

## しきい反応法による中性子の測定

布施 卓 嘉\*

## Threshold Foil Detector

By Takayoshi Fuse

The data on threshold foil detectors for obtaining neutron spectrum information for shield experiments are accumulated. Reactions considered are  $P^{31}(n, p)Si^{31}$ ,  $Ni^{58}(n, p)Co^{58}$ ,

$S^{32}(n, p)P^{32}$ ,  $Zn^{64}(n, p)Cu^{64}$ ,  $Al^{27}(n, p)Mg^{27}$ ,  $Mg^{24}(n, p)Na^{24}$ ,  $Fe^{56}(n, p)Mn^{56}$ ,  $Al^{27}(n, \alpha)Na^{24}$ ,  $I^{127}(n, 2n)I^{126}$ ,  $Cu^{63}(n, 2n)Cu^{62}$ ,  $Mo^{92}(n, 2n)Mo^{91}$ ,  $Np^{237}(n, f)$  and  $U^{238}(n, f)$ . The threshold cross sections, relative isotopic abundances of foils,  $(n, \gamma)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, 2n)$  reaction products, half lives of reaction products and energies of radiations from reaction products are presented. The neutrons correspond to 1000 counts for 5 minutes are presented. These may be regarded as measures of the minimum neutrons detectable. The orthonormal expansion method is also described.

## 1. ま え が き

しきい反応法による中性子の測定は有効な中性子測定法であり、原子炉の中性子測定に応用されてきている。核分裂中性子に対する種々の原子核の反応断面積は、初め Hughes により研究され<sup>1)</sup>、その後多くの研究が行なわれてきており、その結果は集約されている<sup>2)~4)</sup>。

遮蔽の研究をする場合の中性子検出器としてしきい反応法を考えると、場所をとらないこと、エネルギースペクトルが求められること、ガンマ線に感じないこと等の長所がある。また、近年遮蔽計算法の進歩により中性子のエネルギースペクトルも求められる計算法が開発されてきているが、しきい反応法はそのチェックのためには有効な検出法である<sup>5)</sup>。

本資料は遮蔽の研究にしきい反応法を応用するとき必要なデータを集約したものである。

## 2. しきい反応の種類

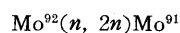
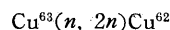
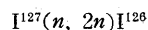
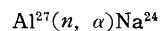
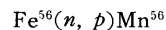
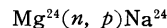
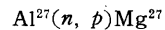
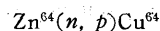
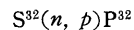
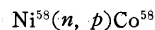
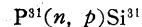
しきい反応が遮蔽研究用の中性子検出器として応用されるためには、次の条件を備えていることが望ましい。

- (1) しきいエネルギーは 14 Mev 以下。
- (2) 反応生成物の半減期は数分以上で、また、それか

ら出る放射線が容易に計測できること。

- (3) 反応断面積がよく測定されており、かつ大きいこと。
- (4) 反応を起す物質の高純度のものが容易に入手できること。

以上の条件を満すものとして、次の反応が考えられる。



そこで、磷、ニッケル、硫黄、亜鉛、アルミニウム、マグネシウム、鉄、沃素、銅、モリブデンをペレット状にして検出器が作られる。

ペレットを作る物質は天然の物質を使用するから、中性子測定に使われる以外のアイソトープも含んでおり、必要な反応以外の反応も起きる。そこで天然物質に含まれるアイソトープとその存在比、それらが  $(n, \gamma)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, 2n)$  反応をしたときの反応

\* 東海支所

生成物，そのうち放射性反応生成物の半減期，放射線種，放射線エネルギーを表1-a~1-jに示す<sup>6)</sup>。ペレットはすべて単体で作れるから表1に示された以外の反応は不純物以外は起らない。

### 3. しきい反応の断面積

しきい反応の断面積はエネルギーの関数である。エネルギースペクトルを求めるにはステップ関数であると理想的であるが，実際にはそうでないので次のように実効しきいエネルギー，実効しきい断面積を決めてステップ関数を仮定しておく。

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \sigma(E) \phi_f(E) dE &= \bar{\sigma}_f \int_0^{\infty} \phi_f(E) dE \\ &= \sigma_{eff} \int_{E_{eff}}^{\infty} \phi_f(E) dE \\ &= \sigma_{eff} \Phi(E_{eff}) \end{aligned}$$

$\phi_f(E)$  : 核分裂により生ずる中性子束

$\sigma(E)$  : しきい断面積

$\bar{\sigma}_f$  : 平均しきい断面積

$E_{eff}$  : 実効しきいエネルギー

$\sigma_{eff}$  : 実効しきい断面積

$\Phi(E_{eff})$  :  $E_{eff}$  以上の積分中性子束

実効しきいエネルギー，実効しきい断面積は核分裂中性子に対して決められたものであるから，測定しようとする中性子エネルギースペクトルが核分裂中性子エネルギースペクトルに近い場合はこれで大体的見当はつけられる。

中性子のエネルギースペクトルが計算で求められている場合，その計算法をチェックするには

$$\int_0^{\infty} \sigma(E) \phi(E) dE$$

を計算し，これと測定値を比較する。

しきい反応の断面積  $\sigma(E)$  を表 2-a~2-m に示す<sup>8)-21)</sup>。またそのグラフを図 1-a~1-m に示す。図 1-a~1-m には核分裂中性子束  $\phi_f(E)$ ， $\sigma(E)\phi_f(E)$  の相対値をも示してある。参考のために  $U^{238}(n, f)$ ， $Np^{237}(n, f)$  の場合も示してある。

### 4. 正規直交関数展開法<sup>7)</sup>

しきい反応法により中性子エネルギースペクトルを解析的に求める方法は前に述べた実効しきい断面積によるもの以外に多項式展開法や正規直交関数展開法等がある<sup>4)</sup>。これらの中で正規直交関数展開法は最小二

(46)

乗法と同等であり，測定しようとする中性子エネルギースペクトルが核分裂中性子スペクトルと非常に異なっている場合にも適用できる。

中性子のエネルギースペクトルを次のように定義する。

$$\phi(E) = \sum_K B_K \psi_K(E)$$

$\psi_m(E)$  は正規直交関数である。次に，しきい断面積を次のように定義する。

$$\phi_1(E) = A_{11} \sigma_1(E)$$

$$\phi_2(E) = A_{21} \sigma_1(E) + A_{22} \sigma_2(E)$$

$$\phi_n(E) = \sum_{m=1}^{m=n} A_{nm} \sigma_m(E)$$

$\phi_m(E)$  の正規直交性から次の関係がなりたつ。

$$\int_0^{\infty} \phi_m(E) \psi_K(E) dE = 0 \quad m \neq K$$

$$\int_0^{\infty} \phi_m(E) \psi_K(E) dE = 1 \quad m = K$$

これから例えば次の関係がなりたつ。

$$\int_0^{\infty} \phi_1^2(E) dE = A_{11}^2 \int_0^{\infty} \sigma_1^2(E) dE = 1$$

$$\int_0^{\infty} \phi_1(E) \phi_2(E) dE$$

$$= A_{11} A_{21} \int_0^{\infty} \sigma_1^2(E) dE$$

$$+ A_{11} A_{22} \int_0^{\infty} \sigma_1(E) \sigma_2(E) dE = 0$$

これらの式から  $A_{ik}$  が求まる。 $A_{ik}$  が求められると逆に  $\sigma_n(E)$  は  $\phi_m(E)$  から求められる。

$$\sigma_1(E) = C_{11} \phi_1(E)$$

$$\sigma_2(E) = C_{21} \phi_1(E) + C_{22} \phi_2(E)$$

$$\sigma_n(E) = \sum_{m=1}^{m=n} C_{nm} \phi_m(E)$$

しきい反応を起す割合  $K_n$  は次のように表わせる。

$$K_n = \int_0^{\infty} \phi(E) \sigma_n(E) dE$$

この式に上に求めた  $\phi(E)$ ， $\sigma_n(E)$  の展開式を代入すると次のようになる。

$$K_1 = \int_0^{\infty} \phi(E) \sigma_1(E) dE$$

$$= \int_0^{\infty} \{B_1 \phi_1(E) + \dots\} \{C_{11} \phi_1(E)\} dE$$

$$= B_1 C_{11}$$

$$K_2 = \int_0^{\infty} \phi(E) \sigma_2(E) dE = B_1 C_{21} + B_2 C_{22}$$

$$K_3 = \int_0^{\infty} \phi(E) \sigma_3(E) dE = B_1 C_{31} + B_2 C_{32} + B_3 C_{33}$$

$$K_n = \int_0^{\infty} \phi(E) \sigma_n(E) dE = \sum_{m=1}^{m=n} B_m C_{nm}$$

$K_n$  は測定でき、 $C_{nm}$  は既に計算されているから、この式から  $B_m$  が求められ、中性子エネルギースペクトルは計算できる。

## 5. 測定可能な最小中性子束

しきい断面積は 5%以上の誤差を含むから 1000 計数 (計数誤差 3%) を得るために必要な中性子束が測定可能な最小中性子束の目安となる。計数と中性子束との関係は次の式で求められる。

$$C = \eta \varepsilon N V (1 - e^{-\lambda t_r}) e^{-\lambda t_w} \frac{1 - e^{-\lambda t_c}}{\lambda} \int_0^{\infty} \sigma(E) \phi(E) dE$$

