

加速器ニュートリノ実験の将来計画



中平 武
(KEK)

コンテンツ

- ニュートリノに関して調べるべきこと
- 現行の実験(T2K)の状況と今後数年
- “Post-T2K”のニュートリノ実験計画
 - どの物理量をターゲットとするか？
 - どのような実験条件で行うか？
 - どんなビームが必要か？
 - どのような検出器が必要か？
- 欧州／米国での将来計画は？
- まとめ

ニュートリノに関して調べるべきこと

赤字が加速器実験のターゲット

- **ニュートリノ振動の理解**
 - 三世代混合のすべての混合角、質量差の確定
 - Matter effect (真空中と物質中での振動の違い)
- ニュートリノ質量
 - **Mass hierarchy**
 - 質量の絶対値
- Majorana or Dirac: ($0\nu\beta\beta$ 探索実験)
- **CP対称性の破れ**
 - 破れはあるか？
 - 破れのメカニズムは？
- **ニュートリノ-核子相互作用**
 - ν , anti- ν の差の理解は、CP対称性の探索に必須

加速器ニュートリノ実験

Flavor eigenstates

● ニュートリノ振動がProbe:

■ 生成時:

- ・ フレーバーの固有状態
= 質量固有状態の重ね合わせ

■ 検出器まで飛行する間(基線長L)

- ・ 質量固有状態毎に時間発展
→ 生成時とは違うフレーバー成分が出現。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Mass eigenstates

Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata Matrix (CKM matrix in lepton sector)

$$U_{\text{MNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +c_{23} & +s_{23} \\ 0 & -s_{23} & +c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{13} & 0 & +s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & +c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{12} & +s_{12} & 0 \\ -s_{12} & +c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

大気、加速器
(大気)、加速器
太陽、原子炉

6 independent parameters govern oscillation

$\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}, \delta$

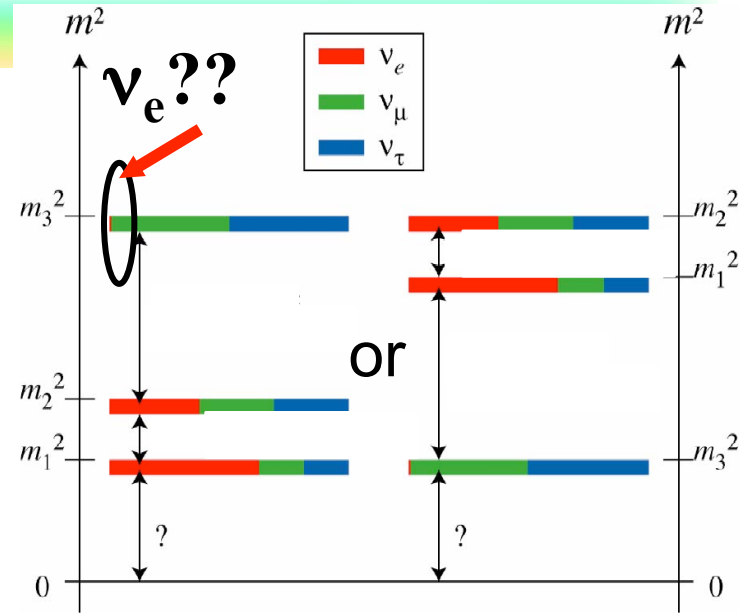
$\Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2, \Delta m_{13}^2$

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

$$c_{ij} = \cos(\theta_{ij}), \quad s_{ij} = \sin(\theta_{ij})$$

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ appearance

- ニュートリノ振動: $(L/E\nu)$ の関数
- CPの破れ: $\nu / \text{anti-}\nu$ で違い
($\delta \leftrightarrow -\delta, a \leftrightarrow -a$)
- 物質効果:
 - L と Δm_{31}^2 (の符号) による
... Mass Hierarchy



$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & 4C_{13}^2 \underbrace{S_{13}^2}_{\text{circled}} S_{23}^2 \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \times \left(1 + \frac{2a}{\Delta m_{31}^2} (1 - 2S_{13}^2) \right) \\
 & + 8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos \delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cos \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \\
 & - 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} \underbrace{S_{13}}_{\text{circled}} S_{23} \sin \delta \sin \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \quad \text{CPV} \\
 & + 4S_{12}^2 C_{13}^2 \{ C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{23}^2 S_{13}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{23} S_{13} \cos \delta \} \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \quad \text{Sol term}
 \end{aligned}$$

