

JAERI-M

6928

遮蔽材料の群定数

—中性子100群・ガンマ線20群・ P_5 近似—

1977年2月

小山 謹二・奥村 芳弘*・古田 公人**・宮坂 駿一

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.

遮蔽材料の群定数

—中性子100群・ガンマ線20群・ P_5 近似—

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

小山 謹二・奥村 芳弘*・古田 公人**

宮坂 駿一

(1977年1月21日受理)

中性子100群・ガンマ線20群・ P_5 近似の中性子・ガンマ線結合群定数を ENDF/B-IV および popop4 から RADHEAT-V3 コードシステムを用いて作成した。整備した群定数ファイルは次の2つである。

- (a) 代表的な41核種の無限希釈・中性子100群・ P_5 近似の断面積ファイル
- (b) 構造材12種、遮蔽材料13種を含む代表的な31種の材料に対する中性子100群・ガンマ線20群・ P_5 近似の巨視的実効断面

Multi-group Cross Section Sets for Shield Materials
-100 neutron groups and 20 gamma-ray groups in P_5 approximation-

Kinji KOYAMA, Yoshihiro OKUMURA*, Kimihito FURUTA**,
and
Shun-ichi MIYASAKA

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

(Received January 21, 1977)

In establishing the data and methods for shielding calculations, it is necessary to have the multi-group cross sections usable in many fields of analysis. Multi-group cross section files with P_5 scattering anisotropy were generated with code system RADHEAT-V3 for transport calculations. The basic microscopic cross sections and secondary gamma-ray production cross sections are used from ENDF/B-IV and POPOP4 libraries, respectively. The files generated are the following two:

- (a) An infinite dilution cross section file for nuclides
100 energy-group microscopic neutron cross sections in P_5 approximation for 41 nuclides
- (b) A coupled neutron and gamma-ray macroscopic effective cross section file for materials

A coupled file of 100 neutron energy-group cross sections with 20 gamma-ray energy-group values for typical 31 materials containing 13 shield and 12 structural materials.

* ISHIKAWAJIMA-HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO., LTD.

** NIPPON KOKAN K.K.

目 次

1	まえがき	1
2	エネルギー群構造	3
3	核種および遮蔽材料	6
3.1	核種および物質番号	6
3.2	遮蔽材料および識別番号	6
4	群定数の作成	9
4.1	無限希釈断面積	9
4.2	遮蔽体に関する中性子・ガンマ線結合群定数	11
4.2.1	実効断面積	11
4.2.2	二次ガンマ線生成断面積	12
4.2.3	ガンマ線の断面積	12
4.2.4	結合群定数ファイル	12
5	まとめ	16
	参考文献	16
付 録	A ファイル構造説明資料	18
	B 二次ガンマ線生成断面積参考資料	23
	C 遮蔽材の原子組成	32
	D 無限希釈断面積グラフ集	38
	E 巨視的実効断面積グラフ集	107

1 ま え が き

我国においても遮蔽解析あるいは設計計算に、ANISN,¹⁾ DOT,²⁾ あるいはTWOTRAN³⁾などの輸送計算コードが広く使用されるようになった。このことは、遮蔽計算の精度向上とより安全な環境の整備という社会的要求に応えるためと言っても過言ではないだろう。遮蔽計算の精度は単にその解析方法によるばかりでなく、使用する群定数にも大きく依存する。⁴⁾

遮蔽計算に用いる中性子およびガンマ線の群定数は、主として海外において整備されたライブラリー、例えばORNL-RSICのDLCライブラリー・シリーズ^{5,6,7)}などが用いられている。これらの群定数は中性子に関しては無限希釈断面積のみを集めたものであったり、群定数作成に用いた基礎データがENDF/B-I、IIであったり、更に特定の目的のためのエネルギー群構造を採用している場合もあるので、今後進めて行かなければならない遮蔽計算におけるデータと解析手法(DATA and METHOD)の確立の基礎として採用するには不十分である。

また、遮蔽設計精度に対する要求が厳しくなるにつれ、使用する群定数に対する要求精度も当然厳しくなる。従って、群定数作成にあたってはより正確を期すべく最新の手法と評価された核データを用いなければならない。また既存の群定数を使用する場合には、その特質を充分理解していなければならない。

筆者らは均質な混合物質、例えばステンレス・スチールの実効断面積を正確に求め、中性子・ガンマ線結合群定数を作成するRADHEAT-V3コードシステム⁸⁾を開発したのを機会に、ANISNなどの輸送計算コードに使用出来る遮蔽材用群定数ファイルを作成した。この種の機能は米国で開発された群定数作成コードシステムAMPX-1⁹⁾にも含まれていない。

筆者らが整備した群定数ファイルは下記の3種類である。

- (a) 無限希釈中性子群定数ファイル(ファイル名: JSD100)
- (b) 遮蔽材に関する中性子・ガンマ線結合群定数ファイル(ファイル名: JSD120)
- (c) (b)の結合群定数をANISN-JRで直接使用出来るように群独立型に変換したファイル(ファイル名: JSD120GI)

(a)は原子炉構造材および遮蔽材料に含まれる代表的な21核種、核燃料中に含まれるUおよびPuなどの10核種および中性子検出器などに用いられる10核種、合計41核種について、中性子100群・ P_5 近似で作成した群定数ファイルである。群定数化する際に用いた重み関数は0.4MeV以上を核分裂中性子スペクトルを、それ以下のエネルギー領域では $1/E$ スペクトルを用いた。第100群、すなわち熱中性子エネルギー領域(0.001~0.414eV)の平均断面積は中性子のスペクトルが20°Cのマックスウェル分布をしていると仮定して求めた。

(b)および(c)は代表的な燃料、構造および遮蔽材料31種について、中性子100群・ガンマ線20群・ P_5 近似で作成した巨視的実効断面積ファイルである。中性子の群定数は(a)の無限希釈断面積をもとにして、各材料の実効断面積に共鳴エネルギー領域における自己遮蔽効果を考慮して求めた。二次ガンマ線生成データに関しては中性子放出に要する結合エネルギーを1つの基準として、RADHEAT-V3に組み込まれているPOPOP4-JRからもっとも合理的と考えられるデータを選んで使用した。(a)の無限希釈断面積ファイルは感度評価にも利用出来るよ

りに反応別に整備されている。さらに、これらの群定数セットは必要に応じてデータの削除、修正、編集および作図ができるように考慮されている。

2 エネルギー群構造

遮蔽計算用群定数のエネルギー群構造は解析しようとする問題に直接依存するので、一義的に決められないが、計算機の処理能力が充分であり、かつ計算機所要時間にも制限がなければ詳細な群構造である程望ましい。しかし現状では、中性子100群・ガンマ線20群程度の群構造をもつ群定数から計算を始めればよいとされている。¹⁰⁾

例えば、ユーラトムで採用しているEURLIB-2¹¹⁾は構造材(主に鉄)の断面積に重点を置き中性子の高エネルギー領域を細かく分割し、中性子100群・ガンマ線20群の群構造を採用している。一方、米国のORNL-RSICの作成した遮蔽解析用群定数DLC-2³⁾は中性子のエネルギー15MeV~0.111MeV間を0.1レサジー、0.111MeV~0.414eVまでを0.25レサジー間隔で分割した中性子100群のライブラリーである。DLC-2の群構造はEURLIB-2に比べ高エネルギー側でやゝ粗いが、放射化断面積の大きい低エネルギー側にも考慮が加えられている。反面、鉄の共鳴断面積については特別な考慮はされていない。また、ORNL-RSICにはキャスクの設計計算用として中性子22群・ガンマ線18群の群定数DLC-23⁶⁾さらに核融合炉の設計計算用として中性子52群・ガンマ線20群の群定数DLC-28⁷⁾が整備されているが、いずれも特定の利用目的に便利な様にまとめたもので、後者はDLC-2から導かれたものである。

前述の如く、EURLIB-2の群構造は放射化量あるいは(n, γ)反応による二次ガンマ線の生成量を正しく扱うには中性子の低エネルギー領域の分割が粗すぎるきらいがあり、DLC-2の群構造の方がバランスがとれている。従って、中性子の群構造はDLC-2を採用した。一方、ガンマ線のエネルギー群構造については、群定数の比較、検出器のエネルギー・レスポンス、さらに反応率分布等の計算結果の比較の面からEURLIB-2を採用した。

Table 2.1に本ファイル作成に採用した中性子およびガンマ線のエネルギー構造を示す。

Table 2.1 Energy group structure in units of eV

..... NEUTRON GROUP					
GROUP	ENERGY RANGE		GROUP	ENERGY RANGE	
1	1.4918E+07	1.3499E+07	51	8.6617E+04	6.7379E+04
2	1.3499E+07	1.2214E+07	52	6.7379E+04	5.2475E+04
3	1.2214E+07	1.1052E+07	53	5.2475E+04	4.0868E+04
4	1.1052E+07	1.0000E+07	54	4.0868E+04	3.1828E+04
5	1.0000E+07	9.0484E+06	55	3.1828E+04	2.4788E+04
6	9.0484E+06	8.1873E+06	56	2.4788E+04	1.9305E+04
7	8.1873E+06	7.4082E+06	57	1.9305E+04	1.5034E+04
8	7.4082E+06	6.7032E+06	58	1.5034E+04	1.1709E+04
9	6.7032E+06	6.0653E+06	59	1.1709E+04	9.1188E+03
10	6.0653E+06	5.4881E+06	60	9.1188E+03	7.1017E+03
11	5.4881E+06	4.9659E+06	61	7.1017E+03	5.5308E+03
12	4.9659E+06	4.4933E+06	62	5.5308E+03	4.3075E+03
13	4.4933E+06	4.0657E+06	63	4.3074E+03	3.3546E+03
14	4.0657E+06	3.6788E+06	64	3.3546E+03	2.6126E+03
15	3.6788E+06	3.3287E+06	65	2.6126E+03	2.0347E+03
16	3.3287E+06	3.0119E+06	66	2.0347E+03	1.5846E+03
17	3.0119E+06	2.7253E+06	67	1.5846E+03	1.2341E+03
18	2.7253E+06	2.4660E+06	68	1.2341E+03	9.6112E+02
19	2.4660E+06	2.2313E+06	69	9.6112E+02	7.4852E+02
20	2.2313E+06	2.0190E+06	70	7.4852E+02	5.8295E+02
21	2.0190E+06	1.8268E+06	71	5.8295E+02	4.5400E+02
22	1.8268E+06	1.6530E+06	72	4.5400E+02	3.5357E+02
23	1.6530E+06	1.4957E+06	73	3.5357E+02	2.7536E+02
24	1.4957E+06	1.3534E+06	74	2.7536E+02	2.1445E+02
25	1.3534E+06	1.2246E+06	75	2.1445E+02	1.6702E+02
26	1.2246E+06	1.1080E+06	76	1.6702E+02	1.3007E+02
27	1.1080E+06	1.0026E+06	77	1.3007E+02	1.0130E+02
28	1.0026E+06	9.0718E+05	78	1.0130E+02	7.8893E+01
29	9.0718E+05	8.2085E+05	79	7.8893E+01	6.1442E+01
30	8.2085E+05	7.4274E+05	80	6.1442E+01	4.7851E+01
31	7.4274E+05	6.7206E+05	81	4.7851E+01	3.7267E+01
32	6.7206E+05	6.0810E+05	82	3.7267E+01	2.9023E+01
33	6.0810E+05	5.5023E+05	83	2.9023E+01	2.2603E+01
34	5.5023E+05	4.9787E+05	84	2.2603E+01	1.7603E+01
35	4.9787E+05	4.5049E+05	85	1.7603E+01	1.3710E+01
36	4.5049E+05	4.0762E+05	86	1.3710E+01	1.0677E+01
37	4.0762E+05	3.6883E+05	87	1.0677E+01	8.3153E+00
38	3.6883E+05	3.3373E+05	88	8.3153E+00	6.4760E+00
39	3.3373E+05	3.0197E+05	89	6.4760E+00	5.0435E+00
40	3.0197E+05	2.7324E+05	90	5.0435E+00	3.9279E+00
41	2.7324E+05	2.4724E+05	91	3.9279E+00	3.0590E+00
42	2.4724E+05	2.2371E+05	92	3.0590E+00	2.3824E+00
43	2.2371E+05	2.0242E+05	93	2.3824E+00	1.8554E+00
44	2.0242E+05	1.8316E+05	94	1.8554E+00	1.4450E+00
45	1.8316E+05	1.6573E+05	95	1.4450E+00	1.1254E+00
46	1.6573E+05	1.4996E+05	96	1.1254E+00	8.7642E-01
47	1.4996E+05	1.3569E+05	97	8.7642E-01	6.8256E-01
48	1.3569E+05	1.2277E+05	98	6.8256E-01	5.3158E-01
49	1.2277E+05	1.1109E+05	99	5.3158E-01	4.1399E-01
50	1.1109E+05	8.6617E+04	100	4.1399E-01	1.0000E-03

Table 2.1 (Continued)

..... GAMMA GROUP

GROUP	ENERGY RANGE	
1	1.4000E+07	1.2000E+07
2	1.2000E+07	1.0000E+07
3	1.0000E+07	8.0000E+06
4	8.0000E+06	6.5000E+06
5	6.5000E+06	5.0000E+06
6	5.0000E+06	4.0000E+06
7	4.0000E+06	3.0000E+06
8	3.0000E+06	2.5000E+06
9	2.5000E+06	2.0000E+06
10	2.0000E+06	1.6600E+06
11	1.6600E+06	1.3300E+06
12	1.3300E+06	1.0000E+06
13	1.0000E+06	8.0000E+05
14	8.0000E+05	6.0000E+05
15	6.0000E+05	4.0000E+05
16	4.0000E+05	3.0000E+05
17	3.0000E+05	2.0000E+05
18	2.0000E+05	1.0000E+05
19	1.0000E+05	5.0000E+04
20	5.0000E+04	2.0000E+04

3 核種および遮蔽材料

3.1 核種および遮蔽材料

原子炉等の遮蔽を考える時、扱わなければならない核種はある程度限定されるが、遮蔽解析を行なう場合にはその放射線源と検出器の断面積も同時に必要となる。筆者らは代表的な遮蔽材料及び構造材料を構成する主要な元素から21核種、核燃料あるいは核分裂率の測定に用いるU, Np およびPu から10核種、さらにAu, In等検出器として用いられる核種から10核種、合計41核種の無限希釈断面積を求め、1つのファイルJSD100に収録した。

JSD100に収録した核種とその物質番号(MAT. No)をTable 3.1に示す。

3.2 遮蔽材料および識別番号

遮蔽材料の巨視的な中性子・ガンマ線結合群定数を作成しておくことは、遮蔽設計計算および放射線強度の予想に有用である。筆者らは代表的な遮蔽材、構造材および中性子の散乱材料の巨視的実効断面積を中性子100群・ガンマ線20群・P₀近似で作成し、一次元輸送計算コードANISN-JRで使用出来る形式にまとめた。各材料の巨視的実効断面積はその材料を構成する元素の原子数密度により定められる。しかし、材料の特性は通常その比重と各元素の重量比だけで示されているので、可能な限り、原子数密度と対応する比重および重量比を明記した。このことはANISN-JRにより輸送計算を行なう際に、少なくとも比重のみ異なる材料の実効断面積を正しく与えるのに役立つからである。

巨視的実効断面積を求めた材料の識別番号(ID. No)をTable 3.2に、原子組成を付録C Table 1に示した。ここで、代表的な炉心材料(核燃料物質)を記載した目的は遮蔽計算に必要な炉心の核計算の便を図るためである。PWR, BWR用核燃料については熱中性子炉特有の非均質効果を考慮しなければ正しい核計算は不可能なので、ピン燃料材質のみを対象とした。

また高速炉系炉心については、均質化した組成で求めた実効断面積でも比較的良い近似で炉心の状態を表現するため、二領域型高速原型炉“もんじゅ”を模擬したFOAV-1集合体の2つの炉心領域およびブランケットを取上げた。なお、Table C. 1で使用したアボガドロ数は 0.602252×10^{24} とし、それぞれの核種の質量数¹⁴⁾はそれらの同位元素の存在比による重みづけを考慮して計算値に統一化を図った。

Table 3.1 Nuclides and the Mat. % contained in the file J1026-JSD100

Shielding mat.		Actinoide		Detector elements		
Nuclide	MAT %	Nuclide	MAT %	Nuclide	MAT%	Reaction type
H	1269	U-234	1043	Li-6	1271	(n, α)
C	1274	U-235	1261	Li-7	1272	
N	1275	U-236	1163	B-10*	1273	(n, α)
O	1276	U-238	1262	B-11*	1160	
Na	1156	Np-237	1263	F	1277	
Mg	1280	Pu-238	1050	Mg-24*	1280	(n, p)
Al	1193	Pu-239	1264	Al-27	6193	(n, p)(n, α)
Si	1194	Pu-240	1265	Fe-54	6417	(n, p)
K	1150	Pu-241	1266	Fe-56	6410	(n, p)
Ca	1195	Pu-242	1161	Co-59	1199	(n, γ)
Cr	1191			Ni-58	6419	(n, p)
Mn	1197			In-115	6416	(n, n')
Fe	1192			Al*	1193	
Ni	1190			Cu*	1295	
Cu	1295			Cd*	1281	
Zr	1284			Au-197	1283	(n, γ)
Mo	1287					
Cd	1281					
Pb	1288					
B-10	1273					
B-11	1160					

* Nuclides with asterisk are the same as those listed in the shielding material column.

Table 3.2 Materials and the ID. № contained in the file J1026•JSD120

Material	ID. №	Material	ID. №	Material	ID. №	Material	ID. №	Material	ID. №
WATER	100	IRON	200	2S-AL	300	ORDINARY CONCRETE 1	400	FUEL PIN (PWR)	500
SODIUM	110	COPPER	210	SS41	310	ORDINARY CONCRETE 2	401	FUEL PIN (BWR)	510
GRAPHITE	120	CHROMIUM	220	SUS27	320	HEAVY CONCRETE	410	INNER CORE* (HOMO)	520
PARAFFIN	130	NICKEL	230	SUS32	321	SERPENTINE CONCRETE	420	OUTER CORE* (HOMO)	530
POLYETHYLEN	140	LEAD	240	PRESSURE VESSEL	330	INSULATION (CHRYSOITILE)	430	DILUTION* BLANKET 1 (HOMO)	540
ALUMINIUM	150			SB42	331			DILUTION* BLANKET 2 (HOMO)	541
AIR	160			ZIRCALLOY4	340			B ₁ C+AL	550

* For the Fast Critical Assembly

4 群定数の作成

4.1 無限希釈断面積

RADHEAT-V3に組込まれている SUPERTO G-JRにより ENDF/B-IV ライブラリーを使用して無限希釈断面積を作成した。

無限希釈断面積を求める際に用いる非共鳴同位元素のポテンシャル散乱断面積 σ_p は 10^8 barnと仮定した。採用した中性子の群構造は100群とし(Table 2.1 参照), 群定数化に用いた重み関数は $E > 0.4 \text{ MeV}$ の範囲では核分裂スペクトルを, $0.4 \text{ MeV} \geq E \geq 0.001 \text{ eV}$ の範囲では $1/E$ スペクトルを使用した。弾性散乱の異方性はルジャンドル展開項の第5次(P_5)までとった。

この条件を使って算出した無限希釈断面積は中性子のエネルギーが $E > 0.414 \text{ eV}$ の範囲では合理的な値となっているが, 熱群(第100群)は重み関数を $1/E$ スペクトルとしたためにマックスウェル分布をしている実効値とは異なる。このため, 熱中性子についてはRADHEAT-V3システムのTHERMOSルーチンで計算した実効値と置換えることが望ましいが, 本ファイルの群定数はむしろ汎用のデータを提供するという目的で作成したので, THERMOSルーチンを使用せずに, 一般的手法として熱群の断面積が $1/v$ 吸収体の特性を持ち, スペクトルがマックスウェル分布に従っていると仮定して求めた断面積の値に置換えた。

熱群の断面積の修正方法は下記のとおりである。

1) BNL-325 Third Edition-Vol 1に熱中性子断面積の値が記載されている場合。

(a) $\sigma_\gamma, \sigma_\alpha, \sigma_f$

熱中性子スペクトルが T (°K)におけるマックスウェル分布で, 断面積が $1/v$ 吸収体に近いと仮定した。すなわち,

$$\sigma_{i(\text{new})} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sigma_{i0} \cdot g \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T}}, \quad i = \gamma, \alpha, f \quad (4.1.1)$$

σ_{i0} : 媒質温度 20°C での 2200 m/s の中性子に対する断面積の値
(BNL-325より)

$i = \gamma$: (n, γ) 反応を示す添字

$i = \alpha$: (n, α) 反応を示す添字

$i = f$: (n, f) 反応を示す添字

g : $1/v$ 吸収体からのずれに対する補正係数(Westcott法による)

T : 媒質温度(ここでは 293°K)

T_0 : 常温(ここでは 293°K)

(b) σ_s

熱中性子領域では, 弾性散乱断面積はエネルギーにほとんど依存しないので, 使用する重み関数には影響されない。従って, 束縛効果(bound effect)のみを補正した。

すなわち,

$$\sigma_{s(\text{new})} = (\sigma_0)_s \cdot \left(\frac{A+1}{A} \right)^2 \quad (4.1.2)$$

A : 対象となる核種の質量数

$(\sigma_0)_s$: 媒質温度 20°C, 2200m/s の弾性散乱断面積の値
(BNL-325 より)

2) BNL-325 Third Edition Vol-1に熱中性子断面積の値が記載されていない場合。

(a) $\sigma_\gamma, \sigma_\alpha, \sigma_f$

SUPERTOG-JR で計算された値をマックスウェル分布を仮定して次式により修正置換した。

$$\sigma_{i(\text{new})} = c \cdot \sigma_{i0} \cdot g, \quad i = \gamma, \alpha, f \quad (4.1.3)$$

σ_{i0} : SUPERTOG-JR で作成した断面積の値

$i = \gamma$: (n, γ) 反応を示す添字

$i = \alpha$: (n, α) 反応を示す添字

$i = f$: (n, f) 反応を示す添字

g : 1/v 分布からのずれに対する補正係数 (Westcott 法による)

c : 次式にて表わされる係数

$$c = \frac{\left[\frac{\int_0^\infty \sigma(E) \phi(E) dE}{\int_0^\infty \phi(E) dE} \right]_{\substack{\sigma(E) \propto 1/\sqrt{E} \\ \phi(E) : \text{マックスウェル分布}}}}{\left[\frac{\int_{0.001}^{0.414} \sigma(E) \phi(E) dE}{\int_{0.001}^{0.414} \phi(E) dE} \right]_{\substack{\sigma(E) \propto 1/\sqrt{E} \\ \phi(E) \propto 1/E}}} \quad (4.1.4)$$

(b) σ_s

熱中性子の弾性散乱断面積はエネルギーにほとんど依存しないので、上式(4.1.4)のcを1.0とし束縛効果(bound effect)のみの修正を行なった。

$$\sigma_s = (\sigma_0)_s \times \left(\frac{A+1}{A} \right)^2 \quad (4.1.5)$$

3) 水素の弾性散乱断面積

水素の熱中性子弾性散乱断面積の値は上記の補正を施しても不十分であり、水素分子または水分子の散乱を加味する必要があるので、次のようにした。

すなわち、水(H₂O)の全断面積115バーン [BNL-325 2nd Editionより] から、酸素(O)の散乱断面積および(n, γ)断面積と水素(H)の(n, γ)断面積を差し引いて求めた値と置換した。

4) 修正前および修正後の熱中性子断面積

上記1) 2) 3)の方法で修正置換した熱中性子断面積の値と修正前の値をTable 4.1に示す。

以上のようにして熱中性子断面積を置換した各核種の中性子100群の無限希釈断面積のグラフを付録Dに示す。

なお、断面積ファイルの構成については付録Aを参照の事。

4.2 遮蔽材に関する中性子・ガンマ線結合群定数

前節で作成した核種毎の無限希釈断面積ファイルに基づいて、遮蔽計算に必要な代表的な31種類の材料について、中性子実効断面積、二次ガンマ線生成断面積およびガンマ線の断面積を求め、これらの三者を結合し、いわゆる結合群定数ファイル(中性子100群・ガンマ線20群・ P_5 近似)を作成した。

4.2.1 実効断面積

材料の中性子に対する共鳴領域の実効断面積はその材料を構成する各元素の無限希釈断面積と材料を構成しているお互いの元素の断面積との相関関係によって定まる。

一般に無限希釈断面積は共鳴領域の自己遮蔽効果を考慮した実効断面積に比べて大きな値となるので、もし自己遮蔽効果を無視すると遮蔽体の厚さが大きくなるにつれて、透過線束の減衰に対する計算誤差が累積して正しい結果は得られない。それゆえ、各材料の中性子に対する実効断面積は共鳴領域の自己遮蔽因子(f-factor)を考慮してより正確な値を求める必要がある。

筆者らは無限希釈断面積に、RADHEAT-V3システムに組込まれたJAERI-Fast Setルーチンを使用して、自己遮蔽因子を加味した実効断面積を求めた。その概要は次のとおりである。

f-factorの定義は

$$f_x^j(\sigma_0) = \frac{\bar{\sigma}_x^j(\sigma_0)}{\sigma_x^j(\sigma_0 = \infty)} \quad (4.2.1)$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{N_j} \sum_i N_i \cdot \bar{\sigma}_t^i \quad (4.2.2)$$

ここで、

$f_x^j(\sigma_0)$: 核種jの(n, x)反応に対するf-factor, xはtotal, capture, fissionあるいはelastic scatteringを表わす。

$\bar{\sigma}_x^j(\sigma_0)$: 核種jの(n, x)反応の実効断面積

$\sigma_x^j(\sigma_0 = \infty)$: 核種jの(n, x)反応の無限希釈断面積

N_i : 核種iの原子数密度

$\bar{\sigma}_t^i$: 核種iの実効全断面積

σ_0 : 均質な素材に含まれている核種j以外の核種の $\bar{\sigma}_t^i$ の総和を核種jの原子数密度 N_j で除した値

JAERI-Fast Setにおけるf-factorは、(n, t)に関する f_t , (n, r)に対する f_c , (n, f)に対する f_f および弾性散乱に対する f_e から成り、 σ_0 および絶対温度 $T(K)$ の関数で表わされている。すなわち、

$$\bar{\sigma}_t = f_c \cdot \sigma_c + f_f \cdot \sigma_f + f_e \cdot \sigma_e + \sigma_{in} + \sigma_{n2n} \quad (4.2.3)$$

RADHEAT-V3システムでは、(4.2.3)式により全ての核種について $\bar{\sigma}_t$ を求めた後、これらの値を(4.2.2)式に代入し(4.2.1)式にさかのぼり、 $\bar{\sigma}_t$ の相対変化量が1%以内に納ま

るまで $\bar{\sigma}_g$ の繰返し計算を行なう。

4.2.2 二次ガンマ線生成断面積

次に、こうして求められた実効断面積をもとにPOPOP4-JRを使用して、材料の二次ガンマ線生成断面積を求めた。

POPOP4ライブラリには1つの核種、1つの反応について複数の測定データが登録されているものもあるので、それらの中から1つのデータを選ぶ必要がある。その選択手段として「Wapstra & Goveの原子質量の質量過剰の表」¹³⁾(数値は五十嵐¹⁴⁾の値を採用)から計算した中性子の分離エネルギーのしきい値 $Q_{n,sp}$ とPOPOP4ライブラリから得られた (n, γ) 反応のQ値(付録B Table B.2参照)とを比較して、 $Q_{n,sp}$ 値に最も近くかつ、Q値の方が大きい値となるデータを採用した。

また、 (n, γ) 以外の (n, α, γ) 、 (n, p, γ) 等のデータは、上記の方法で選択した (n, γ) 反応データと同一研究者又は研究所で発表しているデータを優先的に採用した。また、本報告書ではPOPOP4ライブラリの使用に際しては

B-11は除外、

Pu-240はU-238のデータを代用、

Pu-241, 242はPu-239のデータを代用、

とした。このようにして選択した二次ガンマ線生成データのID. No.を付録B Table B.1に示す。

4.2.3 ガンマ線の断面積

次に、ガンマ線輸送群定数をRADHEAT-V3システムのGAMLEG-JRルーチンで作成した。これは原子番号とその原子に対応する原子数密度を与えれば、自動的に輸送群定数をつくるルーチンである。

ここで注意しなければならないのは、ガンマ線の断面積のうち光電効果の断面積は原子番号の5乗に比例するので、材料の組成の中で原子番号が大きい微量しか含まれていない様な元素を無視すると、ガンマ線の遮蔽効果は少な目に計算される。しかし、現状では二次ガンマ線生成データに内蔵する誤差の方が大きいと考えられるので、微量元素の補正は行っていない。

4.2.4 結合群定数ファイル

以上の手順に従って作成した材料の結合群定数ファイルは次の二つの形で登録、保存した。
[ファイルの構造は付録Aを参照]

(a) ファイル名 J1026・JSD120

中性子100群の無限希釈断面積ファイルJ1026・JSD100をベースに作成した、中性子100群・ガンマ線20群・ P_5 近似の材料別ファイルで、材料の種類はTable 3.2に示す31種類である。

(b) ファイル名 J1026・JSD120GI

J1026・JSD120ファイルを一次元輸送コードANISNで直接読み込めるように群独立型(Group independent)に配列替えしたものである。

JSD120GIに収納した材料は31種類と多いので、本ファイルそのまま使用するとANISN計算に必要な群定数のための記憶容量が大きくなり、計算体系の大きさが制限され

る。

従って、記憶容量および計算時間を節約するためには、計算に必要な材料のみを J1026・JSD120 から抜取り、RADHEAT-V3 step3 により群独立型に変換して使用した方が J1026・JSD120GI をそのまま使うよりは有利である。

Table 4.1 Comparison between new and old values of thermal cross sections in units of barns

Nuclide	(n, γ)	(n, α)	(n, p)	(n, f)	(n, n')	
					new value	old value
H	2.94200-1*				4.85160+1	2.04490+1
	5.29673-1					
C	3.01000-3				5.57400	4.72895
	5.37363-3					
N	6.65000-2		1.60400		1.21680+1	9.95700+0
	1.19024-1		2.88747			
O	2.39000-4				4.24500	3.67285
	2.82525-4					
Na	8.2420 -1				3.48400	3.27226
	8.47637-1					
Mg	5.5830 -2				3.70300	3.28507
	1.00117-1					
Al	2.03800-1				1.60200	1.33120
	3.68368-1					
Si	1.41800-1				2.54975-1	2.12497
	2.36000					
K	1.86100	4.07700-3	4.52000-2		1.57800	2.16444
	3.33359	7.30212-3	8.09557-2			
Ca	3.81100-1	8.69800-4			1.74800	2.98027
	6.82831-1	1.55750-3				
Cr	2.74700				3.94700	4.34200
	4.92076					
Mn	1.17860+1				2.17700	1.74404
	2.11107+1					
Fe	2.26000				1.12930+1	1.13325+1
	4.06384					
Ni	3.92600				1.78950+1	1.78641+1
	7.25332					
Cu	3.35900				8.15000	8.56480
	6.01472					
Zr	1.63900-1				6.54100	6.17741
	3.30198-1					
Mo	2.34900				5.92300	5.0000
	4.20661					
Cd	2.17120+3				5.7000	1.16993+1
	4.10174+3					
Pb	1.50700-1				1.15110+1	1.11760+1
	2.82556-1					
B-10	4.43100-1	3.40045+3	5.02000-4		2.69800	2.03979
	0.0	6.08960+3	8.98227-4			
B-11	4.87425-3				4.64132	5.03600
	7.93708-3					

* to be read as 2.942×10^{-1}

Table 4.1 (Continued)

Nuclide	(n, γ)	(n, α)	(n, p)	(n, f)	(n, n')
U-234	8.880 00+1 1.533 65+2				1.210 28+1 1.533 65+1
U-235	8.738 20+1 1.659 63+2			5.035 27+2 9.573 34+2	1.391 77+1 1.519 38+1
U-236	4.608 40 8.156 56				9.540 30 9.443 67
U-238	2.392 80 4.299 85				8.974 95 8.916 92
Np-237	1.497 72+2 2.846 69+2			1.683 80-2 2.798 20-2	1.704 29+1 1.690 93+1
Pu-238	4.847 66+2 9.088 70+2			1.462 27+1 2.710 86+1	2.026 93+1 2.007 10+1
Pu-239	2.382 18+2 5.532 43+2			6.900 69+2 1.397 39+3	7.764 57 8.267 27
Pu-240	2.565 63+2 4.617 53+2			2.658 70-2 9.209 93-2	1.552 86 3.435 04
Pu-241	3.261 32+2 7.043 51+2			9.332 80+2 1.715 41+3	1.109 15+1 1.105 62+1
Pu-242	1.639 52+1 2.929 27+1				8.066 30 8.325 72
Li-6	2.481 40-2 6.111 46-2	8.330 53+2 1.492 19+3			9.800 00-1 7.212 31-1
Li-7	3.279 04-2 5.554 22-2				1.371 17 1.049 80
F	8.419 16-3 1.507 91-2				4.432 13 3.929 29
Mg-24 Al-27 Fe-54 Fe-56	Because of threshold detector, these values are same as from SUPERTOG-JR.				
Co-59	3.296 76+1 5.908 06+1				
Ni-58	Because of threshold detector, this value is same as from SUPERTOG-JR.				
In-115	1.790 18+2 2.636 42+2				
Au-197	8.755 92+1 1.565 80+2				

5 ま と め

遮蔽設計計算に用いられる群定数は、本来その体系に依存するものである。すなわち、使用材料とその配置、中性子およびガンマ線エネルギースペクトルの空間変化に大きく依存する。従って、全ての遮蔽体系に適用できるという様な汎用的な遮蔽群定数セットは一義的に決められない。

一般には無限希釈の仮定のもとに、適当なスペクトルを重み関数として求められた群定数が用いられている。しかし、実際の遮蔽計算を精度よく行なうためには、遮蔽体系を構成する各材料の共鳴エネルギー領域における自己遮蔽効果を考慮した巨視的実効断面積が必要となる。また、体系中の中性子の減速および吸収過程で放出される二次ガンマ線量を評価するためには、二次ガンマ線生成断面積を含んだ中性子・ガンマ線結合型の実効的な群定数が必要となる。

筆者らはRADHEAT-V3を用いて遮蔽設計に際して現われる元素を中心に、41種の元素について中性子100群・P₅近似の無限希釈断面積を作成した。次いで、この断面積を用いて代表的な構造材、遮蔽材を中心に、31種の材料について中性子100群・ガンマ線20群・P₅近似の巨視的実効断面積を作成した。これらの群定数はSN輸送コードANISN-JR, TWOTRANあるいはDOT-III等対象としたが、前者の無限希釈断面積はその他の解析計算、たとえば断面積感度解析などにも使用できるように考慮されている。しかし、ここで作成した31種の材料だけでは計算可能な体系には限度があるので、筆者らは系統的な巨視的実効断面積が追加作成できるように、二次ガンマ線生成データを中心にこれらの実効断面積の作成に用いたデータを可能な限り記載した。

筆者らはこれらの群定数の特性を、FCAV-1集合体の遮蔽解析を通じて調べ始めている。しかし、少数の解析対象では、この種の群定数セットの十分な検証は不可能で、多くの方々の協力を得て達成できるものである。この意味から本群定数セットが広く遮蔽解析計算に使用され、問題点があれば指摘していただければ幸である。

おわりに本群定数作成にあたりRADHEATコードシステムの改良やデータファイルの管理に種々御援助いただいた富士通(株) 南多善氏に感謝します。

参考文献

- (1) Engle W. W. Jr. : "A USER MANUAL FOR ANISN: A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering," K-1963 [1976]
- (2) Mynatt P. R. : "Development of Two-dimensional Discrete Ordinates Transport Theory for Radiation Shielding", K-1694 [1969]
Rhoades W. A. and Mynatt F. R. : "The DOT-III Two-dimensional Discrete Ordinates Transport Code", ORNL-TM-4280
- (3) Lathrop K. D. and Brinkley F. W. : "TWOTRAN-III: An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-dimensional

5 ま と め

遮蔽設計計算に用いられる群定数は、本来その体系に依存するものである。すなわち、使用材料とその配置、中性子およびガンマ線エネルギースペクトルの空間変化に大きく依存する。従って、全ての遮蔽体系に適用できるという様な汎用的な遮蔽群定数セットは一義的に決められない。

一般には無限希釈の仮定のもとに、適当なスペクトルを重み関数として求められた群定数が用いられている。しかし、実際の遮蔽計算を精度よく行なうためには、遮蔽体系を構成する各材料の共鳴エネルギー領域における自己遮蔽効果を考慮した巨視的実効断面積が必要となる。また、体系中の中性子の減速および吸収過程で放出される二次ガンマ線量を評価するためには、二次ガンマ線生成断面積を含んだ中性子・ガンマ線結合型の実効的な群定数が必要となる。

筆者らはRADHEAT-V3を用いて遮蔽設計に際して現われる元素を中心に、41種の元素について中性子100群・ P_5 近似の無限希釈断面積を作成した。次いで、この断面積を用いて代表的な構造材、遮蔽材を中心に、31種の材料について中性子100群・ガンマ線20群・ P_5 近似の巨視的実効断面積を作成した。これらの群定数はSN輸送コードANISN-JR, TWOTRANあるいはDOT-III等対象としたが、前者の無限希釈断面積はその他の解析計算、たとえば断面積感度解析などにも使用できるように考慮されている。しかし、ここで作成した31種の材料だけでは計算可能な体系には限度があるので、筆者らは系統的な巨視的実効断面積が追加作成できるように、二次ガンマ線生成データを中心にこれらの実効断面積の作成に用いたデータを可能な限り記載した。

筆者らはこれらの群定数の特性を、FCAV-1集合体の遮蔽解析を通じて調べ始めている。しかし、少数の解析対象では、この種の群定数セットの十分な検証は不可能で、多くの方々の協力を得て達成できるものである。この意味から本群定数セットが広く遮蔽解析計算に使用され、問題点があれば指摘していただければ幸である。

おわりに本群定数作成にあたりRADHEATコードシステムの改良やデータファイルの管理に種々御援助いただいた富士通(株) 南多善氏に感謝します。

参考文献

- (1) Engle W. W. Jr. : "A USER MANUAL FOR ANISN: A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering," K-1963 [1976]
- (2) Mynatt P. R. : "Development of Two-dimensional Discrete Ordinates Transport Theory for Radiation Shielding", K-1694 [1969]
Rhoades W. A. and Mynatt F. R. : "The DOT-III Two-dimensional Discrete Ordinates Transport Code", ORNL-TM-4280
- (3) Lathrop K. D. and Brinkley F. W. : "TWOTRAN-III: An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-dimensional

- Transport ", LA-4848-MS [1973]
- (4) Avery A. F. and Lympny S. D. : "Joint IAEA-OECD (NEA) Technical Committee Meeting on Differential and Integral Nuclear Data Requirements for Shielding Calculations, Vienna, 12-15 Oct. 1976", TC-84/24 [1976]
- (5) Wright R. Q. : "99-Group Neutron Cross-Section Data based on ENDF/B, DLC-2", ORNL-TM-3049 [1969]
- (6) Morrison G. W., et al. : "CASK 40 Group Coupled Neutron and Gamma-Ray Cross-Section Data, DLC-23, [1972]
- (7) Kriese J. T. : "Coupled Neutron and Gamma-Ray Cross-Section Sets for Fusion Reactor Calculations, DLC-28", ORNL-TM-4277 [1973]
- (8) Miyasaka S. et al. : "A Code System for Analyzing the Radiation Transport in a Nuclear Reactor and Shield, RADHEAT-V3", JAERI-M [1976]
- (9) Greene N. M. : "AMPX-1 Modular Code System for Generating Coupled Multi-group Neutron-Gamma Libraries from ENDF/B", ORNL-TM-3706 [1974]
- (10) Butler J., Nicks R., Jubbs N. : "Specialist's Meeting on Sensitivity Studies and Shielding Benchmarks, Paris, October 1975", NEACRP-L-150 [1976]
- (11) Hehn G., Koban J. : "Reactor Shield Benchmark #2 ESIS 4, ESIS NEWSLETTER, " ISPRA, January [1976].
- (12) Katsuragi S., et al. : "JAERI Fast Reactor Group Constants Systems Part I-1", JAERI 1199 [1970]
- (13) Wapstra A. H. and Gove N. B. : "Nuclear Data Table 9, # 4-5, " [1971]
- (14) 五十嵐 信一 : "中性子入射によって起る核反応のしきい値の表" 私信 [1976]
- (15) Duffey D., et al., : "Analytical Sensitivities and Energies of Thermal Neutron Capture Gamma-Rays", Nucl. Inst. & Method, 80 [1970]
- (16) Senftle F. E., et al., "Analytical Sensitivities and Energies of Thermal Neutron Capture Gamma-Rays II, " Nucl. Inst. & Method, 93 [1971]
- (17) 石川 寛, 他 : "JRR-3 (国産一号炉) 設計計算", JAERI-1002 [1960]
- (18) 森島 淳好, 他 : "燃料設計に必要な物性値及び計算図表・第1集 (改訂第2版)" JAERI-M-4881 [1972]

付録 A ファイル構造説明資料

A.1 無限希釈断面積のファイル構造

無限希釈断面積のファイル名は J1026・JSD100 で、ファイルの構造を Fig. A. 1 に、その記号の説明を Table A. 1 に示す。本ファイルには、初めに中性子群数、ルジャンドル展開項数、核種の数およびエネルギー群構造等が記入され、続いて各核種毎に各断面積、非弾性散乱マトリックス、(n, 2n) 散乱マトリックスそして弾性散乱断面積が $l=0$ から $l=LOR$ DER まで記入されている。

Fig. A. 1 において、 $H_f \dots \dots H_{n2n}$ 、 $D_{np} \dots \dots D_{n2n}$ はそれぞれ発熱および放射線損傷の断面積を示すが、本ファイルではこれらを全て 0.0 とした。

尚、核種の収録順序は原子番号の小さい順に並べ [Table 3.1 参照]、各核種の反応断面積の順序は下記のとおりである。

- (1) TOTAL : 全断面積 σ_t
- (2) CAPTURE : 捕獲断面積 σ_c (注)
- (3) FISSION : 核分裂断面積 σ_f
- (4) N/FISSION : 核分裂当りの中性子発生数 ν
- (5) N, PROTON : (n, p) 反応断面積 σ_p
- (6) N, ALPHA : (n, α) 反応断面積 σ_α
- (7) N, GAMMA : (n, γ) 反応断面積 σ_j
- (8) ELASTIC : 弾性散乱断面積 σ_{el}
- (9) INELASTIC : 非弾性散乱断面積 σ_{in}
- (10) N, 2N : (n, 2n) 反応断面積 σ_{n2n}

注) 捕獲断面積 σ_c

$$\sigma_c = \sigma_\gamma + \sigma_p + \sigma_d + \sigma_{tri} + \sigma_{3He} + \sigma_\alpha + \sigma_{2\alpha}$$

(σ_d , σ_{tri} , σ_{3He} , $\sigma_{2\alpha}$ はそれぞれ重水素, 三重水素, He-3, 2つのアルファ粒子生成断面積を示す。)

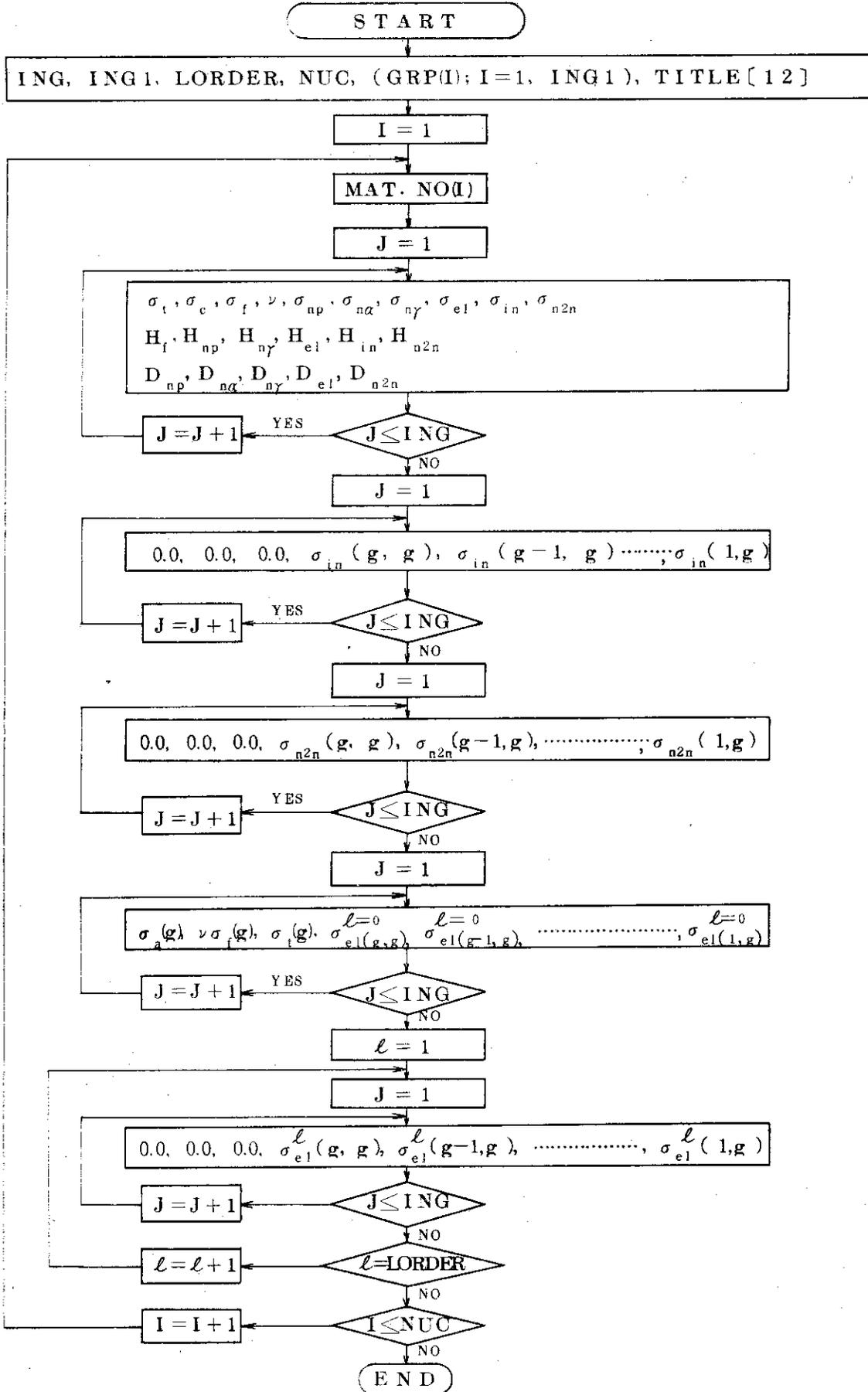


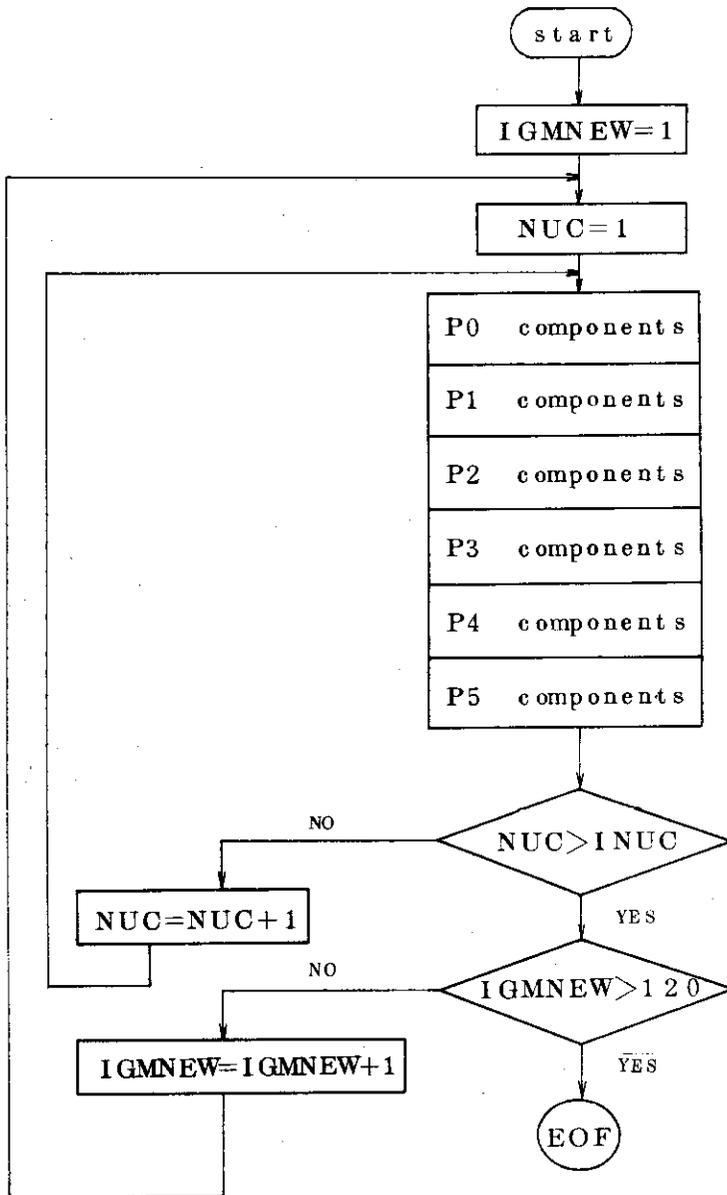
Fig. A.1 File structure of infinite dilution cross section.

