

JAERI-Research

95-033



有機溶剤の散乱核の導出と
有機溶剤減速材-MOX燃料棒体系の臨界解析

1995年3月

角谷浩亨*・塩田雅之*・末富英一*・内藤俊孝・黒澤正義

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 株原子力資料サービス

有機溶剤の散乱核の導出と有機溶剤減速材-MOX 燃料棒体系の臨界解析

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学部

角谷 浩亨*・塙田 雅之*・末富 英一*

内藤 哲孝・黒澤 正義

(1995年3月10日受理)

有機溶剤を減速材にもつ MOX 燃料棒体系の臨界実験は従来、有機溶剤の熱中性子散乱核を用いては解析されていない。通常有機溶剤中の水素原子に対する散乱核は、軽水中の水素に関するもので代用されている。これは、有機溶剤に関して熱中性子散乱断面積の信頼できるデータが存在しなかったためである。そこで、有機溶剤 TBP (Tributyl phosphate) に関する全断面積の実験値を再現するような散乱核を作成し、これを用いて 32 vol% の n-ドデカンの混合液を減速材にもつ MOX 燃料棒体系の臨界実験を解析した。

臨界解析は、モンテカルロ法臨界解析コード MULTI-KENO 及び MGCL 多群定数ライブリーラーを用いて行った。新しい散乱核を用いて計算された実効増倍率は従来の結果より小さく、かつ実験との良い一致を示した。また、軽水の散乱核を用いた従来の解析との差は約 0.5 % Δk と小さかったが、臨界固有値の燃料棒格子幅に対する依存性等が改善された。

Derivation of Scattering Kernel for Organic Moderator and Criticality Analysis
of a System Consisted of Organic Moderator-mixed Oxide Fuel Pin Assembly

Hiroyuki KADOTANI*, Masayuki SHIOTA*, Eiichi SUETOMI*
Yoshitaka NAITO and Masayoshi KUROSAWA

Department of Fuel Cycle Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 10, 1995)

Critical experiments of mixed oxide fuel pins in organic moderator have not been analyzed with the proper thermal scattering kernel for organic moderator. Usually the scattering kernel of hydrogen atoms in organic moderator are substituted by the scattering kernel of hydrogen atoms in light water. This was caused by the fact that there exist no reliable data concerning thermal scattering cross section of hydrogen atoms in organic moderator. Then, we synthesized a scattering kernel of hydrogen atoms in 32 vol% Tributyl Phosphate (TBP) and 68% n-dodecane so as to reconstruct the measured total cross section of the organic moderator. By using the scattering kernel, we analyzed the critical experiments of the organic moderator and mixed-oxide fuel pin system.

The critically analyses were performed with the standard MGCL library and MULTI-KENO. The calculated effective multiplication factor with the new scattering kernel showed lower values and better agreement than the existing results which use the substituted scattering kernel of hydrogen atoms in light water. However, even though it was found that the difference of criticality analysis between the two kernels was not too large ($\sim 0.5\%$ in k_{eff} 's), the lattice pitch dependence of k_{eff} was improved.

Keywords: Criticality, Organic Moderator, Scattering Kernel, Frequency Distribution,
Normal Dodecane, Tributyl Phosphate (TBP)

* CRC Research Institute, Inc.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験の現状	2
3. 有機溶剤の断面積の作成	4
4. 臨界解析	7
5. 結論と残された問題	9
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Current Status of the Experiment	2
3. Generation of Cross Section for Organic Moderator	4
4. Criticality Analysis	7
5. Conclusion and Remained Problem	9
References	10

1. はじめに

再処理工場の溶媒抽出工程で用いられる有機系の溶媒中の核物質の臨界性は、重要な問題であると考えられる。従来、これらの工程の臨界安全評価では、有機溶剤の断面積データの信頼性が乏しいため、有機溶剤中の水素の断面積の代わりに、軽水中の水素の断面積を用いて臨界解析を行ってきた。したがって、この代用が十分安全側となっているか、また、どの程度安全裕度をもつかを把握することは臨界解析の信頼性の点で非常に重要である。ここでは、有機溶剤として、TBP(tributyl phosphate)と炭化水素(ここでは、Dodecane)及びそれらの混合物をとりあげ、臨界性に関する解析を行い、軽水と有機溶剤の臨界性の差を定量的に評価した。

現在までに報告されている有機溶剤を減速材に用いる臨界実験は、プルトニウムの酸化物を用いたピン体系のものが知られている⁽¹⁾。一方、有機溶剤の熱中性子散乱断面積については、散乱法則を測定した実験は報告されておらず、唯一全断面積の実験が報告されているにすぎない⁽²⁾。

そこで本研究では、この全断面積を手がかりに有機溶剤の散乱断面積を構成し、この断面積を用いて、臨界実験の解析を行った。本報告書は、第2章で実験の現状のレビュー、第3章で有機溶剤の断面積の計算と評価、第4章で臨界解析、第5章で結論、の5章により構成されている。

2. 実験の現状

2. 1 有機溶剤の熱中性子断面積⁽¹⁾

本解析で対象とした臨界実験で減速材として用いられた有機溶剤は、TBP (Tributyl Phosphate, 32%) と炭化水素 (n-Dodecane, 68%) の混合物である。これらの有機物質及び混合物（断面積測定時の混合物の組成は、30%vol%TBPと70%vol% n-ドデカンである）の熱中性子全断面積は、武藏工業大学のTRIGA-II (100 kW) に設置されたチヨッパー、TOF 装置を用いて測定された。

熱中性子全断面積の測定は、室温 ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) で行なわれた。TBPの純度は約99.8%であり、その密度は0.998 g/ccであった。臨界解析上最も重要であると考えられる不純物はC1で約0.2 ppmの濃度があった。またn-ドデカン ($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$) の純度は99.3%であり不純物は0.9%のn-C₁₁H₂₄と0.3%のC₁₃H₂₈であった。全体の密度は、0.982 g/ccであった。なお、中性子断面積の測定に用いた有機溶剤の試料は、臨界実験で用いられた減速材の有機溶剤から取られたものではない。従って、不純物等に関しては若干の相違が存在する可能性がある。

熱中性子全断面積の測定結果を、Fig. 1にしめす。この図から判るように、TBPとn-ドデカンの全断面積の間には、有意の差は見られなかった。しかし、水素1原子あたりの断面積で比較すると、有機溶剤と軽水の全断面積の間には、中性子のエネルギーの0.01 eV ~ 0.1 eVの範囲で明かな差が認められた。Fig. 2には、70%のn-ドデカンと30%のTBPとの混合物の全断面積の測定結果を示す。混合物の全断面積は、その成分であるn-ドデカンなし TBPの断面積と相違する事なくほぼ同一であることが判った。

2. 2 有機溶剤減速材体系の臨界実験

米国の高速中性子実験炉 (FFTR) で用いられてるPuとUの混合酸化物燃料棒（以下FTRピン、燃料の組成・形状等は第4章に示す）を用いた格子燃料体系の臨界実験で、減速材と

して軽水を用いた場合と有機溶媒を用いた場合の臨界燃料本数の比較をTable Iに示す⁽¹⁾。臨界実験⁽³⁾は、1978年と1985年の2度行なわれた。臨界実験での燃料領域は、上方向を除く3方向には少なくとも15cm厚の反射体（軽水ないし有機溶剤）が存在し、上方向にも同様に実効的に無限大厚の反射体が存在する直方体に配列された。但し、上方向では反射体を燃料棒が貫通している。この表から、軽水減速体系と有機材減速体系での臨界燃料本数には、大きな差が存在しないことが判る。しかし、格子ピッチの狭い減速不足の体系で臨界燃料本数ではその差はやや大きくなる傾向が認められる。

Fig.3に軽水減速体系と、有機溶剤減速体系の臨界燃料本数の比較して示す⁽³⁾。この図からも、軽水減速体系と有機溶剤減速体系の臨界燃料本数の差が大きくないことが判る。一般にFTRピンを用いる臨界実験では、軽水体系に比べて、有機溶剤体系の方が臨界燃料本数が多くなる。したがって、有機溶剤減速体系の方が、軽水減速体系に比べて、臨界安全上やや有利であると言える。

Fig.4に既に実施された実験解析の結果の1例を示す⁽⁴⁾。この解析例では、均質化セルに対する巨視的断面積はWIMSコード⁽⁵⁾を用いて作成し、実効増倍率は多群拡散コード、CITATION⁽⁶⁾より求めた。以下に述べる米国で行なわれた解析の場合も同様であるが、この解析では有機溶剤を構成する水素の熱中性子散乱断面積は、軽水を構成する水素の断面積と同一であると仮定して行なわれている（但し、水素の原子数密度は有機溶剤中の原子数密度を用いる）。Fig.4を見ると、有機溶剤減速体系では実効増倍率は明らかに過小評価されている。Fig.5は同一の有機溶剤減速体系の解析をSCALEコードシステム⁽⁷⁾で行なった例である⁽¹⁾。この場合は、実効増倍率は1よりやや大きく評価されており、Fig.4の解析結果とはやや傾向が異なる。

3. 有機溶剤の断面積の作成

3. 1 作成の方針

有機溶剤の散乱過程に関して現時点で入手できるデータは、Fig.1,2のみである。そこでこの熱中性子に対する全断面積データを再現するように有機溶剤の散乱モデルを立てることとする。Fig.1を見るとTBPとn-ドデカンとの断面積の間に特に大きな差がないことから、両者を区別する事なくおもにn-ドデカンを対象に散乱モデルを提案する事とした。n-ドデカンは C_2H_{10} の10個の鎖と両端の C_2H_5 より構成された鎖状の分子である。この鎖の長さが無限大となり重合した物質がポリエチレンである。

熱中性子の散乱断面積は、散乱原子が非干涉性散乱体の場合振動数分布(Frequency Distribution)と呼ばれる1変数の関数が与えられれば精度良く計算出来ることが知られている⁽⁸⁾。振動数分布は、中性子散乱の実験結果から実験的に決めることが可能であるが、散乱原子の運動状態(例えば原子の振動状態や、その原子を含む分子の拡散の様子等)をモデルを用いて計算し、この結果から理論的に決めることが可能である。ポリエチレン中にある水素原子に対する振動数分布は、既に標準的なものが評価されている⁽⁹⁾。この振動数分布はENDF-IIIの散乱法則のデータの計算に用いられたものである。

有機溶剤に対する散乱断面積計算のための振動数分布は、著者の知る限り発表されていない。そこで、本研究ではポリエチレンの振動数分布を元に、有機溶剤の全断面積(Fig.1)を再現するように、試行錯誤により有機溶剤の振動数分布を構成するという手法をとった。

Fig.6は、ENDF/B-IIIで採用されているポリエチレンを構成する水素に対する振動数分布である⁽⁹⁾。Fig.7にこの振動数分布から計算されたポリエチレンの全断面積の計算値と実験値との比較をしめす⁽⁹⁾。なお、同図には散乱角の余弦の平均の計算値も示した。計算値の全断面積と実験値は0.01eV以下の低エネルギー領域でやや一致が悪い外、全体的には両者の一致はよい。ポリエチレンの熱中性子散乱に関する特性は、全断面積の外、微分散乱断面積に直接比例する散乱法則に関しても実験と比較され両者の一致の良いことが確かめられた⁽⁹⁾。

これらの比較からこの振動数分布は、ポリエチレンの熱中性子散乱の特性を十分精度良く再現出来ることが確立している。そこで、ポリエチレンの振動数分布を、有機溶剤の振

動数分布を評価・作成するための出発点として採用する事とした。

3. 2 振動数分布の評価

Fig. 8,9に今回評価した有機溶剤中の水素原子に対する振動数分布を示す。これらの振動数分布は、ポリエチレンの振動数分布の音響分枝（振動数0を含む低振動数の領域に対応）と光学分枝（高振動数部分にあるピークに対応）の形を保存して、両者の強度比と光学分枝の位置を変えることにより求めたものである。Fig. 8のケース1の振動数分布による全断面積の実験との比較をFig. 10に示す。なお、有機溶剤中の炭素原子による中性子散乱の寄与は、

$$\begin{array}{c} \text{炭素原子数} & & 1.2 \\ \hline \text{———} \times (\text{炭素の自由原子散乱断面積}) = & \text{———} & \times 4.35 \text{ バーン} \\ \text{水素原子数} & & 2.6 \end{array}$$

