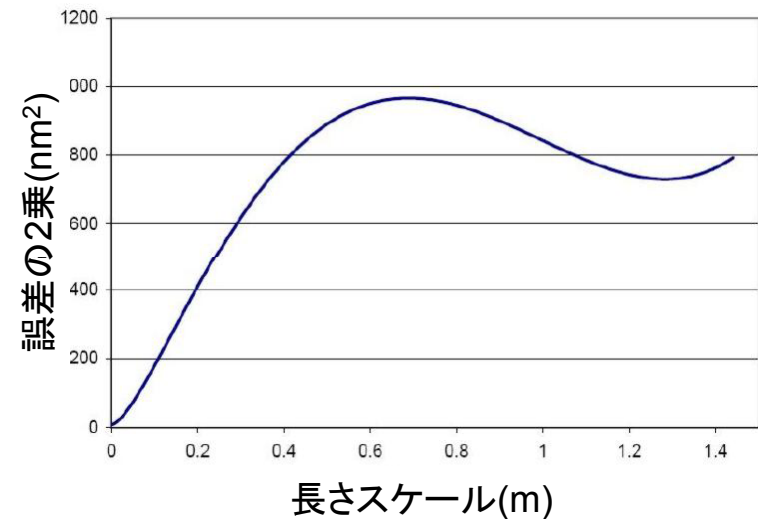
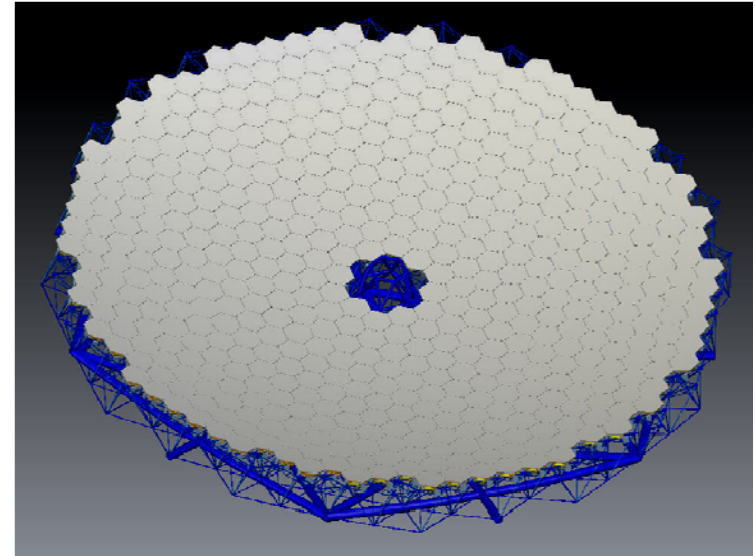
# セグメント鏡の配置



82種類 × 6 = 492枚  
中心からの距離に応じて  
微妙に表面形状が異なる

# セグメント鏡の仕様

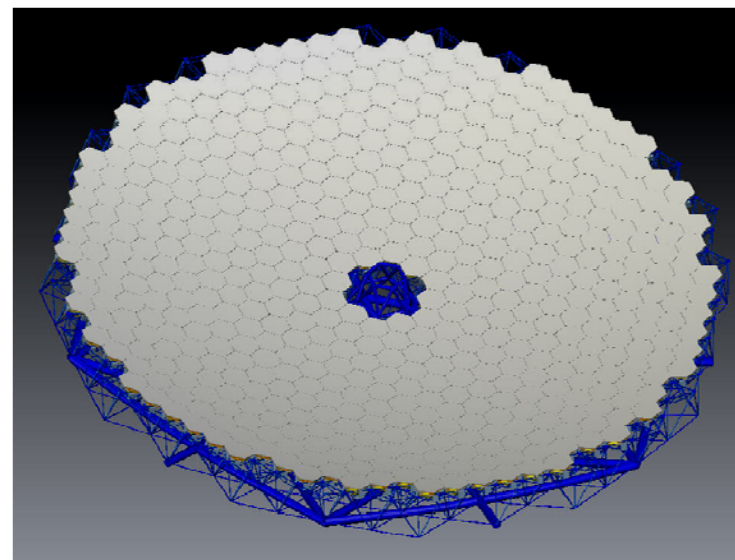
- 492セグメント(+蒸着交換用82枚)
  - 82種類 × (6 (+1)枚)
- 単体のセグメント鏡
  - 対角長: 約1.44m、**厚さ 45mm**
  - 仕上げ面精度:
    - 右図の構造関数(旧仕様)



# セグメント鏡のメリット・デメリット

- **メリット**

- 単一鏡では製作できない口径の鏡を製作できる
- 鏡の厚さを非常に薄くできる
  - すばる 200mm v.s. TMT 45mm
  - 主鏡重量を軽減できる
    - 全体重量を軽減できる
  - 熱慣性を小さくできる
    - 温度追随性の向上
    - シーイングの劣化を軽減



