

JAERI-M

6550

JMTRCに於ける中性子スペクトルの測定

箔検出器法による0.1~1MeV領域の評価

1976年5月

近藤 育朗・瀬崎 勝二・桜井 文雄

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JMTRC に於ける中性子スペクトルの測定
— 箔検出器法による 0.1 ~ 1 MeV の評価 —

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

近藤育朗・瀬崎勝二・桜井文雄

(1976年4月26日受理)

JMTRC に於て、箔放射化法による中性子スペクトルの測定を行った。特に、0.1 ~ 1 MeV エネルギーレンジの中性子束の寄与を評価することを目的として、 $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107\text{m}}\text{Ag}$ 反応を導入した。速中性子モニタとしてはIn を、低エネルギー側には3種類の共鳴検出器を用いた。スペクトルの導出にはSAND II コードを用いたが、それに必要な初期スペクトルとしては1次元SNコードANISNによる計算値を用いた。Ag 箔の導入に当ってはENDF/B - IVの $^{107}\text{Ag}(n, n')$ 反応に関する励起関数を基にして編集を行い、 $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107\text{m}}\text{Ag}$ 反応の断面積ファイルを作成してSAND II 断面積ライブラリに加えた。SAND II を2回ランさせることにより、無理のないスペクトルが得られると同時に、Ag - 箔の実用化の見通しが得られた。

JAERI-M 6550

Neutron Spectrum Measurement in JMTRC
(Evaluation in the Energy Region of 0.1-1 MeV by
Foil Activation)

Ikuo KONDO, Katsuji SEZAKI and Fumio SAKURAI

Division of JMTR Project, Oarai, JAERI

(Received April 26, 1976)

The evaluation of a reactor neutron spectrum by multi-foil activation was made at a point in the core of JMTRC. Reaction $^{107}\text{Ag}(n,n')^{107\text{m}}\text{Ag}$ should serve to estimate the contribution of neutrons in the energy range of 0.1 to 1 MeV. In was used as the only fast neutron monitor, and three resonance detectors were used to monitor the lower energy regions. Computer code SAND II was employed to determine the neutron spectrum, to which a spectrum computed by one dimensional SN code ANISN served as the first initial function. To apply $^{107}\text{Ag}(n,n')^{107\text{m}}\text{Ag}$ for the spectrum measurement, cross section data for the excitation reaction $^{107}\text{Ag}(n,n')$ were obtained from ENDF/B-IV, compiled as cross section of $^{107}\text{Ag}(n,n')^{107\text{m}}\text{Ag}$, and added to the SAND II cross section library. A reasonably acceptable spectrum was obtained by two runs of SAND II, showing feasibility of Ag as a neutron monitor just below 1 MeV.

目 次

序 文	1
1. $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107\text{m}}\text{Ag}$ 反応の利用及び断面積データ	1
2. インジウム箔の利用	2
3. 銅箔の利用	2
4. マンガン箔の利用	2
5. SAND IIコードによる処理	2
6. 初期スペクトル	3
7. JMTRCでの箔照射	4
8. 自己遮蔽効果の補正	4
9. 測定結果及びデータ処理	5
検 討	6
謝 辞	6
参考文献	7
附 録	8

List of Tables

Table 1	CSTAPE input data list for the reaction $^{107}\text{Ag}(n,n')^{107\text{m}}\text{Ag}$
Table 2	List of SAND II input
Table 3	SAND II Run 1 output 1
Table 4	SAND II Run 1 output 2
Table 5	SAND II Run 2 output 1
Table 6	SAND II Run 2 output 2

List of Figures

Fig. 1	Excitation functions for the reaction $^{107}\text{Ag}(n,n')$
Fig. 2	Energy dependent neutron cross section for the reaction $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$
Fig. 3	Energy dependent neutron cross section for the reaction $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ (Cd-covered)
Fig. 4	Energy dependent neutron cross section for the reaction $^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$
Fig. 5	Energy dependent neutron cross section for the reaction $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$
Fig. 6	Initial neutron spectrum obtained from ANISN calculation
Fig. 7	Configuration of JMTRC core
Fig. 8	Comparison of cross section curve after selfshielding correction with original one for the reaction $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ (Cd-covered)
Fig. 9	Gamma peaks from $^{107\text{m}}\text{Ag}$ and $^{109\text{m}}\text{Ag}$ of irradiated silver foil
Fig. 10	1st SAND II result
Fig. 11	2nd SAND II result
Fig. 12	Comparison of SAND II results with and without $^{107}\text{Ag}(n,n')^{107\text{m}}\text{Ag}$ data based on the initial spectrum from ANISN out
Fig. 13	Final spectrum and detector responses.

序 文

材料試験炉 J M T R に於ける照射中性子に関する情報については、1 MeV を超える高速中性子ばかりでなく、次第にそれより低いエネルギー領域に関するものも含めて要求されるようになってきている。このような背景のもとで、炉内の中性子スペクトルの評価が、実験及び計算の両面から進められているが、本報告は臨界実験装置 J M T R C を用いて進めているフォイル法による中性子スペクトル測定に関するものである。MeV 領域のフォイル放射化法によるスペクトル測定には、ニッケル、鉄、チタンその他のしきい検出器の組合せが用いられるが、何れもそのしきい反応の断面積（又は検出器としての感度）の関係から、それらの照射には、少くとも数 KW の炉出力を要する。一方、sub-MeV 領域については、しきい検出器としては、 ^{238}U 、 ^{237}Np 等の核分裂フォイルの外、 (n, n') 反応を行う核種が主体となる。核データの信頼性から云って、この種の検出器には問題が残るものの、一方、反応断面積の大きさ及び生成核の半減期から、むしろ低出力の臨界実験装置に於ける測定に適したものを選ぶことができる。その代表的なものは $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ 、 $^{109}\text{Ag}(n, n')^{109m}\text{Ag}$ 、 $^{103}\text{Rh}(n, n')^{103m}\text{Rh}$ 等の各しきい反応であり、さらに $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ 反応は MeV 領域の優れたモニタに利用できる。これらは、少くとも生成核種の減衰の速さから云って、手軽にフォイル照射の出来る臨界実験装置でこそ、その特性を生かすことができるものである。

今回の実験で検出器として選んだ反応は、 $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ 、 $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ 、 $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ 、 $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 、 $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$ で、何れもカドミウムカバーを施した状態で照射を行った。放射能データの処理は専ら SAND II [1] によっており、検出器の断面積データは、SAND II ライブラリとして予め用意されているものはそのまま使用し、含まれない $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ の断面積データは ENDF/BW の非弾性散乱のデータから編集した。

1. $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ 反応の利用及び断面積データ

銀をしきい検出器として利用する場合、 $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ 及び $^{109}\text{Ag}(n, n')^{109m}\text{Ag}$ の2種類の反応が考えられるが、何れも、その断面積についての実験データがないため、非弾性励起断面積の励起レベル毎の値と、各励起レベルから準安定状態に至る確率とから計算する必要がある。 ^{107}Ag 及び ^{109}Ag の (n, n') 反応の断面積データは、核データファイル ENDF/B の Bhat and Prince の理論計算によるもの [3] が形式的にまとまった唯一のものであるが、何れの反応についても、ある励起準位以上については分離されない状態で断面積値が与えられている。一方、崩壊形式についての幾つかのデータのうち、Table of Isotopes [4] によれば、 ^{107}Ag については 1.222 MeV から、 ^{109}Ag については 0.86 MeV のエネルギー準位から、夫々の準安定状態に至る割合が相当にあり、しかもこれらのエネルギーレベルは、上記の断面積ファイルでは連続領域として一括された範囲に含まれるため、準安定状態に至る実効的な断面積に対する、その崩壊の寄与が明確でない。本報告では取敢えず ^{107}Ag のみを取上げ、上記の寄与を無視して $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ の断面積を計算した。この様にして得られた断面積の値の良否は、組合せフォイル法の SAND II による処理過程で明らかになると期待される。Fig. 1 に ^{107}Ag の励起準位別の断面積（励起関数）及びこれらをもとに計算した $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ の断面積カーブを示す。これを SAND II の断面積ライブラリに加えるため Table 1

序 文

材料試験炉 J M T R に於ける照射中性子に関する情報については、1 MeV を超える高速中性子ばかりでなく、次第にそれより低いエネルギー領域に関するものも含めて要求されるようになってきている。このような背景のもとで、炉内の中性子スペクトルの評価が、実験及び計算の両面から進められているが、本報告は臨界実験装置 J M T R C を用いて進めているフォイル法による中性子スペクトル測定に関するものである。MeV 領域のフォイル放射化法によるスペクトル測定には、ニッケル、鉄、チタンその他のしきい検出器の組合せが用いられるが、何れもそのしきい反応の断面積（又は検出器としての感度）の関係から、それらの照射には、少くとも数 KW の炉出力を要する。一方、sub-MeV 領域については、しきい検出器としては、 ^{238}U 、 ^{237}Np 等の核分裂フォイルの外、 (n, n') 反応を行う核種が主体となる。核データの信頼性から云って、この種の検出器には問題が残るものの、一方、反応断面積の大きさ及び生成核の半減期から、むしろ低出力の臨界実験装置に於ける測定に適したものを選ぶことができる。その代表的なものは $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ 、 $^{109}\text{Ag}(n, n')^{109m}\text{Ag}$ 、 $^{103}\text{Rh}(n, n')^{103m}\text{Rh}$ 等の各しきい反応であり、さらに $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ 反応は MeV 領域の優れたモニタに利用できる。これらは、少くとも生成核種の減衰の速さから云って、手軽にフォイル照射の出来る臨界実験装置でこそ、その特性を生かすことができるものである。

今回の実験で検出器として選んだ反応は、 $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ 、 $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ 、 $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ 、 $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 、 $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$ で、何れもカドミウムカバーを施した状態で照射を行った。放射能データの処理は専ら SAND II [1] によっており、検出器の断面積データは、SAND II ライブラリとして予め用意されているものはそのまま使用し、含まれない $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ の断面積データは ENDF/BV の非弾性散乱のデータから編集した。

1. $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ 反応の利用及び断面積データ

銀をしきい検出器として利用する場合、 $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ 及び $^{109}\text{Ag}(n, n')^{109m}\text{Ag}$ の 2 種類の反応が考えられるが、何れも、その断面積についての実験データがないため、非弾性励起断面積の励起レベル毎の値と、各励起レベルから準安定状態に至る確率とから計算する必要がある。 ^{107}Ag 及び ^{109}Ag の (n, n') 反応の断面積データは、核データファイル ENDF/B の Bhat and Prince の理論計算によるもの [3] が形式的にまとまった唯一のものであるが、何れの反応についても、ある励起準位以上については分離されない状態で断面積値が与えられている。一方、崩壊形式についての幾つかのデータのうち、Table of Isotopes [4] によれば、 ^{107}Ag については 1.222 MeV から、 ^{109}Ag については 0.86 MeV のエネルギー準位から、夫々の準安定状態に至る割合が相当にあり、しかも、これらのエネルギーレベルは、上記の断面積ファイルでは連続領域として一括された範囲に含まれるため、準安定状態に至る実効的な断面積に対する、その崩壊の寄与が明確でない。本報告では取敢えず ^{107}Ag のみを取上げ、上記の寄与を無視して $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ の断面積を計算した。この様にし得られた断面積の値の良否は、組合せフォイル法の SAND II による処理過程で明らかになると期待される。Fig. 1 に ^{107}Ag の励起準位別の断面積（励起関数）及びこれらをもとに計算した $^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$ の断面積カーブを示す。これを SAND II の断面積ライブラリに加えるため Table 1

の様なファイルを作成した。620群形式のSANDII用断面積ライブラリを作成するには、サブプログラムCSTAPEを用いるが、その入力データ形式で保存されている既成の断面積ライブラリのファイルに上述の ^{107}Ag の単独ファイルを加え、さらにそれを入力としてCSTAPEをランさせることにより、新しいSANDIIライブラリが出来る。

2. インジウム箔の利用

$^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ 反応は、1 MeV近傍にしきいエネルギーを持ち、しかも比較的低下中性子束で容易にファイルの放射化量が得られる点で、高速中性子のモニタとしては特徴的である。断面積データは、既成のSANDIIライブラリのもをそのまま使用した。一般に (n, n') 反応による準安定核種生成の断面積評価には、前項の銀の場合のように、誤差の入り込む可能性が大きく、 ^{115}In の場合も、既成の幾つかの評価済みデータの間有意の差が認められるが、それによる影響は別に報告したい。ここでは、 $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ 反応は、高エネルギー側の中性子束の代表値を与えるために用いる。Fig. 2に同反応の断面積曲線を示す。

一方 $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$ 反応は、上述の高速中性子モニタとしてインジウムを使用する際、付随的に利用できるもので、数eVのエネルギー領域に共鳴ピークを持つ。Fig. 3に断面積曲線を示す。

3. 銅箔の利用

$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 反応の共鳴ピークは、比較的高いエネルギー領域に分布しているため、0.1 MeV近傍への低エネルギー側からの内挿に有力な足がかりを与える。Fig. 4に同反応の断面積データを示す。

4. マンガン箔の利用

銅フォイルと共に共鳴領域のスペクトルデータの信頼性を上げるために $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ 反応を利用する。数百eVの領域に共鳴ピークを持つ。Fig. 5に断面積曲線を示す。

5. SAND II コードによる処理

SANDIIは1967年にMcElroyらによって開発された組合せフォイル放射能データのunfolding用のコードである。このコードの特徴のひとつは、初期スペクトルを詳細なテーブルで与えて使用することができる点である。計算は620エネルギー群に対して行われ、対象とするエネルギーレンジは $10^{-10} \sim 18\text{MeV}$ である。処理のプロセスとしては、初期スペクトルから始めて、順次これを入力で与えられた箔放射能の測定値に合うように修正してゆく方法をとるが、それは最小自乗法により最適解を求める手法ではないので、逆マトリクスを計算する過程がなく、上記のような多群でスペクトルを扱うことができる。この方法では、解スペクトルは、それを使って計算した検出器放射能が、各々の実測値に、与えられた誤差範囲で一致し、しかもその形状が理論的に無理のない場合に適当と見做される。

