

大型研究計画に関する進捗評価について（報告）

「スーパーカミオカンデによるニュートリノ研究の推進」

平成28年12月6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	1
「スーパーカミオカンデによるニュートリノ研究の推進」について	
1. 進捗評価の実施方法	2
2. 計画の概要	3
(1) 概要と主な内容	
(2) 実施体制	
(3) 年次計画及び予算規模	
3. 計画の進捗状況	7
(1) ニュートリノの質量階層性など全貌解明に向けた研究の展開の状況	
(2) ニュートリノを用いた宇宙観測の状況	
(3) 大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探索の状況	
(4) 情勢の変化に対する対応の状況	
(5) 社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況	
4. 計画の進捗評価と今後の留意点	14
(1) 計画の進捗状況を踏まえた評価	
(2) 今後の事業の推進に当たっての留意点	
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	19

## はじめに

文部科学省においては、学術研究の大規模プロジェクトへの安定的・継続的な支援を図るべく、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、世界が注目する大規模プロジェクトについて、「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」<sup>1</sup>等に基づき、社会や国民の幅広い理解・支持を得つつ、国際的な競争・協力を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。「スーパーカミオカンデによるニュートリノ研究の推進」の年次計画においては、留意事項として、「スーパーカミオカンデの観測装置の改良が終了する平成28年度に進捗評価を実施する」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、関係分野の専門家の助言を得つつ、委員による研究現場の状況を確認するための現地調査、ヒアリング及びそれらを踏まえた審議を実施し、評価結果を取りまとめた。

---

<sup>1</sup> 本作業部会は、平成26年2月、日本学術会議が策定した「マスタープラン2014」を踏まえ、学術研究の大型プロジェクト推進に当たっての優先度を明らかにする観点から、学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想「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—ロードマップ2014—」を取りまとめた。

URL [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1351171.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1351171.htm)

# 「スーパーカミオカンデによるニュートリノ研究の推進」について

## 1. 進捗評価の実施方法

### 現地調査・ヒアリング

進捗評価に当たっては、研究現場の状況を確認するとともに、調査後の意見交換や若手研究者などからの意見聴取を通じて、より丁寧な状況把握に努めることとし、下記のとおり、作業部会委員及びアドバイザー総数12名が岐阜県飛騨市神岡町にある神岡宇宙素粒子研究施設を訪問し、調査を行った。

(1) 日時 平成28年10月12日(水) 9:55~17:10

(2) 参加委員(敬称略)

本現地調査に参加した作業部会委員等は、以下のとおり。(○現地調査の主査)

作業部会委員：伊藤早苗、井本敬二、川合知二、小林良彰、瀧澤美奈子、

○永宮正治、松岡彩子、山中佳子、横山広美

アドバイザー：井上邦雄、藏重久弥、中野貴志

(3) 調査の概要

#### ・実施責任機関からのヒアリング(30分)

計画の概要、進捗状況などについて、実施責任機関から説明を聴取した後、質疑応答を行った。

【説明者】梶田隆章 宇宙線研究所長、中畑雅行 神岡宇宙素粒子研究施設長、

塩澤真人 神岡宇宙素粒子研究施設教授、早戸良成 神岡宇宙素粒子研究施設准教授

#### ・現地調査(45分)

神岡鉱山内のスーパーカミオカンデ観測装置設置場所で、観測装置の構造、光電子増倍管の構造、観測データの解析方法、安全管理システムなどについての説明を受け、状況の確認を行った。その後、ガドリニウム溶解のための試験用タンクや新たに掘削を行い坑内に設置された純水純化装置設置室の状況の確認を行った。

#### ・若手研究者からのヒアリング(40分)

スーパーカミオカンデ電子回路、純水製造装置、高電圧装置の維持・管理、長基線ニュートリノ振動実験(T2K実験)のデータ解析を行っている若手研究者から、研究現場で感じている課題などについてのヒアリングを実施し、意見交換を行った。

#### ・現地調査後の実施責任機関との意見交換(30分)

年次計画に盛り込まれている装置の改良、ガドリニウムを溶解した観測に向けた計画の準備状況、ニュートリノ研究の最新の研究成果、現在の共同研究実施体制や今後の計画推進などの具体策について、忌憚のない意見交換を行った。

#### ・まとめ(15分)

現地調査を踏まえた研究の進捗状況についての確認を行い、その後、今後の推進方策や計画推進に当たっての留意点などを検討し、その結果概要を実施責任機関へ伝達した。

### 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会での審議

(1) 日時 平成28年12月6日(火) 13:00~15:00

(2) 概要 進捗評価報告書(案)の審議

## 2. 計画の概要

### (1) 概要と主な内容

「スーパーカミオカンデ」は岐阜県神岡鉱山の地下 1,000m に設置された 5 万トンの純水を貯めた水槽に光電子増倍管を取り付け、ニュートリノ反応から生成される荷電粒子が発するチェレンコフ光をパターンとして捉え、反応した場所や粒子の方向、粒子の種類を決定することができる世界最大級の水チェレンコフ型検出器である。(図 1) スーパーカミオカンデは平成 3 年から建設を開始し、平成 8 年 4 月から観測を開始した。平成 10 年には大気ニュートリノ観測によってニュート

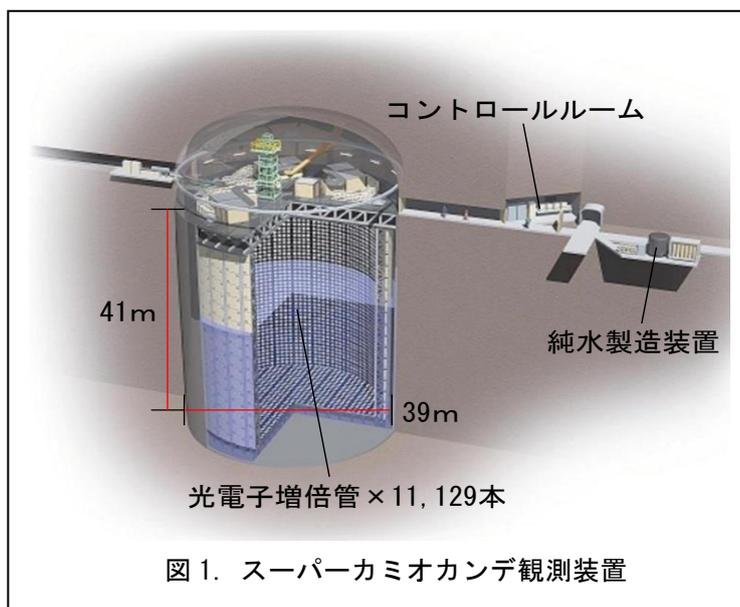


図 1. スーパーカミオカンデ観測装置

リノ振動を発見し、ニュートリノが質量を持つことを示し、また平成 13 年にはスーパーカミオカンデの結果とカナダの SNO 実験の結果を比較することにより太陽ニュートリノ振動を発見するなど、これまで多くの成果を上げている。

