

JAERI-M

7085

一次元輸送コードXSDRNによる
UO₂燃料の臨界量に関する検討

1977年5月

北野 照明^{*}・大西 信秋・齊藤 伸三・稻辺 輝雄
石島 清見・吉村 富雄^{**}・石川 迪夫・村主 進

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です、入手、複製などのお問合せは、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.

一次元輸送コード X S D R N による
 UO_2 燃料の臨界量に関する検討

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

北野照明*・大西信秋・齊藤伸三

稻辺輝雄・石島清見・吉村富雄**

石川迪夫・村主 進

(1976年9月受理)

UO_2 燃料の臨界質量に関して、濃縮度および水素／ウラン 235 の密度比をパラメータにとって、一次元輸送コード X S D R N で計算し、これらのパラメータと UO_2 燃料の臨界質量の関係を求めた。さらに、この計算結果を基に、軽水炉の UO_2 燃料が溶融し、一箇所に集った場合の再臨界の可能性について検討した。その結果、 UO_2 燃料のみが一箇所に集った場合いかなる条件を仮定しても再臨界になる可能性はないという結論を得た。

* 三井造船 K.K

** 船舶技術研究所

JAERI - M 7085

Study of a UO_2 Critical Mass by Calculation
with a Transport Code XSDRN

* Teruaki KITANO, Nobuaki OHNISHI, Shinzo SAITO,
** Teruo INABE, Kiyomi ISHIJIMA, Tomio YOSHIMURA,
Michio ISHIKAWA and Susumu SUGURI

Division of Reactor Safety, Tokai, JAERI

(Received September, 1976)

A critical mass of UO_2 fuel was calculated with a transport code XSDRN to examine the effect of parameters such as U-235 enrichment and ratio of H/U-235 atomic density. Based on the results, the probability of re-criticality when molten UO_2 of a water reactor was collected, was examined. If only the UO_2 fuel gets together, a re-criticality does not occur under any conditions.

* Mitsui Shipbuilding & Engineering Co., LTD.

** Ship Research Institute, Ministry of Transportation

目 次

1. まえがき	1
2. 計算方法	1
2.1 計算モデルおよび計算条件	1
2.2 計算方法	2
2.3 計算手順	2
3. 計算結果の検討	2
3.1 臨界質量について	2
3.2 計算条件について	3
(1) 反射体厚みの効果	3
(2) メッシュ巾の効果	4
(3) 中性子吸収材の混入の効果	4
3.3 他の計算法による計算結果の検討	5
3.4 TID-7016の臨界量による検討	6
4. 考 察	6
4.1 臨界質量と濃縮度	6
4.2 臨界質量と $N^H/N^{2.5}$	7
4.3 濃縮度, $N^H/N^{2.5}$ と臨界質量	7
5. まとめ	8
6. 参考文献	8

1. まえがき

軽水動力炉で想定される1次冷却材喪失事故において、万一緊急冷却系が作動しないと仮定した場合、燃料が溶融した後落下して再集合し、体系の条件によっては再臨界になるのではないかという疑問がある。この問題を検討するために、以下の条件の基に UO_2 燃料の臨界質量を計算し、再臨界の可能性を検討した。

計算では、臨界質量を小さくする安全側の条件と計算の単純化を考えて、球体系の燃料の周囲に厚さ 20 cm の水の反射体を仮定した 2 領域体系とし、体系温度を常温（20°C）とした。燃料領域は UO_2 のみが溶融し固ったものとし、他の物質（被覆材、構造材、中性子吸収材水等）の混入はないものを主として計算の対象とした。計算は、一次元輸送計算コード XSDRN を使用し、計算に用いる核種断面積は ENDF-B/VIII のデータを XLACS コードにより、123 群に縮約したライブラリーデータを使用した。

臨界量の計算結果は、現在の軽水動力炉の燃料の総重量と比較し、軽水動力炉の再臨界になる可能性について検討した。

次に、燃料中に減速材である水が存在すると仮定した場合に、臨界質量がどの程度変化するか比較するために燃料中の水素-ウラン密度比、ウラン 235 の濃縮度などをパラメータとして計算を行った。さらに中性子吸収材が混入した場合についても計算を行った。

臨界量の計算結果を十分吟味するために、計算結果に影響を及ぼすと考えられる反射体厚みの効果、計算メッシュ巾の効果について検討した。また、計算された臨界量の妥当性を検討するために、拡散コード CITATION による計算結果と比較した。U.S.AEC によって作成された臨界安全に関する Safety Guidance TID-7016 の臨界量のデータとの比較も行った。

2. 計算方法

2.1 計算モデルおよび計算条件

UO_2 臨界質量を求める際の計算モデルおよび計算条件を設定する場合、パラメータとして次のものが考えられる。すなわち、a) 形状、b) 燃焼度、c) N^H/N^{235} 比 (N^H : 水素原子個数密度, N^{235} : U^{235} 原子個数密度)、d) 濃縮度、e) 構造材、吸収材の種類と混合比、f) 体系の温度、g) 反射体の厚み、などである。

パラメータ設定については、臨界量について安全側に行うものとして、計算条件を次の様に設定する。a) 形状: 臨界質量が最小になる形状である球を仮定する。b) 燃焼度: 中性子増倍率の最も大きい初期状態を仮定する。c) 構造材、吸収材等の種類と混合比: 構造材、吸収材等は中性子吸収材として寄与するので、ここでは安全側に計算を行うとの仮定から、構造材制御材等の混入はないものを主として計算の対象とする。d) 濃縮度: パラメータとする。e) N^H/N^{235} 比: UO_2 燃料中の N^H/N^{235} 比は零とする。

本計算の対象は、仮想事故である一次冷却材喪失事故において、さらに非常冷却系が働か

1. まえがき

軽水動力炉で想定される1次冷却材喪失事故において、万一緊急冷却系が作動しないと仮定した場合、燃料が溶融した後落下して再集合し、体系の条件によっては再臨界になるのではないかという疑問がある。この問題を検討するために、以下の条件の基に UO_2 燃料の臨界質量を計算し、再臨界の可能性を検討した。

計算では、臨界質量を小さくする安全側の条件と計算の単純化を考えて、球体系の燃料の周囲に厚さ 20 cm の水の反射体を仮定した 2 領域体系とし、体系温度を常温（20°C）とした。燃料領域は UO_2 のみが溶融し固ったものとし、他の物質（被覆材、構造材、中性子吸収材水等）の混入はないものを主として計算の対象とした。計算は、一次元輸送計算コード XSDRN を使用し、計算に用いる核種断面積は ENDF-B/V のデータを XLACS コードにより、123 群に縮約したライブラリーデータを使用した。

臨界量の計算結果は、現在の軽水動力炉の燃料の総重量と比較し、軽水動力炉の再臨界になる可能性について検討した。

次に、燃料中に減速材である水が存在すると仮定した場合に、臨界質量がどの程度変化するか比較するために燃料中の水素-ウラン密度比、ウラン 235 の濃縮度などをパラメータとして計算を行った。さらに中性子吸収材が混入した場合についても計算を行った。

臨界量の計算結果を十分吟味するために、計算結果に影響を及ぼすと考えられる反射体厚みの効果、計算メッシュ巾の効果について検討した。また、計算された臨界量の妥当性を検討するために、拡散コード CITATION による計算結果と比較した。U.S.AEC によって作成された臨界安全に関する Safety Guidance TID-7016 の臨界量のデータとの比較も行った。

2. 計算方法

2.1 計算モデルおよび計算条件

UO_2 臨界質量を求める際の計算モデルおよび計算条件を設定する場合、パラメータとして次のものが考えられる。すなわち、a) 形状、b) 燃焼度、c) N^H/N^{235} 比 (N^H : 水素原子個数密度, N^{235} : U^{235} 原子個数密度)、d) 濃縮度、e) 構造材、吸収材の種類と混合比、f) 体系の温度、g) 反射体の厚み、などである。

パラメータ設定については、臨界量について安全側に行うものとして、計算条件を次の様に設定する。a) 形状: 臨界質量が最小になる形状である球を仮定する。b) 燃焼度: 中性子増倍率の最も大きい初期状態を仮定する。c) 構造材、吸収材等の種類と混合比: 構造材、吸収材等は中性子吸収材として寄与するので、ここでは安全側に計算を行うとの仮定から、構造材制御材等の混入はないものを主として計算の対象とする。d) 濃縮度: パラメータとする。e) N^H/N^{235} 比: UO_2 燃料中の N^H/N^{235} 比は零とする。

