

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2006～2008 年

課題番号：18760057

研究課題名（和文）飛程識別を用いた二次荷電粒子検出器の開発

研究課題名（英文）Development of a secondary charged particle detector using identification of particle range

研究代表者

田中 浩基 (TANAKA HIROKI)

京都大学原子炉実験所・助教

研究者番号：70391274

研究成果の概要：

高効率かつ精度よく二次荷電粒子を検出する手法として、飛程の違いを利用した粒子識別方法を考案し、その原理実証のためのマルチワイヤ二次元ガス検出器の開発を行った。

原子力機構 FNS 施設において、アルミニウム薄膜ターゲットに 14MeV 中性子を入射することにより発生する荷電粒子の放出角（飛程）とエネルギー情報の同時測定を実施した。本研究の飛程識別手法を用いることで高効率かつ精度良く二次荷電粒子を検出できることを実証した。また高速中性子の二次元イメージングが取得可能であるという、新たな知見を得ることができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,300,000	0	1,300,000
2007 年度	1,600,000	0	1,600,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	180,000	3,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学工学基礎・応用物理学一般

キーワード：放射線

## 1. 研究開始当初の背景

100MeV 以下の中性子、陽子は二次宇宙線の中でも大部分を占めており搭乗員の被爆、宇宙船損傷、半導体エラーを引き起こす等の問題がある。また重粒子線治療においては治療ビームに幅広いエネルギー範囲にわたる様々な荷電粒子が混入することになる。さらに加速器ベース中性子捕捉療法においては治療ビーム内に混入する高エネルギー中性子の線量評価手法の開発が望まれている。

このような中高エネルギーの陽子、中性子及び重粒子線が物質に入射した際に発生する二次重荷電粒子は線エネルギー付与が大きく局所的にエネルギー損失するので線量評価が重要である。しかしながら二次重荷電粒子生成断面積の測定ではターゲット内でのエネルギー損失を減らすため薄いターゲットを必要とする。ターゲットからの二次重荷電粒子生成量が減少するので実験が困難となり二次重荷電粒子の実験データは非常

に少ない。特に中性子入射に対する実験データはほとんど無い。また使用可能な計算モデルやコードは限られ、実験データとの比較評価が重要となる。よって二次重荷電粒子を高効率で精度よく検出することが望まれている。

## 2. 研究の目的

これまでに二次重荷電粒子測定には $\Delta E$ - $E$ 検出器や、ブラッグピークの電荷情報と全エネルギーの関係を用いた方法などが用いられてきたが、飛程を弁別する研究はほとんど行われていない。本研究の手法を用いれば低バックグラウンド測定、高検出効率、検出精度の高い測定が可能であると考えられる。提案する手法は二次元ガス検出器（信号ラインを個別に読み出す方式）があれば実現可能である。

本研究では二次重荷電粒子の飛程の違いに着目し、二次元位置検出が可能なガス検出器を用いることでエネルギー情報と粒子識別を同時に測定する検出器を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究の要点は二次重荷電粒子をいかにして正確に識別できるかである。粒子の識別を行うにはそれぞれの粒子種、およびエネルギーに依存した阻止能（エネルギー損失）を持つことを利用する。図1に今回提案するシステムの概要について示す。図1の左の図は二次粒子のブラッグカーブとディスクリの関係を示している。本来ならば各信号ラインからの電荷信号（波高値）をアナログデジタル変換機に通して記録していく方法がよいが、信号線の本数が100~1000本になると信号回路及びシステムが複雑になる。本研究課題では粒子の弁別をブラッグピークの波高で行うのではなく、飛程の違いに着目している。入射粒子がターゲットと相互作用を起こし二次重荷電粒子を発生する。それぞれ二次重荷電粒子は阻止能に従ってエネルギーを損失しブラッグピークの近辺でエネルギー損失が最大となり粒子は全エネルギーを付与して止まる。全エネルギー情報は個々の信号を全てサムして測定を行う。それぞれの信号ラインはアンプ-シェイピング-ディスクリミネータ回路へ繋がっておりディスクリ値を越えると Low voltage differential signal (LVDS) デジタル信号を出力する。LVDS信号のうち一番端を飛程とみなすことができ、粒子識別が可能となる。この際 LVDS 信号の端の判別は Field programmable data array (FPGA) を用いて位置エンコードされる。この位置情報と全エネルギーの相関関係をとると図1の右の図のような出力結果が期待される。

