

(p , α) 反応実験低しきいエネルギー ΔE - E カウン ターテレスコープの開発

山本, 晃央
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

原田, 正英
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

井尻, 秀信
九州大学大学院総合理工学研究科先端エネルギー理工学専攻

渡辺, 幸信
九州大学大学院総合理工学研究科先端エネルギー理工学専攻

<https://doi.org/10.15017/17464>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 20 (2), pp.151-156, 1998-09-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン :
権利関係 :

(p, α) 反応実験用低しきいエネルギー ΔE -E カウンターテレスコープの開発

山本 晃 央* ・原田 正 英**
井尻 秀 信*** ・渡辺 幸 信***

(平成10年5月29日 受理)

Development of Low Threshold ΔE -E Counter Telescope for (p, α) Reaction Experiment

Akihisa YAMAMOTO*, Masahide HARADA**, Hidenobu IJIRI***
and Yukinobu WATANABE***

We have developed a compact ΔE -E counter telescope composed of a proportional gas-counter as the ΔE detector and a silicon surface barrier detector as the E detector in order to measure energy spectra of emitted α particles from proton-induced reactions on ^{12}C . A thin window made of aluminum-evaporated mylar foil and low pressure P-10 gas were employed in the ΔE counter to achieve the low threshold energy of detected α particles by reducing the energy loss in the ΔE counter. The developed counter telescope has been used successfully in an experiment of the $^{12}\text{C}(p, \alpha)$ reaction at incident energies of 14 and 18 MeV, and the threshold energy of α particles was about 1 MeV.

1. 序 論

近年、中性子及び陽子に対する ^{12}C の高精度核データが様々な分野で要求されている。例えば、粒子線癌治療における人体中のエネルギー付与評価、宇宙空間での作業に伴う宇宙線被曝線量評価、高速中性子検出器の効率計算などである。 ^{12}C と 10 数 MeV 以上の中性子・陽子との核反応では、弾性散乱以外の主要な反応チャンネルは、 ^{12}C の 3α ブレークアップ反応（終状態が、 $naaa$ または $paax$ の 4 体になる反応で、途中に色々な中間状態を経る。）であることが知られている¹⁾。したがって、 ^{12}C の 3α ブレークアップ反応機構の詳細を知ることは、核子と ^{12}C との原子核レベルでの相互作用に関する基礎データ（核データ）の評価において重要である。

当研究グループのこれまでの研究では、上記反応機構の解明を目指し、九州大学理学部タンデム加速器、日本原子力研究所タンデム加速器を利用した 14~26 MeV 領域の $p+^{12}\text{C}$ 反応実験を計画し、放出陽子および α 粒子のエネルギースペクトルの同時測定²⁾³⁾を行ってきた。使用した検出器は、シリコン半導体検出器（Silicon Solid-State Detector；以下、Si-SSD）で構成された ΔE -E カウンターテレスコープである。

4.3 MeV の α 粒子の最大飛程に相当する $20\mu\text{m}$ の厚さの ΔE 検出器を用いたために、粒子弁別ならびに γ 線バックグラウンドの抑止の目的で ΔE 検出器と E 検出器の信号の同時計測を行った場合には、検出可能な α 粒子のしきいエネルギーは約 4.5 MeV であった。この結果、 3α ブレークアップ反応の理論モデルが予測する低エネルギー部に見られる主成分を低バックグラウンド下で精度良く測定できなかった。

そこで、本研究では、約 1 MeV 領域までの低エネルギー α 粒子を検出可能な (p, α) 反応実験用 ΔE -E カウンターテレスコープを開発し、 $p+^{12}\text{C}$ 反応からの放出 α 粒子スペクトルの低エネルギー成分を測定することを目的とする。

