

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 22 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540311

研究課題名（和文） 時間反転対称性の破れの探索実験のための高速電荷測定機器の研究

研究課題名（英文） Research of a charge sensitive device for the search of the time reversal symmetry violation using kaon decay

研究代表者

五十嵐 洋一 (IGARASHI YOUICHI)

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・研究機関講師

研究者番号：50311121

研究成果の概要（和文）：大強度陽子加速器施設 J-PARC において時間反転対称性の破れの測定実験 J-PARC E06 TREK 実験が企画されている。この実験で用いられる検出器からの信号を高速にデジタルデータに変換するために電荷、時間を同時測定する手法の研究および実験の測定器システムで使用可能な測定モジュールの開発を行った。本研究により TREK 実験ではフラッシュ ADC (FADC) による手法が適切であることが分かり、TREK 実験での要求を満たす時間測定精度、電荷測定精度を持った FADC モジュールを開発することが出来た。

研究成果の概要（英文）：TREK experiment is an experiment of the search for the time reversal invariance using kaon decay, planned at Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). We researched the high speed signal to digital conversion methods and the reading the charge information and the timing information. And we developed the practical read-out module to use TREK experiment. In this study, we understood that a method using the flash ADC is effective. And we developed a flash ADC module which has the sufficient the charge resolution and the time resolution.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：高エネルギー物理学実験、データ収集

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：粒子測定技術・データ収集システム

1. 研究開始当初の背景

時間反転対称性破れの探索を行うことは CPT 対称性の元に CP の破れの探索を意味している。この時間反転対称性の測定を行うことで CP の破れに対して知見を得ることが出来る。標準理論の枠内では時間反転の破れは非常に小さく今までの測定では観測で

きていない。しかし一方では宇宙の物質/反物質の存在比の起源、いくつかの未検証の理論などから標準理論を超えた CP の破れが示唆されており時間反転対称性の精密測定を行うことは標準理論を超えた新たな物理が見えそうな領域に感度をもつ良いプローブとなっている。

J-PARC で企画されている E06 TREK 実験ではこの時間反転対称性を測定するために K 中間子が π^0 , μ , ν の 3 体に崩壊 ($K_{\mu 3}$ 崩壊) するときのミュオン偏極の崩壊平面に対する垂直成分 (P_T) の測定を行う。この P_T は時間反転に対して反転する物理量 (T-odd) でありこの P_T を測定することが、直接時間反転対称性を測定することになる。また、 $K_{\mu 3}$ 崩壊は偏極測定をゆがめる終状態相互作用が非常に小さいため精密測定が可能となる。

E06 TREK 実験では P_T の上限を 10^{-4} の精度で測定することを目的としている。この目的を達成するポイントは系統誤差の削減と高統計である。系統誤差を削減するために偏極測定器の改良と磁場中でのミュオンスピンの回転を利用した系統誤差の削減法の研究が行われている。そして高統計を得るため J-PARC メインリングの大強度ビームとそのレートに耐えるための検出器の改良、そして本研究が一部を占める高速なリードアウトを用いる予定である。

2. 研究の目的

E06 TREK 実験では事象発生率 (トリガーレート) が 10 kHz オーダーであることが見積もられている。このトリガーレートの状況では、ほとんどのカウンター類、チェンバー類の電荷を高速に測定する機器が民生品に存在しない。そこで本研究では TREK 実験実現のためにトリガーレート 10 kHz オーダーの状況で使用可能かつ電荷の測定 1 nsec オーダーでの時間測定を同時に行うことのできるアナログデジタル変換の手法の研究を行い TREK 実験に使用できる機器の開発を行う。

TREK 実験の検出器群の内 CsI (T1) 光子検出器、陽電子飛跡追跡型ミュオン偏極測定器で使用されるドリフトチューブ、ワイヤーチェンバーなどの検出器などの信号を読み出すことを目的として研究を行う。目的は TREK 実験に使用することであるが開発は出来るだけ汎用を使用できることを念頭において進め、他の実験でも使用できるように研究を進める。

3. 研究の方法

(1) 電荷測定の手法の検討

電荷測定の方法として 2 通りの方法の検討を行った。ひとつは QTC (電荷時間変換) IC を用いた方法、もうひとつはフラッシュ ADC による波形取り込みを行い取り込んだ波形データから電荷と時間を算出する方法である。

はじめにこの 2 つの方法について検討、評価を行った。検討の結果、使用することを考えていた東京大学宇宙線研究所で開発されてスーパーカミオカンデで使用されている QTC ASIC は広いダイナミックレンジを確保す

