

は著しい改善が見られ実験値との一致は満足すべきものである。これら3つの計算を通じて輸送コードによるストリーミング計算では角度分点数のみならず、体系表示にも十分留意すべきであることが理解される。

植木は実験 2.7の90° 屈曲ダクトに対しモンテカルロコードMORSE を用いて計算手法の評価を行っている。⁽³⁾ すなわち炉心から測定点までの計算を直接1回の計算で行う方法とつなぎ計算法 (Monte Carlo Coupling Technique) を比較し後者の方法を用いると計算結果に著しい改善が見られることを示している。つなぎ計算法を用いた場合、計算値と実験値はしきい検出器でファクター2、カドミウム被覆をした金箔の場合でファクター3以内の一致を示す。通常のモンテカルロ法を用いた計算でこの程度の精度が得られたことは評価されてよいであろう。今後はさらに熱中性子領域までの計算が行われることが期待される。

以上4つの計算例を示したが、いずれも3次元形状を表現できるコードを用いているだけに計算時間がかかりエネルギー領域的に見ると十分に解析計算が行われたとはいえない。この点は今後に残された問題であるが、3次元コードは複雑形状遮蔽の解析にとって極めて有用なことはいうまでもなく今後の発展が大いに期待されることである。

第4章 円環ダクト漏洩中性子挙動の分析

4.1 経験式の導出

すでに第1章の緒言で示したように円環ダクトに関する少なからぬ実験がなされてきたが系統的な実験を行った例は少い。このうちPrice等はバライトコンクリート中を貫通する壁材が鋼の円環ダクト内の熱中性子束分布を空隙巾を変化させながら測定し、その結果から熱中性子束分布を表わす一つの経験式を導出した。⁽⁴⁾しかしながら彼らは円環ダクトを円筒ダクトと同じ方法で取り扱うことを考えたため、各空隙巾に対する分布を空隙面積の平方根に比例する量すなわち $(R^2 - r^2)^{1/2}$ を軸方向の距離の単位として整理した。ここでRおよびrは円環状空隙の外半径および内半径である(Fig.2.8.3.参照)。このため、この単位で測った距離ごとに各空隙巾の中性子束を比較すると最大と最小の値で2~3倍の差が生じた。明らかに空隙巾が狭くなるとともに空隙面積に対する測定点から入口部を見る直視面積の割合は減少する。一方中性子束分布を決定するのに最も寄与する線源は直視面積内に存在する線源であるし、また2.4の実験からも直視面積が円環ダクト内の中性子束分布を決定する主要因であることが推測された。それ故ここでは次式によって計算される直視面積 S_ℓ ⁽⁴⁾の平方根を軸方向の単位距離として実験2.8の結果を整理した。

$$S_\ell = R^2 \cdot \cos^{-1}(r/R) + (R^2 - r^2) \cdot \cos^{-1}(r/a) - r \cdot (R^2 - r^2)^{1/2} \quad (4.1.1)$$

ここでaはダクトの中心軸から測定点までの距離で $r \leq a \leq R$ である。ただし、本研究における実験では測定点をつねに空隙部の中心にとっているので、以後 $a = (R+r)/2$ と固定する。

Fig.4.1.1. 4.1.2.に $Z = 0$ cmで測定した熱、熱外中性子束分布および速中性子束分布を示す。図から明らかなようにいずれのエネルギーの中性子束分布も空隙巾によらず一つの関数で表現できることが期待された。それ故種々の関数を試行錯誤的にあてはめることを試みた。その結果、次式が最もよく分布を表現することが明らかとなった。

$$f(X) \equiv \phi(X) / \phi(0) = [1 + (X / \sqrt{S_\ell} / \alpha)^\beta]^{-1} \quad (4.1.2)$$

ここで $\phi(X)$ と $\phi(0)$ はそれぞれダクト入口からXの位置およびダクト入口での中性子束である。 α と β はエネルギー依存の定数である。 $Z = 0$ cmのような軸対称配置においては α と β の値は次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{熱中性子に対し} \quad \alpha = 1.6, \beta = 3.3 \\ \text{熱外中性子に対し} \quad \alpha = 1.2, \beta = 2.9 \\ {}^{58}\text{Ni}(n,p){}^{58}\text{Co} \text{ 反応率に対応する速中性子に対し} \quad \alpha = 1.4, \beta = 2.5 \end{array} \right\} \quad (4.1.3)$$

このように α と β をとることにより $3\sqrt{S}_l$ から $30\sqrt{S}_l$ の範囲の中性子束分布は(4.1.2)式により30%以内の精度で記述することができる。Fig. 4.1.3. は非軸対称系である配置2Lと2Sでの熱、熱外中性子束分布を示す。この場合は入口部における中性子束分布はダクト軸に対し非対称であるので $\phi(0)$ をどのようにとるかが問題である。 $\phi(0)$ の決定法として次の二つが考えられる。その一つは入口部において空隙部全体にわたって中性子束を平均する方法である。このようにして決定した中性子束を $\overline{\phi(0)}$ とする。他の一つはline Bとダクト入口面の交差点における中性子束を取る方法である。これを $\phi_B(0)$ とする。

$\phi_B(0)$ は一般的にダクト入口面中央の中性子束とほぼ等しい。配置2Lと2Mの場合、ダクトの前部に空間部があるため中性子束の空間的变化が少く $\overline{\phi(0)}$ と $\phi_B(0)$ はほぼ等しい値を示した。Fig. 4.1.3.に示すように熱、熱外中性子束の場合は、配置2Lあるいは2Mのように斜め入射に対しても $Z=0$ cmでの軸対称配置の場合と全く同じく条件(4.1.3)の α と β の値を用いて式(4.1.2)で中性子束分布を表わすことができる。ただし、この場合、式はline A, B, Cに分布する値の最大値を示す包絡線に対応する。ダクト軸が $Z=160$ cmにくる配置3Lでの熱、熱外中性子束に対しても全く同じことがいえることがわかった。

次にFig. 4.1.4.に配置2L, 2Mでの速中性子束分布を示す。この場合は非軸対称効果が顕著に現れておりline A, B, Cの間で、速中性子束はかなり変化するし、また、減衰の様子は軸対称配置の場合と異り、より急速に減衰する。しかしながら、この場合には条件(4.1.3)の熱外中性子に対する α と β の値を用いることにより再び式(4.1.2)を用いて最大包絡線を記述することができることが明らかとなった。ただし $\phi(0)$ の決定法は前述したものと同じである。このようにダクト入口が線源を見る非軸対称配置においても、中性子束分布は軸対称配置で用いたのと同じ式で表現できることが明らかとなった。このように、ここで求めた式(4.1.2)は円環ダクト内での軸方向中性子束分布を一般的に記述できる経験式となりうる可能性が期待された。

4.2. 経験式の適用範囲の検討

実験2.8の結果から求めた経験式の一般性を調べるには、次のようないくつかの項目に関する検討が必要である。実験2.8は水遮蔽体中に存在する壁が鋼の円環ダクトに対して行われ、かつエネルギー的に見ると熱、熱外中性子および $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 反応率に対応する速中性子に対してのみ測定が行われた。これに対して実際のダクトはコンクリート遮蔽体中に最も多く存在する。また一般にダクト壁は鋼製であることが多いがその厚さは一定ではない。さらに実際の遮蔽計算においてはもっと広いエネルギー範囲の情報が必要である。本節では計算あるいは他の実験結果との比較を行い、これらの点については検討を行う。

4.2.1 計算による検討

計算による検討は鋼壁の厚さの影響、エネルギーの変化に伴う中性子束分布の変化さらにはストリーミングする中性子に寄与する入射領域について行った。計算は直接積分法に基づく2次元輸送コードPALLAS-2DCY-FC⁴⁴⁾を用いて行った。本コードは直接線は解析的に計算するので、空隙部においていわゆるRay-effectと呼ばれている中性子束の振動が起りにくく、ダクト問題を比較的少い角度分点で精度良く解くことができるコードである。²⁵⁾ 計算は14.2MeVから熱エネルギー領域までを40エネルギー群で行った。角度分点は半球面上に対称的に28点取った。計算は実験2.8の軸対称配置1Lを基準とし、空隙巾を変えずに鋼壁の厚さのみを変える等して上記の項目に対して行った。本計算において空隙巾は一定であるので計算条件はほぼすべての計算において変化しないと考えられる。それ故計算精度は体系1Lに対しての計算値と実験値を比較することにより調べた。Table 4.2.1.に入口部から距離X cmでの減衰率の比を示す。計算値と実験値の比は0.87~1.15の範囲にあり良く一致しているといえる。したがって本節での計算の信頼性は高いといえる。

鋼壁の厚さの影響は体系1Lで鋼壁の厚さを0.2~1.0 cmまで変化させ、鋼壁の厚さ0.6 cmの場合の中性子束を1.0としたときの相対値で調べた。結果をTable 4.2.2.に示す。鋼壁が0.2 cmの場合の熱中性子を除くと、その変化は20%以内である。これに対し、鋼壁が0.2 cmと薄くなると熱中性子束は他の場合に比べファクター2近く増加する。これらの結果から鋼壁の厚さが0.4~1.0 cmの範囲では中性子束分布の変化はエネルギーによらず少く、経験式はそのまま用いることができることが明らかとなった。熱外中性子以上のエネルギーの中性子の場合、壁厚が0.2 cmと薄くなっても経験式をそのまま用いることができる。しかし熱中性子の場合0.2 cmの場合経験式によると過少評価となるので注意する必要がある。

つぎにFig. 4.2.1. にエネルギー依存の中性子束分布の例を4つのエネルギー点について熱外中性子束分布に対する経験式と比較して示す。同図に示すように1.59eVから579keVの領域における中性子束分布の変化は少い。例えば軸方向の距離217.5 cmの計算点における上記のエネルギー範囲での中性子束の減衰率の変化は最大11%である。ところがエネルギーが579 keVから868 keVまで変化する間に減衰率は31%も変化する。これらのことから熱外領域から500 keV位までのエネルギー領域においては中性子束分布の変化は少く、これらの領域の分布に対し、熱外中性子に対して得た経験式を適用することができることが明らかとなった。また1Lの体系に対して円環ダクト入口面での線源領域を変えたいくつかの計算を行った結果、1Lの場合漏洩中性子の98%以上は半径40cm以内に存在する線源によることがわかった。入口部での線源強度は半径方向にだんだんと小さくなっているため、その補正をほどこすと半径方向に一定の強度で分布した線源の場合でも漏洩中性子の90%以上は上記の領域内の線源によることが明らかとなった。この結果は円環ダクト問題を考えるとき、実効的な線源領域を決定するうえでの参考データとなるであろう。

4.2.2. 実験結果との比較

前節で求めた経験式の適用範囲を本研究で行ったすべての実験およびPrice等が行った実験の結果を用いて調べた。Table 4.2.3. に本研究で行った実験で用いた円環ダクトの仕様を示す。本研究で分類した体系のうちダクト入口が線源を見ない体系、すなわち実験2.4および2.6の円環ダクトの空隙中の放射線分布は線源とダクト軸の距離によって変化するはずで、線源からダクト軸が離れるほど軸方向の分布の変化は小さくなっていく。したがってダクト入口が線源を見ない体系では軸方向の放射線分布を簡単に記述できる一般的な式は存在しない。したがってここではダクト入口が線源を見る体系に対し経験式を当てはめてみる。

実験2.5の結果と経験式の比較をFig.4.2.2.と4.2.3.に示す。実験2.5の体系はダクト入口が軸に対して42.6°の方向に線源中心を見、実験2.8の配置2Lに近い体系であるが、ダクト入口の前部には実験2.8のような空隙部が存在せず、このため入射中性子の非軸対称性は配置2Lに比べると極めて大きい。したがって、前述した斜め入射に対する $\phi(0)$ の2つの決定法はかなり異なった値を示す。実験値との比較から判断すると熱中性子に対しては $\phi_B(0)$ 、熱外中性子および速中性子に対しては $\sqrt{\phi(0)}$ をそれぞれとることにより、実験2.8で得たのと同じ精度で中性子束分布を表現できる。ただし、速中性子束分布を表現するには $\alpha=1.2$ 、 $\beta=2.9$ と条件(4.1.3)の熱外中性子に対する値を用いる必要がある。また経験式は斜め入射なので最大包絡線を表わしている。

実験2.7の90°屈曲ダクトの場合の比較をFig. 4.2.4.に示す。比較は熱および熱外中性子に対してのみ行った。第1脚目の分布は正確に経験で表わすことができた。第2脚目の分布はSimonとCliffordの屈曲円筒ダクトに対する式から類推して次式によって表わされることが予想された。

$$\phi(Z)/\phi(0)=f(l_1) \cdot (C/\sin\theta) \cdot f(Z) \quad (4.2.1)$$

ここでZ：第1脚部の軸から測った計算点までの距離

l_1 ：ダクト入口から第2脚部の軸までの距離

C：定数

θ ：屈曲角

である。熱中性子と熱外中性子に対し、それぞれCの値として0.5および0.66をとることによりFig. 4.2.4.に示すような良い一致が得られた。これらのCの値がそれぞれのエネルギーにおけるアルベドの値に近いことを注意すべきことであろう。なお同図の実験値は4本の測定ライン上の測定値の平均値である。

これまで行った計算および実験による経験式の検討はすべて水遮蔽体中にある鋼壁円環ダクトに対して行ったが、すでに述べたように実際のダクトはコンクリート中にある場合が多い。しかしながら、中性子のコンクリート中での挙動と水中における挙動は類似しているので、水中において行われた中性子ストリーミングに関する実験から得た経験式はそのままコ

ンクリート中の同様のストリーミング実験結果にあてはめることができると予想される。ここでは Price 等の実験結果⁽⁴⁾と比較を行う。Price 等の実験の体系を Fig. 4.2.5. に示す。この実験では熱中性子束分布のみが測定されており、ダクト入口面において、円環状空隙部以外のところを通りダクトの中にもれ込んでくる熱中性子を遮蔽するために入口部には鋼製の遮蔽体が設けてある。空隙巾は Table 4.2.4. に示すよう 0.32~4.4cm の間で 6 種類のものがとられている。 $(R^2-r^2)^{1/2}$ を軸方向の単位距離として整理されて報告されている彼らのデータをここでは $\sqrt{S_\ell}$ を軸方向の単位距離として整理しなおし、Fig. 4.2.6. に示す。同図と Fig. 4.2.7 に示す参考文献(4)の結果を比較すると明らかであるが、このように単位距離をとることにより異った空隙巾で測定された熱中性子束は経験式の近くに集まり、Price 等の結果よりその分散は少い。一方熱中性子束に対する経験式との一致の程度は $5\sqrt{S_\ell}$ から $30\sqrt{S_\ell}$ の領域で良く、その他の領域ではかなりの差が見られる。しかし、 $5\sqrt{S_\ell}$ より小さい領域での不一致の原因の一つは、ダクト入口にある鋼製の遮蔽体による熱中性子の吸収にある。この点に関して、この実験体系は特異である。したがって入口に近いところで一致の度合いが悪いのはしかたがない。 $30\sqrt{S_\ell}$ より大きな距離において経験式と実験値の間の差が大きくなっていくように見える。この理由として次の二つのことが考えられる。(1) 経験式の適用範囲、すなわち距離の 3.3 乗で減衰する領域は約 $30\sqrt{S_\ell}$ までで、これ以上では line-of-sight 成分が主となって距離の 2 乗の減衰に近づく。(2) 各空隙巾ごとの実験値に多少のばらつきが見られるし、距離とともにデータの精度が悪くなることが考えられるので $30\sqrt{S_\ell}$ 以上の領域の数少ないデータのばらつきによる。しかしながら現時点では、いずれが正しいか断定はできない。いずれにせよ以上のことから経験式は周辺物質がコンクリートの場合にも適用できると考えてよいであろう。なぜならすでに述べたように中性子の水中およびコンクリート中での挙動は類似しているし、また薄い鋼と水あるいはコンクリート二重層のアルベドはほぼ等しい⁽⁴⁾という報告もあり、かつ、ここで示したように経験式はコンクリート中の鋼壁ダクト内の熱中性子束分布を $5\sqrt{S_\ell} \sim 30\sqrt{S_\ell}$ の範囲でよく表わしたからである。

以上、ここで求めた経験式を評価できるすべての実験結果との比較を行い、経験式の適用性を調べた。ここではさらに実験 2.4 および 2.6 の結果とも比較してみる。Fig. 4.2.8. は実験 2.4 で得た熱エネルギーから keV 領域の中性子束分布と経験式との比較である。経験式は熱中性子束の場合 2~3 倍高目であるが熱外エネルギーから keV 領域では良く一致している。もちろん速中性子の場合には入射角度依存性が大きいので比較は行っていない。Fig. 4.2.9. は実験 2.6 の結果との比較である。この場合も速中性子束分布は経験式によって表現することはできないので除く。熱、熱外中性子束分布は斜め入射の場合と同様の $\phi(0)$ の決定法を用いて $5\sqrt{S_\ell}$ 以上の領域で良く表現できる。このように実験 2.4 および 2.6 での低エネルギー中性子束分布が経験式で良く表わすことができたのは、たまたま線源とダクト軸までの距離が短く、体系を斜め入射の極端な場合と考えてよいような条件となったためであろう。しか

し、これらの結果から管軸に対し垂直方向から中性子が入射する場合でも、入射領域が局所的であれば低エネルギー中性子束のダクト軸方向への分布はここで求めた経験式で記述できる可能性が大きいことがわかった。

最後に本研究で求めた円環ダクト内中性子束分布に対する経験式に含まれるダクト形状に関するパラメータは直視面積 S_{ℓ} のみであることから、この式を円筒ダクトにも適用できる可能性があると思われる。この場合 S_{ℓ} としてはダクトの切口面積をとる。このように S_{ℓ} を置き替えた式と Price 等が行った水中にある円筒ダクト内熱中性子束の測定結果の比較をFig. 4.2.10. に示す。一致の程度は円環ダクトの場合に比べるとよくないが $4\sqrt{S_{\ell}}$ 以上の領域でファクター1.6以内の一致を示し、かつ減衰率もよく一致している。このように式を他の形状のダクト等における中性子ストリーミング問題に適用できる可能性が示された。

4.2.3. 経験式の適用範囲

本研究で求めた鋼壁円環ダクト軸方向への中性子束分布を円環ダクトの空隙巾によらず一般的に表わす経験式の適用範囲に関して計算および実験的に調べた結果を以下の(1)～(11)に示す。

- (1) 式(4.1.2)は鋼壁円環ダクトに対し線源が広がって分布している一般的な条件に対して用いることができる。斜め入射の場合は同式は軸方向分布の最大値を結ぶ包絡線を示す。
- (2) 線源強度がダクト入口部において一定の場合は線源として考慮すべき領域は空隙部のごく近傍のみで十分で例えば実験2.8の1Lのように内径約20cm, 外径約40cmの場合半径40cmの線源を考えればよい。また空隙部以外から入射する成分の影響は入口からの距離が $5\sqrt{S_{\ell}}$ より大きくなると極めて小さくなる。
- (3) 熱および熱外中性子の場合、(1)の条件範囲内、すなわち斜め入射の場合も含めて条件(4.1.3)の α および β を用いればよい。ただし、 $\phi(0)$ としては入口部の円環空隙上で平均した中性子束 $\overline{\phi(0)}$ をとる。ただし熱中性子束の場合は入口部中央の値 $\phi_B(0)$ をとればよりよい結果が得られる。
一般に $\overline{\phi(0)} \geq \phi_B(0)$ であるので熱中性子の場合に $\phi(0)$ として $\overline{\phi(0)}$ をとれば安全側の評価となる。
- (4) 熱外中性子に対して得られた α と β は約500keV位までの中間領域のエネルギーの中性子束分布を表わすのに用いることができる。
- (5) 約500keV以上の速中性子束分布は入射角度に依存するが、各入射角度において分布は空隙巾によらず(4.1.2)の形で表現できる。同式のうち α と β が入射角度依存の値となる。
- (6) $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ 反応率(反応のしきい値 $\sim 2.8\text{MeV}$)に対応する速中性子の場合、軸対称

配置では(4.1.3)の α と β を用いることができる。一方非軸対称配置の場合、入射角度が $36^\circ \sim 43^\circ$ のところでは α と β は(4.1.3)の熱外中性子に対する値を用いればよい。すなわち入射角度 0° に対し条件(4.1.3)の α と β を用いた式(4.1.2)で表わされる速中性子束分布は入射角度が大きくなるとともにだんだんと急な減衰傾向を示し、入射角度 $36^\circ \sim 43^\circ$ 位で熱外中性子束分布と一致する。さらに入射角度が増すと減衰傾向はさらに急になる。斜め入射の場合 $\phi(0)$ としては $\overline{\phi(0)}$ をとるべきである。

- (7) 式が適用できる鋼壁の厚さについては実際的な厚さの範囲である 0.2~1.0 cmの範囲について調べた。その結果、熱外中性子以上のエネルギーの中性子に対しては 0.2~1.0 cmの鋼壁厚さすべてに対して式は適用可能である。
熱中性子に対しては 0.4~1.0 cmに対して適用可能で、0.2cmの場合は式をそのまま用いるとファクター 2 程度過少評価となる。
- (8) 式(4.1.2) は水遮蔽体中の鋼壁円環ダクトに対して得られたものであるが、より一般的なコンクリート遮蔽体中の鋼壁円環ダクトに対しても用いることができる。
- (9) 屈曲円環ダクト中の熱、熱外中性子束分布に対しては屈曲部の前後の部分に適用される式(4.1.2)を屈曲部で接合した式(4.2.1)を用いることができる。
- (10) 式(4.1.2) は水又はコンクリート中の鋼壁円筒ダクトに適用できる。この場合 S_ℓ は円筒の断面積に置き替える。精度は円環ダクトの場合に比べ多少悪くなる。
- (11) 以上(1)~(9)の適用範囲において、本研究で求めた経験式は、鋼壁円環ダクト内軸方向の中性子束分布を軸方向の距離 $3\sqrt{S_\ell} \sim 30\sqrt{S_\ell}$ の範囲において $\pm 30\%$ の精度で表わすことができる。

第5章 結 論

本研究においては遮蔽体中に存在する空隙部のうち最も基本的な形状である円環ダクトを漏洩する中性子の計算法を評価するための実験を実施した。このような実験に対して要求される条件は「1.2 研究の目的」において詳述したが、ここで実施した実験はほぼその条件を満足した系統的な実験である。すなわち円環ダクトの計算を行ううえでの問題点を明確化するため体系を分類した。この分類は現在設計計算において最も基本的な計算法となっている2次元輸送計算による体系表示に関して記述可能な軸対称配置と記述不能な非軸対称配置に分け、またダクト内の中性子束分布が主としてストリーミング成分により決定される線源がダクト入口を見る配置とストリーミング成分のみならず透過成分も重要な線源がダクト入口を見ない配置に分けることにより行った。このようにして4つに分類された体系に対し、それらの分類に属する実際的な円環ダクトを選び、それを模擬した実験体系を作った。すなわちベンチマーク計算が行えるような体系とした。また体系はできるだけ単純な形となるようにし、計算において不必要な体系近似を行わなくてもすむようにした。

これらの体系のうち軸対称配置のものは2次元輸送計算でほとんどモデル化を行わず体系表示ができるので、計算技法のうち基本的な点を評価するのに適している。したがって、この体系では空隙巾を変化させる実験を行った。この結果を用いれば、輸送計算の場合、角度分点の取り方と計算精度の関係を明らかにすることができるであろう。この場合、精度を直視面積の平方根を軸方向の単位距離とした距離の関数として求めればより一般的な精度評価とすることができるであろう。非軸対称配置の実験は体系のモデル化あるいはつなぎ計算法の評価に適している。本実験では体系のモデル化に関してさらに複雑な体系である屈曲ダクトおよび2つの径の異なる円環ダクトの接続体系についての実験も実施した。

次に体系を構成する遮蔽材に関しては実験はすべてスイミングプール型原子炉のプール水中に2重鋼管を設置することにより行ったので、すべての場合でダクト壁は鋼製であり、ダクト周囲の遮蔽体は水となった。壁物質が鋼であることは実際的である。遮蔽材が水であるということは、構成原子密度が正確にわかっており、断面積も比較的精度よく求まっているので計算法評価の点から都合のよいことであった。さらに鋼壁円環ダクト中の中性子の挙動は周辺物質がコンクリートと水の場合でほとんど差がないことが明らかとなったので遮蔽材が水であることは結果的に評価実験の条件を最もよく満足した。

本実験では各円環ダクト中の軸方向の中性子束分布を絶対値で求めた。測定は放射法で行い、測定結果は反応率または中性子束の形で求めた。速中性子束は主に $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 反応率で代表させた。エネルギー的には速中性子と熱外中性子の間の中間エネルギーの中性子

束分布に関する測定値がないが、評価済みの輸送計算から熱外中性子から 500keV 位までの中性子の挙動は極めてよく類似していることが判明し、実験で得た熱外中性子束分布でこの中間エネルギー領域の中性子束分布を代表させ得ることが明らかとなった。したがってかなり広いエネルギー領域の中性子情報が得られたことになる。このように本実験は評価実験の条件をほぼすべて満足しており、この結果を用いて計算法の評価を系統的に行えるであろう。この際、本実験における中性子挙動の検討の結果導出した円環ダクトの軸方向中性子束分布を表わす経験式が有用なものとなるであろう。同経験式に関する適用範囲等については第 4 章にまとめてある。この式の適用範囲は極めて広く、本実験体系のほぼすべての場合の中性子束分布を記述でき実験結果をほぼ総括しているのみならず、実際的なコンクリート遮蔽体を貫通する鋼壁円環ダクトさらには鋼壁円筒ダクト内の中性子束分布を記述するものであり、その有用性は極めて高いと思われる。

今後は本実験結果を用いた計算法の評価を系統的に進める必要がある。また本実験で得た経験式をさらに一般的なものとする必要がある。このためには速中性子領域において入射角度およびエネルギー依存の分布を実験的に求める必要がある。さらに式には体系的なパラメーターとして直視面積が入っているのみであるので、円筒ダクト問題にその適用範囲を広げることができたように、他の形状のダクトあるいは不規則形状物に適用範囲を拡張することが期待できる。

謝 辞

本研究は船舶技術研究所と日本原子力研究所の原子炉遮蔽に関する共同研究の一部として行われたものである。本研究を遂行するうえで全般にわたり御指導、御尽力下さった船舶技術研究所布施卓嘉原子力船舶長(元東海支所長)並びに竹内清遮蔽効果研究室長に深く感謝いたします。また研究をまとめるにあたり御助言、御激励下さった横村武宣前東海支所長に篤く感謝します。本研究で実施した計算の一部は日本原子力研究所安全解析部山野直樹氏によるところが多い。ここに謝意を表します。また実験を実施するうえで原子炉を運転して下さいた日本原子力研究所 JRR-4 の職員の皆様に感謝いたします。

最後に本研究をまとめるにあたり懇切丁寧に御指導下さった京都大学兵藤知典教授に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) Kawai, M., Hayashida, Y., Yamauchi, M., "Application of Albedo Monte Carlo Method to FBR Neutron Streaming Analysis," 6th Int. Conf. Reactor Shielding, 6a-2, (1983).
- (2) Shin, K., Hyodo, T., "Applicability of Albedo Concept to Neutron Streaming Through Small Ducts and Slits," *ibid.*, 6a-3, (1983).
- (3) Ueki, K., "Three-Dimensional Neutron Streaming Calculations Using the Monte Carlo Coupling Technique," *Nucl. Sci. Eng.*, 79, 253 (1981).
- (4) Price, B.T., Horton, C.C., Spinny, K.T., *Radiation Shielding*, Pergamon Press, London, England, (1957).
- (5) Miura, T., et al., "Fast Neutron Streaming Through a Cylindrical Air Duct in Water," Paper No.49, *Ship Res. Inst.*, (1975).
- (6) Nilsson, J., Sandlin, R., "Measured and Predicted Thermal- and Fast-Neutron fluxes in Air-Filled Annular Ducts," *Nucl. Sci. Eng.* 23, 224 (1965).
- (7) Miyasaka, S., et al., "Mock-Up Experiment and Analysis for the Primary Shield of the Nuclear Ship MUTSU," *Proc. Fifth Int. Conf. Reactor Shielding*, Science Press, New Jersey, (1977).
- (8) Tsubosaka, A., et al., "Mock-Up Experiment of Radiation Streaming Through Coolant Pipe Penetration," *ibid.*, (1977).

