

大型研究計画に関する事前評価について（報告）

「大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験（ハイパーカミオカンデ計画の推進）」

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
「大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験（ハイパーカミオカンデ計画の推進）」について	
1. 計画の概要	
(1) 概要	4
(2) 内容	5
(3) 実施体制	8
(4) 国内における検討経緯	8
(5) 国際的な動向	10
(6) 年次計画	11
(7) 予算規模	12
2. 計画の評価	
(1) 研究者コミュニティの合意	13
(2) 計画の実施主体	13
(3) 共同利用体制	13
(4) 計画の妥当性	14
(5) 緊急性	14
(6) 戦略性	14
(7) 社会や国民からの支持	14
3. まとめ	
(1) 総合評価	16
(2) 計画推進に当たっての留意点	16
用語解説	18
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	22

はじめに

文部科学省では、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ため、2012年度（平成24年度）に「大規模学術フロンティア促進事業」（以下「フロンティア事業」という。）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である「ロードマップ」*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。

このたび、2017年（平成29年）7月に作業部会が策定した「ロードマップ2017」に基づく検討を行った結果、フロンティア事業の新規プロジェクトとして、「大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験（ハイパーカミオカンデ計画の推進）」を選定した。

これに伴い、作業部会では、本プロジェクトの計画全体を確認し、今後のプロジェクト推進に当たっての留意点を明らかにする観点から、事前評価を実施した。

事前評価に当たっては、関連分野の専門家がアドバイザーとして参画し、本プロジェクトの実施機関からヒアリングを実施した。評価の観点は、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社会や国民からの支持とし、観点別の評価を踏まえてここに総合的な評価結果を取りまとめた。

* 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

「大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験（ハイパーカミオカンデ計画の推進）」について

1. 計画の概要

(1) 概要

本計画は、日本をホスト国とする世界 17 カ国による国際協力科学事業として、岐阜県飛騨市に総重量 26 万トン（有効質量 19 万トン）の大型先端検出器「ハイパーカミオカンデ」を建設するとともに、運用中の J-PARC 大強度陽子加速器（以下、「J-PARC 加速器」という。）の増強と組み合わせて素粒子ニュートリノの性質の全容を解明し、さらに陽子崩壊の探索や超新星ニュートリノの観測を行う。スーパーカミオカンデの約 8 倍の有効質量の検出器に従来の 2 倍の性能を持つ最新型光センサーを使用することで究極の性能を実現するハイパーカミオカンデは、2020 年代後半から 20 年以上にわたり素粒子・宇宙研究の国際的な基幹装置となる。



(2) 内容

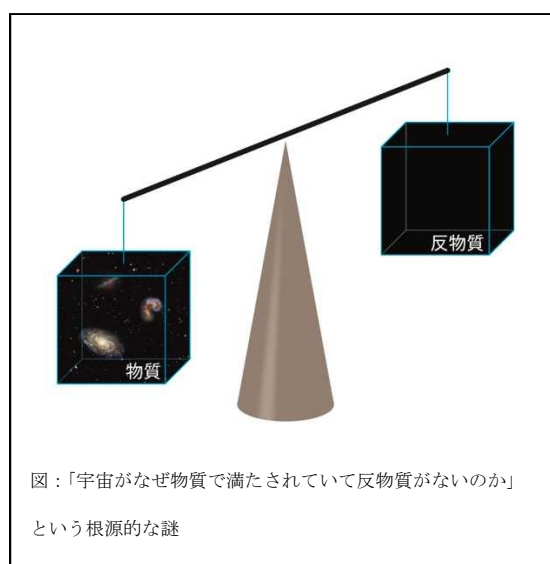
ニュートリノ研究及び陽子崩壊実験は、素粒子の大統一理論を直接検証できる唯一の実験手法とされており、アインシュタインも夢見た万物の究極理論に向けて、人類の理解を大きく前進させることに挑戦する。

スーパーカミオカンデ¹や後続実験の成果により、ニュートリノの性質の理解はこの20年で大きく進展してきた。その一方で、ニュートリノの質量が他の素粒子に比べて不自然に100万倍以上も軽いことや、ニュートリノの性質によって宇宙が現在の姿になったとする仮説など、深淵な謎や可能性が新たに生まれてきた。さらに、大統一理論が预言する陽子の崩壊現象をより高感度で実験する必要性が高まってきた。

ハイパーカミオカンデ計画においては、人類にとって根源的な問いにつながる以下の3つの主要な研究に取り組む。

i. ニュートリノの性質の全容解明

ハイパーカミオカンデ計画においては、J-PARC加速器からのニュートリノビームと大気・超新星・太陽ニュートリノにおけるニュートリノ振動を精密に測定することにより、3種類のニュートリノの質量(差)と混合パラメータの全容を解明する。ニュートリノの性質の理解は素粒子物理学において重要であるばかりでなく、宇宙の物質の起源につながると期待されている²。ハイパーカミオカンデ計画によってその解明の鍵となるCP対称性の破れの検証を行い、さらに、ニュートリノの質量・混合パラメータの精密な決定を通して、ニュートリノの性質の背後にある未知の法則に迫る。



ii. ニュートリノ天文学

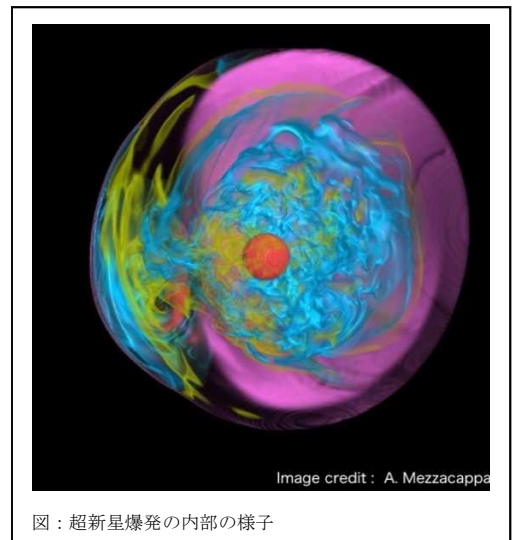
超新星爆発は地球の原材料でありかつ生命体にも必須な重い元素を生成し、宇宙空間に放出してきたとされるが、巨大な星自身の重力に逆らって爆発する仕組みはいまだに理解されていない。ハイパーカミオカンデ計画においては、超新星爆発の中心部から飛来する

