

■研究紹介

ハイパーカミオカンデの大口径光検出器開発

慶應義塾大学 理工学部物理学科

西村 康宏

nishimura@phys.keio.ac.jp

2021年（令和三年）8月13日

1 ハイパーカミオカンデ建設開始

1.1 次世代カミオカンデに向けて

ニュートリノと核子崩壊を探るスーパーカミオカンデ(Super-K)は、5万トンの超純水と約1.1万本の直径20インチ(50cm)光電子増倍管(PMT)を用いて、水中のチェレンコフ光を観測する大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置である。1996年に観測を始めてから2021年で25年目を迎えた。まだ多くの謎が残るニュートリノのCP対称性やフレーバー混合の詳細に迫り、大統一理論の検証につながる核子崩壊を観測するには、検出層の質量と観測時間で決まる物理感度を大幅に向上する必要がある。このために検出層を大型化する次世代検出器ハイパーカミオカンデ(Hyper-K)[1]の建設が2020年2月に始まった。

大型化により検出数が増えると、バックグラウンド事象や系統誤差が物理感度に大きく影響するため、検出器の高性能化が重要である。また、大型化に伴い水深が深くなると、高水圧に耐える強度向上も必要であった。そこでHyper-K向けに直径50cmの高性能光検出器開発を進め、光検出性能はSuper-K[2]の2倍、カミオカンデ[3]の4倍に達した。さらに耐水圧も向上して、Super-Kの2倍の水深で使えるようになった。十分な高性能化を果たしたため、2020年10月には量産が始まった。そこで、最近10年の50cm径光検出器開発を振り返って簡単に紹介したい。

1.2 ハイパーカミオカンデ概要

Hyper-KはSuper-Kから南方に8km離れた岐阜県飛騨市の山の地下650mに建設中である。同時に加速器ニュートリノ源である茨城県東海村J-PARCのビーム増強と近接・中間距離検出器の準備も進めて、ニュートリノによるレプトンCP対称性の破れや核子崩壊の発見を目指す。他にも、ニュートリノ振動パラメータの精密測定や超新星爆発・天体由来の宇宙ニュートリノ観測、暗黒物質探索などの幅広い物理研究を行える。これらHyper-Kで解き明かす物理の詳細については、高エネルギーニュースVol.37 No.4(2019)をご参照頂きたい。

Hyper-Kの水タンクは直径68m・水深71mの縦型円筒形に26万トンの超純水を有し、検出有効領域はSuper-Kの8.4倍となる。タンク内は内外2つの検出層に分かれ、内側の内水槽には約4万本の50cm径光検出器が取り付けられる。外側の外水槽では波長変換板を取り付けた8cm径の光検出器を外向きに並べ、宇宙線ミューオン等の通過荷電粒子を識別する。2021年5月時点では、Hyper-Kグループは19カ国からのコラボレーター約450名で構成される。外水槽の検出器、内側の光検出器の半分や電子回路等は国際協力により実現する。2027年観測開始に向け地下掘削を進めており、2025年後半からタンク内に検出層を構築する。

1.3 光検出器の要件

水を標的かつ検出層とするSuper-KやHyper-Kでは、ニュートリノ反応や核子崩壊から現れる荷電粒子が水中で発するリング状のチェレンコフ光を捉える。このために多くの光検出器を水中に並べて、光子が光電子として1つでも検出されると、それぞれの時間(しきい値電圧を超えた時間)・光量(信号の積分電荷)をヒットとして全て取得する。複数の光検出器に同時ヒットが現れると、チェレンコフリング事象の候補を選出できる。ここから粒子情報を再構成するため、以下に挙げる光検出性能が求められる。

時間分解能 水タンクの内面に並ぶ50cm径の光検出器で、各々の検出時間から光の発生点を再構成するためには、2ナノ秒程度の時間精度が必要となる。

1光電子検出感度 Super-Kでは、微弱なチェレンコフ光が1MeVあたりにヒットする光検出器数は6本程度である。数MeV事象を観測するための優れた1光電子識別・高い検出効率・低ノイズが重要になる。

ダイナミックレンジ 100GeV台の高エネルギーニュートリノも観測対象であり、1光電子から1000光電子以上の広範囲での検出が求められる。

高レート耐性 平時の信号は少ないが、超新星爆発バースト事象が起こると、Hyper-Kの事象レートは最大10MHz程度まで上がる。

長期安全観測 Super-Kの40m水深より高い水圧に耐える強度、水中で長年使用できる素材と耐久性が必要になる。

これら Hyper-K での使用に適う高い検出性能と安全性を実現するため、増幅機構が異なる 3 種の新型光検出器を開発することとなった。

1.4 光検出器の改良点

Hyper-K に採用した 50 cm 径 PMT では、種々の検出性能が Super-K で用いる PMT (Super-K PMT) に比べて倍に向かっている。1 光子検出性能は設計と製法で見込んだ通りに短時間で向上し、1 光子検出効率は 2 倍、1 光電子の時間・光電子数は 2 倍の高分解能を達成した。

一方で、高強度・高精度・低ノイズ化や実用面の検証には長期を要した。耐水圧強度は外形や素材を変更して 2 倍に上がった。ガラスの放射性不純物量はおおよそ半分に落とし、水中の発光バックグラウンドとなる放射性ラドンの放出量も大幅に低減できた。暗中下で生じるノイズによるダークカウントは、長期間の調整を経て Super-K と同程度の 4 kHz のレートに抑えられた。

1.5 新型光検出器とハイパーカミオカンデ設計

光検出器の性能向上は、Hyper-K の設計改良を可能にした。Hyper-K の最大水深は光検出器の耐水圧性能によって制限されるため、大型化のためには横に伸ばすか、光検出器の耐水圧性能を上げる必要があった。Hyper-K の構想は 1998 年頃から始まり、2011 年の計画時には、Super-K PMT の耐水圧性能を想定して水深を 48 m に抑え、横長く 248 m に伸びる 2 つの水タンクが提案されていた[4]。横に伸びると体積に比べて表面積の割合が増え、使用する光検出器の数も増える。また、水の透過長が 100 m 程度なので、光が減衰する前に直進したまま検出できるよう、長い検出層を複数に分割するための光検出器面の壁がタンク内に必要であった。この設計では、Super-K の光検出器密度の半分（検出面の被覆率で 20%）としても、56 万トンの検出水量に対して約 10 万本の光検出器を使うことになる。

新型光検出器の開発により、2016 年には Super-K の 2 倍の水圧でも運用可能な光検出器を実現できた。これによって、深さ方向にも水タンクを拡張できるようになり、表面積を抑える効率化が可能となった。一方で、検出層を大型化して観測数が増えても、例えば核子崩壊探索で背景事象も比例して増えると、発見感度を上げにくくなる。しかし、光検出器の性能を向上できたので、高い分解能から信号選出領域を絞れるようになり、高い検出効率のおかげで背景事象の除去率を上げられた。これら光検出器の高性能化による物理感度向上のおかげで、同等の達成目標を保って水タンクの大きさを最適化し、高さと直径が各々約 70 m で Super-K のような縦型円筒形を採用できた。地下空洞の掘削量と光検出器本数に関わるコストが効率的に抑えられ、建設実現につながった。

2 50 cm 径光検出器

2.1 従来の 50 cm 径光電子増倍管

PMT で光子をカウントするためには、光から電子への変換・収束・増倍が必要となる。光が受光面内側に蒸着された光電面に当たると光電効果により電子へ量子化される。これを収束・増倍するために、金属製のダイノードと呼ばれる電極間に電圧を印加する。光電子が電場中で加速され、電極（第一ダイノード）に収束されてぶつかると多くの二次電子を放出し、続くダイノード電極間でも次々に電子の加速と増倍を繰り返して、最終的に多段増倍した電流信号として光を検出できる。受光面が大きくなると、収束と増倍を受光面全体で均一に保つ設計が難しくなる。

