



ニュートリノ振動パラメータ θ_{13} 角の測定のための
原子炉ニュートリノ検出装置の開発

課題番号 16204015

平成16年度～平成17年度科学研究費補助金
(基盤研究(A)) 研究成果報告書

平成18年4月

研究代表者 末包文彦

東北大学・大学院理学研究科・助教授

目 次

概要	.....	1
研究組織	.....	1
交付配分額	.....	1
研究発表	.....	2
研究成果	.....	8
資料	.....	31

発表資料

新聞記事、紹介記事など

ワークショッププログラム

ボーリング調査報告書

修士論文

概要

現在ニュートリノ 研究の分野で最も囑望されている実験の一つは、最後のニュートリノ混合角 θ_{13} を測定することである。本研究グループは 2003 年に、原子炉による θ_{13} 測定の重要性を世界に先駆けて指摘し、その後その実験を実現すべく R&D を行って来た。この実験計画はニュートリノ源となる柏崎刈羽原子力発電所の名前に因み、KASKA 計画と呼ばれる。

本研究は、その仕上げに相当し、実際の実験環境（原子力発電所構内の地下）でのバックグラウンド測定及びプロトタイプ検出器によるニュートリノ検出効率の実測などを行った。また、光電子増倍管の開発、フロントエンドエレクトロニクスの開発、液体シンチレーターの開発、キャリブレーションシステムの開発なども平行して行った。以上の開発結果をふまえ KASKA グループは、Letter of Intent を完成した。KASKA グループは今後も実験実現に向け努力して行く。

研究組織

- 研究代表者： 末包文彦 （東北大学・大学院理学研究科・助教授）
研究分担者： 井上邦雄 （東北大学・大学院理学研究科・教授）
研究分担者： 住吉孝之 （首都大学東京・都市教養部・教授）
研究分担者： 田村詔生 （新潟大学・大学院自然科学研究科・教授）
研究分担者： 久世正弘 （東京工業大学・大学院理工学研究科・助教授）
- 研究協力者： 坂本泰伸 （東北大学・大学院理学研究科・研究員）
研究協力者： 新田和範 （東京工業大学・理工額研究科・特別研究員）
研究協力者： 宮田等 （新潟大学・自然科学系・助教授）
研究協力者： 勝亦正明 （新潟大学・自然科学系・技術職員）
研究協力者： 松本崇博 （東京都立大学・理学部・研究員(2004年度))

交付配分額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 16 年度	22,000,000	6,600,000	28,600,000
平成 17 年度	16,400,000	4,920,000	21,320,000
総計	38,400,000	11,520,000	49,920,000

研究発表 (*印は参考資料に添付)

(1) 学会誌など

[1]* M.Kuze, F.Suekane, T.Sumiyoshi, N.Tamura, その他 KASKA メンバー
'Letter of Intent for KASKA'

[2] 田村詔生、末包文彦、安田修、
「原子炉をもちいたニュートリノ振動パラメータ θ_{13} の測定」
日本物理学会誌 (投稿中) 2006年

[3]* F.Suekane,
'Reactor Neutrino Oscillations: KamLAND and KASKA'
Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 157(2006)21-26.

[4]* 古田久敬
「原子炉ニュートリノ実験におけるガンマ線バックグラウンドの解析」
修士論文、東京工業大学、2006年3月

[5]* 佐久間清美
「原子炉ニュートリノ振動実験 (KASKA) における宇宙線バックグラウンドの考察」
修士論文、東京都立大学、2006年3月

[6]* H.Sugiyama, O.Yasuda, F.Suekane, G.A.Horton-Smith
'Systematic limits on $\sin^{22}\theta(13)$ in neutrino oscillation experiments with
multireactors'
Physical Review D73, 053008, (2006),

[7]* 渡辺亮平
「ニュートリノ振動実験 KASKA の為の液体シンチレーターの開発研究」
新潟大学修士論文 2005.3

[8]* M.Kuze

'The KASKA project: A Japanese medium-baseline reactor-neutrino oscillation experiment to measure the mixing angle θ_{13} '.

Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) vol.149, 160 (2005)

[9]* F.Suekane

'Status of KASKA: The Japanese reactor $\sin^2 2\theta_{13}$ project'
Neutrino Oscillations and their Origin' (proceedings), p228 (2004)

[10]* 末包文彦

「KASKA：原子炉による精密 θ_{13} 測定計画」

High Energy News、vol.23, p157, 2004

(2) 口頭発表、講演など

岩渕龍也(新潟大)

「KASKA 実験におけるフロントエンドエレクトロニクスの開発」

前田順平(東工大)

「KASKA 実験のための宇宙線飛跡検出器の研究開発」

船木好子(東工大)

「KASKA 実験のキャリブレーションに使用するワイヤの研究」

坂本泰伸

「KASKA プロトタイプを用いたニュートリノ検出に向けての準備」

以上、日本物理学会一般講演@愛媛大学 2006年3月30日

土屋泰(東北大)

「Current Status of KASKA Experiment」

12th ICEPP symposium in 白馬、2006.2.26-3.1

* F.Suekane

'Status of KASKA'

Workshop on Systematic Errors in θ_{13} Measurement at Nuclear Reactors.

@College du France, Paris, 2006.2.17

F.Suekane

'KASKA Project'

International Reactor Neutrino Planning Workshop

@Niigata Univ., Japan, 2005.12.09

田村詔生

「柏崎刈羽の地で原子力から広がる科学技術」

日本原子力学会関東甲越支部講演会

柏崎エネルギーホール 2005.12.02

F.Suekane

'KASKA Project'

PANIC2005 Satellite meeting

@Santa Fe, NM, USA, 2005.10.30

F.Suekane

'Reactor Neutrino Oscillations: KamLAND and KASKA'

7th International Symposium on radiative corrections,

@Hayama, Soken-dai, 2005.10.03

末包文彦

「KamLAND の結果と新しい原子炉ニュートリノ振動実験計画 KASKA」

佐賀大学セミナー 2005.5.27

田村詔生

「柏崎・刈羽における研究」

柏崎・刈羽 親と子供のおもしろ実験とニュートリノの不思議

2005年9月18日

坂本泰伸 (東北大)

「KASKA プロトタイプ検出器を用いた γ 線 containment の評価

土屋泰 (東北大)

「KASKA プロトタイプ検出器を用いた宇宙線バックグラウンドの評価」
以上、日本物理学会一般講演 2005年9月

Y.Sakamoto,

'KASKA'

7th International Workshop on Neutrino Factories and Superbeams

Rome, Italy, 2006.6.21-26

M. Kuze

'The KASKA Project'

11th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology(PASCOS05),

Gyeongju, Korea, 2005.5.31

H.Furuta

'Geant4 analysis of underground gamma ray background at KASKA near detector
site'

MeV Antineutrino and Neutrino Detector simulation workshop

(Mand-sin 2005), 2005.5.14-15, Kansas, USA

佐久間清美

「KASKA 実験における宇宙線バックグラウンドの研究」

古田久敬

「KASKA 実験予定地における地下 γ 線バックグラウンドの測定」

坂本泰伸

「KASKA 実験用プロトタイプ検出器の準備状況」

以上、日本物理学会一般講演 2005年3月

M.Kuze,

'The KASKA project, A Japanese medium-baseline reactor-neutrino oscillation
experiment to measure the mixing angle θ_{13} '

DESY Zeuthen Seminar, 2005.3.16

M.Kuze,

'The KASKA project, A Japanese medium-baseline reactor-neutrino oscillation experiment to measure the mixing angle θ_{13} '

DESY Seminar, 2005.3.15

末包文彦

「カムランドとカスカ実験が解くニュートリノの謎」

福井県環境放射能測定技術会議 2005.2.28.

F.Suekane

'Status of the KASKA Project'

4th Workshop for Future Low-Energy Neutrino Experiments

@Angra dos Reis, Brazil, 2005.2.24.

