

T2K 実験ニュートリノ生成機器

京都大学大学院理学研究科

市川 温子

ichikawa@scphys.kyoto-u.ac.jp

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

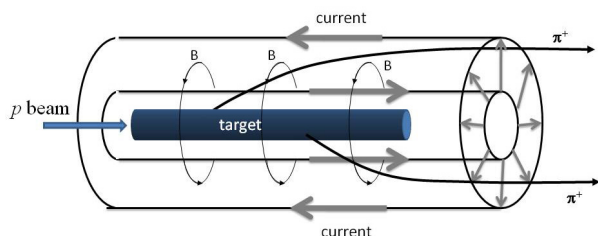
関口 哲郎, 中平 武

tetsuro.sekiguchi@kek.jp, nakadair@neutrino.kek.jp

2010年2月12日

1. はじめに

T2K 実験のニュートリノビームは、J-PARC 加速器で加速された数十 GeV の陽子ビームを標的に入射し、ハドロン反応により発生するパイ中間子が走行中に弱崩壊して生成するニュートリノを用いる。そのままでは、パイ中間子もニュートリノも四方八方へ飛び散ってしまうため、図 1 のような電磁ホーンと呼ばれる装置でパイ中間子を前方へ収束する。電磁ホーンはアルミニウム合金の同軸構造をした装置で、数百キロアンペアのパルス電流を流すことによりトロイダル磁場を作り出す装置である。



$$\text{magnetic field strength } B[T] = \frac{I[kA]}{5r[mm]}$$

図 1 電磁ホーンの概念図

2000 年当時に T2K 実験(当時は JHF-神岡ニュートリノ実験と呼ばれていた)が計画された時のニュートリノフラックスの見積もりは、以下のような条件でなされた。

- 標的：直径 6.4 mm, 長さ 45 cm のサファイア (Al_2O_3)
- 電磁ホーン：2 台で構成, 電流は 250 kA, 最大磁場 5 T
 - 第一ホーン 内部導体の内径 14 mm, 厚み 2.5 mm
外部導体の外径 340 mm
長さ 2.2 m
 - 第二ホーン 内部導体の最小内径 116 mm, 厚み 2 mm
外部導体の外径 876 mm
長さ 1.5 m

これらの標的および電磁ホーンは、米国ブルックヘブン国立研究所で用いられていたものに基づいたもので、図 2(上)のような形状をしている。

一方、T2K 実験の現状は以下の通りである。

- 標的：直径 26 mm, 長さ 91 cm のグラファイト
- 電磁ホーン：3 台で構成
 - 電流は 320 kA (ただし 2010 年は 250 kA)
最大磁場 2.1 T
 - 第一ホーン 内部導体の内径 54 mm, 厚み 3 mm
外部導体の外径 400 mm
長さ 1.5 m
 - 第二ホーン 内部導体の最小内径 80 mm, 厚み 3 mm
外部導体の直径 1000 mm
長さ 2 m
 - 第三ホーン 内部導体の最小内径 140 mm, 厚み 3 mm
外部導体の直径 1400 mm
長さ 2.5 m

で、図 2(下)にその形状を示す。ずいぶん、変わったものである。計画するは易しで、実際にやりはじめると、そこには多くの紆余曲折があった。ここでは、T2K 実験の標的、電磁ホーンの製作、設置について、紆余曲折を含めて紹介する。

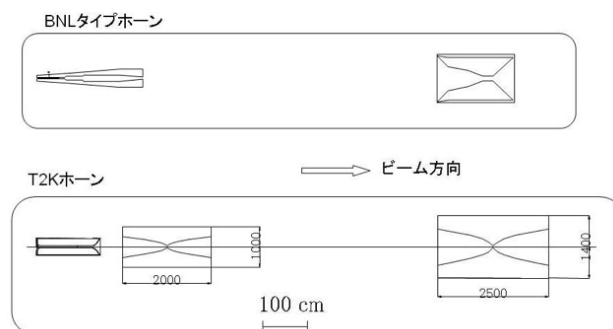


図 2 (上)実験計画時に参考にしたホーン形状, 配置
(下) T2K のホーン形状, 配置

1.1 予備知識 - 熱衝撃 -

標的、電磁ホーンについて紹介する前に、知っておいていただきたい点を述べる。J-PARCでは、30GeVのエネルギーを持った 3.3×10^{14} 個の陽子が5マイクロ秒の間にニュートリノビームラインに取り出される。つまり1.6メガジュールのエネルギーを持ったビームが瞬間的に標的に入射する。陽子ビームは、標的内でハドロン反応を起こし、大量のエネルギーを落とす。エネルギーを注入された物質は、温度上昇を起こし、通常は膨張する。しかし、膨張に要する時間よりも短い時間でエネルギーが注入された場合には、瞬間的に物質は圧縮された状況になり強いストレスにさらされる。これが熱衝撃である。図3に、鉄の塊に 3.3×10^{14} 個の陽子ビーム(ただしエネルギー50GeVでの評価¹⁾が入射した場合の温度上昇を示す。熱衝撃ストレスは3GPaに達し、耐力(300MPa)を越えるため、破壊されると予想される。標的も電磁ホーンもこうした熱衝撃に耐えられるものでなければならない。また、1年間の運転で吸収される放射線量は10ギガグレイ以上で、高い放射線耐性も求められる。

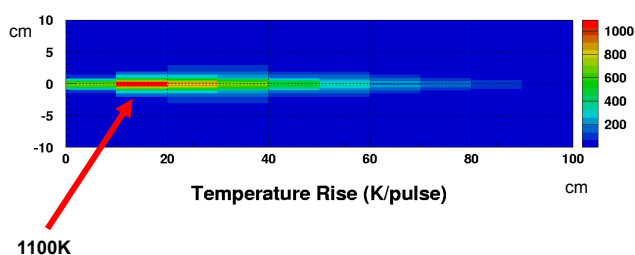


図3 3.3×10^{14} 個の50GeV陽子が瞬間的に鉄ブロックに入射した場合に予想される温度上昇分布(左側より陽子ビームが入射)

