

大型研究計画に関する進捗評価について（報告）

「大型低温重力波望遠鏡（KAGRA）計画」について

2018年（平成30年）8月30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
「大型低温重力波望遠鏡（KAGRA）計画」計画について	
1. 進捗評価の実施方法	4
2. 計画の概要	
(1) 概要	6
(2) 実施体制	8
(3) 年次計画及び予算規模	9
3. 計画の進捗状況	
(1) 研究の進捗状況	10
(2) 設備の整備状況	10
(3) 情勢の変化があった場合の対応状況	15
(4) 社会や国民の理解を得るための取組	15
(5) 年次計画における「進捗評価報告書での留意点」への対応状況	15
(6) 今後の運用体制（共同利用体制）	17
(7) 計画推進に当たっての課題	18
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	20
(2) 今後の事業の推進に当たっての留意点	20
備考（用語解説等）	22
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	24

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ーロードマップー」^{※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。

「大型低温重力波望遠鏡（KAGRA）計画」の年次計画においては、10年計画の6年目に当たる2018年度（平成30年度）に、「KAGRAによる本格観測に向けた装置整備の状況」の確認を行うことが記載されており、このたび、本作業部会において進捗評価を実施した。

進捗評価に当たっては、本作業部会において、実施機関である法人に対し、「学術研究の大型プロジェクトの推進方策の改善の方向性」（2017年（平成29年）3月本作業部会決定、以下「改善の方向性」という。）や現在の財政環境などに基づく課題を整理の上、これらの課題に主体的に対応するよう促していることに鑑み、従来の評価の観点に、

- ・ 実施機関による財政環境への対応が適切に行われたかどうか
- ・ 期末まで安定的・継続的にプロジェクトを推進することができるよう年次計画の内容の変更等が行われたかどうか

を加え、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

「大型低温重力波望遠鏡（KAGRA）計画」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 9 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： 2018 年（平成 30 年）7 月 20 日（金）10：00～12：00

(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）井本 敬二、栗原 和枝、○小林 良彰、鈴木 洋一郎、観山 正見、
横山 広美

（アドバイザー）井上 邦雄、藏重 久弥、中野 貴志

(3) 概 要：

・機関からのヒアリング（35 分）

東京大学から、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。

（東京大学説明者）

梶田 隆章	東京大学宇宙線研究所長、
大橋 正健	同所重力波観測研究施設長・教授、
三代木 伸二	同施設准教授、
桑田 悟	東京大学研究推進部長、
生田目 金雄	同学宇宙線研究所事務長、
大浦 輝一	同所副事務長、
佐藤 立子	同所特任専門員

・まとめ（25 分）

以上を踏まえ、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行った。その後、東京大学に、ヒアリングの結果の概要を伝達した。

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： 2018 年（平成 30 年）8 月 10 日（金）13:30～16:30

(2) 審議事項： 進捗評価報告書（案）の審議

- (1) 日 時： 2018 年（平成 30 年）8 月 30 日（木）13:00～15:00
- (2) 審議事項： 進捗評価報告書（案）の審議

2. 計画の概要

(1) 概要

1. 研究計画

大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)計画は、重力波天文学の創成に貢献するため、数多くの最先端研究を結集し、一辺の長さがそれぞれ3kmあるレーザー干渉計などで構成される大型低温重力波望遠鏡(以下、「KAGRA」という。)を地面振動が極めて低減される岐阜県飛騨市の神岡鉱山の地下に設置する計画である。



重力波とは周囲の時空をゆがめるような非常に重たい天体が加速しながら動くときに起こす波のことで、アインシュタインの一般相対性理論により予言されていたが、「時空のさざ波」と形容されるように極微細な波であり、その検出は極めて難しく、アインシュタインの最後の宿題とされていた。そのような中、一般相対性理論百周年となる2015年(平成27年)9月14日に、連星ブラックホール合体イベントが発生した信号が米国の重力波望遠鏡LIGOにより観測され、この業績に対して、2017年度(平成29年度)ノーベル物理学賞が授与された。その後も観測が続き、これまで合計5つの連星ブラックホール合体イベントがとらえられ、さらに2017年(平成29年)8月17日には、連星中性子星合体イベントがLIGOとVirgoの共同観測によりとらえられた。

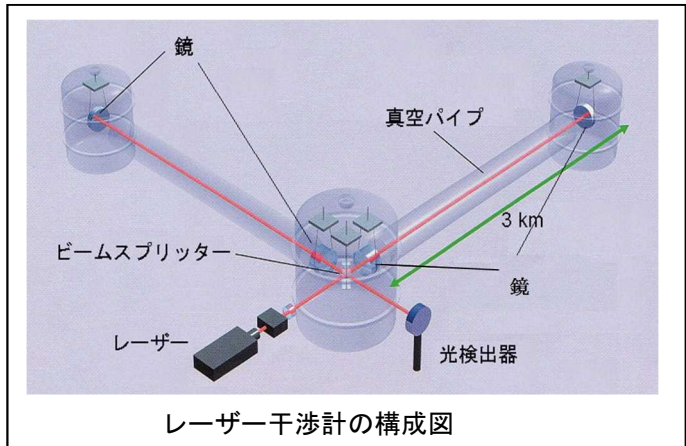
このように、コンパクト天体の現象を重力波で観測し、その波形を数値シミュレーションと比較することで、星の内部構造に関する情報を得る手段を持つことに加え、一般相対性理論の検証、中性子星やブラックホールの連星の合体や超新星爆発といった天体現象の解明が可能となる。また、将来的には、初期宇宙の情報の取得や非常に強い重力場での物理現象の観察が期待される。

重力波の初検出に向けて国際競争が行われてきたが、今後は、米国の改良型LIGOや欧州の改良型Virgoなど、KAGRAと同程度の感度を目指す重力波望遠鏡と共同して国際観測ネットワークを形成する。既にLIGOとVirgoは共同観測体制を構築しており、そこにKAGRAが加わることで研究の連携を一層深めることが可能になる。これにより、国際的共同観測におけるアジア・オセアニア地域の拠点として、国際的な頭脳循環に貢献するとともに、重力波によって宇宙を観測する「重力波天文学」という新分野の創成を目指している。

2. 施設整備

KAGRA は、岐阜県飛騨市の神岡鉱山の地下に設置される一辺 3km の L 字型の超高感度レーザー干渉計である。地面振動を避けるために地下に設置し、日本独自に開発した低温鏡を用いて鏡の熱雑音を抑えることにより、7 億光年先までの連星中性子星合体现象を捕捉できる高感度の達成を目指している。

