

# 11. ニュートリノターゲット

高エネルギー加速器研究機構

中 平 武

# 目 次

## ニュートリノターゲット

1 長基線ニュートリノ振動実験 .....	11-1
2 ニュートリノビームの生成方法 .....	11-1
2.1 概要 .....	11-1
2.2 早い取り出しビーム .....	11-2
2.3 ニュートリノ生成標的の制約条件 .....	11-2
3 ニュートリノ生成標的の設計 .....	11-2
3.1 ニュートリノ生成標的の材質 .....	11-2
3.2 冷却方式 .....	11-3
3.3 寿命想定 .....	11-4
3.4 標的の構造 .....	11-4
3.5 接地と絶縁 .....	11-5
3.6 標的の状態監視 .....	11-5
4 ニュートリノ生成標的の現状とまとめ .....	11-6
4.1 ビーム運転での実績 .....	11-6
4.2 1.3MW 対応のアップグレード .....	11-6
4.3 まとめ .....	11-6
参考文献 .....	11-7

# ニュートリノターゲット

## 1. 長基線ニュートリノ振動実験

物質を構成する基本的な粒子の一つであるニュートリノには未解明の謎が残されており、実験的にその性質を解明することが素粒子物理学の最大の課題の一つとなっている。とくに、「弱い相互作用におけるパリティの破れ」という実験事実に基づいて素粒子の「標準模型」ではニュートリノの質量はゼロとされていたにもかかわらず、「ニュートリノ振動」の発見によってゼロでない質量をもつことが証明され、その理解は標準模型を超える新物理の糸口と期待されている。そこでニュートリノ振動現象の全貌を解明するため、加速器により人工的に生成したニュートリノビームを用いてニュートリノ振動を精度よく測定する「長基線ニュートリノ振動実験」が行われている。とくに、ニュートリノとその反粒子である反ニュートリノの間で、もし「ニュートリノ振動」の振る舞いに違いがあれば、宇宙開闢の時に物質と同量生成されたはずの「反物質」が消えてしまった謎の大きなヒントが得られると期待されている。

ニュートリノは、反応の仕方が異なる電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの3種類が存在する。ニュートリノ振動とは、生成された時点で種類が特定されたニュートリノが、一定時間の経過した後別の種類のニュートリノとして観測される現象である。とくに現在進行中の長基線ニュートリノ振動実験では、加速器を用いて生成されたミューニュートリノが電子ニュートリノに変化する確率を高精度で測定することをめざしている。加速器で生成した数百 MeV のニュートリノは、このモードのニュートリノ振動を起こして種類が変化するまでに 100km 以上伝搬する。J-PARC 加速器を用いた T2K 実験 [1] では、ニュートリノ生成点から 295km 離れた大型水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデ [2] で検出する。(Fig.1) 日本列島を横断した先で反応性の極端に小さいニュートリノを観測す

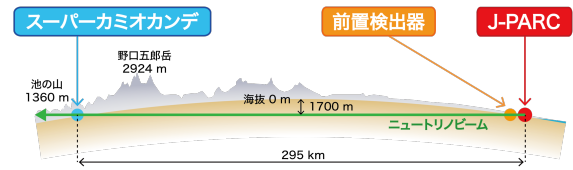


Fig.1 長基線ニュートリノ実験(T2K)の概要

(図:T2K コラボレーション)

るため、いかに大強度のニュートリノビームを生成できるかが実験の成否を左右する。

長基線ニュートリノ実験のためのニュートリノビーム施設は、日本、および欧米で建設されているが[3-5]、本項では J-PARC ニュートリノビームラインでのニュートリノ生成標的[6-9]について述べる。

## 2. ニュートリノビームの生成方法

### 2.1. 概要

J-PARC では、陽子ビームを黒鉛標的にあてて、反応によって生成された荷電パイ中間子を電磁ホーンと呼ばれるパルス電磁石で収束する。(Fig.2) 収束されたパイ中間子が飛行しながら崩壊すると進行方向にミューオンとミューニュートリノが放出される。約 110m 下流のビームダンプでミューオンや他の荷電粒子を止めてしまうと、ニュートリノだけが地中を伝搬してビームとなる。電磁ホーンに流す電流の極性によって収束される粒子の電荷の正負を選べる。それにより、 $\pi^+$ 中間子を収集してニュートリノビームを生成するか、 $\pi^-$ 中間子を収集して反ニュートリノビームを生成するか、2つの実験条件を選択的できる。