2. ニュートリノ生成標的

標的は陽子ビームが照射される受動的な装置であるが、陽子との反応による熱衝撃や放射線損傷に耐えることと、発生する反応熱を冷却する機構が必要とされる。また、ニュートリノ実験の標的には電磁ホーンの内部に収められなければならないという空間的な制約がある。T2K実験の場合には電磁ホーンの内径は54mmで、電気的絶縁のためのギャップや冷却機構も含めてこの内部におさまらなければならない。

標的本体の材質には等方性黒鉛が用いられている。融点と耐熱性が高いだけでなく、金属などと比較して密度が小さいので陽子との反応による発熱密度が抑えられる。それでも、ビーム照射に伴う瞬間温度上昇は約200度が想定される。この発熱による熱応力は約7MPaで、黒鉛材の引張強度(37MPa)の2割に相当するストレスが3.5秒のビーム

間隔ごとにかかる。また標的全体では、約20kWの発熱となる。

黒鉛の放射線損傷については、原子炉の材料として多くの研究があり、熱伝導率が低下することや、寸法が収縮することが示されている。T2Kでは約1mの標的が1年で1mm縮むと予想される。また、陽子ビームの照射によって、黒鉛内部に水素ガスがボイドとして蓄積して強度が劣化すると予想される。これらの放射線損傷は照射時の温度に大きく依っていて、400度以下の照射では損傷が非常に大きいことが示されている。

標的の冷却方法としては、ヘリウムガスによる冷却を採用した。より一般的な水冷方式と比較して、標的温度を400度以上に保てること、二次粒子との反応が小さいこと、冷媒圧力が小さいので配管の肉厚を薄くできることなどの利点がある。逆に、水冷方法では、二次粒子との反応熱に伴う瞬間圧力上昇が約2MPaに達する、放射化した冷却水の処理などの困難がともなう。ヘリウムガスで冷却するには、毎分 9 Nm^3 の大流量、流速にして200m/sが必要となる。KEK素核研低温グループの春山氏、笠見氏の協力のもと、民生用コンプレッサを用いた循環系を構築した。

ヘリウム冷却で標的温度を高温に設定したことにより、ヘリウムガス中に含まれる不純物の酸素による酸化消耗が問題となる。酸化消耗の進行速度と、酸化消耗した黒鉛材の強度を、炭素材の供給元メーカーに委託した測定から、5年の寿命を確保するには100ppm以下に保つ必要があることが分かった。このため、標的本体は密閉された容器に収納する必要がある。容器の一部は陽子ビームが通過するので、その容器の冷却も必要になる。

標的の設計には、電磁ホーンに隣接することからくる制約もある。標的は、陽子ビームを直接受けるシビアな部分のため電磁ホーンよりも障害発生頻度は高いと考えられる。そのため、電磁ホーンから切り放して交換できるようにすることが望ましいので、片持ちの構造となる。そのため、冷媒ガスの入口と出口も一方にある必要がある。また、電磁ホーンはパルス高電圧がかかるので、標的にもAC結合で高電圧がかかる。したがって、支持機構やヘリウムガス配管に絶縁が必要である。

標的は、機能としてはただ陽子を待ち構えるだけの装置ではある。しかし、英国RALのグループ(C. Densham, M. Fitton, M. Baldwin, V. Francis, J. Butterworth)の協力の下に設計をすすめるうちに、前述の様々な制約から非常に複雑な内部構造となった。

図4に標的の内部構造を示す断面図を、図5に第一電磁ホーンにインストールされる直前の標的を示す。

¹ 当初想定された陽子ビームエネルギーが50GeVのため、概念設計時の評価は50GeVでなされている。

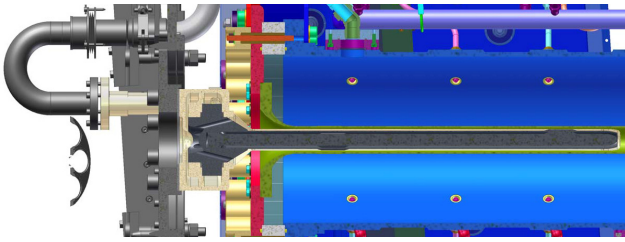


図4 T2Kの標的の内部構造の断面図

中央部の濃いグレーの棒状の部分が黒鉛製の標的。標的を格納しているチタン合金製のヘリウム容器ごと、第一電磁ホーンの内側に差し込まれている。標的のグラファイトとチタン合金製容器を同時に冷却するようにヘリウムガスを流すため、標的上流部に穴が交差してあけられていたり、標的と同心状にグラファイトの筒が接着されているなど、非常に複雑な構造になっている。

