

# 100万トン水チェレンコフ検出器 「ハイパーカミオカンデ」 の開発研究

**西村 康宏**

東京大学宇宙線研究所   
東京大学次世代ニュートリノ科学連携研究機構

2018年度 東京大学宇宙線研究所 共同利用研究成果発表会  
2018/12/21(金)

# 課題と使途

- 100万トン水チェレンコフ検出器  
（ハイパーカミオカンデ）の開発研究
  - 塩澤 真人（宇宙線研） 10万円
- 次世代ニュートリノ検出器のための  
大口径光検出器の開発と運用
  - 西村 康宏（宇宙線研） 5万円
- 次世代ニュートリノ検出器のためのソフトウェア開発
  - 三浦 真（宇宙線研） 0円
- 合計 15万円 (国内旅費)

# ハイパーカミオカンデで目指す新たな物理

- 素粒子の包括した理解を目指す「大統一理論」の検証
  - 陽子崩壊の発見
    - 未知の物理事象から、素粒子の根源を探る
- ニュートリノで探る対称性と世代混合
  - レプトンCP対称性の破れ発見
    - 宇宙の反物質消滅の手がかり
  - ニュートリノ振動パラメータの詳細測定
    - 世代構造と未知の対称性の可能性を精査
- ニュートリノで観る天体事象
  - 超新星残骸ニュートリノの調査
    - 宇宙と星の歴史を探る
  - 超新星爆発ニュートリノの観測
    - 爆発・ブラックホール形成のモデル検証

# ハイパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデ



有効質量  
22.5 kton

8倍

有効質量  
186 kton

光センサ開発で未到の感度達成

新型50 cm(20インチ)光電子増倍管を開発

検出効率 ×2 倍

時間・電荷分解能 2 倍向上

耐水圧 ×2 倍

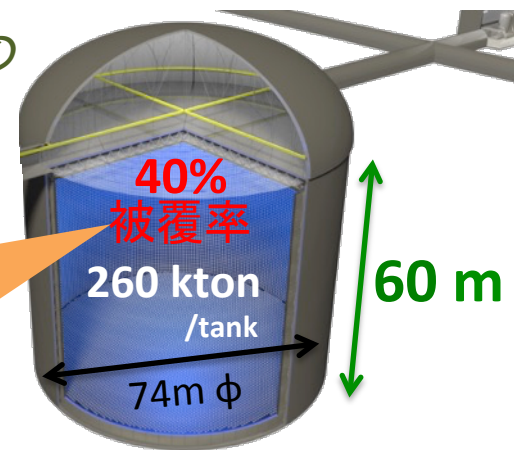
▶ 大きさ・性能共に大幅な向上

ソフトウェア開発による  
検出器構成の最適化と  
到達感度見積もり

要求性能を明らかにし、  
海外貢献による  
さらなる性能向上を目指す

ハイパーカミオカンデ

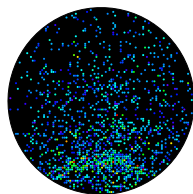
大空洞・タンクの  
設計と建設



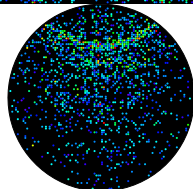
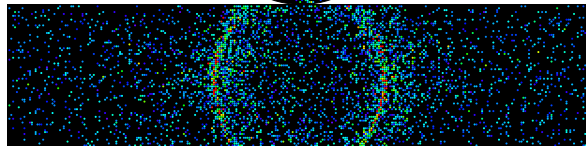
外水槽:  
6,700本の 20 cm (8インチ)光電子増倍管

シミュレーション  
(600 MeV)

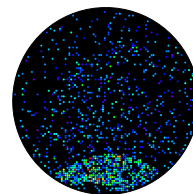
$\nu_e \rightarrow e^-$



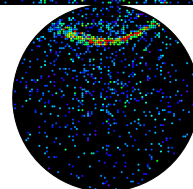
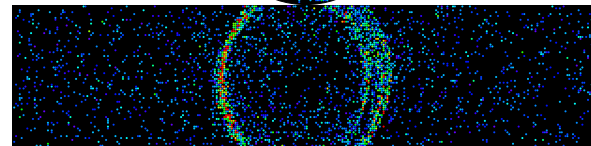
e型



$\nu_\mu \rightarrow \mu^-$



μ型





# 設計

## ハイパーカミオカンデの設計報告書「Hyper-Kamiokande Design Report」

2018年5月公開 arXiv:1805.04163 (日本物理学会PTEPにも掲載予定)

<https://arxiv.org/abs/1805.04163>



**Hyper-Kamiokande**

Design Report  
(Dated: November 30, 2018)

- 統括的な設計・建設計画
  - 物理感度
  - 空洞建設
  - タンクと水循環システムの構築
  - 光センサ・回路による光検出システムと安全性
  - ソフトウェア・バックグラウンド
  - ニュートリノビームと加速器側の検出器

**建設可能な設計と技術が揃った**

## ハイパーカミオカンデ2基目を韓国に建設する場合の物理感度

2018年6月 日本物理学会PTEPに公開

Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, 063C01 (65 pages)  
DOI: 10.1093/ptep/pty044

