



KEK

Detector Technology Project

測定器開発室

測定器開発室活動報告

2009年9月



High Energy Accelerator Research Organization

測定器開発室活動報告

2009 年 9 月

目次

はじめに	1
ASIC プロジェクト	1
次世代 DAQ プロジェクト	20
MPGD プロジェクト	36
SOI プロジェクト	46
次世代光センサープロジェクト	55
STJ プロジェクト	67
液体キセノン TPC プロジェクト	75
液体アルゴン TPC プロジェクト	83
測定器開発室 歴代室員リスト	90
測定器開発室 評価書	i

はじめに

2006年測定器開発室を開設するに当たり、Web ページの挨拶はその活動の原点を強い危機感で次のよう述べている。

「21世紀をむかえ、幸いにも日本の素粒子物理学は極めて順調なすべり出しをしております。世界最高性能の加速器にバックアップされたBファクトリーによる豊富な heavy flavor の物理、SK/K2K/KamLand 等によるニュートリノ物理の画期的成果など、いまや我が国が名実ともに素粒子物理研究の大きな極となっている事は間違いありません。しかしふと立ち止まって、我が手の内をみますと、そこにあったのは、外国から学んで後20年近く使い込んできたにすぎない測定器技術と、世界に誇る超優良日本企業が製造するセンサーがあるばかりでした。一方ヨーロッパにおいては、10余年の歳月とエネルギーをLHCとその測定器システムの建設に注ぎ、そこで開発されてきた膨大な技術が着々と蓄積されてきているようです。彼の地での（測定器技術の開発を大切にする）そもそもの文化基盤とも相まって、彼我の差は拡がるばかりに思えます。これではLHC以降の勝負はすでにあつたといわざるを得ません。フィールドは素粒子物理の分野にとどまりません。生き残りをかけて世界の高エネルギーラボは、将来に向けたあらゆる可能性を模索しております。成否の一つの鍵となるのは、いろんな意味での「技術力」と思われます。そこで、KEK素粒子原子核研究所では、2005年度より測定器周辺技術の開発において、新たな展開を期そうとしております。それが測定器開発室（KEK Detector Technology Project, KEKDTP、以後「開発室」）です。」

この強い危機感を原動力に4つの基盤テーマで始まった開発室プロジェクトも、いまやDAQ、ASIC, MPGD, SOI, 光センサー、液体TPC, STJの7つを数えるまでになった。すべてが同一の基準、均質な運営を行っているわけではない。それぞれが主張する存在意義のベクトルは実はそれぞれ全く異なる。**先鋭的な技術開発**で世界をリードするプロジェクト、**機構の技術成果について他分野での応用可能性**をアピールするプロジェクト、あるいは**基盤先端技術**を関連コミュニティに定着、**技術レベルの底上げ**を狙うプロジェクトなど、その性格は多様性に富んでおり一元的に論ずることは容易ではない。

そんなKEKDTP 発足3年の節目として、昨年度には全プロジェクトの担当レビューア－20名合同による開発室全体レビューをお願いし、開発室の存在意義・これまでの成果・めざしている方向について高い評価をいただく一方、運営の方法などについていくつかの有益な提言をいただいております。今後の課題として現在取り組みつつある。レビューレポートの詳細は巻末の appendix として掲載している。

この提言のうち重要なものの一つが、「機構内での横の連携を強化して**機構横断的な組織**となる」ことであった。そもそも素粒子原子核研究所内の仮想プロジェクトして誕生した「開発室」ではあったが、それまでも「測定器技術は加速器ビームを使ったサイエンスに共通」という理念のもと、素粒子・原子核研究以外の分野との交流もはかっており、2008年度は技術のいっそうの交流・提供・応用を通じて放射光、中性子、ミュオンなど物質構造研究の各分野で多くの具体的な実績を積み上げた。実際DAQプロジェクトで開発されたデータ収集プラットフォームはいくつかのJ-PARC中性子ビームラインで標準として採用されるまでになっており、MPGDプロジェクトで開発された2次元検出器システムはいくつかの中性子・放射光の実験において実用されはじめている。レビューでいただいた提言とこうした関係者の努力が実り、KEKDTPは2009年度から高エネルギー加速器研究機構の横断的組織として公認され、測定器開発室として正式に組織図に加えられた。この正式発足のタイミングに、仮想研究グループであった4年間の成果をまとめておくことは、今後の合法組織・測定器開発室の展開の出発点として重要であるものと考え、ここに「測定器開発室—KEKDTP/2005-2008」成果報告書をまとめる。

2009年9月

高エネルギー加速器研究機構

測定器開発室長

幅 淳二

ASIC プロジェクト

田中 真伸

全体概要

ASIC プロジェクトの目的は“ASIC 開発可能な人員を育成し実力を高め、かつそこで培われた ASIC およびその関連技術が、日本から発信される先端測定器システムの重要な要素技術として活用されること”である。人的リソースが限られている現状で上記を成功させるには、KEK 内で努力するのみでなく、外部（大学、企業）との連携を広げ、加速器科学コミュニティ内の ASIC 開発組織として、人的及び技術ネットワーク内にノウハウを溜め込むことが重要であり、測定器開発室立ち上げ時におけるエレクトロニクス DAQ に関する議論でもかなりの時間を割いた。



図 0-1 現在の ASIC プロジェクト

この目標を達成するためには、具体的なアプリケーションを決め実際に検出器読み出しシステムに組み込み、評価することは必須であり、図 1 に示すいくつかの具体的な目標を掲げそれに基づき開発（サブプロジェクト）を遂行してきた。特に初年度は汎用機能ブロック（オペアンプ、デジタルアナログコンバータ等）を含む ASIC を目標として選定した。こうすることで当該プロジェクト途中でも、開発された機能ブロックを加速器科学コミュニティに公開し、コミュニティ内での ASIC 開発アクティビティを高め、且開発リスクを下げることを目指した。この目標に基づき、2007 年度には 3 つのサブグループで開発された ASIC 開発用アナログライブラリを公開し、2008 年からは加速器科学総合支援事業のサポートを受け教育プログラムとして“放射線検出器用集積回路製作講習会”を開催している。

一方前述のすそ野を広げる努力を行いながら、先端測定器システムの重要な要素技術として技術を確立させるためにマイクロパターンガス検出器用 ASIC の量産化と多チャンネル化、高レートガス検出器フロントエンド ASIC の量産化を行いながら、更に先端を目指すために2つのパイロットプロジェクトを2007年より立ち上げた。

ここで目指した方向は

1) 超高速多チャンネルフロントエンド

加速器の高輝度、高強度化に伴う測定装置の高速化の要求にどのような形でアプローチ可能かを検討するために、1GHz帯のアナログ信号処理 ASIC の検討を行うことを目標とし、2009年度に独立した新規プロジェクト“高速ピクセルセンサー”として測定器開発室に提案され開始予定である。

2) 高機能ピクセル

加速器の高輝度、高強度化に伴う測定装置の多チャンネル化、高機能化の要求にこたえるための技術限界を見極めるために、疑似3次元ピクセル（ボクセル）検出器システム用の要素技術を検討し R&D を開始した。の2つである。

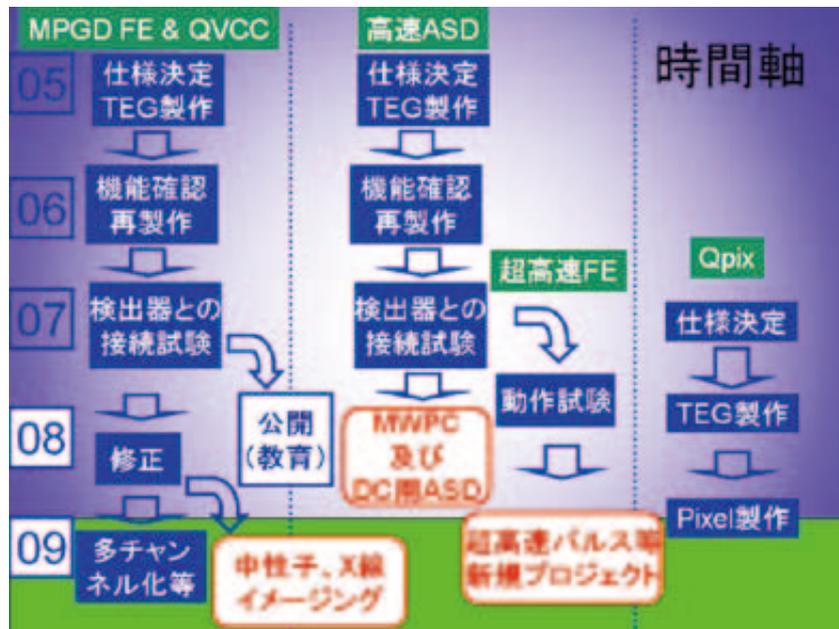


図 0-2 ASIC プロジェクトの経緯

計画当初からのプロジェクトの変更点としては、高精度時間測定回路の R&D および担当者を ASIC プロジェクトから SOI プロジェクトに移したことであるが、マンパワーの有効活用として必要な措置であった。現在担当者は当該 R&D 以外に SOI プロジェクトにおける R&D の一部を担っており、更に2009年度からはマイクロパターン検出器用フロントエンド ASIC を製作した担当者が SOI プロジェクトにかかわるなどプロジェクト間での人的交流も進んでいる。

上記に記述されたプロジェクトのレポートは (<http://e-sys.kek.jp/tech/asic/asicreport.html>) にアップロードされている。

以下 CMOS フロントエンド、高レートガス検出器用フロントエンド ASIC、超高速エレクトロニクス、Qpix および ASIC 教育プログラムについて記述する。

マイクロパターンガス検出器用フロントエンドエレクトロニクス

概要

マイクロパターンガス検出器（MPGD）用フロントエンドエレクトロニクス（図 1-1）は uPIC 及び GEM を使用したガス検出器に接続することを前提としている。表 1-1 に示す仕様を満たす CMOS フロントエンド ASIC を開発しほぼ要求を満たす ASIC を現在までに 4000 チャンネル分量産テストし、マイクロパターンガス検出器用に使用されている。

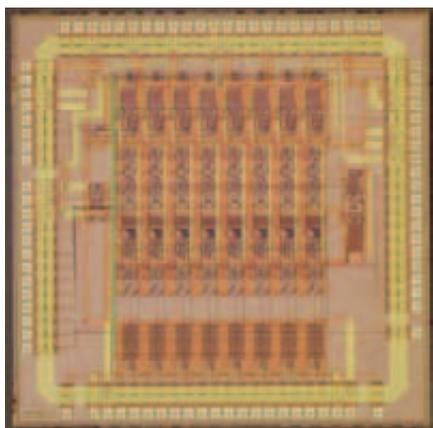


図 1-1 MPGD 用フロントエンド ASIC

	目標	現状
ダイナミックレンジ	$\pm 1.5\text{pC}$	$\pm 1.5\text{pC}$
ピーキングタイム	30nsec	20nsec
ノイズ	5000 electron	5900 electrons
タイムウォーク	10nsec	6nsec
クロストーク	1%	0.4% typ
消費電力	20mW/ch	28mW/ch
ピーキングタイムばらつき	-	$\pm 6\%$
ゲインチャンネルばらつき	<10%	4%
閾値ばらつき	-	<20mV
チャンネル数	8	8
プロセス		TSMC CMOS0.5um
イールド		90%
量産		4000 チャンネル
その他		閾値調整用 DAC 内蔵 キャリブレーション入力、 ゲイン調整用コントロールデ ジタル回路回路内蔵

表 1-1 開発した ASIC のパラメータ

この ASIC の開発にあたって使用された回路、およびレイアウト等は必要な手続きの後に開示されており、後述の集積回路教育プログラムに使用されている。2009 年度以降は用途に応じてユーザーと協力し開発を進める体制をとる。また人的資源を有効に開発に向けるために、KEK 知財産学連携室と連携し、技術移転先として KEK ベンチャーを指定し一部ユーザーのサポート、開発はそこで行うよう整備を進めている。

性能

図 1-2 に回路ブロックを示す。検出器からの信号は電荷有感型プリアンプを通しポールゼロ・シェーパーによりパルス幅約 100nsec の疑似ガウシアン波形に整形されアナログ出力部とデジタル出力部へ分配される。

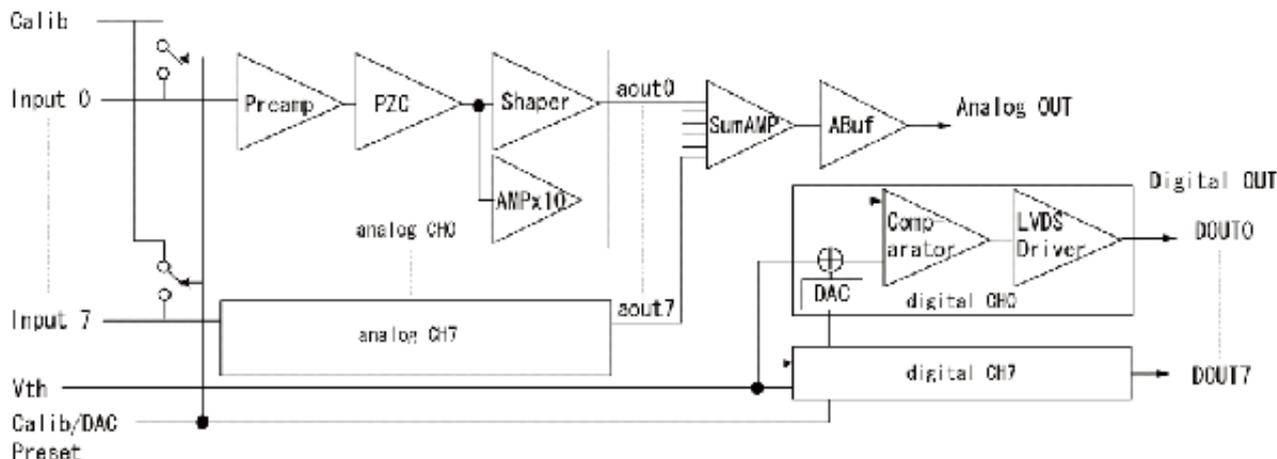


図 1-2 CMOS フロントエンド ASIC のブロックダイアグラム

アナログ出力部は、ゲイン可変回路とアナログ足し算器、およびアナログバッファからなる。デジタル出力部はコンパレータ、LVDS ドライバ及び閾値調整用 5bit デジタルアナログコンバータ (DAC) が内蔵されている。入力にはキャリブレーション用テストパルスが個別に入力できるようになっている。これらの切り替えスイッチ及び DAC は、内蔵のデジタル回路を通し外部から制御される。

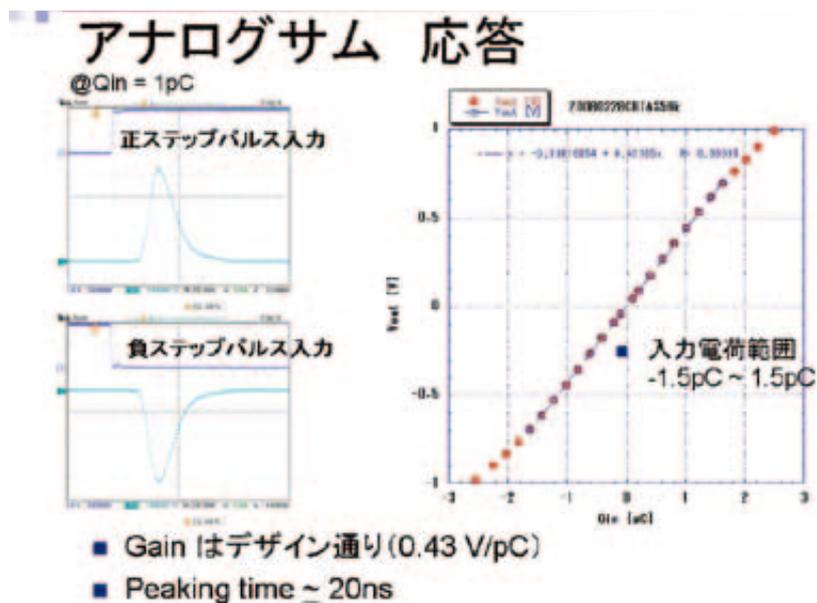
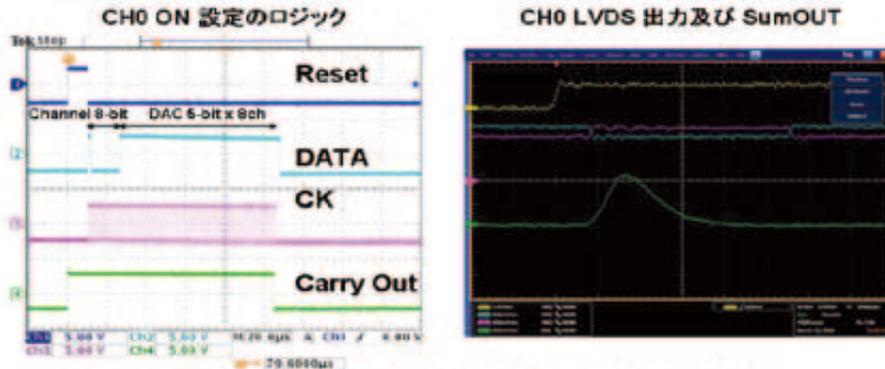


図 1-3 アナログ出力とダイナミックレンジ

較正入力 応答



- 8-bit データプリセットにより、特定チャネルを ON/OFF
- 各チャネルからの出力を確認、動作検証済み

図 1-4 キャリブレーション入力等のテスト

このチップは京都大学 uPIC グループ及び測定器開発室 MPGD グループにおいて試験され量産フェーズへ移行した。

量産およびシステム化

技術開発するだけでなく、我々が実験で使用できる技術とするために FIB 等の LSI 回路修正技術、ワイヤーボンディング、MCM (マルチチップモジュール) 等のシステム化技術を外部の企業と連携を取りながら ASIC 関連技術のネットワークを作った。更に量産試験の自動化を目的とし、KEK においてテストシステムを作り上げた。この連携の中で製作した MCM を図 1-5 に示す。この MCM は前述のテストシステムを使用した量産テストを経て京都大学の uPIC 読み出し、測定器開発室の MPGD プロジェクトに使用されている。

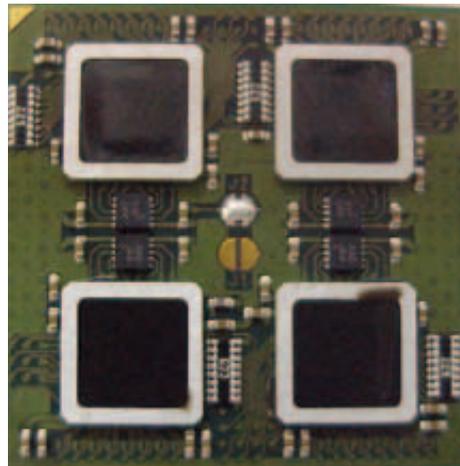


図 1-5 量産 MCM (Multi-Chip-Module)

これらをベースに MPGD グループ、先端 DAQ グループと共同で汎用読み出しボード (図 1-6) の製作を行った。これらの結果は学会、IEEE 等で発表されている。

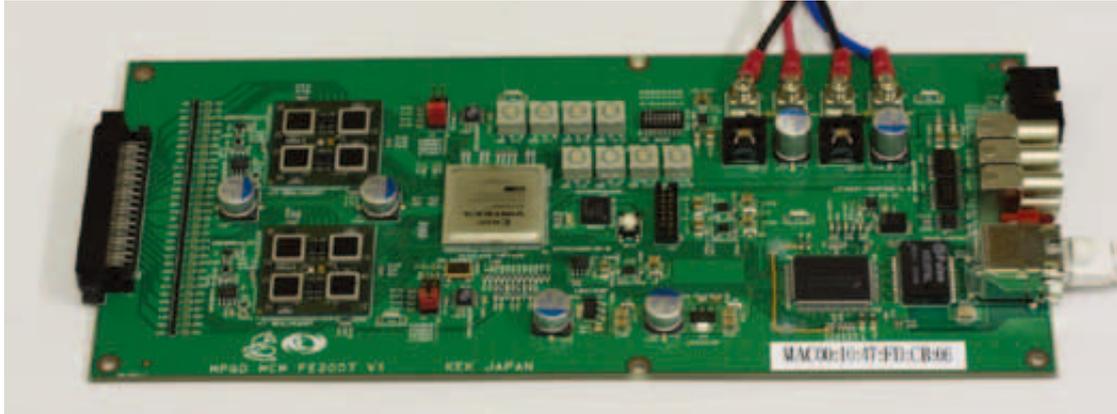


図 1-6 汎用読み出しボード

まとめと今後の予定

現在までに、量産可能な ASIC を製作し検出器開発グループと協力しアナログデジタル回路ブロックの完成度を上げつつ成果を出してきた。今後は低消費電力化、広ダイナミックレンジ化、高速化等目的に応じたカスタマイズが必要であるがそれらは個別の実験プロジェクトのサポートによって行われることになるため本プロジェクトとしての開発は完了した。今後は人的資源の確保が重要で、今後後述の ASIC 関連技術の教育プログラム等を通した ASIC デザインの組織化へ移行していく。CMOS0.5 μ m に関しては、安価に試作可能であるという利点を備えているため、重点を教育へ移しここを入り口として若手を育成することを課題とする。

この教育プログラムに関しては別章を設け記述を行う。

不感時間ゼロ電流積分器 CMOS ASIC

概要

不感時間ゼロ電流積分器は3つの電流積分器及びデジタルコントロール回路よりなっている。動作は図 2-1 に示すように3つのモードでそれぞれ3つの電流積分器が動作するために不感時間ゼロが実現できている。表 2-1 に仕様を示す。

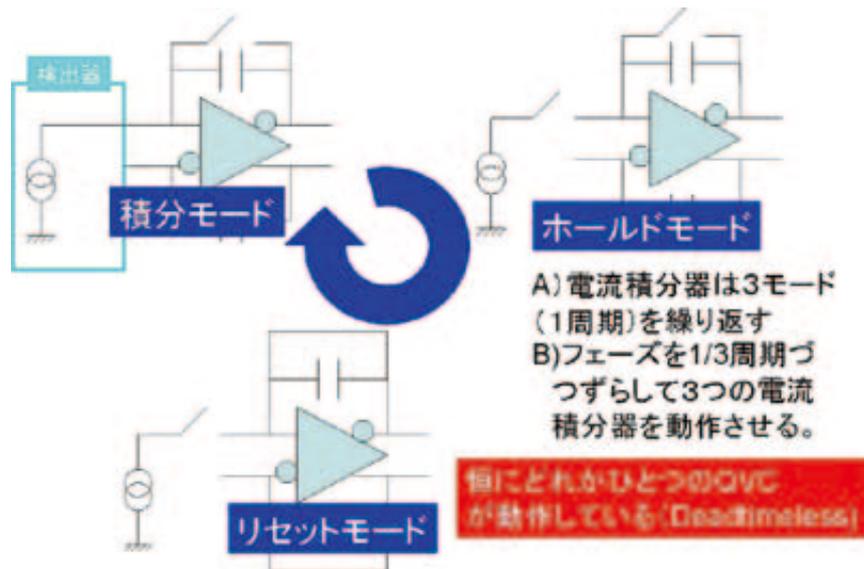


図 2-1 不感時間ゼロ電流積分器の動作

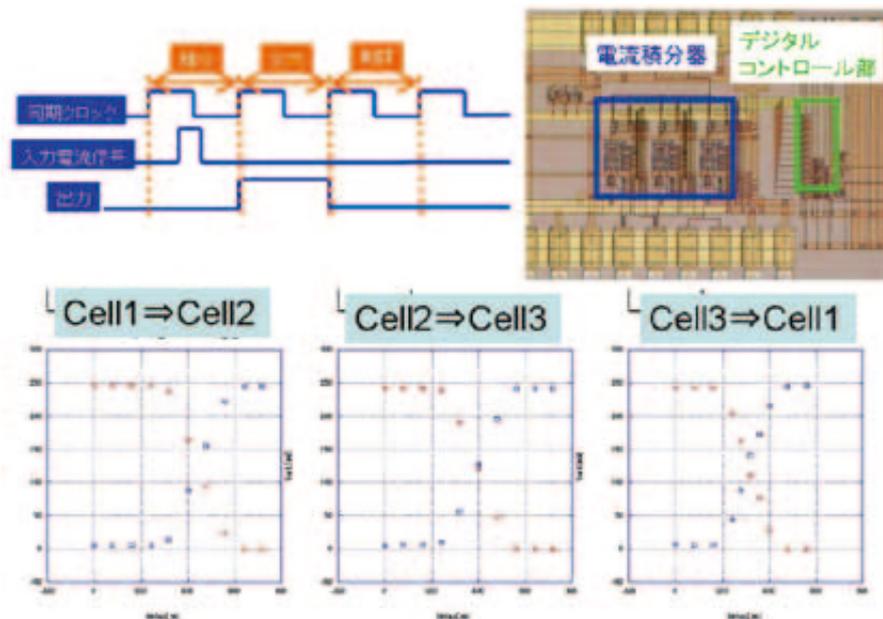


図 2-2 電流積分器 ASIC の写真とその測定結果

図 2-2 に示すように、入力信号のタイミングにかかわらず、入力電荷が一定であれば出力電圧の総和も一定であることを確認した。

パラメータ	仕様
プロセス	0.5um
チャンネル数	4ch/chip
ダイナミックレンジ	-2V~2V
セル間のゲインばらつき	<0.5%
セル間のオフセットばらつき	<10mV
動作クロック	10MHz Max
消費電力	TBD

電源電圧	+5V
その他の機能	テスト入力

表 2-1 QVC 仕様

検出器との接続試験

この ASIC と MPPC との接続試験を行った結果を示す。

図 2-3 は信号を入れていないときの QVC からのペDESTAL 分布でノイズは 1 mV 以下に抑えられている。

LED から光を入射させたときの QVC の出力を図 2-4 に示す。フォトエレクトロンの信号を捕らえられており問題なく動作はしているが、まだ環境雑音が存在するため各フォトエレクトロンの分解能が悪くなっているがテスト基板を作りなおすことで改善する。

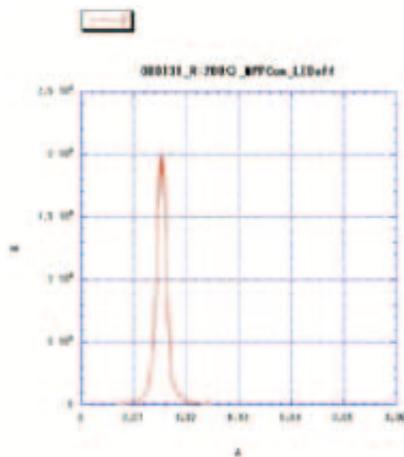


図 2-3 ペDESTAL 分布

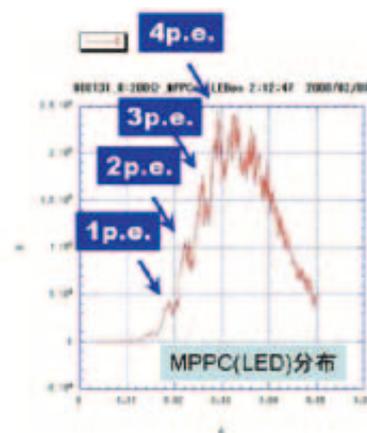


図 2-4 接続試験結果

まとめ及び今後の予定

MPPC との接続試験において動作確認は完了し、ASIC の試作はいったん終了した。しかしながら下記 A-C に示す改良点が提案されており、レビューア及びグループメンバーで今後議論し応用範囲を明確にし試作を行う。さらに ADC を組み込んだ MPPC システムテスト用基板を設計することも検討している。

トランジスタばらつきに強い CMFB 回路への変更

多チャンネル化へ向けたレイアウト変更

高ダイナミックレンジ化へ向けた積分容量の変更

しかしながら動作等問題はないため、アナログライブラリ化等の作業は今後も続けていく。

ドリフトチェンバー、MWPC 等ガス検出器用フロントエンド(ASD) BICMOS ASIC(ASD プロジェクト)

概要

MWPC、ドリフトチェンバー用高レート用ガス検出器の高速読み出しエレクトロニクスは多くの実験で要求があり、其のうちアンプ・シェーパー・ディスクリ (ASD) は実験にとって必要な機能ブロックを含み汎用性

があるため開発プロジェクトの一つとして選択された。量産を考慮し使用プロセスは新日本無線の 0.8 μ mBiCMOS プロセスが選定された。

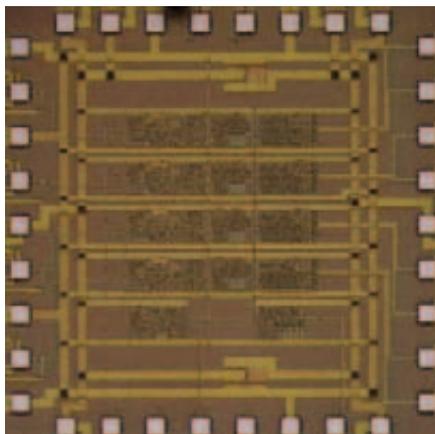


図 3-1 ASD チップの写真

ASD (図 3-1) および AS (アンプシェーパー) は検出器と結合試験を行い基本性能を確認し実際に使用するための量産 (ASD: 約 2500ch, AS: 約 1000ch) も終了している。これらはダブルベータディケイ グループドリフトチェンバー用および MWPC テスト、DC 読み出しテスト等に使用されている。

このプロジェクトでは会社との共同開発および会社による販売、保守に関するテストケースとして開発共同で行ない、現在この会社からこれらの ASIC は販売されており購入可能となっている。

これらの回路及びレイアウトは前述の CMOS プロセスを使用したフロントエンド ASIC と同様に、NDA を結べば公開可能で、その一部は前述の ASIC 教育プログラムにおいて公開された。

以下 ASD および ASB の基本性能を示す。

ASD 仕様

	仕様
ゲイン	1V/pC, 1.4V/pC, 2.3V/pC, 7V/pC
ダイナミックレンジ	2V
ピーキングタイム	20nsec: パルス幅 60nsec for 1/t input
入力	アノード用
出力	Quasi-PECL (振幅 400mV)
テストパルス入力	あり
1/t tail キャンセル	あり
BLR	あり
アナログ出力用モニター	シェーパー出力に対して
チャンネル数	4チャンネル/chip
消費電力 (電源電圧 5V)	-60mW/ch

AS仕様

	仕様
ゲイン	0.7V/pC, 0.86V/pC, 1.12V/pC, 1.7V/pC
ダイナミックレンジ	2.5V
ピーキングタイム	25nsec : パルス幅 60nsec for 1/t input
入力	アノード用/カソード用 1.5pC Max
出力	アナログ出力
テストパルス入力	あり
1/t tail キャンセル	あり
BLR	あり
チャンネル数	4チャンネル/chip
消費電力（電源電圧5V）	~60mW/ch

超高速フロントエンドエレクトロニクス（パイロットプロジェクト）

概要

“超高速フロントエンドエレクトロニクス” に関しては、高速・高レート・高時間分解能を有するマルチピクセル検出器システムの開発を目標に他分野（放射光、加速器）との連携を考慮しつつ立ち上げた。これは前述の ASD、AS 開発のノウハウを生かし発展させるためのパイロットプロジェクトという位置づけである。

高速・高レート・高時間分解能マルチピクセル検出器システムは応用として BELLE アップグレード用 TOP 検出器など素粒子原子核実験分野内で存在するだけでなく、放射光への応用として（特に核共鳴散乱、メスバウアー分光、XAFS、XIFS、Pump-probe イメージングデバイスの高速化など）多く存在する。また高強度放射光施設が多く利用、もしくは建設されている現状ではこれから更に重要な測定システムとなると期待される。

医療用としては TOFPET などは注目すべきものである。現在シンチレータの開発が進んでおり従来存在しない新しい高速応答の結晶が開発されてきており、それに伴い読み出しシステムへの要求も高まってきている。時間分解能としては 50psec で充分であるがチャンネル数が数十万チャンネルでありシステム全体でどのような処理を行うのかなどは要素技術と共に議論され研究される必要がある。当然のことながら ASIC 技術無しで対応は不可能であることは言うまでもない。更に NMR-PET などの複合機に到っては磁場中での観測、低雑音化などの問題をクリアする必要もあり検出器として APD や MPPC などの検出器システムがそのまま適応できる可能性もある。

超高速アンプシェーパー、アンプシェーパーディスクリ

高速アンプ

アンプはカスケード構成になっており、それぞれはエミッター接地にエミッターフォロワーをダーリントン接続したフィードバックアンプからなっている。一段目と二段目の間には二段目の入力インピーダンスの影

響を避けるために C と R とをシリーズにつないだダンパーを入れて波形が変形するのをおさえた。その結果パルス幅として FWHM \sim 1.5nS が得られた。得られたアンプのゲインは約 3V/pC 程度である。

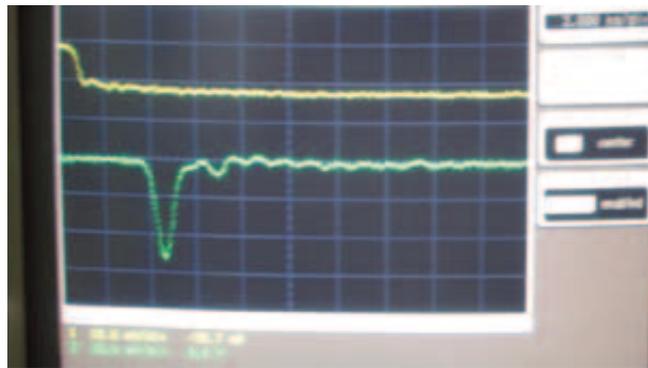


図 4-1 高速フロントエンドアンプ出力波形

ディスクリミネーター

500MHz 以上の入力レートを処理するディスクリミネーターに使用されている主要部分は SiGe バイポーラプロセス半導体である。パルスの立ち上がり、立ち下がり時間はおよそ 250pS、パルス幅はおよそ 500pS から 4nS 程度まで可変である。最大繰り返しはおよそ 560MHz である。図 4-2 は上が入力、下が出力である。タイムレンジは 1 nS/div. である。

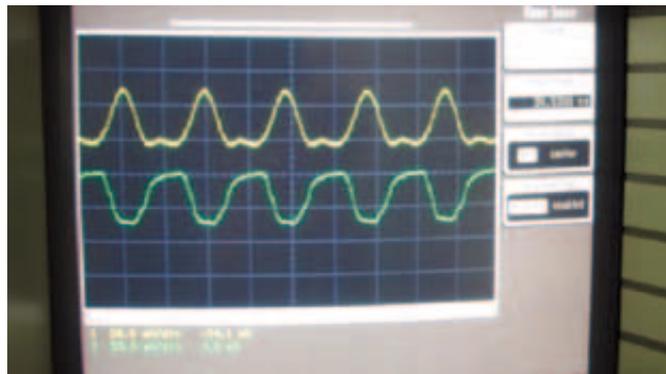


図 4-2 高速ディスクリミネータ出力波形

ASD プロジェクトおよびそのサブプロジェクトまとめ・今後の予定

ASD プロジェクト

ASD, AS は合わせて 3000 チャンネルほどの製作を行い検出器と接続し動作している。更に現在ドリフトチェンバー用等の開発要求を受けデザインを行っており、試作費用等は各実験プロジェクトから支出されている。更にここで開発された要素技術はオープンにされ ASIC 製作実習等で使用されている。今後このような方向に進みながら、引き続き BiCMOS のマルチチッププロジェクトをいくつかの用途に合わせ運用できるような体制を整えていく。

概要で述べたとおり、民間会社との共同開発方式のテストケースとして本プロジェクトを開始した。共同開発会社は現在開発された ASIC を製品として維持、販売している。一方必要な知財は KEK に維持されているため、開発、応用、再生産等に関して技術移転に関し問題が生じることはない。このように民間との共同開発

研究を利用し、研究開発とメンテナンスを分離することは重要であり、今後長期的にこのようなフレームワークをどのように維持、活用していくかが次の課題となるが、それに関しては後述のパイロットプロジェクトへ引き継ぐこととし、このサブプロジェクトは完了した。

超高速フロントエンドエレクトロニクス

パイロットプロジェクトは GHz 帯で動作するフロントエンドエレクトロニクスのプロトタイプ製作、評価が終了し、目標仕様を満たす ASIC 製作が可能であることを示した。次のステップとして高速・高レート・高時間分解能マルチピクセル検出器システム R&D を目標として測定器開発室内に別途新規プロジェクトを立ち上げた。

QPIXASIC プロジェクト

概要

このサブプロジェクトの目的は 3D 検出器用ピクセル読み出し回路を製作することで、deep-submicron プロセスを使用したピクセル読み出し用途 ASIC の技術力を日本において発展させる為のものである。このプロジェクトの目標はタイムプロジェクションチェンバー (TPC) 用読み出しピクセル回路を製作することである。このサブプロジェクト内ではあくまでも要素開発を目指すものであって、検出器を含むシステムを製作することではない。

ASIC 技術を考えた場合高集積が第一の特徴でありそれは、微細化、複雑な機能、多チャンネルを含む。我々はこれらを全て含む開発要素としてピクセル検出器用読み出し ASIC を選定した。

更に開発において学際連携を取り入れ外部のノウハウと我々の持つノウハウを組み合わせる取り組みも行っている。

QPIX 仕様

3次元検出器 (voxel 検出器) では完全な読み出し方法としては時間方向を FADC 等で時分割しアナログ値を記録するが、その方法ではデータ量が多くなり、検出器の不感時間増大、ピクセルの小型化が困難、低消費電力困難など問題が起こる。よって図 5-1 に示すように時間方向でのデータの簡略化を行うことで擬似的に 3次元検出器を実現させることを考える。つまり全ての時間バケットではなく、信号の来たところだけの情報を残す ASIC を考案し製作する。

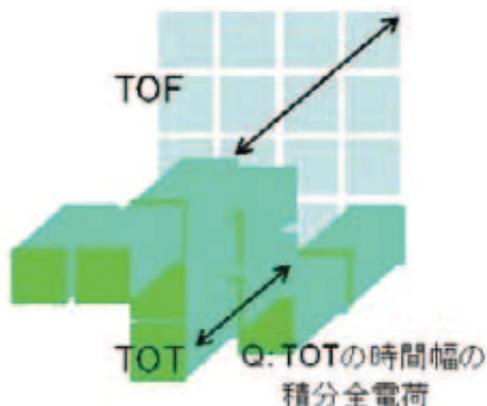


図 5-1 Qpix 検出器システムの概念図

具体的には下記の情報を取り込む。

TOF：到達時間のみ

TOT：信号幅のみ（入射放射線のトラックの角度と長さの情報を持つ）

Q：ある時間内に入った全電荷

よって TOF, TOT, Q 及びイベントバッファ（4つの情報）(Quad Information)及び 擬似（Quasi）3次元検出器読み出しという意味をもつため以下当該チップを Qpix と呼ぶ。

下記に主要仕様を示す。

パラメータ	仕様
検出器容量	~20fF
時間分解能	~<10nsec
時間ダイナミックレンジ	14.ビット
入力信号最小値	10fC
入力信号最大値	1.6pC
ピクセルサイズ	200umx200um
TOT ダイナミックレンジ	6ビット以上
イベントバッファ	あり
消費電力	TBD
その他	トリガー出力 OR 全ピクセル読み出し 読み出し方式は検討中 ゼロデータサプレッス等も検討中

表 5-1 Qpix 仕様

QPIX contains SAR ADC, comparator, and amplifier.

