

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23684016

研究課題名(和文)ニュートリノにおけるCP対称性の破れの探索のための二次粒子強度モニターの開発

研究課題名(英文)The development of the secondary particle monitor for the CP violation search in neutrinos

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・准教授

研究者番号：30378575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：大強度陽子加速器J-PARCを用いたニュートリノ振動実験において、ニュートリノの粒子・反粒子の対称性(CP対称性)の破れの探索の感度を向上するため、生成するニュートリノビームと反ニュートリノビームの性質の違いを精度良く実測することをめざし、そのための二次粒子モニターの開発を行った。非常に高い放射線環境下で、ニュートリノの親粒子となる二次粒子のフラックスを測定するための放射線耐性型の変流器(CT)を設計・試作し、試作機がJ-PARCのニュートリノビームラインで予想される電流密度を測定するために必要な基本的な性能をもつことを確かめた。

研究成果の概要(英文)：The intensity monitor for the secondary particles is developed to enhance the sensitivity of the search for asymmetry between matter and anti-matter (CP violation) in the neutrino oscillation experiment by measuring the difference between the neutrino-beam and the anti-neutrino beam that are produced using high intensity proton accelerator, J-PARC. Because the secondary particle monitor is required to measure the flux of secondary particles that are the parent-particles of neutrinos under the high radiation environment, the radiation-hardness current transformer (CT) is developed. The prototype of the CT is produced, and it is confirmed that the prototype CT has the basic performance to measure the expected current produced by the secondary particles at the J-PARC neutrino beam-line.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：ニュートリノビーム 大強度陽子加速器

### 1. 研究開始当初の背景

東海-神岡長基線ニュートリノ実験(T2K)は、大強度陽子加速器 J-PARC で生成したニュートリノビームを 295km 離れたスーパーカミオカンデで検出して、この間に起きたニュートリノ振動現象を測定する。T2K 実験の第一目標は、唯一観測されていなかったミュー型ニュートリノから電子型ニュートリノへの振動を探索して、3 世代のニュートリノの間の混合を実験的に確定することである。さらに将来ビーム強度を増強して、反ニュートリノビームでも同じ測定を行い、ニュートリノの粒子-反粒子の対称性(CP 対称性)の破れの探索を目指している。CP 対称性の破れの探索の感度を向上するには、ニュートリノビームと反ニュートリノビームの性質の違いを精度良く理解する必要がある。

### 2. 研究の目的

(1) T2K 実験では、陽子ビームと炭素標的との衝突反応によって生じる二次粒子(主に荷電 $\pi$ 中間子)を、三台の電磁ホーンと呼ばれるトロイダル電磁石によって神岡方向に収束する。収束された二次粒子が飛行しながら崩壊しニュートリノビームが生成される。このとき、電磁ホーンの磁場の極性によって、収束する二次粒子の電荷を選択することができ、 $\pi^+$ 中間子を収束した場合にニュートリノビームが生成され、 $\pi^-$ 中間子を収束した場合に反ニュートリノビームが生成される。実際のビームラインでのニュートリノビームと反ニュートリノビームの性質の違いを実測することをめざし、ニュートリノの親粒子となる二次粒子の強度を測定する二次粒子強度モニタを開発する。

(2) 二次粒子の強度の測定は、変流器(Current Transformer, CT)を用いることで可能になると考えられる。ビーム軸から 15cm ほど離れた位置では、電磁ホーンの極性が正の場合には、 $\pi^+$ 中間子と標的で散乱された陽子が観測される。逆に、電磁ホーンの極性が負の場合には $\pi^-$ 中間子が観測される。また電磁ホーンを励磁しない場合には、標的で散乱された陽子のみが観測される。これら 3 条件での測定を組み合わせることで、ニュートリノの親粒子のフラックスを決定できると期待される。陽子ビーム強度 750kW、電磁ホーン電流 320kA の場合に予想される二次粒子のつくる電流密度は約 20A/m<sup>2</sup>で、一次陽子ビームの強度測定で用いられているのと同程度の性能の CT で測定可能と考えられる。

### 3. 研究の方法

二次粒子強度モニタは、大強度陽子ビームと炭素標的との衝突反応で生成される粒子に直接曝され、非常に強い放射線耐性が求められる。そのため、(1)無機材料のみを使用し、(2)放射線によって劣化・破損した場合にも周囲を汚染しないような構造をもち、さらに(3)放射線による発熱への対策を施した CT

を新規に設計・試作する。試作した耐放射線型 CT を試験して性能を評価し、J-PARC のニュートリノビームラインでの実機構造の二次粒子モニタの設計に必要な知見を得る。