$C$ : 計数

$\eta$ : 反応生成物 1 崩壊あたり放出される放射線の数

$\varepsilon$ : 検出効率

$N$ : ペレット単位体積中の原子数

$V$ : ペレット体積

$\lambda$ : 崩壊定数

$t_r$ : 照射時間

$t_w$ : 照射終了後計数を開始するまでの待時間

$t_c$ : 計測時間

$\phi(E)$ : 中性子束

遮蔽研究の場合、照射時間は 5 時間以下、待時間は 30 分以上と考えるのが妥当である。

計測器としてはガンマ線には 2 インチ  $\phi \times 2$  インチ NaI (TI) シンチレーション・カウンター、ベータ線には 2 インチ  $\phi \times \frac{1}{4}$  インチプラスチック・シンチレーション・カウンターを使用する。

計測する放射線がガンマ線のときはペレットの厚さは入射中性子が 90% になるような厚さ、ベータ線のときはそのペレット中でのベータ線の飛程距離と同じくする。ペレットの直径 3.57cm (面積 10cm<sup>2</sup>)、計測時間 5 分、計数 1000 のときの  $\int_0^{\infty} \sigma(E) \phi_f(E) dE$  と  $\phi(E_{eff})$  の値を表 3 に示す。これらの値は測定可能な最小中性子束の目安となる。表 3 には反応生成物の半減期、計測する放射線種とそのエネルギー、実効しきいエネルギー、実効しきい断面積、平均しきい断面積、照射時間、待時間も示してある。

## 参考文献

- 1) D.J.Hughes, "Pile Neutron Research" Chap. 4, Addison-Wesley (1953)
- 2) J.Moteff, E.R.Beever, "The Status of Threshold and Resonance Neutron Detectors" Selected Topics in Radiation Dosimetry IAEA Vienna (1960)
- 3) T.O.Passell, R.L.Heath, Nucl. Sci. Eng. Vol. 10 308 (1961)
- 4) J. Moteff, Nucleonics, Vol. 20, No. 12, 56 (1962)
- 5) V.V.Verbinski, T.Fuse, J.Kington, K.M. Henry, ORNL-3360 (1962)
- 6) D.Strominger, J.M.Hollander, G.T.Seaborg, Rev. Mod. Phys. Vol. 30, 585 (1958)
- 7) J.B.Trice, APEX-408 (1957)
- 8) D.J.Hughes, R.B.Schwartz, BNL-325 (1958)
- 9) J.A.Grundl, R.L.Henkel, B.L.Perkins, Phys. Rev. Vol. 109 425 (1958)
- 10) K.Nakai, H.Gotoh, H.Amano, Jour. Phys. Soc. Jap. Vol. 17 1215 (1962)
- 11) T.Hürlimann, P.Huber, Helv. Phys. Acta. Vol. 28 33 (1955)
- 12) E.D.Klema, A.O.Hanson, Phys. Rev. Vol. 73 106 (1948)
- 13) L.Allen, Jr., W.A.Biggers, R.J.Prestwood, R.K.Smith, Phys. Rev. Vol. 107 1363 (1957)
- 14) J.P.Butler, D.C.Santry, Can. Jour. Phys. Vol. 41 372 (1963)
- 15) J.Terrell, D.M.Holm, Phys. Rev. Vol. 109 2031 (1958)
- 16) H.C.Martin, R.F.Tascheck, Phys. Rev. Vol. 89, 1302 (1953)
- 17) J.L.Fowler, J.M.Slye, Jr., Phys. Rev. Vol. 77, 787 (1950)
- 18) J.E.Brolley, Jr., J.L.Fowler, L.K.Schlacks, Phys. Rev. Vol. 88, 618 (1952)
- 19) S.J.Forbes, Phys. Rev. Vol. 88 1309 (1952)
- 20) Shinjiro Yasumi, Jour. Phys. Soc. Jap. Vol. 12, 443 (1957)
- 21) R.J.Howerton, UCRL-5226 (1959)

表 1<sup>63</sup>

Relative isotopic abundance of foils ( $n, \gamma$ ), ( $n, p$ ), ( $n, \alpha$ ), ( $n, 2n$ ) reaction products  
Half-lives of reaction products  
Energies of radiations from reaction Products.

表 1-a Phosphorus

Stable Isotope	Natural Abundance (%)	Reaction Product and its Half-Life			
		( $n, \gamma$ )	( $n, p$ )	( $n, \alpha$ )	( $n, 2n$ )
P <sup>31</sup>	100	P <sup>32</sup> (14.22d)	Si <sup>31</sup> (2.62h)	Al <sup>28</sup> (2.27m)	P <sup>30</sup> (2.55m)
Radioactive Nucleus	Half-Life	Energy of Radiation (Mev)			
P <sup>32</sup>	14.22d	$\beta$	1.707		
Si <sup>31</sup>	2.62h	$\beta$	1.471		
		$\gamma$	1.26 (0.07%)		
Al <sup>28</sup>	2.27m	$\beta$	2.87		
		$\gamma$	1.78		
P <sup>30</sup>	2.55m	$\beta^+$	3.24		
		$\gamma$	2.16 (0.5%)		

表 1-b Nickel

Stable Isotope	Natural Abundance (%)	Reaction Product and its Half-Life			
		( $n, \gamma$ )	( $n, p$ )	( $n, \alpha$ )	( $n, 2n$ )
Ni <sup>58</sup>	67.76	Ni <sup>59</sup> ( $8 \times 10^4$ y)	Co <sup>58</sup> (71.3d)	Fe <sup>55</sup> (2.60y)	Ni <sup>57</sup> (36h)
Ni <sup>60</sup>	26.16	Ni <sup>61</sup> (stable)	Co <sup>60</sup> (5.24y)	Fe <sup>57</sup> (stable)	Ni <sup>59</sup> ( $8 \times 10^4$ y)
Ni <sup>61</sup>	1.25	Ni <sup>62</sup> (stable)	Co <sup>61</sup> (99m)	Fe <sup>58</sup> (stable)	Ni <sup>60</sup> (stable)
Ni <sup>62</sup>	3.66	Ni <sup>63</sup> (125y)	Co <sup>62</sup> (1.6m)	Fe <sup>59</sup> (45.1d)	Ni <sup>61</sup> (stable)
Ni <sup>64</sup>	1.16	Ni <sup>65</sup> (2.564h)	Co <sup>64</sup> ( $\sim 5$ m)	Fe <sup>61</sup> (5.5m)	Ni <sup>63</sup> (125y)
Radioactive Isotope	Half-Life	Energy of Radiation (Mev)			
Ni <sup>57</sup>	36h	$\beta^+$	0.849 (*87), 0.72 (*11), 0.35 (*2)		
		$\gamma$	0.127 (14%), 0.40 (0.5%), 1.37 (86%), 1.89 (14%)		
Ni <sup>59</sup>	$8 \times 10^4$ y	EC	Co-K-X		1.07
			internal bremsstrahlung endpoint		
Ni <sup>63</sup>	125y	$\beta$	0.067		
Ni <sup>65</sup>	2.564h	$\beta$	2.10 (57%), 1.01 (14%), 0.60 (29%)		
		$\gamma$	1.49, 1.12, 0.37		
Co <sup>58m</sup>	9.2h	$\gamma$	0.025		
Co <sup>58</sup>	71.3d	$\beta^+$	0.472		
		$\gamma$	0.81		
Co <sup>60</sup>	5.24y	$\beta$	0.312		
		$\gamma$	1.173, 1.332		
Co <sup>61</sup>	99m	$\beta$	1.42 (55%), 1.00 (45%)		
		$\gamma$	0.072		
Co <sup>62</sup>	1.6m	$\gamma$			
Co <sup>64</sup>	$\sim 5$ m				
Fe <sup>55</sup>	2.60y	EC	internal bremsstrahlung endpoint		0.22
Fe <sup>59</sup>	45.1d	$\beta$	0.271 (46%), 0.462 (45%), 1.56 (0.3%)		
		$\gamma$	0.191 (2.8%), 1.098 (57%), 1.289 (43%)		
Fe <sup>61</sup>	5.5m	$\beta$			
		$\gamma$			

表 1—c Sulfur

Stable Isotope	Natural Abundance (%)	Reaction Product and its Half-Life			
		(n, $\gamma$ )	(n, $p$ )	(n, $\alpha$ )	(n, 2n)
S <sup>32</sup>	95	S <sup>33</sup> (stable)	P <sup>32</sup> (14.2d)	Si <sup>29</sup> (stable)	S <sup>31</sup> (2.66s)
S <sup>33</sup>	0.75	S <sup>34</sup> (stable)	P <sup>33</sup> (24.4d)	Si <sup>30</sup> (stable)	S <sup>32</sup> (stable)
S <sup>34</sup>	4.215	S <sup>35</sup> (87d)	P <sup>34</sup> (12.4s)	Si <sup>31</sup> (2.62h)	S <sup>33</sup> (stable)
S <sup>36</sup>	0.017	S <sup>37</sup> (5.04m)	P <sup>36</sup> ( )	Si <sup>33</sup> ( )	S <sup>35</sup> (87d)

Radioactive Isotope	Half-Life	Energy of Radiation (Mev)	
S <sup>31</sup>	2.66s	$\beta^+$	4.1
S <sup>35</sup>	87d	$\beta$	0.167
S <sup>37</sup>	5.04m	$\beta$	1.6 (90%), 4.3 (10%)
		$\gamma$	3.09
P <sup>32</sup>	14.2d	$\beta$	1.70
P <sup>33</sup>	24.4d	$\beta$	0.249
P <sup>34</sup>	12.4s	$\beta$	5.1 (75%), 3.2 (25%)
		$\gamma$	2.10, 4.0 (0.2%)
Si <sup>31</sup>	2.62h	$\beta$	1.471
		$\gamma$	1.26 (0.07%)

