

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」  
について

2018年（平成30年）8月30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
「スーパーカミオカンデによるニュートリノ研究の推進」計画について	
1. 進捗評価の実施方法	4
2. 計画の概要	
(1) 研究計画、設備整備に関する概要	6
(2) 実施体制	8
(3) 当初計画	9
3. 計画の進捗状況	
(1) 研究の進捗状況、設備の整備状況	12
(2) 情勢の変化に対する対応状況	21
(3) 社会や国民の理解を得るための取組、情報発信の状況	22
(4) 年次計画における「計画推進に当たっての留意事項等」への対応状況	23
(5) 共同利用・共同研究を行うための実施体制の状況	25
(6) 幅広い研究者が参画できる運用体制の状況	25
(7) 計画推進に当たっての課題	26
(8) 安全管理体制の強化	26
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	28
(2) 今後の事業の推進に当たっての留意点	28
備考（用語解説等）	30
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	32

## はじめに

文部科学省においては、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べく、2012年度（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ロードマップの策定ーロードマップー」<sup>※1</sup>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。

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、10年計画の6年目に当たる2018年度（平成30年度）に、「超純水にガドリニウムを溶解するための装置改良の状況」の確認を行う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、本作業部会において、実施機関である法人に対し、「学術研究の大型プロジェクトの推進方策の改善の方向性」（2017年（平成29年）3月本作業部会決定、以下「改善の方向性」という。）や現在の財政環境などに基づく課題を整理の上、これらの課題に主体的に対応するよう促していることに鑑み、従来の評価の観点に、

- ・ 実施機関による財政環境への対応が適切に行われたかどうか
- ・ 期末まで安定的・継続的にプロジェクトを推進することができるよう年次計画の内容の変更等が行われたかどうか

を加え、関係分野の専門家（以下「アドバイザー」という。）から助言を得つつ、委員が研究現場の状況を確認するためのヒアリング及びそれらを踏まえた審議を実施した。

---

※1 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](http://www.mext.go.jp/a_menu/kyoten/1383666.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」計画について

## 1. 進捗評価の実施方法

### ヒアリング

今回の進捗評価は、次のとおり、本作業部会委員及びアドバイザーからなる評価者 9 名による実施機関からのヒアリングを通じて実施した。

(1) 日 時： 2018 年（平成 30 年）7 月 20 日（金）10：00～12：00

(2) 参加委員： ヒアリングに参加した評価者は、以下のとおり。（敬称略、○は主査）

（作業部会委員）井本 敬二、栗原 和枝、○小林 良彰、鈴木 洋一郎、観山 正見、  
横山 広美

（アドバイザー）井上 邦雄、藏重 久弥、中野 貴志

(3) 概 要：

#### ・機関からのヒアリング（35 分）

東京大学から、計画の概要、進捗状況等について説明を受けた後、質疑応答を行った。

（東京大学説明者）

梶田 隆章	東京大学宇宙線研究所長、
中畑 雅行	同所神岡宇宙素粒子研究施設長・教授、
塩澤 真人	同施設教授、
桑田 悟	東京大学研究推進部長、
生田目 金雄	同学宇宙線研究所事務長、
大浦 輝一	同所副事務長、
佐藤 立子	同所特任専門員

#### ・まとめ（25 分）

機関からのヒアリングを踏まえ、研究の進捗状況に係る確認及び今後の推進方策や留意事項等に係る検討を実施した。

### 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会における審議

(1) 日 時： 2018 年（平成 30 年）8 月 10 日（金）13:30～16:30

(2) 審議事項： 進捗評価報告書（案）の審議

- (1) 日 時： 2018 年（平成 30 年）8 月 30 日（木）13:00～15:00
- (2) 審議事項： 進捗評価報告書（案）の審議

## 2. 計画の概要

### (1) 研究計画、設備整備に関する概要

「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5万トンの純水を用いた水チェレンコフ型検出器であり、直径39m、高さ41mの円筒形水槽に、内水槽は50cm径光電子増倍管を11,129本、外水槽には20cm径光電子増倍管を1,885本取り付けられた装置である。(図1参照)

ニュートリノ反応によって生成される荷電粒子が発するチェレンコフ光を多数の光電子増倍管によってパターンとしてとらえることにより、反応した場所、粒子の方向、粒子の種類を決定することができる観測装置である。

スーパーカミオカンデは1991年(平成3年)からの5年間に建設され、1996年(平成8年)4月から観測を開始した。1998年(平成10年)には大気ニュートリノ観測によってニュートリノ振動を発見し、ニュートリノが質量を持つことを示した。2001年(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した。また、1999年(平成11年)から始まったK2K(KEK to Kamioka)実験では世界に先駆けて加速器で人工的に作られたニュートリノを使った実験が行われ、2004年(平成16年)には人工ニュートリノによってニュートリノ振動を確認することに成功した。そして、2009年(平成21年)にはT2K(Tokai to Kamioka)実験がスタートし、東海村の大強度陽子加速器施設(J-PARC)で作られる大強度ニュートリノビームを用いた研究が進められている。2011年(平成23年)には第3のニュートリノ振動モードにともなうミューニュートリノビームからの電子ニュートリノ出現をとらえ、ニュートリノが3世代間で振動していることを明らかにした。1998年(平成10年)の大気ニュートリノ振動の発見に始まる数多くのニュートリノ振動に関する成果は高く評価され、2015年(平成27年)にはノーベル物理学賞が梶田隆章氏に授与され、同年「基礎物理学ブレークスルー賞(Breakthrough Prize in Fundamental Physics)」がスーパーカミオカンデ実験グループ、K2K/T2K実験グループに授与された(SNO, KamLAND, Daya Bay実験と共に)。

2013年(平成25年)に大規模学術フロンティア促進事業の年次計画が設定されたが、そこでは以下の3項目を研究の柱とした。

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索

研究項目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」では、今までスーパーカミオカンデが世界をリードして進めてきたニュートリノ振動研究を更に発展させ、ニュートリノ振動の全貌解明に向けて展開していくことを目指している。今までの

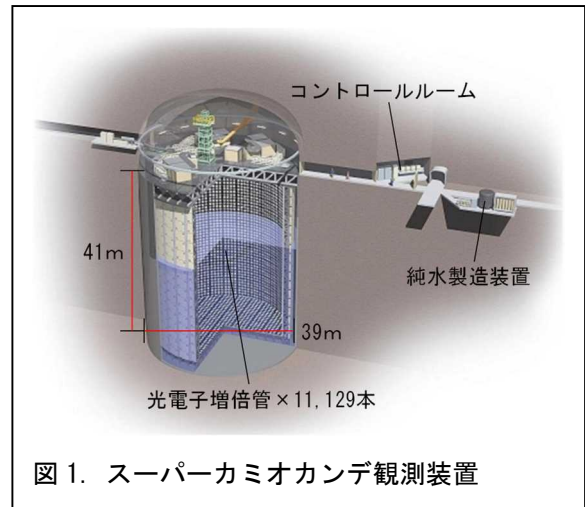


図1. スーパーカミオカンデ観測装置

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、混合の割合が図2のようにわかってきた。しかし、いまだに図2左に示した「標準階層性」が正しいか、右の「逆階層性」が正しいかはわかっていない。

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対称性が破れているのかもまだ分かっていない。CP対称性の破れは宇宙・素粒子研究において重要なテーマであり、これが証明されれば宇宙はなぜ「物質」だけでできていて「反物質」が無いのかを解く鍵となる。

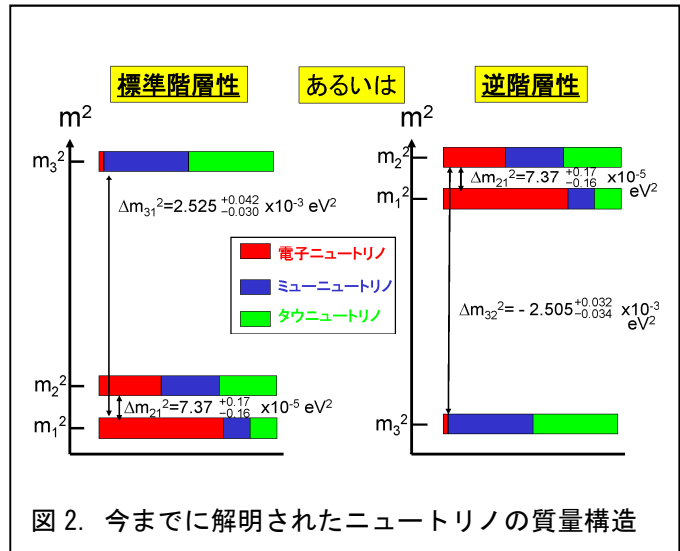


図2. 今までに解明されたニュートリノの質量構造

研究項目2「ニュートリノを用いた宇宙観測」では、超新星爆発からのニュートリノを捉え、超新星爆発の機構を解明することを目指している。1987年（昭和62年）にカミオカンデが捉えた大マゼラン星雲での超新星爆発（SN1987A）（図3）では、捉えられたニュートリノ事象の数が11個しかなく、爆発メカニズムを解明することまではできなかった。スーパーカミオカンデでは我々の銀河系で超新星爆発が起きれば、約8,000事象ものニュートリノ事象（約10kpc(3万光年)の場合）が予想され、爆発メカニズムの解明に大きく寄与するデータを取得できる。一方、ベテルギウスやアンタレスといったような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、爆発の全貌を記録することができない。それに対する設備の改良も本計画に入れている。我々の銀河系での超新星爆発頻度は30-50年に一度と見積もられており、スーパーカミオカンデの観測期間中に何度も爆発を観測することは難しい。一方、宇宙ではビッグバンに始まる開闢以来今までに  $10^{19}$  個の超新星爆発が起きてきたはずであり、そうした「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はずである。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はずである。しかし、このようなまれな現象をとらえるために



