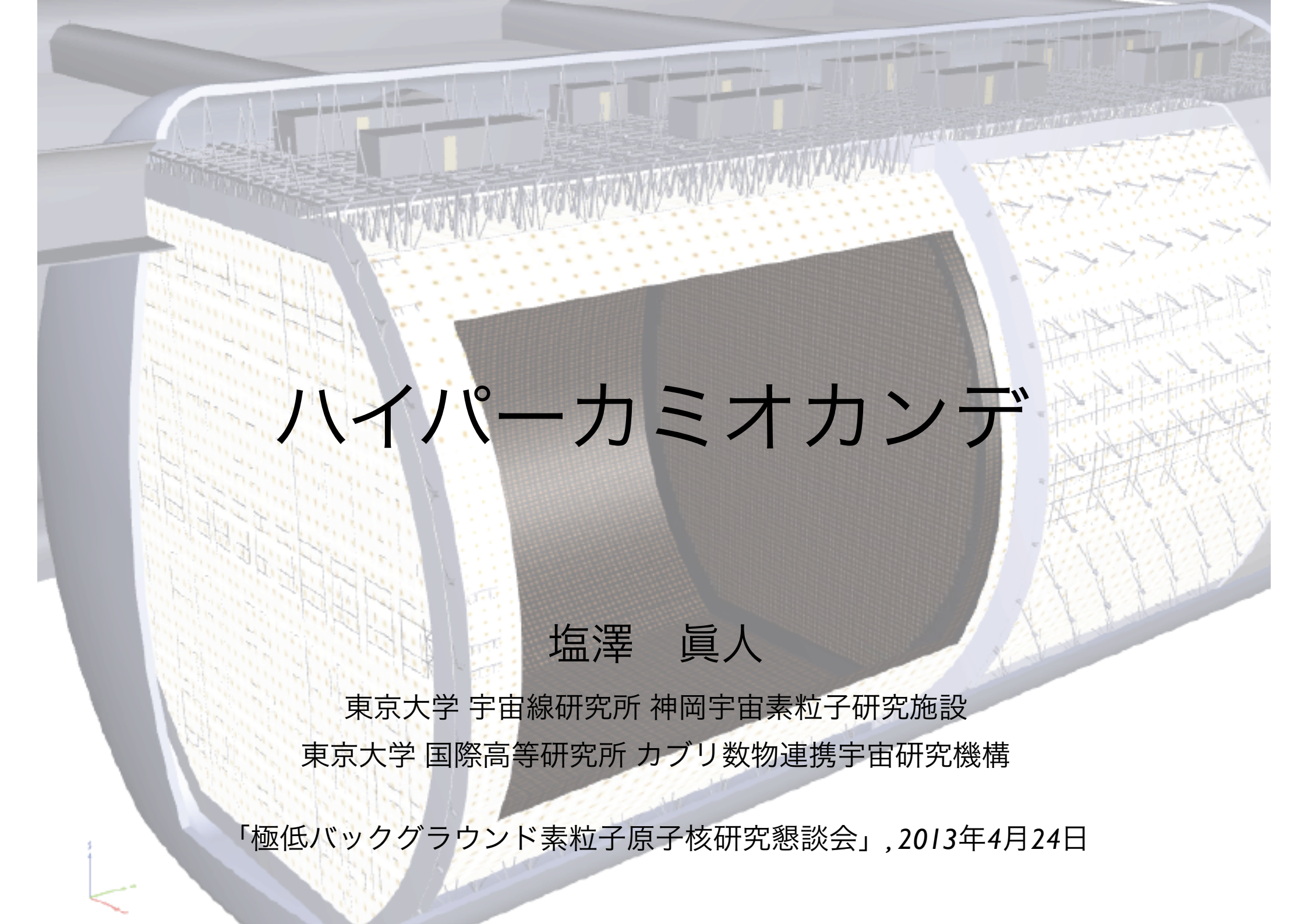


A 3D cutaway diagram of the Hyper-Kamiokande detector. The diagram shows a large cylindrical structure with a central dark brown region. The outer layers are composed of numerous small, light-colored rectangular blocks arranged in a grid pattern. The top of the structure is covered by a series of grey rectangular blocks. The overall design is complex and multi-layered, representing the intricate structure of the detector.

ハイパーカミオカンデ

塩澤 真人

東京大学 宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

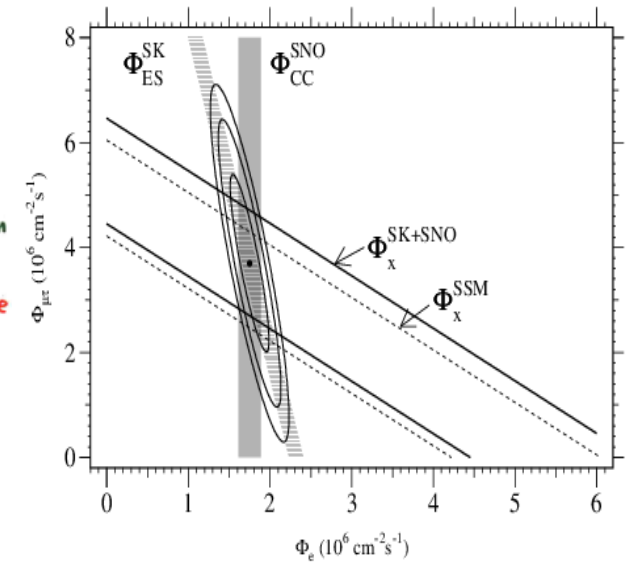
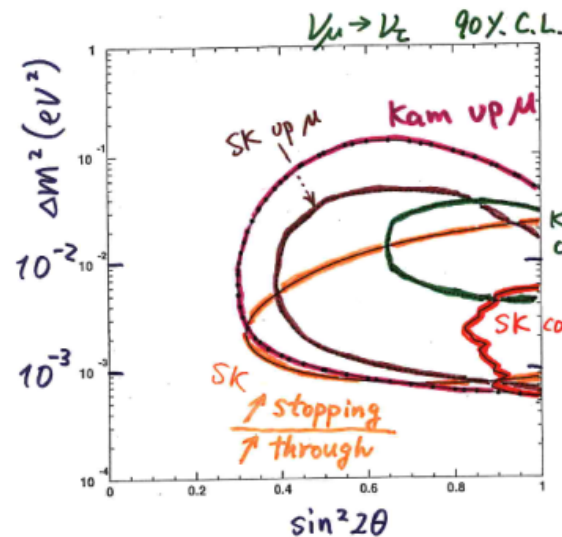
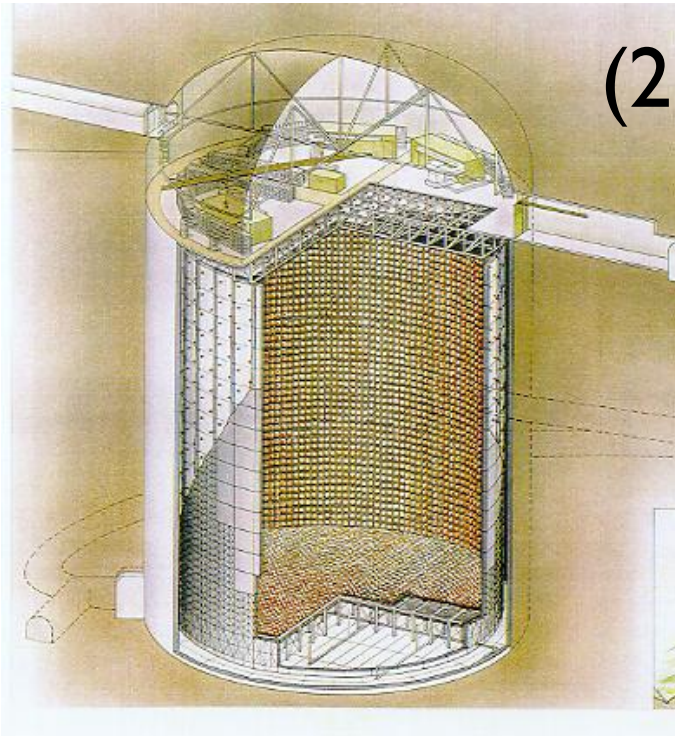
東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構

