

JAERI-M
8870

黒鉛反射体付酸化リチウム体系中での
 ^{235}U と ^{238}U の核分裂率に対する感度解析

1980年5月

大山 幸夫・関 泰・前川 洋・中村 知夫

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.

黒鉛反射体付酸化リチウム体系中での ^{235}U
と ^{238}U の核分裂率に対する感度解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
大山幸夫・関 泰⁺・前川 洋・中村知夫

(1980年4月受理)

D-T核融合炉の黒鉛反射体付酸化リチウムブランケットを模擬した体系において核分裂率測定実験を行った。その結果を解釈する一方法として、 ^{235}U と ^{238}U の各測定点における核分裂率の体系を構成する核種の全断面積に対する感度解析を行った。感度解析は計算コードSWANLAKEを用いて行い、このコードによってエネルギー依存の感度とエネルギー積分した感度が得られる。解析の結果、核分裂率に対する影響度の大きい核種を指摘し、実験上の問題を明らかにした。

JAERI-M 8870

Cross Section Sensitivity Analysis of ^{235}U and ^{238}U Fission Rates in a Graphite Reflected Lithium Oxide Assembly

Yukio OYAMA, Yasushi SEKI⁺, Hiroshi MAEKAWA
and Tomoo NAKAMURA

Division of Reactor Engineering,
Tokai Reserch Establishment, JAERI

(Received April 30, 1980)

Fission rates were measured in an assembly which resembles a "Graphite Reflected Lithium Oxide Blanket" for a D-T Fusion Reactor. In order to obtain more information for the interpretation of the results of the measurements and calculations, the cross section sensitivity of the ^{235}U and ^{238}U fission rates at each measured position were calculated by the computer code SWANLAKE. This code gives a sensitivity profile as a function of energy and an energy integrated sensitivity. The results have revealed the nuclides of importance to the fission rates and identified some problems in the experimental condition.

Keyword: Fission Rate, Lithium Oxide, Blanket, Fusion Reactor, Sensitivity Analysis, Cross Section, SWANLAKE Code, Uranium 235, Uranium 238

⁺ Div. of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, JAERI

目 次

1. 序 論	1
1.1 概要と目的	1
1.2 感度解析	1
2. 計 算	2
2.1 $\text{Li}_2\text{O}-\text{C}$ 実験	2
2.2 計算モデル	2
2.3 計算方法	3
3. 計算結果と検討	3
3.1 エネルギー依存性 (Sensitivity Profile)	3
3.2 空間依存性	5
4. 結 論	6
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Sensitivity Analysis	1
2. Calculation	2
2.1 $\text{Li}_2\text{O}-\text{C}$ Experiment	2
2.2 Calculation Model	2
2.3 Computational Method	3
3. Result and Discussion	3
3.1 Energy Dependence (Sensitivity Profile)	3
3.2 Space Dependence	5
4. Conclusion	6
Acknowledgment	7
References	7

1. 序 論

1.1 概要と目的

トカマク装置を中心とした最近のプラズマ閉じ込めの著しい進展に伴い、D-T核融合炉の実現のための研究がプラズマ物理から炉工学へと広がってきた。その中でもブランケットの炉物理研究は重要であり、原研では昭和48年から一次元球状体系によるブランケット模擬実験が行われてきた⁽¹⁾。これらの実験ではコッククロフト型加速器を用いて14MeVのD-T中性子を発生し、そのターゲットのまわりを2インチ立方を単位としたリチウムと黒鉛のブロックでとりかこむことによってD-T核融合炉のブランケットを球状に模擬した。この模擬ブランケット内の中性子の挙動を調べるため、²³⁵U、²³⁸U等の核分裂率分布を測定し、実験結果を一次元輸送計算コードANISNを用いて解析した。解析の結果、核分裂率分布の計算値と実験値の比であるC/Eの値が1からずれており、特にグラフィイト反射体を取付けたLi-C体系においてそのずれが大きいことが明らかになった。この不一致の原因を調べる目的で、計算上の問題点について検討を行い、エネルギー群数、 S_N 近似、 P_L 展開の次数の影響等について調べた⁽²⁾⁽³⁾。その結果、非弾性散乱の断面積における異方性の正確な取扱いの必要性などを指摘した。

最近、この一連の実験の一つとして、原研の核融合実験炉の概念設計⁽⁴⁾に取りあげられ重要度の増してきた酸化リチウムブランケットに対する模擬実験を行い報告した⁽⁵⁾。その実験結果においてもFig. 1.1に見られるようなC/Eの不一致が生じた。そこでこの原因を調べるための一つの手段として、核分裂率の中性子断面積に対する影響を調べる感度解析法⁽⁶⁾を適用し、その影響の断面積のエネルギーへの依存性、空間的位置への依存性などを詳細に検討した。そして体系内の中性子挙動、実験上の問題点等を含めて、核分裂率の計算値に断面積がどのように影響するかを調べた。その結果に基づいて影響の大きい核種を指摘し、それらの影響を明確にするための実験を提案した。

1.2 感度解析⁽⁷⁾

この節では、感度解析について簡単に説明する。ここで感度 (Sensitivity) S を次のように定義する。

$$S = \frac{\Delta F}{F} \bigg/ \frac{\Delta \Sigma_m}{\Sigma_m} \quad (1)$$

ここで F は核分裂率で、 Σ_m は体系内の着目する核種の中性子断面積である。 ΔF と $\Delta \Sigma_m$ は各々核分裂率と断面積の微小変化であり、感度 S は断面積変化に対する核分裂率の規格化された微係数を示す。言い換れば、感度 S は断面積が1%変化したとき、核分裂率が何%変化するかを示す。

また、位置 r における核分裂率 $F(r)$ は次のように書ける。

$$F(r) = \int \Sigma_f(E) \phi(r, E) dE \quad (2)$$

ここで $\Sigma_f(E)$ は核分裂断面積で、 $\phi(r, E)$ は位置 r でのエネルギー E をもつ中性子束である。この式の中で、 Σ_f に対応する核種が対象とする体系の構成核種として含まれていないときには、 Σ_f は Σ_m を変えても変化をしない。従って(1)式において ΔF は実際には(2)式の $\phi(r, E)$ の変化に対応することになる。

本報告で用いられた感度解析計算コード SWAULAKE⁽⁸⁾ では、感度 S の計算を一次摂動論に基づいておこなう。

また、このコードでは多群断面積のエネルギー群毎の感度を計算することができ、従って、断面積セットの不確かさと核分裂率へのその影響とを結びつけて考えることができる。しかしながら、逆に核分裂率測定と計算結果に差を生ずる原因は多数考えられるので、両者の差から断面積セットに原因をたどるのは困難である。従って本報告では、断面積が体系の各領域毎に空間的にどのように影響を与えていくかという観点にたつて、黒鉛反射体付酸化リチウム体系で C/E のずれの原因となる可能性のある核種を探るにとどめた。

2. 計 算

2.1 Li_2O-C 実験

具体的な計算の説明に入る前に、実験を行った黒鉛反射体付酸化リチウム体系(以後 Li_2O-C 体系と呼ぶ)について説明する。

この体系はステンレス製の格子管を束ねた 1.5 m 立方の格子管集合体の中に、2 インチ立方を 1 単位とした酸化リチウム、黒鉛の各ブロックをひき出しに装荷して Fig. 2.1 のように近似的に球形になるように組み上げてある。この体系の中心に置いたトリチウムのメタルターゲットにコッククロフト型静電加速器により 300 keV に加速した重陽子ビームを照射し、D-T 核融合反応による 14 MeV の中性子を発生させて核融合炉の中性子源を模擬した。

核分裂率の空間分布の測定は、重陽子ビームと垂直な方向にあけた実験孔の中を体系の中心から外側に向かって検出器である核分裂計数管の位置を順次変えながら行なった。実験では、 ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{237}Np の 4 種の核分裂計数管を用いたが、本報告では核分裂断面積が熱中性子領域にまでにわたり $^6Li(n, \alpha)T$ 反応と似た傾向をもつ ^{235}U と、しきい値を持つため主として 1.4 MeV 以上の中性子に対してのみ反応する ^{238}U の 2 種類の核分裂率に対して感度解析を行なった。

2.2 計算モデル

計算は上述した実験体系を Fig. 2.2 に示すような一次元球体系として扱った。酸化リチウ

また、位置 r における核分裂率 $F(r)$ は次のように書ける。

$$F(r) = \int \Sigma_f(E) \phi(r, E) dE \quad (2)$$

ここで $\Sigma_f(E)$ は核分裂断面積で、 $\phi(r, E)$ は位置 r でのエネルギー E をもつ中性子束である。この式の中で、 Σ_f に対応する核種が対象とする体系の構成核種として含まれていないときには、 Σ_f は Σ_m を変えても変化をしない。従って(1)式において ΔF は実際には(2)式の $\phi(r, E)$ の変化に対応することになる。

本報告で用いられた感度解析計算コード SWAULAKE⁽⁸⁾ では、感度 S の計算を一次摂動論に基づいておこなう。

また、このコードでは多群断面積のエネルギー群毎の感度を計算することができ、従って、断面積セットの不確かさと核分裂率へのその影響とを結びつけて考えることができる。しかしながら、逆に核分裂率測定と計算結果に差を生ずる原因は多数考えられるので、両者の差から断面積セットに原因をたどるのは困難である。従って本報告では、断面積が体系の各領域毎に空間的にどのように影響を与えていくかという観点にたつて、黒鉛反射体付酸化リチウム体系で C/E のずれの原因となる可能性のある核種を探るにとどめた。

2. 計 算

2.1 Li_2O-C 実験

具体的な計算の説明に入る前に、実験を行った黒鉛反射体付酸化リチウム体系(以後 Li_2O-C 体系と呼ぶ)について説明する。

この体系はステンレス製の格子管を束ねた 1.5 m 立方の格子管集合体の中に、2 インチ立方を 1 単位とした酸化リチウム、黒鉛の各ブロックをひき出しに装荷して Fig. 2.1 のように近似的に球形になるように組み上げてある。この体系の中心に置いたトリチウムのメタルターゲットにコッククロフト型静電加速器により 300 keV に加速した重陽子ビームを照射し、D-T 核融合反応による 14 MeV の中性子を発生させて核融合炉の中性子源を模擬した。

核分裂率の空間分布の測定は、重陽子ビームと垂直な方向にあけた実験孔の中を体系の中心から外側に向かって検出器である核分裂計数管の位置を順次変えながら行なった。実験では、 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{237}Np の 4 種の核分裂計数管を用いたが、本報告では核分裂断面積が熱中性子領域にまでにわたり $^6Li(n, \alpha)T$ 反応と似た傾向をもつ ^{235}U と、しきい値を持ったため主として 1.4 MeV 以上の中性子に対してのみ反応する ^{238}U の 2 種類の核分裂率に対して感度解析を行なった。