水チェレンコフ検出器の性能は、検出面の受光面積が広いほど良い。受光面積あたりの PMT 製造コストは口径が大きいほど抑えられるが、ガラスバルブを安定して製造できる大きさは 50 cm 径が限度になる。約 40 年前にカミオカンデのために開発されたこの大きさは、いまだに PMT として最大である。3000 トンの水を用いるカミオカンデでは、7000 トンの水と当時最大の 5 インチ径 PMT を使うアメリカの Irvine-Michigan-Brookhaven (IMB) 検出器に対抗できるように、より大口径の光検出器を開発して高感度化を狙うことになった。50 cm 径の PMT 開発は 1979 年に始まり、15 カ月間で開発を終えて 15 カ月間で製造を行った。1982 年にはカミオカンデ用に 1050 本の PMT(R1449) が完成した。電子を増倍するダイノード電極には、大面積化しやすいベネシアンブラインド型が採用され、細い金属板が窓の遮光に使われるベネシアンブラインドのように並べられた形となっている[3]。光検出器の感度が高く、水中の放射性ラドンも抑えられたので、カミオカンデは核子崩壊だけでなく MeV スケールの太陽や超新星爆発からのニュートリノを検出できるようになった。結果として、1987 年 2 月の超新星爆発 SN1987A で、カミオカンデでは IMB 等の他実験より多い 11 事象のニュートリノを観測できた。

続いて 1986 年頃から Super-K に向けて開発された R3600[2] では、約 5 年の開発期間を経て、収集効率と分解能がカミオカンデの PMT より倍に向上した。ダイノード間隔を狭めて時間分解能を上げ、外部磁場による収集効率の低下を抑えるためダイノード開口面積を広くして、ダイノード後段の光やイオンの逆流を防ぐ絶縁構造を追加した。シミュレーションで電子増倍部の最適化も行えるようになり、ダイノードの位置を調整して電極で電子軌道を矯正し、収集効率と 1 光電子分解能が向上した。

カムランド実験では、R3600 の 50 cm 径ガラスバルブ形状にボックスライン型のダイノードを採用することで、17 インチ(43 cm) 径の受光面を持つ R7250 を開発し、時間・

光電子数分解能が向上した。受光面の端では時間特性が悪く、収集効率も落ちて大口径化は難しかったため、43 cm 径以上は遮光マスクされている。ボックスライン型ダイノードは、小口径では一般的であり Super-K の外水槽用 8 インチ(20 cm)径 PMT でも用いられている。ボックス型の第一ダイノードの収集効率は高く、ライン型では電子軌道のばらつきが小さく時間分解能が良いメリットがある。これは正面から見ると非対称な形状で、口径が大きくなると電子軌道が長くなるので、入射位置により性能のばらつきが顕著になって収束電場設計が難しい。

どの PMT もこれまでのニュートリノ研究を大きく発展させた実績があるが、Hyper-K ではさらなる光検出器の高性能化を目指した。

2.2 新型 50 cm 径光検出器候補

2011 年の暮れに研究者と浜松ホトニクス社の関係者が集まり、50 cm 径光検出器の開発方針を決めた。Hyper-K の光検出器候補として Super-K の PMT 以外に新型光検出器の候補を 2 つ検討していた。その内の 1 つはダイノードに従来のベネシアンブラインド型ではなく、ボックスライン型を採用する PMT であった。細かな金属部品を多く組み立てるベネシアンブラインド型よりコストが若干下がり、高性能化を期待できて小口径での実績もあったので、まずこれは実現しようということになった。他方のハイブリッド型光検出器(HPD)は、内部の増倍に半導体検出器を用いる。新たな試みが多く実用化の見込みは未知であったが、より高性能で低コスト化の可能性があったため、この開発にも挑戦することになった。これら 2 種の新型光検出器では、光子から光電子を得る量子効率(QE)を高め、従来のピーク値 22~23% から 30% への高 QE 化を目指した。

開発は既に先行して進んでいた 20 cm 径 HPD (R12112) から始め、50 cm 径 Super-K PMT の高 QE 化(R3600HQE)に着手し、高 QE 50 cm 径 HPD (R12850) と高 QE 50 cm 径ボックスライン型 PMT (R12860) の開発に取り組んだ。学生を中心に回路設計や評価などの開発と調整を行い、試作と評価を繰り返して多くの改良案から採用候補を絞っていった。

浜松ホトニクス社以外でも中国 NNVT 社はマイクロチャンネルプレート(MCP)を使った PMT を製造しており、液体シンチレータを用いるニュートリノ実験を行う JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) 用に新たな 50 cm 径 PMT (N6201) が開発されていた。これを元に、Hyper-K のため時間分解能を高めてダークカウントレートを下げた MCP PMT (N6203) を開発することになった。

図 1 の写真はここで挙げた 4 種の防水光検出器の外観であり、図 2 で増倍原理を比較した。Hyper-K で採用することとなった高 QE 50 cm 径ボックスライン型 PMT(R12860) をこれから Hyper-K PMT と呼ぶことにする。これを中心 HPD と中国 NNVT 社製 50 cm 径 PMT も交えて、開発の経緯を紹介したい。



図 1 50 cm 径光検出器

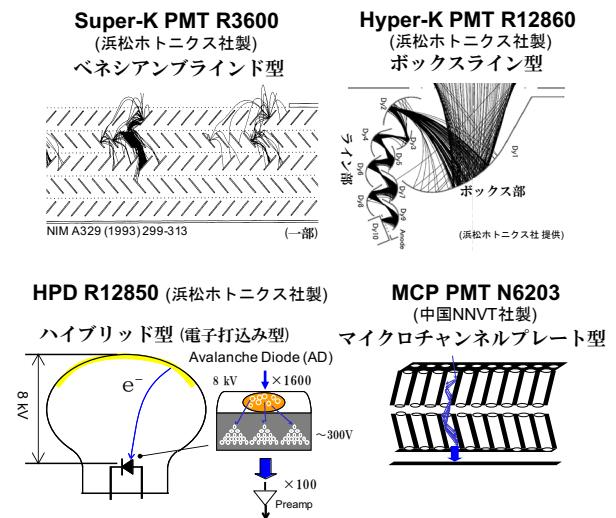


図 2 50 cm 径光検出器の増倍原理

2.3 ボックスライン型光電子増倍管

2.3.1 外観と性能向上

開発されたボックスライン型の防水 Hyper-K PMT は、図 3 のように硼珪酸ガラスバルブと防水部を外面に持つ。外部から約 2 kV の高電圧が、防水部内の電圧分割回路に供給される。一見して Super-K PMT との違いに気付けないかもしれないが、多くの改良が施されている。例えば、耐水圧性能は 0.65 MPa から 1.25 MPa へおよそ 2 倍に向上しており、ガラス中の放射線量も大きく下げられている。

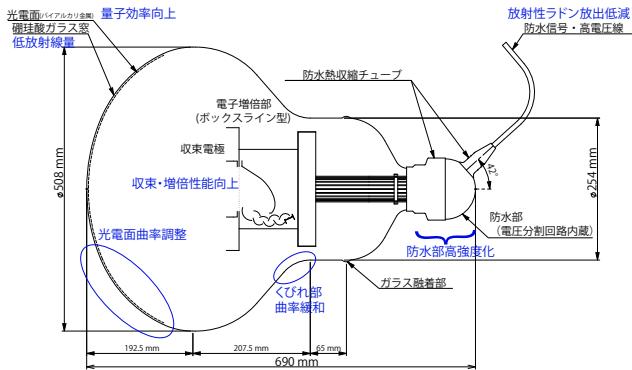


図 3 Hyper-K PMT (R12860) 外観と主な改良点

高い検出性能は 2018 年に Super-K へ取り付けた 100 本以上の Hyper-K PMT で実証されている。図 4 に、各 PMT の 1 光子相対検出効率と、1 光電子の時間分解能・光電子数（電荷）分解能の分布を、2 種の PMT で分けて示した。ゲインは 1.7×10^7 に調整している。Hyper-K PMT で検出する水チエレンコフ光量を Super-K PMT と比べると、 1.97 ± 0.10 倍の高い 1 光子検出効率が得られた。分解能は単色レーザー光で評価し、時間分解能(σ)は 3.0 ± 0.2 ナノ秒から 1.5 ± 0.1 ナノ秒へ向上した。取り付け前の事前較正時では、取得回路が異なるが約 1 ナノ秒の高分解能を得られていた。1 光電子ピーク電荷の広がり($\sigma/\text{ピーク}$)は $54 \pm 9\%$ から $27 \pm 4\%$ に狭まった。検出効率と分解能は 2 倍に向上したことが分かる。各性能の個体差のばらつきも小さいことを確認できた。これらの性能は Super-K 環境で評価されたが、信号ケーブル長は Super-K での 70 m から Hyper-K では 25 m 程度へ短くなり、データ取得回路も刷新されるので、Hyper-K ではより良い性能を得られるかもしれません。