**PTEP**

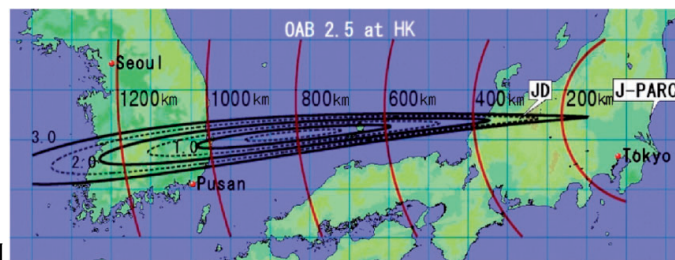
## Physics potentials with the second Hyper-Kamiokande detector in Korea

The Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration

- 相補的な土地の利

- 別のニュートリノ振動が見える長いニュートリノビーム基線長
- ハイパーカミオカンデより地下深い低バックグラウンド環境

ニュートリノビーム源からの距離



# 研究体制

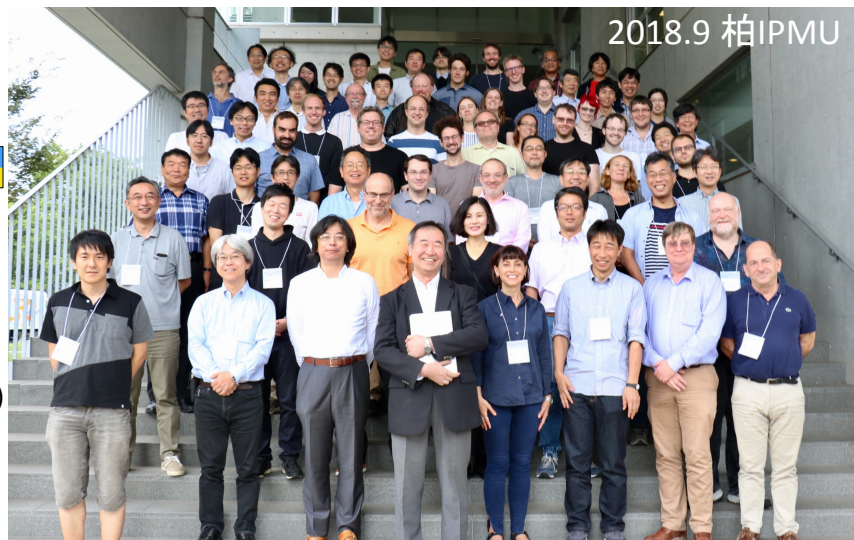
17カ国・80機関・約300名による  
国際共同研究グループ



3/4のメンバーは海外から参加

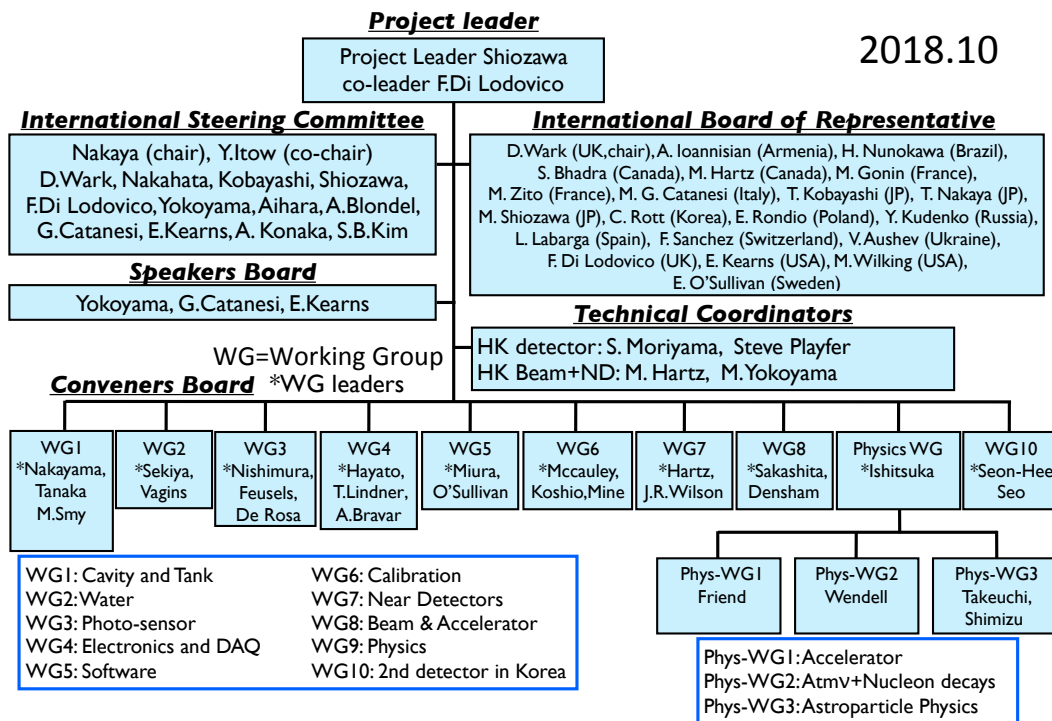
国内からも多くの機関が推進

(東大, 京大, KEK, 名大, 東北大, 神大, 岡大, 東工大, 大阪市立大, 宮教大, 横国大, 東理大)



2018.9 柏IPMU

2018.10



## ● 国際協力体制の確立

### ○ 運営委員・各構成担当による 組織的推進

▶ 空洞水槽・純水・光検出器・電子回路・ソフトウェア・校正・前置検出器・加速器・物理感度(加速器 $v$ ・大気 $v$ と陽子崩壊・天体 $v$ )・韓国検出器

### ○ 建設費分担と協力体制

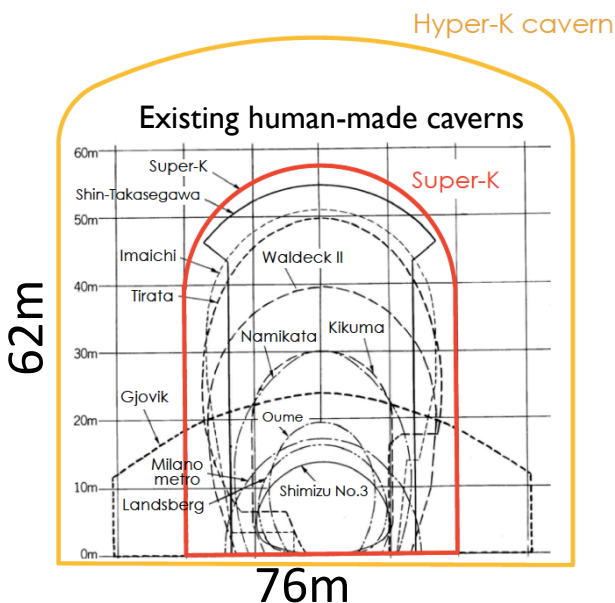
▶ 光センサの半分、外水槽検出、回路等は海外から供給

### ○ より詳細な分担体制を構成中

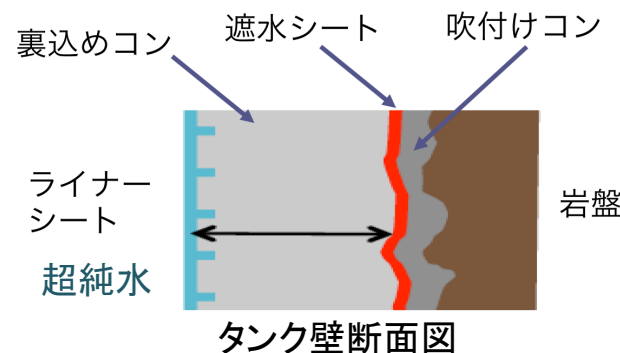
# 建設地・空洞/水槽



- スーパーカミオカンデの8km南方
  - 坑口から2kmのアクセストンネルを新設
- 建設予定地・坑口・ずり処分地の調査を完了
  - ずり処分地(円山)認可に向けた自然環境調査(通年)を実施完了
  - 建設実施可能
  - 道路・電力供給の整備を検討中



- 現行技術で掘削可能な安定空洞の設計
  - 岩盤等級・アンカーを考慮し、建設実現性を確認
- 水槽壁の耐久試験
  - 高密度ポリエチレン製ライニングシートの歪耐久試験完了、長期歪・遮水試験中

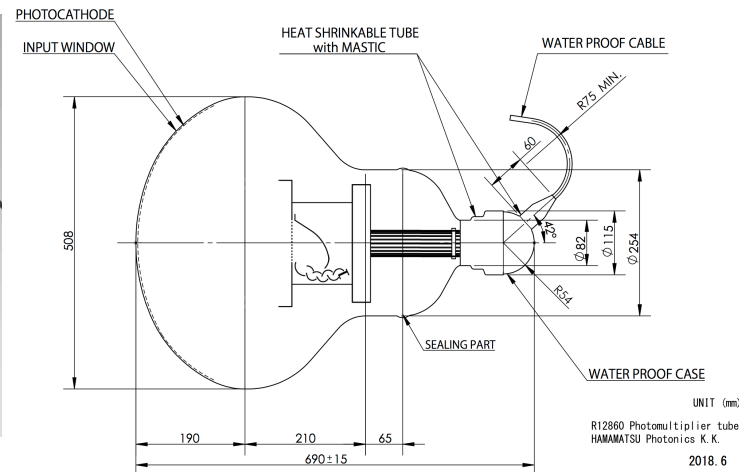
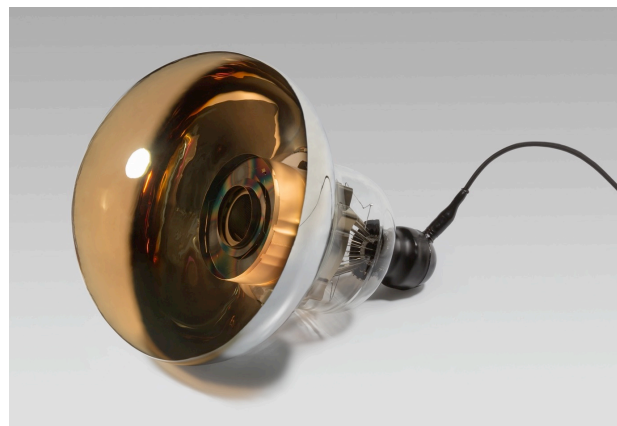


建設全般を見据え、着工準備が整いつつある

# 光センサ

20インチ(50cm)径  
高量子効率型光電子増倍管  
(ボックス&ラインダイノード型)

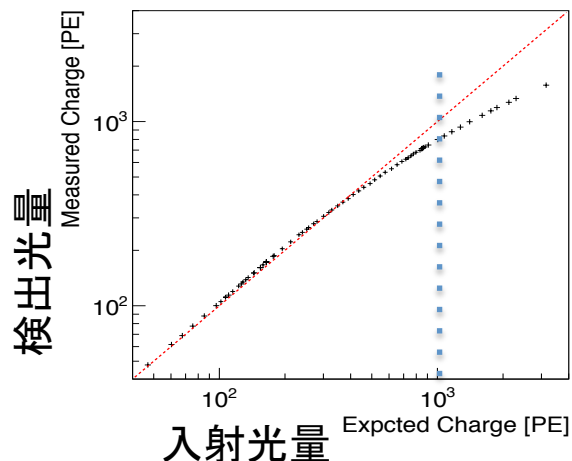
浜松ホトニクス製  
R12860



性能・耐水圧性は十分完成、  
さらなる改良を施した

最大出力電圧を大幅に向上

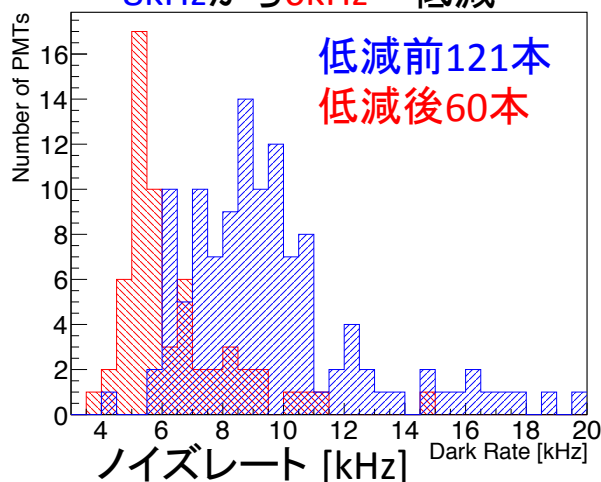
1000光電子以上の大光量も  
検出可能になった



後段ダイノードの電圧調整で達成

ノイズ低減

ダークノイズレートが  
8kHzから6kHzへ低減



光電面の作り込みで達成

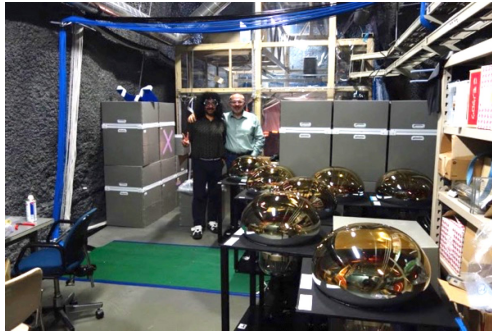
● ガラス中の放射線量を抑え、  
さらにノイズ低減を目指す

- 検出効率が倍となり、  
ガラス中で発光するノイズの影響を受けやすい
- 来年中にガラスの高純度化に取り組む
- バックグラウンドを抑えた  
低エネルギー天体ニュートリノ  
観測の感度向上へ

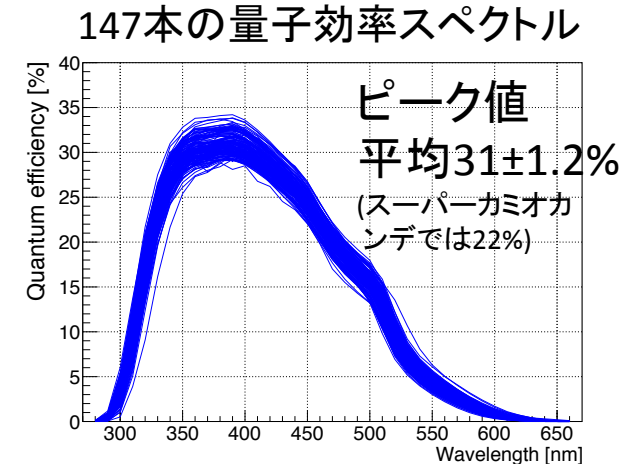


# 光センサ製造品質

- 約140本の新型光センサを製造
  - 0.95MPaの高水圧試験で耐压性能を実証
  - 神岡にて全数性能検査を実施
    - ▶ 共同研究者で6本/日をゲイン較正



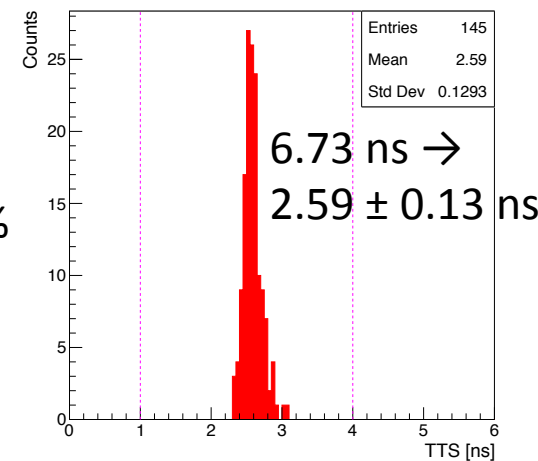
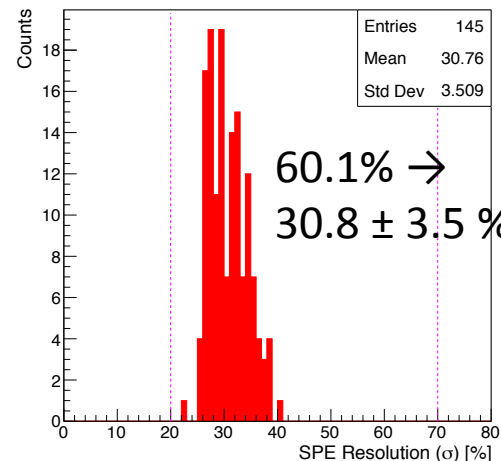
2018.3～7



- ▶  $1.4 \times 10^7$ ゲインで  
1光電子検出性能を確認
- ▶ スーパーカミオカンデ光電子増倍管  
に比べ、分解能は半減
- ▶ 製造個体差は10%程度に収まる

- 均一な性能を確認
  - 既に実用段階にあり、  
大量製造も可能

145本の1光電子検出性能  
電荷分解能 [ $\sigma$ /ピーク] 時間分解能 [半値全幅]



# 新型光センサの実用

- 2018年夏、スーパーカミオカンデ内に  
136本のハイパーカミオカンデ用新型光電子増倍管を取り付けた



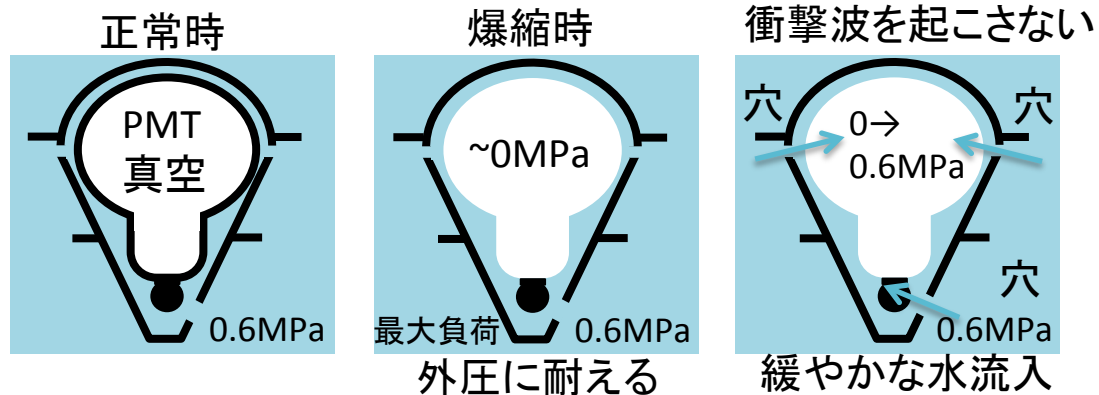
SK-Gdの一部として今後長期で運用され、  
水チェレンコフ検出器内で詳細な性能と安定性も評価される



# 防爆カバー新型と試験

ハイパーカミオカンデは水深60 m (スーパーカミオカンデの1.5倍)へ大型化 → 安全対策も必要

- カバー内部の真空バルブが爆縮しても、外部に衝撃波を出さない
  - 頑丈で割れないカバーで衝撃波を抑え、隣接する光電子増倍管を守る



スーパーカミオカンデ用カバー  
(水深 40 mまで)



2016年に、水深80mまで耐えるステンレス製カバーを完成・実証  
2018年に安価・軽量の改良カバー3種を製作、試験

2016年初期型



アクリル受光面  
なしの重量 22kg

耐水圧  
試験機

1. ステンレス改良型



17kg

軽量・大量生産向け

1 MPa

2. 樹脂製



6.4kg

超軽量・大量生産向け

0.5-0.57 MPa  
(開発途中)

3. ステンレス円筒形



30kg

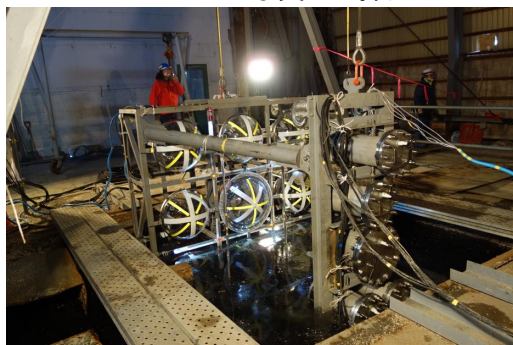
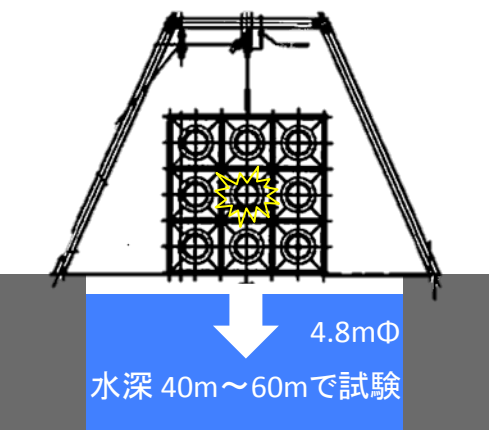
安価・スペイン開発

