

T2K実験の現状と 第二フェーズに向けた展望

市川温子

京都大学

for the T2K collaboration

The T2K Collaboration



~500 members, 59 Institutes, 11 countries

Canada

TRIUMF
U. B. Columbia
U. Regina
U. Toronto
U. Victoria
U. Winnipeg
York U.

Italy

INFN, U. Bari
INFN, U. Napoli
INFN, U. Padova
INFN, U. Roma
ICRR Kamioka
ICRR RCCN

Japan

Kavli IPMU
KEK
Kobe U.
Kyoto U.
Miyagi U. Edu.
Osaka City U.
Okayama U.
Tokyo Metropolitan U.
U. Tokyo

Poland

IFJ PAN, Cracow
NCBJ, Warsaw
U. Silesia, Katowice
U. Warsaw
Warsaw U. T.
Wroclaw U.

Russia

INR

Spain

IFAE, Barcelona
IFIC, Valencia

Switzerland

ETH Zurich
U. Bern
U. Geneva

United Kingdom

Imperial C. London
Lancaster U.
Oxford U.
Queen Mary U. L.
STFC/Daresbury
STFC/RAL
U. Liverpool

U. Sheffield
U. Warwick

USA

Boston U.
Colorado S. U.
Duke U.
Louisiana S. U.
Michigan S.U.
Stony Brook U.
U. C. Irvine
U. Colorado
U. Pittsburgh
U. Rochester
U. Washington

France

CEA Saclay
IPN Lyon
LLR E. Poly.
LPNHE Paris

Germany

Aachen U.

Tokai-to-Kamioka (T2K) experiment



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



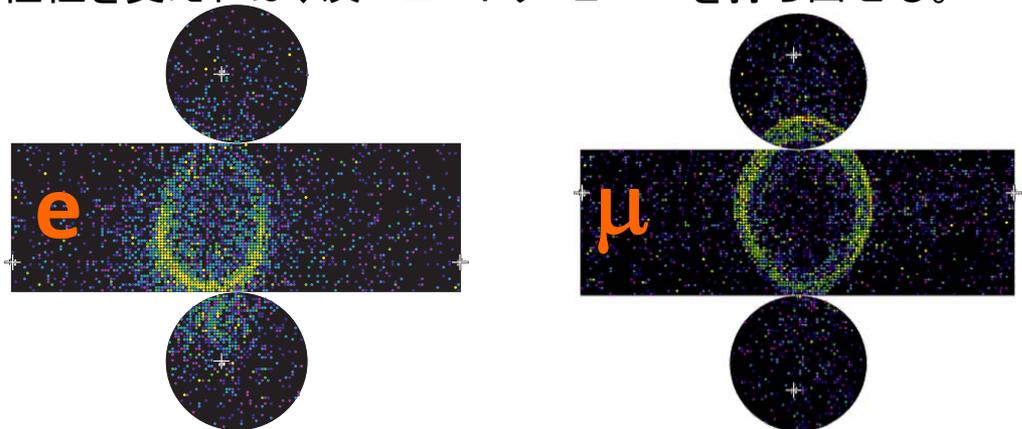
J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



Signal

- Fully Contained
- 1-ring
- ν_e appearance
 - e-like ring
 - Visible Energy >100MeV
 - No decay-e
 - π^0 mass cut
 - $E_{rec} < 1250$ MeV
- ν_μ disappearance
 - μ -like ring
 - $p_\mu > 200$ MeV/c
 - #decay-e ≤ 1

~0.6GeVのミュオンニュートリノビームを神岡に向けて打ち出す。
ホーンの極性を変えれば、反ニュートリノビームを打ち出せる。



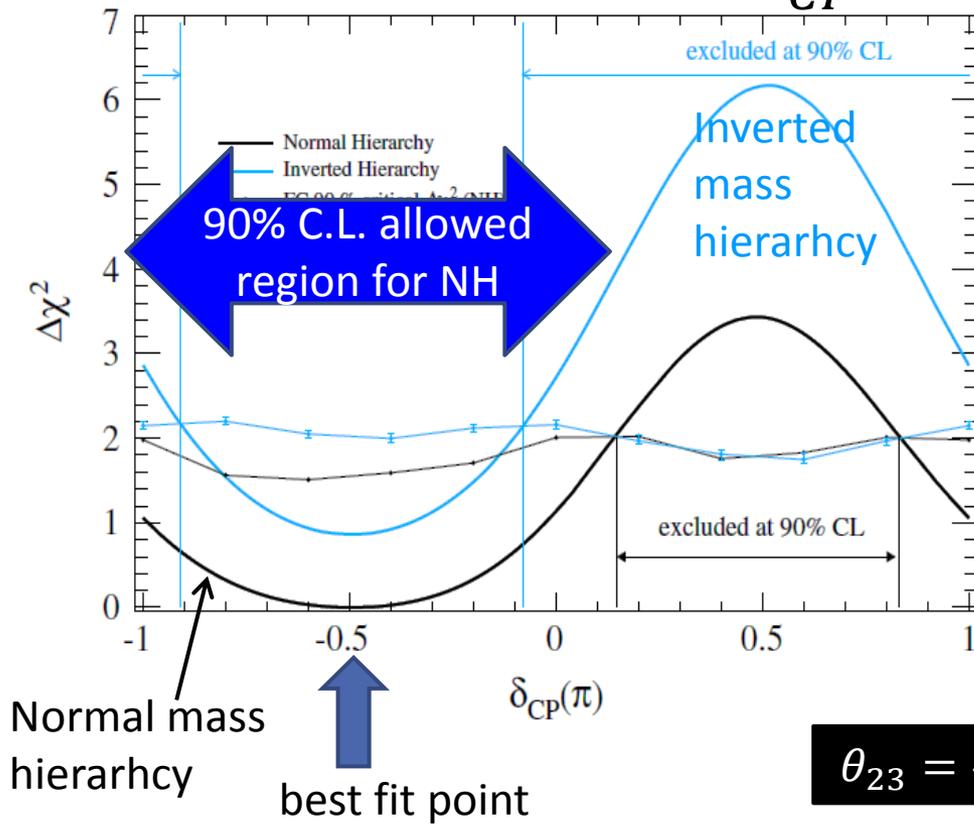
Data taking goal = $7.8E^{21}$ protons-on-target(POT)

