Happy 60th birthday, Mark! 還曆(Kanreki) in Japanese

We have been working together at SK for over 30 years.

Supernova Neutrinos Invited Gadolinium to Kamioka

M. Nakahata

Kamioka Observatory ICRR, K-IPMU Univ. of Tokyo

Prof. Mark Vagins' 60th Birthday Celebration Workshop, Kashiwa, April 22-24, 2025

Contents

- Why did we start research at Kamioka?
- What made the SN1987A neutrino detection possible?
- How were the SN1987A neutrinos detected?
- Why was the Super-Kamiokande construction approved?
- How did we prepare the SK-Gd (originally GADZOOKS!)?
- What made the SK-Gd project difficult?
- How were those problems solved?
- Summary

Prediction of GUTs in 1970's

VOLUME 32, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

25 FEBRUARY 1974

Unity of All Elementary-Particle Forces

Howard Georgi* and S. L. Glashow Lyman Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138 (Received 10 January 1974)

Strong, electromagnetic, and weak forces are conjectured to arise from a single fundamental interaction based on the gauge group SU(5).

We present a series of hypotheses and speculations leading inescapably to the conclusion that SU(5) is the gauge group of the world—that of the GIM mechanism with the notion of colored quarks⁴ keeps the successes of the quark model and gives an important bonus: Lepton and hadron



Georgi and Glashow



P. Langacker, Phys. Rep. 72, No.4(1981) 185.

Proton decay was predicted.

Expected number of proton decay events was $30 \sim 300$ events/1000ton/year for $10^{31} \sim 10^{30}$ years of proton lifetime.

Large proton decay detectors were constructed in 1980's



IMB (3400 ton)



Kamiokande (880 ton)

Frejus (700 ton)

NUSEX (130 ton)

> KGF (~100 ton)



(fiducial volume)

Kamiokande-I (1983-1984)



Fiducial volume: 880 ton (2m from the wall)

1000 20-inch PMTs were used

Photo-coverage: 20%

Original purpose: Search for proton decay

Inner detector only, i.e. no outer detector. Readout of charge information only (i.e. no timing information).



Competitor: IMB experiment



Fiducial volume: ~3400 ton (x4 of Kamiokande)

2048 5-inch PMTs

Photo-coverage: 1.3%

It is enough for $p \rightarrow e^+ \pi^0$ search

Already started in 1982

First discovery of proton decay must be from IMB.

Purpose of Kamiokande



Upgrade to Kamiokande-II (1984-1985)

Thanks to large photo-coverage, it was found that the detector is sensitive to low energy events.

So, the detector was upgraded for solar neutrino measurement in 1984-1985.



Upgrade to Kamiokande-II (1984-1985)

Upgrade electronics for readout of timing information. It improved vertex reconstruction.

Univ. of Pennsylvania people joined.

R.Van Berg E.W.Beier





UPENN electronics was installed in 1985 autumn.

B.G.Cortez

A.K.Mann

<u>Battle against Radon(1985 \rightarrow)</u>

²²²Rn \rightarrow ²¹⁸Po \rightarrow ²¹⁴Pb \rightarrow ²¹⁴Bi $\rightarrow\beta$ (3.26MeV)





Typical event displays

Event #1





Event #7

Kamiokande, IMB and Baksan observed neutrinos



What we have learned from SN1987A



Jegerlehner, Neubig & Raffelt, PRD 54 (1996) 1194

- > Total energy released by \overline{v}_{e} was measured to be ~5x10⁵² erg.
- > Assuming equipartition, binding energy was estimated to be $\sim 3 \times 10^{53}$ erg.
- The observed released energy and explosion time scale were consistent with predictions from the supernova theory.

However, no detailed information of burst process was observed because of low statistics.

Angle vs. energy of Kamiokande, IMB



• First Kamiokande event is from the direction of SN1987A. (expected electron scattering event is 0.4 for entire time range. Expected neutronization event is $0.001 \sim 0.005$)

- Higher energy events of Kamiokande are close to the direction from SN1987A.
- 7 out of 8 IMB events are in the forward hemisphere.

Are they simply statistical fluctuation? I am eager to see the distribution of the next galactic supernova.

Solar neutrino observation at Kamiokande



K.S. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. 63, 16 (1989)

- Kamiokande successfully observed solar neutrinos and published a paper in 1989.
- This observation satisfied the requirements of "astronomy" (according to Prof. Koshiba):
 - Real-time observations
 - Measuring the direction of particles
 - Measuring the energy of particles
- Kamiokande confirmed the "solar neutrino problem" but its cause (neutrino oscillation?, solar model problem?, etc.) was not clear at that time.