表 1—d Zinc

Stable Isotope	Natural Abundance (%)	Reaction Product and its Half-Life			
		(n, $\gamma$ )	(n, $p$ )	(n, $\alpha$ )	(n, 2n)
Zn <sup>64</sup>	48.89	Zn <sup>65</sup> (245d)	Cu <sup>64</sup> (12.8h)	Ni <sup>61</sup> (stable)	Zn <sup>63</sup> (38.3m)
Zn <sup>66</sup>	27.81	Zn <sup>67</sup> (stable)	Cu <sup>66</sup> (5.10m)	Ni <sup>63</sup> (125y)	Zn <sup>65</sup> (245d)
Zn <sup>67</sup>	4.11	Zn <sup>68</sup> (stable)	Cu <sup>67</sup> (58.5h)	Ni <sup>64</sup> (stable)	Zn <sup>65</sup> (stable)
Zn <sup>68</sup>	18.56	Zn <sup>69</sup> (57m)	Cu <sup>68</sup> (32s)	Ni <sup>65</sup> (2.564h)	Zn <sup>67</sup> (stable)
Zn <sup>70</sup>	0.62	Zn <sup>71</sup> (2.2m)	Cu <sup>70</sup> ( )	Ni <sup>67</sup> ( )	Zn <sup>69</sup> (57m)

Radioactive Isotope	Half-Life	Energy of Radiation (Mev)	
Zn <sup>63</sup>	38.3m	$\beta^+$	2.36 (*92), 1.40 (*7), 0.5 (*1)
		$\gamma$	0.96 (~8%), 1.89 (~4%), 2.60 (~0.5%)
Zn <sup>65</sup>	245d	$\beta^+$	0.324
		$\gamma$	1.119
Zn <sup>69</sup>	57m	$\beta$	0.897
Zn <sup>71</sup>	2.2m	$\beta$	2.4
		$\gamma$	0.12, 0.51
Cu <sup>64</sup>	12.8h	$\beta$	0.571
		$\beta^+$	0.657
		$\gamma$	1.34 ( $\gamma/\beta^+$ 0.025)
Cu <sup>66</sup>	5.10m	$\beta$	2.63 (91%), 1.5 (9%)
		$\gamma$	1.04 (*100), 0.83 (*2.5)
Cu <sup>67</sup>	58.5h	$\beta$	0.395 (45%), 0.484 (35%), 0.577 (20%)
		$\gamma$	0.092 (*56), 0.182 (*100), 0.296 (*1.4)
Cu <sup>68</sup>	32s	$\beta$	3.0
		$\gamma$	weak
Ni <sup>63</sup>	125y	$\beta$	0.067
Ni <sup>65</sup>	2.564h	$\beta$	2.10 (57%), 1.01 (14%), 0.60 (29%)
		$\gamma$	1.49, 1.12, 0.37

表 1-e Aluminum

Stable Isotope	Natural Abundance (%)	Reaction Product and its Half-Life			
		(n, $\gamma$ )	(n, p)	(n, $\alpha$ )	(n, 2n)
Al <sup>27</sup>	100	Al <sup>28</sup> (2.27m)	Mg <sup>27</sup> (9.45m)	Na <sup>24</sup> (14.97h)	Al <sup>26</sup> (8×10 <sup>5</sup> y)

Radioactive Isotope	Half-Life	Energy of Radiation (Mev)	
Al <sup>26</sup>	8×10 <sup>5</sup> y	$\beta$ 1.17 $\gamma$ 1.83 (96%), 2.96 (0.3%), 1.12 (3.7%)	
Al <sup>28</sup>	2.27m	$\beta$ 2.87 $\gamma$ 1.78	
Mg <sup>27</sup>	9.45m	$\beta$ 1.75 (58%), 1.59 (42%) $\gamma$ 0.834 (58%), 1.015 (42%)	
Na <sup>24</sup>	14.97h	$\beta$ 1.394 $\gamma$ 1.368, 2.754	

表 1-f Magnesium

Stable Isotope	Natural Abundance (%)	Reaction Product and its Half-Life			
		(n, $\gamma$ )	(n, p)	(n, $\alpha$ )	(n, 2n)
Mg <sup>24</sup>	78.60	Mg <sup>25</sup> (stable)	Na <sup>24</sup> (14.97h)	Ne <sup>21</sup> (stable)	Mg <sup>23</sup> (11.9s)
Mg <sup>25</sup>	10.11	Mg <sup>26</sup> (stable)	Na <sup>25</sup> (60s)	Ne <sup>22</sup> (stable)	Mg <sup>24</sup> (stable)
Mg <sup>26</sup>	11.29	Mg <sup>27</sup> (9.45m)	Na <sup>26</sup> ( )	Ne <sup>23</sup> (40.2s)	Mg <sup>25</sup> (stable)

Radioactive Isotope	Half-Life	Energy of Radiation (Mev)	
Mg <sup>23</sup>	11.9s	$\beta^+$ 2.95	
Mg <sup>27</sup>	9.45m	$\beta$ 1.758 (85%), 1.59 (42%) $\gamma$ 0.834 (85%), 1.015 (42%)	
Na <sup>24</sup>	14.97h	$\beta$ 1.394 $\gamma$ 1.368, 2.754	
Na <sup>25</sup>	60s	$\beta$ 3.7 (55%), 2.7 (45%) $\gamma$ 0.40 (*10), 0.58 (*9), 0.98 (*10), 1.61 (*3)	
Ne <sup>23</sup>	40.2s	$\beta$ 2.4 (1%), 3.95 (32%), 4.39 (67%) $\gamma$ 0.436 (*100), 1.65 (*3)	

表 1—g Iron

Stable Isotope	Natural Abundance (%)	Reaction Product and its Half-Life			
		(n, $\gamma$ )	(n, p)	(n, $\alpha$ )	(n, 2n)
Fe <sup>54</sup>	5.84	Fe <sup>55</sup> (2.60y)	Mn <sup>54</sup> (291d)	Cr <sup>51</sup> (27.8d)	Fe <sup>53</sup> (8.9m)
Fe <sup>56</sup>	91.68	Fe <sup>57</sup> (stable)	Mn <sup>56</sup> (2.576h)	Cr <sup>53</sup> (stable)	Fe <sup>55</sup> (2.60y)
Fe <sup>57</sup>	2.17	Fe <sup>58</sup> (stable)	Mn <sup>57</sup> (1.7m)	Cr <sup>54</sup> (stable)	Fe <sup>56</sup> (stable)
Fe <sup>58</sup>	0.31	Fe <sup>59</sup> (45.1d)	Mn <sup>58</sup> ( )	Cr <sup>55</sup> (3.52m)	Fe <sup>57</sup> (stable)

Radioactive Isotope	Half-Life	Energy of Radiation (Mev)	
Fe <sup>53</sup>	8.9m	$\beta^+$ 2.5 $\gamma$ 0.370 ( $\gamma/\beta^+$ 0.30)	
Fe <sup>55</sup>	2.60y	EC internal bremsstrahlung endpoint	0.22
Fe <sup>59</sup>	45.1d	$\beta$ 0.271 (46%), 0.462 (54%), 1.56 (0.3%) $\gamma$ 0.191 (2.8%), 1.098 (57%), 1.289 (43%)	
Mn <sup>54</sup>	291d	EC internal bremsstrahlung endpoint $\gamma$ 0.84	0.53
Mn <sup>56</sup>	2.576h	$\beta$ 2.81 (50%), 1.04 (30%), 0.65 (20%) $\gamma$ 0.845 (100%), 1.81 (30%), 2.13 (20%)	
Mn <sup>57</sup>	1.7m	$\beta$ 2.6 $\gamma$ 0.117 (strong), 0.134 (strong), 0.22 (weak), 0.35 (weak), 0.69 (weak)	
Cr <sup>51</sup>	27.8d	EC internal bremsstrahlung endpoint $\gamma$ 0.325 (9%), 0.320 (10 <sup>-3</sup> %), 0.65 (5 $\times$ 10 <sup>-4</sup> %)	0.75
Cr <sup>55</sup>	3.52m	$\beta$ 2.85	

表 1—h Iodine

Stable Isotope	Natural Abundance (%)	Reaction Product and its Half-Life			
		(n, $\gamma$ )	(n, p)	(n, $\alpha$ )	(n, 2n)
I <sup>127</sup>	100	I <sup>128</sup> (24.99m)	Te <sup>127</sup> (9.4h)	sb <sup>124</sup> (60.9d)	I <sup>126</sup> (13.3d)

Radioactive Isotope	Half-Life	Energy of Radiation (Mev)	
I <sup>126</sup>	13.3d	$\beta$ 0.39 (*5.8), 0.87 (*29), 1.25 (*9.3) $\beta^+$ 0.46 (*0.3), 1.11 (*1.0) $\gamma$ 0.382 (*100), 0.48 (*9.6), 0.48 (*9.6), 0.65 (*96), 0.74 (*11), 0.86 (*1.8), 1.42 (*1.1)	
I <sup>128</sup>	24.99m	$\beta$ 2.12 (76%), 1.67 (16%), 1.13 (2%) $\gamma$ 0.75 (0.3%), 0.46 (17%), 0.54 (1.8%), 0.99 (0.3%)	
Te <sup>127</sup>	9.4h	$\beta$ 0.70 (99%) $\gamma$ 0.059 (0.05%), 0.145 (0.007%), 0.203, 0.215, 0.360 (0.1%), 0.418 (0.8%)	
sb <sup>124</sup>	60.9d	$\beta$ 2.32 (21%), 1.60 (7%), 0.97 (9%), 0.61 (49%), 0.24 (14%) $\gamma$ 0.603 (*100), 0.646 (*6), 0.714 (*4), 0.723 (*11), 0.970 (*5), 1.047 (*2), 1.298 (*1.3), 1.326 (*2), 1.361, 1.370, 1.692 (*52), 2.088 (*7)	