るため 3 チャンネルを束ねて使用するようになっていた。そのため TREK 実験で使用するにはコスト的にふさわしくないことが判明した。他方のフラッシュ ADC を用いる場合は時間測定精度に研究が必要なものの汎用性が高く QTC と比較すればコスト的にメリットがあることが判明したため、フラッシュ ADC を用いる方法を採用して試作に進んだ。

(2) 試験基板の開発

読み出す信号の幅や部品の流通性、保守期間、コストなどから使用するフラッシュ ADC にはアナログデバイス社の 10 bit, 最大サンプリング周波数 105 MHz の ADC AD9216 を選択した。制御用の FPGA には動作速度、機能等の点から Xilinx 社の Vertex5 あるいは Spartan6 を選択した。コストの点から Spartan6 を用いたかったが、市場に流通していなかったため、試作機では Vertex5 を使用した。試作機の形状は 6U VMEbus カードとしたが、イベントの識別情報を受け取るため VME-J0 に識別情報を受け取るための信号線を拡張したものとした。データ転送は VMEbus を使用するとバスの転送速度がデータ収集の速度のボトルネックとなるため FPGA 上に実装されたネットワークエンジンである SiTCP を使用し 100Mbps のネットワークでデータを転送することとした。

図 1 に試作基板の機能ダイアグラムを示す。

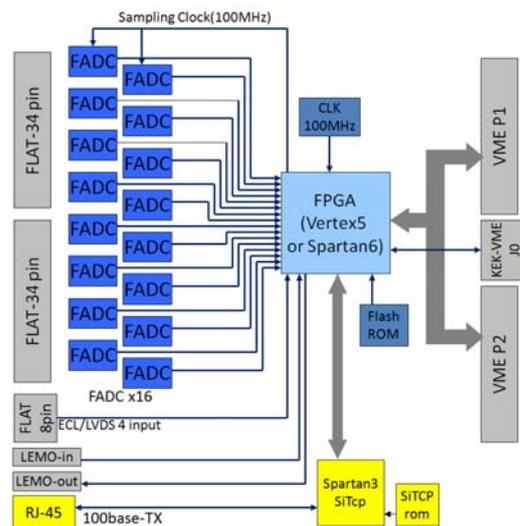


図 1. フラッシュ ADC モジュール試作機能ダイアグラム

開発された試作機を用いて制御ファームウェアの開発を行い、性能の評価を行った。制御ファームウェアは機能として以下のようなものを持っている。

- フラッシュ ADC と同期してデータを読み込む。
- データを FIFO に保持しイベントを同定するトリガ信号を待つ。

- トリガ信号により FIFO のデータをイベントバッファに転送を行う。
- イベントバッファ上のデータをネットワークを用いてデータ転送を行う。
- データにはイベント識別用の信号線から読み込んだイベント識別番号をつける。

図 2 にファームウェアの機能ダイアグラムを示す。

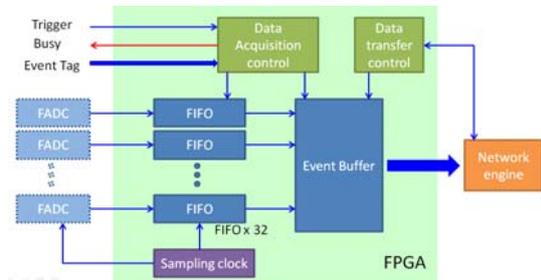


図 2. ファームウェア機能ダイアグラム。イベント識別情報は Event Tag 信号線から入力される。常にフロントエンド FIFO に ADC 出力を入力、Trigger が入力されると Busy を出して FIFO を止め Event Buffer にデータの転送を行う。

開発された試験機及びファームウェアを用いて試験機の性能試験、問題の洗い出しを行った。この性能試験により、ややデータにノイズが多いものの実験の要請を満たす電荷測定精度と時間測定精度を持つことが分かった。また、制御上 LEMO 出力がもう一つあったほうが望ましいことが分かった。

(3) 試験基板の改良、実用機器の開発

試作機の試験により分かった改良点及びコスト削減のために以下のような点を改良し実用機の開発を行った。

- ノイズ削減のために信号の入力部をシングルエンド入力から差動入力に変更
- 外部制御をし易くするために LEMO による制御信号の入出力を 2 入力 2 出力とした。
- コスト削減のために FPGA を Vertex5 から Spartan6 に変更を行った。
- コスト削減のためにネットワークエンジンの FPGA を主 FPGA に取り込み 1 つの FPGA で処理を行うようにした。