本計算の対象は、仮想事故である一次冷却材喪失事故において、さらに非常冷却系が働か

なかった場合を仮定して燃料が溶融し、再集合した場合を考えているから圧力容器内に水がほとんど存在しないと考えるのが妥当と考える。なお、参考のために、 N^H/N^{235} 比をパラメータとしても計算を行った。f) 体系の温度：密度が一定の場合、体系の反応度の温度効果は負であるので、安全側である常温（20°C）を仮定する。g) 反射体の厚み：体系からの中性子の洩れに対して、十分な厚みである 20 cm を仮定する。

本計算に用いた計算モデルを第1図に示す。

2. 2 計算方法

計算は、以下のような方法ならびに仮定に基づいて行った。

- (1) 球体系であるので、計算モデルは一次元で取扱う。
- (2) 燃料領域（第1図参照）は均質を仮定し、燃料ペレットの非均質性は考慮しない。

計算の回数が多いため、核定数の計算および全体系の計算を一連に行うことができ、かつ、上記の条件を満す一次元 1 2 3 群輸送計算コード X S D R N¹⁾ を使用した。計算に使用する核種断面積は、ENDF-B/III のデータを X S D R N 計算用に X L A C S コードにより 1 2 3 群に作成したものを使用した。

2. 3 計算手順

2.1 の計算モデルを用いて、2.2 に述べた計算方法により UO₂ 燃料の臨界量を求める。臨界量の導出の手順を第2図に示す。燃料領域内の N^H/N^{235} 比は零とし、臨界量計算のパラメータとしては濃縮度のみを考慮し、上記の計算手順により臨界質量を求める。各計算に用いる濃縮度は、0 wt% から 100 wt% 全領域について求め、低濃縮度の領域を特に詳細に求める。各計算に用いる定数値を第1表に示す。

次に、燃料領域中に減速材である水が存在すると仮定した場合、臨界質量は当然小さくなることが予想される。そこで、燃料領域中に水が存在しない場合と比較して、臨界質量がどの程度小さくなるか検討した。ここでは、 N^H/N^{235} と濃縮度の 2 つをパラメータとして UO₂ の臨界量を求める。計算に使用する燃料の U²³⁵ 濃縮度については、低濃縮度（3 wt%）と中濃縮度（10 wt%）の 2 ケースについて計算した。また、全濃縮度については、それらを内挿することにより臨界量を求めた。 N^H/N^{235} 比については、3 wt% と 10 wt% で詳細に求めた。各計算に使用した定数値を第2表に示す。

3. 計算結果の検討

3. 1 臨界質量について

以上の計算から、UO₂ 燃料のみが溶融し固った場合の臨界質量を、濃縮度が変化した場合について求めた。この臨界質量の計算結果と軽水動力炉の UO₂ 燃料の総重量と比較することにより、軽水炉の燃料が溶融した場合の再臨界の可能性について検討する。

なかった場合を仮定して燃料が溶融し、再集合した場合を考えているから圧力容器内に水がほとんど存在しないと考えるのが妥当と考える。なお、参考のために、 N^H/N^{235} 比をパラメータとしても計算を行った。f) 体系の温度：密度が一定の場合、体系の反応度の温度効果は負であるので、安全側である常温（20°C）を仮定する。g) 反射体の厚み：体系からの中性子の洩れに対して、十分な厚みである20cmを仮定する。

本計算に用いた計算モデルを第1図に示す。

2. 2 計算方法

計算は、以下のような方法ならびに仮定に基づいて行った。

(1) 球体系であるので、計算モデルは一次元で取扱う。

(2) 燃料領域（第1図参照）は均質を仮定し、燃料ペレットの非均質性は考慮しない。

計算の回数が多いため、核定数の計算および全体系の計算を一連に行うことができ、かつ、上記の条件を満す一次元123群輸送計算コードXSDRN¹⁾を使用した。計算に使用する核種断面積は、ENDF-B/IIIのデータをXSDRN計算用にXLACSコードにより123群に作成したものを使用した。

2. 3 計算手順

2.1の計算モデルを用いて、2.2に述べた計算方法によりUO₂燃料の臨界量を求める。臨界量の導出の手順を第2図に示す。燃料領域内の N^H/N^{235} 比は零とし、臨界量計算のパラメータとしては濃縮度のみを考慮し、上記の計算手順により臨界質量を求める。各計算に用いる濃縮度は、0wt%から100wt%全領域について求め、低濃縮度の領域を特に詳細に求める。各計算に用いる定数値を第1表に示す。

次に、燃料領域中に減速材である水が存在すると仮定した場合、臨界質量は当然小さくなることが予想される。そこで、燃料領域中に水が存在しない場合と比較して、臨界質量がどの程度小さくなるか検討した。ここでは、 N^H/N^{235} と濃縮度の2つをパラメータとしてUO₂の臨界量を求める。計算に使用する燃料のU²³⁵濃縮度については、低濃縮度(3wt%)と中濃縮度(10wt%)の2ケースについて計算した。また、全濃縮度については、それらを内挿することにより臨界量を求めた。 N^H/N^{235} 比については、3wt%と10wt%で詳細に求めた。各計算に使用した定数値を第2表に示す。

3. 計算結果の検討

3. 1 臨界質量について

以上の計算から、UO₂燃料のみが溶融し固った場合の臨界質量を、濃縮度が変化した場合について求めた。この臨界質量の計算結果と軽水動力炉のUO₂燃料の総重量と比較することにより、軽水炉の燃料が溶融した場合の再臨界の可能性について検討する。

燃料領域内には、 UO_2 のみが存在する体系で濃縮度のみが変化したときの UO_2 の臨界質量の計算結果を第3表に、またその関係を第3図に示す。この結果より、濃縮度が 10 wt % より低くなると、臨界質量は急激に増加し 7 wt % で無限大に近くなる。一方、軽水炉の場合、燃料の濃縮度はたかだか 3 wt % 程度であり、2.1 に記した臨界質量に対して安全側の条件を仮定しても、再臨界になる可能性はないと言える。ちなみに、軽水炉の UO_2 燃料の総重量は第3図に併せて示したように、50万KWe 級で 56 ton, 90万KWe 級で 82 ton, 110万KWe 級で 160 ton であり、これらの燃料がすべて溶融し、1箇所に固ったとしても再臨界になる可能性はない。本来、燃料溶融時には圧力容器内に水はほとんどあり得ないと考えているにもかかわらず、上記の結果は燃料周囲に 20 cm の厚みの水の反射体を仮定している。それ故反射体を除いた裸のモデルでは、臨界量は上記の結果より一層大きくなり、さらに臨界性から遠ざかることになる。

次に、燃料領域内に水分子を含むと仮に考えた場合の計算の結果について、濃縮度が変化した場合の臨界質量を第4表および第4図に、また N^H/N^{235} 比が変化した場合の臨界質量を第4表に、そのグラフを第5図に示す。この結果より、任意の N^H/N^{235} 比について濃縮度が変化した場合の臨界質量は、 UO_2 のみの体系の場合と同様に濃縮度が低くなるにつれて増加する傾向がある。一方、 N^H/N^{235} 比が変化する場合は、 N^H/N^{235} 比が大きくなるにつれて、つまり燃料領域内に水分子を含む割合が大きくなるにつれて臨界質量は減少する。たとえば、濃縮度 3 wt % の場合では、 $N^H/N^{235} \approx 500$ で最小値 (94 kg UO_2) をもつ。これは N^H/N^{235} 比が増加するにつれて、熱中性子の中性子増倍率に寄与する割合が大きくなるためである。参考のために、第6図に、水体積比が 10%, 40%, 90% の場合の燃料領域内中心での中性子エネルギースペクトルを示した。

以上のように、燃料領域内に水を含むと仮定すれば、当然水を含まない場合と比べて、第4図、第5図に示したように、 UO_2 臨界質量は大巾に減少する。

3.2 計算結果に与える反射体厚み、ミツシユ巾および中性子吸収材の効果

XSDRN の計算では、燃料領域の半径をパラメータとし、反射体厚みを 20 cm とした。また、空間メッシュ数は、燃料領域 40 メッシュ、反射体領域 20 メッシュ、 P_3 , S_4 として臨界量を求めた。ここでは、前記の計算条件の検討、すなわち反射体厚さ、あるいは計算のメッシュ点数が計算結果に及ぼす効果、さらに、中性子吸収材が溶融して燃料体系に混入した場合についても検討する。