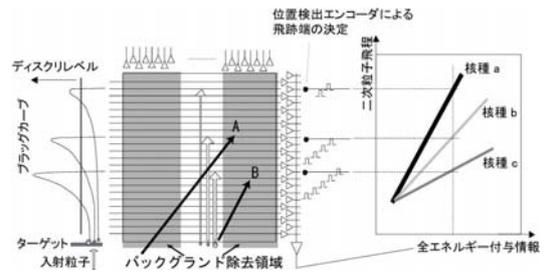


図1 飛程識別手法の検出原理の概略図

さらに外から入ってくるようなバックグラウンド（図中 A）や斜め方向に放出した二次粒子（図中 B）を除去することによって、飛程測定の精度が向上し（粒子識別分解能の向上：斜めに放出した粒子は投影すると短くみえる）、低バックグラウンド測定が可能である。

本研究では飛程識別原理確認を行うために（1）均一出力型マルチワイヤ検出素子の製作・調整・特性試験を実施し、（2）飛程測定用圧力容器の製作・ガス条件の最適化（3）二次重荷電粒子測定の実証試験を実施した。

### (1) 均一出力型マルチワイヤ検出素子の製作とアルファ線による動作確認試験

提案する飛程識別手法の実現の要点としては、それぞれの信号ラインからの出力波高が均一である必要がある。そのためにはガス増幅を起こすアノード芯線が均一にかつ一定の張力がかかっている必要がある。製作したマルチワイヤ検出素子に関してはその電気測定、引っ張り強度試験、ピッチ間隔測定試験を実施し、精密に製作されていることを確認した。均一出力型マルチワイヤ検出素子を個別読み出しシステムにマウントし原理確認試験を実施した。二次重荷電粒子生成断面積の測定では薄い試料を用いるため生成量が少ない。そのため測定時間が長時間に及ぶので長期安定性試験が必要である。また飛程を正確に測定するためのディスクリ調整試験を実施した。ゲインの均一性を確保した後に実際にアルファ粒子の飛程測定を実施した。

### (2) 飛程測定用圧力容器の製作とガス条件の最適化

ターゲットを圧力容器の外に配置した測定の場合、ターゲットから出てくる二次粒子は真空中のフライトパスを通して検出器に入射される必要があるため、検出器の入射窓はベリリウム、マイラ箔などエネルギー損失が少ない材質を選択しなければならない。それに

伴い動作可能なガス圧が低下するのでエネルギー測定範囲は限定される。しかしながら中性子入射反応の場合はターゲットを圧力容器の中に配置することができ、高耐圧とすることが出来るのでエネルギー測定範囲を向上することができる。高耐圧にするためには入射窓を厚くする必要があり（～5 mm）、中性子の散乱を防ぐために材質は散乱断面積が小さなアルミニウムの窓とした。

ガス条件はエネルギー分解能の低下につながる電子付着が起こりにくい希ガスを選択した。具体的にはAr90%+CH<sub>4</sub>10%のガスとした。中性子入射の場合はガス中の原子からも二次荷電粒子が生成されるので荷電粒子生成断面積の小さい原子番号の大きな検出ガスを選択する必要がある。ガス条件によってガスゲインが変化するので最適ディスクリ値を各ガス条件に対して取得する必要があるため、ディスクリ値の最適化試験を実施した。

### (3) 二次重荷電粒子測定の実証試験

図2に個別読出し型ガス二次元位置検出器の概略図を示す。高速中性子と薄膜アルミニウムターゲットとのAl(n, p)、Al(n, α)反応によって放出される荷電粒子はドリフトスペース内で飛跡に沿ってガスを電離する。電離電子はアノードワイヤ上でガス増幅を行い、前置増幅器、アナログデジタルコンバータを介してエネルギー情報として記録される。一方アノードワイヤの後方に設置したカソードワイヤおよびバックストリップには誘導電荷が誘起され、それぞれの信号は増幅器、弁別器を通してデジタル信号に変換される。これらの信号には荷電粒子の飛跡の二次元位置情報を持っており、デジタル信号処理回路によって軌跡端の情報を記録する。

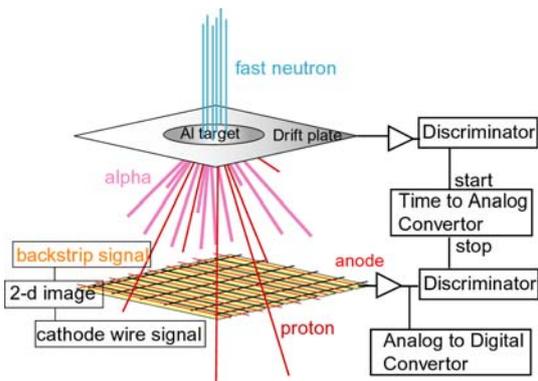


図2 二次重粒子測定実証試験概略図

## 4. 研究成果

### (1) 均一出力型マルチワイヤ検出素子の製作

### とアルファ線による動作確認試験

均一出力型マルチワイヤ検出素子の均一試験として、<sup>3</sup>He(n, p)T 反応による放出エネルギー765keVを用いて波高分布を取得し、各有感領域での一様性の確認試験を行った。実験は日本原子力研究開発機構放射線標準施設に設置してある黒鉛パイル熱中性子場で行った。図3に熱中性子の入射位置分布を示す。