¹ 1996年から我が国が世界中の研究者と共に推進してきたスーパーカミオカンデにおける研究は、ノーベル物理学賞につながる素粒子ニュートリノの質量の発見を成し遂げるなど、世界の基礎科学の一分野を牽引してきた。

² ビッグバンによって粒子と反粒子が同じ数だけ生まれたにもかかわらず「宇宙がなぜ物質で満たされていて反物質がないのか」という根源的な問題がニュートリノの性質の理解によって解けると予想されている。

大量のニュートリノを観測することにより、時々刻々の天体内部の変化の様子を調べることができる。仮に天の川銀河中心で超新星爆発が起きた場合には、約5万事象という圧倒的な数のニュートリノが検出され、1ミリ秒以下での詳細な時間変化やエネルギー分布変動の情報が得られることから、超新星爆発機構の詳細な研究が可能となる。それに加えて同じく神岡に設置されているKAGRAをはじめとする重力波観測装置や世界各国の天文台とも連携することで、多角的に爆発の仕組みが解明できると期待される。

爆発に伴う大量のニュートリノの観測が期待される一方で、超新星爆発は宇宙初期から多数発生しており、ここで生成したニュートリノは宇宙全体に漂っている。これらのニュートリノを測定することで、星やブラックホール誕生の歴史の解明にも挑む。

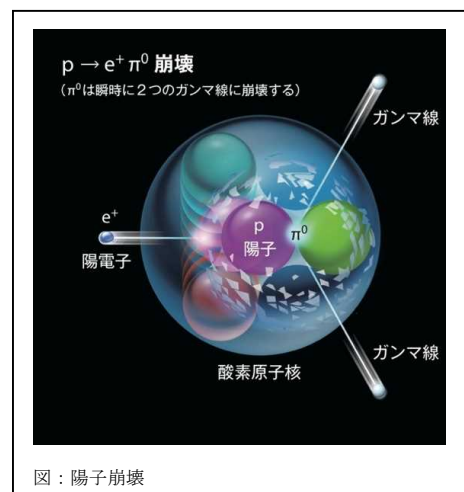


図：超新星爆発の内部の様子

iii. 陽子崩壊の探索

「全ての物質はいつの日かすべて消滅する運命にあるか」という根源的な問いに、ハイパーカミオカンデ計画は挑戦する。³

ハイパーカミオカンデ計画は、崩壊寿命にして 10^{35} 年までの陽子崩壊を発見できる世界で唯一の将来計画とされる。陽子崩壊の発見は、宇宙の物質は永遠ではないことを証明すると同時に大統一理論の確証を得ることとなり、素粒子物理学にパラダイムシフトを起こすことになる。



図：陽子崩壊

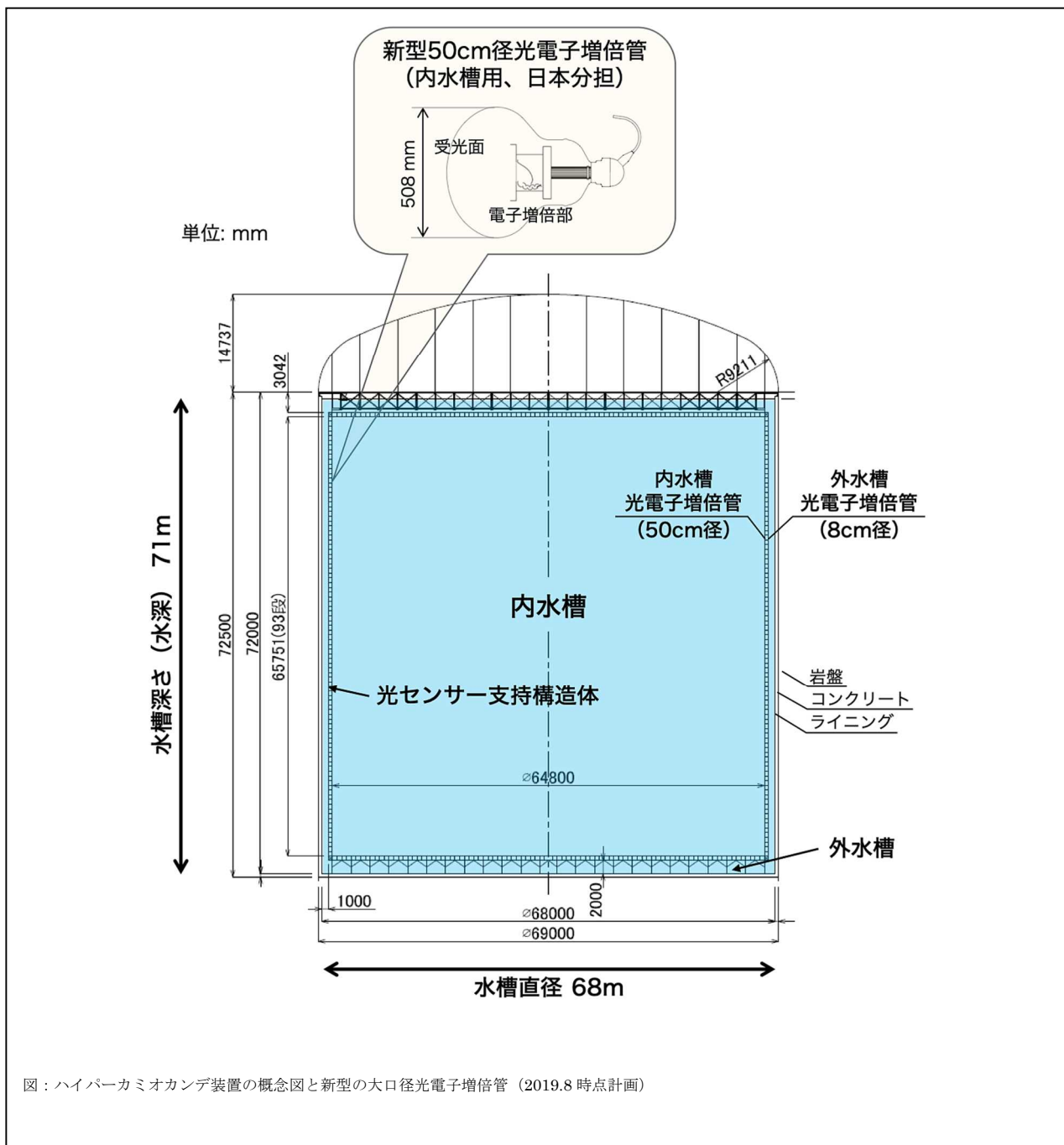
これらの研究を行うためのハイパーカミオカンデは、水槽に26万トンの超純水を貯め、内部でのニュートリノ反応等から生じる微弱な光を水槽内壁に高密度に設置した超高性能光センサーで捉える観測装置である。測定の基本的な原理はカミオカンデ、スーパーカミオカンデで実証されている。このことから、高い信頼度で性能の予想が可能であるばかりでなく、設計において最適化が可能となっている。また、外部からの背景事象を取り除くための外水槽の厚みや水槽内の不感領域を必要最小限に抑えることで、建設コストを抑えつつ観測に用いる有効質量は19万トンを確保する。