2. 低しきいエネルギー ΔE -E カウンターテレスコープの設計製作

2.1 設計の指針

ΔE -E カウンターテレスコープを用いて、より低エネルギーの α 粒子を測定するためには、 ΔE 検出器でのエネルギー損失をできるだけ小さくしなければならない。Si-SSD を用いた場合、1 MeV の α 粒子に対する最大飛程は約 $3.8\mu\text{m}$ となり、この程度の厚さを有し、実験に適した有感面積を持つ Si-SSD の製作は困難である。また、薄い Si-SSD は大きな電気容量を持つために、ノイズ成分が増加し、S/N 比の劣化が予想される。 ΔE 検出器の他候補として、プラスチック

*エネルギー変換工学専攻修士課程

**エネルギー変換工学専攻博士後期課程

***先端エネルギー理工学専攻

クシンチレータがある。薄膜シンチレータでは、厚さが約0.2μm (20μg/cm²) というような極めて薄い膜まで作ることが可能である。一方、薄膜シンチレータはTOF測定のために開発された特殊なプラスチックシンチレータであるため、応答信号を取り出す方法が面倒であり、薄膜の応答は検出器内における荷電粒子のエネルギー損失の予測値に直接従わず、荷電粒子の速度や原子量のより複雑な関数となり、荷電粒子の弁別は難しくなる。

以上の考察から、固体検出器を低しきいエネルギーΔE検出器として使用することは適当でないと判断し、本研究では、低エネルギー損失で大きな信号を得ることが期待できるガス比例計数管を採用することにした。この結果、以下の3点の設計指針に基づき、カウンターテレスコープの設計・製作を行った。

- 1) ΔE検出器でのエネルギー損失を小さくするために、入射窓はできるだけ薄くし、カウンターテレスコープを一体型とし、ガス圧は低圧で使用できるようにする。
- 2) 実験用散乱槽（真空チェンバ）の大きさが決まっているので、カウンターテレスコープをできるだけ小型にする。
- 3) カウンターテレスコープは真空中で用いるため、各構成部品はO-ringを用いて密封する。

2.2 ΔE-E カウンターテレスコープ

製作したΔE-Eカウンターテレスコープの断面図をFig. 1に示す。カウンターテレスコープは(A)立体角を決める直径3mmのスリット、(B)ΔE検出器用ガス比例計数管(入射方向の有感部の厚さ2.5cm)、(C)E検出器用Si-SSD(厚さ300μm)の大きく3つの部分により構成されている。各構成部品の材質として、スリットには銅を、カウンターテレスコープ本体にはアルミニウムを、カウンターテレスコープを設置する台には真鍮を使用した。なお、設計に当たっては、R.G.Markham等⁹⁾の研究を参考にした。

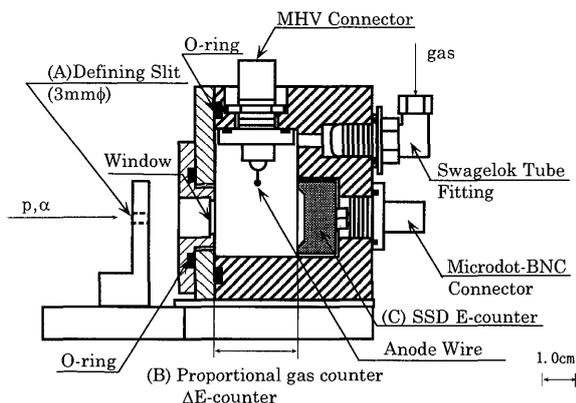


Fig. 1 Side view of the ΔE-E counter telescope

エネルギー損失を小さくするために、ΔE検出器とE検出器を一体型とした。カウンターテレスコープの大きさは80mm×60mm×57.7mmとした。また、真空中で使用するので、カウンターテレスコープを構成する本体とフタと窓の3つの部品はO-ringを用いて密封した。その他の密封しなければならない部分として、ΔEとE検出器に電圧をかけるコネクタ部とガスを供給するチューブ継手がある。それらの部品にはそれぞれO-ringを用いた真空用のものを使用し、気密性を高めて、充填ガス(P-10ガス：90%アルゴン+10%メタン)を密封した。また、ΔE検出器にガスを供給するチューブは、散乱槽を開けずにカウンターテレスコープを回転させ、角度分布を測定するために、弾力性があり、ある程度曲げたりできるシンフレックスチューブを用いた。

本体には、E検出器(Ortec社製Si-SSD：厚さ300μm、直径24mm)が収められている。E検出器の前面はガス比例計数管の陰極面としての役割を持つ。入射窓の大きさは直径10mmである。入射窓の後部が、ガスカウンターの陰極面となるように、入射窓の膜の材質には、アルミニウムを蒸着した厚さ1.6μmのマイラー膜(製品名：PETフィルム)を用い、導電性のアラルダイト(製品名：エコボンド、型名：57C)で接着した。使用した陽極芯線は直径20μmのニクロム線で、E検出器の有感領域よりも上部に取り付けられた2つのMHVコネクタ間(長さ35mm)に張られている。陽極芯線にバイアス電圧を印加して、ΔE検出器内でのエネルギー損失に相当する電気信号を取り出す。

実験では、ΔE-Eカウンターテレスコープは真空チェンバ内に設置して使用される。Fig. 2に、ΔEガス比例計数管へのガス供給システムの概略図を示す。このシステムを用いることで、ΔE検出器を封じ切りガス比例計数管として動作させることができる。真空を破らずにガス圧を自由に変えられるので、実験に応じてΔE検出器部における入射粒子のエネルギー損失量

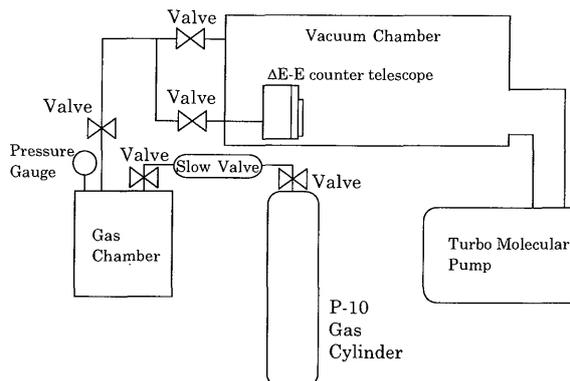


Fig. 2 Schematic illustration of the gas-supply system used for the ΔE proportional counter

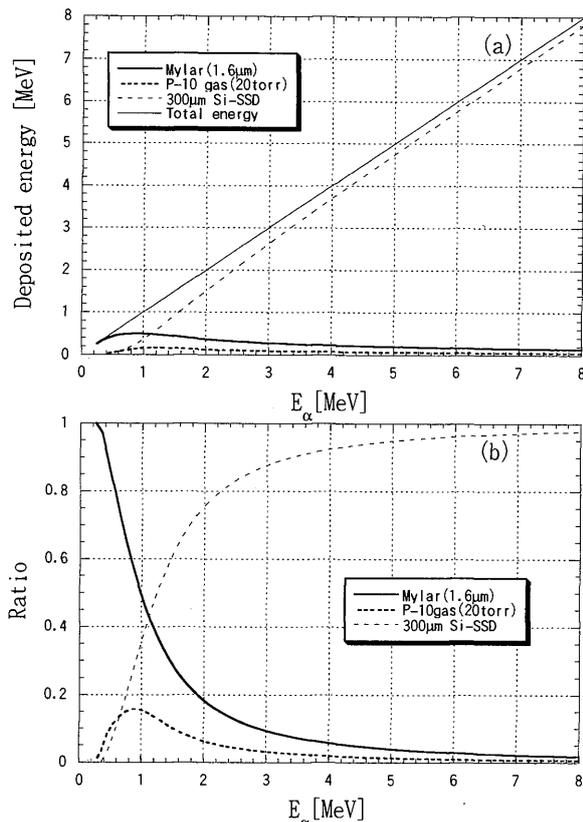


Fig. 3 Calculated energy deposit of α particles in some parts of the ΔE -E counter telescope given by (a) the energy in MeV unit and (b) the ratio.

を調整できる。

2.3 シミュレーション計算

製作した ΔE -E カウンターテレスコープ内での入射荷電粒子のエネルギー付与過程をシミュレーションして、 ΔE ガス比例計数管のガス圧の最適化ならびに各検出器の応答や信号波高のエネルギー較正式を評価する目的で、モンテカルロ法に基づいた簡易シミュレーションコードの開発を行った。

エネルギー付与過程のシミュレーションでは、エネルギー損失とそのストラグリング効果および多重散乱による角度の広がりを考慮した。エネルギー損失の計算では、ICRU Report 49⁵⁾ 及び、Joseph F. Janni ら⁶⁾ によって与えられた荷電粒子の阻止能の数表を利用した。エネルギー損失ストラグリングの計算では、G.D. Badhwarの研究⁷⁾を参考にし、Vavilov 分布を確率分布関数としたサンプリングを行った。散乱による角度の広がり、荷電粒子の物質中での散乱現象である多重クーロン散乱を単一クーロン散乱の多数回の重ね合わせという統計的な過程としてとらえた Moliere の多重散乱理論⁸⁾を用いた。この理論によって得られる散乱角度分布を使って散乱角度のサンプリングを行った。

Fig. 3(a) に、本シミュレーションコードを使って

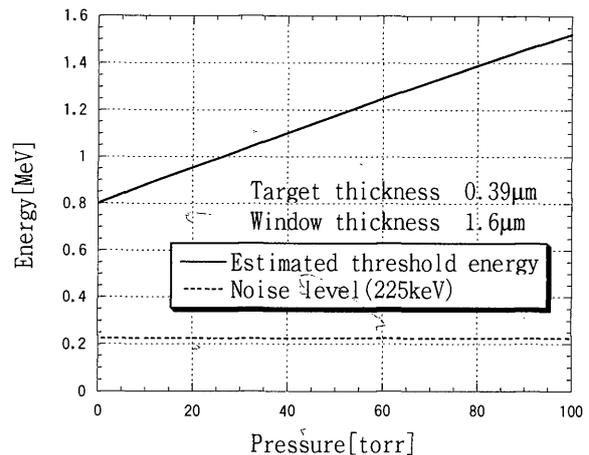


Fig. 4 Relation between α particle threshold energy and gas pressure in the ΔE proportional counter.

計算したカウンターテレスコープの各構成要素部（入射窓、充填ガス圧20torr の ΔE ガス比例計数管、厚さ300 μm Si-SSD 検出器）におけるエネルギー損失 (MeV 単位) を示す。Fig. 3(b) は縦軸をそれぞれの入射エネルギーに対する比で示した図である。このガス圧の場合、全エネルギー範囲にわたり、入射窓材でのエネルギー損失の方が、ガス中でのエネルギー損失に比べて大きいことがわかる。1 MeV 以下では、入射窓材でのエネルギー損失は全体の50%以上を占め、低エネルギー α 粒子検出が困難となる様子がわかる。

次に、本シミュレーション計算の結果に基づいて、 ΔE ガスカウンターの有効ガス圧範囲の最適化を行った。Fig. 4 にその結果を示す。E検出器の電気的ノイズレベルを実測し、ノイズ成分除去に必要なディスクリレベルを225keV であると推定した。Fig. 4 の縦軸は、入射陽子が厚さ0.39 μm の炭素薄膜ターゲットと核反応を起こし、放出された α 粒子がターゲット及び ΔE 検出器でエネルギー損失したのちE検出器で検出されるエネルギーがノイズレベル (225keV) 以上となる検出可能な最低の α 粒子エネルギーに相当する。このシミュレーション結果から、(p, α) 反応実験に使用する際のガス圧は、20~100torrの範囲に設定することに決めた。

さらに、エネルギー付与シミュレーションコードは、(p, α) 反応実験のデータ処理において必要となる各検出器の出力信号波高と付与されたエネルギーとの関係式 (エネルギー較正式) を導出するためにも用いられる。