Simulated event display

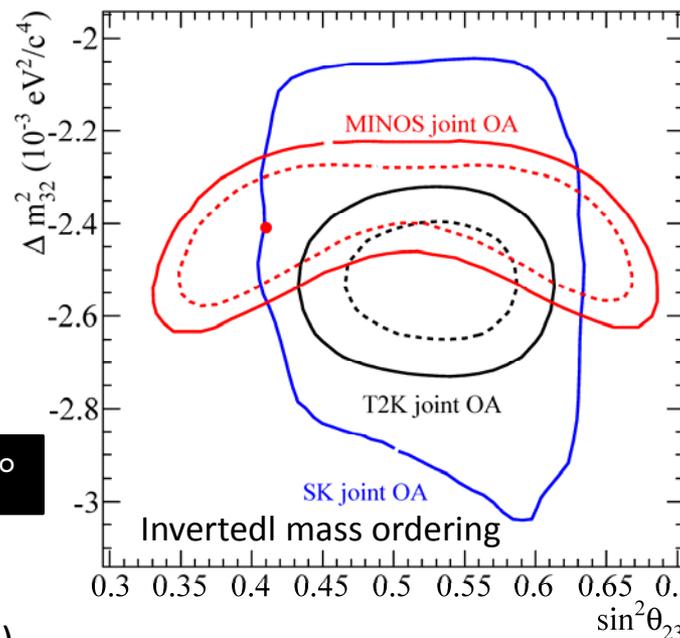
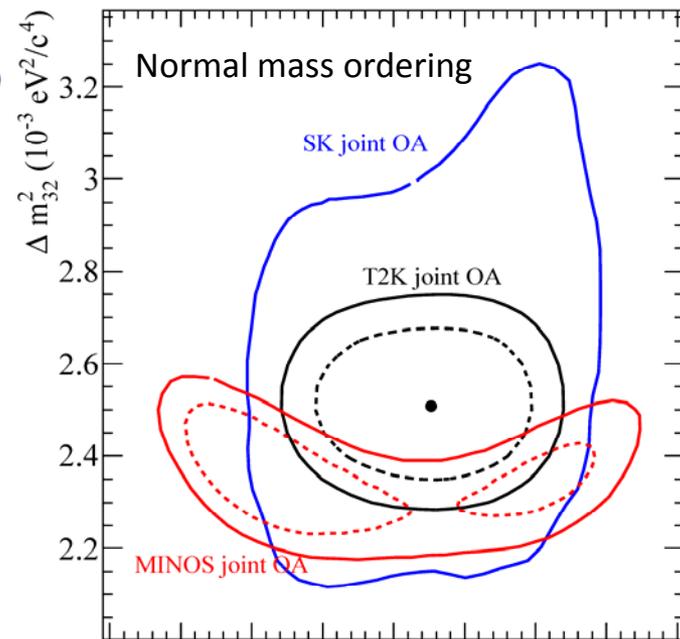
T2K result w/ data till 2013

6.6E20 POT (8.5% of goal statistics)

Constraint on δ_{CP}



$\theta_{23} = 46^\circ \pm 3^\circ$



2014年から2015年にかけての動き

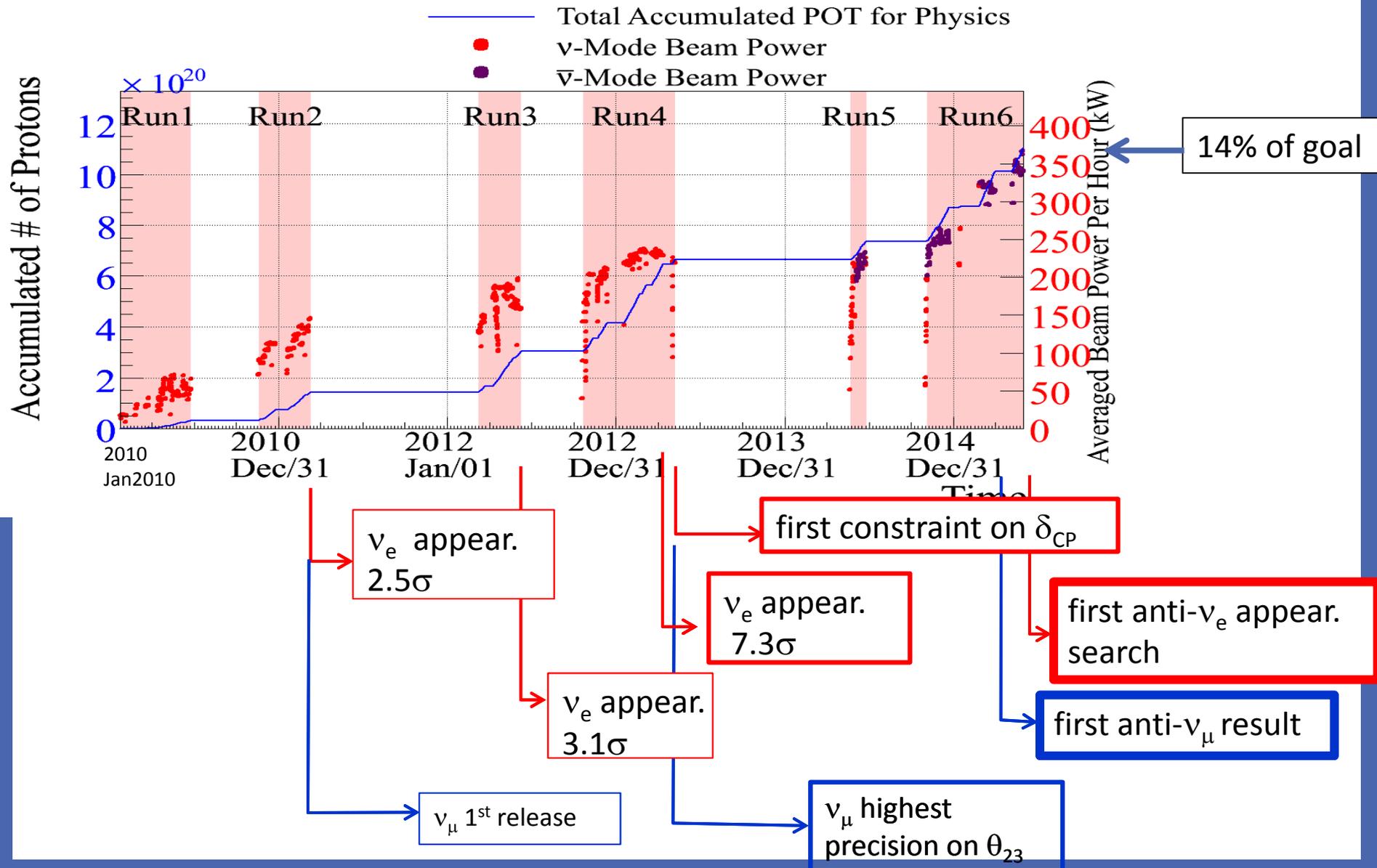
- 2013年までに 6.6E20 POT (8.5% of goal statistics)
 - ν_e appearance 7.3σ
 - world best measurement of $\sin^2 \theta_{23}$ by ν_μ disappearance
 - 統計的有意性は低いけれど、CPの破れが最大($\delta_{CP} = -\frac{\pi}{2}$, 標準質量階層)を favor



(反) ν_e への振動確率が $\pm 27\%$ 変わる。
質量階層性の方は $\pm 10\%$ の影響

- 反ニュートリノビームでのランを開始
 - 最終目標
 - ν_e appearance、反 ν_e appearance(+原子炉による測定)により、レプトンにおけるCP対称性の破れを見つける。(または δ_{CP} の測定)
 - ν_μ disappearanceの精密測定により、 θ_{23} がどこまで最大混合に近いかを突き詰める。(現状 $46^\circ \pm 3^\circ$)
 - 近々の目標
 - 反 ν_e appearanceの観測
 - 反 ν_μ disappearanceの精密測定で、CPTテスト
 - すべてのサンプルを用いての δ_{CP} , $\sin^2 \theta_{23}$, Δm_{32}^2
- 2013年、2014年は、ハドロン事故、電気代高騰、運転経費の不足などでビームタイムが非常に苦しい状況

