

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月19日現在

機関番号：83401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560835

研究課題名（和文） TOF-ERDAによる軽元素分析のための反跳断面積の測定

研究課題名（英文） Measurements of recoil cross sections for the TOF-ERDA using He beam

研究代表者

安田 啓介（YASUDA KEISUKE）

（財）若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・主任研究員

研究者番号：00359241

研究成果の概要（和文）：ヘリウムビームを用いた飛行時間測定による弾性反跳粒子検出（TOF-ERDA）法による軽元素分析では、ヘリウムを軽元素に衝突させた際の断面積データが必要となる。本研究では、ヘリウムビームが窒素に入射した際の反跳断面積の測定を行った。タンデム加速器を用いて2～5.5MeVのエネルギー範囲で測定を行い、分析に必要な反跳断面積のデータを得た。また、得られた断面積データと理論計算との比較も行い、理論計算の適用可能性についても検討した。

研究成果の概要（英文）：Recoil cross section data are required for light element analysis by means of TOF-ERDA using He beams. We measured recoil cross sections for ${}^4\text{He}+{}^{14}\text{N}$ elastic scattering. Recoil cross section data were obtained by measurements using ${}^4\text{He}$ beams from a tandem accelerator in the energy range between 2 MeV and 5.5 MeV. Comparisons between the obtained data and theoretical predictions were carried out, and applicability of the theoretical prediction for the TOF-ERDA analysis was discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：イオンビーム分析、軽元素、TOF-ERDA、反跳断面積

1. 研究開始当初の背景

(1) 飛行時間測定弾性反跳粒子検出（TOF-ERDA）法はイオンビーム分析手法の一つで、水素から酸素程度までの軽元素を同時に分離して元素分析および深さ分布測定が可能である。

(2) TOF-ERDA 測定で元素濃度の定量分析を行うには反跳断面積のデータが必要となる。

(3) 入射ビームとしてヘリウムビームを用いて TOF-ERDA 法で軽元素測定を行う場合、入射エネルギーがおおよそ 2MeV 以上では核力の影響によって反跳断面積がラザフォー

ド断面積とはずれるため、実験または理論計算等によって反跳断面積データを求める必要がある。

(4) これまでの実験データは主に 1960 年代の原子核物理学実験によるものであり、TOF-ERDA 分析に必要なデータが揃っていないとはいえない。イオンビーム分析用の理論計算コードも存在するが、主に後方散乱データを再現することを主眼に開発されており、TOF-ERDA 測定への適用可能性の検討は不十分である。

2. 研究の目的

(1) ヘリウムビームを用いた TOF-ERDA による窒素等の軽元素の定量分析に必要な反跳断面積の測定を行う。

(2) 測定データと理論計算によって得られる断面積との比較を行い、理論計算の適用可能性について検討する。

3. 研究の方法

(1) 本研究ではヘリウムビームを窒素に衝撃した際の断面積の測定、および実験データと理論計算との比較を行った。

(2) 断面積の測定は京都大学大学院工学研究科附属量子理工学教育研究センターの 2MV ペルトロンタンデム加速器を用いて行われた。加速器で加速された ${}^4\text{He}$ ビームを金をコートした厚さが 50nm の窒化シリコン薄膜ターゲットに照射し、 83.6° と 165° に散乱された ${}^4\text{He}$ イオンをシリコン半導体検出器 (SSD) で検出した。入射エネルギーは 2~5.5 MeV で、この間でおおよそ 30keV 間隔でエネルギーを変化させて断面積データを取得した。図 1 にセットアップの概略を示す。 ${}^4\text{He}$ の散乱角 83.6° は ${}^{14}\text{N}$ の反跳角が 40° に相当する (図 2)。実験では ${}^4\text{He}$ が ${}^{14}\text{N}$ によって 83.6° に散乱された時の散乱断面積を測定し、これから運動学的計算によって反跳角 40° での反跳断面積を求めた。また、散乱角 165° の測定は既存の断面積データとの比較による測定の信頼性のチェックを目的とした。