3. 性能評価実験

3.1 α 線入射予備実験

(p, α) 反応実験に先立って、開発したカウンターテレスコープの動作特性とシミュレーション計算の妥

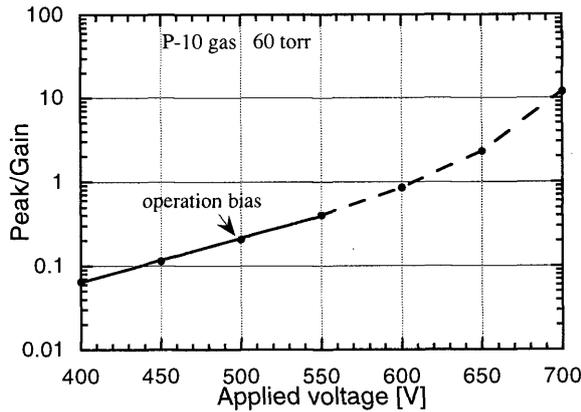


Fig. 5 Variation of the peak to gain ratio with applied voltage.

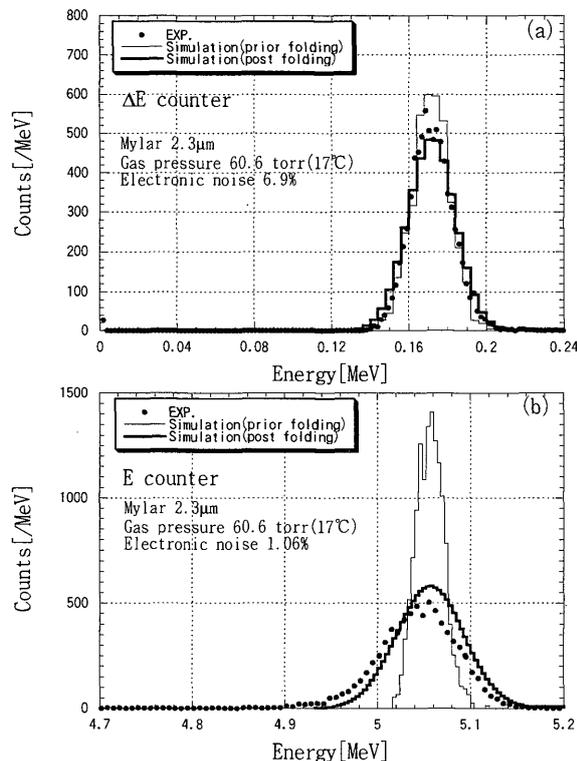


Fig. 6 Comparison of experimental pulse height spectra of ΔE and E detectors for 5.486MeV α particle with the simulation result.

当性を調査する目的で、α線源を用いた予備実験を行った。

実験は、²⁴¹Am-α線源(5.486MeV)を用いて、(p, α)反応実験用真空チェンバ(汎用大型散乱槽)中で行われた。まず、ΔEガス比例計数管の動作電圧を決定するために、ガス圧を変化させてプラトー特性を測定した。結果の一例として、60torrの場合の印加電圧と信号波高の関係をFig. 5に示す。400~550Vの領域で、良好な比例関係が見られ、動作電圧を500Vに設定することにした。ガス圧20torr, 100torrの場合も同様なプラトー特性が得られ、動作電圧をそれぞれ

400V, 550Vと決定した。

ΔEガス比例計数管のガス圧を60torrにして、²⁴¹Am-α線源からのα線を入射して、ΔEおよびE検出器の応答を調べ、シミュレーション計算結果との比較を行った。その結果をFig. 6に示す。横軸はそれぞれの検出器でのエネルギー付与である。黒丸は実験値で、ヒストグラムはモンテカルロシミュレーションの結果である。シミュレーション計算結果を回路系の雑音の半値幅を持ったガウス関数でフォルディングした結果は太い実線のヒストグラムで示されている。ΔE検出器に対するシミュレーション結果は実験値をよく再現している。一方、E検出器の方は、ピーク的位置がずれているが、そのずれは1%未満と小さい。ピークの半値幅については実験値と計算値はよい一致を示しており、ピーク位置を合わせると実験値のピーク形状を再現していることがわかる。以上の結果から、シミュレーション計算の妥当性を確認することができた。