を水素の全断面積に加えて補正した（実験と計算との比較はすべて水素1原子当たりに規格化して行なわれている）。正確には、炭素原子の有機溶剤中での化学結合の効果を取り入れる必要があるがここではこれを無視した（水素原子の化学結合効果に比べれば十分無視できる）。なお、図中の水素の全断面積の計算値には中性子吸収断面積が加えられていないが、この効果も無視できる（水素の中性子吸収断面積は中性子エネルギーが0.025 eVで約0.33バーンである）。

Fig. 10を見ると、ケース1の振動数分布は0.1eV以下の低エネルギー側では実験値の全断面積を、比較的良く再現していることが判る。しかし、0.1eV~0.3eVではかなり過小評価となっている。同図には、参考のためポリエチレンの振動数を用いて再現した全断面積も示した。この図から、有機溶媒の全断面積の実験値はポリエチレンの振動数分布によって計算した全断面積にも良く一致することが判った。しかし、0.1eV以下のエネルギー領域では、ケース1の振動数分布を用いた方が、ポリエチレンの振動数分布を用いた場合よりも全断面積の計算結果が実験値に近いことが判る。

0.1eV以上の高エネルギー側における実験とケース1との不一致の改善のため、ケ

ース 2 の振動数分布で計算した全断面積を Fig. 11 に示す。しかし、この時の全断面積の計算値は低エネルギー領域で過小評価となっている。

Fig. 12 にはケース 1、ケース 2、ポリエチレンの振動数分布により計算した全断面積の C/E 値を示した。誤差の最大値は約 10 % である。

上で述べた振動数分布（ケース 1、2）の他、種々の分布についても全断面積の計算を行い実験との比較を行なったが、実験との不一致を改善する事は出来なかった。特に全中性子エネルギーに渡って全断面積の測定値を再現出来る振動数分布を構成する事には、現在まで成功していない。

そこで、中性子エネルギーの低エネルギー部分と高エネルギー部分で実験と最も良い一致を示している 2 種類の断面積を用いて臨界解析を実施し、この結果によりケース 1 と 2 の振動数分布の優劣を決めることとした。

4. 臨界解析

新たに作成した有機溶剤の熱中性子断面積を用いて臨界実験の解析を行い、断面積の有効性を確かめた。解析は、米国の高速実験炉の混合酸化物燃料を用いた臨界実験を対象とし、参考文献（1）に述べられている形状と組成を用いて行った。

4.1 実験体系

燃料

燃料は、既に述べたように米国のFTR用の混合酸化物燃料（FTR燃料ピン）で、次のような組成と形状を持っている⁽¹⁾。

燃料直径 4.9403 mm

燃料有効長 914.400 mm

燃料組成（重量%）

核種	Type 3.1	Type 3.2
²³⁸ Pu	0.0130	0.0111
²³⁹ Pu	21.0641	17.1251
²⁴⁰ Pu	2.8606	2.3150
²⁴¹ Pu	0.3461	0.2876
²⁴¹ Am	0.0504	0.0597
²⁴² Pu	0.0526	0.0381
²³⁵ U	0.4547	0.4853
²³⁸ U	63.5857	67.8638
O	11.6728	11.8143

燃料密度 (g/cm³)

ペレット	9.903	9.994
スタック	9.783	9.830

被覆材

外径	5.8420 mm
内径	5.0800 mm
材質	316ステンレス・スチール

燃料棒の上下には種々の構造材が存在するが、この解析では上部プレナムとスプリングを除いて、出来る限り正確に取り扱った。プレナムおよびスプリング部は、被覆管のみとし被覆管の内側はボイドとしてモデル化した。燃料棒の上下の構造材の詳細については、参考文献（1）のFig.6を参照されたい。

炉心の形状

炉心の断面形状をFig.13～17に示す。解析では全方位に実効的に無限大厚の水ないし有機溶剤の反射体を仮定した。臨界炉心の形状は参考文献（1）のFig.3、4に基づいた。ただし、Table Iに示した臨界燃料本数の端数については四捨五入して処理した。

4. 2 臨界計算とその結果

臨界計算は、MULTI-KENO⁽¹⁰⁾、⁽¹¹⁾で行なった。主な計算条件を以下に示す。1バッチは3000個の独立した核分裂源からなっており、実効増倍率は110個のバッチに対して計算した。各バッチで得られた実効増倍率を平均してその系の実効増倍率とした。実効増倍率の誤差は、この平均操作で求められた標準偏差である。また核分裂分布の初期値は、コサイン型を仮定した。このため最初の10バッチで得られた実効増倍率は、上で行う平均操作から除いた。

得られた結果をTable IIに示す。この表から、有機溶剤減速体系と軽水減速体系で、実効増倍率に有意な差を認めることが出来る。しかし、その差は約0.5%△kとあまり大きなものではない。また、有機溶剤として仮定した振動数分布の差（ケース1、2）の効果は小さく、断面積の差は実効増倍率には殆ど影響を与えていない。この表をグラフにして、Fig.18～21に示す。軽水の散乱断面積を用いた場合に比べてケース2の振動数分布から計算された散乱断面積を用いた場合の方が、実効増倍率の格子依存性もかなり改善されていることが判る。

5. 結論と残された問題

混合酸化物燃料棒と減速材として有機溶剤を用いる臨界実験が、有機溶剤を構成している水素原子の断面積を用いて初めて解析された。従来この解析は、水素の断面積としては軽水の水素の断面積を代用して行なわれていた。

解析の結果、以下の3点が明らかになった。

- (1) 有機溶剤の水素と軽水の水素の断面積により実効増倍率に0.5%程度の差が生じる場合がある。
- (2) 有機溶剤の断面積を用いることにより実効増倍率の格子依存性は、従来の軽水の断面積を代用する近似に比べて改善できた。
- (3) 有機溶剤の水素原子に対する振動数分布を2種類提案したが、臨界実験からその優劣を決めるることはできなかった。ケース1、ケース2のどちらの断面積を使用しても良いと結論できる。

本解析は、有機減速の臨界実験に関する情報が十分でなく、ベンチマーク実験解析ではない。そのため、実効増倍率が有機溶剤の断面積を用いることにより実験値(=1)に近づいたが、これが直ちに有機溶剤の断面積の優位性を示すことにはならない。しかし、解析で仮定した実験形状は、実際の形状と大きく相違しているとは考えにくいから、絶対値としても実効増倍率の実験との一致は、軽水の断面積で代用する場合に比べて改善されていると言えよう。しかし、この点は今後実験の詳細が明らかにされた時点で解析を繰り返し、今回得られた結論を確認する必要がある。

有機溶剤の熱中性子断面積そのものに関しては、新しい実験値が得られないと、本報告書で採った現象論的なアプローチ以上の改良余地はあまり期待できない。また、有機溶剤の熱中性子散乱実験が今後行なわれる可能性も少ないと考えられるが、有機溶剤の分子の運動を分子動力学的に解いて、水素原子に関する振動数分布を純粹に理論的に求めることは可能である。しかし、本臨界実験の解析によれば、有機溶剤の水素の熱中性子散乱断面積を軽水のものと置き換えた場合でさえ実効増倍率に与える影響はあまり大きくなく、实用上は有機溶剤中の水素原子の振動数分布としては今回の評価値を用いれば十分であると結論できよう。

参考文献

- (1) G.R. Smolen, S.R. Bierman, N.Fukumura, "Criticality Data and Validation Study of Arrays of Mixed-Oxide Fuel Pins in Aqueous and Organic Solutions", Nuch.Tech., 107, pp.285-303(1994)
- (2) H.Kadotani, Y.Hariyama, N.Fukumura, N.Aihara, O.Aizawa, K.Hirano, "Measurement of Total Neutron Cross Section for Some Organic Moderators in Thermal Energy Range", Nuclear Data for Science and Technology(1988 MITO), PP.137-140.
- (3) G.R. Bierman, G.R.Smolen, T.Matsumoto, "Experimental Criticality Data comparing Organic with Water Moderation", Trans.Am.Nucl.Soc., 54, pp.195-196(1987)
- (4) N.Aihara, N.Fukumura, H.Kadotani, T.Koyama, M.J.Haire, "Analytical Study of Criticality Experiments of Organic and Light-Water-Moderated Mixed-Oxide Fuel Pin Arrays", Trans.Am.Nucl.Soc., 54, pp.200-201(1987).
- (5) J.R.Askew, M.J.Roth, "WIMS-E A Scheme for Neutronics Calculations", AEEW-R1315(1982).
- (6) T.B.Fowler et al., "Nuclear Reactor Core Analysis Code CITATION", ORNL/TM-2596, Rev.2(1971).
- (7) J.A.Bucholz et al., "SCAL:A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation", NUREG/CR-0200(1982).
- (8) Thermalization Group, Japanese Nucelar Data Committee, "Evaluation of Thermal Neutron Scattering Cross Sections for Reactor Moderators (Summary report)", JAERI 1181 (1969).
- (9) J. V. Koppel, K. H. Houston, "Reference Manual for ENDF Thermal Neutron Scattering Data", GA-8774 (1968).
- (10) Y. Naito, et al., "MGCL-PROCESSOR: A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M 9396 (1981).
- (11) Y. Naito, et al., "MULTI-KENO: A Monte Carlo Code for Criticality Safety Analysis", JAERI-M 83-049 (1983).

Table I * Number of Critical FTR Fuel Pins Moderated and Fully Reflected by
Either Water or an Organic Solution of TBP-NPH.

Lattice Spacing (cm)	Water Moderator		Organic Moderator	
	Experiment Number	Critical Number of Fuel Pins	Experiment Number	Critical Number of Fuel Pins
0.761 ± 0.001	067	1046.9 ± 0.2	065	1054.8 ± 0.2
0.968 ± 0.001	021	571.9 ± 0.2	063	599.2 ± 0.8
1.242 ± 0.001	043	293.9 ± 0.1	062	301.8 ± 0.2
1.537 ± 0.001	068R	199.7 ± 0.3	061	199.5 ± 0.3
1.935 ± 0.002	032	165.1 ± 0.4	060	165.3 ± 0.1

* This Table I was made by rearranging Table 1 of reference 1.

Table II Results of Criticality Analysis with the Simulated Scattering Cross Section
for Hydrogen in Organic Moderator and with Light Water Cross Section.

Experiment Number	Effective Multiplication Factor P3 Scattering Kernel		Case 2 Cross Section	Light Water Cross Section
	Case 1 Cross Section			
065	1.01568 ± 0.00111		1.01148 ± 0.00131	1.01302 ± 0.00149
063	1.00752 ± 0.00163		1.00555 ± 0.00143	1.01256 ± 0.00141
062	1.00662 ± 0.00156		1.00286 ± 0.00152	1.00941 ± 0.00140
061	1.00676 ± 0.00134		1.00684 ± 0.00143	1.01224 ± 0.00155
060	0.99931 ± 0.00149		0.99943 ± 0.00155	1.00327 ± 0.00136
Average	1.00718		1.00523	1.01010

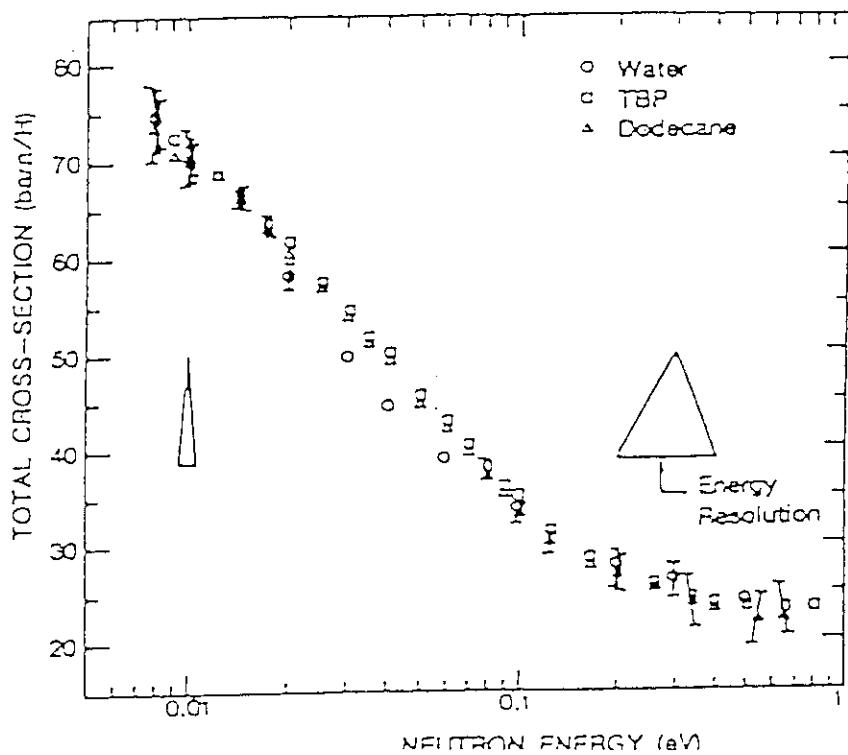


Fig. 1 Comparison of total neutron cross sections among water, TBP and normal.

