TMT用観測装置の開発状況と技術課題

国立天文台ハワイ観測所・TMTプロジェクト室
臼田　知史（うすだとものり）

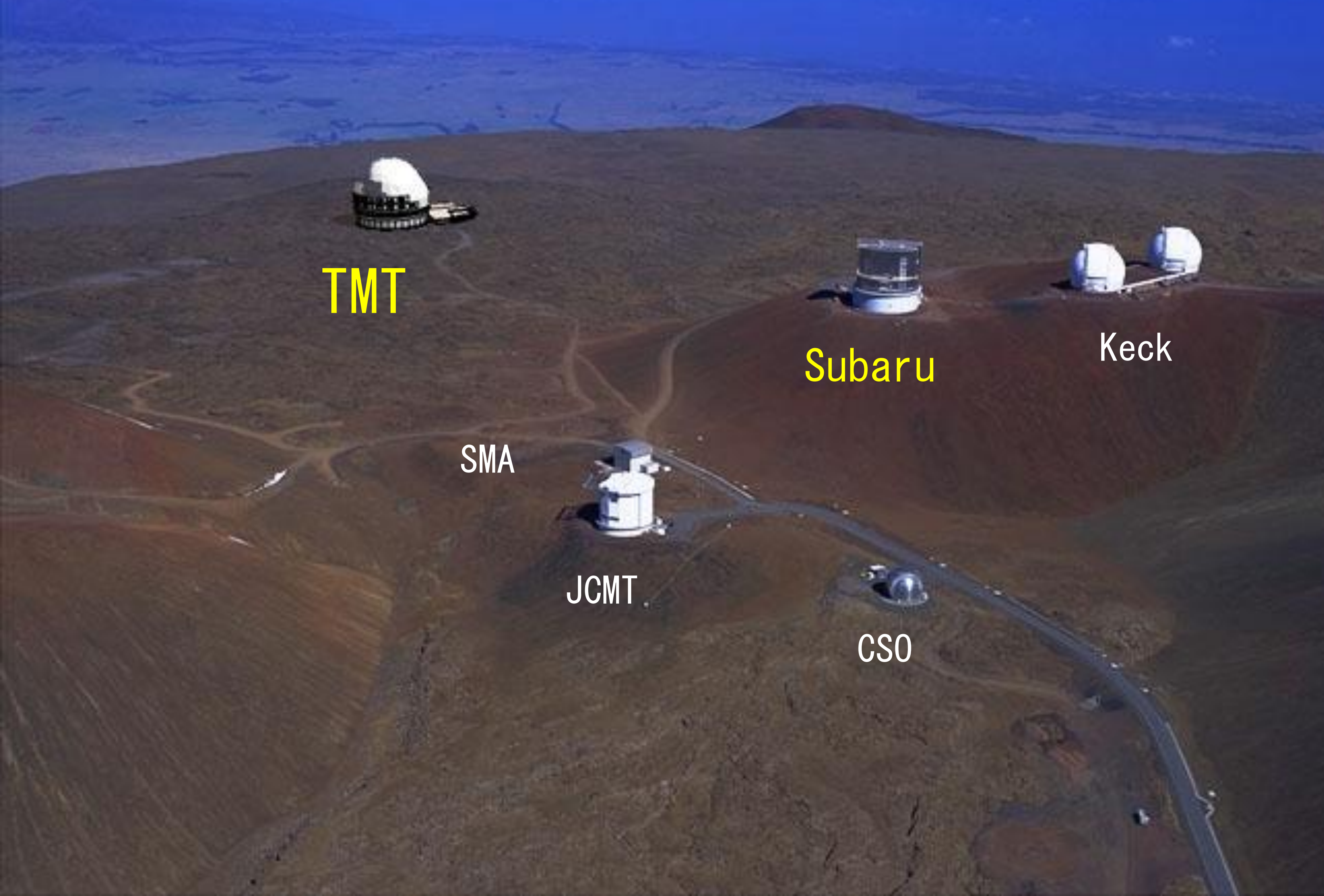
次世代30m超大型望遠鏡TMT

- 銀河の誕生と宇宙の夜明け
- 太陽系外の第二の地球、生命の兆候
- ブラックホール、暗黒物質
- 暗黒エネルギー、物理定数、宇宙定数

- 1.5m六角鏡492枚
- 建設費約1,300億円（日本の分担25%）
- 2020年完成予定

日本国立天文台、カリフォルニア大学、カリフォルニア工科大学
カナダ天文学大学連合、中国国家天文台、インド、
（米国天文学大学連合など）

地元に配慮して、すばるよりも低くなったところ

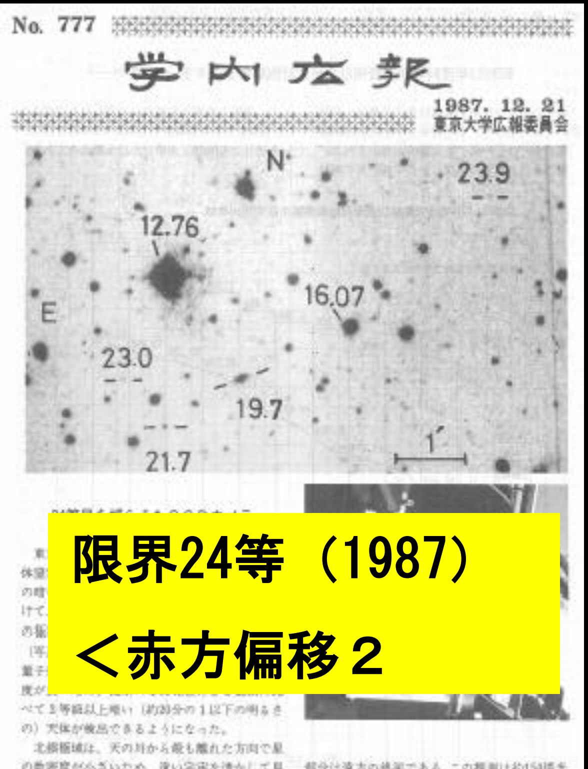


望遠鏡の進化

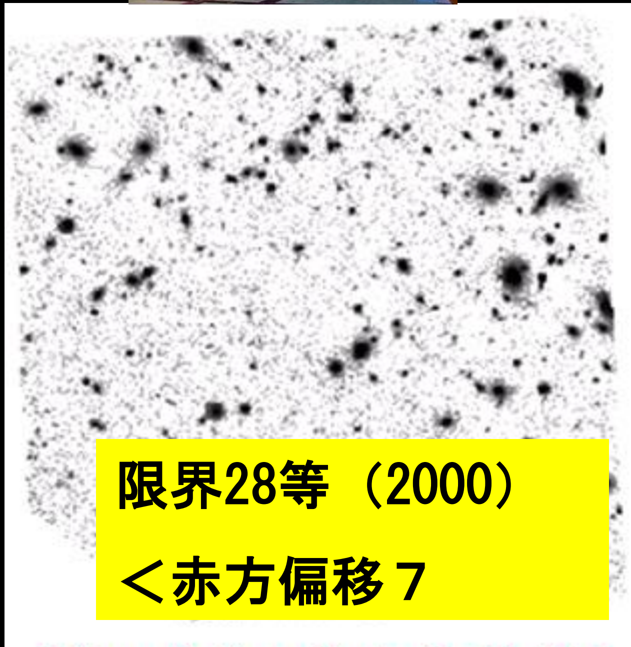
岡山188cm（1960）　8.2mすばる望遠鏡（1999）　30m望遠鏡TMT（2020）