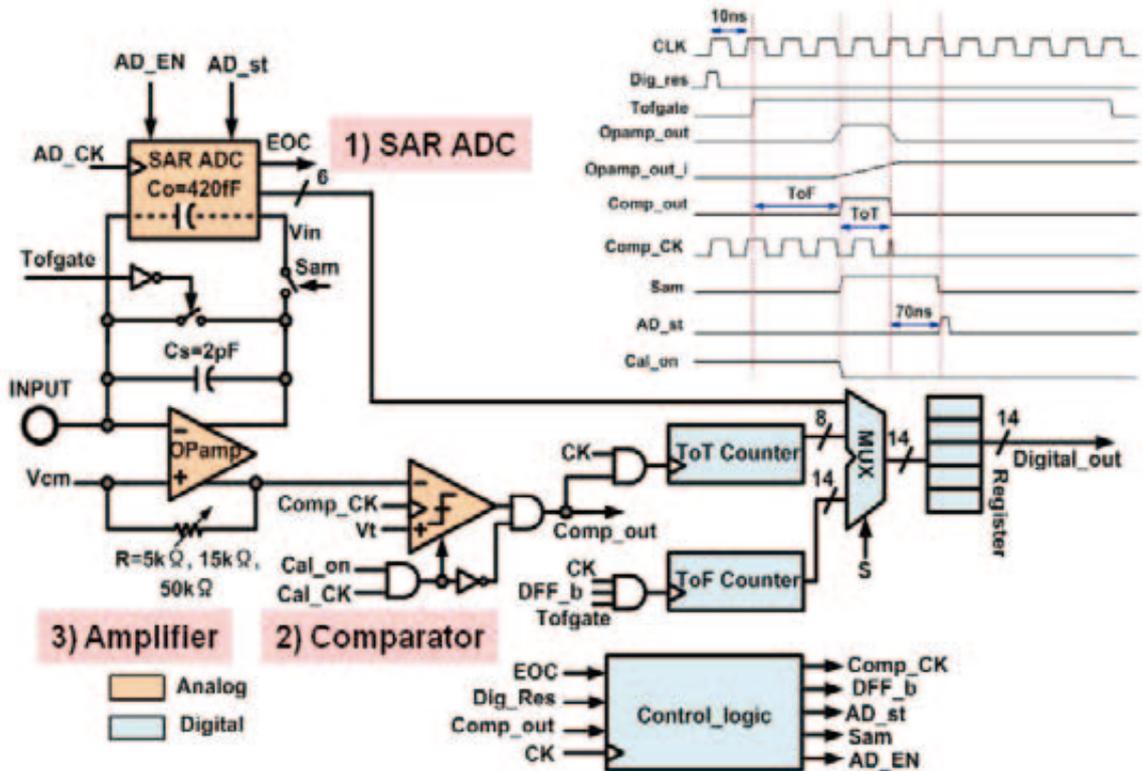


図 5-2Qpix ブロックダイアグラム

QPIX 要素試作

図 5-2 に全体の Qpix 試作チップのブロックダイアグラムを示す。入力電荷は ADC により電荷量をデジタル変換するブロックと、コンパレータを通し TOF, TOT を測定するブロックの 2 つに分かれる。入力電流信号は積分され電荷情報となり、電荷は SAR-ADC によってデジタル変換される。一方電流信号は抵抗により電圧変換されコンパレータへ入り TOT および TOF カウンターを駆動するためのタイミング信号として使用される。

現在までに、ADC の性能確認及び 1 ピクセル分の回路の動作確認用の ASIC 試作を行った。

図 5-3 に SAR-ADC に関するテスト結果とレイアウトを示す。消費電力は $300\mu\text{W}$ で 10MHz の 6bit SAR-ADC の動作を確認した。ロジック回路等を調整することによりさらなる小型化、低消費電力化は可能である。またピクセル内部において使用するコンパレータは閾値ばらつきを抑えながら動作させる必要があるため閾値補正機構を導入しピクセル間のばらつきを極力抑えた（東工大にて特許申請中）。

ADC Layout and measured data

Sufficient accuracy was measured as a 6bit 10Msps ADC.
 Occupied area can be reduced to 50um x 100um by further optimization.

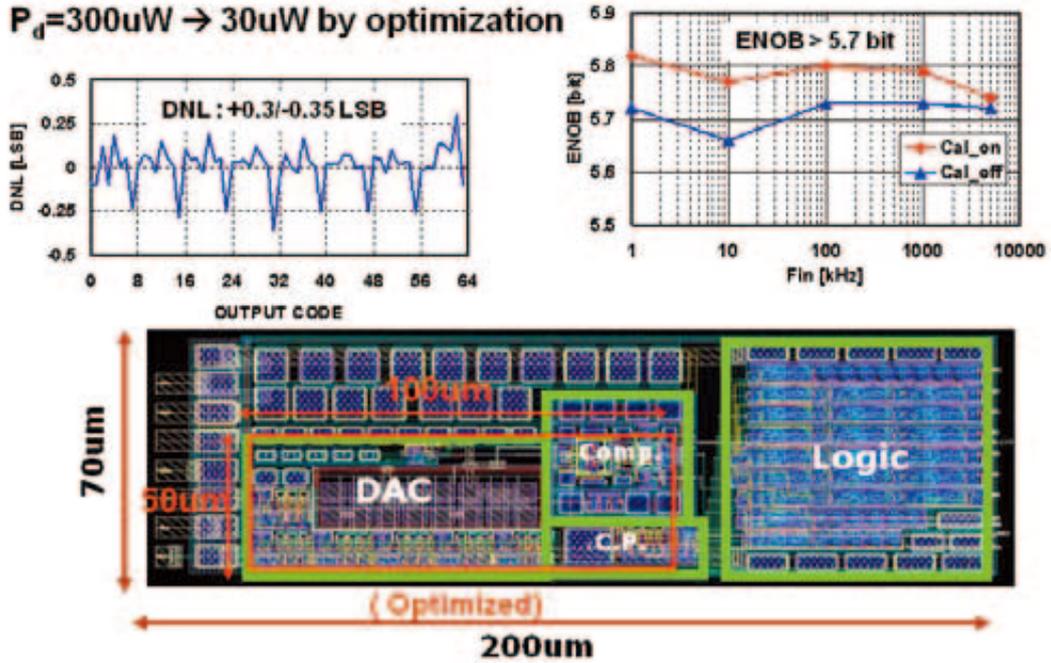


図 5-3 逐次比較型 ADC のレイアウト及び性能

これらの機構を使用し図 5-4 に示すピクセルを製作した。水色に囲われている部分が 1 ピクセル要素である。現在のサンプルはテストのため各ピクセル入力は個別にボンディングパッドに接続されている。

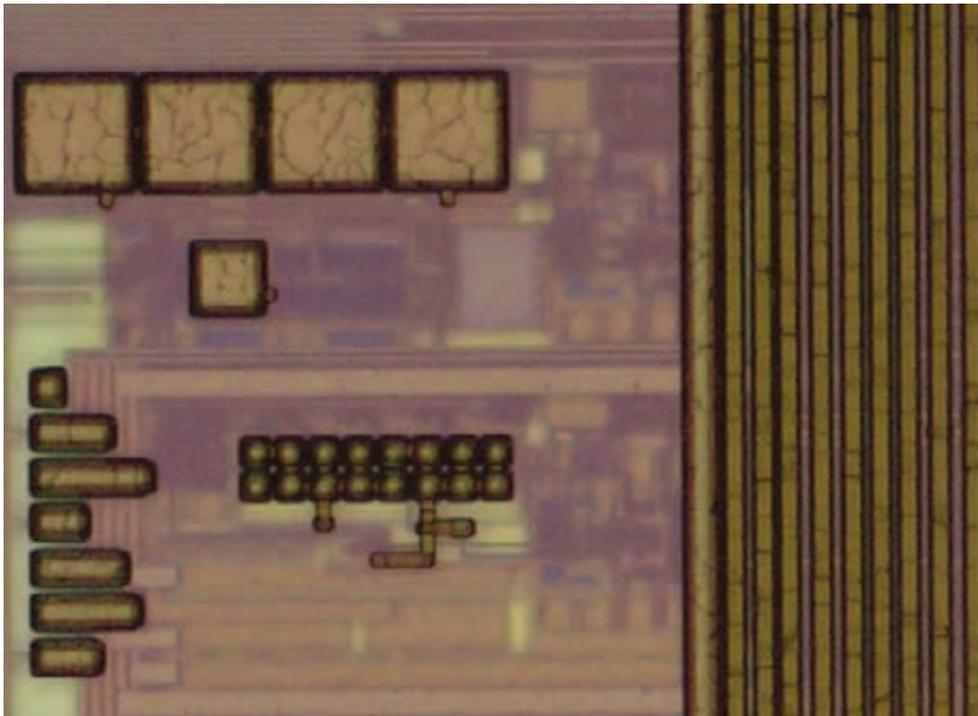


図 5-4 ピクセル要素の写真

現在機能動作は確認終了し、図 5-5 に示すガス検出器読み出しシステムを製作し図 5-6 に示すアルファ線の飛跡を観測した。現状では外来雑音等の影響により内部コンパレータの閾値が十分に下がらない等の改良が必要であり現在ガス検出器に組み込んだシステムからのデータを解析しつつ今後の仕様を議論している。



現段階のQpixチップは機能確認のために16チャンネル/chipで製作され、テストのために全ての入力が入力パッドに接続されている。よって直接読み出しパッドとして使用することができないため今回のシステムテストではドリフトする電子をGEMによって増幅し、ガス雰囲気中の基板上ピクセル電極によって受け、基板配線によってQpixチップに接続されている。2009年にはアレー状に配置されたQpixを試作する予定である。

図 5-5 TPC を使用した Qpix チップのシステムテストセットアップ

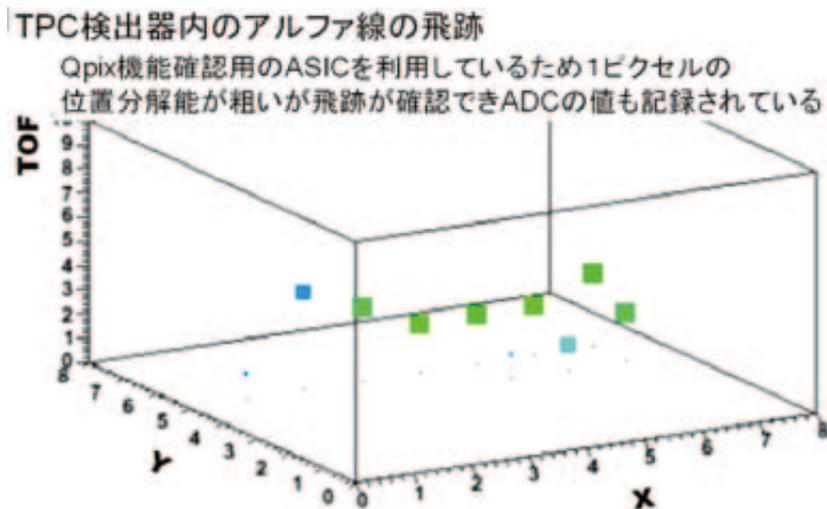


図 5-6 システムテストにおいて検出された放射線の飛跡

今後の予定

ガス TPC 用のピクセル検出器読み出し ASIC を開発しており、そのピクセル中には時間測定回路及び ADC が内蔵されている。現在、要素の機能確認及び1ピクセル分の機能確認は終了しており、システムテスト中である。今後も引き続きガス検出器との接続をおこないデモンストレーションをしつつ、仕様の見直しを進め、改良をおこなう。またこのチップ自身はガス検出器だけでなく半導体検出器等の検出器と接続し使用できる可能性もあり、今後コミュニティーを徐々に広げつつアクティビティーを拡大していく予定である

更にプロジェクトは工学部等との学際連携の良好なあり方を探るためにも行っており引き続きこのプロジェクトに限らず協力を継続できるように努力を続ける。

ASIC 教育プログラム

概要

前述の MPGD 用フロントエンド及び ASD 等の開発が量産フェーズに入り、ASIC 製作用アナログ回路ブロックの整備が進んできた。そこでこれらを使用しこのプロジェクトの目標であった ASIC デザインコミュニティを拡大するための集積回路デザインに関する教育・実習プログラムを始動させた。このプログラムはエレクトロニクスシステムグループが加速器科学総合支援事業の助成と測定器開発室の支援を基に行っている。

プログラム及び資料は下記のホームページを参照されたい。

<http://e-sys.kek.jp/seminar.html>

<http://www.kek.jp/ja/news/topics/2008/ASIC.html>

初年度の教育内容としては、BiCMOS プロセス、SOI プロセス、CMOS プロセスの3種類を行い、このうち最後の CMOS プロセスに関しては、実際にシミュレーション、レイアウト、検証を行い参加者が計10チップを製作した。参加者は32人で、その中で10チップのASICをサブミットし、現在7チップの動作が確認できた。これら試作チップのうち、低雑音フロントエンドエレクトロニクス、ワイドダイナミックレンジアンプの2チップに関しては、当初の仕様を満たす性能を得たためそれぞれ XeTPC 用フロントエンド、カロリメータ読み出しエレクトロニクスの実用化へ向けて 0.25um プロセスにて試作を開始した。

このように初心者向けの ASIC 製作実習に参加した数人が引き続き更に高度な ASIC を開発し実験に役立てようとしており、ASIC デザインの入り口としての第一回目の“ASIC 教育・実習プログラム”は機能をはたしているように見える。今後も緩やかにこのような方向で人材等が育つよう、アクティビティの活性化を目標にし活動を続けていく予定である。

図 6-1 にサブミットしたチップのレイアウト図を載せる



図 6-1 ASIC 教育実習プログラムによるサブミットチップのレイアウト

開発に携わったメンバー

1) マイクロパターンガス検出器用フロントエンドエレクトロニクス

人員： 藤田陽一、村上武、田中真伸（KEK）
窪秀利、服部香里、井田知広、岩城智（京都大学）
内田智久、宇野彰二（KEK、MPGDグループ）
大友季哉、大下英敏、清水裕彦（物構研）

デザインに際してはテクニカルレビューを下記の方およびプロジェクトレビューアに
協力いただき行い問題点を洗い出していただいた。深く感謝いたします（敬称略）

池田博一（JAXA）新井康夫、谷口敬、佐々木修（KEK）
C. de LA TAILLE（LAL Orsay）

2) QVCC

人員： 田中真伸、藤田陽一（KEK）
佐野恵理、田村 勇樹、川越清以（神戸）

3) 高計数率用ガス検出器フロントエンドエレクトロニクス及び超高速フロントエンドエレクトロニクス

人員： 谷口敬、島崎昇一、高橋俊行、田中真伸（KEK）
根岸久、青木巖（KEK 共同研究員）
高橋智則（東大）
岸本俊二、張小威（物構研）
三井隆也（日本原子力研究機構）
瀬戸 誠（京都大学）

4) Qpix

人員： 杉山晃（佐賀）
松澤昭、V.Koah、L.Fei、（東工大）
宮内正也、倉科隆、遠藤洋輝（東工大）
身内賢太郎（京都）
田中真伸、新井康夫、幅淳二、佐々木修（KEK）
房安貴弘（長崎総合科学大学）

論文発表、学会発表、特許出願（リスト）

- 2007/3 日本物理学会 “ガス増幅検出器読み出し用多チャンネル低消費電力 ASIC の開発” 藤田陽一
- 2007/10 IEEE NSS 2007 Y. Fujita “Performance of Multi-Channel and Low Power Front-End ASIC for MPGD m-PIC Readout”
- 2008/3 日本物理学会 “CMOS ASIC を用いた μ PIC 読み出しシステムの開発および厚型 GEM の開発” 井田知宏
- 2008/3 物理学会 “ガス増幅検出器読み出し用多チャンネル低消費電力 ASIC（FE2007）の開発” 藤田陽一
- 2008/9 物理学会 “J-PARC K1.8 ビームスペクトロメーター用 MWPC の性能評価(2)” 高橋智則
- 2009/9 物理学会 “多チャンネル APD-X 線検出器用超高速アンプ、ディスクリミネーターの開発” 谷口敬

- 2009/9 物理学会 “新日本無線 BiCMOS プロセスによるドリフトチェンバー用 ASIC の開発” 島崎昇一
 - 2008 神戸大学 修士論文 佐野 恵理 新型半導体光検出器 MPPC のための電流積分器 ASIC の開発
 - 2008 京都大学修士論文 井田 知宏 μ -PIC を用いた紫外線光子検出器および読み出しシステムの開発
 - IEEE 2008/10 Y. Fujita et al, “Improvement of CMOS Front-End ASIC for MPGD m-PIC Readout System” , IEEE NSS Dresden
 - IEEE TNS T. Uchida et al, "Prototype of a Compact Imaging system for GEM Detectors"
 - S. Kishimoto^{1,2}, T. Taniguchi¹, M. Tanaka¹, T. Mitsui^{2,3}, and M. Seto^{2,4} "A Si-APD array detector for nuclear resonant scattering using synchrotron x-rays and its fast-pulse processing"
 - Yasuhide Kuramochi, Akira Matsuzawa, and Masayuki Kawabata "A 0.05-mm² 110-uW 10-b Self-Calibrating Successive Approximation ADC Core in 0.18-um CMOS" A-SSCC, 8-1, pp 224-227, korea, jeju, Nov, 2007
 - MINH KHOA VU・宮原正也・岡田健一・松澤 昭, "容量 DAC の寄生容量が SAR ADC の精度に与える影響の検討" 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 川崎, C-12-19, Sep. 2008
 - Masaya Miyahara, Yusuke Asada, Daehwa Paik and Akira Matsuzawa "A Low-Noise Self-Calibrating Dynamic Comparator for High-Speed ADCs" A-SSCC, 9-2, pp 269-272, Japan, Fukuoka, Nov, 2008.
 - KEK 共同開発研究 “高レート用ガスチェンバー高速アンプシェーパーディスクリミネーター集積回路の開発” 代表者 谷口敬
 - 大学等連携支援事業 “先端半導体プロセスを用いたピクセルセンサーシステムの高度化に関する開発・教育に関する連携” 代表者 松澤昭
 - 加速器科学支援事業 “高度化エレクトロニクス要素技術の普及と展開” 代表者 幅淳二
 - JST 先端機器開発プログラム “到来方向測定による高感度ガンマ線 3D カメラの開発” 代表者 谷森達
 - JST-CREST 研究領域「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」研究課題名「物質科学のための放射光核共鳴散乱法の研究」研究代表者 瀬戸 誠 H17 年 10 月—H22 年度
 - 科研費基盤 B “次世代実験に向けた高精細 3 次元粒子検出器の開発” 代表者 杉山晃
 - 集積回路及び関連技術に関するワークショップ
- (<http://www-online.kek.jp/Seminar/asicworkshop2008.html>)

次世代 DAQ プロジェクト

安 芳次・内田智久

活動報告

実験データは実験規模に関わらずに大幅に増大している。この為、新しいデータ収集 (DAQ) 技術と開発手法が必要とされている。私達はネットワーク技術が次世代 DAQ を支える技術になると考え、関連する技術をソフトウェアとハードウェア両側面から開発を行ってきた。SiTCP、DAQ ミドルウェア、およびトリガレスである。将来これらの技術をオープン化・標準化することで、多分野の研究者と連携しつつ、今後加速器科学分野で必須となるネットワークベース分散高速データ収集制御システム構築用の基盤を支える技術へ発展させていくことを念頭に置き開発・普及を行っている。ここでは過去3年間の活動を振り返り、活動報告をする。

SITCP

SiTCP は小型機器をネットワークに接続する技術である。今までの DAQ システム内には様々なインタフェース規格が混在していた。特に検出器に近い部分は多くの制約がある為に使えるインタフェースは限られていた。主な制限は大きさ、消費電力である。検出器は限られた空間に配置される為に形状や発熱について強い制限がある。この様な多種インタフェースが混在している部分にネットワークを使用する事が出来るようになるれば、ネットワークを共通インタフェースとして使用することができる。この事にはシステム設計を柔軟にすると共にノート PC と直接接続する事ができるようになりシステムや検出器などの開発効率が向上と期待できる。そこで、この様な制限下で使用できる実験用ネットワーク処理回路 (SiTCP) を開発した。SiTCP により小型の読みだしボードに直接イーサネットケーブルを接続してデータを取得する事ができるようになった。SiTCP は現在 10Mbps、100Mbps 及び 1Gbps 技術が確立している。様々な実験グループに採用されており成果が論文などで公表されている。現在は、開発から普及の段階に入りつつあり、普及活動の一環として FPGA 講習会を実施した。また普及には不可欠なサポート体制の一環として、KEK 発ベンチャー企業である株式会社 Bee Beans Technologies との協力体制が進んでいる。

SiTCP を採用したグループと開発したモジュールについて説明する。図1は、KEK で開発されたモジュールである。左上図は J-PARC/MLF 用に開発された NEUNET モジュールである。中性子 He カウンターの信号を処理し SiTCP を使用してデータをネットワークへ転送する。DAQ ミドルウェアと協調して動作し、J-PARC/MLF の実験にすでに利用されている。左下図は KEK が開発したフロントエンドシステム規格 COPPER の後継機 Copper-Lite である。CPU を排除し全ての処理を FPGA で行うことで高速データ処理および高速データ転送の安定化を目指している。1つの FPGA 内で Event Building およびネットワーク処理 (GbE-SiTCP) を行う。4つの子ボード (FINESSE) からのデータは FIFO に書き込まれイベント毎に一つのデータとして組み立てられる。GbE-SiTCP はそのデータを TCP プロトコルに従いネットワークへ送り出す。中央図は測定器開発室 MPGD グループ用の GEM 読み出しモジュールである。右図は測定器開発室 SOPIX グループ用の SOPIX ファミリー ASIC テストボードである。サブボードを変更する事で様々な ASIC のテストを行う事が出来るモジュールである。FPGA が2つ搭載されている。一つは SiTCP が搭載され、も

う一方はユーザー回路実装用である。ユーザーが ASIC に適した機能を容易に実装できるように FPGA が分離されている。この事でユーザーは SiTCP 回路への悪影響を気にすることなく回路開発を行う事ができる。

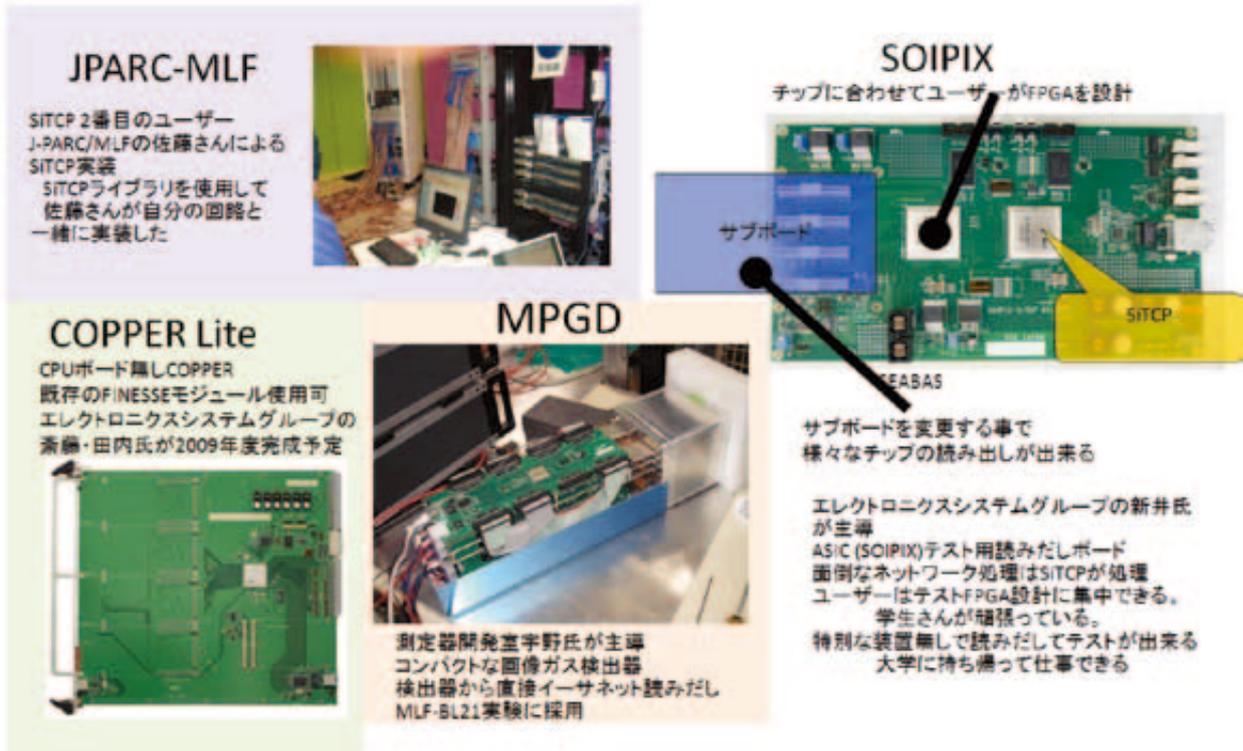


図1 KEK 内の活動

更に KEK 外でも SiTCP は種々の実験に採用され始めており、以下 SiTCP を採用したグループやそのモジュールについて説明する。図2は他機関の研究グループのために開発されたモジュールである。図1の左図は Super Kamiokande 実験のための読み出しモジュールである。100Mbps 用 SiTCP が採用され既にインストールされ実験データを取得している。(S. Yamada , et. al., “The Development of the New Data Acquisition System Without Hardware Trigger for the Super-Kamiokande Experiment ,” IEEE TNS 55(2008)683)。中央は国立天文台 Hyper Suprime-Cam 用に開発されたすばる望遠鏡用次世代主焦点 CCD カメラ用読みだしモジュールである。CCD 画像サイズ 2Gbyte を処理する為に DDR2 SDRAM を採用している。膨大な画像データを高速に転送する為に Gigabit Ethernet 版 SiTCP を採用している。右図は地震研究所の宇宙線ミュオン・ラジオグラフィ用に開発されたモジュールである。宇宙線ミュオン・ラジオグラフィは測定した火山を通過してくる宇宙線ミュオンの角度分布と地形から火山の密度分布を求め火山内部を観測する方法である。このモジュールは検出器の信号を処理し角度分布ヒストグラムを生成する。光電子増倍管とイーサネットをモジュールに直接接続する事ができるため、このモジュールのみでデータを取得する事が出来る。また Web Server になっているので、ノート PC などを接続して通常の Web ブラウザを使用することで角度分布ヒストグラムを見ることが出来る。遠隔地にある測定器はワイヤレスネットワークなどを利用する事でインターネット越しに研究室から角度分布を取得する事ができる。

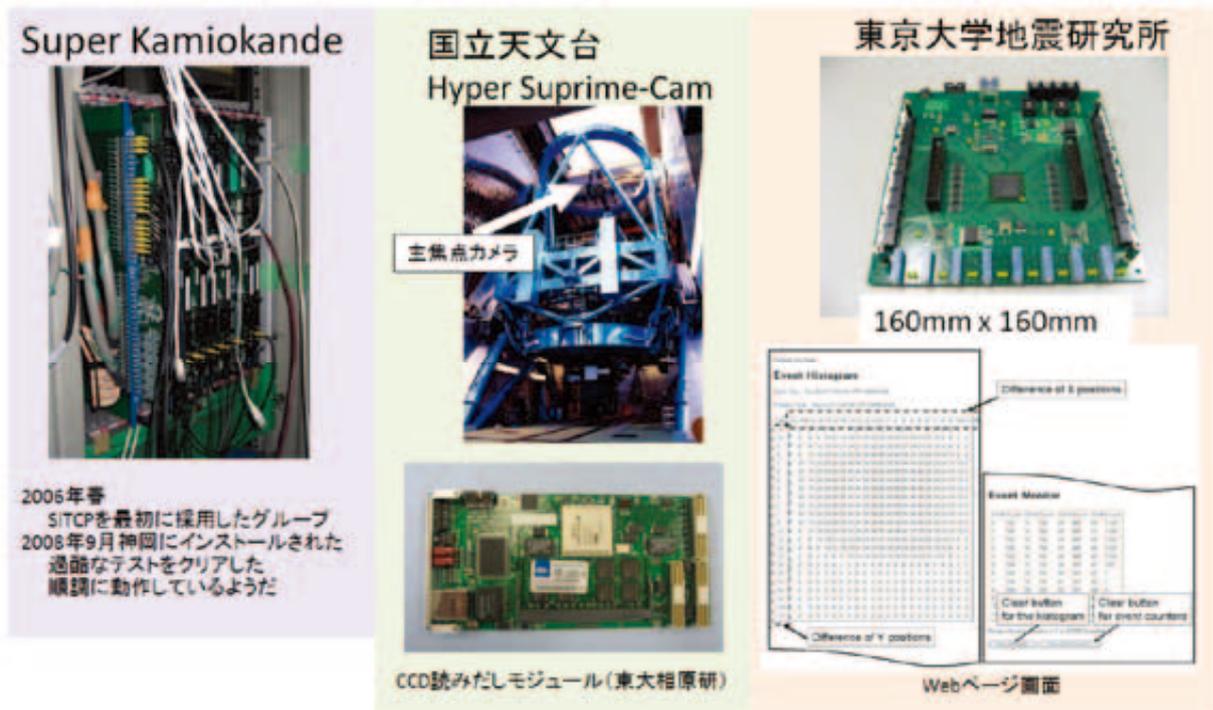


図2 他機関における採用例

DAQ ミドルウェア

今までDAQソフトウェアは各実験グループが実験の為に特定のソフトウェアを開発してきた。しかし、データ量の増大と共に実験毎にソフトウェアを開発することは難しくなっている。これはデータ量の増大により処理量が増大する事でソフトウェアの開発量も増大しているからである。データ量の増大は開発量を増大させるだけでなく分散環境などの専門技術も必要になってきている。実験毎にソフトウェアを開発してきた為、過去に開発した資産を再利用する仕組みが無く、毎回ゼロから作り直している事が問題を大きくしている。これらの問題を解決する為に産業総合技術研究所と高エネルギー加速器研究機構間の共同研究としてDAQミドルウェア(DAQ-MW)を開発した (<http://www.is.aist.go.jp/rt/OpenRTM-aist/html/>)。このソフトウェアは機能部品の集合として扱われ、それぞれはDAQ-MWを介して接続され通信する。DAQ-MWが共通の通信インタフェース仕様を提供しているので特定の部品の変更やアップグレードが容易に出来る。機能部品はネットワークで接続されているコンピュータ上になら何処でも動作する。この機能を使用することで分散環境を容易に構築する事ができる。この様に再利用、分散化を容易にする技術がDAQ-MWである。

DAQ-MWの基本部分の開発は終了しJ-PARC/MLF中性子、ミュオンで採用された。J-PARC/MLFにおいてまずは5月にNeutronによるファーストビームを用いたBL20でDAQミドルウェアコミッションングを成功させた。続いて9月にはmuonによるファーストビームを用いたミュオン実験のコミッションングが成功した。

中性子用 DAQ ミドルウェア

中性子の DAQ ミドルウェアコミショニングにおいては、DAQ ミドルウェアコミショニンググループが作られ、DAY1 において BL20(茨城県材料構造解析装置)で DAQ コミショニングを行うことを決め、実施計画・要領を作成し、実施計画・要領に基づき、コミショニングが行われた。この DAQ コミショニングの目的は、J-PARC の実際のビームを用いて茨城県材料構造解析装置の検出器から DAQ までの機能・性能を評価し、特に DAQ システムが正しく動作するかどうかを一連の項目に従って実施された。コミショニングの内容は大きく分けて4つあった。1つは、DAQ のハードウェアに関わるエレクトロニクス。2つは、DAQ のソフトウェアに関わる DAQ ミドルウェア。3つは、MLF 計算機環境フレームワークと DAQ の接続に関わるフレームワーク。4つは、BL20 実験に即したオフライン解析である。ここでは DAQ ミドルウェアについて報告する。

図3は Neutron によるファーストビームで用いたシステムアーキテクチャである。この実験は、PSD 800ch、NEUNET 100 台、VME Crate 5 台、Readout PC 5 台からなる。20 台の NEUNET を1つの VME クレートに格納し、1 台のネットワークスイッチを介して NEUNET からのデータを1 台の PC で受けるシステムを「フェーズ1ターゲット」システムとして、この「フェーズ1ターゲット」システムを5セット並列に配置した。右図はフェーズ1ターゲットシステムと UI システムを示している。ここでは DAY1 のために、Gatherer, Dispatcher, Logger, Monitor, DAQOperator, WEB Server (Apache+ mod_python) を走らせることにした。また CPU UI も同様に、CUI や(WEB ブラウザによる)GUI, ネットワークモナ Nagios, Logger がデータを書き込むための NFS, 3 台の CPU DAQ が書いたデータを処理するオフライン解析が走った。

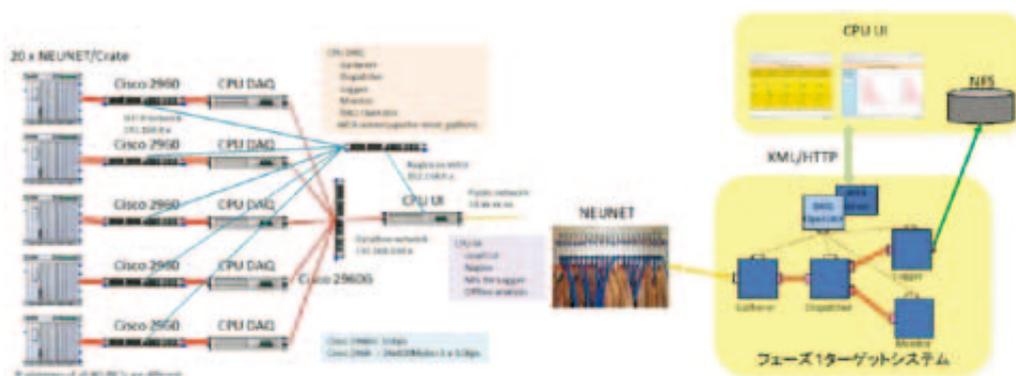


図3 Neutron によるファーストビームで用いたシステム構成

DAQ ミドルウェアのコミショニングは、Gatherer の機能、Dispatcher と Logger の機能、オンライン解析モニタの機能、DAQOperator の機能、システムインターフェース、WEB を使った DAQ 操作の機能などである。まとめると、

DAQ-Middleware でデータを取得することができた。

WEB 上のコントロールパネルで問題なくランコントロールができた。

WEB によるオンラインモニターも正常に動作した。

当初、52x8 本の PSD を使用予定だったが、PSD の AMP 回路の問題で 8 本によるデータ収集となった。

図5はそのコミショニングのスナップショットである。1つの「フェーズ1ターゲット」システムは160チャンネルのPSDを扱った。図4の左上図はオペエータパネル、右上図の160枚の一次元TOFヒストグラムと右下図の160枚の一次元位置ヒストグラムはサンプル、左下図の1枚の二次元位置ヒストグラムを作成した。



図4 Neutronによるファーストビームでスナップショット

DAQミドルウェアではその後MLF用DAQミドルウェア2008年12月版・2009年4月版の開発を行い、PSD検出器とシンチ検出器がMLF用DAQミドルウェアで統一的に扱えるようになった。図5はMLF用DAQミドルウェアで、PSD、ScintiおよびGEM検出器がMLFのコンポーネントの中にどのように位置付けられているかを示すものである。DAQOperator、Dispatcher、LoggerはMLF共通のコンポーネントとして利用され、Gatherer、Monitorは検出器固有の性格のためそれぞれに開発されるべきコンポーネントである。

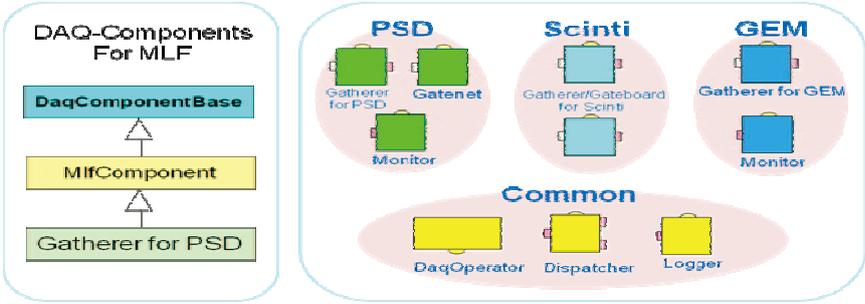


図5 MLF用DAQミドルウェアのコンポーネント構成

さらに、最新版である2009年4月版において、装置パラメータや解析パラメータをユーザが自由に定義し設定可能な枠組みを作ったこと、PSDとScinti検出器とが同じDAQOperatorを使用することが可能となったなどの改善がなされた。また、Scinti検出器用のGathererは1.28秒以内に読み出しを完了させるというリアルタイム性の要求から、マルチスレッド化された構造を持つように変更されている。

また、性能測定が行われ、MLF中性子DAQの要求を満たすものであることが示された。図6にDAQ-Middlewareの性能測定のセットアップとトータルスループットの測定結果を示す。横軸はNEUNETエミュレータの数を示し、縦軸はトータルスループットをMB/sであらわしたものである。1つのNEUNETエミュレータは1.28MB/sのデータを生成する。下記の図は測定のセットアップを示している。最大30台

の NEUNET エミュレータを2つの Cisco の 24ポート用 GbE ネットワークスイッチを2つで読み出し、1つのスイッチに集めて、基本コンポーネント群からなるコンポーネントを1つの PC で走らせて測定した。

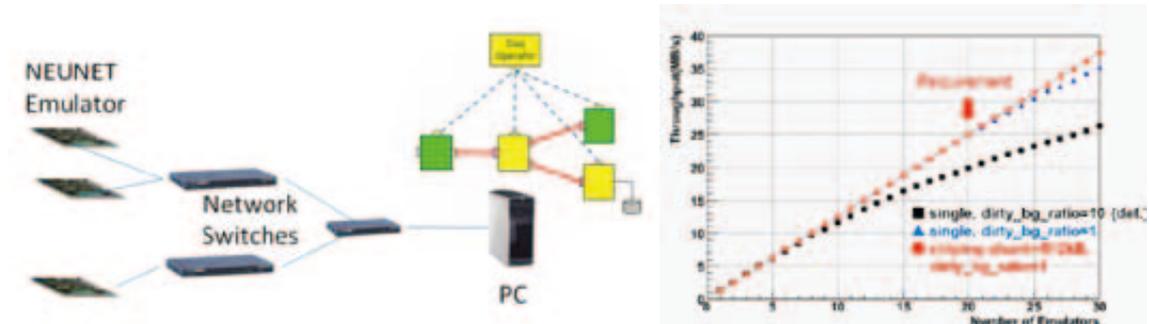


図 6 性能測定のセットアップとその結果

詳細の設定については省略するが、大事なパラメータとして、dirty_background_ratio と呼ばれるカーネルパラメータがある。デフォルトは 10 である。この意味は、通常ディスクへの書き込みはキャッシュされ、書き込みのタイミングで必ずしもディスク本体に書き込まない。PC のシステムメモリの 10% (デフォルトの 10 はその意味) がディスクキャッシュに書き込まれた時点で書き込みが発生する。メモリが大きくなるとこの書き込みによるブロッキングが他のシステムの挙動に影響を及ぼす。これを 1% にしたとき、劇的な性能の違いを見出した。下記の図で、黒い四角のデータは NEUNET エミュレータの数が 5 台を過ぎるあたりからデータの取りこぼしを起している。しかし、dirty_background_ratio を 1% にしたときは、大幅に性能が改善され、20 台程度までデータをロスすることがなくなった。青の三角のデータがそれである。さらに、ディスクの性能を上げるため、4 台のディスクを 1 つのディスクに見せる手法であるストライピングを行うことでさらに性能が向上していることがわかる。このようにして、MLF が求める 20 台でデータがロスすることなくデータ収集ができることという要求が満たされることが実証された。

ミュオン用 DAQ ミドルウェア

MLF 全体に DAQ ミドルウェアのフレームワークが使用され始めミュオンでも採用されている。中性子の場合は、トリガーという概念がないが、ミュオンの場合はトリガーシステムが必要である、この事から素粒子原子核実験でも使用出来るシステムが構築されつつある、との認識で開発を行った。

中性子の場合はイベント再構成の必要はないが、ミュオンの場合は必要でありデータ取得方法が異なる。この様な違いがあるにもかかわらず DAQ-MW を採用する事でワーキングデスクトップという枠組みに容易に組み込む事が出来る。Copper システムを DAQ ミドルウェアに組み込むための方策を検討した結果、変更を Gatherer と Monitor ののみにとどめて、DAQOperator、Dispatcher、Logger は MLF 共通のコンポーネントを可能な限り利用する事で、ワーキングデスクトップへのスムーズな移行が可能になった。図 7 の写真は新 FPGA-TDC FINESSE である。32 チャンネル TDC で、LSB は 1ns である。



図7 FPGA-TDC FINESSE

コミショニングに用いたトリガーシステムは図8に示す。NIM ロジックの配置およびトリガーの仕組みを示している。Copper からの読み出しは Copper のイーサネットから直接 PC に流れる。