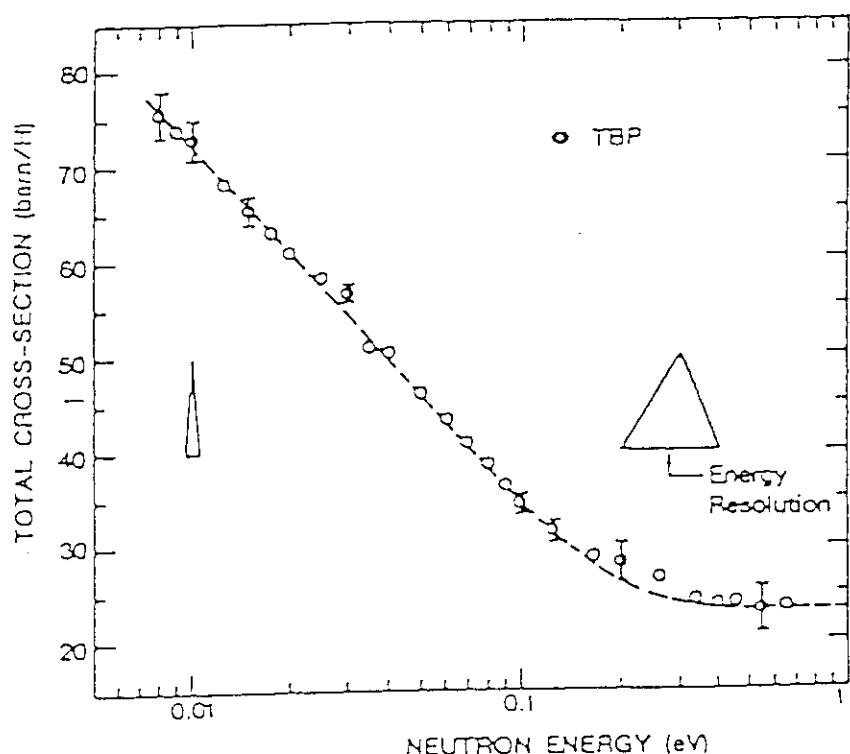


Fig. 2 Total cross section of the mixture of TBP and normal dodecane.

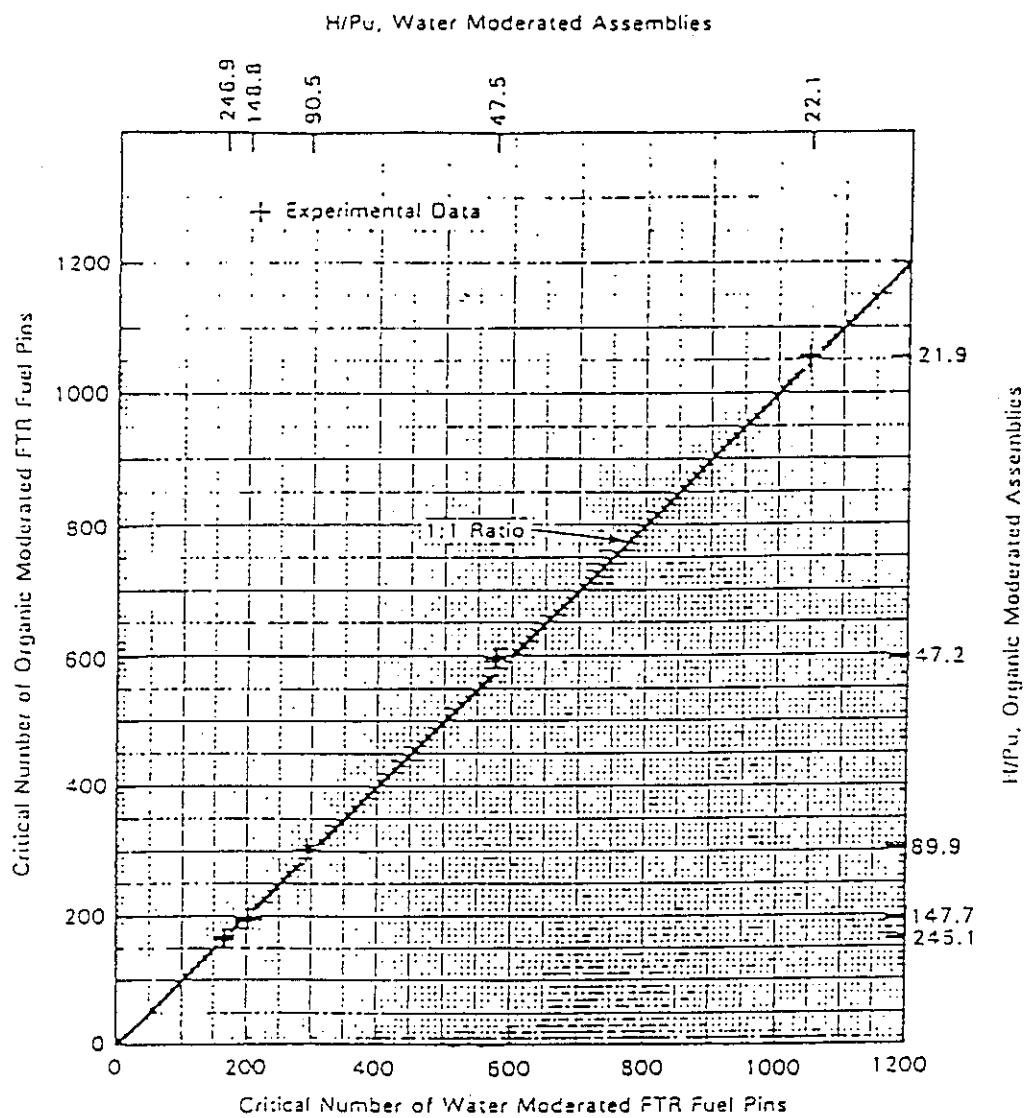
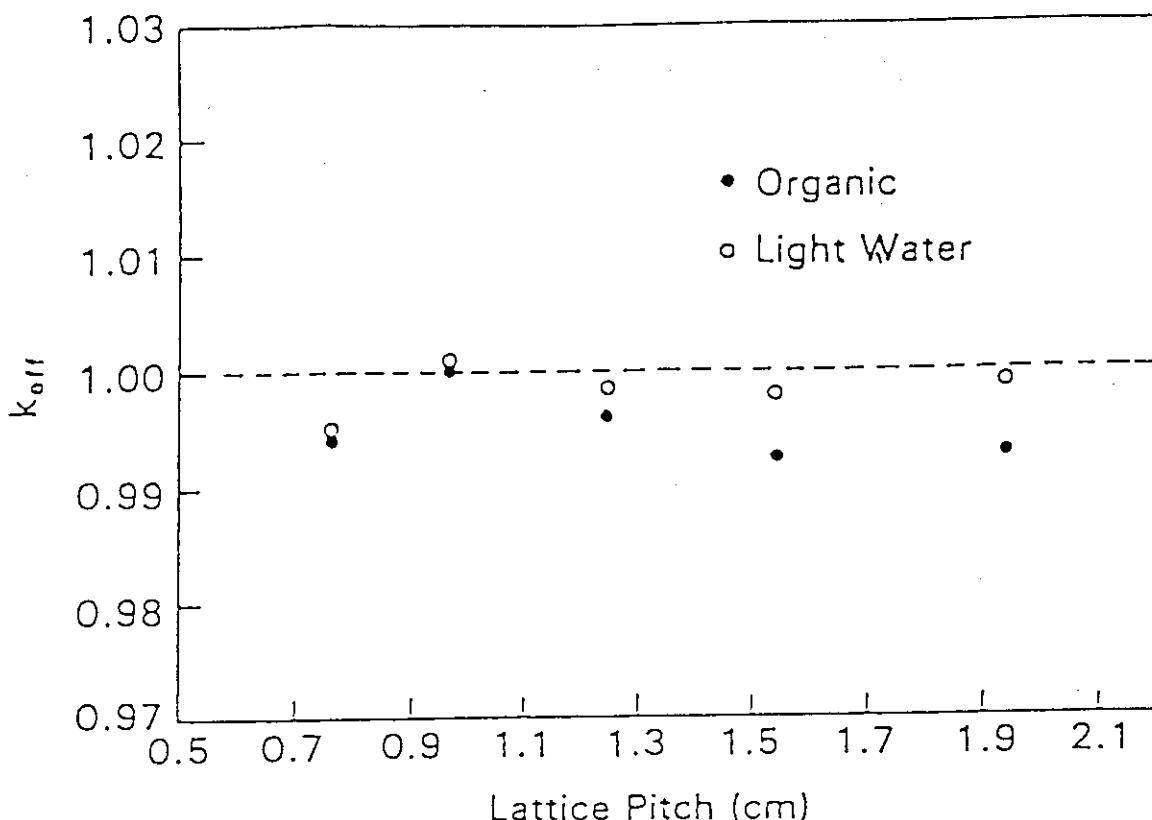
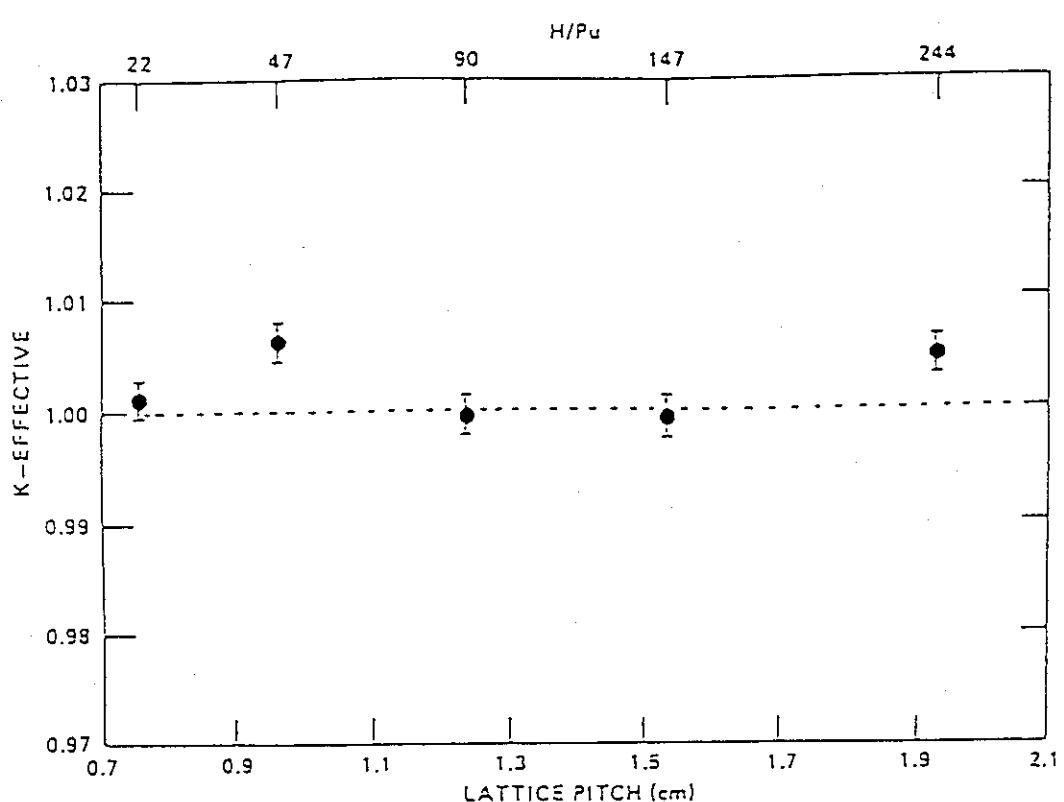


Fig. 3 Critical fuel pin number moderated by light water vs. critical fuel pin number moderated by organic moderator.