大気ニュートリノ振動の発見に始まるニュートリノに質量があることの発見により、梶田隆章博士がノーベル物理学賞を受賞した。

本計画は、平成 25 年度から大規模学術フロンティア促進事業に位置付けられ、新たに平成 34 年度までの年次計画が定められている。具体的には、以下の 3 項目の研究を、国内外の連携機関との協力関係の下で進めることとしている。

### 研究計画 1. ニュートリノの質量階層性など全貌解明に向けた研究の展開

これまでのニュートリノ振動研究によって、3 つあるニュートリノ間の質量の差、混合の割合が明らかとなってきたが、質量の階層性については「標準階層性」が正しいのか、「逆階層性」が正しいかは解っていない。また、ニュートリノとその反粒子である反ニュートリノ間での CP 対称性の破れがあるのかについても、明らかとなっていない。これらについて、大気ニュートリノの精密観測や加速器によって人工的に作ったニュートリノの観測 (T2K 実験) によって明らかにしようとするものである。

### 研究計画 2. ニュートリノを用いた宇宙観測

スーパーカミオカンデでは超新星爆発の機構解明を目指しているが、ベテルギウスやアンタレスといった超近傍の赤色巨星が爆発した場合には、既存データ収集システムがオーバーフローしてしまい、爆発メカニズムの全貌を記録することができない。このため、電子回路の改良を行い、より多くのニュートリノ事象のデータ収集を可能にすることを計画している。

一方、宇宙では、ビッグバンに始まる開闢<sup>かいびやく</sup>以来、今までに  $10^{17}$  個の超新星爆発が起きたと予測されており、過去の超新星爆発によるニュートリノが今でも飛び交ってい

ると予想されている。その強度は、数十ニュートリノ/cm<sup>2</sup>/sec 程度の強度を持つと見積もられており、スーパーカミオカンデのサイズでは、年間に数事象観測できることが見込まれている。そこで、ガドリニウムをタンク内の超純水に溶解するなどして装置の感度を向上させ、過去の超新星爆発からのニュートリノを捉えることを目指している。

また、太陽内部や地球内部等において、暗黒物質が対消滅して生まれるニュートリノを捉えることによって、間接的に暗黒物質を捉えることを目指している。すなわち、暗黒物質の有力候補として考えられている電荷をもたない重い粒子であるニュートラリーノは、太陽や地球などの重い天体に重力的に捕まり、そこでニュートラリーノ同士が対消滅してエネルギーの高いニュートリノが生成される可能性がある。それをスーパーカミオカンデで観測して、暗黒物質の証拠を捉え、その性質の解明を目指すものである。

### 研究計画 3. 大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探索

水の中の陽子や中性子がレプトンや中間子に崩壊する事象を捉え、力の大統一理論を証明することを目指している。すなわち、大統一理論が正しければ、「強い力」が働くクォークと、「弱い力」が働く電子などのレプトンとが交換可能となり、陽子が陽電子とパイ中間子に崩壊することが可能となるとされている。陽子崩壊が発見されれば、大統一理論を直接的に検証したことになる。

## (2) 実施体制

スーパーカミオカンデは、東京大学宇宙線研究所をホスト機関として、国内から13の大学・研究機関、国外からは7カ国22の大学・研究機関が参加する国際共同実験（表1参照）となっている。平成28年7月時点では、総数146名の研究者が実験に参加している。

また、T2K実験は高エネルギー加速器研究機構（KEK）と宇宙線研究所がホスト機関となり、11カ国から59大学・研究機関が参加する国際共同研究実験であり、平成28年7月時点での共同研究者数は462名となっている。

実験装置が設置されている神岡町には、共同利用・共同研究のための研究棟・宿泊棟を備え、現地研究スタッフとの議論や毎日の実験監視当番がスムーズに実施できる体制を整備している。

神岡施設に設置されているデータ解析用コンピュータを用い、リアルタイムでデータ解析を行っており、データに問題が生じた場合には、即座に対応できる体制としている。また年2回程度、全ての研究者が集まる「SKグループ共同研究者会議」を開催し、実験装置の運転状況、データ解析の進捗状況を議論できる体制としている。

さらには、神岡に滞在する研究者が幅広く知識を習得できるよう、外部の研究者を神岡に招へいしたセミナーの開催、図書室の図書を充実させるなど、共同利用者に対する便宜向上を図っている。

多数の研究者が実験に参画できる体制として、共同研究者が神岡外部から自由にコンピュータを利用してデータ解析を可能とする体制とし、また、高速ネットワークを利用したテレビ会議システムを導入し、研究棟、地下実験室など複数の場所に設置す

ることによって、実験監視当番を行っている研究者、装置のメンテナンスを行っている研究者が会議に参加できる体制としている。

安全対策としては、実験施設が「地下」という特殊な環境に設置されていることから、研究スタッフが共同利用研究者に対して、安全教育が実施できる体制を整備している。また、研究者や職員の移動を常にモニターできるように入出坑管理システムを導入し、災害が発生した場合には、坑内エリア単位で避難することによって、迅速に人数把握ができるようにしている。さらには、火災時の風向きによって安全な方向に避難できるように通常入坑する跡津通洞以外に茂住通洞を避難用に整備した。このほか、酸素濃度が低下した場合には、坑外でも検知できるように酸素モニターを整備し、消防等に迅速に通報できるようにしている。

年に1度の避難訓練を行うとともに、坑内での安全管理の情報を全ての実験グループや鉱山を監視する神岡鉱業（株）とも共有できるよう、安全協議会を通じて、月に1度安全に関する確認や検討を行っている。

(表1 参加機関及び参加者数一覧)

東京大学宇宙線研究所	日本	29	Stony Brook Univ.	アメリカ	7
東京大学 Kavli IPMU	日本	7	Univ. of Hawaii	アメリカ	3
東京大学理学系研究科	日本	2	Seoul National Univ.	韓国	1
宮城教育大学	日本	1	Chonnam National Univ.	韓国	3
岐阜大学	日本	1	Sungkyunkwan Univ.	韓国	1
京都大学	日本	8	Gwangju Institute of Science and Technology	韓国	1
大阪大学	日本	1	Tsinghua University	中国	3
神戸大学	日本	5	Univ. Autonoma Madrid	スペイン	2
岡山大学	日本	8	National Centre For NR	ポーランド	2
名古屋大学	日本	3	TRIUMF	カナダ	1
高エネルギー加速器研究機構	日本	11	Univ. of British Columbia	カナダ	2
東海大学	日本	2	Univ. of Regina	カナダ	1
福岡工業大学	日本	1	Univ. of Toronto	カナダ	3
静岡福祉大学	日本	1	Imperial College London	イギリス	4
東京工業大学	日本	3	Queen Mary Univ. of London	イギリス	2
Univ. of California. Irvine	アメリカ	8	Univ. of Liverpool	イギリス	3
Boston Univ.	アメリカ	7	Univ. of Oxford	イギリス	1
California State Univ.	アメリカ	2	Univ. of Sheffield	イギリス	2
Duke Univ.	アメリカ	4	合計		146人