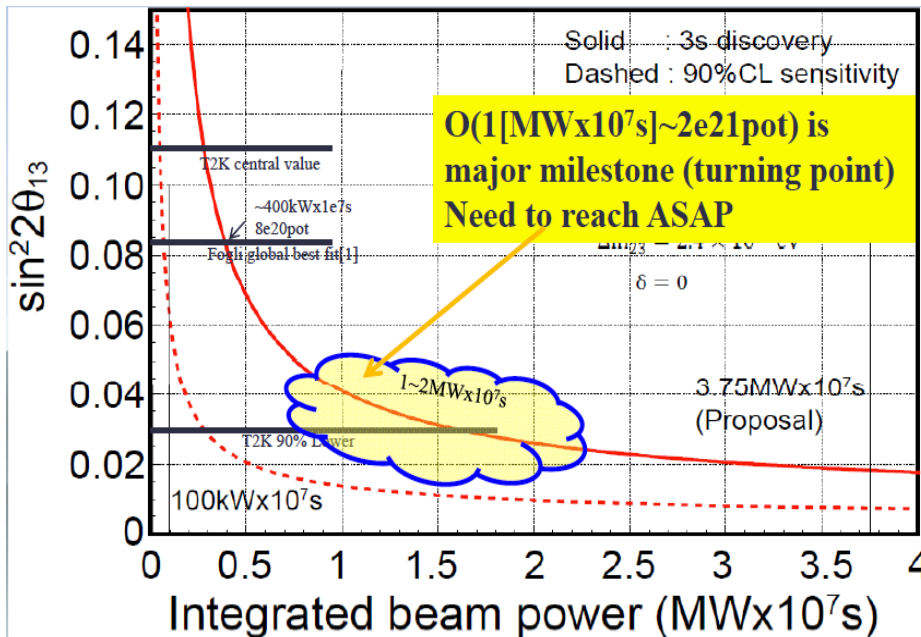
現状

● 三世代ニュートリノ振動の混合角の測定

- $\theta_{12}, \theta_{23}, \Delta m^2_{12}, |\Delta m^2_{23}|$ は確定
- θ_{13} : T2K, MINOS で比較的大きな値の兆候
 - 原子炉ニュートリノ実験ももうすぐ結果が出る。
 - NO ν A: 2013~
- $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ appearance 探索が進行中: OPERA, ICURUS
- いくつか単純な三世代ニュートリノ振動では理解できない現象の兆候 (要検証)
 - LSND, MiniBooNE:
 - ✓ $\Delta m^2 \sim O(0.1 \sim 10 \text{eV}^2)$ の anti- $\nu_{\mu} \rightarrow \text{anti-}\nu_e$ 振動 = 新たな質量階層か
→ “Sterile neutrino”
 - MINOS: ν_{μ} disappearance: Δm^2 が ν_{μ} と anti- ν_{μ} で違う?
 - ✓ もし本当ならば CPT の破れ

T2K実験の近未来

- ‘10/1~’11/3までに 1.4×10^{20} POTのビームが供給
 - ~70[kW $\times 10^7$ s]相当
 - 6事象の $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ を発見(BG 1.5 ± 0.3 を含む $\rightarrow \text{sig}=4.5$)
- 現計画では次のMilestone ~1[MW $\times 10^7$ s]に達するのは早くてもH26
 - 一方、米NO ν A実験はH25からビーム強度700kWで実験開始予定

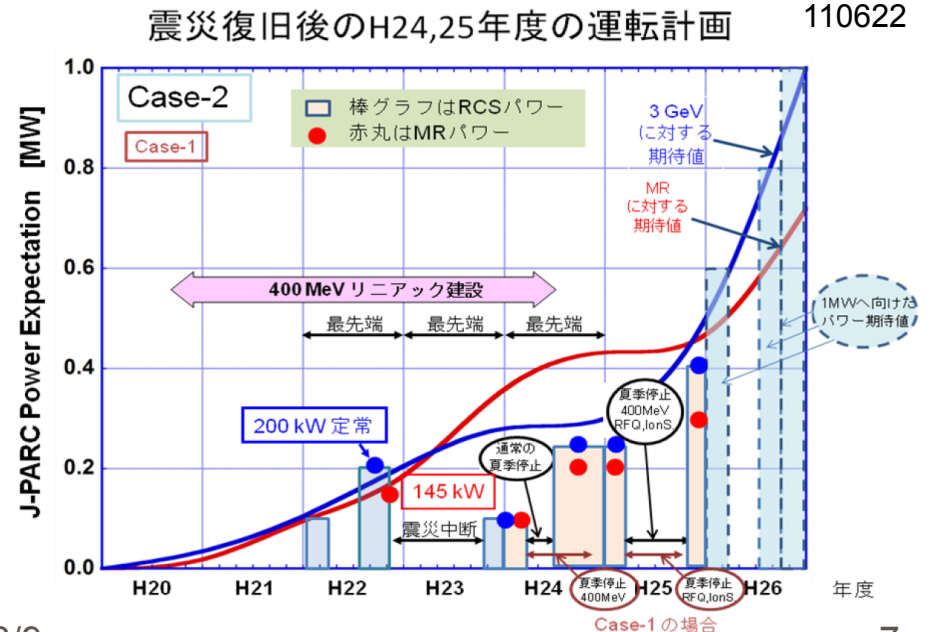


タウンミーティング@J-PARC

2011/8/9

(次年度以降の計画)

利用者協議会
110622



ケース2を基調に考える。

“Post-T2K” の大目標

- ニュートリノ振動の理解
 - 三世代混合のすべての混合角、質量差の確定
 - Matter effect
- ニュートリノ質量
 - Mass hierarchy
 - 質量の絶対値
- Majorana or Dirac: $0\nu\beta\beta$ 探索実験

- **CP対称性の破れ**
 - 破れはあるか？ 破れのメカニズムは？



- ニュートリノ-核子相互作用

大前提: **ビーム強度1.66MW (KEK roadmap) が必須!**

Quest for the Origin of Matter Dominated Universe

**One of the Main Subject of the
KEK Roadmap**

T2K
(2009~)

Discovery of
the ν_e Appearance

MR 1.66MW

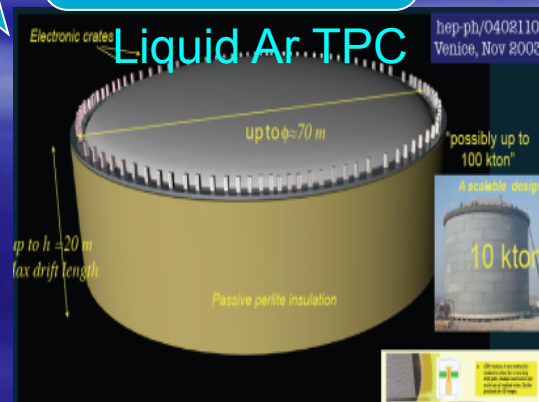
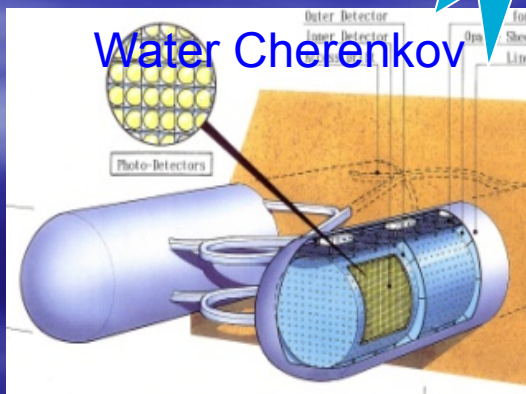
**Neutrino
Intensity Improvement**

Huge Detector R&D

Establish
Huge Detector
Technology

**Construction of
Huge Detector**

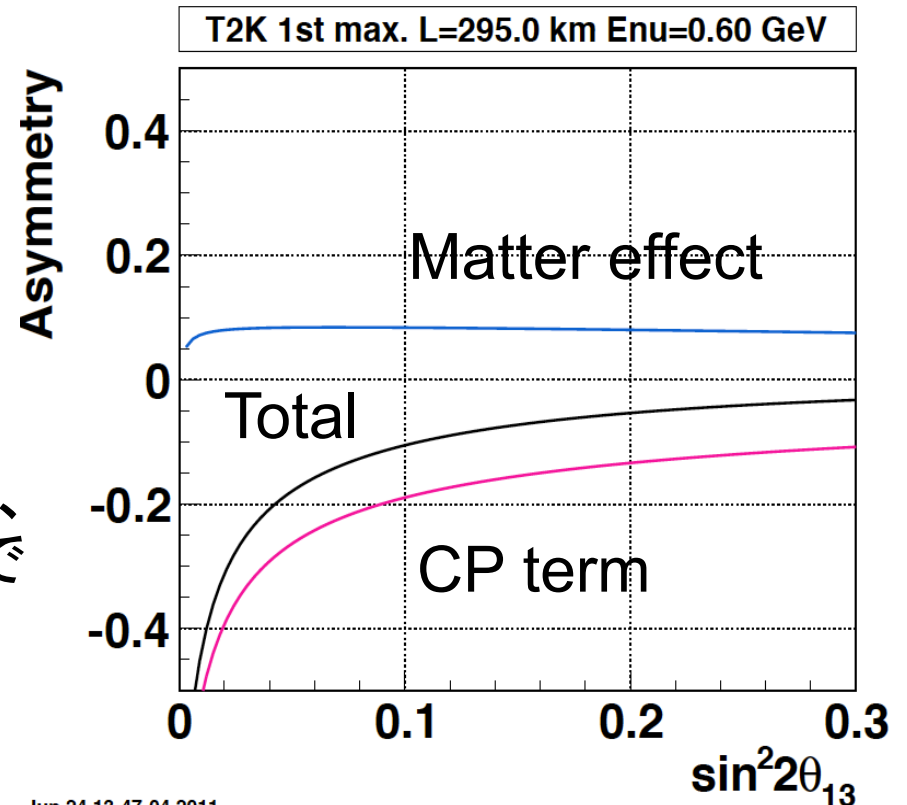
**Discovery of
Lepton CP Violation
Proton Decay**



必要な統計数

● 超概算 (統計エラーのみ)