また、光センサーと関連機器は日本を含む国際貢献により実現する。日本が分担する新型の大口径光電子増倍管はスーパーカミオカンデで使用されているものに比べ性能が飛躍

³ 自然界にある4つの基本的な力のうち重力を除く3つを統一する理論（大統一理論）では、陽子の崩壊が予言される。

的に向上しており、2倍の光子検出効率を持っている。これを2倍の時間精度で捉えることで究極の性能を実現する。さらに、光電子増倍管の耐水圧性能が2倍改善されていることに加え、高強度の保護カバーを開発することで、実験の安全性を損なうことなくより大きな水槽の設計が可能となっている。

さらに、ニュートリノビームを供給するJ-PARC加速器ではビーム強度を1.3MWに増強するとともに、前置ニュートリノ測定器の改良を行うことにより、世界最高感度でニュートリノにおけるCP対称性の破れを探る。

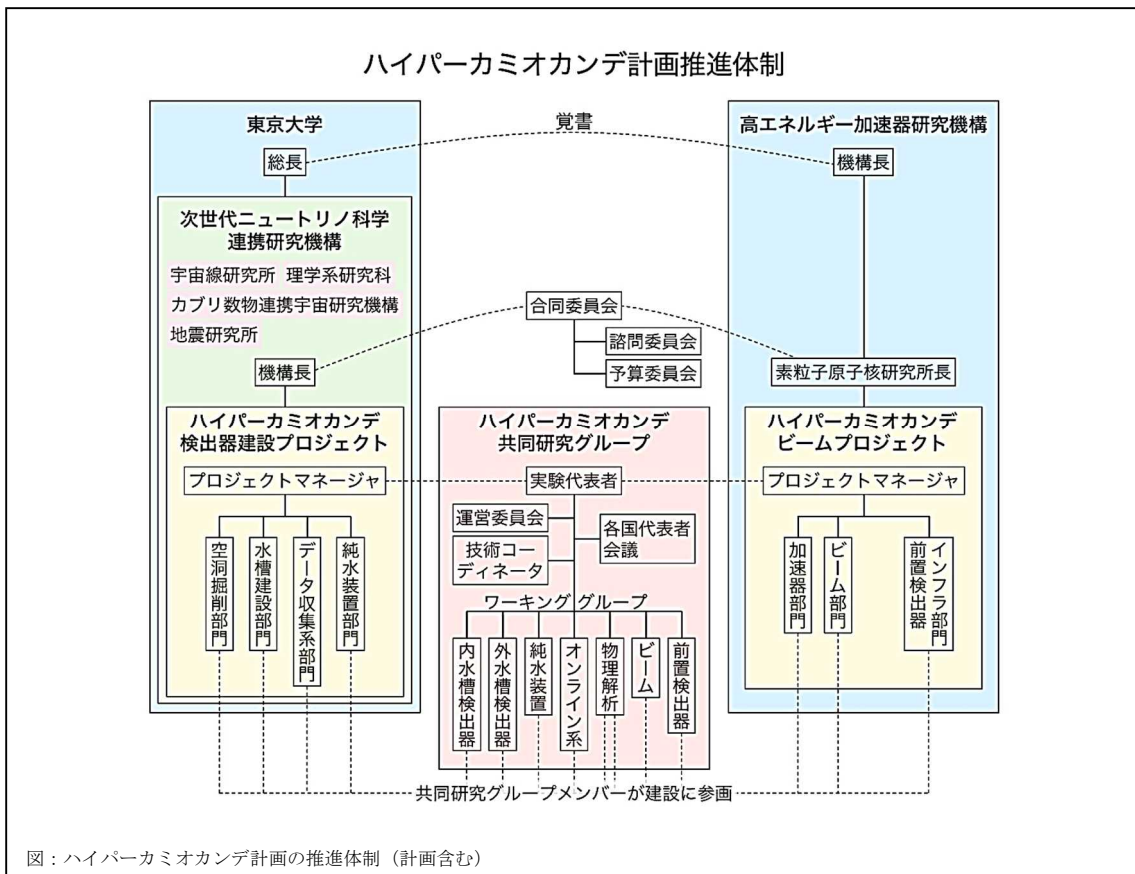


(3) 実施体制

東京大学と高エネルギー加速器研究機構を中核機関とし、国内外の研究機関・大学から参加する研究者が協力して計画を推進する⁴。

東京大学では、推進体制をより一層強化するため、2017年10月に次世代ニュートリノ科学連携研究機構を発足させている。また、国内外の素粒子物理・宇宙線物理研究者と工学専門家からなる外部諮問委員会により、本計画への評価と助言を定期的に受ける体制ができています。さらに国内外の政府機関・研究機関代表者等が一堂に会する予算委員会において、国際協力推進のための情報交換と議論を行ってきている。

研究者間では、17カ国82機関から約330名の研究者が参加する国際共同研究グループを結成し、組織を構築して計画を推進している。また、メンバーの7割以上が海外からの参加者である。実験代表者には国内及び海外のメンバーから1名ずつを選び、各国代表者による会議の議長を外国人が務めるなど、研究グループの運営を国際的なメンバーによって行う体制が整えられている。



(4) 国内における検討経緯

東京大学宇宙線研究所が責任機関として建設したスーパーカミオカンデでは1996年4月から国際共同実験として観測を開始し、これまでに大気ニュートリノや太陽ニュートリノ

⁴ 2015年1月には、東京大学宇宙線研究所と高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所の間で、ハイパーカミオカンデ計画における協力についての覚書を交わしている。

ノの観測によりニュートリノ振動の発見をはじめとする数々の画期的な成果を上げてきた。これらの発見を契機とした研究の劇的な進展に伴い、新たな根源的な謎が数多く生まれ、その解明のための新たな実験の必要性が明らかとなった。そのため、次世代の観測装置としてハイパーカミオカンデを構想し検討が続けられてきた。

長年にわたり候補地の地盤調査や岩盤の安定性解析を進め、また、装置の技術的な実現可能性を確立するよう水槽や検出器支持構造体の設計を行ってきたところ、空洞と水槽の設計に関しては2018年7月までに国内の工学専門家によるレビューを4度にわたり開催し、「空洞・水槽工事の実現可能性は確かなレベルに達した」と評価されている。

2013年度からは科学研究費助成事業新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」の計画研究A03「大気ニュートリノを用いた質量階層構造の研究と次世代研究フロンティアの発展」（代表：宇宙線研究所 塩澤真人）等により高感度光電子増倍管などの技術開発を行い、装置の設計の最適化が行われている。

装置の設計と期待される成果をまとめたレポートを作成し、2016年2月、2017年9月及び2019年6月の3度にわたり国際的な外部諮問委員会によるレビューを受けた結果、「日本および世界的な基礎科学のプログラムにおいて非常に重要な実験であり、全面的にサポートすべきである」という評価を受けている。

本計画は宇宙線物理及び高エネルギー物理学の分野をまたぐ計画であり、両分野のコミュニティにおいては、ともに最重要計画として位置付けられている。宇宙線コミュニティ（宇宙線研究者会議）では、本計画を重力波望遠鏡KAGRAの次の超大型将来計画の最重要課題と位置付けられている（CRC実行委員長レター「ハイパーカミオカンデ計画の早期実現へ向けてCRCからのお願い」、平成28年3月31日）。

高エネルギー物理のコミュニティ（高エネルギー物理学研究者会議）では、2012年及び2017年に公表された将来計画検討小委員会の答申で、本計画が分野の基幹となる将来計画であり早期実現を目指すべきとされている。

宇宙線研究所では外部の委員による将来計画検討委員会を設置して研究所の将来計画の検討を行った結果、2017年3月に本計画を「次期主要プロジェクトとして適切な計画と認め、速やかに実現を目指すべき」という報告を受けている。また、2016年に国際的な外部有識者によるレビューを経て策定された高エネルギー加速器研究機構でのProject Implementation Planでは、「ハイパーカミオカンデプロジェクトのためのJ-PARC増強」が優先順位1位とされている。

また、スーパーカミオカンデの建設時に、カミオカンデをカムランドとして他大学にその運営を引き継いだように、ハイパーカミオカンデの建設・安定運用後は、スーパーカミオカンデの停止や他大学への引継ぎ等も検討している。

このように本計画は関連コミュニティの検討及び十分な技術開発を経て、いつでも建設に着手できる状況にある。

(5) 国際的な動向

ニュートリノの性質の解明は基礎科学の領域で世界的に重要な研究課題として認知されており、米国の高エネルギー物理学研究の戦略をまとめた Particle Physics Project Prioritization Panel (P5) の報告書や、欧州の高エネルギー物理学分野と宇宙素粒子物理学分野それぞれの戦略をまとめた報告書、“The European Strategy for Particle Physics” 及び “European Strategy for Astroparticle Physics” においても、ニュートリノ研究は最重要研究の1つとして位置付けられている。

ニュートリノ・陽子崩壊の研究において日本は30年以上にわたり世界を牽引してきており、国際的にもこの分野での我が国のリーダーシップに対する期待⁵は大きい。

米国では本計画と同様の目標のもと、4万トンの液体アルゴンニュートリノ測定器を用いる DUNE 実験が計画されており、2026年に加速器ニュートリノビームを用いた実験を開始する予定である。2017年度には米国エネルギー省(DOE)により施設の建設予算措置が開始され、これを受けて世界各国で DUNE 実験への参加のための予算要求が始まっており、熾烈な国際競争の状況にある。本計画の始動が遅れれば基礎科学分野での日本の主導権を失う危機を招くことになる。

欧州でも以前は独自の将来計画が検討されていたが、2013年にまとめられた “The European Strategy for Particle Physics” において欧州内では大規模ニュートリノ実験は行わず、日米で行われる実験に参加するという方針が決定されている。その後、米国で DUNE 実験が承認されたため、DUNE 実験に多数の欧州からの参加者が集まってきているという状況にある。一方、日本では多くの成果を出している現行実験(スーパーカミオカンデ、T2K実験)には、欧州から多くの研究者が参加しており、ハイパーカミオカンデ計画の実現が待ち望まれている。さらに、2019年から “The European Strategy for Particle Physics” の更新のための議論が始まっており、ハイパーカミオカンデ計画への欧州コミュニティの強力な貢献を期待している(ESPPU Open Symposium Granada、2019年5月)。