Table A. 1 Notations used in Fig. A. 1

Symbol	Notation
ING	number of neutron energy groups (100)
ING1	number of neutron energy boundaries (101)
LORDER	order of Legendre polynomial expansions
MATNO	identification number of nuclides (same as MATNO in ENDF/B-4 library)
NUC	number of nuclides contained in the file
σ_t	total cross section
σ_c	capture cross section
σ_f	fission cross section
ν	neutron numbers per fission
σ_{np}	(n, p) reaction cross section
$\sigma_{n\alpha}$	(n, α) reaction cross section
$\sigma_{n\gamma}$	(n, γ) reaction cross section
σ_a	absorption cross section
σ_{n2n}	(n, 2n) reaction cross section
σ_{in}	inelastic scattering cross section
σ_{el}	elastic scattering cross section

A.2 群独立(Group independent) ファイルの構造

遮蔽材に関する中性子・ガンマ線の群独立結合群定数はJ1026・JSD120GI に収録した。このファイルはANISNコードで直接読み込める様に、エネルギー群毎に独立した断面積セットであり、ファイルの構成をFig. A. 2, 各材料のP₀の位置をTable A. 2 に示す。尚、各材料の収録順序はTable 3.2 に従った。



Notes) IGMNEW : Number of total energy groups
 INUC : Number of materials

Fig. A. 2 File structure of group independent cross sections

Table A. 2 Material and P₀-Position in the file
J1026·JSD120GI

P ₀ Position	Material	P ₀ Position	Material
1	WATER	97	PRESSURE VESSEL
7	SODIUM	103	SB42
13	GRAPHITE	109	ZIRCALOY-4
19	PARAFFIN	115	ORDINARY CONCRETE 1
25	POLYETHYLEN	121	ORDINARY CONCRETE 2
31	ALUMINIUM	127	HEAVY CONCRETE
37	AIR	133	SERPENTINE CONCRETE
43	IRON	139	CHRYSOTILE
49	COPPER	145	FUEL PIN (PWR)
55	CHROMIUM	151	FUEL PIN (BWR)
61	NICKEL	157	FBR (INNER CORE) HOMO.
67	LEAD	163	FBR (OUTER CORE) HOMO.
73	2S-AL	169	DILUTION BLANKET 1
79	SS41	175	DILUTION BLANKET 2
85	SUS27	181	B ₄ C + AL
91	SUS32		

付録B 二次ガンマ線生成断面積参考資料

筆者らが採用した POPOP4 ライブラリーのデータ番号 (ID. No) を Table B. 1 に、それらの選択ベースとなった計算結果を Table B. 2 に示す。

Table B. 1 Material number and the ID. No. in the POPOP4 library

Elements	Z	ENDF/B-4 MAT. NO.	POPOP4 ID. NO.		
H	1	1269	10101		
C	6	1274	60102	60304	
N	7	1275	70102	70301	
O	8	1276	80201	86302	86601
Na	11	1156	113101	113301	
Mg	12	1280	120101	120301	
Al	13	1193	130103	130302	
Si	14	1194	140104	140201	140301 140601
K	19	1150	190102	190301	
Ca	20	1195	200103	200301	
Cr	24	1191	240104	240301	
Mn	25	1197	250101		
Fe	26	1192	266301	269102	
Ni	28	1190	280104	280301	
Cu	29	1295	290104		
Zr	40	1284	400102		
Mo	42	1287	420103		
Cd	48	1281	480102		
Pb	82	1288	820102	820301	
B-10	5	1273	50103	50201	
B-11	5	1160			
U-234	92	1043			
U-235	92	1261	925101	925301	925806
U-236	92	1163	926101		
U-238	92	1262	928112	925806	
Np-237	93	1263			
Pu-239	94	1264	925101	925806	
Pu-240	94	1265	928112	925806	
Pu-241	94	1266	925101	925806	
Pu-242	94	1161	928112	925806	
Li-6	3	1271			
Li-7	3	1272			
F	9	1277	90102		
Mg-24	12	1280			
Al-27	13	6193			
Fe-54	26	6417			
Fe-56	26	6410			
Co-59	27	1199			
Ni-58	28	6419			
In-115	49	6416			
Al	13	1193	130103	130302	
Cu	29	1295	290104		
Cd	48	1281	480102		
Au-197	79	1283			

Note: ID No. used in the POPOP4 library has five(5) or six(6) digits.

They indicate the following meaning :

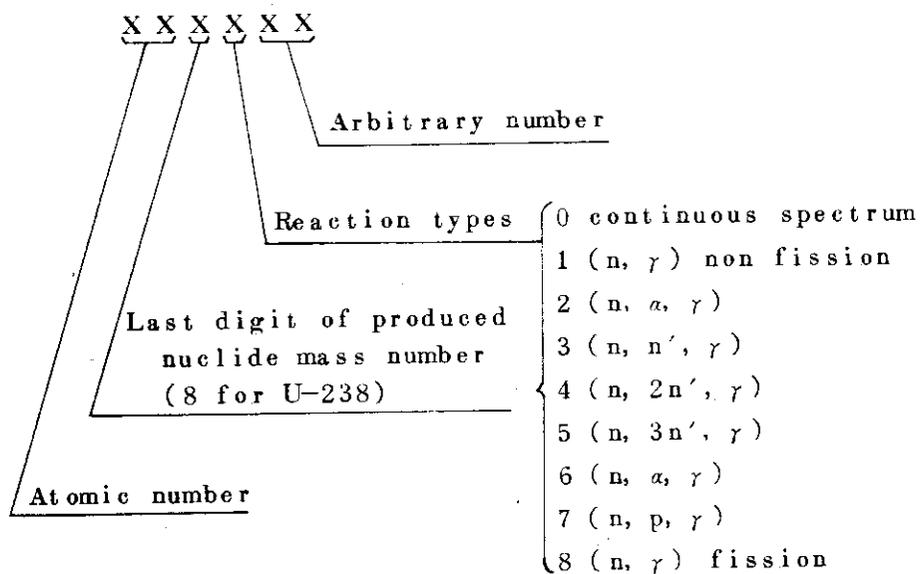


Table B. 2 Comparison of total gamma-ray energy released by neutron capture and the binding energy of captured neutron

Element	Z	*1) A (a.m.u)	*2) Effective $\sigma_{n,\gamma}$ at 2200 m/s (barn)	*3) Calculated Q-value (MeV)	*4) Measured Q-Value (MeV)	POPOP4 Library		
						ID.No	*5) photon	E _γ (MeV)
H	1	1.00783	0.332	2.2246		10101	1.00	2.230
D	1	2.01410	0.00053	6.2576		12101	1.00	6.000
T	1	3.01605	$<6.0 \times 10^{-6}$	-2.8979		13101	1.00	6.240
Li	3	6.940934	0.03622	2.3813	0.917113	30101	2.59	8.908
						30102	1.00	7.200
Be	4	9.01218	0.0092	6.812	6.65267	40101	2.07	9.097
						40102	1.25	6.803
						40103	1.27	6.540
¹⁰ B	5	10.01294	0.5	11.4560	2.30617	50102	1.45	6.640
						50103	1.97	11.029
C	6	12.01114	0.003374	4.9552	3.31315	60101	1.25	4.899
						60102	1.30	4.950
						60103	1.00	4.000
N	7	14.00671	0.07474	10.8337	10.3573	70101	0.096	0.475
						70102	2.16	10.862
¹⁴ N	7	14.00307	0.0750	10.8337		74103	1.87	10.920
F	9	18.99840	0.0095	6.6013	4.73366 (6.34738)	90101	7.44	14.040
						90102	2.11	8.160
Na	11	22.98977	0.9	6.9594	7.35996 (10.2666)	110101	1.88	6.240
						110102	1.88	6.233
						110103	5.11	11.720
²³ Na	11	22.98977	0.9	6.9594	7.35996	113101	3.57	6.873
						113102	4.46	11.228
Mg	12	24.30505	0.06302	8.3208	4.98789	120101	2.27	5.715
						120102	1.14	4.501
Al	13	26.98154	0.230	7.7255	3.99380 (5.56235)	130101	1.75	7.393
						130102	6.40	11.787
						130103	2.65	9.180
						130104	1.77	7.450
						130105	1.68	7.279
						130106	2.77	9.200
						130107	6.00	10.970

Element	Z	*1) A (a.m.u)	*2) Effective $\sigma_{n,\gamma}$ at 2200m/s (barn)	*3) Calculated Q-Value (MeV)	*4) Measured Q-Value (MeV)	POPOP4 Library		
						ID. #	*5) photon	E_γ (MeV)
²⁷ Al	13	26.98154	0.230	7.7255	3.99380	137101	2.11	6.053
						137102	2.12	7.099
Si	14	28.08581	0.17318	8.5974	9.14578 (9.30172)	140101	2.26	9.288
						140102	2.63	10.501
						140103	2.28	9.305
						140104	2.17	9.041
						140105	2.34	9.575
						140106	2.97	6.753
P	15	30.97376	0.18	7.9363	6.91110	150102	5.74	10.396
³¹ P	15	30.97376	0.18	7.9363	6.91110	151101	4.36	11.342
S	16	32.06410	0.51836	8.6126	6.50917	160101	2.58	8.381
						160102	2.00	7.909
						160103	2.01	8.115
						160104	2.95	8.590
Cl	17	35.45274	33.1138	8.5730	5.29182	170101	2.20	7.855
						170102	2.52	9.510
						170103	2.46	9.385
						170104	3.01	9.645
K	19	39.09758	1.92803	7.7876	4.53997 (4.57365)	190101	2.07	5.843
						190102	2.32	7.526
						190103	2.32	7.472
						190104	3.86	9.976
Ca	20	40.07799	0.42161	8.3562	4.88957	200101	5.28	11.778
						200102	2.58	8.216
						200103	2.61	8.475
						200104	4.33	12.244
Sc	21	44.95592	53.0	8.7670	4.11005 (4.14560)	210101	2.55	7.395
Ti	22	47.87444	6.04551	8.2766	8.96105	220101	2.38	7.661
						220102	2.31	8.765
						220103	2.31	8.623
						220104	3.34	8.834
V	23	50.94147	4.9328	7.4435	6.87028 (7.86218)	230101	3.30	8.820

Element	Z	*1) A (a.m.u)	*2) Effective $\sigma_{n,\gamma}$ at 2200m/s (barn)	*3) Calculated Q-Value (MeV)	*4) Measured Q-Value (MeV)	POPOP4 Library		
						ID. No.	*5) photon	E_γ (MeV)
Cr	24	51.99593	3.06345	9.2330	7.57986	240101	0.90	0.432
						240102	2.27	5.879
						240103	2.27	7.185
						240104	1.87	9.227
Mn	25	54.93805	13.3	7.2704	5.12309 (6.30117)	250101	3.77	8.890
⁵⁵ Mn	25	54.93805	13.3	7.2704	5.12309	255101	2.50	5.358
Fe	26	55.84731	2.59954	7.7797	6.32581	260101	1.94	7.040
						260102	1.35	7.459
						260103	1.35	7.452
						260104	2.50	7.373
						260105	1.35	7.394
						260106	1.35	7.480
						260108	2.50	7.260
SUS						269101	1.41	7.785
						269102	1.41	7.793
Co	27	58.93319	37.0	7.4916	4.10500	270101	2.07	6.000
⁵⁹ Co	27	58.93319	37.0	7.4916	4.10500	279101	1.95	5.061
Ni	28	58.72843	4.41582	8.5673	8.46137	280101	1.19	6.253
						280103	1.12	7.773
						280104	1.12	7.830
						280105	2.67	9.595
						280106	1.44	8.497
Cu	29	63.54703	3.79549	7.7693	5.96395 (5.98141)	290103	1.59	7.910
						290104	1.60	7.931
						290105	1.53	7.849
						290106	1.59	7.911
						290107	2.07	7.198
Zn	30	65.40036	1.09249	8.0785	3.31093	300101	2.58	9.149
						300102	2.56	9.135
						300103	4.10	8.870
Ga	31	69.72523	2.93024	6.9156	4.85186 (5.93951)	310101	1.70	1.675
						310102	0.91	4.336
As	33	74.92160	43	7.3282	0.632879 (0.638479)	330101	0.70	3.280

Element	Z	*1) A (a.m.u)	*2) Effective $\sigma_{n,\gamma}$ at 2200m/s (barn)	*3) Calculated Q-Value (MeV)	*4) Measured Q-Value (MeV)	POPOP4 Library		
						ID. No	*5) photon	E_T (MeV)
Se	34	77.9930	12.3068	8.2681	1.69496	340101	1.03	5.110
Br	35	80.9073	6.9935	7.8298	0.314097 (0.531290)	350101	1.26	6.132
Sr	38	87.6462	1.2662	10.8998	5.10874	380101	1.34	6.950
Y	39	88.90587	1.28	6.8600	5.64749	390101	2.09	6.390
Zr	40	91.22375	0.22159	7.8130	1.56085	400101	1.84	4.133
						400102	1.52	6.940
Nb	41	92.90638	1.15	7.2289	0.376237	410101	0.68	3.032
						410102	2.86	7.239
						410103	2.86	7.237
⁹⁷ Nb	41	96.90810		5.9769		410101	1.30	1.745
Mo	42	95.886305	2.7266	8.9092	1.20961	420101	1.57	2.787
						420102	2.68	6.118
						420103	3.58	8.783
Rh	45	102.90551	150.00	6.9997	0.289783 (0.301236)	450101	2.99	5.585
Ag	47	107.8779	63.2693	6.9466	0.39722 (0.417091)	470101	3.31	7.225
Cd	48	112.43405	243485	9.0396	1.58458	480101	1.85	7.821
						480102	4.14	8.485
In	49	114.8193	193.801	6.7801	0.106991 (0.762390)	490101	4.17	7.095
Sn	50	118.7472	0.65080	8.9680	0.349114	500101	6.12	12.950
						500102	0.80	1.615
Sb	51	121.7590	5.4381	6.6927	0.177400 (0.203738)	510101	3.55	5.845
Te	52	127.6395	4.5486	8.9048	1.05057	520101	0.58	0.290
I	53	126.90448	6.2	6.8254	0.324366 (0.363305)	530101	1.49	5.350
Cs	55	132.90544	31.5	6.8907	0.366946	550101	1.32	4.170
						560101	2.56	7.299
						560102	2.56	7.233
						560103	2.56	7.295
Ba	56	137.32473	6.5401	8.4556	2.31980	560104	0.91	3.962
						570101	0.77	2.382
La	57	138.9055	9.1461	5.2227	1.62874 (1.87133)	570101	0.77	2.382
Pr	59	140.90770	11.5	5.8437	0.673574	590101	0.42	1.840
Nd	60	144.22348	49.9374	7.5671	1.70547	600101	1.05	0.525
Sm	62	150.27179	5849.03	7.9636	0.954408	620101	4.77	7.990
						620102	2.19	1.581

Element	Z	*1) A (a.m.u)	*2) Effective $\sigma_{n,\gamma}$ at 2200m/s (barn)	*3) Calculated Q-Value (MeV)	*4) Measured Q-Value (MeV)	POPOP4 Library		
						ID. No	*5) photon	E_γ (MeV)
Eu	63	151.59507	4627.51	6.3115	0.774954 (0.800833)	630101	4.35	6.340
						630102	4.31	8.180
Gd	64	157.25684	49007.6	8.0421	0.444377	640101	0.78	0.938
						640102	4.68	8.209
¹⁵⁵ Gd	64	154.92263	61000.0	8.5307		645101	1.95	1.376
						645102	0.75	1.159
¹⁵⁷ Gd	64	156.92397	254000.	7.9307		647101	1.46	7.854
Tb	65	158.92538	25.50	6.3617	0.0152958	650101	0.07	0.035
Dy	66	162.49434	945.708	6.1020	0.849535	660101	3.51	6.950
						660102	1.14	1.734
Ho	67	164.93036	66.5	6.2427	0.0637168	670101	2.32	5.835
Er	68	167.25476	156.7479	7.7532	0.631400	680101	6.20	11.585
Tm	69	168.93425	103.0	6.5937	0.103236	690101	2.29	5.990
Hf	72	178.49572	98.2006	7.1506	0.559292	720101	4.24	7.775
Ta	73	180.9479	21.0840	6.0692	0.199385	730101	3.62	6.320
						730103	3.62	6.320
¹⁸¹ Ta	73	180.94803	21.0	6.0627		731103	0.86	0.866
W	74	183.72215	18.2022	5.8556	1.01872 (1.19328)	740104	0.95	2.214
						740111	3.37	6.309
						740112	2.78	6.105
Re	75	186.2134	88.1822	6.0183	0.0576149	750101	3.36	6.160
Ir	77	192.1921	426.9341	6.1774	0.680345 (0.703006)	770101	3.12	6.431
Pt	78	194.85032	10.0246	7.7442	1.04090	780101	3.26	6.305
						780102	1.22	2.491
Au	79	196.96655	98.8	6.5127	1.43603 (1.44228)	790101	3.08	7.368
Hg	80	200.80899	345.303	8.0055	4.33214	800101	2.34	5.690
						800102	3.98	9.575
Tl	81	204.38380	3.3378	6.6525	1.53056	810101	1.38	6.760
Pb	82	207.20476	0.17418	7.3043	6.98265	820102	1.00	7.325
						820104	1.00	7.860
²⁰⁴ Pb	82	203.97305	0.661	6.7347		824101	1.71	6.806
Bi	83	208.9804	0.033	4.5977		830101	1.00	4.000
						830102	1.29	4.197

Element	Z	*1) A (a.m.u)	*2) Effective $\sigma_{n,\gamma}$ at 2200m/s (barn)	*3) Calculated Q-Value (MeV)	*4) Measured Q-Value (MeV)	FOPOP Library		
						ID. #	*5) photon	E_γ (MeV)
Th	90	232.03807	7.4	4.7867		900101	3.44	5.462
U	92	239.59365	7.00344	5.1712				
²³⁸ U	92	238.05082	2.7	4.8027		928102	0.85	1.341
Np	93					930101	7.96	19.720
²³⁷ Np	93	237.04819	169.	5.4797		937101	1.27	2.706
Pu	94					940102	6.11	19.925

*1) Mass (a.m.u) weighted by natural abundance :

$$A = \frac{\sum_i A_i W_i}{\sum_i W_i}$$

A_i : Mass (a.m.u) of isotope i ($C^{12} = 12.00000$)

W_i : Natural abundance of isotope i

With regard to A_i , refer to the reference (14)

*2) Neutron capture cross section (at velocity = 2200 m/s) weighted by natural abundance :

$$\sigma_{n,\gamma} = \frac{\sum_i (\sigma_{n,\gamma})_i \cdot \left(\frac{W}{A}\right)_i}{\sum_i \left(\frac{W}{A}\right)_i}$$

$(\sigma_{n,\gamma})_i$: Neutron capture cross section of isotope i given in BNL-325.

*3) Q-Value weighted by atomic number density of each isotope and its neutron capture cross section :

$$\text{Calculated Q-Value} = \frac{\sum_i (\sigma_{n,\gamma})_i \cdot \left(\frac{W}{M}\right)_i \cdot Q_i}{\sum_i (\sigma_{n,\gamma})_i \cdot \left(\frac{W}{M}\right)_i}$$

Q_i : Q-Value of isotope i defined in the reference (14)

*4) Refer to the references (15) and (16)

*5) Numbers of photons released per neutron capture reaction

付録 C 遮蔽材の原子組成

Table C. 1 に巨視的実効断面積を求めた 31 種類の遮蔽材料の原子組成を示す。

Table C. 1 Atomic compositions of materials

MATERIAL	WATER		SODIUM		GRAPHITE		PARAFFIN		POLYETHYLEN		ALUMINIUM		AIR	
	I.D. %	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20
DENSITY (g/cm ³)	0.9982 *1)	0.9712 *1)	1.700 *0)	0.890 *1)	0.930 *1)	0.930 *1)	2.699 *1)	0.0012049 *1)	ATOMIC %	DENSITY (x10 ²³ /cm ³)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC %	DENSITY (x10 ²³ /cm ³)	WEIGHT FRACTION
	ATOMIC %	WEIGHT FRACTION	ATOMIC %	WEIGHT FRACTION	ATOMIC %	WEIGHT FRACTION	ATOMIC %	WEIGHT FRACTION	ATOMIC %	WEIGHT FRACTION	ATOMIC %	WEIGHT FRACTION	ATOMIC %	WEIGHT FRACTION
H	6.67382-2	1.1190-1					7.89666-2	1.4850-1	7.9793 -2	1.4360-1			7.1991 -9	1.0000-5
B														
C			8.5240 -2	1.000	3.7999 -2	8.5150-1			3.9930 -2	8.5630-1			7.5847 -9	1.2554-1
N													3.9099 -5	7.5470-1
O	3.39698-2	8.8810-1											1.0538 -5	2.3233-1
Na			2.5442 -2	1.0000										
Mg														
Al												6.0244 -2	1.0000	
Si														
P														
S														
Cr														
Mb														
NOTES	*1) Data, 20°C	*2) to be read as 6.67382x10 ⁻²	*1) Quoted from Engineering Compendium on Radiation Shielding	*1) Same as the left	*1) Analyzed by SUMITOMO	*1) Analyzed by SUMITOMO	*1) Analyzed by SUMITOMO	*1) Quoted from Engineering Compendium on Radiation Shielding	*1) Quoted from Engineering Compendium on Radiation Shielding	*1) Data, 20°C				

Table C.1 (Continued)

MATERIAL	IRON		COPPER		CHROMIUM		NICKEL		LEAD	
	DENSITY (g/cm ³)	7.87 *1)	2.10	8.96 *1)	2.20	7.14 *1)	2.30	8.902 *1)	2.40	11.340 *1)
	ATOMIC WEIGHT	56	63.5	52	58.7	58.7	58.7	58.7	207.2	207.2
	DENSITY ($\times 10^{-24}$ /cm ³)	7.87	8.96	8.96	7.14	8.902	8.902	8.902	11.340	11.340
	FRACTION	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
NUCLIDES										
H										
B										
C										
N										
O										
Cr					8.2700 -2	1.0000				
Fe	8.4869 -2	1.0000								
Co										
Ni							9.1289 -2	1.0000		
Cu				8.4916 -2	1.0000					
Zn										
Mo										
Pb									3.2960 -2	1.0000
NOTES	*1)	Quoted from Engineering Compendium on Radiation Shielding	*1)	Same as the left	*1)	Quoted from physical constant table	*1)	Quoted from the Handbook	*1)	Quoted from Engineering Compendium on Radiation Shielding

Table (1.1) (Continued)

MATERIAL	2S-AL (AL1100)		SS-41		SUS 27 (AISI 304)		SUS 32 (AISI 316)		PRESSURE VESSEL		SB-42		ZIRCALOY-4		
	ID. #	300	310	320	321	330	331	340	330	331	331	340	330	340	
DENSITY (g/cm ³)	*1)	*1)	*1)	*1)	*1)	*1)	*1)	*1)	*1)	*1)	*1)	*1)	*1)	*1)	
	2.71	7.85	7.91	7.91	7.91	7.846	7.845	6.553	7.846	7.845	7.845	6.553	7.846	6.553	
	*2)	*2)	*2)	*2)	*2)	*2)	*2)	*2)	*2)	*2)	*2)	*2)	*2)	*2)	
ATOMIC % DENSITY ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC % DENSITY ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC % DENSITY ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC % DENSITY ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC % DENSITY ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC % DENSITY ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC % DENSITY ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC % DENSITY ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)	
H															
B															
C		8.2658 -4	2.1000 -3	3.1729 -4	8.0000 -4	3.1729 -4	8.0000 -4	8.0000 -4	9.8293 -4	2.4985 -3	1.0690 -3	2.6948 -3			
N															
Al	5.9885 -2	9.9000 -1													
Si	2.0339 -4	3.5000 -3	5.0499 -5	3.0000 -4	1.6962 -3	1.0000 -2	1.6962 -3	1.0000 -2	3.8698 -4	2.3001 -3	3.8700 -4	2.3005 -3			
P			2.2895 -5	1.5000 -4	6.9211 -5	4.5000 -4	6.9211 -5	4.5000 -4							
S			4.1285 -5	2.8000 -4	4.4572 -5	3.0000 -4	4.4572 -5	3.0000 -4							
Cr					1.7408 -2	1.9000 -1	1.5575 -2	1.7000 -1						7.5891 -5	
Mn	1.4854 -5	5.0000 -4	9.8102 -4	1.1400 -2	1.7343 -3	2.0000 -2	1.7343 -3	2.0000 -2	1.1399 -3	1.3253 -2	6.8800 -4	8.0000 -3			
Fe	8.7673 -5	3.0000 -3	8.4296 -2	9.9577 -1	5.7872 -2	6.7845 -1	5.5740 -2	6.5345 -1	8.2195 -2	9.7145 -1	8.3500 -2	9.8701 -1	1.4838 -4	2.0998 -3	
Co															
Ni					8.1116 -3	1.0000 -1	9.7339 -3	1.2000 -1	4.4297 -4	5.5655 -3					
Cu	5.1367 -5	2.0000 -3													
Zn	2.4956 -5	1.0000 -3													
Zr													4.2500 -2	9.8240 -1	
Mo													4.8207 -4	1.4510 -2	
Sr															
Sn															
NOTES	*1) *2) Quoted from Engineering Cor- pendium on Radiation Shielding *3) When calculated, this was replaced by Cu.	*1) *2) From analyze report *3) *4) When calculated, these were replaced by Si.	*1) *2) Supposed from AISI Spec. *3) *4) Same as the left.	*1) *2) Same as the left. *3) *4) Same as the left.	*1) *2) Supposed for the general composition	*1) *2) Same as the left.	*1) *2) Same as the left.	*1) *2) Same as the left.	*1) *2) Same as the left.	*1) *2) Same as the left.	*1) *2) Same as the left.	*1) *2) Same as the left.	*1) *2) Same as the left.	*1) *2) Refer to the reference (18) *3) When calculated, this was replaced by Zr.	

Table C. 1 (Continued)

MATERIAL I.D. %	ORDINARY CONCRETE 1		ORDINARY CONCRETE 2		HEAVY CONCRETE		SERPENTINE CONCRETE		INSULATION (CHRYSOPILE)	
	4.00	2.30	4.01	2.4283	4.10	3.715	4.20	2.350	4.30	0.57
DENSITY (g/cm ³)	*1)		*1)		*1)		*1)		*1)	
	ATOMIC DENSITY (×10 ²¹ /cm ³)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC DENSITY (×10 ²¹ /cm ³)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC DENSITY (×10 ²¹ /cm ³)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC DENSITY (×10 ²¹ /cm ³)	WEIGHT FRACTION	ATOMIC DENSITY (×10 ²¹ /cm ³)	WEIGHT FRACTION
H	5.7167 -3	4.1600-3	6.9932 -3	4.8200-3	9.9885 -3	4.5000-3	2.7920 -2	1.9885-2	4.5086 -3	1.3239-2
B									1.4437 -3	4.5471-2
C			3.2631 -4	2.6800-3					3.6093 -4	1.2629-2
O	4.3929 -2	5.0740-1	4.5302 -2	4.9561-1	4.3899 -2	3.1392-1	4.6005 -2	5.2007-1	1.0238 -2	4.7716-1
Na			7.0229 -4	1.1040-2					1.2185 -5	8.1604-4
Mg	6.5540 -5	1.1500-3	5.6982 -4	9.4700-3	4.3265 -5	4.7000-4	9.8006 -3	1.6831-1	3.2877 -3	2.3277-1
Al	2.2897 -4	4.4600-3	3.0424 -3	5.6130-2	1.6502 -4	1.9900-3	1.6962 -3	3.2337-2	6.1949 -5	4.8691-3
Si	1.9040 -2	3.8606-1	1.5546 -2	2.9856-1	2.3755 -3	2.9820-2	7.9522 -3	1.5781-1	2.1197 -3	1.7342-1
S	3.0240 -5	7.0000-4	7.3432 -5	1.6100-3	1.3509 -3	1.9360-2	6.0103 -3	1.3617-3		
Cl									1.1619 -5	1.2000-3
K			2.9887 -4	7.9900-3					1.2391 -5	1.4113-3
Ca	2.3741 -3	6.8690-2	3.0101 -3	8.2490-2	2.2782 -3	4.0810-2	2.5566 -3	7.2398-2	6.1216 -6	7.1469-4
Ti			5.1625 -5	1.6900-3						
Cr									2.2586 -6	3.4210-4
Mn			6.5751 -5	2.4700-3					9.6785 -7	1.5489-4
Fe	6.7911 -4	2.7380-2	6.6854 -4	2.5530-2	2.3602 -2	5.8913-1	7.0546 -4	2.7838-2	2.2442 -4	3.6511-2
Co									2.2806 -7	3.9324-5
Ni									4.1344 -6	7.0731-4
Zr									1.8610 -7	4.9454-5
NUCLIDES										
	*1) *2)	Refer to the reference (17) *3)	*1)*2) From the chemical Com- position analysis by KASHIMA (CONST- RUTION Co., LTD. *3) *4) When calculated, S was replaced by Si and Ti by Fe.	*1) *2) Refer to the reference (17) *3) When calculated, this was replaced by Si.	*1) *2) Refer to the reference (17) *3) When calculated, this was replaced by Si.	*1) *2) Refer to the reference (17) *3) When calculated, this was replaced by Si.	*1) *2) Analyzed by SHIMIZU CONSTRUCTION Co., LTD. *2) Ig. loss was replaced by H ₂ O *3) Ig. B-10: 0.30823-3 R-11: 1.13549-3 *4) *5) When calculated, Cl was replaced by K and Co by Mn.	*1) *2) Analyzed by SHIMIZU CONSTRUCTION Co., LTD. *2) Ig. loss was replaced by H ₂ O *3) Ig. B-10: 0.30823-3 R-11: 1.13549-3 *4) *5) When calculated, Cl was replaced by K and Co by Mn.	*1) *2) Analyzed by NIPPON ASBESTOS Co., LTD. *2) Ig. loss was replaced by H ₂ O *3) Ig. B-10: 0.30823-3 R-11: 1.13549-3 *4) *5) When calculated, Cl was replaced by K and Co by Mn.	*1) *2) Analyzed by NIPPON ASBESTOS Co., LTD. *2) Ig. loss was replaced by H ₂ O *3) Ig. B-10: 0.30823-3 R-11: 1.13549-3 *4) *5) When calculated, Cl was replaced by K and Co by Mn.
NOTES										

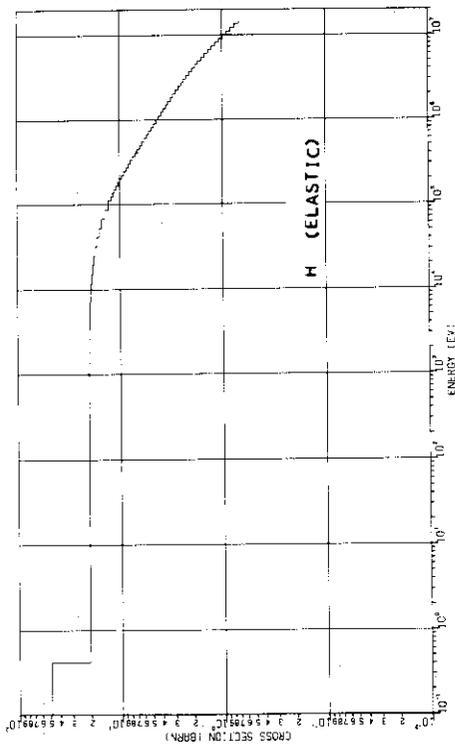
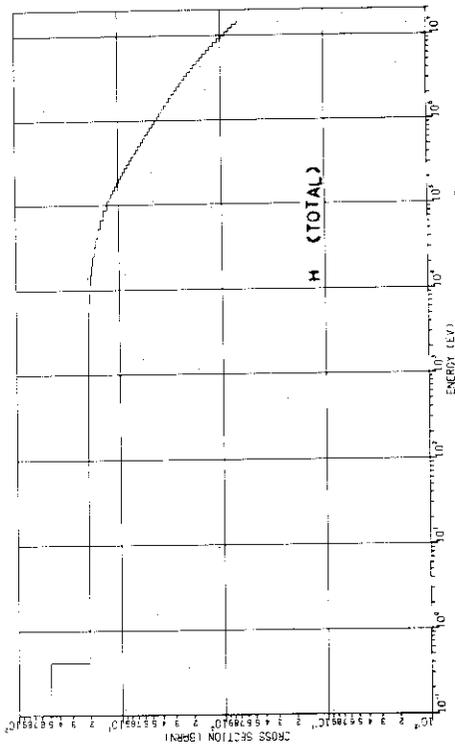
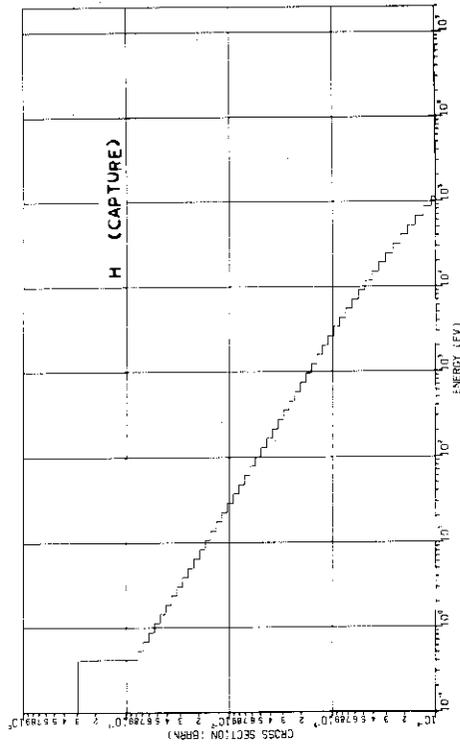
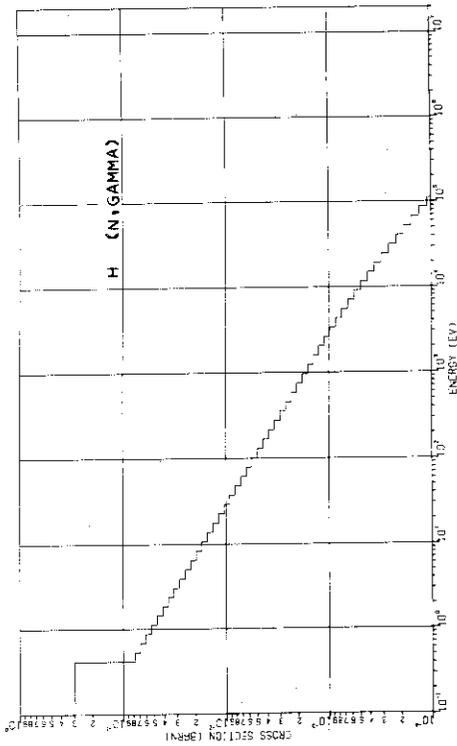
Table C. 1 (Continued)

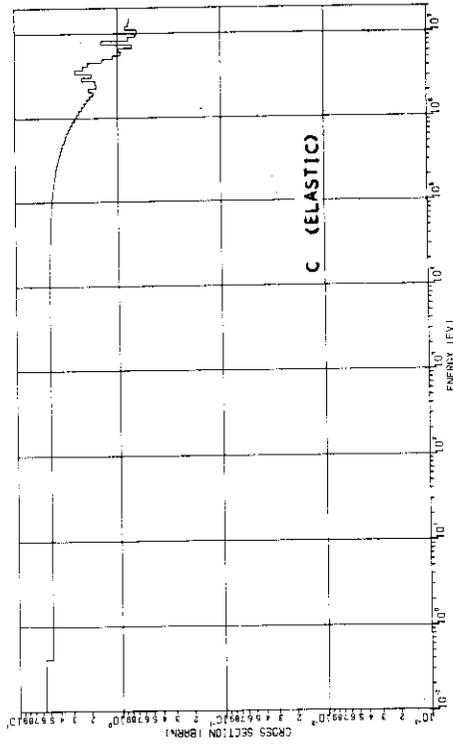
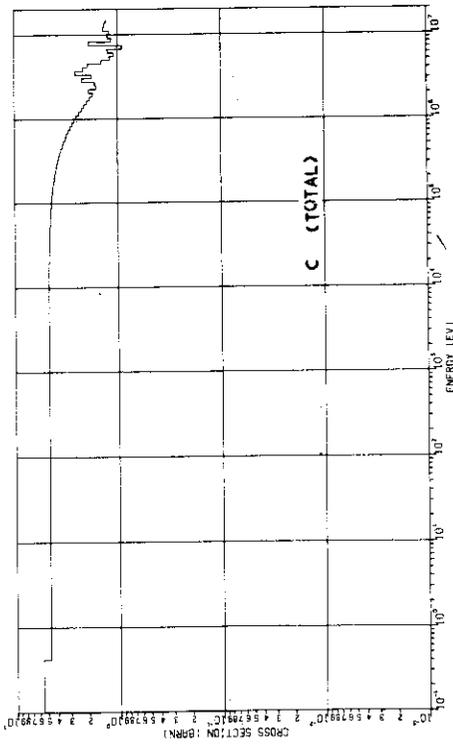
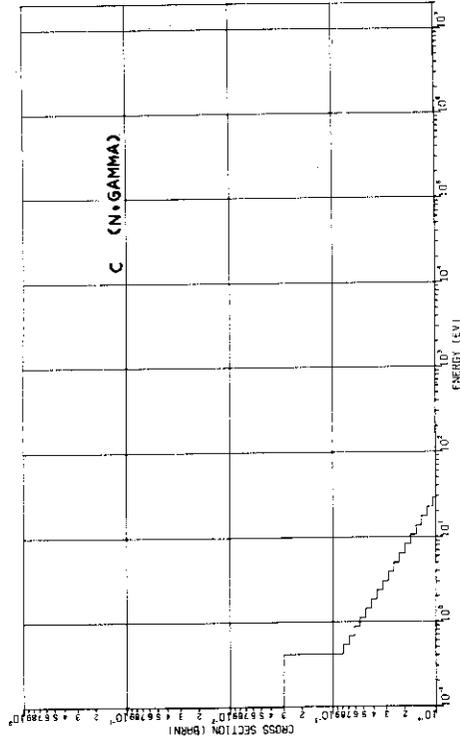
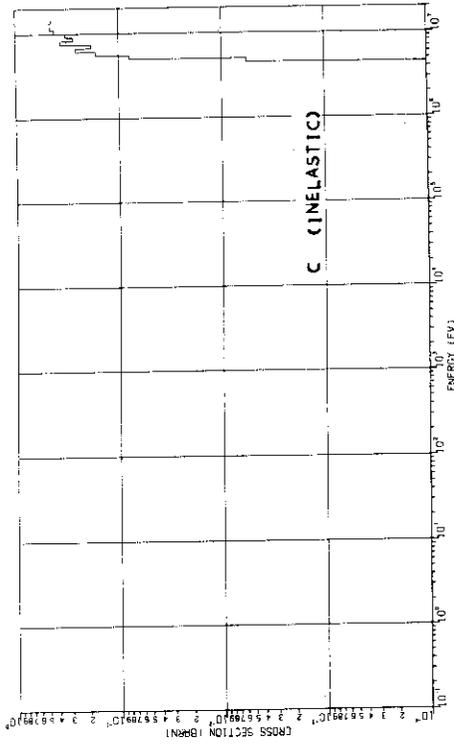
ID. #	FUEL PIN *1) (PMR)		FUEL PIN *1) (BWR)		INNER CORE (HOMOGENIZED)		OUTER CORE (HOMOGENIZED)		DILUTION BLANKET1 (HOMOGENIZED)		DILUTION BLANKET2 (HOMOGENIZED)		B, C + AL.	
	DENSITY (g/cm ³)	WEIGHT FRACTION	DENSITY (g/cm ³)	WEIGHT FRACTION	DENSITY ($\times 10^{21}$ /cm ³)	WEIGHT FRACTION	DENSITY ($\times 10^{21}$ /cm ³)	WEIGHT FRACTION	DENSITY ($\times 10^{21}$ /cm ³)	WEIGHT FRACTION	DENSITY ($\times 10^{21}$ /cm ³)	WEIGHT FRACTION	DENSITY ($\times 10^{21}$ /cm ³)	WEIGHT FRACTION
	500		510		520		530		540		541		550	
	10.35242		10.4											
		*2)		*2)										*3)
		DENSITY ($\times 10^{21}$ /cm ³)												
H														
B														
C														
N														
O	4.5980 -2	1.1802-1	4.6323 -2	1.1833-1	1.7149 -2		1.5461 -2		1.8470 -2		1.8279 -2			
Na					7.6560 -3		7.6560 -3		7.6430 -3		7.5920 -3			
Mg														
Al					2.4030 -3		1.3540 -3						4.5178 -2	8.0000-1
Cr					3.4130 -3		3.5520 -3		3.1340 -3		3.1660 -3			
Fe					1.2504 -2		1.3004 -2		1.1441 -2		1.1572 -2			
Ni					1.5560 -3		1.6390 -3		1.4190 -3		1.4860 -3			
Pu-239					1.0457 -3		1.5685 -3				1.7290 -4			
Pu-240					9.6200 -5		1.3890 -4				1.5100 -5			
Pu-241					7.7000 -6		1.1600 -5				1.4000 -6			
U-235	7.5900 -4	2.8600-2	5.6387 -4	2.1160-2	1.4000 -5		1.4000 -5		1.9400 -5		1.9200 -5			
U-238	2.2350 -2	8.5337-1	2.2641 -2	8.6051-1	6.8684 -3		6.8684 -3		9.2200 -3		9.1251 -3			
NOTES	*1) Enrichment = 3.3 w/o		*1) Enrichment = 2.4 w/o											
	*2) From private communication (Mr. UEKI)		*2) From private communication (Mr. UEKI)											
	*3) Supposed for the general composition B-10:4.7237-3 B-11:1.74017-2													