Data taking and Physics release history

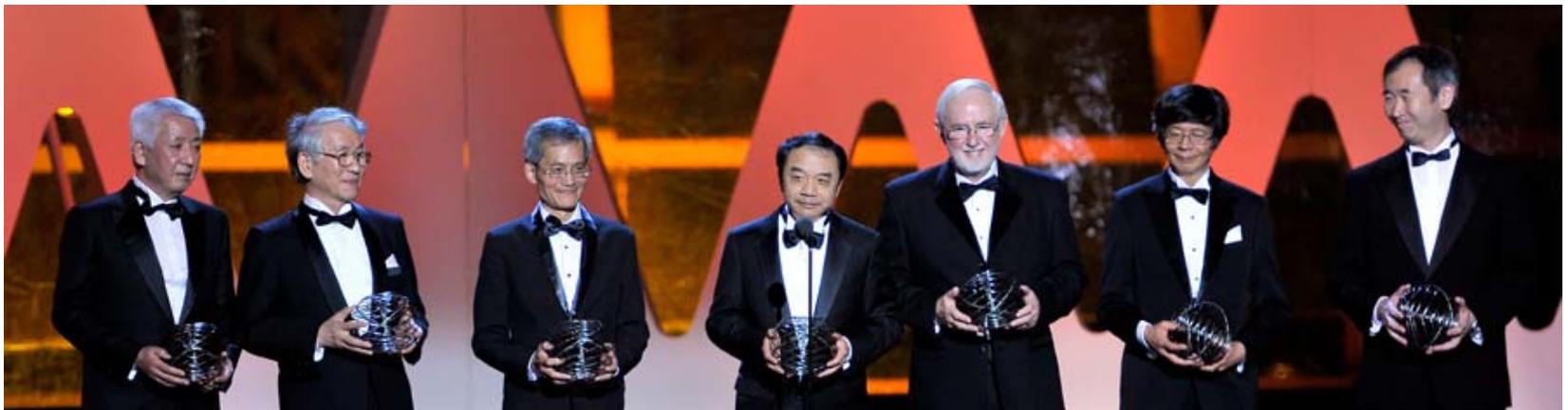


2015年のハイライト(+問題点)

- beam power 250kW → 360kW (目標は >750kW)
- 統計
6.6x10²⁰ POT (2013) → 11.0x10²⁰(total)= 7.0x10²⁰(ν-beam)+4.0x10²⁰($\bar{\nu}$ -beam)
- 反ν_μ disappearanceの測定(初)
- 反ν_e appearance search(初)

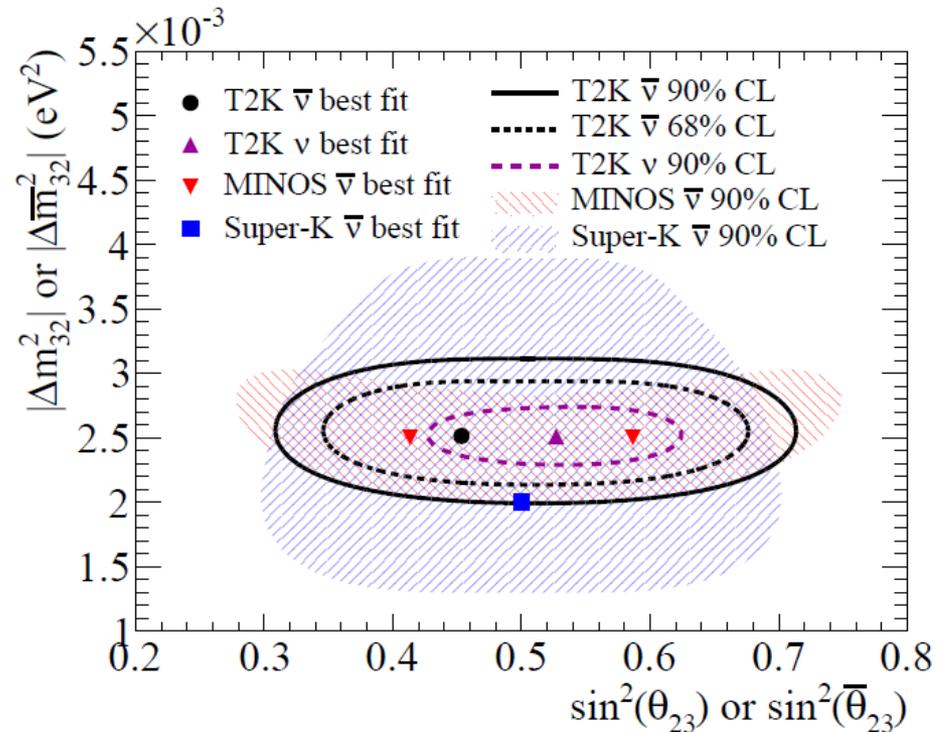
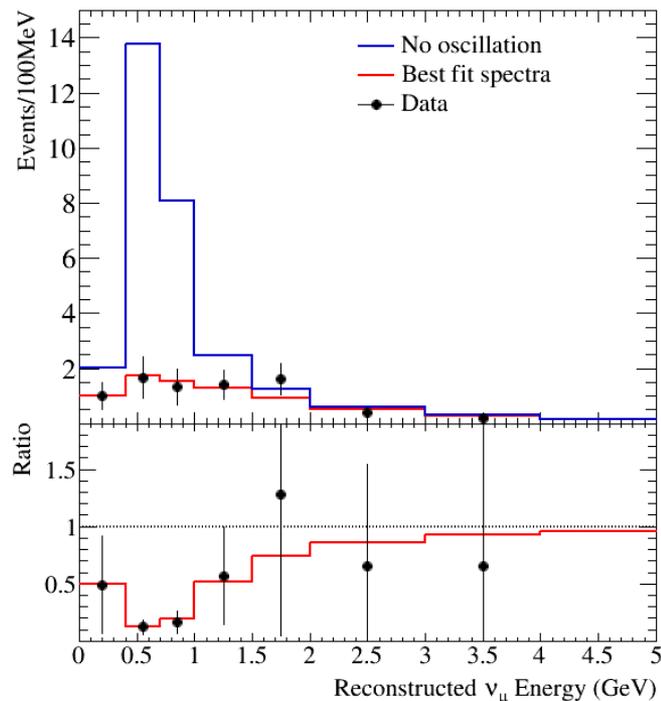
(注) 反ニュートリノでは、断面積がニュートリノの~1/4になってしまうため、統計を貯めるのが難しい。(それでも、速やかにCPVを探すためには、反ニュートリノビームでのデータ取得が有効)

- ニュートリノ生成標的の冷却ヘリウムガスのリーク
- breakthrough賞受賞！ 戸塚賞(小林、塩澤、中家)



Measurement of θ_{23} and Δm^2_{32} with muon antineutrino disappearance

- Should match with neutrino measurement.
 - If different, violation of the CPT theorem or unknown non-standard neutrino-matter interaction
- Achieved (almost) world-best measurement. Consistent with neutrino measurement.