これらの改良を行ったフラッシュ ADC モジュール実用機の開発を行った。

実用機は 2 台生産を行った。基本性能試験を行った後、2 台の実用機を用いてシステム試験を行った。システム試験は複数の機器を用い以下のような点に注目して行った。

- 複数の機器が協調して動けるか？

- イベントの識別は出来るか？
- 複数の機器で同期して同じ時間が同じように測定出来るか？

図 3 にシステム試験のセットアップを示した。

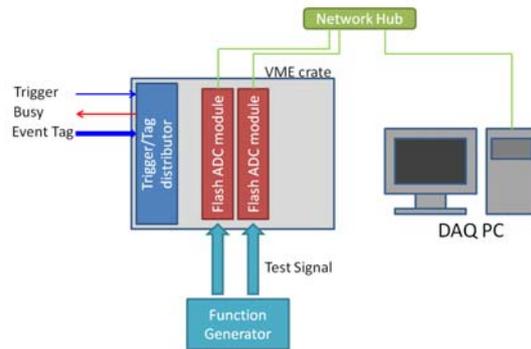


図 3. システム試験セットアップ。外部からテスト信号とトリガ、イベント識別情報を入力し、ネットワークでデータ転送を行いデータ収集用計算機でデータの確認を行う。Trigger/Tag distributor は J0 バックプレーンを通して各々のモジュールにトリガやイベント識別情報を送る。

これらの試験を経てすべての機能が実現できていることを確認した。これにより開発したフラッシュ ADC を用いた電荷測定モジュールが実験に使用できるという確信を得ることが出来た。

4. 研究成果

本研究により TREK 実験で使用するためのフラッシュ ADC を用いた時間測定可能な電荷測定モジュールの開発を行うことが出来た。開発された電荷測定モジュールの機能仕様を以下に示す。

- 32 チャンネルの 100 MHz サンプル可能なフラッシュ ADC
- 1 μ sec (深さ 1024) までのフロントエンド FIFO
- イベントバッファリング機能
- イベントの識別情報を受けることが出来る。

● ネットワークでデータの転送が可能
このモジュールを用いた場合の時間測定精度は 0.8 nsec となった。データ転送速度は 11MB/sec であった。

TREK 実験ではこの電荷測定モジュールを CsI (T1) 光子検出器の読み出し及び偏極測定用ドリフトチューブ、ワイヤーチェンバーの読み出しに用いる予定である。

図 4 に開発されたフラッシュ ADC モジュールの写真を示す。

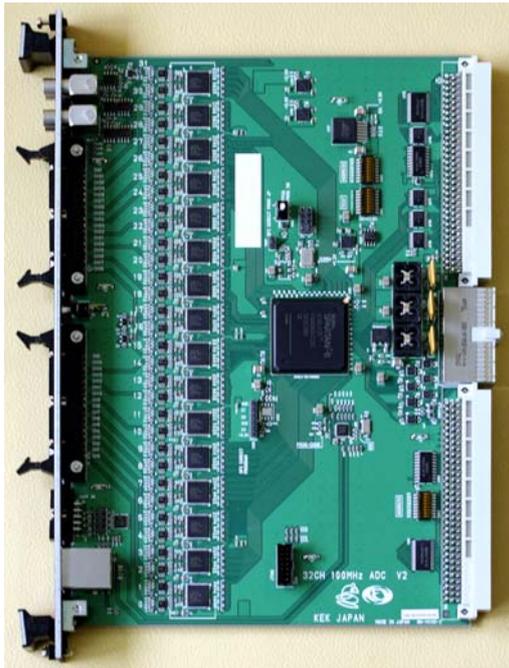


図 4. TREK 実験用 32 チャンネル 100Hz
フラッシュ ADC モジュール

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 3 件)

- ① PIENU Collaboration, Search for Massive Neutrinos in the Decay $\pi \rightarrow e \nu$, Physical Review, 査読有, D84 2011 052002
- ② Y. Igarashi et al., An integrated data acquisition system for J-PARC hadron experiments IEEE Trans. Nucl. Sci., 査読有, 57 2010 618-624
- ③ Y. Igarashi for TREK collaboration, Target design and R&D of J-PARC E06 TREK experiment PoS KAON09, 査読無

[学会発表] (計 2 件)

- ① 五十嵐 洋一 他、J-PARC TREK 実験用 アクティブターゲットの開発、日本物理学会 第 66 回年次大会 2011 年 3 月 25 日 関東学院大学
- ② 五十嵐 洋一 他、K1.1BR ビームライン ビーム調整におけるデータ収集システム、日本物理学会 第 67 回年次大会 2010 年 3 月 (未開催につき資料投稿)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

五十嵐 洋一 (IGARASHI YOUICHI)

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・研究機関講師

研究者番号：50311121

(2) 研究分担者

田内 一弥 (TAUCHI KAZUYA)

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・技師

研究者番号：70391737

斎藤 正俊 (SAITO MASATOSHI)

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・技師

研究者番号：30391783

(3) 連携研究者

今里 純 (IMAZATO JUN)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・名誉教授

研究者番号：40107686