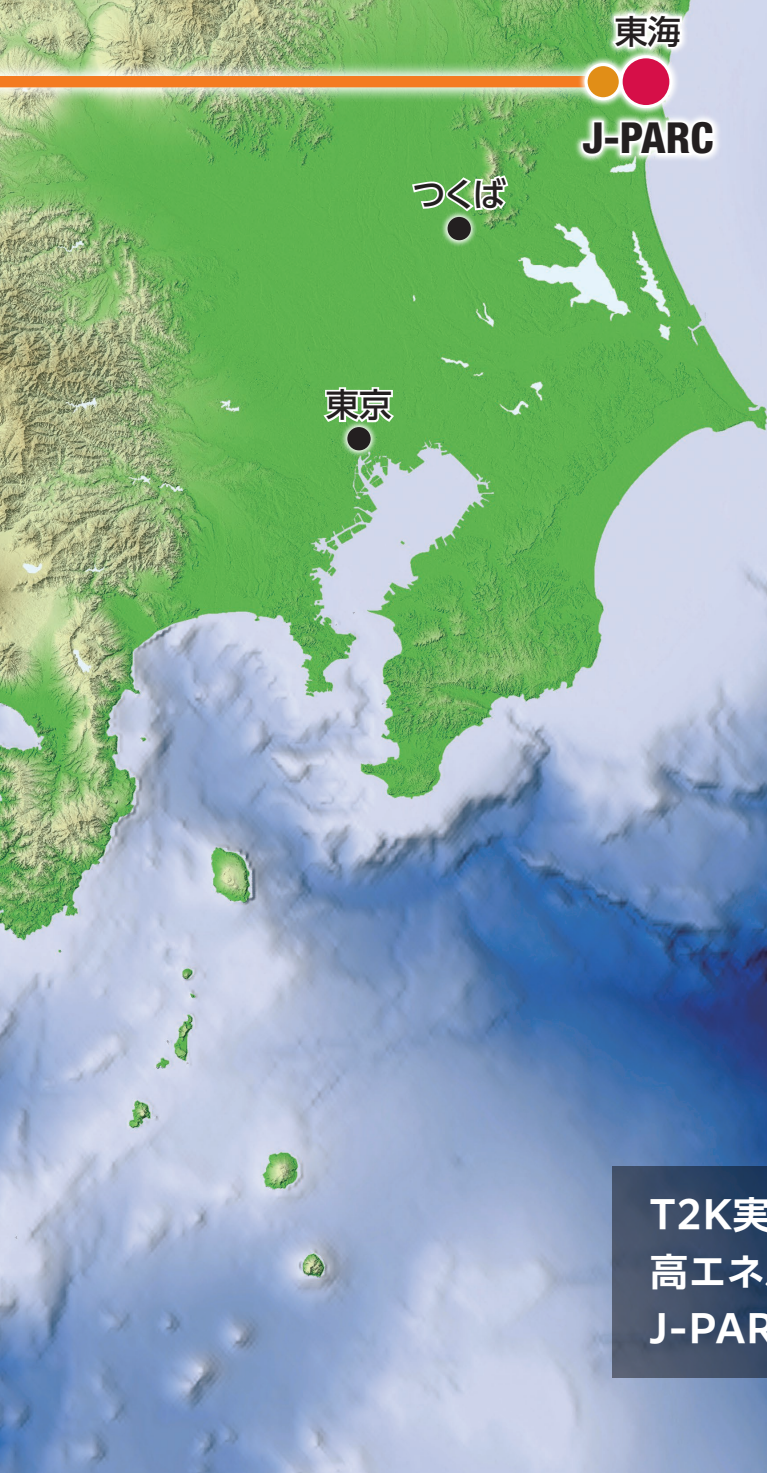


T2K (Tokai-to-Kamioka) long-baseline
neutrino-oscillation experiment

東海—神岡間 長基線ニュートリノ 振動実験



T2K実験グループ

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所
J-PARCセンター

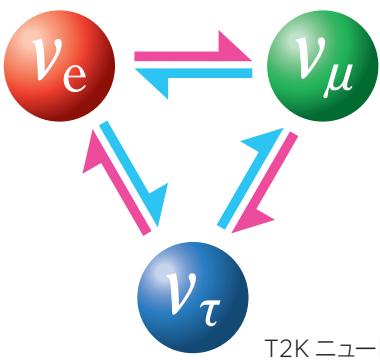
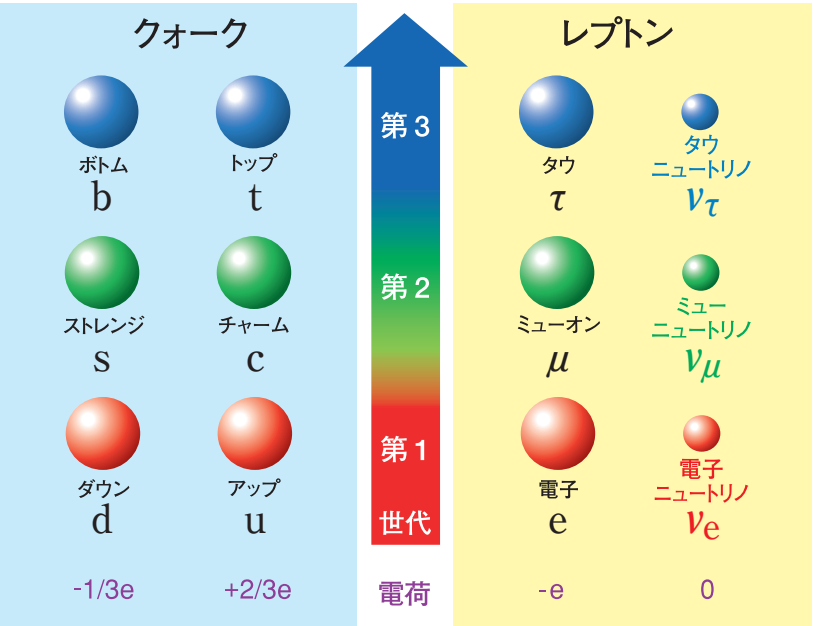
2024年8月

ニュートリノ振動と 長基線ニュートリノ振動実験

ニュートリノとは？

ニュートリノとは電氣的に中性で、最も軽いクォークや電子の 100 万分の 1 以下の重さしかもたない素粒子です。ニュートリノには電子ニュートリノ(ν_e)、ミューニュートリノ(ν_μ)、タウニュートリノ(ν_τ)の3種類(世代)あり、またそれぞれの反ニュートリノがあることが知られています。太陽から放射されるニュートリノが、毎秒数百兆個も私達の体を通り抜けています。しかし全く害はありません。

自然界をかたちづけているクォークとレプトンの種類には共に3世代があります。



ニュートリノ振動とは？

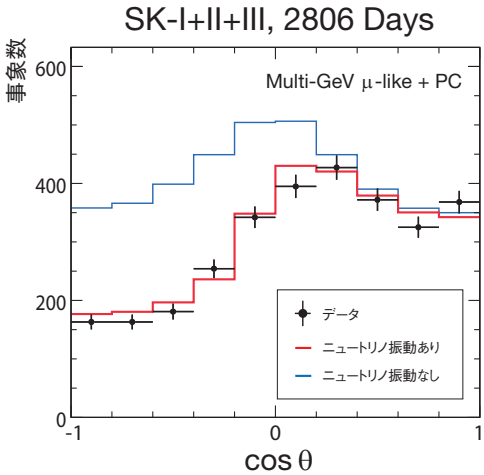
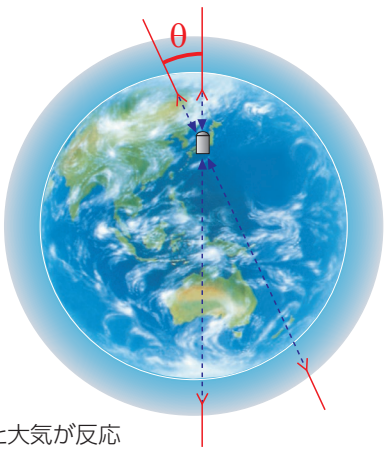
3世代あるニュートリノが飛んでいるうちに互いに入れ換わることをニュートリノ振動といいます。例えば加速器で 100% 純粋なミューニュートリノを作っても、距離と共にある割合でタウニュートリノに変化してしまいます。更に進むと、また元のミューニュートリノにもどります。これを繰り返すので、ニュートリノ振動と名付けられました。ニュートリノ振動はニュートリノが質量をもち、世代間の混合がある場合に限り起きる現象です。今のところ、ニュートリノ振動は極めて微小なニュートリノの質量と、世代間の混合を調べる唯一の方法です。

T2K ニュートリノ振動実験が発見を目指す 3 世代間のニュートリノ振動現象の模式図。

スーパーカミオカンデによるニュートリノ振動の発見

ニュートリノ振動の発見は 1998 年 6 月にスーパーカミオカンデ研究グループによって発表されました。スーパーカミオカンデで観測された大気ニュートリノの天頂角分布は、地球の裏側から飛んでくるミューニュートリノが上空からくるものよりも有意に少ないことを示していました。これは、ミューニュートリノがニュートリノ振動によって観測できないタウニュートリノに変化したためであると考えられます。ニュートリノに微小な質量があることを世界で初めて実験的に証明したことになります。

スーパーカミオカンデで観測された宇宙線と大気が反応して生まれた大気ニュートリノの天頂角分布。地球の裏側からくるミューニュートリノは予想より少い。



加速器を使ったニュートリノ振動研究

スーパーカミオカンデのニュートリノ振動の発見を受けて、2000 年頃からニュートリノビームを使ったニュートリノ振動実験が行われるようになりました。加速器で作ったニュートリノビームを数百キロ離れた測定器で観測し、飛行中のニュートリノ振動を調べる長基線ニュートリノ振動実験です。

自分達でニュートリノ振動研究に最適なニュートリノビームを作り、生成直後のニュートリノを測定し、素性のよく分かったニュートリノを使って、より詳しくニュートリノ振動の研究しようと考えたのです。

K2K (KEK-to-Kamioka) 実験

世界で最初の長基線ニュートリノ振動実験は K2K 実験です。茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で作ったニュートリノビームを、250km 離れた岐阜県飛騨市神岡町の 50000 トン水チェレンコフ検出器、スーパーカミオカンデへ打ち込みました。実験は 1999 年から 2004 年まで行われ、大気ニュートリノで観測されていたニュートリノ振動を人工のニュートリノを用いて初めて証明しました。

T2K (Tokai-to-Kamioka) 実験

K2K 実験の後継実験として 2009 年に T2K 実験が開始されました。茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で大強度ニュートリノビームを作り、295km 離れたスーパーカミオカンデに打ち込み、さらなるニュートリノ振動の解明を行っている実験です。



ニュートリノ研究の歴史

1930	ニュートリノの存在を予言 (W.パウリ)	2001	太陽ニュートリノ観測でもニュートリノ振動の存在を証明 (スーパーカミオカンデ実験およびカナダSNO実験)
1956	反電子ニュートリノを発見 (F.ライネス、C.コーワン)	2002	原子炉からの反電子ニュートリノ振動を観測 (カムランド実験)
1962	ミューニュートリノを発見 (L.レーダマンら)	2002	小柴昌俊、R.デービス Jrらとともにノーベル物理学賞を受賞
1962	ニュートリノ振動理論を提唱 (牧二郎・中川昌美・坂田昌一)	2004	人工ニュートリノビームでニュートリノ振動の存在を確立 (K2K実験)
1987	超新星爆発により発生したニュートリノを世界で初めて観測 (小柴昌俊らカミオカンデ実験)	2013	「電子ニュートリノ出現」の発見 (T2K実験)
1991	軽いニュートリノが3世代しか存在しないことを証明 (LEP実験)	2015	梶田隆章とA.マクドナルドがノーベル物理学賞を受賞
1998	大気ニュートリノの観測からニュートリノ振動を発見 (戸塚洋二・梶田隆章らスーパーカミオカンデ実験)	2015	西川公一郎らK2K・T2K実験グループがブレークスルー賞を受賞
1999	世界初の長基線ニュートリノ振動実験K2Kにおいて人工ニュートリノ信号の観測に成功	2016	ニュートリノの「CP対称性の破れ」の兆候を捉える (T2K実験)
2000	タウニュートリノの存在を確認 (丹羽公雄らDONUT実験)		

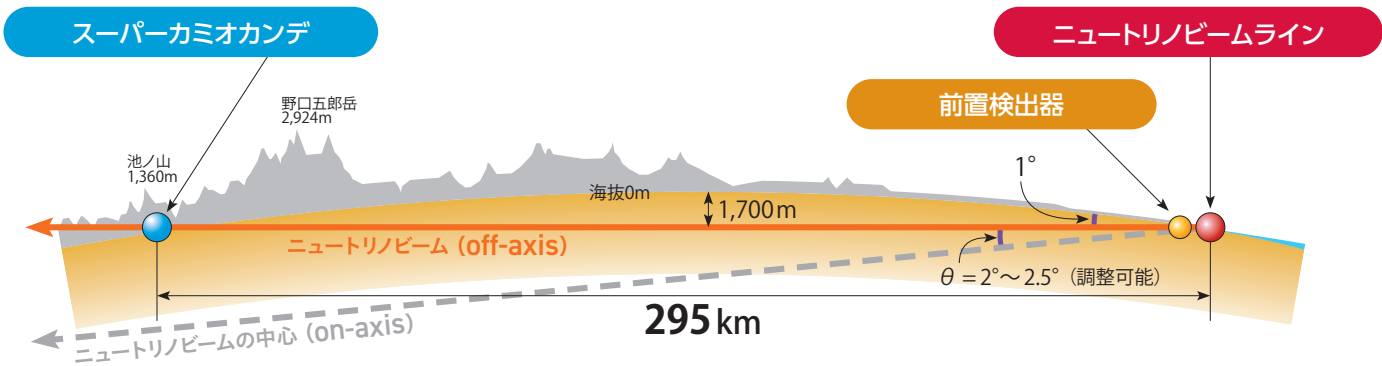
T2K 実験を行う国際共同研究グループには、国内外の約 500 人の研究者が参画するなど、ニュートリノ研究を進める世界的拠点となっています。

T2K実験の概要

T2K実験は以下の3つによって行われている長基線ニュートリノ振動実験です。

- 1 東海でニュートリノビームを作る …………… ニュートリノビームライン
- 2 東海でニュートリノビームを測定する …………… 前置検出器
- 3 神岡でニュートリノビームを測定する …………… スーパーカミオカンデ測定器

東海で観測されたできたばかりのニュートリノと、神岡で観測された295km飛行した後のニュートリノを比較することにより、飛行中に生じたニュートリノ振動現象を解明します。



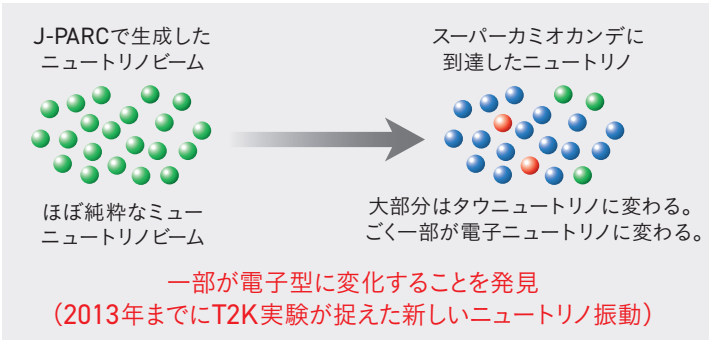
T2K実験による $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の発見

ミューニュートリノが電子ニュートリノに変わる確率は、タウニュートリノに変わる確率に比べて非常に小さく、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動は T2K 実験以前のニュートリノ振動実験では観測されませんでした。そこで T2K 実験では、大強度のニュートリノビームを作り出す J-PARC ニュートリノビームラインを新たに建設し、2010 年より本格的に実験を開始しました。

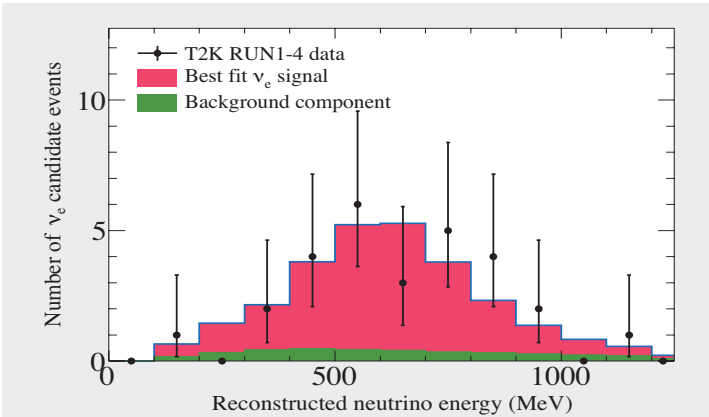
T2K 実験グループは、2013 年 7 月、ミューニュートリノが飛行中に電子ニュートリノに変化する「電子ニュートリノ出現」が存在することを示す決定的な測定結果が得られたことを発表しました。未発見であった最後の振動パターンが見つかったことで、ニュートリノ振動が 3 世代の間の振動現象であることが示されました。これにより、ニュートリノ振動の研究は、新たな段階に入りました。

ニュートリノの 「CP対称性の破れ」

ニュートリノにおいて「CP 対称性の破れ」が起きていればニュートリノと反ニュートリノで振動確率に違い生じるはずで。T2K 実験は 2014 年から CP 対称性の破れの発見を次の目標にして、反ニュートリノビームの運転を開始し、現在に至っています。



T2K 実験が直接検出したミュー型から電子型へのニュートリノ振動「電子ニュートリノ出現」の模式図



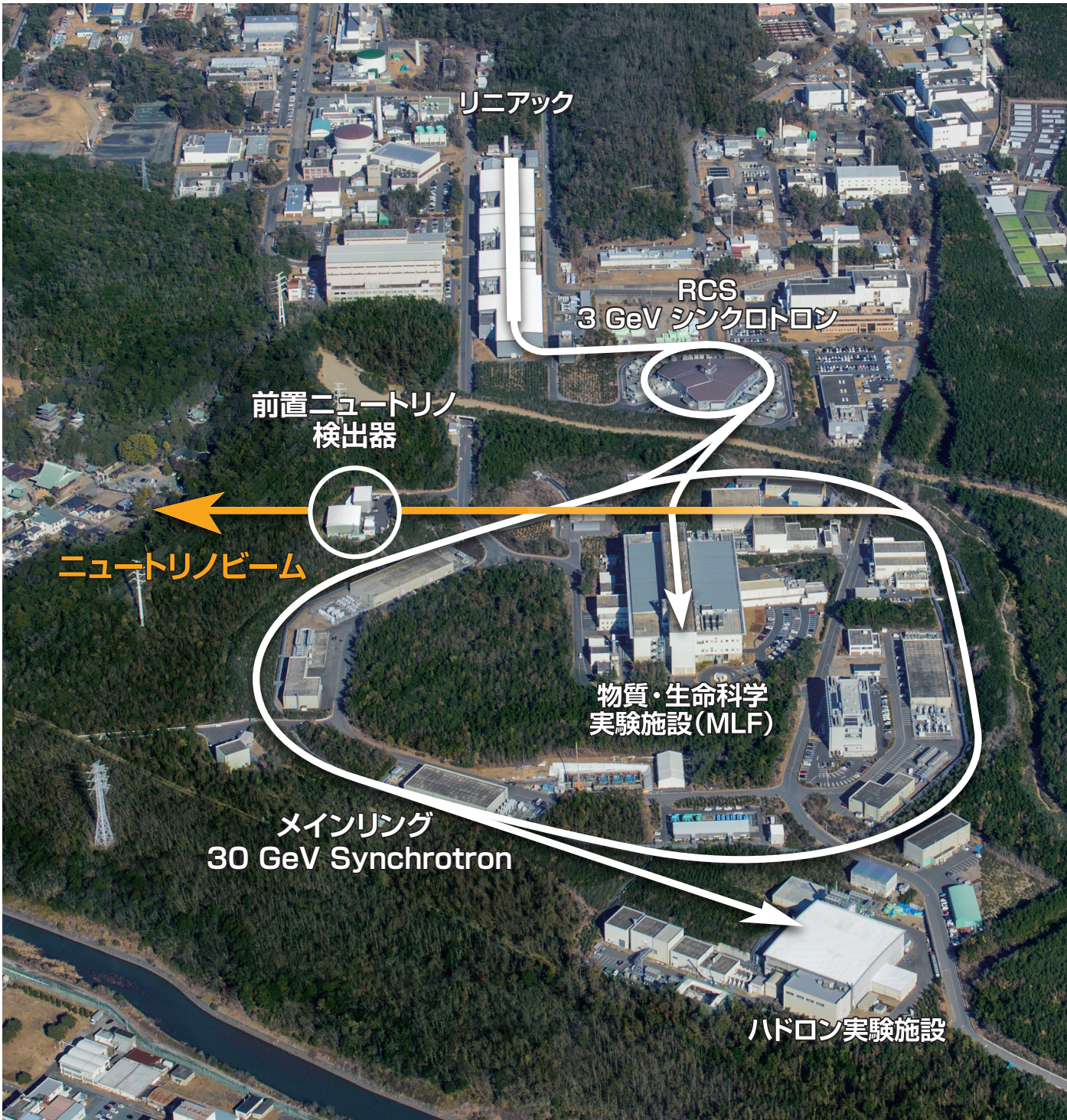
観測された28個の電子生成事象のニュートリノエネルギー分布。データ(黒点)は、予想される背景事象(緑)に電子型ニュートリノ出現現象(赤)を加えると非常によく再現されることがわかります。

解析の結果、背景事象のみの統計的な揺らぎによって偶然に起こる確率は1兆分の1以下しかないと明らかとなりました。

大強度陽子加速器施設 (J-PARC)

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、2001 年より高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が共同で茨城県東海村に建設した陽子加速器施設と利用施設群の総称です。T2K 実験のうちニュートリノビームラインと前置検出器は J-PARC の施設の一部です。

J-PARC では、陽子をリニアックで加速後、3 GeV シンクロトロン (RCS) を経てメインリング (MR) に送り込みます。陽子をキッカーとよばれる電磁石により内向きに蹴りだし神岡の方に向けた後、ニュートリノビームラインに供給します。



1 東海でニュートリノビームを作る ニュートリノビームライン



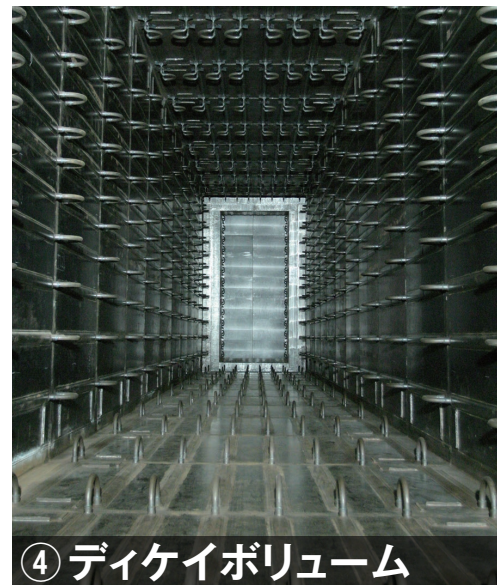
⑥ ミューオンモニタ

ミューオンモニタは、ニュートリノとともに生成されたミュー粒子を測定することにより、間接的にニュートリノビームの方向およびその安定性を監視するための測定器です。



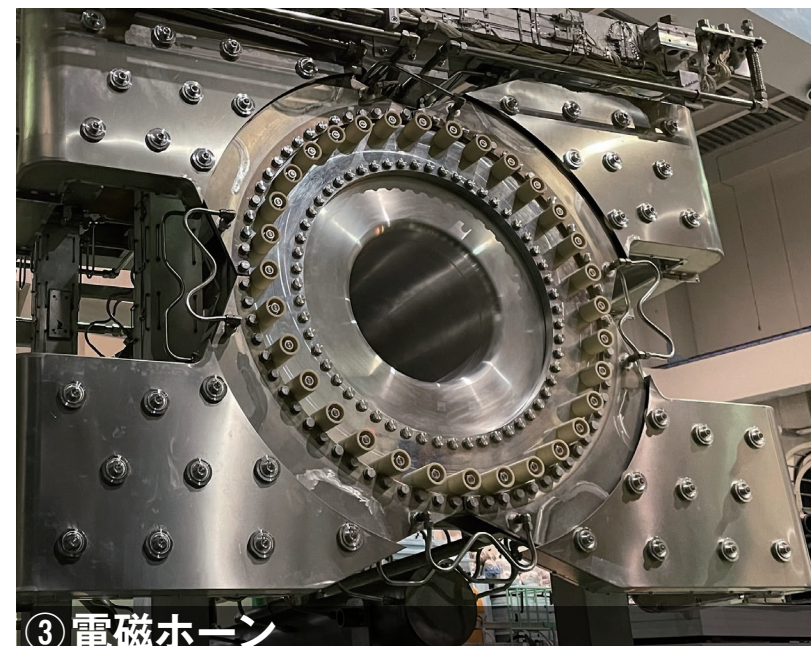
⑤ ビームダンプ

ビームライン下流にはグラファイトブロックを用いたビームダンプが設置されています。ニュートリノ以外の粒子はこのビームダンプに吸収されます。



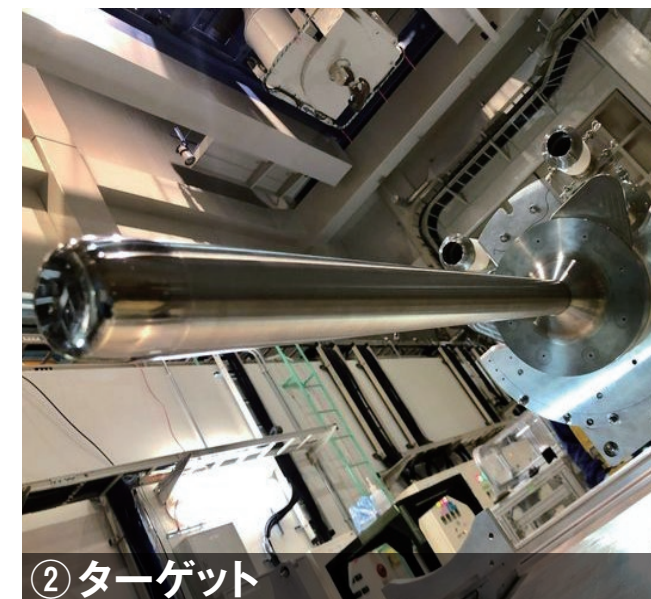
④ ディケイボリューム

パイ中間子は約 100m のディケイボリュームで崩壊し、ニュートリノが生成されます。



③ 電磁ホーン

電磁ホーンは 32 万アンペアのパルス電流により生じた強磁場でパイ中間子を前方に収束させる装置です。電流の方向を切替えることによりニュートリノビームと反ニュートリノビームの切替ができます。



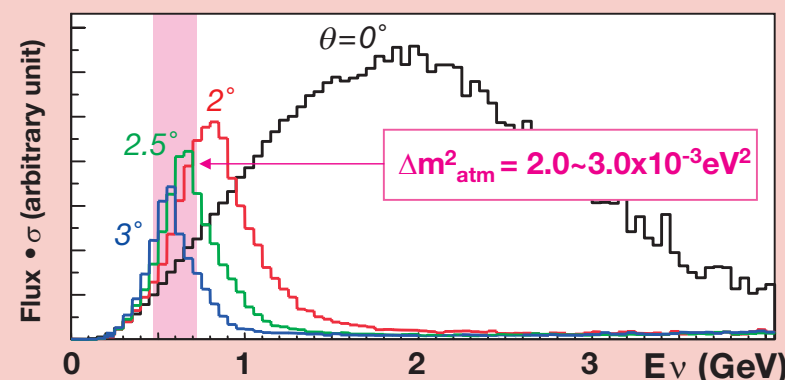
② ターゲット

ターゲットステーションに導かれた陽子ビームは第一ホーンの内部に設置された黒鉛製のターゲットに衝突し、反応します。

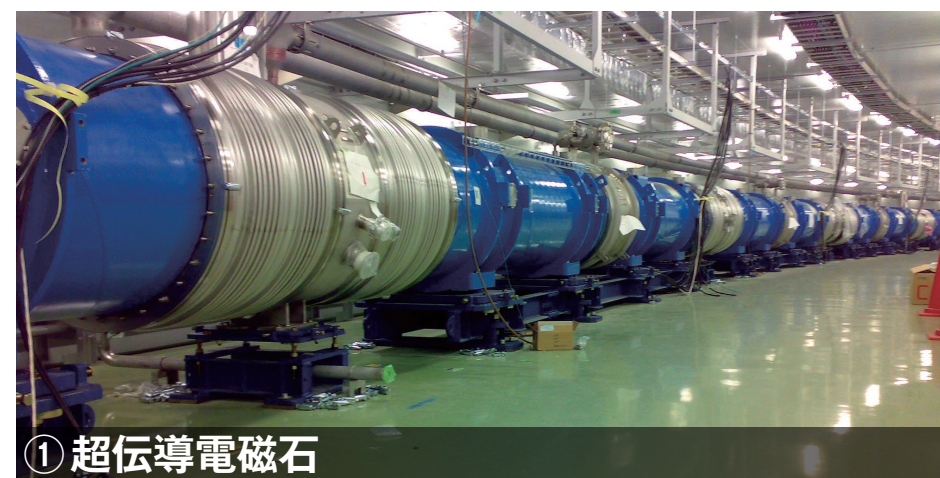
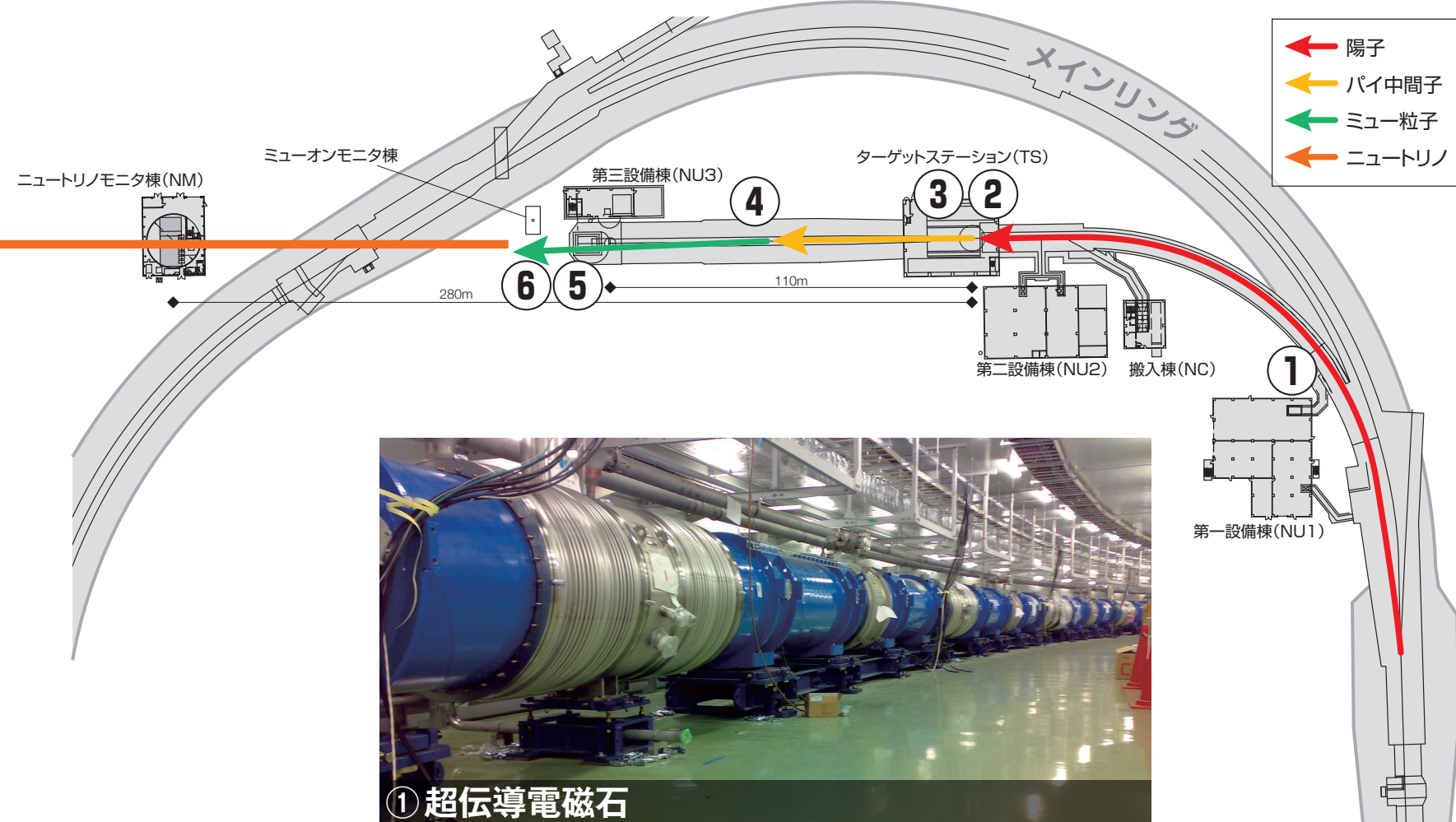
To Super-Kamiokande 295km先 スーパーカミオカンデへ

J-PARCで生成されるニュートリノビームは広がりを持っています。ニュートリノビームのエネルギーは中心方向が高く、中心から外れるほど低くなります。T2K実験では、「オフアクシス法」を採用し、スーパーカミオカンデにはビーム中心から2.5°ずれた方向のニュートリノビームが届くように設計されています。

スーパーカミオカンデで観測されるニュートリノは、ニュートリノ振動の確率が最も高い0.6 GeVぐらいの低いエネルギーのニュートリノになります。



オンアクシスビーム ($\theta=0^\circ$) と比較したオフアクシスビーム ($\theta=2^\circ \sim 3^\circ$) のエネルギー分布

