

大型研究計画に関する評価について(報告)

「30m光赤外線望遠鏡(TMT)計画」

平成24年9月24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	1
「30m光赤外線望遠鏡（TMT）計画」の推進について	
1. 計画の概要	2
(1) 概要	
(2) 内容	
(3) 実施体制	
(4) 日本国内及び国外における検討経緯	
(5) 国際的な動向	
(6) 年次計画	
(7) 予算規模	
2. 計画の評価	9
(1) 研究者コミュニティの合意	
(2) 計画の実施主体	
(3) 共同利用体制	
(4) 計画の妥当性	
(5) 緊急性	
(6) 戦略性	
(7) 社会や国民の理解	
3. まとめ	13
(1) 総合評価	
(2) 計画推進に当たっての留意点	
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	18

はじめに

文部科学省においては、学術研究の大規模プロジェクトへの安定的・継続的な支援を図るべく、平成 24 年度、新たに「大規模学術フロンティア促進事業」¹を創設した。

この事業は、世界が注目する大規模プロジェクトについて、「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』²」等に基づき、社会や国民の幅広い理解・支持を得つつ、国際的な競争・協力を迅速かつ適切に対応できるように支援し、戦略的・計画的な推進を図ることを目的とし、現在整備中又は推進中の大規模プロジェクトの着実な実施とともに、新規の大規模プロジェクトを推進することとしている。

本作業部会においては、新規の大規模プロジェクトの立ち上げに向けて、「ロードマップ」を踏まえ、早急に着手すべきと考えられるプロジェクトについて審議を行い、「30m光赤外線望遠鏡（TMT）計画」について事前評価を行った。

評価に当たっては、関係分野の専門家にアドバイザーとして加わっていただき、ヒアリング及び審議を実施した。また、評価の観点として、①研究者コミュニティの合意、②計画の実施主体、③共同利用体制、④計画の妥当性、⑤緊急性、⑥戦略性、⑦社会や国民の理解を設定し、観点別の評価を踏まえて総合的な評価結果をとりまとめた。

なお、本報告は、「学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会」において、平成 23 年 11 月に一度とりまとめたが、その後の進捗状況を踏まえ、本作業部会において再度審議を行い、平成 24 年 9 月 24 日に改めてとりまとめたものである。

¹ 本作業部会が、平成 24 年 5 月 28 日にとりまとめた「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想 ロードマップの改訂—ロードマップ 2012—」において、「・・・国は、ロードマップ等を基本に、長期的視点に立ち、大型プロジェクトの着実な推進に向けて、安定的・継続的な予算の確保に最大限の努力をすることが必要」、「平成 24 年度に『大規模学術フロンティア促進事業』が創設され、今後の大型プロジェクトの推進は、ロードマップ等に基づくとの方針が明確に打ち出されている。もとより、大型プロジェクトに関する予算は、当該事業だけに限定されるものではなく、例えば科学研究費補助金や独立行政法人運営費交付金等によることが期待される所であり、国として様々な手法を駆使しながら、戦略的・計画的に大型プロジェクトを推進していくことが求められる」としている。

² 本作業部会は、平成 22 年 10 月、日本学術会議が策定したマスタープランを踏まえ、学術研究の大型プロジェクト推進に当たっての優先度を明らかにする観点から、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」を策定し、公表した。その後、日本学術会議がマスタープランの小改訂を行ったことを受け、本作業部会は新たに盛り込まれた 15 計画を中心に検討を進め、本作業部会としての評価結果を盛り込むこと等により、平成 24 年 5 月、「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想 ロードマップの改訂—ロードマップ 2012—」をとりまとめた。

URL http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1321812.htm

「30m光赤外線望遠鏡（TMT）計画」の推進について

1. 計画の概要

(1) 概要

本計画は、ハワイ島マウナケア山頂域に、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の光赤外線望遠鏡（TMT (Thirty Meter Telescope)）を建設し（図1）、第二の地球探査と生命の確認、ダークエネルギー^{※1}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^{※2}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。



図1：TMT完成予想図

(2) 内容

2000年から観測を開始したハワイ観測所のすばる望遠鏡(口径8m)は、遠宇宙の銀河、系外惑星系^{※3}、超新星の観測などで成果を挙げてきた。現在、全世界で10台ほどの8~10m級の望遠鏡が稼働中であるが、1990年代からの観測天文学の急激な発展を礎として、2020年代の天文学フロンティアを担う30m級望遠鏡構想が、日米欧で2000年代前半から本格的に検討されてきた。

日本の光赤外線天文学コミュニティと理論天文学コミュニティは、次世代超大型望遠鏡で狙うサイエンスについて組織的な検討を行い、「TMTで切り拓く新しい天文学」を2011年2月に発表した。TMTが取り組む3つの主要テーマは、「第二の地球の探査と生命の確認」、「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」である。

①第二の地球探査と生命の確認

惑星の公転運動による中心星^{※4}の揺れを検出する視線速度法^{※5}により、最初の系外惑星が1995年に発見され、以後数多くの系外惑星の存在が確認された。地球からみて

惑星がちょうど母星の前面を通過するときに一時的に母星が暗くなる効果を調べるトランジット法^{※6}での発見も近年増加し、系外惑星の数は 3000 個を超えるほどになった。発見された系外惑星は多様であり、惑星系形成理論に新たな展開が始まっている。生命を宿す惑星は母星からの距離が適切で、水が液体の状態で存在する「ハビタブルゾーン^{※7}」にあると期待される。岩石質の惑星も、その発見/検証が具体化しつつあるが、ハビタブルゾーンにあって生命を宿す可能性のある岩石惑星である「第二の地球」の発見は、これからの課題である。TMTでは、直接撮像法によって「第二の地球」を発見し、その惑星表面の性質を調べることを目指す。また、「第二の地球」の中で、星の表面の前を通過するトランジットを起こす惑星の大気スペクトル^{※8}を分光解析^{※9}することで、生命の兆候の有無について解明することも大きな目的である(図2)。