2.3.2 検出効率

検出効率は量子効率 QE と収集効率に類別され、1 光電子の検出効率にはしきい値電圧以上の波高を選出する際のヒット効率も含まれる。受光面が大口径になると、収集効率とヒット効率が磁場や電圧に依存しやすくなり、光の入射位置によらず広く一様な検出効率を得るための製法と設計は簡単ではない。これらの影響を検証しながら開発を進め、検出効率の各要素は向上した。

Super-K PMT の高 QE 化は、中型 PMT での高 QE 化手法を元に短期間で成功した。300 から 650 nm に感度を持つ QE 波長分布の形状は変わらず、400 nm 付近のピーク値は 22% から 30% へ向上した。光電面材質も変わらず、アンチモンを下地にカリウムとセシウムを蒸着させたバイアルカリ金属の光電面材質を用いる。高 QE 化製法によって、光電面の厚み等を調整し、光の反射による損失を下げて吸収効率を高め、電子が飛び出しやすいように工夫されている。一方で、光電子だけでなくダークカウントの元になる熱電子も放出されやすくなり、中型 PMT では QE の向上に伴いダークカウントレートの増加が確認されていた。Super-K PMT の高 QE 化では、元の 4 kHz から大きく増えて 20 kHz 以上となった。新しいボックスライン型の Hyper-K PMT でも高 QE 化はすぐに成功したが、同様に高いレートとなった。後述するが、目標値 4 kHz への低減までに 7 年を要した。

Hyper-K PMT では光電面の製法が変更された。Super-K PMT では封入されたペレット中のアルカリ金属をガラス外部から高周波照射により熱して光電面を活性したため、アルカリ金属量にばらつきが生じやすかった。Hyper-K PMT ではアルカリ金属ディスペンサを利用して、アルカリ源に直接電流を通して加熱できる。アルカリ金属量を容易にコントロールできるようになり、光電面感度の監視と制御もしやすくなった。さらに、新たに竣工した工場では、一定環境と大型設備による自動化で、個体差を抑えて安定した製造を期待できる。これまでの量産品では平均 QE が $33.7 \pm 1.2\%$ となり、Super-K 時より 1.5 倍に向上している。

検出効率 2 倍の達成には、QE だけでなく収集効率の向上が大きく寄与している。カミオカンデのベネシアンブラン

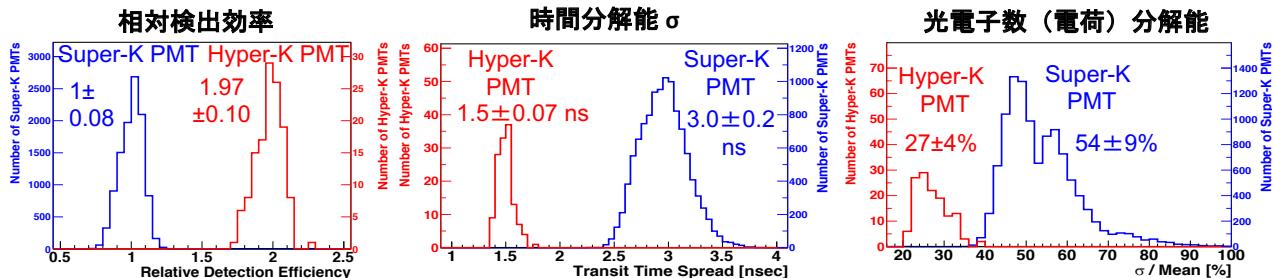


図 4 Super-K 内で評価した Hyper-K PMT (R12860) と Super-K PMT (R3600) の 1 光子検出効率と 1 光電子分解能分布

インド型ダイノードは、細長いダイノードがブラインドのように斜めに並べられるため、特定の角度から入射する電子はダイノードに当たらず、電子の収集効率は悪かった。Super-K PMT では電子の飛方向がダイノードに当たりやすくなるように、異なる電位の金属メッシュ板をダイノード前に 3 層並べて電場を調整し、収集効率と分解能が向上した。3 層合わせたメッシュ穴の開口率は 79% であり、Super-K PMT の電極構造自体の収集効率は計算値で 86% となるので、実質的な収集効率は合わせて 68% であった。Hyper-K PMT でも、斜めに傾いたボックス型の第一ダイノードで電場が非対称にならないように、ボックス型開口部にメッシュ板が 1 層あって平らな等電位を作っている。メッシュ穴の開口率は 97% であり、電極構造による収集効率は 98% と高く、合わせて 95% の高い収集効率を設計できた。Hyper-K PMT の収集効率は Super-K PMT より 1.4 倍高くなり、QE 向上分を合わせると検出効率は 2 倍になる。

光電子が光電面から初段のダイノードまでに打ち込まれるまでの収集効率は、QE と同様に 1 光子信号の有無を決める検出効率の一部であり、第一ダイノード収集効率と呼ばれる。この入射位置依存性は、電場設計と周辺磁場の影響で決まり、広い受光面全体で均一に電子軌道を調整する必要がある。同じダイノード方式を用いたカムランドのボックスライン型 PMT では有効径（出力低下が半分以下に収まる範囲）が 43 cm であったが、光電面形状とダイノードの形状・位置を新たに設計して 49 cm 径に広げられた。大きな改良点として、ボックス型ダイノードの開口面積は 1.7 倍に広がり、収束前に加速電極が加わった。図 5 では 1 光子検出効率の入射位置依存性をダイノードに対し 2 方向で実測し、Super-K PMT に比較して相対的に図示している。大口径の端まで広く均一な検出応答を得られたことが分かる。

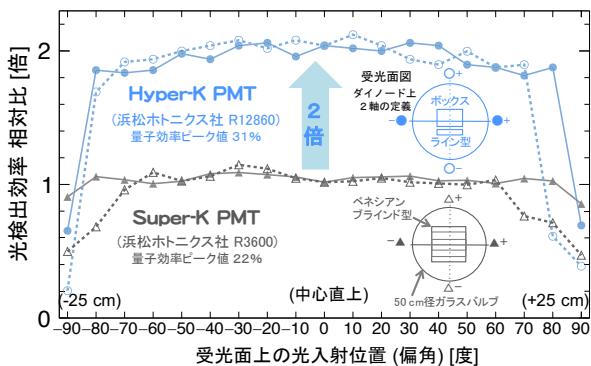


図 5 Hyper-K PMT(R12860)の Super-K PMT(R3600)に対する受光面上の 1 光子相対検出効率

第二ダイノード以降のダイノードでの収集損失はゲイン悪化を招く。Super-K PMT では、斜めのダイノード板をすり抜ける角度で入射する電子がダイノードを 1 つ飛ばして

増幅されない場合にゲインが落ち込み、分解能が悪くなっていた。カムランドの 43 cm 径 PMT でも、入射位置によってはボックス型の第一ダイノードからライン型の第二ダイノードへの収集効率が悪く、ゲインが低下する。開発していたボックスライン型ダイノードでも、光電面上の特定の位置で光が入射する場合は、特に磁場があると出力が落ち込んでいた。地磁気は 50 cm 径内の電子収束においては無視できないため、Super-K と Hyper-K ではタンク壁に地磁気を打ち消すコイルを設置する。この残留磁場が十分収まる磁場 ± 100 mG の範囲内での局所的な性能劣化を防ぐため、時間性能と全体の収集効率も見ながらダイノードの位置や形状を調整した。図 6 にシミュレーションで得られた入射位置による出力分布を比較した。他の性能を見ても、Hyper-K PMT の応答一様性はもっとも広く均一となつた。神岡坑内では入射位置・電圧・磁場 3 方向ごとに実測しており、計算値と同様にゲイン・収集効率・到達時間・時間分解能の一様性が向上したことを確認している。

