

## ニュートリノの観測感度向上 —新生スーパーカミオカンデで Gd を加えて観測開始



関谷 洋之  
Sekiya Hiroyuki



中畑 雅行  
Nakahata Masayuki

### 1 はじめに

スーパーカミオカンデ (SK) は、岐阜県飛騨市神岡町にある標高 1,369 m の池ノ山の山頂直下 1,000 m に設置された世界最高感度のニュートリノ検出器である。直径 39 m 高さ 41 m の巨大な水槽に蓄えられた 5 万 t の純水と、その水中でニュートリノ反応によって発生するチェレンコフ光を捕らえるために水槽内に内向きに取り付けられた 11,129 本の直径 50 cm の光検出器と外向きに取り付けられた 1,885 本の直径 20 cm の光検出器からなる。1996 年に実験がスタートして以降、太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、人工ニュートリノ等の観測を通じて、ニュートリノの性質を解明してきた。2020 年 7 月に SK では、タンク中の純水にレアアースの一種であるガドリニウム (Gd) を導入し、新たな装置として観測をスタートさせた。これにより、特に宇宙の初期から起きてきた超新星爆発によって蓄積されたニュートリノである「超新星背景ニュートリノ」の観測も高感度で行えるようになった。

### 2 超新星爆発ニュートリノとは

超新星爆発は太陽の約 8 倍以上の質量をもつ星がその一生の最後に起こすと考えられていて、宇宙で最も大きなエネルギーを放出する天体現象のひとつである。太陽が一生の間 (約 100 億年) に放出する

総エネルギーの約 300 倍に相当するエネルギーを 10 秒間程度で一気に放出する。その爆発エネルギーの 99% はニュートリノによって放出される。したがって、超新星爆発にともなうニュートリノを観測することが爆発の本質を探る上で重要である。

歴史上、観測された超新星ニュートリノは、1987 年に観測された大マゼラン星雲での超新星 SN1987A の 1 例のみである。SK の前身である「カミオカンデ」は 11 個のニュートリノを捉えた。

超新星爆発は、超高密度での物質の振舞いや、一般相対性理論を考慮すべき状態で、複雑なメカニズムが関わってくるため、物理学の基本法則を検証する絶好の対象である。長年、天体物理学の理論研究者が最新の計算機能力を生かして爆発のシミュレーションをしてきているが、いまだに納得のいく理解がされていない。爆発メカニズムの解明のためには、豊富なニュートリノのデータが必要である。SK はカミオカンデの約 15 倍の容積を持っている。そのため我々の銀河系において超新星爆発がおきた場合には、約 8,000 ものニュートリノ事象を捉えることができ、爆発メカニズムの解明に大きく寄与できると考えている。ただし、我々の銀河系で起きる超新星爆発の頻度は 30 年から 50 年に一度と予想されており、今後 SK で捉えることができたとしても 1~2 回程度の爆発に限られる。もっと多くの超新星爆発に関する情報を得るには我々の銀河系よりもずっと遠くの銀河を対象にしなければならない。

### 3 宇宙に漂う超新星背景ニュートリノを探す

宇宙には数千億個の銀河があるので、宇宙全体を見渡せばどこかで毎秒数回の超新星爆発が起きていることになる。それぞれの超新星爆発においてニュートリノが放出されるので、超新星爆発ニュートリノは宇宙に拡散し、宇宙の歴史と共に蓄積していく。(図1参照) このニュートリノが「超新星背景ニュートリノ」である。

超新星背景ニュートリノが蓄積された量は私たちの掌を一秒間に数千個通り抜けるほどになる。これは、SKタンク内の水と年間に数回反応する程度のレベルに相当する。これまでもSKでこうした反応が起きてきたはずだが、ノイズによる反応と見分けがつかず、観測することができなかった。もう少し詳細にニュートリノの反応とノイズについて述べよう。超新星爆発ではすべての種類のニュートリノ(電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノ)が生まれ、「粒子」も「反粒子」も生まれる。この内、SKタンク内の水と最も反応しやすいのは、「反電子ニュートリノ」である。反電子ニュートリノは陽子( $\text{H}_2\text{O}$ のHの原子核)と反応し、陽電子と中性子を生成する。これまでも超新星背景ニュートリノの探索を行ってきたが、この反応によって生じる「陽電子のみ」による事象を探していた。似たようにみえる現象には、宇宙線がタンク内で生成する放射性原子核や太陽ニュートリノが電子を弾き飛

