1999年4月30日

平成１０年度高エネルギー加速器研究機構共同開発研究成果報告書

研究責任者　　武田　廣
所属機関　　神戸大学理学部　教授
受理番号　　９８－００８

共同開発研究が終了したので、研究成果を報告します。

1. 研究課題名

リニアコライダーのための補償型タイルファイバーカロリメータの
高エネルギービームを用いたビームテスト

2. 研究期間　　平成１０年４月１日～平成１１年３月３１日

3. 研究実施施設　　KEK 、筑波大、神戸大、信州大、甲南大

4. 研究目的

標準理論を超えた物理を探究するために、電子陽電子衝突型線形加速器（以下LCと略す）の開発が世界の主要な研究所で進められている。質量の起源たるHiggs粒子や統一理論の担い手たるSUSY 粒子を研究するためには超高性能の加速器と超高性能の測定器（以下LCD と略す）が必要であり、カロリメータにおいてはハドロンに対して$40\%/\sqrt{E}+2\%$という優れたエネルギー分解能が要求されている。このようなハドロンエネルギー分解能は、補償型と呼ばれる構成をもつサンプリング型カロリメータでのみ達成することが可能である。

タイルファイバー型のカロリメータが補償型として機能しLCD で要求されるエネルギー分解能を達成出来ることを実証するために、神戸大･甲南大･信州大･筑波大･KEK からなる我々のグループでは1996年度-97年度において共同開発研究を行なった。この研究においてはテストモジュールを製作するとともにKEK-PS に於いて３回のビームテストを行い、比較的低エネルギー領域における性能を実証した。

LC 実験における反応生成粒子のエネルギーは数100GeV以上にもわたる。このためLCD のカロリメータにおいては、高エネルギー領域における性能もまた極めて重要である。またエネルギー分解能における統計項は主として低エネルギービームを用いた実験で詳しく調べられるが、定数項を調べるためには高い入射エネルギーが必要となる。このため1998年度共同開発研究においては、1996-97年度共同開発研究で製作したカロリメータモジュールについてFNAL の高エネルギービームを用いたテスト実験を行ない、高エネルギーにおける性能を確立することを目的とした。

5. 研究成果

神戸大･甲南大･信州大･筑波大･KEK からなる我々のグループでは、超高性能なカロリメータの開発を目的として1996-9年度において共同開発研究を行なった。最も有力な候補として補償構成比をもつタイルファイバー型のサンプリングカロリメータを採用し、図１に示すような構造をもつカロリメータテストモジュールを製作した。このテストモジュールは鉛の板とシンチレータの板を２本のレールの上から吊り下げる構造をしており、鉛とシンチレータの構成比率を広い範囲にわたって細かく変えることができる。このテストモジュールを用いてKEK-PS において３回のビームテストを行ない、エネルギー分解能の鉛とシンチレータの構成比率に対する依存性や、タワー構造の境界領域におけるレスポンスの特異性を詳しく測定した。これにより比較的低いエネルギー領域における性能を実証した。この結果については添付したNIMの投稿論文に詳述されている。

カロリメータの性能を正確に把握するためには、低いエネルギーにおける測定と高いエネルギーにおける測定の両者が不可欠である。本研究では前述のテストモジュールをFNAL に持ち込み、高エネルギービームを用いて性能測定を行なう事を目的としていた。しかしながら1998年度にはFNAL の運転が行なわれなかったため、ビームテストを行なう事ができなかった。このため1999年度にビームテストを行なうための現地調査、シミュレーションスタディ、モジュールの改造作業等を行なった。またFNAL に対してLetterof Intent,BeamTest Proposalを提出するとともに、実施取り決めの締結へ向けた交渉を行なっている。

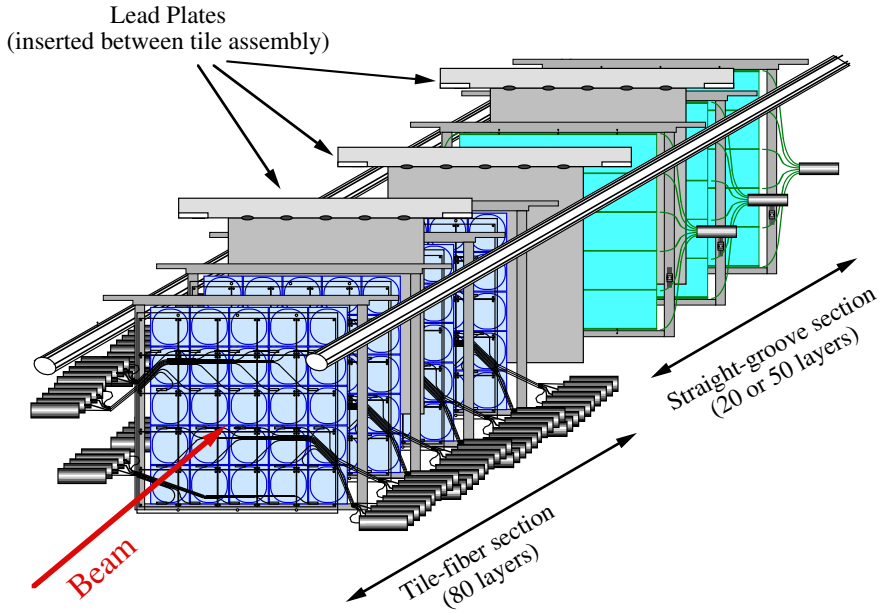

図１. タイルファイバー型ハドロンカロリメータテストモジュールの概観

5-1) FNAL 現地調査

1996-9年度に製作したテストモジュールがFNAL の実験エリアに設置出来るかどうかを確認するため、FNAL の実験エリアを実地調査を行なった。

実験はFNAL の中間子測定実験室（MesonDet. BLDG. ）E-741エリアで行なう。現在このエリアの最下流には、汎用測定器駆動架台とそれに載ったCDFカロリメータテストモジュールが設置してある。このCDF モジュールを撤去し、我々のテストモジュールを架台上に設置してビームテストを行なう。図２にこの架台とカロリメータモジュールの設置図を示す。この架台の面積は十分広く、カロリメータについてはほとんど改造無しに架台上に設置出来る見込みである。架台については図面をもとに強度計算を行ない、十分な強度をもつことを確認した。また駆動重量についても十分な容量をもつことが確認された。しかしながら最低地上高が高く、最も架台を下げた位置においてもHCAL の最も高いタワーにビームを中心入射することができない事が判明した。このため昇降架台の一部を取り外す必要があり、これについてはFNAL に提出したビームテストプロポーザル受理後直ちに改造作業を開始する。左右のスイングについては十分なスパンをもっていることを確認した。

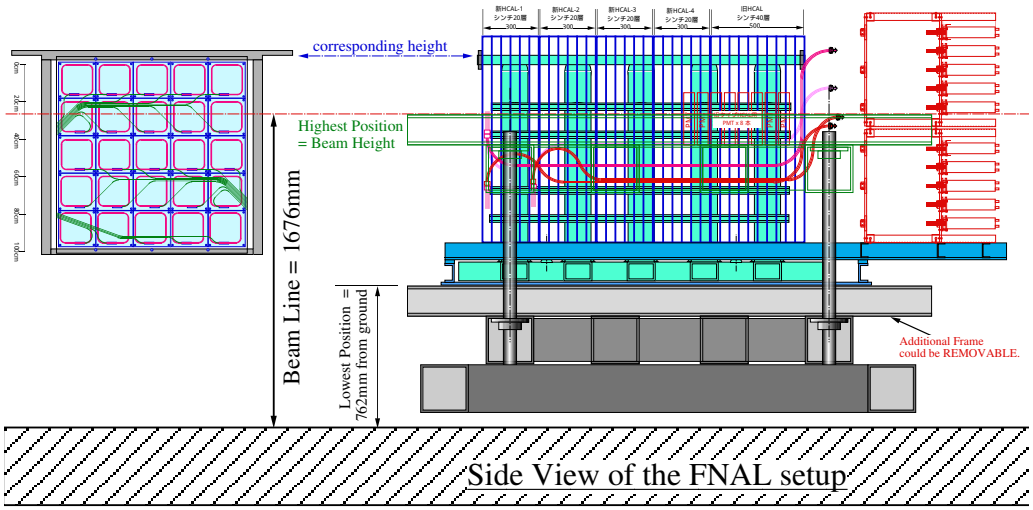

図 2 . FNAL 実験エリアのセットアップ概略図 (側面図)
図は架台を最低高に設定した図である。左端にはその時タワーを正面から見た位置を示した。
この図からモジュールの最上段のタワーは現状ではビームラインまで降りない事がわかる。
このため架台最上部の横梁を取り外す。

