

11.2.8 総合的な放射線遮蔽の解析法の確立

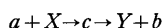
輸送方程式の数値解法の一つである本計算法はこれまでに述べたように中性子遮蔽に対する精度の良い解析法であることが確められた。しかも単に中性子遮蔽の解析法としてだけでなく、中性子遮蔽の設計法としても使用可能であることも確められた。中性子透過問題は原子炉の放射線遮蔽の基本的な問題であるから、

精度のよい中性子透過計算法が確立されたことはこれを基にして精度の高い総合的な放射線遮蔽の解析法を確立することが可能であることを意味する。本研究の最終目標は精度の高い信頼できる総合的な放射線遮蔽の理論的解析法および設計法の確立にある。したがって本研究よりなる中性子遮蔽の解析が、この最終目標を達成するための礎になることを切望する。

付 録

付録 A 複 合 核^{27),88)}

複合核のモデルは、ボーア⁸⁹⁾およびブライトとウィグナー⁹⁰⁾によって考え出された核反応のモデルである。この反応は2段階に起ると考える。第1段階が標的核に入射粒子が吸収されて複合核を作る。複合核の寿命は、入射粒子が原子核の直径だけの距離を通過するのに要する時間 (10^{-17} 秒程度)⁸⁸⁾ に比べて約 10^{-14} 秒と 1000 倍程度長い。次に第2段階として複合核が反応粒子を放出する。すなわち



と書き表わせる。ここで a は入射粒子、 X は標的核、 c は複合核、 Y は残留核、 b は放出粒子である。

複合核は一般に高く励起された状態にある核で、入射粒子 a と標的核 X との重心系における運動エネルギーの和を E_a 、 a の X に対する結合エネルギー (一般に遅い中性子の重い核による捕獲の場合は 8 MeV 程度) を B_a とすると、複合核 c の励起エネルギー E_c ²⁷⁾ は

$$E_c = E_a + B_a$$

である。

次に高く励起された複合核のこわれ方は複合核の出来方には関係しない。これは励起エネルギーの分配の様子が統計的なものだからである。そして励起した複合核のこわれ方により次の3の反応が観測されるのである。

- i) 複合核がその余分のエネルギー (励起エネルギー) をガンマ線の形で放出する反応。これは捕獲ガンマ線を出す反応である。
- ii) 同じく余分のエネルギーを再び中性子の形で放出する反応。これは共鳴散乱現象である。
- iii) 高く励起された複合核が、より低い運動エネルギーの中性子を放出して、あとには励起状態にある核が残る反応。これは非弾性散乱現象である。

上述の i) および ii) の反応は重い標的核に対して遅い中性子のある特定のエネルギーで起る。この理由は複合核の励起準位に関係している。すなわち標的核が遅い中性子を捕獲して励起状態に上る場合、複合核の励起準位に一致しているか近い場合に i) および ii) の反応が起る。これを共鳴吸収という。一方、軽い核の場合は複合核のエネルギー準位の間隔が大きいので、よりエネルギーの高い中性子で共鳴吸収が起るようにな

(384)

る。

共鳴吸収の核断面積はブライト-ウィグナーの一準位公式によって計算される。すなわち⁸⁸⁾

$$\sigma = \frac{A}{\sqrt{E}} \cdot \frac{\Gamma_b}{(E - E_r)^2 + \frac{1}{2}\Gamma^2}$$

である。ここで A は定数、 E はエネルギー、 E_r は共鳴吸収の起るエネルギー、 Γ は準位幅といい、あるエネルギー状態にある複合核が単位時間あたり変化する確率に比例する。また Γ は共鳴吸収の断面積の山の半値幅に相当している。一方、 Γ_b は b という過程によって変化する単位時間あたりの確率を示す尺度である。そして捕獲ガンマ線を放出する時は Γ_b は Γ_γ となり、再び中性子を放出する共鳴散乱の時は Γ_n となる。

以上の過程は入射エネルギーがあり高くない場合の現象であるが、入射エネルギーが充分高くして複合核が準位密度の充分大きい励起状態になる場合は、複合核の可能な崩壊の仕方が非常に多くあるようになる。このような状態では弾性散乱はなくなり非弾性散乱だけが可能になる。このような場合は連続体理論で取り扱われる²⁷⁾。

付録 B 弾性散乱における諸関係式²⁶⁾

実験室系における散乱前後の中性子の速度を \bar{v}' , \bar{v} とし、標的核の質数を M とし、重心系における散乱角を ϑ とすれば次式の関係式がある²⁶⁾。

$$\bar{v}^2 = \left(\frac{\bar{v}'}{M+1} \right)^2 (M^2 + 2M \cos \vartheta + 1) \quad (\text{B-1})$$

また、実験室系における散乱角を θ で表わせば、重心系における散乱角 ϑ との間に次式に示す関係がある²⁶⁾。

$$\cos \theta = \frac{M \cos \vartheta + 1}{\sqrt{M^2 + 2M \cos \vartheta + 1}} \quad \dots \dots (\text{B-2})$$

さらに、散乱前の中性子のエネルギーを E' 、散乱後の中性子のエネルギーを E とすれば (B-1) 式から

$$\frac{E}{E'} = \frac{\frac{1}{2}\bar{v}^2}{\frac{1}{2}\bar{v}'^2} = \frac{M^2 + 2M \cos \vartheta + 1}{(M+1)^2} \quad (\text{B-3})$$

したがって (B-1) 式から

$$\cos \vartheta = \frac{1}{2M} \left\{ (1+M)^2 \frac{E}{E'} - (1+M^2) \right\} \quad (\text{B-4})$$

の関係式を得る。また (B-4) 式を (B-2) 式に代入すれば (B-5) 式の関係式を得る。

$$\cos \theta = \frac{1}{2}(M+1)\sqrt{\frac{E}{E'}} + \frac{1}{2}(1-M)\sqrt{\frac{E'}{E}} \quad \dots(B-5)$$

付録 C ダイヤモンド差分法とステップ近似

Discrete Sn 法では一般にその導出された差分形の式は次式のような形で書き表わせる³⁴⁾。

$$\begin{aligned} & \mu_D(A_{i+1}\Phi_{G,i+1,D} - A_i\Phi_{G,i,D}) \\ & + \frac{1}{4\mu_D}(B_{a+1}\Phi_{G,I,a+1} - B_a\Phi_{G,I,a}) \\ & + V_I \Sigma_{G,I}^T \Phi_{G,I,D} = V_I S_{G,I,D} + \frac{V_I}{2} F_{G,I,D} \end{aligned} \quad \dots(C-1)$$

上式で A_i および V_I はそれぞれ面積要素および体積要素であり、例えば平板形状においては $A_i=1.0$, $V_I=\Delta x_I$ である。また球形状では $A_i=4\pi r_i^2$, $V_I=\frac{4}{3}\pi(r_{i+1}^3-r_i^3)$ であり、さらに円柱形状では $A_i=2\pi r_i$, $V_I=\pi(r_{i+1}^2-r_i^2)$ である。また係数 B は中性子が i メッシュから $i+1$ メッシュに進行するのに従って、その進行方向メッシュから流出およびそのメッシュへ流入する割合を表わす。したがって、平板形状では $B_{a+1}=B_a=0$ であり、球および円柱形状では値を

$$\Phi_{G,i+1,D} = \frac{\left\{ \mu_D A_i - \left(\frac{B_{a+1}}{4\mu_D} + \frac{V_I \Sigma^T}{2} \right) \right\} \Phi_{G,i,D} + \frac{1}{4\mu_D} (B_{a+1} + B_a) \Phi_{G,I,a} + V_I G_{G,I,D}}{\mu_D A_{i+1} + \frac{B_{a+1}}{4\mu_D} + \frac{V_I \Sigma^T}{2}} \quad \dots(C-4)$$