Cover page of the document for the Super-Kamiokande budget request

Fiscal Year 1991

平成 3 年度 概算要求説明資料

Document for budget request

大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置

Large Water Cherenkov Astro-Particle Detector

東京大学

The University of Tokyo

Research subjects



以上2 図よりわかるように、スーパー神岡地下実験計画では、非常に広いエネルギー範囲にわたる確々のニュー トリノ源が観測可能であり、一方、腸子崩壊や、モノボール等は、現在考えられている最大の加速器でも全く到達 不可能なエネルギースケールの物理が関係していることがわかる。

以下で期待される成果の個々について述べる。

① 太陽ニュートリノの精密測定

アメリカのディビスらによりおこなわれている実験及び現行神岡実験で太陽ニュートリノは理論予想値の約半 分以下しか来ていないことが観測されている。これは『太陽ニュートリノ問題』と名付けられ、この問題の解明 が天文学・物理学上の重大な課題となっている。本研究では、太陽ニュートリノの水槽中での反応を構密測定す ることにより、『太陽ニュートリノ問題』を解決する。すなわち太陽中心の湿度が予想値よりも実際に低いのか 、(天文学的問題)、またはニュートリノ自体の問題すなわち生成ニュートリノが途中で検出できない他のニュー トリノに変換されたのか(物理学的問題)を同定する。もし、『太陽ニュートリノ問題』がニュートリノの性質 によるなら、この観測はニュートリノに質量があることを意味し、素粒子の標準理論で説明できない初めての実 験事実となり、大航一理論等への波及効果ははかり知れない。またもし、『太陽ニュートリノ問題』が天文学的 問題なら、やはり太陽の標準理論を否定することになり、この影響は天文学各方面に大きく波及する。 (2) 超新星爆発からのニュートリノの精密測定

超新星爆発からのニュートリノは、史上はじめて現行神岡地下実験により昭和62年2月23日に観測されたが、 本研究では水槽中での超新星爆発ニュートリノ反応の観測を28倍の感度(有効質量の比)にて遂行する。この結 果により超新星爆発(中性子星生成)のメカニズムの精密な実験的検証を行う。また、この観測は、ニュートリ ノの性質(ニュートリノの質量、ニュートリノ振動)の解明にも非常に重要なデータとなる。なお、この観測の 天文学、物理学の多方面への波及効果がいかに大きいかは、すでに昭和62年2月23日の観測で実証されている。 ③ 過去の超新星爆発による累積ニュートリノの精密測定

過去から引き続いて起っている超新星は、ニュートリノを宇宙に放出し、宇宙は祭々にこれらのニュートリノ によって満たされてきた。このように累積したニュートリノの水中での反応を測定することにより過去における 超新星の活動度すなわち宇宙の活動度を推測することができる。特に②で述べた超新星爆発からのニュートリノ が検証されたため、過去の活動度の推測が信頼度を増している。現行沖岡実験でも観測を試みているが、測定器 が小さすぎて、有限値を得ていない。本計画の体積を持ってはじめて有限値が観測されるものと期待されている。 ④ 大気ニュートリノの精密測定

地球に入射する腸子などの宇宙線は、大気中での反応でニュートリノを発生する。これら大気ニュートリノの 角度分布や強度を精密に測定することによって、ニュートリノ振動の検証ができる。現行神岡実験では、大気ニュー トリノの詳細な解析により、ある種のニュートリノ(ミュー・ニュートリノ)の反応頻度が予想の約60%しかないことを解明した。この結果は、上記ニュートリノ振動である可能性が強いが、この可能性を確実に検証するためには、本計画により、より詳細な測定が必要である。この可能性が検証されれば、①の太陽ニュートリノと同様ニュートリノの質量の存在を意味し、素粒子の標準理論で説明できない初めての実験事実となり、大統一理論等への彼及効果ははかり知れない。(ニュトリノ振動:ニュートリノが飛行中に他のニュートリノに変ること。)
⑤ 高エネルギー太陽ニュートリノによる暗黒物質の探索

