II. 中性子ビーム利用の基礎

1. 中性子の物理 (核反応)[†]

中沢正治

東京大学工学系研究科システム量子工学専攻
113 東京都文京区本郷 7-3-1

Key Words: nuclear reaction, scattering, absorption, resonance,
nuclear data

1. 核反応断面積の定義など

中性子は、陽子とともに原子核の構成粒子であり、核子とも呼ばれている。質量は 1.00866 u ($1.675 \times 10^{-24} \text{ g}$)、電荷 0、スピン $1/2$ 、磁気モーメント $-1.913 \mu_N$ (核磁子) で、核力を通じて原子核と相互作用をする。

一般に核反応物理では、約 10 MeV 以下の核反応は、低エネルギー領域と呼ばれ、大部分は二体反応

と書かれる。ここで、 A は、標的となる原子核、 a は入射粒子、 B は残留核、 b は放出粒子、 Q は反応の発熱量 (Q 値と呼ぶ) であり、これを $A(a, b)B$ と表す。中性子の弾性散乱反応は、 $A(n, n)A$ 、中性子の捕獲反応は、 $A(n, \gamma)B$ となる。

反応の Q 値は、式(1)の両辺の質量エネルギーの差によって与えられ、 Q が正のとき発熱反応、負のとき吸熱反応である。したがって、弾性散乱のときは、 $Q=0$ である。また、 $Q < 0$

のときは、入射粒子 a のエネルギーが重心系で $|Q|$ の値となると、反応が可能となり、この入射エネルギーを反応のしきい値と呼ぶ。

10 MeV 以下の中性子の核反応は、非相対論的な扱いが可能である。中性子エネルギーが 10 MeV のとき $\beta = v/c = 0.1459$ であり、 $1/\sqrt{1-\beta^2} = 1.011$ なので、相対論にすると、10 MeV でも質量やエネルギーは 1 % 程変わるだけである。

核反応を表現する座標系には、図 1 のように実験室系と重心系がある。実験室系とは、標的が静止した座標系であるのに対し、重心系とは、運動量の合計値が零になる座標系である。したがって、重心系では、運動量保存則により、散乱後の二つの粒子は逆方向に動く。通常、中性子エネルギーは、実験室系で与えられているが、理論的な計算結果や弾性散乱後の中性子の放出角分布等は、重心系で与えられる場合が多いので注意が必要である。

中性子は原子核と衝突すると、核力により散乱や吸収などの核反応を起こす。この核反応の起こりやすさを表すのに核反応断面積という量が用いられる。いま、 $A + n \rightarrow B + b$ という反応を図 2 のように考えてみよう。標的は、表面積 $S \text{ cm}^2$ 、体積 $V \text{ cm}^3$ で原子核 A を数密度 $N \text{ cm}^{-3}$ で含んでいるとする。入射中性子ビーム

[†] II. Basics for Neutron Beam Utilization.
1. Neutron Physics (Nuclear Reaction). Masaharu NAKAZAWA: Department of Quantum Engineering and Systems Science, School of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku Tokyo 113, Japan.

図 1 重心系と実験室系における中性子弾性散乱の図

図 2 核反応断面積の説明図

は、ビームに垂直な単位面積を毎秒 ϕ 個通過しているとする。これを、中性子束 $\phi \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ と表す。

このとき、入射ビーム軸に対し、 θ, ϕ という角度方向の微小立体角 $d\Omega$ の中に毎秒到着する粒子 b の数 $R(\theta, \phi)d\Omega$ は、標的試料への入射中性子束と標的原子核の総数 $N \cdot V$ に比例するので、比例係数を $d\sigma(\theta, \phi)$ として次のように書ける。

$$R(\theta, \phi)d\Omega = d\sigma(\theta, \phi)\phi \cdot N \cdot V \quad (2)$$

ここで、比例係数 $d\sigma(\theta, \phi)$ は、 ϕ, N, V によらず、この反応のみによる量とする。 $d\sigma(\theta, \phi)$ は面積の次元をもっており、 $d\sigma(\theta, \phi)/d\Omega$ という量をこの反応の微分断面積と呼ぶ。