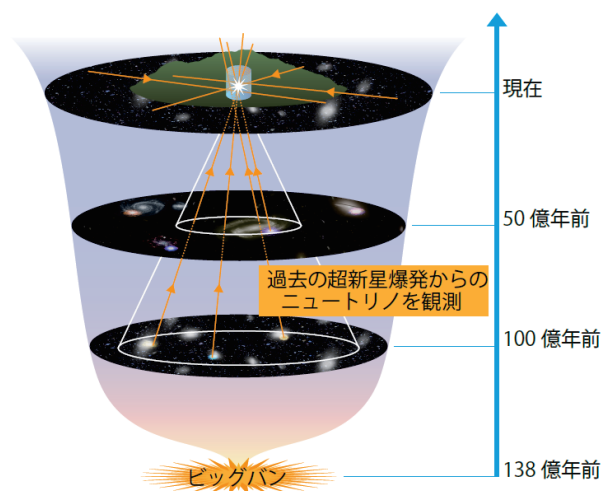


図1 超新星背景ニュートリノ

ばす現象等があり、そうした「ノイズ」による現象は年間数万事象もあり、その中に埋もれた数事象の超新星背景ニュートリノ事象を探し出すのは困難であった。

### 4 ガドリニウムによる性能向上

そこで、埋もれた超新星背景ニュートリノを“掘り出す”ためにガドリニウム(Gd)をSKに加えることが計画された。Gdは原子番号64の元素であり、希土類元素(レアアース)の一種である。Gdは、すべての元素のなかで中性子捕獲断面積が格段に大

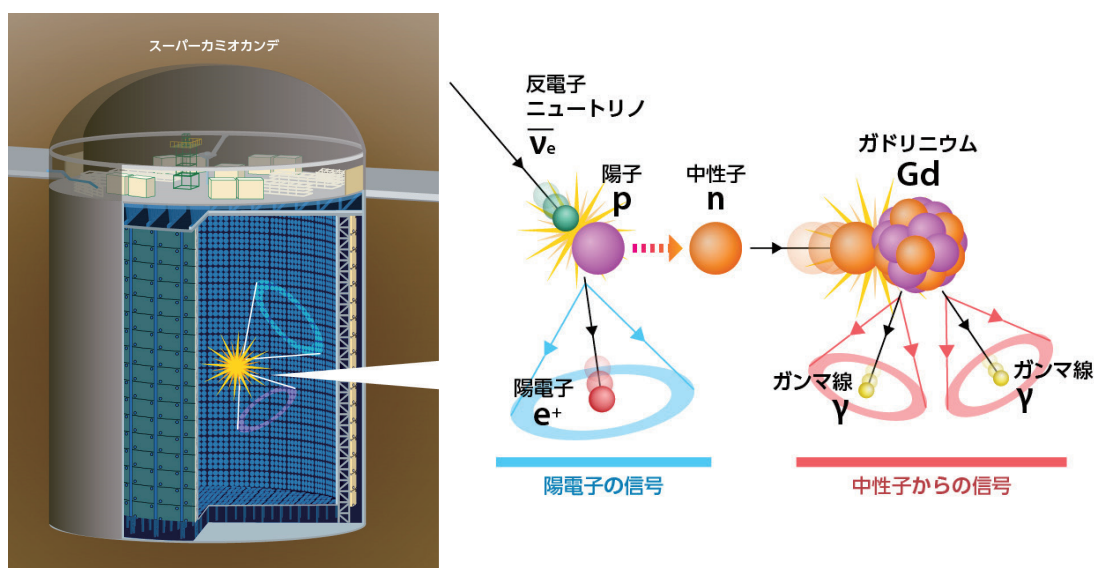


図2 反電子ニュートリノの反応とSKでの信号

きい。SKタンク中の純水にGdを混ぜると、図2のように反電子ニュートリノが反応した際に陽電子によるチェレンコフ光が発生するのに加え、生成された中性子が数十～百マイクロ秒後にGdに捕獲されて、 $\gamma$ 線を放出するようになる。 $\gamma$ 線もチェレンコフ光を発生させるので、特徴的な2回の発光がSKタンク内で起こることになる。したがって、反電子ニュートリノに対するS/Nを各段に向上させることができ、ノイズの中から超新星背景ニュートリノによる反応を選び出すことができるようになる。期待される。Gdの中性子の捕獲能力は非常に優れているため、たった0.01%の濃度で水に溶かしても50%の効率で中性子を捕獲することができ、90%の効率を得るのも0.1%の濃度で十分である。

