

30～200 MeV 陽子束を評価するための $^{27}\text{Al}(\text{p},\text{x})^{24}\text{Na}$ と $^{197}\text{Au}(\text{p},\text{x})^{194,196}\text{Au}$ 反応断面積の検証

小迫 和明 能任 琢真

(技術研究所)

(技術研究所)

Verification of $^{27}\text{Al}(\text{p},\text{x})^{24}\text{Na}$ and $^{197}\text{Au}(\text{p},\text{x})^{194,196}\text{Au}$ Reaction Cross Sections for Estimating the Proton Flux from 30 to 200 MeV

Kazuaki Kosako, and Takuma Noto

陽子束を最も容易に測定する方法は、放射化箔を用いた放射化量測定である。200 MeV 以下の陽子の測定では、単独同位体元素であるアルミニウムと金の箔を用いた $^{27}\text{Al}(\text{p},\text{x})^{24}\text{Na}$ と $^{197}\text{Au}(\text{p},\text{x})^{194,196}\text{Au}$ の反応率測定が標準的に実施されている。これらの反応断面積の精度がそのまま評価する陽子束の精度となる。輸送計算や放射化量評価で使用されるこれらの陽子入射の反応断面積は、十分な検証がなされていないため、EXFOR 実験データベースを元に検証を行った。その結果、最新の評価済核データファイルである JENDL-4.0/HE と JEFF-3.3 を使用すれば、 ^{24}Na と $^{194,196}\text{Au}$ の放射化量を 10～20%の精度で評価できることがわかった。

The method to measure the proton fluxes most easily is the radioactivity measurement using the radioactivation foils. For estimating the proton fluxes less than 200 MeV, the reaction rate measurements of $^{27}\text{Al}(\text{p},\text{x})^{24}\text{Na}$ and $^{197}\text{Au}(\text{p},\text{x})^{194,196}\text{Au}$ used the Al and Au foils are performed standardly. The precision of reaction cross section is completely included in the precision of proton flux. Because the verification of $^{27}\text{Al}(\text{p},\text{x})^{24}\text{Na}$ and $^{197}\text{Au}(\text{p},\text{x})^{194,196}\text{Au}$ reaction cross sections are not enough, we verified these by comparing with the experimental data retrieved from the EXFOR database. If the reaction cross sections of JENDL-4.0/HE or JEFF-3.3 are used, the radioactivation of ^{24}Na and $^{194,196}\text{Au}$ can evaluate with the precision from 10 to 20%.

1. はじめに

陽子の情報(フラックス、エネルギー分布、運動量など)を測定するための検出器は、NaI(Tl)シンチレーション検出器、ドリフトチェンバーや高分解能 Ge 検出器などがある。高線量場や多数位置の同時測定、陽子用検出器がない場合などの条件下においても、最も容易で多数の実績がある方法は放射化箔を用いた測定である。放射化箔法は、箔内部で起きる入射陽子による放射化反応を利用するものであり、生成した放射性核種に固有の崩壊ガンマ線を高純度 Ge 検出器等で測定し、検出数のピーク面積から放射化反応率を導出する。得られた反応率から反応断面積と実験解析により陽子束の情報を推定できる。20 MeV 以上の陽子を放射化箔法で測定する場合には、アルミニウム箔と金箔を用いて $^{27}\text{Al}(\text{p},\text{x})^{24}\text{Na}$ 反応(^{27}Al に陽子 p が入射し複合核が形成され、その直後に粒子 x(厳密には陽子 3 個と中性子 1 個から成る 1 個以上の

粒子)が放出され残留核として ^{24}Na が生成される核反応)と $^{197}\text{Au}(\text{p},\text{x})^{194,196}\text{Au}$ が標準的に使用される。この理由は、99.99%以上の高純度の Al 箔と Au 箔が適切な価格で入手可能であること、Al 元素と Au 元素の天然同位体は ^{27}Al と ^{197}Au のみであること、 $^{27}\text{Al}(\text{p},\text{x})^{24}\text{Na}$ 反応断面積が約 0.01 barns であり $^{197}\text{Au}(\text{p},\text{x})^{194,196}\text{Au}$ が約 0.1 barns であるので比較的大きくかつ閾エネルギーからの反応断面積の立ち上がりが急峻でエネルギー依存性の小さい平坦な断面積であることが挙げられる。また、生成核種 ^{24g}Na (基底状態 g)の β -崩壊の半減期が 14.959 時間であるため多数の箔の測定が比較的容易であり、崩壊ガンマのエネルギーと効率が高い(1.369 MeV (1 崩壊当たりの放出率: 100%)と 2.754 MeV (99.9%))ため測定し易い。 ^{194}Au は EC 崩壊の半減期が 38.02 時間、主な崩壊ガンマ線が 0.3285 MeV (60.4%)と 0.2935 MeV (10.58%)である。 ^{196g}Au は、93%が EC 崩壊で 7%が β -崩壊であり、半減期が比較的長く 6.1669 日、主な崩壊ガン

マ線が 0.3557 MeV (87%)と 0.333 MeV (22.9%)
である。 $^{196m1}\text{Au}$ (第1準安定状態 m1)は IT 崩壊
(100%)の半減期が 8.1 秒である。 $^{196m2}\text{Au}$ (第2準
安定状態 m2) は、IT 崩壊の半減期が 9.6 時間、
主な崩壊ガンマ線が 0.1883 MeV (30%)と 0.1478
MeV (43.5%)である。 ^{196}Au は、金箔を放射化した
直後にガンマ線を測定すると ^{196g}Au と $^{196m2}\text{Au}$ の
両方が存在するが、2 日以上経過すれば殆どの
 $^{196m2}\text{Au}$ が ^{196g}Au に遷移しほぼ ^{196g}Au のみとなる
ことに注意する必要がある。

陽子の放射化箔検出器として優れた特性を持ち
かつ測定し易い $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ と $^{197}\text{Au}(p,x)^{194,196}\text{Au}$
の反応断面積は、1950 年代から現在まで多くの測定
が実施され、公開された実験データは EXFOR データ
ベース¹⁾に登録されている。2021 年 5 月時点で
 $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 断面積が 58 件、 $^{197}\text{Au}(p,x)^{194}\text{Au}$ が 7
件、 $^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ が 17 件登録されている。登録
データは、200 MeV 以上の高エネルギー陽子入射や
純粋な反応断面積以外も含むため、200 MeV 以下の
陽子の検証に利用できるデータは半数程度となる。
ユーザーがこれらの断面積データを実際使用する
場合は、評価済核データファイルに格納されている
その断面積データを利用目的の形式やエネルギー群
構造に変換した上で、反応率や陽子束の算出などに
用いる。陽子入射の標準的な放射化箔検出器で使用
する評価済核データファイルの $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ と
 $^{197}\text{Au}(p,x)^{194,196}\text{Au}$ 反応断面積は基準データとなる
ため、その評価精度を検証した。これは陽子入射の
放射化計算の精度検証に必要不可欠である。

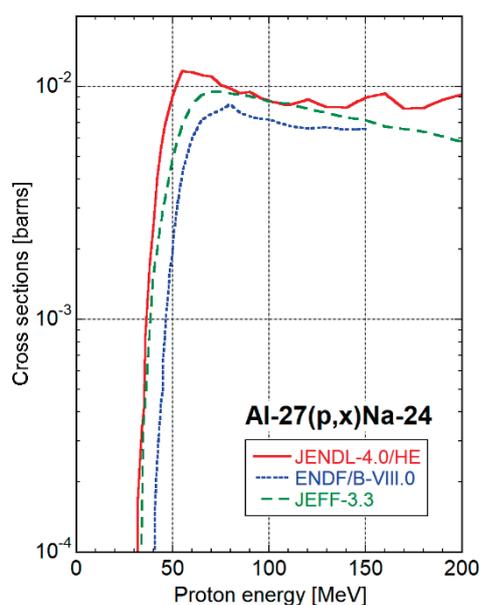


図-1 $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 反応断面積の評価値

2. 評価済核データファイルにおける評価値

国内で使用可能な最新の陽子入射評価済核デー
タファイルは、JENDL-4.0/HE²⁾(日本：2015 年公
開：131 核種；J4HE と略記)、ENDF/B-VIII.0³⁾(米
国：2018 年：49 核種；B80 と略記)、JEFF-3.3⁴⁾(欧
州と OECD/NEA：2017 年：2804 核種；JF33 と略
記)の 3 つである。JF33 の陽子入射核データは、
TENDL-2017⁵⁾がそのまま採用されているため、厳
密な意味では核モデル計算値である。検証対象とす
る核種 ^{27}Al と ^{197}Au は、 ^{27}Al が 3 つの核データファ
イルで評価されているのに対して、 ^{197}Au は J4HE
と JF33 の 2 つで評価されている。入射陽子エネル
ギーの上限値は、J4HE と JF33 が 200 MeV、B80
が 150 MeV である。

$^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 反応断面積の 3 つの評価値を図-1
に示す。 $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 反応の Q 値は-26.81 MeV、
閾エネルギーは 27.81 MeV、評価の反応型式は(p,x)
の MT=5 サブセクションである。断面積は、30 MeV
付近から急激に立ち上がり、60 MeV 付近のピーク
から緩やかな右下がり傾向となっている。B80 を
J4HE と JF33 と比較すると、B80 は立ち上がりの
エネルギーが 10 MeV 高い 40 MeV になっており、
ピークのエネルギーも 80 MeV 付近にずれて、平坦
部の断面積も約 20%低いために明確な違いがある
と言える。J4HE と JF33 を比較すると、立ち上がり
は一致しているが、50~70 MeV のピーク付近と
150 MeV 以上に差があり、J4HE の方が約 20%高い。