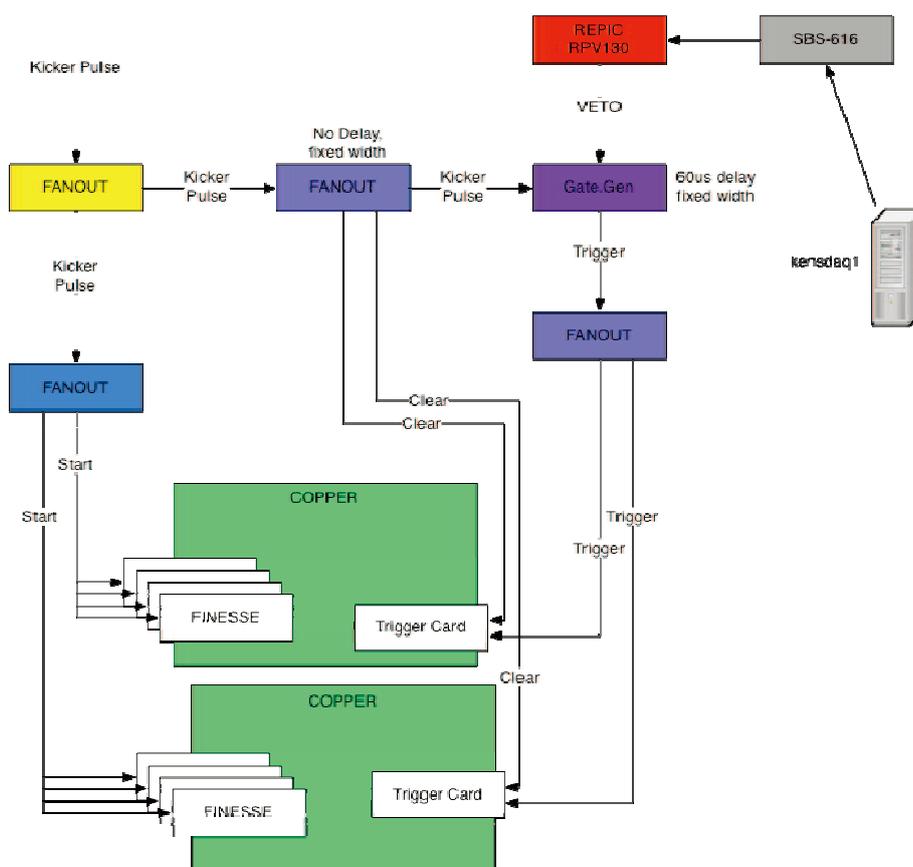


図8 トリガーシステム

その他の DAQ ミドルウェアの活動

産総研との共同研究はDAQミドルウェアの改良・改善のために継続中で、RT ミドルウェア 1.0 へ向け改良点の確認がなされた。また、DAQ ミドルウェア 1.0 RC が出荷され、8月には DAQ 講習会で全国大学・研究所の学生・スタッフに学んでいただいた。

ドリガーレス

従来のデータ収集システムは規模が大きくなればなるほどトリガー回路やタイミングの分配方法が複雑になる。しかもその回路や分配方法は実験毎に特別に設計しなければならない。新しいデータ収集システムでは、

トリガー回路やタイミング回路をなくし、信号波形はセルフトリガーですべて収集するという方法をとる。高速な ADC や読み出しシステムを駆使し、時間情報による信号同期と多数の PC によるイベントビルダで、複雑な処理をソフトウェア的に解決しようというものである。図9にトリガーレスデータ収集システムを示す。トリガーレスデータ収集においては、ADC module を宇宙線テストベンチに接続し、2 つ以上の検出器(シンチと MWPC)からの data を triggerless で event build することを目指すことや、event building のアルゴリズムを、SuperKEKB における DAQ を “free running” 化したときに応用する方法を探るなどの計画がある。

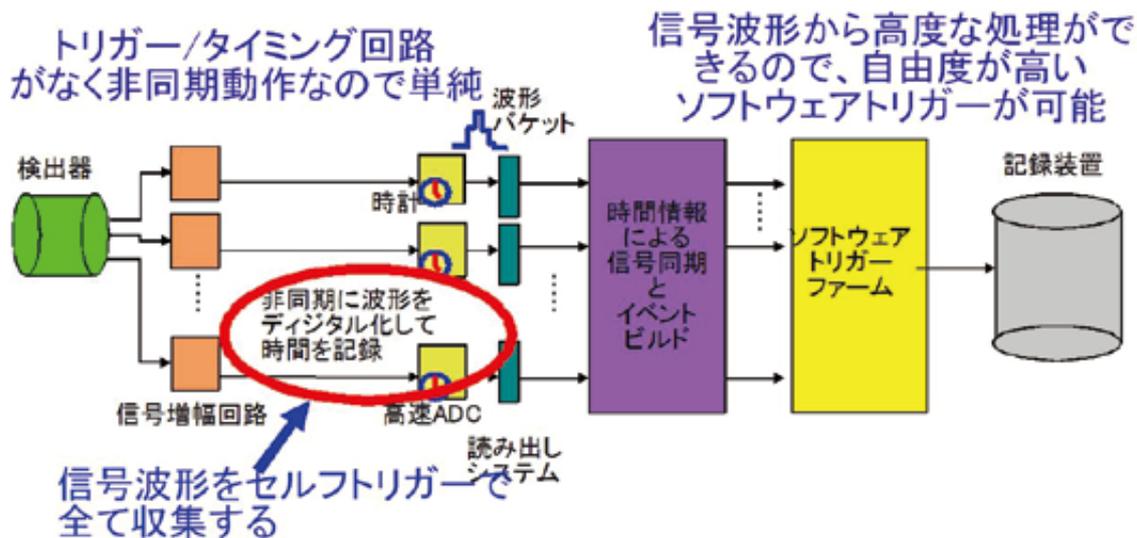


図9全波形を処理する完全非同期のトリガーレスデータ収集システム

メンバー

KEK 素核研：安芳次（代表）、内田智久（旧所属：東京大学）、仲吉一男、井上栄二、千代浩司、田中真伸、伊藤領介（トリガーレス DAQ 代表）、中尾幹彦、樋口岳雄

KEK 計算科学センター：鈴木聡（山形）

KEK 中性子科学施設：大友季哉、武藤 豪、佐藤節夫、金子直勝

KEK 中間子科学施設：竹下聡史（総研大）、幸田章宏、門野良典、河村成肇、西山樟生、平石雅俊、宮崎正範

日本原子力研究開発機構：伊藤孝、髭本巨理化学研究所：石田勝彦、松田恭幸、松崎禎一郎

東京大学・宇宙線研：早戸良成、山田 悟

レビューア

大阪大学：能町正治

広島工業大学：長坂康史

KEK 加速器研究施設：山本昇、古川和朗

- Soshi Takeshita, Masatoshi Hiraishi, Masanori Miyazaki, Akihiro Koda, Ryosuke Kadono, Soh Y. Suzuki, Yoshiji Yasu, Manobu Tanaka, Yasuyuki Matsuda, Katsuhiko Ishida, Teiichiro Matsuzaki, Development of positron detector for μ SR based on multi-pixel photon counter, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 600 (2009) 139-142.
- Soh Y. Suzuki, Manobu Tanaka, Kazuya Tauchi, Tomohisa Uchida, Akihiro Koda, Masatoshi Hiraishi, Masanori Miyazaki, Soshi Takeshita, Kohki Satoh, Ryosuke Kadono, Teiichiro Matsuzaki, Katsuhiko Ishida, Dai Tomono, Yoshiji Yasu, Takeo Higuchi, New pipelined data acquisition system for μ SR experiments at J-PARC, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 600 (2009) 53-55.
- Soh Y. Suzuki, Manobu Tanaka, Kazuya Tauchi, Yoshiji Yasu, Soshi Takeshita, Akihiro Koda, Masatoshi Hiraishi, Masanori Miyazaki, Kohki Satoh, Ryosuke Kadono, Katsuhiko Ishida, Dai Tomono, Teiichiro Matsuzaki, Development of a pipelined data acquisition system for μ SR experiments at J-PARC, Physica B, in press.
- Tomohisa Uchida, Hiroyuki K. M. Tanaka, and Manobu Tanaka, "Space Saving and Power Efficient Readout System for Cosmic-ray Muon Radiography," will be published on IEEE Trans. Nucl. Sci. 56, April, 2009.
- Hiroyuki K. M. Tanaka, Tomohisa Uchida, Manobu Tanaka, Hiroshi Shinohara, and Hideaki Taira, "Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan," GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 36, L01304
- T. Uchida, Y. Fujita, M. Tanaka, and S. Uno, "Prototype of a Compact Imaging System for GEM detectors." IEEE Trans. Nucl. Sci. 55, pp.2698-2703, 2008.
- T. Uchida, Hardware-Based TCP Processor for Gigabit Ethernet, IEEE Trans. Nucl. Sci. 55, pp.1631-1637, 2008.
- S. Satoh, S. Muto, N. Kaneko, T. Uchida, M. Tanaka, Y. Yasu, K. Nakayoshi, E. Inoue, H. Sendai, T. Nakatani, T. Otomo, Development of a readout system employing highspeed network for J-PARC, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A (2008),
- K. Nakayoshi, Y. Yasu, E. Inoue, H. Sendai, M. Tanaka, S. Satoh, S. Muto, N. Kaneko, T. Otomo, T. Nakatani, T. Uchida, Development of a data acquisition sub-system using DAQ-Middleware, Nucl. Instr. and Meth. A 600 (2009) 173-175.
- Y. Yasu, K. Nakayoshi, E. Inoue, H. Sendai, H. Fujii, N. Ando, T. Kotoku, S. Hirano, T. Kubota, T. Ohkawa, A Data Acquisition Middleware, 15th IEEE NPSS Real Time Conference, 2007, doi:10.1109/RTC.2007.4382850

- Y. Yasu, E. Inoue, K. Nakayoshi, H.Fujii, Y.Igarashi, H. Kodama, N. Ando, T. Kotoku, T. Suehiro, S. Hirano, "Feasibility of data acquisition middleware based on robot technology, CHEP2006 Macmillan Advanced Research Series p458-461

国際会議発表

- S. Uno, M. Sekimoto, T. Murakami, H. Ohshita, K. Nagaya, T. Koike, T.Uchida, "Development of Hard X-Ray Detector with GEM," Oral N31-8, IEEE Nuclear Science Symposium, Dresden, Germany, 19 - 25 October 2008.
- T. Uchida, H.K.M. Tanaka, M. Tanaka, "Space and Power Effective Readout System for Cosmic-Ray Muon Radiography," Oral N52-5, IEEE Nuclear Science Symposium, Dresden, Germany, 19 - 25 October 2008.
- T. Uchida, "Hardware-Based TCP Processor for Gigabit Ethernet," IEEE Nuclear Science Symposium, Honolulu, USA, Oct. 30, 2007, N15-17 Poster, Conference Record pp.309-315.
- S. Uno, M. Sekimoto, T. Murakami, N. Ujiie, T. Uchida, H. Kadomatsu., Sugiyama, S. Nakagawa, E. Nakano, "Performance Study for New Thicker GEM," 11th Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, 19-24 February 2007.
- T. Uchida and M. Tanaka, "Development of a TCP/IP Processing Hardware," IEEE Nuclear Science Symposium, San Diego, USA, Oct. 29- Nov.4, 2006. Oral, Conference Record pp.1411-1414.
- Y. Yasu, E. Inoue, K. Nakayoshi, H.Fujii, Y.Igarashi, H. Kodama, N. Ando, T. Kotoku, T. Suehiro, S. Hirano, "Feasibility of data acquisition middleware based on robot technology, International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP06), 13-17 February, 2006, T.I.F.R. Mumbai, India
- Y. Yasu, K. Nakayoshi, E. Inoue, H. Sendai, H. Fujii, N. Ando, T. Kotoku, S. Hirano, T. Kubota, T. Ohkawa, A Data Acquisition Middleware, 15th IEEE NPSS Real Time Conference, Fermilab, Batavia IL, 60510, April 29 - May 4, 2007
- K. Nakayoshi, Y. Yasu, E. Inoue, H. Sendai, M. Tanaka, S. Satoh, S. Muto, N. Kanekoa, T. Otomoa, T. Nakatanib, T. Uchida, Development of a Data Acquisition Sub-System using DAQMiddleware, presented at International Symposium on Pulsed Neutron and Muon Sciences (IPSO8), March 2008, Mito(Japan).
- Soh Y. Suzuki, Manobu Tanaka, Kazuya Tauchi, Tomohisa Uchida, Akihiro Koda, Masatoshi Hiraishi, Masanori Miyazaki, Soshi Takeshita, Kohki Satoh, Ryosuke Kadono, Teiichiro Matsuzaki, Katsuhiko Ishida, Dai Tomono, Yoshiji Yasu, Takeo Higuchi, New Pipelined Data Acquisition System For the μ SR Experiment at J-PARC, presented at International Symposium on Pulsed Neutron and Muon Sciences

(IPSO8), March 2008, Mito(Japan).

- Takashi Nakatani, Tetsuo Aoyagi, Toshiya Otomo, Jiro Suzuki, Yoshiji Yasu, Masatoshi Arai, Day-1 status of the software framework for experimental instruments in J-PARC/MLF, presented at International Symposium on Pulsed Neutron and Muon Sciences (IPSO8), March 2008, Mito(Japan).
- Toshiya Otomo, M. Misawa, N. Kaneko, T. Kamiyama, S. Sato, J. Suzuki, S. Muto, S. Shimizu, Y. Yasu, S. Uno, M. Tanaka, K. Suzuya, S. Shamoto, S. Takata, T. Nakatani, T. Fukunaga, k. Itoh, M. Sugiyama, K. Mori, Y. Kameda, K. Yoshida, T. Yamaguchi, Y. Kawakita, K. Murayama, Overview of the High Intensity Total diffractometer at J-PARC, presented at International Symposium on Pulsed Neutron and Muon Sciences (IPSO8), March 2008, Mito(Japan).
- K. Nakayoshi, Y. Yasu, H. Sendai, E. Inoue, M. Tanaka, S. Sato, S. Muto, J. Suzuki, T. Otomo, T. Nakatani, T. Ito, Y. Inamura, M. Yonemura, T. Hosoya, T. Uchida, DAQ-Middleware for MLF/J-PARC, The 1st international conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPPO9), Tsukuba, Japan, March 12-17, 2009
- Y. Yasu, K. Nakayoshi, H. Sendai, E. Inoue, M. Tanaka, S. Satoh, S. Muto, T. Otomo, T. Nakatani, T. Uchida, N. Ando, T. Kotoku, S. Hirano, Development of DAQ-Middleware, 17th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics(CHEP09), Prague, Czech Republic, 21-27 March 2009
- E. Inoue, Y. Yasu, K. Nakayoshi, H. Sendai, M. Tanaka, A DAQ System for CAMAC controller CC/NET using DAQ-Middleware, 17th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics(CHEP09), Prague, Czech Republic, 21-27 March 2009
- Toshiya Otomo, Kentaro Suzuya, Masakatsu Misawa, Naokatsu Kaneko, Hidetoshi Ohshita, Toshiharu Fukunaga, Keigi Itoh, Kazuhiro Mori, Masaaki Sugiyama, Yasuo Kameda, Toshio Yamaguchi, Koji Yoshida, Yukinobu Kawakita, Kenji Maruyama, Shamoto Shinichi, Shinichi Takata, Setsuo Satoh, Suguru Muto, Junichi Suzuki, Takashi Ino1, Hirohiko Shimizu, Takashi Kamiyama, Susumu Ikeda, Yoshiji Yasu, Kazuo Nakayoshi, Shoji Uno, Manobu Tanaka, Construction of High-Intensity Total Diffractometer (NOVA) at J-PARC, International Conference on Neutron Scattering (ICNS2009), Knoxville, Tennessee USA, May 3-7, 2009
- Takayoshi Ito, Stefanus Harjo, Hiroshi Arima, Jun Abe, Atsushi Moriai, Kazuya Aizawa, Masatoshi Arai, Takeshi Nakatani, Yasuhiro Inamura, Takaaki Hosoya, Masao Yonemura, Jiro Suzuki, Toshiya Otomo, Kazuo Nakayoshi, Hiroshi Sendai, Yoshiji Yasu, Software for the Engineering Materials Diffractometer (TAKUMI) at MLF, J-PARC, International Conference on Neutron Scattering (ICNS2009), Knoxville, Tennessee USA, May 3-7, 2009
- Takeshi Nakatani, Yasuhiro Inamura, Takayoshi Ito, Ryoichi Kajimoto, Tetsuo Aoyagi, Takashi Ohhara, Toshiya Otomo, Yoshiji Yasu, Jiro Suzuki, Takahiro Morishima, Takaaki Hosoya, Masao Yonemura,

Masatoshi Arai, Harjo Stefanus, Suguru Muto, Ryosuke Kadono, Shuki Torii, Hiroshi Nakagawa, Kazuo Nakayoshi, Hiroshi Sendai, Development of the software framework in MLF, J-PARC, International Conference on Neutron Scattering (ICNS2009), Knoxville, Tennessee USA, May 3-7, 2009

学会発表

- 長屋慶, 氏家宣彦, 内田智久, 宇野彰二, 大下英敏, 杉山晃, 小池貴久, 関本美智子, 田中秀治, 田中真伸, 中野英一, 仲吉一男, 村上武, “GEM を用いた X 線検出器の性能評価” 日本物理学会 秋季大会 素粒子実験領域 20aSJ-10, 2008 年 9 月 20 日から 23 日@山形大学
- 大下英敏, 氏家宣彦, 宇野彰二, 大友季哉, 関本美知子, 田中秀治, 田中真伸, 仲吉一男, 村上武, 長屋慶, 小池貴久, 内田智久, 中野英一, 杉山晃, “GEM を用いた中性子検出器の開発,” 日本物理学会 秋季大会 領域 10 21aWA-8, 2008 年 9 月 20 日から 23 日@岩手大学
- 奥村公宏, 新井康夫, 栗井恭輔, 内田智久, 金行健治, 塩澤真人, 清水雄輝, 竹田敦, 中山祥英, 西野玄記, 早戸良成, 山田悟 他 Super-Kamiokande Collaboration, “Super-Kamiokande における新フロントエンドボード製品版の性能評価について,” 日本物理学会 秋季大会 宇宙線・宇宙物理領域 22pSF-3, 2008 年 9 月 20 日から 23 日@山形大学
- 中山祥英, 新井康夫, 栗井恭輔, 内田智久, 奥村公宏, 金行健治, 塩澤真人, 清水雄輝, 竹田敦, 西野玄記, 早戸良成, 山田悟, 他 Super-Kamiokande Collaboration, “Super-Kamiokande における新エレクトロニクスシステムの導入,” 日本物理学会 秋季大会 宇宙線・宇宙物理領域 22pSF-5, 2008 年 9 月 20 日から 23 日@山形大学
- 廣瀬穰, 花垣和則, 内田智久, 新井康夫, 池上陽一, 海野義信, 坪山透, 寺田進, 羽澄昌史, 高力孝, 田内一弥, 池本由希子, 三好敏喜, 池田博一, 原和彦, 三宅秀樹, 河内山真美, 瀬賀智子, 石野宏和, “SiTCP 技術を用いた SOI pixel 検出器読み出しシステムの開発,” 日本物理学会 秋季大会 素粒子実験領域 23aSJ-7, 2008 年 9 月 20 日から 23 日@山形大学
- 長屋慶, 氏家宣彦, 内田智久, 宇野彰二, 大下英敏, 杉山晃, 関本美知子, 田中秀治, 田中真伸, 中川真介, 中野英一, 仲吉一男, 村上武, 杉山史憲, “GEM を用いた X 線検出器への応用,” 日本物理学会 第 63 回年次大会 素粒子実験領域 23pZJ-13, 2008 年 3 月 22 日から 26 日 @近畿大学 大学本部キャンパス
- 中山祥英, 新井康夫, 栗井恭輔, 内田智久, 奥村公宏, 金行健治, 塩澤真人, 竹田敦, 西野玄記, 早戸良成, 山田悟, “Super-Kamiokande における新 DAQ システムの開発[1]: フロントエンドエレクトロニクスとクロックシステム,” 日本物理学会 第 63 回年次大会 素粒子実験領域 25pZJ-1, 2008 年 3 月 22 日から 26 日 @近畿大学 大学本部キャンパス
- 西野玄記, 新井康夫, 栗井恭輔, 内田智久, 奥村公宏, 金行健治, 塩澤真人, 竹田敦, 中山祥英, 早戸良成, 山田悟, “Super-Kamiokande における新 DAQ システムの開発[2]: フロントエンド ASIC QTC の開発,” 日本物理学会 第 63 回年次大会 素粒子実験領域 25pZJ-2, 2008 年 3 月 22 日から 26 日 @近畿大学 大学本部キャンパス

- 山田悟, 粟井恭輔, 内田智久, 奥村公宏, 大林由尚, 金行健治, 塩澤真人, 竹田敦, 中山祥英, 西野玄記, 早戸良成, “Super-Kamiokande における新 DAQ システムの開発[3]: 新オンラインシステムの開発,” 日本物理学会 第 63 回年次大会素粒子実験領域 25pZJ-3, 2008 年 3 月 22 日から 26 日 @近畿大学 大学本部キャンパス
- 鈴木聡, 田中真伸, 田内一弥, 内田智久, 幸田章宏, 平石雅俊, 宮崎正範, 竹下聡史, 佐藤宏樹, 門野良典, 松崎禎一郎, 安芳次, 樋口岳雄, “ミュオンスピン回転実験への COPPER システムの適用,” 日本物理学会 第 63 回年次大会 素粒子実験領域 25pZJ-8 B, 2008 年 3 月 22 日から 26 日 @近畿大学 大学本部キャンパス
- 仲吉一男, 安芳次, 井上栄二, 千代浩司, 内田智久, 田中真伸, 佐藤節夫, 武藤豪, 金子直勝, 大友季哉, 中谷健, “DAQ Middleware を用いたデータ収集ソフトウェアの開発”, 2007 年 11 月 28 日, ポスターP3-45, 日本中性子科学会 第 7 回年会, 2007 年 11 月 27-28 @九州大学
- 佐藤節夫, 武藤豪, 金子直勝, 内田智久, 田中真伸, 安芳次, 仲吉一男, 井上栄二, 千代浩司, 中谷健, “高速ネットワーク(SiTCP)を使用した, He3-PSD 読み出しシステムの開発”, 2007 年 11 月 28 日, ポスターP3-23, 日本中性子科学会第 7 回年会, 2007 年 11 月 27-28 @九州大学
- 宇野彰二, 氏家宣彦, 関本美知子, 田中秀治, 田中真伸, 仲吉一男, 村上武, 中川真介, 中野英一, 内田智久, 大下英敏, 杉山晃, 杉山史憲, 長屋慶, “GEM を使った高速中性子画像検出器の開発,” 日本物理学会 領域 10 21aTC-6, 2007 年 9 月 21 日から 24 日@北海道大学
- 杉山史憲, 氏家宣彦, 内田智久, 宇野彰二, 大下英敏, 杉山晃, 関本美知子, 田中秀治, 田中真伸, 中川真介, 中野英一, 長屋慶, 仲吉一男, 村上武, “GEM の X 線検出器への応用,” 日本物理学会 素粒子実験領域 21aZB-3, 2007 年 9 月 21 日から 24 日@北海道大学
- 中川真介, 氏家宣彦, 内田智久, 宇野彰二, 大下英敏, 杉山晃, 杉山史憲, 関本美知子, 田中秀治, 田中真伸, 中野英一, 長屋慶, 仲吉一男, 村上武, “GEM を用いた中性子画像検出器の性能評価,” 日本物理学会 素粒子実験領域 21aZB-4, 2007 年 9 月 21 日から 24 日@北海道大学
- 内田智久, 氏家宣彦, 宇野彰二, 大下英敏, 杉山晃, 杉山史憲, 関本美知子, 田中秀治, 田中真伸, 中川真介, 中野英一, 長屋慶, 仲吉一男, 村上武, “GEM を用いた中性子画像検出器の読み出しシステム,” 日本物理学会 素粒子実験領域 21aZB-5, 2007 年 9 月 21 日から 24 日@北海道大学
- 奥村公宏, 新井康夫, 粟井恭輔, 内田智久, 金行健治, 塩澤真人, 竹田敦, 中山祥英, 西野玄記, 早戸良成, 山田悟, “Super-Kamiokande における新 DAQ システムの開発[1]: 新フロントエンドボードの開発,” 日本物理学会 素粒子実験領域 23pYC-4, 2007 年 9 月 21 日から 24 日@北海道大学
- 中山祥英, 新井康夫, 粟井恭輔, 内田智久, 奥村公宏, 金行健治, 塩澤真人, 竹田敦, 西野玄記, 早戸良成, 山田悟, “Super-Kamiokande における新 DAQ システムの開発[2]: システムの構築と評価,” 日本物理学会 素粒子実験領域 23pYC-5, 2007 年 9 月 21 日から 24 日@北海道大学
- 山田悟, 粟井恭輔, 内田智久, 奥村公宏, 大林由尚, 金行健治, 塩澤真人, 竹田敦, 中山祥英, 西野玄記, 早戸良成, “Super-Kamiokande における新 DAQ システムの開発[3]: 新オンラインシステムの開発,” 日本物理学会

素粒子実験領域 23pYC-6, 2007年9月21日から24日@北海道大学

- 内田智久, 田中真伸, “検出器に組み込み可能な TCP/IP/Ethernet プロセッサ,” 日本物理学会 実験核物理領域 28pWG-12, 2006年3月27日(月)~30日(木)@愛媛大学、松山大学
- 田中真伸, 内田智久, “イーサネット: TCP/IP のハードウェア化及びイベントビルド用新プロトコルの開発と性能,” 日本物理学会 素粒子実験領域 30pWK-4, 2006年3月27日(月)~30日(木)@愛媛大学、松山大学
- 日本物理学会2006年春、2006年3月27日(月)~30日(木)@愛媛大学
- 安芳次、井上栄二、仲吉一男、藤井啓文、児玉英世、五十嵐洋一、ロボット・テクノロジー・ミドルウェアを用いたデータ収集の試み
- 日本物理学会2007年春、2007年3月25日(日)~28日(水)@首都大学東京
- 千代浩司、安芳次、井上栄二、仲吉一男他 KEK エレクトロシステムグループ、DAQ ミドルウェアのためのネットワークモニター
- 井上栄二、安芳次、仲吉一男、千代浩司他 KEK エレクトロシステムグループ、DAQ ミドルウェアのための開発環境
- 安芳次、井上栄二、仲吉一男、千代浩司他 KEK エレクトロシステムグループ、DAQ ミドルウェアの機能改善と性能評価
- 日本物理学会2007年秋、2007年9月21日(金)~24日(月)@北海道大学
- 仲吉一男、安 芳次、井上栄二、千代浩司他 KEK エレクトロシステムグループ、GUI による DAQ ミドルウェアのシステム構築
- 千代浩司、安 芳次、井上栄二、仲吉一男他 KEK エレクトロシステムグループ、DAQ ミドルウェアのための Nagios を使ったデータ収集モニタリングフレームワークの開発
- 井上栄二、安 芳次、仲吉一男、千代浩司他 KEK エレクトロシステムグループ、DAQ ミドルウェアベースの CC/NET 用オールインワン DAQ の開発
- 安 芳次、仲吉一男、井上栄二、千代浩司他 KEK エレクトロシステムグループ、DAQ ミドルウェアのための DAQ ワークフロー、GUI およびデータベースの事例研究
- 日本中性子科学会 (JSNS2007)、2007年11月27, 28日@九州大学
- 仲吉一男、安芳次、井上栄二、千代浩司、田中真伸、佐藤節夫、武藤豪、金子直勝、大友季哉、中谷健、内田智久、DAQMiddleware を用いたデータ集積ソフトウェアの開発
- 佐藤節夫他、高速ネットワーク (SiTCP) を使用した He3-PSD 読み出しシステムの開発
- 中谷健、青柳哲雄、大友季哉、鈴木次郎、安芳次、新井正敏、J-PARC/MLF の Day-1 における計算機環境ソフ

トウエアフレームワーク

- 日本物理学会2008年春、2008年3月23日(日)~26日(水)@近畿大学
- 仲吉一男、安 芳次、井上栄二、千代浩司他 KEK エレクトロシステムグループ、DAQ Middleware の開発
- 千代浩司、安 芳次、井上栄二、仲吉一男他 KEK エレクトロシステムグループ、ネットワークスイッチテスト環境の開発
- 井上栄二、安 芳次、仲吉一男、千代浩司他 KEK エレクトロシステムグループ、DAQ ミドルウェアベース・オールインワン DAQ の GUI 開発
- 安芳次、仲吉一男、井上栄二、千代浩司他 KEK エレクトロシステムグループ、DAQ ミドルウェアのための WEB インターフェースの開発
- 日本中性子科学会 (JSNS2008)、2008年12月1-2日@名古屋大学
- 鈴谷賢太郎、社本真一、高田慎一、大友季哉、三沢正勝、金子直勝、大下英敏、佐藤節夫、神山崇、清水裕彦、宇野彰二、田中真伸、安芳次、仲吉一男、武藤豪、猪野隆、福永俊晴、伊藤恵司、杉山正明、森一広、亀田恭男、山口敏男、吉田次、河北、丸山健二、高強度全散乱装置 (NOVA) の現状
- 仲吉一男、安芳次、井上栄二、千代浩司、田中真伸、佐藤節夫、鈴木次郎、武藤豪、大友季哉、中谷健、伊藤崇芳、稲村泰宏、米村雅男、細谷孝明、内田智久、J-PARC/MLF における DAQ ミドルウェア開発の現状
- 伊藤崇芳、ステファヌス・ハルヨ、中谷健、相澤一也、坂佐井肇、中村龍也、阿部淳、盛合、細谷孝明、安芳次、仲吉一男、関暁之、三浦孝充、J-PARC/MLF 工学材料解析装置「匠」におけるデータ収集システムとソフトウェアの現状
- 中谷健、稲村泰宏、新井正敏、大友季哉、鈴木次郎、安芳次、MLF 計算機環境ソフトウェアフレームワーク整備状況

研究会・展示会等

研究会

2006年12月14-17日 SI2006、計測自動制御学会、札幌コンベンションセンター、
2007年6月28日、ロケットアビオニクス開発研究会

展示会

2007年1月30日、TXショーケース、つくば国際会議場、
2008年1月25、26日、TXショーケース、産業技術総合研究所

外部資金獲得

基盤研究 (C) 安 芳次 (仲吉一男)、データ収集ミドルウェアのためのデータベースの研究開発：
18・19年度

基盤研究(C) 井上栄二(仲吉一男、安 芳次)、CC/NETを使ったXMLベースのオールインワンDAQの研究開発：19・20年度

基盤研究(C) 仲吉一男(安 芳次)、データ収集ミドルウェアのための新しいソフトウェア開発手法の研究開発：20・21・22年度

基盤研究(C) 安 芳次(仲吉一男)、データ収集ミドルウェアのためのWEB技術の研究開発：20・21・22年度

雑誌

安 芳次、粒子物理実験のための新しい汎用データ収集システムをめざして、Science & TechnoNews Tsukuba, No.80, 2006.10

特許等

著作権登録(KEK)、安 芳次、井上栄二、仲吉一男、藤井啓文、DAQミドルウェア、2006年度

MPGD プロジェクト

宇野 彰二

1. はじめに

最近の高エネルギー実験や原子核実験では、高粒子密度や高バックグラウンド環境下でよりよい性能を得るために、より高い計数率に耐えられて、よりよい位置分解能が求められている。そこで、最近の微細加工技術の発展と相まって、新しいガス放射線検出器が開発されつつある。このグループでは、Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD) の1つである Gas Electron Multiplier (GEM) の開発を中心に行ってきた。GEM は、10年ほど前に、CERN の F.Sauli(1)によって提案された放射線検出器で、図1に示すような市販の両面フレキシブル基板に多数の細孔が開けられたものである。絶縁体が $50\mu\text{m}$ 厚のポリイミドで、銅箔の厚みが $5\mu\text{m}$ 、孔径が $70\mu\text{m}$ 、孔ピッチが $140\mu\text{m}$ のものが標準である。このフォイルの両面間に高電圧を印加すると、図2に示すように、通常のワイヤーチェンバーのセンスワイヤー近傍のような高電場が孔内に形成され、これを利用してガス増幅を行う。多数の孔がフォイル上に一様に広がっていて、それぞれの孔がガス放射線検出器として働くので、高計数率に耐えられ、2次元的に一様な性能が得られる。この特徴から画像データが得られ、いろいろな応用が期待されている。これまでに、GEM 検出器の動作に関する基本パラメータの測定や電子回路を含めた検出器システムの開発やその応用を試みてきたので、その開発状況の報告を行う。

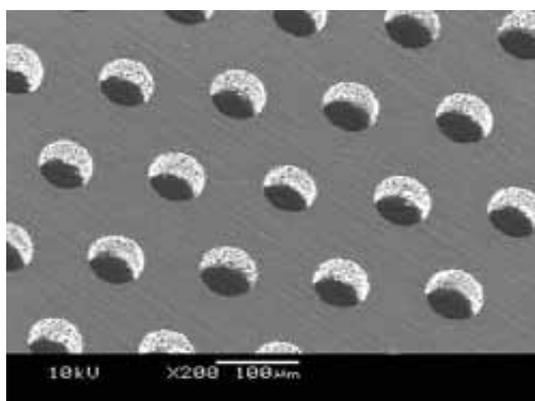


Fig.1 Photo of GEM foil taken by an electron microscope.

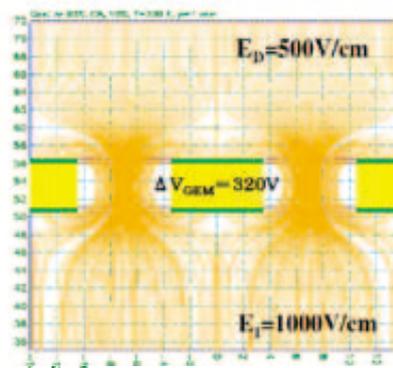


Fig.2 Electric field.

GEM は、CERN などで化学エッチング法(2)によって作られてきた。最近、日本の会社(4)で CERN とは違うプラズマエッチング法(3)により GEM が作られた。また、より放電を少なくするために、レーザーエッチング法(5)との組み合わせによって、同じ会社により新しい GEM が製作されるようになってきた。我々のグループで使われている GEM はすべてその会社から購入したものである。さらに、新しい製作方法により、厚手の GEM ($100\mu\text{m}$ 厚など) も製作可能になり、少ない枚数でより高いガス増幅度得るのに役に立っている。その GEM の場合、ポリイミドの代わりに新しい材料 Liquid Crystal Polymer (LCP)が使われたり、孔径が少し大き目 ($90\mu\text{m}$) のものを使ったりしている。

開発の流れとして、まず、チェンバーの基本動作を理解するための測定を行った。それには、さまざまなパラメータに対するガス増幅度の測定と読み出しパターンを決める上で重要なパラメータである電荷分

布の測定を行った。次に、実際の粒子を測定するための検出器の開発を進めている。その方針は、できるだけ開発室の他のグループと協力して、そこで開発した（または、しようとしている）ものを利用しようとしている。また、できるだけ簡単なものからはじめて、開発が進むのに従ってより難しいものへと発展しようとしている。具体的には、GEM そのものに関しては、厚みは、標準的な $50\mu\text{m}$ 厚のものからはじめ、別の厚みのものを製作、テストする。現在では、 $100\mu\text{m}$ 厚のものを定常的に使用している。大きさは、 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ を標準としてテストを行ってきた。今は、 $20\text{cm}\times 20\text{cm}$ のもののテストを開始しようとしている段階である。読み出しパターンは、電子回路の関係から XY のストリップを用いることによって、2次元位置情報を得ている。パッド読み出しに関しては、今後、電子回路の多チャンネル化に合わせて、徐々に進めていく方針である。ストリップピッチは、最初は、 1.6mm であったが、現在は、 0.8mm である。今年度中には、 0.4mm ピッチを手掛けることができると思っている。ピッチサイズと相関しているが、読み出し電子回路は、最初は、ハイブリッドアンプを並べていたが、現在は、8ch の ASIC を利用している。今後は、32ch ASIC へと進みたいと考えている。データ収集システムも CAMAC を用いたものから初めて、今では、FPGA を利用した CPU 無しの TCP/IP プロトコル (SiTPC) で高速データ転送を行うシステムである。今後は、これを並列化してスケールアップしたいと考えている。検出する粒子は、ガス増幅度がさほど要求されない初期電子数の大きなものからということで、最初は中性子（ボロンとの反応で発生するアルファ粒子）、次は、X線、それから高速の荷電粒子、最後は紫外線（1個の電子）までも検出すること考えている。現在までのところでは、中性子検出器、X線検出器に関しては、あとで示すように成果があがりつつある。今後は、高速の荷電粒子の検出にも力を入れていきたいと思っている。

2. 基本パラメータの測定

2.1 ガス増幅度

高い増幅度で安定に動作させるためには、一般的に3層構造をとることが多い。その場合、チェンバーを動作させるのに多くのパラメータがある。そこで、図3に示すような3層構造のテストチェンバーを製作して、それぞれのパラメータに対してガス増幅度がどのように変化するかを Fe-55 からの 5.9keV の X 線を利用して測定した。GEM チェンバーでは、図に示されているように、それぞれのギャップを DRIFT、TRANSFER、INDUCTION と呼ばれている。図4に GEM の表裏に印加された電圧に対してガス増幅度がどう変化するかを示している。この図では、3枚の GEM に同じ電圧が印加されている状態であるが、通常のワイヤーチェンバーと同様に、印加電圧に対して、指数関数的にガス増幅度が大きくなるのがわかる。

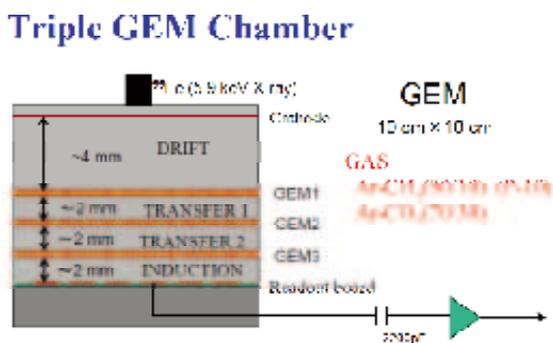


図3 3層 GEM 構造

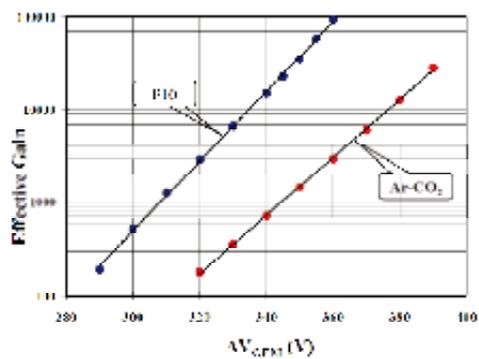


図4 ガス増幅度の μVGEM 依存性

図 5(a)に DRIFT 領域の電場に対するガス増幅度の変化が示されている。低い電場領域では、ほとんど一定であるが、電場が高くなるとガス増幅度は低下する。それは、DRIFT 領域で生成された電子が GEM に向かって移動する際に、図 2 の電気力線からわかるように、電場が高すぎると電子が孔に入らずに GEM の表面に到達してしまう割合が増えてくるからである。よって、発生した全電子を収集するためには、DRIFT 電場は低目の方がいいことがわかる。図 5(b)に INDUCTION 領域の電場に対するガス増幅度の変化が示されている。電場が高くなるにしたがって、ガス増幅度が大きくなる。それは、図 2 からわかるように、INDUCTION 領域の電場があまり弱いと孔内で増幅された電子の一部が GEM の表面に戻ってしまって、読み出し基板の方へ流れる割合が減るからである。電場がある程度以上になると今度は INDUCTION 領域でガス増幅が始まり、急激なガス増幅度の増加がみられる。図 5(c)には、TRANSFER 領域の電場依存性が示されている。この領域は 2 枚の GEM に挟まれているので、ガス増幅度の振る舞いは、DRIFT 領域と INDUCTION 領域の両方の特徴を兼ね備えている。図 5(d)には、INDUCTION 領域のギャップ長を変えたときにガス増幅度がどうなるかを示している。図からわかるように基本的には、ガス増幅度は電場だけにより、ギャップ長には寄らないことがわかる。ただし、あまり短いギャップ長の場合（特に、0.5mm）は、急激なガス増幅度の増加がみられる。これは、孔径、孔ピッチに比べて、ギャップ長が十分に小さくなく、孔付近の電場も変化するためだと思われる。これらの性質は、CERN GEM を利用したものと同様である(7)。さらに詳しい測定データは、修士論文(8)にまとめられている。