表 1-i Copper

Stable Isotope	Natural Abundance (%)	Reaction Product and its Half-Life			
		(n, $\gamma$ )	(n, p)	(n, $\alpha$ )	(n, 2n)
Cu <sup>63</sup>	69.1	Cu <sup>64</sup> (12.80h)	Ni <sup>63</sup> (125y)	Co <sup>60</sup> (5.24y)	Cu <sup>62</sup> (9.73m)
Cu <sup>65</sup>	30.9	Cu <sup>66</sup> (5.10m)	Ni <sup>65</sup> (2.564h)	Co <sup>62</sup> (1.6m)	Cu <sup>64</sup> (12.80h)

Radioactive Isotope	Half-Life	Energy of Radiation	
Cu <sup>62</sup>	9.73m	$\beta^+$ 2.91 $\gamma$ 0.69, 0.88, 1.13, 1.17	
Cu <sup>64</sup>	12.80h	$\beta$ 0.571 $\beta^+$ 0.657 $\gamma$ 1.34	
Cu <sup>66</sup>	5.10m	$\beta$ 2.63 (91%), 1.5 (9%) $\gamma$ 1.04 (*100), 0.83 (*2.5)	
Ni <sup>63</sup>	125y	$\beta$ 0.067	
Ni <sup>65</sup>	2.564h	$\beta$ 2.10 (57%), 1.01 (14%), 0.60 (29%) $\gamma$ 1.49, 1.12, 0.37	
Co <sup>60</sup>	5.24y	$\beta$ 0.312, 1.478 (0.01%) $\gamma$ 1.1728, 1.3325	
Co <sup>62</sup>	1.6m	$\gamma$	



表 1-j Molybdenum

Stable Isotope	Natural Abundance (%)	Reaction Product and its Half-Life			
		(n, $\gamma$ )	(n, p)	(n, $\alpha$ )	(n, 2n)
Mo <sup>92</sup>	15.86	Mo <sup>93m</sup> (6.95h)	Nb <sup>92</sup> (10.1d)	Zr <sup>89</sup> (79.3h)	Mo <sup>91</sup> (15.5m)
Mo <sup>94</sup>	9.12	Mo <sup>95</sup> (stable)	Nb <sup>94</sup> (1.8×10 <sup>4</sup> y)	Zr <sup>91</sup> (stable)	Mo <sup>93m</sup> (6.95h)
Mo <sup>95</sup>	15.70	Mo <sup>96</sup> (stable)	Nb <sup>95</sup> (35d)	Zr <sup>92</sup> (stable)	Mo <sup>94</sup> (stable)
Mo <sup>96</sup>	16.50	Mo <sup>97</sup> (stable)	Nb <sup>96</sup> (23.35h)	Zr <sup>93</sup> (1.1×10 <sup>5</sup> y)	Mo <sup>95</sup> (stable)
Mo <sup>97</sup>	9.45	Mo <sup>98</sup> (stable)	Nb <sup>97</sup> (72.1m)	Zr <sup>94</sup> (stable)	Mo <sup>96</sup> (stable)
Mo <sup>98</sup>	23.75	Mo <sup>99</sup> (66.0h)	Nb <sup>98</sup> (26m)	Zr <sup>95</sup> (65d)	Mo <sup>97</sup> (stable)
Mo <sup>100</sup>	9.62	Mo <sup>101</sup> (14.61m)	Nb <sup>100</sup> ( )	Zr <sup>97</sup> (17.0h)	Mo <sup>99</sup> (66.0h)

Radioactive Isotope	Half-Life	Energy of Radiation (Mev)	
Mo <sup>91</sup>	15.5m	$\beta^+$ 3.44	$\gamma$ no
Mo <sup>93m</sup>	6.95h	$\gamma$ 0.264, 0.685, 1.479	
Mo <sup>99</sup>	66.0h	$\beta$ 1.18 (83%), 0.80 (3%), 0.41 (14%)	$\gamma$ 0.041, 0.140, 0.181, 0.372, 0.74
Mo <sup>101</sup>	14.61m	$\beta$ 2.23	$\gamma$ 0.080, 0.191, 0.510, 0.590, 0.704, 0.890, 1.02, 1.18, 1.56, 2.08
Nb <sup>92</sup>	10.1d	$\gamma$ 0.90 (*1), 0.93 (*98), 1.83 (*2)	
Nb <sup>94</sup>	1.8×10 <sup>4</sup> y	$\beta$ 0.50	$\gamma$ 0.70 (92%), 0.87 (92%), 1.57 (8%)
Nb <sup>95</sup>	35d	$\beta$ 0.158	$\gamma$ 0.765
Nb <sup>96</sup>	23.35h	$\beta$ 0.750 (92%), 0.37 (8%)	$\gamma$ 0.216 (7%), 0.238 (10%), 0.451 (27%), 0.56 (61%), 0.77 (100%), 0.804 (6%), 0.84 (16%), 1.078 (52%), 1.187 (32%)
Nb <sup>97</sup>	72.1m	$\beta$ 1.27	$\gamma$ 0.665
Nb <sup>98</sup>	26m	$\beta$	
Zr <sup>89</sup>	79.3h	$\beta^+$ 0.91	$\gamma$ 0.913
Zr <sup>93</sup>	1.1×10 <sup>5</sup> y	$\beta$ 0.056 (96%)	$\gamma$ 0.0304
Zr <sup>95</sup>	65d	$\beta$ 0.360 (43%), 0.396 (55%), 0.89 (2%)	$\gamma$ 0.722
Zr <sup>97</sup>	17.0h	$\beta$ 1.91	$\gamma$ 1.02 (*10), 1.15 (*20), 1.72 (*5)

表 2 Threshold Cross Sections

表 2-a <sup>89g</sup>P<sup>31</sup> (n, p) Si<sup>31</sup>

E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)
2.0	9	2.65	48	4.82	134.3±13
2.07	19	2.74	63	5.33	134.6±13
2.12	13	2.80	53	5.69	136.9±13
2.23	35	2.85	67	6.11	145.9±14
2.26	23	2.92	47	6.61	148.1±14
2.28	35	3.05	62	7.11	136.4±13
2.32	21	3.15	83	7.61	136.7±13
2.36	38	3.33	60	8.09	144.2±14
2.40	29	3.40	66	8.58	138.9±13
2.46	39	3.50	62	9.07	143.4±14
2.53	37	3.60	70	9.57	142.1±14
2.60	57	4.05	95.9±9	14.1	85.5±7
2.62	57	4.54	106.3±10		

表 2-b <sup>310</sup>Ni<sup>58</sup> (n, p) Co<sup>58</sup>

E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)
1.84	46±14	4.16	330±52	8.0	460
2.27	84±25	4.34	412±65	9.0	470
2.57	84±35	4.50	445±68	10.0	470
2.98	147±31	4.63	420±63	11.0	450
3.30	151±40	4.82	407±60	12.0	400
3.67	281±52	6.0	390	13.0	530
3.78	256±44	6.5	450	14.0	275
4.02	357±62	7.0	450		

表 2-c <sup>811121314</sup>S<sup>32</sup> (n, p) P<sup>32</sup>

E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)
2.20	50	3.12	151	4.04	302±20
2.23	50	3.20	145	4.3	349
2.25	60	3.27	175	4.54	263±18
2.32	79	3.31	225	4.82	250±17
2.40	87	3.39	222	5.33	248±17
2.47	69	3.44	212	5.69	304±20
2.55	75	3.46	213	6.11	331±21
2.56	72	3.48	220	6.61	336±21
2.60	76	3.52	225	7.11	322±20
2.67	66	3.54	235	7.61	346±22
2.71	60	3.59	250	8.09	351±25
2.75	103	3.64	212	8.58	376±40
2.79	109	3.66	206	9.07	351±25
2.83	94	3.69	190	9.56	376±40
2.86	89	3.79	163	13.38	285±15
2.92	92	3.81	158	13.41	291±14
2.95	106	3.89	172	13.59	274±14
3.00	131	3.92	246	13.70	266±13
3.09	180	3.97	251	13.89	257±13

表 2—d <sup>310)</sup> Zn<sup>64</sup> (n, p) Cu<sup>64</sup>

E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)
1.85	7.4 $\pm$ 2	4.15	98 $\pm$ 20	6.2	244
2.31	15 $\pm$ 4	4.34	114 $\pm$ 23	6.6	270
2.60	25 $\pm$ 5	4.51	108 $\pm$ 22	7.0	300
2.99	43 $\pm$ 9	4.63	134 $\pm$ 27	8.0	360
3.29	64 $\pm$ 13	4.82	125 $\pm$ 25	9.0	410
3.65	85 $\pm$ 18	5.0	155	10	450
3.76	77 $\pm$ 16	5.4	183	11	470
4.02	91 $\pm$ 19	5.8	213	12	450

表 2—e <sup>5)</sup> Al<sup>27</sup> (n, p) Mg<sup>27</sup>

E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)
2.63	0.2	4.65	19	6.25	56
2.75	0.7	4.70	18	6.30	53.5
2.85	1.0	4.75	15	6.35	56.5
2.95	1.3	4.80	13.5	6.45	56
3.07	1.5	4.85	18.5	6.50	50
3.15	2.5	4.90	22	6.60	52
3.25	2.0	4.95	26	6.65	51
3.33	2.0	5.05	25.5	6.75	52.5
3.37	2.0	5.10	25	6.80	51.5
3.45	7.0	5.17	27.5	6.85	49.5
3.50	10.0	5.25	29	6.90	54
3.55	8.2	5.30	25	6.95	61
3.60	5.0	5.37	27	6.97	58
3.65	8.5	5.42	31	7.02	61.5
3.75	8.5	5.47	35	7.05	61
3.80	4.0	5.55	39	7.10	64
3.85	6.0	5.60	38	7.20	64.5
3.90	8.0	5.65	38.5	7.25	71
4.00	6.0	5.75	53	7.30	77
4.07	5.0	5.80	51	7.35	71.5
4.15	6.0	5.85	46	7.40	64.5
4.20	7.5	5.88	39.5	7.45	66.5
4.25	10.0	5.93	41.5	7.50	72
4.33	12.0	5.97	43	7.55	75
4.37	11.0	6.05	37.5	7.60	75.5
4.45	12.0	6.10	41	7.65	81.5
4.50	15.0	6.15	42.5		
4.60	19.0	6.20	48		