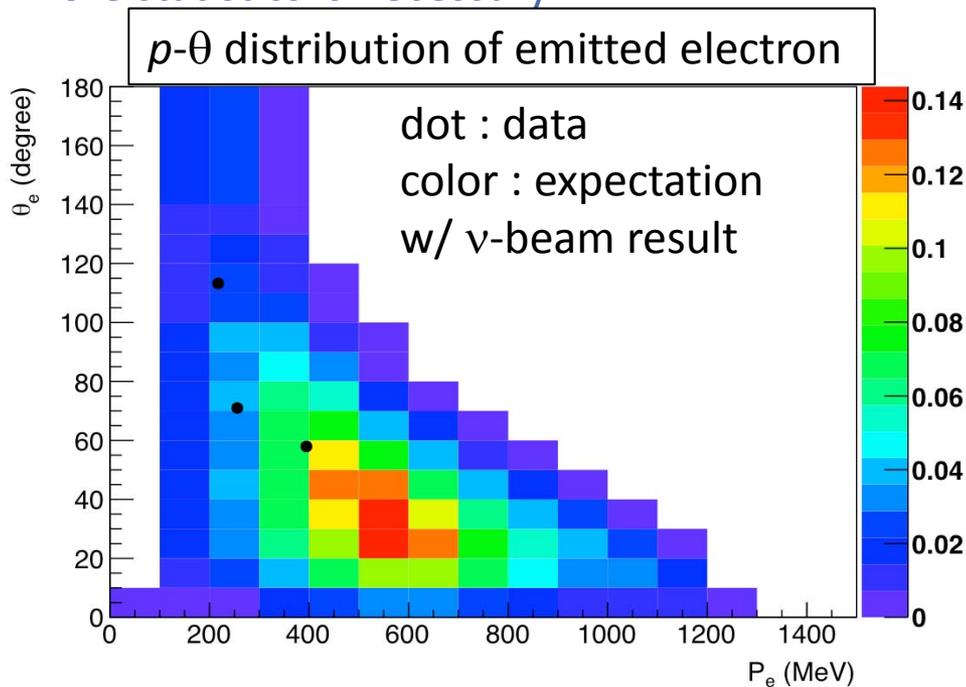


The first anti- ν_e appearance search

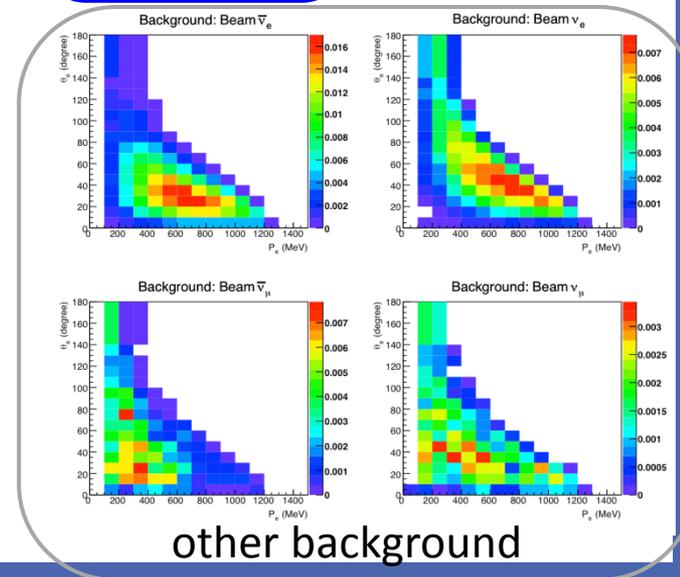
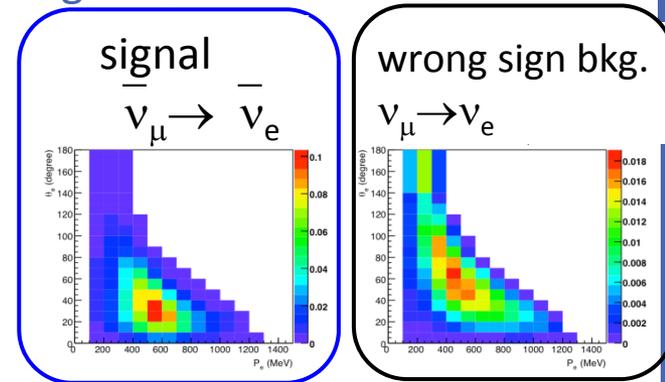
- First step towards CP-phase measurement
- Enhanced(Suppressed) if $0 < \delta_{CP} < \pi$ ($-\pi < \delta_{CP} < 0$) (ニュートリノの場合と逆)
- Expect 3.7~5.5 events while background is 1.5~2.1 depending on δ_{CP}