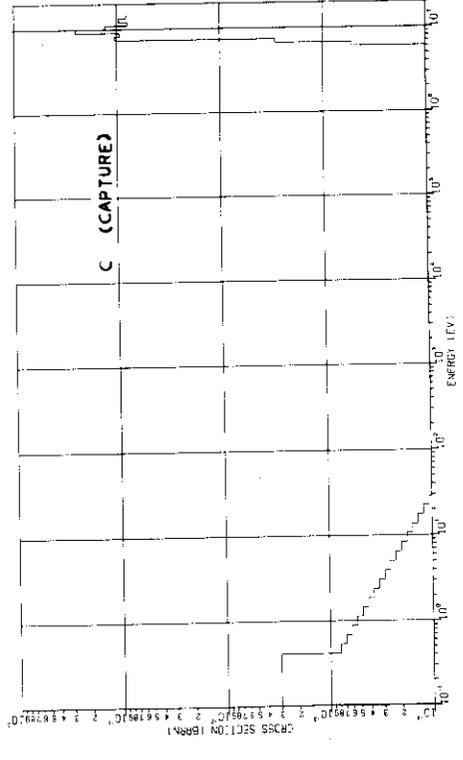
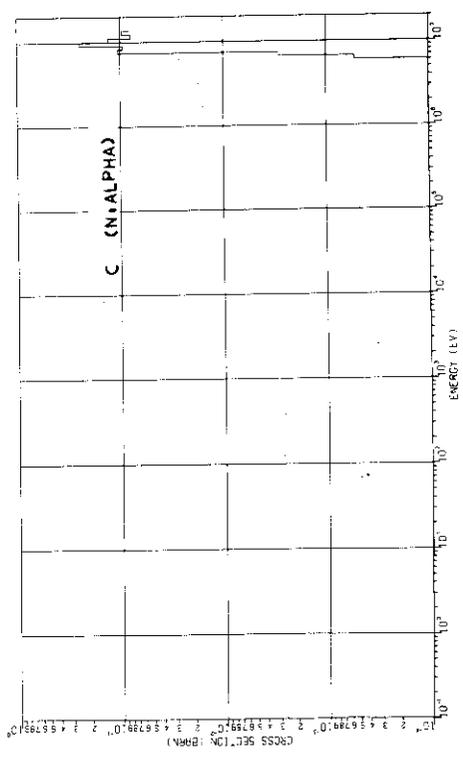
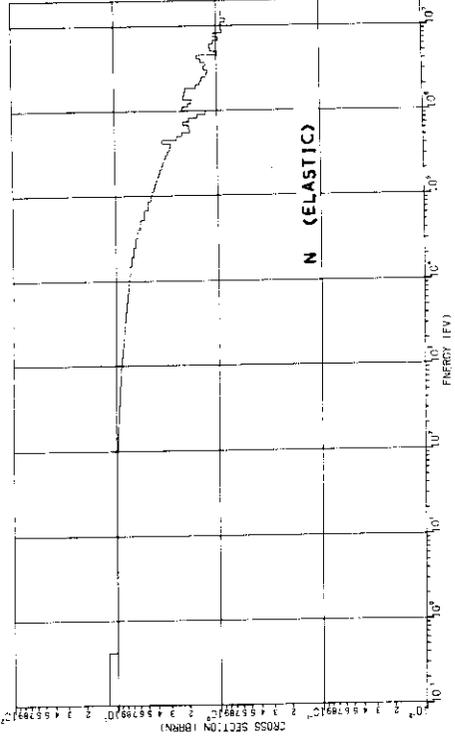
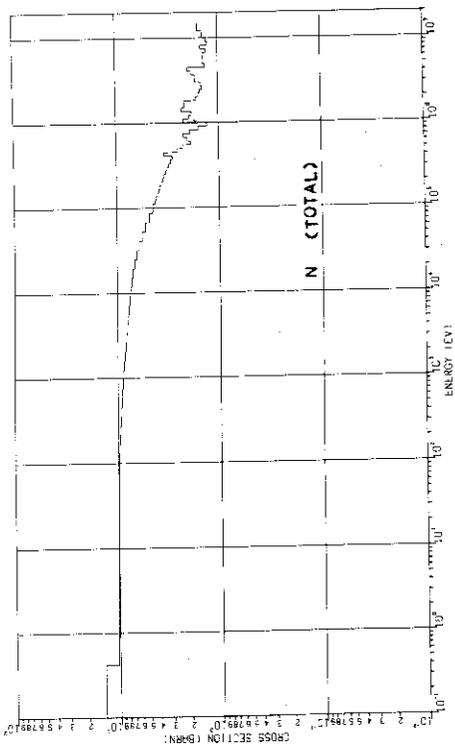
付録 D 無限希釈断面積グラフ集

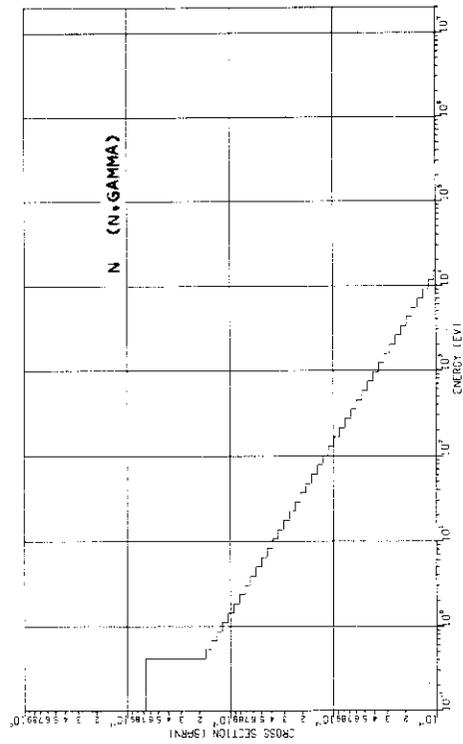
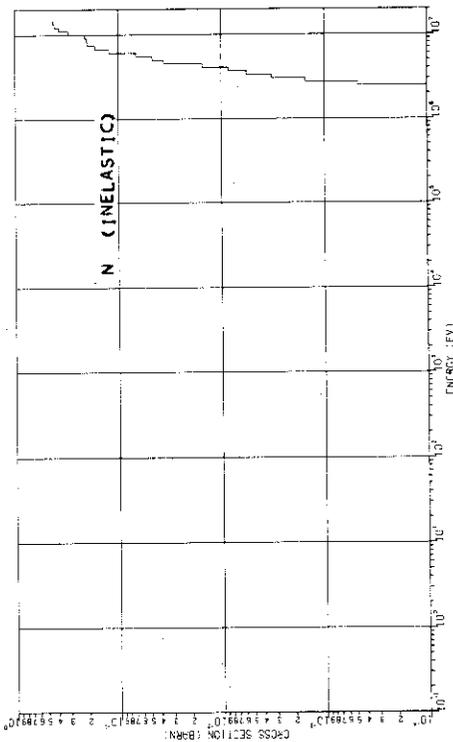
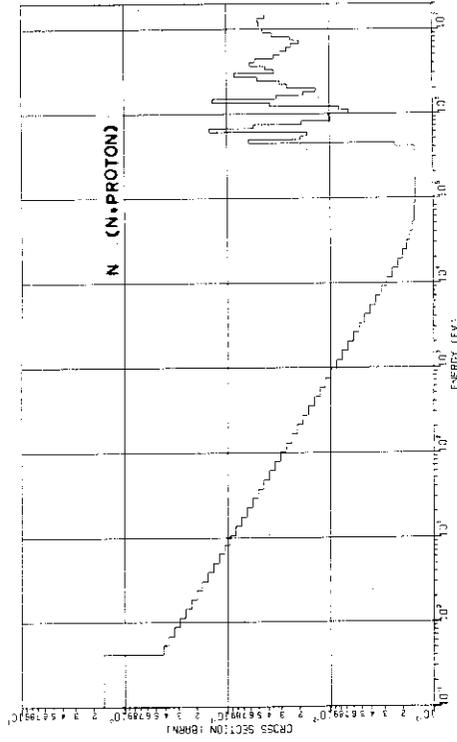
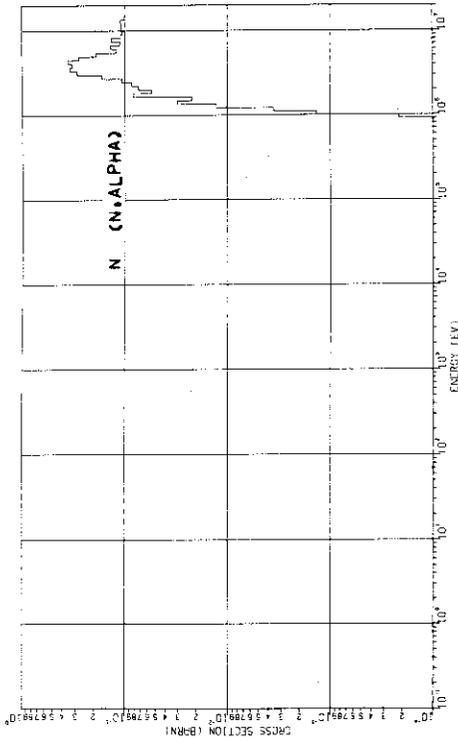
4.1 の手法によって作成した中性子 100 群・P₅ 近似の無限希釈断面積を編集したもので、核種の種類および配列順序は Table 3.1 に従った。

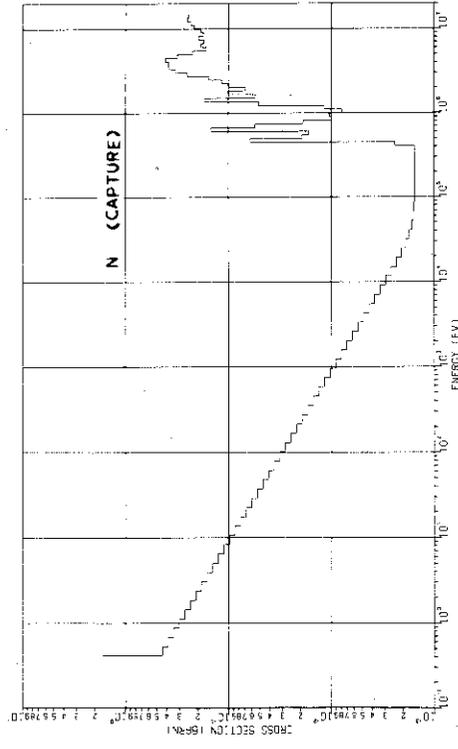
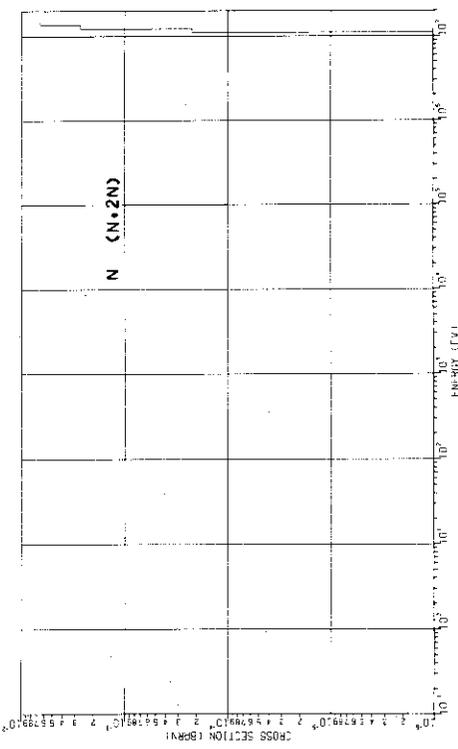
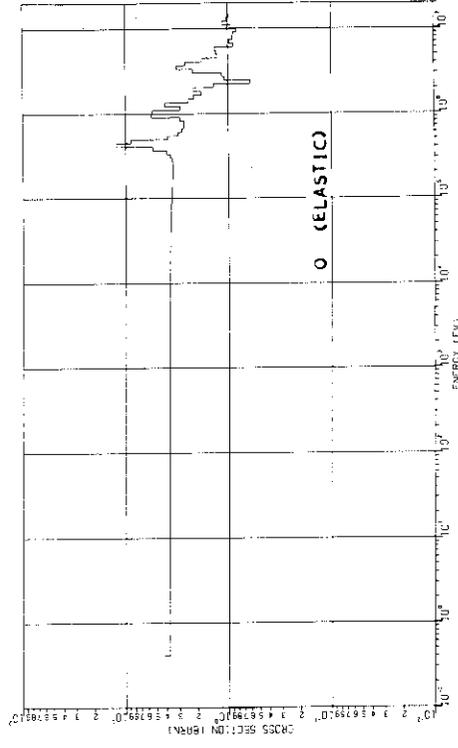
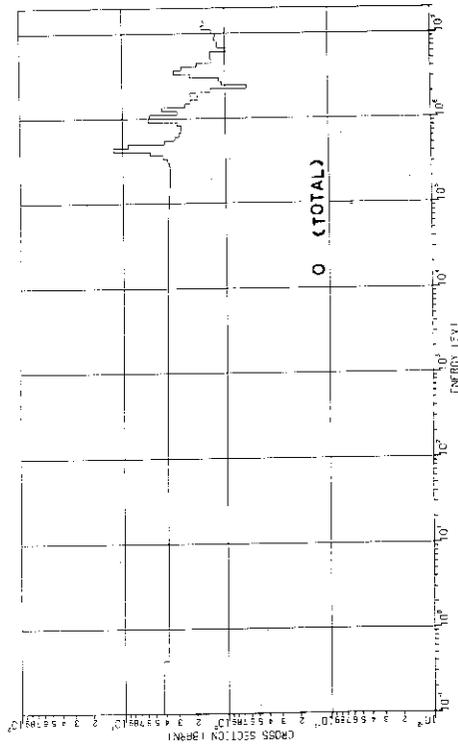
なお、それぞれの核種についての反応断面積の順序は、TOTAL, CAPTURE, FISSION, N/FISSION, (N, PROTON), (N, ALPHA), (N, GAMMA), ELASTIC, INELASTIC, (N, 2N) の順である。

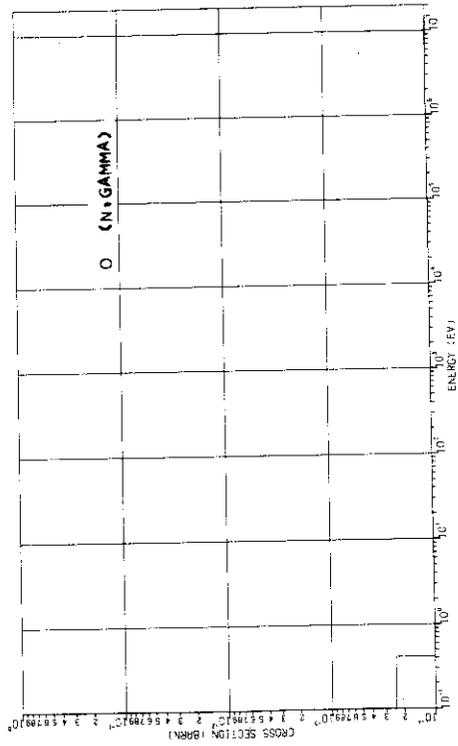
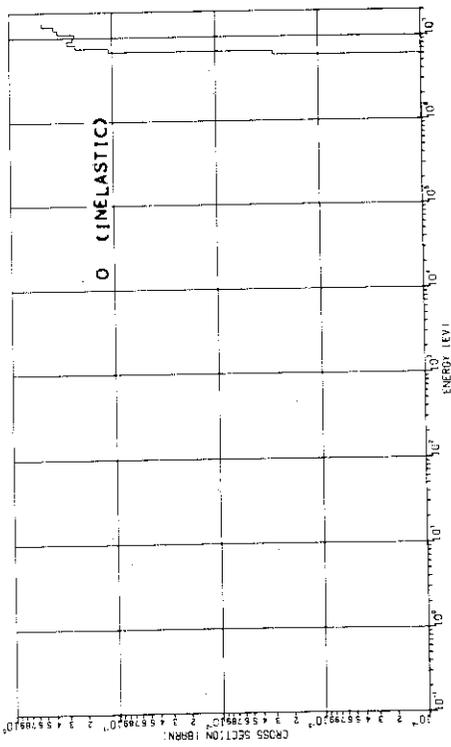
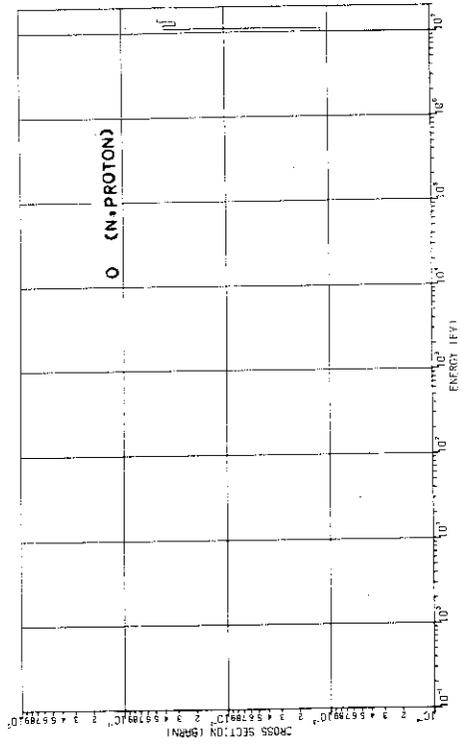
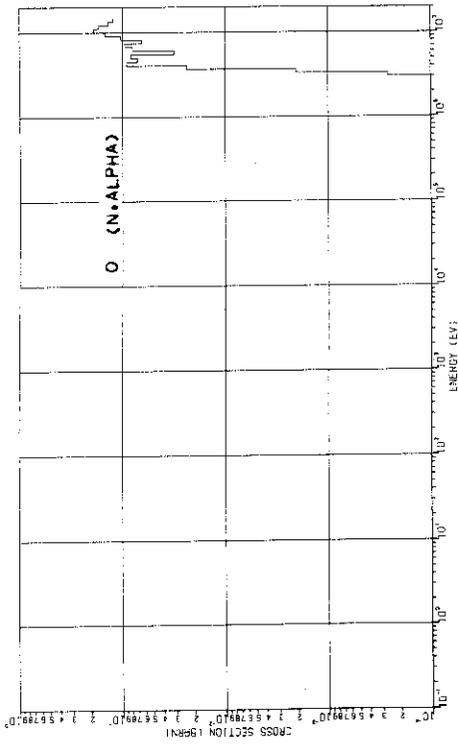


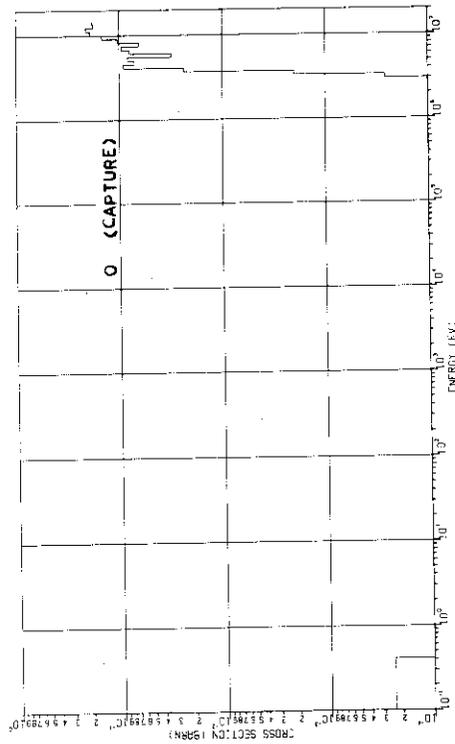
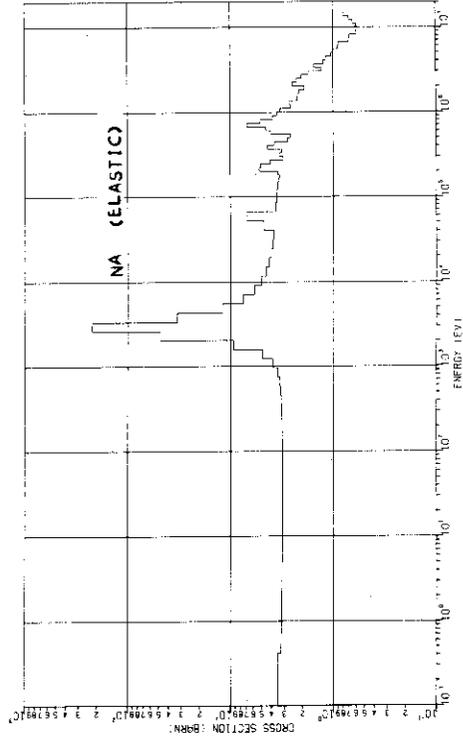
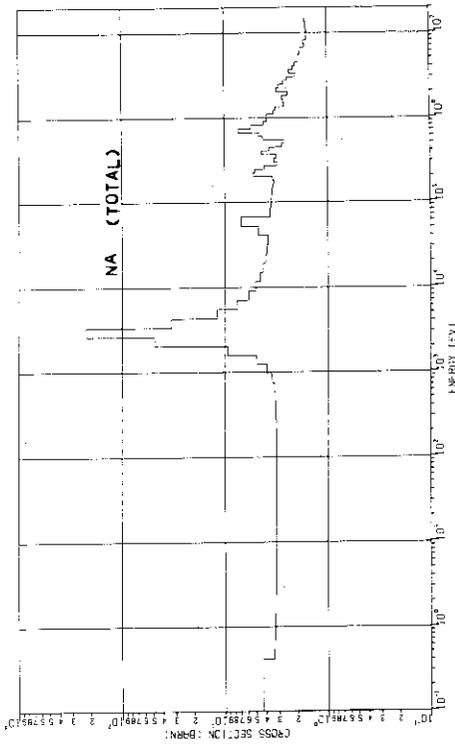


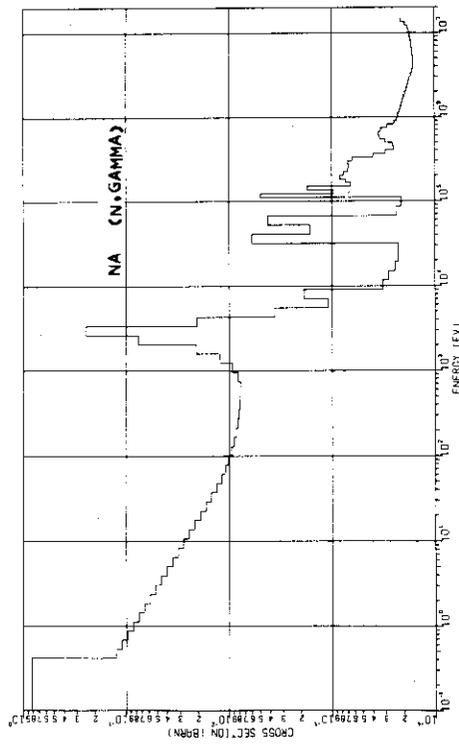
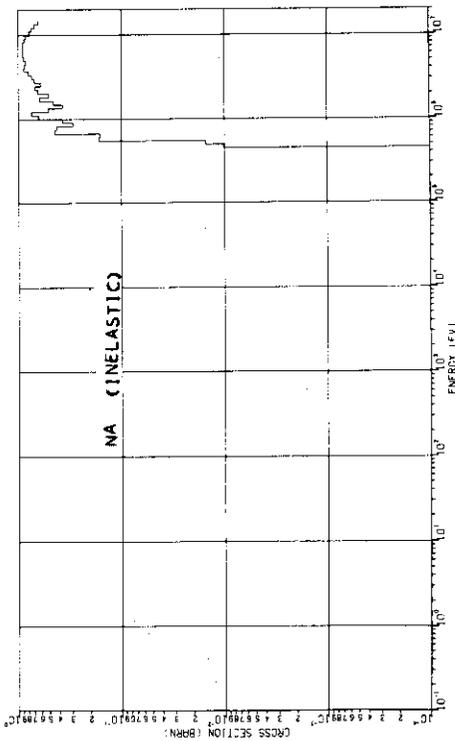
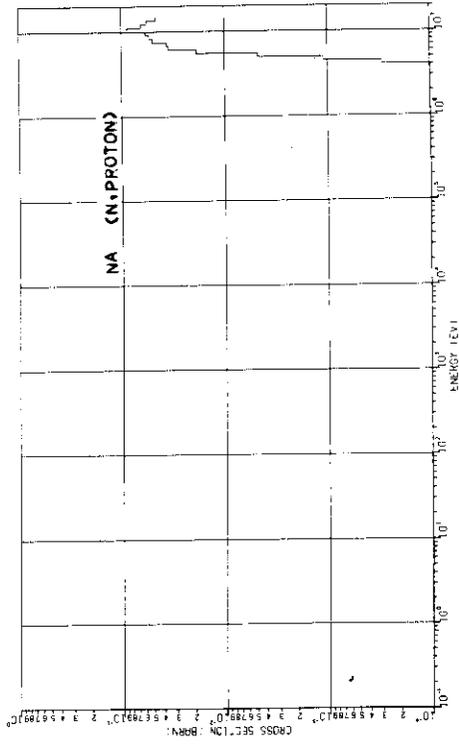
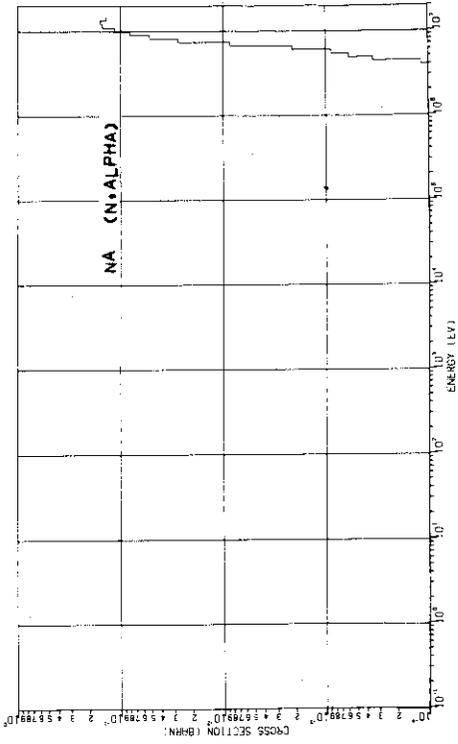


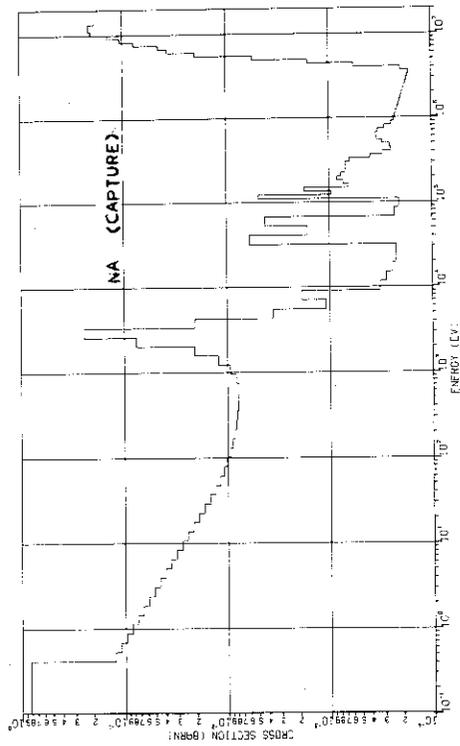
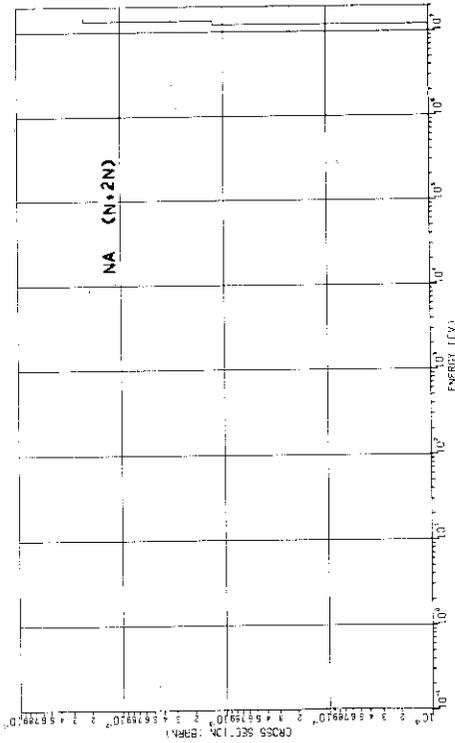
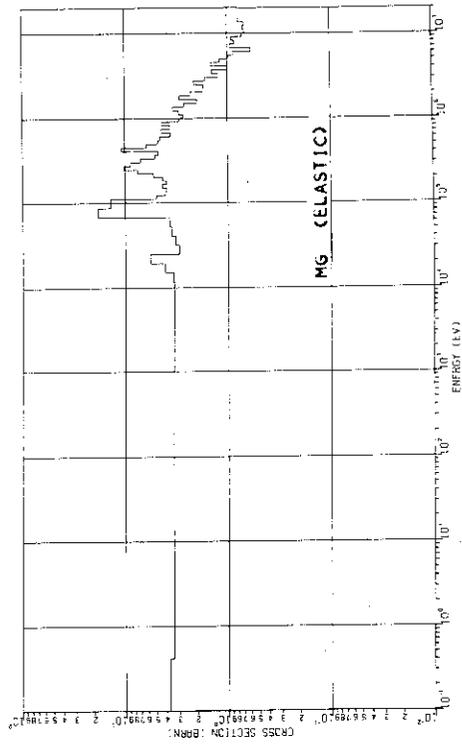
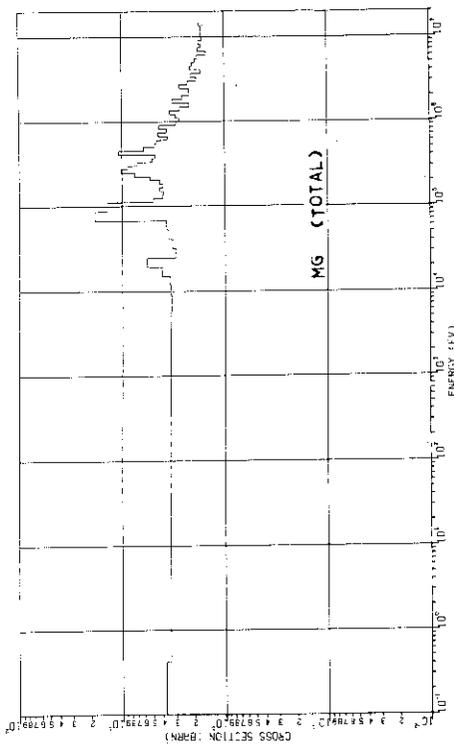


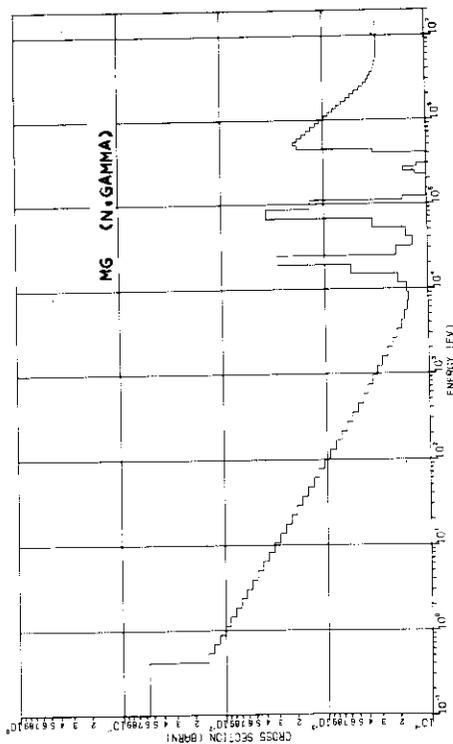
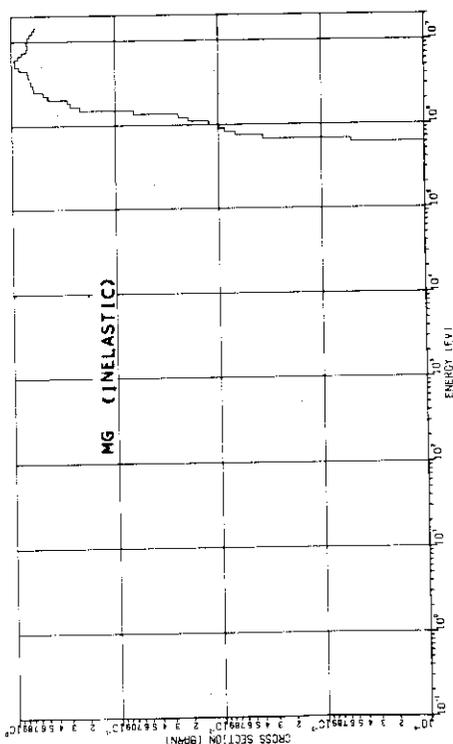
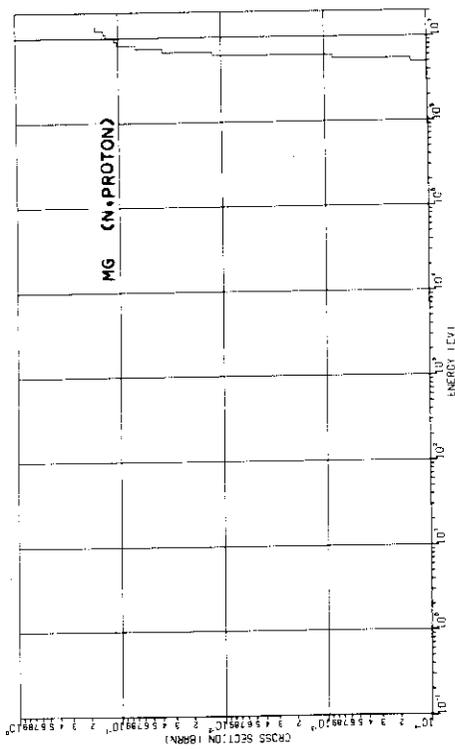
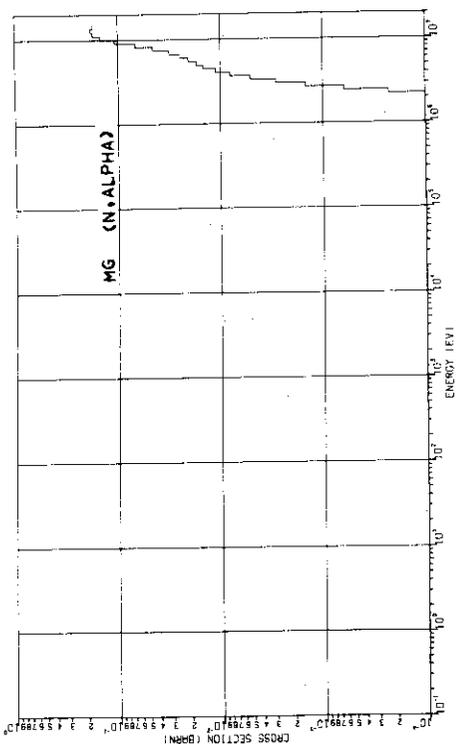


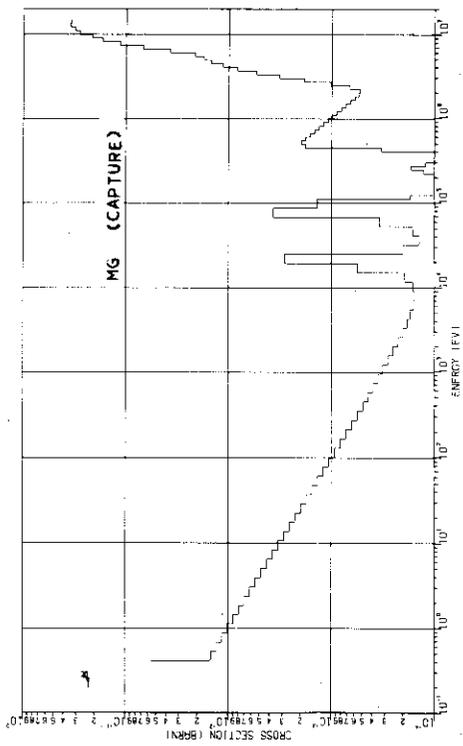
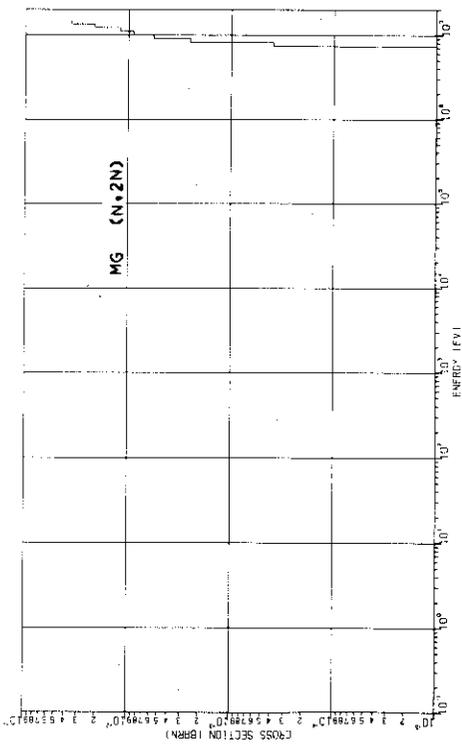
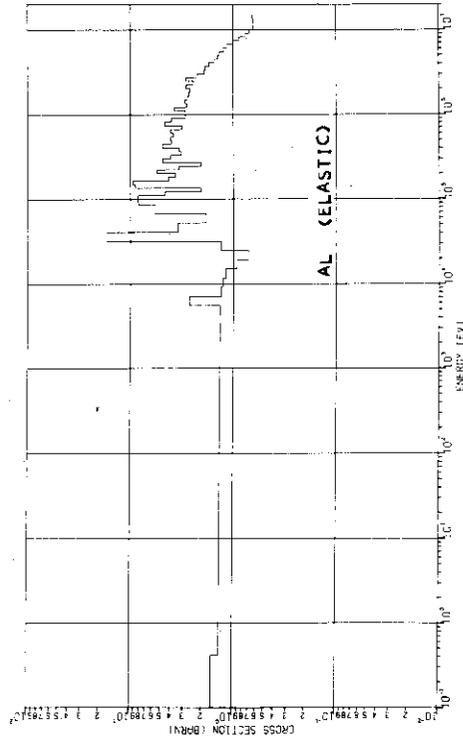
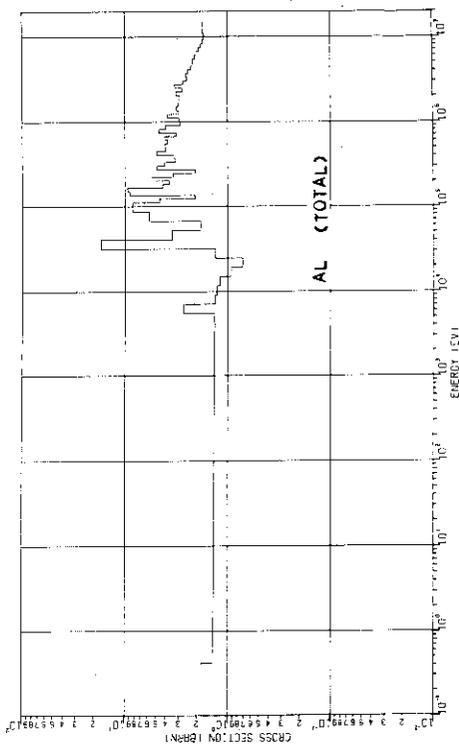


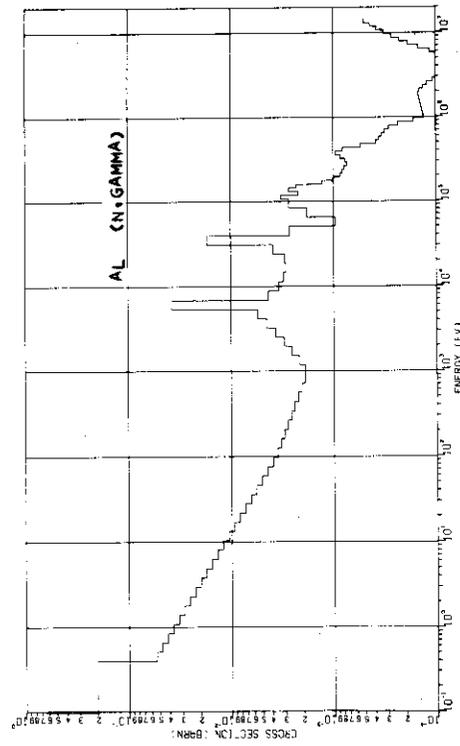
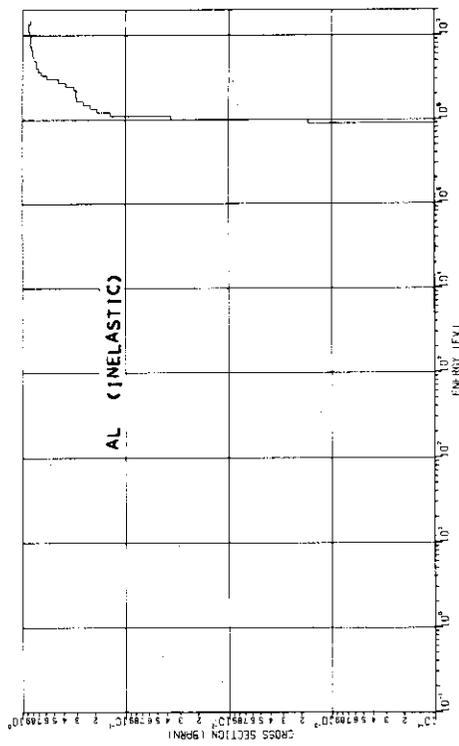
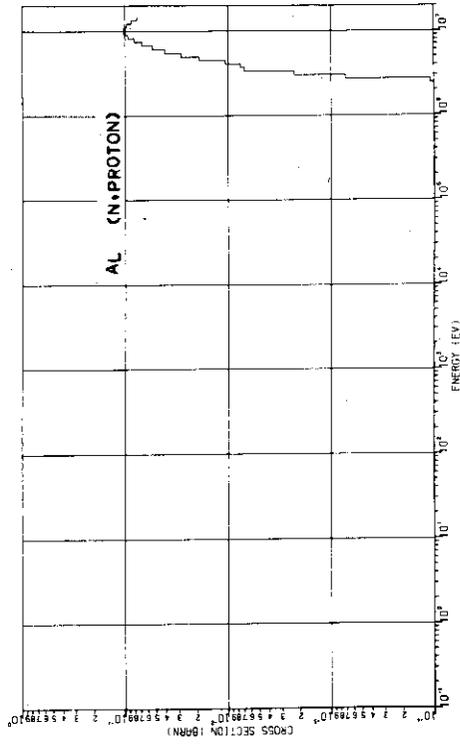
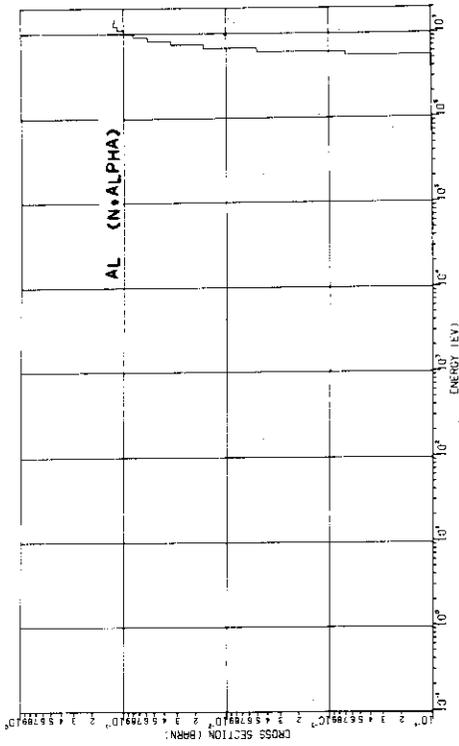


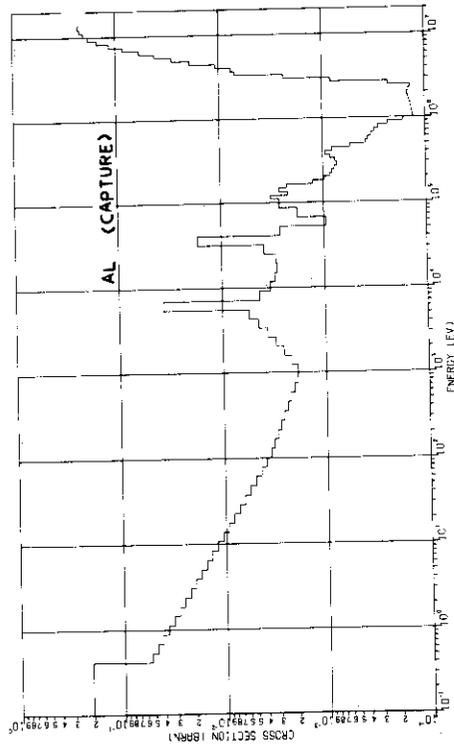
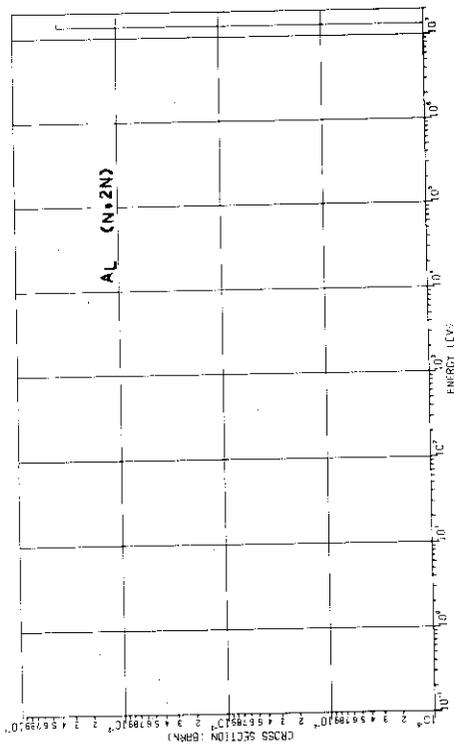
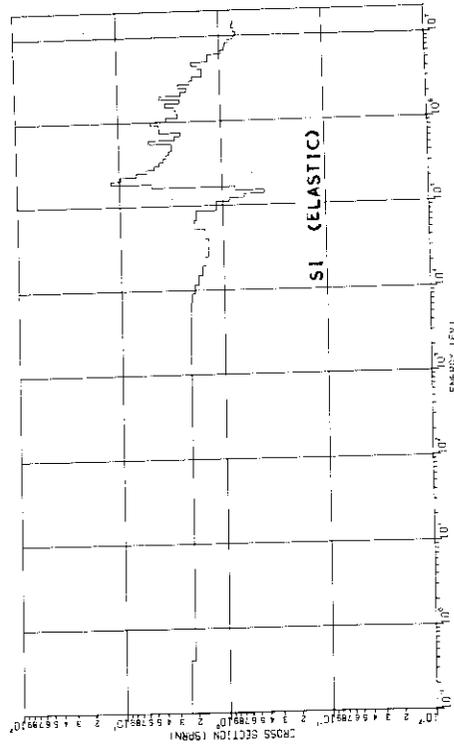
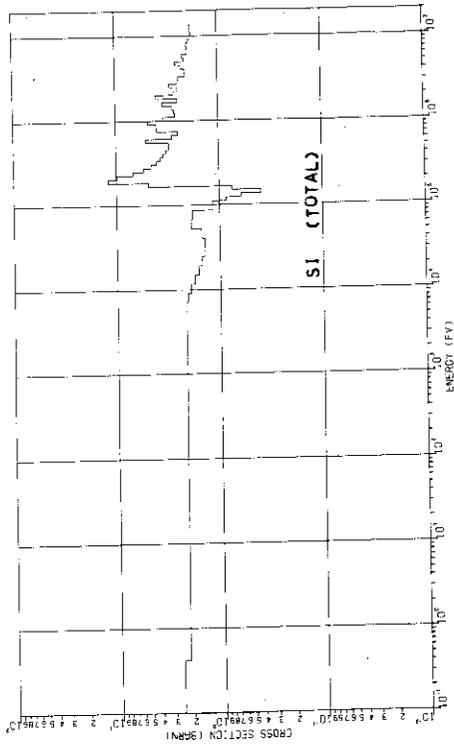