図3. 超新星爆発（SN1987A）

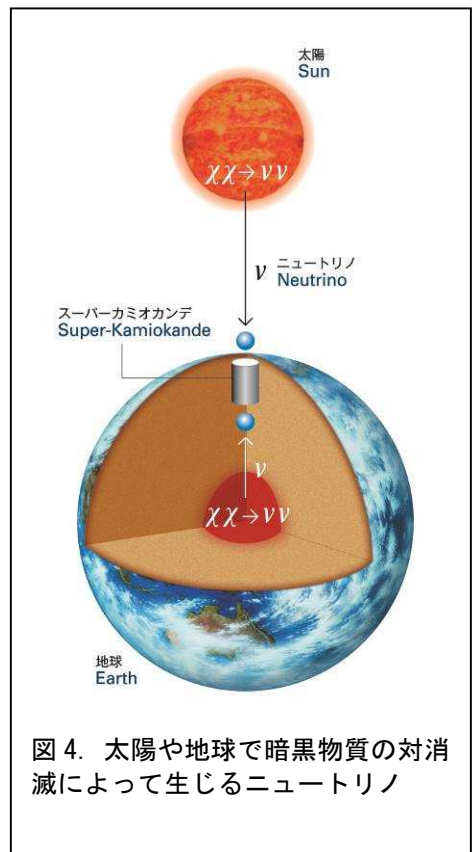


図4. 太陽や地球で暗黒物質の対消滅によって生じるニュートリノ

は装置の改良が必要であり、具体的にはガドリニウムをタンク水に溶解し中性子との同時計測を行うことを計画している。(詳細は「(3) 当初計画」に記述。) さらに研究項目 2 では、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も目指している(図 4 参照)。近年の精密宇宙観測により、暗黒物質は我々が知っている通常の物質の 6 倍近い質量、宇宙の物質・エネルギーの割合では 27% を占めることがわかっているが、その正体はまだ解明されていない。最も有力な候補として考えられているのは超対称性理論から予想される「ニュートラリーノ」とよばれ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トラップされ、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、その性質を解明することを目指している。

研究項目 3「大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探索」では、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。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変換可能となり、例えば図 5 のように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。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となり、その意義は計り知れない。

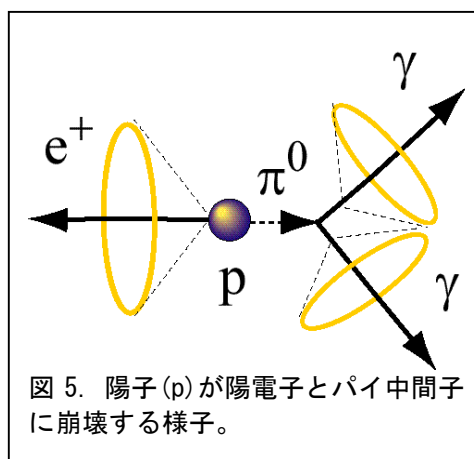


図 5. 陽子(p)が陽電子とパイ中間子に崩壊する様子。

## (2) 実施体制

(国内外の連携体制等)

スーパーカミオカンデ実験は、東京大学宇宙線研究所をホスト機関として、国内から 17 の大学・研究機関、国外からは 9 カ国から 27 の大学・研究機関が参加する、国際共同実験である。2018 年(平成 30 年)6 月時点で総勢 175 名の研究者が実験に参加している。参加機関と研究者数を以下に示す。

東京大学宇宙線研究所	日本	35	Seoul National Univ.	韓国	1
東京大学 Kavli IPMU	日本	7	Chonnam National Univ.	韓国	3
東京大学理学系研究科	日本	2	Sungkyunkwan Univ.	韓国	1
宮城教育大学	日本	1	Gwangju Institute of Science and Technology	韓国	1
岐阜大学	日本	1	Tsinghua University	中国	2
京都大学	日本	8	Univ. Autonoma Madrid	スペイン	2
大阪大学	日本	1	National Centre For NR	ポーランド	2
神戸大学	日本	8	TRIUMF	カナダ	1
岡山大学	日本	9	Univ. of British Columbia	カナダ	1
名古屋大学	日本	4	Univ. of Toronto	カナダ	4



高エネルギー加速器研究機構	日本	11	Univ. of Winnipeg	カナダ	1
東海大学	日本	1	Imperial College London	イギリス	3
福岡工業大学	日本	1	Queen Mary Univ. of London	イギリス	3
静岡福祉大学	日本	1	Univ. of Liverpool	イギリス	3
東京工業大学	日本	3	Univ. of Oxford	イギリス	2
東京理科大学	日本	3	Univ. of Sheffield	イギリス	2
横浜国立大学	日本	1	Ecole polytechnique LLR	フランス	5
Univ. of California, Irvine	アメリカ	9	INFN Bari	イタリア	4
Boston Univ.	アメリカ	7	INFN Naples	イタリア	3
California State Univ.	アメリカ	2	INFN Roma	イタリア	1
Stony Brook Univ.	アメリカ	7	INFN Padova	イタリア	3
Univ. of Hawaii	アメリカ	2	合計		175
Duke Univ.	アメリカ	3			

また、T2K 実験は高エネルギー加速器研究機構と東京大学宇宙線研究所がホスト機関となり、12 カ国から 64 大学・研究機関が参加する実験であり、2018 年（平成 30 年）6 月時点での共同研究者数は 463 名である。

### （3）当初計画

（研究、設備整備に関する当初計画）

「2. 計画の概要（1）研究計画、設備整備に関する概要」に記したように 2013 年（平成 25 年）からの大規模学術フロンティア促進事業の年次計画においては、

研究項目 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

研究項目 2. ニュートリノを用いた宇宙観測

研究項目 3. 大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探索を掲げている。

研究項目 1 の具体的な内容として以下を年次計画に掲げている。

- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 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。

設備整備に関することとしては、J-PARC のビーム強度増強（高エネルギー加速器研究機



図 6. T2K 実験。J-PARC で作ったニュートリノビームを 295km 飛ばし、スーパーカミオカンデで捉える。

構担当)により、T2K 実験の観測精度を向上させることを当初計画に掲げている。また、スーパーカミオカンデ本体においては太陽ニュートリノ観測精度を向上させるために放射性物質によるバックグラウンドなどの周辺ノイズを取り除くことを掲げている。

研究項目 2 においては当初計画として以下の課題を掲げている。

- ・ 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。
- ・ 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。

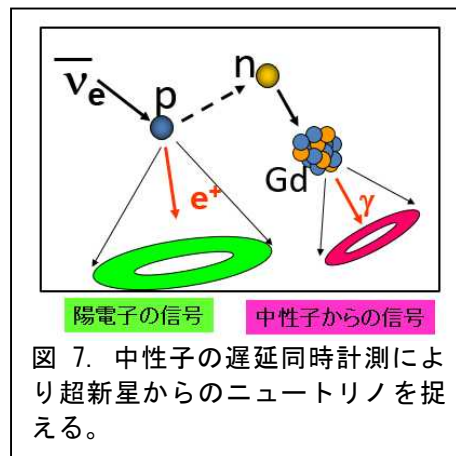


図 7. 中性子の遅延同時計測により超新星からのニュートリノを捉える。

設備整備に関することとしては、「過去の超新星爆発」を捉えるためにスーパーカミオカンデタンクにガドリニウム(Gd)を溶解し、中性子の遅延同時計測(図 7 参照)により信号を捉えることを掲げている。超新星爆発から生成される反電子ニュートリノは水中の陽子と反応して陽電子と中性子を生成する。今までの観測では陽電子の信号のみしか観測に使用できなかったため、ノイズに埋もれてしまい真の信号を選び出すことができなかった。Gd を純水に溶解することにより、中性子が Gd に捕獲されガンマ線を放出するため、それを捉えることによって真の信号を選び出すことができる。そのためには、Gd を保持したまま水を純化する装置、Gd を溶解・純化する装置の設置が必要であった。また、他の設備整備に関することとしては、超近傍で超新星爆発が起きた場合にデータ収集システムがオーバーフローしてしまうことへの対策として、光電子増倍管のヒット数情報のみを数え、記録する電子回路をあらたに開発し、導入することとした。

研究項目 3 においては当初計画として以下の課題を掲げている。

- ・ 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。

この研究項目に対しては、これに特化したあらたな設備の設置は必要ないが、前述のガドリニウム溶解によって、陽子崩壊に対するバックグラウンドを格段に除去することができる。

(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) 高エネ研、京都大 外11機関 (国外) カリフォルニア大アーバイン校、ボストン大 外20機関																					
所要経費	建設費総額 約 104億円 年間運用経費 約 7億円	計画期間					運用期間 平成25年度～34年度 (評価実績: 事前評価 平成2年度、中間評価 平成14年度 ※事故後の復旧について、進捗評価 平成28年度)															
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索																					
年次計画	2013 (H25)	2014 (H26)	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	2019 (H31)	2020 (H32)	2021 (H33)	2022 (H34)	2023 (H35)											
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	<p>観測開始</p> <p>J-PARCの増強 (750kV) 【大強度陽子加速器施設 (J-PARC) による物質起源の解明において実施】</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>環境整備 (ノイズ増減)</p>																					
・ 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。												ニュートリノ質量階層性の発見を目指す										
・ 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。												ニュートリノのCP非保存の兆候を探る										
2. ニュートリノを用いた宇宙観測	<p>超純水にガドリニウムを溶解するための装置の改良</p> <p>電子回路の改良</p> <p>解析プログラムの改良</p> <p>超新星爆発からのニュートリノの捕捉を目指す</p> <p>本観測開始</p> <p>暗黒物質の高感度探索</p>																					
・ 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。												超新星爆発からのニュートリノの捕捉を目指す										
・ 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。												暗黒物質の高感度探索										
3. 大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探索	<p>観測開始</p> <p>大統一理論の検証</p>																					
・ 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索を行う。												大統一理論の検証										
評価の実施時期	-	-	-	進捗評価	-	進捗評価	-	-	-	-	-											

期末評価

(これまでの予算措置の状況)

建設費 : 103.8 億円 (1991 年度 (平成 3 年度) ~2018 年度 (平成 30 年度) までの経費)

運転経費・実験経費 : 149.8 億円 (1996 年度 (平成 8 年度) ~2018 年度 (平成 30 年度) までの経費)

### 3. 計画の進捗状況

#### (1) 研究の進捗状況、設備の整備状況

各研究項目に対して、研究の進捗状況、設備の整備状況を報告する。

#### 研究項目 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

##### ①大気ニュートリノの精密観測

スーパーカミオカンデでの大気ニュートリノ観測によってニュートリノ振動が発見されて以来、加速器ニュートリノや原子炉ニュートリノなどによる多くの実験で精密測定が行われ、3世代でのニュートリノ振動理論の検証が進みつつある。残る大きな課題として、CP非保存パラメータ ( $\delta_{CP}$ ) の測定とニュートリノ質量の階層性の決定が挙げられる。このうち特に質量階層性の解明が、大気ニュートリノ研究によって達成されることが期待されている。ニュートリノの質量については太陽ニュートリノ振動に関わる2つの質量と、3つ目の質量の大きがいまだわかっていない。これが質量階層性と呼ばれ、3つ目の質量が最も重い標準階層性と最も軽い逆階層性の二通りの状態を取りうる。この階層性の違いによって、ニュートリノが地球を通過する際に受ける物質効果によりミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動確率に差異が生じる。スーパーカミオカンデの大気ニュートリノ研究では、この特長の観測による質量階層性の決定を目指している。

