

大型研究計画に関する進捗評価について（報告）

「30m光学赤外線望遠鏡（TMT）計画の推進」について

2019年（令和元年）8月27日

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会

目 次

はじめに	3
「30m光学赤外線望遠鏡（TMT）計画の推進」について	
1. 進捗評価の実施方法	4
2. プロジェクトの概要	
(1) 概要と主な内容	5
(2) 実施体制	5
(3) 年次計画及び予算規模	8
3. プロジェクトの進捗状況	
(1) 日本分担分の施設等の整備状況	9
(2) 各国の施設等の整備状況	9
(3) コミュニティの活動状況	10
(4) 若手技術者・研究者の育成状況	10
(5) 社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況	11
(6) 情勢の変化があった場合の対応状況	11
(7) 年次計画における「計画推進に当たっての留意事項等」への対応状況	14
4. 計画の進捗評価と今後の留意点	
(1) 計画の進捗状況を踏まえた評価	18
(2) 今後の事業の推進に当たっての留意点	19
備考（用語解説等）	20
科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 委員等名簿	23

はじめに

文部科学省においては、学術研究の大型プロジェクトへの安定的・継続的な支援を図るべく、2012年度（平成24年度）に「大規模学術フロンティア促進事業」を創設した。

この事業は、世界が注目する学術研究の大型プロジェクトについて、科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会（以下「作業部会」という。）が策定した「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップの策定－ロードマップ」^{※1}等に基づき、社会や国民からの支持を得つつ、国際的な競争・協調に迅速かつ適切に対応できるよう支援し、戦略的・計画的な推進を図ることを目的としている。

各プロジェクトの推進に当たっては、本作業部会が「大規模学術フロンティア促進事業の年次計画」（以下「年次計画」という。）を作成し、進捗管理を行っているところである。

「30m光学赤外線望遠鏡（TMT）計画の推進」については、2013年度より計画が開始し、年次計画における10年計画の中間年度である2017年度に事業の進捗確認を行うこととしていたが、実施機関の予期せざる事由が発生し、年次計画の遅延が生じていた。このことから、本作業部会において、2018年8月に進捗評価の時期を変更し、現年次計画には、2019年度に進捗状況等の確認を行うことが記載されている。

進捗評価に当たっては、関係分野の専門家（以下「アドバイザー」という。）から助言を得つつ、委員が研究現場の状況を確認するためのヒアリング及びそれらを踏まえた審議を実施した。

※1 本作業部会においては、日本学術会議の「マスタープラン」が示す学術的意義の高い大型プロジェクトのうち、推進に当たっての優先度が高いと認められるものを選定し、「ロードマップ」として策定している。2017年（平成29年）7月には「ロードマップ2017」を取りまとめた。
(URL) http://www.mext.go.jp/a_menu/kyoten/1383666.htm

「30m光学赤外線望遠鏡（TMT）計画の推進」について

1. 進捗評価の実施方法

ヒアリング

今回の進捗評価は、次のとおり、本作業部会委員及びアドバイザーからなる評価者11名による実施機関からのヒアリングを通じて実施した。

- (1) 日 時：2019年（令和元年）7月16日（火）13：30～15：30
- (2) 参加委員：ヒアリングに参加した評価者は、以下のとおり。（敬称略、○は主査）
（作業部会委員）○小林 良彰、城石 俊彦、鈴木 裕子、東嶋 和子、中野 貴志、松岡 彩子、山本 智、吉田 善章
（アドバイザー）井上 一、岡村 定矩、永原 裕子

(3) 概 要：

・機関からのヒアリング（60分）

自然科学研究機構から、計画の概要、進捗状況等について説明を受けた後、質疑応答を行った。

（自然科学研究機構説明者）

常田 佐久 自然科学研究機構国立天文台長、
井口 聖 同台 副台長（企画担当）、
吉田 道利 同台 ハワイ観測所長、
岩田 生 同台 TMT推進室 副室長、
笹川 光 同台 事務部長、
本田 大輔 同台 財務課長、
岩下 金史 同台 財務課課長補佐、
山本 真一 同台 財務課司計係長、
徳田 次男 自然科学研究機構 理事／事務局長、
鈴木 隆 同機構 事務局財務課長

・まとめ（35分）

機関からのヒアリングを踏まえ、研究の進捗状況に係る確認及び今後の推進方策や留意事項等に係る検討を実施した。

※今回の進捗評価における現地調査は、現地状況に鑑み、実施しないこととした。

学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会における審議

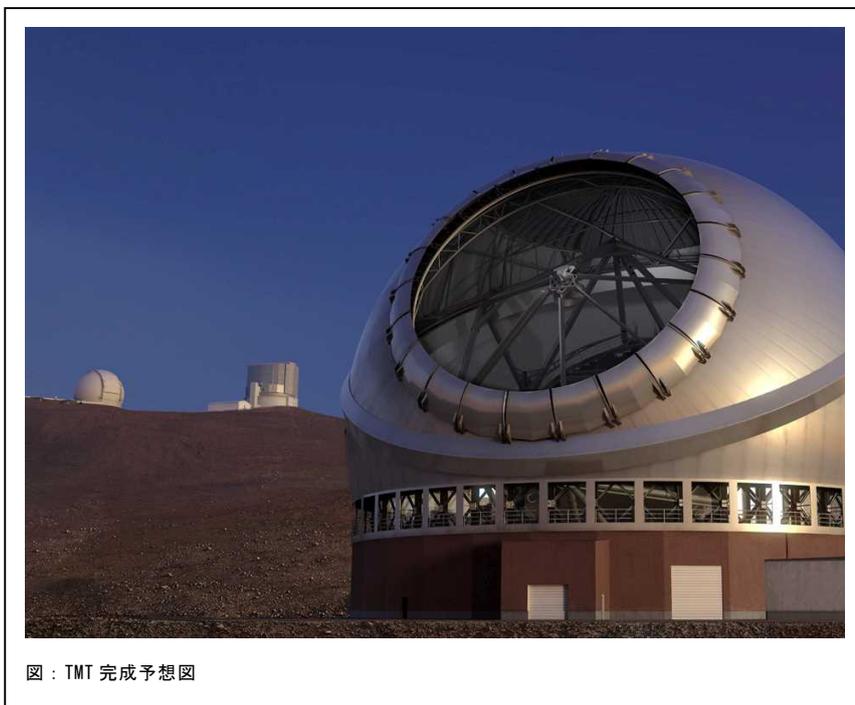
- (1) 日 時：2019年（令和元年）8月27日（火）10：00～12：30
- (2) 審議事項：進捗評価報告書（案）の審議

2. プロジェクトの概要

(1) 概要と主な内容

TMT 計画は、光学赤外線観測の最適地の一つであるハワイ島マウナケア山頂域に、日本・米国・カナダ・インド・中国ⁱの国際協力科学事業として口径 30m の超大型光学赤外線望遠鏡「TMT (Thirty Meter Telescope) ⁱⁱ」を建設し、太陽系外の第 2 の地球探査と生命の確認、ダークエネルギーの性質の解明、宇宙で最初に誕生した星や銀河の検出等を目指すものである。

完成すれば、従来の口径 8-10m の光学赤外線望遠鏡に対し 10 倍以上の集光力、3 倍以上の解像度、点光源の天体に対しては 100 倍以上の感度という過去に類のない性能向上を実現する。これにより、現代天文学の重要課題に対して既存の望遠鏡では成しえない成果を創出することが期待されている。