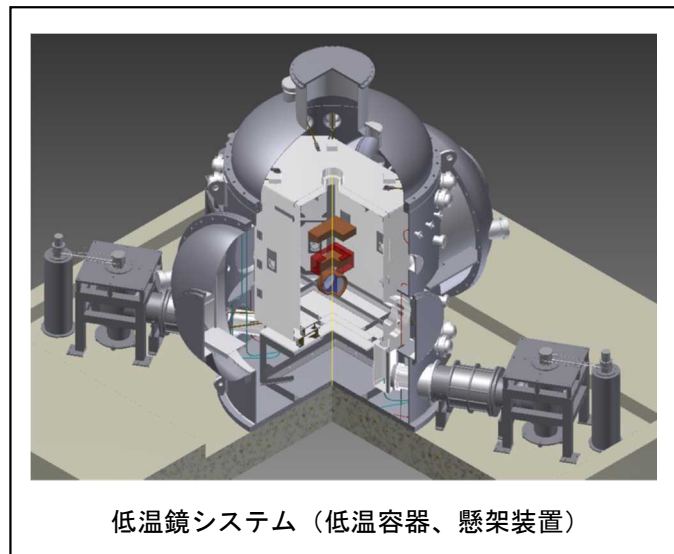
重力波の検出に使用するレーザー干渉計は、一つの光源から出たレーザー光線を直角二方向に分け、分けた光が、遠方に配置されたミラーで反射されて、また分離地点に戻ってくる構造を持たせた装置で、二方向から帰ってきた光の到達時間の差を、光の波としての性質である「干渉」という性質を利用して判定する装置である。光は時空の歪みに沿って「まっすぐ」走る性質があるため、二つの方向に分かれた光が、それぞれ重力波の影響でゆがんだ空間を走るうちに発生した二つの道筋の間での光の到達時間の差を検出する。



レーザー干渉計の構成図

3. 設備

KAGRA は高い感度を実現するために、神岡鉱山内という極めて地面振動が少なく温度・湿度が安定した環境に設置することに加え、ミラーの熱雑音を低減するためにサファイアミラーを極低温(マイナス 253 度)まで冷却する先進的なレーザー干渉計である。右の図は、サファイアミラーを冷却するための低温容器と、その懸架装置を示したものである。



低温鏡システム (低温容器、懸架装置)

(2) 実施体制

東京大学宇宙線研究所がホスト機関となり、自然科学研究機構国立天文台、高エネルギー加速器研究機構を共同ホスト機関として密接な協力のもとで装置を建設中である。また、京都大学、大阪大学、大阪市立大学、カリフォルニア工科大学（米）、精華大学（中国）、高麗大学（韓国）、西オーストラリア大学（豪）など国内外の研究機関と連携して実施している。特に、神岡に近い富山大学が、低温鏡の準備作業等のための新たな研究拠点として整備されるとともに、フロリダ大学（米）が光アイソレータの製作・設置を行い、西江大（韓国）が鏡の傾きセンサーの製作・設置をするなど連携して作業を行っている。また、最近では、台湾の研究グループがキャリブレーショングループとして加入するなど、国内外から 200 人を超える共同研究者が参加し、活発な国際協力体制のもと推進している。

2012 年度（平成 24 年度）に岐阜県飛騨市から地元公民館の一部の無償貸与を受け改築



し、神岡における研究拠点である重力波推進室を立ち上げるとともに、学内配分により事務職員 1 名が配置されている。さらには、隣接地を地元から無償で借り受け、KAGRA データ収集・解析棟を建設している。2016 年度（平成 28 年度）からは研究所附属施設として、重力波推進室を学内組織に格上げして宇宙線研究所附属重力波観測研究施設を設置し、15 名の教員・ポスドクが主として研究を担い、15 名の職員（非常勤を含む）が事務業務や共同研究者の対応、及び技術的な対応を行っている。

2017 年（平成 29 年）1 月に、宇宙線研究所が飛騨市と協定を結んで連携協力関係を確立したことで、飛騨市が行うふるさと納税に宇宙線研究所の若手研究者を支援する項目が盛り込まれたことに加え、公民館の 2 階部分についても無償貸与を受けることが可能となり、若手研究者のための研究スペース（居室）として活用されている。

研究者の人員については、国立天文台の教職員 3 名が常駐しており、高エネルギー加速器研究機構からも研究者 2 名が常駐に近い形で神岡に滞在している。

(3) 年次計画及び予算規模

KAGRA に係る年次計画及び予算規模は次のとおりである。

(年次計画)

計画名称	大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) 計画										
実施主体	【中心機関】 東京大学宇宙線研究所 【連携機関】 国立天文台、高エネルギー加速器研究機構、東京大学、富山大学【外5機関】										
所要経費	建設費総額 約 164億円 年間運用経費 約 4.5億円	計画期間		建設期間 平成23年度～28年度 試運転期間 平成28年～29年度 運用期間 平成29年度以降10年以上(平成34年に計画を見直し) (評価実績: 事前評価 平成22年度、進捗評価 平成28年度)							
計画概要	我が国独自の低温技術を盛り込む観測装置を神岡の地下に設置して、重力波の世界初検出を目指し、その後、世界的観測ネットワークの一翼を担う。										
研究領域(研究テーマ)	1. 地下大型レーザー干渉計の建設 2. 重力波の検出と重力波による天体の観測 3. 国際的観測ネットワークの構築や他の観測機器との連携により重力波天文学を創成										
年次計画	2013 (H25)	2014 (H26)	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	2019 (H31)	2020 (H32)	2021 (H33)	2022 (H34)	2023 (H35)
1. 地下大型レーザー干渉計の建設											
連星中性子星の合体現象を7億光年先まで検出できる感度(年数回から数十回検出可能な感度)を持つ日本独自の低温鏡技術を用いた地下大型レーザー干渉計を建設											
2. 重力波の検出と重力波による天体の観測											
・連星中性子星の合体により生じる重力波等を直接検出し、一般相対性理論を検証 ・連星中性子星の合体により生じる重力波から中性子星質量を決定。また、超新星爆発による重力波から中性子星コアの振動の直接観測や、ブラックホール準固有振動の観測、連星ブラックホールの合体やブラックホールへの星の落下、宇宙背景重力波などの事象を観測。											
3. 国際的観測ネットワークの構築や他の観測機器との連携により重力波天文学を創成											
・日本はアジア・オセアニア地域の拠点として、欧米で進められている重力波望遠鏡と共同して重力波観測網を構成 ・ニュートリノ検出器やガンマ線衛星等の最先端観測装置と連携これらを通じて重力波天文学を創成											
評価の実施時期	-	-	-	進捗評価	-	進捗評価	-	-	-	-	-

(これまでの予算措置の状況)

建設費 : 164.0 億円 (2010 年度 (平成 22 年度) ~2018 年度 (平成 30 年度) までの経費)

運転経費・実験経費 : 12.4 億円 (2014 年度 (平成 26 年度) ~2018 年度 (平成 30 年度) までの経費)

3. 計画の進捗状況

(1) 研究の進捗状況

本計画は 2010 年度（平成 22 年度）から 7 年計画で開始され、連星中性子星の合体イベントを 7 億光年先まで検出できる感度（年数回から数十回検出可能な感度）を持つ日本独自の低温鏡技術を用いた地下大型レーザー干渉計を建設する計画である。