上式で $G_{G,I,D} = S_{G,I,D} + \frac{1}{2} F_{G,I,D}$ である。

(C-4) 式で問題になる点は右辺の分子の第1項に負の項が含まれている点である。速中性子領域で外部線源のない遮蔽体内では内部線源も小さな値なので μ_D が小さな値の時、すなわち 90 度方向に近い進行方向の場合、しばしば負の $\Phi_{G,i+1,D}$ が得られる。この事実を明らかにするためには (C-4) 式を平板形状で書き表わすとよい。すなわち

$$\Phi_{G,i+1,D} = \frac{\left(1 - \frac{\Delta x \Sigma^T}{2\mu_D} \right) \Phi_{G,i,D} + \frac{\Delta x G_{G,I,D}}{\mu_D}}{1 + \frac{\Delta x \Sigma^T}{2\mu_D}} \quad \dots(C-5)$$

を得る。(C-5) 式で $\frac{\Delta x \Sigma^T}{2\mu_D} > 1$ の場合、 $\Phi_{G,i+1,D}$ は負になる恐れがある。もし負の中性子角度束が求められたら、これは明らかに誤りであるので、次に示すステップ近似により再び計算を行なう必要がある。

持つ。 μ_D は D 番目の進行方向角の余弦であり、 Σ^T は全断面積、 S は外部線源、 F は散乱減速にもとづく内部線源を意味する。中性子角度束 Φ の添字は Fig. 4.1 を参照して、 G がグループを表わし、 i は空間上のメッシュ、 d は中性子の進行方向上のメッシュを表わす。また添字の I, D は i および d についてのメッシュの中間点を意味する。Fig. 4.1 からわかるように (C-1) 式は Φ について 5 つの異なった位相空間上の値を含んでいる。これでは未知変数の数が多過ぎるので (C-1) 式を解くことはできない。そこで次に述べるダイヤモンド差分法を導入して未知変数の数を減ずる。

(1) ダイヤモンド差分法

ダイヤモンド差分法は次に示す関係を仮定する。すなわち

$$\Phi_{G,I,D} = \frac{1}{2}(\Phi_{G,i+1,D} + \Phi_{G,i,D}) \quad \dots(C-2)$$

$$= \frac{1}{2}(\Phi_{G,I,a+1} + \Phi_{G,I,a}) \quad \dots(C-3)$$

(C-2) および (C-3) 式の関係を使って (C-1) 式に含まれる $\Phi_{G,I,a+1}$ さらに $\Phi_{G,I,D}$ を消去し、 $\Phi_{G,i+1,D}$ を $\Phi_{G,I,a}$ および $\Phi_{G,i,D}$ から求めるように (C-1) 式を導出すれば次式のように求まる。すなわち、

(2) ステップ近似

ステップ近似は位相空間セル (Fig. 4.1) 内で中性子束は一定であるという仮定にもとづく。すなわち、

$$\Phi_{G,i+1,D} = \Phi_{G,I,D} \quad \mu_D > 0 \quad \dots(C-6)$$

$$\Phi_{G,i,D} = \Phi_{G,I,D} \quad \mu_D < 0 \quad \dots(C-7)$$

および

$$\Phi_{G,I,a+1} = \Phi_{G,I,D} \quad \dots(C-8)$$

である。ステップ近似を (C-1) 式に適用すれば

$$\Phi_{G,i+1,D} = \frac{\mu_D A_i \Phi_{G,i,D} + \frac{B_a}{4\mu_D} \Phi_{G,I,a} + V_I G_{G,I,D}}{\mu_D A_{i+1} + \frac{B_{a+1}}{4\mu_D} + V_I \Sigma^T} \quad \dots(C-9)$$

となり常に正の $\Phi_{G,i+1,D}$ が得られる。その代りに位相空間セル内で線束は一定であるという仮定にもとづいているので、遮蔽体内における中性子束の挙動を表わすには最も不向きな近似である。

付録 D 微分散乱断面積の取り扱い

文献 (2) を参照して

$$\begin{aligned} \sigma(\bar{Q}' \rightarrow \bar{Q}, E' \rightarrow E) dE d\bar{Q} \\ = \sigma_S(\theta) \delta(\cos \theta - \alpha) \frac{d\alpha}{dE} dE d\bar{Q} \quad \dots(D-1) \end{aligned}$$