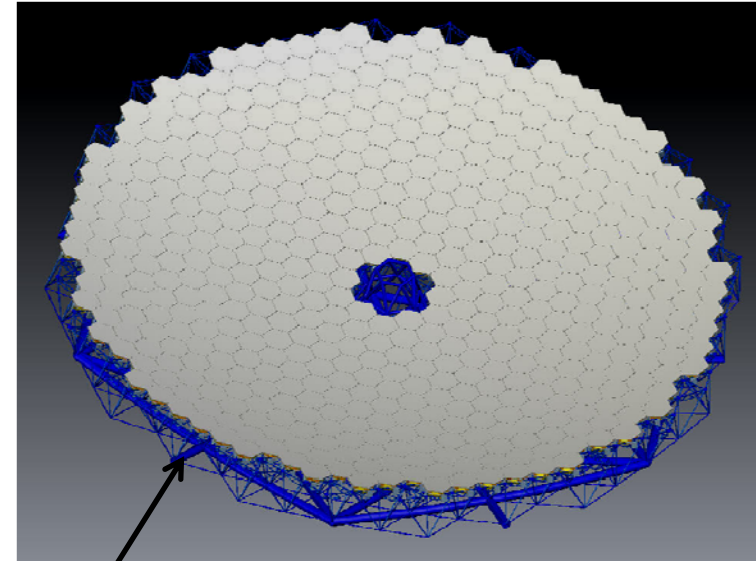
- **デメリット**

- 製作が容易ではない
- セグメント鏡間の位置調整(位相合わせ)が容易ではない

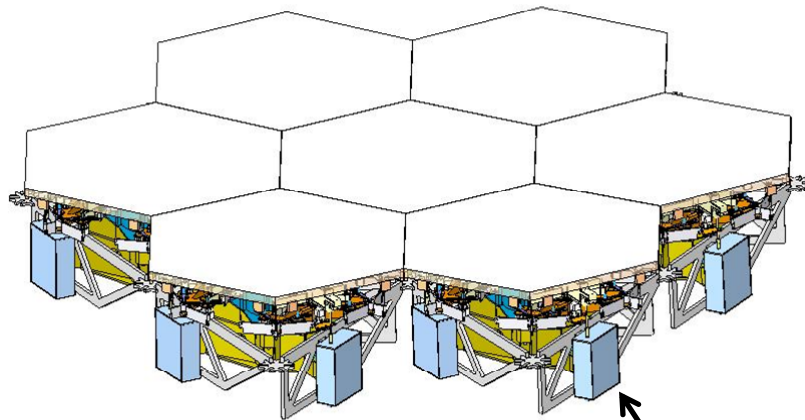


# TMTのセグメント主鏡

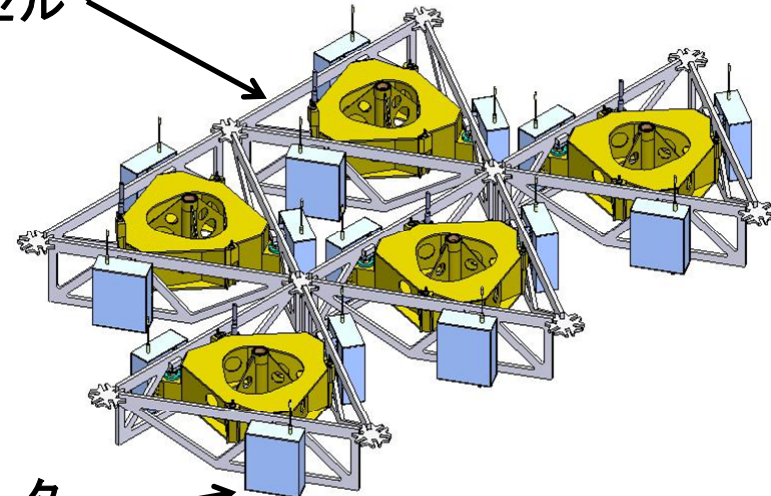
- 主鏡の構成
  - 主鏡セル
  - 支持機構に載ったセグメント鏡



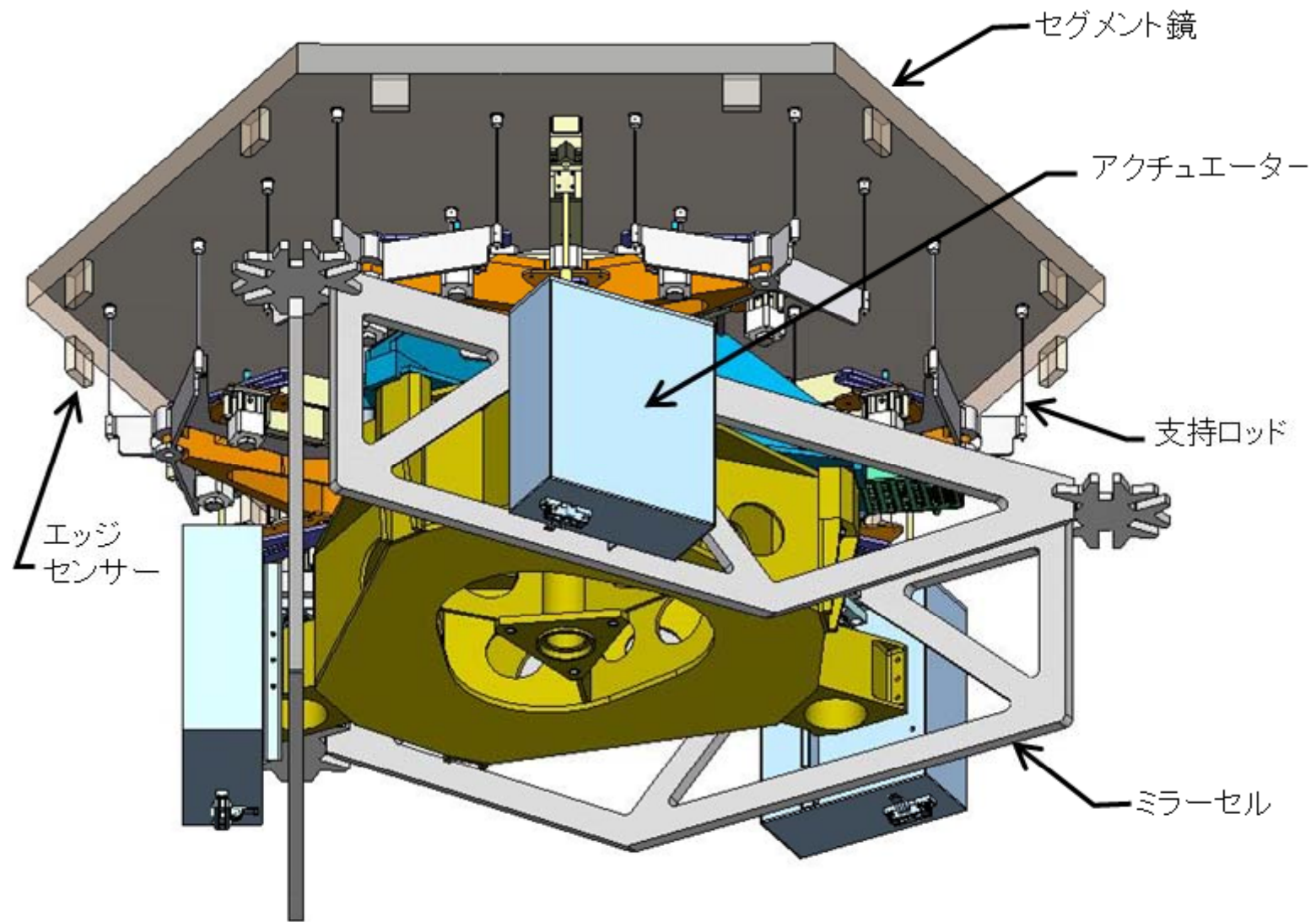
主鏡構造の一部を拡大



主鏡セル

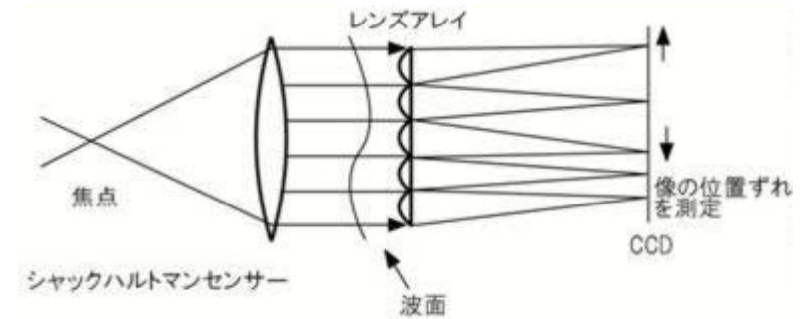


アクチュエーター  
装置WS・技術シンポ



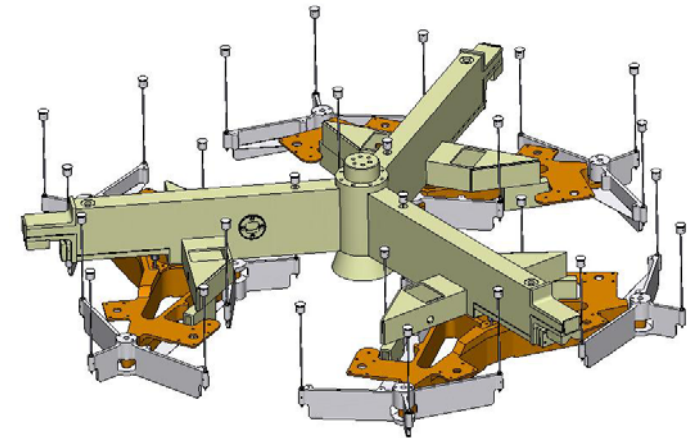