震災の影響で空洞掘削の着工が 1 年遅れたことに加え、大量湧水や地下水対策に時間を要したこと、低温鏡に関して結晶製作や研磨について問題が生じ、干渉計の高感度化（低温鏡）後の本格運転が更に遅れた状況となっている。しかし、KAGRA を構成する各種装置の製作・設置作業の効率化を図ることにより、国際的観測ネットワークの構築時期の遅れが最小限（1 年）になるように改善してきている。また、全長 6km にわたるネットワーク経路の計算機制御も初期運転時に予定通り稼働している。

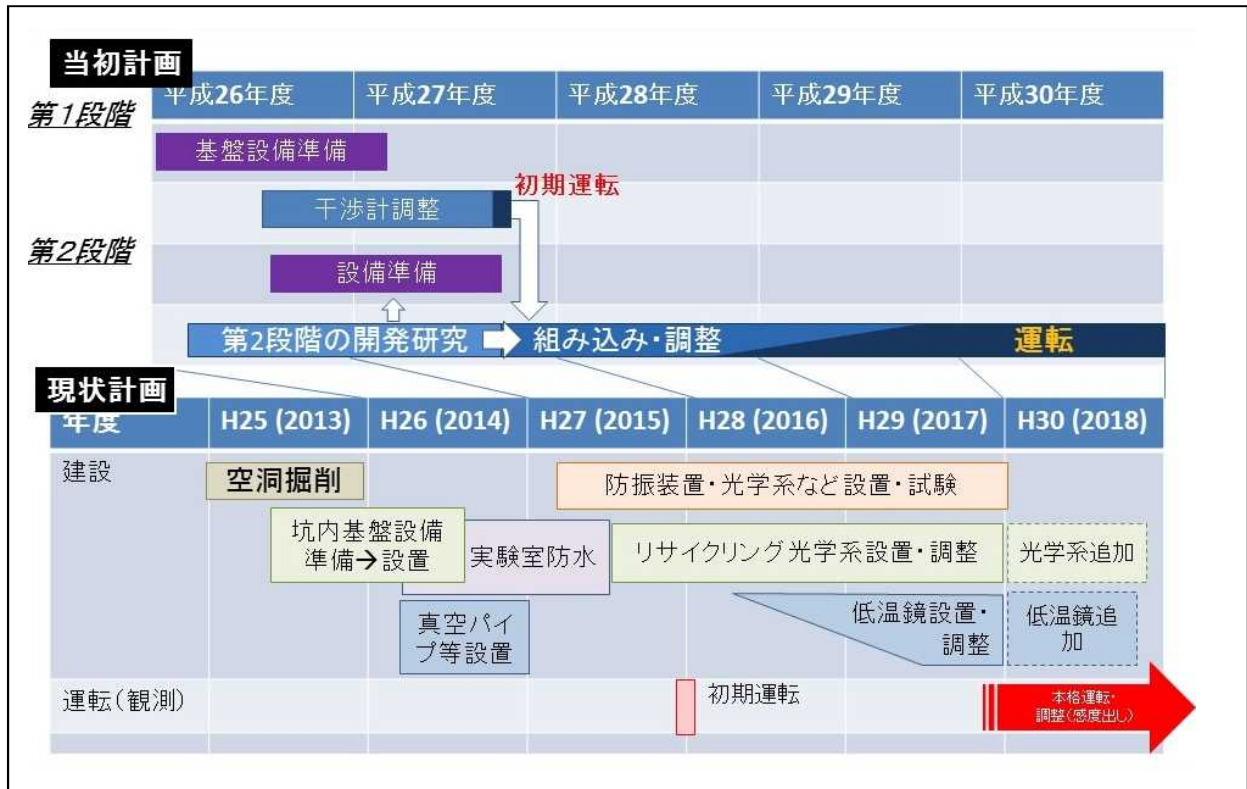
重力波の発生源特定のためには、複数台のレーザー干渉計の観測データを利用して三角測量を行う必要がある。世界の重力波望遠鏡としては、米国に LIGO、欧州に Virgo があり、ともに KAGRA と同等の感度を目指して改造作業が進められている。将来的には、これら日米欧の観測装置が、既に行っている研究連携を一層強固なものにして国際観測ネットワークを構成する予定であり、KAGRA はアジア・オセアニア地域の観測拠点として重要な役割を果たすことが期待されている。LIGO からも将来の観測パートナーである KAGRA との連携の強化のため、研究者の活発な交流に加えて、2016 年（平成 28 年）の KAGRA の試験運転に必要であった常温ミラー（LIGO 初期のもの）を借り受ける等の協力を得ている。

2015 年度（平成 27 年度）には共同研究者数約 240 人のうち外国の研究機関（中国、韓国、豪、米、伊等）に属する共同研究者は 78 人であった。また、オーストラリアや韓国とは光学系に関する共同研究を検討しており、今後、外国人研究者の更なる増加が期待される。

(2) 設備の整備状況

1. 予算および進行状況

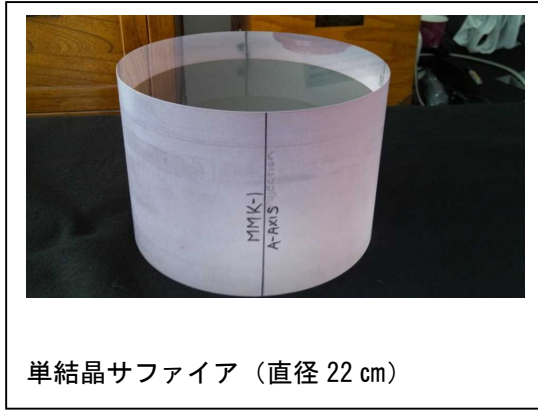
当初、最先端研究基盤事業 98 億円と施設整備補助金 56 億円の、建設費総額 154 億円の資金計画であったが、2013 年度（平成 25 年度）の空洞掘削の追加予算 2 億円と 2015 年度、2016 年度（平成 27、28 年度）の高感度化（低温鏡）予算 8 億円を加えて総額 164 億円となっている。



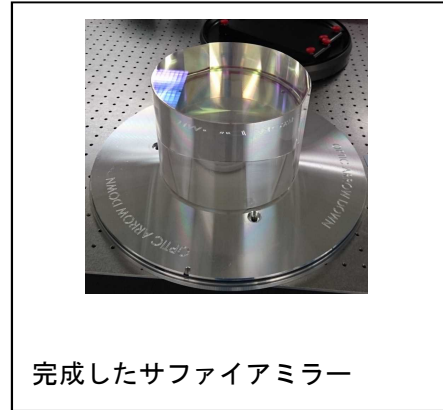
2010年度（平成22年度）の最先端研究基盤事業採択後、震災の影響で2012年度（平成24年度）から当初予定の1年遅れで空洞掘削を開始し2013年度（平成25年度）末に完了した。それと平行して、2012年度（平成24年度）からレーザー干渉計高感度化（低温鏡）、地下実験室高度化を開始し、2013年度（平成25年度）には干渉計制御・データ収集棟が建設された。2014年度（平成26年度）以降は地下空洞における環境整備工事、真空容器や真空パイプ等の設置・接続作業を行ってきた。2015年度（平成27年度）には試験運転用の防振系・光学系の設置・調整およびネットワークを含む計算機制御システムの構築が完了し、2016年（平成28年）3月に試験運転が実行された。平成28年度からは鏡の低温化（高感度化）を進め、2018年度（平成30年度）初頭に本格運転（低温レーザー干渉計）を行っている。

