

JAERI-M
7915

感度解析による核融合実験炉
核計算精度の検討

1978年10月

山内 通則*・飯田 浩正

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.

感度解析による核融合実験炉核計算精度の検討

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

山内 通則*・飯田 浩正

(1978年9月19日受理)

1次摂動理論に基づく感度解析を導入して核融合実験炉第1次予備設計における核計算結果の一部を評価した。解析の対象としたのはトーラス外側超電導コイルの ^{58}Ni と ^{54}Fe の(n, p)反応率, トーラス内側超電導コイルの銅の変位損傷, 及び外側ブランケットにおけるトリチウム増殖比である。その結果(n, p)反応率, 銅の変位損傷は構造材中最も多く使用されているFeに, トリチウム増殖比は Li_2O を構成する ^7Li と ^{16}O に最大の感度を示すことがわかった。中性子による超電導コイルの放射化と放射線損傷を計算することは深層透過問題を解くことであり, 断面積の摂動は特にその問題の場合に大きな影響を与える。そこで核定数の不確定さから(n, p)反応率と銅の変位損傷についてその不確かさを見積ると約30~40%となった。これは第1次予備設計の結果の信頼性をほとんど損なわない程度の値である。

*) 外来研究員 東京芝浦電気(株)

Sensitivity Analysis of Neutronics Calculation in the Preliminary
Design of Japan Experimental Fusion Reactor

Michinori YAMAUCHI* and Hiromasa IIDA

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 19, 1978)

Uncertainties of neutronics calculation in the first preliminary design of Japan Experimental Fusion Reactor (JXFR) have been evaluated by sensitivity analysis based on linear perturbation theory. Uncertainties were estimated of the (n,p) reaction rates of ^{58}Ni and ^{54}Fe in outer superconducting magnet (SCM), the displacement rate in the stabilizer (Cu) in inner SCM, and the tritium breeding ratio in outer blanket. The (n,p) reaction and the Cu displacement are most sensitive to the cross section of Fe, a major constituent of the blanket structure, and the tritium breeding ratio is so to the cross sections of ^7Li and ^{16}O in Li_2O . The calculation of induced activity and radiation damage in SCM is equivalent to solving the deep penetration problem; cross section perturbation has large influence on the results of this problem. Taking into account the uncertainty of the cross section data, the uncertainties of (n,p) reaction and Cu displacement rate are 30 ~ 40 %, which little lower reliability of the neutronics calculation in the first preliminary design of JXFR.

Keywords: Linear Perturbation, Sensitivity Analysis, Uncertainty Evaluation,
Japan Experimental Fusion Reactor, Superconducting Magnet,
Blanket, Total Cross Section, (n,p) Reaction Rate, Nickel 58,
Iron 54, Copper Displacement Rate, Tritium Breeding Ratio,
Sn Approximation

* On leave from Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd., Tokyo, Japan

目 次

1. 緒 言	1
2. 計算方法	2
2.1 計算体系	3
2.2 計算内容	10
3. 計算結果	17
3.1 重み, 分点セットと S_n 効果	17
3.2 反応率	23
3.3 トリチウム増殖比の感度	27
3.4 トーラス外側超電導コイル中の誘導放射能の感度	40
3.5 トーラス内側超電導コイル内端における銅の変位損傷の感度	46
4. 検 討	52
4.1 感度係数の S_n 効果	52
4.2 分点セットの違いによる感度係数の差	57
4.3 S_n 計算との比較による摂動計算結果の直線性	57
4.4 誤差評価	60
5. 結 言	63
謝 辞	64
参考文献	65
付 録 摂動理論の概要	67

Contents

1. Introduction	1
2. Calculational method	2
2.1 Calculational model	3
2.2 Calculational conditions and processes	10
3. Calculational results	17
3.1 Reaction rate dependence on angular quadrature sets and Sn order.	17
3.2 Evaluation of reaction rates.	23
3.3 Sensitivity of tritium breeding ratio.	27
3.4 Sensitivity of induced activity in superconducting magnet.	40
3.5 Sensitivity of displacement rate in stabilizer(Cu) of superconducting magnet	46
4. Discussions	52
4.1 Sensitivity change due to the difference of Sn order	52
4.2 Sensitivity change due to the difference of angular quadrature sets.	57
4.3 Examination of validity of linear perturbation.	57
4.4 Estimation of reaction rate uncertainty.	60
5. Conclusion	63
Acknowledgement	64
References	65
Appendix The outline of perturbation theory	67

1. 緒 言

核融合炉においては炉心プラズマから大量の高速中性子が放出され、この中性子の振舞いを追跡する核計算は炉の設計の上で非常に重要な役割を担っている。原研炉設計研究室で進められている核融合実験炉（以後JXFRと呼ぶ）の第1次予備設計¹⁾までは、中性子ストリーミング、3次元形状の模擬、深層透過問題等中性子の透過計算に関する基礎的問題に力点が置かれ、一通りの核計算法が確立されるに至った。特に深層透過問題に関しては第2次試設計に対して収束性、Sn近似度、空間メッシュ幅等について詳細な検討がなされ²⁾、第1次予備設計においてこれらの計算条件の粗さによる誤差はかなり小さいもの（遮蔽層外部で約10%以内）と見積もられた。しかし計算条件と並んで計算結果に大きな影響を及ぼすものとして核データの信頼性があり、JXFRにおいてはこの問題がまだ未検討のままであった。特にD-T反応に基づく核融合炉においては14MeVという非常な高エネルギーの中性子が炉心プラズマから放出され、核分裂炉では経験しなかったエネルギー域の断面積が重要な役割を果たすようになり、核データとして評価すべき実験データが不足気味である。そこでこれら核融合計算に特有な高エネルギー域を中心として、設計に用いた各種断面積に対する幾つかの核計算結果の感度を1次摂動理論により解析し、合わせて断面積の不確定さがもたらす核計算結果の誤差を評価した。

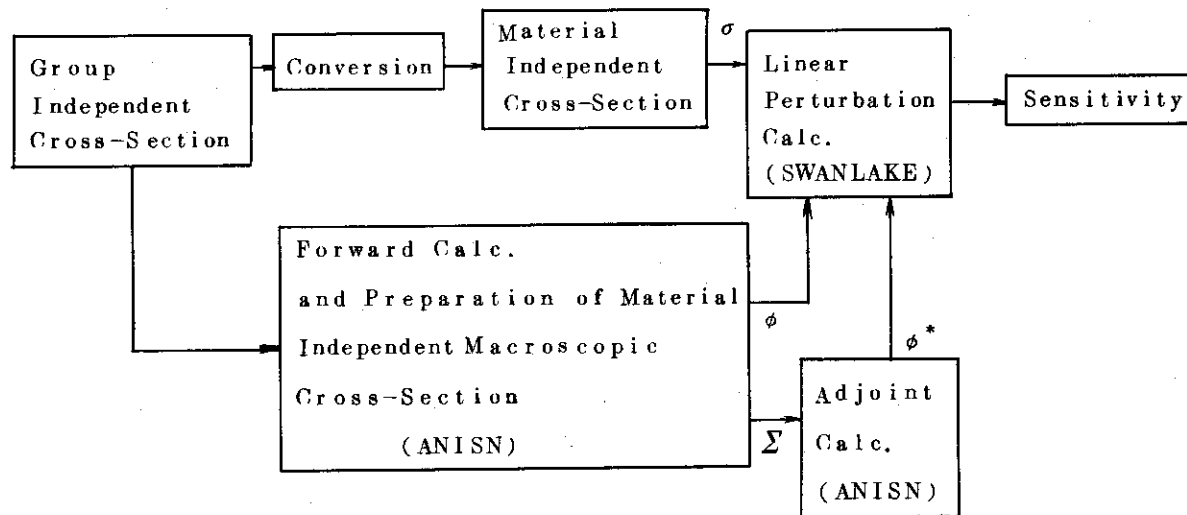
解析の対象としたのはトーラス形状の外側超電導マグネット(SCM)中の ^{58}Ni 、 ^{54}Fe の(n, p)反応率、内側超電導マグネットの最もプラズマ寄りの箇所における銅の変位損傷(Cu Displacement)³⁾、及び外側ブランケット中のトリチウム増殖比の3つである。外側SCM中の(n, p)反応率は炉の停止時周辺の空間ガンマ線量率に最も大きな寄与をする。内側SCM中の銅は安定化材として用いられており、変位損傷により抵抗が増大するとNbTiの超電導性が失われた時ジュール熱によりSCMを損ねることになる。これら外側と内側のSCM中の反応率の感度解析は、深層透過問題において断面積の不確定さが計算結果にどの程度の影響を与えるかを計算条件の粗さによる誤差と比較検討するために行ったものである。観点は異なるがJXFRの核計算において最も重要な問題の一つである点からトリチウム増殖比に対する感度を合わせて解析した。

JXFRに感度解析を適用したのはこれが初めての試みであるが、TFTR⁴⁾、ORNL-EPR⁵⁾等他の設計に適用した例は多い。アメリカのプリンストン大学プラズマ物理研究所(PPPL)ではミラー型ハイブリッド炉の設計に感度解析を適用し、トリチウム増殖比やプラウトニウム生成量などがローレンスリバーモア研究所(LLR)による同炉の解析結果と大きく異なることを見い出したりしている⁶⁾。一般にトカマク型のブランケット又はその模擬形状に適用してトリチウム増殖比を始めとする各種反応の感度解析を行った例は多い^{7)~9)}。定量的には各炉型によっていろいろ異なった結果を与えるが、トリチウム増殖反応を含めいずれの反応においても数MeV以上の高エネルギー域の断面積に対する感度の大きいのが核融合炉の特徴である。

解析に際しては標準計算として $S_{16}P_5$ の条件を採択し、メッシュ構造は第1次予備設計におけるそれを踏襲した。しかし計算条件に関しては反応率及び感度の S_n 効果 (S_n 次数の違いにより結果が異なること。他の効果も同様) の検討により次のような傾向が得られた。すなわち反応率については S_n 次数の違いによる差よりも重み、及び分点セットの違いによる差の方が大きいことが見出され、感度については S_n 次数の違いにより反応率の変動から予想されるより大きな差が現われた。両者共 S_n 次数の一層の高次化、 S_n の重みと分点の取り方の検討により計算結果の動向を把握したり、原理的な追求を進めたりして最適な条件を求めることが問題となるが、今回は解析の本筋から幾分はずれるので問題の提起にとどめる。

2. 計 算 方 法

今回用いた1次摂動理論による感度解析法はすでに多くの研究者によって充分展開されており、簡便な使用に供するものとして米国でSWANLAKE¹⁰⁾コードが開発されている。摂動論については概要を付録で述べるが、詳細は上記コードマニュアル、あるいは他の文献¹¹⁾¹²⁾を参照すれば良い。感度計算の前には与えられた体系に対して中性子束及び随伴中性子束を計算しておかなければならない。今回は輸送計算コードとして1次元 S_n コードANISN¹³⁾、感度解析コードとしてSWANLAKEを用いた。一つの反応率について感度解析を行うために必要な作業の流れはFig. 2.1に示す通りである。



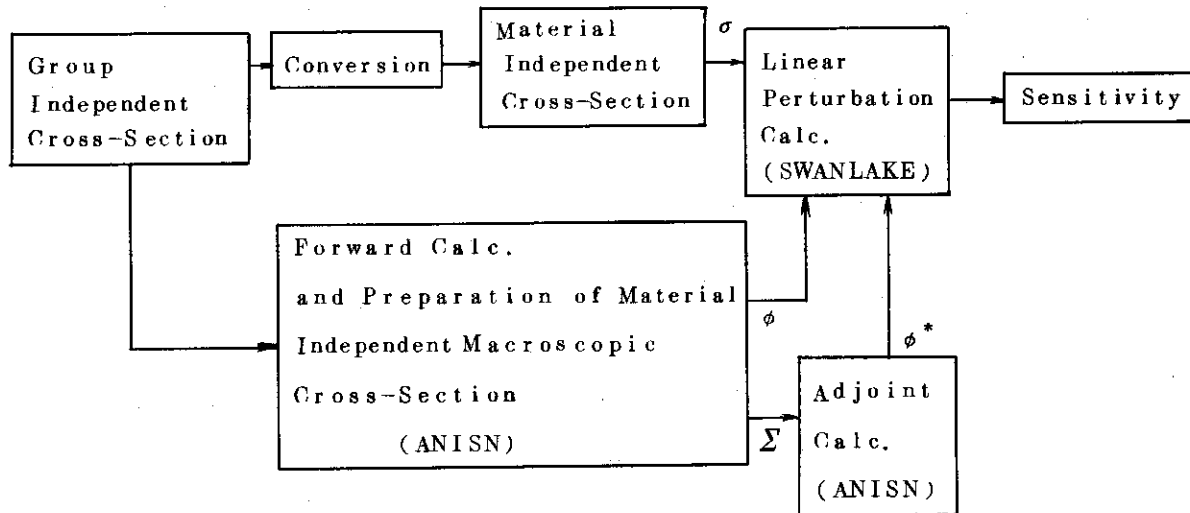
- σ : Microscopic Cross Section
- Σ : Macroscopic Cross Section
- ϕ : Forward Angular Flux
- ϕ^* : Adjoint Angular Flux

Fig. 2.1 Flow Chart of Sensitivity Study Process

解析に際しては標準計算として $S_{16}P_5$ の条件を採択し、メッシュ構造は第1次予備設計におけるそれを踏襲した。しかし計算条件に関しては反応率及び感度の S_n 効果 (S_n 次数の違いにより結果が異なること。他の効果も同様) の検討により次のような傾向が得られた。すなわち反応率については S_n 次数の違いによる差よりも重み、及び分点セットの違いによる差の方が大きいことが見出され、感度については S_n 次数の違いにより反応率の変動から予想されるより大きな差が現われた。両者共 S_n 次数の一層の高次化、 S_n の重みと分点の取り方の検討により計算結果の動向を把握したり、原理的な追求を進めたりして最適な条件を求めることが問題となるが、今回は解析の本筋から幾分はずれるので問題の提起にとどめる。

2. 計 算 方 法

今回用いた1次摂動理論による感度解析法はすでに多くの研究者によって充分展開されており、簡便な使用に供するものとして米国でSWANLAKE¹⁰⁾コードが開発されている。摂動論については概要を付録で述べるが、詳細は上記コードマニュアル、あるいは他の文献¹¹⁾¹²⁾を参照すれば良い。感度計算の前には与えられた体系に対して中性子束及び随伴中性子束を計算しておかなければならない。今回は輸送計算コードとして1次元 S_n コードANISN¹³⁾、感度解析コードとしてSWANLAKEを用いた。一つの反応率について感度解析を行うために必要な作業の流れはFig. 2.1に示す通りである。



- σ : Microscopic Cross Section
- Σ : Macroscopic Cross Section
- ϕ : Forward Angular Flux
- ϕ^* : Adjoint Angular Flux

Fig. 2.1 Flow Chart of Sensitivity Study Process

2.1 計算体系

1次元計算体系はプラズマの中心からトーラスの外側方向に向かって採ったもの(外側形状と呼ぶ)と内側方向に向かって採ったもの(内側形状と呼ぶ)とがある。外側形状のメッシュ構造を第1群(15~13.7MeV), 第18群(1.06~0.8MeV), 第30群(2.15~1.0KeV), 第42群(熱領域)の平均自由行程と共にTable 2.1に示す。ここで平均自由行程は全断面積の逆数と定義した。表の中でCase 1と示してあるのは第1次予備設計の1次元透過計算で採用したメッシュ間隔である。第10領域(重コン+ボロン水)と第14領域(SCM)を除いてメッシュ間隔は1keV以上の平均自由行程を充分下まわっていることがわかる。熱群になると5つの領域でメッシュ間隔が平均自由行程を上まわり, そのうち Li_2O の領域では前者が後者の10倍ほどにもなっている。しかし低速群の平均自由行程が小さいことは中性子の透過という観点から見れば低速群の中性子が構造材深部には到達しにくいということになり, 深部の中性子束を与える高速群の中性子の透過計算には重大な影響は生じないといえる。ただボイド域にメッシュを一つしか割り当てないのは微分型輸送方程式を解くという点から楽観できないのでボイド中のメッシュ間隔をその周辺の間隔に近づけて設定したメッシュ構造をCase 2に示した。検討結果は次章で述べる。

内側形状のメッシュ構造及び外側の形状の場合と同様に定義した平均自由行程をTable 2.2に示す。メッシュ構造は第1次予備設計で使用したものを採用した。トーラスの中央ではトロイダル及びポロイダルコイルが密になり, コイルの寸法をできるだけ小さくしたいという設計上の要望とからめると空間的制限はかなり厳しくなる。そこでJXFRではプラズマ中心から見て外側と内側とは1次元構造が非対称になっている。すなわち内側形状のブランケットはトリチウムの増殖という本来の機能を放棄して遮蔽専門にされ, トロイダルコイル外端までの寸法が外側形状に比べて幾分小さくなっている。従ってメッシュ間隔は, その分だけ細かくすることができ, 熱群の平均自由行程をもほとんど下まわっていることがわかる。

トリチウム増殖比の感度を解析する際には, トロイダルコイル外端までの形状を用いる必要はない。ブランケット外端から外をすべて真空という境界条件で定めた形状をTable 2.3に示す。標準計算としてのCoarse Meshの場合はメッシュ構造を第1次予備設計の時のものと同じにした。トリチウムの増殖率を与える反応の一つである ${}^6\text{Li}(n, p)$ の断面積はFig. 2.2に示すようにエネルギーが低くなるほど大きな値を持ち熱群で最大となるので, 熱群のメッシュ効果をなくすために第1, 2及び第5, 6, 7領域のメッシュを細かくして熱群のメッシュ効果(メッシュの粗さによる計算値の不確かさ)も無視できる形状(Fine Mesh)を作り標準計算の信頼性の検討も行った。

計算に使用した原子数密度は外側形状の場合Table 2.4に, 内側形状の場合Table 2.5に掲げた。表の上端は領域の名前であり, 下端には1次元形状でその領域が現れた厚さの総量を示す。反応率の感度は大凡領域の厚さ, 原子数密度, 断面積の3つの量の積に左右されると推定できるが, この表にはそのうちの2つを掲げてあるので大きな感度を与える元素を選び出すのに幾らかの助けとなるであろう。表の左端には感度を解析した元素を○印で示した。但しTable 2.4の場合, HはSCM中の (n, p) 反応率感度の解析のみに対象とし, Δ

印はトリチウム増殖比感度の解析のみに対象とした。

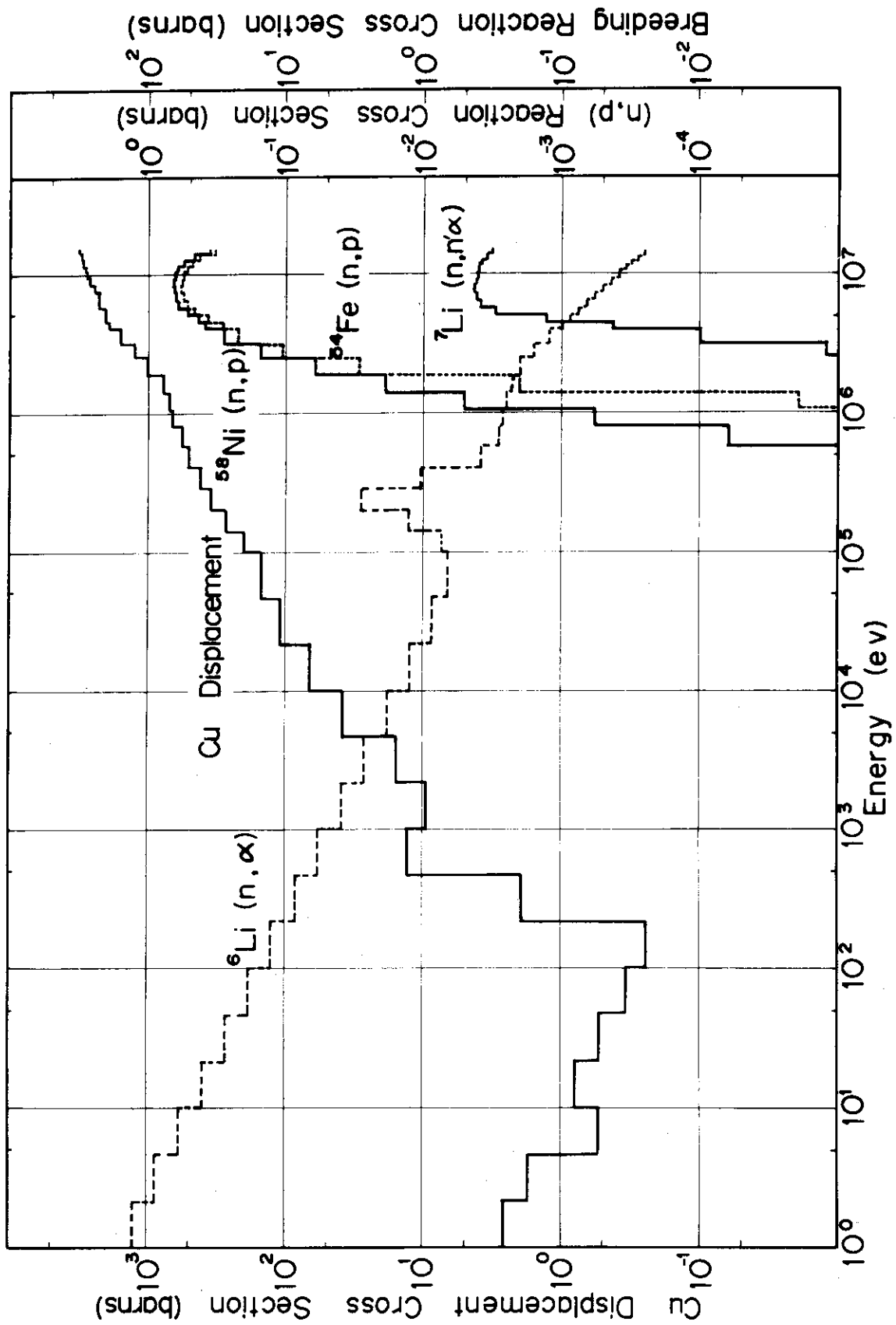


Fig. 2.2 Response Function Profiles Used in Sensitivity Study

Table 2.1 Outer Blanket, Shield and TFC Calculational Model and Mean Free Paths

Zone	Region %	Region	Radius Mesh % Mesh Width			Mean Free Path (cm)				
			(cm)	Case 1	Case 2	Mesh %	Group 1	Group 18	Group 30	Group 42
BLANKET	1	Plasma	0	1 (1)	1 (10)		1.48×10 ¹¹	2.24×10 ¹⁰	4.94×10 ⁹	4.83×10 ⁹
	2	Vacuum	150	2 (1)	11 (10)		1.48×10 ¹¹	2.24×10 ¹⁰	4.94×10 ⁹	4.83×10 ⁹
	3	Carbon Coating	174.5	3 (2)	21 (2)	0.25	8.93	4.49	2.53	2.53
	4	Stainless Steel(SS)	175	5 (2)	23 (2)	0.5	4.57	4.19	1.29	0.916
	5	Li ₂ O(24%)+SS(9%)+He(27%)	176	7 (4)	25 (4)	4.75	1.76	1.20	8.17	0.768
	6	Li ₂ O(72%)+SS(17%)+He(11%)	195	11 (20)	29 (20)	2	6.76	4.43	3.46	0.263
	7	SS(90%)+He(10%)	235	31 (16)	49 (16)	1.25	5.08	4.65	1.43	1.02
	8	SS	255	47 (10)	65 (10)	0.45	4.57	4.19	1.29	0.916
	9	Vacuum	259.5	57 (1)	75 (20)		1.48×10 ¹¹	2.24×10 ¹⁰	4.94×10 ⁹	4.83×10 ⁹
SHIELD	10	Heavy Conc.(90%)+Borated Water(10%)	335	58 (50)	95 (50)	1.5	6.62	2.85	1.15	0.752
	11	Lead	410	108 (8)	145 (8)	0.625	6.06	5.81	2.70	2.68
	12	Air	415	116 (1)	153 (2)		1.16×10 ⁴	8.11×10 ³	2.45×10 ³	1.89×10 ³
TFC	13	Insulator(Aℓ)	425	117 (2)	155 (2)	5	3.20	1.61	3.63	3.27
	14	SCM	435	119 (70)	157 (70)	2	4.62	3.9	1.11	1.06
	15	Insulator(Aℓ)	575	189 (2)	227 (2)	5	3.20	1.61	3.63	3.27

Table 2.2 Inner Blanket, Shield and TFC Calculational Model and Mean Free Paths

Zone	Region %	Region	Radius (cm)	Mesh %	Mesh Width (cm)	Mean Free Path (cm)			
						Group 1	Group 18	Group 30	Group 42
	1	Plasma	0	1					
	2	Vacuum	150	(1)					
	3	Carbon Coating	174.5	2					
	4	Stainless Steel(SS)	175	(1)					
	5	Helium	176	3					
	6	SS	181	(2)					
	7	SS(90%)+He(10%)	182	5					
	8	SS(17%)+W(73%)+He(10%)	191	(2)					
	9	SS	215	10					
	10	Vacuum	219	(10)					
	11	Heavy Conc.(90%)+Borated Water(10%)	255	20					
	12	SS(40%)+B ₄ C(40%)+H ₂ O(20%)	285	(24)					
	13	Air	295	44					
	14	Insulator(Al)	305	(4)					
	15	SCM	315	48					
	16	Insulator(Al)	405	(1)					
			415	98					

Zone	Region %	Region	Radius (cm)	Mesh %	Mesh Width (cm)	Group 1	Group 18	Group 30	Group 42
BLANKET	1	Plasma	0	1					
	2	Vacuum	150	(1)		1.48×10 ¹¹	2.24×10 ¹⁰	4.94×10 ⁹	4.83×10 ⁹
	3	Carbon Coating	174.5	2		1.48×10 ¹¹	2.24×10 ¹⁰	4.94×10 ⁹	4.83×10 ⁹
	4	Stainless Steel(SS)	175	(1)		8.93	4.49	253	253
	5	Helium	176	3		4.57	4.19	1.29	0.916
	6	SS	181	(2)		9.60×10 ³	1.84×10 ³	1.38×10 ⁴	1.37×10 ⁴
	7	SS(90%)+He(10%)	182	5		4.57	4.19	1.29	0.916
	8	SS(17%)+W(73%)+He(10%)	191	(2)		5.08	4.65	1.43	1.02
	9	SS	215	10		4.00	3.16	0.649	1.02
	10	Vacuum	219	(4)		4.57	4.19	1.29	0.916
SHIELD	11	Heavy Conc.(90%)+Borated Water(10%)	255	(1)		1.48×10 ¹¹	2.24×10 ¹⁰	4.94×10 ⁹	4.83×10 ⁹
	12	SS(40%)+B ₄ C(40%)+H ₂ O(20%)	285	49		6.63	285	1.15	0.752
	13	Air	295	(40)		5.62	3.10	7.49×10 ⁻¹	8.45×10 ⁻³
	14	Insulator(Al)	305	(8)		1.16×10 ⁴	8.11×10 ³	2.45×10 ³	1.89×10 ³
TFC	15	SCM	315	97		3.20	16.1	36.3	32.7
	16	Insulator(Al)	405	(1)		4.63	3.90	1.11	1.06
			415	98		3.20	16.1	36.3	32.7