TMT 完成後の日本における共同利用は、天体探査能力に秀でたハワイ島マウナケア山頂に建設された口径 8.2m の大型光学赤外線望遠鏡「すばる」で地球型惑星や超遠方銀河の候補天体を検出し、TMT で高感度分光観測を実施するといった連携観測を可能にする。また、二つの望遠鏡を一体的に運用し、効率化を図る予定となっている。しかしながら、ハワイ島マウナケア山頂での TMT 建設に対する反対運動による建設工事の遅れが生じており、本進捗評価実施時である 2019 年 8 月末現在においても、建設工事は再開されていない状況となっている。このため、ハワイ島マウナケア山頂における当初の完成予定が大幅に遅れ、科学運用開始時期も相当年の延期が見込まれている。

ⁱ メンバーは、日本：自然科学研究機構国立天文台、米国：カリフォルニア工科大学、カリフォルニア大学、中国：中国国家天文台、カナダ：国立研究機関（カナダ天文学大学連合）、インド：科学技術庁（TMT 連携機構）で構成。

ⁱⁱ 補償光学を高度化した TMT は、究極の望遠鏡として完成から約 30 年間、観測天文学の基幹装置となることが予想されている。

(2) 実施体制

TMT 計画は日本・米国・カナダ・インド・中国の5カ国による国際共同事業である。2014年に建設・運用を統括する組織として米国法人であるTMT国際天文台(TMT International Observatory LLC; TIO)を設立し、次のとおり建設の役割分担が決定されている。

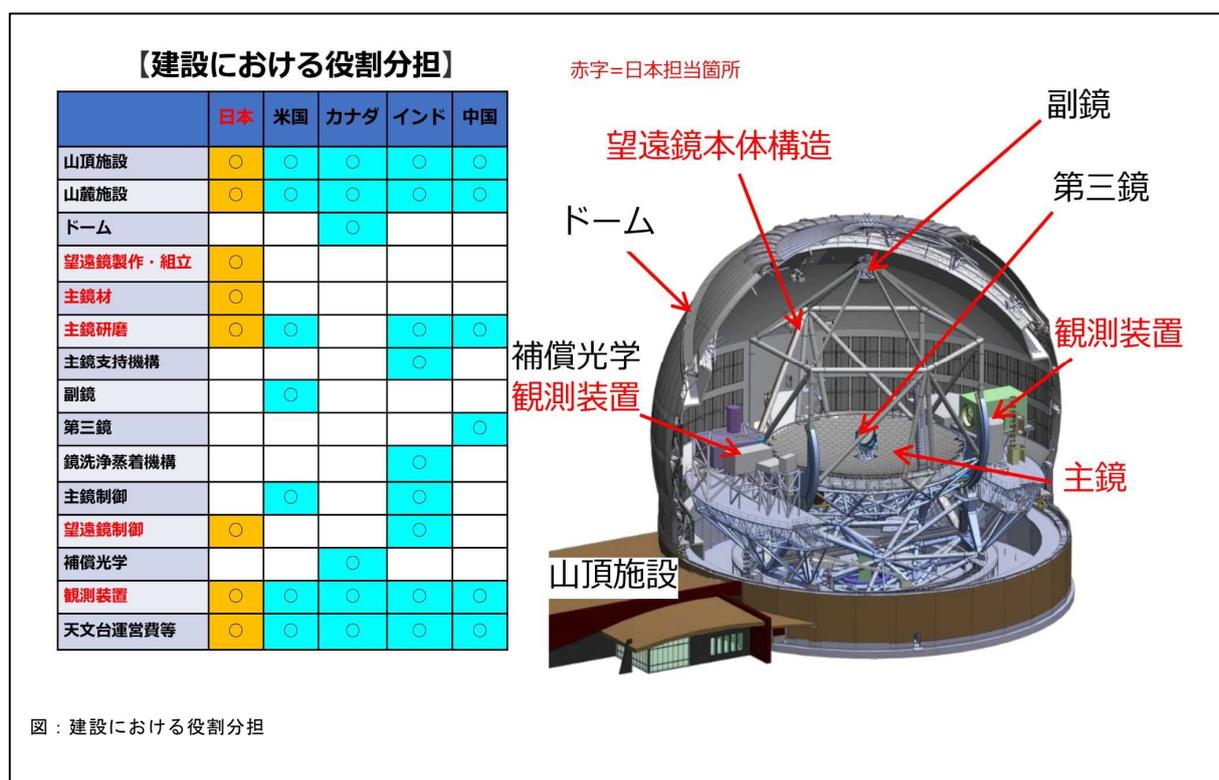
日本：建設の枢要部分である超大型高剛性軽量化望遠鏡本体構造及び制御系、574枚に及ぶ主鏡分割鏡材の製作及び非球面加工の一部、第一期観測装置の主要部分等

米国：主鏡制御、副鏡、第一期観測装置の主要部分、主鏡加工・研磨の一部等

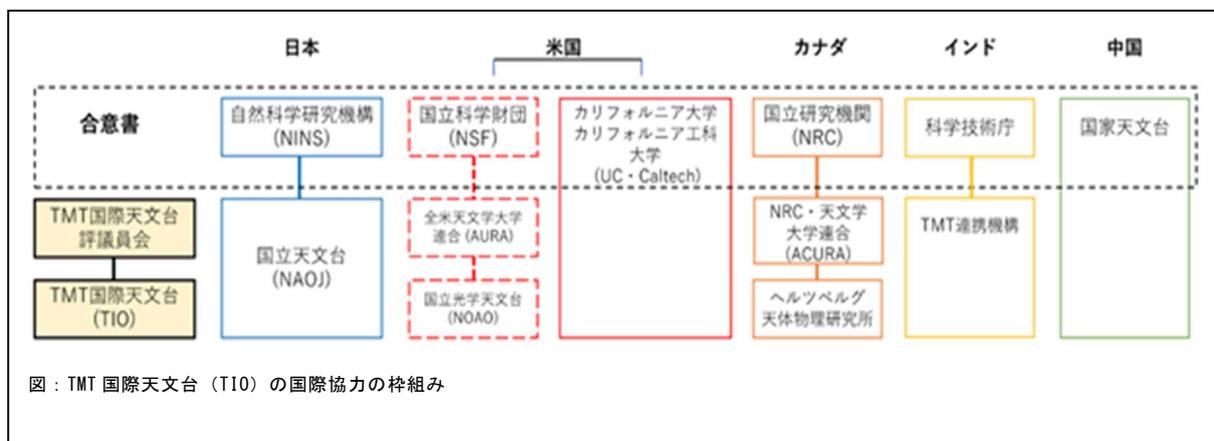
カナダ：ドーム、補償光学装置等、第一期観測装置の主要部分等

インド：主鏡支持機構、鏡洗浄蒸着機構、主鏡加工・研磨の一部等

中国：第三鏡、主鏡加工・研磨の一部、第一期観測装置の一部等



スケジュールや予算を始めとする TIO の意思決定は、メンバー機関が任命した者で構成される TIO 評議員会によってなされる。また、TIO は建設計画を統括するとともに、現地建設工事を担当し、完成後には望遠鏡運用を行う。



