

# 修 士 学 位 論 文

## ハイパーカミオカンデに向けた自動較正装置の開発

2018年3月9日

専攻名 物理学専攻  
学籍番号 169S101S  
氏名 阿部 圭悟

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

# 概要

本論文では、ハイパーカミオカンデ計画に向けた自動較正装置の開発、およびスーパーカミオカンデでこの装置を導入することを目的に行った動作試験とその結果について記述する。

1998年にスーパーカミオカンデによってニュートリノ振動が証明され、その後ニュートリノ振動の研究によって、ニュートリノの性質の理解が大幅に進んだ。一方でニュートリノの性質については未解明である部分が多く、CP対称性の破れの探索、質量階層性の決定など、数々の研究課題が存在する。ハイパーカミオカンデは現在稼働中のスーパーカミオカンデの後継となる実験計画として、世界最大の有効体積を持つ水チェレンコフ検出器を用いて、更なる新しい物理の発見を目指すものである。前述したニュートリノ振動に関連する測定のほか、太陽ニュートリノ観測、超新星爆発ニュートリノ観測、陽子崩壊の探索など、様々な研究課題に挑むために現在研究開発が進められている。

ハイパーカミオカンデでは、先行実験であるスーパーカミオカンデで確立された方法で較正を行う。しかし検出器が大型化することで、人手や負担の増加が予想される。これを解決するため、放射線源を用いた較正を自動化し、より少ない時間・人手で行うようにできる装置を新たに開発した。この装置はハイパーカミオカンデに先立ち、スーパーカミオカンデで導入、運用される。本論文ではこの自動較正装置の仕様、開発、および導入に向けた運転試験について記述する。

本装置はワイヤーに放射線源を取り付け、上昇・下降させる機構となっている。また検出器を傷つけたり光漏れしたりしないよう、種々の安全装置が搭載されている。これらの機能について確認するため、光漏れ箇所の確認試験および安全装置の動作試験を行った。また装置の動作確認のため、短距離での繰り返し試験や、深さ 35 m の水槽を用いた運転試験など様々な試験を行った。改善点はあるものの基本的な運転、安全性においての問題は試験を通して確認、解決された。自動較正装置は今年度末にはスーパーカミオカンデに導入して、最も頻繁に行われる放射線源 (Ni 線源) を用いた較正は、これを用いて行うようにする。



# 目次

第1章 序章	1
1.1 ニュートリノ	1
1.1.1 ニュートリノ振動	1
1.1.2 太陽ニュートリノ観測	2
1.1.3 超新星爆発ニュートリノ	3
1.2 ニュートリノ実験	5
1.2.1 スーパーカミオカンデ	5
1.2.2 T2K 実験	8
1.2.3 ニュートリノ振動測定の現状	10
第2章 ハイパーカミオカンデ	12
2.1 概要	12
2.2 検出原理	13
2.3 光センサー	15
2.4 検出器校正	18
2.5 低エネルギーニュートリノ観測のバックグラウンド	20
2.5.1 ラドンによるバックグラウンド	20
2.5.2 宇宙線によるバックグラウンド	21
第3章 自動校正装置	22
3.1 開発目的	22
3.2 自動校正装置の概要	23
3.3 光漏れ測定	27
3.4 運転試験	31
3.4.1 安全装置試験	31
3.4.2 水中での長距離運転試験	32
3.4.3 長距離運転試験	34
第4章 議論及び結論	42
4.1 議論	42
4.2 結論	45
付録 A hep ニュートリノ観測	46
A.1 hep ニュートリノ探索の感度見積もり	46
A.1.1 解析方法	47
A.1.2 結果	48
A.2 まとめ	49

# 第 1 章 序章

## 1.1 ニュートリノ

ニュートリノとは標準模型における素粒子の 1 つとされている、電荷を持たないレプトンである。1930 年に W.Pauli が 崩壊におけるエネルギーの消失を説明するために未知の中性粒子として初めて提唱し、1954 年に Reines と Cowan が原子炉によって生成された反電子ニュートリノを検出 [1] してその存在が確立された。また 1962 年にはミューニュートリノ [2]、1997 年にはタウニュートリノ [3] がそれぞれ発見された。ニュートリノは物質とほとんど反応せず、検出が非常に難しいため、その基本的性質の解明が進むまでには多くの時間を要した。現在では電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの 3 世代のニュートリノが存在すると考えられている。

### 1.1.1 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、弱い相互作用の固有状態が質量の固有状態の混合で表されるために起こる、ニュートリノの 3 種類のフレーバーが互いに变化し合う現象のことである。素粒子の標準模型においてニュートリノの質量はゼロと定義されている。しかしながら、1998 年にスーパーカミオカンデ実験によってニュートリノ振動の存在が報告された [4]。これはニュートリノがゼロでない有限の質量を持つことを示し、標準模型に対して修正を迫るものであった。ニュートリノ振動は 1957 年に初めて予測され、現在のフレーバー間ニュートリノ振動については 1962 年に牧・中川・坂田らによって定式化された [5]。

簡単のため 2 種類のフレーバー ( $\alpha, \beta$ ) と質量固有状態 (1, 2) の混合 (混合角  $\theta$ ) の場合を考えると、フレーバー固有状態は、質量固有状態と混合行列を用いて以下のように記述される。

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

よって、各フレーバー固有状態はそれぞれのニュートリノに対して  $E$  をエネルギー、 $t$  を時間、 $p$  を運動量、 $x$  を距離として以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} |\nu_\alpha(t)\rangle &= \cos\theta e^{-i(E_1 t - p_1 x)} |\nu_1\rangle + \sin\theta e^{-i(E_2 t - p_2 x)} |\nu_2\rangle \\ |\nu_\beta(t)\rangle &= -\sin\theta e^{-i(E_1 t - p_1 x)} |\nu_1\rangle + \cos\theta e^{-i(E_2 t - p_2 x)} |\nu_2\rangle \end{aligned} \quad (1.2)$$

ここで生成点からの距離を  $L$  と置き直すと、 $\alpha$  から  $\beta$  への遷移確率は次式のように導かれる。

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta(0) | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 = \left| \sin\theta \cos\theta (-e^{-i(E_1 t - p_1 L)} + e^{-i(E_2 t - p_2 L)}) \right|^2 \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{(E_2 - E_1)t - (p_2 - p_1)L}{2} \right) \end{aligned} \quad (1.3)$$

ニュートリノの質量  $m$  とすると、これは非常に小さいため、以下のような近似を行うことができる。

$$E = \sqrt{p^2 + m^2} \simeq p + \frac{m^2}{2p} \simeq p + \frac{m^2}{2E} \quad (p \gg m) \quad (1.4)$$

また、ニュートリノの速度は光速  $c$  とみなす。すると (1.3) は  $\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$  として

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{m_2^2 - m_1^2}{4E} L \right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2 c^3}{4E} L \right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right) \end{aligned} \quad (1.5)$$

(1.5) より、質量固有状態間に質量差が存在し、ニュートリノ混合角がゼロでない場合にニュートリノ振動が起こることがわかる。また、ニュートリノの飛行距離とエネルギーを適切に選ぶことで、遷移確率を大きくすることが出来る。

これらを3つのフレーバー固有状態  $\nu_\alpha (\alpha = e, \mu, \tau)$  と質量固有状態  $\nu_i (i = 1, 2, 3)$  に拡張したとき、これらの混合行列は MNS 行列と呼ばれ、以下のように記述される。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

ここで  $c_{ij}$  と  $s_{ij}$  はそれぞれ  $\cos\theta_{ij}, \sin\theta_{ij}$  であり、 $\theta_{ij}$  はニュートリノ混合角である。また  $\delta_{CP}$  はレプトンセクターでの CP 位相を表す。 $\delta_{CP}$  がゼロでない値を持つことは、ニュートリノの CP 対称性が破れていることを示す。

現在では、様々な実験によってニュートリノ混合角が有限の値を持つことが示されている。 $\theta_{12}$  は太陽ニュートリノ [6]、 $\theta_{23}$  は大気ニュートリノ [7]、 $\theta_{13}$  は原子炉ニュートリノ [8] や加速器ニュートリノ [9] を観測することで、それぞれ測定された。

### 1.1.2 太陽ニュートリノ観測

太陽ニュートリノとは、太陽内部の核融合反応 ( $4p \rightarrow \text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ ) によって発生するニュートリノのことである。光が太陽中心から表面に到達するまでには、太陽の高密度により数千万年かかると考えられており、太陽内部の様子を光によって観測することは出来ない。一方ニュートリノの場合は物質とほとんど反応せず突き抜けてくるため、太陽ニュートリノを観測することは太陽内部を直接観測していることになる。

太陽ニュートリノ観測は 1960 年代後半から R.Davis らによる Homestake 実験で初めて行われた。この実験では、太陽ニュートリノが塩素原子核に衝突し、アルゴン原子核になることを利用して観測を行った。その結果、観測されたニュートリノのフラックスが、理論による予測値の  $1/3 \sim 1/2$  程度であった [10]。その後、他にもニュートリノ観測実験が行われたが、いずれも予測値に対して少ないという結果になった [11, 12]。これは太陽ニュートリノ問題と呼ばれ、長年の疑問とされていた。この問題への解として、素粒子物理学の立場からニュートリノ振動が候補となっていた。1990 年代には大型検出器による観測が始まり、より精密な測定が可能になった。2001 年にはスーパーカミオカンデ実験と SNO 実験の結果により、太陽ニュートリノで振動が起こっていることが確かめられ、問題は解決された。

太陽ニュートリノの放出過程には pp チェインと CNO サイクルと呼ばれる反応があり、pp チェインが支配的である (図 1.1)。核融合による電子ニュートリノ生成には複数の種類があり、エネルギースペクトルはそれぞれ異なる。ハイパーカミオカンデ実験で観測するものは主に  ${}^8\text{B}$  と hep と呼ばれる過程から生成されるものである。以下にその過程を示す。

${}^3\text{He}$  が  ${}^4\text{He}$  と融合し、 ${}^7\text{Be}$  を生成する。さらに陽子が衝突することで  ${}^8\text{B}$  となる。



${}^8\text{B}$  は崩壊し、さらにヘリウム原子核に分裂する。



以上が  ${}^8\text{B}$  によるニュートリノ生成の過程である。hep ニュートリノの生成については以下の式で表される。



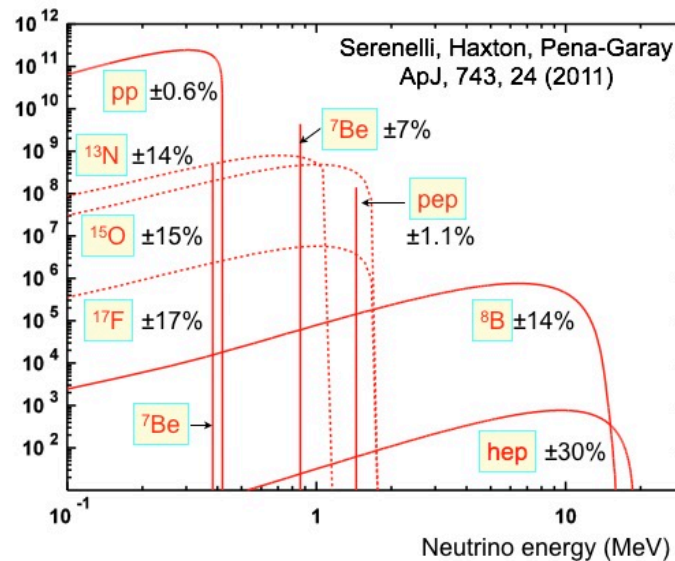


図 1.1 標準模型太陽模型による太陽ニュートリノエネルギースペクトルの予想 [13]。実線・点線はそれぞれ pp チェインと CNO サイクルによる放出。

$^8\text{B}$  ニュートリノのフラックスは、太陽コアの温度に大きく依存していると考えられている。前述したように、太陽の中心部から出た光子は幾度も散乱を繰り返して表面にたどり着くが、ニュートリノはほとんど物質と相互作用すること無く地球に到達する。そのため、ニュートリノを観測することで太陽のコア周辺について正確に情報を得ることが出来る。ハイパーカミオカンデはその大統計により、より精度良く太陽ニュートリノのフラックスを測定できる。そのため、太陽コアの温度変化をより細かくモニターすることが出来る。

hep ニュートリノは、太陽ニュートリノの中で最もエネルギーが高いが最もフラックスが小さい。hep ニュートリノの最大エネルギーは 18.8 MeV であり、 $^8\text{B}$  の 14 MeV よりも大きい。そのエネルギースペクトルの大部分が  $^8\text{B}$  と重なっている。しかしフラックスは標準太陽模型によると  $^8\text{B}$  ニュートリノの約 100 分の 1 ととても小さく、未だに観測はされていない。太陽中心部で起こる核融合反応は内側の高温領域と外側の低温領域で異なることがわかっており、 $^8\text{B}$  ニュートリノなどは内側、hep ニュートリノは pp チェインによるニュートリノ反応のうち最も外側の領域で生成される。これらを観測することで、太陽内部の各領域で起こる核融合反応を検証することができる。

hep ニュートリノと  $^8\text{B}$  ニュートリノを区別するためには、高いエネルギー分解能が必要となる。ハイパーカミオカンデは検出器の性能向上によってエネルギー分解能の向上が期待されており、hep ニュートリノ観測においてバックグラウンドとなる  $^8\text{B}$  ニュートリノの混入を識別できると予想されている。ハイパーカミオカンデで予想される太陽ニュートリノのエネルギースペクトルと、 $^8\text{B}$  ニュートリノのエネルギースペクトルを図 1.2 に示す。

### 1.1.3 超新星爆発ニュートリノ

超新星爆発が起きると、十数秒のあいだに大量のニュートリノが放出される。そのため、超新星爆発ニュートリノを観測することは超新星爆発の機構の解明につながると考えられている。1987年2月23日にカミオカンデを始めとするニュートリノ実験によって、超新星 1987A による超新星爆発ニュートリノが観測された。これによって重力崩壊型超新星についての理論が基本的には正しいことが示された。しかし他の超新星爆発からのニュートリノは未だ観測されておらず、その機構のすべてを解明するには至っていない。以下では超新星爆発の機構と、超新星爆発ニュートリノについて記述する。

恒星は中心部では核融合反応によって熱エネルギーが発生し、それによって重力崩壊を防いでいる。太陽質

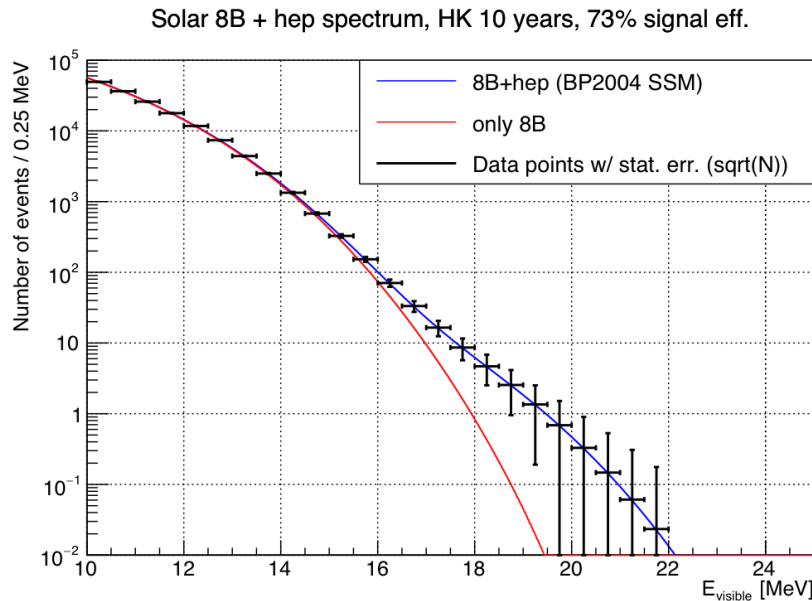


図 1.2 ハイパーカミオカンデにおいて 10 年間の観測で予想される太陽ニュートリノのエネルギースペクトルと、 $^8\text{B}$  ニュートリノのエネルギースペクトル [13]。

量の 8 倍以上重い大質量の恒星は赤色巨星・赤色超巨星等を経た後に超新星爆発を起こす。生まれたばかりの恒星は水素・ヘリウム等の軽い原子核の核融合により熱・光を生み出す。その結果星の内部ではより重い原子核が生まれ、最終的にシリコンや鉄の原子核が出来る。しかし中心部が鉄の原子核で構成されるようになると、鉄が最も安定な原子核であるために、それ以上重い元素への核融合でエネルギーを取り出すことができなくなる。すると構成を支えていた熱による対流の力と重力のバランスが崩れ、最終的に崩壊が起こる。

重力崩壊が進み中心の密度が上がると電子が縮退圧で星を支えようとするが、同時に電子がニュートリノに変わる反応も起こるため、結果的により密度は高まっていき、ニュートリノですら自由に抜け出すことは困難になる。さらに密度が上昇すると原子核どうしが合体して中性子の塊となり、膨大なエネルギーを生成する。

中性子星となるとそこに働く核力の反発によって圧力が急激に高くなる。そこに対して外側から落ちてくる鉄等が表面で跳ね返されることにより、衝撃波が発生、外層で核融合反応を起こし、超新星となる。

後には、中性子星またはブラックホールとなった恒星のコアと、構成していた物質が超新星残骸として残される。またこの過程で、亜鉛や金・銀など、鉄より重い元素が合成・放出される。超新星爆発の過程の概観を図 1.3 に示す。

超新星爆発のエネルギーの 99% 以上はニュートリノとして放出される。これはニュートリノは他の物質との相互作用が小さいため、超新星内部の高圧・高密度の物質をすり抜けることができるからである。これによって、ニュートリノは超新星内部の温度や、爆発の時間発展の情報を保持したまま地球へと到達する。典型的な超新星ニュートリノの放出は、原子核が陽子・中性子に分解され、その陽子が中性子化する反応から始まる ( $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ )。それに続き約 1 秒間の加熱フェイズと約 10 秒間の冷却フェイズにより、反ニュートリノを含むすべての種類のニュートリノが残ったエネルギーを持ち去る。このとき、ニュートリノは超新星内部の温度に対応するフェルミ・ディラック型エネルギー分布を持つ。SN1987A をモデルとして、放出されるニュートリノのルミノシティと時間変化をシミュレーションしたものが図 1.4 である。電子、反電子ニュートリノ以外の者は  $\nu_x$  としてまとめられている。 $\nu_e$  は衝撃波以降の陽電子捕獲でも生成されるため、フラックスが他のニュートリノと異なる形を示す [14]。

地球から天の川銀河の中心までの距離、約 10 kpc の距離で超新星爆発が起きた場合、ハイパーカミオカンデでは 52000 ~ 72000 ものニュートリノ事象を観測できることが予想されている。典型的な事象における時間発展の例を図 1.5 に示す。また、超新星 1987A と同じ約 50 kpc の距離で起きた場合にも 2100 ~ 3200 の事象

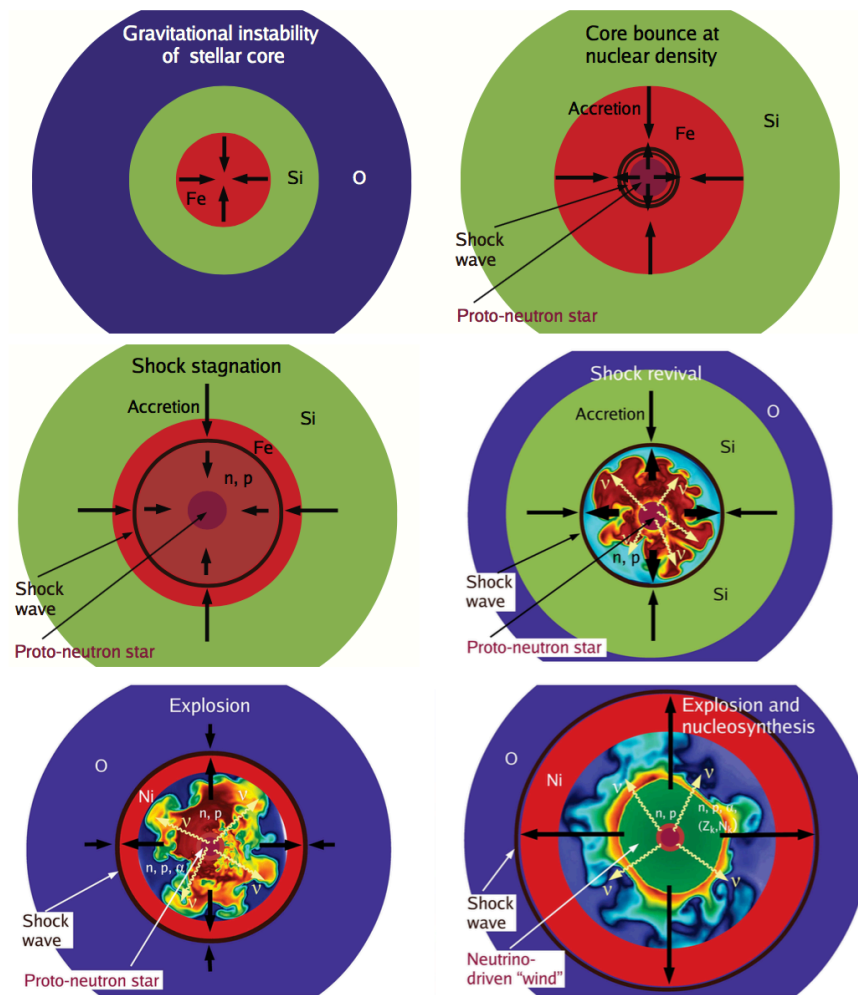


図 1.3 超新星爆発の過程の概観。超新星の重力崩壊（左上図）から、中心部における原始中性子星の形成と反跳による衝撃波面の形成（右上図）、衝撃波の減速（左中図）、ニュートリノ加熱による衝撃波の復活（右中図）、超新星の爆発と波面の加速（左下図）、爆発の広がり超新星元素合成の様子（右下図）を順に示している [13]。

を観測できることが予想される。超新星爆発までの距離と、ハイパーカミオカンデにおいて観測できる予想される事象数の関係を図 1.6 に示す。

ハイパーカミオカンデにおける検出事象数の 9 割以上は逆ベータ崩壊反応 ( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ) によるもので、残りは電子散乱事象 ( $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$ )、電子・反電子ニュートリノによる荷電カレント反応が ( $\nu_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^- + {}^{16}\text{F}^*$ ,  $\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^+ + {}^{16}\text{N}^*$ ) などが占めている。超新星爆発に関連する、水中でのニュートリノ反応の散乱断面積を図 1.7 に示す。

超新星爆発ニュートリノの観測は、超新星爆発の機構の解明や、ニュートリノの性質の解明につながると期待されている。超新星爆発の機構に関する予想モデルは複数存在し、そのモデルや計算手法によって予想されるニュートリノの検出事象数やエネルギーの時間発展は異なる。ハイパーカミオカンデにおけるニュートリノの検出事象数と、平均エネルギーの時間発展を図 1.8 に示す。このモデル間の差よりも正確にニュートリノのフラックスを測定することができれば、超新星爆発の過程や詳細について解明することが出来る。

## 1.2 ニュートリノ実験

### 1.2.1 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデ (SK) は岐阜県飛騨市神岡町にある大型水チェレンコフ検出器である。図 1.9 にスーパーカミオカンデの概形を示す。二層構造のタンク内に 50 kt の超純水が蓄えられており、内水槽には 11129



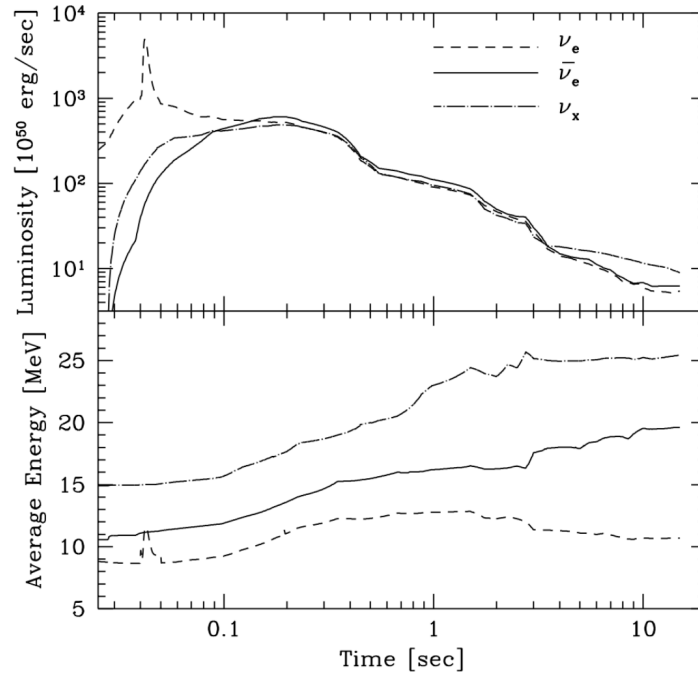


図 1.4 シミュレーションによる超新星爆発ニュートリノのルミノシティと時間変化 [14]。

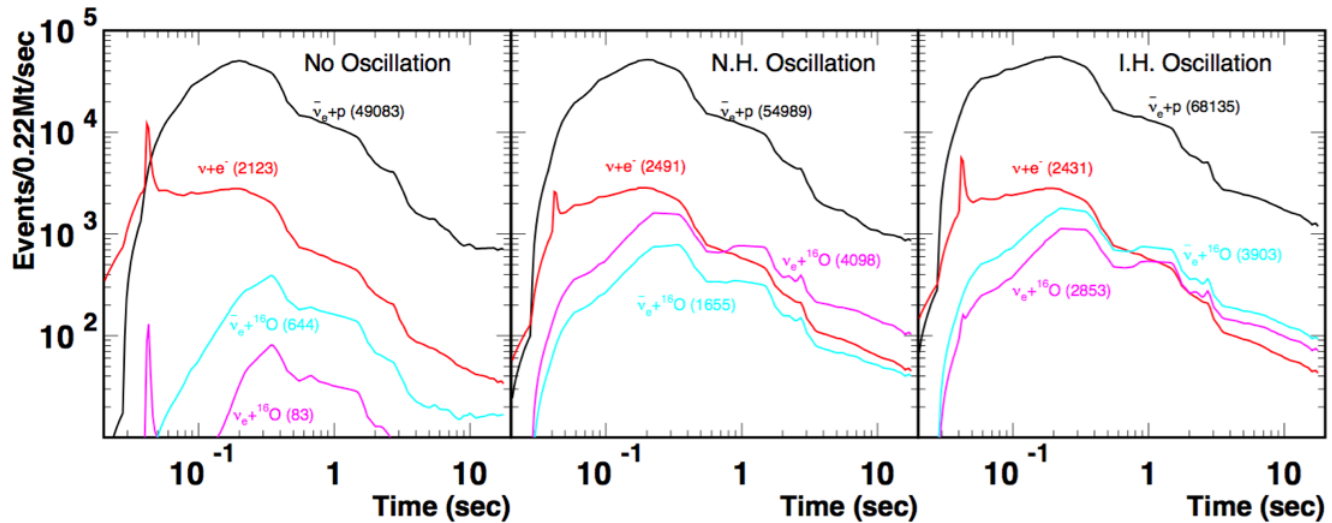


図 1.5 10 kpc 遠方で発生した超新星爆発から検出されるニュートリノ事象の時間発展の例。左図は振動が完全に打ち消される場合、中図は正常階層での振動が起こった場合、右図は逆階層での振動が起こった場合を示している [13]。