2. サファイアミラーの製作

KAGRAのサファイアミラーは熱雑音を低減するため極低温（マイナス253度）に冷却されるが、そのために、一般的な光学特性だけでなく、熱伝導特性や光に対する低吸収性についても厳しい条件が求められている。つまり、基材となるサファイア単結晶は、光学的な特性（屈折率の一様性、透過率）が非常に高く、冷却のために熱伝導特性が良く、ミラーでの発熱を抑えるために光の吸収が極めて低いものでなくてはならない。このような高品質のサファイア単結晶を製作できる企業は世界的にも少ないが、最近ではLED基盤などへの応用があり、国内でも入手できるようになってきている。また、ダイヤモンドについて硬いサファイアの精密研磨も非常に困難であるが、ノウハウの蓄積を経て可能となった。なお、2018年（平成30年）7月に4個のサファイアミラーの製作が完了した。



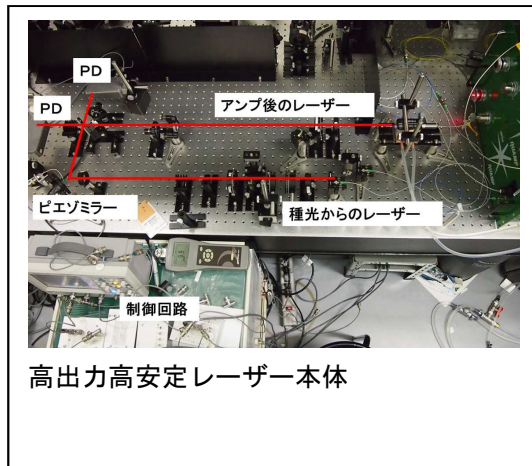
単結晶サファイア（直径 22 cm）



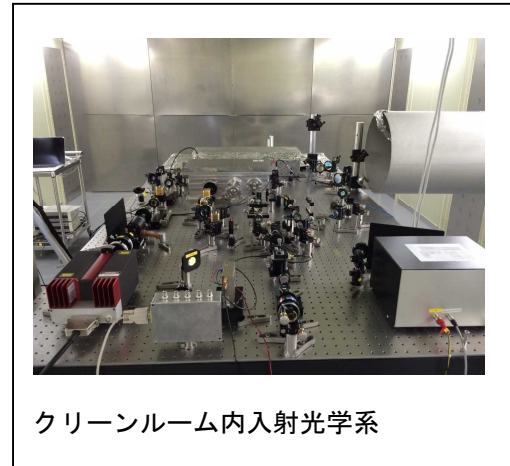
完成したサファイアミラー

3. 高出力高安定レーザーの製作および入射光学系

高出力高安定レーザーは通常のレーザーの出力をファイバアンプ等で増幅することにより実現している。また、出力安定化、周波数安定化を行う入射光学系と共にクリーンルーム内に設置される。



高出力高安定レーザー本体



クリーンルーム内入射光学系

4. 防振系

太陽と地球間の距離が水素原子 1 個分程度伸縮する程度の極微な空間歪である重力波を検出するためには、ミラーを極限的に防振することが必要である。そのため、KAGRA では多段の防振系を採用して、これを構築してきた。現在これらは構築の最終段階にあり、2018 年（平成 30 年）9 月に完成する予定である。



ビームプリッター防振系

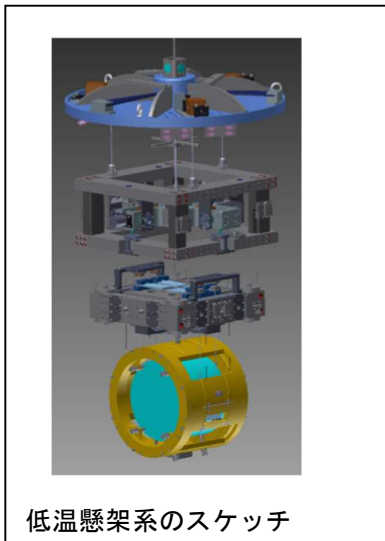


サファイアミラー常温防振系

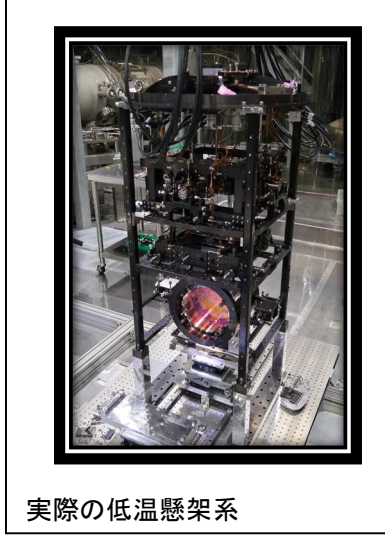
5. 低温懸架系

サファイアミラーを吊り下げた状態で冷却するための低温懸架系には非常に高い性能が求められている。ミラーは細いサファイアロッドで吊られるが、通常の極低温実験で使われるような熱交換ガスは一切使わず、サファイアロッドの高い熱伝導だけでミラーを冷却することになる。さらに、外部からの振動が混入しないように、サファイアミラーから冷凍機に至る熱伝導の経路（ヒートリンク）は防振されている必要があり、KAGRA では、ヒートリンクを 99.99%以上の純アルミ製リボンなどにすることで実現している。

低温懸架系については、既に低温容器は全て冷却性能試験が終わっているため、今後は、低温懸架系を低温容器内に設置していくことになる。



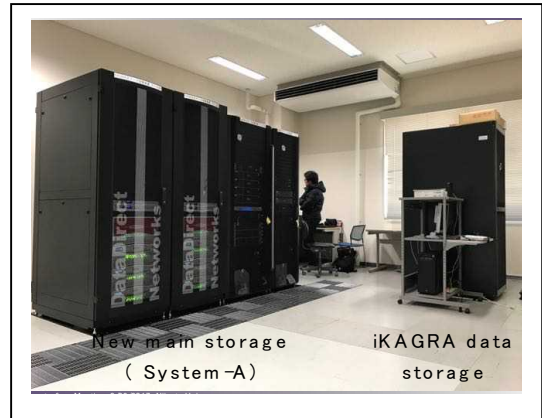
低温懸架系のスケッチ



実際の低温懸架系

6. データサーバーの運用とデータ解析体制の確立

2016年度（平成28年度）に、千葉県柏市にデータサーバーを設置し、その運用を開始した。現在は宇宙線研究所、大阪市立大学および韓国のデータ開発拠点と高速回線で接続し、観測データの共有が可能となっている。また、本格的なデータ解析体制についても新学術領域研究「重力波天文学創世記」と協力しながら確立しているところである。