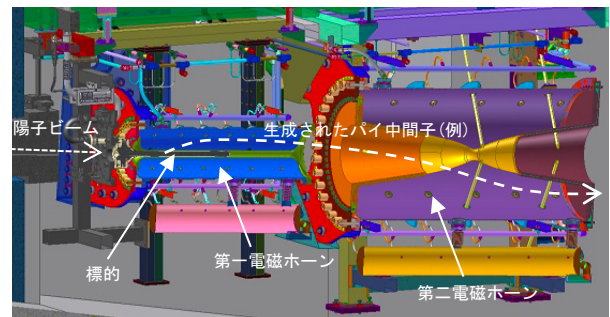


Fig.2 ニュートリノ標的まわりの機器の断面図

## 2.2. 早い取り出しビーム

長基線ニュートリノ振動実験では、加速器で生成したニュートリノを、宇宙線由来の天然のニュートリノから分別するために、時間情報を用いる。J-PARC MR 加速器を周回している陽子ビーム(8バンチ)を1ターンの間にすべて取り出して、約 $5\mu\text{s}$ の短時間の間にニュートリノを生成する。スーパーカミオカンデでは、加速器の陽子ビーム取り出しに同期した短時間の間の事象のみ選別することで、大気ニュートリノの混入を十分小さくできる。つまり長基線ニュートリノ実験のためには、早い取り出しビームを用いることが必須と考えられる。

## 2.3. ニュートリノ生成標的の制約条件

前述のようにニュートリノ生成標的には早い取り出しによる照射に耐え、そこで生成されるパイ中間子を収集する電磁ホーンの内部に收容される必要がある。これらに由来するニュートリノ生成標的に対する主な設計要求は以下のとおりとなる。

- 設計当初には、陽子ビームの条件として、
  - 運動エネルギー $30\text{GeV}$
  - 1スピルあたり陽子数 $=3.3\times 10^{14}$
  - 繰り返し周期 $=2.1$ 秒周期で、ビーム強度 $750\text{kW}$ を想定していた。2020年からは、繰り返し周期を1.16秒周期に短縮してビーム強度 $1.3\text{MW}$ に対応するようにアップグレードを進めている。
- 1年間のビーム運転時間としては $10^7$ 秒を想定する。
- 電磁ホーン(同心円筒導体によるトロイダル電磁石)の内部導体の中に設置できるように固体標的とする。
- パイ中間子の収量を最大にするため、Nuclear Interaction Lengthの約2倍程度の厚さをもつ“Thick Target”とする。
- 高度に放射化することが見込まれる標的や電磁ホーンのメンテナンス回数を減らすため、5年程度の機器寿命を確保する。

以下では、より具体的なニュートリノ生成標的(Fig.3)の設計について述べる。

## 3. ニュートリノ生成標的の設計

### 3.1. ニュートリノ生成標的の材質

ニュートリノ生成標的では、早い取り出しにより一度に大粒子数の陽子が照射されることで生じる瞬間的な温度上昇が問題となる。発熱密度が大きくならないように比較的密度が低く、かつ融点が高い材質として、等方性黒鉛(グラファイト)が選定された。グラファイト標的の基本的なサイズ(長さ、外径)に関しては、陽子ビームのプロファイルおよび電磁ホーンの内部導体の形状や配置などのパラメータと合わせて、パイ中間子の収量を最大化するようにモンテカルロシミュレーションにより最適化された。グラファイト標的の基本的な形状としては、直径 $26\text{mm}$ 、長さ約 $900\text{mm}$ の丸棒で、その中心軸(=陽子ビーム軌道)に合わせて $4.2\text{mm}$ のビーム幅( $\sigma_x, \sigma_y$ )をもつ陽子ビームが照射される。この条件下で標的黒鉛内部での局所発熱量をMARSによるシミュレーションにより評価すると、ビームパルスあたり最大で約 $200[\text{J/g}]$ となり(Fig.4)、断熱条件を仮定する



Fig. 3 J-PARC ニュートリノ生成標的 1号機(手前)と電磁ホーン(奥). [6]

標的は交換装置のリニアガイドにしたがって、電磁ホーンの内部導体の中心に挿入される。中央のチタン合金製直管の中に黒鉛標的が収納されている。

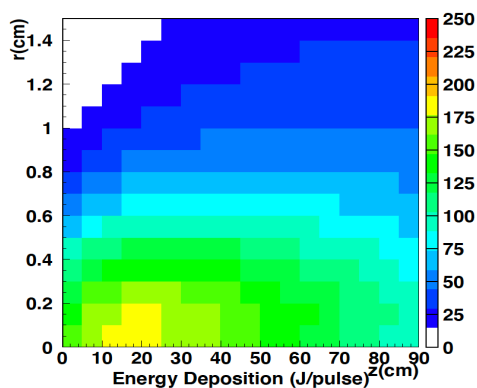


Fig. 4 陽子ビーム ( $\sigma_x = \sigma_y = 4.2\text{mm}$ ,  $3.3 \times 10^{14}$ )  
1 パルスあたりの発熱密度 J/g/pulse [11]

と瞬間温度上昇  $\Delta T$  は約 200K となる。これに起因する熱応力  $\sigma_{eq}$  は、

$$\sigma_{eq} = \frac{2-\nu}{3(1-\nu)} E\alpha\Delta T \quad (3-1)$$

により評価される。ここで、ヤング率  $E$ 、ポアソン比  $\nu$ 、線膨張係数  $\alpha$  はグラファイト材料の物性値であり、瞬間温度上昇  $\Delta T$  もグラファイト材料の密度にほぼ比例する。グラファイトは延性材料ではないが、J-PARC のニュートリノ生成標的の材料選定にあたっては、材料の引張強度に対して繰り返し疲労を考慮するための係数 0.7 を掛けた値を許容応力とし、許容応力の熱衝撃による熱応力 (3-1) との比を安全率として考慮した。国内メーカーの等方性黒鉛製品で、標的を製作するのに十分なサイズが供給されている製品のなかから、この安全率の高い東洋炭素製の IG-430[10] を選定した。この製品の引張強度 37.2MPa に対して、想定される熱応力は 7.2MPa と算出され、安全率としては約 3.5 と評価した。[11]

等方性黒鉛に関しては、永年にわたって原子炉や核融合炉の炉心材料として研究されており[12-14]、放射線損傷の影響による物性値の変化などがよく調べられている。標的の設計においてまず問題となるのは、放射線損傷による寸法変化である。シミュレーション(MARS[15])により、想定使用期間である 5 年間での放射線損傷は 1.25 dpa 程度と評価され、これにより-0.5%の寸法変化が見込まれる。つまり約 1m の長さの標的が 5mm

縮むことが予想されるので、標的の両端を固定するような支持構造は避ける必要がある。また、放射線損傷により黒鉛の熱伝導率は大幅に低下するので、冷却設計の考慮に入れる必要がある。これらの黒鉛の放射線損傷の影響は、照射時の黒鉛の温度に大きく依存することが知られており、照射時温度が 400~800°C の場合に影響が小さいとされている。また、400°C よりも低い温度では黒鉛材料の中に水素やメタンガスが蓄積して脆化するスウェリングなどの影響が懸念される。

### 3.2. 冷却方式

設計時には、MARS によるシミュレーションに基づいて、陽子ビーム強度 750kW の場合の黒鉛標的の総発熱量として 20kW を想定した。従来のニュートリノ生成標的では水冷が主流であったが、J-PARC では黒鉛の温度を放射線損傷の影響が少ない 400°C 以上にすることをねらって、ヘリウムガス冷却を採用した。水冷方式の場合には冷却水の沸点(100°C)以下では放射線損傷の影響が大きいことに加えて、早い取り出しビームの照射による冷却水自身の瞬間温度上昇やそれともなう大きな圧力変化も解決困難な問題であった。ヘリウム配管の設計を容易にするためにヘリウムガスの温度として 200°C 以下 (供給温度を 30°C とした場合の許容温度上昇として 170K 以下) を条件とすると、必要なヘリウムガス質量流量としては 25 g/s = 560 Nm<sup>3</sup>/h となり、陽子ビーム強度 750kW 定常運転時の黒鉛標的の中心部の平均温度の最高値としては約 870°C と想定される。ヘリウムガスによる冷却を採用するためには黒鉛標的をヘリウムタイトな容器に収容することが必要で、その容器には陽子ビームの通過する部分(ビーム窓)が必要となる。J-PARC ニュートリノ標的では、比強度の高いチタン合金のうち、加工性、強度、入手性の観点からチタン JIS60 種(Ti-6Al-4V)を標的容器の材料として選定した。シミュレーション(MARS)による発熱量想定は不定性があるため、実際のヘリウムガス循環系の構築にあたっては、30%の安全マージンを確保すべくヘリウ



ムガス質量流量として  $32 \text{ g/s} = 660 \text{ Nm}^3/\text{h}$  を設計仕様とした。

### 3.3. 寿命想定

ニュートリノ生成標的では、黒鉛部分を  $400^\circ\text{C}$  以上の高温を維持するので、黒鉛の強度低下につながる経年変化の主たる要因としては、冷媒ヘリウムガス中の不純物として含まれる酸素による酸化消耗が考えられる。標的で用いている黒鉛製品(IG-430)について、黒鉛の温度や酸素濃度と酸化消耗の進行速度の関係や、酸化消耗の進行に伴う引張強度の変化等を黒鉛素材のメーカーに委託して測定した。その結果に基づくと、5年間の酸化消耗による引張強度の低下を考慮した場合に熱応力に対する安全率として2以上を確保するためには、ヘリウムガスの不純物として混入する酸素を濃度  $100\text{ppm}$  以下にし、かつ標的の表面付近の温度を  $700^\circ\text{C}$  以下にする必要がある。また黒鉛材料の灰分(不純物)が少ないほど酸化消耗耐性が高いので、灰分の少ないグレードを選定した上で、製作工程(グラファイト部品の接合)で熱処理を実施している。

### 3.4. 標的の構造

標的は電磁ホーンの中に設置されている機器であるが、陽子ビームの照射を直接受けるよりシビアな環境にある機器であり、標的のみが故障した場合に電磁ホーンから分離して交換できるようにするのが合理的である。また、前述のとおり黒鉛標的は放射線損傷で収縮するため両端を固定する設計にはできない。これらのことから、ニュートリノ生成標的の基本構造としては、電磁ホーンの支持フレームにカンチレバー式に支持されて、電磁ホーンの内部導体にビーム軸の上流側から差し込まれる形状が採用された。この構造では、黒鉛標的を冷却するためのヘリウムガスの供給口および排出口もビーム軸の上流側に配置する必要が生じる。それに加えて、標적을格納するチタン合金容器のビーム窓となる部分も冷却する必要がある。そのため、黒鉛標的の周りに2重の配管を配置したり、黒鉛標的を支持する黒鉛ブロックに開けた交差した穴を通して、ヘリウムの流れを立体交差させたり、複雑な構造となっている。(Fig.5)

冷媒のヘリウムガスは、まずチタン容器の上流側のビーム窓部分を冷却する。これにより上流側のビーム窓は陽子ビーム強度  $750\text{kW}$  の場合でも

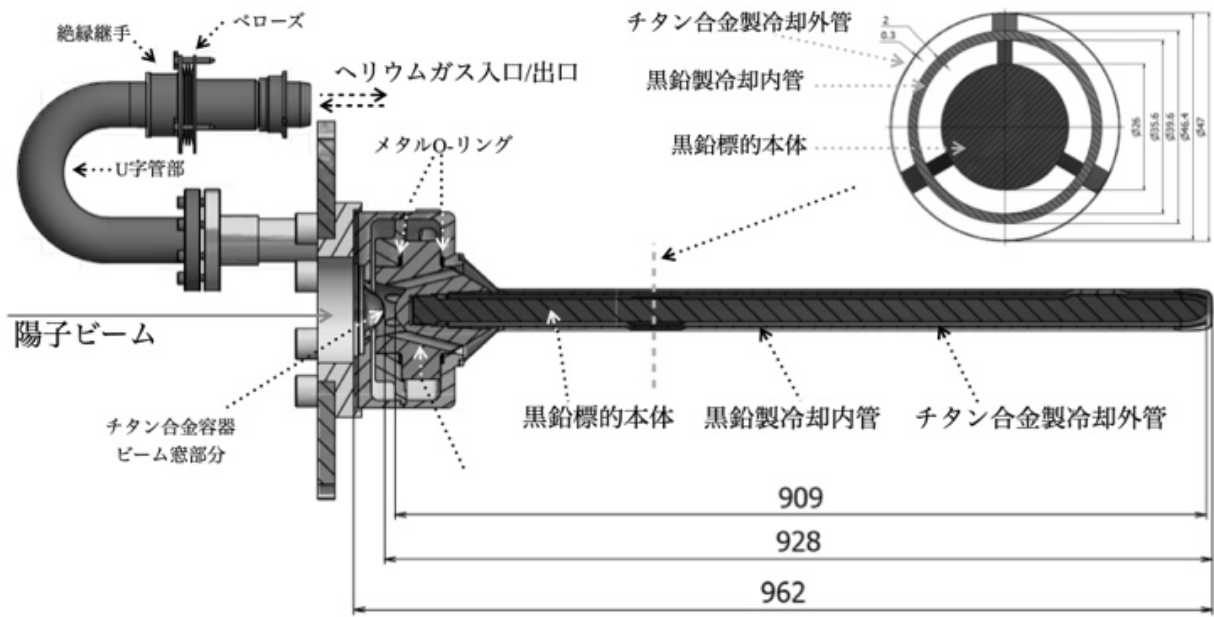


Fig. 5 J-PARC ニュートリノ生成標的の断面図 [6]

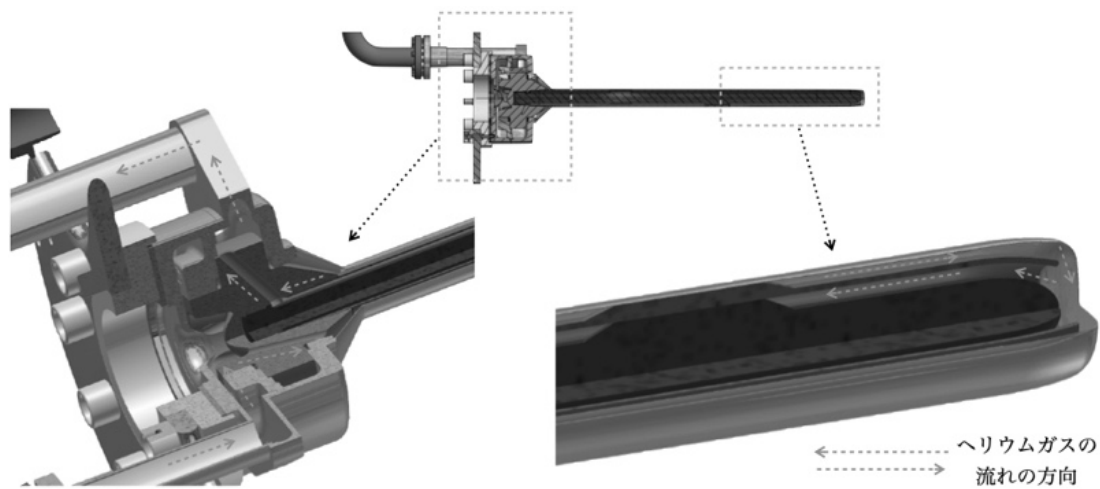


Fig. 6 標的内部でのヘリウムガスの流れ [6]

平衡温度は  $120^{\circ}\text{C}$ 以下に保たれる。そのあと二重配管の隙間(チタン容器と黒鉛管の間)を通して標的下流側に導かれ、チタン容器の下流側のビーム窓を冷却して方向を  $180^{\circ}$  変える。そのあと、標的と黒鉛管(二重配管の内側の管)の間を通過しながら標的本体を冷却したのち排出される。(Fig.6)

標的へ供給されるヘリウムガスの圧力は、約  $0.2\text{MPa}$ (ゲージ圧)である。標的の周りの配管断面積が限られるためヘリウムガスの流速は約  $230\text{m/s}$  に達するが、ヘリウム中の音速の約  $1/4$  程度に相当する。常温でのサンプル試験では、とくにエロージョンなどの影響は見られなかった。

