

1. 序 論

中性子による核反応で荷電粒子を放出する反応はガス生成反応ということが出来る。この様に、従来、荷電粒子反応と呼ばれていたものを、殊更にガス生成反応と言うようになった由来は知らないが、核反応をどの時点で考えるかという時間的経過と関係がありそうである。核分裂片と核分裂生成物との関係に対応している。荷電粒子放出という時点で核反応を見る視点は物理学的であるし、それをガス生成という見方をする立場は、むしろ、応用分野というか、核反応それ自体よりも反応が起こす二次効果に関心を持った表現である。

核反応の断面積は、反応生成物を検出して測定される。通常、軽い生成物 p 、 d 、 α 等の荷電粒子の方が重い生成物である残留核よりも検出し易いので、反応時の測定には前者の軽いイオンが対象となる。しかし、核反応断面積の測定には、残留核が放射性であれば、残留放射能を測定する放射化法の方が多くの利点を有し、測定値の数は放射化法によるものが圧倒的に多い。従って、現状では、ガス生成断面積の測定の殆どが放射化法による残留核の検出によってなされている。しかし、一般的には、放射化法ではガス生成断面積は測定出来ない。測定可能なのは或る条件が充された時である。

核反応を放出粒子で分類したのが表-1である。 (n, α) と $(n, n'\alpha)$ の残留核は別の核種である。両核種が共に放射性であっても、放出放射線の違いで両者を選別することが可能である。しかし、 α 粒子を直接検出する測定法および α 粒子を生成 He ガスとして測定する方法では、両者を区別することは出来ない。両核反応生成物の和しか測定出来ない。従って、放射化法で測定可能なのは (n, α) しか起らない場合、すなわち、 $(n, n'\alpha)$ のしきい値以下

の中性子エネルギー領域でしか放射化法によって He ガス生成断面積は測定出来ない。

以上の理由で、厳密にはガス生成断面積は生成ガスそれ自体の測定またはガス・イオンの検出によってしか測定出来ない。放射化法で測定出来るのは物理的にはっきりした部分断面積である。この様な点に配慮せず安易にガス生成断面積という表現が使用されている場合があるので注意しなければならない。測定される断面積は測定方法に対応した量であって、物理的に定義される量との対応は必ずしも一対一でない場合があるので、この点を充分理解して測定値を見る必要がある。これは、反応断面積を応用する場合にも重要で、何に、どんな両者を利用するかで、いずれの断面積を使用するかが決ってくる。

2. 測定および評価

ガス生成断面積の測定および評価に関して、最近、飯島、山室 [1] によってまとめられ

表 1 核反応の分類

(n, p)	(n, d)	(n, t)	$(n, {}^3\text{He})$	$(n, {}^4\text{He})$
(n, d)	$(n, n'p)$			
(n, t)	$(n, 2np)$	$(n, n'd)$		
$(n, n't)$	$(n, 3np)$	$(n, 2nd)$		
$(n, {}^3\text{He})$	$(n, n'2p)$	(n, pd)		
$(n, {}^4\text{He})$	$(n, n'{}^3\text{He})$	(n, pt)	$(n, 2d) \dots$	
$(n, n'{}^4\text{He})$	$(n, 2n'{}^3\text{He})$	$(n, npt) \dots$		

たすぐれた報告がある。

中性子による核反応の断面積の大きさを14.6 MeVでのデータについて比較したのが図1である。これ以外の中性子エネルギーでは比較出来る程の測定値はない。

Asymmetry parameter $[N-Z]/A$ (N :中性子数、 Z :原子番号、 A :質量数、いずれも試料核種の値)でデータを整理すると割合よくsystematicsがはっきりするので、この種の処理法がよく用いられるが、実際にはバラツキが相当にある。データは殆ど放射化学法による測定である。 (n, d) と $(n, n'p)$ が区別できないのはこのためである。重い核では n は放出され易いが、荷電粒子はクーロン力が効いて来て出難くなる傾向がある。荷電粒子放出は、 $p, \alpha, t, {}^3\text{He}$ と断面積が小さくなるのがよく判かる。