Table 2.3 Outer Blanket Calculational Model for Tritium Breeding Ratio

Zone	Region		Radius		Coarse Mesh		Fine Mesh		MFP (cm)	
	%	Region	(cm)	%	Width(cm)	%	Width(cm)	Group 30	Group 42	
1	Plasma	0	1	1	150	(10)	15	4.94×10^9	4.83×10^9	
2	Vacuum	150	2	2	245	(10)	2.45	4.94×10^9	4.83×10^9	
3	Carbon Coating	174.5	3	3	0.25	(2)	0.25	2.53	2.53	
4	Stainless Steel(SS)	175	5	5	0.5	(2)	0.5	1.29	0.916	
5	Li ₂ O(24%)+SS(9%)+He(27%)	176	7	7	4.75	(40)	0.475	8.17	0.768	
6	Li ₂ O(72%)+SS(17%)+He(11%)	195	11	11	2	(100)	0.4	3.46	0.263	
7	SS(90%)+He(10%)	235	31	31	1.25	(32)	0.625	1.43	1.02	
8	SS	255	47	47	0.45	(10)	0.45	1.29	0.916	
BLANKET		259.5	57	57		207				

Table 2.4 Mixtures for Outer Blanket, Shield and TFC of JXFR

SWANLAKE		Element	Plasma Vacuum	Carbon Coating	S.S.	Li ₂ O(24) SS (9) He (27)	Li ₂ O(72) S.S.(17) He (11)	S.S.(90) He (10)	H.C. H ₂ O(B)	Lead	Air	Insulator (Al)	SCM
○		⁶ Li				1.228-3	3.685-3						
○		⁷ Li				1.532-2	4.598-2						
△		¹² C		8.374-2					3.383-2		1.17-5		
○		¹⁶ O				8.275-3	2.483-5						
		⁴ He				2.700-5	1.100-5	1.0-5					
		Nb											3.884-3
○		Mo			1.255-3	1.130-4	2.134-4	1.130-3					7.530-4
○		Cr			1.575-2	1.418-3	2.678-3	1.418-2					9.450-3
○		Ni			9.848-3	8.863-4	1.674-3	8.863-3					5.909-3
○		Fe			5.909-2	5.319-3	1.005-2	5.318-2	3.176-2				3.545-2
△		H	1.0-11						1.861-2				
		¹⁰ B							5.601-5				
		N							2.728-3		4.22-5	1.801-2	
		Al											
		Cu								3.296-2			2.370-2
		Pb											
		Ca							2.155-3				
Total Width(cm)			250	0.5	5.5	19	40	20	75	5	10	20	140

[Unit atoms×10²⁴/cm³]

Al

Table 2.5 Mixtures for Inner Blanket, Shield and TFC of JXFR

(Unit : atoms $\times 10^{24}$ / cm 3)

SWANLAKE	Element	Plasm Vacuum	Carboma Coating	S.S.	He	S.S.(90) He (10)	S.S.(17) W (73) He (10)	H.C. H ₂ O(B)	S.S.(40) B ₄ C (40) H ₂ O (20)	Air	Insulator (Al)	SCM
	¹² C		8.374-2					3.383-2	1.185-2			
○	¹⁶ O				1.0-4	1.0-5	1.0-5		6.630-3	1.17-5		
	⁴ He											
	Nb											3884-3
○	Mo			1.255-3		1.130-3	2.134-4		5.020-4			7.530-4
○	Cr			1.575-2		1.418-2	2.678-3		6.300-3			9.450-3
○	Ni			9.848-3		8.863-3	1.674-3		3.939-3			5.909-3
○	Fe			5.909-2		5.318-2	1.005-3	3.176-2	2.364-2			3.545-2
○	H	1.0-11						1.861-2	1.326-2			
○	¹⁰ B							5.601-5	3.764-2	4.22-5	1.801-2	
	N							2.728-3				
○	Al											
○	Cu							2.155-3				
	Ca											
○	¹⁸² W						1.215-2					
○	¹⁸³ W						6.577-3					
○	¹⁸⁴ W						1.398-2					
○	¹⁸⁶ W						1.297-2					
Total Width(cm)		208.5	0.5	6	5	9	24	30	10	10	20	90

2.2 計算内容

解析の対象は外側SCM中の ^{58}Ni と ^{54}Fe の(n, p)反応率, 内側SCM中の銅の損傷, 及び外側ブランケット中 Li_2O のPebbleとBlock両領域のトリチウム増殖比でありそれぞれTable 2.1, 2.2, 2.3の形状が適用される。計算の種類はそれぞれの解析内容毎に中性子輸送計算, 随伴計算, 摂動計算の3つに分かれる。エネルギー群構造はTable 2.6に示す。基本になるのは高速炉の核計算で広範に用いられているABB N型群構造¹⁴⁾であるが, DT核融合炉という特殊性から10.5MeV~100keVの間を2.5倍ほどに細分し, 10.5MeV~15MeVの間に特別に4群設けてある。断面積はENDF/B-IIIと-IVからSUPERTOG¹⁵⁾及びSPTG4Z¹⁶⁾により作成した中性子42群定数ライブラリーGICX40(ガンマ線生成データも含む)を使用した。Sn計算に用いた重みと分点はTable 2.7にまとめる。重みのセットはWestinghouse Astronuclear Lab.製¹⁷⁾(以後WANLセットと呼ぶ)とGeneral Electric Co. Advance Product Operation製¹⁸⁾(以後GEAOセットと呼ぶ)とがあり, それぞれのセットによる計算結果を比較して重みと分点の取り方の影響を検討した。計算の概要は以下の通りである。

(1) 中性子輸送計算

プラズマ領域中に1neutron/cm³/secの強度の分布線源を置き固定線源問題として計算を行った。Outer Iteration 1回, Inner Iteration 最大200回, 収束条件0.0001, Sn次数と散乱核は標準条件としてS₁₆P₅を採用した。

(2) 随伴計算

線源としては, 感度解析の対象とする反応の応答関数を分布線源として反応率計算領域にした。積分量 $\int S^* \phi dV$ (ϕ は通常の中性子束, 積分は S^* の存在する全位相空間に及ぶ)が反応率の総量であるためには, 随伴方程式の線源すなわち応答関数 S^* は巨視断面積の次元でなければならない。しかし後述の(2-2)式に見られるように, たとえこの条件が満足されなくても感度計算式の分母の総反応率Rと分子の随伴中性子 ϕ^* と同じ比で変化するので, それらの変動分が打ち消し合って正しい感度の値を得ることができる。従って今回の解析では応答関数 S^* としてFig. 2.2又はTable 2.8に掲げた微視断面積を用いる。この場合随伴中性子束は本来の値と原子数密度の比だけ異なり, 反応率を絶対値に換算する際に考慮しなければならない。線源の種類及び入力位置はTable 2.9に示す。

Table 2.9 Contents of Adjoint Calculation

Case No.	Source	Location where source was input
1	$^{58}\text{Ni}(n, p)$	Outer SCM Region
2	$^{54}\text{Fe}(n, p)$	Outer SCM Region
3	Cu Disp.	Innermost Mesh Interval in Inner SCM Region
4	$^6\text{Li}(n, \alpha)$	Li_2O Pebble Region (Li ₂ O 24%)
5	$^7\text{Li}(n, n' \alpha)$	Li_2O Pebble Region (Li ₂ O 24%)
6	$^6\text{Li}(n, \alpha)$	Li_2O Block Region (Li ₂ O 72%)
7	$^7\text{Li}(n, n' \alpha)$	Li_2O Block Region (Li ₂ O 72%)

繰り返しと収束の条件及びSn 次数と散乱核の標準条件は中性子輸送計算の場合と同様である。

(3) 1次摂動計算

中性子の発生、輸送、消滅が定常状態にある一つの系にΔCの摂動が加えられたとする。一般の1次摂動理論では全断面積、散乱断面積、応答関数(随伴線源)のすべてが一定の比率ΔCで摂動を受けると仮定する。すなわち、

$$\Delta C = \frac{\Sigma_{Tp} - \Sigma_{Tu}}{\Sigma_{Tu}} = \frac{\Sigma_{Sp} - \Sigma_{Su}}{\Sigma_{Su}} = \frac{\Sigma_{rp} - \Sigma_{ru}}{\Sigma_{ru}} \quad (2-1)$$

- Σ_{Ti} : i系の全断面積
- Σ_{Si} : i系の散乱断面積
- Σ_{ri} : i系の応答関数(巨視反応断面積)
- u : 非摂動系
- p : 摂動系

Rを非摂動系の総反応率、ΔRを摂動による変動分とすると一般の1次摂動理論では無限小の摂動量δCに対する感度 $\frac{\delta R/R}{\delta C}$ は次式によって表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\delta R/R}{\delta C} = & \frac{1}{R} \int \{ -\phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \Sigma_{Tu}(\vec{r}, E) \phi_u^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ & + \int \phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \Sigma_{Su}(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \phi_u^*(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \\ & + \Sigma_{ru}(\vec{r}, E) \phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \} d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \end{aligned} \quad (2-2)$$

ϕ_u, ϕ_u^* : 非摂動系の中性子束と随伴中性子束

(2-2)式の右辺の第3項は応答関数(随伴線源)の摂動項であり、解析の対象とする断面積を持つ核種が反応の標的核と同一の場合にのみ反応率の計算領域の中で値が存在する。すなわちNiに対するSCM中の⁵⁸Ni(n, p)反応の感度とか⁶Li, ⁷Liに対するLi₂O領域中のトリチウム増殖比の感度の場合等がそうである。今回用いたSWANLAKEコードにはこの項が考慮に入っていない。しかしエネルギー的に積分した量としてのみ感度を取り扱おうならば、(2-2)式から容易にわかるように第3項の値として1.0を加えておけば良い。

随伴演算子の定義式より中性子束φと随伴中性子束φ*の間には次の関係が導かれる。

$$\int \Sigma_r \phi d\vec{r} dE d\vec{\Omega} = \int S \phi^* d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \quad (2-3)$$

Σ_r は応答関数(随伴線源)、Sは中性子線源である。左辺から容易にわかるように(2-3)式の値は総反応率に等しい。SWANLAKEにはあらかじめ計算されている反応率を入力データとして入れてやらなければならないが、今回は中性子束φを基準にとり、反応率の計算値はすべて(2-3)式の左辺によるものを使用した。

Table 2.6 42-group neutron energy group structure

Group	Energy Limits	Mid-Point Energy	Lethargy Width
1	15000 — 13720 MeV	14360 MeV	0.08920
2	13720 — 12549	13135	0.08921
3	12549 — 11478	12014	0.08921
4	11478 — 10500	10989	0.08906
5	10500 — 9314	9907	0.1199
6	9314 — 8261	8788	0.1200
7	8261 — 7328	7795	0.1198
8	7328 — 6500	6914	0.1199
9	6500 — 5757	6129	0.1214
10	5757 — 5099	5428	0.1214
11	5099 — 4516	4808	0.1214
12	4516 — 4000	4258	0.1213
13	4000 — 3162	3581	0.2351
14	3162 — 2500	2831	0.2349
15	2500 — 1871	2186	0.290
16	1871 — 1400	1636	0.290
17	1400 — 1058	1229	0.280
18	1058 — 0800	0929	0.280
19	0800 — 0566	0683	0.346
20	0566 — 0400	0483	0.347
21	0400 — 0283	0342	0.346
22	0283 — 0200	0242	0.347
23	0200 — 0141	0171	0.350
24	0141 — 0100	0121	0.344
25	1000 — 465 keV	7325 keV	0.766
26	465 — 215	340	0.771
27	215 — 100	1575	0.765
28	100 — 465	7325	0.766
29	465 — 215	340	0.771
30	215 — 100	1575	0.765
31	100 — 0465	0733	0.766
32	0465 — 0215	0340	0.771
33	0215 — 0100	0158	0.765
34	1000 — 465 eV	7325 eV	0.766
35	465 — 215	340	0.771
36	215 — 100	1575	0.765
37	100 — 465	7325	0.766
38	465 — 215	340	0.771
39	215 — 100	158	0.765
40	100 — 0465	0733	0.766
41	0465 — 0215	0340	0.771
42	0215 — 0001	0108	—

Table 2.7 Quadrature Weight and Cosine Used in Calculations

1) S_8

No.	WANL set		GEO set	
	Weight	Cosine	Weight	Cosine
1	0.0	-0.9759000	0.0	-0.9759000
2	0.0604938	-0.9511897	0.0533004	-0.9511897
3	0.0453704	-0.7867958	0.0505864	-0.7867958
4	0.0453704	-0.5773503	0.0505864	-0.5773503
5	0.0604938	-0.2182179	0.0533004	-0.2182179
6	0.0604938	0.2182179	0.0533004	0.2182179
7	0.0453704	0.5773503	0.0505864	0.5773503
8	0.0453704	0.7867958	0.0505864	0.7867958
9	0.0604938	0.9511897	0.0533004	0.9511897
10	0.0	-0.8164965	0.0	-0.8164965
11	0.0453704	-0.7867958	0.0505864	-0.7867958
12	0.0462962	-0.5773503	0.0365807	-0.5773503
13	0.0453704	-0.2182179	0.0505864	-0.2182179
14	0.0453704	0.2182179	0.0505864	0.2182179
15	0.0462962	0.5773503	0.0365807	0.5773503
16	0.0453704	0.7867958	0.0505864	0.7867958
17	0.0	-0.6172134	0.0	-0.6172134
18	0.0453704	-0.5773503	0.0505864	-0.5773503
19	0.0453704	-0.2182179	0.0505864	-0.2182179
20	0.0453704	0.2182179	0.0505864	0.2182179
21	0.0453704	0.5773503	0.0505864	0.5773503
22	0.0	-0.3086067	0.0	-0.3086067
23	0.0604938	-0.2182179	0.0533004	-0.2182179
24	0.0604938	0.2182179	0.0533004	0.2182179

2) S_{12}

No.	WANL set		GEO set	
	Weight	Cosine	Weight	Cosine
1	0.0	-0.9859208	0.0	-0.9847319
2	0.0353813	-0.9716377	0.0318843	-0.9692234
3	0.0279406	-0.8722706	0.0284499	-0.8703883
4	0.0186688	-0.7600210	0.0226880	-0.7587869
5	0.0186688	-0.6280191	0.0226880	-0.6276459
6	0.0279406	-0.4595476	0.0284499	-0.4605662
7	0.0353813	-0.1672126	0.0318843	-0.1740777
8	0.0353813	0.1672126	0.0318843	0.1740777
9	0.0279406	0.4595476	0.0284499	0.4605662
10	0.0186688	0.6280191	0.0226880	0.6276459
11	0.0186688	0.7600210	0.0226880	0.7587869
12	0.0279406	0.8722706	0.0284499	0.8703883
13	0.0353813	0.9716377	0.0318843	0.9692234
14	0.0	-0.8881531	0.0	-0.8876254
15	0.0279406	-0.8722706	0.0284499	-0.8703883
16	0.0251410	-0.7600210	0.0173687	-0.7587869
17	0.0129257	-0.6280191	0.0151378	-0.6276459
18	0.0251410	-0.4595476	0.0173687	-0.4605662
19	0.0279406	-0.1672126	0.0284499	-0.1740777
20	0.0279406	0.1672126	0.0284499	0.1740777
21	0.0251410	0.4595476	0.0173687	0.4605662
22	0.0129257	0.6280191	0.0151378	0.6276459

Table 2.7 (Continued)

23	0.0251410	0.7600210	0.0173687	0.7587869
24	0.0279406	0.8722706	0.0284499	0.8703883
25	0.0	-0.7781979	0.0	-0.7784990
26	0.0186688	-0.7600210	0.0226880	-0.7587869
27	0.0129257	-0.6280191	0.0151378	-0.6276459
28	0.0129257	-0.4595476	0.0151378	-0.4605662
29	0.0186688	-0.1672126	0.0226880	-0.1740777
30	0.0186688	0.1672126	0.0226880	0.1740777
31	0.0129257	0.4595476	0.0151378	0.4605662
32	0.0129257	0.6280191	0.0151378	0.6276459
33	0.0186688	0.7600210	0.0226880	0.7587869
34	0.0	-0.6498985	0.0	-0.6513390
35	0.0186688	-0.6280191	0.0226880	-0.6276459
36	0.0251410	-0.4595476	0.0173687	-0.4605662
37	0.0186688	-0.1672126	0.0226880	-0.1740777
38	0.0186688	0.1672126	0.0226880	0.1740777
39	0.0251410	0.4595476	0.0173687	0.4605662
40	0.0186688	0.6280191	0.0226880	0.6276459
41	0.0	-0.4890236	0.0	-0.4923660
42	0.0279406	-0.4595476	0.0284499	-0.4605662
43	0.0279406	-0.1672126	0.0284499	-0.1740777
44	0.0279406	0.1672126	0.0284499	0.1740777
45	0.0279406	0.4595476	0.0284499	0.4605662
46	0.0	-0.2364743	0.0	-0.2461830
47	0.0353813	-0.1672126	0.0318843	-0.1740777
48	0.0353813	0.1672126	0.0318843	0.1740777

3) S₁₆

No.	WANL set		GEAO set	
	Weight	Cosine	Weight	Cosine
1	0.0	-0.9902984	0.0	-0.9888265
2	0.0244936	-0.9805009	0.0227558	-0.9775252
3	0.0206648	-0.9092855	0.0198873	-0.9067647
4	0.0106163	-0.8319966	0.0150231	-0.8299933
5	0.0128104	-0.7467506	0.0136660	-0.7453560
6	0.0128104	-0.6504264	0.0136660	-0.6497863
7	0.0106163	-0.5370966	0.0150231	-0.5374839
8	0.0206648	-0.3922893	0.0198873	-0.3944053
9	0.0244936	-0.1389568	0.0227558	-0.1490712
10	0.0244936	0.1389568	0.0227558	0.1490712
11	0.0206648	0.3922893	0.0198873	0.3944053
12	0.0106163	0.5370966	0.0150231	0.5374839
13	0.0128104	0.6504264	0.0136660	0.6497863
14	0.0128104	0.7467506	0.0136660	0.7453560
15	0.0106163	0.8319966	0.0150231	0.8299933
16	0.0206648	0.9092855	0.0198873	0.9067647
17	0.0244936	0.9805009	0.0227558	0.9775252
18	0.0	-0.9198419	0.0	-0.9189566
19	0.0206648	-0.9092855	0.0198873	-0.9067647
20	0.0180243	-0.8319966	0.0116426	-0.8299933
21	0.0072294	-0.7467506	0.0093143	-0.7453560
22	0.0172479	-0.6504264	0.0088157	-0.6497863
23	0.0072294	-0.5370966	0.0093143	-0.5374836
24	0.0180243	-0.3922893	0.0116426	-0.3944053
25	0.0206648	-0.1389568	0.0198873	-0.1490712

Table 2.7 (Continued)

26	0,0206648	0,1389568	0,0198873	0,1490712
27	0,0180243	0,3922893	0,0116426	0,3944053
28	0,0072294	0,5370966	0,0093143	0,5374839
29	0,0172479	0,6504264	0,0088157	0,6497863
30	0,0072294	0,7467506	0,0093143	0,7453560
31	0,0180243	0,8319966	0,0116426	0,8299933
32	0,0206648	0,9092855	0,0198873	0,9057647
33	0,0	-0,8435208	0,0	-0,8432740
34	0,0106163	-0,8319966	0,0150231	-0,8299933
35	0,0072294	-0,7467506	0,0093143	-0,7453560
36	0,0042590	-0,6504264	0,0076713	-0,6497863
37	0,0042590	-0,5370966	0,0076713	-0,5374836
38	0,0072294	-0,3922893	0,0093143	-0,3944053
39	0,0106163	-0,1389568	0,0150231	-0,1490712
40	0,0106163	0,1389568	0,0150231	0,1490712
41	0,0072294	0,3922893	0,0093143	0,3944053
42	0,0042590	0,5370966	0,0076713	0,5374839
43	0,0042590	0,6504264	0,0076713	0,6497863
44	0,0072294	0,7467506	0,0093143	0,7453560
45	0,0106163	0,8319966	0,0150231	0,8299933
46	0,0	-0,7595693	0,0	-0,7601170
47	0,0128104	-0,7467506	0,0136660	-0,7453560
48	0,0172479	-0,6504264	0,0088157	-0,6497863
49	0,0042590	-0,5370966	0,0076713	-0,5374839
50	0,0172479	-0,3922893	0,0088157	-0,3944053
51	0,0128104	-0,1389568	0,0136660	-0,1490712
52	0,0128104	0,1389568	0,0136660	0,1490712
53	0,0172479	0,3922893	0,0088157	0,3944053
54	0,0042590	0,5370966	0,0076713	0,5374839
55	0,0172479	0,6504264	0,0088157	0,6497863
56	0,0128104	0,7467506	0,0136660	0,7453560
57	0,0	-0,6651042	0,0	-0,6666667
58	0,0128104	-0,6504264	0,0136660	-0,6497863
59	0,0072294	-0,5370966	0,0093143	-0,5374839
60	0,0072294	-0,3922893	0,0093143	-0,3944053
61	0,0128104	-0,1389568	0,0136660	-0,1490712
62	0,0128104	0,1389568	0,0136660	0,1490712
63	0,0072294	0,3922893	0,0093143	0,3944053
64	0,0072294	0,5370966	0,0093143	0,5374839
65	0,0128104	0,6504264	0,0136660	0,6497863
66	0,0	-0,5547308	0,0	-0,5577733
67	0,0106163	-0,5370966	0,0150231	-0,5374839
68	0,0180243	-0,3922893	0,0116426	-0,3944053
69	0,0106163	-0,1389568	0,0150231	-0,1490712
70	0,0106163	0,1389568	0,0150231	0,1490712
71	0,0180243	0,3922893	0,0116426	0,3944053
72	0,0106163	0,5370966	0,0150231	0,5374839
73	0,0	-0,4161729	0,0	-0,4216370
74	0,0206648	-0,3922893	0,0198873	-0,3944053
75	0,0206648	-0,1389568	0,0198873	-0,1490712
76	0,0206648	0,1389568	0,0198873	0,1490712
77	0,0206648	0,3922893	0,0198873	0,3944053
78	0,0	-0,1965146	0,0	-0,2108185
79	0,0244936	-0,1389568	0,0227558	-0,1490712
80	0,0244936	0,1389568	0,0227558	0,1490712

Table 28 Response Functions Used in Sensitivity Study
(Unit ; barns)

Group	$^{58}\text{Ni}(n,p)$	$^{54}\text{Fe}(n,p)$	$^6\text{Li}(n,\alpha)$	$^7\text{Li}(n,n'\alpha)$	Cu Displacement
1	3.5905-1	3.3799-1	2.5294-2	3.2338-1	3.102 +3
2	4.6181-1	4.3196-1	2.7750-2	3.5168-1	3.008 +3
3	5.5621-1	4.9122-1	3.0974-2	3.8247-1	2.972 +3
4	6.1956-1	5.3182-1	3.4300-2	4.0062-1	2.887 +3
5	6.5201-1	5.6569-1	3.8447-2	4.1554-1	2.818 +3
6	6.6073-1	5.8585-1	4.4316-2	4.1995-1	2.700 +3
7	6.5288-1	5.8791-1	5.0658-2	4.2396-1	2.429 +3
8	6.3387-1	5.6938-1	5.8019-2	4.1948-1	2.252 +3
9	6.1285-1	5.2965-1	6.6492-2	3.8405-1	2.265 +3
10	5.2301-1	4.6377-1	7.6484-2	2.9887-1	2.094 +3
11	4.2913-1	3.7416-1	8.7118-2	1.2941-1	2.038 +3
12	3.8645-1	2.9275-1	9.9839-2	4.3060-2	1.906 +3
13	2.8257-1	2.2309-1	1.2242-1	9.7912-3	1.593 +3
14	1.5226-1	1.0788-1	1.5930-1	1.2312-3	1.257 +3
15	6.1369-2	2.9929-2	2.0238-1	0.0	1.001 +3
16	1.8845-2	2.1214-3	2.3090-1		7.69 +2
17	5.0696-3	1.9619-5	2.5382-1		7.02 +2
18	5.8205-4	0.0	2.6875-1		6.67 +2
19	6.2068-5		2.8666-1		5.74 +2
20	2.7125-6		3.8706-1		5.12 +2
21	8.5174-8		1.059		4.16 +2
22	0.0		2.8752		3.49 +2
23			1.2791		2.74 +2
24			7.2005-1		2.02 +2
25			6.7137-1		1.51 +2
26			8.7341-1		1.10 +2
27			1.2484		6.69 +1
28			1.8176		3.89 +1
29			2.6658		1.53 +1
30			3.9150		9.51
31			5.7450		1.29 +1
32			8.4442		1.91
33			1.2407+1		2.4 -1
34			1.8201+1		3.4 -1
35			2.6738+1		5.2 -1
36			3.9271+1		7.9 -1
37			5.7598+1		5.3 -1
38			8.4605+1		1.73
39			1.2424+2		2.62
40			1.8220+2		3.83
41			2.6760+2		5.77
42			9.4025+2		1.63 +1

3. 計算結果

3.1 重み, 分点セットと S_n 効果

S_n 計算では角中性子束は幾つかの散在的な方向(角度分点)の成分によって離散的な取り扱ひに置き替えられる。それぞれの分点と成分の重みとの組み合わせは、積分量としての中性子束と中性子流とが保存されればどんなものでも良いはずである。しかし一般には限られた数の方向が特定の角度範囲ばかりに偏らないように次のように工夫される。¹⁹⁾ すなわち1つの計算点を包む球面上の1/8領域を大雑把に正三角形と見たてた場合、頂点と対応する辺の中点を結ぶ線に対して重みと分点とが対称になるように配列と値が設定される。