### 4. 研究成果

(1) 2009 年より稼働している J-PARC ニュートリノビームラインの一次陽子ビーム強度モニタをベースに、二次粒子強度モニタ用の耐放射線型 CT の設計を行った。磁性体(コア)としては、実績のある日立金属製ファインメットを使用することとした。一般の CT ではドーナツ形状のコアの内側のみの電流を測定し、信号線の巻き数が N の場合の変流比は 1/N となる。一方、二次粒子モニタではコアの内側だけではなく、コア自体にも荷電粒子(電流)が通過する。その場合の変流比を評価し、コアの内径/外径が 1 に近い場合、コアの外径よりも内側を通過した電流に対する変流比が  $1/N \times (\text{コアの内径} / \text{コアの外径})$  と近似できることを計算により評価し(電流密度が一樣と仮定した場合)、出力信号の大きさに対する影響が小さいことを確認した。

(2) 耐放射線型 CT ではコアに巻く信号線の周囲との絶縁方法(被覆の材質)と、信号線の固定方法が懸案であった。一次陽子ビーム強度モニタでは、ポリイミド被覆の信号線を、ポリイミド製粘着テープでコアに固定する方法が用いられているが、これを無機の材質で置き換える必要がある。当初、信号線として高放射線環境下での使用実績のある MI (Mineral Insulation) ケーブルを使用する方針であった。しかし、MI ケーブルは外皮として金属を用いており、そのままコアに巻くと外皮が信号線とトポロジカルに同じ経路を通るため、信号線とおなじ誘導起電力が外皮にも発生する。これを避けるために、外皮を一巻き毎に電氣的に絶縁をとる必要があるが、構造上非常に困難であることがわかった。この問題を解決するため、部品を機械的に固定して、コアに巻き付く形で自立する部品で信号線を構成することを考案した。(図 1)

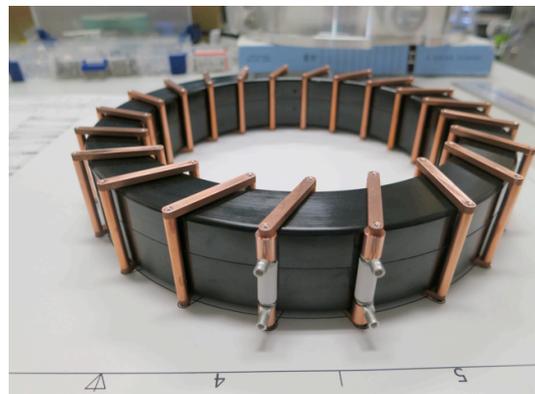


図 1 考案した自立する信号線(黒い部品がコアで、その周囲に巻き付く銅製部品)

また、コアの信号線の経路でない箇所をより肉厚なセラミック製部品でサポートすることにより、信号線と筐体とのギャップを維持して信号線の絶縁をとる構造とした。このセラミック製サポートは、アルミ製の筐体とコアとの熱接触をとっており、筐体に水冷機構を持たせる事で、コア自体の冷却が出来るようにした。(図2)

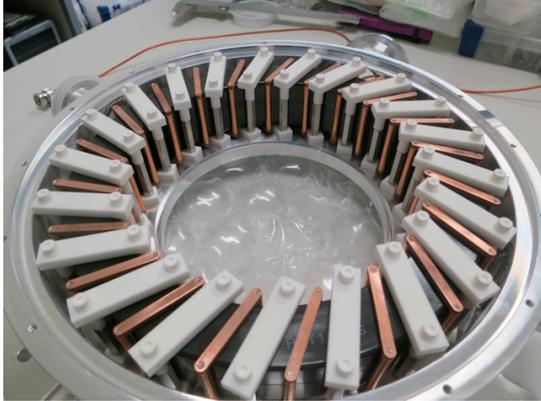


図 2 セラミック部品によるコアの固定と、信号線の筐体からの絶縁方法

コアの内側の筐体は、二次粒子に対するミラーカレントが流れないようにセラミック製内筒で構成し、外側のアルミ筐体と一体で密閉構造にした。アルミ筐体には NW 規格のフランジをつけ、汎用のフィードスルーを介して CT の信号線、校正用の入力信号線や温度センサの導入ができるようにした。(図3)



図 3 セラミック製内筒と、アルミ製筐体 (コアを固定するセラミックと密着する)

これらにより、無機材料のみを使用し、放射線によって劣化・破損した場合にも周囲を汚染しないように密閉された構造をもち、さらに放射線による発熱に対する冷却機構をもった高放射線耐性型の CT の設計が得られた。

(2) 上記の設計に基づいて二次粒子モニタ用 CT の試作機の製造・組み立てを行った。用いたコアは、外径 200mm, 内径 160mm である。製造に当たっては、筐体にアルミ製の NW フランジを溶接で取り付ける部分の空間的余裕がない点が指摘されたが、組み立てにあつ

ては大きな問題はなく、本研究で得られた設計が適切であることがわかった。(図4)



