

# NEWS RELEASE

## カミオカンデ・スーパーカミオカンデ 大口径光電子増倍管の開発経緯

2015年10月6日  
**浜松ホトニクス株式会社**  
本社：浜松市中区砂山町 325-6  
代表取締役社長：晝馬 明(ひるま あきら)

今回の受賞は、梶田先生のスーパーカミオカンデにおける成果が主ですが、スーパーカミオカンデに至るカミオカンデについての説明も欠かすことができないため、カミオカンデ用の光電子増倍管開発についてからまとめました。

## カミオカンデ

### 1979年 秋                      開発依頼

東京大学理学部教授（現、同大学特別荣誉教授）の小柴昌俊先生から、陽子崩壊観測実験に使用する大口径光電子増倍管の開発依頼があった。陽子崩壊の実験は、物理学上重要な大統一理論の検証につながり、この開発が実験の成否に関わるとのこと。その要求されたサイズは、直径 25 インチ（約 63cm）だった。当時、イギリスの EMI 社が 8 インチ（約 20cm）径の開発を進めており、当社でも、その年の春に半球状の 5 インチ（約 13cm）と 8 インチ径の試作に着手したばかりだった。桁違いの要求に、断ろうと、当社社長（現会長）晝馬輝夫が研究部長を伴って同教授の研究室を訪れた。

この頃、アメリカにおいても IMB という同様の陽子崩壊観測実験計画が進んでいた。それは 5 インチ径の光電子増倍管を数千個も使用し、規模的に日本の計画に比べ倍以上のものであった。この計画を耳にした小柴先生は、陽子崩壊の証となるチェレンコフ光の検出精度を高めることで規模の劣勢を補い、何とかアメリカよりも早く成果を上げたいと考え、大口径の光電子増倍管の開発依頼となった。

チェレンコフ光は非常に微弱な光なので、光の粒（光子）の数が少ない。20 インチ径は IMB 計画の 5 インチ径に比べ受光面の面積が 16 倍なので、一本の光電子増倍管に光の粒が 16 倍入ってくることになる。同じ性能ならば、大口径であればあるほど、小さいものに比べ一本で大きな信号を確実に検出でき検出精度が高まる。さ



らに、信号をコンピューターに入力する回路等も 16 分の 1 と少なくてすむというアイデアだった。

陽子崩壊は大統一理論では予言されているが、未だに実験による証明はなされていない。大統一理論では、強い相互作用まで統一された結果、クォークとレプトンの転換が許され、陽子は安定でなくなり崩壊する。その寿命は 10 の 32 乗年程度と気の遠くなるような長さだが、実験的に 10 の 32 乗個の陽子を集めて監視していると、1 年に 1 回は陽子崩壊に巡り合うチャンスがある。3,000 トンの水には、10 の 32 乗個以上の陽子が含まれているから、カミオカンデは 3,000 トンの超純水を入れる容器の構造にしようというもの。

陽子が崩壊すると、陽電子などの素粒子が飛び出す。水中では、光の速度は遅くなるため、素粒子の速度が水中の光の速度を超える現象がある。飛行機が音速を超える時に発生する音波の衝撃波と同じように、高エネルギーの電荷を持った素粒子が水中で光の速度を超えた時に衝撃波が発生して、青白い微かなチェレンコフ光と呼ばれる光を出す。光電子増倍管は、その光の強度や時間などを測定する役割を担う。

## 1979 年 12 月            開発着手

熟考の末、小柴先生の熱心さに打たれ、当社社長（現会長）晝馬輝夫の「できるかどうかわからんがともかくやってみよう」との決断で、関連の従業員が総動員され開発に着手。25 インチ径というガラス管作りには、港湾などで海面に浮かべておく目印となる約 20 インチ（約 50cm）径のガラスのブイ（浮標）がヒントになった。硬質ガラスを使用することや厚さ精度を均一にするなどの要件を検討した結果、サイズは 20 インチ径（直径 50cm）となった。前例のない 20 インチ径というだけでなく、3,000 トンの純水の中に設置されるという過酷な条件、光電面製作、電子軌道解析、ガラス容器製作など全て未踏のことだった。