→

→


No. 777
学内広報
1987. 12. 21
東京大学広報委員会

限界24等（1987）
＜赤方偏移２



Subaru/S-Cam 60min, R=28, 0".5

限界28等（2000）
＜赤方偏移７

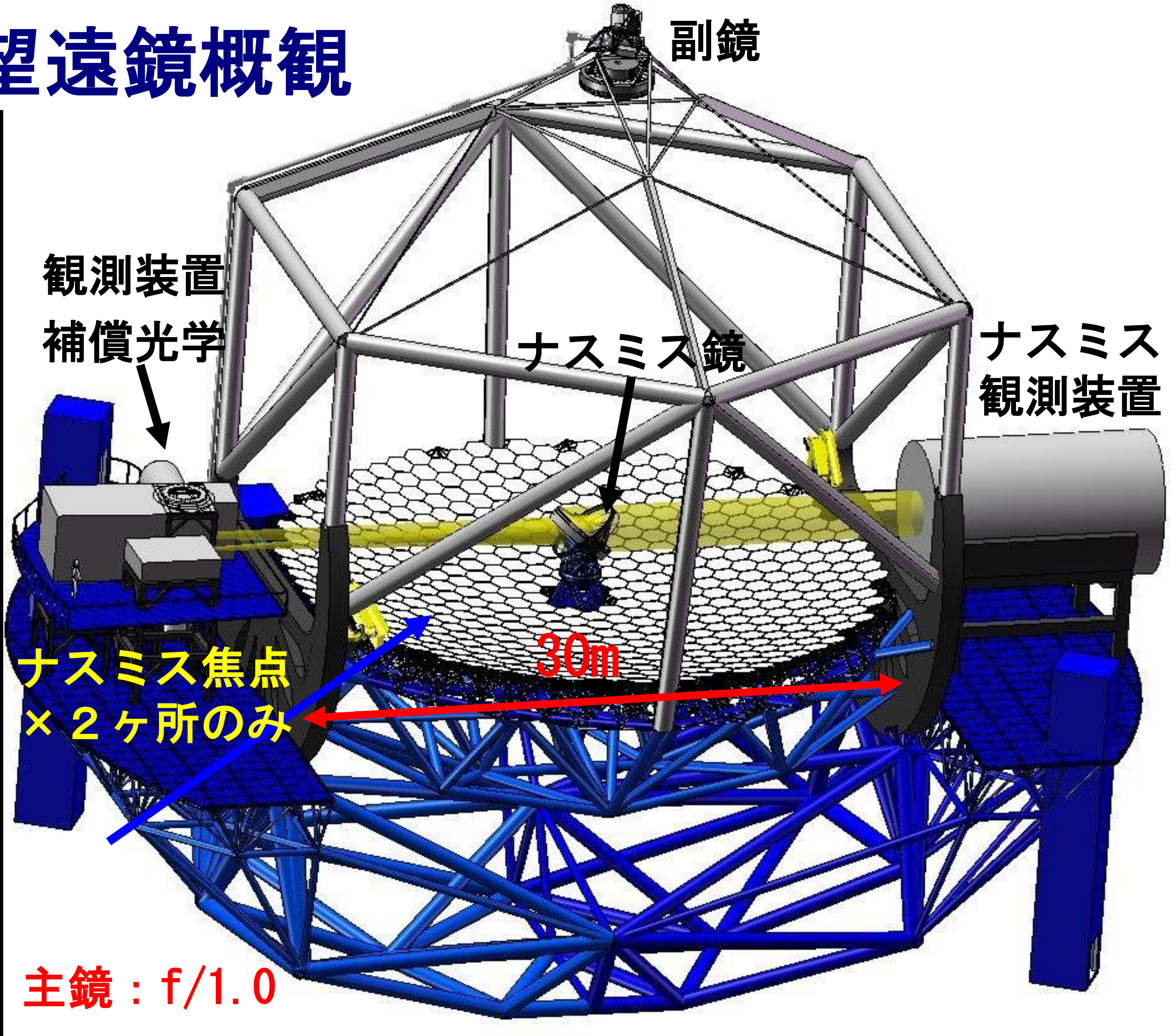
集光力～口径^2　14倍

解像力～口径　　4倍

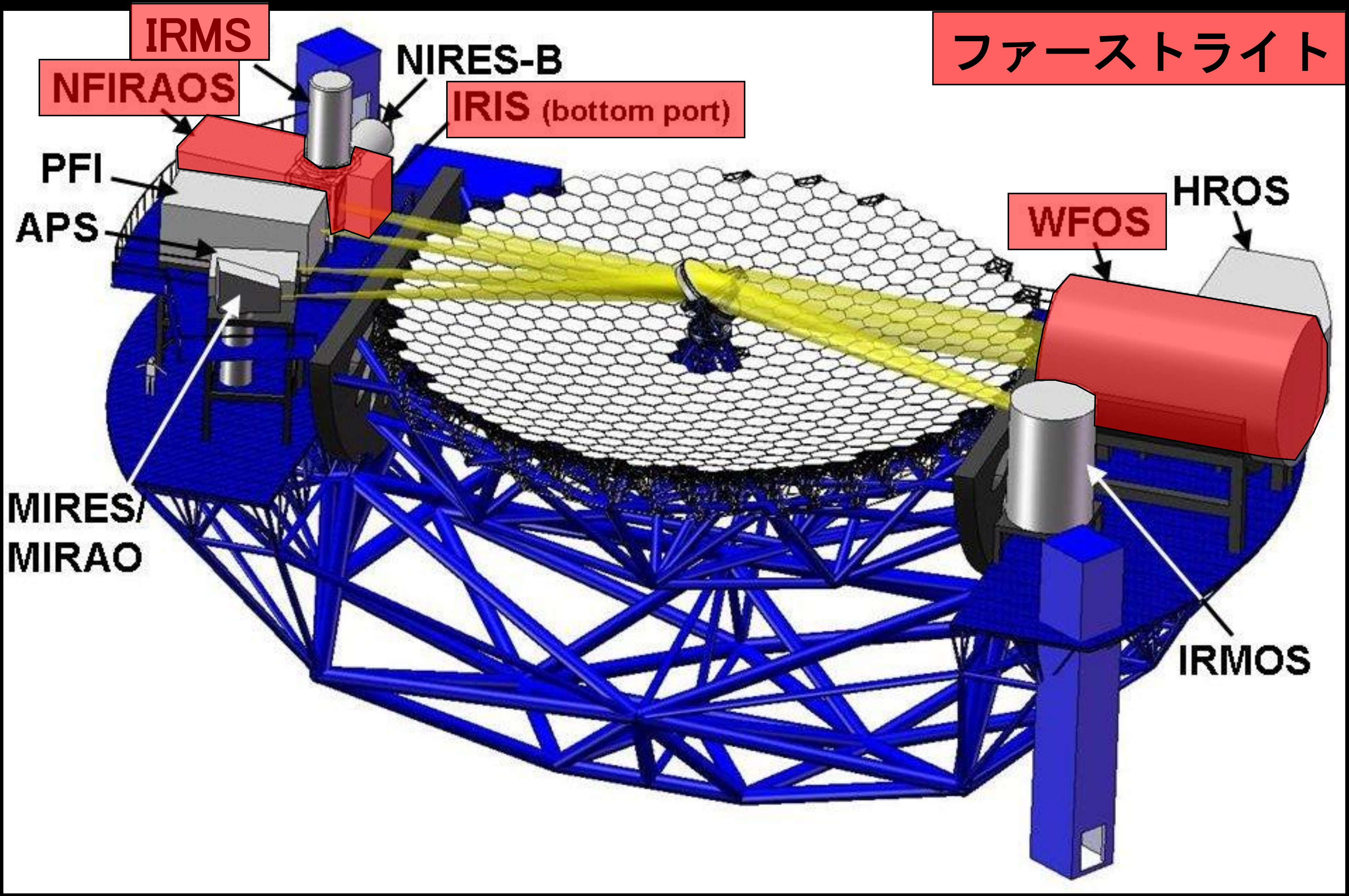
感度～口径^4　200倍

限界33等（2020）
＜赤方偏移17

TMT望遠鏡概観



TMT観測装置計画の概要(2006年)



TMT観測装置計画の概要(2006年)