表 2—f <sup>14)</sup> Mg<sup>24</sup> (n, p) Na<sup>24</sup>

E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)
5.45	0.05 $\pm$ 0.01	7.50	52.2 $\pm$ 1.6	9.63	129 $\pm$ 4
5.70	0.22 $\pm$ 0.05	7.59	81.3 $\pm$ 2.5	9.88	136 $\pm$ 4
5.94	1.40 $\pm$ 0.20	7.80	103 $\pm$ 3	10.13	159 $\pm$ 5
6.22	4.83 $\pm$ 0.20	8.01	117 $\pm$ 4	10.40	156 $\pm$ 5
6.40	9.61 $\pm$ 0.30	8.10	116 $\pm$ 4	10.62	166 $\pm$ 6
6.53	25.8 $\pm$ 0.08	8.27	120 $\pm$ 4	10.81	163 $\pm$ 6
6.60	38.4 $\pm$ 1.2	8.40	122 $\pm$ 4	11.00	160 $\pm$ 5
6.70	45.7 $\pm$ 1.4	8.61	126 $\pm$ 4	11.22	163 $\pm$ 6
7.01	38.1 $\pm$ 1.2	8.81	123 $\pm$ 4	11.61	189 $\pm$ 7
7.20	51.3 $\pm$ 1.6	9.02	129 $\pm$ 4	12.59	194 $\pm$ 10
7.40	49.6 $\pm$ 1.4	9.30	127 $\pm$ 4	13.58	205 $\pm$ 15

表 2-g<sup>8)15)</sup> Fe<sup>56</sup> (n, p) Mn<sup>56</sup>

E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)
4.86	1.2±0.1	6.54	20±2	13.35	116±3
4.56	0.4±0.6	7.41	34±4	13.99	114±2
5.24	2.6±0.2	8.21	39±5		
5.55	5.6±0.8	12.43	111±3		

表 2-h<sup>14)</sup> Al<sup>27</sup> (n,  $\alpha$ ) Na<sup>24</sup>

E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)
5.94	1.23±0.05	8.27	46.0±1.4	10.40	97.4±3.2
6.22	3.04±0.09	8.40	52.9±1.6	10.62	104 ±3
6.53	6.53±0.21	6.61	64.3±1.9	10.81	102 ±3
6.70	9.87±0.30	8.81	66.8±2.0	11.00	111 ±4
7.01	16.2 ±0.5	9.02	74.4±2.2	11.22	118 ±4
7.20	19.8 ±0.6	9.30	79.1±2.5	11.61	118 ±4
7.50	25.6 ±0.8	9.63	86.3±2.7	12.10	112 ±5
7.80	39.2 ±1.2	9.88	88.3±2.8	12.59	119 ±6
8.01	45.2 ±1.4	10.03	91.0±2.9	13.08	116 ±7
8.10	45.7 ±1.4	10.13	90.5±3.0	13.58	123 ±9

表 2-i<sup>8)16)</sup> I<sup>127</sup> (n, 2n) I<sup>126</sup>

E (Mev)	$\sigma$ (b)	E (Mev)	$\sigma$ (b)	E (Mev)	$\sigma$ (b)
9.52	0 (Eth)	13.1	1.12±6%	15.6	1.32±6%
12.3	0.90±6%	14.1	1.30±6%	16.2	1.22±6%

表 2-j<sup>8)17)18)19)</sup> Cu<sup>63</sup> (n, 2n) Cu<sup>62</sup>

E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)
11.8	12±30	12.6	157±20	14.6	650± 90
12.0	41±20	13.2	280±40	16.9	810± 90
12.2	90±20	14.0	330±20	19.4	950±100
12.4	130±20	14.1	510±7%		

表 2-k<sup>8)18)20)</sup> Mo<sup>92</sup> (n, 2n) Mo<sup>91</sup>

E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)
13.2	110±60	14.14	132±16	16.8	770±130
13.51	60±18	14.6	310±90	19.4	960±140
13.76	100±18	14.8	180±17		

表 2-1<sup>21D</sup> Np<sup>237</sup> (*n, f*)

E (Mev)	$\sigma$ (b)	E (Mev)	$\sigma$ (b)	E (Mev)	$\sigma$ (b)
0.25	0.04±0.01	2.00	1.68±0.8	4.98	1.34±0.8
0.35	0.1±0.01	2.15	1.63±0.8	5.11	1.33±0.8
0.46	0.33±0.02	2.28	1.73±0.8	5.25	1.44±0.8
0.50	0.50±0.10	2.40	1.70±0.8	5.35	1.34±0.8
0.60	0.75±0.10	2.51	1.70±0.8	5.38	1.51±0.8
0.70	1.00±0.10	2.54	1.70±0.8	5.51	1.35±0.8
0.75	1.15±0.10	2.68	1.70±0.8	5.64	1.37±0.8
0.85	1.20±0.10	2.76	1.64±0.8	5.78	1.44±0.8
0.90	1.49±0.18	2.82	1.60±0.8	5.90	1.48±0.8
0.98	1.58±0.18	2.90	1.67±0.8	5.92	1.58±0.8
1.02	1.57±0.18	3.05	1.70±0.8	6.05	1.50±0.8
1.15	1.57±0.18	3.20	1.63±0.8	6.17	1.73±0.8
1.20	1.61±0.18	3.33	1.55±0.8	6.38	1.79±0.9
1.25	1.54±0.18	3.48	1.48±0.8	6.61	1.96±0.9
1.26	1.74±0.18	3.62	1.55±0.8	6.70	1.77±0.9
1.30	1.79±0.18	3.78	1.60±0.8	6.80	1.91±0.9
1.38	1.62±0.18	3.92	1.54±0.8	7.02	1.96±0.9
1.44	1.70±0.18	4.30	1.43±0.8	7.21	2.02±0.9
1.50	1.62±0.18	4.32	1.36±0.8	7.42	1.93±2.0
1.55	1.69±0.18	4.44	1.40±0.8	7.97	2.05±0.8
1.63	1.74±0.8	4.58	1.36±0.8	14.6	2.4±0.2
1.75	1.68±0.8	4.71	1.45±0.8		
1.88	1.73±0.8	4.85	1.40±0.8		

表 2-m<sup>21D</sup> U<sup>238</sup> (*n, f*)

E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)	E (Mev)	$\sigma$ (mb)
0.49	0 ±4%	1.89	500 ±5%	7.5	1009 ±5%
0.57	1 ±4%	1.92	530 ±5%	8.0	992.9±5%
0.64	2 ±4%	1.94	530 ±5%	8.5	1040 ±5%
0.72	2 ±4%	1.96	540 ±5%	9.0	1049 ±5%
0.76	3 ±4%	1.98	520 ±5%	9.5	1022 ±5%
0.78	4 ±4%	2.0	555.7±5%	10.0	1008 ±5%
0.81	6 ±4%	2.5	563.8±5%	10.5	960 ±5%
0.83	5 ±4%	3.0	540.4±5%	11.0	1040 ±5%
0.85	7 ±4%	3.5	560.2±5%	11.9	975.6±5%
0.87	8 ±4%	4.0	564.4±5%	12.2	1023 ±5%
0.89	10 ±4%	4.5	563.9±5%	13.0	1069 ±5%
1.00	13.2±5%	5.0	567.8±5%	13.2	1110 ±5%
1.205	68.5±5%	5.5	573.7±5%	13.20	1043 ±5%
1.50	356.6±5%	6.0	622.7±5%	13.86	1120 ±5%
1.736	440.5±5%	6.5	826.9±5%	14.10	1165.4±5%
1.87	520 ±4%	7.0	964.5±5%		

表 3

Reaction	$t_{1/2}$	Radiation observed (Mev)	$E_{eff}$ (Mev)	$\sigma_{eff}$ (mb)	$\bar{\sigma}_f$ (mb)	$\int \phi \sigma dE$ ( $\frac{n \cdot \text{barn}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}$ )	$\Phi(E_{eff})$ (n/cm <sup>2</sup> ·sec)	$t_r$	$t_w$	ref.
P <sup>31</sup> (n, p) Si <sup>31</sup>	2.62h	$\beta$ 1.471	2.9	75	30	$1.5 \times 10^2$	$2 \times 10^3$	5h 30m	3)	
Ni <sup>58</sup> (n, p) Co <sup>58</sup>	71.3d	$\gamma$ 0.81	2.9	420	93	$1.5 \times 10^3$	$4 \times 10^5$	5h 24h	4)	
S <sup>32</sup> (n, p) P <sup>32</sup>	14.2d	$\beta$ 1.7	3.0	310	65	$10^4$	$3 \times 10^4$	5h 15h	4)	
Zn <sup>64</sup> (n, p) Cu <sup>64</sup>	12.8h	$\gamma$ 0.511	4.0	320	34	$1.2 \times 10^2$	$4 \times 10^2$	5h 15h	4)	
Al <sup>27</sup> (n, p) Mg <sup>27</sup>	9.45m	$\gamma$ 1.015, 0.834	5.3	80	3.9	$2.5 \times 10^2$	$3 \times 10^3$	1h 30m	2)	
Mg <sup>24</sup> (n, p) Na <sup>24</sup>	14.97h	$\gamma$ 1.368, 2.754	6.3	60	1.2	$6 \times 10$	$10^3$	5h 15h	4)	
Fe <sup>56</sup> (n, p) Mn <sup>56</sup>	2.576h	$\gamma$ 0.845, 1.81, 2.13	7.5	110	0.84	10	$10^3$	5h 30m	4)	
Al <sup>27</sup> (n, $\alpha$ ) Na <sup>24</sup>	14.97h	$\gamma$ 1.368, 2.754	8.15	130	0.60	$1.3 \times 10^2$	$10^3$	5h 15h	4)	

$t_{1/2}$  : half-life

$E_{eff}$  : effective threshold energy

$\sigma_{eff}$  : effective threshold cross section

$\bar{\sigma}_f$  : average threshold cross section

$\int \phi \sigma dE$  :  $\int_0^\infty \phi_f(E) \sigma(E) dE$ ; value corresponds to 1000 counts for 5 minutes

$\Phi(E_{eff})$  : integral flux above  $E_{eff}$  corresponds to 1000 counts for 5 minutes

$t_r$  : time of irradiation

$t_w$  : time from the end of irradiation to the start of counting, i.e., wait time.