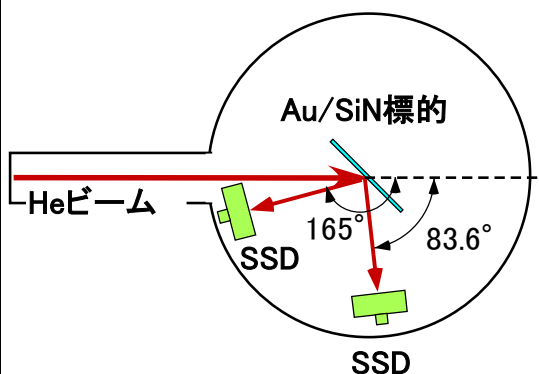


図 1 断面積測定の設定アップの概略図

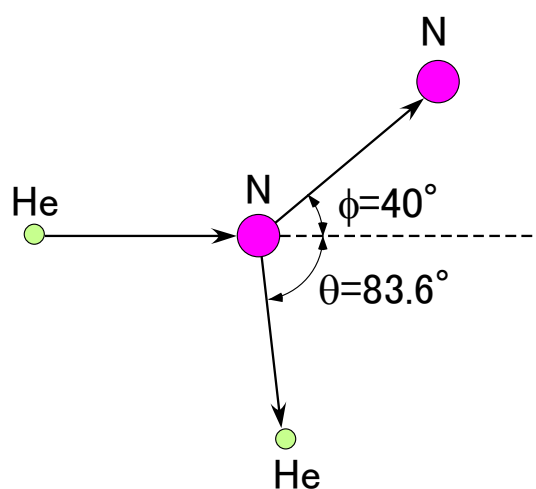


図 2 ヘリウムビームを窒素に衝撃した際の散乱角 (θ) と反跳角 (ϕ) の関係。

(3) ビームエネルギーの校正は、散乱角 165° での ${}^4\text{He} \rightarrow {}^{16}\text{O}$ (共鳴エネルギー: 3.04 MeV)、 ${}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ (共鳴エネルギー: 4.265 MeV)、 ${}^4\text{He} \rightarrow {}^{28}\text{Si}$ (共鳴エネルギー: 5.375 MeV) の共鳴弾性散乱の測定を用いて行った。

(4) 測定で得られた断面積データと SigmaCalc コードによる計算結果の比較を行った。散乱角が 165° の断面積データについては過去の実験データ (Feng et al. NIMB94(1994), 11) との比較も行った。

4. 研究成果

(1) 図3に測定で得られたエネルギースペクトルを示す。窒素、シリコン、金による弾性散乱のピーク、および窒素からの核反応によるピークが見られる。厚さが50nmと薄いターゲットを用いたため、それぞれのピークは分離されており、バックグラウンドも少なく良好な信号雑音比で測定することができた。

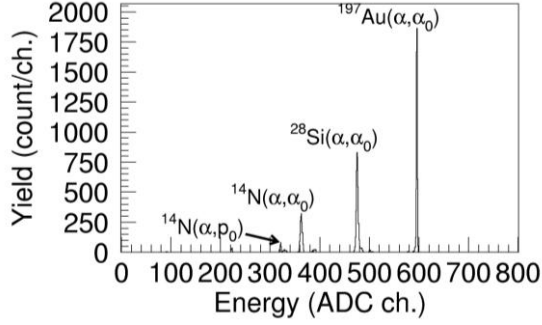


図3 測定で得られたエネルギースペクトル。入射エネルギーが5.238 MeV、散乱角が83.6°のもの。縦軸はエネルギー、横軸はカウント数を表す。

(2) 窒素の散乱断面積をラザフォード散乱断面積の比として求めた。ある入射エネルギーでの窒素の散乱断面積およびラザフォード散乱断面積をそれぞれ σ_N 、 $\sigma_{N,Ruth}$ 、金の散乱断面積およびラザフォード散乱断面積をそれぞれ σ_{Au} 、 $\sigma_{Au,Ruth}$ とすると、

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{N,Ruth}} = \frac{\sigma_{Au,Ruth}}{\sigma_{N,Ruth}} \frac{\sigma_N}{\sigma_{Au,Ruth}} \quad (1)$$

と表すことができる。本研究での入射エネルギー領域では $\sigma_{Au} = \sigma_{Au,Ruth}$ とみなしてよいので

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{Au,Ruth}} = \frac{\sigma_N}{\sigma_{Au}} = \frac{Y_N}{Y_{Au}} \frac{N_{Au}}{N_N} \quad (2)$$

となる。ここで、 Y_N 、 Y_{Au} はエネルギースペクトルで求めた窒素および金の弾性散乱のカウント数、 N_N 、 N_{Au} はターゲットに含まれる窒素および金の面密度である。式(1)、(2)から、

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{N,Ruth}} = \frac{\sigma_{Au,Ruth}}{\sigma_{N,Ruth}} \frac{Y_N}{Y_{Au}} \frac{N_{Au}}{N_N} \quad (3)$$

となる。ラザフォード散乱断面積 $\sigma_{Au,Ruth}$ 、

$\sigma_{N,Ruth}$ は計算で求めた。また、ターゲットの金と窒素の面密度の比 N_{Au}/N_N は2MeVのヘリウムビームを用いたラザフォード後方散乱(RBS)測定によって求めた。

