

# 東京大学宇宙線研究所将来計画検討委員会 中間報告

2017年3月24日

## 委員会設立の経緯と趣旨

東京大学宇宙線研究所（ICRR）は1987年以降4回、（共同利用）運営委員会のもとに将来計画検討（小）委員会を組織してきた。それらの委員会では研究所の将来計画、特に研究所の将来の研究の柱となるような大型計画の検討及び推薦がなされ、研究所はそれを実行するように努めてきた。第1回の委員会（1987）ではスーパーカミオカンデ（Super-K）が推薦されて実現し顕著な成果を生み出し、第2回（1993）に推薦された最高エネルギー宇宙線研究はテレスコープアレイ（TA）実験として実現し、第2回及び第3回（2007）の委員会により推薦された重力波望遠鏡 KAGRA は、検出器建設が進行中である。第4回（2013）の委員会では、Super-KとKAGRAに続く新たな将来計画を検討し、すみやかに実現をめざすべき次期計画としてチェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA）実験に重点を置くことが勧告され、2016年度概算要求ではCTAの建設が認められた。そのため、KAGRA、CTAに続く研究所の将来計画を検討する時期を迎えている。

2012年-2013年の将来計画検討委員会では、大型計画であるハイパーカミオカンデ（Hyper-K）についても議論され、「チャンスが巡ってきたときにいつでも実現が可能となるよう、ハイパーカミオカンデの開発研究を大いに進めることを期待する。その一方で、予算規模が約800億円と見積もられていることから、関係者に対し、国ごとの分担の見通しをたて、予算の見積もりをより正確にし、予算の獲得に向けて詳細に検討するよう要請する。」と勧告されている[1]。

その後、ICRRと高エネルギー加速器研究機構（KEK）素粒子原子核研究所（IPNS）は、Hyper-Kに関する協力の協定を締結し、外部国際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た。

そこで、ICRR運営委員会は、2013年の将来計画委員会報告書[1]以降これまでにどのようなことがなされてきたのかという点について精査し、研究の意義や実現可能性などの点についても再度検討し、次期主要プロジェクトとして適切かどうかの判断をするために今回将来計画検討委員会を立ち上げ、あらためて Hyper-K 計画を中心課題として検討することとなった。また、前回の将来計画検討委員会後に新たに構想された計画案などがあれば、それらもあわせて議論することとなった。

現在、学術会議では第23期学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープラン策定が進められており、文部科学省では2017年の早い時期にロードマップの改訂が議論さ

れる模様である。それらの中でHyper-K計画も議論の俎上にあげられることが予想される。そこで、こうした動きに迅速に対応するため本将来計画検討委員会ではHyper-K 計画についてのみ先行して中間報告をまとめることとした。

## 委員の構成

岡田 安弘(委員長)	高エネルギー加速器研究機構 理事
相原 博昭	東京大学大学院理学系研究科 教授
伊藤 好孝	名古屋大学宇宙地球環境研究所 教授
井上 邦雄	東北大学ニュートリノ科学研究センター 教授
荻尾 彰一	大阪市立大学大学院理学研究科 教授
岸本 忠史	大阪大学大学院理学研究科 教授
久野 純治	名古屋大学基礎理論研究センター 教授
森 正樹	立命館大学理工学部 教授
中畑 雅行(幹事)	東京大学宇宙線研究所 教授
伊部 昌宏(副幹事、書記)	東京大学宇宙線研究所 准教授
梶田 隆章(オブザーバー)	東京大学宇宙線研究所 所長

## 委員会の経緯

- 第1回 (2016年10月4日)
  - 趣旨説明
  - Hyper-K Advisory Committee 報告
  - Hyper-K 計画について
  - コミュニティの検討状況について
  - 今後の進め方について
    - Hyper-K の議論の進め方
    - その他の計画の提案募集とレビュー時期
- 第2回 (2016年11月14日)
  - Hyper-K 計画のヒアリング
    - Hyper-K を推進する体制について
    - Hyper-K の物理 I (太陽、超新星爆発ニュートリノ)
    - Hyper-K の物理 II (CPV、陽子崩壊)
  - Hyper-K 計画の議論
  - 新規提案について
    - 教授会メンバーへの公募
    - 提案書
    - 新規提案に対する議論の進め方

- 第3回 (2016年12月13日)
  - 中間報告とりまとめのための議論
  - 新規計画ヒアリングについて
- 第4回 (2017年2月2日)
  - 中間報告とりまとめのための議論
- 第5回 (2017年2月21日)
  - 中間報告(案)を教授会と運営委員会へ提出の報告
  - 新規提案に対するヒアリング
- 2017年3月6日-3月24日
  - 教授会(2月23日、3月23日開催)、運営委員会(3月6日開催)でのコメントを踏まえ、改訂をメール議論

## ハイパーカミオカンデ計画

### 計画の概要と前将来計画検討委員会以降の変更点

Hyper-Kはカミオカンデ、Super-Kに続く、第3世代の水チェレンコフ検出器による核子崩壊・ニュートリノ実験計画である。この計画で期待される物理は、加速器ニュートリノによるレプトンでの荷電パリティ(CP)非対称性の測定、大気ニュートリノでのニュートリノ質量階層性の決定、核子崩壊探索、太陽ニュートリノ、超新星爆発ニュートリノ、超新星背景ニュートリノなど幅広い。検出器サイトの候補地は岐阜県飛騨市神岡町の柗洞鉦(Super-Kから約10キロメートル離れた、深さ約650メートルの地下)である。

前将来計画検討委員会において検討された検出器のデザインは、高さ54メートル、長さ250メートルの円筒形タンク2セットで構成され、総質量100万トン(うち有効体積は56万トン、Super-Kの約25倍)、20%の受光面積、光センサーの総数量は約10万本であった。その後検出器サイズの最適化が行われ、本将来計画検討委員会に提出された検出器デザインは、高さ60メートル、直径74メートルの円柱型タンク(総質量26万トン、有効体積19万トン)に超高感度光センサー(従来の2倍の感度)を内水槽に4万本取り付けるといったものになった。総質量の縮小によって建設経費の削減が図られている。従来のデザインに比べて有効体積は縮小しているが、J-PARCのビーム強度が以前見込んでいた0.75MWから1.3MWに増強される計画があり、それが実現されればCP非対称性測定に関する感度は変わらない。また、従来のデザインでは通常感度の光検出器を20%の光電面被覆率で配置することが計画されていたが、新たなデザインでは2倍の感度を持つ光検出器を40%の光電面被覆率で配置することに変更した。これにより、中性子のタグ(陽子の中性子捕獲にともなう2.2MeVガンマ線の同時計測)による核子崩壊に対するバックグラウンドの低減が可能となり、核子崩壊に対する実験感度(発見能力)を維持している。なお、Hyper-Kグループでは将来的にタン

クを2基にする可能性も検討している。

タンク1基分の建設費見積もりは総額で675億円であり、その内訳は空洞掘削163億円、ズリ・排水処理92億円、地質調査・実施設計24億円、ライナー・構造体125億円、光センサー(内水槽)196億円、光センサー(外水槽)18億円、電子回路12億円、純水システム33億円、計測計算機1億円、校正装置1億円、建設マネジメント10億円となっている。このうち、光センサー(内水槽)の半分、光センサー(外水槽)、電子回路、計測計算機、校正装置に当たる124億円相当は海外からの寄与を想定している。

2015年1月に国際共同研究グループが正式発足し、現時点では15か国から約300名が参加する国際共同実験となっている。研究組織としては、プロジェクトリーダーの下にある10のワーキンググループが各実験コンポーネントを担当し、また、実験全体の大きな方針を決めるInternational Steering Committee (ISC)と各国からの代表からなるInternational Board of Representative (IBR)とを持つ。

2018年度から建設予算が措置されれば、アクセストネルの掘削に約2年、実験空洞掘削に約3年、タンク建設に約2年、光検出器取り付けに約1年を経て2025年度までに建設を終え、2026年度から観測開始する年次計画である。

## **取り巻く状況の進展**

現在までにHyper-Kプロジェクトの推進に関連して以下のような進展があった。

- (1) KEKの研究実施計画(KEK-PIP)では、新規予算要求により実現を目指すべき4つの優先度の高い研究計画のうち、Hyper-KのためのJ-PARC高強度化を最優先課題に位置付けた[2]。
- (2) 高エネルギー物理学研究者会議は将来計画において、大型ニュートリノ測定器を基幹となる大規模将来計画の一つとして提言した[3]。
- (3) 宇宙線研究者会議(CRC)は将来計画において、Hyper-Kを最重要課題の一つと位置付けた[4]。また、CRC実行委員会は、「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」を日本学術会議物理学委員会素粒子物理学原子核物理学分科会委員長宛に提出し(2016年3月31日)、KAGRA建設完了以降の宇宙線分野における超大型将来計画の最重要課題として位置付けた。
- (4) 研究者コミュニティの議論をもとにHyper-K計画が「大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験」という計画タイトルで日本学術会議に提出され、マスタープラン2017として採択された。また、重点大型研究計画の一つとして認められた。
- (5) ホスト機関(ICRRとKEK-IPNS)間での協力についての覚書が交わされ、国際諮問委員会の設置がされ議論が進んでいる。国際諮問委員会ではHyper-Kは国際的に競争力が高く今後推進すべきプロジェクトであると結論付けた。