$\int_0^\infty \phi_f(E) \sigma(E) dE$  and  $\Phi(E_{eff})$  may be regarded as a measure of the minimum neutron detectable.

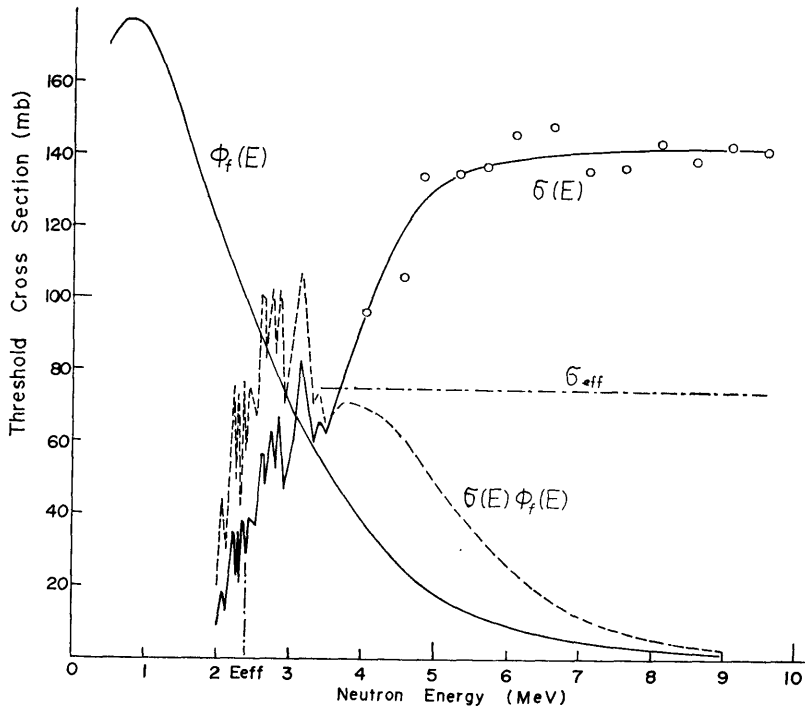


图 1-a  $P^{31}(n, p)Si^{31}$

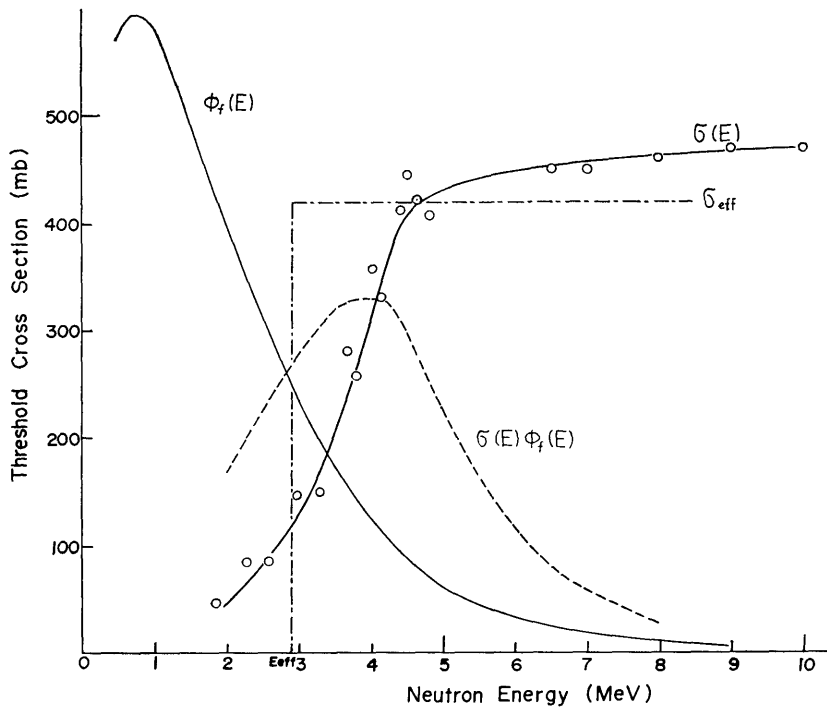
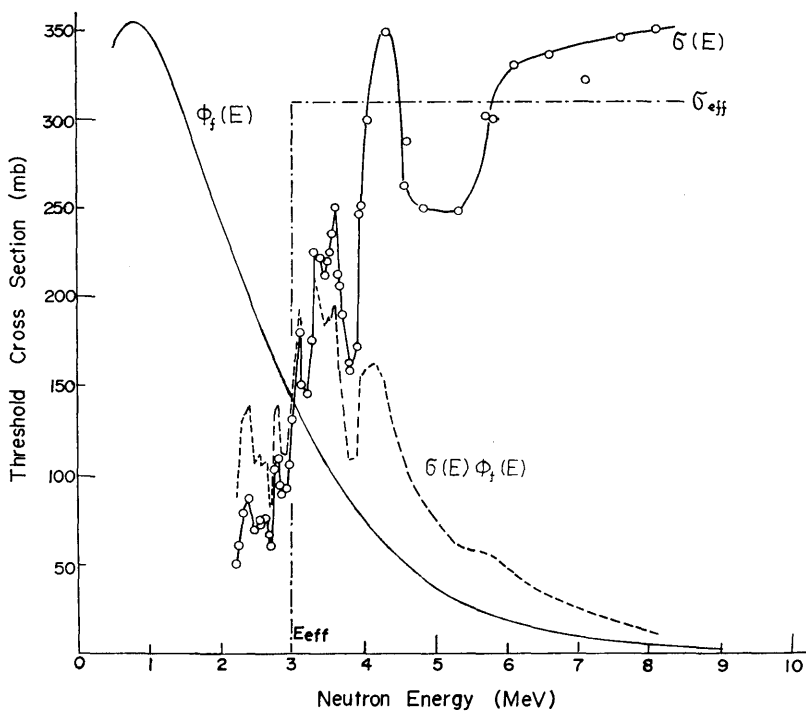
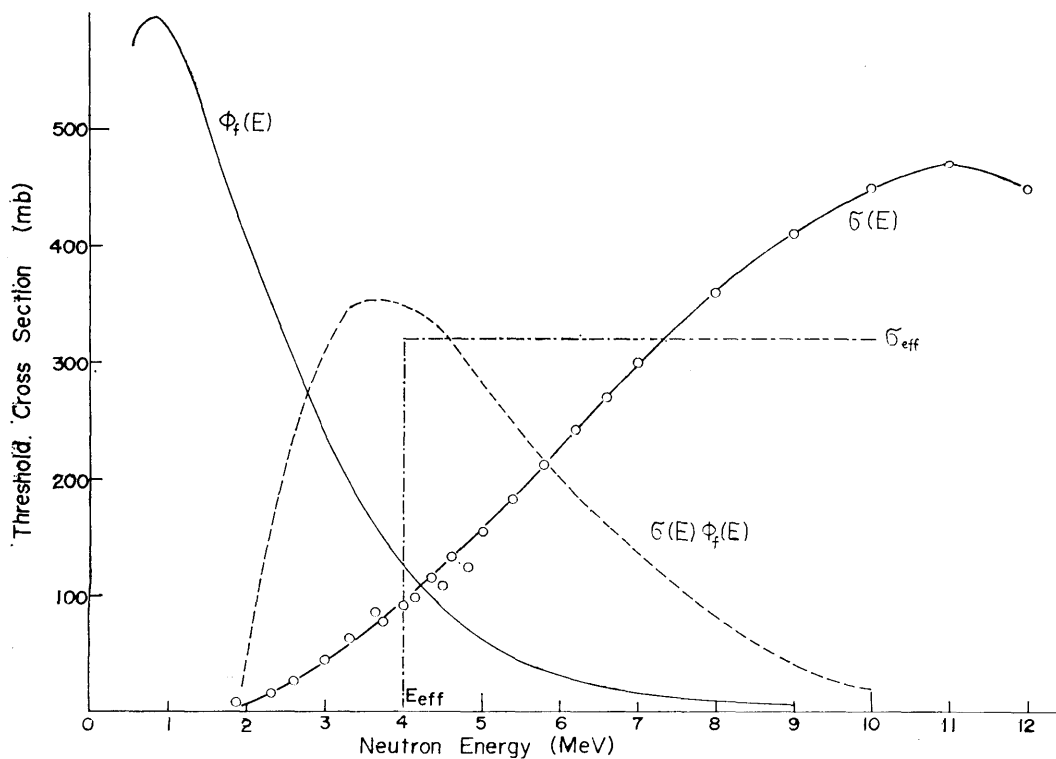


图 1-b  $Ni^{58}(n, p)Co^{58}$



1-c  $S^{32}(n, p)P^{32}$



1-d  $Zn^{64}(n, p)Cu^{64}$



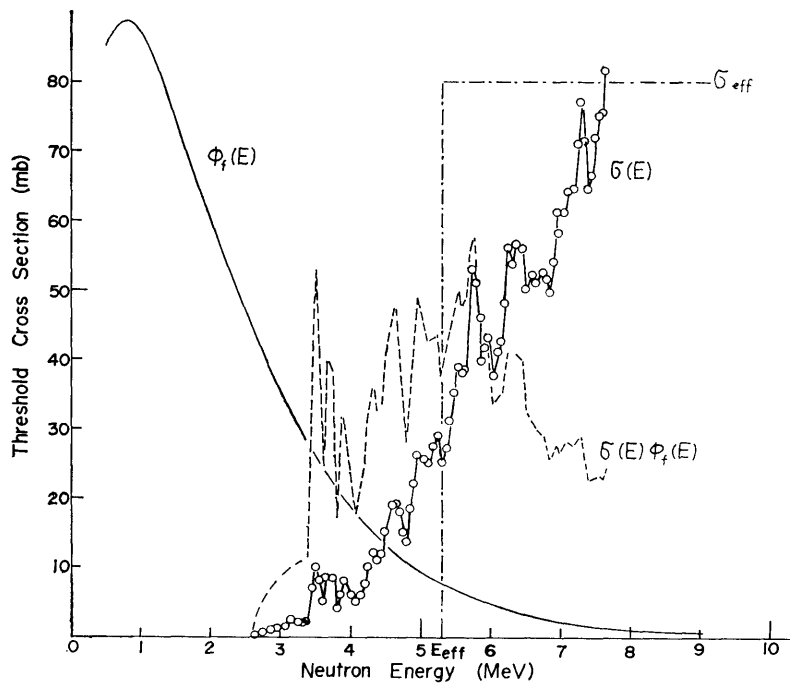


图 1-e  $\text{Al}^{27}(n, p)\text{Mg}^{27}$

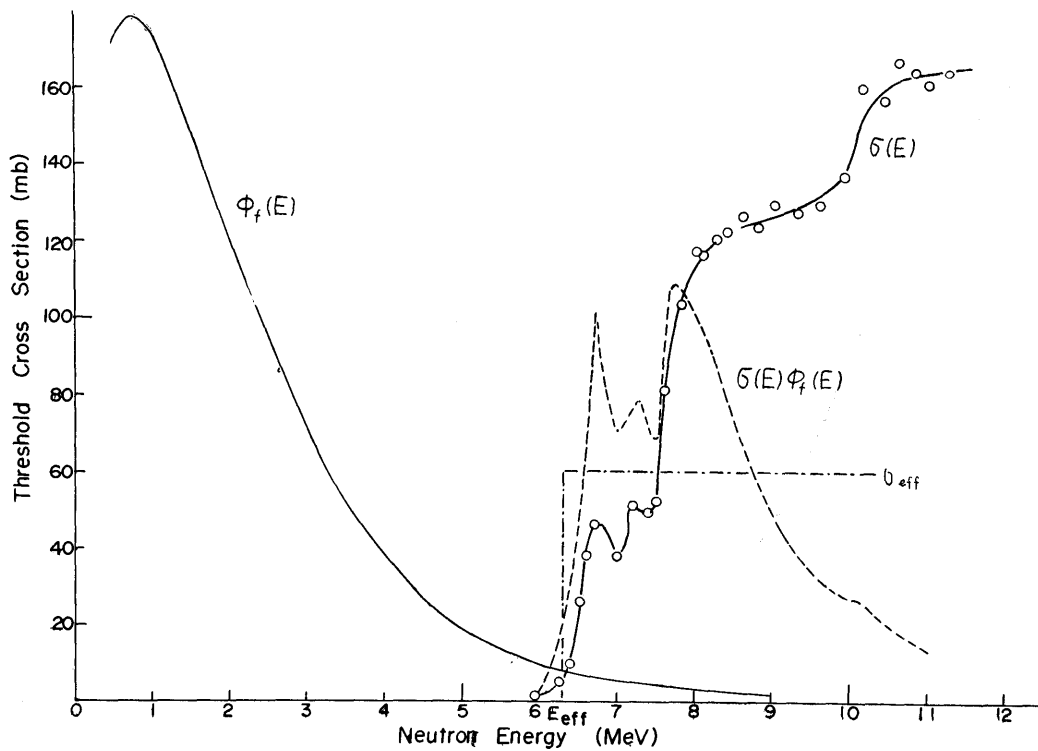


图 1-f  $\text{Mg}^{24}(n, p)\text{Na}^{24}$

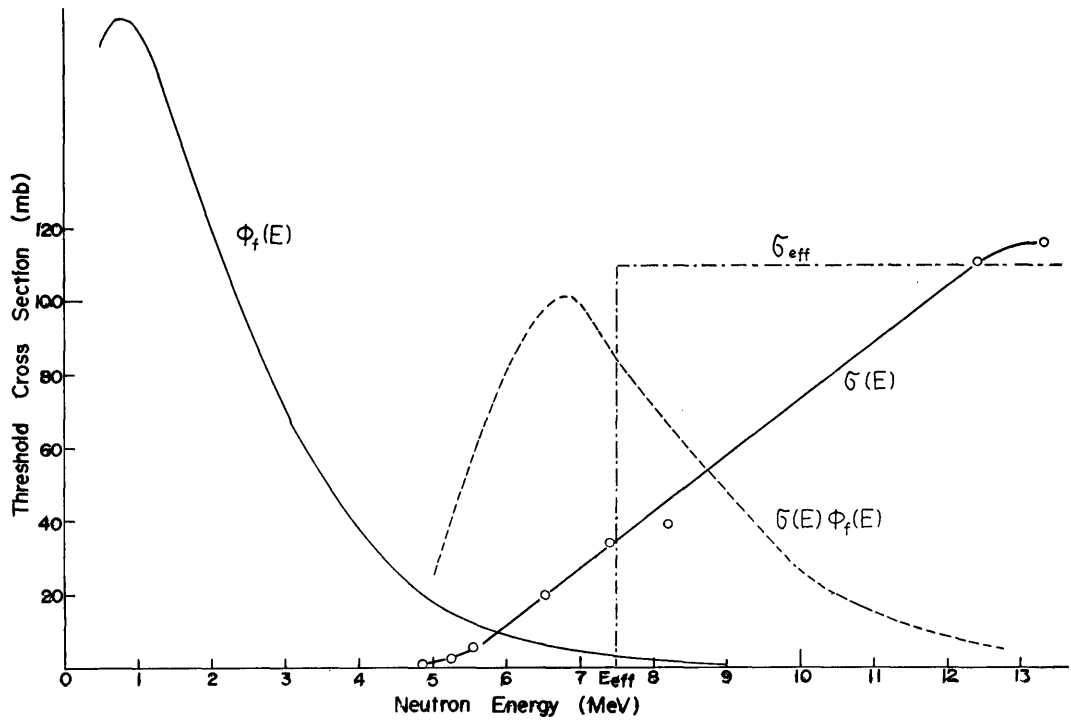


图 1-g  $Fe^{56}(n, p)Mn^{56}$

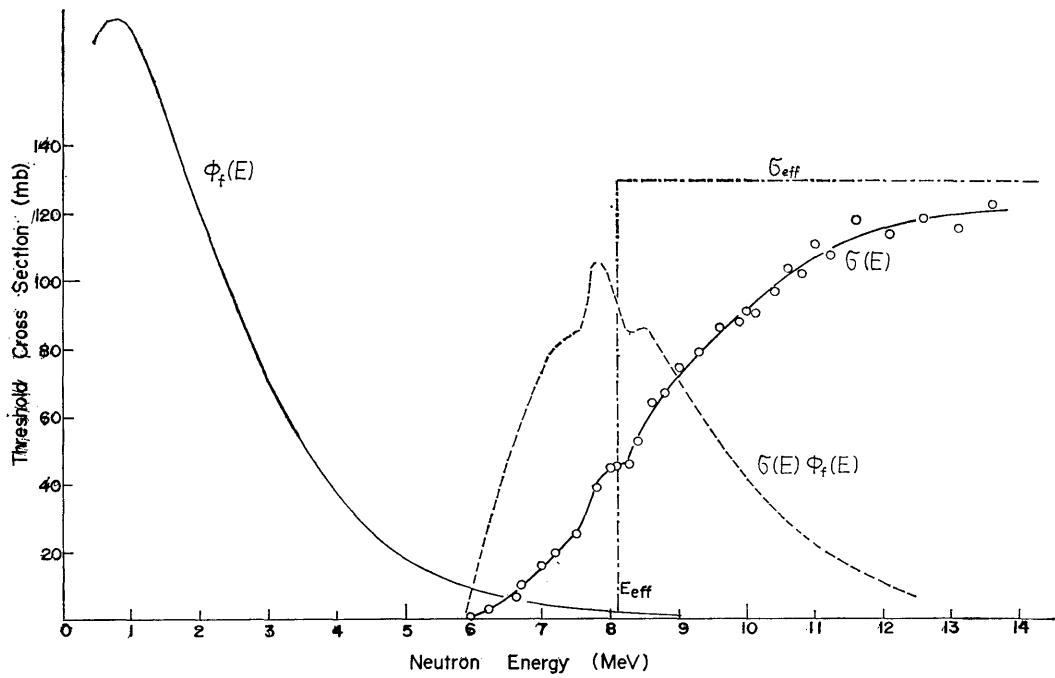


