

# 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

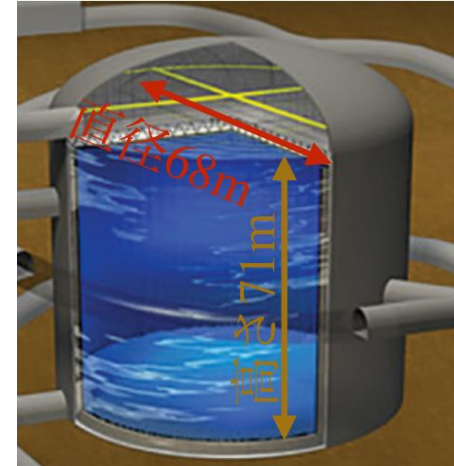
中村輝石 (ICRR)

ICRR 共同利用研究会

2021/02/08

# ハイパーカミオカンデ (HK)

- 次世代の大型水チェレンコフ検出器
- 有効体積: 19万トン (SKの約10倍)
- 目的: ニュートリノのCP、質量階層性、陽子崩壊、ニュートリノ天文学
- (詳しくは前の竹本トーク参照)
- チェレンコフ光の検出に20インチPMTを使う

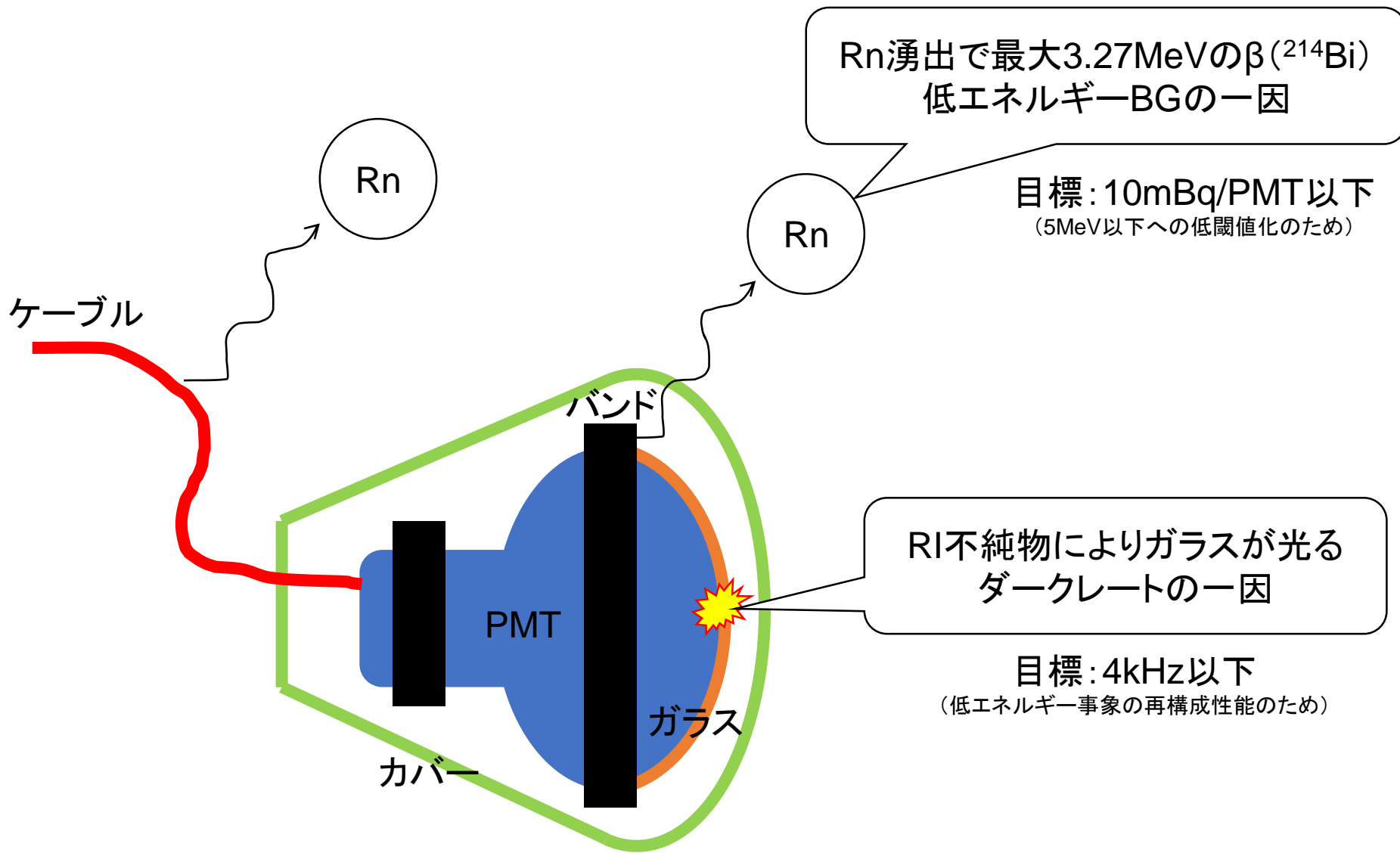


	検出効率比	電荷分解能	時間分解能
SK PMT	1	54% ( $\sigma$ )	3.0ns
HK PMT	1.97	27% ( $\sigma$ )	1.5ns



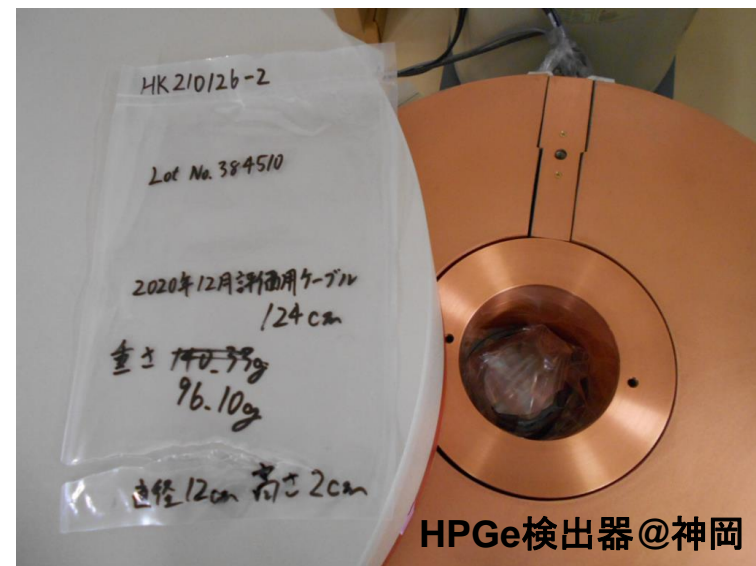
性能up!

# PMT関係の開発項目



# ケーブル

- RI源の素材を特定(PVC)
- きれいなもの(ポリエチ)に交換
- Rnの低減に成功
  - 4mBq/PMT(20m)を達成



サンプル名	U系列 mBq/m	Th系列 mBq/m	40K mBq/m	Rn 湧出 mBq/m
SKケーブル	14.8±2.7	39.6±2.7	32.9±20.2	0.6±0.1
HKケーブル旧	16.7±1.7	50.0±2.5	27.5±15.0	1.4±0.1
HKケーブル新 試作品	7.8±0.8	<0.8	<10.1	<b>0.19±0.04</b>
HKケーブル新 量産品	8.3±1.5	<2.9	<18.1	測定中
HKケーブル新 量産品	3.9±2.6	<3.7	<36.4	測定待ち



# PMT固定用バンド

- SKで使用したバンド
  - クロロプレンゴム製
  - Rn湧出あり(18 mBq/PMT)
- HKに向けて
  - 有力候補:シリコーンゴム(0.4 mBq/PMT)
  - 機械的性能(保持力)の確認を実施予定

