

中性子断面積評価の精度向上

東京工業大学

山室 信弘

1. 序論

中重核評価WGでは新しい中性子断面積のファイル作成を行なっている。そのなかで2、3の問題点について検討し断面積評価を出来るだけ精度の良いものにすることを述べる。

先ず $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ と $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}^{\text{m}}$ 断面積における計算値が実験値と異なることから生じた問題点について、その解決のために実行されたことにもふれる。次に $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}^{\text{g}}$ 断面積の新しい測定値と現在ある2、3の評価値とを比較し、今後の改善と精度の良い断面積評価に関する指針を求めることを目的とした考察を述べる。

2. ^{58}Co ground & isomeric level transition の問題点

$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ と $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$ 反応の生成核である ^{58}Co の level transition は Nuclear Data Sheets for A=58 p.473⁽¹⁾ に与えられている。そのデータによれば 52.8 keV の 2nd. level から ground & 1st. level への γ decay の比率は 100 対 40 と与えられている。この比を用いて上記2反応の断面積を計算すると Fig.1 (a) & Fig.2 (a) が得られる。Fig. 1 (a) に与えられる $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 断面積では isomer 生成の値が実験値と違うことが示される。同様に $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$ 断面積では isomer と ground の値が計算と実験で逆転することが示されている。尚 JENDL-3.2 の $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 断面積も Fig.1 (a) に示した。

以上の問題を解決するためにとりあえず γ decay の比率を逆転させて 1st. level へ $100/(100+40)=71.4\%$ decay するようにして計算を進めてみると比較的良い結果が得られた。その後 Trieste meeting で Hungary, Debrecen University を中心とする group の V. Avrigeanu et al. "ENEGRGY DEPENDENCE OF THE ISOMERIC CROSS SECTION RATIO IN THE $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}^{\text{m}}$ "⁽²⁾ が提出され、新しい実験結果も加えてこの問題に関して発表が行われた。この論文では 52.8 keV \rightarrow 24.9 keV decay を M1 ではなく E2 type であるとし branching-ratio を $(75\pm 5)\%$ として扱いを進め $\sigma_m/(\sigma_m + \sigma_g)$ の実験値と計算

値との一致が得られることを示している。SINCROS system での計算に用いた値と誤差範囲で同じであるが、以後この値を 0.75 として計算した $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 断面積を Fig.1 (b) に、 $\sigma m/(\sigma m + \sigma g)$ を Fig.3 に示した。図中には新しい Avrigeanu et al. の断面積の値を Fig.1 (b) に、比の値を Fig.3 に書き入れてある。参考文献(2)の Fig.1 に与えられている isomer + ground 断面積の値では 6 MeV から 12 MeV までの値はほぼ同じ値を示し、又 $\sigma m/(\sigma m + \sigma g)$ の 2 MeV 以下の低いエネルギーで比が高くなる形が与えられている。これらの点では SINCROS による計算で示した Fig.1 (b) 及び Fig.3 とそれぞれ多少の差が認められる。 $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$ 断面積の新しい結果は Fig. 2 (b) に示してあり ground の計算値が少し大きいが Bormann の実験結果との一致を与えている。isomer+ground の計算値は 20 MeV 以上でやや大きいようであり高エネルギー計算に際して検討を要すると思われる。以上のことから、新しく用いることにした $\sigma m/(\sigma m + \sigma g) = 0.75$ は良い結果を導くものと判断出来る。

3. $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}^{\text{e}}$ 断面積

Aluminum は通常の Optical Potential Model で取り扱いが出来る軽い核の代表となるもので比較的容易に高いエネルギーの計算を試みることが出来る。原子核の有する励起レベルが重い核に比較して密度が低いので、核反応断面積の計算をする際に用いるエネルギー間隔 ΔE を大きく選べることが出来、高エネルギー計算に要する時間が少なくすむ。以上のことから他の核についての計算と併せて実行し計算に用いるファクターなどの検討をしてきている。ただこの中で(n,2n)反応により生成される ^{26}Al の ground level は 7.2×10^5 year の半減期を持ち又 isomer は 6.345 sec で ϵ -capture してしまう。従って良い実験データがない状態が続いていた。