本の直径 50cm 光電子増倍管がタンク内向きに、外水槽には 1885 本の直径 20cm 光電子増倍管がタンク外向きにそれぞれ取り付けられている。ニュートリノが超純水内の電子や核子と反応し、叩き出された荷電粒子が発生させるチェレンコフ光をタンク内壁の光センサーで検出する。ミュオン等の宇宙線によるバックグラウンドを低減するため、検出器は鉱山の地下 1000 m に建設されている。ニュートリノの測定のほか陽子崩壊の探索など多種の物理現象の観測をしており、これまでにニュートリノ振動によるニュートリノ質量の発見や、ニュートリノ振動パラメータの測定など大きな成果を挙げている。

スーパーカミオカンデは 1996 年に観測を開始し、これまでに数度のアップデートを重ねながら現在も続けられている。その観測時期によってデータ取得システムや光電子増倍管の数などが異なり、現在までに 4 つのフェーズが存在する。

1996 年に SK-I として観測を開始した際には内水槽に 11146 本内水槽に 1885 本の光電子増倍管が設置さ

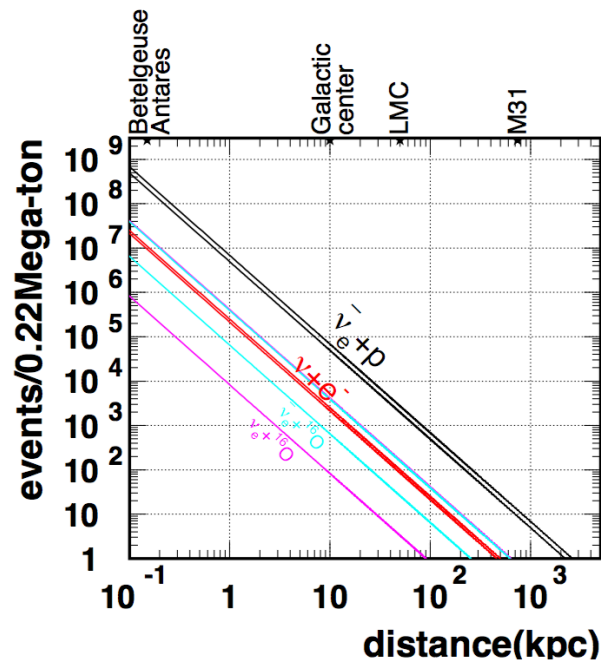


図 1.6 超新星爆発までの距離（横軸）と、ハイパーカミオカンデにおいて観測できる予想される事象数（縦軸）の関係。各線はニュートリノ反応の種類、線の幅はニュートリノ振動による変化を表している [13]。

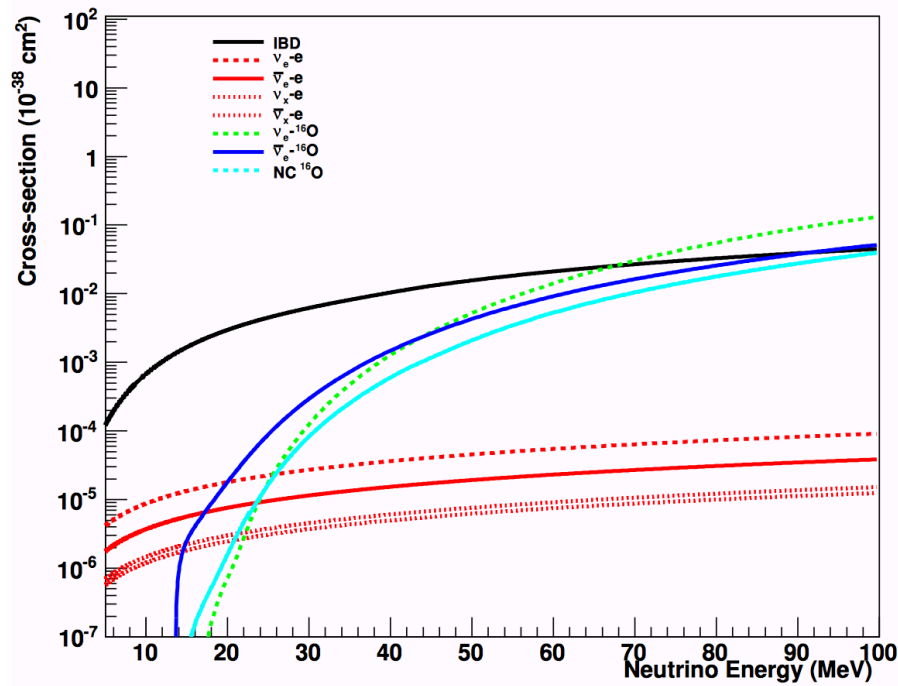


図 1.7 超新星爆発に関連する、水中でのニュートリノ反応の散乱断面積 [15]。

れ、光電被覆率は 40% であった。5 年間観測を続けられた後、2001 年に不具合のあった光電子増倍管の交換作業が行われた。作業後水槽に注水をする際に、光電子増倍管が連鎖的に破損する事故が発生し、内水槽 6777 本と外水槽 1100 本がそれぞれ被害を受けた。この事故を受け、残った光電子増倍管には衝撃波防止ケースが取り付けられ、内水槽の光電子増倍管 5182 本、外水槽は元と同じ 1885 本、光電被覆率は 19% で 2002 年 10 月から再度観測を開始した。このフェーズを SK-II と呼ぶ。その後 2005 年 10 月から 2006 年 6 月にかけて、欠損した光電子増倍管をもとに戻すための再建作業が行われた。これにより内水槽には SK-I とほぼ同数の 11129 本の光電子増倍管が取り付けられ、光電被覆率は 40% となった。検出器の性能も元に戻り、SK-III として観測を再開した。2008 年 9 月にはさらにエレクトロニクス等のデータ取得システムを一新した。これを



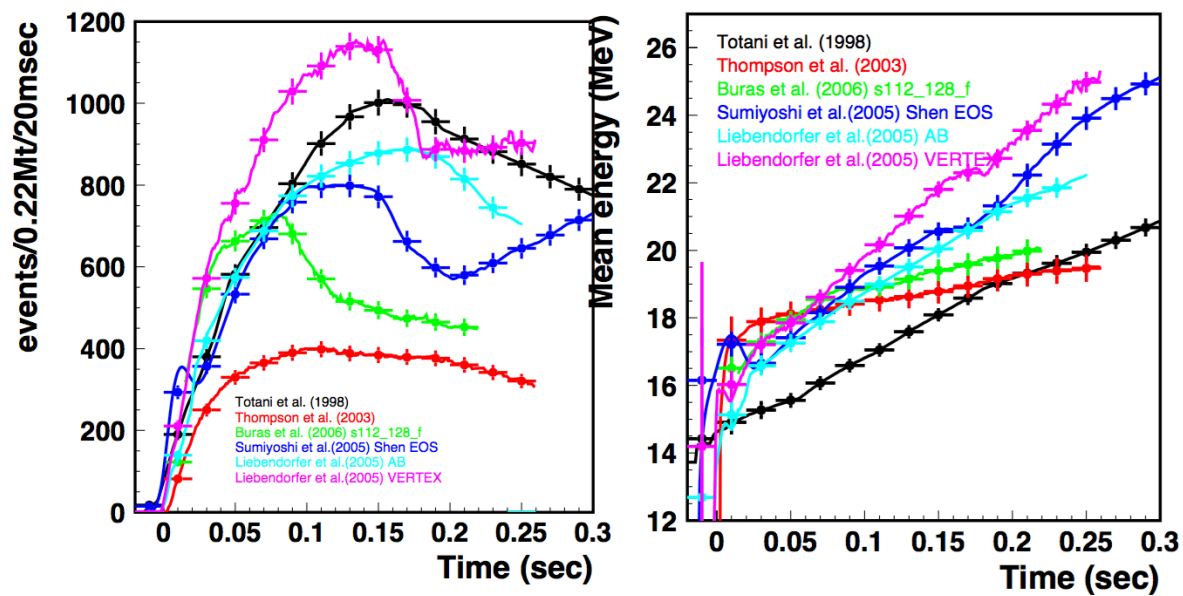


図 1.8 ハイパーカミオカンデにおけるニュートリノの検出事象数（左図）と、平均エネルギー（右図）の時間発展 [13]。

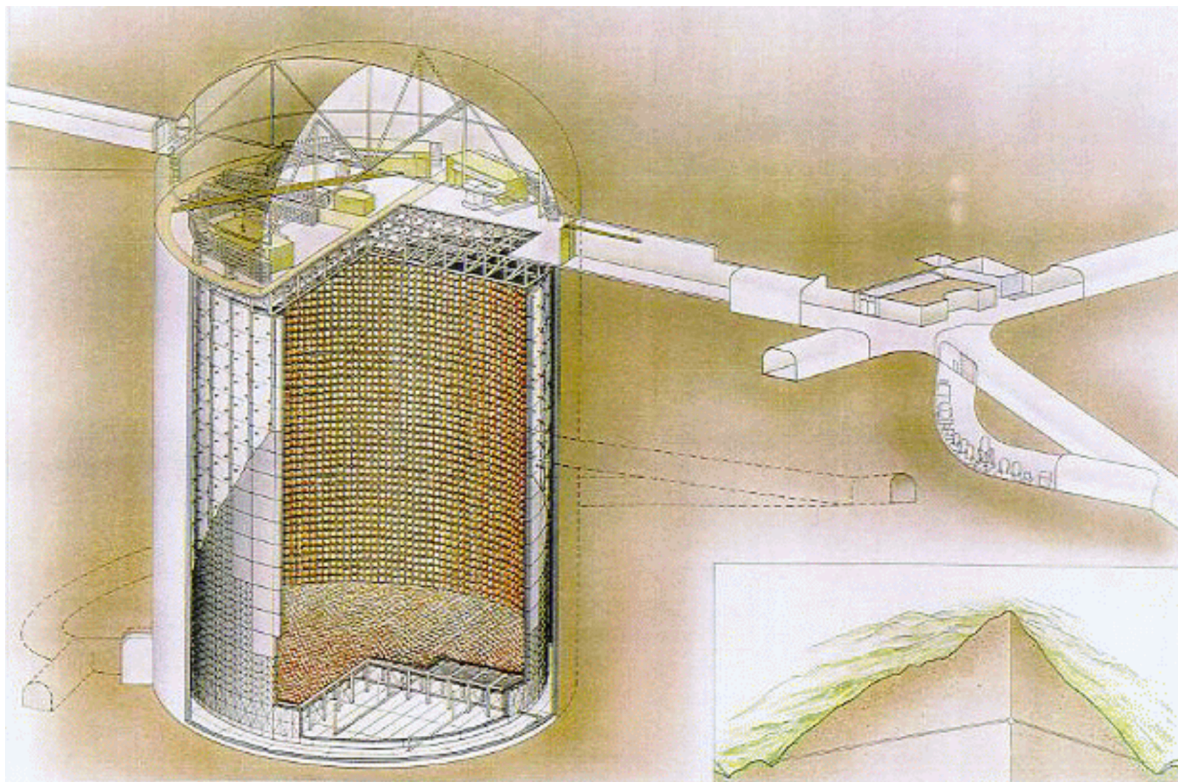


図 1.9 スーパーカミオカンデの概形

SK-IV と呼び、現在も観測を続けている。各フェーズのまとめ及び比較を表 1.1 に示した。

### 1.2.2 T2K 実験

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は、茨城県東海村の大強度陽子加速器 J-PARC でミュオンニュートリノを生成し、295 km 離れたスーパーカミオカンデで検出する、長基線ニュートリノ実験である。実験の概念図を図 1.10 に示す。

T2K 実験は 2009 年に開始された実験で、 $\delta_{CP}$  の測定、また  $\theta_{13}$  や  $\theta_{23}$  の精密測定を目標としている。

T2K 実験では 30 GeV 陽子ビームを用いて(反)ミュオンニュートリノを生成している。加速された陽子を炭素の標的に衝突させると、中間子が大量に発生する。荷電中間子は電磁ホーンで磁場をかけることによっ

表 1.1 スーパーカミオカンデの各フェーズにおける詳細。

フェーズ	SK-I	SK-II	SK-III	SK-IV
観測時期	1996/04 - 2001/07	2002/10 - 2005/10	2006/07 - 2008/08	2008/09-
光電子増倍管 内水槽	11146	5182	11129	11129
光電子増倍管 外水槽	1885	1885	1885	1885
光電被覆率	40%	19%	40%	40%
防爆ケース	無	有	有	有
フロントエンド電子回路	ATM	ATM	ATM	QBEE

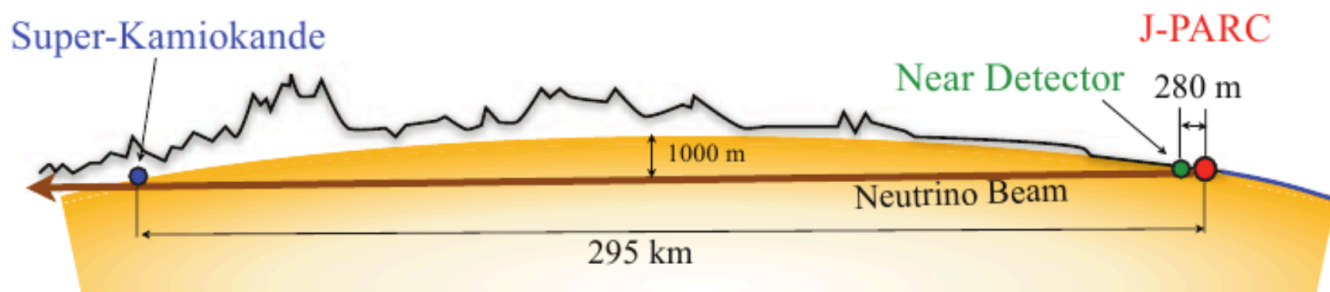


図 1.10 T2K 実験

で方向が揃えられる。この荷電中間子が数十メートル飛ぶ間にミュオンとニュートリノに崩壊する。ビーム生成の概要を図 1.11 に示す。

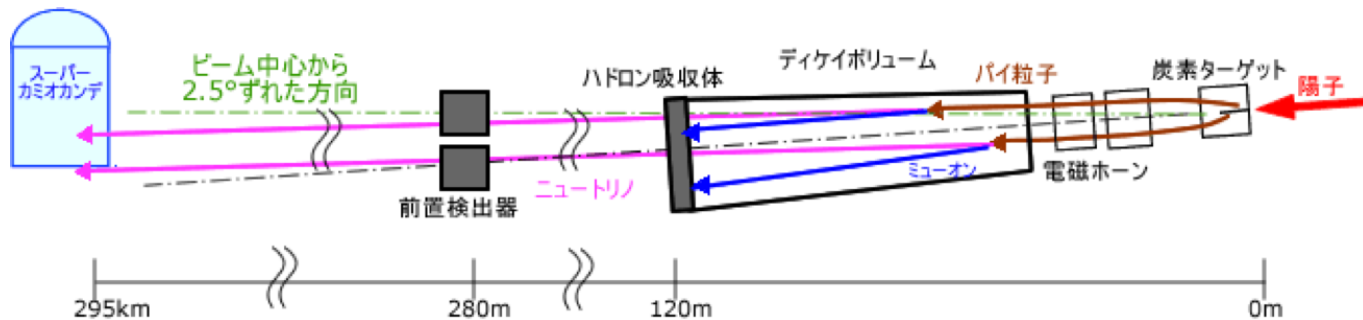


図 1.11 J-PARC の陽子加速器を用いた、ニュートリノビーム生成の概要。

ニュートリノビームは、ビーム中心からの角度によってニュートリノエネルギーのフラックスが変化する。この角度をオフ軸角と呼ぶ。オフ軸によるエネルギースペクトルの違いと、それに対応する振動確率を図 1.12 に示す。T2K 実験は後置検出器であるスーパーカミオカンデとの距離 295 km において、600 MeV 付近で振動確率が大きくなることから、 $2.5^\circ$  のオフ軸角を採用している。

また、CP 非対称性の探索のため、T2K 実験では反ニュートリノビームによる実験も行っている。ニュートリノと反ニュートリノでは  $\delta_{CP}$  の正負が反転するため、振動の確率が変化する。 $\delta_{CP}$  の効果による振動確率の違いを図 1.13 に示す。現在 T2K 実験では、CP 保存の理論を 90% の信頼度で排除するという結果を出している [16]。

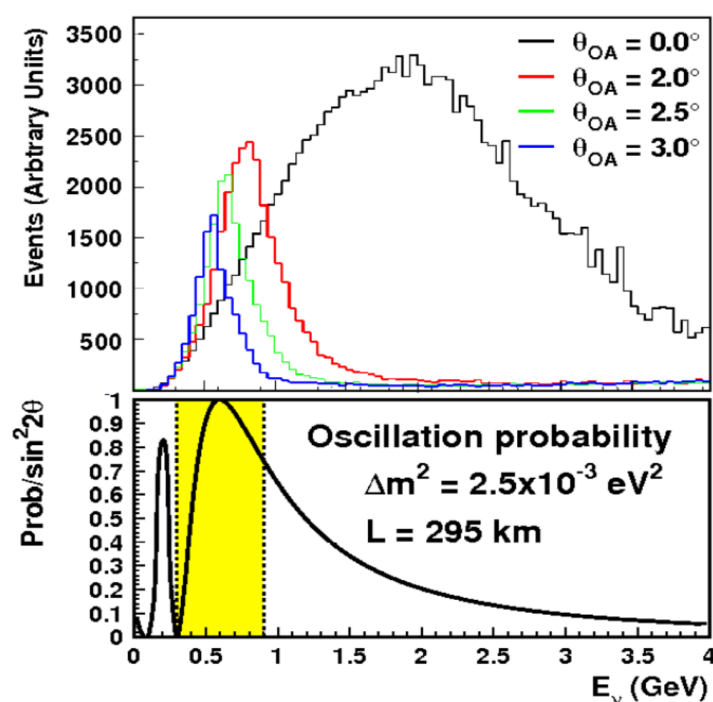


図 1.12 オフアキシ角によるエネルギースペクトルの違い。下図はそれに対応する振動確率。

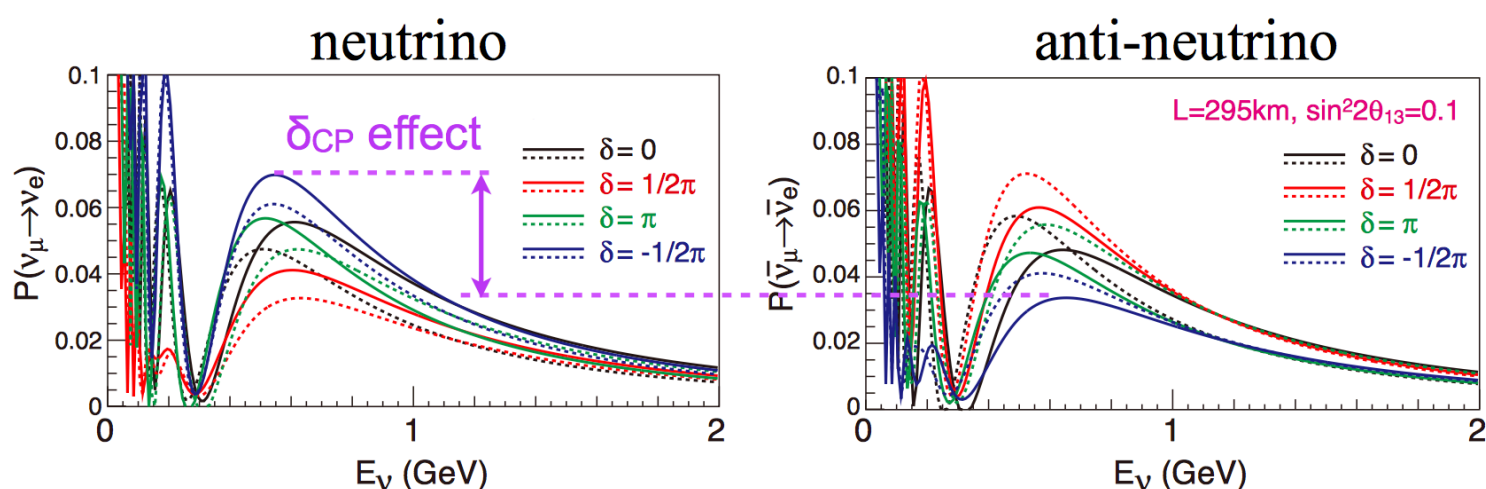


図 1.13 異なる  $\delta_{CP}$  における  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  と  $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$  のエネルギースペクトル。

### 1.2.3 ニュートリノ振動測定の実況

ニュートリノ振動の研究によってニュートリノの性質の理解が大幅に進み、世代間混合のパラメータについて多くの測定がなされた。大気ニュートリノ観測や長基線ニュートリノ実験により、 $|\Delta m_{32}^2| = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 、 $\theta_{23} = 45.6 \pm 2.9^\circ$  という値が、太陽ニュートリノおよび原子炉ニュートリノ実験からは、 $\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ 、 $\theta_{12} = 33.5 \pm 0.9^\circ$  という値が得られている。また、2012年のT2K実験と原子炉ニュートリノ実験からは  $\theta_{13} = 8.5 \pm 0.2^\circ$  という結果が得られ、3つの混合角のすべてが有限な値を持つことがわかっている [18]。

ニュートリノ混合角と質量二乗差が明らかになった一方、ニュートリノ振動に関係した残る研究課題として、レプトンセクターにおけるCP対称性の破れ ( $\delta_{CP}$ ) の測定、またニュートリノの質量階層性 ( $\nu_3$  と  $\nu_2$  の質量の大小) の決定が挙げられる。

レプトンセクターにおけるCP対称性の破れは、現在の物質優勢宇宙を説明するメカニズムとして期待さ



れている。クォークセクターでの CP 対称性の破れはすでに測定されているが、クォーク混合角が小さいため、その効果は物質と反物質の非対称性を説明する上で十分ではない。そこで、ニュートリノを起源として物質優勢宇宙を説明する理論（レプトジェネシス）が注目されている [19]。そのため、CP 対称性の破れ  $\delta_{CP}$  の測定は重要な課題となっている。

ニュートリノの質量については  $|\Delta m_{32}^2|$  が測定されているが、 $m_3$  と  $m_2$  の大小関係は未決定である。太陽ニュートリノ観測によって  $m_2 > m_1$  であることは明らかにされており、 $m_3 > m_2 > m_1$  の場合は正常階層、 $m_2 > m_1 > m_3$  の場合は逆階層と呼ばれて区別されている（図 1.14）。ニュートリノは物質中を通過すると物質内の電子による影響で、真空中とはニュートリノ振動の確率が変化することが知られている。正常階層ではニュートリノが、逆階層では反ニュートリノがそれぞれ変化するため、SK ではこれを利用して、物質効果を受けた大気ニュートリノの振動を観測することで質量階層性の決定に挑んでいる。

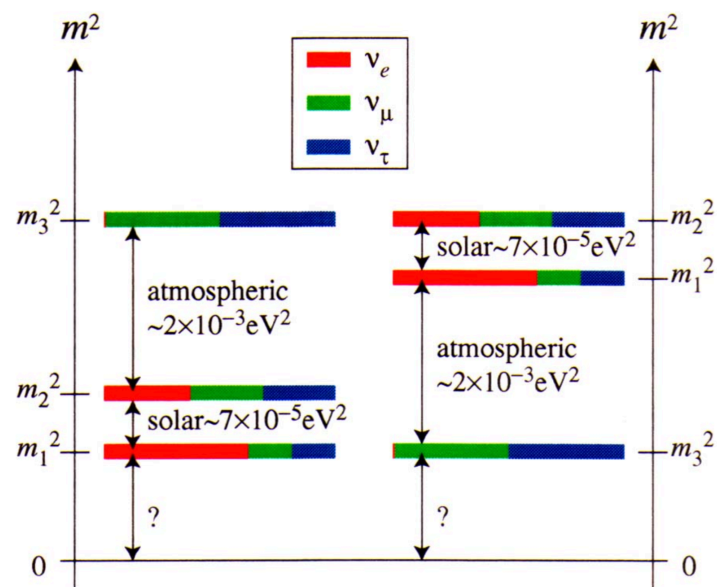


図 1.14 ニュートリノ質量階層、左が正常階層、右が逆階層を示している。

## 第2章 ハイパーカミオカンデ

### 2.1 概要

ハイパーカミオカンデは現在稼働中のスーパーカミオカンデの後継となる実験計画として、世界最大の有効体積を持つ水チェレンコフ検出器を用いて、更なる新しい物理の発見を目指すものである。検出器は高さ 60 m・直径 74 m の巨大な円筒形の水槽であり、258,000 トンの超純水で満たされる。ハイパーカミオカンデ検出器の全体像を図 2.1 に示す。水槽はスーパーカミオカンデと同様に内水槽と外水槽の二層構造になっており（図 2.2）、内水槽で目的となる信号を検出する。外水槽は宇宙線ミュオンなどの外部から入ってくる粒子を識別するために用いられる。