3.2 (p, α) 反応スペクトル測定への応用

本研究で開発した低しきいエネルギーΔE-Eカウンターテレスコープを使用して、十数MeV(p, α)反応からの放出α粒子のエネルギースペクトルを測定した。

実験は、九州大学理学部タンデム加速器からの14MeVおよび18MeVの陽子ビームを用いて行われた。タンデム加速器で加速された陽子ビームは、大型散乱槽に導かれ、炭素の薄膜ターゲット(厚さ0.1mg/cm²)に照射される。散乱槽内に設置されたΔE-Eカウンターテレスコープを用いて、¹²C原子核との核反応により放出されたα粒子と低エネルギー陽子のエネルギースペクトルの測定を行った。ΔE-Eカウンターテレスコープは回転アーム上に置かれており、20°~160°の範囲を10°おきに15角度に対するスペクトルが測定された。ΔEガス比例計数管の動作ガス圧は、α粒子スペクトルと陽子スペクトル測定で、それぞれ20torr, 100torrとした。各ΔE, E検出器の信号は、データ処理システムSDAQ⁹⁾を使ってイベント毎のリストデータとして記録された。その後、ワークステーション上でオフライン処理され、最終的にエネルギースペクトル(二重微分断面)データに変換された。

ΔE, E検出器の波高信号の二次元分布図をFig. 7に示す。ΔE-Eの2次元処理により、粒子弁別ができ、α粒子および陽子成分が良好に分離されている様子がわかる。ΔEの波高チャンネルが高く、かつEの波高チャンネルが低い領域に存在する事象は、炭素の陽子弾性および非弾性散乱により反跳された炭素原子核に相当する。図中のα粒子の事象に相当する領域にウィンドウをかけて、E軸上へ写像することで、放出α粒子のエネルギースペクトルに変換した。

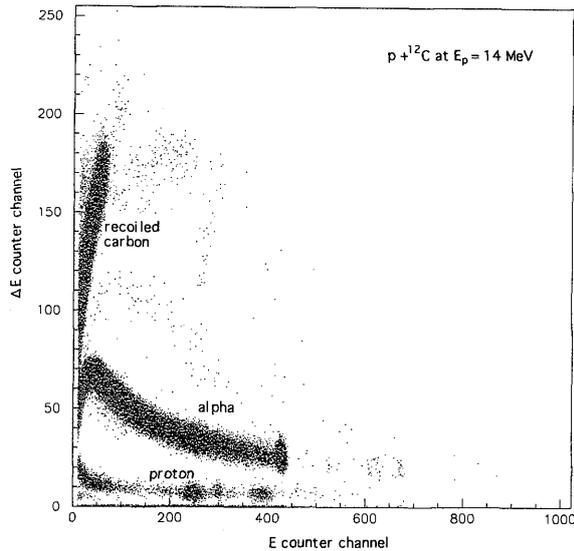


Fig. 7 Two-dimensional plot of ΔE and E pulse height distributions measured for the $p + {}^{12}\text{C}$ reactions at 14 MeV.

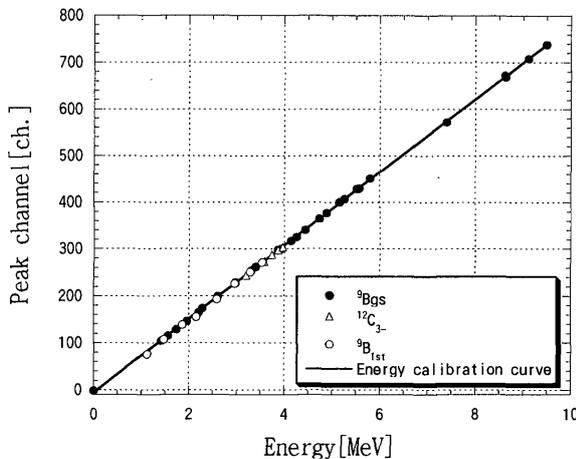


Fig. 8 An energy calibration curve representing a relation between the energy of detected α particle and the pulse height channel.