S_n 計算を行う前にはまず目的に合った重みと分点のセットの選択から始めなければならない。対称条件等の入力によりこの重み分点セットを計算してくれるコード²⁰⁾もあるが、ここではWANLとGEAOの2種類のセットを用いて透過計算の結果を検討した。両セット共上記対称条件は満足する。しかしこの条件だけでは重みと分点の値は一意に定まらず(分点の値のみに関しては一点の値が決まれば他の値も定まる関係式が得られる)、それぞれ独自の思想に基づいて重み, 分点セットを決めることになる。

Table 3.1 に外側形状における両セットによる反応率計算結果の S_n 効果を示す。値はDT反応による中性子線源強度が単位厚さ(1 cm)の円盤状プラズマ領域中で1中性子/cm³/sec となるように規格した。()内には S_{16} の値を1.0とした相対値, 表の右側には両セットの比の値を示した。この表を見る上で重みと分点セット以外の計算条件は全く同じであることを明記しておく。

ブランケットの中央部であるLi₂O Block 中では S_n 効果はほとんど生じておらず、⁶Li(n, α)と⁷Li(n, n' α)の反応率はいずれのセットによっても S_8 と S_{16} で1%以内の差しか生じていない。両セットによる計算値を比較した結果も1%以内で合っている。しかし遮蔽層透過後のSCM中の⁵⁸Ni(n, p)と⁵⁴Fe(n, p)反応率に目を移してみると、 S_8 計算による結果は S_{16} 計算結果に対してWANLセットの場合3%, GEAOセットの場合は10%も小さい値を示している。 S_{12} 計算の結果は、いずれも S_8 と S_{16} の中間的な値にあり、 S_n 次数の変化に従って反応率は一様な動きをしていることが確認される。両セットによるSCM中の(n, p)反応率を比較してみると、 S_8 計算ではGEAOセットよりWANLセットの方が40%ほど大きい値になっている。 S_{12} 計算ではこの差が2~3%縮まり、 S_{16} 計算になると両者の差は30%余りまで小さくなっている。 S_n 次数をさらに大きくすれば両セットによる反応率計算値の差はさらに小さくなることは以上の比較により容易に推定できる。ここではどちらのセットによっても S_n 効果は S_8 と S_{16} で最大10%しか生じなかったのに、重み, 分点セットが違えば S_{16} 計算でも30%余りも違った結果を与えることに注意する。

Fig. 3.1にプラズマ中心から335.75 cm(遮蔽層内端)と504 cm(SCM領域中央)におけるWANLセットとGEAOセットによる中性子スペクトルを比較して示す。335.75 cm

の位置のスペクトルはリチウム領域での弾性散乱, ${}^7\text{Li}$ による $(n, n' \alpha)$ 反応等がよく効いて 100keV 以下でかなりきれいな $1/E$ 型となっている。重みと分点セットによる違いは 1MeV 以上の高エネルギー域で現われ, 1群 ($15 \sim 13.72\text{MeV}$) で 15% , 2群 ($\sim 12549\text{MeV}$) で 11% WANLセットによるスペクトルが高くなっている。21群以下 (400keV 以下) では両セットによるスペクトルにはほとんど差が見られない。 504cm の位置のスペクトルは, 遮蔽層中のボロン水による吸収が効いて, 高エネルギー域のみならず低エネルギー域においても減衰が大きく, 100keV 付近になだらかなピークを持つ山型となっている。両セットによるスペクトルの差は, 第1群で 84% , 第2群で 77% , 第20群 ($566 \sim 400\text{keV}$) で 32% , 第30群 ($215 \sim 1.0\text{keV}$) で 29% いずれも WANLセットによるスペクトルが高くなっている。

以上の2点におけるスペクトルの検討により, WANLとGEOの両セットは高速中性子の輸送計算に差があることがわかる。Fig. 3.2に両セットの円筒計算用の S_{16} の重みと分点を, Fig. 3.3にプラズマ中心から 255cm (ステンレスブロックとブランケット壁の境) における両セットによる外側方向 (方向余弦 > 0.0) の第1群の角中性子束を示す。どちらの図も値は三角形に配列してあるが, 右の値ほど径方向 (R方向) に, 上の値ほど軸方向 (Z方向) に近い値となり左下ほど RZ面に垂直な方向の値となる。下端には径方向に対する方向余弦 (以後 μ とする) を示した。角中性子束の平均値は同じ μ を持つ角度領域の平均値である。

WANL, GEO両セットの μ の差は非常に小さいが, 前者の分点が後者に比べわずかに径方向及びR軸に垂直な方向に偏っている。これに対して重みは例外的な値もあるが概して三角形の頂点に近いほど WANLセットの値が大きく, 中央部ほど GEOセットの値が大きくなっている。すなわち WANLセットは GEOセットに比べ, より広範囲な角度領域の角中性子束を, より R, Z方向又はそれらに垂直な方向に近い分点に代表させて計算を行うことになる。その結果 WANLセットによる角中性子束は最も R方向に近い値で GEOセットのものより 20% ほど大きく (この値の持つ μ のわずかな差は無視する), $\mu = 0.537$ の方向で約 5% 小さくなり, R方向に垂直な方向の平均値で再び 17% ほど大きくなっている。このことから WANLセットによる計算が中性子の深層透過量を GEOセットによる計算よりも大きく見積もるのは, 高速群における径方向の角中性子束を大きく算出するからであることがわかる。

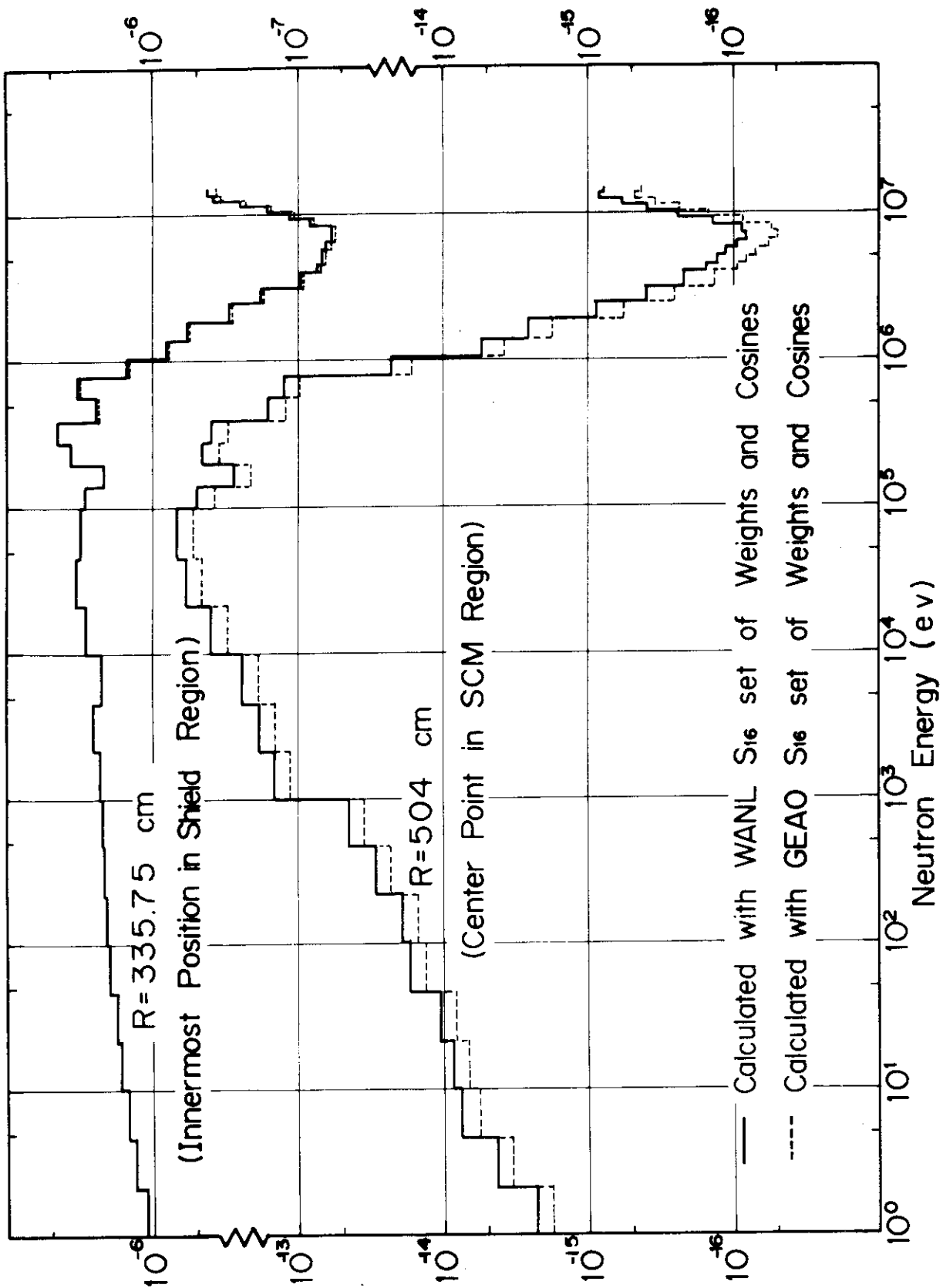


Fig.3.1 Spectra Calculated by ANISN Code with WANL and GEAO S_{16} Angular Quadrature Set at R=335.75 cm and 504 cm

Weight	0.02449								
	0.02066	0.02066							
	0.01062	0.01802	0.01062						
	0.01281	0.00723	0.00723	0.01281					
	0.01281	0.01725	0.00426	0.01725	0.01281				
	0.01062	0.00723	0.00426	0.00426	0.00723	0.01062			
	0.02066	0.01802	0.00723	0.01725	0.00723	0.01802	0.02066		
	0.02449	0.02066	0.01062	0.01281	0.01281	0.01062	0.02066	0.02449	
	0.13896	0.39229	0.53710	0.65043	0.74675	0.83200	0.90929	0.98050	
	Direct.Cosine								

(a) WANL set

Weight	0.02276								
	0.01989	0.01989							
	0.01502	0.01164	0.01502						
	0.01367	0.00931	0.00931	0.01367					
	0.01367	0.00882	0.00767	0.00882	0.01367				
	0.01502	0.00931	0.00767	0.00767	0.00931	0.01502			
	0.01989	0.01164	0.00931	0.00882	0.00931	0.01164	0.01989		
	0.02276	0.01989	0.01502	0.01367	0.01367	0.01502	0.01989	0.02276	
	0.14907	0.39441	0.53748	0.64979	0.74536	0.82999	0.90676	0.97753	
	Direct.Cosine								

(b) GEAO set

Fig. 3.2 Arrangement of S_{16} Weights in Outer Region of 1 - Dimensional Cylindrical Angular Domain

Table 3.1 Comparison of Reaction Rates among S_8 , S_{12} and S_{16} Calculational Conditions
 [Unit : Reactions/sec]

Reaction	Region	WANL set			GEO set			(WANL set)/(GEO set)		
		S_8	S_{12}	S_{16}	S_8	S_{12}	S_{16}	S_8	S_{12}	S_{16}
${}^6\text{Li}(n, \alpha)$	$\text{Li}_2\text{O Block}$	0.6272 (1.001)	0.6269 (1.000)	0.6268 (1.0)	0.6281 (1.001)	0.6279 (1.000)	0.6276 (1.0)	0.9986	0.9984	0.9987
${}^7\text{Li}(n, n' \alpha)$	$\text{Li}_2\text{O Block}$	0.1379 (0.994)	0.1387 (1.000)	0.1388 (1.0)	0.1392 (0.998)	0.1397 (1.001)	0.1396 (1.0)	0.9907	0.9928	0.9943
${}^{58}\text{Ni}(n, p)$	SCM	9.771×10^{-10} (0.971)	1.000×10^{-9} (0.994)	1.007×10^{-9} (1.0)	6.910×10^{-10} (0.901)	7.293×10^{-10} (0.940)	7.666×10^{-10} (1.0)	1.414	1.389	1.313
${}^{54}\text{Fe}(n, p)$	SCM	4.143×10^{-10} (0.970)	4.243×10^{-10} (0.993)	4.271×10^{-10} (1.0)	2.919×10^{-10} (0.900)	3.044×10^{-10} (0.939)	3.242×10^{-10} (1.0)	1.419	1.394	1.317

Note : Values are normalized as source is unity in unit thickness.

3.2 反応率

摂動理論による断面積感度は(2-2)式からわかるように反応率に直接左右される。反応率の値は(2-3)式により計算される。もし計算方法に近似がなく中性子束 ϕ と随伴中性子束 ϕ^* の正確な解が得られれば、(2-3)式は厳密に成り立つはずである。しかし実際には計算における各種の近似、計算機の性能からくる計算条件の不満等から(2-3)式の両辺には差が生じる。そこで ϕ に基づく反応率を R 、 ϕ^* に基づく反応率を R^* とし次のように定義する。

$$R = \int \Sigma_f(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \quad (3-1)$$

$$R^* = \int S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \phi^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \quad (3-2)$$

計算機の容量、時間の点から R と R^* のある程度の不一致はやむを得ないが、ここでは簡便に使用できる計算条件の範囲でいかにして R と R^* の精度をあげられるかを検討し、さらに標準計算により得られた値を設計値と比較しうる単位に換算して示した。

(1) トリチウム増殖比

Table 3.2にトリチウムの増殖に寄与する反応率をまとめる。Sn 次数と散乱核は $S_{16}P_5$ であり、WANLセットの重みと分点を用いた。Li₂O 領域はPebble(Li₂O 24%)とBlock(Li₂O 72%)の2領域ある。増殖反応は ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ と ${}^7\text{Li}(n, n' \alpha)$ である。反応率は、単位厚さ(1cm)の円盤状プラズマ中で中性子線源強度が1 neutron/cm³/sec となるように規格化した。従って表の反応率そのものが増殖比の計算値とみなすことができる。Standard Mesh というのはTable 2.3におけるCoarse Meshの構造で、Fine Meshは、すでに第2章の1節で述べたように低速群のメッシュ効果を検討するために行った比較計算用のメッシュ構造である。結果はTable 3.2に示す通りメッシュ効果はほとんど現れなかった(<1.0%)。RとR^{*}も非常に良い一致を示し、Li₂O Block 領域の ${}^7\text{Li}(n, n' \alpha)$ 反応率が3.7%の違いを見せたほかはすべて1%以内で合っている。2領域の2反応による増殖比総量、すなわち今回の1次元形状によるトリチウム増殖比は1.088である。

(2) トーラス外側SCM中の誘導放射能

Table 3.3に外側SCM中の誘導放射能に大きな寄与をする ${}^{58}\text{Ni}$ と ${}^{54}\text{Fe}$ の(n, p)反応率をまとめる。値は(3-1)式の体積積分を単位厚さの全SCM中で行って得られたものであり規格化はトリチウム増殖比の場合と同様に行った。Sn 分点セットはWANLのS₈(第1次予備設計における条件)、S₁₆及びGEAOのS₁₆セットを用いた。散乱核次数はP₅である。Case 番号が1の場合はTable 2.1に示した通り第1次予備設計に用いた標準メッシュ構造であり、Case 2は第2章の1節で述べたようにポイド中も周辺部と同程度のメッシュ間隔になるように設定したメッシュ構造である。計算条件の悪い方から順次RとR^{*}を比較していくと、Case 1のS₈計算では両者の間に16%余りの差があった。次にS₁₆計算を行うと両者の差が12~13%にまで小さくなった。しかしまだ満足できる一致ではなく、 ${}^{58}\text{Ni}(n, p)$ 反応に注目してCase 2の計算を行うとS₈で8%

S_{16} では 2.3% にまで差を小さくできた。

他方、Case 2 の反応率を Case 1 のそれと比較すると、輸送計算に基づく R は S_8 で 0.4%, S_{16} で 1.5% 増加したに過ぎず〔表の () 内に示す〕、通常の輸送計算に関する限りボイド領域を 1 メッシュだけで代表させても深層透過の計算にほとんど支障ないことがわかった。しかし随伴計算に基づく R^* に目を移すと、Case 2 の値は Case 1 のそれより S_8 で 6.7%, S_{16} で 7.1% も小さくなっている。 R^* は (3-2) 式によって計算されるが、積分値はプラズマ領域のみで存在する。そこで随伴中性子束 ϕ^* の空間分布を調べるために S_{16} 計算による ϕ^* の領域毎の位相空間積分量を求めて両ケースで比較すると次のようになる。

領域番号 (名)	1 (プラズマ)	2 (真空)	3 (炭素)	4 (ステンレス)	以下略
積分量 ϕ^* {	Case 1	4.345×10^{-2}	1.039×10^{-2}	2.080×10^{-4}	4.214×10^{-4}
	Case 2	4.030×10^{-2}	1.038×10^{-2}	2.080×10^{-4}	4.214×10^{-4}

Case 1 と 2 で計算値が異なるのはプラズマ領域中だけである。すなわち円柱形状の最も中央にあるプラズマ領域を 1 メッシュだけで代表させた随伴計算では、内側境界条件を、うまく考慮に入れることができないと推論できる。

無限時間の照射、冷却時間なしの全 SCM 中の誘導放射能は Table 3.3 の反応率により容易に求めることができる。反応率として、 R を採用し、計算に用いた線源強度から 100 MW への規格化因子を 8.37303×10^{15} とすると Case 1 の形状、 $S_{16} P_5$ の条件の $^{58}\text{Ni}(n, p)$, $^{54}\text{Fe}(n, p)$ 反応による誘導放射能は、それぞれ WANL セットにより 0.97 Ci, 0.41 Ci, GEAO セットにより 0.74 Ci, 0.31 Ci と計算される。

(3) トーラス内側 SCM 内端における銅の変位損傷

Table 3.4 に内側 SCM 内端における単位時間当りの DPA を示す。規格化は外側形状の場合と同じく単位厚さの円盤状プラズマ中で中性子線源強度が 1 中性子/cm³/sec とするようになった。 R と R^* の差は S_8 で 1.7%, S_{16} で 1.1% と大きい。すでに外側 SCM 中の (n, p) 反応率の検討で判明したように、プラズマ中の随伴中性子束 ϕ^* の値のみにメッシュ効果が現われ他の領域の計算値には問題がないのでここでの検討は省略した。

S_{16} 計算によると炉心全出力を 100 MW に規格化した場合の SCM 内端における単位時間(年)当りの DPA は R から 2.40×10^{-5} となる。

Table 3.2 Summary of Reaction Rates for Tritium
Breeding Ratio in Outer Blanket gained
by S_{16} Calc.

(Unit: Reactions/sec)

Reaction	Region	Type of Reaction Rate	Standard Mesh	Fine Mesh
${}^6\text{Li}(n, \alpha)$	Li_2O Pebble	R	0.2065	0.2061
		R^*	0.2044	0.2059
		$(R^* - R)/R$	-0.010	-0.001
${}^7\text{Li}(n, n' \alpha)$	Li_2O Pebble	R	0.1165	0.1163
		R^*	0.1159	-
		$(R^* - R)/R$	-0.005	-
${}^6\text{Li}(n, \alpha)$	Li_2O Block	R	0.6266	0.6264
		R^*	0.6270	-
		$(R^* - R)/R$	0.001	-
${}^7\text{Li}(n, n' \alpha)$	Li_2O Block	R	0.1388	0.1398
		R^*	0.1440	-
		$(R^* - R)/R$	0.037	-
T.B.R. given by R			1.088	1.089
$(\text{T.B.R.})^*$ given by R^*			1.091	-
$\{(\text{T.B.R.})^* - \text{T.B.R.}\} / \text{T.B.R.}$			0.003	-

Note : Values are normalized as source is unity in unit
thickness.

Table 3.3 Summary of Reaction Rates for Induced Activity in Outer SCM

(Unit : Reactions/sec)

Reaction	Case	Type of Reaction Rate	WANL set		GEAO set
			S ₈	S ₁₆	S ₁₆
⁵⁸ Ni(n,p)	1	R	9771×10 ⁻¹⁰	1.007×10 ⁻⁹	7.666×10 ⁻¹⁰
		R*	1.136×10 ⁻⁹	1.134×10 ⁻⁹	8.568×10 ⁻¹⁰
		(R* - R)/R	0.163	0.126	0.118
⁵⁸ Ni(n,p)	2	R	9.814×10 ⁻¹⁰ (1.004)	—	7.781×10 ⁻¹⁰ (1.015)
		R*	1.060×10 ⁻⁹ (0.933)	—	7.963×10 ⁻¹⁰ (0.929)
		(R* - R)/R	0.0797	—	0.0234
⁵⁴ Fe(n,p)	1	R	4.143×10 ⁻¹⁰	4.271×10 ⁻¹⁰	3.242×10 ⁻¹⁰
		R*	4.824×10 ⁻¹⁰	—	3.626×10 ⁻¹⁰
		(R* - R)/R	0.164	—	0.118

Note : Values are normalized as source is unity in unit thickness.

Table 3.4 Summary of Reaction Rates for Cu Displacement in Inner SCM

(Unit : DPA/sec)

Reaction	Type of Reaction Rate	WANL set	GEAO set
		S ₈	S ₁₆
Cu Displacement	R	1.055×10 ⁻²⁸	9.096×10 ⁻²⁹
	R*	1.239×10 ⁻²⁸	1.010×10 ⁻²⁸
	(R* - R)/R	0.174	0.110

Note : Values are normalized as source is unity in unit thickness.

3.3 トリチウム増殖比の感度

ブランケット外側形状の構成元素の全断面積に対するトリチウム増殖比の感度を Table 3.5 と Table 3.6 に示す。前者は Li_2O の Pebble 領域における増殖比の感度であり、後者は Li_2O の Block 領域における感度である。

計算はWANLの S_{16} 分点セットを用いて行った。すでに2章で述べたように表の値は全エネルギー域で断面積が1%変化した場合の反応率(増殖比)の変動分(%)である。またトリチウムの増殖反応は摂動を受けないと仮定してあるが、増殖反応断面積も全断面積と同じ比の摂動を受けるとすれば ${}^6\text{Li}$ に対する ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応、 ${}^7\text{Li}$ に対する ${}^7\text{Li}(n, n' \alpha)$ 反応の感度は表の値よりも1.0大きいことになる。

Li_2O Pebble 領域においては ${}^{12}\text{C}$ に対する ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応のみが正の感度(断面積の増加に応じて反応率も増加する)を持っており、他の核種に対する ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応及びすべての核種に対する ${}^7\text{Li}(n, n' \alpha)$ 反応は負の感度(断面積の増加に応じて反応率は減少する)となっている。 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応断面積は、Fig. 2.2 に示したようにほぼ $1/v$ 型をしており低エネルギーになるほど値が大きい。従って Li_2O 領域の内側に置かれた ${}^{12}\text{C}$ は高速中性子を ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応に回答しやすく減速させるのに貢献していることがわかる。他の核種は減速効果よりも吸収などによって反応率を減少させる競合関係の方が強いことが予想される。 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応に最大の感度を与えるのは ${}^{16}\text{O}$ で、全断面積の1%の増加により反応率を0.0436%減少させる。以下 ${}^7\text{Li}, \text{Fe}, {}^6\text{Li}, \dots$ と続くが、 ${}^{12}\text{C}$ の感度はこれらの負の感度と比較しても非常に小さいといえる。

${}^7\text{Li}(n, n' \alpha)$ 反応は3MeV付近にしきい値を持ち、どの核種の断面積も増加により高速中性子の減少、すなわち反応率の減少を生じさせるという競合関係にあることがわかる。最大の感度を与えるのはFeで全断面積の1%の増加により反応率を0.0178%減少させる。以下 ${}^7\text{Li}, {}^{16}\text{O}, \text{Cr}, \text{Ni}, \dots$ と続く。Fe, Cr, Ni等SUSの構成元素は非弾性散乱が大きく、 ${}^7\text{Li}(n, n' \alpha)$ 反応のようなしきい反応に対しては大きな競合性を持つ。 ${}^7\text{Li}$ と ${}^{16}\text{O}$ は、 Li_2O の構成元素である。 ${}^6\text{Li}$ は元然存在比が約7%しかなくそれだけ断面積の与える感度も小さいのであろう。

Li_2O Pebble 領域のトリチウム増殖比の感度としては ${}^{16}\text{O}$ が最大で、Fe と ${}^7\text{Li}$ がこれとほとんど同じ感度を与える。以下 ${}^6\text{Li}, \text{Cr}, \text{Ni}, \dots$ と続く。

Li_2O Block 領域においてはすべての核種に対して ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応も ${}^7\text{Li}(n, n' \alpha)$ 反応も負の感度を持つ。前者に最大の感度を与えるのは ${}^{16}\text{O}$ で、全断面積の1%の増加により反応率を0.0968%減少させる。以下 ${}^7\text{Li}, \text{Fe}, {}^6\text{Li}, \dots$ と続くがこの傾向は Li_2O Pebble 領域のそれと非常に良く似ている。感度の値も ${}^{12}\text{C}$ の場合を除いて、Pebble 領域のその約2倍強である。 ${}^{12}\text{C}$ だけはPebble 領域の ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応率に正の感度を与えたが、Block 領域がCarbon Coating から離れすぎているため、減速された中性子がPebble 領域で吸収される効果を促進して結果的に Li_2O Block 領域の ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応率に負の感度を与えることになっていると考えられる。

${}^7\text{Li}(n, n' \alpha)$ 反応の感度が一番大きいのは ${}^7\text{Li}$ に対してであり、全断面積の1%の増

加により反応率は0.0886%減少する。その次にFe, ^{16}O と続くがこの2元素の与える感度は非常に近い。以下Cr, Ni, ^6Li , …… と続く。 Li_2O の Pebble 領域の感度との比較からわかるようにFe, Cr, Ni といったSUSの構成元素に対する感度が小さくなり相対的に ^7Li , ^6Li , ^{16}O のようなトリチウム増殖材の感度が大きくなっている。これはSUSの構成元素が主に高エネルギー中性子の非弾性散乱により $^7\text{Li}(n, n'\alpha)$ 反応に大きな感度を与えていたのに領域がプラズマ中性子源から遠ざかって中性子スペクトルが軟化し、非弾性散乱の影響が小さくなったためと見ることができる。