主な研究目的のひとつは、ニュートリノの性質の解明である。J-PARC 加速器のニュートリノビームと組み合わせることで、ニュートリノの CP 対称性の破れの探索、ニュートリノの質量階層性の決定を目指す。

他の研究目的としては、宇宙ニュートリノの観測があげられる。超新星ニュートリノの観測を通して、超新星爆発のメカニズムや中性子星の特性の解明等の成果が期待されている。また太陽ニュートリノの観測から、標準太陽モデルの検証、エネルギースペクトルの精密測定についても行うことが出来る。その他にも J-PARC の加速器を用いたニュートリノビームの観測、大気ニュートリノの観測、また検出器の超純水自体に含まれる膨大な量の陽子の観測による、陽子崩壊の探索についても期待されている。

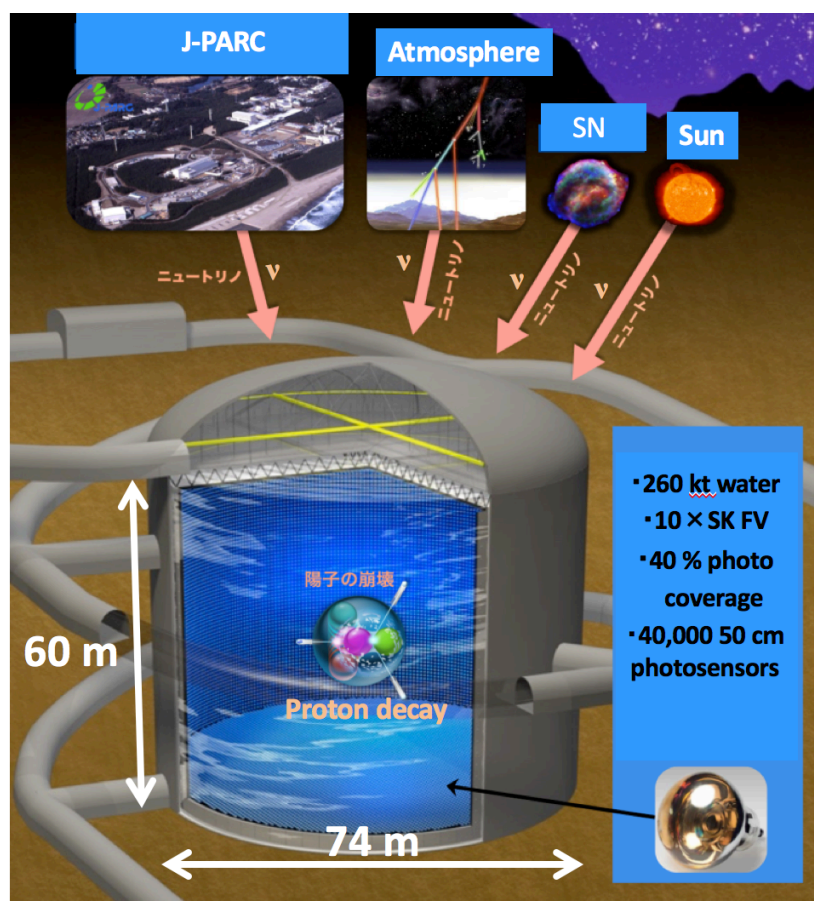


図 2.1 ハイパーカミオカンデ検出器の全体像

ハイパーカミオカンデ検出器の建設候補地としては、岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山栃洞坑が選ばれている。栃洞坑はスーパーカミオカンデの約 8 km 南、二十五山と呼ばれる山の山頂からほぼ真下に約 650 m の位置にあたる。図 2.3 に建設候補地の周辺地図を示す。

表 2.1 にスーパーカミオカンデ検出器との基本構成の比較を示す。水槽の高さはスーパーカミオカンデの約

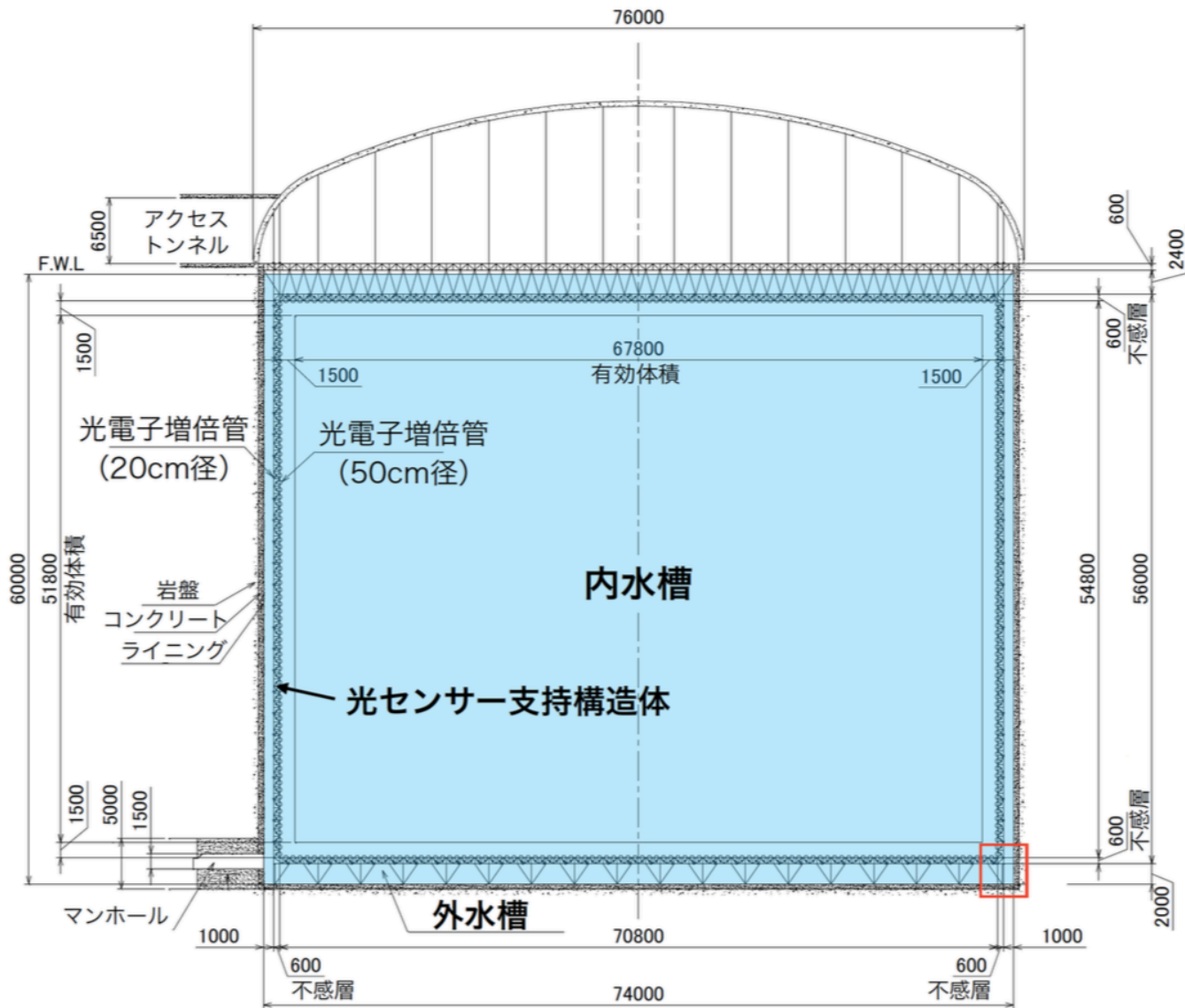


図 2.2 ハイパーカミオカンデ検出器の断面図 [13]。寸法の単位は mm。

1.5 倍、有効質量は約 10 倍になる。内水槽壁面には、光センサーが約 40,000 個設置される。設置される光センサーには、有力な候補の 1 つとして口径 50 cm の新型光電子増倍管がある。この新型光電子増倍管はハイパーカミオカンデのために開発され、光子の検出効率スーパーカミオカンデのものとは比べて大きく向上しており、約 2 倍となっている (2.3 節参照)。

## 2.2 検出原理

荷電粒子が、通過する媒質中での光の速度より速い場合、進行方向に対して一定の角度で光が放射される。この光をチェレンコフ光と呼ぶ。その角度  $\theta$  は、媒質の屈折率を  $n$ 、荷電粒子の速度を  $v$  とすると、

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta} \quad (2.1)$$

で求められる。ここで  $c$  を真空中の光速とすると、 $\beta = v/c$  である。また媒質中での光の速度は  $c/n$  となるため、チェレンコフ光が出る条件は

$$v > \frac{c}{n} \quad (2.2)$$

となる。参考として水の屈折率を 1.33 とした場合、検出できる電子の運動量閾値は 0.57 MeV となる。

ニュートリノは電荷を持たず、弱い相互作用しかしないので、物質とほとんど反応することがない。しかし、



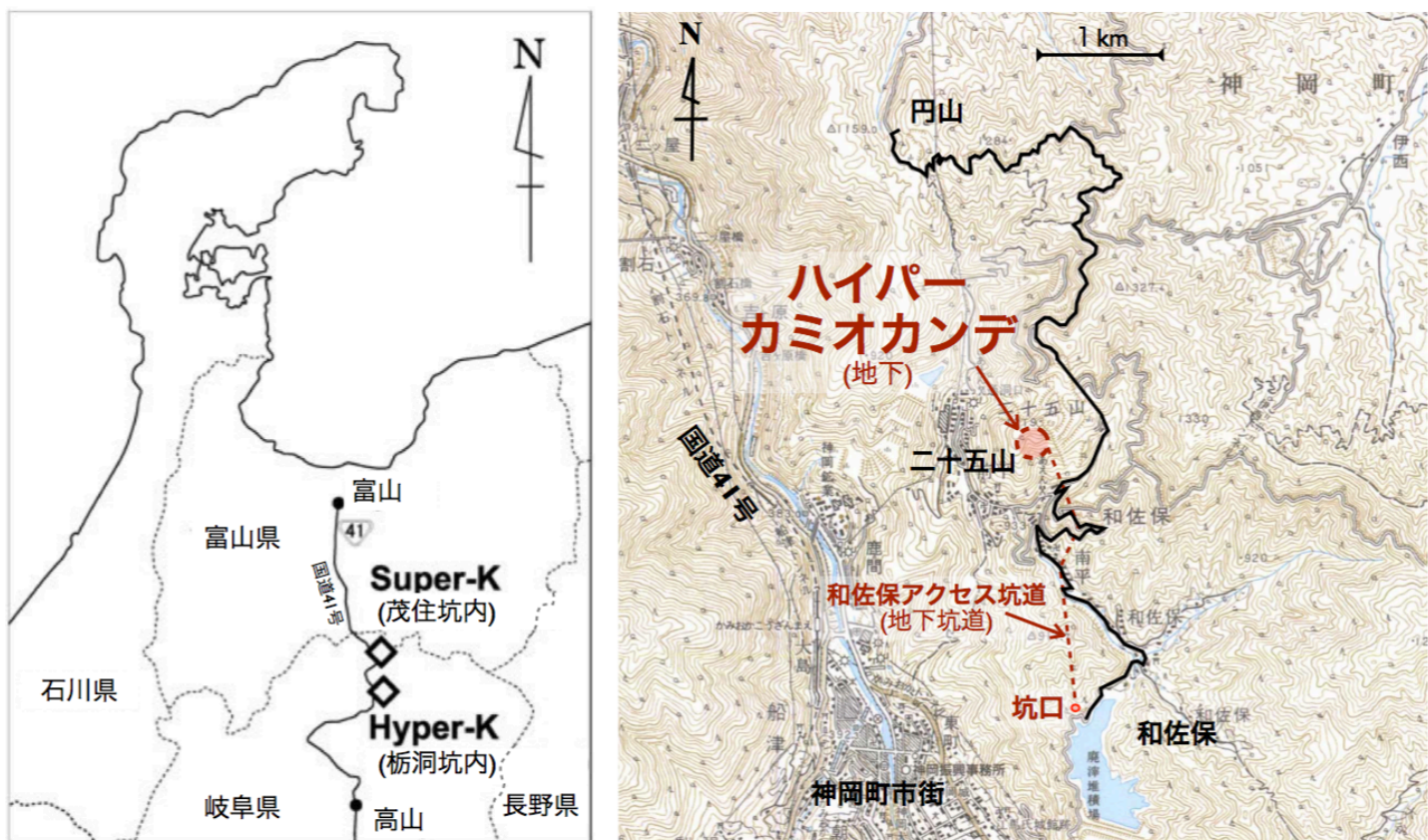


図 2.3 検出器の建設候補地、神岡鉱山栃洞坑の周辺地図

表 2.1 ハイパーカミオカンデ検出器とスーパーカミオカンデ検出器の基本性能の比較。

	ハイパーカミオカンデ	スーパーカミオカンデ
地表からの深さ	650 m	1000 m
水槽のサイズ		
高さ	60 m	41.4 m
直径	74 m	39.3 m
総水量	258,000 トン	50,000 トン
有効質量	187,000 トン	22,500 トン
光電子増倍管の本数		
内水槽	約 40,000	11,129
外水槽	約 6,700	1,885
光電面被覆率	40%	40%

稀に水槽内の超純水中の核子や電子と反応し、荷電粒子を生成する。この荷電粒子は光速に非常に近い速度で飛行するため、検出器中でチェレンコフ光を発生する。ハイパーカミオカンデでは、このチェレンコフ光を水槽の壁面に設置された光センサーで捉えることによってニュートリノを検出する。検出原理の概念図を図 2.4 に示す。

ニュートリノが起こす弱い相互作用には、 $W$  ボソンを介して電荷の交換が行われる荷電カレント反応 (CC) と、 $Z$  ボソンを介して反応する中性カレント反応 (NC) の 2 種類がある。CC 反応は  $W$  ボソンの受け渡しによってニュートリノが同世代のレプトンに転換するので、反応前のニュートリノの世代を特定することが出来る。しかしこの反応は電子やミュオンなどの荷電レプトンを生成するエネルギーを必要とするため、一定以

上のエネルギーを持つニュートリノでしか起こらない。反応の例としては  $\nu_e + e \rightarrow e + \nu_e$  や  $\nu_l + N \rightarrow l + N'$  などが挙げられる。ここで  $l$  は  $e, \mu, \tau$  のいずれかを、 $N$  は原子核を表す。一方 NC 反応は  $Z$  ボソンの媒介によって電子や核子にエネルギーを受け渡すのみの反応であるため、ニュートリノの種類にかかわらず起こる反応である。反応の例としては  $\nu_l + e \rightarrow l + \nu_e$  や  $\nu + N \rightarrow \nu + N'$  などが挙げられる。

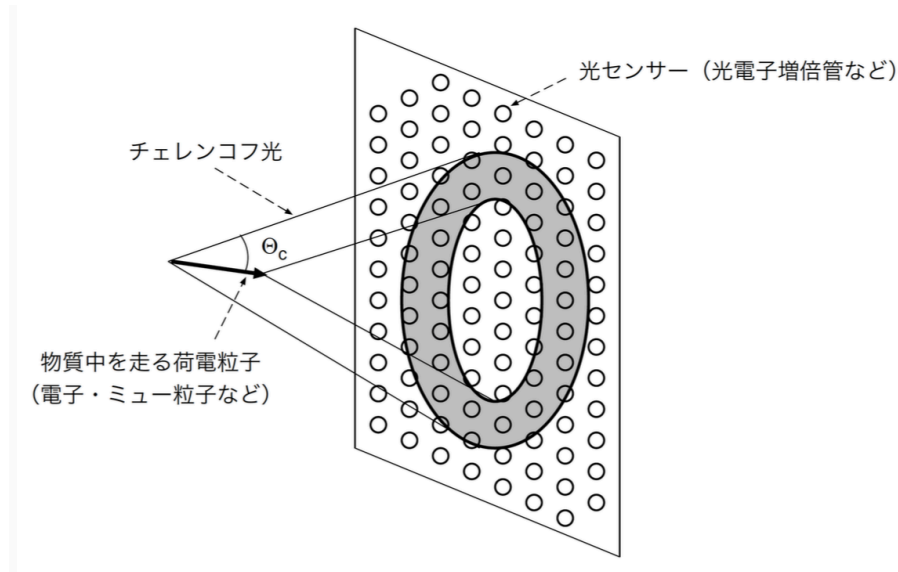


図 2.4 チェレンコフ検出器によるの検出原理の概念図

## 2.3 光センサー

ハイパーカミオカンデでは、タンクの超純水中で発生したチェレンコフ光を水槽壁面に設置された光センサーで検出し、得られた電荷と時間の情報を用いてニュートリノの反応位置、種類、エネルギーなどを再構成する。そのため検出器全体の性能は、光検出器の性能に大きく影響される。ニュートリノ反応を正確に知るためには、低エネルギーの粒子を検出できる高い検出効率や、1 光電子を識別できる高い電荷分解能、正確に位置を再構成するための高い時間分解能などが求められる。ハイパーカミオカンデにおける、光検出器に対する要求性能を表 2.2 に示す。

表 2.2 ハイパーカミオカンデにおける光検出器の要求性能 [13]。

要求性能	要求値	条件
検出効率	$\geq 16\%$	量子効率 $\times$ 光電収集効率
時間分解能	$\leq 5.2$ ns	1 光電子光量での半値全幅
1 光電子計数分解能	$\leq 50\%$	1 光電子光量での標準偏差
信号解析ゲート幅	$\leq 200$ ns	95% 以上がゲート内に収まる
ダイナミック幅	2 光子 / $\text{cm}^2$	5% 内で線形出力性を保つ入射光子数上限
信号増幅率	$10^7 \sim 10^8$ 倍	
ダークヒットレート	$\leq 4$ kHz	安定化後・水中 15°C での値
増幅率の高レート耐性	10 MHz	1 光電子光量、増幅率が 10% 以内で安定
増幅率の磁場耐性	$\geq 100$ mG	10% 以内の特性変化に収まる
稼働寿命	20 年以上	不良発生を 10% 以下に抑える
耐水圧	0.8 MPa 以上	



要求性能を達成するため、ハイパーカミオカンデのために新たな 50 cm 径光電子増倍管（浜松ホトニクス社製 R12860）の開発が行われた。

従来スーパーカミオカンデで用いられていた光電子増倍管はベネシアンブラインド型（以下 SK-PMT）と呼ばれるものであったが、新たに開発されたものはボックスアンドライン型（以下 B&L-PMT）と呼ばれるもので、内部構造が異なる。

SK-PMT のダイノードは図 2.5 に示すようにすだれ型に広がっている。そのため増幅過程で電子がとる経路は様々であり、時間分解能の悪化につながっていた。また電子が初段のダイノードではなく 2 段目のダイノードに最初に衝突することが多く、ゲインの安定性や 1 光電子分解能に悪影響を与えていた。

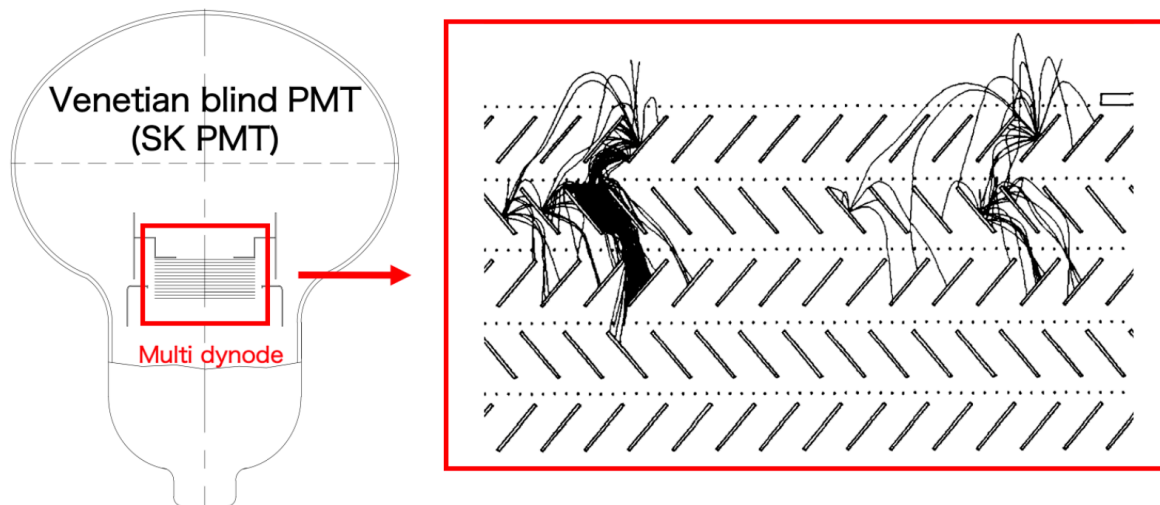


図 2.5 ベネシアンブラインド型光電子増倍管のダイノードの概形と、電子の増幅過程 [20]。

一方で B&L-PMT のダイノードは図 2.6 に示すように、初段のダイノードが大きい構造になっている。これにより電子が 1 通りの経路をとり、初段のダイノードに当たらないことも少なくなる。このことから時間分解能、電子収集効率に大幅な改善が見られ約 2 倍の性能向上を達成している。ハイパーカミオカンデに用いる光センサーの有力な候補となっている。

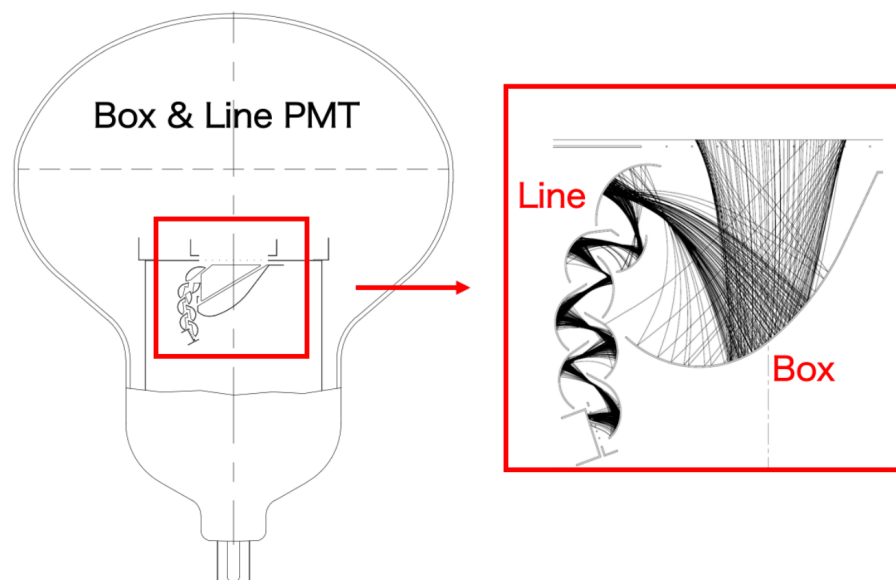


図 2.6 ボックスアンドライン型光電子増倍管のダイノードの概形と、電子の増幅過程 [21]。

量子効率とは、光子が光電子に変換される効率を指す。図 2.7 に 6 本の B&L-PMT についての量子効率の測定結果と、SK-PMT の比較を示す。ピークが従来の約 22% から約 30% となり向上していることがわかる。

光電子のダイノードへの収集効率、初段のダイノードがボックス型となったことで 73% から 95% へ向上した [13]。また図 2.8 には SK-PMT と比較し、B&L-PMT の検出効率の一様性を測定した結果である。実線、破線はそれぞれ検出面から見て電極に対し水平方向、垂直方向の 2 方向で測定した結果である。ダイノードは方向により異なる構造を持つが、両方において相対的な検出効率は約 2 倍となっており、入射角度によるばらつきも小さい。

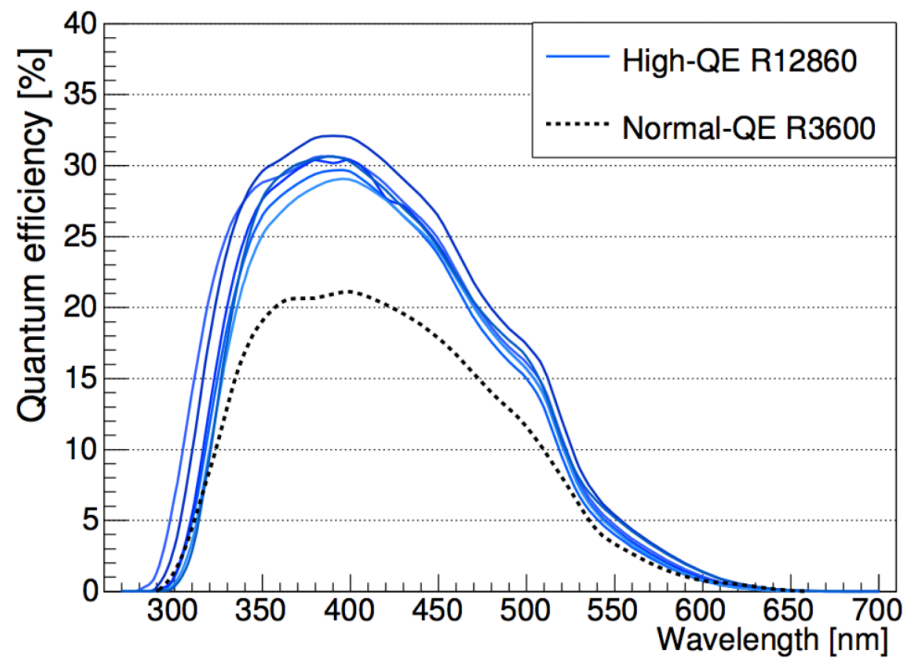


図 2.7 光の波長と量子効率の関係。点線は従来の SK-PMT(R3600)、実線は 6 本の B&L-PMT(R12860) で測定したもの [13]。従来のものはピークが約 22% であるところが新型では約 30% と向上している。