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  $\Delta m^2_{32}$  や  $\theta_{23}$ 、 $\theta_{12}$  など、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実験他の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、質

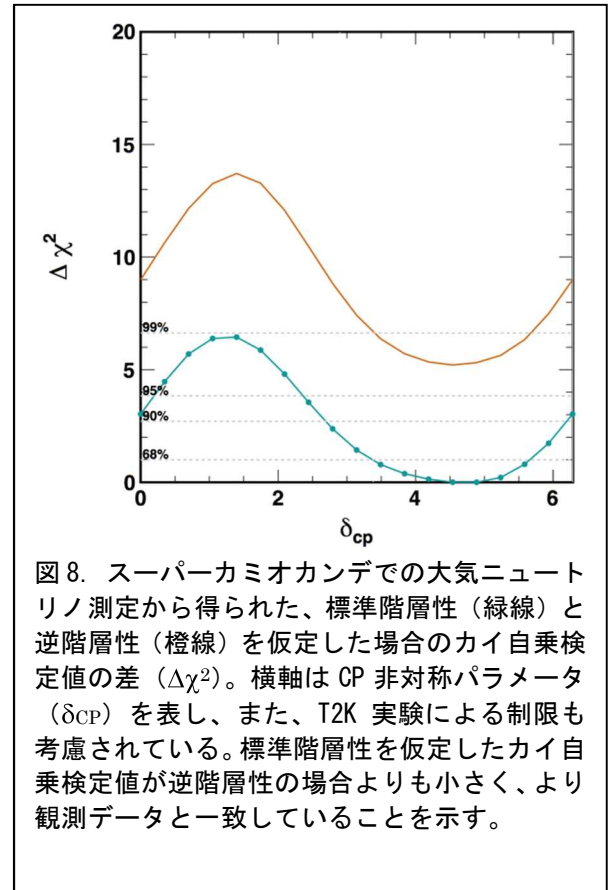


図 8. スーパーカミオカンデでの大気ニュートリノ測定から得られた、標準階層性（緑線）と逆階層性（橙線）を仮定した場合のカイ自乗検定値の差 ( $\Delta\chi^2$ )。横軸は CP 非対称パラメータ ( $\delta_{CP}$ ) を表し、また、T2K 実験による制限も考慮されている。標準階層性を仮定したカイ自乗検定値が逆階層性の場合よりも小さく、より観測データと一致していることを示す。

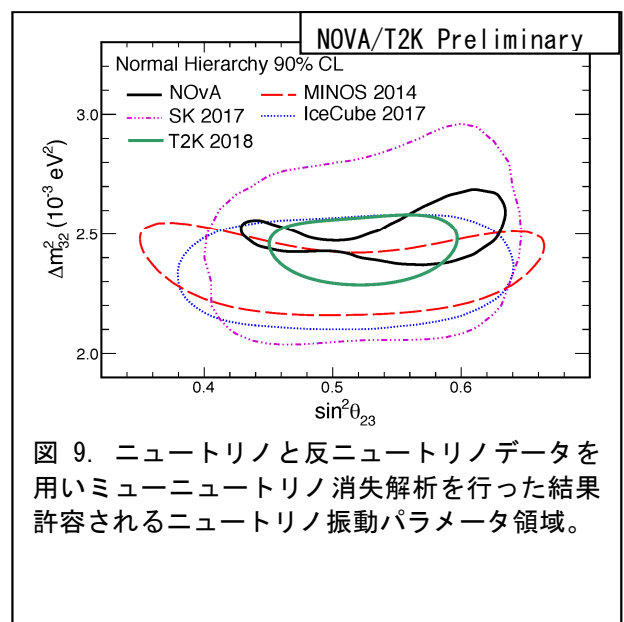


図 9. ニュートリノと反ニュートリノデータを用いミューニュートリノ消失解析を行った結果許容されるニュートリノ振動パラメータ領域。

量階層性以外のニュートリノ振動パラメータの不定性を考慮すると、91.9%から94.5%の信頼度で標準階層性を示唆する結果が得られた。

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た。

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すこととなっている。

## ②T2K 実験の観測精度の向上

T2K 実験は2010年(平成22年)1月より物理データ取得を開始、2011年(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、2012年(平成24年)3月から実験を再開している。当初はニュートリノビームを生成、実験を行っていたが、2014年度(平成26年度)からは反ニュートリノビームの供給を開始、2018年(平成30年)5月末までには、 $15.1 \times 10^{20}$  p. o. t. (protons on target) のニュートリノビーム及び  $16.5 \times 10^{20}$  p. o. t. の反ニュートリノビームのデータを取得している。

取得したデータのうち、 $14.9 \times 10^{20}$  p. o. t. のニュートリノデータおよび、 $11.2 \times 10^{20}$  p. o. t. の反ニュートリノデータを用いてニュートリノ振動パラメータの解析結果を得ている。

解析において、従来は系統誤差の観点から検出器内壁から2m以上離れた事象のみを利用していた。2017年度(平成29年度)以後は、新しい解析手法を導入、粒子の進行方向まで考慮することで、系統誤差を増やさずに利用可能な事象数を増やすことに成功した。また、ミューニュートリノが電子ニュートリノに変化する様子を探るにあたっては、これまで電子が一つだけ観測された事象を用いることで、特定の反応(凝弾性散乱)のみを選択していたが、電子に付随して $\pi$ 粒子が生成した事象を選別した事象サンプルも利用することで、さらに統計数を増やすことに成

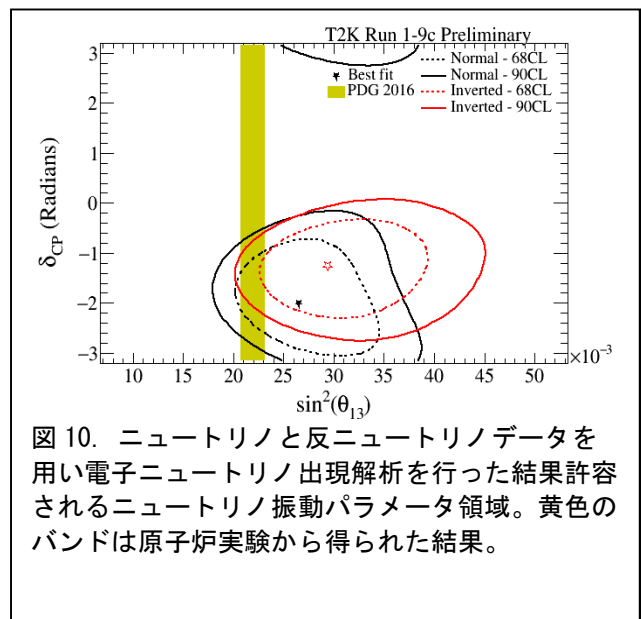


図10. ニュートリノと反ニュートリノデータを用い電子ニュートリノ出現解析を行った結果許容されるニュートリノ振動パラメータ領域。黄色のバンドは原子炉実験から得られた結果。

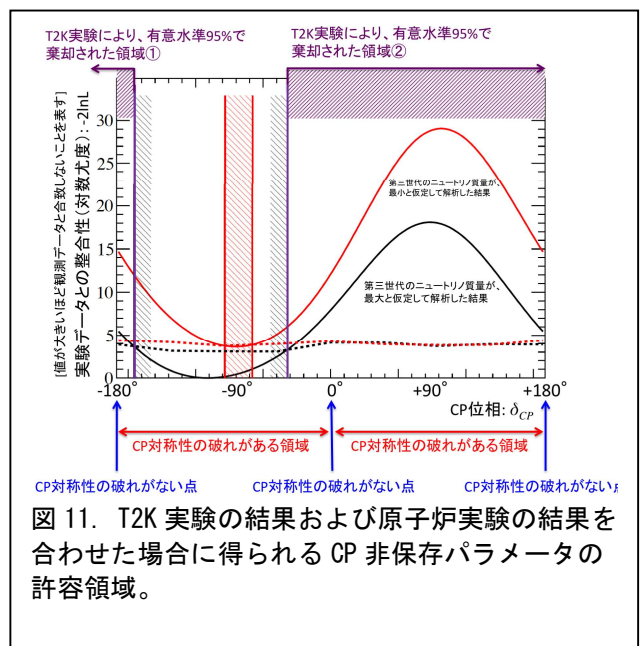


図11. T2K 実験の結果および原子炉実験の結果を合わせた場合に得られる CP 非保存パラメータの許容領域。

功した。

これらのデータを用い、主に(反)ミューニュートリノの消失により測定できる混合角  $\theta_{23}$  および質量二乗差  $\Delta m^2_{23}$  について解析を行ったところ、混合角  $\sin^2 \theta_{23}$  については大気ニュートリノを用いた測定よりも高精度な、世界最高感度での測定を達成することができた(図9)。

電子ニュートリノ及び反電子ニュートリノ出現により調べることが可能となる混合角  $\theta_{13}$  および CP 非保存パラメータについて解析を行ったところ、図10に示されるようなニュートリノ振動パラメータの許容領域を得た。さらに原子炉実験データを合わせて CP 非保存パラメータを評価したところ、CP 対称性の破れ(ニュートリノと反ニュートリノの違い)があることを示唆する結果(図11)が得られている。

T2K 実験の電子ニュートリノ出現とミューニュートリノ消失の観測結果を同時に用い、さらに原子炉実験のデータ合わせることで、質量階層は標準階層性が、混合角  $\theta_{23}$  は 45 度より大きい値が、また、CP 非保存パラメータは  $\pi/2$  が好まれる傾向があることが見えてきている。

2018 年(平成30年)5月には、加速器のビーム強度は 485kW を安定して供給することに成功、設計強度の達成も視野に入ってきている。これまで取得されたデータは、実験で予定している量の 40%程度であるが、今後のビーム強度増加に伴い、これまでよりもさらに早いペースでスーパーカミオカンデにおける T2K ニュートリノ事象の観測数も増加することが期待されている。このデータを用い、解析手法のさらなる改良も行うことで、ニュートリノ振動パラメータ  $\theta_{13}$ 、 $\theta_{23}$  および  $\Delta m^2_{32}$  の測定精度を向上させ、CP の保存、非保存の解明を目指した解析を行う予定である。

### ③太陽ニュートリノの観測精度

2013~2014 年(平成25~26年)に、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を改良した後、2015 年(平成27年)5月からはデータ収集システムの取得エネルギーしきい値を 0.5 MeV 相当引き下げた。この状態で 2018 年(平成30年)1月まで、低エネルギー領域の太陽ニュートリノ