図2：第二の地球の大気分析から生命の兆候の有無に迫る。

②ダークエネルギーの性質の解明

1998年に絶対光度^{※10}が一定と考えられるIa型超新星^{※11}の多数の観測結果から、宇宙膨張が加速していることが発見された。2003年には宇宙背景放射観測衛星WMAP^{※12}の観測データの解析からも同じ結論が導かれた。宇宙のエネルギー密度の約74%を占めるダークエネルギー(図3)の正体解明には、天文学において宇宙膨張の歴史を直接測定することにより、その性質に迫ることが可能と考えられている。TMTでは、波長分解能の高い分光器を製作して、多数のクェーサースペクトル^{※13}上の視線速度が、宇宙膨張に伴い10年間でどのように増加したかを測定することで、宇宙の膨張率を直接測定する。

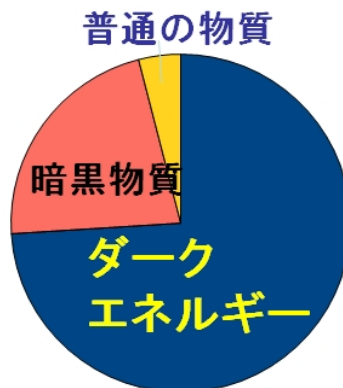


図3：ダークエネルギーに迫る。

③宇宙で最初に誕生した星の検出

すばる望遠鏡は、124 億光年から 129 億光年彼方(宇宙誕生から 8～13 億年)の輝線銀河^{※14}を多数発見し、その個数密度の年代変化に特徴的な兆候を発見した。ビッグバンから 38 万年後に中性水素原子が物質の主成分となった宇宙は、ビッグバンの約 2 億年後から生まれ始めた初代星(一番星)の紫外線などでやがて再び電離したと考えられるが、その時期がビッグバン後約 8 億年前後であることがわかり始めた。TMT はすばる望遠鏡の探査限界を越え、ビッグバン後約 2 億年から始まった初代銀河や初代星を直接観測し、銀河形成史に迫る。

上記①から③の観測的研究を遂行するために、TMT 本体と観測装置の概念設計が進められている。すばる望遠鏡は、直径 8 m の単一主鏡を持つ高性能な望遠鏡であるが、次世代の 30 m 級望遠鏡の主鏡は、単一鏡での実現は不可能であり、TMT では、直径 1.5 m の六角形の要素鏡 492 枚をほとんど隙間無く敷き詰めて、有効口径 30 m の主鏡に仕立てる。主鏡の口径に対して焦点距離を前例の無いほど短くして、望遠鏡をコンパクトに製作し、ドームの大きさも必要最小限にすることで建設コストを削減する(図 4)。観測装置は、望遠鏡の両側のナスミス焦点台^{※15}に最大約 10 台まで配置することができ、第 3 鏡の角度を調節して天体からの光の向きを変えることで観測装置を簡単に切り替えられるようにする。補償光学(図 5)を最大限活用することで TMT の解像度^{※16}は近赤外線で 0.01 秒角に達し、ハッブル宇宙望遠鏡^{※17}の約 13 倍、すばる望遠鏡の 3.7 倍の解像度を実現する。集光力の鍵となる TMT の主鏡面積は、ハッブル宇宙望遠鏡の約 160 倍、すばる望遠鏡の約 13 倍あり、TMT の感度^{※18}は宇宙と地上の違いを考慮してもハッブル宇宙望遠鏡の約 40 倍、すばる望遠鏡の約 13 倍となる。これらの優れた結像性能を活かした様々な観測装置が提案されているが、第一世代としては 3 台の観測装置の製作を優先することを決定している。