さらに、標的チタン容器につながるヘリウムの供給管や排出管は、U字管(現在はマイタ接合によるコの字管に設計変更)により流路が  $180^{\circ}$  変えられたうえで着脱可能な継手がつけられている。これは、標的をビーム軸方向に動かして電磁ホーンに対して着脱を行う際に、ヘリウム配管の着脱も同時に自動的に行われるようにするためである。これによりヘリウム配管の脱着操作としてはリモートクランプの締結/解放のみとなる。

ヘリウムガスの流れる方向は、電磁ホーンへの熱の伝搬を防ぐように決められている。電磁ホーンの内部導体は高導電性アルミ合金製で、その許容温度は約  $60^{\circ}\text{C}$ 程度である。標的のヘリウム流路を逆にすると、内部導体に近接する標的チタン容器の温度が、標的冷却後の  $200$  度のヘリウムガスにより同程度の温度まで上昇してしまう。

### 3.5. 接地と絶縁

標的が電磁ホーンに設置されると、標的チタン容器と電磁ホーンの内部導体の間は  $3\text{mm}$  程度しかないため、“同心円筒のコンデンサー”とみなせてしまう。電磁ホーンに約  $1\text{kV}$ (想定値)のパルス電圧が印加されると、AC 結合により標的チタン容器も電磁ホーンと同程度の高電圧がかかることになる。そのため、標的チタン容器はセラミック製の絶縁部品を介して固定され、ヘリウムガス配管にもセラミック製の絶縁継手を使用している。ただし、長期間の電磁ホーン運転に伴うチャージアップを防ぐために、高抵抗( $\sim 4\text{M}\Omega$ )を介して接地している。高放射線環境であることを考慮して、無機材料の抵抗器(金属皮膜抵抗)を選択し、なんらかの原因で抵抗器が物理的に損傷しても飛散したりしないようにセラミック製部品の内部で使用している。

### 3.6. 標的の状態監視

前述のとおり、ニュートリノ標的本体は複雑な構造となっていることにくわえて、高放射線環境にあり、高電圧もかかる。そのため、各種センサーなどを仕込むことは容易ではない。現状では標的の近傍で冷媒のヘリウムガスの入口温度と出口温度を測定する熱電対が標的本体付近にある唯一の状態監視機器となっている。それらに加えて、ガスクロマトグラフィー装置によるヘリウム

ガスの不純物監視や、ヘリウムガス中に生成されたトリチウム量の測定を行なっている。

## 4. ニュートリノ生成標的の現状とまとめ

### 4.1. ビーム運転での実績

J-PARC ニュートリノビームラインは 2009 年度に運転を開始し、ニュートリノ生成標的の 1 号機は 2013 年まで最大陽子ビーム強度 240kW で使用され、とくに問題なく累積陽子数  $6.7 \times 10^{20}$ POT の照射を受けた。電磁ホーンの交換に伴って 2014 年から 2021 年まで標的 2 号機が使用され、最大ビーム強度 520kW、累積陽子  $3.2 \times 10^{21}$ POT の照射に耐えた。この間 2015 年には標的からのヘリウム排出管のセラミック製絶縁継手でヘリウムリークが発生したため、リモートメンテナンスで改良された配管に置き換えられた。2023 年からは英国 RAL より設計改良・製作された 3 号機が使用されている。3 号機ではチタン容器の真空引きが可能になっており、これまでよりもヘリウムガスの純度管理が改善されることが期待されている。それに加えて、ヘリウム循環系の熱交換器を圧力損失の小さいものに変更することで流量を増加させ、750kW を超えるビーム強度に対応する。

### 4.2. 1.3MW 対応のアップグレード

J-PARC MR 加速器およびニュートリノビームラインは、T2K 実験や次世代の長基線ニュートリノ振動実験であるハイパーカミオカンデ[16]にむけた出力増強改修をすすめている。[17,18] ハイパーカミオカンデ実験が開始される 2027 年度までに、繰り返しを約 1Hz に短縮して陽子ビーム強度 1.3MW でのニュートリノビーム生成を実現する予定となっている。前述のとおり、ニュートリノ生成標的の基本的な設計をすすめる上で最も支配的な必要条件は、パルスあたりの陽子数で決まる熱衝撃に対する耐性であるが、ビーム出力増強のための高繰り返し化で条件は変わらない。ただし、単位時間あたりの発熱量が増えるため、冷却能力の増強が必要であり、陽子ビーム強度 1.3MW に対して必要なヘリウムガスの質量流量