このコードによるスペクトル修正のプロセスは以下のようなものである。即ち、プログラムは第*i*番目の検出器の放射能について、計算値と実測値との比 R_i を計算する。そのとき、計算値のもとになるスペクトルは、最初は初期スペクトル、その後は1回前の繰返し過程による修正スペクトルである。この

の様なファイルを作成した。620群形式のSANDII用断面積ライブラリを作成するには、サブプログラムCSTAPEを用いるが、その入力データ形式で保存されている既成の断面積ライブラリのファイルに上述の ^{107}Ag の単独ファイルを加え、さらにそれを入力としてCSTAPEをランさせることにより、新しいSANDIIライブラリが出来る。

2. インジウム箔の利用

$^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ 反応は、1 MeV近傍にしきいエネルギーを持ち、しかも比較的低下中性子束で容易にファイルの放射化量が得られる点で、高速中性子のモニタとしては特徴的である。断面積データは、既成のSANDIIライブラリのもをそのまま使用した。一般に (n, n') 反応による準安定核種生成の断面積評価には、前項の銀の場合のように、誤差の入り込む可能性が大きく、 ^{115}In の場合も、既成の幾つかの評価済みデータの間有意の差が認められるが、それによる影響は別に報告したい。ここでは、 $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ 反応は、高エネルギー側の中性子束の代表値を与えるために用いる。Fig. 2に同反応の断面積曲線を示す。

一方 $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$ 反応は、上述の高速中性子モニタとしてインジウムを使用する際、付随的に利用できるもので、数eVのエネルギー領域に共鳴ピークを持つ。Fig. 3に断面積曲線を示す。

3. 銅箔の利用

$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 反応の共鳴ピークは、比較的高いエネルギー領域に分布しているため、0.1 MeV近傍への低エネルギー側からの内挿に有力な足がかりを与える。Fig. 4に同反応の断面積データを示す。

4. マンガン箔の利用

銅フォイルと共に共鳴領域のスペクトルデータの信頼性を上げるために $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ 反応を利用する。数百eVの領域に共鳴ピークを持つ。Fig. 5に断面積曲線を示す。

5. SAND II コードによる処理

SANDIIは1967年にMcElroyらによって開発された組合せフォイル放射能データのunfolding用のコードである。このコードの特徴のひとつは、初期スペクトルを詳細なテーブルで与えて使用することができる点である。計算は620エネルギー群に対して行われ、対象とするエネルギーレンジは $10^{-10} \sim 18\text{MeV}$ である。処理のプロセスとしては、初期スペクトルから始めて、順次これを入力で与えられた箔放射能の測定値に合うように修正してゆく方法をとるが、それは最小自乗法により最適解を求める手法ではないので、逆マトリクスを計算する過程がなく、上記のような多群でスペクトルを扱うことができる。この方法では、解スペクトルは、それを使って計算した検出器放射能が、各々の実測値に、与えられた誤差範囲で一致し、しかもその形状が理論的に無理のない場合に適当と見做される。

このコードによるスペクトル修正のプロセスは以下のようなものである。即ち、プログラムは第*i*番目の検出器の放射能について、計算値と実測値との比 R_i を計算する。そのとき、計算値のもとになるスペクトルは、最初は初期スペクトル、その後は1回前の繰返し過程による修正スペクトルである。この

の様なファイルを作成した。620群形式のSANDII用断面積ライブラリを作成するには、サブプログラムCSTAPEを用いるが、その入力データ形式で保存されている既成の断面積ライブラリのファイルに上述の ^{107}Ag の単独ファイルを加え、さらにそれを入力としてCSTAPEをランさせることにより、新しいSANDIIライブラリが出来る。

2. インジウム箔の利用

$^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ 反応は、1 MeV近傍にしきいエネルギーを持ち、しかも比較的low中性子束で容易にファイルの放射化量が得られる点で、高速中性子のモニタとしては特徴的である。断面積データは、既成のSANDIIライブラリのもをそのまま使用した。一般に (n, n') 反応による準安定核種生成の断面積評価には、前項の銀の場合のように、誤差の入り込む可能性が大きく、 ^{115}In の場合も、既成の幾つかの評価済みデータの間有意の差が認められるが、それによる影響は別に報告したい。ここでは、 $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ 反応は、高エネルギー側の中性子束の代表値を与えるために用いる。Fig. 2に同反応の断面積曲線を示す。

一方 $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$ 反応は、上述の高速中性子モニタとしてインジウムを使用する際、付随的に利用できるもので、数eVのエネルギー領域に共鳴ピークを持つ。Fig. 3に断面積曲線を示す。

3. 銅箔の利用

$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 反応の共鳴ピークは、比較的高いエネルギー領域に分布しているため、0.1 MeV近傍への低エネルギー側からの内挿に有力な足がかりを与える。Fig. 4に同反応の断面積データを示す。

4. マンガン箔の利用

銅フォイルと共に共鳴領域のスペクトルデータの信頼性を上げるために $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ 反応を利用する。数百eVの領域に共鳴ピークを持つ。Fig. 5に断面積曲線を示す。

5. SAND II コードによる処理

SANDIIは1967年にMcElroyらによって開発された組合せフォイル放射能データのunfolding用のコードである。このコードの特徴のひとつは、初期スペクトルを詳細なテーブルで与えて使用することができる点である。計算は620エネルギー群に対して行われ、対象とするエネルギーレンジは $10^{-10} \sim 18\text{MeV}$ である。処理のプロセスとしては、初期スペクトルから始めて、順次これを入力で与えられた箔放射能の測定値に合うように修正してゆく方法をとるが、それは最小自乗法により最適解を求める手法ではないので、逆マトリクスを計算する過程がなく、上記のような多群でスペクトルを扱うことができる。この方法では、解スペクトルは、それを使って計算した検出器放射能が、各々の実測値に、与えられた誤差範囲で一致し、しかもその形状が理論的に無理のない場合に適当と見做される。

このコードによるスペクトル修正のプロセスは以下のようなものである。即ち、プログラムは第*i*番目の検出器の放射能について、計算値と実測値との比 R_i を計算する。そのとき、計算値のもとになるスペクトルは、最初は初期スペクトル、その後は1回前の繰返し過程による修正スペクトルである。この

の様なファイルを作成した。620群形式のSANDII用断面積ライブラリを作成するには、サブプログラムCSTAPEを用いるが、その入力データ形式で保存されている既成の断面積ライブラリのファイルに上述の ^{107}Ag の単独ファイルを加え、さらにそれを入力としてCSTAPEをランさせることにより、新しいSANDIIライブラリが出来る。

2. インジウム箔の利用

$^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ 反応は、1 MeV近傍にしきいエネルギーを持ち、しかも比較的low中性子束で容易にファイルの放射化量が得られる点で、高速中性子のモニタとしては特徴的である。断面積データは、既成のSANDIIライブラリのもをそのまま使用した。一般に (n, n') 反応による準安定核種生成の断面積評価には、前項の銀の場合のように、誤差の入り込む可能性が大きく、 ^{115}In の場合も、既成の幾つかの評価済みデータの間には有意の差が認められるが、それによる影響は別に報告したい。ここでは、 $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ 反応は、高エネルギー側の中性子束の代表値を与えるために用いる。Fig. 2に同反応の断面積曲線を示す。

一方 $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$ 反応は、上述の高速中性子モニタとしてインジウムを使用する際、付随的に利用できるもので、数eVのエネルギー領域に共鳴ピークを持つ。Fig. 3に断面積曲線を示す。

3. 銅箔の利用

$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 反応の共鳴ピークは、比較的高いエネルギー領域に分布しているため、0.1 MeV近傍への低エネルギー側からの内挿に有力な足がかりを与える。Fig. 4に同反応の断面積データを示す。

4. マンガン箔の利用

銅フォイルと共に共鳴領域のスペクトルデータの信頼性を上げるために $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ 反応を利用する。数百eVの領域に共鳴ピークを持つ。Fig. 5に断面積曲線を示す。

5. SAND II コードによる処理

SANDIIは1967年にMcElroyらによって開発された組合せフォイル放射能データのunfolding用のコードである。このコードの特徴のひとつは、初期スペクトルを詳細なテーブルで与えて使用することができる点である。計算は620エネルギー群に対して行われ、対象とするエネルギーレンジは $10^{-10} \sim 18\text{MeV}$ である。処理のプロセスとしては、初期スペクトルから始めて、順次これを入力で与えられた箔放射能の測定値に合うように修正してゆく方法をとるが、それは最小自乗法により最適解を求める手法ではないので、逆マトリクスを計算する過程がなく、上記のような多群でスペクトルを扱うことができる。この方法では、解スペクトルは、それを使って計算した検出器放射能が、各々の実測値に、与えられた誤差範囲で一致し、しかもその形状が理論的に無理のない場合に適当と見做される。

このコードによるスペクトル修正のプロセスは以下のようなものである。即ち、プログラムは第*i*番目の検出器の放射能について、計算値と実測値との比 R_i を計算する。そのとき、計算値のもとになるスペクトルは、最初は初期スペクトル、その後は1回前の繰返し過程による修正スペクトルである。この

の様なファイルを作成した。620群形式のSANDII用断面積ライブラリを作成するには、サブプログラムCSTAPEを用いるが、その入力データ形式で保存されている既成の断面積ライブラリのファイルに上述の ^{107}Ag の単独ファイルを加え、さらにそれを入力としてCSTAPEをランさせることにより、新しいSANDIIライブラリが出来る。

2. インジウム箔の利用

$^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ 反応は、1 MeV近傍にしきいエネルギーを持ち、しかも比較的low中性子束で容易にファイルの放射化量が得られる点で、高速中性子のモニタとしては特徴的である。断面積データは、既成のSANDIIライブラリのもをそのまま使用した。一般に (n, n') 反応による準安定核種生成の断面積評価には、前項の銀の場合のように、誤差の入り込む可能性が大きく、 ^{115}In の場合も、既成の幾つかの評価済みデータの間有意の差が認められるが、それによる影響は別に報告したい。ここでは、 $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ 反応は、高エネルギー側の中性子束の代表値を与えるために用いる。Fig. 2に同反応の断面積曲線を示す。

一方 $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ 反応は、上述の高速中性子モニタとしてインジウムを使用する際、付随的に利用できるもので、数eVのエネルギー領域に共鳴ピークを持つ。Fig. 3に断面積曲線を示す。

3. 銅箔の利用

$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ 反応の共鳴ピークは、比較的高いエネルギー領域に分布しているため、0.1 MeV近傍への低エネルギー側からの内挿に有力な足がかりを与える。Fig. 4に同反応の断面積データを示す。

4. マンガン箔の利用

銅フォイルと共に共鳴領域のスペクトルデータの信頼性を上げるために $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ 反応を利用する。数百eVの領域に共鳴ピークを持つ。Fig. 5に断面積曲線を示す。

5. SAND II コードによる処理

SANDIIは1967年にMcElroyらによって開発された組合せフォイル放射能データのunfolding用のコードである。このコードの特徴のひとつは、初期スペクトルを詳細なテーブルで与えて使用することができる点である。計算は620エネルギー群に対して行われ、対象とするエネルギーレンジは $10^{-10} \sim 18\text{MeV}$ である。処理のプロセスとしては、初期スペクトルから始めて、順次これを入力で与えられた箔放射能の測定値に合うように修正してゆく方法をとるが、それは最小自乗法により最適解を求める手法ではないので、逆マトリクスを計算する過程がなく、上記のような多群でスペクトルを扱うことができる。この方法では、解スペクトルは、それを使って計算した検出器放射能が、各々の実測値に、与えられた誤差範囲で一致し、しかもその形状が理論的に無理のない場合に適当と見做される。

このコードによるスペクトル修正のプロセスは以下のようなものである。即ち、プログラムは第*i*番目の検出器の放射能について、計算値と実測値との比 R_i を計算する。そのとき、計算値のもとになるスペクトルは、最初は初期スペクトル、その後は1回前の繰返し過程による修正スペクトルである。この

R_i は、次の修正に使われることになるが、そのとき次式の C_j が導入される。即ち、

$$C_j^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij}^{(k)} \ln R_i^{(k)}}{\sum_i W_{ij}^{(k)}} .$$

ここに

- n : 検出器の数
- j : 第 j エネルギー数
- W : 重み関数
- k : 第 k 番目の繰返し

第 j 群の中性子束に対して以下の修正を行う。

$$\varphi_j^{[k+1]} = \varphi_j^{[k]} \exp(C_j^{[k]})$$

但し、この修正が行われるのは $\sum_{i=1}^n W_{ij}^{[k]} \neq 0$ の場合であって、 $= 0$ となるエネルギー区間については $\log-\log$ 内挿が適用される。

重み係数 $W_{ij}^{[k]}$ は次式で定義される。

$$W_{ij}^{[k]} \equiv A_{ij}^{[k]} / A_i^{[k]}$$

$$A_{ij}^{[k]} \equiv \varphi_j^{[k]} \sigma_{ij} (E_{j+1} - E_j)$$

$$A_i^{[k]} \equiv \sum_{j=1}^{620} A_{ij}^{[k]}$$

6. 初期スペクトル

既述の如く、SANDII は或る初期スペクトルを、実測された検出器の放射能の組合せに合うように、順次修正して行く方式をとる。初期スペクトルとしては、SANDII で取扱う全エネルギーに亘っての関数として与えられることが望ましい。一方、一次元 SN コード ANISN の JMTR 炉心への適用が試みられており、現時点では、その計算結果が、初期スペクトルとして使用できる唯一のものである。