## 委員会の評価

ニュートリノ振動の精密測定と核子崩壊の探索は、素粒子標準理論を超える物理を解明し、さらに初期宇宙を探る手段として重要な位置を占めている。また、ニュートリノ天文学は星の内部構造を探るユニークな手段として他の観測では得られない情報をもたらす。Hyper-Kは多目的検出器であり、ニュートリノ振動の精密測定、ニュートリノ天文学、大統一理論の直接検証などの多様なサイエンスの進展に貢献することを高く評価する。ニュートリノにおけるCP対称性の破れの発見という喫緊の課題の解決に加え、ニュートリノ天文学の観測所としての長期的役割も兼ね備えた優れた検出器である。本委員会では日本学術会議マスタープラン2017に提出された総質量26万トン1基の計画について評価する。

近年、ニュートリノ混合角 $\theta_{13}$ が十分大きい値を持つことが分かり、CP対称性の破れの早期発見の可能性があることが分かってきた。右巻きニュートリノを導入したシーソー機構によるレプトジェネシス(宇宙のレプトン数生成)は、宇宙のバリオン数の起源の有力候補である。レプトンセクターにCP対称性の破れが存在することがわかれば、レプトジェネシス解明に向けての重要な一歩となる。ニュートリノ振動におけるCP対称性の破れを最も確実に成熟した技術により世界で最初に見つけるということに関してHyper-Kは有利な立場にある。Hyper-Kは広い範囲のCP対称性の破れのパラメータを探ることができ、T2K実験の結果が示唆するようにCP対称性が最大限に破れている場合には、5シグマを超える感度を持つ。系統誤差を着実に改善する道筋が示されており、達成可能性の高さが伺える。また、Hyper-Kは大気ニュートリノの高統計観測によって質量階層性について決定できる点も評価に値する。

核子崩壊は大統一理論(GUT)を検証する直接的な手段である。Hyper-Kは $e^+\pi^0$ モードの探索寿命感度を $10^{35}$ 年まで伸ばすことができる唯一の将来計画である。 $e^+\pi^0$ モードは大統一理論で新たに導入されるゲージボゾン(Xボゾン)によって生じる。標準模型の3つのゲージ結合定数の測定から超対称大統一理論が $10^{16}\text{GeV}$ で実現されていることが期待されており、Xボゾンの質量が $10^{16}\text{GeV}$ 近傍にあれば、Hyper-Kで核子崩壊が見つかる可能性は高い。また、超対称大統一理論の模型を強く制限する $\nu K^+$ モードは、新しいデザインによって2-3倍感度が改善される。本委員会はHyper-Kを次世代核子崩壊探索の適切な計画であると評価する。

超新星の爆発機構の解明や太陽ニュートリノの精密観測はニュートリノ天文学の重要な課題である。Hyper-Kは我々の銀河系内での超新星爆発に対して総数10万ものニュートリノ事象数が期待でき、爆発の初段階である中性子化バーストや、爆発過程でのショック不安定性やコアの回転などから生じる短周期での時間変動を捉えるなど、詳細なデータを取得することができる。これによって爆発機構の解明が期待でき、Hyper-Kはニュートリノ天文

学推進のための重要な計画であると評価する。

太陽ニュートリノの観測精度を上げ、特にニュートリノの質量差 $\Delta m_{21}^2$ の測定精度を上げることは意義があると評価する。現在、太陽ニュートリノ観測から得られた $\Delta m_{21}^2$ と KamLAND の原子炉ニュートリノ観測から得られた $\Delta m_{21}^2$ の間には 2 シグマレベルの違いがあり、これが統計/系統誤差によるのか、新しい物理が潜んでいるのか見極めることが重要である。ただし、宇宙線バックグラウンドの見積もりが進められているが、シミュレーションベースのより詳細な検討が必要である。また岩盤からのラドンの影響、水の流れによるラドン低減などについても検討を進めるべきである。

競合する計画として、CP 対称性の破れの測定や核子崩壊の探索に関して、4 万トン液体アルゴン TPC 検出器を用いた LBNF/DUNE 計画が、米国にて 2026 年からの実験開始を目指して建設が進行中である。同計画は CP 対称性の破れの測定では同等の感度を持ち、Hyper-K と国際競争となっている。技術開発を伴う液体アルゴン TPC 検出器に対し、既存の技術により実現可能でこれまでの実績を持つ Hyper-K は実現可能性において有利な立場にある。Hyper-K は予定している 2026 年実験開始から質の良いデータ蓄積が可能であり、DUNE 実験よりも早く CP 対称性の破れを発見できると予測される。なお、LBNF/DUNE 実験は建設がすでに開始されており、Hyper-K をいち早くスタートすることが重要である。

陽子崩壊探索に関して、 $e^+\pi^0$ モードの感度は有効体積の大きさが本質的である。また、 $\nu K^+$ モードは 4 万トン DUNE に迫る感度を Hyper-K は持つ。陽子崩壊探索においても、既存の技術と検出器の大型化により着実な進展が期待できる。

ニュートリノ天文学・大気ニュートリノ観測に関しては、南極氷床を用いた IceCube/DeepCore 実験や地中海を用いた ANTARES 実験があり、20GeV 以上のニュートリノを対象に観測が行われている。また、IceCube の感度を 10GeV 以下の低エネルギーに拡張する PINGU 計画が計画されている。Hyper-K は、これらの実験が観測できない太陽ニュートリノや超新星ニュートリノの観測が可能であり、相補的な計画である。

以上のように、Hyper-K は競合計画には無い独自性を持つと共に、国際競争となっている CP 対称性の破れの測定などでは緊急性が高く、一刻も早いスタートが望まれると判断する。

これまでの計画案と比べ、デザインの見直しにより、CP 対称性の破れや核子崩壊に対する検出器感度を損なわずに経費削減を行ったことは評価できる。さらに、前回の将来計画検討委員会において指摘された経費の不定性について、その低減が認められる。例えば、これまで見積もられていなかったズリ・排水処理にかかる経費が具体的に見積もられている。また、経費の大きな部分を占める空洞掘削について、ボーリング調査を基に慎重な見積もりを

行っている。タンクの構造(防水シート、ポリエチレンライナーなどの表面処理を含めて)の具体的な設計、衝撃波防止ケースの設計・試験で進展が認められる。このように経費を含め技術的な実現性が十分に高まっていると判断できる。

前回の将来計画検討委員会後 2015 年 1 月に国際共同研究グループが正式に発足しコラボレーションとしての体制を整えてきていることは評価できる。特に、日本以外の国からの建設費分担及び運転経費分担に関し、各国代表者の間との合意書が 2017 年 3 月中に締結されることとであり、高く評価できる。今後は、それをより具体化する作業が必要である。

ホスト機関(ICRR と KEK-IPNS)間での協力についての覚書が交わされ、国際諮問委員会が設置され、議論が進んでいることを評価する。ICRR は Hyper-K 建設・運転の中心、KEK は J-PARC ビームと前置検出器の建設・運転の中心と、責任分担がより明確になったことは前回の将来計画検討委員会以降の大きな進展といえる。ICRR が Hyper-K の建設・運転に責任を持つということは宇宙線研究分野の将来計画であるという大きなメッセージである。実際、Hyper-K は長基線実験の後置検出器というだけでなく総合的な宇宙線研究施設になっているということは特筆すべき点である。ただし、ICRR 内部の体制としては Super-K のスタッフ数の 2 倍に当たる約 20 名が必要であると見積もられており、現状に比べて 6 名程度の増員が必要である。常勤ポストの確保が難しい場合は特任教員を雇用するなどして補い、プロジェクト推進と同時に若手研究者の育成に努めることを勧める。大きな予算規模に対応するため組織体制づくりの提案があったことは評価に値する。さらなる体制の強化が必要であり、例えば、建設遂行に責任を持つプロジェクトマネージャーを中心とした推進チームを設けるなどがあげられる。ICRR と国際コラボレーションが連携して建設と遂行に適切なマネジメント体制を構築することを要望する。必要に応じて大型計画の遂行に経験をもつ専門家を含む第三者委員会の助言をえることも重要だと考える。

本委員会は、前回の将来計画検討委員会において指摘されていた課題である予算の見積もりの正確性の向上、国際コラボレーションの形成、ICRR と KEK の役割分担の明確化について大きな進展を認める。以上の観点と科学的意義から判断して、本委員会は Hyper-K 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であると判断する。

## 参考資料

- [1] 東京大学宇宙線研究所将来計画検討委員会 報告書 (2013年9月26日)  
<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/report/futureplan/futureplan2013.pdf>
- [2] KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP) (2016年6月30日)  
<https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/KEK-PIP.pdf>
- [3] 高エネルギー物理学将来計画検討小委員会 (2012年2月11日)  
[http://www.jahep.org/office/doc/201202\\_hecsubc\\_toushin.pdf](http://www.jahep.org/office/doc/201202_hecsubc_toushin.pdf)
- [4] CRC 将来計画検討小委員会 2013-2014年度報告書  
[http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/CRC/townmeeting/doc/CRC\\_FPSC\\_report\\_2013-14-v3.pdf](http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/CRC/townmeeting/doc/CRC_FPSC_report_2013-14-v3.pdf)