



季刊誌

NO. 17

J-ARC

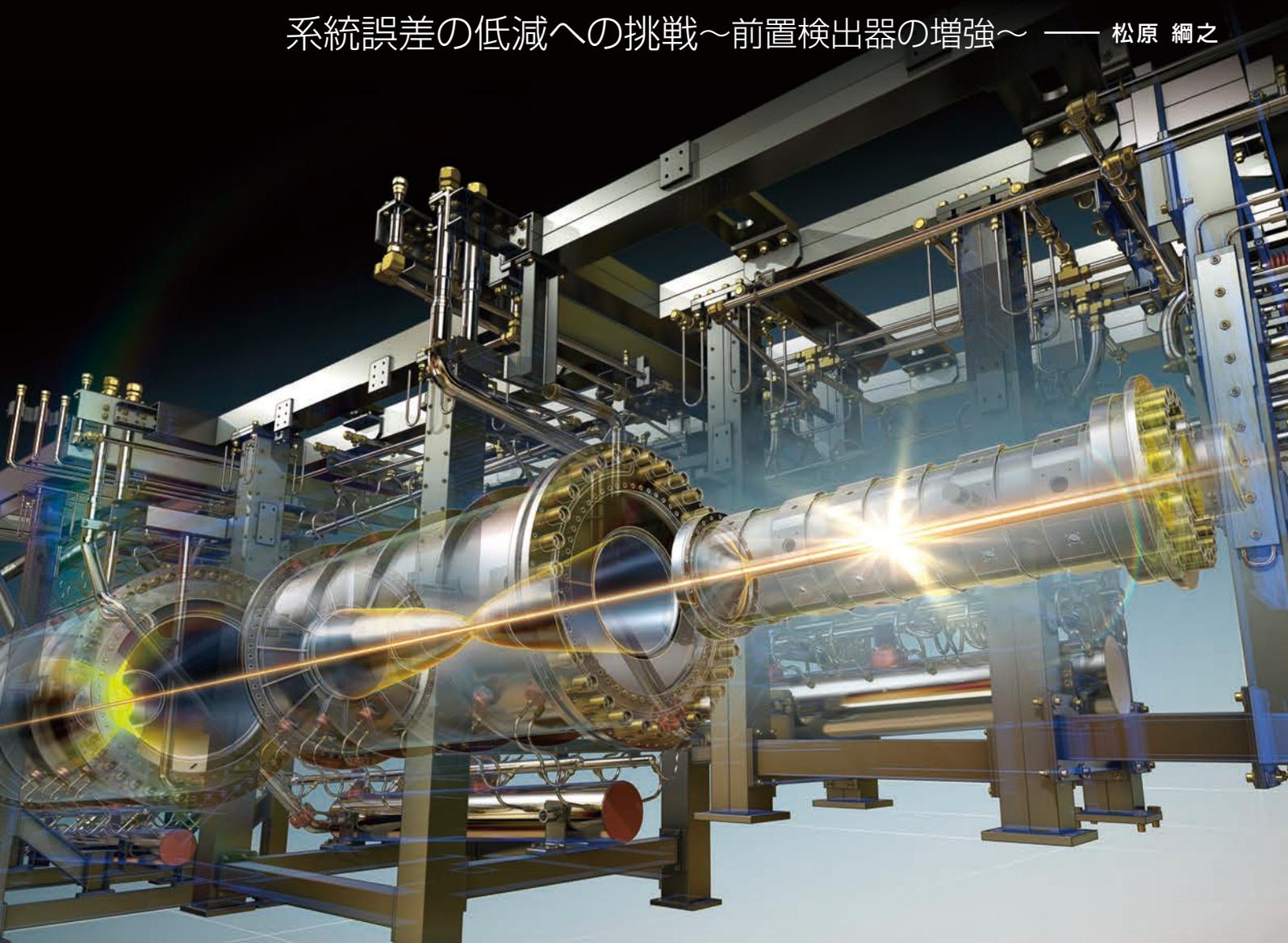
JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX 2022

特集

CP対称性の検証に向けて 進化するニュートリノ実験施設

インタビュー

CP対称性の破れをより高い信頼度で示すために — 坂下 健
電磁ホーンを増強
～より大強度のビームを受けるために～ — 関口 哲郎
大きな検出器をつくる — 竹田 敦
系統誤差の低減への挑戦～前置検出器の増強～ — 松原 綱之



CP 対称性の検証に向けて 進化するニュートリノ実験施設

茨城県東海村にある J-PARC の加速器を用いてつくった素粒子ニュートリノのビームを、岐阜県飛騨市神岡にあるスーパーカミオカンデ検出器まで飛ばし、飛行中にニュートリノの種類が変わる「ニュートリノ振動」を調べる実験、T2K (Tokai to Kamioka)。実験開始からまもなくの2013年、3種類あるニュートリノのうちの「ミューニュートリノ」が、別の種類の「電子ニュートリノ」に変わるニュートリノ振動を発見した。その後、実験グループは、このニュートリノ振動の現象を利用して、「CP 対称性の破れ」を検証する実験を開始した。宇宙誕生時に粒子と反粒子（粒子と同じ性質を持つが電荷の符号が反対の粒子）は同数つくられたはずであるのに、現在の宇宙は粒子から成る物質で満たされており、反粒子から成る反物質は見当たらない。これは、粒子と反粒子の性質にわずかな違い（= CP 対称性の破れ）があるためではないかと考えられている。T2K 実験で、ニュートリノと反ニュートリノでニュートリノ振動の起こる確率に違いがあるかを調べることで、ニュートリノにおける CP 対称性の破れを検証しようとしているのだ。（CP 対称性の破れの詳細については、季刊誌「J-PARC」9号を参照）