- (9) Diettrich, O., et al., "Neutron Streaming Along the Penetration of a Twice Bent Sodium Pipe," 4th Int. Conf. Reactor Shielding, C3-8, (1972).
- (10) McGreger, B.J., Muckenthaler, F.J., "FFTF Pipe Chase Streaming Experiment," ANS Topical Meeting, p.431, (1972).
- (11) Rahn, F., Till, H., "Neutron Flux Determination in the Reactor Cavities of LWR's," ORNL/RSIC-43, (1978).
- (12) Iotti, R.C., Yang, T.L., Rogers, W.H., "Reactor Cavity Streaming - The Problem and Engineering Solutions," *ibid.*, (1978).
- (13) Butler, H.M., Ohnesorge, W.F., Auxier, J.A., "Measured Distribution of Neutrons Inside Containment of a PWR," *ibid.*, (1978).
- (14) Hankins, D.E., Griffith, R.V., "A Survey of Neutrons Inside the Containment of a Pressurized Water Reactor," *ibid.*, (1978).
- (15) Davies, N. et al., "The Development of a Calculational Route for PWR Cavity Streaming," 6th Int. Conf. Reactor Shielding, 6a-7, (1983).
- (16) Barbucci, P. et al., "Reactor Cavity Radiation Streaming Analysis and Shielding Solutions for the ENEL PWR Reference Plant," *ibid.*, 6a-8, (1983).
- (17) Barbucci, P. et al., "Comparison between Neutron Flux Measurements and Calculations in the Dry-Well of CAORSO BWR Power Station," *ibid.*, 7-2, (1983).
- (18) Nakai, M. et al., "Neutron and Gamma Ray Distribution in BWR Dry-Well," *ibid.* 7-3, (1983).

- (19) Ohtani, N., Kawakita, T., "Radiation Shielding Analysis of JOYO," *ibid.* 7-4, (1983).
- (20) Simon, A., Clifford, C.E., "The Attenuation of Neutrons by Air Ducts in Shields," *Nucl. Sci. Eng.*, 1, 156 (1956).
- (21) 宮坂駿一, "JRR-4実験設備の利用手引き", JAERI 6016, (1965).
- (22) Miura, T., Yamaji, A., Takeuchi, K., "A Two-Dimensional Benchmark Experiment for Neutron Transport in Water," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 14(12), 878 (1977).
- (23) Zijp, W.L., "Review of Activation Methods for the Determination of Intermediate Neutron Spectra," RCN-40, (1965).
- (24) Miura, T., Fuse, T., Yamano, N., "Experiments on Neutron Transport through Annular Duct of Large Radius," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 18(5), 369 (1981).
- (25) 竹内清他, "Discrete Ordinates コードおよびモンテカルロコードによる2次元遮蔽ベンチマーク計算 (No.1)," JAERI-M 7799, (1978).
- (26) Engle, W.W., Jr., "A USERS MANUAL FOR ANISN: A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering," K-1693, (1967).
- (27) McElroy, W.E., et al., "A Computer-Automated Iterative Method for Neutron Flux Spectra Determination by Foil Activation," AFWL-TR-67-41, (1967).
- (28) Rhoades, W.A., Mynatt, F.R., "The DOT-III Two-Dimensional Discrete Ordinate Transport Code," ORNL-TM-4280, (1973).
- (29) Megurno, B.A., "ENDF/B-IV Dosimetry File," BNL-NCS-50446, (1975).

- (30) Simmons, R.L., McElroy, W.E., "Evaluated Reference Cross Section Library," BNWL-1312, (1970).
- (31) Koyama, K., et al., "ANISN-JR, A One-Dimensional Discrete Ordinates Code for Neutron and Gamma-Ray Transport Calculations," JAERI-M 6954, (1977).
- (32) Zijp, R.L., "Review of Activation Methods for the Determination of Neutron Flux Density Spectra," EUR 5667e/f, Part I, (1977).
- (33) Kemshall, C.D., "The Use of Spherical Proportional Counters for Neutron Spectrum Measurements," AWRE 031/73, (1973).
- (34) Benjamin, P.W., et al., "The Analysis of Recoil Proton Spectra," AWRE 0-9/68, (1968).
- (35) 三浦俊正, 竹内清, 布施卓嘉, "円環ダクト漏洩放射線の測定と計算," 船研報告, 第16巻, 第6号, (1977)
- (36) Miura, T., Sasamoto, N., "Experimental Study of Neutron Streaming Through Steel-Walled Annular Ducts in Reactor Shields," Nucl. Sci. Eng., 83, 333 (1983).
- (37) Nishimura, T., et al., "Development of Discrete Ordinates Sn Code in Three-Dimensional (X,Y,Z) Geometry for Shielding Design," J. Nucl. Sci. Technol., 79, 253 (1981).
- (38) Sasamoto, N., Takeuchi, K., "Direct Integration Method for Solving the Neutron Transport Equation in Three-Dimensional Geometry," Nucl. Sci. Eng. 80, 554 (1982).
- (39) Takeuchi, K., Kanai, Y., "Development of a Series of PALLAS Discrete-Ordinate Direct-Integration Codes," 6th Int. Conf. Reactor Shielding, 3b-1, (1983).

- (40) 田中俊一 他, "遮蔽ベンチマーク問題(II)," JAERI-M 8686, (1980).
- (41) 山路昭雄 他, "放射線輸送計算コードを用いた「むつ」船用炉の遮蔽解析法と実験解析に基づく評価," J. Nucl. Sci. Technol. 26(2), 139 (1984).
- (42) Lathrop, K.D., Brinkley, F.W., "TWOTRAN-II: An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport," LA-4848-MS, (1973).
- (43) Koyama, K., et al., "RADHEAT-V3, A Code System for Generating Coupled Neutron and Gamma-Ray Group Constants and Analyzing Radiation Transport," JAERI-M 7155, (1977).
- (44) Takeuchi, K., "PALLAS-2DCY-FC, A Computational Method and Radiation Transport Code in Two-Dimensional (R,Z) Geometry," Paper NO.57, Ship Res. Inst., (1979).
- (45) Miller, W., Snow, W.J., "NaI and CsI Efficiencies and Photo-fractions for Gamma-Ray Detection," Nucleonics 19, 174 (1961).

Table 2.2.1. Atomic Compositions and Densities of Materials Existing Inside the Aluminum Tank of the JRR-4 Reactor (atoms/cm·barns)

	Core	Reflector	Al Wall	Water
H	4.577×10^{-2}	1.638×10^{-3}		6.674×10^{-2}
C	—	6.405×10^{-2}	—	—
O	2.291×10^{-2}	8.190×10^{-4}	—	3.337×10^{-2}
Al	1.785×10^{-2}	8.537×10^{-3}	5.997×10^{-2}	—
Fe	4.569×10^{-4}	—	2.832×10^{-4}	—
^{10}B	6.500×10^{-6}	—	—	—
^{235}U	1.015×10^{-4}	—	—	—
^{238}U	1.13×10^{-5}	—	—	—