この光電子増倍管の原理は、微弱なチェレンコフ光を光電子に変換し 1,000 万倍に増幅した電気信号として取り出すもの。20 インチ径のガラス窓の内側には、アルカリ金属などを薄膜状に蒸着した光電面がある。そのガラス窓にチェレンコフ光が入射すると、光電面内の電子を励起して真空中に光電子を放出する。その光電子を管の内部に取り付けた増倍部に集める。増倍部には、ダイノードとよばれる電極が 11 段取り付けられている。ダイノードに光電子が当たると、複数の 2 次電子を放出する。11 段のダイノードに、次々に当たって 2 次電子放出を繰り返し、鼠算式に増幅されて最終的に約 1,000 万倍の電気信号を得る。

形状は、さまざまな角度から飛んでくるチェレンコフ光をキャッチしやすく、どこの光電面に入射しても同じ応答時間精度で、光電子の収束効率を良くすることや、水圧にも耐える必要があることから半球を少し潰したラグビーボールのようにした。それにしても大口径と高速応答性は二律背反となる。光電面から電極までの光電子の軌道を極力同じ距離にする。大きな 20 インチ径のガラス面に、アルカリ金属を均一に蒸着して光電面をつくる。それらの解決に、それぞれの専門部署が集中して取り組んだ。

小柴先生からの要求は、光が入射して計測できるまでの応答時間を 2 ナノ（10 億分の 1）秒以下にという厳しいものだった。当社の電子軌道解析の技術力で、精密に電極の設計がされた。そのシミュレーションどおりに加工するため、第一ダイノードへの光電子の走行

時間差と入射角度に注意を払った。結果的には、試作品から 3.3 ナノ秒を記録し設計精度が高いことを実証した。

ガラス管の素材は、耐水性に優れたフラスコや電子レンジ用食器などに使われる、ハリオ 32 という硬質ガラスを初めて採用した。ガラス管と増倍部を取り付けたガラスシステムの封止作業は難関だった。10 インチ径で、硬く、肉厚 4mm のガラスバブルは普通のガスバーナーでは加工が不可能だった。10 連の水素ガスバーナーを使用し、さらに除冷用の 2 台の大型バーナーを併用する大型のガラス旋盤を採用し、試行錯誤の上で乗り切った。

また、3,000 トンの純水に耐えるよう、大型の耐水圧試験器を設計して水圧試験を行ったり、高電圧の加わっているものを水中で動作させるための防水モールドに力を入れた。爆縮実験で周囲に轟いた爆縮音など、これまで経験のない実験もあった。ダイノードへのアンチモン金属の蒸着や光電面の活性化は、これまで蓄積された数多くの高い製造技術がこの大型管に集大成された。

新しい光電子増倍管を開発するとき、光電面の製作の条件がなかなかつかめず、何度も失敗を重ねながら追い込んでいくのが常であった。アンチモン蒸着作業は目と勘に頼る以外に方法がなかった。その後カリウムを反応させると、一瞬にして見事に理想的な光電面の色合いに変わり、作業台を囲んだスタッフから歓声が上がった。わずかに数本目にして特性の目標を達成した。これは極めて異例のことだった。

#### 1980 年 12 月                    試作 1 号完成

思いのほか光電面が均一にでき、シミュレーション技術もうまくできて、コンピューターと実際の誤差が少なかったため、大口径のわりには応答時間精度が良く、シングルフォトン（1 個の光子：光の粒）を見つけ出すのに優れた試作品が完成した。予想していたよりもスムーズに開発が進んだことは、これまで培った技術力を実証することとなった。

