

逆運動学を用いた放射性厚標的の反応収率評価法

An evaluation method of thick-target yields on radioactive target from inverse kinematics

北海道大学知識メディア・ラボラトリー

今井 匠太郎、江幡 修一郎

北海道大学大学院理学研究院

合川 正幸

IMAI Shotaro, EBATA Shuichiro

Meme Media Laboratory, Hokkaido University

AIKAWA Masayuki

Faculty of Science, Hokkaido University

Abstract

We suggest a conversion method to evaluate the thick-target yields (TTY) on a radioactive lump. While TTY is a key quantity for transmutation, it is difficult to perform an experiment with radioactive targets. Based on the inverse kinematics, we derive an equation that relates TTYs for forward and backward kinematic systems. In our approach, the experimental set up can be built by a stable thick-target and a radioisotope beam to evaluate the TTY of radioactive targets. This method is highly applicable in reactions far above threshold energies, which is practically confirmed by the simulation of the SRIM2008 code.

1 はじめに

放射性廃棄物の処理・減量は社会的に関心の高い問題であり、原子力工学の重要課題となっている。長寿命核分裂生成物 (long-lived fission products: LLFP) の安定核・短寿命核への核変換はその有力な方法として提案されているが、放射性物質の塊をターゲットとする実験は困難であるため核反応データが不足しており、技術の確立はまだなされていない。厚標的の反応収率 (thick-target yields: TTY) はこの目的のための基礎的な情報であり、如何にしてこのデータを蓄積するかが問題となる。

理化学研究所仁科加速器研究センターでは LLFP を含む重い放射性同位体 (radioisotope: RI) ビームを生成する施設 (RI ビームファクトリー: RIBF) が稼動しており、逆運動学の実験によりこれらの核種の研究を進めている。JCPRG では 2010 年 1 月から 2014 年 3 月までの間、理研と共同研究「RIBF 核反応データの高度利用研究」を推進してきた。この共同研究の過程で、RI ビームの利用を

前提とした核変換の可能性について議論がなされた。この技術を用いることで、放射性物質をターゲットとした実験を直接行なわずとも LLFP の TTY を得られると期待できる。

本年度は、この研究を具体的にスタートさせ、研究成果を Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B へ投稿中である [1]。我々の研究では、放射性ターゲット \mathcal{T} に入射粒子 \mathcal{P} を照射した際の TTY を見積るために、この逆運動系 (標的 \mathcal{P} 、入射 \mathcal{T}) を考え、両者を関係付ける変換式を導出する。具体例として ${}^{\text{nat}}\text{Cu}({}^{12}\text{C},\text{X}){}^{24}\text{Na}$ [2] を考え、方法を評価した。また、核変換が起こる高いエネルギーにおいてこの変換式は単純な比例関係になることを示した。

2 変換式

入射粒子 \mathcal{P} が厚い標的 \mathcal{T} 内部の微小距離 dx [cm] を進む間に核変換が起こる確率 dY は断面積 σ [cm^2]、標的の密度 ρ [mg/cm^3]、質量数 A_T [mg/mol]、アボガドロ数 N_A [mol^{-1}] を用いて

$$dY = \sigma \frac{\rho N_A}{A_T} dx \quad (1)$$

と書ける。入射粒子は全て標的内部で静止するとし、その侵入長 x [cm] まで積分すれば、全反応率: $Y(x)$ を得ることができる。厚い標的を用いた実験系の場合、ビームの減衰を無視できれば、反応率は TTY と全く等価である [3]。

入射粒子は入射エネルギー E_{in} [MeV] で入射し、 \mathcal{T} 内部 x [cm] で静止 ($E = 0$) するため、エネルギーの損失を阻止能 $S(E) = -\frac{dE}{d(\rho x)}$ で表わすと、式 (1) の積分から全 TTY

$$Y(\epsilon_{\text{in}}) = \frac{N_A A_P}{A_T} \int_0^{\epsilon_{\text{in}}} \sigma(\epsilon) \frac{1}{S(\epsilon)} d\epsilon \quad (2)$$

及び

$$\frac{dY(\epsilon)}{d\epsilon} = \frac{N_A A_P}{A_T} \sigma(\epsilon) \frac{1}{S(\epsilon)} \quad (3)$$

を得る。ただし、逆運動学を適用することを考慮し、(入射) エネルギーを入射粒子 (質量数 A_P) の 1 核子あたりのエネルギー $\epsilon_{(\text{in})} = E_{(\text{in})}/A_P$ で表現した。

以降、区別のため入射粒子 \mathcal{P} 標的 \mathcal{T} の場合を「順運動系 (forward kinematics)」として for と書き、入射粒子 \mathcal{T} 標的 \mathcal{P} の場合を「逆運動系 (inverse kinematics)」として inv と書き表わす。式 (2) 及び (3) は逆運動系でも全く同様に成立するため、両者の TTY (dY_{for} と dY_{inv}) の比を取ると

$$R(\epsilon) \equiv \frac{dY_{\text{for}}(\epsilon)}{dY_{\text{inv}}(\epsilon)} = \frac{A_P^2 S_{\text{inv}}(\epsilon)}{A_T^2 S_{\text{for}}(\epsilon)} \quad (4)$$

という関係式を得る。逆運動学より明かに両者の断面積は等しく、相殺される。順運動系における標的が放射性物質であっても逆運動系で TTY を測定し、比 $R(\epsilon)$ を知ることができれば、放射性物質の TTY へ変換することができる。さらに、この比は質量数と阻止能のみに依存しているため、 dY_{inv} が既知であれば、断面積の情報を必要としない。

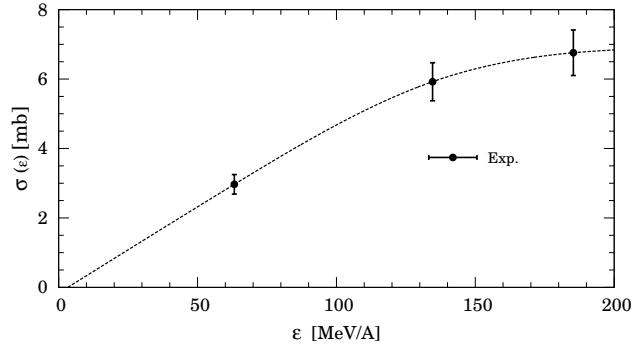


図 1: 断面積のエネルギー依存性。点は実験 [2] より引用、点線はそのスプライン補間を表わす。

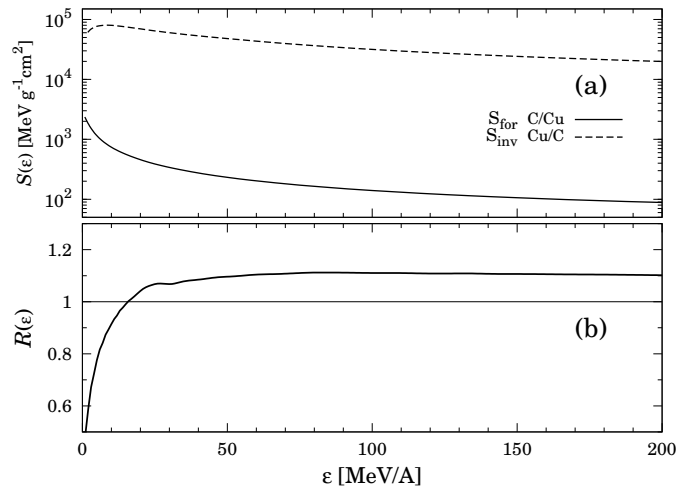


図 2: (a) 阻止能の SRIM2008 のシミュレーション結果と (b) 比 $R(\epsilon)$ のエネルギー依存性。

3 変換式の単純化

ここでは、 ${}^{\text{nat}}\text{Cu}({}^{12}\text{C}, \text{X}){}^{24}\text{Na}$ の反応断面積の実験データ [2] と阻止能の SRIM2008 [4] によるシミュレーションを利用し、TTY を式 (2) から見積った結果と、関係式 (4) から評価した場合とを比べ、その正当性を確認する。反応断面積とそのスプライン補間を図 1 に、SRIM2008 による阻止能のシミュレーションとそこから算出される比 $R(\epsilon)$ を図 2 に示す。

式 (2) を用いることで、図 1 と 2(a) から順運動系 ${}^{\text{nat}}\text{Cu}({}^{12}\text{C}, \text{X}){}^{24}\text{Na}$ と逆運動系 ${}^{12}\text{C}({}^{63,65}\text{Cu}, \text{X}){}^{24}\text{Na}$ の TTY をそれぞれ見積ることができる。ここでは、 $\epsilon_{\text{in}} = 40, 100$ [MeV/A] の場合を選び、 Y_{for} 、 Y_{inv} を計算する。さらに、算出した Y_{inv} と比 $R(\epsilon)$ (図 2(b)) から、式 (4) を用いて Y_{for} へ変換する。

ここで、図 2(b) は高エネルギー (およそ 50 MeV 以上) において一定値に収束しているとみなすことができる。さらに、核変換の断面積はある程度高エネルギーでしか TTY に寄与しないことを考慮すると、この領域では比 $R(\epsilon)$ を一定値 \tilde{R} と近似することが可能になる。従って、微分量で得られている式 (4) はただちに積分され

$$Y_{\text{for}}(\epsilon) \simeq \tilde{R} Y_{\text{inv}}(\epsilon) \quad (5)$$

表 1: 順運動系 TTY $Y_{\text{for}}(\epsilon)$ を式 (2) と式 (5) によりそれぞれ見積った結果。入射エネルギーは $\epsilon = 40$ 、 100 [MeV/A] をとっている。