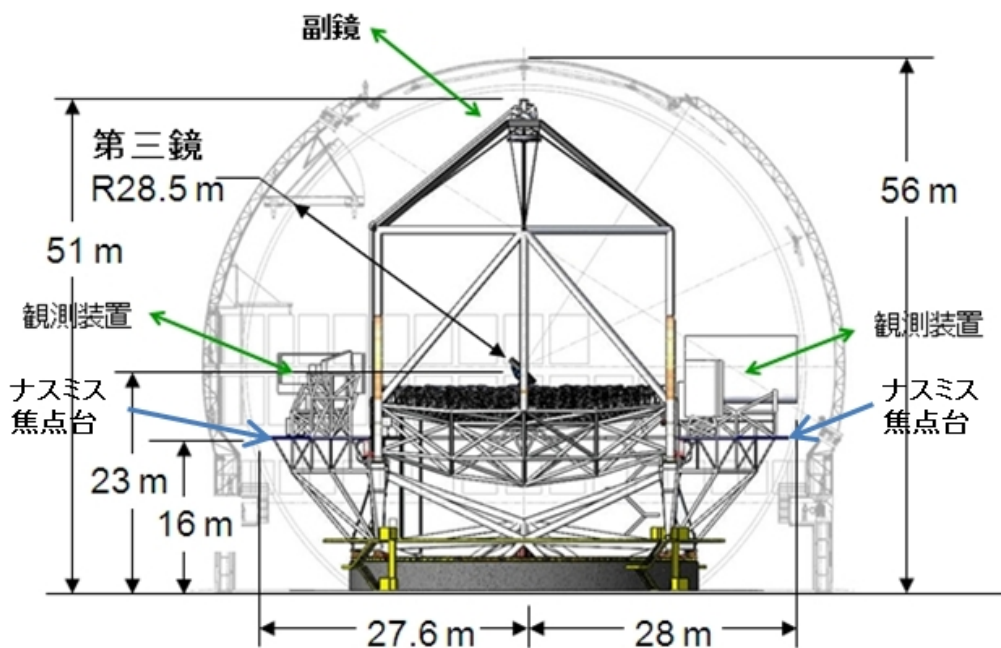


図 4 : 望遠鏡とドームの概念

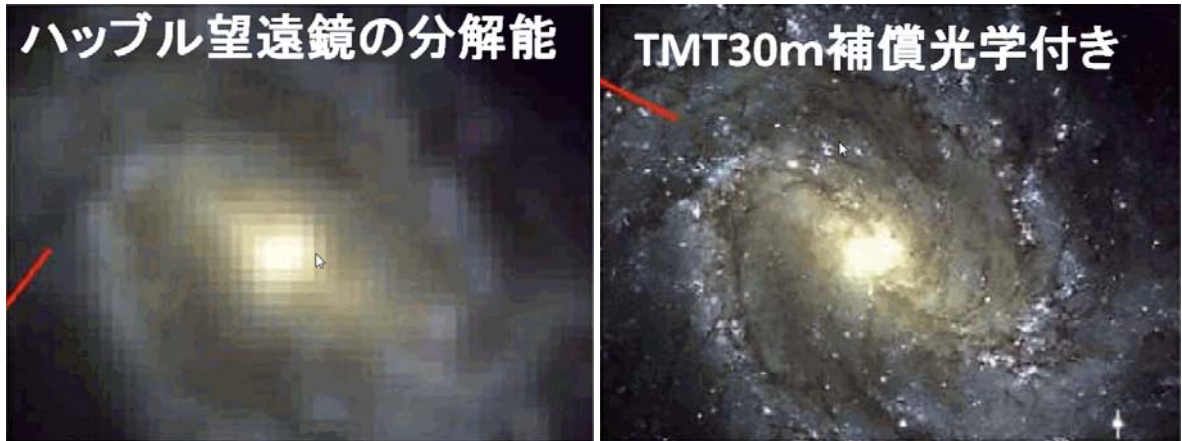


図5：補償光学の威力

工程としては、2011-2013年は建設参加パートナーの役割分担確定、予算要求、望遠鏡の運用方針策定、鏡の試作などの準備期間とし、2014-2021年の8年計画での建設を目指す。なお、2011年にハワイ現地での建設許可は取得済みである。

(3) 実施体制

TMT計画に参加するパートナーの代表は、TMT天文台の最高意思決定機関となるTMT天文台評議会を構成する。現時点では、日本は国立天文台、米国はカリフォルニア大学とカリフォルニア工科大学、カナダは天文学大学連合（ACURA）、中国は国家天文台、インドは科学技術省が窓口となる。これらのパートナー間で、各パートナーの分担内容とその範囲(図6)、権利と責任、具体的なプロジェクト推進体制(図7)、重要事項の決定を行うTMT天文台評議会の具体的な構成、完成後の望遠鏡時間の配分・運用方針などについての合意形成に向けた協議を行っている。

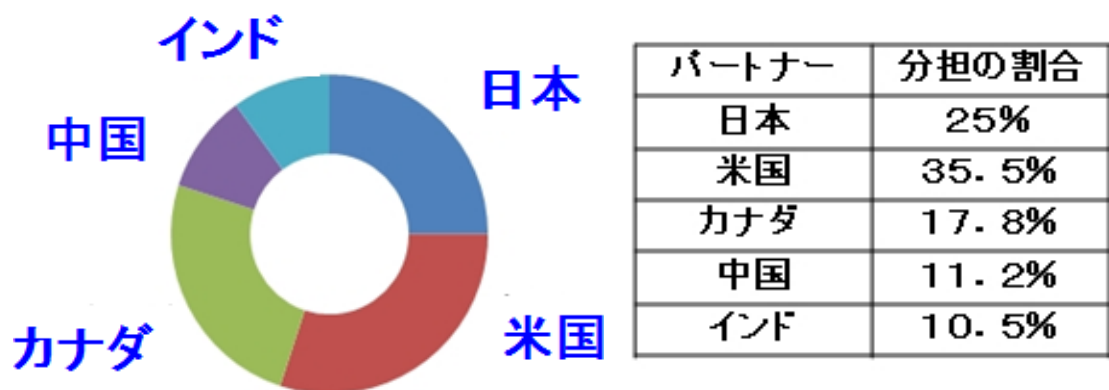


図6：パートナーの分担の割合（平成24年4月現在）

TMTプロジェクト推進体制

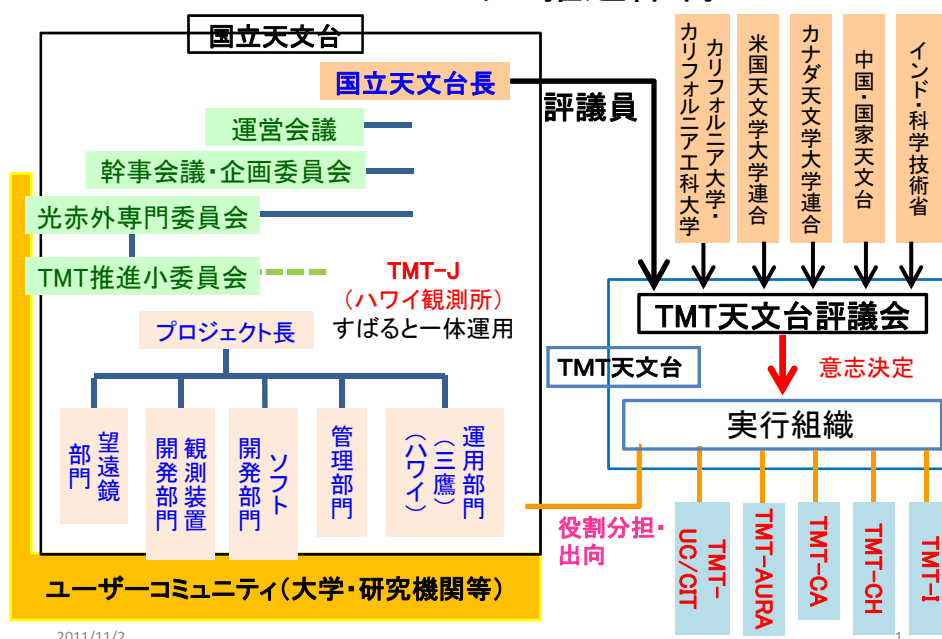


図7：TMTプロジェクト推進体制

(4) 日本国内及び国外における検討経緯

国立天文台は、1991年から9年計画ですばる望遠鏡を建設した。8台の観測装置を含めた全体システムが軌道に乗った2002年から、次世代超大型望遠鏡として口径30mのJELT (Japan Extremely Large Telescope) 構想の検討を行った。