# セグメント鏡の制御

- セグメント鏡面の形状
  - シャックハルトマン法で計測



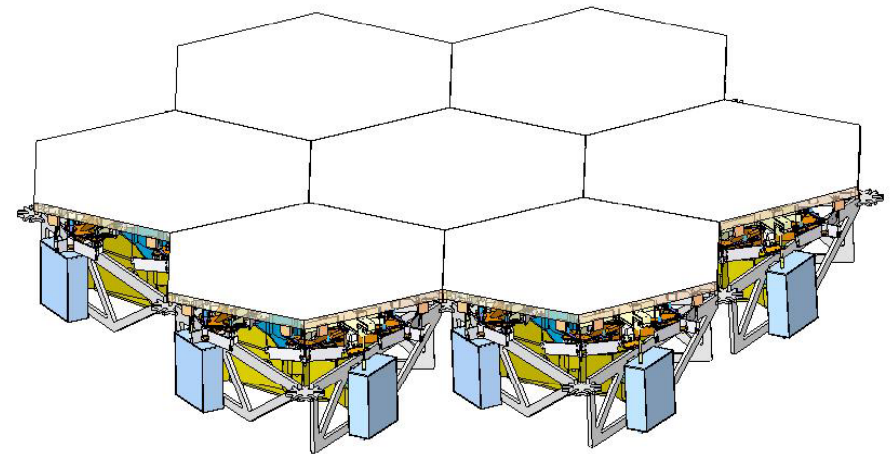
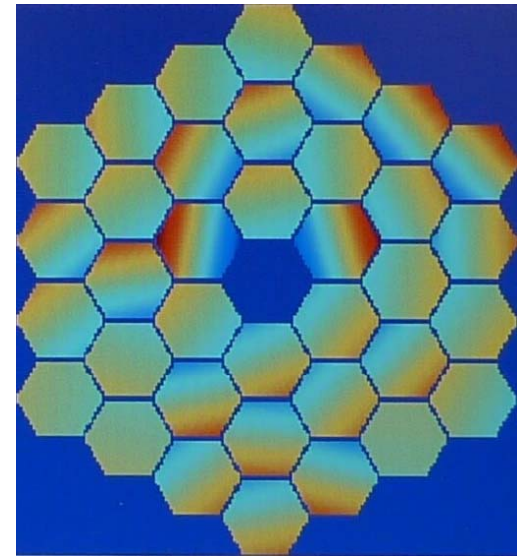
- 支持機構のウィッフルツリーのアームにモーメントを掛けて変形

- 観測中は制御しなくても良い予定



# セグメント鏡の制御

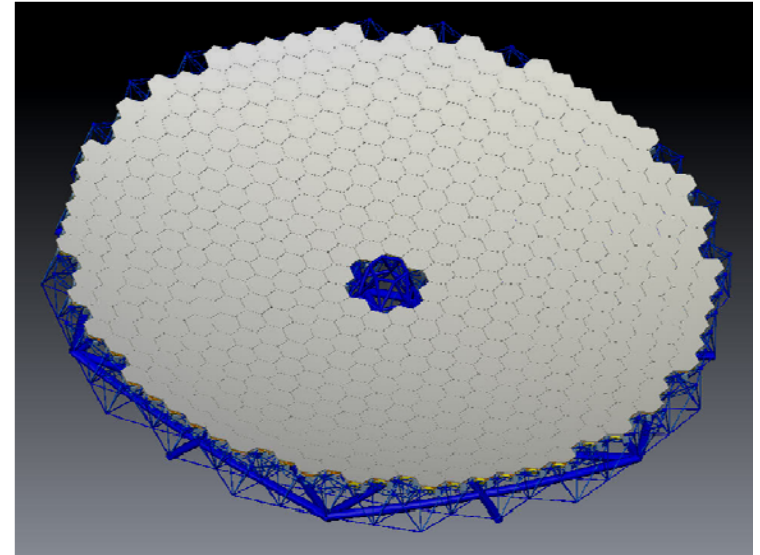
- セグメント鏡間の段差
  - まず、光学的な方法で測定
    - 隣り合う面の干渉パターンから
  - 3本のアクチュエーターの長さ(高さ)制御
  - セグメント鏡の隣り合う面にエッジセンサー
    - 観測中はエッジセンサーにもとづいて制御
    - 光学的測定はエッジセンサーの原点決定