佐久間清美

「KASKA experiment; for θ_{13} measurement using reactor neutrino」

11th ICEPP Symposium in 白馬、2005.2.20-23、 白馬

末包文彦

「原子炉ニュートリノ振動実験:KamLAND の最新結果と KASKA 実験計画」

岡山大学セミナー、2004.12.13

末包文彦

「KASKA 実験の前置検出器による原子炉ニュートリノスペクトルの精密測定の可能性」

佐久間清美

「KASKA 実験におけるバックグラウンドの考察」

古田久敬

「KASKA 実験のポーリング調査地点におけるバックグラウンド測定」

渡辺亮平

「KASKA 実験へ向けての Gd 入り液体シンチレーターの開発」

以上 日本物理学会春季大会（高知大学） 2004. 9. 27-30

M.Kuze

'The KASKA Project'

6th International Workshop on Neutrino Factories & Superbeams (NuFact04)

Osaka, Japan, 2004.7.26-8.1

(3) 出版物

(4) 新聞報道、紹介記事など、

* 朝日新聞 2004. 8. 29

「ニュートリノ観測施設設置可能性を10月から調査」

* 読売新聞 2004. 9. 1

「ニュートリノ観測施設へ 10月、ボーリング調査」

* 新潟日報 2004, 8. 27

「宇宙創世のなぞ柏崎原発で解ける!？」

* 越後タイムス 2004. 9. 3

「柏崎原発構内でニュートリノ観測実験へ」

* 柏崎日報 2004. 8. 26

「ニュートリノ観測施設 10月にボーリング調査」

* 柏崎かわら版 2004. 10. 1 「原発でニュートリノ研究」

* 新潟総合テレビ 2004. 8. 26 放送 「柏崎原発でニュートリノ?」

* 週刊エネルギー通信 2005. 2. 25

「原子炉ニュートリノ実験 KASKA, θ_{13} の測定」

* 高エネルギー加速器研究機構 ホームページ News@KEK 2005. 4. 14-21

「『微かな』ニュートリノ振動」

* CERN COURIER Vol.44, No 5, 2004.6

'The search for the disappearing neutrinos'

* Long-Baseline news, 2004.10, 'Shaking up a few (reactor) neutrino physicists'

「研究成果」

以下研究成果の概要をまとめる。詳しくは添付資料参照。

(1) ボーリング調査 (担当：東北大、首都大、東工大、新潟大)

原子炉による θ_{13} 測定実験では、原子力発電所内に直径 5m、深さ 50m 程度の立坑を掘りその地下にニュートリノ検出器を設置する。そこで、次の項目を目的として、ボーリング調査を行った。

- (i) 地下での、ガンマ線及び宇宙線バックグラウンドを測定し、ニュートリノ検出器設計に役立てる。
- (ii) 地質を調査し、それを元に、立坑建設方法の検討を行う。
- (iii) 実際に原子力発電所内で、作業を行うことで発電所内部での作業に伴う制約などを実体験し、実際の実験の手続きに役立てる。

図 1 に柏崎刈羽原子力発電所の原子炉と KASKA 検出器の位置関係を示す。ボーリングは、B 地点で行った。

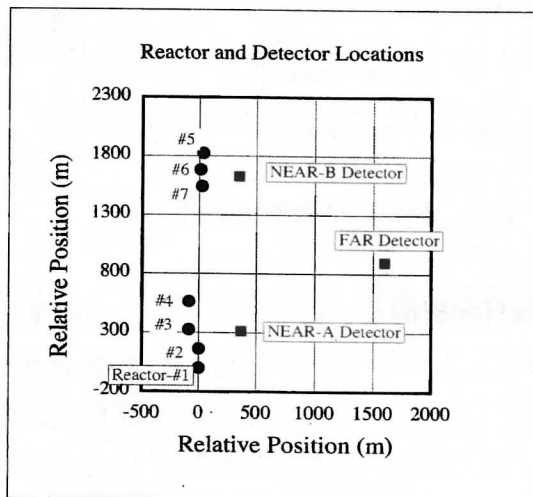


図 1 原子炉と検出器の位置関係

ボーリング位置は、東経 $138^{\circ} 36' 13''$ 、北緯 $37^{\circ} 26' 10''$ に位置し、第 5、第 6、第 7 原子炉から約 350m の距離になる。ここは、原子炉建屋建設時の掘削土砂を利用してつくられた、標高 34m の盛り土の上になる。したがって、孔口から 50m 地下の検出器深度は、海面下 16m に相当する。

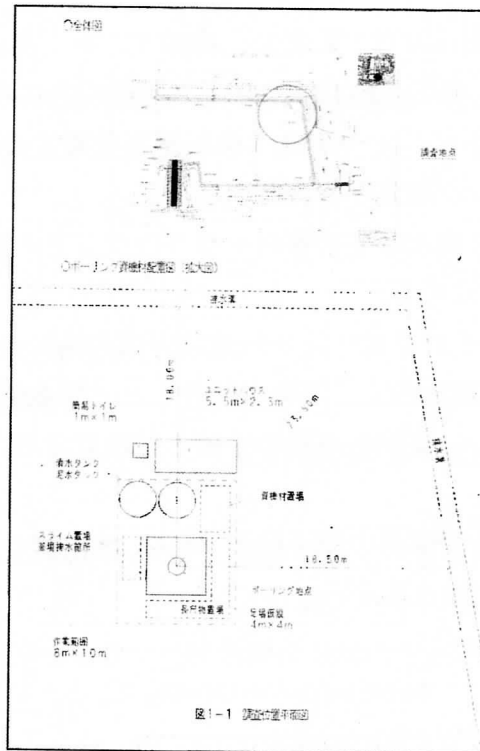


図2、ボーリング位置と機材配置図

図2にボーリング位置と機材配置図を、図3にボーリング作業の概念図と実際のボーリング作業風景を示す。ボーリングの掘削孔径は66mmφで、掘削深度は70mまで行った。ボーリングに際し、各深度でコアを採取し、地質調査を行った。また、地層の硬軟及び締まり程度の指標であるN値を求めるために標準貫入試験を実施した。ボーリング調査は、2004年10月に行われた。途中新潟県中越地震に遭遇したが、幸い大きな影響はなく無事調査を行うことができた。地質調査の詳細は、添付の「ボーリング調査報告書」に詳しい。調査の結果、この地点での地層構造が、図4のように確認され、各層の地盤定数も表1のように得られた。これらの情報を元にして、実際の立て坑掘削方法の検討を行った。また、この地点の地盤の密度が、 $1.7\sim 1.8\text{g}/\text{cm}^3$ であることが確認されたため、後述するボーリング孔での宇宙線頻度の実測値と合わせ、地下での

宇宙線頻度の計算を行うことが可能となった。

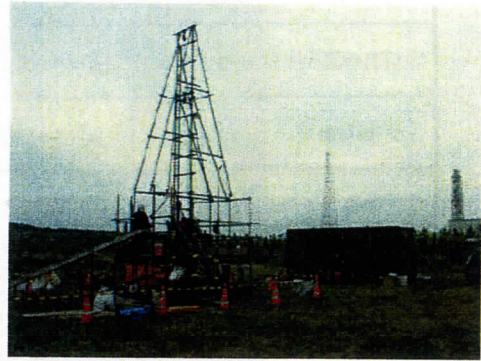
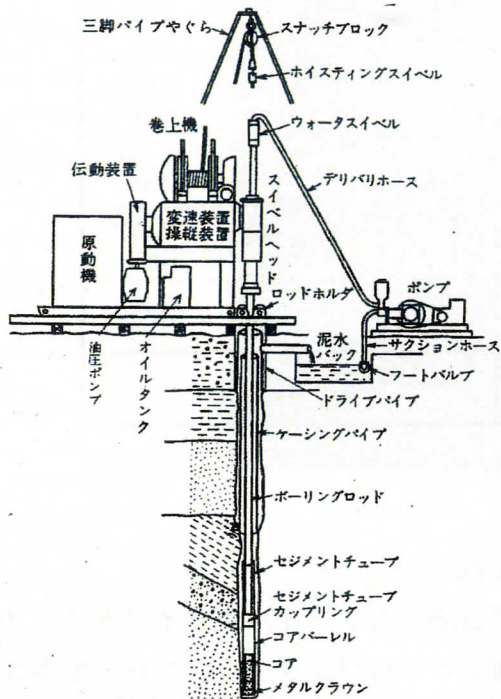


図3 (左) ボーリング方法と (右) 実際の作業風景

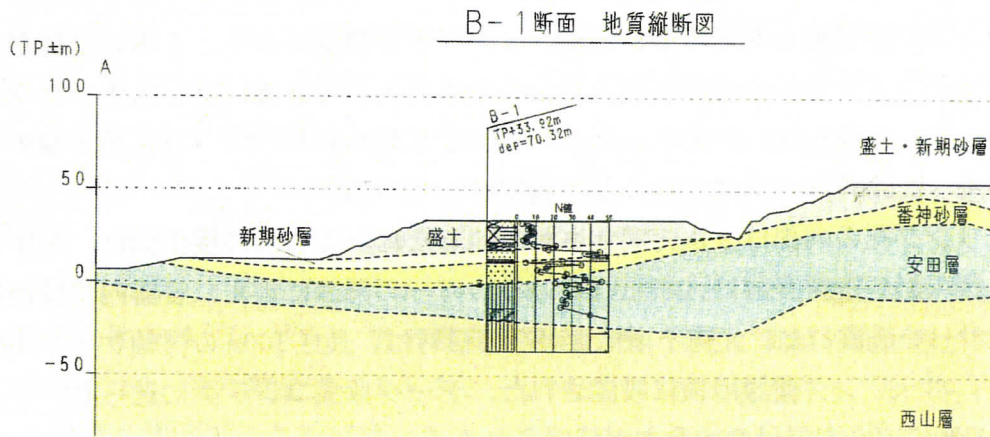


図4 地質断面図

地層名	記号	設計 N値	密度 γ (g/cm^3)	粘着力C (kN/m^2) [kgf/cm^2]	内部摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)	変形係数E (kN/m^2) [kgf/cm^2]
①盛土層	bs	9	1.76	16 [0.16]	2.5	6,000 [60]
②新期砂層・上部層	Sd1	46	1.8		40	32,000 [320]
③新期砂層・下部層	Sd2	15	1.7	30 [0.3]	-	10,000 [100]
④番神砂層	B	26	1.8		35	18,000 [180]
⑤安田層	Ya	30	1.8	200 [2.0]	-	21,000 [210]
⑥西山層	N	50	-	-	-	-

