

(2) ガス生成核データ・サブワーキング・グループ^{*})

NAIG 飯島俊吾

1. ガス生成核データへの要求と範囲

ガス生成断面積は種々な目的から要求されているが、主な分野は放射線損傷、誘導放射能、ドシメトリー、トリチウム生成、核発熱等々である。特殊な適用としては、使用済核燃料の非破壊定量に自発核分裂中性子を使った Si (n,p), Al (n,p), F(n,p), F(n,α)測定も挙げられている。また、医学用に有機物中の元素のデータへの要求もある。(九大、大沢氏の調べ: WG資料。)

ガス発生が構造材の放射線損傷にどう影響するかは、核データ評価を行うさいに概念位は知っておきたいことで、原研、材料物性研究室の菱沼章道室長に教えて頂いた。(n, xp), (n, xα)反応で生成したガスは、主にスウェリングと機械的強度の劣化(ぜい性)を起こすとのことである。DPAで作られる格子欠陥に He や水素が入りこんで居座ると欠陥集合(ボイド)成長の核となる。ボイドが成長すると材料原子は外へ押しやられてスウェリングを起こす。この場合、DPAとガス発生の競合した相乗効果(synergistic effect)が重要である。核融合炉第1壁、特に Ni を含む材料ではガス原子数/DPA比が大きい。FBRではこの比が小さく、主にDPAが利く。もう一つは、結晶粒界にガス原子が拡散してきて集まり、石油タンカーが溶接部で二つに折れたのと同じような、水素(ヘリウム)ぜい化を起こす。核融合炉第1壁では溶接部があり、強い熱応力が繰返し掛かるので問題が大きい。現在、核融合炉でのDPAとガス発生を模擬した、日米共同実験がORNLのHFIR, ORR炉を用いて進められているとのことである。^{**)}

WGが対象とする核種は、現在はTi (Z=22)~Cu (Z=29)に力を入れているが、Zr, Nb, Moも当然対象となる。また、核融合炉第1壁コーティングやブランケット材も含めるとBe, C, O, Mg, Al, Siのデータも必要である。要するに核データベースという見地からは何でもかんでも全部必要であるらしい。

反応の種類は、水素、ヘリウム放出以外に、D, T, ³He発生も含める予定でいる。統一のとれた核データ評価では、中性子及びガンマ線生成を同時に見ておくことも欠かせない。

ENDF/B-Vではかなりの数のFP核種にも(n,p), (n,α)等々の断面積を含めている。例えばKr, Zr, Nb, Ag, Xe, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Dy等の同位元素についてである。この理由はやや理解に苦しむが、同様のことがJEF-2においても計画されていると聞

^{*}) WGメンバー: 杉暉夫(原研), 八谷雅典(三井造船), 山越寿夫(船研), 中村久(富士電機), 浅野則雄(住友原子力), 川合将義, 吉田正, 山室信弘, 飯島俊吾(NAIG), 原田吉之助(原研, オブザーバー)

^{**)} 以上の記述の不正確, 不十分な点は筆者の責任であり, Ref.(1)~(3)を参照して頂きたい。

く。日本も数においても劣らないようにするには仲々大変である。

2. ガス生成断面積の一般的な模様

14 MeV 中性子による系統性は種々調べられている。(n, p), (n, α) については限部一福田の系統性式⁽⁴⁾が優れており、他の反応については Qaim の提唱式^{(5),(6)}がある。これらの表式を Table 1 に掲げる。

14 MeV (n, p), (n, α) 断面積の特徴は, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni のように $Z = \text{even}$ の核では, N が最も小さい第 1 同位元素の断面積が非常に大きく, N が増加すると急に小さくなることである。(n, p) についての例を Fig. 1 に示す。この傾向は反応の Q 値と密接に関連しているが, Q 値だけでデータを整理しても必ずしもうまくいかない。残留核の偶奇性と関連してのレベル密度の効果が大きい。