2.2 計算モデル

計算は上述した実験体系を Fig. 2.2 に示すような一次元球体系として扱った。酸化リチウ

ム、黒鉛等の各領域の半径は各物質の占める体積が実験体系でのそれと実効的に等しくなるよう選んだ。ターゲット部分は半径 0.5 cm の球で近似することにより 14 MeV の中性子源とした。領域の組成と原子数密度を Table 2.1 に示す。ステンレスの格子管の成分である Fe, Cr, Ni の各原子数密度は実験体系の各領域毎に、領域の体積で平均した値を与え領域にわたって均一に分布しているとした。

核分裂率の測定は、10.1 cm, 15.6 cm, 21.1 cm, 26.6 cm, 32.2 cm, 37.7 cm, 43.3 cm の各点で行なったので、計算でもそれに対応した各点での感度を求めた。

2.3 計算方法

核データファイル ENDF/B-IV から断面積処理コード NJOY を用いて作成した 100 群の断面積セットをこの解析に用いた。断面積セットのルジャンドル展開係数の次数は P_5 であり、エネルギー荷重関数としては $1/E$ を用いた。Li₂O-C 体系の体系内における forward angular flux と adjoint angular flux は、一次元輸送計算コード ANISN を用いて、 $P_5 - S_{64}$ 近似で計算した。これらの angular flux を感度解析コード SWANLAKE⁽⁸⁾ の入力として感度を計算した。そして各測定点における ²³⁵U と ²³⁸U の核分裂断面積を adjoint angular flux を計算する際の随伴線源とした。

SWANLAKE は ANISN 型の断面積マトリクスの各マトリクス要素毎にその感度を計算することができる。また、エネルギー群毎の感度を単位レサジー当りの感度 $\{ (\Delta F / F) / (\Delta \Sigma_m / \Sigma_m) \} \cdot (1 / U_i)$ として計算し、感度のエネルギー依存性 (Sensitivity Profile) を図示することができる。

3. 計算結果と検討

感度解析の結果は次の 2 つの観点で整理した。

- (1) エネルギー依存性 (Sensitivity Profile)
- (2) 空間依存性

ここで、(1) のエネルギー依存性とは、着目する核種のそれぞれのエネルギー群の断面積を変えた時の核分裂率の感度を示す。(2) の空間依存性は (1) のエネルギー群毎の感度を全エネルギーにわたって加えあわせたものについての空間分布を示す。

3.1 エネルギー依存性 (Sensitivity Profile)

体系内での酸化リチウム領域と黒鉛領域 (以下各々 Li₂O 領域, C-領域と書く) 内の各 1 点とそれらの境界の 3 点における核分裂率のエネルギー依存の感度の計算結果を以下に示す。各々の核種についての感度のエネルギー依存性は一般に構造が複雑で、簡単に理解できる例は少い。Fig. 3.1 に示すグラフは ANISN を用いて計算した各点での中性子スペクトルで、中

ム、黒鉛等の各領域の半径は各物質の占める体積が実験体系でのそれと実効的に等しくなるよう選んだ。ターゲット部分は半径 0.5 cm の球で近似することにより 14 MeV の中性子源とした。領域の組成と原子数密度を Table 2.1 に示す。ステンレスの格子管の成分である Fe, Cr, Ni の各原子数密度は実験体系の各領域毎に、領域の体積で平均した値を与え領域にわたって均一に分布しているとした。

核分裂率の測定は、10.1 cm, 15.6 cm, 21.1 cm, 26.6 cm, 32.2 cm, 37.7 cm, 43.3 cm の各点で行なったので、計算でもそれに対応した各点での感度を求めた。

2.3 計算方法

核データファイル ENDF/B-IV から断面積処理コード NJOY を用いて作成した 100 群の断面積セットをこの解析に用いた。断面積セットのルジャンドル展開係数の次数は P_5 であり、エネルギー荷重関数としては $1/E$ を用いた。Li₂O-C 体系の体系内における forward angular flux と adjoint angular flux は、一次元輸送計算コード ANISN を用いて、 $P_5 - S_{64}$ 近似で計算した。これらの angular flux を感度解析コード SWANLAKE⁽⁸⁾ の入力として感度を計算した。そして各測定点における ²³⁵U と ²³⁸U の核分裂断面積を adjoint angular flux を計算する際の随伴線源とした。

SWANLAKE は ANISN 型の断面積マトリクスの各マトリクス要素毎にその感度を計算することができる。また、エネルギー群毎の感度を単位レサジ-当りの感度 $\{ (\Delta F / F) / (\Delta \Sigma_m / \Sigma_m) \} \cdot (1 / U_i)$ として計算し、感度のエネルギー依存性 (Sensitivity Profile) を図示することができる。

3. 計算結果と検討

感度解析の結果は次の 2 つの観点で整理した。

- (1) エネルギー依存性 (Sensitivity Profile)
- (2) 空間依存性

ここで、(1) のエネルギー依存性とは、着目する核種のそれぞれのエネルギー群の断面積を変えた時の核分裂率の感度を示す。(2) の空間依存性は (1) のエネルギー群毎の感度を全エネルギーにわたって加えあわせたものについての空間分布を示す。

3.1 エネルギー依存性 (Sensitivity Profile)

体系内での酸化リチウム領域と黒鉛領域 (以下各々 Li₂O 領域, C-領域と書く) 内の各 1 点とそれらの境界の 3 点における核分裂率のエネルギー依存の感度の計算結果を以下に示す。各々の核種についての感度のエネルギー依存性は一般に構造が複雑で、簡単に理解できる例は少い。Fig. 3.1 に示すグラフは ANISN を用いて計算した各点での中性子スペクトルで、中

心から離れるに従ってスペクトルが軟化していく様子を見ることができる。これらのスペクトルを考慮しつつ感度解析の結果を検討した。

(a) ${}^6\text{Li}$ に対する感度

${}^{235}\text{U}$ の核分裂率の ${}^6\text{Li}$ に対する感度をみると、エネルギー範囲の全体にわたって ${}^6\text{Li} (n, \alpha)$ 反応が支配的である。 Li_2O 領域では低エネルギー側の感度が小さくなっているが、境界領域ではこの低エネルギー部にも感度があらわれ C 領域では再び小さくなっている。この現象は ${}^{235}\text{U}$ の核分裂断面積が低エネルギー側で大きくなっていくことと、中性子のスペクトルが体系の外側に行くに従って軟かくなっていることから、次のように理解できる。 Li_2O 領域では中性子束そのものが低エネルギー側で小さいために感度も小さくなり、境界領域では C 領域からの中性子の反射によって低エネルギー範囲の中性子束が増加するので感度が大きくなる。しかし、C 領域では Li は存在しないので Li_2O 領域での中性子と ${}^6\text{Li}$ との相互作用の結果が現わされている。従って Li_2O 領域で低エネルギーの中性子束の小さいことが感度が小さい結果として現われている。(Fig. 3.2)

${}^{235}\text{U}$ の核分裂率の感度はこの核分裂断面積がしきい値をもつことから、このしきい値以上のエネルギー範囲でのみ値を持つ。しかも、ほとんどの核種について感度は負であり、核種毎に区別すべき差違は少ない。従って以下の核種においては、 ${}^{235}\text{U}$ の核分裂率の感度についてのみ検討をおこなった。(Fig. 3.7)

(b) ${}^7\text{Li}$ に対する感度 (Fig. 3.3)

${}^{235}\text{U}$ の核分裂率の感度は全体的に高いエネルギーで正の感度を持ち、低いエネルギーになると負に変化する。この正の感度の部分は中性子が散乱によって ${}^{235}\text{U}$ の核分裂断面積が大きいところへ減速する効果であると考えられる。また ${}^7\text{Li}$ による散乱によりある程度エネルギーが下がってくると ${}^6\text{Li} (n, \alpha)$ 反応により吸収される中性子が増大するので感度は負になる。C 領域で約 10 keV 以下のエネルギーで感度が負になるのは、 Li_2O 領域にわたっての中性子減速によってこの効果が強調されるためと考えられる。

(c) ${}^{16}\text{O}$ に対する感度 (Fig. 3.4)

全体的には高エネルギーの部分を除き ${}^7\text{Li}$ の傾向に似ている。数 MeV 以上のエネルギー範囲で負の感度になっているのは ${}^{16}\text{O} (n, \alpha)$ 反応によるものと思われ、この反応のしきい値より下のエネルギー範囲では ${}^7\text{Li}$ と同様に核分裂断面積の大きいところへの中性子減速で正の感度になる。さらに低いエネルギー範囲では ${}^6\text{Li} (n, \alpha)$ 反応が強調され再び負の感度になると考えられる。

(d) ${}^{12}\text{C}$ に対する感度 (Fig. 3.5)

${}^{235}\text{U}$ の核分裂率の感度からは C 領域での反射の様子を知ることができる。 Li_2O 領域では約 10 eV 以上のエネルギーの中性子が C 領域から反射されてきている。また、そのうち 10 keV 以下のエネルギーの中性子は ${}^6\text{Li} (n, \alpha)$ 反応が強調されて感度が負になると考えられる。境界領域では、反射された中性子のうち高いエネルギーの中性子が増えて感度の正の部分が Li_2O 領域に比べて低いエネルギーのところまである。同時に低エネルギー中性子も増えて感度が熱エネルギー領域にまであらわれる。C 領域では中性子減速効果が支配的になり正の感度がみられる。

(e) Fe, Cr, Ni に対する感度 (Fig. 3.6)

Feを除いて原子数密度が他の核種に比べて小さいため絶対値は小さい。Feに対する感度は高エネルギー中性子に対しては中性子減速効果によって正の感度を持ち、低エネルギーでは、 Li_2O 領域での ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ の吸収、C領域ではFeの吸収の効果で負の感度をもつ。

3.2 空間依存性

感度の空間依存性を考えるとき、このような中心から外側へ向かう中性子束が支配的である体系では、吸収反応のような除去的性質をもつ断面に対して次に示すように単調減少の傾向があらわれる。高いエネルギー群の中性子束に対しては除去断面は散乱断面でもよいことになる。ここで除去断面を Σ_R 、地点 r での中性子束を $\phi(r)$ 、核分裂率を $F(r)$ とすると、

$$\phi(r) = \phi(r_0) \cdot e^{-\Sigma_R r} \quad (3)$$

そして、

$$\Delta\phi(r) = -\phi(r_0) \cdot r e^{-\Sigma_R r} \Delta\Sigma_R \quad (4)$$

従って、除去断面に対する感度 $S(r)$ は、

$$\begin{aligned} S(r) &= \frac{\Delta F(r) / F(r)}{\Delta\Sigma_R / \Sigma_R} \\ &\approx \frac{\Delta\phi(r)}{\phi(r)} \\ &= -r \cdot \Delta\Sigma_R \end{aligned} \quad (5)$$