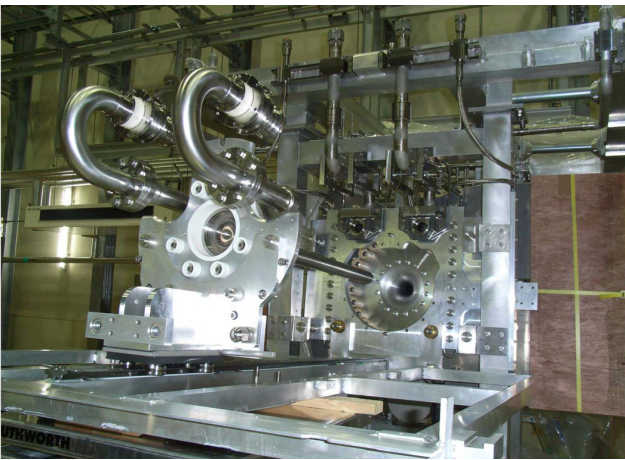


図5 第一電磁ホーンにインストールされる直前の標的

3. 電磁ホーン的设计から製作まで

電磁ホーンは、標的で生成されたパイ中間子を前方へ収束させるために、図6のようにアルミニウム合金の同軸構造でトロイダル磁場を作り出す装置である。必要な磁場を得るためには、数百キロアンペアという途方もない電流を流す必要がある。このような直流電流を常伝導状態で流せば導体がジュール熱で溶けてしまう。そこで、加速器からビームが来る瞬間に合わせて、パルス電流を流す。確率冷却法でWボソンの発見に貢献したとしてノーベル賞を受賞した van der Meer の考案した装置である[1]。磁場は、中心軸からの距離に反比例して弱くなるため、有効にパイ中間子を収束するためには、パイ中間子が広がってしまう前に収束することが重要である。現在よく用いられているホーンの形状、配置は、B. Palmerによって考案されたもので[2]、図2のように二つのホーンからなり、第一ホーンの上流側直線部分でパイ中間子が広がらないよう集めておき、下流のホーン型部分で方向をある程度整形する。下流側へ少し離して置く第二ホーンではさらに、粒子の方向を平行へ整形するようになっている。第一ホーンの内部導体の径を小さくする、ないし、電流を高くすれば、全体の大きさを抑えることができる。

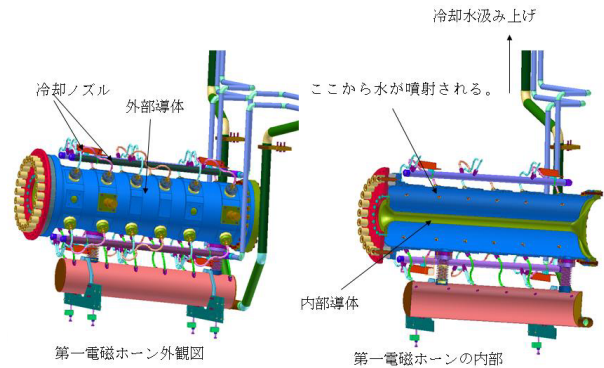


図6 第一電磁ホーンの構造

導体に電流が流れ、磁場が発生すると、磁場と電流の相互作用によりローレンツ力が発生する。T2Kの第一ホーンを例にとると、内部導体には、内向きに約20気圧の圧力が瞬間的にかかる。導体は、この力に耐えられるようにしなければならないが、厚くしてしまうと、物質内でパイ中間子が吸収されてニュートリノの収量が減ってしまう。また、J-PARCの大強度パルスビーム下では、内部導体は、1.1節で述べた熱衝撃によるストレスにさらされる。熱衝撃ストレスをアルミニウム合金の許容応力以下にするためには、内径を54mm以上にしなければならないことが明らかになった。これは元々の計画時に比べ3.8倍であり、単純にスケールして同じ電流値で、同じ収束効率を得ようとする3.8倍の大きさ、すなわち8m以上のホーンが必要になってしまう。ホーン間の距離も同じようにスケールすると、そもそもホーンが設置されるターゲットステーションに収まらなくなってしまう。余談であるが、J-PARCのニュートリノビームラインは、前代未聞(?)の、加速器リングの内側へ蹴り出す配置となっており、崩壊ボリュームも含めたビームラインの長さは、リングの大きさでリミットされている。そのため、ターゲットステーションを大きくするなど、実際にはあり得なかった。そこで、現実に折り合いをつけるべく試行錯誤が始まった。ホーンが大きくなっていく問題は、電流を250kAから320kAに増やすとともに、第一ホーンを上流側と下流側に分割して、全体で3台とすることによってそれぞれの大きさを抑えるようにした。それでも、当初よりは大きくなってしまっている。ターゲットステーションの大きさはすでに決まっていたため、ホーン間の距離は無理やり元の大きさのまま固定して、出来る限り当初計画のニュートリノ収量を実現すべく3台のホーンの形状を最適化していった。最適化のパラメータは、それぞれのホーンについて内部導体の径、長さ、カーブの形状などである。シミュレーションでパイ粒子の飛跡を見ながらある程度当たりをつけた後は、ブルートフォースにいろいろなパラメータの組み合わせを試していった。図7は、いろいろなパラメータについて、得られたニュートリノの収量を横軸電流値としてプロットしたものである。大体、600通りくらいを試したであろうか。

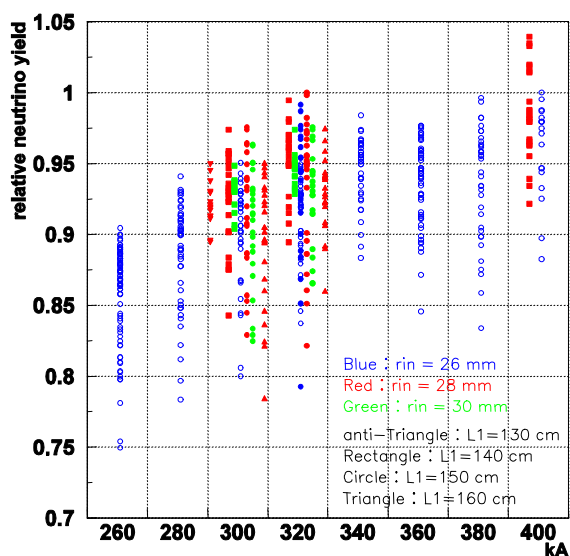


図7 ホーンの形状や電流値を変えた時のニュートリノ収量の変化
それぞれの点がある形状に対応している。

このようにして当初の計画の95%程度の収量は見込めるホーンの形状が決まった。図8は、電磁ホーンがある場合とない場合の、スーパーカミオカンデでのニュートリノフラックスを示す。次は、ローレンツ力に耐えられるように角の形状を丸めて行く必要がある。これも、こんな感じかなという当たりをつけては有限要素法でストレスを確かめるといふ試行錯誤であった。ちなみに、許容応力は、アルミニウム合金(6061-T6)の繰り返し疲労強度、水などの腐食による劣化などを考慮して、 10^8 回の負荷(T2K実験約50年分)に対する破断確率が2.5%という基準で決めた。

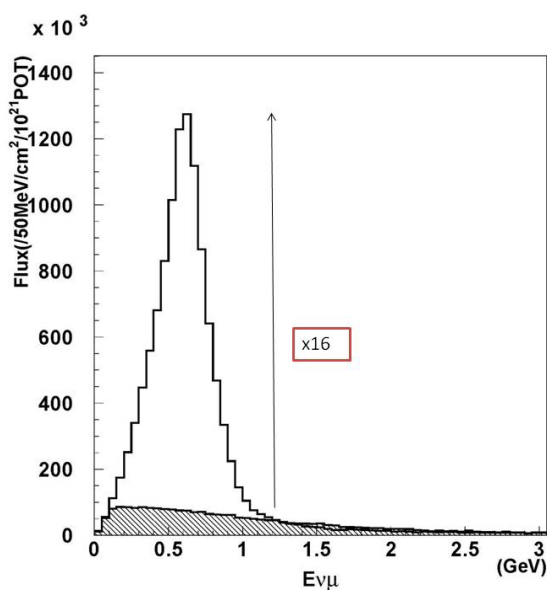


図8 スーパーカミオカンデでのニュートリノのフラックス
斜線部分が電磁ホーンのない場合、実線白塗り部分が電磁ホーンを用いた場合。

さて、ここからは実際に製作するための技術的な設計作業が始まる。電磁ホーンは極度に高い放射線に曝されるため、高分子材料は一切使えない。すべてを金属ないしセラミックスで作る必要がある。ジュール熱や放射線により内部導体には約20キロワットの熱が発生するため、外部導体に取り付けたノズルから水を噴射して冷却する必要がある。冷却配管と外部導体の間は絶縁する必要があるためセラミックスを介して接続するのであるが、ろう付けでは振動にたいしてもたないと予想されるため、金属製のシールを介してボルトで接続した。この際、水のある環境でアルミに異種金属が接すると電気腐食が懸念されるため金属製シールの材質にも気を配った。また、繰り返される振動の対策として、ボルトの緩み止めはもちろん、固く作る部分はがっちり固く、やわらかく作る部分は、十分なやわらかさを保つ必要がある。たとえば、ノズルへ水を供給する1/4インチの配管は、振動を吸収するためにm字型にした。冷却水は、8メートル近くの高さから配管を介してノズルに水を供給した後、ホーン下部のドレインタンクに集まったものを、自吸式ポンプで吸い出す。8メートルというのは、吸い上げるには微妙な高さ(原理的には10メートルまで大丈夫のはず)であり、また供給側のポンプとのバランスを、高放射線下でアナログ的に行わなければならない。そこで以下のような原理でコントロールすることとした。吸い上げのパワーを少し強めに設定しておく。吸い上げ過ぎるとドレインタンク内の水位が落ちてガスが混入し、吸い上げるパワーが落ちて、結局、バランスの取れたところで落ち着く。プロの設備屋はみな首をかしげたが、物理屋のセンスでうまくいくはずと信じて、試験などによって方法を確立していった。電流を供給するバスバーについても、放射線によって発生する熱が問題となるため、ダクトで覆い、ヘリウムを強制的にふきつけることとした。また、電磁ホーンが故障した場合にそなえ、ホーン本体を遠隔操作で交換できる機能をもたせた。こういった詳細設計は、とてもとても物理屋だけの手に負えるものではなかったが、K2K実験の電磁ホーンを製作したKEK 山野井氏にアドバイスをいただき、また、米国コロラド大学の協力で約 10^8 回という世界最高の運転パルス数を誇るMiniBooNE実験のホーンを製作したL. Bartoszek氏に共同で設計に入ってもらい、さらには実際に製作を行った東芝の協力もあって、なんとか設計を完了した。特にL. Bartoszek氏のボルト1本にまで至る深い考察は、有益であるだけでなく、楽しい共同作業であった。(ボルトは、締め付ける対象物よりもやわらかい材質で作るべきだって知ってました?)

製作は、内部導体の試作から始まった。アルミニウム合金を溶接でつなぐと、溶接部の強度が落ちるため、Tig溶接、摩擦攪拌接合、電子ビーム溶接などを検討したが、最終的には、第一電磁ホーンについては、すべてブロックか

ら削りだし(!), 米国側が製作した第二ホーンは摩擦撻拌接合, 第三ホーンはTig溶接とした。内部導体と外部導体は下流側で結合され, 上流側ではセラミックスのリングを介して絶縁されるのであるが, 第三ホーン用には, 直径1.4メートルのものが必要で, 製作可能なメーカーを探すのに苦労した。コストを下げるため, セラミックスや特殊なボルトなどを供給品にしたり, その他いろいろ(ここには書けない)紆余曲折, 苦労はあったが, 2006年春, 第一ホーンの試作機が完成し, KEKのテスト棟へ設置された。数秒に一度, パルス電流を通電するのであるが, 電流を少しずつ上げるにつれ, ポーン, ポーンとローレンツ力によって内部導体が叩きつけられる音が聞こえ始め, 200kAを越えるあたりからは, 「パーン」という大音響になり, 設計値の320kAでは, うるさいというのを越え, 耳が痛くなる感じであった²。ジョギングをしている職員の証言によりKEKの敷地外にまで音が漏れていることがわかったため, 急遽, 工事用の防音シートを被せ, 85万回の長期通電試験を行った。気のせいかもしれないが, テスト棟の隣の桜が翌春あまり花をつけなかった。2007年に, 第三ホーンも完成し, 第一ホーン試作機と直列につないで43万回の長期通電試験を行った。2008年には, 第二ホーンが米国から届き通電試験を行った。が, この辺りから, 後に大問題となる電源のトラブルが発生しはじめ, われわれを悩ませることになる。ホーン本体については, ノズルを固定するボルトが弛んで脱落したり, 絶縁用セラミックスの部品が欠けるなどの問題が発生したが, 大きな問題は見つからなかった。本番機については, ボルトの弛み対策を徹底し, セラミックスも強度の高い高純度のアルミナに変更した。