式(2)より、微分断面積 $d\sigma(\theta, \phi)/d\Omega$ の物理的意味は、「単位中性子束 $\phi = 1 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ が 1 個の原子核（つまり、 $NV=1$ ）と衝突したとき、 θ, ϕ 方向の立体角 $d\Omega$ 中に粒子 b を放出する確率」となる。

これより、

$$R(\theta, \phi) = N \cdot V \cdot \frac{d\sigma(\theta, \phi)}{d\Omega} \cdot \phi \quad (3)$$

である。

微分断面積を全立体角で積分した量を、この反応の断面積 σ という。つまり

$$\sigma \equiv \int \frac{d\sigma(\theta, \phi)}{d\Omega} d\Omega \quad (4)$$

この断面積 σ は、原子核 A が 1 個だけ、単位中性子束 $1 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ の中に置かれたとき、 $A + n \rightarrow B + b$ の反応が起こる確率に等しい。したがって、核反応断面積 σ の原子核が N_0 個、中性子束 $\phi \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ の場に置かれたとき、該当する核反応の起こる確率 R (個/s) は、式(3)を $d\Omega$ で積分して、次式で与えられる。

$$R = N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \quad (5)$$

具体的な核反応断面積は、反応の形式ごとに、通常次の表記法が用いられている。

弾性散乱断面積	σ_s または $\sigma(n, n)$
非弾性散乱断面積	σ_{inel} または $\sigma(n, n')$
吸収断面積	σ_a
放射化断面積	σ_{act}
(n, γ) 断面積	σ_γ または $\sigma(n, \gamma)$

など。

また、これらの各部分反応断面積を合計した値 $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_{\text{inel}} + \sigma_a + \dots$ を全反応断面積 σ_t と呼ぶ。

この断面積の単位は面積の次元であるが、 $1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 = 1 \text{ b}$ (バーン: barn) の慣用単位で表すことが多い。これは、原子核の半径 R がおよそ、 10^{-12} cm なので、その幾何学的

断面積 πR^2 が大体 10^{-24} cm^2 のオーダーになるからである。

以上の断面積は、原子核 1 個当たりについて定義されたものであるが、原子炉や中性子輸送理論の分野では、物質 1 cm^3 当たりの反応の確率を表すため、マクロ（または巨視）断面積 $\Sigma \equiv N \cdot \sigma$ を用いることがある。ここで N (個/ cm^3) は式(2) および (3) と同じく、原子核数密度である。この Σ の値の逆数は、その物質中において該当する核反応を生ずる点の間の平均距離、つまり平均自由行程 $\lambda = 1/\Sigma$ (cm) となるので、巨視的な中性子の挙動を知る場合に便利である。

また、ここで述べた核反応断面積は原則として、原子核 1 個に対して定義されており、反応率は式(2), (3) のように原子核数に比例する。もちろん、原子核が規則的に複数個配置されたときに生ずる中性子回折などの効果は含まない。

2. 原子核との散乱反応

中性子の原子核による散乱現象は、2 種類に分けられる。一つは弾性散乱であり、もう一つは非弾性散乱である。弾性散乱とは、重心系でいうと、散乱によって方向のみ変えるだけであり、衝突する二つの粒子の速さは、変わらないものをいう。実験室系では、図 1 に記したとおり、入射中性子エネルギー E_n のうち、一部 E_R が標的原子核に与えられる。これを反跳核と呼び、 E_R を反跳エネルギーという。

弾性散乱後の中性子エネルギー $E_{n'}$ は、実験室系で次のように与えられる。

$$\frac{E_{n'}}{E_n} = \frac{1}{2} [(1+\alpha) + (1-\alpha) \cos \theta] \quad (6)$$

なお、 $\alpha = [(A+1)/(A-1)]^2$ で、 A = 標的核質量/中性子質量である。また、 θ は、重心系における中性子の散乱角で、対応する実験室系の中性子の散乱角 θ_0 は、

$$\cos \theta_0 = \frac{A \cos \theta + 1}{\sqrt{A^2 + 2A \cos \theta + 1}} \quad (7)$$

となる。

この弾性散乱の角度分布の例として、鉄の微分散乱断面積を図 3 に示した。高速中性子領域では、前方散乱（散乱後の中性子が前方に偏っている）が多いが、中速中性子から熱中性子領域では、重心系で等方散乱となる。この重心系で等方散乱のとき、実験室系での散乱角 θ_0 の $\cos \theta_0$ の平均値は、

$$\overline{\cos \theta_0} = \frac{2}{3A} \quad (8)$$

となる。質量数 (A) の大きい原子核では、 $2/3A \approx 0$ となるから、実験室系でも等方的な散乱になることがわかる。

また、式(6) のように散乱後の中性子エネルギー $E_{n'}$ は、散乱角 θ_0 によっていろいろ変わるが、散乱角 θ (重心系) が等方として散乱角について平均をとると、

$$\overline{E_{n'}} = \frac{E_n}{2} (1+\alpha) \quad (9)$$

となる。したがって、中性子が 1 回の弾性散乱により失うエネルギーの平均値 $\overline{\Delta E_n}$ 、つまり反跳エネルギーの平均値 $\overline{E_R}$ は

$$\overline{\Delta E_n} = \overline{E_R} = E_n - \overline{E_{n'}} = E_n \frac{1-\alpha}{2} \quad (10)$$

である。

原子炉物理の分野では、エネルギー E のかわりにその自然対数の値、つまり、 $\ln E_0/E$ (ただし $E_0 = 1 \text{ MeV}$ とするのが普通) をレサージ (lethargy) と呼び、1 回の弾性散乱によるレサージの増加量の平均値を ξ と呼ぶ。 ξ は

$$\xi = \ln E_n - \overline{\ln E_{n'}} = \ln \frac{\overline{E_n}}{E_{n'}} = 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \alpha \quad (11)$$

で、重心系等方の場合、1 回の弾性散乱によるレサージの増加値 ξ は、常に一定である。たとえば、2 MeV の高速中性子が熱中性子 (0.025 eV) になるまでに必要な弾性散乱の回数 n は、

$$n = \frac{\ln 2 \text{ MeV} / 0.025 \text{ eV}}{\xi} \quad (12)$$

図 3 鉄による中性子の微分散断面積

で求められる。なお、水素 $A=1$ のとき $\xi=1.0$, $A \gg 1$ のとき $\xi \approx 2/(A+2/3)$ となる。代表的な核種についての A, α, ξ, n を表 1 に示した。

弾性散乱の反応断面積の代表的な値を模式的に図 4 に、また水素についての例を図 5 に示した。図 4 に示したように、熱中性子領域での弾性散乱断面積 σ_{el} は、

$$\sigma_{el} \div 4\pi R^2$$

である。 R は原子核半径である。

また、中速中性子領域では共鳴的な弾性散乱があり、高速エネルギー領域になると、 σ_{el} は πR^2 という幾何学的断面積に近くなるのが一般

的である。

一方、非弾性散乱は、散乱によって標的原子核が励起状態になるもので、

の形で表され、吸熱反応となっている。したがって、入射中性子のエネルギーが Q 以上でないと、この反応は生じない。 Q は原子核内の励起状態のエネルギー値で、おおよそ数十 keV～数 MeV である。つまり、非弾性散乱は中速から高速中性子領域で生じる。

非弾性散乱においては、散乱された原子核の内部エネルギーが増加し、励起状態になっている点に特徴がある。また、10 MeV 程度以上の

表 1 各種材料中での中性子減速拡散パラメータ

	減速パラメータ ξ	散乱回数 n^* (回)	平均自由行程, λ (cm)	
			14 MeV 中性子	熱中性子
水 (H ₂ O)	~0.8	23	11	0.4
重水 (D ₂ O)	~0.5	36	9.4	2.4
ベリリウム	0.21	86	5.4	2.1
グラファイト (C)	0.16	113	6.3	2.8
鉄	0.035	516	4.7	0.8
鉛	0.0096	1 881	5.5	3.4
リチウム (Li)	0.27	67	14	0.3
酸化リチウム (Li ₂ O)	0.175	103	5.2	0.17
Li ₁₇ Pb ₈₃	0.015	1 204	6.3	1.6