ここで $\theta = \cos^{-1}(\bar{Q}' \cdot \bar{Q})$ は実験室系における散乱角でエネルギー E と標的核の質量数 M に対し次の関係式がある (B-5)。

$$\cos \theta = \frac{M+1}{2} \sqrt{\frac{E}{E'}} - \frac{M-1}{2} \sqrt{\frac{E'}{E}} \equiv \alpha \quad \dots(D-2)$$

いま重心系における散乱角を ϑ で表わすと、実験室系と重心系の両系における σ_S は次式の関係式で表わせる。

$$\sigma_S(\theta) d\alpha = \sigma_S(\vartheta) d\mu \quad \dots(D-3)$$

ここで $\mu = \cos \vartheta$ である。

したがって

$$\begin{aligned} \sigma_S(\bar{Q}' \rightarrow \bar{Q}, E' \rightarrow E) &= \sigma_S(\vartheta) \frac{d\mu}{d\alpha} \delta(\cos \theta - \alpha) \frac{d\alpha}{dE} \\ &= \sigma_S(\vartheta) \delta(\cos \theta - \alpha) \frac{d\mu}{dE} \quad (D-4) \end{aligned}$$

また μ と E との関係は次式で表わされる (B-4)。

$$\mu = 1 - \frac{(M+1)^2}{2M} \left(1 - \frac{E}{E'}\right) \quad \dots(D-5)$$

上式から $\frac{d\mu}{dE} = \frac{(M+1)^2}{2ME'}$ であるから

$$\sigma(\bar{Q}' \rightarrow \bar{Q}, E' \rightarrow E) = \sigma_S(\vartheta) \delta(\cos \theta - \alpha) \frac{(M+1)^2}{2ME'} \quad \dots(D-6)$$

いま $\sigma_S(\vartheta)$ を散乱角度分布関数 $f(E, \mu)$ を用いて表わすと

$$\sigma_S(E', \vartheta) = \sigma_S(E') f(E', \mu) \quad \dots(D-7)$$

のように書き表わせる。

上式で散乱角度分布関数 $f(E, \mu)$ は次のように規格化される。すなわち、

$$2\pi \int_{-1}^1 f(E', \mu) d\mu = 1 \quad \dots(D-8)$$

したがって (D-4) 式は次のように書き表わすことができる。

$$\begin{aligned} \sigma(\bar{Q}' \rightarrow \bar{Q}, E' \rightarrow E) \\ = \sigma_S(E') f(E', \mu) \delta(\cos \theta - \alpha) \frac{(M+1)^2}{2ME'} \quad \dots(D-9) \end{aligned}$$

(386)

付録 E 角度分点の選び方

角度分点 Ω_{pq} の例およびガウス求積法の積分点とその重みについて。

(1) 角度分点 $\Omega_{pq}(\omega_p, \phi_{pq})$ の選び方とその重みについて $p=1 \sim 6$ ($-1 < \omega_p < 1$), $q=1 \sim 6$ ($0 < \phi_{pq} < \pi$) の場合の例⁶⁰⁾

ω_p	重み
0.93247	0.17132
0.66121	0.36072
0.23862	0.46791
-0.23862	0.46791
-0.66121	0.36072
-0.93247	0.17132
ϕ_{pq} (ラジアン)	重み
$\phi_{11}=0.7854$	$\pi/2$
$\phi_{12}=2.3562$	$\pi/2$
$\phi_{21}=0.3927$	$\pi/4$
$\phi_{22}=1.1781$	$\pi/4$
$\phi_{23}=1.9635$	$\pi/4$
$\phi_{24}=2.7489$	$\pi/4$
$\phi_{31}=0.2618$	$\pi/6$
$\phi_{32}=0.7854$	$\pi/6$
$\phi_{33}=1.3090$	$\pi/6$
$\phi_{34}=1.8326$	$\pi/6$
$\phi_{35}=2.3562$	$\pi/6$
$\phi_{36}=2.8798$	$\pi/6$

したがって Ω_{pq} に対する重みは次のように決まる。

Ω_{pq}	重み
Ω_{11}, Ω_{12}	0.26912
$\Omega_{21}, \Omega_{22}, \Omega_{23}, \Omega_{24}$	0.28334
$\Omega_{31}, \Omega_{32}, \dots, \Omega_{36}$	0.24500
$\Omega_{41}, \Omega_{42}, \dots, \Omega_{46}$	0.24500
$\Omega_{51}, \Omega_{52}, \Omega_{53}, \Omega_{54}$	0.28334
Ω_{61}, Ω_{62}	0.26912

(2) ガウス求積法における積分点およびその重み

$$\int_{-1}^{+1} f(x) dx \approx \sum_{i=1}^n W_i f(x_i)$$

積分点 $\pm x_i$	重み W_i
$n=14^{91)}$	
0.9862838	0.0351195
0.9284349	0.0801581
0.8272013	0.1215186
0.6872929	0.1572032

0.5152486	0.1855384
0.3191124	0.2051985
0.1080549	0.2152639
$n = 16^{(2)}$	
0.9894009	0.0271525
0.9445750	0.0622535
0.8656312	0.0951585
0.7554044	0.1246290
0.6178762	0.1495960
0.4580168	0.1691565
0.2816036	0.1826034
0.0950125	0.1894506
$n = 20^{(2)}$	
0.9931286	0.0176140
0.9639719	0.0406014
0.9122344	0.0626720
0.8391170	0.0832767
0.7463319	0.1019301
0.6360537	0.1181945
0.5108670	0.1316886
0.3737061	0.1420961
0.2277858	0.1491730
0.0765265	0.1527534

【引用文献】

- 1) E. P. Blizard, L. S. Abbott; Reactor Handbook (2nd ed.) Vol. III Part B, Shielding, Interscience Publishers, New York, (1962)
- 2) H. Goldstein; Fundamental Aspects of Reactor Shielding, Addison-Wesley Pub. Co. Inc. Reading, Ma. (1959)
- 3) D. L. Broder et al.; Atomnaja Energija 12, 129 (1962)
- 4) A. P. Veselkin et al.; Problems of Dosimetry and Radiation Shielding, Moscow (1966)
- 5) R. D. Albert and T. A. Welton; A Simplified Theory of Neutron Attenuation and Its Application to Reactor Shielding Design, WAPD-15 (Del.) (1950)
- 6) G. T. Chapman and C. L. Storrs; Effective Neutron Removal Cross Sections for Shielding, ORNL-1843 (1955)
- 7) A. F. Avery et al.; Methods of Calculation for Use in the Design of Shields for Power Reactors, AERE-R-3216 (1960)
- 8) R. G. Jaeger et al.; Engineering Compendium on Radiation Shielding Vol. I Shielding Fundamentals and Methods, Springer-Verlag, Berlin (1968)
- 9) J. Butler; The Status of Theoretical Methods for Reactor Shield Design, AEEW-R-361 (1964)