0.7 MPa  
(開発途中)

- 爆縮時の外圧耐性を試験、内部爆縮時の外部への連鎖抑止実証へ

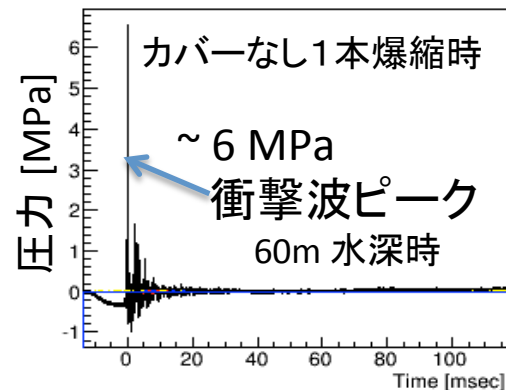
# 爆縮連鎖抑止実証試験

ICRRカレンダー写真にも採用



光電子増倍管を水中で爆縮させ、  
周囲に爆縮が連鎖しないこと・  
カバーが爆縮しないことを確認

## 爆縮時の衝撃波

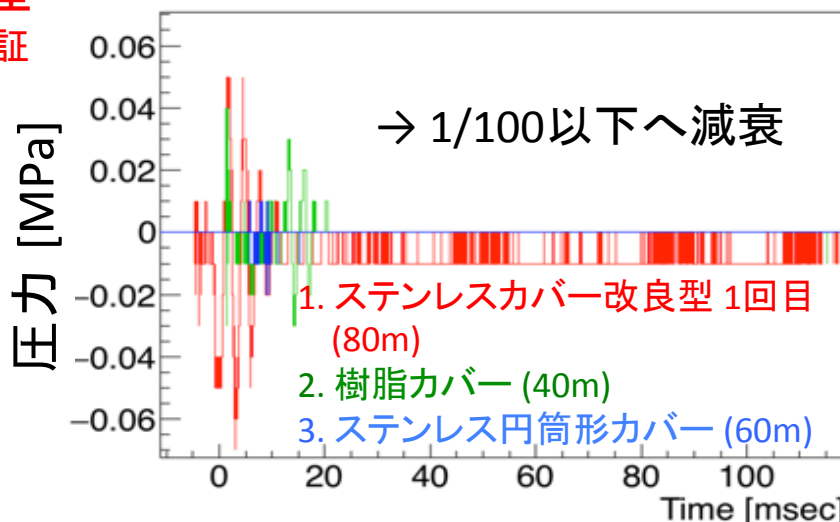


## ステンレスカバー改良型

3回試験し全て成功→実証



衝撃波モニタ  
(70 cm 直上)



## 2. 樹脂カバー

40 m水深で成功 (1回試験),  
60 mでは爆縮連鎖で失敗

形状と樹脂材料の再検討で強度向上へ

## 3. ステンレス円筒形

60 m水深で成功 (1回試験)

80mでの試験と、大量生産向けの  
改良で安価カバー実現を予定・  
3回試験で実証へ

- 改良型ステンレスカバーを実証、他新規カバー2種は原理実証・開発継続

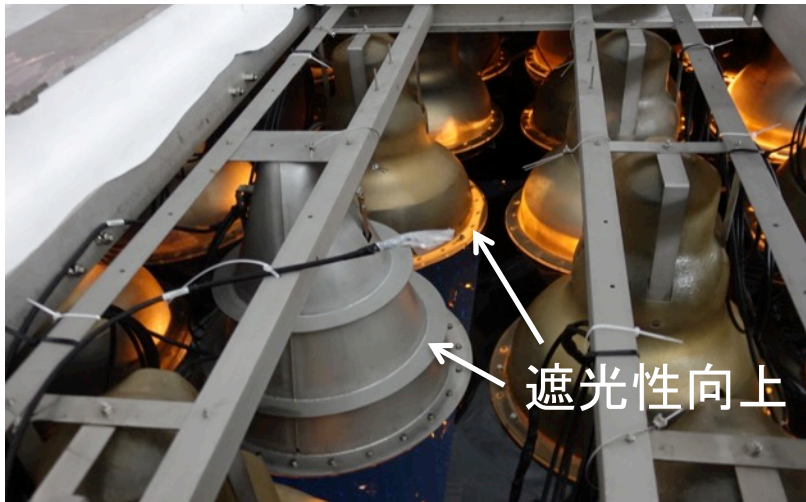


# 性能向上カバーの実用

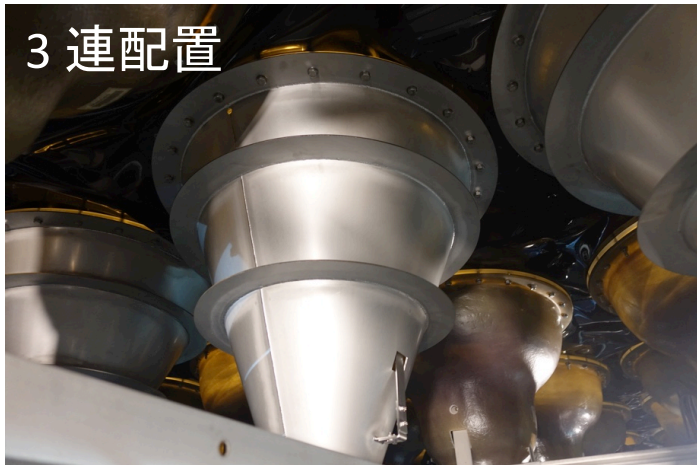
一部のハイパーカミオカンデ用光電子増倍管と共に、  
スーパーカミオカンデ内へ部分的に取り付けられた

ステンレスカバー(改良型)

樹脂カバー



3 連配置

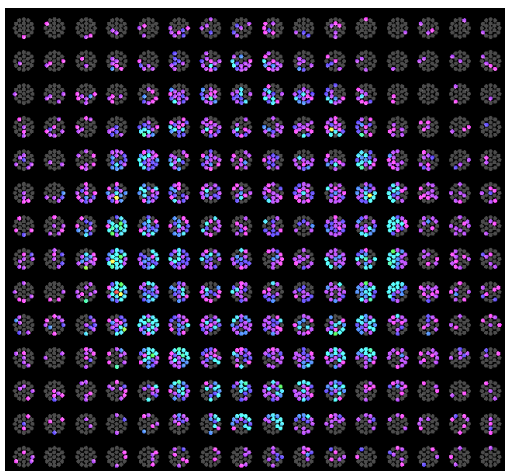


- 安全性向上
- 低放射性バックグラウンド化により、  
光電子増倍管の低ノイズ化を期待
- 開口を広く確保し、  
光検出のアクセプタンスを向上

# マルチチャンネル光センサーモジュール

## 海外機関が開発・供給する光センサ代案

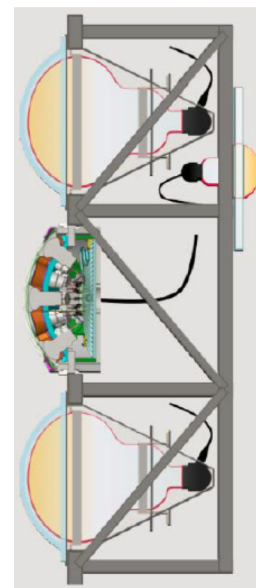
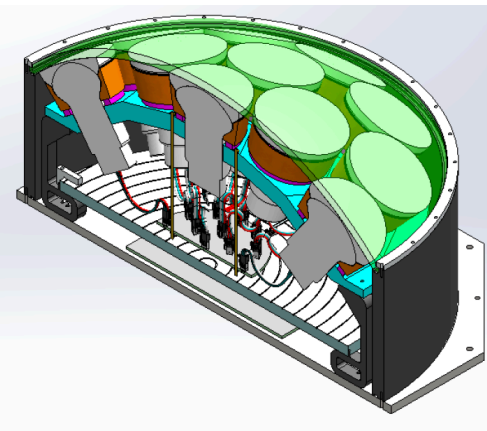
- マルチチャンネル読み出しによる、高解像度＋高時間分解能化
  - 8 cm(3インチ)径光電子増倍管を複数用いた、50cm径の回路一体型 複眼光センサモジュール
  - 50 cm径4万本中の一部に置き換え、相補的に性能向上を狙う



チェレンコフ光リング形状を  
より細かくイメージング可能  
(全て置き換えた場合のイベントシミュレーション)



19本を電源・読み出し回路と共に  
耐圧容器内へモジュール化

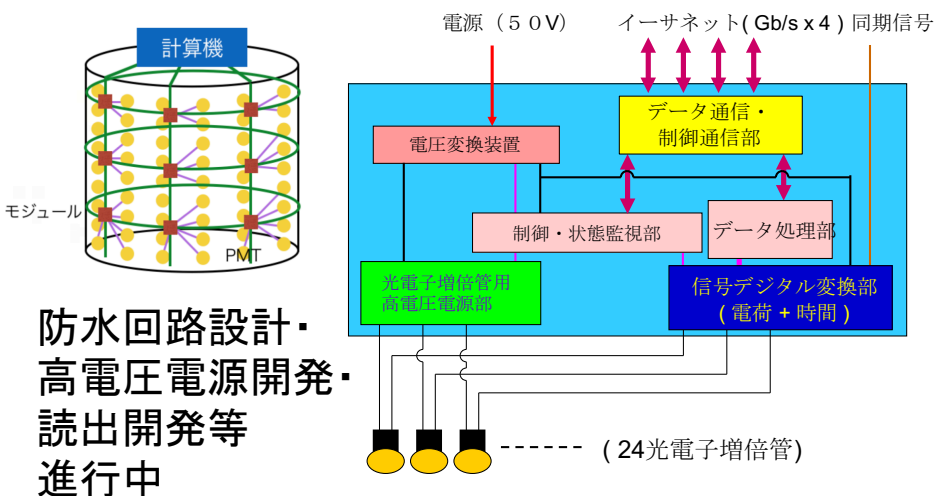


共存可能な  
設計へ

- 来年度に試作機を完成、原理実証と性能実測へ
- 共存した場合のハイパーカミオカンデ感度見積もり中、最終設計へ

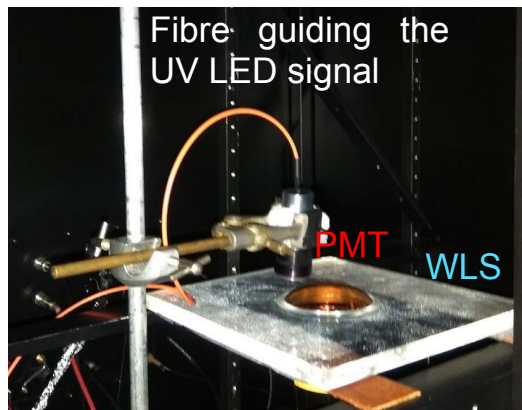
# 回路・ソフトウェア・外水槽・前置検出器

## 回路開発

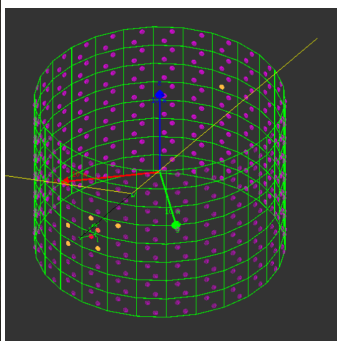


## 外水槽検出の設計

8cm光電子増倍管 (9320KFLB) と  
波長変換板 (WLS-EJ286) の増光・集光測定



外水槽シミュレーション



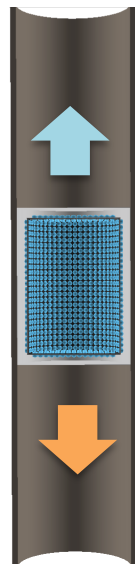
1% Coverage

## ソフトウェア開発

- Geant4ベースの水チェレンコフ検出器用シミュレーションWCSimを元に開発
  - 反ニュートリノ識別(中性子タグ)の改良
  - 高精度事象再構築(fiTQun)による評価
  - 光センサ構成の最適化
  - 集光ミラーによる光センサの検出効率向上検討
  - バックグラウンド評価

## ニュートリノビーム上流側 前置検出器の開発

- E61実験: 10m規模の小型水チェレンコフ検出器(茨城県東海村)
  - 系統誤差の低減を狙う
  - 上下に駆動して、ニュートリノビーム角(=エネルギー)を選択
  - マルチチャンネル光センサで高精度検出
  - 2021年に小型プロトタイプ検出器の荷電粒子ビーム照射試験を計画
  - 2025年開始目標

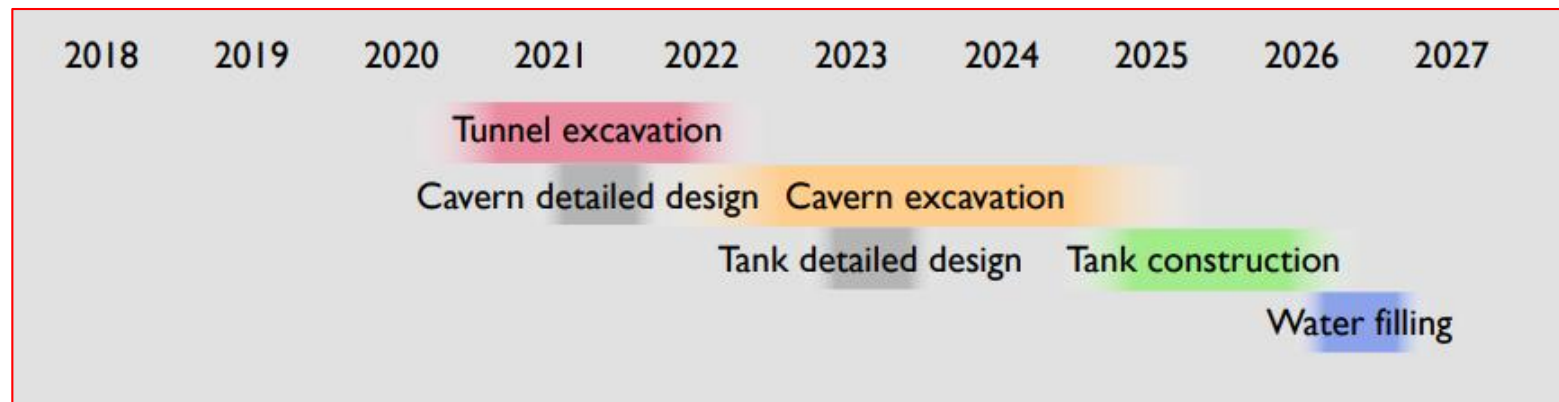




# 建設へ

- 文科省ロードマップ2017に掲載
  - 緊急性の高い大型7計画の1つに選出
- 次世代ニュートリノ科学連携研究機構 2017年発足
  - 建設の中心母体へ
- 2018年 東京大学の始動決意表明
  - 2020年4月の建設プロジェクト開始を、東京大学として方針表明
- 文科省の2019年度予算要求に調査費計上
  - スーパーカミオカンデでも1990年に建設調査費を経て、1991年に建設が始まった
  - 2020年度の建設予算化を目指す

2027年開始を予定



# まとめ

- ハイパーカミオカンデを実現し、多角的な新領域の開拓を目指す
  - 素粒子の新物理解明
  - ニュートリノ振動の全容を解明
  - ニュートリノを使った天体観測の発展
- 大型化だけではなく、各要素の技術革新で高感度化を見込む
  - 光検出性能の大幅な向上
  - 系統誤差低減と較正・検出精度改善
  - ニュートリノビームの高強度化
- 建設開始に向け準備中、2020年代後半から観測開始を目指す