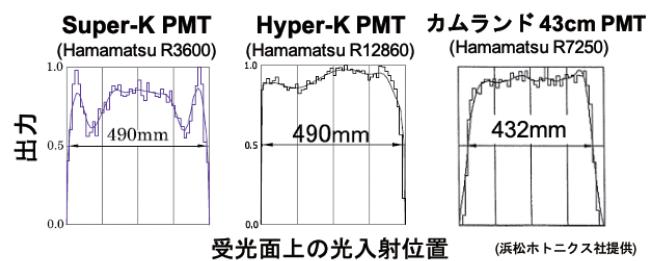


図 6 非一様性がもっとも大きいダイノード断面上の方向にてシミュレーションで得た PMT 3 種の出力一様性

1 光電子を検出する際に各 PMT 波高に設けるヒットのしきい値は、Super-K では 1/4 光電子数相当に設定されている。Hyper-K PMT では時間応答が良く波形が鋭いため、同じ電荷でも波高が 1.5 倍ほど高く、同じしきい値電圧でも 1/6 光電子以上の高い効率でヒットを取得できる。入射位置や磁場によるゲインの落ち込みが Super-K PMT に比べ大幅に改善されたので、1 光電子の電荷分布に 0 光電子付近のテールが大幅に減少し、図 7 で示す綺麗な 1 光電子分布を得られるようになった。

2.3.3 検出性能

時間分解能はライン型ダイノードによって電子軌道が揃うことで向上し、電子軌道計算でも半値全幅が Super-K PMT の 3 ナノ秒以上から 2 ナノ秒以下へ抑えられると見込まれた。試作後すぐに分解能が予想通りに高いことが分かった。波形も速く鋭くなり、波高が 10% から 90% に達する立ち上がり時間は 10 ナノ秒から 6 ナノ秒へ短くなった。また、PMT 内の電圧分割回路中で抵抗を追加・調整して波形のリングングやオーバーシュートを抑え、綺麗な波形が得られた。光電面からの信号到達時間は、Super-K PMT

では入射位置の違いで 2 ナノ秒程度ずれうるが、Hyper-K PMT でのそれは 1 ナノ秒より小さい程度であり、一様な応答時間を得られる。

PMT の 1 光電子分解能は初段増倍から収集できる二次電子数のふらつきによって決まる。Super-K PMT と比較すると、第一ダイノードの電圧が高くなつて初段の打ち込みゲインが 1.7 倍比となり、さらに第一ダイノードから第二ダイノードへの収集効率が向上したため、初段の実効ゲインは 2.2 倍も高く、分解能は 1.5 倍の向上を見込んだ。図 6 で見たように、入射位置による出力一様性は Super-K PMT より良いため、全面に光が入射することを考えると、分解能は相対的にはさらに向上していることになる。

Hyper-K PMT では図 7 のように微弱光からの電荷分布中に 1 光電子ピークがはっきりと見える。1 光電子と 0 光電子（ペデスタル）の間に含まれる平らなテール分布は、第一ダイノード表面で光電子が増倍されずに散乱してエネルギーを失い、再度収束されて検出される際に現れると考えられる。ダイノード間の収集効率が良いため、他の PMT で見えることのある 0 光電子付近に集中するテールは見えていない。1 光電子ピークは、ガウス分布と平らな分布の両端を誤差関数で鈍らせたものを合わせた関数でよく再現できており、ゲイン較正の精度向上を期待できる。

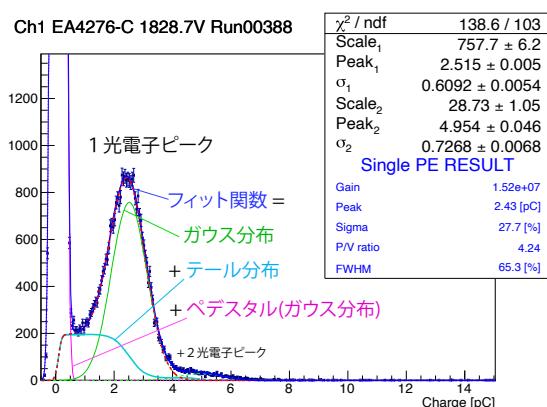


図 7 Hyper-K PMT (R12860) の 1 光電子電荷分布

大きな光量でも精確に測定するには、光量で変動しない安定したゲインも重要である。Hyper-K PMT では波形が鋭く、ライン型ダイノードでは電子軌道が狭い空間に集中するため、大きな光量では空間電荷飽和が起こつて電子が放出されにくくなり、入出力線形性が低下しやすいつと予想される。また、電圧を分割する回路では、水中での発熱を抑えるために高めの抵抗値で消費電力を抑えているので、信号出力が大きな時に補える電流が不足して線形性の低下を招きやすい。1 光電子で 6 mV 程度の波高とすると、1000 光電子程度では 6 V の出力になるが、当初の設計では線形出力性が悪く、十分な波高が得られなかつた。このため、空間電荷飽和を抑えるようにダイノード間の電圧を後段で

高める回路（テーパー型と呼ばれる）へ調整した。収集効率が低下しないように第一ダイノード電圧も同時に調整し、時間等の性能が低下しない範囲で最後のダイノード 3 段の電圧比を決定した。出力線形性は Super-K PMT より若干落ちるもの、飽和せず 1000 光電子以上でも出力できるようになった。

高レート検出時のゲイン変動は、レートと光量を変えられるパルス光源をバックグラウンドとして、別のリファレンス光源のパルス電荷を見て評価した。平均出力電流が 0.1 mA の出力（1 光電子で 10 MHz 以上相当）でもゲインは安定であり、十分な高レート耐性を確認した。

2.3.4 性能実証

Super-K では当初から取り付けられた PMT の半数が 25 年を経ても現役で使われている。Hyper-K でも長期で安定に使用できるように、水中での長期実証試験を行つてきた。神岡坑内にガドリニウムを用いた反ニュートリノ検出実証用の 200 トン水チェレンコフ検出器(EGADS)があり、2013 年夏に Super-K PMT に加えて 5 本の高 QE Super-K PMT を取り付けた。2014 年夏には 3 本の高 QE Hyper-K PMT を取り付け、長期に故障せず検出できている。その後は開発が大幅に進んで、2018 年にはダークカウントレートとアフターパルスを低減した 136 本を Super-K へ取り付け、前述の図 4 で挙げた検出効率と時間・電荷分解能の性能向上を確認した。さらに長期性能安定性を確認するため、ゲインやレートのモニタ測定を継続しており、これら事前の運用経験を踏まえて Hyper-K 観測開始に臨むことができる。

2.4 ノイズ

光検出器起因のノイズとして、暗中でも 1 光電子として見えるダークカウント、信号から遅延して現れるアフターパルス、放射性同位体起因の発光ノイズ、増倍中や放電による発光ノイズが挙げられる。物理事象と完全に区別できない大きな発光ノイズは、非常に低頻度であつても問題となる。水中の信号レートは大変低く、ダークカウントが PMT ヒットの大半を占めている。

アフターパルスは、加速された電子が真空中の残留ガスに衝突して生まれる正イオンの逆流により起こる。大口径では光電面までの飛距離が長くなるので、口径が小さな通常の PMT より現れるタイミングが遅くなり、イオンの質量によって 30 マイクロ秒辺りまで広がる。アフターパルスは信号に伴い遅延して現れるので、ミューオンの崩壊で生じる電子などの遅延信号を見たい時には邪魔になる。Super-K PMT のベネシアンブラインド型では 1 光電子に対して 1% 程度の頻度でアフターパルスが現れていた。ボックスライン型はダイノードが光電面側に広く開かれ、ガスイオンの逆流が起こりやすくなる。初期の Hyper-K PMT

ではアフターパルス発生率が 30%と高かった。そこで、ダイノードの形状調整や内部の残留物除去によって低減を試み、5%まで落とすことができた。

ダークカウントレートは事象識別や事象再構成に影響する。Hyper-K では検出効率が倍になり、1 MeVあたり 12 光電子数程度を検出できるが、光検出器の本数は 4 万本に増える上に、各 PMT のノイズが大きければコインシデンスで観測する低エネルギー事象の識別効率が下がってしまう。また、水中での反ニュートリノ識別を利用する 2.2 MeV ガンマ線の探索効率にも影響する。データの転送レートを考えると平均 10 kHz までが限界で、開発当初に見られた 20 kHz レートは許容できなかった。さらに Hyper-K で目指す物理感度を考えると、Super-K PMT と同程度の 4 kHz まで下げる必要があった。