5-2) シミュレーションスタディ

GEANT を用い、高エネルギービームに対するレスポンスについて以下のような検討を行なった。
a) 厚さの増強の必要性の検討、
b) 前置電磁カロリメータからの横方向リークの評価、
c) カロリメータ本体からの横方向リークの評価、
d) 各タワーのキャリブレーション精度の評価。
その結果100GeVのパイオンに対してもリークは十分小さく、図 3 に示すようにエネルギー測定の線形領域内にあることが確認された。キャリブレーションについては現在スタディを進めている。

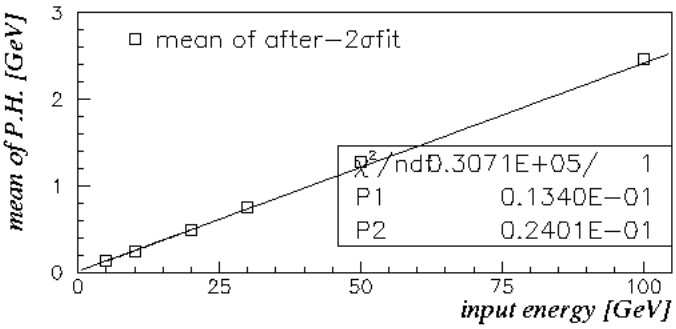

図 3 .テストモジュールのパイオンに対するエネルギー測定のリニアリティ (GEANT simulation)

5-3) 高エネルギー用改造

高エネルギービームに対しても十分な性能を発揮できるようにするため、カロリメータの厚み、PMT、LED モニタについて以下のような改造を行なった。
a) 厚みの増強
現テストモジュールは鉛厚で96cm(約 6 相互作用長) の厚みをもっている。これはKEK-PS におけるビームテストに対しては十分な厚さであるが、100GeVのパイオンに対しては約 8 相互作用長の厚みが必要である。このため 8 mm厚の鉛板を16枚追加製作し、約 1 相互作用長の厚みの増強を行なった。予算が許せば99年度においてもさらに 1 相互作用長の厚みの増強を行なう予定である。これらに必要なシンチレータ板と光電子増倍管は、97年度において鉛/シンチレータ構成比率スキャンのために用いたものがそのまま使用できる。

b) PMT交換

現在用いているPMTはVENUS測定器のToFカウンターに用いられていたものを転用しており、必ずしもカロリメータに最適なものではない。このためPMTのダイナミックレンジについてのベンチテスト及びGEANTシミュレーションによる検討を行なった。この結果100GeV電子の測定には約9000peまでの線形性が必要であるとの結果が得られた。これに対して測定されたPMTの応答線形性は、図4に示すように約7000peまでであった。このため該当するセクションのPMTについては、より線形範囲のひろいファインメッシュ型のPMTと置き換えることとした。

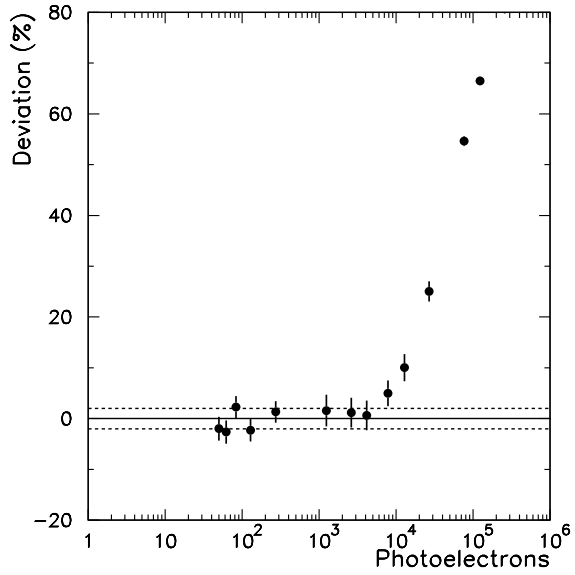

図4.PMTのダイナミックレンジ

c) モニター精度の検討

エネルギー分解能の定数項を最小限に抑えかつ精度良く評価するため、各セクションのキャリブレーションは極めて重要である。このためKEK-PSにおけるビームテストの際のLEDモニターの性能を詳細に解析した。