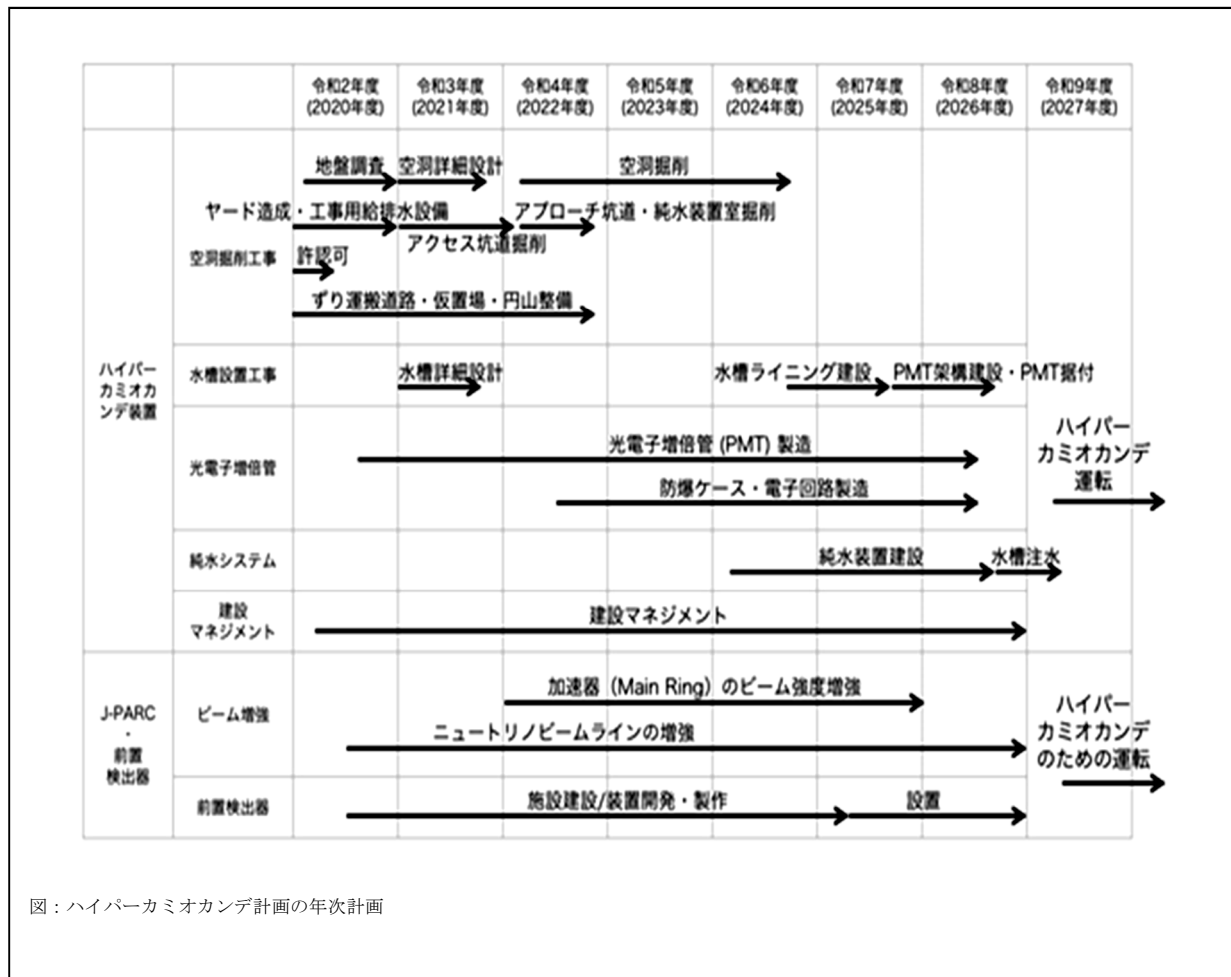
これまで築き上げて来た実験技術、経験と知識の蓄積、人材を礎に、今後も日本が世界をリードするためにハイパーカミオカンデ計画の実現は急を要する状況である。

⁵ さらに、国際加速器将来委員会(ICFA)のニュートリノ分科会による “Roadmap for the international accelerator-based neutrino programme” の中では、ハイパーカミオカンデ計画と DUNE 実験が国際的な基幹ニュートリノプロジェクトと位置付けられている。

(6) 年次計画

本計画に係る年次計画は、以下のとおりである。

ハイパーカミオカンデの建設及びJ-PARC加速器の高度化は、全体で7年を予定している。初年度に許認可手続や地下空洞掘削予定地の詳細な地盤調査を完了し、また地下サイトへのアクセストンネル入口予定地におけるヤード造成・設備設置を行い、光電子増倍管（PMT）の生産を開始する。次年度には空洞及び水槽の詳細設計を行うとともに、アクセス坑道の掘削等を開始する。約3年の空洞掘削の後、2年をかけて水槽の建設とPMTの据付けを行い、さらに純水を水槽に注水して装置の運転を開始する。J-PARC加速器は段階的にビーム強度を増強し、2026年度までに1.3MWでの安定運転を実現する。



図：ハイパーカミオカンデ計画の年次計画

(7) 予算規模

建設予算総額 約 722 億円（日本負担：約 545 億円、2020～2026 年度）

ハイパーカミオカンデ 約 649 億円（日本負担約 502 億円⁶）

J-PARC 加速器 約 73 億円（日本負担約 43 億円）

年間運用経費 約 60 億円/年

※ 建設終了後の運転経費。ハイパーカミオカンデが年間 20 億円（20 年間）、
J-PARC 加速器が 40 億円（10 年間）と見込んでいる。

⁶ 実施機関である東京大学は、200 億円の自主財源（資金運用収益や土地等の有効活用、寄付金等）の確保を行い、建設経費に充当する予定。

2. 計画の評価

(1) 研究者コミュニティの合意

ハイパーカミオカンデ計画は、宇宙線及び高エネルギー物理学にまたがる計画であることから、両分野の国内コミュニティにおいて議論が進められており、重要な計画と位置付けられている。例えば、宇宙線分野では、東京大学宇宙線研究所の将来計画検討委員会が本計画を「ICRRの次期主要プロジェクトとして適切な計画と認め、速やかに実現を目指すべき」と判断（東京大学宇宙線研究所将来計画検討委員会最終報告書（2017年10月26日））し、高エネルギー物理学分野では、高エネルギー物理学研究者会議（JAHEP）の下に設置された高エネルギー物理学検討委員会による答申において「ハイパーカミオカンデの早期実現を国際プロジェクトとして推進すべき」（2017年9月6日）と位置付けられている。また、国際的な動向としても、米国の素粒子物理学プロジェクトの長期戦略（P5レポート）（2014年8月）や欧州の素粒子物理戦略（2013年5月）のそれぞれの戦略においても、ニュートリノ研究は最重要研究の1つとして位置付けられており、ニュートリノ研究は基礎科学の領域で世界的に重要な研究課題として認知されている。