Result

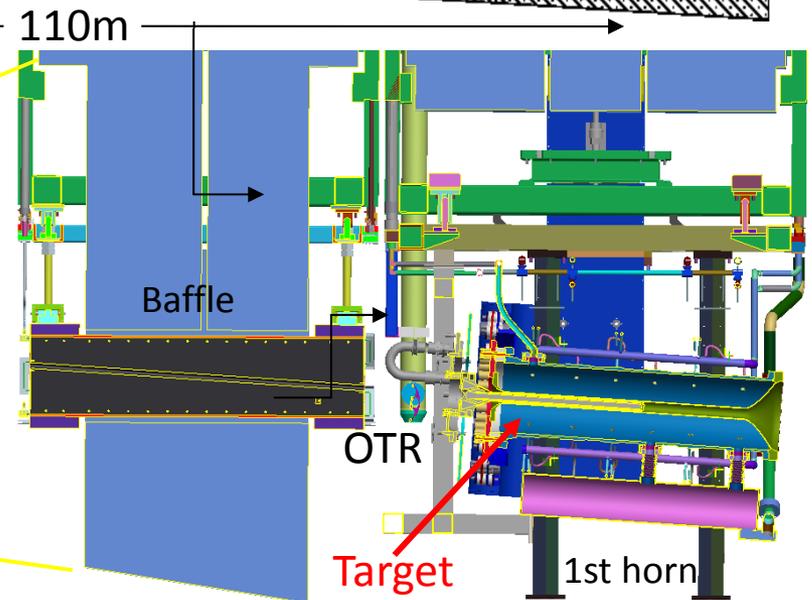
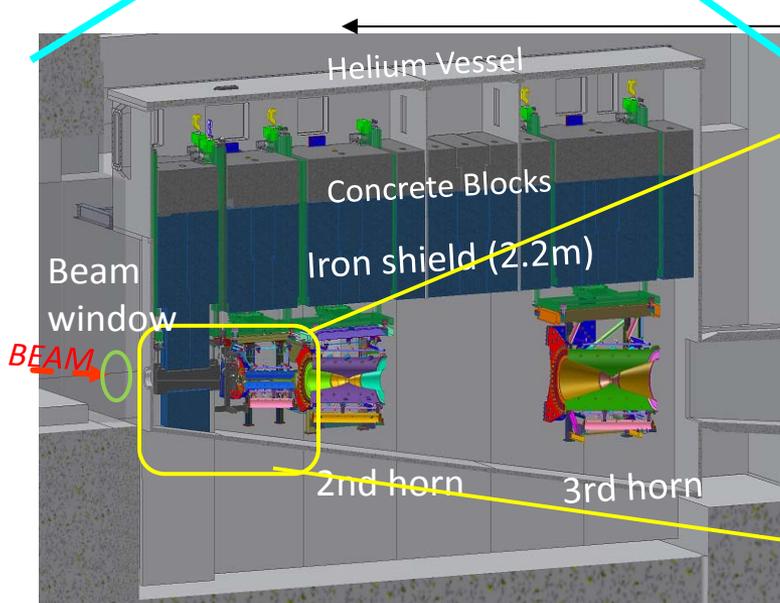
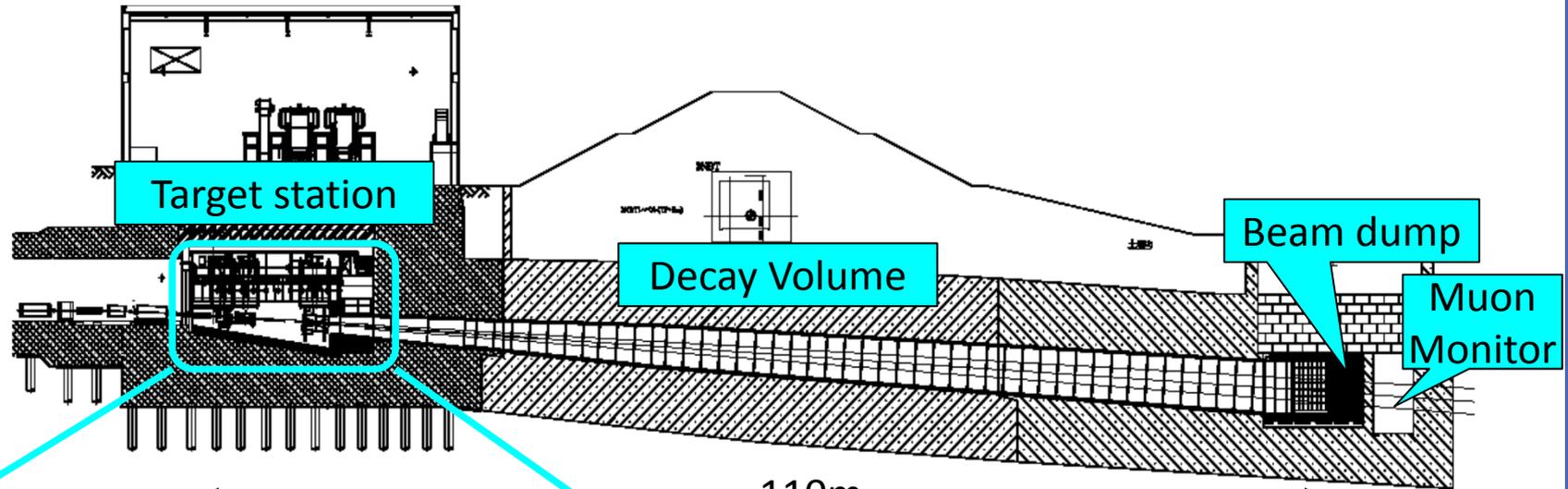
- **Three events observed.**
- More statistics is necessary.



expected distribution for signal and background

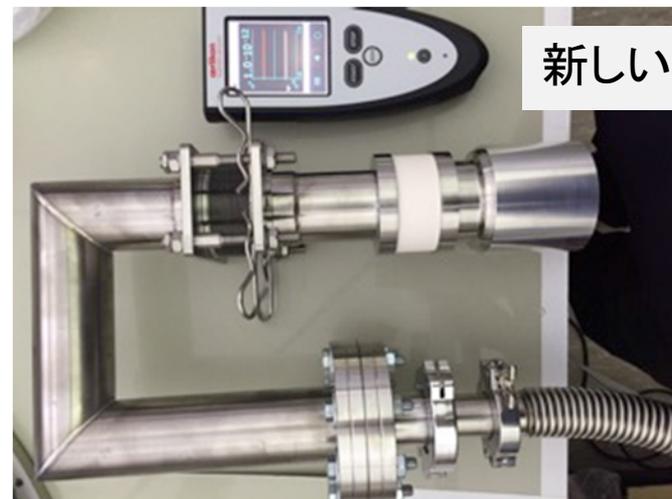
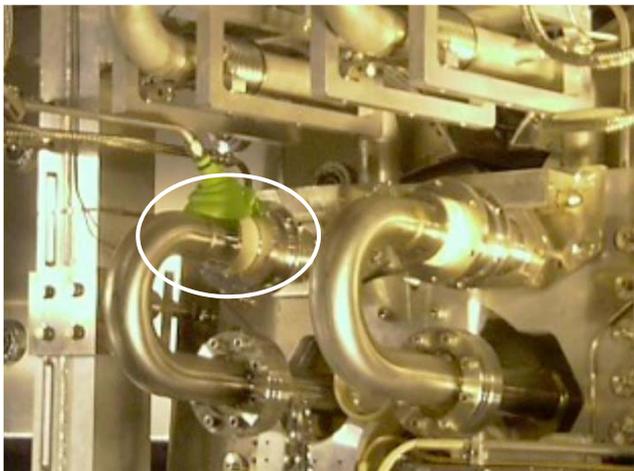


標的ヘリウム漏れ問題



標的の冷却ヘリウムガス漏れ問題

- 6月の運転後、標的を冷却するヘリウムが1cc/sのレートで減少
 - 冷却能力に支障はなく、TS+DVヘリウムチェンバー内での漏れなので、環境への影響もないが、原因がわからないと運転の継続ができない。
- リモートメンテナンスエリアでの調査の結果、標的近くの配管の絶縁セラミック部から漏れていると特定された。
- セラミック部にかかる応力を軽減した新設計の配管と交換作業中



新しいパイプ

2016夏に向けた展望

- すべてのサンプルを用いての $\delta_{CP}, \sin^2 \theta_{23}, \Delta m_{32}^2$ の同時決定

- これまでのデータについては、冬にリリースの予定

6.6x10²⁰ POT (2013)

→ 11.0x10²⁰(total)= 7.0x10²⁰(ν-beam)+4.0x10²⁰($\bar{\nu}$ -beam)

- 2016年1月末から運転再開予定。夏までに、さらに6x10²⁰ POTを貯めることを目標にする。

- 4月末までデータ取得予定。5月は未定。

- 合計で 17.0x10²⁰(total)= 7.5x10²⁰(ν-beam)+9.5x10²⁰($\bar{\nu}$ -beam)

- 最終目標の21%

- 反 ν_e appearance searchの感度は2 σ 以上

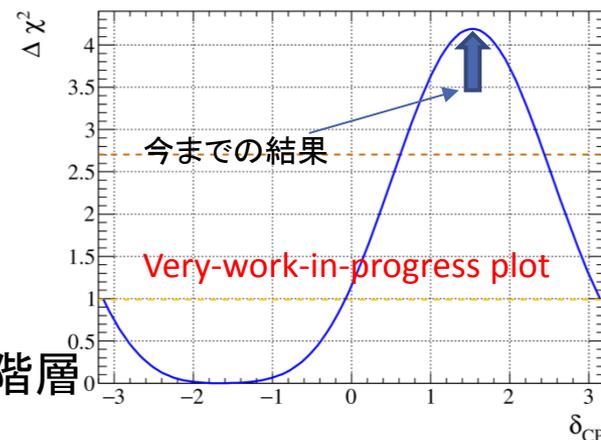
- 系統誤差は(イベント数に対して)4~6%を達成できる見込み (10%くらいだった)