表1 推定地盤定数

* ポーリング孔でのバックグラウンド測定。

直径 66mm ϕ のポーリング孔の内部に NaI 検出器とサンドイッチタイプのプラスチックシンチレーター検出器を挿入し、地中の γ 線バックグラウンドと宇宙線バックグラウンドの直接測定を行った。図5にバックグラウンド測定装置の図と図6に実機の写真を示す。

γ 線検出器は、直径1インチ、厚さ2インチのNaIシンチレーターからなる。宇宙線検出器は、直径1インチ、厚さ2cmのプラスチックシンチレーター2枚で厚さ1cmの鉛を挟んだ構造をしており、この2枚のシンチレーターのコインシデンスで宇宙線を同定する。鉛は、コンプトン散乱により、1本の γ 線がコインシデンスを生じる確率を減少させるためのものである。プラスチックシンチレーターの厚みは、宇宙線がその中に落とすエネルギーが、 ^{208}Tl の γ 線のエネルギー2.6MeVより大きくなるよう設定されている。

ポーリング孔の内部は、水で満たされているため、これらの検出器は、ステンレス製の耐圧密封容器に入れられている。万一の漏水に備え、容器内には湿度センサーを設置した。光電子増倍管からの信号は、長さ100mの同軸ケーブルにより、ポーリング機器の横に設置された、データ収集コンテナに送られ、そこで、VMEのADCで信号の大きさが記録される。

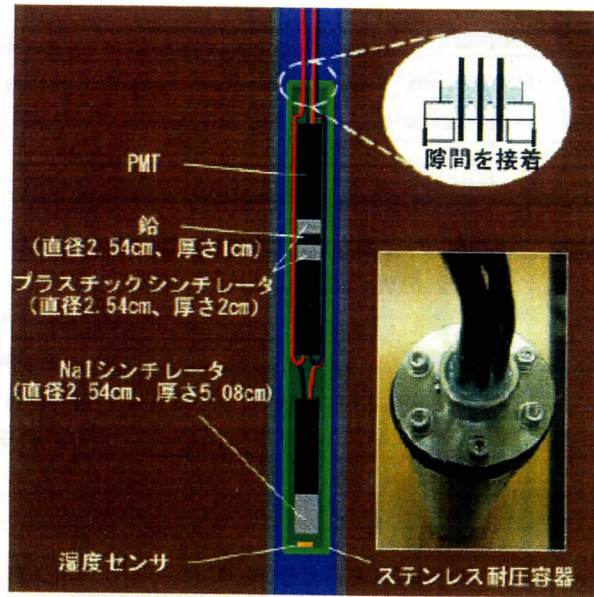


図5 地中バックグラウンド検出概念図。

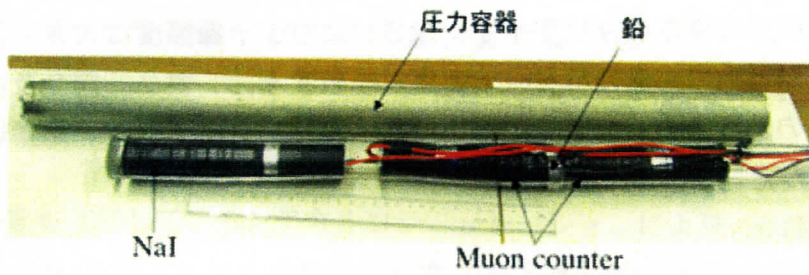


図6 バックグラウンド検出器（実機）の写真

バックグラウンドの測定は、地下15m、30m、50m、65mと地上で行った。図7にNaIで検出した γ 線のエネルギー分布を示す。いずれの深度でも ^{208}Tl と ^{40}K から来る2.6MeVと1.5MeVの γ 線の明白なピークが見える。

この分布をモンテカルロシミュレーションから予想される分布と比較することにより、地中の ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K の濃度を測定した。図8に実際の検出器が設置される深さ50mでの測定データとシミュレーションの比較を行う。シミュレーションは良く測定データを再現した。これらの核種が放射平衡になっていると仮定して得られた各深度での地中の ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K の濃度を表2に示す。

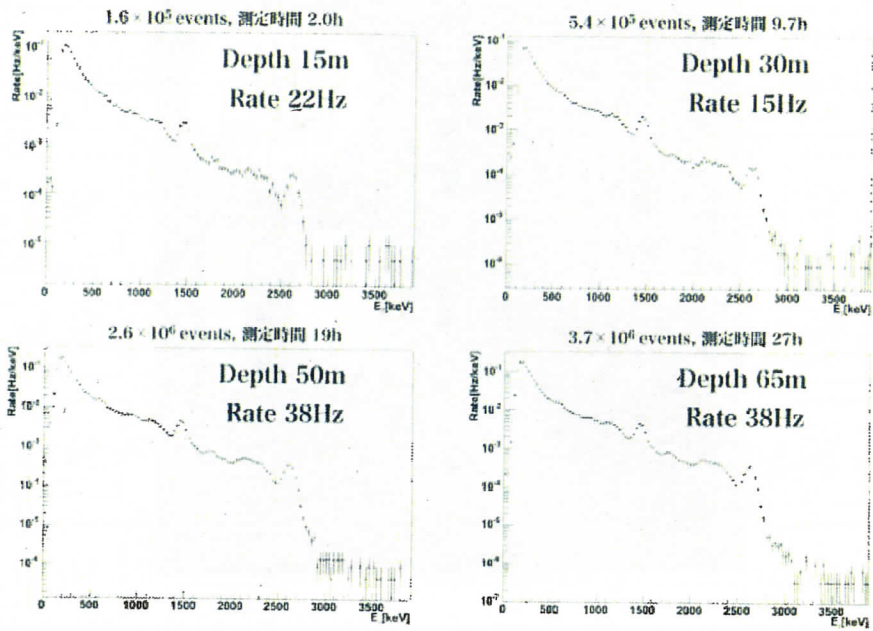


図7、地中 γ 線測定結果

図9に γ 線頻度の深さ依存性を示す。深さにより、 γ 線頻度は大きく異なり、変化の傾向は地層の構造のパターンと良く一致する。表2、図9及び図4から、検出器の位置する西山層では、比較的 γ 線バックグラウンドが多いことが明らかになった。

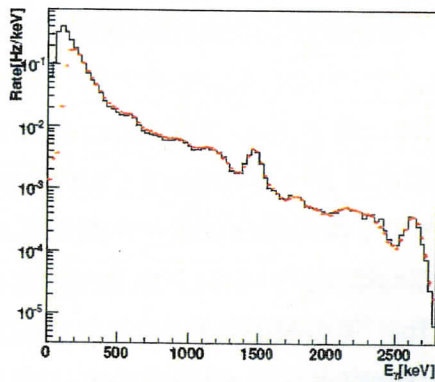


図8 測定地点深さ50m。黒いヒストグラムは測定データ、赤い十字は、シミュレーション。

測定地点の深さ	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
15m	0.1 ± 0.01	0.3 ± 0.01	0.1 ± 0.003
30m	0.4 ± 0.01	1.0 ± 0.01	0.5 ± 0.01
50m	2.1 ± 0.03	6.3 ± 0.04	1.5 ± 0.01
65m	3.2 ± 0.03	8.7 ± 0.05	2.1 ± 0.01

表2 U/Th/Kの土中重量濃度(ppm)