Table 2.3.1. Characteristics of Activation Detectors

Reaction	Dimension (mm)	Observed γ -Ray (MeV)	η^a	Half Life	Er ^b (eV)	Eeff ^c (MeV)
$^{197}\text{Au} (n, \gamma) ^{198}\text{Au}$	$17^\phi \times 0.025$	0.411	1.00	2.70d	4.90	—
$^{186}\text{W} (n, \gamma) ^{187}\text{W}$	$20^\phi \times 0.133$	0.686	0.288	24h	18.8	—
$^{55}\text{Mn} (n, \gamma) ^{56}\text{Mn}$	$12.7^\phi \times 0.042$	0.845	0.99	2.56h	337	—
$^{63}\text{Cu} (n, \gamma) ^{64}\text{Cu}$	$12.7^\phi \times 0.138$	0.511	0.38	12.8h	580	—
$^{27}\text{Al} (n, \gamma) ^{28}\text{Al}$	$12.7^\phi \times 0.753$	1.782	1.00	2.31m	9100	—
$^{115}\text{In} (n, n') ^{115m}\text{In}$	$13^\phi \times 6.5$	0.335	0.475	4.50h	—	1.12
$^{58}\text{Ni} (n, p) ^{58}\text{Co}$	$30^\phi \times 6.5$	0.799	1.00	71.3d	—	2.79
$^{64}\text{Zn} (n, p) ^{64}\text{Cu}$	$30^\phi \times 6.5$	0.511	0.38	12.8h	—	4.4
$^{54}\text{Fe} (n, p) ^{54}\text{Mn}$	$30^\phi \times 6.5$	0.840	1.00	303d	—	5.1
$^{27}\text{Al} (n, p) ^{27}\text{Mg}$	$40^\phi \times 6.5$	0.834	0.70	9.5m	—	5.46
$^{24}\text{Mg} (n, p) ^{24}\text{Na}$	$30^\phi \times 6.5$	2.754	1.00	15.0h	—	6.3
$^{56}\text{Fe} (n, p) ^{56}\text{Mn}$	$30^\phi \times 6.5$	0.845	0.99	2.56h	—	7.5
$^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na}$	$40^\phi \times 6.5$	2.754	1.00	15.0h	—	8.1

^aIntensity per disintegration

^bMain resonance energy

^cEffective threshold energy for fission spectrum

Table 2.4.1. Atomic Compositions and Densities of Shield Materials of Experiment 2.4 (atoms/cm·barns)

	Lead	Steel
C	-	5.021×10^{-4}
Si	-	3.070×10^{-4}
Mn	-	7.533×10^{-4}
Fe	-	8.450×10^{-2}
Pb	3.286×10^{-2}	-

Table 2.4.2. Atomic Compositions and Densities of Boron Layers

Nuclide	Nuclear density (atoms/cm·barns)	
	BC05	BC10
^{10}B	0.05377	0.04556
^{11}B	0.00518	0.00439
C(natural)	0.01340	0.01135
O(natural)	0.000884	0.000749

Table 2.4.3. Measured Reaction Rate ($\text{sec}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$) on the Line B in Experiment 2.4

Z (cm)	$^{58}\text{Ni}, \text{p}$	$^{197}\text{Au}, \gamma$ Cadmium Covered
-37	$1.41 \cdot 22^{\text{a}}$	$4.82 \cdot 20$
-17	$2.20 \cdot 22$	$7.42 \cdot 20$
3	$2.09 \cdot 22$	$6.55 \cdot 20$
23	$1.11 \cdot 22$	$3.70 \cdot 20$
43	$3.72 \cdot 23$	$1.20 \cdot 20$
63	$7.12 \cdot 24$	$2.57 \cdot 21$
83	$1.16 \cdot 24$	$4.98 \cdot 22$
103	$1.83 \cdot 25$	$1.54 \cdot 22$
123	$2.61 \cdot 26$	$6.81 \cdot 23$
143	$4.26 \cdot 27$	$2.62 \cdot 23$

^aRead as 1.41×10^{-22}

Table 2.4.4. Measured Reaction Rates ($\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$) on the Line F in Experiment 2.4

Reaction	Filter	Z: Vertical Distance from R-Axis (cm)				
		0	20	40	60	80
$^{197}\text{Au}, \gamma$		1.21-20 ^a	1.02-20	7.25-21	4.83-21	3.12-21
$^{197}\text{Au}, \gamma$	CD	1.02-20	8.68-21	6.01-21	3.80-21	2.48-21
$^{197}\text{Au}, \gamma$	BC05	6.57-22		3.72-22		1.28-22
$^{197}\text{Au}, \gamma$	BC10	3.65-22		1.96-22		7.47-23
$^{186}\text{W}, \gamma$	CD	1.89-21	1.57-21	1.15-21	7.80-22	5.13-22
$^{186}\text{W}, \gamma$	BC05	1.34-22		7.41-23		3.18-23
$^{186}\text{W}, \gamma$	BC10	6.09-23		3.39-23		1.25-23
$^{55}\text{Mn}, \gamma$	CD	1.81-22	1.48-22	1.07-22	6.86-23	4.39-23
$^{55}\text{Mn}, \gamma$	BC05	5.07-23		2.90-23		1.15-23
$^{55}\text{Mn}, \gamma$	BC10	2.86-23		1.58-23		6.83-24
$^{63}\text{Cu}, \gamma$		2.02-22	1.66-22	1.18-22	7.59-23	4.71-23
$^{63}\text{Cu}, \gamma$	CD	7.09-23	5.74-23	3.99-23	2.59-23	1.52-23
$^{63}\text{Cu}, \gamma$	BC05	3.12-23		1.68-23		6.24-24
$^{63}\text{Cu}, \gamma$	BC10	2.31-23		1.20-23		4.60-24
$^{27}\text{Al}, \gamma$	CD	1.86-24				4.12-25
$^{27}\text{Al}, \gamma$	BC05	4.74-25				8.71-26
$^{27}\text{Al}, \gamma$	BC10	3.92-25				6.41-26
$^{115}\text{In}, n$	CD	3.62-23	2.62-23	1.47-23	6.62-24	2.83-24
$^{58}\text{Ni}, p$	CD	1.80-23	1.32-23	6.92-24	2.82-24	9.86-25
$^{64}\text{Zn}, p$	CD	7.58-24	5.42-24	2.53-24	9.70-25	3.50-25
$^{54}\text{Fe}, p$	CD	1.39-23	1.03-23	5.19-24	2.40-24	8.52-25
$^{27}\text{Al}, p$	CD	1.20-24	8.70-25	4.20-25	1.75-25	5.74-26
$^{24}\text{Mg}, p$	CD	4.43-25	3.42-25	1.95-25	8.12-26	2.71-26
$^{56}\text{Fe}, p$	CD	3.10-25	2.31-25	1.23-25	5.27-26	1.72-26
$^{27}\text{Al}, \alpha$	CD	2.32-25	1.79-25	9.66-26	3.58-26	1.12-26

^aRead as 1.21×10^{-20}

Table 2.4.4. (Continued)

Reaction Filter	Z: Vertical Distance from R-Axis (cm)				
	100	120	140	160	180
$^{197}\text{Au}, \gamma$	2.08-21	1.43-21	1.02-21	7.63-22	6.35-22
$^{197}\text{Au}, \gamma$ CD	1.58-21	1.08-21	7.60-22	5.79-22	4.86-22
$^{197}\text{Au}, \gamma$ BC05		5.58-23		2.82-23	
$^{197}\text{Au}, \gamma$ BC10		3.13-23		1.48-23	
$^{186}\text{W}, \gamma$ CD	3.36-22	2.26-22	1.59-22	1.19-22	1.01-22
$^{186}\text{W}, \gamma$ BC05		1.28-23		6.41-24	
$^{186}\text{W}, \gamma$ BC10		5.23-24		2.56-24	
$^{55}\text{Mn}, \gamma$ CD	2.79-23	1.92-23	1.35-23	1.01-23	8.77-24
$^{55}\text{Mn}, \gamma$ BC05		5.00-24		2.69-24	
$^{55}\text{Mn}, \gamma$ BC10		2.97-24		1.44-24	
$^{63}\text{Cu}, \gamma$	2.98-23	1.94-23	1.33-23	9.71-24	7.80-24
$^{63}\text{Cu}, \gamma$ CD	9.71-24	6.54-24	4.63-24	3.22-24	2.95-24
$^{63}\text{Cu}, \gamma$ BC05		2.59-24		1.26-24	
$^{63}\text{Cu}, \gamma$ BC10		1.89-24		9.04-25	
$^{27}\text{Al}, \gamma$ CD				8.65-26	
$^{27}\text{Al}, \gamma$ BC05				1.46-26	
$^{27}\text{Al}, \gamma$ BC10				1.23-26	
$^{115}\text{In}, n$ CD	1.37-24	8.08-25	5.20-25	3.63-25	2.70-25
$^{58}\text{Ni}, p$ CD	3.89-25	2.18-25	1.36-25	1.02-25	7.11-26
$^{64}\text{Zn}, p$ CD	1.40-25	7.84-26	4.58-26	3.25-26	2.40-26
$^{54}\text{Fe}, p$ CD	3.42-25	1.71-25			
$^{27}\text{Al}, p$ CD	1.95-26	8.82-27	5.28-27	3.56-27	2.79-27
$^{24}\text{Mg}, p$ CD	9.00-27	3.43-27	1.66-27	1.04-27	7.39-28
$^{56}\text{Fe}, p$ CD	5.67-27	2.64-27	1.42-27	9.53-28	5.61-28
$^{27}\text{Al}, \alpha$ CD	3.15-27	1.15-27	5.66-28	3.70-28	2.58-28

Table 2.4.5. Measured Reaction Rates ($\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$)
on the Line G in Experiment 2.4