一方、日本国内の光赤外線天文学コミュニティ (光学赤外線天文連絡会) と理論天文学コミュニティは、2005年3月に日本の光赤外線天文学コミュニティの将来計画「2010年代の光赤外天文学—将来計画検討報告書—」をとりまとめた。そこでは「可視光・赤外線地上観測は、すばる望遠鏡の成果をさらに発展させ、すばる望遠鏡を軸に広がった観測的研究者層・装置開発者層を有効に活かすため、次世代30m級望遠鏡計画の具体化を進めるべきである。」とされ、2006年11月には、光学赤外線天文連絡会から、建設推進要望書が国立天文台長に寄せられた。このような状況下、国立天文台においては、JELTとして新機軸を盛り込んだ構想を練ったが、建設予算が1000億円を越す見込みとなったため、2007年2月にハワイ島での国際協力での早期実現を目指す方針を固めた。

国外においては、次世代の大型望遠鏡計画として、カリフォルニア大学の30m CELT (California Extremely Large Telescope) 構想、米国光学国立天文台の30m GSMT (Giant Segmented Mirror Telescope) 構想、カナダ天文学大学連合のVLOT (Very Large Optical Telescope) 構想の3つの構想があったが、三者間の覚書により、2003年6月にTMT計画として統合された。2003年10月には、カリフォルニア大学及びカリフォルニア工科大学により米国で登録されたCELT開発公社が設立され、2007年3月に現在のTMT天文台に改称され、TMT計画の実現に向け、同天文台を中心にハワイかチリでの建設を目指して、活動を展開していた。

そのような状況において、2008年3月には外部委員を含む国立天文台の光赤外専門委員会は国立天文台長に次世代30m級望遠鏡計画推進を勧告するなど、日本国内における次世代30m級望遠鏡計画推進にむけての気運が高まる中、同年11月に日本の光赤外線コミュニティは、ハワイでの建設を条件として、TMT計画に参加する意向を表明した。2009年にはTMT天文台は日本の意向を尊重してハワイでの建設を決断し、建設許可手続きを推進することとなった。2010年には新たに中国とインドがTMT計画への参加意向を表明し、2011年にはハワイでの建設許可を得るなど、TMT計画は5カ国事業として、TMT天文台を中心に、ムーア財団から建設準備期間の運営資金の寄付を受けて推進体制を構築し、計画の具体化と建設予算の確保に向けて協力して活動している。そして、2011年10月には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、国立天文台及び中国国家天文台の間でTMT天文台参加意向表明書が交わされ、国際協力にもとづく実行組織の設立に向けた準備活動の正式な枠組みとしてTMT協力評議会が発足した。インドについては、2012年4月に科学技術省次官からNSF長官に、NSFの参加を前提に、参加の意向を表明する旨の書簡を送付している。

国内においては、TMT計画への参加表明以後、計画の推進に向けて動きが高まっている。2010年3月には、日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会がとりまとめた長期計画において「日本の天文学・宇宙物理学コミュニティが一丸となって早急に実現すべき特に重要度の高い大型計画」と位置付けられ、2010年10月には、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が2010年10月27日にとりまとめた「ロードマップ」においても、「基本的な要件が満たされており、一定の優先度が認められる計画」としてTMT計画はaa評価という高い評価を得ている。また、2011年2月には、光赤外線天文学コミュニティと理論天文学コミュニティがTMT計画の学術研究上の目的を明確にまとめた報告書「TMTで切り拓く新しい天文学」を完成させている。

さらに、平成24年度予算の「超大型望遠鏡建設の革新技術の実証（2億円）」において、準備段階の技術実証を着実に進めており、具体的には、望遠鏡本体の構造設計の検討や、主鏡を構成するセグメント鏡の試作及び量産工程の開発を行っている。

（5）国際的な動向

次世代超大型望遠鏡構想については、2000年代に世界中で7つほどの構想が検討されてきたが、2011年時点で、TMT計画、GMT（Giant Magellan Telescope）計画、E-ELT計画（European-Extremely Large Telescope）の3つの計画に収束している。この中でも日本の光赤外線天文学コミュニティが最も設計・製作の検討が進んでおり、実現可能性が高いとみなされているのが、ハワイで北の宇宙観測を目指すTMT計画である。GMT計画はカーネギー天文台・アリゾナ大学ほかの連合チームが検討を進めてきたもので、8m鏡を合計7枚製作してそれらを単一の架台に載せるといった構想である。建設地はチリのラスカンパナス天文台を想定しており、有効直径は22mの望遠鏡となる。

全米科学財団NSF（National Science Foundation）は、TMT計画とGMT計画

の両計画を支援する財政的ゆとりは無いため、2011年12月に両計画に対し提案書招請を行い、2012年7月末までにTMT計画とGMT計画との比較評価を行うとしていたが、提出期限までにGMT計画の提案書は提出されなかった。これらを踏まえ、近日中に国立科学評議会（NSB）が評価結果を公表する予定となっている。