- 新しく1-ring CC1piサンプルを導入する予定

- 1 decay-e事象 = 見えない π^+

- ν-beamのデータ量を13%増やせる

$\delta_{CP} = -1.6$, 標準質量階層の場合の $\Delta\chi^2$ カーブ



When T2K is completed (78×10^{20} POT)

ν_e appearance sample

* bkg includes wrong-sign

	ν_e signal	ν_e bkg.	$\bar{\nu}_e$ signal	$\bar{\nu}_e$ bkg.
$\delta = 0$	98.2	26.8	25.6	16.3
$\delta = -90^\circ$	121.4	26.4	19.0	17.2

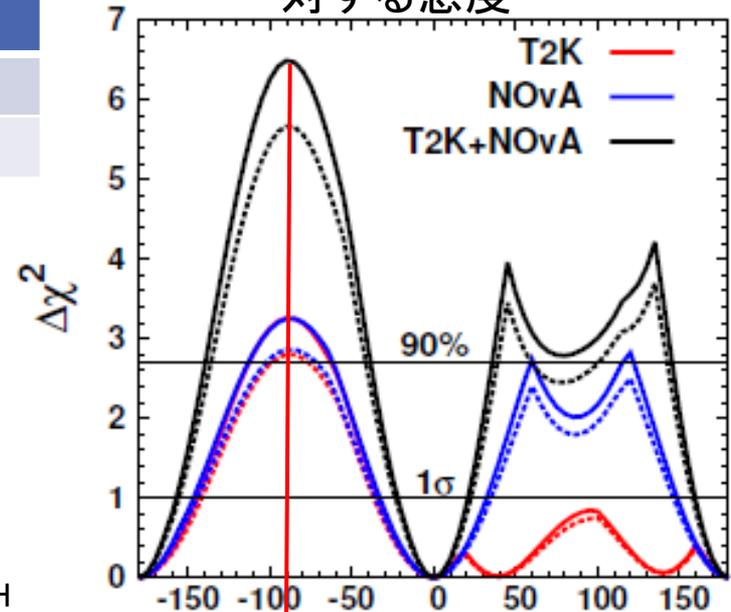
ν_μ disappearance sample

	ν_μ -mode	$\bar{\nu}_\mu$ -mode
w/o oscillation	2,648	1,007
w/ oscillation	741	342

CPの破れが最大の場合($\delta_{CP} = -\frac{\pi}{2}$)に
 90%C.L.の感度
 NOvA実験とcombineすると95.5%C.L.くらい。
 δ_{CP} を測定して、ニュートリノ混合の全貌を
 確立するには、T2Kだけでは不十分。

assuming 1:1 ν -mode: $\bar{\nu}$ -mode running

CPの破れ($\sin \delta_{CP} \neq 0$)に
 対する感度



NH
 $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$
 solid : stat. only
 dash: 5% sys. error

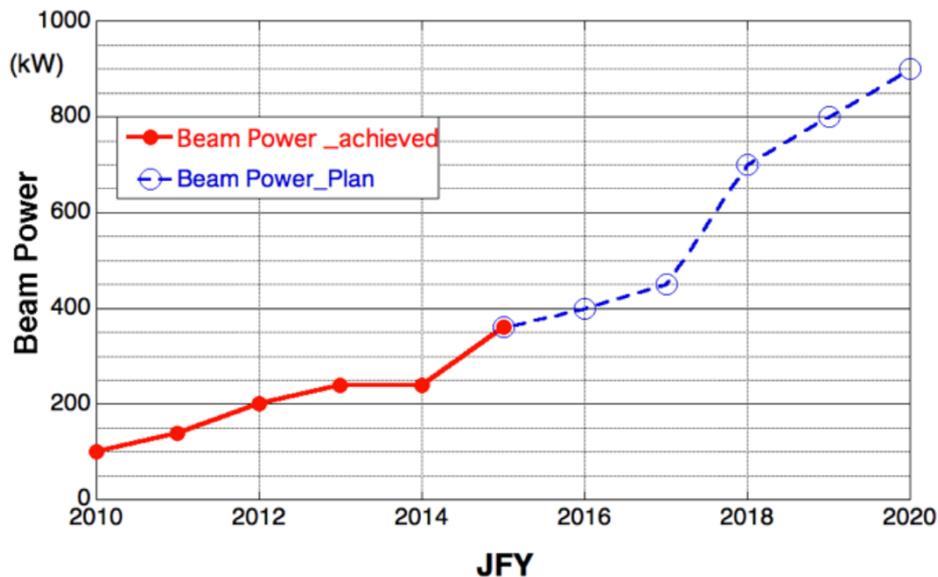
True $\delta_{CP} (^\circ)$

Current most
 probably situation.
 (NH, $\delta_{CP} = -90^\circ$)

T2K-II(仮称)に向けた動き

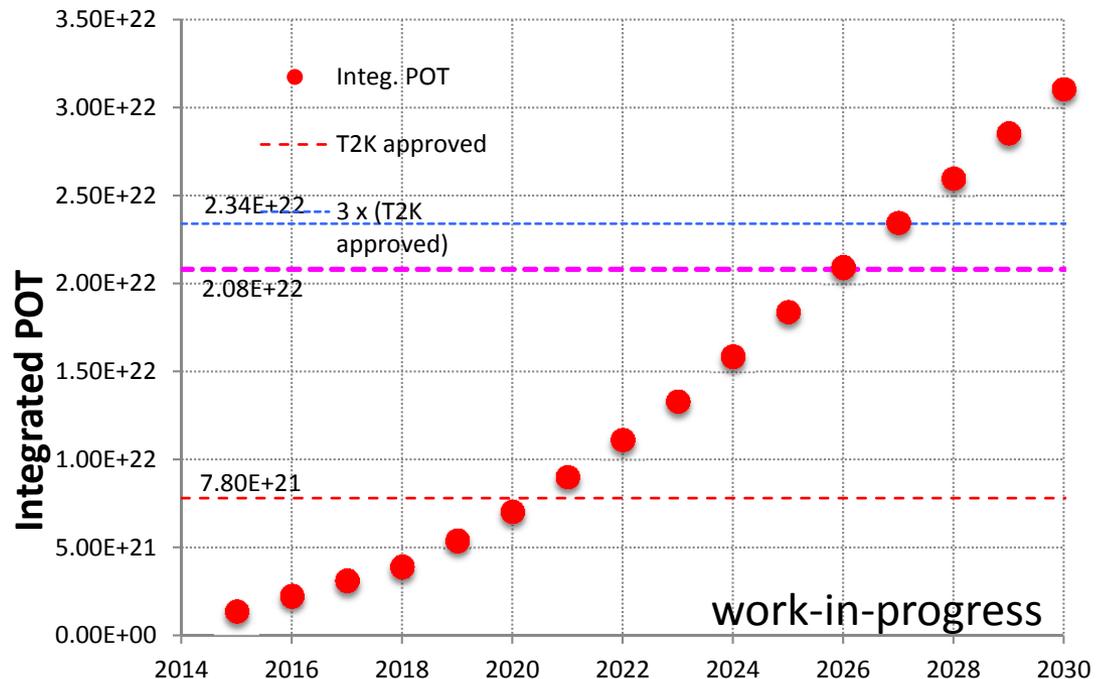
- T2Kの全統計が貯まるのは2021年頃と予想される。
- Hyper Kamiokandeは早くても2025年
- ビーム強度は、~1MWまで上げられるかもしれないが、そのためには数年の運転が必要。
- ニュートリノ振動(主にはCPV)の研究を途切れさせずに、かつ速やかにHyper-Kにつなげるため、2021年以降、大強度ビームを使ってT2Kを延長する議論が始まっている。
- 主目標 : $\delta_{CP} = -\frac{\pi}{2}$ の場合に
3 σ 以上の感度でCPの破れを見つける。
- T2Kの延長上の新しい
コラボレーション