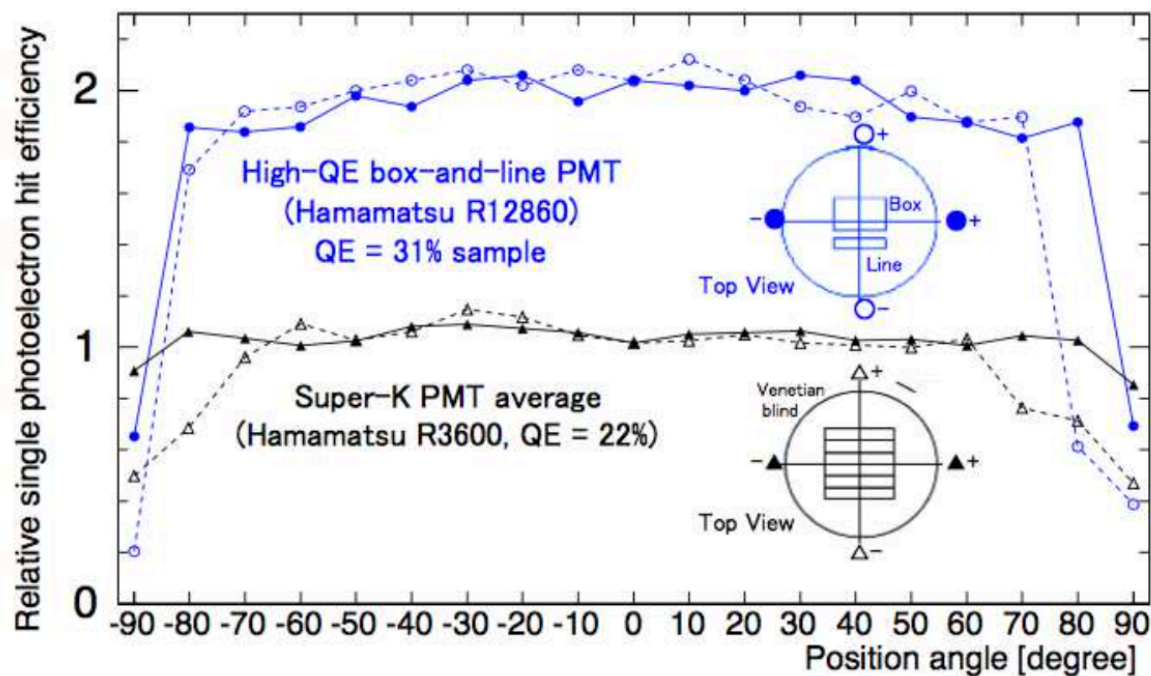


図 2.8 SK-PMT に対する B&L-PMT の、角度ごとの相対検出効率 [13]。実線、破線はそれぞれ検出面から見て電極に対し水平方向、垂直方向の 2 方向で測定した結果。

図 2.9 の左図は 0.25 光電子を閾値として、入射した時間と応答時間の差を表したものであり、1 光電子に対

する時間分解能を表している。B&L-PMT は増幅機構が直線上で、入射した光電子がほぼ同じ経路を通り増幅されるため、応答までの時間的な広がりが少なくなっている。右図は 1 光電子の電荷分布を表している。光電子の収集精度が増してゲインが安定したことにより、0 にピークを持っているノイズからよく分離できている。

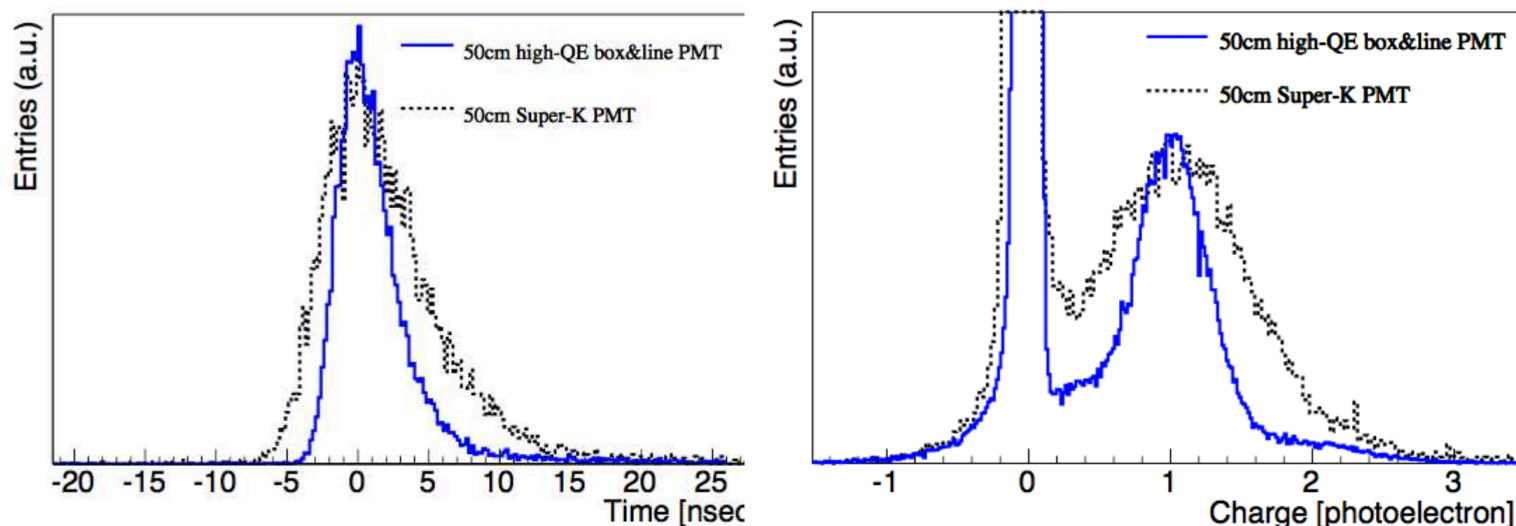


図 2.9 SK-PMT と B&L-PMT の、応答時間（左図）と 1 光電子の分布 [13]。

入射光とは無関係に、放出された熱電子が増幅されて光電子と同様の信号が出てしまうダークノイズは可能な限り低減する必要がある。B&L-PMT におけるダークノイズのレートは約 7.5 kHz 程度と、従来の倍程度の値となっている。ハイパーカミオカンデにおける要求性能は約 4 kHz 以下であり、現在これを満たすために調整が続けられている。

様々な条件で性能が安定していることも確認されている。大光量の信号でもゲインはほぼ一定で、340 光電子の信号を検出しても相対的なずれは 5% 程度で収まる。また超新星爆発のニュートリノ信号に対応するためには高い入力レートに耐えられる必要があるが、1 光電子光量では 87 MHz まで、ゲインのずれは 5% 以内で安定している [13]。また磁場中では光電子が曲げられるため収集効率に影響が出るが、ハイパーカミオカンデでの運用で想定される 100 ミリガウス以内では、2% 程度のずれで収まることが確認されている。長期測定における安定性については 10 年以上の安定性が必要とされるが、2014 年から 3 本の光電子増倍管で実証試験が行われており、2018 年現在も安定して動作している。詳細は参考文献 [13] を参照。

## 2.4 検出器較正

検出器の較正は、物理実験において得られたデータの信頼性のために重要である。検出器較正とは、測定精度の確認や検出器の調整、データの補正パラメータの決定などを行うための作業のことを言う。ハイパーカミオカンデは先行実験のスーパーカミオカンデと同様の構造を持つため、スーパーカミオカンデで行われてきた手法と経験に基づいて較正を行う。

ハイパーカミオカンデで行う較正には、光センサーや読み出し回路など検出器そのものの較正、タンク内の超純水の光学的性質、物理解析のための較正がある。表 2.3 にスーパーカミオカンデで現在行われている較正の一覧を示す。

表 2.3 中の較正に用いる較正源のひとつに、Ni 線源というものがある。現在スーパーカミオカンデで用いられている Ni 線源は、35% の酸化ニッケル  $\text{NiO}_2$  と 65% のポリエチレンを直径 18 cm の球状に固め、中心に  $^{252}\text{Cf}$  をセットしたものである（図 2.10）。上下から棒状の真鍮で蓋をする構造になっている。この Ni 線源を、検出器上部に複数個用意された較正用の穴からワイヤーによって吊るすことで、タンク内に配置し、検出

表 2.3 スーパーカミオカンデで現在行われている較正

較正項目	較正源
光センサー・電気回路の較正	
電源高電圧の調整	Xe フラッシュランプ
一光電子辺りの電荷、ゲイン	Ni 線源
電気回路の閾値近辺の振舞	Ni 線源
光センサーの量子効率	Ni 線源
応答の非線形性	窒素、色素レーザー
全域の電荷スケール	宇宙線ミュオン
時間-電荷補正	窒素、色素レーザー
時間分解能	窒素、色素レーザー
暗電流	ランダムトリガー
構造体の光学的性質	
純水の光学的性質（透過長、散乱長）	窒素、半導体レーザー
光センサーガラス部、カバーの光学的性質	窒素、半導体レーザー、Xe ランプ
物理的解析のための較正	
太陽、超新星ニュートリノ等： エネルギースケール、位置分解能	線形加速器、DT 線源、Ni 線源
加速器、大気ニュートリノ等： エネルギー、運動量スケール、粒子識別	宇宙線ミュオン、ミュオン崩壊電子、パイゼロ粒子

器の較正を行う。



図 2.10 Ni 線源 [22]

$^{252}\text{Cf}$  は原子番号 98 の超ウラン元素である。半減期は 2.65 年で、97% が  $\alpha$  崩壊 ( $^{252}\text{Cf} \rightarrow ^4\text{He} + ^{248}\text{Cm}$ )、3% が自発核分裂を起こす。自発核分裂の際に、中性子が平均 3.8 個と、エネルギーの合計が 8 MeV のガンマ線が平均 10.8 個放出される。放出される中性子のエネルギーは 2.1 MeV で、スペクトルは約 14 MeV まで広がりを持つ。この中性子がポリエチレンの陽子と弾性散乱を起こして数  $\mu\text{s}$  の間にエネルギーを失い熱化、ニッケル原子核に捕獲され、ガンマ線が等方に放出される。Ni 線源の概要図を図 2.11 に示す。この中性子捕獲反応を  $\text{Ni}(n, \gamma)\text{Ni}^*$  と書く。反応は  $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}^*$  が最も多く、この際のガンマ線の合計エネルギーは約 9 MeV である。ニッケル原子核の自然存在比、中性子捕獲の断面積、それぞれの場合に放出されるガンマ線の合計エネルギーを表 2.4 に示す。



Ni 線源から放出されたガンマ線は、検出器の純水中で電子対生成やコンプトン散乱を起こして電子にエネルギーを与え、電子がチェレンコフ光を発生させる。この線源によるチェレンコフ光は十分弱く、各光センサーに光子1つのみが入る領域で使用される。そのため、1光電子辺りの電荷、ゲイン測定や、光センサー間の相対的な量子効率の測定などに用いる。これらは特に太陽ニュートリノや超新星ニュートリノなどの低エネルギーニュートリノ事象の解析に重要な情報となる。

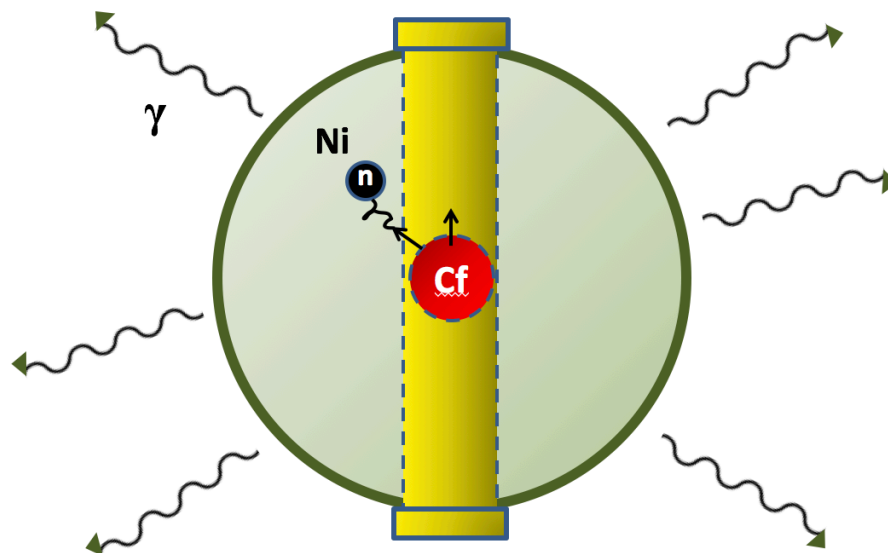


図 2.11 Ni 線源の概要図。

表 2.4 Ni( $n, \gamma$ )Ni\* 反応

反応	存在比 (%)	断面積 ( barns )	ガンマ線エネルギー ( MeV )
$^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}^*$	67.88	4.4	9.00
$^{60}\text{Ni}(n, \gamma)^{61}\text{Ni}^*$	26.23	2.6	7.82
$^{62}\text{Ni}(n, \gamma)^{63}\text{Ni}^*$	3.66	15	6.84
$^{64}\text{Ni}(n, \gamma)^{65}\text{Ni}^*$	1.08	1.52	6.10

一方、窒素、色素レーザーを用いると、光学フィルターと組み合わせることで光電子数 0.25 個から 1000 個という広範囲での較正ができ、光センサー、電気回路の直線性の較正に用いられる。これは大気ニュートリノなどの高エネルギーニュートリノの解析で特に重要となる。解析には水の光学的性質、透過長、散乱長も重要となる。これらはレーザーダイオードや宇宙線を用いて較正を行う。

## 2.5 低エネルギーニュートリノ観測のバックグラウンド

### 2.5.1 ラドンによるバックグラウンド

水中のラドンが原因となる放射線は、太陽ニュートリノ観測において主要なバックグラウンドとなる。スーパーカミオカンデでは、内水槽の光電子増倍管から水中に溶け出すラドンが主なバックグラウンド源となっている。スーパーカミオカンデでは 50000 トンの水槽に 11129 本の光電子増倍管が設置されているのに対し、ハイパーカミオカンデでは 258000 トンの水槽に 40000 本の光センサーを設置する予定である。スーパーカミオカンデと同程度のラドン放出量を仮定すると、ハイパーカミオカンデにおける単位体積あたりのラドン放出量

はスーパーカミオカンデと同程度以下に抑えられると予想されている [13]。

### 2.5.2 宇宙線によるバックグラウンド

高速の粒子が原子核に衝突した際に原子核が破壊され、複数の破砕片に崩壊することを核破砕反応と呼ぶ。宇宙線ミュオンが水槽内の酸素原子書くなどに衝突して核破砕反応を起こし、これに由来して合成された放射性核種の崩壊が、低エネルギーニュートリノの観測においてバックグラウンド源となる。

栃洞坑内のハイパーカミオカンデ検出器の建設予定地は、宇宙線のミュオンのシールドとなる検出器上部の地表からの深さが 600 m であり、茂住坑のスーパーカミオカンデが設置されている場所の 1000 m に比べて浅い。そのためミュオンフラックスが増加することが予想される。栃洞坑における宇宙線のミュオンのレートは、モンテカルロシミュレーションによって予測されている。スーパーカミオカンデの場合との比較を図 2.12 に示す。シミュレーションではミュオンフラックスは約 5 倍、単位体積あたりの放射性核種の生成レートは約 4 倍と見積もられている [13]。

この結果から、ハイパーカミオカンデにおける目的のひとつである hep ニュートリノ観測について感度を見積もるために、シミュレーションを行った。この詳細については付録 A に記す。

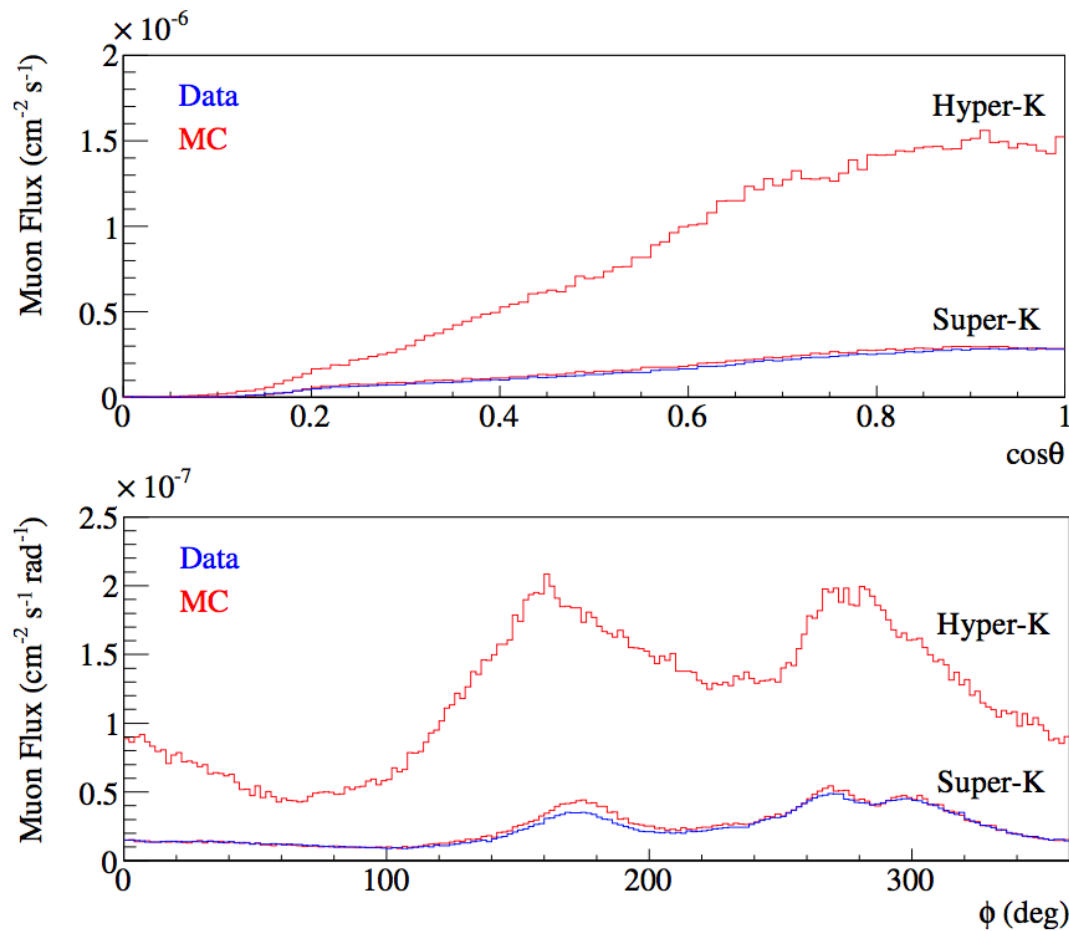


図 2.12 スーパーカミオカンデがある茂住坑と、ハイパーカミオカンデ建設予定地の栃洞坑でのミュオンフラックスの比較。天頂角分布（上図）と方位角分布（下図）。

## 第3章 自動較正装置

### 3.1 開発目的

ハイパーカミオカンデでは、先行実験であるスーパーカミオカンデで確立された方法で較正を行う。ハイパーカミオカンデはスーパーカミオカンデと同様の構造を持つため、その多くは大きな困難なく行うことが出来る。しかし検出器が大型化することで、一部行うことに困難が予想される較正がある。そのうちのひとつに線形加速器を用いた較正が挙げられる。そのためハイパーカミオカンデでは、放射線源を用いた較正がより重要になると考えられる。

一方で現在スーパーカミオカンデで行われている放射線源を用いた較正についても、検出器の大型化に伴って負担の増加が予想される。現行のNi線源を用いた較正用の装置は、検出器上部の較正用の穴の部分に暗室を設置して行われており、この暗室の準備には4人必要である。較正作業そのものは通常2名で行われている。タンク内のNi線源の上昇・下降は位置を設定してスイッチを押すことで装置が行うが、Ni線源をタンク内に挿入する際や引き上げる際など、精密さが必要な場所では手でワイヤーを持って上げ下ろしを行う必要がある。そこで準備・較正作業に必要な人手・時間を減らし、手動での作業をなるべく排除することで較正作業の負担を減らすことを目的に、新たに装置を開発した。

この装置はハイパーカミオカンデに先立ち、スーパーカミオカンデで導入、運用される。本研究では自動較正装置について

- 導入に向けた運転試験
- 試験の結果を受けた改良

を行った。本章ではまずそれに先立って行われた装置の仕様、開発について述べた後に、研究の内容について報告する。

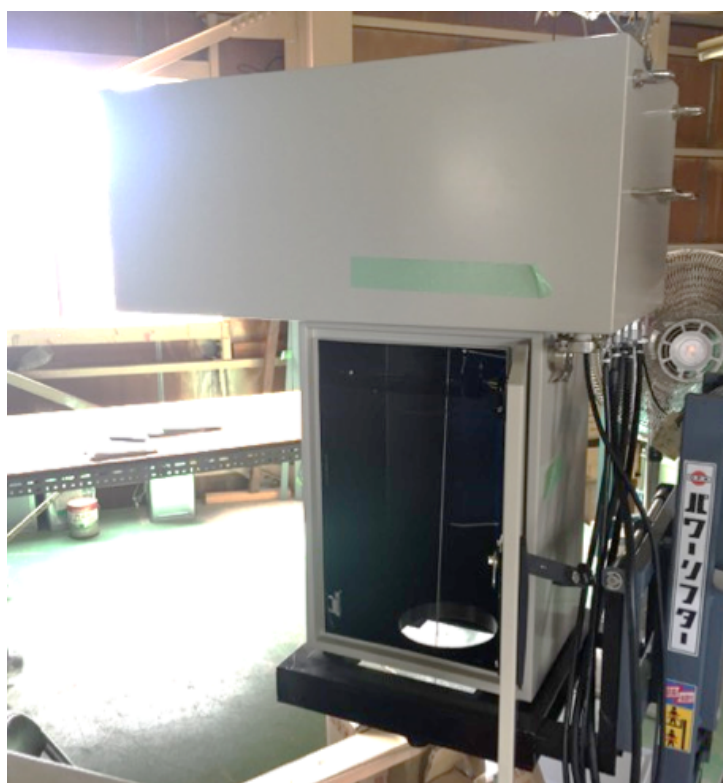


図 3.1 自動較正装置の写真

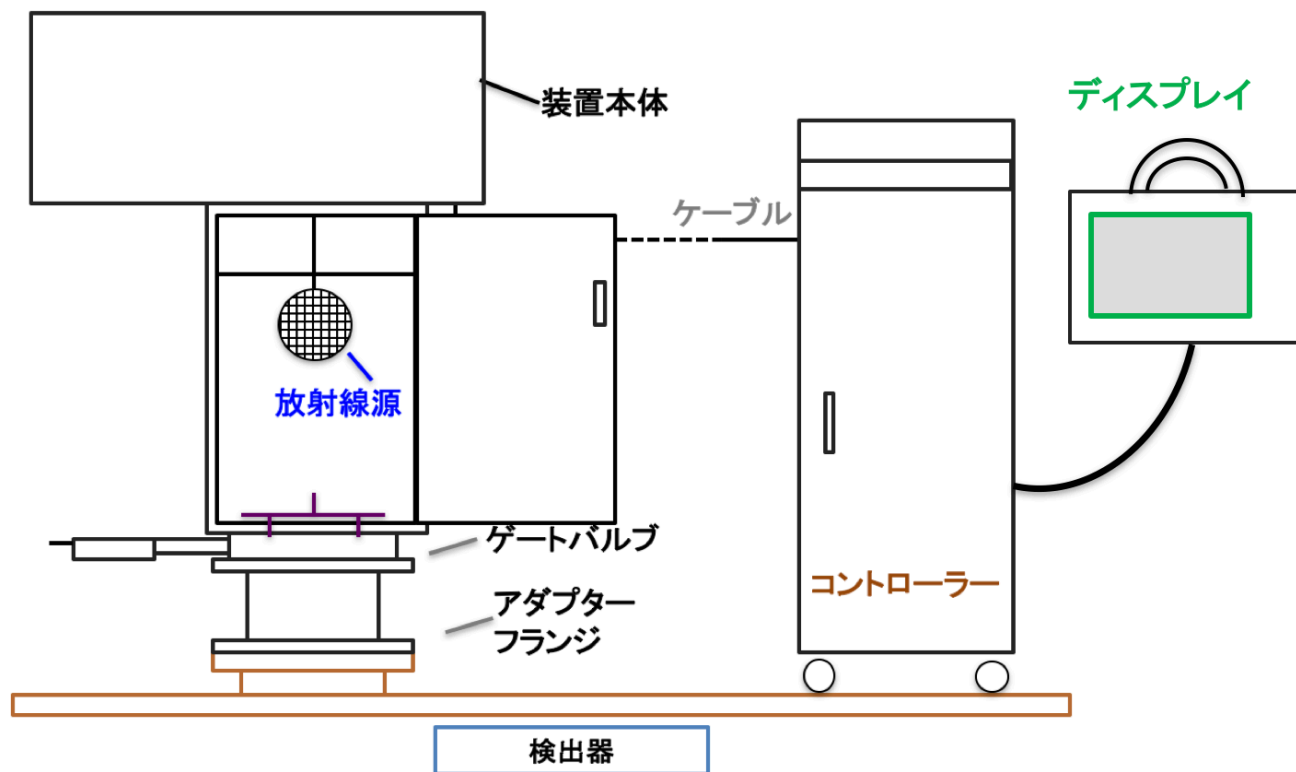


図 3.2 自動較正装置の構成

### 3.2 自動較正装置の概要

装置を開発するにあたっての要請は

- 放射線源を用いた較正を自動化すること
- 検出器に対して安全であること

である。較正を自動化し手動作業をなるべく排除するために、検出器に対して安全であること、つまり検出器に物を落としたり、装置を通して光漏れしたりしないことがより重要となる。そのため本装置は種々の安全装置を搭載し、様々な状況で検出器に悪影響を及ぼさないよう工夫が施されている。本節では装置の基本的な仕様と各安全装置の詳細を記す。