暗中で見えるダークカウントは、常温では光電面上の熱電子放出による 1 光電子量の偽信号が主要因と考えられた。環境温度に依存するため 14°C（推測の水温であり、Super-K では 13°C）で安定化した後にレートを評価した。熱電子は光電面全体からランダムに放出され、個々の信号は 1 光電子と区別できない。高 QE 化で光電面の仕事関数が下がると熱電子の放出レートも上がり、ボックス型で収集効率が上がると熱電子も収集されやすくなるので、原理的には検出効率が上がるとダークカウントレートの増加を招く。また、ガラスや水中の放射性物質崩壊等による発光がダークカウントの一部として混ざっていた場合は、検出効率向上分でさらにダークカウントが増えてしまうことになる。4 kHz のレートは汎用の PMT としては低くないが、受光面積の広さを考慮すると最低水準にあり、Super-K PMT と同じ 4 kHz に保つ目標値は難易度が非常に高い。

光電面製法条件の最適化により、2015 年に 20 kHz から 10 kHz まで落とし、2016 年にはさらに 8 kHz まで低減した。さらに条件を変えながら最適な製造方法を見つけるため、東京大学宇宙線研究所柏キャンパスの地下で、10 本以上の 50 cm 径光検出器を 13~14°C 環境で同時に評価できる測定室を設けた。ダークカウントレートが安定化するまで 3 ヶ月以上測定し、開発が進むたびに効果を確認した。

ここで 5 年にわたって計 50 本程の PMT の設置と評価を繰り返したが、始めの数年間はなかなかレートを下げられなかつた。その後、2017 年度に製造して Super-K に取り付けた PMT は、2 年程経過して 13°C の水中で 5.4 ± 0.4 kHz まで下がり、安定化すると個体差も小さいことが分かつた。製法のさらなる改善と後述するガラス改良により、2019 年後半には室温で 8 kHz から 6 kHz まで下げられた。2020 年 3 月に 14°C で最終評価品 8 本の測定を開始し、3 ヶ月後に平均 3.9 kHz へ低減できた。目標の 4 kHz 以下に到達したことで要求性能を全て満たした PMT が完成し、2020 年 10 月に量産を開始できた。

2.5 ガラス改良

ダークカウントレート低減にはガラスの改良も必要になった。ガラスの自発発光が微弱で遅延した蛍光を伴うと分かり、ヒットの光量ではなくノイズヒット数を増やしていたためである。そこで、2018 年末からガラスの原材料や溶融炉を含む製造工程全体を見直し、改良の余地を探った。

光検出器である PMT が光を発すると困るため、PMT 開発当初から放電や電荷飽和等の発光が漏れ出ていないか確認していた。2013 年に 2 つの PMT を向かい合わせてコインシデンスレートを見ると、Super-K PMT で 2 光電子以上の低光量発光事象が確認された。高 QE 版 Super-K PMT や Hyper-K PMT で見ると、検出効率の分だけレートが高く、100 Hz 台で見えていた。一方で、PMT 波形に暗中下で稀に持続したパルスが見られたので、放電を疑って調査した。高電圧には関係しない発光の存在が分かったので、ガラス量や種類を変えてガラス単体を探った結果、放射性同位体がガラス中で起こすシンチレーション光が問題であると特定された。PMT に用いた硼珪酸ガラスは、添加物で活性化させると中性子検出用シンチレータとして活用できるが、ここでは邪魔になってしまふ。

ダークカウント中で持続発光するシンチレーション光のヒット時間分布には、主に 2 マイクロ秒と 8 マイクロ秒の時定数を持つ指数関数のテールが見られた。 α ・ β 線や宇宙線がガラス中に入射する際の発光でも同様のテールを確認した。熱電子由来のダークカウントレートは温度が高いほど増えるはずだが、Super-K PMT では 13°C 辺りでレートが最小になり、低温になるほど増える成分も現れていた。ダークカウントをランダムノイズ成分と持続パルス成分に分けて温度依存性を見ると、低温で増える成分は持続パルスを含む側に分離された。これはシンチレーション光量の温度依存性を示唆していると思われる。検出効率が高い Hyper-K PMT ではこの発光成分が多めに見えていた。

同時期に、IceCube 将来実験に向けた PMT ガラスとその耐圧ガラス容器について、放射性同位体の崩壊に起因してガラスがシンチレータとして微弱で持続した発光を見せる現象がドイツの研究者により報告されていた[5]。南極の低温では光量が増え、顕著に見えてくる。Super-K や Hyper-K では 50 cm 径バルブに大量のガラス 7 kg を使用する上に、低い 1 光電子光量を見るので影響を受けやすい。

当初は熱電子がダークカウント量の大半を占めると思われていたが、放射性同位体の崩壊数のみでなく持続ヒットも考慮して改めて調査すると、半分ほどはシンチレーション発光であった。光検出効率が高い Hyper-K PMT では発光の影響を受けやすくなる。これを抑えるためには、ガラス中の放射性不純物を減らすか、ガラスのシンチレーション発光量を減らすため、ガラスの改良が必要になった。

ウラン・トリウム系列の混入源を探るため、ガラスの原材料や製造工程中のガラスと周辺の材質を調査すると、ガラス原材料とガラスの溶融炉からおおよそ同じ量で混入していることが分かった。ガラスの放射線量を下げる前例はあるが、50 cm 径 PMT の製造で大量に必要な数百トンのガラス量と、設備投資にかかる高額なコストを考えると採用は難しかった。また、溶融炉の素材調査と放射線量低減の検討を進めると、低減の手段の 1 つでは炉のコストが膨大で、別の手段には不定性も大きく、製造の都合で現実的な対策としては難があつて改善を見送った。一方で、ガラス原材料に放射線量の低い綺麗な代替候補が見つかり、採用して頂いた。放射線量を見て製造調整するため、各工程や溶融炉内の場所ごとにサンプル採取を行い、毎日の採取にもご協力頂いた。線量測定や質量分析を行い、他の混入経路を塞ぎつつ製造方法を調整して、1 年後には放射線量の半減に成功した。Super-K PMT のガラスに比べ、以下の放射線量低減を確認できた。

表 1 ガラス中の放射線量

放射線量 Bq/kg	^{238}U 系列	^{232}Th 系列	^{40}K
Super-K	5.5	1.8	18.2
Hyper-K (2020)	2.9	0.95	2.0

同時に、ガラスが綺麗になって透過率も向上した。短波長側の QE はガラスの光透過率で決まり、III 値鉄イオンの混入量が短波長光の減衰に寄与していた。この混入量が原材料中から減った上に、製造ラインを改善して鉄の混入を防ぎ、積極的な除去を行つた。改善の結果、350 nm 以下の QE が顕著に向上了し、厚いガラスでは見た目で分かる程度に赤みが消えた。水チエレンコフ光は波長のマイナス二乗で短波長側の光量が増加するので改善効果が大きく、1 割近くの検出光量増加を期待している。一方で、ガラス発光測定によるおおまかな見積もりでは、透過率が向上したためにシンチレーション発光 1 回あたりで生じる発光量は 2 割程度増えてしまった。この効果を含めても、ガラス中の自発発光ヒットレートは合わせて 2 割程度の低減と考えられる。

このガラス改善だけでは目標に到達できなかつたが、製法調整によるレート低減成功も加わつて、量産開始の半年前に 4 kHz を達成できた。放射線量は量産中も毎月のモニタリングを実施しており、最近は低減傾向が見られている。

2.6 放射性ラドン放出の低減

低エネルギー事象の主なバックグラウンド源として、放射性ウラン・トリウム系列等の崩壊や、そこから水中に放出される放射性ラドン等がある。 ^{222}Rn は半減期 3.8 日のガスとして水中に長く留まり、崩壊系列で 3.3 MeV のベータ崩壊が起こるので、低エネルギーの偽信号としても PMT

ノイズヒットとしても邪魔になる。外部からの放射性ラドン侵入を遮断しても、水中で常時放出されると困るので、光検出器の素材選定も重要になる。水中で用いる素材の放射性ラドン放出量を調べる内に、Hyper-K PMT は Super-K PMT より高いラドン放出量を持つことが分かった。PMT ガラスは放射性ウラン・トリウム系列を大量に含むが、ラドンはガラスをあまり透過せず無視できる量の放出しかないことが分かり、原因を探る内に防水 PMT ケーブル内部のポリ塩化ビニル(PVC)が原因であることが分かった。PMT ケーブル中の信号線と高電圧線は共に同軸線で PVC 外皮を持ち、この 2 線がポリエチレン外皮で 1 本にまとめられた複合線となっている。Super-K の高電圧線は単線で PVC 外皮がないので、Hyper-K 用ケーブルの方が PVC 使用量は多く、PMT 周りのケーブル量も Hyper-K の方が多くなる。別種の PVC を調べたがどれも放射線量が多く、ラドン放出量が少ない PVC やシールド等も検討したが、結局は内部の同軸線外皮もポリエチレンに置き換えた。ケーブル 1 mあたりのラドン放出量は Super-K PMT で 0.6 mBq/m、Hyper-K PMT で 1.4 mBq/m であったが、改良後は 0.1 mBq/m 以下となり一桁低減できた。