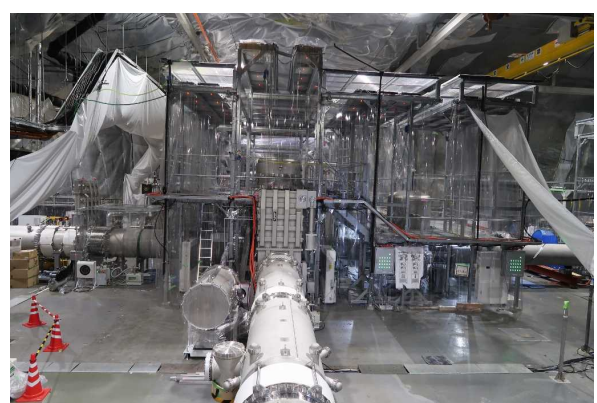


7. 今後の予定

世界的な状況を見ると、LIGO と Virgo の共同観測（03：オースリー）が2019年2月から1年間の予定で行われる（現状で多少の遅れが予想されている）。まず、重力波天文学はLIGO 単独の01 観測で連星ブラックホール合体イベントをとらえたことで始まったが、それに続く02 観測の終了近くにVirgoが参加したときに連星中性子星合体イベントがとらえられた。これは多波長におよぶ電磁波観測とタイアップしてマルチメッセンジャー天文学へと展開した一方で、重力波観測における角度分解能を高める必要があることがわかった。そのため、次期観測としての03にKAGRAが参加することが期待されており、KAGRA研究者の総意として参加することが決定された。

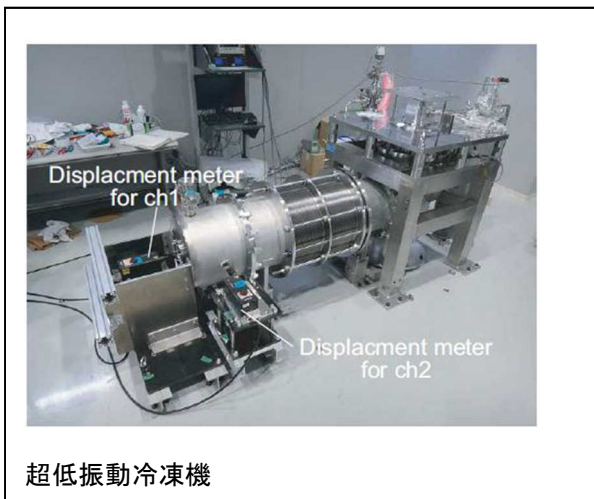
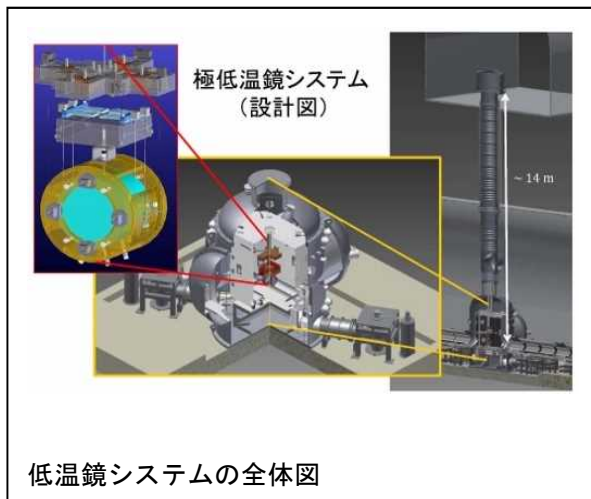


KAGRA コントロール室



KAGRA 坑内センターエリア

なお、KAGRA 建設においては日本の最先端技術を集約している。鏡を極低温に冷却するために、低温技術を活用して超高純度素材による外部からの熱輻射を制限する断熱真空設備を組み込んだ低温容器や、極低温下でも超低振動で稼動する冷凍機を作成している。また極低温鏡の間をつなぐ超高真空ステンレスパイプにはレーザー光の散乱を防ぐためのバップル等の超高真空技術がつぎ込まれており、国内最大規模の超高真空容器となる。このような技術開発は、核磁気共鳴（NMR）装置に応用され、医療分野のMRI装置にも応用されている。



(3) 情勢の変化があった場合の対応状況

大型レーザー干渉計による世界初の重力波検出に向けて国際競争が行われていたが、2016年（平成28年）2月11日、米国のLIGOが重力波信号を発見したことが公表された。今後も引き続きKAGRAの建設を進めて完成させ、高い感度を実現して重力波国際観測ネットワークに参加し、重力波天文学という新たな学問分野に貢献していく旨のコメントを発表し、記者会見等の対応も行われた。

その後のLIGOとVirgoが共同で連星中性子星合体イベントをとらえた際にも、世界の情勢とその中でのKAGRAの状況について社会へ発信が行われた。

(4) 社会や国民の理解を得るための取組

重力波は「ブラックホール」や「アインシュタインの一般相対性理論」といった、社会や国民が比較的関心を寄せやすい事柄と密接に関連することから、その関連性等を分かりやすく説明することなどを通して、本計画の科学的重要性等について社会・国民の理解を深めてきている。

本計画への理解を得るための広報活動として、マスメディア取材への対応、動画配信等を含むインターネットによる広報、地元住民や学生を対象とするイベント、全国各地での講演会等が積極的に行われている。

2017年度（平成29年度）は、計13件の講演活動を行い、KAGRA市民見学会の212人、1623人の参加者があった。2018年（平成30年）3月9日にはサファイアミラーが富山大学からKAGRA坑内に搬入されるタイミングでプレス発表を行い、多数のマスコミが参加し、テレビ局も当日のニュース等でとりあげている。

さらにKAGRAでは地元行政と連携した取り組みが行われており、上述の飛騨市民や富山市民を主な対象とする公募制のKAGRA見学会や一般講演会、神岡町内での出張講演会や地元高校への出張授業や交流など、様々な形態での活動を行っている。2018年度（平成30年度）も、KAGRA命名委員長の小川洋子氏（作家）の協力を得てサイエンスカフェを神岡図書館で開催することなどを予定している。

(5) 年次計画における「進捗評価報告書での留意点」への対応状況

年次計画においては、「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」として、以下の内容を掲載している。

①マネジメント体制の構築と推進体制の強化について

KAGRA の長所を活かし、これ以上の遅れが生じることなく本格観測を実施できるようにし、国際連携ネットワークに確実に参入するためには、関係する三機関（東京大学宇宙線研究所、高エネルギー加速器研究機構、国立天文台）において、これまで以上に強力なマネジメント体制を構築することが必要と考えられる。特に、高感度化の段階である「b KAGRA」に向けて防振化と低温化という二つの課題を解決するためには、役割と責任分担を明確にし、優れたプロジェクトマネージャーによるマネジメント力の強化とそれを支える高い知識を有するエンジニアを増員することなどにより、推進体制を強化することが必要である。