(1) 反射体厚みの効果

前章に述べた計算では、中性子の洩れに対し十分な厚みを持つであろうという仮定の基に水反射体の厚みを 20 cm とした。しかしながら、反射体である水の水素原子は熱中性子(0.025 eV)に対し約 0.3 パーンの吸収断面積を持つので、反射体の厚みが大き過ぎると反射体の中で中性子が吸収される割合が大きくなり、反射体効果として必ずしも有効に働くことにはならない場合を考えられる。そこで臨界量を最小値にする反射体の厚みを計算する。

計算は、濃縮度 10 wt %, 燃料領域内 N^H/N^{235} 比が約 650, 燃料半径が 20 cm の体系

で、反射体厚みを変化させることにより中性子増倍率の変化を計算した。

計算結果を表5に、またそのグラフを第7図に示すように、反射体の厚みが10 cm付近で中性子増倍率は1.012で最大値を持ち、20 cmの厚みに対し0.2%△k/k過大であった。この値を臨界質量に換算すると、約1.4%臨界質量は小さくなる。

(2) メッシュ幅の効果

本計算では、燃料領域の空間メッシュ数はすべて燃料半径について40とした。従来、メッシュ幅の変化により計算結果に誤差が生ずる場合があると言われている。その理由は、計算コードではある領域間の中性子のバランス式を解いているためメッシュ巾の大きさに比べて中性子密度の空間変化分の変化が大きい場合誤差が生ずる。ここでは、メッシュ幅の大きさを無限小にした場合と比較を行うため、メッシュ幅の大きさを変化させて計算を行い、中性子実効倍率の変化を求めた。計算は、濃縮度3 wt%，水体積比5.5%，燃料半径25 cm，水反射体の厚みが20 cmの体系について行なった。

計算結果を第6表、第8図に示す。計算結果より、メッシュ幅が無限小の場合と比較しても計算結果の誤差はないと言える。濃縮度、水体積比、燃料半径を他の値を使用することにより、特に燃料領域の半径が大きくなる場合は誤差は生じうるが、ここでは上記の結果からメッシュ巾の効果による誤差はないものとした。

(3) 中性子吸収材の混入の効果

燃料が溶融し、再集合すると仮定した場合、燃料の中に中性子吸収材として働く被覆材、構造材、中性子制御材が混入することは十分にありうることである。これまでの計算では安全側を考えて、これらの物質の混入は考慮しなかった。

ここでは、まず燃料領域内に被覆材が混入した場合の臨界量の変化を求めた。計算条件は、軽水炉体系を考えて濃縮度3 wt%とした。また $N^H/N^{2.35}$ 比については、前に記したように臨界質量を最小にする500とし、被覆材は炉心内に存在する燃料および被覆材と同じ体積比で燃料領域内に均質に混っているものとした。

次に、燃料領域内に中性子吸収材(B₄C)が混入した場合の臨界質量を求めた。計算では、全挿入時の制御材の5%，7%，10%（体積比）が均質に燃料領域に混入した場合について計算した。

計算の結果、被覆材だけが混入し、濃縮度3 wt%， $N^H/N^{2.35}$ 比500とした場合の臨界質量は、103 Kg UO₂で、被覆材が混入しない場合の臨界質量94 Kg UO₂より9.6%増加する。さらに中性子制御材(B₄C)が混入した場合、全制御材の5%で約600 Kg UO₂、7%で約2700 Kg UO₂、10%で無限大となる。この関係を第12図に示した。

この図より、濃縮度3 wt%の軽水炉燃料中に、最も臨界量を小さくする水の含有率($N^H/N^{2.35} \approx 500$)を仮定したとしても、中性子吸収材が体積比にして10%以上均質に混入すれば、再臨界の可能性はなくなることが判る。

3. 3 他の計算法による計算結果の検討

X S D R N の計算結果の妥当性を検討するために、全く別のコードシステムにより計算を行った。全体系については、拡散計算を行う C I T A T I O N コード⁽⁵⁾を使用し、その結果から、X S D R N の結果を検討した。計算に用いた核定数については、熱組を T H E R M O S - M U G⁽²⁾ 高速組を ANDROMEDA⁽³⁾ および G G C - 4⁽⁴⁾により計算した。THERMOS-MUGは、熱中性子についてエネルギーおよび空間について積分型輸送方程式を解き、求めた中性子束分布により微細エネルギー組の核定数を縮約する。また、G G C - 4 は輸送方程式を B_1 近似等により解き、その個有の核定数を縮約する。ANDROMEDAは、アバギヤン型の 2.5 群核断面積ライブラリ (JAERI FAST SET 等)を持ち、一次元拡散計算によりエネルギーおよび空間について中性子束分布を求め、また縮約も行なう。

計算を行う体系は濃縮度 2.0 wt % の球体系とし、燃料部の半径は 2.4 cm、水反射体厚み 2.0 cm の 2 領域を用いた。

計算手順は次の 2 つの方法を用いた。

1. 热組核定数は THERMOS-MUGにより、高速組核定数は G G C - 4 により計算し、全体の中性子束分布、中性子増倍率は C I T A T I O N により計算した。
2. 上記 1 の計算手順のうち、G G C - 4 の計算部分を ANDROMEDAで行い、その他は 1 と同じ手順で行う。

X S D R N の中性子増倍率の計算結果と比較して、上記の 1 の場合で 1.7% $\Delta k / k$ 過少、2 の場合で 0.1% $\Delta k / k$ 過少であった。この値を臨界質量に換算すると 1 の場合で 1.19% 過大 2 の場合で 1.2% 過大である。

X S D R N は輸送計算 (P_3 , S_4) であること、核定数の縮約はしていないこと（拡散計算の場合は、4 群計算）等から拡散計算の結果と比較すると、X S D R N の計算結果の方が真値に近いと判断するのが妥当であろう。しかしながら、計算に使用している核定数の信頼性については、どの計算コードもある程度の使用実績を持っており、優劣の判断はきわめて難しい。計算方法の違いによる誤差はないと仮定するならば、上記の計算結果より X S D R N の臨界質量の計算結果の持つ誤差は、最大でも 10 パーセント程度と考えられる。

3. 4 T ID-7016 の臨界量と計算結果との比較

X S D R N の計算結果を T ID-7016⁽⁶⁾ の臨界データと比較し、X S D R N の計算結果の妥当性を検討する。T ID-7016 は、核燃料取扱い時の臨界安全のために出版された U.S.AEC の指針書であり、広く利用されているものである。T ID-7016 による臨界量の計算はその指針に示してあるように、水を含む体系で、かつ十分な反射体を持つ場合には、各 N^H / N^{235} 比での濃縮度 9.3.5 wt % ウラン臨界質量に、濃縮度緩和係数を乗することにより、また水を含まない体系については、稀釈緩和係数および濃縮度緩和係数を乗ることにより、その臨界質量を導くことができる。第 9 図に上記の手順により求めた T ID-7016 の臨界質量（表 5）と X S D R N の計算結果を比較して図に示した。

N^H / N^{235} 比が大きい場合 ($N^H / N^{235} \approx 500$)、つまり臨界質量最少値を示す N^H / N^{235}

比の場合は、誤差10数パーセントでXS DRNの計算結果と比較的良い一致を示したが、 N^H/N^{235} 比が小さくなるにつれて、特に濃縮度が低い場合に両者の違いは大きくなる。これは、TID-7016では濃縮度緩和係数がすべての N^H/N^{235} 比に対して、一律に決めてあるために生ずるものであり、 N^H/N^{235} 比が低い場合には、XS DRNの計算結果の方が真値に近いと考えられる。

4. 考察

4.1 臨界質量と濃縮度

濃縮度が変化した時の UO_2 、臨界質量および臨界半径はそれぞれ第4図および第10図に示したように、低濃縮度付近(10wt%)で急激に増加し、7wt%で無限大に近い値を示している。臨界半径と濃縮度のこのような関係を、簡単な計算により予測してみる。XS DRNの計算モデルと同様に反射体と燃料の2領域球モデルを考え、体系の中性子増倍率は熱中性子のみにより影響されると仮定する。

$$k = \eta f P_f$$

η : ($\nu \sum f / \sum a$) 燃料領域

f : 燃料領域の熱中性子利用率

P_f : 中性子が体系から洩れ出ない確率

ここで P_f を $1 / (1 + \tau B^2)$ で近似できるとすると、上式の $k = 1$ とすると、次のようになる。

$$1 = \frac{\tau N_{235} \sigma_{f235} \cdot f}{(N_{235} \sigma_{a235} + N_{238} \sigma_{a238} + N_{H_2O} \sigma_a H_2O)} \cdot \frac{1}{(1 + \tau B^2)}$$