$^{197}\text{Au}(p,x)^{194}\text{Au}$ 反応断面積の 2 つの評価値を図-
2 に示す。 $^{197}\text{Au}(p,x)^{194}\text{Au}$ 反応の Q 値は-16.26 MeV、
閾エネルギーは 16.34 MeV、評価の反応型式は
J4HE が MT=5 サブセクションのみであり、JF33
が 30 MeV 以上で MT=5、30 MeV 以下で(p,2nd)の
MT=11、(p,nt)の MT=33、(p,3np)の MT=42 サブ
セクションである。JF33 は 4 つのサブセクション
を合算した。断面積は、25 MeV 付近から急激に立
ち上がり、50 MeV 付近のピークから緩やかな右下
がり傾向となっている。J4HE と JF33 を比較する
と、立ち上がりは一致しており、50 MeV 付近のピー
クエネルギーには差が見られるものの、平坦部も
10%以内で一致している。

$^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 反応断面積の 2 つの評価値を図-
3 に示す。 $^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 反応の Q 値は-5.848 MeV、
閾エネルギーは 5.878 MeV、評価の反応型式は
J4HE が MT=5 サブセクションのみであり、JF33
が 30 MeV 以上で MT=5、30 MeV 以下で(p,np)の
MT=28、(p,d)の MT=104 サブセクションである。

JF33は3つのサブセクションを合算し、更に基底状態と2つの準安定状態を合計したものをAu196、基底状態と第1準安定状態(半減期8.1秒でIT崩壊)を合計したものをAu196g+Au196m1と表記した。断面積は、15 MeV付近から急激に立ち上がり、40 MeV付近のピークから緩やかな右下がり傾向となっている。JF33の2つの反応断面積を比較すると、両者の差が第2準安定状態からの寄与分を示しており、ピーク付近では約40%あるがエネルギーが高くなると徐々に縮小し200 MeVでは約10%となる。J4HEとJF33(Au196)を比較すると、立ち上がりは一致しており、40 MeV付近のピーク付近と150 MeV以上で約10%の差も大きなものではなく、平坦部の傾向も含めて良く一致している。

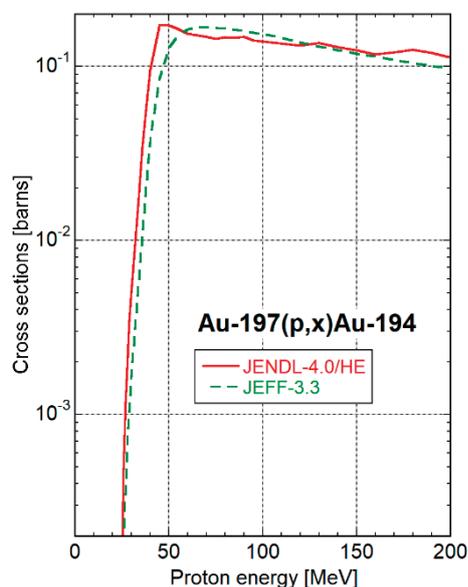


図-2 $^{197}\text{Au}(p,x)^{194}\text{Au}$ 反応断面積の評価値

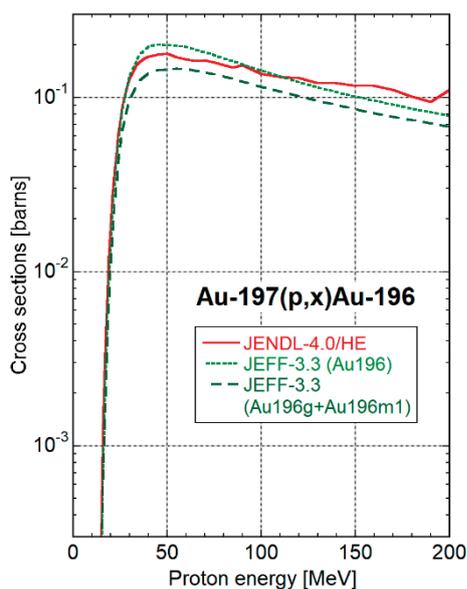


図-3 $^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 反応断面積の評価値

3. $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 反応断面積の検証

$^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 反応断面積として EXFOR に登録されている実験データは、3つに分類できる。陽子入射エネルギーが200 MeV以下の実験データは、表-1の $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 反応断面積、表-2の $^{27}\text{Al}(p,n+3p)^{24}\text{Na}$ と ^{24}gNa 反応断面積、表-3の $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ と ^{24}gNa 累積核種生成断面積である(‘Reference No.’は参考文献番号)。表-1と表-2は、生成粒子の分類が異なるだけで断面積データとしては実質的に同じである。表-3の累積核種生成断面積は、陽子が ^{27}Al に入射し生成した全核種の崩壊による寄与も含む ^{24}Na 生成断面積であるため、原理的に反応断面積より大きいか等しい。しかし、崩壊による寄与分は生成し崩壊する核種の半減期による