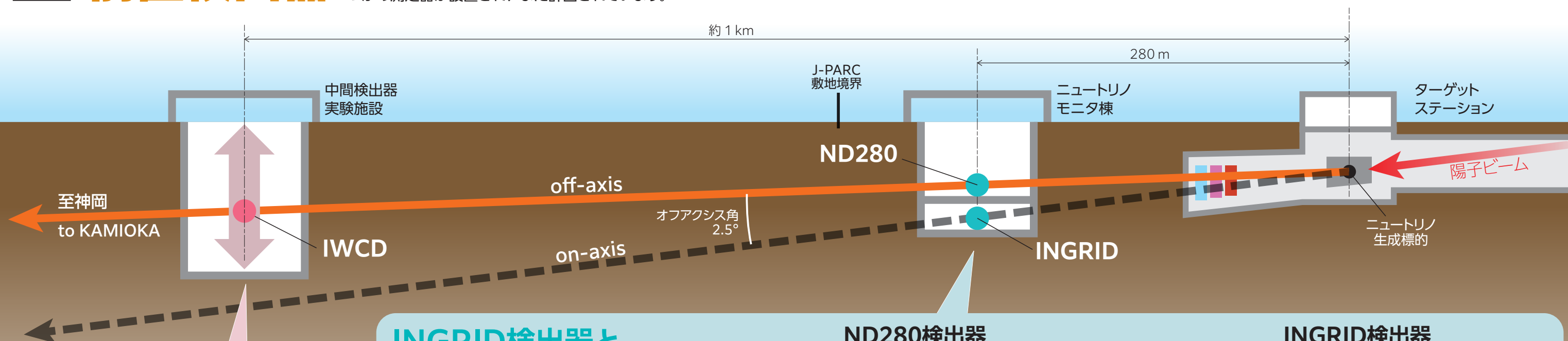


① 超伝導電磁石

メインリングから射出された陽子ビームは、アーク部に並べられた超伝導電磁石の強磁場によって神岡方向に曲げられます。

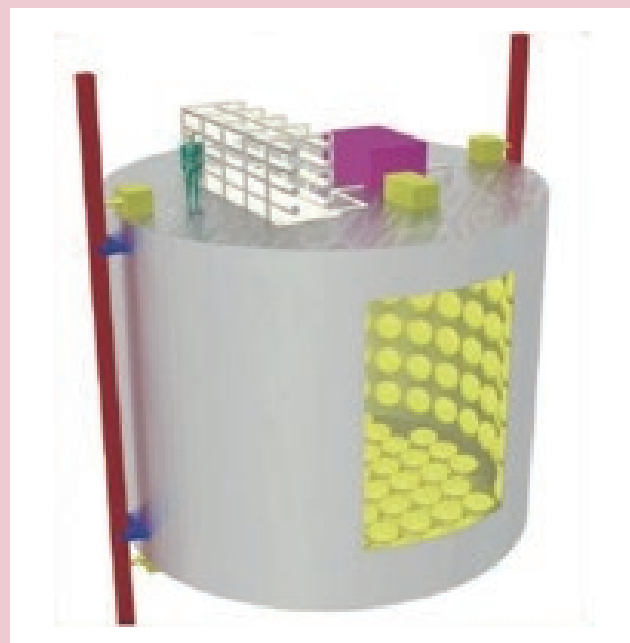
2 東海でニュートリノビームを測定する 前置検出器

生成された直後のニュートリノを測定するために、東海にはいくつかの測定器が設置され、また計画されています。



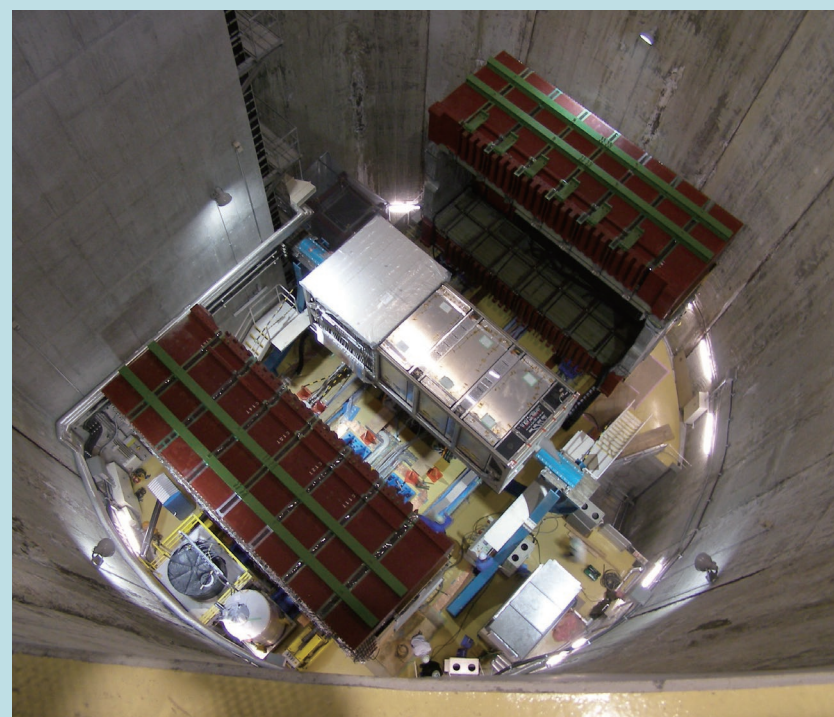
IWCD検出器

ターゲットから 1km 離れた J-PARC 敷地の外、国道 245 号線の西側に IWCD 検出器を計画中です。IWCD 検出器は神岡と同じ水チェレンコフ検出器なので、測定器の特徴を考慮せず直接測定結果の比較ができます。また、IWCD 測定器は、オフアクシス 2.5° のハイパーカミオカンデの方向を中心に上下に移動することにより 1.5° から 4.0° までの方向のニュートリノを測定することができます。



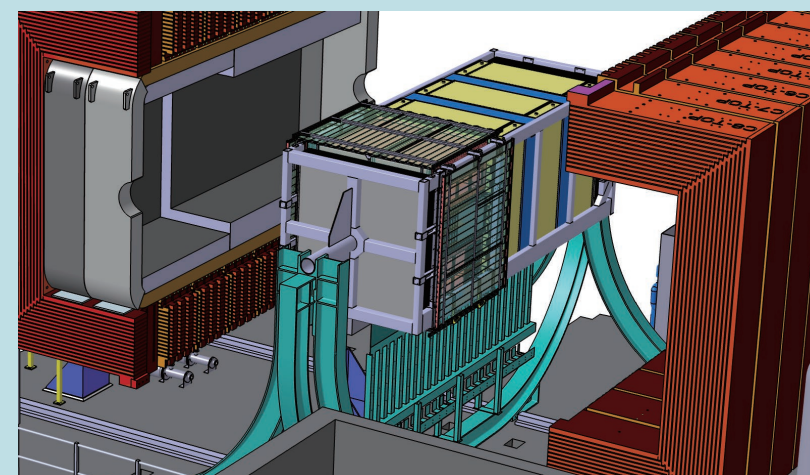
INGRID検出器とND280m検出器

J-PARC 敷地内の前置検出器は、ターゲットの下流 280m の位置にある深さ 33.5m、直径 17.5m の地下実験ホール（ニュートリノモニタ棟）内に設置されています。ビーム中心方向に置かれている INGRID 検出器と神岡方向に置かれている ND280 検出器から構成されています。



ニュートリノモニタ棟地上階から見下ろした ND280 検出器。メンテナンスのため INGRID 測定器を取り囲む電磁石が左右に開いており、測定器中心部が見えます。

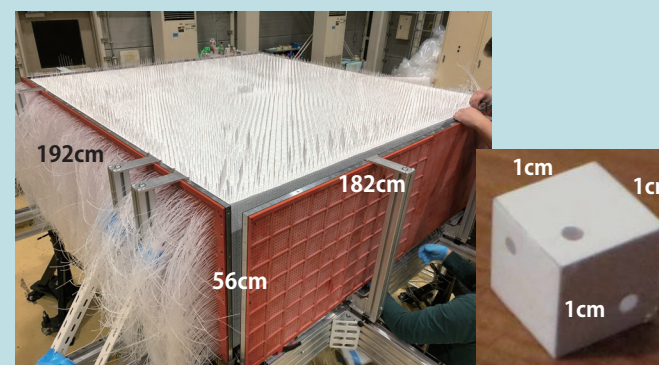
ND280検出器



ND280 検出器はニュートリノビームのエネルギー分布やビーム中の電子ニュートリノ成分の測定を行います。

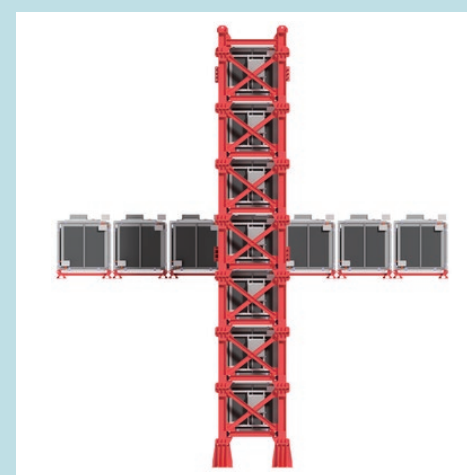
【SuperFGD】

2023 年に設置され、ND280 検出器の中核となっているのは SuperFGD と名付けられた検出器です。SuperFGD は 1cm 立方のプラスチックシンチレータキューブを 192x182x56= 約 200 万個並べた標的兼飛跡検出器です。それぞれのキューブで荷電粒子により生じたシンチレーション光はファイバーにより 3 方向から読み出されます。SuperFGD は大質量標的であり粒子の飛跡を 1cm の空間分解能で 3 次元的に再構成できる理想的なニュートリノ検出器です。