「極低バックグラウンド素粒子原子核研究懇談会」, 2013年4月24日

Brief history

スーパーカミオカンデ (1996-現在)

5万トン総体積
(2万2千トン有効体積)



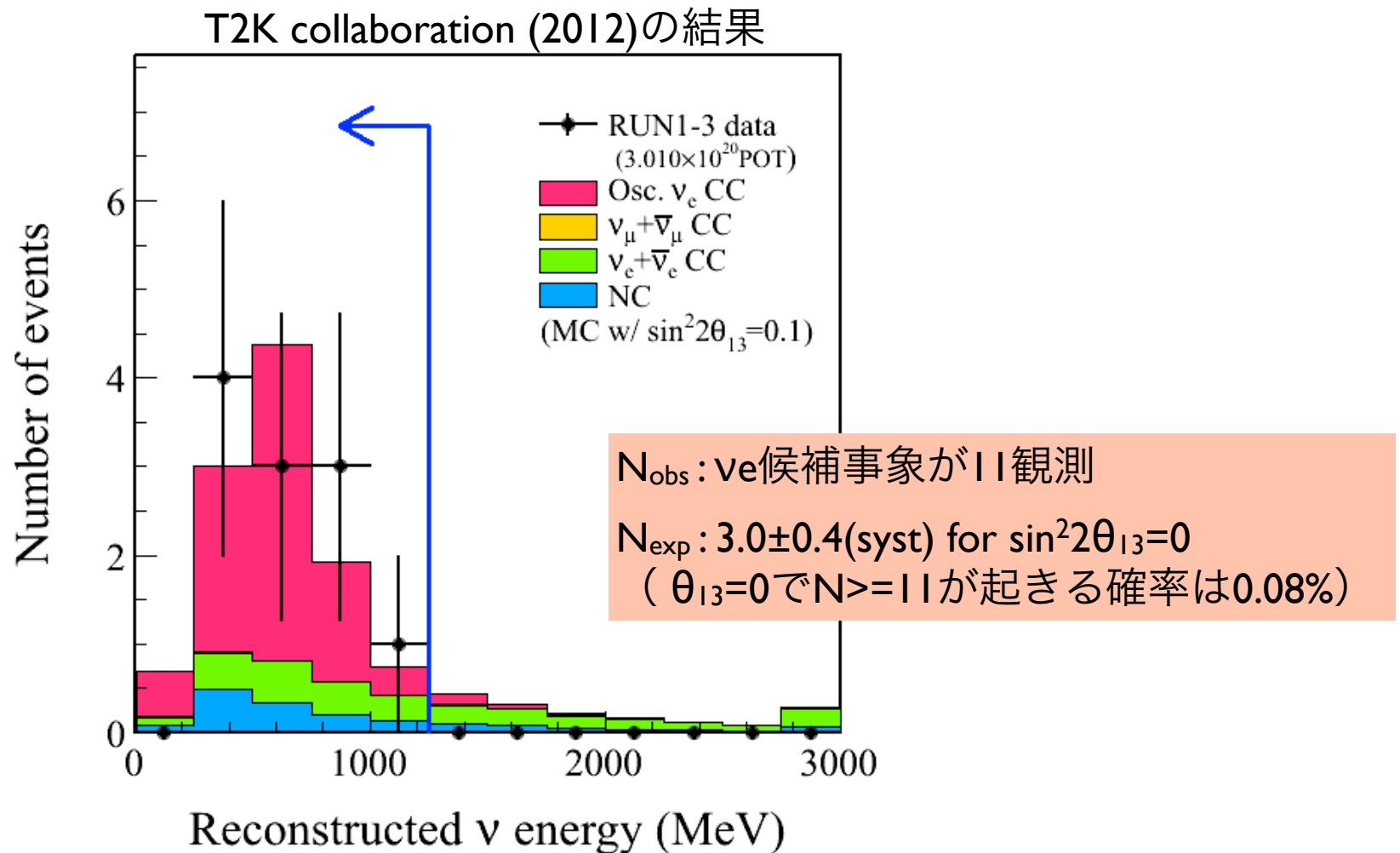
1998 ニュートリノ振動の発見

2001 太陽ニュートリノ振動 (SK vs SNO CC)

2009 核子崩壊の制限 $\tau_{\text{proton}}/B(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 10^{34}$ years

2011 最後の混合角 θ_{13} ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出現、T2K)

ν_e 出現現象の存在の確立



- ▶ ν_e 出現現象の証拠。(原子炉 ν 実験ともconsistent.)
 - ニュートリノのCP対称性の破れは実験的に検証可能となった。
(ν_e 出現と反 ν_e 出現確率はCP位相 δ により増減し、逆方向)

大きな成果、残された課題

- ニュートリノの3つの振動モードは確立された

- 三世代構造の解明が次世代実験の課題

CP対称性の破れ、質量階層構造 (Δm^2_{32} の正負)、他パラメータの精密測定 (CKM構造? Sterile ν ? 非標準相互作用?)