装置名・主な機能	AO	波長分解能	サイエンスケース
近赤外 回折限界 分光撮像 (IRIS)：0.8~2.5μm	MCAO	2~50, ~4,000	銀河形成、BH・AGN、球状星団等
広視野、可視、分光 (WFOS) ：0.3~1.1μm	*GLAO*	300 ~ 5,000	高ｚ銀河間物質、高ｚ銀河分光、星の種族、化学組成など
マルチスリット、近赤外、分光 (IRMS) ：0.8~2.5μm	MCAO	2,000 ~ 10,000	近赤外最微光天体、JWST フォローアップ
中間赤外、エシェル分光撮像 (MIRES) ：7~25μm	*MIR-AO*	5,000 ~ 100,000	原始星キネマティクス 原始惑星系円盤
(HROS) ：0.3~1.1μm	―――	50,000	成・運動、高ｚ銀河間物質、系外惑星
近赤外回折限界エシェル (NIRES-R) ：2.5~5.5μm	MCAO	5,000 ~ 30,000	視線速度によるM型星の惑星検出 高ｚ銀河間物質

最初の3つは決定

提案中

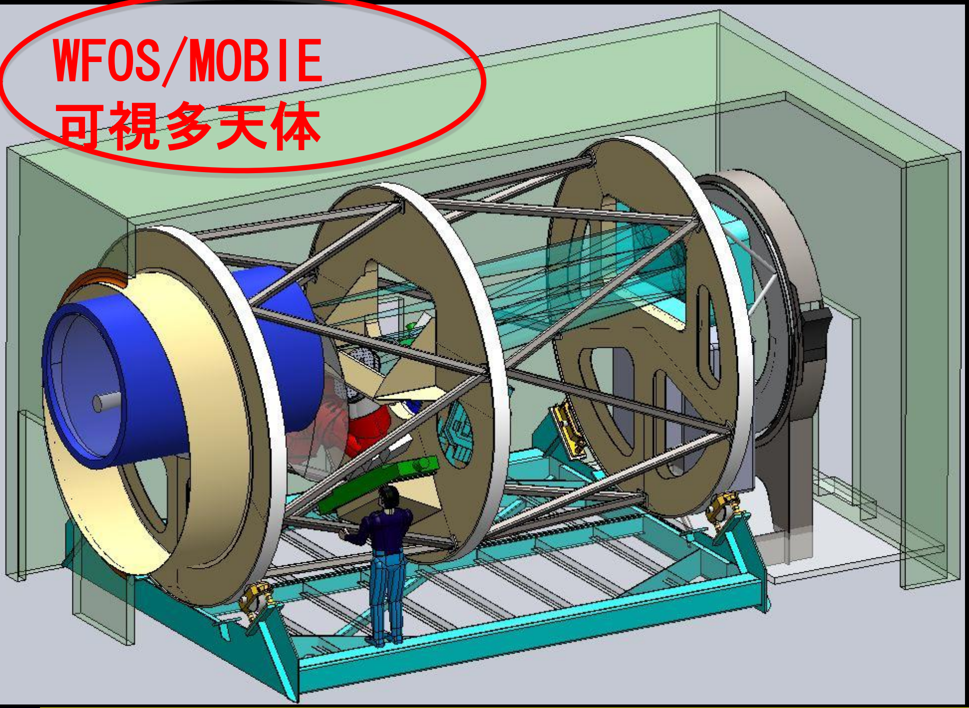
IRIS ← Keck / OSIRIS (近赤外3次元瞳分光 w/ LGSAO)

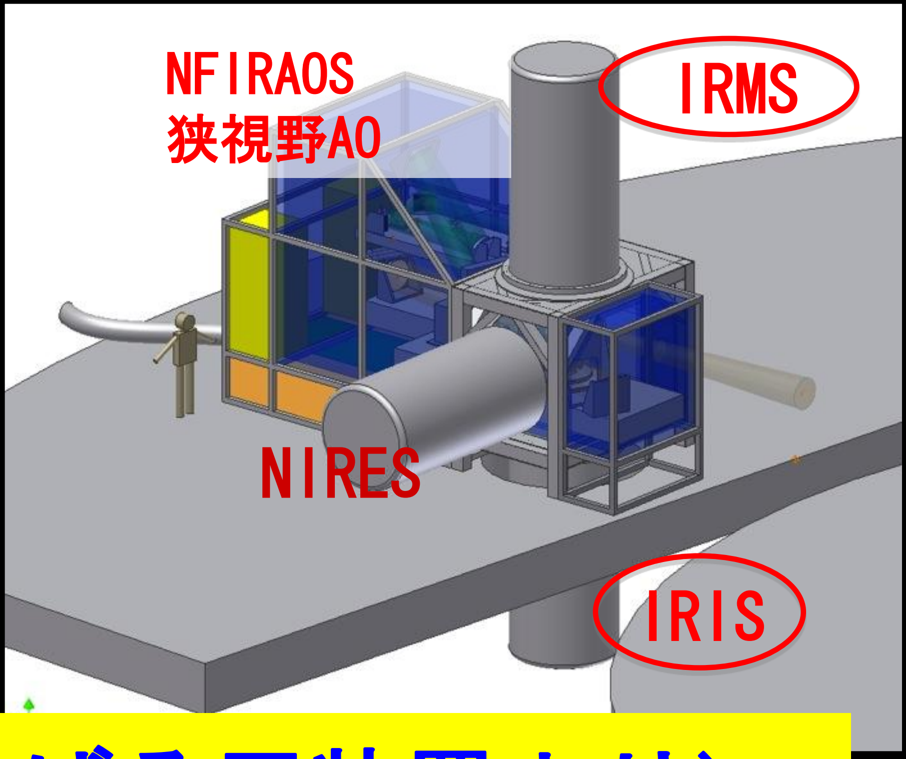
WFOS ← Keck / DEIMOS (可視多天体分光 w/o AO)

IRMS ← Keck / MOSFIREのコピー

(近赤外多天体スリット分光 w/o AO)

TMT観測装置計画の概要(2006年)