自動較正装置の写真と構成、装置本体の詳細を図 3.1、図 3.2、図 3.3 に示す。装置は主に巻取り装置が搭載された部分、放射線源の着脱を行うソースコンテナと呼ばれる部分、そして装置と検出器の間で開閉することで運転時以外検出器を遮光する、ゲートバルブから構成される。ハイパーカミオカンデ検出器の上部、検出器較正用の穴に装置を設置し、ワイヤーにより放射線源を上下させて水タンク内部に配置する。

巻取り装置はワイヤードラムとスライダから成り、ドラムの回転と連動してスライダがドラムを平行移動させることにより、常に一定の位置からワイヤーの送り出し、巻取りを行いながら線源を上下させる。巻取り装置の概観を図 3.4 に示す。巻取り装置が搭載された部分は、試験時などに挙動が確認できるように上部に扉が設置されている。現在搭載されているワイヤーの長さはスーパーカミオカンデ用の 35 m であり、何らかの事故によりワイヤーが伸び切ってしまった場合でも、検出器の水タンク底面の光センサーに放射線源が当たらないような長さに設計されている。ワイヤーはタンク内の超純水に悪影響を与えないようオイルフリーのもので、被膜は現在スーパーカミオカンデで用いられている装置のワイヤーと同様のものを用いている。



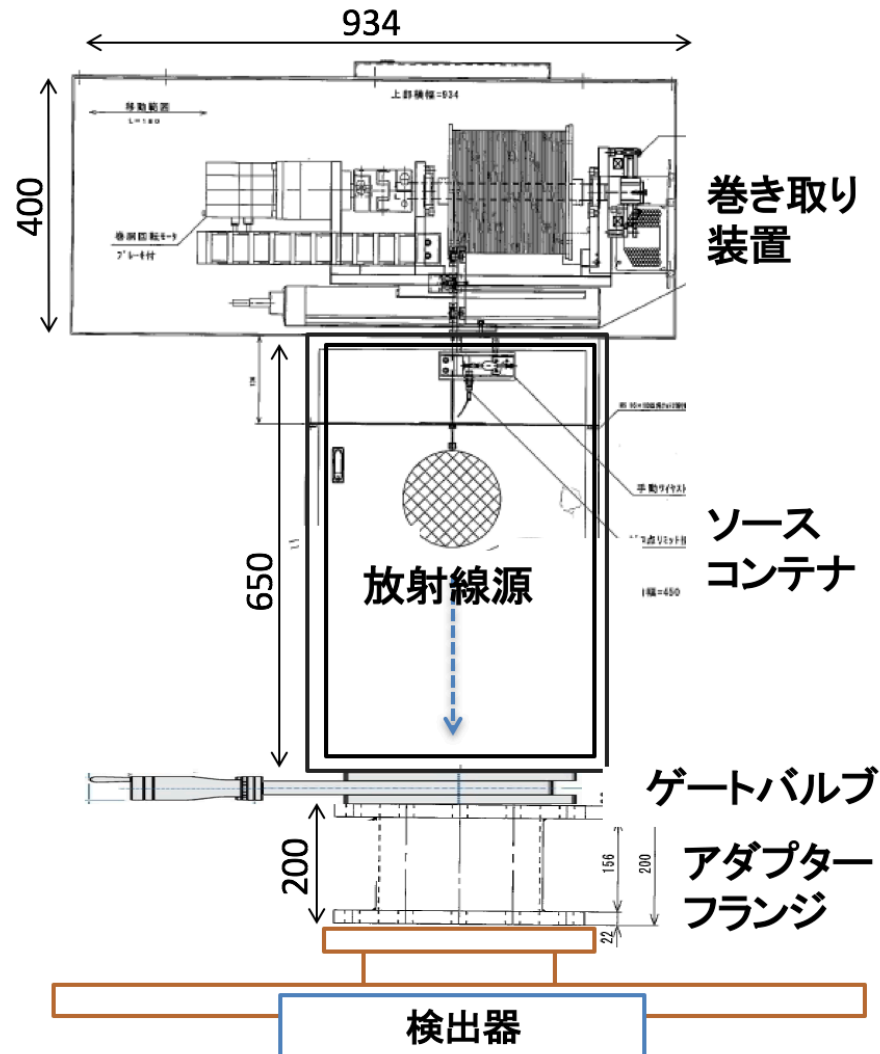


図 3.3 自動較正装置本体の詳細

放射線源の上昇、下降速度は  $1 \sim 100 \text{ cm/s}$  の範囲で調整可能である。これにより、放射線源が検出器上部の穴を通る際や、タンク内で着水する際などの、精密さが求められる場所では速度を小さく、タンク内を上昇、下降させる際には速度を大きくするなどの調整ができる。

ステッピングモーターとワイヤーの詳細を以下に記す。

- ステッピングモーター詳細
  - モーター：オリエンタルモーター株式会社 ARL98AAC-N50-1 (最大  $60 \text{ N} \cdot \text{m}$ )
  - ドラム径：20 cm
  - 最大出力：300 N = 30.6 kg
- ワイヤー詳細
  - 材質：SUS304 製 直径 2 mm
  - 皮膜：ナイロン 12 製 0.2 mm 厚
  - 使用荷重：120 kg
  - 破断荷重：358.0 kg

ソースコンテナ部分は前面に扉があり、運転の前後にゲートバルブを閉じた状態で扉を開き、放射線源の着脱を行う。最上部にはゼロ点調整のためのセンサーを搭載している。センサーの概要と写真を図 3.5 に示す。ワイヤーに取り付けた金具によって金属板が持ち上げられ、センサーが開放されることによって線源が最上点

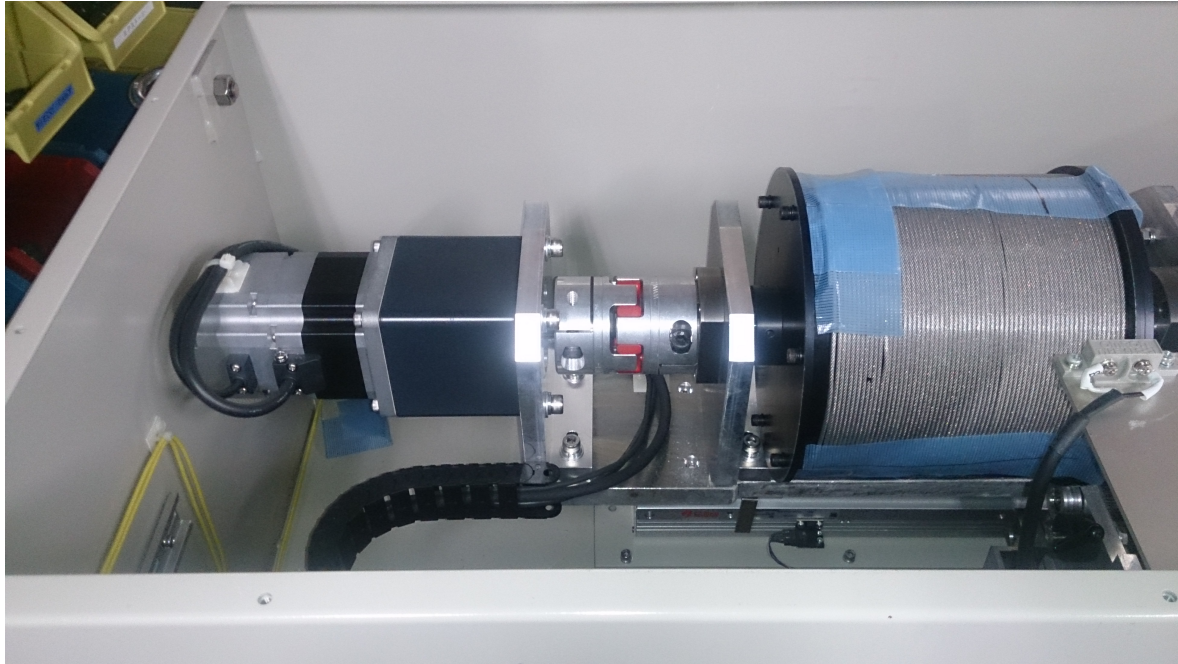


図 3.4 巻取り装置の概観。ドラムには試験用にテープが巻かれている。

にあることを検出する。運転前にゼロ点調整の操作を行うと低速でワイヤーを巻き上げ、センサーが動作した位置で停止、そこから一定量ワイヤーを下ろすという動作を行う。これによって常に同じ位置から運転を開始することができる。また運転後に放射線源が戻ってきた際にも自動で同じ動作を行うことで、放射線源が戻ってきていることを扉を開けずに確認すると同時に、同じ位置で次の運転に向けて待機する。

ゲートバルブはハンドル部分を手で回して開閉を行う。自動較正装置と接続しており、装置によって開閉の状態が監視されている。ゲートバルブの写真と概要を図 3.6 に示す。

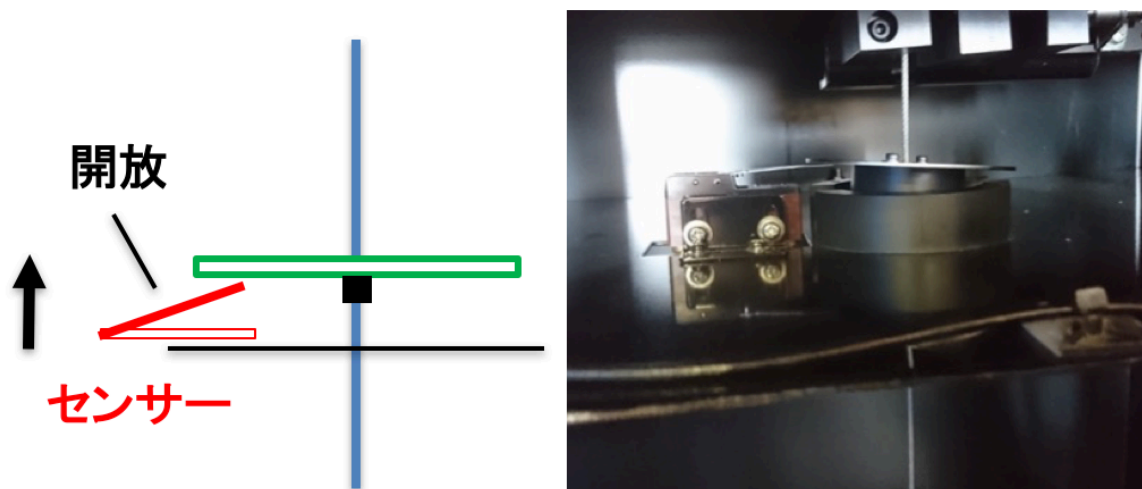


図 3.5 ゼロ点調整センサーの概要。ワイヤーに取り付けた金具によって金属板が持ち上げられ、センサーが開放されることによって線源が最上点にあることを検出する。製作当初は上部センサーに接触する方式であったが、より信頼性の高いこの方式に変更した。

自動較正装置には、主に 2 種類の運転方法がある。1 つは放射線源を配置する位置、その位置に到達するまでの移動速度をその都度設定し、運転を行う方法、もう 1 つは位置と移動速度、待機時間を予め複数個設定しておき、プログラム制御で一連の運転を行う方法である。以下ではそれぞれ「マニュアル運転」、「プログラム運転」とする。

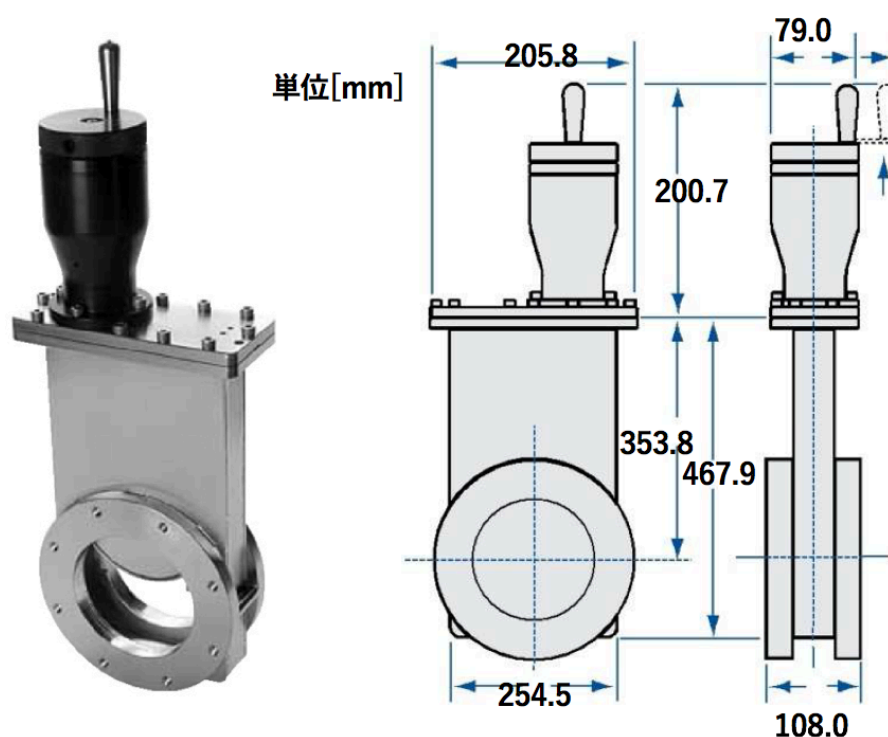


図 3.6 ゲートバルブの写真と概要。

自動較正装置の操作は、装置本体に接続されたコントロールボックスと、タッチパネルのディスプレイで行う。コントロールボックスと、ディスプレイの一例を図 3.7、図 3.8 に示す。ディスプレイ左部は現在の装置のステータスを表しており、上面・前面のドアの開閉、ゲートバルブの開閉、電磁ブレーキ（後述）の状態、エラーの有無をそれぞれ表す。全てのステータスが運転に適した状態になった場合に「Ready」のランプが点灯し、運転を開始できる状態になる。ディスプレイ右部では運転のためのパラメータ（位置・移動速度）の表示、設定を行う。図 3.8 はマニュアル運転の画面を表示している。装置の制御はキーエンス社製のプログラマブルロジックコントローラー（シーケンサ）で行われており、ラダー言語で記述されている。

また、本装置の各部には検出器を安全に保つために安全装置が搭載されている。安全装置にはそれ単体でメカニカルな事故を防ぐ機能を持つものだけでなく、運転中の様々な状況を想定して、複数の機能の連携によって働くものもある。以下ではこれらの安全装置について記す。

- 電磁ブレーキ

電流遮断時にワイヤードラムが回転しないようにするためのブレーキ。装置本体の電源がオフの状態、ドラムの回転を防ぐ役割を担っている。装置本体の電源をオンにした後、運転前にコントロール画面から操作することによって解除する。

- モーター内ブレーキ

電磁ブレーキを解除した状態で、意図しないワイヤードラムの回転を防ぐ役割をする。通電時は、運転中以外常に動作している。

- スライダーリミットスイッチ

巻取り装置のスライダーが動く範囲を制限するスイッチ。設定のミスなどにより、通常の動作範囲では到達しない部分までスライダーが動いてしまうと、ワイヤー等の部分に負荷がかかる可能性があるため、これを防ぐ。リミットスイッチを設置した部分にスライダーが到達すると、アラームが鳴り運転が停止する。

- テンションセンサー





図 3.7 コントロールボックスとディスプレイ。製作当初、ディスプレイはコントロールボックスに埋め込まれており画面も小さかったが、視認性に配慮して画面を大型化、さらに手持ちできるように変更した。

ワイヤーにかかる重量の下限、上限を設定することができるセンサー。放射線源を上昇、下降させる際に検出器の構造などに引っかかると、それを検出してアラームが成り、運転が停止する。構造を図 3.9 に示す。バネで上下する金具によってワイヤーが支えられており、ワイヤーに負荷がかかったり緩んだりすると金具が上下することによってテンションの変化を検知する。

- ドアロック  
ゲートバルブと連携しており、ゲートバルブが開いている場合に扉が開かないよう、自動的にドアにロックをかける。
- 光センサー  
ソースコンテナ内に光センサーを搭載し、運転前にその応答を見ることで、常に光漏れが無いか、正しく遮光できているかを確認する。
- 非常停止ボタン  
人為的なミスなど、あらゆる不測の事態に備えて非常停止ボタンが搭載されている。操作するとアラームが鳴り、行われている運転を強制的に停止する。

### 3.3 光漏れ測定

本装置を運用するにあたって、装置を通して検出器に光漏れしないことが重要となる。装置の扉を閉めた状態でゲートバルブを開けて運用するため、装置の外部から内部に光漏れしないようにする必要がある。装置内部への光漏れ箇所を特定し、対策すべき場所を確認するため、光電子増倍管を用いた試験を行った。

試験は装置のソースコンテナ内部に光電子増倍管を配置して、光子を計数する方法で行った。試験には 2 インチ光電子増倍管を用いた。光電子増倍管の仕様と測定時の設定は以下の通りである。また配置の様子を図



図 3.8 コントロール画面の一例。図はマニュアル運転の画面。ディスプレイの変更に伴い、利便性・視認性の向上を目的として、当初は単色であった画面をカラー化、ボタン配置などデザインを一から行った。

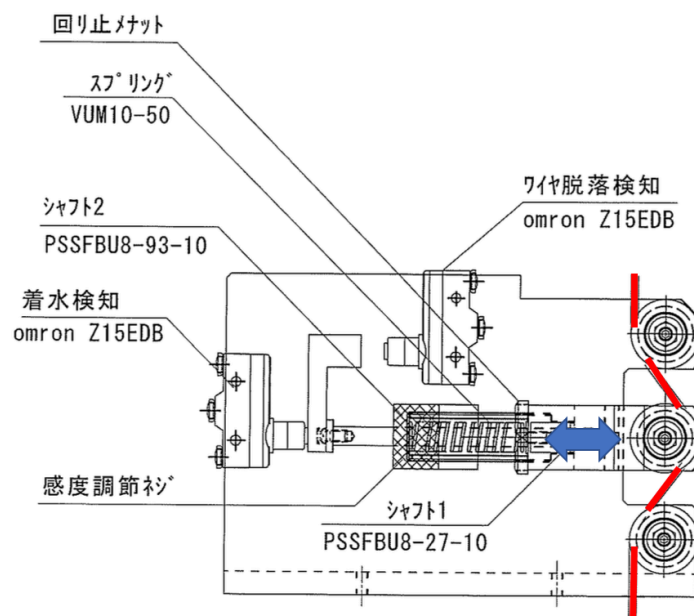


図 3.9 テンションセンサーの構造。赤線はワイヤーを示している。

3.10 に示す。

- 光電子増倍管の仕様
  - 型番：H1161-50（浜松ホトニクス社製）
  - 口径：51 mm
  - 感度波長：300 nm - 650 nm
  - 最大印加電圧：2700 V
- 測定時設定

- 印加電圧：1700 V
- 閾値：約 75.0 mV



図 3.10 光漏れ確認試験のセットアップ。ソースコンテナ内部に 2 インチ光電子増倍管を設置している。

装置の外部から黒シートやビニールテープで部分的に遮光しながら、それぞれの場合の内部での光子数を計測し、光漏れをしている箇所を確認した。遮光の一例を図 3.11、図 3.12 に示す。



図 3.11 前面ドアの縁を黒シートとビニールテープで遮光している様子。この状態で内部に光電子増倍管を入れて光子数を計測する。

試験では光電子増倍管のダークレートの変動が大きく（約 500 ~ 2000 Hz）、定期的にダークレートを測定しながら相対的な差を見積もった。対策を施す前の状態では、光電子増倍管のダークレート約 1 kHz に対し 30 kHz 以上の光漏れが測定された。そこで前面扉取手部だけを遮光して測定すると約 7 kHz にまで光漏れが減





図 3.12 上面ドア全体を遮光している様子。

少、さらに前面扉全体を遮光して測定すると約 2 kHz まで減少した。この結果から、前面のドアの縁と取手部（図 3.13 参照）からの光漏れが最も多いということがわかった。また前面ドアより極端に少ないためその効果は見えないが、上面ドアからも光漏れしている可能性があるため、これらへの対策としてまず両ドアの取手部裏側を黒色のパテで埋めた。その様子を図（3.14）に示す。この状態でその他の遮光なしで測定した場合と、取手部を外側から遮光した場合で比較しても差が見られなかったことから、取手部の遮光は完了し、残りの光漏れは扉の縁からであると結論付けた。

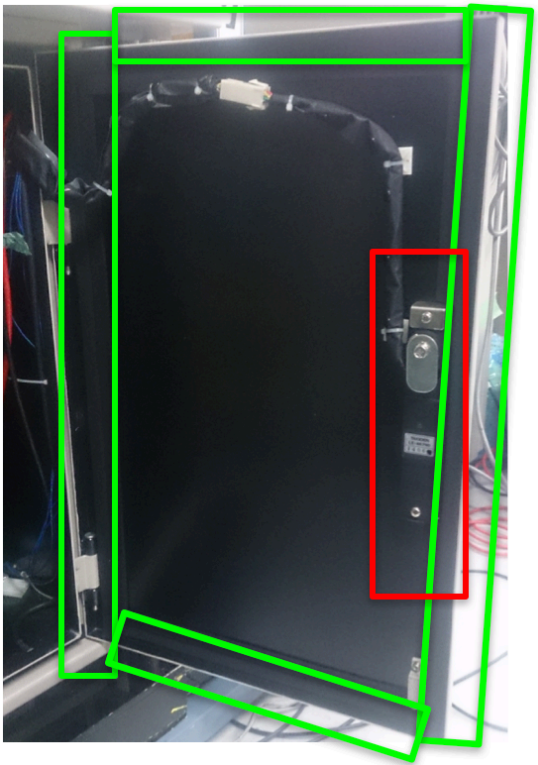


図 3.13 光漏れが多いドアの縁（緑色）と取手部（赤色）。



図 3.14 ドア取っ手部の裏側をパテで埋めた様子。上面、前面のドアともに同様の処置が施されている。図は前面のドア。

ドアの縁へは、スポンジテープを内側に貼る等の対策を行ったが、開閉を行う関係上完全な遮光は難しく、運用時はドア部を黒シートで覆うという方法で対策をすることに決定した。

## 3.4 運転試験

自動校正装置の導入に向けて、動作や安全性の確認、また必要なデータの収集のため、様々な運転試験を行った。これらの試験の結果を受けてアップデートを施したものが、現在の自動校正装置の仕様となっている。以下に試験の一覧と概要を示す。

- 短距離での動作確認試験

基本的な動作の確認のために、3 m 程度の高さで約 8.5 kg と約 6 kg のおもりをそれぞれ吊るし、プログラム運転でおもりを上下させた。30 cm/s, 60 cm/s, 100 cm/s でそれぞれ試験し、設定した位置、速度で運転可能であることを確認した。また、同様の設定で複数回おもりの配置を行った際の再現性は約 ± 1 mm 程度と非常に良い結果を得た。

- 安全装置試験

各安全装置が正しく動作することを確認するための試験。詳細は 3.4.1 節に記す。

- 水中での長距離運転試験

ワイヤー長 30 m でのマニュアル運転の動作の確認と、水槽内での動作の確認、またプログラム運転に必要なパラメータの取得とプログラム運転の試験を目的として、深水槽で試験を行った。プログラム運転の際に問題が発生、以後の試験を行うことが困難となったため、後に再度長距離での運転試験を行った。詳細は 3.4.2 節に記す。

- 長距離運転試験

過去の試験の結果からソフトウェア、ハードウェアの改良を行い、ワイヤー長 30m での運転ができることを再度確認するために長距離運転試験を行った。詳細は 3.4.3 節に記す。

### 3.4.1 安全装置試験

自動校正装置を安全に運用するために搭載されている安全装置が正しく動作することを確認するために試験を行った。セットアップを図 3.15 に示す。装置を台座に乗せ、必要に応じて最大 1 m 程度の高さで上部から貨物用クレーンで固定し、その状態で試験を行った。試験には新ニッケル球（3.4.2 節参照）を用いた。

試験は、個々の安全装置がそれぞれ働くことの確認を行った後、実際の運用の流れの中で複数の安全装置が連携して働くことを試験する、という順で行った。

個々の安全装置の確認について、行った事項と結果を以下に記す。

- 電磁ブレーキ

電源オフ時に 10 kg 程度の負荷をかけ、ドラムが回転しないことを確認。正常に動作していることを確認した。

- モーター内ブレーキ

電磁ブレーキ解除時に 10 kg 程度の負荷をかけ、ドラムが回転しないことを確認。正常に動作していることを確認した。

- リミットセンサー

運転によりスライダを動作させ、リミットセンサーの設定位置まで来るとエラーを出して運転が停止することを確認。正常に動作していることを確認した。

- テンションセンサー

運転中にワイヤーをたるませたとき（おもりが地面についたとき）に運転が停止することにより、ワイヤーのテンションが下がった際に正しく動作することを確認。また、ワイヤーを引っ張って負荷をかけ



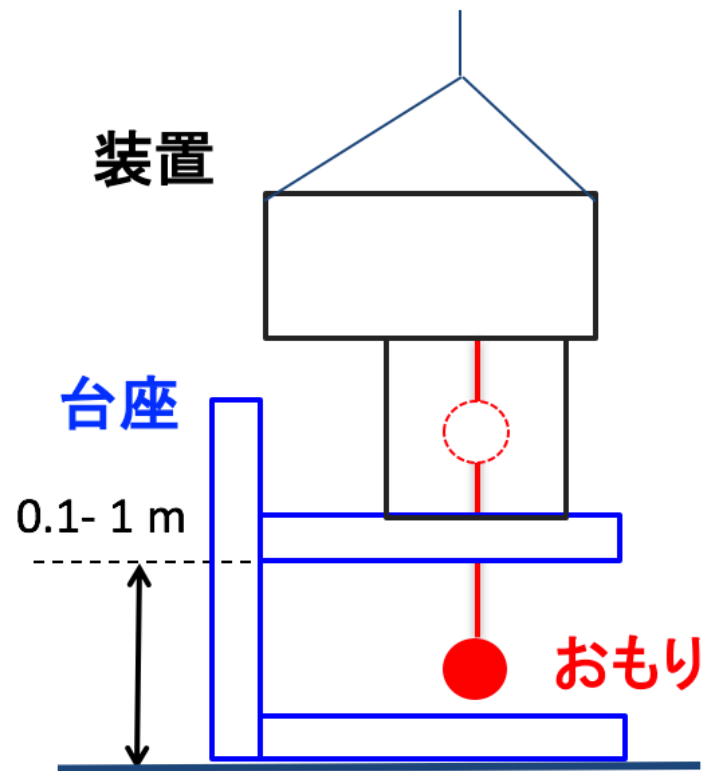


図 3.15 安全装置試験のセットアップ。おもりには新ニッケル球を用いた。

た際に運転が停止することにより、ワイヤーのテンションが上がった際に正しく動作することを確認。

次に複数の安全装置の連携試験のため、運用の流れを表にまとめた。運用者が行う操作、装置のステータス、システムによる操作や次ステップに移る条件をそれぞれ区別し、装置が期待通りの動作を行うかどうか、また装置のステータスに応じて本来すべきでない操作を行った場合に、期待通りのエラーを出すかどうか、の2項目をチェックリスト方式で確認した。例としてチェックリストを図 3.16, 3.17 に示す。

この試験の結果、安全装置が正しく働くことを確認した。

### 3.4.2 水中での長距離運転試験

東京都、三鷹市の海上技術安全研究所にある深海水槽（図 3.18）という施設を用いて、水中での長距離運転試験を行った。

試験の主な目的は、ワイヤー長 30 m での運転試験、水中での線源の挙動測定、プログラム運転に必要なパラメータの取得、およびプログラム運転試験である。スーパーカミオカンデの上面に開いている較正用の穴には、較正源をタンク内に入れる際にタンク上面の光電子増倍管に較正源が当たらないよう、ガイドのために直径 22 cm、長さ約 3 m のパイプが取り付けられている。線源を下ろす際と引き上げる際にこのパイプにぶつからないための速度や、そのために揺れがおさまるまでの待機時間といったパラメータを取得しておく必要がある。

深海水槽とは、最大直径 16 m、最深部は直径 5 m の円形水槽部と深さ 35 m の深海ピット部により構成されており、円形水槽外周の造波装置と水槽内部に設置された潮流発生装置により、様々な波や潮流を人工的に発生させることができる施設である。水槽の断面図を図 3.19 に示す。

水中には複数のカメラが設置されており、対象物の位置を映像から約 4 mm の精度で算出できる挙動計測装置が搭載されている。今回はこの挙動計測装置を用いて、ニッケル球の挙動を計測した。

本試験に使用したニッケル球はパイプによりぶつかりにくくするため新たに作成されたもので、現在スーパーカミオカンデで用いられているものより小型な、直径 16 cm、重量 3.5 kg のものである（図 3.20）。

使用Firmware: 170713				
作業内容, チェック内容	期待の動作をした	期待のエラーを出した		期待の動作をした
1. 通電開始 ① (装置の全ての扉がロックされていること、ゲートバルブが閉まっていることを確認, 青:ユーザー操作) ② 上記が確認できた場合以下の操作が可能となる。赤:次ステップに移る条件等			5. 線源下降準備 ① ゲートバルブが閉まっていることを監視 (開いたらアラーム) ② (光センサーの出力電圧が一定以下であることを監視) ③ ワイヤテンションが設定範囲内であることを監視 ④ ステッピングモーター、スライダーを操作し、ゼロ点調整を行う。 ⑤ ゼロ点から一定値(数cm)線源を下げる。 ⑥ 状態を表示する。例: “ゼロ点調整完了。”	
2. 線源コンテナオープン ① 線源コンテナのドアのロックを解除。			6. ゲートバルブオープン ① 装置の全ての扉が閉まっており、ロックされていることを監視 (開いたらアラーム) ② (光センサーの出力が一定以下であることを監視) ③ ワイヤテンションが設定範囲内であることを監視 ④ ゲートバルブを開ける。 ⑤ ゲートバルブが開いていることを監視 (操作されたらアラーム) ⑥ ゲートバルブが開きはじめてから一定時間に全開にならなければアラーム ⑦ ゲートバルブが開いている場合以下の操作にうつる。	
3. 線源取り付け ① ゲートバルブが閉まっていることを監視 緑:システム内の安全ステータス。満たされない場合はアラームを発報 ② 線源コンテナのドアをあける。 ③ 線源コンテナ内の蓋を確認。 ④ Ni/Cf線源をワイヤー先端に取り付ける。 ⑤ ワイヤホルダーを解除する。 ⑥ 線源コンテナ内の蓋を外す。 ⑦ 線源コンテナのドアを閉じる。 ⑧ 目的の線源位置を入力する。 (光センサーの出力電圧が一定以下であることを確認。) 現仕様では自動校正装置ではなく、人間が操作開始時に確認。			7. 線源下降 ① 装置の全ての扉が閉まっており、ロックされていることを監視 ② (光センサーの出力が一定以下であることを監視) ③ ワイヤテンションが設定範囲内であることを監視 ④ ゲートバルブが開いていることを監視 ⑤ ステッピングモーター、スライダーを操作し、ワイヤー先端の線源を指定位置まで降下させる。この際、速度と位置を自動調整可能であること。 1. 自動化にあたっては、装置下端から1mの範囲では0.01m/s、1m-5mの範囲では0.3m/s、5mから設定点までは0.3m/sで線源を移動させるものとする。 2. 上の設定値(1m, 5m, 0.01m/s, 0.1m/s, 0.3m/s)は可変であること。 ⑥ 指定位置まで降下させた後、以下の線源保持に移る。	
4. 線源コンテナクローズ ① ゲートバルブが閉まっていることを確認 ② パネルで『運転開始』操作を行う。(Brake 解除) ③ 電磁ブレーキ(独立)解除。 ④ (光センサーの出力電圧が一定以下であることを監視) ⑤ スライダー用リミットスイッチを監視				

図 3.16 安全装置試験のためのチェックリスト (前半)。青字は運用者が行う操作、緑字は装置のステータス、赤字はシステムによる操作や次ステップに移る条件を表す。

装置のセットアップを図 3.21 に示す。スーパーカミオカンデの校正用の穴についているパイプを再現するため、直径 20 cm、長さ約 1 m の PVC パイプを 3 本接続して設置した。また、水中には挙動計測装置とは別にカメラを設置し、視覚的にもモニターを行った (図 3.22, 3.23)。

パラメータの取得は、マニュアル運転で 5 m の上下と 30 m の上下を 3 回ずつ行い、その様子を観察、および挙動計測装置によって測定することで行った。この運転の様子を直接の目視とカメラの映像から観察し、着水の際にたるまないことや振動の様子などを考慮して、運転の速度を表 3.1 のように決定した。位置については、運転開始時の装置ソースコンテナ内のニッケル球の位置を 0 m としている。

表 3.1 試験より決定した線源の移動速度。0 m は運転開始時の装置ソースコンテナ内の線源の位置。

状態	範囲	速度
水中に沈むまで	0 - 1 m	1 cm/s
パイプから出るまで	1 - 5 m	3 cm/s
タンク内	5 - 30 m	30 cm/s

この決定した速度でマニュアル運転を行い、挙動計測装置による測定を行った。その測定結果を図 3.24 に示す。

図の縦軸は上から順に Z, X, Y 方向の挙動、横軸は経過時間を表している。パイプを出た時点から再度パイプに入るまでの挙動が記録されており、3 cm/s の速さで約 5 m の地点まで下降、約 150 秒の待機をした後に

作業内容、チェック内容	期待の動作をした	期待のエラーを出した	期待の動作をした	期待のエラーを出した
<b>8. 線源保持</b> ① 装置の全ての扉が閉まっており、ロックされていることを監視 ② (光センサーの出力が一定以下であることを監視) ③ ワイヤータンションが設定範囲内にあることを監視 ④ ゲートバルブが開いていることを監視 ⑤ 線源を指定位置に保持する。 ⑥ (次の状態に移るため、線源を維持する時間はあらかじめ設定するものとする。)			<b>12. ゲートバルブクローズ</b> ① 装置の全ての扉が閉まっており、ロックされていることを監視 ② (光センサーの出力が一定以下であることを監視) ③ ゲートバルブを閉じる。 ④ ゲートバルブが閉じていることを確認。 ⑤ 装置の全ての扉のロックを解除する。 ⑥ ゲートバルブが閉じている場合以下の操作にうつる。	
<b>9. (線源移動)</b> ① 装置の全ての扉が閉まっており、ロックされていることを監視 ② (光センサーの出力が一定以下であることを監視) ③ ワイヤータンションが設定範囲内にあることを監視 ④ ゲートバルブが開いていることを監視 ⑤ ステッピングモーター、スライダを操作し、ワイヤー先端の線源を指定位置まで降下させる。			<b>13. 線源コンテナオープン</b> ① ゲートバルブが開まっていることを監視	
<b>10. 線源巻上</b> ① 装置の全ての扉が閉まっており、ロックされていることを監視 ② (光センサーの出力が一定以下であることを監視) ③ ワイヤータンションが設定範囲内にあることを監視 ④ ゲートバルブが開いていることを監視 ⑤ ステッピングモーター、スライダを操作し、ワイヤー先端の線源をゼロ点まで上昇させる。 ⑥ ゼロ点まで線源を上昇させた後、以下の終了処理に移る。			<b>14. 線源取りはずし</b> ① ゲートバルブが閉まっていることを監視 ② 線源コンテナのドアを開ける ③ 線源コンテナ内の蓋を取り付ける。 ④ ワイヤホルダーをロックする。 ⑤ Ni/Cf線源をワイヤー先端から取り外す。 ⑥ 線源コンテナのドアを閉じる。 ⑦ 次の線源降下がある場合、それに備える。	
<b>11. 線源巻上終了</b> ① ゼロ点ランプを確認し、ランプがついていなければゼロ点調整を行う。 ② 装置の全ての扉が閉まっており、ロックされていることを監視 ③ (光センサーの出力が一定以下であることを監視) ④ ワイヤータンションが設定範囲内にあることを監視 ⑤ ゲートバルブが開いていることを監視 ⑥ ステッピングモーター、スライダを操作し、ゼロ点調整を行う。 1. スライダ用リミットスイッチを監視 2. ゼロ点スイッチの故障対策として、ゼロ点からの巻き上げ量が一定値を超えると停止する。巻き下げ長さ、巻き上げ長さをそれぞれ記憶し、その差が[設定値]cmを超えた場合、警報を発生する。			<b>15. 線源コンテナクローズ</b> ① ゲートバルブが閉まっていることを監視	
			<b>16. 通電終了</b> ① 装置の全ての扉をロックする。	

図 3.17 安全装置試験のためのチェックリスト(後半)

30 m 地点まで 30 cm/s の速さで下降している。その後約 5 m の地点まで 30 cm/s で上昇、パイプに当たらないように十分振動が収まるのを待った後、3 cm/s の速さで引き上げている。

X, Y 方向の挙動を見ると、ニッケル球は 30 cm/s の速さで上昇、下降しているときに最も振動しており、X, Y 方向ともに 15 cm 程度の振幅があることが見て取れる。約 1220 秒の時点で 5 m 地点まで引き上げられ停止、この時点では約 5 cm の振幅で振動しているが、その後約 120 秒の間に振幅は約 1 cm 程度まで収まっている。その後 3 cm/s で引き上げる際にも振幅は増加せず、パイプと接触すること無く引き上げを完了した。スーパーカミオカンデのパイプ径 22 cm に対しニッケル球の直径 16 cm であることから、待機時間約 2 分、引き上げ速度 3 cm/s で十分に安全であると判断し、これを採用した。

プログラム運転では、5m 地点までの上昇、下降では問題は発生しなかった。しかし、30m 地点までの運転では引き上げ時にワイヤーの絡まりが発生(図 3.25)した。これはドラムの回転とスライダの動作の同期がソフトウェアのバグによりずれていたことが原因で、短距離の試験では問題がなかったが、そのずれが大きくなる長距離での運転試験により問題が表面化した。このバグは現在では既に修正されており、後の長距離試験で正常に動作することが確認されている。

### 3.4.3 長距離運転試験

過去の試験の結果からソフトウェア、ハードウェアの改良を行い、ワイヤー長 30m での運転ができることを再度確認するために長距離運転試験を行った。岐阜県飛騨市神岡町に防災科学技術研究所と東京大学地震研究所が共同で所有している、直径 15 cm、深さ 350 m の試錐孔を借りて試験に使用した(図 3.26)。試験には



図 3.18 海上技術安全研究所の深海水槽

直径 12 cm、重さ 1 kg のおもりを用いた（図 3.27）。

屋外のため、C チャンネル 2 本を渡してその上に自動較正装置を設置、クランプと貨物固定用ベルトを用いて装置を固定した。セットアップの様子を図 3.28 に示す。