### (3) 年次計画及び予算規模

本計画に係る年次計画及び予算規模は以下の通りである。

#### 大規模学術フロンティア促進事業の年次計画

計画名称	「スーパーカミオカンデ」によるニュートリノ研究の推進									
実施主体	【中心機関】 東京大学宇宙線研究所 【連携機関】 (国内) 高エネルギー加速器研究機構、京都大学 外 11 機関 (国外) カリフォルニア大学アーバイン校、ボストン大学 外 16 機関									
所要経費	年間運用経費 6.7 億円程度 (10 年総額 67 億円程度)	計画期間	運用期間 平成 25 年度～平成 34 年度 【事前評価】 平成 2 年 7 月 【中間評価】 平成 14 年 5 月※事故後の復旧について							
計画概要	ニュートリノ研究における世界最大級の大型実験装置「スーパーカミオカンデ」を改良し、ニュートリノの全貌解明に向けた研究の展開やニュートリノを利用した宇宙観測を実施することで世界のニュートリノ研究の中心を担う。									
研究目標 (研究テーマ)	1. ニュートリノの質量階層性など全貌解明に向けた研究の展開 2. ニュートリノを用いた宇宙観測 3. 大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探査									
年次計画	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33	H34
1. ニュートリノの質量階層性など全貌解明に向けた研究の展開	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 加速器や原子炉ニュートリノ実験の結果を合わせることで観測精度の向上を図り、大気ニュートリノの精密観測により、ニュートリノ質量階層性の発見を目指す。</li> <li>・ T2K 実験の観測精度を向上し、原子炉ニュートリノとの比較によりニュートリノと反ニュートリノの違いを探り(ニュートリノの CP 非保存)、その兆候を探る。</li> <li>・ 周辺ノイズを取り除くことで太陽ニュートリノの観測精度を向上させ 新種ニュートリノの存否の決着を目指す。</li> </ul>									
2. ニュートリノを用いた宇宙観測	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 超純水にガドリニウムを混合するなど装置の感度向上を図ることで超新星爆発からのニュートリノを捉え、超新星爆発の機構解明に迫る。</li> <li>・ 太陽内部等での暗黒物質同士が対消滅して生まれるニュートリノの飛来方向を、解析プログラムの改良を行いより良く捉えることにより、観測精度を 2 倍にして暗黒物質を探る。</li> </ul>									
3. 大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ニュートリノの質量を含む大統一理論の検証を行うため、継続して陽子崩壊の探査を行う。</li> </ul>									
評価の実施時期	-	-	-	進捗評価	-	-	-	-	-	期末評価

#### 【これまでの予算】

建設費	: 平成 3 年度～平成 8 年度	104.4 億円
大型水チェレンコフ装置対策費	: 平成 14 年度	2.5 億円
全面復旧経費	: 平成 15 年度～平成 18 年度	24.8 億円
運転・実験経費	: 平成 8 年度～平成 24 年度	82.3 億円
	: 平成 25 年度～平成 28 年度	26.4 億円
		計 108.7 億円

### 3. 計画の進捗状況

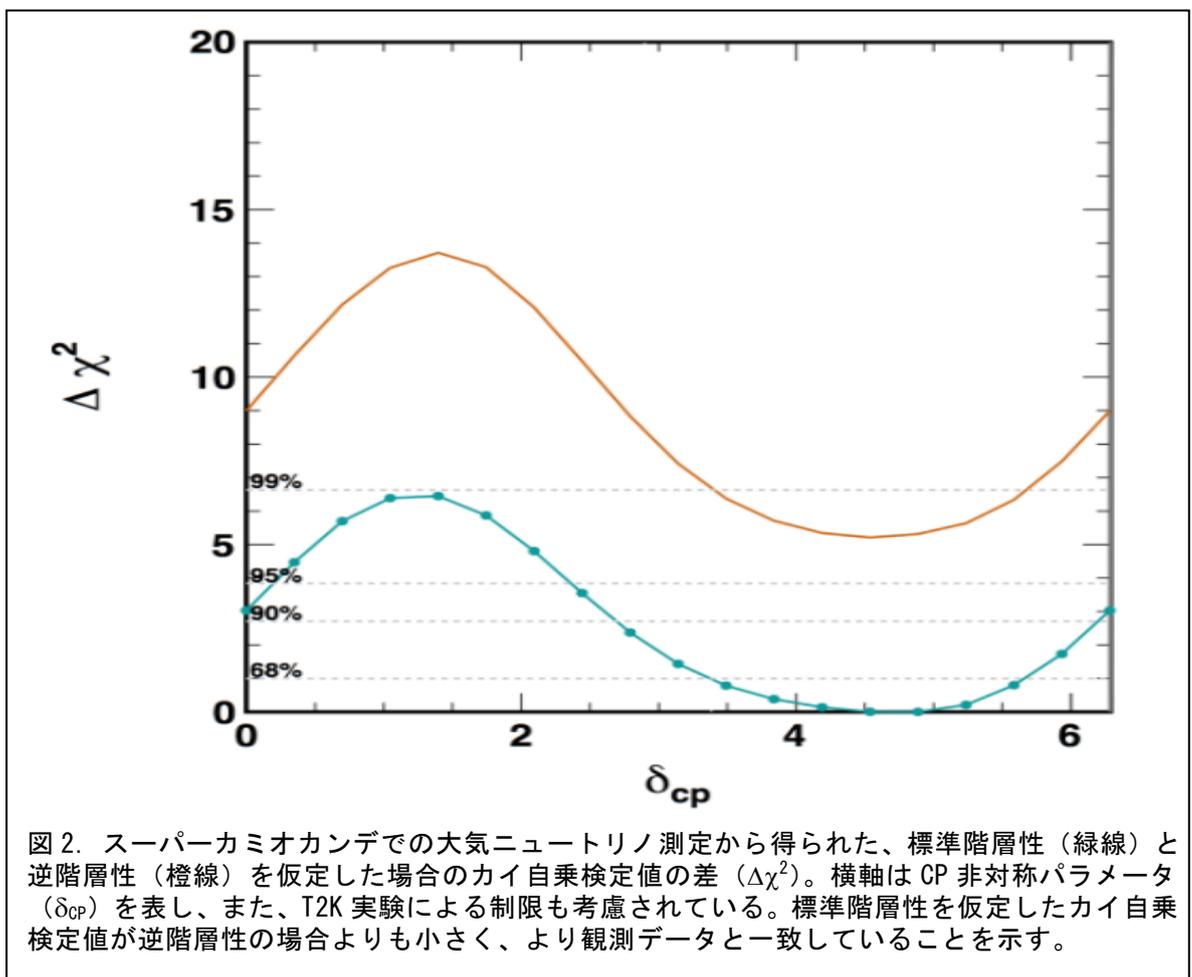
#### (1) ニュートリノの質量階層性など全貌解明に向けた研究の展開の状況

##### 大気ニュートリノの精密観測

スーパーカミオカンデの大気ニュートリノ研究では、質量階層性の決定を目指しているが、現在までに、スーパーカミオカンデの約15年分の観測データを蓄積し、また最新のニュートリノ反応モデルを取り入れたシミュレーションを用いて、統計および系統誤差の両方から測定精度向上を行っている。また、質量階層性以外のニュートリノ振動パラメータの精度から来る不定性を縮小するために、T2K実験や他の実験から得られた高精度測定値を取り入れて、大気ニュートリノでの質量階層性決定の感度を向上させた。以上により、図2に示すように、95%以上の確率で標準階層性を示唆する結果が得られている。