濃縮度を ϵ (原子個数% / 100)とし、各数値を代入すると、

$$\tau = \sqrt{\frac{192000 \epsilon + 807}{1430 f \epsilon - 667 \epsilon - 3}} \quad (1)$$

となる。ここで

$N_{235}, N_{238}, N_{H_2O}$: U^{235}, U^{238}, H_2O の原子(分子)個数密度

σ_a, σ_f : 微視的断面積(吸収、核分裂)

r : 臨界半径(reflector savingを含む)

B^2 : バックリング

τ : 热中性子のヘルミ年齢

$f = 1.0, 0.5$ について図示すると、次のようになり臨界半径は双曲線に近い図になる。

このことから、第4図および第10図の傾向は妥当であると言える。

比の場合は、誤差10数パーセントでXS DRNの計算結果と比較的良い一致を示したが、 N^H/N^{235} 比が小さくなるにつれて、特に濃縮度が低い場合に両者の違いは大きくなる。これは、TID-7016では濃縮度緩和係数がすべての N^H/N^{235} 比に対して、一律に決めてあるために生ずるものであり、 N^H/N^{235} 比が低い場合には、XS DRNの計算結果の方が真値に近いと考えられる。

4. 考察

4.1 臨界質量と濃縮度

濃縮度が変化した時の UO_2 臨界質量および臨界半径はそれぞれ第4図および第10図に示したように、低濃縮度付近(10 wt %)で急激に増加し、7 wt %で無限大に近い値を示している。臨界半径と濃縮度のこのような関係を、簡単な計算により予測してみる。XS DRNの計算モデルと同様に反射体と燃料の2領域球モデルを考え、体系の中性子増倍率は熱中性子のみにより影響されると仮定する。

$$k = \eta f P_f$$

η : ($\nu \sum f / \sum a$) 燃料領域

f : 燃料領域の熱中性子利用率

P_f : 中性子が体系から洩れ出ない確率

ここで P_f を $1 / (1 + \tau B^2)$ で近似できるとすると、上式の $k = 1$ とすると、次のようになる。

$$1 = \frac{\tau N_{235} \sigma_{f235} \cdot f}{(N_{235} \sigma_{a235} + N_{238} \sigma_{a238} + N_{H_2O} \sigma_a H_2O)} \cdot \frac{1}{(1 + \tau B^2)}$$

濃縮度を ϵ (原子個数% / 100)とし、各数値を代入すると、

$$\tau = \sqrt{\frac{192000 \epsilon + 807}{1430 f \epsilon - 667 \epsilon - 3}} \quad (1)$$

となる。ここで

$N_{235}, N_{238}, N_{H_2O}$: U^{235}, U^{238}, H_2O の原子(分子)個数密度

σ_a, σ_f : 微視的断面積(吸収、核分裂)

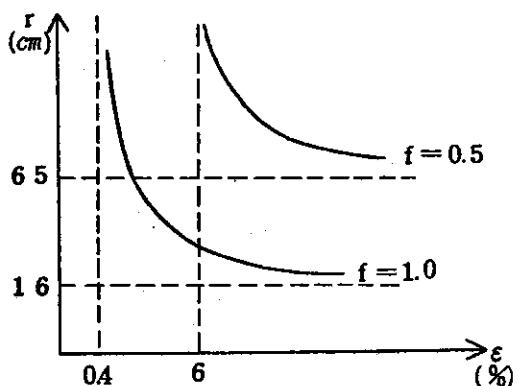
r : 臨界半径(reflector savingを含む)

B^2 : バックリング

τ : 热中性子のヘルミ年齢

$f = 1.0, 0.5$ について図示すると、次のようになり臨界半径は双曲線に近い図になる。

このことから、第4図および第10図の傾向は妥当であると言える。



4. 2 臨界質量と N^H/N^{25}

N^H/N^{25} が変化したときの UO_2 臨界質量は、図5に示したように、 N^H/N^{25} が増加するにつれて急激に減少し $N^H/N^{25} = 500$ 付近で最少値になり再び増加する。これは、 N^H/N^{25} が増加するにつれて熱中性子が燃料中に存在する割合が増加するためである。この傾向を示すために、第11図に N^H/N^{25} が変化した時のXSDRNの計算による熱中性子の空間分布を示す。 N^H/N^{25} 比が約500以上になると、燃料中の熱中性子の割合は一定となり、逆に燃料中の水分子に吸収される割合が大きくなるために、臨界量は増加することになる。

4. 3 濃縮度、 N^H/N^{25} と臨界質量

第4図と第5図に示されるように、 N^H/N^{25} の値が500と0を比較すると、濃縮度10wt%では $1/770$ であるのに対し濃縮度3wt%では $1/\infty$ となり、濃縮度が減少するにつれて両者の臨界質量の差は大きくなる。これは N^H/N^{25} が増加するにつれて、(1)式のfの値すなわち、熱中性子利用率が大きくなり、(1)式のグラフの漸近線が2軸とも負の方向に移動するためである。

5. ま と め

上記の計算結果から、軽水動力炉における炉心溶融時の再臨界の可能性を検討した結果次のような結論が得られた。

- 1) 燃料溶融時には、圧力容器内に水は存在しないとし、水の反射体がない裸の体系を考えた場合、(a)体系は最小臨界量となる球型を仮定する、(b)燃料中に被覆材、構造材、中性子吸収材の混入はないものとする、等のいくつかの安全側の仮定をしても、再臨界の可能性はない。
- 2) さらに、燃料の周囲に中性子の洩れに対して十分な厚みを持つ水の反射体を仮定したとしても、現在の軽水動力炉では再臨界の可能性はない。
- 3) 燃料の周囲に水の反射体を仮定し、その上に燃料内に水が均質に混入するとすれば、混入する水の比率によっては当然のことながら臨界になる。この場合でも、被覆材の混入、全中性子制御材の10%以上(体積比)が均質に混入するとすれば、再臨界になる可能性はなくなる。
- 4) 計算した臨界質量の誤差は、最大で10数パーセント程度と考えられる。

謝 辞

X S D R N コードの使用に関して、原子炉研修所課長待遇の末武雅晴氏に、また ANDROME DA コードの使用に関しては、動力炉開発管理部副主任研究員、猪川浩次氏に御援助頂きました。さらに、企画室次長桂木学氏および F C A 黒井英雄氏には本報告書を作成するにあたり、有益な御助言をいただきました。ここにつつしんで感謝の意を表わします。

6. 参 考 文 献

- 1) Greene, Craven, " XSDRN: A Discrete Ordinates Spectral Averaging Code," ORNL-TM-2500
- 2) 伊勢・堀上、熱群炉定数作成コード THERMOS-MUG, JAERI-memo 4394 (公開)
4/1971
- 3) Ikawa, " ANDROMEDA : A One-Dimensional Diffusion Theory Burnup Code , " JAERI-M 4808, 5/1972
- 4) 筒井・伊勢: " GGC - 4 コードによる多群群定数作成とその検討," JAERI-M 5991,
2/1975
- 5) Fowler, " Nuclear Reactor Core Analysys Code CITATION " ORNL-TM-2496, 7/1971
- 6) A.S.A.S. CN6, " Nuclear Safety Guide, " TID-7016, 1961

5. ま と め

上記の計算結果から、軽水動力炉における炉心溶融時の再臨界の可能性を検討した結果次のような結論が得られた。

- 1) 燃料溶融時には、圧力容器内に水は存在しないとし、水の反射体がない裸の体系を考えた場合、(a)体系は最小臨界量となる球型を仮定する、(b)燃料中に被覆材、構造材、中性子吸収材の混入はないものとする、等のいくつかの安全側の仮定をしても、再臨界の可能性はない。
- 2) さらに、燃料の周囲に中性子の洩れに対して十分な厚みを持つ水の反射体を仮定したとしても、現在の軽水動力炉では再臨界の可能性はない。
- 3) 燃料の周囲に水の反射体を仮定し、その上に燃料内に水が均質に混入するとすれば、混入する水の比率によっては当然のことながら臨界になる。この場合でも、被覆材の混入、全中性子制御材の10%以上(体積比)が均質に混入するとすれば、再臨界になる可能性はなくなる。
- 4) 計算した臨界質量の誤差は、最大で10数パーセント程度と考えられる。