Reaction	Filter	Z: Vertical Distance from R-Axis (cm)				
		0	20	40	60	80
$^{197}\text{Au}, \gamma$		2.06-20 ^a	1.63-20	1.02-20	5.39-21	2.66-21
$^{197}\text{Au}, \gamma$	CD	1.20-20	9.16-21	5.61-21	2.95-21	1.50-21
$^{197}\text{Au}, \gamma$	BC05	7.14-22		3.49-22		8.33-23
$^{197}\text{Au}, \gamma$	BC10	4.04-22		1.73-22		4.27-23
$^{186}\text{W}, \gamma$	CD	2.20-21	1.70-21	1.06-21	5.82-22	3.09-22
$^{186}\text{W}, \gamma$	BC05	1.50-22		7.12-23		1.85-23
$^{186}\text{W}, \gamma$	BC10	6.59-23		2.91-23		7.09-24
$^{55}\text{Mn}, \gamma$	CD	2.03-22	1.55-22	9.25-23	5.23-23	2.60-23
$^{55}\text{Mn}, \gamma$	BC05	5.71-23		2.57-23		7.22-24
$^{55}\text{Mn}, \gamma$	BC10	3.20-23		1.49-23		4.06-24
$^{63}\text{Cu}, \gamma$		3.77-22	2.92-22	1.79-22	9.45-23	4.60-23
$^{63}\text{Cu}, \gamma$	CD	7.82-23	5.92-23	3.48-23	1.77-23	8.83-24
$^{63}\text{Cu}, \gamma$	BC05	3.53-23		1.52-23		3.78-24
$^{63}\text{Cu}, \gamma$	BC10	2.56-23		1.07-23		2.69-24
$^{27}\text{Al}, \gamma$	CD	2.10-24				2.60-25
$^{27}\text{Al}, \gamma$	BC05	5.28-25				5.42-26
$^{27}\text{Al}, \gamma$	BC10	4.43-25				3.91-26
$^{115}\text{In}, n$	CD	3.31-23	2.32-23	1.13-23	4.28-24	1.45-24
$^{58}\text{Ni}, p$	CD	1.67-23	1.10-23	5.56-24	1.94-24	5.76-25
$^{64}\text{Zn}, p$	CD	7.20-24	4.92-24	2.29-24	7.62-25	2.39-25
$^{54}\text{Fe}, p$	CD	1.39-23	9.95-24	4.99-24	1.81-24	5.66-25
$^{27}\text{Al}, p$	CD	1.22-24	8.97-25	4.38-25	1.50-25	4.30-26
$^{24}\text{Mg}, p$	CD	4.60-25	3.22-25	1.62-25	5.62-26	1.55-26
$^{56}\text{Fe}, p$	CD	3.24-25	2.30-25	1.15-25	4.26-26	1.20-26
$^{27}\text{Al}, \alpha$	CD	2.13-25	1.53-25	7.83-26	3.04-26	8.76-27

^aRead as 2.06×10^{-20}

Table 2.4.5. (Continued)

Reaction Filter		Z: Vertical Distance from R-Axis (cm)				
		100	120	140	160	180
$^{197}\text{Au}, \gamma$		1.33-21	7.44-22	4.32-22	2.71-22	1.93-22
$^{197}\text{Au}, \gamma$	CD	7.82-22	4.30-22	2.58-22	1.62-22	1.21-22
$^{197}\text{Au}, \gamma$	BC05		2.25-23		8.08-24	
$^{197}\text{Au}, \gamma$	BC10		1.16-23		4.06-24	
$^{186}\text{W}, \gamma$	CD	1.53-22	8.84-23	5.18-23	3.33-23	2.47-24
$^{186}\text{W}, \gamma$	BC05		5.00-24		1.82-24	
$^{186}\text{W}, \gamma$	BC10		1.85-24		6.50-25	
$^{55}\text{Mn}, \gamma$	CD	1.35-23	7.13-24	4.47-24	2.89-24	2.05-24
$^{55}\text{Mn}, \gamma$	BC05		1.96-24		7.44-25	
$^{55}\text{Mn}, \gamma$	BC10		1.18-24		3.81-25	
$^{63}\text{Cu}, \gamma$		2.25-23	1.16-23	6.55-24	4.16-24	2.94-24
$^{63}\text{Cu}, \gamma$	CD	4.39-24	2.17-24	1.31-24	8.44-25	6.52-25
$^{63}\text{Cu}, \gamma$	BC05		1.00-24		3.64-25	
$^{63}\text{Cu}, \gamma$	BC10		6.92-25		2.45-25	
$^{27}\text{Al}, \gamma$	CD				2.43-26	
$^{27}\text{Al}, \gamma$	BC05				4.55-27	
$^{27}\text{Al}, \gamma$	BC10				3.22-27	
$^{115}\text{In}, n$	CD	5.72-25	2.86-25	1.65-25	1.07-25	7.44-26
$^{58}\text{Ni}, p$	CD	1.92-25	8.44-26	4.67-26	3.00-26	1.99-26
$^{64}\text{Zn}, p$	CD	8.20-26	3.82-26	2.17-26	1.48-26	9.12-27
$^{54}\text{Fe}, p$	CD	2.16-25	9.85-26			
$^{27}\text{Al}, p$	CD	1.36-26	5.14-27	2.36-27	1.56-27	9.62-28
$^{24}\text{Mg}, p$	CD	4.03-27	1.41-27	6.76-28	4.30-28	2.89-28
$^{56}\text{Fe}, p$	CD	3.32-27	1.23-27	5.22-28	3.44-28	2.31-28
$^{27}\text{Al}, \alpha$	CD	2.53-27	8.55-28	3.78-28	2.21-28	1.46-28

Table 2.4.6. Comparison of Measured Attenuation Rates of Neutron Fluxes on the Line F and G in Experiment 2.4

Detector	90% Response Range (eV)	(A)		(B)		(B) (A)
		$[(R.R.)Z=160]$ (R.R.)Z=0	D=20	$[(R.R.)Z=160]$ (R.R.)Z=0	D=10	
$^{27}\text{Al}, \alpha$	$6.6+06 \sim 1.2+07$ ^a	1/627		1/964		1/1.54
$^{27}\text{Al}, p$	$3.6+06 \sim 1.0+07$	1/337		1/782		1/2.32
$^{58}\text{Ni}, p$	$1.9+06 \sim 8.6+06$	1/176		1/557		1/3.17
$^{115}\text{In}, n$	$8.0+05 \sim 6.6+06$	1/99.7		1/309		1/3.10
$^{27}\text{Al}, \gamma, \text{BC10}$	$1.8+03 \sim 6.6+05$	1/31.9		1/138		1/4.33
$^{27}\text{Al}, \gamma, \text{Cd}$	$5.2-01 \sim 2.4+05$	1/21.5		1/86.4		1/4.02
$^{197}\text{Au}, \gamma, \text{Cd}$	$2.0+00 \sim 2.8+02$	1/17.6		1/74.0		1/4.21
$^{197}\text{Au}, \gamma, \text{Bare}$	$1.0-02 \sim 1.6+02$	1/15.9		1/76.0		1/4.78

^aRead as 1.2×10^7

Table 2.4.7. Sources of Cross Sections in the Activation Cross Section Files

Reaction	File A	File B
$^{197}\text{Au}, \gamma$	o (a)	* (b)
$^{186}\text{W}, \gamma$	** (c)	**
$^{55}\text{Mn}, \gamma$	o	*
$^{63}\text{Cu}, \gamma$	o	*
$^{27}\text{Al}, \gamma$	**	**
$^{115}\text{In}, n$	o	*
$^{58}\text{Ni}, p$	o	*
$^{64}\text{Zn}, p$	o	o
$^{54}\text{Fe}, p$	o	*
$^{27}\text{Al}, p$	o	*
$^{24}\text{Mg}, p$	o	o
$^{56}\text{Fe}, p$	o	*
$^{27}\text{Al}, \alpha$	o	*

(a), (b) and (c) indicate respectively SAND-II library, ENDF/B-IV dosimetry file and ENDF/B-IV file.

Table 2.5.1. Measured Reaction Rates ($\text{sec}^{-1}\cdot\text{w}^{-1}$)
in Configuration 1 of Experiment 2.5

Position (cm)				$^{58}\text{Ni},p$	$^{64}\text{Zn},p$	$^{197}\text{Au},\gamma$ Cadmium Covered	$^{197}\text{Au},\gamma$ Bare
Name	X	Y	Z				
A(1,1)	1	0	15	$6.78\text{-}24^a$	2.90-24	1.59-21	4.84-21
(2,1)	20			9.46-24	4.15-24	1.59-21	5.29-21
(3,1)	40			9.16-24	4.00-24	9.75-22	3.21-21
(4,1)	60			5.27-24	2.42-24	5.31-22	1.73-21
(5,1)	80			2.89-24	1.29-24	2.82-22	9.64-22
(6,1)	100			1.50-24	5.27-25	1.55-22	5.25-22
(7,1)	120			7.66-25	2.68-25	9.63-23	3.17-22
(8,1)	140			4.23-25	1.52-25	7.36-23	2.22-22
B(1,1)	1	-15	0	1.77-23	5.62-24	2.42-21	9.07-21
(2,1)	20			1.92-23	7.28-24	1.81-21	6.97-21
(3,1)	40			9.81-24	4.39-24	9.89-22	3.57-21
(4,1)	60			4.23-24	1.84-24	5.14-22	1.81-21
(5,1)	80			2.04-24	7.72-25	2.81-22	1.02-21
(6,1)	100			1.07-24	3.85-25	1.71-22	5.85-22
(7,1)	120			5.72-25	2.02-25	1.00-22	3.52-22
(8,1)	140			3.70-25	1.29-25	7.73-23	2.50-22
C(1,1)	1	0	-15	6.38-23	2.93-23	8.22-21	3.35-20
(2,1)	20			2.30-23	9.97-24	2.58-21	1.00-20
(3,1)	40			5.49-24	2.49-24	1.04-21	3.85-21
(4,1)	60			2.17-24	7.37-25	5.04-22	1.81-21
(5,1)	80			1.06-24	3.83-25	2.89-22	1.03-21
(6,1)	100			6.97-25	2.45-25	1.67-22	5.96-22
(7,1)	120			4.10-25	1.39-25	1.02-22	3.42-22
(8,1)	140			2.84-25	1.02-25	8.02-23	2.62-22