これで PMT からのラドン放出量は大幅に落とせて Hyper-K でラドンフリー測定を行えると良いが、PMT を水中で保持するためのバンドに用いるクロロブレンゴムもラドンを多く放出することが分かった。このゴムは超純水の光透過率も悪化させるので、シリコンゴムが代替品として検討されている。放射性不純物がほぼなく、安定で摩擦力が高く、超純水を汚さないので、実現すればゴムからのラドン放出量は 2 桁低くできる。信頼性と安全性を確認するため、PMT 保持バンドの改良と実証試験を進めている。

2.7 光検出器の高強度化

水中で光検出器の長期間測定を行うためには、確実な安全対策が必要となる。もし 1 本でも高水圧中で割れると、その衝撃で周囲の光検出器も破壊が誘発され、これが連鎖して大量に破壊されうる。発生する衝撃は水圧が高いほど大きくなる。ガラスバルブは手作りで個体差があり、僅かな損傷を見逃す可能性もあるので、水中に沈める 4 万本が 10 年以上 1 本も壊れないと保証することも難しい。もちろん耐水圧試験は全ての光検出器に対して行うが、万が一ガラスが割れても衝撃波を生じない機構が必要となる。過去には 2001 年に Super-K で底面の 1 本が爆縮して連鎖破壊が起り、半数の PMT が失われている。Super-K では早急な対策により、PMT 全数を 65 m 水深相当の静水圧試験で選別し、かつ爆縮しても衝撃を発生しないカバーを開発して、1 年後に測定を再開した。Super-K よりさらに 30 m 深い Hyper-K の水深 71 m でも連鎖破壊を確実に防ぐため、

より強度を増した 125 m の水圧に耐える光検出器と 80 m 水深まで連鎖破壊を抑止できるカバーを開発した。

Super-K PMT のガラスバルブは約 3 mm 厚の硼珪酸ガラスでできており、大口径から後部の円筒部に形状が変わらぐびれ部分の強度が弱かった。応力計算に基づいて、この曲率を緩くして応力を 1/8 に緩和し、光電面部分でも曲率を調整して 1/16 に抑えられた。ガラス形状の改良後は、水に直接触れる部分ではないが、相対的に金属リードが貫通する PMT 底部がもっとも弱い箇所となった。ここは Super-K ではポリエチレンの黒いプラスチックカバーで覆われ、高電圧分割回路とケーブルと共にウレタンで充填され防水されていた。ポリエチレンには外部の高水圧から内部の高圧化を避けられるほど強度がないため、強度が十分で超純水にも耐性がある PPS (ポリフェニレンサルファイド) 樹脂で半球状のカバーを作り、最弱部も保護できる設計が得られた。

ここから実証により完成させるまでが大変で、神岡坑内で様々な条件のガラスバルブを高水圧容器に入れ、加圧して割る試験を繰り返した。各バルブの厚さを超音波厚み測定器でスキャンして測定し、厚さごとに色付けて、ガラス中の異物や泡などに印をつけていき、割れ方が分かるように養生した。加圧していくと不意に割れて大きな爆縮音が坑内に轟いた。1.6 MPa まで上げても割れないもの (HPD のバルブなど) もあり、ひびのみ入った危険なガラスの処理も必要だった。割れの形状やひびの発生点などを記録して試験を 50 回以上続け、割れる水圧とガラスの厚みや異物との相関を見出せた。形状や防水方法、バルブを封じる寸法などを変えて、厚さ等の選別条件を探ることで、高強度設計を実現した。ガラスの品質選別方法を決め、設計が決まった 50 本以上の PMT バルブで 125 m 水深相当まで耐水圧試験を行ったが、全てに損傷はなかった。Super-K PMT の 65 m 耐水圧に比べると、約 2 倍に向上了と言える。強度の劣化も試験しており、素材の水への溶出加速測定や、温度・水圧のサイクル試験、運搬時の衝撃耐性等の確認を行った。

製造工程も改良され、ガラス量を均一化し、ガラスの厚みをスキャン計測して選別できる装置と、自動で加圧試験を行える高水圧容器が用意された。ガラスの外観は、製造中や Hyper-K への取り付け前でも確認される。量産時には、過負荷によるダメージを避けて 85 m 水深相当まで加圧試験し、全ての PMT で強度を確認する。量産開始前後にも 40 本の PMT を 135 m 水圧まで加圧したがいずれも損傷はなく、高い強度を再確認できた。

2.8 光検出器カバー

周囲への爆縮連鎖を回避するため、2002 年以降の Super-K では全ての PMT にカバーを取り付けている。受光面側

には紫外線透過アクリルを用い、後部はガラス繊維強化プラスチック(FRP)を使って、2 つを大口径部でフランジ締結している。この FRP 素材はガラス由来の放射性同位体含有量が高く、遮光性が低い上に励起光が長期間漏れ、個体差が出やすく、粉塵が作業者に好ましくない。このため、Hyper-K 向けにはステンレススチールまたは 2 つの樹脂候補を検討し、80 m 水深まで使えるカバーの開発を始めた。

カバーは耐水圧に耐えるが密閉容器ではないので、通常はカバーの穴を通して PMT に高水圧がかかる。万が一ガラスバルブが割れて真空空間がカバー内に生まれた場合に、高水圧による水の衝突で衝撃波が生じないように、カバー周囲の水がカバー内へ緩やかに流入して衝撃を緩和する設計になっている。カバー内部で PMT が失われてから水が満たされるまでの間に、カバーは外部の高水圧に耐え、衝撃波を大幅に緩和する必要がある。

この性能を実証するため、2 段階で試験を行う。まず、カバー内を大気圧にして密封し、外部を高水圧で加圧して、耐えうる強度を持つかどうかを確認する。神岡坑内に 68 cm 外径のカバーが入る大型の高水圧タンクを用意し、静水圧試験でカバーの設計を固めた。最終的には、破壊時の動的な変形と圧力変化に耐え、かつ外部に衝撃波を出さない実証が必要である。この爆縮連鎖抑止試験は水で満たされた北海道の豊岡跡で行った。ここに、縦横 3 列で PMT を 9 本並べられるフレームを水深 80 m まで沈める (図 8)。中心のカバー内の PMT のみに自発的な爆縮を起こさせ、水中の衝撃波とカバーの歪みを測定し、カバーと周辺 PMT への外傷有無を確認した。3 回の試験全てで、カバーが潰れず衝撃波が緩和される要件を課した。

受光面に用いるドーム状アクリルカバーは、Super-K のものから外径や高さを調整した。後部のステンレス製カ

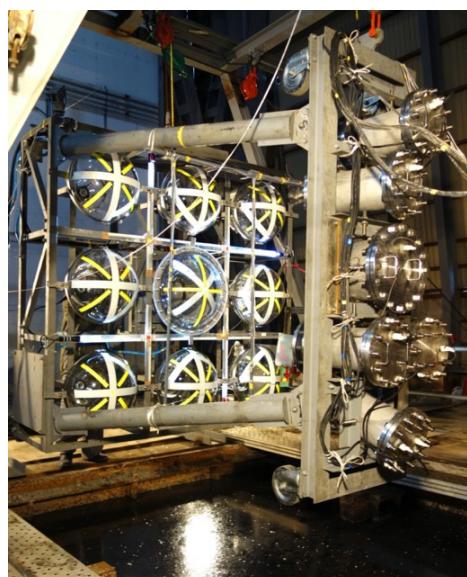


図 8 水面上に吊るされた爆縮連鎖の抑止実証装置

バーは有限要素解析による動的な爆縮時のシミュレーションを元に設計した。2016年冬に80m水深までの爆縮連鎖抑止試験を行い、板厚や補強形状を複数通り用意した中で最も軽いカバーの実用性を実証できた。さらに軽量化して、PMT検出面の開口率を上げたステンレス製カバーを開発し、2018年冬に2度目の試験を行った。80m水深で再度実証できたことで、Super-Kの40m水深に比べ2倍の深さで使えるカバーが完成した。また、格段に軽く短期製造できるカーボンファイバーで強化したPPS樹脂製カバーと、スペイン開発の重量より低コストを優先するステンレス製カバーの原理実証試験も行った。

樹脂製のカバー検証はSuper-K水深での試験に留まっていたが、安価なPOM(ポリアセタール)樹脂と金属部品による補強により強度を上げて改良している。また、スペイン製カバーはフランジを省いた軽量化設計も進めている。タンク内での固定方法の検証も含め、これらカバーの最終試験を2021年度中に行い、2022年度のカバー量産開始を予定している。

2.9 ハイブリッド型光検出器(HPD)

50cm径光検出器として先に開発を進めていたハイブリッド型光検出器(HPD)のR12850は、中にダイノードではなく小さな半導体検出器を用いる。ダイノードの材料費と組立工賃を省ければ製造コストを抑えられ、内部の構造物が少なければ光電面製造やノイズ低減の調整を行いやすい期待もあった。半導体検出器の検出面積はノイズとコスト面から大きさに限界があり、大口径の光電面から小さな半導体内へ光電子を収束させる高電圧が必要となる。PMTで用いる2kVより高い8kVのおかげで、大きな打ち込みゲインにより増倍のばらつきを抑えて光電子数分解能は高くなり、半導体内の増倍時間のばらつきが小さいため時間分解能も高い。ただしアンプの性能が分解能を大きく左右し、高電圧は技術面と実用面で最大の懸念でもあった。

Hyper-Kへの採用には至っていないが、水中で動作できるものまでできあがったので、開発経緯を簡単にご紹介する。

HPDは約50年前に提案された原理で、Super-Kで半数のPMTが失われた2001年には、球体形状のガラス中央に小さな半導体検出器を置く案が既に議論され、開発も始まっていた。当初は応力を分散できる球体に近づけ、高い耐水圧性を実現したい考えがあった。ダイノードのためのガラスバルブ奥行きを短くできれば、タンク内の無駄なスペースを減らせて、かつ約60kgの浮力を減らせてタンク内の光検出器支持構造も安くできる。実際には、球体で中央の平面に収束させる電場設計は難しく、光電面の形状はPMTとほぼ同様になっている。また、奥行きが短いと必要な耐水圧強度を得られず、PMTと同程度の長さになった。

Hyper-K向けには、デジタル回路開発も併せて13インチ(33cm)径HPD(APDを用いるHPDの意で、ここで挙げるHPDと同じ)まで試作が進み、必要な印加電圧は20kVから8kVまで落とさせていた[6]。さらに、Hyper-Kの外水槽で使える8インチ(20cm)径のHPDを実現するため、高電圧とアンプ回路を含む防水版を開発した。50cm径HPDバルブの開発を並行して進め、開発した回路は大口径版へ応用する方針であった。

8インチ径のHPDには5mm径のアバランシェダイオード(AD, APDと同等)を用い、光電面からADに+8kVの電圧を与えて5mm径内に光電子を収束させる。AD上の打ち込みゲインは1600倍程で、AD内で50~100倍に増幅して、アンプでさらに100倍に増幅すると、PMTと同程度のゲインと波形が得られる。ADの径と増倍率は異なるが、50cm径HPDの原理(図2)と同じである。最初は読み出し回路の故障が頻発したので保護回路を開発し、差動アンプで信号雑音比を上げ、1光電子の電荷分解能は良いときで12%に達した。長期間で故障や放電・発光を起こさず水中で安全に使えることを、耐久性試験や水中動作試験、ノイズ調査等で念入りに確認し、防水仕様のHPDが完成了。2013年には神岡坑内の200トンEGADS水タンクへ8本の防水20cm径HPDを取り付け、長期の観測を始めた。

50cm径HPDの実現には課題が多かった。磁場と光の入射位置による電子軌道のふらつきを考えると、ADには20mm径の大きさが必要となるが、ADの接合容量が電圧印加時で800pFと大きい。これを低ノイズかつ高ゲインで読み出せて波形を100ナノ秒幅程度に収められるアンプの開発が難航した。まず容量の小さい5mm, 10mm, 15mm径のADや、接合容量を抑えるため20mm径内で5チャンネルまたは2チャンネルに分割したADを使ってHPDを試作すると、十分に良い分解能が得られた。アンプ低ノイズ化のため、コイルを介したトランス結合やブートストラップ回路等の形式を試みたが、最終的にはAD層の厚みを調整して接合容量を半減した1チャンネル型ADと性能向上したアンプで1光電子を検出できるようになった。図9上段に光電面中心への入射時の1光電子の電荷・時間分布を載せた。50cm径光検出器の中でもっとも高い分解能を得られている。1光電子光量ではどちらの分解能もアンプのノイズに大きく影響されており、時間分布ではHyper-K PMTと大差ないが、電荷分布では2光電子も識別できている。高い光量では良い分解能が顕著に見えてくる(図9下段)。2017年には1本の防水50cm径HPDを200トンEGADS水タンクに取り付けた。

HPDの高電圧回路とアンプに汎用の設計は使えないため、多方に開発を依頼した。+8kVの電位上から相対的にADへ数百Vの電圧をかけるため、2チャンネルの高電圧回路を3社で試作した。防水HPDケーブルとして、電源・コ

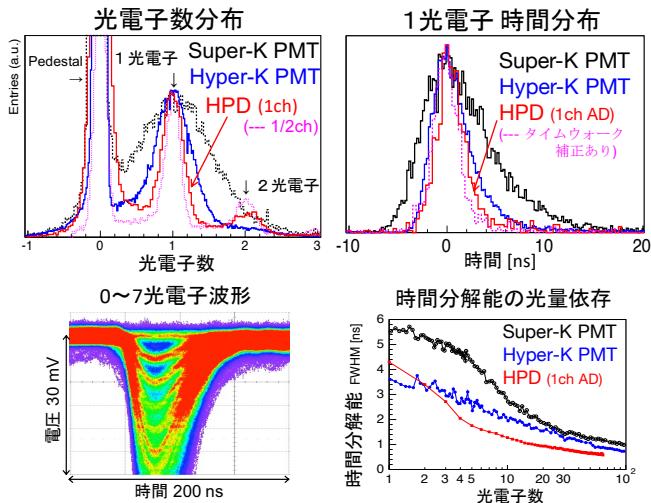


図 9 ハイブリッド型光検出器 HPD の検出性能

ントロール低電圧の 10 線に同軸信号線を複合したケーブルと、10 kV 高電圧 2 線と同軸信号線の複合ケーブルの 2 候補を開発した。また、高水圧用防水コネクタも開発した。アンプはディスクリート実装で、トランジスタ等の個々部品選別や調整を繰り返した。また、多チャンネル AD 読み出しにサムアンプを用いず、個別読み出しにより HPD の光電面への光の入射位置を再構成できる可能性も検証された。これには、光電面上の位置によって AD 上の収束点がずれ、また到達時間もずれてしまうことを利用する。

残る一番の懸念は量産性であった。電圧をガラス内部に通す金属リード周りで、2 kV 程度の PMT と同様に 8 kV から絶縁を保ってグラウンド電位を通すことは難しく、量産時の光電面蒸着に必要なグラウンド電位の確保が難しかった。また、AD 等の量産コストが想定より下がらず、性能がアンプのノイズで制限されていたことも難点であった。量産手法の確立に開発継続が必要で、一方で Hyper-K PMT の性能が十分向上したため、開発は保留となった。1 つの解決案としては、ガラスが高水圧を受けるのではなく、球形で受光面が透明な耐水圧容器に入れる前提で長さを短くし、高電圧とグラウンド電位の絶縁性を確保してガラスバルブを封じ、電源とアンプとデジタル回路を耐水圧容器に収めてしまう方法がある。光電面形状の設計に耐水圧を気にする必要がなくなり、一様な検出応答を持つよう改良できそうだが、改めて開発を進める機会はなかった。

2.10 中国製マイクロチャンネルプレート型光電子増倍管 (MCP PMT)