4. 設置

2008年7月中旬, いよいよJ-PARCへの設置作業が始まった。2009年4月にニュートリノビームを生成するという大命題を達成するため, 数ヶ月前から工程を綿密に練り, 遅れが生じないように最善の努力を行った。ニュートリノ生成機器の設置場所となるターゲットステーション棟の建築工事が6月末によく終わり, その後設備関係の工事が激化し, 様々な業者が並行して作業を行っていた。建築完了が遅れていただけでなく, 設備関係の工事も場所や時間の取り合いによる工程の遅れが生じ始め, われわれの作業の前に終わっているべき工事がなかなか終わらず, 結局ニュートリノ生成装置の設置作業は12月中旬から本格化することとなった。4ヶ月後にはニュートリノビームを出さなければならないという極度のプレッシャーと戦いながら。

ターゲットステーション棟には, ニュートリノ生成機器が収められる大型ヘリウム容器(幅4m, 高さ10m, 長さ

15m)が設置されている。ニュートリノ生成機器は, 標的, 電磁ホーン, 標的の前に設置されるグラファイト製コリメータから構成される。電磁ホーンおよびコリメータは, 支持モジュールと呼ばれる箱形の装置に懸架される状態でヘリウム容器に設置される(図9)。支持モジュールの内側の空間には, 放射線を遮蔽するための鉄とコンクリートの二種類の遮蔽ブロックが置かれる(図10)。支持モジュールに懸架された状態では, 電磁ホーン下部から支持モジュール上部までの高さは8mに及ぶ。総重量は最大16トンである。

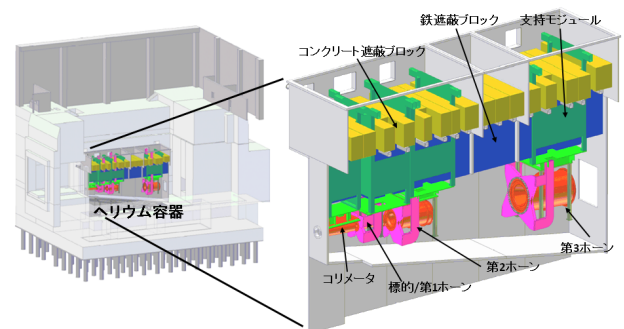


図9 ヘリウム容器の概念図

ターゲットステーション棟の地下15mに設置されている。

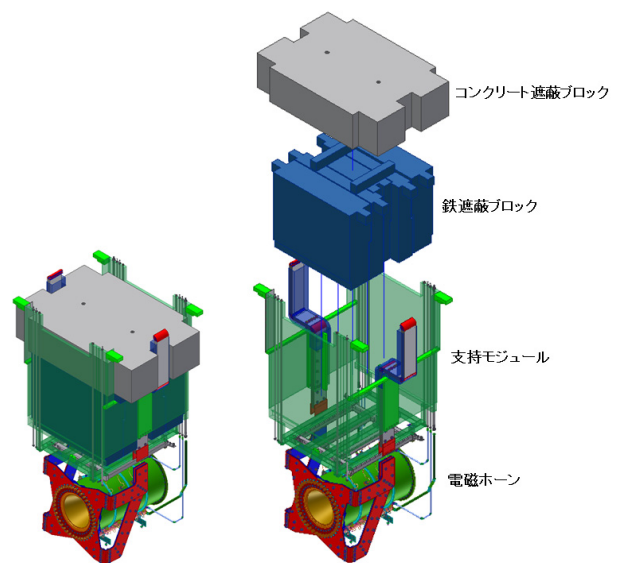


図10 支持モジュールに懸架された状態の電磁ホーン

J-PARCの陽子加速器は設計ビームパワーが750kWであり, KEK 12GeV-PSの約100倍にも及ぶ。大強度ビーム運転が始まれば, ヘリウム容器内部で電磁ホーンの近傍は1Sv/hを超す程残留放射線強度が高くなり, 電磁ホーンに近づくことすら不可能なほどになる³。そのような環境下においても電磁ホーンが故障した場合に新しい電磁ホーンと

² もちろん, 普段はヘッドフォンで耳を保護する。

³ コンクリート遮蔽ブロックの上では人間がアクセスできるほど放射線強度は弱くなっている。

交換できるように、クレーンの遠隔操作によりヘリウム容器から電磁ホーンや鉄遮蔽ブロックなどを引き出すことで、人間が近づかなくても機器を移動することが可能になっている。クレーンで引き出された放射化した機器は、ターゲットステーション棟内にあるメンテナンスエリアと呼ばれるスペースに移動され(もちろん、この操作も遠隔操作である)、マニピュレータや専用のメンテナンス機器を使って、遮蔽ブロック越しにメンテナンスなどの作業が行われる。T2K実験では、こうして高度に放射化したものでも交換・メンテナンスを行うことを可能としている。

ニュートリノ生成機器の設置作業の準備作業は、ターゲットステーション棟の地上における設置作業場所のセットアップから始まった。電磁ホーンのアラインメント調整や支持モジュールに懸架された状態での試験通電を行うことが出来るような架台(以下、調整架台)の設置を行った。他の業者の作業スケジュールにより、クレーンを思うように使えないという状況下で、約2ヶ月を要してセットアップが完了した(図11)。



図11 調整架台に設置された電磁ホーンと支持モジュール

ヘリウム容器に設置する前に調整架台においてアラインメント調整を行う。初回の設置の際は、ビームラインレベルで測量を行うことのできるため、正確な機器のアラインメントを行えるが、ヘリウム容器内が放射化した後ではビームラインレベルでは直接アラインメントができない。そこで、以下のような方法でアラインメントを行う。支持モジュール上部にアラインメント用マーカーを設ける。電磁ホーンを中心軸(ビームラインに一致するべき軸)に対してこのマーカーの相対位置関係を精密に測量する。ヘリウム容器に設置後、コンクリート遮蔽ブロックが置かれれば人間がアクセス出来るため、このマーカーを基準にして支持モジュールの位置や高さを調整することにより4電磁ホーンを中心軸