図 4 二次粒子強度モニタ用 CT 試作機

また、二次粒子モニタを支持する架台や、二次粒子モニタにワイヤーを通して模擬入力信号を入力して試験するテストベンチを構築した。

(3) 試作した二次粒子モニタ用 CT に対し、ワイヤーを通してテストパルスを入力し、基本的な性能評価を行った。陽子ビーム強度 750kW、電磁ホーン電流 320kA の場合にこの試作機に用いたサイズのコアに予想される二次粒子のつくる電流は約 500mA であるが、それよりも小さい約 10mA の入力信号に対しても 50Ω 読み出しで約 25mV の出力信号が十分な S/N で得られており、CT としての基本的な動作が確認された。(図5)

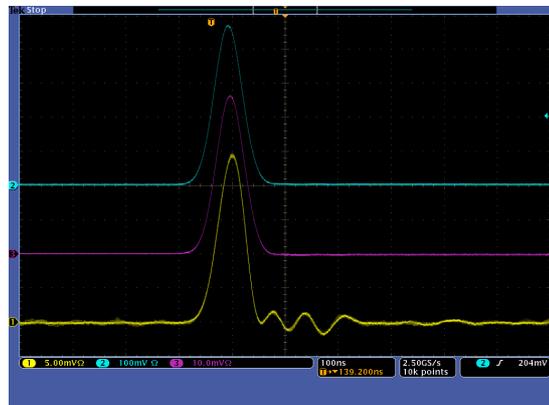


図 5 試験入力電流(水色:50Ω 終端抵抗での電圧、紫色:校正用 CT(5mV/mA)による波形)に対する二次粒子モニタ用 CT の出力波形(黄色:50Ω 終端抵抗での電圧値)

また、正弦波を用いた出力信号の大きさの周波数特性も測定した。J-PARC-MR 加速器のから早い取り出しで取り出される陽子ビームのバンチ幅は約 60ns であるが、それに対応する約 8MHz までの周波数特性は安定しており、想定されるパルス入力信号に対しても実用に適していることが確かめられた。(図6)

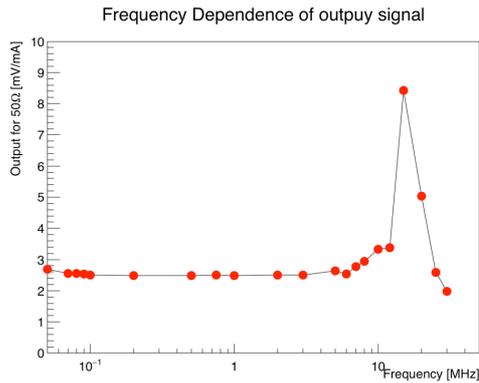


図 6 二次粒子モニタ用 CT の出力信号強度の周波数特性(赤点が実測値)

(4)本研究で製作した二次粒子モニタ試作機では、温度センサを付加することができ、また、水冷機構も実装されているので、CTとしての温度特性の評価や、冷却性能の評価が可能であるので、さらなる性能評価を行っていく。また、J-PARC ニュートリノビームラインのビームダンプ下流に置いて、三次粒子のミュオン粒子を測定することで、一様な荷電粒子の照射に対する性能評価も行うことができる。米国の研究者との意見交換の際に、大強度の二次粒子がコアに照射されてコアの内部で電磁シャワーが生成された場合には、コアの磁性体としての特性が変わるのではないかと指摘を受けた。この点も、本研究で製作した試作機を用いたビームテストを行う事により、検証を行っていくことが可能と考えられる。T2K 実験は、2013 年までにミュー型ニュートリノから電子型ニュートリノへ転換するニュートリノ振動を世界ではじめて捉えることに成功し、さらに 2014 年からは反ニュートリノビームを用いたニュートリノ振動の測定を開始し、本研究が目指す CP 対称性の破れの探索が現実のものとなってきた。本研究の次の段階としては、二次粒子モニタの実用機で必要となる、放射線環境下でのリモートハンドリングやキャスクなどの周辺機構も含めた開発が考えられる。

#### 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)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Takeshi Nakadaira, “CT for secondary particle monitoring”, US/Japan Collaboration Beam Monitor Meeting, 2015 年 3 月 25 日～2015 年 3 月 27 日, Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia IL (USA)
- ② 中平 武, 「加速器ニュートリノ実験での CP 対称性の破れの探索」、RCNP 研究会 CP violation in elementary particles and composite systems, 2014 年 11 月 10

日～2014 年 11 月 11 日、大阪大学 核物理センター(大阪府・茨木市)

- ③ 中平 武, 「大強度陽子加速器を用いたニュートリノビームのための二次粒子モニタの開発研究」、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27 日～2014 年 3 月 30 日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

中平 武 (NAKADAIRA, Takeshi)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号： 30378575