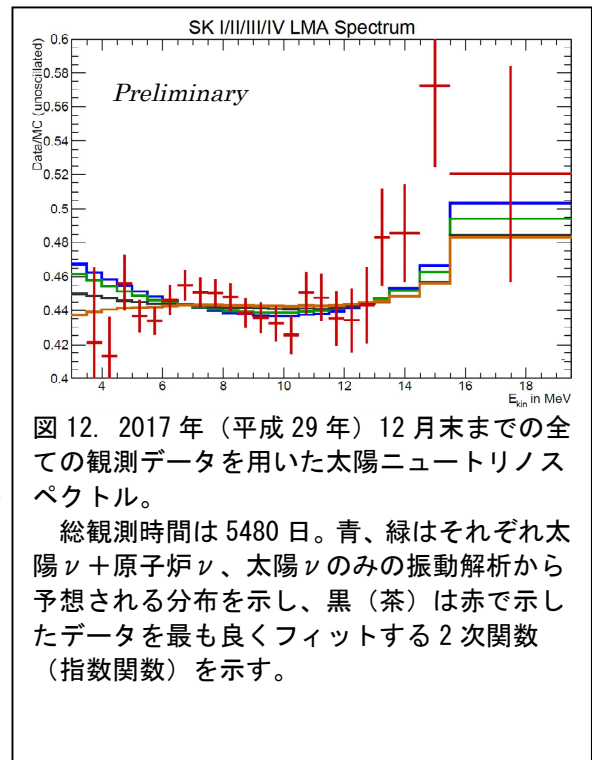


図12. 2017 年(平成29年)12月末までの全ての観測データを用いた太陽ニュートリノスペクトル。

総観測時間は 5480 日。青、緑はそれぞれ太陽  $\nu$  + 原子炉  $\bar{\nu}$ 、太陽  $\nu$  のみの振動解析から予想される分布を示し、黒(茶)は赤で示したデータを最も良くフィットする 2 次関数(指数関数)を示す。

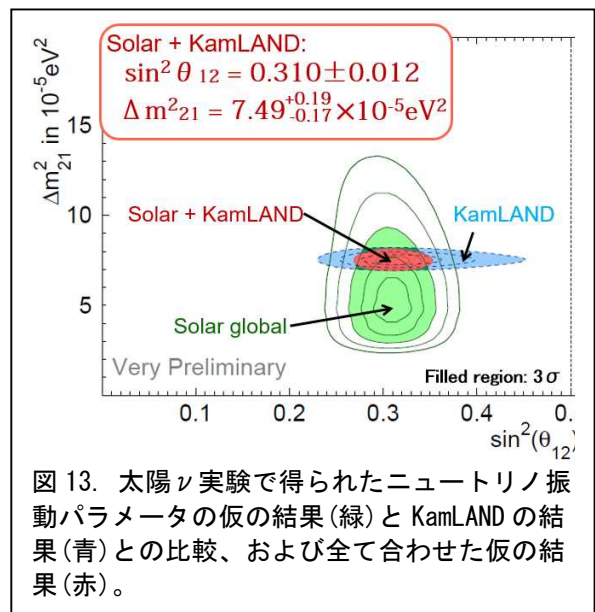


図13. 太陽  $\nu$  実験で得られたニュートリノ振動パラメータの仮の結果(緑)と KamLAND の結果(青)との比較、および全て合わせた仮の結果(赤)。

( $\nu$ )観測データを取得し、計画通り、高品質な観測データの蓄積を行った。また、2018年（平成30年）4月までに、光電子増倍管のゲイン変動の補正等を考慮した新しいエネルギー再構成手法を開発し、観測精度の向上を図った。この新手法を用いて解析した仮のニュートリノ振動解析の結果を2018年（平成30年）6月に開催されたニュートリノ国際会議で報告した。

結果の一例として、図12は、2017年（平成29年）12月末までの全てのスーパーカミオカンデの観測データを用いた太陽 $\nu$ スペクトルを示す。2次関数で評価した場合、SKで観測されたスペクトルデータは、太陽 $\nu$ 実験のみの振動解析から予想される結果と $1.2\sigma$ の違いがあった。また、太陽 $\nu$ 実験とカムランドで得られた原子炉からの反電子ニュートリノを使った解析から予想される結果とは $2.0\sigma$ の違いがあり、これまでの結果を支持する仮の結果となった。

ニュートリノ振動パラメータに対する制限は、特に $\theta_{12}$ に対して大きく寄与しており、現在のParticle Data Groupのテーブル[Phys. Rev. D98, 030001(2018)]では、我々の解析結果[Phys. Rev. D94, 052010(2016)]が $\theta_{12}$ の値として採用されている。図13は上記のスペクトルデータを含めて更新したニュートリノ振動解析の仮の結果を示す。この結果は最も高精度な $\sin^2\theta_{12}$ の値となった。太陽 $\nu$ 実験とカムランド実験の結果は、 $\theta_{12}$ についてはよく一致しているが、 $\Delta m^2_{21}$ については依然として $2\sigma$ 程度の違いが見られ、新しい物理が存在する可能性がまだ残る。

今後は、SK-IVまでの全てのデータを用いた昼夜変動の解析結果の更新も行い、より精密なニュートリノ振動パラメータの導出を行う。また、SK-Gdフェーズにおいても、太陽ニュートリノ観測データを蓄積し、さらなる高品質データを増やしていく。

## 研究項目2. ニュートリノを用いた宇宙観測

### ①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

図7に示したように、ガドリニウム(Gd)を溶かす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。それによってまだ観測されていない「過去の超新星ニュートリノ」（「超新星背景ニュートリノ」とよばれる）を観測できるようになる。

この研究を進めるにあたっては、Gd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(SK)を模擬した200トンサイズの試験用タンクを作り、Gdを溶解した時の水の透過率を測定した。タンク内部には240本の50cm径光電子増倍管が取り付けられた。その測定の結果、0.1%の濃度までGdを溶解してもSKの超純水と比べて約92%レベルの

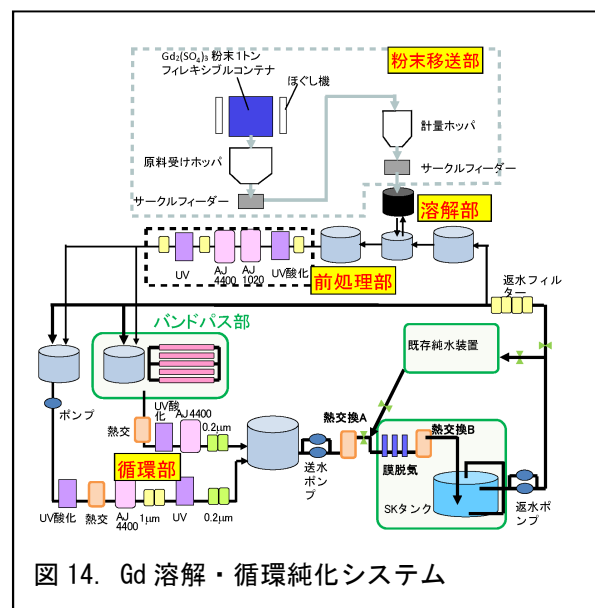


図14. Gd溶解・循環純化システム

透明度を有すること、つまり Gd による光の減衰は 8%程度であり大きな問題は無いことが分かった。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た。

SKの現在の純水装置ではイオンを含むすべての不純物を取り除くように設計されているため、ガドリニウム溶解後にはそのまま使用することはできない。200 トンの試験用タンクではガドリニウムを保持したまま水を純化する装置を開発し、それが良い透過率を保持できることを実証した。その結果を踏まえて実際の SK において使用する「Gd 溶解・循環純化システム」を設計・建設した。システムは硫酸ガドリニウムの粉を移送する部分、溶解する部分、前処理して純化する部分、SK の純水からの戻り水と合流させた後循環時に純化する部分から構成される。概念図を図 14 に示し、建設されたシステムの写真を図 15 に示す。このシステムは SK タンクに Gd を 17 日あるいは 35 日で溶解し、循環時には 120 トン毎時（17 日で一巡する流速）で Gd 水を循環処理することができる。このシステムは図 16 に示すように SK から約 120 m 坑内への入り口方向に進んだ場所にある Lab-G に設置されており、そこへの配管も既に設置されている。

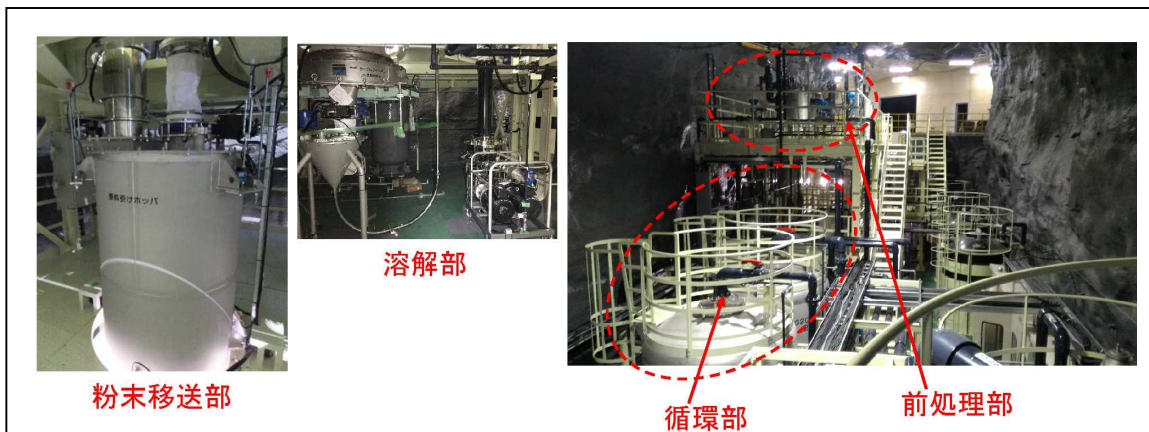


図 15. Gd 溶解・循環純化システムの写真

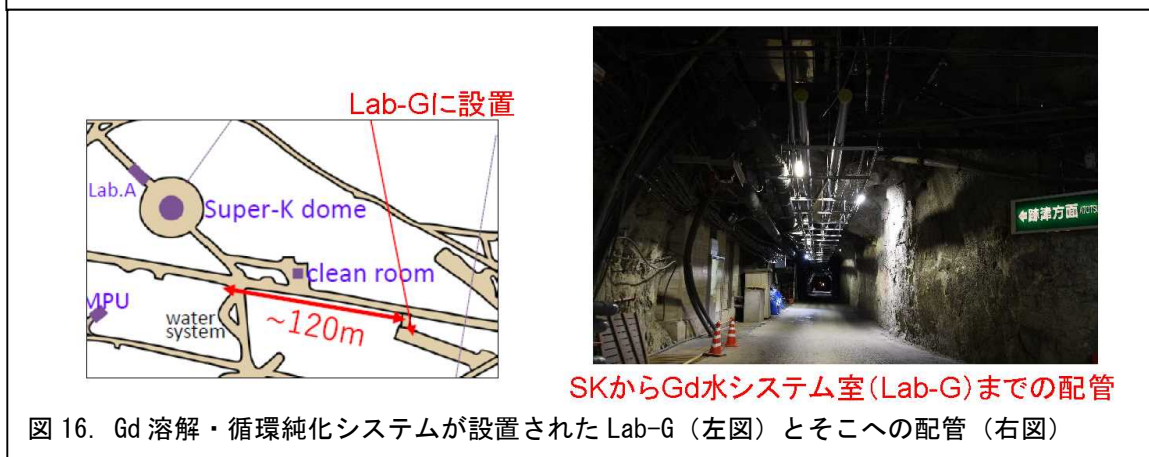


図 16. Gd 溶解・循環純化システムが設置された Lab-G（左図）とそこへの配管（右図）



これまでのSKタンクでは、観測では問題とならないレベルであるが、純水の漏れがあった。これまでの調査により、主要な漏れはタンクの底部にあると考えられる。そこで、Gdを溶解するに先立ち、水漏れを止めるとともに、たとえごく近傍で地震などの災害が発生してもSKタンクから水がもれないよう、底部だけでなく、タンク内壁を構成するステンレスパネルのすべての溶接のつなぎ目に止水剤を塗り保護することとなった。