- 核子崩壊の世界最高の制限 (でも未発見)

- 飛躍的な感度向上が欲しい

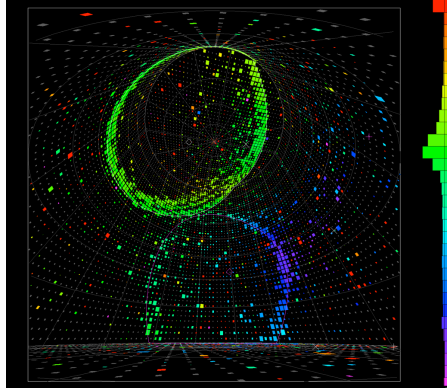
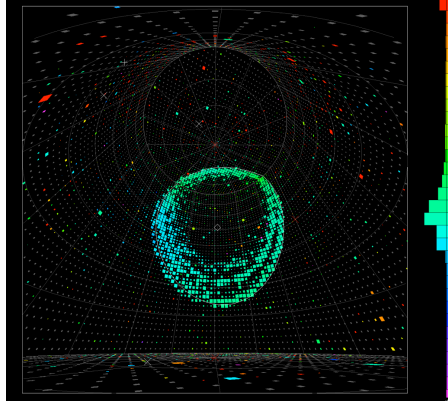
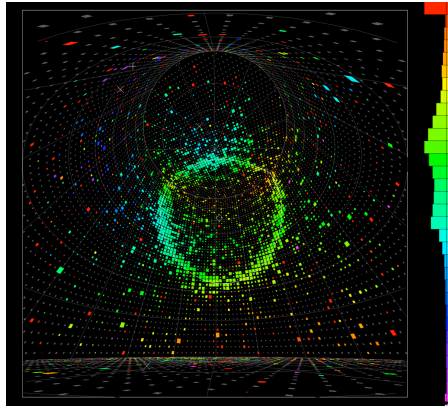
標準模型を超えた物理を切り開く

HK検出器

全体積	99万トン
内水槽 (有効体積)	74(56)万トン
外水槽	20万トン
光センサー 内水槽	99,000 20-inch Φ PMTs (20% photo-coverage)
外水槽	25,000 8-inch Φ PMTs



Hyper-Kの要点



- 水チェレンコフ技術
 - 実証された技術と高い性能. 多くの成果の実績.
 - スケーラビリティ (データ統計は常にcritical) .
- 豊富な物理 (発見の可能性)
 - Discovery potential of CPV、質量階層性、他パラメータ精密測定
 - 核子崩壊探索の世界一の感度、大統一描像の直接検証
 - 超新星爆発によるニュートリノ天文学、素粒子実験
 - 他天体ニュートリノ探索
- 日本でやる必然性がある.
 - 既存の加速器 (J-PARC) の存在とパワー増強プラン.
 - 水チェレンコフ実験の実績 (Kam, Super-K) .

Physics Potentials of Hyper-K

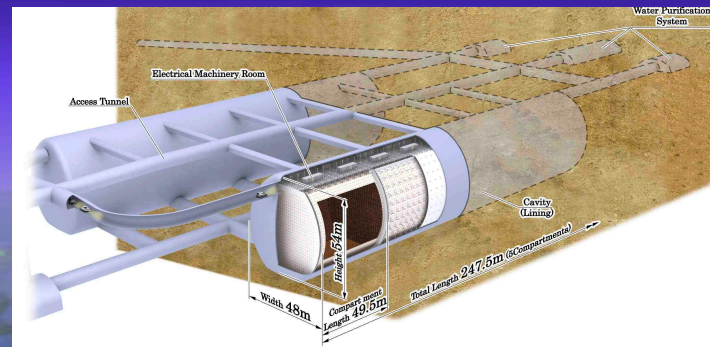
ν CP測定

ν_e (反 ν_e)出現の高精度測定

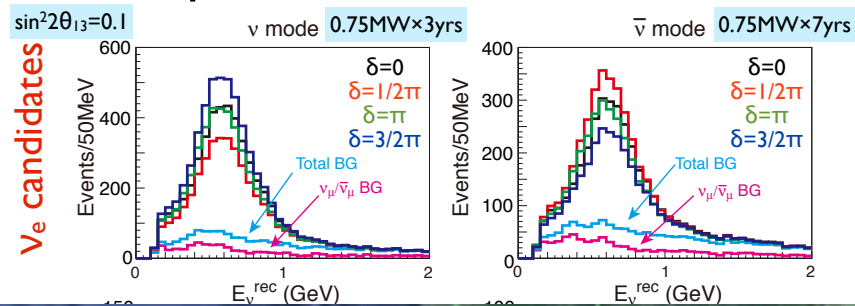
- ν_e 2,600~4,200事象

-反 ν_e 1,300~2,400事象

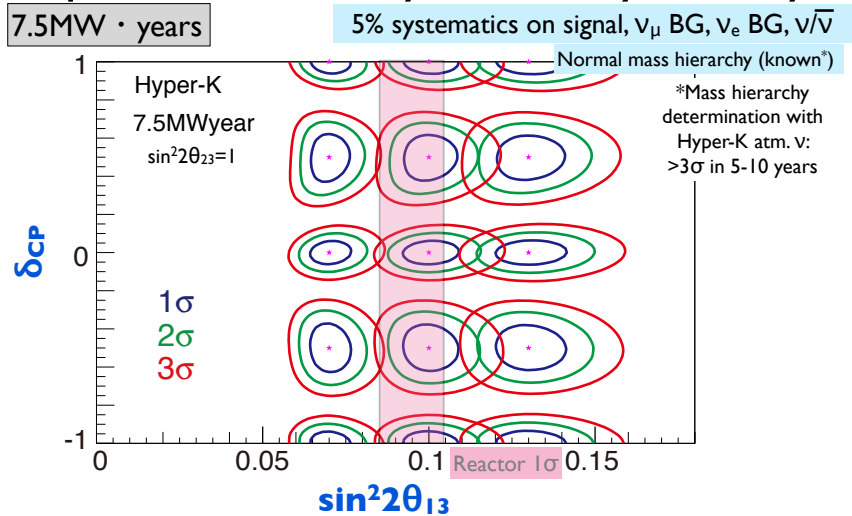
560kton (SKx25)



Expected ν_e CC candidates



Expected sensitivity to CP asymmetry



Good sensitivity for currently allowed values

Hyper-K



~0.6GeV ν_μ
295km baseline

Upgraded J-PARC ν
750kW and beyond



大気電子ニュートリノ発現

NuclPhysB669,255(2003)

NuclPhysB680,479(2004)

$$\frac{\Phi(\nu_e)}{\Phi_0(\nu_e)} - 1 \approx P_2(r \cdot \cos^2 \theta_{23} - 1) \quad \text{Solar term}$$

$$-r \cdot \sin \tilde{\theta}_{13} \cdot \cos^2 \tilde{\theta}_{13} \cdot \sin 2\theta_{23} (\cos \delta \cdot R_2 - \sin \delta \cdot I_2) \\ + 2 \sin^2 \tilde{\theta}_{13} (r \cdot \sin^2 \theta_{23} - 1) \quad \text{Interference term } (\delta\text{CP}) \\ \theta_{13} \text{ resonance term} \quad (3)$$

r : μ/e flux ratio (~ 2 at low energy)

$P_2 = |A_{eq}|^2$: 2ν transition probability $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu\tau}$ in matter