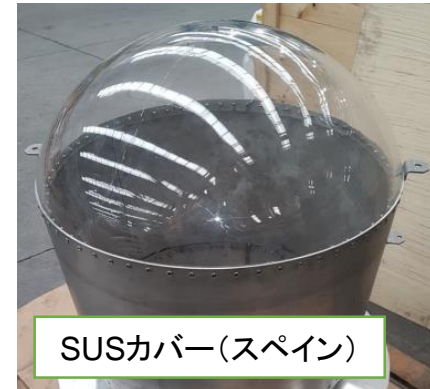


ゴムの種類	ゴムの名称	U 含有量 mBq/g	Rn湧出 mBq/PMT
クロロプレンゴム	SK使用品		18±1
	CB260NE	0.65±0.02	39±1
	CR3006	1.60±0.06	
	NEO-180	0.45±0.02	
	白CR NEO-180w	0.99±0.05	
	白CR NW3000	1.24±0.06	
	白CR タイガース	3.75±0.10	
シリコーンゴム	KE-561-U	<0.01	0.4±0.1

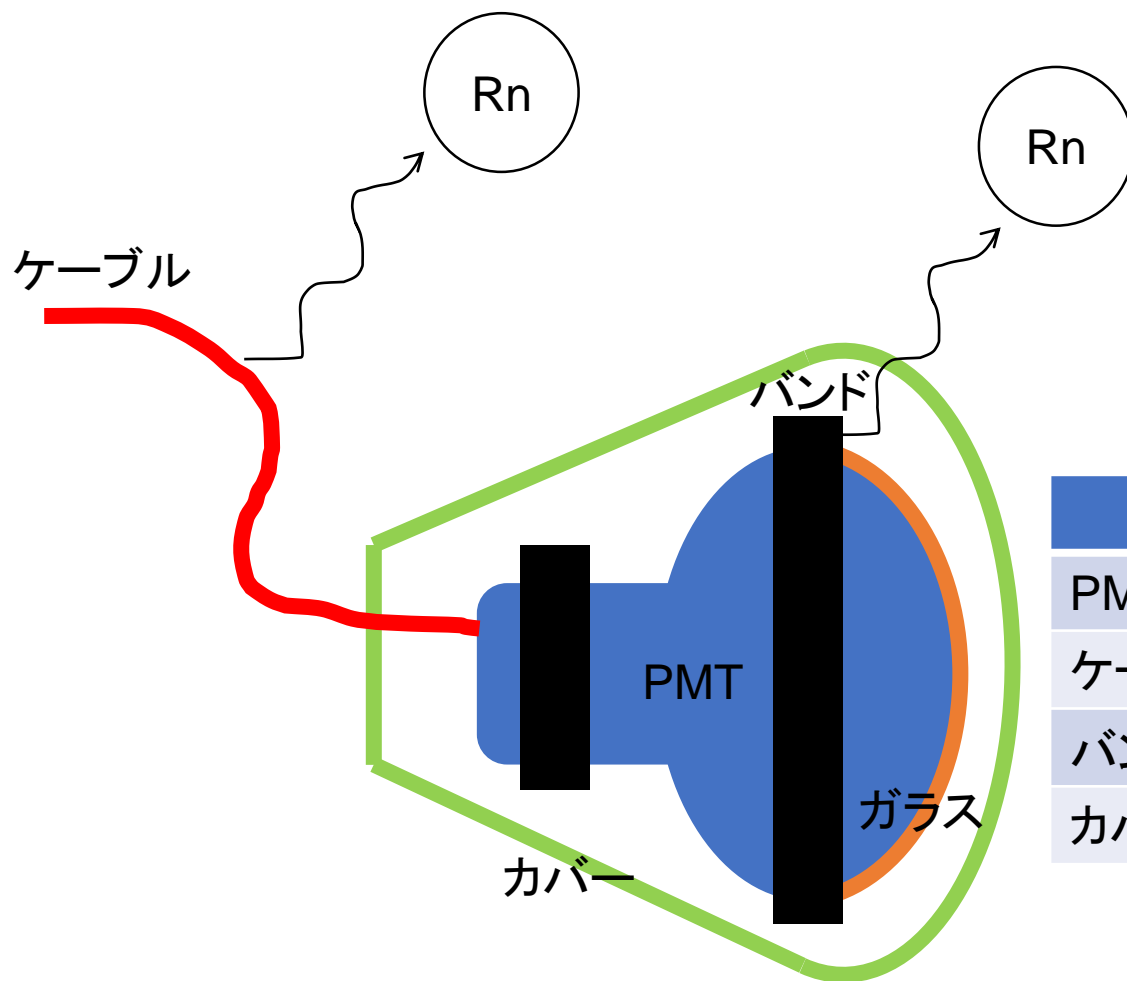


# PMTカバー

- HKに向けて3つのタイプを開発中
  - Rn湧出を抑え、HKの水圧に耐える
- SUSカバー（日本）
  - Rn湧出： $0.8 \pm 0.4$  mBq/PMT
  - 80m深水での連鎖爆縮防止を実証済み