表-1 $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 反応断面積の実験データ

Authors	Year	Incident energy [MeV]		Reference No.
		lower	upper	
M.U. Khandaker, et al.	2011	31	38	6
Yu.E. Titarenko, et al.	2009	36	2600	7
M.C. Lagunas-Solar, et al.	1988	10	67	8
P. Pulver	1979	35	71	9
K. Miyano	1973	34	52	10
C. Brun, et al.	1962	40	150	11
H. Gauvin, et al.	1962	60	150	12
C. Baumer, et al.	2019	100	180	13

表-2 $^{27}\text{Al}(p,n+3p)^{24}\text{Na}$ 反応断面積の実験データ

Authors	Year	Incident energy [MeV]		Reference No.
		lower	upper	
R.J. Schneider, et al.	1987	40	160	14
V. Parikh	1960	100	1000	15
H.G. Hicks, et al.	1956	50	350	16
H.P. Yule, et al.	1960	82	426	17

表-3 $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 累積断面積の実験データ

Authors	Year	Incident energy [MeV]		Reference No.
		lower	upper	
M.S. Uddin, et al.	2004	31	67	18
R. Michel, et al.	1997	25	360	19
R. Bodemann, et al.	1993	63	94	20
R. Michel, et al.	1985	46	200	21
A. Grutter	1982	34	69	22
P. Pulver	1979	35	71	9
J.J. Hogan, et al.	1978	35	100	23
R. Holub, et al.	1977	40	85	24
K. Miyano	1973	34	52	10
J.B. Cumming	1963	37	51	25
S. Meghir	1962	27	86	26
I.R. Williams, et al.	1967	34	61	27
N.M. Hintz, et al.	1952	13	118	28

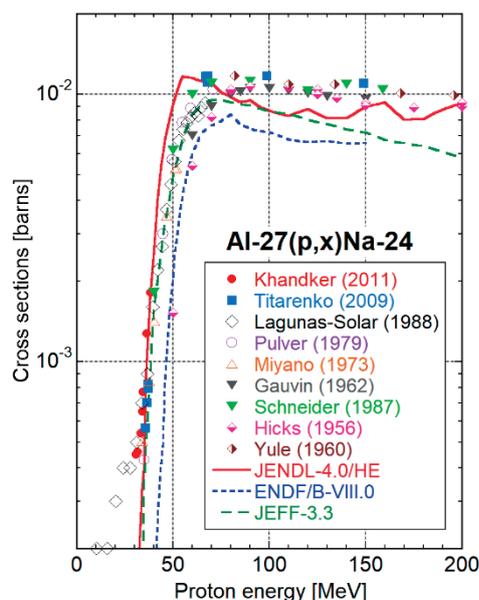


図-4 $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 反応断面積の実験値と評価値

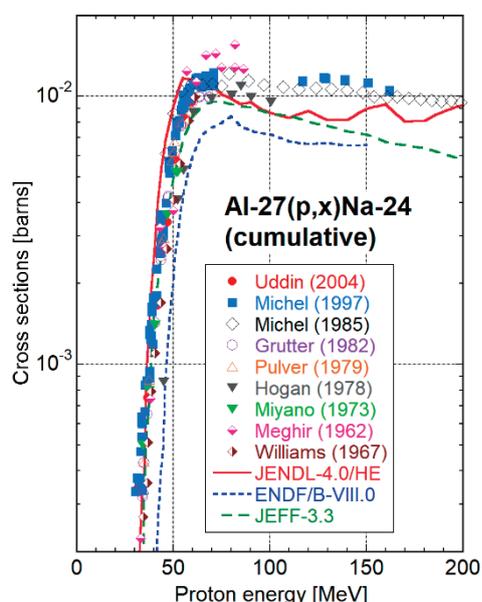


図-5 $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 累積断面積の実験値と反応断面積の評価値

影響を直接受けることに十分注意する必要がある。

^{24m}Na は半減期の 20.18 ms で 99.95%が IT 崩壊し 0.05%が β -崩壊する。 ^{24m}Na は短半減期であるため、崩壊ガンマ線の測定時点では全て壊変し累積生成核種 ^{24g}Na になっていると扱える。

$^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ と $^{27}\text{Al}(p,n+3p)^{24}\text{Na}$ と ^{24g}Na 反応断面積の実験値と 3 つの評価値の比較図を図-4 に示す。図中で実験値は記号、評価値は実線と破線で示す。実験値は、陽子入射エネルギーが 60~70 MeV のピーク付近で実験値間に 10~20%程度の不一致があることと Hicks の実験値が 70 MeV 以下で明確