米国では、2013 年から国立科学財団（NSF）による連携計画資金の助成を受け、NSF の TMT 計画への正式参加に向けた協議を進めている。また、NSF による予算措置後に執行機関となる米国天文学大学連合（AURA）が TIO 評議員会に準メンバーとして参加している。現在米国では 2020 年代の天文学・宇宙物理学における課題の優先度を同定し、NSF 等の政府機関による投資の戦略を策定する Decadal Survey が進行している。Decadal Survey の結果は 2021 年初頭に公表される見通しで、TMT 計画への支援が決定された場合、NSF の TMT 計画への参加開始は 2022 年度からと見込まれている。

日本においては、すばるの運用と TMT の建設及び運用を一体的に行う体制を構築し、現在のハワイ観測所の人員規模を大きく上回ることなく事業を実施することとしており、すばるや大型電波望遠鏡「アルマ」で建設・開発・運用を担った職員がその技術と経験を活かして中心的な役割を担っている。

また、TMT 完成後の科学観測の時間配分は、建設時の現物貢献と現金貢献を併せた貢献割合によって決定することとなっている。

(3) 年次計画及び予算規模

TMT 計画に係る現行の年次計画及び予算規模は次のとおりである。

<年次計画変更要請案ⁱⁱⁱ>

大規模学術フロンティア促進事業の年次計画												
計画名称	30m光学赤外線望遠鏡(TMT)計画の推進											
実施主体	【中心機関】日本(自然科学研究機構国立天文台)、米国(カリフォルニア工科大学、カリフォルニア大学)、カナダ(カナダ天文学会)、中国(中国国家天文台)及びインド(TMT連携機構) 【連携機関】北大、北海道教育大、東北大、筑波大、茨城大、埼玉大、東京大、東工大、日本大、工学院大、神奈川大、総研大、JAXA、名大、信州大、京大、甲南大、大阪大、大阪産業大、神戸大、兵庫県立大、広島大、愛媛大、久留米大、鹿児島大、米国(ハワイ大、テキサス大、イェール大、スタンフォード大)											
所要経費	建設費総額 約 1,800億円 (日本負担分:375億円、建設費総額の21%程度) 年間運用経費 未定	計画期間	建設期間 2013(平成25)年度～2027(平成39)年度(現地での建設は2014年度から) 運転期間 2028(平成40)年度から運用開始(以後30年間運用予定) (評価実績: 事前評価 平成23年11月、平成24年9月)									
計画概要	ハワイ島マウナケア山頂域に(万一、ハワイで建設できない場合には、代替地としてスペイン・ラパルマ島に)、日本、米国、カナダ、中国及びインドの国際協力科学事業として口径30mの光学赤外線望遠鏡(TMT:Thirty Meter Telescope)を建設し、第二の地球探査と生命の確認、ダークエネルギーの性質の解明、宇宙で最初に誕生した星の検出などに挑むことを目的とする。(補償光学を高度化したTMTは、究極の望遠鏡として2020年代から約30年間、観測天文学の基幹装置となる。)											
研究目標(研究テーマ)	1. TMT望遠鏡の建設 2. 最先端観測研究による新たな宇宙像の開拓(第二の地球探査と生命の確認、ダークエネルギーの性質の解明、宇宙で最初に誕生した星の検出)[運用開始後]											
年次計画	2013 (H25)	2014 (H26)	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	2019 (H31)	2020 (H32)	2021 (H33)	2022 (H34)		—
1. TMT望遠鏡の建設・運用						建設						
TMT望遠鏡の建設・運用を行う。日本は、主に望遠鏡構造、主鏡鏡材、主鏡研磨の一部、観測装置の一部の建設を担当。												
○望遠鏡本体構造の製作 ○主鏡分割鏡の製作 ○観測装置の製作												
												期末評価
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> ※実施機関の予期せざる事由の発生によって年次計画の遅延が生じていることに鑑み、これを踏まえた計画期間の延長(期末評価の時期の設定を含む)に係る変更については、当該事由の進展が見込まれる2018年度下期以降、実施機関からの変更の申出に基づく学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会における審議、又は2019年度に実施予定の進捗評価を通じて判断する。 </div>											
評価の実施時期	-	-	-	-	-	-	進捗評価	-	-	-		

<予算規模>

資金計画 (日本分担分)

建設費 (国際貢献分) : 375 億円

運用費 : 年約 30 億円

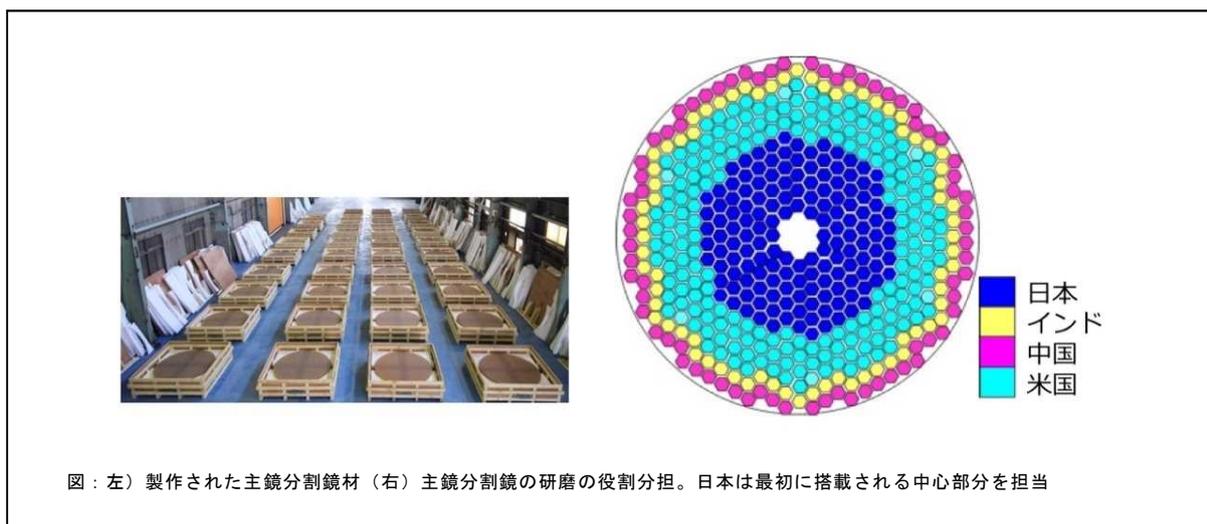
ⁱⁱⁱ 「大規模学術フロンティア促進事業の年次計画について(科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 平成24年11月(平成30年8月改訂)」に掲載の年次計画より。

3. プロジェクトの進捗状況

(1) 日本分担分の施設等の整備状況

施設等名	現在の進捗状況
望遠鏡本体構造及び制御系	<ul style="list-style-type: none"> ・望遠鏡構造の総重量は約 2,600 トンと、すばるの 4 倍程度に抑えた軽量化を達成。リニアサーボモータの設計改良により、高度角 85 度以下で 0.2 ミリ秒角以下の駆動誤差という厳しい要求を満たす設計を達成。 ・これまでに 8 つの国際設計審査会を完了し、主鏡分割鏡交換機構の試作や振動を抑制するケーブル巻取装置の試作を実施した上で 2018 年度から製造に着手。
主鏡分割鏡	<ul style="list-style-type: none"> ・鏡材は日本が 574 枚（492 枚+再蒸着交換用 82 枚）全数を製造する計画であり、これまでに 328 枚の製造を完了し、球面研削加工は 277 枚完了。 ・日本以外に研磨加工を担当する米国・インド・中国への出荷も進めている。
第一期観測装置 近赤外撮像分光装置 (IRIS) の撮像系 ^{iv}	<ul style="list-style-type: none"> ・2017 年度に基本設計審査を完了し、2018 年度より詳細設計段階に入ったところ。