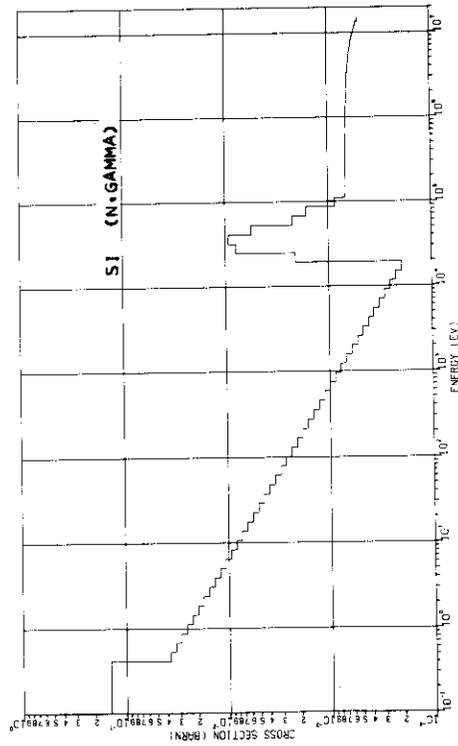
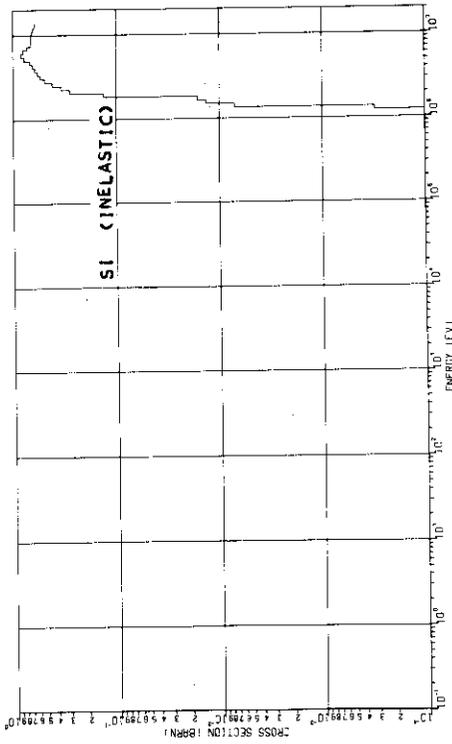
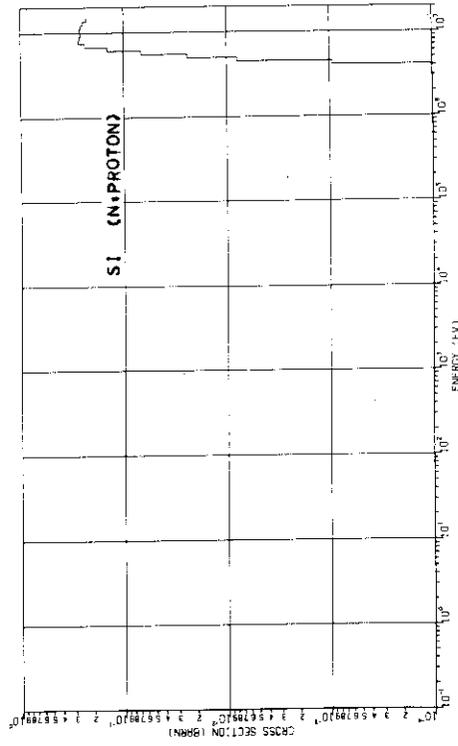
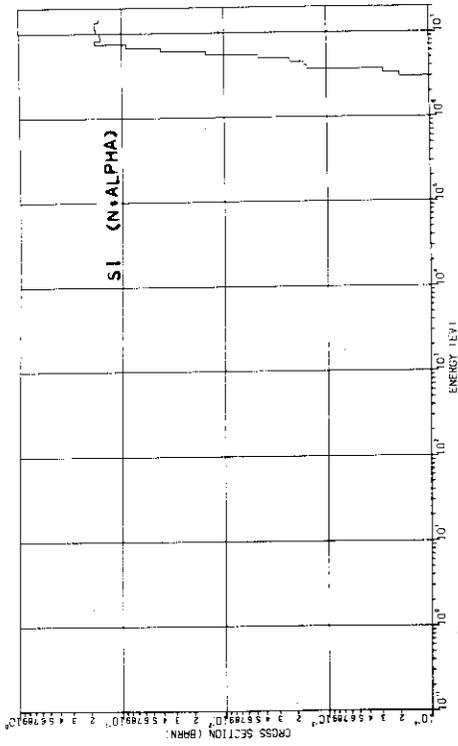


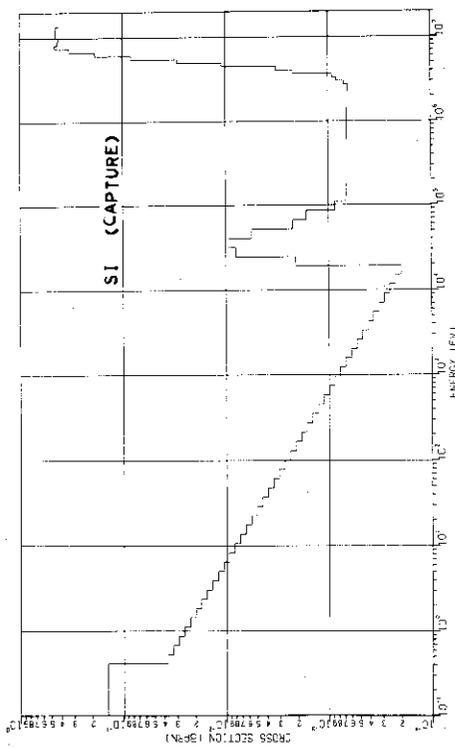
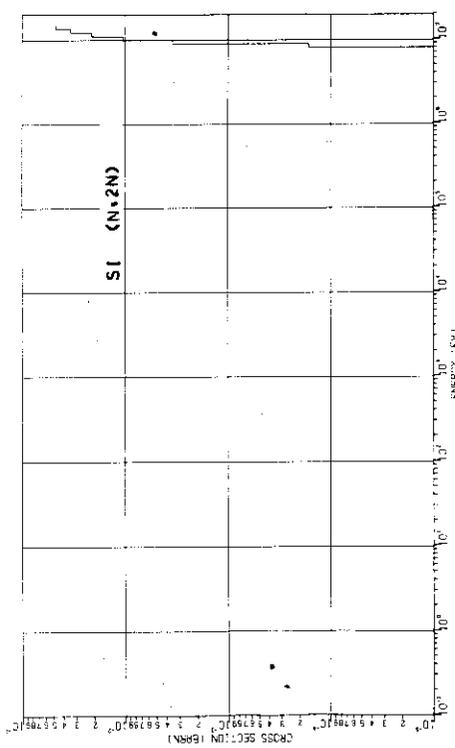
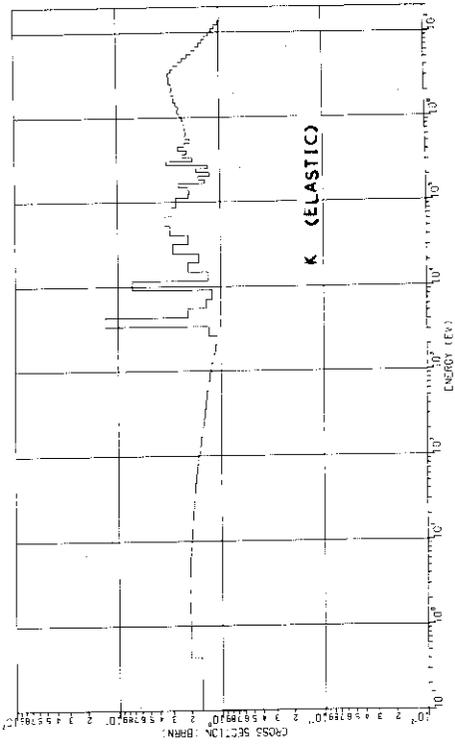
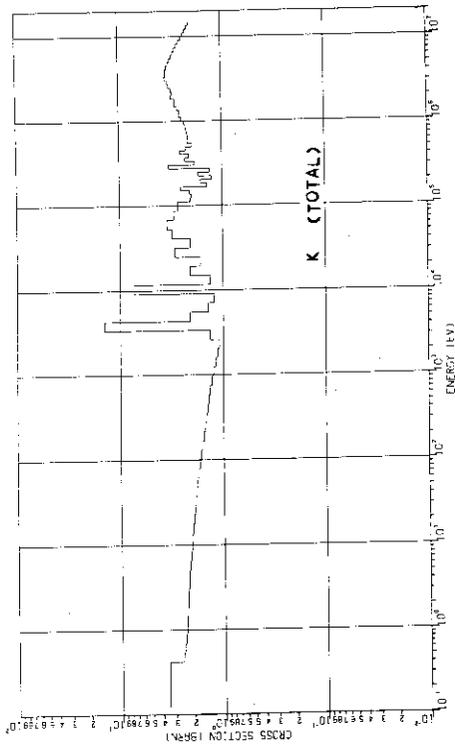


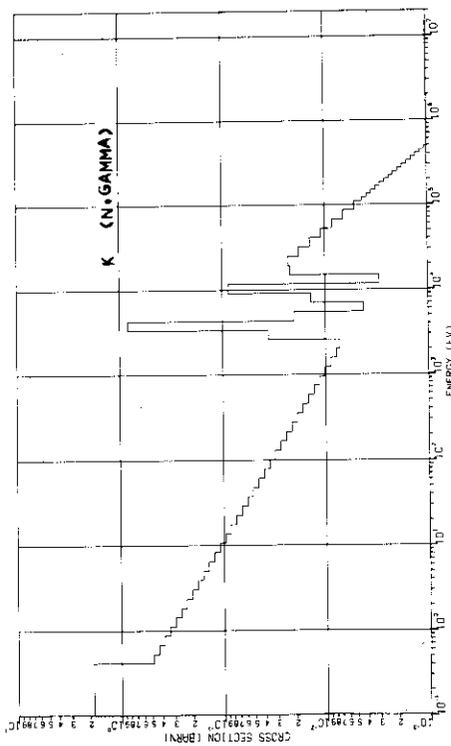
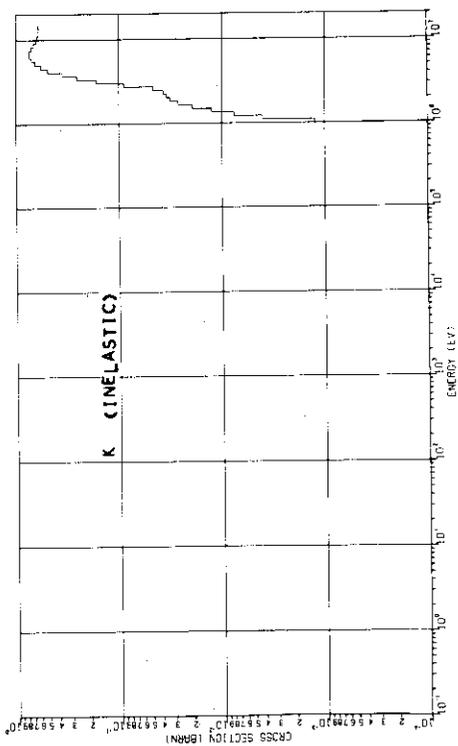
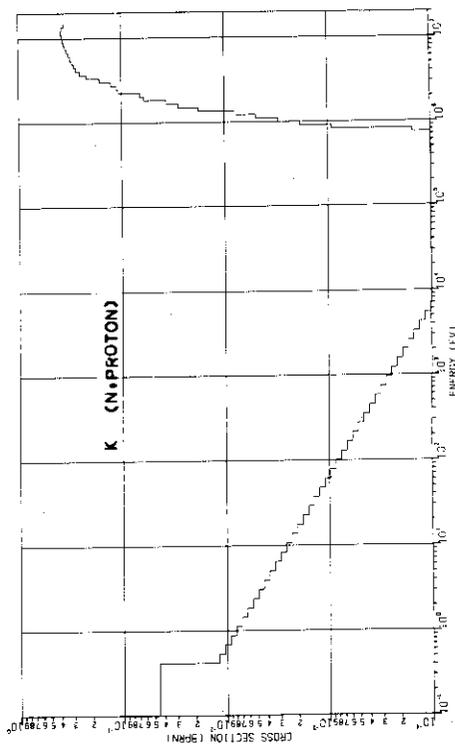
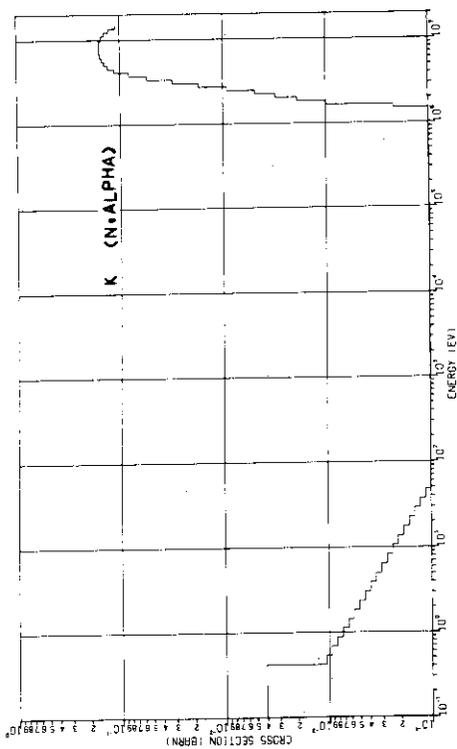


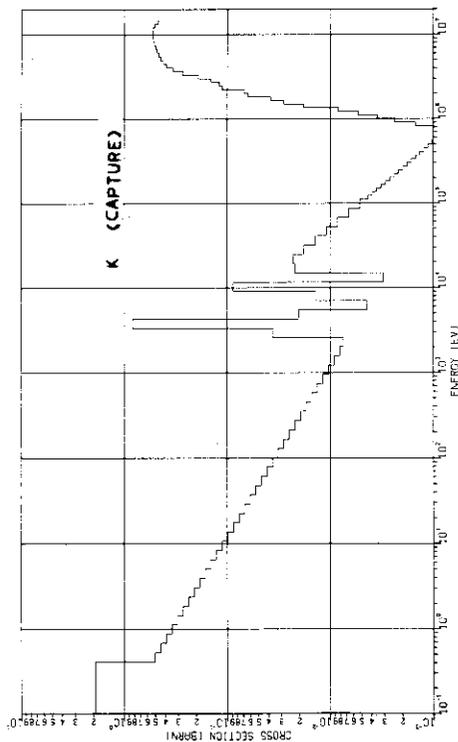
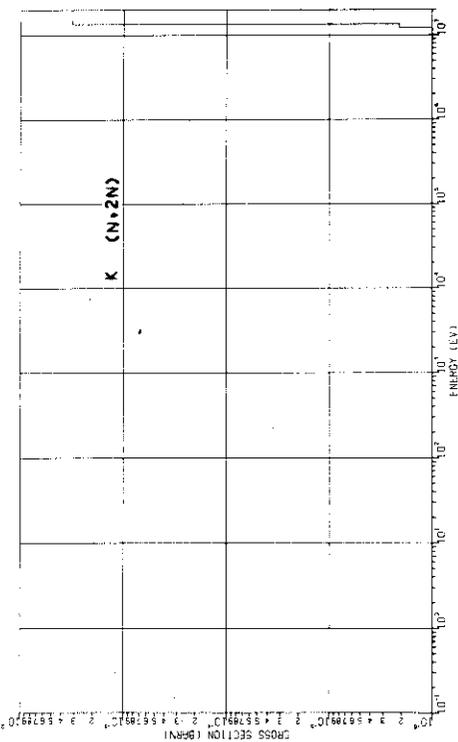
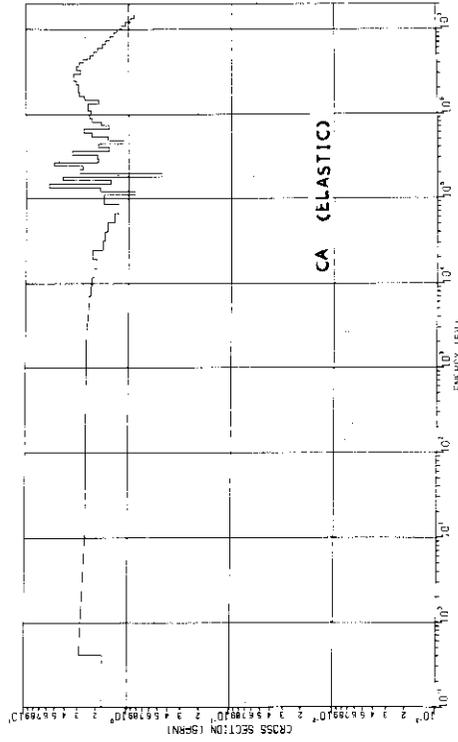
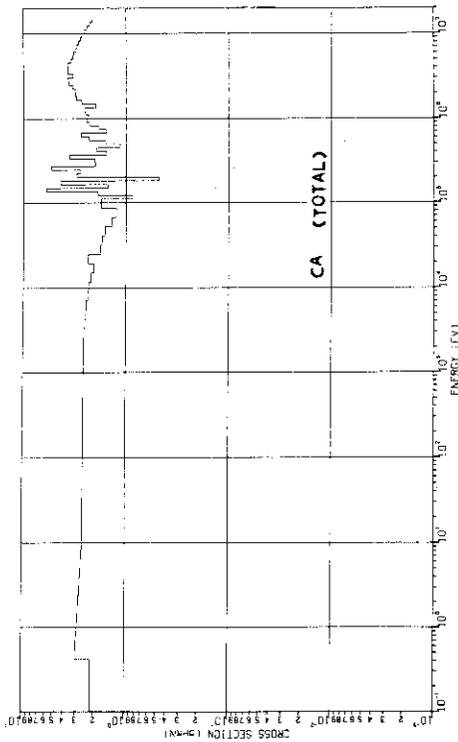


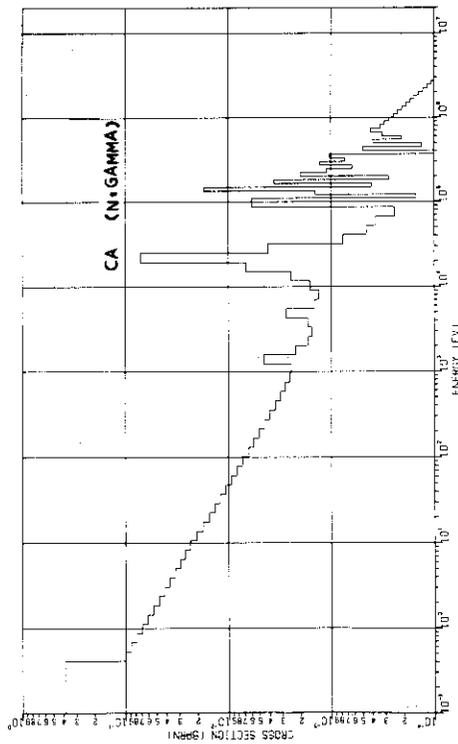
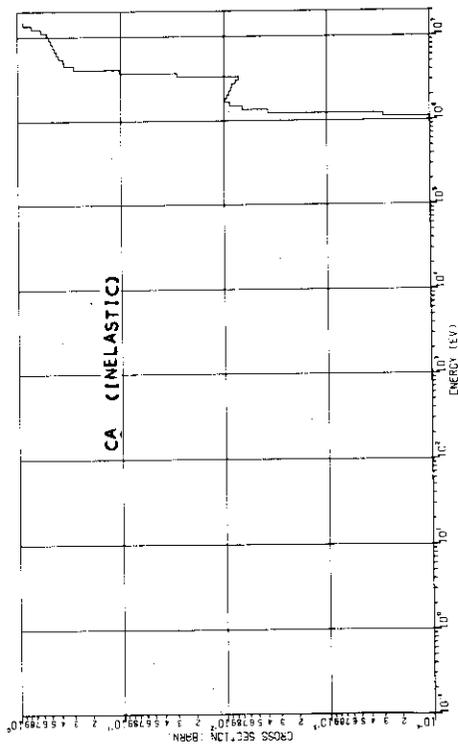
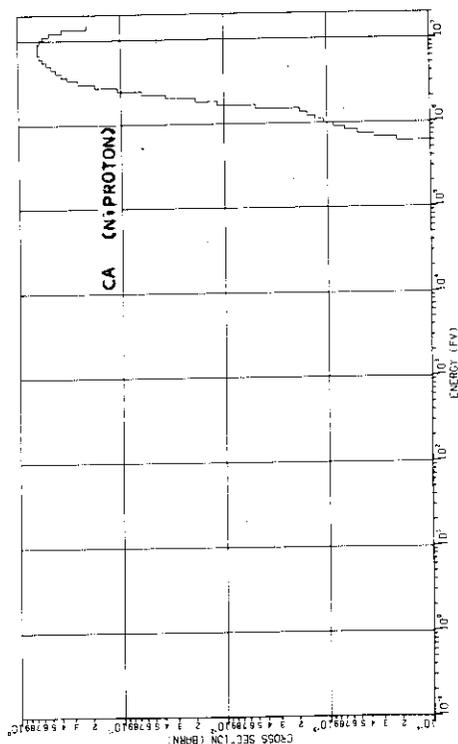
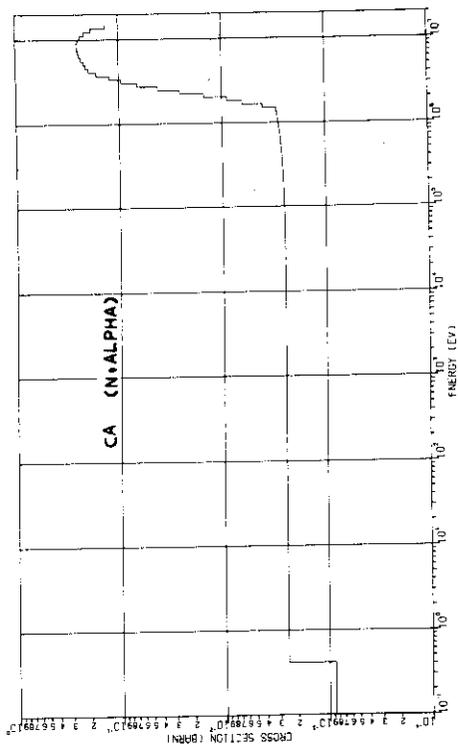


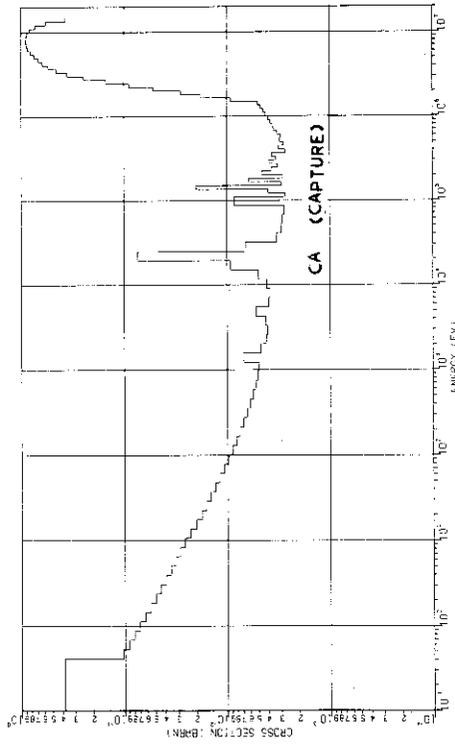
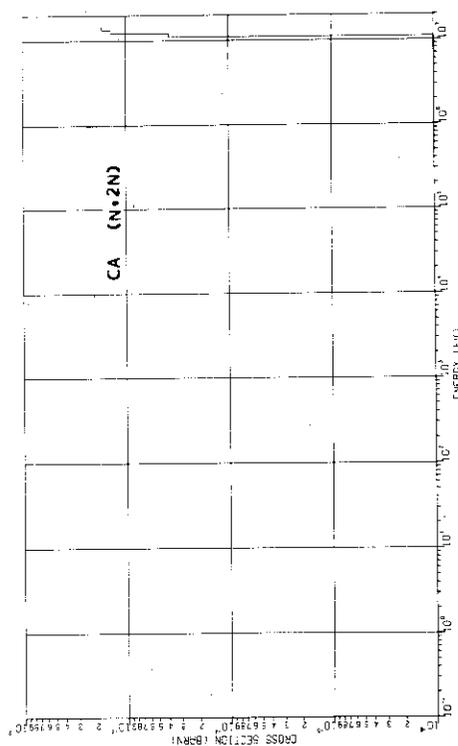
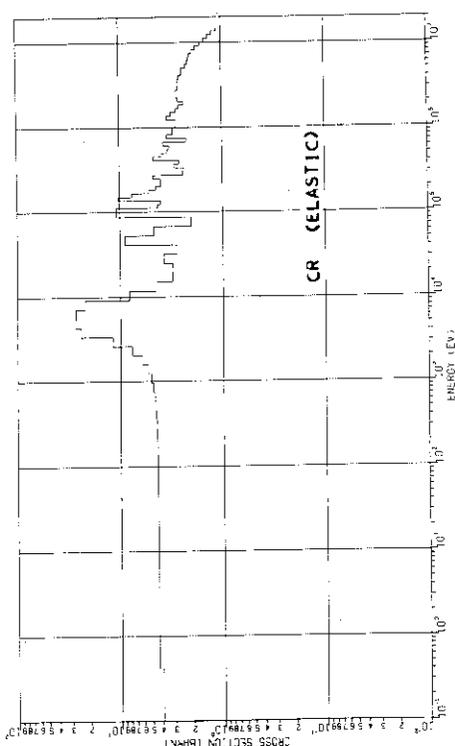
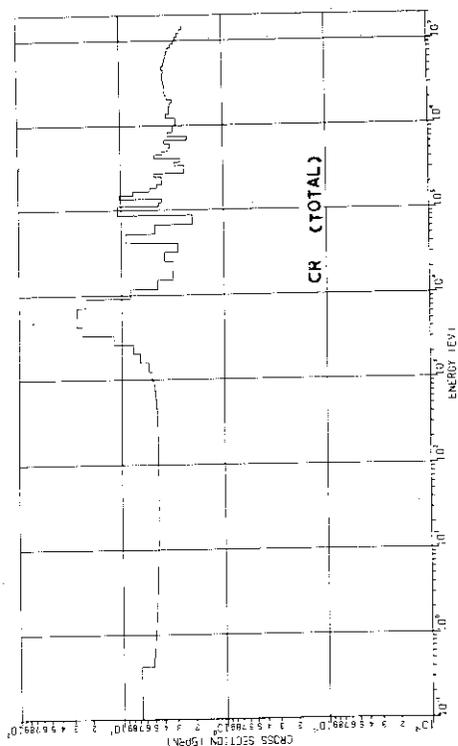


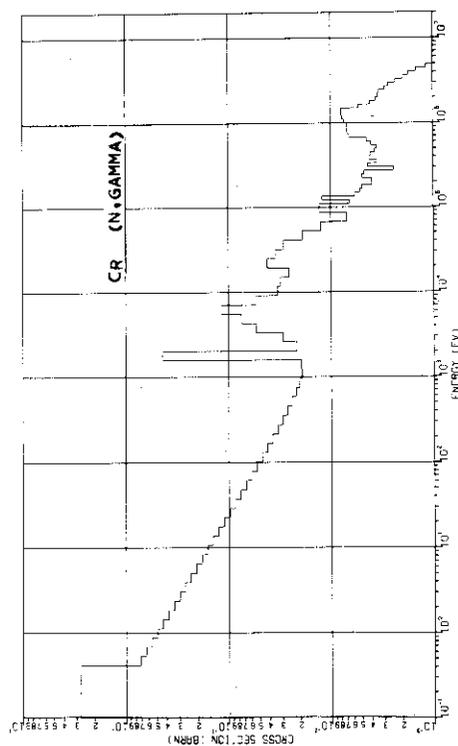
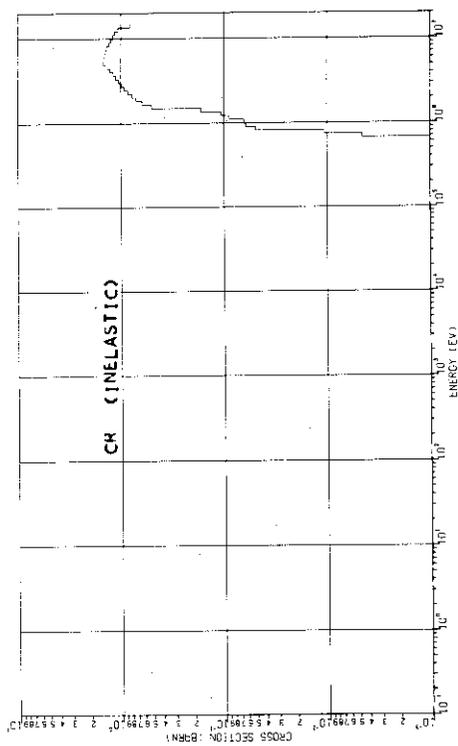
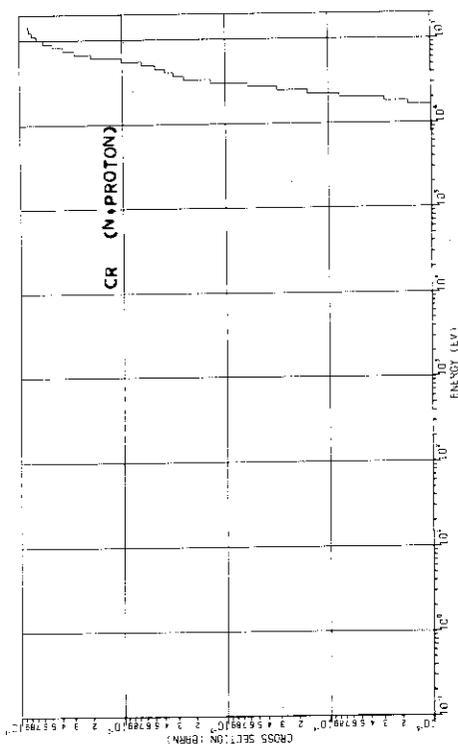
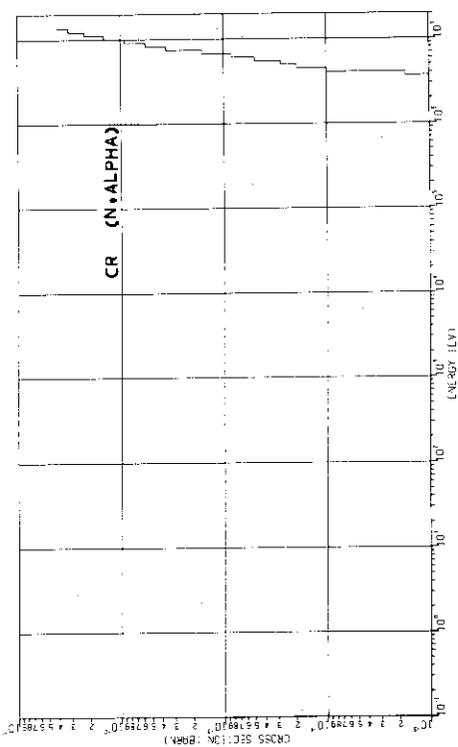


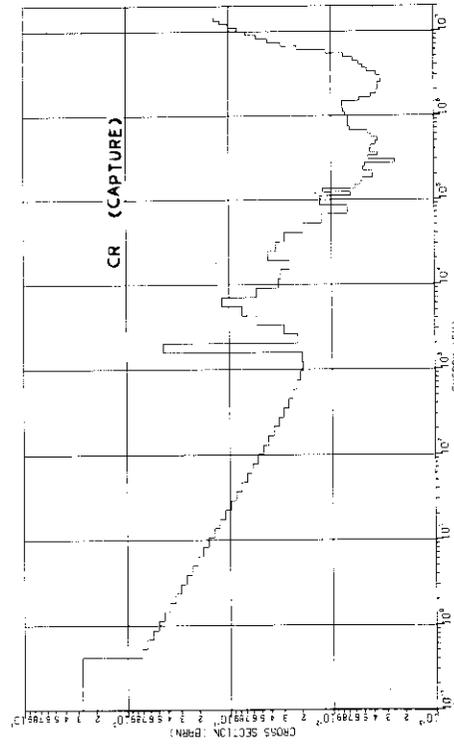
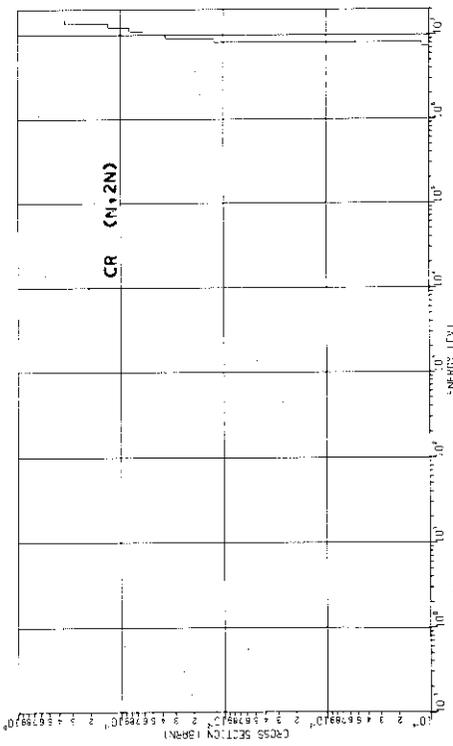
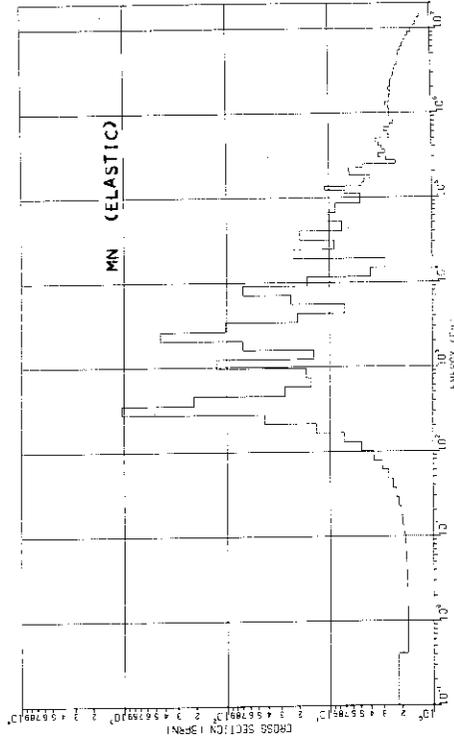
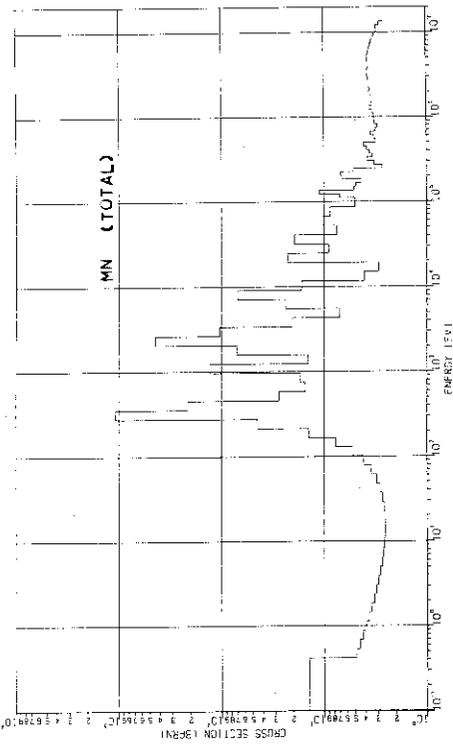


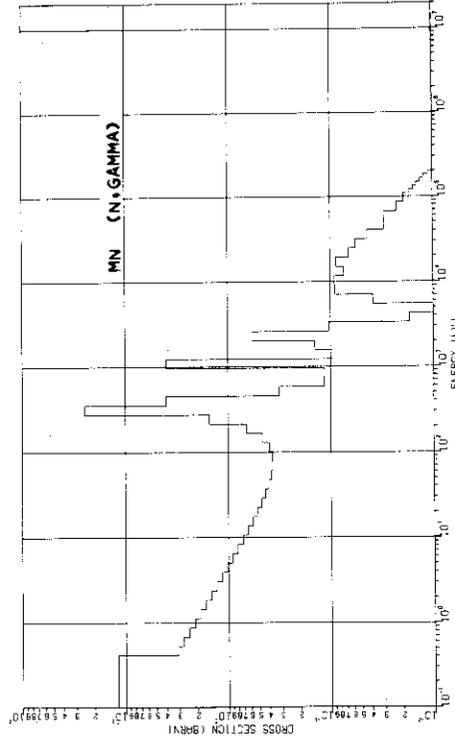
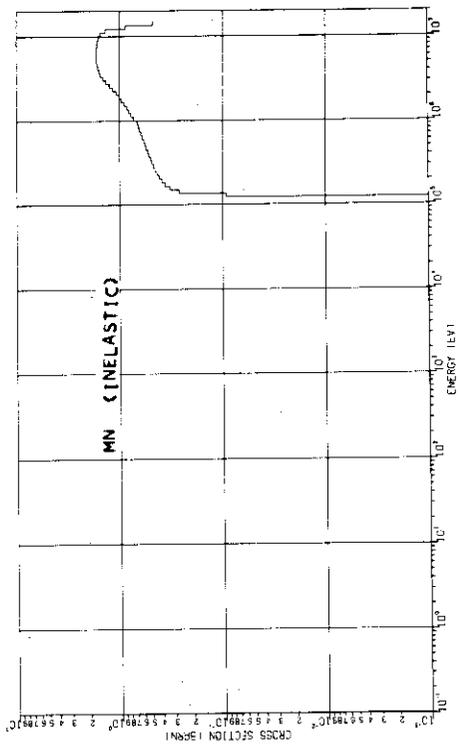
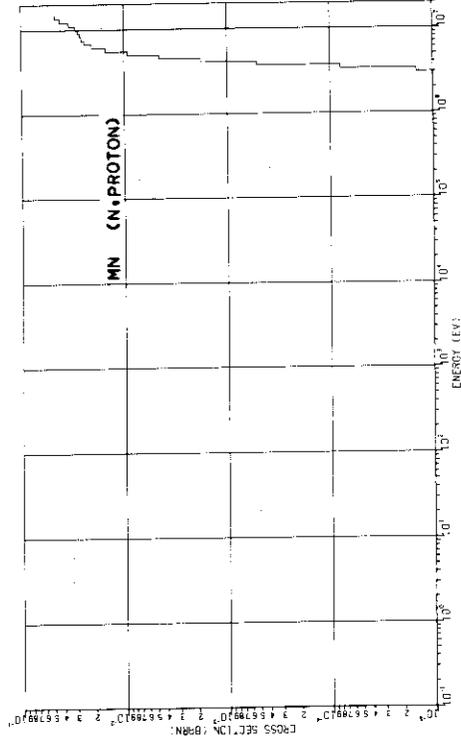
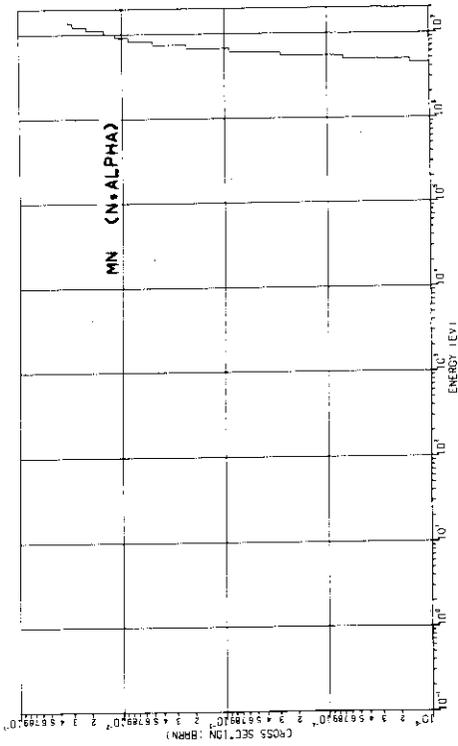


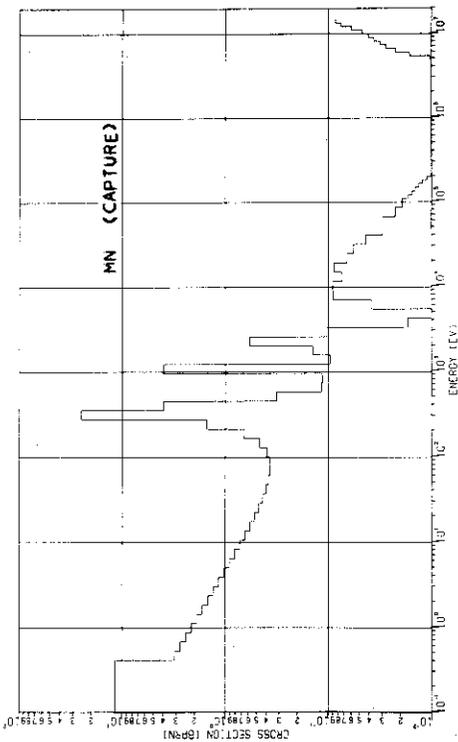
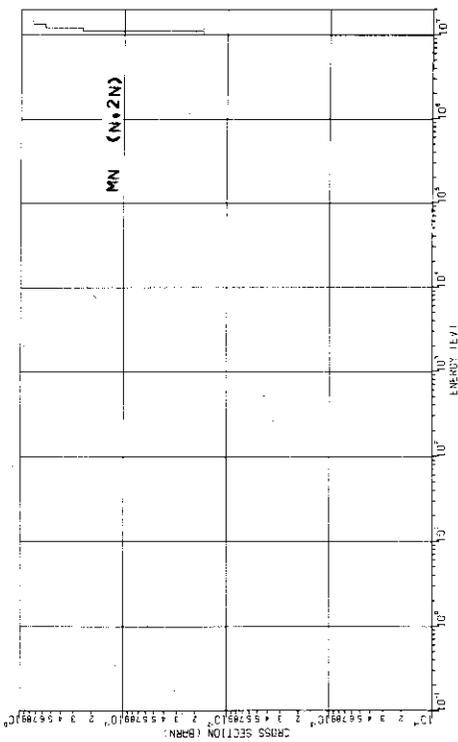
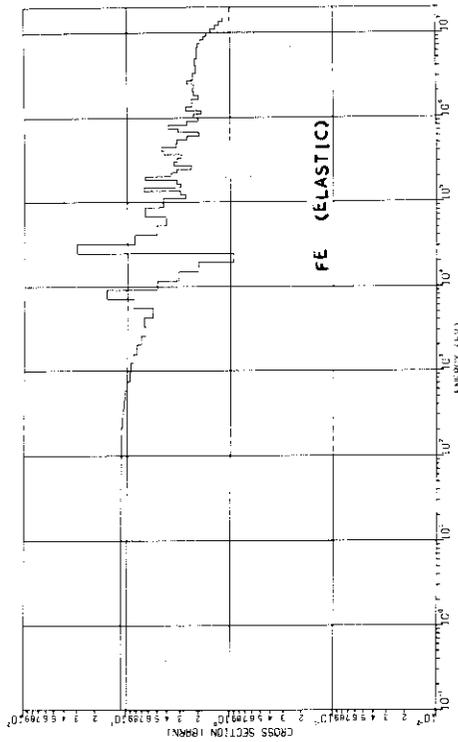
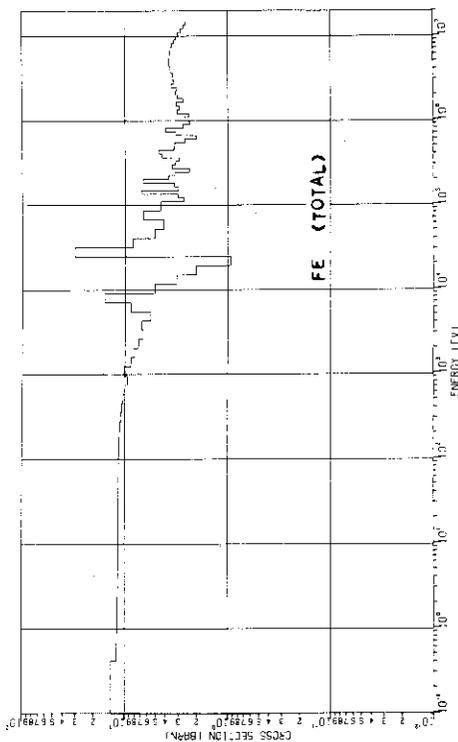