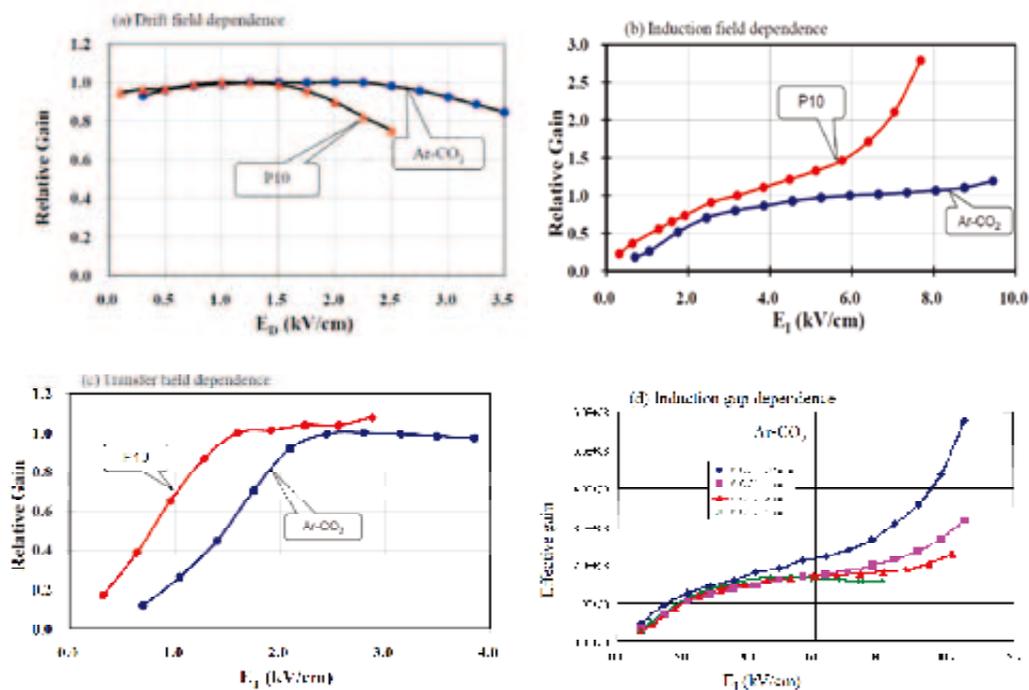


図 5 各場所の電場を変えた時のガス増幅度の変化

2.2 電荷分布

読み出し基板上での電荷分布は、検出器を設計する上で重要な項目である。そこで、図 3 に示すような 3 層構造のテストチェンバーに細かいピッチのストリップが配置された読み出し基板を組み込んで、電荷分布を測定した。ここでは、測定を簡便にするために、ガス増幅度の測定と同じ Fe-55 からの 5.9keV の X 線を用いて行われた。読み出し基板には、0.1mm 幅、0.1mm ギャップ（つまり、0.2mm ピッチ）で長さ 50mm の 64

本のストリップが真ん中に配置され、他の部分は接地してあるものを用いた。ストリップのからの信号は、ハイブリットアンプで増幅された後、30m のケーブルを通して電荷積分型 CAMAC-ADC で電荷量を記録した。測定された典型的な電荷分布が図 6 に示されている。このような分布をガウスフィットして、そのシグマを電荷の拡がりとして定義してこれからの議論を行う。図 7 は、拡がりの 2 乗をギャップを変えながら測定した結果である。2 種類の混合ガスに対して、いずれも線形性があるので、電荷の拡がりには、ガス中を移動する際の拡散が大きく寄与していることがわかる。GEM の孔構造などは考慮されていない単なる平行電場が仮定されている Magboltz(9)によるシミュレーション結果も図中に示されているが、データとよく一致していると言える。アルゴンと二酸化炭素の混合ガスに対しては、少しのずれが認められるが、これは、かなり小さな拡がり (0.2mm 以下) となっているので、ストリップピッチ(0.2mm)やガス中での電子の飛程 (0.1mm) が影響していると考えられる。さらに、詳しい解析方法やデータに関しては、修士論文(10)を参照してもらいたい。

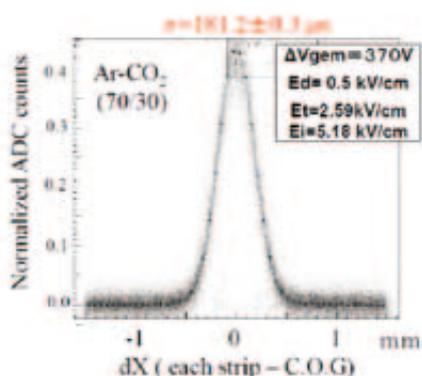


図 6 典型的な電荷分布

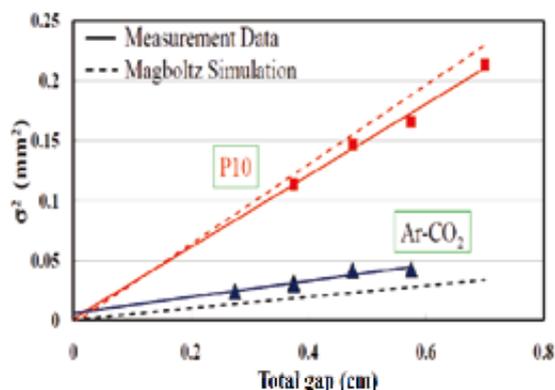


Fig.7 全ギャップ長に対する電荷分布の拡がり具合

3. 中性子検出器

3.1 測定原理と検出器システム

GEM を実際の検出器として使う応用例として、J-PARC のようなパルス中性子源における熱(冷)中性子を検出するガス中性子検出器の開発を行ってきた。ここでの測定器は、2次元位置情報は、散乱する角度を測定する上で重要であり、また、飛行時間から中性子の波長を求めるために時間の測定も同時に行う必要がある。中性子の検出には、GEM の表面にボロン-10 を付加して行っている。中性子は、ボロン層で反応して、荷電粒子(アルファ粒子やリチウム原子核)が生成される。その荷電粒子が、ガス中を通過することによって、中性子の入射位置や時間を測定できる。発生した荷電粒子のボロン内での飛程が非常に短いので、ボロン層の厚みを増やしても、検出効率は上げることができない。そのため、高検出効率を得るためには、薄くボロンを付加した GEM を多数、積層する必要がある。このような構成の中性子検出器は、以下のような特徴を持っている。(1)中性子を検出するための高価なヘリウム-3 ガスを使用しなくてもよく、そのために圧力容器もいらぬ。(2)読み出しパターンを自由に選択でき、2次元読み出しが可能である。(3)よい位置分解能、よい時間分解能が得られる。(4)原子番号の大きな物資を使用していないので、バックグラウンドとなるガンマ線に対して不感な検出器になる。(5)高い計数率に耐えられる。

製作したテストチェンバーには、2種類の GEM が使われていて、ボロンは、50 μm 厚の GEM の両面に付加されていて、ボロンが付加されていない 100 μm 厚の GEM も 1 枚使用されている。また、カソードプレートとしてボロンを片側だけに付加したアルミ薄板を組み込んでいる。ボロンは、中性子と反応しやすいボロン-10 を 99%以上濃縮したものを利用している。

それぞれのボロン層の厚みは、1.2 μm であるが、基本テストのためだけに別の厚みのものも使用している。

ボロン GEM への印加電圧は、有効ガス増幅度が 1 になるようにしている。一方、100 μm 厚 GEM には、信号が現在の電子回路で測定できるように、ガス増幅度が 100 程度になるような高電圧が印加されている。読み出し基板には、それぞれ 0.8mm ピッチの X ストリップと Y ストリップが 120 本ずつ配置されていて、96mmx96mm の範囲をカバーしている。信号の増幅、整形、波高弁別には、開発室の ASIC グループが開発した ASIC チップ(12)を使用している。その 1 チップに 8 チャンネル分あり、それを 1 つの基板に 8 個を配置することによって、1 基板で 64 チャンネル分、この基板 4 枚で 240 本のストリップの信号を処理している。FPGA の配置した基板に 240 本分の信号を集めて、X-Y のコインシデンスなどのデジタル処理を行い、最後は、CPU 無しで TCP/IP の通信プロトコルを利用して、イサネットケーブル 1 本で直接 PC に高速にデータ転送を行っている(13)。

電子回路は、図 8 に示すように GEM チェンバーの背後にコンパクトにまとめられているので、積み重ねることで、検出領域を容易に拡張できるシステムになっている。

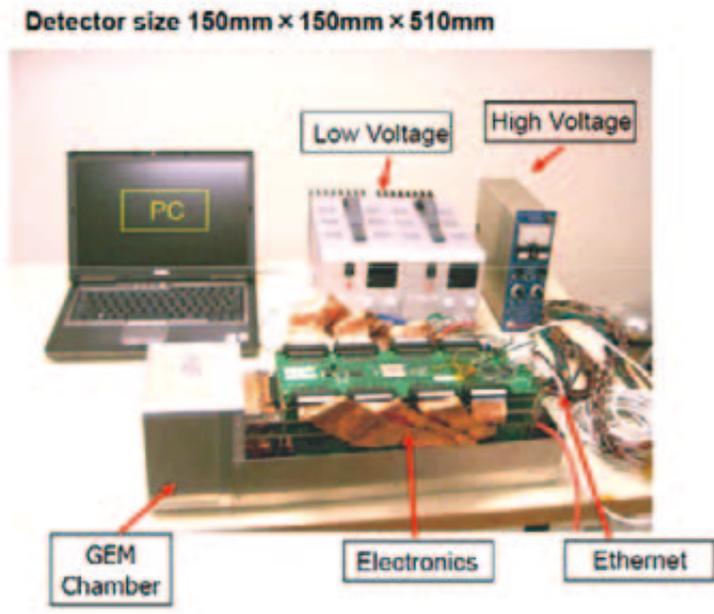


図 8 可搬型コンパクト検出器システム

3.2 放射線源によるテスト

まず、放射線源 Cf-252 を使って原理検証試験を行った。放射線源からの出る中性子のエネルギーは、熱中性子と比較するとかなり高いので、ポリエチレンブロックを利用して、エネルギーを下げることを行ってテストした。まず、最初に、ボロンを付加した GEM を 1 枚だけ検出器の中に入れて、ボロン層の厚みの違いで検出効率がどうなるかを調べた。測定結果は、図 9(a)に示すように、ボロン層の厚みに比例して、測定計数が増えているが、2 μm でかなり飽和現象が見られる。Simulation によれば、3 μm で完全に飽和することが予想

されている。中性子とボロンとの反応で発生するアルファ粒子の飛程は、ボロン層内でもかなり短いので図9(a)のような飽和現象が見られる。そこで、さらに高い検出効率を得るためには、ボロンを付加した GEM を複数枚積層する必要がある。図9(b)が、その測定結果である。図からわかるように、検出効率が、ボロン GEM の積層枚数に対して線型に増えていることがわかる。もちろん、いずれ、飽和することは明らかであるが、その領域にいたるためには、さらにボロン GEM を積層する必要があることも分かる。これらの測定結果により、ボロン GEM を使った中性子検出器が原理的に動作可能であることが示されたといえる。

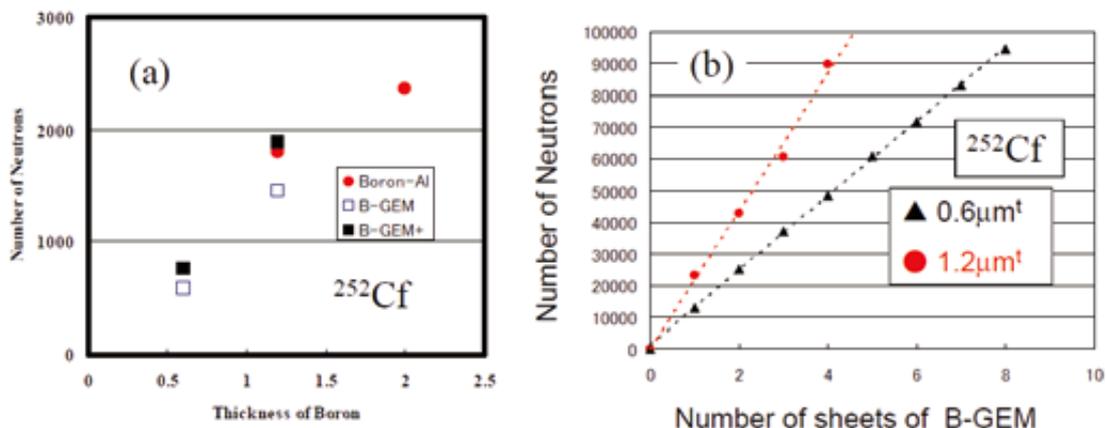


図9 (a) ボロン厚みに対してと(b)ボロン GEM の枚数に対する測定計数の変化

3.3 ビームテスト

日本原子力開発研究機構の研究原子炉 JRR3 からの中性子ビームを用いて、開発した試作器の性能評価試験を行った。中性子ビームで得られたパルス波形は、十分に短いもので高計数率に耐えられることを示唆している。また、中性子による信号の大きさを放射線源 Co-60 からガンマ線と比較すると、十分におおきく、容易に弁別できることが分かった。

検出効率は、よく知られた 10 気圧のヘリウム-3 カウンターと比較すると 2.2\AA の熱中性子に対して、約 30%であることが分かった。このときのチェンバーの構成は、 $1.2\mu\text{m}$ 厚のボロンを両面に付加した GEM を 4 枚と同じ厚みのボロンをカソード片面に付加したものを積層した状態である。位置分解能は、直径 0.5mm のピンホールが開いたカドミニウム板を使って評価すると FWHM で 1mm であると見積もられた。

同じ 2.2\AA の単色熱中性子を使って、散乱テストも行った。図 10(a)に示すように、単結晶である NaCl サンプルを回転中心にセットして、サンプルとチェンバーをそれぞれ回転することによって、期待されたそれぞれの回転角に対して、図 10(b)のようなきれいなブラッグピークを測定することができた。また、 8\AA の単色冷中性子を使って、小角中性子散乱テストも行った。図 11(c)に示すように、サンプルのないダイレクトビームと比較すると、サンプルをおくと明瞭な散乱パターンを測定することができた。さらに、詳しいデータは、修士論文(14)にまとめられている。

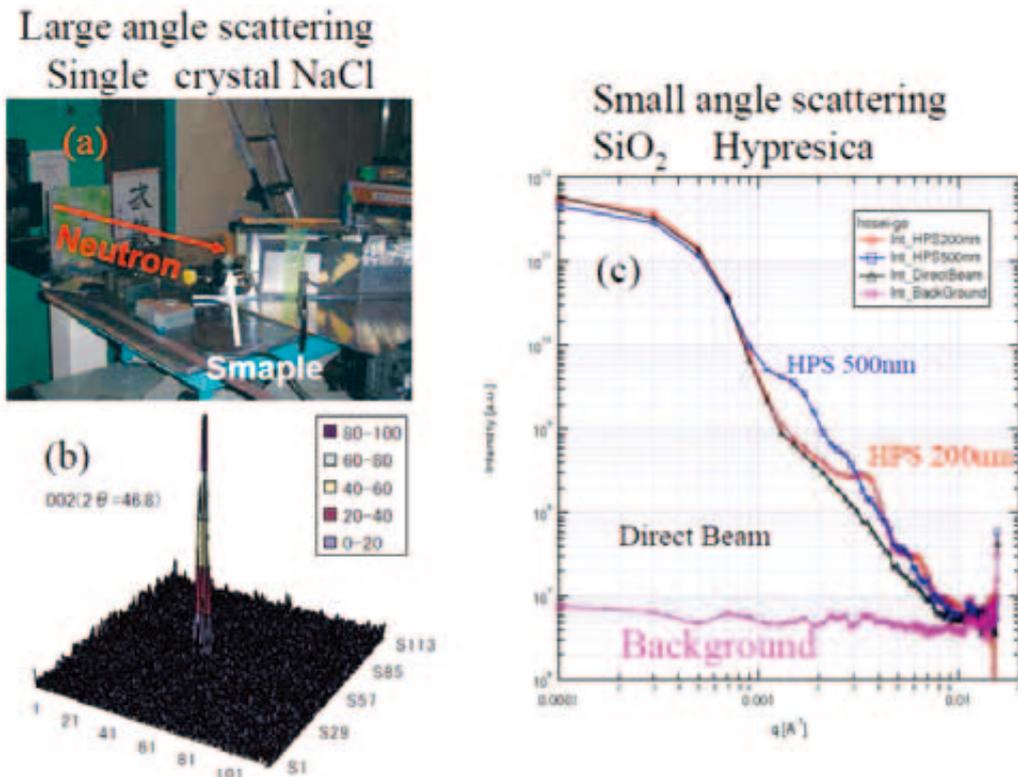


図 10 JRR3 のガイドホールで行われたサンプルテスト
 (a) セットアップ, (b) 単結晶で得られたブラッグ点, (c) 小角中性子散乱の様子

昨年度末に、J-PARC において、パルス中性子源からのビームが使えるようになったので、BL21 でビームテストを行った。図 11 に得られた 2 次元画像と中性子の波長分布を示した。このように、開発中の検出器は、2 次元位置を精度よく測定できると同時に、飛行時間を測定でき、波長分布を求めることが可能である。このような良い結果が得られたので、BL21 では、まず、ビームモニターとして使用することが期待されている。その際に、GEM の高頻度耐性も採用される重要な要素となっている。ビームテストの詳しい結果は、TIPP09 で報告され、論文(15)として公表される予定である。

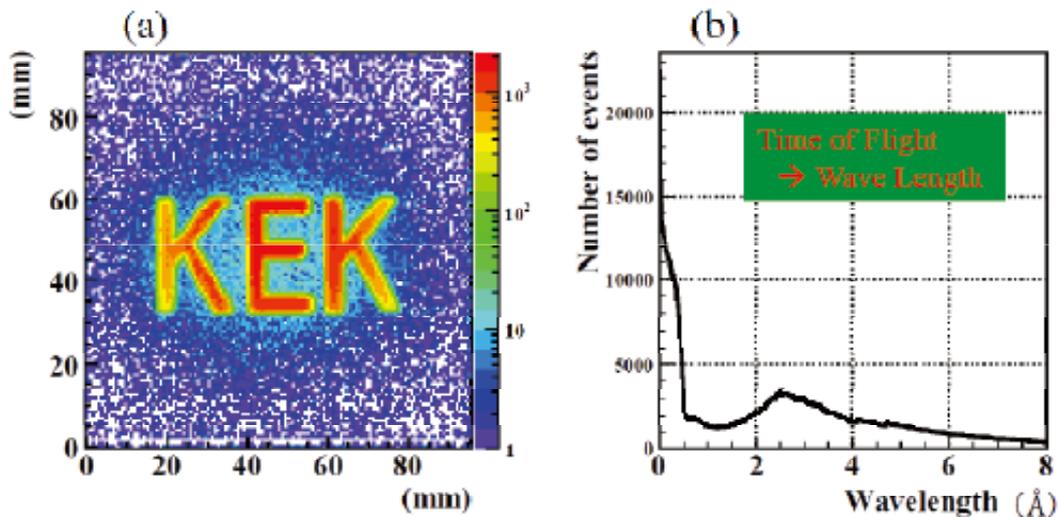


図 11 (a) カドニウムスリットによる 2 次元イメージ (b) パルス中性子源での飛行時間分布

4. 硬 X 線検出器

4.1 検出原理

硬 X 線は、通常の X 線と比べるとはるかに透過力が高いため、重い物質内部の構造解析やコンクリート内の鉄筋の様子を調査するなどの非破壊検査に役立つ。しかし、硬 X 線は、透過力が高いことの裏腹に検出することが難しい。一般に、X 線検出で高感度にするために、Xe ガスが用いられるが、ここでは、金を GEM の表面に付加することによって硬 X 線を電子に変換してから検出する方法を取っている。このことによって、高価な Xe ガスを使う必要がなく、しかも、より高いエネルギーの硬 X 線にまで対応することが可能である。しかも、前述の中性子検出器のボロンを金に代えただけで、まったく同じシステムを利用することが可能である。また、薄く金を付加した GEM を複数枚積層することによって、高い検出効率を得ようとするところも同じである。このような検出器は、検出感度は、結晶型シンチレーターには劣るが、容易に高位置分解能が得られるメリットがある。

実際に、金を付加した GEM を製作して、硬 X 線検出器として動作していることを確認することを行った。3 μm の金を片側に付加したドリフト面を 1 枚と両面に金を付加した GEM を 4 枚積層することによって、検出効率の向上を図っている。1 万倍程度のガス増幅を得るために、100 μm 厚と 50 μm 厚の 2 枚の GEM を利用している。ちなみに、金を付加した GEM では、硬 X 線が電子に変換された場所によって、信号の大きさが大きく変わらないように、有効増幅度が 1 になるような電圧が印加されている。また、GEM 間のギャップは、位置分解能に影響するので 1mm と小さめの値が選ばれている。読み出しストリップのパターンや電子回路は、中性子検出器とまったく同じものが用いられている。

4.2 X 線照射試験

製作した試作器の性能を調べるために、医療用の X 線発生装置を用いた X 線照射試験を行った。用いられた X 線発生装置の管電圧は、120kV で管電流は、1mA 程度である。また、低エネルギーの X 線は今回のテストでは不要であるので、0.3mm 厚のモリブデンフィルターでカットしている。これによって、検出器に照射されている X 線の平均エネルギーは、80keV 程度ある。

鉛板スリットを用いることによって、図 11(a)と同様な 2 次元画像は容易に得ることができた。また、直径 0.5mm のピンホールを利用して、位置分解能を評価すると FWHM で 1mm 程度であることもわかった。

硬 X 線検出器として動作していることを明瞭にわかるサンプルを 2 例示す。図 12 は、厚さ 10mm の鉄板に 9 つの深さの違った直径 6mm の穴をあけたものの吸収透過画像である。9 つの穴の場所で透過量が大きくなっている様子がわかり、1mm の深さのものまで明瞭に認識できる。このことから、鉄管の磨耗状態を使用状態のまま非破壊検査できることが分かる。2 つ目の例が、図 13 で、10cm 厚のコンクリートブロック内の鉄筋の様子を見たものである。3 本の鉄筋が認識できることはもちろんその直径も測定可能であることも分かる。今後、さらに、検出効率を上げたり、照射時間を長くすることによって、さらに厚いコンクリート内の鉄筋の様子を捕らえることが可能になると期待している。さらに、詳しい結果は、修士論文(16)にまとめられている。

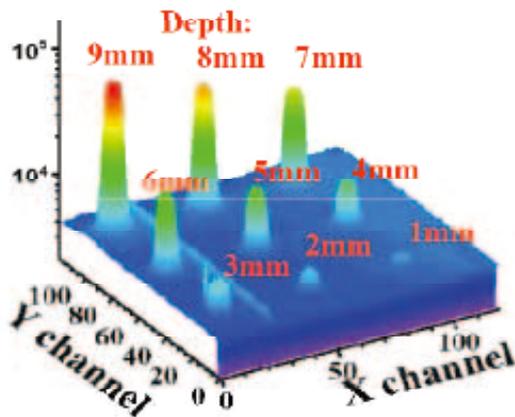


図 12 10mm 厚の鉄板に開けられた深さの違う穴の見え具合

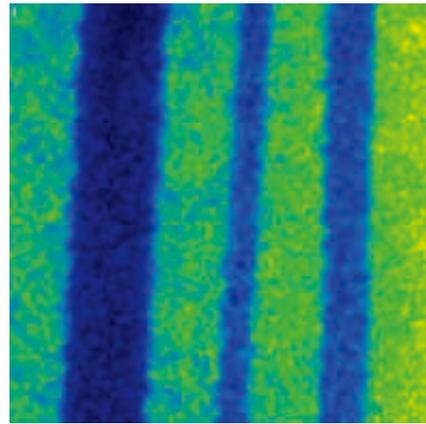


図 13 10cm 厚のコンクリートブロック内鉄筋の透過画像、鉄筋の太さは、左から 16mm、6mm、10mm である。

参考文献

- (1) F. Sauli, Nucl. Instr. and Meth. A 386 (1997) 531.
- (2) The Gas Detector Development Group in CERN (<http://gdd.web.cern.ch/GDD/>).
- (3) M. Inuzuka, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 525 (2004) 529.
- (4) Scienergy Co. Ltd. (info@scienergy.jp) (<http://www.scienergy.jp>).
- (5) T. Tamagawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 560 (2006) 418.
- (6) S. Uno et al., Nucl. Instr. and Meth. A 581 (2007) 271.
- (7) S. Bachmann, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 438 (1999) 376.
- (8) F. Sugiyama, Master thesis in Tokyo University of Science, 2008.
- (9) R. Veenhof, Version 2, CERN April-13, 2005.
- (10) H. Kadomatsu, Master thesis in Saga University, 2007.
- (11) C. Schmidt and M. Klein, Neutron News, vol. 17, pp.12, 2006.
- (12) Y. Fujita, et al., 2007 IEEE Nuclear Science Symposium, N15-19.
- (13) T. Uchida, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 55, pp. 2698, 2008.
- (14) S. Nakagawa, Master thesis in Osaka city University, 2008
- (15) H. Ohosita et al., Nucl. Inst. and Meth. paper is in preparation.
- (16) K. Nagaya, Master thesis in Tokyo University of Science, 2009

成果発表

国内講演

日本物理学会

2006年3月27-30日 愛媛大学 3講演

2007年3月18-21日 鹿児島大学 1講演

2007年3月25-28日 首都大学 1講演

2007年9月21-24日 北海道大学 3講演
2008年3月23-26日 近畿大学 1講演
中性子科学会
2006年12月5-6日 水戸 1ポスター講演
2007年11月27-28日 九州大学 1ポスター講演
2008年12月1-2日 名古屋大学 2ポスター講演
MPGD研究会
2006年1月26-27日 RCNP 2講演

2007年1月26-27日 佐賀大学 3講演
2007年12月14-15日 大阪市大3講演
2008年12月12-13日 理研 3講演 中性子研究会
2008年1月7-8日 中性子デバイスと小角散乱・反射
率研究会 北海道大学 1講演
2008年1月17-18日 中性子制御及びMIEZE/NRSE
合同研究会 京大原子炉実験所

国際会議講演

IEEE: 2006年10月29日-11月4日 San Diego USA 1講演、2007年10月28日-11月2日 Honolulu USA 1講演、2007年10月28日-11月2日 Dresden USA 1講演
VCI: 2007年2月19-24日 Vienna Austria 1ポスター講演
ICANS: 2007年4月25-29日 Dongguan China 1講演

投稿論文

S.Uno, et al., NIM A 581(2007) 271-273
T.Uchida, et al, IEEE TNS 55(2008)2698-2703
宇野彰二 日本物理学会誌 63(2008)687-693
大下英敏、宇野彰二 中性子科学誌 「波紋」 7月号掲載予定

修士論文

門松宏治 佐賀大学 2007年3月卒
中川真介 大阪市大学 2008年3月卒
杉山史憲 東京理科大学 2008年3月卒
長屋慶 東京理科大学 2009年3月卒

現在のグループメンバー

KEK 宇野彰二、関本美知子、村上武、内田智久、
大下英敏（物構研、特任助教）
大阪市大 中野英一
東京理科大 小池貴久
東北学院大、近畿大学、東京農工大学の参加予定

外部資金

科研費 基盤研究B 3年間（2007-2009） 1420万円
NEDO（大友, BL21）からの資金 中性子ビームモニターの開発（2007-2010）
JST 量子ビーム（浦川）からの資金 X線検出器の開発（2008年度）
企業からの共同研究（2社、2007年から）
加速器支援事業 北海道大学（2008、2009年度）

SOIプロジェクト

新井 康夫

1. はじめに

数 μm の位置精度で、高レートの環境化でも荷電粒子の位置検出を行える、Pixel 検出器は今や高エネルギー加速器実験に欠かせない検出器となりつつある。また Pixel 検出器は荷電粒子のみならず、X 線、ガンマ線、中性子等のイメージングデバイスとしても広く使える事から、その応用範囲は医用、構造解析、宇宙、原子力と非常に幅広くなっている。

しかしながら現在実験に使用されている Pixel 検出器は、主にセンサー部とエレクトロニクス部をインジウムや鉛のバンプで接合させた Hybrid 型 Pixel 検出器である。これは、高抵抗のシリコンウエハーが必要となるセンサー部と、低抵抗基板の読みだしエレクトロニクスを同一シリコン上に形成する事が困難であるためである。Hybrid Pixel は二つのシリコンを非常に数多くのバンプにより接合しなければならないという困難を伴い、分解能、物質量、といった様々な面で限界に面してしまっている。

そこで、我々は最新の SOI (Silicon On Insulator) 技術を利用した Monolithic Pixel 検出器の開発を開始した。SOI ウエハーは2種類のウエハーを熱酸化膜により張り合わせる技術で、これにより下部 Si にセンサー用高抵抗率ウエハーを、上部 Si に LSI 用ウエハーといった2種類のウエハーを使用する事が出来る。下部 Si に不純物をインプラントする事により p-n 接合を形成し、さらにここから信号を取り出す VIA の形成を行い上部 LSI 回路に繋ぐ事が出来れば、1 チップで放射線センサーと読み出し回路を備えたピクセル検出器を実現する事が出来る。SOI Pixel 検出器の模式図を図 1 に示す。

SOI Pixel のプロセスは OKI セミコンダクター社の $0.2 \mu\text{m}$ FD-SOI プロセスを元に改良を加え開発を行っている。プロセスの主な仕様を表 1 に示す。

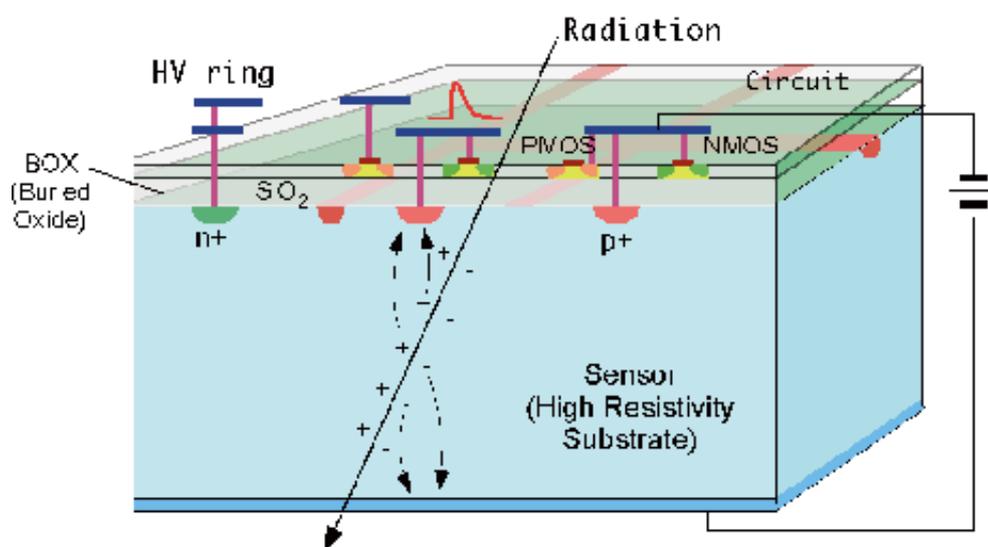


図 1. SOI Pixel 検出器の模式図。

表 1。SOI Pixel プロセス仕様。

Process	0.2 μ m Low-Leakage Fully-Depleted SOI CMOS 1 Poly, 4 Metal layers, MIM Cap., DMOS option Core (I/O) Voltage = 1.8 (3.3) V
SOI wafer	Diameter: 200 mm ϕ , Top Si: Cz, \sim 18 Ω -cm, p-type, \sim 40 nm thick Buried Oxide: 200 nm thick Handle wafer: Cz n-type 700 Ω -cm, 725 μ m thick
Backside	Thinned to 260 μ m, and sputtered with Al (200 nm).

半導体プロセスは一回のプロセスのコストが高い事と、定常的にプロセスを流さないと安定しない事から、国内外の研究者に呼びかけ、我々が主導してMPW(Multi Project Wafer)ランを行ってきた(図 2)。これまでに 3 回の MPW ランを行い、主に積分型ピクセル(INTPIX、図 3)、計数型ピクセル(CNTPIX、図 4)の開発を行ってきた。

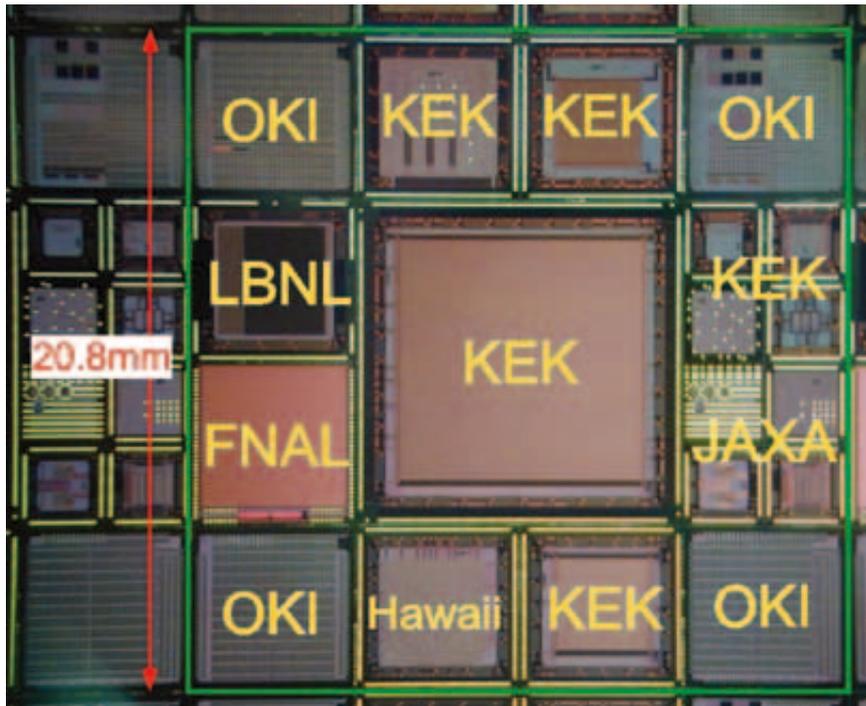


図 2。MPW ランウエハーの写真。緑で囲った部分が 1 枚のマスク領域。

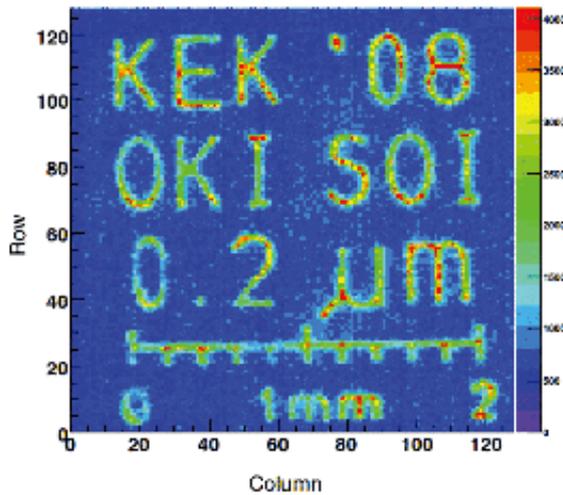
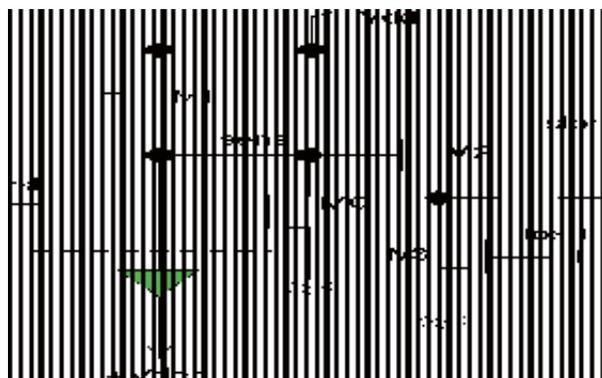


図 3. 積分型ピクセル(INTPIX). (左) ピクセル回路、(右) レーザー光によるイメージ。

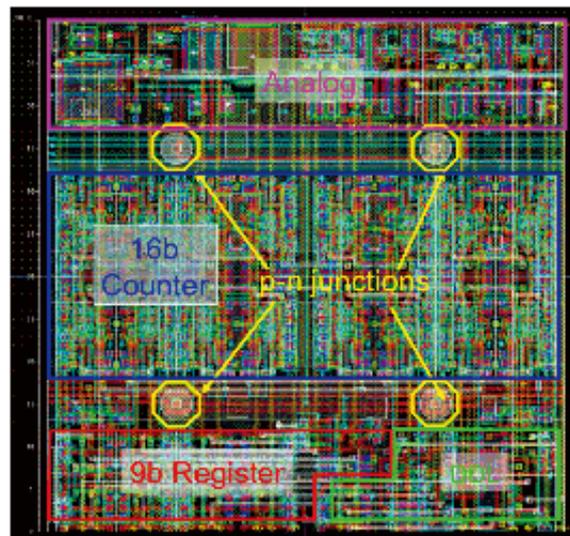
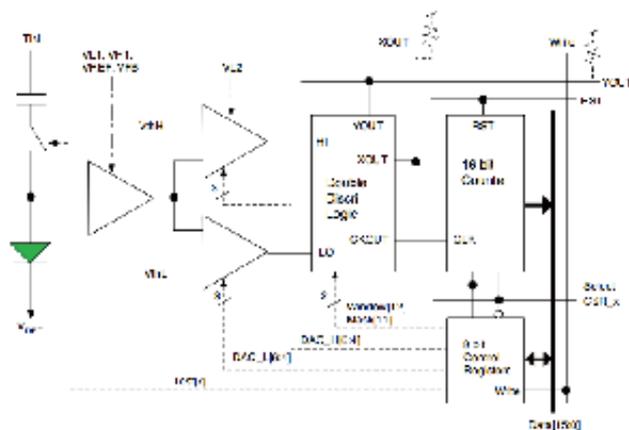


図 4. 計数型ピクセル(CNTPIX). (左) ピクセル回路図、(右) ピクセルレイアウト。

開発経過

これまでの開発経過を以下に示す。

- 2005. 5: SOI Pixel の開発を測定器開発室プロジェクトに提案。
- 2005. 7: (株) 沖電気と SOI ピクセル検出器の開発をスタートすることに合意。
- 2005.10: 東大 VDEC の 0.15 μ m SOI MPW ランに同居して試験チップを試作。
- 2006. 3: 最初の試験チップ完成。光や放射線に対する良好な応答を確認する。
- 2006.12: KEK 主催の 0.15 μ m MPW ランを行う。国内外の研究所・大学から 17 設計を集めた。
- 2007. 6: 八王子 0.15 μ m ライン廃止に伴い、宮城 0.2 μ m ラインへの移行を決断。
- 2007. 9: 科学技術振興事業団、先端計測分析技術・機器開発事業(要素技術開発)の課題に選ばれる。
- 2008. 1: 0.2 μ m プロセスでの初めての MPW ランを行なう。
- 2008. 6: 日米科学技術協力事業の課題に採択。LBNL, Fermilab, Univ. of Hawaii との共同開発を正式にスタートさせる。

2008.10: 半導体部門が(株)沖電気より分社化(株)OKI セミコンダクターに社名変更。同時に(株)ロームの傘下に入る。

2009. 1: 0.2 μ m プロセスでの2回目のMPWを行う。集積度を上げるため、前回よりもメタル間のピッチを縮小した。また、Back Gate 効果の抑制を狙ったBuried P-Well, 3次元積層技術を盛り込む。

参加メンバー

現在共同研究者として活動に参加しているメンバー名を以下に示す。

名前	所属
新井康夫	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
池上陽一	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
海野義信	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
坪山透	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
寺田進	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
高力孝	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
田内一弥	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
池本由希子	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
三好敏喜	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
藤田陽一	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
一宮 亮	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
仁尾大資	総合研究大学院大学、高エネルギー加速器科学研究科
池田博一	宇宙航空研究開発機構、宇宙科学本部
小林 大輔	宇宙航空研究開発機構、宇宙科学本部
和田 武彦	宇宙航空研究開発機構、宇宙科学本部
永田 洋久	宇宙航空研究開発機構、宇宙科学本部
原和彦	筑波大学数理物質科学研究科
三宅秀樹	筑波大学数理物質科学研究科
河内山真美	筑波大学数理物質科学研究科
瀬賀智子	筑波大学数理物質科学研究科
花垣和則	大阪大学理学研究科
廣瀬穰	大阪大学理学研究科
内田潤	大阪大学理学研究科
出原寿紘	大阪大学理学研究科
山本均	東北大学
田窪洋介	東北大学
長嶺 忠	東北大学
小貫 良行	東北大学
堀井泰之	東北大学