この結果から標準階層性を決定づけるにはまだ測定の信頼度を高める必要があるが、スーパーカミオカンデのデータからは標準階層性で期待される地球を通過した電子ニュートリノ事象増加の傾向も見られ、その兆候が見え始めた結果となっている。

今後は大気ニュートリノデータのさらなる詳細な検証を行うと共に、反跳中性子信号による正・反ニュートリノ反応の識別、電子ニュートリノ振動事象のバックグラウンドとなるタウニュートリノ事象の除去、時間情報を用いたミューニュートリノ事象の識別能力向上など、解析手法を向上させ、質量階層性決定を目指していくこととしている。



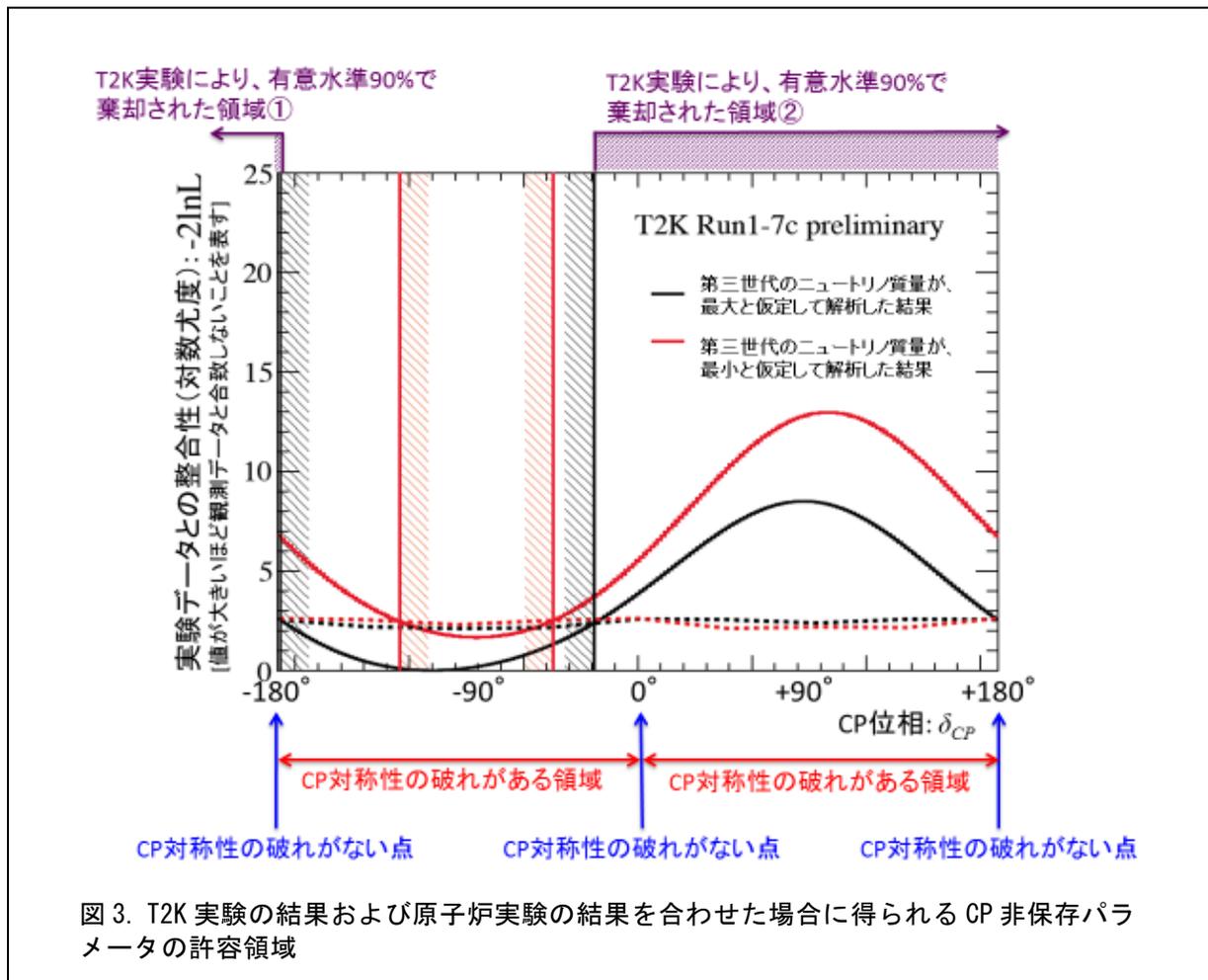
## T2K実験の観測精度の向上

T2K実験は平成22年1月より物理データ取得を開始、平成23年の震災時には、加速器、ビームライン機材ともかなりの被害を受けたが、1年で復旧を完了し、平成24年3月から実験を再開している。平成25年5月までに  $6.57 \times 10^{20}$  p. o. t. (protons on target) のニュートリノビームデータを取得した。

平成26年度から平成28年6月までは、加速器からのビーム供給を反ニュートリノ生成モードとし、 $7.5 \times 10^{20}$  p. o. t. (protons on target) のデータを取得、スーパーカミオカンデにおいて66の反ミューニュートリノ候補事象を確認した。これらのニュートリノデータと反ニュートリノデータすべてを用いて行った解析の結果や原子炉実験データを合わせて評価したところ、図3に示した通りCP対称性の破れがあることを示唆する結果が得られている。

これまで取得されたデータは、実験で予定している量の20%程度であるが、今後、J-PARC加速器のビーム強度増強に伴い、これまでよりも早いペースでT2K実験によるニュートリノ事象の観測数が増加することが期待されている。

今後は、このデータを用い、さらには、これまで解析に用いていなかった事象を用いるような解析手法の改良も行い、CPの保存、非保存の解明を目指した解析を行っていくとしている。



### 太陽ニュートリノの観測精度

平成25年から平成26年にかけて、スーパーカミオカンデの水純化システムの水温コントロールシステムの改良によりスーパーカミオカンデタンク内水流を改善した。これによって、タンク中心部の放射性不純物をさらに外周部に局在化させることに成功し、計画通り低エネルギー領域(4MeV以下)のノイズを低減させた。これにより精度の高い観測を継続することで、新しい物理、新種のニュートリノの存否について決着を目指す。また、水純化システムの改良によって不純物そのものを効率的に取り除く研究を続け、さらなる高品質データを増やしていくとしている。

