

平成 28 年 11 月 29 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2015

課題番号：15K13477

研究課題名(和文)シンチレーションファイバーとPPDを用いた高性能荷電粒子測定器の開発

研究課題名(英文)Development of charged particle detectors with scintillation fibers and PPD

研究代表者

河合 秀幸(KAWAI, Hideyuki)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60214590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では高位置分解能・大面積・安価な荷電粒子測定器を開発した。具体的には、A. 板状無機シンチレーター、波長変換ファイバー、PPDの組み合わせで、位置分解能50 μ m, 有効面積2m \times 2m, X Y 2面の素材価格200万円の測定器 B. プラスチックシンチレーター, 透明光ファイバー, 波長変換ファイバー, PMTの組み合わせで、位置分解能1mm, 有効面積100平方メートル, X Y 2面4setで素材価格2億円の測定器である。

研究成果の概要(英文)：We have been developed new charged particle detectors with high position resolution, wide effective area and low costs. For examples; detectors made of plate inorganic scintillators, Wave Length Shifting Fibers and Pixelated Photon Detectors with a position resolution of 0.05mm, effective area of 2m times 2m and cost of 10 MYen : detectors made of plastic scintillators, Crear Fibers, WLSF and PMT with a position resolution of 1mm, effective area of 100m² and cost of 4sets of 200 MYen.

研究分野：素粒子実験

キーワード：放射線検出器 シンチレーション測定器 高位置分解能 大面積 安価

1. 研究開始当初の背景

一般に放射線測定器は光検出器・ガス検出器・半導体検出器に分類され、この三者の中で光検出器は最も安価で時間分解能は最も優れているが位置分解能が最も劣る。光検出器とりわけシンチレーション検出器の位置分解能はシンチレーターの大きさに決まり、一般的には数 cm である。(本報告では分解能を標準偏差で示す。) Scintillation Fiber (以下 SF と略す。) は直径 0.2mm までのものが市販されているが、この細いファイバーに対応する微小受光素子がなかったため、SF を用いた荷電粒子測定器はほとんど用いられなかった。近年になって Pixelated Photon Detector (シリコン PM やガイガーモード APD と呼ばれる。浜松ホトニクス社の商品名は Multi Pixel Photon Counter) が開発され市販されるようになった。そこで SF と PPD を組み合わせると、安価で高い時間分解能を持ちながら、ガス検出器以上・半導体検出器に迫る位置分解能を持つ荷電粒子測定器が実現できる。

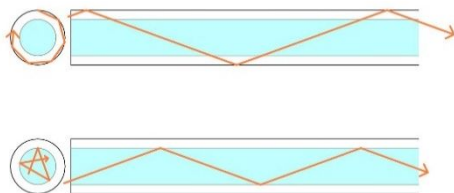
2. 研究の目的

本研究の当初の目的は、直径 0.2mm のシンチレーションファイバーと PPD を用いて、標準偏差で 30 μm の位置分解能を持つ、有効面積 1m² 以上の安価な荷電粒子測定器を開発することとしていた。

SF は世界中で(株)クラレとフランスのサンゴバン社だけが製造販売しており、クラレは直径 0.2mm まで、サンゴバンは直径 0.25mm までである。両社とも直径 1mm の SF の透過長は 2.7m と公表しているが、細い SF の透過長は不明とのことであった。我々が透過長を測定してみると、直径 1mm の SF で約 1.5m、細い SF では約 90cm であった。製造業者に透過長の測定方法を尋ねてみると、下



図のようにファイバーの一端の近傍で LED を発光させ、他端に光電子増倍管を接着して透過光量を測定したとのことであった。この測定法は透明ファイバーの透過長測定には有効であるが、SF では以下のように透過長



が大きく誤認してしまう。

SF の中を伝播するシンチレーション光は上図の下のように中心部分(コア)と周辺部分(クラッド)の境界面での全反射によって伝播するが、LED による光では上のようにクラッドだけを伝播する光も存在する。シンチレ

ーション物質を含まないクラッドのほうが



高透明度のため、透過長を大きめに誤る。我々は上図のように SF をシート状に並べて上下にプラスチックシンチレーターを挟んで宇宙線 μ 粒子が貫通した事象を測定した。シンチレーション光はコアで発生しコアとクラッドの境界面で全反射して伝播し、正しい減衰長が得られる。このようにして我々が独自に測定した減衰長はメーカーのカatalog 値より大幅に短かったため、本科研費の申請時に考えていた SF を用いた荷電粒子位置測定器は想定していた感度を得る見込みがなくなったので断念した。