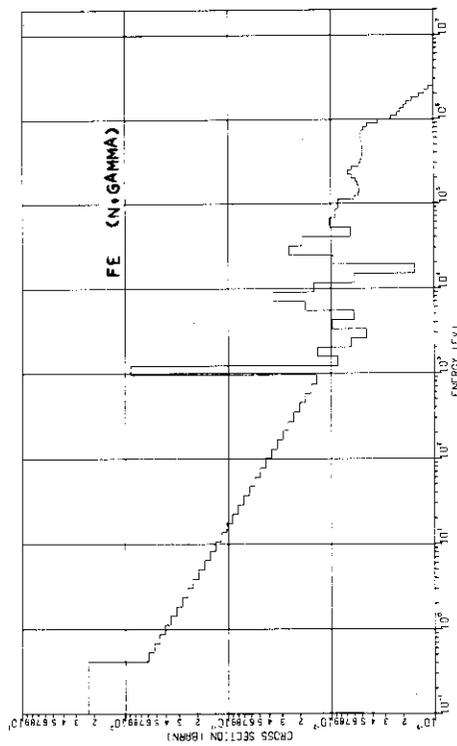
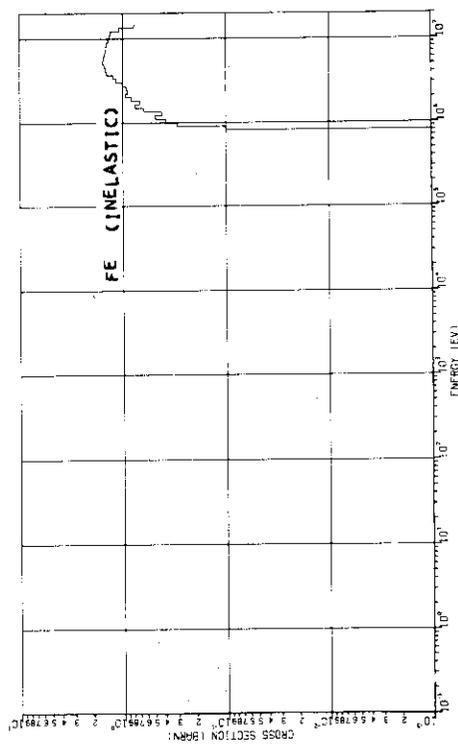
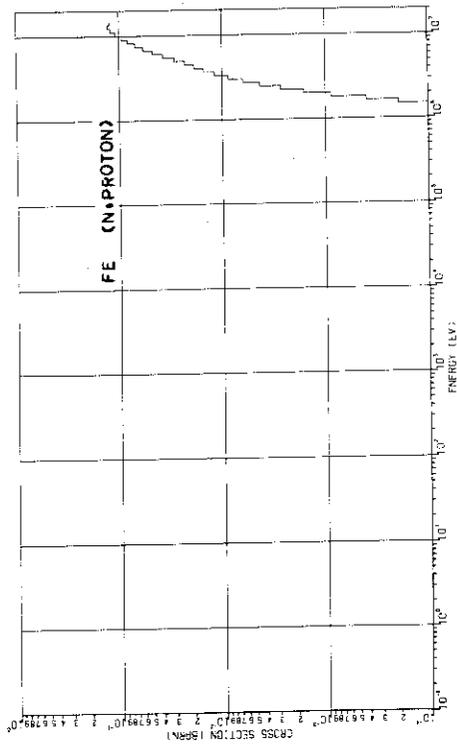
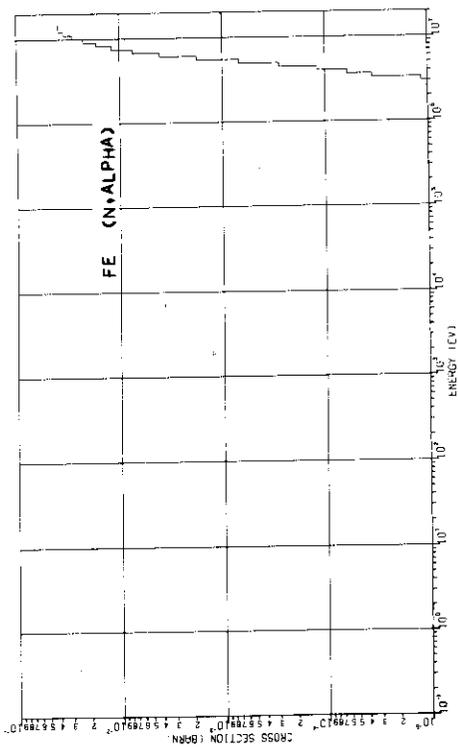


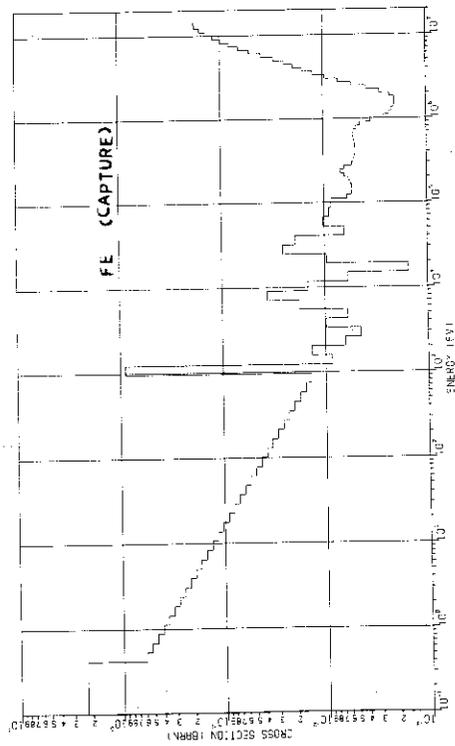
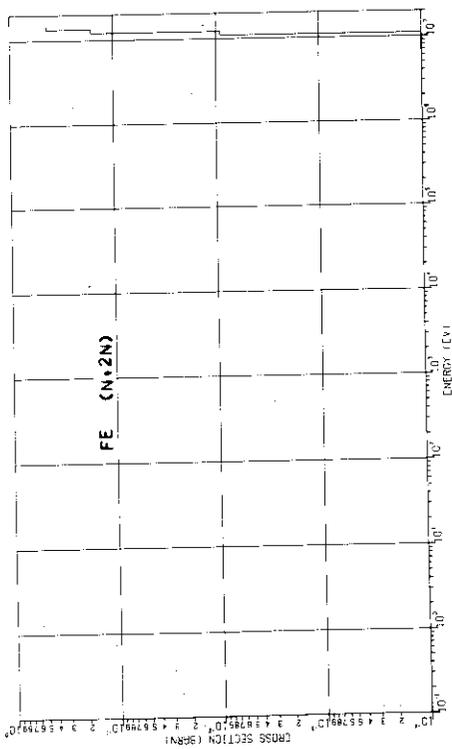
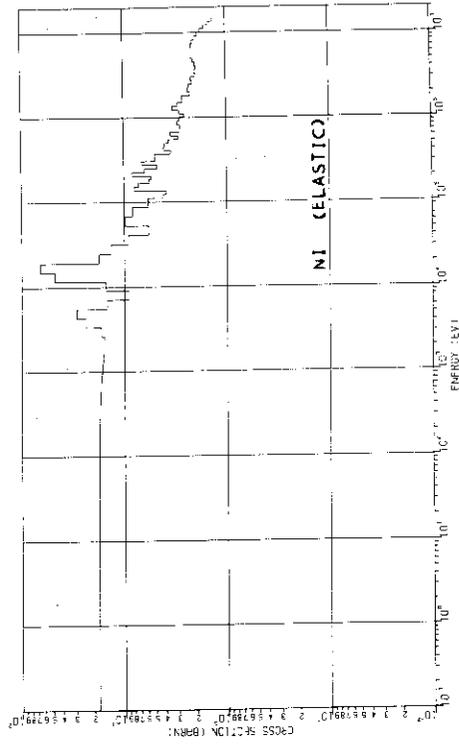
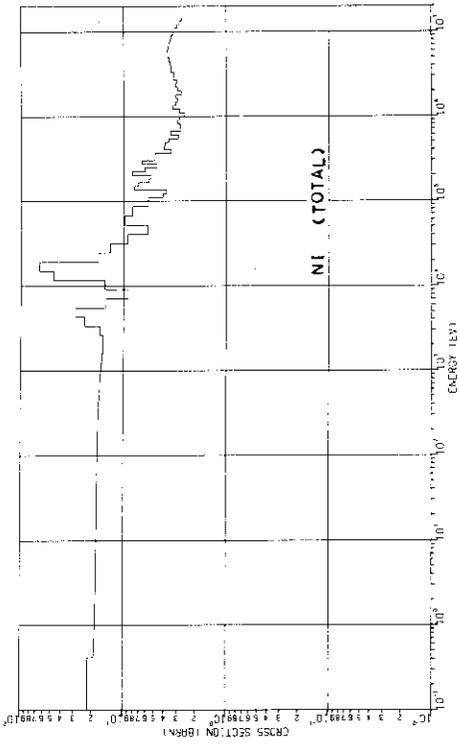


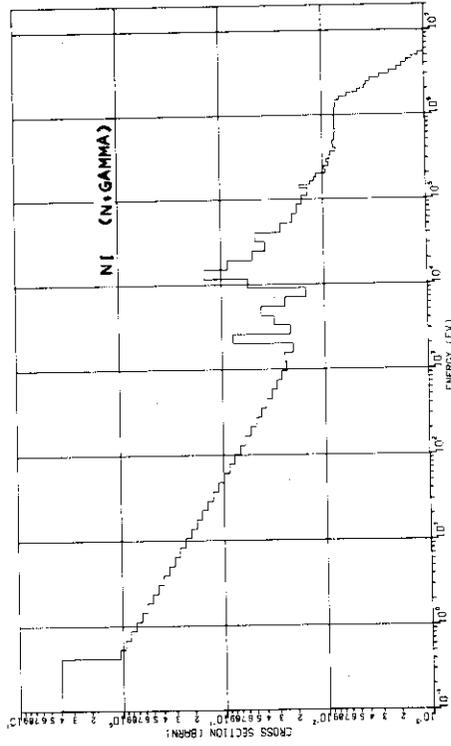
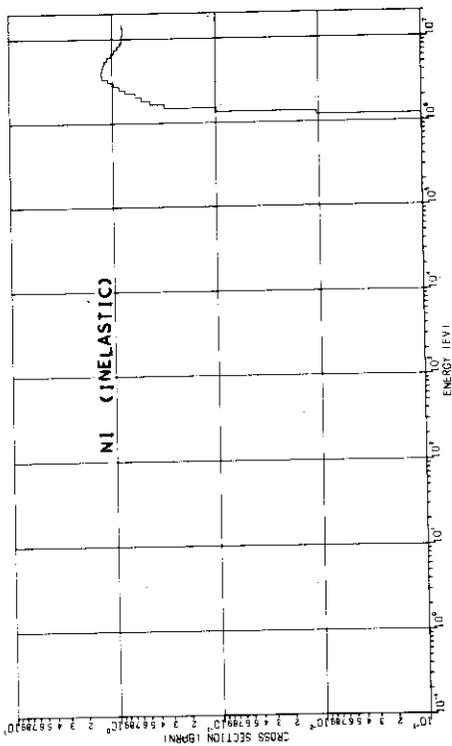
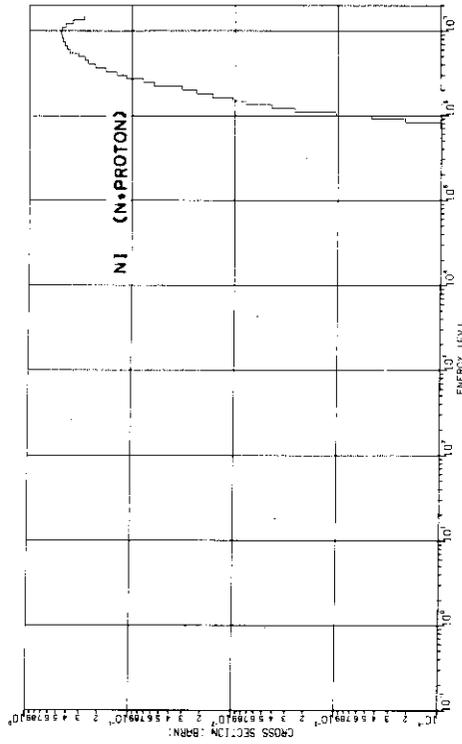
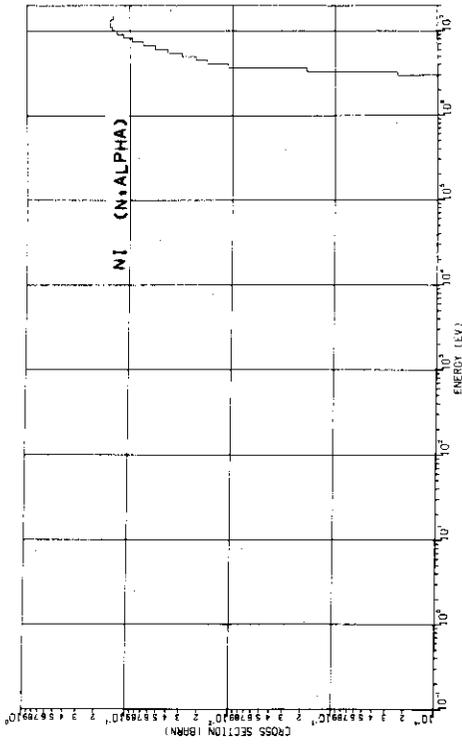


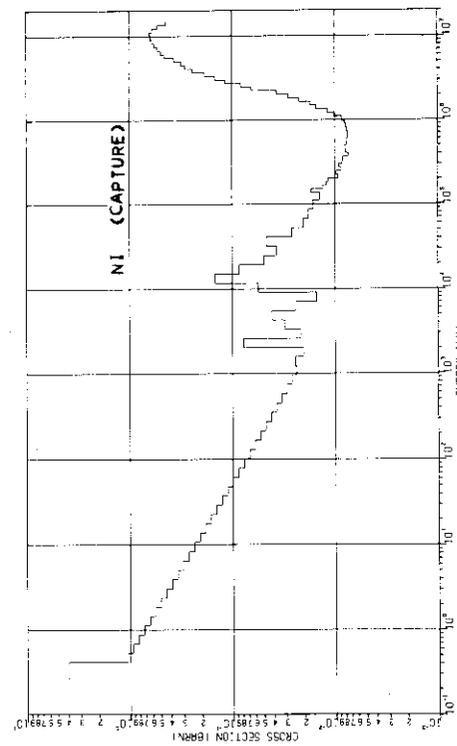
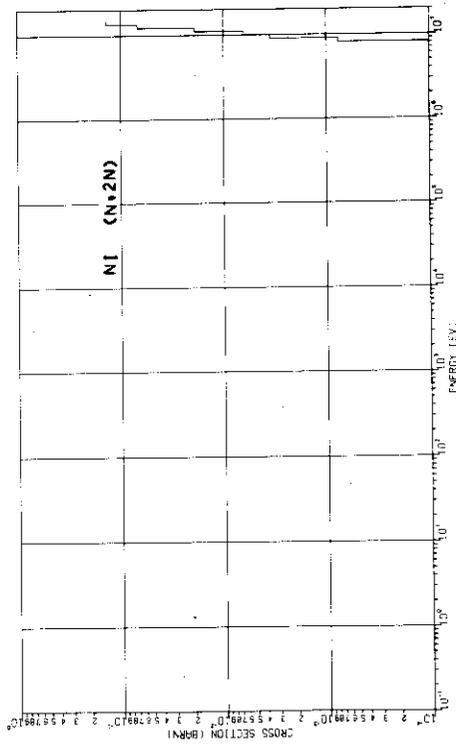
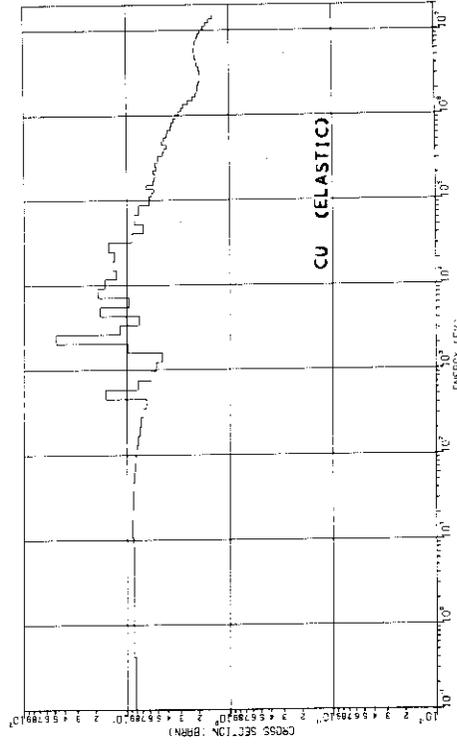
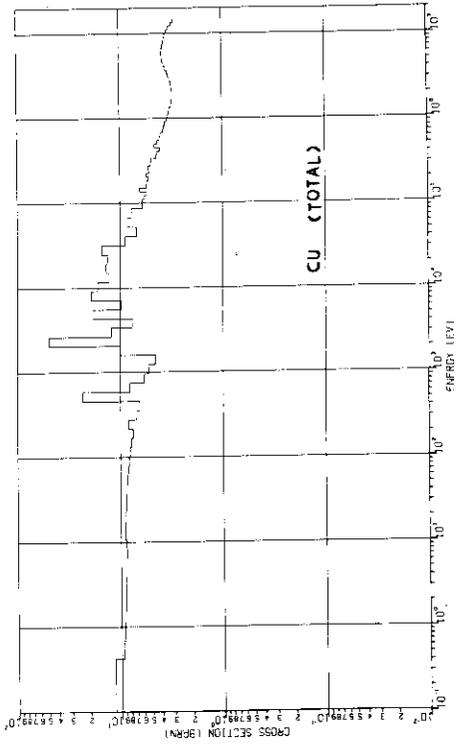


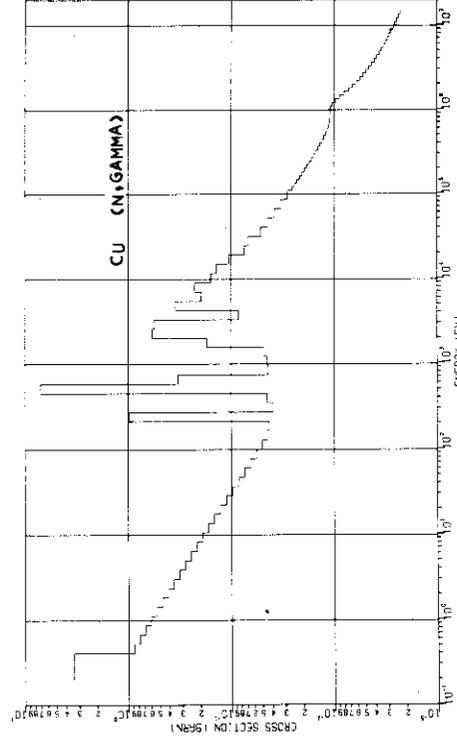
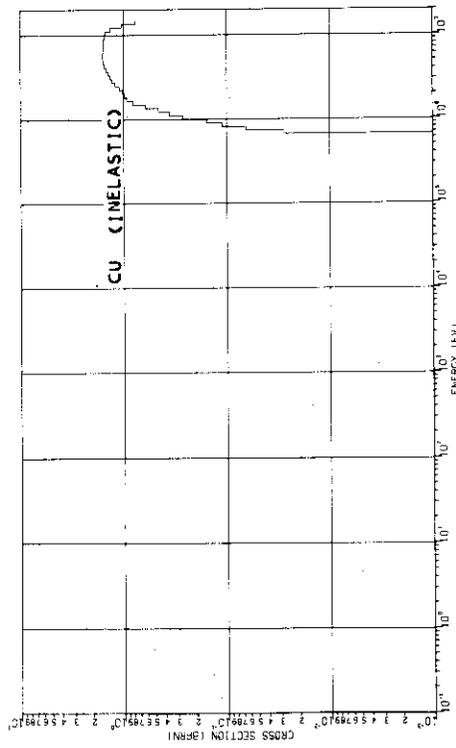
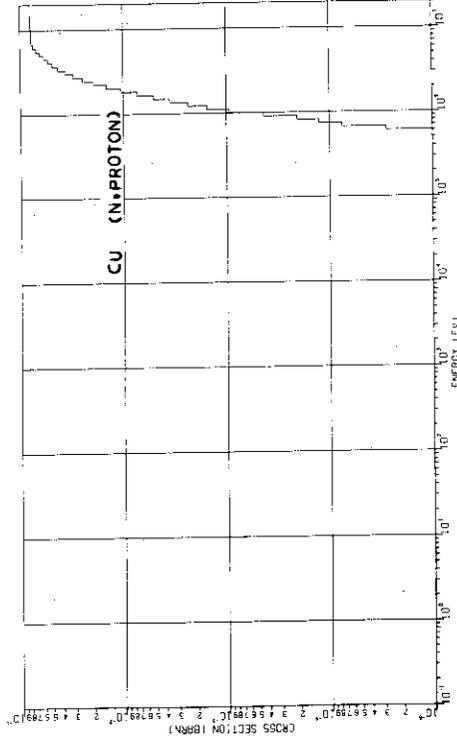
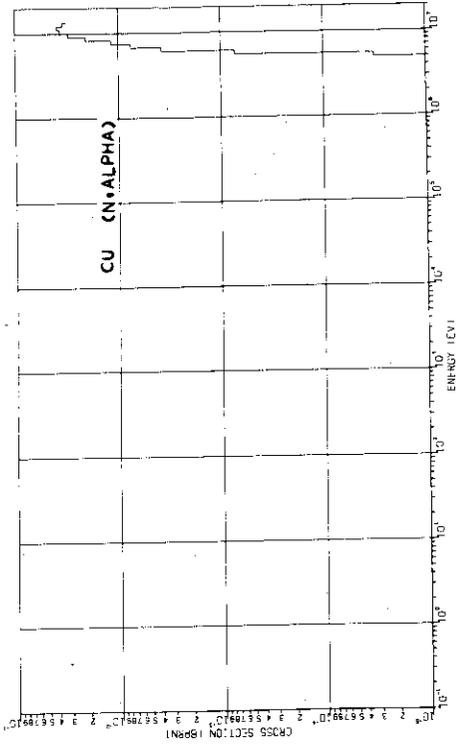


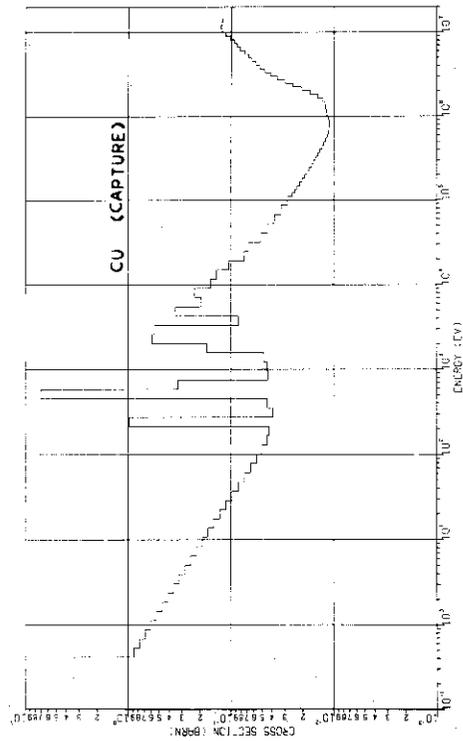
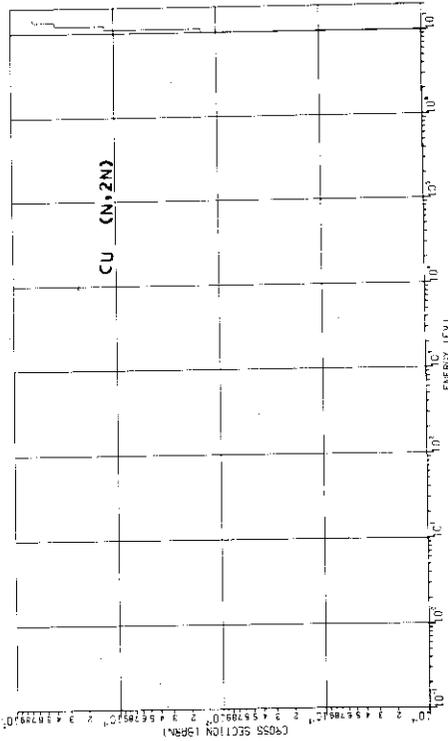
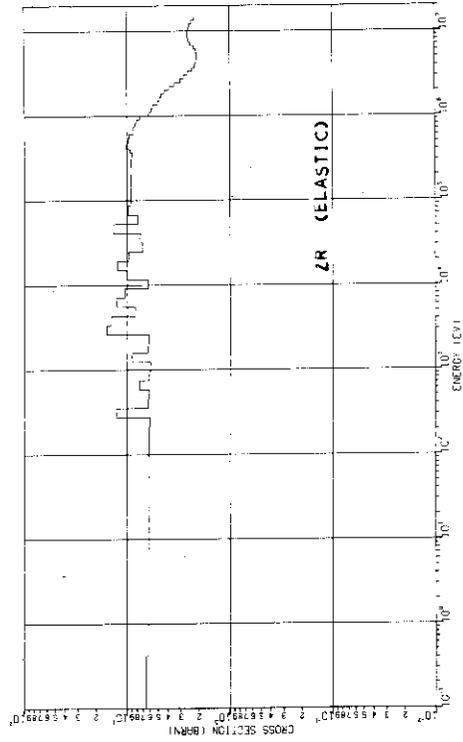
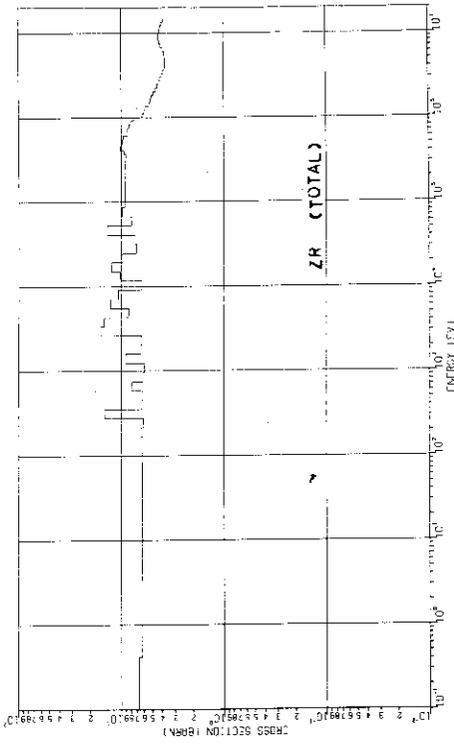


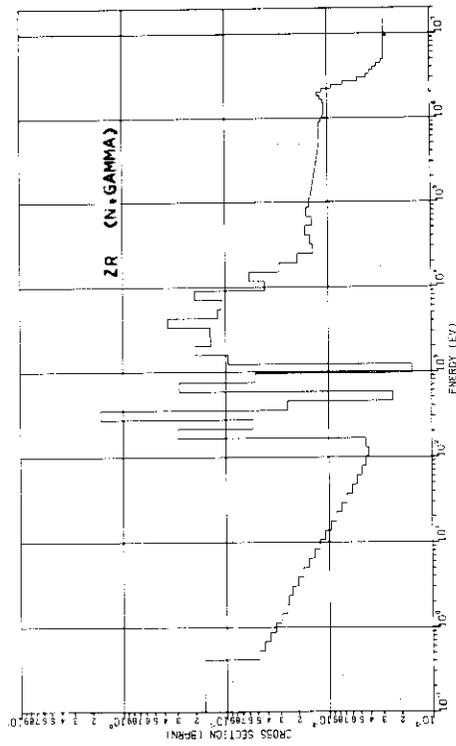
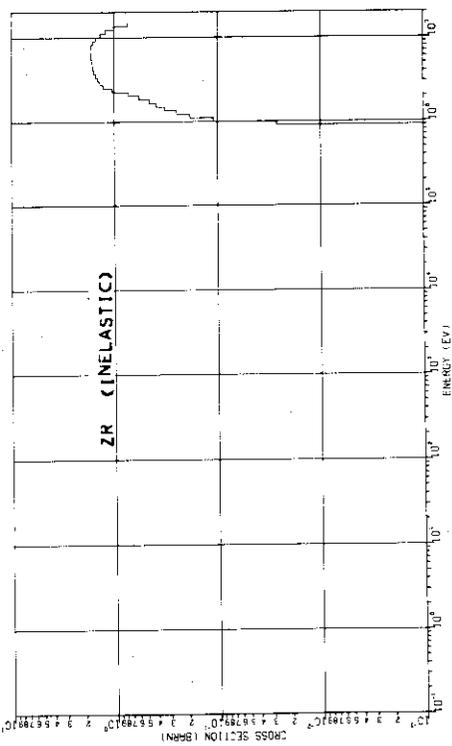
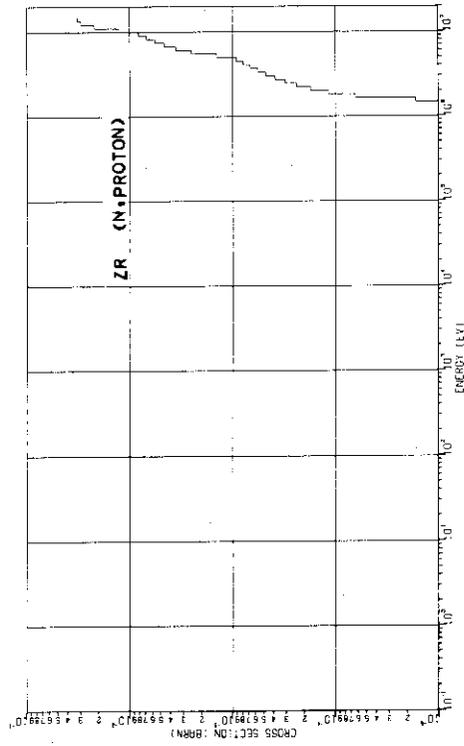
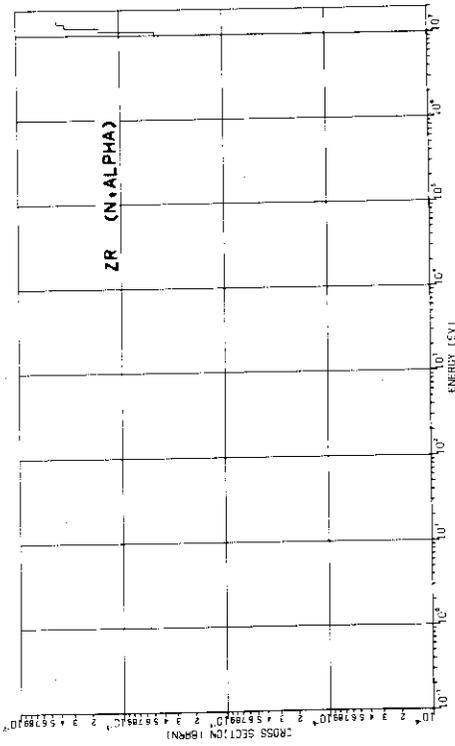


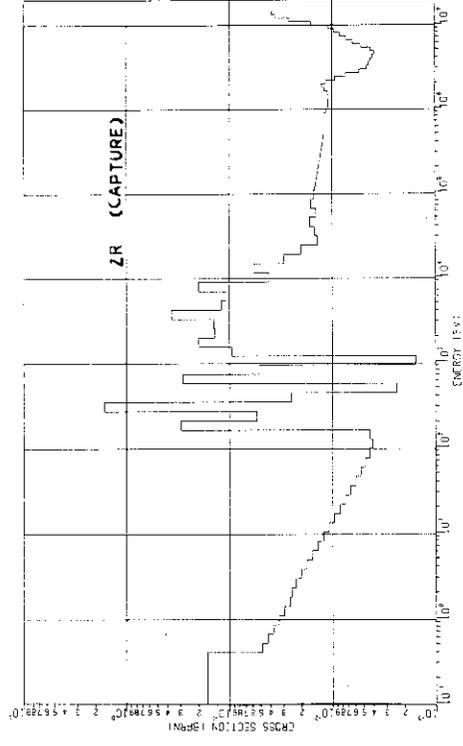
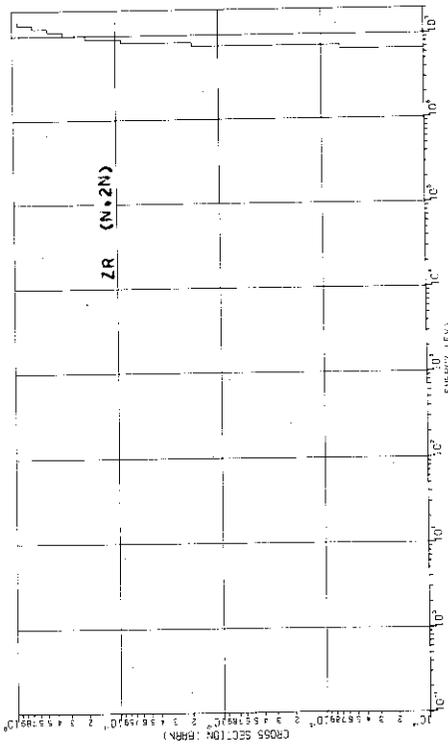
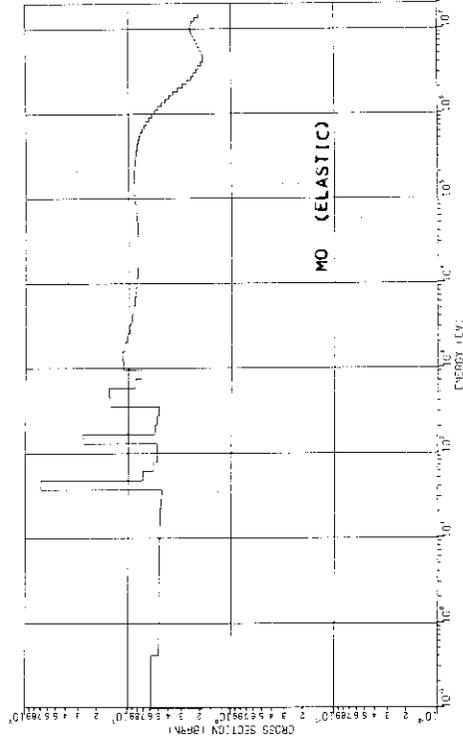
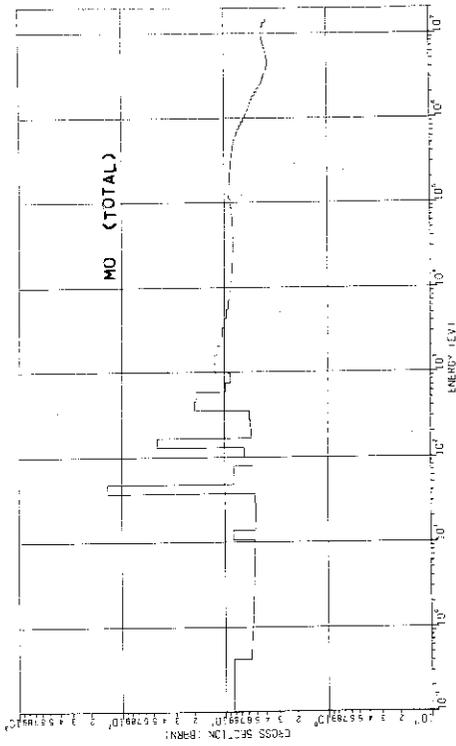


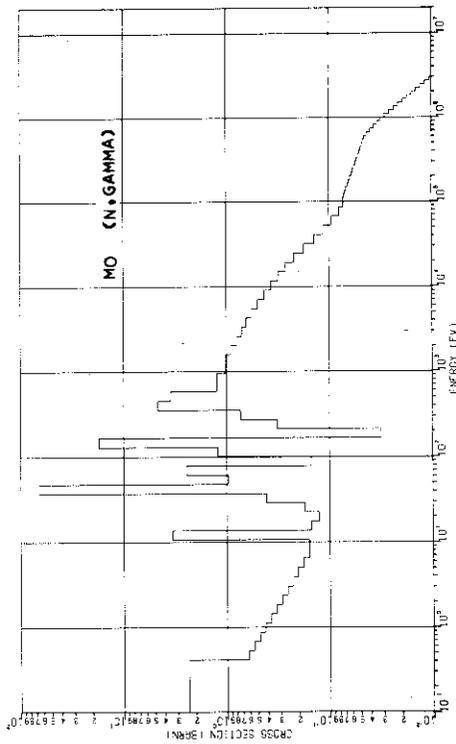
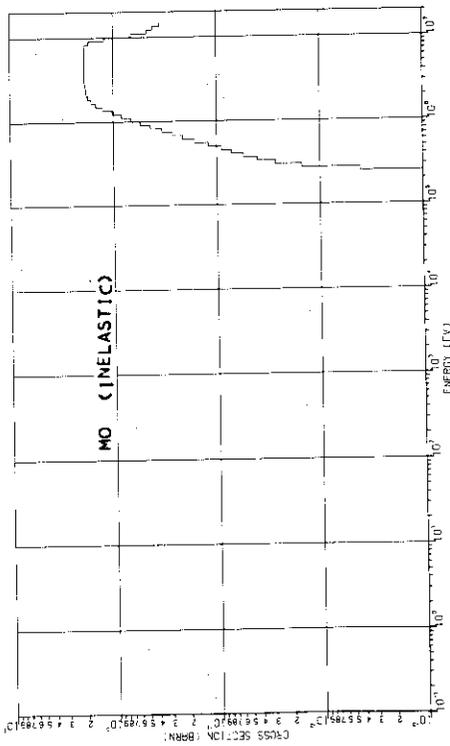
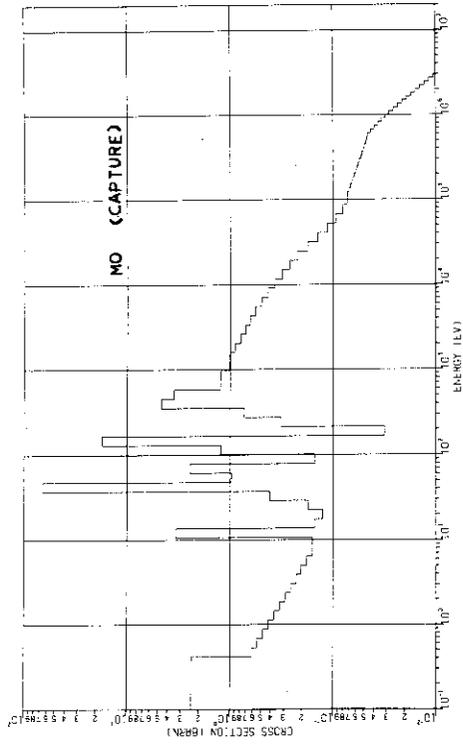
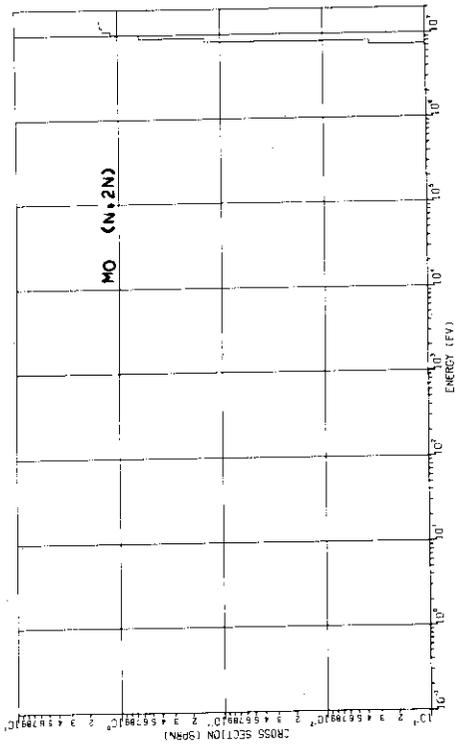


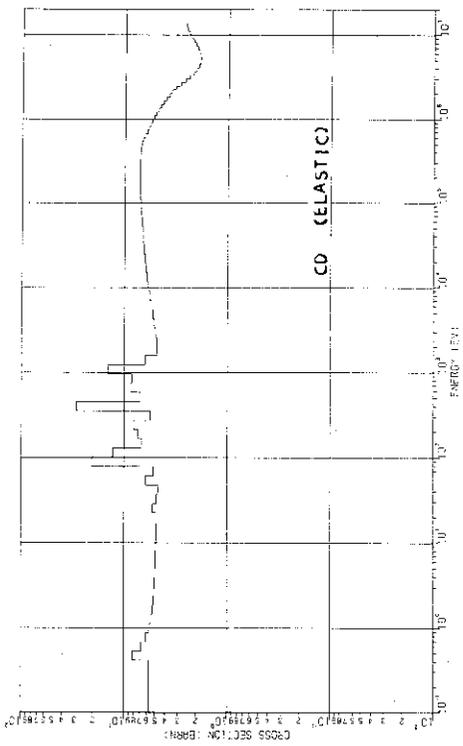
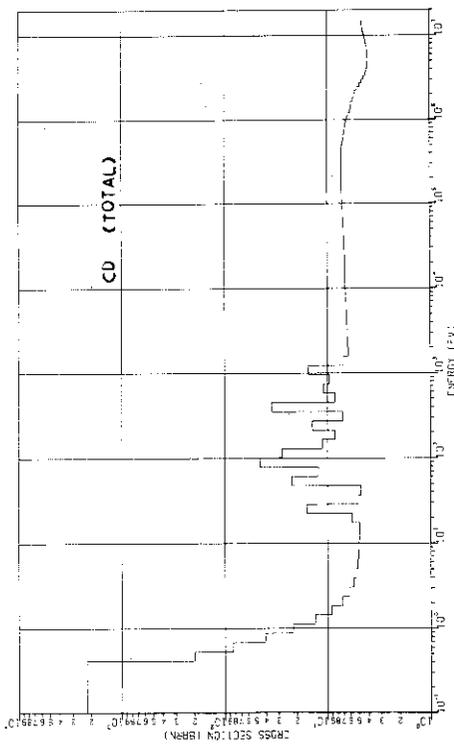
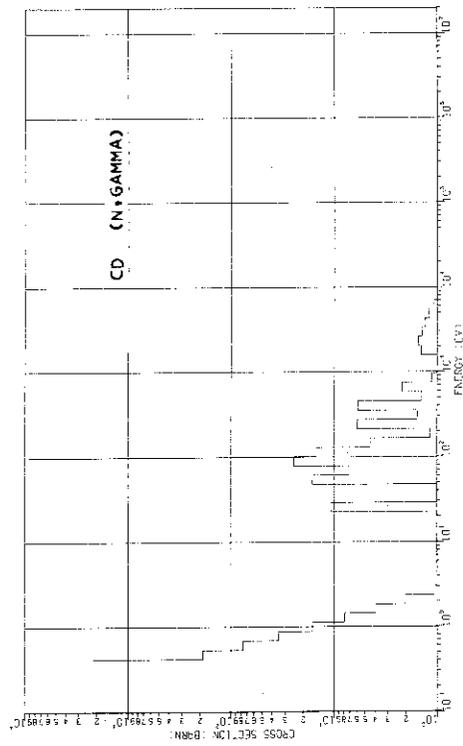
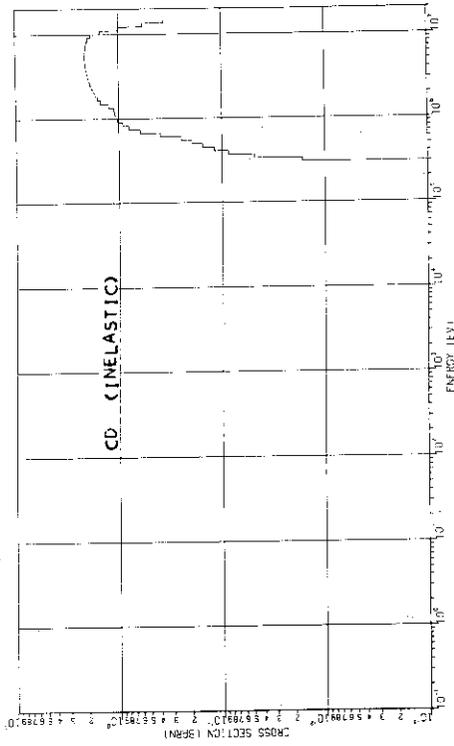


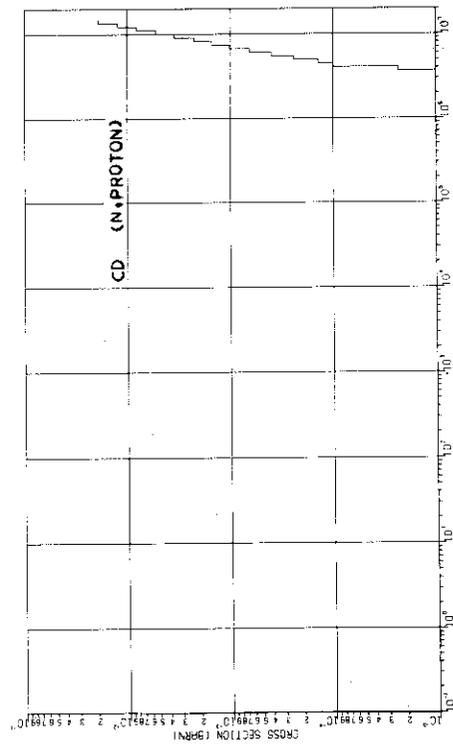
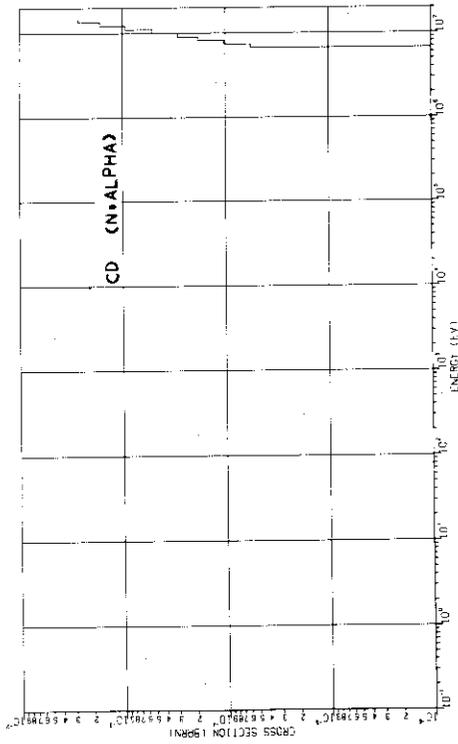
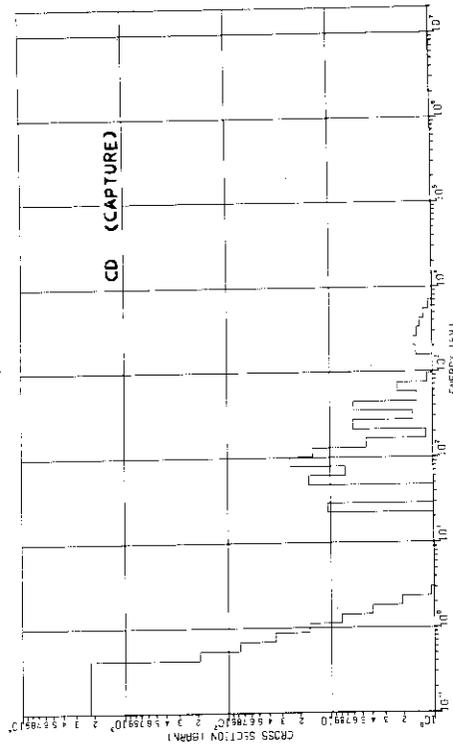
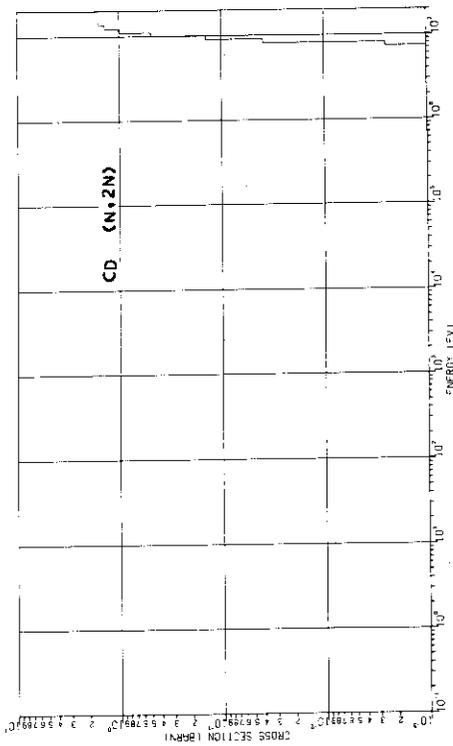