J-PARC MR beam power upgrade plan

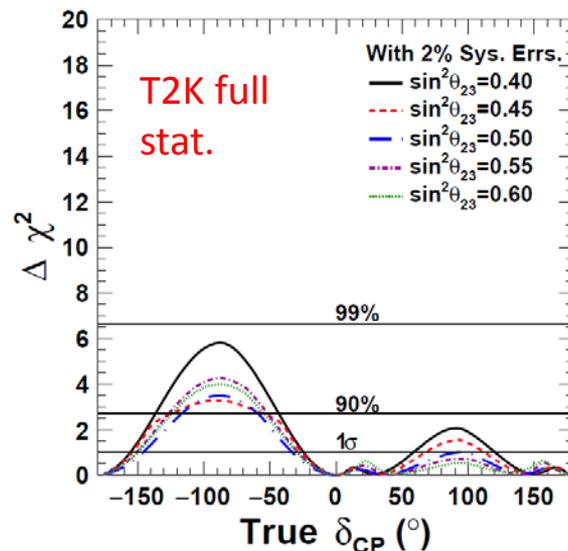
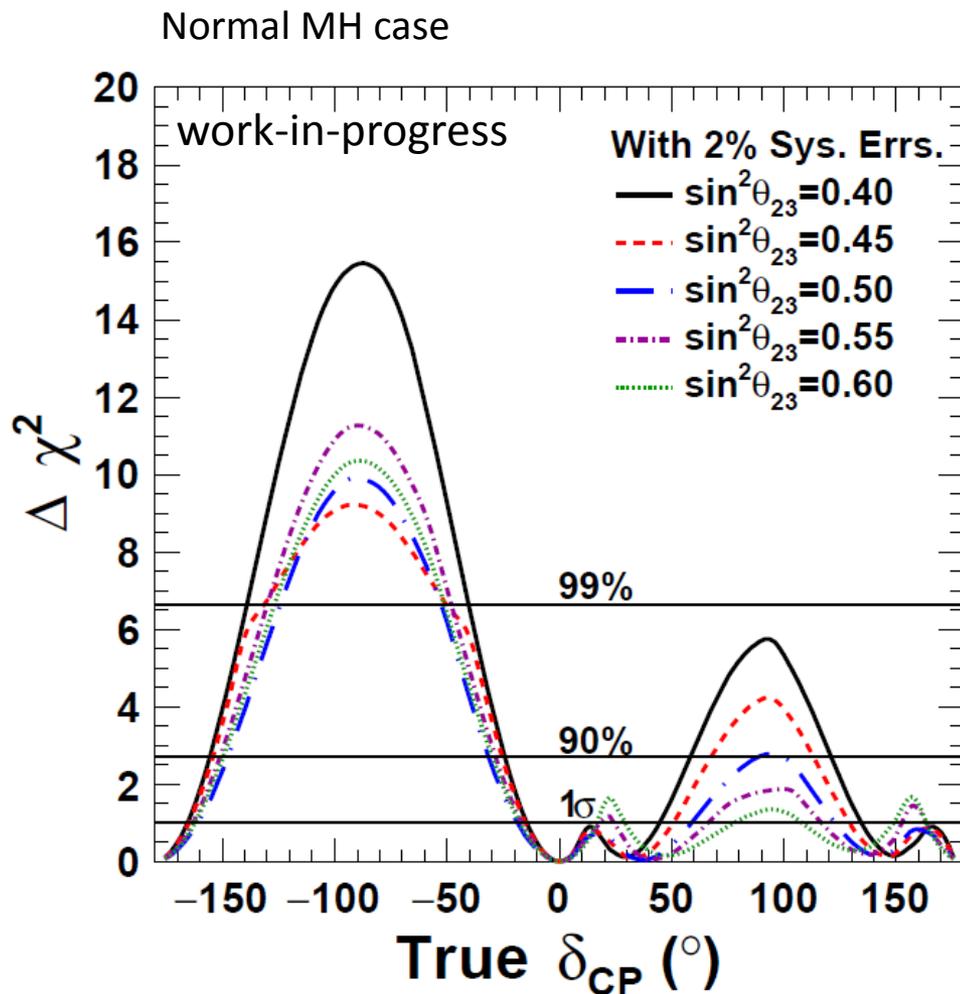


T2K-II(仮称)のworking assumption(目標)

- 積算POTの予想 : 加速器グループと議論
 - 最大 1.3 MW
 - 2026までに 20×10^{21} POT
- 実験グループ側の努力目標 (議論中)
 - フラックス増強 (ホーン 250kA→320kAなど) > 10%
 - SKのnew sample (2-ringなど), 有効体積増大で~50%増の可能性
 - 系統誤差の低減 現状 5~6% → 3~4%



Sensitivity to CP violation at 25E21 POT (20E21 POT x 実験グループ努力で1.25倍)

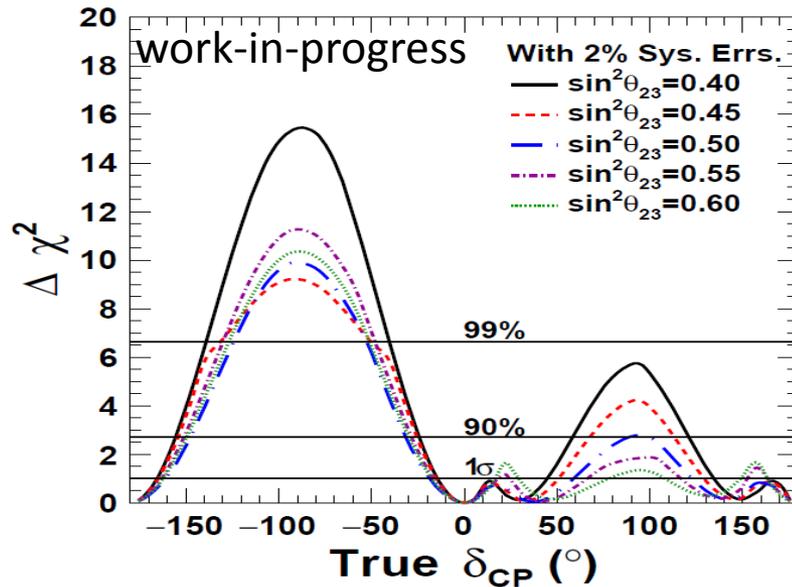


Sensitivity to CP violation depends on the value of $\sin^2\theta_{23}$.
At 25E21 POT, we can reach $>3\sigma$ for maximal CP violation case for all possible value of $\sin^2\theta_{23}$.

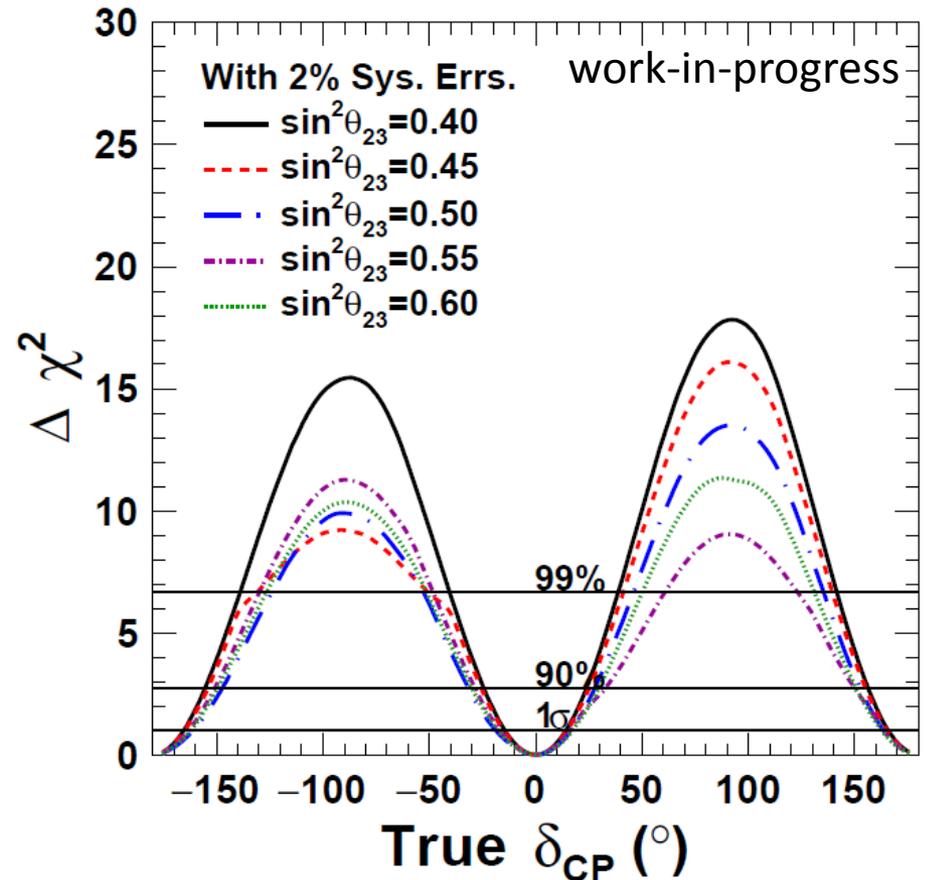
Sensitivity to CP violation at 25E21 POT w/ known mass hierarchy

Normal MH case

MH may be known at that time.
Then, sensitivity extend to opposite-sign side.

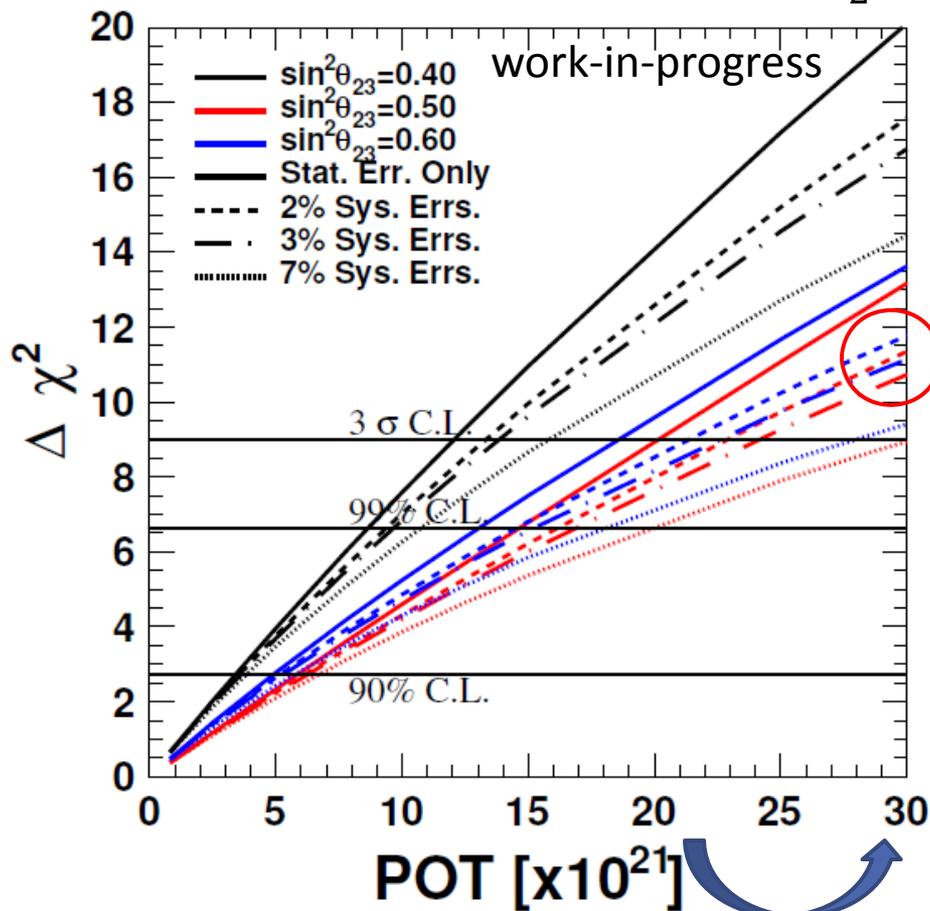


MH unknown



MH known

Sensitivity to CP violation at $\delta_{CP} = -\frac{\pi}{2}$, NH



θ_{23} については、 $45^\circ \pm 1.9^\circ$

この辺りを狙う

beamline, 解析で1.5倍

まとめ

2015

- 最初の反 ν_e appearance searchと反 ν_μ disappearance測定
- 反ニュートリノも含めた系統誤差のアップデート (<6%)

2016年

- $\nu_\mu, \nu_e, \text{反}\nu_\mu, \text{反}\nu_e$ の同時フィット解析
- 1月末から夏まで(5月?)は反ニュートリノビームを主としたデータ取得
 - 久しぶりのまとまったデータ取得を期待。ビーム強度400kW?
 - 反 ν_e が少ない方がうれしい?

T2K-IIIに向けた議論が始まっている

- CPの破れ 3σ 以上で測定 @ $\delta_{CP} = -\frac{\pi}{2}$
- 新しいコラボレータ歓迎(の予定)。実験アップグレードの余地多々あり。