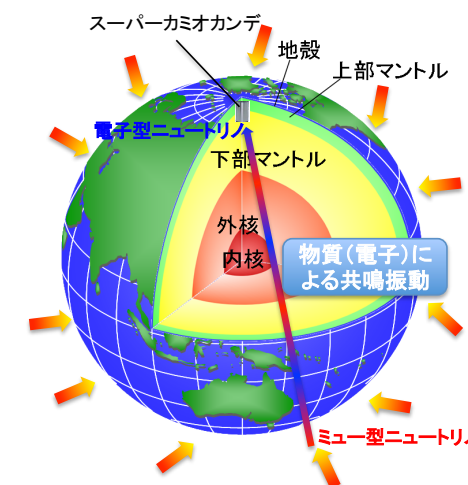
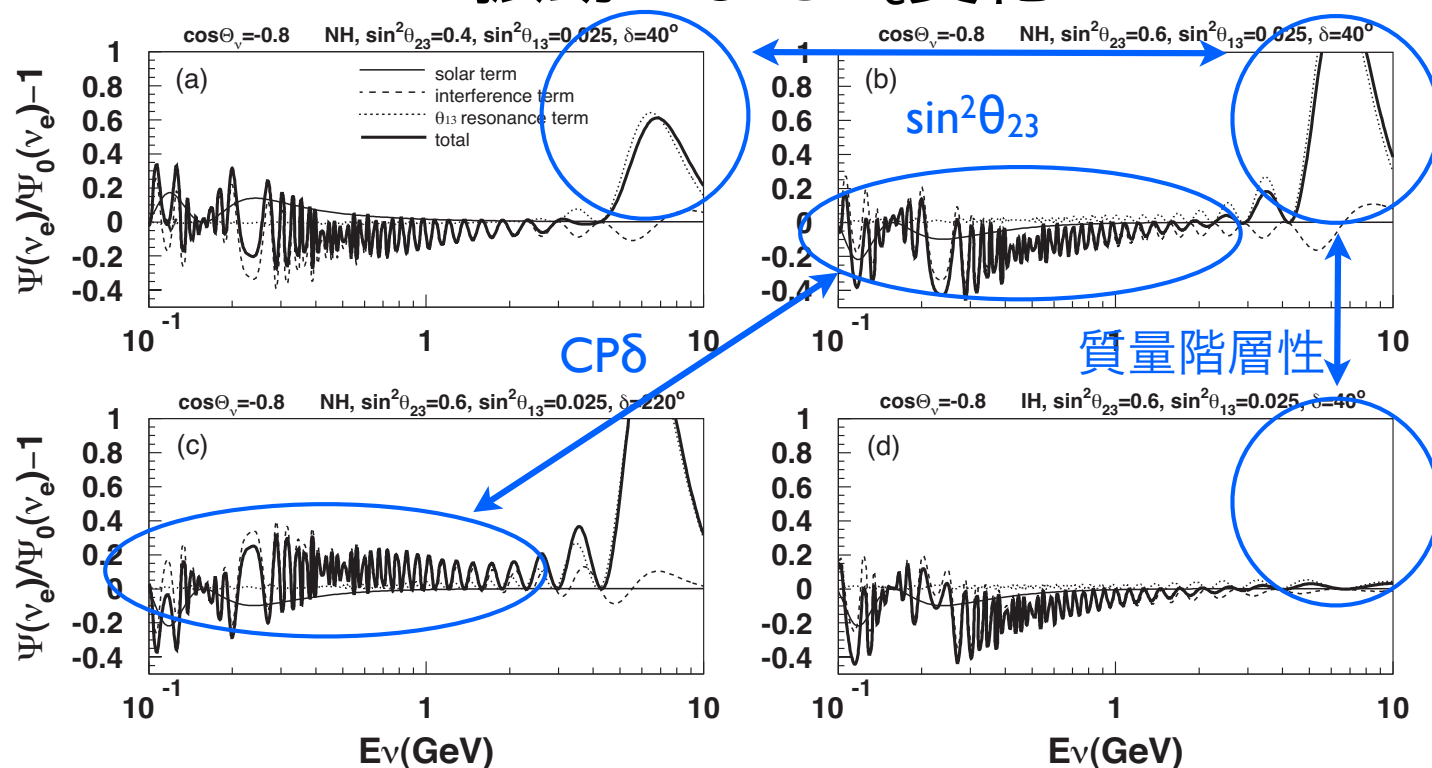
$R_2 = \text{Re}(A_{ee}^* A_{eq})$

$I_2 = \text{Im}(A_{ee}^* A_{eq})$

A_{ee} : survival amplitude of the 2ν system

A_{eq} : transition amplitude of the 2ν system

振動による ν_e 変化



地球の物質効果 (MSW効果) の共鳴による ν_e 出現現象.

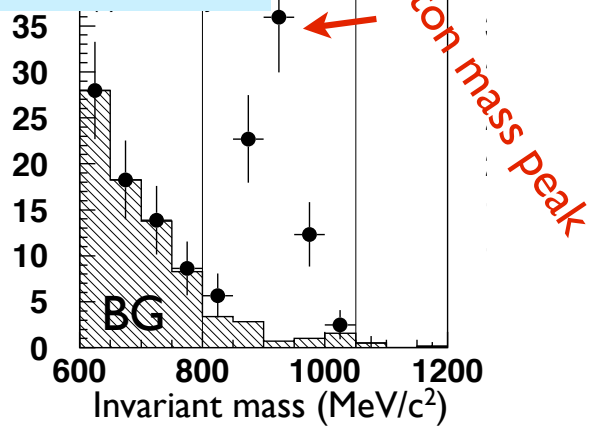
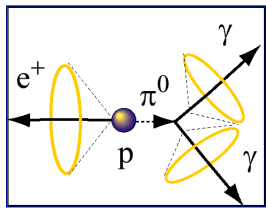
- 質量標準階層構造の場合電子 ν 出現
- 逆階層構造の場合反電子 ν 出現

- 大きな θ_{13} 値により、質量階層性の決定の機会ができた. (θ_{23} octant, CP δ の感度も)
- 質量階層性決定: 2~10年で 3σ (大気ニュートリノ単独で)

核子崩壊によるGUT検証

$$p \rightarrow e^+ \pi^0$$

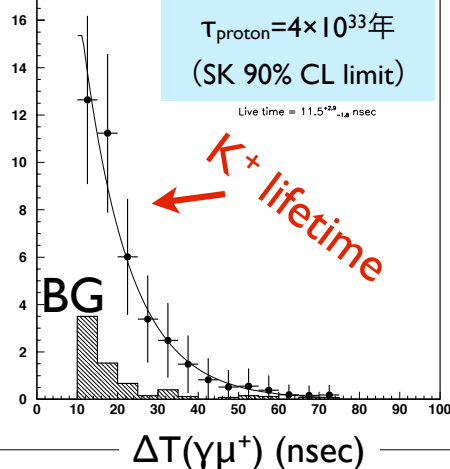
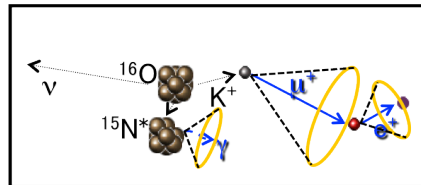
$\tau_{\text{proton}} = 1.2 \times 10^{34}$ 年
(SK 90% CL limit)