②本格運用に向けた運用体制の在り方について

KAGRA の本格運用（24 時間運転）が開始されると、装置の管理・運用のみならず、多くのデータを管理・処理することが必要となる。試験運転では、共同研究者の輪番で上手く運用できたが、本格運用では、その状態を長期間続ける必要ある。そのためにも、本格運用に向けた今後の運用体制の在り方について、十分な検討を行うことが必要である。

③社会や国民からの支持を得るための取り組みについて

重力波の世界初検出という目標を達成することができなくなったことを踏まえて、重力波に関する国際連携ネットワークを構築することの意義や目標とする科学的成果などについて、国民や社会に分かりやすく発信し、計画の意義について理解や支持が得られるよう努力することが必要である。

これらへは以下のような対応が行われている。

1. マネジメント体制の構築と推進体制の強化について

KAGRA は、LIGO と Virgo の共同観測 03（2019 年 2 月から 1 年間の予定）に参加することを共同研究者全体の意思として決定している。そのためには、2019 年 3 月に観測装置として完成させ、試運転および感度向上作業を少なくとも半年間行うことが必要である。KAGRA 建設を共同で担う東京大学宇宙線研究所、高エネルギー加速器研究機構、国立天文台を中心として役割分担を明確にし、今後 1 年間の作業スケジュールを繰り返し議論することで実行可能なものに仕上げている。その段階で、プロジェクトマネージャーに建設現場の予算配分を含むこれまで以上の権限を与えることで、より機動的な動きが可能となっている。さらに防振系や低温系などの各構成要素の設置後に行う動作確認に責任を持つコミッションチームをつくり、LIGO や Virgo からエキスパートを随時招聘することにより、共同観測に向かうための体制が整えられている。プロジェクトマネージャーを長とする SE0（システムエンジニアリングオフィス）が各サブグループ間のインターフェース部分に積極的に関与して、並行する作業が円滑に進むようにし、必要になったサブグループ構成の変更を行っており、E0（エクゼクティブオフィス）を含めたマネジメント体制は改善されている。人員の増強のため、地域でスキルを持つ技術者を積極的に雇用することと、世界中から研究者をポスドクとして雇用することを着実に進めている。また、すでに国際共同観測の準備を始めており、LIGO と KAGRA のデータ解析担当者が定期的な会合（テレコン）を行

うとともに、国際レビューの準備も併せて進めている。

2. 本格運用に向けた運用体制の在り方について

研究および生活のインフラを整備することを進めており、これまで1階部分を無償貸与されていた地元公民館全体を飛騨市から無償貸与を受け、それを改装して若手研究者のための研究スペースが大幅に増床された。安全衛生体制も強化しており、トンネルを含む地下環境での安全インフラの改善（緊急連絡電話の増設など）に努めている。これは国際安全レビューの勧告に基づくものに加え、自発的に行うものも含んでおり、安全に対する意識向上が進んでいることが伺える。今後は、外国人を含む観測シフト体制を整え、長期間の24時間観測に対する準備が進められている。

3. 社会や国民からの支持を得るための取り組みについて

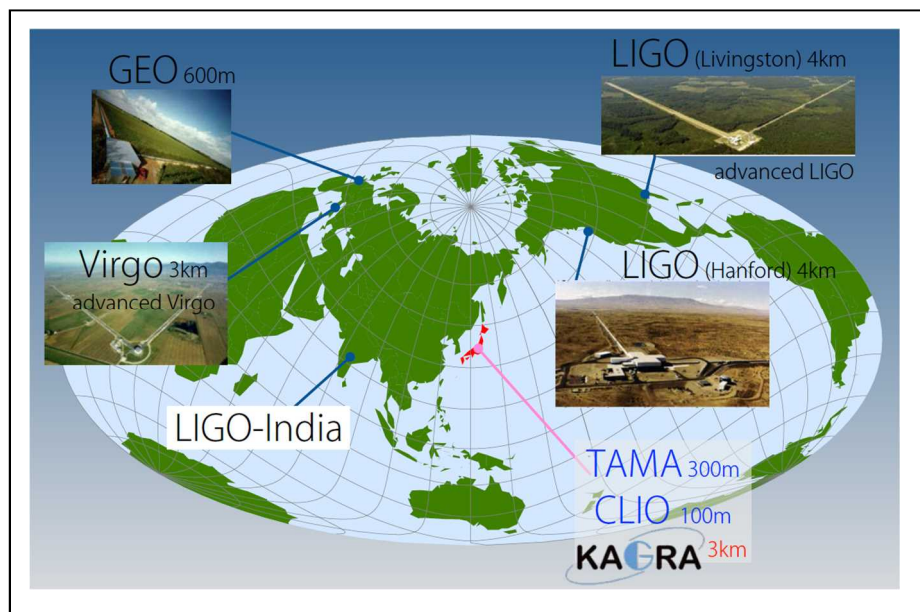
KAGRA について、広く社会や国民からの支持を得るために、例年、一般見学会やサイエンスカフェを行うとともに、日頃からマスコミへの情報提供や地域における広報活動に努めている。直近では、富山大学における懸架の準備作業を終えたサファイアミラーを、神岡坑内に移送することをプレスリリースし、当日のテレビニュースでも放映された。また、若手研究者の支援のため、東大基金の一つである KAGRA 基金や、飛騨市が実施している宇宙線研究所若手支援基金への寄附を目的としたふるさと納税も行われている。

(6) 今後の運用体制（共同利用体制）

2015 年度（平成 27 年度）末から 2 度の試験運転を実行し、基線長 3km におよぶ巨大な観測装置が仕様通り建設されていることや、試験運転時の 3 交代制による 24 時間運転が滞りなく運営されていることが確認された。また、2016 年度（平成 28 年度）末に導入された計算機システムの運用が行われている。さらに、2018 年度（平成 30 年度）初頭には、低温鏡を組み込んだレーザー干渉計の運転も行い、低温鏡システムの動作確認も完了するとともに、これと並行して、干渉計制御システムの高度化も進められ、2018 年度（平成 30 年度）中には高度化された重力波望遠鏡として完成する予定である。

本計画においては、重力波望遠鏡の完成後に感度出しの調整を行い、本格観測に入る予定となっている。KAGRA の科学目標は主として「重力波の検出と一般相対性理論の検証」と「重力波による天体の観測」であり、連星中性子星の合体により生じる重力波等を直接検出し、一般相対性理論を検証するとともに、連星中性子星の合体により生じる重力波から中性子星の質量を決定する。また、超新星爆発による重力波から中性子星コアの振動の直接観測や、ブラックホール准固有振動の観測、連星ブラックホールの合体やブラックホールへの星の落下、宇宙背景重力波などの事象を観測する。

重力波観測体制に入った後は、日本はアジア・オセアニア地域の拠点として、欧米で進められている重力波望遠鏡 LIGO および Virgo と共同して重力波観測網を構成し、ニュートリノ検出器やガンマ線衛星等の最先端観測装置と連携することを通じて重力波天文学の創成を目指す予定となっている。