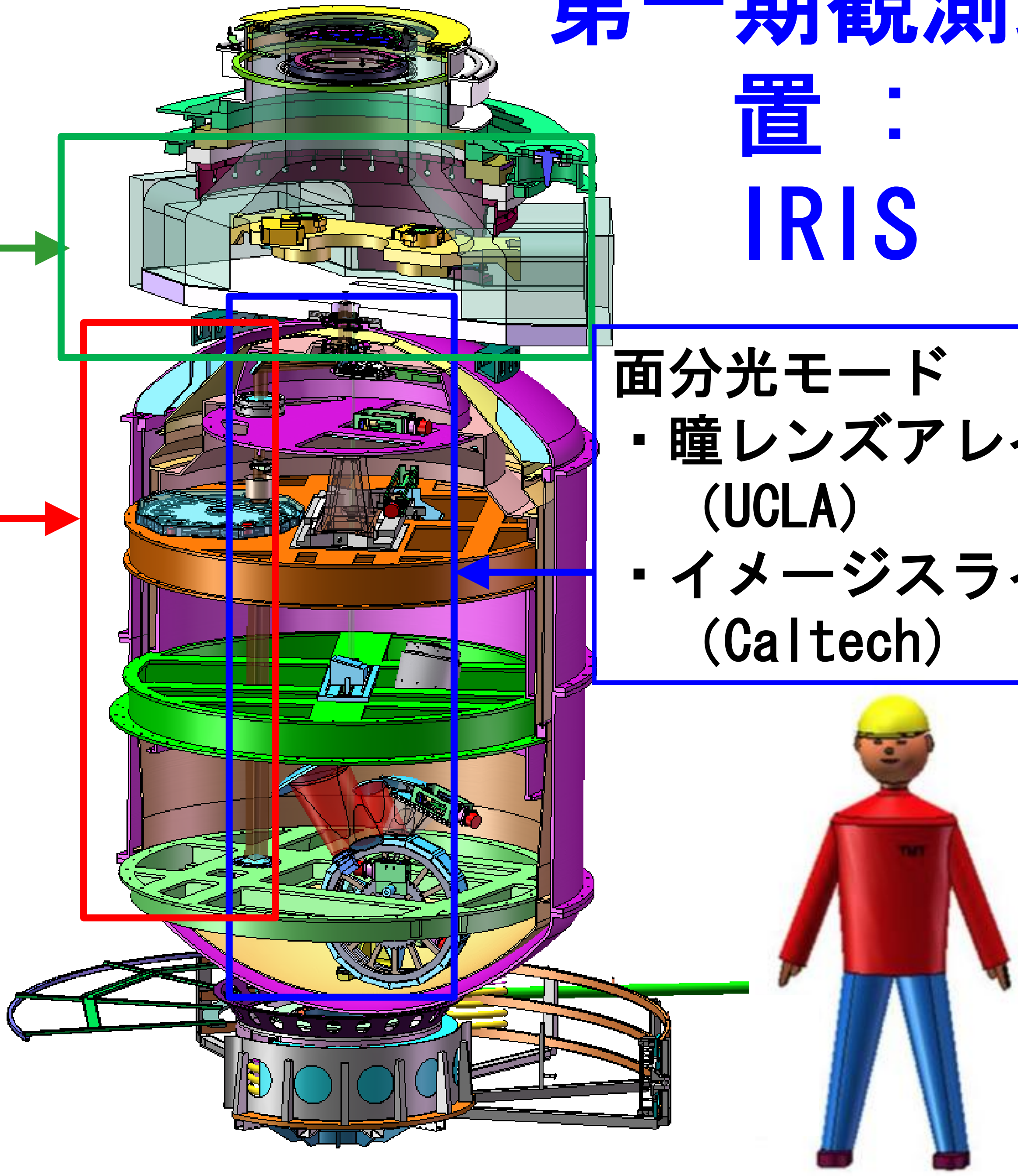
特徴その１：大型（すばる用装置より）

特徴その２：補償光学装置（AO）と組み合わせるとすばる装置並のサイズ

TMT観測装置開発の概要

- 第一期観測装置の開発・製作に日本から参加
  - IRIS（近赤外回折限界分光・撮像装置）
    - 撮像部の設計参加（鈴木竜、臼田、小西ほか）
  - WFOS/MOBIE（可視広視野多天体分光・撮像装置）
    - カメラ部の光学設計参加（宮崎、尾崎ほか）
  - IRMS（近赤外多天体分光・撮像装置）
    - 所期性能検討（東谷ほか）

第一期観測装置：IRIS

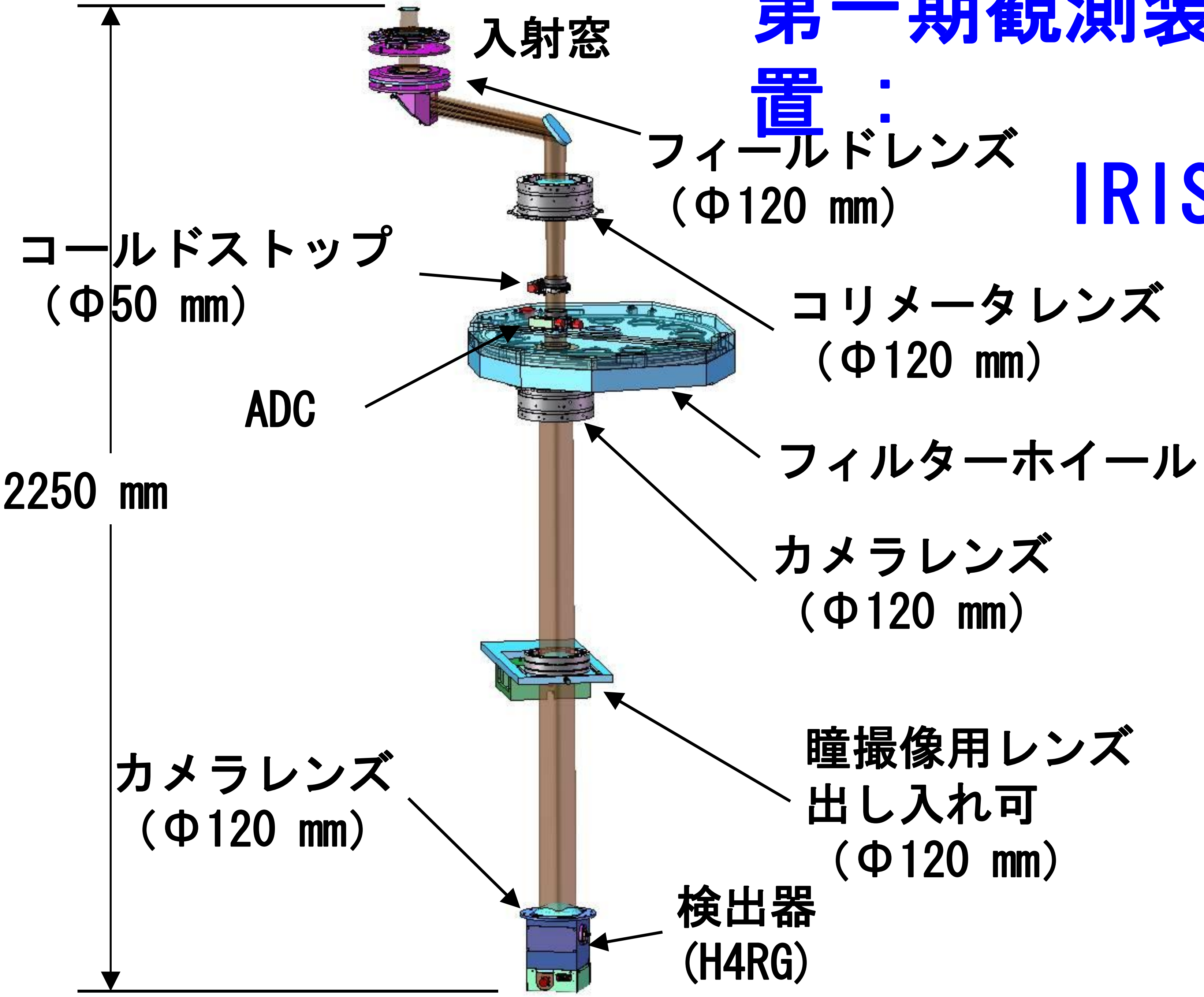


OIWFS
波面センサー
（カナダHIA）

撮像モード
（日本）

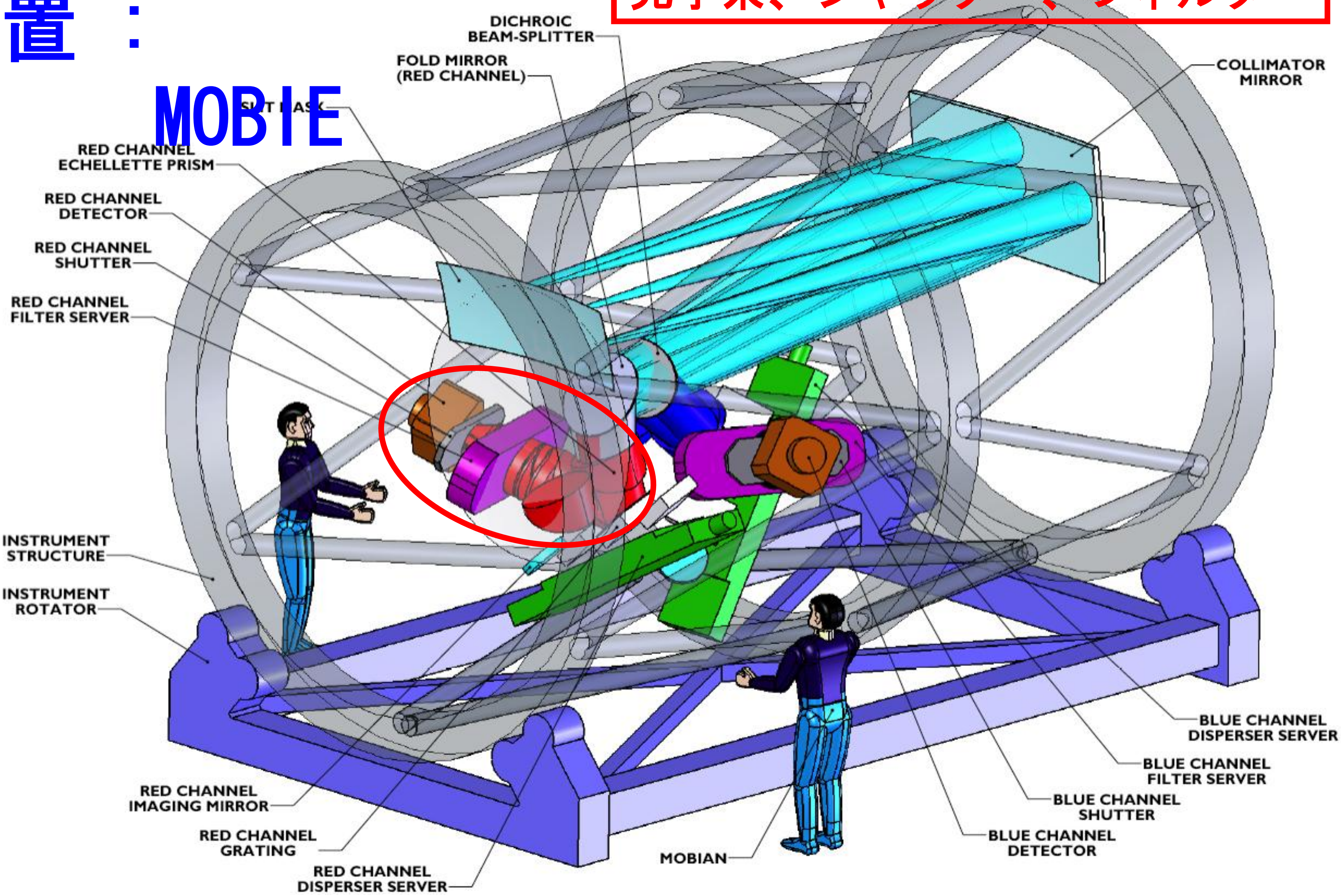
面分光モード
・瞳レンズアレイ
（UCLA）
・イメージスライサー
（Caltech）