となり、距離 r の一次関数で減少していく。そして、特に ${}^{238}\text{U}$ のようにしきい値があり、高速中性子にだけ感度のある核種に対しては体系核種の散乱断面が除去的性質を持ち、この傾向が顕著になる。

各々の核種に対する核分裂率の感度の空間依存性を以下に順次検討した。

(a) ${}^6\text{Li}$ に対する感度 (Fig. 3.8)

感度は Li_2O 領域中での ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応による吸収のために負の値を持ち、しかも距離とともにその絶対値が大きくなる。しかし、C領域中では ${}^6\text{Li}$ が存在しないためにほとんど変化を示さない。 ${}^{235}\text{U}$ についてはその核分裂断面が低いエネルギーで大きくなるため、減速によって中性子のエネルギーが低くなったとき感度としては正の値をもつことになる。従ってC領域中では、 Li_2O 領域で負になった感度を正の側に少し回復させると考えられる。(Fig. 3.2)

${}^{238}\text{U}$ では減速によってしきい値より高いエネルギーの中性子が減るために感度も負で減少する。(Fig. 3.7)

(b) ${}^7\text{Li}$ に対する感度 (Fig. 3.9)

この場合は弾性散乱による反射の効果で Li_2O 領域の中心付近の中性子が増加し正の感度と

なっている。(Fig. 3.3, Fig. 3.7)そして ^{238}U に対しては散乱された中性子はすぐにしきい値以下に減速をするので負の感度となる。ところが ^{235}U では逆に断面積が大きくなる低いエネルギーの中性子が増えるため正の感度を保ち続ける。

(c) ^{12}C に対する感度 (Fig. 3.10)

^{12}C の場合は当然ながらC領域で大きな感度がある。しかも、この ^{12}C の断面積を変化させた影響は Li_2O 領域にも大きくあらわれている。 ^{235}U に対しては中性子減速によって正の感度を示し、 ^{238}U に対してはC領域の前面ではC領域の深層からの反射によって中性子数が増え、深部では逆に減速の効果が大きくなって負の感度となると考えられる。

(d) ^{16}O に対する感度 (Fig. 3.11)

^{16}O においては、基本的には ^7Li と同様の傾向を示すが、 $^{16}\text{O}(n, \alpha)$ 反応による負の効果のために感度は正から負へと変化する。

(e) Fe, Cr, Niに対する感度 (Fig. 3.12)

これらの核種は体系全体に分布しているが、Feを除いては原子数密度は小さく、従って感度もFe以外は小さな値を示す。

4. 結 論

以上の検討の結果からブランケット模擬体系の構成核種の断面積と核分裂率分布との相関を知ることができた。黒鉛反射体付酸化リチウム体系でのC/Eのずれに関して得られた知見は次のとおりである。

①実験値と計算値を比較したFig. 1.1においては ^{235}U と ^{238}U のC/Eが共に1を下回っていたので、この感度計算の結果においても両者の感度に共通の傾向を与える核種をまず検討の対象とした。その意味で ^6Li 、 ^{16}O に注目すべきであるが、計算結果では感度の絶対値が小さく実験でのC/Eのずれの主因と考えるには無理がある。

② ^{12}C の場合、実験体系でのC/EのずれがC領域で大きい傾向があり、また計算結果でも ^{12}C の感度は大きかった。従って不一致の原因が ^{12}C の断面積の核データの不確定さにある可能性が大きいものと思われる。

③C/Eと感度との相関は単純なものではなく、今後、反応別や角度分布を考慮して断面積を詳細に調べていく必要がある。

さらに、核データおよび核計算の検証をおこなうこのような実験の指針として次のような事柄が指摘できる。

①実験条件として、格子管集合体を用いた体系は構造材としてのステンレスの影響が大きく、特にFeではLi等に匹敵する感度の大きさであった。従って組成を均質化している計算モデルにも問題があり、純粋なブランケット模擬が行えていない。

②核データ上の問題点を探る目的では、着目した核種に対する感度の大きい体系を組むことが有利である。また2つの領域間の相互作用が問題を複雑にしていることもあるので、計算システムを検証するためのベンチマーク実験としては単純組成、単純体系の実験が望まれる。

なっている。(Fig. 3.3, Fig. 3.7)そして ^{238}U に対しては散乱された中性子はすぐにしきい値以下に減速をするので負の感度となる。ところが ^{235}U では逆に断面積が大きくなる低いエネルギーの中性子が増えるため正の感度を保ち続ける。

(c) ^{12}C に対する感度 (Fig. 3.10)

^{12}C の場合は当然ながらC領域で大きな感度がある。しかも、この ^{12}C の断面積を変化させた影響は Li_2O 領域にも大きくあらわれている。 ^{235}U に対しては中性子減速によって正の感度を示し、 ^{238}U に対してはC領域の前面ではC領域の深層からの反射によって中性子数が増え、深部では逆に減速の効果が大きくなって負の感度となると考えられる。

(d) ^{16}O に対する感度 (Fig. 3.11)

^{16}O においては、基本的には ^7Li と同様の傾向を示すが、 $^{16}\text{O}(n, \alpha)$ 反応による負の効果のために感度は正から負へと変化する。

(e) Fe, Cr, Niに対する感度 (Fig. 3.12)

これらの核種は体系全体に分布しているが、Feを除いては原子数密度は小さく、従って感度もFe以外は小さな値を示す。

4. 結 論

以上の検討の結果からブランケット模擬体系の構成核種の断面積と核分裂率分布との相関を知ることができた。黒鉛反射体付酸化リチウム体系でのC/Eのずれに関して得られた知見は次のとおりである。

①実験値と計算値を比較したFig. 1.1においては ^{235}U と ^{238}U のC/Eが共に1を下回っていたので、この感度計算の結果においても両者の感度に共通の傾向を与える核種をまず検討の対象とした。その意味で ^6Li 、 ^{16}O に注目すべきであるが、計算結果では感度の絶対値が小さく実験でのC/Eのずれの主因と考えるには無理がある。

② ^{12}C の場合、実験体系でのC/EのずれがC領域で大きい傾向があり、また計算結果でも ^{12}C の感度は大きかった。従って不一致の原因が ^{12}C の断面積の核データの不確定さにある可能性が大きいものと思われる。

③C/Eと感度との相関は単純なものではなく、今後、反応別や角度分布を考慮して断面積を詳細に調べていく必要がある。

さらに、核データおよび核計算の検証をおこなうこのような実験の指針として次のような事柄が指摘できる。

①実験条件として、格子管集合体を用いた体系は構造材としてのステンレスの影響が大きく、特にFeではLi等に匹敵する感度の大きさであった。従って組成を均質化している計算モデルにも問題があり、純粋なブランケット模擬が行えていない。

②核データ上の問題点を探る目的では、着目した核種に対する感度の大きい体系を組むことが有利である。また2つの領域間の相互作用が問題を複雑にしていることもあるので、計算システムを検証するためのベンチマーク実験としては単純組成、単純体系の実験が望まれる。

この意味で、 ^{12}C の体系は感度も大きく、 ^{235}U と ^{238}U の感度の傾向が逆であるため実験精度上も調べやすいと思われる。

酸化リチウムのみからなる体系については感度が小さいために、感度が周辺に行くに従って大きくなるという傾向を利用してより厚い体系で実験を行うことが望まれる。その厚みは実験精度上40ないし50cm程度は必要であろう。

謝 辞

この研究にあたり快よく議論をしていただいた炉物理実験技術開発室のFNSグループの諸氏および遮蔽研究室の田中俊一氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) MAEKAWA H., SEKI Y. : J. Nucl. Sci. Technol., 14(2), 97(1977)
- (2) SEKI Y., MAEKAWA H. : *ibid.*, 14(3), 210 (1977).
- (3) SEKI Y., *etal.* : *ibid.*, 14(9), 680 (1977).
- (4) 核融合研究部炉設計研究室 : JAERI-M7300 (1977).
- (5) MAEKAWA H., *etal.* : J. Nucl. Sci. Technol., 16(5), 377 (1979).
- (6) SEKI Y., MAEKAWA H. : Nucl. Sci. Eng., 66, 243 (1978).
- (7) OBLOW E. M., *etal.* : ORNL-TM-4110 (1973).
- (8) BARTINE D. E., *etal.* : ORNL-TM-3809 (1973).

この意味で、 ^{12}C の体系は感度も大きく、 ^{235}U と ^{238}U の感度の傾向が逆であるため実験精度上も調べやすいと思われる。

酸化リチウムのみからなる体系については感度が小さいために、感度が周辺に行くに従って大きくなるという傾向を利用してより厚い体系で実験を行うことが望まれる。その厚みは実験精度上40ないし50 cm程度は必要であろう。

謝 辞

この研究にあたり快よく議論をしていただいた炉物理実験技術開発室のFNSグループの諸氏および遮蔽研究室の田中俊一氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) MAEKAWA H., SEKI Y. : J. Nucl. Sci. Technol., 14(2), 97(1977)
- (2) SEKI Y., MAEKAWA H. : *ibid.*, 14(3), 210 (1977).
- (3) SEKI Y., *etal.* : *ibid.*, 14(9), 680 (1977).
- (4) 核融合研究部炉設計研究室 : JAERI-M7300 (1977).
- (5) MAEKAWA H., *etal.* : J. Nucl. Sci. Technol., 16(5), 377 (1979).
- (6) SEKI Y., MAEKAWA H. : Nucl. Sci. Eng., 66, 243 (1978).
- (7) OBLOW E. M., *etal.* : ORNL-TM-4110 (1973).
- (8) BARTINE D. E., *etal.* : ORNL-TM-3809 (1973).

この意味で、 ^{12}C の体系は感度も大きく、 ^{235}U と ^{238}U の感度の傾向が逆であるため実験精度上も調べやすいと思われる。

酸化リチウムのみからなる体系については感度が小さいために、感度が周辺に行くに従って大きくなるという傾向を利用してより厚い体系で実験を行うことが望まれる。その厚みは実験精度上40ないし50 cm程度は必要であろう。

謝 辞

この研究にあたり快よく議論をしていただいた炉物理実験技術開発室のFNSグループの諸氏および遮蔽研究室の田中俊一氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) MAEKAWA H., SEKI Y. : J. Nucl. Sci. Technol., 14(2), 97(1977)
- (2) SEKI Y., MAEKAWA H. : ibid., 14(3), 210 (1977).
- (3) SEKI Y., et al. : ibid., 14(9), 680 (1977).
- (4) 核融合研究部炉設計研究室 : JAERI-M7300 (1977).
- (5) MAEKAWA H., et al. : J. Nucl. Sci. Technol., 16(5), 377 (1979).
- (6) SEKI Y., MAEKAWA H. : Nucl. Sci. Eng., 66, 243 (1978).
- (7) OBLOW E. M., et al. : ORNL-TM-4110 (1973).
- (8) BARTINE D. E., et al. : ORNL-TM-3809 (1973).