Li_2O Block 領域のトリチウム増殖比の感度としては、 ^7Li が最大で、以下 ^{16}O , Fe, ^6Li , Cr, Ni …と続く。

Fig. 3.4~3.19に Li_2O のPebble とBlock の両領域におけるトリチウム増殖比の感度スペクトル(Sensitivity Profile)を示す。縦軸は次式によって計算された量である。

$$\frac{1}{\Delta u_i} \cdot \frac{\delta R}{R} \Big/ \frac{\delta \Sigma_i}{\Sigma_i}$$

$\delta R/R$ は断面積の摂動によって生じた反応率の変化分であり、 $\delta \Sigma_i / \Sigma_i$ は第*i*群の断面積に与えられた微小摂動量である。 Δu_i は第*i*群のレサジー幅である。図中の実線は断面積の正の摂動(微量の増加)に対して負の感度(反応率の減少)を表わし、点線は正の感度(反応率の増加)を表わす。感度スペクトルの縦線は群構造の境で感度の値を対応させ得ないが、線の種類は左隣(低エネルギー側)の群のそれを使った。図中には感度スペクトルの属する2種類の増殖反応を明示しておいた。

Fig. 3.4, 3.5 はそれぞれ Li_2O のPebble とBlock の各領域におけるトリチウム増殖比の ^{12}C の全断面積に対する感度スペクトルである。Table 2.3からわかるように ^{12}C は第1壁の内側にコーティングとしてのみ用いられている。Fig. 3.4, 3.5において $^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応は ^{12}C に対し全エネルギー的に正の感度を持っている。これは減速により $^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応がよけい起こり易くなる効果の表われであろう。ただ Li_2O のPebble, Block のいずれの領域においても14MeV 中性子を含む第1群(15.0~13.72MeV)が負の感度を持っているのが特徴的である。これは上記の効果よりも14MeV 中性子すなわち Li_2O 領域の高速中性子源が減少することによる反応率の減少の効果の方が大きいことを表わす。特に Li_2O のBlock 領域における $^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応の感度はカーボンコーティングから距離も遠く第1の効果よりも後者の効果の方が大きくて全エネルギー的に積分した感度係数はTable 3.6に示したように負の感度となっている。 $^7\text{Li}(n, n'\alpha)$ 反応の感度は第1群において $^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応の場合と同様な効果により負となり、以下12~13MeV 付近では $^7\text{Li}(n, n'\alpha)$ 反応断面積のより大きなエネルギー域への中性子の減速により正の感度となっている。しかしこの反応は3MeV 付近にしきい値を持ち、11~12MeV より下ではしきいエネルギー以下への中性子の減速効果が支配的になって、再び負の感度となっている。

Fig. 3.6, 3.7 は ^6Li の全断面積に対する感度スペクトルである。この場合 $^6\text{Li}(n, \alpha)$ 断面積は摂動を受けないと仮定する。感度はすべて負の値となっている。いずれの反応においても14MeV 中性子の影響が強く出ているのは他の感度スペクトルと同様である。 $^6\text{Li}(n, \alpha)$

反応の感度スペクトルには約250keVにピークがあるが、これは ${}^6\text{Li}$ 断面積の共鳴エネルギー域である。

Fig. 3.8, 3.9 は ${}^7\text{Li}$ の全断面積に対する感度スペクトルである。 ${}^6\text{Li}$ に対する感度スペクトルに比べ幾分高エネルギー側に大きな感度のスペクトル形をしている。これも全エネルギー域で負の感度である。

Fig. 3.10, 3.11 には ${}^{16}\text{O}$ の全断面積に対する感度スペクトルを示す。Table 3.5, 3.6 に掲げるように ${}^{16}\text{O}$ に対してトリチウム増殖比は最大の感度を示す。そのスペクトル形は ${}^{16}\text{O}$ の次に大きい ${}^7\text{Li}$ のそれに非常に類似している。

Fig. 3.12, 3.13 にはMoの全断面積に対する感度スペクトルを示す。 Li_2O Pebble中の ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応の感度は14MeV 中性子が存在する第1群(15.0~13.7MeV)において負の値を持ち第2~第8群(13.7~6.5MeV)で正の値となる。第9群以下(6.5MeV以下)ではすべて負の感度となっている。 Li_2O Block領域における ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応の感度は第3~第5群(12.5~9.3MeV)で正の値となっている。いずれの領域の ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応も第1群で感度が負となるのは第1壁(領域番号4)のMoの全断面積の増加に対して Li_2O 領域の高速中性子源の減ずる効果が大きくきくからであろう。10MeV 付近で正の感度となるのは散乱、特に $(n, 2n)$ 反応の増加により中性子が ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応のより大きなエネルギー域へ減速される効果が増大するからである。7~9MeVより下では減速よりも吸収が増大する効果の方が大きくなるため負の感度となっている。 ${}^7\text{Li}(n, n'\alpha)$ 反応は高速中性子の除去される影響を大きく受け、4MeV以上の高エネルギー域では ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応よりも大きな負の感度を示している。

Fig. 3.14, 3.15 にCrの全断面積に対する感度スペクトルを示す。Crの1MeV以上の高エネルギーの散乱断面積はMoに比べて小さく、10MeV 付近でMoに対してほど顕著に ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応の正の感度が見られない。 Li_2O Block領域の ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応の感度の場合全エネルギー域で負の値となっている。

Fig. 3.16, 3.17 はNiの全断面積に対する感度スペクトルである。トリチウム増殖比を与える反応の感度はすべて負となっている。これはNiの数MeV以上の吸収断面積がMo, Cr, Fe等ステンレス鋼の他の構成元素のそれに比べ数倍大きいからで、全断面積の増加により反応断面積の大きいエネルギー域への減速よりも吸収により中性子を減少させる効果の方が大きいことを表わしている。

Fig. 3.18, 3.19 はFeの全断面積に対する感度スペクトルである。 Li_2O Pebble領域中の ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応のみが第3~第5群(12.5~9.3MeV)で正の感度を持つ。ステンレス鋼を構成するMo, Cr, Ni, Feはどれも大きな非弾性散乱断面積を持つが、高エネルギーで大きな吸収断面積を持つNiを除きこの非弾性散乱断面積が多かれ少なかれトリチウム増殖比の10MeV 付近の複雑な感度スペクトルに影響を及ぼしていると思われる。

Table 3.5 Sensitivity of Tritium Breeding Ratio in Li₂O Pebble Region for Blanket Constituents of JXFR Outer Model obtained from Perturbation Calculation with WANL S₁₆ Quadrature Set

Reaction	Region %	Element								
		¹² C	⁶ Li	⁷ Li	¹⁶ O	Mo	Cr	Ni	Fe	
⁶ Li(n,α)	3 Carbon Coating	1.22×10 ⁻³				-1.19×10 ⁻⁴	-8.13×10 ⁻⁴	-9.74×10 ⁻⁴	-3.30×10 ⁻³	
	4 Stainless Steel					-4.46×10 ⁻⁴	-3.33×10 ⁻³	-3.66×10 ⁻³	-1.39×10 ⁻²	
	5 Li ₂ O Pebble		-1.08×10 ⁻²	-1.41×10 ⁻²	-1.48×10 ⁻²	-4.46×10 ⁻⁴	-3.33×10 ⁻³	-3.66×10 ⁻³	-1.39×10 ⁻²	
	6 Li ₂ O Block		-7.82×10 ⁻³	-2.55×10 ⁻²	-2.88×10 ⁻²	-4.69×10 ⁻⁴	-4.18×10 ⁻³	-4.17×10 ⁻³	-1.53×10 ⁻²	
	7 S.S. Block					-9.93×10 ⁻⁶	-8.25×10 ⁻⁵	-7.39×10 ⁻⁵	-2.81×10 ⁻⁴	
	8 Stainless Steel					-9.66×10 ⁻⁸	-6.17×10 ⁻⁷	-5.68×10 ⁻⁷	-2.42×10 ⁻⁶	
	Total		1.22×10 ⁻³	-1.87×10 ⁻²	-3.96×10 ⁻²	-4.36×10 ⁻²	-1.04×10 ⁻³	-8.40×10 ⁻³	-8.88×10 ⁻³	-3.28×10 ⁻²
	⁷ Li(n,dα)	3 Carbon Coating	-2.76×10 ⁻³							
4 Stainless Steel						-2.13×10 ⁻⁴	-2.42×10 ⁻³	-1.49×10 ⁻³	-9.01×10 ⁻³	
5 Li ₂ O Pebble			-6.34×10 ⁻⁴	-8.55×10 ⁻³	-7.07×10 ⁻³	-2.06×10 ⁻⁴	-2.17×10 ⁻³	-1.36×10 ⁻³	-8.16×10 ⁻³	
6 Li ₂ O Block			-1.02×10 ⁻⁴	-1.39×10 ⁻³	-1.00×10 ⁻³	-1.85×10 ⁻⁵	-1.77×10 ⁻⁴	-1.14×10 ⁻⁴	-6.70×10 ⁻⁴	
7 S.S. Block						-9.61×10 ⁻⁹	-8.71×10 ⁻⁸	-5.79×10 ⁻⁸	-3.32×10 ⁻⁷	
8 Stainless Steel						-1.05×10 ⁻¹¹	-9.37×10 ⁻¹¹	-6.28×10 ⁻¹¹	-3.59×10 ⁻¹⁰	
Total			-2.76×10 ⁻³	-9.94×10 ⁻³	-8.07×10 ⁻³	-4.38×10 ⁻⁴	-4.76×10 ⁻³	-2.96×10 ⁻³	-1.78×10 ⁻²	
Sum of ⁶ Li and ⁷ Li			-1.54×10 ⁻³	-4.95×10 ⁻²	-5.17×10 ⁻²	-1.48×10 ⁻³	-1.32×10 ⁻²	-1.18×10 ⁻²	-5.06×10 ⁻²	

Table 3.6 Sensitivity of Tritium Breeding Ratio in Li₂O Block Region for Blanket Constituents of JXFR Outer Model obtained from Perturbation Calculation With WANL S₁₆ Quadrature Set

Reaction	Region %	Region	Element																	
			¹² C	⁶ Li	⁷ Li	¹⁶ O	Mo	Cr	Ni	Fe										
⁶ Li(n,α)	3	Carbon Coating	-1.62×10 ⁻³																	
	4	Stainless Steel																		
	5	Li ₂ O Pebble		-6.10×10 ⁻³	-1.91×10 ⁻²	-1.78×10 ⁻²	-4.11×10 ⁻⁴	-3.91×10 ⁻³	-1.41×10 ⁻³	-1.11×10 ⁻³										
	6	Li ₂ O Block		-2.78×10 ⁻²	-6.42×10 ⁻²	-7.89×10 ⁻²	-1.45×10 ⁻³	-1.32×10 ⁻²	-1.41×10 ⁻²	-1.41×10 ⁻²										
	7	S.S. Block					-2.07×10 ⁻⁴	-1.83×10 ⁻³	-2.13×10 ⁻³	-2.13×10 ⁻³										
	8	Stainless Steel					-1.94×10 ⁻⁶	-1.46×10 ⁻⁵	-1.86×10 ⁻⁵	-1.86×10 ⁻⁵										
		Total	-1.62×10 ⁻³	-3.39×10 ⁻²	-8.32×10 ⁻²	-9.68×10 ⁻²	-2.14×10 ⁻³	-2.03×10 ⁻²	-2.08×10 ⁻²											
⁷ Li(n,nα)	3	Carbon Coating	-4.27×10 ⁻³																	
	4	Stainless Steel																		
	5	Li ₂ O Pebble		-2.06×10 ⁻³	-2.79×10 ⁻²	-2.20×10 ⁻²	-6.47×10 ⁻⁴	-6.52×10 ⁻³	-4.11×10 ⁻³	-4.11×10 ⁻³										
	6	Li ₂ O Block		-4.49×10 ⁻³	-6.07×10 ⁻²	-4.19×10 ⁻²	-7.85×10 ⁻⁴	-7.57×10 ⁻³	-4.88×10 ⁻³	-4.88×10 ⁻³										
	7	S.S. Block					-1.24×10 ⁻⁶	-1.15×10 ⁻⁵	-7.60×10 ⁻⁶	-7.60×10 ⁻⁶										
	8	Stainless Steel					-1.14×10 ⁻⁹	-1.04×10 ⁻⁸	-6.97×10 ⁻⁹	-6.97×10 ⁻⁹										
		Total	-4.27×10 ⁻³	-6.54×10 ⁻³	-8.86×10 ⁻²	-6.39×10 ⁻²	-1.77×10 ⁻³	-1.77×10 ⁻²	-1.12×10 ⁻²											
Sum of ⁶ Li and ⁷ Li			-5.89×10 ⁻³	-4.04×10 ⁻²	-1.72×10 ⁻¹	-1.61×10 ⁻¹	-3.91×10 ⁻³	-3.80×10 ⁻²	-3.20×10 ⁻²											

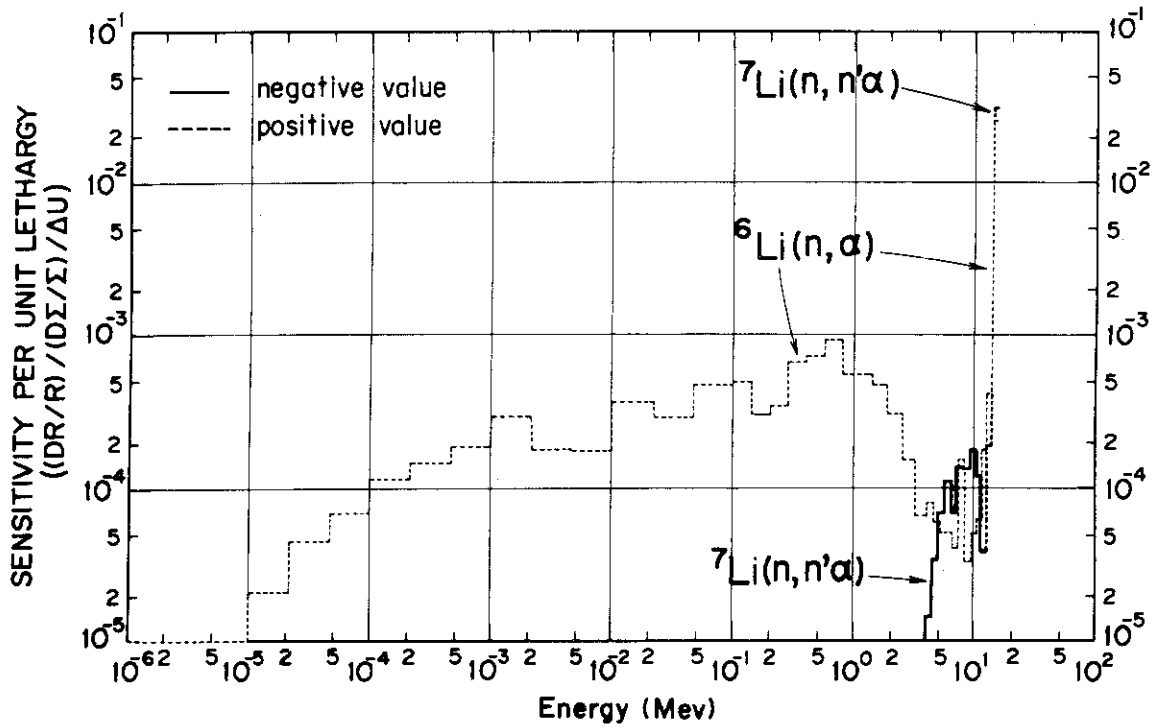


Fig.3.4 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li_2O Pebble Region for ${}^{12}\text{C}$ Total Cross Section

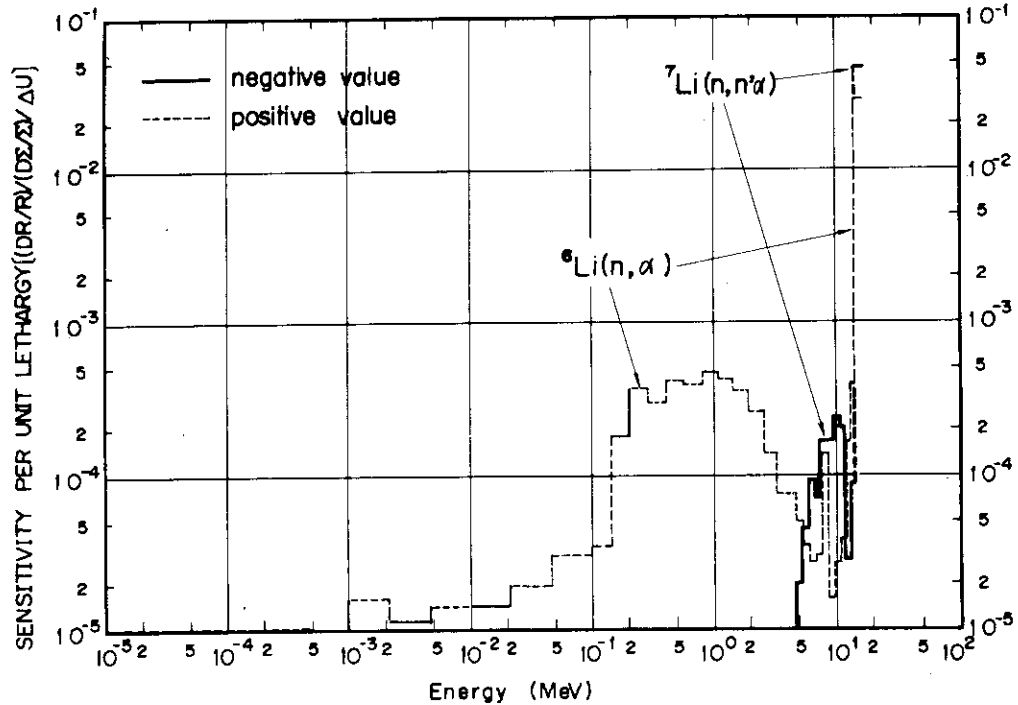


Fig.3.5 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li_2O Block Region for ${}^{12}\text{C}$ Total Cross Section.

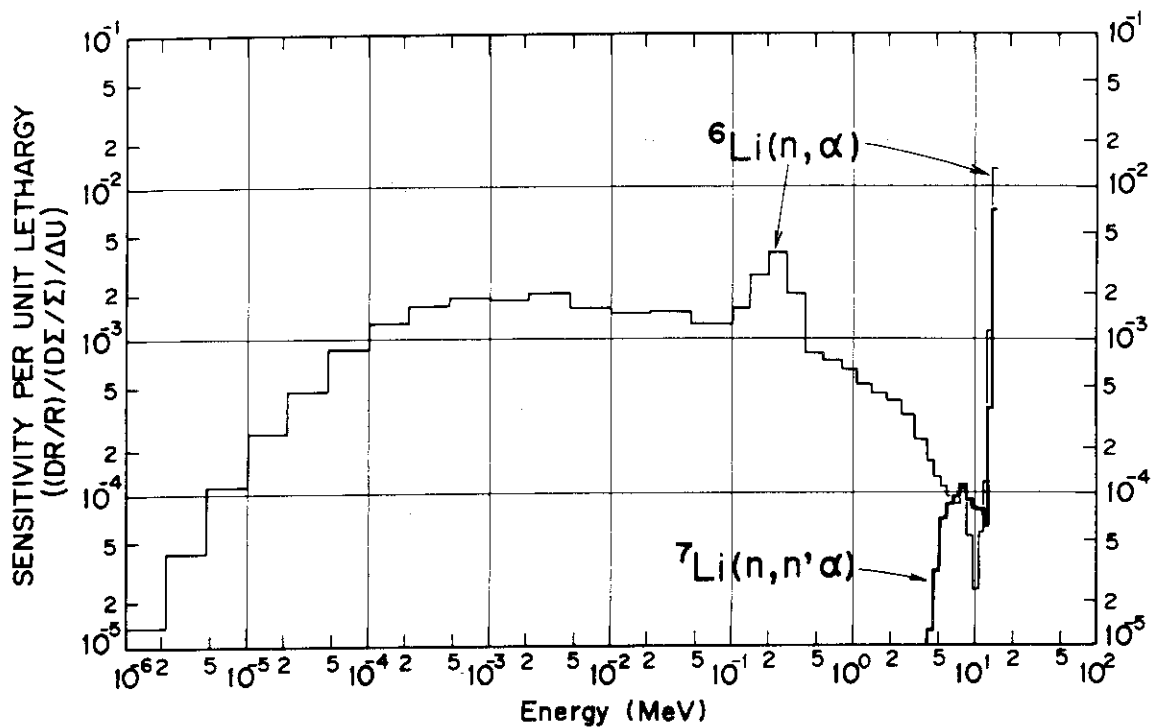


Fig.3.6 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li_2O Pebble Region for ${}^6\text{Li}$ Total Cross Section

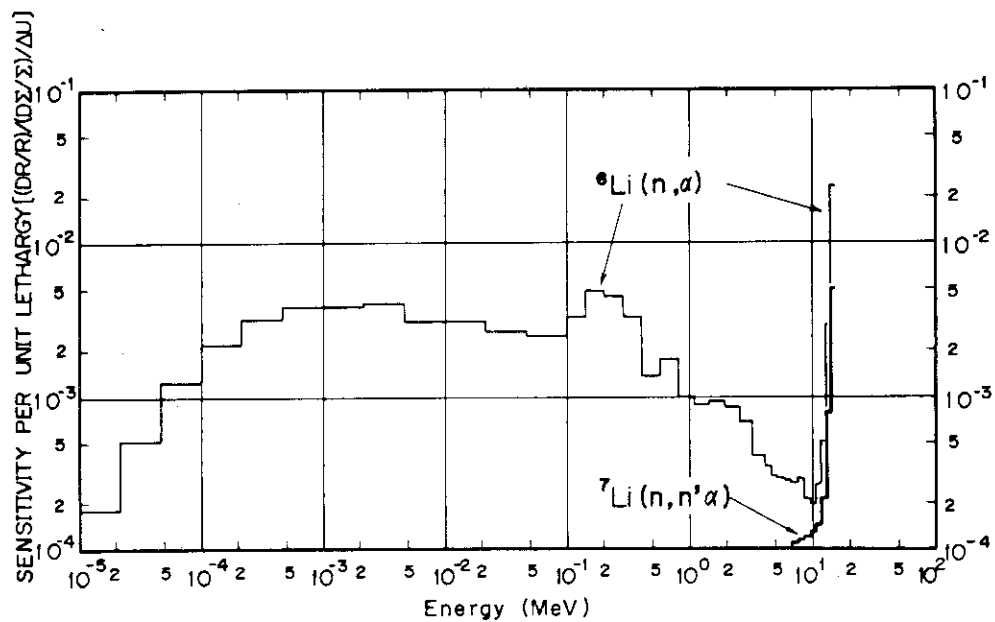


Fig.3.7 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li_2O Block Region for ${}^6\text{Li}$ Total Cross Section.

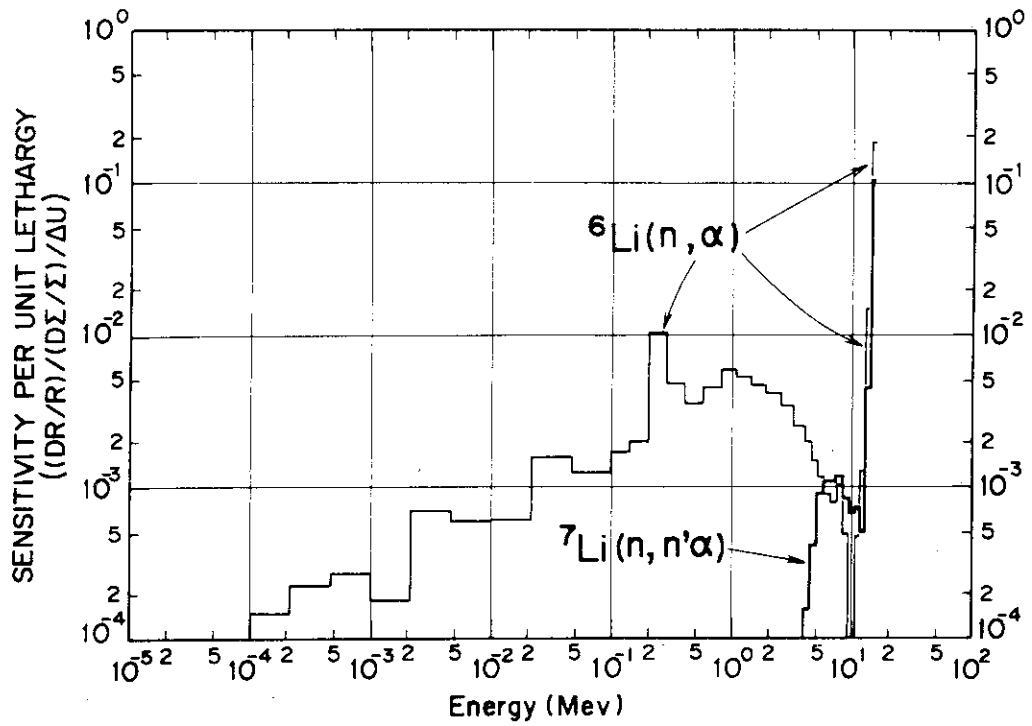


Fig.3.8 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li₂O Pebble Region for ⁷Li Total Cross Section

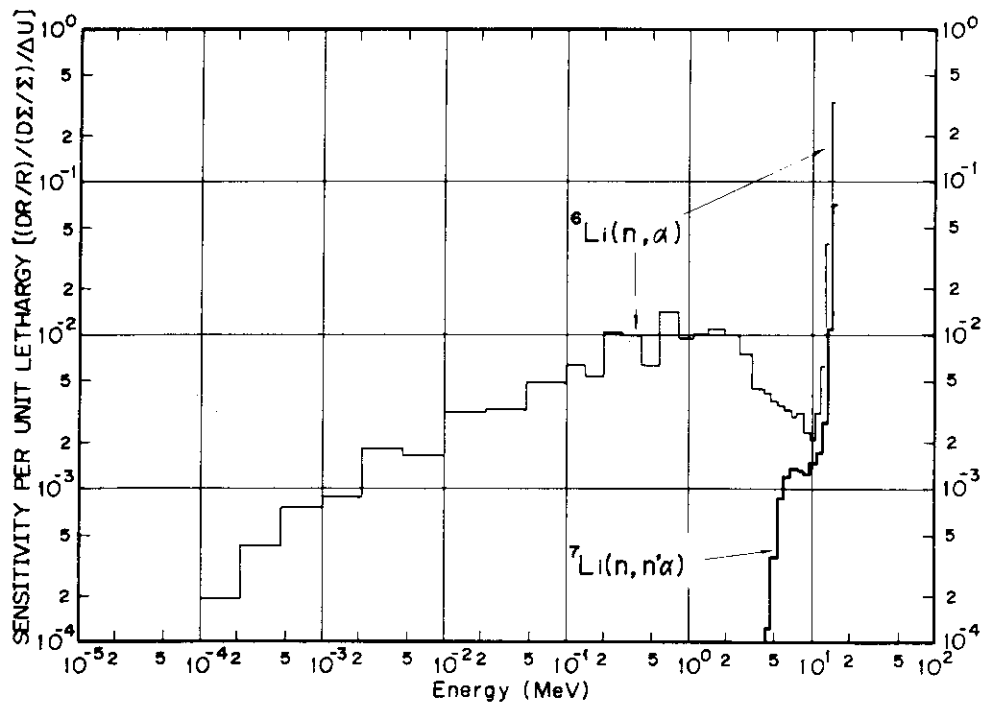


Fig. 3.9 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li₂O Block Region for ⁷Li Total Cross Section

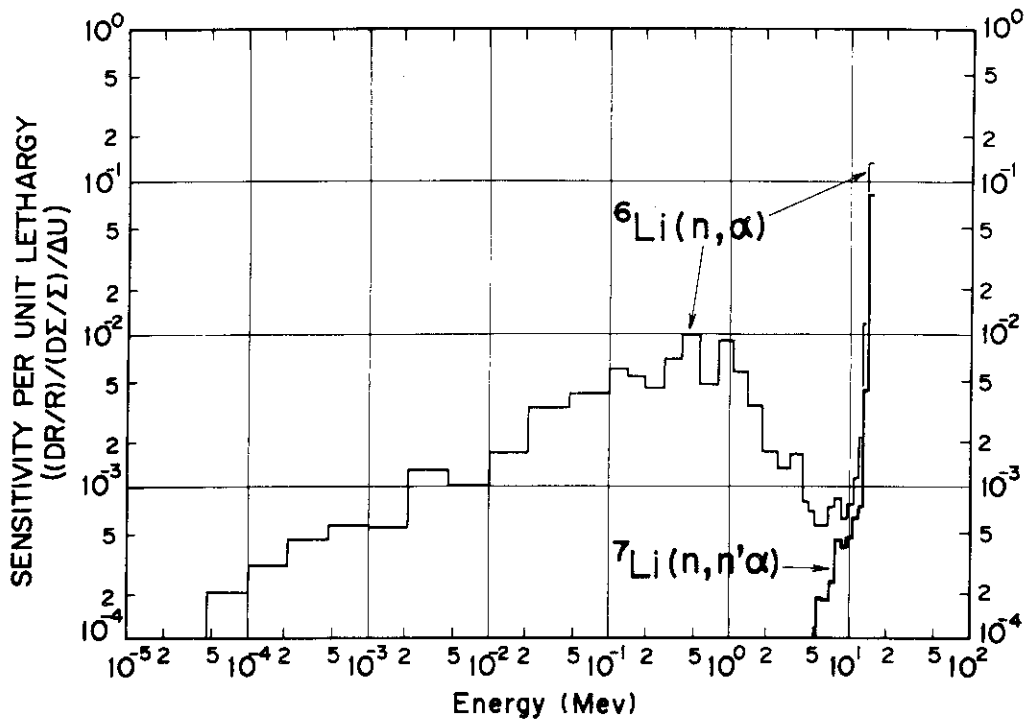


Fig.3.10 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li₂O Pebble Region for ¹⁶O Total Cross Section

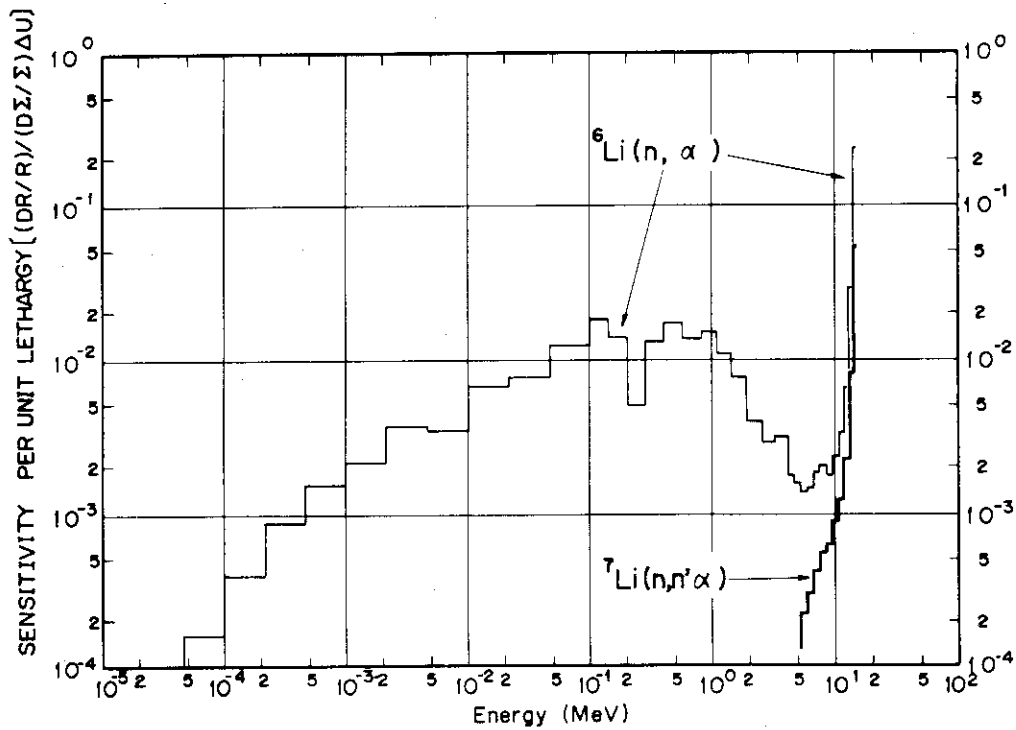


Fig.3.11 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li₂O Block Region for ¹⁶O Total Cross Section.

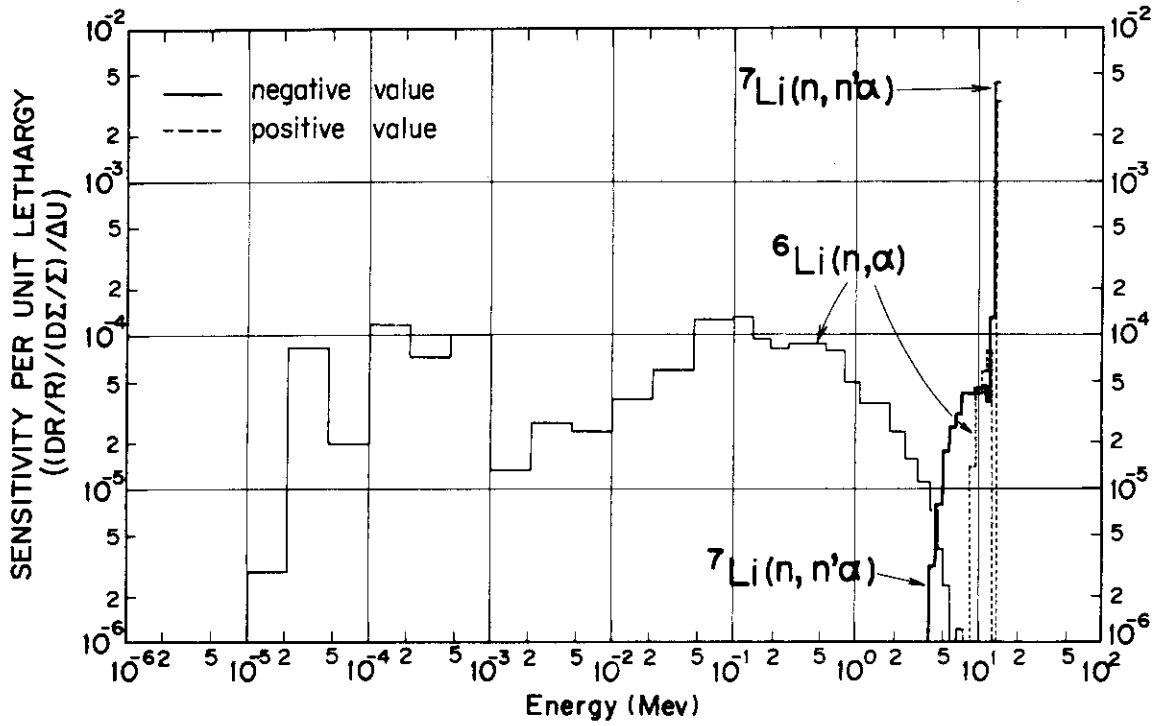


Fig.3.12 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li_2O Pebble Region for Mo Total Cross Section

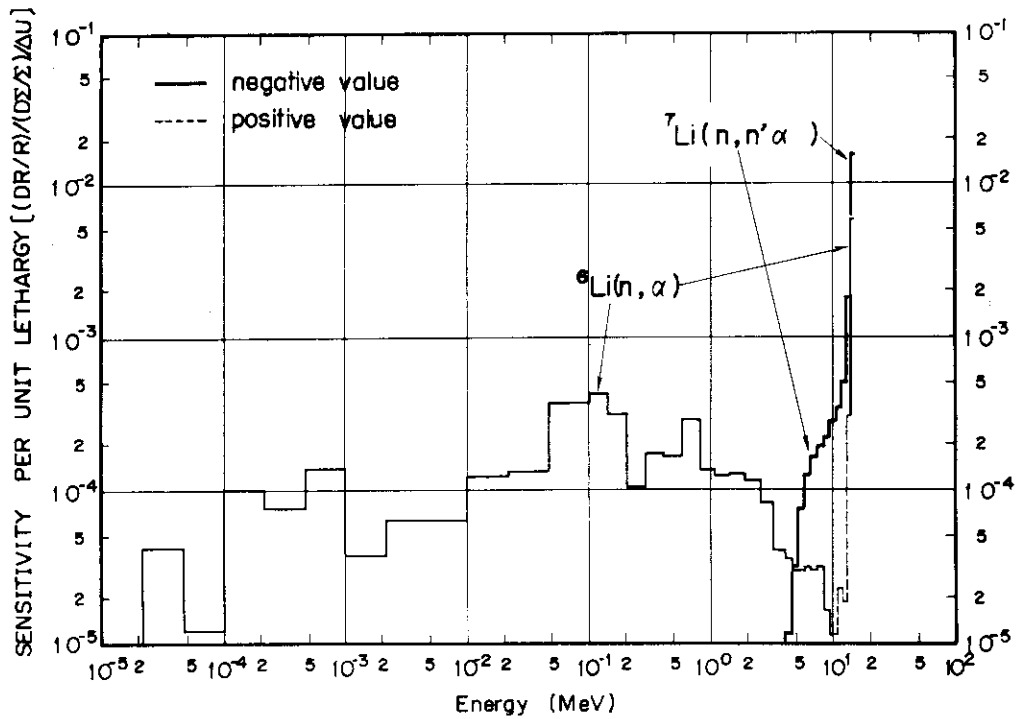


Fig.3.13 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li_2O Block Region for Mo Total Cross Section.

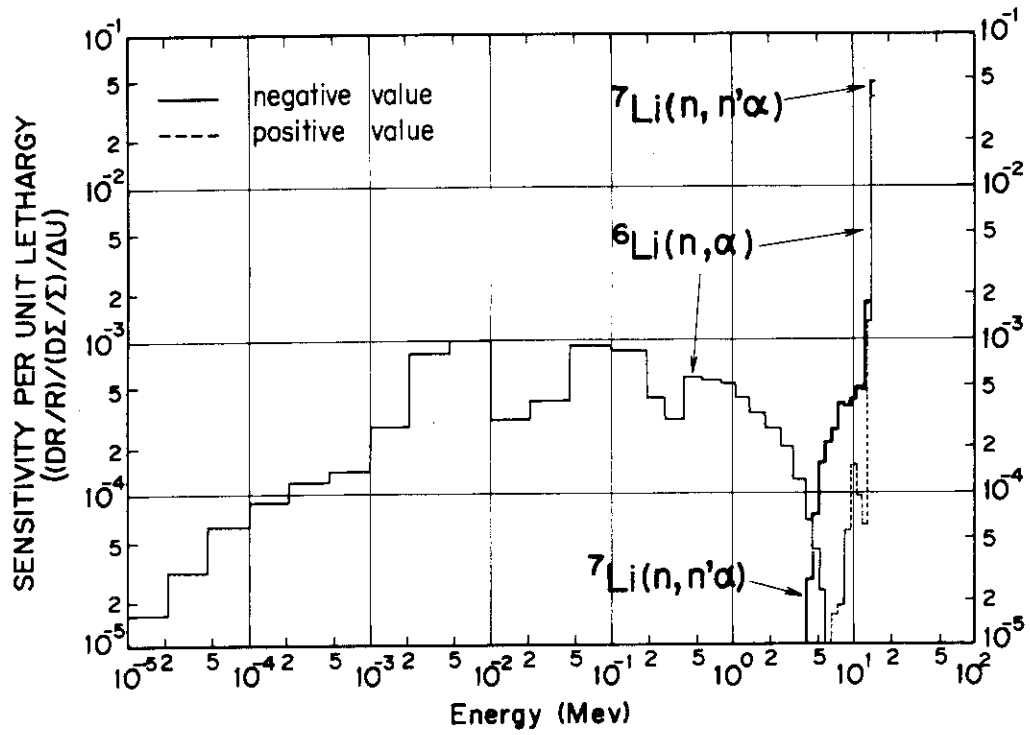


Fig.3.14 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li₂O Pebble Region for Cr Total Cross Section

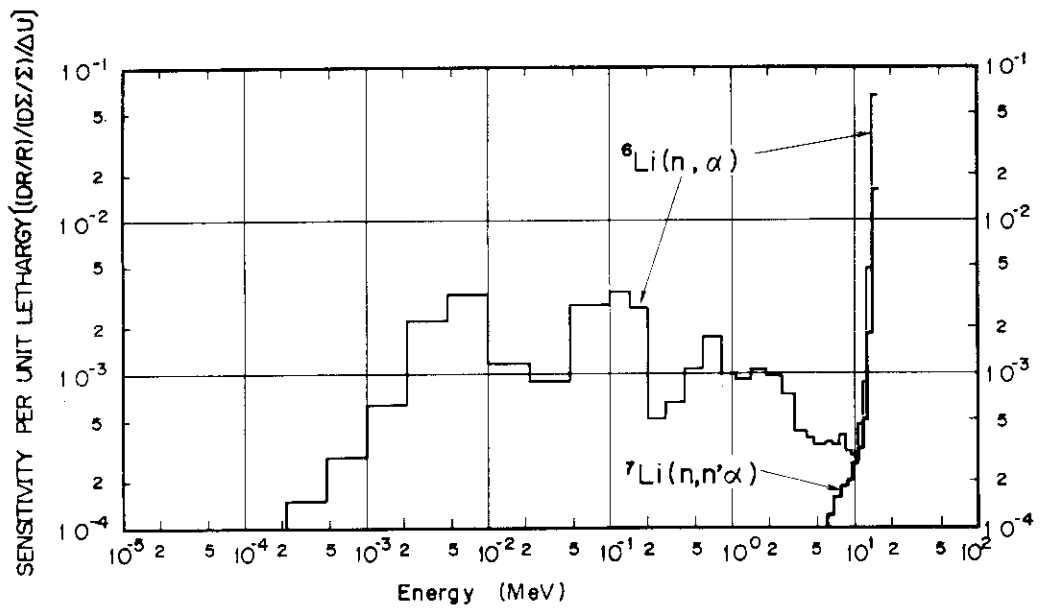


Fig.3.15 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li₂O Block Region for Cr Total Cross Section.

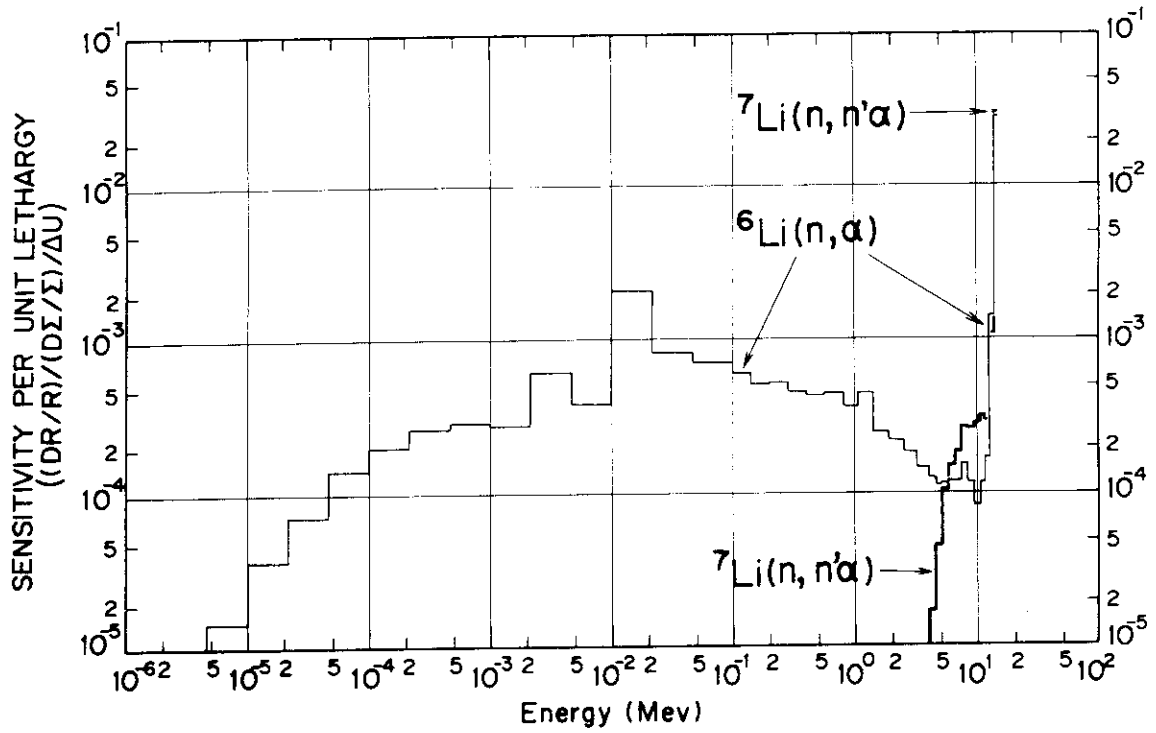


Fig.3.16 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li_2O Pebble Region for Ni Total Cross Section

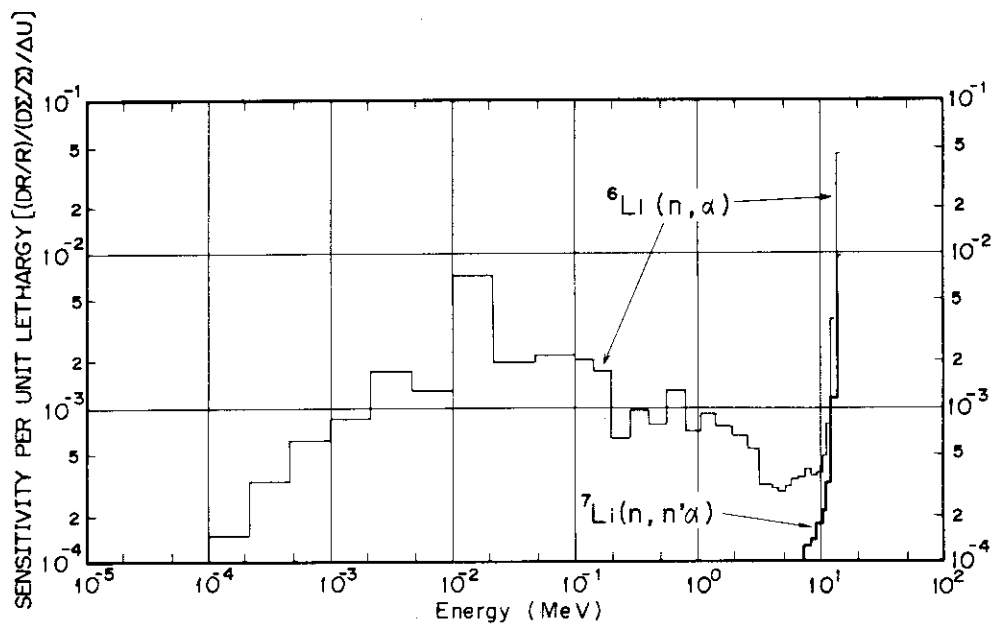


Fig.3.17 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li_2O Block Region for Ni Total Cross Section

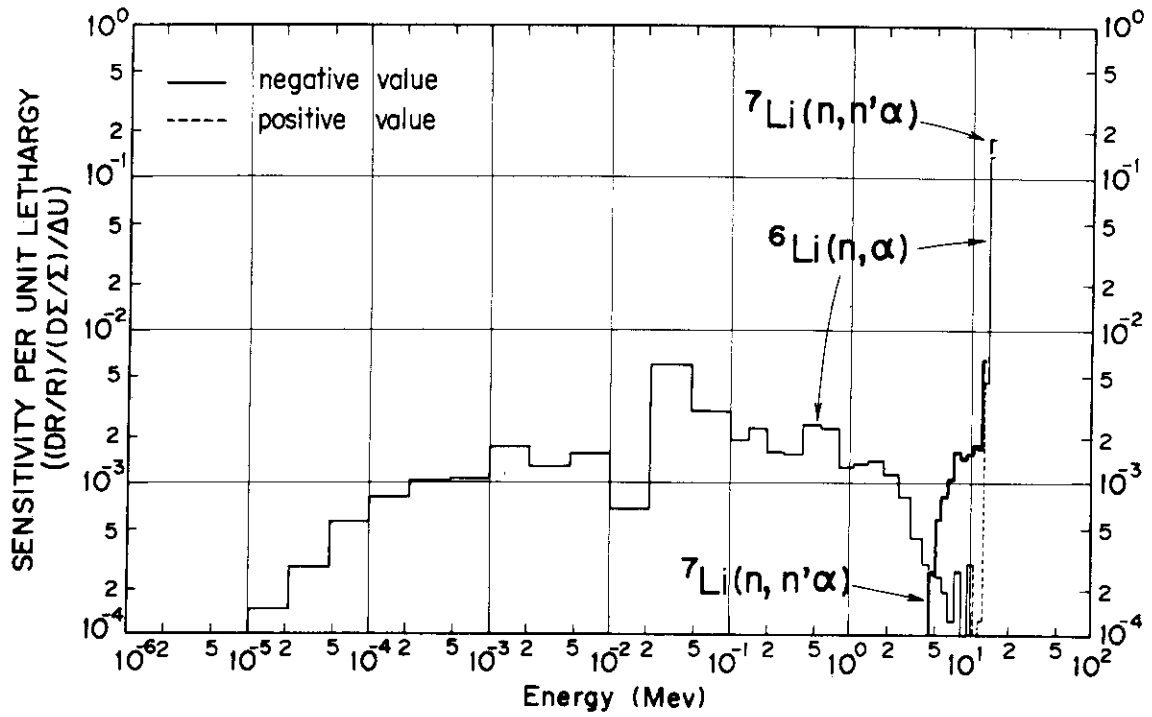


Fig.3.18 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li_2O Pebble Region for Fe Total Cross Section

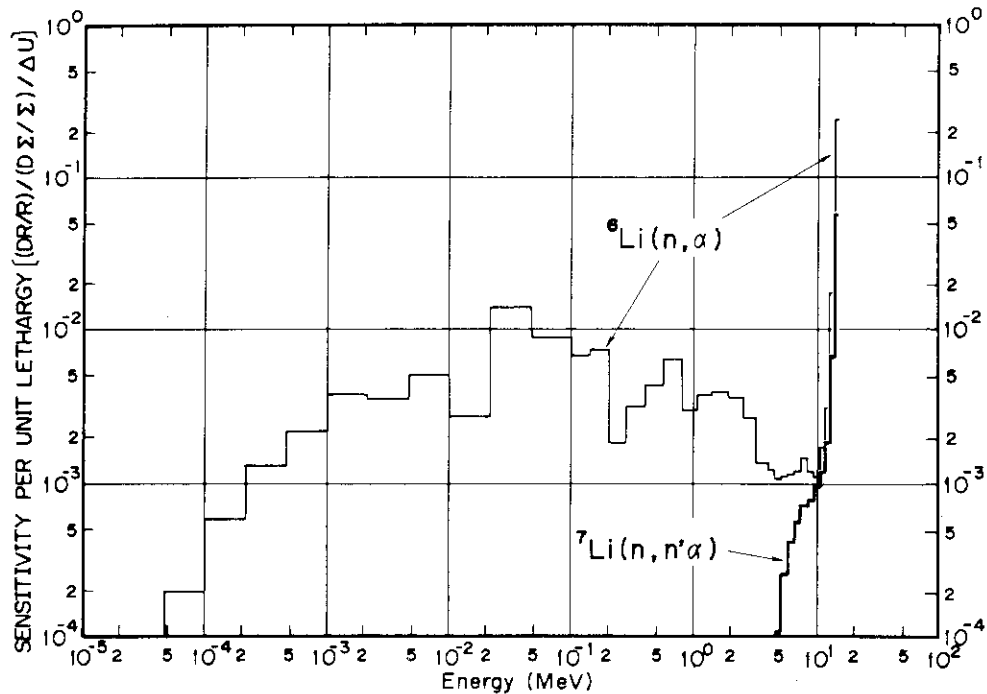


Fig.3.19 Breeding Ratio Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy in Li_2O Block Region for Fe Total Cross Section.

3.4 トーラス外側超電導コイル中の誘導放射能の感度

炉の停止時に周辺の空間ガンマ線量の最も大きな原因となるのは外側超電導コイル中の ^{58}Ni と ^{54}Fe の(n, p)反応である。トーラス外側形状の構成元素の全断面積に対するこれらの反応の感度をTable 3.7とTable 3.8に示す。計算はGEOのS₁₆セットを用いてP₅の条件で行った。トリチウム増殖比の場合と同様にここでも(n, p)反応断面積は振動を受けないと仮定した。

^{58}Ni (n, p)反応の場合、感度を調べた8核種中Feが最も大きな感度を与えており、全断面積の1%の増加により反応率を2.83%減少させる。次に大きいのは ^{16}O でFeの約50%の感度を与える。以下Cr, H, Ni, ……と続くがこれらは高々Feの12%以下の感度しか与えない。8核種中最も感度が小さいのは ^6Li で全断面積の1%の増加により反応率を0.0428%減少させるのみである。また、これらはすべて負の感度である。 ^{58}Ni (n, p)反応断面積はFig. 2.2に示すように約300keVにしきいエネルギーがあり反応率に寄与するのは高速中性子のみである。プラズマから超電導コイルまでの間の媒質の断面積の増加は、散乱、吸収のいずれにしても高速中性子を除去する効果をもたらす。このことは ^{58}Ni (n, p)反応の感度がすべて負であることの裏づけともいえる。

領域毎に感度をながめるとLi₂O Block中の ^7Li , ^{16}O , ステンレス鋼Block中のFe, Cr, Ni, 重コンとボロン水中のFe, ^{16}O , Hの感度が大きい。すなわち超電導コイルの遮蔽設計という観点からすればLi₂O Block, ステンレス鋼Block, 重コンとボロン水の層の成分及び寸法が大きな影響を及ぼすことが予想される。

^{54}Fe (n, p)反応断面積はFig. 2.2に示すように値が少し小さいだけで ^{58}Ni (n, p)反応断面積とほとんど同じ形をしている。従って、構造材の8核種の断面積に対する感度は ^{58}Ni (n, p)反応の場合と同様の傾向を示す。ただししきいエネルギーが高いので(約1MeV)高速中性子の変化に対してより高い感度を示し、わずかに(約0.5%)大きな感度の値になっている。

Fig. 3.20, 3.21に外側超電導コイル中の ^{58}Ni と ^{54}Fe の(n, p)反応の感度スペクトル(Sensitivity Profile)を示す。縦軸はすでにトリチウム増殖比の場合に述べた通りである。比較を容易にするために類似した特徴を持つ感度スペクトルを幾つか重ねて図示した。すなわち左から、Li₂O領域で支配的な ^7Li と ^6Li , ステンレス鋼Block中で支配的なCr, Mo, Ni, 重コンとボロン水中で支配的な ^{16}O , Hという順に並べた。8つの核種の中で最大であるFeの感度スペクトルだけは、離れて図示されたものの比較を容易にするためにすべての感度スペクトルのグループ中に図示した。また核種の区別を明白にするためにいろいろな種類の線を用いたが、Figs. 3.20, 3.21の感度スペクトルはすべて負の感度である。

^{58}Ni (n, p)反応と ^{54}Fe (n, p)反応の感度スペクトルの間にはほとんど差がなく以下に述べる特徴は両方にあてはまる。Li₂O領域においては14MeV中性子の影響が非常に強く、 ^7Li の場合Feに対して約40%の大きさの感度を持っているが、エネルギーの減少と共に急速に小さくなり7MeV(第8群)でFeに対して約3%の大きさの感度しか持っていない。 ^6Li の場合も同様の傾向を示す。Cr, Mo, NiのようなSUSの構造材はFeと同

様に高エネルギーでの非弾性散乱断面積が大きい。支配的な領域はステンレス鋼中であり遮蔽体としての重コン中で最も大きな感度を持つFeに比べ14MeV中性子の影響をやや強く反映している。 ^{16}O はFeに次いで大きな感度を与えることはすでに述べたが、その分布が Li_2O 領域から重コンとボロン水の領域までとかなり広範囲にわたる点でFeと似ており、感度スペクトルもFeと同じく広いエネルギー範囲で大きな値を与えている。Hはボロン水中でしか存在しなく、14MeVでFeの7%の大きさの感度しかなかったのが5MeV(第11群)でFeに対して30%の大きさの感度を与えるというように低エネルギー域でより大きな感度を与える。

Table 3.7 Sensitivity of $^{58}\text{Ni}(n,p)$ Reaction for Various Constituents of JXFR Outer Model
 Obtained from Perturbation Calculation With GEAO S₁₆ Quadrature Set.

Zone	Region %	Region	Element							
			^6Li	^7Li	^{16}O	Mo	Cr	Ni	Fe	H
Blanket	4	Stainless Steel				-5.80×10^{-4}	-5.44×10^{-3}	-3.45×10^{-3}	-2.04×10^{-2}	
	5	Li ₂ O Pebble	-4.06×10^{-3}	-5.52×10^{-2}	-3.89×10^{-2}	-1.16×10^{-3}	-1.07×10^{-2}	-6.82×10^{-3}	-4.04×10^{-2}	
	6	Li ₂ O Block	-3.87×10^{-2}	-5.25×10^{-1}	-3.43×10^{-1}	-6.41×10^{-3}	-5.73×10^{-2}	-3.78×10^{-2}	-2.20×10^{-1}	
	7	S.S. Block				-2.03×10^{-2}	-1.80×10^{-1}	-1.20×10^{-1}	-6.91×10^{-1}	
Shield	10	H.C.+H ₂ O(B)			-9.96×10^{-1}				-1.59×10^0	-3.23×10^{-1}
TFC	14	SCM						-2.53×10^{-2}	-1.65×10^{-2}	-9.32×10^{-2}
Total			-4.28×10^{-2}	-5.81×10^{-1}	-1.38×10^0	-3.63×10^{-2}	-3.23×10^{-1}	-2.15×10^{-1}	-2.83×10^0	-3.23×10^{-1}

Table 3.8 Sensitivity of $^{54}\text{Fe}(n,p)$ Reaction for Various Constituents of JXFR Outer Model
Obtained from Perturbation Calculation With GEAO S₁₆ Quadrature Set

Zone	Region %	Region	Element							
			^6Li	^7Li	^{16}O	Mo	Cr	Ni	Fe	H
Blanket	4	Stainless Steel				-582×10^{-4}	-546×10^{-3}	-346×10^{-3}	-204×10^{-2}	
	5	Li ₂ O Pebble	-408×10^{-3}	-555×10^{-2}	-390×10^{-2}	-1.16×10^{-3}	-1.07×10^{-2}	-683×10^{-3}	-405×10^{-2}	
	6	Li ₂ O Block	-389×10^{-2}	-528×10^{-1}	-3.44×10^{-1}	-6.44×10^{-3}	-5.75×10^{-2}	-379×10^{-2}	-2.21×10^{-1}	
	7	S.S. Block				-204×10^{-2}	-1.80×10^{-1}	-1.21×10^{-1}	-6.93×10^{-1}	
	8	Stainless Steel				-5.11×10^{-3}	-4.51×10^{-2}	-303×10^{-2}	-1.73×10^{-1}	
Shield	10	H.C. + H ₂ O(B)			-101×10^0				-1.61×10^0	-324×10^{-1}
TFC	14	SCM							-9.47×10^{-2}	
Total			-430×10^{-2}	-583×10^{-1}	-1.39×10^0	-3.64×10^{-2}	-325×10^{-1}	-2.16×10^{-1}	-2.85×10^0	-324×10^{-1}

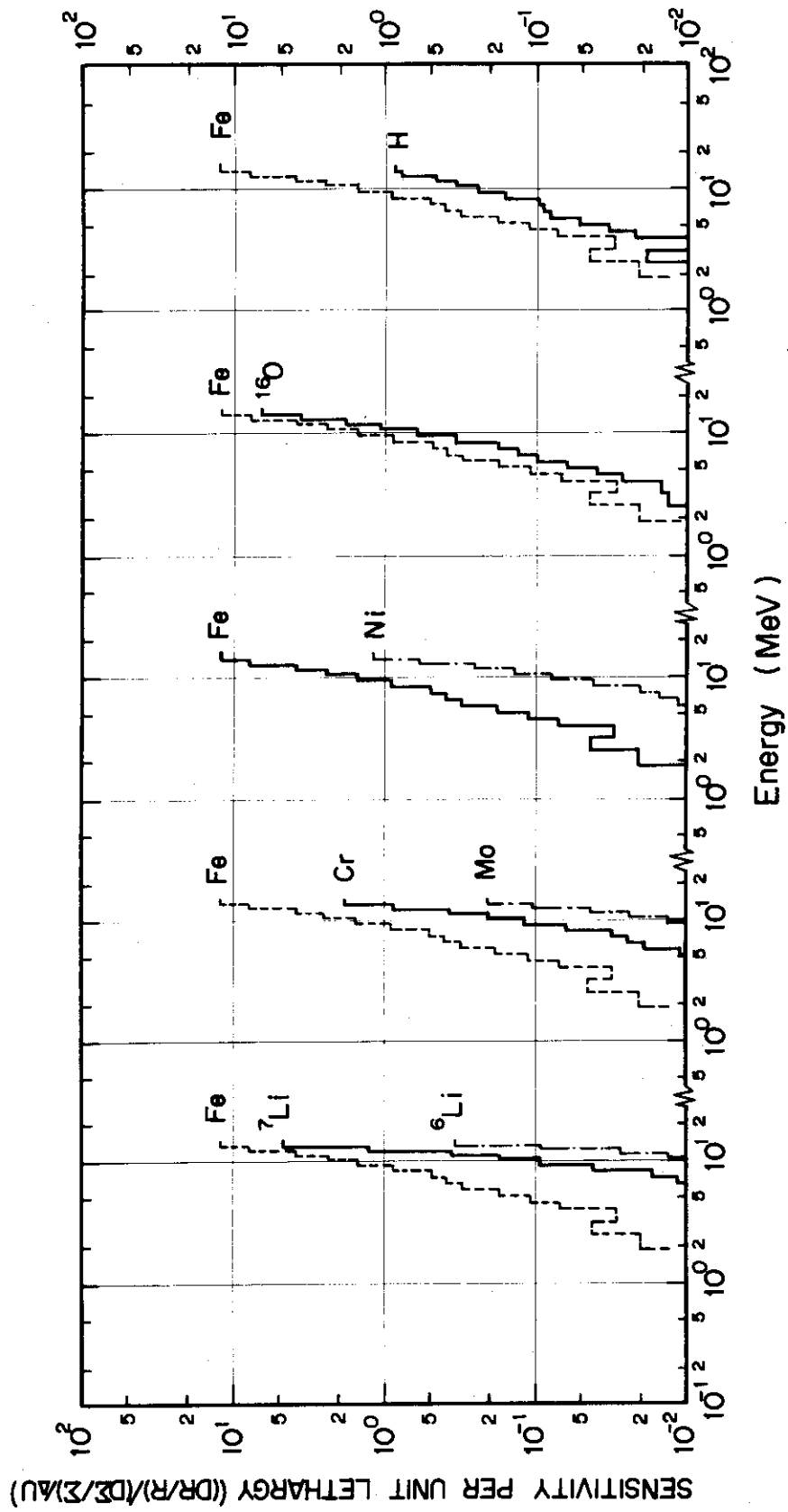


Fig. 3.20 ${}^{58}\text{Ni}(n,p)$ Reaction Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy for Various Constituents of JXFR Outer Model

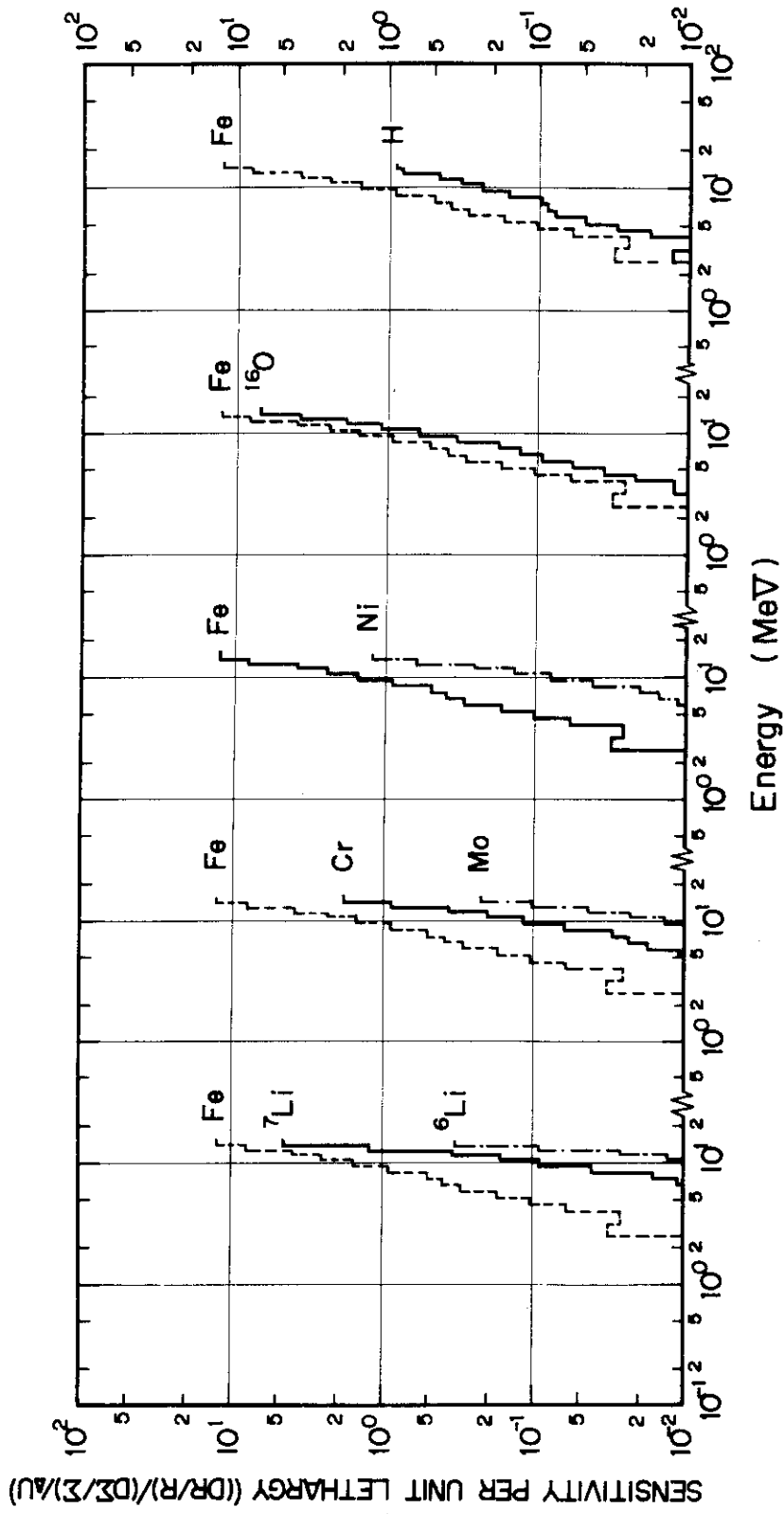


Fig. 3.21 ${}^{54}\text{Fe}(n,p)$ Reaction Sensitivity per Unit Lethargy versus Energy for Various Constituents of JXFR Outer Model

3.5 トーラス内側超電導コイル内端における銅の変位損傷の感度

トーラス構造の内側は、中性子の遮蔽専用設計されている。この内側形状で核的に最も厳しい条件となるのは内側超電導コイルの最もプラズマに近い部分の銅の変位損傷であり、構成元素である13の核種に対してこの損傷の感度を調べた。計算はGEOのS₁₆セットを用いてP₅の条件で行った。トリチウム増殖比、(n, p)反応の場合と同様にここでもCuの全断面積の摂動の際に銅の変位損傷断面積は摂動を受けないと仮定した。

Table 3.9 に13の核種に対する銅の変位損傷の感度を領域毎にまとめる。13核種中最大の感度を与えるのはFeで、全断面積の1%の増加により銅の変位損傷を1.03%減少させる。Feの次には遮蔽層に水として含まれている¹⁶Oの感度が大きくFeの36%の感度を与え、その次にはブランケットの遮蔽効果を上げるため混入してあるタングステンに対する感度が大きく、¹⁸²W, ¹⁸³W, ¹⁸⁴W, ¹⁸⁶WはFeに比べ15~30%の大きさの感度を与えている。以下Cr, H, NiがFeの10~15%の大きさの感度を与え、残りのMo, ¹⁰B, Al, CuはFeの10%以下の感度しか与えない。

Fig. 3.22~3.25にはトーラス内側形状を構成する代表的な核種の全断面積に対する銅の変位損傷の感度スペクトル(Sensitivity Profile)を示す。Table 3.9に掲げた13核種のうち、タングステンの4つの同位元素に対する感度スペクトルはどれもよく似ているので最大の感度を与える¹⁸⁴Wの感度スペクトルで代表し、NiとMoもまたその形がCrの感度スペクトルに似ているので省略した。縦軸はすでにトリチウム増殖比、(n, p)反応の感度スペクトルの際に述べた通りである。比較のためにすべての核種の感度スペクトルにはFeのそれを重ねて図示したが、破線で描いたものは判別を容易にするためだけの理由でありすべて負の感度である。CuとAlの場合にのみ100keV又は600keV以下の中エネルギー域で正の感度が見られる。

Feと同じくステンレス鋼の構成元素であるCrは鉄と良く似た感度スペクトルを持っている。しかしFeが非常に大きな感度を与える遮蔽層の重コン中にCrは用いられておらず、14MeVでFeの17%だった感度が2MeV(第15群)でFeの10%の感度しかもたないというように高エネルギー域で幾分大きな感度を与えている。タングstenは高エネルギー域でFeよりも大きな非弾性散乱断面積を持ち、ブランケット中の1つの領域では構造材として利用されている。¹⁸⁴Wの感度スペクトルはこの大きな非弾性散乱断面積とブランケット中の硬い中性子スペクトルとを反映して14MeVでFeの36%、2MeV(第15群)で11%と10MeV以上の高エネルギー域で極端に大きな感度を与えている。¹⁶Oは遮蔽層で多く用いられFeに次いで大きな感度を与えるが、1MeV以上での散乱断面積が非常に小さくFeの30~40%の感度しか与えないのに対し1MeV以下ではFe以上の感度を与える。Hも遮蔽層のみで存在し、¹⁶Oと同様の傾向が見られる。¹⁰Bは低エネルギーでの吸収断面積が大きいという特徴を生かして遮蔽層中に用いられているが、約500keVより低エネルギー域ではFeより大きな感度を与えることによりその効果を裏づけている。超電導コイルの断熱材として用いられているAlに対する銅の変位損傷の感度はFeの10%以下しかない。約600keV以下では正の感度となっているが、これはちょうどAlの非弾性散乱のしき

いエネルギーに近く、中性子を大きく減速して実質上変位損傷断面積の大きい高エネルギー域から除去してしまうような効果がこのエネルギー以下でなくなったために生じる現象と予想される。Fig. 3.25 には Cu に対する感度スペクトルを示すが Fe に比べ値は非常に小さい。すなわちトーラス内側 SCM の最もプラズマ寄りの部分における銅の変位損傷は Cu の全断面積に対して非常に小さい（最大の Fe に比べ約 1.3%）感度しか持たないといえる。

Table 3.9 Sensitivity of Cu Displacements for Various Constituents of JXFR Inner Model
Obtained from Perturbation Calculation With GEAO S₁₆ Quadrature Set

Zone	Region %	Region	Element											
			¹⁶ O	Mo	Cr	Ni	Fe	H	¹⁰ B	Al	Cu			
Blanket	4	Stainless Steel		-6.00×10 ⁻⁴	-5.79×10 ⁻³	-3.65×10 ⁻³	-2.17×10 ⁻²							
	6	S.S.		-6.53×10 ⁻⁴	-6.18×10 ⁻³	-3.92×10 ⁻³	-2.33×10 ⁻²							
	7	S.S. + He		-5.99×10 ⁻³	-5.59×10 ⁻²	-3.57×10 ⁻²	-2.12×10 ⁻¹							
	8	S.S. + W + He		-3.72×10 ⁻³	-3.40×10 ⁻²	-2.21×10 ⁻²	-1.30×10 ⁻²							
	9	S.S.		-3.76×10 ⁻³	-3.41×10 ⁻²	-2.23×10 ⁻²	-1.30×10 ⁻¹							
Shield	11	H.C. + H ₂ O(B)	-351×10 ⁻¹				-5.20×10 ⁻¹	-1.11×10 ⁻¹						
	12	S.S. + B ₄ C + H ₂ O	-160×10 ⁻²	-2.61×10 ⁻³	-2.34×10 ⁻²	-1.55×10 ⁻²	-8.78×10 ⁻²	-2.36×10 ⁻²						
TFC	14	Insulator(Al)												
	15	SCM		-5.22×10 ⁻⁴	-4.52×10 ⁻³	-3.06×10 ⁻³	-1.68×10 ⁻²							
	16	Insulator(Al)												
Total			-367×10 ⁻¹	-1.79×10 ⁻²	-1.64×10 ⁻¹	-1.06×10 ⁻¹	-1.03×10 ⁰	-1.34×10 ⁻¹	-8.88×10 ⁻²	-6.82×10 ⁻²	-1.29×10 ⁻²			

Zone	Region %	Region	Element		
			¹⁸² W	¹⁸³ W	¹⁸⁴ W
Blanket	8	S.S. + W + He	-284×10 ⁻¹	-1.54×10 ⁻¹	-3.26×10 ⁻¹
	Total			-284×10 ⁻¹	-1.54×10 ⁻¹

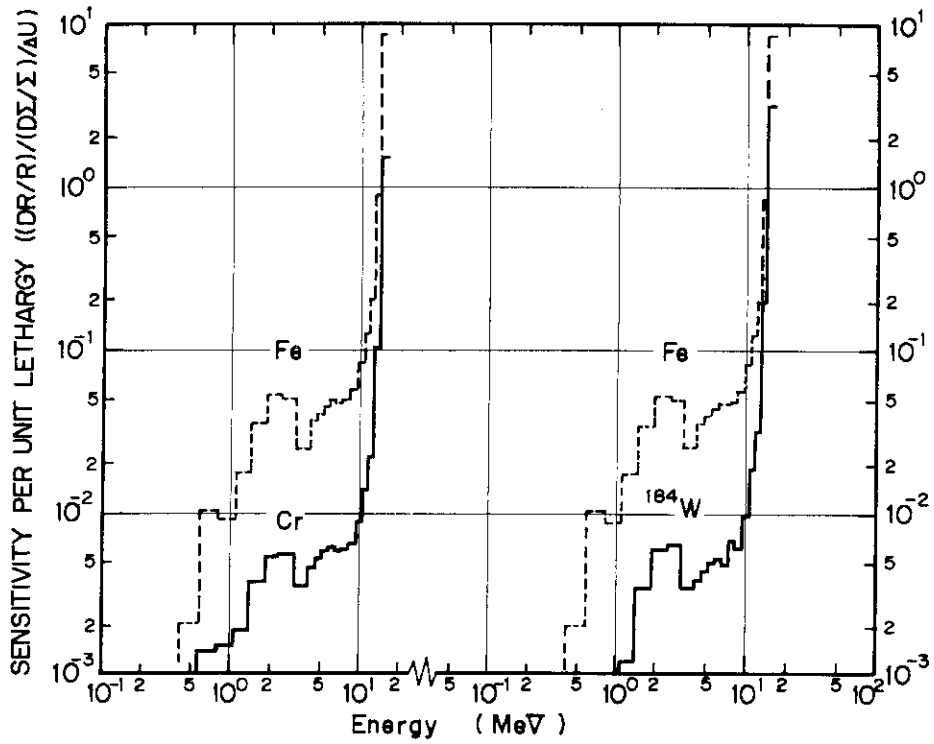


Fig. 3.22 Sensitivity of Cu Displacement per Lethargy versus Energy for Fe, Cr and ¹⁸⁴W

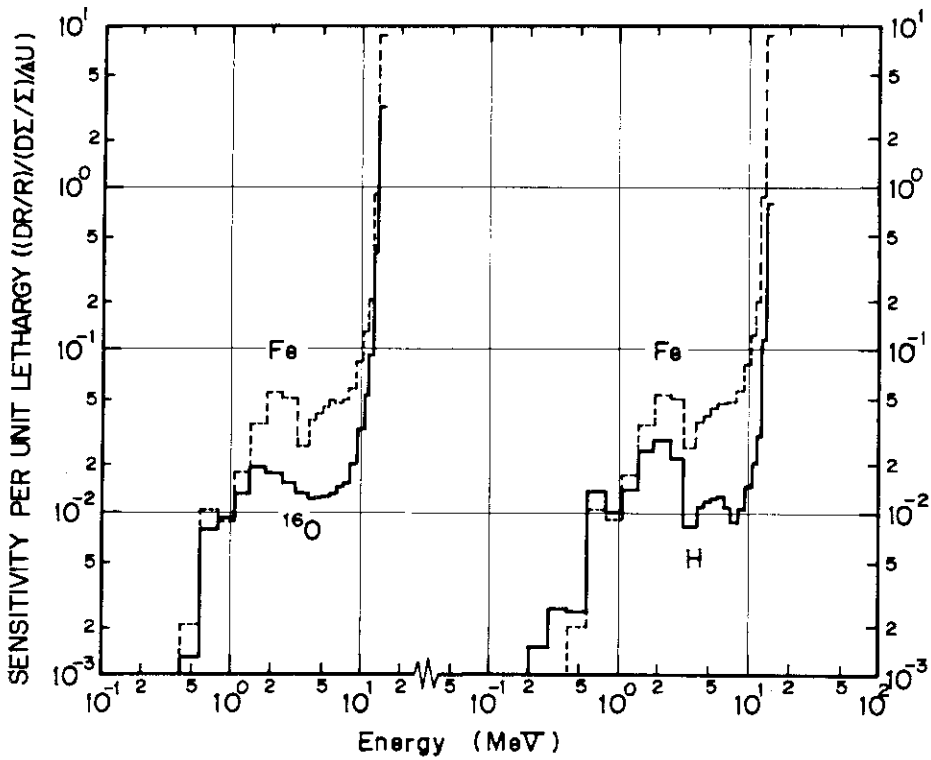


Fig. 3.23 Sensitivity of Cu Displacement per Lethargy versus Energy for Fe, ¹⁶O and H

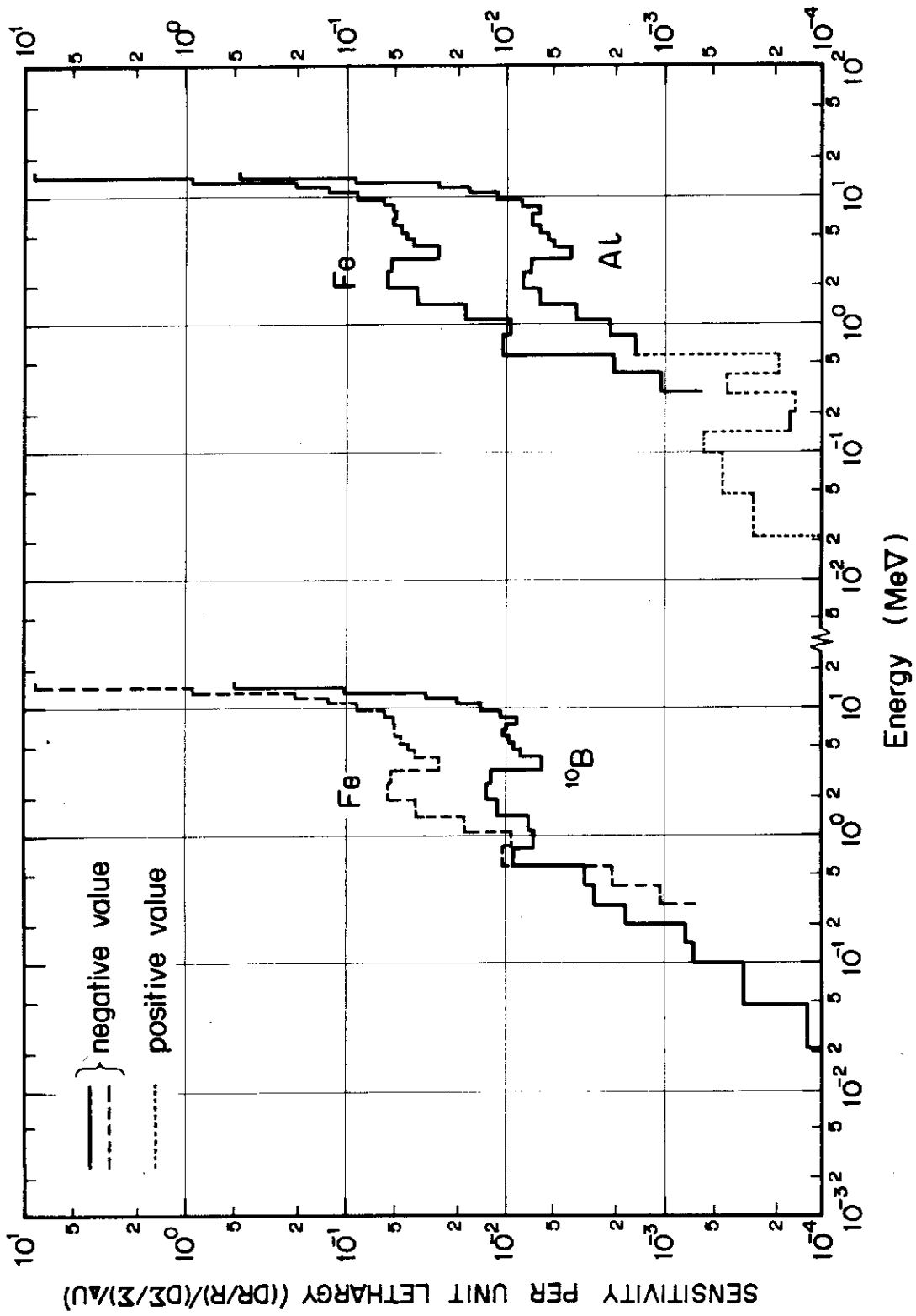


Fig. 3.24 Sensitivity of Cu Displacement per Lethargy versus Energy for Fe, ^{10}B and Al

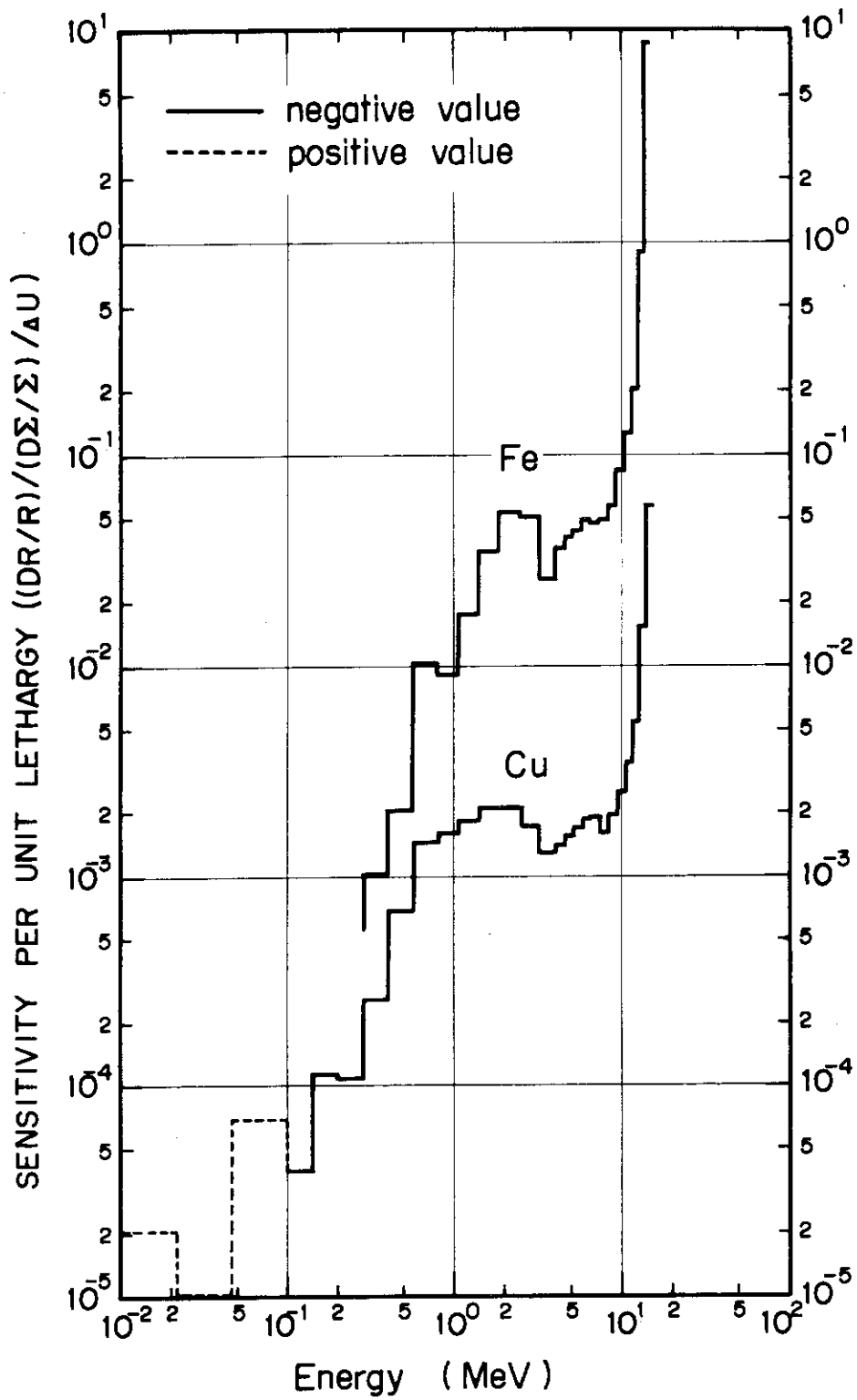


Fig. 3.25 Sensitivity of Cu Displacement per Lethargy versus Energy for Fe and Cu

4. 検 討

4.1 感度係数の S_n 効果

第3章の第1節で見たように反応率の S_n 効果は、外側超電導コイル中の $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応の場合で最大10%程度と見積もられた。しかし感度の計算式は(2-2)式に見られるように輸送計算又は随伴計算によるどちらか一方の角中性子束の単なる角度積分ではないので、 S_n 効果がどう出るかは多少の検討を要する。Table 4.1 にはWANLの S_8 と S_{16} のセットを用いて計算された $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応率感度の比較を示す。摂動を加える断面積としては表に掲げた5核種を選択したが、どの核種に対する感度も S_8 と S_{16} の間には平均1.9倍もの違いが見られる。この原因を追求するために15.0~13.7MeVと5.10~4.52MeVの2箇所のエネルギー域で、感度を比較した領域内の全中性子束の S_n 効果と、FeとHの感度マトリックスの S_n 効果とを検討した。

Table 4.2に輸送計算と随伴計算とによる全中性子束を示す。比較はWANLの S_8 セットと S_{16} セットとで行った。輸送、随伴計算結果とも違いは非常にわずかで、ブランケット、遮蔽体中ではたかだか2%、超電導コイル中においても輸送計算による全中性子束に3~4%の違いが生じているにすぎない。すなわち単なる角中性子束の角度積分である中性子束には S_8 程度で計算を行っても S_n 効果は非常に小さいことがわかる。

Table 4.3にFeとHの感度マトリックスの一部である全断面積と自群内散乱断面積の摂動に対する $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応率感度の S_n 効果を示す。感度マトリックスとは特定の反応の種類(又は減速による行き先の群番号)とエネルギー群の断面積の摂動に対する感度を断面積セットと同じ配列に並べたものである。全断面積と散乱断面積とに対する g 群の感度マトリックス Q_g^T , $Q_{g \rightarrow g'}^S$ は次のようになる。

$$Q_g^T = \frac{1}{R} \int_{E < \Delta E_g} d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \{ -\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \Sigma_T(\vec{r}, E) \phi^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \} \quad (4-1)$$

$$Q_{g \rightarrow g'}^S = \frac{1}{R} \int_{E < \Delta E_g} d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \int_{E' < \Delta E_{g'}} dE' d\vec{\Omega}' \Sigma_S(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \cdot \phi^*(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') \quad (4-2)$$

式の中の各記号は(2-2)式に用いたのと同様で、慣用的な意味を持つ。 ΔE_g , $\Delta E_{g'}$ は g 群, g' 群のエネルギー幅で、エネルギー積分はこの範囲で行う。応答関数の摂動がなければ(2-2)式の値は(4-1)式、(4-2)式の和を全エネルギー域で積分したものに等しい。表に示したように反応率感度を感度マトリックスという成分に細分化して比較すると S_8 と S_{16} の間には2倍以上の違いがあることが見出された。(4-1)式による全断面積に対する感度マトリックスに焦点を合わせると反応率 R の S_n 効果は10%以内であったから、輸送計算と随伴計算による角中性子束の積の角度積分には単独の角中性子束の角度積分で

ある中性子束とは異なった S_n 効果が現われていることが推論できる。

WANLの S_8 と S_{16} セットによれば、感度係数の S_n 効果は約2倍となり中性子束の S_n 効果よりはるかに大きいことがわかった。 S_n 次数の変化と共に感度係数の値がどのように変わるかはまだ未知の問題であり今後の検討を要する。但し、Table 4.1に見られるように S_n 効果は各領域のそれぞれの元素に対して一様に現れており、どの元素の断面積に対する感度が大きいかという点に関心がある場合にはほとんど問題は生じない。

Table 41 Comparison of $^{58}\text{Ni}(n,p)$ Reaction Sensitivities for Various Constituents of JXFR Outer Model Obtained from Perturbation Calculations with WANL S_8 set and WANL S_{16} Set (P_5 Scattering)

Zone	Region No.	Region		Element				
				^7Li	^{16}O	Cr	Fe	H
Blanket	4	Stainless Steel	S_8			-132×10^{-2}	-491×10^{-2}	
			S_{16}			-590×10^{-3}	-219×10^{-2}	
			S_8/S_{16}			2.24	2.24	
	5	Li_2O Pebble	S_8	-136×10^{-1}	-946×10^{-2}	-259×10^{-2}	-977×10^{-2}	
			S_{16}	-604×10^{-2}	-423×10^{-2}	-116×10^{-2}	-437×10^{-2}	
S_8/S_{16}			2.25	2.24	2.23	2.24		
6	Li_2O Block	S_8	-118×10^0	-767×10^{-1}	-129×10^{-1}	-492×10^{-1}		
		S_{16}	-586×10^{-1}	-379×10^{-1}	-632×10^{-2}	-242×10^{-1}		
		S_8/S_{16}	2.01	2.02	2.04	2.03		
7	S.S. Block	S_8			-381×10^{-1}	-146×10^0		
		S_{16}			-200×10^{-1}	-767×10^{-1}		
		S_8/S_{16}			1.91	1.90		
8	Stainless Steel	S_8			-942×10^{-2}	-360×10^{-1}		
		S_{16}			-501×10^{-2}	-192×10^{-1}		
		S_8/S_{16}			1.88	1.88		
Shield	H.C. + $\text{H}_2\text{O}(\text{B})$	S_8		-200×10^0		-318×10^0	-667×10^{-1}	
		S_{16}		-112×10^0		-176×10^0	-360×10^{-1}	
		S_8/S_{16}		1.79		1.81	1.85	
TFC	SCM	S_8			-601×10^{-2}	-219×10^{-1}		
		S_{16}			-291×10^{-2}	-107×10^{-1}		
		S_8/S_{16}			2.07	2.05		
Total		S_8	-132×10^0	-286×10^0	-704×10^{-1}	-585×10^0	-667×10^{-1}	
		S_{16}	-646×10^{-1}	-154×10^0	-360×10^{-1}	-313×10^0	-360×10^{-1}	
		S_8/S_{16}	2.04	1.86	1.96	1.87	1.85	

Table 4.2 Comparison of Total Flux Obtained from Transport and Adjoint Calculations with WANL S₈ set and WANL S₁₆ set (P₅ Scatterings)

Zone	Region No.	Region	S _n	Transport 1)		Adjoint 2)	
				MeV 150~137	MeV 510~452	MeV 150~137	MeV 510~452
Blanket	4	Stainless Steel	S ₈	147×10 ⁰	327×10 ⁻²	193×10 ⁻⁴	114×10 ⁻⁷
			S ₁₆	145×10 ⁰	325×10 ⁻²	192×10 ⁻⁴	113×10 ⁻⁷
			S ₈ /S ₁₆	1.01	1.01	1.01	1.01
	5	Li ₂ O Pebble	S ₈	134×10 ¹	560×10 ⁻¹	455×10 ⁻³	308×10 ⁻⁶
			S ₁₆	134×10 ¹	560×10 ⁻¹	453×10 ⁻³	303×10 ⁻⁶
			S ₈ /S ₁₆	1.00	1.00	1.00	1.02
	6	Li ₂ O Block	S ₈	301×10 ⁰	345×10 ⁻¹	143×10 ⁻¹	695×10 ⁻⁴
			S ₁₆	303×10 ⁰	347×10 ⁻¹	141×10 ⁻¹	685×10 ⁻⁴
			S ₈ /S ₁₆	0.99	0.99	1.01	1.01
	7	S.S. Block	S ₈	210×10 ⁻²	530×10 ⁻³	156×10 ⁰	272×10 ⁻²
			S ₁₆	212×10 ⁻²	532×10 ⁻³	154×10 ⁰	267×10 ⁻²
			S ₈ /S ₁₆	0.99	1.00	1.01	1.02
8	Stainless Steel	S ₈	585×10 ⁻⁴	117×10 ⁻⁴	172×10 ⁰	418×10 ⁻²	
		S ₁₆	593×10 ⁻⁴	118×10 ⁻⁴	169×10 ⁰	410×10 ⁻²	
		S ₈ /S ₁₆	0.99	0.99	1.02	1.02	
Shield	10	H.C. + H ₂ O(B)	S ₈	758×10 ⁻⁴	211×10 ⁻⁴	205×10 ⁴	997×10 ³
			S ₁₆	768×10 ⁻⁴	213×10 ⁻⁴	204×10 ⁴	994×10 ³
			S ₈ /S ₁₆	0.99	0.99	1.00	1.00
TFC	14	SCM	S ₈	518×10 ⁻⁸	216×10 ⁻⁸	191×10 ⁶	181×10 ⁶
			S ₁₆	542×10 ⁻⁸	222×10 ⁻⁸	191×10 ⁶	181×10 ⁶
			S ₈ /S ₁₆	0.96	0.97	1.00	1.00

N.B. 1) Normalized as source is unity in unit thickness.

2) Obtained as ⁵⁸Ni(n,p) reaction cross section is input for distributed source in SCM region.

Table 4.3 Comparison of $^{58}\text{Ni}(n,p)$ Reaction Sensitivities for Partial Cross Sections of Fe and H Obtained from Perturbation Calculations with WANL S_8 set and WANL S_{16} set (P_5 Scatterings)

Reaction	Energy(MeV)	S_8	Fe	H
Total	150~137	S_8	-323	-202×10^{-1}
		S_{16}	-151	-9.87×10^{-2}
		S_8/S_{16}	214	205
	5.10~4.52	S_8	-5.44×10^{-2}	-1.14×10^{-2}
		S_{16}	-2.38×10^{-2}	-5.05×10^{-3}
		S_8/S_{16}	229	2.26
Self-scatter	150~137	S_8	1.01	7.78×10^{-3}
		S_{16}	4.12×10^{-1}	3.24×10^{-3}
		S_8/S_{16}	2.45	2.40
	5.10~4.52	S_8	2.36×10^{-2}	6.25×10^{-4}
		S_{16}	9.80×10^{-3}	2.54×10^{-4}
		S_8/S_{16}	2.41	2.46

4.2 分点セットの違いによる感度係数の差

反応率においては S_n 効果よりも分点セットの違いにより値に大きな差が生じた。これは主として高速中性子の輸送量に差があるがための結果であることがわかった。摂動計算においては分点セットの重みは単に角度的な微分量を積分する際に積分量の精度を保つ役割しか持たず、透過計算の時ほど深刻な影響はないと思われる。

Table 4.4 に WANL の S_{16} セットを用いた場合と GEAO の S_{16} セットを用いた場合の $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応の感度係数を比較する。 $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応率は WANL セットによれば GEAO セットによる値よりも約 30% も大きくなったが、WANL セットによる感度係数は GEAO セットによるそれよりも約 10% 大きいのみである。分点セットの違いによる感度係数の差が反応率の場合よりも小さくなったのは、(2-2) 式によれば、分母の反応率 R と分子の中性子束 ϕ 又は ϕ^* との間で分点セットの違いによる値の変動が相殺し合った結果と考えられる。反応率 R が (3-1) 式によって計算されているとするならば、 R の計算に用いられた中性子束 ϕ は Table 4.4 に示した領域中ではプラズマ線源から最も離れており、分点セットの違いによる差が最も大きく現われる。以下プラズマ線源に近づくに従ってこの差は小さくなるが、その傾向は Table 4.4 に示した両セットによる感度の差がプラズマ領域に近づくに従って小さくなることにより裏づけされている。

4.3 S_n 計算との比較による摂動計算結果の直線性

1 次摂動理論に基づいて SWANLAKE コードによって計算された感度係数が 1 次元 S_n 輸送計算コード ANISN によって摂動系を直接解いた結果とどの程度合うか、またどの位の摂動量まで適用可能かを外側超電導コイル中の $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応の場合について検討した。摂動を加えたのは Fe の全断面積で SWANLAKE の計算と矛盾しないように ANISN 計算では散乱断面積も同じ比の摂動を受けるとした。計算条件は ANISN による計算時間を考慮して S_8P_5 とした。摂動理論計算による結果と直接計算による結果との比較を Fig. 4.1 に示す。横軸は Fe の全断面積の摂動量 (%) である。縦軸は摂動系における $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応率で、摂動を受けない系の値を 1.0 とした相対値である。実線は 1 次摂動理論による感度係数の表示で、断面積の摂動量と反応率の間には 1 次関数の関係がある。従って摂動量を極端に増やせば、図の Fe の場合全断面積の 17.1% の増加により $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応率は 0 になってしまうことになり明きらかに不合理である。ANISN により Fe の断面積を -16, -8, -4, 2, 4, 8, 16% 増加させて計算した反応率の値を記号 \otimes によって示す。計算値をなめらかにつなげば破線の通りとなる。直接計算による反応率が正しいものとするれば Fe 断面積が 8% 増加した時及び 7% 減少した時、摂動計算による反応率は約 10% 過少評価される。すでに検討したように感度係数の S_n 効果は大きく、以上の数値をすぐに S_{16} 計算にあてはめることはできない。仮に上に述べた直接計算と摂動計算とによる摂動系の反応率計算値の漸近関係が一般的なものとするならば次のようなことがいえる。すなわち 1 次摂動理論による外側超電導コイル中

の $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応の感度は、反応率の変化が40%以内ならば10%以内の正しさで直接計算によって得られる反応率変化を見積もることができる。

Table 4.4 Comparison of $^{58}\text{Ni}(n,p)$ Reaction Sensitivities for Various Constituents of JXFR Outer Model Obtained from Perturbation Calculations with WANL S_{16} set and GEAO S_{16} set (P_5 Scattering)

Zone	Region No.	Region	*) Set	Element				
				^7Li	^{16}O	Cr	Fe	H
Blanket	4	Stainless Steel	W			-590×10^{-3}	-219×10^{-2}	
			G			-544×10^{-3}	-204×10^{-2}	
			W/G			1.085	1.074	
	5	Li_2O Pebble	W	-604×10^{-2}	-423×10^{-2}	-116×10^{-2}	-437×10^{-2}	
			G	-552×10^{-2}	-389×10^{-2}	-107×10^{-2}	-404×10^{-2}	
			W/G	1.094	1.087	1.084	1.082	
	6	Li_2O Block	W	-586×10^{-1}	-379×10^{-1}	-632×10^{-2}	-242×10^{-1}	
			G	-525×10^{-1}	-343×10^{-1}	-573×10^{-2}	-220×10^{-1}	
			W/G	1.116	1.105	1.103	1.100	
	7	S.S. Block	W			-200×10^{-1}	-767×10^{-1}	
			G			-180×10^{-1}	-691×10^{-1}	
			W/G			1.111	1.110	
8	Stainless Steel	W			-501×10^{-2}	-192×10^{-1}		
		G			-450×10^{-2}	-173×10^{-1}		
		W/G			1.113	1.110		
Shield	H.C. + $\text{H}_2\text{O}(\text{B})$	W		-112×10^0		-176×10^0	-360×10^{-1}	
		G		-996×10^{-1}		-159×10^0	-323×10^{-1}	
		W/G		1.124		1.107	1.115	
TFC	SCM	W			-291×10^{-2}	-1.07×10^{-1}		
		G			-253×10^{-2}	-932×10^{-2}		
		W/G			1.150	1.148		
Total		W	-646×10^{-1}	-154×10^0	-360×10^{-1}	-313×10^0	-360×10^{-1}	
		G	-581×10^{-1}	-138×10^0	-3.23×10^{-1}	-283×10^0	-323×10^{-1}	
		W/G	1.112	1.116	1.115	1.106	1.115	

*) W means WANL quadrature set and G does GEAO set.

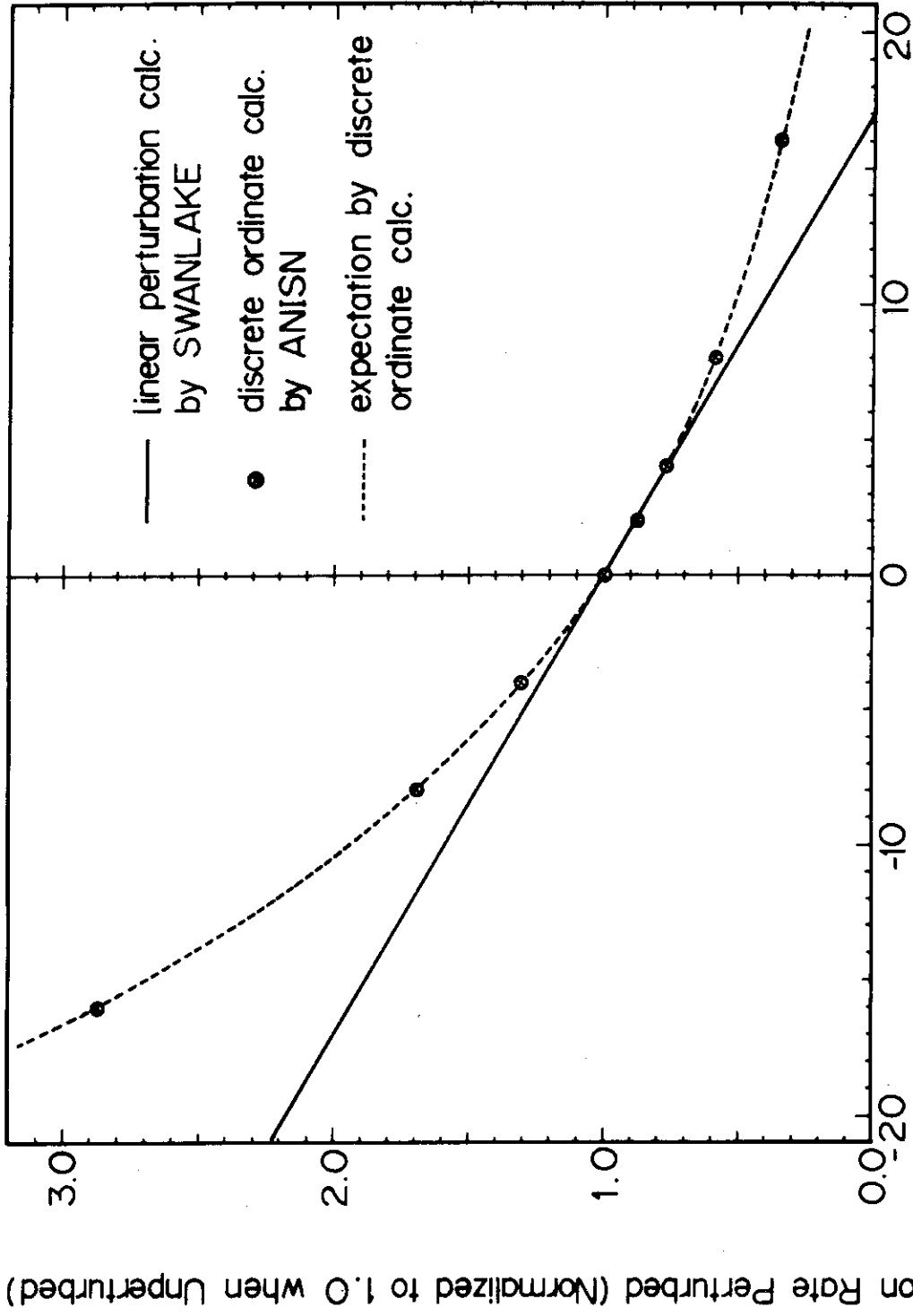


Fig. 4.1 $^{58}\text{Ni}(n,p)$ Reaction Rate Change due to Perturbation of Fe Total Cross Section