#### 1981 年 1 月                    評価用試作品納入

#### 1981 年 2 月 25 日            大口径光電子増倍管完成発表

20 インチ径、広立体角受光面、増倍率 1,000 万倍以上、耐圧力 4 気圧以上、水中動作可能という世界に類を見ない光電子増倍管を完成。



#### 1982 年 7 月                    1,050 本完納

純水タンク完成に合わせて 1,050 本を完納。大口径なため取扱上の安全や保管の問題に予想外に苦労した。

#### 1983 年 8 月                    観測開始

#### 1984 年 1 月 5 日 陽子崩壊確認か？新聞発表

検証を進めた結果、陽子崩壊に似ていたが陽子崩壊ではなかった。

#### 1984 年 9 月 25 日 アンタйкаウンタ用光電子増倍管納入

1984 年 5 月 11 日に小柴先生から、タンクの外側に外水槽を設け、その部分に光電子増倍管を設置して、アンタйкаウンタの機能を増設したいという提案があった。これは、宇宙線バックグラウンドノイズや岩盤からのバックグラウンドノイズをさらに減らすための改良だった。同年 9 月 25 日に 20 インチ光電子増倍管を 110 本納入。さらに、純水の純度を上げて放射線の量を減らしたことで、バックグラウンドノイズを格段に下げることができた。これにより、本来の目的だった陽子崩壊だけでなく、1986 年 12 月には宇宙からのニュートリノや大気ニュートリノ、太陽ニュートリノまで検出できるようになった。

#### 1987 年 2 月 23 日 超新星ニュートリノ観測成功

偶然起きた大マゼラン星雲の超新星爆発によるニュートリノを、人類で初めて観測に成功した。このニュースは、開発や製造に携わった者にとって、光電子増倍管が期待通りの性能を発揮したことの証明であり、社員一同の最大の喜びとなった。

約4年間、1,050本の光電子増倍管は水中でじっと動作を続けていた。またこれを期に「ニュートリノ天文学」と言われる新たな研究分野が日本から発信された。

#### 1988 年 7 月 太陽ニュートリノが理論値の半分と新聞発表

## スーパーカミオカンデ

#### 1986 年 7 月 次期カミオカンデ計画の準備

小柴先生からの新たな提案で、カミオカンデの 20 倍位大きいものを考えているとのこと。そのために光電子増倍管の改良を更に行うことになる。カミオカンデを担当していた東京大学理学部の戸塚洋二教授（故人 元:高エネルギー加速器研究機構長・東京大学宇宙線研究所長）が次期カミオカンデ計画（スーパーカミオカンデ）の主担当になった。

#### 1986 年 第 2 世代の 20 インチ光電子増倍管の開発に着手

光電面のどこへ入射しても、また 1 つの光子でも、より確実に検出できるようにするための改良が検討された。増倍部を小さくすると、大きな光電面からの電子レンズでの収束に地磁気が影響したり、大きくすると、薄い電極が製作時の熱でたわんでしまうという困難な問題があった。また、光電面の縁の方と中央とで放出される光電子の応答時間差

を最小にという課題もあった。第2世代の開発には、必要な応答時間精度3ナノ秒以内をクリアした上で、これらの問題を解決するため、電極の構造設計と、電圧2,000V、水深41mでの防水などに苦勞し完成させた。

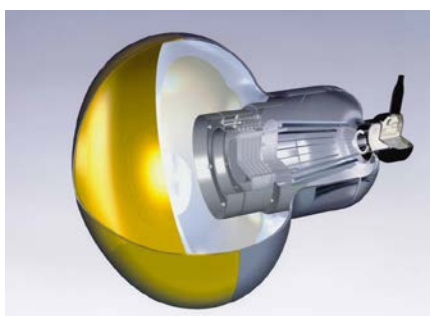
### ■なぜ特性向上が必要か？

超純水タンクがカミオカンデの3,000トンから50,000トンと大型になるため、タンク壁面に到達する光子が著しく減少する。また、20インチ光電子増倍管の直径に相当する位置分解能50cmを得るためには、チェレンコフ光のパターン情報だけでなく時間情報を必要とする。このため、3ナノ秒以下の時間特性が要求された。さらに、光子数減少にともない雑音レベルが相対的に目立つため、光子入射による信号と雑音レベルを充分区別できるよう1光子による波高分布のピークが明瞭に確認できる必要があった。

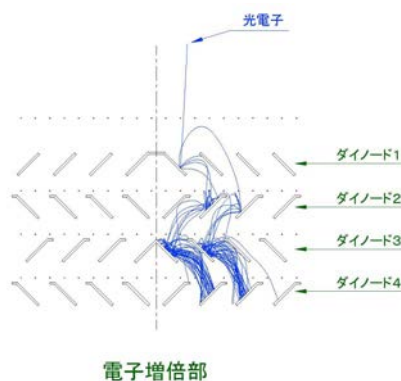


### ■20インチ光電子増倍管の特性向上方法

これらの要求に応えるため、大面積の新しいダイノードが必要となった。具体的には、ベネシアンブラインド型ダイノードの改良を進め、時間特性改善を得るためダイノードの厚さを2.5mmと従来の2分の1としてスケール効果を得た。また、電子増倍部の口径を、従来の直径75mmφから90mmφに広げて、地磁気の影響を少なくした。



さらに、光電面から放出された光電子を効率良く第1段ダイノードに入射させるように、第1段ダイノードと第2段ダイノードとの最適位置関係を見出すことと、第1段ダイノードの直前にそれぞれのベネシアンブラインド型ダイノードの羽に対応したグリッド（格子）を配置した。



光電子は、半球状のガラスバルブ内面に形成されている光電面から入射光子に対応して放出されるため、半球の曲率で大きくダイノード1に収束され、さらにグリッドで第1段ダイノードのそれぞれの羽に収束される。これらのことにより、時間特性が改善され、同時に1光子による波高分布のピークが明瞭に確認できるようになった。

### ■開発過程で3つの特許が発明された

- 1) 第1段ダイノードと第2段ダイノードの最適位置

登録番号：2840853 名称：2次電子増倍管およびこの2次電子増倍管を用いた光電子増倍管 発明者：久嶋浩之、伊藤益保

2) 第1段ダイノード直前のグリッド

登録番号：2925020 名称：光電子増倍管 発明者：久嶋浩之

3) ダイノード間にフィードバック防止用絶縁物を配置

登録番号：1838548 名称：電子放出電極の支持構造 発明者：久嶋浩之

### ■エピソード

1) 設計した構造が形にならない

幅2.5mm長さ90mmのダイノードの羽をつくるための金型が数個プレスするだけで壊れてしまう問題が発生、金型の構造を工夫して対応した。開発初期金型はKEKで加工実験を行い、その後、浜松電子プレス（株）で金型が製作された。

2) 雑音レベル（ノイズ）が大きい問題が発生

いくら作っても印加電圧が1,000V以上でノイズの増大が確認された。電子増倍過程での光電面へのフィードバック防止用絶縁物をダイノード間に配置することにより防止した。

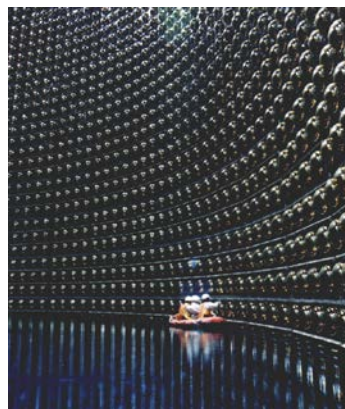
3) 専用の建物が必要になった。

11,200本の20インチ光電子増倍管を製造するには、専用の建物（工場）が必要となった。現在の豊岡製作所第7棟

### 1992年9月 大口径光電子増倍管納入開始

### 1995年6月 大口径光電子増倍管取り付け開始

格段に性能アップした光電子増倍管の取り付けが開始された。増倍率は1,000万倍程度、感度はフォトン1個でも確実に検出でき、応答時間精度は2.5ナノ秒で、光はこの時間で水中を約60センチメートル進むから、光がタンク内のどこで発生したのかがこの長さ程度の精度で分かる。1フォトンを検出できるということは、他に光がない状態を仮定して、月面から懐中電灯で地球に向かって照らした時に、この光を地球で捕捉できるぐらいの感度に相当。