我々は 2014 年度以前の研究の中で、板状の線用シンチレーターと波長変換ファイバー Wave Length Shifting Fiber と PPD を用いて、安価で位置分解能 50 μm 程度の荷電粒子測定法を発見していた。また本研究の中で有機シンチレーターと WLSF と光電子増倍管 Photo-Multiplier Tube を用いて有効面積 10m² 以上で位置分解能 1mm 程度の荷電粒子測定法を発見した。これらを踏まえて、本研究の目的を、

- A 板状の線用シンチレーター・WLSF・PPD を用いた、有効面積 2m×2m、位置分解能 0.05mm、X,Y 両面で素材価格が 7,000 万円以下の荷電粒子測定器
- B 有機シンチレーター・WLSF・PMT を用いた、有効面積 100m²、位置分解能 1mm、素材価格が X,Y2 面×4 組で 2 億円程度の荷電粒子測定器

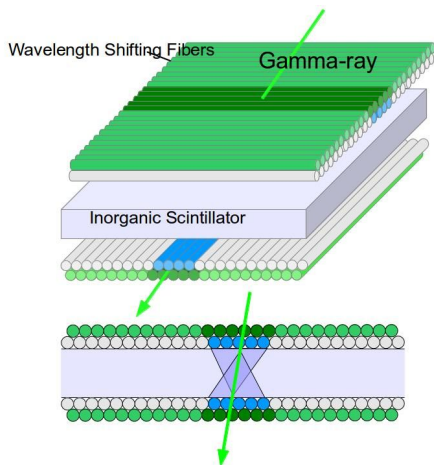
の開発研究を行うこととする。A ではドリフトチェンバーと同等の面積で、より安価で、位置分解能が 1/10 の素粒子・ハドロン・原子核実験用の荷電粒子位置検出器を、B では海上輸送用の国際コンテナ (8 feet×9.6 feet×48 feet) に対する宇宙線 μ 粒子による透視装置を想定している。

なお、本研究の成果を千葉大学発明委員会に届けたところ特許出願に相当すると判定されたため、本報告書の提出を 11 月末まで猶予して頂いた。B については 10 月 28 日に特許出願を完了した。A については特許出願準備中の 9 月にさらに高性能低価格の無機シンチレーターを発見し、素材価格 2,000 万円以下で実現できる見込みとなったため、特許出願文章を現在修正中である。本報告ではこの新しいシンチレーターには触れず、従来のシンチレーターを用いた測定器として報告する。両者の違いは価格だけで、感度や位置分解能などの性能はほとんど同じである。

3. 研究の方法

我々は 2013 年度公益財団法人中谷医工計測技術振興財団の研究助成によって

Positron Emission Tomography における 511keV 線の測定器として、板状の無機シンチレーター + WLSF シート + PPD の組み合わせによる新測定器を発明した。これは 5 . [産業財産権] のように特許が認められている。この測定器を少し改良すれば 2 . において A



