

ミッションR&D完了、EGADS新たな未来へ

マーク・ヴェイギンズ Mark Vagins

Kavli IPMU 主任研究員

15年前、理論家のジョン・ビーコムと私は、スーパーカミオカンデ (Super-K, SK) 測定器に水溶性のガドリニウム [Gd] 化合物である塩化ガドリニウム、 $GdCl_3$ 、またはそれより反応性が低い水溶性に劣る硫酸ガドリニウム、 $Gd_2(SO_4)_3$ を100トン添加することを初めて提案しました。GADZOOKS! (Gadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande, Super!)^{*}と名づけられた、このSKにGdを混ぜるアイデアの基本原理は、*Physical Review Letters*に発表した論文 [1] と、*Kavli IPMU News* に書いた解説 [2] に詳しく述べられています。

^{*}「ガズークス」と読む。「ワーッ!」という驚きを表現する英語であると共に1694年に遡る捨て台詞のような古語であるが、ここではGadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande, Super!の略語で「旧いカミオカンデよりも、スーパーカミオカンデよりも、とんでもなく優れた素晴らしいガドリニウム反ニュートリノ検出器」という意味をもつ。

要約するとこういうことです。中性子がガドリニウムに捕獲されるとエネルギーの高いガンマ線のカスケード的放射が起こるため、Gdを添加したSuper-Kの中で逆ベータ崩壊 (IBD) 反応からは陽電子による信号と中性子捕獲による信号が同時に発生します。この同時計数 (あるいは同時計数の欠如) を利用すると、バックグラウンドを大幅に減らすことができ、その結果超新星ニュートリノ (天の川銀河内で発生した超新星からのニュートリノと過去の超新星からの背景ニュートリノの両方) および原子炉からの反ニュートリノに対する検出効率が大幅に上がります。また、陽子崩壊の探索に関して、真の核子崩壊では終状態に自由な中性子は通常存在しないため、バックグラウンドをカットすることによりSuper-Kの陽子崩壊に対する感度を改