▶ Discovery reach (3σ) $\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) \sim 5.4 \times 10^{34}$ 年 (HK 10年)

▶ 下限値 (90%CL) $\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 1.3 \times 10^{35}$ 年 (HK 10年)

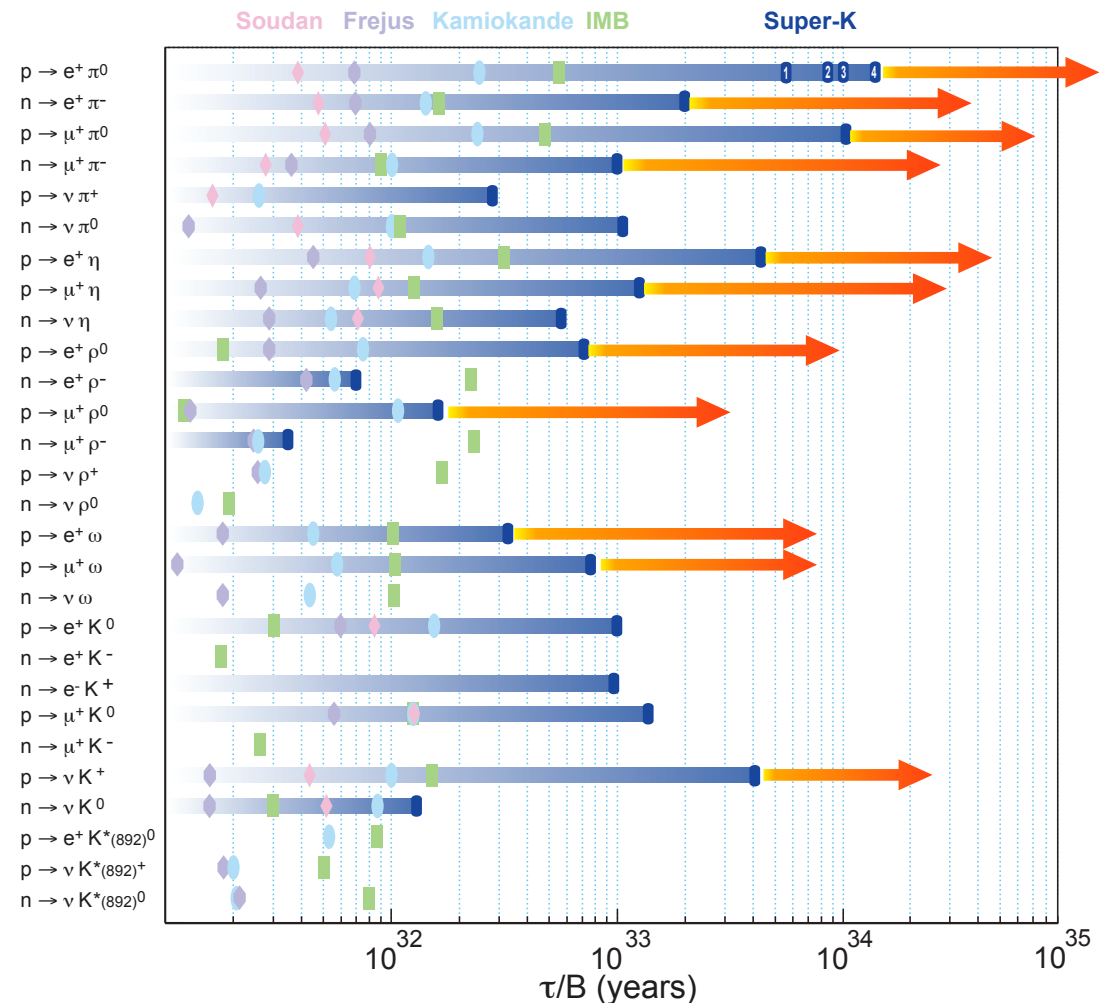
$$p \rightarrow \nu K^+$$



▶ Discovery reach (3σ) $\tau(p \rightarrow \nu K^+) \sim 1.2 \times 10^{34}$ 年 (HK 10年)

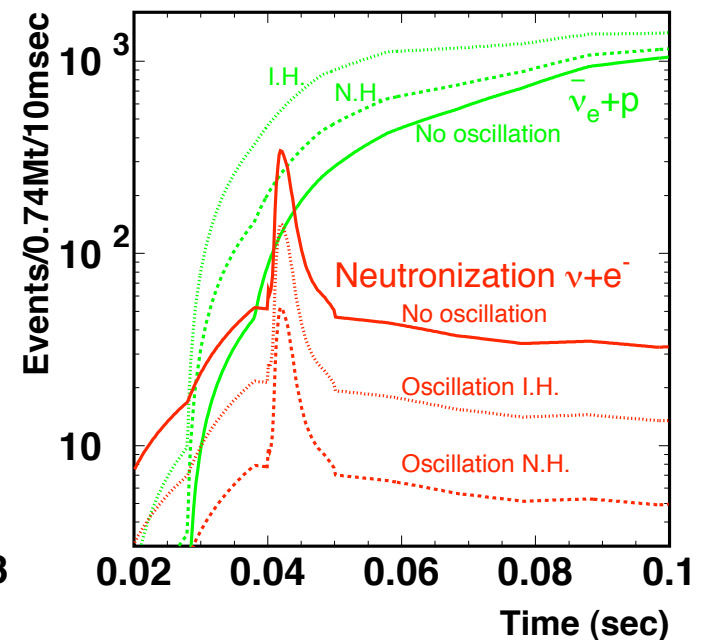
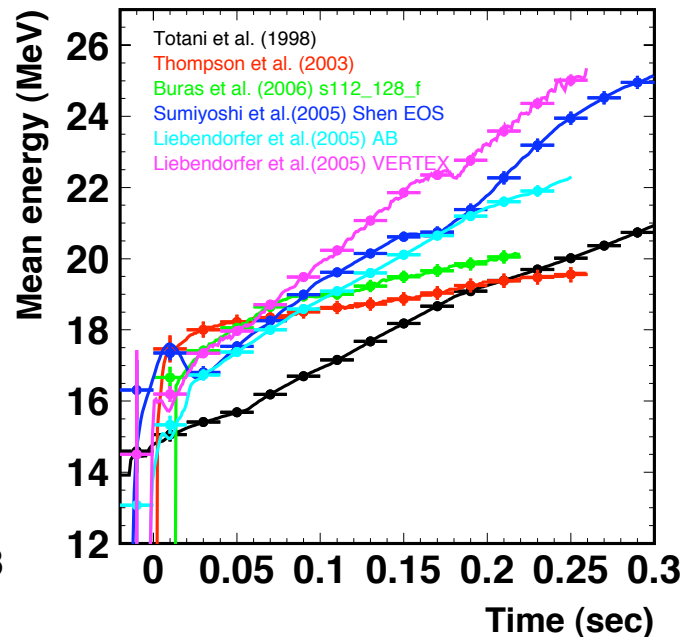
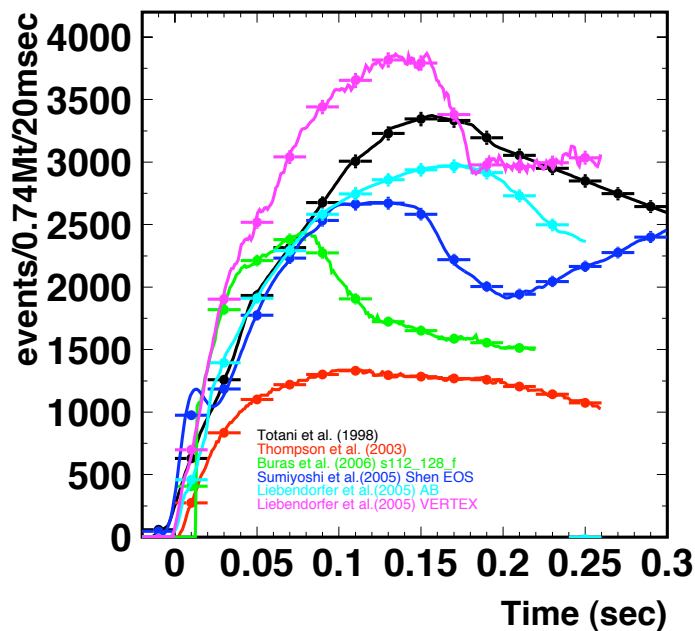
▶ 下限値 (90%CL) $\tau(p \rightarrow \nu K^+) > 3.2 \times 10^{34}$ 年 (HK 10年)