Fig. 4 Analysis of the critical experiments with the WIMS-CITATION⁽⁴⁾Fig. 5 Analysis of organic moderated system with SCALE code system⁽⁵⁾

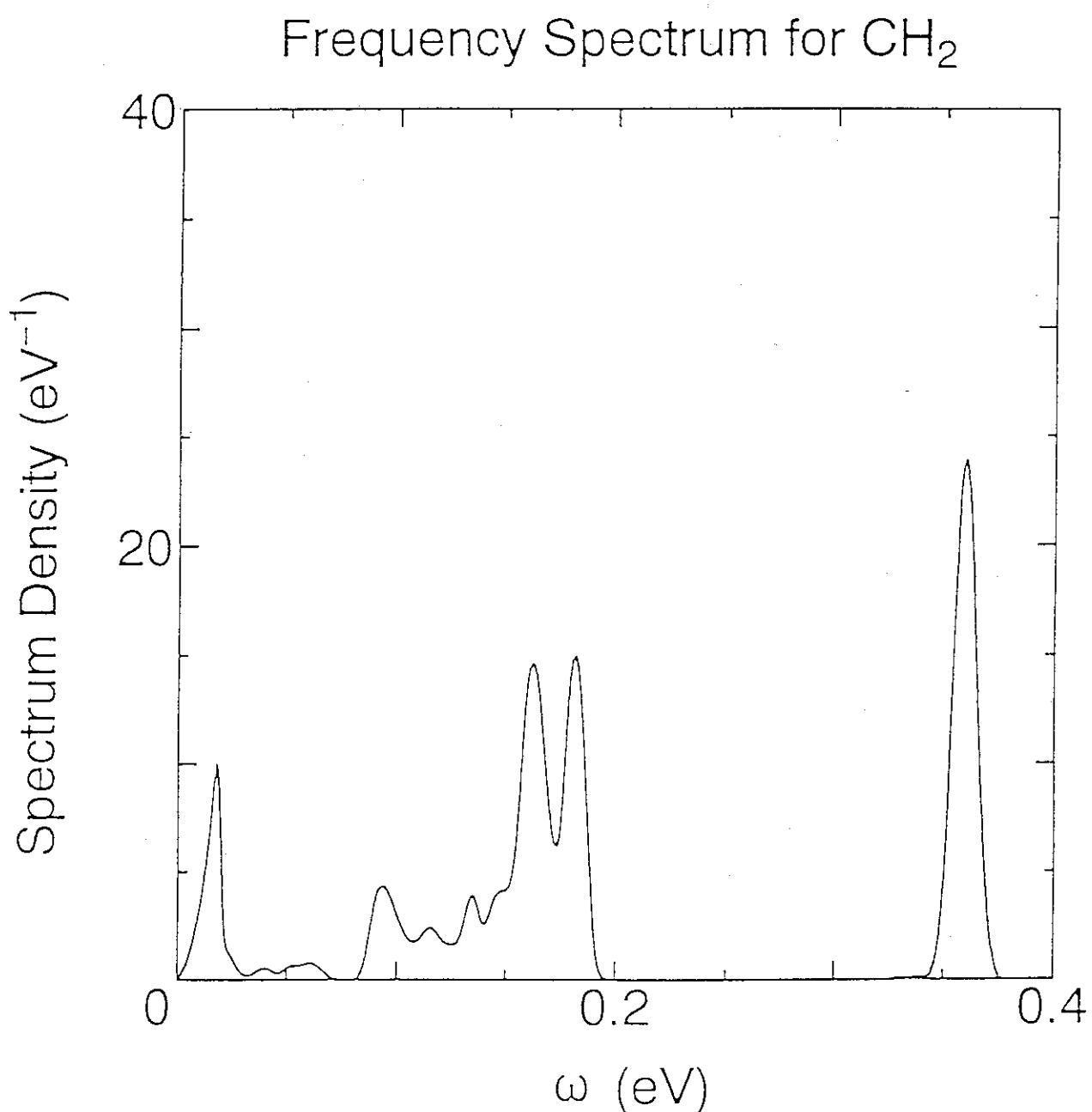


Fig. 6 The spectral density (frequency distribution) for polyethlen employed in ENDF/B-III⁽⁹⁾

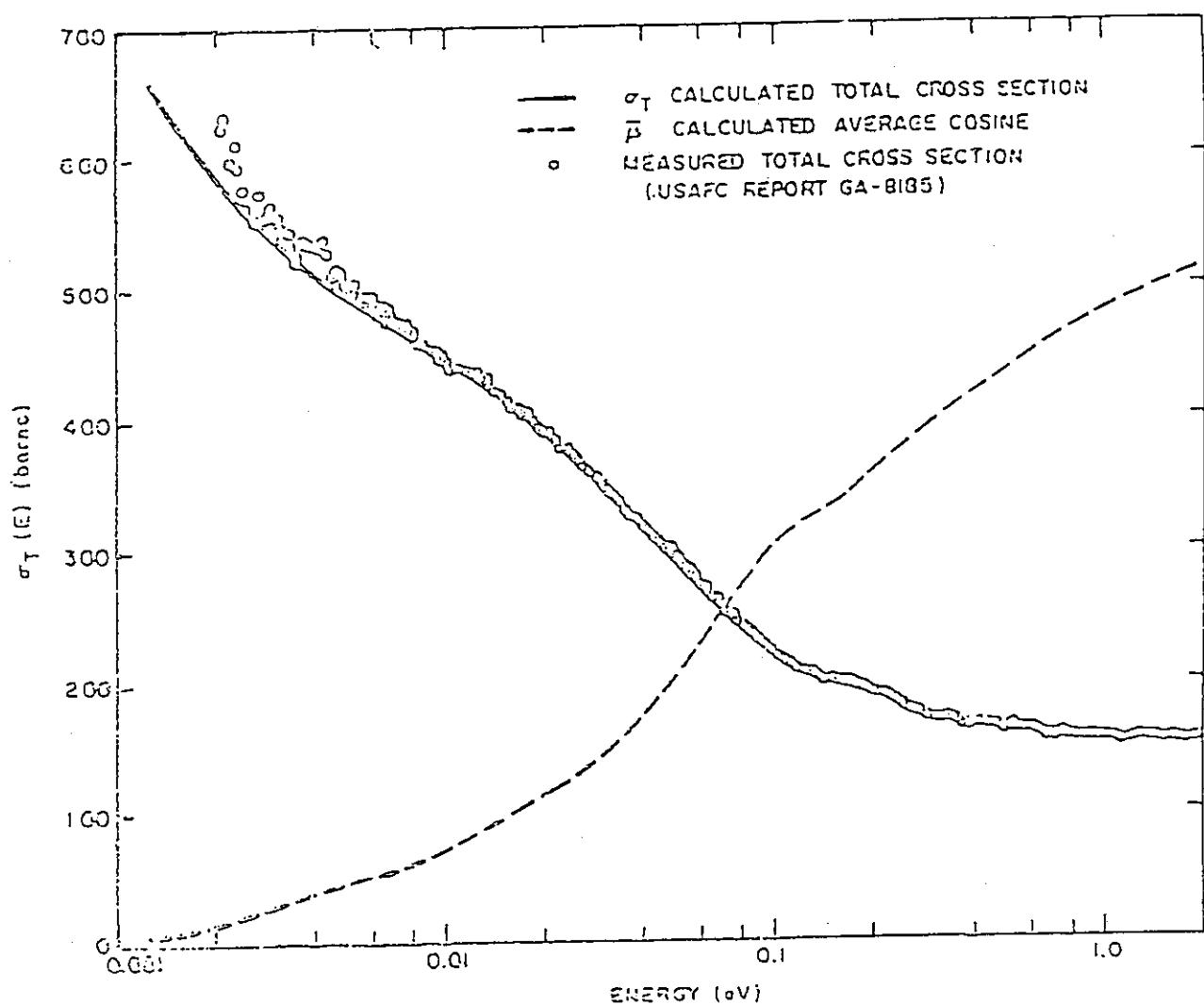


Fig. 7 Comparison of the theoretical polyethylen cross section with the experiment⁽⁹⁾

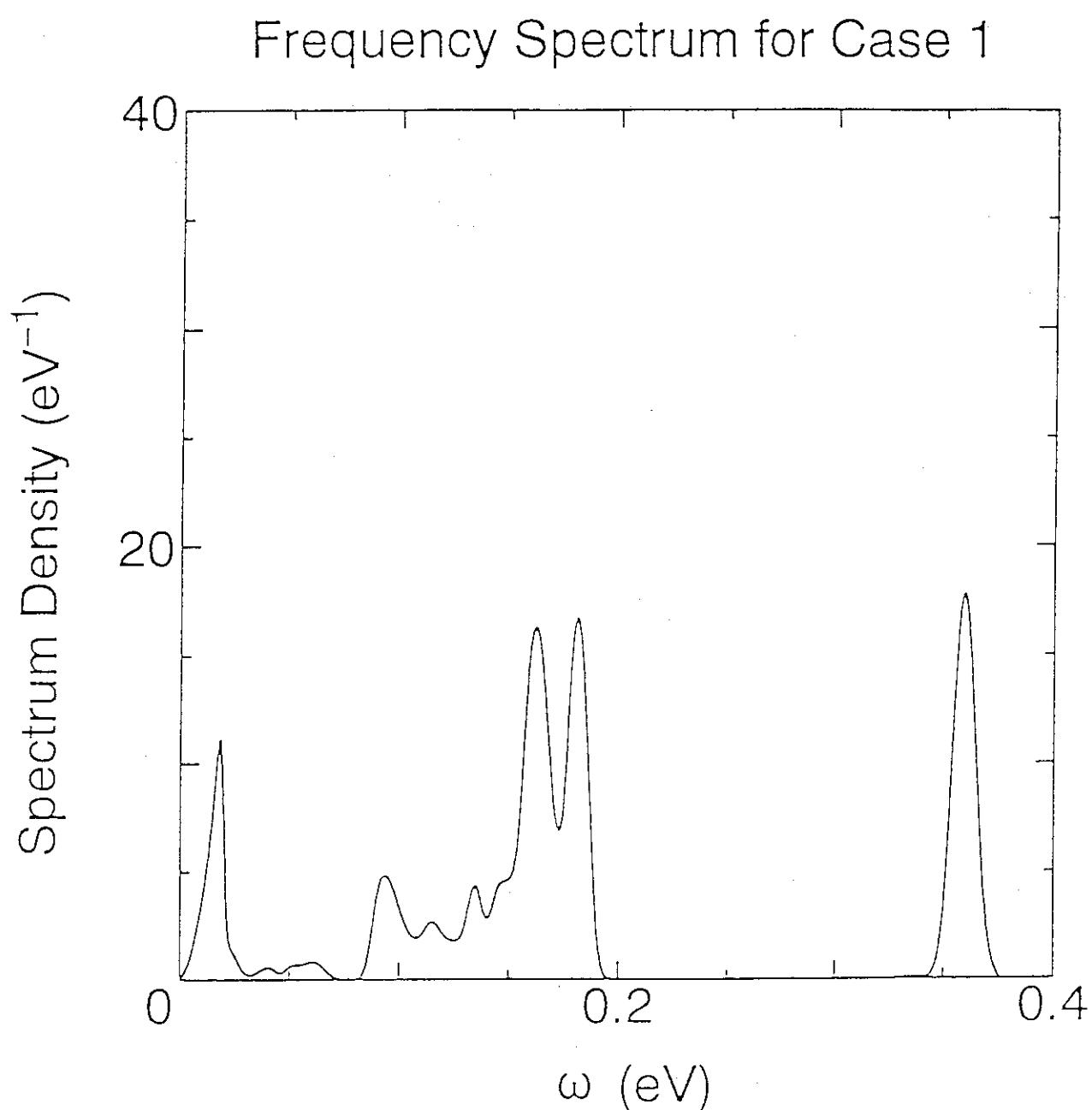


Fig. 8 The proposed spectral density for hydrogen atom
in organic moderator (CASE 1)