超新星背景ニュートリノが観測できるようになると何が分かるだろうか？ まず、超新星爆発の平均的な様子が分かる。超新星背景ニュートリノはこれまでに宇宙で起きてきた超新星爆発の『積分』現象なので、平均的になっているというわけである。また、超新星背景ニュートリノのエネルギースペクトルを測定することができれば、宇宙のどの時期に多くの超新星爆発が起きてきたか、といった「超新星爆発の歴史」を探ることができる。超新星爆発は星の中心核が重力崩壊した際に起こる現象だが、場合によっては重力崩壊後にブラックホールができて、光で見える超新星爆発は起こらないかもしれない。しかし、ブラックホールを生成する重力崩壊でも、ブラックホールができるまでの間に十分な量のニュートリノが放出されると考えられている。そこで、超新星背景ニュートリノの強度と光で観測される超新星爆発の頻度とを比較すれば、どのくらいの割合でブラックホールができるかが分かるはずである。このように、超新星背景ニュートリノの観測により超新星爆発の理解が大いに進むと考えられる。また、我々の身の回りには多種多様な元素は、大質量星の中で核融合反応が進む間や超新星爆発の際、あるいは中性子星（超新星爆発の後にできる高密度天体）同士の合体によって生まれたと考えられている。そのため、超新星爆発の理解は宇宙での元素合成の理解へとつながるのである。

## 5 硫酸ガドリニウムの導入

Gdは大きな中性子捕獲能力を持つこと以外にも、大きい磁気モーメントを持つという特長もあり、MRI（核磁気共鳴画像法）検査における造影剤としても広く使われている。自然界には、例えば日本の土壤中に3～7 ppmの濃度で存在している。Gdに対しては環境基準、排水基準等の法的な規制はない。しかし、河川にはあまり存在しない物質なので、十分配慮して取り扱っている。Gdを導入する前の2018年にはSKタンクの改修工事を行った。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等、漏洩しないように万全の対策を施した。また、SKタンクの外側は水没させているが、その水を毎日採水しGd濃度を誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS）で監視する体制を整えた。以後、これまでSKタンクからの有意な水漏れも、周囲からの有意なGd濃度の上昇も確認されていない。

単体のGdは水に溶けないので、実際に導入するには化合物を溶かす必要があるのだが、ステンレスへの腐食性や溶解した際の光の透過率へ与える影響等から、硫酸ガドリニウム八水和物（ $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ ）を選択した。SKは世界最高精度の太陽ニュートリノ観測装置でもあるので、その性能を保持するためには極めて放射性不純物の少ない（ $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ ）でなければならない。日本イットリウム（株）と共同で、そのような超高純度硫酸ガドリニウムを開発した。

タンク改修工事の後、まず2019年2月にかけて純水を給水した。更に以前から利用してきた純水装置を使い循環純化を進め、2019年末までに不純物の混入が極めて少ない純水でタンクを満たした状態にした。その状態の水を、新開発の硫酸ガドリニウム水溶液の循環純化装置で処理する試験を2020年2月まで行い、タンク内純水の透過率を元の純水装置と同じレベルで保てることを確認した。新たな純化装置で最も重要なエレメントは、 $Gd^{3+}$ 、 $SO_4^{2-}$ を保持したまま他のイオンを除去する特殊なイオン交換樹脂である。これは東京大学とオルガノ（株）とで共同開発したものである。

そして2020年7月14日から13 tの $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ の導入をスタートした。これは5万 tのSKの