テストモジュールにはゲイン追跡用のLED光がシンチレータ部を照射するように組み込んである。これは単なる正常動作の確認にとどまらず、ゲインの変動の補正も行なうことを考えていた。ミューオン貫通イベントに対して、PMTからの出力をLEDで補正する前と補正後の分布を図5に示す。この結果からLEDによるゲインの追跡にはゲイン補正に用いるのに十分な精度がないことが分かった。

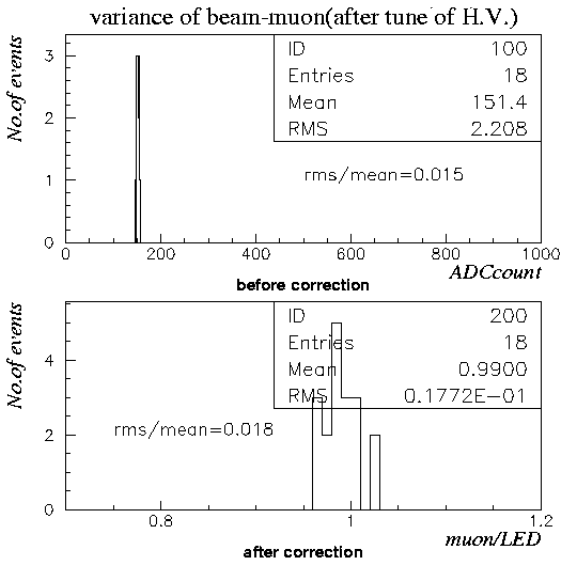

図5.ミューオン貫通イベントに対するPMT出力の変動

上図はLEDを用いた補正前、下図は補正後の分布で、出力の変動は各々1.5%及び1.8%である。

これに対する抜本的解決策はまだ得られていないが、補助的システムとしてPMTに直接光を照射するLEDを追加動作させることにした。またKEK-PSにおけるビームテストではテストモジュールの温度をコントロールすることは出来なかったが、FNALの実験エリアには空調システムが備え付けられている。このためPMT出力の変動はKEK-PSでのビームテスト時よりも改善すると期待される。図5に示されているように、PMT出力の変動は補正無しでも1.5%のレベルである。したがってLEDによる補正がうまく機能しない場合でも、温度制御により変動を目標とする分解能の定数項2%に比べて十分小さいレベルに抑え込めると期待出来る。

5-4) 粒子識別用測定器の製作

E-741ビームテストエリアには以前は粒子識別用のチェレンコフ測定器が実装されていたが、現在は解体されて倉庫に保管されている。これを再組立して使用することが出来ない場合に備えて、プリシャワー測定器とシャワーマックス測定器の製作を行なった。図6に示すように両者ともLCD測定器デザインに則って設計されており、単なるビームライン装備ではなくカロリメータシステムの一翼を構成する測定器として位置付けられるものになっている。

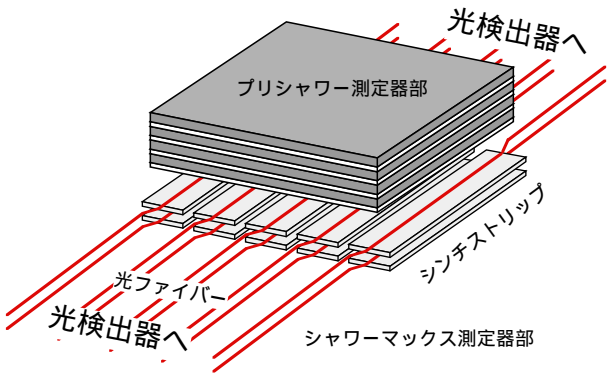

図6. プリシャワー測定器及びシャワーマックス測定器の概念図

5-5) データ収集系の構築

現在我々が所有するADCのうち、適切なダイナミックレンジと感度をもつものはFastBus-ADCのみである。このためデータ収集系はFastBusを機軸として構成することとした。基本的な構築作業は一応終了しており、今の所図7に示すように予定データサイズ(192ch)に対して約30events/secの収集速度が得られている。これは現実的なビームタイム内に測定を完了させるのに必要なぎりぎりの速度であり、現在性能向上のための作業をしているところである。

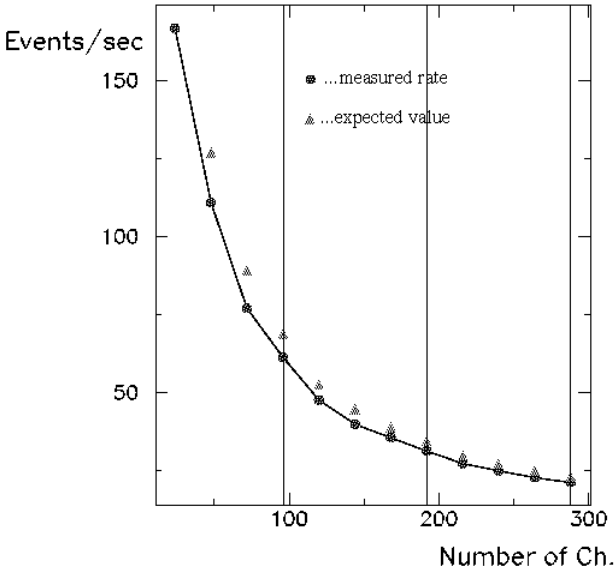

図7. データ収集速度とデータ量の関係

5-6) 輸送手順の検討

カロリメータモジュールは全体で20tonにも及ぶため、輸送は船便で行なう。早ければ1999年9月初旬から開始できるビームテストに備えて、６月末までにはKEK からの発送を完了させる。このため現在運送業者とのコンタクトをとりながら、輸送計画を策定を行なっている。

光電子増倍管やシンチレータアセンブリなどの精密部品や、鉛薄板のような壊れやすい重量物など取扱が難しい物品が多いため、基本的に梱包は我々自身で行なう予定である。また梱包に用いる鉛板を固定するための輸送治具の製作も行なった。

5-7) テスト実験計画の策定

FNAL におけるビームテストで明らかにすべきカロリメータの具体的特性は、

a) エネルギー分解能、特に定数項、

b) エネルギー測定の線形性とダイナミックレンジ、

c) 電磁シャワーとハドロンシャワーに対する出力比（いわゆるe/π比）、

d) タワー構造におけるタワー境界のレスポンスの特異性、

の４点である。このうちいわゆるe/π比については、これまで鉛とプラスチックシンチレータについてはその厚みの比（体積比）が4:1の構成が最適であると言われて来た。これに対して我々のグループのKEKにおける低エネルギービームを用いた系統的なテストでは、図８に示す様に9mm:2mmに最適点があるという結果が得られている。しかしながら鉛厚9mmというのはモジュールの構造上実現出来ないため、8mm厚と12mm厚の２構成で実験を行ないその間を補間する。

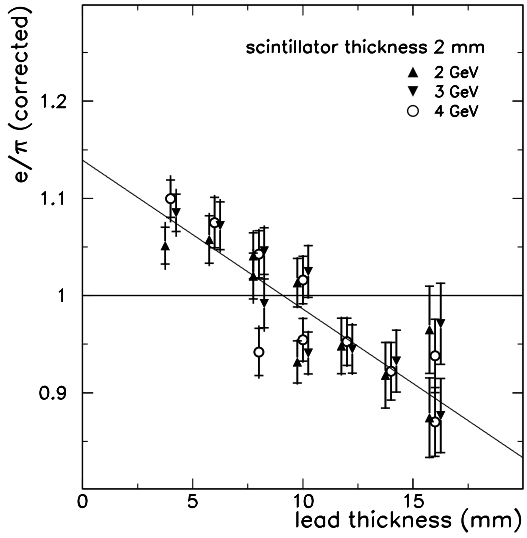

図８. 鉛/プラスチックシンチレータにおける鉛厚とe/π比の関係

策定した測定計画を表１に示す。現在達成しているデータ収集速度を仮定すると、１構成での項目a)-d)の測定に約4日間を必要とする。途中構成の組み替えに約3日間は必要であり、実験期間は実ビーム時間としてはチューニングも含め10日間程度、全実験期間としては2週間弱である。