欧州を中心とする15カ国からなる国際天文台である欧州南天天文台ESO（European Southern Observatory）におけるE-ELT計画は、TMT同様の分割主鏡方式で主鏡直径39mの次世代超大型望遠鏡計画を検討している。光学系はユニークな5面（うち3面は非球面）反射系で、補償光学機能が望遠鏡本体に組み込まれた野心的な設計で、建設には時間がかかる見込みである。なお、2012年6月、ESOは、建設総額の90%が確保できる見込みが立つまでは本格建設には入らないことを前提として、道路などの準備建設の開始を承認している。

日本の光赤外線天文学コミュニティは、（1）ハワイでの建設によるすばる望遠鏡の広視野サーベイ機能との連携、（2）最初の実現が可能な次世代望遠鏡への参加、の二つの観点からTMT計画に参加する戦略を立てた。2014年から建設を開始し、2020年代前半に主要テーマについての観測を世界に先駆けて進めることを期している。

（6）年次計画（工程表 2012年7月現在）

年度 (西暦)	平成24 2012	平成25 2013	平成26 2014	平成27 2015	平成28 2016	平成29 2017	平成30 2018	平成31 2019	平成32 2020	平成33 2021
山頂工事	地質調査・	基本検討	道路・地盤							
ドーム	ドーム	基本設計		下部構造	上部構造	ドーム仕上				
望遠鏡構造	基本設計	基礎開発	詳細設計	製造				据付・調整		
主鏡 鏡材 研磨 調整	性能検証・ 研磨	量産試作 試作		初期量産	量産	本格量産		搭載・調整		
副鏡・第3鏡	基本設計	基礎開発	詳細設計		製作			据付・調整		
観測装置	基本設計・基礎開発	詳細設計		製作				組立・調整		
補償光学	詳細設計			製作				組立・調整		

※二重線は日本が担当

（7）予算規模

建設予算総額 1500億円（日本の分担規模：375億円、25%程度、2014—2021年度）

2. 計画の評価

(1) 研究者コミュニティの合意

TMT計画について、日本の光赤外線天文学コミュニティ（光学赤外線天文連絡会）の将来計画「2010年代の光赤外天文学—将来計画検討報告書—」において「可視光・赤外線地上観測は、すばる望遠鏡の成果をさらに発展させ、すばる望遠鏡を軸に拡がった観測的研究者層・装置開発者層を有効に活かすため、次世代30m級望遠鏡計画の具体化を進めるべきである。」とされている。また、日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会がとりまとめた長期計画において「日本の天文学・宇宙物理学コミュニティが一丸となって早急に実現すべき特に重要度の高い大型計画」とされている。

さらに、TMT計画に参加を表明している米国、カナダ等の研究機関の代表者で構成されるTMT天文台評議会の議長と国立天文台長との間で本計画の推進に関する覚書が交わされている。

以上から、本計画に着手するに当たっての研究者コミュニティの合意は国内外を通じて十分に得られていると判断される。

(2) 計画の実施主体

TMT計画の実現には、巨額の費用がかかることから、国際協力による実施体制を構築することが不可欠であり、本計画は、日本、米国、カナダ、中国及びインドの5カ国の国際協力科学事業として推進することが予定されている。

TMT計画については、カリフォルニア大学及びカリフォルニア工科大学の出資により、2003年に設立されたCELT開発公社を2007年に改称したTMT天文台において、ムーア財団からの寄付を受け、本計画の推進体制の構築が進められている。日本は、2008年に国立天文台が、TMT天文台の最高意思決定機関であるTMT天文台評議会との間で覚書を結び、協力機関との位置付けで、計画の具体化に向けて活動してきた。2011年10月には、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に加えて、中国国家天文台が新たな参加意向表明書に署名し、TMT計画協力評議会が発足している。なお、インドについては、2012年4月に科学技術省次官からNSF長官に、NSFの参加表明を前提に、参加の意向を表明する旨の書簡を送付している。

現在、2014年からの建設を目指して、日本、米国、カナダ、中国及びインドにおいて技術実証が継続的に実施されているほか、参加機関の役割分担、計画の推進組織体制、望遠鏡の運用方針など、参加機関において協議が行われており、各国政府の支援により、国際協力による実施体制が構築されると判断される。

本計画の建設予算については、参加国において分担分の協議が行われているところである。日本は約25%、米国は約35.5%、カナダは約17.8%、中国は約11.2%、及びインドは約10.5%の予算を分担する構想である。このうち、米国については、分担分の約4割を寄付等により確保しているほか、NSFがTMT計画から提出された計画書を評価し、支援を行う計画を決定することとなっている。また、カナダ、中国及びインドは

NSFの参画を前提として分担分の一部を政府予算として要求を行う予定である。

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通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。

(3) 共同利用体制

国立天文台は、1988年の設置から、大学共同利用機関として共同利用・共同研究、国際協力科学事業などを行う、天文学分野における中核的な研究拠点としての活動を行っている。

特に、日本国内9つの観測施設による国内の共同利用・共同研究、ハワイ観測所のすばる望遠鏡や、2011年9月に初の科学観測となる「初期科学運用」を開始したチリ・アタカマ高地に建設中のアルマ計画による国際協力科学事業を計画的に実施するなど、十分な実績を有しており、TMT計画に必要な国際的な共同利用・共同研究体制が構築されると判断される。

一方、本計画が実施されれば、TMT計画、アルマ計画という多数の研究者、技術者等の参画を必要とする国際的な大型プロジェクトが同時に実施されることとなり、実施体制として十分な人員の確保が課題となるが、ハワイ観測所として、すばる望遠鏡のプロジェクトの見直しのほか、アルマ望遠鏡の建設やソフトウェア開発に携わった技術者や国際的なプロジェクトの経験のある研究者などの人員の配置転換などにより、こうした課題は解決できると考えられる。

また、国立天文台は、現在、地球惑星科学分野のコミュニティと系外惑星の探査に向け観測装置の開発等を共同で進めるとともに、物理学分野のコミュニティとダークマター、ダークエネルギーの解明に向けた共同研究を進め、生命科学分野のコミュニティと生命発生を宇宙的視点で考えるアストロバイオロジーの展開に向けたネットワークを構築するなど、広く関連する分野のコミュニティの協力を得て連携を強化しつつある。今後、我が国の天文学分野の連携協力体制を強固にした上で、関連する分野のコミュニティの組織化・協力体制を構築するとともに、これらコミュニティの力をどのように配分し、複数の計画を成功させるかについて、リーダーシップを発揮して取り組んでいくことが望まれる。

(4) 計画の妥当性

本計画は、現在世界で稼働している約 10 基の口径 8～10m級の地上望遠鏡に対し、30 mの口径を持つ大口径の地上望遠鏡を人類史上初めて建設し、解像度、集光力、感度を飛躍的に向上させることを目指すものであり、地上望遠鏡の大型化に伴い高度な技術が求められる。

国立天文台は、TMTと同じ光赤外線望遠鏡であるすばる望遠鏡建設の際に望遠鏡製作、主鏡材の製作・研磨等の技術を国際的に高く評価され、TMT建設に必要とされる技術を蓄積している。また、これらの計画の実施を通じ、研究者、技術者などの人的資源も蓄積されており、5カ国の国際協力科学事業として、本計画の実現は可能と判断される。なお、TMTの完成に向けては、すばる望遠鏡により培われてきた技術が蓄積されているものの、技術的に克服すべき課題もあり、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。

本計画における費用負担については、国際協力により実施する計画において、日本が計画段階から主導的役割を担うことや、日本が優位性を持つ技術の最大限の活用のほか、運用段階において参加国間で分割される観測時間の確保等を考慮すれば、国立天文台の分担分として約 25%を予定していることは、日本の分担分が約 25%であったアルマ計画と比較しても、概ね妥当なものと判断される。

一方で、多額の国費を投入して建設・運用を行うという性質に鑑み、すばる望遠鏡建設及びその後の高度化における技術的な経験、ノウハウを適切に反映しながら、我が国が担当する望遠鏡本体の建設や、主鏡を構成するセグメント鏡の量産などに向けて、一層の経費効率化に向けた取組を行うことを期待する。

(5) 緊急性

天文学・宇宙物理学の分野においては、約 10 年間にわたる 8～10m級の地上望遠鏡の運用により飛躍的な進歩・発見がなされてきたが、これらの望遠鏡では解明できない「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」といったテーマに挑むTMT計画は、科学の最先端を切り開き、知のフロンティアを大きく前進させることになる。各国が次世代の超大型望遠鏡の建設・運用による研究成果を競う中、速やかに本計画を推進する必要がある。

現在、TMT計画においては、2014年からの建設を目指して、日本、米国、カナダ、中国及びインドにおいて技術実証が継続的に実施されているほか、参加機関の役割分担、計画の推進組織体制、望遠鏡の運用方針など参加機関において協議が行われている。役割分担の最終合意は2013年度中に行われる予定であり、我が国が、技術的に優れている望遠鏡の本体構造の製作や大量に必要となる高精度な主鏡の生産を担うために、望遠鏡本体の構造設計の検討や、主鏡を構成するセグメント鏡の試作及び量産工程の開発などについて、2012年度に技術実証を開始したところである。2014年度における建設開始に先立って、2013年度は建設開始に不可欠な望遠鏡本体の構造設計の検討等を確実に実施

する必要がある。我が国のTMT計画への参加が遅れることは、アルマ計画に計画当初から参加することができず、対等な協力関係を確保するために多大な苦勞をしたとの経験から、当該分野における学術研究の推進に大きな支障が生じることが予想され、国立天文台は、我が国の研究者がこれまでの実績の上に主導的な立場で活動できる体制を整える必要がある。

国立天文台が、政府の支援を受けて、技術実証を確実に実施していくことにより、本計画において我が国の研究者が主導的な立場で活動できるとともに、各国政府における検討を加速させ、建設開始に向けて各国の準備が整うことが期待できる。以上から、本計画の緊急性は高く、2012年度から実施している技術実証を踏まえ、着手することは妥当であると判断される。

(6) 戦略性

本計画は、我が国の天文学分野の飛躍的推進に資するばかりでなく、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にも大きな波及効果をもたらすものである。

また、すばる望遠鏡等により、124億光年から129億光年彼方(宇宙誕生から8~13億年)の輝線銀河を多数発見し、その個数密度の年代変化に特徴的な兆候を発見したことや、100億光年以上遠方にある超新星を発見したことなど、天文学分野をリードする研究成果を挙げてきた我が国の研究者が、各国が次世代の超大型望遠鏡の運用による研究成果を競う時代において、引き続き第一線で学術研究を展開していくために必要不可欠な計画である。

TMT計画の実現には、国際協力による実施体制を構築することが不可欠であり、現在当該分野において提案されている次世代超大型望遠鏡計画の中で、国立天文台が最も実現性が高いと判断した計画について、計画の立案段階から主体的に進めようとすることは評価できる。

国立天文台は、すばる望遠鏡の建設・運用を通じて、当該分野における先導的な研究成果を挙げるとともに、TMTにおいて必要とされる各種の基幹技術に関しても、企業とも連携しながら、広視野機能に関する卓越した技術、超低膨張セラミックガラス、高精度な非球面鏡、高精度望遠鏡構造など多くの技術開発や経験を蓄積している。これらの日本の特長を活かし本計画に参加することで、今後の次世代超大型望遠鏡計画を国際的にリードし、本計画による新たな学術研究の成果を通じて、日本のプレゼンスを国際的に示すことが期待できる。