中国では JUNO 用にマイクロチャンネルプレート(MCP)を用いた 50 cm 径 MCP PMT の開発が行われていた。MCP では、ガラスプレートに大量の細孔を密に空け、その両面に電位差を作つて細孔内で電子増倍させる（図 2）。液体シンチレータを用いる JUNO では高いエネルギー分解能が

重要であり、時間性能より検出効率向上に特化した設計となっていた。そのため、当初は球形ガラスの中央に両面で読める MCP を置いて、全方向から検出する案で試作されていた。最終的には楕円断面の形状で片側 MCP から読む形になっているが、光電面の逆側でアルミ蒸着されている背面では光を反射させて光電面側に戻すだけでなく、アルミ蒸着面上の光電面からも光電子を収束できる電場設計を取った。また、MCP では細孔の被覆率で検出効率が制限される欠点があるが、JUNO 用 PMT(NNVT N6201)では細孔の空いていない面でも光電子を跳ね返らせて検出できる。

Hyper-K 向けの MCP PMT 開発は、2016 年アメリカ・シカゴでの高エネルギー物理学国際会議(ICHEP)で JUNO 用 PMT の展示が行われていた際に、時間分解能を高めてダークカウントを落とした Hyper-K 向けの改良をできないか問い合わせたことから始まった。翌 2017 年春に、まず JUNO 用 PMT のサンプル評価と改良打ち合わせのため、製造と改良を担当する北方夜視(NNVT)と中国科学院高能物理研究所(IHEP)の研究者が来日した。日本側は改良点を伝えて開発品を評価し、実用性を判断する一方で、開発と製造は NNVT を中心に行われた。MCP 自体の時間性能は高く、1 光電子波形の立ち上がり時間は 1.4 ナノ秒と早い。時間分解能は 20 ナノ秒と悪かったが、2 段の MCP の電圧を調整することで 10 ナノ秒まで改善した。光電子の到達時間と分解能が共に光入射位置に大きく依存していたので、収束電極を取り付けることで大幅に改善した。検出効率は元の JUNO 用 PMT より落ちるもの Hyper-K PMT と同程度で、Super-K PMT より若干良い時間分解能を得られた。ガラスを封じる辺りの耐水圧設計も向上し、耐水圧試験に耐えることが確認された。ダークカウントレートは 20 kHz から 10 kHz 以下まで大幅に下げられたものの、目標の 4 kHz まで届かず、要求性能に満たない部分がいくつかあったので、採用は見合わせることになった。開発された N6203 は中国で高エネルギー大気シャワー観測のため高標高宇宙線観測ステーション(LHAASO)に採用され、高エネルギーガンマ線観測で既に成果が上がっている。

3 現状と今後

3.1 その他の候補と今後の光検出器開発

Hyper-K では、海外グループが主導して高解像度のマルチ PMT と呼ばれる光検出器モジュールの開発を進めている。50 cm 径サイズの耐水圧容器に 8 cm 径 PMT を 19 本並べ、内部の電子回路でデジタル化できる。高い時間分解能と細かい位置情報で、壁に近い事象等の測定精密化を図るために、内水槽に取り付ける 50 cm 径光検出器の一部にマルチ PMT を採用する計画も進めている。

50 cm 径光検出器の検出効率をさらに上げる可能性として、カミオカンデでも途中から採用したように、水中に集光ミラーを取り付ける案も検討された。PMT 内部にもミラーとなるアルミ蒸着があるが、これを外に延長したイメージになる。迷光による事象再構成への影響の検証、反射率の水中長期安定性などが課題となる。

他にも、大面積の光検出技術は多方面で開発が進められてきた。例えば Incom 社の LAPPD (Large Area Picosecond Photodetector) は MCP を使った 20 cm 角の平らな光検出器で、まだ試作機段階であるが 50 ピコ秒の時間分解能とミリメートルの位置感度を持つ[7]。ダークカウントレートはまだ高いが、量産性が良ければ大型検出器に使えるかもしれない。また、ガス増幅を利用する光検出器も各所で原理実証が行われているが、水中では長寿命と発光抑制が課題となる。AD を用いる HPD 以外にも、AD ではなくシンチレータを置いて小型光検出器で読む方式や、ダイナミックレンジは下がるが SiPM (ガイガーモードのピクセルカウンター) を使う方式も小口径では開発されている。

3.2 高精度検出を目指す準備

Hyper-K PMT が完成したものの、製造は始まったばかりである。高性能化した PMT を活かして精確なデータ取得を行うため、今後 5 年あまりの研究が重要になる。2021 年には PMT を不備なく揃えるための検査システムを用意し、製造初期の 1000 本近くの PMT 全てで外観・動作確認を行った。2026 年まで毎月一定数の抜き取り確認をしながら製造・長期保管中の性能をモニタする。

今後は PMT と回路や較正装置を全てまとめ、光学的に隔てた内水槽と外水槽の内外を観測する 1 つの検出システム実現を目指す。一部実物大のモックアップで検証しながら、全体の詳細設計と建設作業の効率化を進めている。2025 年に水槽を完成させてから 2026 年末までの 1 年以内に検出システムを建設して安定した観測を実現するため、多くの Hyper-K 研究者が尽力している。

3.3 おわりに

Hyper-K の光検出器実現には、設計や製法改良による検出性能の向上のみでなく、高水圧下での安全性と、これらの実証・品質管理まで求められる。2026 年まで続く製造と事前較正、その後の Hyper-K への取り付けから運用開始まで無事に終えて、Hyper-K 検出器の高精度化を果たしたい。

光検出器を細かなところまで完成度高く仕上げられた背景には、最善の方法を選ぶために多くの可能性を検討した学生の貢献が大きい。これまで合わせて 40 名近い学生が関わり、毎年数名が主力となって開発を進めていた。国内では 30 名以上の研究スタッフが関わっており、海外も含めると光検出器の国際開発グループは現在 100 名規模で、

共同開発は 9 年目になる。光検出器の強度向上とカバー開発には、東京大学宇宙線研究所の研究者が中心となった。Hyper-K での実用性に重点を置いて堅実に検証するため、開発をお願いした業者の方々も含め、多くの方々にご協力を頂いている。特に、浜松ホトニクス社の方々には 100 回を超える開発打ち合わせを始め、多様な注文に応えて多大なご協力を頂き、大変お世話になっている。中国の NNVT 社と IHEP の方々とも、互いに国境を越えて協力し、積極的な開発と迅速な改良のおかげで高性能化につながった。両社の高い技術力と開発のおかげで Hyper-K に見合う高性能光検出器を追求できた。

検出器完成まで Hyper-K 検出精度を高める研究はまだ続いている。建設と測定開始を計画通りに行えるよう綿密な準備を進めている。まだ活躍の場は多いので、地下の巨大施設立ち上げに興味のある方々にはぜひご協力をお願いしたい。6 年後には Hyper-K 観測が始まり、ニュートリノや大統一理論研究の躍進が待ち受けている。その頃には大統一理論精密検証への新たな道が拓けていることを願って、次なる計画に向けた今後の光検出技術革新を期待したい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP25707016, JP25105004, JP18H05536 の助成を受け、東京大学宇宙線研究所の共同利用研究プロジェクトの援助を得ました。浜松ホトニクス社・NNVT 社や多くの企業と研究者の方々にご協力を頂きました。

参考文献

- [1] Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration, Hyper-Kamiokande Design Report, arXiv:1805.04163 (2018).
- [2] A. Suzuki, M. Mori, K. Kaneyuki, T. Tanimori, J. Takeuchi, H. Kyushima, Y. Ohashi, Nucl. Instr. Meth. A **329**, 299-313 (1993).
- [3] H. Kume, S. Sawaki, M. Ito, K. Arisaka, T. Kajita, A. Nishimura, A. Suzuki, Nucl. Instr. Meth. **205**, 443-449 (1983).
- [4] K. Abe *et al.*, Letter of Intent: The Hyper-Kamiokande Experiment, arXiv:1109.3262 (2011).
- [5] M.A. Elorrieta, Master Thesis, Westfälische Wilhelms-Universität Münster (2017).
- [6] 阿部利徳, 相原博昭, 田中真伸, 河合克彦, 久嶋浩之, 須山本比呂, 高エネルギーニュース **28-3**, 157 (2009).
- [7] A.V. Lyashenko *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **958**, 162834 (2020).