としては  $60 \text{ g/s} = 1240 \text{ Nm}^3$  となる。すでに音速の約 1/4 に達しているヘリウムガスの最高流速を増やすのは難しいため、ヘリウム供給圧力を約 0.6 MPa (ゲージ圧)に増加されることで流量を確保する方針で、標的チタン容器の設計変更やヘリウム循環系の改修の準備が進められている。

### 4.3. まとめ

長基線ニュートリノ振動実験のための J-PARC ニュートリノビームラインでは、二次ビーム収束用パルス電磁石(電磁ホーン)の中で早い取り出しによる大強度ビームを受ける黒鉛製の厚い標的である。陽子ビームの照射により約 20kW の発熱があるが、黒鉛部分の放射線損傷を低減することをねらい高温で運用するため、ヘリウムガス冷却が採用されている。これまでに最大陽子ビーム強度 520kW で累積陽子数  $3.2 \times 10^{21}$ POT の照射を達成している。さらに、1.3MW の陽子ビームに対応するための標的の冷却能力を増強する改良がすすめられている。



## 参考文献

- [1] Public webpage of the T2K Experiment  
(<https://t2k-experiment.org/ja/>)
- [2] スーパーカミオカンデ 公式ホームページ  
(<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>)
- [3] P. Adamson et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 806, 279 (2016),  
(<https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.08.063>)
- [4] G. Acquistapace, et al., "The CERN neutrino beam to Gran Sasso (NGS)," CERN-98-02,  
(<https://doi.org/10.5170/CERN-1998-002>)
- [5] S. Kopp, Phys.Rept.439:101-159,2007  
(<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.11.00>)  
加速器を用いたニュートリノビーム生成についての包括的なレビューペーパー
- [6] 中平 武 , 松原 綱之,  
「加速器」 Vol. 18, No. 4, 2021 (217-224)  
([https://doi.org/10.50868/pasj.18.4\\_217](https://doi.org/10.50868/pasj.18.4_217)),
- [7] T. Nakadaira, J. Radioanal. Nucl. Chem. 305, 777  
2015, (<https://doi.org/10.1007/s10967-015-4120-7>.)
- [8] C.J. Densham et al., WE6RFP033, Proc. of PAC09,  
Vancouver, Canada, 4-8.
- [9] C.J. Densham et al., THOA01, Proc. of HB2010,  
Morschach, Switzerland, 560-562.
- [10] Property data of special graphite,  
([https://www.toyotanso.co.jp/Products/Special\\_graphite/data.html](https://www.toyotanso.co.jp/Products/Special_graphite/data.html))
- [11] 上田 俊輔, 「J-PARC ニュートリノ振動実験におけるニュートリノ生成標的の研究・開発」, 修士論文 京都大学 (2004/01/29)  
J-PARC ニュートリノ標的の材料選定について詳しい記述がある。
- [12] JAERI-M 89-006 「高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針」, 日本原子力研究所 高温工学試験研究炉設計室 (1989/02)  
(<https://doi.org/10.11484/jaeri-m-89-006>)
- [13] JAERI-M 91-153 「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針における設計用データの解説」  
石原 正博, 伊与久 達夫, 豊田 純二, 佐藤 貞夫, 塩沢 周策 (1991年10月)  
(<https://doi.org/10.11484/jaeri-m-91-153>)
- [14] JAERI-M 91-154 「高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針における設計用データの解説」, 石原 正博, 伊与久 達夫, 豊田 純二, 佐藤 貞夫, 塩沢 周策 (1991年10月)  
(<https://doi.org/10.11484/jaeri-m-91-154>)
- [15] N. Mokhov, C. James, "The MARS Code System User's Guide Version 15(2016)",  
FNAL-FN-1058-APC  
(<https://doi.org/10.2172/1462233>)
- [16] ハイパーカミオカンデホームページ  
(<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/>)
- [17] S. Igarashi, et al., "Accelerator technical design report for 1.3 MW operation at J-PARC Main Ring",  
KEK Report 2021-2  
(<https://lib-extopc.kek.jp/preprints/PDF/2021/2124/2124002.pdf>)
- [18] K. Abe, et al, "J-PARC Neutrino Beamline Upgrade Technical Design Report",  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.05141>