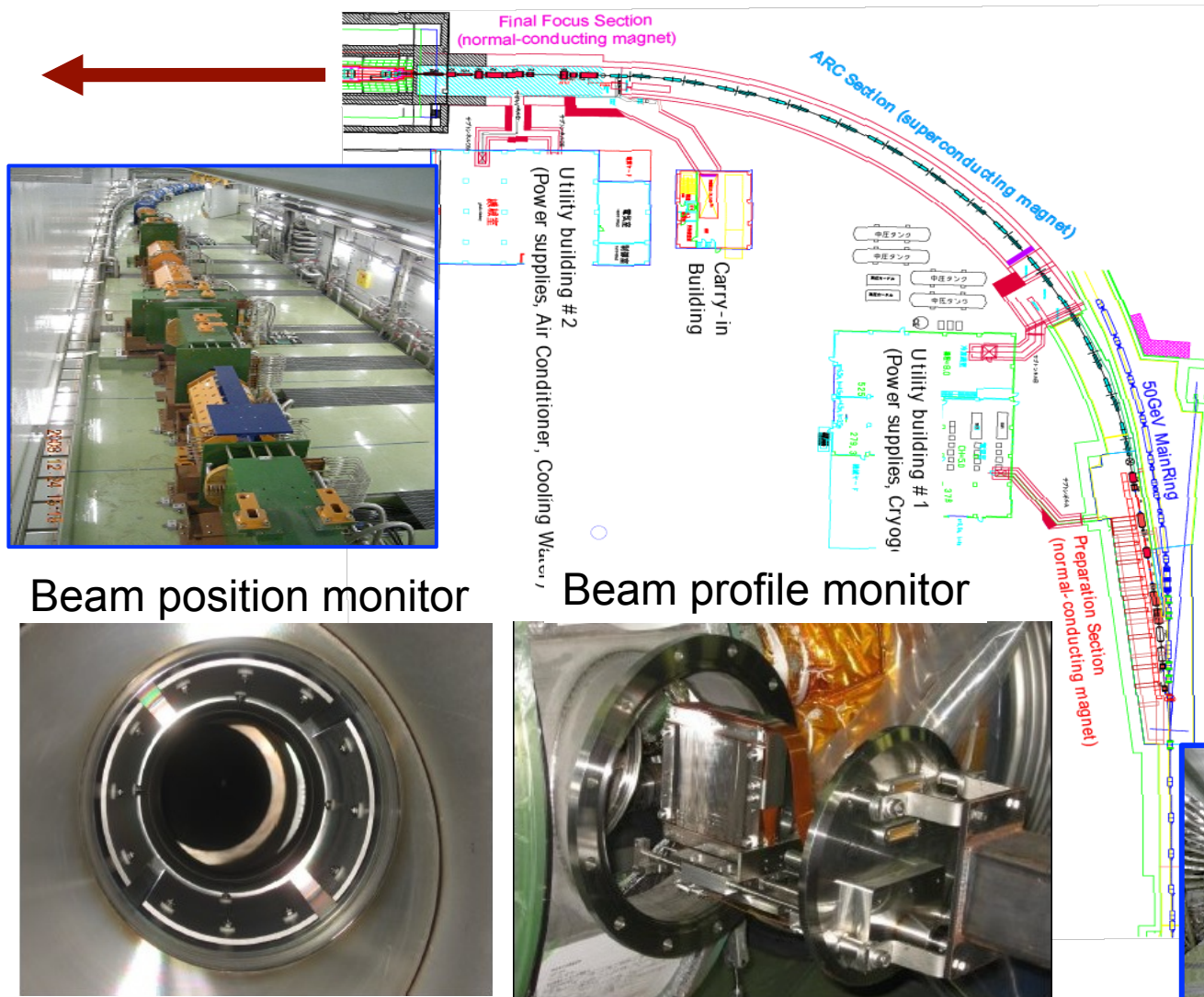
- Matter effectを無視
- Oscillation Max. での
Asymmetry @ $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$
 - 最大 $\sin\delta=1$ で $\sim 20\%$
 - $\sin\delta=0.2$ で $\sim 4\%$
- この範囲を 3σ でカバーするには、 $\nu/\text{anti-}\nu$ をそれぞれ $\sim 1\%$ の精度で要測定
- それぞれ約11000事象必要
 - T2K:
4.5 event / $70 \text{ kW} \cdot 10^7 \text{ s}$ / 22.5kt
 - $175 \text{ MW} \cdot 10^7 \text{ s} \cdot 22.5 \text{ kt}$ 必要
 - **2MW** × 1Mt × ~ 4 年 × 2 ($\nu/\text{anti-}\nu$)



CP破れの探索のためのニュートリノ源

- 将来のニュートリノ源のための加速器:
~2MWのビームが必要
 - “Super beam”
 - 最もストレートフォワード (J-PARC MRの大強度化)
 - T2Kの示唆する大きな θ_{13} の値は、a few MWのSuper beamでCP破れの探索実験ができることを示している。
 - ベータビーム (R&D段階)
 - (反)電子ニュートリノ源
 - ニュートリノファクトリー(R&D段階)
 - ミューオンリング ($\mu \rightarrow e \nu_{\mu} \nu_e$)
 - ✓ やっぱり大強度のpビームが必要
 - 遠方検出器での電荷識別が必要 → 磁石
- 現在のJ-PARC ν ビームラインは？
 - 次項

J-PARC ニュートリノビームライン (I)



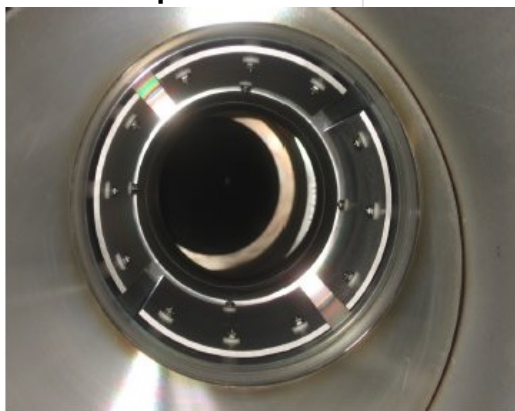
Bend the beam by ~80°
Using Super-conducting
combined function Magnets

NC magnets
Using MIC
(Mineral-insulation-cable)