(2) 計画の実施主体

本計画は、東京大学及び高エネルギー加速器研究機構を中核機関とし、国内外の研究機関・大学から参加する研究者が協力して計画を推進することとしている。そのため、2015年1月には、東京大学宇宙線研究所と高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所の間で、ハイパーカミオカンデ計画における協力についての覚書が交わされるとともに、東京大学では、推進体制をより一層強化するため、関係部局の連携による次世代ニュートリノ科学連携研究機構を発足している。

また、国内外の素粒子物理・宇宙線物理研究者と工学専門家からなる外部諮問委員会により、本計画への評価と助言を定期的に受ける体制を構築するとともに、国内外の政府機関・研究機関代表者等が一堂に会する予算委員会においては、国際協力推進のための情報交換・議論が行われている。

(3) 共同利用体制

東京大学宇宙線研究所及び高エネルギー加速器研究機構両機関ともに、これまで国際的な共同利用・共同研究を受け入れてきており、スーパーカミオカンデによる実験では10カ国約180人（約半数が海外）、T2K実験では12カ国約470人（75%が海外）の実績がある。また、ハイパーカミオカンデ計画においては、これらよりも多い17カ国82機関から研究者が参加する国際共同研究グループを結成（約330人が参加予定であり、メンバーの7割以上が海外からの参加者）し、実験代表者には国内及び海外のメンバーから1名ずつを選び、また各国代表者による会議の議長は外国人が務めるなど、研究グループの運営を国際的なメンバーによって行う体制が取られる。したがって、国際的な面も含め、共同利用体制が整っているものと見受けられる。

(4) 計画の妥当性

実施主体である東京大学及び高エネルギー加速器研究機構において、ロードマップ2017の留意点に係る調査検討を実施し、26億円の建設費見直し、23億円の海外負担の増大、200億円の自主財源の確保等により国費相当額の圧縮に努めている。また、カミオカンデ及びスーパーカミオカンデ等で蓄積してきた実績や経験をもとに、ハイパーカミオカンデ建設地における岩盤調査・安定性解析、岩盤内部における空洞成立性の確認、光電子増倍管の性能向上を既の実現している。加えて、人員面においても、先述のとおり、東京大学次世代ニュートリノ科学連携研究機構を発足させるなど体制整備を進めている。

また、スーパーカミオカンデが建設された際には、カミオカンデをカムランドとして他大学にその運営を引き継いだように、ハイパーカミオカンデの建設・安定運用後は、スーパーカミオカンデの停止や他大学への引継ぎ等も検討されていることから、本計画の妥当性が見受けられる。

(5) 緊急性

国際的な競合関係にある米国のDUNE実験が先行し、2026年から観測開始が予定されているとともに、DUNE実験へ参加する研究者についても増加している状態である。ハイパーカミオカンデ計画への着手の遅延は、これまで我が国がカミオカンデ、スーパーカミオカンデやT2K実験等でリーダーシップを発揮してきたニュートリノ研究において後塵を拝することになるとともに、これまで我が国と連携を深め、今後もハイパーカミオカンデ計画への参画が見込まれる優秀な研究グループが海外に流出する恐れがあることから緊急性が見受けられる。

(6) 戦略性

本計画では、1. ニュートリノの性質の全容解明、2. ニュートリノ天文学、3. 陽子崩壊の探索を主要な研究目的として取り組むこととしている。カミオカンデ、スーパーカミオカンデによる実験やT2K実験等によって培われてきた実績や経験をもとにしつつ本計画を推進することは、その実現可能性はもとより、素粒子物理学分野において、2度のノーベル賞受賞に代表されるように、ニュートリノ天文学の創出に貢献してきた我が国の強み・特色を最大限発揮することが可能となる戦略性を有するものである。さらに、日本の先端性に魅力を感じ、海外も含め多数の研究グループ当該研究グループに豊富な研究機会の提供を可能とする国際的な拠点機能は、当該分野は勿論のこと、他分野への波及効果も含め、我が国のサイエンスの国際競争力の強化や長期的な発展に資するものであることから、計画の実現に向けて戦略的な取組がなされている。

(7) 社会や国民からの支持

岐阜県飛騨市と東京大学宇宙線研究所で連携協定を結び、研究の発展と地域活性化における協力関係を構築していることや、地域での一般講演会やサイエンスカフェを定期的実施している。また、地域をはじめ、全国的にもテレビ報道や新聞、雑誌、教科書等への掲載など十分な社会発信に努めており、地域との連携強化や地域活性化、国民の基礎科学と本計画に対する支持の向上、次世代の研究開発人材の育成等に貢献している。

3. まとめ

(1) 総合評価

ハイパーカミオカンデ計画は、カミオカンデ及びスーパーカミオカンデで取組んできたニュートリノ研究の延長上にある研究内容であり、早期に実現すれば国際的に優位に立つことが期待される。他方、米国ではDUNE実験が既に建設に着手しているとおり、当該研究分野における国際競争は激しい。

これまで世界のニュートリノ研究を主導してきた我が国にとって、CP対称性の破れや陽子崩壊の探索等、他国が我が国に先んじて研究成果を公表することになれば、我が国の強みや優位性が失われる懸念を踏まえると、早急に取り組むべき計画と考える。

実施主体においては、本計画の実現に向けた戦略的な取組が進んでいる。まず、実施機関である東京大学及び高エネルギー加速器研究機構において、2017年のロードマップ掲載時の留意点として掲げた「本計画は規模・経費ともに壮大であるため、国際連携の更なる深化、拡大を図り、多方面にわたる国際協力体制の構築を検討する必要がある」への対応として、大学における自主負担を含めた経費の削減に取り組むとともに、国際的な予算委員会の設置等を通じ、国際的にも積極的なプロモーション活動を実施することで、当初予定以上の国際協力が見込まれる状況となっている。また、スーパーカミオカンデが建設された際には、カミオカンデをカムランドとして他大学にその運営を引き継いだように、ハイパーカミオカンデの建設・安定運用後は、スーパーカミオカンデの停止や他大学への引継ぎ等も検討している。