前述の如く、これ等の殆どは放射化学法による測定値であるが、この方法では断面積のみしか測定出来ない。放出粒子の角度分布やエネルギー・スペクトルはガス・カウンター、原子核乾板、半導体検出器で測定する努力がなされて来た。しかし、断面積が小さい上に、外部に出てくる放出粒子を測定する方法であるために試料を薄くしなければならず、統計精度があがらない。加えて、粒子選別が必要であり、エネルギー分解能も希望する程にあがらず、これ等の測定データの質はあまり良くない。しかし、最近、Grimesらによって、磁気四重極スペクトロメータ[2]および荷電粒子飛行時間法[3]が開発されて、新しいデータが測定されていた。そのデータの一部を図2[2]に示す。特に、14 MeVによる p と α のエネルギー・スペクトルはLivermoreの強力中性子源RTNS-Iを用いて、多くの元素についてのデータが得られて、モデル計算との比較に頻繁に引用されている。

ガス生成それ自身の測定がなされているのは、 T と ${}^4\text{He}$ の生成反応である。

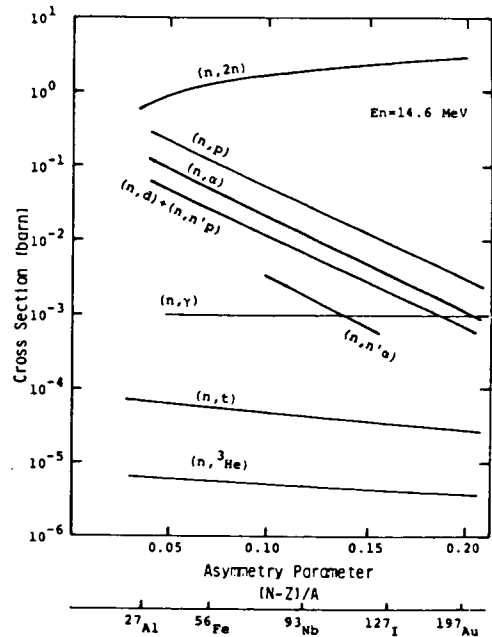


図1 14.6 MeV中性子による荷電粒子放出断面積の比較

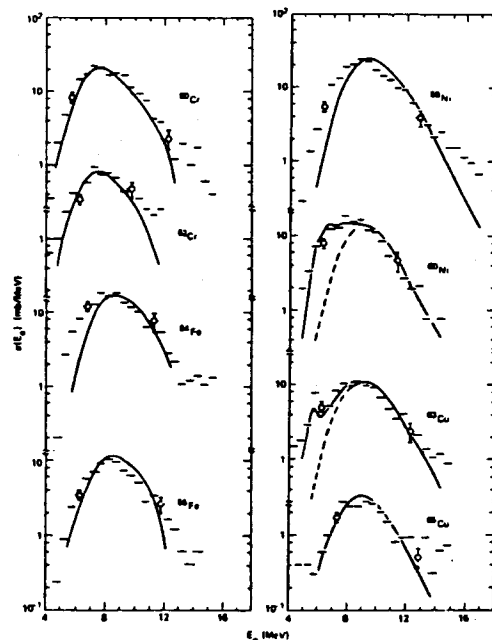


図2 $(n, x\alpha)$ からの α スペクトル($E_n=15$ MeV)

T生成反応断面積測定はGaimら[4]のJulichグループの独断場である。中性子照射試料を化学処理してTを集め、その放射能を測定している。この方法では試料を大量に使用出来て、全体の測定効率を大きくすることが可能なため、中性子源の強度の条件が緩和され、小さな断面積でも測定可能となる。この方法でT生成断面積データを蓄積している。

Rockwell InternationalのFarrar-IVら[5]のグループは、強力14 MeV中性子源RTNS-I/IIで照射した試料中に集積したHeを質量分析器で測定して、多くのHe生成断面積を求めた。この方法は直接Heをガスとして測定していると共に、放射化法に必須な照射中性子束の時間変化の補正は必要でない点など、断面積測定法として有利な特徴を有する。筆者らもこの方法でHe生成断面積を測定している。[6]この方法は全測定効率が高くなく、高い中性子照射量を必要とする欠点があり、今の所、強力14 MeV中性子源による測定に限られている。この方法はHe集積法と呼ばれ、後で述べる如く、中性子ドジメトリーとしての利用と有望である。