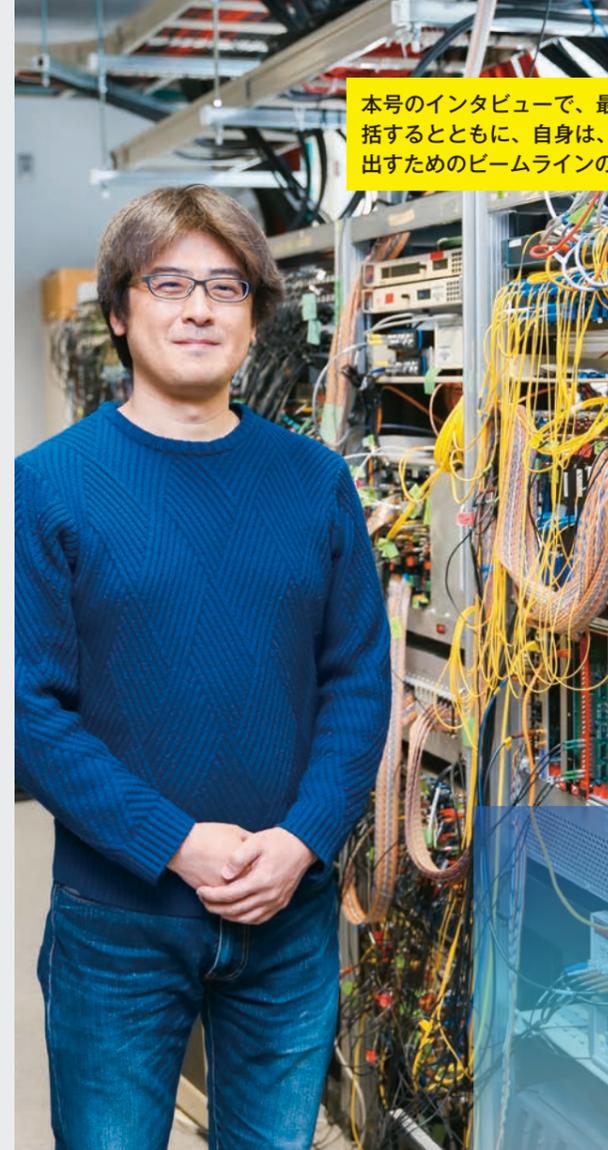
現在までの実験から、ニュートリノにおいて CP 対称性の破れがある可能性は、約95%。かなり確実に変わったように聞こえるかもしれないが、CP 対称性の破れがない可能性も約5%あるわけだ。実験グループは、実験誤差を減らして、CP 対称性の破れの決定的な証拠、さらには破れの大きさを決める量である CP 位相角の精密測定に向けて挑戦を続けている。

実験誤差には「統計誤差」と「系統誤差」がある。統計誤差は、実験データの数を増やすことで小さくなっていく。多数のデータをできるだけ短い期間でためるための方策は2つ。1つは、生成するニュートリノの数（=ニュートリノビームの強度）を増やすこと。このために、J-PARC は、2021年夏からメインリング加速器の運転を長期休止し、加速器やニュートリノビーム生成施設の増強を進めている。2022年秋ごろからは、性能が向上した施設で大強度のニュートリノビームを生成し、従来よりも高い効率で実験を再開する予定である。短期間で多数のデータをためるもう1つの方策は、検出器をより大きくして、より多くのニュートリノを検出できるようにすること。スーパーカミオカンデの8倍の有効体積を持つハイパーカミオカンデ検出器の建設が始まり、2027年の稼働を予定している。

一方の系統誤差は、測定方法などに何か原因があって、実験値が真の値からずれてしまう誤差のことである。T2K 実験の場合、主要な系統誤差は、ニュートリノと原子核の反応の理解が不十分であることに起因する誤差である。そこで、ニュートリノと原子核の反応を詳しく調べるために、前置検出器の改良が進められている。前置検出器は、加速器でつくった陽子ビームを標的に当ててニュートリノビームを生成する場所から280 m 先に置かれており、ニュートリノ振動が起こる前のニュートリノを調べる検出器である。

本号では、ニュートリノの CP 対称性の破れを、より早くにより高い信頼度で示すために、現在、研究者達が進めている、施設の増強の取り組みを紹介する。

本号のインタビューで、最初に直撃したのは、坂下氏。ニュートリノビームライン施設の増強において、全体を統括するとともに、自身は、ビームラインの制御系の開発と、ビームコミッショニング（要求性能を満たすビームを出すためのビームラインの調整）を担当している立場から、お話を伺った。（聞き手：J-PARC 広報セクション）