* $n=2$ MeV から 0.025 eV になるまでの散乱回数。

図 4 典型的な中性子の散乱断面積

より高いエネルギーの入射中性子になると、A (n, 2n)B のように、2 個の中性子を放出することもある。このような非弾性散乱をした原子核は、いずれにしろ衝突前の状態とは、内部エネルギー状態や核子数が変化している。広い意味での非弾性衝突反応は、衝突後の粒子の内部状態が変化していると定義されることもある。逆に、弾性散乱とは、散乱前後の入射粒子および標的核の内部状態に何の変化もない衝突と定義することができる。

3. 原子核による吸収反応

中性子が、原子核の領域 (10^{-12} cm) を通過する時間は、遅い熱中性子でも 10^{-17} 秒ぐらい

図 5 水素による中性子の弾性散乱断面積

であるが、特定のエネルギーの中性子が入射すると、この1000倍以上も長い時間、原子核の内部に滞在していることがある。これは複合核の共鳴状態と呼ばれ、この共鳴エネルギーで入射した中性子の原子核反応断面積は共鳴的に大きな値を示す。

この複合核状態から中性子を放出し、複合核が反応前の原子核に戻る場合は、共鳴的な弾性散乱と呼ばれ、前項で説明したものである。一方、複合核という中間共鳴準位を経由してから γ 線や α 線を放出する反応が (n, γ) 反応、 (n, α) 反応である。これらの反応断面積の典型的な値を図6に示した。

この複合核を経由する中性子吸収反応は、熱中性子領域で $1/v$ 反応（中性子速度 v の逆数に比例）であり、熱外から中速領域では多数の共鳴反応を示すのが、一般的な特徴である。また、高速領域になるとこの複合核型の連続的な共鳴吸収反応以外に、パチンコ玉の衝突のような形で原子核内から荷電粒子を弾き出す (n, p) 反応や (n, α) 反応等が生じる。これは直接反応型と呼ばれている。

高速領域における弾性散乱の断面積はおおよそ πR^2 になるが、弾性散乱以外の反応（非弾性散乱や吸収反応）も合計で πR^2 程度になり、この両者を加えた全断面積は $2\pi R^2$ になるのが典型的である。 R は核半径で、質量数 A のとき、 $R = r_0 \cdot A^{1/3}$ 、 $r_0 = (1.1 - 1.2) \times 10^{-15} \text{ m}$ で

ある。

中速から熱領域の中性子が原子核に吸収されたとき、ほとんどの原子核では γ 線を放出する (n, γ) 反応が最も起こりやすい。特殊な原子核では荷電粒子が放出される。具体的には、

$${}^3\text{He}(n, p)t, \quad Q=0.764 \text{ MeV}$$

$${}^6\text{Li}(n, \alpha)t, \quad Q=4.80 \text{ MeV}$$

$${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}, \quad Q=2.308 \text{ MeV}({}^7\text{Li}), \\ 2.785 \text{ MeV}({}^7\text{Li})$$

$${}^{235}\text{U}(n, \text{fission}), \quad Q=\text{約 } 200 \text{ MeV}$$

であり、これら核反応は中性子の検出によく利用される。図5にいくつかの断面積を示した。

このとき、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^{10}\text{B}$ はいずれも奇-奇核（中性子数も陽子数も奇数のもの）という特殊な原子核であることを指摘しておく。

4. 中性子の核反応断面積データの入手法

中性子の原子核との散乱、吸収の各反応断面積の詳細な数値データは、いくつかの方法で入手することができる。まず、データブックとしてまとめられたものとして、アメリカのBNL-325レポートがあり^{1), 2)}、最近これは商業出版されている³⁾。この本には多くの測定値が並列的に記入され、グラフもあって便利だが、これらのデータを評価した推奨値が評価済みデータファイルとして、日、米、欧にて作られている。日本のものは、JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library) と呼ばれ、日本

図6 典型的な中性子の吸収断面積

表 2 熱中性子吸収断面積の例 (「アイソトープ手帳」より)

- 1) 断面積の値は、速度2200m/s(エネルギー0.0253eV)の中性子に対する値を示す。
 2) 断面積の単位のうち μmb はmilibarn、 μb はmicrobarnを示す。
 3) 中性子捕獲断面積の欄には(n, γ)反応の値を示す。但し、他の核反応が重要な場合は、反応形式と断面積を示す。