謝 辞

X S D R N コードの使用に関して、原子炉研修所課長待遇の末武雅晴氏に、また ANDROME DA コードの使用に関しては、動力炉開発管理部副主任研究員、猪川浩次氏に御援助頂きました。さらに、企画室次長桂木学氏および F C A 黒井英雄氏には本報告書を作成するにあたり、有益な御助言をいただきました。ここにつつしんで感謝の意を表わします。

6. 参 考 文 献

- 1) Greene, Craven, " XSDRN: A Discrete Ordinates Spectral Averaging Code," ORNL-TM-2500
- 2) 伊勢・堀上, 熱群炉定数作成コード THERMOS-MUG, JAERI-memo 4394 (公開)
4/1971
- 3) Ikawa, " ANDROMEDA : A One-Dimensional Diffusion Theory Burnup Code , " JAERI-M 4808, 5/1972
- 4) 筒井・伊勢: " GGC - 4 コードによる多群群定数作成とその検討," JAERI-M 5991,
2/1975
- 5) Fowler, " Nuclear Reactor Core Analysys Code CITATION " ORNL-TM-2496, 7/1971
- 6) A.S.A.S. CN6, " Nuclear Safety Guide, " TID-7016, 1961

第1表 水を含まない体系の計算条件

ケース番号	濃縮度 (wt%)	水体積比 or N^H/N^{235}	水反射体厚み
1-1	6	0.0	20
1-2	7	0.0	20
1-3	8	0.0	20
1-4	9	0.0	20
1-5	10	0.0	20
1-6	15	0.0	20
1-7	20	0.0	20
1-8	93.5	0.0	20

第2表 水を含む体系の計算条件

ケースNo.	濃縮度 (wt%)	N^H/N^{235}	反射体厚み(cm)
2-1	10	0.0	20
2-2	10	0.14	20
2-3	10	1.1	20
2-4	10	3.0	20
2-5	10	18.0	20
2-6	10	107.9	20
2-7	10	242.7	20
2-8	10	310.1	20
2-9	10	64.2	20
2-10	3	18.0	20
2-11	3	107.9	20
2-12	3	400.0	20
2-13	3	500.0	20
2-14	3	600.0	20

第3表 水分子を含まない体系のXSDRN 臨界量計算結果

ケースNo.	濃縮度 (wt%)	N^H / N^{25}	臨界半径 (cm)	臨界質量 (kg)
1-1	7	0.0	∞	∞
1-2	8	0.0	350	1.97×10^6
1-3	9	0.0	87.5	3.08×10^4
1-4	10	0.0	62.2	1.10×10^4
1-5	15	0.0	33.8	1.77×10^3
1-6	20	0.0	26.3	8.35×10^2
1-7	93.5	0.0	10.3	5.02×10^1

第4表. 水分子を含む体系のXSDRN 臨界量計算結果

ケースNo.	濃縮度 (wt%)	N^H / N^{25}	臨界半径 (cm)	臨界質量 (kg)
2-1	10	0.0	62.2	1.10×10^4
2-2	10	0.14	57.8	8.82×10^3
2-3	10	1.1	43.2	3.55×10^3
2-4	10	3.0	36.6	2.03×10^3
2-5	10	18.0	20.8	2.48×10^2
2-6	10	107.9	15.2	3.22×10^1
2-7	10	242.7	15.4	1.68×10^1
2-8	10	310.1	15.9	1.48×10^1
2-9	10	647.2	19.6	1.38×10^1
2-10	3	18.0	236.0	5.0×10^5
2-11	3	107.9	25.2	3.34×10^2
2-12	3	400.0	22.6	9.5×10^1
2-13	3	500.0	23.9	9.4×10^1
2-14	3	600.0	25.9	1.0×10^2

第5表. 反射体厚みの効果計算結果

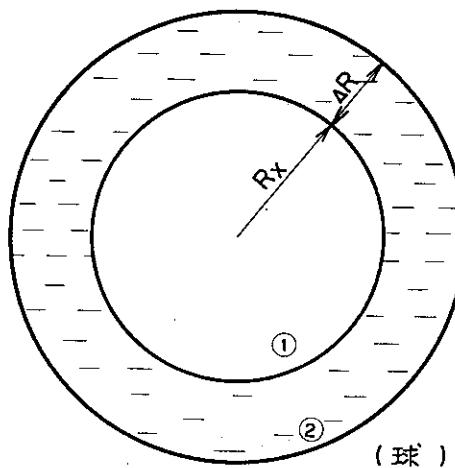
ケース番号	反射体厚み(cm)	濃縮度(wt%)	燃料半径(cm)	水体積比(H/U ²⁵)	中性子実効増倍率
5-1	0.5	10.0	20.0	0.96 (647.2)	0.9132
5-2	5.0				0.9936
5-3	7.5				1.0069
5-4	10.0				1.0121
5-5	14.0				1.0117
5-6	20.0				1.0096

第6表 計算メッシュ巾の効果

ケースNo.	燃料領域メッシュ数	メッシュ巾(cm)	濃縮度(wt%)	水体積比(%)	反射体(cm)	keff
6-1	40	0.625	3.0	54.56	20	0.9975
6-2	20	1.250				0.9975
6-3	10	2.500				0.9997
6-4	5	5.000				1.0093

第7表 TID-7016による UO_2 臨界質量

濃縮度 (wt%)	安全率	濃縮度 緩和係数	$N^H/N^{25} = 500$		$N^H/N^{25} = 108$		$N^H/N^{25} = 18$		$N^H/N^{25} = 0$		
			制限量	U^{235} 量	UO_2 量	制限量	U^{235} 量	UO_2 量	制限量	U^{235} 量	UO_2 量
93.5	1.0		0.81	0.98		1.73	2.10		7.41	9.00	
20	1.36		1.10	6.24		2.36	13.39		10.00	57.08	
10	1.70	0.35	1.37	15.54	0.75	2.94	33.36	3.2	12.53	142.21	10.0
8	1.82		1.47	20.85		3.15	44.67		13.44	190.6	380 5390 (1.5)
6	2.08		1.67	31.58		3.58	67.70		15.27	288.7	380 26100
4	2.68		2.16	6.26		4.63	1313		19.75	560.2	
2	6.33		5.10	289.29		10.93	620.0		46.63	264.5	ω ω