をビームラインと一致させる。電磁ホーンを中心軸は、水平から 3.64° 下を向いているため、アラインメント調整を始めたばかりの頃は、調整が難航した。また、支持モジュールに懸架された状態では、電磁ホーンを中心軸から支持モジュール上部マーカーまでは6mもあるため、支持モジュールがほんのわずかに傾いているだけでも下部では1mm以上ずれてしまう。そのような困難も、試行錯誤の末アラインメント技術が向上して解消されていった。実際、調整後の電磁ホーンは、水平からの角度で $3.64 \pm 0.005^\circ$ 、高さ方向は6mの高低差に対して1mm以内(約0.017%)で調整を行うことが出来た⁵。

アラインメント作業が終了後、ヘリウム容器に設置する前に試験通電を行う。調整架台には、支持モジュールを2台分設置できるスペースがあるが、そのうちの片方には通電設備が設置されている。設置前に1週間程度の長時間通電を行い、初期不良による故障を洗い出すのが目的である。本来ならば一日中連続通電を行いたいところだが、日中は他の作業があるため夜間のみ通電を行った。日中も作業を行っているわれわれのみでは通電の監視を行いきれないので、T2K実験のコラボレータの協力を得て毎夜の通電が可能となった。

試験通電が終わればよいよヘリウム容器への設置である。コリメータ、3台の電磁ホーンと計4台の機器があるため、1台ずつ組立アラインメント試験通電(コリメータ以外)設置という流れで順次ヘリウム容器に設置していく予定であった。1台あたりに要する時間は1ヶ月弱である。9月中旬からコリメータの設置作業を始めたので、12月末までには全数設置が終わっているはずであったが、7月から続いていた慢性的なクレーンの取り扱い問題によりコリメータのヘリウム容器への設置時期が12月中旬までずれ込み、深刻な遅れが生じていた。11月頃には、日中はクレーンがまったく使えない状況が続いていたので、クレーン作業を行う日は夕方から作業を始めて深夜まで(時には明け方まで)作業を行うこともしばしばあった。そのような血のにじむ努力の末にコリメータの設置を行う日を迎えた訳であるが、コリメータの設置作業を開始してよいよ所定の位置に置こうというその瞬間、われわれは思いもよらぬ事実と直面した。ヘリウム容器の中に施工されている冷却水配管が支持モジュールと干渉して、所定の位置まで下ろせないのである。何本も張り巡らされている配管の一部が設計値よりも5センチほど高く施工されていたのである。その他にも似たような干渉問題はいくつかあった。ヘリウム容器の内部は、放射線が外に抜けてこないように極力隙間を減らす設計となっている。機器と容器、機器同士、機

⁴ 支持モジュールの4ヶ所の支点には、三次元に移動可能な位置調整台座が置かれている。一旦設置した後も、水平方向に ± 30 mm、高さ方向に ± 5 mmの移動が可能である。

⁵ 高さ方向の誤差の半分は、使用した長尺の製作精度によっている。

器と遮蔽ブロックの隙間は設計上すべて30mmしか取っていない。このような隙間のない空間の中で、配管一本を取っても数センチもずれることは許されないのである。結局、容器内部の干渉部分をすべて修正するのに1ヶ月を要した。

年が明けて1月10日、再びコリメータを設置する日を迎えた。干渉はすべて直したはずであるが、機器が設置されるまでは気が抜けない状況であった。作業を開始して約1時間後、ようやく最初の機器コリメータがヘリウム容器に設置された。作業自体は非常にスムーズに行われた。10日後には第一ホーンの設置が行われ、こちらも問題なく設置が完了した(図12)。

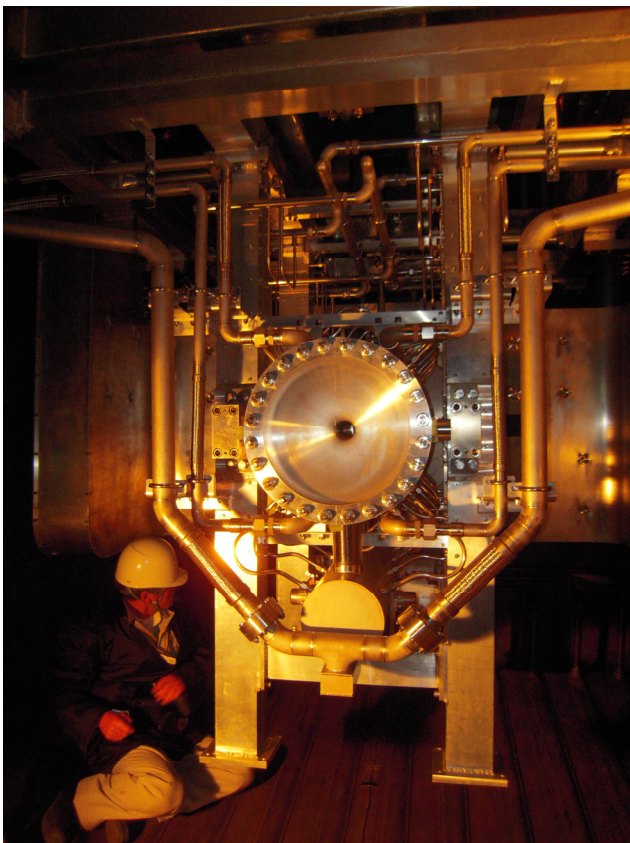


図12 クレーンに吊られ設置中の第一ホーン(上)と設置完了後の第一ホーン(下)