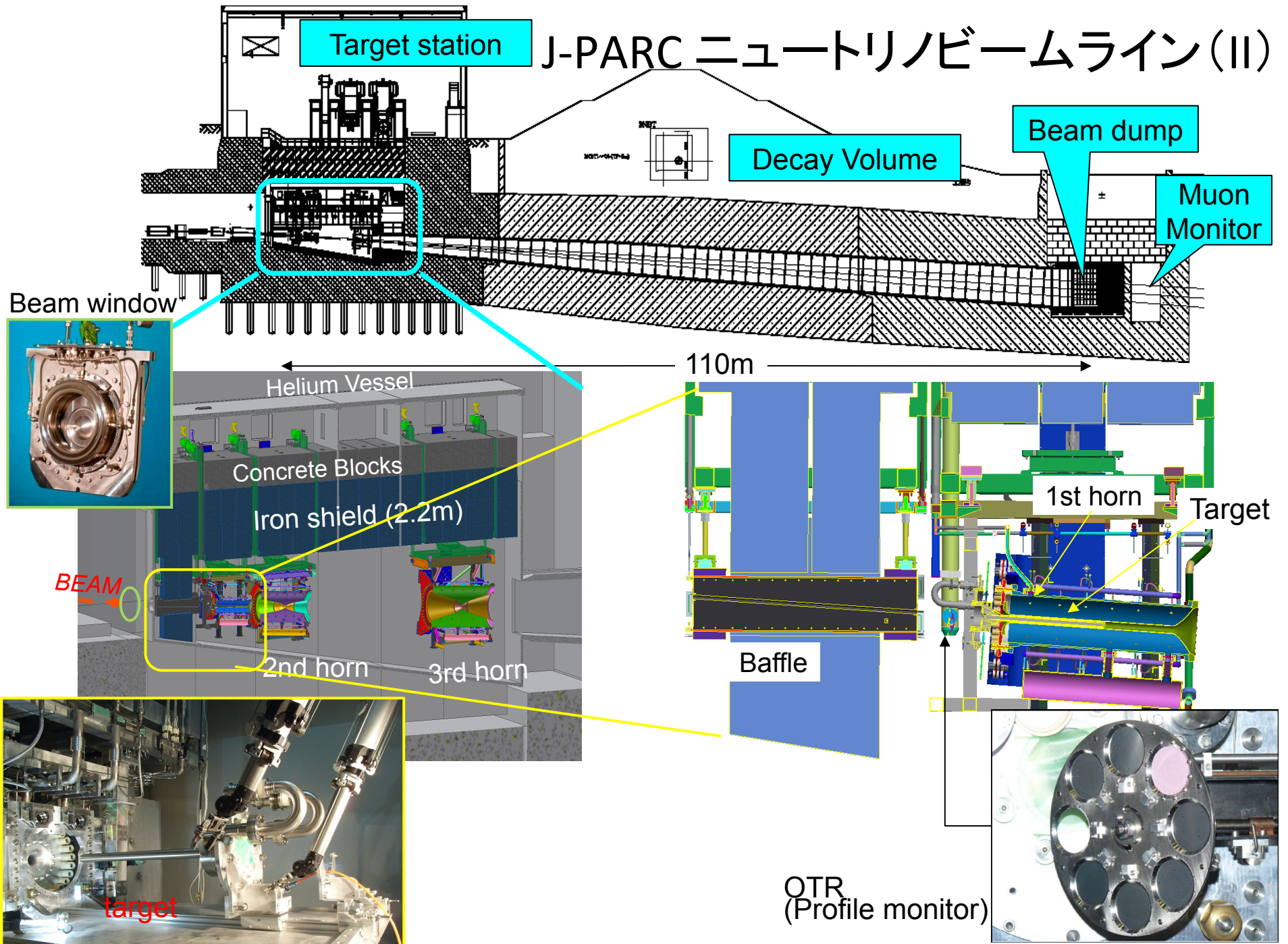
Beam position monitor

Beam profile monitor



Secured operation is important for high intensity beam.
Allowable beam loss: ~1W/m.

J-PARC ニュートリノビームライン(II)

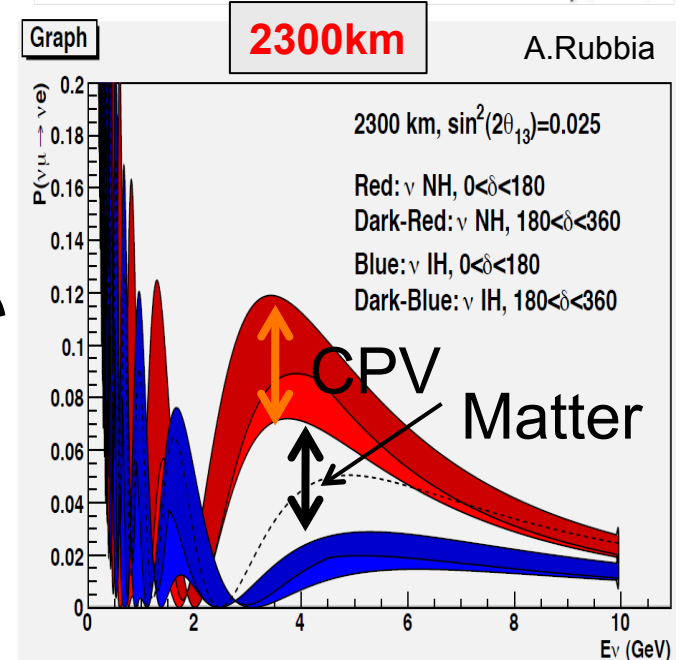
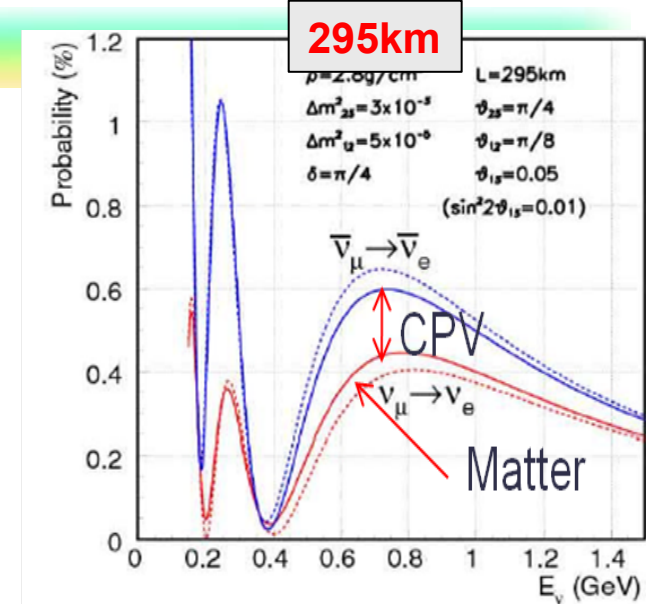