で示した大面積の荷電粒子位置検出器が実現できる。本研究で提案する測定器の構造を上図に示す。

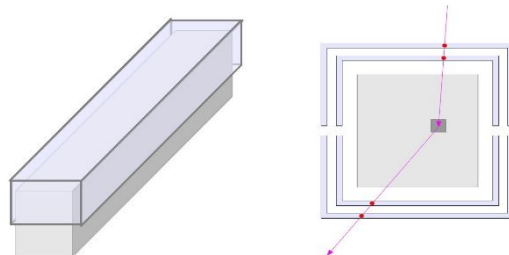
無機シンチレーターとしては $\text{La-GPS}(\text{Gd}_{1-x}\text{La}_{x-y}\text{Ce}_y)_2\text{Si}_2\text{O}_7$; $x \sim 0.25, y \sim 0.01$ を想定している。La-GPS は波長 350 ~ 450nm (ピーク波長 390nm) のシンチレーション光を放出する。WLSF の中で (株)クラレが発売している B-3 は波長 350 ~ 400nm の光を吸収して 420nm の青光を再発光する。また Y-12 は波長 400 ~ 450nm の光を吸収して 480nm の黄緑光を再発光する。上図のように、La-GPS に接する層に B-3 を、その外側に Y-11 を並べた 2 層構造とすると、厚さ 1mm の La-GPS を宇宙線 μ 粒子が通過した場合に、WLSF シートの一方の端に PMT を接着して 1 層目で光電子数 25 個以上、2 層目で 15 個以上が観測できた。このことから有効面積 $2\text{m} \times 2\text{m}$ の測定器の中央を荷電粒子が通過した場合でも WLSF シートの両端で観測される光電子数の和は、1 層目で 15 個以上、2 層目で 10 個以上となり、もし何らかの理由で光量が 50% に低下しても測定効率は 99% 以上である。La-GPS シンチレーター板の価格は当初は 1 平方 μm 当たり 1,500 万円と考えていたが、2 . で述べたように安価なシンチレーターを発見したため 1 平方 μm 当たり 200 万円程度である。また直径 0.2mm の WLSF の価格は 1m 当たり約 50 円であり、本測定器に必要な長さは $2\text{m} \times 1000$ 本 $\times 4$ 層で約 400 万円となる。

2 層目の WLSF は 5mm 分 25 本ずつ束ねて有効面積 $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ の PPD に接着する。必要な PPD の個数は x 面 y 面ともに片端で 400 個なので、合計 1,600 個となる。(単価は約 1,000 円) PPD の出力信号は 2 分割し、一方は PPD の通し番号を 20 で割った商が同じもの同士を結合し、他方は 20 で割った余りが同じもの同士を結合する。これによって信号読み出し回路数は x 面 y 面ともに 40 channel となる。PPD の信号読み出し回路は 64channel

で 35 万円程度のモジュールが市販されている。この 2 層目の信号によって荷電粒子の通過位置は $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ の領域に限定できる。

1 層目の WLSF は、おおむね 10cm ごとに、通し番号を 25 で割った余りが同じもの同士を接着する。10cm ごとに 25 個の PPD を使うので、2m の全体では 500 個、 x 面 y 面の両端合わせて 2,000 個の PPD を使用することになる。信号読み出し回路の数は各面 25channel である。

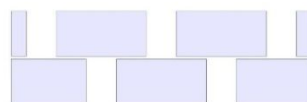
以上のように有効面積 4 平方 μm の荷電粒子位置検出器が 3,600 個の PPD と 130channel の信号読み出し回路で実現できる。



2 . において B

で示した 100 平方 μm の μ 粒子測定器 = コンテナ透視装置は下図のように

コンテナに入射する μ 粒子の位置を 2 箇所、コンテナ内で散乱して出てゆく μ 粒子の位置も 2 箇所測定する。このため X 面 Y 面共に 4 面の測定器が必要となる。A で開発した La-GPS 板と WLSF を用いた測定器は 20 億円となり、コンテナ透視としては位置分解能が不必要に高い。そこでもっと安価なプラスチックシンチレーターを用



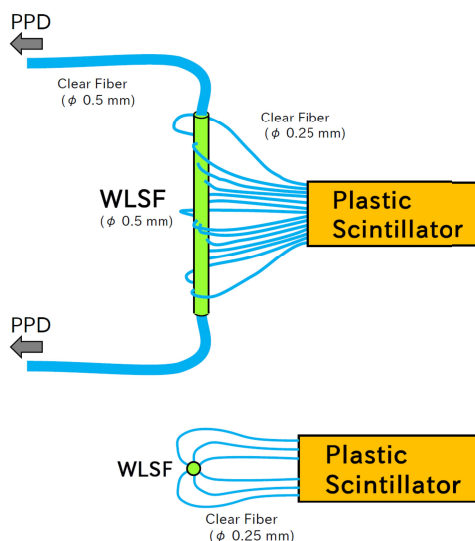
いる。我々は断面が $5\text{mm} \times 7.5\text{mm}$

で長さが 750 mm 以内 (2 ~ 2.5 feet) の棒状シンチレーターを、右上図のように 2.5mm ずつ重なるように 2 層に配置する。海上輸送用コンテナの半分を覆うためにはおよそ 24,000 本のシンチレーターが必要となる。