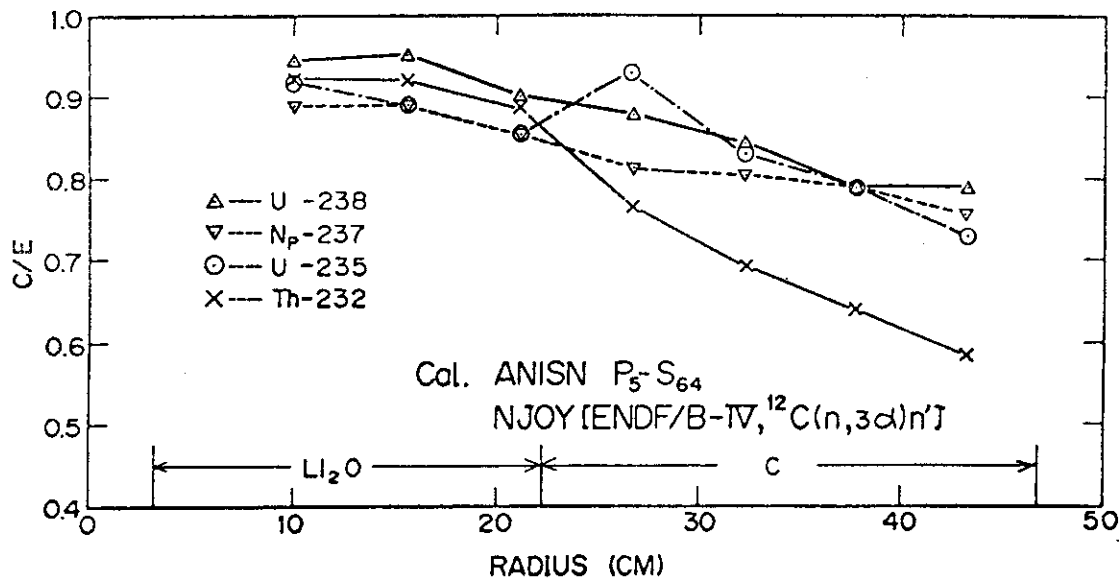
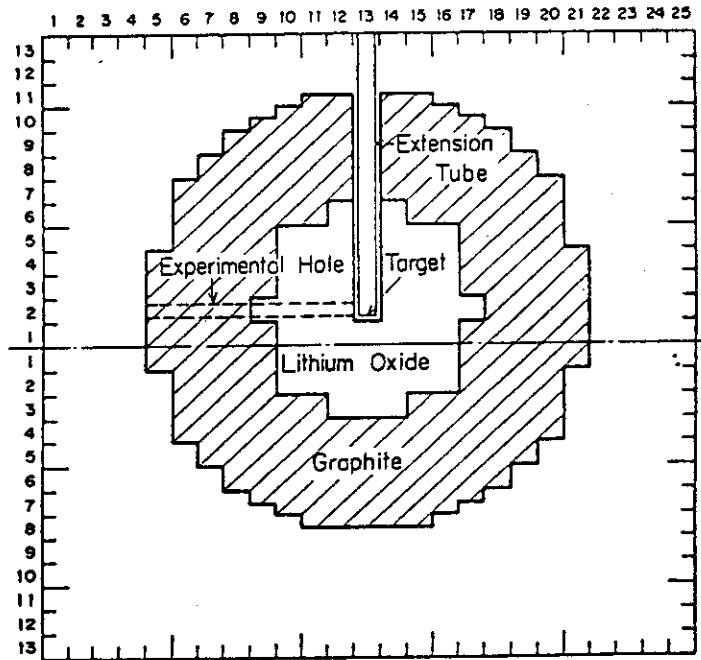


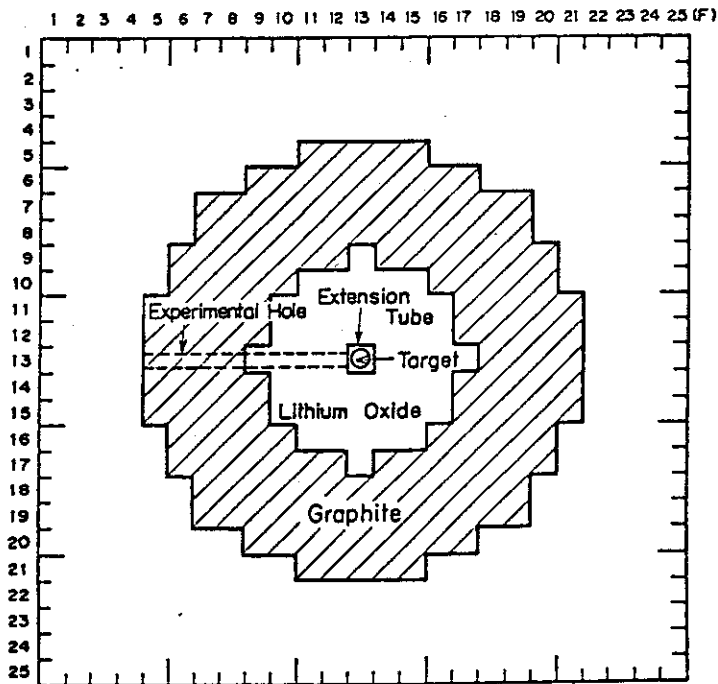
Fig.1.1 Comparison of the calculated and experimental result for Li₂O-C assembly.

Nuclide	Nuclide density (10 ²⁴ atoms/cm ³)			
	Void	Li ₂ O	Graphite	Lattice
⁶ Li		3.3547x10 ⁻³		
⁷ Li		4.1857x10 ⁻²		
O		2.2606x10 ⁻²		
C			7.3445x10 ⁻²	
Cr	1.827x10 ⁻³	2.011x10 ⁻³	1.827x10 ⁻³	1.224x10 ⁻³
Ni	7.964x10 ⁻⁴	8.781x10 ⁻⁴	7.964x10 ⁻⁴	5.336x10 ⁻⁴
Fe	6.652x10 ⁻³	7.346x10 ⁻³	6.652x10 ⁻³	4.457x10 ⁻³

Table 2.1 Nuclide densities of each region in Li₂O-C assembly



(a) Horizontal section



(b) Vertical section

Fig.2.1 Horizontal and vertical sections across the center of $\text{Li}_2\text{O-C}$ experimental assembly.

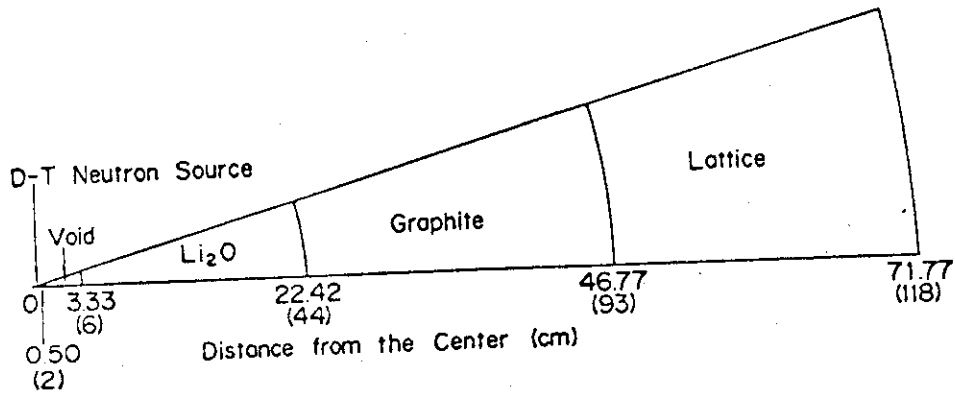


Fig.2.2 Model for calculation of $\text{Li}_2\text{O-C}$ assembly.

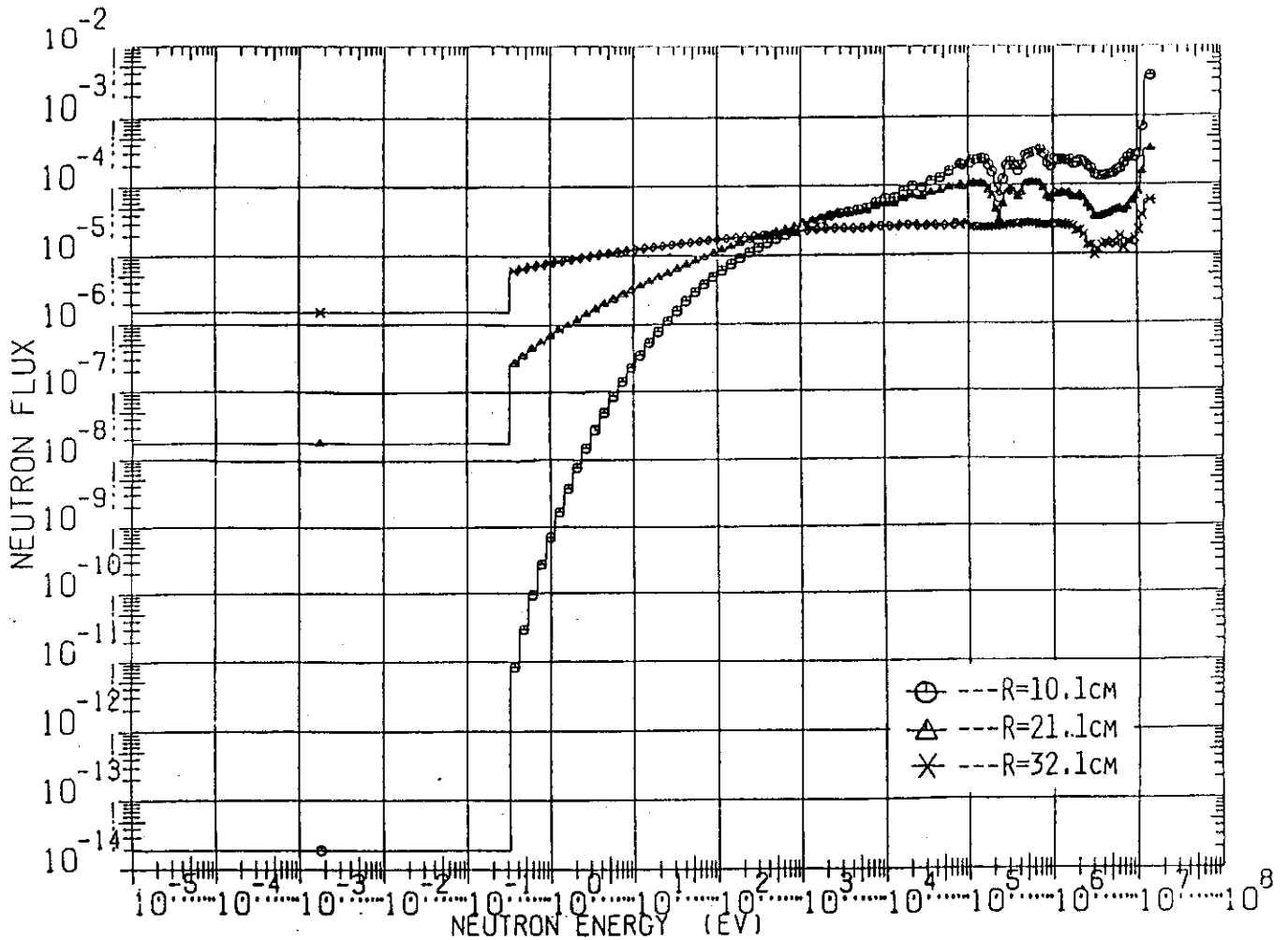


Fig. 3.1 Neutron spectra in $\text{Li}_2\text{O-C}$ assembly.