窒素の反跳断面積は散乱断面積から以下の式を用いて求めることができる。

$$\sigma_{recoil,N}(\phi) = 4 \cos \phi \frac{\sin^2 \theta \cos(\theta_{CM} - \theta)}{\sin^2 \theta_{CM}} \sigma_N(\theta) \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{recoil,N}$ は窒素の反跳断面積、 θ 、 ϕ はそれぞれ実験室系での散乱角、反跳角、 θ_{CM} は重心系での散乱角を表す。反跳断面積をラザフォード断面積の比として表す場合は以下のようなになる。

$$\frac{\sigma_{recoil,N}}{\sigma_{recoil,N,Ruth}}(\phi) = \frac{\sigma_N}{\sigma_{N,Ruth}}(\theta) \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_{recoil,N,Ruth}$ は窒素のラザフォード反跳断面積を表す。式(4)の運動学的因子はキャンセルするため、反跳断面積のラザフォード断面積に対する比は散乱断面積のそれと等しくなる。

(3) 測定データから式(3)を用いて散乱角165°の散乱断面積とラザフォード散乱断面積の比を各入射エネルギーについて求めた。結果を図4に示す。赤丸が本研究で得られた実験値、紫三角がFengらによる過去の実験値、青実線が計算コードによる計算値をそれぞれ示す。計算コードには近年イオンビーム分析において広く用いられているSigmaCalcコードを用いた。入射エネルギーが3.2 MeVから3.7 MeVの間では本研究での実験値が欠落しているのは、このエネルギー領域ではエネルギースペクトルにおいて窒素の弾性散乱のピークと $^{14}\text{N}(\alpha, p_0)^{17}\text{O}$ 反応のピークを分離することが困難なためである。

本研究で得られた散乱断面積の実験値はFengらによって得られた実験値と良く一致している。これは本研究での測定の信頼性が高いことを示している。

SigmaCalcコードによる計算結果は本研究およびFengらの実験値を良く再現する。これはSigmaCalcコードが $^4\text{He} \rightarrow ^{14}\text{N}$ 弾性散乱では後方散乱の散乱断面積を求めることを目的としていて、後方散乱角の実験データを再現するようにパラメータが調整されているためと考えられる。

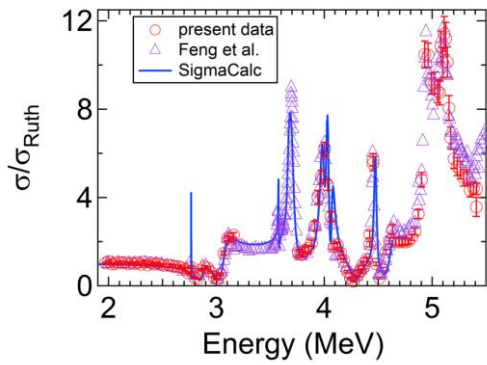


図4 散乱角 165° の ${}^4\text{He}\rightarrow{}^{14}\text{N}$ 弾性散乱断面積。横軸は入射ヘリウムエネルギー、縦軸は反跳断面積とラザフォード断面積の比を表す。赤丸は本研究で得られた測定データで、誤差は統計誤差を表す。紫三角は Feng らによる過去の実験値、青実線は SigmaCalc コードによる計算結果を示す。

(4) 測定データから式(3)、式(5)を用いて反跳角 40° の反跳断面積とラザフォード断面積の比を各入射エネルギーについて求めた。反跳断面積を入射エネルギーの関数として表したものを図5に示す。

図5からわかるように、入射エネルギーがおよそ 3MeV 以下では反跳断面積とラザフォード断面積の比がほぼ1であり、反跳断面積はラザフォード断面積とほぼ一致する。これに対して入射エネルギーが 3 MeV 以上ではラザフォード断面積からのずれが見られる。

測定で得られた反跳断面積データと計算コードで得られる断面積との比較を行った。SigmaCalc で計算された断面積を図5に青実線で示した。入射エネルギーがおよそ 3.5MeV 以下ではSigmaCalc による計算結果は実験値を良く再現する。しかし、3.5MeV 以上では測定データとの間にずれが見られ、再現性はよくない。これはSigmaCalc コードによる計算値は入射エネルギーが 3.5 MeV 以上では精度に問題があることを示している。以上から、入射エネルギーが 3.5 MeV 以下では窒素の反跳断面積としてSigmaCalc コードの計算値を用いることができるが、3.5 MeV 以上では実験データを用いる必要があることがわかった。