まず、波高分布とエネルギーとの関係を、 ${}^{12}\text{C}(p, \alpha){}^9\text{B}_{gs}$ 反応の運動学と2章で述べたシミュレーションコードを使って求めた。計算では、放出 α 粒子のターゲット中でのエネルギー損失分を、すべての α 粒子はターゲット中心位置から放出されると仮定して補正した。この補正の割合は、1 MeV の α 粒子に対して、約0.12 MeV 程度である。エネルギーが高くなるとほとんど無視できるようになる。得られたエネルギー較正曲線を Fig. 8 に示す。観測されたスペクトルに見られる ${}^{12}\text{C}(p, \alpha){}^9\text{B}_{1st}$ や ${}^{12}\text{C}(p, p'){}^{12}\text{C}_{3-}$ 反応の離散的なピークの位置 (白ぬき記号) も導出された較正曲線上にあり、本エネルギー較正法の妥当性が確認できた。

最終的に得られた ${}^{12}\text{C}(p, \alpha)$ 反応二重微分断面積の測定結果の一例を Fig. 9 に示す。測定角度は 30° で

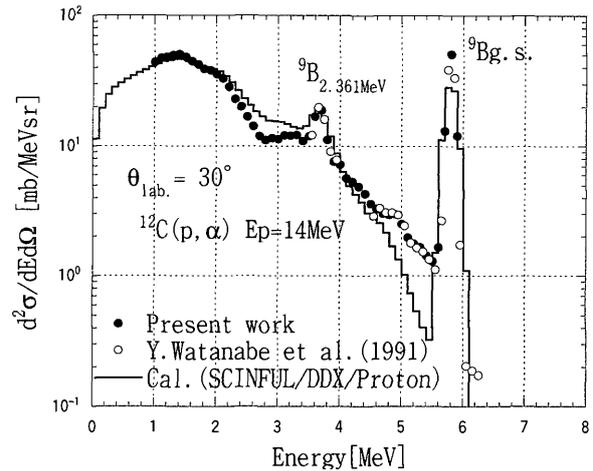


Fig. 9 Double-differential cross sections of α particles emitted from proton-induced reaction on ${}^{12}\text{C}$ at 14 MeV. The closed circles are the present experimental data. The open circles are taken from the data²⁾ measured with a ΔE - E counter telescope composed of two Si-SSDs. A theoretical prediction given in Ref. 3) is also displayed by histogram.

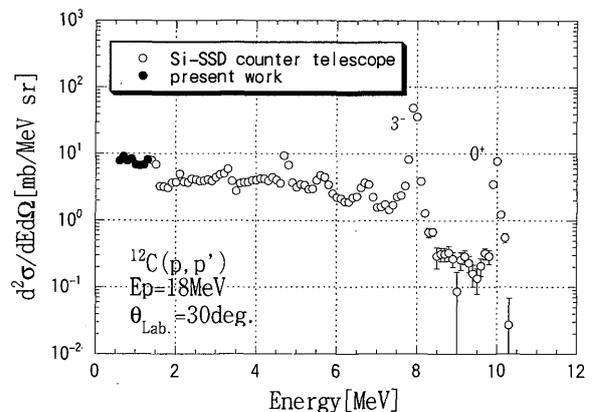


Fig. 10 Double-differential (p, p') cross sections for ${}^{12}\text{C}$ at 18 MeV. The closed circles are the present experimental data. The open circles are taken from the data measured with a ΔE - E counter telescope composed of Si-SSD³⁾.