20 回以上の長距離運転試験を行った結果、マニュアル運転、プログラム運転の双方において問題は発生しなかった。



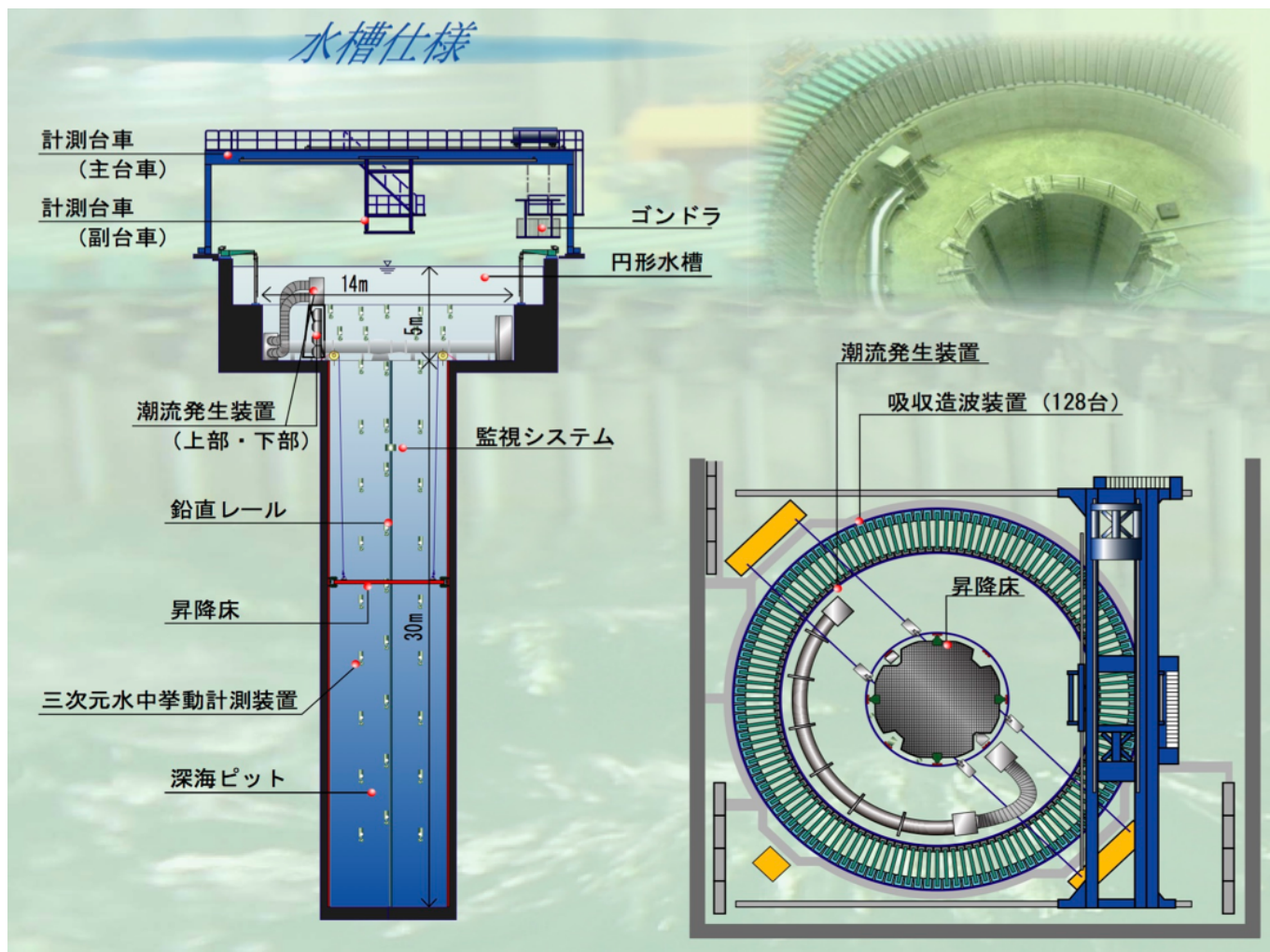


図 3.19 深海水槽の断面図



図 3.20 試験に用いた小型ニッケル球。直径 16 cm、重量 3.5 kg。挙動計測装置のため、表面には青いテープが貼り付けてある。

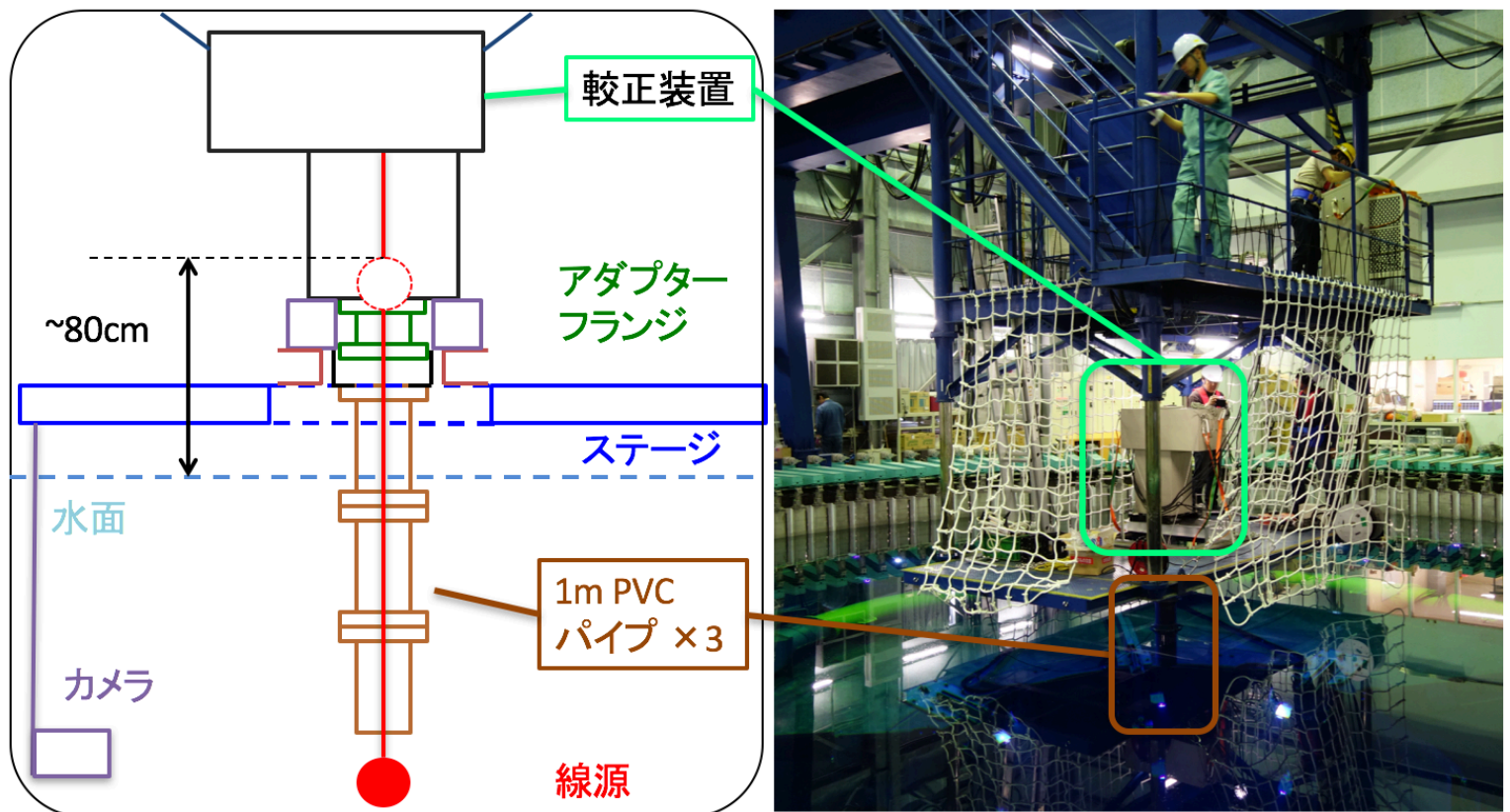


図 3.21 深海水槽試験のセットアップ。左図はセットアップの模式図、右図は実際の写真。

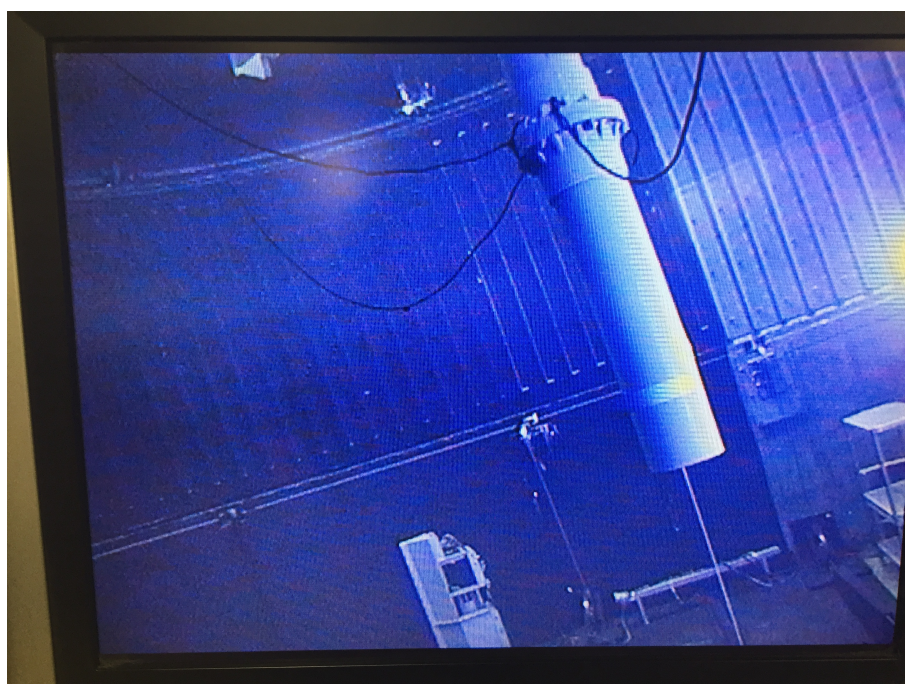


図 3.22 カメラによる水中の視覚的なモニターの様子。パイプの先端を真横から写している。



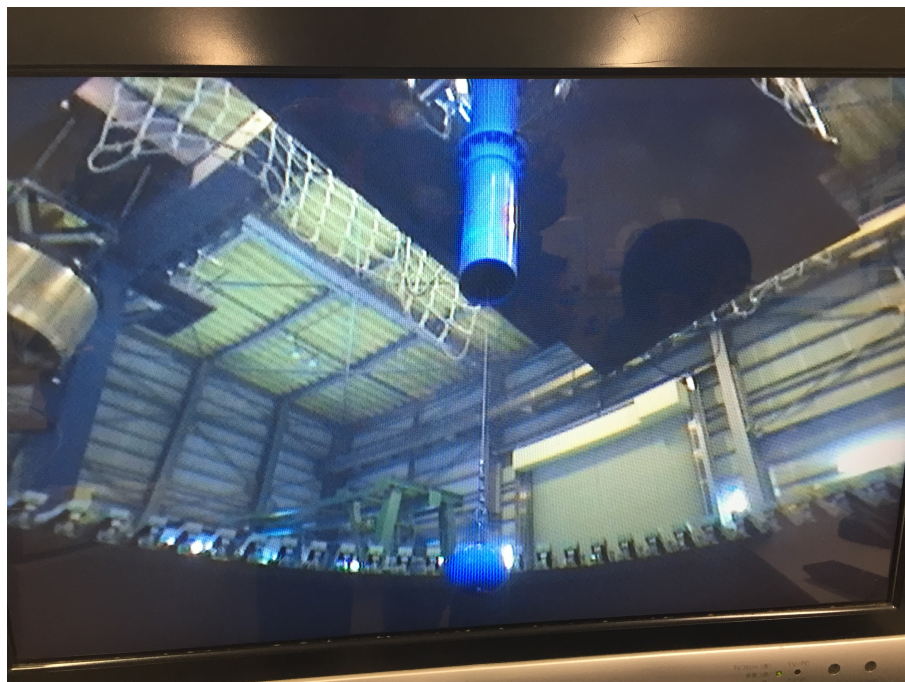


図 3.23 別のアングルからのモニターの様子。こちらはパイプに入る様子が見えるよう少し下から写している。



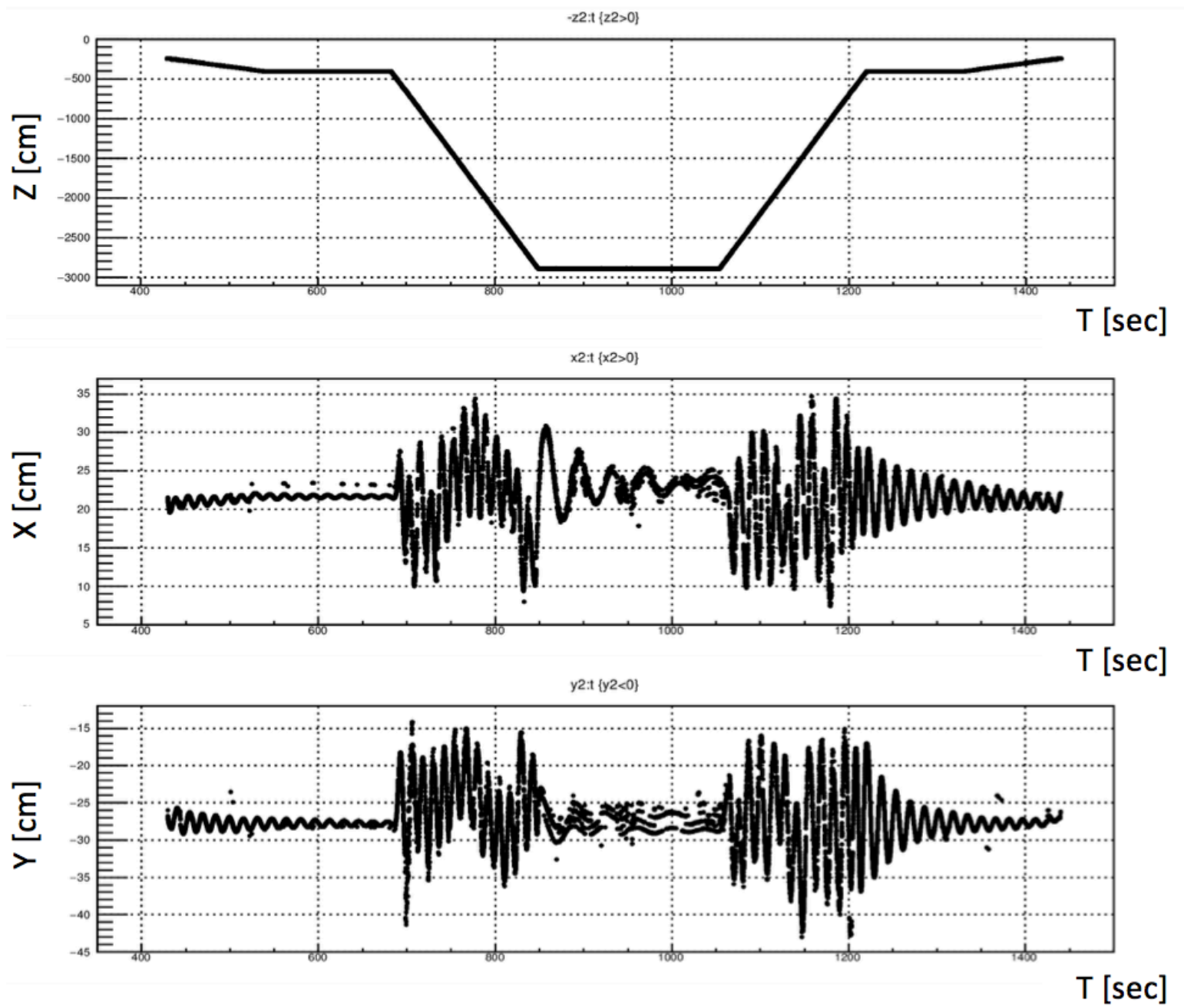


図 3.24 拳動計測装置による測定結果。縦軸は上から順に  $Z$ ,  $X$ ,  $Y$  方向の拳動、横軸は経過時間を表している。

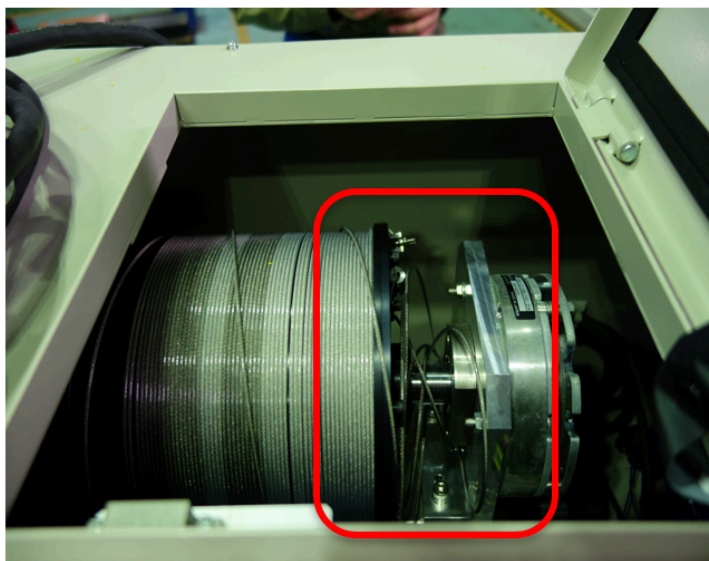


図 3.25 プログラム運転で発生したワイヤーの絡まり。本来ドラムに巻かれるべきワイヤーがドラム以外の部分に巻かれている（赤枠）。



図 3.26 神岡にある試錐孔。直径 15cm、深さ 350m。



図 3.27 長距離運転試験に用いたおもり。直径 12cm、重さ 1kg のものを 1 枚または 2 枚重ねて使用した。



図 3.28 長距離運転試験のセットアップ。C チャンネルと装置の間をクランプで固定し、貨物固定用ベルトで四方を固定している。

## 第4章 議論及び結論

### 4.1 議論

自動校正装置の開発において、第一の目標は放射線源を自動で配置することである。複数回の運転試験を通して放射線源の上昇・下降に関する問題は解決された。マニュアル運転、プログラム運転の双方において、短距離・長距離での繰り返し運転で問題なく動作していることから、この目標の大部分は達成されたと言える。

放射線源を配置する際に重要な要素のひとつに、位置の精度がある。位置精度の目標は $\pm 5$  mm である。これは検出器の位置再構成の分解能が数 cm 程度であることから定められた。装置自体の位置再現性は $\pm 1$  mm 程度と良い結果を得ているが、その他の要素で絶対的な位置が意図した配置場所からずれる可能性が存在する。

そのうちのひとつの理由として考えられるのが、ワイヤードラム一周あたりのワイヤーの長さの正確さである。

本装置はドラムの円周と回転数から位置の計算を行っているため、計算上の数値と実際送り出されたワイヤーの長さに差異があると、配置場所に誤差が生じる。本装置ではワイヤードラムの直径は正確に測定されているが、実際に巻かれているワイヤーの長さ、位置の計算に用いている値に差が存在する可能性がある。この差自体は小さなものであるが、30 m の運転では約 12 回転、同様のワイヤードラムで運用を行うと、ハイパーカミオカンデの 60 m では 20 回転以上するため、位置精度の不確定性は大きくなる。その他にも、経年によるワイヤーの伸び、放射線源を外した際や異なる校正源を使用した際の重さの違いから来るワイヤー巻きのゆるみなど、様々な要素に配置精度は影響を受ける。こういった要素を考慮に入れた上での位置精度は、今後測定を行っていく必要がある。

中国、広東省で行われている Daya Bay 実験 [23] では、自動校正装置の精度がワイヤーを送り出すアクリルホイールの直径の正確さから影響を受ける。Daya Bay 実験で用いられている自動校正装置の概観を図 4.1 に示す。そのため、正確に長さの印をつけた校正用ものさしを線源を配置する軸に取り付けることで、ホイールの実効的な直径を正確に見積もっている。こういった形で位置情報の校正を小さな負担でできるようにし、定期的に行うことは、放射線源の配置の位置精度を向上することにつながる。

装置開発のもうひとつの目標は、検出器に対して安全なことである。物を落とさないという点においては、電磁ブレーキ、モーターブレーキ、ゲートバルブが正しく動作していることから、安全対策は十分に出来ていると考えられる。

光漏れの防止については改善の余地がある。現状では装置の一部を黒シートで覆うなどして運用する予定であるが、厳密に遮光するためにはしっかりとテープ等で止める必要がある。そのため、装置の扉部分の光漏れをより簡単に防ぐ事ができれば、本来の装置の目的である、負担を減らすことにつながると考えられる。現在考えられている対策は、磁石等で簡単に着脱を行うことが出来る本装置専用の遮光シートを作成することである。

その他にも、運用時にソースコンテナ内部に光センサーを設置し、運転前・運転中に光漏れが無いかを確認する予定であるが、現在はまだ行っていない。光漏れ試験に用いた 2 インチ光電子増倍管は常にソースコンテナ内に設置しておくにはサイズが大きく（直径 6 mm、長さ約 21 cm）、また高圧電源（ $\sim 2000$  V）が必要なことから、小型の光センサー（図 4.2）の使用を予定している。小型光センサーの主な仕様を以下に記す。

- 型番：H10720-219 浜松ホトニクス製 光センサモジュール
- 受光面サイズ： $\Phi 8$  mm
- 外形寸法：50.0 x 22.0 x 22.0 mm



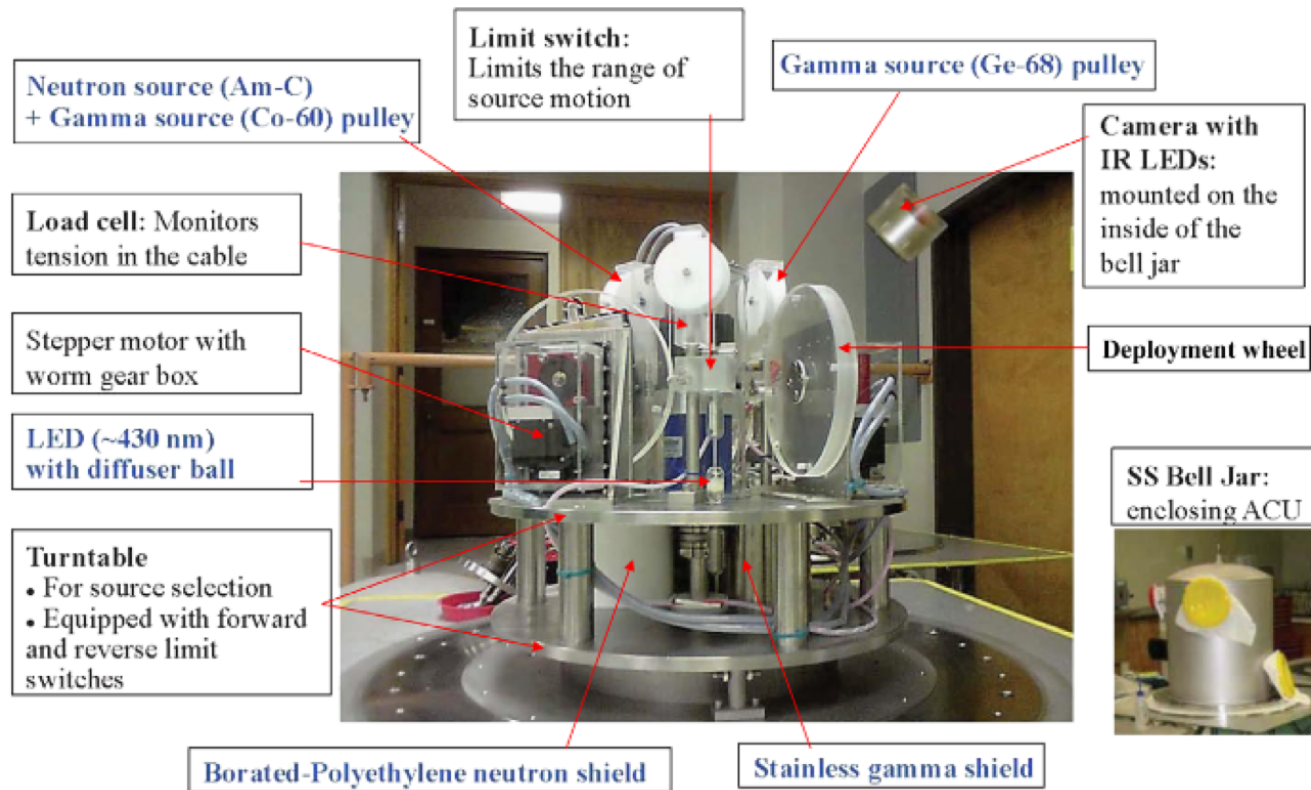


図 4.1 Daya Bay 実験の自動較正装置。複数の較正源を搭載し、アクリルホイールによって送り出す。

- 入力電圧：+2.8 ~ +5.5 V
- 質量：80 g

この光センサーであれば本体が小型・軽量で、電源も低電圧かつ小型のモジュールであるため、運搬が容易で安全である。こちらの光センサーの試験、性能の確認は順次行っている。基本的な動作については問題ないことが確認済みで、今後はその特性や、実際の運用時の適切な設定についても調査していく。



図 4.2 ソースコンテナ内への搭載を予定している小型光センサー。

これらの物品が導入できれば、遮光や光漏れの確認を手軽に行うことができ、光漏れの可能性をより抑えることが出来ると考えられる。

次に本装置を用いて人手・負担を軽減するという面については、一定の効果が期待できる。表 4.1 に現在 Ni 線源の較正に用いられている装置との比較を記す。



表 4.1 現行の較正装置と、自動較正装置の比較

	準備に必要な人数	較正作業に必要な人数	暗室の有無	線源の挿入・引き上げ
現行の装置	4人	2人	有	手動
自動較正装置	2人	1人	無	自動

現行の装置では、暗室を準備するために4人必要となる。自動較正装置は暗室を必要とせず、装置さえ移動させれば良いため必要な人数を2人としてある。しかし実際にはゲートバルブを検出器に設置する際には暗室が必要となる。そのためゲートバルブは常に設置しておく必要があるが、頻繁に較正を行う場所のみそうするのか、複数個のゲートバルブを用いて複数箇所に設置しておくのかは、較正の頻度や他の較正との兼ね合いによって決める必要がある。

装置自体は2人で持ち上げることが可能であるが、長距離を移動することは困難である。現在装置の運搬はキャスター付きのリフターで行っているが、実際の運用時もこれを用いてハイパーカミオカンデのタンク上の移動を行う必要がある可能性がある。タンク上には様々な物品が配置され、ケーブル類も多くあるため、自動較正装置の保管場所や動線の確保については考える必要がある。

較正作業は放射線源の装着、ゲートバルブの開閉、コントロール画面から行う操作のどれも1人で行うことが出来る。安全性の観点から、不測の事態に備えるために複数人が控えていることが望ましいが、作業負担の軽減という面では期待できると言える。

自動較正装置はネットワークケーブルを接続して機能の拡張ができる仕様になっており、将来的にはPC上で遠隔での操作を出来るようにすることが予定されている。実際に全ての操作を遠隔で行うためには、Ni線源を常に装置内に装着しておく必要があるという課題が存在する。その他にも安全性の面から、全ての操作を遠隔で行うことができるかどうかは、スーパーカミオカンデでの実際の運用を行って考える必要がある。

その他今後行う必要があることのひとつに、現行のニッケル球と新ニッケル球(3.4.2節参照)を用いた場合との違いを測定する必要がある。Ni線源は $^{252}\text{Cf}$ が放出した中性子がポリエチレン中でエネルギーを落として熱化、捕獲されることを利用しているため、ニッケル球の大きさの違いによるガンマ線の放出レートの違いなどが無いかを確認しておく必要がある。これについては、現行のNi線源のための較正装置を用いて、新ニッケル球の場合のデータ取得をスーパーカミオカンデで行い、現行のものとの違いを見積もる予定である。

また、ハイパーカミオカンデで現行の装置よりワイヤーが長くなる(30 m → 60 m)ことの影響として、水中での放射線源の挙動の変化を考える必要がある。ワイヤーが長くなった場合、現在決定された放射線源をパイプ内に引き上げる際の、揺れがおさまるまでに必要な待機時間が十分で無い可能性がある(3.4.2節参照)。

これに対する解決方法としてはまず、放射線源の揺れがどのような要素に特に影響を受けるのかを正確に知ることが必要となる。予想される要素としては、巻き上げ開始前のワイヤーの長さ、巻き上げ速度、また巻き上げ開始時の放射線源の中心軸からの変位などが挙げられる。これら要素への依存性自体は、現行の装置でも確認することが出来る。例えば巻き上げ開始前のワイヤーの長さについては、30 m地点からの巻き上げと、10 m地点からの巻き上げでの揺れの差を確認することで調べることが出来る。こういった試験を行うことで挙動をより深く理解し、待機時間を調整したり、段階的に速度を変えるなどして、較正時間の最適化を行うことは重要である。

また異なる解決方法として、テンションセンサーの機能を拡張する方法が考えられる。現在のテンションセンサーは上限、下限を設定し、その範囲を外れた場合に運転を停止するというものであり、運転中にテンションの変化をモニターすることは出来ない。これを、バネの出力を読み出す等の方法でモニターすることができ

れば、ワイヤーテンションの変化から振動の様子を知ることが可能となる。ワイヤーのテンションと振動の大きさの関係を予め調べておけば、テンションの数値を見て十分に振動が収まったことを確認することができる。

## 4.2 結論

ハイパーカミオカンデは、スーパーカミオカンデの後継となる世界最大の水チェレンコフ検出器を用いた実験計画である。258,000 トンの大容量の水タンクを活かした大統計により、CP 対称性の破れの探索、ニュートリノの質量階層性の決定、太陽ニュートリノのエネルギースペクトルの精密測定など、様々な課題に挑む。

ハイパーカミオカンデの検出器較正に関しては、スーパーカミオカンデの長期間の運用によって蓄積された知識や技能を用いてその大部分を行うことが出来るが、検出器が大型化することで、一部については行うことに困難が予想される。そのうちのひとつとして線形加速器を用いた較正が挙げられるため、ハイパーカミオカンデでは放射線源を用いた較正がより重要になると考えられる。そこで放射線源を用いた較正をより便利に、少ない人手、負担で行うことが出来るようにするため提案されたのが自動較正装置である。現在はハイパーカミオカンデに先立ってスーパーカミオカンデでの導入を目指している。

自動較正装置は放射線源を用いた較正を自動化すること、検出器に対して安全であることを目標に開発されている。ワイヤードラムとスライダーによって放射線源を上昇・下降させることで放射線源を検出器内に配置する。また検出器内に物を落としたり光漏れしたりしないように、電磁ブレーキ、モーターブレーキ、スライダリミットスイッチ、テンションセンサー、ドアロック等、種々の安全装置が搭載されている。

スーパーカミオカンデでの導入に向け、様々な運転試験を行った。短距離運転試験、ワイヤー長 30 m での動作確認と水中での動作確認のための深水槽での運転試験、安全装置の試験等を行い、ソフトウェア・ハードウェア共に改善を行った。試験を通して基本的な運転、安全性において問題がないことを確認した。

今後はまず新ニッケル球と現行のニッケル球の違いを見積もるための測定を、現行の装置を用いて行い、問題がなければその後、2017 年度内に自動較正装置を用いたスーパーカミオカンデでのデータ取得を予定している。2018 年度内にはスーパーカミオカンデでの定期的な Ni 線源による較正を順次自動較正装置によるもので置き換えることを目標に、複数回のデータ取得を通して運用上での問題を修正していく。またハイパーカミオカンデに向けた改善も、運用の様子を見ながら行っていく。

## 付録 A hep ニュートリノ観測

ハイパーカミオカンデでは太陽ニュートリノの観測を通して、標準太陽模型の精密測定を目指している。5 ~ 20 MeV の太陽ニュートリノのエネルギー分布や時間変動を測定することでこれを行う。図 1.1 に予想されるニュートリノフラックスのエネルギー分布を示す。

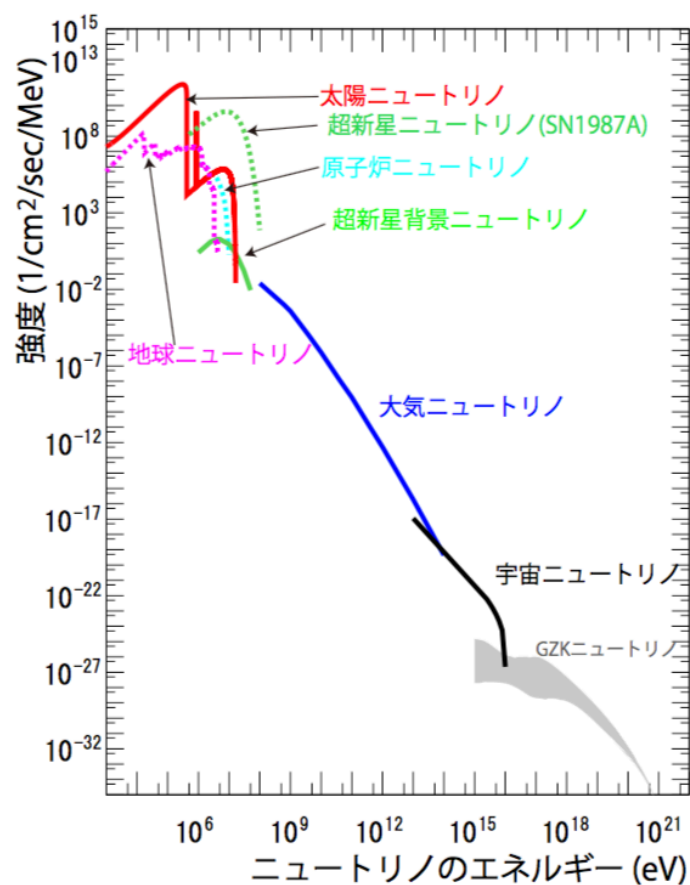


図 1.1 神岡でのニュートリノフラックスのエネルギー分布の予測 [13]。

### A.1 hep ニュートリノ探索の感度見積もり

1.1.2 節で述べたように、ハイパーカミオカンデでは太陽ニュートリノの中で最もエネルギーが高いが最もフラックスが小さい hep ニュートリノの初観測を目指す。hep ニュートリノ観測において、 $^8\text{B}$  ニュートリノはバックグラウンドとなる。ハイパーカミオカンデは光電子増倍管の改良により、スーパーカミオカンデに比べて光電子の検出効率が約 2 倍となりエネルギー分解能と位置分解能が向上する。これによりバックグラウンドの除去効率が向上することもあり、hep ニュートリノの測定が可能であると期待されている。

図 1.2 は、ハイパーカミオカンデによる 10 年間の観測 (1.9 Mton year) で得られると予想される、ニュートリノ振動を考慮に入れた太陽ニュートリノフラックスを示している。横軸は電子の合計エネルギーに対するエネルギー閾値、縦軸は標準太陽模型を仮定した、10 年間の観測による予想される事象のレートを表している。バックグラウンドや検出効率、系統誤差は考慮されていない。

$^8\text{B}$  ニュートリノと hep ニュートリノのスペクトルを分離できるかどうかは、検出器のエネルギー分解能に大きく依存している。表 1.1 は、典型的なエネルギー範囲での予想される太陽ニュートリノ事象数を示している。ハイパーカミオカンデは SK-III /IV に比べて  $^8\text{B}$  ニュートリノと hep ニュートリノをよく分離している。

しかしハイパーカミオカンデの建設が予定されている栃洞においては、宇宙線ミューオンのフラックスが

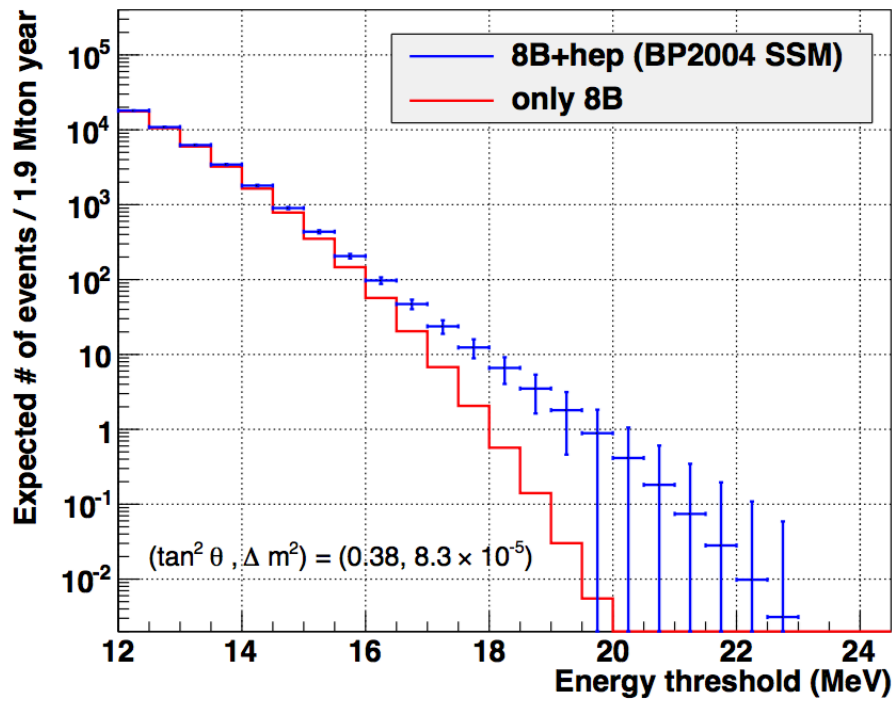


図 1.2 ハイパーカミオカンデによる 10 年間の観測で予想される太陽ニュートリノフラックス。

表 1.1 SK-III /IV とハイパーカミオカンデで予想される太陽ニュートリノの事象数。

エネルギー分解能	エネルギー範囲 [MeV]	$^8\text{B}$ [/1.9 Mton /year]	hep [/1.9Mton /year]	hep / $^8\text{B}$
SK-III /IV	19.5 - 25.0	0.77	3.03	3.9
ハイパーカミオカンデ	18.9 - 25.0	0.56	6.04	10.6

スーパーカミオカンデの場合と比べて約 5 倍に上昇する (2.5.2 節参照)。そこでハイパーカミオカンデにおける hep ニュートリノ観測の感度を評価するため、種々のシミュレーションを行った。

#### A.1.1 解析方法

$^8\text{B}$  ニュートリノフラックスに対する不定性と hep ニュートリノフラックスの不定性を仮定し、どの程度の範囲で測定ができれば hep ニュートリノの分布を観測できるかを見積もった。

尤度関数として正規分布を仮定し、最尤推定によって感度の見積もりを行った。対数尤度と予想される事象数の定義を以下に示す。

$$-2 \ln L = \sum_i \left\{ \ln(2\pi\sigma_i^2) + \frac{(N_{i,\text{obs}} - N_{i,\text{exp}})^2}{\sigma_i^2} \right\} \quad (1.1)$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,\text{stat}}^2 + \sigma_{i,\text{sys}}^2 \quad (1.2)$$

$$N_{i,\text{exp}} = a \cdot N_{\text{B8}} + b \cdot N_{\text{hep}} \quad (1.3)$$

