

平成 22 年 9 月 2 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740162
 研究課題名（和文） ニュートリノのCP対称性の破れの探索のための大強度ニュートリノ生成標的の開発
 研究課題名（英文） Development of the neutrino production target for the study of CP violation in neutrino.
 研究代表者
 中平 武 (NAKADAIRA TAKESHI)
 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
 研究者番号：30378575

研究成果の概要：大強度陽子加速器(J-PARC)を用いたニュートリノ振動実験では、ビーム強度を現状の750kWから2~4MW程度に増強することで、CP対称性の破れを探索できると期待される。そのために、より大強度の陽子ビームの照射に耐えうる黒鉛粉末を材質としたニュートリノ生成標的の試作を行った。また、陽子ビームと標的の反応によって生じるニュートリノ生成量の理解のため、CERN NA61 実験において陽子-炭素反応で二次粒子生成のデータ収集を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	0	1,500,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	510,000	3,710,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子物理学

1. 研究開始当初の背景

T2K 実験では、茨城県東海村にある大強度陽子加速器 J-PARC を用いてニュートリノビームを生成し、岐阜県飛騨市にあるスーパーカミオカンデまでの約 300km を飛行する間の $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動を探索する。J-PARC では、陽子ビームをグラファイト標的にあて、生成された荷電 π 中間子を磁場によってスーパーカミオカンデ方向に集束する。集束された π 中間子の崩壊により ν_{μ} ビームが生成される。

もし、 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動が発見されれば、ビーム強度を上げて実験の精度を上げ、ニュートリノと反ニュートリノでの $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動の違いを見ることにより、ニュートリノでの CP 対称性の破れを探索することができると期待されている。

ビーム強度を上げるためには、陽子ビームの直接照射をうける標的の熱衝撃に対する耐性が問題となる。現在の T2K 実験用の黒鉛製標的は、材質強度の熱衝撃の大きさに対

する比で評価した安全率は 3.5 である。ビームを増強すると熱衝撃は比例して増えると予想されるため、2-4MW の陽子ビームに対しては十分な安全率を確保できない。そのため、新しいニュートリノ生成標的の開発が必要である。

また、ニュートリノ振動を精密に測定するためには、J-PARC で生成されるニュートリノのエネルギー分布・方向分布を精度よく決め、スーパーカミオカンデまでのニュートリノビームの外挿を精度よく行う必要がある。そのためには、陽子と標的の反応によって生じる π 中間子の運動量・角度分布の測定が必要である。

2. 研究の目的

2-4MW 級の大強度ニュートリノ実験のための標的の材質として、黒鉛粉体を用いることができるかを明らかにする。

現在の黒鉛固体を材質に用いた標的で熱衝撃が問題となるのは、熱膨張がビームの発熱の速度に間に合わず、応力が発生してしまうことが原因である。そこで、材料を粉体に用いることで、ビームによる発熱の時間内に熱膨張が伝播でき、応力の発生を抑えられると考えられる。J-PARC の陽子ビームの 1 バンチの時間は約 60nsec であり固体の黒鉛の音速は約 2km/sec であることから、黒鉛を粒径 100 μ m 程度の粉末にすれば、熱応力の発生が抑えられると考えられる。一方、粉体は取り扱いが容易でないうえに、ビームによる発熱を冷却する効率が落ちるので、これらの問題を克服できるかを明らかにする。

また、標的での陽子と黒鉛の反応を測定するため、欧州原子核研究機構(CERN)の NA61 実験で、陽子と黒鉛の反応によって生じる二次粒子の運動量・角度分布を測定する。

3. 研究の方法

ビーム強度の増強以外は現行の T2K 実験と実験同じ条件を想定し、標的の概念設計を行う。概念設計にあたっては、「黒鉛粉体をどのようにビームラインに設置するか」と、「陽子ビームの照射による黒鉛粉体標的での発熱をどのように除熱するか」がポイントとなる。黒鉛の冷却方法自体は、現行の T2K 実験用標的の開発時の検討結果を踏まえ、黒鉛の放射線損傷を最小にすることが可能なヘリウムガスによる冷却を想定する。

つぎに、得られた設計に基づいて、黒鉛粉末標的を試作する。この際、技術的に製作が難しいとおもわれる部分が製作可能である

ことを確認する。また、試作にあたっては、模擬熱負荷を用いた冷却試験を行えるような設計にし、実際にヘリウムガスを用いた冷却試験を行って冷却効率を評価する。

4. 研究成果

黒鉛粉末のビームラインへの設置方法について検討した。図 1 のように T2K 実験の黒鉛標的では、発熱が中心部に集中している外縁部では発熱量が比較的小さいことに着目し、黒鉛粉末を黒鉛製容器の内部に封じきる方針で黒鉛粉末標的を設計した。つまり、固体の黒鉛標的の内部のみを黒鉛粉体で置き換える設計となった。これにより、現行の T2K 実験標的の外形は変更せずに置き換えることが可能になるので、冷却方式に関しても、現行とおなじく標的表面を冷却することを想定した。ただし、標的内部での熱伝導が大幅に低下することと、さらに黒鉛粉体の熱伝導率の評価が困難であることから、この点に関しては冷却試験を行って可否を判断することにした。