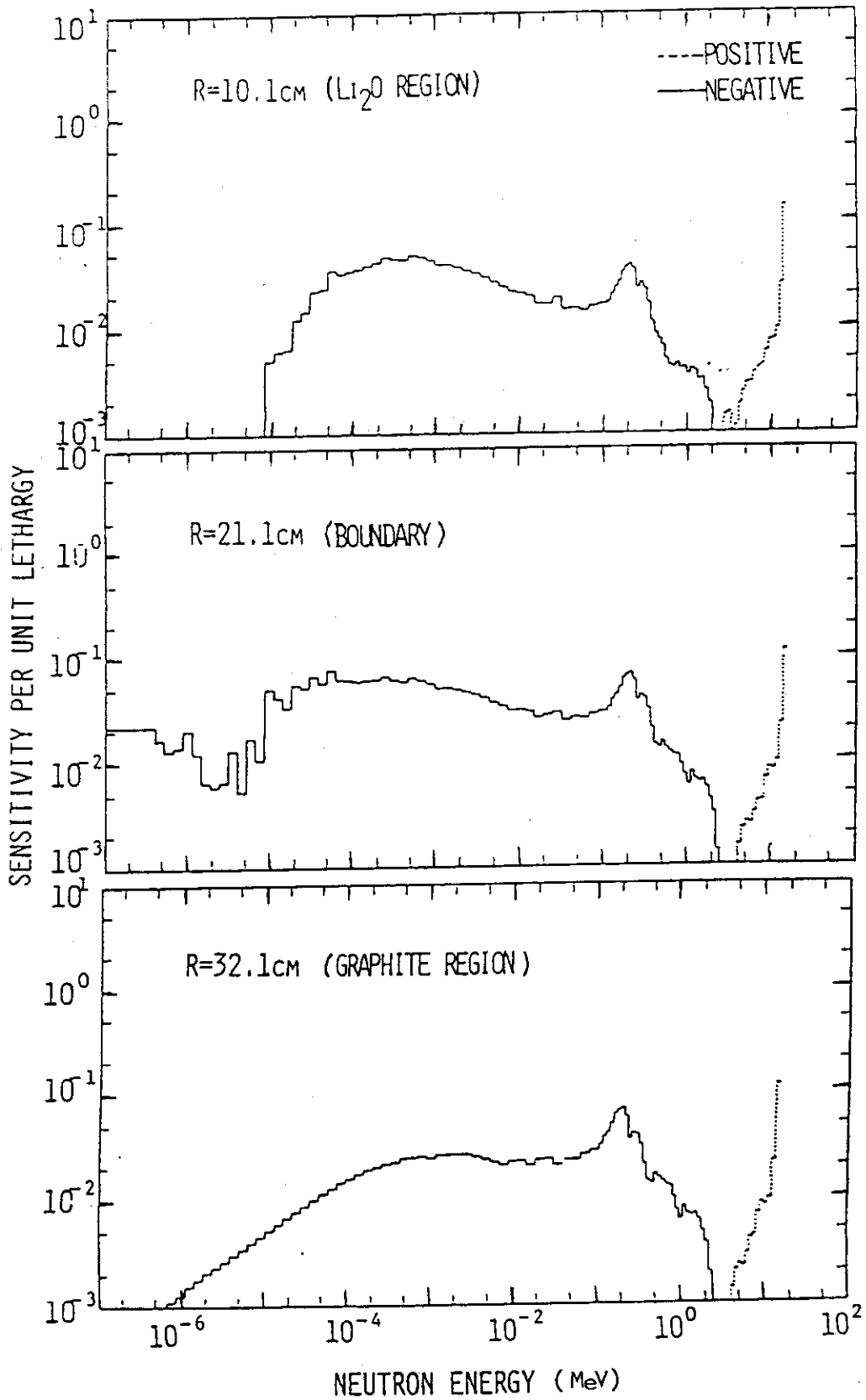


Fig.3.2 Sensitivity Profile of U-235 fission rate for Li-6

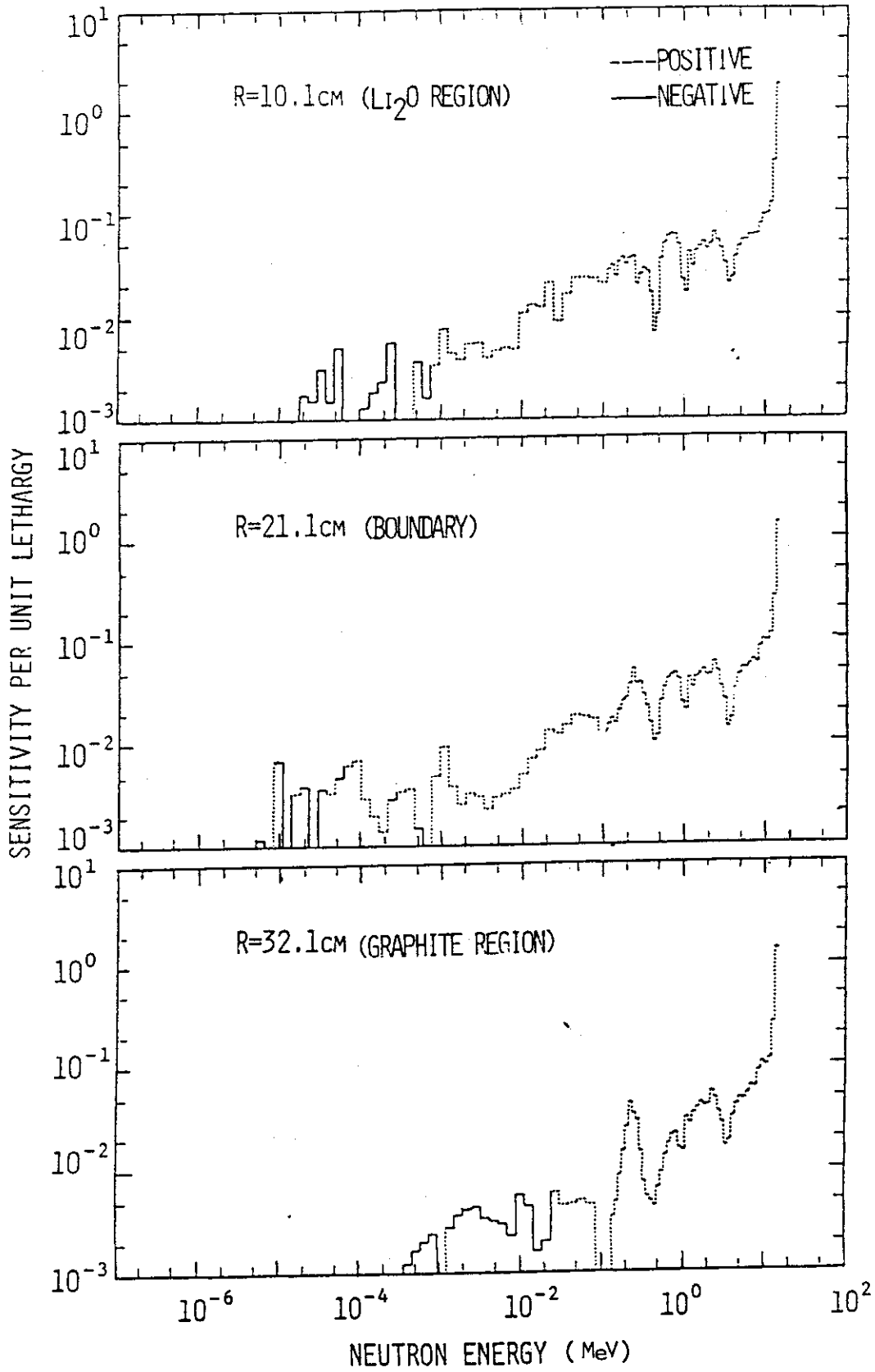


Fig.3.3 Sensitivity Profile of U-235 fission rate for Li-7

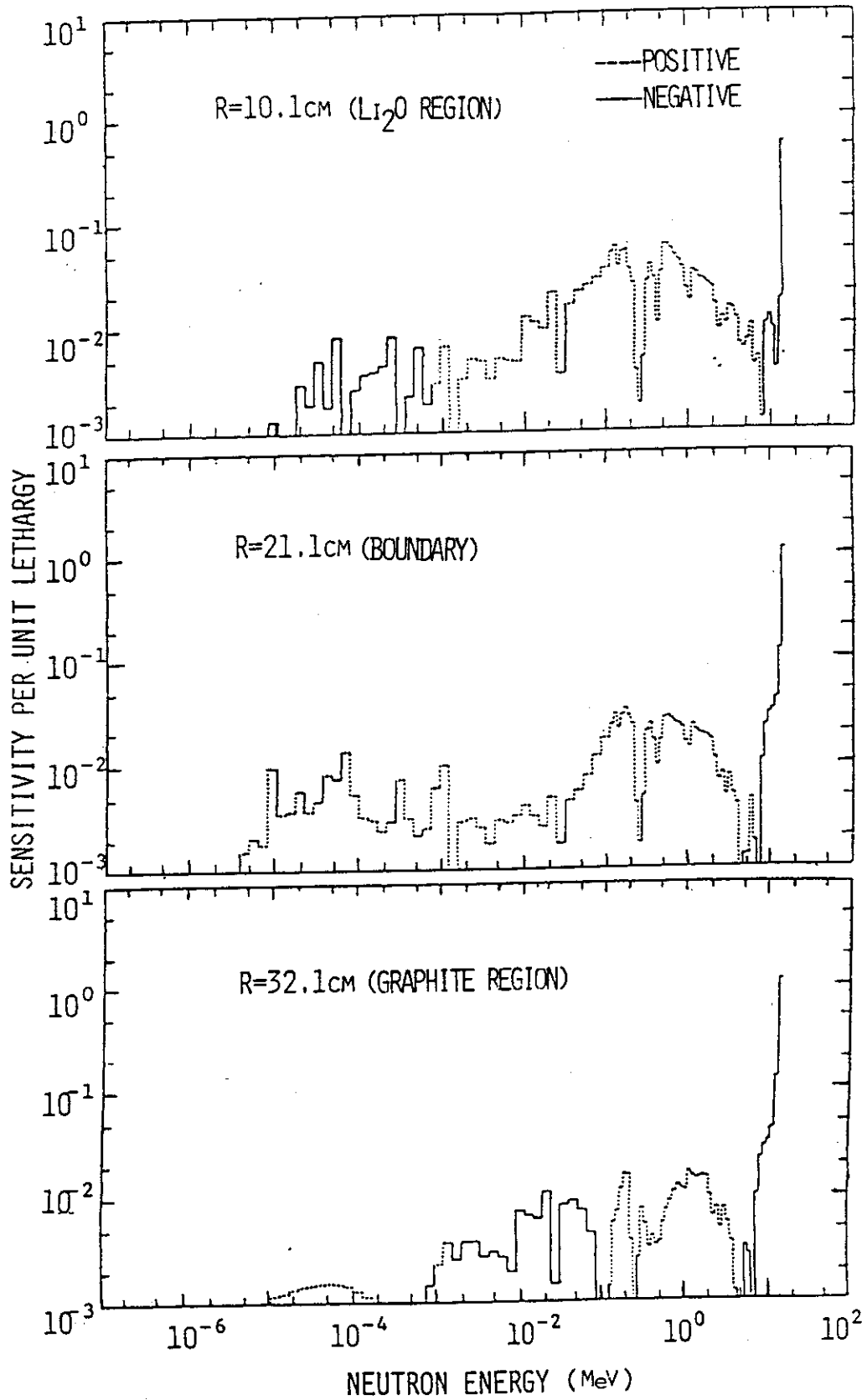


Fig.3.4 Sensitivity Profile of U-235 fission rate for O-16

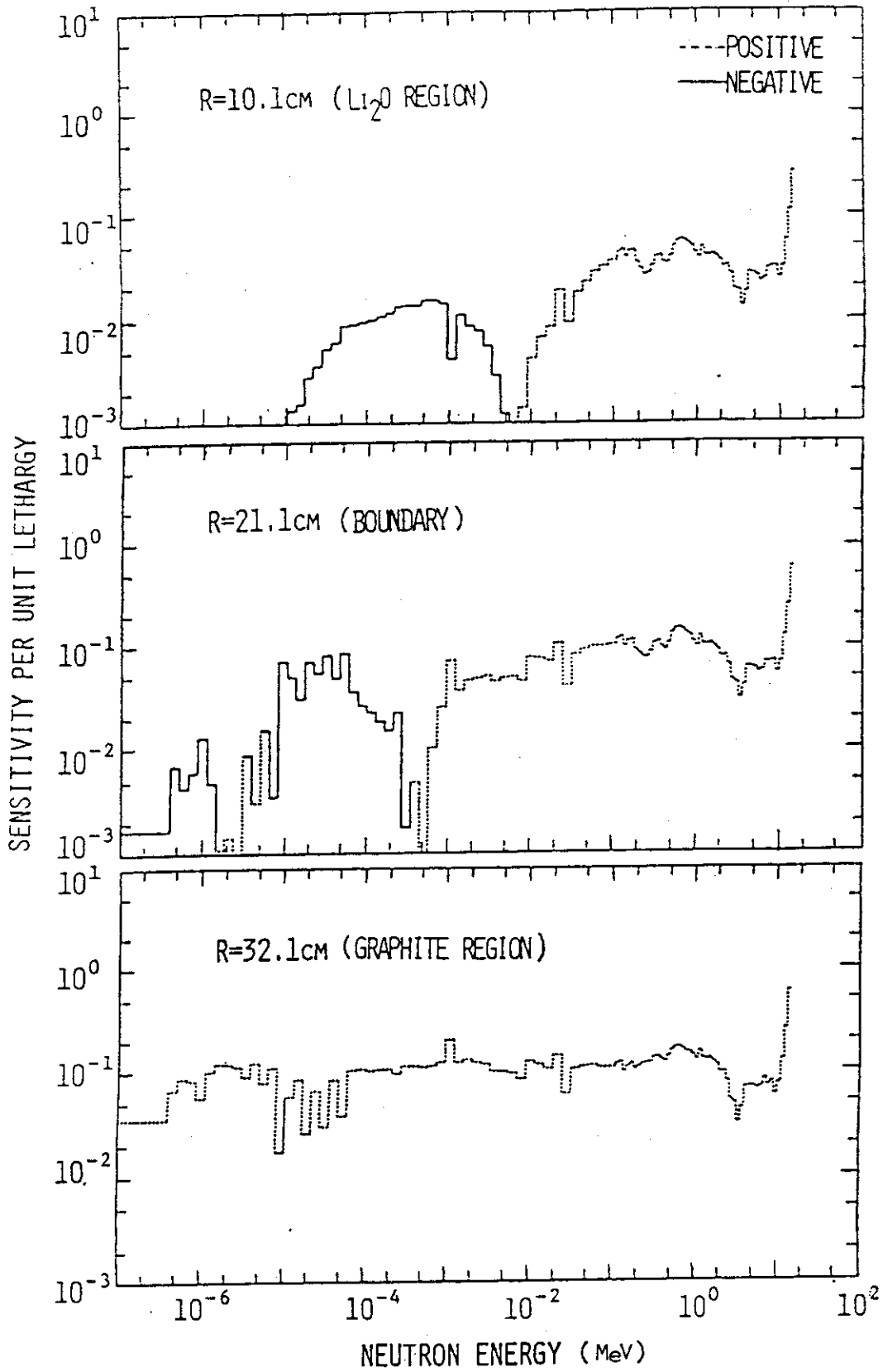


Fig.3.5 Sensitivity Profile of U-235 fission rate for C-12

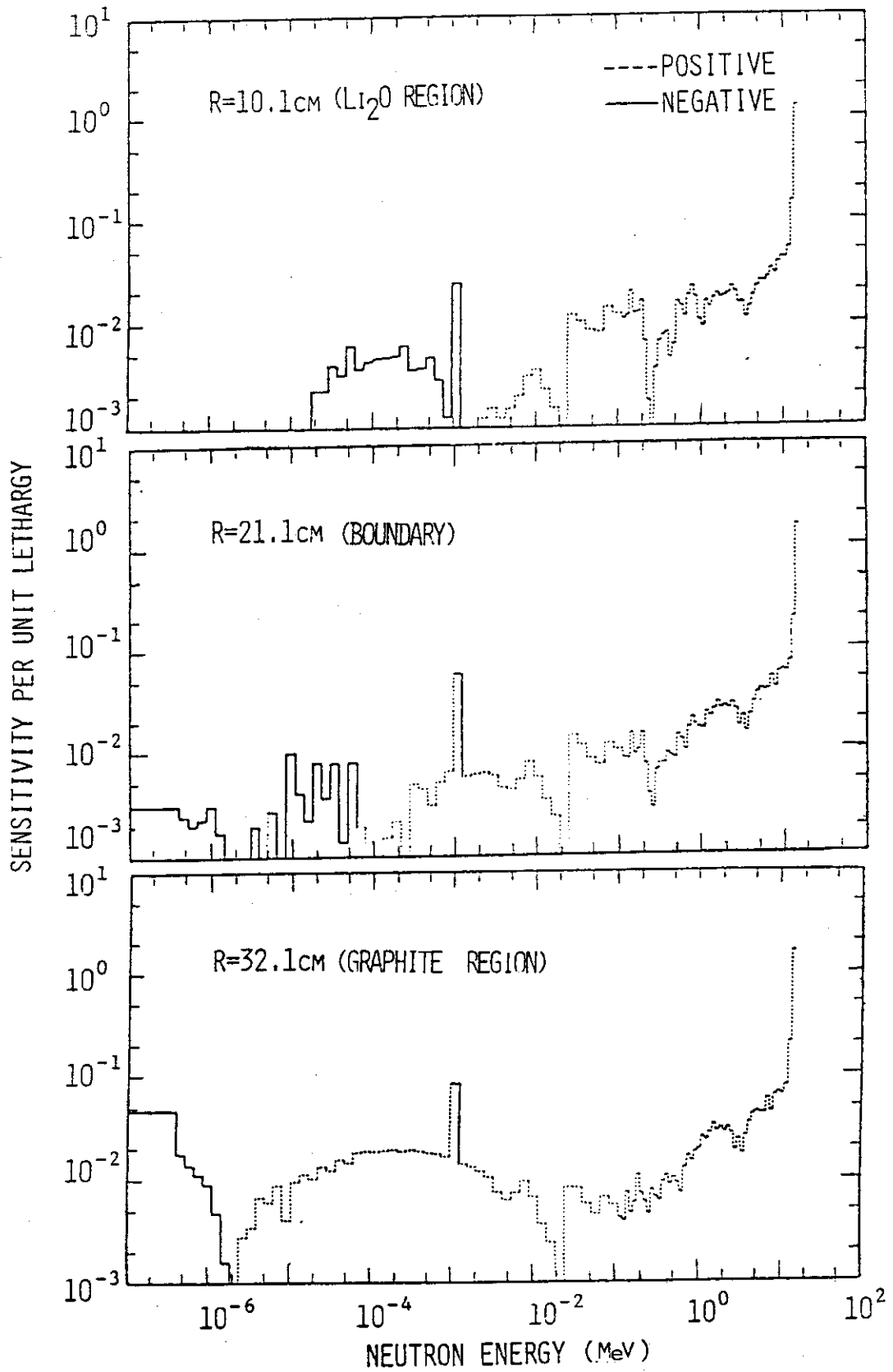


Fig.3.6 Sensitivity Profile of U-235 fission rate for Fe.

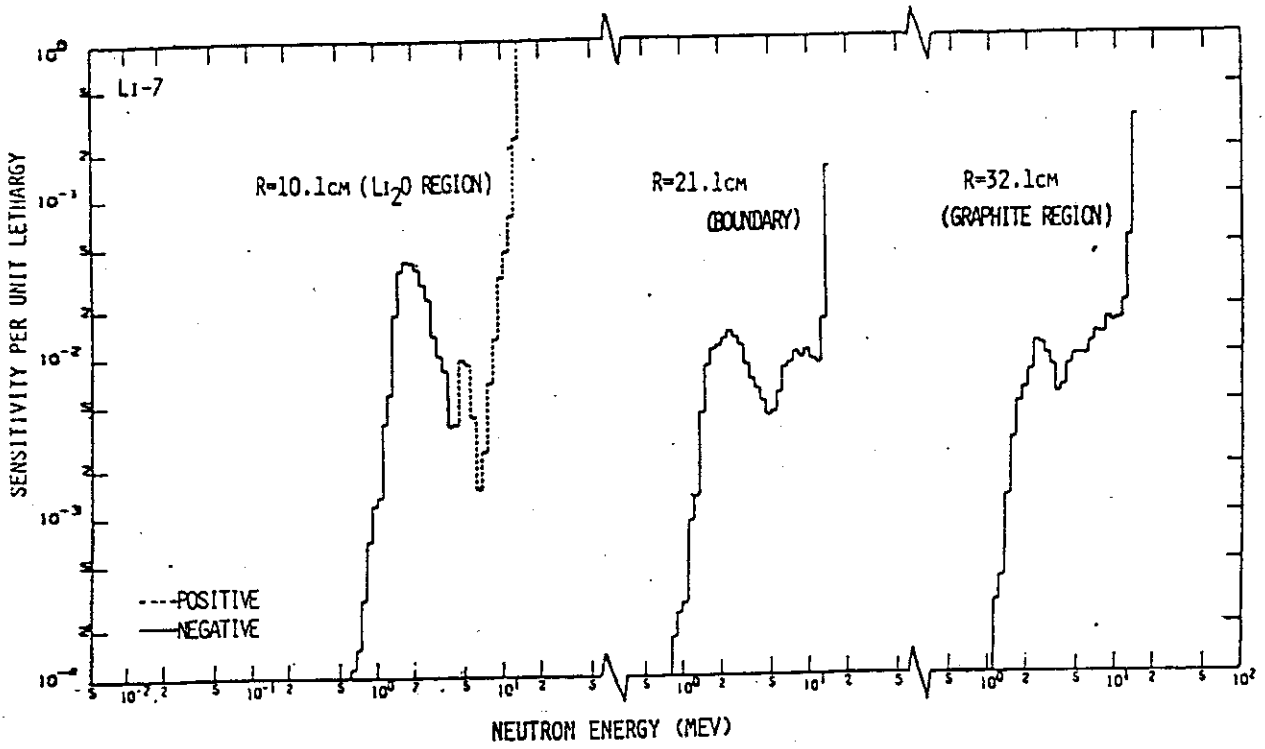
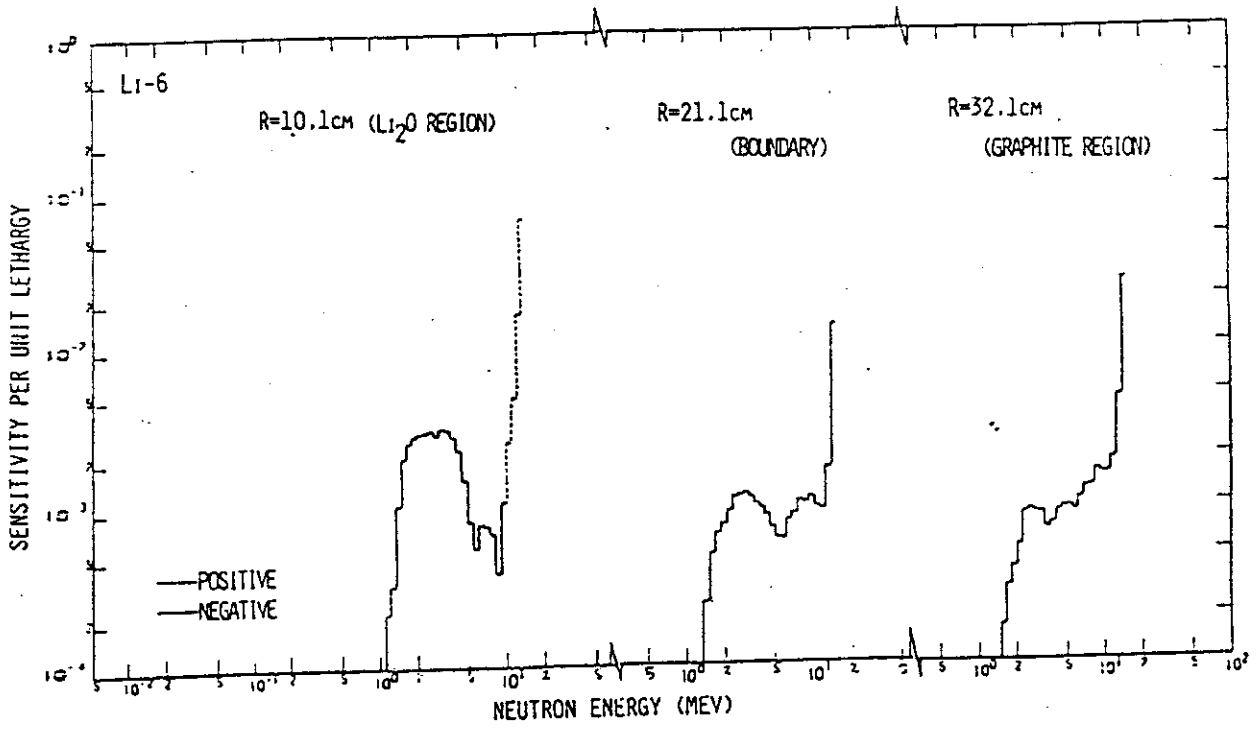


Fig.3.7 Sensitivity Profile of U-238 fission rate for Li-6 and Li-7

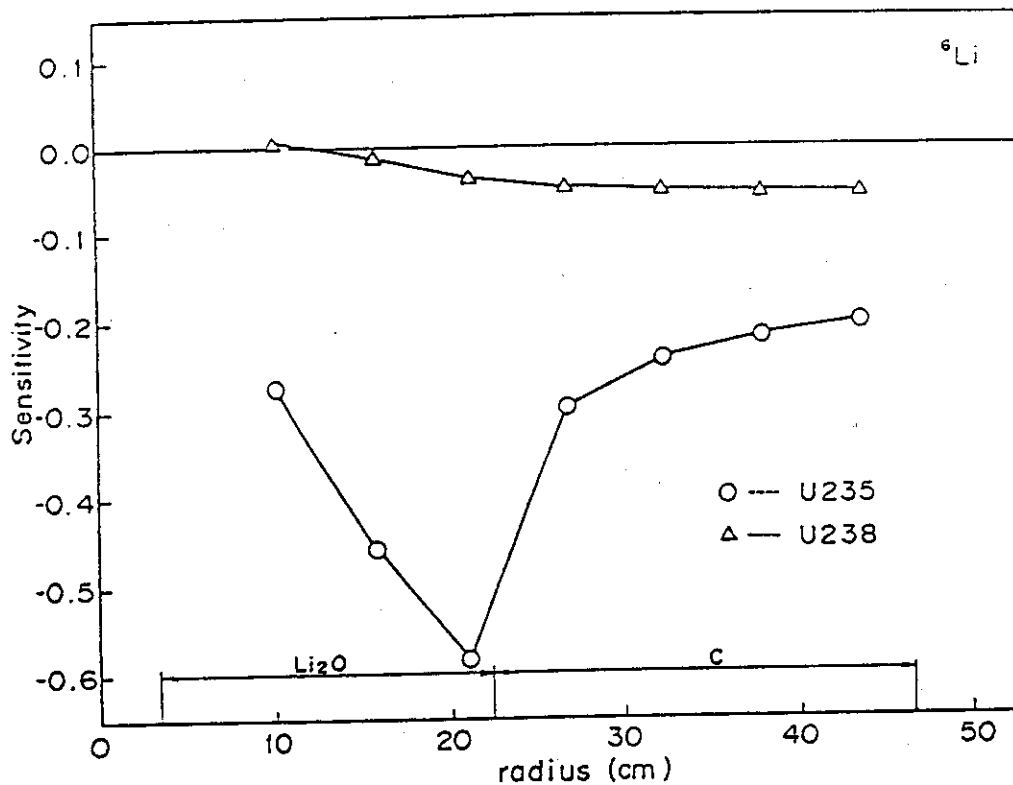


Fig.3.8 Spatial Sensitivity of U-235 and U-238 fission rate for Li-6.

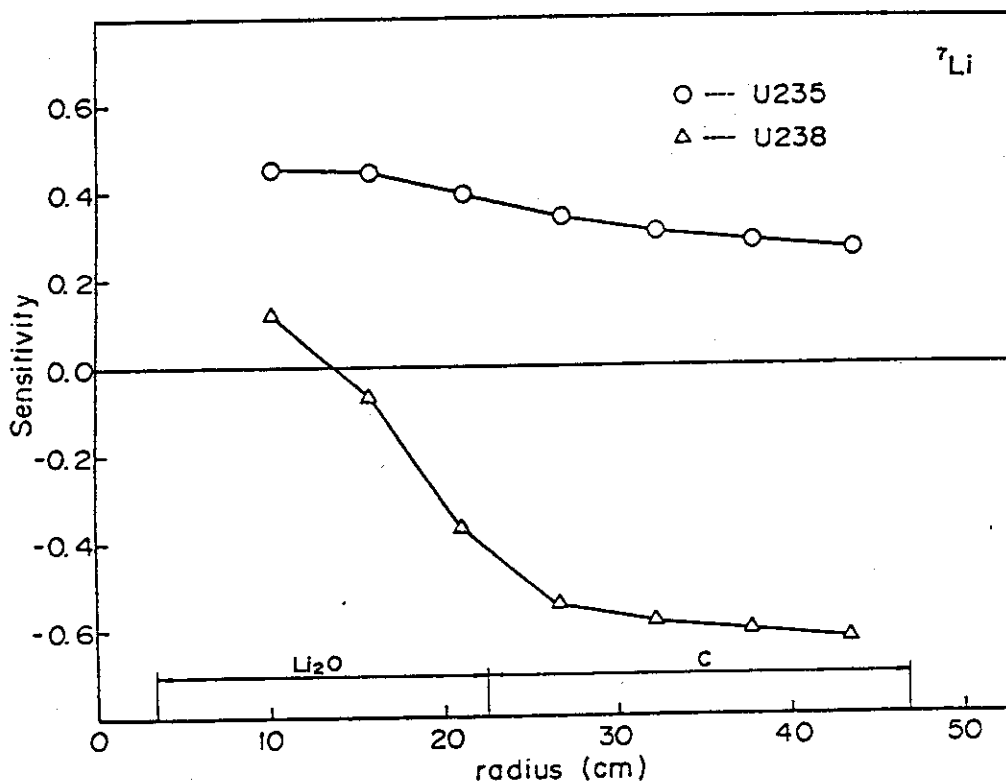


Fig.3.9 Spatial Sensitivity of U-235 and U-238 fission rate for Li-7.