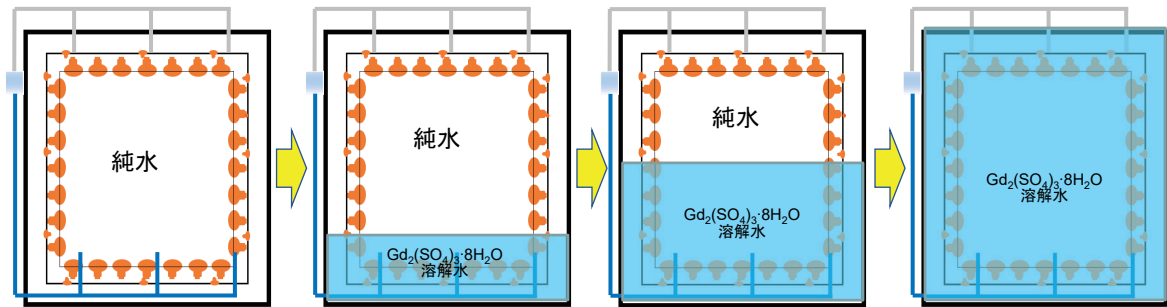


図3 硫酸ガドリニウム導入方法

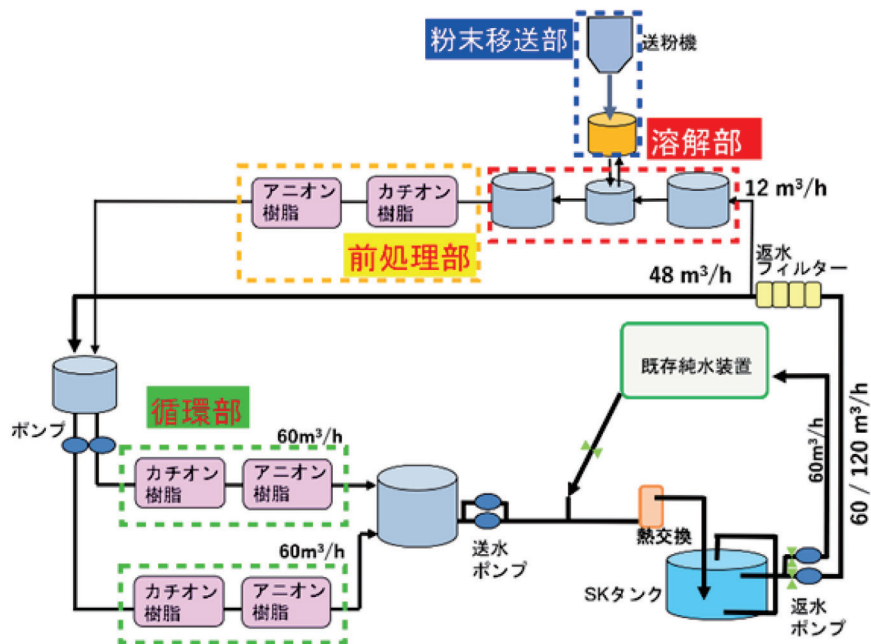
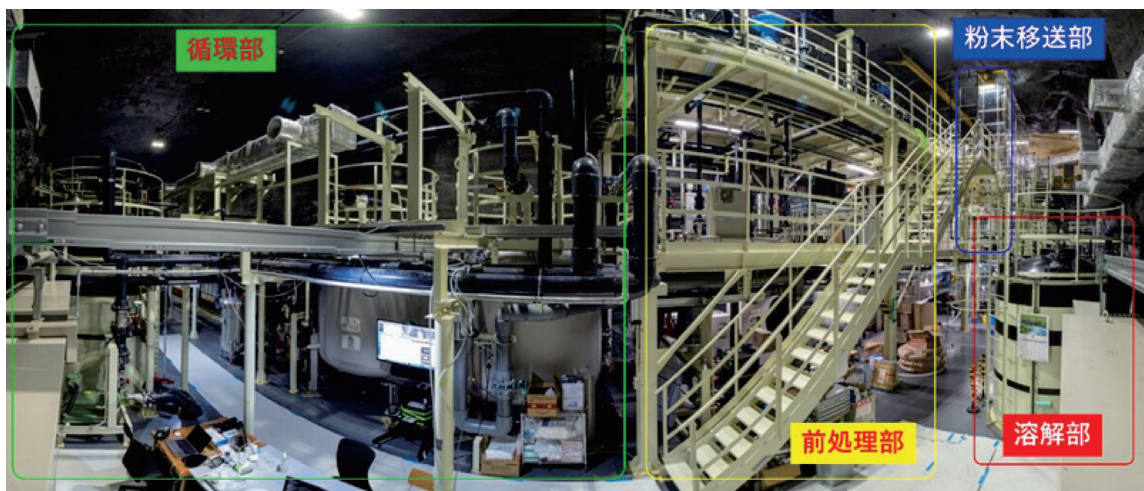