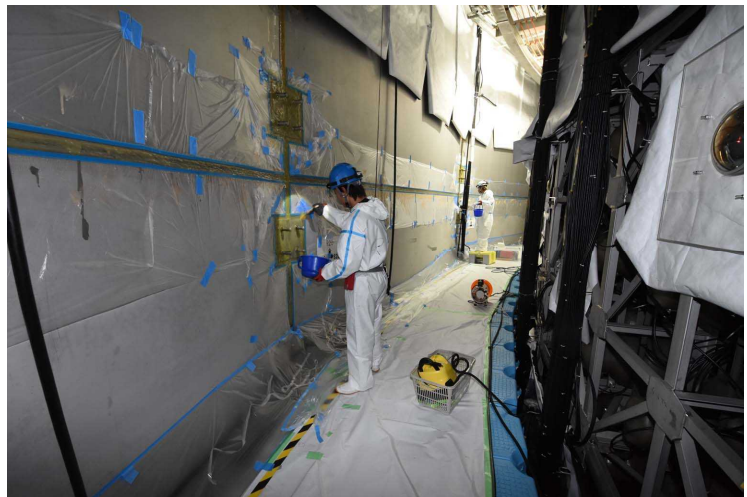


図 17. 2018年（平成30年）6月1日より開始したSKの改修工事での止水補強作業の様子。

SKタンクの内壁は厚さが3-4mmのステンレス(SUS)パネルで構成されている。SUSパネルと岩盤の間には鉄筋とコンクリートが入っており、タンク内の水圧を岩盤に持たせる構造になっている。タンクの側面においては、高さ2m、長さ6mのSUSパネル同士が溶接されて面を作っており、底面も同様の構造になっている。本年（2018年（平成30年））5月31日より開始したSKの改修工事ではこうした溶接によるつなぎ目（溶接線）や貫通物がある部分の周りに伸縮性のある止水材料を塗って止水補強していく。

（図17参照）溶接線の総延長は約6,000mになるが、すべての溶接線を止水材料で保護していく。ちなみに、止水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ないこと、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も満たす必要があった。これらの条件を満たす新たな材料を過去約5年間にわたり業者と共に開発してきた。

今回の改修工事では、タンク内の水配管の改良も行っている。これまでのSKは60トン毎時の流速で水を循環純化させていたが、一回循環処理するのに35日要していた。Gdを溶解する際には、タンクから戻ってくる水にGdを加え、タンクに供給することになるが、なるべく早くタンク内を一様なGd濃度にし、また、溶解後は常に良い透過率に保つためには、流速を上げて処理する必要がある。そこで今回、新たに導入した前述のGd水循環純化システムに合わせ、タンク内の配管を120トン毎時（一循環に要する日数を17日）で通水できるように増強する。SKタンクは一体物の水タンクであるが、壁から2m分を「外水槽」(OD)、その内側を「内水槽」(ID)としており、その間は光が行き来できないようにシート

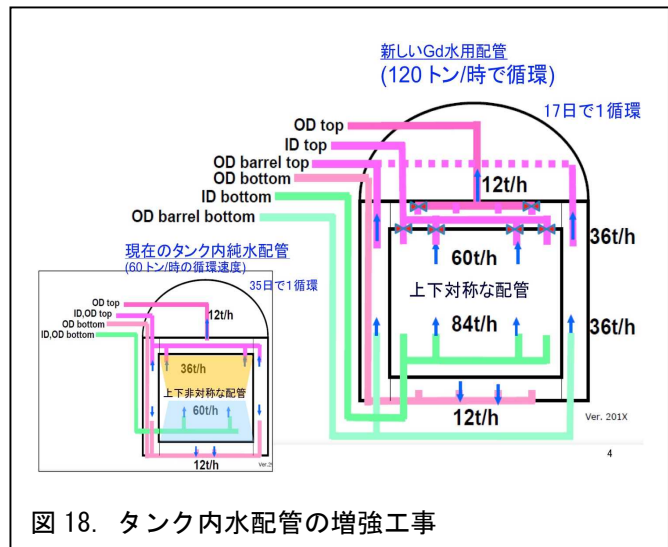


図 18. タンク内水配管の増強工事

が貼られており、水流を制限している。また、同様にタンクの底部 (bottom)、側部 (barrel)、上部 (top) にも仕切りのためのシートがある。このように仕切られた各部分をバランスよく Gd を含んだ水を循環させることができるように水配管に工夫を施している。(図 18 参照)

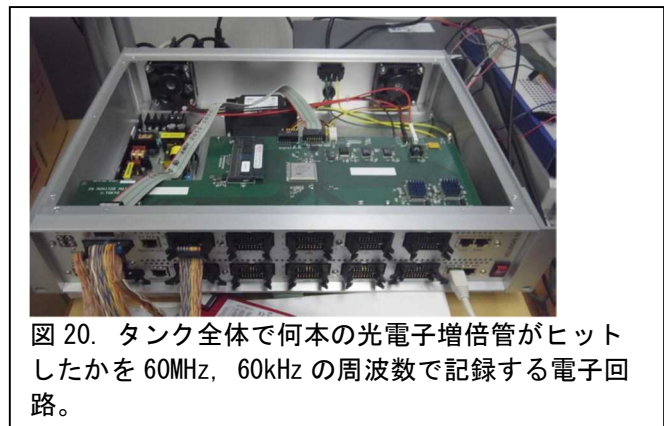
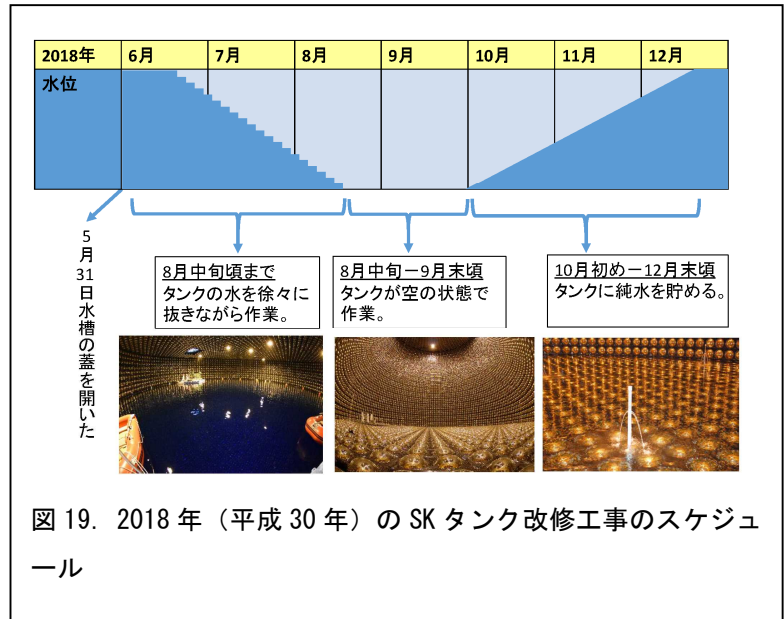
SK の改修工事は、本年 (2018 年 (平成 30 年)) 9 月末ごろまでの 4 か月間に行ない、10 月初めから 12 月中旬までの約 2 か月半の間に超純水の給水を行い、12 月末頃から超純水での観測を再開する予定である。

(図 19 参照) そして、来年度 (2019 年度) に T2K 実験のスケジュールと調整しながら、10 トンの硫酸ガドリニウム (0.01% の Gd 濃度に相当) を溶かして、超新星背景ニュートリノの観測を開始する予定である。0.01% の Gd 濃度は最終目標である 0.1% Gd 濃度の 1/10 ではあるが、0.01% の濃度でも中性子の捕獲効率が既に 50% あり、0.1% 濃度の場合の 90% 効率と比べて半分強の効率があり、超新星背景ニュートリノ観測を開始できると考えられる。

## ②超近傍での超新星爆発観測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 (超) 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 3000 万以上のニュートリノ事象が観測されると予想される。しかし、現在の主データ収集システムは検出器からの全ての事象データを記録する設計であるため、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ない。つまり、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 20 参照) を新たに設計・製作し、2015 年度 (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。これらのシステムは非常に安定に稼働、データを記録している。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な改良を準備してきた。本システムはその性格上、誤動作が通常のデータ収集に影響を与えるため、慎重にその性能評価を実施、問題ないことが確認されたため、2019年1月からのSK再稼働時から常時稼働の予定である。

### ③暗黒物質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、低エネルギーの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出来る。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は、2015年度（平成27年度）に解析結果が公表された（図21参照）。有意な信号は見られなかったが、4-200 GeV/c<sup>2</sup>の質量を持つ暗黒物質と核子との衝突断面積への厳しい制限を与えた。スピンに依存する相互作用の場合は、対消滅後に発生するニュートリノのエネルギーが低くなるbクォーク・反クォーク対への崩壊モードを含めて、最も厳しい制限を与えた。また、地球に集まった暗黒物質に対しても、同様の探索が行われ、地球中心に集積した暗黒物質の間接的探索として最も厳しい制限を与えている。さらに、標準的な暗黒物質とは異なり、非相対論的な速度で運動し、暗黒物質の一部を担っていると考えられている、Boosted dark matter 仮説についても、世界で初めて実験的な探索を行った。その結果、雑音事象を上回る Boosted dark matter 信号は得られなかった。この結果、Boosted dark matter に対する制限を課すことに成功し、この結果を掲載した Physical Review Letter 誌の Editor's suggestion に選出された。

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予定である。

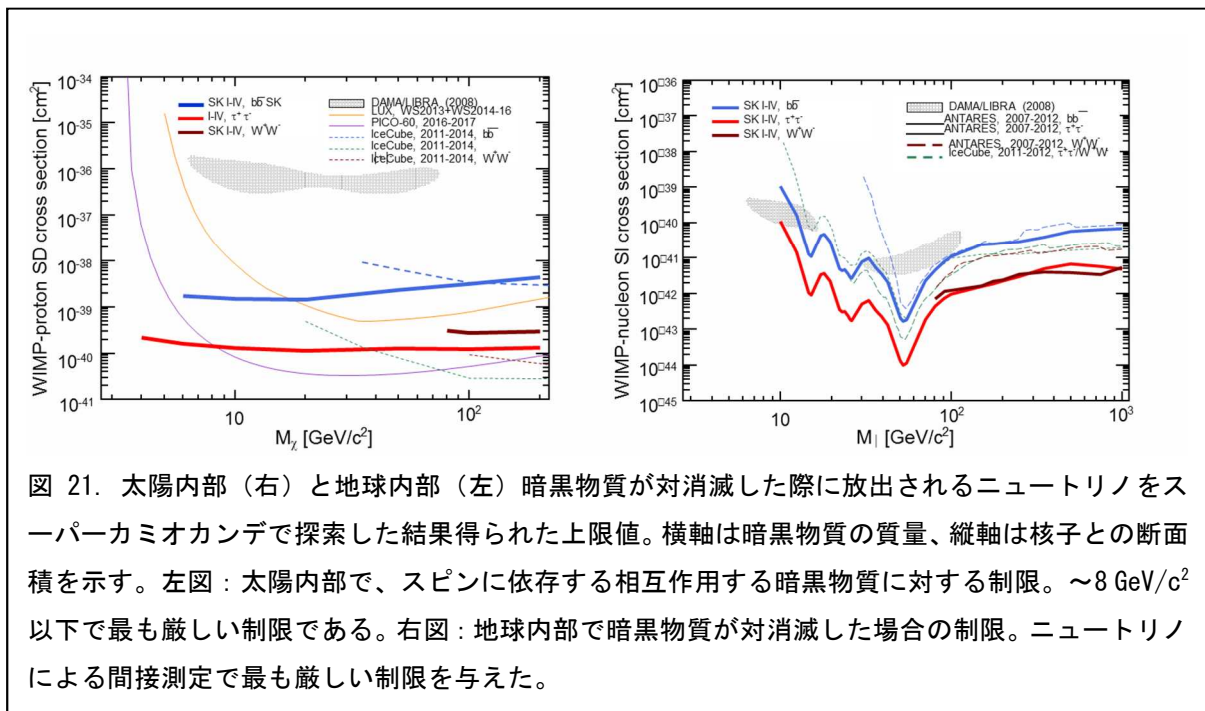


図 21. 太陽内部（右）と地球内部（左）暗黒物質が対消滅した際に放出されるニュートリノをスーパーカミオカンデで探索した結果得られた上限値。横軸は暗黒物質の質量、縦軸は核子との断面積を示す。左図：太陽内部で、スピンに依存する相互作用する暗黒物質に対する制限。～8 GeV/c<sup>2</sup>以下で最も厳しい制限である。右図：地球内部で暗黒物質が対消滅した場合の制限。ニュートリノによる間接測定で最も厳しい制限を与えた。

### 研究項目 3. 大統一理論の検証を可能とする陽子崩壊の探索

#### ①陽子崩壊の探索

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、陽子の寿命の予言値はおおむね  $10^{30}$  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。2018年（平成30年）現在、様々な陽子崩壊モードにおいて、365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、365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  $2.0 \times 10^{34}$  年と求まった。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  $8.2 \times 10^{33}$  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1イベントの候補が見つかったが、期待されるバックグラウンドは0.7イベントと矛盾しない結果となった。

スーパーカミオカンデでは2つの核子が同時に崩壊して2つのレプトン、あるいは1つのレプトンとガンマ線に崩壊するモードを系統的に探索することが可能である。これらのモードは上記の陽子がレプトンと中性パイ粒子の崩壊と同様、核子の質量と運動量を再構成することによって抽出することができる（図22）。

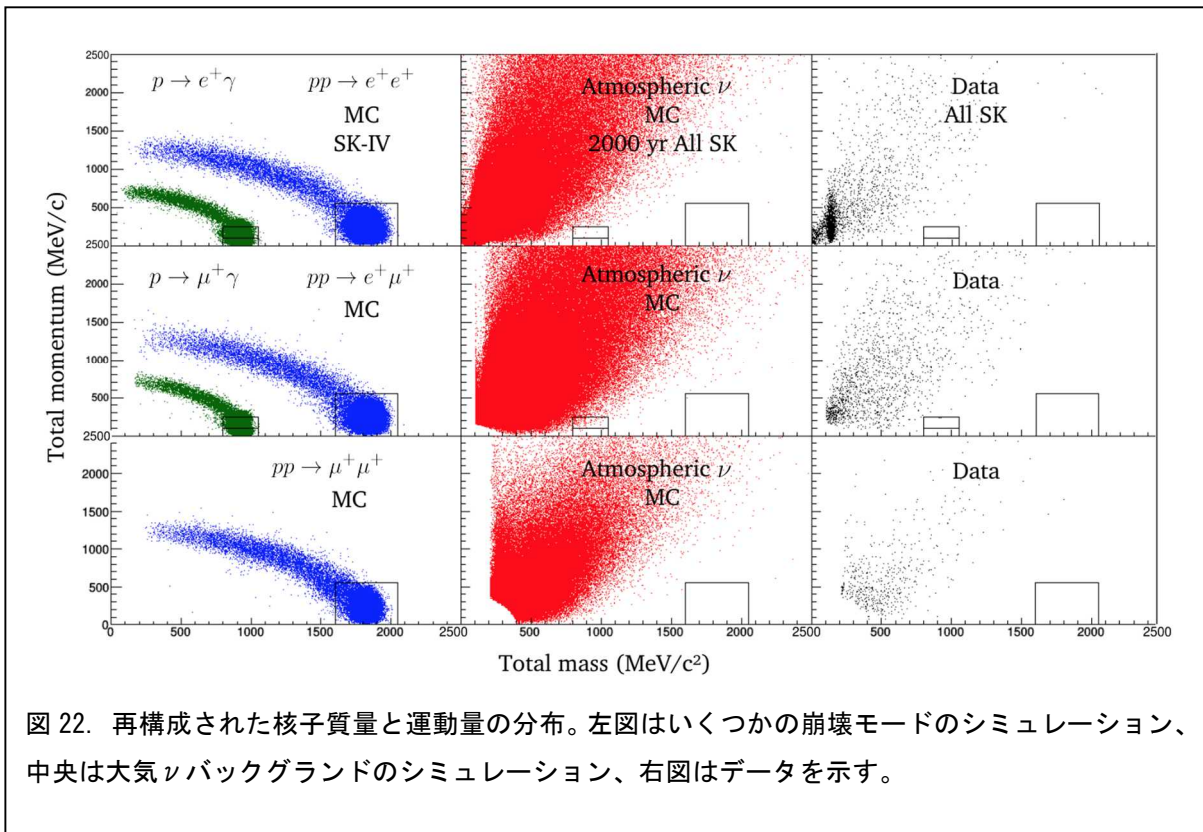


図 22. 再構成された核子質量と運動量の分布。左図はいくつかの崩壊モードのシミュレーション、中央は大気 $\nu$ バックグラウンドのシミュレーション、右図はデータを示す。

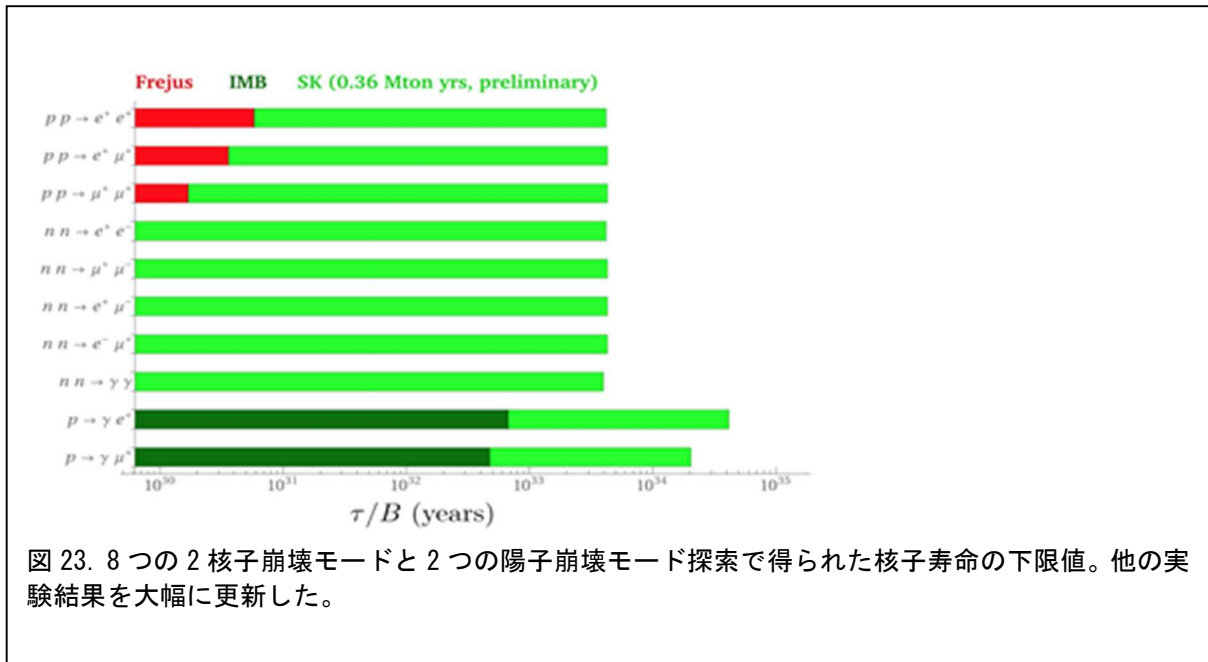


図 23. 8 つの 2 核子崩壊モードと 2 つの陽子崩壊モード探索で得られた核子寿命の下限值。他の実験結果を大幅に更新した。

この探索では 8 つの 2 核子崩壊:  $pp \rightarrow e^+e^+$ ,  $pp \rightarrow e^+\mu^+$ ,  $pp \rightarrow \mu^+\mu^+$ ,  $nn \rightarrow e^+e^-$ ,  $nn \rightarrow e^+\mu^-$ ,  $nn \rightarrow e^-\mu^+$ ,  $nn \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $nn \rightarrow \gamma \gamma$  および 2 つの陽子崩壊:  $p \rightarrow e^+ \gamma$  and  $p \rightarrow \mu^+ \gamma$  の探索を 365 キロトン・年のデータを基に行われた。いずれの崩壊モードにおいても、期待されるバックグラウンドと矛盾しない結果が得られた。求められた寿命の下限值を図 23 に示す。過去の実験結果が大幅に更新された。

## (2) 情勢の変化に対する対応状況

2016 年度（平成 28 年度）の進捗評価の際には、「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 2011 年（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、2013 年（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 2014 年（平成 26 年）9 月にアメリカの No $\nu$ A 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 2013 年度（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、2018 年度（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することができると判断し、タンク改造の実施時期を変更した。」と報告書に書いてある。J-PARC 側は予算措置の遅れにより予定が遅延し、2018 年度（平成 30 年度）のビーム強度増強のための電源交換を行わないこととなったが、SK の改修工事は予定通り 2018 年度（平成 30 年度）に行うこととした。

当初の予定では、SKの改修工事自身に4か月、超純水の給水に2.5か月、その後、水の透過率が安定してT2K実験のビームを受けるまでに3か月を見込み、全工程9.5か月間をJ-PARCの電源交換期間と合わせる予定であった。電源交換の遅延にともない、SKの改修工事を通常時のJ-PARC運転スケジュールに合わせてように短縮する方策を考えた。これまでSKに超純水を給水する際には、30トン毎時で製造した超純水をタンクに送るだけであ

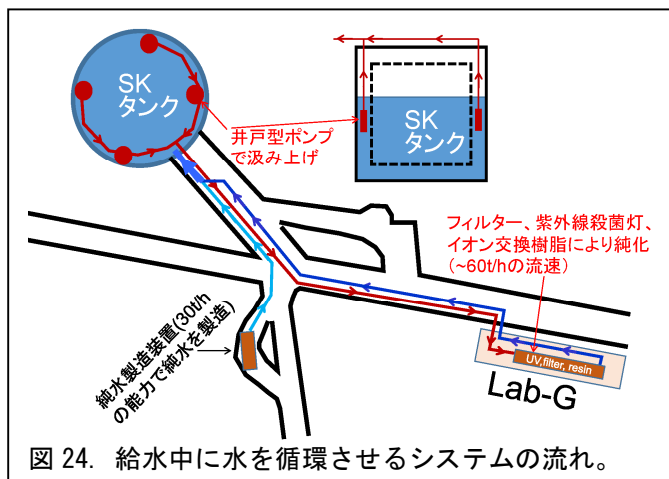


図 24. 給水中に水を循環させるシステムの流れ。

ったため、給水期間の2.5か月間に水質が落ち、満水後に約3か月間、循環して水質を上げる必要があった。そこで、今回の給水においては給水中でもタンク内の水を汲み上げてその水をGd水循環純化システムの一部使って純化し、SKへ戻すという流れを新たに追加することとした。(図24)これにより、満水となった直後でもT2K実験のニュートリノビームを受けられる水質となり、SK改修工事によるT2K実験停止期間を6.5か月に短縮する計画をつくることのできた。

### (3) 社会や国民の理解を得るための取組、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、一般向けパンフレットなどによって広く社会や国民に発信している。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おり、H28、29年度はスーパーカミオカンデ一般公開を主催し、各300名の見学者を受け入れた。過去3年間の広報に関する実績を以下に示す。

	H27年度		H28年度		H29年度	
	回数	人数	回数	人数	回数	人数
SSH 見学	13	401	29	880	16	493
一般講演 (中高生)	17	557	27	873	24	721
一般講演 (大学生)	23	301	29	242	23	174
一般講演 (他分野研究者等)	17	62	47	390	41	205
一般講演 (一般)	35	4058	19	3190	15	2455
サイエンスカフェ	7	379	2	75	1	379
一般見学者数 延べ	2443		3907		3346	

#### (4) 年次計画における「計画推進に当たっての留意事項等」への対応状況

年次計画においては、「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」として、以下の内容を掲載している。

##### 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、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。

これらへは以下のような対応が行われている。

##### ①国際共同研究体制について

スーパーカミオカンデ実験の国際共同利用体制は、1992年にアメリカが参加したことを契機にスタートしたが、その後、ポーランド(1992年(平成4年))、韓国(1998年(平成10年))、中国(2006年(平成18年))、スペイン(2008年(平成20年))、カナダ(2011年(平成23年))、イギリス(2016年(平成28年))、イタリア(2016年(平成28年))、フランス(2017年(平成29年))が加わり、現在10か国が参加する国際共同実験となっている。実験グループ内の当初の取り決めは日本とアメリカの2か国の体制を想定したものであったが、現在それを他国も含めた体制に変更しつつある。

まず、共同実験の運営の中心である Executive Committee は、日本から3名、アメリカから2名、カナダから1名、ヨーロッパから1名のメンバーで構成されている。

また、2018年(平成30年)に行っているSKタンクの改修工事においては、外水槽の光電子増倍管交換に関わる経費は日本以外の国が負担している。改修工事を始めるにあたり、各国の代表者が集まる委員会(Tank Open Country Board)を作り、そこでの議論の結果、外水槽関係にかかる経費を各国からの共同実験者数に比例して負担している。負担分を現金として東京大学に振り込む方式で、スペイン、ポーランド、カナダ、中国、韓国が対応し、実際に物品を購入して負担する(in-kind)やり方でアメリカ、イギリス、イタリア、フランスが対応することになった。現金で振り込む国については、その国の機関と学術協定を結ぶ必要があり、実際、スペイン、ポーランド、カナダ、中国とはそうした協定をこれまでに結んでいる。また、今回の改修工事では約1800人/日の研究者による作業が必要

であるが、共同研究者数に比例して、それに相当する分量の作業を行っている。作業のために外国から来る旅費は相手国持ちである。来年以降は、通常運転時の運転経費への財政的貢献について議論する予定である。

## ②広報体制について

まず、2016年度（平成28年度）の進捗評価以降、千葉県柏市の宇宙線研究所、神岡宇宙素粒子研究施設ともに池ノ山模型や検出器の模型の整備など、展示施設の充実が図られた。さらに2016年（平成28年）11月、2017年（平成29年）11月にはスーパーカミオカンデ一般公開を行い、各300名の参加者がスーパーカミオカンデ実験施設を見学した。また、スーパーカミオカンデパズルや、スーパーカミオカンデのイベントディスプレイが表紙に使われたノートなど、関連商品の開発が行われた。

神岡宇宙素粒子研究施設では、広報を専門に担当する特任専門職員が1名おり、こうした広報活動の中心となって働いている。また、宇宙線研究所には「広報室」を置いているが、それは所長を室長とし、副室長、専任の広報担当職員（勤務地は柏）、および各研究部門から各1名以上選出の教員あるいは広報担当教職員をもって構成している。神岡での広報活動も必要に応じて、研究所の広報室と連携して運営している。

宇宙線研究所は、地元岐阜県飛騨市と連携協力に関する協定書を取り交わしており、その協力には、最新の学術研究や研究成果の発信と普及を目的する事項、スーパーカミオカンデ一般公開に関する事項も掲げている。また、地元のボランティア団体からも協力を得ている。実際、スーパーカミオカンデ一般公開は、宇宙線研究所、飛騨市、地元のボランティア団体が共同で開催しており、当日の受付、案内誘導、安全監視員等において、地元の方々の多大な協力を頂いている。また、地元飛騨市との連携協定のもとで、飛騨市神岡商工会議所と連携した関連商品も開発されており、研究を一般の方々に発信する一助となっている。さらに、飛騨市では宇宙物理学研究紹介施設を新設する準備を進めており、神岡宇宙素粒子研究施設の教職員はその展示計画、設計において助言監修を行っている。

## ③安全対策について

「3. (1) 研究の進捗状況、設備の整備状況」の「研究項目 2. ①」に書いたように、本年（2018年（平成30年））は、タンクの水漏れを止めるとともに、たとえごく近傍で地震等の災害が起きてもガドリニウム(Gd)を含んだ水が河川など環境に漏れ出ることが無いように止水補強工事を行っている。また、何か不測の事態が生じた場合には、すぐにGdをタンク水から回収できるようにイオン交換樹脂を使用したGd回収装置を2017年度（平成29年度）に建設されている。Gdを溶解した後は、SKタンク周りのトンネルでのGd量を定期的に測定し、タンク周りで自主的に決めた基準値を超えた場合にはGdをタンクから回収することとする予定である。Gdに対しては排水基準、環境基準等の法的な規制はないが環境保全に十分配慮して、各種金属に対する排水基準においてもっとも厳しい値である「0.005mg/L (5 ppb) 以下」を坑内の実験専用区域の境界での値として適用する予定である。この値は下流にある神通川流域では0.0009 ~ 0.005 micro-g/L (0.9 ~ 5 ppt) 以下に相当し、その値は通常の河川中のGd自然存在量以下に相当する。



地元や近隣自治体の方々などからの支持につなげるため、プロジェクトの概要、環境保全に対する考え方を以下の方々に説明を行い、必要に応じて意見交換会を行っている。

- 2015年（平成27年）7月24日 神岡鉱業株式会社社長、専務他への説明。
- 2015年（平成27年）8月11日 飛騨市長への説明。
- 2015年（平成27年）10月7日 地元飛騨市茂住地区住民への説明会。
- 2016年（平成28年）8月3日 富山市長への説明。
- 2016年（平成28年）9月14日 イタイイタイ病対策協議会、神通川流域カドミウム被害団体連絡協議会（以下、「被団協」と記す）の会長、事務局長へ説明。
- 2017年（平成29年）10月5日 被団協の方々との意見交換会（1回目）。
- 2017年（平成29年）12月10日 被団協の方々との意見交換会（2回目）。
- 2018年（平成30年）5月17日 宇宙線研究所メディア懇談会で説明。
- 2018年（平成30年）5月22日 河川での自然 Gd 濃度を測定するため、被団協と共同で河川の水を採水。（一回目）
- 2018年（平成30年）5月25日 富山県行政（具体的には、富山県生活環境文化部環境保全課水質保全係）への説明。
- 2018年（平成30年）5月25日 富山市行政（具体的には、富山市環境部環境保全課）への説明。
- 2018年（平成30年）6月10日 「スーパーカミオカンデ改修工事にとまなう坑内見学会」にて、マスコミ向けに説明。