励起断面積の立上り具合はもう一つの重要点であり、特に核分裂スペクトルでの積分測定との比較のさいには Fig. 2 に示すように立上り部分の寄与が大きい。立上りの位置は、構造材領域では (n, p) の場合は反応しきい値から約 2 MeV 高いエネルギーであり、(n, α) の場合は約 6 MeV 上である。最近 ANL で $E_n \leq 10 \text{ MeV}$ の微分測定が盛んに行われている。日本では原研 FNS を用いて高精度の測定が原研、大学で行われており大変心強い。

3. 断面積の理論計算⁽¹⁰⁾

理論計算の正統的な計算コードとして我々が用いているのは GNASH コード (1984 年版) である。このコードは御存知のように、Hauser-Feshbach 統計理論とエキシトンモデルによる前平衡過程理論を組み合わせたもので、残留核の離散レベルも扱い、ガンマ線カスケードを含めた精緻なものである。利点は計算の詳細性と、ガンマ線生成断面積、isomer 生成断面積も得られることである。欠点は、中性子幅揺動補正を含めていないこと、放出粒子角分布計算が含まれていないこと、前平衡での複合粒子放出の理論式が見るからにいやになるような訳の判らない式であること、それから計算時間がかかりコストも高くつくことである。

逆に極めて簡単な計算法としては Pearlstein の THRESH-2 コードがある。これは (Z, A) だけ入力すれば 19 反応の励起断面積を 0 ~ 20 MeV にわたって 1 秒以内で計算するという素晴らしいものである。しかし、Fig. 3 に示すように荷電粒子放出反応に関しては測定値と比較して絶望的に合わない。Built-in パラメータ値が悪すぎ、また、理論を単純化し過ぎているため規格化の改訂だけではどうにもならないので、まず使用不可である。

従って、もっと理論的ベースに立った簡易コードとして、蒸発理論と closed form exciton model による前平衡理論を組み合わせた PEGASUS (Pre-equilibrium and Equilibrium Gas Production Cross Section Calculation using Systematics) を開発している。前平衡の複

合粒子放出も、岩本／原田／佐藤⁽¹¹⁾のクラスタ形成因子という明瞭な理論を用いている。このコードの利点はそれだけでなく、GNASHで現在出来ない、前平衡放出粒子角分布、 $(n, 2n)$ スペクトル計算も出来ることになっている。パソコンで計算出来、計算時間もすこぶる早くて安い。結果も概して良好である。勿論GNASHの利点が逆にPEGASUSの欠点ではある。

4. ワーキング・グループの目的

このWGはかねてから、JENDL-3のための評価とどう結び付けるのか、好き者のサロンではないか等と厳しい批判を受けて来たのだが、原子核がガス放出をする心境も大分判ってきたので、ここらでWGの仕事の方向をまとめておきたい。

一つは核種間にまたがる、データの系統性、計算パラメータ決定方法、計算手法やパラメータ値の効果、等の検討である。これらについてはGNASHコードやPEGASUSコードで計算を行いながら、かなりの知見が蓄積してきている。第1段階粒子放出の様子は理解が進んだが、第2段階反応は未だ良くつかめていない。

もう一つは、現在山室先生が主導するGNASHコードによる詳細評価計算である。New GNASHの解説、修正を行いながら、ガス生成だけでなく中性子、ガンマ線発生もすべて同時に片付けるのである。「我に良き測定データを与えよ。さればすべてのデータにフィットするパラメータセットを定めて見せよう」という実年の意気である。

第3の仕事はPEGASUSコードの開発と適用である。GNASHでの詳細計算の予備検討の他に、放出中性子角分布や $(n, 2n)$ スペクトルの計算は現在のGNASHでは出来ないので、評価データファイル作成にPEGASUSコードが直接活用出来る。また、 (n, d) 、 (n, t) 、 $(n, {}^3\text{He})$ の計算や、多数のFP核種計算には適している。14 MeVのデータ系統性等を内蔵させてon-lineで計算結果を調整することや、断面積共分散計算とBayesian adjustmentも出来るのではないかと考えている。全部やる気である。