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
素粒子原子核ディビジョン

坂下 健准教授



陽子ビーム位置をリアルタイムで計算する電子回路（開発中）。

より早く、より高い信頼度で、 CP 対称性の破れを示すことの重要性

ニュートリノはいろんな物質を通り抜けやすく、物質とほとんど反応しない性質であるので、たくさんのニュートリノを生成して神岡に飛ばしても、観測されるのはごくわずかだ。「これまでの約10年でニュートリノの観測数は100くらい。より高い信頼度で CP 対称性の破れがあるかどうかを言うためには、少なくとも1000くらいの観測数が欲しいのです。これをできるだけ短い期間で達成したい。そのために、J-PARC のビームパワー（強度に比例）を現状の500kW から将来的に1300kW (2.6倍) にし、スーパーカミオカンデの8倍の有効体積を持つハイパーカミオカンデを建設します。実現すれば、これまでの約20分の1の時間でデータをためられることになります。」と、坂下氏は説明した。早くためられることは、2つの観点で重要であると坂下氏は言う。1つは、国際競争に勝つためという観点。もう1つは純粋に未知のサイエンスを早く知りたいという観点である。「基礎科学の研究の重要性を考えると、スティーブ・ジョブズ氏の「リベラルアーツがあってこそ、テクノロジーのイノベーションが生まれる」という言葉が、まさにそのとおりだなあと感じます。」と、自由に生きるための技であるリベラルアーツの重要性を語ってくれた。

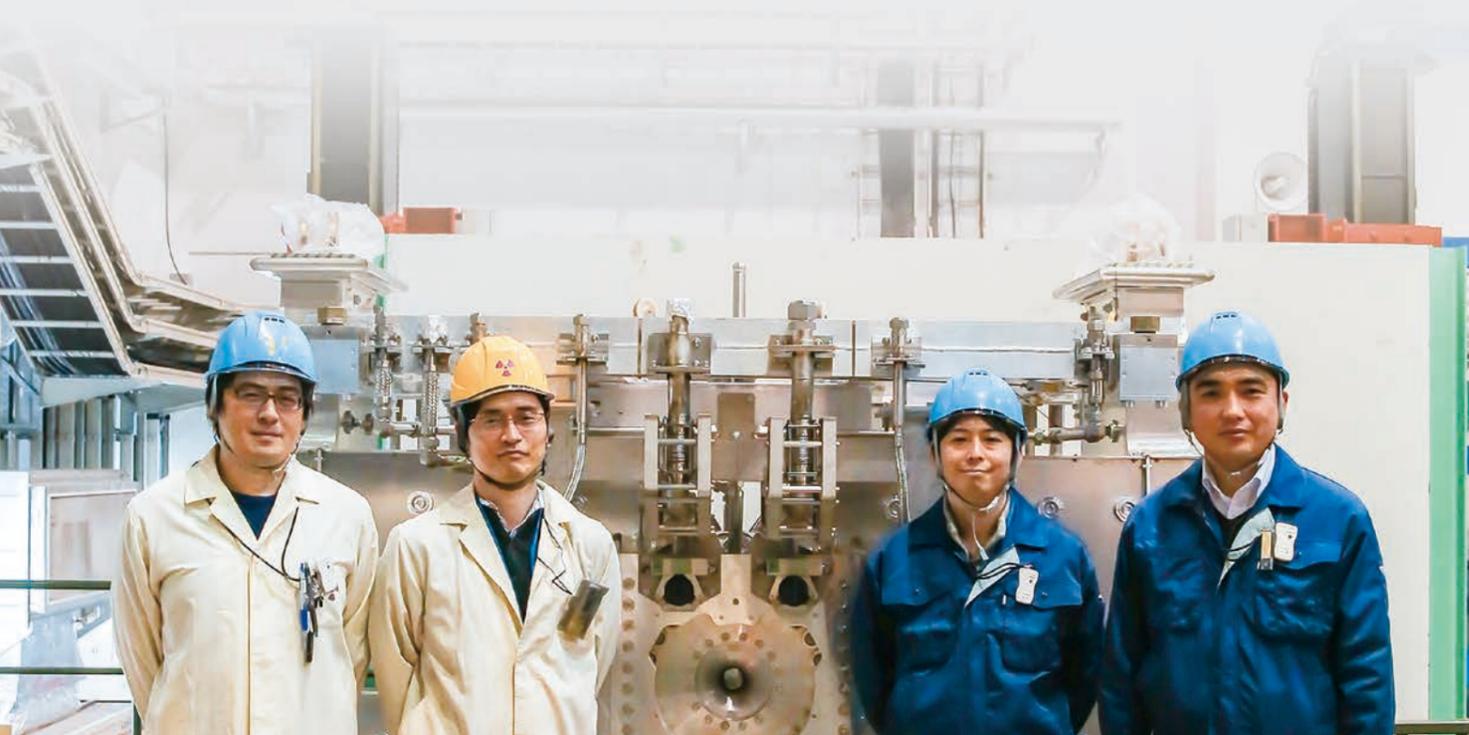
大強度だからこそ重要性が高まる インターロックシステムの開発

坂下氏が精力的に取り組んでいるのが、インターロックシステムの開発だ。自動で安全の診断をして、危険回避の措置を取るシステムのことだ。「ビームが大強度になるのに伴い、不具合があればすぐ物を壊すことになるので、これまで以上にインターロックシステムが重要になります。」と、坂下氏。例えば、ニュートリノを生成する標的に、J-PARC 加速器からの陽子ビームを当てる際に、正確に標的の真ん中でビームを受け、衝撃を受けるようにする必要がある。真ん中からずれた位置で大強度のビームを受けることになれば、衝撃で標的が壊れてしまう。これを防ぐために、ビーム軌道がずれていないかを迅速に判断し、もしずれていればビームを止めなければならない。ビーム軌道位置の計算は、従来はコンピュータで行い、

1秒くらいかかっていた。今回の大強度化は、ニュートリノ生成標的に陽子ビームの塊を単位時間あたりに送り出す数を増やすことで実現する。具体的には、今まで2.48秒に1回だったのを、1.3秒に1回に変更する。「したがって、1つのビームの塊についての計算に1秒かけているのは、次の塊を送り出すのに間に合いません。そこで、計算のための電子回路を共同研究者と一緒に開発し、計算時間を1000分の1秒よりも短くすることができました。」と、説明してくれた。現在、ビームの幅が想定よりも狭くなり標的に局所的に衝撃を与え続けることを避けるために幅の計算も電子回路で行う改良を新しい共同研究者と共に進めている。

また、陽子ビームの軌道を曲げたり収束したりする電磁石の磁場の調整においても、少しのずれが甚大な被害につながる。これを避けるための電磁石電源の電流・電圧のインターロックも KEK の技術職員の方と一緒に開発を進めている。

CP 対称性の破れを より高い信頼度で示すために



ニュートリノ生成施設の心臓部ともいえる装置が、電磁ホーンだ。生成したニュートリノビームは何もしなければ四方八方に広がり、神岡に届くのは生成したうちのごく一部だ。ニュートリノは電荷を持たないため、収束できない。そこで、電荷を持つ親粒子の π 中間子を、磁場をかけて収束する。この装置が電磁ホーンだ。収束しない場合の15倍もの数のニュートリノをスーパーカミオカンデに送ることを可能にする。今回の施設増強で、3台の電磁ホーンのうちの第1ホーンと第2ホーンを新しいものに入れ替える。T2K実験の立ち上げ時から電磁ホーンの開発を担当し、今回の増強も担当している関口氏にお話を伺った。



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
素粒子原子核ディビジョン

関口 哲郎准教授

電磁ホーンの増強

～より大強度のビームを受けるために～

ビーム収束力をさらに向上

今回の増強の1つ目の目玉は、電磁ホーンに供給する電流を、これまでの250kAから当初の設計値である320kAに増やすこと。より強い磁場で収束することで、神岡に届くニュートリノの数が10%増えるそうだ。大電流を供給するために、電源からホーンまでのすべての送電系を、より電流が流れやすくより壊れにくいものに入れ替えた。さらに、前ページに記載のとおり、今回の増強で、陽子ビームの塊が送られてくる周期がおよそ半分になるので、今までよりも短い時間で大電流を供給するために、エネルギー回生システムを備えた電源を新たに開発し、また電源を2台から3台に増やし、1台のホーンに対して1台の電源で運転するように、電源システムの大改造を行った。

大強度化したビームを受けるために

もう1つの目玉は、大強度ビームに対応することだ。計画当初に、ニュートリノビームライン諮問委員会で、大強度化したビームを受けたときに問題がないか、検討、助言をいただいたという。電磁ホーンの各部の温度シミュレーションを行った結果、第2ホーンのパスパー（通電のための導体板）が高温になり、冷却が必要なが分かった。高温になる理由は、第1ホーンで π 中間子を収束するための磁場で、逆電荷の π 中間子は蹴り出され、第2ホーンのパスパーに当たるためである。「すでに、新たに開発した第2ホーンのパスパーに通電し、発生するジュール熱に対して冷却試験を行いました。その結果からシミュレーションにより、第1ホーンからの蹴り出しの π 中間子が当たっても、冷却できることを確認しました。」と、準備は万全だ。

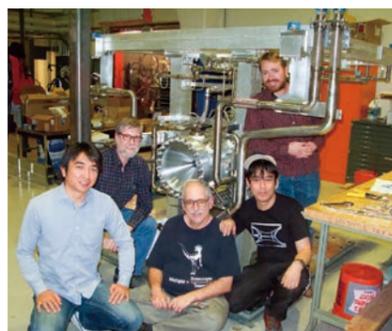
他にも、ビームの塊が来るのに合わせて電磁ホーンに通電する際、機械的な振動が発生するので、回数が重なってくると、装置の故障を生じる。大強度化により、陽子ビームの周期が

およそ半分になるので、同じ運転時間での通電回数はこれまでの2倍になる。そこで、長期間の運転に耐えられるように、振動で故障しにくい構造に改良した。

また、冷却水による長期間での腐食も、ホーンの寿命を左右するほどの深刻な問題となる。「小さい隙間などの水が溜まりやすいところを徹底的に無くすることで腐食を起りにくくする対策をしました。」さらには、水に放射線が当たることで、水が分解して水素が発生することも、大強度化では非常に大きな問題となる。T2K実験開始当初から10年以上にわたり、水素を除去するシステムの開発、運用を行ってきた。「このノウハウは、世界の他の大強度施設に情報提供しています。」と話してくれた。

さらなる大強度化に向けて

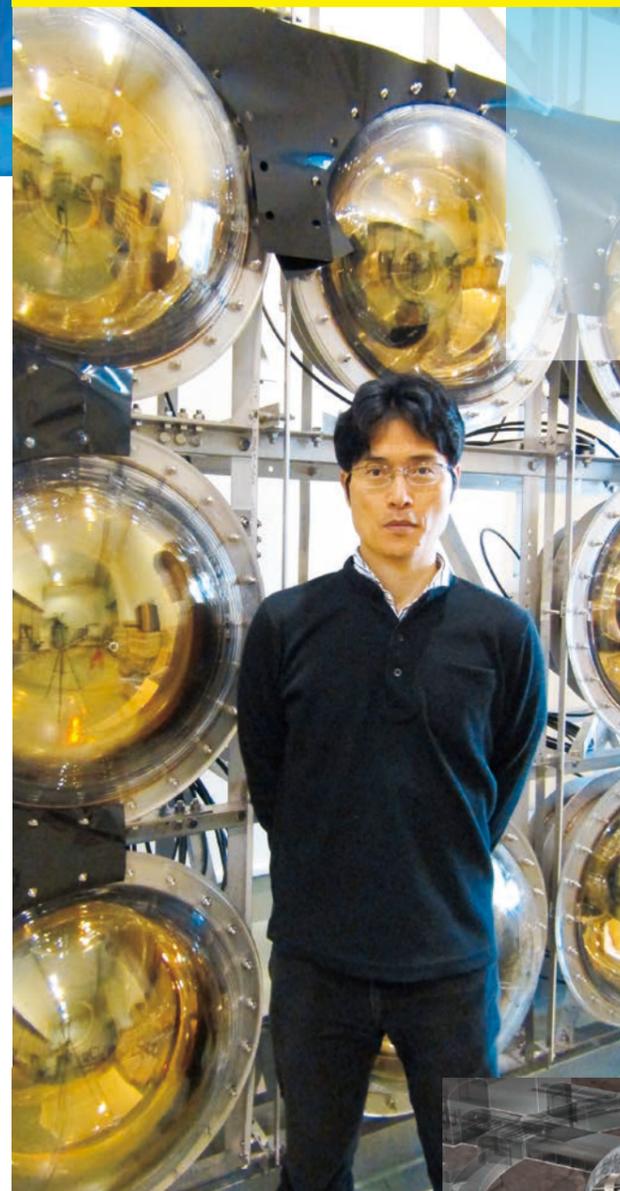
「大強度化は、世界の様々な施設を見ても非常にチャレンジングな取り組みです。今回の1.3秒周期への改良により、750kWを実現する見通しですが、300kWのころは、750kWは達成できるのか?と思いました。1.3MWの実現までは、まだ必要なことが多く、落ち着かない気持ちですが、ワクワクするところでもあります。さらにその先、電磁ホーン的设计を変えて、ニュートリノの収量をもっと上げたいという構想もあります。」と、さらに先まで見据えている。「目指す物理成果のために、装置開発は非常に重要。」と挑戦を続ける関口氏の努力が実を結ぶときが楽しみだ。



新しい第1電磁ホーンはコロラド大学でつくられた。関口氏（一番左）とコロラド大学の研究者達。

大きな検出器をつくる

スーパーカミオカンデ（SK）の8倍の有効体積を持つハイパーカミオカンデ（HK）の建設に、水槽と光電子増倍管の支持構造体の責任者として取り組む竹田氏。コストをかけずに、有効体積を大きくすることがポイントだ。



東京大学宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子研究施設

竹田 敦准教授

(株)日建設計、(株)三井E&Sマシナリーと共同で設計が進められているHKの水槽と光電子増倍管の支持構造体。J-PARC方向から飛来したニュートリノによるチェレンコフリングが描かれている。

大きな水槽をつくる

「水槽は内水槽と外水槽から成ります。有効体積はニュートリノの反応によって出されるチェレンコフ光を検出する内水槽の大きさで決まり、コストは空洞体積を決める外水槽の大きさの影響を受けます。外水槽の目的は、ニュートリノ反応のバックグラウンドとなる宇宙線ミュオンによる事象を除くことと、周囲の岩盤中の放射性物質からの放射線をシールドすることですが、その厚みはSKの2mからHKで1mにしても十分であることがわかりました。有効体積の取り方の改善も合わせて、水槽全体の大きさはSKの5倍に抑えて、有効体積を8倍にすることができました。」と、大きな水槽の実現のカギを竹田氏は説明した。

また、SKでは水槽からの水漏れがあった。最近、ニュートリノの検出感度を上げるため、SK水槽中の純水にガドリニウム（Gd）が加えられた。環境中にほとんど存在しないGdが入った水が放出されることは好ましくないため、水槽を補修してGdが入った水が漏れないようにした後、Gdを加えたという。「HKでも将来的にGdを加えたいと思っています。水槽の外側に湧き水がたまって、メンテナンスで水槽の水を抜いたときに、水槽を押しつぶす力がはたらくと考えられるので、歪みを逃す構造を考えました。」大きな水槽の背景には、様々な知恵と工夫があった。

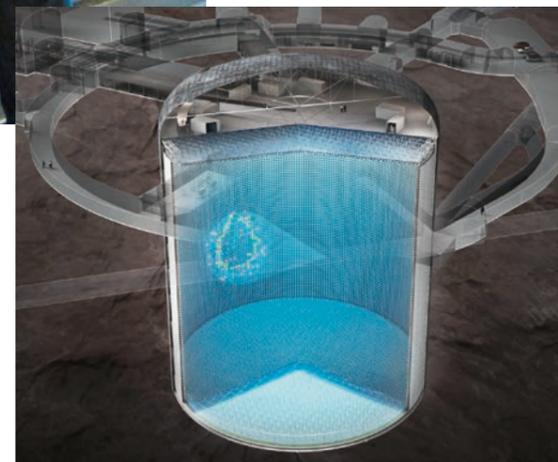
光電子増倍管を固定する支持構造体

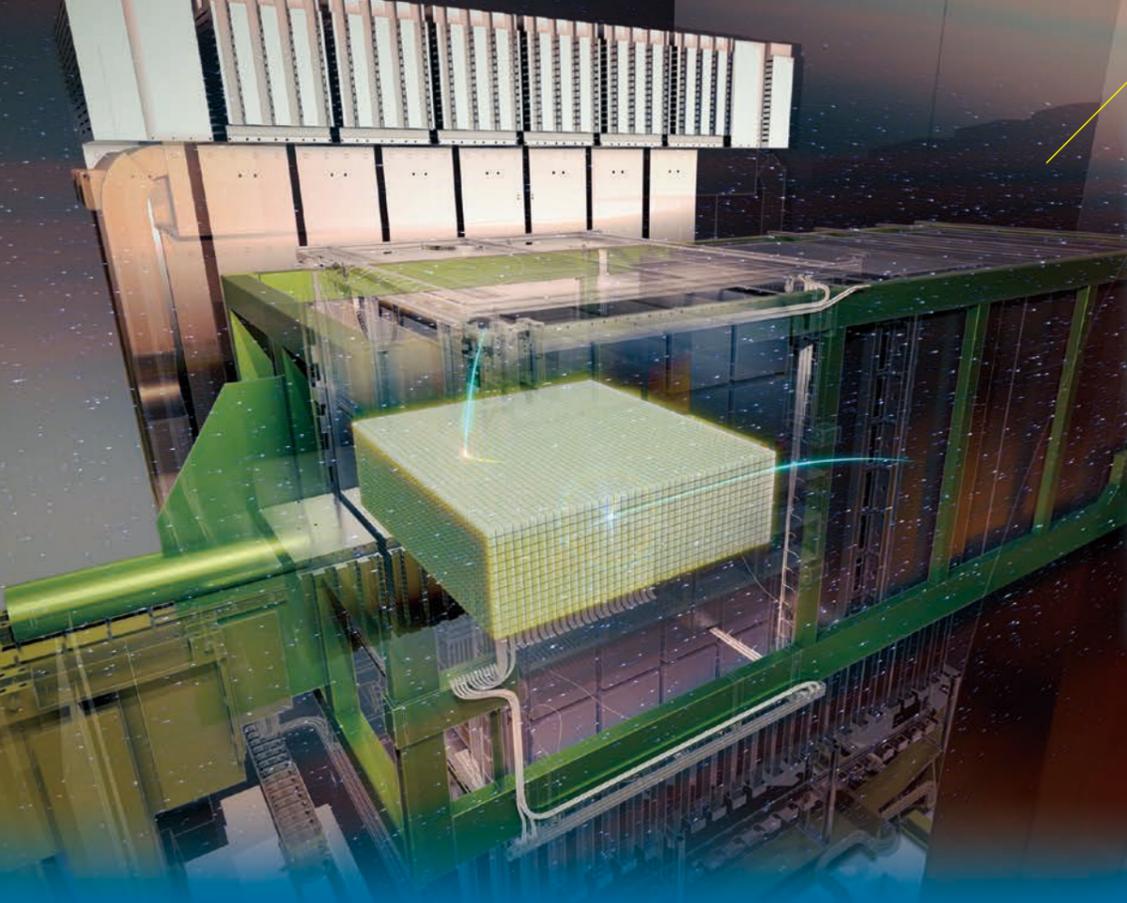
ニュートリノの反応により出るチェレンコフ光を捉える光電子増倍管のコストも重要な要素だ。研究グループは光電子増倍管の性能を向上させ、少ない本数でも要求される物理成果を出せるようにして、コストを抑えた。「私の役割は、その光電子増倍管を固定する支持構造体の建設と、そこへの光電子増倍管の設置です。支持構造体はステンレス製で、その量がコストに効きます。一方で、建設場所近くには跡津川断層があり、想定される大地震に耐えられるように設計する必要があります。少ないステンレス量で、耐震性を確保するために、支持構造体の上面は空洞の壁面に当たる岩盤にロックボルトで固定し、その上面から支持構造体側面を吊るようにしました。自立させるよりもはるかに少ないステンレス量で済み、SKのわずか2.5倍程度に抑えられています。」と、ここでもコストと大きさを両立させたアイデアを披露してくれた。

また、光電子増倍管の設置作業は、業者任せでなく、光電子増倍管とケーブルの接続チェックなどを研究者も行うことになるそうだ。作業用の足場は素人でも安全に作業できるものを組めるように、支持構造体の設計段階から、後の施工作业に主眼を置く必要がある。設計業者と契約する段階で施工業者も決め、設計業者、施工業者、研究者の3者が密に連携して進めているのがポイントで、3者間の調整も竹田氏の重要な任務だ。

建設も物理も、やりがい十分の検出器

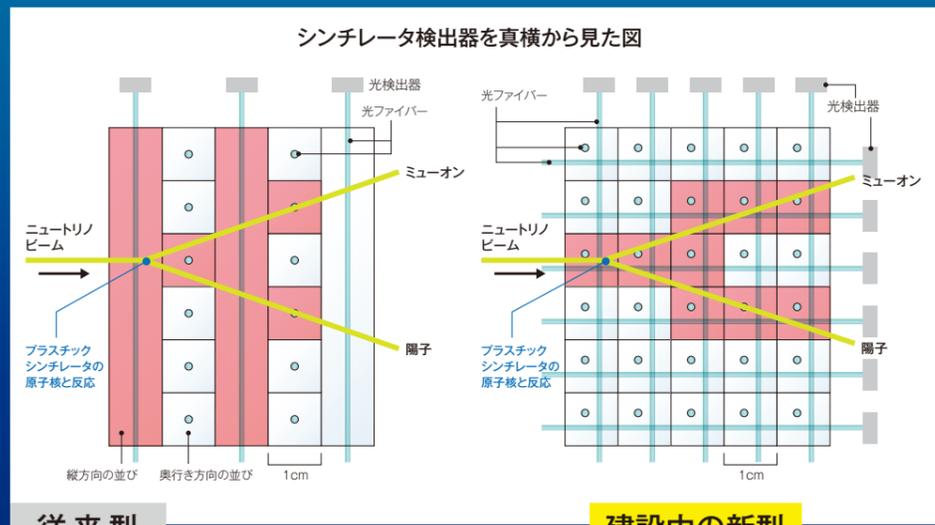
前例のない大がかりな検出器をつくること、そのために物理とかけ離れた建築、土木を学ぶことは、おもしろいという。それにより目指す物理としては、最初は暗黒物質の探索など、加速器を使わないものを考えていたそうだ。「陽子崩壊や超新星も含め、ニュートリノのCP対称性の破れの探索以外にも、たくさんの物理を与える検出器。そこにあこがれて、いろんな人が集まる。やりがいは大きいです。」と熱く語った竹田氏は、「HKプロジェクトにはそれだけのポテンシャルがある。」と結んでくれた。





シンチレータ検出器の改良 従来よりも高い精細度で 短い飛跡も検出！

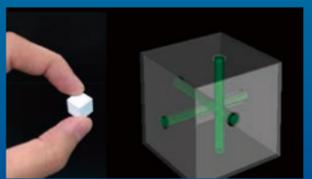
ニュートリノと原子核とで起こる2体反応やそれ以外の反応を詳しく調べるには、反応で出る低エネルギーの粒子も検出する必要があります。短い飛距離で止まるので、検出器の分解能が高くないと検出できない。



従来型 **建設中の新型**

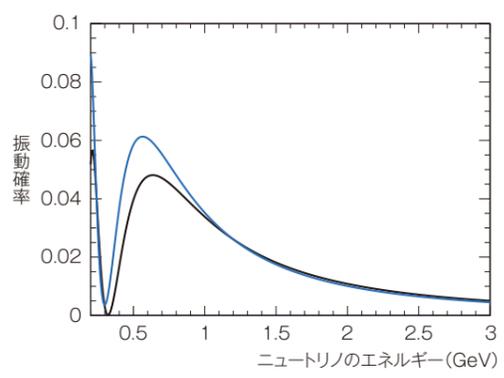
棒状のシンチレータを縦方向（紙面の上下方向）と奥行き方向（紙面に垂直の方向）に交互に並べている。ニュートリノがシンチレータを構成する原子核と反応して生じたミュオンや陽子などの荷電粒子がシンチレータ中を通過する際にシンチレーション光が発生する。シンチレーション光は、棒状シンチレータの中を貫く光ファイバーに吸収され、その信号は棒の端に設置された検出器で捉えられる。つまり、どの棒を粒子が通過したかが分かる。縦方向と奥行き方向の情報を組み合わせることで、粒子の通過位置を検出する。

キューブ状のシンチレータが並べられており、その中を縦、横、奥行き（紙面に垂直）方向に光ファイバーが貫き、その端に光検出器が設置されている。これにより、どのキューブを粒子が通過したかが分かり、従来型より優れた位置分解能が得られる。