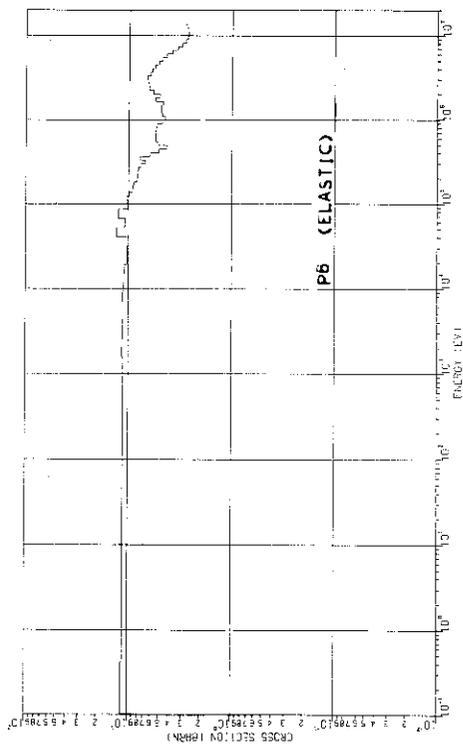
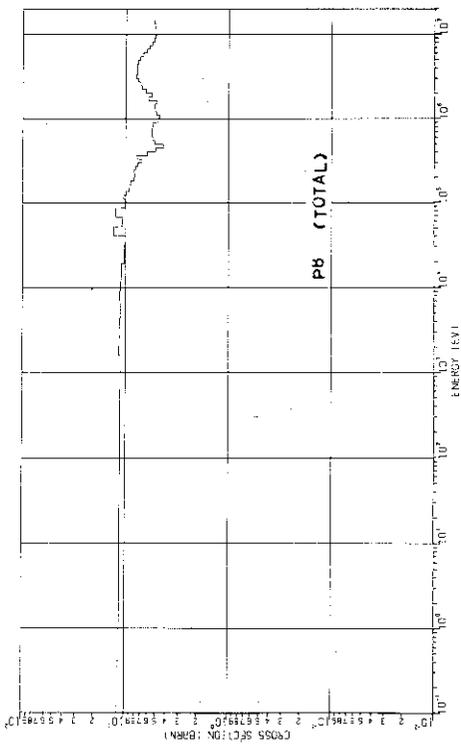
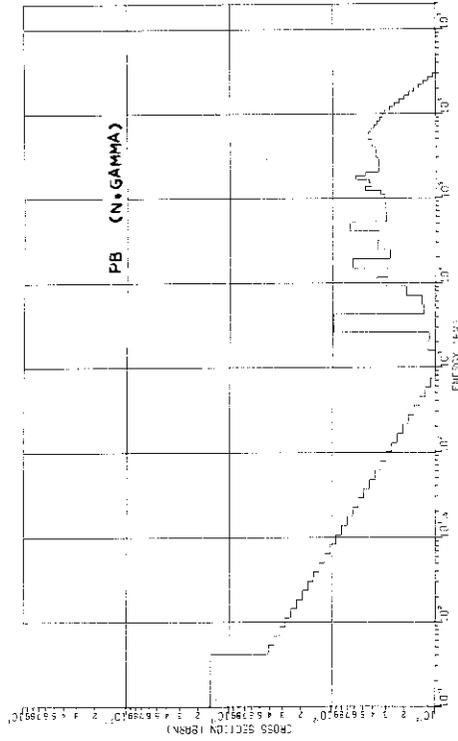
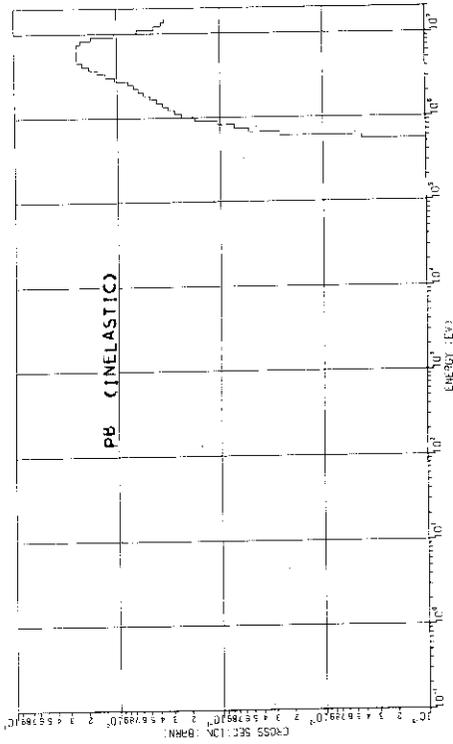


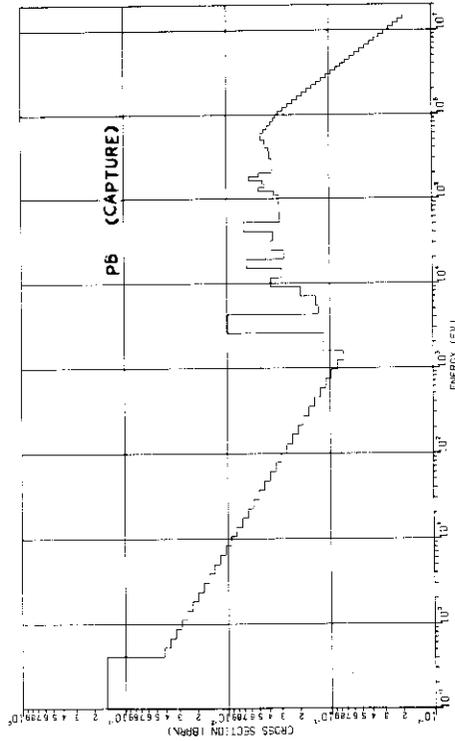
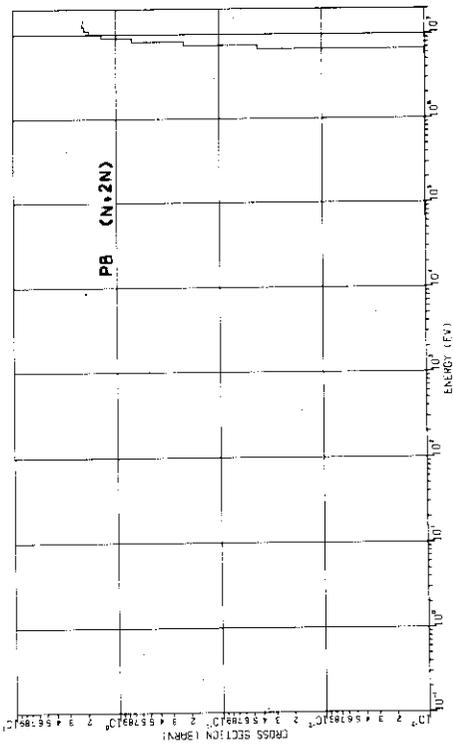
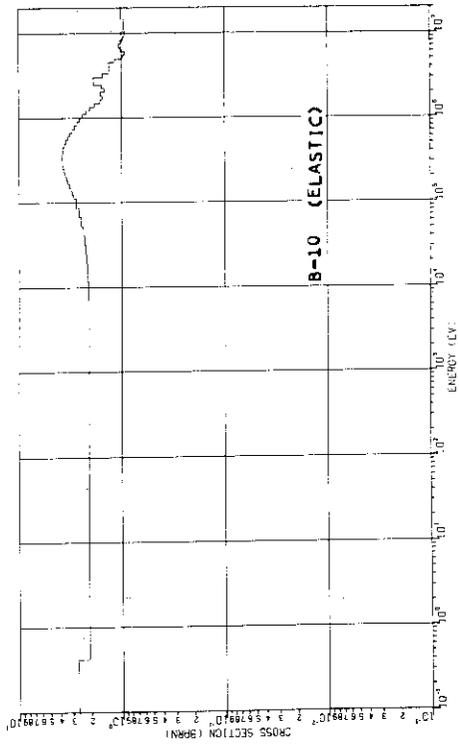
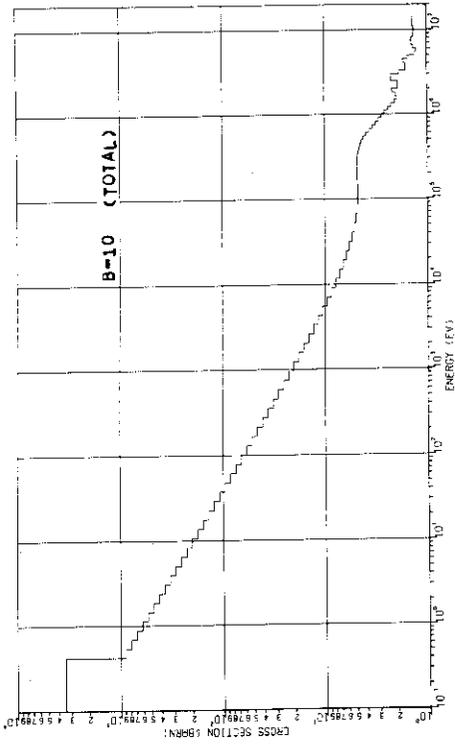


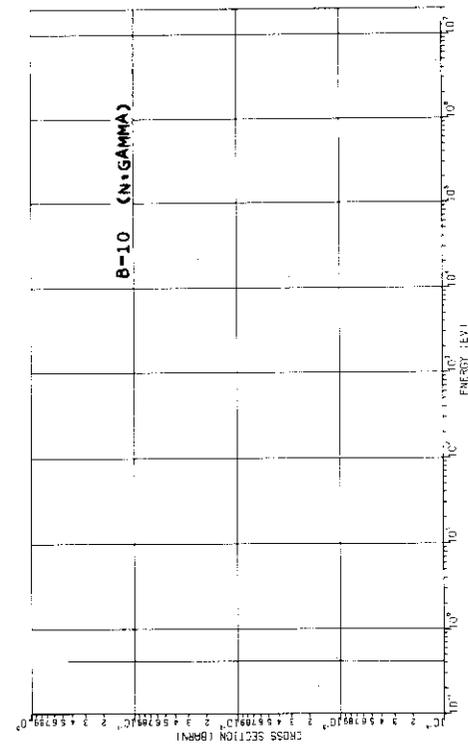
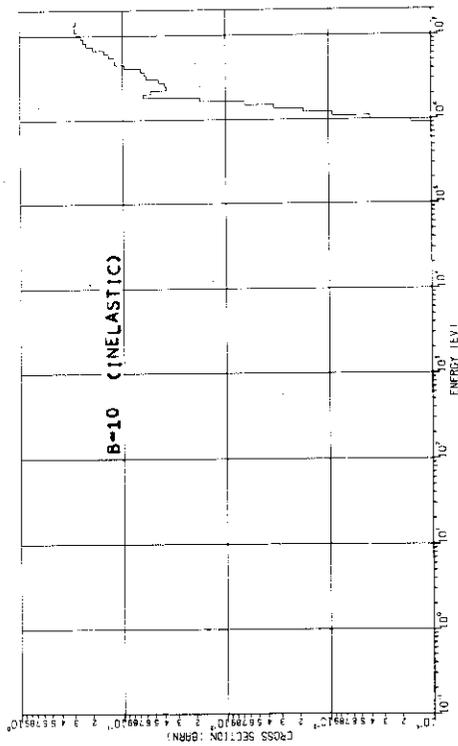
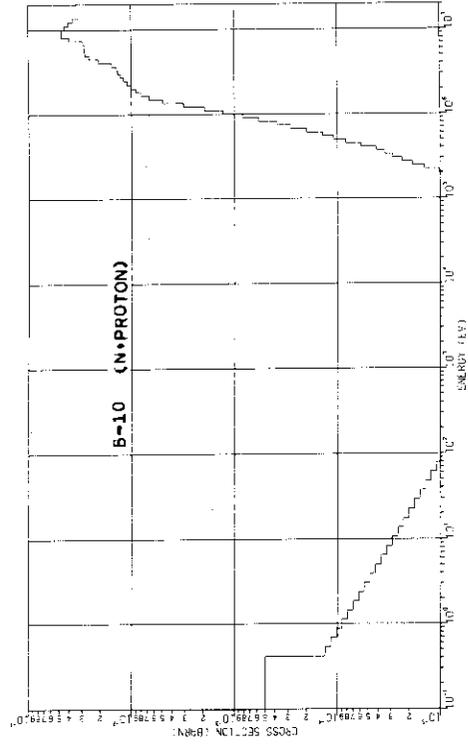
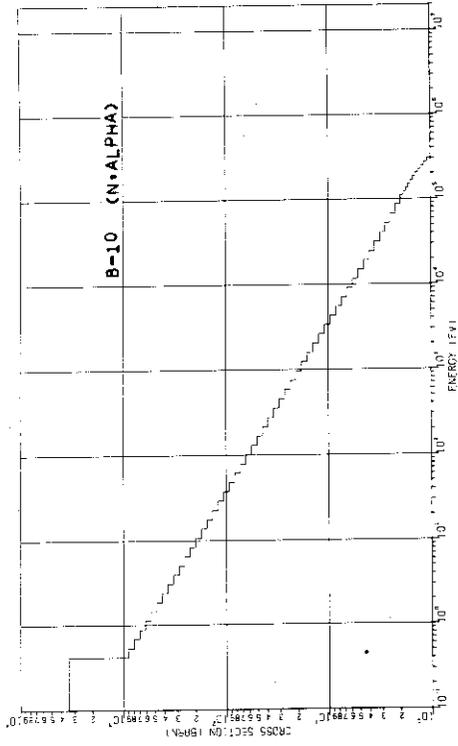


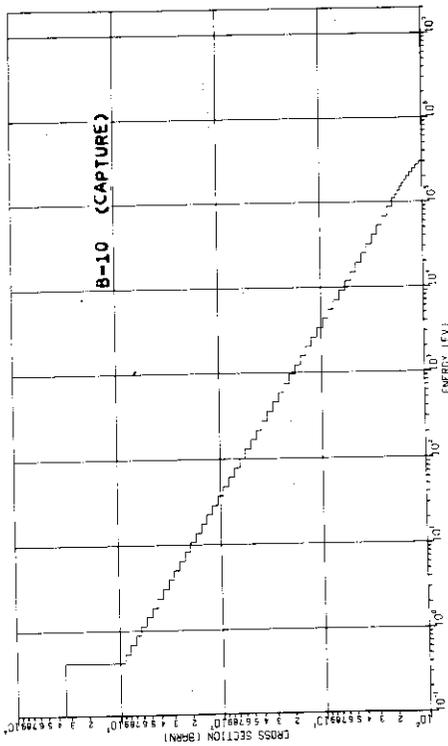
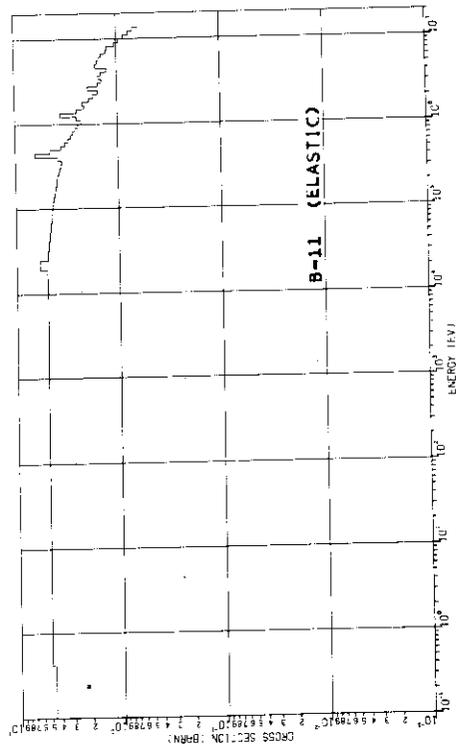
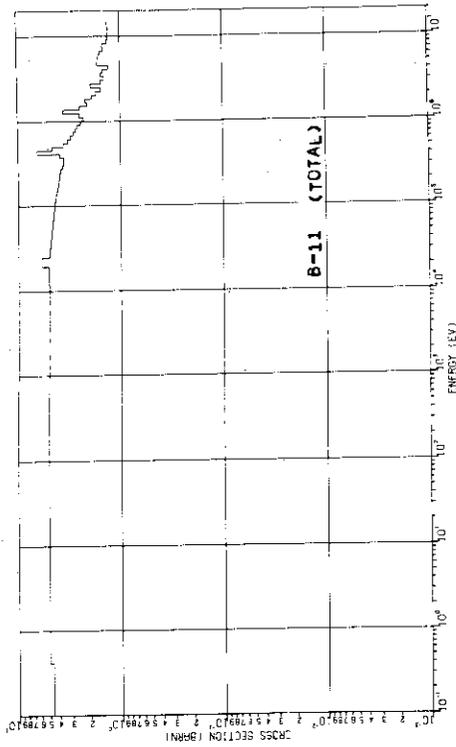


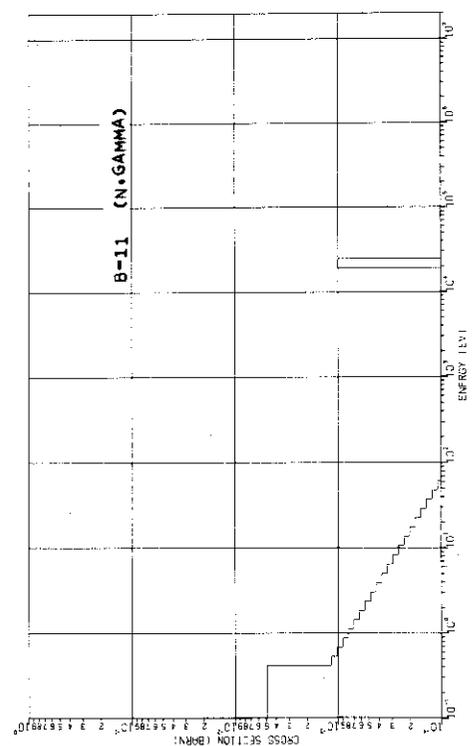
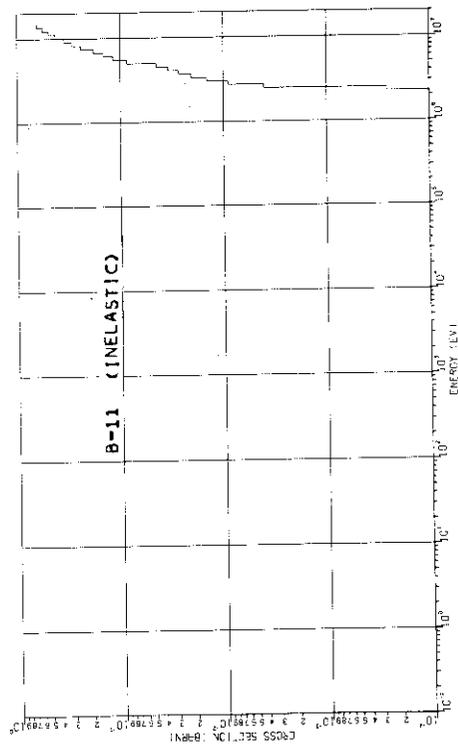
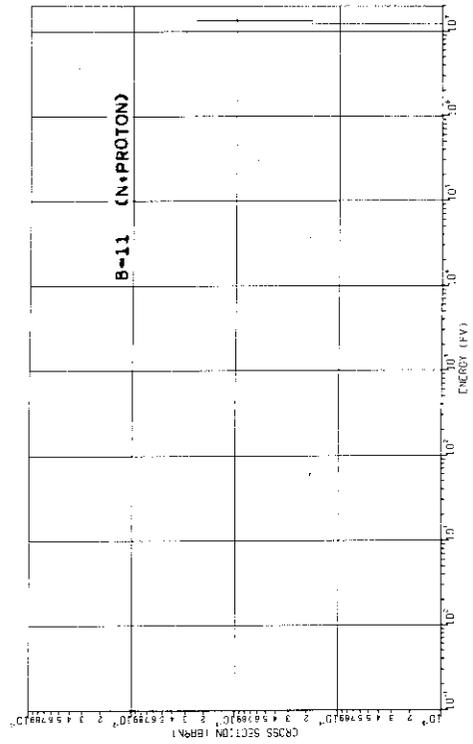
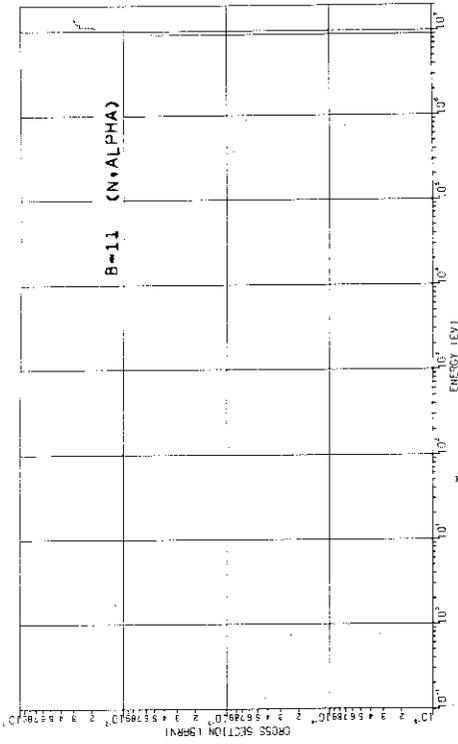


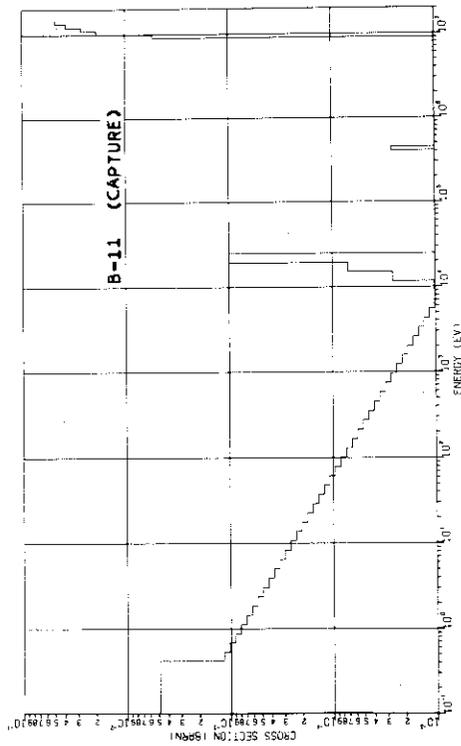
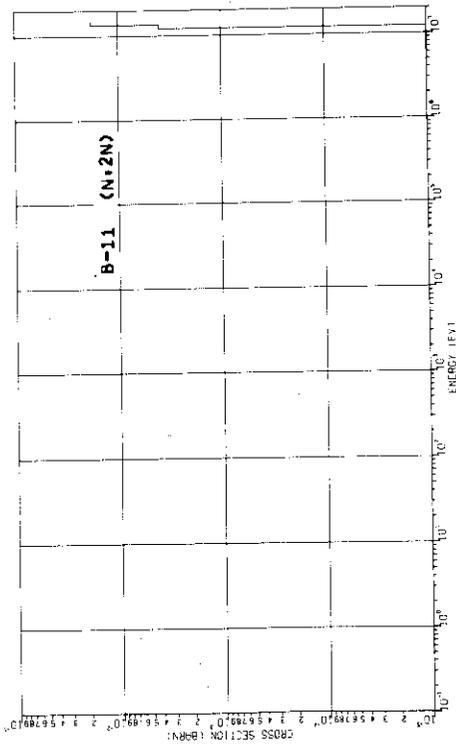
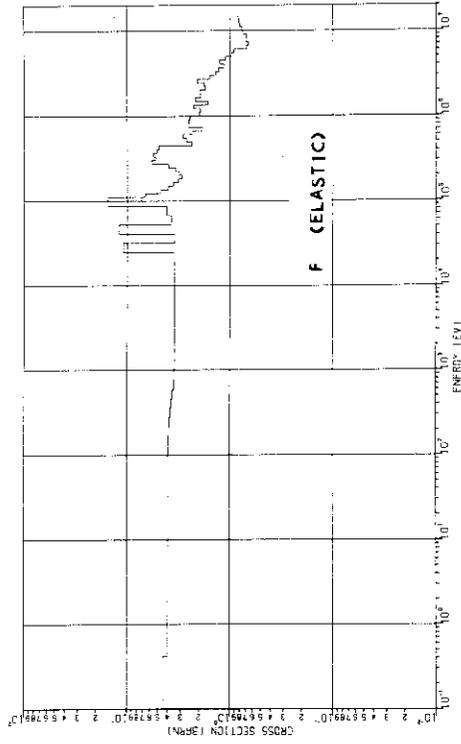
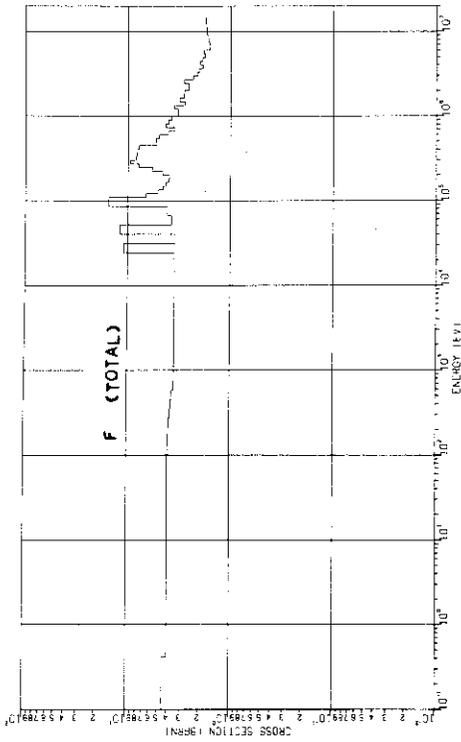


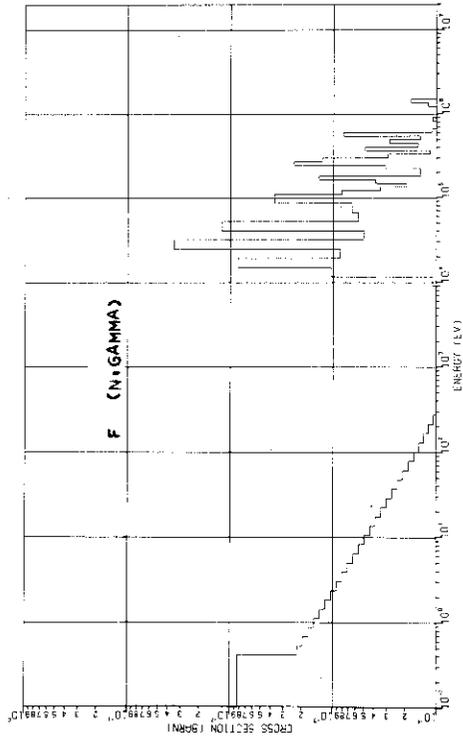
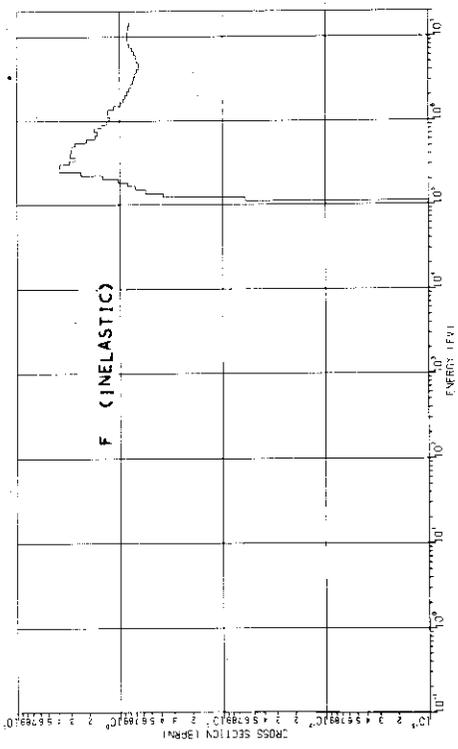
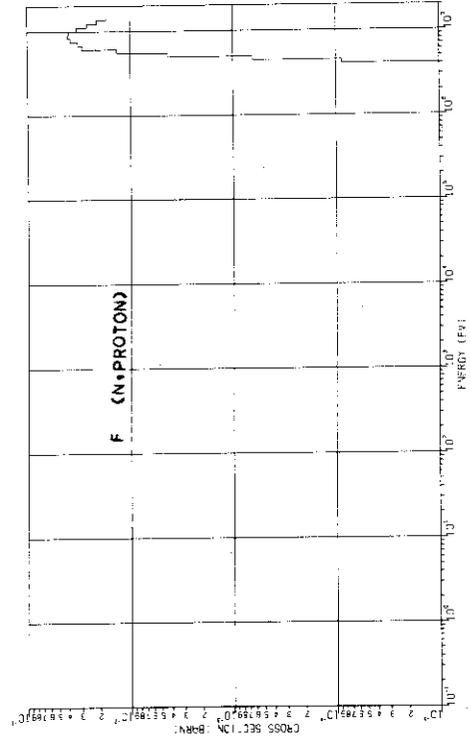
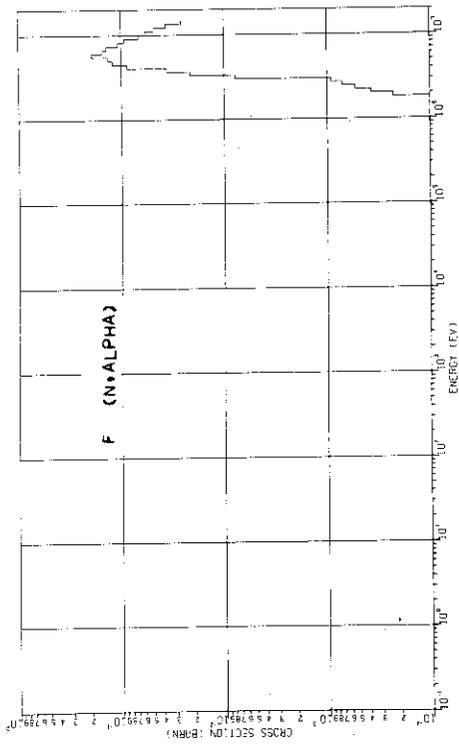


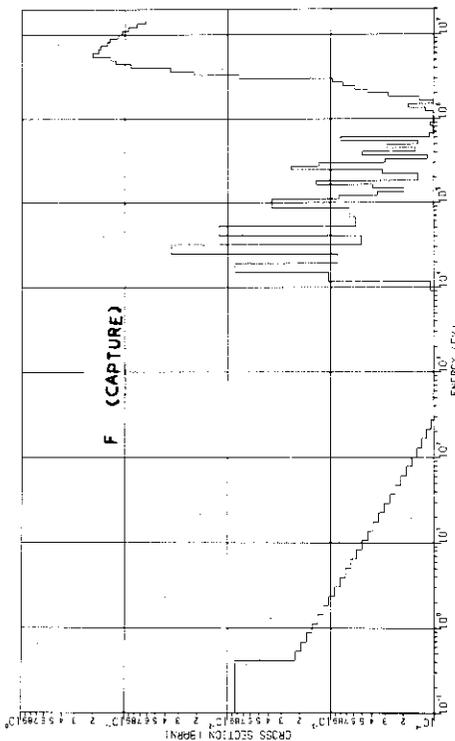
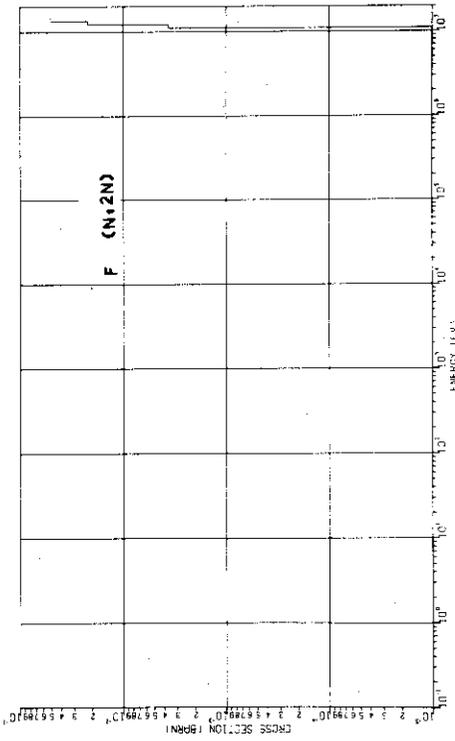
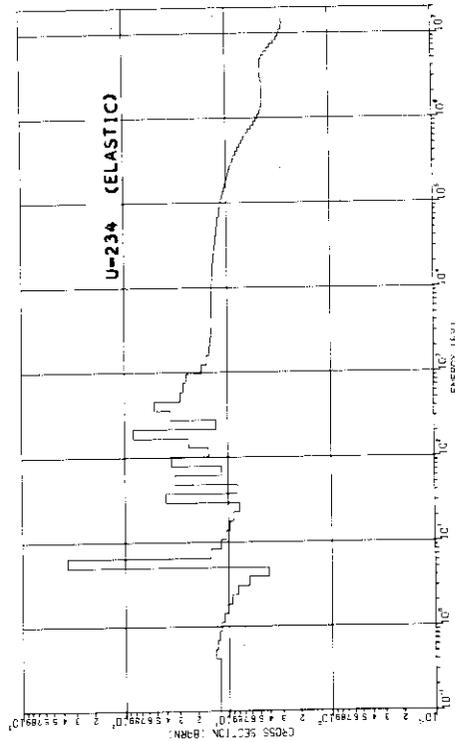
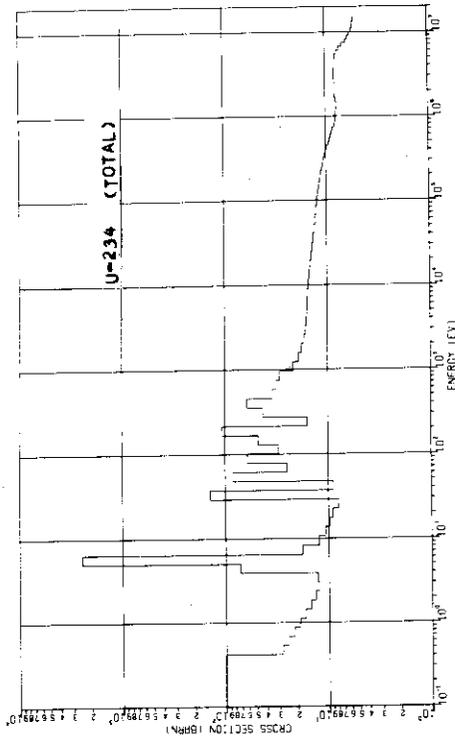


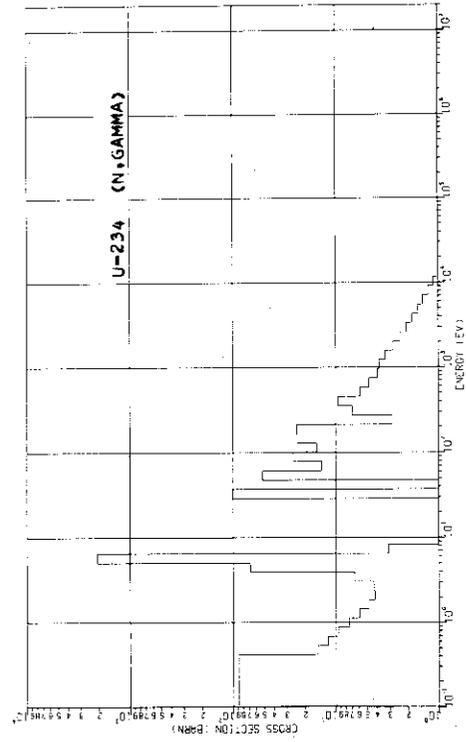
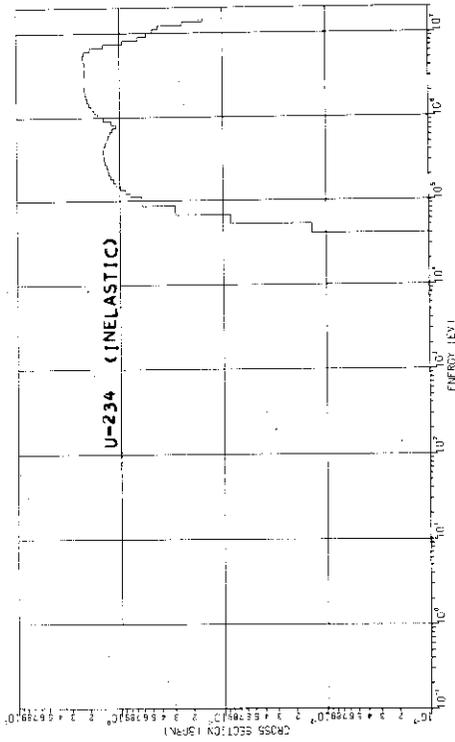
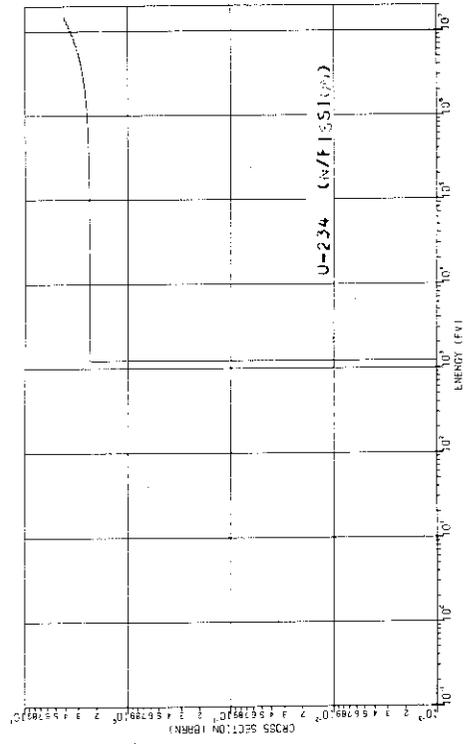
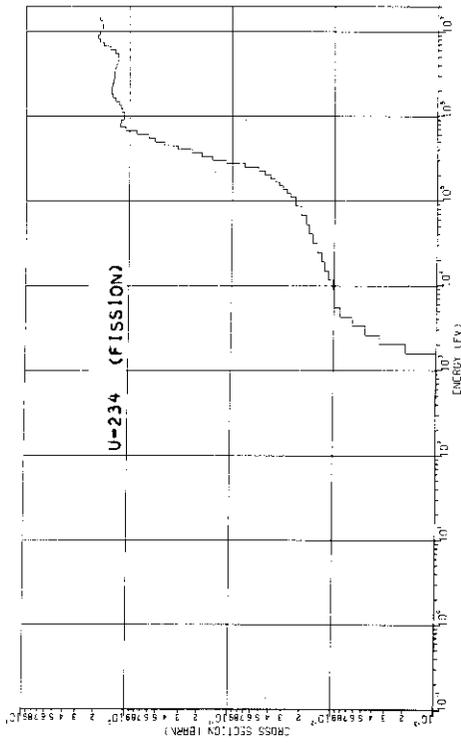


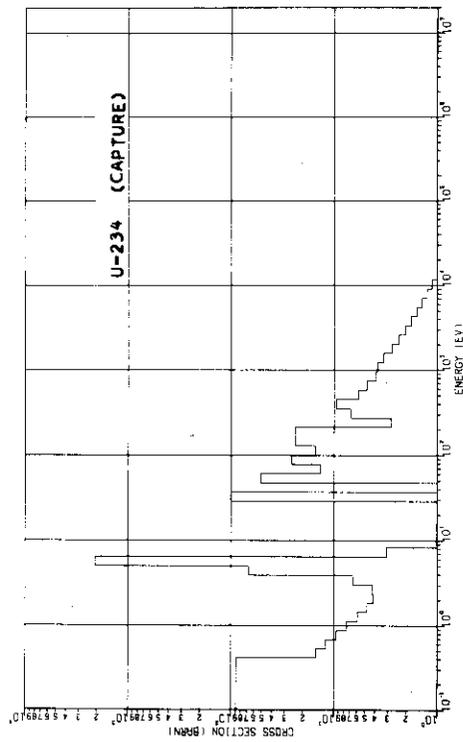
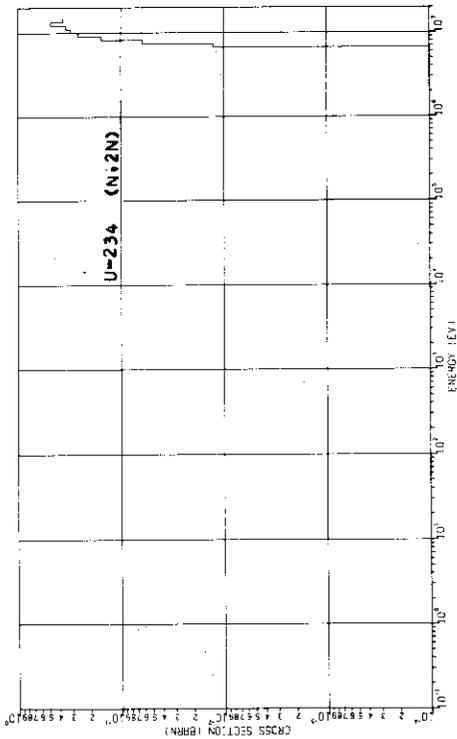
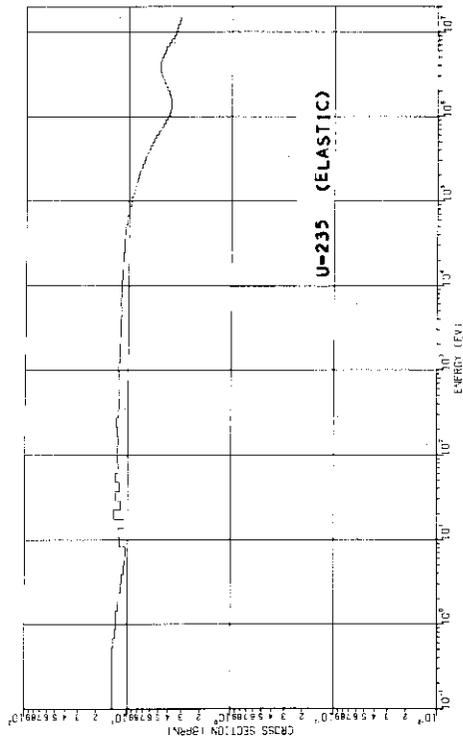
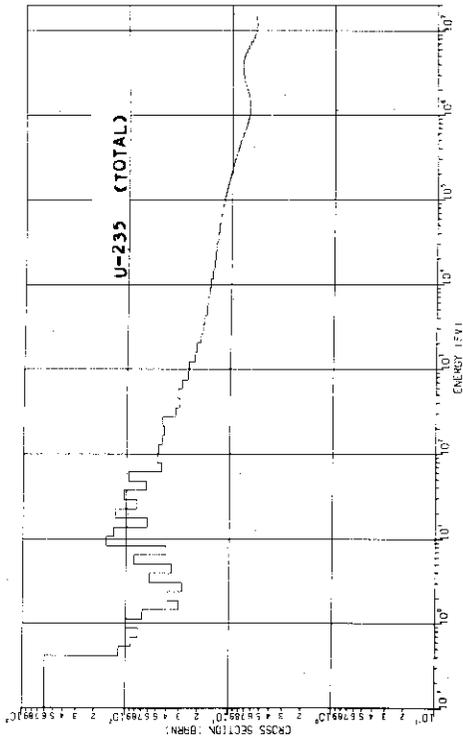