に小さいことを除き、良く一致している。J4HE の評価値は、立ち上がりから 40 MeV までは実験値と良く一致しているが、70 MeV までのピーク構造はピークエネルギーを含めて 20~30%程度過大評価している。90~150 MeV は約 20%の過小評価であるが、150 MeV 以上では Hicks の実験値と一致している。B80 の評価値は、立ち上がりのエネルギーが約 10 MeV 高エネルギー側にずれており、断面積も 20~50%程度過小評価している。JF33 の評価値は、立ち上がりから 80 MeV まで実験値と良く一致しているが、90 MeV 以上では 20~30%程度の過小評価である。

$^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ と ^{24g}Na 累積核種生成断面積の実験値と 3 つの反応断面積の評価値の比較図を図-5 に示す。実験値は、Hogan が 20%程度小さく、ピーク付近で 15%程度のばらつきがあり Meghir が 20%程度大きいことを除き、良く一致している。J4HE は、立ち上がりは一致しているが、40~60 MeV のピークを 10~20%程度過大評価し、80 MeV 以上で約 20%過小評価している。JF33 は、立ち上がりは一致しているが、50~70 MeV のピークを約 10%過小評価し、80 MeV 以上では右下がり傾向が強いため過小評価が大きくなり 200 MeV で約 40%の違いとなっている。図-4 の実験値と比較すると、ピークエネルギーが 70 MeV から 65 MeV に移動し、80 MeV 以上の断面積が 10%程度大きくなっている。

反応断面積だけを見れば JF33 の評価値が最も良いと言えるが、累積断面積を見ると J4HE と JF33 は同程度に実験値をそれぞれ過大評価と過小評価している。放射化核種の生成量を安全側に評価するという観点では J4HE が良いと言えるが、J4HE はピークエネルギーを高エネルギー側に移動した評価とすべきである。

4. $^{197}\text{Au}(p,x)^{194}\text{Au}$ 反応断面積の検証

$^{197}\text{Au}(p,x)^{194}\text{Au}$ 反応断面積として EXFOR に登録されている実験データは、2 つに分類できる。陽子入射エネルギーが 200 MeV 以下の実験データは、表-4 の $^{197}\text{Au}(p,x)^{194}\text{Au}$ 反応断面積と表-5 の $^{197}\text{Au}(p,3n+p)^{194}\text{Au}$ 反応断面積の合計 5 つである。同位体の $^{194m1}\text{Au}$ は半減期 600 ms(IT 崩壊 100%)、 $^{194m2}\text{Au}$ は半減期 420 ms(IT 崩壊 100%)であるため、即時崩壊し ^{194g}Au として扱える。

$^{197}\text{Au}(p,x)^{194}\text{Au}$ 反応断面積の実験値と 2 つの評価値の比較図を図-6 に示す。実験値は、60 MeV のピーク付近で 10~20%程度のばらつきが見られ

ることを除いて良く一致している。J4HEは、ピークエネルギーが約10 MeV 低エネルギー側に寄っているために立ち上がりの30~50 MeVが20~50%程度の過大評価となっており、110 MeV以上でも20~30%程度の過大評価である。JF33は、立ち上がりから70 MeVまで実験値とピークも含めて良く一致しているが、80 MeV以上では10~30%程度の過大評価である。

実験値との一致度からJF33の評価値が最も良いと言える。

表-4 $^{197}\text{Au}(p,x)^{194}\text{Au}$ 反応断面積実験データ

Authors	Year	Incident energy [MeV]		Reference No.
		lower	upper	
J. Cervenak, et al.	2019	23	35	29
F. Ditroi, et al.	2016	10	64	30
F. Szelecsenyi, et al.	2007	25	65	31
R. Michel, et al.	1997	44	2600	19

表-5 $^{197}\text{Au}(p,3n+p)^{194}\text{Au}$ 反応断面積実験データ

Authors	Year	Incident energy [MeV]		Reference No.
		lower	upper	
T.M. Kavanagh, et al.	1961	18	86	32

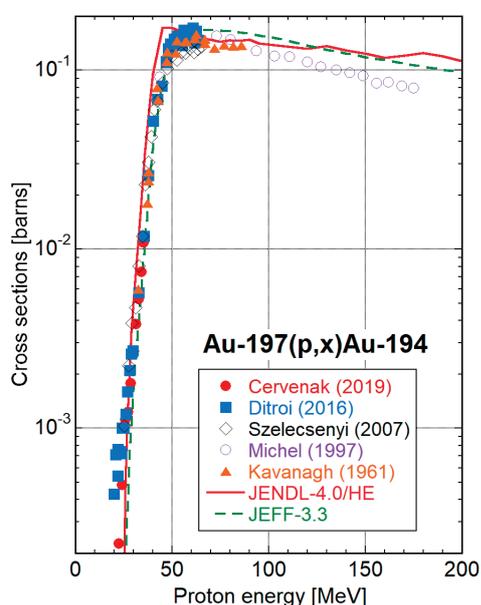


図-6 $^{197}\text{Au}(p,x)^{194}\text{Au}$ 反応断面積の実験値と評価値の比較図

5. $^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 反応断面積の検証

$^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 反応断面積として EXFOR に登録されている実験データは、3つに分類できる。陽子入射エネルギーが200 MeV以下の実験データは、