第一期観測装置：IRIS



第一期観測装置：MOBIE

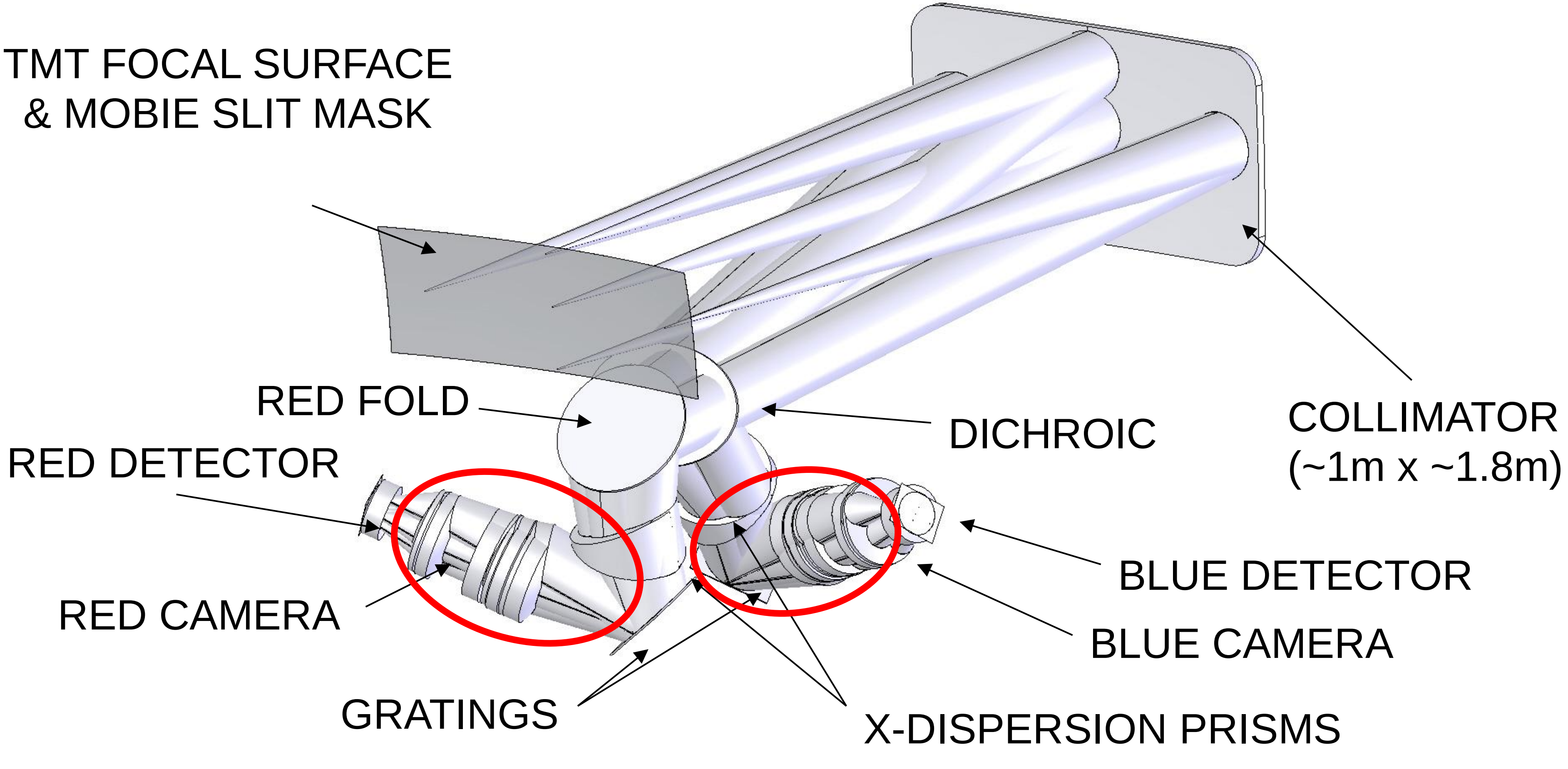
日本：カメラ部（赤＆青）
光学系、シャッター、フィルター



第一期観測装置　：
MOBIE

日本：カメラ部(赤&青)
光学系、シャッター、フィルター

Hyper Suprime-Cam開発の経験 →
•レンズ（~Φ400 mm：CaF_2など）
•シャッター、フィルター交換機構



第二期観測装置開発の概要

- 第二期装置をどう実現していくか具体的方針については未決定であるが、将来的に海外の装置検討と競争または協力が必須

→ 今から十分競争力のある検討・要素開発をする必要

第二期観測装置開発の概要：工程

- TMT計画全体の工程および役割分担に大きく影響するため、第二期観測装置開発の工程は未定（注：下表は最速の想定案）
- 2006年のFeasibility Study（予備設計検討）以来、TMTプロジェクト全体として何か進展はない。各パートナー独自R&D
- 2011年3月のTMT SAC（科学諮問会議）で各パートナーの優先順位を確認。可視＆赤外高分散分光器は高い評価

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
WFOS/MOBIE		CoDR	PDR		FDR		Test	Test	Comm	1st Light	
IRIS	CoDR		PDR		FDR		Test	Test	w/ AO	Comm	1st Light
IRMS			PDR	FDR			Test	Test	w/ AO	Comm	1st Light
Japan #1	R&D	R&D	R&D	CoDR	PDR	FDR			Test	Test	Comm
Japan #2	R&D	R&D	R&D	R&D	CoDR	PDR	FDR		Test	Test	Comm

CoDR（概念設計レビュー）、PDR（構想設計レビュー）、FDR（最終設計レビュー）
Comm（据付調整）、R&D（研究開発）、プロトタイプは各設計期に実施

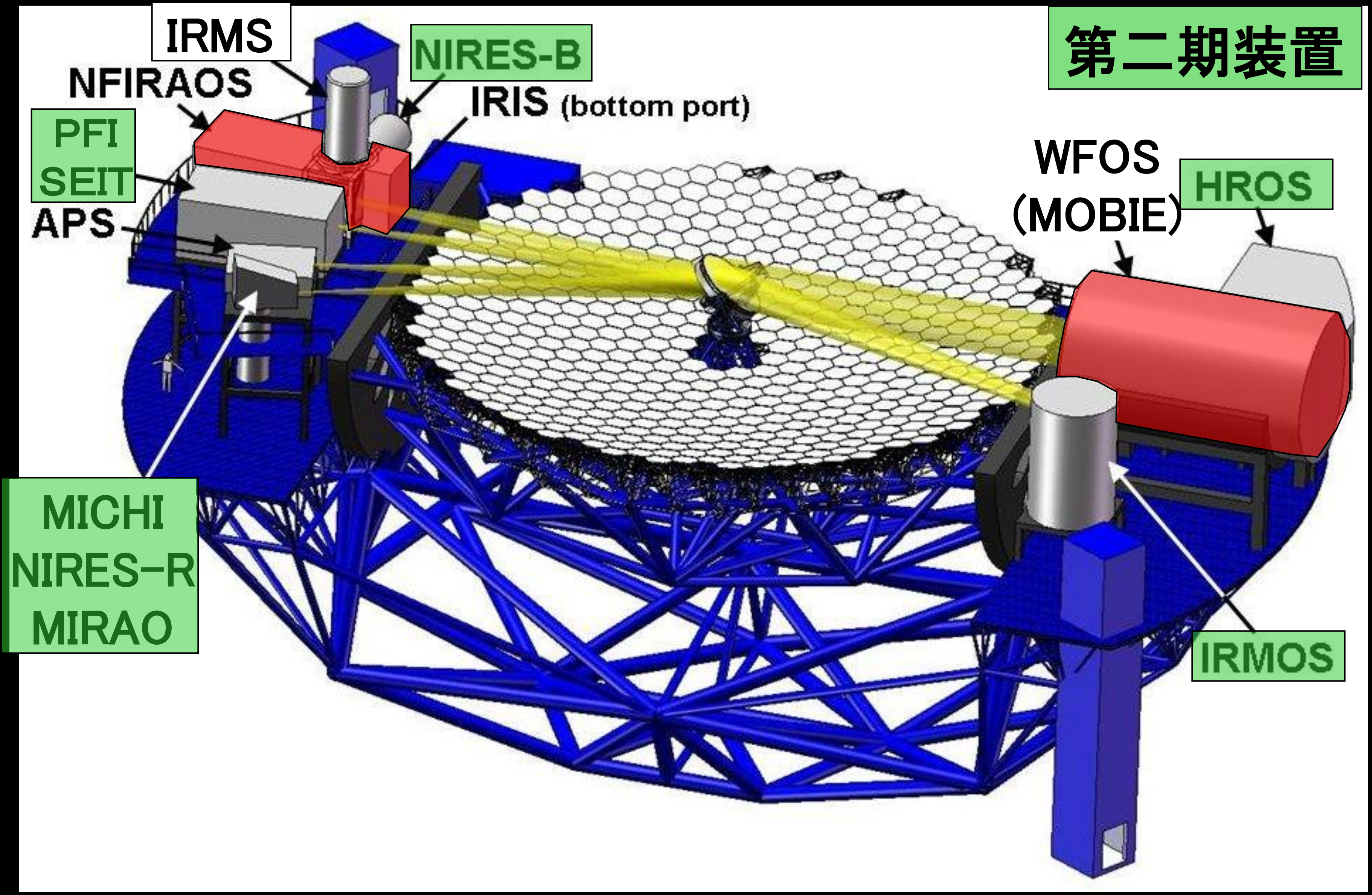
TMT観測装置開発の概要

- 第一期観測装置の開発・製作に日本から参加
  - IRIS（近赤外回折限界分光・撮像装置）
    - 撮像部の設計参加（鈴木竜、臼田、小西ほか）
  - WFOS/MOBIE（可視広視野多天体分光・撮像装置）
    - カメラ部の光学設計参加（宮崎、尾崎ほか）
  - IRMS（近赤外多天体分光・撮像装置）
    - 所期性能検討（東谷ほか）
- 第二期観測装置を日本主導で開発・製作・供給
  - 2008/06/30　装置計画案募集締切 → ４提案（現在５）
  - 2008/11/20　第一回TMT観測装置検討会（評価委員：岩室、高遠、児玉、臼田）。これまでに７回開催。
  - 2010/06/26　TMT Instrument WS
  - 2011/03/28~30 TMT Science & instruments WS
  - この期間プロトタイプ開発、R&DおよびTMTプロジェクト関係者および海外パートナーに進捗報告

第二期観測装置開発の概要

- MICHI：中間赤外（7~25μm）カメラ、高分散分光器、低中分散面分光装置（茨城大 岡本ほか）←TMT-MIRESを独自改良 ← すばるCOMICS, TAO
- J-NIRES：近赤外高分散分光器（0.8~5.5μm）（東大 小林、京産大 池田ほか）← すばるIRCS-HRU, WINERED & IRD（イマージョン回折格子、アストロコム、ファイバなど）
- J-IRMOS：MOAO付き近赤外多天体面分光装置（0.8~2.5μm）（東北大 秋山ほか）← TMT-IRMOSと独立に検討 ← RAVEN, nuMOIRCS
- J-HROS：可視高分散分光器（0.3~1.1μm）（天文台 青木ほか）←TMT-HROSと独立に検討 ← すばるHDS, 岡山HIDES（ヨードセル、イメージスライサー、光ファイバ）
- SEIT：地球型系外惑星撮像・面分光装置（0.8~1.7μm）（京大 松尾、JAXA 小谷、天文台 田村ほか）← すばるHiCIAO, SCExAO, IRD

第二期観測装置開発の概要



TMT用観測装置の技術課題

- 特徴：集光力~口径^2（すばるの14倍）、解像力~口径（~4倍）、感度~口径^4（~200倍）

  → 遠くまで、暗いところまで、細かいところまでよく見える

  → 高い波長分解能により物理測定の精度が上がる
- より厳しい位置精度、光学波面精度、高い再現性
  - IRISの仕様：30nmの波面誤差、30マイクロ秒角の相対アストロメトリ（1/400ピクセルの精度で天体の位置）
  - 低温度(数～77K)での機械駆動、光学アライメントなど
  - 波長較正（例：Laser Frequency Comb）、装置の温度や圧力の安定性（例：数m^{3}の分光器室を10^{-3}度で管理）
- 高い波長分解能 → すばる級と同じ波長分解能を達成するには、より大きな光学素子が必要

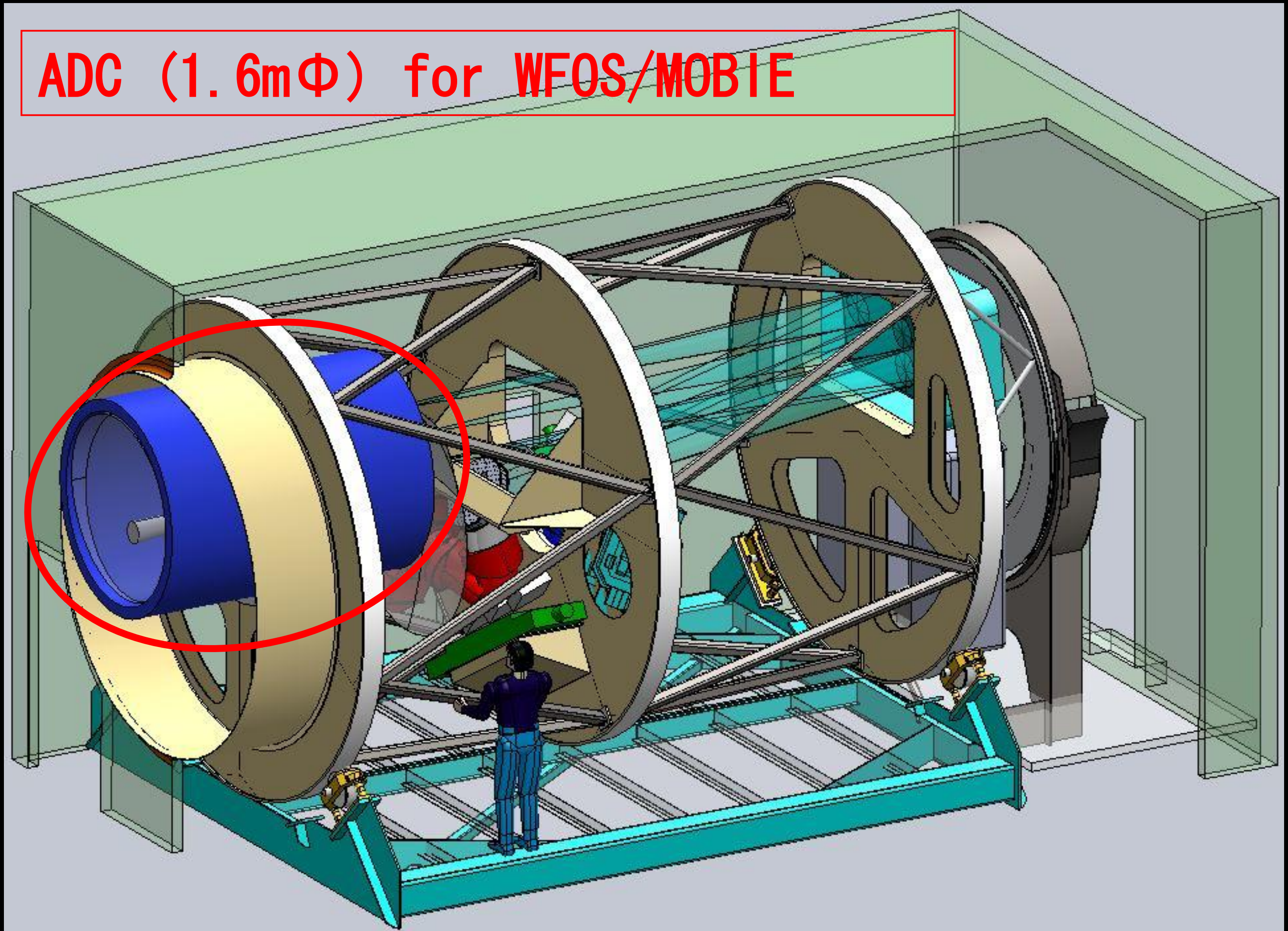
TMT用観測装置の技術課題

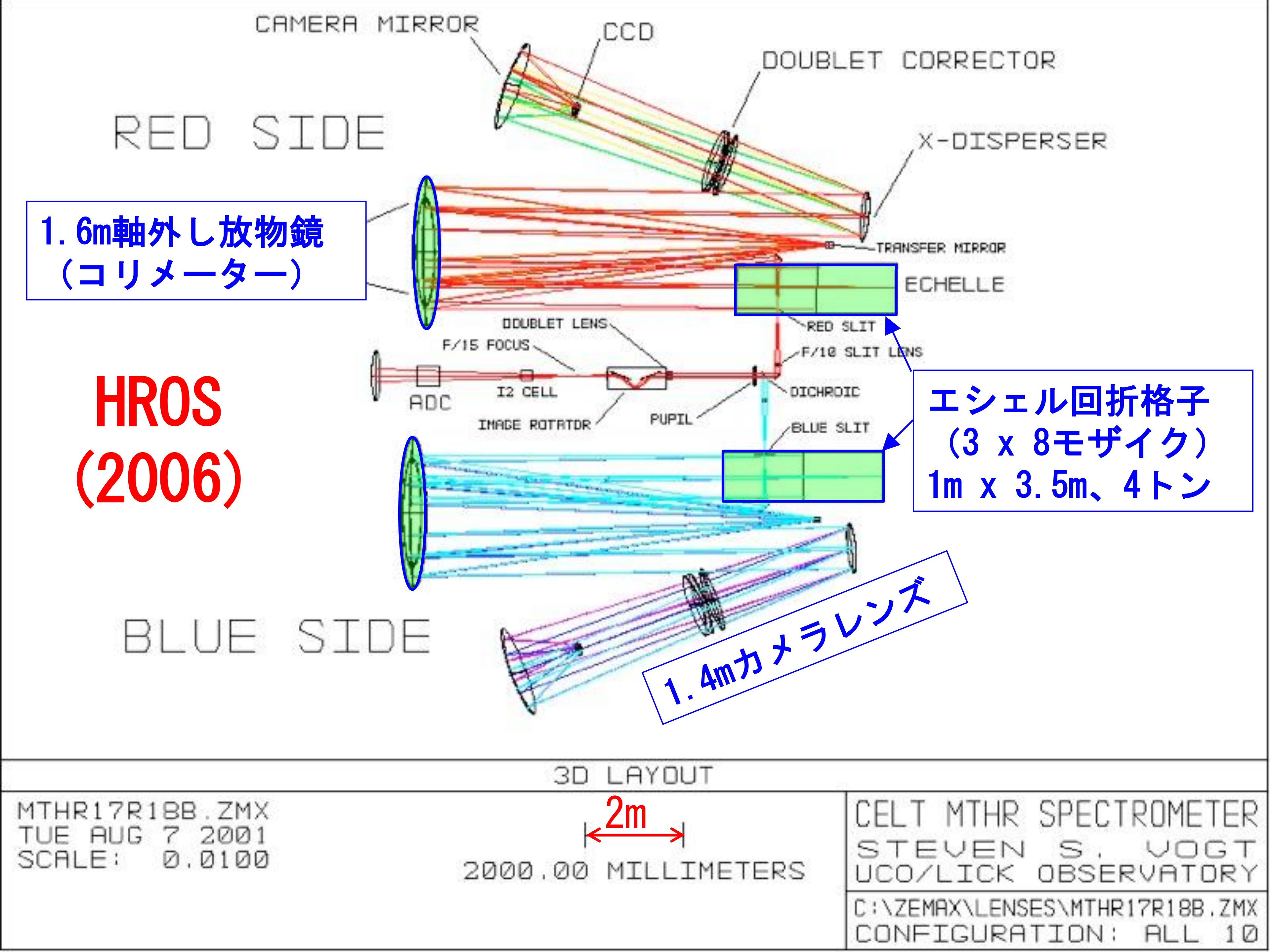
- 高い波長分解能 → すばる級と同じ波長分解能を達成するには、より大きな光学素子（レンズ、窓、鏡、大気分散補正光学系ADC、分散素子など）が必要
- 主な光学素材の要求性能などは以下の通り：

	要求性能値
BK7、Fused Silica、FK5など	1~2mΦ for 可視光光学素子
BaF_2、CaF_2、ZnS、ZnSeなど	~0.5mΦ for 赤外光学素子
一様性	10E-7 for 1mΦ、60mm厚、気泡<0.05~1mm、Striae＜10nm
回折格子	VPH（＞1m）、イマージョン（Si, Ge, ZnSe等＞0.5m）
低温度下の性能	屈折率データ(dn/dT、dn/dl)
レンズ波面誤差	波面誤差<1nm、 Diff-aberration <0.075nm for PFI & ExAO

