

## 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

本計画では、既存のスーパーカミオカンデの 8.4 倍の有効体積 19 万トン(総重量 26 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。さらに大強度陽子加速器 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ことで、ニュートリノ研究を行う。また陽子崩壊探索や自然ニュートリノの観測および関連研究を行い、素粒子と宇宙に対する知見を大きく広げる。これまでカミオカンデ・スーパーカミオカンデによって長年にわたり積み重ねてきた経験と実績をもとに、ニュートリノと関連分野の研究をさらに発展させ、世界をリードする国際的研究拠点として基礎科学の発展に貢献する。本計画は、17 ヶ国による国際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建設経費は 673 億円と見積もられており、日本はそのうちの 549 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 72 億円が必要であり、日本はそのうち 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、概算要求を行なっている。2020 年からの建設開始と、2027 年の運転開始を目指している。



図 1 : 実験概観

### ② 学術的な意義

Hyper-Kamiokande will be leading the frontier of many exploration paths...



図 2 : 目指すサイエンス (E.Lisi のスライドより)

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、「素粒子の大統一理論」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、天体の爆発機構の解明や、重元素合成の歴史の理解を目指す。

### ③ 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おり、予算措置により検出器の建設が始まっている。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。

#### ④ 実施機関と実施体制

プロジェクトの中核となる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は、ハイパーカミオカンデに関する協力の協定を締結し、計画の具体化に向けた検討を進めてきている。東京大学では、オール東大での推進体制構築のために、次世代ニュートリノ科学連携研究機構を設置している。連携研究機構の参加機関は、宇宙線研究所、理学系研究科、カブリ数物連携宇宙研究機構、地震研究所である。東京大学はカミオカンデおよび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、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。両機関は常設諮問委員会を設置し、国内外の関連分野研究者と工学専門家によるレビュー体制を敷いている。東京大学総長や宇宙線研究所長は実行組織としての推進の了承をしており、高エネルギー加速器研究機構長、素粒子原子核研究所長も協力している。

国内の参加研究機関は、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、京都産業大学、東京理科大学、横浜国立大学、慶応義塾大学であり、要素開発・建設・運転・データ解析に参加する。また海外（アルメニア、ブラジル、カナダ、フランス、ドイツ、インド、イタリア、韓国、ポーランド、ロシア、スペイン、スウェーデン、スイス、イギリス、ウクライナ、アメリカ）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の建設を分担すると共に運転・データ解析に参加する。

#### ⑤ 所要経費

総経費は約 1,545 億円、そのうち日本分担分は約 1,391 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 673 億円と見積もられており、日本はそのうちの 549 億円を 2020 年から 2026 年度の 7 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 263 億円)、(2) 水槽ライナーと構造体(約 127 億円)、(3) 内側水槽の光検出システムの半分(約 113 億円)、および(4) 純水製造装置および建設マネジメント(約 47 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(2027 年から 2046 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(2027 年から 2036 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。

#### ⑥ 年次計画

2020 年 建設地地質調査開始  
アクセストンネル掘削開始  
2022 年 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  
2025 年 水槽建設開始  
2026 年 光検出システム取り付け開始  
2026 年 純水供給開始  
2027 年 ハイパーカミオカンデ運転開始(2046 年度まで)  
J-PARC1.3MW 運転開始(2036 年度まで)

#### ⑦ 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。本研究は未だ謎にま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。

#### ⑧ 本計画に関する連絡先

塩澤 真人(東京大学宇宙線研究所)