古くから、宇宙には光っていない物質が光で見える物質より、非常に多くあることがわかっていた(『見えな い質量』の問題)。近年の観測によりこれらの『見えない物質』は我々の体を形作っている陽子や電子ではなく、 全く新しい素粒子の可能性が段々高まってきている(暗黒物質)。これらの素粒子は太陽に捕獲され対消滅して 高エネルギーニュートリノを発生する。本計画ではこのよりな高エネルギー太陽ニュートリノを描らえることに より暗黒物質の正体を研究する。この研究は同時に未知の素粒子を探索する実験である。暗黒物質の正体を解明 すればそれはおそちく、今まで知られている素粒子と全く違った素粒子であるので、素粒子物理学の急速な発展 をうながすと共に、天文学宇宙論にとっては今世紀の最も重要な発見の一つとなる。特に、宇宙が開いているか、 閉じているかという根本的問題の解明にも重要な鍵となる。

⑥ 超高エネルギーニュートリノ点源の探索

若い中性子星や連星を形作っている中性子星は、陽子や原子核を超高エネルギーに加速している可能性が大き い。これらの超高エネルギー陽子や原子核は星の大気と反応して超高エネルギーニュートリノを生成する。従っ て地球に飛来する超高エネルギーニュートリノの観測は中性子星における葉粒子の加速機構を解明する鍵となる。

⑦ 陽子崩壊の探索

陽子崩壊を見つければ、素粒子の大統一理論の直接的検証になるとともに、宇宙の粒子・反粒子非対称性に対 する実験的抵拠を与え、かつビックパンが宇宙の特異点から始まったことを証拠だてることになる。本計画では 測定聯有効体質(22000トン)の内の腸子の崩壊を探索する。陽子崩壊の発見は疑いもなく本研究の最も重要な目 的であり、また今世紀素粒子物理学の最も重要な発見の一つとなるであろう。現行神岡実験では陽子崩壊の強い 候補はなく、考えうるほとんどの崩壊様式に対して、世界で最もきびしい寿命の下限を得ている。本計画では現 行実験に比して28倍長い陽子の寿命まで測定可能となる。また陽子崩壊が発見され、その崩壊様式を決めれば、 種々ある大統一理論のうちどれが正しいかを決定し、ひいては、重力まで含めた総統一理論への足がかりを与え る。

⑧ 中性子一反中性子振動の探索

ある種の大統一理論によれば、原子核中の中生子が反中性子に変換されることが子言されている。測定器内の 水分子中の酸素原子核中でこの反応がおこると、変換された反中性子は残りの核子と反応して原子核をパラパラ に壊してしまう。この核反応を観測することにより中性子一反中性子振動を探索し、さらに大統一理論の検証を 行なう。特に、中性子一反中性子振動の存在しうる大統一理論の種類は限られているので、大統一理論の大きな 制限になる。

③ モノボール(磁気単極子)の探索

大統一理論の直接的帰結としてモノボールの存在が予言されている。モノボールは極端に質量が大きいため人 工的に作ることは不可能で、宇宙生成すなわちビックパン直後の超高温の世界で生成されたと考えられている。 ビックパンで生成されたモノボールは現在もこの宇宙を漂っている。本研究ではモノボールが太陽に擁護され、 太陽中でモノボールが陽子崩壊を引き起し、その結果出てくるニュートリノを検出することにより、モノボール を探索する。モノボールの存在が確認されれば、大統一理論の考え方が正しいこと及び、宇宙がビックパンの超 高エネルギーの状態から始まったことの直接的証拠となる。

19

-3-

-4-

Research subjects



以上2回よりわかるように、スーパー神岡地下実験計画では、非常に広いエネルギー範囲にわたる確々のニュー トリノ源が観測可能であり、一方、腸子崩壊や、モノボール等は、現在考えられている最大の加速器でも全く到達 不可能なエネルギースケールの物理が関係していることがわかる。

以下で期待される成果の個々について述べる。

① 太陽ニュートリノの精密測定

アメリカのディビスらによりおこなわれている実験及び現行神岡実験で太陽ニュートリノは理論予想値の約半 うい下しか来ていないことが観測されている。これは「大陽ニュートリノ問題」と名付 のため情密測定す ることにより、『太陽ニュートリノ問題』を解決する。すなわち太陽中心の温度が予想値よりも実際に低いのか 、大文学的問題)、またはニュートリノ自体の問題すなわち生成ニュートリノが途中で検出できない他のニュー トリノに変換されたのか(物理学的問題)を同定する。もし、『太陽ニュートリノ問題』がニュートリノの性質 によるなら、この観測はニュートリノに質量があることを意味し、素粒子の標準理論で説明できない初めての実 験事実となり、大病一理論等への波及効果ははかり知れない。またもし、『太陽ニュートリノ問題』が天文学的 問題なら、やはり太陽の標準理論を否定することになり、この影響は天文学各方面に大きく波及する。

② 超新星爆発からのニュートリノの精密測定

超新星爆発からのニュートリノは、史上はじめて現行神岡地下実験により昭和62年2月23日に観測されたが、

②Supernova#neutrino#precise#measurement# RKL\$D超新星爆発(中性子星生成)のメカニズムの請定な実験的検証を行う。また、この最適は、ニュートリ

質(ニュートリノの質量、ニュートリノ振動)の解明にも非常に重要なデータとなる。なお、この観測の 、物理学の多方面への波及効果がいかに大きいかは、すでに昭和62年2月23日の観測で実証されている。 Not: found yet の精密測定

から引き続いて起っている越新星は、ニュートリノを学宙に放出し、字宙社会々にこれらのニュートリノ

③Supernova relic neutrino precise measurement

が検証されたため、過去の活動度の推測が信頼度を増している。現行神岡実験でも観測を試みているが、測定器 が小さすぎて、有限値を得ていない。本計画の体積を持ってはじめて有限値が観測されるものと期待されている。

Main topic of Gd-loaded Super-K
 Atmospheric v precise measurement

Score

トリノの詳細な解析により、ある種のニュートリノ(ミュー・ニュートリノ)の反応頻度が予想の約60%しかな いことを解明した。この結果は、上記ニュートリノ扱動である可能性が検証されれば、①の太陽ニュートリノと同 様ニュートリノの質量の存在を意味し、素粒子の標準理論で説明できない初めての実験事実となり、大統一理論 等への彼及効果ははかり知れない。(ニュトリノ振動:ニュートリノが飛行中に他のニュートリノと変ること。) ⑤ 高エネルギー太陽ニュートリノによる暗黒物質の振索

古くから、宇宙には光っていたい物質が光で見える物質より、非常に多くあることがわかっていた(『見えた

⑤ High energy neutrino from dark matter in the Sun -トリノを発生する。本計画ではこのような高エネルギー太陽ニュートリノを描らえることに よう時間物質の正体を研究する。この研究は同時に未知の実粒子を提案する実験である。時間物質の正体を解明

若い中性子星や温星を形作っている中性子星は、腸子や原子核を極高エネルギーに加速している可能性が大き 6 High energy neutrino point Source ノンを生成する。従っ

て心球に発来する程高エネルギーニュートリノの観測は中性子星におけるのでの加速世界を用明する程となる。 ⑦ 陽子厳峻の探索

陽子崩壊を見つければ、素粒子の大統一理論の直接的検証になるとともに、宇宙の粒子・反粒子非対称性に対

(7) Proton decay search

的であり、また今世紀素粒子物理学の最も重要な発見の一つとなるであろう。現行神画実験では腸子崩壊の強い 候補はなく、考えうるほとんどの崩壊様式に対して、世界で最もきびしい寿命の下限を得ている。本計画では現 行実験に比して28倍長い腸子の寿命まで測定可能となる。また腸子崩壊が発見され、その崩壊様式を決めれば、 種々ある大統一理論のうちどれが正しいかを決定し、ひいては、重力まで含めた起統一理論への足がかりを与え る。

⑧ 中性子一反中性子振動の探索

ある種の大統一理論によれば、原子核中の中性子が反中性子に変換されることが子言されている。測定器内の 永分子中の酸素原子核中でこの反応がおこると、変換された反中性子は残りの核子と反応して原**予核をパラパラ**

(8) れにサーマア・OSCILLATIONにとにより中性子ー反中性子振行なう。特に、中性子ー反中性子振動の存在しうる大統一理論の種類は 制限になる。

⑨ モノボール (磁気単極子)の探索

大統一理論の直接的帰結としてモノボールの存在が予言されている。モノボールは極端に質量が大きいため人 工的に作ることは不可能で、宇宙牛成すたわちビックバン直参の弱高温の世界で牛成されたと考えられている。

③ Monopole Search
との宇宙を漂ってい、「アダウはキノボールが生産に捕蔓され、
太陽中でキノボールが属于崩壊を引き起し、その結果出てくる。」

を探索する。モノボールの存在が確認されれば、大統一理論の考え方が正しいこと及び、宇宙がビックパンの超高エネルギーの状態から始まったことの直接的証拠となる。

Ondoing

Super-K construction



Outer detector PMT installation

Inner detector PMT installation

We did a lot of labor work for the construction.

Online monitor

Mark also worked on an online monitoring system. The computer, called "Kingfish", distributes data to an online event display.

The software (part2) So, now that we have all this lovely data stored in memory, we use the first" of our detached processes, SCAN.* SCAN is a fast event display/scanner with several nice Features: 1) blink between inner and outer 2) color-keyed T and Q subjuit 3) Sliding color scale (* SCAN = Speedy Color ANalyzer) 0

Copy of the transparency from Mark's presentation at the April 1996 collaboration meeting.



April 1, 1996 Super-K started



April 1, 1996 Super-K started



April 1, 1996 Super-K started



Initial Discoveries at Super-Kamiokande





1998: Neutrino oscillations were discovered with atmospheric neutrinos (muon-neutrinos to tau-neutrinos)

2001 : Solar neutrino oscillation by comparing SK and SNO data (electron-neutrinos to muon/tau-neutrinos)

Nov.12, 2001 Super-K accident



6,777 inner-detector PMTs were destroyed. 1,100 outer-detector PMTs were destroyed.

Approximately 60% of the PMTs were destroyed. The damage was triggered by the breakage of one PMT at the bottom. This created a shockwave, leading to a chain reaction that caused many PMTs to break.



Broken dinode



A lot of glass wreck at the bottom₂₈

Super-Kamiokande reconstruction





Mount PMTs (May-October, 2002)



Case which prevent shock wave production

Acrylic (13 mm thick; front) and Fiberglass (9 layers of glass mat; back)

Super-Kamiokande Collaboration meeting on Nov. 11-12, 2002 at Osawano

9:15 - 9:25 Preface Y. Suzuki(PDF) (PPT

SK reconsturcution

9:25 - 9:40 <u>SK reconstruction ID work + hardware status Y. Itow</u> 9:40 - 9:55 <u>SK reconstruction OD work + hardware status B. Kropp (PDF) (PPT)</u>

Online, Acrylic, Calibration

ATMPD + UPMU

Gadzooks!



[A Serious SK Upgrade Suggestion]

Mark Vagins University of California, Irvine

> Osawano November 12, 2002

The 0.1% Solution

Even better, to collect >90% of the neutrons on gadolinium you only need to put 100 tons of GdCl₃ in Super-K! That's about twenty cubic meters, or a 0.1% concentration of Gd in the tank, and we can tag all the SRN events.

SK-III should see about five each year with no background at all! Now imagine Hyper-K seeing 100+ supernova relic neutrinos every year!

But is the weird stuff in the water dangerous?



Test at 1kt water tank used for K2K



In November 2005, GdCl₃ was loaded with 0.02% solution.



Light yield of cosmic ray muons has drastically reduced. Iron ion concentration was increased.





Visually inspected and we found that rust is a big issue.

I started to get into the GADZOOKS! project through

studies on corrosion and environmental impacts

Gd committee report on Impact on the SK tank

December 3, 2006 M. Nakahata

Corrosion of stainless steel

based on the report from Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd.

Tests proposed by Mitsui

Gd committee report on Impact on environment

December 3, 2006 M. Nakahata

Effect of gadolinium on development of aquatic animals Research by Honorary Professor Hideyo Kuroda (Toyama university).

Corrosion test by Mitsui

June 23, 2007 M. Nakahata

- Measurement of Polarization curve
- Evaluation of crevice corrosion (すき間腐食)
- Evaluation of stress corrosion cracking (応力腐 食割れ)

GADZOOKS! people proposed to dissolve ~200 kg of $Gd(NO_3)_3$ to SK. Gd committee report and collaboration decision for that. (Nov.2007 collaboration meeting)

Summary and Recommendation

- Very low concentration of Gd(NO3)3 fulfills the previous requirements, though possible unknown risks. It is deadline of decision, so the collaboration must judge its motivation and the risk now.
- Official local ICRR participation and responsibility must be needed for further promotion of the project.
- Some remaining check must be done and reported quickly (transparency at 337nm, etc..)
- For final approval, answer for remaining questions, detail plan, cost, man power and responsibility, including local ICRR contribution must be written in a new TDR of option alpha ASAP and presented at the next opportunity quickly (when ? For ex, around next TMC?).
- Remind deadline of Gd removal is strict to protect further schedule of SK electronics upgrade.

Alternative way I

- Make <1kt (?) water tank equipped with sufficient numbers of PMT to test various things with 0.2% Gd concentration.
 - Almost all the purpose of the 0.0004% run can be achieved.
 - Can run a few years
- Please answer if this approach is acceptable and feasible
 - Size?
 - Number of PMT?

Additional questions

Unknown risk

- <u>Known unknown risk</u>
 - 1. for the damaged cable
 - Pure water ightarrow no problem
 - Gd \rightarrow conductive water
 - 2. BG increase by the remaining Gd in the water tank
- <u>Unknown unknown risk??</u>

Alternative way II

- 1st test at the time we will replace PMTs next time
 - Risks may be recovered since we drain water after
 - Plenty of times to prepare
- Please consider the possibility

➔Another possibility

To use separated inner container for Gd compouds 34

EGADS

Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems

Make 200 ton test tank and demonstrate the GADZOOKS! Idea.



Decided place for EGADS was excavated



EGADS water tank construction



May 18, 2010

EGADS hall



Feb.16, 2011

EGADS strategy [Step 1]



- Circulate pure water through 200 ton tank and the water circulation system to test basic performance of the water circulation system.
 - It was done from March June, 2011.

EGADS strategy [Step 2]



- Circulate Gd-loaded water through 15 ton tank and the water circulation system to measure water transparency of Gd itself.
- Started from Aug.2011.

EGADS strategy [Step 3]



Circulate Gd-loaded water through 200 ton tank and the water circulation system to test the effect of the stainless steel tank.

EGADS strategy [Step 4]



Mount 240 PMTs.

EGADS strategy [Step 5]



Circulate Gd-loaded water through 200 ton tank and the water circulation system for real simulation of the Super-K detector.

240 PMTs were mounted in the EGADS tank in 2013 summer.



Light @ 15 meters in the 200-ton tank (Gd water, with PMT's)

There's definitely something bad at the top of the tank! Also...

In May 2014, we opened the EGADS tank and found that one of the wires supporting the black sheet was not stainless steel. Once again, we realized that rust is the enemy. We spent the summer of 2014 removing the rust from the tank.

Photo while mounting PMT in July, 2013.

Cleaning EGADS tank in 2014

Light @ 15 meters in the 200-ton tank (Gd water, PMT's)

Nov. 10, 2014 Feb. 25, 2015

June 24,

2015

Official statement to outside

- On June 27, 2015, the Super-Kamiokande collaboration approved the SuperK-Gd project which will enhance anti-neutrino detectability by dissolving gadolinium to the Super-K water.
- The actual schedule of the project including refurbishment of the tank and Gd-loading time will be determined soon taking into account the T2K schedule.

<u>There were still many issues that we had to solved even</u> <u>after receiving approval from the SK collaboration</u>

- How to stop the water leak in the SK tank
- · How to deal with the local environmental community
- How to remove rust from the SK tank
- How to construct the real water system for Super-K
- How to load tens of tons of gadolinium into the Super-K tank within a reasonable time
- Prepare the Gd removal system before loading

```
Those would be presented by Sekiya-san tomorrow, who has led their development.
```

The 1st Gd-loading Jul.14 – Aug.17, 2020

The pure water in the SK tank was taken from the top and returned from the bottom in <u>0.02% $Gd_2(SO_4)_3$ solution (=0.01% Gd = 0.026% $Gd_2(SO_4)_3$ ·8H₂O)</u>

It took 35 days to replace 50,000 tons of water at 60 $\overline{m^3/h}$

The 2nd Gd-loading Jun.1 – Jul.5, 2022

0.01% Gd water was taken from the top and returned from the bottom in $0.06\% Gd_2(SO_4)_3$ solution (=0.03% Gd = 0.078% $Gd_2(SO_4)_3$ ·8H₂O). It took 35 days to replace 50,000 tons of water at 60 m³/h

One batch:

- 17 kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O
 - + 1600 L of SK water

~900kg /day x 35 day.

<u>26 tons of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ was loaded.</u>

27tons =1350 x 20kg cardboard boxes!

Message to Mark

- Thank you very much for your GADZOOKS! proposal and tireless efforts in realizing it.
- The fascinating physics of supernova neutrinos led us to load gadolinium into the Super-K tank, hence "Supernova neutrinos invited gadolinium to Kamioka."
- Now, gadolinium should invite supernova neutrinos to Super-K from the universe, specifically, diffuse supernova neutrinos should be detected.
- A galactic supernova should occur within the lifetime of Super-K.
- Thank you again to the Gdfather, Prof. Mark Vagins.