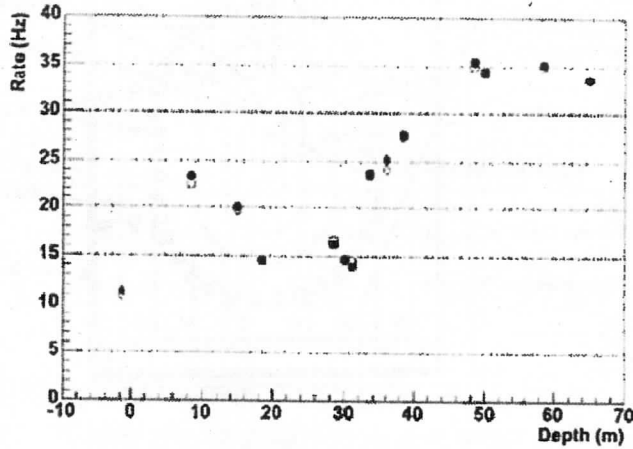


図9 γ 線頻度の深さ依存性

この結果をもとにして、モンテカルロシミュレーションにより、KASKA 検出器での γ 線バックグラウンドの評価を行った。シミュレーションでは、図10のKASKA 検出器を元にし、PMTは、本研究で開発した低バックグラウンドガラスを用いた。シミュレーションの結果を表3に示す。

threshold level(MeV)	0.4	0.7	1.0
土	0.20	0.15	0.12
PMT ガラス	1.8	1.2	0.87
コンクリート	0.54	0.43	0.34
ステンレスタンク	0.06	0.04	0.03
PMT ステンレス支持具	0.30	0.20	0.14
鉄タンク	0.01	0.008	0.006
計	2.9	2.1	1.5

表3 threshold以上の γ 線バックグラウンド頻度(Hz)

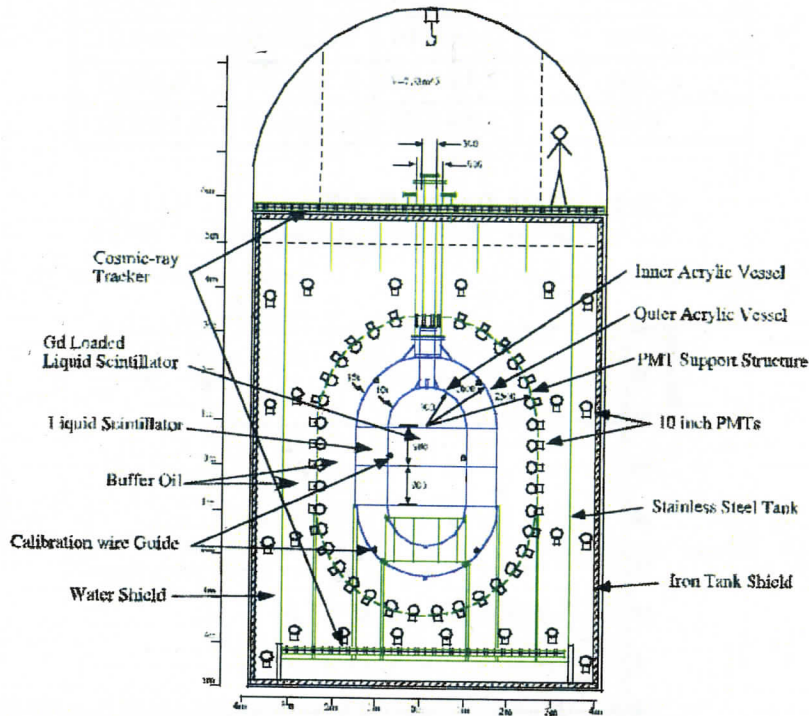


図 1 0 KASKA 検出器

エネルギー-threshold は、 0.7MeV に設定する予定なので、 γ 線によるバックグラウンド頻度は、 2.1Hz となる。これは、目標値の 10Hz 以下に比べ十分小さい。また、現在の KASKA 検出器の構造では、 11cm の鉄と 2.2m 以上のバッファ層で、土からのバックグラウンド γ 線を遮へいしているため、他のバックグラウンドに比較して、土からのバックグラウンドは少ない。この結果から、鉄シールド又はバッファ層を薄くできる可能性があることが分かった。

宇宙線バックグラウンド。

図 1 1 に、 3MeV 以上の信号が 2 つのプラスチックシンチレーターで得られた信号の分布とシミュレーションの結果を示す。シミュレーションは、Geant4 を利用し、宇宙線の角度分布、エネルギー分布、電荷比は、BESS 及び CAPRICE のデータに基づいた。また土の成分は、本ボーリング調査で得られたものを基準にしている。

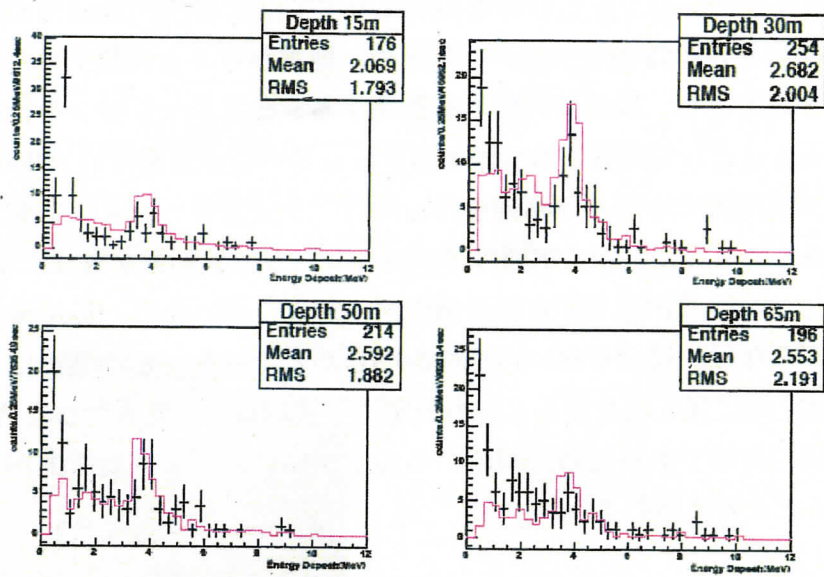


図 1 1 宇宙線のエネルギー分布とシミュレーション結果

宇宙線による MIP のピークが良く再現されている。

この結果を元にして、各深度での宇宙線フラックスを表したものが図 1 2 である。深度>30m では、シミュレーションとデータが誤差の範囲 ($\pm 20\%$) で一致し、このシミュレーションをもちいて KASKA 実験の評価を行うことができることが確認された。

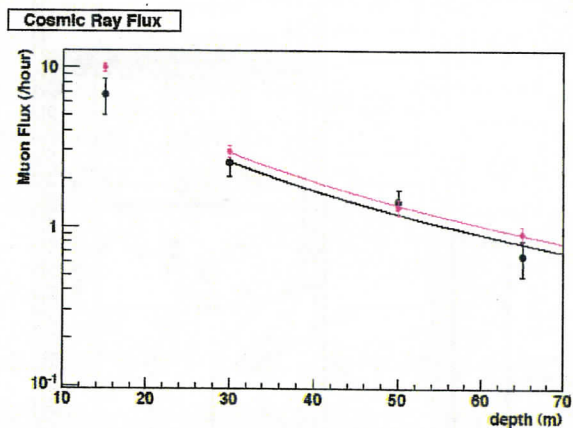


図 12, 宇宙線信号の頻度と経験式によるフィッティング。
黒はデータ、ピンクはシミュレーション。

次にこのシミュレーションをもちいて KASKA の主検出器 (深さ 150m) での中性子バックグラウンドの評価を行った。そのため、地表からミュオン粒子を入射し、高速中性子を発生させ、検出器で信号を観測するシミュレーションを行った。その際 reference として CHOOZ 検出器でのシミュレーションを行い、CHOOZ での実際のデータを再現することの確認を行った。シミュレーションにもちいた検出器の構造を図 13 に、宇宙線頻度のシミュレーション結果を表 4 に示す。表 4 によると、Near 検出器で宇宙線の頻度が予想より高いため、Near 検出器の深度を深くとらなければならない可能性が明らかとなった。この理由は、これまで、平坦な土地に立て坑を掘るという仮定で宇宙線量の評価を行ったきたが、実際の土地は、台地であるため、斜めからの宇宙線に対する有効深度が予想より小さいからだと考えられる。

	KASKAr Nearr	KASKA Far	CHOOZ	CHOOZ (measured)
Veto 層のレート	480Hz	40.2Hz	15.0Hz	
平均エネルギー	$6.6/m^2/s$	$0.55/m^2/s$	$0.48/m^2/s$	$0.4/m^2/s$
	20.4GeV	67.5GeV	69.0GeV	-