图 1-h  $Al^{27}(n, \alpha)Na^{24}$

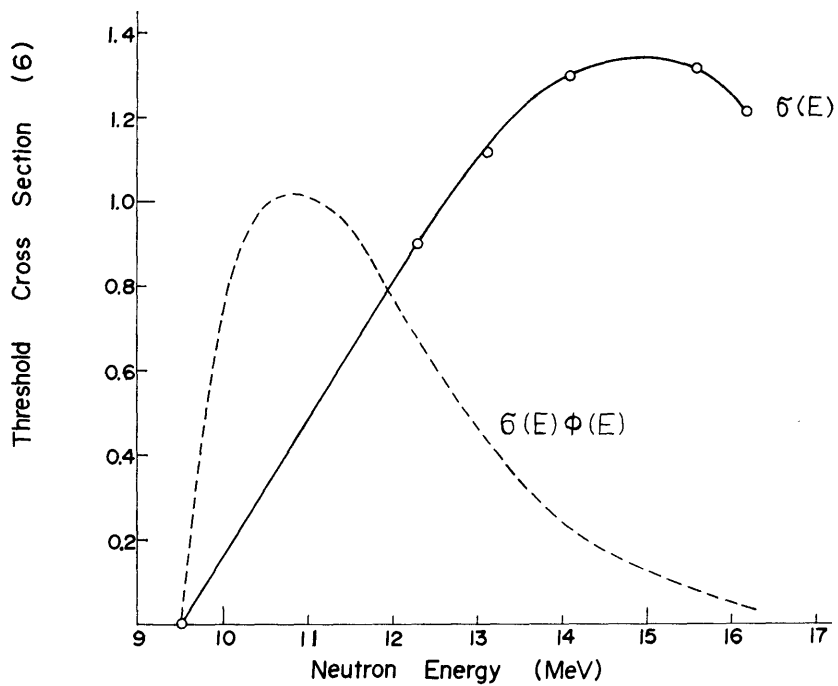


图 1-i  $I^{127}(n, 2n)I^{126}$

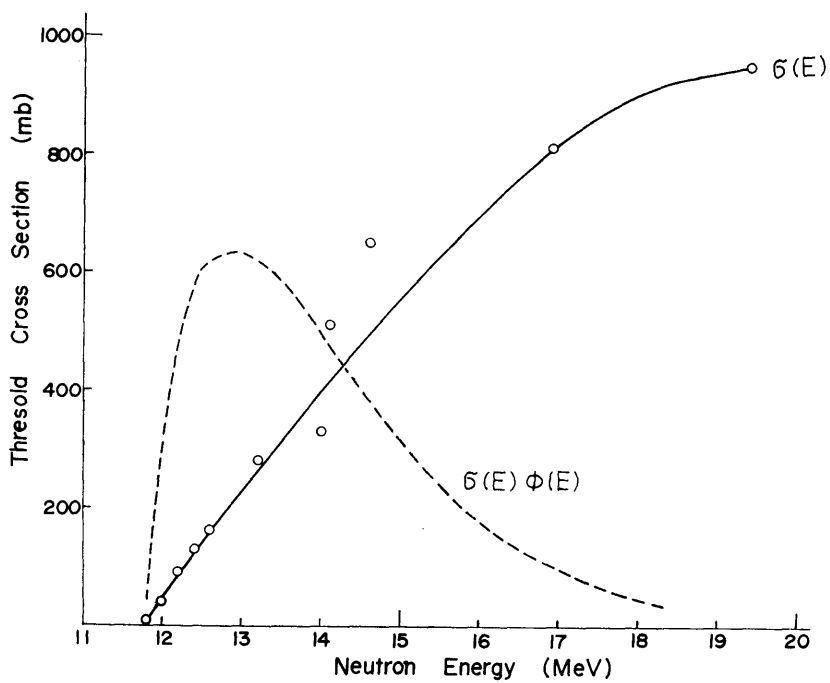
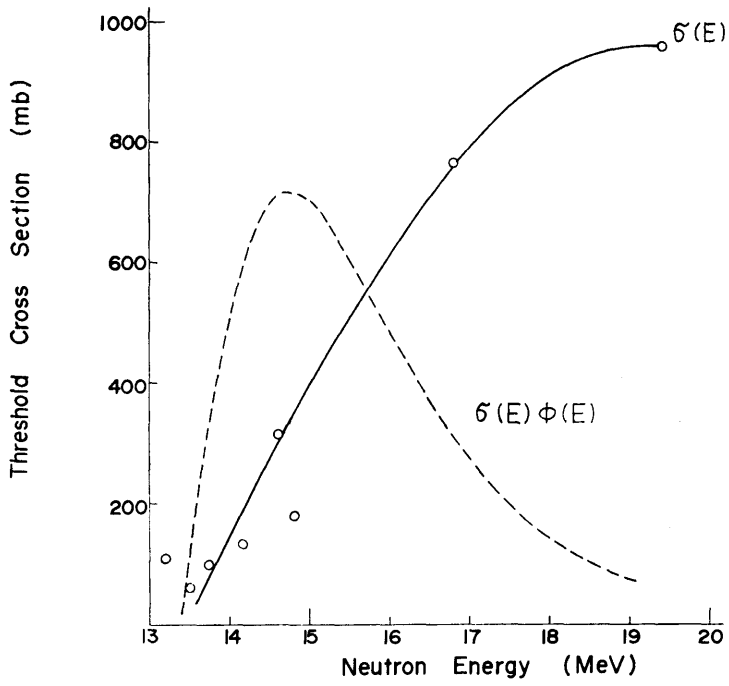
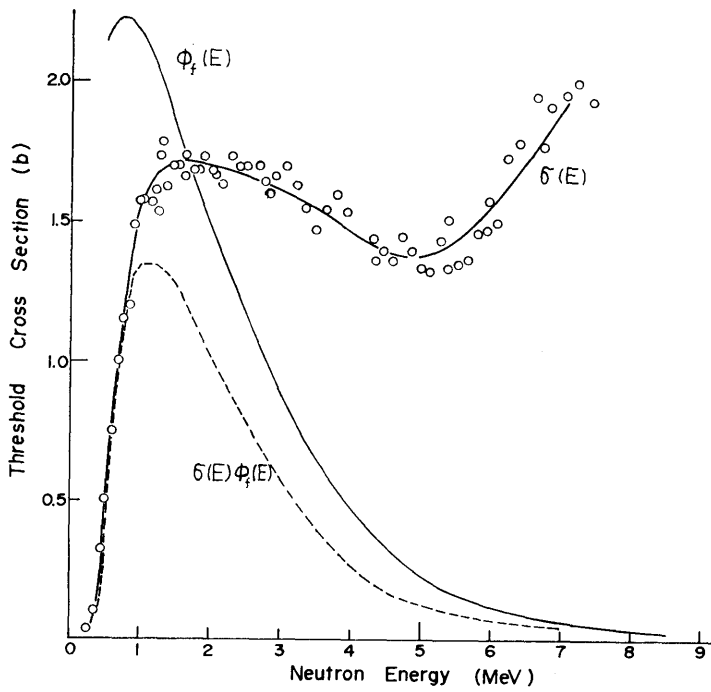


图 1-j  $Cu^{63}(n, 2n)Cu^{62}$



1-k  $\text{Mo}^{92} (n, 2n) \text{Mo}^{91}$



1-1  $\text{Np}^{237} (n, f)$

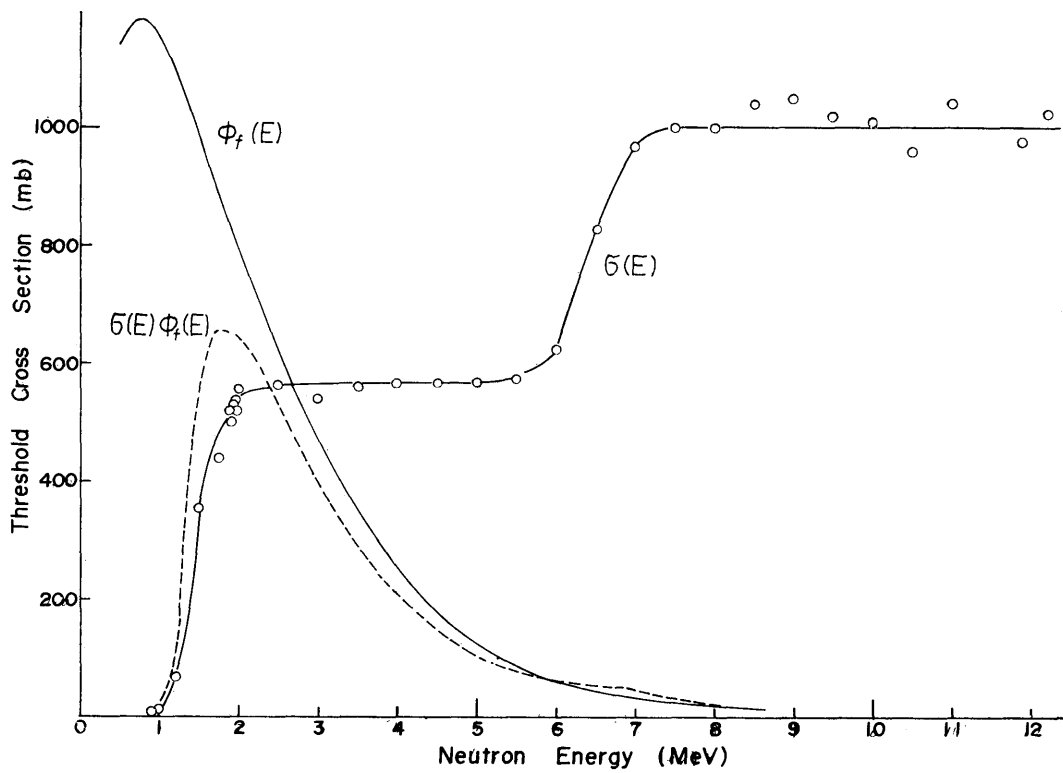


图 1-m  $U^{235}(n, f)$