- many models predicts branching ratio of $p \rightarrow e^+ \eta$, $e^+ \rho$, $e^+ \omega$ are 10~20%
- Flipped SU(5) (Ellis) predicts $\text{Br}(p \rightarrow e^+ \pi^0) \sim \text{Br}(p \rightarrow \mu^+ \pi^0)$
- (B-L)非保存モード、 $|\Delta B|=2$ など。バリオジェネシスとの関係？



超新星爆発 ν @ Milky way (10kpc)

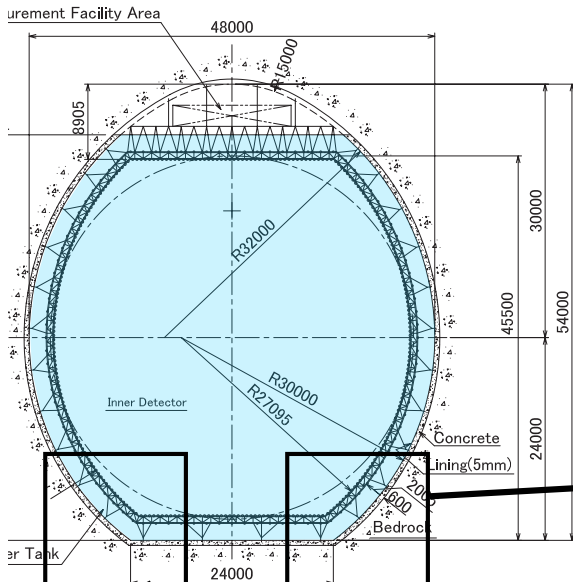
- 20万 ν による詳細な情報.
 - 時刻毎の(ν luminosity, temperature, flavor)
 - 星崩壊と冷却過程 (モデル) の解明
 - 中性子化 νe バースト事象が20(NH) or 56(IH)
 - 開始時刻決定精度 ~ 1 m秒 $\rightarrow$ 光、重力波との比較
 - ν の質量 (ν TOF) $\rightarrow 0.3 \sim 1.3 \text{eV}/c^2$
 - ν 質量階層性によるスペクトルの時間変化



Detector design work

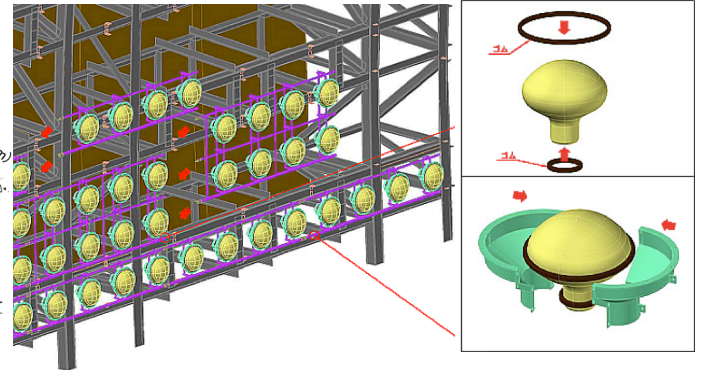
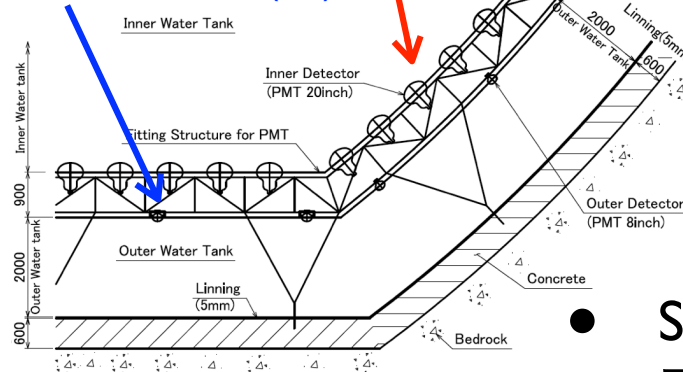
HK水槽構造

CROSS SECTION



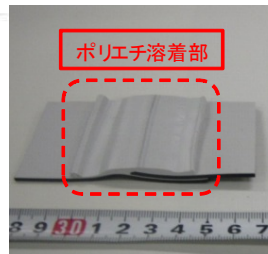
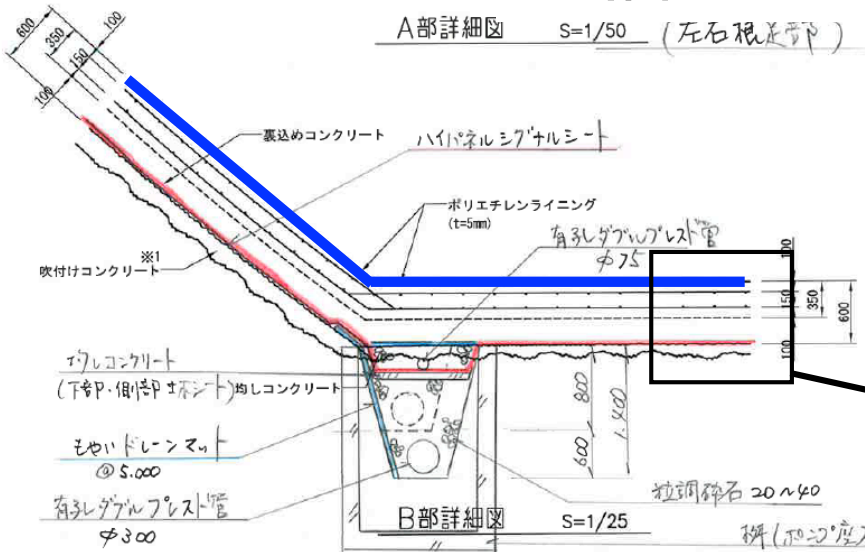
光検出器支持構造体

内水槽 光検出器 (20")
外水槽光検出器 (8")



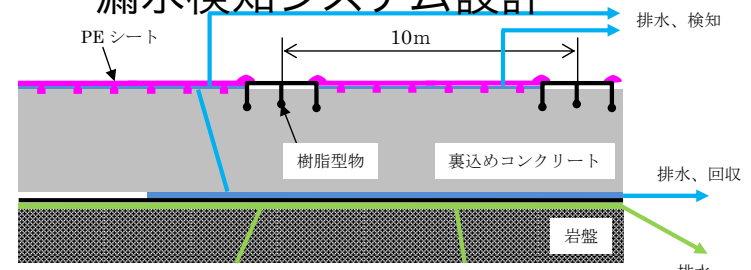
- SSの支持構造体
- 別の支持方法も検討中

水槽ライニング構造



- コンクリート
- ポリエチレン・シート
- 漏水の検知・回収システム

漏水検知システム設計



純水製造・循環システム開発

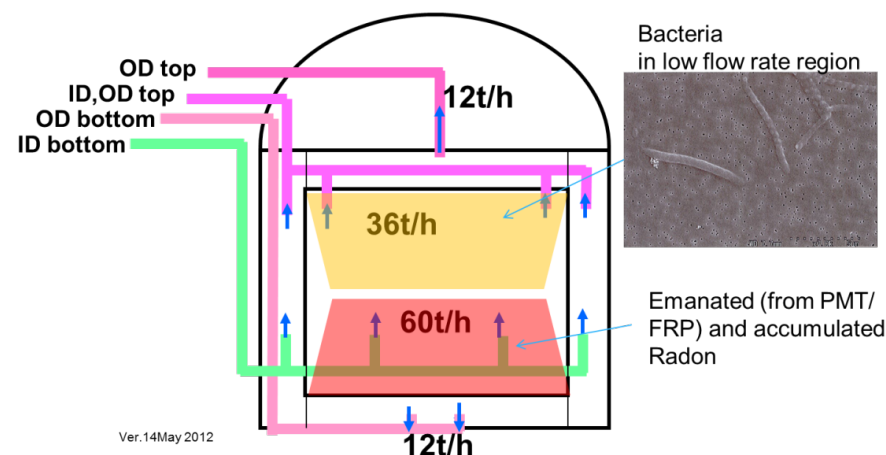
1、HK水槽内の水流、配管設計

SKでの問題

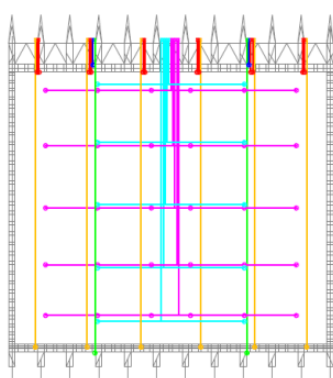
水の流れを考慮せず設計された

→上部の水は滞留、下部の水は対流

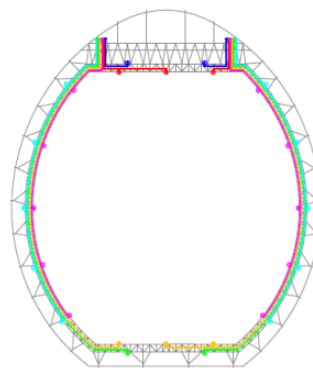
→透過率やバックグラウンド悪化の原因となり物理解析に対する制限となっている。



1-1、シミュレーションによる配管設計



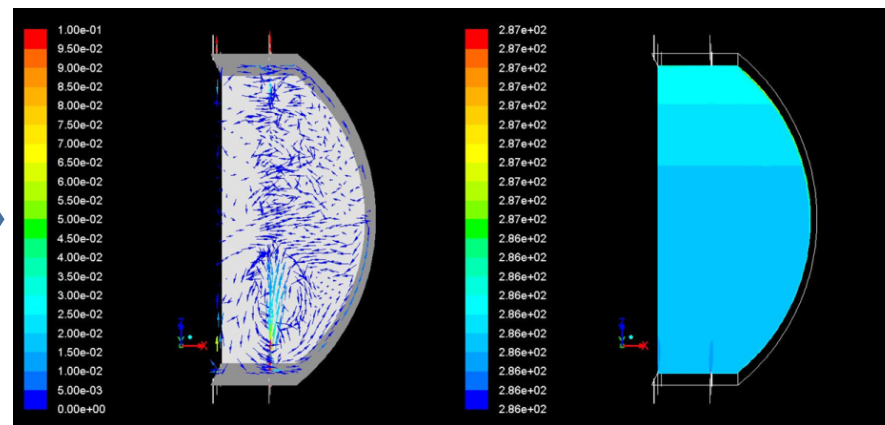
側面配管レイアウトイメージ①



水槽断面配管レイアウトイメージ

流れベクトル

温度分布



1-2、SK、HKプロトタイプ検出器による試験

2、コスト削減のための設計変更、試験

設計のベースはSK。adhocに改良を重ねて来ているため、HKに対してはオーバースペックの可能性。SK、HKプロトタイプ検出器による試験を行う。

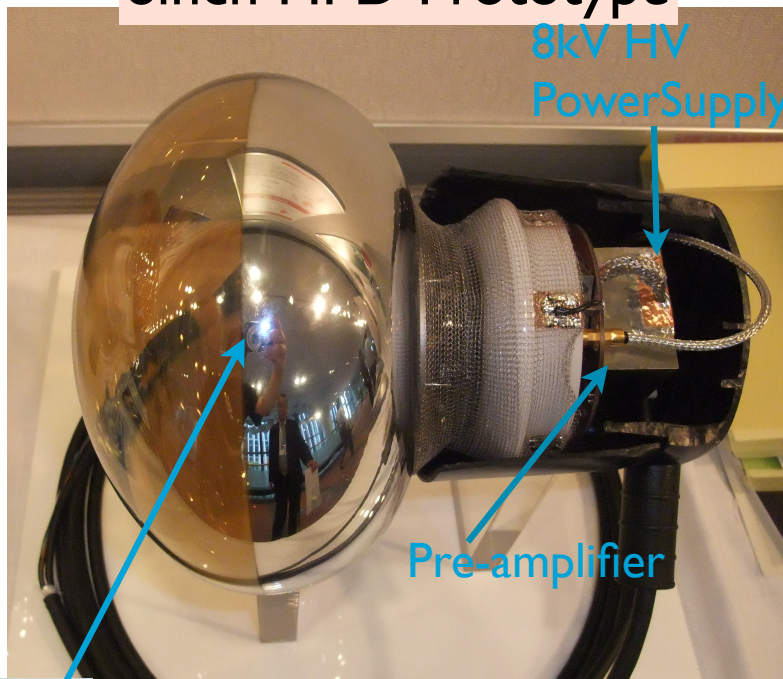
新型光検出器の開発

- 複数の候補
 - 20" Super-K PMT (既存)
 - **[NEW]** 20" 高効率ハイブリッド光検出器 (HPD)
 - **[NEW]** 20" 高効率改良型PMT (開発リスク小)
- 8" HPDと20" 高量子効率PMTの水チェレンコフ検出器での試験を夏から
- 20" HPDプロトタイプを今年度製作
- 2015年に200本程度試作し2年程で水タンクでの実証