表 4 検出器 veto 層に入って来る宇宙線頻度と平均エネルギー

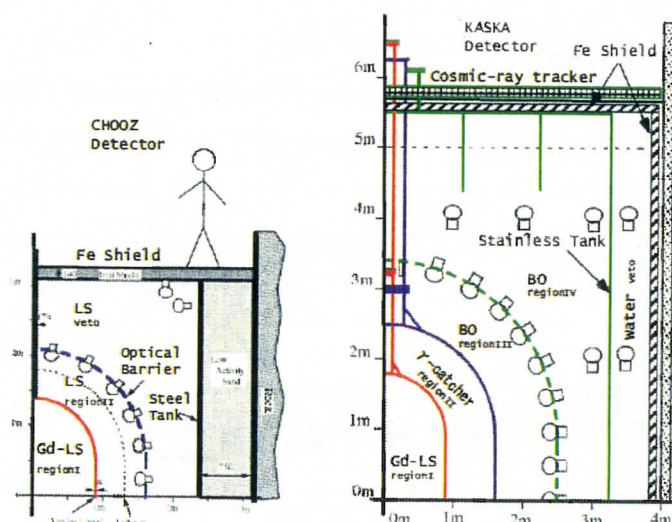


図 13 KASKA と CHOOZ 検出器の層構造の比較

図 14 の左に高速中性子が発生した場所を表し、右にはその中でバックグラウンドとなる、液体シンチレーター中で吸収された中性子が発生した場所を示す。このように、バッファ層が遮へいとして有効に働き、シンチレーター外部で生じた高速中性子は殆ど液体シンチレーター中で吸収されることがないことが分かった。したがって液体シンチレーターを通過する宇宙線を効率良く veto することで高速中性子を有効に除くことができる。

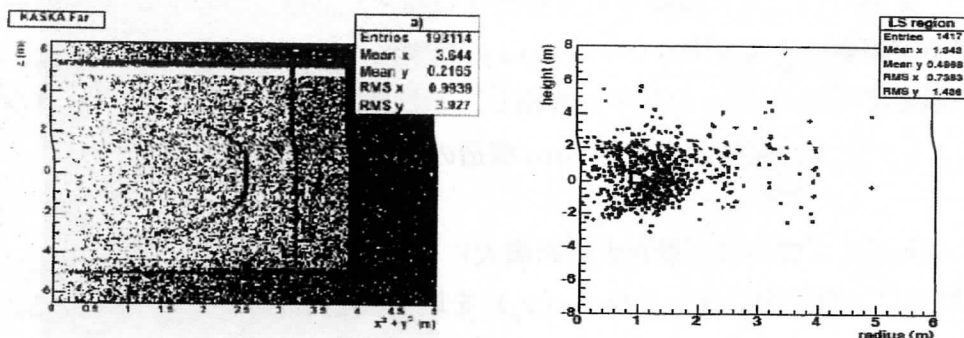


図 14 (左) 高速中性子発生場所。(右) その中で、液体シンチレーター中で吸収された高速中性子が発生した場所。

佐久間の修論[5]では、宇宙線の veto の効率を一様に 99%として、中性子バックグラウンドの評価を行った。その結果を表 5 に示す。

	KASKA	CHOOZ	CHOOZ (measured)
accidental	0.005/day	0.09/day	0.23±0.05/day
correlated	0.38/day	0.31/day	0.8±0.2/day
total	0.39/day	0.4/day	1.03±0.21/day

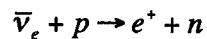
表 5、バックグラウンド

accidental バックグラウンドは、 γ 線バックグラウンド信号と中性子の吸収の信号が確率的に 200 μ s 以内 (CHOOZ の場合は、100 μ s 以内) に生じるもので、KASKA の場合は、PMT からの γ 線を遮へいするバッファ層があるため、格段に少なくなっている。Correlated バックグラウンドは、主に高速中性子が液体シンチレーター中の陽子を弾き、弾かれた陽子がニュートリノ反応と同様の信号を出し、

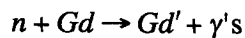
弾いた中性子がガドリニウムに吸収され、8MeV の信号を出すことで、ニュートリノ信号と同定されてしまう信号である。CHOOZ の simulation と測定の違いの原因は良く分かっていないが、KASKA の simulation 結果も CHOOZ の場合と同等に 2.5 倍すると、バックグラウンド頻度は、1/day になり、ニュートリノ信号の 2.5% になる。この correlated バックグラウンドは、殆どが検出器を通過した宇宙線の発生する高速中性子によるものなので、veto の非効率性に比例する。その中でも、ガドリニウムに吸収される中性子は殆どが液体シンチレーター部分を通過する宇宙線によるものなので、veto の効率は高いと思われる。今後は、宇宙線の通過場所別の veto の効率を評価し、それに伴う中性子バックグラウンドをシミュレートし、実機の宇宙線 veto 構造の詳細設計に役立てる。

(2) プロトタイプ検出器 (東北大、新潟大)

KASKA 実験では、原子炉ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) を以下の反応を利用して検出する。



この反応では、まず陽電子がニュートリノのエネルギーより 0.8MeV 低いエネルギーの信号を発生する。中性子は、周囲の陽子と弾性散乱を繰り返し、熱中性子化し、平均 30 μ s 後にガドリニウムに吸収され、複数の γ 線を放出する。この γ 線と合計エネルギーはガドリニウムノ励起エネルギーに相当する 8MeV になる。



この 2 種類の信号の遅延同時計測を行うことにより、バックグラウンドの少ないニュートリノ信号を検出することができる。

KASKA 実験では、検出器間のニュートリノ信号の検出効率の差を、1% 以内の精度でおさえなければならない。そのためには、ニュートリノ信号の選択に対する効率をエネルギーなどの誤差に対して不感にしなければならない。そのため、ニュートリノターゲットの壁の近くで発生したニュートリノ反応の中で発生しがガドリニウムが発生し、ニュートリノターゲット領域から逃げる γ 線を効率良く捕まえ、8MeV のエネルギーを再構成する必要がある。そのため KASKA 検出器には、ニュートリノターゲットの外側にガドリニウムが入っていない液体シンチレーター層を設け、ニュートリノターゲットから逃げる γ 線を捕らえる構造になっている。この層は γ -catcher と呼ばれる。

一方ガドリニウムから発生する γ 線のエネルギー分布は、良く知られていな

いため、検出効率などのシミュレーションによる評価には限界がある。そのため、実際の γ -catcher 層と同程度の半径をもつ球状のプロトタイプ検出器を製作し、その中心で、放射線ソースを使い、実際のニュートリノ反応の疑似反応を発生させ、検出効率の測定を行った。

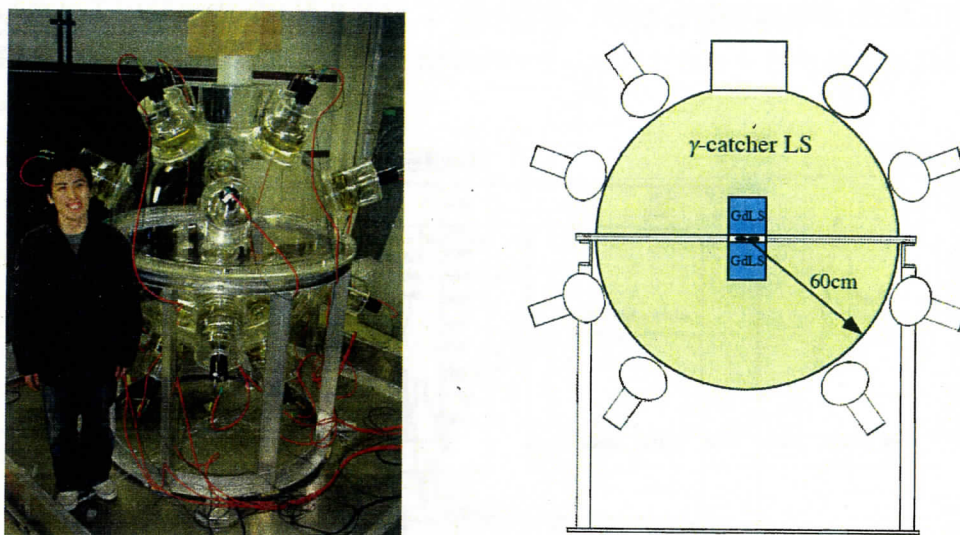


図15 (左) プロトタイプ検出器と(右) その構造。

図15にプロトタイプ検出器を示す。構造は、半径60cmの球状の亚克力に、8インチの光電子増倍管が16本取り付けられている。亚克力は紫外線透過型であり、光電子増倍管の面積はKASKA検出器とほぼ同じ10%である。900リットルの液体シンチレーターは、1,2,4トリメチルベンゼン15%、イソパラフィンオイル85%に発光剤であるPPO(0.4重量%)とbis-MSB(0.006重量%)を溶かし込んだもので、発光量は、約60%アントラセン相当となる。

図16は、プロトタイプ検出器の中心に ^{60}Co をセットし測定したエネルギースペクトル(左)とそのシミュレーション結果(右)である。 ^{60}Co は、1.17MeVと1.33MeVの2本の γ 線を同時に発生する。エネルギーが高い方のピークは、両方の γ 線がプロトタイプ内部で吸収された時のもので、2.5MeVのエネルギーに相当する。低い方のピークは、一本の γ 線がプロトタイプから逃げたものである。シミュレーションは、データを良く再現しており、このようにして、60cmの厚みの液体シンチレーターから逃げる γ 線の効果を知ることができる。