表-6の $^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 反応断面積、表-7の $^{197}\text{Au}(p,n+p)^{196}\text{Au}$ 反応断面積、表-8の $^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 累積断面積の11つである。同位体の $^{196m1}\text{Au}$ は半減期8.1 s(IT崩壊100%)であるため、即時崩壊し ^{196g}Au として扱える。 $^{196m2}\text{Au}$ の半減期は9.6hであるため ^{196}Au の生成断面積に含まれているかが問題となる。論文中に明記されていないが、表-6と表-7は実質的に累積断面積と考えられる。

$^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 反応断面積の実験値と2つの評価値の比較図を図-7に示し、ピーク付近の拡大図を図-8に示す。Nagame (1990) 'g+m1'の実験値は、生成核種が $^{196g+m1}\text{Au}$ に限定され、 $^{196m2}\text{Au}$ を含まないので、JEFF-3.3 (g+m1)と同等である。実験値は30~60 MeVのピーク付近で10~25%程度のばらつきが見られることを除いて良く一致している(GusakowとYuleの実験値は傾向が異なるため除外した)。J4HEとJF33は、立ち上がりから30 MeVまで一致しているが、実験値と比べて高エネルギー側に約4 MeVずれている。J4HEは、30 MeV以上でDitroiとMichelの実験値と10%以内で一致している。JF33は、35~100 MeVで約15%過大評価しているが、100 MeV以上ではMichelの実験値と10%以内で一致している。JF33 (g+m1)は、Nagameの実験値を20%以上過大評価しており、35 MeV以上ではSzelecsenyi (1997)に近い断面積となっているため、見直しが必要と考えられる。

実験値との一致度からJ4HEの評価値が最も良く、立ち上がりのエネルギーの不一致を改善できれば極めて良い評価値となる。

表-6 $^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 反応断面積実験データ

Authors	Year	Incident energy [MeV]		Reference No.
		lower	upper	
F. Ditroi, et al.	2016	4.9	64	30
F. Szelecsenyi, et al.	2007	25	65	31
M. Gusakow, et al.	1960	35	155	33
Y. Nagame, et al.	1990	14	49	34
J. Cervenak, et al.	2019	17	35	29

表-7 $^{197}\text{Au}(p,n+p)^{196}\text{Au}$ 反応断面積実験データ

Authors	Year	Incident energy [MeV]		Reference No.
		lower	upper	
T.M. Kavanagh, et al.	1961	18	86	32
F. Szelecsenyi, et al.	1997	14	18	33
M. Gusakow, et al.	1961	40	160	34
H.P. Yule, et al.	1960	82	430	17

表-8 $^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 累積断面積実験データ

Authors	Year	Incident energy [MeV]		Reference No.
		lower	upper	
R. Michel, et al.	1997	22	2600	19
J. Cervenak, et al.	2019	13	35	29

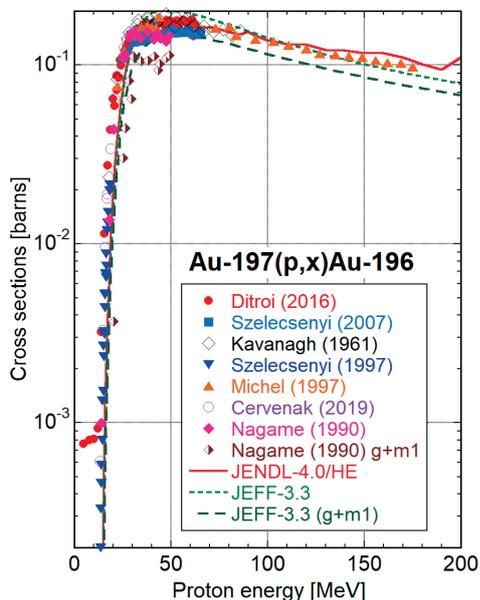


図-7 $^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 反応断面積の実験値と評価値の比較図

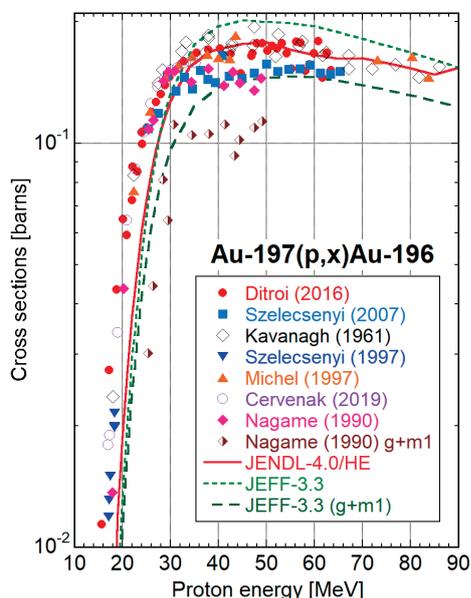


図-8 $^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 反応断面積の実験値と評価値の比較拡大図

6. まとめ

200 MeV 以下の陽子束に関する情報を実験により得る必要がある場合、最も容易で信頼できる方法は、放射化箔による放射性核種の反応率測定で

ある。陽子入射実験の標準的な放射化箔検出器である Al 箔と Au 箔で使用する評価済核データファイルの $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ と $^{197}\text{Au}(p,x)^{194,196}\text{Au}$ 反応断面積は基準データである。それらの反応断面積の評価精度が、陽子入射の放射化計算の精度に直結するため、EXFOR の実験データを用いた検証が不可欠となる。

評価済核データファイルは、 $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ 反応断面積について J4HE, B80, JF33 の3つを実験値と比較検討した。80 MeV 以下は JF33 が良い評価であるが、80 MeV 以上で JF33 は最大 40% の過小評価となり、J4HE の約 20% の過小評価の方が良い。B80 は大きく過小評価している。

$^{197}\text{Au}(p,x)^{194}\text{Au}$ 反応断面積について J4HE と JF33 の2つを実験値と比較検討した。JF33 は、70 MeV 以下で実験値と良く一致しているが、80 MeV 以上では 10~30% 程度の過大評価である。J4HE は、全体的に約 20% 過大評価しており、ピークエネルギーが低エネルギー側にずれている。

$^{197}\text{Au}(p,x)^{196}\text{Au}$ 反応断面積について J4HE と JF33 の2つを実験値と比較検討した。J4HE と JF33 は共に立ち上がりのエネルギーが約 4 MeV 高エネルギー側にずれている。J4HE は、30 MeV 以上で実験値と 10% 以内で良く一致している。JF33 は、30 MeV 以上で約 15% の過大評価となっている。

<参考文献>

- 1) IAEA, Nuclear Data Services: "Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)", <https://www-nds.iaea.org/exfor/> (May 12, 2021).
- 2) S. Kunieda, O. Iwamoto, N. Iwamoto, et al.: "Overview of JENDL-4.0/HE and benchmark calculation," JAEA-Conf 2016-004, pp.41-46, 2016.
- 3) D.A. Brown, M.B. Chadwick, R. Capote, et al.: "ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data," Nuclear Data Sheets, Vol.148, No.2, pp.1-142, 2018.
- 4) OECD, Nuclear Energy Agency: "JEFF-3.3", <https://www.oecd-nea.org/dbdata/jeff/jeff33/> (May 12, 2021).
- 5) A. J. Koning, D. Rochman and J. Ch. Sublet: "TENDL-2017", https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/tendl2017.html (May 12, 2021).
- 6) M.U. Khandaker, K. Kim, M.W. Lee, et al.: "Excitation functions for the $^{27}\text{Al}(p,x)^{22,24}\text{Na}$ nuclear reaction up to 40 MeV," Journal of the Korean Physical Society, Vol.59, p.1821, 2011.

- 7) Yu.E. Titarenko, V.F. Batyaev, E.I. Karpikhin, et al.: “Experimental and theoretical studies of the yields of residual nuclei produced in thin Pb and Bi targets irradiated by 40-2600 MeV protons,” USSR report to the I.N.D.C., No.0447, 2009.
- 8) M.C. Lagunas-Solar, O.F. Carvacho, R.R. Cima: “Cyclotron production of PET radionuclides: ^{18}F (109.77 min; beta+ 96.9%; EC 3.1%) from high-energy protons on metallic aluminum targets,” *Applied Radiation and Isotopes*, Vol.39, p.41, 1988.
- 9) P. Pulver: “Determination of absolute production cross sections for proton induced reactions in the energy range 15 to 72 MeV and at 1820 MeV,” Thesis, Universitaet Bern (Switzerland), 1979 (in German).
- 10) K. Miyano: “The ^7Be , ^{22}Na and ^{24}Na production cross sections with 22- to 52-MeV proton on ^{27}Al ,” *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.34, p.853, 1973.
- 11) C. Brun, M. Lefort, X. Tarrago: “Determination of proton beam intensities from 40 to 150 MeV,” *Journal de Physique*, Vol.23, p.371, 1962.
- 12) H. Gauvin, M. Lefort, X. Tarrago: “Emission of alpha particles from the spallation reactions,” *Nucl. Phys.*, Vol.39, p.447, 1962.
- 13) C. Baumer, C. Maximilian Backer, M. Gerhardt, et al.: “Measurement of absolute activation cross sections from carbon and aluminum for proton therapy,” *Nucl. Instrum. Methods B*, Vol.440, p.75, 2019.
- 14) R.J. Schneider, J.M. Sisterson, A.M. Koehler, et al.: “Measurement of cross sections for aluminum-26 and sodium-24 induced by protons in aluminum,” *Nucl. Instrum. Methods B*, Vol.29, p.271, 1987.
- 15) V. Parikh: “Cross-sections for $\text{Al}^{27}(\text{p},3\text{pn})\text{Na}^{24}$, $\text{Al}^{27}(\text{p},5\text{p}5\text{n})\text{F}^{18}$ and $\text{C}^{12}(\text{p},3\text{p}3\text{n})\text{Be}^7$ relative to $\text{C}^{12}(\text{p},\text{pn})\text{C}^{11}$,” *Nucl. Phys.*, Vol.18, p.638, 1960.
- 16) H.G. Hicks, P.C. Stevenson, W.E. Nervik: “Reaction $\text{Al}^{27}(\text{p},3\text{pn})\text{Na}^{24}$,” *Phys. Rev.*, Vol.102, p.1390, 1956.
- 17) H.P. Yule and A. Turkevich: “Radiochemical studies of the (p,pn) reaction in complex nuclei in the 80-450 MeV range,” *Phys. Rev.*, Vol.118, p.1591, 1960.
- 18) M.S. Uddin, M. Hagiwara, F. Tarkanyi, et al.: “Experimental studies on the proton-induced activation reactions of molybdenum in the energy range 22-67 MeV,” *Applied Radiation and Isotopes*, Vol.60, p.911, 2004.
- 19) R. Michel, R. Bodemann, H. Busemann, et al.: “Cross sections for the production of residual nuclides by low- and medium-energy protons from the target elements C, N, O, Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Sr, Y, Zr, Nb, Ba and Au,” *Nucl. Instrum. Methods B*, Vol.129, p.153, 1997.
- 20) R. Bodemann, H.-J. Lange, I. Leya, et al.: “Production of residual nuclei by proton-induced reactions on C, N, O, Mg, Al and Si,” *Nucl. Instrum. Methods B*, Vol.82, p.9, 1993.
- 21) R. Michel, R. Stueck, F. Peiffer: “Measurement and hybrid model analysis of integral excitation functions for proton-induced reactions on vanadium, manganese and cobalt up to 200 MeV,” *Nucl. Phys. A*, Vol.441, p.617, 1985.
- 22) A. Grutter: “Excitation functions for radioactive isotopes produced by proton bombardment of Cu and Al in the energy range of 16 to 70 MeV,” *Nucl. Phys. A*, Vol.383, p.98, 1982.
- 23) J.J. Hogan, et al.: “Production of ^{24}Na from ^{27}Al by 35-100 MeV protons,” *Nuovo Cimento A*, Vol.45, p.341, 1978.
- 24) R. Holub, M. Fowler, et al.: “Formation of ^{24}Na in ‘fission-like’ reactions,” *Nucl. Phys. A*, Vol.288, p.291, 1977.
- 25) J.B. Cumming: “Absolute cross section for the $\text{C}^{12}(\text{p},\text{pn})\text{C}^{11}$ reaction at 50 MeV,” *Nucl. Phys.*, Vol.49, p.417, 1963.
- 26) S. Meghir: “Excitation functions of some monitor reactions,” Thesis, McGill University (Canada), 1962.
- 27) I.R. Williams and C.B. Fulmer: “Excitation functions for radioactive isotopes produced by protons below 60 MeV on Al, Fe, and Cu,” *Phys. Rev.*, Vol.162, p.1055, (1967).
- 28) N.M. Hintz and N.E. Ramsey: “Excitation functions to 100 MeV,” *Phys. Rev.*, Vol.88, p.19, 1952.
- 29) J. Cervenak and O. Lebeda: “Measurement of cross-sections of proton-induced nuclear reactions on ^{197}Au focused on the production of the theranostic pair $^{197\text{m}}\text{gHg}$,” *Nucl. Instrum. Methods B*, Vol.458, p.118, 2019.
- 30) F. Ditroi, F. Tarkanyi, et al.: “Activation cross sections of proton induced nuclear reactions on gold up to 65 MeV,” *Applied Radiation and Isotopes*, Vol.113, p.96, 2016.
- 31) F. Szelecsenyi, G.F. Steyn, Z. Kovacs, et al.: “Application of Au + p nuclear reactions for proton beam monitoring up to 70 MeV,” *Conf. on Nucl. Data for Sci. and Technol.*, Nice, France 2007, Vol.2, p.1259, 2007.
- 32) T.M. Kavanagh and R.E. Bell: “Cross sections of (p,pxn) reactions in Au^{197} ,” *Canadian Journal of Physics*, Vol.39, p.1172, 1961.
- 33) M. Gusakov, Y. Legoux, H. Sergolle: “Spallation reaction (p,n+p), (p,2n+p) and (p,3n) on gold. Production effective cross section at variation proton energy,” *Comptes Rendus*, Vol.251, p.70, 1960.
- 34) Y. Nagame, K. Sueki, S. Baba, et al.: “Isomeric yield ratios in proton-, ^3He -, and alpha-particle-induced reactions on ^{197}Au ,” *Phys. Rev. C*, Vol.41, p.889, 1990.