## (2) ニュートリノを用いた宇宙観測の状況

### ガドリニウム溶解による過去の超新星ニュートリノの観測

スーパーカミオカンデにガドリニウムを溶解することによって、反電子ニュートリノが反応した際に生じる中性子を同時計測できるようになり、バックラウンドと本物の反電子ニュートリノ反応とを区別できるようになる。宇宙誕生以来の超新星爆発によって放出されたニュートリノは未だ観測されていないが、反電子ニュートリノを特徴的に捉えることで、世界初観測が期待され、さらには星形成の歴史の解明につながっていくとしている。

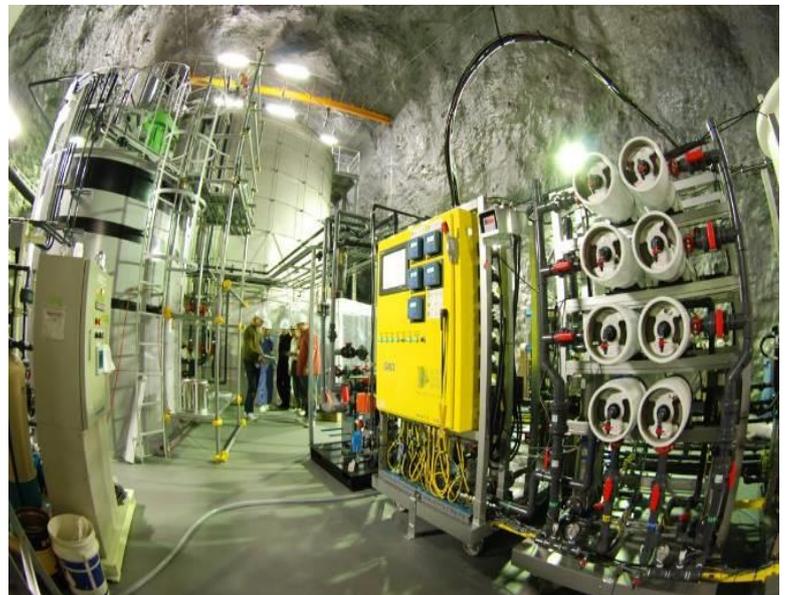


図4. ガドリニウム溶解試験を行った200tの試験用タンク（真ん中奥）とガドリニウムを保持したまま水を純化する装置（右側）

この研究を進めるにあたっては、ガドリニウム溶解によって他のニュートリノ研究に悪影響がないかをまず確認する必要がある。そのため、スーパーカミオカンデを模擬した200tサイズの試験用タンクを作り(図4参照)、0.1%のガドリニウムを溶解した時の水の透過率を測定した。透過率測定の結果、0.1%を溶解してもスーパーカミオカンデの超純水と比べて約92%レベルの透明度を有すること、つまりガドリニウムによる光の減衰は8%程度であることが分かった。更なる詳細なシミュレーションも行い、他のニュートリノ研究への影響は十分小さいことが確認されている。

また、スーパーカミオカンデの現在の純水装置ではイオンを含む全ての不純物を取り除くように設計されているため、ガドリニウムを保持したまま水を純化する装置を

開発するとともに、それが良い透過率を保持できることが実証されている。

一方で、ガドリニウムをスーパーカミオカンデタンクに溶解するにあたっては、地震等の災害が起きてもガドリニウムを環境へ流出させないようにする対策が必要である。具体的な方策として、タンク内部の溶接部全箇所に渡って止水材料を塗布することを計画している。その材料は止水能力のみだけでなく、水の透過率を悪くするような溶出物が無いこと、ラドンなどの放射性物質の放出が極めて少ないことという条件を満たす必要があり、条件を満たす新たな材料を開発した。止水材料を塗布するにはスーパーカミオカンデでの観測を約6か月間中止し、タンクの水を抜きながら作業する必要がある。当初の予定では平成27年度までにその作業を行い、同年度から観測を開始する予定であったが、進行中のT2K実験との兼ね合い等も考慮して、計画を延期するとしている。

### 超近傍での超新星爆発に向けた電子回路の改良

ベテルギウスやアンタレスなどの超近傍の赤色巨星が超新星爆発を起こした場合、スーパーカミオカンデでは3,000万以上のニュートリノ事象が観測されると予想されている。しかし、現在の主データ収集システムは、処理能力の制約から超新星爆発の始めからの20%程度分のデータしか完全に記録することができず、爆発の全貌を取り逃してしまうことになる。

そこで検出器全体で同時に何本の光電子増倍管が信号を出していたかを16ナノ秒および16マイクロ秒毎に記録する電子回路(図5参照)を新たに設計・製作し、平成27年度からデータ収集を開始した。16マイクロ秒毎のデータは常時ディスクに記録、16ナノ秒毎のデータは超新星爆発候補を捉えた場合のみ爆発の近傍1分間だけディスクに記録する。

平成28年度には、この電子回路の出力を利用してスーパーカミオカンデの主データ収集システムにおいて、記録しきれないほどの大量の事象が発生した場合には一部データを間引きするロジックを導入し、サンプリングしながら爆発の全貌を捉えることができるように改良する予定である。

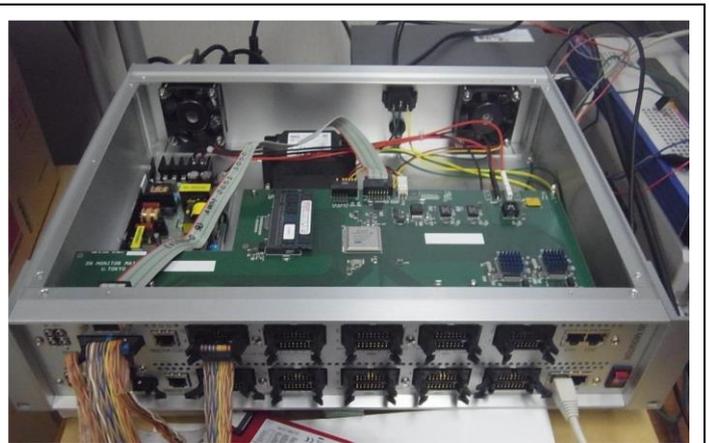


図5. タンク全体で何本の光電子増倍管がヒットしたかを60MHz、60kHzの周波数で記録する電子回路

### 暗黒物質の対消滅によるニュートリノ探索

直接検出の分野で興味が高まっている軽い質量を持つ暗黒物質の探索には、それらの対消滅によって生じるニュートリノ信号に高い感度を持つスーパーカミオカンデの特徴を活かすことができる。バックグラウンドとなる大気ニュートリノと暗黒物質由来のニュートリノの到来方向の情報を利用し、高感度の探索が行えるよう、解析プロ