図4 硫酸ガドリニウム水溶液純化システム

純水に対して重量比で 0.026% の  $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$  濃度であり、Gd の濃度としては重量比 0.01% (中性子捕獲効率 50%) になる。導入方法は図 3 に示すようにタンク水を 1 循環させる間 (約 35 日間) で導入

するよう、タンク上部から純水をガドリニウム導入システムへ送り、溶解した Gd を含む水をタンクの底部へ送ることとした。導入する前には純水装置を使用してタンクの水温を約 0.3 °C 上昇させておき、

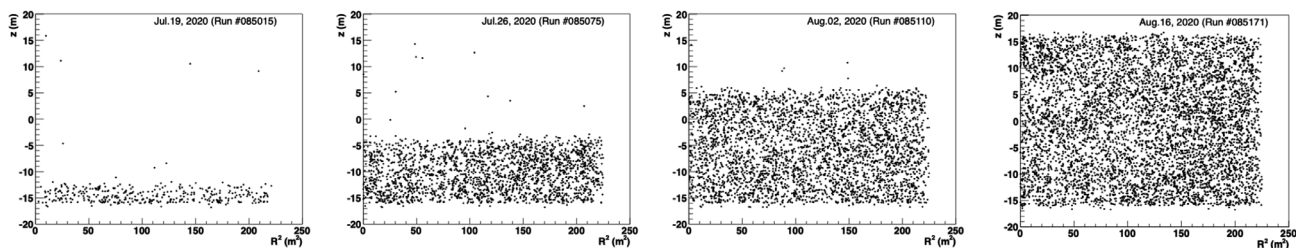


図5 硫酸ガドリニウム導入時のSKでの中性子捕獲事象の様子

横軸は円筒型検出器の半径の二乗 [m<sup>2</sup>] 縦軸は高さ方向の位置 [m] Gdが存在する領域が日々上昇している様子が分かる

Gd水を給水する際には水温をタンク水に比べて0.3℃低い温度のGd水を供給することによってタンク底部から積み上げるように導入することをもくろんだ。

図4に導入システムの写真と構成図を示す。SKタンクからは60t/時の流速で純水が導入システムへ送られ、12t/時と48t/時に分岐され、12t/時の流れに15.6kg/時の量でGd<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>・8H<sub>2</sub>Oを溶解して作った0.13%の濃度の溶液を「前処理部」に通水することで精製した。前処理部でも重要なエレメントは新開発のイオン交換樹脂である。0.13%濃度のGd<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>・8H<sub>2</sub>O溶液を48t/時に純水の流れと合流させると0.026%濃度のGd<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>・8H<sub>2</sub>O溶液になり、試験済みの「循環部」を通してSKタンクへ送ることができた。循環部は導入が完了した後に常時SKタンク水を循環させる部分で、その際はシステムを2重にして120t/時で循環させている。

実際、システムは非常に安定に運用ができ、硫酸ガドリニウムの導入は8月17日に完了した。

図5は実際にSKでとらえたGd<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>・8H<sub>2</sub>O導入中のGdによる中性子捕獲イベントである。地下1,000mでも岩盤を突き抜けてくる高エネルギーの宇宙線があり、それらがハドロン生成反応を起こした際にできた中性子がGdによってとらえられた位置を示している。タンク内のGd濃度が日々どのように変化していったかを表しているが、図3のもくろみどおりタンク底部から上へ積みあがるようにしてGdがタンク内へ入っていったことが分かる。

## 6 今後

今回最初のステップとして0.01%濃度のガドリニウムを導入し、中性子の捕獲効率50%を達成した。今後数年で濃度を上げていき、7~8年の観測で超新星背景ニュートリノの世界初観測を目指している。

(東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設)