望遠鏡本体構造、主鏡分割鏡、観測装置それぞれの設計において、基本設計・詳細設計・製造前といったマイルストーンで、T10 が主導し、国立天文台職員も加わったレビューを開催している。ここで、要求仕様を満たしているかを厳しく検証しながら工程を進めている。



図：左）製作された主鏡分割鏡材（右）主鏡分割鏡の研磨の役割分担。日本は最初に搭載される中心部分を担当

(2) 各国の施設等の整備状況

日本以外の参加国での製作も着実に進んでいる。米国とインドが担当する主鏡分割鏡制御システムは、試作品による実証試験も行い、光学系全体の最終設計審査に合格して製造準備段階に入っている。カナダが担当する TMT の解像性能を達成する

^{iv} IRIS は補償光学装置を利用して TMT が達成する高解像度を最大限に活かす近赤外線観測装置で、撮像系を日本が担当するほか、低次波面センサー部をカナダが、面分光系を米国がそれぞれ開発。

ために必須である補償光学装置や望遠鏡を格納する斬新な設計のドームも、最終設計審査に合格して製造準備段階にある。TMT では第三鏡も 3.5m x 2.5m の大きさがあるが、中国がこれを担当し、こちらも製造準備段階に入っている。観測装置も含め、参加国が密接に協力しながら工程に沿った製作が進められている。

国際協力で開発を分担しつつ、各部分が円滑に連携して予定する性能を発揮できるように、国立天文台は T10 と連携してインターフェース管理を行っている。また、T10 や他国チームと定常的にコミュニケーションをとりながら、プロジェクト全体の一貫性を確保している。

(3) コミュニティの活動状況

TMT による科学研究の推進に向けた日本国内コミュニティでの活動として、大学等の研究者約 100 人の協力を得た観測研究提案の検討が進められている。2011 年には、日本国内でのサイエンス検討報告書「TMT で切り拓く新しい天文学」が作成^vされている。

国際的な研究者コミュニティでの活動としては、2013 年から毎年開催されている TMT サイエンスフォーラムがあり、若手研究者を中心に日本の研究者が多数参加している。また、TMT 全体の科学諮問委員会^{vi}の下で TMT 計画に関心を持つ研究者が集まり科学戦略を議論するグループとして国際科学研究検討チーム (International Science Development Teams; ISDTs) がある。ISDTs では 9 つの分野(「基礎物理学と宇宙論」「初期宇宙、銀河形成、銀河間物質」「超巨大ブラックホール」「銀河系と近傍銀河」「恒星と星間物質」「星・惑星形成」「系外惑星」「太陽系」「時間軸科学」)でそれぞれチームを構成して進めている。日本人は 38 名(内 24 名が大学の研究者)が参加している。

(4) 若手技術者・研究者の育成状況

TMT 計画における望遠鏡や、観測装置の開発を通じて、若手技術者・研究者の育成が進んでいる。近赤外撮像分光装置 (IRIS) の光学設計で日本光学会 光設計優秀賞を受賞した国立天文台技術職員や IRIS の開発に関して、2019 年 4 月にレーザー学会の奨励賞を受賞した国立天文台助教など若手が活躍している。

大学においても、国際協力で行われる TMT の観測装置開発への参加を通じて、若手研究者・大学院生の国際共同研究や研究・教育力の向上に貢献している。

また、国際的な頭脳循環に関する取組として、海外からのインターンを 2016 年度以降 8 名受け入れている。それぞれ 3-6 ヶ月滞在して、装置開発チームに所属して研修を実施している。さらには、国際共同事業の特長を活かして、T10 が主催する若手育成の国際ワークショップが過去 3 回開催されている。日本からは計 22 人

^v 現在すばると TMT の連携をテーマにしたサイエンスブックが製作中であり、2019 年 11 月に公開を予定。

^{vi} TMT の意思決定機関である T10 評議員会への科学研究の観点からの提言を行う組織として TMT 全体の科学諮問委員会があり、これには 5 名の日本人研究者が参加し、年 4 回の会議で緊密に議論を実施。

の大学院生や若手研究者が参加している。

(5) 社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況

ハワイにおいて、天文学や望遠鏡建設への支持を得るために、地域社会と協力関係を築く取組^{vii}が進められている。具体的には、ハワイ島内の小中学校での出前授業や天文学の普及イベントにマウナケアの他の天文台とともに取り組んでいるところである。TIO は、地元からの期待の強い教育への支援のために 2014 年に基金を設立し、継続的な支援を行っている。また、国立天文台ではハワイ文化や歴史を学ぶセミナーの開催や、マウナケアの自然・文化を紹介するパンフレットの日本語版を製作・配布するといった取組を行っている。

日本国内では、全国の学校や科学館などで出張授業・講演を過去 5 年間で 256 回（2014-2018 年度）実施しており、広く自然科学への理解を深めることに貢献している。また、日本国内での報道としては、2014 年以降 115 件の新聞報道、24 件のテレビ・ラジオでの報道がある。



(6) 情勢の変化に対する対応状況

一方、TMT 計画全体としては、ハワイでの反対運動によって現地建設工事の遅れが生じており、スケジュールの遅延が発生している。

現地建設工事の遅延：マウナケア山頂は、ハワイ大学が科学研究のために管理しており、TMT 建設のためにはハワイ大学がハワイ州から許可を得る必要がある。複数の必要な手続のうち、マウナケア保全地区利用許可（CDUP）について、2013 年に承認を得ていたが、建設に反対する人々からの訴訟に対して 2015 年にハワイ州最高裁判所が出した判決により、CDUP の再承認手続が必要となった。2017 年に許可は再承認され、これに対する訴訟も起こったが、2018 年 10 月には同州最高裁において許可承認の有効性が確認され、現地建設再開に向けた法的環境が全て整った。これを受けて、TIO は 2018 年からハワイ州当局・ハワイ大学と協力し現地建設準備を進め、現地作業に必要な行政手続を完了し、2019 年 6 月にハワイ大学に対してハ

^{vii} ハワイ州で行われた世論調査によると、2015 年には TMT 建設支持が 62%、反対が 21%であったのに対し、2018 年には支持 77%、反対 15%と支持者の割合が増加している。

ワイ州による着工承認の通知を出した。このことにより、2019年7月に本格的に現地工事を再開する予定であったが、反対運動により、2019年8月末時点においても、現地建設工事は再開されていない状況である。

ハワイ現地建設工事をめぐる主な動き

※マウナケア山頂の科学保護地区は、ハワイ大学がハワイ州から借り受けて管理を行っている。
※上記手続は、ハワイ大学がハワイ州の土地・天然資源委員会（BLNR）に申請し承認を得ている。

2013年4月 ハワイ州土地・天然資源委員会（BLNR）が TMT 建設のための保護地区利用許可（CDUP）を承認。これに反対する訴訟が起こる。

2014年10月 山頂での起工式※以降、建設工事開始

2015年4月 反対運動活発化により建設工事を一時中断（300人程度のデモ）

12月 ハワイ州最高裁が保護地区利用許可（CDUP）無効の判決 ※以降、訴訟対応

2017年2月 サブリース（土地の転貸許可）に関するハワイ州最高裁への訴訟提起
※ハワイ大学が TMT 国際天文台（TIO）に土地を転貸することについて、ハワイ州土地・天然資源委員会（BLNR）が公聴会を開催せずに承認したことを問題とした訴訟

9月 ハワイ州土地・天然資源委員会（BLNR）が保護地区利用許可（CDUP）を改めて承認

10月 保護地区利用許可（CDUP）に対するハワイ州最高裁への訴訟提起

2018年8月 サブリースに関するハワイ州最高裁の判決（再審査の訴えを棄却）

10月 保護地区利用許可（CDUP）に関するハワイ州最高裁の判決
※保護地区利用許可の再承認の有効性が認められる【TMT 建設承認】

2019年6月19日 ハワイ州土地天然資源局（DLNR）より TMT 工事再開の許可が下りる

7月10日 イゲ州知事と TMT 国際天文台の会見（7月15日の週の工事再開発表）

7月17日 反対運動により、以降の工事が再開できない状況。

7月30日 イゲ州知事記者会見（緊急事態宣言の撤回、工事再開期限の延長）

国際的な競争：世界に目を転じてみると、超大型望遠鏡計画は現在3つ進行している。TMT 計画のほか、米国（カーネギー天文台等）、オーストラリア、韓国等が参

加する 8.4m の鏡を 7 枚使用し口径 24.5m に相当する GMT と、ヨーロッパ、ブラジル、チリが参加する E-ELT が進行している。これら二つの望遠鏡はチリに建設されるのに対し、TMT は北半球に位置することを予定しており、観測できる天域が異なるため、連携観測が重要になる。完成時期については、いずれも 2020 年代後半の完成を目指している。

	TMT	GMT	E-ELT
口径	30m	24.5m (8.4m x 7)	39m(中心部の 26%の鏡は Phase 2)
副鏡サイズ	3.1m	1.1m x 7	4.1m
建設地	ハワイ島マウナケア (北緯 20 度)	チリ ラスカンパナス (南緯 29 度)	チリ アルマゾネス (南緯 25 度)
標高	4012m	2500m	3064m
望遠鏡 反射回数	3 回	2 または 3 回	5 回
望遠鏡 効率	0.92	0.92-0.95 (ファイバーを使うと低下)	0.79
可変形鏡	独立装置 (将来副鏡を可変形鏡化の計画有)	望遠鏡に組み込み(副鏡が可変形鏡)	望遠鏡に組み込み (第 4 鏡)

表: TMT と GMT、E-ELT の比較

(7) 年次計画における「計画推進に当たっての留意事項等」への対応状況

年次計画においては、「計画推進に当たっての留意事項等」として、次の内容を掲げている。

「計画推進に当たっての留意事項等」

本計画の推進にあたっては、これまでの技術的蓄積を十分に活用するとともに、それぞれの観測装置が有する性能の積極的活用など、建設及び運用段階において、相互の連携を強化することが望まれる。

国立天文台は、我が国の天文学分野の連携協力体制を強化した上で、天文学のみならず地球惑星科学や物理学のほか、生命科学など広く関連する分野のコミュニティの協力を得て、十分な実施体制がとれるよう、幅広く研究者コミュニティの組織化・協力体制を構築するとともに、技術者、運営管理者のさらなる充実にも留意することが望まれる。

なお、すばる望遠鏡のプロジェクトの見直しにあたっては、ハワイ観測所として両望遠鏡の一体的な運用を図る観点から、TMT望遠鏡は高感度の望遠鏡として、すばる望遠鏡は広視野の望遠鏡として役割分担を進めていく。さらに、すばる望遠鏡について、主焦点に特化した望遠鏡とすることで運用を簡素化するとともに、諸外国との国際共同運用を進めて運営負担の軽減を図るなど、効率的な運営体制の構築が必要である。

国立天文台は、本計画を主導的な立場で推進する観点から、早期からの安定的な技術開発によりその課題解決が可能となるようにするとともに、年次計画に沿った円滑な推進体制の構築に努めることが望まれる。その上で、参加国の取組状況や計画の進捗に応じ、工程の確認や技術評価を十分に行うとともに、各国の技術状況の違いにより技術開発が計画どおりに進まないといった技術面でのリスクや将来の技術革新の可能性への対応も視野に入れ、プロジェクト管理を適切に実施し、建設計画を着実に進める必要がある。

なお、国際協力による計画は、計画実行に多くの困難や紆余曲折を経ることが避けられないところであり、国立天文台は、各国における本計画の実施状況や支援体制等について、特に、財政事情等により、参加各国において予算措置が計画どおりに進まない可能性を含め、適切に検証を行うとともに、アルマ計画の推進によって蓄積している経験も活かして、国際的な大規模プロジェクトのマネジメント力を有する運営管理者をTMT計画に参画させるとともに、世界をリードする我が国の研究者が多数参画して共同研究を行うための協力体制を強化するなど、マネジメントとサイエンスの両面から、国際協力の中でリーダーシップを発揮し続ける努力をすることが望まれる。また、国は、TMT計画における国立天文台の取組に対し、必要な支援に努める必要がある。

①すばるとTMTの連携強化について

日本は望遠鏡本体構造、全ての主鏡材の製作と175枚(全体の1/3)の分割鏡の研磨及び観測装置を担当している。日本には、野辺山45mミリ波望遠鏡に始まり、すばる、太陽観測衛星「ひので」の可視光望遠鏡、アルマなどでの30年以上にわたる望遠鏡製作の技術的蓄積がある。すばるでは、8-10m級望遠鏡で最も堅牢かつ非常に優れた像質をもたらす高精度の望遠鏡駆動技術が実装されており、アルマではリニアサーボモータにより従来の電波望遠鏡を上回る高い指向精度が実現している。これらが評価され、TMTの望遠鏡本体構造を日本が担当することになったところであり、主鏡の製作においても、すばるの超広視野主焦点カメラを実現した大型補正レンズなど、日本の光学技術が遺憾なく発揮されている。これらの技術的蓄積が、TMT計画において、日本が望遠鏡の核となる部分を担当することに直結してい

るといえる。

また、TMT の運用段階に向けて、すばると TMT の科学研究における連携を更に具体的なものとすべく検討が進められている。すばるは、8-10m 級望遠鏡において、世界唯一の超広視野の撮像・分光能力をもっていることから、すばるの広視野探査によって観測ターゲットを見つけ出し、TMT による高感度・高解像度観測でその性質を明らかにするという連携観測は、日本のユニークな強みとなることが期待される。

また、望遠鏡運用においては、20 年に及ぶすばるの共同利用運用で培われたシステムと経験を活かし、TMT の日本分観測時間とすばるの共同利用運用を一体的に実施することが計画されている。

②幅広いコミュニティでの協力について

TMT は次期地上大型望遠鏡計画として、研究者の自主的組織である光学赤外線天文連絡会（光赤天連）の支持を得て建設が進められている。日本国内での天文学コミュニティとのインターフェースとしては、国立天文台 TMT 科学諮問委員会が組織されており、光赤外線天文学分野だけでなく、幅広い分野の研究者が参加して TMT 建設進捗の状況を共有し、TMT からの科学的成果を最大化するため、運用形態や科学戦略の議論がなされている。