グラムの改良とデータ群の整備を行った。

太陽中心に集まった暗黒物質が対消滅する際に発生するニュートリノの探索の解析結果が平成27年度に公表されたが、有意な信号は見られなかった。

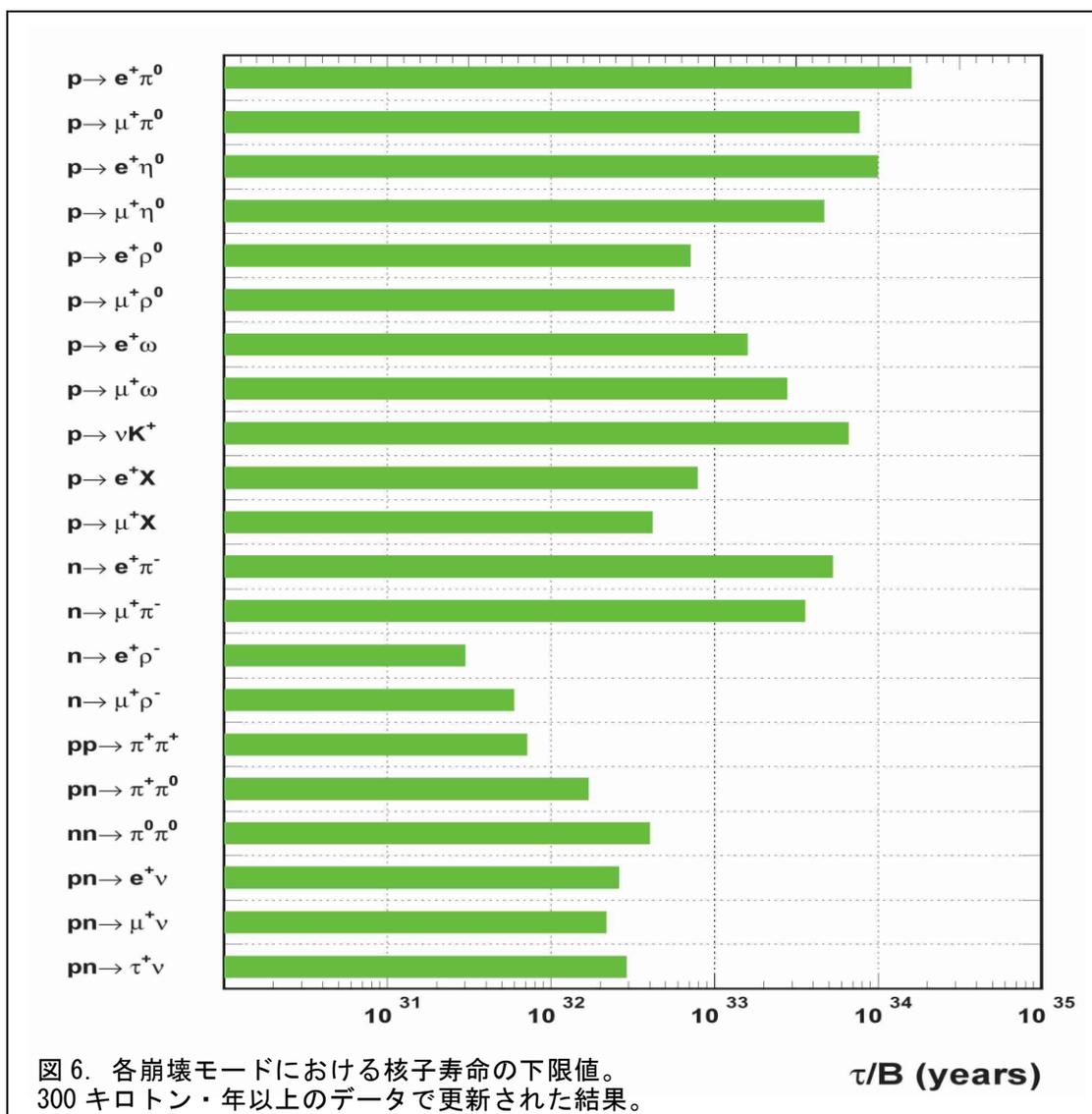
暗黒物質が陽子と反応する際の解析には、スピンに依存する相互作用の場合と依存しない相互作用の場合とに分けて行うことが標準的である。軽い質量を持つ暗黒物質について、スーパーカミオカンデの解析結果は他の実験と比較してそれぞれ最も厳しい制限を与えている。重い質量を持つ暗黒物質については、スピンに依存する相互作用の場合に最も厳しい制限を与えている。

今後は本事業の間に得られるデータを基にした探索を進め、感度を向上させる。並行して銀河中心や地球中心部に集まってくる暗黒物質の対消滅で発生するニュートリノの検出を目指す解析も進める。

### (3) 大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探索の状況

3つの力（電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用）を統合する大統一理論はさまざまなモデルが提案されているが、陽子寿命の予言値は概ね  $10^{30}$  年以上である。このような長大な寿命を探索するため、スーパーカミオカンデは有効体積内にある  $7.5 \times 10^{33}$  個の陽子を用いて、陽子の崩壊現象を探索している。陽子崩壊探索ではより多くのデータを取得することが重要だが、陽子崩壊を探索したデータ量は（質量） $\times$ （時間）で表現される。平成28年現在、様々な陽子崩壊モードにおいて、300 キロトン・年を超える世界最大の観測データ量での陽子崩壊研究が精力的に進められている（図6参照）。

また、解析方法の改善も行われているところであるが、陽子崩壊の証拠はまだ見つかっていない。陽子が陽電子と中性パイ粒子に崩壊するモードは、大統一理論の様々なモデルで予言されているが、306 キロトン・年のデータに対して期待されるバックグラウンドが0.6 イベントに対して観測されたイベントは0であった。この結果から陽子寿命の下限値は  $1.6 \times 10^{34}$  年と求められた。超対称性理論を用いた大統一理論のモデルでは、陽子がニュートリノと  $K^+$  粒子に崩壊するモードが優勢であると考えられているが、このモードの探索でも観測されたイベントは0で、陽子寿命の下限値は  $6.6 \times 10^{33}$  年と見積もられた。なお、陽子がミュー粒子と中性パイ粒子に崩壊するモードでは2 イベントの候補が見つかった。期待されるバックグラウンドは0.9 イベントで、バックグラウンドで2 イベント起こる確率は23%とまだ有意な陽子崩壊の兆候とは言えず、さらなるデータの蓄積が待たれる。



#### (4) 情勢の変化に対する対応の状況

計画当初は、超純水にガドリニウムを溶解するなど装置の感度向上をして平成27年度より観測を開始する予定であったが、以下の事由により平成31年度以降に延期することを計画している。

- ① ガドリニウムは排水基準等の法的規制が適用される物質ではないが、河川などの環境にはほとんど存在しない物質であるため、環境に漏れることがないように配慮する必要がある。地震などの災害時においても環境にガドリニウムが漏出しないようにするため、タンクの溶接部に塗る止水材料の開発を行った。
- ② スーパーカミオカンデでは太陽・大気ニュートリノの観測、T2K実験も行われているため、これらのニュートリノ観測に影響を与えないためには、ガドリニウムを溶解しても水の透過率が良くないといけない。そのため、試験用タンクを作り実証試験を行ってきたが、既存の純水装置を改造してガドリニウムを保持したまま水を循環させる装置を建設することが必要となった。その装置の建設は平成28、29年度に行う予定である。