^aRead as 6.78×10^{-24}

Table 2.5.2. Measured Reaction Rates ($\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$)
in Configuration 2 of Experiment 2.5

Position (cm)				$^{58}\text{Ni},p$	$^{64}\text{Zn},p$	197Au, γ Cadmium Covered	197Au, γ Bare
Name	X	Y	Z				
A(1,1)	1	0	15	5.26-24 ^a	2.33-24	9.20-22	3.63-21
(2,1)	20			2.54-24	1.11-24	7.10-22	3.34-21
(3,1)	40			1.20-24	5.18-25	3.98-22	1.87-21
(4,1)	60			6.13-25	2.76-25	1.89-22	9.20-22
(5,1)	80			3.54-25	1.59-25	9.34-23	4.66-22
(6,1)	100			2.21-25	1.07-25	4.87-23	2.34-22
(7,1)	120			1.33-25	6.41-26	2.66-23	1.35-22
(8,1)	140			9.89-26	4.56-26	1.93-23	9.03-23
(1,2)	1		21	3.31-24	1.36-24		4.40-21
(1,3)			30	1.50-24	6.17-25		2.90-21
(1,4)			40	5.76-25	2.31-25		8.72-22
(3,2)	40		21	1.26-24	5.25-25		1.88-21
(3,3)			30	3.50-25	1.44-25		8.57-22
(3,4)			40	1.09-25	4.46-26		1.86-22
(5,2)	80		21	2.81-25	1.26-25		4.08-22
(5,3)			30	6.62-26	3.05-26		1.45-22
(5,4)			40	9.59-27	7.79-27		2.89-23
(7,2)	120		21	-	3.65-26		1.13-22
(7,3)			30	-	4.67-27		3.37-23
(7,4)			40	-	1.02-27		4.89-24
B(1,1)	1	-15	0	1.56-23	6.49-24	2.17-21	8.72-21
(2,1)	20			1.54-23	6.27-24	1.29-21	6.37-21
(3,1)	40			7.59-24	3.14-24	5.44-22	2.76-21
(4,1)	60			2.94-24	1.20-24	2.28-22	1.18-21
(5,1)	80			1.30-24	5.32-25	1.07-22	5.69-22
(6,1)	100			5.76-25	2.57-25	5.72-23	3.15-22
(7,1)	120			3.14-25	1.39-25	2.99-23	1.74-22
(8,1)	140			2.19-25	9.24-26	2.34-23	1.24-22
(1,2)	1	-21		1.52-23	6.40-24		1.75-20
(1,3)		-30		1.35-23	5.63-24		2.51-20
(1,4)		-40		8.85-24	3.70-24		1.69-20

^aRead as 5.26×10^{-24}

Table 2.5.2. (Continued)

Position (cm)				$^{58}\text{Ni}, p$	$^{64}\text{Zn}, p$	$^{197}\text{Au}, \gamma$ Cadmium Covered	$^{197}\text{Au}, \gamma$ Bare
Name	X	Y	Z				
B(3,2)	40	-21		3.39-24	1.46-24		2.76-21
(3,3)		-30		5.08-25	2.14-25		1.42-21
(3,4)		-40		2.53-25	1.11-25		4.41-22
(5,2)	80	-21		6.05-25	2.61-25		4.85-22
(5,3)		-30		5.17-26	2.14-26		1.75-22
(5,4)		-40		1.48-26	5.64-27		2.95-23
(7,2)	120	-21		-	5.80-26		1.31-22
(7,3)		-30		-	4.22-27		3.92-23
(7,4)		-40		-	7.42-28		5.24-24
C(1,1)	1	0	-15	6.40-23	2.43-23	7.51-21	3.64-20
(2,1)	20			2.25-23	1.01-23	2.16-21	1.22-20
(3,1)	40			5.54-24	2.46-24	7.14-22	3.76-21
(4,1)	60			1.78-24	7.76-25	2.54-22	1.43-21
(5,1)	80			8.15-25	3.49-25	1.16-22	6.71-22
(6,1)	100			4.88-25	2.15-25	6.30-23	3.59-22
(7,1)	120			2.81-25	1.23-25	3.25-23	1.91-22
(8,1)	140			1.91-25	8.63-26	2.74-23	1.58-22
(1,2)	1		-21	1.03-22	4.31-23		1.72-19
(1,3)			-30	2.17-22	8.78-23		8.82-19
(1,4)			-40	3.26-22	1.31-22		1.41-18
(3,2)	40		-21	1.71-24	6.56-25		3.06-21
(3,3)			-30	1.60-24	6.46-25		2.99-21
(3,4)			-40	1.98-24	8.28-25		3.19-21
(5,2)	80		-21	2.01-25	8.62-26		4.77-22
(5,3)			-30	3.12-26	1.40-26		1.30-22
(5,4)			-40	2.54-26	9.79-27		3.45-23
(7,2)	120		-21	-	2.53-26		1.40-22
(7,3)			-30	-	1.61-27		3.92-23
(7,4)			-40	-	1.80-27		5.24-24

Table 2.5.3. The Thermal and Epithermal Neutron Fluxes ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$) Measured in Configurations 1 and 2 of Experiment 2.5

Position	Configuration 1		Configuration 2	
	ϕ_0 ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$)	θ' ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$)	ϕ_0 ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$)	θ' ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$)
A(1.1)	3.58 +01 ^a	2.21 +00	3.01 +01	1.28 +00
(2.1)	4.09 +01	2.21 +00	2.94 +01	9.90 -01
(3.1)	2.47 +01	1.36 +00	1.64 +01	5.55 -01
(4.1)	1.32 +01	7.40 -01	8.14 +00	2.63 -01
(5.1)	7.56 +00	3.93 -01	4.16 +00	1.30 -01
(6.1)	4.09 +00	2.16 -01	2.06 +00	6.79 -02
(7.1)	2.44 +00	1.34 -01	1.21 +00	3.71 -02
(8.1)	1.63 +00	1.02 -01	7.89 -01	2.69 -02
B(1.1)	7.39 +01	3.37 +00	7.29 +01	3.02 +00
(2.1)	5.73 +01	2.52 +00	5.68 +01	1.79 +00
(3.1)	2.86 +01	1.37 +00	2.37 +01	7.58 -01
(4.1)	1.43 +01	7.17 -01	1.06 +01	3.18 -01
(5.1)	8.14 +00	3.92 -01	5.18 +00	1.49 -01
(6.1)	4.58 +00	2.38 -01	2.88 +00	7.97 -02
(7.1)	2.79 +00	1.39 -01	1.61 +00	4.17 -02
(8.1)	1.90 +00	1.07 -01	1.12 +00	3.26 -02
C(1.1)	2.81 +02	1.14 +01	3.22 +02	1.04 +01
(2.1)	8.25 +01	3.59 +00	1.12 +02	3.01 +00
(3.1)	3.12 +01	1.45 +00	3.41 +01	9.96 -01
(4.1)	1.44 +01	7.03 -01	1.31 +01	3.54 -01
(5.1)	8.22 +00	4.03 -01	6.23 +00	1.61 -01
(6.1)	4.76 +00	2.32 -01	3.31 +00	8.78 -02
(7.1)	2.65 +00	1.42 -01	1.77 +00	4.53 -02
(8.1)	2.00 +00	1.11 -01	1.46 +00	3.82 -02

^aRead as 3.58×10^1

Table 2.5.4. Statistical Errors in the Measurement of $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ and $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ Reaction Rates in Configuration 2 of Experiment 2.5

$^{58}\text{Ni},p$		$^{64}\text{Zn},p$	
Reaction rate ($\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$)	Statistical Error (%)	Reaction rate ($\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$)	Statistical Error (%)
$> 3\times 10^{-25}$	1	$> 3\times 10^{-26}$	1
1×10^{-25}	2	1×10^{-26}	2
3×10^{-26}	3	3×10^{-27}	3
$< 1\times 10^{-26}$	5	$< 1\times 10^{-27}$	5

Table 2.5.5. Comparison of Reaction Rates Measured in Configurations 1 and 2 of Experiment 2.5

Reaction	Ratio of reaction rates measured at X = 120 cm in the two configurations		
	line A	line B	line C
$^{64}\text{Zn},p$	1/4.18	1/1.45	1/1.13
$^{58}\text{Ni},p$	1/5.76	1/1.82	1/1.45
$^{197}\text{Au},\gamma,\text{Cd}$	1/3.62	1/3.34	1/3.14
$^{197}\text{Au},\gamma,\text{Bare}$	1/2.35	1/2.02	1/1.79

Table 2.6.1. Reaction Rates ($\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$)
Measured in Experiment 2.6