この ANISN 計算に於いて行われた近似は、一次元モデル作成のために、燃料領域に於いては、燃料要素が中心より 2.5 層分のスラブ状炉心を、反射体領域に於ては、キャプセル等一切の炉心挿入物のないベリリウム反射体 2 層とアルミ領域とを想定している。この計算結果の実績としては、鉄、ニッケル等のフルエンスモニタをデータ処理する際、その照射位置（第何層目か）の中性子スペクトルとして用いられて来たことと、それらの処理結果が、2次元 4 群拡散計算による推定フルエンスと矛盾しないことである。しかし、1 MeV 以下のエネルギー範囲については既に減速材により散乱を受けた中性子が主体になることから、上記の実績が必ずしも sub-MeV 領域に於ける信頼性につながるもの

R_i は、次の修正に使われることになるが、そのとき次式の C_j が導入される。即ち、

$$C_j^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij}^{(k)} \ln R_i^{(k)}}{\sum_i W_{ij}^{(k)}} .$$

ここに

- n : 検出器の数
- j : 第 j エネルギー数
- W : 重み関数
- k : 第 k 番目の繰返し

第 j 群の中性子束に対して以下の修正を行う。

$$\varphi_j^{[k+1]} = \varphi_j^{[k]} \exp(C_j^{[k]})$$

但し、この修正が行われるのは $\sum_{i=1}^n W_{ij}^{[k]} \neq 0$ の場合であって、 $= 0$ となるエネルギー区間については $\log\text{-}\log$ 内挿が適用される。

重み係数 $W_{ij}^{[k]}$ は次式で定義される。

$$W_{ij}^{[k]} \equiv A_{ij}^{[k]} / A_i^{[k]}$$

$$A_{ij}^{[k]} \equiv \varphi_j^{[k]} \sigma_{ij} (E_{j+1} - E_j)$$

$$A_i^{[k]} \equiv \sum_{j=1}^{620} A_{ij}^{[k]}$$

6. 初期スペクトル

既述の如く、SANDII は或る初期スペクトルを、実測された検出器の放射能の組合せに合うように、順次修正して行く方式をとる。初期スペクトルとしては、SANDII で取扱う全エネルギーに亘っての関数として与えられることが望ましい。一方、一次元 SN コード ANISN の JMTR 炉心への適用が試みられており、現時点では、その計算結果が、初期スペクトルとして使用できる唯一のものである。

この ANISN 計算に於いて行われた近似は、一次元モデル作成のために、燃料領域に於いては、燃料要素が中心より 2.5 層分のスラブ状炉心を、反射体領域に於ては、キャプセル等一切の炉心挿入物のないベリリウム反射体 2 層とアルミ領域とを想定している。この計算結果の実績としては、鉄、ニッケル等のフルエンスモニタをデータ処理する際、その照射位置（第何層目か）の中性子スペクトルとして用いられて来たことと、それらの処理結果が、2次元 4 群拡散計算による推定フルエンスと矛盾しないことである。しかし、1 MeV 以下のエネルギー範囲については既に減速材により散乱を受けた中性子が主体になることから、上記の実績が必ずしも sub-MeV 領域に於ける信頼性につながるもの

ではない。ここでは、ANISNのスペクトルを初期関数として設定し、これをSANDII計算の収斂スペクトルとにらみ合せて補正を行い、再びSANDIIをランさせることにより、最終的に、論理的に無理のないスペクトル形状を得ることとした。Fig. 6に今回使用した初期スペクトルを示す。

7. JMTRCでの箔照射

今回の測定は、JMTRCの炉心番号C-68のベリリウム反射体領域第一層目、格子番号M-7位置のプラグ孔に中空のアルミニウムパイプを半挿入状態にし、検出器類はパイプ底部、即ち炉心の中心レベルで照射される様にした。Fig. 7に測定時の炉心構成を示す。

検出器類はすべて厚さ1mmのカドミウムカバーを被せた状態で照射した。炉出力は約100W、照射時間は2時間とした。

箔照射に中空パイプを用いたのは、炉運転中にしきい検出器としての銀の挿入取出しを容易にするためである。即ち、2個の銀フォイルを用意し、3分照射30秒冷却40秒計測を交互に10回ずつ繰返した。他のフォイルと同様、銀の場合もGe(Li)検出器(ORTEC)-4096チャンネル波高分析器系で γ 計測を行ったが、この場合、短い半減期のために、数え落しの時間依存を考慮することが必要となり、専用の計算コードを作成した。このコードでは、40秒の計数中に減衰するのは ^{107m}Ag と ^{109m}Ag とによる2つの γ -ピークだけであり、他の原因による放射能は一定であるという仮定が基礎になっている。

8. 自己遮蔽効果の補正

共鳴検出器に対する自己遮蔽効果補正の方法として、採用したのは、SANDII用の断面積ライブラリ上に於いて、エネルギーの関数として620群で与えられる断面積値ひとつひとつについて、フォイルの仕様に合った補正を行い、この補正が施された断面積ライブラリを用いてSANDII処理を行うやり方である。この方法の利点は、補正に際して中性子スペクトルを仮定する必要がないことであり、一方、問題点としては、共鳴ピークに於けるサンプリング点のとり方が補正值に影響を与える可能性があることであり、この点については別に報告したい。

プログラムSELS^{[5][6]}は、上述の様な補正を目的として作成された計算コードであり、これにより、オリジナルの断面積ライブラリに、補正済み断面積データを加え、順次内容を拡大して行くことができる。このプログラムによる補正式を以下に示す。

$$\{ \sigma(\text{補正済}) \}_i = G(\tau_i) \cdot \{ \sigma(\text{オリジナル}) \}_i$$

$$i = 1, 2, \dots, 620$$

$$\tau_i = N_V \sigma_i t$$

N_V : 単位体積当りの標的核種

t : フォイル厚さ

$$G(\tau_i) = \frac{1 - 2E_3(\tau_i)}{2\tau_i}$$

ではない。ここでは、ANISNのスペクトルを初期関数として設定し、これをSANDII計算の収斂スペクトルとにらみ合せて補正を行い、再びSANDIIをランさせることにより、最終的に、論理的に無理のないスペクトル形状を得ることにした。Fig. 6に今回使用した初期スペクトルを示す。

7. JMTRCでの箔照射

今回の測定は、JMTRCの炉心番号C-68のベリリウム反射体領域第一層目、格子番号M-7位置のプラグ孔に中空のアルミニウムパイプを半挿入状態にし、検出器類はパイプ底部、即ち炉心の中心レベルで照射される様にした。Fig. 7に測定時の炉心構成を示す。

検出器類はすべて厚さ1mmのカドミウムカバーを被せた状態で照射した。炉出力は約100W、照射時間は2時間とした。

箔照射に中空パイプを用いたのは、炉運転中にしきい検出器としての銀の挿入取出しを容易にするためである。即ち、2個の銀フォイルを用意し、3分照射30秒冷却40秒計測を交互に10回ずつ繰返した。他のフォイルと同様、銀の場合もGe(Li)検出器(ORTEC)-4096チャンネル波高分析器系で γ 計測を行ったが、この場合、短い半減期のために、数え落しの時間依存を考慮することが必要となり、専用の計算コードを作成した。このコードでは、40秒の計数中に減衰するのは ^{107m}Ag と ^{109m}Ag とによる2つの γ -ピークだけであり、他の原因による放射能は一定であるという仮定が基礎になっている。

8. 自己遮蔽効果の補正

共鳴検出器に対する自己遮蔽効果補正の方法として、採用したのは、SANDII用の断面積ライブラリ上に於いて、エネルギーの関数として620群で与えられる断面積値ひとつひとつについて、フォイルの仕様に合った補正を行い、この補正が施された断面積ライブラリを用いてSANDII処理を行うやり方である。この方法の利点は、補正に際して中性子スペクトルを仮定する必要がないことであり、一方、問題点としては、共鳴ピークに於けるサンプリング点のとり方が補正值に影響を与える可能性があることであり、この点については別に報告したい。

プログラムSELS^{[5][6]}は、上述の様な補正を目的として作成された計算コードであり、これにより、オリジナルの断面積ライブラリに、補正済み断面積データを加え、順次内容を拡大して行くことができる。このプログラムによる補正式を以下に示す。

$$\{ \sigma(\text{補正済}) \}_i = G(\tau_i) \cdot \{ \sigma(\text{オリジナル}) \}_i$$

$$i = 1, 2, \dots, 620$$

$$\tau_i = N_V \sigma_i t$$

N_V : 単位体積当りの標的核種

t : フォイル厚さ

$$G(\tau_i) = \frac{1 - 2E_3(\tau_i)}{2\tau_i}$$

ではない。ここでは、ANISNのスペクトルを初期関数として設定し、これをSANDII計算の収斂スペクトルとにらみ合せて補正を行い、再びSANDIIをランさせることにより、最終的に、論理的に無理のないスペクトル形状を得ることにした。Fig. 6に今回使用した初期スペクトルを示す。

7. JMTRCでの箔照射

今回の測定は、JMTRCの炉心番号C-68のベリリウム反射体領域第一層目、格子番号M-7位置のプラグ孔に中空のアルミニウムパイプを半挿入状態にし、検出器類はパイプ底部、即ち炉心の中心レベルで照射される様にした。Fig. 7に測定時の炉心構成を示す。

検出器類はすべて厚さ1mmのカドミウムカバーを被せた状態で照射した。炉出力は約100W、照射時間は2時間とした。

箔照射に中空パイプを用いたのは、炉運転中にしきい検出器としての銀の挿入取出しを容易にするためである。即ち、2個の銀フォイルを用意し、3分照射30秒冷却40秒計測を交互に10回ずつ繰返した。他のフォイルと同様、銀の場合もGe(Li)検出器(ORTEC)-4096チャンネル波高分析器系で γ 計測を行ったが、この場合、短い半減期のために、数え落しの時間依存を考慮することが必要となり、専用の計算コードを作成した。このコードでは、40秒の計数中に減衰するのは ^{107m}Ag と ^{109m}Ag とによる2つの γ -ピークだけであり、他の原因による放射能は一定であるという仮定が基礎になっている。

8. 自己遮蔽効果の補正

共鳴検出器に対する自己遮蔽効果補正の方法として、採用したのは、SANDII用の断面積ライブラリ上に於いて、エネルギーの関数として620群で与えられる断面積値ひとつひとつについて、フォイルの仕様に合った補正を行い、この補正が施された断面積ライブラリを用いてSANDII処理を行うやり方である。この方法の利点は、補正に際して中性子スペクトルを仮定する必要がないことであり、一方、問題点としては、共鳴ピークに於けるサンプリング点のとり方が補正值に影響を与える可能性があることであり、この点については別に報告したい。

プログラムSELEFS^{[5][6]}は、上述の様な補正を目的として作成された計算コードであり、これにより、オリジナルの断面積ライブラリに、補正済み断面積データを加え、順次内容を拡大して行くことができる。このプログラムによる補正式を以下に示す。

$$\{ \sigma(\text{補正済}) \}_i = G(\tau_i) \cdot \{ \sigma(\text{オリジナル}) \}_i$$

$$i = 1, 2, \dots, 620$$

$$\tau_i = N_V \sigma_i t$$

N_V : 単位体積当りの標的核種

t : フォイル厚さ

$$G(\tau_i) = \frac{1 - 2E_3(\tau_i)}{2\tau_i}$$

$$E_3(\tau_1) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-\tau_1 t}}{t^3} dt$$

9. 測定結果及びデータ処理

検出器の仕様, 利用した反応およびそれらに対応して得られた放射能データは以下の通りである。

箔種類	厚さ (mm)	反 応	放射能 (dps/atom)
In	0.254	$^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$	5.769×10^{-17}
		$^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116\text{m}}\text{In}$	5.809×10^{-14}
Ag	2.0	$^{107}\text{Ag}(n, n')^{107\text{m}}\text{Ag}$	7.053×10^{-17}
Cu	0.254	$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	1.896×10^{-16}
81.3%Mn-Cu	0.508	$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$	6.323×10^{-16}

これらのうち, 共鳴検出器については, 断面積ライブラリに自己遮蔽の補正を施したデータを加え, SANDII 処理では, それら補正断面積を用いた。Fig. 8 は $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ 反応断面積を上記の厚さについて自己遮蔽補正したものを, オリジナルデータと比較したものである。

$^{107\text{m}}\text{Ag}$ の生成量は, Fig. 9 のような計数結果をもとにして附録に示す方法により処理して得た。さらに, 放射能測定時の γ 線自己吸収のための補正係数 0.940 を考慮する必要がある。(ANL-5800 に於ける Sn の全重量減衰係数を準用) 又, フォイルの厚さから, 自己遮蔽効果を見逃さず, 全断面積を使った補正を断面積データに対して行った。

初期スペクトルとしては, ANISN スペクトルのうちベリリウム第 1 層目に対応するものを用いた。Table 2 は SANDII の入力リスト, Table 3 は初期スペクトルから計算した各検出器の理論放射能値と, 実測値との比較である。Table 4 は, 両者の偏差の自乗平均が入力で指定した 5% 以下になるまで初期スペクトルに修正を加えた結果であり, Fig. 10 にその収斂スペクトルを示す。これは 5 回の繰返し計算の結果である。

この図からわかる通り, $10^{-2} \sim 10^{-1}$ MeV の検出器感度の及ばないエネルギー範囲では, 初期スペクトルが保存されており, 更に低いエネルギーでは, 共鳴検出器の測定値によりスペクトル形状が支持されていることがわかる。これをもとに, 検出器感度の及ばない範囲を同図の破線で示すように内挿したものが, より実際に近いと考えられる。これを初期スペクトルとして再び SANDII をランさせるると Table 5, 6 の如く 2 回の繰返しで収斂し, Fig. 11 に示すスペクトルが得られる。今回の測定では, 1 MeV 以上のエネルギー領域を対象とした検出器は, In 1 種類であるため, 上述の SANDII における繰返し計算と共に形状の変化する高エネルギー領域のスペクトル形状の正当性については必ずしも保証はないが, $^{115}\text{In}(n, n')^{116\text{m}}\text{In}$ のしきい値以上の中性子束積分値は保存されている。従って, 1 MeV 以上のエネルギー積分中性子束を基準にして, Sub-MeV から共鳴エネルギーに至るスペクトルを議論することは可能である。

今 0.1~1.0 MeV と 1 MeV 以上の中性子束比を ANISN スペクトルと, 最終スペクトルについて比較すると下表のようになる。

$$E_3(\tau_i) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-\tau_i t}}{t^3} dt$$

9. 測定結果及びデータ処理

検出器の仕様、利用した反応およびそれらに対応して得られた放射能データは以下の通りである。

箔種類	厚さ (mm)	反 応	放射能 (dps/atom)
In	0.254	$^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$	5.769×10^{-17}
		$^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$	5.809×10^{-14}
Ag	2.0	$^{107}\text{Ag}(n, n')^{107m}\text{Ag}$	7.053×10^{-17}
Cu	0.254	$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	1.896×10^{-16}
81.3%Mn-Cu	0.508	$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$	6.323×10^{-16}

これらのうち、共鳴検出器については、断面積ライブラリに自己遮蔽の補正を施したデータを加え、SANDII処理では、それら補正断面積を用いた。Fig. 8は $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$ 反応断面積を上記の厚さについて自己遮蔽補正したものを、オリジナルデータと比較したものである。

^{107m}Ag の生成量は、Fig. 9のような計数結果をもとにして附録に示す方法により処理して得た。さらに、放射能測定時の γ 線自己吸収のための補正係数0.940を考慮する必要がある。(ANL-5800に於けるSnの全重量減衰係数を準用)又、フォイルの厚さから、自己遮蔽効果を見逃さず、全断面積を使った補正を断面積データに対して行った。

初期スペクトルとしては、ANISNスペクトルのうちベリリウム第1層目に対応するものを用いた。Table 2はSANDIIの入力リスト、Table 3は初期スペクトルから計算した各検出器の理論放射能値と、実測値との比較である。Table 4は、両者の偏差の自乗平均が入力で指定した5%以下になるまで初期スペクトルに修正を加えた結果であり、Fig. 10にその収斂スペクトルを示す。これは5回の繰返し計算の結果である。

この図からわかる通り、 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ MeVの検出器感度の及ばないエネルギー範囲では、初期スペクトルが保存されており、更に低いエネルギーでは、共鳴検出器の測定値によりスペクトル形状が支持されていることがわかる。これをもとに、検出器感度の及ばない範囲を同図の破線で示すように内挿したものが、より実際に近いと考えられる。これを初期スペクトルとして再びSANDIIをランさせるとTable 5, 6の如く2回の繰返しで収斂し、Fig. 11に示すスペクトルが得られる。今回の測定では、1 MeV以上のエネルギー領域を対象とした検出器は、In 1種類であるため、上述のSANDIIにおける繰返し計算と共に形状の変化する高エネルギー領域のスペクトル形状の正当性については必ずしも保証はないが、 $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$ のしきい値以上の中性子束積分値は保存されている。従って、1 MeV以上のエネルギー積分中性子束を基準にして、Sub-MeVから共鳴エネルギーに至るスペクトルを議論することは可能である。

今0.1~1.0 MeVと1 MeV以上の中性子束比をANISNスペクトルと、最終スペクトルについて比較すると下表のようになる。

$$\frac{\phi(0.1 < E < 1.0)}{\phi(E > 1.0)}$$

ANISN スペクトル	1.314
最終 スペクトル	0.619

検 討

結果の項に示した 1 MeV を境とする積分中性子束比が 2 種類のスペクトルによって大きく異なっているのは、次のように理解することができる。即ち、ANISN 計算では反射体領域の第 1, 2 層は無垢のベリリウムを仮定しているのに対して、JMTRC に於ける実測では、ベリリウム要素のプラグ孔に中空アルミパイプを挿入し、その中に於ける中性子スペクトルが測定の対象となっているため、当然後者のスペクトルの方がかたくなる。今後のスペクトルサーチの方向として、ANISN を中心とする計算法の検証を軸とするにしても、実測そのものに重点を置くにしても、計算と実測との接点を設け、両者の相違、及び各々の問題点を明確にする必要はある。その意味で、計算モデルに出来るだけ近い実験体系で測定を行うというプロセスが次に必要となろう。

SANDII の第 1 回目のランの結果 (Fig. 10) から分る通り、今回特に対象とした Sub-MeV 領域でも、検出器感度の十分届いていない 0.1 MeV 付近に対しては、初期スペクトル依存性が高い。最終結果をさらに信頼性のあるものにするためには、しきい値のさらに低い検出器 (例えばロジウム) の実用化を計るのも方法の一つであるが、今回の測定結果に於いて、問題とする sub-MeV 領域に於けるスペクトル形状に対して、銀検出器が決定的な役割を持ったということは、Fig. 10 のスペクトルと、 ^{107m}Ag の放射能データを組合せから外して SANDII 処理した結果のスペクトルとを比較した Fig. 12 に明確に示されており、しかも最終結果 (Fig. 11) を得る過程に於いても $1/E$ 領域への結合が無理なく行われており、内挿部分の信頼性はかなり高いと考えられる。

最終スペクトルに対する各検出器の応答曲線を Fig. 13 に示す。

なお、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ MeV レンジに於いてスペクトル形状に小さい変動が見られるが、これは $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$ 反応のデータを外すとなくなる。同反応に関する自己遮蔽補正は、Fig. 8 に示すように大巾なものであり、この補正の過程で誤差が入り込み易いことを示している。

謝 辞

本報告に関連した箔照射実験及び JMTRC の運転に当っては、作田孝 (現原子炉 1 課)、武田勝彦 (計画課)、伊藤活彦 (現照射 1 課) の各氏の御協力を得た。ここに感謝の意を表する。

$$\frac{\phi(0.1 < E < 1.0)}{\phi(E > 1.0)}$$

ANISN スペクトル	1.314
最終 スペクトル	0.619

検 討

結果の項に示した 1 MeV を境とする積分中性子束比が 2 種類のスペクトルによって大きく異なっているのは、次のように理解することができる。即ち、ANISN 計算では反射体領域の第 1, 2 層は無垢のベリリウムを仮定しているのに対して、JMTRC に於ける実測では、ベリリウム要素のプラグ孔に中空アルミパイプを挿入し、その中に於ける中性子スペクトルが測定の対象となっているため、当然後者のスペクトルの方がかたくなる。今後のスペクトルサーチの方向として、ANISN を中心とする計算法の検証を軸とするにしても、実測そのものに重点を置くにしても、計算と実測との接点を設け、両者の相違、及び各々の問題点を明確にする必要はある。その意味で、計算モデルに出来るだけ近い実験体系で測定を行うというプロセスが次に必要となろう。

SANDII の第 1 回目のランの結果 (Fig. 10) から分る通り、今回特に対象とした Sub-MeV 領域でも、検出器感度の十分届いていない 0.1 MeV 付近に対しては、初期スペクトル依存性が高い。最終結果をさらに信頼性のあるものにするためには、しきい値のさらに低い検出器 (例えばロジウム) の実用化を計るのも方法の一つであるが、今回の測定結果に於いて、問題とする sub-MeV 領域に於けるスペクトル形状に対して、銀検出器が決定的な役割を持ったということは、Fig. 10 のスペクトルと、 ^{107m}Ag の放射能データを組合せから外して SANDII 処理した結果のスペクトルとを比較した Fig. 12 に明確に示されており、しかも最終結果 (Fig. 11) を得る過程に於いても $1/E$ 領域への結合が無理なく行われており、内挿部分の信頼性はかなり高いと考えられる。

最終スペクトルに対する各検出器の応答曲線を Fig. 13 に示す。

なお、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ MeV レンジに於いてスペクトル形状に小さい変動が見られるが、これは $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$ 反応のデータを外すとなくなる。同反応に関する自己遮蔽補正は、Fig. 8 に示すように大巾なものであり、この補正の過程で誤差が入り込み易いことを示している。

謝 辞

本報告に関連した箔照射実験及び JMTRC の運転に当っては、作田孝 (現原子炉 1 課)、武田勝彦 (計画課)、伊藤活彦 (現照射 1 課) の各氏の御協力を得た。ここに感謝の意を表する。

$$\frac{\phi(0.1 < E < 1.0)}{\phi(E > 1.0)}$$

ANISN スペクトル	1.314
最終 スペクトル	0.619

検 討

結果の項に示した 1 MeV を境とする積分中性子束比が 2 種類のスペクトルによって大きく異なっているのは、次のように理解することができる。即ち、ANISN 計算では反射体領域の第 1, 2 層は無垢のベリリウムを仮定しているのに対して、JMTRC に於ける実測では、ベリリウム要素のプラグ孔に中空アルミパイプを挿入し、その中に於ける中性子スペクトルが測定の対象となっているため、当然後者のスペクトルの方がかたくなる。今後のスペクトルサーチの方向として、ANISN を中心とする計算法の検証を軸とするにしても、実測そのものに重点を置くにしても、計算と実測との接点を設け、両者の相違、及び各々の問題点を明確にする必要はある。その意味で、計算モデルに出来るだけ近い実験体系で測定を行うというプロセスが次に必要となろう。

SANDII の第 1 回目のランの結果 (Fig. 10) から分る通り、今回特に対象とした Sub-MeV 領域でも、検出器感度の十分届いていない 0.1 MeV 付近に対しては、初期スペクトル依存性が高い。最終結果をさらに信頼性のあるものにするためには、しきい値のさらに低い検出器 (例えばロジウム) の実用化を計るのも方法の一つであるが、今回の測定結果に於いて、問題とする sub-MeV 領域に於けるスペクトル形状に対して、銀検出器が決定的な役割を持ったということは、Fig. 10 のスペクトルと、 ^{107m}Ag の放射能データを組合せから外して SANDII 処理した結果のスペクトルとを比較した Fig. 12 に明確に示されており、しかも最終結果 (Fig. 11) を得る過程に於いても $1/E$ 領域への結合が無理なく行われており、内挿部分の信頼性はかなり高いと考えられる。

最終スペクトルに対する各検出器の応答曲線を Fig. 13 に示す。

なお、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ MeV レンジに於いてスペクトル形状に小さい変動が見られるが、これは $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$ 反応のデータを外すとなくなる。同反応に関する自己遮蔽補正は、Fig. 8 に示すように大巾なものであり、この補正の過程で誤差が入り込み易いことを示している。

謝 辞

本報告に関連した箔照射実験及び JMTRC の運転に当っては、作田孝 (現原子炉 1 課)、武田勝彦 (計画課)、伊藤活彦 (現照射 1 課) の各氏の御協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) McElroy, W. N., Berg, S.; "A computer automated iterative method for neutron flux spectra determinations by foil activations", AFWL-TR-67-41, Vol.II, SAND II and associated codes (Sept. 1967).
- 2) Berg, S.; "Modification of SAND II", BNWL-855 (August, 1968).
- 3) Baht, M. R., Prince, A.; "Evaluated neutron cross sections", BNL-50383 (ENDF-163) (April 1973).
- 4) Lederer, C. M., Hollander, J. M., et al.; "Table of Isotopes" sixth edition, (1967), John Willey.
- 5) Kondo, I.; "SELES, A program for determining self-shielding corrections for foil detectors", RCN-74-105 (August 1974).
- 6) Zijp, W. L., Nolthenius, H. J.; "Neutron selfshielding of activation detectors used in spectrum unfolding", RCN-231 (August 1975).