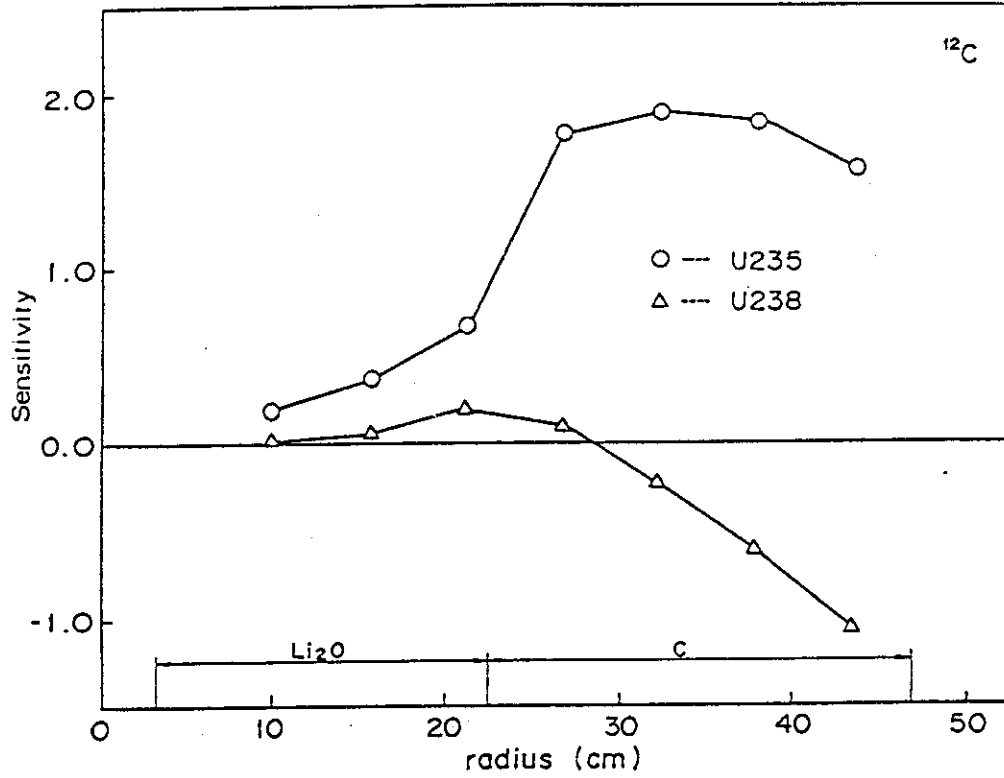


Fig.3.10 Spatial Sensitivity of U-235 and U-238 fission rate for C-12.

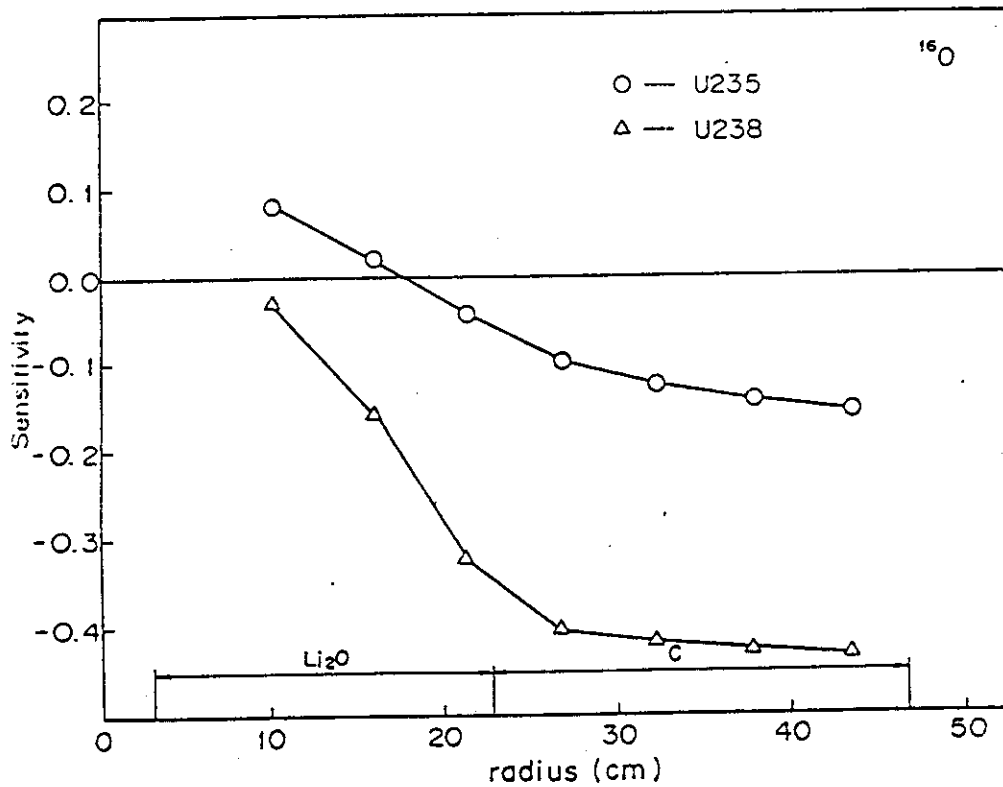


Fig.3.11 Spatial Sensitivity of U-235 and U-238 fission rate for O-16.

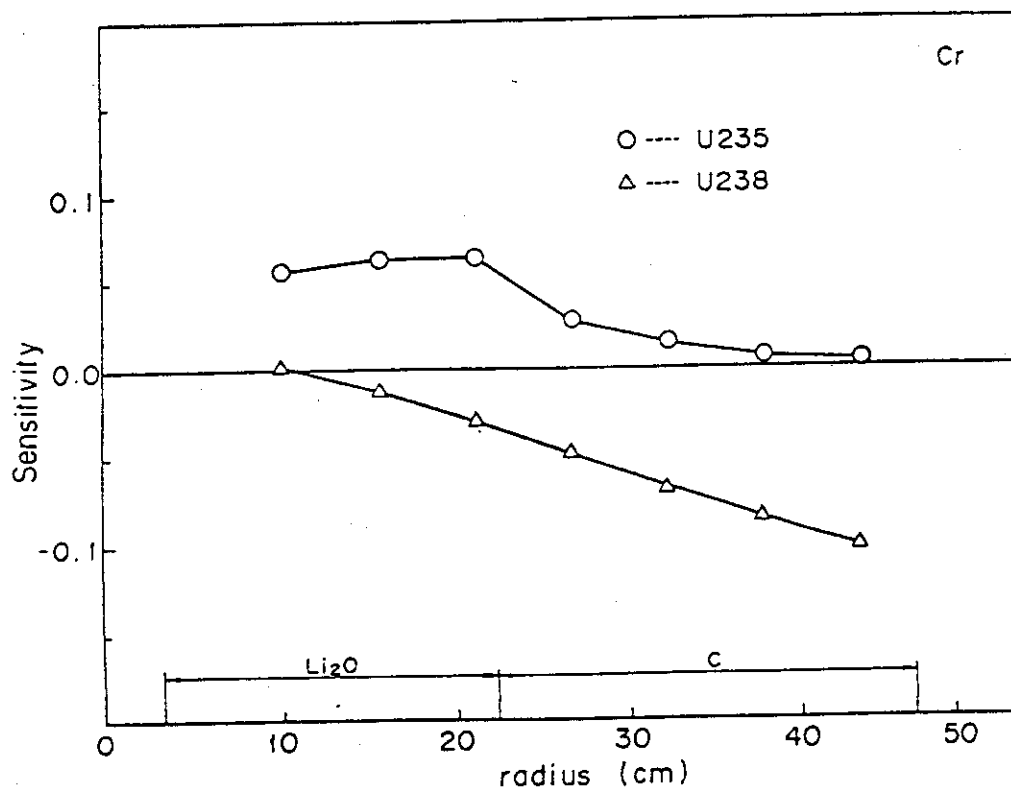
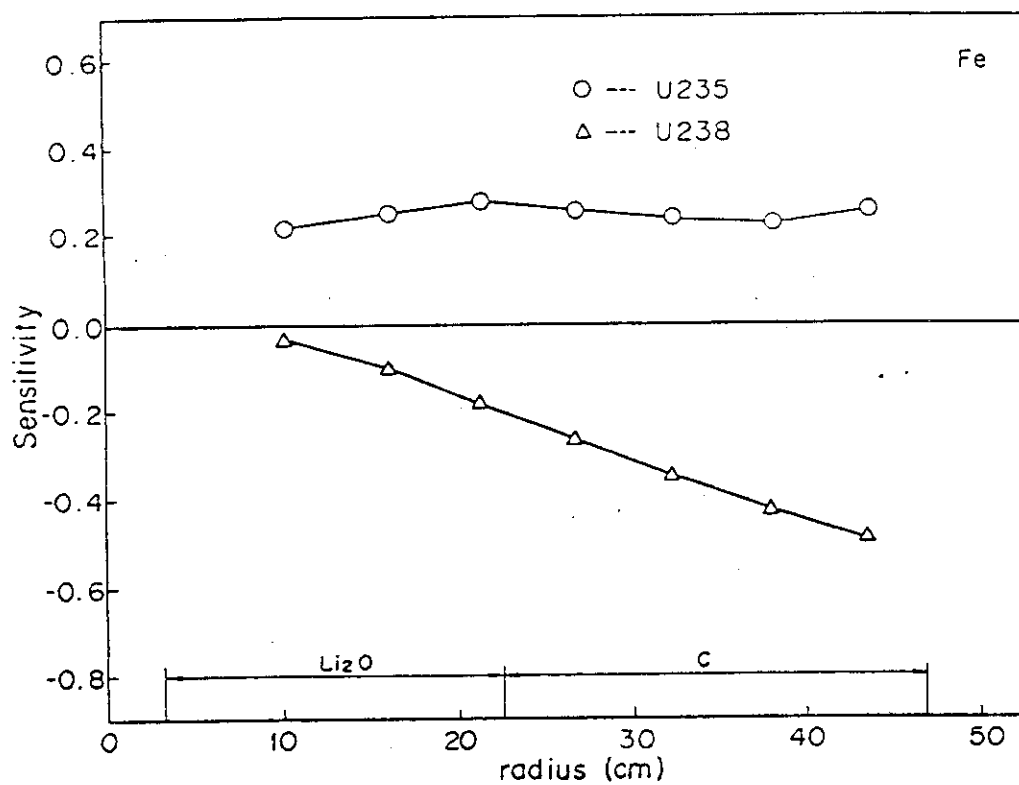


Fig.3.12 Spatial Sensitivity of U-235 and U-238 fission rate for Fe and Cr.