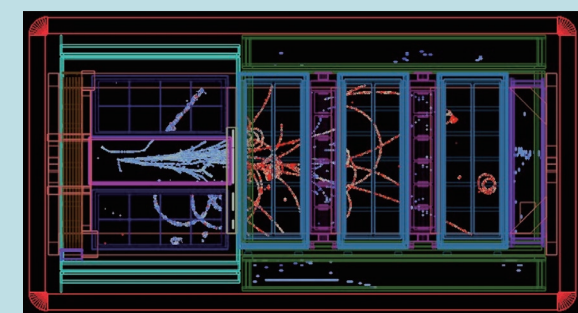


設置前の SuperFGD と 1 個のプラスチックシンチレータキューブ

INGRID検出器



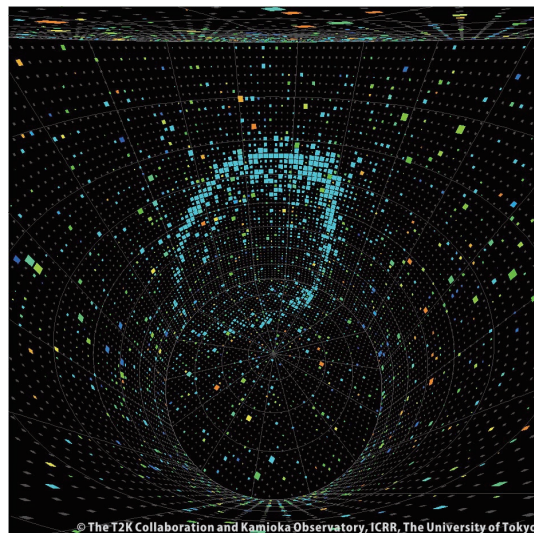
INGRID 検出器の概略図。黒い正方形の部分がニュートリノ検出器となっています。



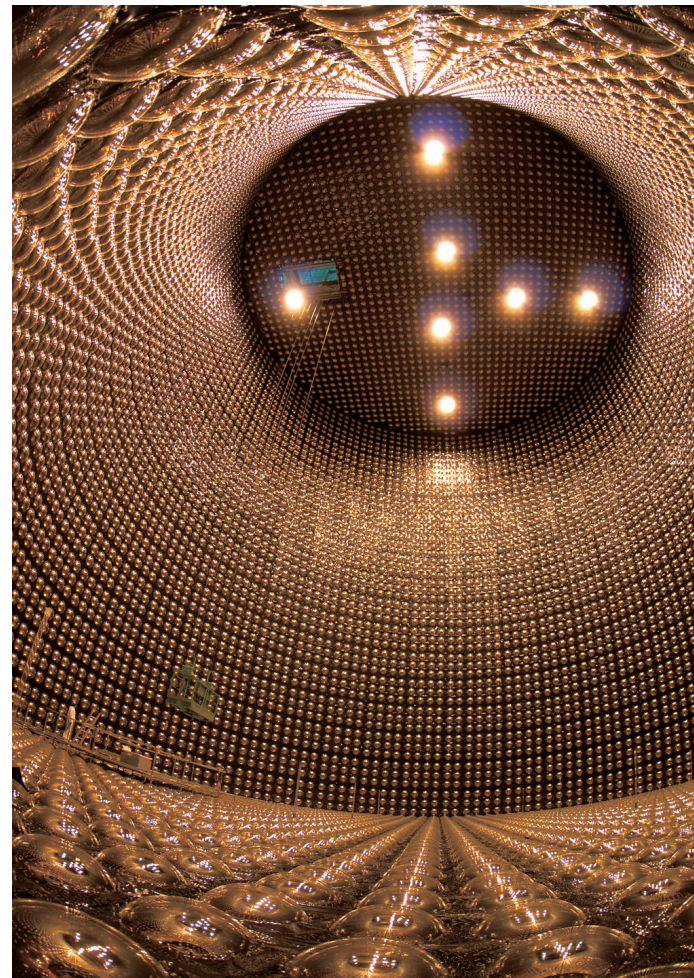
SuperFGD 内部で生じたニュートリノ反応を ND280 検出器全体で観測した事象。

3 神岡でニュートリノビームを測定する スーパーカミオカンデ検出器

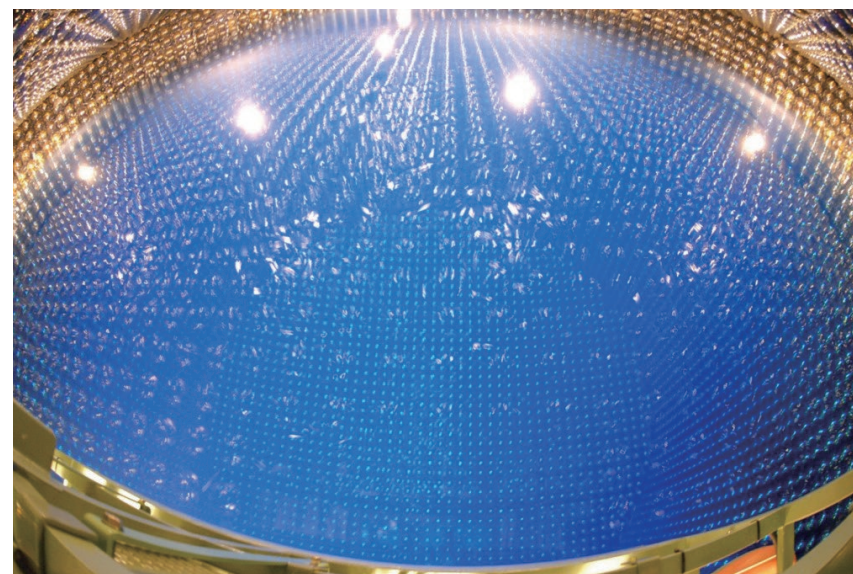
スーパーカミオカンデは、岐阜県飛騨市、神岡鉱山の地下 1000m にある東京大学宇宙線研究所の巨大なニュートリノ観測装置です。1996 年 4 月から観測を開始し、宇宙から飛来するニュートリノの観測を続けています。装置は直径 39.3m、高さ 41.4m の水槽に 5 万トンの純水をたくわえ、11129 本の高感度光検出器（光電子増倍管）を装着、水中でニュートリノが稀に反応する際に発生する微弱なチェレンコフ光を検出することによりニュートリノの種類、飛来方向とエネルギーを決定できます。