- 樹脂カバー（日本）
  - Rn湧出： $0.6 \pm 0.3$  mBq/PMT
  - 金属補強を追加。静水圧試験（80m相当）に合格
- SUSカバー（スペイン）
  - Rn湧出：測定予定
  - 静水圧試験（80m相当）に合格
- 最終版の深水での連鎖爆縮防止試験を2021年に予定



# PMT一式からのRn湧出の低減

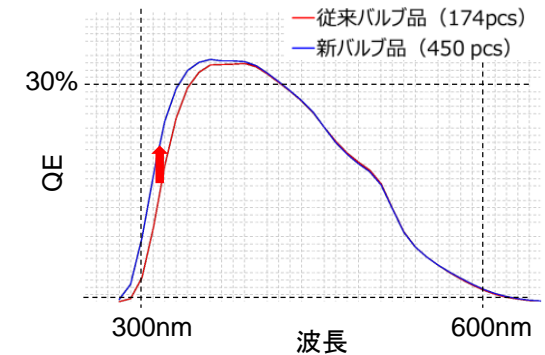


	mBq/PMT
PMT本体	0.5~2.5
ケーブル	4
バンド(シリコーン)	0.4
カバー	0.6~0.8

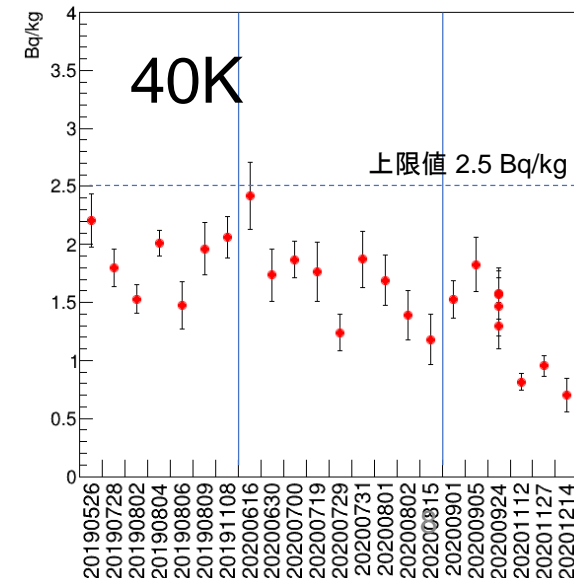
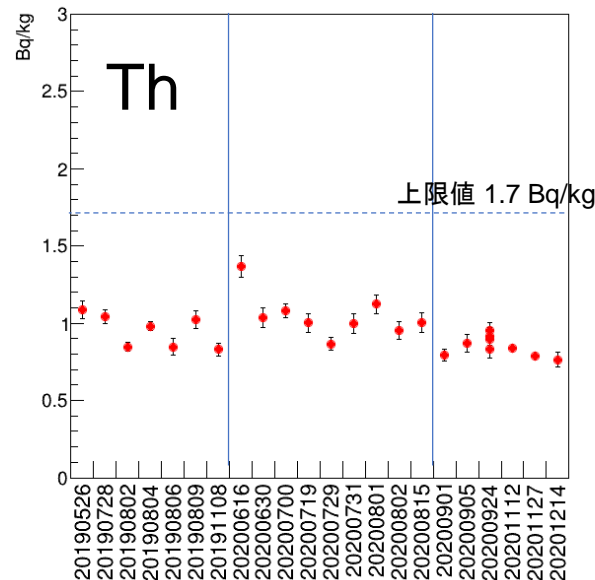
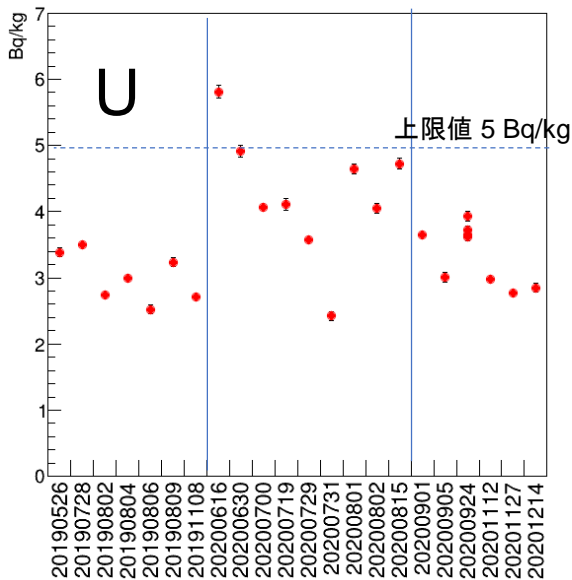
- 目標値10mBq/PMT以下を達成できそう