H、Dおよび³He生成断面積の測定を生成ガスを利用して測定した例は見当たらない。いずれも放射性でないために、GaimらのT測定法を採用することは出来ない。原理的にはHe集積法がそのまま応用可能だが、筆者らの経験から、技術的困難が大きく、今の所測定不可能と言わざるを得ない。

核データ評価の立場からは、ガス生成断面積は直接に評価すべき物理量ではない。前述のごとく、ガス生成反応は複数種類の核反応を含む。例えばHe生成断面積は、 (n, α) $(n, n'\alpha)$ $(n, p\alpha)$ ・・・の各部分断面積の和である。実験値とこの様な和をとった比較の例がGrimesら[7]の報告にある。

荷電粒子生成反応の励起関数の測定の多くは、前述のごとく、放射化法によるものである。放射化法で求まるものは単一反応の断面積であるために、それらの測定結果は断面積評価に直接利用できる。この様にして、多く荷電粒子放出反応の断面積が評価されている。しかし、残留核が放射性である場合に限られることは当然であるし、測定困難な放射性残留核もある。従って、評価値はすべて測定値から求めることが不可能で、現在では、核反応模型を用いて計算せざるを得ない。現在よく使われているのは、Multi-step Hauser-Feshback model と Pre-equilibrium model の並用である。この手法では、多くのパラメータを必要とする。関連する核物理学の知識やデータを考慮してそれらのパラメータを決定して計算する。計算値は必ずしも実験に合うとは言いが、相当良い一致が得られるようになって来た。桁違いという状態は脱し、精度を向上させる努力がなされる段階にまでなっており、今後は、計算で評価値を求める方向が益々強化されるであろう。また、技術的に実験値が多く出て来る情勢ではないので、計算による評価が主流にならざるを得ない。

3. Dosimeterの応用

neutron dosimeter は放射化箔が実用化され、手法として確立されている。しかし、放射化法には幾つかの欠点がある。最大の欠点は放射能強度が照射時間に対して飽和することである。Heガス生成断面積を利用するHe集積法 dosimeter は照射時間に依存せず、中

中性子フルーエンスに比例する値が直接測定可能である。その他、必要核データが断面積のみという長所がある。この点は絶対測定に有利である。使用核データが多いことは、それらのデータの誤差が加算されて求められる結果の誤差の大部分が使用データの誤差に依存することとなり、測定における精度向上の効果が小さいことになる。この点では、He集積法は有利である。He集積法の最大の欠点は感度が低いことにある。しかし、14 MeV中性子が強い核融合炉には利用度が高い。

これらの点に着目して、筆者らはHe集積法によるneutron dosimetryを検討して来た。[8] 測定技術としての問題点は、少量のHeの絶対測定である。Dosimeterを真空中で蒸発させるために、測定対象ガスは多量のバックグラウンドガスを含有する。特に、真空容器内壁からのアウトガスに含まれる水素除去が課題となる。Heは少量ため、関係する真空容器、配管等の容積を小さくする必要もある。これ等を勘案すると、今の所、 10^{12} He原子が測定に適した量である。これは40mgのAlを使用した14 MeV中性子照射でフルーエンス 10^{15} に相当する。この条件をHe集積法に、放射化法には測定効率1%、計数率0.1 cpsを条件として両者を比較したのが図3である。単純にこの比較を見れば放射化法優位と見える。しかし、Alの例で見ると、下限は放射化法の場合、一定となっており、放射能強度の飽和の結果が現われている。結局Alでは残留核 ^{24}Na の半減期(15 hr)に相当する短時間のフルーエンスしか測定出来ないことを示している。この点で長期照射下でのフルーエンス測定には、He集積法が有利であることが明らかである。

He集積法での他の課題は、適当なdosimeterの選択が難しいことにある。(n, x α)の断面積が小さいこと、およびこの種の断面積の測定値が少ないこと、しきい値が核種によってそう変化しないこと等がその理由である。(n, x α)の断面積は個々のxについては中性子エネルギーについて増加そして減少する変化をするであろうが、総量としてのHeは中性子エネルギーの増加にもなって増加するので、高エネルギー中性子の高照射の許でのdosimeterとして有望である。測定された(n, x α)の励起関数はないが、(n, xt)については最近の測定例[4]がある。その様子を図4に示す。この励起関数は、Be(d, n)中性子源で測定した値で、D-T反応からの単色中性子による測定とは違い、広いエネルギー分布をしている中性子源である。そのために、中性子エネルギーで積分された値である。それを励起関数に変換するために計算機処理(LSQ-2 code 使用)をしている。それを単色中性子源で測定した(n, t)断面積と比較している。