1辺1cmのキューブ状のプラスチックシンチレータ（上）。釣り糸で組み上げられた約200万個のシンチレータキューブ（下）。今後、各キューブの中を、縦、横、奥行き方向に貫くように光ファイバーを設置する。

ニュートリノ振動解析におけるニュートリノ反応の系統誤差を減らすための前置検出器の改良も、今回の施設増強の目玉だ。担当者の松原氏にお話を伺った。



— CP位相角 0°: CP対称性の破れがない。
— CP位相角 -90°: CP対称性が最大限に破れている。

ニュートリノのエネルギーとミュオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動確率の関係（T2K実験の飛距離295kmの場合に、理論から導かれたグラフ）。例えば、CP位相角の値が異なると、グラフの形が変わることが見てとれる。T2K実験で生成するニュートリノのエネルギーは、CP位相角の値による振動確率の違いがよく見える0.6GeV付近にシャープなピークを持つエネルギー分布であり、実験と予測を比較することで、CP位相角の値を求めることができる。

系統誤差の低減への挑戦 ～前置検出器の増強～

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 素粒子原子核ディビジョン

松原 綱之助教

ニュートリノ振動解析における ニュートリノ反応の系統誤差とは？

ニュートリノがある決まった距離（T2K実験では東海―神岡間の295km）を飛行したときにニュートリノ振動が起こる確率は、ニュートリノのエネルギーによって異なる。その様子は、横軸をニュートリノのエネルギー、縦軸を振動確率としたグラフで表される（図）。「このグラフの形は、ニュートリノ振動を理論的に表す数式から導くことができます。その数式にはニュートリノ振動にかかわる『2つの質量二乗差』、『3つの混合角』、そして『CP位相角』と呼ばれる物理量があり、これらの値によって振動確率が変わります。実験で観測されたニュートリノのエネルギー分布と予測分布とを比較することで、目的の物理量を測定することができます。」と、松原氏はニュートリノ振動解析の手法について、丁寧に説明してくれた。

ニュートリノ振動を詳しく調べるには、ニュートリノと原子核の反応をよく理解して、その系統誤差を小さくすることがカギとなる。ニュートリノはごくまれに物質を構成する原子核と反応する。主な反応モードはニュートリノと核子との反応（2体反応）で、反応で放出されるミュオンの運動量と方向から、元のニュートリノのエネルギーを求めることができる。しかし、ニュートリノの原子核との反応は複雑であり、例えば2体反応以外にもミュオンを出す反応が存在する。そのような反応で出たミュオンを2体反応によるものだと思って解析をすると、ニュートリノのエネルギーを間違えて求めてしまい、系統誤差の要因となる。

系統誤差を小さくするには

「ニュートリノと原子核の反応で放出される粒子を精度良く捉えることができる新型の標的兼飛跡検出器を中心とする、前置検出器の改良を進めています。2体反応をより高い精度で観測する、またそれ以外の反応も詳しく調べることで、系統誤差を大幅に減らすことができるからです。」と、松原氏は意欲を見せる。今回の改良のポイントは、以下の3点だ。

- 1) 新しい標的兼飛跡検出器に、1cmのキューブ状プラスチックシンチレータを用いる（左ページ左下の模式図参照）。棒状のものを縦横に交互に並べた従来型検出器に対して位置分解能に優れ、反応を詳細に調べるために重要となる短い飛距離で止まる低エネルギー粒子の検出効率が向上する。また、複数の粒子が出る反応を従来の検出器よりも詳細に観測できる。
- 2) 標的重量を約2トンとすることで、ニュートリノが標的内の原子核と反応するデータをより多く得ることができる。使用するキューブは約200万個、高い精細度を得るための読み出しチャンネル数は約6万チャンネルにも及ぶ。
- 3) ミュオンの3次元飛跡を精細に調べることができるガス検出器を標的兼飛跡検出器の上下に2台設置する。2体反応とそれ以外の反応ではミュオンの放出角度分布が異なる。この検出器配置によって、これまで検出が難しかった、入射ビームに対して大きな角度方向に飛び出す粒子も検出できる。

前置検出器改良にかける松原氏の思い

「概念設計の段階からこの計画に加わりました。実現可能な詳細設計に落とし込むまでには多くの苦労がありましたが、いろいろな国の研究者や技術者と協力して徐々に形になっていく過程は楽しくもありました。まだ検出器の建設に気が抜けませんが、新しい検出器で物理結果を得るのが待ち遠しいです。」と、熱い思いを語ってくれた松原氏。前置検出器の完成と、それが生み出す物理の結果を、読者の皆さんも楽しみにしてほしい。



実験グループメンバーの集合写真。ニュートリノビーム生成施設の建屋前にて撮影。

ご意見、ご感想をお待ちしております。 ✉ web-staff@j-parc.jp

< 編集後記 >

本号のインタビューで直撃したニュートリノの皆さんは、どの方も、装置開発の大変さ、日々のたゆまぬ努力の大切さを教えてくれました。そして、皆さん共通に、その先に見据えているのは、ニュートリノのCP対称性の破れについて、より確実に知りたい、ということ。読者の皆さんの中から、こうした物理の研究に興味を持って、足を踏み入れようという方が出てきたら、嬉しいです。