佐藤優太郎	東北大学理学研究科
鶴 剛	京都大学理学部
松本浩典	京都大学理学部
高嶋 隆一	京都教育大学
武田 彩希	京都教育大学
初井宇記	理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部
工藤統吾	理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部
広野等子	理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部
矢橋牧名	理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部
古川行人	理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部
亀島敬	理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部
竹谷篤	理化学研究所
Gary Varner	Univ. of Hawaii
Michael Cooney	Univ. of Hawaii
Herbert Hoedlmoser	Univ. of Hawaii
James Kennedy	Univ. of Hawaii
Himansu Bhusan Sahoo	Univ. of Hawaii
Hiro Tajima	SLAC
Peter Denes	LBNL
Marco Battaglia	LBNL
Chinh Vu	LBNL
Devis Contarato	LBNL
Piero Giubilato	University of Padova and INFN Padova, Italy, & LBNL, USA
Lindsay Glesener	LBNL
Raymond Yarema	FNAL
Ronald Lipton	FNAL
Grzegorz Deptuch	FNAL
Marcel Trimpl	FNAL
Piotr Kapusta	Institute of Nuclear Physics, Krakow
Henryk Palka	Institute of Nuclear Physics, Krakow
Dario Bisello	University of Padova & INFN Padova, Italy
Serena Mattiazzo	University of Padova & INFN Padova, Italy
Devis Pantano	University of Padova & INFN Padova, Italy
大野守史	沖セミコンダクター (株)
倉知郁生	沖セミコンダクター (株)
福田浩一	沖セミコンダクター (株)
井田次郎	沖セミコンダクター (株)

林洋一	沖セミコンダクター（株）
河合泰明	沖セミコンダクター（株）
五十嵐泰史	沖セミコンダクター（株）
沖原将生	沖セミコンダクター宮城（株）
小松原弘毅	沖セミコンダクター宮城（株）
大友 篤	沖セミコンダクター宮城（株）
三浦規之	沖セミコンダクター宮城（株）

学位修得の状況

これまでに SOI Pixel の研究で修士論文を書かれた方を以下に示す。

- 1) SOI 技術を用いた一体型 Pixel 検出器用読み出しシステムの開発、及び積分型 Pixel 検出器の性能評価’、大阪大学大学院理学研究科物理学専攻、山中卓研究室前期博士課程 2 年、廣瀬 穰、February 3, 2009
- 2) SOI 技術を用いた半導体検出器の開発’、東京工業大学大学院理工学研究科基礎物理学専攻、修士論文、久世研究室、三枝裕司、2008 年 2 月 12 日
- 3) Silicon-On-Insulator 技術を用いた読み出し回路一体型シリコンピクセル検出器の開発研究’、筑波大学大学院数理物質科学研究科、金研究室、修士論文、望月亜衣。

投稿論文

主な投稿論文を以下に示す。

- 1) “Hard X-Ray SOI Sensor Prototype”, E. Martin, G. Varner, M. Barbero, J. Kennedy, H. Tajima, Y. Arai, IEEE Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics, 11 - 16 June 2006, Otranto (Lecce), Italy
- 2) “First Results of 0.15um CMOS SOI Pixel Detector”, Y. Arai, M. Hazumi, Y. Ikegami, T. Kohriki, O. Tajima, S. Terada, T. Tsuboyama, Y. Unno, H. Ushiroda, H. Ikeda, K. Hara, H. Ishino, T. Kawasaki, E. Martin, G. Varner, H. Tajima, M. Ohno, K. Fukuda, H. Komatsubara, J. Ida, SNIC Symposium, Stanford, California, 3-6 April 2006, SLAC-PUB-12079, KEK preprint, 2006-34, SLAC Electronic Conference Proceedings Archive (SLAC-R-842, eConf: C0604032) PSN-0016.
<http://www.slac.stanford.edu/econf/C0604032/papers/0016.PDF>.
- 3) “Monolithic Pixel Detector in a 0.15um FD-SOI Technology”, Y. Arai, presented at the 6th Hiroshima symposium of Development and Application of semiconductor tracking devices, Sep. 11-15, 2006, Carmel, California, U.S.A.
- 4) “Development of a CMOS SOI Pixel Detector”, Y. Arai, M. Hazumi, Y. Ikegami, T. Kohriki, O. Tajima, S. Terada T. Tsuboyama, Y. Unno, Y. Ushiroda, H. Ikeda, K. Hara, H. Ishino, T. Kawasaki, H. Miyake, E. Martin, G. Varner, H. Tajima M. Ohno, K. Fukuda, H. Komatsubara, J. Ida, Proceedings of 12th Workshop on Electronics for LHC and Future Experiments (LECC 2006), 25-29 September 2006, Valencia SPAIN.
- 5) “Monolithic Pixel Detector in a 0.15um SOI Technology”, Y. Arai, M. Hazumi, Y. Ikegami, T. Kohriki, O. Tajima, S. Terada, T. Tsuboyama, Y. Unno, H. Ushiroda, H. Ikeda, K. Hara, H. Ishino, T. Kawasaki, E. Martin, G. Varner, H. Tajima, M. Ohno, K. Fukuda, H. Komatsubara, J. Ida, H. Hayashi, IEEE Nuclear Sci. Symposium, San Diego, Oct. 29 - Nov. 4, 2006, Conference

- 6) "Evaluation of OKI SOI Technology" presented at the 6th Hiroshima symposium of Development and Application of semiconductor tracking devices, Sep. 11-15, 2006, Carmel, California, U.S.A., Y. Ikegami, Y. Arai, K. Hara, M. Hazumi, H. Ikeda, H. Ishino, T. Kohriki, H. Miyake, A. Mochizuki, S. Terada, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 579, Issue 2, 1 September 2007, Pages 706-711
- 7) "R&D of a monolithic pixel sensor based on 0.15 μm fully depleted SOI technology", Toru Tsuboyama, Yasuo Arai, Koichi Fukuda, Kazuhiko Hara, Hirokazu Hayashi, Masashi Hazumi, Jiro Ida, Hirokazu Ikeda, Yoichi Ikegami, Hirokazu Ishino, Takeo Kawasaki, Takashi Kohriki, Hirotaka Komatsubara, Elena Martin, Hideki Miyake, Ai Mochizuki, Morifumi Ohno, Yuuji Saegusa, Hiro Tajima, Osamu Tajima, Tomiaki Takahashi, Susumu Terada, Yoshinobu Unno, Yutaka Ushiroda and Gary Varner, Nucl. Instr. and Meth. A. *Volume 582, Issue 3, 1 Dec. 2007*, pp. 861-865, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2007.07.130>
The 11th Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria Feb. 19-24, 2007.
- 8) "Deep sub-micron FD-SOI for front-end application", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 579, Issue 2, 1 September 2007, Pages 701-705, H. Ikeda, Y. Arai, K. Hara, H. Hayakawa, K. Hirose, Y. Ikegami, H. Ishino, Y. Kasaba, T. Kawasaki, T. Kohriki, et al. Proceedings of the 11th Symposium on Radiation Measurements and Applications (SORMA XI): Ann Arbor, MI, USA, May 23-26, 2006
- 9) "Electronics and Sensor Study with the OKI SOI process", Y. Arai, Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP-07), 3-7 Sep. 2007, Prague, Czech Republic. CERN-2007-007, pp. 57-63.
- 10) "SOI Monolithic Pixel Detector R&D in a 0.15 μm SOI Technology", Y. Arai, Y. Ikegami, Y. Unno, T. Tsuboyama, S. Terada, M. Hazumi, T. Kohriki, H. Ikeda, K. Hara, H. Ishino, H. Miyake, K. Hanagaki, G. Varner, E. Martin, H. Tajima, Y. Hayashi, M. Ohno, K. Fukuda, H. Komatsubara, J. Ida. 16th International Workshop on Vertex detectors, September 23-28, 2007, Lake Placid, NY, USA, Vertex 2007, Poster Presentation.
- 11) "SOI Pixel Developments in a 0.15 μm Technology" , Y. Arai, Y. Ikegami, Y. Unno, T. Tsuboyama, S. Terada, M. Hazumi, T. Kohriki, H. Ikeda, K. Hara, H. Miyake, H. Ishino, G. Varner, E. Martin, H. Tajima, M. Ohno, K. Fukuda, H. Komatsubara, J. Ida, H. Hayashi, Y. Kawai, 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, N20-2, pp. 1040-1046.
- 12) "Total Dose Effects on 0.15 μm FD-SOI CMOS Transistors" , Y. Ikegami, Y. Arai, K. Hara, M. Hazumi, H. Ikeda, H. Ishino, T. Kohriki, H. Miyake, A. Mochizuki, S. Terada, T. Tsuboyama and Y. Unno, 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, N44-6, pp. 2173-2177.
- 13) "A monolithic pixel sensor in fully depleted SOI technology" , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 583, Issues 2-3, 21 December 2007, Pages 526-528. Marco Battaglia, Dario Bisello, Devis Contarato, Peter Denes, Piero Giubilato, Lindsay Glesener, Chinh Vu.
- 14) N04-5 'Radiation Resistance of SOI Pixel Sensors Fabricated with OKI 0.15 μm FD-SOI Technology' , K. Hara, M. Kochiyama, A. Mochizuki, T. Sega, Y. Arai, K. Fukuda, H. Hayashi, M. Hazumi, J. Ida, H. Ikeda, Y. Ikegami, H. Ishino, Y. Kawai, T. Kohriki, H. Komatsubara, H. Miyake, M. Ohno, M. Okihara, S. Terada, T. Tsuboyama, Y. Unno, Nuclear Science Symposium Conference Record, 2008. NSS '08. IEEE, 19-25 Oct. 2008 Page(s):1369 - 1374, Digital Object Identifier 10.1109/NSSMIC.2008.4774670

- 15) “Waveform Observation of Digital Single-Event Transients Employing Monitoring Transistor Technique”, Daisuke Kobayashi, Kazuyuki Hirose, Yoshimitsu Yanagawa, Hirokazu Ikeda, Hirobumi Saito, Veronique Ferlet-Cavrois, Dale McMorrow, Marc Gaillardin, Philippe Paillet, Yasuo Arai, and Morifumi Ohno, IEEE Trans. Nucl. Sci., Volume 55, Issue 6, Part 1, Dec. 2008 Page(s):2872 - 2879, Digital Object Identifier 10.1109/TNS.2008.2006836
- 16) D. Kobayashi, K. Hirose, V. Ferlet-Cavrois, D. McMorrow, M. Gaillardin, T. Makino, H. Ikeda, Y. Arai, and M. Ohno, “Device-physics-based analytical model for single event transients in SOI CMOS logics”, 2009 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC), Quebec, Canada, July 20--24, 2009, accepted for platform presentation, paper A-2.
- 17) 新井康夫、「SOI 技術による一体型ピクセル検出器の開発」、高エネルギーニュース、2007 年 6 月、第 26 巻 1 号、pp. 1-8.
- 18) 2008.9 (株)TCAD インターナショナル「TCAD の SOI ピクセル検出器開発への応用、～放射線センサーと LSI の融合に向けて～」、
http://www.tcad-international.com/user_case/user_case01.html
- 19) 2008.9.25 KEK ニュース「超小型の放射線イメージセンサー、～絶縁技術で放射線検出器を作る～」、<http://www.kek.jp/newskek/2008/sepoct/SOI.html>

国際学会、国内学会発表状況

これまでに学会等で発表した状況を以下に示す。

- 1) IEEE Nucl. Sci. Symp., Oct. 2008, Poster R12-58, ‘Development of Silicon-on-Insulator Sensor for X-Ray Free-Electron Laser Applications’, T. Kudo, T. Hatsui, Y. Arai, Y. Ikegami, Y. Unno, T. Tsuboyama, S. Terada, M. Hazumi, T. Kohriki, H. Ikeda, K. Hara, A. Mochizuki, H. Miyake, H. Ishino, Y. Saegusa, S. Ono, M. Ohno, K. Fukuda, H. Komatsubara, J. Ida, H. Hayashi, Y. Kawai, M. Okihara, T. Ishikawa.
- 2) 2006 年 3 月 27 日、日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学）、SOI 技術による Pixel 検出器の開発、新井康夫、他 SOIPIX グループ。
- 3) 2006 年 10 月 31 日、日本物理学会 2006 年秋季大会（ハワイ）Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities、”SOI pixel technology and Study on its radiation hardness”, ISHINO, Hirokazu.
- 4) 2006 年 10 月 31 日、日本物理学会 2006 年秋季大会（ハワイ）Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities、”Performance test of the SOI pixel detector”, MIYAKE, Hideki
- 5) 2006 年 10 月 31 日、日本物理学会 2006 年秋季大会（ハワイ）Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities、”TCAD Simulation for SOI Pixel detectors”, HAZUMI, Masashi
- 6) 2007 年 9 月 22 日、日本物理学会第 62 回年次大会（北海道大学）、SOI 技術を用いた pixel 検出器の開発(1)（レーザー・放射線源を使用した実験評価）、小野峻、他 SOIPIX グループ。
- 7) 2007 年 9 月 22 日、日本物理学会第 62 回年次大会（北海道大学）、SOI ピクセル検出器開発 2「TCAD シミュレーションを用いた SOI ピクセル検出器の性能評価」、三枝裕司、他 SOIPIX グループ。
- 8) 2007 年 9 月 22 日、日本物理学会第 62 回年次大会（北海道大学）、SOI 技術を用いた monolithic pixel 検出器の開発(3)（陽子線照射実験）、望月亜衣、他 SOIPIX グループ。
- 9) 2008 年 3 月 26 日、日本物理学会第 63 回年次大会（近畿大学）、”SOI 技術を用いた monolithic pixel 検出器の開発（ γ 線照射実験）”、望月亜衣、他 SOIPIX グループ。

- 10) 2008年3月26日、日本物理学会第63回年次大会(近畿大学)、“SOI技術を用いたpixel検出器の開発(放射線検出による実験評価)”、小野峻、他 SOIPIX グループ。
- 11) 2008年9月21日、日本物理学会秋季大会(岩手大学)、“SOI技術を用いた新しいX線イメージセンサーの開発”、三好敏喜、他 SOIPIX グループ。
- 12) 2008年9月23日、日本物理学会秋季大会(山形大学)、“SOI pixel 検出器におけるセンサー及び回路開発”、池本由希子、他 SOIPIX グループ。
- 13) 2008年9月23日、日本物理学会秋季大会(山形大学)、“SiTCP 技術を用いた SOI pixel 検出器読み出しシステムの開発”、廣瀬穰、他 SOIPIX グループ。
- 14) 2008年9月23日、日本物理学会秋季大会(山形大学)、“SOI技術を用いた pixel 検出器の開発(放射線損傷試験)” 瀬賀智子、他 SOIPIX グループ。
- 15) 2009年3月27日、日本物理学会第64回年次大会(立教大学)、“SOI pixel 検出器におけるセンサー及び回路開発”、池本由希子、他 SOIPIX グループ、素粒子実験領域。
- 16) 2009年3月27日、日本物理学会第64回年次大会(立教大学)、“SOI pixel 検出器用 DAQ システムの開発、及び性能試験”、廣瀬穰、他 SOIPIX グループ、素粒子実験領域。
- 17) 2009年3月27日、日本物理学会第64回年次大会(立教大学)、“SOI技術を用いた読みだし一体型ピクセル検出器の開発(ENEXSS を用いた放射線損傷シュミレーション)”、河内山真美、他 SOIPIX グループ、素粒子実験領域。
- 18) 2009年3月28日、日本物理学会第64回年次大会(立教大学)、“X線 CCD の多数読み出しのためのFD-SOI を利用した ASIC の開発”、出原寿紘、他 SOIPIX グループ、宇宙線・宇宙物理領域。
- 19) 2009年3月28日、日本物理学会第64回年次大会(立教大学)、28pRE-7、“SOI技術を用いた新しいX線イメージセンサーの開発II”、三好敏喜、他 SOIPIX グループ、領域 10。

外部資金獲得状況

現在までに獲得した外部資金の状況を以下に示す。

- 1) 平成19-22年度、科学技術振興機構 先端計測分析技術・機器開発事業(要素技術開発)、「SOI技術による時間・空間X線イメージセンサー」
- 2) 平成20-21年度、日米科学技術協力事業(高エネルギー物理分野)、衝突実験用測定器の開発、「SOI技術を用いた先進的ピクセルセンサーの開発」
- 3) 平成18年度-19年度、科学研究費補助金 基盤研究(A)(一般) 研究代表者 坪山透、「SOI技術を用いたピクセルセンサーの開発」
- 4) 平成20年度-22年度、科学研究費補助金 基盤研究(B)(一般) 研究代表者 鶴 剛、「SOI技術による低バックグラウンド・精密分光撮像・広帯域X線ピクセル検出器の開発」
- 5) 平成21年度-24年度、科研費 基盤研究(A)、「SOI技術による高分解能・薄型ピクセル検出器の研究」、研究代表者 新井康夫。

次世代光センサープロジェクト

吉村 浩司

活動報告

平成 17 年度に測定器開発室の光センサーグループを立ち上げるにあたり、新しい光センサとして SiPM/MPPC (Silicon Photomultiplier/MultiPixel Photon Counter) の実用化を目指して活動を開始した。このセンサーは APD をガイガーモードで動作させて 2 値信号として読み出し、それを多数集めることにより擬似的なアナログ信号を得るという原理に基づいている。主な特長はゲインが高く、高倍率のプリアンプが不要で、100V 程度の電圧で駆動でき、パルスが高速で、磁場中で動作可能という点である。開発に成功すれば、高速、多チャンネルの光センサを安価に実装することが可能になり、素粒子原子核実験のみならず、他分野(医学等)への波及効果も期待できる。

従来、光センサーの開発は、各実験グループがそれぞれ個別に光センサーメーカーにアクセスし開発を行ってきたのに対して、測定器開発室光センサーグループ (RD-Photon) が、情報交換および R&D をとりまとめる中心的な役割を果たすことにより、成果をグループ間で共有して有効に利用できるようにし、開発を効率化することができた。発足から 4 年間で、基本特性の理解、測定器システムとしてのインテグレーション、環境の影響(温度、放射線)、大量サンプルのテスト、等について成果をあげ、T2K 実験において世界に先がけて実用化に成功した。

平成 20 年度には実用化の最終段階として大量サンプルの試験を行い、また、ピクセル数の高いサンプルを大量に使用した試作器のテスト、ガンマ線中性子照射による特性の変化の測定を行った。また、将来に向けて、さらに性能を向上させるスタディもおこなっている。シミュレーションを用いデバイス特性を理解して、新たなアイデアに基づくセンサーの提案も行った。本報告では、以上の R&D の成果を報告する。

MPPC の実用化 (実機への応用)

T2K 測定器

T2K 実験では、大規模な高エネルギー実験の測定器の実機として初めて MPPC を採用した。棒状のシンチレータの光を、埋め込まれた波長変換ファイバー (WLS) ファイバーで外部に引き出して光センサーで読み出す方式で、1.3 mm x 1.3 mm の MPPC センサーを開発した。実験全体では 63500 個のセンサーが使用されるが、すでに平成 19 年度から大量生産が始まっており、平成 20 年度は納入された 24500 個の光センサーのサンプルの性能をチェックした。大量サンプルを効率よくテストするため、図 1 に示すような 64 個のサンプルを同時に測定できるシステムを Trip-T チップを用いて測定器開発室で開発した。測定項目は、ゲイン、ノイズ、光検出効率 (PDE) および、それぞれの温度依存性である。図 2 に 1024 個の測定結果を示す。光センサーメーカーから送られてきたデータシートとほぼ一致する結果が得られた。

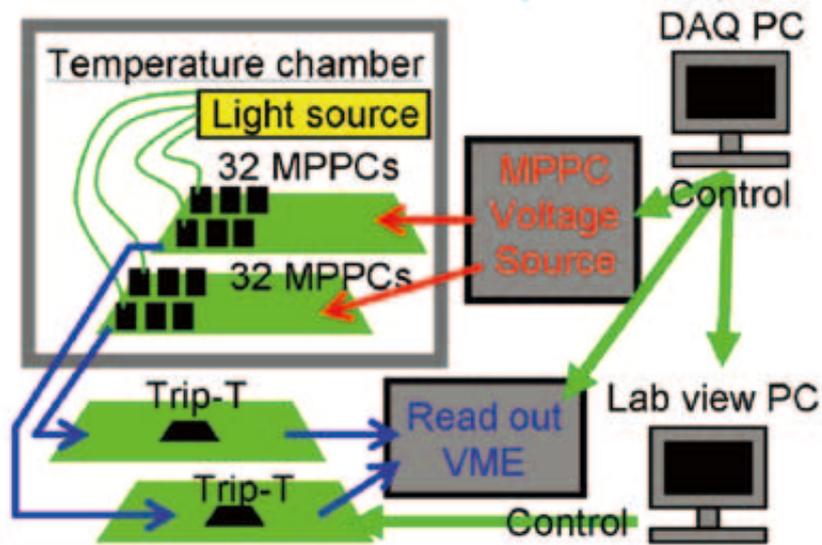


図1 大量サンプル測定装置：恒温槽内で温度をコントロールしつつ、光を照射するとにより64個のセンサーの測定を一度に行うことができる。

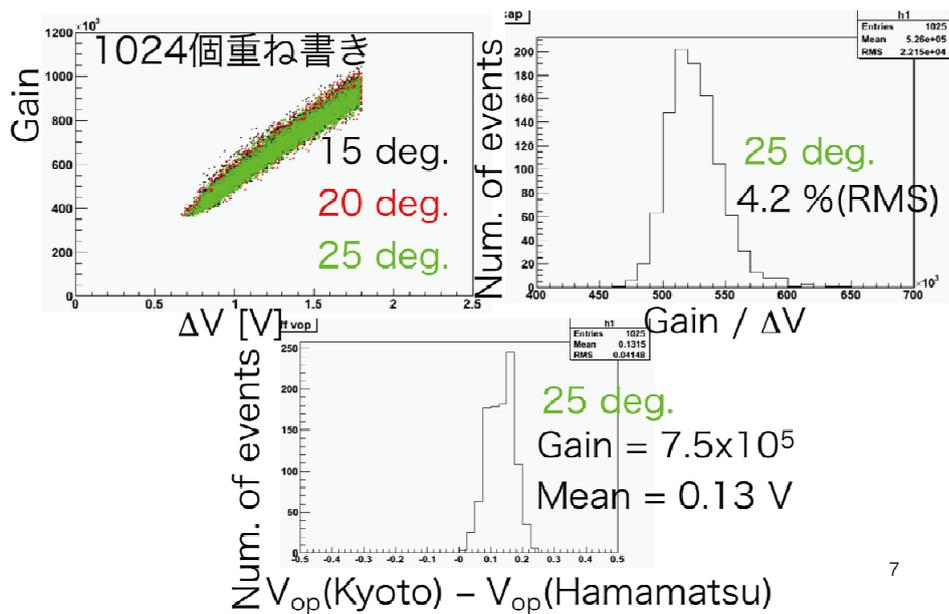


図2 測定結果の一部：1024個のサンプルについて、3つの温度でゲインと ΔV （ブレイクダウン電圧を基準にした電圧）をプロットしたもの（左上）、ゲインと ΔV の直線性（右上）、 ΔV のメーカーにおける測定値との変化（図）

ILC カロリメータ

ILC カロリメータグループ (CALICE) は、MPPC を用いたカロリメータを開発している。シンチレータの棒または板に WLS ファイバーを埋めこんで、MPPC で読み出す。電磁シャワー等を高いリニアリティで測定するため、MPPC にも高いリニアリティが必要とされる。測定器開発室では、高いリニアリティを達成するため、

高いピクセル数の MPPC を開発してきた。現在 1600 ピクセルのものができており、さらに高いピクセル数のものを開発中である。また、カロリメータとして測定器を組み上げた時の不感領域を小さくするために、MPPC のセンサーをシンチレータに直付けにしてフレキシブル基板で読む方式（図3）を採用しており、そのためのパッケージの開発を行った。

平成 20 年度は図3に示すような 2000 個の MPPC を使用したプロトタイプを作成し、フェルミ研究所でビームテストを行った。それに先駆けて、使用する MPPC のテストを行った。現在、得られたデータを解析中である。

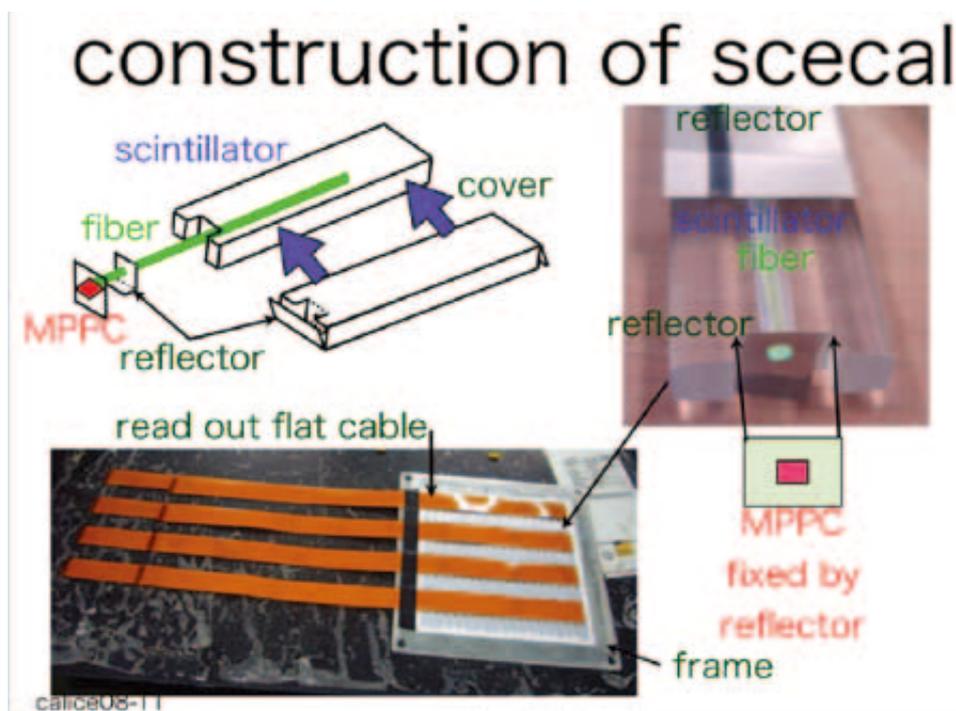


図3 カロリメータの構造：シンチレータの端部に溝がつけられており、その溝に MPPC が埋め込まれて WLS ファイバーからの信号を読み出す。MPPC センサーはフレキシブルに取り付けられて、シンチレータと位置決めが行われる。

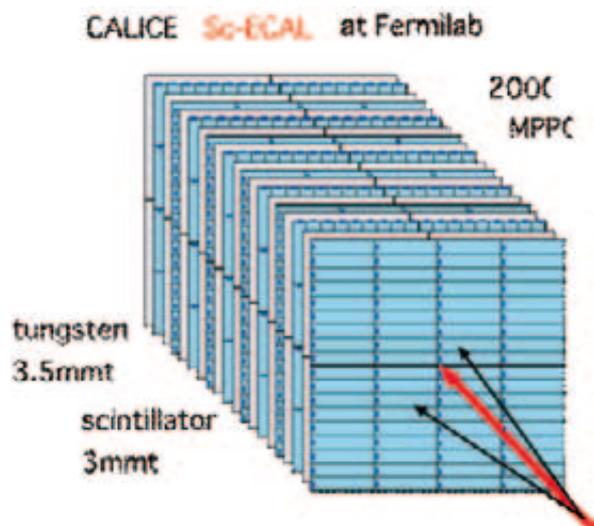


図4 ビームテストを行ったカロリメータのプロトタイプ概念図：2000 個の MPPC が使用されている。

環境耐性の評価（放射線耐性、温度特性、長期安定性）

MPPCはその優れた特長から、素粒子原子核実験、宇宙線実験での幅広い利用が見込まれているが、今後、使用環境に合わせて、その動作を検証していく必要がある。特に、放射線に曝される環境での使用が数多く検討されており、耐放射線に関する情報およびその特性改善が非常に重要となっている。

測定器開発室では、平成18年度から、様々なビーム（ガンマ線、陽子線、中性子線、重イオンビーム）をあてて、MPPCの特性変化を調べてきた。その結果、放射線照射による特性変化には、ガンマ線、電子線放射によって引き起こされる電離過程による電荷捕獲による電氣的性質の変化と、陽子線、中性子線、その他重粒子先放射による格子欠陥が引き起こす（バルク損傷）との2種類があることがわかってきた。

平成20年度は電離過程による損傷に有効な対策が施されたサンプルがメーカーから供給されたので、そのテストを行った。また、中性子照射に対しては、さらに照射サンプルの性能評価、解析を進めた。

ガンマ線照射

メーカーから供給された2種類のサンプル(図5 A, C)を従来サンプル(図5 B)とともに ^{60}Co 線源(10TBq)を用いて約60 Gy/hの強度で照射した。照射中、センサに電圧をかけて、漏れ電流をモニタした。図6に示すように積分線量200 GyあたりでサンプルBの漏れ電流が急激に増加し、200 GyでサンプルBの漏れ電流が増加した。サンプルCは同様の変化が90 Gyあたりでおこり、サンプルAは600 Gyを照射しても、変化は見られなかった。照射後、漏れ電流が増加したサンプルBの赤外線写真をとったところ、左右端に放電が認められた。サンプルAに関しては従来構造よりも放射線耐性が強く、サンプルCについては放射線耐性が弱くなっていることを確認できた。

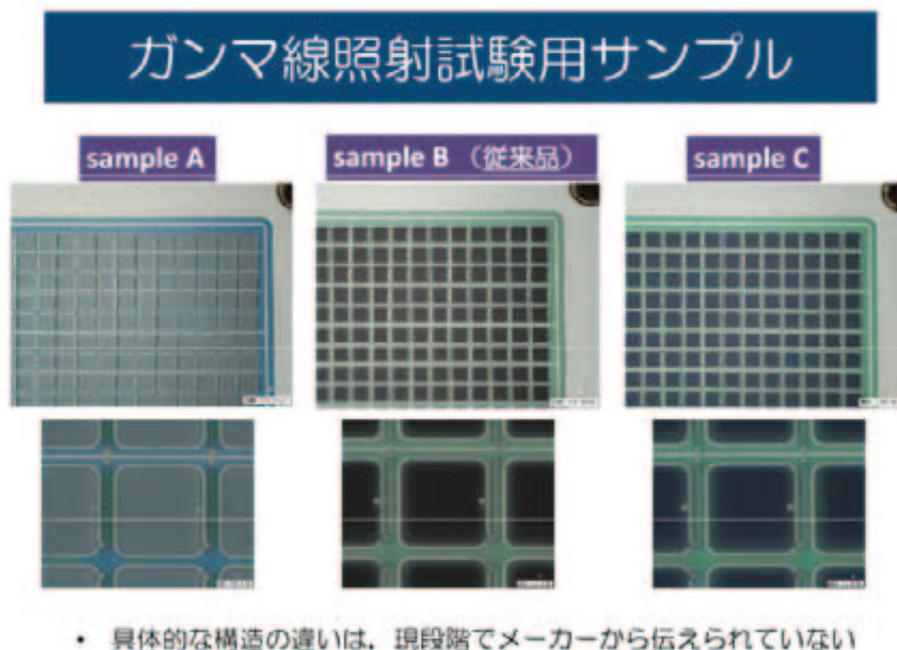


図5 新しい試験サンプル拡大写真：見た目の構造はほぼ同じに見えるが、色の見え方が異なっている。

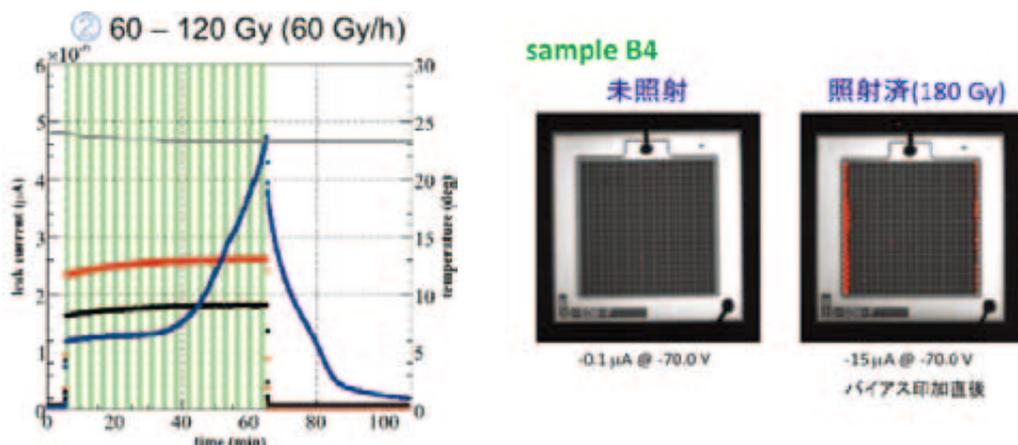


図6 照射中の漏れ電流および温度変化（左）、赤外線写真（右）：サンプルBの漏れ電流が急激に増加し、照射をやめると徐々に落ちてきているのがわかる。サンプルAは照射をやめるとほぼ0になる。

中性子照射

H19年度に照射したサンプルに対して、基礎特性の測定を引き続き行った。図7に示すように中性子の照射が増えるとノイズが増加し始めて 10^{10} n/cm² を越えたあたりから、光電子ピークが見られなくなっている。ノイズの状況は1年後でも変化が見られなかった。同じサンプルを-10℃まで冷却したところ、ノイズレートが減り光電子のピークがはっきりと見られるようになり、一定の改善が認められた（図8）。

ガンマ線の放射線耐性を向上させた試験サンプルに中性子を照射したところ、従来のサンプルとの間に変化は見られなかった。新しいサンプルはバルク損傷に対しては効果がないことが分かった。

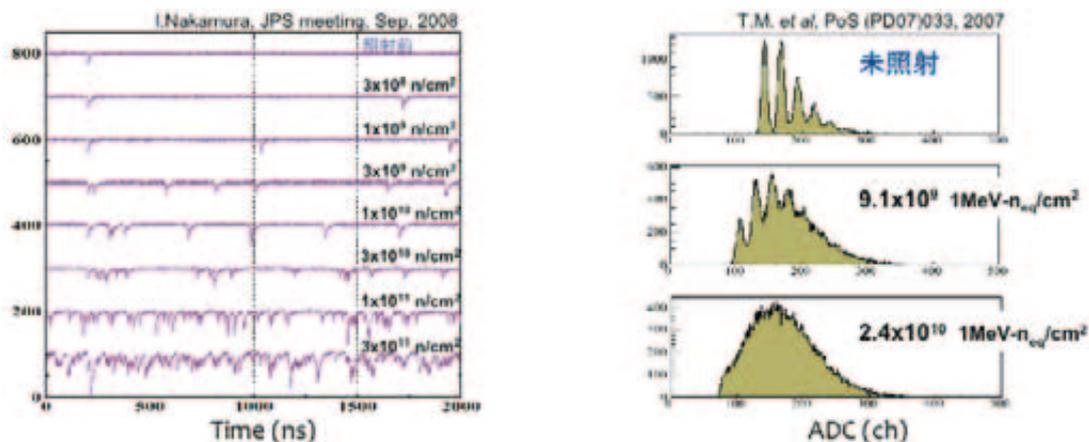
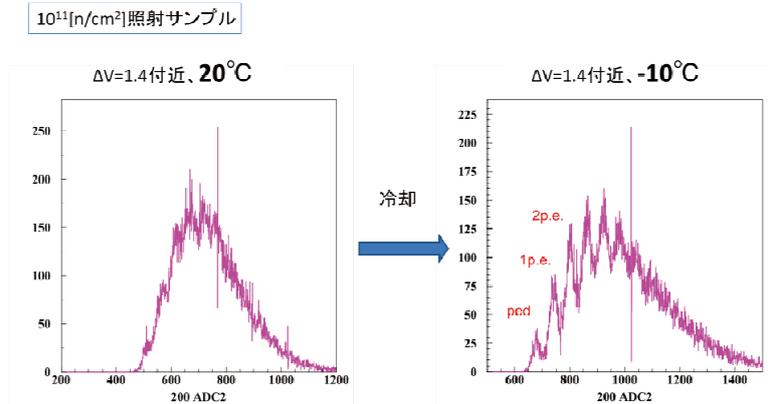


図7 中性子照射によるノイズの増加：中性子の照射量を変化させたときのMPPCの波形（左）、ADC分布（右）

ADC分布



冷やしてノイズレートを減ったことにより、1p.e.,2p.e.の山がはっきり見えるようになった。

図 8 冷却によるノイズの減少： -10°Cまで冷却すると ADC 分布における光電子のピークがはっきりと見えるようになった（右）。

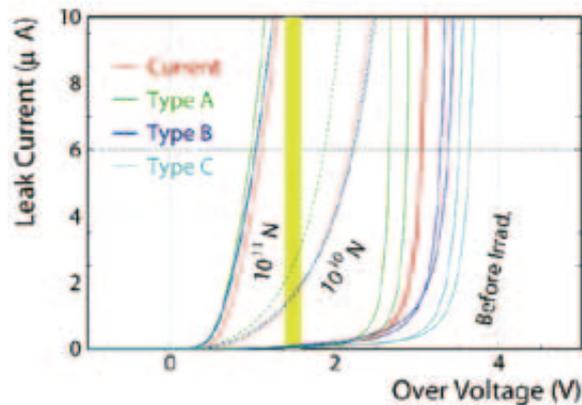


図 9 中性子照射量による漏れ電流の変化： 照射前、10¹⁰、10¹¹ 中性子を照射したときの、各サンプルの漏れ電流をΔV に対してプロットしたもの。異なる種類のサンプル間に違いは認められなかった。

特性の理解と新しいデバイス提案

測定器開発室は、さまざまな測定を通して、MPPC デバイスの特性理解につとめてきた。これまでに、ランダムノイズに埋もれて分離困難であったクロストークやアフターパルスを、測定方法を工夫したり波形解析を行うことにより、分離して理解することに成功している。今後、デバイスを改良し、さらに性能を向上させていくためには、プロセスのレベルまで踏み込んで、内部動作を詳細に理解する必要がある。そのために、等価回路を用いたモデル化や TCAD シミュレーションの手法を利用している。

図 10 に、低温時に観測された波形変化を定量的によく再現する等価回路を示す。このモデルでは、ゲインはデバイスの静電容量によって決定され、クエンチ抵抗の温度変化により波形変化がよく再現されている。ま

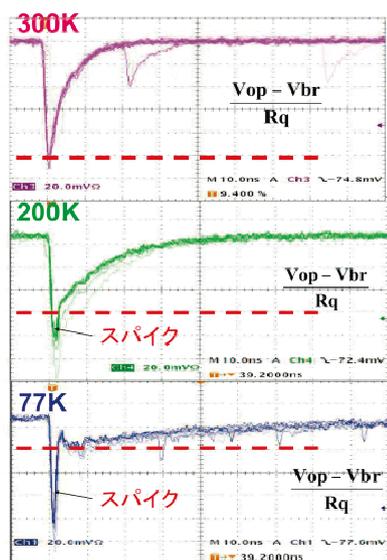
た、シミュレーションを利用して、電子なだれ（アバランシュ）を起こすことに成功した。図 11 にシミュレーションで得られた電子および正孔(ホール)が元になってできるアバランシュ確率の電圧依存性を示す。電子、ホール起源のアバランシュ確率の電圧依存性は、それぞれ PDE（光測定効率）およびノイズレートの電圧依存性を再現しているのがわかる。この結果は、青色の光は表面近くで電子ホールペアを生成し、増倍層で電子がアバランシュを起こすのに対し、ランダムノイズは裏側のドリフト層で発生し、ホールがドリフトして増倍層に到達し、アバランシュを起こしていることを示唆している。つまり、光に対しては感度が小さいドリフト層でノイズが多く発生していることを意味している。

これらの結果を元に、次の2点の新しいデバイス構造の提案を行った。

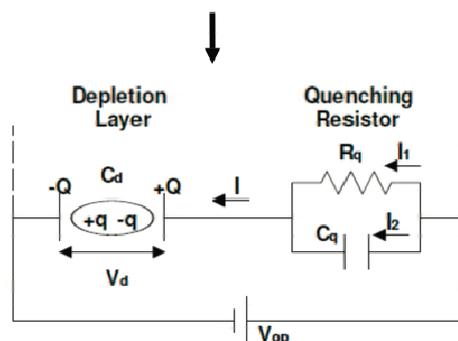
- (1) 裏側のドリフト層を薄くして、ノイズの発生源を押さえてノイズを低減させる。これは中性子照射によるバルク損傷を起こす領域を減らす効果もあり、耐放射線性を改善できる可能性もある。
- (2) センサー部分に並列にバッファコンデンサを接続することにより、ゲインを増大させる。裏面に作成することで、開口率を減らさずにコンデンサを生成する。

現在、これらの提案を反映したセンサーの試作をメーカーに依頼しているところである。

内部動作メカニズムのモデル化



- なぜスパイク状の波形が見えるのか
- 電流値が予想より大きいのはなぜか
- なぜクエンチが起きるのか



$$I = C_d \frac{dV_d(t)}{dt} + \frac{dq(t)}{dt}$$

図 10 内部動作メカニズムのモデル化： 等価回路により低温時に観測されるスパイク状の波形がよく再現される。

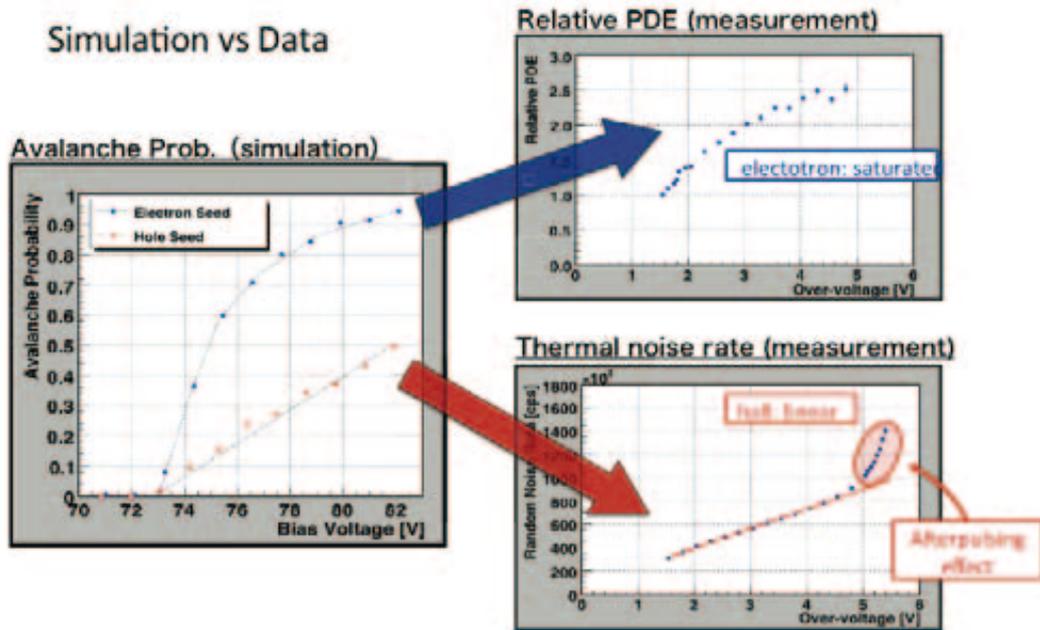


図 11 シミュレーションによるアバランシュの起こる確率： 電子起源のものは PDE、ホール起源のものはノイズレートの電圧依存性をよく再現している。

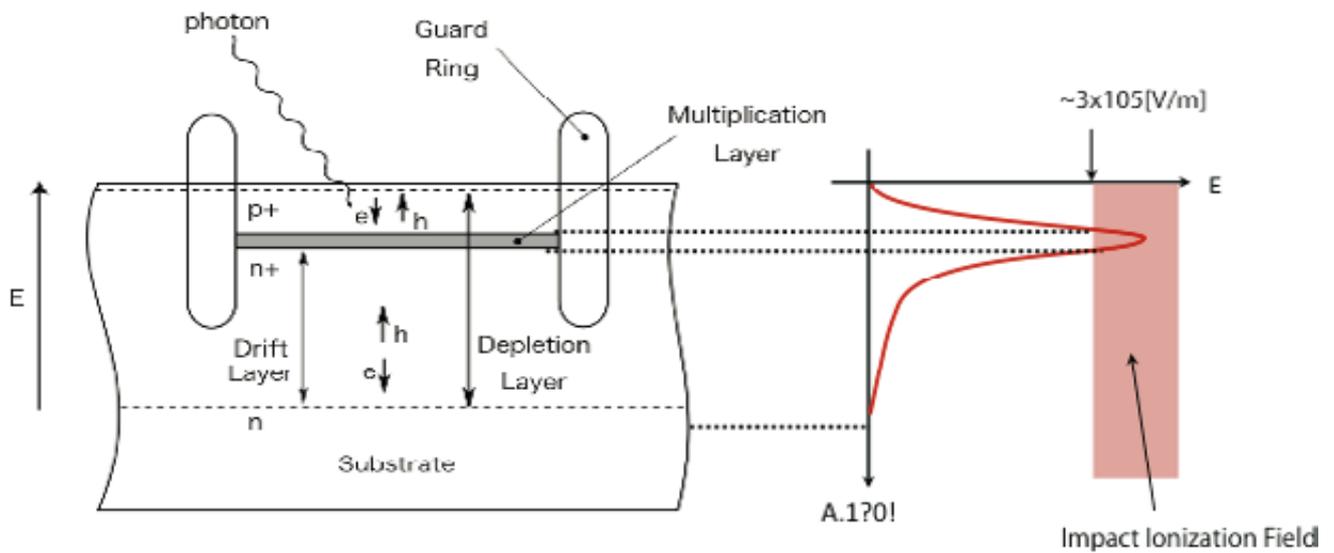


図 12 デバイスの内部構造： 青色光は表面付近で電子ホール対を作り、電子が増倍層に到達してアバランシュを起こす。一方ノイズはドリフトレイヤーで発生して、ホール起源のアバランシュを起こす。

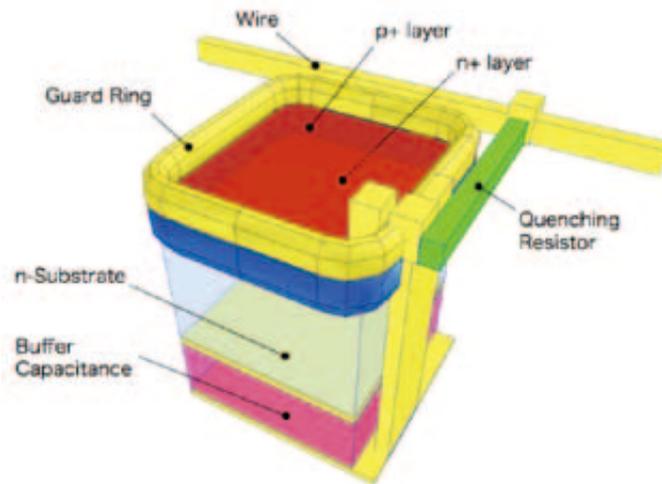


図 13 新しいデバイスの提案： 背面にバッファコンデンサを生成し、ゲインを増大させる。

メンバー

KEK/IPNS：吉村浩司、中村勇、中平武、村上武

KEK/IMSS：門野良典、竹下聡史、平石雅俊、宮崎正範、佐藤宏樹

信州大：竹下徹、小寺克茂、山崎真、佐久間隆幸、戸塚俊介、長峯宏昌、和田秀雄

東工大：久世正弘、松原綱之、田中浩基

東京大：山下了、吉岡瑞樹、音野瑛俊、生出秀行、村瀬拓郎

名古屋大：飯嶋 徹、原 康二 ,Samo Korper, Peter Krizan, Rok Pestotnic,
Rok Dolenec (Josef Stefan Institute)

名古屋大・太陽地球環境研究所：伊藤好孝、田中隆之、滝和也

奈良女子大：宮林謙吉・平井珠生

京都大：中家剛、横山将志、南野彰宏、新田和範、大谷将士、永井直樹、家城佳、
ダニエル オーム

大阪大：佐藤朗、江口陽介、久野良孝

東京理科大学：千葉順成、角田周一

神戸大：川越清以、魚住聖、池田紘子、上山敬五、木村暁彦、東條剛士、野木寛之

筑波大：金信弘、前田高志、山崎秀樹、須藤裕司、生野利典、高橋優介

防衛大：新川孝男、松村徹

新潟大：宮田等

レビューア

JAXA/ISAS : 吉田哲也、 東京大学 : 山下了、 KEK IPNS : 坪山透

投稿論文

- Hidetoshi Otono, Hideyuki Oide, Takuro Murase, Satoru Yamashita, T. Yoshioka, K. Yamamoto, K. Yamamura, K. Sato, "A Study of the internal mechanisms of Pixelized Photon Detectors operated in Geiger-mode", Nucl. Inst. Meth. A
- Hidetoshi Otono, Hideyuki Oide, Takuro Murase, Satoru Yamashita, K. Yamamoto, K. Yamamura, K. Sato, "Studies on multiplication effect of noises of PPDs, and a proposal of a new structure to improve the performance", Nucl. Inst. Meth. A
- Satoru Uozumi, "Fine granular calorimeter with scintillator strips and new photon sensor readout", IEEE Trans. Nucl. Sci. 55:1367-1371, 2008, 5pp.
- S. Kopar, R. Dolenc, K. Hara, T. Iijima, P. Krizan, Y. Mazuka, R. Pestotnic, A. Stanovnik, and M. Yamaoka, "Measurement of Cherenkov photons with silicon photomultipliers", Nucl. Inst. Meth. A594, pp. 13-17 (2008)
- T. Matsumura, T. Matsubara, T. Hiraiwa, K. Horie, M. Kuze, K. Miyabayashi, A. Okamura, T. Sawada, S. Shimizu, T. Shinkawa, T. Tsunemi, M. Yosoi, "Effects of radiation damage caused by proton irradiation on Multi-Pixel Photon Counters (MPPCs)", Nucl. Instr. Meth. A (2009), doi:10.1016/j.nima.2009.02.022

国際会議発表

- Hidetoshi Otono, Hideyuki Oide, Takuro Murase, Satoru Yamashita and KEK Detector Technology Project, "Study of the Mechanisms of Pixelated Photon Detector (PPD)", The Eighteenth Particle and Nuclei International Conference (PANIC), 10 Nov 2008
- H. Oide, T. Murase, H. Otono, S. Yamashita, on behalf of KEK Detector Technology Project, "Studies on multiplication effect of PPD, and a proposal of a new structure to improve the performance", Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP09), 12-17, March, 2009, Tsukuba
- H. Oide, H. Otono, S. Yamashita, T. Yoshioka, on behalf of KEK Detector Technology Project, "On the basic mechanisms of PPDs", New Developments in Photodetection 2008, June, 2008, (Aix-les-Bains)
- T. Matsumura for the KEK detector technology project, "Effects of radiation damage on Multi-Pixel Photon-Counter (MPPC)", The 2008 IEEE Nuclear Science Symposium (Dresden, Germany) 2008.10.19-10.25
- S. Uozumi, ScECAL test beam, LCWS08, Chicago, 2008 November
- S. Uozumi, ECAL Scintillator, ILD Workshop, Seoul, 2009 February

- S. Uozumi, ScECAL+AHCAL+TCMT Combined Beam Test @ FNAL , CALICE09, Daegu, 2009 February
- S. Uozumi, Performance of scintillator-strip electromagnetic calorimeter for ILC experiment, TIPPO9, Tsukuba, 2009 March
- “Mass Sample Test of HPK MPPCs for the T2K Neutrino Experiment”, K. Nitta, Symposium on Radiation Measurements and Applications (SORMA WEST 2008), June 1-5,2008, Berkeley, USA.
- “Application of Hamamatsu MPPC for the T2K neutrino detector”, M. Yokoyama, 5th International Conference on New Developments In Photodetection (NDIPO8), June 15-20, 2008, Aix-les-Bains, France.
- “Mass production test of Hamamatsu MPPC for T2K neutrino oscillation experiment”, M. Yokoyama, ibid.
- “Multi-Pixel Photon Detectors”, T. Nakaya, Pixel 2008 International Workshop, 23-26 September 2008, Fermilab, Batavia, IL, USA.
- “Development of Multi-Pixel Photon Counter for T2K Experiment,” A.Minamono, 2008 IEEE Nuclear Science Symposium, Dreaden, Germany, October 19-25, 2008.
- “Design and Construction of INGRID Neutrino Beam Monitor for T2K Neutrino Experiment”, M. Otani, ibid.
- “Design and construction of INGRID neutrino beam monitor for T2K neutrino experiment”, M. Otani, The 1st international conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics, Mar. 12-17 2009, Tsukuba, Japan.
- “Development of Multi-Pixel Photon Counters for the T2K long baseline neutrino experiment”, D. Orme, ibid.
- “Development of Multi-Pixel Photon Counter and Application to T2K experiment”, M. Yokoyama, Seminar at University of Rome “La Sapienza”, June 23, 2008.

学会発表

- 音野瑛俊、生出秀行、吉岡瑞樹、山下了、羽野仁志、末廣徹、他KEK検出器開発室光センサーグループ「ピクセル型光検出器(PPD)の動作メカニズムに関する研究」日本物理学会第63回年次大会(近畿大学)
- 生出秀行、音野瑛俊、吉岡瑞樹、山下了、羽野仁志、末廣徹、他KEK検出器開発室光センサーグループ「ピクセル型光検出器(PPD)の動作メカニズムに関する研究」日本物理学会第63回年次大会(近畿大学)
- 角田周一 「MPPCの中性子照射実験(1)」日本物理学会第63回年次大会(近畿大学)
- 田中浩基「KASKA実験における宇宙線飛跡検出器の検出器構造決定のためのビームテスト」日本物理学会2008年秋季大会(山形大学)
- 松村徹、「高感度光検出器MPPCの放射線耐性」日本物理学会2008年秋季大会(山形大学)
- 音野瑛俊、生出秀行、村瀬拓郎、山下了A、吉岡瑞樹 他KEK光センサーグループ「ピクセル型光検出器(PPD)の動作メカニズムに関する研究」,日本物理学会2008年秋季大会(山形大学)
- 村瀬拓郎、音野瑛俊、生出秀行、山下了 他KEK光センサーグループ「PPDの高増幅率に向けた諸特性の精密測定」,日本物理学会2008年秋季大会(山形大学))

- Daniel Orme, 「T2K実験に使用される15000個のMPPCの性能測定1」, 日本物理学会2008年秋季大会(山形大学)
- 永井直樹, 「T2K実験に使用される15000個のMPPCの性能測定2」, 日本物理学会2008年秋季大会(山形大学)
- 生出秀行, 村瀬拓郎, 音野瑛俊, 山下了, KEK測定器開発室光検出器グループ「シミュレーションによるPixelated Photon Detectorの基礎特性の計算」日本物理学会第64回年次大会(立教大学)
- Daniel Orme, 「Measurement of MPPC characteristics with different wavelengths of light」, 日本物理学会第64回年次大会(立教大学)

研究会・展示会等

研究会 2008年12月25日 MPPC/PPD ワークショップ、東京大学

学位取得

平成20年度：

修士（11件）：

生野利典（筑波大）、須藤裕司（筑波大）、大谷将士（京都大）、永井直樹（京都大）、角田周一（東理大）、池田紘子（神戸大）、上山敬五（神戸大）、田中浩基（東工大）、生出秀行（東京大）、平井珠生（奈良女大）、江口陽介（大阪大）

学士（7件）：

田中航平（筑波大）、木村暁彦（神戸大）、東條剛士（神戸大）、野木寛之（神戸大）、戸塚俊介（信州大）、長峯宏昌（信州大）、和田秀雄（信州大）

外部資金獲得

学術創成研究：「ILCのための革新的測定器の開発」（研究分担者 竹下徹）

基盤研究(A) 2007-2010：

最高エネルギーのコライダー実験によるBSM物理の新展開（研究代表者 川越）

萌芽研究（研究代表者 山下了）

特許等

該当なし

STJプロジェクト

羽澄 昌史

はじめに

超伝導といえばクーパー対である。クーパー対の大きな特徴の一つは、結合エネルギーがとても小さいことである。したがってわずかなエネルギーを与えるだけで壊れてしまう。これは、測定器として理想的な条件である。

高エネルギー加速器研究機構における様々な素粒子・原子核・物性研究では、半導体検出器が多用されている。半導体検出器では、放射線が入射しエネルギーを失うことにより電子・ホール対が生成される。電子・ホール対生成に必要なエネルギーは、物質によるが、電子ボルトのオーダーである。したがって、これを用いて検出できる光の波長は、近赤外線より短い領域に限られる。一方、超伝導体のクーパー対は、ミリ電子ボルトのオーダーのエネルギーで壊れる。表1に主な超伝導体とその特性を示す。(フォトン検出、ビデオ検出については次節)

超伝導体	臨界温度 (T_c) [K]	ギャップエネルギー (2Δ) [meV]	フォトン検出閾値 [GHz]	ビデオ検出帯域 [GHz]
Nb	9.23	3.1	750	375-750
Pb	7.193	2.4	580	290-580
Ta	4.39	1.4	340	170-340
In	3.4035	1.1	270	135-270
Al	1.196	0.34	80	40-80
Ga	1.091	0.31	75	37-75
Mo	0.92	0.26	60	30-60
Zn	0.852	0.22	50	25-50
Cd	0.56	0.15	36	18-36
Ti	0.39	0.10	24	12-24
Hf	0.165	0.04	10	5-10

表1：主な超伝導体とその特性

このように、ミリ電子ボルトのエネルギーに感度があるため、超伝導検出器は、近赤外よりはるかに波長の長い(つまり光子エネルギーの低い)遠赤外線、テラヘルツ光、ミリ波といった電波ですら光子として超高感度で検出することができる。もちろんX線や荷電粒子エネルギーの超精密測定などにも役立つ。したがって、その応用範囲は加速器実験、宇宙観測、医用、質量分析、原子力など非常に幅広く、超伝導検出器は非常に高い将来性を持つ。超伝導検出器の技術をKEKに導入し、育て、広く大学共同利用研究者の研究に供することを目的として、本STJグループを提案し、2007年より研究開発を行っている。

STJに関する最初の提案は、2006年12月に筑波大・金がおこなった。エネルギーギャップの低いハフニウム、またはタングステンを用いて、遠赤外線エネルギー測定ができる検出器を開発する、という提案であった。素粒子物理への応用としては、宇宙背景ニュートリノの崩壊を探索することにあつた。続いて、2007年4月に、KEK・羽澄がアルミニウムのSTJを用いてミリ波のカメラを作る提案を行った。その結果、ふたつの提案をまとめて、STJグループとして統一的な活動を行うことに決定した。

STJの原理

STJは超伝導トンネル接合（Superconducting Tunnel Junction）の意味で、S-I-S（Superconductor-Insulator-Superconductor）という構造をもつ。図1に書かれているとおり、光子（より一般には放射線）が超伝導体に入射するとクーパ対を壊し準粒子を生成する。それらが絶縁層をトンネル効果で通過する。これを電流として検知するのが「フォトン検出」の測定原理である。

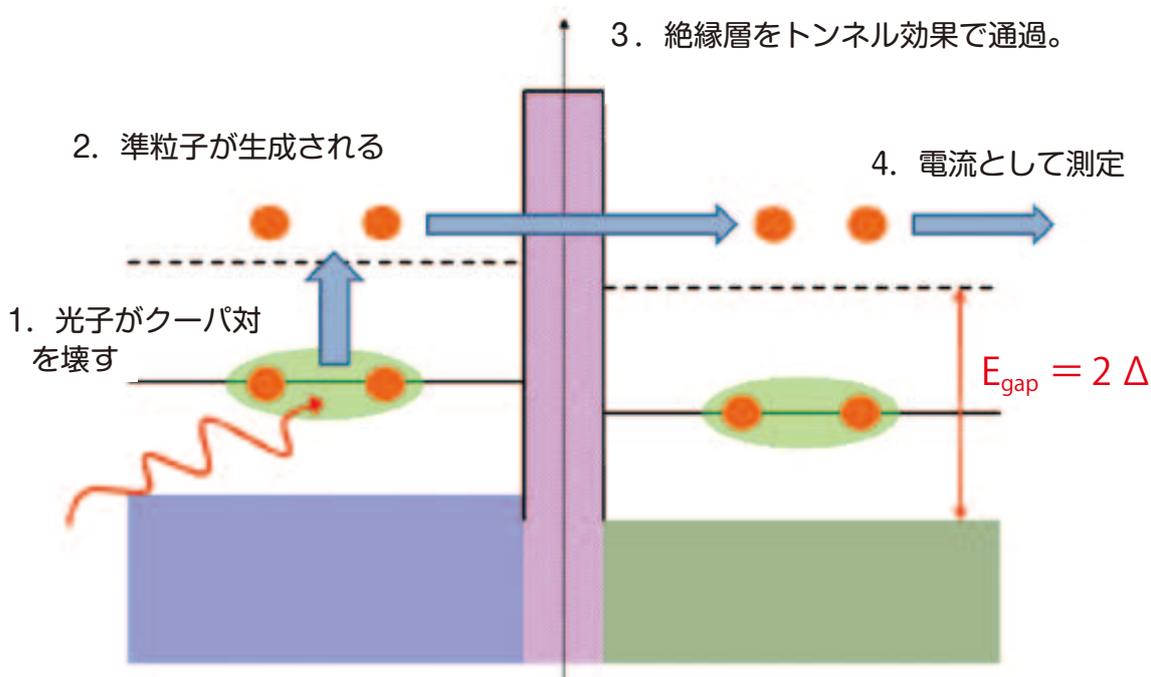


図1. STJの検出原理

代表的な超伝導体に対するフォトン検出の閾値は表1に示した。フォトン検出に加えて、波長の長い光に対するもう一つの方法として「ビデオ検出」が存在する。この方法では、あらかじめSIS接合に適当なバイアス電圧をかけておくことにより、エネルギーギャップによる閾値より低い周波数の光も検出することができる。

現在開発をおこなっている赤外線エネルギー測定用ハフニウムSTJとミリ波検出用アルミニウムSTJは、それぞれフォトン検出、ビデオ検出を用いている。

図2にハフニウムSTJの概観を示す。

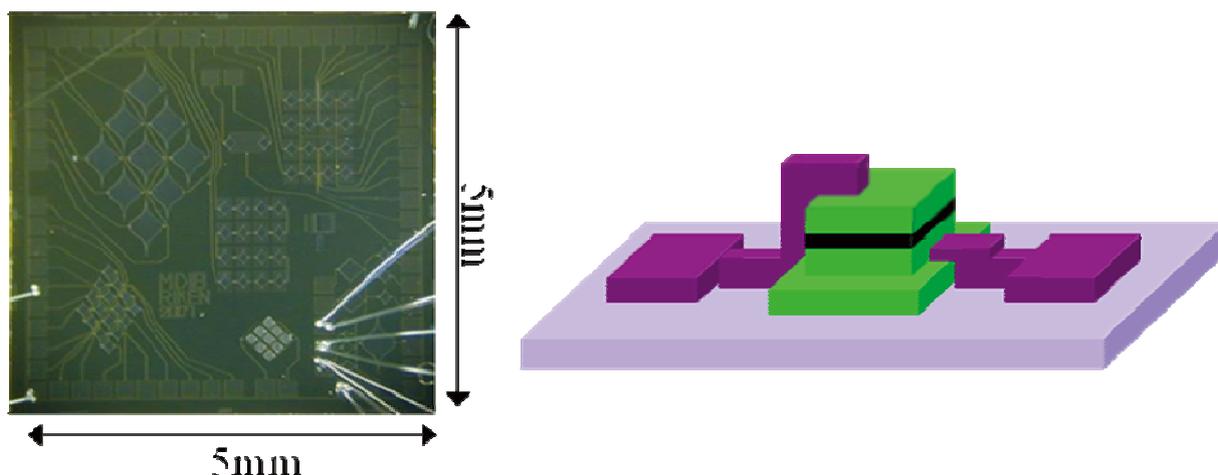


図2：（左図）ハフニウムSTJセンサー試作品。（右図）ハフニウムSTJ俯瞰図。緑の部分がハフニウム、黒い部分が酸化絶縁膜、濃い紫の部分はニオブの配線と読み出しパッド。これらが基盤（薄紫）にのっている。

ハフニウムSTJは、これまで開発を行っていた報告はあるが、いまだに実現されていない。したがって、本測定器開発室で開発に成功すれば、世界初の快挙となる。

図3にアルミニウムSTJの概観と製作工程などを示す。

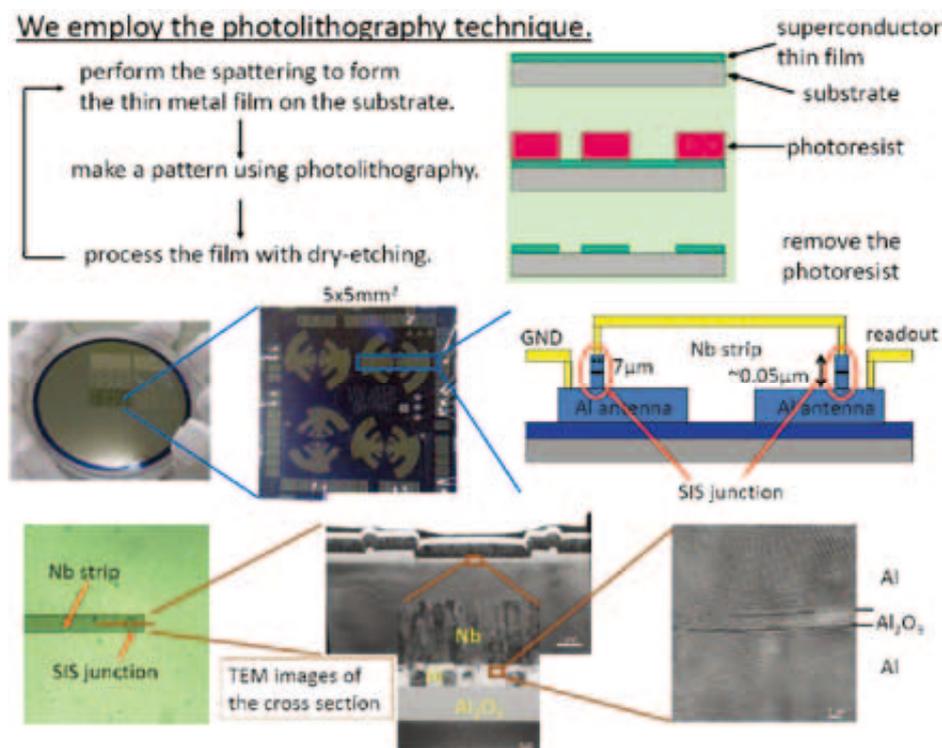


図3. アルミニウムSTJ概観と製作工程。

入射する電波のパワーを効率よく SIS 接合に送るために、ログペリオディックアンテナをリソグラフィ技術で書き込み、マイクロストリップラインのインピーダンスをマッチさせる等のデザインをもつ。この方式は、テラヘルツ光の受信機として理研の有吉誠一郎氏が実現したものをベースとしている。

開発経過

これまでの開発経過を以下にまとめる。

- 2006.12: ハフニウム STJ 提案（筑波大 金）。
- 2007. 4: アルミニウム STJ 提案（KEK 羽澄）。
- 2007. 5: ふたつの提案をまとめて、STJ グループとして統一的な活動を行うことに決定。
- 2007. 5: 理研（和光）クリーンルームにて良好な I-V 特性を持つ Al-STJ の作製に成功
- 2008. 3: KEK クリーンルーム完成、アライナーの購入。
- 2008. 4: ハフニウム膜の超伝導転移を確認。
- 2008. 9: アンテナ結合 Al-STJ マスクデザイン(ver.1)完成。
- 2008.10: 理研から KEK へ STJ 製作装置の一部を移設。
- 2008.12: KEK 測定器開発室クリーンルーム（図 4）での装置条件出し開始。
- 2009. 1: KEK 測定器開発室クリーンルームでの装置条件だし完了。
- 2009. 2: バルクと同等の相転移温度を示すハフニウムの成膜条件の確立（図 5）。
- 2009. 2: ICP エッチングによるハフニウム薄膜の加工条件の確立と加工後の超伝導転移の確認（図 6）。
- 2009. 2: KEK 測定器開発室クリーンルームにて、Nb/Al-STJ を試作。理研で移設直前に作ったものとリークカレントが同等に優れた素子が出来ていることを確認（図 7）。

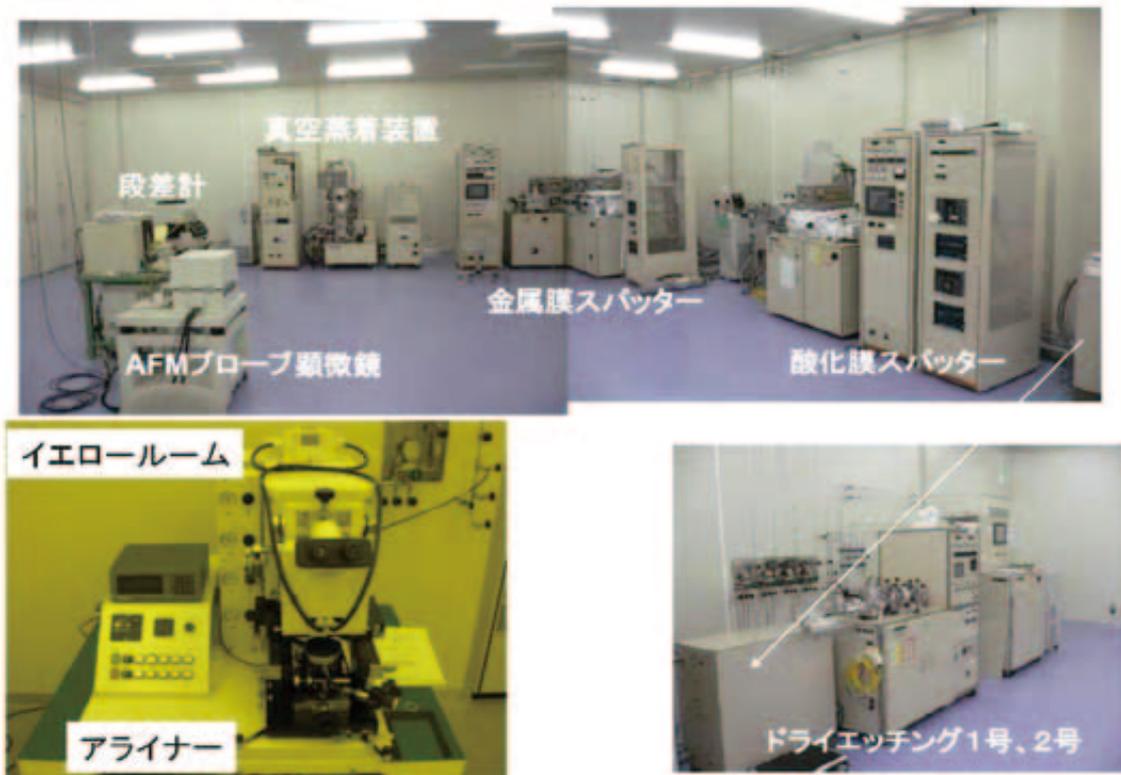


図 4. KEK クリーンルーム。

deposition conditions

	Power [W]	Ar Pressure [Pa]	Seed [$\mu\text{m}/100\text{nm}$]	Thickness [nm/5min]
Hf-002	300	1.5	0.034854	76.5
Hf-005	600	0.7	-21.689552	134
Hf-008	600	4.0	-1.0269692	117
Hf-020	350	1.5	-0.9649903	86.2
Hf-022	350	2.1	-0.3786127	86.5
Hf-000	300	1.0	-	83.5

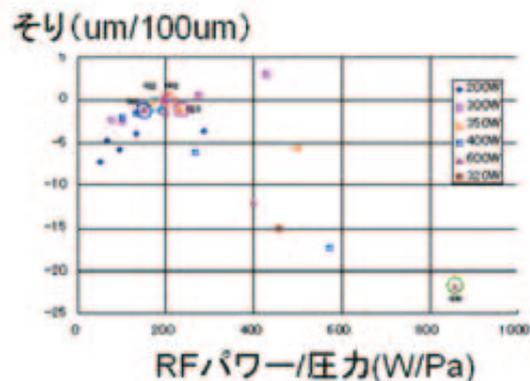


図5. ハフニウム成膜条件。

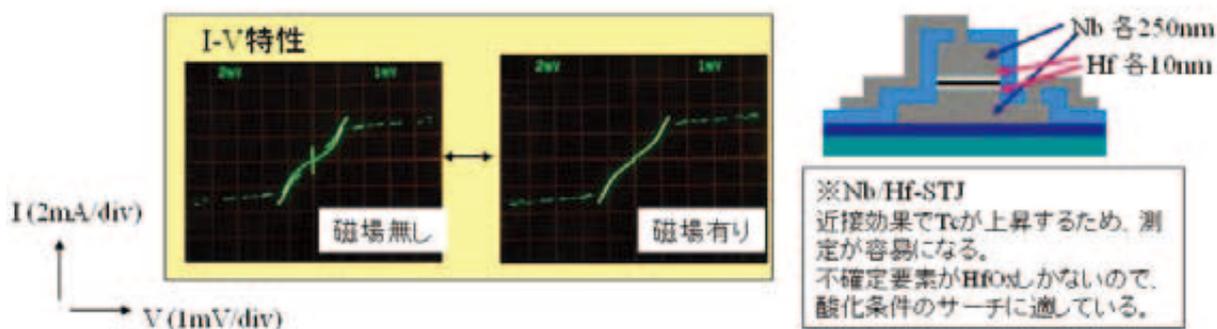
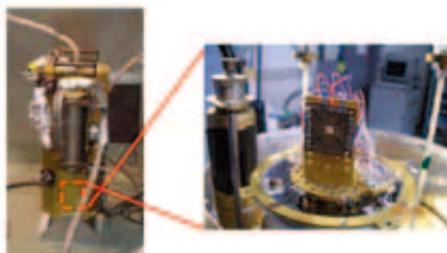


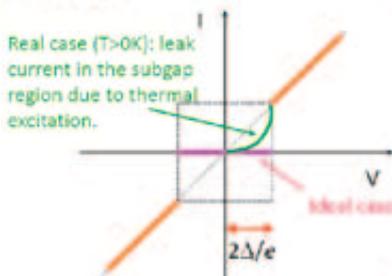
図6. ハフニウムSTJ試作品のI-V特性。

Evaluation

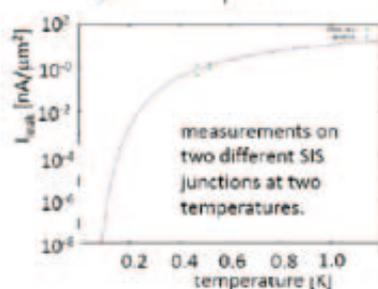
We use a ^3He sorption cryostat able to cool down to 0.3K and measure IV curves.



Measurement results



$4\Delta/e = 650\mu\text{V}$ gap due to serial connection of two STJs. $R_s = 0.3\Omega$



Comparison with the theoretical calculation

$$I_{\text{leak}} = \frac{1}{eR_s} \frac{\Delta + eV_s}{(\Delta + eV_s)^2 + \Delta^2} \sqrt{2\pi\Delta k_B T} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right)$$

The magnitude of the leakage current is within expectation.