Table 1 CSTAPE input data list for the reaction $^{107}\text{Ag}(n,n')^{107m}\text{Ag}$

		ENERGY		CROSS SECTION	
AG107M					
AG107(N,N)AG107M					
LAMBDA	0.0156465				
60 POINTS					
9.4-2	1.03-1	1.27-1	1.3-1	1.4-1	
1.95-1	2.0-1	3.0-1	3.31-1	3.61-1	
3.88-1	4.0-1	4.42-1	4.7-1	5.0-1	
5.7-1	6.0-1	7.0-1	7.7-1	8.0-1	
8.73-1	9.0-1	9.49-1	9.87-1	1.0	
1.024	1.1	1.3	1.4	1.5	
1.6	1.7	1.9	2.0	2.1	
2.2	2.3	2.5	3.0	3.5	
4.0	4.5	5.5	6.0	6.5	
7.0	7.5	8.5	15.	20.	
0.0	2.6-3	1.09-2	1.191-2	1.508-2	
3.96-2	4.18-2	9.38-2	1.084-1	1.169-1	
1.378-1	1.426-1	1.530-1	1.58399-1	1.68344-1	
1.91044-1	2.00685-1	2.33936-1	2.56921E-1	2.64638-1	
2.80597-1	2.86380-1	3.30966-1	3.62800-1	3.72308-1	
3.88319-1	4.27870-1	4.80342-1	4.9117-1	5.09823-1	
5.07008-1	4.99367-1	4.73125-1	4.55704-1	4.36004-1	
4.14818-1	3.92344-1	3.45614-1	2.33638-1	1.44590-1	
8.50441-2	4.84699-2	1.59816-2	1.00991-2	6.95020-3	
5.4524-3	4.59450-3	3.68340-3	7.8-6	7.1136-6	

Table 2 List of SANDII input

T JMTRC M-7 WITH FOILS ACTIVATION

ITERATION

5 FOILS

AG107M01

IN115N

CU63G CADMIUM 0.004635

MN55G CADMIUM 0.004635

IN115G CADMIUM 0.004635

ACTS 7.503-17

ACTS 5.769-17

ACTS 1.896-16

ACTS 6.323-16

ACTS 5.809-14

SPECTRUM TABULAR

99 POINTS

ENER	.4926-6	.6325-6	.8121-6	.1043-5	.1339-5	.1719-5	.2208-5
ENER	.2835-5	.3640-5	.4673-5	.6001-5	.7705-5	.9893-5	.1270-4
ENER	.1631-4	.2094-4	.2689-4	.3453-4	.4434-4	.5693-4	.7310-4
ENER	.9387-4	.1205-3	.1548-3	.1987-3	.2552-3	.3276-3	.4207-3
ENER	.5402-3	.6936-3	.8906-3	.1142-2	.1468-2	.1885-2	.2421-2
ENER	.3108-2	.3991-2	.5125-2	.6581-2	.8450-2	.1085-1	.1393-1
ENER	.1789-1	.2297-1	.2949-1	.3787-1	.4862-1	.6243-1	.8016-1
ENER	.1029	.1166	.1289	.1425	.1575	.1740	.1923
ENER	.2125	.2349	.2596	.2869	.3171	.3504	.3873
ENER	.4280	.4730	.5228	.5777	.6385	.7056	.7799
ENER	.8619	.9525	1.053	1.163	1.286	1.421	1.570
ENER	1.736	1.918	2.120	2.343	2.589	2.862	3.162
ENER	3.495	3.863	4.269	4.718	5.214	5.762	6.368
ENER	7.038	7.778	8.597	9.501	10.500	11.604	12.825
ENER	14.173						

FLUX	.72966	.56967	.44466	.34710	.27085	.21129	.16483
FLUX	.12858	.10033	.78267-1	.61087-1	.47674-1	.37223-1	.29054-1
FLUX	.22665-1	.17694-1	.13804-1	.10773-1	.84036-2	.65574-2	.51153-2
FLUX	.39911-2	.31147-2	.24311-2	.18979-2	.14820-2	.11574-2	.90413-3
FLUX	.70649-3	.55216-3	.43161-3	.33738-3	.26375-3	.20631-3	.16151-3
FLUX	.12654-3	.99290-4	.77874-4	.61496-4	.48512-4	.38365-4	.30411-4
FLUX	.24148-4	.19217-4	.15223-4	.12215-4	.98505-5	.80330-5	.65638-5
FLUX	.54109-5	.47375-5	.43784-5	.40946-5	.38501-5	.36005-5	.33654-5
FLUX	.31402-5	.29282-5	.27410-5	.25866-5	.24482-5	.22994-5	.21902-5
FLUX	.20400-5	.18580-5	.16646-5	.13255-5	.90096-6	.12521-5	.11150-5
FLUX	.10760-5	.93466-6	.83528-6	.81241-6	.79234-6	.81050-6	.76354-6
FLUX	.68627-6	.56734-6	.45040-6	.38308-6	.24524-6	.14008-6	.13380-6
FLUX	.11139-6	.93181-7	.79490-7	.57773-7	.42705-7	.29040-7	.19821-7
FLUX	.12208-7	.69648-8	.40269-8	.21599-8	.10584-8	.46645-9	.20192-9
FLUX	.70857-10						

LIMIT 10

DEVIATION 5

DISCARD 100

LOW END THERMAL

HIGH END FISSION

NORM 1

PLOT, NO CARDS

SMOOTH 1

Table 3 SANDII Run 1 output 1

FOIL REACTION	INTERIM RESULTS AFTER 0 ITERATIONS				RATIO MEASURED TO CALCULATED ACTIVITIES	DEVIATION OF MEASURED FROM CALCULATED ACTIVITY (PERCENT)
	NOMINAL 5.00 PERCENT ACTIVITY LIMITS (MEV)		RATIO MEASURED TO CALCULATED ACTIVITIES			
	LOWER	UPPER	LOWER	UPPER		
IN115(N,G)IN116M CD	1.000E-06	1.900E-06	0.5144		-48.56	
MN55(N,G)MN56 CD	6.600E-07	1.050E-03	0.9506		-4.94	
CU63(N,G)CU64 CD	6.300E-07	1.600E-02	0.9166		-8.34	
IN115(N,N)M	1.000E+00	5.500E+00	1.5959		59.59	
AG107(N,N)AG107M	3.400E-01	2.700E+00	1.0224		2.24	

STANDARD DEVIATION OF MEASURED ACTIVITIES (PERCENT) 38.76

AVERAGE TOTAL FLUX (ABOVE 1.00E+00 MEV) 1.482E+08

Table 4 SANDII Run 1 output 2

SOLUTION HAS BEEN ACHIEVED.
STANDARD DEVIATION OF MEASURED-TO-CALCULATED ACTIVITY RATIOS IS LESS THAN 5.00 PERCENT.

FOIL REACTION	SOLUTION RESULTS OBTAINED AFTER 5 ITERATIONS				RATIO MEASURED TO CALCULATED ACTIVITIES	DEVIATION OF MEASURED FROM CALCULATED ACTIVITY (PERCENT)
	SATURATED MEASURED ACTIVITY (DPS/NUCLEUS)	SATURATED CALCULATED ACTIVITY (DPS/NUCLEUS)	NOMINAL 5.00 PERCENT ACTIVITY LIMITS (MEV)			
			LOWER	UPPER		
IN115(N,G)IN116M CD	5.809E-14	5.813E-14	9.200E-07	3.600E-06	0.9993	-0.07
MN55(N,G)MN56 CD	6.323E-16	6.325E-16	6.600E-07	1.050E-03	0.9997	-0.03
CU63(N,G)CU64 CD	1.896E-16	1.895E-16	6.300E-07	1.700E-02	1.0007	0.07
IN115(N,N)M	5.769E-17	5.478E-17	1.200E+00	6.200E+00	1.0532	5.32
AG107(N,N)AG107M	7.503E-17	7.922E-17	4.000E-01	3.100E+00	0.9471	-5.29

STANDARD DEVIATION OF MEASURED ACTIVITIES (PERCENT) 3.75

Table 5 SANDII Run 2 output 1

FOIL REACTION	INTERIM RESULTS AFTER 0 ITERATIONS				DEVIATION OF MEASURED FROM CALCULATED ACTIVITY (PERCENT)
	NOMINAL 5.00 PERCENT ACTIVITY LIMITS (MEV)		RATIO MEASURED TO CALCULATED ACTIVITIES		
	LOWER	UPPER	LOWER	UPPER	
IN115(N,G)IN116M CD	1.000E-06	1.300E-06	0.5675		-43.25
MN55(N,G)MN56 CD	6.300E-07	1.050E-03	1.0829		8.29
CU63(N,G)CU64 CD	6.300E-07	1.150E-02	1.0673		6.73
IN115(N,N)M	1.200E+00	6.100E+00	1.2020		20.20
AG107(N,N)AG107M	4.600E-01	3.100E+00	1.0803		8.03

STANDARD DEVIATION OF MEASURED ACTIVITIES (PERCENT) 24.78

AVERAGE TOTAL FLUX (ABOVE 1.00E+00 MEV) 1.817E+08

Table 6 SANDII Run 2 output 2

SOLUTION HAS BEEN ACHIEVED.
STANDARD DEVIATION OF MEASURED-TO-CALCULATED ACTIVITY RATIOS IS LESS THAN 5.00 PERCENT.

FOIL REACTION	SOLUTION RESULTS OBTAINED AFTER 2 ITERATIONS				RATIO MEASURED TO CALCULATED ACTIVITIES	DEVIATION OF MEASURED FROM CALCULATED ACTIVITY (PERCENT)
	SATURATED MEASURED ACTIVITY (DPS/NUCLEUS)	SATURATED CALCULATED ACTIVITY (DPS/NUCLEUS)	NOMINAL 5.00 PERCENT ACTIVITY LIMITS (MEV)			
			LOWER	UPPER		
IN115(N,G)IN116M CD	5.809E-14	5.959E-14	9.200E-07	3.400E-06	0.9749	-2.51
MN55(N,G)MN56 CD	6.323E-16	6.239E-16	6.300E-07	1.050E-03	1.0134	1.34
CU63(N,G)CU64 CD	1.896E-16	1.873E-16	6.300E-07	1.275E-02	1.0121	1.21
IN115(N,N)M	5.769E-17	5.605E-17	1.200E+00	6.200E+00	1.0292	2.92
AG107(N,N)AG107M	7.503E-17	7.732E-17	4.250E-01	3.200E+00	0.9703	-2.97

STANDARD DEVIATION OF MEASURED ACTIVITIES (PERCENT) 2.59

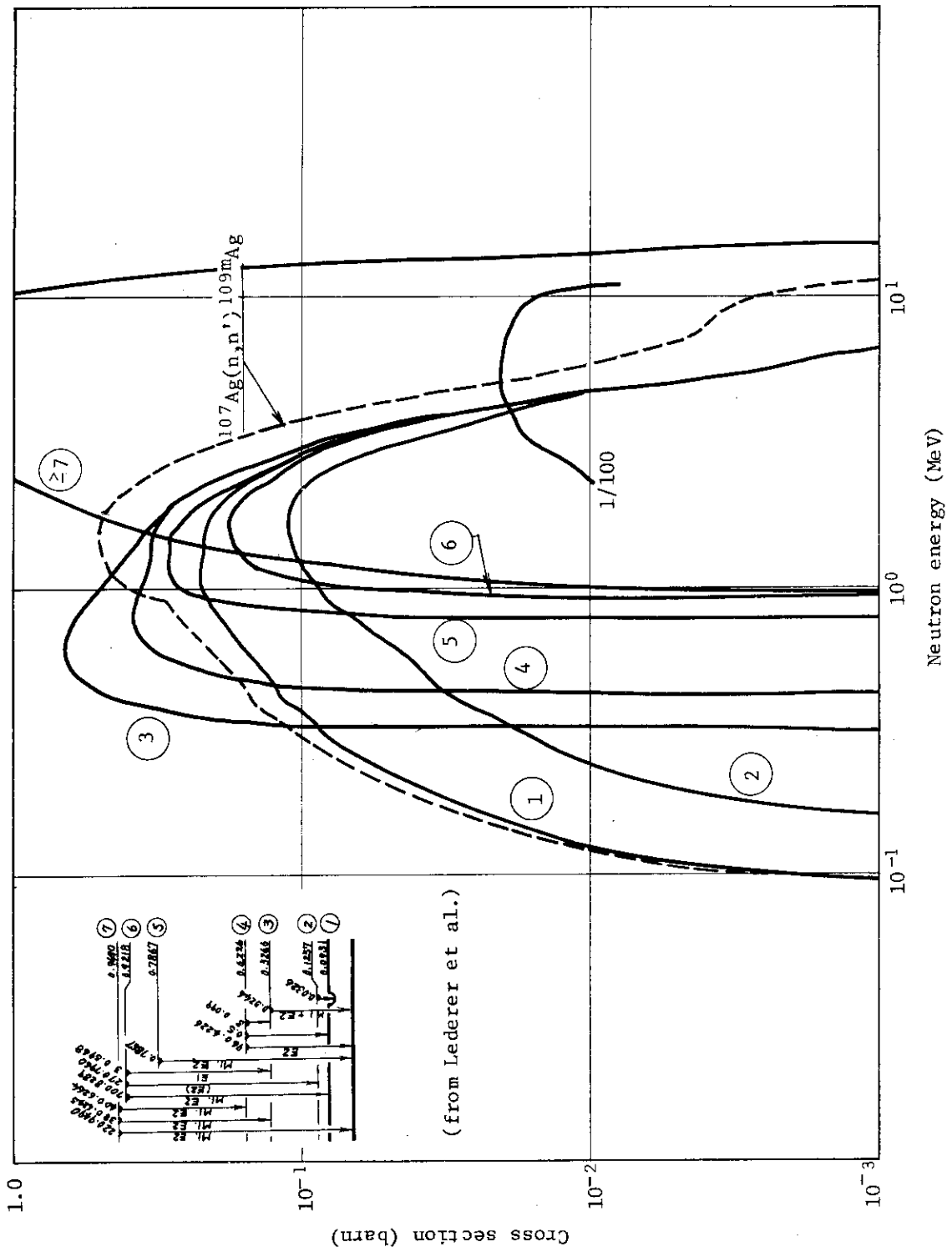


Fig. 1 Excitation functions for the reaction $^{107}\text{Ag}(n,n')$

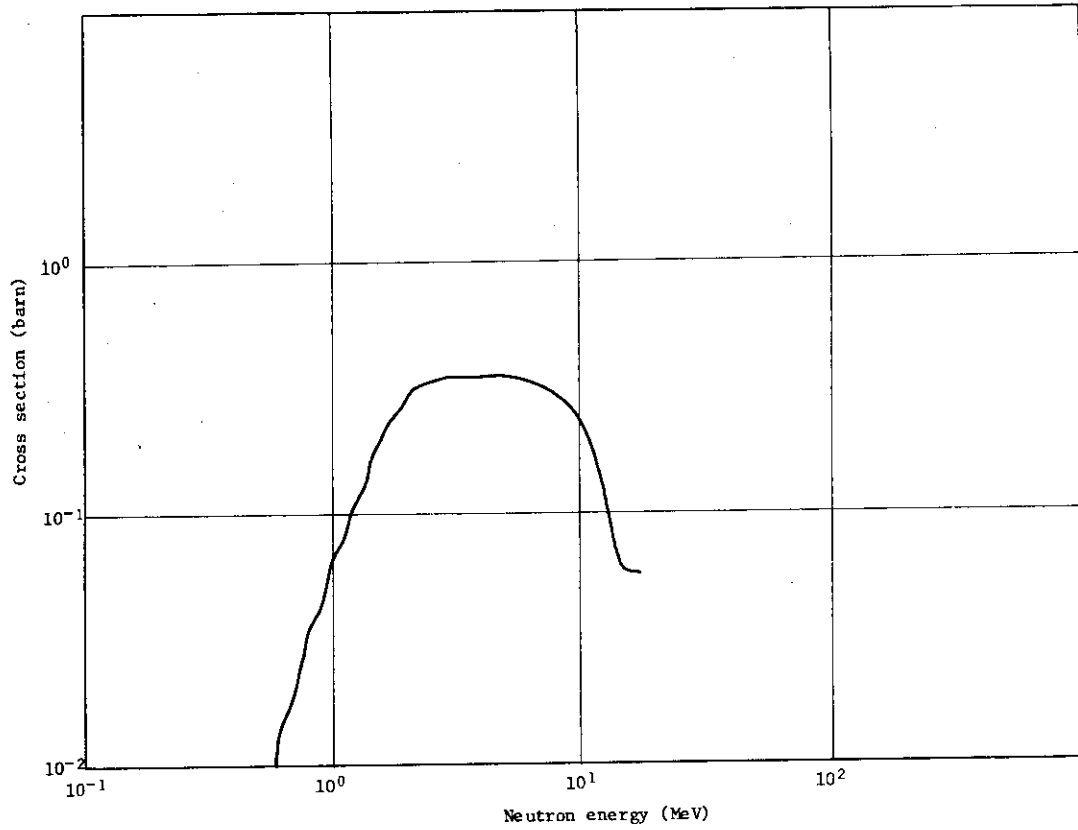


Fig. 2 Energy dependent neutron cross section for the reaction $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$

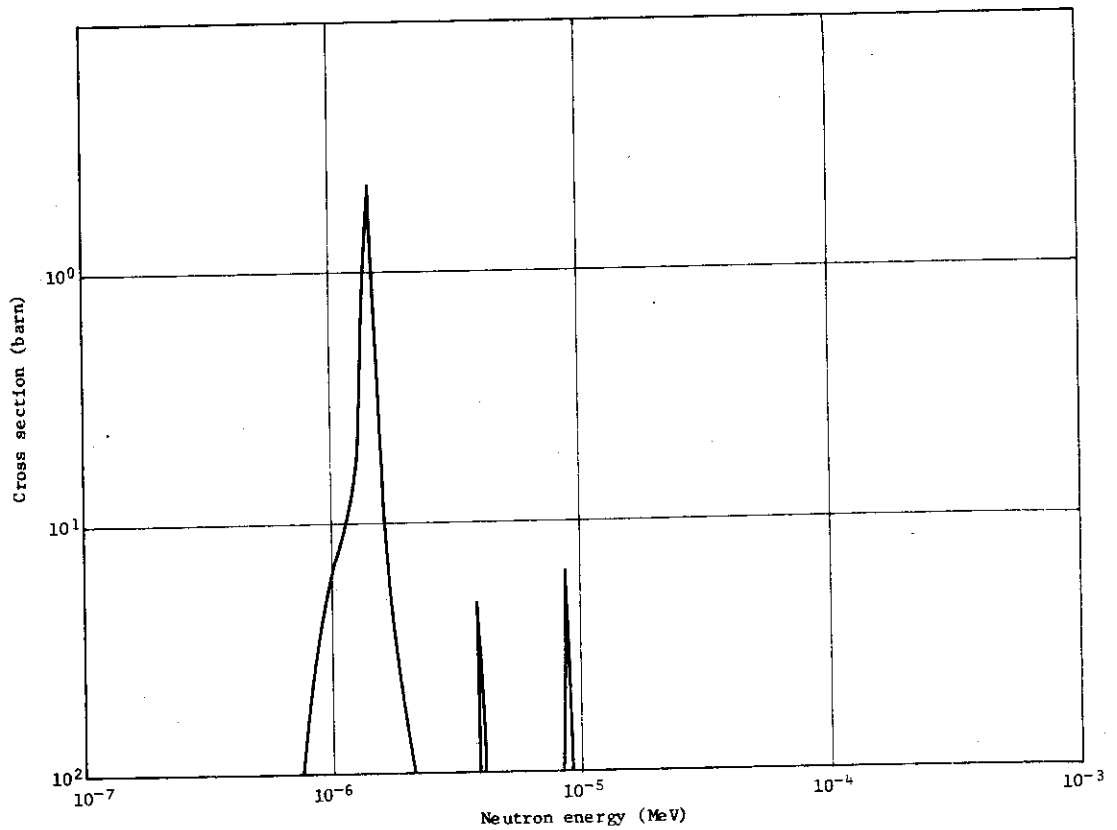


Fig. 3 Energy dependent neutron cross section for the reaction $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ (Cd-covered)

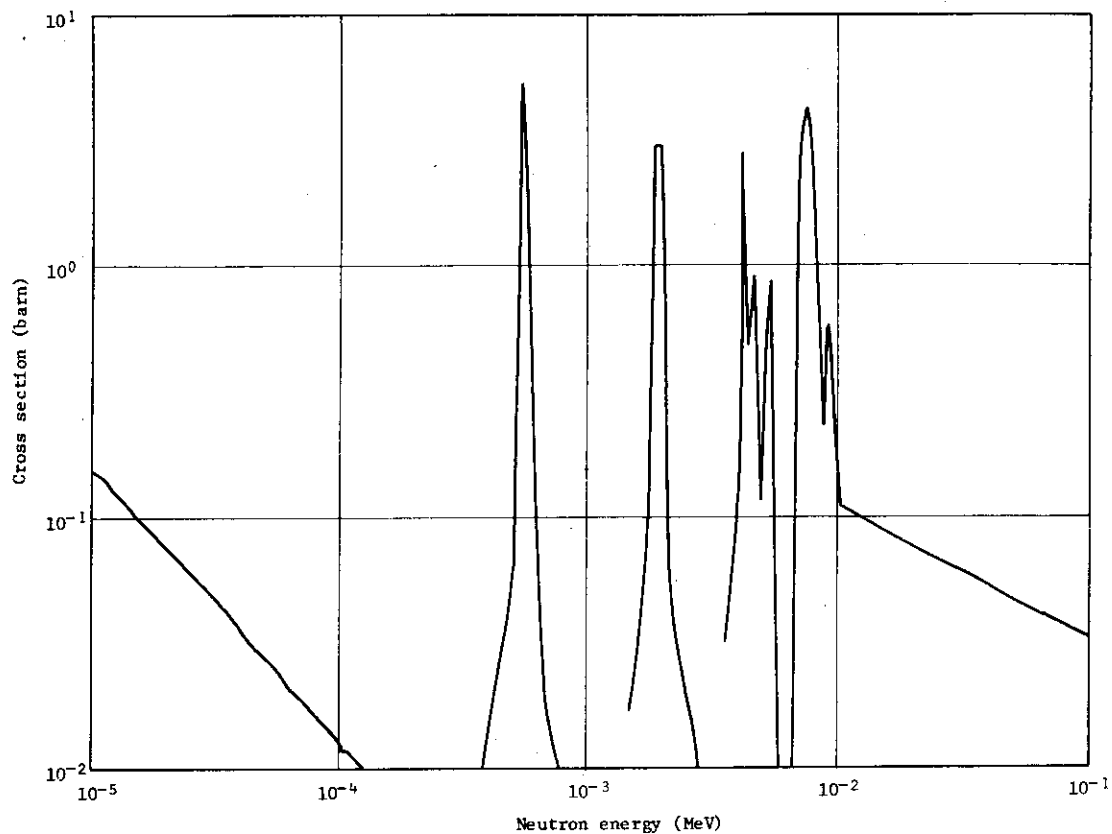


Fig. 4 Energy dependent neutron cross section for the reaction $^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$

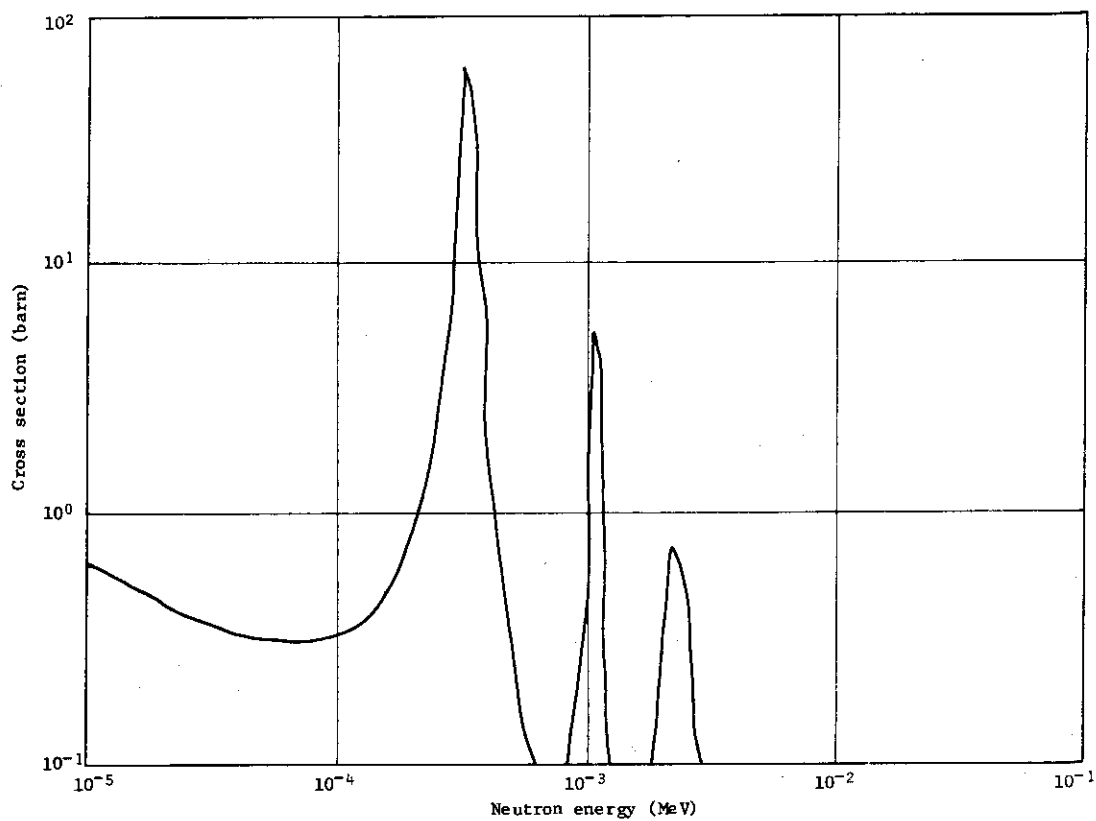


Fig. 5 Energy dependent neutron cross section for the reaction $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$