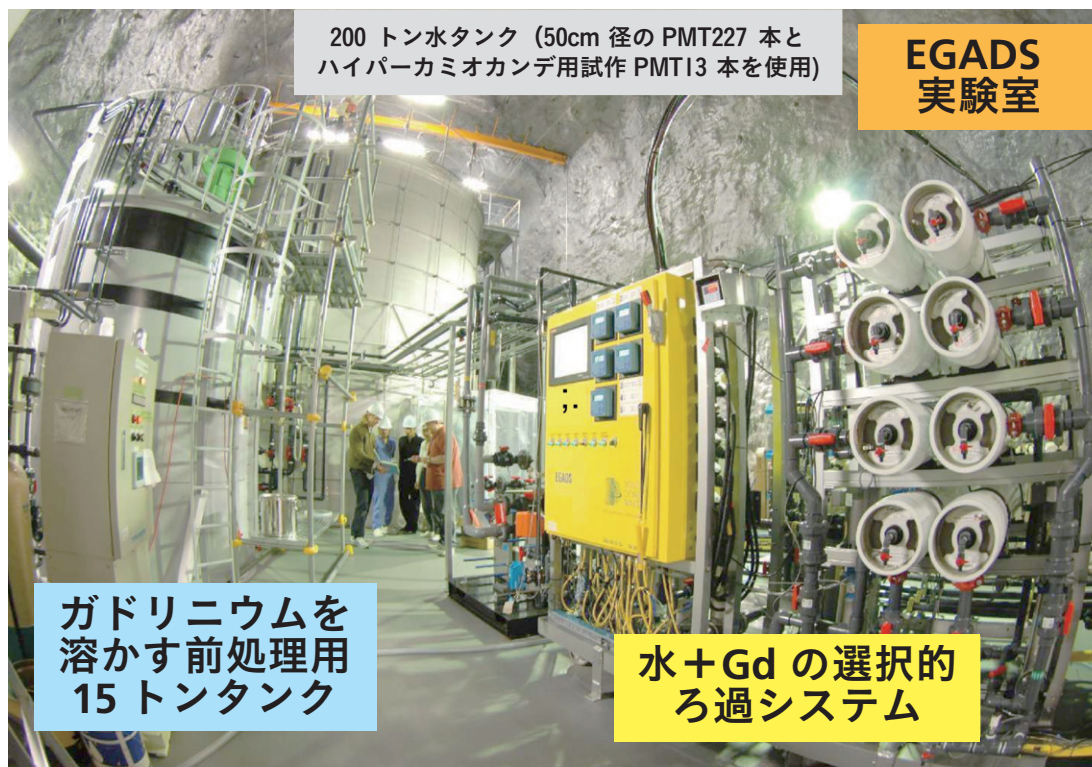


図1 神岡鉱山に設置された大規模ガドリニウム試験設備、EGADS。

EGADS の 200 トンタンク内の光の透過率と硫酸ガドリニウムの濃度

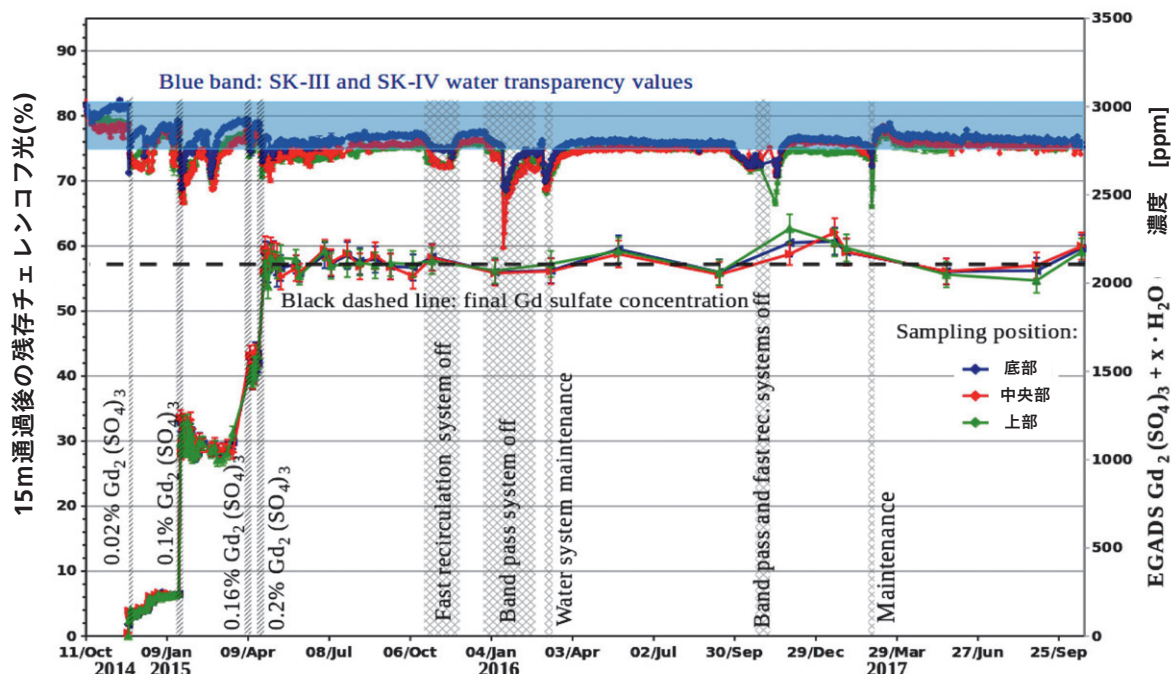


図2 EGADSの主要結果。

善します。さらに、太陽ニュートリノの研究もスペレーション（宇宙線 μ 粒子による核破砕反応）からのバックグラウンドの低減により恩恵を受けます。

結果。

GADZOOKS! の概念の物理的可能性は容易に理解できるものでしたが、実現しようと思うと取り組まなければならない複数の技術的問題がありました。当然、ガドリニウムと測定器に用いられている物質である水との相溶性（混合した場合、分離せずに混ざり合う性質）を示す必要がありましたが、一番の難題は、スーパーカミオカンデのような測定器では水中の光の平均自由行程が約100メートルと長いことが必要で、これを保つため常に水を精製装置を通して循環させることです。既存のスーパーカミオカンデの精製装置は、ガドリニウムをいくら添加したとしても、光学的な透明度を保つために除去する他の全ての不純物と共に速やかに排出してしまいます。

この重大な問題を解決するため、私は本質的に新しいタイプのろ過システムを開発しました。私の「分子バンドパスフィルター」は水から選択的に硫酸ガドリ

ニウムを抜き出してタンクに戻し、同時に他の全ての不純物を除去することができるように設計されたものです。

2009年9月から神岡鉱山内のスーパーカミオカンデの近くに新しい実験室の開削が始まり、そこには図1に示す専用の大規模ガドリニウム試験設備と水チェレンコフ検出器（本質的には200トンのスーパーカミオカンデ縮小モデルで、取り付けられた光電子増倍管のうちの十数本はハイパーカミオカンデ用に試作されたもの）が建設されました [3]。EGADS（イーガズと読む。Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems の略称で、「ガドリニウムが検出器システムに及ぼす作用の評価」の意味）として知られるこの装置は、添加されたガドリニウムが測定器中の物質に悪影響を及ぼすことは絶対ないと確認することと、最終的にスーパーカミオカンデに適用するために必要な条件に近い規模でガドリニウム添加技術の実行可能性を証明するために設計されました。これらの準備研究は既に完了しました。