今後、JENDL-3につづく計画として検討中の特殊目的データファイルへの反映も本WGの目標であろう。また、JENDL-3評価データの一貫性という意味で、中・重核、及びガンマ線生成核データのWGとの相互協力が大切であり、仕事の交流と懇親に努めている。

謝 辞

核データセンターの浅見哲夫氏、中川庸雄氏にはデータ面で恒常的にお世話になっている。原研、原田氏、菱沼氏には本文で述べたことに関して種々教えて頂いている。積分データについては、京大焔、小林捷平氏に来て頂いて詳細な話を伺った。他にも、多数の方に折にふれ協力頂いており、名前を挙げきれないことをお詫びしつつ、この誌上を借りて深く謝意を述べさせて頂きたい。

References

- (1) 核融合研究の進歩と動力炉開発への展望, 日本原子力学会「核融合炉調査」研究専門委員会報告(1976年8月)
- (2) 核融合炉設計及び研究開発の現状と課題, 日本原子力学会「核融合炉物理・工学」, 「核融合炉燃料・材料」研究専門委員会報告(1983年4月)
- (3) 石野菜, 照射損傷, (1979)東大出版会
- (4) Kumabe, I., Fukuda, K., NEANDC(J)-65/U(1978) p. 45
- (5) Qaim, S.M., Proc. Int. Conf. Neutron Physics and Other Applied Physics Purposes, Harwell, 1978, p.1088
- (6) Qaim, S.M., Proc. Conf. Nuclear Cross Sections and Technol., Washington, D.C., 1975, NBS Special Publications 425, p.664
- (7) Bychkov, V.M., et al., INDC(CCP)-146/LJ(1980)
- (8) 小林捷平, 放射化法による平均断面積測定と計算法の現状, (Dec. 5, 1985), ガス生成核データWG配布資料
- (9) Horibe, O., Ann. Nucl. Energy, 10, 359 (1983)
- (10) Sugi, T., et al., Evaluation of Threshold Reaction Cross Sections, Proc. Nuclear Data Seminar, JAERI, 1985 (to be published as JAERI-M report)
- (11) Iwamoto, A., Harada, K., Phys. Rev. C 26, 1821 (1982),
Sato, K., Iwamoto, A., Harada, K., ibid., C 28, 1527 (1983)

Table 1 14 MeV中性子断面積の系統性表式

(単位: mb, $S = (N - Z) / A$)

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 \sigma_{np} = 21.8 A \exp(-34.0 S), \quad (40 \leq A \leq 62) \\
 = 0.75 A^2 \exp(-43.2 S), \quad (63 \leq A \leq 89) \\
 = 0.75 A^2 \exp(-45.0 S), \quad (90 \leq A \leq 160)
 \end{array} \right\} \text{隈部-福田}^{(4)} \\
 \\
 \left. \begin{array}{l}
 \sigma_{n\alpha} = 51.0 \sqrt{A} \exp(-30 S), \quad (30 \leq A \leq 60) \\
 = 55.0 \sqrt{A} \exp(-33 S), \quad (61 \leq A \leq 105) \\
 = 7.6 \times 10^{-4} A^3 \exp(-40 S), \quad (106 \leq A \leq 150)
 \end{array} \right\} \text{隈部-福田}^{(4)} \\
 \\
 \left. \begin{array}{l}
 \sigma_{nt} = 4.52 (A^{1/3} + 1)^2 \exp(-10 S) \times 10^{-3} \\
 \sigma_{n, {}^3\text{He}} = 0.54 (A^{1/3} + 1)^2 \exp(-10 S) \times 10^{-3} \\
 \sigma_{nd} \approx 0.12 \sigma_{np} \\
 \sigma_{nr} \approx 1
 \end{array} \right\} \text{Qaim}^{(5),(6)}
 \end{array}$$

注) Qaimの σ_{nt} 表式はeven核については良いが、odd核では約10倍する必要がある。
 (INDC(HUN)-22/L, 1985。) σ_{nd} の式は σ_{np} が大きい核に対しては過大評価になっている。