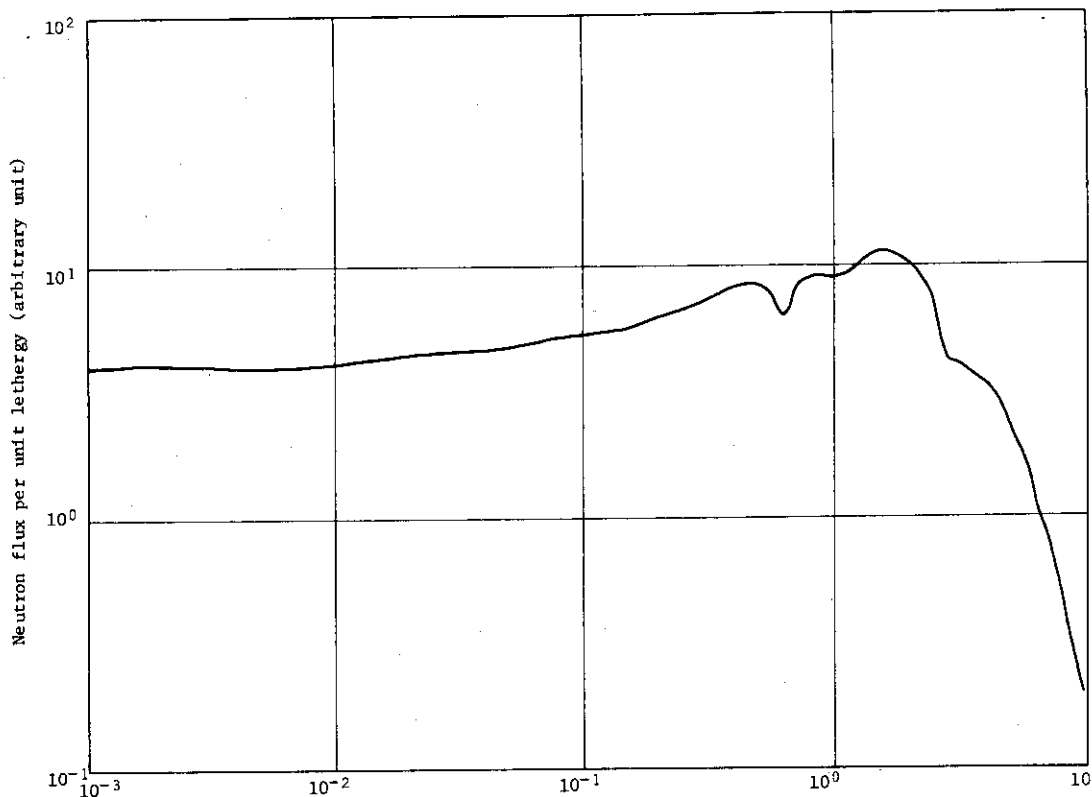


Fig. 6 Initial neutron spectrum obtained from ANISN calculation

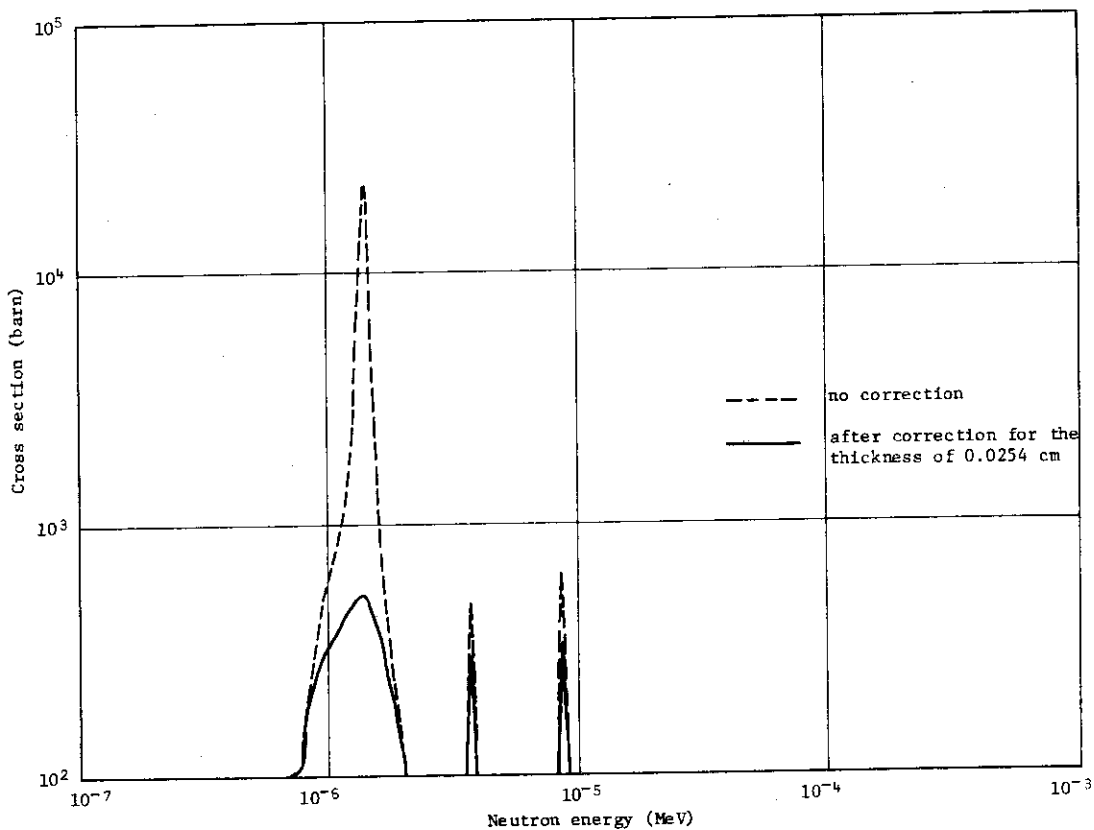
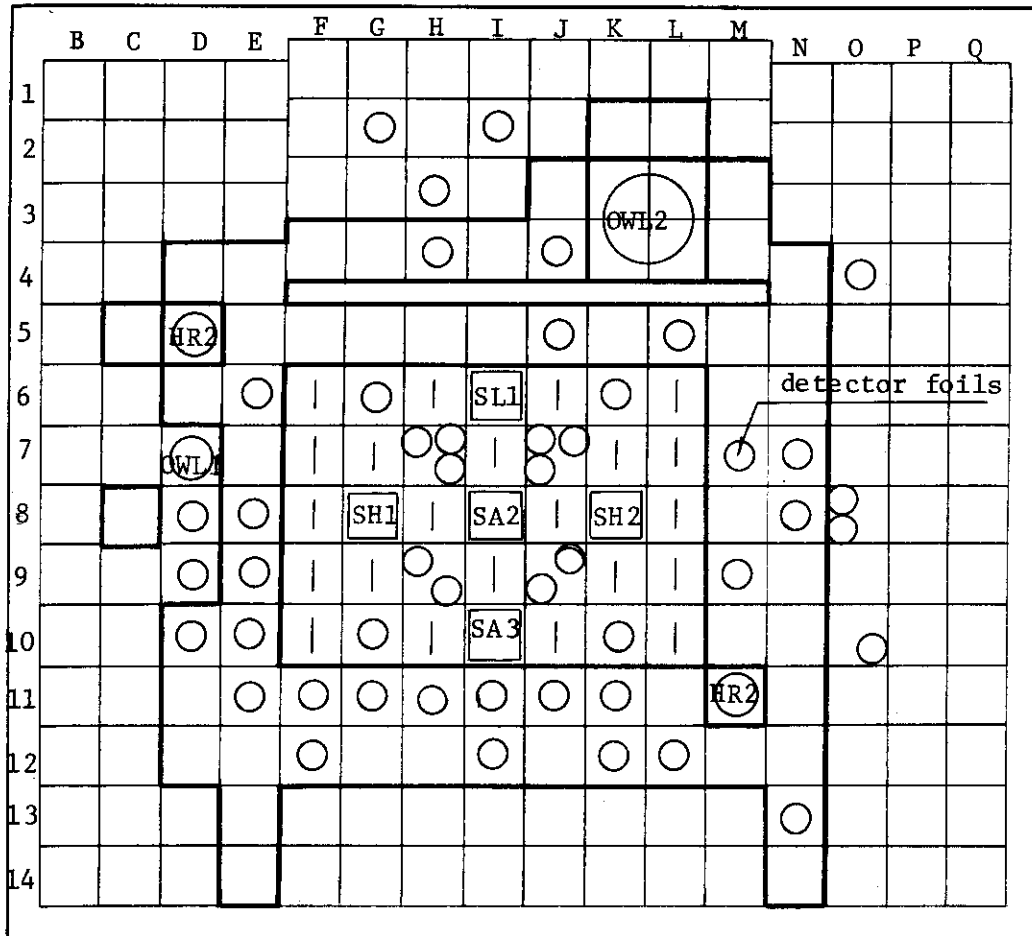


Fig. 8 Comparison of cross section curve after self-shielding correction with original one for the reaction $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ (Cd-covered)

JMTRC








-  fuel element
-  shim or safety rod with fuel follower
-  Beryllium element
-  Aluminum element
-  capsule