EGADSの主な結果を図2に示します。スーパーカミオカンデ中をチェレンコフ光が通過する平均距離であ

る15メートルを通過した後に残存する光量で表した水の透明度と、200タンク中の硫酸ガドリニウムの濃度を時間の関数としてプロットしてあります。両方ともタンクの底部、中央部、上部の3点で測定されたものです。図の上の方の3本の線が透明度（残存光量（%単位）、左側のスケール）を、図の下の方の3本の線が濃度（ppm単位、右側のスケール）を示しています。スーパーカミオカンデの超純水はこれまでに作られたこれ程大容量の水としては最も透明度が高いのですが、その透明度は図の上部の青い帯で示される領域にありました。

2015年4月にガドリニウムが予定の濃度に達すると、次の重要な知見が得られました。

- 1) ガドリニウム対応の水循環精製システムが正常に運転している時（図2で灰色の網線で示された箇所以外）は、ガドリニウムを添加した水の透明度はスーパーカミオカンデの超純水の透明度と同等になる。
- 2) 200トンタンク中のガドリニウムを添加した水の総量を、650回に渡りガドリニウム対応の水ろ過システムを通過させたが、その間検出可能な硫酸ガドリニウムの損失は全くなかった。

これらの結果を得て、タンクを開き内部を点検する時が来ました。図3に示す写真はEGADSの200トンタンクの頂上にある大きな正方形のハッチを開く準備ができたところです。図4の写真では、このハッチを通し



図3 これからEGADSタンクを開けるところ。

てタンク内部を見下ろしたところです。ガドリニウムを添加した水が見えます。図5は水が抜かれたタンクの底部で側壁を見上げた写真です。全てピカピカで美しく、何年も0.2%の $Gd_2(SO_4)_3$ が溶けた水にさらされていたのに何も変わっていません。

EGADSによって得られた知見は、スーパーカミオカンデにガドリニウムを添加する計画を進めるため、スーパーカミオカンデ共同実験グループおよびT2K共同実験グループの両方から正式な承認を得るに十分なものでした。

一方、R&Dの役割を終えたEGADSはデータ取得用のハードウェアおよびオンライン計算機の計算能力を著しく増強し、今や世界で最先端の水を用いた超新星ニュートリノ測定器として稼働を続けています。その野心的な目標は、再びガドリニウムを添加した水を満たし、逆ベータ崩壊（IBD）反応からの中性子にガドリニウムでタグする（標識を付ける）ことによる信頼性に基づき、天の川銀河系内で発生した超新星爆発を、最初のニュートリノが測定器に到着してから1秒以内に、完全に自動的に人手を介さずアナウンスすることです [4]。この生まれ変わったEGADSは今や真のマルチメッセンジャー天文学を目指し、日本の可視光、X線、ガンマ線、赤外線、重力波を用いる観測のネットワークに加わっています。再利用されたEGADSという略語さえ、その意味は Employing Gadolinium to Autonomously Detect Supernovas（自律的超新星検出のためのガドリニウム利用）と変更されました。



図4 2年間満水状態でガドリニウムを添加した水にさらされたEGADSタンク内を見下ろす。



図5 タンク内の水を抜いた後、2年半に渡りガドリニウムを添加した水につかっていたEGADSの側壁を見上げる。

文献

- [1] J. F. Beacom and M. R. Vagins, "GADZOOKS! Anti-neutrino spectroscopy with large water Cherenkov detectors," *Phys. Rev. Lett.* **93**, 171101 (2004) [hep-ph/0309300].
- [2] M. R. Vagins, "Kavli IPMUのニュートリノ予報：概ね晴れ、超新星の可能性大," *Kavli IPMU News*, No. 19, September 2012, pages 32-37.
- [3] M. R. Vagins, "EGADS実験始まる," *IPMU News*, No. 15, September 2011, page 39.
- [4] S. M. Adams, C. S. Kochanek, J. F. Beacom, M. R. Vagins, K. Z. Stanek, "Observing the Next Galactic Supernova," *Astrophys.J.* **778** (2013) 164 [arXiv:1306.0559 [astro-ph.HE]].