- ③ タンク改造のためには、観測を一時中断してタンク内で作業を行う必要がある。一方、T2K実験のためにスーパーカミオカンデの運転を継続する必要がある。T2K実験は平成23年6月にミューニュートリノビームから電子ニュートリノが発生する兆候をつかみ、平成25年にはそれを確実なものとした。当初の予定よりも早くその成果を得ることができたため、その後はニュートリノ振動と反ニュートリノ振動との違いをみる研究を精力的に進めている。この研究においては平成26年9月にアメリカのNoνA実験がスタートし、T2K実験を超える勢いでデータを収集しつつある。

このようにT2K実験は外国との激しい競争関係にあり、当初予定していた平成25年度に実験を中止してタンクを改造することは適当ではなく、平成30年度に予定されているJ-PARC加速器のビーム強度増強のための電源交換と同時期に行うこととした方が、研究に与える影響を小さくできると判断し、タンク改造の実施時期を変更した。

#### (5) 社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況

スーパーカミオカンデで得られた研究成果を一般講演会、ホームページ、パンフレットなどによって広く社会や国民の方々に発信している。また、スーパーサイエンスハイスクール（SSH）指定校をはじめとして、教育・研究に関連する方々の実験施設見学を受け入れ、要望に応じて特別講義も行っている。さらに、地元が企画する一般向け坑内見学会へも協力している。過去3年間の広報に関する活動実績は下記のとおりである。

	平成 25 年度		平成 26 年度		平成 27 年度	
	回数	人数	回数	人数	回数	人数
一般講演(学生)	1	31	2	51	3	105
一般講演(一般)	4	440	3	472	10	2,829
サイエンスカフェ	3	93	3	80	7	379
講演等 小計	8	564	8	603	20	3,313
SSH 等(高校生)	20	570	16	553	13	436
見学者 (大学生)	25	338	27	424	29	329
見学者 (研究者)	16	148	14	214	18	67
見学者 (関係企業、視察 等)	97	828	92	688	115	811
見学者 (一般公開)	1	1,140	1	800	1	800
見学者 等 小計	159	3,024	150	2,679	176	2,443
合計	167	3,588	158	3,282	196	5,756

## 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

世界最大級の大型実験装置「スーパーカミオカンデ」を用いて、ニュートリノの全貌解明に向けた研究の展開やニュートリノを利用した宇宙観測を実施する世界のニュートリノ研究の中心を担う計画として、研究計画 1. ニュートリノの質量階層性などの全貌解明に向けた研究の展開、研究計画 2. ニュートリノを用いた宇宙観測、研究計画 3. 大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探索を行っている。

計画の進捗状況としては、下記のとおりである。

#### ① 研究の進捗状況について

研究の進捗状況については、後述する超純水へのガドリニウム溶解による装置の感度向上を除き、順調に進捗しており、ニュートリノの質量階層性について 95%以上の確率で標準階層性を示唆する結果が得られているとともに、ニュートリノと反ニュートリノの違い、CP 対称性の破れがあることを示唆する結果が得られるなどの成果をあげている。

また、太陽ニュートリノの観測精度向上のための水純化システムの改良、超近傍での超新星爆発の観測のための電子回路の改良、暗黒物質同士が対消滅して生まれるニュートリノ探索のためのデータ解析プログラムの改良も計画どおり行われ、今後の成果が期待される場所である。

さらに、大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探索については、解析方法を改善し、陽子崩壊モードの探索を可能とするバックグラウンドを半減することなどに成功している。一方、陽子崩壊の証拠を発見するまでには至っていないので、今後の飛躍が待たれる。

#### ② 超純水にガドリニウムを溶解するなどの装置の感度向上について

超純水にガドリニウムを溶解し、過去の超新星爆発の機構解明を目指す計画については、年次計画との比較において遅れが認められる。これは純水にガドリニウムを溶解させることによるニュートリノ研究への影響の確認、地震等による災害が発生した場合でも、ガドリニウムを環境へ流失させないための対策を講じ、地元の方々の理解を得ることに時間を要したためである。さらに、国際競争下にある T2K 実験等の研究進捗への影響を考慮すると、J-PARC 加速器のビーム強度増強のための電源交換時期に合わせて、ガドリニウム溶解に伴うスーパーカミオカンデのタンク改造を行うことは合理的と考えられる。

#### ③ 実施体制について

計画の実施体制については、実験研究に参画している研究者が密な連絡を取り合い、それぞれの立場においても、全体像をつかめるシステムになっている。

また、計算機システムや宿舎利用のための支援スタッフは非常に良く機能しており、国内外の多くの機関から研究者が集結した共同利用・共同研究体制が確立されている。

さらには、研究施設内では日常的に英語が用いられ、外国人の研究者が研究上の不

利益を感じることもなく、国際的に開かれた体制が整備され、若手研究者が高いモチベーションを持って責任ある仕事を任されるなど、人材育成にも繋がる効率よい運営がなされている。

一方で、近年英国やカナダの研究グループの参画もあり、今後、国際化・大規模化が急速に進展することが予想される。優秀なシニア研究者と若手研究者が全体を見通した上で、それぞれが何役もこなしていると思われ、プロジェクト規模が大きくなるといずれ分業体制を取らざるを得なくなる。研究者に係る負荷の軽減、国際化への対応、安全対策や広報体制の充実など、計画全体のマネジメント体制の強化を検討していくことも必要と思われる。

社会や国民からの支持を得るための情報発信の状況については、若手研究者を中心として、アウトリーチ活動に熱意をもって取り組んでおり、地元の方々とのより一層の信頼獲得のための周知や交流を図ろうとする姿勢が窺え、非常に良い関係が築かれていることが認められる。

以上を総合的に勘案すると、本計画は概ね順調に進捗しており、計画の一部変更についても妥当なものであると評価できる。

## (2) 今後の事業の推進に当たっての留意点

上記の進捗状況を踏まえ、今後の事業推進にあたっては、以下の点について留意が必要である。

なお、以下の留意点については、超純水にガドリニウムを溶解するための装置改良が完了した時点で進捗評価を行うこととし、その対応状況の確認を行うものとする。

### ① 国際共同研究体制について

本計画については、近年新たな外国の研究グループの参画があり、今後も国際化の進展が見込まれることから、今後の発展を見据えた国際共同研究体制の確立に向けた検討が望まれる。

### ② 広報体制について

広報活動は重要であるが、梶田博士のノーベル賞受賞により国民の関心が高まっており、広報活動が研究者に過大な負担を強いていることも認められる。研究者の本分である研究に集中できる環境を維持することができるよう、広報体制の更なる充実が必要である。

### ③ 安全対策について

超純水にガドリニウムを溶解し装置の感度向上を進める計画については、ガドリニウムが自然界に万が一にも漏れ出し、環境に負荷を与えないよう慎重に計画を進めることが不可欠であり、地元や近隣自治体の方々などの理解や支持を得ることも重要である。地元等との信頼関係を今後も維持し、万全の安全対策が講じられるよう一層の努力が望まれる。