分布が平坦であることから、マルチワイヤ検出素子が均一な感度を有していることが確認された。

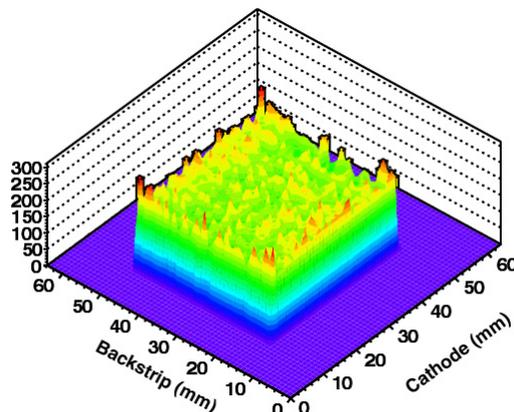


図3 マルチワイヤ検出素子の均一確認試験結果

さらに各入射位置での波高分布の765keVのピークをプロットした分布を図4に示す。765keVのピーク位置はガス増幅の情報を含んでいる。それぞれの有感領域におけるガス増幅率のばらつきは10%以下であり、均一性を有する検出素子であることを確認した。

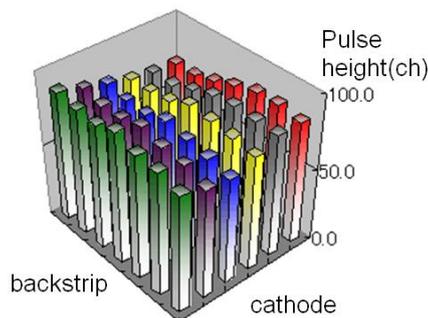


図4 ガスゲイン均一試験の結果

印加電圧、最適ディスクリ値の決定の後、この手法における原理確認試験として<sup>241</sup>Amアルファ線源からのアルファ線を用いて飛程とエネルギー情報の同時取得を行った。図

5にアルファ線のエネルギー情報と飛程の相関関係を示す。

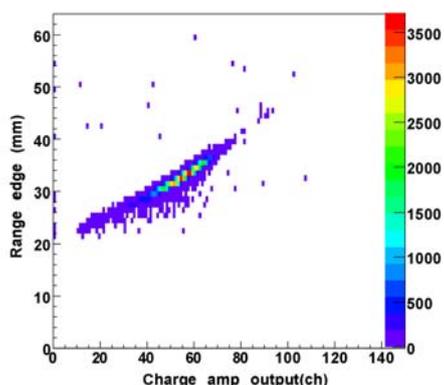


図5 アルファ線のエネルギー情報と飛程の相関関係

$^{241}\text{Am}$  アルファ線源内のエネルギー損失のため検出器有感部には様々なエネルギーを持つアルファ線が入射するが、それぞれの入射エネルギーに対するアルファ線の飛程毎のエネルギー情報を得ることができ、さらにエネルギー分解能の向上を示した。一方この同時測定から他の荷電粒子に対する粒子識別が可能であることを確認した。また、アルファ粒子の軌跡を二次元で測定可能であることを利用し、放出角度方向が選別可能であることを確認することができた。

### (2) 飛程測定用圧力容器の製作とガス条件の最適化

ドリフトケージを長くし、飛程の測定範囲を広げることで有感エネルギー領域を拡大した。また電界計算、絶縁特性試験を行い、エネルギー分解能の低下につながる電子付着が起こりにくい希ガスを選択することで飛程情報の劣化が少ないシステムを確立することができた。また、最適なガス条件を決定し、十分なガスゲインを得ることができた。図6は閾値およびアノード印加電圧を変化させた際のカウント数で、カウント数がプラトー領域になるように設定することでカウントロスが少ない測定が可能となり、最適なガス条件を選択することができた。

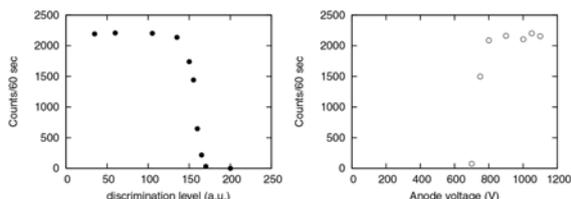


図6 閾値及びアノード印加電圧とカウント数の関係

### (3) 二次荷電粒子測定の実証試験

荷電粒子弁別実証測定は原子力機構の FNS 施設で行った。製作したシステムの特長試験として、アルミニウム薄膜ターゲットに 14MeV 中性子を入射させることによって発生する荷電粒子の放出角（飛程）とエネルギー情報の同時測定を行った。図7はアルミニウムと中性子との反応によって出てきた陽子とアルファ線のエネルギーと飛程の相関関係を示す。同じエネルギーの陽子とアルファ線では飛程が異なるためイベントが明確に分かれていることが分かる。このことから、本研究での飛程識別を用いた荷電粒子弁別が可能であることを示すことができた。

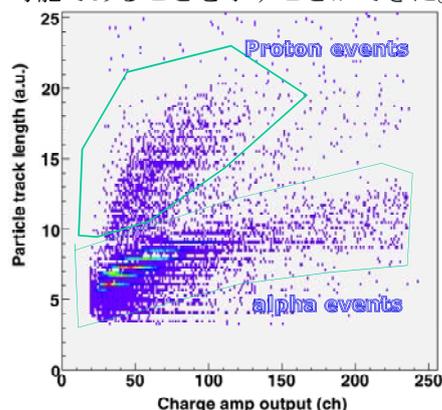


図7 アルファ線及び陽子の飛程とエネルギーの相関関係

また、図8に $\phi 5\text{mm}$ にコリメートした高速中性子の二次元位置プロファイルを示す。これにより荷電粒子の軌跡の射影成分が測定可能であることを確認し、高速中性子のイメージングへの適応も可能であることを新たな知見として得ることができた。本研究成果を用いることで、中性子捕捉療法における高速中性子イメージングによる線量評価が可能であることが分かり、新たな研究領域に適応可能であることを確認することができた。

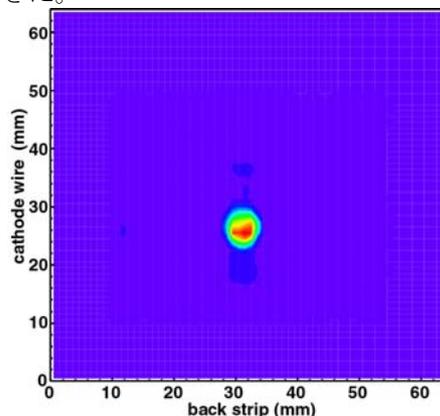


図8 14MeV 中性子の二次元位置プロファイル

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① H. Tanaka, T. Nakamura, et. al., Physica B, 385-386, 1293-1296, (2006), 査読有
- ② 田中浩基、山岸秀志、その他4名, 医学物理, 26 Sup. 3, 33-34, (2006) 査読無
- ③ T. Nakamura, H. Tanaka, et. al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A573, 187-190, (2007) 査読有
- ④ H. Tanaka, H. Yamagishi, et. al., Radiation Detectors and Their Uses, 2007-12, 169-174 (2007) 査読有
- ⑤ H. Tanaka, H. Yamagishi, et. al., 2007 IEEE nuclear Science Symposium Conference Record, N15-211 (2007) 査読無
- ⑥ 田中浩基、高田卓志、その他7名, 医学物理, 27 Sup. 4, 111-112 (2007) 査読無
- ⑦ 田中浩基、山岸秀志、他, JAEA-Review, 2008-052, 69-76 (2008) 査読無
- ⑧ H. Tanaka, Y. Sakurai, et. al, Proceeding of the 13th International Congress on Neutron Capture Therapy, 510-513 (2008) 査読有
- ⑨ H. Tanaka, Y. Sakurai, et. al, Applied Radiation and Isotopes, in press 査読有

[学会発表] (計9件)

- ① 田中浩基、山岸秀志、その他4名, 第92回日本医学物理学会学術大会
- ② 田中浩基、山岸秀志、その他4名, 2007年日本原子力学会春の年会
- ③ 田中浩基、山岸秀志、その他4名, 第67回応用物理学会学術講演会
- ④ 田中浩基、高田卓志、その他7名, 第4回日本中性子捕捉療法学会学術大会
- ⑤ 田中浩基、高田卓志、その他7名, 第94回日本医学物理学会学術大会
- ⑥ H. Tanaka, H. Yamagishi, et. al., 2007 IEEE nuclear Science Symposium
- ⑦ 田中浩基、山岸秀志、その他6名, 応用物理学会 2008年春季第55回学術講演会
- ⑧ H. Tanaka, S. Sakurai, et. al. 13th International Congress on Neutron Capture Therapy
- ⑨ 田中浩基、櫻井良憲、他第69回応用物理学会
- ⑩ 田中浩基、櫻井良憲、他 2009年日本原子力学会春の年会

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 浩基 (TANAKA HIROKI)  
京都大学原子炉実験所・助教  
研究者番号：70391274