ニュートリノビームライン

- 現行のビームダンプやDVの遮蔽は3MWまでOK
- 大強度(>>1MW)対応が必要な点
 - 標的、ビーム窓など直接ビーム照射を受ける機器
 - 熱衝撃 $\propto p/pulse$ の増加は、 $\sim 5 \times 10^{14}$ pppくらいが限界か。高繰り返しへの対応は冷却能力の増強で対応可能。
 - 放射線損傷による単寿命化。頻繁な交換前提な設計に。
 - 電磁ホーン
 - T2Kとは異なる最適化がありうる。
 - 電源は ~ 1 Hz以下への高繰り返しには大きな改造が必要。ホーン本体も繰り返し疲労が増加。
 - 陽子ビームライン
 - コリメータの強化(超伝導磁石の保護)
 - プロファイルモニタ(現行SSEM(破壊型) → ビームロスのため代替案必要か)
 - 放射線遮蔽・気密の強化
 - 二次ビームライン機器の放射線耐性の強化
 - 地下におかざるを得ない機器の材質変更、遠隔制御化...

CPの破れ探索実験条件をどうきめるか？

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ アピアランスの何に着目するか？
 - ニュートリノと、反ニュートリノとの比較
 - エネルギースペクトラム
 - 1st oscillation max. と 2nd oscillation Max.の違い
- 調整可能なパラメータ
 - 基線長(L) をどれくらい取らないといけないか？
 - 観るべきニュートリノのエネルギーが決まる
 - 必要なビーム強度x検出器サイズも決まる。
 - ビームの種類
 - Wide band or Narrow band? Or other?
 - ニュートリノの反応モード
 - 検出器のテクノロジー
- 他に測定が必要な物理量は？
 - ニュートリノと反ニュートリノの反応断面積の違い
 - 物質効果(Mass Hierarchy)
 - ビーム中の ν /anti- ν 比は対称か？



CP破れの探索のための Far Detector

●測定すべき事象

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ アピアランス : T2K実験と同じ
 - ニュートリノと反ニュートリノとの比較
 - エネルギースペクトラム

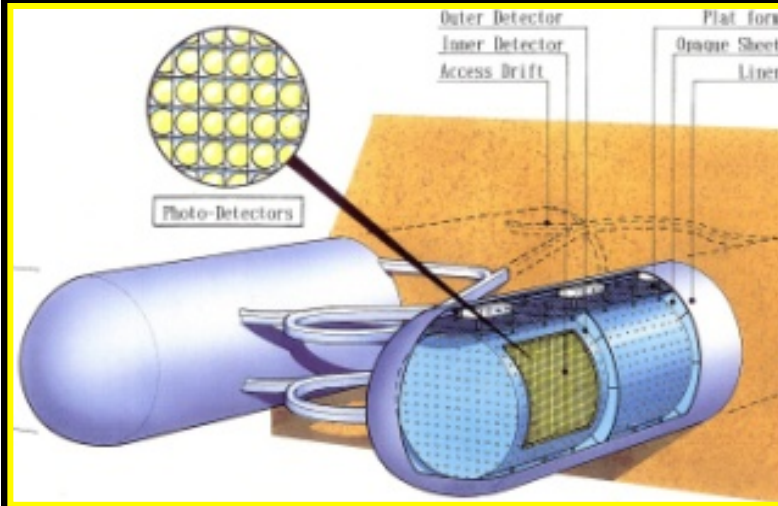
●ただし、必要な統計が、 $\times \sim 50$

- ニュートリノ反応数
 \propto ビーム強度 \times 検出器質量 \times 検出効率

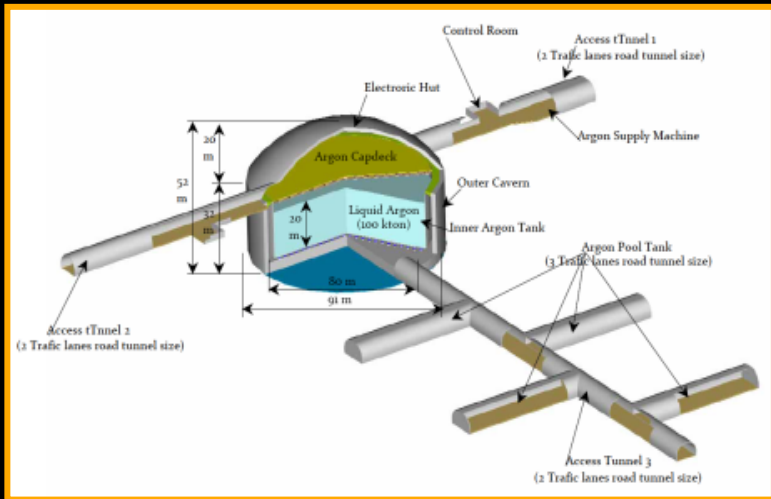
●大型化・高性能化が必須

- いま考えられているのは2つのテクノロジー
 - 水チェレンコフ (WC) ... O (1Mt)
 - 液体アルゴンTPC (LAr) ... O (100kt)