## 用語解説

### ○ ニュートリノ

ニュートリノは、物質のもとになっている素粒子の1つ。電荷を持たず、物質との相互作用が非常に小さいため、巨大な検出器によって初めて検出することが出来る。

他の素粒子と比べ、著しく質量が小さく、未だ直接には測定されていない。

### ○ ガドリニウム

原子番号64の元素で、元素記号は Gd と書かれる。希土類の1つ。中性子に対する吸収反応が非常に大きく、これを利用して原子炉の制御材料などに用いられている。昨今ではニュートリノ実験で盛んに用いられている。

### ○ ニュートリノ振動

素粒子の一員であるニュートリノは3種類ある。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。

### ○ T2K実験

茨城県東海村のJ-PARC加速器で生成した $\mu$ ニュートリノを295km離れたスーパーカミオカンデに打ち込み、これを観測する実験。スーパーカミオカンデでは、加速器からの $\mu$ ニュートリノがどのように消失するか、電子ニュートリノがどのように出現するかを観測することで、ニュートリノ振動やCP対称性の研究を行なうことが可能となる。

### ○ チェレンコフ光

物質中での光速は、光の屈折率分遅くなっている。電荷を持った粒子が物質中を物質中の光速以上の速さで進むことが可能となるが、このとき、粒子の進行方向に対して円垂状に光が放出される。この光がチェレンコフ光と呼ばれる。

水中をほぼ光速で移動する粒子の場合、チェレンコフ光は粒子の進行方向に対して約42度の方向に放出される。

### ○ SNO実験

1999年から2006年までカナダのサドベリー州の地下実験施設で行われた重水1,000tを用いたニュートリノ実験。スーパーカミオカンデ実験など他の太陽ニュートリノ実験の結果を組み合わせることで、太陽からのニュートリノの欠損がニュートリノ振動によることが明らかとなった。

## ○ 質量階層性

ニュートリノには3つの異なる「質量状態」がある。電子ニュートリノ、 $\mu$  ニュートリノ、 $\tau$  ニュートリノは、これら3つの「質量状態」が混ざりあっている。電子ニュートリノに多く含まれる第一状態と、 $\tau$  ニュートリノに多く含まれる第三状態は、どちらが重いかわからない。  $\tau$  粒子は電子よりも3500倍も重い、この関係がニュートリノでも同じとなっているかどうか興味が集まっている。

## ○ 反ニュートリノ

物質には、例えば、電子と陽電子の様に、電荷が正反対の「反物質」と呼ばれるペアが存在する。ニュートリノは電荷を持たないが、相互作用の際には陽電子と対になるニュートリノと電子と対になるニュートリノと2種類が存在することが知られている。この2つのニュートリノは別の素粒子であり、前者をニュートリノ、後者を反ニュートリノと呼ぶ。

## ○ CP対称性の破れ

ニュートリノとその反粒子である反ニュートリノ間での性質の違いであるが未解明であり、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、有力候補となっている。

## ○ 超新星爆発

太陽の約8倍程度以上の星がその一生を終える際、その星自身の重力を支えることが出来ず(重力崩壊)、非常に大規模な爆発現象を引き起こす。この大爆発を超新星爆発(II型超新星)と言う。

この他、白色矮星と呼ばれる天体が連星系を形成している場合、連星からの物質が降り積もり、爆発的な核融合反応を生じる事がある。この爆発現象も超新星爆発(I型超新星)と呼ばれる。

## ○ 暗黒物質

宇宙の物質エネルギーの27%を占めるもの。通常物質は4.9%しかない。暗黒物質の存在は宇宙の様々な階層で知られているが、その正体は解明されておらず、新しい素粒子であるとも言われている。

## ○ 大統一理論

素粒子には電磁的相互作用、弱い相互作用、強い相互作用の3つの力が作用する。標準理論では電磁的相互作用と弱い相互作用を統一的に扱うが、大統一理論ではさらに強い相互作用も統一する究極の理論である。

## ○ 陽子崩壊

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。この大統一理論では、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されている。

○ パイ中間子

クォーク 2 つから構成される中間子（メソン）の一種で、中間子の中では最も質量が小さく、ギガ電子ボルトのエネルギー以上でのニュートリノ反応で比較的生成されやすい粒子である。また、陽子崩壊で有力な崩壊モードでも生成されると予想されている。

○ カイ自乗検定値

統計学的検定方法の一つであり、観測値が理論から期待される推定量と矛盾しないかを検定する。検定に用いられる量（カイ自乗値）は観測値と理論値の差の自乗を用いて計算され、その値が小さいほど観測と理論が合致することを意味する。

○ バックグラウンド

実験、観測を行なったとき、求める反応等による信号、事象だけでなくノイズや、異なる反応による信号、事象なども観測される。こういった、本来実験、観測対象としていない信号や事象をバックグラウンドと呼ぶ。特に事象をさす場合には、背景事象と呼ぶこともある。

○ スピンに依存する相互作用

暗黒物質と物質の相互作用の強さは、スピンと呼ばれる空間の回転に関係した素粒子の性質によって左右される場合がある。ここでは核子のスピンと暗黒物質のスピンの関係によって違いが生じる相互作用をさす。

○ スピンに依存しない相互作用

核子のスピンにも暗黒物質のスピンにもよらない相互作用をさす。

○ No $\nu$ A 実験

米国フェルミ研究所から、810km 離れたアッシュリバーに設置した検出器に、大強度のミューニュートリノを打ち込み、その振動を観測する実験。電子ニュートリノ出現を用いた、ニュートリノ質量階層性や、CPの破れの研究を主な目的とする。2014年に開始、順調にデータをため、2016年夏には  $6.05 \times 10^{20}$  p. o. t 相当のデータを用いた解析結果を発表している。

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

(委員)

西尾 章治郎 大阪大学総長

(臨時委員)

海部 宣男 自然科学研究機構国立天文台名誉教授  
川合 知二 大阪大学産業科学研究所特任教授  
伊藤 早苗 九州大学理事・副学長  
井本 敬二 自然科学研究機構生理学研究所長  
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  
小林 良彰 慶應義塾大学法学部教授  
瀧澤 美奈子 科学ジャーナリスト  
横山 広美※ 東京大学大学院理学系研究科准教授

(専門委員)

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  
永宮 正治 理化学研究所研究顧問、  
高エネルギー加速器研究機構名誉教授  
新野 宏※ 東京大学大気海洋研究所教授  
松岡 彩子 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所准教授  
山中 佳子 名古屋大学大学院環境学研究科准教授

評価にご協力いただいた専門家

井上 邦雄 東北大学ニュートリノ科学研究センター教授・センター長  
藏 重久 弥 神戸大学先端融合研究環・環長  
中野 貴志 大阪大学核物理研究センター教授・センター長

(敬称略、五十音順)

〔 ※大島委員、横山委員、鈴木委員、新野委員は、「スーパーカミオカンデによるニュートリノ研究の推進」計画の利害関係者であるため、進捗評価には参加していない。 〕