また、TMT が目指す科学研究は天文学にとどまらず、幅広い分野のコミュニティからの支持は本計画の推進に当たり不可欠であるという認識の下、協力体制が構築されてきた。一例として、近年発展が目覚ましいニュートリノや重力波の観測においても、すばると TMT の連携による光学赤外線観測は、それらの現象の理解のために本質的に重要であり、東京大学宇宙線研究所や東北大学、甲南大学等の研究者との共同研究の検討が進められている。

国際的な大規模プロジェクトのマネジメント力を有する運営管理者として、ハワイ観測所副所長や科学運用部門長をはじめ、すばるの運営管理経験者が TMT 計画を牽引している。また、運営管理者の更なる充実の一環として、民間企業での経験を有する職員がこれまでに 7 名採用されており、今後も拡大が予定されている。

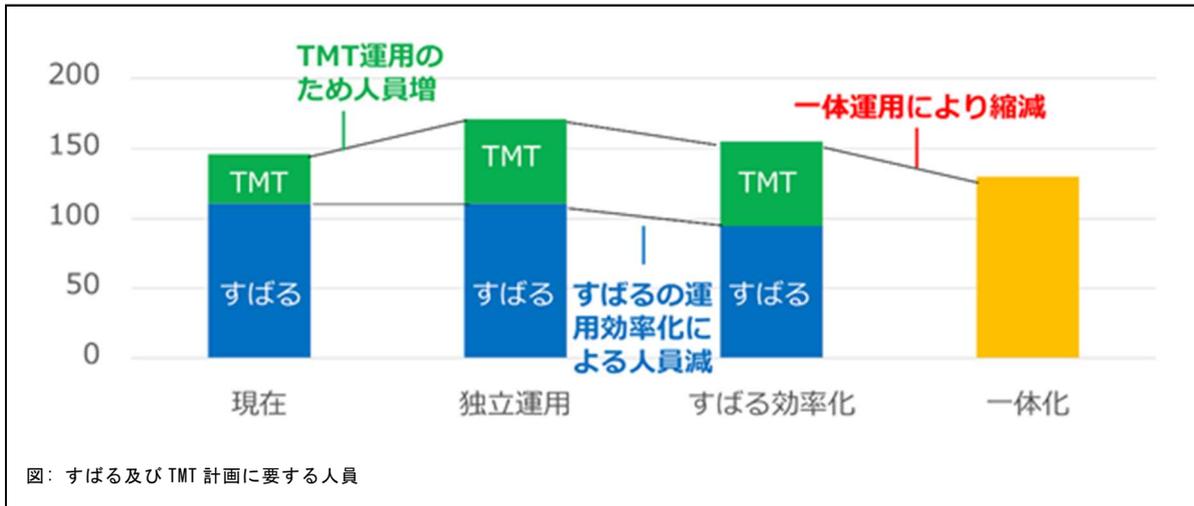
③すばると TMT の一体運用について

広視野のすばる^{viii}、高感度の TMT という役割分担が明確化されており、連携観測の検討をコミュニティ主導で進められている。

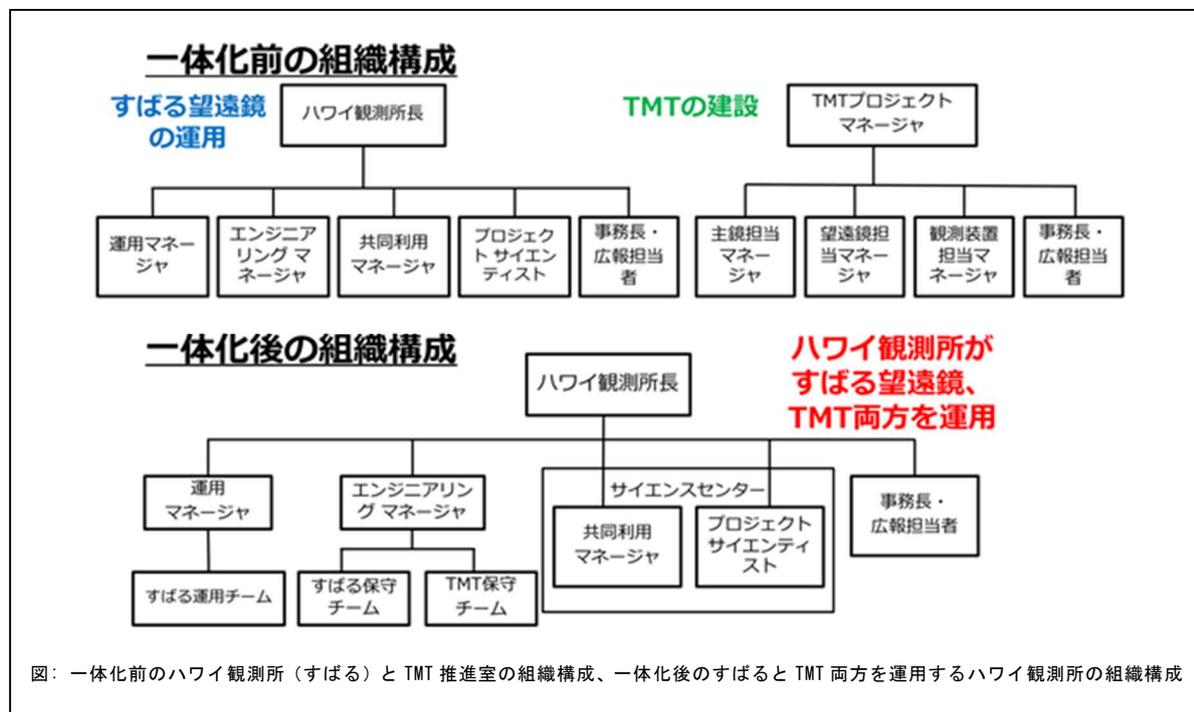
すばると TMT の一体的運用に向けては、国立天文台において、TMT 運用期まで含めた長期的な人員体制の検討が行われている。特に技術系職員については、現在すばるが抱える老朽化の問題に対処しつつ、運用の簡素化を実現するためのリソースの投資が必要であり、それを実施するための人員強化も図りつつ、今後の望遠鏡構

^{viii} すばるは、広視野観測の役割に特化し、観測装置を集約し、リモート観測を推進するなどして運用の簡素化を図っている。

造の日本国内での仮組み、ハワイでの TMT の現地組立・調整へと技術系職員がシフトしていく体制を計画している。その他、すばるの運用を簡素化することで、その運用に必要な人員を縮減すること、共同利用における観測者支援、データアーカイブ、広報、事務などあらゆる局面での効率化を図ることで、TMT 運用に必要な人員増^{ix}を吸収する。



図：すばる及び TMT 計画に要する人員



図：一体化前のハワイ観測所(すばる)と TMT 推進室の組織構成、一体化後のすばると TMT 両方を運用するハワイ観測所の組織構成

④円滑な推進体制の構築・プロジェクト管理について

^{ix} すばると TMT を独立に運用する場合、約 170 名が必要となるが見込まれるが、これらの効率化が実現すれば、約 130 名で二つの望遠鏡を運用する計画が策定されている。この計画を実現するため、2020 年度から組織の一体化を開始する予定。