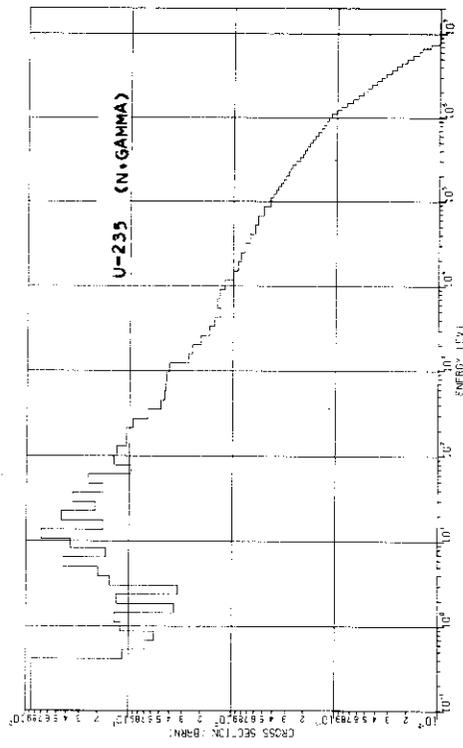
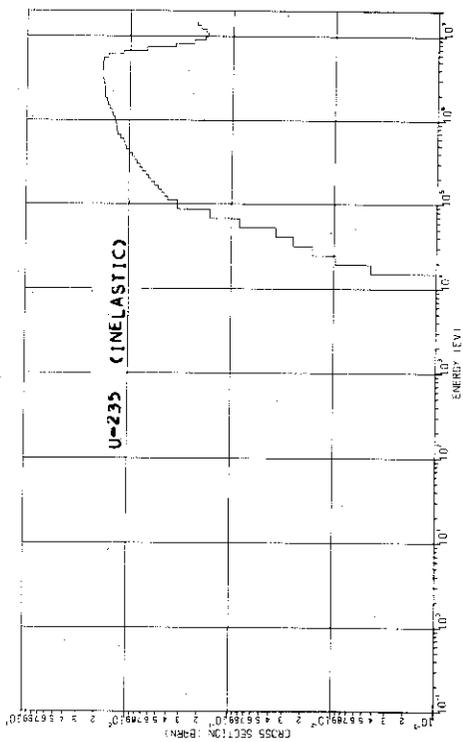
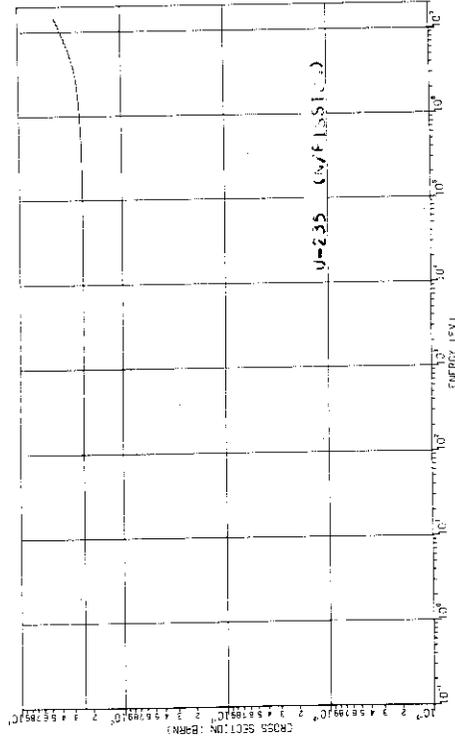
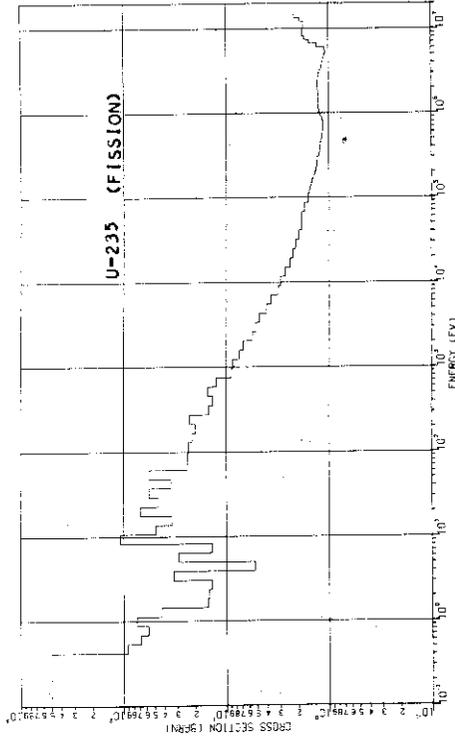


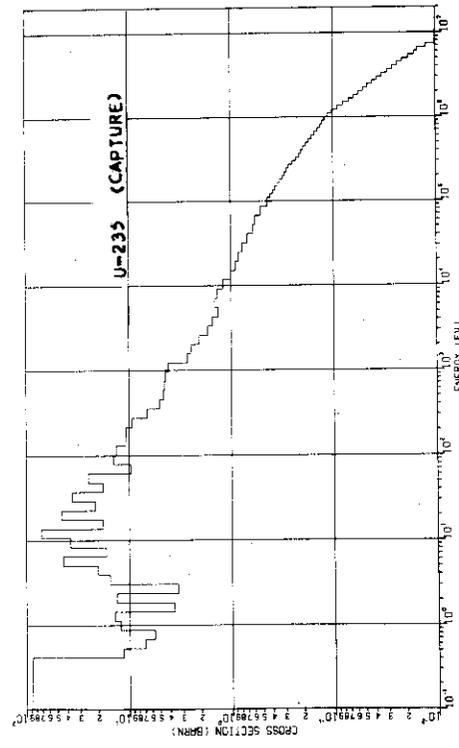
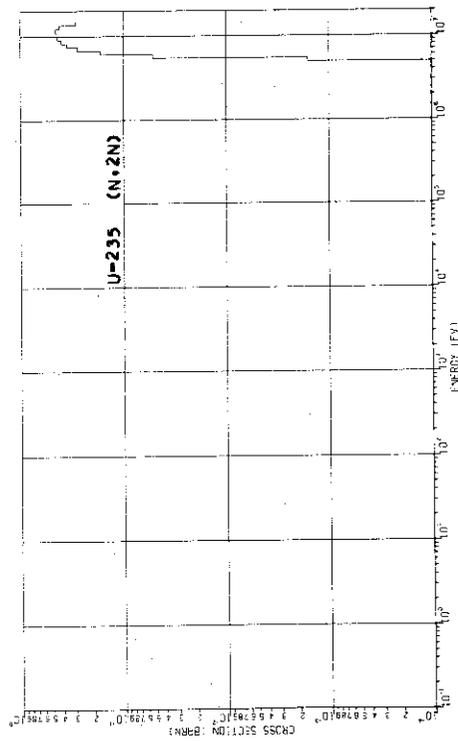
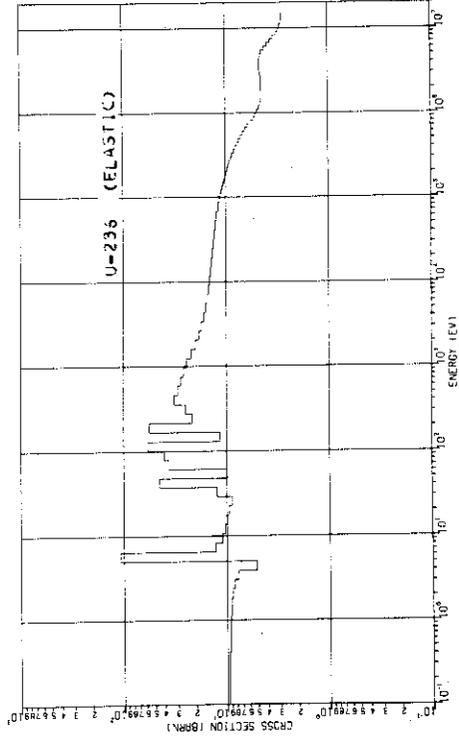
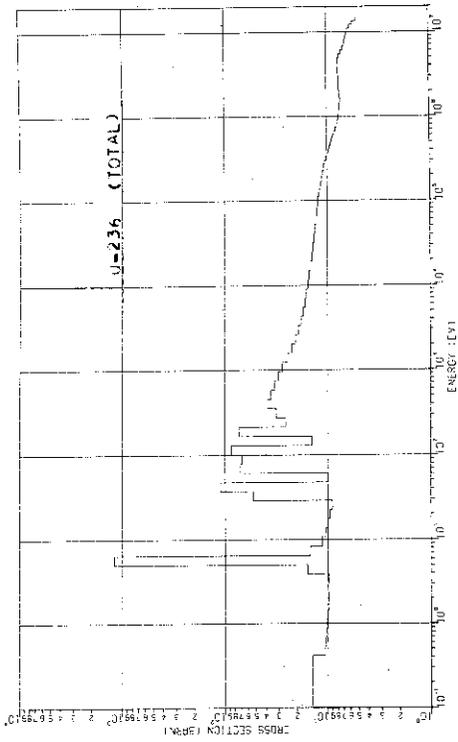


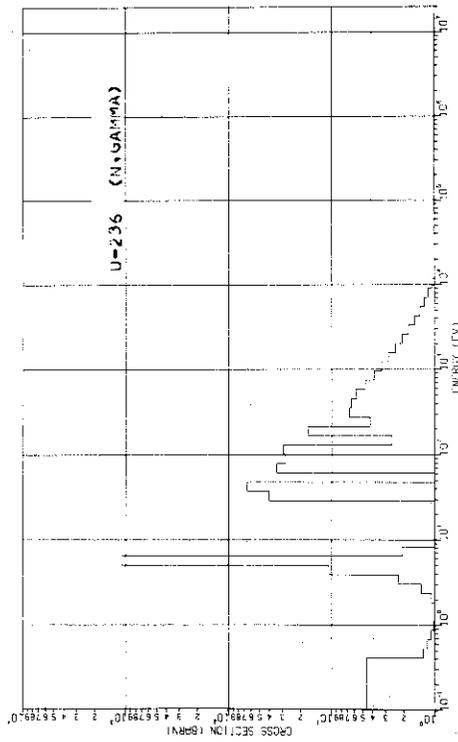
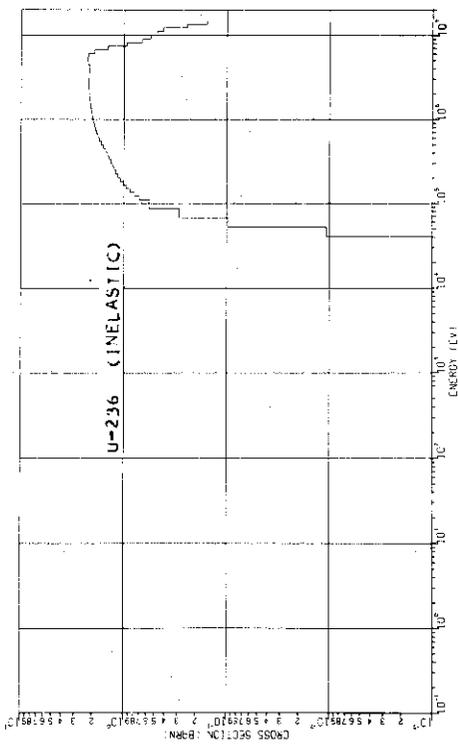
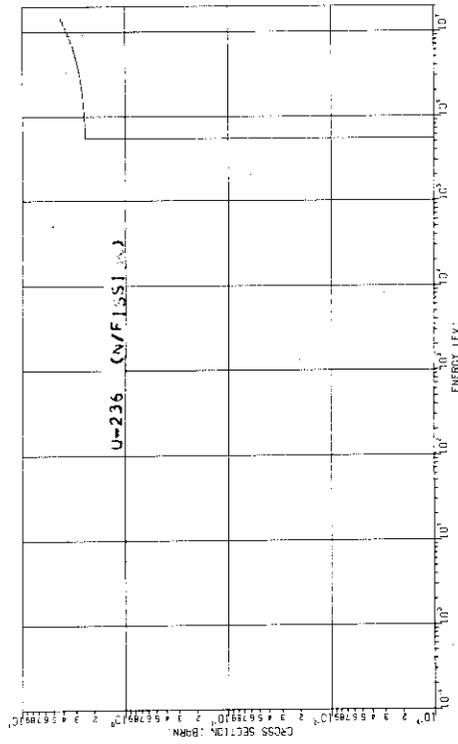
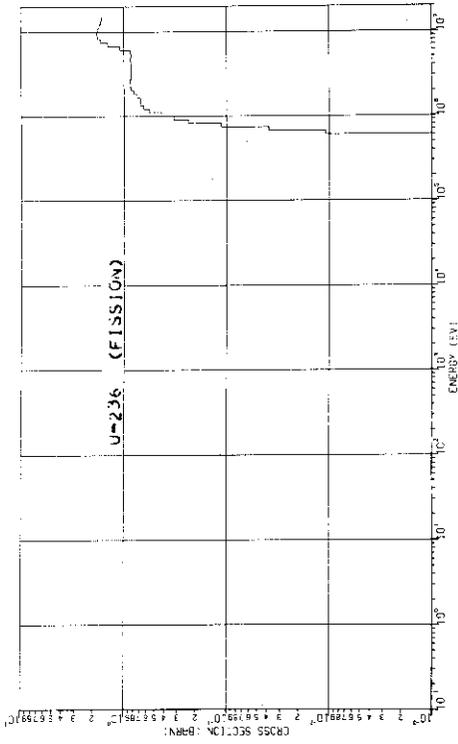


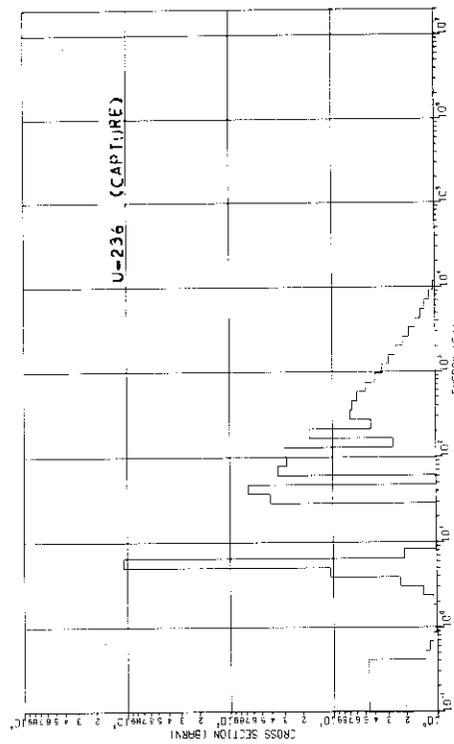
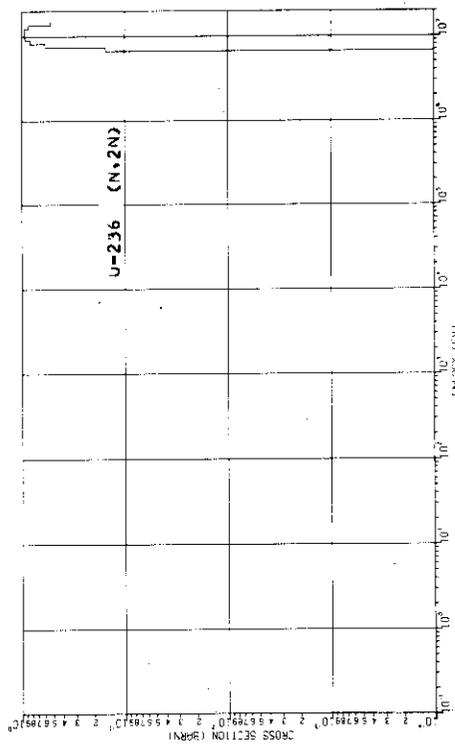
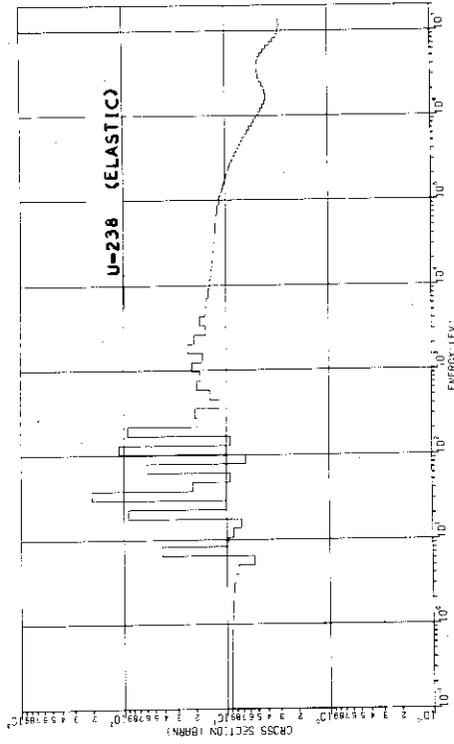
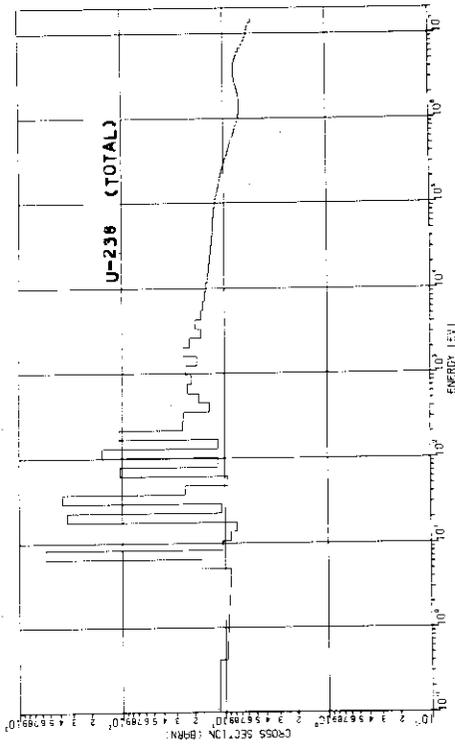


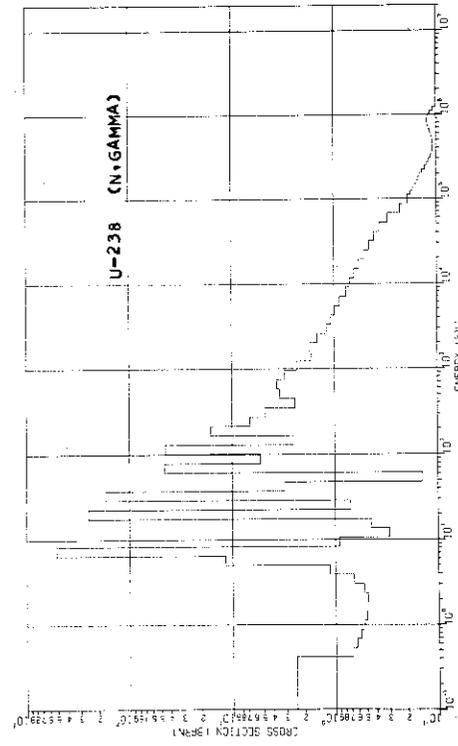
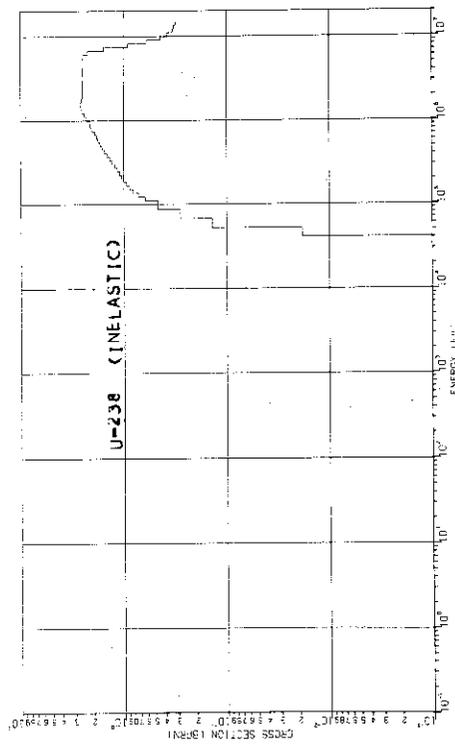
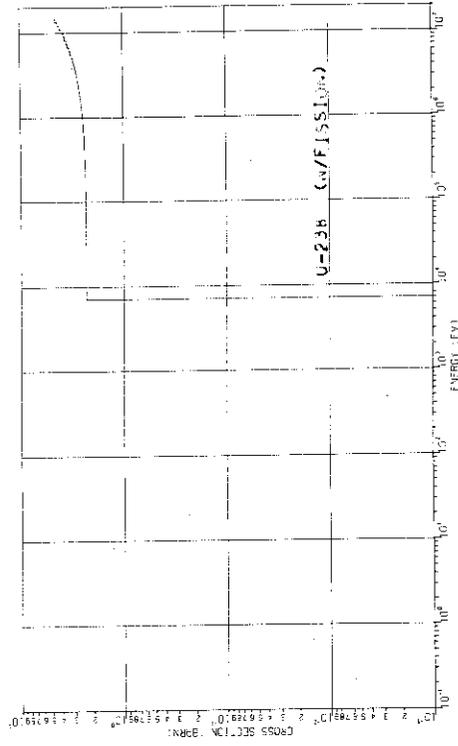
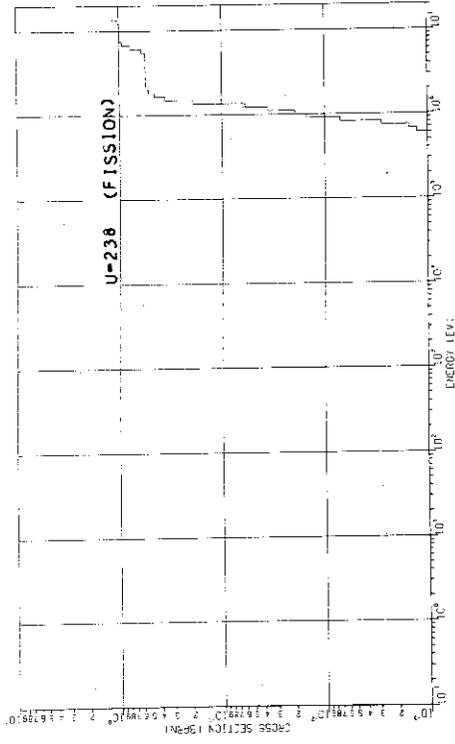


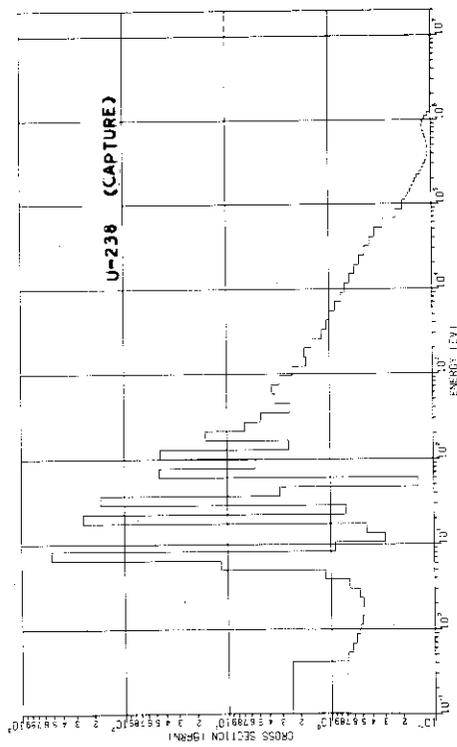
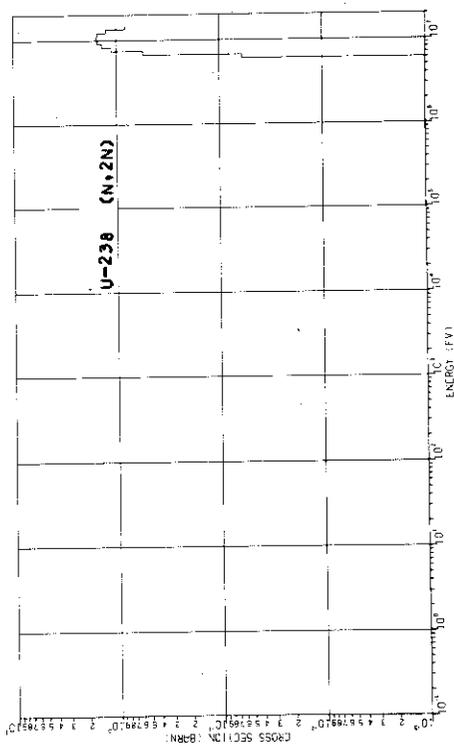
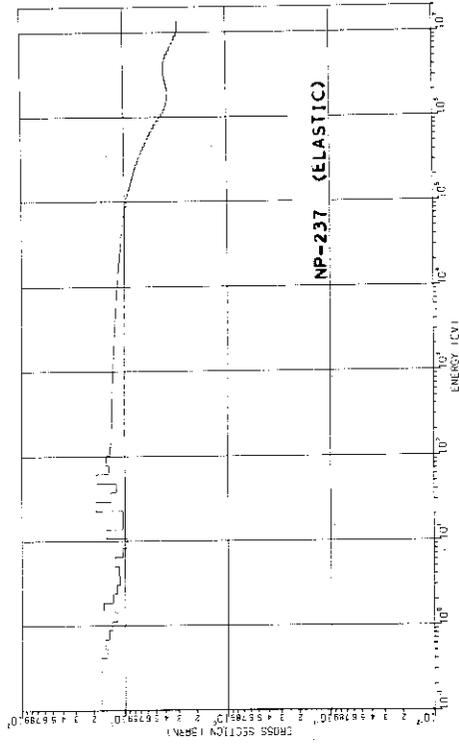
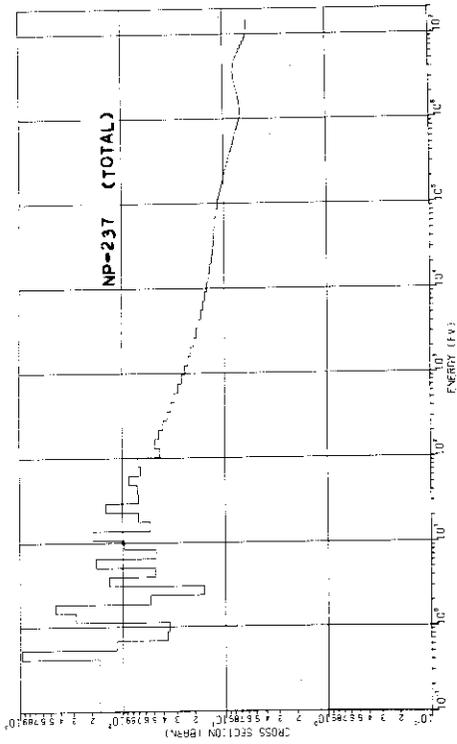


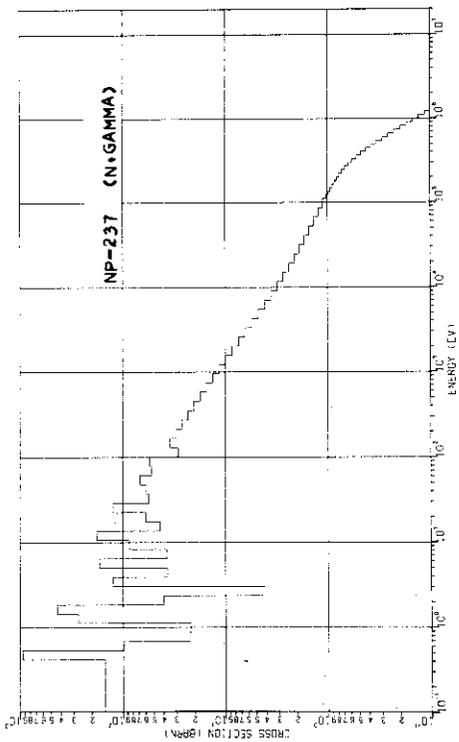
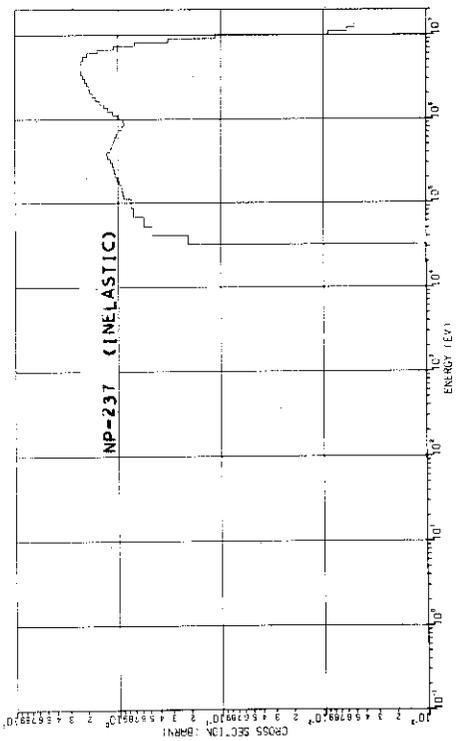
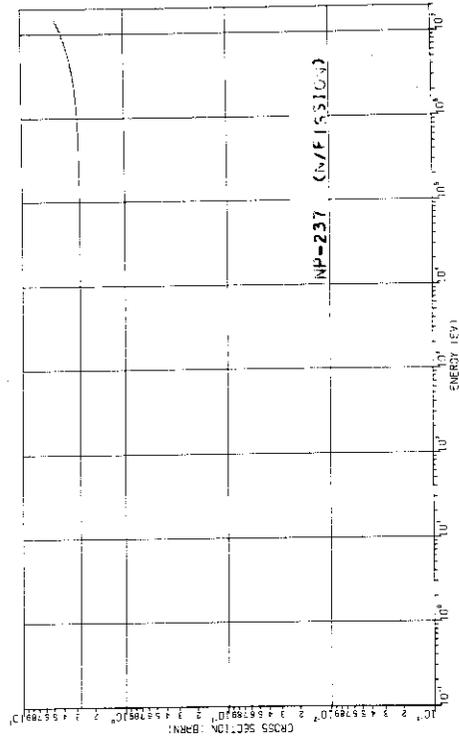
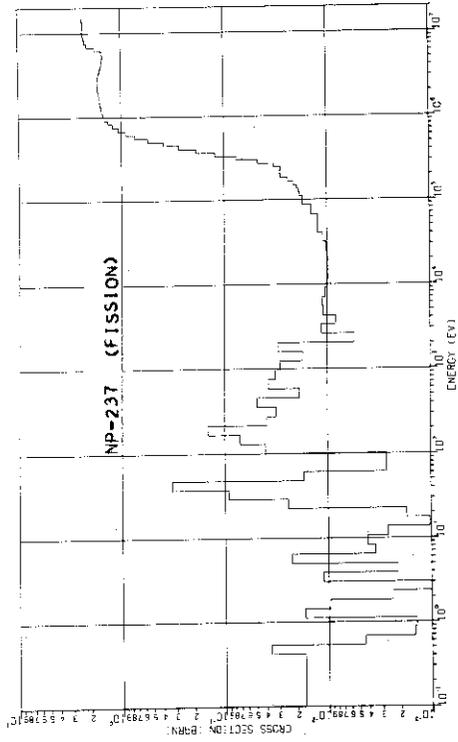


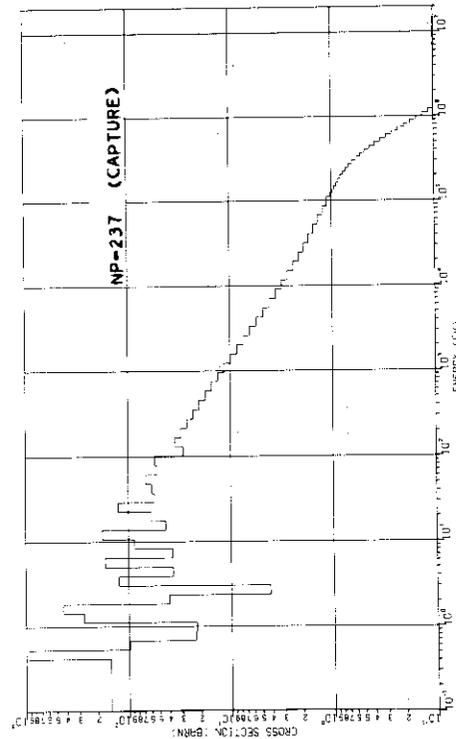
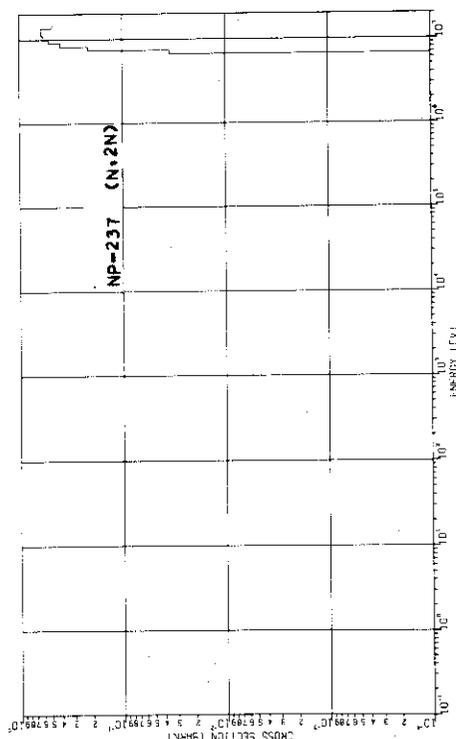
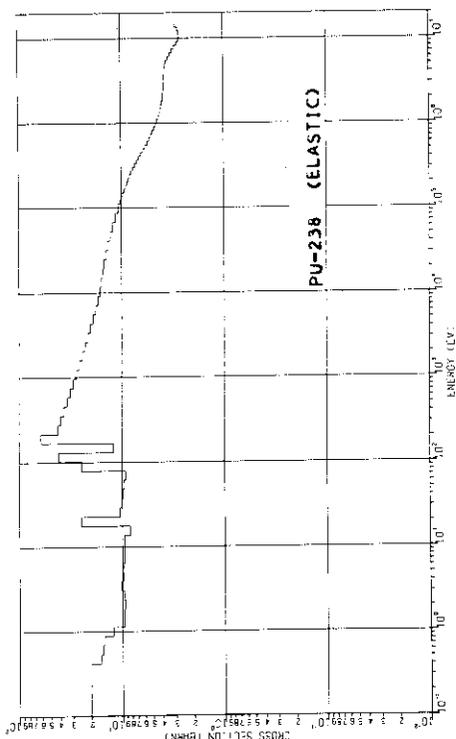
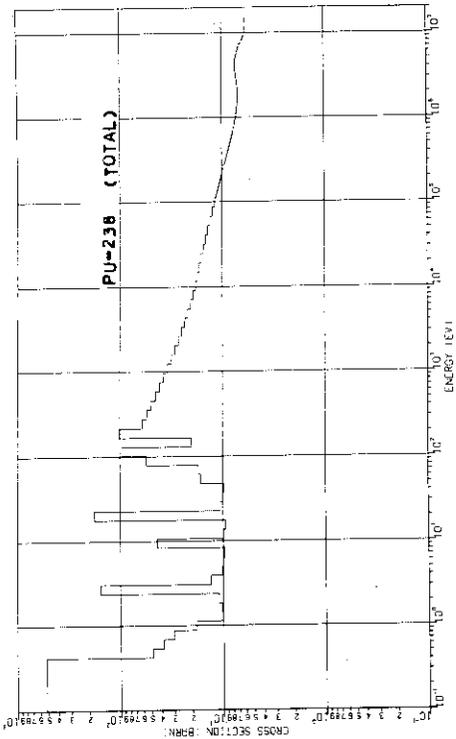


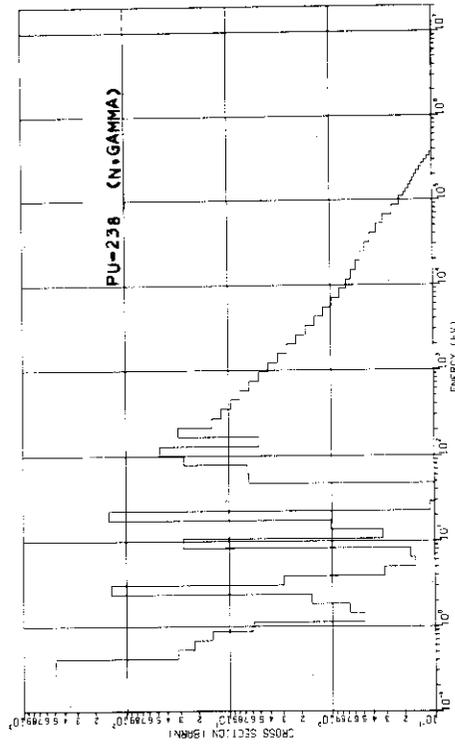
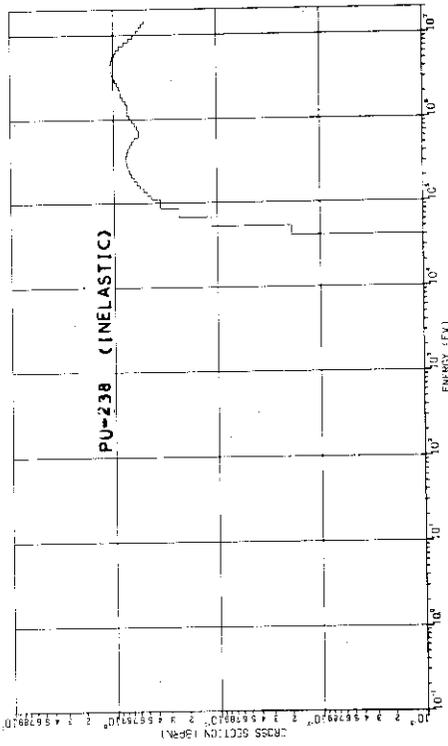
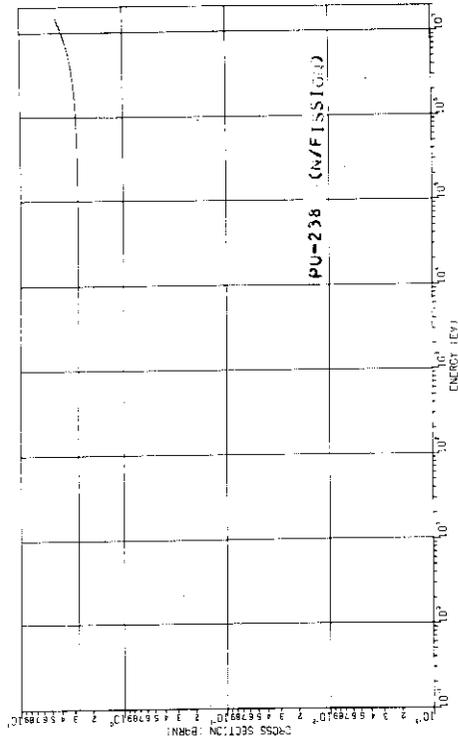
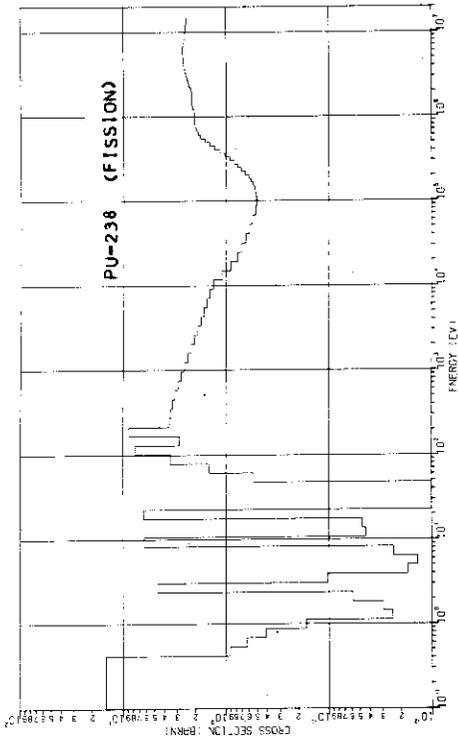


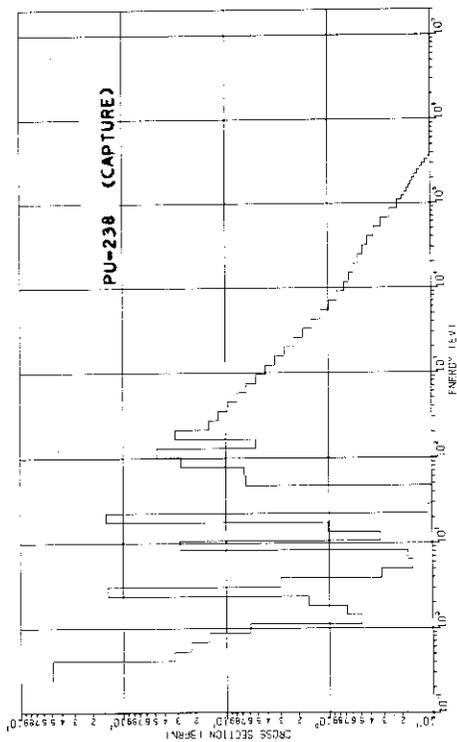
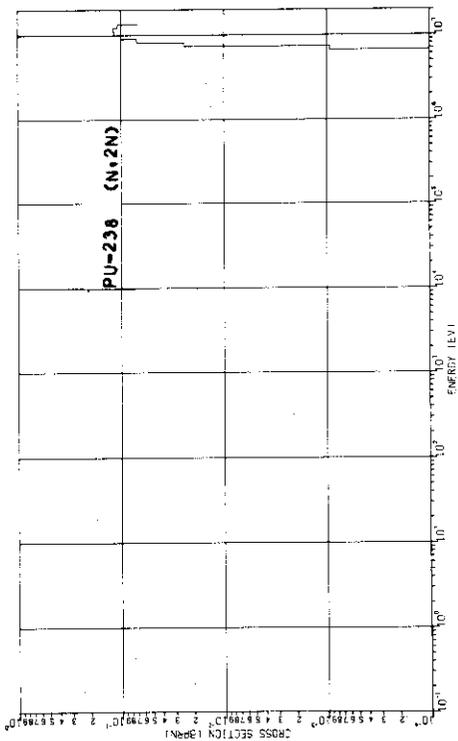
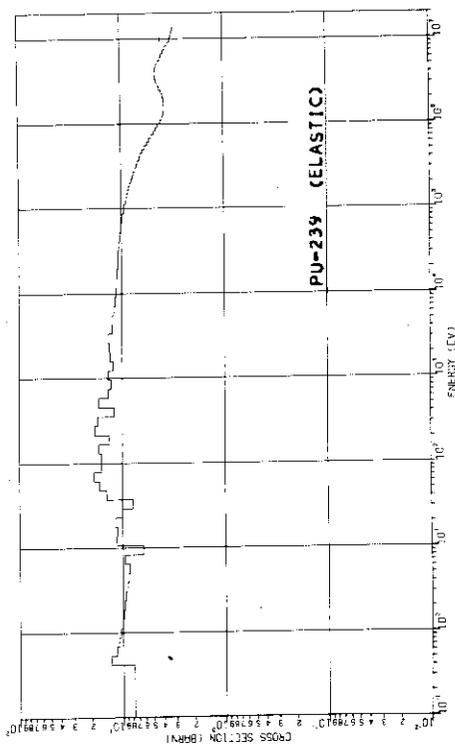
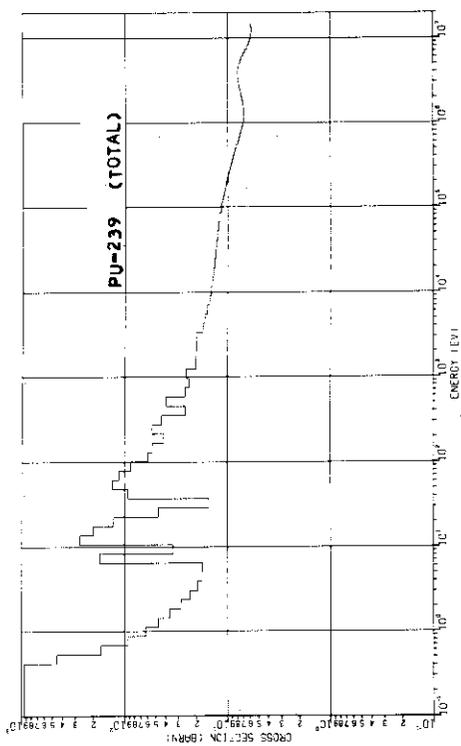


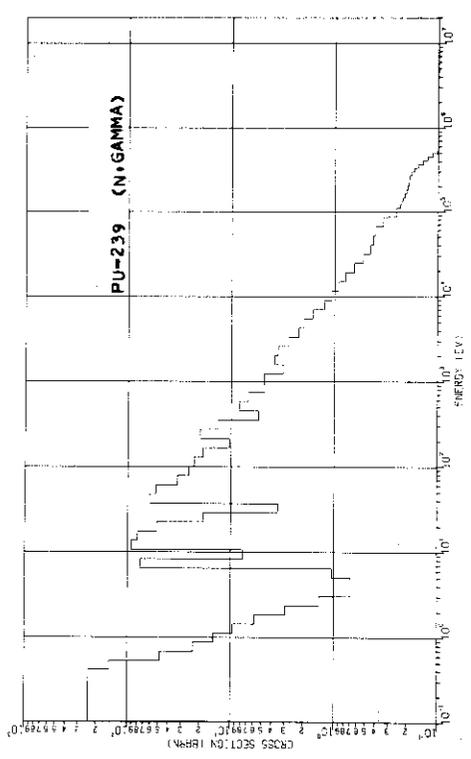
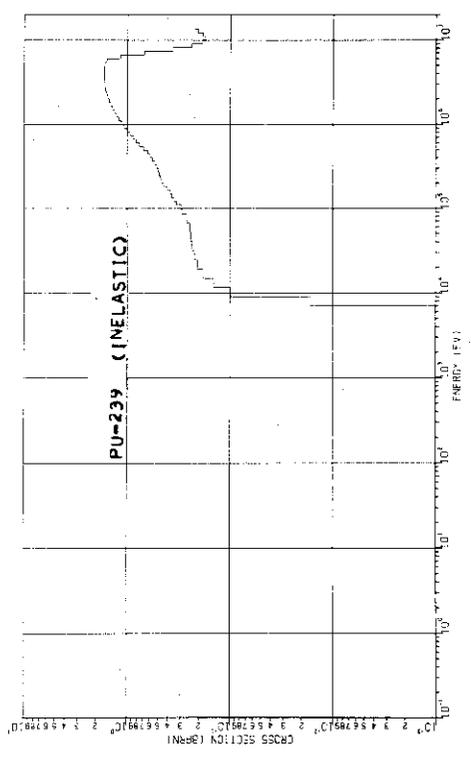
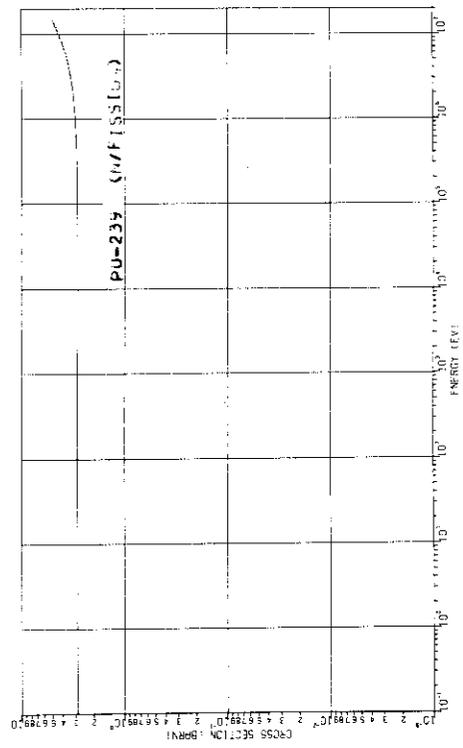
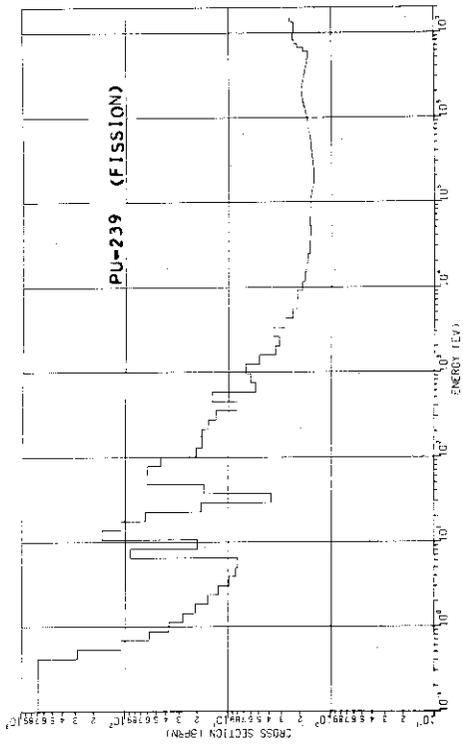