# 主鏡に関する日本の貢献

# 日本の貢献

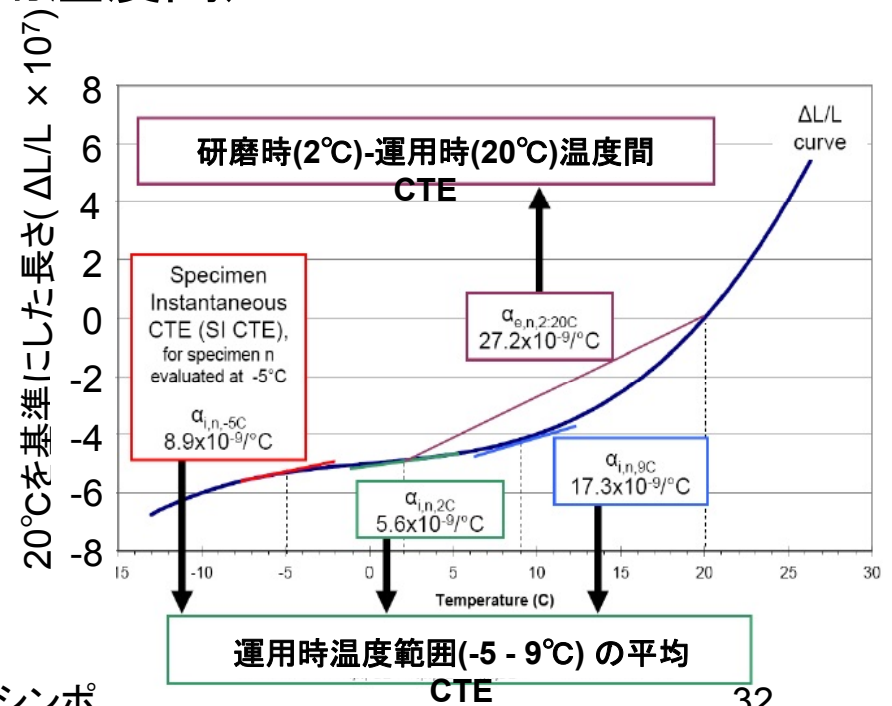
- 主鏡・鏡材の製造
  - 日本が100% (574枚)
  - 球面研削加工までを含む
- 主鏡セグメント鏡の研磨加工
  - 日本が30% (175枚)
  - 米国40%
  - 中国15%
  - インド15%
  - 最終仕上げ(IBF加工)は米国100%



# 主鏡に関する日本の貢献 鏡材

# 日本のセグメント鏡開発：鏡材

- 主鏡鏡材: **超低膨張ガラス**
  - 温度変化による鏡面変形を起こさないように
    - 鏡面研磨加工時の温度:  $\sim 20^{\circ}\text{C}$
    - 運用時の温度: 平均 $2^{\circ}\text{C}$  ( $-5 - 9^{\circ}\text{C}$ )
  - 膨張係数(CTE: Coefficient of Thermal Expansion)
    - $0 \pm 4 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$  ( $-5, 2, 9^{\circ}\text{C}$ の平均)
  - CTEの鏡材間の分散(研磨—使用温度間)
    - $0 \pm 2.5 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$  ( $2-20^{\circ}\text{C}$ 間)
  - CTEの分布の仕様など