次に Am/Be ソースを用いて疑似ニュートリノ信号を発生し、ガドリニウムの中性子吸収後発生する γ 線のエネルギー分布を測定した。測定は、プロトタイプ中心部に約 7 リットルの Gd 入り (0.1%) 液体シンチレーターが入った紫外線透過型アクリル容器と Am/Be ソースを入れて行った。Am/Be ソースは、4.4MeV の γ 線と数 MeV の中性子を発生する。4.4MeV の γ 線が先発信号となり、中性子を吸収した Gd が後発信号となり、疑似ニュートリノ信号を得ることができる。

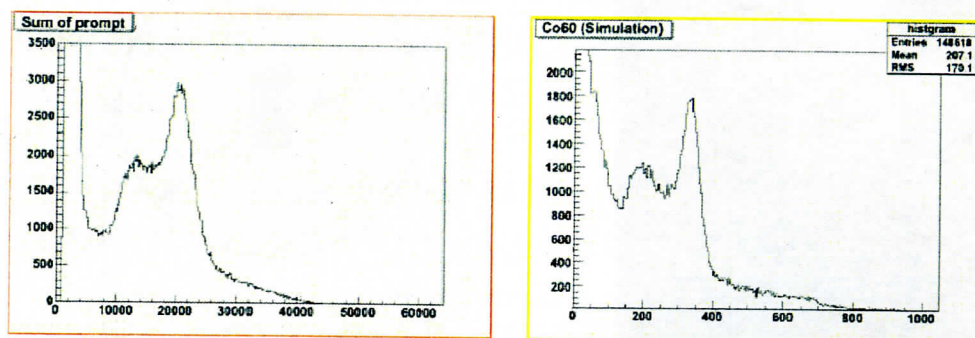


図 1 6 ^{60}Co のエネルギースペクトル。

(左) 実測データ、(右) シミュレーション

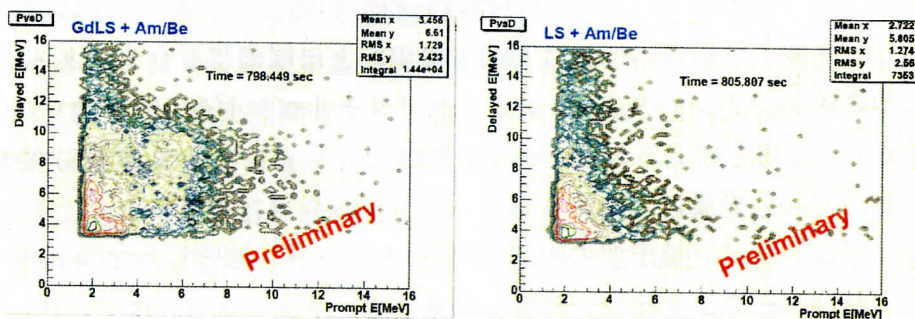


図 1 7 先発信号のエネルギーと、それらから $30\ \mu\text{s}$ 以内に発生した後発信号のエネルギーの関係。

左は、Gd 入り液体シンチレーターと Am/Be ソースを導入したもの。
右は、Gd 無しの液体シンチレーターと Am/Be ソースを導入したもの。

図 17 にこのようにして得られた 2 つの信号のエネルギーの関係を示す。左の図は、Gd 入り液体シンチレーターと Am/Be ソースを導入したもの。右の図は、Gd 無しの液体シンチレーターと Am/Be ソースを導入したもの。左の図に明らかなガドリニウムによる信号が見られる。実際の原子炉ニュートリノもこのように見えるはずである。本プロトタイプは地上にあり、宇宙線や γ 線に対する対策は施していないので、バックグラウンドは、実際の実験にくらべ何桁も多い。

図 18 に先発信号のエネルギーが $5\text{MeV} < E_p < 6\text{MeV}$ でカットした時の後発信号のエネルギー分布を示す。

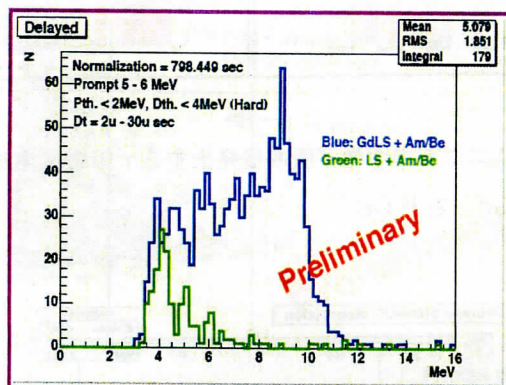


図 18 先発信号のエネルギーが $5\text{MeV} < E_p < 6\text{MeV}$ でカットした時の後発信号のエネルギー分布。

Am/Be ソースの場合、先発信号の γ 線エネルギーは 4.4MeV だが、中性子がはね飛ばした陽子による信号が重なるため、エネルギーは $1 \sim 2\text{MeV}$ 高めに見える。後発信号の 9MeV 付近に見られるのが、Gd の中性子吸収信号である。低エネルギー側にあるテイルは、 γ 線がプロトタイプ検出器から逃げたために生じたものであり。現在このデータをもとにして、Gd 信号に対するシミュレーターを調整中である。これまでのシミュレーションプログラム GEANT4 には、ガドリニウムからの γ 線の情報は用意されていないため、新たにそのモジュールを開発し、プロトタイプでの信号をシミュレートした。この際用いたガドリニウムの γ 線のエネルギー密度スペクトルを図 19 に示す。一つのイベント中の γ 線の組み合わせは、合計約 8MeV になるようにこの密度分布の重みで確率的に選んだ。このようにして得られたプロトタイプでの Gd 信号のシミュレーション結果を図 20 に示す。この分布の傾向は、図 18 のデータの傾向を再現しているが、今

後さらに詳細な比較を行い、シミュレーションを最適化し、実機のデザインに役立てる。

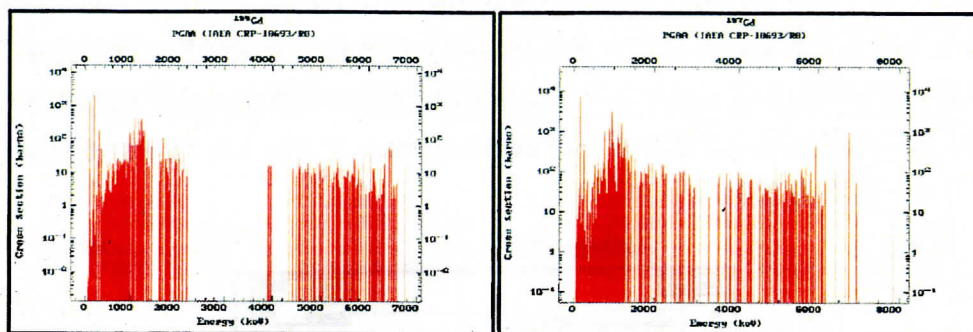


図19 ガドリニウムの中性子吸収後発生する γ 線のエネルギー分布。
左 ^{155}Gd 、右 ^{157}Gd 。

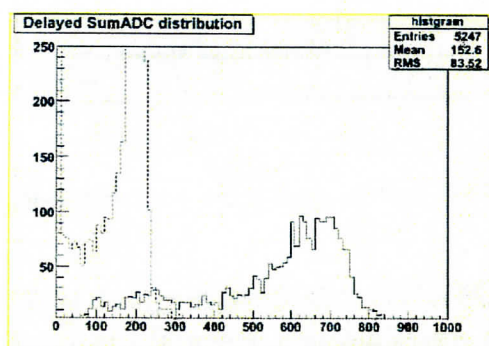


図20 プロトタイプでのガドリニウムからの γ 線信号のエネルギー分布のシミュレーション。200付近にあるピークは、中性子が陽子に吸収されて生じた2.2MeVの γ 線のもの。

なお、実際の KASKA 実験では、ニュートリノターゲットが大きいことと、 γ -catcher 表面の曲率が小さいことで、 γ 線が逃げる確率は小さくなり、エネルギー分布が鋭いピークになることが期待されるが、今後シミュレーションを用いてその定量的評価を行う。

プロトタイプは、今後高速実験炉である常陽に移設し、実際の原子炉ニュートリノを検出する予定である。常陽は定格熱出力 140MW の日本最大の研究用高速炉であり、その炉心から 30m-の距離にプロトタイプを設置する。これが成功すれば、世界初の高速炉からのニュートリノ検出となる。常陽でのニュートリノ信号検出に対するバックグラウンドの評価を行った。図 2 1 にプロトタイプによるバックグラウンド測定データのデータを示す。