ある。比較のため、以前、渡辺等²⁾により測定されたデータを白丸で示している。本実験の測定データおよび渡辺等²⁾のデータの統計精度は十分高く、統計誤差はいずれもほぼ実験点の範囲にある。Fig. 9 からわかるように、両者は、3.5 MeV 以上の領域で良い一致を示している。序論に述べたように、渡辺等²⁾の測定では、 ΔE 検出器として、Si-SSD 検出器が使われたために、低エネルギー α 粒子成分の測定ができなかった。 ΔE 検出器のみを使った低エネルギー成分の測定も行われたが、この場合には ΔE - E の2次元情報に基づく粒子弁別ができず、 α 粒子以外のバックグラウンド成分 (γ 線も含む) が完全に除去された確認はない。また、低エネルギー領域と高エネルギー領域との

境界エネルギー4.3MeV ではディスクリレベルの影響を受けたデータの数え落としのために、前後0.25MeV のデータが測定できなかった等の問題があった。しかし、今回の新しい低しきいエネルギー ΔE -E カウンターテレスコープを用いた測定では、一度に ^{12}C (p, α) 反応の放出 α 粒子の全エネルギー範囲を測定することができており、その不十分だった点を補ったデータとなっている。又、1 MeV まで測定範囲を広げることになった結果、ヒストグラムで示された理論計算結果⁹⁾との比較も可能となった。

さらに、 ΔE ガス比例計数管のガス圧を100torr として、エネルギー損失量を大きくすることで、低エネルギー陽子を0.5MeV まで測定することにも成功した。その測定結果を Fig. 10 に示す。白丸は、3連の Si-SSD からなる ΔE -E カウンターテレスコープを使って測定した結果である。 ΔE ガス比例計数管を使用した場合、従来の Si-SSD では、測定が困難であった1.5MeV 以下の低エネルギー成分を観測できることがわかった。

4. 結 論

本研究では、 ΔE 検出器として低圧ガス比例計数管を用いた小型の低しきいエネルギー ΔE -E カウンターテレスコープを開発した。また、 α 粒子をはじめ荷電粒子に対する ΔE および E 検出器の応答、およびカウンターテレスコープの各構成要素におけるエネルギー付与過程をシミュレーションするための簡易計算コードを作成した。 ΔE -E カウンターテレスコープを10数 MeV 陽子入射 ^{12}C (p, α) 反応実験に適用し、放出 α 粒子および陽子スペクトルを要求されるエネルギー分解能ならびに精度で測定することができた。本実験で測定された α 粒子のしきいエネルギーは1MeV であった。さらに、ガス圧を100torr に上げることで、しきいエネルギー0.5MeV までの低エネルギー陽子の検出にも成功し、測定可能なエネルギー範囲を広げることができた。以上より、本研究で開発された ΔE -E

カウンターテレスコープは、低エネルギー軽イオンの計測に有効であることが実証できた。さらに、実験で得られた ΔE -E 二次元波高分布 (Fig. 7) を見ると、重イオンである反跳炭素原子核も計測されていることがわかった。今後、より薄い窓材を使うことで、一次弾き出し原子 (primary knock-on atom ; PKA) を含め、核反応から放出される重イオンの測定にも応用可能であろう。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、比例計数管用ガス供給システムを使用させて頂いた九州大学理学部物理学科の杉光強助教授、ならびにタンDEM加速器の運転や実験に際してご協力を頂いた同学科の相良建至助教授、中村裕之助手 (現、北九州高専助教授) をはじめとするスタッフの方々に深く感謝致します。また、実験に必要な機材を製作して頂いた九州大学工学部エネルギー科学科の是永忠志技官、柴田豊和技官に謝意を表します。本研究は、平成8年度総理工奨励研究費の援助を一部受けて行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) M. Harada et al., J. Nucl. Sci. & Technol., **34**, 116 (1997).
- 2) Y. Watanabe et al., Proc. of Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, May 13-17, 1991, Jülich, Germany, (1991) p.1002
- 3) M. Harada et al., JAERI-Conf 98-003, 276 (1997).
- 4) R.G. Markham et al., Nucl. Instr. and Meth. **129**, 141 (1975).
- 5) "Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles", ICRU REPORT **49** (1993).
- 6) J.F. Janni, Atomic Data and Nuclear Data Tables **27**, 147 (1982).
- 7) G.D. Badhwar, Nucl. Instr. and Meth. **109**, 119 (1973).
- 8) G. Moliere, Z. Naturforsch. **3a**, 78 (1948).
- 9) 佐藤一道, 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻修士論文(1996).