Frequency Spectrum for Case 2

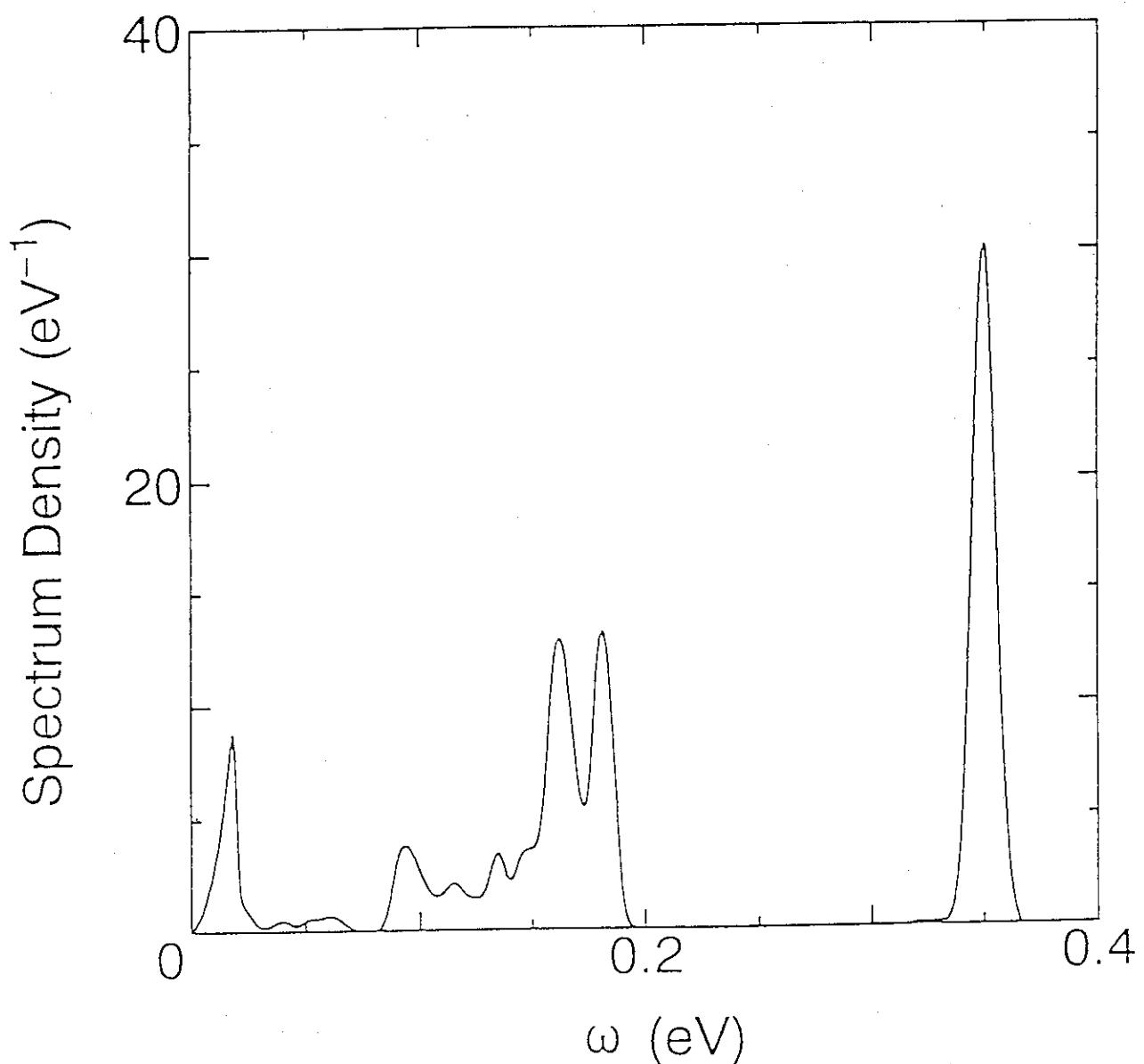


Fig. 9 The proposed spectral density for hydrogen atom
in organic moderator (CASE 2)

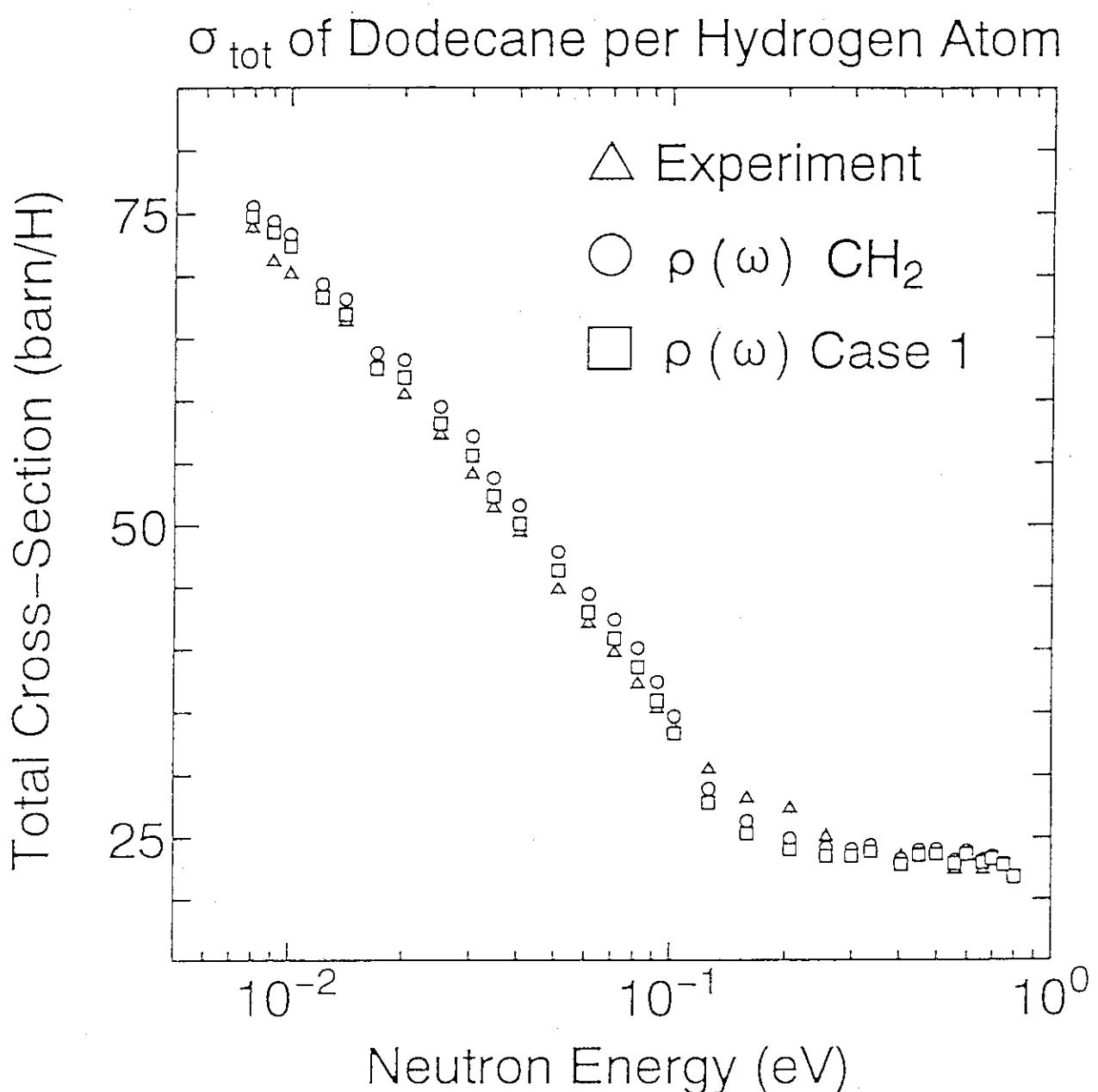


Fig. 10 Comparison of the theoretical total cross section with the experiment.

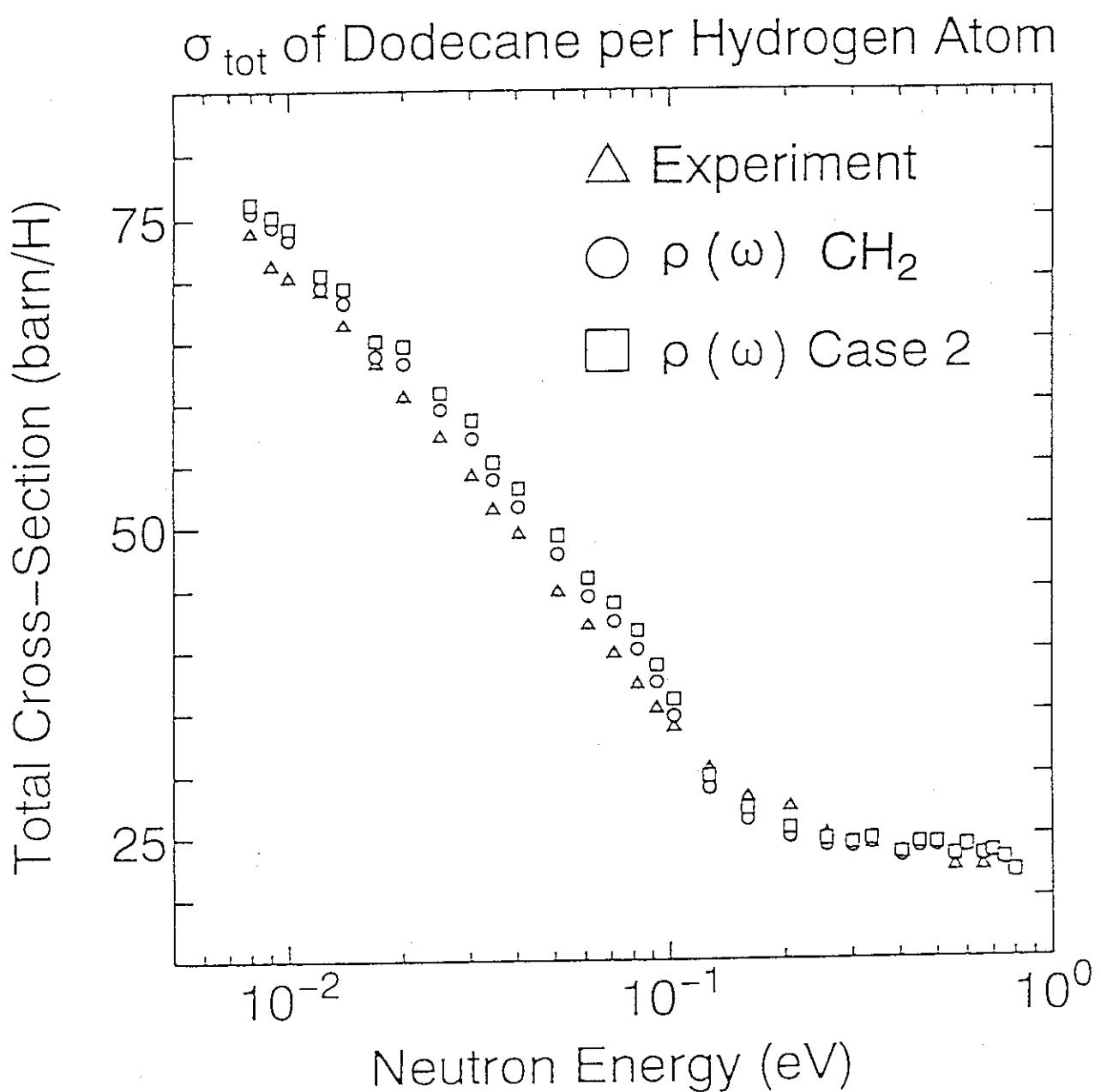


Fig. 11 Comparison of the theoretical total cross section with the experiment.

Comparison between Experiments and Theoretical Results

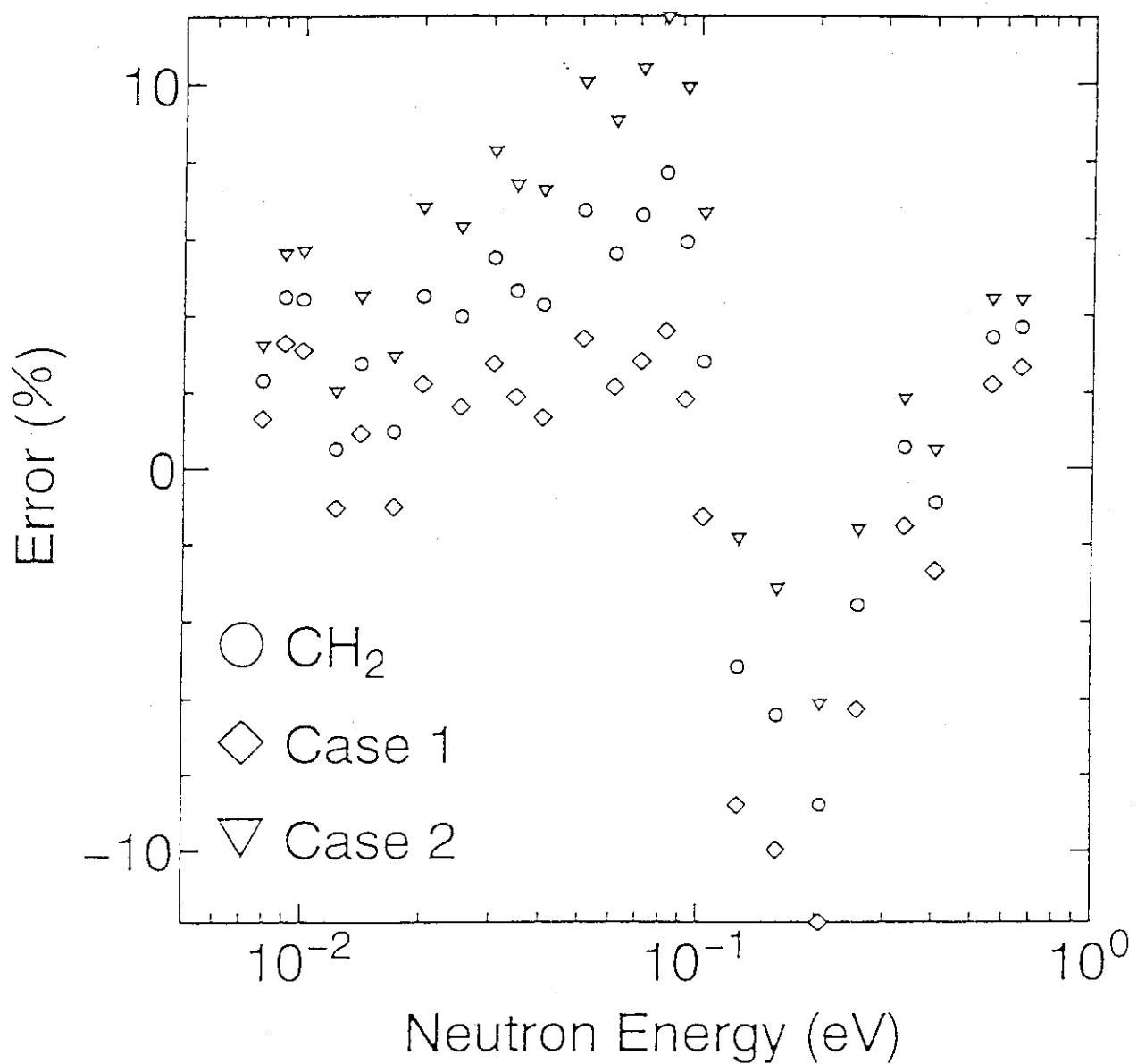
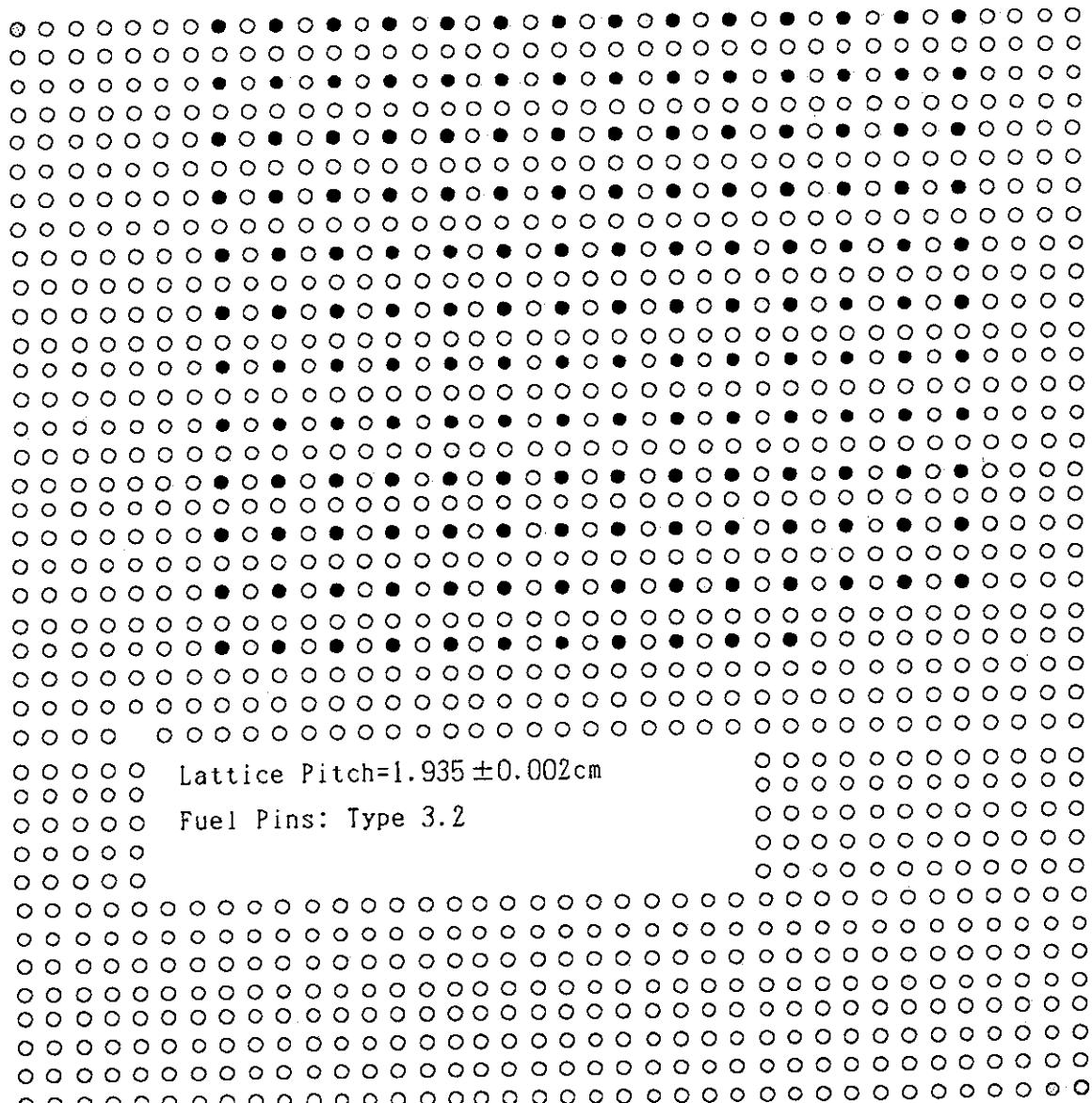


Fig. 12 The C/E (calculation/experiment) value of the total cross section for case 1 and case 2 cross sections.



Black dots mean fuel pins actually loaded, and white dots mean lattice positions.

Fig. 13 The layout of fuel pins for 060 critical experiment.

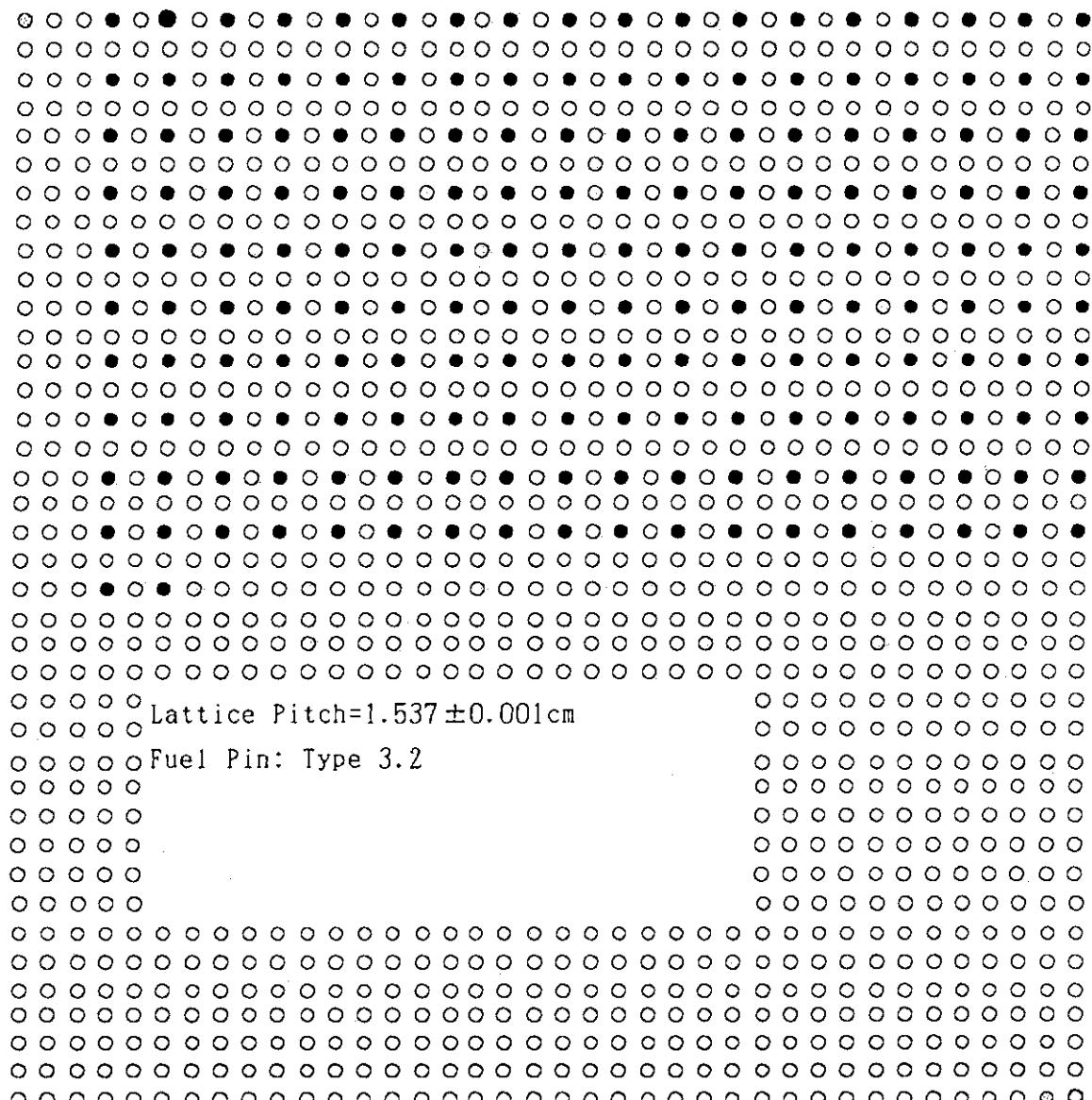
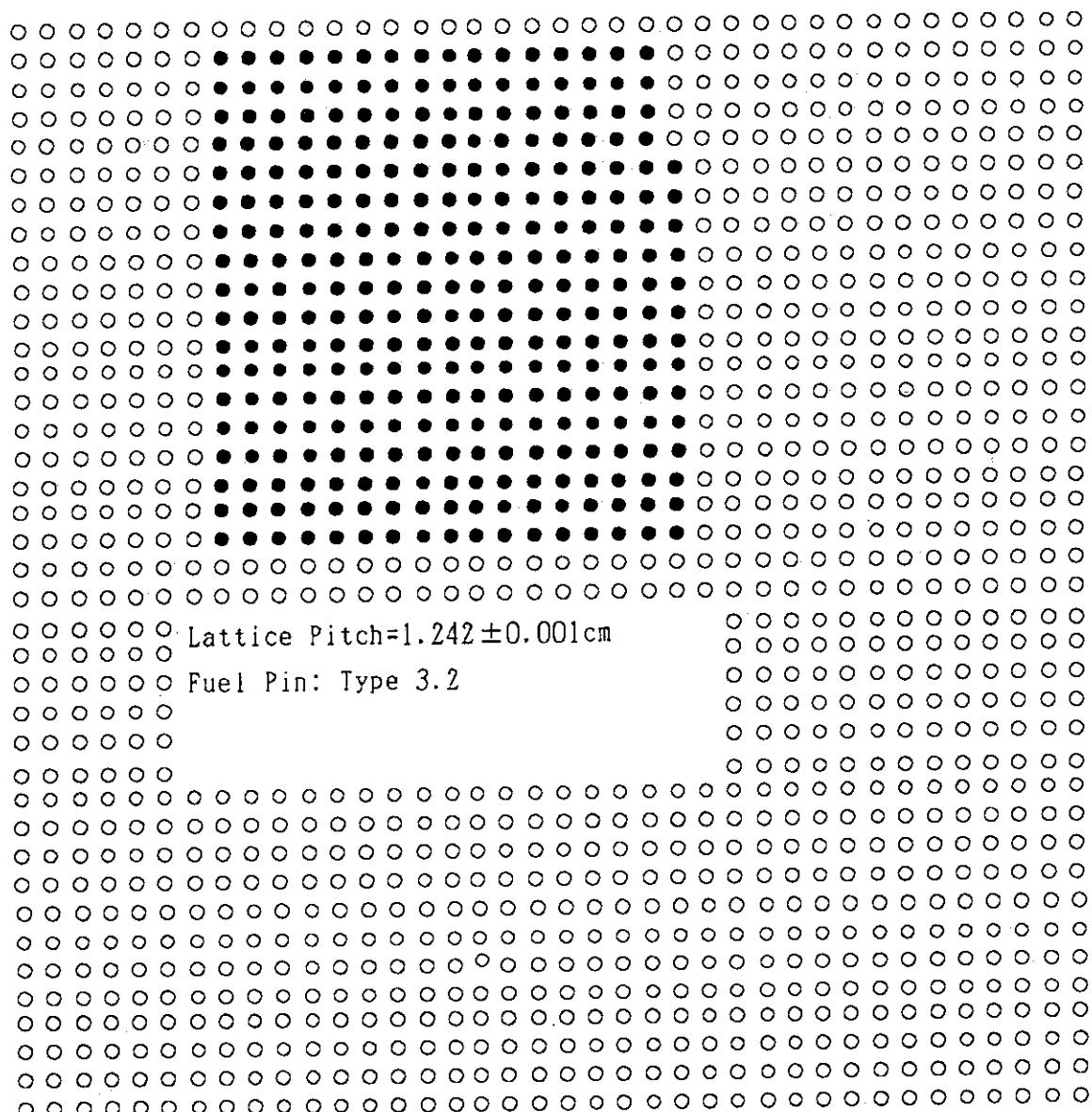
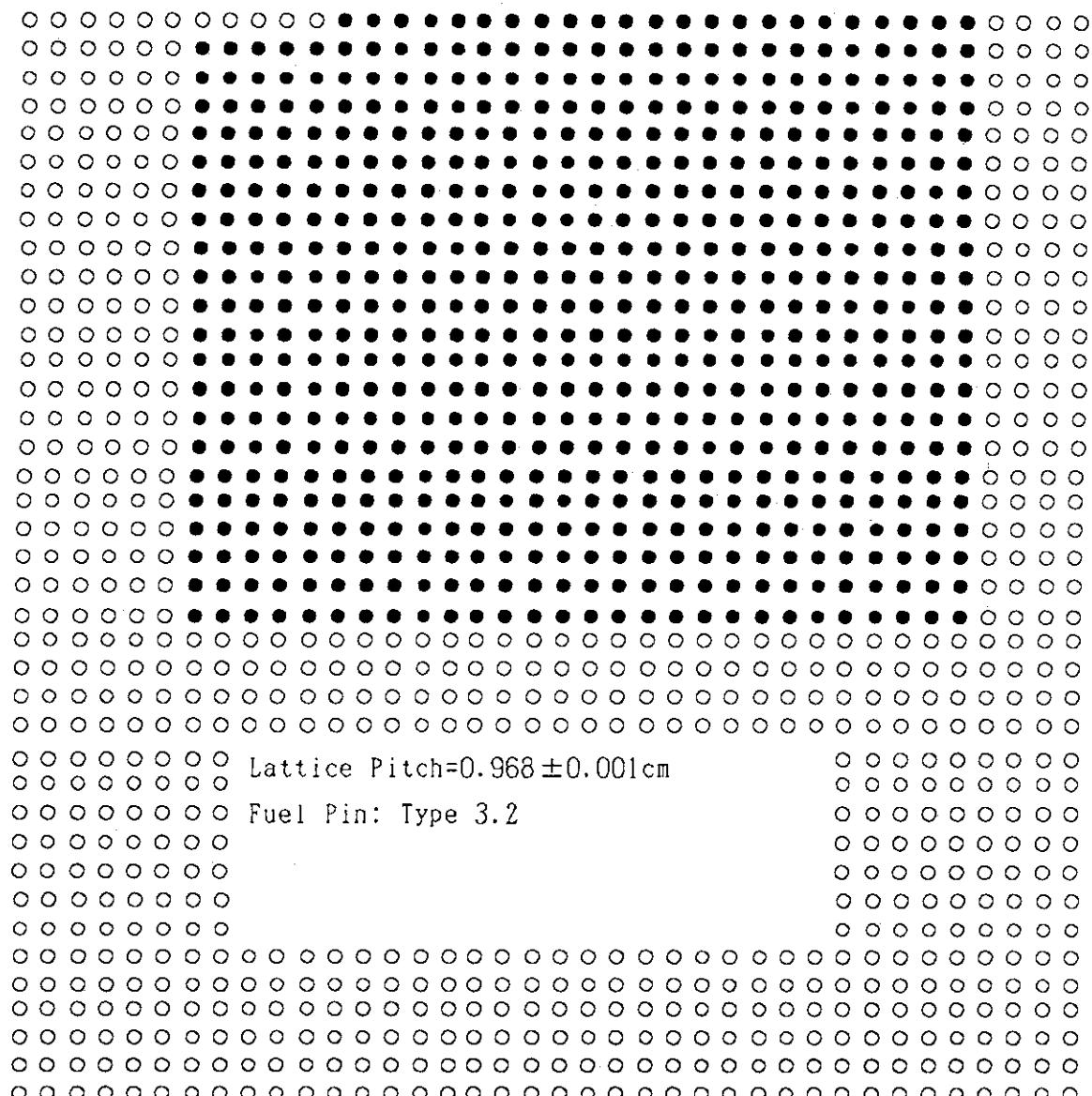