- 10) E. G. Peterson; MAC-A Bulk Shielding Code, HW-73381 (1962)
- 11) U. Canali et al.; MAC-RAD, A Reactor Shielding Code, EUR-2152e (1964)
- 12) L. Hjarne and M. Leimdorfer'; A Method for Predicting the Penetration and Slowing Down of Neutrons in Reactor Shields, Nucl. Sci. Eng. 24, 165 (1966)
- 13) K. Shure; P-3 Multigroup Calculation of Neutron Attenuation, Nucl. Sci. Eng. 19, 310 (1964)
- 14) B. G. Bennett and H. L. Beck; Legendre, Tschebyscheff, and Half-Range Legendre Polynomial Solutions of the Gamma Ray Transport Equation in Infinite Homogeneous and Two Media Plane Geometry, HASL-185 (1967)
- 15) H. Kahn; Random Sampling (Monte Carlo) Techniques in Neutron Attenuation Problems-I and II, Nucleonics 6 (5), 27 and 6 (6), 60 (1950)
- 16) E. D. Cahwell and C. J. Everett; A Practical Manual on the Monte Carlo Method for Random Walk Problems, Pergamon, New York (1959)
- 17) D. C. Irving et al.; 05R, A General-Purpose Monte Carlo Neutron Transport Code, ORNL-(1965)
- 18) J. Certaine; A Solution of the Neutron Transport Equation Part I, NYO-3081 (1954); Part II, NDA-UNIVAC Moments Calculation, NYO-6268 (1955); Part III, Reconstruction of a Function from Its Moments, NYO-6270 (1956)
- 19) P. Soran and H. Goldstein; Reconstruction of Neutron Spatial Distributions from Spatial Moments, Trans. Am. Nucl. Soc. Vol. 13 No. 1 405 (1970)
- 20) V. A. Ambarzumian; Diffusion of Light by Planetary Atmospheres, Astron. Zh. 19, 30 (1942)
- 21) D. R. Mathews et al.; Deep Penetration of Radiation by the Method of Invariant Imbedding, Nucl. Sci. Eng. 27, 263, (1967)
- 22) J. O. Mingle; Applications of the Invariant Imbedding Method to Monoenergetic Neutron Transport Theory in Slab Geometry, Nucl. Sci. Eng. 28, 177 (1967)
- 23) 小松一郎, 他; 動燃報告書 J 201 の 70-3~70-6 (1970)
- 24) P. N. Stevens and D. K. Trubey; Weapons Radiation Shielding Handbook, DASA-1892-3 (1968)
- 25) J. C. Zink and J. W. Lucey; Neutron Transport in Two-Dimensional Slabs by Invariant Imbedding, Trans. Am. Nucl. Soc. Vol. 13 No. 2 855 (1970)