さらに、これまでの研究内容・成果については、2度にわたるノーベル賞の受賞につながったこととも相まって社会からの関心も高く、マスメディアを通じて広く社会や国民に発信がなされている。特に、地元地域については、施設見学の受入れや地元の小中学生への出前授業等を通じ、ニュートリノ研究に対する支持を得ており、良好な関係を築いている。

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) 計画推進に当たっての留意点

ハイパーカミオカンデ計画の推進に当たっては、以下の点について留意する必要がある。

① 関連するニュートリノ研究に係るコミュニティの連携強化

本計画は、米国DUNE実験と競合関係にあり、米国においてはすでに建設が着手している状況にあることから、海外のニュートリノ研究のコミュニティはその多くがDUNE実験に参画し始めており、ハイパーカミオカンデ計画とは4倍近い差が開きつつある。今後の計画の実現に向け、海外からの更なる参画者の確保を含めた関連するニュートリノ研究のコミュニティとの連携協力強化を目指す必要がある。

② 社会発信と国民の支持の増大

カミオカンデやスーパーカミオカンデは、2度にわたるノーベル賞の受賞という社会的なインパクトも手伝って、適切な社会発信や地元と良好な関係を築いている。今後、ハイパーカミオカンデ計画という新規のプロジェクトに取り組むことから、巨額の資金に見合った必要性等について、地元住民のみならず、広く国民全体からもより強い支持を得られるよう一層努力する必要がある。

③ 不測事態への対応

本計画は、大規模かつ壮大であることから、建設に当たっては、自然災害や事故等予期せぬ不測の事態が生じることが想定される。また、激しい競争関係にある米国DUNE実験との関係を常に注視するなど国際情勢への適切な対応も求められる。そのため、安全・安心に配慮した計画の推進はもとより、2027年度からの観測開始を目指したプロジェクトマネジメントを適切に実施する必要がある。

備考（用語解説）

○ J-PARC大強度陽子加速器

東海村に建設された大強度陽子加速器施設。直線加速器、3 GeV（30億電子ボルト）陽子シンクロトロン、50 GeV（現在は30 GeV）陽子シンクロトロンから構成され、それぞれの加速器が供給する大強度の陽子ビームを用いて、素粒子、原子核、物質、生命などの研究が行われている。

○ ニュートリノ

最も基本的な粒子「素粒子」のうちの一つ。1930年ごろパウリにより予言され、1956年にライネスとコーワンの実験により発見された。電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの3種類が存在し、それぞれに反粒子も存在する。ニュートリノは他の物質と弱い相互作用しかしないため、反応する力が非常に弱く、ほとんどすべての物質を透過してしまい、観測することが大変難しい。このため、いまだその性質の多くが解明されていない。たとえば、なぜ他の粒子に比べて非常に軽いのか、電子ニュートリノとタウニュートリノ、どちらが重いのか、別の種類のニュートリノに変化する確率がなぜこんなに大きいのか、ニュートリノと反ニュートリノで本当に性質が一緒なのか、などといった謎が残されている。これらの謎は、現在の宇宙に物質しかないことの起源や、素粒子の「標準模型」を超えた新たな理論に関連していると考えられている。

○ 陽子崩壊、大統一理論

大統一理論は自然界の3つの力を統一しかつ2つの物質素粒子クォークとレプトンを統一する仮説であり、陽子の崩壊を予言する。素粒子の大統一理論仮説は、素粒子の究極理論に到達するための通過点と考えられている。現在の素粒子の「標準理論」では、自然界の4つの力のうちの2つ（電磁気力と弱い力）しか統一されていない。大統一理論仮説は、これら2つに加えて強い力も統一的に扱うものだが、その実験的検証は非常に困難である。数少ない検証可能な予言として、陽子が未来永劫安定ではなく、より軽い粒子にまれに壊れる事があるというものがあるため、陽子崩壊の観測が待ち望まれている。

○ 超新星爆発と超新星爆発ニュートリノ

星が自らの重力に耐え切れなくなり崩壊し、このとき、鉄より重い元素を生成すると同時に、ニュートリノや光を大量に生成する現象を超新星爆発と呼ぶ。古来より、突然明るく光る星として認知されてきた。1987年に観測された超新星1987Aから飛来したニュートリノはカミオカンデ他の検出器で観測され、この成果から、2002年に小柴教授にノーベル物理学賞が授与された。超新星の中心部から飛来するニュートリノは、未だ理解が進んでいない超新星の爆発過程の情報を持っていると期待さ

れ、その観測が待たれている。

○ スーパーカミオカンデ

5万トンの大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置。ニュートリノが水と反応した時に発する光を検出する。1996年から稼働。1998年にニュートリノに質量があることを示す大気ニュートリノ振動を発見し、2015年の梶田隆章氏のノーベル物理学賞につながった。また、2001年の太陽ニュートリノ振動発見においても大きな寄与を果たした。

○ 大気ニュートリノ

宇宙線が地球大気と衝突することにより生じるニュートリノのこと。宇宙を飛び交う高エネルギーの粒子（主に陽子）が、地球表面の大気に衝突したとき、クォーク・反クォークからなる π 粒子などが生成する。 π 粒子はミューニュートリノとミュー粒子に崩壊、ミュー粒子はさらにミューニュートリノと電子ニュートリノ、電子に崩壊する。これらの過程で生成されるニュートリノを大気ニュートリノと呼ぶ。大気ニュートリノは地球のどこでも生成するが、カミオカンデ実験においては上向きのミューニュートリノが少ない兆候が見られた。スーパーカミオカンデにおける高統計精密測定により、これがニュートリノ振動によることが明らかとなり、2015年にノーベル物理学賞が梶田教授に授与された。

○ 太陽ニュートリノ

太陽は主に水素の核融合でエネルギーを生成している。このとき、電子ニュートリノが大量に生成される。このニュートリノを太陽ニュートリノと呼び、地球表面では1平方センチメートルあたり毎秒600億個以上が飛来している。太陽ニュートリノの観測により、太陽のエネルギー起源が核融合であることが実験的に証明された。デイビス博士らの太陽ニュートリノの初観測の頃からニュートリノ量が少ないことが報告されていたが、スーパーカミオカンデ実験及びSNO実験によって、これが最終的にニュートリノ振動によるものとわかった。

○ ニュートリノ振動

ニュートリノが飛行中に種類を変える現象をニュートリノ振動という。ニュートリノに質量がある時にのみ起こる現象であり、ニュートリノ振動が存在することは、ニュートリノに質量がある証拠となる。

○ CP対称性の破れ、CP非保存

粒子と反粒子の間で素粒子としての基本的な性質が変わらないことをCP対称性と呼ぶ。クォークではCP対称性がわずかに破れている（粒子と反粒子でわずかに性質が違う）ことが知られているが、ニュートリノとその反粒子である反ニュートリノの間の性質の違いは未解明であり、ニュートリノ振動の精密測定により検証が可

能になる。ニュートリノのCP対称性の破れは、ビッグバンにより生じたはずの反物質が消えた謎を解決する、重要な鍵となっている。

○ KAGRA

神岡町に建設された重力波観測装置。端点で直角に交わる3 kmの直線の坑道に設置された真空パイプ中に強力なレーザー光を往復させ、光の干渉縞を観測することで、二つの坑道の微小な長さの変化を検出することにより、重力波の通過に伴う時空のゆがみを見つけ、重力波観測を行う。海外で先行して稼働している実験では、検出器は（ほぼ）地表に設置され、かつ、レーザー光の反射に用いる鏡が常温であるため、地面振動や熱雑音が信号検出感度を下げる原因となっている。KAGRAでは装置全体を地下に設置し、さらに鏡を冷却することで雑音を減らし、感度の向上を図っている。

○ 銀河宇宙形成以来起こっている超新星爆発

宇宙の初めから宇宙のいたるところで起きてきた超新星爆発で生成されたニュートリノは宇宙に溜まり続けている。こうしたニュートリノは背景輻射のように宇宙に漂っているため「超新星背景ニュートリノ」ともよばれる。このニュートリノはあらゆる方向からとんでくるもので、その検出は容易ではないが可能である。過去の超新星ニュートリノの測定により、過去の星の生成・死滅の歴史に加え、爆発やブラックホール形成のメカニズムなど貴重な情報が得られる。

○ カミオカンデ

3千トンの水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置。陽子崩壊探索を主目的として建設され、1983年から稼働。1987年に超新星1987Aからのニュートリノを世界で初めて観測した。また、大気ニュートリノの方向分布に上下非対称性があることや、太陽ニュートリノ数が期待値よりも大幅に少ないことなどの観測結果を得た。これらがスーパーカミオカンデにおけるニュートリノ振動・質量存在の発見につながっている。

○ 光電子増倍管

微弱な光を検出するために実験等で用いられる光検出器。検出器表面にあたった光量に比例した信号が出力される。ハイパーカミオカンデにおいて用いる場合、信号を千万倍に増幅する。実験にあわせ、直径1 cm程度のものから、スーパーカミオカンデ、ハイパーカミオカンデなどで使用される50 cmのものまでさまざまな大きさ、形状の検出器が開発されている。非常に信頼性が高く、正しく利用すれば数十年以上の寿命を持つことも知られている。

○ 前置ニュートリノ測定器

加速器ニュートリノビームを生成直後にJ-PARC側で測定するための検出器。前置ニュートリノ測定器での観測を通し、ハイパーカミオカンデを通過するニュート

リノ数やエネルギー分布を予測することが可能となる。さらに、本測定器を用いたニュートリノ・原子核散乱の精密測定は、ハイパーカミオカンデにおけるニュートリノ観測の不定性低減にも大きく貢献する。

○ 液体アルゴンニュートリノ測定器

荷電粒子（電荷を持った粒子）が液体アルゴン中を通過する際に生成する電離電子やイオンを観測することで、粒子の飛跡を直接観測する検出器。観測には検出器内に大量に設置された電荷収集用のワイヤー（電線）からの電気信号を継続的に読み出すことで行う。陽子など質量が大きい粒子でも低エネルギーから精度よく観測することが可能である。一方で大型化の実現においては技術的難易度が非常に高く、また、コストも大幅に上昇することから、現在提案されているDUNE実験でも4万トン規模となっている。

○ DUNE実験

米国イリノイ州にあるフェルミ研究所の加速器で生成したニュートリノビームを、1300 km離れたサウスダコタ州サンフォード地下実験施設に設置予定の液体アルゴンニュートリノ測定器を用いて観測、ニュートリノ振動を調べる実験。2026年度の実験開始を予定している。サンフォードに新設する液体アルゴン検出器の体積は4万トンを予定、この検出器を収容する地下実験ホールの建設が2017年7月に開始された。フェルミ研内に新設されるニュートリノビーム生成施設は1.2MWのビーム強度での運転を予定しており、将来2MW超に増強予定である。

○ T2K実験

J-PARC加速器を用いて生成した大強度ニュートリノビームを295 km離れたスーパーカミオカンデに打ち込み、観測することでニュートリノ振動現象を調べる実験。よく理解されたニュートリノビームを用い、高統計でニュートリノ振動を精密に測定できるため、世界最高レベルの精度でニュートリノ振動を研究することが可能となっている。

○ カムランド（KamLAND）

岐阜県神岡町にある鉱山の地下1000メートルに建設された液体シンチレータ検出器であり、スーパーカミオカンデの稼働により、カミオカンデの跡地を東北大学ニュートリノ研究科学センターが引き継ぐ形で2001年より観測が開始した。液体シンチレータは、ベータ線やガンマ線などの放射線が通過するとシンチレーション光という青い光を発する。水を使ったニュートリノ検出器に比べ、シンチレーション光による発光量は約100倍も大きいいため、より低いエネルギーのニュートリノを観測できる。KamLANDの名称は、Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector（神岡液体シンチレータ反ニュートリノ検出器）の略。

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・研究環長
吉田滋	千葉大学大学院理学研究院附属ハドロン宇宙国際研究センター長

(敬称略、五十音順)

※山本委員、吉田委員は、「大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験
(ハイパーカミオカンデ計画の推進)」の利害関係者であるため、評価には参加して
いない。