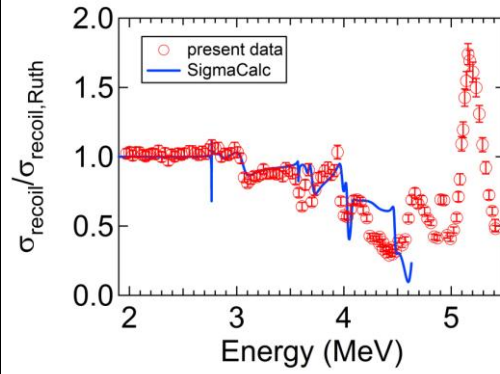


図5 反跳角 40° の ${}^4\text{He}\rightarrow{}^{14}\text{N}$ 弾性反跳断面積。横軸は入射ヘリウムエネルギー、縦軸は反跳断面積とラザフォード断面積の比を表す。赤丸は本研究で得られた測定データで、誤差は統計誤差を表す。青実線は SigmaCalc コードによる計算結果を示す。

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 2 件)

- ① Keisuke Yasuda, Chuluunbaatar Batchuluun, Ryoya Ishigami and Shogo Hibi, Depth resolution of TOF-ERDA using a He beam, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 査読有、Volume 269, Issue 9, 1019-1022, 2011.
- ② 安田啓介, TOF-ERDA による軽元素分析法の開発、まてりあ、査読有、第 52 巻 第 8 号、2013、印刷中

[学会発表] (計 12 件)

- ① Keisuke Yasuda, Chuluunbaatar Batchuluun, Ryoya Ishigami, Shogo Hibi, TOF-ERDA for analysis of light elements using a He beam, 24th International Conference on Atomic Collisions in Solids, 2010 年 7 月 20 日、Krakow, Poland
- ② 安田 啓介、石神 龍哉、Chuluunbaatar Batchuluun、日比 章五、軽元素分析のための TOF-ERDA 測定系の開発、2010 年秋季 応用物理学会学術講演会、2010 年 9 月 15 日、長崎大学
- ③ 安田 啓介、石神 龍哉、Chuluunbaatar Batchuluun、日比 章五、ヘリウムビームを用いた TOF-ERDA による軽元素分析法開発、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 23 日、大阪府立大学
- ④ Keisuke Yasuda, Chuluunbaatar

- Batchuluun, Ryoya Ishigami, Shogo Hibi, Depth resolution in TOF-ERDA using a He beam, 第11回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会、2010年12月3日、名城大学
- ⑤ 安田 啓介、石神 龍哉、Chuluunbaatar Batchuluun、ヘリウムビームを用いた TOF-ERDA のための反跳断面積の測定、2011 年秋季 応用物理学会学術講演会、2011 年 9 月 1 日、山形大学
- ⑥ 安田 啓介、TOF-ERDA による軽元素分析法の開発、京都大学工学研究科 GCOE セミナー、2011 年 11 月 22 日、京都大学
- ⑦ 安田 啓介、石神 龍哉、Chuluunbaatar Batchuluun、日比章五、ヘリウムビームを用いた TOF-ERDA のための反跳断面積の測定、第 12 回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会、2011 年 12 月 9 日、東京大学
- ⑧ Keisuke Yasuda, Hidetsugu Tsuchida, Takuya Majima, Measurements of $4\text{He}+^{14}\text{N}$ elastic scattering cross sections for TOF-ERDA using He beam, 22nd International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, 2012 年 08 月 06 日、米国
- ⑨ 安田 啓介、土田 秀次、間嶋 拓也、ヘリウムビームを用いた TOF-ERDA のための $4\text{He}+^{14}\text{N}$ 弾性反跳断面積の測定、2012 年秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会、2012 年 09 月 13 日、愛媛大学
- ⑩ Keisuke Yasuda, Hidetsugu Tsuchida, Takuya Majima, Measurements of 4He Elastic Scattering Cross Sections from Nitrogen for TOF-ERDA using He beam, 25th International Conference on Atomic Collisions in Solids, 2012 年 10 月 23 日、京都大学
- ⑪ 安田 啓介、日比章五、軽元素分析のための TOF-ERDA 測定システムの開発、財団法人若狭湾エネルギー研究センター第 14 回研究報告会、2012 年 10 月 31 日、福井大学
- ⑫ 安田 啓介、TOF-ERDA による軽元素分析法の開発、日本材料学会 第 140 回セラミック材料部門委員会、2013 年 3 月 11 日、若狭湾エネルギー研究センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 啓介 (YASUDA KEISUKE)
若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・主任研究員
研究者番号：00359241

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

石神龍哉 (ISHIGAMI RYOYA)
若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・主任研究員
研究者番号：10359242