2月に入り、ヘリウム容器の真空引き試験を行った⁶。その後は、ニュートリノ生成機器用の冷却水配管の接続作業、電磁ホーンへの給電用バスバーの接続作業を行い、3月後半には、第一ホーンのヘリウム容器内での通電を行えるまでこぎ着けた。4月23日、ビームコミッションングにおいて陽子ビームが初めてT2Kの標的に照射され、晴れてニュートリノビームを生成することに成功した。4月、5月に9日間のビームコミッションングを終え、6月からは第二・第三ホーンの設置作業が再開された。この時には、経験を積んだおかげですべての作業が順調に行われ、7月上旬に第二ホーンが(図13)、8月上旬に第三ホーンがヘリウム容器に設置された(図14)。紆余曲折はあったものの、1年以上を要してようやくニュートリノ生成機器全数の設置が完了したのである。



図13 ヘリウム容器に設置中の第二ホーン

⁶ ヘリウム容器は、ディケイボリュームと一体となっており、全体を真空引きした後、ヘリウムを充填する。

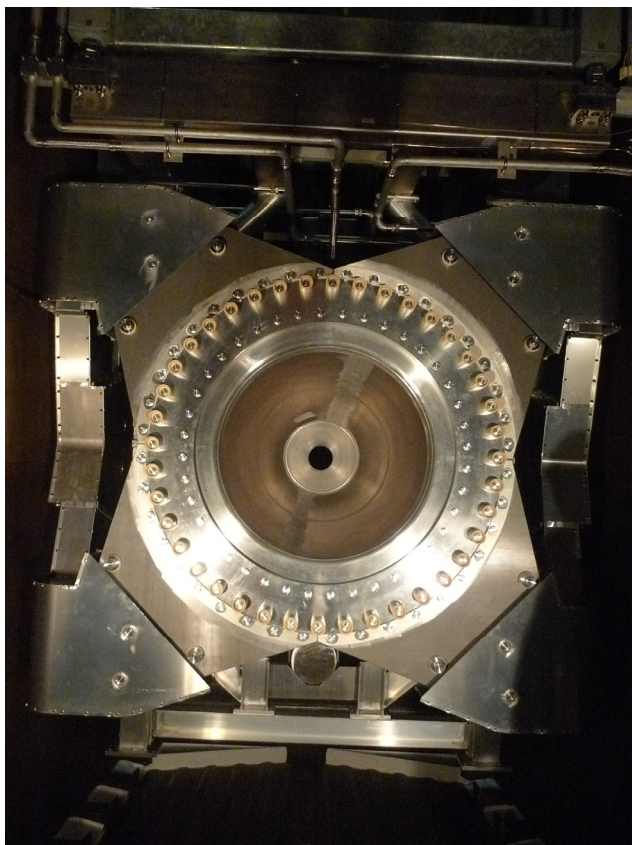


図 14 ヘリウム容器に設置された第三ホーン

5. 運転

5.1 冷却水循環装置

電磁ホーンの冷却水循環装置は、供給用の循環ポンプとドレインタンクに溜まった水をくみ上げる自吸式ポンプの2種類のポンプからなる。自吸式ポンプでくみ上げられた冷却水は、バッファータンクに集められ、再び循環ポンプにより電磁ホーンに供給される。ここで重要なのは、供給する冷却水流量とくみ上げる流量が長時間にわたりバランスすることである。3月上旬には、第一ホーン単体で冷却水循環を始めたが、単体では問題なく冷却水をバランスよく循環させることができた。問題は、電磁ホーンが2台、3台と増えた時にバランスよく循環できるかである。それぞれ単体でバランスよく循環できるように調整を行ったところ、3台同時でも安定した循環を行うことができた。現在では、1週間以上連続で冷却水循環を行っているが、バランスを崩すことなく安定な運転ができています。

5.2 電源

現在 T2K 実験で使用している電磁ホーン用電源は、K2K 実験で使用されたものを再利用している。K2K 実験では、2台の電源で2台の電磁ホーンを運転していたが、T2K 実験では3台の電磁ホーンを使用するため、第二・第三ホーンを直列に接続し1台の電源で同時運転できるようにした。この電源は、元々定格電流が250kAのところを特段大きな

改良を加えることなくしばらくの間320kAで運転していた経緯がある。そのため、つくばでの通電試験の最中に何度か故障のトラブルに見舞われた。2008年9月には、つくばにおいて第二ホーンの長期運転試験を行っていた最中に2台のうち1台の電源が故障し、まったく起動することもできないほどまで深刻なトラブルに陥ってしまった。原因調査に進展のないまま数ヶ月が経ってしまった。そこで、KEK 加速器の小関国男氏をはじめとするパルス電源のエキスパートに原因調査を依頼したところ、パルス出力の際に発する高調波により回路部品が故障したためであることが判明した。パルス電源内部では、コンデンサに数kVまで充電した後、瞬時にスイッチを入れてパルス電流を流すが、この際、高圧ケーブルの浮遊容量を充放電する高調波が電源の接地ラインに流れ込み、接地電位を大きく揺さぶるため接地ラインに接続された制御回路などが誤動作するのが原因であった。接地電流を計測したところ、高圧ケーブルから接地ラインには400Aもの接地電流が流れ込んでいた。根本的に接地系統に問題があった上に、定格電流以上の過負荷で長期間運転を行ってきたため、故障するのもやむを得ない。接地ラインに流れ込む接地電流を抑えるのは大きな改良を伴い労力を要するため、対処療法として、接地ラインに繋がる制御機器との間にノイズフィルターを追加することにより、ノイズにより制御回路が誤動作する確率を大幅に軽減させることができた。安定に運転できるようにはなったが、電源に大きな負荷をかけて長期間運転するのは危険であるため、現在は250kAで運転を行い、負荷を下げた状態で使用している。T2K 実験が行われる今後5年以上の間、故障のリスクを抱えたまま実験を行うのは大変危険であるため、現在新しい電源の開発・製造を行っている。新しい電源では、接地系統を抜本的に見直し、原理的に接地電流が流れないような回路を採用した。誤動作や故障のリスクの非常に小さい新しい電源の完成を待望している。