$Y_{\text{for}}(\epsilon)$	40 MeV/A	100 MeV/A
式 (2) より	0.94×10^{-5}	0.113×10^{-3}
式 (5) より	0.91×10^{-5}	0.114×10^{-3}

と単純化される。我々は式 (4) ではなく、式 (5) を採用し、 Y_{for} を見積もることとする。得られた結果を表 1 に示す。比 $R(\epsilon)$ が十分収束している 100 MeV/A において特によい一致を見せている。

4 放射性物質への適用

変換式 (5) が適用可能なのは入射粒子、標的共に荷電粒子である場合となる。荷電粒子による LLFP の核反応率や TTY を測定したデータは少なく、直接的に変換式の有用性を検証することは難しい。ここでは、 ^{137}Cs を標的とし、入射粒子として ^{12}C を選んだ場合の TTY を逆運動学による変換式から見積る場合を考える。核変換が起こっていることを前提とするため、単に ^{137}Cs が励起される様な反応は除く。逆運動系では入射粒子は ^{137}Cs を用いることになる。この場合、反応しなかったセシウムが標的内に残り、 β 崩壊を経由し、バリウムの準安定状態 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ から放出される γ 線を測定することで、その粒子数 N_{u} を特定することができる。したがって、反応した粒子数 N_{tr} は入射粒子数 N_{i} と N_{u} の差分で表わすことができ、セシウムの反応率 Y^{tr} は

$$Y_{\text{inv}}^{\text{tr}} = \frac{N_{\text{tr}}}{N_{\text{i}}} = \frac{N_{\text{i}} - N_{\text{u}}}{N_{\text{i}}} \quad (6)$$

で実験的に測定することが可能になる。この方法は、逆運動系での入射粒子、即ち本来知りたい TTY が放射性物質であることを最大限に活用した方法となる。

さて、変換率 $Y_{\text{for}}^{\text{tr}}$ を変換式 (5) から知るためには比 $R(\epsilon)$ を計算し、一定値に収束することを確認しなければならない。SRIM2008 により ^{137}Cs に ^{12}C を入射した場合とその逆の阻止能をシミュレートし、比を計算する。ここでは、標的を Cs だけでなく、Zr、U とした場合も併わせて図 3 に示す。これによると、核変換が起こる高エネルギー領域では、3 つ全ての系についてそれぞれ比は一定値になることが示され、変換式 (5) が利用できることを示唆する。

5 まとめ

放射性廃棄物の減量方法として核変換に注目し、基礎データ (TTY) を得るための理論的手法を構成した。手法は不安定核ビームを使うことを前提としたものであり、放射性物質を直接標的とせずとも目的の TTY を得られることに利点がある。さらに、従来なされてきたような中性子を使った核変換ではなく、荷電粒子の利用の可能性を提案している。本研究で得られた変換式は極めて簡単なものであり、現実性・有用性についてはこれからの研究課題となる。

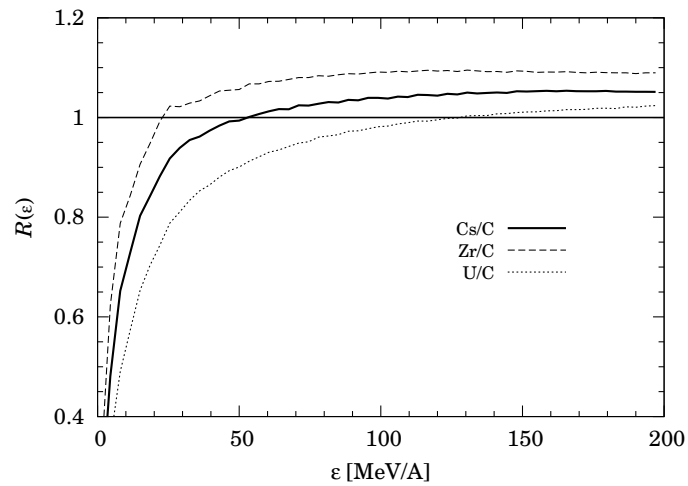


図 3: Cs/C、Zr/C、U/C の比 $R(\epsilon)$ のエネルギー依存性。阻止能は SRIM2008 の結果を使用している。

参考文献

- [1] M. Aikawa, S. Ebata and S. Imai, submitted to Nucl. Instrum. Meth. B, arXiv:1411.6729 [nucl-th]
- [2] H. Yashima, Y. Uwamino, H. Sugita, T. Nakamura, S. Ito, A. Fukumura, Phys. Rev. C 66, (2002) 044607.
- [3] N. Otuka, S. Takács, Radiochim. Acta 103, (2015) 1.
- [4] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, M. D. Ziegler, SRIM: the Stopping and Range of Ions in Matter, <http://www.srim.org>.