国際協力での一つの望遠鏡を建設する TMT 計画では、各国の担当部分の間のインターフェースを入念に擦り合わせ、各部が十全に機能するように調整するシステムズエンジニアリングが重要である。このため、実務マネジメントの中枢を主体的に担うため、国立天文台パサデナ分室が設置されている。これにより、T10 や他のパートナーとのコミュニケーションを強化して、進捗状況の把握、十分な技術評価、技術的問題が発生した場合の迅速な対応を一層充実させ、円滑な推進体制の構築が進められている。

プロジェクト管理としては、それぞれの部位の設計・製作において、基本設計審査、詳細設計審査、製造前設計審査など、T10 主導のレビュー（国立天文台職員もレビュアーとして参加）を実施し、要求仕様を満たすことを確認しながら工程が進められている。

2015 年以降の TMT 計画全体として最大のリスクは現地建設工事の遅延である。国立天文台は、T10 によるハワイ州当局等関係者との協議や裁判への対応に国立天文台長や国立天文台 TMT プロジェクト長等が参加し、問題の早期解決に努めてきた。加えて、国立天文台の 20 年以上にわたる地元ハワイとの良好な関係で築かれた信頼関係を基盤として、ハワイの市民との対話を続け、TMT 計画への理解の輪を拡げる努力が行われている。

⑤国際協力でのリーダーシップについて

国立天文台 TMT プロジェクト長を筆頭に国立天文台パサデナ分室への職員駐在を行っていることにより、建設地の状況や各メンバーの開発状況・財政事情等について、直接に情報を得て検証を行い、必要な対応が行われている。

また、T10 評議員会には国立天文台長及びアルマ望遠鏡のプロジェクトマネージャーであった副台長が参加し、実施状況の検証及び TMT 計画の運営管理の中枢に参画するなど、今後、一層、国際協力の中でのリーダーシップを発揮するよう努力が行われている。

4. プロジェクトの進捗評価と今後の留意点

(1) プロジェクトの進捗状況を踏まえた評価

TMT 計画全体は、5 か国による国際共同事業であり、建設計画・現地での工事・完成後の運用を統括する組織として米国法人である TMT 国際天文台 (TIO) が 2014 年に設立された。また、各国の役割分担は合意書で定められており、我が国は TMT 計画の枢要部分である主鏡分割鏡の製作・加工及び望遠鏡本体構造の製作と第一期観測装置の一部製作・組立、ならびに TMT 国際天文台運営費の分担を担うことが定められている。

我が国が実施するとされている役割の内、主鏡分割鏡の製作・加工については、574 枚の製造計画のうち、328 枚の製造が完了し、球面研削加工についても 277 枚が完了している。また、望遠鏡や観測装置の開発を通じて、大型加工機の精度や機械加工・溶接技術の信頼性向上、ロボット技術やセンシング技術の向上にも寄与している。さらに、若手研究者・大学院生の育成が進んでおり、国際的な研究者コミュニティである TMT サイエンスフォーラムへの参加や国際共同研究への積極的な参画する等の成果を挙げている。加えて、すばるやアルマ望遠鏡で経験を積んだ技術者等を有効に活用するとともに、民間企業での経験を有する職員を増やすなど、内外の人材を有効に活用したプロジェクト推進体制を構築している。その他、社会や国民からの支持を得るための取組として、ハワイを含めた現地小中学校への出前授業や天文学の普及イベントへの講師派遣に積極的に取り組んでおり、日本国内では 5 年間で 256 回 (2014-2018) 実施するなど、地域社会との信頼関係や自然科学への理解を深めるための取組を継続的に進めている。

他方、TIO による TMT 計画全体としては、ハワイでの反対運動による現地建設工事の遅れに伴い、ハワイにおける施設等の整備が大きく遅延している (実施機関である国立天文台からは、建設期間終了年度が 2029 年度へと延伸 (当初予定 2021 年度) すること、また、それに伴い、日本負担として 3,200 万ドルの増加 (TMT 計画総額としては 2 億ドル増加) が見込まれる旨報告を受けている)。なお、現地建設の再開に向けて、法的には承認が下りているが、現時点においても工事再開はなされておらず、工事再開時期も明確ではないため、今後も予定通り建設が進むかどうかの見通しは不透明である。

以上を総合的に勘案すると、TIO による TMT 計画全体の中で国立天文台が担うとされていた部分の内、主鏡分割鏡の製造については順調に進捗している。一方で、TIO による TMT 計画全体については大きく遅延しており、順調に進捗しているとは言い難い。このため、我が国が担うとされている役割の内、望遠鏡本体構造の製作と第一期観測装置の一部製作・組立については進捗できない状況である。

なお、上述した通り、今後の見通しが明確と言える状況にないことから、現段階では、実施機関から変更要請があった建設期間の延長や予算増加の承認を判断できる状況とは言えない。そのため、しかるべきタイミングで、現地の状況をモニターした上で、改めて評価を実施することとする。

(2) 今後の事業の推進に当たっての留意点

以上の進捗状況を踏まえ、今後のプロジェクトの推進に当たっては、以下の点に留意が必要である。

① T10 との緊密な連携による事業の推進

TMT 計画全体は5か国による国際共同事業であり、現地での建設・運用を統括する米国法人である T10 のもと、各国の役割分担が定められている。そのため、国際協力の下で国立天文台が担うべき役割（主鏡分割鏡の製造等）の進捗を引き続き注視して精査すべきである。

また、TMT 計画全体の現地での建設運用を統括するのは米国法人の T10 であるが、T10 の意思決定を担う T10 評議員会に国立天文台長もメンバーとして参加している。そのため、例えば、国立天文台がこれまで実施してきたハワイにおける理解増進活動などを通じて獲得したノウハウや知見を T10 に積極的に提供することにより、こうした活動を T10 として実施するよう促し、ハワイにおける TMT 計画全体のプレゼンス向上と地元住民の了解を目指すことを求めるなど T10 との緊密な連携を実施することが重要である。

② 不測の事態に備えた事前検討の着手

ハワイ現地における工事の再開及び今後の展開が長期化する懸念から、場合によっては、TMT 建設の代替候補地（スペイン・ラパルマ島）等になる可能性がある。その際、TMT との将来的な一体運用を目指しているすばるの運用にも影響を与えるものであり、本計画の国際的優位性の確保に加え、代替案に決定した場合の課題について国立天文台が十分に検討しておく必要がある。TMT 計画に投じてきた国費が科学技術のために適切に活かされるよう、代替候補地等であっても有効的に活用できる研究開発部分（主鏡の製作や鏡面加工等）の精査についても併せて国立天文台は、早期に検討することが必要である。

備考（用語解説等）

OE-ELT

ヨーロッパ南天天文台（ESO）がチリのアルマゾネス山に建設中の口径 39m の光学赤外線望遠鏡。

OGMT

カーネギー天文台、アリゾナ大学などの米国の大学とオーストラリア、韓国が中心となり、チリのラスカンパナス山に建設を計画している望遠鏡。中心の 8.4 m 望遠鏡と 6 本の軸外し 8.4 m 望遠鏡を共通の架台に載せて、ビーム結合する方式。

○ISDTs（International Science Development Teams; 国際科学検討チーム）

TMT に関心をもつ研究者が集まり科学戦略を議論するグループ。9 つの分野（「基礎物理学と宇宙論」「初期宇宙、銀河形成、銀河間物質」「超巨大ブラックホール」「銀河系と近傍銀河」「恒星と星間物質」「星・惑星形成」「系外惑星」「太陽系」「時間軸科学」）でそれぞれチームを構成して進めており、各チームのコンビナーは TMT 全体の科学諮問委員会の承認を受ける。

○OTIO（TMT 国際天文台）

TMT の建設・運用を担う法人組織として、2014 年 5 月に米国内で設立、法人登記された有限責任会社（LLC）。メンバーから任命された代表によって構成される評議員会が建設・運用に関する意思決定を行う。メンバーの負担する分担金で運営し、望遠鏡構造や主鏡などの製造は TMT 国際天文台とメンバーの間で結ぶ契約の形で実施する。

○アルマ望遠鏡

日米欧の国際協力により南米チリのアタカマ高地（標高 5,000m）に建設した電波干渉計。口径 12m と 7m のアンテナ計 66 台から構成され、ミリ波・サブミリ波領域で観測を行う。従来のミリ波干渉計を圧倒的に凌ぐ角分解能と集光力で、遠方銀河の星生成活動、太陽系外惑星の形成過程、有機分子の探査などの分野で画期的な成果を挙げている。

○国立天文台 TMT 科学諮問委員会

日本国内の幅広い関連分野の研究者が TMT 計画の推進と具体的な検討に参加するための枠組みであり、国立天文台長が委嘱した日本のコミュニティの代表者からなる。台長が諮問する TMT に関する審議事項（科学戦略、装置開発戦略、共同利用の在り方等）を審議し、台長に提言を行う。

○近赤外撮像分光装置（IRIS）

TMT の第一期観測装置の一つとして設計が進んでいる観測装置。0.8 から 2.5 ミクロンの近赤外線を観測波長とし、カナダが製作する補償光学システムと組合せて、TMT の空間解像力を最大限に活かした観測を可能にする。日本、米国、カナダが共同して開発しており、日本は撮像部、米国は面分光（空間 2 次元、波長 1 次元の情報を一度の観測で得る観測モード）部、カナダは低次波面センサー部を担当する。

○重力波

一般相対性理論などの相対論的な重力理論一般に予言される重力場の波動的振動。一般相対性理論では、重力波は物質の四重極モーメント以上の高次モーメントの時間変化から放射される横波で、その伝播速度は光速に等しい。2015 年に米国の重力波観測装置 LIGO でブラックホール連星の合体に伴う重力波が初めて観測された。

○初代星（宇宙で最初に生まれた星）

宇宙の進化の中で生まれた第一世代の星のこと。宇宙論的な密度ゆらぎの成長とともに主に水素分子の放射冷却により重力収縮して形成されたと考えられる。ビッグバンで作られる水素・ヘリウム・リチウム以外の元素を全く含まない星である。その質量は太陽質量よりもはるかに大きかったと理論的には予想され、超新星爆発などを通して、その後の銀河形成期の物質進化に大きな影響を与えたと考えられるが、観測的証拠が得られていない。

○ダークエネルギー

現在の宇宙の平均エネルギー密度の約 4 分の 3 を占めていると考えられる正体不明の成分。その存在が認められるようになったのは、遠方の Ia 型超新星の観測データによる宇宙の加速膨張の発見（1998）による（2011 年ノーベル物理学賞）。加速膨張は実効的に負の重力（斥力）を及ぼすような何らかの成分が宇宙を満たしていることを示唆するが、その実体は謎であり、宇宙の観測でその性質を調べるのが当面の最重要課題である。

○太陽系外惑星（系外惑星）

太陽以外の恒星を周回する惑星。1995 年に発見が報告されて以来、急速に研究が進み、これまでに 3 千を超える惑星系候補がみついている。惑星は木星のような巨大ガス惑星と、地球のような岩石惑星に大別される。地球型の系外惑星は生命の存在可能性を探るうえで重要なターゲットであり、すばる望遠鏡などの地上望遠鏡や宇宙望遠鏡で探査が行われている。一方、生命探査のためには地球型系外惑星の直接撮像が必要となり、TMT など次世代望遠鏡の課題となっている。

○秒角

角度の単位で、1 度の 3,600 分の 1 に対応する角度。

○分割鏡

TMT などの次世代超大型望遠鏡の主鏡は、小型の鏡を複数並べ合わせることで構成されるが、その構成要素となるそれぞれの鏡のこと。または、そのように鏡を製作する手法のこと。すばる望遠鏡の主鏡は直径 8.3m（実際に観測に用いることができる有効な口径は 8.2m）の一枚鏡であるが、これを上回る大きな一枚鏡を製作することは極めて困難である。次世代超大型望遠鏡では、いずれも複数の鏡を並べ合わせて主鏡を構成する分割鏡方式が採用される。TMT 計画と E-ELT 計画では、対角線が 1.44m の六角形の分割鏡をごくわずかな隙間で並べる方式で主鏡を製作する。

○望遠鏡本体構造

主鏡をはじめとする望遠鏡の光学系を支え、天体の方向に向けて追尾するための構造。望遠鏡架台ともいう。TMT は水平方向と高度角方向に駆動する、経緯台式とよばれる方式の望遠鏡である。望遠鏡を覆うドーム構造とは独立の基礎のうえに置かれる。

○補償光学

地球大気ゆらぎによる光波面の乱れをリアルタイムで測定して、波面補正素子で矯正することにより、望遠鏡の回折限界の空間解像力を実現するシステム。TMT や他の超大型望遠鏡では、回折限界は地球大気ゆらぎの影響を受けた天体像よりもはるかに小さい空間スケールになるので、望遠鏡の解像力や感度は補償光学の性能に大きく依存する。

○保全地区利用許可（CDUP）

マウナケア山頂域はハワイ州の保全地区とされ、ハワイ大学が管理を委託されているが、望遠鏡建設を行うにはハワイ州による利用許可が必要とされる。TMT 建設のための保全地区利用許可申請は、ハワイ大学ヒロ校からハワイ州土地・天然資源委員会（BLNR）に提出され、承認を受ける。

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 委員等名簿

【学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会委員】

(臨時委員)

小林良彰	慶應義塾大学法学部教授、社会科学データ・アーカイブセンター長
竹山春子	早稲田大学理工学術院教授
松岡彩子	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所准教授
山本智	東京大学理学系研究科教授

(専門委員)

岡部寿男	京都大学学術情報メディアセンター教授
城石俊彦	理化学研究所バイオリソース研究センター・センター長
鈴木裕子	鈴木裕子公認会計士事務所長
田村裕和	東北大学大学院理学研究科教授
東嶋和子	科学ジャーナリスト
中野貴志	大阪大学核物理研究センター・センター長
八田英二	学校法人同志社総長・理事長
原田尚美	海洋研究開発機構地球表層システム研究センター・センター長
樋口知之	中央大学理工学部経営システム工学科教授
吉田善章	東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻教授

【アドバイザー】

井上一	JAXA 宇宙科学研究所名誉教授
岡村定矩	東京大学エグゼクティブ・マネジメント・プログラム（東大EMP）チェアマン補佐
永原裕子	日本学術振興会学術システム研究センター副所長

(敬称略、五十音順)