# PMTガラス

- ガラスのRI(ダークレートの原因)をモニター
- 大量生産のガラスも安定していることを確認
- 鉄混入量も減ったので透過率(QE)が改善



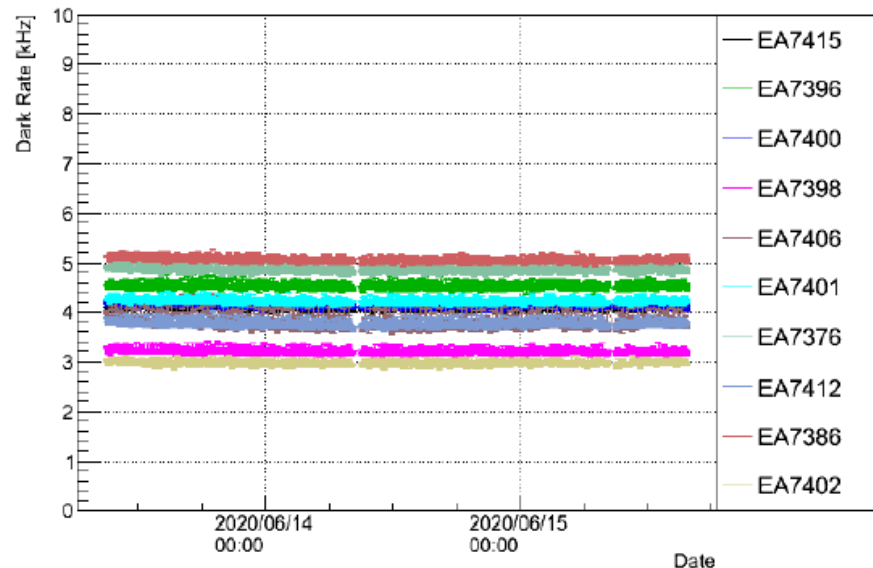
← 2019試作      2020試作      2020量産 →



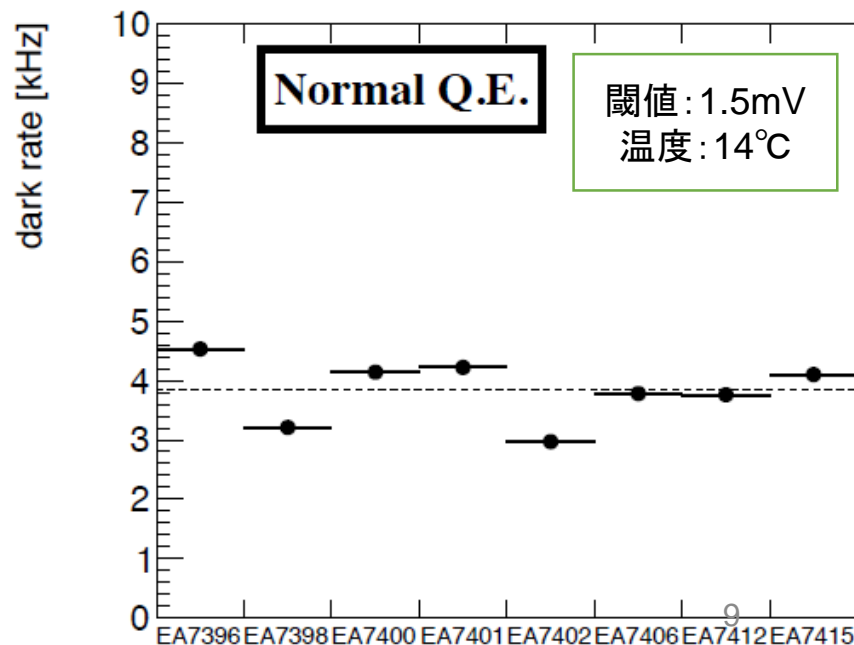


# ダークレート低減

- 低RIガラスで作ったPMT
- 長期HV印加試験
  - ゲイン $10^7$  のHV
  - 印加後3か月で安定
- ダークレート
  - 平均で3.8kHz
  - 目標値の4kHz以下を達成



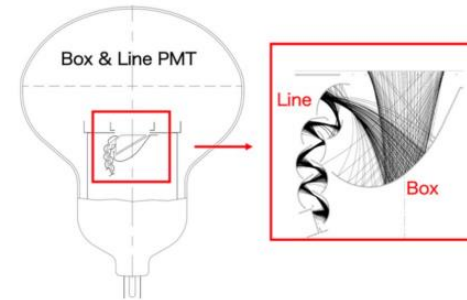
Threshold: 1.5mV



# PMTの仕様評価

- 仕様を策定

- HV @  $1e7$  ゲイン: 1600-2200V
- ゲイン変動 @24時間: <2%
- P/V ratio: >2 (平均で>3)
- 1p.e.分解能 $\sigma$ : <50%
- アフターパルス: <10% (平均で<5%)
- 時間分解能: 平均で<5.2 ns FWHM
- マテリアル: RI、Rn湧出、水浸透後の透過率



- PMTの性能が仕様に合うか評価

- 浜ホト B&L PMT (R12860)

- 大量購入するPMTを浜ホトのB&L PMTに決定！

# 大量製造品

- HKに入れるためのPMTが6本到着
- 外観や信号を確認





# PMTの受け入れ態勢

- レート: 300個/月 (3月から)