### 1996年1月 大口径光電子増倍管 11,200本完納

### 1996年4月 本格観測開始

### 1996年5月 太陽ニュートリノの観測に成功

### 1998年6月5日      ニュートリノが質量を持つことを確認したと発表

高山市で行われた「ニュートリノ・宇宙物理国際会議」で発表。2年間にわたりスーパーカミオカンデで観測した大気ニュートリノの観測結果からニュートリノが質量を持つことを結論づけた。物理学の「標準理論」の書き換えを迫るもの。

### 1999年6月19日      人工ニュートリノ検出に世界で初めて成功

ニュートリノに質量があることを人工的なニュートリノで検証するため、つくば市にある高エネルギー加速器研究機構（KEK）の陽子加速器で作りに出した人工的な大量のミューニュートリノを、約250km離れたスーパーカミオカンデに向けて地中を飛ばす実験（K2K）が行われ、人工ニュートリノがスーパーカミオカンデにて世界で初めて検出された。

### 2000年6月17日      ニュートリノ質量 K2K 実験で「兆候」

K2K 実験では、大量の人工ニュートリノにより、精度の高い検証を目指して、ニュートリノの検出をしてきた。3月末までの10ヶ月間の実験で、質量がないと仮定した場合の29個より少ない17個しか観測されず、「質量がないとの考えが約95%の確率で支持されない」と発表した。

その後、01年6月までのK2K実験データの解析によりニュートリノ質量の存在確率99%までにアップと発表（02年6月）。この結果はスーパーカミオカンデにより大気ニュートリノを観測して得た答えを裏付けるものである。

### 2001年7月              初めてのメンテナンス開始

約5年半経過して初めてメンテナンスを行い、一部の光電子増倍管を交換した。9月には再度純水が注がれ、12月には実験が再開される予定であった。

### 2001年11月12日      大口径光電子増倍管破損事故発生

純水が注がれて3分の2ほどになったときに事故が発生した。原因の究明と対策検討が数ヶ月かけて行われた。破損原因はメンテナンス作業時のストレスにより1本が爆縮し、その衝撃波による連鎖破壊であった。

### 2002年12月              観測再開

衝撃波による連鎖破壊を免れたものと予備用の大口径光電子増倍管を連鎖破壊防止用の防爆ケースに収納し、約6,000本を再配置し実験を再開した。

2003年6月 全面復旧に向けて大口径光電子増倍管の納入開始

新たに工場と生産設備を整備し完全再建に向けて 6,114 本の納入が開始された。

2006年1月 全面復旧用大口径光電子増倍管 6114 本完納

すでにタンク内取り付けは 2005 年 10 月からは開始されており納入と検査・取り付け作業が平行して行われた。

2006年4月 大口径光電子増倍管の全数取り付けが完了

純水を抜きながらの取り付け作業であったが 11 日に底面も含め取り付け完了し、このあとは 5 万トンの純水注入作業に入った。

2006年7月11日 完全再建し観測開始

元通り 11,200 本の大口径光電子増倍管が取り付けられた 5 万トンのタンク内は純水で満たされ、完全再建し観測が開始された。

以上

この件に関するお問い合わせ先  
■報道関係の方 浜松ホトニクス株式会社 広報室 野澤利行  
〒430-8587 浜松市中区砂山町 325-6 日本生命浜松駅前ビル  
TEL053-452-2141 FAX053-456-7888 E-mail:tnozawa@hq.hpj.co.jp  
時間外は、携帯電話 090-7695-1616 へお願いします