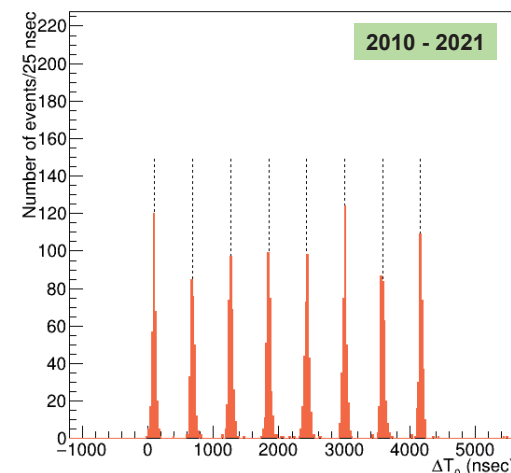
T2K 実験で世界に先がけて観測された
電子ニュートリノ出現事象の候補



水を抜いた状態のスーパーカミオカンデ



90% 以上超純水で満たした状態のスーパーカミオカンデ



ニュートリノ事象の時間分布。
ニュートリノビームの 8 バンチ構造が
確認できる。

ハイパーカミオカンデ（建設中）

ハイパーカミオカンデは、現行のスーパーカミオカンデの後継実験で、岐阜県北部の神岡町の地下 600m に設置される巨大水チェレンコフ測定器です。直径 68m、深さ 71m のタンク中の超純水で発生するチェレンコフ光を、スーパーカミオカンデの約 2 倍の感度・分解能・安全性を持つ約 4 万本の光電子増倍管でとらえます。有効質量はスーパーカミオカンデの 8.4 倍に相当します。J-PARC からのニュートリノビームを用いたニュートリノ振動実験もハイパーカミオカンデ実験に含まれます。2020 年初めに実験計画が承認され、2027 年の実験開始に向けて建設中です。2023 年 8 月の時点で、世界 22 カ国から 500 名以上の研究者が参加しています。

進行中!

地下空洞とタンク

2021 年 5 月からトンネルの掘削を開始しました。ドームと円筒部を合わせると直径 69m 高さ 94m の大空洞となり、地下人工空洞としては世界最大規模です。2024 年度の掘削工事完了、その後のタンク製作工事を経て光電子増倍管設置が始まります。



進行中!

光電子増倍管

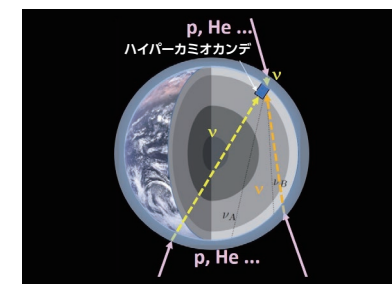
スーパーカミオカンデで使われた直径 50cm の高感度光電子増倍管をさらに改良したもの（写真左）が使われます。年平均 5000 本のベースで製造され、タンクへの設置を待っています。2026 年に全部で約 20000 本の光電子増倍管が完成する予定です。より時間精度を高めた「複眼」光センサー（写真右）も開発され、両方を組み合わせることで検出精度向上が期待されます。



ハイパーカミオカンデが目指す物理

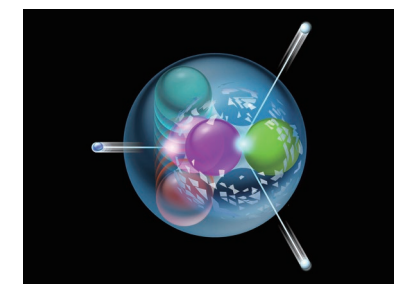
ニュートリノ振動の解明

J-PARC からのニュートリノビームと反ニュートリノビームに加えて、大気ニュートリノ、太陽ニュートリノを用いて 3 世代の間のニュートリノ振動を包括的に解明します。



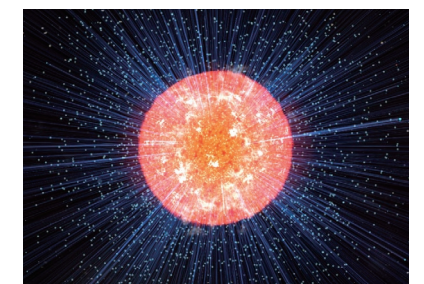
陽子崩壊の観測

自然界に存在する相互作用のうち強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用を統一的に説明する「大統一理論」では陽子の崩壊が予言されています。世界初の陽子崩壊の発見と新たな素粒子物理学の枠組みの開拓を目指します。

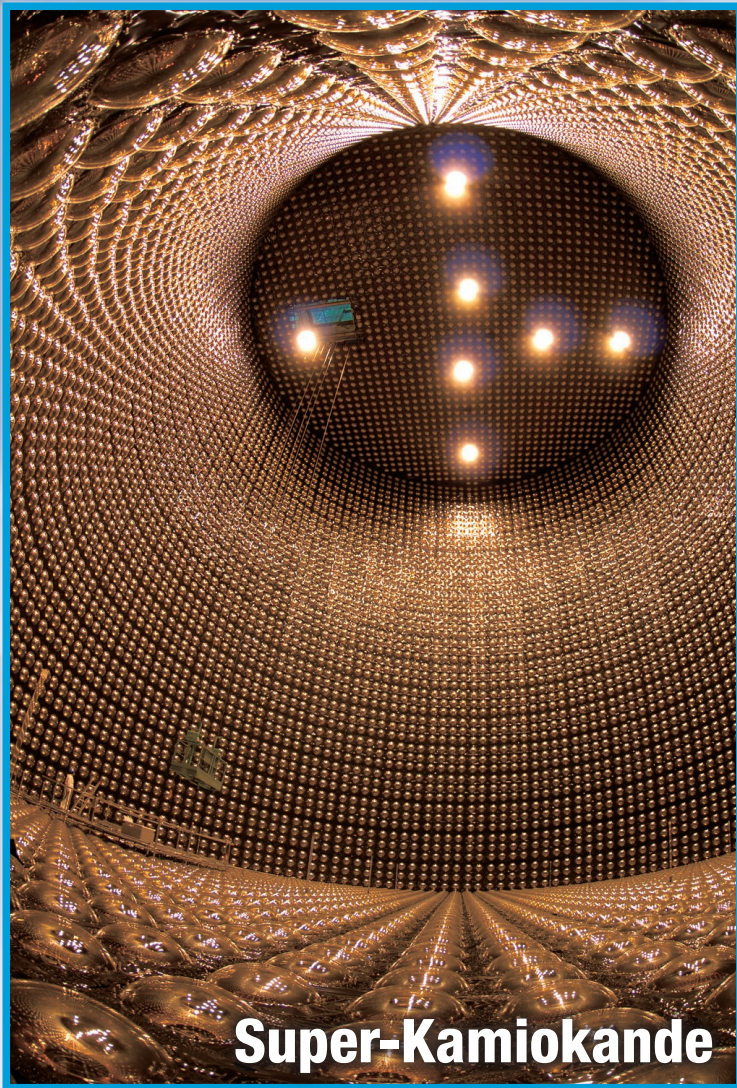


ニュートリノ天文学の発展

太陽ニュートリノ、超新星爆発からのニュートリノ、過去の超新星爆発ニュートリノ、中性子星等の高エネルギー天体からのニュートリノ等の観測により、宇宙の進化や歴史の解明、マルチメッセンジャー天文学の発展に寄与します。



Copyrights : Hamamatsu Photonics K.K. (光センサー)、J-PARC Center (航空写真)、東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設 (その他)



T2K実験紹介ビデオ（約14分）がYouTubeにアップロードされています。
<https://www.youtube.com/watch?v=z1YYMchj6xw>
もしくは

T2K実験 KEK YouTube

検索

もしくは



T2K実験紹介パンフレット及びT2K実験の最新結果は以下からダウンロードできます。
https://j-parc.jp/documents/pdf/2024/T2K_202408_J-Low.pdf
https://j-parc.jp/documents/pdf/J-PARC_T2Kleaflets.pdf

もしくは



及び