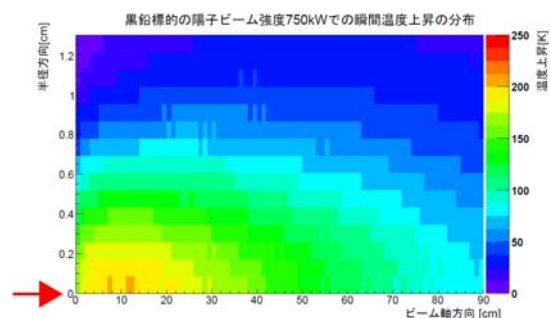


図 1: シミュレーションによって得られた陽子ビームとの一回の衝突で発生する黒鉛標的内でのビームによる発熱の分布。外縁部では、中心部に比べると半分以下である。赤い矢印は陽子ビーム入射方向を示す。

黒鉛製の容器は、できる限り薄肉のパイプとし、両端に封じ切りための蓋を、ネジ構造により取り付ける設計とした。

黒鉛製粉末標的を製作する上では、この黒鉛製容器が問題なく製作可能であるかが重要である。実際に黒鉛製容器の試作をおこない、設計どおり製作可能であることを確認した。(図 2)

試作した容器の一端からは、ビームによる発熱を模擬する熱負荷となるヒーターを埋め込めるような設計とし、冷却試験に用いるようにした。また、黒鉛粉末自身も容易に入手することができた。

現設計では蓋の厚みは 7mm であるが、図

1にあるようにビームの上流側は端の中心具は、温度上昇が比較的高く、最大値の 3/4 程度に達する。そのため、上流部の蓋の中心部の厚みをさらに薄くするような設計を進めることが今後の課題である。



図 2: 試作した黒鉛製容器(長さ 900mm, 外径 38.2mm, 肉厚 3.55mm)

試作した黒鉛粉末標的にヘリウムガスを冷媒として冷却する循環系を設計した。また、実際に標的を格納してヘリウムガスを流すためのヘリウム容器を設計・製作し、図 3 のようなヘリウム冷却試験セットアップを製作した。



図 3: 黒鉛粉末標的の試験用ヘリウム容器
容器内部に取り付けた配管内部に試作した標的を設置する。

残念ながら、使用する予定であった既存のヘリウム循環装置が老朽化のために使用不可能になってしまったため、実際の冷却試験を研究期間内に実施することはできなかった。したがって、ヘリウムガス用のコンプレッサを手配し、冷却試験でデータを収集することが、今後の課題となっている。

本研究をすすめるにあたって、現行の T2K 実験の標的の製作を共同で行っている英国ラザフォード・アップルトン研究所のエンジニアと情報交換を行いながらすすめた。彼らによって、ニュートリノファクトリーなどの

将来計画を想定した、タングステンの粉体をジェット状に吹き出して、陽子ビームの標的とするというアイデアが提案されるようになった。(C. J. Densham (RAL), Aug. 6-11th Nufact07, Okayama) 粉体を陽子ビームのターゲットとするアイデアは他でも検討されるようになってきたので、本研究を進めて粉体を用いたターゲットを実用化することで、T2K 実験のみならず、大強度陽子ビームを用いる他の将来計画においても役立つと期待される。

欧州原子核研究機構(CERN)での NA61 で、陽子ビームと黒鉛との反応によって生成される二次粒子の運動量・角度分布のデータを収集することができた。陽子と炭素原子の反応を測定するための 2cm 厚の標的と、生成された二次粒子の黒鉛内での減衰等の効果も含めて測定するための 90cm 厚の二種類の NA61 実験用の黒鉛標的を設計・製作・設置した。2007 年に 2cm, 90cm の標的に対してそれぞれ 67 万事象、23 万事象の陽子-炭素衝突のデータを収集することができた。現在、データを解析中である。

2010 年末までに、2cm の標的から生成された π 中間子の運動量分布、角度分布の結果が出ると期待されている。その後、90cm 標的での結果との比較から、標的内部での π 中間子の損失を見積もり、 π 中間子の生成量を最大にするために、標的の形状を最適化することが今後の課題と思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① T. Nakadaira, et. al.,
"T2K target",
AIP Conf. Proc. 981. 290-292 (2008),
査読無

[学会発表] (計 4 件)

- ① 中平武, 他 T2K 実験グループ
「J-PARC ニュートリノ標的のトピックス」,
第 10 回核破砕中性子源用材料技術の研究会,
2009/12/14,15,
いばらき量子ビーム研究センター
- ② 中平武, 他 J-PARC ニュートリノ実験施設建設グループ,
「J-PARC ニュートリノ生成標的の開発の現状」,
日本物理学会 秋季大会,

2007/9/21,
北海道大学

③T. Nakadaira (T2K collaboration)
"T2K Target",
9th International Workshop on Neutrino
Factories and Superbeams,
August 6-11, 2007,
Okayama

[その他]
ホームページ等
<http://jnusrv01.kek.jp/public/t2k/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中平 武 (NAKADAIRA TAKESHI)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器
研究機構・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号：30378575

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし