

<概要>

原子炉物理の理解のための前提条件として原子と原子核についての基本的な知識と、原子核から放出される放射線と物質の相互作用について知ることが必要である。この分野を原子核物理と呼んでいるが、本タイトルは原子核物理の基礎としての「原子核の構造」<03-06-03-01>に始まる一連の内容についてシリーズ形式で記述したものであり、シリーズ物が総合されてサブタイトルの「原子核の物理」編として完結する。

<更新年月>

2006年03月（本データは原則として更新対象外とします。）

<本文>

1. 核分裂反応

たとえば ^{235}U に中性子が吸収されると、複合核 ^{236}U が形成される。低いエネルギーの中性子が吸収された場合、複合核 ^{236}U のうち17%は ^{236}U のまま γ 線を出して基底状態におちるが、残りの83%は核分裂する。ここで低いエネルギーの中性子とは、常温の環境温度（数100 K）と熱平衡にある状態の中性子を意味し、これを熱中性子と呼ぶ。293 K（20℃）に対応する熱中性子のエネルギーは0.0253 eVでその速さは約 $2.2 \times 10^3 \text{ m/s}$ である。

核分裂反応における2つの核への分かれ方は様々であるが（そのため式（1.41）で2つの核を X' 、 X'' と示しているが）たとえば表1の（1）（1.44）のようになる。このとき分かれた2つの原子核（核分裂片という）は高い電荷をもち、かつクーロン力による反発により高スピードで反対方向に運動する。核分裂片は移動経路の近くにある原子と衝突して原子にエネルギーを与え、また周辺の原子から電子を奪って電荷を失い減速されていき、やがて静止する。この核分裂片の運動エネルギーとして核分裂で解放されるエネルギーの約80%が放出され、減速の過程で熱エネルギーに変換される。この静止した核分裂片を核分裂生成物という。核分裂生成物が質量数に対してどのように分布しているかを図1に示す。これを収率曲線という。注目されるのは対称な核分裂は少なく、質量数がおおよそ95と140近くをピークとする2山になっていることである。また核分裂する核種が変わると、上のほうの山はあまり変わらないのに対し、下の山が大きく変わるということである。なお入射中性子のエネルギーが上がると対称核分裂の割合が増す。核分裂の瞬間に約4%のエネルギーが γ 線の形で放出される。これを即発 γ 線という。核分裂生成物は、その質量数の核としてはN/Zの比が大きすぎる（つまり中性子が過剰である）ため、殆どの場合不安定で、何回かの β 壊変を行って安定な核へと移行するが、その際 β 線として約3.5%、それに伴う γ 線として約3.5%のエネルギーを放出する。このエネルギーは様々な核の半減期に相当する時間遅れを持って放出されるので、原子炉は停止後も長期間にわたって発熱する。これを崩壊熱という。この崩壊熱を除くため、原子炉では長期間にわたり冷却を確保する必要がある。崩壊熱の見積もりのためにしばしば次に示すWay-Wignerの式が用いられる。この式は核分裂後10秒から 10^6 秒の範囲で妥当である。ただし、最近の事故解析では数表化された値（たとえば「原子炉崩壊熱とその推奨値」、日本原子力学会（1987））が用いられる。

（1核分裂してから t 秒後に β 線、 γ 線として放出されるエネルギーの割合）
$$= 2.66 t^{-1.2} \text{ (MeV/s)} \quad (1.45)$$

熱中性子に対して ^{235}U は核分裂の際平均2.4個の中性子を放出する。核分裂で放出される中性子数は生成される核分裂片の種類によりかなり異なるが、原子炉物理では非常に多くの核分裂を対象とするので、その平均値（1核分裂当りに発生する平均の中性子数）のみが問題となる。これを通常 ν という記号で表わす。 ν の値は核分裂する核種と、入射中性子エネルギーの両方に依存し、

入射中性子エネルギーとともに増加する。この様子を図2に示す。核分裂に伴って発生する中性子のうちの1個を²³⁵Uに吸収させて次の核分裂反応を起こさせることができれば、核分裂反応を限りなく（燃料のある限り）続けさせることができる。これを核分裂連鎖反応という。

核分裂で発生する中性子のエネルギーは熱中性子に比べてはるかに高く、図3に示すようなエネルギー分布を持って現れる。その平均エネルギー2MeVである。²³⁵Uに対してよく用いられるエネルギー分布を表わす式を次に示す。ここで $\chi(E)dE$ は核分裂中性子が $E \sim E+dE$ のエネルギーに現れる割合を示し、 $\int dE \chi(E) = 1$ に規格化されている。

$$\chi(E)dE = 0.453e^{-1.036E} \sinh(\sqrt{2.29E}) dE \quad (1.46)$$

核分裂中性子の殆どは核分裂が生ずると同時に（ 10^{-14} 秒以内に）放出され、これを即発中性子という。しかし、ごく僅か（1%以内）の中性子がかなりの時間遅れ（数10秒まで）の時間遅れを持って放出される。これを遅発中性子という。遅発中性子はその生成率がきわめて小さいにも拘らず原子炉の制御にとってきわめて重要な役割を占める。

核分裂に伴って放出される粒子とそれによって解放されるエネルギーとをまとめて表2に示す。核分裂生成物の β 壊変に伴って約10MeVもエネルギーが中性微子として放出される。中性微子は原子炉内で殆ど相互作用をしないので、この分のエネルギーは原子炉内で熱に変わることなく外部に失われてしまう。したがって核分裂で発生するエネルギーのうち約5%は原子炉で利用できない。しかし、原子炉では核分裂で発生した約2.5個の中性子のうち次の核分裂連鎖反応に用いられる1個を除く1.5個が原子炉を構成する材料に吸収されて中性子の結合エネルギー（約8MeV）に相当する捕獲 γ 線を放出するので、中性微子に持ち去られるエネルギーにほぼ相当するエネルギーが原子炉に与えられるため、最終的に1核分裂毎に約200MeVのエネルギーが原子炉内で熱として利用できることとなる。これは

$$200(\text{MeV}) \times 1.602 \times 10^{-13}(\text{J/MeV}) = 32.0(\text{pJ}) \quad (1\text{pJ} = 10^{-12}\text{J}) \quad (1.47)$$

のエネルギーに相当する。これを用いると、1Jのエネルギーを得るのに必要な核分裂数は $1(\text{J}) / (32.0\text{pJ}) = 3.12 \times 10^{10}$ 個となる。また1gの²³⁵U（ $= 6.023 \times 10^{23} / 235 = 2.56 \times 10^{21}$ 個）が全て核分裂したとすると

$$2.56 \times 10^{21} \times 32.0 \times 10^{-12} = 8.21 \times 10^{10} \text{J} \approx 1\text{MWD} \quad (1.48)$$

のエネルギーが放出される。1MWDは1MW（ 10^6W ）の出力で原子炉を1日（86400秒）連続運転したときに放出されるエネルギー量で $8.64 \times 10^{10} \text{J}$ である〔 $1\text{WD} = 1(\text{J/s}) \times 3600 \times 24(\text{s}) = 86400(\text{J})$ 〕。

2.核融合

核融合は原理的には通常の水素中に0.015%含まれている重水素（表1の（2））を用いて原子核を融合させてエネルギーを得るものであるが、核の持つクーロン障壁に打ち勝って大規模の核融合反応を起こすには、原子を原子核と電子とがバラバラに存在するプラズマ状態として、イオンを10keV以上に加速する必要がある。現在最も実現の可能性が高いとされるのは表1の（3）式（1.49）によるものである。トリトン（表1の（4））は天然には殆ど存在しない半減期12.26年の水素の同位体であり、これは天然のリチウムからたとえば表1の（5）式（1.50）のような核反応で作る必要がある（核融合炉では炉心を取り巻くブランケットでこれを作ることにしている）。より高温が実現できれば、重水素のみで起こる表1の（6）式（1.51）の反応が利用できる。

<関連タイトル>

- 原子核物理の基礎 (1) 原子核の構造 (03-06-03-01)
- 原子核物理の基礎 (2) 原子核の壊変 (03-06-03-02)
- 原子核物理の基礎 (3) 核反応 (03-06-03-03)
- 原子核物理の基礎 (5) 断面積 (03-06-03-05)
- 原子核物理の基礎 (7) 関連用語一覧 (03-06-03-07)
- 原子核物理の基礎 (6) 放射線と物質の相互作用 (03-06-03-06)

<参考文献>

平川直弘、岩崎智彦：「原子炉物理入門」、東北大学出版会（2003年10月）

表1 数式等一覧表

(1)	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow ({}_{92}^{236}\text{U})^* \rightarrow {}_{56}^{139}\text{Ba} + {}_{36}^{94}\text{Kr} + 3{}_0^1\text{n} \quad (1.44)$
(2)	${}_1^2\text{H}$
(3)	${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n} + 17.58\text{MeV} \quad (1.49)$
(4)	${}_1^3\text{H} \text{ (トリトン)}$
(5)	${}_3^6\text{Li} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^3\text{H} + {}_2^4\text{He} \quad (1.50)$
(6)	${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^3\text{He} + {}_0^1\text{n} + 3.27\text{MeV}$ $\rightarrow {}_1^3\text{H} + {}_0^1\text{n} + 4.04\text{MeV} \quad (1.51)$

表2 ^{235}U の1核分裂あたりに発生するエネルギー

	発生エネルギー (MeV)
核分裂片	168
即発 γ 線	7
即発中性子	5
核分裂生成物からの β 線	7
核分裂生成物からの γ 線	6
中性微子	10
合 計	約200

[出典] J.J.Duderstadt & L.J.Hamilton "Nuclear Reactor Theory" John Wiley & Sons Inc.

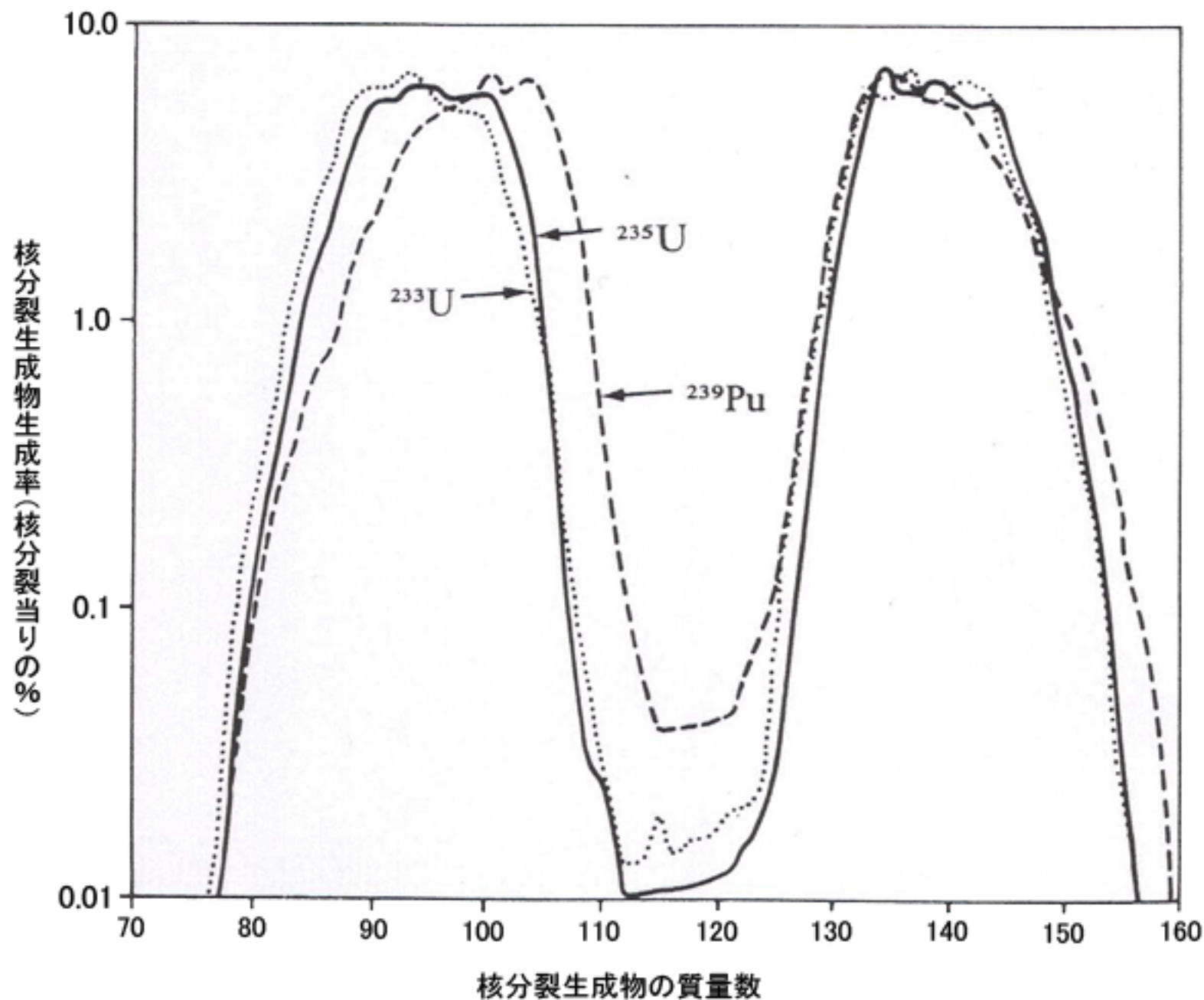


図1 核分裂生成物の質量数分布

[出典]W.マーシャル編:原子炉技術の発展(上)、裳華房、p.72

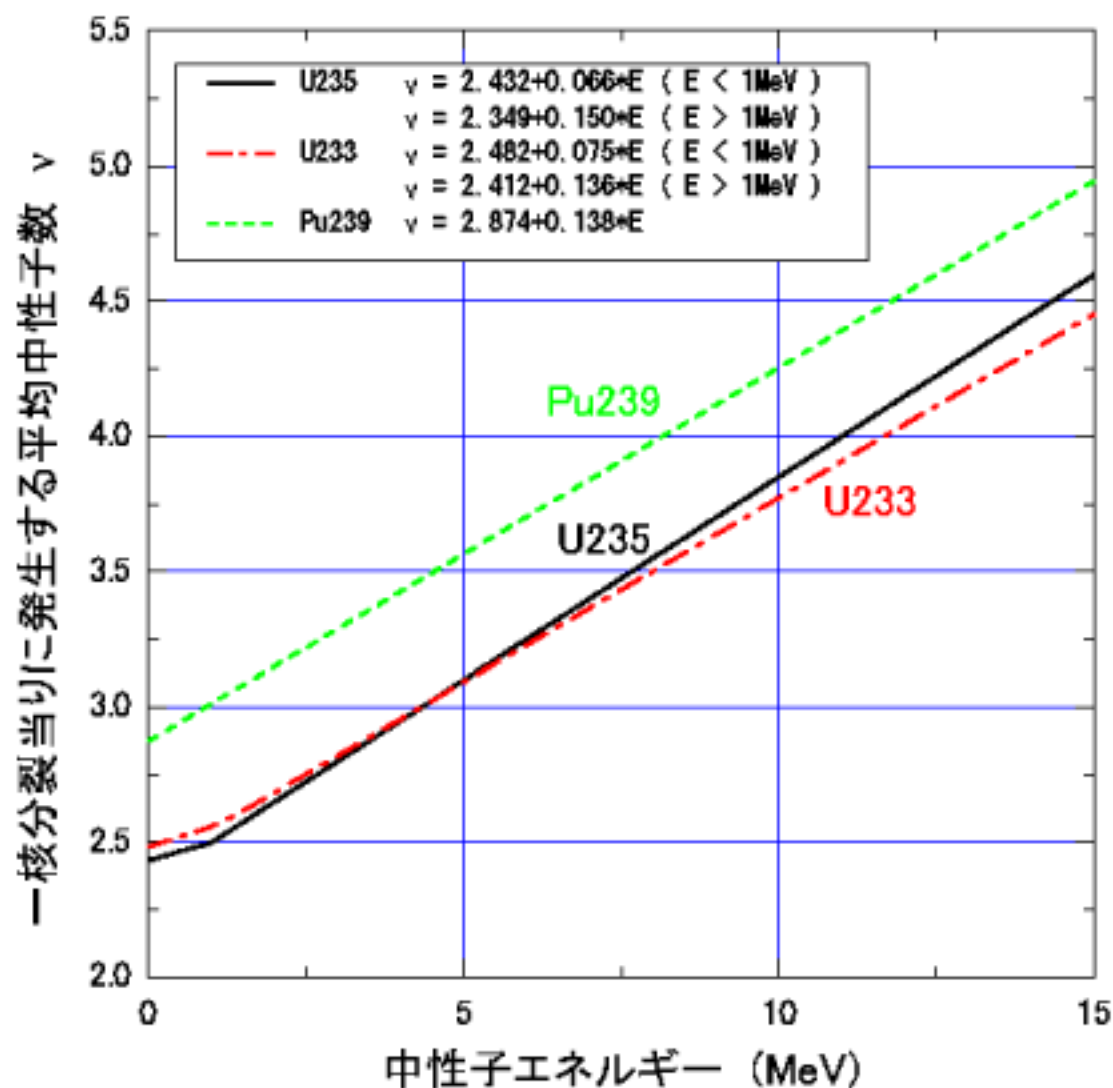


図2 入射中性子エネルギーに対する1核分裂あたりに発生する中性子数 ν の変化

[出典]平川直弘、岩崎智彦:原子炉物理入門、東北大学出版会、p.20

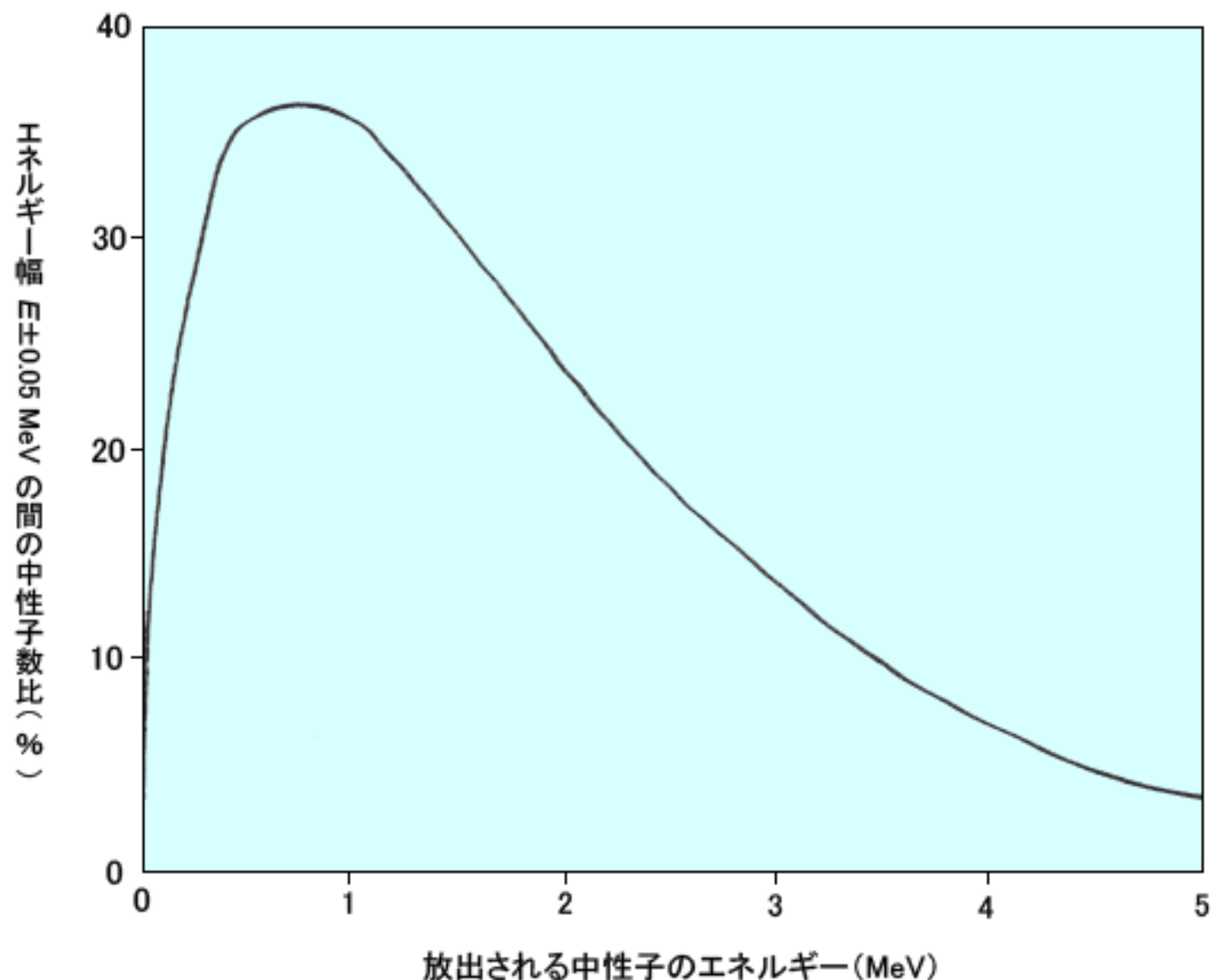


図3 核分裂中性子のエネルギー分布

[出典]W.マーシャル編:原子炉技術の発展(上)、裳華房、p.16