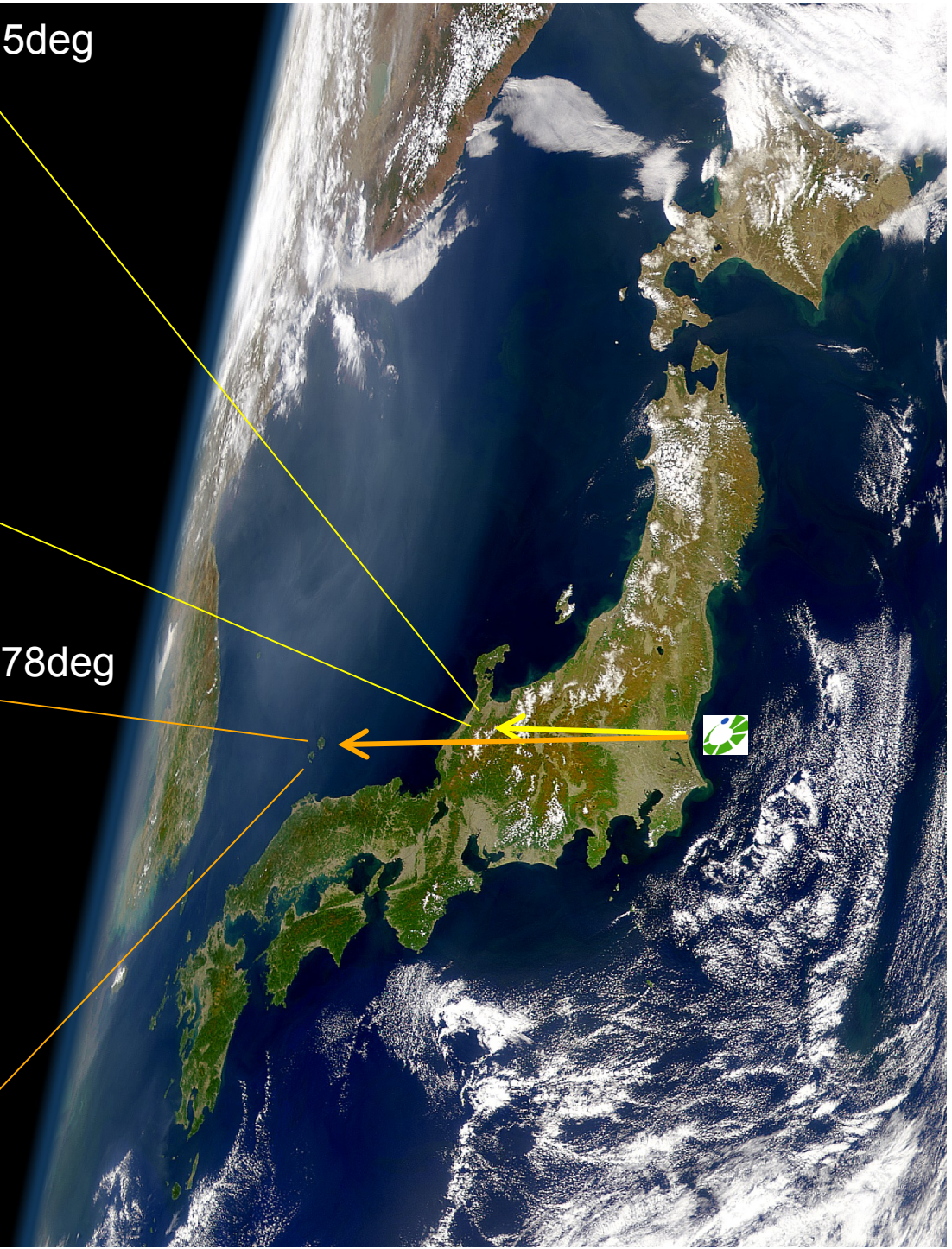
J-PARC+HK @ 神岡 L=295km OA=2.5deg



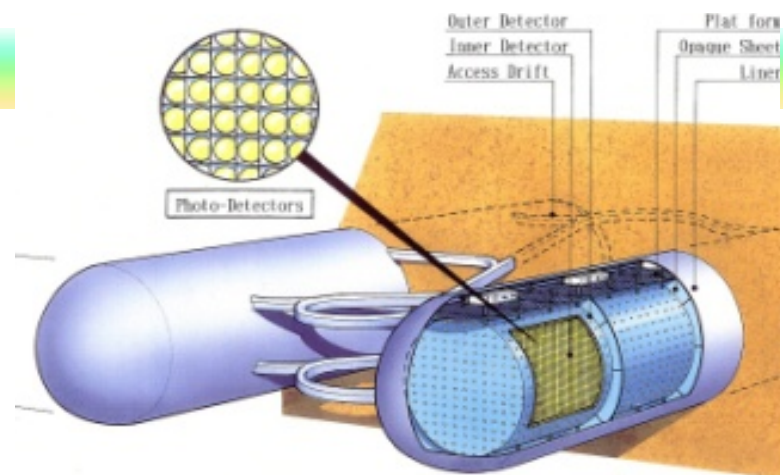
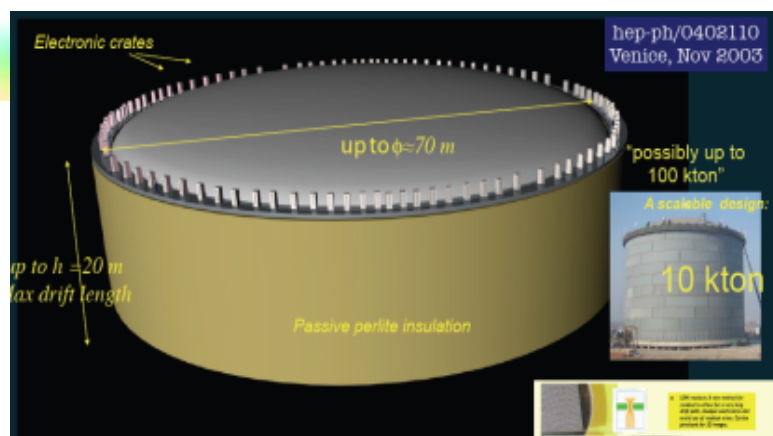
J-PARC+LAr @ 隠岐 L=658km OA=0.78deg



P32 proposal (Lar TPC R&D)
Recommended by J-PARC PAC
(Jan 2010), arXiv:0804.2111



Far detector technology



Liq Ar TPC

- Aim $O(100\text{kton})$
- Electronic “bubble chamber”
 - Can track every charged particle
 - Down to very low energy
- Neutrino energy reconstruction by eg. total energy
 - No need to assume process type
 - Capable upto high energy
- Good PID w/ dE/dx , π^0 rejection

Good at Wideband beam

Water Cherenkov

- Aim $O(1000\text{kton})$
- Energy reconstruction assuming $Ccqe$
 - Effective $< 1\text{GeV}$
- Good PID (μ/e) at low energy
- Cherenkov threshold

Good at low E ($< 1\text{GeV}$)
narrow band beam

J-PARC + HK

- 特徴：日本で三代目となる大型WC:O (1Mt)
 - Sub-GeVのニュートリノに対するエネルギー再構成、 μ/e 識別が方法が確立されている。
 - 主なニュートリノ反応がCC-QE反応(1-ring検出)
 - NC π^0 事象が ν_e 検出の主なバックグラウンド
 - T2K 現状不定性 ~20% 目標5%
 - OA法でのNarrow Band beamが必須
- 課題：
 - バックグラウンドの系統誤差をどこまで押さえられるか？

J-PARC + LAr

- 特徴 : O(100kt)
 - Multi-trackなニュートリノ反応も検出可能
 - ・ ニュートリノ反応をExclusiveに検出可能