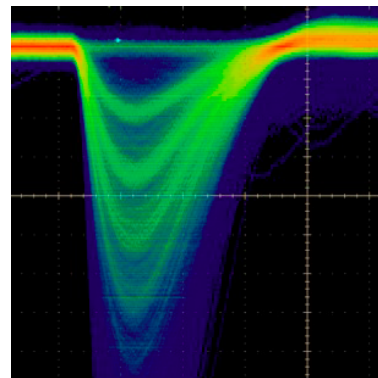
-高量子効率
-高電界光電子加速+半導体電子検出器
-高効率I_{pe}検出、時間分解能
-構造単純化によるコスト減

-高量子効率
-ダイノード改良
-構造設計見直し

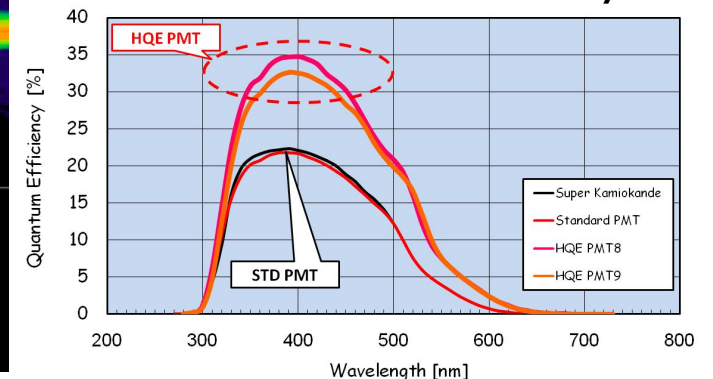
8inch HPD Prototype



5mm Φ Avalanche Detector



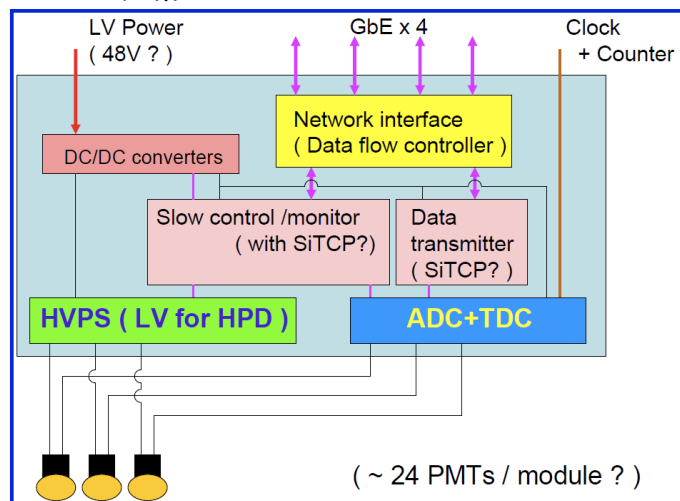
20" Quantum Efficiency



電子回路、検出器校正装置等

電子回路

- 光検出器近く（水中）に配置する事を検討中
- 電子回路要素開発
 - Self-triggering & dead-time free ADC+TDC
 - 高電圧・低電圧電源（光検出器用）
 - Intelligent network interfaces
- 2-3年で500チャンネル程度試作し2年程で水タンクでの実証

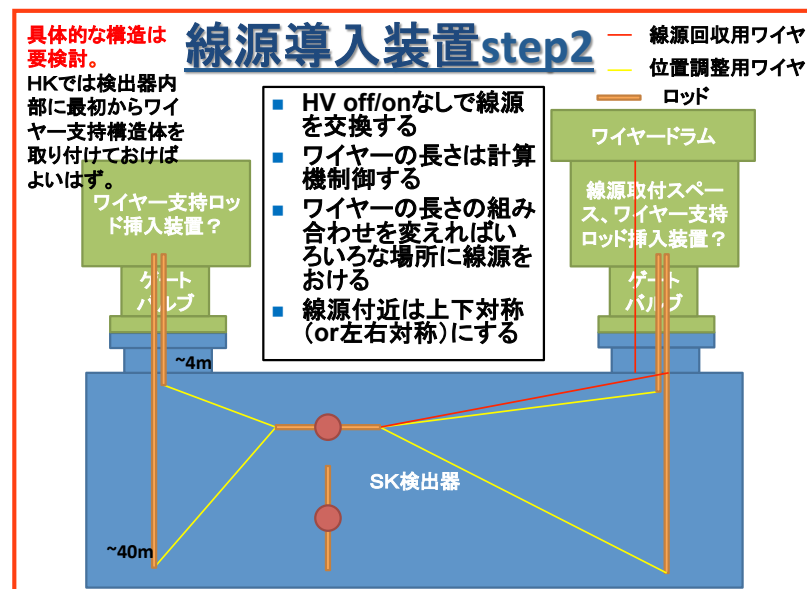


検出器校正装置

- 改善点
 - 自動化（Down timeの低減、現実的なマンパワーで実行可能）
 - キャリブレーションホール以外の位置での校正（場所依存性系統誤差の低減、HKの水槽端での校正）
 - 上下対称性の精密検証（太陽 ν 、大気 ν 研究で上下対称性は重要）
- SKでの利用を視野に入れながら開発。
- 2-3年で自動化、その後2-3年で位置制御の開発。

HKソフトウェア開発

- HK検出器シミュレーション、事象再構成の開発
 - 検出器設計の最適化（センサー、仕切り壁）
 - 物理感度の研究、改善！



Hyper-K WGチーム

1st Open HK meeting (2012 August)

2nd Open HK meeting (2013 January)



~100 participants



- 国際グループ、各要素のsub-WGとconveners。
 - カナダ、日本、ロシア、スイス、英国、米国、他
 - 約130名のmailing list登録者。約半分为日本人。
- 次回のHK meetingは6月21-22日開催予定（柏IPMU）。
- 関心のある方の参加歓迎。アブストラクト受付。

まとめ

- 核子崩壊・ニュートリノ振動の次世代基幹実験
 - お金、人も必要。
 - おおがかりだが、重要な物理、発見の可能性。ぜひ実現させたい。
- 二重 β 崩壊、暗黒物質実験と共通の実験要素
 - 光センサー、電子回路、DAQシステム、、、
 - 開発に置ける連携、協力