Fig. 14 The layout of fuel pins for 061 critical experiment.



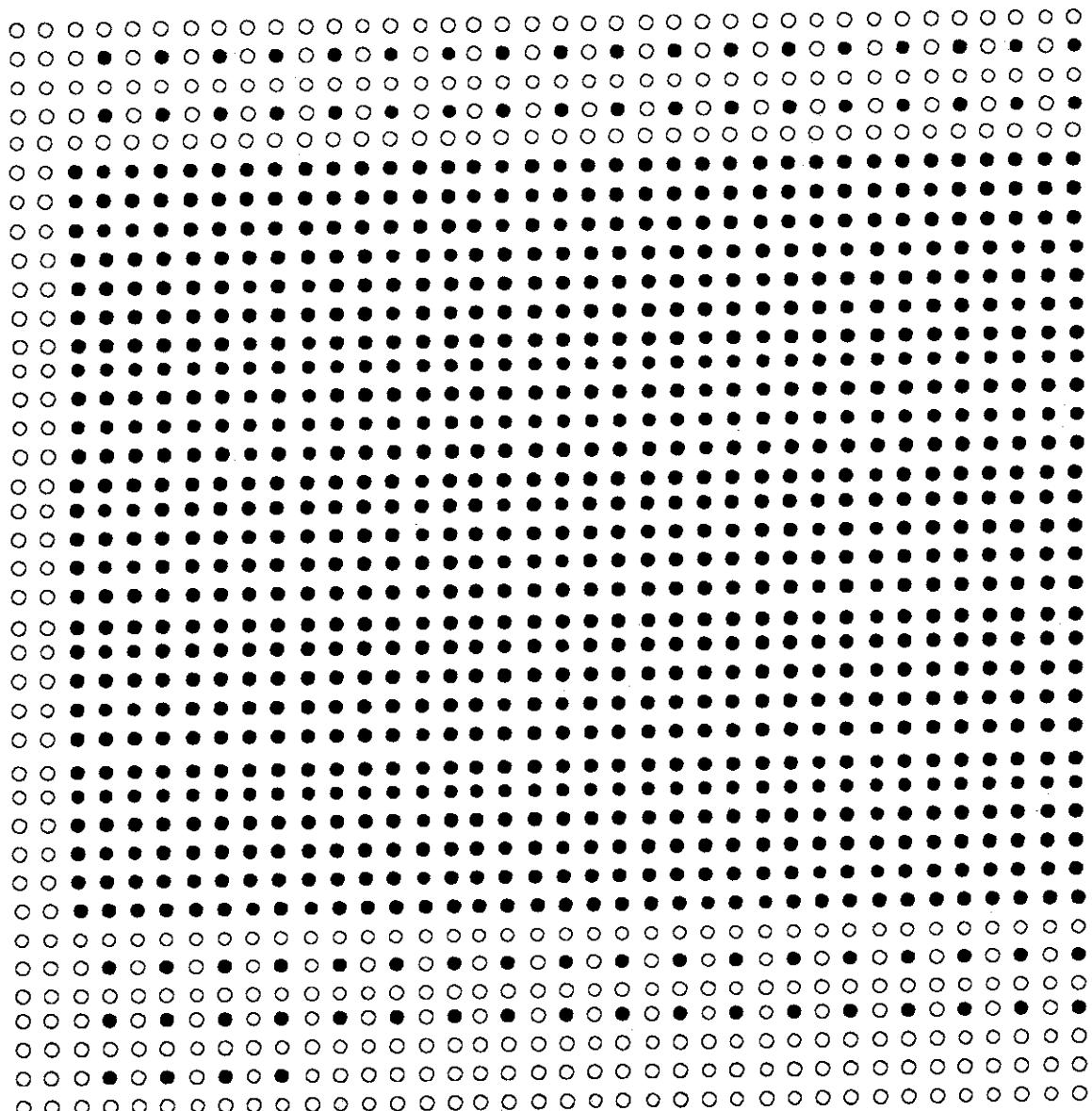
Black dots mean fuel pins actually loaded, and white dots mean lattice positions.

Fig. 15 The layout of fuel pins for 062 critical experiment.



Black dots mean fuel pins actually loaded, and white dots mean lattice positions.

Fig. 16 The layout of fuel pins for 063 critical experiment.