2009年3月に上述したような故障から復帰し、何とか4月のビーム試験に目処がついた。4,5月のビームコミッションでは、大きなトラブルもなく安定に運転することができた。9月には、第二・第三ホーンがヘリウム容器に設置された状態での通電を行い、こちらも安定に運転できた。しかしながら、ヘリウム容器にヘリウムが充填され、ヘリウム中での通電を初めて行った11月中旬にまた問題が起こった。ヘリウム中でバスターが放電したのである。バスターの高圧側と低圧側の極板間の電位差は1kV以下であり、ヘリウム中での耐電圧は3kV以上と評価していたので問題ないであろうと見ていた。実際には、バスター極板の対地電位は3kVに達するまでになっていた(図15)。電流増幅に使用しているパルストランスの二次側での電位がフローティングになっており固定されていなかったため、トランス一次側の高電位(6kV)にAC結合で引っ張られて二次側の対

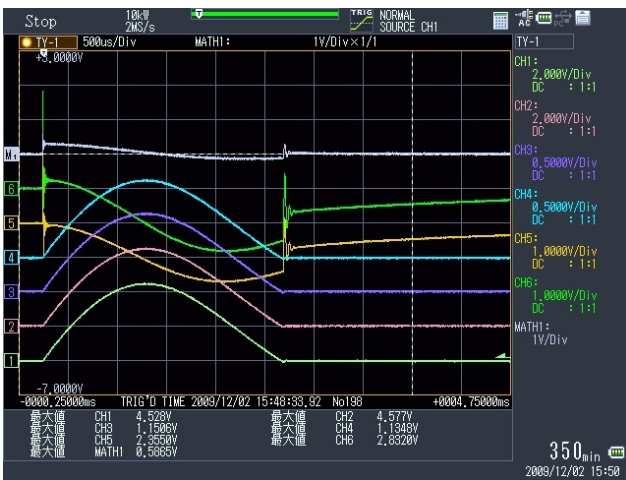
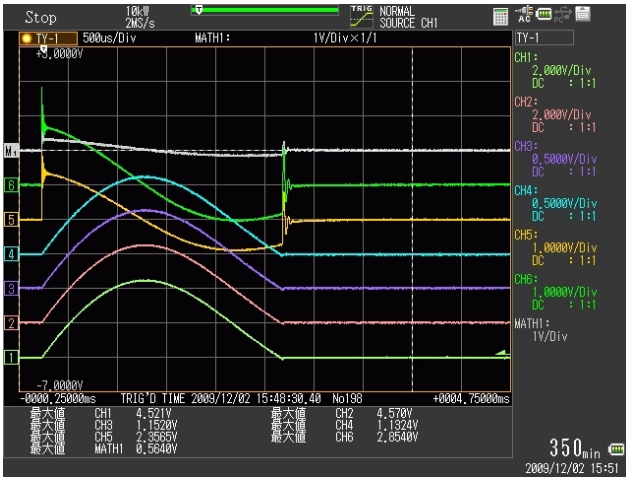


図 15 トランス周辺の電流および電圧(上)と放電時の波形(下)

パルス出力時に 3kV 付近まで電圧が上がった後、急に 0V 付近に電圧が低下している。Ch1：トランス一次側電流(高压側)，Ch2：同一次側電流(低压側)，Ch3：トランス二次側電流(高压側)，Ch4：同二次側電流(低压側)，Ch5：同二次側電圧(高压側)，Ch6：同二次側電圧(低压側)。M1：Ch5 と Ch6 の差分。

地電位も上がってしまったのが原因である。今までは空气中で通電していたため耐電圧は 10kV 以上なのでまったく問題にならなかったが、ヘリウム中で通電して初めて問題が浮き彫りになった。そこで、二次側バスバーを電位固定のため接地することにより、対地電圧を 700V 程度まで抑えることができた(図 16)。現在は放電の兆候は見られずヘリウム中でも電磁ホーンを安定に運転できている。12 月には、ついに 3 台の電磁ホーンを同時に通電した状態でビームを出し、ダンプ直後のミュオンモニターや、前置検出器で収束の効果が確認された。

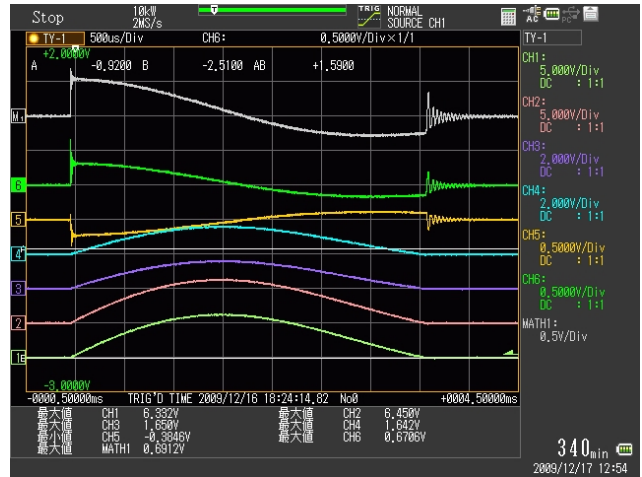


図 16 トランス二次側バスバーを接地後の電流・電圧波形

6. まとめ

T2K 実験の計画が始まってからすでに 10 年たった。世界最大強度のニュートリノビームを作り出すために、T2K 実験グループはもちろん、加速器グループ、超伝導グループ、放射線グループ、KEK の施設部をはじめとする管理局、業者などなどの皆さんが限界まで努力し続け、今、プロジェクトはここまでこぎつけた。けれど、本当に世界最大強度のビームを実現するにはまだまだ課題は山積しており、担当者はこれからも眠れない夜を多く過ごすことだろう。けれども、320 キロアンペアの電流が初めて流れた時のように、節目節目には大きな喜びがあるので、それを目標に一歩々々歩いていけばきっと何とかかなると思う。

参考文献

- [1] S. van der Meer, CERN-61-07 (1961).
- [2] R. B. Palmer, CERN-65-32 (1965) 141.