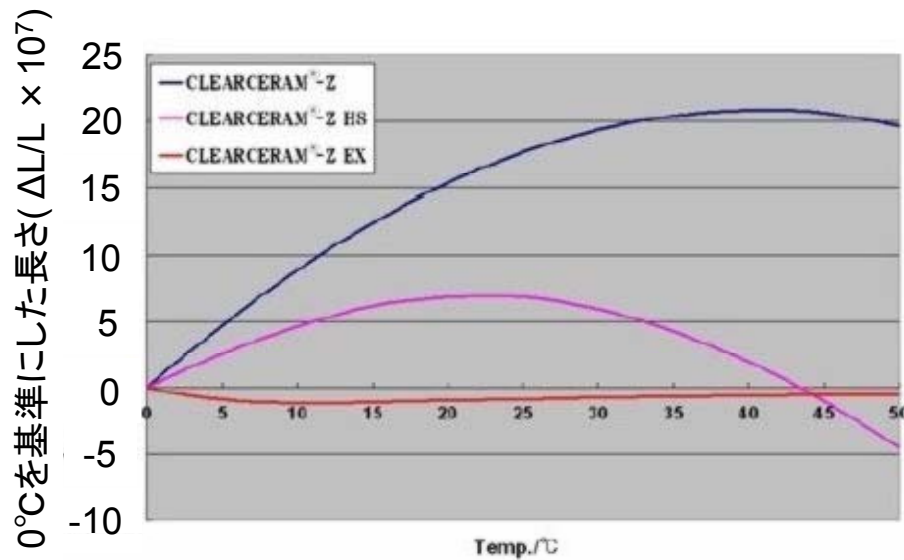




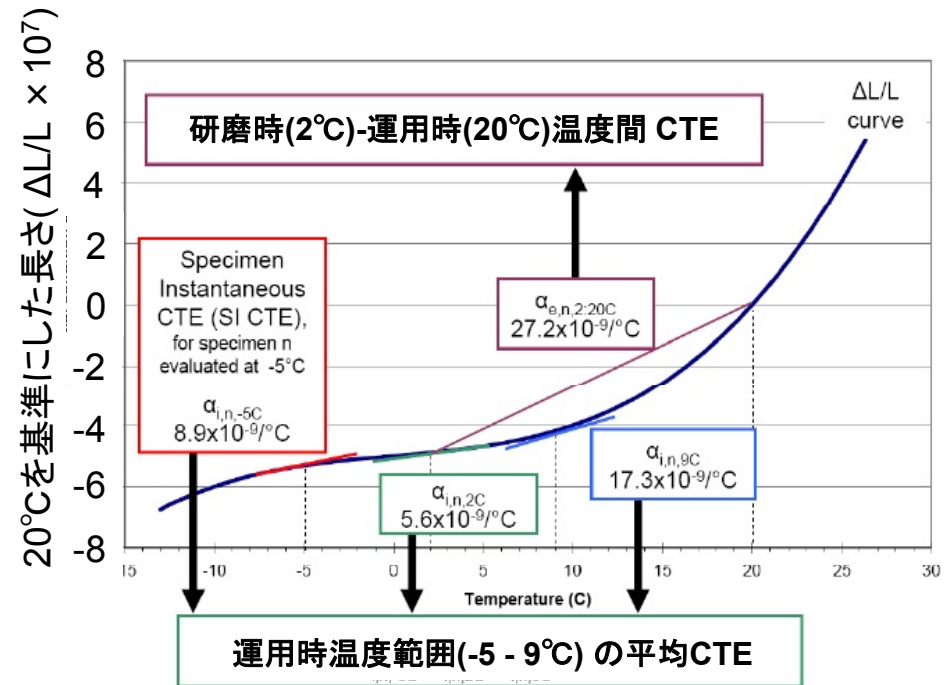
# 日本のセグメント鏡開発：鏡材

- 主鏡鏡材

- 日本のオハラ社のクリアセラム HS
- 但し、微妙に仕様が異なる
  - 使用温度範囲
  - 残留応力の仕様・測定点数
- 通常のクリアセラムのプロセスを改良して量産試作

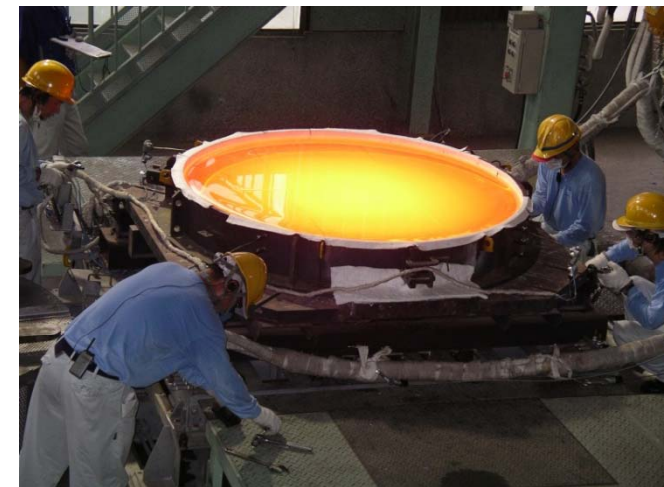


クリアセラムの熱膨張



# 日本のセグメント鏡開発：鏡材

- 鏡材
  - 形状
    - $\Phi 1520$ , t46 のメニスカス形状(曲率半径=62.5m)
  - 技術開発がほぼ完了
    - 1世代前の炉では脈理の問題があったが、新しい炉では解決
    - 米国TMTで研磨試験・温度試験
  - 鏡材の全量(574枚)を日本が供給
    - すでに量産能力を持っている
    - (炉の寿命もあり)この量産に合わせて設備更新を予定

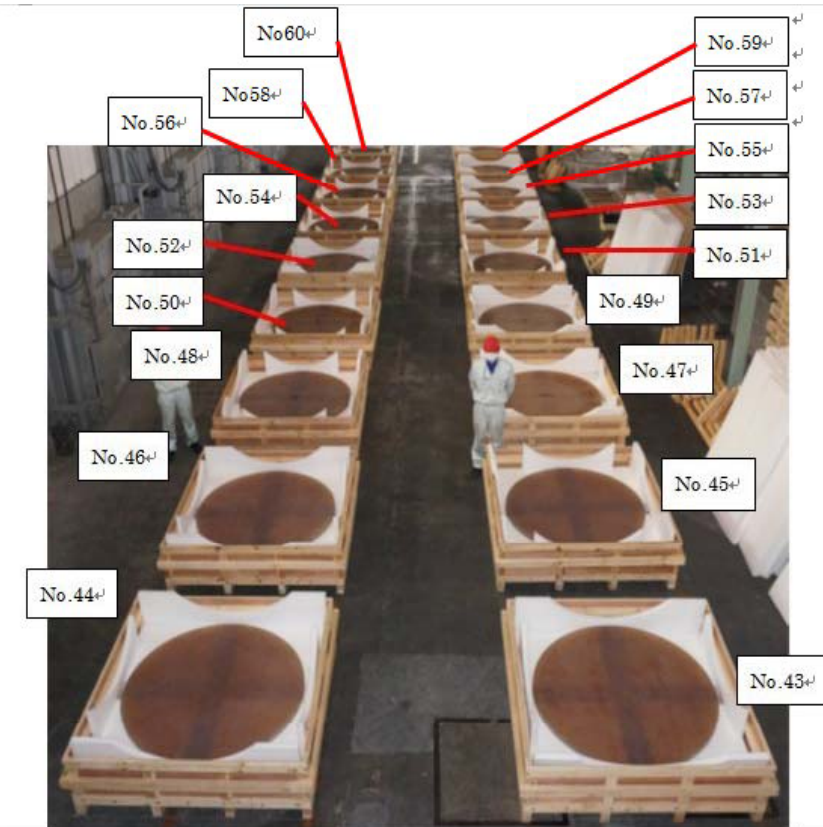


クリアセラムの鑄込み作業

# 鏡材の量産

- 2012年度から順調に生産中

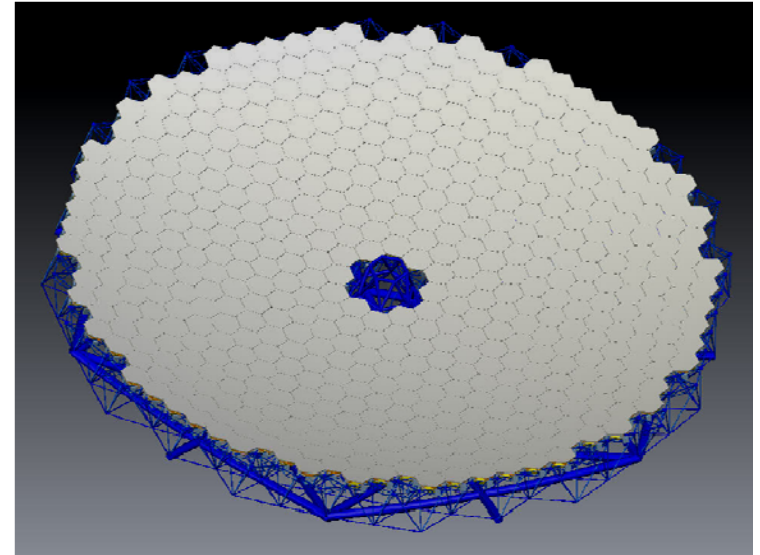
工程	2013年度	2014年度	2015年度予定	2015年度まで合計
鏡材の製作	60	39	65	164/574