Position Name	Z (cm)	$^{58}\text{Ni}, \text{p}$	$^{197}\text{Au}, \gamma$ Cadmium Covered	$^{197}\text{Au}, \gamma$ Bare
Line A : X = 50.1 cm, Y = 0 cm				
A - 1	-20	$6.26\text{-}26^{\text{a}}$	5.81-23	2.26-22
2	0	7.32-26	5.89-23	2.62-22
3	20	6.36-26	5.32-23	2.37-22
4	60	1.91-26	2.74-23	1.23-22
5	100	5.53-27	1.04-23	4.26-23
6	140	1.83-27	3.50-24	1.42-23
7	180	8.34-28	1.40-24	5.18-24
8	220	4.35-28	6.42-25	2.24-24
9	260	2.71-28	3.88-25	1.31-24
Line B : X = 0 cm, Y = 50.1 cm				
B - 1	-20	1.39-24	3.42-22	1.17-21
2	0	1.63-24	3.28-22	1.34-21
3	20	1.36-24	2.63-22	1.13-21
4	60	3.59-25	1.01-22	4.32-22
5	100	6.42-26	2.81-23	1.10-22
6	140	1.04-26	8.22-24	2.98-23
7	180	2.94-27	3.19-24	1.08-23
8	220	1.35-27	1.57-24	5.00-24
9	260	7.45-28	1.11-24	3.34-24
Line C : X = -50.1 cm, Y = 0 cm				
C - 1	-20	7.29-24	2.10-21	7.84-21
2	0	8.21-24	1.72-21	7.88-21
3	20	6.30-24	1.25-21	5.97-21
4	60	9.83-25	3.00-22	1.32-21
5	100	7.32-26	4.50-23	1.75-22
6	140	9.07-27	1.12-23	3.78-23
7	180	2.36-27	4.39-24	1.32-23
8	220	1.09-27	2.14-24	6.21-24
9	260	6.21-28	1.64-24	4.33-24

^aRead as 6.26×10^{-26}

Table 2.6.2. The Thermal and Epithermal
Neutron Fluxes ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$
 $\cdot\text{W}^{-1}$) Measured in Experiment
2.6

Position Name	ϕ_{th}	θ'
A - 1	$1.88+00^{\text{a}}$	8.10-02
2	2.27+00	8.22-02
3	2.05+00	7.42-02
4	1.07+00	3.82-02
5	3.59-01	1.45-02
6	1.19-01	4.88-03
7	4.20-02	1.95-03
8	1.77-02	8.96-04
9	1.02-02	5.41-04
B - 1	9.23+00	4.77-01
2	1.13+01	4.58-01
3	9.68+00	3.67-01
4	3.69+00	1.41-01
5	9.12-01	3.92-02
6	2.40-01	1.15-02
7	8.44-02	4.45-03
8	3.79-02	2.19-03
9	2.46-02	1.55-03
C - 1	6.43+01	2.92+00
2	6.88+01	2.40+00
3	5.29+01	1.74+00
4	1.14+01	4.19-01
5	1.45+00	6.28-02
6	2.95-01	1.56-02
7	9.72-02	6.12-03
8	4.48-02	2.99-03
9	2.95-02	2.29-03

^aRead as 1.88×10^0

Table 2.7.1. Measured Reaction Rates ($\text{sec}^{-1}\cdot\text{w}^{-1}$) and Gamma-Ray Dose Rates ($\text{mR}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{w}^{-1}$) in Configuration 1 of Experiment 2.7

Position (cm)				$^{115}\text{In}, \text{n}$	$^{58}\text{Ni}, \text{p}$	$^{27}\text{Al}, \alpha$	$^{197}\text{Au}, \gamma$ Cadmium Covered	$^{197}\text{Au}, \gamma$ Bare	^7LiF (mR/h/W)
Name	X	Y	Z						
A- 1	3	0	0	3.36-22 ^a	2.41-22	2.62-24	4.76-20	1.51-19	8.42+02
2	20			1.79-22	1.36-22	1.63-24	2.38-20	8.61-20	4.13+02
3	40			8.72-23	6.82-23	8.47-25	1.39-20	4.21-20	2.14+02
4	60			4.68-23	3.69-23	4.76-25	7.48-21	2.29-20	1.14+02
5	80			2.69-23	2.21-23	2.77-25	4.22-21	1.21-20	6.84+01
6	100			1.65-23	1.36-23	1.78-25	2.38-21	6.42-21	4.09+01
7	120			1.05-23	8.31-24	1.18-25	1.38-21	4.03-21	2.50+01
8	140			6.84-24	5.60-24	8.54-26	8.92-22	2.47-21	1.69+01
9	160			4.72-24	3.74-24	5.88-26	5.72-22	1.55-21	1.09+01
10	180			3.22-24	2.57-24	4.25-26	4.31-22	1.15-21	7.32+00
11			15	3.80-24	3.01-24	4.43-26	3.27-22	9.91-22	9.22+00
12			20	2.41-24	2.03-24	2.73-26	2.51-22	7.17-22	3.89+00
13			40	2.32-25	1.26-25	8.17-28	1.13-22	3.24-22	6.55-01
14			60	7.77-26	3.00-26	1.81-28	5.81-23	1.54-22	3.68-01
15			80	3.54-26	1.06-26	6.16-29	2.84-23	7.51-23	2.07-01
16			100	1.94-26	5.57-27	2.89-29	1.50-23	3.77-23	1.22-01
17			120	1.18-26	2.16-27	-	9.00-24	2.25-23	7.4 -02
B- 1	1		15	2.43-22	1.74-22	2.09-24	3.79-20	1.25-19	6.51+02
7	120			9.40-24	8.32-24	1.07-25	1.45-21	4.35-21	2.30+01
13	165		80	3.30-26	1.13-26	3.84-29	1.61-23	7.65-23	1.95-01
C- 1	1	-15	0	3.66-22	2.51-22	2.99-24	5.10-20	1.66-19	9.71+02
7	120			1.06-23	9.22-24	1.24-25	1.52-21	4.08-21	2.61+01
14	180		80	3.36-26	1.21-26	5.66-29	1.62-23	7.84-23	1.42-01
D- 1	1	0	-15	4.76-22	3.20-22	3.77-24	6.39-20	2.14-19	1.17+03
7	120			1.06-23	8.95-24	1.19-25	1.50-21	4.70-21	2.48+01
16	195		80	3.55-26	1.38-26	7.79-29	1.59-23	7.90-23	2.01-01
E- 1	1	15	0	2.74-22	1.86-22	2.43-24	3.99-20	1.28-19	7.90+02
7	120			1.01-23	5.90-24	1.19-25	1.47-21	4.43-21	2.47+01
14	180		80	3.45-26	-	5.84-29	1.61-23	7.78-23	2.14-01

^aRead as 3.36×10^{-22}

Table 2.7.2. Measured Reaction Rates ($\text{sec}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$) and Gamma-Ray Dose Rates ($\text{mR}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$) in Configuration 2 of Experiment 2.7

Position (cm)				$^{115}\text{In}, \text{n}$	$^{58}\text{Ni}, \text{p}$	$^{27}\text{Al}, \alpha$	$^{197}\text{Au}, \gamma$ Cadmium Covered	$^{197}\text{Au}, \gamma$ Bare	^7LiF (mR/h/W)
Name	X	Y	Z						
A- 1	3	0	0		2.47-22		7.95-20	3.80-19	
2	20				2.59-23		8.56-21	8.69-20	
3	40				4.53-24		1.80-21	2.40-20	
4	60				1.36-24		6.50-22	9.29-21	
5	80				5.88-25		3.25-22	4.53-21	
6	100				3.39-25		1.88-22	2.47-21	
7	120				2.13-25		1.16-22	1.49-21	
8	140				1.46-25		8.01-23	9.25-22	
9	160				1.18-25		6.35-23	5.96-22	
10	180				1.25-25		6.09-23	7.21-22	
11			15		3.78-25		7.88-23	7.29-22	
12			20		3.76-25		6.69-23	5.44-22	
13			40		8.93-27		5.41-24	6.45-23	
14			60		1.13-27		8.66-25	1.54-23	
15			80		-		-	4.97-24	
16			100		-		-	1.94-24	
17			120		-		-	9.14-25	
B- 1	1	0	15	2.46-22 ^a	1.74-22	2.30-24	4.05-20	1.35-19	6.86+02
3	40			3.54-23	2.75-23	3.72-25	8.07-21	3.12-20	1.21+02
5	80			1.10-23	9.06-24	1.31-25	1.95-21	7.21-21	3.23+01
7	120			4.49-24	4.21-24	6.77-26	6.25-22	2.35-21	1.37+01
9	160			2.24-24	2.03-24	3.52-26	2.55-22	9.14-22	6.01+00
10	165		20	1.93-24	1.69-24	2.81-26	1.36-22	6.39-22	6.19+00
11			40	5.46-26	1.98-26	2.03-28	2.62-23	1.14-22	2.6 -01
12			60	1.92-26	4.17-27	3.61-29	9.50-24	4.21-23	1.41-01
13			80	-	2.07-27	8.90-30	4.23-24	1.80-23	1.07-01
14			100	-	-	-	2.05-24	9.01-24	8.46-02
15			120	-	-	-	1.18-24	5.12-24	5.23-02

^aRead as 2.46×10^{-22}