表１．　測定項目リスト

a	較正-1 (各構成の最初)	20時間	e, π, μ	２エネルギー点	各タワー入射
b	エネルギースキャン	20時間	e, π, μ	１０エネルギー点	モジュール中心入射
c	位置スキャン	20時間	e, π, μ	１エネルギー点	１４入射位置
d	較正-2 (各構成の最後)	10時間	e, π, μ	１エネルギー点	各タワー入射

5-8) ビームテストプロポーザル

FNAL の運転スケジュールについては、1999年夏ー秋にテストビームを供給することが決定している。この時期にビームテストを行なうため、1998年12月にはLetter-of-Interestを、また1999年1月に正式なプロポーザルをFNAL に送り実験へ向けた手続きを開始した。これに対してFNAL 側から実験実施取り決めの締結が求められ、現在この交渉が進行中である。

5-9) まとめ

1998年度にFNAL でビームテストを行なう計画で本共同開発研究を申請したが、FNAL のビーム開始時期が遅れたために1998年度においてビームテストを行なうことは出来なかった。しかしながらこの間現地調査や詳細なスタディ、カロリメータ増強作業を積み重ね、準備態勢を万全に整えることが出来たことは非常に大きな進展であった。

6. 成果発表

[1] to be published in Nucl.Instr.Meth.A; "A Systematic Measurement of Energy Resolution and e/pi Ratio of a Lead/Plastic-Scintillator Sampling Calorimeter", T.Suzuki, Y.Fujii, K.Hara, T.Ishizaki, F.Kajino, N.Kanaya, J.Kanzaki, K.Kawagoe, S.Kim, T.Matsui, A.Miyajima, A.Nakagawa, S.Nakazawa, M.Nozaki, T.Ota, K.Sendai, Y.Sugimoto, Y.Sugimoto, H.Takayama, H.Takeda, T.Takeshita, S.Tanaka, A.Tanaka, T.Toeda, Y.Yamada

[2] 石崎智子　　修士論文（筑波大学）
　　加賀志穂佳　　修士論文（信州大学）

[3] 学会発表等
　　石崎智子　　日本物理学会 '98年秋の学会発表
　　大田辰郎　　日本物理学会 '98年秋の学会発表
　　加賀志穂佳　　日本物理学会 '98年秋の学会発表
　　竹内彰　　日本物理学会 '98年秋の学会発表
　　古川啓太郎　　日本物理学会 '99年春の学会発表
　　中川敦子　　日本物理学会 '99年春の学会発表
　　Y. Fujii　　Workshop on Physics and Detectors for Future e+ e- Linear Colliders, Keystone, Colorado, September 26-29, 1998
　　Y. Fujii　　The 1st ACFA Workshop on Physics/Detector at the Linear Collider, Tsinghua University, Beijing, November 26-27, 1998
　　T. Ishizaki　　ACFA Linear Collider WG General Meeting, KEK, March 17-18, 1999
　　T. Ota　　ACFA Linear Collider WG General Meeting, KEK, March 17-18, 1999

7. 研究経費内訳表

7.1 研究費（備品）

事項（規格等）	数量等	単価	金額
光電子増倍管（H6614-01)	2本	283,500円	567,000円
ディスクドライブ	1台	39,952円	39,952円
		合計	606,952円

7.2 研究費（消耗品）

事項（規格等）	数量等	単価	金額
ミューオントリガシンチレータ	2組	176,400円	352,800円
鉛板及びハンガー	16枚	60,000円	1,015,000円
光電子増倍管固定具	一式	150,255円	150,255円
鉛板固定治具	5組	64,000円	320,000円
シンチ光量測定装置改造	一式	451,500円	451,500円
エアーキャップ等梱包用品	一式	58,590円	58,590円
接着剤等小物類		43,365円	43,365円
		合計	2,391,510円

7.3 研究費（その他）

該当無し。

7.4 旅費

配分無し。