- 期間: 6年間 ( $6 \times 12 \times 300 = \text{約}2\text{万}$ )
- やること: 目視確認・信号確認・性能確認・長期保管
- 測定用の大型冷蔵庫暗室や回路が設置されつつある



# まとめ

- Rn湧出を抑えたい
  - ケーブル: Rn湧出の低減に成功
  - バンド: RIの少ない候補あり
  - カバー: Rn湧出の少ない候補あり
- ダークレートを落としたい
  - ガラス: RIの少ないガラスを安定製造できている
  - 実測: ダークレート4kHz以下を達成
- HKに入れるPMTの準備状況
  - B&L PMTを買うことに決定
  - HKに入れる大量製造品の受け入れ開始

# 目標値の理由

- Rn湧出: 10mBq/PMT
- ダークレート: 4kHz

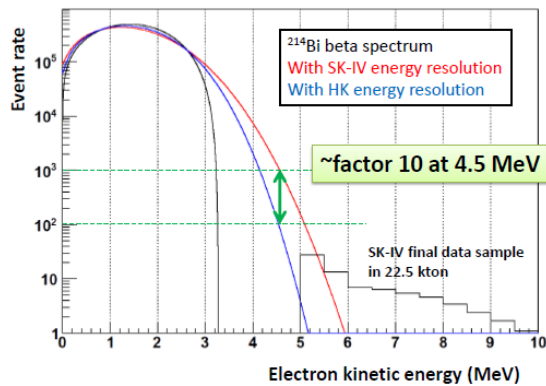


FIG. 117. An estimation of expected Bi-214 energy spectrum. The black, red and blue lines are the original beta decay spectrum, the expected observed spectrum in SK-IV, and expected observed spectrum in Hyper-K, respectively. The black histogram is observed event rate of the SK-IV final data sample in 22.5 kton fiducial volume. The vertical axis is event rate in arbitrary unit.