現在福島第一原発ではメルトダウンした核燃料の位置を測定するために大面積の μ 粒子検出器を製作中であるが、そのために製造された $3\text{m} \times 40\text{cm} \times$ 厚さ 5mm のプラスチックシンチレーターを 1 枚当たり 10 万円で購入した。ところがこのシンチレーターは表面研磨が全くなされていなくて、シンチレーション光の減衰長が 20cm 程度である。それで、このシンチレーター板を幅 7.5mm 長さ 1m 程度に切断した後に高度研磨して、減衰長 1m が得られた。但しこの研磨費用は 1 本当たり約 1 万円であり、 x, y 2 面 $\times 4$ set で 20 万本近いシンチレーターを研磨するのは現実的ではない。次に、表面を整えたい面を上にして水平面に設置してから薄い接着剤を塗布した。4 側面とも接着剤を塗布すると減衰長 1m が得られた。但しこの方法は低価格だが 20 万本も行うと相当長期間が必要である。最後に、水平な金属板をアクリルの融点より少し高

温になるように加熱しておいてシンチレーターの整えたい面を押し付けた。これで、合理的な作業期間で棒状シンチレーターの表面を整えて透過長さ1mを得る目処がたった。費用も棒状シンチレーター1本当たりの材料費500円+切断と表面処理費用で、20万本で1.5億円程度である。

単純にシンチレーター棒の両端にPPDを接着するなら40万個近いPPDが必要となる。そこで、下図のように、シンチレーター棒の端面(5mm×7.5mm)に直径0.25mmの透明ファイバーを20×30本接着する。透明ファイバーの他端は100本ずつ6列に並べて直径0.5mm長さ25+ mmのWLSF Y-11に6方向から接着する。WLSFは直径0.5mmの長い透明フ



ァイバーに接着し、この透明ファイバーの他端を受光素子(PPDまたはPMT)に接着する。このシンチレーション光測定法は、シンチレーション棒の両端5mm×7.5mm×2面=75mm²を直径0.5mmの透明ファイバー4本=1/4mm²に集約することになる。透明ファイバーの価格は1m当り10円以下なので無視できる。

本研究の測定法は1本のシンチレーター棒からの光信号を4本の透明ファイバーで伝えることになる。1面当りのシンチレーター棒は24,000本程度なので、このシンチレーター棒の番号を13進数4桁で表示した上で、第一のファイバーは1桁目の数値が同じものばかり、第二のファイバーは2桁目の数値が同じものばかり、のように束ねる。1本の束には13³=2197本の直径0.5mmファイバーが集まるので、1inch正方形PMTで測定できる。このように、1面当り52本のPMTで測定できるので、透視装置全体に必要なPMTは416本である。

4. 研究成果

Aについては有効面積30mm×30mmの測定器2組を作成し、宇宙線μ粒子を用いて想定どおりの光量が得られることを確認した。近い将来に加速器ビームを用いた性能評価実験を行う。

Bについては5mm×7.5mm×750mmのシンチレーター棒を製作して表面を処理し、3.で示した直径0.25mmの透明ファイバー600本+直径0.5mm長さ30mmのWLSF+直径0.5mm長さ20mmの透明ファイバーを接着して、透明ファイバー終端に接着したPMTで光電子数3.9個を確認した。これによって、本測定器の実現可能性を証明した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計1件) 査読あり

1. T. Mizuno, H. Ito, N. Kaneko, H. KAWAI, A. Kobayashi, S. Kodama and M. Tabata:

Development of Large-Area Charged Particle Detectors with High Position Resolution and Low Cost :

2016 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference N29-48, Nov. 1, 2016, Strasbourg, France

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

1. 名称: 透視装置
発明者: 河合秀幸
権利者: 千葉大学
種類: 特許願
番号: 2016-212361
出願年月日: 平成28年10月28日
国内外の別: 国内

取得状況(計1件)

1. 名称: PET装置及びPET装置用放射線測定器
発明者: 河合秀幸
権利者: 千葉大学
種類: 特許
番号: 2016-133333
取得年月日: 平成28年7月25日
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

現在特許出願の準備中であるため、ホームページは特許出願が完了してから整備する。

6. 研究組織

(1)研究代表者

河合 秀幸 (KAWAI Hideyuki)
千葉大学 大学院理学研究科 准教授
研究者番号: 60214590

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし