

大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験

① 計画の概要

ハイパーカミオカンデ計画は、スーパーカミオカンデの約10倍（有効質量約19万トン）の水槽に超高感度光センサーを約5万本備えた、超大型地下水チェレンコフ実験装置を神岡町に2基建設する、核子崩壊・ニュートリノ実験計画である。1基目の検出器の早期建設・運転開始によりCP対称性研究の早期実現を目指し、また段階的な2基目の建設により総有効質量38万トンを実現し、素粒子の大統一理論に迫る陽子崩壊の探索やニュートリノ天文学の展開を行う。大強度陽子加速器J-PARCでは加速器・ビームラインの大強度化を行い、安定して長期に1.3MW程度の強度で運転する。本計画は、ブラジル、カナダ、フランス、イタリア、日本、韓国、ポーランド、ロシア、スペイン、スイス、イギリス、アメリカの12ヶ国による共同事業計画であり、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を実施中心機関とする。ハイパーカミオカンデの第一期建設経費は約675億円と見積もられており、日本はそのうちの約551億円を負担することを計画している。それとは別にJ-PARCの改良と前置検出器建設費用に約72億円が必要であり、日本はそのうち約42億円を分担することを予定している。これまで推進体制構築や準備研究を進めてきており、検出器設計と国際役割分担、建設スケジュールがほぼ固まり、概算要求の検討をしている。2018年4月からの建設開始を目指している。運転開始は2026年4月を予定している。

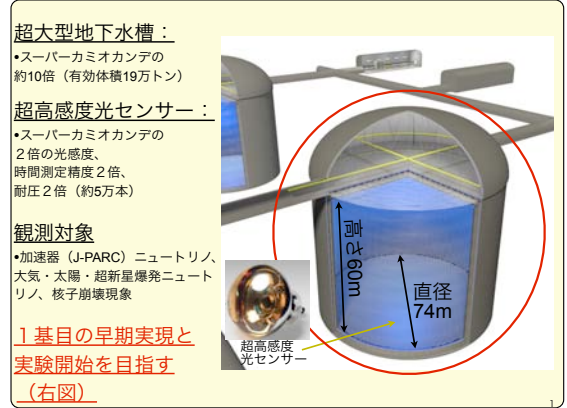


図1、計画の概要

② 目的と実施内容

本研究計画は、スーパーカミオカンデを検出器質量と光感度の双方で凌駕する超大型水チェレンコフ検出器ハイパーカミオカンデを建設し、J-PARCからの大強度・高品質ニュートリノビームを用い、ニュートリノにおけるCP対称性（粒子・反粒子対称性）の破れを探索する。さらに、ハイパーカミオカンデを活用し、素粒子の大統一理論に迫る陽子崩壊の発見を目指す。また、ニュートリノ反応の研究、大気ニュートリノ観測、宇宙ニュートリノ観測、ニュートリノ天文学を総合的に展開する。素粒子物理学の新たな展開と、原子核物理学、宇宙物理学、天文学に新たな知見をもたらすことを目指す。ハイパーカミオカンデは岐阜県飛騨市神岡町の地下に大空洞を掘削して約5万本の光センサーを内部に設置した水槽を2基建設し、超純水を満たすことにより、ニュートリノ反応や核子崩壊から生じる荷電粒子のチェレンコフ光イメージを検出する。第一期建設でスーパーカミオカンデの約10倍（有効質量19万トン）の検出器1基の早期建設・運転開始を行い、CP対称性研究の早期実現を目指す。第一期建設の予算措置などを鑑みて第二期建設の設計を決定し、最終的に総有効質量38万トンを実現する。J-PARCでは加速器・ビームラインの大強度化を行い、安定して長期に1.3MW程度の強度で運転する。

③ 学術的な意義

なぜニュートリノ研究？

- **その性質は標準理論を超える物理の証拠**
 - 極端に軽い質量、大きな世代間混合
- **振動全容の解明へ（世界共通の認識）、ニュートリノ振動を発見した日本が世界を主導できる分野**
 - CP非保存 δ_{CP} → 自然界の粒子と反粒子のアンバランスの理解の鍵
 - 三代質量の順番の決定
- **ニュートリノは天体を見るプローブ**
 - 光では見えない太陽内部、超新星爆発内部等
- **大統一理論の検証**
 - 核子崩壊探索+ニュートリノ研究



図2、科学的動機

J-PARC で進行中のT2Kニュートリノ振動実験で電子ニュートリノへの振動が発見されたため、J-PARC 大強度高品質ニュートリノビームとハイパーカミオカンデを組み合わせれば、世界に先駆けてニュートリノのCP対称性の破れの発見が可能となり、基礎物理学の金字塔となる。また大統計大気ニュートリノもあわせて、CP対称性、質量階層性、混合角等三代ニュートリノの質量・混合の総合研究を行い、世界を主導する次世代ニュートリノ実験を実現する。クォークと大きく異なるニュートリノの性質を明らかにし、未解明の素粒子混合や質量生成機構の理解につなげたい。さらにニュートリノに満ちた宇宙の進化論に対する理解を深める。核子（陽子と中性子）崩壊の探索は、スーパーカミオカンデにより日本が世界を主導しており、核子の寿命が10の33乗から34乗年以上であることがわかってきた。この結果は、もっとも単純な大統一理論予想の範囲に突入したことを意味し、いつ陽子崩壊現象

を発見してもおかしくないところまで来たことを示す。ハイパーカミオカンデの実現により、さらなる長寿命領域が探索可能となり、代表的な崩壊モードである陽子から陽電子と中性パイ中間子への崩壊モードに関して10の35乗年以上の感度に至る。この探索により「素粒子と力の大統一」の証拠の発見と素粒子理論の新たなパラダイムの確立を目指す。超新星爆発に際して

は、例えば我々の銀河中心での爆発においては約 10 万個ものニュートリノ事象の観測が期待される。これにより光では捉えることができない中心核爆発の時々刻々の変化を捉えることができ、中性子星／ブラックホール誕生の瞬間を捉えることができる。また、超新星背景ニュートリノ（宇宙初めからの超新星爆発ニュートリノ）が年間 10 事象程度観測されることが期待され、多くの超新星爆発事象を用いた爆発機構の解明や、重元素合成の歴史の理解を目指す。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

現在日本と米国で CP 対称性の破れの測定実験の実現可能性が追求されている。日本では、スーパーカミオカンデを凌駕するハイパーカミオカンデを建設し、J-PARC ニュートリノビームの増強とあわせて、ニュートリノ研究の確実な展開を目指している。我が国は過去 30 年に渡り水チェレンコフ検出器を用いて世界のニュートリノ研究を主導してきており、また J-PARC 加速器施設を保有するため、本研究は国際協力の中で日本が主導すべき必然性がある。一方米国では日本の実験の 5 倍程度の基線長とニュートリノエネルギー、検出器質量が 1/10 程度の液体アルゴン検出器を用いたニュートリノ実験を計画している。ニュートリノ研究の発展には両方のアプローチが必要で、相互に情報を共有し協力して研究計画を進めている反面、厳しい発見競争に勝つためにはハイパーカミオカンデの一刻も早い建設開始が必要となっている。また代表的な陽子崩壊モードである陽子から陽電子と中性パイ中間子への崩壊モードに関しては、その大検出器質量のためにハイパーカミオカンデのみが 10 の 35 乗年以上の感度に至る。

⑤ 実施機関と実施体制

東京大学宇宙線研究所が中心となりハイパーカミオカンデの建設と運転を推進する。東京大学はスーパーカミオカンデの建設と運転の実績を持ち、実験装置の各要素の開発・運転技術を持つ研究者を擁しており、神岡宇宙素粒子研究施設の総力を動員して実施中心機関としての責任を果たす。J-PARC 加速器の大強度運転、ニュートリノビーム生成、前置ニュートリノ測定器の建設と運転は、もう一つの実施中心機関である高エネルギー加速器研究機構が中心となり推進する。両機関はハイパーカミオカンデに関する協力の協定を締結し、常設諮問委員会を設置し、計画の具体化に向けた検討を進めてきている。これに加え、次の国内の研究機関が本研究計画に参加する。東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構、東京大学、京都大学、東北大学、名古屋大学、神戸大学、大阪市立大学、東京工業大学、宮城教育大学、岡山大学であり、要素開発・建設・運転に参加する。また海外（ブラジル、カナダ、フランス、イタリア、韓国、ポーランド、ロシア、スペイン、スイス、イギリス、米国）からの参加も予定されており、光検出システムの半分や前置検出器を主に分担する。

⑥ 所要経費

総経費は約 1547 億円、そのうち日本分担分は約 1393 億円と見積もられている。ハイパーカミオカンデの建設経費は約 675 億円と見積もられており、日本はそのうちの約 551 億円を 2018 年から 2025 年度の 8 年間に負担することを計画している。その内訳として、(1) 地下空洞掘削(約 284 億円)、(2) 水槽ライナーと構造体(約 123 億円)、(3) 内側水槽の光検出システムの半分(約 102 億円)、および(4) 純水製造装置(約 32 億円)となる。またハイパーカミオカンデ装置の運転と大学共同利用体制整備などに 20 年間で約 400 億円（2026 年から 2045 年度）必要となる。J-PARC の 750kW から 1.3MW への改良に約 32 億円、その運転経費として 10 年間で約 400 億円（2026 年から 2035 年度）が必要となる。ただしこの運転経費は、高エネルギー加速器研究機構分（後段加速器）のみであり、日本原子力機構分の運転経費（前段加速器）は計上していない。前置検出器の建設経費は約 40 億円と見積もられており、日本はそのうちの約 10 億円を分担することを計画している。

⑦ 年次計画

- 2018 年 4 月 建設地地質調査開始
アクセストンネル掘削開始
- 2020 年 4 月 ハイパーカミオカンデ地下空洞掘削開始
J-PARC の 1.3MW への改良開始
前置検出器建設開始
- 2023 年 4 月 水槽建設開始
- 2024 年 10 月 光検出システム取り付け開始
- 2025 年 10 月 純水供給開始
- 2026 年 4 月 ハイパーカミオカンデ運転開始（2045 年度まで）
J-PARC1.3MW 運転開始（2035 年度まで）

⑧ 社会的価値

日本におけるニュートリノ研究は、2002 年（小柴昌俊東京大学特別栄誉教授）と 2015 年（本研究計画提案者梶田）のノーベル物理学賞受賞にも象徴されるように、超新星爆発ニュートリノ観測、ニュートリノ質量の発見、太陽ニュートリノ問題の解決、地球反ニュートリノの発見、3 世代間ニュートリノ混合の確立、と世界第一級の成果をあげてきており、国民による認知度は高い。本研究は未だ謎につつまれた素粒子の大統一理論の解明や、宇宙になぜ反物質がないのかという謎に迫ることを目的にしており、人類の知的好奇心に訴える問題に挑戦する。世界最大のニュートリノ検出器や大強度加速器の開発には、世界最先端の技術を必要とする。高感度光センサーや大規模地下空洞の開発・建設等、経済・産業界への波及も期待される。

⑨ 本計画に関する連絡先

塩澤 真人（東京大学・宇宙線研究所）