 - ・ e/π^0 の識別可能なので、バックグラウンドの系統誤不定性小
 - 高いエネルギーのニュートリノも検出可能で、広いレンジのエネルギースペクトラムが測定可能
- ワイドバンドビーム(オンアクシス)での実験が可能
 - T2Kとは異なるビームライン(電磁ホーン)の最適化がありうる
- 課題
 - 期待どおりの e/π^0 の識別能力があるか実証が必要
 - 大きな検出器が作れるか？がポイント
 - ・ 実験機
 - ・ 原型機 J-PARC T32 ← いまここ
 - ・ 実証機 (欧) ICURUS T600, (米) MicroBooNE ← 次のステップ
 - ・ 実用機

欧米の将来計画

下記で赤字が、J-PARCの”Post T2K” と競合する計画。

● 米

- MicroBooNE: 70t LAr Sterile neutrino search
- NO ν A: 2013~ θ_{13} measurement using 700kW beam.
- MINOS+ : 2013~: Sterile neutrino search w/ MINOS detector.
- **LBNE** : L=1300km WC or LAr : CP violation, MH
 - FNAL-MIIに、ビームラインを新設。検出器も新設。

● 欧:

- ICURUS@CERN PS: LAr for sterile
- **CN2PY(LAr), CN2Frejus(WC)**
 - CERNに加速器、ビームラインを新設。検出器も新設。

● 欧米ともNeutrino factory, Beta beam + MIND/TASDなど、さらに将来の計画も議論されている。

- θ_{13} が大きい兆候で、Design Parameterの最適化が議論されている
- 加速器開発がメイン

まとめ

- T2Kの結果: CPの破れは“Super Beam”で実験できる。
- Post-T2K の加速器ニュートリノ実験
 - 大目標: CPの破れの探索
 - ニュートリノ-反ニュートリノの比較
 - エネルギースペクトラム
 - 大前提: ビーム強度の増強 (~2MW) が必須
 - 2つのFar検出器オプション
 - 水チェレンコフ検出器
 - ✓ バックグラウンドの系統的不定性を想定どおりに押さえられるか？
 - 液体アルゴンTPC
 - ✓ 大型の検出器が検出できるか？
 - ✓ e/π^0 識別は期待通りのパフォーマンスがえられるか？
 - 共通の課題
 - ✓ ニュートリノ-反ニュートリノの反応の断面積の違いの理解が必要。