- 26) M. Clark, Jr. and K. F. Hansen; Numerical Methods of Reactor Analysis, Academic Press, New York (1964)
- 27) 野中至; 核物理学, 培風館 (1956)
- 28) D. J. Hughes; Neutron Cross Sections, Pergamon Press, London, (1957); 西野治訳, 中性子断面積, 産業図書 (1966)
- 29) E. Amaldi; The Production and Slowing Down of Neutrons, Handbuch der Physik Vol. XXXVIII/2, Springer-Verlag, Berlin (1959)
- 30) W. Hauser and H. Feshbach; Phys. Rev., 87, 366 (1952)
- 31) P. A. Moldauer; Statistical Theory of Nuclear Collision Cross Sections, 135 B642, (1964)
- 32) P. A. Moldauer; Rev. Modern Phys., 36, 1079 (1964)
- 33) 丸山倫夫; 終状態が連続な領域での高速中性子の非弾性散乱, 高速中性子断面積研究会報告 JAERI 1102 (1966)
- 34) B. Davison and J. B. Sykes; Neutron Transport Theory, Oxford Univ. Press, New York (1958)
- 35) K. M. Case and P. F. Zweifel; Linear Transport Theory, Addison-Wesley, Reading, Mass. (1967)
- 36) SIAM-AMS Proceedings Volume I, Transport Theory, AMS Providence, Rhode Island (1969)
- 37) 鶴岡正二, 西原宏; 中性子輸送方程式の数学的理論の現状と問題, 日本原子力学会誌 Vol. 13 No. 2 (1971)
- 38) 片岡巖; γ 線平板多重層遮蔽の解析法の研究, 船研報告 第3巻 第4号 (1966)
- 39) A. M. Weinberg and E. P. Wigner; The Physical Theory of Neutron Chain Reactor, Univ. of Chicago Press, Chicago (1958)
- 40) R. Gast; On the Equivalence of the Spherical Harmonics Method and the Discrete Ordinate Method using Gauss Quadrature for the Boltzmann Equation, WAPD-TM-118 (1958)
- 41) G. C. Wick; Zeits. fur Physik, Vol. 121, 702 (1943)
- 42) S. Chandraseker; Radiative Transfer, Oxford Univ. Press, London (1950)
- 43) B. G. Carlson; Solution of the Transport Equation by the Sn Method, LA-1891 (1955)
- 44) C. E. Lee; The Discrete Sn Approximation to Transport Theory, LA-2595 (1962)
- 45) B. G. Carlson; Numerical Formulation and Solution of Neutron Transport Problems, LA-2996 (1964)
- 46) W. W. Engle, Jr.; A Users Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering, K-1693 (1967)
- 47) F. R. Mynatt; A User's Manual for DOT, A Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering, K-1694 (1968)
- 48) S. Preiser, G. Rabinowitz, and E. de Dufor; A Program for the Numerical Integration of the Boltzmann Transport Equation-NIOBE, ARL Technical Report 60-314 (1960)
- 49) 片岡巖, 竹内清; 球対称形状におけるガンマ線輸送方程式の直接積分コード 06 NIOBE-G について, 船研報告 第2巻 第6号 (1965)
- 50) J. Certaine, J. Brooks; Addition of Inelastic Scattering to the Univac Moment Calculations, NDA 2015-92 (1956)
- 51) K. Takeuchi and I. Kataoka; A Method for the Numerical Integration of the Neutron Transport Equation in Slab Geometry, J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 3 No. 5 (1966)
- 52) 竹内清, 片岡巖; ボルツマン輸送方程式の数値積分による中性子平板問題の解析, 船研報告 第3巻 第5号 (1966)
- 53) A. D. Krumbein; Summary of NDA Unclassified Results of Moments Calculations for the Penetration of Neutrons through Various Materials, NDA-92-2 (Rev), (1957)
- 54) R. D. Ritchmyer; A Numerical Method for the Time-Dependent Transport Equation, NYO-7696 (1957)
- 55) K. Takeuchi; A Numerical Method for the Neutron Transport Equation in Finite Cylindrical Geometry, J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 6 No. 8 (1969)
- 56) 竹内清; 円柱形状遮蔽体に対する中性子輸送方程式の数値解法, 船研報告 第6巻 第3号 (1969)
- 57) K. Takeuchi; Numerical Solution to Space-Angle Energy-Dependent Neutron Integral Transport Equation, J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 8 No. 3 (1971)
- 58) K. Takeuchi and I. Kataok; Discrete Ordinates Numerical Integration Method for Neutron Transport Equation in Slab Geometry, J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 5 No. 7 (1968)
- 59) 竹内清, 片岡巖; Discrete Ordinates 直接数値積分解法による中性子平板問題の解析, 船研報告 第6巻 第2号 (1969)
- 60) 竹内清; 有限円柱形状遮蔽体に対する中性子計算コード PALLAS, 船研報告 第7巻 第5号 (1970)
- 61) 竹内清; 船舶技術研究所で開発された電子計算機プログラムの概要, 船研報告 第8巻 第6号
- 62) K. Takeuchi; The MENE Neutron Transport Code, Papers of Ship Research Institute, No. 29 (1968)
- 63) K. Takeuchi; MENE-2, An R-Z Discrete Ordinate Neutron Transport Code, The Penn. State. Univ. Nuc E 35 (1968)
- 64) T. Rockwell, III.; Reactor Shielding Design Manual (1956), McGraw-Hill Co. Inc., New York