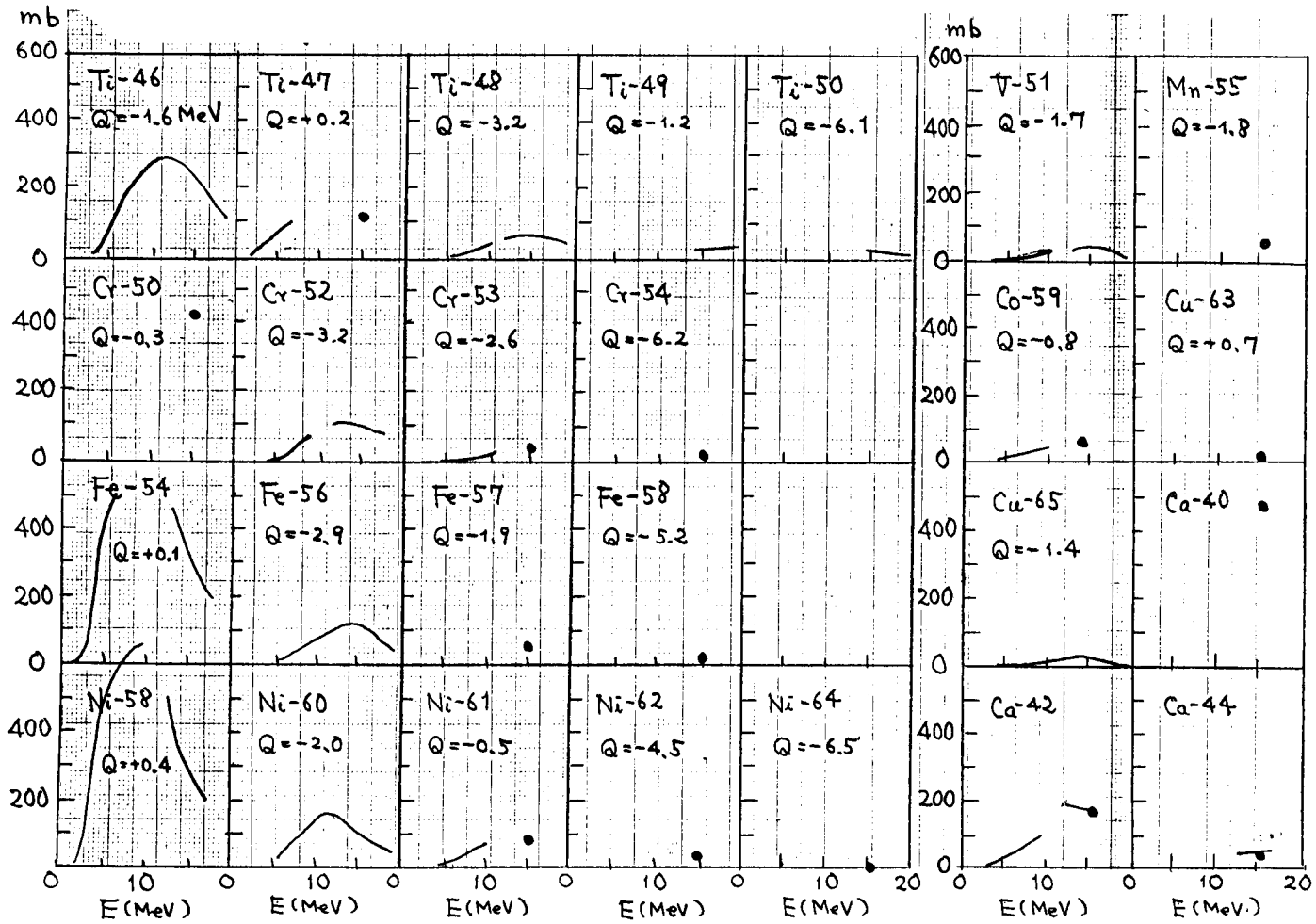


Fig. 1 Rough trends of measured (n,p) cross sections

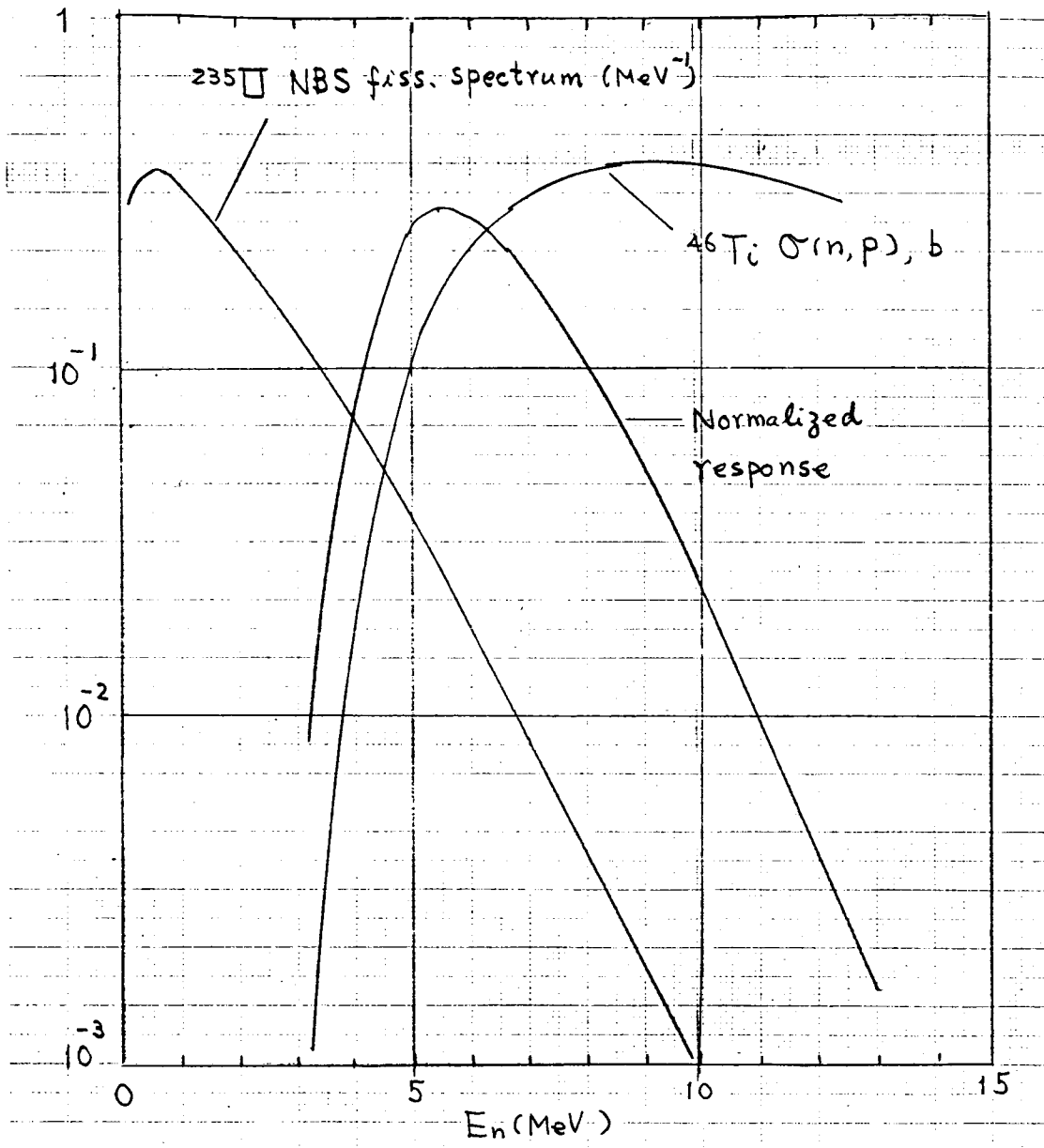


Fig. 2 ^{46}Ti (n, p) response to ^{235}U fission spectrum

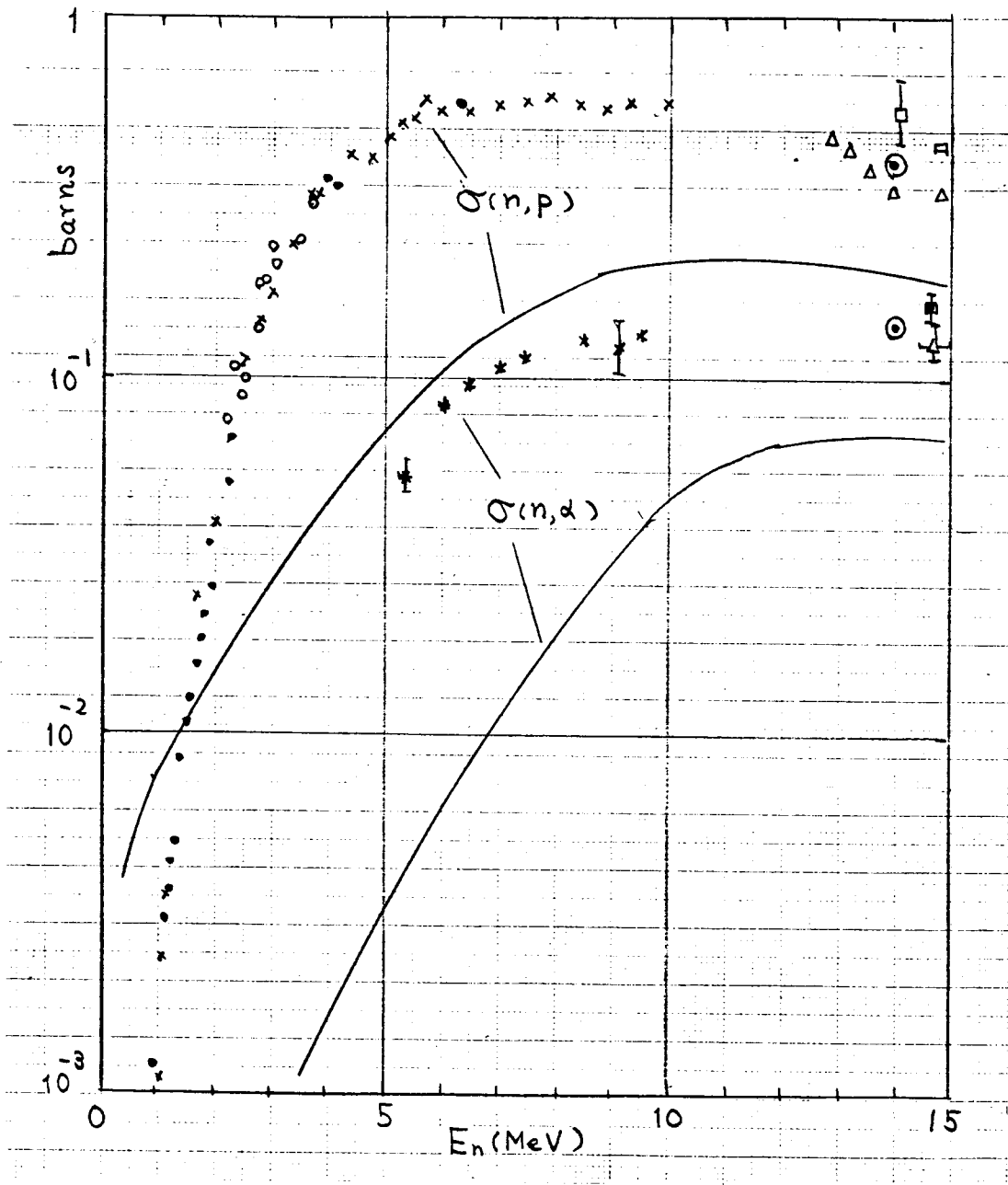


Fig. 3 ^{58}Ni (n,p) and (n, α) cross section

測定値と THRESH-2 code built-in parameter
 による計算（実線）との比較。

⊙ 14 MeVでの隈部-福田の系統性値。