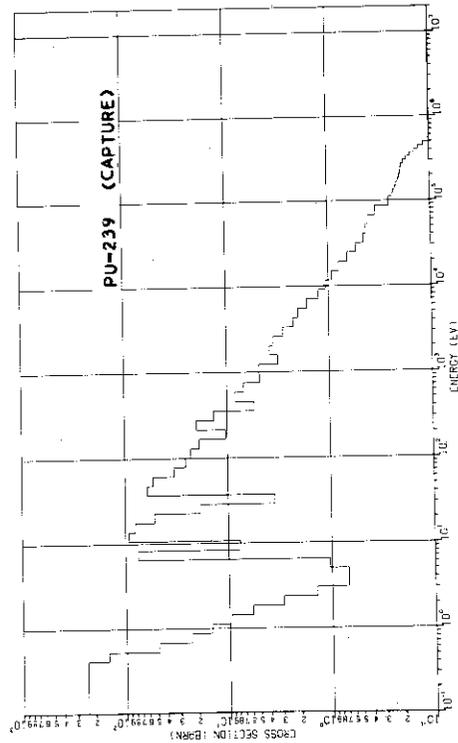
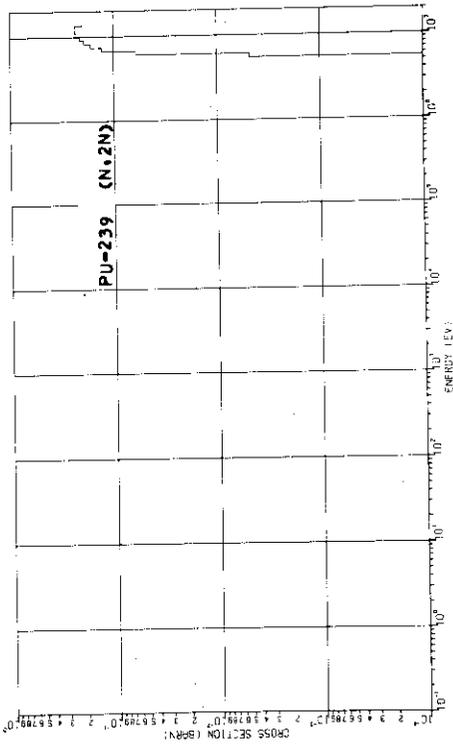
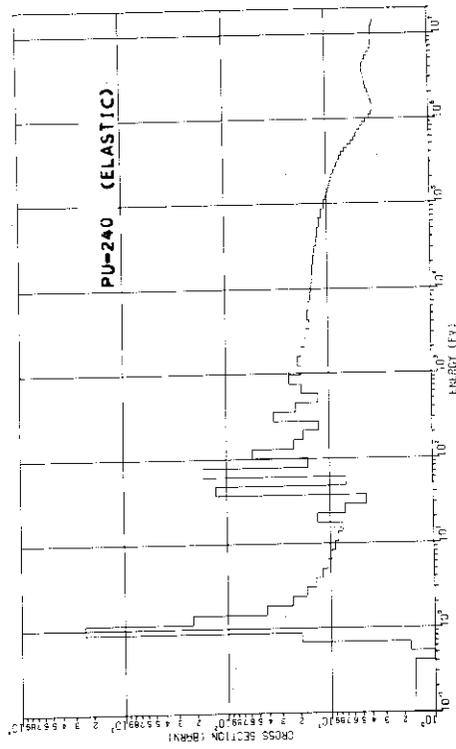
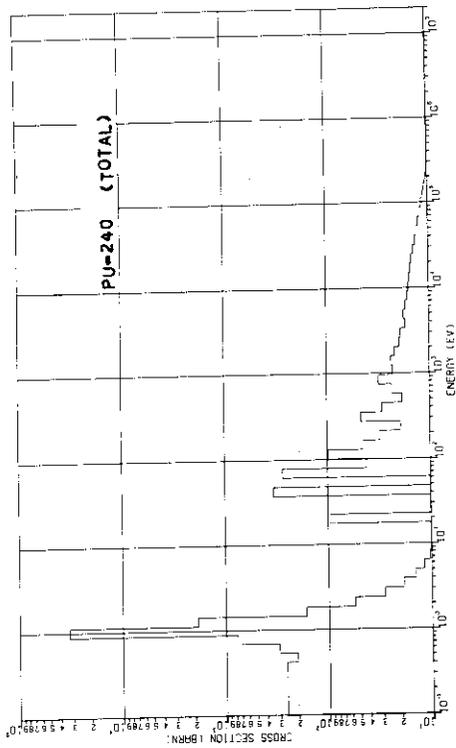


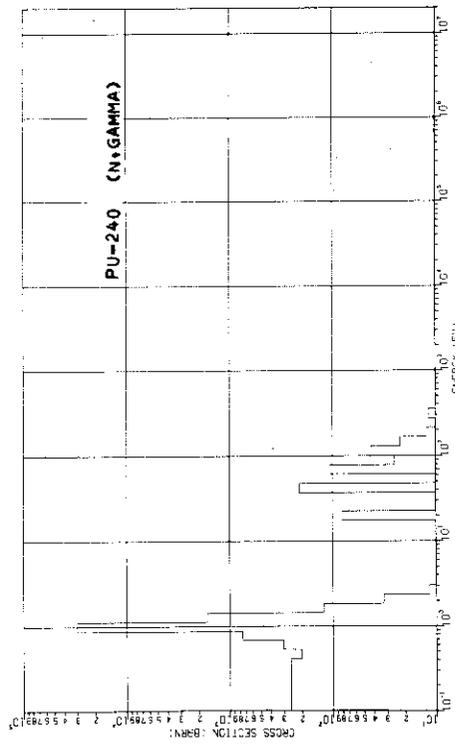
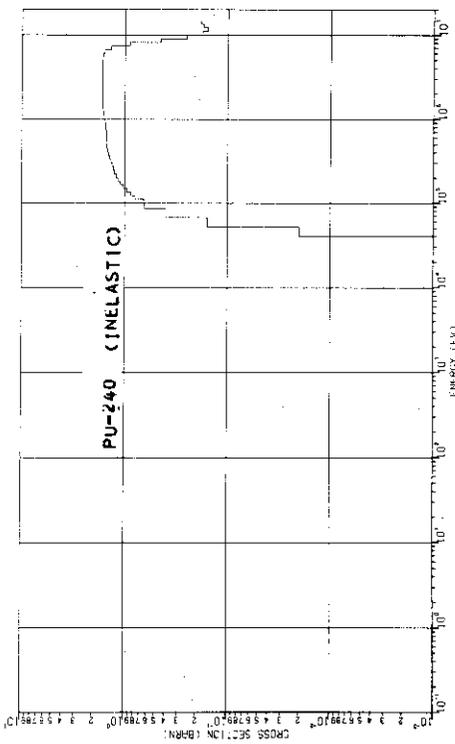
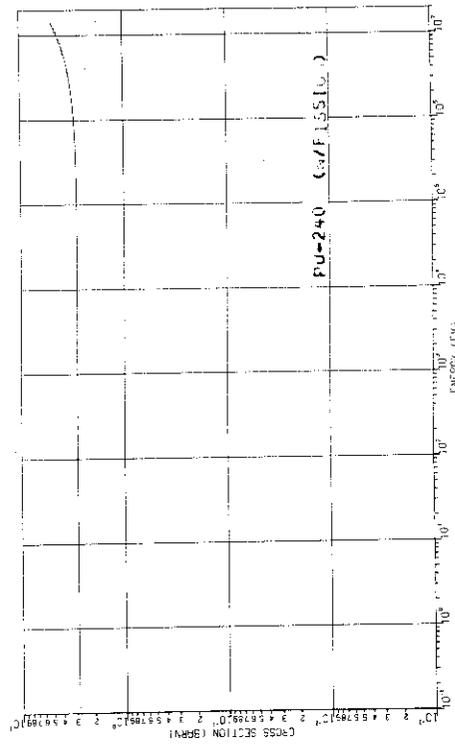
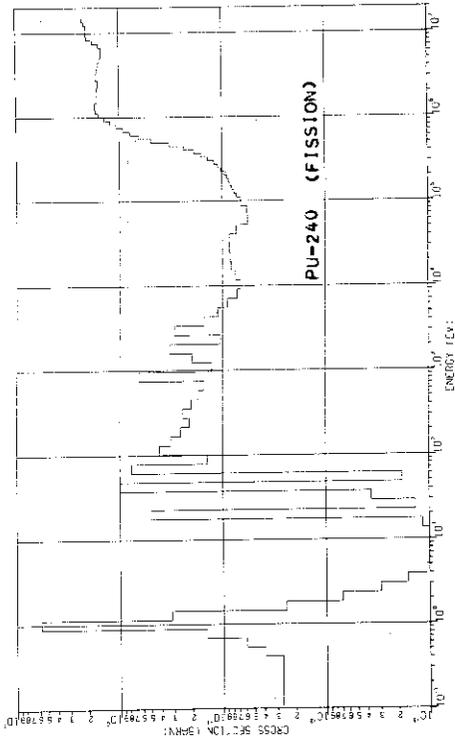


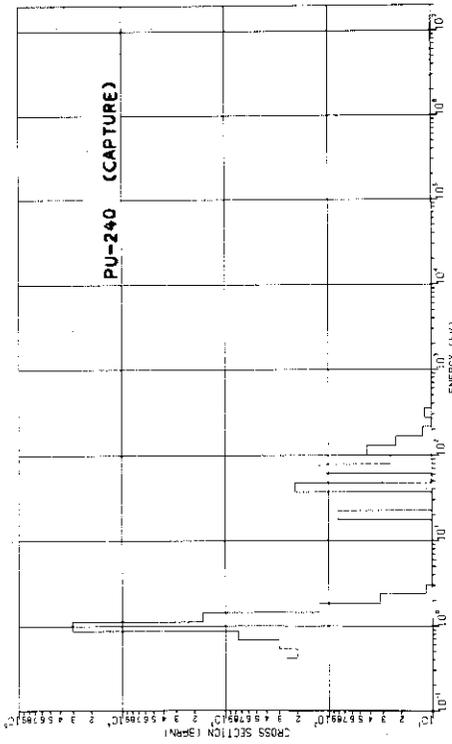
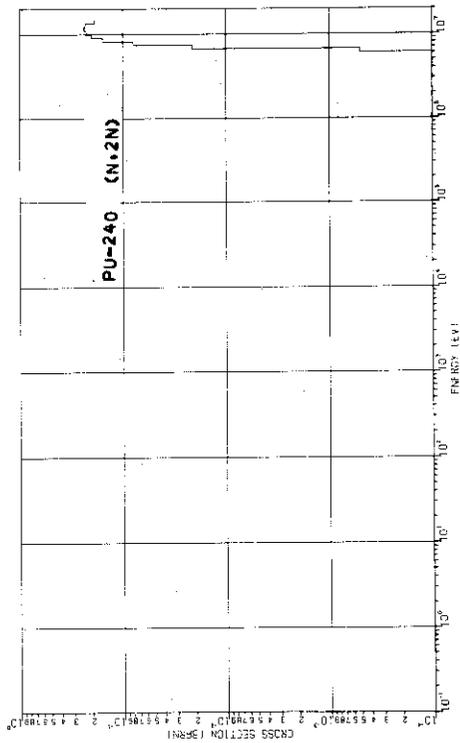
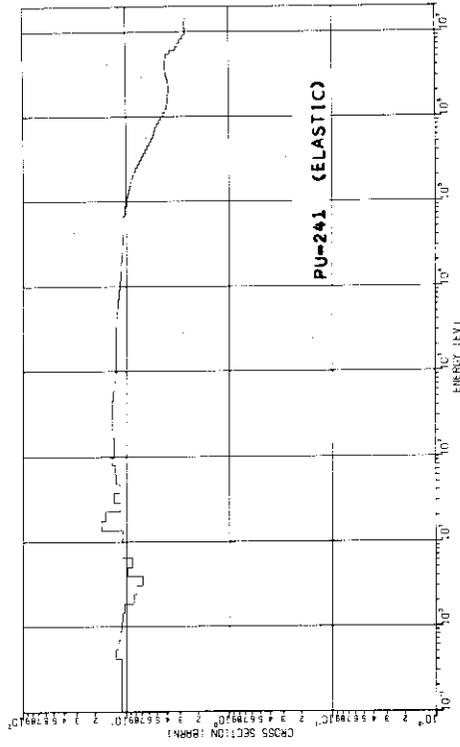
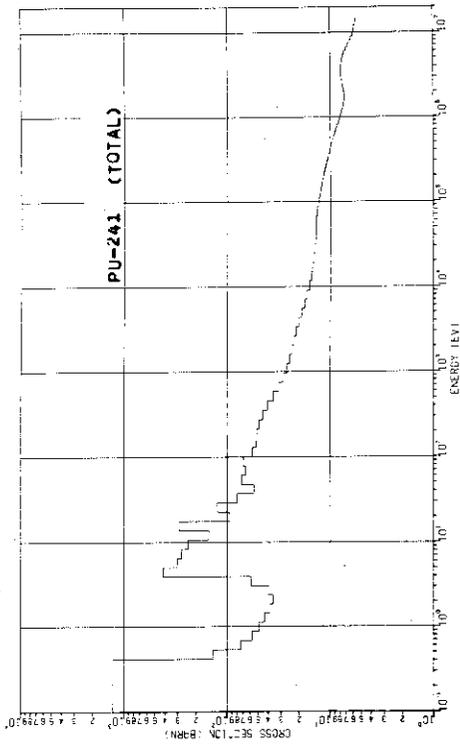


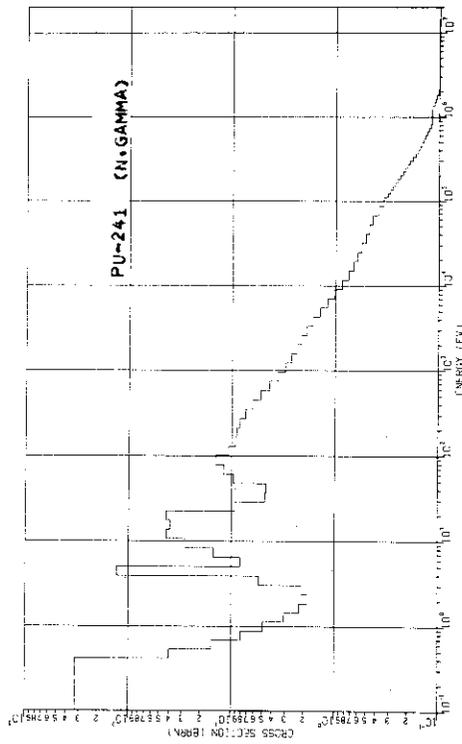
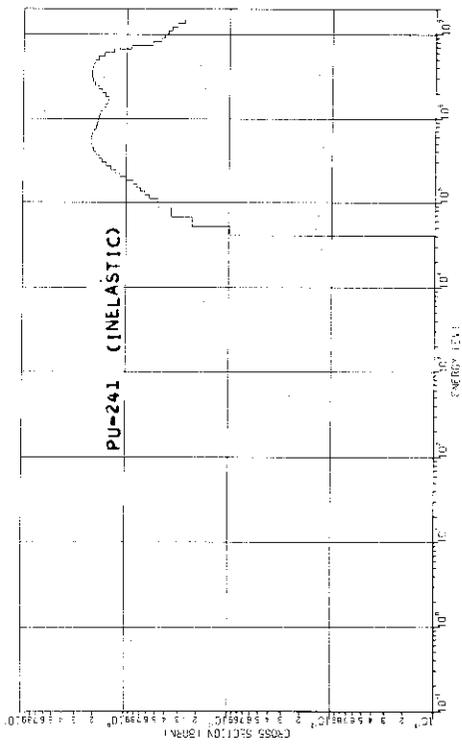
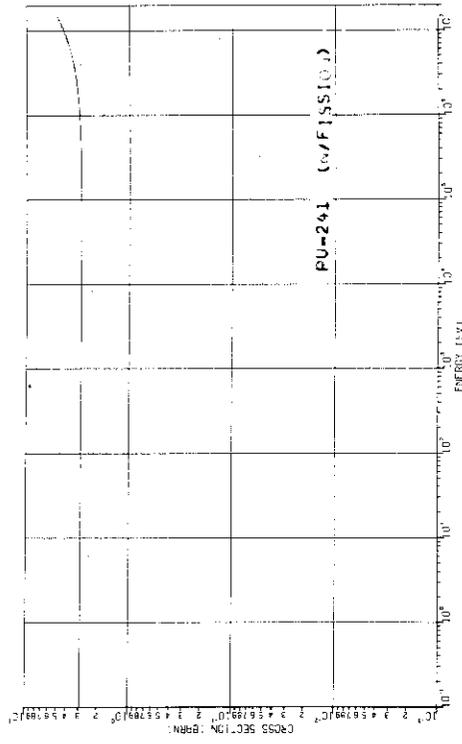
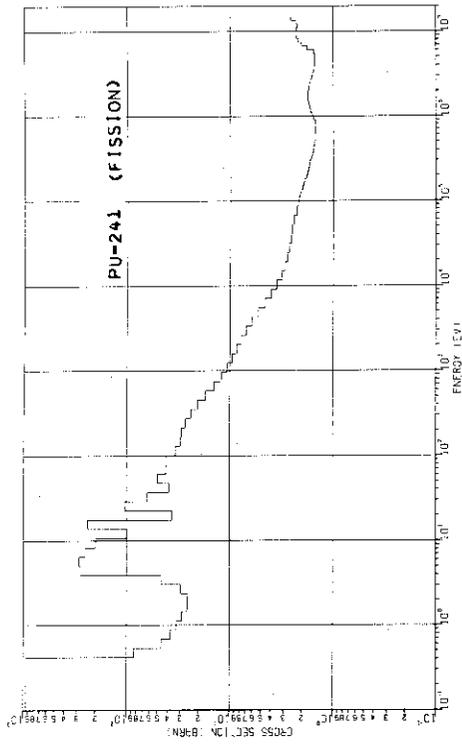


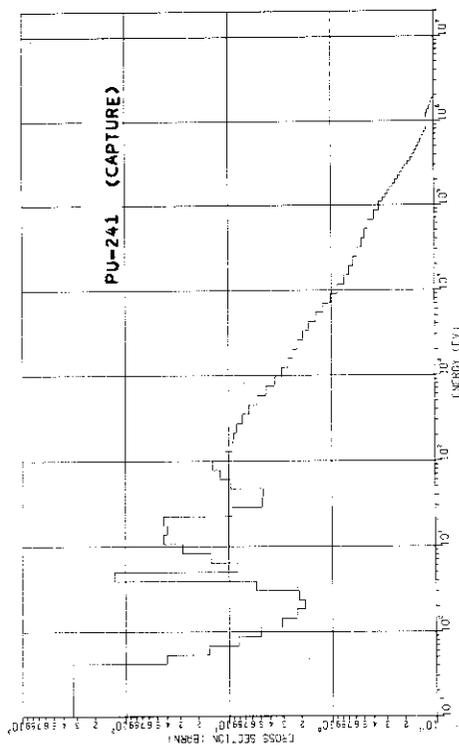
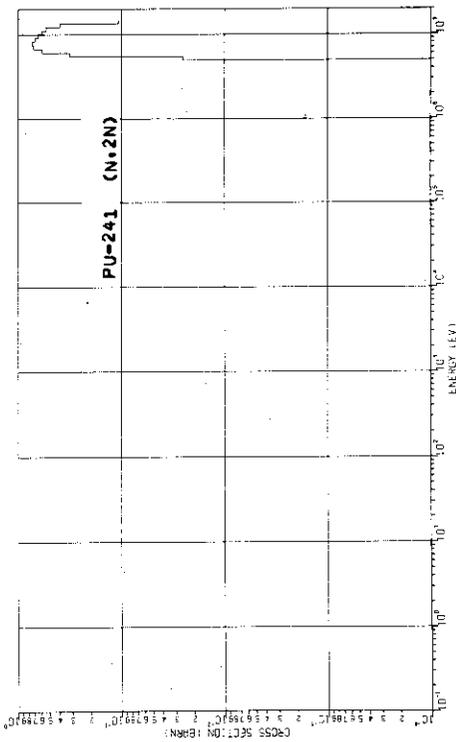
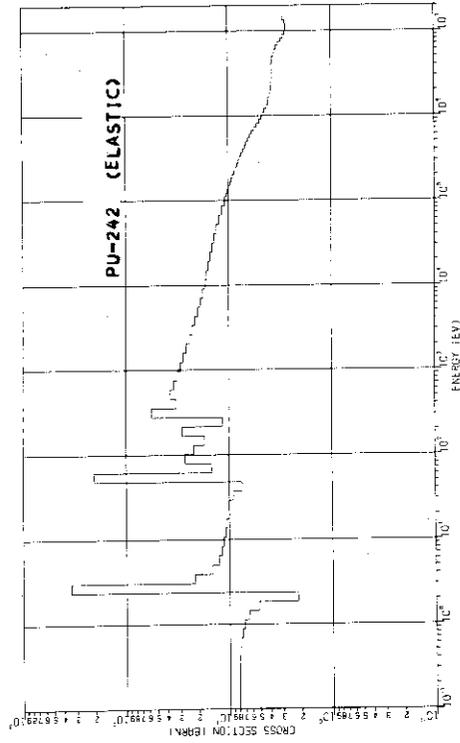
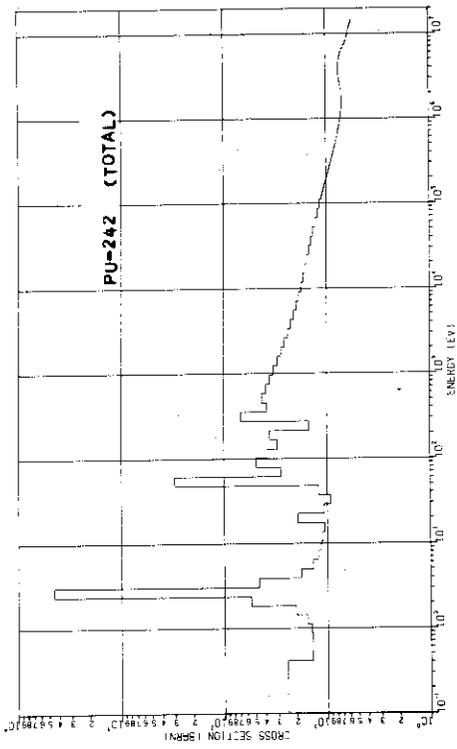


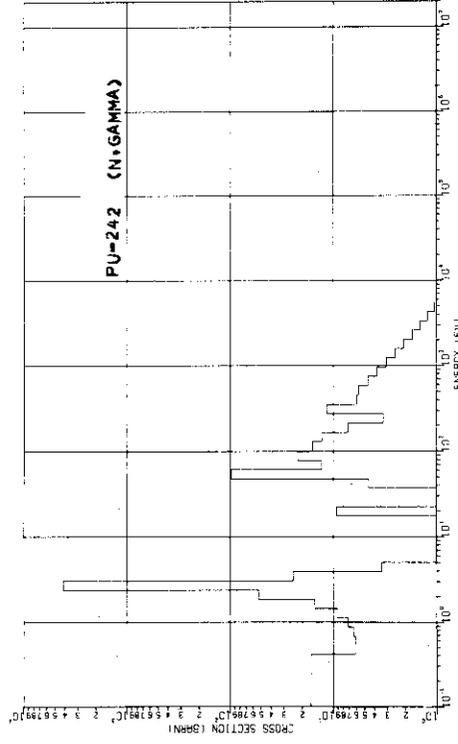
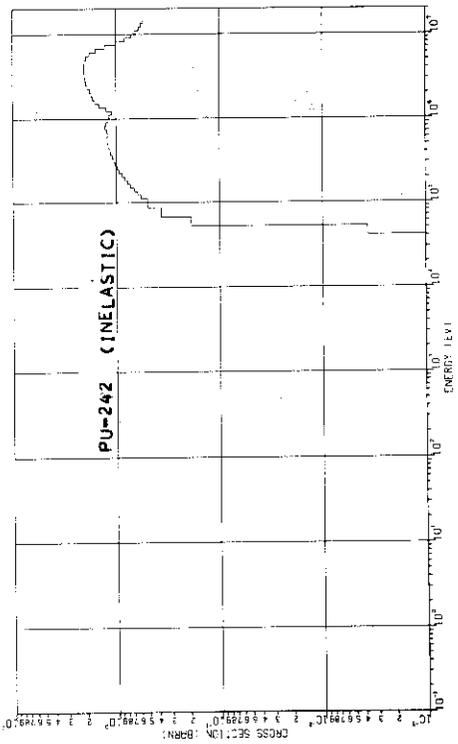
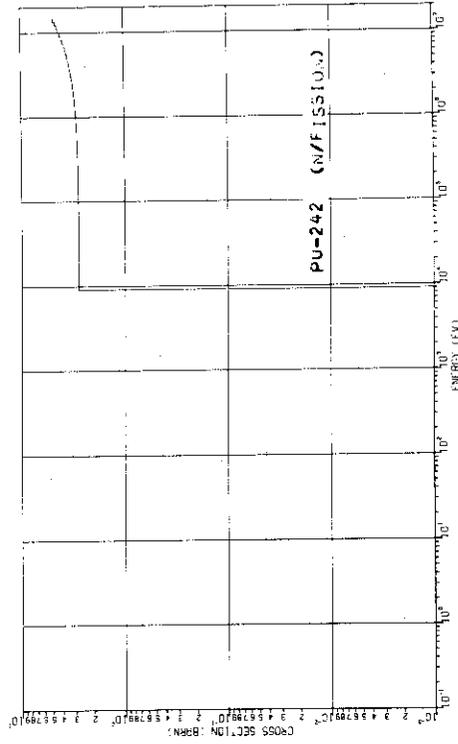
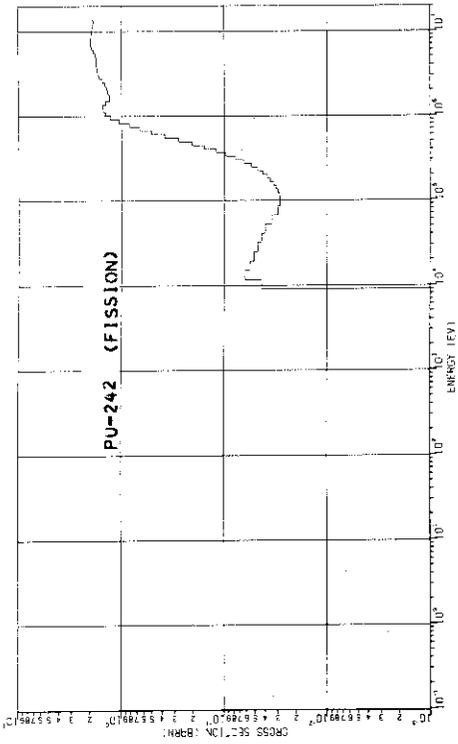


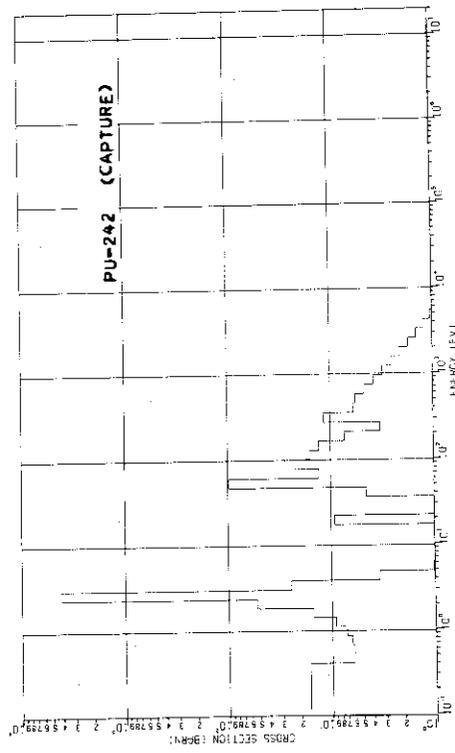
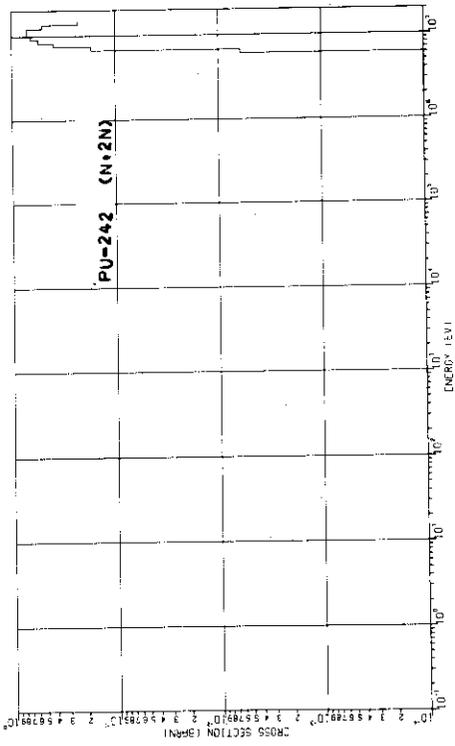
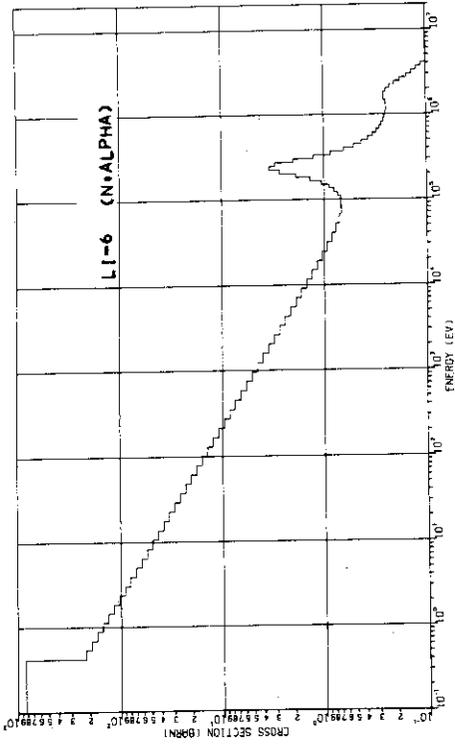


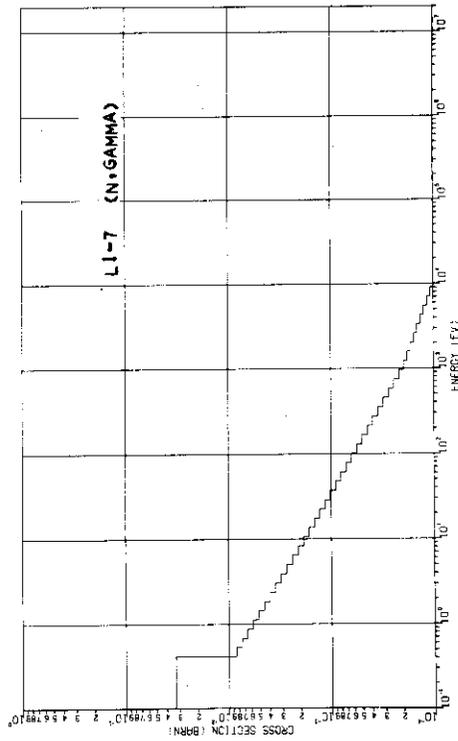
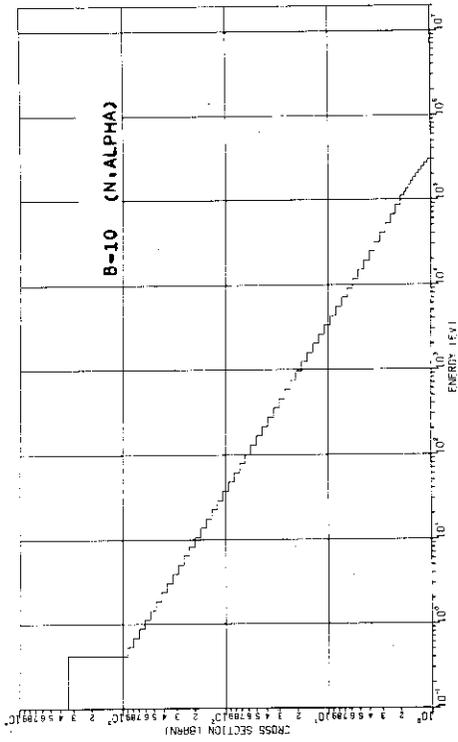


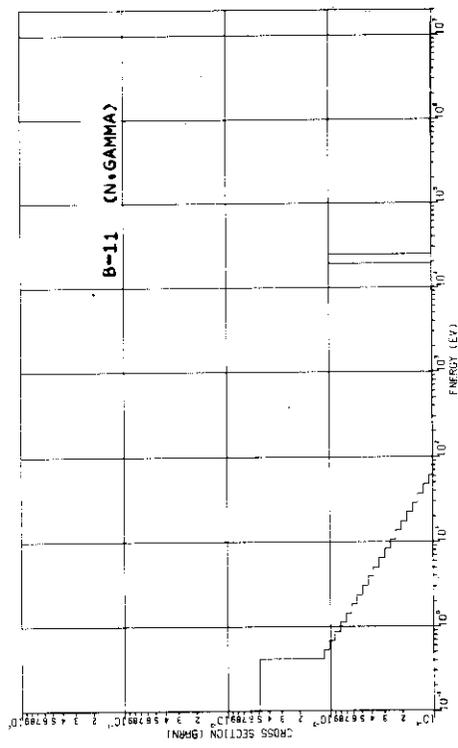
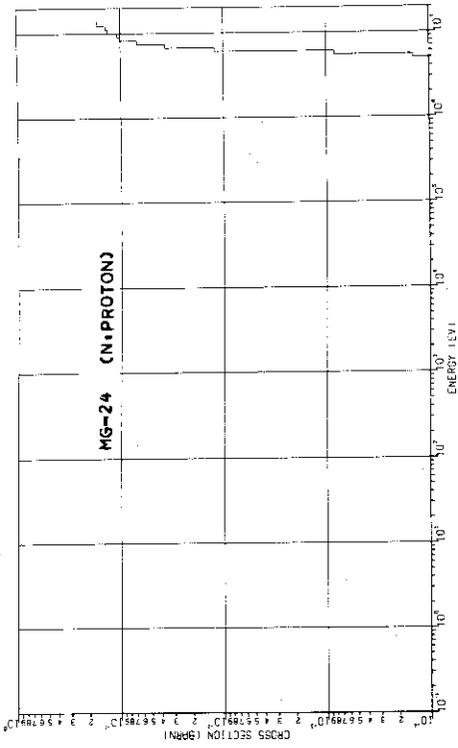


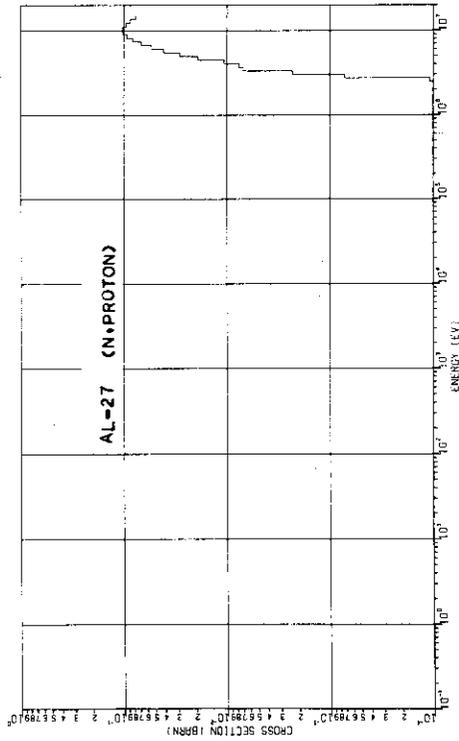
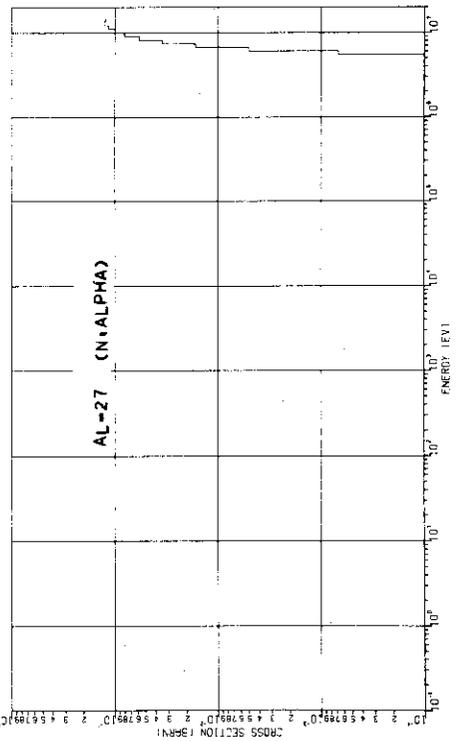
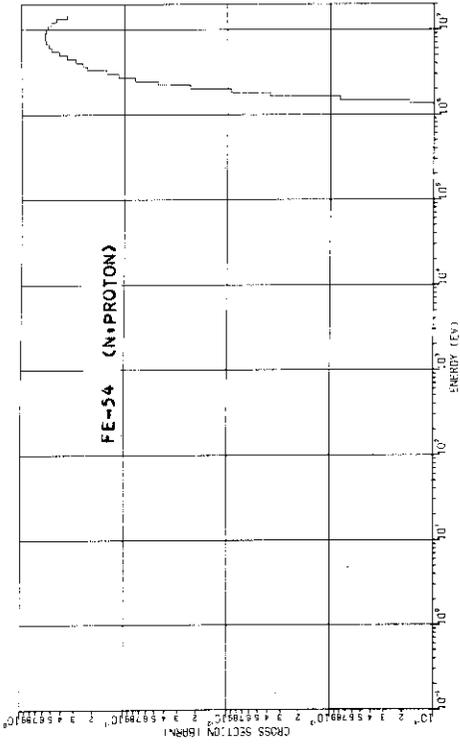


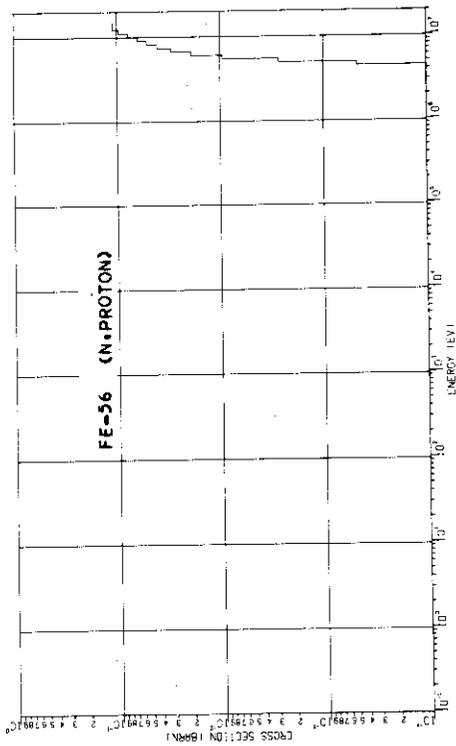
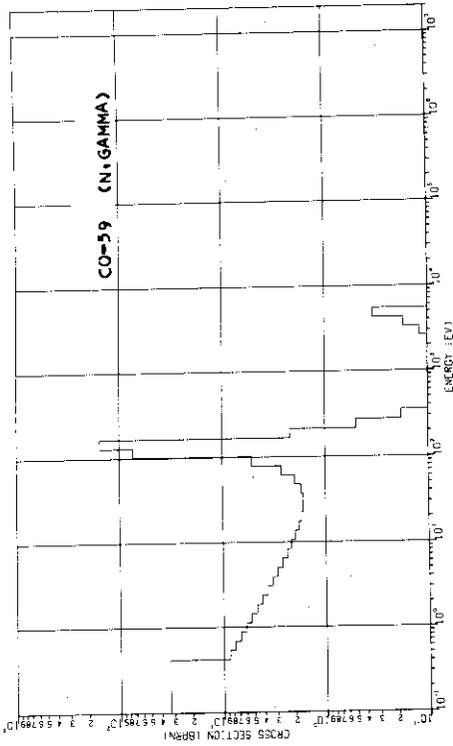


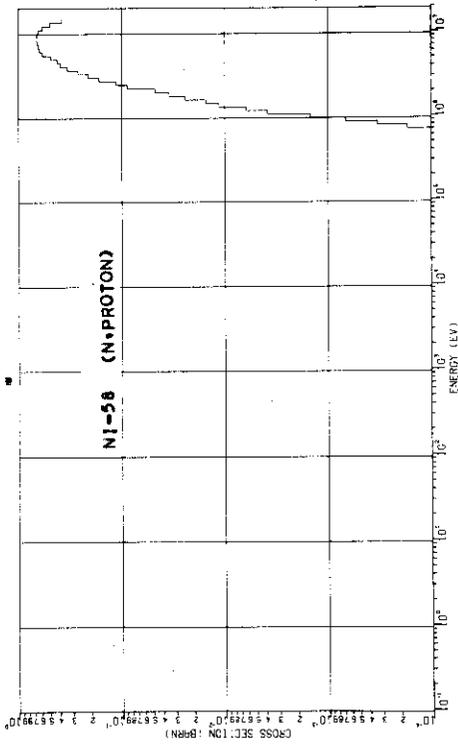
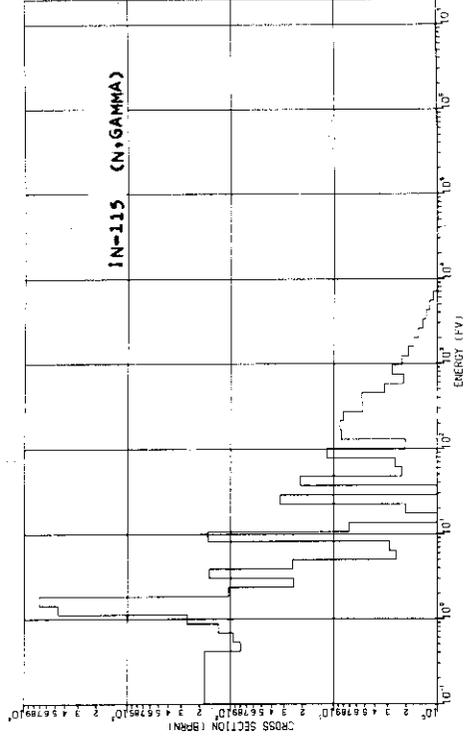
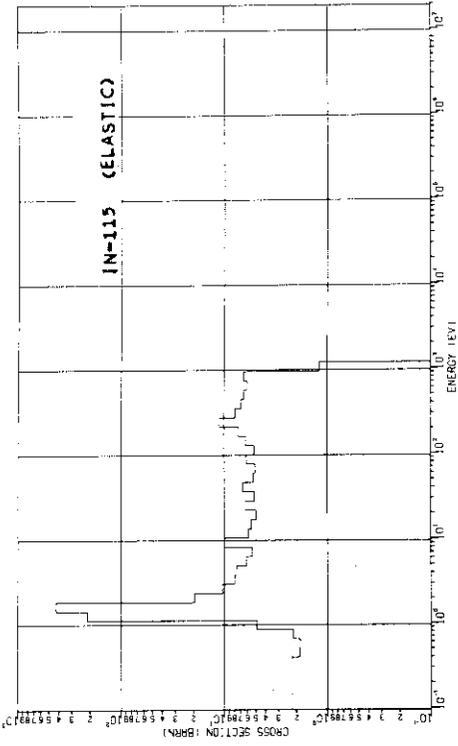


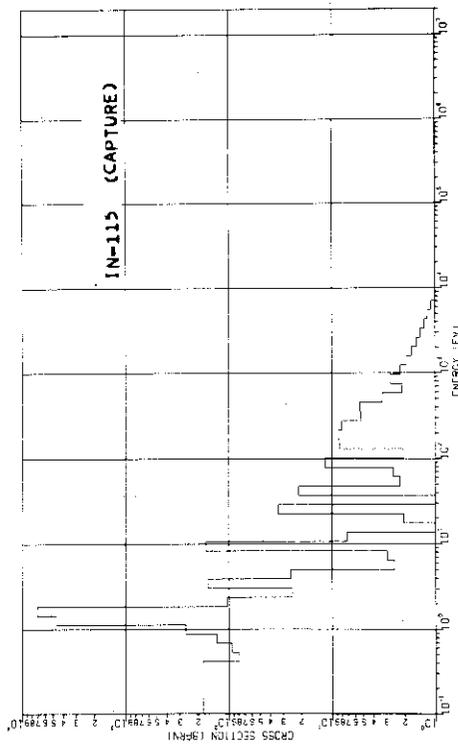
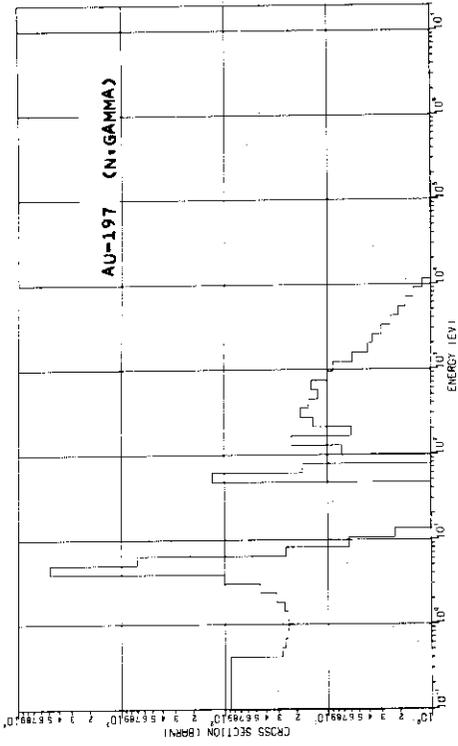












付録 E 巨視的実効断面積グラフ集

4.2 の手法で作成した中性子100群・ガンマ線20群・ P_5 近似の遮蔽材に関する巨視的実効断面積(全断面積のみ)を編集したもので、材料の種類および配列順序はTable 3.2 に従った。