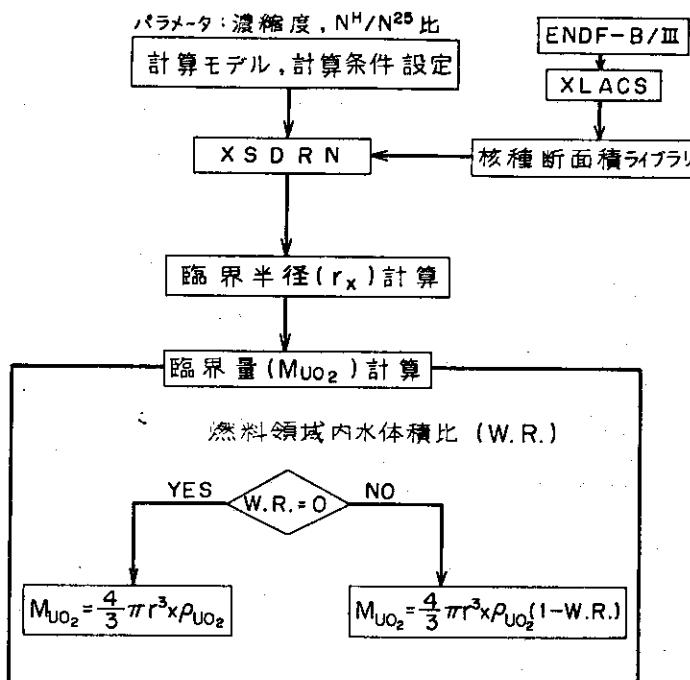
① 燃料領域

 R_x : 燃料臨界半径

② 水領域

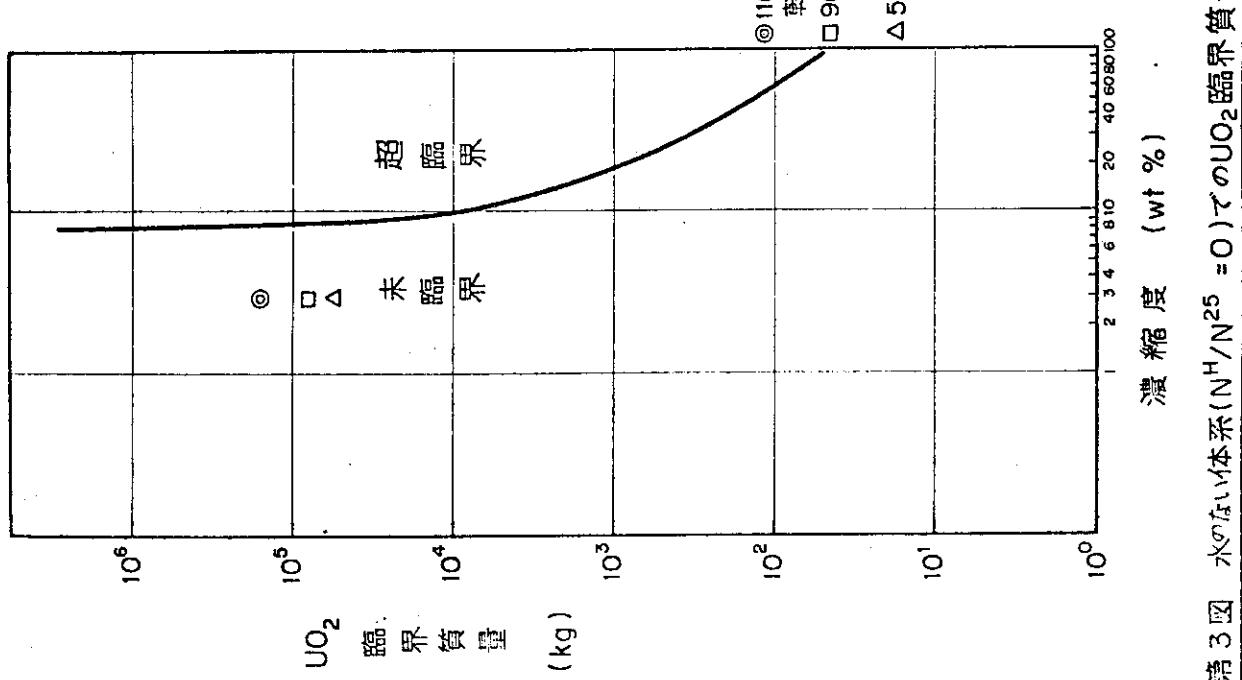
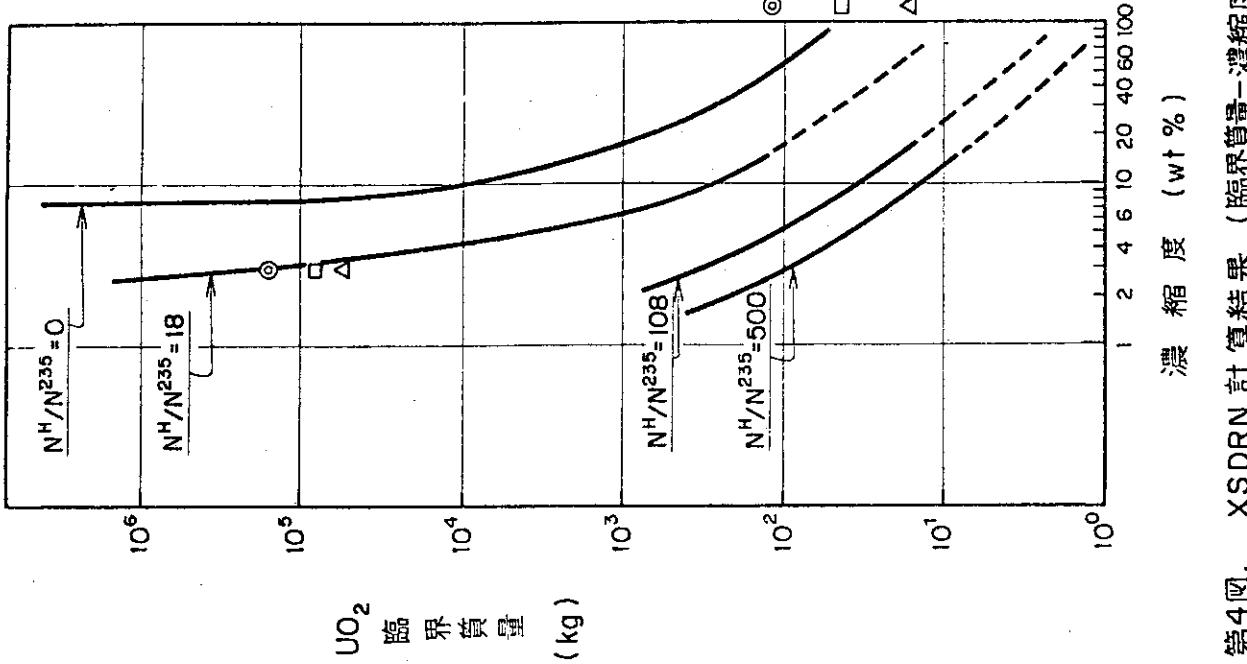
 ΔR : 反射体厚み(20cm)