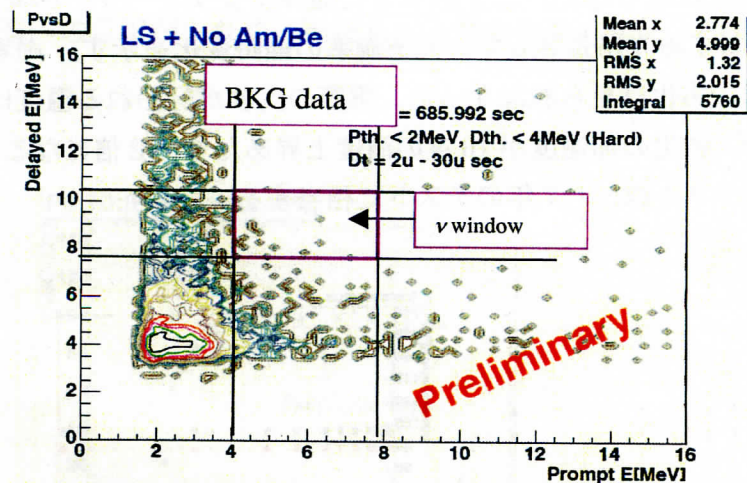


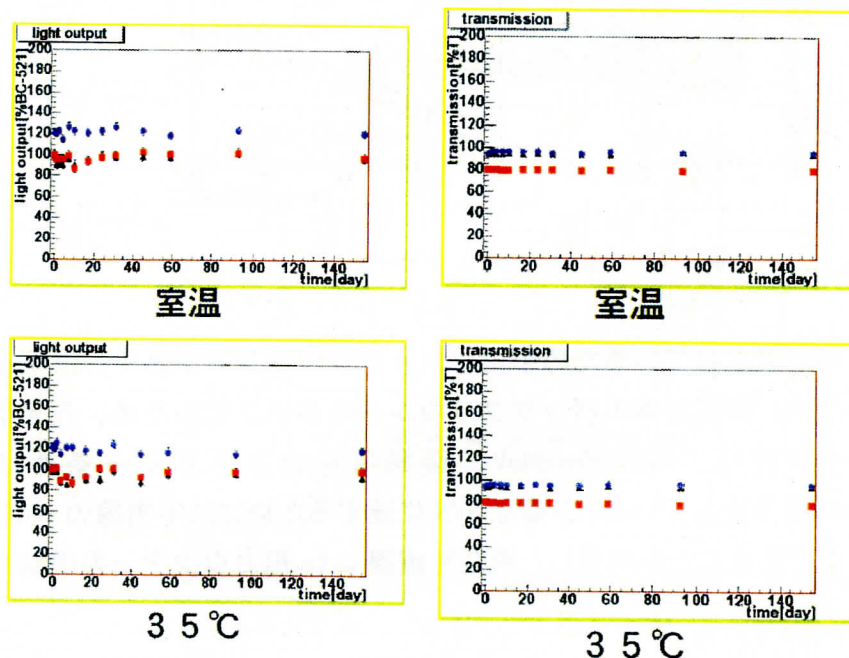
図 2 1 バックグラウンドデータ

検出器は地上に設置されているため宇宙線バックグラウンドが多く、又 γ 線の遮へいが無いいため、環境 γ 線のバックグラウンドも多い。そのため、先発信号のエネルギー条件は、 $4\text{MeV} < E_p < 8\text{MeV}$ 、後発信号のエネルギー条件は、 $7.5 < E_d < 10.5\text{MeV}$ を予定している。必要な S/N に達するためには宇宙線の veto カウンターが必要であることが判明し、現在宇宙線 veto 用カウンターの準備を進めている。

(3) 液体シンチレーターの開発 (新潟大)

KASKA 実験では、ガドリニウム (Gd) 入りの液体シンチレーターをニュートリノターゲットとして利用する。Gd は金属であるため、そのままでは有機溶媒からなる液体シンチレーターに溶解することはできない。そのため有機分子との錯体を合成し、その有機分子と有機溶媒との親和性を利用し、Gd を液体シンチレーターに導入する。KASKA 実験では、米国の原子炉ニュートリノ実験である

PaloVerde 実験のニュートリノ検出器のニュートリノターゲットとして使用されていた Gd 入り液体シンチレーターであるサンゴバン社製の BC521 (0.5%Gd) をテトラデカンと 1,2,4 トリメチルベンゼンで 5 倍に希釈し、0.1%の Gd 入り液体シンチレーターとして使用する予定である。この時、希釈溶液として、水素原子の含有量が正確に分かっているノルマルパラフィンの一種であるテトラデカンを用いるが、これは初めての試みとなるため、発光量や安定性などの確認を行わなければならない。図 2 2 に液体シンチレーターの発光量と波長 420nm の光に対する光透過率の経時変化を示す。両者とも、155 日の測定では、劣化は見られなかった。実際の実験が行われる温度は、15 度程度であるため、劣化の加速度が 10 度の温度上昇あたり、2 倍になると仮定すると、35°でのテストは、1.7 年のテストに相当する。



- ▲ BC-521 : PC : TD = 20 : 20 : 60
(PaloVerde Type)
- BC-521 : PC : TD = 100 : 0 : 0
- BC-521 : PC : TD = 0 : 40 : 60
(PPO : 5g/l) (体積比)

図 2 2 液体シンチレーター長期安定性。▲が KASKA 用液体シンチレーター。左は発光量、右は、波長 420nm の光に対する光透過率。

* γ -catcher 用シンチレーターの開発。

Gd 液体シンチレーターの外側には、Gd が入っておらず、発光量と密度が Gd 液体シンチレーターのそれに近い性質をもつ液体シンチレーターが必要であり、その開発を行った。その結果 1,2,4 トリメチルベンゼン (15%) + テトラデカン (40%) + イソパラフィン (45%) に発光剤 PPO を 5g/リットル入れたものを開発した。図 2 3 に γ -catcher 用液体シンチレーターの発光量と PPO の濃度の関係を示す。この液体シンチレーターの密度は、Gd 液体シンチレーターの 1.005 倍であり、アクリル容器への負担が少なく、引火点が高く安全性も高い。

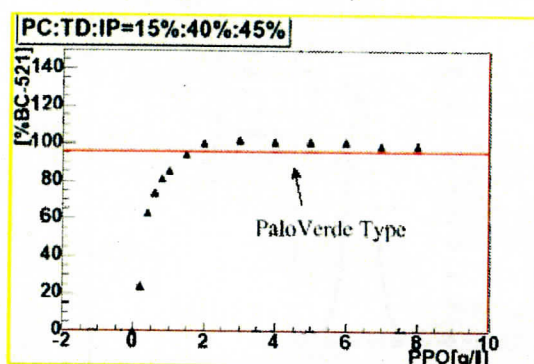


図 2 3 γ -catcher 用液体シンチレーターの発光量と PPO 濃度の関係。

(4) 光電子増倍管の開発 (首都大)

KASKA では、10%以上の光電面面積が必要であり、そのため 350 本の口径 10 インチの光電子増倍管が必要となる。又、 γ 線バックグラウンドは光電子増倍管のガラスからのものが最も多いため、低バックグラウンドのガラスが必要となる。図 2 4 に一光電子信号を使った浜松ホトニクス製の 10 インチ光電子増倍管 R7081 の性能測定の結果を示す。クリアな 1 光子ピークが得られ、時間分解能も 2.5ns (TTS) とカタログ値よりも良い値が得られた。これらは、KASKA 実験で要求される性能を満たす。低バックグラウンドガラスは、放射性元素の混入量が低いガラス原料を選定し、白金のるつぼで製造することにより、表 6 のように低バックグラウンドガラスを得ることができることが分かった。なお、この低バックグラウンドガラスを用いて 13 インチ以上の光電子増倍管を製造する

ことは不可能であるため、KASKA 実験では、10 インチ光電子増倍管を採用することに決定した。

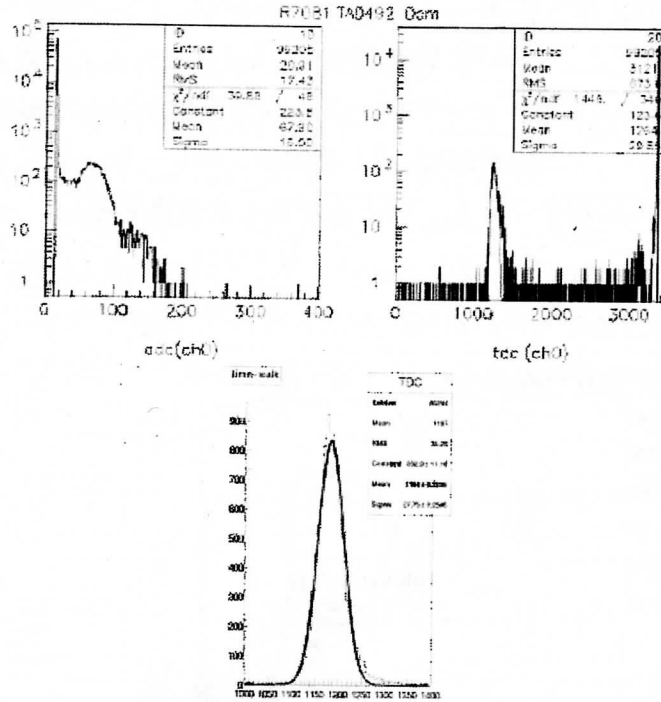


図 2.4 1 光電子信号に対する a) パルス高分布、b) 時間分布。
Time walk の補正後の時間分布。 2.5ns の TTS が得られた。

表 6 光電子増倍管ガラスの放射性元素混入量の比較

Type	²³⁸ U (ppm)	²³² Th (ppm)	⁴⁰ K (ppm)	Reference
KASKA candidate	0.046	0.12	0.01	by Ooura, (TMU) [10]
CHOOZ	0.07	0.1	0.018	
SuperK/KamLAND	0.48	0.47	0.08	by A. Piepke (U. Alabama)
Kamiokande	0.25	0.32	0.016	