元 素	核 種 (存在度)	全吸収断面積 σ_{abs} (barn)	中 性 子 捕 獲 断 面 積 半減期 σ_{c} (barn)
^1H	^1H (99.985)	0.332	0.332
	^2H (0.015)	0.332	0.332
		0.55 mb	12.33y 0.55 mb
^2He	^3He (1.37×10^{-4})	5330.	(n, p) 54. μb
	^4He (99.999863)	0.0	5330.
			0.0
^3Li	^6Li (7.5)	70.6	44.9 mb
		940.	38.5 mb
	^7Li (92.5)	45.4 mb	(n, α) 940.
			838.ms 45.4 mb
^4Be	^9Be (100.)	7.6 mb	$1.51 \times 10^6\text{y}$ 7.6 mb
^5B	^{10}B (19.9)	764.	0.104
		3840.	0.5
	^{11}B (80.1)	5.08 mb	(n, p) 3. mb
			(n, α) 3840.
			20.20ms 5.08 mb
^6C	^{12}C (98.90)	3.53 mb	$3.50 \pm 0.07\text{ mb}$ (a)
	^{13}C (1.10)		3.53 mb
			$5.730 \times 10^3\text{y}$ $1.37 \pm 0.04\text{ mb}$ (a)
^7N	^{14}N (99.634)	1.84	74.7 mb
		1.84	75. mb
	^{15}N (0.366)	24.3 μb	(n, p) 1.77
			7.13s 24.3 μb
^8O	^{16}O (99.762)	0.19 mb	$0.190 \pm 0.02\text{ mb}$ (a)
	^{17}O (0.038)		0.19 mb
			$0.538 \pm 0.065\text{ mb}$ (a)
	^{18}O (0.200)		(n, α) 0.235 ± 0.010 (a)
			(g)26.91s $0.16 \pm 0.01\text{ mb}$ (a)
^9F	^{19}F (100.)	9.57 mb	11.00s 9.57 mb
^{10}Ne	^{20}Ne (90.48)		$39. \pm 4. \text{ mb}$ (a)
	^{21}Ne (0.27)		$37. \pm 4. \text{ mb}$ (a)
			0.666 ± 0.110 (a)
	^{22}Ne (9.25)		(n, α) < 1.5 (a)
			37.24s $45.5 \pm 6.0\text{ mb}$ (a)
^{11}Na	^{23}Na (100.)	0.531	14.96h 0.531
^{12}Mg	^{24}Mg (78.99)	63. mb	63. mb
	^{25}Mg (10.00)	50.3 mb	50.3 mb
	^{26}Mg (11.01)	0.19	0.19
		38.3 mb	9.458m 38.3 mb
^{13}Al	^{27}Al (100.)	0.231	2.241m 0.231
^{14}Si	^{28}Si (92.23)	0.171	0.171
	^{29}Si (4.67)	0.177	0.177
	^{30}Si (3.10)	0.101	0.101
		0.108	157.3m 0.108

(表 2 続き)

元 素	核 種 (存在度)	全吸収断面積 σ_{abs} (barn)	中 性 子 捕 獲 断 面 積	
			半減期	σ_c (barn)
¹⁵ P	³¹ P (100.)	0.166	14.26d	0.166
¹⁶ S		0.522		0.514
			(n, p)	12.1 μ b
			(n, α)	7.92 mb
	³² S (95.02)	0.535		0.528
			(n, α)	7. mb
	³³ S (0.75)	0.52		0.35
			(n, p)	1.61 mb
			(n, α)	0.169
	³⁴ S (4.21)	0.224	87.51d	0.29 $\pm$ 0.06 (c)
	³⁶ S (0.02)	0.15	5.05m	0.23 $\pm$ 0.02 (c)
¹⁷ Cl		33.5		33.1
			(n, p)	0.371
			(n, α)	60.6 μ b
	³⁵ Cl (75.77)	44.1	3.01 $\times 10^5$ y	43.6
			(n, p)	0.489
			(n, α)	80. μ b
	³⁷ Cl (24.23)	0.433	37.24m	0.433
²³ V	⁵⁰ V (0.250)			5.08 $\pm$ 0.04 (a)
	⁵¹ V (99.750)	4.9	3.743m	~60. $\pm$ 40. (a)
²⁴ Cr		3.07		3.07
	⁵⁰ Cr (4.345)	15.9	27.70d	15.9
	⁵² Cr (83.789)	0.764		0.764
	⁵³ Cr (9.501)	18.2		18.2
	⁵⁴ Cr (2.365)	0.364	3.497m	0.364
²⁵ Mn	⁵⁵ Mn (100.)	13.4	2.579h	13.4
²⁶ Fe		2.56		2.56
	⁵⁴ Fe (5.8)	2.16	2.73y	2.16
	⁵⁶ Fe (91.72)	2.81		2.81
	⁵⁷ Fe (2.2)	2.46		2.46
	⁵⁸ Fe (0.28)	1.3	44.50d	1.3
²⁷ Co	⁵⁹ Co (100.)	37.2	5.271y	37.18 $\pm$ 0.06 (a)
			(m)10.47m	20.4 $\pm$ 0.8 (a)
²⁸ Ni		4.38		4.38
	⁵⁸ Ni (68.077)	4.5	7.6 $\times 10^4$ y	4.5
	⁶⁰ Ni (26.223)	2.9		2.9
	⁶¹ Ni (1.140)	2.51		2.51
	⁶² Ni (3.634)	14.2	100.1y	14.2
	⁶⁴ Ni (0.926)	1.48	2.517h	1.8 $\pm$ 0.1 (c)
²⁹ Cu		3.79		3.79
	⁶³ Cu (69.17)	4.51	12.70h	4.51
	⁶⁵ Cu (30.83)	2.17	5.088m	2.17
⁴⁸ Cd		2530.		2530.
	¹⁰⁶ Cd (1.25)	0.97	6.50h	0.97
	¹⁰⁸ Cd (0.89)	1.09	462.6d	1.09
	¹¹⁰ Cd (12.49)	11.1		11. $\pm$ 1. (a)
			(m)48.54m	0.14 $\pm$ 0.05 (a)
	¹¹¹ Cd (12.80)	23.9		23.9
	¹¹² Cd (24.13)	2.19	9.3 $\times 10^{15}$ y	2.19
			(n, α)	66.3 mb
	¹¹³ Cd (12.22)	20600.		20600.
	¹¹⁴ Cd (28.73)	0.34		0.34 $\pm$ 0.02 (a)
			(g)53.46h	0.30 $\pm$ 0.02 (a)
			(m)44.6d	0.036 $\pm$ 0.007 (a)
				0.075 $\pm$ 0.013 (a)
			(g)2.49h	0.050 $\pm$ 0.008 (a)
	¹¹⁶ Cd (7.49)	74.8 mb	(m)3.36h	0.025 $\pm$ 0.010 (a)

原子力研究所の核データセンターより入手できる⁴⁾。米国では、ENDF/V-6、欧州ではJEF-2などが公開されている。

このJENDLには、熱中性子から高速中性子までの間の何万というエネルギー点での数値データが入っているが、そのままでは使い難いので、簡略化したデータが使われている。たとえば、原子炉や遮蔽の計算には、20群とか100群にまとめた群定数が使われる。

最も簡便なデータブックとして、新しい数値データが採用されているものにアイソトープ手帳がある。熱中性子の断面積についてのデータ例を表2に示した⁵⁾。

文 献

- 1) Mughabghab, S. F., Divadeenam, M. and Holden, N. E.: "Neutron Cross Sections, Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections", Vol. 1 Part A ($z=1-60$), Academic Press (1981)
- 2) Mughabghab, S. F.: "Neutron Cross Sections", Vol. 1 Part B ($z=61-100$), Academic Press (1984)
- 3) McLane, V., Dunford, C. L. and Rose, P. F.: "Neutron Cross Sections", Vol. 2, Neutron Cross Sections Curves, Academic Press (1988)
- 4) "Japanese Evaluated Nuclear Data Library", 日本原子力研究所核データセンター 319-11 茨城県那珂郡東海村 Tel. 029(282)5480 Fax 029(282)6122
- 5) 日本アイソトープ会編 "アイソトープ手帳 (改訂9版)", 日本アイソトープ協会, 東京 (1996)