また、高分解機能を有するTMTは、広視野サーベイ観測に優れたすばる望遠鏡との連携に十分配慮した運用を計画しており、ダークエネルギーの探求などで世界をリードする成果が期待できる。さらに、すばる望遠鏡の超高感度CCDカメラの技術が医療用X線カメラに応用されたり、口径8mの主鏡を高精度で支える技術により、重さの計量技術制度が飛躍的に向上し、薬剤の精密な測定に応用されるなどしており、TMT計画において開発される技術についても、我が国の産業への波及効果が期待できる。

(7) 社会や国民の理解

本計画で挑む「第二の地球探査と生命の確認」、「宇宙で最初に誕生した星の検出」といったテーマは、天文学の本質を追究する重要テーマである。

また、日本の天文学は、124 億光年から 129 億光年彼方(宇宙誕生から 8～13 億年)の輝線銀河を多数発見し、その個数密度の年代変化に特徴的な兆候を発見したことや、100 億光年以上遠方にある超新星を発見したことなど、大型の地上望遠鏡を用いて、遠宇宙の銀河、太陽系外惑星系、超新星の観測等で成果をあげてきた。

大型望遠鏡の解像度、集光力、感度を飛躍的に向上させるには、高度な技術が求められるが、国立天文台は、すばる望遠鏡の建設・運用を通じて、広視野機能に関する卓越した技術、超低膨張セラミックガラス、高精度な非球面鏡、高精度望遠鏡構造など、多くの技術や経験を蓄積してきている。

こうした実績を基に取り組む重要テーマは学術的な価値はもちろん、巨大望遠鏡を用いた観測では精緻かつ美しい画像が得られることから、TMT計画は、これまでのすばる望遠鏡計画と同様に、幅広い国民の知的好奇心を刺激し、国民の理解を得られると判断される。

一方、国の財政が厳しさを増す状況にある中で、本計画の推進には、多額の国費を要することから、すばる望遠鏡計画と同様に、日本の装置によって新たな発見をしたという喜びを国民と一体感を持って分かち合えるようにしていくことが重要である。現在、TMT計画のための広報担当者を置いて、全国規模での講演会を実施したり、マスメディア等を通じた広報活動を展開するなどの取組が既に開始されている。すばる望遠鏡と同様の知名度がTMT計画について速やかに国民に定着するよう、これまで以上に幅広く国民の理解と支持を得る取組を積極的に推進することが望まれる。

3. まとめ

(1) 総合評価

日本のほか、米国、カナダ、中国、インドの5カ国の国際協力科学事業として計画されているTMT計画は、現在の8～10m級の地上望遠鏡では解明できない「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」といったテーマに挑むものであり、科学の最先端を切り開き、知のフロンティアを大きく前進させることになるものである。

本計画は、我が国の天文学分野の飛躍的推進に資するばかりでなく、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にも大きな波及効果をもたらすものである。

また、すばる望遠鏡等により天文学分野をリードする研究成果を挙げてきた我が国の研究者が、各国が次世代の超大型望遠鏡の運用による研究成果を競う時代において、引き続き第一線で学術研究を展開していくために必要不可欠な計画である。

本計画において日本の中心機関となる国立天文台は、「野辺山宇宙電波観測所」、すばる望遠鏡、アルマ計画など、数多くの大規模プロジェクトを推進してきており、天文学・

宇宙科学分野の学術研究の第一線で活躍してきている。また、すばる望遠鏡の建設・運用を通じて先導的な成果を挙げるとともに、TMTにおいて必要とされる各種の基幹技術に関して、広視野機能に関する卓越した技術、超低膨張セラミックガラス、高精度な非球面鏡、高精度望遠鏡構造など多くの技術開発や経験を、企業とも連携しながら蓄積している。これらの日本の特色を活かして本計画に参加することで、今後の次世代超大型望遠鏡計画を国際的にリードし、本計画による新たな学術研究の成果を通じて、日本のプレゼンスを国際的に示すことが期待できる。さらに、TMT計画において開発される技術は、我が国の産業への波及効果が期待できる。

現在、TMT計画においては、2014年からの建設を目指して、日本、米国、カナダ、中国及びインドにおいて技術実証が継続的に実施されているとともに、参加機関の役割分担、計画の推進組織体制、望遠鏡の運用方針など、参加機関において協議が行われている。役割分担の最終合意は、2013年度中に行われる予定であり、日本が技術的に優れている望遠鏡の本体構造の製作や大量に必要な高精度な主鏡の生産を担うために、望遠鏡本体の構造設計の検討や、主鏡を構成するセグメント鏡の試作及び量産工程の開発などについて、2012年度に技術実証を開始したところである。2014年度における建設開始に先立って、2013年度は建設開始に不可欠な望遠鏡本体の構造設計の検討等を確実に実施していく必要がある。また、国立天文台が、政府の支援を受けて、技術実証を確実に実施していくことにより、本計画において我が国の研究者が主導的な立場で活動できるとともに、各国政府における検討を加速させ、建設開始に向けて各国の準備が整うことが期待できる。

また、本計画は、天文学分野をリードするこれまでの我が国の研究成果のほか、多くの技術や経験といった実績を基に取り組みのものであり、学術的な価値はもちろん、巨大望遠鏡を用いた観測では精緻かつ美しい画像が得られることから、幅広い国民の知的好奇心を刺激し、国民の理解を得られると判断される。

以上を総合的に勘案し、本計画は積極的に進めるべきであり、早急に着手すべきであると評価する。

(2) 計画推進にあたっての留意点

国立天文台では、現在、すばる望遠鏡、アルマ計画を推進している。

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。

一方、本計画が実施されれば、多数の研究者、技術者等の参画を必要とする国際的な大型プロジェクトが同時に実施されることとなり、十分な人員の確保が課題となるが、すばる望遠鏡のプロジェクトの見直しのほか、アルマ望遠鏡の建設やソフトウェア開発に携わった技術者や国際的なプロジェクトの経験のある研究者などの人員の配置転換などにより、こうした課題は克服できると考えられる。さらに、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。