Fig. 7 Configuration of JMTRC core

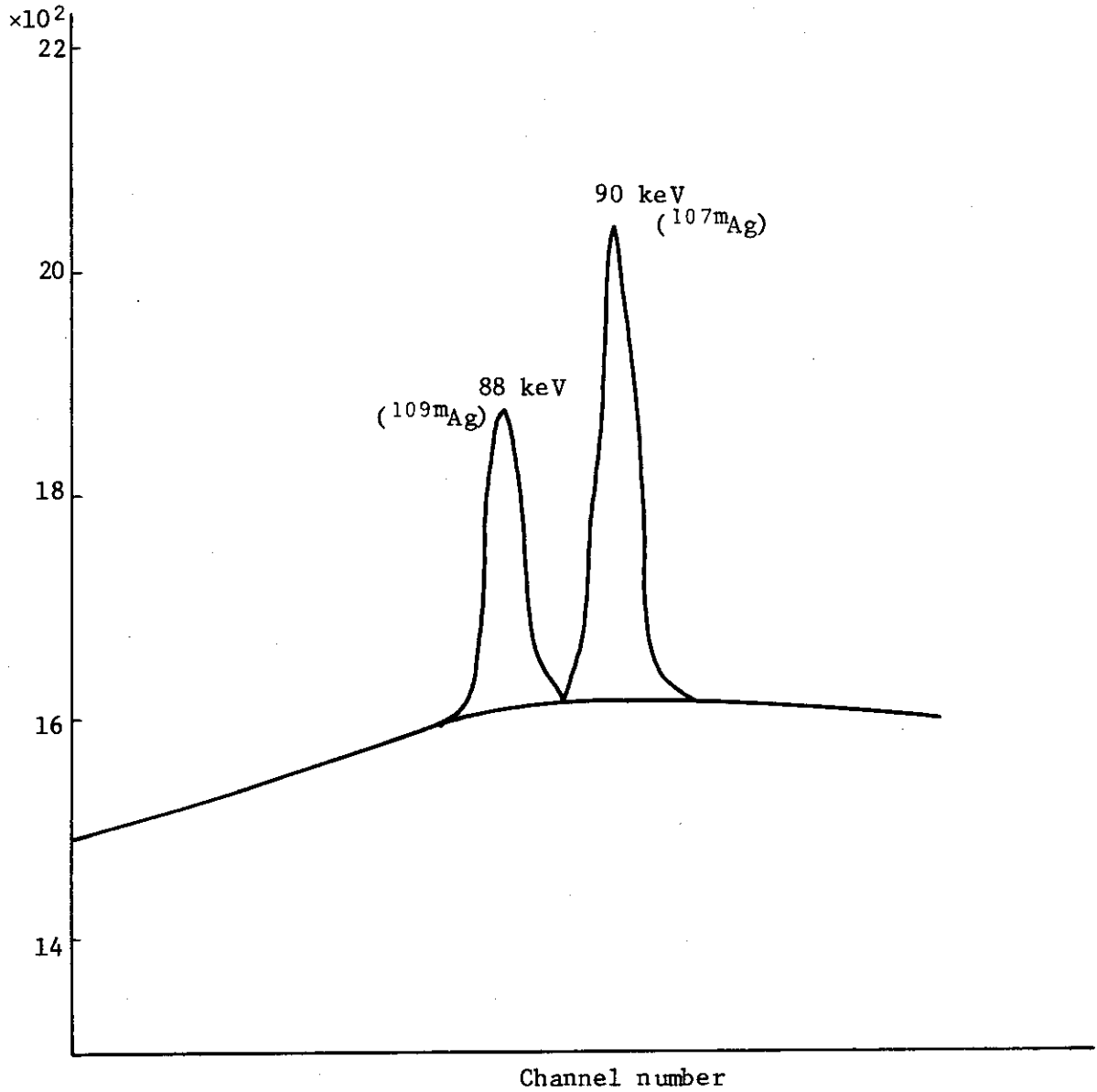


Fig. 9 Gamma peaks from ^{107m}Ag and ^{109m}Ag of irradiated silver foil

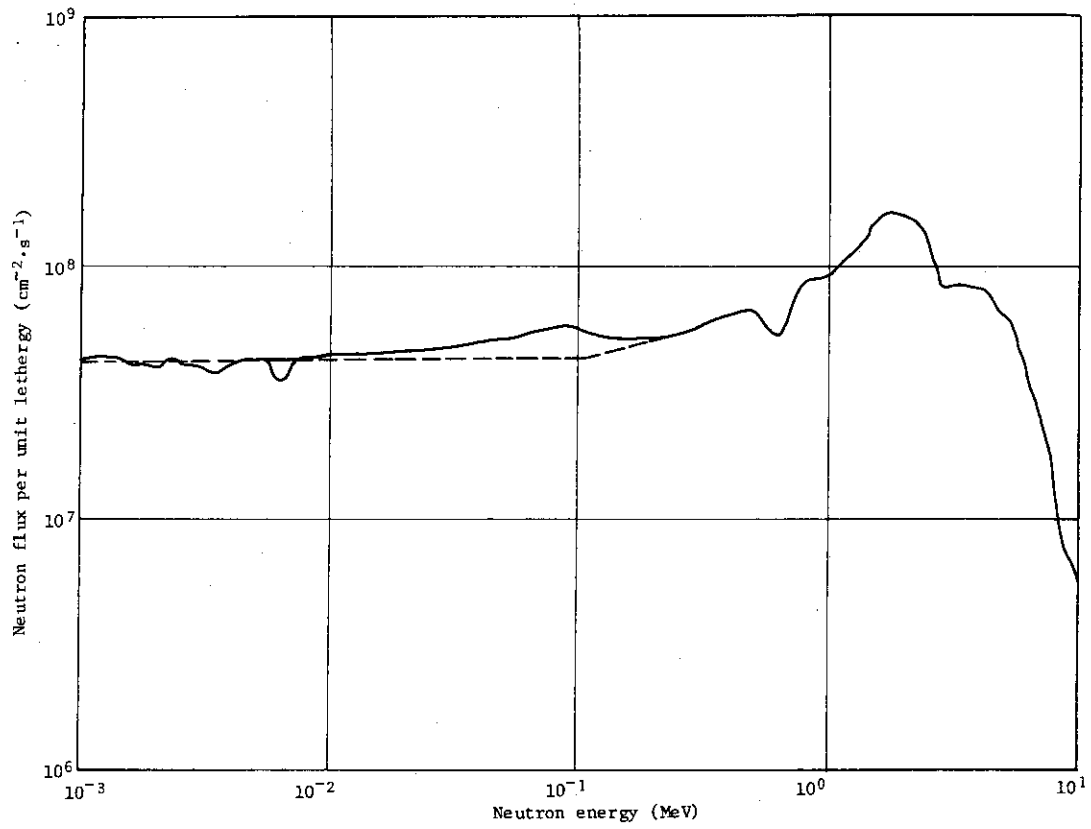


Fig. 10 1st SANDII result

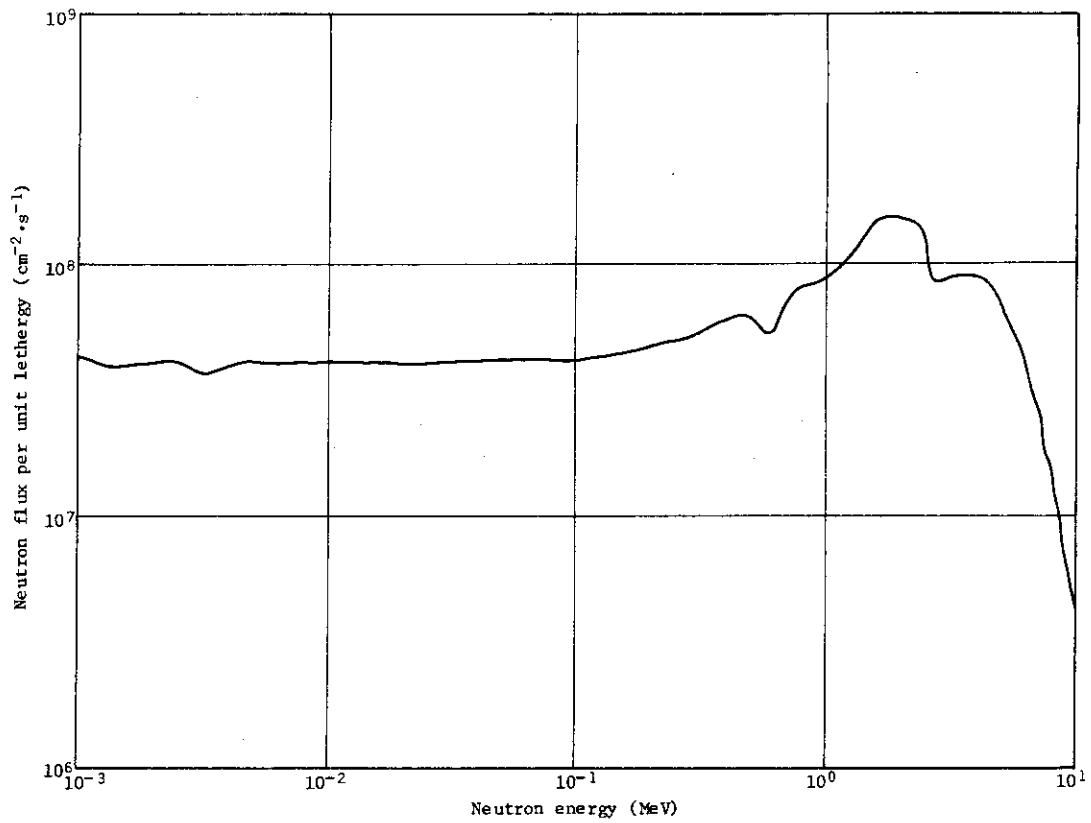


Fig. 11 2nd SANDII result

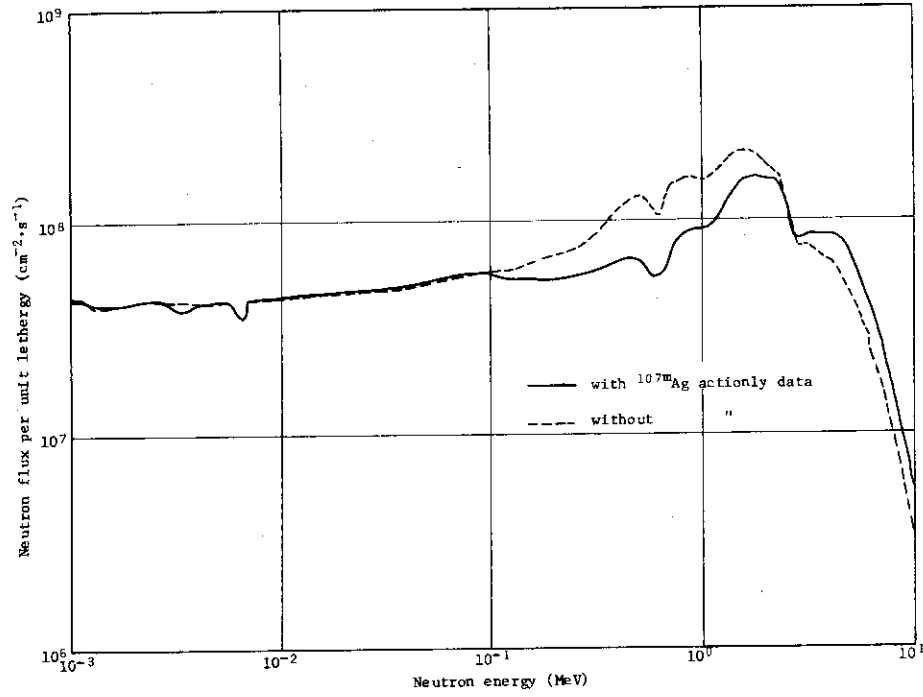


Fig. 12 Comparison of SANDII results with and without ^{107m}Ag activity data, based on the initial spectrum from ANISN out.

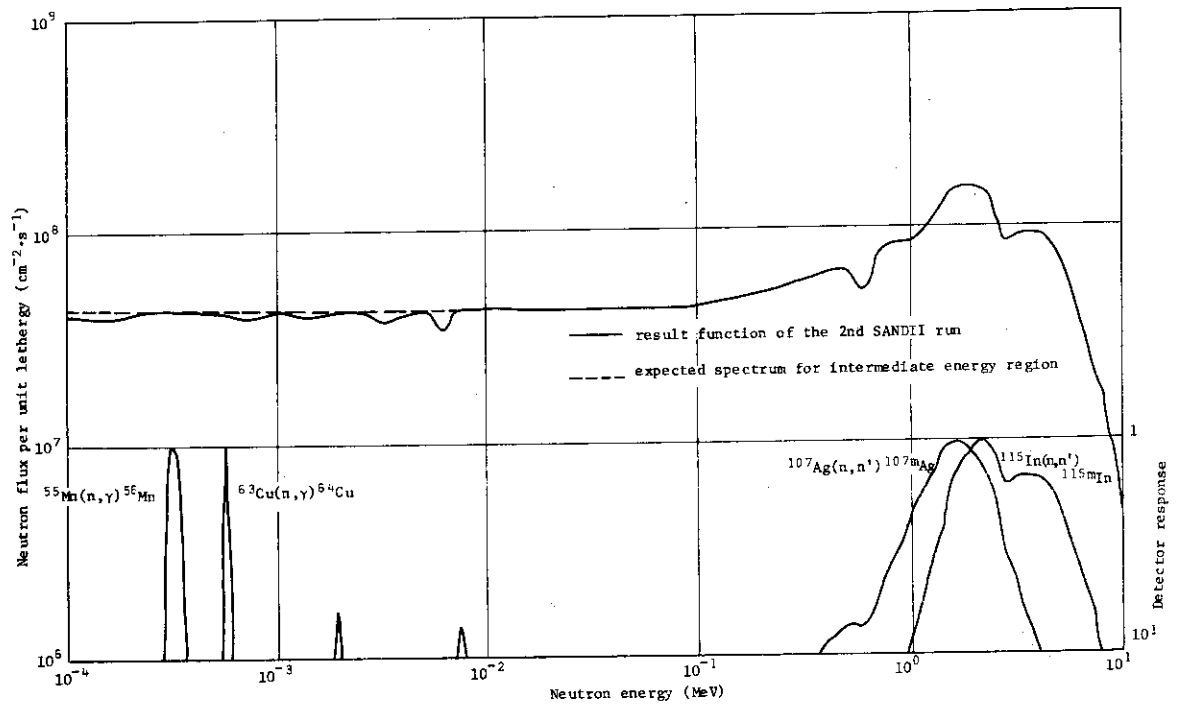


Fig. 13 Final spectrum and detector responses. Maximum value of each response function is normalized to unity.

附録 ^{107m}Ag 及び ^{109m}Ag の γ 線計数結果の処理

計数中に時間変化するのは、 ^{107m}Ag 及び ^{109m}Ag に対応した2種類の γ 線の検出器への入射率だけであると仮定すると、

$$\int_0^T dt \frac{N_{1r} \cdot C \cdot e^{-\lambda_1 t}}{1 + \tau_1 N_{1r} e^{-\lambda_1 t} + \tau_2 N_{2r} e^{-\lambda_2 t}} = S_1 \quad (1)$$

$$\int_0^T dt \frac{N_{2r} \cdot C \cdot e^{-\lambda_2 t}}{1 + \tau_1 N_{1r} e^{-\lambda_1 t} + \tau_2 N_{2r} e^{-\lambda_2 t}} = S_2 \quad (2)$$

$$C = 1 - n_{bc} \tau_b$$

但し、

τ_1 : γ ピーク 1 に対応する計数の不感時間

τ_2 : γ ピーク 2 " "

N_{1r} : 不感時間 0 と仮定した場合のピーク 1 に相当する計数の初期計数率

N_{2r} : " ピーク 2 "

n_{bc} : ピーク 1, 2 以外のバックグラウンドの計数率 (定数)

τ_b : バックグラウンド成分に対応する計数の不感時間

N_{1r} および N_{2r} に対して或る初期値を与え、逐次近似法により式(1)および(2)の両方に矛盾のないよう順次修正していく。プログラムリストを次に示す。

* SOURCE STATEMENT *

```

C INPUT DATA DICTIONARY
C ALAMA= DECAY CONSTANT OF AG-107M
C ALAMB= DECAY CONSTANT OF AG-109M
C N11 = GUESS NUMBER OF INITIAL CORRECTED COUNT RATE OF NO.1 PEAK
C N21 = GUESS NUMBER OF INITIAL CORRECTED COUNT RATE OF NO.2 PEAK
C NBCT= DEAD TIME RATE CAUSED BY THE ALL EVFNTS EXCEPT ABOVE 2 PEAKS
C TAU1= DEAD TIME CAUSED BY # INPUT PULSE CORRESPONDS TO NO.1 PEAK
C TAU2= DEAD TIME CAUSED BY # INPUT PULSE CORRESPONDS TO NO.2 PEAK
C THIS PROGRAM IS TO BE USED FOR MAKING DEAD TIME CORRECTION ON THE
C COUNTING RESULTS OF THE ACTIVITIES OF AG-107M AND AG-109M
C PROGRAM SILDEAD
1 DIMENSION HOL(20)
2 COMMON ALAMA,ALAMB,A,B,AA,BB,C
3 40 READ (5,1001,END=30) HOL
4 1001 FORMAT (20A4)
5 WRITE (6,2000) HOL
6 2000 FORMAT (1X,20A4)
7 GOTO 40
8 30 REWIND 5
9 EXTERNAL F1,F2
10 REAL N11,N21,NBCT,N110,N210
11 READ(5,1000)ALAMA,ALAMB
12 READ(5,1000) N11,N21,NBCT,TAU1,TAU2
13 READ(5,1000) SN1C,SN2C
14 READ(5,1000) TN,TW,TO
15 1000 FORMAT(6E12.6)
16 C=1-NBCT
17 A=N11
18 B=N21
19 1 IB=0
20 2 IA=0
21 3 BB=B*TAU2
22 4 AA=A*TAU1
23 CALL SIMPSN(F1, TO,TN,S)
24 ANS1=S
25 WRITE(6,10) IA,ANS1
26 10 FORMAT(1H0,I6,1PE12.6)
27 EP1=ABS(ANS1-SN1C)/SN1C
28 IF(EP1.LE.0.0001) GOTO 100
29 A=A*SN1C/ANS1
30 IA=IA+1
31 GO TO 4
32 100 IF(IA.EQ.0.AND.IB.NE.0) GOTO 200
33 IB=0
34 5 CALL SIMPSN (F2 ,TO,TN,S)
35 ANS2=S
36 WRITE(6,10) IB,ANS2
37 EP2=ABS(ANS2-SN2C)/SN2C
38 IF(EP2.LE.0.0001) GOTO 6
39 B=B*SN2C/ANS2
40 BB=B*TAU2
41 GO TO 5
42 6 IF(IB.EQ.0) GOTO 200
43 GO TO 2
44 200 N11=A
45 N21=B
46 N110=N11*EXP(ALAMA*TW)
47 N210=N21*EXP(ALAMB*TW)
48 WRITE(6,20) N11,N21,N110,N210

```

* SOURCE STATEMENT (FTMAIN)*

```

49 20 FORMAT(1H0//6H N1I= ,1PE12.5,10H      N2I= ,E12.5//6H N1I0=,E12.5,
110H      N2I0,E12.5)
50 STOP
51 END

```

```

C
C SUBROUTINE OF INTEGRATION BY SIMPSON METHOD
1 SUBROUTINE SIMPSN (F, X0,XN,S)
2 DIMENSION N(500),SUM(500),E(500)
3 NO=50
4 J=0
5 1 K=J+1
6 N(K)=2*NO
7 H=(XN-X0)/FLOAT(N(K))
8 X=X0
9 S2=0.0
10 S4=F(X)
11 NN=NO/2-1
12 DO 2 I=1,NN
13 X=X+H
14 S2=S2+F(X)
15 X=X+H
16 S4=S4+F(X)
17 2 CONTINUE
18 SUM(K)=H*(F(X0)+F(XN)+4.*S2+2.*S4)/3.
19 NO=N(K)
20 J=J+1
21 IF(J.LE.1) GO TO 1
22 E(K)=(SUM(K)-SUM(K-1))/SUM(K)
23 E(K)=ABS(E(K))
24 WRITE(6,10) K,N(K),SUM(K),E(K)
25 10 FORMAT (1H0,14,110,1PE12.6,1PE12.6)
26 IF(E(K).GE.0.00001) GO TO 1
27 KK=K
28 S=SUM(KK)
29 RETURN
30 END

```

```

C
C FUNCTION OF SIMPSON
1 FUNCTION F1(X)
2 COMMON ALAMA,ALAMB,A,B,AA,BB,C
3 F1 =C*A*EXP(-ALAMA*X)/(1+AA*EXP(-ALAMA*X))+BB*EXP(-ALAMB*X)
4 RETURN
5 END

```

```

C
C FUNCTION OF SIMPSON
1 FUNCTION F2(X)
2 COMMON ALAMA,ALAMB,A,B,AA,BB,C
3 F2 =C*B*EXP(-ALAMA*X)/(1+AA*EXP(-ALAMA*X))+BB*EXP(-ALAMB*X)
4 RETURN
5 END

```