# 主鏡に関する日本の貢献 セグメント鏡加工

# セグメント鏡加工特有の問題点

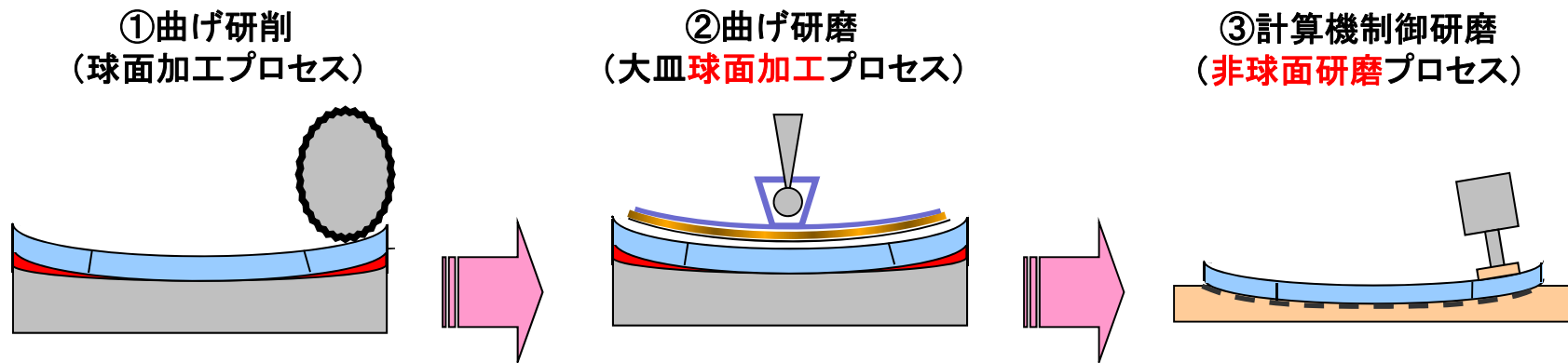
- 全体で1枚の鏡である
- “ふち”問題
  - “ふち”が“ふち”でない
    - “ふち”まで完全に研磨
  - 研磨後、六角形に切断
    - 切断による変形 → 修正研磨
  - 六角形に切断後、研磨
    - “ふち”まで正確な研磨：“やとい”
- 曲率の一致問題
  - すべてのセグメント鏡の形状が連続的でなければならない。
  - 3次元計測器(非干渉計法)
    - 正確な曲率測定は得意
    - 1つの方法を信じるのは危険
      - 干渉計測定法の併用 or 干渉計測定法による検証



# フルサイズセグメント鏡の試作(2010-2011年度)

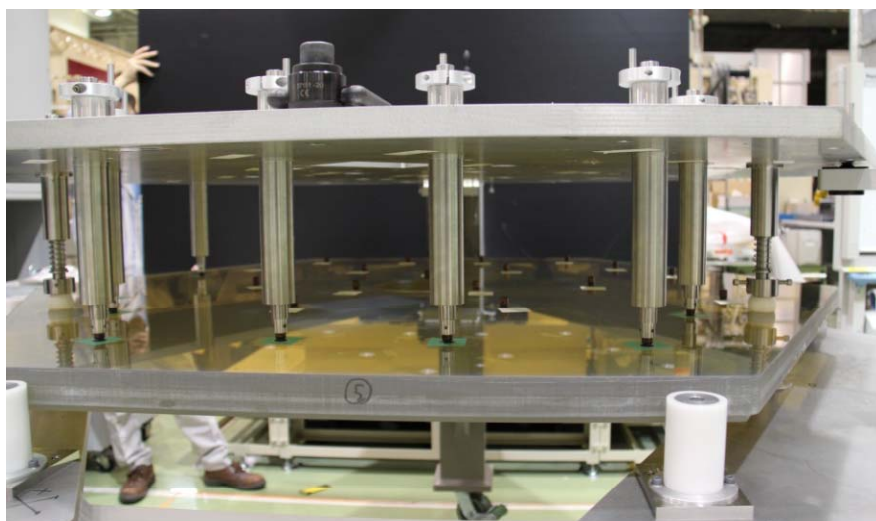
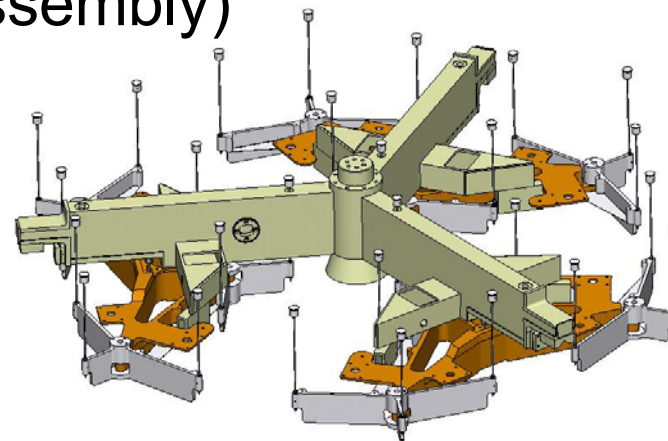
## • 試作の加工工程

- 六角形にカット(鏡面測定装置のサイズによる制限)
- 曲げ研削・研磨(ケック望遠鏡で採用された方法)は採用せず
  - 球面と非球面の差の分だけ鏡材を曲げる
  - この状態のまま、球面研削・研磨
  - 曲げを解放する → 非球面形状
- 計算機制御研磨(Computer Control Polishing)
  - 鏡面測定にもとづいて残差を、**研磨の滞留時間制御**で研磨