1988 年 Iwasaki et al.⁽³⁾、1991 年 Ikeda et al.⁽⁴⁾ により threshold energy 近くの測定が実行されデータ評価上有力なものが与えられた。さらに Trieste meeting での Wallner et al.⁽⁵⁾ "STUDY OF THE $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}$ REACTION" に多くの実験値が示されたがそのうち、 $E_n = 17$ MeV & 19 MeV での断面積を図から読み取り又 35 MeV までの高いエネルギーの測定が Nakamura et al.⁽⁶⁾ によって実行されていたので、それらの値を Fig.4 (a) に示した。この実験値と比較の出来る計算値は JENDL-3.2、JENDL-HE、及び SINCROS による断面積の計算値があり、総て Fig.4 (a) に描いた。JENDL-3.2 のものは大変大きい値であり現在改訂作業が進められている。JENDL-HE は 17 MeV 以上でやや低い値を示している。さらに SINCROS system による計算値を 2 種類与えてある。この点について次節で説明するが、実験値との一致は SINCROS の original Walter-Guss (WG) potential を用いたものが最も良くなっている。

4. 問題点の検討

SINCROS で断面積の計算をする場合には optical-model potential としては neutron & proton に対して modified Walter-Guss potential を用いてきた。この modification に対して問題のあることが指摘された^{(7),(8)}。Walter-Guss⁽⁹⁾の提案している potential form は $A>53$, $10 \text{ MeV} < E_n < 80 \text{ MeV}$ にたいする neutron scattering に対して与えられているものであったので neutron に対しては 20 MeV 以下、proton に対しては 10 MeV 以下に他の potential の値を用いる modification を行い、いくつかの原子核に対する non-elastic cross-section の計算が実験値と一致することを確かめたものであった。指摘された問題点の検討に役立てるために、 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ と $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$ 反応の計算に際して Walter-Guss potential を全エネルギーで用いてみた。結果として両者の違いは僅かで、Fig.1 & Fig.2 に与えたものは original WG potential を用いた計算である。

Aluminum は質量数の点で WG potential parameter を用いられない範囲であるが、現在まで同じ potential を用いて比較的良い計算が得られてきた。そこで neutron 反応の計算に対して上記2つの WG potential を用い、 $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}$ の計算を行い比較してみたものが Fig.4 (a)に与えられたものである。この場合も大きな変化は無いと言えるが、高エネルギーでの実験値との比較からいえば original WG を用いたほうが良い結果を得たと言えるであろう。もちろん計算値は level density parameter など他に用いている物理量にもよるもので断言は出来ない。Wallner et al.⁽⁵⁾ の実験には(n,2n)反応の threshold から 14.9 MeV までの断面積が与えられており、その値は Iwasaki et al.⁽³⁾、Ikeda et al.⁽⁴⁾ の測定値より低い値を示している。現在その値を入手していないので図示出来ないが、このエネルギー領域の値は Sasao et al.⁽¹⁰⁾の実験値を確かめたものであると述べられている。Sasao et al.の値を含めて $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}$ 断面積の低エネルギー部分を Fig.4 (b)に示した。併せて JENDL-3.2、SINCROS modWG & oriWG を描いてある。

JENDL-3.2 は Smither et al.⁽¹¹⁾の実験値に拠ったものなので、この領域で既に高い値を与えている。SINCROS では 16 MeV 以上の実験値との一致の良いほうである oriWG が modWG より低い値となり Sasao et al.⁽¹⁰⁾の実験値との一致も良くなっている。従って記入されていない Wallner et al.⁽⁵⁾の新しいデータにも適合するものと判断できる。Walter-Guss potential parameter は $A>53$ のものであり Aluminum には適合しているものではないので最終的結論ではないが、現在行った計算では oriWG つまり neutron & proton に Walter & Guss potential のみを用いる断面積計算が良いことを示している。

ここでは $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}$ 、 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ と $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$ 反応の計算に関してのみ述べたが、同時に計算結果の出力されている他の断面積について検討が十分行われていない。これらを総て実行してから最終的な結論がでることは言うまでもない。ただ核データニ

ユース No. 61⁽⁶⁾ p.111 で問題としている 10 MeV 領域の前平衡過程は SINCROS では初めから含まれており又 20 MeV までのファイルを作る場合、計算は 30 MeV 位までの計算を行い実験データのある場合には比較をしており、Fig.2 に示した $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$ 反応断面積がその例を示している。さらに 50 MeV までの計算についても $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}$ に示したように実験データとの比較を含めて幾つかの核種について実行してある⁽¹²⁾。

最近もっと高いエネルギーの断面積評価の要望があるが、この領域において計算するには主に 2 つの新しい方法が必要になる。まず Optical Potential を Madland⁽¹³⁾の提案しているものを 30 MeV 或は 50 MeV 以上で用いることであり、この potential は既に SINCROS system のなかに書き込んである。次に Preequilibrium emission に関して新しい手法を取り入れなければならない。この点は Chadwick et al.⁽¹⁴⁾によって既に使用されているのでこの方法を用いることを考えている。

追記 Trieste meeting の Wallner et al.⁽⁵⁾論文に示されていた実験データの値が送られてきたので Fig.4 に記入してある。

参 考 文 献

- (1) L. K. Peker, Nuclear data Sheets **42**, 457 (1984), "Nuclear Data Sheets for A = 58".
- (2) V. Avrigeanu et al., Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Trieste Italy 1997, p.1274.
- (3) S. Iwasaki, et al., "Measurement of the Cross Section for $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}$ Reaction with Activation Technique Around 14 MeV", Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Mito Japan 1988, p.295.
- (4) Y. Ikeda, et al., "Measurements of Long-Lived Activation Cross Sections", Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science & Technol., Juelich May 1991, p.364.
- (5) A. Wallner et al. Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Trieste Italy 1997, p.1248.
- (6) T. Nakamura et al., Phys. Rev. C **43**, 1831 (1991).
- (7) T. Kawano et al., J. Nucl. Sci. Technol. **35**, 519 (1998).
- (8) 評価・計算システムWG, 核データニュース, No.60, p.107, "FP 核種の非弾性散乱断面積評価". No.61, p.109, "核データ計算における最近の問題とその解決法".

- (9) R.L. Walter & P.P. Guss, "A Global Optical Potential Model for Neutron Scattering for $A > 53$ & $10 \text{ MeV} < E < 80 \text{ MeV}$," Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Basic & Applied Science, Santa Fe, New Mexico, 1985, p.1079.
- (10) M. Sasao et al. Phys. Rev. C **35**, 2327 (1987).
- (11) R. K. Smither et al, J. Nucl. Materials **122** & **123**, 1071 (1984).
- (12) N. Yamamuro, Nucl. Sci. Eng. **122**, 374 (1996).
- (13) D. G. Madland, "Recent results in the development of a global medium-Energy Nucleon-Nucleus optical model potential," in Proc. of a Specialists meeting on Preequilibrium Reactions, Semmering, Austria, 1988.
- (14) M. B. Chadwick, et al., "Cross Section Evaluations to 150 MeV for Accelerator-Driven Systems and Implementation in MCNPX," LA-UR-98-1825 (1998).

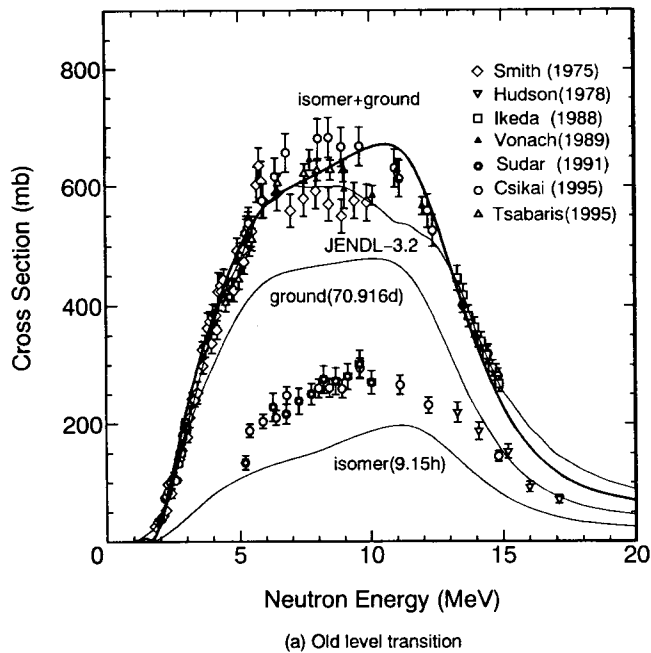


Fig.1 (a) $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ reaction cross-sections

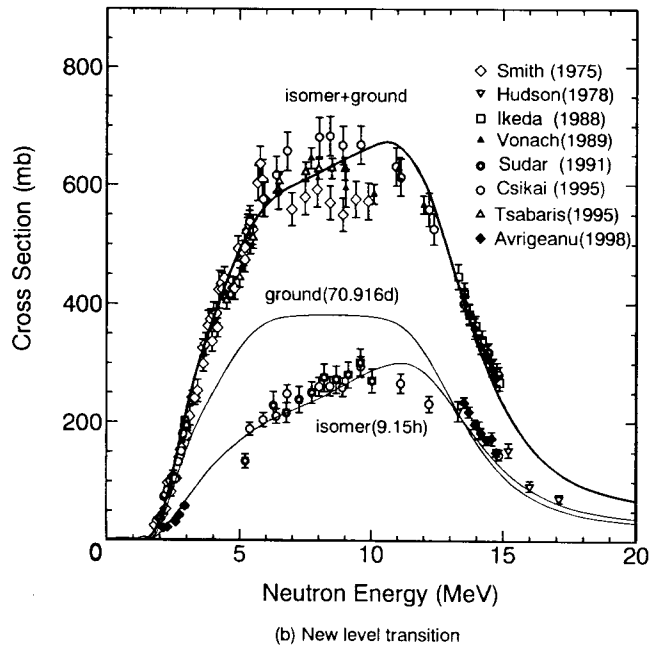


Fig.1 (b) $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ reaction cross-sections

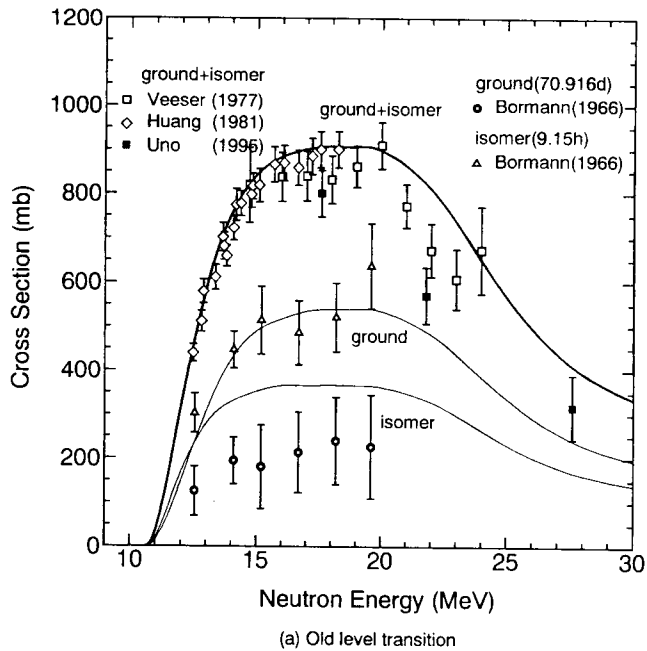


Fig. 2 (a) $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$ reaction cross-sections

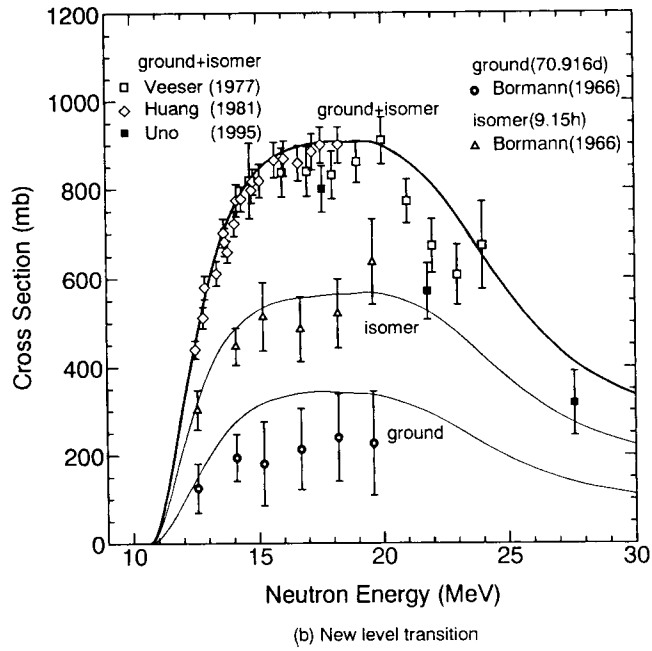


Fig. 2 (b) $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$ reaction cross-sections

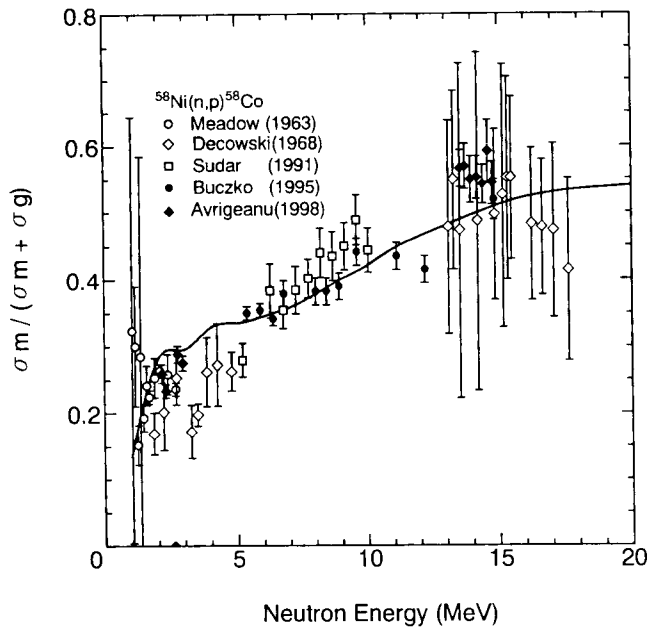
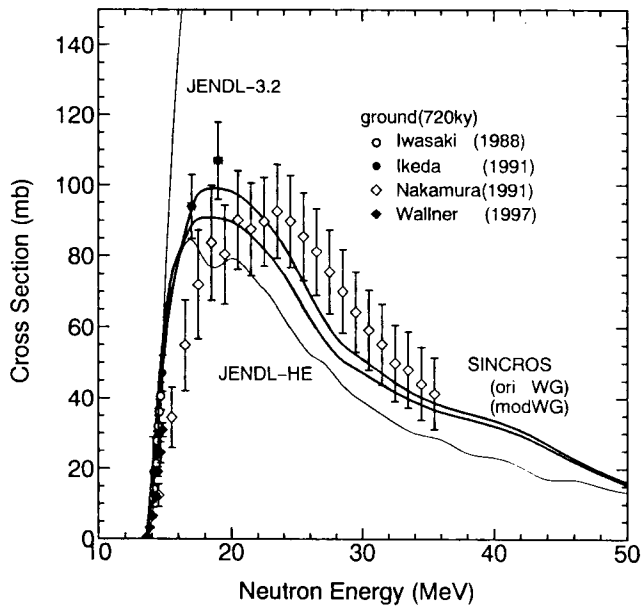
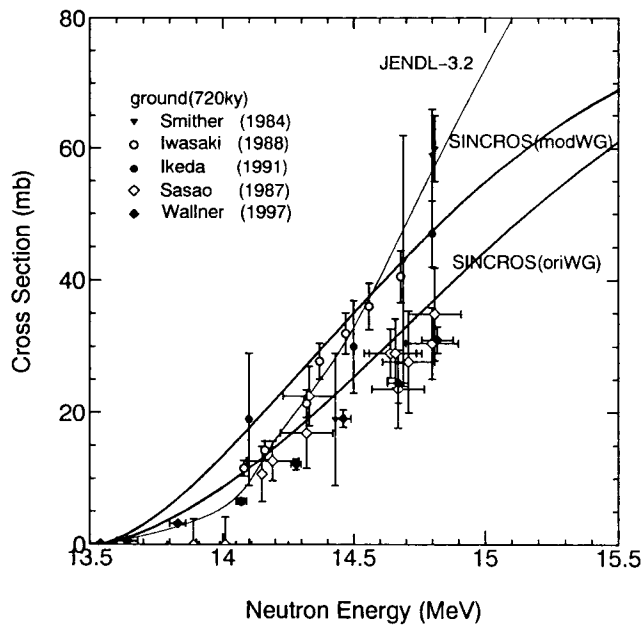


Fig. 3 $\sigma_m / (\sigma_m + \sigma_g)$ for $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ reaction



(a) 10 MeV - 50 MeV region

Fig. 4 (a) $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}$ reaction cross-sections



(b) threshold - 16 MeV region

Fig. 4 (a) $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}$ reaction cross-sections