重力波望遠鏡の運用が軌道に乗った際には、参加している共同研究者の輪番による 24 時間運転を実施する予定であり、試験運転時には 3 交代制による 24 時間運転も滞りなく運営されている。また本格観測のために、2016 年度（平成 28 年度）末に導入された計算機システム（データサーバー）の運用を進めており、KAGRA のデータの保管やデータ転送、データの質保証に責任を持つ体制が整いつつある。今後は、世界の 3 極で共同のデータ解析を遂行するために、欧（Virgo）米（LIGO）の研究者と常時連絡を取り、KAGRA のデータ解析を世界中でスムーズに行えるようにするため、LIGO の研究者との情報交換が進められている。

（7）計画推進に当たっての課題

1. 国際競争力

重力波の検出は、基礎科学の重要なテーマであることから、国際競争のもと進められており、重力波を初観測した米国 LIGO の他に、欧州 Virgo が LIGO と同様の感度を持つ装置への改良を進めている。2017 年度（平成 29 年度）からは LIGO と Virgo は共同観測を開始しており、2019 年 2 月からは共同観測 03 を開始する予定のため、KAGRA の建設もそれに遅れることのないように推進する必要がある。また、LIGO や Virgo の動向は詳しく調査し、先進性のある部分は積極的に取り込んで、総合的に国際競争力を維持しながら事業を進めている。

2. レーザー干渉計の高度化（低温鏡）

本格観測に向けて、研磨した低温鏡のコーティング、レーザー干渉計の高性能化のためのリサイクリング光学系の整備、装置立ち上げ時間の短縮・制御系安定制御のための計算機制御系の高度化、レーザー干渉計出力光ノイズ除去・モニター補正のための補助光学系の高度化、感度低下防止、排気速度増強による稼働時間延長と観測時間増加を図るための超高真空排気システムの導入が進んでいる。

3. 観測データの公開

重力波天文学を推進するうえで不可欠な世界の観測装置との共同解析を見据えて、他のプロジェクトと密に連絡を取って協議を進めることや、LIGO や Virgo のデータ解析そのものに参加することも重要である。これについては、KAGRA のデータサーバを 2016 年度（平成 28 年度）末から稼働させて運用していること、LIGO や Virgo と協調してデータ転送・共有の予行演習やデータ解析を進めることに着手している。

さらに、コミュニティから要望がある観測データの公開については、データを共有することになる LIGO や Virgo とも協議しながら進められる予定である。

4. 安全対策

入出坑管理、緊急避難、保護具等に関する KAGRA 安全規則を定め、教職員、学生、学外共同利用研究者、その他 KAGRA 坑内を利用するすべての関係者の安全を守る体制が整えられている。出口のない X エンドにはシェルターに救出まで最低限の生活ができるために十分な空気や水・食料を備蓄しているが、引き続き、更なる安全支援体制の強化が必要である。

また、2017 年（平成 29 年）2 月 21、22 日には、他の地下実験施設の安全責任者を招いて国際レビューが行われ、このレビュー勧告に従い、非常時の通信手段の複線化や表示の徹底化などハードだけでなく、安全管理体制の強化などソフトの面でも改善が行われた結果、安全性の向上が図られている。さらに坑内避難訓練なども実施して、研究者の安全意識の向上が図られている。



X エンドシェルター全景



シェルターの装備品

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

震災の影響による空洞掘削着工の遅れに加え、湧水及び地下水対策、並びに低温鏡製造の遅延により、計画全体に遅れが生じているものの、2019年度からの本格観測に向けて観測装置の整備や試験運転等は着実に進められている。2016年（平成28年）LIGOによる重力波の初観測以降、この分野に対する関心は高まっており、KAGRAにも国内外から新たな共同研究者が多数参加している。こうした共同研究者相互のコミュニケーションを適切に図り、その総意として、LIGO及びVirgoとの共同観測「O3」に参加することを決定している。今後、国際的観測ネットワークの一角を担い、新たな学問分野たる重力波天文学の創成に寄与していくものと期待される。また、計画に依然として遅れは認められるものの、人員配置や整備計画の工夫によって取り戻しつつあり、O3観測までの装置完成の目途を得ている。

実施体制については、プロジェクトマネージャー及びシステム・エンジニアの権限強化やLIGO及びVirgoからの専門家の招へいなど、前回評価時から柔軟かつ大幅な改善を図ることにより、国際共同研究プロジェクトとしての運用体制及び共同観測体制が確立されつつある。また、双方向の人材交流や技術波及も実現しており、人材育成や技術開発の観点からも優れた体制となっている。さらに、附属施設の設置や現地職員の増員による体制の充実とともに、研究室や宿舎などのインフラを地元の協力を得て整備することにより、現地における研究活動の活性化につなげている。

国際的観測ネットワークの一角として参画し、重力波天文学の創成に寄与できることは、学術的な観点からはもとより、人材育成の観点からも大変意義深い。ネットワーク観測によって重力波源が特定され、天体現象が解明されていくことにより、宇宙の全体像の理解にさらに近づくものと期待される。また、将来的には次世代の重力波観測施設や衛星観測に応用され得る技術開発である。

一般講演会やサイエンスカフェなどを開催し、重力波天文学や基礎科学そのものへの興味・関心につなげるよう努力しており、KAGRA基金の寄付金や、飛騨市のふるさと納税などの成果が認められる。他方、低温、レーザー、防振、真空、測距等、産業への波及効果が期待できる技術が多数生み出されている。

以上を総合的に勘案すると、本プロジェクトは概ね順調に進捗していると評価できる。

(2) 今後の事業の推進に当たっての留意点

① マルチメッセンジャー天文学への展開に対する貢献について

今後のマルチメッセンジャー天文学への展開も視野に、重力波天文学の発展に寄与するため、国際連携ネットワークを確立し、次のO3観測における重力波源の特定に確実に寄与できるよう、最大限努力することが求められる。この際、得られた研究成果に対してKAGRAが果たした役割の重要性や、国際連携ネットワークにおける位置づけを明確にし、国民・社会からの支持につなげていくことが求められる。

②KAGRAによる固有の成果の明確化について

国際連携ネットワークの一角を担う一方で、KAGRA の特性や成果を明確化することが求められる。具体的には、ニュートリノコミュニティと組織的につながる研究体制上の強みを活かしたニュートリノ観測との相乗効果や、鉱山地下に設置された立地上の特徴、低温鏡をはじめとした KAGRA 固有の要素技術による重力波天文学の発展への貢献などが期待される。このことは、厳しい財政環境に対して海外分担を呼び込む財源の多様化に寄与し得るとともに、国民や社会からの支持を得る上でも必要である。

なお、本プロジェクトの年次計画については、先般実施機関から申出のあった変更の内容を踏まえつつ、本評価の内容及び我が国の厳しい財政環境を勘案し、本作業部会において審議の上、決定した。