図7. アルミニウムSTJの性能試験。

参加メンバー

JFY2007-JFY2008 の間に共同研究者として活動に参加したメンバー名を以下に示す。

氏名	Al	Hf	所属
羽澄 昌史*	○	○	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
石本 茂	○		高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
後田 裕	○		高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
佐藤 伸明	○		高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
住澤 一高	○		高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
田島 治	○		高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
長谷川 雅也	○		高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
樋口 岳雄	○		高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
山内 正則		○	高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所
吉田 光宏	○		高エネルギー加速器研究機構、加速器研究施設
鈴木 敏一	○		高エネルギー加速器研究機構、超伝導低温工学センター
都丸 隆之	○		高エネルギー加速器研究機構、超伝導低温工学センター
清水 裕彦	○	○	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
森嶋 隆裕	○		高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
石野 宏和	○		岡山大学 理学部
樹林 敦子	○		岡山大学 理学部
美馬 覚	○		岡山大学 理学部
大田 泉	○		近畿大学 理工学部
池田 博一		○	宇宙航空研究開発機構、宇宙科学研究本部
Soo-Bong Kim		○	ソウル国立大学
金 信弘**		○	筑波大学 数理物質科学研究科
武内 勇司		○	筑波大学 数理物質科学研究科
武政 健一		○	筑波大学 数理物質科学研究科
服部 誠	○		東北大学 理学研究科
有吉 誠一郎	○		理化学研究所 テラヘルツイメージング研究チーム
大谷 知行	○		理化学研究所 テラヘルツイメージング研究チーム
佐藤 広海	○	○	理化学研究所 延與放射線研究室
以上、計 27 名			

* アルミニウム (Al) STJ 開発班代表

** ハフニウム (Hf) STJ 開発班代表

学位取得の状況

「ニュートリノ崩壊の探索に用いる超伝導体光検出器の開発研究」、
堀部 忠明、筑波大学卒業論文、 2008 年 2 月

「ニュートリノ崩壊探索実験のためのハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子検出器の開発研究」、

武政 健一、筑波大学修士論文、 2009 年 2 月

投稿論文

なし

国際学会、国内学会発表状況

これまでに学会等で発表した状況を以下に示す。

- 1) 2007 年 9 月 5 日、第 68 回応用物理学会学術講演会（北海道工業大学）、
理研¹、高工研²、東工大理³ ○佐藤広海¹、羽澄昌史²、田島 治²、後田 裕²、住澤一高²、
樋口岳雄²、石野宏和³
「Al-STJ の作製と評価」
- 2) 2007 年 9 月 24 日、日本物理学会秋季大会（北海道大学）、
筑波大数物 武政健一、
「ニュートリノ崩壊光の観測に用いる超伝導接合素子(STJ)の開発」
- 3) 2008 年 3 月 26 日、日本物理学会第 63 回年次大会（近畿大学）、
高工研、理研^A、東工大^B 後田裕、住澤一高、○田島治、羽澄昌史、樋口岳雄、吉田光宏、佐
藤広海^A、石野宏和^B、他 測定器開発室：超伝導ミリ波カメラ開発グループ、
「ミリ波検出にむけた超伝導トンネル結合素子検出器（STJ）の開発研究」
- 4) 2008 年 9 月 21 日、日本物理学会秋季大会（山形大学）、
筑波大素粒子実験 武政健一、
「ハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子(STJ)検出器の開発研究」
- 5) 2008 年 9 月 23 日、日本物理学会秋季大会（山形大学）、
岡山大、高工研^A、理研^B 美馬覚、石野宏和、樹林敦子、羽澄昌史^A、住澤一高^A、樋口岳雄^A、
吉田光宏^A、田島治^A、佐藤広海^B、他 測定器開発室：超伝導ミリ波カメラ開発グループ、
「CMB カメラ開発におけるアルミ超伝導トンネル結合素子(STJ)の基礎特性評価」
- 6) 2009 年 3 月 13 日、The 1st international conference on Technology and Instrumentation in
Particle Physics (Tsukuba, Japan)、
H. Ishino、
“Development of an Antenna-coupled Al Superconducting Tunnel Junction for a detection of
cosmic microwave background B-mode polarization”
- 7) 2009 年 3 月 27 日、日本物理学会第 64 回年次大会（立教大学）、
筑波大素粒子実験 武政健一、
「ハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子(STJ)検出器の開発研究」
- 8) 2009 年 3 月 27 日、日本物理学会第 64 回年次大会（立教大学）、
岡山大自然、高工研^A、理研^B 美馬覚、石野宏和、樹林敦子、羽澄昌史^A、住澤一高^A、樋口

岳雄^A，吉田光宏^A，田島治^A，佐藤広海^B，他 測定器開発室:超伝導ミリ波カメラ開発グループ

「CMB カメラ開発におけるアルミ超伝導トンネル結合素子(STJ)の基礎特性評価」

外部資金獲得状況

JFY2007-JFY2008 で獲得した外部資金の状況を以下に示す。

- 1) 平成 20 年度 KEK 大学等連携支援事業、研究代表者 石野宏和（岡山大）
「ミリ波検出用超伝導トンネル結合素子アレイカメラの読み出し増幅回路の構築と学生教育・人材育成」
- 2) 平成 20 年度 KEK 大学等連携支援事業、研究代表者 金信弘（筑波大）
「宇宙背景ニュートリノ崩壊検出のための超伝導トンネル接合素子（STJ）検出器の開発」
- 3) 平成 19 年度—20 年度、総研大葉山高等研究センター研究プロジェクト「新領域」、
研究代表者 羽澄昌史（総研大）
「宇宙マイクロ波背景放射（CMB）偏光測定の前準備研究」

研究会開催

- 1) 「超伝導カメラと関連技術 - 宇宙観測への応用を中心として -」
2009 年 2 月 20 日—21 日、高エネルギー加速器研究機構 3 号館 1 階セミナーホール
参加登録者 51 名

液体キセノン TPC プロジェクト

田内 利明

研究計画

現在の真空テスト容器とプロトタイプ（5cm ドリフト、光電子増倍管 2 本）を使用して、シンチレーション光を測定して電荷シグナルの基本的測定方法の確立を行う。液体キセノンの純化方向の確立も行う。また、エレクトロニクスシステムグループの協力の下に、フロントエンド ASIC チップを設計・製作を行う。PET としての性能評価のためのシミュレーションを行う

活動状況

2-1. 液化・純化システム（低温実験装置）の構築

図1と2に示した 1.5 リットルの液体キセノンを精製循環するシステムを完成し、4月30日に試運転を行い動作の確認を成功裏に行った。このとき5時間ほどでチェンバー内（空洞）は冷却され下部にわずかな液体を溜め一晩冷凍機のみで保持することができた。

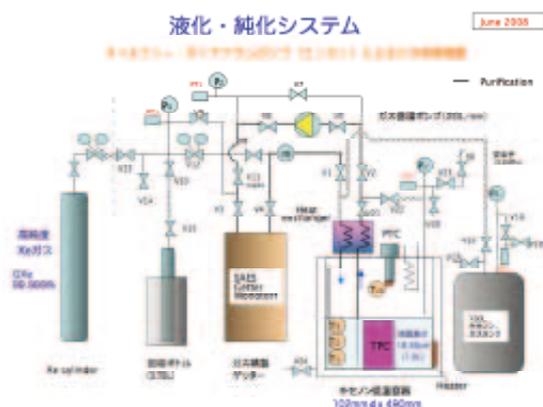


図 1: 液化・純化システム



図 2: 液化・純化システムの写真

このシステムの特徴はパルスチューブ冷凍機（PTC, PDC08, 165K で 24W）で液化を行い、ガス精製サエスゲッターとオイルフリーダイヤグラムポンプによるガス循環により ppb レベルの純化を行うこと、停電時など液体状態を保持できなくとも 750 リットルの容量の貯蔵タンク内にすべてのキセノンガスを貯めることができるため長期自動（無人）運転が可能であることである。

典型的な運転の流れは先ず予冷を行い、液化開始後 12 時間ほどで 1.5 リットルの液体キセノンをチェンバー内に満たす（液化速度=0.16 リットル/時）。図 3 に常温から液化までの 1 サイクル冷却の時間経過（第 2 回冷却試験）を示した。液化終了後の液体キセノンの温度（167K）は PTC ヘッドの温度（163K）を 1KW ヒータにより制御される。その後、精製循環を行う。精製循環の方法として、液面より上のガスからと、液面下の

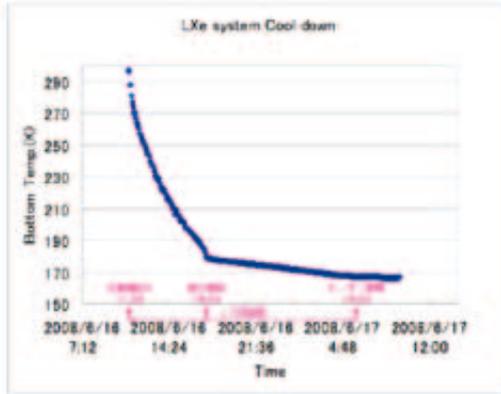


図 3: 冷却 1 サイクル

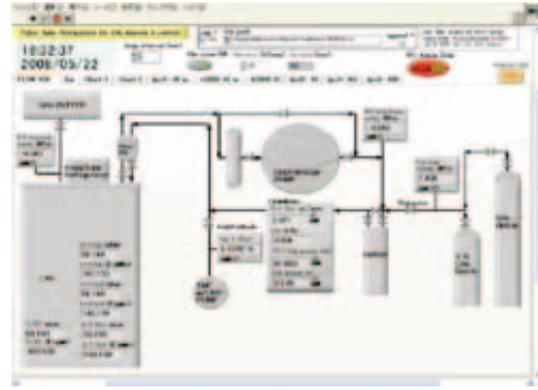


図 4: Labview モニターシステム

液体から循環させるものの2つがある。それぞれの循環速度は、4リットル/分と1リットル/分である。これらは PTC の冷却能力で決まっている。運転中、液化・純化システムとテストチェンバー内の圧力、温度、ガス流量などは LabVIEW でモニターされる。チェンバー内圧変化など異常時には関係者にメールで自動送信される。

2-2. 第 1 回冷却試験：宇宙線によるシンチレーション光の検出

試運転後、第 1 回冷却試験として 5 月 21 日夕方から予冷・液化を行い、22 日午後 1 時過ぎにチェンバー内に設置した光電子増倍管により宇宙線からのシンチレーション光を初めて検出することができた。2 枚の平行板 (5mm ギャップ) の TPC プロトタイプのアノードパッドでは電荷シグナルは見えなかった。このとき、ガスの精製・循環は行わなかった。

この試験から、KEK 加速器の佐伯学行氏と東大理学研究科修士 2 年の金子大輔君が新たにメンバーに加わることとなった。

2-3. 第 2 回冷却試験：光電子増倍管のゲイン測定、ガス相精製循環試験

図 3 に示したように、6 月 16 日より予冷・液化を始め、17 日午前 6 時にヒーター制御による定常運転となった。途中、6 月 28~29 日の 2 日間は停電のためチェンバー内はガス状態となった。6 月 30 日に再度液化を始め 7 月 18 日までの試験を行った。

主目的の液体キセノン中の光電子増倍管(PMT)ゲイン測定のために、青色 LED と α 線ソース(200Bq, 5.5MeV) の 2 つの光源を TPC プロトタイプに設置した。ゲイン (G) は PMT 出力 (<ADC>) とフォトカソードでの光電子数 (N_{pe}) の比で定義される。PMT 出力分布の σ^2 (RMS) は N_{pe} に比例する。これらから、 $G=1.6 \times 10^6 \times \sigma^2 / \langle \text{ADC} \rangle$ の式よりゲインが求められる。ここで、使用した ADC は CAMAC-2249W で 1 カウント辺り 0.25pC である。青色 LED の場合、その光量を任意に変えることができ、 $\sigma^2 / \langle \text{ADC} \rangle$ を直線フィットのスロープとして測定することが出来る (図 5)。 α 線ソースは一点のみの値であるが、シンチレーション光 (波長 175nm) での測定である。図 5 のスロープ値より、PMT1 と 2 のゲインはそれぞれ $7.0 (21) \times 10^6$ と $6.4 (20) \times 10^6$ と評価された。ここで、印加電圧はともに 700 (800) V である。

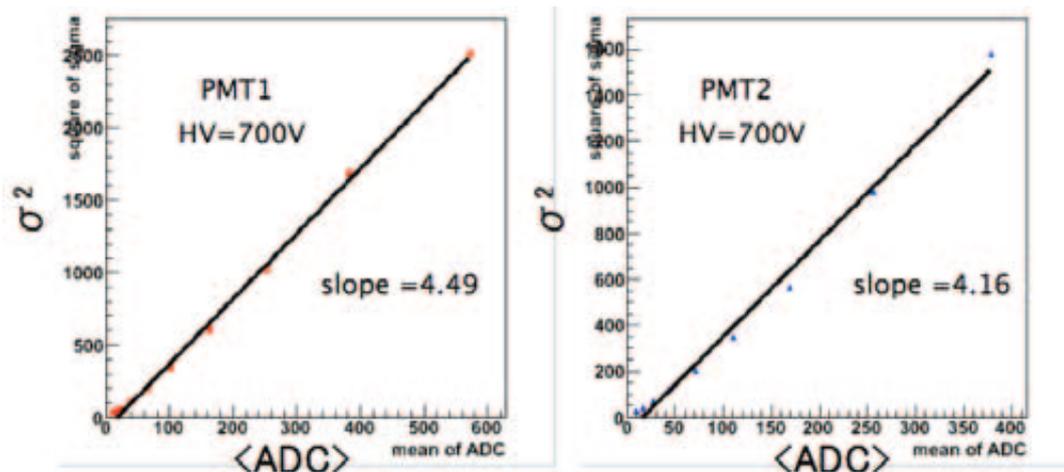


図 5: 青色 LED 光源を使用した PMT ゲイン測定

浜松フォトニクスからのデータによると、印加電圧 800V でのゲインは二つとも 9×10^6 である。ここでゲインは標準光源に対してアノードとカソード電流の比で定義される。我々の測定値はこの値の倍以上である。これまで青色 LED 光源の光量のばらつきを無視していることなどを含めて要チェックである。

α 線ソースによる $\sigma^2 / \langle \text{ADC} \rangle$ は PMT1 と 2 のそれぞれに $30^2 / 100$ と $20^2 / 164$ であった。青色 LED 光源によるゲイン測定値とはファクター 2 程度の一致である。 α 線エネルギー (5.5 MeV), シンチレーション光の W 値 (18 eV), PMT の立体角 ($0.1\% = 1.8 \text{ cm}^2 / 4\pi 5 \text{ cm}^2$), 量子効率 (0.2), PMT 窓の透過率 (0.9) とゲイン測定値から α 線ソースによる光量が評価できる。それぞれ、2,500 と 2,321 という予想値であり、測定値より 20 倍以上大きい。この違いは純度であることが後の実験よりわかった。また、 α 線ソースのシグナル分布はガウス分布ではないことを考慮する必要がある。

7月3日に4時間程度のガス相精製循環を行ったが、純度改善による PMT シグナルの増大を確かめることはできなかった。

電荷シグナルはパッドから直接ケーブルで取出したものをプリアンプ (ORTEC 製 142PC, ゲイン 6.8V/pC) に入力して見たが観測できなかった。ノイズは 50mV 程度で宇宙線のシグナルは 200mV 程度と見積もられた。ここで、TPC のドリフト距離は 6mm で、グリッド (200 メッシュ, ワイヤの半径と間隔: $r=26.5 \mu\text{m}$, $d=127 \mu\text{m}$, 開口率 34%, ドリフト領域に比べて 5 倍の電場) とアノードパッドとの距離は 2mm である。メッシュの電荷通過率については次節を参照。

2.4 第 3 回冷却試験 : TPC (2CM ドリフト, グリッド) 試験

9月3日から4日まで試験を行った。TPC 挿入方法として、これまで最下面のフランジ上に固定していたが、上部より4本の直径 4mm の SUS 棒でつり下げる方法にした。これにより、ケーブルのフィードスルーへの接続が容易になり断線等のトラブルも無くなると期待される。

TPC の構造は、アノードパッド-1mm-グリッド-1cm-電極-1cm-カソードメッシュで、HV はそれぞれ 200M Ω , 100M Ω , 100M Ω の抵抗を直列に接続して供給されている。真ん中の電極にワイヤーソース (Am-241,

-200Bq) を速乾性のアラルダイトで接着した。光源として青色 LED も取付けた。それぞれ 8 個のパッドを接続して 2 つの読み出しチャンネルとした。ノイズ軽減のために AMPTEK 製 A250 アンプ(ゲイン 1V/pC)を P250 テストボードとともに上の PMT1 用取り付け板に設置しパッド 1ch を読み出しこととした。他の 1 ch はこれまでと同じように外付けのアンプ (142PC) に接続した。グリッド用として、20 メッシュ (SUS ワイヤ、直径 $2r=0.17\text{mm}$ 、 $d=0.97\text{mm}$ 間隔、開口率 68%) の金網を使用した。パッド-グリッド間の電場 (E2) はドリフト領域のもの (E1) の 20 倍となる。

電荷のグリッド通過率に関する公式は、"Design of Grid Ionization Chambers", by O. Bunemann et al, Canadian Journal of Research, Vol.27 (1949), 191-206 の論文で与えられている。それによると、ドリフトしてきた電子雲のほとんどがグリッドを通過するには、 $Z = E2/E1 > (1 + 2\pi r/d) / (1 - 2\pi r/d)$ の条件が必要である。上のメッシュの r, d を入れると、 $Z > 3.4$ となる。したがって、十分な通過率が得られると期待される。ただし、上の公式はワイヤ一面に対するものでメッシュの場合でない。メッシュの通過率は $Ar/CO_2(70/30)$ ガス中で測定されており、 $r/d=10(12.5)\mu\text{m}/60(125)\mu\text{m}$ 、開口率 44(64)% のもので $Z=4$ のとき 30(85)% 程度である (P. Everaerts et al., IEEE Nucl. Sci. Symp., San Diego, Oct.2006)。液体キセノン中のデータは無いため、その通過率は実測により確かめなければならない。

A250 のアンプ出力には 50mV 程度のノイズがあった(常温でのノイズは 2mV 以下であった)。 α 線シグナルの大きさは 2mV 程度であると予想される(W 値=18eV, $E1=2\text{KV}$ で、5.4MeV の電荷到達率 4% を仮定; ref: T. Doke et al., Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 1538, E. Aprile et al., NIM A307 (1991)119-125)。配線のミスがあり、9/4 18:40 頃冷却系を停止させた。

2.5 第 4 回冷却試験 : TPC(1CM ドリフト,グリッド)と液相精製循環試験

11 月 10 日から 19 日まで試験を行った。TPC の構造は、アノードパッド-1mm-グリッド(50 メッシュ, SUS, $r=0.05\text{mm}$, $d=0.41\text{mm}$, 開口率 57%)-5mm-電極-5mm-カソードメッシュで、HV はそれぞれ 200M Ω , 100M Ω , 100M Ω の抵抗を直列に接続して供給されている。真ん中の電極に 2 本のワイヤソース(Am-241, -200Bq) を速乾性のアラルダイトで接着した。パッドは前回と同じように 2ch でそれぞれプレアンプ 142PC と A250 に接続された。

容器冷却後に中に入っている A250 が正しく動いていないことが判明した。(後で内部を見ると出力用の同軸ケーブルがショートしていたことが原因とわかった。) 142PC の出力には 20mVp-p のノイズしか見えなかった。

シンチレーション光量の電場依存性をデジタルオシロスコープの 128 事象の平均化で測定しようとしたが、顕著な依存性は見えなかった。

初めて液相精製循環の運転を 27 時間程度行った。これはキセノンの液体を吸い上げ熱交換器で常温の気体にされゲッターを通して純化し、再び PTC で液化を繰り返す精製循環である。循環速度は PTC の冷却能力で 2 リットル/分以下に制限されることがわかった。途中、PMT1 の出力がなくなってしまった(ボルトが PMT ベース回路上に落ちて回路をショートさせていた)ため二つの PMT シグナルの同時計数ができなくなり、純化後のシンチレーション光量変化を確かめることができなかった。

2.6 第 5 回冷却試験 : A250 動作試験

11月26日から28日まで試験を行った。A250の液体キセノン中でのテストパルスモードでの動作の確認が目的のため、TPCはチェンバー内に設置しなかった。図6のように、ノイズはとても小さく、冷却により動作しなくなることは無いことがわかった。また、ゲインも室温時と同じであることも確認できた。

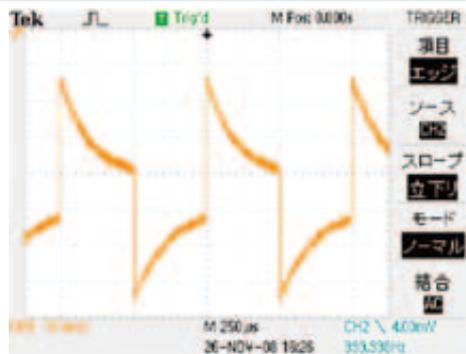


図 6 A250 の冷却試験結果

2.7 第 6 回冷却試験 : TPC (3MM ドリフト, グリッドなし) 試験

12月8日から30日まで試験を行った。この期間中、(1)8日から9日、(2)18日から23日、そして、(3)24日から30日の3回冷却と加温を繰り返した。

TPCの構造は、電荷通過率に不定性のあるグリッド無しのアノードパッド-3mm-カソードメッシュの平行板とした。カソードメッシュの真中には円盤状の α 線ソース(200Bq)をアラルダイトで貼付けた。内部に設置したプリアンプ(A250)出力上のPMTシグナルからのピックアップノイズをなくするため、その設置場所を10cmほど上部に上げた。この配置で常温でのノイズはA250出力で2mV程度であった。

(1)の冷却後、ノイズレベルは100mVあり、50Hz, 200kHzと20MHzに顕著な周波数成分があった。TPC HVへの印加が300Vまでしかできないこともありすぐに加温することにした。このノイズ状況は加温直後も同じであった。キセノンガスを回収し真空パージを行った後、ノイズレベルが10mVほどになった。その後、A250とパッドとの配線の間で断線していることがわかった。この断線と冷却がノイズの原因と考えられる。また、TPC HV電源としてHARb-50R3(松定製)を使用すると、1msec周期の100mV程度のノイズがA250出力にもわたることもわかった。この電源の出力を見ると0.1%程度のリップルノイズ(100~数100Hz)がある。このままではTPC HV用として使用できないので、急遽、林栄精機製RPH-042を借りることとした。フィードスルーのピンでのハンダ付け不良箇所を直した。チェンバー内配線も整理し、A250出力のノイズレベルを2mV程度にすることが出来たので、(2)の冷却を始めた。

(2)と(3)の間、『過電流インターロックで』コンプレッサー停止によりチェンバー内が200Kに加温され、その復旧(応急処置)後に再冷却した。冷却定常運転中、A250出力に20MHzと200MHzの正弦波上のノイズが現れた。再冷却開始時に観測していたところ、20MHzノイズが突然現れ、約1時間30分後に200MHzノイズが支配的となった。12月30日、液化システム停止5分後の190Kで200MHzノイズの振幅は20mV、15分後の200Kで10mVとなり、1時間25分後の280Kでは20MHz

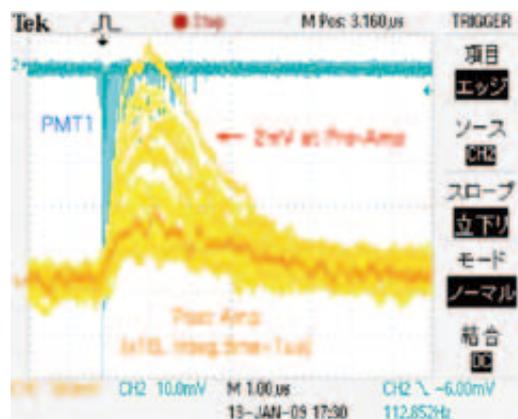


図 7 キセノンガス中のシグナル

が支配的となり振幅は 8mV であった。12 月 24 日午後 5 時よりガス相精製循環を行ったが、電荷シグナルは観測できなかった。

2009 年 1 月 13 日のキセノンガス状態で α 線ソースからのシグナルを観測した。このとき、1 月 6 日から 3 月 31 日まで KEK に滞在し我々のグループに参加のコロンビア大学の Karl Giboni 氏が同席していた。図 7 にそのポストアンプ (ゲイン=18) 出力を示した。プリアンプの A250 出力では約 2mV (2fC の電荷量) で、5.4MeV α 線による電荷量の約 4%に相当する。

1 気圧キセノンガス中の α 線のレンジは 2.8cm であるので、上の 3mm ギャップ中の電荷量と矛盾していない。

2.8 第 7 回冷却試験 : TPC (1CM ドリフト, グリッドなし) と純化試験

TPC の構造は、グリッド無しのアノードパッド-1cm-カソードメッシュの平行板とした。カソードメッシュの真中には円盤状の α 線ソース(200Bq)をアラルダイトで貼付けた。パッドは 2x2=4 個 (全 1.5 x 1.5 cm²) を結線したものの 1ch とした。

K.Giboni 氏からの助言があり、A250 はチェンバー外に設置し、内部には入力用 FET とフィードバック用のコンデンサ(1pF)と抵抗(100M Ω)をパッド上に取付けた。また、パッドへのテストパルス入力 (50 Ω ターミネーションで 2pF に電荷供給)も 1K Ω (外部からのノイズ減衰用)を直列にいれて用意した。最初、この状態で 10MHz ノイズがあったが、グラウンドをしっかりとることによって除去できた。

キセノン純化が 1 つの大きな課題であるので、液化および精製循環までの経過を以下に列挙する。

1/30 19:00 チェンバー真空引き開始

1/31 11:24-12:24 2.6x10⁻³Pa チェンバー内層外面ヒーターオン (約 30°C)

2/2 10:50 6.8x10⁻⁴Pa

10:53-11:02 真空簡易ビルドアップ, 真空度上昇率=0.01Pa/分

11:38 ヒーターオン : フレキ配管@50°C, チェンバー内層外面@40°C

15:37 フレキ配管のヒーターオフ

16:13 ゲッターと循環ポンプともにオン

2/4 14:32 循環ポンプオフ, チェンバー内層外面のヒーターオフ

2/6 11:42 冷却開始, ガスはゲッターを通して液化

2/7 9:00 定常

2/14 13:38 ガス相精製循環開始 (4 リットル/分)

2/27 15:30 液相精製循環開始 (1 リットル/分)

2/28 10:00 1.5-1.7 リットル/分へ流量変更

23:55 1.1 リットル/分へ流量変更 (冷凍能力による制限のため)

3/2 16:30 電源ブレーカー落ちて冷凍機停止

20:13 液相精製循環復旧 (1.1 リットル/分)

4/14 17:15 冷却停止（コンプレッサーオフ）

図8に示すように、冷却開始前にキセノンガス中でのTPC中のドリフト速度を測定した。ドリフト距離の1cmをプリアンプ(A250)出力のパルスの立ち上がり時間で割ることによりドリフト速度は求められた。この結果は、J.C.Bowe, Phys. Rev. 117 (1960) 1411 - 1415 の論文（Fig.9, Xe ガス圧力 267mmHg=0.036MPa でのドリフト速度）とよい一致を示している。

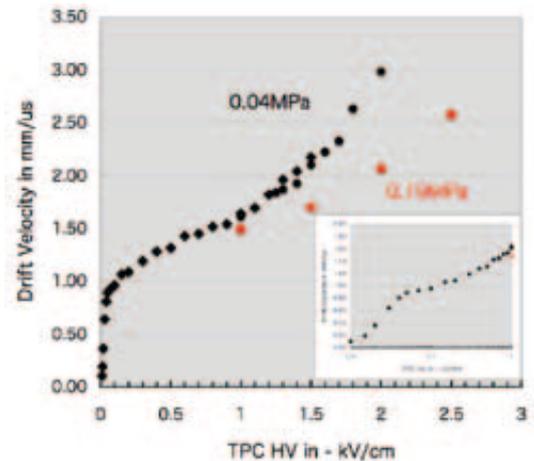


図8 ドリフト速度測定値

液体キセノンの純化の経過はシンチレーション光量の増大でモニターされた。二つのPMTシグナルの波高（オシロスコープによる観測）を、ガス相精製循環の開始された2月14日を時間原点とする日数の関数として図9に示した。液相精製循環はガス相の循環速度の1/4であるが、シンチレーション光量の増大率は同じ程度であった。液相精製循環中（2月28日）に循環速度を1.6倍にしたとき光量の増大率は2倍程度上昇した。PMT2は途中シグナルが出なくなった（PMTのブリーダーに接続するピンが曲がって外れていた）。PMT1の出力から20日後ごろに光量の飽和が見られた。この飽和光量はセクション2-3で評価したものとよい一致をしている。この間、シンチレーション光量は循環開始時から約4倍増加した。

宇宙線による電荷シグナルは11日後の2月25日に、 α 線ソースによるものは図10のように45日後の3月31日に観測された。 α 線エネルギーの5%が再結合を免れて2.2mm/usecの速度で1cmドリフトし、不純物により指数関数的に減少すると仮定して、観測された電荷量より酸素換算での不純物量を370ppb程度と見積もった（参照：減衰長=1.4m/ppb, G.Bakale et al., J.Phys.Chem. 80 (1976), 2556）。

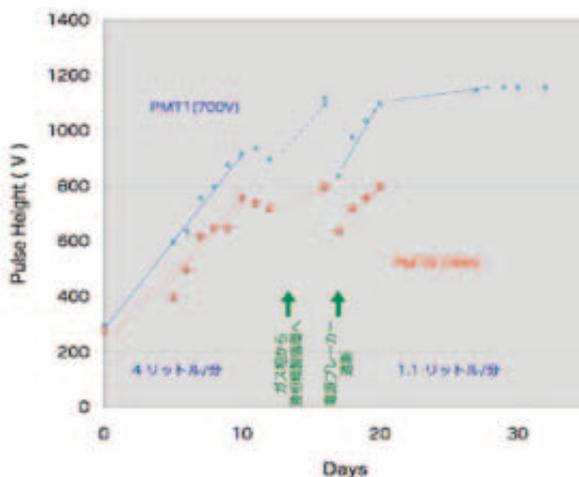


図9 精製循環開始以来の光量変化

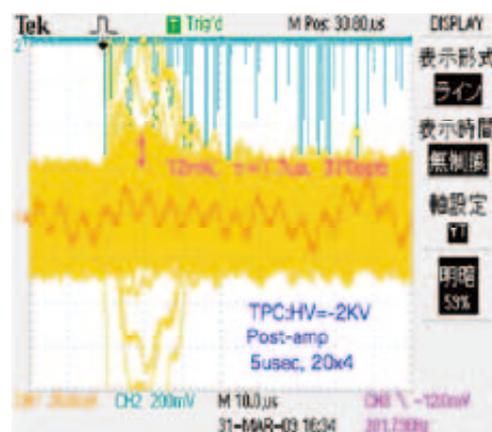


図10 最初の α 線の電荷シグナル

まとめ

3月31日の年度末までの活動状況について液体キセノン中の TPC プロトタイプ試験を主に記述した。液体キセノンの純化過程について詳細な情報を得ることが出来た。循環速度を倍増し、さらに効率の良い純化を達成し TPC の基本性能を評価する予定である。この他に、KEK ASIC 教育プログラムを利用して、ブリアンプとシェイパーからなるフロントエンド・アナログ ASIC チップの設計と製作を行った。その詳細テスト用のボードを作成して-100°Cの低温も含めて性能評価を行う予定である。

平成 20 年度メンバー

田内利明、真木晶弘、春山富義、田中秀治、三原智、協力支援: KEK エレクトロニクスシステムグループ、
佐伯学行、笠見勝裕、鈴木祥仁 (KEK); 杉山 晃、東 田中真伸氏
貴俊 (佐賀大); 森俊則、金子大輔 (東大); 熊田 レビュー: 宮島光弘氏(早稲田大)、海野義信(KEK)
雅之、富谷武浩、寅松千枝 (放医研); 中村正吾 (横
浜国大)

投稿論文

なし

学位取得

金子大輔, 修士, 東大理学研究科, 『次世代 PET に向けた液体キセノン TPC の研究開発』, 平成 21 年 2 月

学会発表等

平成 21 年 3 月 27-30 日、日本物理学会第 64 回年次大会

金子大輔 (東大素セ) 『次世代型 PET に向けた LXeTPC の R&D』

東貴俊 (佐賀大理工) 『液体キセノン TPC で用いるフロントエンドエレクトロニクスのための ASIC デザイン』

(2) 平成 21 年 3 月 12-17 日、TIPP09, ポスターセッション

金子大輔 "Test of liquid xenon TPC for PET application" (Bio. Medic. Mat.)

東 貴俊 "ASIC design and fabrication for front end electronics of liquid xenon TPC" (FrontEnd)

(3) 平成 20(2008)年 1 月 25 日、T×テクノロジー・ショーケース・イン・つくば 2008 のポスターセッション

(4) 平成 19(2007) 年 7 月 30 日、次世代 PET 研究会

真木晶弘 (KEK) 『液体キセノン TPC-PET』

(5) 平成 19(2007) 年 3 月 2 日、新技術説明会 (JST 主催)

田内利明(KEK) 『次世代 PET - 液体キセノンタイムプロジェクションチェンバー(TPC)を用いた TXePET 』 ;

特許出願番号 : 2007-035703

液体アルゴン TPC プロジェクト

丸山 和純

1. はじめに

液体アルゴン TPC 検出器は、次世代のニュートリノ実験や陽子崩壊実験、暗黒物質探索に非常に有望な検出器であり、KEK のニュートリノグループでは平成 20 年度に研究開発を開始した次第である。ここではその活動報告を簡潔に行っていきたい。

我々のグループの活動は測定器開発室の大実験室で行っており、また、いろいろな技術・資金援助を測定器開発室メンバーから受けた。ここで、まずそのお礼を述べておきたい。

2. 短期的戦略

我々のグループでは、上記で述べたような物理を狙っていくために、最終的には大きな検出器を作成する必要があって、そのための開発研究を行う必要がある。そのための共通の大きな開発要素の一つはいかに信号・バックグランド比を良くするかということである。信号・バックグランド比が悪い原因は、もともと液体アルゴン中での電離電子数 (50000 電子/cm) が少ないこと、液体アルゴン中では電子増幅がないこと、液体アルゴン中の酸素等の純度が悪いと電離電子がドリフト中に吸収されてしまうことが挙げられる。特に信号のエネルギーが始めから小さい暗黒物質探索の時には問題になるし、巨大な測定器を使うニュートリノ物理での使用の際もドリフト距離が長くなることから問題になる。このため、本研究ではアルゴン液相のみでなく、検出器としてアルゴン気相を電子増幅に使用する、2 相式読み出し検出器へのトライを目標とする。

今までに最大の有効検出質量を持った液体アルゴン TPC 検出器は ICARUS 実験で使われたものだが、こちらは液相のみを使用する 1 相式検出器の方式を用いていた。日本では、アルゴンの 2 相式検出器の TPC はもちろんのこと 1 相式検出器についてもあまり馴染みがないので、まず基礎的知識の蓄積を目的とした 10 L 程度の容量を持つ小さなテストチェンバーを作成することとした。この小さなテストチェンバーを用いて、1 相式、または 2 相式読み出しへの挑戦を行う。(今回のレポートは 1 相式の結果のみ)

3. 中・長期的戦略

我々は上述した 10 L チェンバーでのテストの後、MEG 実験プロトタイプ (250 リットルの容量を持つ) クライオスタットを借りて、電子ビームを使ったテストビームを行う予定である。これは、ニュートリノ実験で重要な電磁シャワーライクなトラックが多数あるような事象で、検出器読み出しのピッチ間隔やワイヤー・パッド読み出しの違いがどのように検出器性能に影響を及ぼすかを理解するためのもので、我々のグループの非常に重要な次ステップであると考えている。この活動を平成 21 年度、22 年度にかけて遂行していく予定としている。以上の事柄は、様々な液体 TPC で共通の可能性を示すものであり、測定器開発室の趣旨にも合致していると考えられる。

また、長期的戦略として、大型の検出器作成を目指した個々のアイテムについて、研究開発を進めることも考えている。これは主に、

- (A) 高純度を保つための低温容器と循環・純化系の開発、

(B) 液体中で印加できる高電圧システムの開発、などである。

こちらの方は開発室の設立趣旨と合致しない部分もあるかもしれないが、共通に抱える技術的困難などに関しては共同で研究開発できる部分も出てくるのではないかと考えている。

4. 10Lテストスタンド

4-1 液化・純化システム

我々の作成した10Lテストスタンドでは、既製品（エアリキッド社製）である脱水（Hydrosorb）・脱酸素フィルター（Oxysorb）を用いて純化したアルゴン気体を、既に真空ポンプで 10^{-5} Pa程度まで真空化した容器に送り込み、アルゴン外槽に満たした液体アルゴンにて液化するシステムを採用した（図1）。

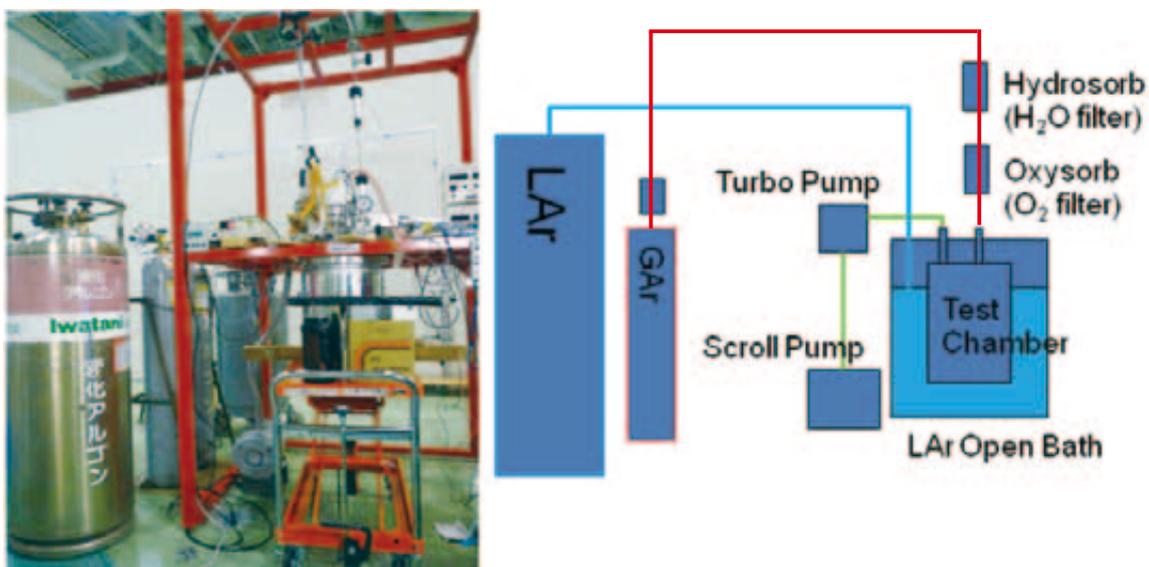


図1；10Lテストスタンド。写真（左）と概念図（右図）

ベーキングも真空引きと同時に摂氏100度程度まで上げて数日間程度行い、システム内のアウトガスを極力減らす非常にシンプルなシステムである。純化フィルターの性能は、1ppm程度のガスを入力すると、10ppb程度の純度のガスを出力するものである。この純度は電離電子ドリフト距離にして約5cmに相当する。（注意；電離電子の純度（特に酸素純度）による減衰は寿命の関数としておおまかに

$$\tau (\mu s) \sim 300 / \text{純度 (ppb)}$$

で表される。10ppbの液体では、寿命が約 $30 \mu s$ となり、我々の典型的な極板間電場 $500V/cm$ をかけたときの電子ドリフト速度 $1.6mm/\mu s$ と合わせて考えると約4.8cmで電離電子数が $1/e$ になることとなる）。



図2；循環系。青いポンプとフィルター回りのSUS管で循環する。

現在、気体用循環ポンプを購入して、容器内気相部分を循環・純化させ続けるシステムを構築することを考えている（図2）。気体による循環は、液体循環による純化よりも効果が薄いと言われるが、現在既に10ppbレベルの純度を達成している中、循環純化による効果を見てみたい。

4-2. TPC用電極板

TPCの研究開発としては1相式のみが平成20年度に成功した。時系列的には、液体内にすべての極板を沈めたシンプルなイオンチェンバー、グリッドを加えたイオンチェンバー、ストリップ状にアノード銅版を切ってTPCとして働かせる、という段階を経ながら行われたが、ここでは最後のTPCとしてのコンフィグレーションとその動作のみを記述することとしたい。

電極板（カソード・アノード）のコンフィグレーションを図3に示す。

銅版をG10の板の上に固定し、カソード（9cm×9cm）とアノード（2.2cm幅×9cm×4ストリップ）を5cmの間隔で離す。カソード-アノード間には、電場を均一にするためのフィールドシェーパと、TPCとしての時間反応を達成するためのグリッドを用意した。

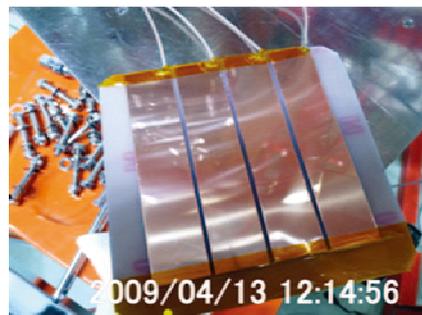
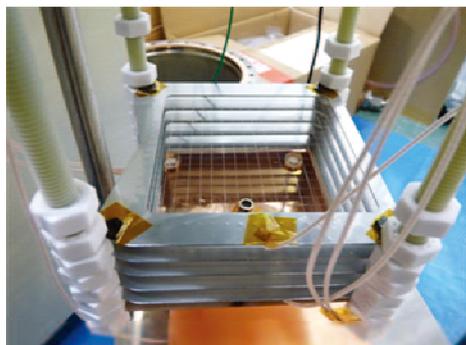


図3； カソード（最下面）とフィールドシェーパ、グリッド（左）。アノード（右）

グリッド面はアノード面から10mm離れた位置に設置され、100 μ m直径のSUS線を5mmピッチで2次的に張っている。文献によれば、透過率が \sim 100%、シールド漏れが15%である。フィールドシェーパは電場を均一にかけられるために必須で、MAXWELL3Dによる電場計算結果を図4に示す。カソードに-2000V、グリッドに-500Vの電圧を印加している。

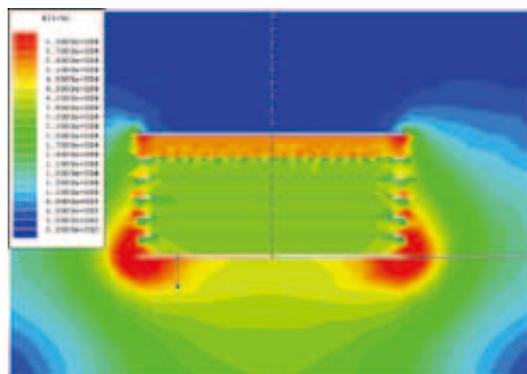


図4； MAXWELL3Dによる電場計算。フィールドシェーパにより、カソード-アノード間の電場が均一になっていることが分かる。オレンジ色の空間がグリッド-アノード間の電場。

4-3. エレクトロニクス

今回、4チャンネル電極から読み出される電荷はAMPTEK社製のプリアンプ(A250)によって増幅される(1V/pCの増幅性能)。時定数は立ち上がりが数nsで、立下りが300μsである。このプリアンプで増幅された後、豊伸社製(N012)のシェーパンプによって、時間分布がTPC用に整形される。

(ゲインが1、時定数が500ns)

読み出された電荷はテクトロニクス社製オシロスコープ(TDS3014)によって、デジタル化され、解析される。次のステップでは、CAEN社製のSY2791+A2792という2MHzサンプリングのFADCを使う予定である。

4-4. 宇宙線トラック測定

宇宙線トラックを測定するために、図5のようなコンフィギュレーションをセットアップし、TPCとしての動作を確かめた。

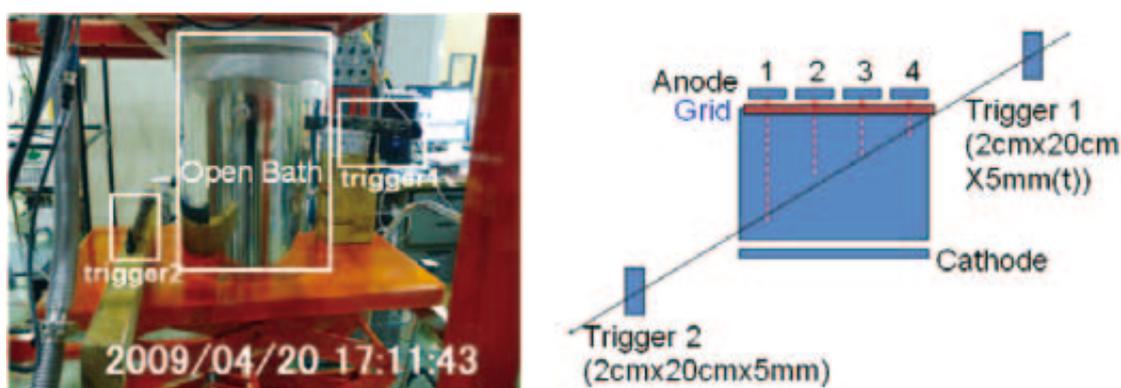


図5：宇宙線測定のコンフィギュレーション。写真(左)と概念図(右図)