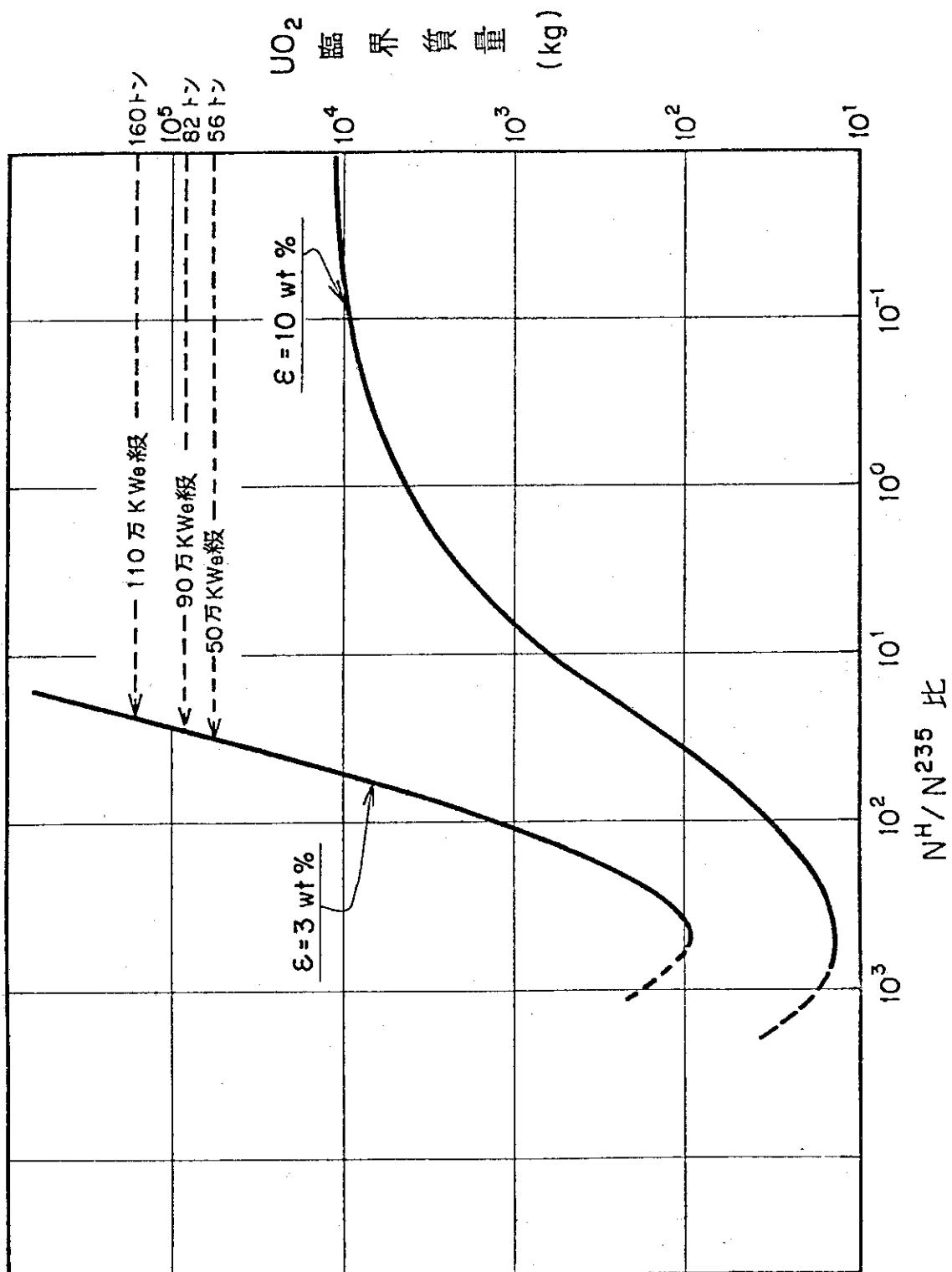
第1図 計算モデル図



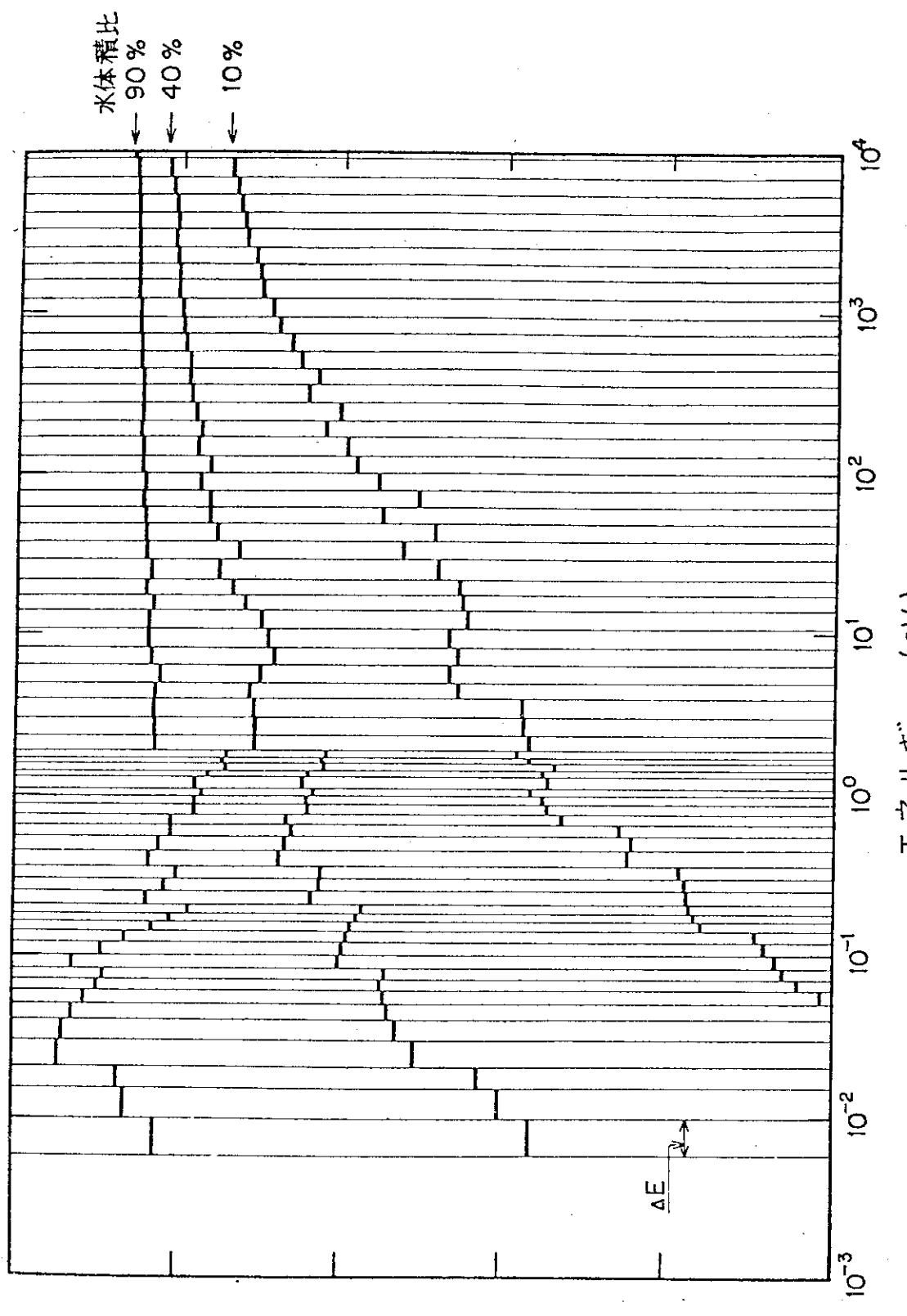
r_x : 臨界半径
 M_{UO_2} : UO_2 臨界質量
 ρ_{UO_2} : UO_2 密度 (10.96)
 W.R. : 燃料領域水体積比

第2図 UO_2 臨界質量導出手順

第3図 水のない体系($N^H/N^{235} = 0$)での UO_2 脇界質量第4図 XSDRN計算結果 (脇界質量-濃縮度, N^H/N^{235})