備考（用語解説等）

○ 重力波

時空の歪みが波動として光速で伝播するもの。1916年にアインシュタインの一般相対性理論により予言された。超新星爆発、連星中性子星や連星ブラックホールの合体、ブラックホールへの天体の落下などの際に放出される。特に、ブラックホールが生まれる瞬間を観測する手段となる。連星中性子星の観測により間接的に存在が確認されていたが、2015年（平成27年）9月14日に米LIGOによりついに連星ブラックホール合体現象からの重力波が直接観測された。

○ 重力波天文学

今までの天文学は、光を含む様々な波長の電磁波を観測することで発展してきた。これに対して重力波を測定することで、重力に起因した超新星爆発、連星中性子星や連星ブラックホールの合体などの天体現象を観測して、今までに得られた天体の情報とは質的に違う情報から宇宙を探る新しい天文学分野のこと。

○ レーザー干渉計

レーザー光の波の干渉を利用して微小な変位を計測する装置であり、高感度に計測するためのさまざまな工夫が加えられている。

○ 連星中性子星

中性子星が対になって互いの周りを公転運動している連星系である。公転運動に伴う重力波放出により次第にエネルギーを失うことが公転周期の長年に亘る観測データから確認されており、最終的には合体してブラックホールになると考えられている。

○ ブラックホール

中性子星の質量はほぼ太陽質量の1.4倍であるが、これよりも質量が重くなると中性子自身が重力に耐えられずに崩壊することが予見されている。これがブラックホールである。このようなブラックホールの連星が連星ブラックホールである。

○ 一般相対性理論

アインシュタインが生み出した重力と時空に関する理論で、我々の住む太陽系のような重力のもとでは、ニュートンの重力法則に帰着するように作られているが、当初、謎だった水星の近日点の移動を解明できたことや光が太陽の重力で曲げられる現象を予言してその通りに観測されたことなどから広く信じられるようになった。今では、ブラックホールや宇宙の膨張などを正しく表すことができると信じられている。

○ 低温鏡

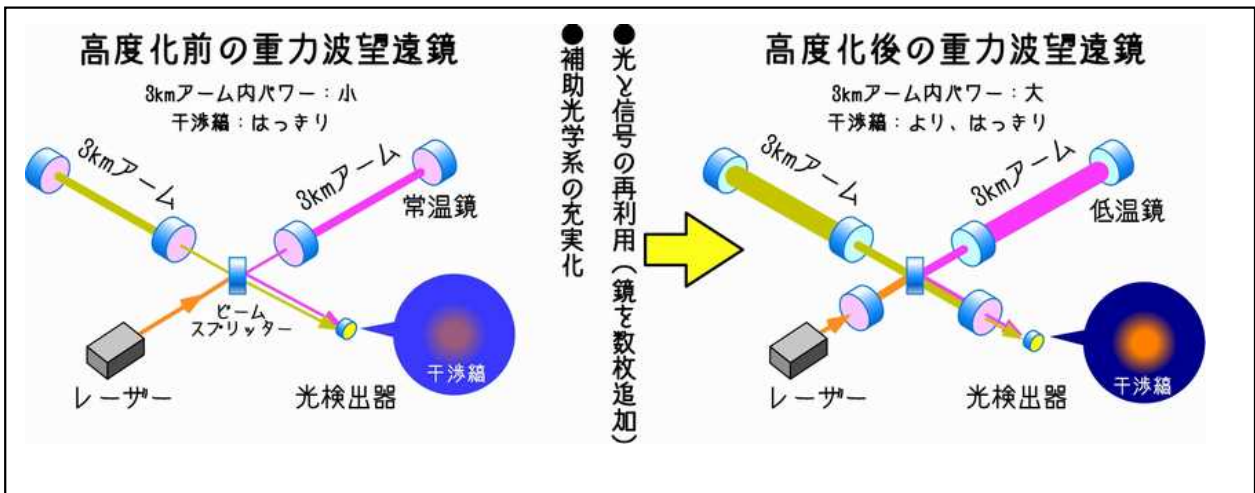
レーザー干渉計に使用する反射鏡は、熱振動により雑音となるが、その振動を温度を低下させることにより下げ、雑音を小さくできる。この目的のために絶対温度で20K(-256℃)にまで冷却した鏡を使用する。

○ 鏡の熱雑音

すべてのものは、熱を持っており、そのエネルギーで運動をしている。自由に動き回れる粒子は、ブラウン運動と呼ばれるランダムな運動を行うことが知られているが、拘束すると、そのエネルギーはその重心の周りに回転したり振動したりすることに向かう。これが熱雑音であり、鏡も例外ではなく振動する。

○ リサイクリング光学系

KAGRA では、当初はまず簡単な干渉計構成で干渉計を動作させて、3km の基線のレーザー干渉計の経験を積む予定である。その後、干渉計の 3km のアームから入射光側に戻ってきたレーザー光、及び出力側に出た光の信号以外の成分を、曲率、表面精度、反射率が非常に精度よく製作された非常に高度な常温の鏡を（低温鏡以外に）新たに追加して、共に反射させて干渉計の 3km のアームに戻して（リサイクリング光学系）干渉計で使える光の強度を増し、その結果感度を向上させる。



左図：最初に動作させる干渉計。3km のアームから戻ってきたレーザー光をビームスプリッターで干渉させ、その出力を検出する単純な構成。右図：リサイクリング光学系を設置して高度化した干渉計。3km のアームから入射光側及び出力側に戻ってきたレーザー光を鏡により反射させて 3km のアームに戻し再利用する干渉計。この工夫によって重力波に対する感度が向上する。

○ 国際共同観測 03（オースリー）

改良型 LIGO により実施される 3 回目の重力波観測。01 で重力波初観測に成功し、02 では Virgo との共同観測が行われ、連星中性子星合体をとらえた。

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

(委員)

栗原和枝 東北大学未来科学技術共同研究センター教授

(臨時委員)

伊藤早苗 九州大学名誉教授、九州大学極限プラズマ研究連携センター顧問
中部大学客員教授

井本敬二 自然科学研究機構理事・副機構長、生理学研究所長

大島まり 東京大学大学院情報学環教授、東京大学生産技術研究所教授

川合知二 大阪大学産業科学研究所特任教授

小林良彰 慶應義塾大学法学部教授、慶應義塾大学社会科学データ・アーカイヴセンター (SU) センター長

※鈴木洋一郎 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構特任教授

原田慶恵 大阪大学蛋白質研究所教授

※横山広美 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構教授

(専門委員)

田村裕和 東北大学大学院理学研究科教授

新野宏 東京大学大気海洋研究所客員教授

松岡彩子 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所准教授

観山正見 広島大学特任教授

安浦寛人 九州大学理事・副学長

アドバイザー

井上邦雄 東北大学 ニュートリノ科学研究センター長

藏重久弥 神戸大学 先端融合研究環長

中野貴志 大阪大学核物理研究センター長

(敬称略、五十音順)

※ 鈴木委員、横山委員は、「大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) 計画」の利害関係者であるため、評価には参加していない。