2cm×20cm×5mm厚のシンチレーションカウンターを2本用意し、宇宙線をコインシデンスによって同定するとともに、宇宙線の通ったパスを限定する。この限定されたパスでは、検出器を斜め横に取りぬけるので、4チャンネルの銅版に少しずつ違ったタイミングの信号が検出されることである。

図6に、オシロスコープで検出された信号を掲載する。

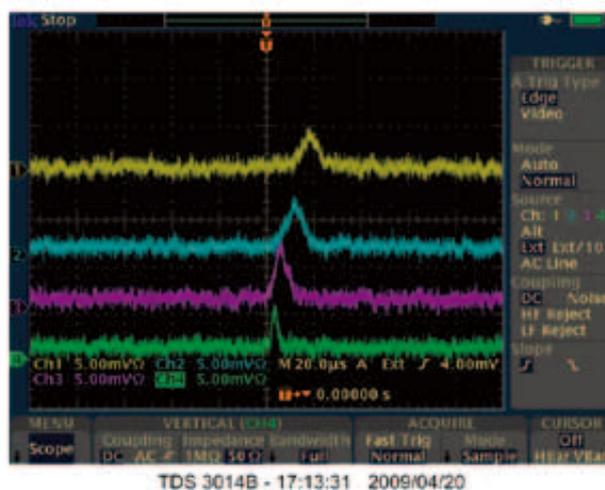


図6：図5のような宇宙線測定セッティングで測定された各チャンネルの波高時間分布。予想通りの時間分布をしていることが分かる。

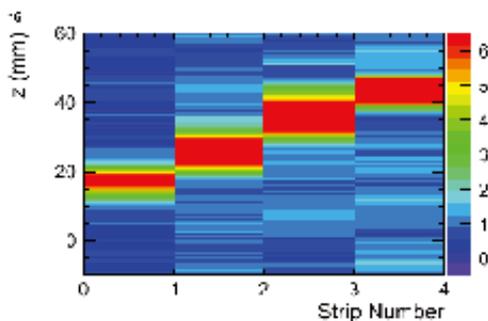
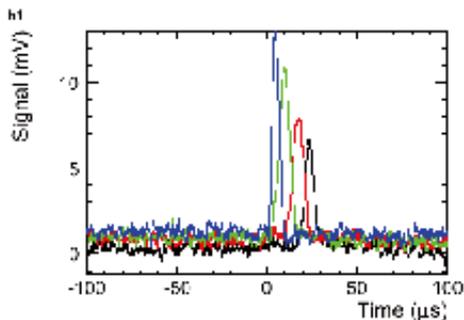


図7；上；オンロから取り込んだ波高時間分布。下図；再構成されたトラック

また、2本以上のトラックを持った事象（図8）も見る事ができる。

予想通り電子到達時間が少しずつ違う信号を観測することができる。また、液体アルゴン内での電子ドリフト速度を他で良く測定されたものと仮定すれば、宇宙線がアノードからどれだけ離れた距離を通ったのかということも分かるはずである。この仮定を用いて、宇宙線のトラックを再構成したものが、図7である。

上図がオンロから取り込んだ波高時間分布、下図が、ドリフト速度を仮定して再構成したトラック。見事に、宇宙線トラックが再構成されている。

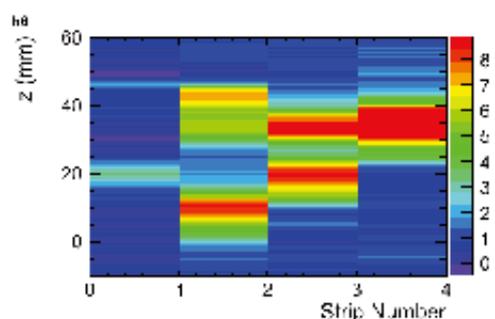
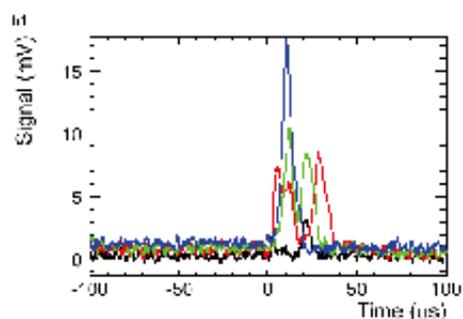


図8；トラック数が2本以上あるように見える事象

4-5. 純度の見積もり

平成20年度はキセノンランプやレーザー光を使った純度モニターを作成する代わりに、宇宙線事象を使って純度を測定することにトライし、ある程度成功した。純度を測定する方法は主に2つで、

- (1) ストリップ1チャンネルを宇宙線が通過する事象を使う
- (2) 4チャンネルを斜め横に宇宙線が通過した事象の波高分布比を使う

グリッドがあるおかげで、1チャンネル上下に宇宙線が通過した事象は本来一定の電荷が一定時間方形型に現れる。また、減衰がなければ、斜め横に通過した宇宙線は4チャンネルに全て同じ波高の信号を与えるはず

である。図9に(1)の方法を使う場合の波高の時間分布を、また図10に(2)の方法を使う場合の4チャンネル分の波高分布を示す。

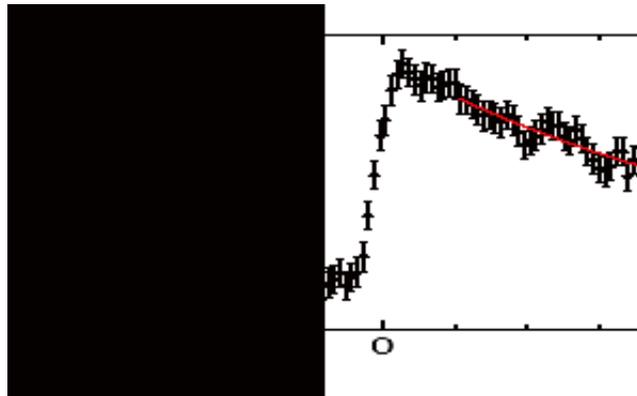


図9；ストリップ1チャンネルを宇宙線が通過する事象の波高時間分布。本来減衰がなければ、方形波となる。赤い線はフィットした線。

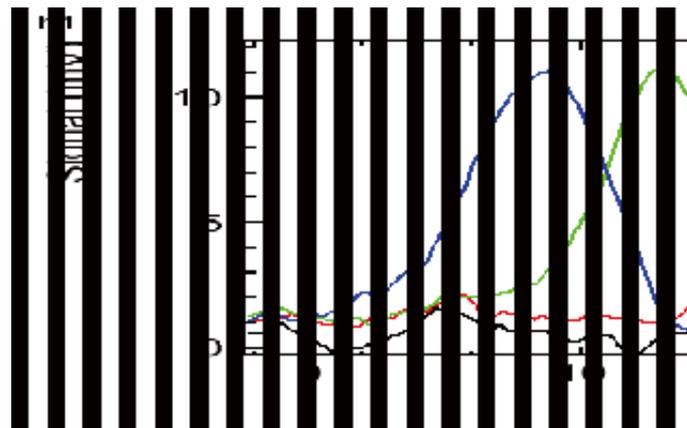


図10；宇宙線が斜めに通過した際の4チャンネルの波高分布。減衰がなければ、全て同じ波高分布になることが予想される。

両方の方法でおおよそ一致した純度が推測された。我々の循環なしでの液体アルゴン純度は ~ 10 ppbであることが推測され、これはフィルターのスペックと一致している。

キセノンランプ/レーザーを使った純度モニターは、光ファイバーを通した系であるため、どれだけ強い光を光電面まで伝達できるかが、勝負となる。平成21年度にトライしていきたい。

4-6. 平成21年度への積み残し

ここまで1相式で行ってきた研究開発は、純度を上げた後は順調に進めることができた。これからの課題としては、2相式での検出器特性の測定がある。2相式は、液面から気体への電子の取り出しのための高い電場が必要で、取り出し専用のグリッド面が必要である。近いうちに、取り出しグリッドによる高電場電子取り出しを試みる。また、2相式のひとつのメリットは気体相での増幅がガス増幅器でできるということであるので、こちらの方も早急に試行していきたい。

また、これとは別に250L容器での電子ビームを使ったテストビームも容器の低温保持性能確認や、内部のワイヤーチェンバーとしての準備を進めていく。

メンバー

KEK（素核研）； 小林隆、田中雅士、西川公一郎、長谷川琢哉、丸山和純

早稲田大学； 寄田浩平

ETHZ（スイス）； Andre Rubbia, Alberto Marchionni

学位取得状況

なし。

投稿論文

なし

国際学会、国内学会発表

なし

外部資金獲得状況

なし

測定器開発室 歴代室員リスト

2005-2006*

新井 康夫 (素核研)
宇野 彰二 (素核研)
杉本 康博 (素核研)
田中 真伸 (素核研)
徳宿 克夫 (素核研)
中平 武 (素核研)
春山 富義 (素核研)
安 芳次 (素核研)
吉田 哲也 (素核研)
吉村 浩司 (素核研)

2009-

新井 康夫 (素核研)
宇野 彰二 (素核研)
岸本 俊二 (物構研)
高力 孝 (素核研)
清水 裕彦 (物構研)
杉本 康博 (素核研)
田中 真伸 (素核研)
羽澄 昌史 (素核研)
春山 富義 (素核研)
三部 勉 (素核研)
吉村 浩司 (素核研)

2007-2008

新井 康夫 (素核研)
宇野 彰二 (素核研)
杉本 康博 (素核研)
高橋 俊行 (素核研)
田中 真伸 (素核研)
中平 武 (素核研)
羽澄 昌史 (素核研)
春山 富義 (素核研)
安 芳次 (素核研)
吉村 浩司 (素核研)

* 西暦年は大概の在籍期間を示すに
すぎず厳密な任期などを意味しない。

測定器開発室 評価書

平成 20 年 7 月

1. はじめに：本評価の目的
2. 評価総括および主要提言 (EXECUTIVE SUMMARY)
 - 評価総括
 - 課題と提言

Appendix

1. レビューの経緯
 - レビューの Charge
2. 評価委員名簿

1. はじめに

測定器開発室は平成17年の設立より高エネルギー加速器研究機構（KEK）における先端的な粒子線計測装置およびそのための基盤技術の更なる発展を目指し活動を行ってきた。活動開始より3年近く経過した現時点において全体の推移と今後の位置づけ、全体および個別プロジェクトの活動指針に関して評価を行うことを開発室室長より諮問された。本年4月および5月に開催した全体会議および意見交換を通じてこのたび評価書としてまとめるに至った。ここに評価書を幅室長に提出する。

平成20年7月
評価委員会 一同
委員長 東京大学 山下 了

2. 評価総括および主要提言 (EXECUTIVE SUMMARY)

評価総括

測定器開発室は KEK・素粒子原子核研究所にその源をもつ。3年前、高崎所長の発案と幅室長のリーダーシップで始まった。この開発室の創造というプロジェクト自体が壮大な計画であり、そこに至る道は明確な指針があるはずもなく、暗中模索の中まずは立ち上げて手探りで様子を見てみる、というのがこれまでの3年間の道であったと思う。その中において、幅室長のリーダーシップは大変大きかった。

今回の評価委員会で表明された幅室長の3年間の戦略は、グループを大きく以下の5つのカテゴリーに分け、立ち上げていったというものである。

1. 国内拠点として基盤技術で当然できるべきことを実際にできるようにするグループ。
2. 海外で発案・開発されている先端の技術にキャッチアップするグループ。
3. KEK独自の技術、得意とする技術を発展させ、その用途や水準を高めるためのグループ。
4. 大学など研究者のニーズの高い研究を集合・統括するグループ。
5. 新しい基盤施設を構築しそれにより新しい研究分野を根付かせるためのグループ。

※ほとんどの研究で基盤となる ASIC および DAQ は 1. に対応し、近年発展の著しい SOI および MPGD は 2 に、低温技術と液体キセノンを用いた TPC は 3 に、浜松ホトニクスやロシア・イタリアで開発が進み、国内の多くの大学などで研究が進む新型光センサーMPPC は 4 つめのカテゴリーに、そして最近立ち上げた STJ は 5 のカテゴリーに属する。

この5つのカテゴリーが混在することに本測定器開発室の特徴がある。このこと自体は学生から専門家まで様々なレベルが混在し活発な活動を行えたという意味でよい選択・戦術であったと評価する。しかしこの複雑な特徴それゆえに測定器開発室全体として室の性質と外部からのアプローチを判りにくくしているのも事実である。

今回の評価は、3年目の節目にあたり、今一度立ち上げ時の原点に立ち戻り、測定器開発室の進むべき方向、戦略を再考するまたとないよい機会となった。特に、測定器開発室の本来の目的とは何かということこそが最も重要な議論であった。

本総括ではまず測定器開発室の方向性を考えるうえで重要と考える観点、および測定器開発室の当初の目的と設立経緯を述べた上で、測定器開発室が全体としてとるべき原則（案）、およびそれを実現するための具体的な提案・提言（機構・素粒子原子核研究所・物質構造研究所への提言、および測定器開発室の全体運営に対する提言）をまとめ、最後に個別プロジェクトに関する主な評価を簡単に記す。測定器開発室の日常的な活動への改善提案および個別プロジェクトに関する詳細は詳述の章に記述する。

高エネルギー加速器研究機構および加速器科学全体が下に述べるような観点からひとつの大きな転機を迎えようとしていることをよく考慮に入れて今後の測定器開発室の機構内の位置付けおよび開発室の運営を行っていただきたい。

観点

1. 機構全体が組織改編に向け大きく踏み出しており、来年度からの正式改編を目指してすでに移行しつつある。
2. 機構ワイドの組織として先端加速器科学技術の推進センター構想が準備されつつあり、すでに活動も開始されている。この中に測定器開発室も位置付けられており、この位置づけと予算的な措置の枠組みなど既存の方策とは異なるさらに発展した運営を行えるようにするよい機会となっている。また、H20年度には新規予算として先端加速器の技術開発のための予算措置も文部科学省から行われ、機構ワイドの組織運営の中にこの測定器開発室をさらにきちんと位置付ける土壌は整っている。
(実際の配分も一部開始されている)
3. J-PARC が今年度後半から一部運用が開始され、来年度からは本格的な運転が開始される。これまで素粒子原子核研究所と物質構造研究所に分かれて技術的な開発がおこなわれてきた分野でも一層の協力や共有が必要となり、またお互いの技術を共有発展させることで一歩進んだ技術・研究課題が見つかることもある。すでにこの一部はまさにこの測定器開発室がリードして行ってきたことであり、これをさらに定着させるためには組織の見直しまで視野に入れた提案を今おこなうことが肝要と考える。
4. 測定器開発室の立ち上げ時における本来の目的は「素粒子原子核などで培ってきた経験を活用し、これまでの用途や指向に限定することなく、さらに先進的な測定器の開発を行える環境を整え、実際に開発を遂行する」という明解なものであったと思う。この理念自体は今後も柱に添えるべきと考える。ただし、これまでの3年間の経過の中で、この主旨を全うするためのいくつかの課題が見いだされた。特にこのことをまとめ、設立当初の趣旨を十分に反映させるために必要な措置・方向性を考えてみた。
5. ただし、残念ながら予算規模および新規のポストに関しては、昨今の緊縮財政から機構全体としては急増は極めて困難であることも正面から受け止めるべきである。
6. 当然、開発というものは一般的にも「人的資産」が第一義的に重要であり、次に財政的・物的資源であろう。しかし、一般論で「人を」「予算を」と言ってみたところで、どちらも急には生まれない。この条件で唯一可能かつ効率よい方法は、リーダーによるコーディネーションによって、人的・物的資産の共有を増やし重複する無駄を省き、異分野間の連携を強め、着実に成果をあげてそれを公表することで、年次ごとに概算要求予算の着実な増加と外部競争的資金の獲得の増加を目指す以外にない。よって、今回の評価・提言においては、どのようにしたら無駄なく効率的な組織編成ができるか、重点的な研究項目はなにか、どうしたらそこに達することが可能かに重点をしばり、提示することにした。
7. 既存の各プロジェクトに関する詳細評価、各グループにおける自己分析、は後半に掲載する。

測定器開発室の当初の目的と設立経緯

設立の発想の原点は、これまでの素粒子・原子核分野で培った先端的な粒子計測器の技術をさらに高い水準に押し進め、技術の継承とその利用を素粒子・原子核分野以外にも広げることを目標にしていたと記憶する。

その背景には、危機感もあった。20世紀におけるいわゆる素粒子・原子核分野が物理学を先導し計測器の技術を大幅に進めた時代があった。その技術は源を同じくする宇宙科学はもちろん、医療、環境、生命科学、材料等の世界で必須の技術基盤となり大きく発展した。放射線・粒子線に関する分野は今や国内でも六兆円を超える分野に成長し、さらに素粒子・原子核・宇宙分野で大きく推進・実用化された情報通信技術も含めると計り知れない規模の分野に成長している。

この現状において、昨今ではむしろ他分野において開発された技術を応用して素粒子原子核実験で利用するという場面が多くなってきた。特に生命科学・医療・通信分野での発展は著しい。これ自体は大変素晴らしい相乗効果であるが、この状況に甘んじていては、今後の発展はない。

常に世界一を目指し、さらに世界規模での協力研究が特徴である加速器科学の分野では、TRISTAN・TEVATRON・LEP・KEKB・PEP-II・HERA といった大型計画のたびに新しい技術が生まれている。TRISTANでは初めて超伝導加速器技術が大型加速器として実用化され、TEVATRONでは初めて超伝導磁石を大量に用いる施設を実現した。LEPを前に誕生したのがWWWであり、これは現在の情報社会の基盤となっている。CERNを中心に創られたGEANTシミュレーションの技術は生命科学などでも応用されつつある。KEKBやPEP-IIでは大型のエアロゲルやクォーツを用いた特殊なチェレンコフ光検出器技術が進んだ。今、LHCが欧州で、J-PARCが日本で建設中であり、ここからすでに新しい技術とさらにそれを超えるニーズが出てきている。特にLHCでは放射線耐性の高い半導体検出器および電子回路技術の開発と超高速大量データ解析のためのグリッドコンピューティングの実用化においても分野を超えた世界的な推進力となっている。日本はどうか。KEKが機構に再編され、法人化された機会をチャンスとらえ、大きく発展させる土壌ができています。KEKは世界でもBNLをしのぐ多目的加速器科学の世界拠点であり、この最大限の利点を使いつくすことができればCERNをしのぐ研究もできるはずである。とくに、日本が総力を挙げて建設中のJ-PARCはこれまでにない多目的施設であり、ここではこれまで素粒子・原子核と物質構造とさらに原子力関連研究が融合する一大拠点とすることが期待されている。

この状況にあって、日本はどうか、どうすべきか、KEKはどうか、どうすべきか。上記の期待と危機感を持って立ち上げられたのが「測定器開発室」であったと認識している。最先端の技術を開発し、それを物理学の発展と社会での応用に広げる、というフロンティア・スピリットに基づく開発室の立ち上げだった。

本来の目的に立ち返り、当初のフロンティア・スピリットを今一度念頭に置いて開発室をさらに充実したものにしていきたいというのが評価者の総意である。

課題と提言

大きな課題の整理

以下に本評価で主に上げられた現在の主要な課題を挙げる。

課題1：機構における位置付け

設立が素粒子原子核研究所を源としていること自体は効率的でもあり、よかった。しかし、予算的にも人的にも素粒子原子核研究所に基盤を置く立ち上げ時の状況がまだ本質的には変わっておらず、機構全体に広がった活動との認識はまだ定着していない。実際、これまでの3年間の予算では測定器開発室の研究内容に関しては必要に応じて個別に物質構造研究所など他部署の予算も措置されているが、基本的には素粒子原子核研究所の所内予算による措置のまま来ている。最も重要な人材的にも測定器開発室員の人員構成もそうである。先にも述べたように、H20年度より先端加速器関連経費より配分が開始されている。この機会を捉え広く認識を深めることが必要である。

課題2：開発室の室員、サポートと開発の両立

測定器開発室には専属のスタッフはいない。室長はじめ全室員がほかのプロジェクトを持ち、開発室としての研究は他のプロジェクトにおける研究と並行して行っている。これ自体は他の先端研究の現場を持つことで感覚と技術を磨く上でむしろ必須であると考えられる。しかし、その個々人の中で他のプロジェクトと測定器開発室としての開発研究の仕分け、重複、時間的・人的貢献の割合は個々に任せられているというのが現状であるため、それぞれの開発室員の開発室としての責任・使命が明確でないという大きな欠点ももっている。実際、機構としてサポートすべき業務的な部分と開発の部分と同じ研究者が行うところに関しては、問題が生じている。特にASICとDAQの2分野では、この問題は顕著である。

課題3：外に開かれているか？ プロジェクトの選択・推進の方法

さらに、素粒子原子核研究所の所内における測定器開発室の位置付け、プロジェクトの選択方法も明確ではなくなってきたという問題がみられる。設立当初はプロジェクトの選択に当たっては世界的・国内的な全体状況を時間をかけて精査し、選択した。しかし、その後の2年あまりにおいては、新たなプロジェクトの選択において、その指針は必ずしも明確には室員全員および外部に示されていなかった。

上記の課題を認識したうえで、3年目にあたって新たな段階を迎えるために、以下においてこの課題に関しての方策を提案する。開発室の運営にかかる小さな改善策や個別の課題に関する多くの意見、提案は詳述の章に譲る。

まず、以下の10の項目を測定器開発室の活動原則とすることを提案する。それに対する具体的な方策の提案を原則案の下にそれぞれ記す。

原則（案）

1. 明確な全体戦略（室長からのメッセージ）と原則（例：下記2項目以降）を外に表明すべし
2. 予算的・人的・組織的の3つにおいてすべて「機構ワイド」であるべし。
3. 長期的に、世界トップレベルの検出器・データ収集・解析技術およびその統合システムが生まれることをめざすべし
4. 人的資産・伝承を最重要視すべし
5. 外部資金の獲得を重視すべし
6. 機構の外、分野外にも開かれた運営を行うべし
7. クレジット・知的財産に関する全体的な方針・指針を、参加する個別・個人ではなく、開発室が知財室（および広報室）と連携し明確にすべし
8. 成果だけでなく、めざすところ、現状を、測定器開発室としても世界・国内に発信すべし
9. 大学共同利用機関として国内の拠点たるべきであり、業務的人的サポートも含めて一括統率することが望ましい。
10. 項目9同様、大学共同利用機関として国内の拠点たるべき物的（ハード基盤・ソフトの基盤）を整備するべし。

具体的な方策の提案・提言（上記の10項目にそれぞれ対応）

1. 室長のメッセージを明文化し、外に向かって掲げるべし。室長の指針が常に外部に分かるようにすることでかなりな部分の課題を解決できる。
2. 「機構ワイド」とは、まずは機構横断的な段階（それぞれの部署からの持ち寄り）を経たうえで、最終的には機構直轄の機構センターの一部として明確に位置づけられることが最も望ましい。暫定的に、平成20年度には素粒子原子核研究所に加え、物質構造研究所から若干の予算配分をしてもらい、開発室にも開発室員として物質構造研究所の研究者を募集・参加頂くべし。平成20年度予算からは、先端加速器の研究開発経費の内数として、最優先の加速器基盤技術開発と並び重要開発項目として事業内容から判断して適切な割合の予算（たとえば10%—20%程度等）を充当することを提案する。（追記：H20年度機構より先端加速器関連予算の配分を直接得ることができている。またその他の競争的資金等外部資金からの予算獲得も今後進める。）このため来年度（H21年度）概算要求において先端加速器経費が継続予算として十分予算措置されることを優先し、その際に先端的な測定器開発をその項目として掲げることを提案する。機構ワイドな体制は測定器開発室の当初の趣旨の体現・実現にとって必須である。
3. 長期的な戦略、たとえば5年計画を打ち出すべし。その際、今一度世界情勢、国内情勢の分析を行い、新しい目・重点課題を整理してまずは測定器の観点から測定器開発室全体として優先順位をつ

けるべき。それをもとに人的資源を募り、実効性の高いものから実行していくこと。ただし、これまでに育ちこれからも育むべき流れ（詳細評価を参照）はこの優先順位の中で妥当であれば当然継続する努力をする。

4. 各既存プロジェクト内で昨今始まった教育・講習プログラムだけでなく、開発室全体で継続的に長期の育成を目指した教育プログラムを立ち上げるべし。その際、特に共通的なニーズの高い電子回路系およびデータ収集系を重点とすることがよい。本評価の詳細に記してもいるが、特にどこに人間的なニーズ、独自性、将来性（キャリアアップの可能性含め）があるか整理する機会を測定器開発室および本評価委員の合同でもつことをまず提案する。
5. 卒業の目安として、当然外部資金で運営すべき段階に入ったプロジェクトに関しては、そのプロジェクトの担当者だけではなく、測定器開発室全体で資金の獲得に向けサポートする（申請書の共同執筆、代表者・参加者の募集を含め）。ただし、これまでのプロジェクトの担当者のクレジットが正当に評価されるように十分注意すること。
6. いかにプロジェクトを募集するか、再考が必要である。上記の項目3のとおり、まずは測定器開発室で優先順位を上げて、その上で参加者を募集する手順を提案する。そのためまず優先順位をつける際に、重要プロジェクトの提案として（人的資源・ユーザーや開発者の集積のありなしとは切り離して、純粋に測定器としての観点から）広く募集することが望ましい。これにより、重要な開発を広く開かれた形で募ること、および外からも参加できる道を明確にすることができると考える。
7. 発案者、担当者、および測定器開発室のクレジットを担保することを測定器開発室のひとつの重要使命として位置付け、測定器開発室長と知財室長による定期的な打ち合わせを持ち、取り扱い方針を明文化して公表すべし。さらに、開発室の状況を外に向かって公表する方針に関して広報室長と同様に行うことが望ましいと考える。
8. 定期的なアップデートが行えるように責任担当・分担を決める。項目1、7と関連。
9. 従来素粒子原子核研究所の所管であったを機構ワイドのサポートを行うものへと発展させること、および技術の伝承・機構プロジェクト（KEKBやJ-PARC等）のサポートと先端技術開発の両立が必須となる。この電子回路・データ収集（エレキ・オンライン）の分野は日常的には研究プロジェクトのサポートを業務的なものとして责任担当しながら、測定器開発室のこの分野における開発を行うことが求められているが、このサポートと開発では人的にほぼ完全に重複している。この重複は実効性のある開発を行うためには必須であり、むしろ奨励されるべきことである。しかし、現行ではサポート主体の組織（従来のエレクトロニクスシステムグループ）と開発主体の組織（測定器開発室）は分離されている。サポートと開発の一括したコーディネーション、あるいは明確な分担がない限り正常には機能しない。ただし、低温グループの様にサポート、研究推進、測定器開発を両立させることができているものもある。エレクトロニクスグループに関する課題を解決するため

に以下の2つの方策を提案する。

(ア) エレクトロニクスシステムグループを機構ワイドの測定器開発室の中に位置づける。現実的な対応のひとつとして、測定器開発室が室長のリーダーシップのもとサポートと開発を両立させることが最も効率的であると提言する。これにはもうひとつの大きな利点がある。エレクトロニクスシステムグループは現在、素粒子原子核研究所に属しているが、J-PARCの開始をはじめこれからさらに分野横断的に重要な基盤技術となる。機構ワイドなグループに生まれ変わることが強く期待される場所であり、測定器開発室を機構ワイドの組織とした上でそこにエレクトロニクスシステムグループを内包することで、人的な課題の解決と組織的な課題の解決の両面が同時に行える。

(イ) 測定器開発室とともに、従来のエレクトロニクスシステムグループを機構ワイドのグループと位置づけ、測定器開発室の責務をそれぞれ機構全体として明確にし、測定器開発室で従来行ってきたサポート部分あるいは従来のエレクトロニクスシステムグループでの研究の延長線上のものは測定器開発室のプロジェクトから切り離す。測定器開発室からエレキ・オンラインに対応する部門を独立させ、共通基盤施設に移行することも原理的にはありうる。ただし、前者の方がより効率的であると考える。

10. 拠点として現在開発に必要な物的（ハード・ソフトの両面で）資産が集約されつつある。TCADプロセス・デバイスシミュレーター、レーザー顕微鏡、測定器開発用クリーンルーム、理研から移設途上の真空センサー製作装置、等である。これらのリストの整備、マニュアルの整備、問合せ先の整備、等もサポートも兼ねるエレクトロニクスシステムグループを内包すること同様、ユーザーサポートの一環として開発室の重要業務として位置づけることを提案する。

組織的には、素粒子原子核研究所の所内プロジェクトから機構ワイドのプロジェクトへの明確な転換が必要である。

初年度は外部にも開かれた多くの提案の中から測定器開発室員が十分に精査して採択プロジェクトを決めたが、その後の拡張はもっぱら室長と測定器開発室による定例会議により提案の収集・選択がなされてきた。当初は素粒子原子核研究所の所内プロジェクトとして測定器開発室が開始された経緯からだとするが、外に開かれた、かつ機構ワイドの組織に生まれ変わることが徹底すべきであり、そのために以下のことを実行することを提案する。

1. 3年前（初年度）に行ったような提案を受けそれを精査する全体研究会および測定器開発室内の選択会議を、物質構造研究所と測定器開発室の共催で7月あるいは9月をめどに行う。今一度世界情勢、国内情勢の分析を行い、新しい目・重点課題を整理してまずは測定器の観点から新しい案を外部からも新たに取り入れ長期戦略として「測定器開発室全体として優先順位」をつけることをまず行う。その上でそれぞれの開発に対し参加者を募集する。以上から新たなスタートを切ること。

2. 本年度に関しては、物質構造研究所からも（当座は些少でもよいので）運営予算を出していただく（象徴的な意味も込めて）。実際に現在も測定器開発室のあるプロジェクトの遂行には物質構造研究所からの予算的サポートが出されている。この一部を測定器開発室全体の運営のためと名目を変更するだけでよい。
3. すでに一部の活動が始まっている機構ワイドの先端加速器推進センター（仮称）のもとに測定器開発室をきちんと位置付け、来年度の概算要求において先端加速器の開発推進のための経費の大幅増要求とその研究課題のひとつに先端測定器開発を位置づけること。これができた暁には素粒子原子核研究所等から出されている予算から切り離し、全機構ワイドの活動として予算的・人的裏付けが初めてできることになる。

個別プロジェクトに関する評価（総括）

個別の既存プロジェクトに関しては詳述の章にまとめるが、主な評価をいかにまとめておく。

MPGD :

- システム化の方向を作ったことは大いに評価する。
- MPGDの基礎研究を目指すコアグループを新たに立ち上げるべき（すでに中核として研究参加することを希望する大学等もある）。
- インフラ（Garfieldなどのソフト維持など）の整備にも力点をおくこと。

光センサー :

- 活動の広がり、学生の育成、実際の研究への発展に関して非常に高いアクティビティがあると評価される。
- ユーザーグループとしての使命はそろそろ終わりという意見もあったが、評価者全体としてはこの形体のグループがあること自体はこれまでの研究の内容、活発な活動状況からむしろよかったという意見であった。
- ただし、今後は東大グループなどの進めている内部理解を深め直接開発に繋がる方向での研究をさらに推進してメーカーサイドと本格的な共同開発が行えるようにすべきである。

SOI :

- OKIという武器は世界的にも独自であり最大限の賛辞を得た。
- たたし、未だ世界を超えるところには至っていないことも事実である。
- デザイナーの教育「一子相伝をモットーとする」というSOIグループ内の方針部分は改善の余地がある。センサーの検査などでは光センサーグループとの協力を推進すべき。
- 外国から「習える」コラボレーションも工夫するべきである。例えば研究者の長期滞在等。
- 今後とも最重要項目のひとつとしてさらに進めるべきである。

※沖電気からロームへの部分的売却のニュースは評価委員会の後に公表された。これに対しては海外と協力してロームへお願いするなど必要な方策を至急検討することを強く望む。

ASIC :

- 設立当初からの目標は、基礎体力の充実というのが眼目であり、当初からグループの外部とのリンク等、非常に素晴らしいものがある。
- ただし、知財の管理に留意すること。
- 成果の公開には大きな課題がある。
- 新しいものをどんどん進めていくだけではなく、まずは実用機となるまで仕上げることを強く望む。
出来たもの（チップも人も）をきちんと残すことをこれからも進めることを推奨する。

DAQ :

- SiTCPはすばらしい成果であり、世界へ積極的に発信すべきである。
- SiTCPを支える人を確保することは測定器開発室全体の中でも高い優先度を与えるべきであると強く提言する。
- 独創的な「トリガーレスDAQ」は必要な（重要な）ところ、特にデータフローレートの大幅な改善等から重点的に攻めるべきだと評価する。
- DAQミドルウェアは期待通りの成果が順調に出ている。先導的に採用している実験グループとの連携により、順調に開発が進んでいる。KEKとして戦略的に将来を見据えたR&Dとして成功しているので、このまま進めていってほしい。これからは、一般のユーザーがいかに使っていくかが鍵となる。講習会開催の成果を期待する。KEKとして一層のサポートをお願いしたい。

STJ :

- はじまってまだ数カ月のプロジェクトであり、未だ中身を評価するステージにはないが、理研との連携を進めていることは高く評価されている。
- まずははじめの成果をみるところから次回評価する。

XeTPC :

- STJ同様、はじまってまだ1年未満のプロジェクトであり、未だ中身を評価するステージにはない。
- 独創性ある計画でかつKEKの得意とする冷却技術をフルに用いた研究と評価される。
- 一方でPET用はプロトタイプ1, 2, 3と開発室で進めていくべき性格のものでないという意見が多かった。競争的資金を獲得を重点的に行うべきである。
- ダークマター探索等、素粒子分野での活用を視野に入れたコアを明確にしておくべきだと評価した。

多くのプロジェクト共通 :

各プロジェクトの中のサブプログラムにおいては目的を既に達していると思うサブプログラムがさらに数年の継続を提案しているものが見受けられるが（詳細は詳述の章参照）、このようなプロポーザルに対する性格付け、言い換えれば交通整理をする開発室の理念、任務、目的などを上記のように明確にして

おくことは重要であるとする。レビュー委員会に定期的な「交通整理」の任務を明確に与えることも一案である。

まとめ

以上の提案・提言をまとめる。

- まずは、室長のリーダーシップのもとに方針を全体で定め直し、そのメッセージを明文化し外に向かって掲げること。
- このため、今一度世界情勢、国内情勢の分析を行い、新しい目・重点課題を整理してまずは測定器の観点から新しい案を外部からも新たに取り入れ長期戦略として「測定器開発室全体として優先順位」をつけることをまず行う。その上でそれぞれの開発に対し参加者を募集する。以上から新たなスタートを切ること。
- 物質構造研究所、共通基盤施設からさらに開発室員を募り、先端加速器センターのもと、機構ワイドの組織として更に明確に位置付ける。
- エレクトロニクスシステムグループとの関係：以下の2方策を提案する。1) 従来は別組織であったエレクトロニクスシステムグループを機構ワイドである測定器開発室の中に位置付け、測定器開発室長のコーディネーションのもと、サポートと開発を両立させる。2) あるいは従来素粒子原子核研究所所管であるエレクトロニクスシステムグループを共通基盤施設の低温グループの様に機構ワイドのグループと位置づけ更に測定器開発室とサポート・技術開発の役割分担の整理および全体コーディネーションの方策（連携会議創設等）を確立する。前者（1）の方が組織的にもまた室員の増強という面でも効率的と評価するが、この場合測定器開発室室長の負担は大きく増すことになること、および各大型プロジェクト経費と測定器開発室の経費との切り分けにも（従来もそうであったが）留意すべし。
- 平成20年度においては素粒子原子核研究所に加え、物質構造研究所からも若干の予算配分および開発室員としての参加を行い、実質的な機構ワイドの体制への移行を促進する。平成21年度からは先端加速器等の経費により本格的に組織化する。

以上を提言・提案する。各個別プロジェクトに関する評価・改善点は前述および個別評価詳述の章を参照のこと。

測定器開発室は、これまでの日本では決して出来なかつたろうと思われる組織・集団であり、大変ユニークであるとする。機構内での位置付けをさらに確かなものとした上で、外に開かれたものとして、これからも決して“日本的な施設”と言われたいよう益々発展していくことを期待したい。

附記

今回の測定器開発室レビューの目指したところ

測定器開発室は室長の強い意志・方向性とボトムアップでの熱意により運営されることを旨としてこれまで3年間の活動を行なってきたところであり、このため総括にのべるように現在いろいろなタイプのグループが混在している。このこと自体は問題ないと考える。本レビューでは各活動への評価というよりはむしろ全体運営にかかわる諸事項を重点的に議論し、新しい成果をさらに十分に出していけるように課題の抽出と交通整理だけではなく、前向きの意味ある（役に立つ）提言をすることが肝心であると考えた。

今回のレビューでは3年の節目にあたって以下のことに留意して評価を行なった。

1. 今後の概算要求や外部資金獲得に役立つような意味のある評価をすること、
3. 測定器開発室への入り口（入学）と出口（卒業）の道筋・目安を示すこと、
4. 測定器開発室の全体運営に対する改善点を提言すること、
2. 各グループに対してレビューして良かったと思える（一般論ではなく役に立つ）具体的・建設的な提言・提案をまとめること、

レビューにあたっては、評価をきちんとするというのと活動を縛るというのは全く別（逆）の話であるので気をつけてまとめた。ただし各グループが自由度の中で戦略的に進めるということと、戦略なく自由に研究を行うというのではかなり望まれる成果・質が異なるのでそこはよく注意して前向き・建設的・具体的な提言・評価をまとめられればと考えた。

測定器開発室の目的は何か、いろいろな議論があった。目的自体の議論は評価の範囲を超えるという議論もあったが、今回の評価は3年間の活動を踏まえ、これまでの経緯や異なるタイプのグループ活動とその成果・今後の計画案を踏まえた上で、開発室を設置した当初の志に戻り、全面的な見直しや方針の再考が必要と思われるところに関しても敢えて指摘と対策・提案を行っている。

評価に関する意見・反省

今回の全体レビューに当たり、今回幅委員長より提出されたガイドラインに基づいてすべてのプロジェクトを判断することはなかなか難しかった。目的を達したもの（計画年限が来たもの）、途上のもの、これからスタートするものなど、合理的な判断基準とでもいえるものをあらかじめ作成して置くことにより、時間と労力の節約が出来るかもしれない。

Appendix

1. 測定器開発室グランドレビューの経緯

- 2008年 3月13日 測定室長よりレビュー依頼
- 4月16日 幅室長からのレビュー依頼およびチャージの配布
- 4月24日 第一回評価委員会
- 5月13日 第二回評価委員会
- 7月 本レポート提出

依頼されたレビューのCharge

- 組織について。
 - チーム形成は戦略的に行われているか？
 - 研究計画に対するマンパワーは妥当か？
 - チーム運営は妥当か？
- 研究の内容。
 - 開発に向けての研究計画は妥当か？
 - 三年間のプロGRESSは十分か？
 - 世界的に見てトップレベルであるか？
 - 独創性があるか？
 - 売れる技術になりつつあるか？
 - 分野横断の努力があるか？
- 予算執行。
 - 予算は適切か？
 - 効率的な執行がなされているか？
 - 外部資金獲得の努力は十分か？
- 関係分野研究者との関係。
 - 活動はコミュニティに開かれているか？
 - コミュニティに対する貢献が顕著か？
 - ☆ (共同利用・共同研究として、研究成果として)
 - 成果発表がきちんとなされているか？
- 今後どうしていけばよいか？
 - 開発研究の方向性。
 - 目標・研究規模。
 - 新たな応用分野。

2. 評価委員名簿

ASIC development

杉山晃（佐賀大）、窪秀利（京都大）、徳宿克夫（KEK）、
田中秀治（KEK）、高橋俊行（KEK）

SOI pixel sensor

廣瀬和之（JAXA）、竹谷篤（理研）、杉本康博（KEK）

2D detector system

越智敦彦（神戸大）、幅淳二（KEK）

New generation photon sensor

吉田哲也（JAXA）、山下 了（東大）（委員長）、坪山透（KEK）

Liquid Xenon TPC

宮島光弘（早大）、海野義信（KEK）

Superconducting Tunneling Junction (STJ) Detector

春山富義（KEK）

Next generation DAQ system

能町正治(大阪大)、長坂康史（広島工大）、山本昇（KEK）、古川和朗（KEK）

測定器開発室活動報告

発行日：2009年9月30日

発行：高エネルギー加速器研究機構
先端加速器推進部 測定器開発室
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
TEL 029-879-6248

発行人：幅 淳二
編集：野地満恵

KEK
*Detector
Technology
Project*

Frontier Center for Accelerator Science & Technology (FCAST)