$N_{i,\text{obs}}$  はハイパーカミオカンデで観測されると予想される太陽ニュートリノの事象数、 $N_{\text{B8}}, N_{\text{hep}}$  はそれぞれ標準太陽模型から予想される  $^8\text{B}$  ニュートリノと hep ニュートリノの事象数を表している。 $a, b$  にはそれぞれ  $^8\text{B}$ 、hep ニュートリノフラックスの不定性が入る。

スーパーカミオカンデの太陽ニュートリノ観測では、太陽方向の事象を選別している。この際に太陽方向以外の事象がバックグラウンドとして統計誤差に影響を与える。統計誤差  $\sigma_{i,\text{stat}}$  については、スーパーカミオカ



ンデ (SK-I) においての研究より  $\sqrt{2N_{i,obs}}$  とした。またバックグラウンドレートの増加に対する統計誤差の増加率も調べられており、ハイパーカミオカンデでは宇宙線のミュオンのフラックスが約 5 倍に増加することから、 $\sigma_{i,stat} = \sqrt{4.5N_{i,obs}}$  と定めた。

系統誤差  $\sigma_{i,sys}^2$  は現在のスーパーカミオカンデ (SK-IV) と同程度を仮定し、エネルギースケールの誤差 0.5 %、エネルギー分解能の誤差 0.6 % と定めた。

### A.1.2 結果

10 年間の観測によって得られると予想される、対数尤度の分布を図 1.3 に示す。縦軸は予想される hep ニュートリノ分布に対して観測される he ニュートリノの相対フラックス、横軸は同様に  ${}^8\text{B}$  ニュートリノの相対フラックスを表している。この図によると、 $1\sigma$  の範囲では hep ニュートリノフラックスに約 60%、 ${}^8\text{B}$  ニュートリノフラックスに約 3% の不定性が存在する。

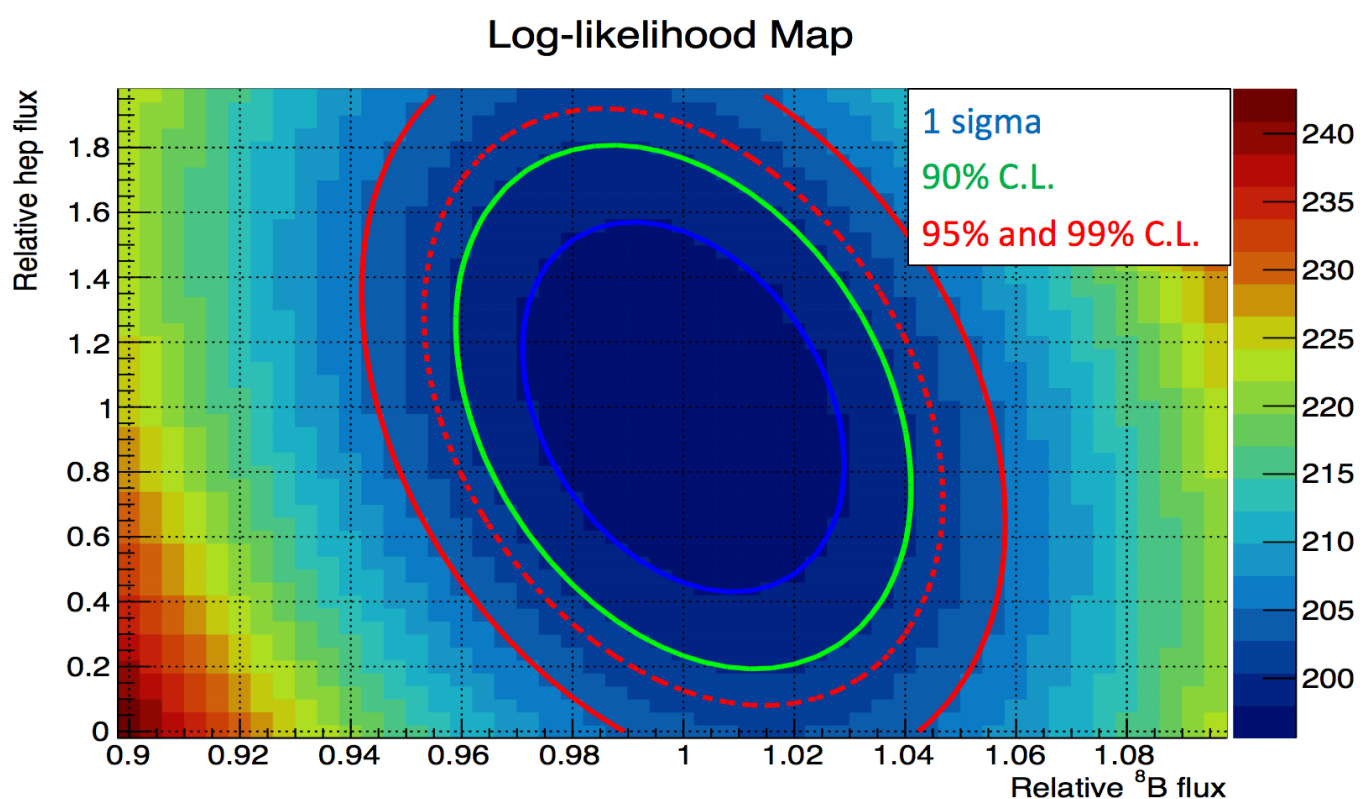


図 1.3 ハイパーカミオカンデにおいて 10 年間の観測によって得られると予想される、対数尤度の分布。青線は  $1\sigma$ 、緑線、赤線、赤点線はそれぞれ 90%、95%、99% の信頼区間を表す。

同様に 20 年間の観測によって得られる対数尤度分布が図 1.4 である。こちらの場合の  $1\sigma$  の範囲での不定性は hep ニュートリノフラックス約 40%、 ${}^8\text{B}$  ニュートリノフラックス約 3% となる。この場合には約  $2.3\sigma$  の感度で hep ニュートリノを観測することが出来る。これを改善するためには、核破碎反応によるバックグラウンドを低減する、検出器の較正をより良くすることによってエネルギースケールの不定性を減らす、などの方法が考えられる。

そこで、スーパーカミオカンデと同程度にまで核破碎のバックグラウンドを減らすことが出来た場合にはどのような観測ができるかを見積もったものが図 1.5 である。スーパーカミオカンデ検出器がある茂住抗と同等のバックグラウンド量 ( $\sigma_{i,stat}^2 = \sqrt{2N_{i,obs}}$ ) における、20 年間の観測を仮定している。この場合の不定性は hep ニュートリノフラックス約 30%、 ${}^8\text{B}$  ニュートリノフラックス約 3% となる。

さらに検証のためエネルギースケールとエネルギー分解能の不定性を無くし、統計誤差のみで見積もった対数尤度分布が図 1.6 である不定性は hep ニュートリノフラックス約 20%、 ${}^8\text{B}$  ニュートリノフラックス約

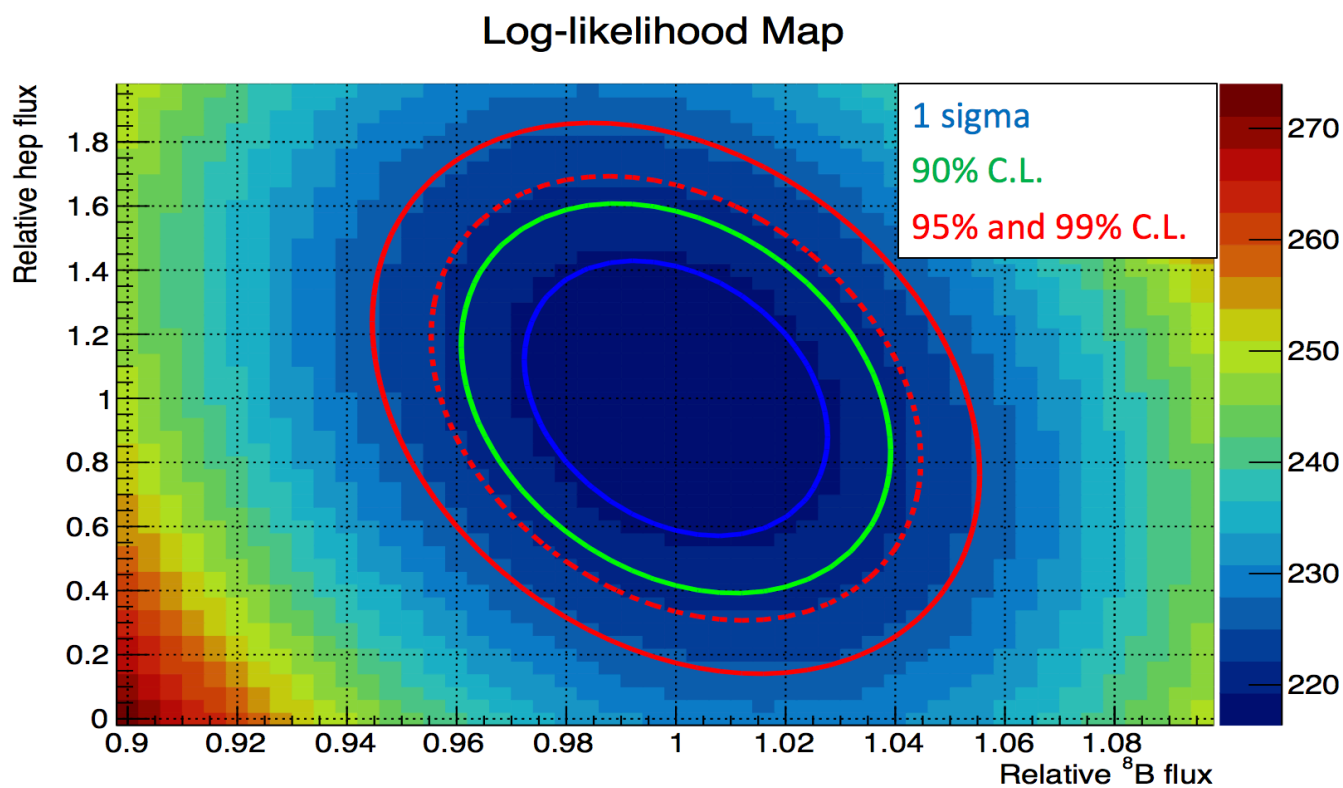


図 1.4 ハイパーカミオカンデにおいて 20 年間の観測によって得られると予想される、対数尤度の分布。青線は  $1\sigma$ 、緑線、赤線、赤点線はそれぞれ 90%、95%、99% の信頼区間を表す。

1% となる。このことから、 $^8\text{B}$  ニュートリノフラックスは主にエネルギースケールとエネルギー分解能の不定性から影響を受けることがわかる。ここまで不定性を小さくすることができれば、 $5\sigma$  の感度で hep ニュートリノを観測することが出来る。

図 1.7 は、187 kt の有効体積における hep ニュートリノ観測の感度を表している。横軸は観測時間、縦軸はエネルギースペクトルの解析から導いた、hep ニュートリノの信号が観測できる感度を表している。黒線は栃洞、赤線は茂住でのバックグラウンド量を仮定した観測の感度を表している。また赤点線は核破砕によるバックグラウンドがない場合を仮定している。宇宙線によって起こる各破砕のバックグラウンド、検出効率、エネルギースケールの系統誤差は現在の SK-IV のものから見積もっており、栃洞のものに対しては、栃洞における宇宙線ミュオンのレートに合わせてスケールしている。hep ニュートリノフラックスの不定性は 10 年間の観測で 60% で、 $1.8\sigma$  の強度で観測でき、20 年ではそれぞれ 40%、 $2.3\sigma$  ということがわかる。仮に核破砕のバックグラウンドを SK-IV と同程度にすることができれば、10 年で 40%、 $2.5\sigma$ 、20 年では 30%、 $3.2\sigma$  にまで改善する見込みである。

## A.2 まとめ

本章では、ハイパーカミオカンデにおける hep ニュートリノに対する感度の見積もりについて記した。hep ニュートリノへの感度は検出器のエネルギー分解能と核破砕反応のバックグラウンドに大きく影響される。そこで、現在のスーパーカミオカンデで得られている情報を用いてハイパーカミオカンデの 10 年、20 年間の観測における感度の見積もりを行った。

ハイパーカミオカンデの建設が予定されている栃洞では宇宙線ミュオンによる核破砕のバックグラウンドがスーパーカミオカンデの場合と比べて上昇するが、ハイパーカミオカンデはその大統計と高いエネルギー分解能により、スーパーカミオカンデと同等の時間の観測を行った場合統計誤差は小さくなる。標準太陽模型を仮定すると、20 年間の観測では約  $2.3\sigma$  の感度で hep ニュートリノが観測できるという結果となった。特に核

### Log-likelihood Map

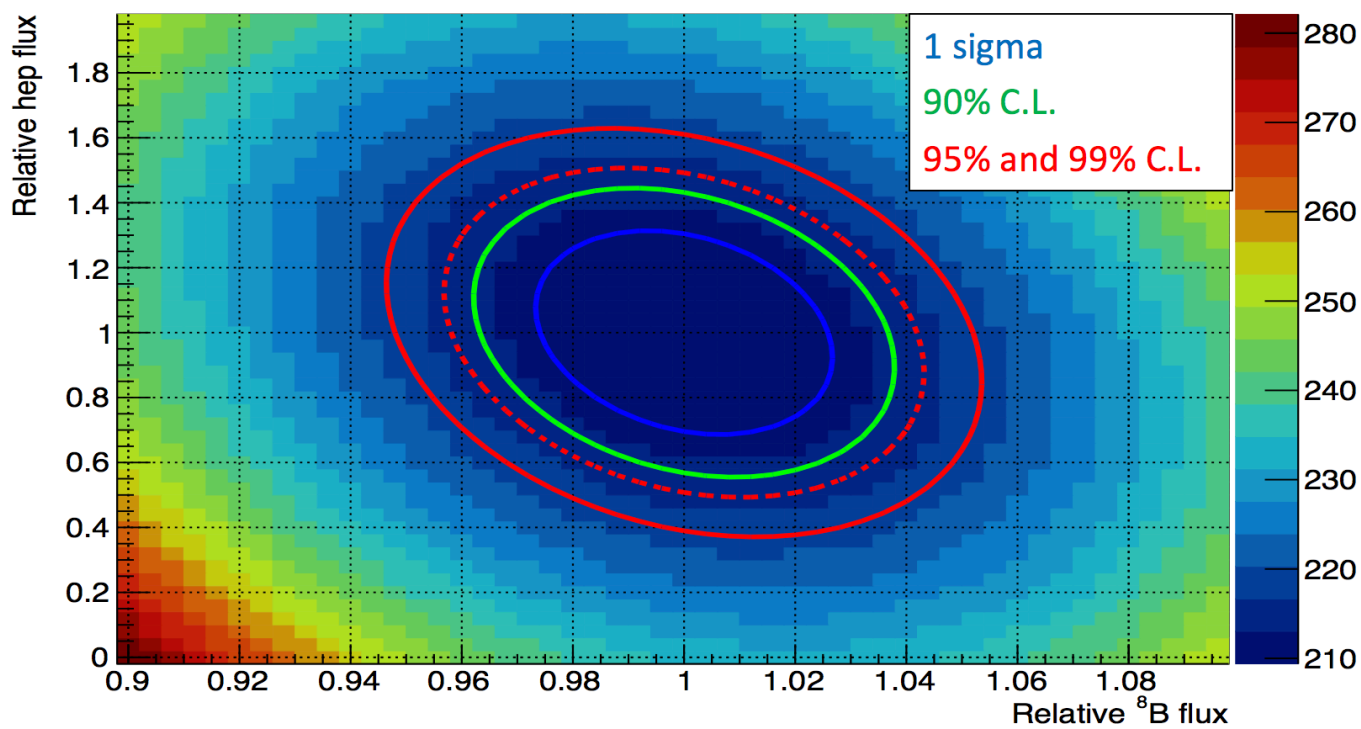


図 1.5 スーパーカミオカンデと同等のバックグラウンド量となった場合に、ハイパーカミオカンデにおける 20 年間の観測によって得られると予想される、対数尤度の分布。青線は  $1\sigma$ 、緑線、赤線、赤点線はそれぞれ 90%、95%、99% の信頼区間を表す。

破碎反応のバックグラウンドによる影響が大きく、これを低減することができれば感度は大幅に改善する。

### Log-likelihood Map

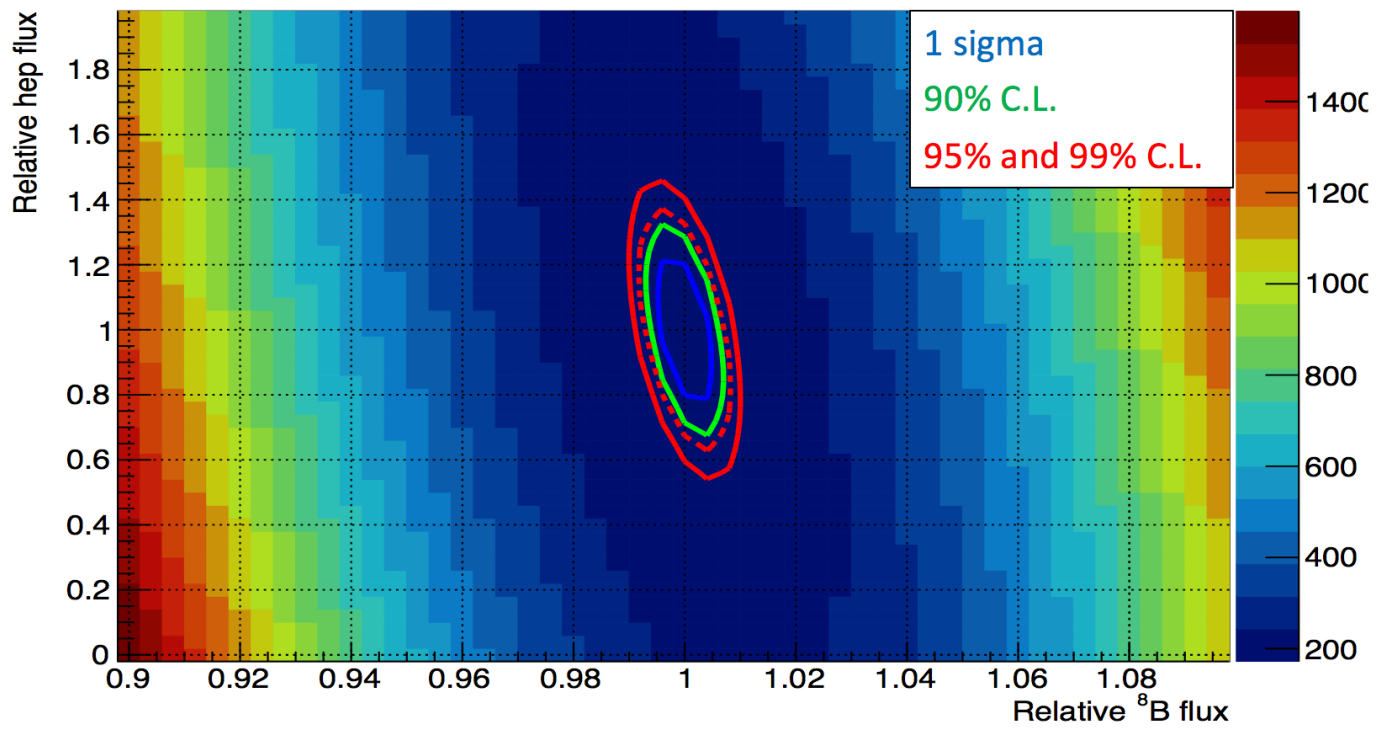


図 1.6 ハイパーカミオカンデにおける 20 年間の観測によって得られると予想される対数尤度の分布を、統計誤差のみで見積もった図。青線は  $1\sigma$ 、緑線、赤線、赤点線はそれぞれ 90%、95%、99% の信頼区間を表す。

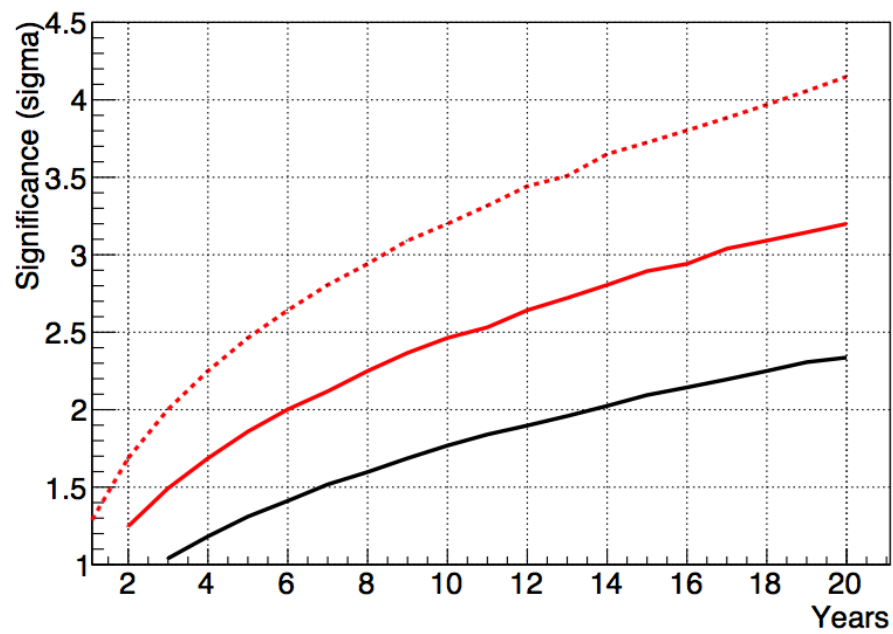


図 1.7 hep ニュートリノ観測の感度。横軸は観測時間、縦軸は感度を表している。黒線は柗洞、赤線は茂住でのバックグラウンド量を仮定した観測の感度を表している。また赤点線は核破砕によるバックグラウンドがない場合を仮定している。



## 参考文献

- [1] F. Reines and C. L. Cowan, Phys. Rev. 92, 830 (1953).
- [2] G. Danby et al., Phys.Rev.Lett. 9 (1962) 36-44.
- [3] K. Kodama et al., Phys.Rev.Lett. B504 (2001) 218-224.
- [4] Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. 81, 1562 (1998).
- [5] Z. Maki et al., Prog. Theor. Phys. 28, 870 (1962).
- [6] Y. Ashie et al., Phys. Rev. D - Part. Fields, Gravit. Cosmol. 71, (2005).
- [7] S. Fukuda et al., Phys. Lett. Sect. B Nucl. Elem. Part. High-Energy Phys. 539, 179 (2002).
- [8] F. P. An et al., Phys. Rev. Lett. 108, 171803 (2012).
- [9] H. Ahn et al., Phys. Rev. Lett. 90, 5 (2003).
- [10] B. T. Cleveland et al., Nucl. Phys. B (Proceedings Suppl. 38, 47 (1995).
- [11] J. Kiko, Astrophys. Space Sci. 228, 107 (1995).
- [12] J. N. Abdurashitov et al., Phys. Lett. B 328, 234 (1994).
- [13] Hyper-Kamiokande Collaboration, KEK-PREPRINT-2016-21, ICRR-REPORT-701-2016-1 (2017).
- [14] T. Totani et al., Astrophys. J. 496, 216 (1998).
- [15] K. Scholberg, J. Phys. Conf. Ser. 309, (2011).
- [16] K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 118, 151801 (2017).
- [17] F. P. An et al., Phys. Rev. D 93, (2016).
- [18] C. Patrignani et al., Chinese Phys. C 40, 100001 (2016).
- [19] M. Fukugita and T. Yanagida, Phys. Lett. B 174, 45 (1986).
- [20] A. Suzuki, et al., "Improvement of 20 in. diameter photomultiplier tubes" Nucl: Instrum. Meth. A329 (1993) 299-313.
- [21] 武藤 史真, "ハイパーカミオカンデ実験のための新型光検出器の性能評価" 名古屋大学 修士論文 (2017)
- [22] K. Abe et al., Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 737, 253 (2014).
- [23] J. Liu et al., Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 750, 19 (2014).

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご協力をいただきましたので、ここに感謝の意を表します。

指導教官である鈴木州先生には、スーパーカミオカンデ・ハイパーカミオカンデでの貴重な研究の機会を頂きました。研究の指導やアドバイスなどを頂いた他にも、出張に関してのお世話をして頂いたり、出張先での様々な体験の機会を頂くなど、おかげで充実した研究生生活を送ることが出来ました。本当にありがとうございます。

東京大学宇宙線研究所の矢野孝臣先生には、特に研究に関して多くのご指導を頂きました。研究テーマについて深く教えて下さるほか、些細な疑問などにも丁寧に向き合ってくれて教えて下さりました。また出張先では様々な場所に連れて行って頂いたり、おすすめの場所を紹介して頂いたり、生活面でもとてもお世話になりました。ご迷惑をおかけすることも多かったと思いますが、特に多くの時間を割いて頂き感謝しております。

東京大学宇宙線研究所の森山茂栄先生、峰俊一先生には同じ実験内のグループで多くのアドバイスを頂きました。日々のミーティングで私の拙い発表にも丁寧にコメントを下さったり、研究外でも話しかけて下さったりと、とても心強かったです。

神戸大学の粒子物理研究室では、竹内先生にはスーパーカミオカンデのことなどで特に助言を頂くことが多く、また神岡宇宙素粒子研究施設でも大変お世話になりました。

藏重先生、山崎先生、身内先生、越智先生、前田先生、清水先生には研究室内の発表で様々なアドバイスを頂いたほか、研究生生活においても色々な話をして頂いてとても楽しい日々を送ることが出来ました。

秘書の横山有美さん、吉田和美さんには出張手続きを始め多くのお世話を頂き、研究に集中することが出来ました。

また同研究室の学生である皆様のおかげで大学生活を楽しく過ごすことができました。本当に感謝しています。

最後に、様々な面でサポートをして頂いた家族に御礼申し上げます。