4.4 誤差評価

1次摂動計算によって得られた感度係数を用いて計算結果としての反応率に見込まれる誤差を評価した。対象としたのは深層透過という初期の目的を念頭において外側超電導コイル中の ^{58}Ni と ^{54}Fe の(n, p)反応率, 及び内側超電導コイル中の銅の変位損傷である。断面積の不確定さは参考文献21)から引用した。計算に使用した42群構造に整理した全断面積の不確定さをTable 4.5に掲げる。文献に記されているのはENDF/B-IVの核データに対する不確定さであり, 核種の幾つかはENDF/B-IIIから作成された群定数ライブラリーGICX40に対する不確定さとしては問題がある。従ってここで評価された誤差はすぐ第1次予備設計の核計算結果の有効範囲とは見なさず計算上の各近似が結果に与える効果と比較すべき大まかな目安と考えるべきである。不確定さの評価はすべての核種, すべてのエネルギー範囲になされているわけではない。Table 4.5には上記反応率の感度解析に対象とした核種を選び, 文献に与えられているエネルギー点を○印により, エネルギー範囲を▽印(上限)と△印(下限)により示した。核種Xの断面積のエネルギーEにおける不確定さを $A_X(E)$ とし, Eの近傍の単位エネルギー当りの断面積変化に対する反応率の感度を $S_X(E)$ とすると核種Xの断面積の不確定さに起因する反応率の誤差 D_X は次式によって計算した。

$$D_X = \int |A_X(E) S_X(E)| dE \quad (4-3)$$

積分の遂行により積分値 D_X が最大値となるために被積分関数は必ず正でなければならない。外側超電導コイル中の(n, p)反応に対する D_X の値をTable 4.6に, 内側超電導コイル内端の銅の変位損傷に対する D_X の値をTable 4.7に示した。

^{58}Ni と ^{54}Fe の(n, p)反応率の誤差はFig. 3.20, 3.21から予想されたようにほとんど同じ値16%となった。核種毎に見て最も大きな誤差を与えるのはFeで誤差全体の約70%を占める。他方同文献²¹⁾により(n, p)反応断面積の不確定さを求めると ^{58}Ni の場合5~10%, ^{54}Fe の場合20%である。構造材の核種の断面積の不確定さと応答関数としての(n, p)反応断面積の不確定さは一応独立と考えられる。従って断面積の不確定さに起因する誘導放射能の誤差は30~40%と見積もられる。

銅の変位損傷の誤差は約5.5%となった。但しこの場合はTable 3.9に見られるように, 同位元素のそれぞれが最大の感度を与えるFeに比べ約30%もの大きさの感度を与えるタングステンに対して断面積の不確定さが得られてなく, 変位損傷の誤差評価に考慮されてない。また応答関数である銅の損傷断面積はENDF/B-IVよりDPAコードを用いて計算されたものを用いたが, その計算過程を追跡し断面積の不確かさの評価を行うことは本研究の本筋ではないので省略した。しかし断面積の不確定さが評価されている核種のみから得られた結果から推定して, 外側超電導コイル中の(n, p)反応の誤差と大差ない値が得られると考えられる。

Table 4.5 Estimated Uncertainties of Total Cross Sections (%)

Group	Energy	H	⁶ Li	⁷ Li	¹⁶ O	²⁷ Al	Cr	Fe	Ni	Cu	Mo
1	150 -1372 ^{MeV}	○1	○6	○2	○1	○1	○2	▽4	○3	○3	▽10
2	1372-1255 "	1	6	2	1	1	2	4	3	3	0
3	1255-1148 "	1	6	2	1	1	2	4	2	3	0
4	1148-105 "	1	6	2	○1	○1	2	4	2	3	0
5	105 -9.31 "	1	5	2	1	1	○2	4	○2	○3	0
6	9.31 -8.26 "	1	5	2	1	1	2	4	2	3	0
7	8.26 -7.33 "	1	5	2	○1	○1	2	△4	2	3	0
8	7.33 -6.5 "	1	5	2	1	1	2	4	2	3	0
9	6.5 -5.76 "	1	4	2	1	1	2	4	2	3	△10
10	5.76 -5.10 "	1	4	2	1	1	2	4	2	3	▽5
11	5.10 -4.52 "	○1	○4	○2	○1	○1	○2	4	○2	○3	5
12	4.52 -4.0 "	1	4	2	1	1	2	4	2	4	5
13	4.0 -3.16 "	1	6	3	1	1	2	4	2	5	5
14	3.16 -2.5 "	1	○8	○3	○1	○1	○2	4	○2	○5	5
15	2.5 -1.87 "	1	6	3	1	1	○2	4	○1.5	5	5
16	1.87 -1.4 "	1	6	3	1	1	2	4	1.5	4	5
17	1.4 -1.06 "	1	5	3	1	1	2	4	1.5	3	5
18	1.06 -0.8 "	○1	○5	○3	○1	○1	○2	4	○1.5	○2	5
19	0.8 -0.566 "	1	4	4	1	1	▽10	4	▽10	2	5
20	0.566-0.4 "	1	3	5	1	1	10	4	10	○2	5
21	0.4 -0.283 "	1	○2	○5	1	1	10	4	10	2	5
22	0.283-0.2 "	1	2	5	1	1	10	4	10	4	5
23	0.2 -0.141 "	1	2	5	1	2	10	4	10	6	5
24	0.141-0.1 "	○1	2	5	○1	○2	10	4	10	○7	5
25	100 -465 ^{KeV}	○1	2	4	○1	○2	10	4	10	○7	5
26	465 -215 "	1	1.5	4	1	3	10	4	10	○10	5
27	215 -100 "	1	○1.5	○4	1	○5	10	4	10	8	5
28	100 -465 "	1	○1.5	○4	1	○5	10	4	10	7	5
29	465 -215 "	1	1.5	4	1	5	10	4	10	6	5
30, 31	215 -0.465 "	○1	1.5	4	1	5	10	4	10	○5	5
32~41	465 -0.215 ^{eV}	1	1.5	4	1	5	△10	4	△10	5	5
42	0.215-0.001 "	○1	○0.5	○3	○1	○5	○5	4	○5	○1.5	△5

N.B. Data with symbol ○ and those between ▽ and △ were got in USNDC-CTR-1.

Table 46 Errors of (n,p) Reactions in Outer SCM
 Estimated from Cross Section Uncertainties
 and Sensitivities Calculated with GEAO S₁₆ Set.

Element	⁵⁸ Ni(n,p)	⁵⁴ Fe(n,p)
⁶ Li	0.26 %	0.26 %
⁷ Li	1.16 %	1.17 %
¹⁶ O	1.38 %	1.39 %
Mo	0.36 %	0.36 %
Cr	0.65 %	0.65 %
Ni	0.59 %	0.59 %
Fe	11.3 %	11.4 %
H	0.32 %	0.32 %
Sum	16.0 %	16.1 %

Table 47 Errors of Cu Displacement in Inner SCM
 Estimated from Cross Section Uncertainties
 and Sensitivities Calculated with GEAO S₁₆ Set.

Element	Cu Disp
¹⁶ O	0.37 %
Mo	0.17 %
Cr	0.33 %
Ni	0.31 %
Fe	4.10 %
H	0.13 %
¹⁰ B	
Al	0.068 %
Cu	0.041 %
¹⁸² W	—
¹⁸³ W	—
¹⁸⁴ W	—
¹⁸⁶ W	—
Sum	5.52 %

5. 結 言

本解析は核融合実験炉 J X F R の核計算結果を一次摂動理論による感度解析の手法により評価しようとした初めての試みであり、解析に用いた条件、方法がすべて首尾一貫し、生じた問題がすべて解決されてしまったというわけではない。未解決の問題は今後の検討の積み重ねにより順次明らかにされていかなければならない。以下に主だった結論又は問題点を示す。

- (1) 反応率を計算する際に S_n 効果は比較的小さく、外側超電導コイル中の $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応率について S_8 と S_{16} の条件で得られたものを比べて高々 10% の差しか生じない。しかし輸送計算に用いる角度分点と重みの取り方、すなわち分点セットの選び方は反応率計算値に S_n 効果よりも大きな影響を与える。すなわち WANL set と GEAO set によれば反応率の値に 30~40% の差が生じた。
- (2) 第 1 次予備設計で採用した空間メッシュの切り方はメッシュ効果を打ち消すのに充分細かいことが確認された。ボイドをただの 1 メッシュで代表しても中性子の輸送計算には支障ないことがわかった。ただ線源が中央から離れて分布する随伴計算の際に寸法として巨大な中央のプラズマ領域を 1 メッシュだけにすると、内側(円筒形状の中央)の境界条件が充分満たされずプラズマ領域中の随伴中性子束及びそれから計算される反応率 R^* が不正確になる。
- (3) トリチウムの増殖比に最も大きな感度を与えるのは ^7Li と ^{16}O で、断面積の 1% の増加により Li_2O の Pebble と Block の両領域で増殖比をそれぞれ 0.222%, 0.213% 減少させる。但し応答関数は摂動を受けないとする。全エネルギー域にわたる断面積の摂動に対して正の感度を持つのは ^{12}C に対する Li_2O Pebble 中の $^6\text{Li}(n,\alpha)$ 反応だけである。
- (4) 外側超電導コイル中の $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応率が最も大きな感度を持つのは Fe に対してであり、Fe の全断面積の 1% の増加により反応率は 28.3% 減少する。Fe は構造材中最も多く使用されている元素であり当然の結果ともいえる。また $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応は約 300 keV にしきいエネルギーを持ち、断面積の摂動に対してすべて負の感度を示す。 $^{54}\text{Fe}(n,p)$ 反応は $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応とほとんど同じエネルギー分布形の断面積を持ち、感度の特徴も同様である。
- (5) 内側超電導コイル内端の銅の変位損傷も Fe に対して最も大きな感度を示し、Fe の全断面積の 1% の増加により 1.03% 減少する。銅の損傷断面積はエネルギーの減少と共にほぼ単調減少を示し 100 eV 付近で最小値となるが、応答関数のこのエネルギー分布形を反映して感度はすべて負の値を取る。
- (6) 感度の S_n 効果はかなり大きく、 S_8 と S_{16} の計算により約 2 倍の差が生じた。この差の原因は輸送計算と随伴計算による角中性子束の積の角度積分にあると考えられるが、単独の角中性子束の積分量の S_n 効果から推論して大きすぎる感もあり、今後 S_n 次数をパラメータとしてさらに詳細な検討が望まれる。

- (7) S_n 分点セットの違いによる感度の差は反応率の差から予想して非常に小さい。外側超電導コイル中の $^{58}\text{Ni}(n, p)$ 反応の感度の場合 WANL と GEAO の S_{16} セットにより 10% の差が生じたのみである。
- (8) 外側超電導コイル中の $^{58}\text{Ni}(n, p)$ 反応について S_8 の条件で Discrete Ordinate 法による直接計算と 1 次摂動計算とによる感度を比べると反応率の変化が 40% 以内ならば両者の差は 10% 以内と見積もられた。
- (9) 断面積の不確定さによる反応率の誤差は、外側超電導コイル中の (n, p) 反応の場合 30~40% と見積もられた。

謝 辞

本研究を遂行する過程で迫室長を初めとする炉設計研究室の室員一同の皆様には討論の場、時として個別に数々の助言をいただいた。又米国のオークリッジ研究所へ留学中の関 泰氏からは数々の御教示及び激励をいただいた。ここに改めて感謝の意を表する。

- (7) S_n 分点セットの違いによる感度の差は反応率の差から予想して非常に小さい。外側超電導コイル中の $^{58}\text{Ni}(n, p)$ 反応の感度の場合 WANL と GEAO の S_{16} セットにより 10% の差が生じたのみである。
- (8) 外側超電導コイル中の $^{58}\text{Ni}(n, p)$ 反応について S_8 の条件で Discrete Ordinate 法による直接計算と 1 次摂動計算とによる感度を比べると反応率の変化が 40% 以内ならば両者の差は 10% 以内と見積もられた。
- (9) 断面積の不確定さによる反応率の誤差は、外側超電導コイル中の (n, p) 反応の場合 30~40% と見積もられた。

謝 辞

本研究を遂行する過程で迫室長を初めとする炉設計研究室の室員一同の皆様には討論の場、時として個別に数々の助言をいただいた。又米国のオークリッジ研究所へ留学中の関 泰氏からは数々の御教示及び激励をいただいた。ここに改めて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 迫 淳, 他 ; 核融合実験炉第1次予備設計, JAERI-M 7300(1977)。
- 2) 関 泰, 他 ; 超電導マグネットの遮蔽設計の検討(Ⅱ),
JAERI-M 6540 (1976)。
- 3) 井手 隆裕, 他 ; 核融合炉材料の中性子照射損傷計算, JAERI-M 6672(1976)。
- 4) S.A.W. Gerstl et al. ; "Cross-Section Sensitivity and Uncertainty Analysis with Application to a Fusion Reactor" Nucl.Sci.Eng. 62 137-156(1977)。
- 5) R.G. Alsmiller et al. ; "Uncertainty in Calculated Heating and Radiation Damage in the Toroidal Field Coil of a Tokamak Experimental Power Reactor due to Neutron Cross-Section Errors", Nucl. Technol. vol. 34 376-386 (1977)。
- 6) Long-poe Ku and William G. Price, Jr. ; " Neutronic Calculation Sensitivity Analysis of the Livermore Mirror Fusion/Fission Hybrid Reactor Blanket", PPPL-1370 (1977)。
- 7) R.G. Alsmiller et al. ; "Comparison of the Cross Section Sensitivity of the Tritium Breeding Ratio in Various Fusion-Reactor Blankets", Nucl. Sci. Eng. 57 122-128 (1975)。
- 8) D.E. Bartine et al. ; " Cross-Section Sensitivity of Breeding Ratio in a Fusion-Reactor Blanket", Nucl. Sci. Eng. 53 304-318 (1974)。
- 9) Yasushi Seki and Hiroshi Maekawa ; "Cross-Section Sensitivity Analysis of ^{235}U and ^{238}U Fission Rates Measured in a Graphite - Reflected Lithium Assembly", Nucl. Sci. Eng. 66 243-268 (1978)。
- 10) D.E. Bartine et al. ; " SWANLAKE, A Computer Code Utilizing ANISN Radiation Transport Calculations for Cross Section Sensitivity Analysis", ORNL-TM-3809 Oak Ridge National Laboratory (1973)。
- 11) Lewins, J ; " Importance ; The Adjoint Function " , Oxford, Pergamon (1965)。
- 12) グラストン, エドランド ; 原子炉の理論。
- 13) W.W.Engle, Jr. ; " A Users Manual for ANISN:A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering", K-1693 (1967)。
- 14) L.P. Abagyan et al. ; Group Constants for Nuclear Reactor Calculations, Consultants Bureau New York (1964)。
- 15) Wright, R.Q. et al ; " SUPERTOQ:A Program to Generate Fine Group Constants and Pn Scattering Matrices from ENDF/B", ORNL-TM-2679 (1969)。

- 16) 長谷川 明 (公刊予定)
- 17) R.G. Soltesz ; Revised WANL ANISN Program User's manual,
WANL-TMI-1967 (1969).
- 18) Private Communication
- 19) Clarence E. Lee ; The Discrete Sn Approximation to Transport
Theory, Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-2595(1962)
- 20) Soltesz R.G. et al. ; " One Dimensional Discrete Ordinates
Transport Technique ", WANL-PR-(LL)-034 (Vol.4) (1970).
- 21) D. Steiner ; " The Status of Neutron-Induced Nuclear Data for
Controlled Thermonuclear Research applications ",
USNDC-CTR-1 (1974).

付録 摂動理論の概要

i 次摂動計算コード SWANLAKE には解析可能な問題の範囲に制限がある。ここでは一般的な摂動理論を展開して SWANLAKE コードの取り扱おう問題の範囲を明白にすると共に断面積に対する反応率の感度以外の諸量についてその計算法を検討する。

定常状態の系 i の輸送方程式と随伴方程式は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} & \vec{\Omega} \cdot \nabla \phi_i(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_{Ti}(\vec{r}, E) \phi_i(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ & - \int \Sigma_{Si}(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \phi_i(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' = S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \quad (\text{A-1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -\vec{\Omega} \cdot \nabla \phi_i^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_{Ti}(\vec{r}, E) \phi_i^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ & - \int \Sigma_{Si}(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \phi_i^*(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' = \Sigma_{ri}(\vec{r}, E) \quad (\text{A-2}) \end{aligned}$$

Σ_T は全断面積, Σ_S は散乱断面積, S は中性子線源, Σ_r は応答関数で他の記号については慣用的な意味を持たせてある。上式をオペレータによってそれぞれ次のように表わす。

$$H_i \phi_i = S \quad (\text{A-3})$$

$$H_i^* \phi_i^* = \Sigma_{ri} \quad (\text{A-4})$$

非摂動系及び摂動系を u 及び p で表わすと、それぞれの系における反応率 R_u 及び R_p は次のようになる。

$$R_u = \int \Sigma_{ru} \phi_u d\vec{r} dE d\vec{\Omega} = \int S \phi_u^* d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \quad (\text{A-5})$$

$$R_p = \int \Sigma_{rp} \phi_p d\vec{r} dE d\vec{\Omega} = \int S \phi_p^* d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \quad (\text{A-6})$$

反応率, 中性子束, 随伴中性子束の摂動による変化量をそれぞれ $\Delta R, \Delta \phi, \Delta \phi^*$ とする。 ΔR は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \Delta R &= R_p - R_u \\ &= \int S \Delta \phi^* d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \\ &= \int \Delta \phi^* H_p \phi_p d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \\ &= \int \phi_p H_p^* \Delta \phi^* d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \quad (\text{A-7}) \end{aligned}$$

(A-7) 式中の随伴オペレータは次のように変形する。

$$\begin{aligned} H_p^* \Delta \phi^* &= H_p^* \phi_p^* - H_p^* \phi_u^* \\ &= (H_u^* - H_p^*) \phi_u^* + \Sigma_{rp} - \Sigma_{ru} \end{aligned} \quad (A-8)$$

(A-8)式を(A-7)式に代入して

$$\Delta R = \int \{ \phi_p (H_u^* - H_p^*) \phi_u^* + (\Sigma_{rp} - \Sigma_{ru}) \phi_p \} d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \quad (A-9)$$

(A-9)式は断面積の摂動に対する反応率の変化量の厳密な解である。(A-9)式でオペレータの代わりに(A-1)式,(A-2)式の左辺を代入して整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta R &= \int \{ -\phi_p \{ \Sigma_{Tp}(\vec{r}, E) - \Sigma_{Tu}(\vec{r}, E) \} \phi_u^* \\ &\quad + \phi_p \{ \Sigma_{Sp}(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') - \Sigma_{Su}(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \} \phi_u^* dE' d\vec{\Omega}' \\ &\quad + (\Sigma_{rp} - \Sigma_{ru}) \phi_p \} d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \end{aligned} \quad (A-10)$$

A. SWANLAKE コードを初めとする1次摂動理論では $\phi_p \approx \phi_u$ として計算を行う。これによりこの近似が成り立つ限り反応率変化量 ΔR は断面積の摂動量のみの関数となる。断面積の摂動の与え方はいろいろあるが、SWANLAKE コードでは次のような方法による。

$$\Delta C = \frac{\Sigma_{Tp} - \Sigma_{Tu}}{\Sigma_{Tu}} = \frac{\Sigma_{Sp} - \Sigma_{Su}}{\Sigma_{Su}} \quad (A-11)$$

$$\Sigma_{rp} = \Sigma_{ru} \quad (A-12)$$

(A-11)式は全断面積及び散乱断面積が同じ比率の摂動を受けることを表わし,(A-12)式は応答関数が摂動を受けないことを表わす。(A-11),(A-12)式を(A-10)式に代入し, $\phi_p \approx \phi_u$ の近似を用いると次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta R &= \Delta C \int \{ -\phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \Sigma_{Tu}(\vec{r}, E) \phi_u^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ &\quad + \phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \Sigma_{Su}(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \phi_u^*(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') \} dE' d\vec{\Omega}' \} d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \end{aligned} \quad (A-13)$$

断面積の摂動量 ΔC を限りなく小さくして行った時の反応率の変化率 $(\frac{\delta R}{R_u}) / \delta C$,すなわち(A-13)式の右辺の積分値を反応率で割った値がSWANLAKE コードによる感度である。感度スペクトル(Sensitivity Profile)とはエネルギーについての積分を行わず,エネルギーの関数としてながめた感度である。

SWANLAKE コードでは感度の計算に先立って(4-1),(4-2)式によって表わされる感度マトリックス $Q_g^T, Q_{g \rightarrow g'}^S$,という量を計算する。この時断面積に対する感度は感度マトリックスによって次のように表わされる。

$$\left(\frac{\delta R}{R_u} \right) / \delta C = \sum_g \left(Q_g^T + \sum_{g'} Q_{g \rightarrow g'}^S \right) \quad (A-14)$$

B. 1次摂動理論で断面積の摂動が部分断面積毎に一様でない場合のことを考える。全断面積、散乱断面積、応答関数の摂動量を次のように定める。

$$\Delta C_1 = \frac{\sum T_p - \sum T_u}{\sum T_u} \quad (A-15)$$

$$\Delta C_2 = \frac{\sum S_p - \sum S_u}{\sum S_u} \quad (A-16)$$

$$\Delta C_3 = \frac{\sum r_p - \sum r_u}{\sum r_u} \quad (A-17)$$

上の3式を(A-10)式に代入し、 $\phi_p \approx \phi_u$ の近似を用いて次式を得る。

$$\begin{aligned} \Delta R = & \int \{ -\Delta C_1 \phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \sum T_u(\vec{r}, E) \phi_u^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ & + \Delta C_2 \int \phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \sum S_u(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \phi_u^*(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \\ & + \Delta C_3 \sum r_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \} d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \end{aligned} \quad (A-18)$$

上式で個々の断面積の摂動量のみを考慮して得られる感度 $(\frac{\partial R}{\partial C_1}) / \delta C_1$, $(\frac{\partial R}{\partial C_2}) / \delta C_2$, $(\frac{\partial R}{\partial C_3}) / \delta C_3$ は特別な意味を持つ。すなわち第1の場合非散乱断面積のみに摂動があり全断面積に対する感度である。第2の場合は全断面積が一定で散乱断面積のみに摂動に対する感度である。第3の場合は全断面積が一定で応答関数のみに摂動に対する感度であるがこれは1.0に等しい。以上のように第2, 第3の場合の感度は全断面積中の部分断面積の内訳の摂動という意味を持つ。そこで部分断面積の摂動と共に全断面積も同量の摂動を受ける場合の吸収断面積 \sum_a と散乱断面積 \sum_s に対するエネルギー依存の感度 $P_a(E)$, $P_s(E)$ を求めてみる。応答関数に対する感度は、この条件が必ずしも必要とされないので省略する。(A-10)式において $\sum T_p - \sum T_u = \sum_{ap} - \sum_{au}$, $\sum S_p - \sum S_u = 0$, $\sum r_p - \sum r_u = 0$ とすれば容易に次の式が得られる。

$$P_a(E) = -\frac{1}{R_u} \int \phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \sum_{au}(\vec{r}, E) \phi_u^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) d\vec{r} d\vec{\Omega} \quad (A-19)$$

又(A-10)式において $\sum T_p - \sum T_u = \int \{ \sum_{sp}(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') - \sum_{su}(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \} dE' d\vec{\Omega}'$, $\sum r_p - \sum r_u = 0$ とすれば次式が得られる。

$$\begin{aligned} P_s(E) = & \frac{1}{R_u} \int \{ -\phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \int \sum_{su}(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \phi_u^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \\ & + \int \phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \sum_{su}(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \phi_u^*(\vec{r}, E', \vec{\Omega}') dE' d\vec{\Omega}' \} d\vec{r} d\vec{\Omega} \end{aligned} \quad (A-20)$$

C. 散乱核次数の感度について

(A-10)式において $\phi_p \approx \phi_u$ と仮定し散乱断面積のみが摂動を受ける時のことを考える。

$$\Delta R = \iint \phi_u \{ \Sigma_{sp}(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') - \Sigma_{su}(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \} \phi_u^* dE' d\vec{\Omega}' d\vec{r} dE d\vec{\Omega} \quad (A-21)$$

$\vec{\Omega}$ と $\vec{\Omega}'$ のなす角の余弦を μ_0 とすれば散乱断面積 Σ_s は μ_0 のみの関数となる。そこで μ_0 のルジャンドル多項式 $P_l(\mu_0)$ によって Σ_s を展開すると次のようになる。

$$\Sigma_s(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') = \frac{1}{4\pi} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \Sigma_{sl}(\vec{r}, E \rightarrow E') P_l(\mu_0) \quad (A-22)$$

ここで展開係数 Σ_{sl} は次式によって与えられる。

$$\Sigma_{sl}(\vec{r}, E \rightarrow E') = 2\pi \int_{-1}^1 \Sigma_s(\vec{r}, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') P_l(\mu_0) d\mu_0 \quad (A-23)$$

また1次元形状を仮定して角中性子束 $\phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$ を方向余弦 μ のルジャンドル多項式 $P_l(\mu)$ によって展開すると次のようになる。

$$\phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) = \frac{1}{4\pi} \sum_{l=1}^{\infty} (2l+1) \phi_l(\vec{r}, E) P_l(\mu) \quad (A-24)$$

展開係数 $\phi_l(\vec{r}, E)$ は次式によって与えられる。

$$\phi_l(\vec{r}, E) = 2\pi \int_{-1}^1 \phi_u(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) P_l(\mu) d\mu \quad (A-25)$$

随伴中性子束 $\phi_u^*(\vec{r}, E', \vec{\Omega})$ も (A-24) 式と同様に展開する。(A-21) 式において Σ_{su} を M 次まで、 Σ_{sp} を N 次 ($N < M$) まで考慮した散乱核と見なせば、ルジャンドル多項式による散乱断面積展開次数が M 次から N 次に減少した時の反応率の変化分 ΔR が得られる。

(A-22), (A-24) 式及び随伴中性子束の展開式を (A-21) 式に代入する。ルジャンドル多項式の加法定理を用いて散乱核を μ_0 の関数から μ と μ' ($\vec{\Omega}$ と $\vec{\Omega}'$ の方向余弦) の関数に移し、方位角方向の積分を実行すると、最終的には反応率変化 ΔR として次の式が得られる。

$$\Delta R = - \sum_{l=N+1}^M \frac{2l+1}{4\pi} \int \phi_l(\vec{r}, E) \Sigma_{sl}(\vec{r}, E \rightarrow E') \phi_l^*(\vec{r}, E') d\vec{r} dE dE' \quad (A-26)$$

SWANLAKE コードを始めとする一次摂動計算においては (A-26) 式によって散乱核次数の打ち切りの効果を見ることができる。