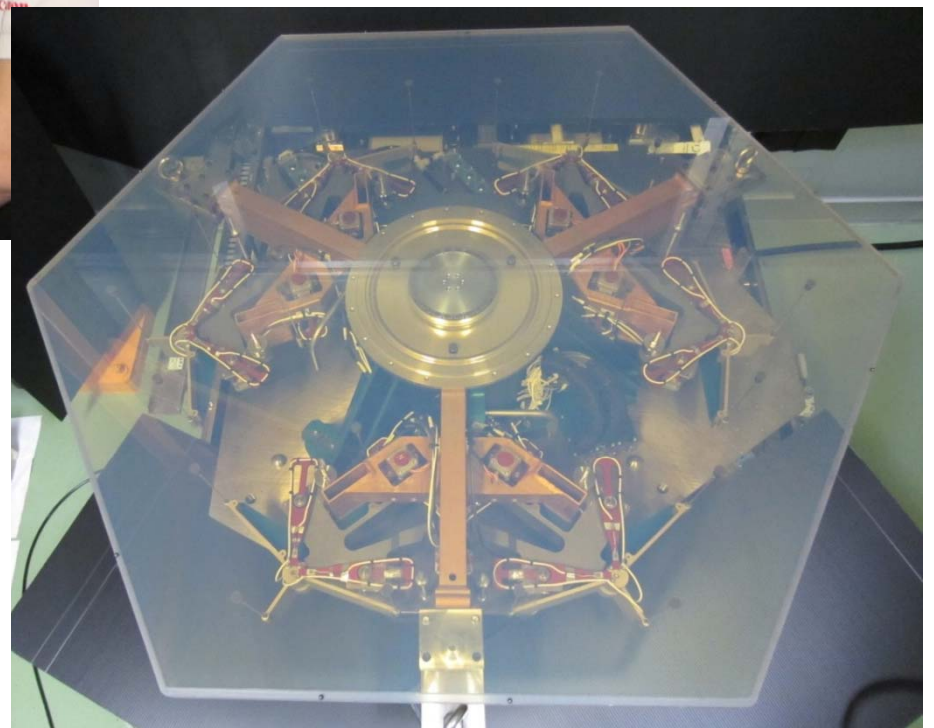
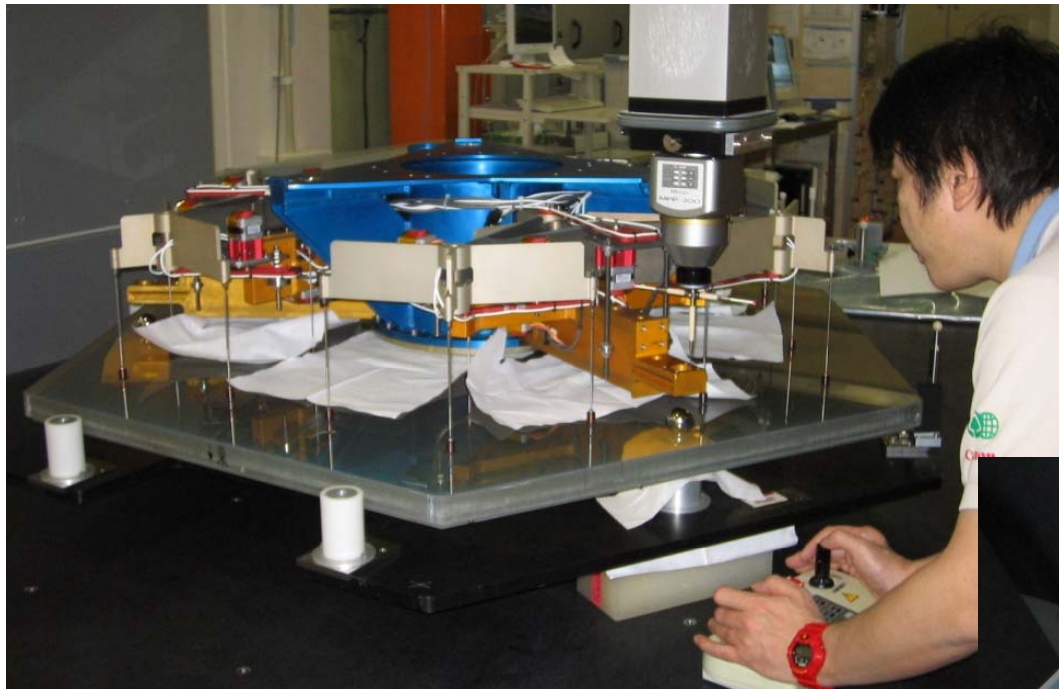