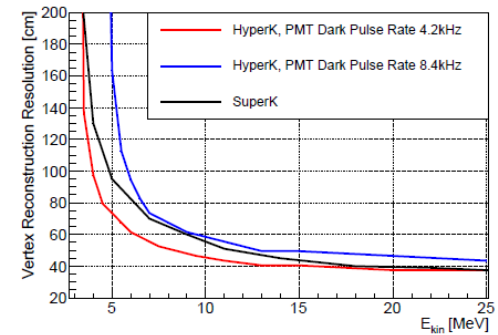
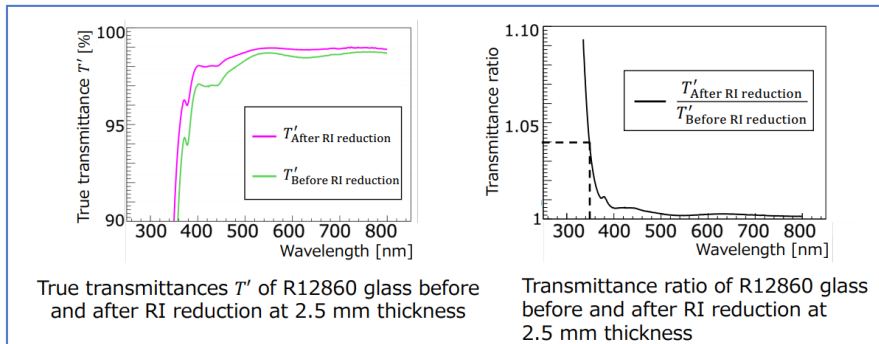


FIG. 115. Vertex reconstruction resolution for electrons with BONSAI for Hyper-K and Super-K detectors. Here, WCSim is used for Hyper-K detector simulation. Red line shows the resolution with the PMT dark pulse rate of 8.4kHz, as seen in [II.2F](#). Blue is for the case of PMT dark pulse rate of 4.2kHz, which is same as the rate of Super-K photosensors. Black line shows the performance with Super-K detector, simulated with SKDETSIM.

# ガラスの透過率

- 透過率: 4%増
- チェレンコフ光の検出効率: 10.7%増

## Transmittance measurement of glass : result



The RI reduction increased the transmittance at  $x = 2.5\text{mm}$ ,  $\lambda = 350\text{nm}$ , by 4%.

## Increase of observed Cherenkov light by reducing Fe contamination ②

Iron content, detected Cherenkov light					
Iron contamination [ppm]	144.3 (Before RI reduction)	93.4 (After RI reduction)	75 (production in 2020)	40	20
$\int_{309\text{ nm}}^{660\text{ nm}} d\lambda Q_{E_x} \times \frac{dN}{d\lambda} \times T'$	613994	638253	647635	667274	679424
$Q_{E_x}$ (QE used for Integral)	$Q_{E_{\text{Before RI reduction}}}$	$Q_{E_{\text{Before RI reduction (expect)}}$	$Q_{E_{75\text{ppm}(\text{expect})}}$	$Q_{E_{40\text{ppm}(\text{expect})}}$	$Q_{E_{20\text{ppm}(\text{expect})}}$
Relative ratio of observed Cherenkov light	1	1.040	1.055	1.087	1.107

In this analysis, the calculation was performed using the region where the wavelength is longer than 309 nm. The reason is that the transmittance fluctuates greatly in the region where the wavelength is shorter than 309 nm.

Observed Cherenkov light is increased by 10.7% from the glass before RI reduction (144.3 ppm) to 20 ppm.