## （５）共同利用・共同研究を行うための実施体制の状況

「2.（2）実施体制」にも記したように、スーパーカミオカンデ実験は（2018年（平成30年）7月時点で）国内から17の大学・研究機関、国外からは9カ国から27の大学・研究機関から総勢175名の研究者が参加する、国際共同実験である。東京大学宇宙線研究所はホスト機関として、実験のためのユーティリティーを提供している。実験装置が設置された岐阜県神岡町茂住には、共同利用・共同研究のために訪れる研究者向けに研究棟、宿泊施設を備え、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行えるように体制を整えている。また、神岡現地にはデータ解析用コンピュータがあり、リアルタイムでのデータ解析処理を行うことによって、データに問題があった場合には即座に対応できるようにしている。また、過去に取ったデータの再解析、シミュレーションデータの生成もこのデータ解析用コンピュータで行っている。SKの実験場所は「地下」という特殊環境にあるため、神岡宇宙素粒子研究施設（神岡施設）のスタッフは共同利用研究者に対して、地下で安全に研究を行うための教育を行っている。

## （６）幅広い研究者が参画できる運用体制の状況

神岡のデータ解析用コンピュータシステムには高速ネットワークが接続されており、共同研究者は神岡外部からでも自由に神岡用コンピュータを利用してデータ解析を行えるようになっている。また、高速ネットワークを利用した質の高いテレビ会議システムを用意しており、データ解析を行っているサブグループの会議などが日々頻繁に行われている。テレビ会議システムは研究棟で会議が行える全部屋のみならず、地下実験室にも設置され

ており、地下で実験監視当番を行っている研究者や装置のメンテナンスを行っている研究者も会議に参加できるようにしている。そして、全共同研究者が集まる「SK グループ共同研究者会議」を年に 2 回ほど開催しており、実験装置の運転状況、データ解析の進捗状況を全研究者で議論している。また、神岡に滞在する研究者が知識を広げることができるように、関連宇宙・素粒子研究を行っている外部の研究者を神岡に招待してセミナーを開催したり、神岡施設の図書室に雑誌類を用意したりして共同利用者に便宜を図っている。

### (7) 計画推進に当たっての課題

「3. (2) 情勢の変化に対する対応状況」にも記したように、現時点では T2K 実験との調整ができれば 2019 年度にガドリニウムを溶解して超新星背景ニュートリノの観測を開始する予定となっている。一方、中国では 20,000 トンの液体シンチレータを用いた JUNO 実験が建設されており、2020 年の観測開始を目指している。JUNO 実験は原子炉ニュートリノを用いて質量階層性を探る実験であるが、超新星背景ニュートリノの観測に対してもスーパーカミオカンデと競合する大きさを持つため、スーパーカミオカンデの計画も遅延なく進める必要がある。

我々の銀河系での超新星爆発は 30-50 年に一度程度の頻度しかなく、その瞬間を逃さないようにするためには 24 時間 365 日体制の安定したデータ取得が必要である。スーパーカミオカンデ (SK) 後の新規計画としてハイパーカミオカンデ (HK) 実験を計画しているが、HK が動き出して安定稼働に入るまで SK を継続的に運転する必要がある。

### (8) 安全管理体制の強化

スーパーカミオカンデは神岡鉱山の地下 1,000 m の場所にあり、安全に実験を推進するために安全管理体制を整備してきている。以下に具体的な取り組みを示す。

- ・ 入出坑管理システムを導入し、研究者や職員が坑内のどこにいるかを常にモニターすることができるようにした。
- ・ 火災などの災害時には坑内のエリア単位で避難し、人数の把握を迅速にできるようにした。また、年に一度坑内からの避難訓練を行っている。
- ・ 通常入出坑する跡津通洞に加え、茂住通洞も避難用に整備し、火災時の風向きによって安全な方向へ避難できるようにした。
- ・ 酸素モニターを整備し、酸素濃度が低下した場合には坑外でもそれを検知し、消防等へ通報することができるようにした。
- ・ 坑内での安全に関する情報を他の実験グループや神岡鉱業（株）と共有するため、安全協議会を作り月に一度安全に関する議論を行っている。
- ・ 共同利用研究者に対する地下で安全に研究を行うための教育に、e ラーニングを導入し始め、国内外の多くの受講対象者への教育の効率化を図った。
- ・ 神岡施設内で起きた事故やヒヤリ・ハットの事例を、ホームページや電子メール等で、共同利用者に紹介し、注意喚起を行ってきた。
- ・ 非常時に迅速に対応できるように、神岡施設のスタッフによる 24 時間のオンコールシフト体制をしいている。

- ・ 実験室の要所に置かれた web カメラを警備員が定期的に確認することに加え、緊急退避時に坑道全体の状況が確認できるよう web カメラの設置を強化した。
- ・ 坑内へ入れる車両を増やすことで、これまでより多数の研究者が一時に作業を行う必要が生じたときでも遅延なく退避できる体制の維持を可能にした。

## 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

年次計画に掲げられた3つの科学目標いずれも順調に進捗している。特に、ニュートリノ質量階層性やCP対称性の破れに関する研究に貢献するT2K実験の進展については、加速器のビーム増強に遅れがあるものの、検出器の改修時期やタンク水の純化システムに係る改良等の調整によって停止期間を短縮し、データ収集への影響を極力抑える工夫がなされている。今後も関係機関間の密な連携の下、海外の競合実験の動向も踏まえつつ、本実験を推進することが望まれる。また、超新星爆発に伴うニュートリノの観測に向けたガドリニウム実験の準備も、環境調査や地元住民との調整を含めて順調に進捗している。

国際共同研究体制については、過半数を海外研究者で構成したExecutive Committeeによる共同実験の運営体制を確立するとともに、各国代表者によるTank Open Country Boardの議論を経て海外参画機関と外水槽の改修費用を分担するに至っており、今後さらに運転経費への貢献を求める交渉を継続するなど、プロジェクトの発展を見据えた国際共同研究体制の構築と国際的な役割分担の明確化が期待される。また、研究棟及び宿泊施設の整備、実験データへのアクセシビリティの向上、共同研究者全体による会議の年2回開催など、共同利用・共同研究体制の充実にも取り組んでいることは、評価できる。

学術的には、ニュートリノの性質及び宇宙観測に係る研究成果により、素粒子物理学及び宇宙物理学の周辺領域に大きなインパクトを与え、宇宙の歴史、天体の進化に対して重要な情報を与えるものである。特に、ガドリニウム実験の成果によって超新星爆発時の反ニュートリノに係る高感度観測を可能にすれば、ニュートリノによる宇宙観測の進展に寄与すると期待される。

社会的な波及効果については、小柴博士、梶田博士のノーベル賞受賞等の成果を活かして講演会や施設見学会などを実施し、基礎科学全般への興味・関心につなげようとする努力が認められる。また、地元自治体、ボランティア団体、商工会議所等との連携協力の下に広報体制を構築し、研究者に過度の負担を与えないかたちで積極的なアウトリーチ活動を実施している。我が国の将来的な基礎科学力の向上に寄与するものと期待され、広報面から基礎科学全般を盛り立てる活動の一層の強化が望まれる。他方、実験に必要な超純水の精製技術等は産業応用への芽も有している。

以上を総合的に勘案すると、本プロジェクトは概ね順調に進捗していると評価できる。

### (2) 今後の事業の推進に当たっての留意点

#### ①国際共同研究体制の更なる深化と国際費用分担の更なる検討について

上述のとおり、本プロジェクトは高い国際競争力を有し、10か国の研究機関が参画し、全体の半数弱という高い割合の海外研究者が参加する国際共同研究体制となっている。今後、Tank Open Country Boardにおける意思決定プロセスの明確化や、国際共同実験に基づくオーサーリストの作成プロセスの明確化など、国際共同研究体制を更に深化させること、並びに海外研究者の更なる参加に応じて、通常運転時の運転経費等への更なる貢献を得ることが期待される。

## ②ガドリニウム実験に伴う安全対策の更なる徹底について

従来から行ってきた環境影響への対策や地元住民への説明を徹底することはもとより、今後、工事へ着手するに当たり、ガドリニウムの溶解に携わる作業従事者及び研究者への研修や、作業現場の安全確保など、事故防止に向けた教育と対策の徹底や、第三者機関によるガドリニウムの漏えい検知や、検知した場合の具体的な対応プロセスの事前検討などを含む安全対策全般に対するチェック機能の整備と情報の公開など、更に慎重な対応が求められる。

## ③年次計画上の最終年度におけるアウトカムの明確化について

2019年度から2022年度まで4年間のガドリニウム実験が、当該分野において具体的にどのような意義を持つものなのか、達成目標としてのアウトカムを明らかにすることが求められる。このことは、期末評価における達成度の確認に寄与するばかりでなく、国民や社会からの支持を得る上でも必要である。

なお、本プロジェクトの年次計画については、先般実施機関から申出のあった変更の内容を踏まえつつ、本評価の内容及び我が国の厳しい財政環境を勘案し、本作業部会において審議の上、決定した。

## 備考（用語解説等）

### ○ 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。

### ○ CP 対称性の破れ、CP 非保存

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なぞを解決する、有力候補となっている。

### ○ 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。

### ○ 暗黒物質

宇宙の物質エネルギーの 27%を占めるもの。通常の物質は 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。

### ○ bクォーク

陽子や中性子等を形作るような強い力を受ける素粒子の仲間をクォークと呼ぶ。その6種類ある仲間のうちの一つ。質量が大きいため沢山の粒子に崩壊し、そのためニュートリノに渡されるエネルギーが小さくなる傾向がある。

### ○ レプトン

電子やニュートリノ等強い力を受けない素粒子の仲間をレプトンと呼ぶ。その6種類ある仲間のうちの一つで、最も質量の大きな、電荷を持った粒子。

### ○ 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。

## 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

(委員)

栗原和枝 東北大学未来科学技術共同研究センター教授

(臨時委員)

伊藤早苗 九州大学名誉教授、九州大学極限プラズマ研究連携センター顧問  
中部大学客員教授

井本敬二 自然科学研究機構理事・副機構長、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

川合知二 大阪大学産業科学研究所特任教授

小林良彰 慶應義塾大学法学部教授、慶應義塾大学社会科学データ・アーカイヴセンター (SU) センター長

※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

原田慶恵 大阪大学蛋白質研究所教授

※横山広美 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構教授

(専門委員)

田村裕和 東北大学大学院理学研究科教授

新野宏 東京大学大気海洋研究所客員教授

松岡彩子 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所准教授

観山正見 広島大学特任教授

安浦寛人 九州大学理事・副学長

#### 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 先端融合研究環長

中野貴志 大阪大学核物理研究センター長

(敬称略、五十音順)

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