また、国立天文台は、TMT建設に必要なとされる技術が蓄積されているが、その完成に向けては克服すべき課題もある。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。

用語解説

- ※1 ダークエネルギー
137億年前に始まった宇宙膨張は一旦減速したが、約70億年まえからは加速していることが判明した。宇宙膨張を加速する正体不明のエネルギーにつけられた呼称。
- ※2 補償光学
大気のゆらぎなどによる像の劣化を補正し、非常にシャープな像を得るための装置。
- ※3 系外惑星系
太陽以外の恒星と、それを公転周回する惑星からなる系を指す「太陽系外惑星系」を略した呼称。
- ※4 中心星
系外惑星系の中心となる恒星のこと。太陽系では太陽に相当する。
- ※5 視線速度法
惑星の公転運動の反動で中心星はわずかに振り回される。振り回される中心星から発せられる光は、観察者(視線方向)に中心星が近づくと波長が青く(短く)なり、遠ざかると波長が赤く(長く)なる。この中心星の動き(速度)が大きいほど、波長の変化も大きくなる。このような視線速度の周期的変化から系外惑星の存在を間接的に証拠立てる手法。
- ※6 トランジット法
中心星の手前を惑星が通過するとき中心星の明るさが減少することから系外惑星の存在を間接的に証拠立てる手法。
- ※7 ハビタブルゾーン
中心星から近すぎる星では水は蒸発する。遠すぎると凍る。惑星表面の水が液体として存在できる温度環境にある軌道範囲をさす。
- ※8 大気スペクトル
中心星の手前を惑星が通過する場合、中心星からの光の一部は惑星の大気を通過する。このため、中心星のスペクトルを詳しく調べると惑星大気の組成を調べることができる。
- ※9 分光解析
天体からの光を分光器で虹のようなスペクトルにして解析すると、天体の元素組成、温度、密度や運動状態を調べることができる。これを分光解析と呼ぶ。
- ※10 絶対光度
天体の本来の明るさを示す概念。対して、みかけの明るさは天体と観測者の距離によって変化する。
- ※11 Ia型超新星
白色矮星の爆発現象で、極めて明るくその絶対光度は一定である。このため、みかけの明るさからその距離を算出できる。遠い銀河の距離測定に利用される。

- ※12 宇宙背景放射観測衛星WMAP
ビッグバンから 38 万年後の宇宙からのマイクロ波のムラを精密に測定することに成功した科学衛星。この解析から、宇宙年齢やダークエネルギーの存在が解明された。
- ※13 クェーサースペクトル
クェーサーとは、太陽の約 1 億倍の重さを持つブラックホールに落ち込むガスが光るため、銀河系の約 2000 億個の恒星全体の明るさに匹敵するほど明るく輝く天体であり、遠い宇宙でも観測できる。そのスペクトルからクェーサーと地球の間にある物質についての情報を得ることができる。
- ※14 輝線銀河
銀河中の星間ガスは、その中に含まれる元素に特有な色を放つ。宇宙で一番多い水素原子が放つライマン α 輝線など、特徴的なスペクトルを強く放つ銀河をさす。
- ※15 ナスミス焦点台
大型望遠鏡の両サイドに設けられる焦点台のこと。星を追尾して望遠鏡が傾いても、ナスミス焦点では観測装置を傾ける必要が無いため大型観測装置を配備できる。
- ※16 解像度
「どれだけ細かい構造まで鮮明に見えるか」という能力。地上望遠鏡では、主に大気の揺らぎによる影響が大きいのが、補償光学装置を用いて大気の揺らぎを克服すると、望遠鏡の主鏡口径に比例して解像度が高くなる。
- ※17 ハッブル宇宙望遠鏡
1990 年に打ち上げられた直径 2.4m の宇宙望遠鏡。大気のゆらぎの影響を受けないため、解像力の高い写真が得られる。
- ※18 感度
「どれだけ暗い天体まで検出することができるか」という能力。地上望遠鏡同士の比較では主鏡の面積に比例して高くなる。地上望遠鏡では夜空の明るさが暗い天体の検出をじゃまするのに対して、宇宙望遠鏡は夜空（に相当するもの）が非常に暗いので、同じ主鏡面積でも宇宙望遠鏡の方が感度が高い。しかし、TMT 望遠鏡は主鏡面積がハッブル宇宙望遠鏡の 160 倍もあるため、この効果を考慮しても感度は約 40 倍高い。感度と解像度は異なる能力であるが、両方とも現代天文学においては重要な能力であり、主鏡の口径（面積）を大きくすることにより高めることができる。

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

(◎：主査)

〔臨時委員：4名〕

岡田 清孝	自然科学研究機構理事、基礎生物学研究所長
川合 知二	大阪大学産業科学研究所特任教授
平 朝彦	独立行政法人海洋研究開発機構理事長
瀧澤美奈子	科学ジャーナリスト
西尾章治郎	大阪大学大学院情報科学研究科教授

〔専門委員：8名〕

◎ 飯吉 厚夫	中部大学理事長・総長
海部 宣男	国立天文台名誉教授
佐藤 勝彦	自然科学研究機構長
塚本 桓世	東京理科大学理事長
長田 重一	京都大学大学院医学研究科教授
永宮 正治	日本原子力研究開発機構客員研究員、 高エネルギー加速器研究機構研究員
横山 広美	東京大学大学院理学系研究科准教授

※評価にご協力いただいた専門家

井上 一	独立行政法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所名誉教授
永原 裕子	東京大学大学院理学系研究科教授
山本 智	東京大学大学院理学系研究科教授

(敬称略、五十音順)