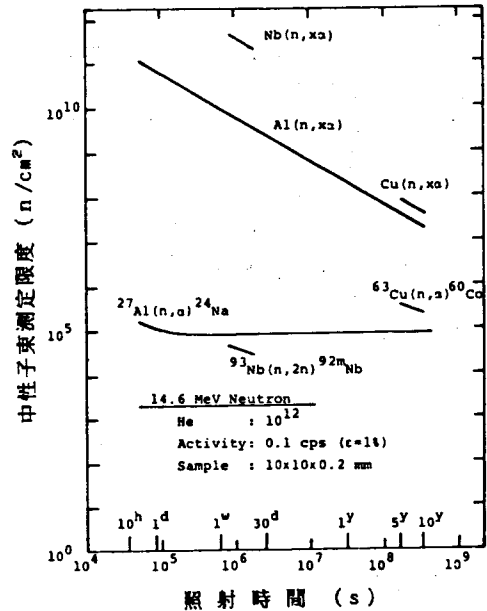


図3 He集積法と放射化法による中性子フルーエンス測定限界

4. 結 論

ガス生成反応は荷電粒子反応とは一対一には対応しないので、測定された量は測定方法を参照して確認する必要がある。

ガス自体を測定している例はTと⁴Heにあり、最近データが蓄積されつつある。放出荷電粒子の測定技術も発展があり、限られた中性子エネルギーではあるが、核反応模型計算の検証によく引用されている。

Heガス生成をneutron dosimeterに応用したHe集積法は中性子フルエンスの絶対量測定に適している。しかし、断面積データの蓄積、測定技術の向上が今後の課題である。

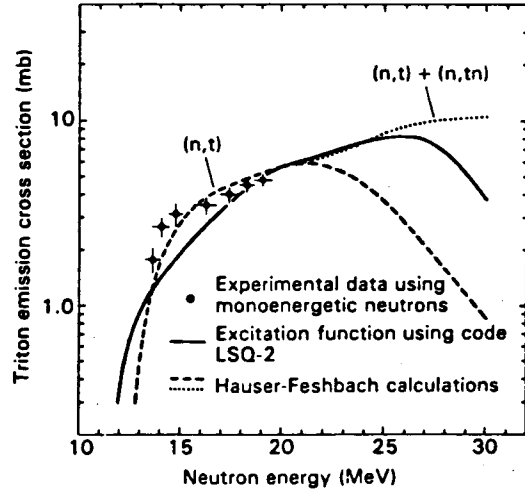


図4 (n,t)と(n,tn)断面積の比較

参 考 文 献

- (1) 飯島俊悟、山室信弘；日本原子力学会誌28巻285頁(1986)
- (2) Grimes, S. M., Haight, R. C., Alvar, K. R., Barshall, H. H., and Borchers, R. R.; Phys. Rev. C 23, 700 (1981)
- (3) Private Communication from M. S. Grimes (1984) and Ref.[7]
- (4) Wölflle, R., Sudár, S., and Qaim, S. M.; Nucl. Sci. Eng. 91, 162 (1985)
- (5) Kneff, D. W., Oliver, B. M., Farrar IV, H., and Greenwood, L. R.; Nucl. Sci. Eng. 92, 491 (1986)
- (6) Fukahori, T., Kanda, Y., Tobimatsu, H., Maeda, Y., Yamada, K., Nakamura, T., and Ikeda, Y.; J. Nucl. Sci. Technol. 23, 91 (1986)
- (7) Ahmad, M., Galtram, S. L., Grimes, S. M., Satyanarayana, H., Saraf, S. K., and Stricklin, S.; Nucl. Sci. Eng. 90, 311 (1985)
- (8) Fukahori, T., Kanda, Y., Nakamura, T., Mori, K., Tobimatsu, H., and Maeda, Y.; J. Nucl. Sci. Technol. 23, 503 (1986)