- 65) A. Tsuruo; Unscattered Flux from Spherical and Cylindrical Sources with Shell-Shaped Shields, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2 [7], 261 (1965)
- 66) H. Ōno and A. Tsuruo; An Approximate Calculation Method of Flux for Spherical and Cylindrical Sources with a Slab Shield, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2 [6], 229 (1965)
- 67) V. V. Verbinski, et al.; Measurements and Calculations of the Spectral and Spatial Details of the Fast-Neutron Flux in Water Shields, *Nucl. Sci. Eng.* 27, 283 (1967)
- 68) L. Harris, Jr.; Measurement of Fast Neutron Spectra in Water and Graphite, Technical Report, Univ. of Michigan, 07786-1-T (1967)
- 69) B. E. Watt; Energy Spectrum of Neutrons from Thermal Fission of U^{235} , *Phys. Rev.*, 87, 1037 (1952)
- 70) E. L. Slaggie and J. T. Reynolds; O^{16} Fast Neutron Cross Sections and Legendre Moments Below 15.0 MeV, KAPL-M-6452, (1965)
- 71) D. J. Hughes and R. B. Schwartz; Neutron Cross Sections, BNL-325, 2nd ed. (1958)
- 72) D. B. Fossan et al.; Neutron Total Cross Sections of Be, B^{10} , B, C and O, *Phys. Rev.*, 123, 209 (1961)
- 73) A. E. Profio, et al.; The Neutron Spectrum from a Fission Source in Graphite, *Nucl. Sci. Eng.* 35, 91 (1969)
- 74) E. L. Slaggie and J. T. Reynolds; C-12 Fast Neutron Cross Sections and Legendre Moments Below 15 MeV, KAPL-3099 (1966)
- 75) P. F. Yergin et al.; MeV Total Cross Sections with the Rensselaer LINAC, Proc. Conf. Neutron Cross Section Technology, Washington, D. C., (1966)
- 76) A. F. Avery, et al.; Comparison of Spectra Calculated by Discrete Ordinate Methods With Time-of-Flight Measurements in Polythene, Graphite and Sodium, AERE-R 5773, (1968)
- 77) D. B. Gayther et al.; Neutron Energy Spectra and Angular Distributions From Targets Bombarded by 45 MeV Electrons, *J. Nucl. Energy* Vol. 21, 733 (1967)
- 78) M. C. Bertin, et al.; Neutron Cross Sections of U^{238} , U^{235} , U^{237} , U^{239} , U^{234} , U^{236} , Pu^{239} , Pu^{240} , W, Pb, Ni, Cr, C, Li^6 , Li^7 , and T, UNC-5099 (1964)
- 79) H. Goldstein; Neutron Cross Sections for Neutron Attenuation Problems Proposed by the ANS Shielding Division, TID-21294, (1963)
- 80) 布施卓嘉, 三浦俊正, 山路昭雄; Private Communication
- 81) A. M. Bresesti, et al.; Threshold Reaction Exitation Functions Intercalibrated in a Pure Fission Spectrum, *Nucl. Sci. Technol.* 40, (1970)
- 82) H. Liskien and A. Paulsen; Compilation of Cross Sections for Some Neutron Induced Threshold Reactions, EUR 119.e (1961)
- 83) 布施卓嘉; しきい反応法による中性子の測定, 船研報告 第1巻 第1号 (1964)
- 84) 竹内清; 中性子直円筒ダクト問題に対する積分型輸送方程式の数値解法, 昭和44年原子力学会炉物理・学分会予稿集 D 4
- 85) W. W. Engle; A User's Manual for ASOP, ANISN Shield optimization program, CTC-INF-941 (1969)
- 86) 金井康二, 片岡巖; 球状遮蔽体の最適化に関する理論的研究 II ダイナミックプログラミングによる数値解法, 昭和45年原子力学会予稿集 A 2
- 87) 金井康二, 伊藤泰義, 片岡巖; 遮蔽体の最適化に関する理論的研究——最適配列について——昭和46年原子力学会年会 C 52
- 88) S. Glasstone and M. C. Edlund; The Elements of Nuclear Reactor Theory, D. Van Nostrand Co. Inc., New York (1952); 伏見康治, 大塚益比古訳, 原子炉の理論, みすず書房 (1961)
- 89) N. Bohr; *Nature*, 137, 344 (1936)
- 90) G. Breit and E. P. Wigner; *Phys. Rev.* 49, 519 (1936)
- 91) A. N. Lowan, et al.; Table of the Zeros of the Legendre Polynomials of Order 1-16 and the Weight Coefficients for Gauss' Mechanical Quadrature Formula, *Bulletin of the AMS* Vol. 48, No. 10 PP. 739~743 (1943)
- 92) P. Davis and P. Rabinowitz; Abscissas and Weights for Gaussian Quadratures of High Order, *Journal of NBS* Vol. 56, No.1 (1956)

謝 辞

本研究は船舶技術研究所における船用炉の遮蔽の理論的研究の一部として行なったものである。研究遂行にあたり、ご助言、ご激励をいただいた中田原子力船部長、ならびに佐藤前原子力船部長（現、造船研究協会）、また本研究の全般にわたりご指導をいただいた片岡前遮蔽構造研究室長（現、三菱原子力工業）に篤く感謝致します。また鉄—水多重層の実験データを提出して下さった布施東海支所長並びに三浦、山路両技官に感謝の意を表します。

本研究のまとめに際して懇篤なるご助言とご指導をいただいた京都大学兵藤知典教授に篤い感謝の意を表します。