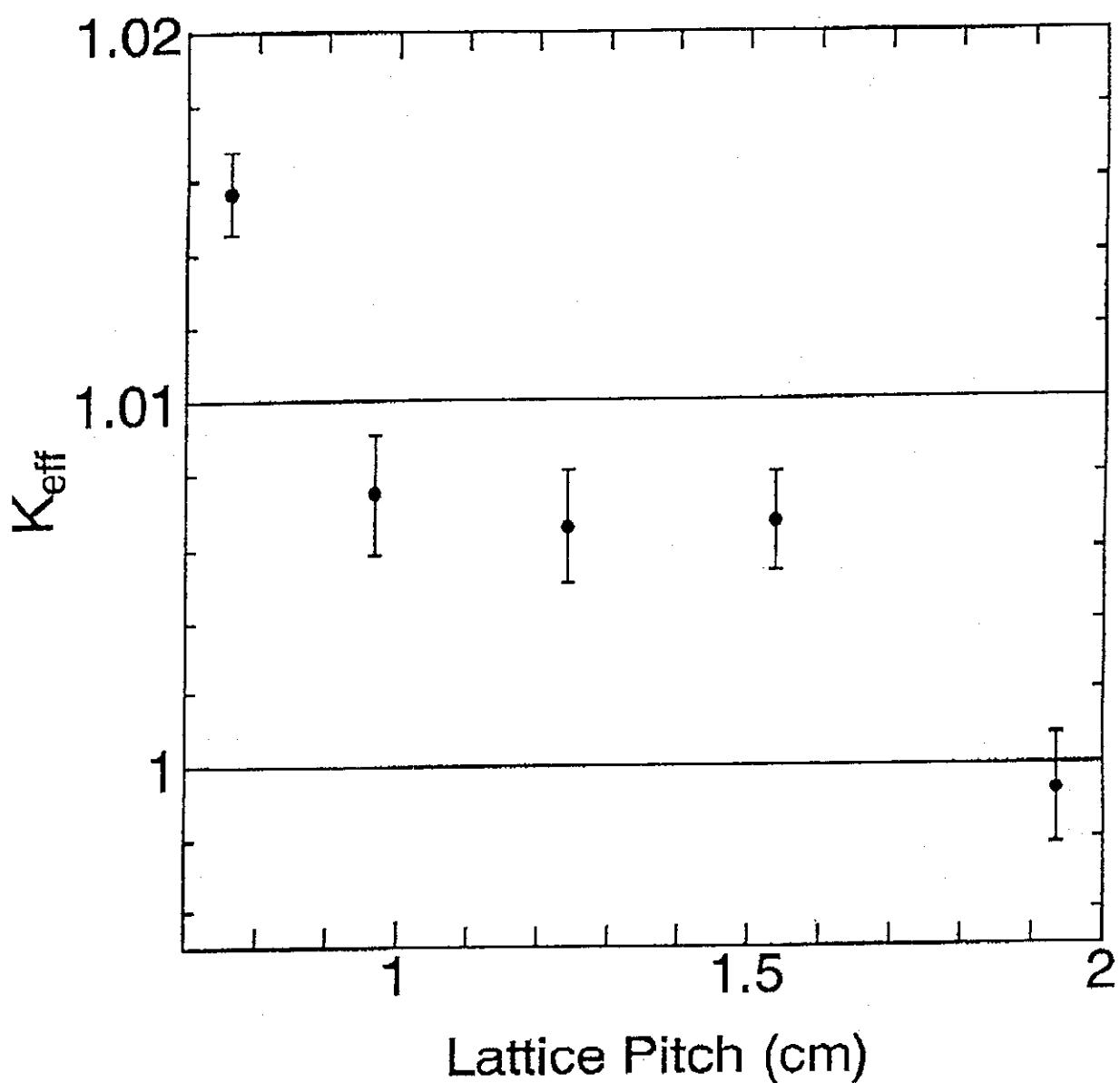
Lattice Pitch (small)= 0.761 ± 0.001 cm

Fuel Pin: Type 3.2 on tighter lattice points

Type 3.1 on looser lattice points

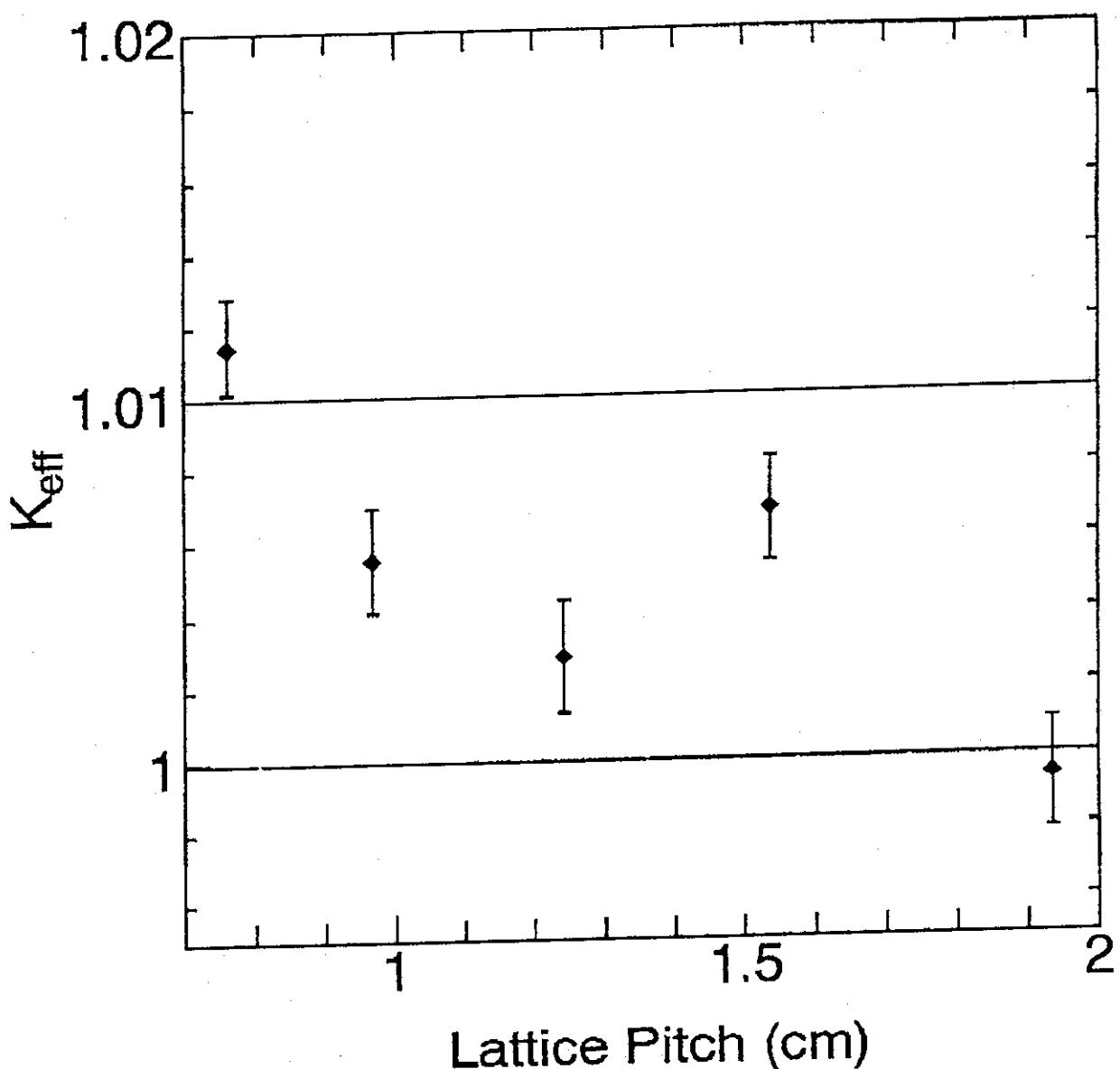
Black dots mean fuel pins actually loaded, and white dots mean lattice positions.

Fig. 17 The layout of fuel pins for 065 critical experiment.



K_{eff} by Case 1 Kernel

Fig. 18. k_{eff} calculated with case 1 hydrogen cross section
for various lattices.



K_{eff} by Case 2 Kernel

Fig. 19 k_{eff} calculated with case 2 hydrogen cross section
for various lattices.

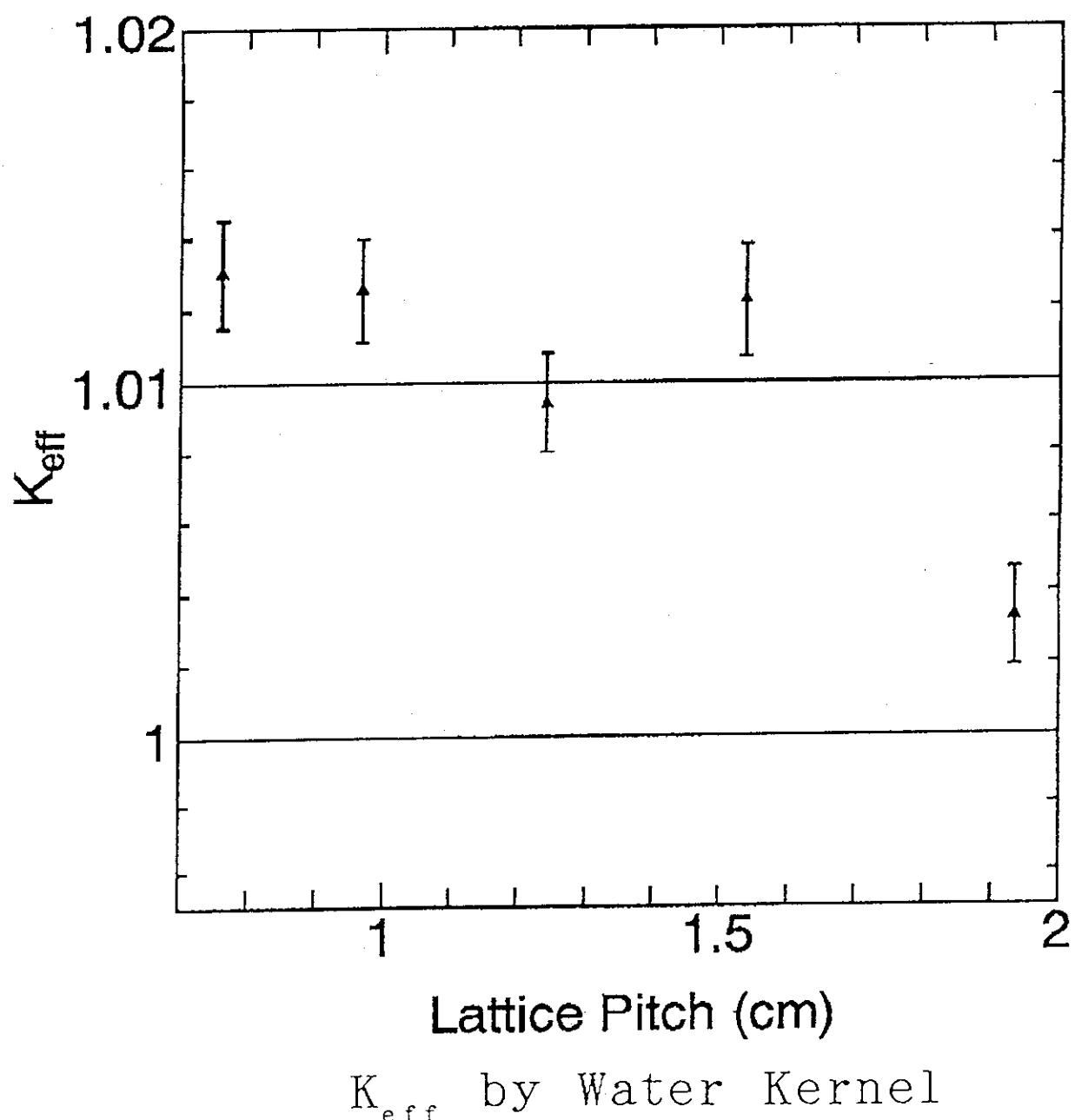
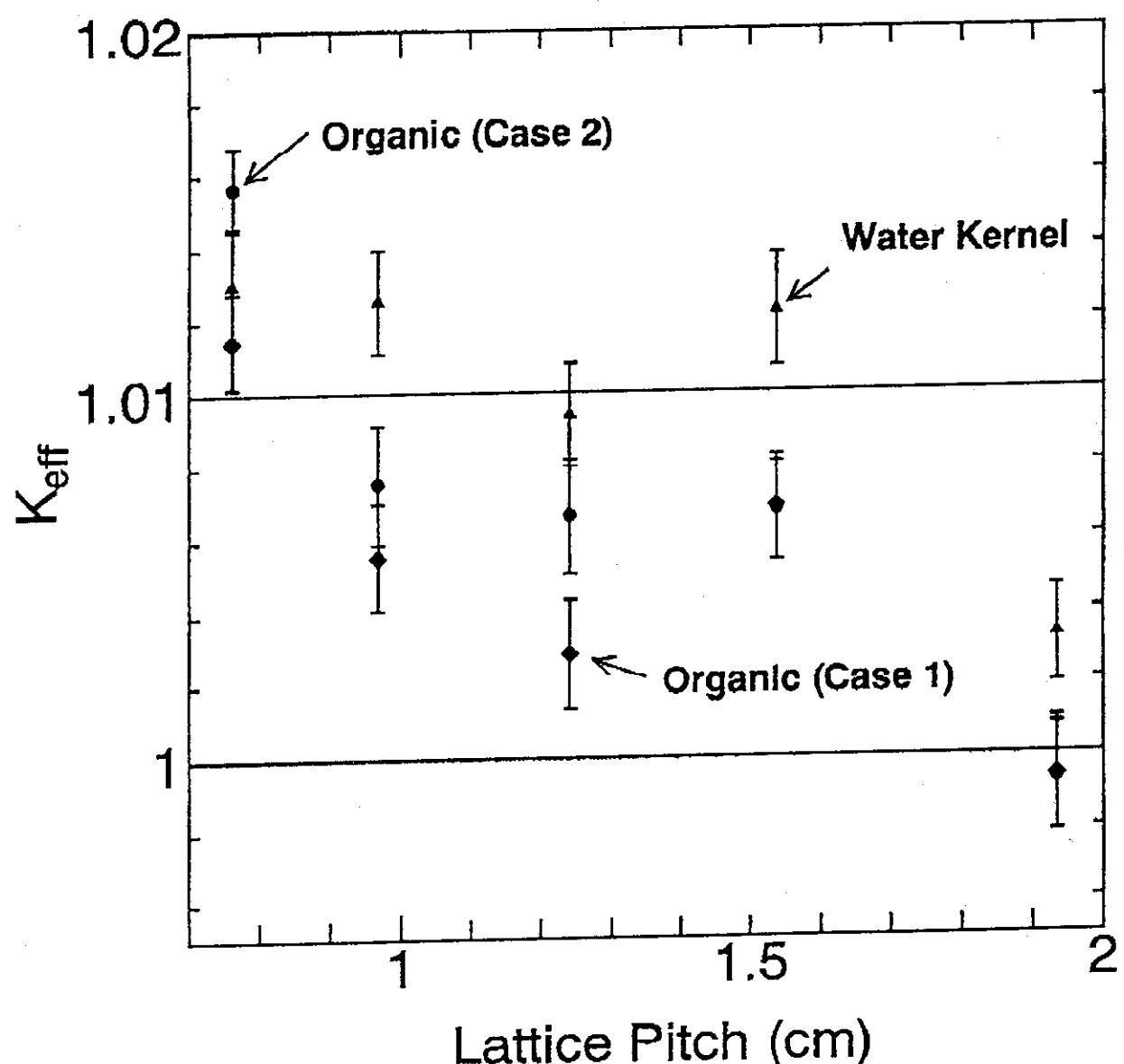


Fig. 20 k_{eff} calculated with water hydrogen cross section
for various lattices.



K_{eff} for Organic Mod. Systems

Fig. 21 Comparison of k_{eff} calculated with hydrogen cross sections.