(5) データ収集エレクトロニクスの開発 (新潟大)

KASKA 実験の前置検出器では、数百 MeV のエネルギーを伴う数百 Hz の宇宙線信号の中、数 MeV のエネルギーで 0.01Hz 以下で発生するニュートリノ信号を捕らえることになる。そのため、saturation からの回復の早いフロントエ

ンド回路が必要である。又、パルス波形も利用してS/Nを上げるため高速のフラッシュADCを用いる。

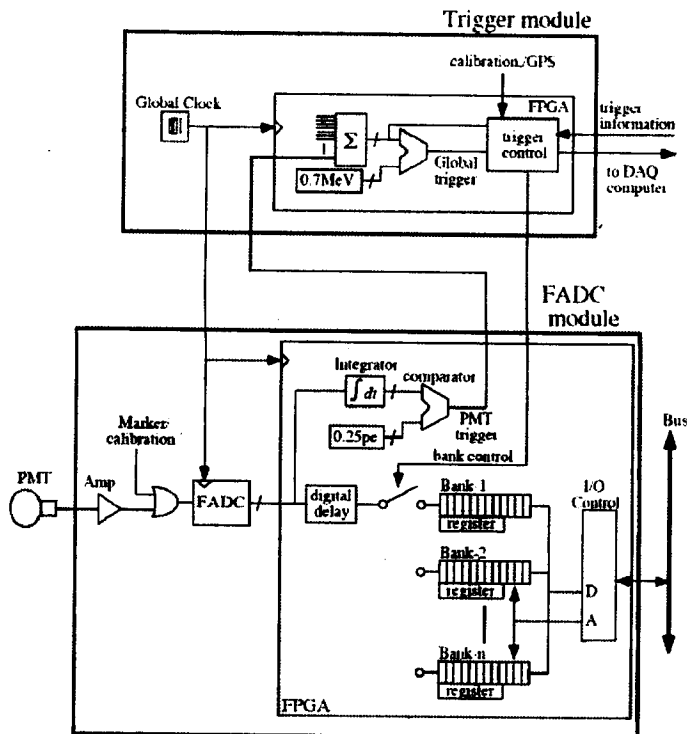


図25 KASKA読み出しエレクトロニクス基本デザイン。

これらの条件と、データ収集に必要な性能をリストアップし図25のような基本デザインを行い、新潟大学で取得している科研費でその試作を行った。

(6) キャリブレーションシステムの開発 (東工大)

KASKAでは、イベントセレクションの効率を高精度で行わなければならないため、エネルギーキャリブレーションが重要である。一方、検出器は、放射線ソースなどのアクセスポートとして、内径28cm、長さ4.5mの筒を通らなければならない構造をしている。そのためSNO検出器のように、検出器内部にワイヤーの方向を変えるフックをもうけ、放射線ソースをそのワイヤーで吊り、その長さを調節することにより、高さ方向及び水平方向へ動かすシステムを考慮

中である。このシステムの開発のため、図26のように、実際にワイヤーの長さを操作することにより重りの位置を移動させる装置を製作し、様々なテストを行った。また、使用するワイヤーについても、耐有機溶媒性、繰り返し荷重テスト（図27）などを行い、スーパー繊維であるザイロン及びベクトランを選定した。

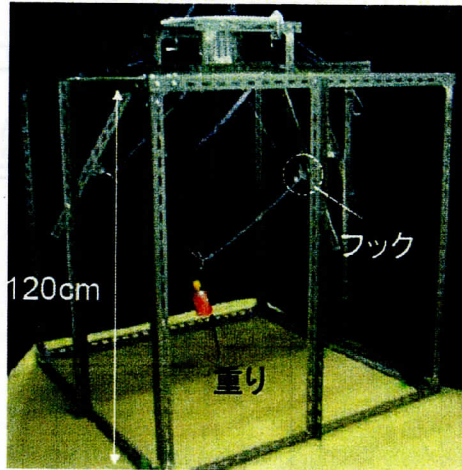


図26 キャリブレーション操作テスト装置

試験結果 1

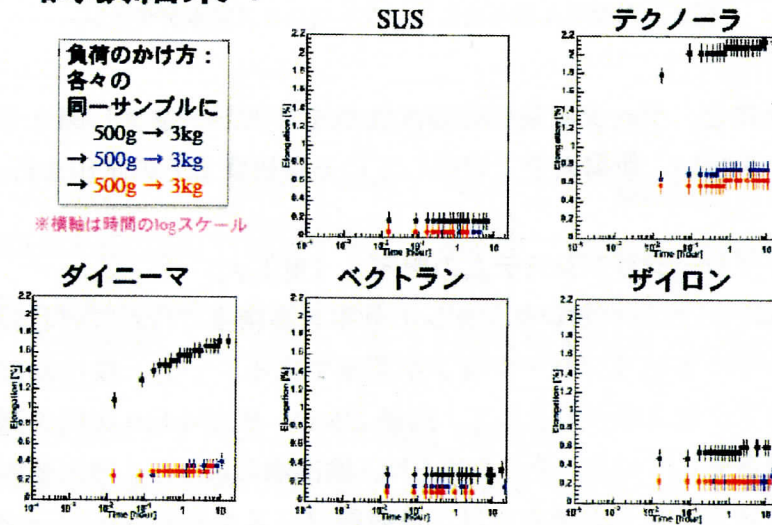


図27 キャリブレーション操作ワイヤ繰り返し荷重テスト結果

(7) その他

- Letter of Intent

本研究と他の研究よりえられた成果をまとめて、KASKA 計画の LoI を完成させた（資料参照）。

- 国際ワークショップの開催

2005 年 12 月 9 日に新潟大学に於いて、米国、フランス、韓国、台湾から、原子炉ニュートリノの研究者を招いて「原子炉ニュートリノ計画に関する生国際ワークショップ」を新潟大学の企画調査研究と共催し、近い将来の原子炉ニュートリノを利用した研究についての議論を行った。（プログラムを資料として添付）

(8) 研究成果まとめ

本研究では、2 年の研究期間で、実験現地のボーリング調査とバックグラウンド調査、プロトタイプ検出器による疑似ニュートリノ信号検出。又、これらのデータを元にしたモンテカルロシミュレーションの開発とそれによる検出器デザインの妥当性の評価。液体シンチレーターの開発、低バックグラウンド光電子増倍管の開発、読み出しエレクトロニクスの開発、キャリブレーション方法の開発、などを行った。その結果、KASKA 検出器開発は大きく進み、LoI を完成することができた。本研究の途中経過や成果は、講演や論文などで多数報告された。その結果海外も含め KASKA 実験計画の認知度は飛躍的に高まった。今後は残された検出器開発研究と検出器の詳細設計を続けるとともに、KASKA 実験実現をめざして活動してゆく。

資料

発表資料

M.Kuze, F.Suekane, T.Sumiyoshi, N.Tamura, その他 KASKA メンバー
'Letter of Intent for KASKA'

F.Suekane,
'Reactor Neutrino Oscillations: KamLAND and KASKA'
Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 157(2006)21-26

H.Sugiyama, O.Yasuda, F.Suekane, G.A.Horton-Smith
'Systematic limits on $\sin^2 2\theta_{13}$ in neutrino oscillation experiments with
multireactors'
Physical Review D73, 053008, (2006),

M.Kuze
'The KASKA project: A Japanese medium-baseline reactor-neutrino oscillation
experiment to measure the mixing angle θ_{13} '.
Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) vol.149, 160 (2005)

F.Suekane
'Status of KASKA: The Japanese reactor $\sin^2 2\theta_{13}$ project'
Neutrino Oscillations and their Origin' (proceedings), p228 (2004)

未包文彦
「KASKA : 原子炉による精密 θ_{13} 測定計画」
High Energy News, vol.23, p157, 2004

F.Suekane
'Status of KASKA'
Workshop on Systematic Errors in θ_{13} Measurement at Nuclear Reactors.
@College du France, Paris, 2006.2.17 スライドコピー

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録していません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。