# 試作鏡の支持機構への搭載(2012年度)

- 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



# 試作鏡の支持機構への搭載(2012年度)





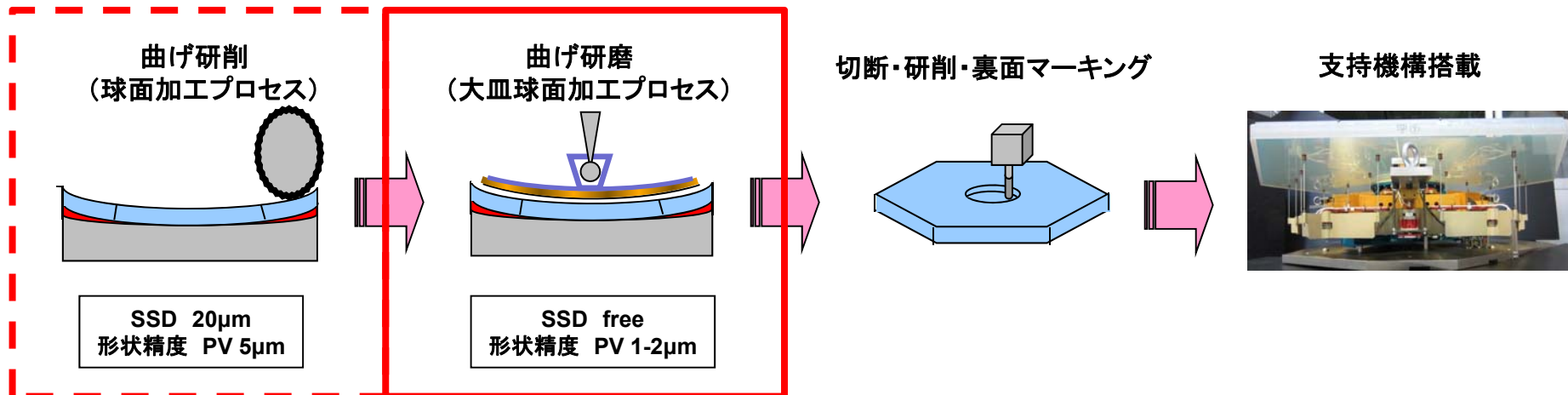
# 量産工程での曲げ研磨法の採用

- 米国TMTの推奨してきた曲げ研磨の採用へ

- 球面と非球面の差分形状だけ鏡材を曲げる
- 球面研磨する(高速)
- 曲げを解放すると非球面に

- 選択理由

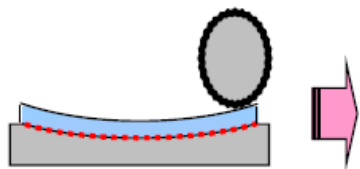
- 小スケールの厳しい仕様にはSmall toolを使わないのが望ましい
- 六角形切断や支持機構搭載での変形があるので、曲げ研磨で十分
- 研磨効率が良いので生産性が良い



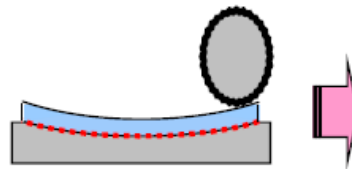
# セグメント鏡の加工工程

## 日本の分担範囲

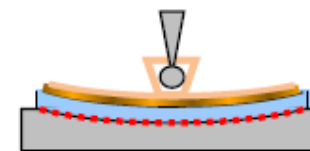
① #200球面研削  
(カーブジェネレータ)



② #800球面曲げ研削  
(ロータリー研削機)

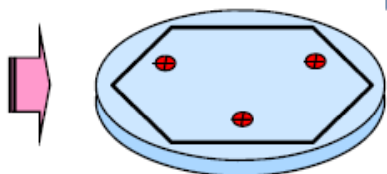


③ 大皿球面研磨  
(曲げ研磨)

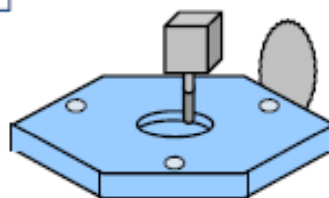


形状精度  $PV < 1\mu m$

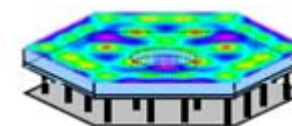
⑤ ミラー面マーキング  
+ 外形基準加工  
(高精度研削機)



⑥ 外形研削仕上げ + 裏面センター穴 + センサーポケット加工  
(高精度研削機)



⑦ 専用支持機構搭載



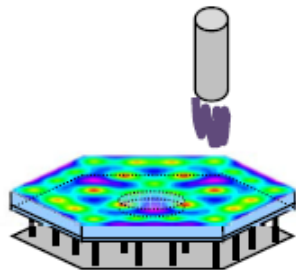
形状精度  $PV < 2\mu m$

⑧ CGH干渉計測 + IBF研磨

米国へ移送



最終仕上げ



SSA: Segment Support Assembly (セグメントミラー保持機構)

CGH: Computer Generated Hologram )

IBF: Ion Beam Figuring

# 曲げ機構の設計・製作

# 曲げ研磨の採用・試作

- 2次元形状測定器の導入
  - TMT-Tinsleyで開発
  - Zernike15項までの測定:
    - 測定精度:  $0.65\mu\text{m}$
    - 鏡面仕様: PV  $2\mu\text{m}$ 以下
  - 12/14の週にキヤノンで受け入れ試験予定

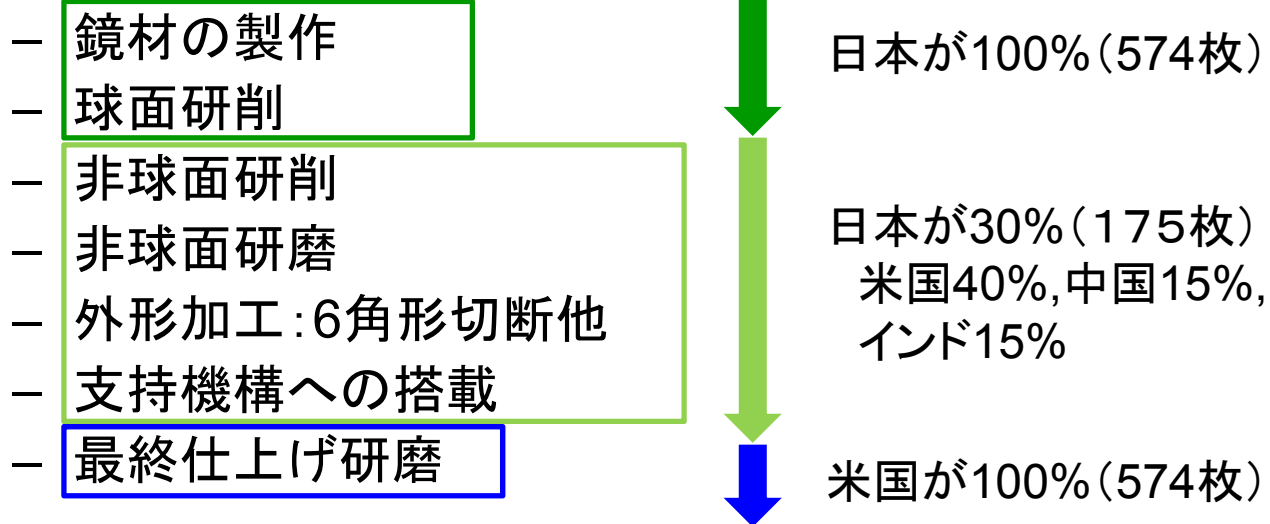
2次元形状測定器

# 曲げ研磨のFRR(2015年10月6,7日)

- Fabrication Readyness Review
  - 合格 → 研磨加工の量産OK
    - ただし、詳細については今後の検討・改善が必要

# セグメント鏡の量産状況

- 製造工程と国別の割当



## 今年度までの量産状況

工程	2013年度	2014年度	2015年度予定	2015年度まで合計
鏡材の製作	60	39	65	164/574
球面研削	12	19	63	94/574
非球面研削	12	16	31	59/175
非球面研磨			7	7/175