TMT用観測装置の技術課題

- 高い波長分解能 → すばる級と同じ波長分解能を達成するには、より大きな光学素子（レンズ、窓、鏡、大気分散補正光学系ADC、分散素子など）が必要





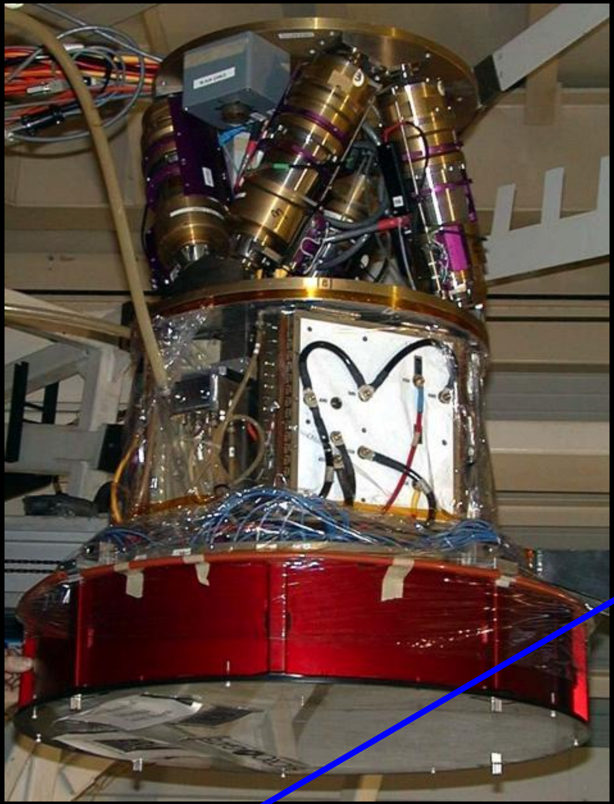
CAMERA MIRROR
CCD
DOUBLET CORRECTOR
RED SIDE
X-DISPERSER
1.6m軸外し放物鏡
（コリメーター）
TRANSFER MIRROR
ECHELLE
DOUBLET LENS
RED SLIT
F/15 FOCUS
F/10 SLIT LENS
ADC
I2 CELL
DICHROIC
IMAGE ROTATOR
PUPIL
BLUE SLIT
HROS
(2006)
エシェル回折格子
（3 x 8モザイク）
1m x 3.5m、4トン
1.4mカメラレンズ
BLUE SIDE
3D LAYOUT
MTHR17R18B.ZMX
TUE AUG 7 2001
SCALE: 0.0100
2m
2000.00 MILLIMETERS
CELT MTHR SPECTROMETER
STEVEN S. VOGT
UCO/LICK OBSERVATORY
C:\ZEMAX\LENSES\MTHR17R18B.ZMX
CONFIGURATION: ALL 10

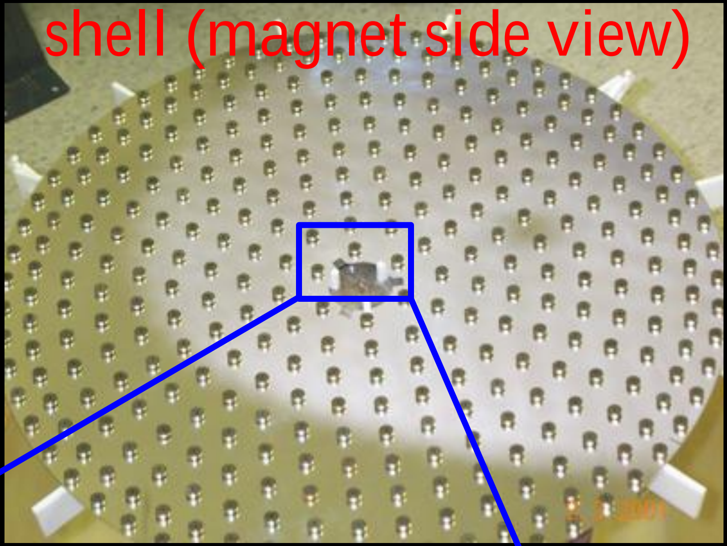
TMT用観測装置の技術課題：AOM2

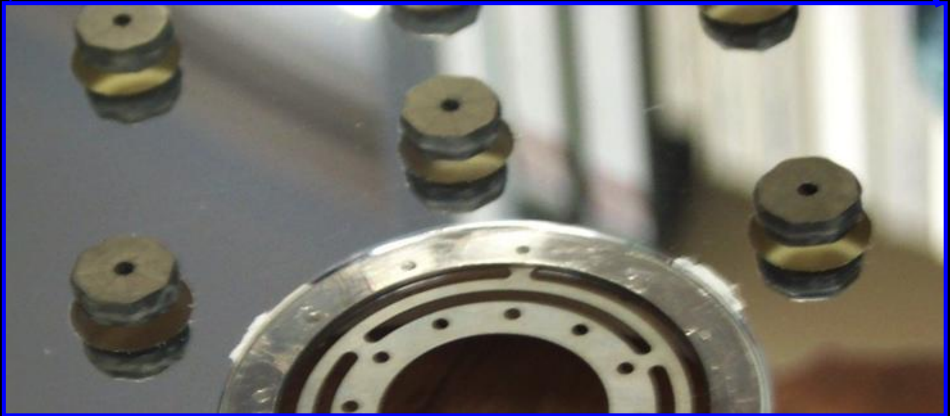
- 補償光学(AO)により装置の小型化、単純化が可能。
  → 全ての装置を小型化する方法として、AO副鏡(AOM2)
  - シーイング条件下のスリットロス減少（WFOS, HROS等）
  - 装置内光学素子数削減で効率向上＆赤外放射率抑制（MICHI、NIRESなど）
  - 高精度AOで可変副鏡の寄与削減（PFI、IRMOSなど）

TMT用観測装置の技術課題：AOM2

MMT: AO副鏡（642mmΦ、336本アクチュエータ）







その他

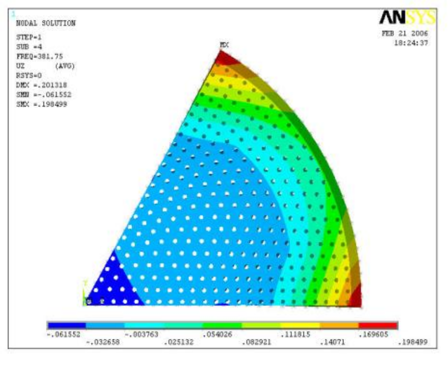
LBT 8.4m x 2
- 911mmΦ
- 672本Act
- 稼働中

VLT 8.1m
- 1100mmΦ
- 1170本Act
- 開発中

すばる 8.2m
- 検討中（岩田、大屋プレゼン）

TMT用観測装置の技術課題：AOM2

- 補償光学(AO)により装置の小型化、単純化が可能。
  → 全ての装置を小型化する方法として、AO副鏡
  - シーイング条件下のスリットロス減少（WFOS, HROS等）
  - 装置内光学素子数削減で効率向上＆赤外放射率抑制（MICHI、NIRESなど）
  - 高精度AOで可変副鏡の寄与削減（PFI、IRMOSなど）
- 主なAO副鏡のスペック



直径	3.64m：1枚または6 or 7枚セグメント
波長	0.31~18μm（目標28μm）
材質	ULE / Zerodur vs. SiC or composite
素子数	500~1200アクチュエータ
バンド幅	50 Hz for MOAO、250 Hz for ExAO
ストローク	40μm（目標100μm）for Tip-Tilt、10μm for 高次
鏡面精度	フラット時20nm RMS（目標10nm） 波面フィッティング誤差：250nm RMS（目標175nm）

TMT用観測装置の技術課題：AO

- 補償光学(AO)により装置の小型化、単純化が可能。
  → 全ての装置を小型化する方法として、AO副鏡
  - シーイング条件下のスリットロス減少（WFOS, HROS等）
  - 装置内光学素子数削減で効率向上＆赤外放射率抑制（MICHI、NIRESなど）
  - 高精度AOで可変副鏡の寄与削減（PFI、IRMOSなど）

その他

- 高速（1kHz）・低ノイズ（<5e⁻）赤外波面センサー
- ピラミッド型波面センサー、干渉型波面センサー（PFI等）
- 多素子・小型可変鏡：120x120 MEMS、Piezostack
- 大パワーレーザーシステム

まとめ

- **TMTの観測装置計画：第一期３台、第二期以後６台以上**
- **第一期観測装置の開発・製作に日本から参加**
  - IRIS（近赤外回折限界分光・撮像装置）
  - WFOS（可視広視野多天体分光・撮像装置）
- **第二期観測装置を日本主導で開発・製作・供給**
  - J-NIRES（近赤外高分散分光装置
  - MICHI（中間赤外線分光・撮像装置）
  - J-IRMOS（近赤外線多天体広視野面分光装置）
  - J-HROS（可視高分散分光器）
  - SEIT（地球型系外惑星撮像分光装置）　　など
- **今後に向けて（要望）**
  - 大学や関連メーカーと協力した、重要な要素技術の検討、プロトタイプの製作、試験、性能評価への協力