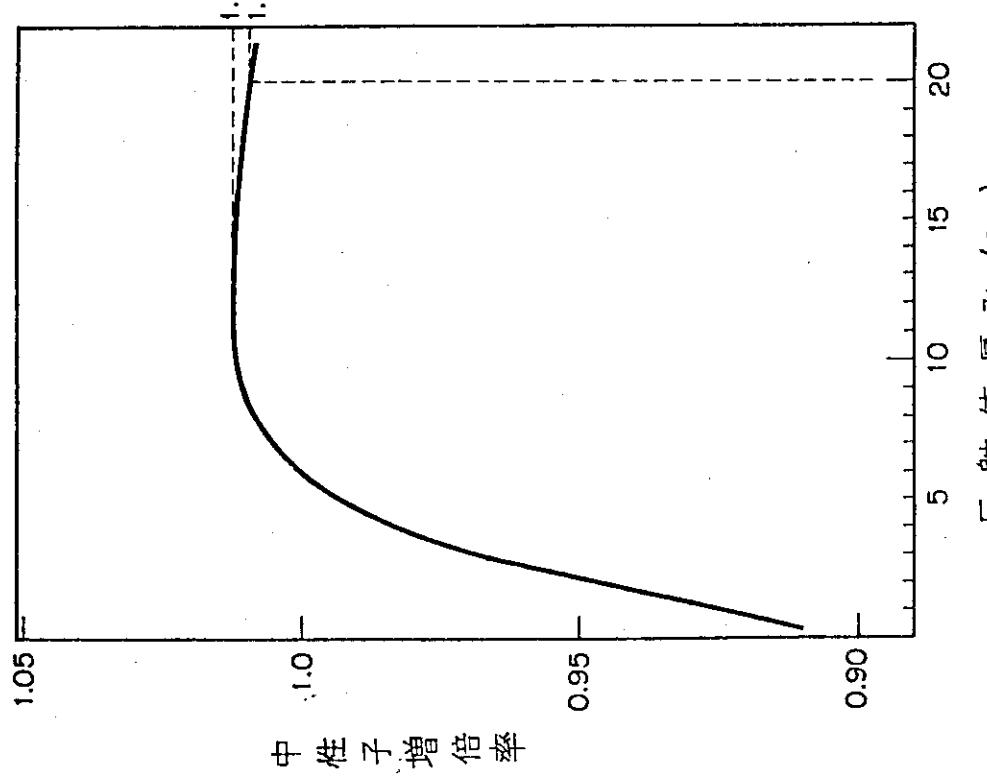


第5図 XSDRNによる $\text{N}^{\text{H}}/\text{N}^{235}$ 比変化時の UO_2 臨界質量

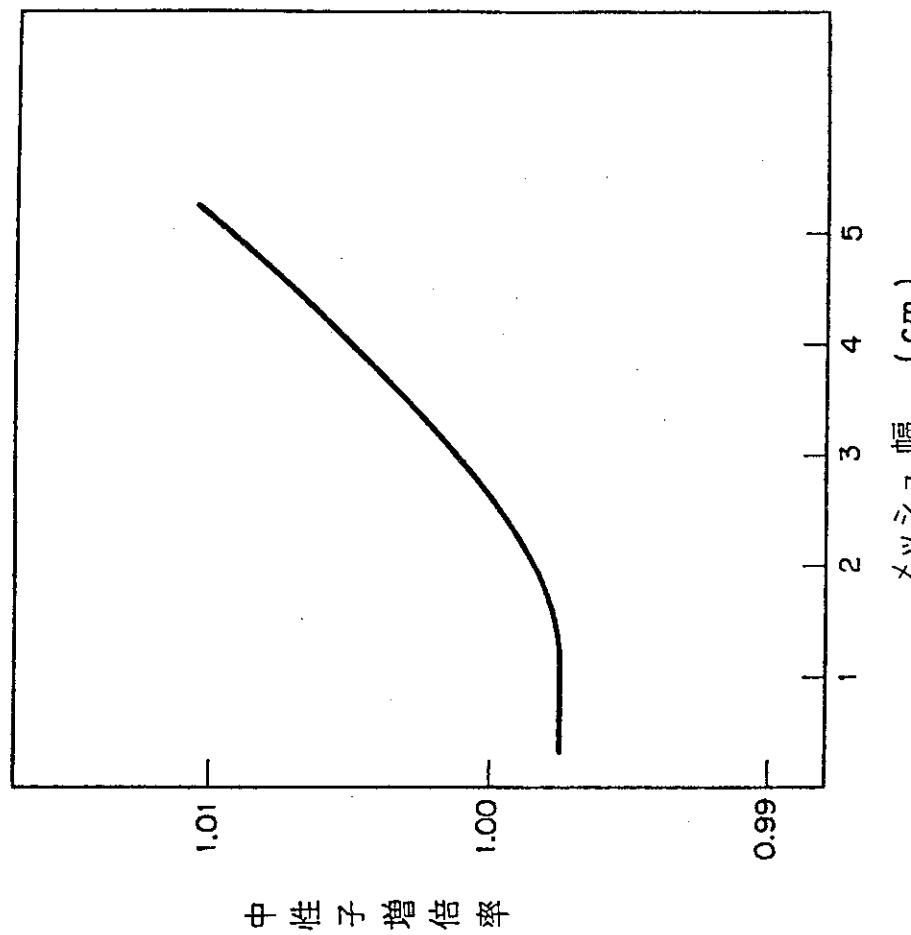


第6図 水体積比変化時(10%, 40%, 90%)中性子エネルギースペクトル

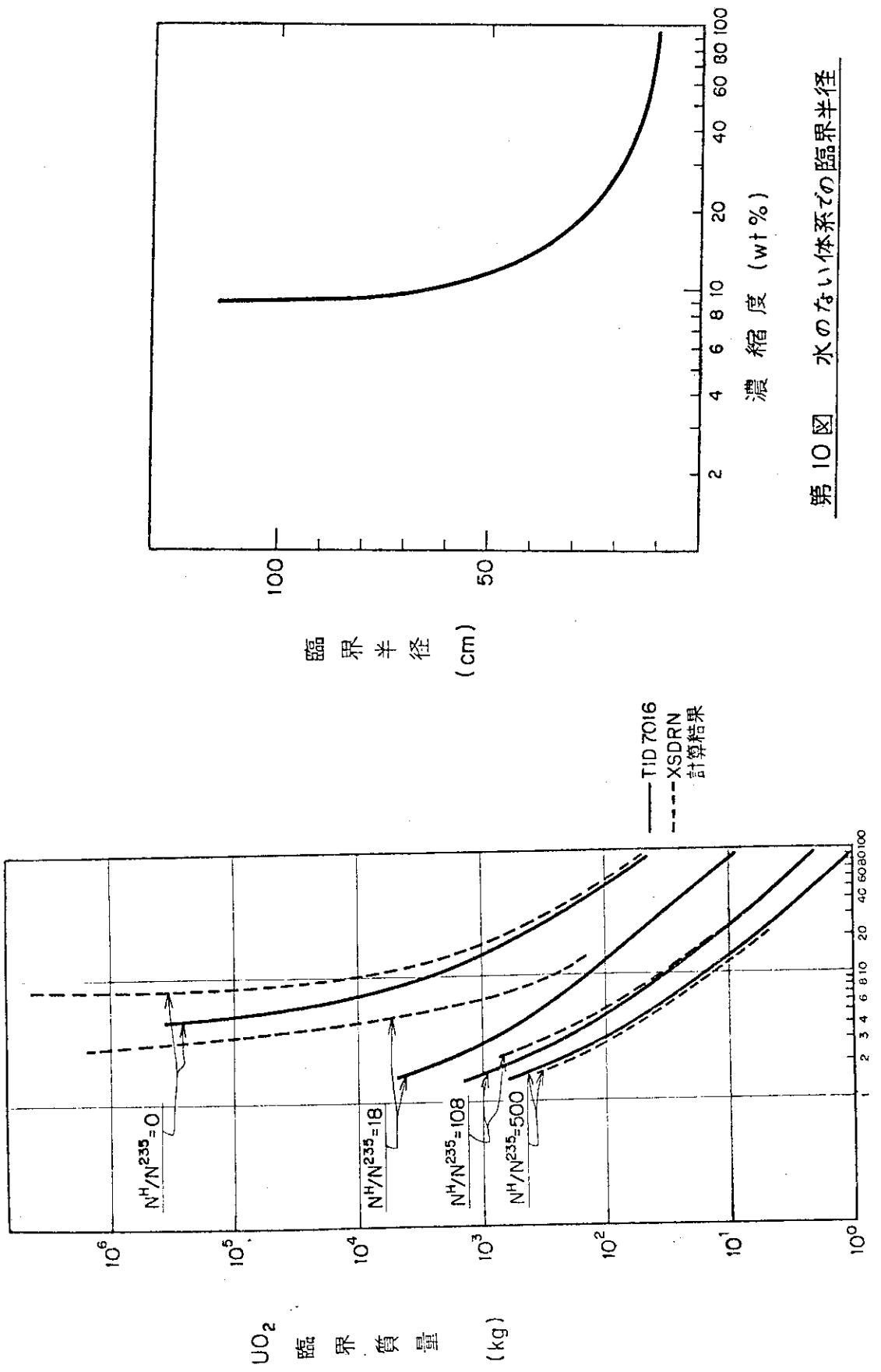
中性子束
 $\phi(E) \Delta E$

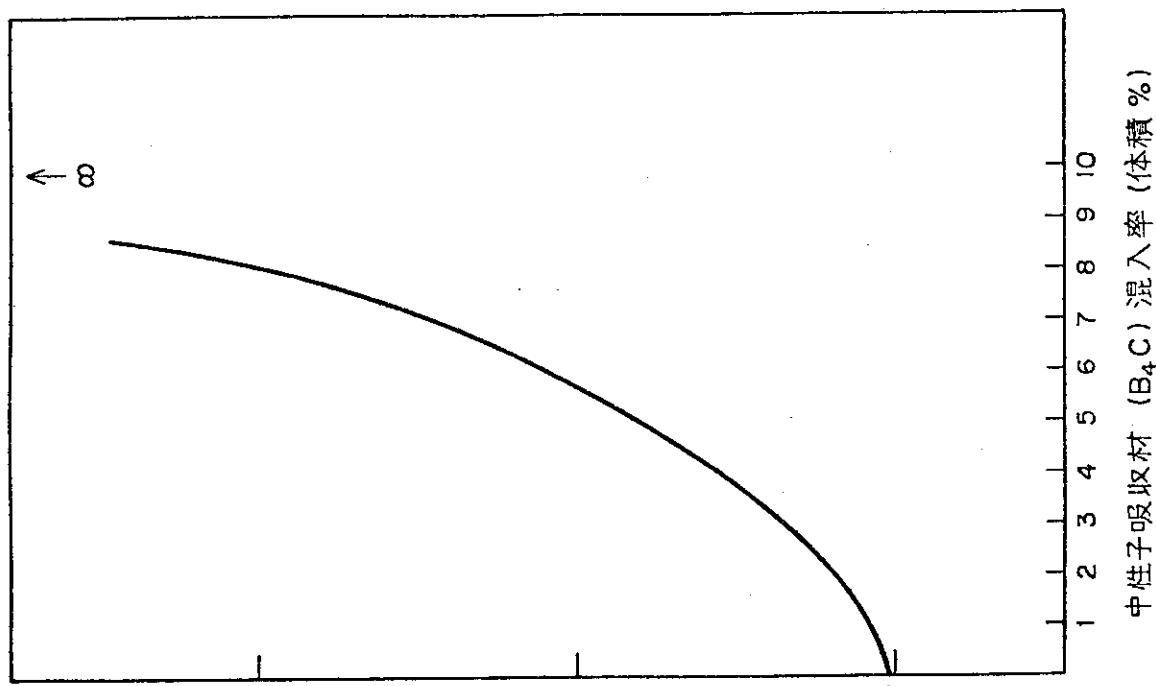
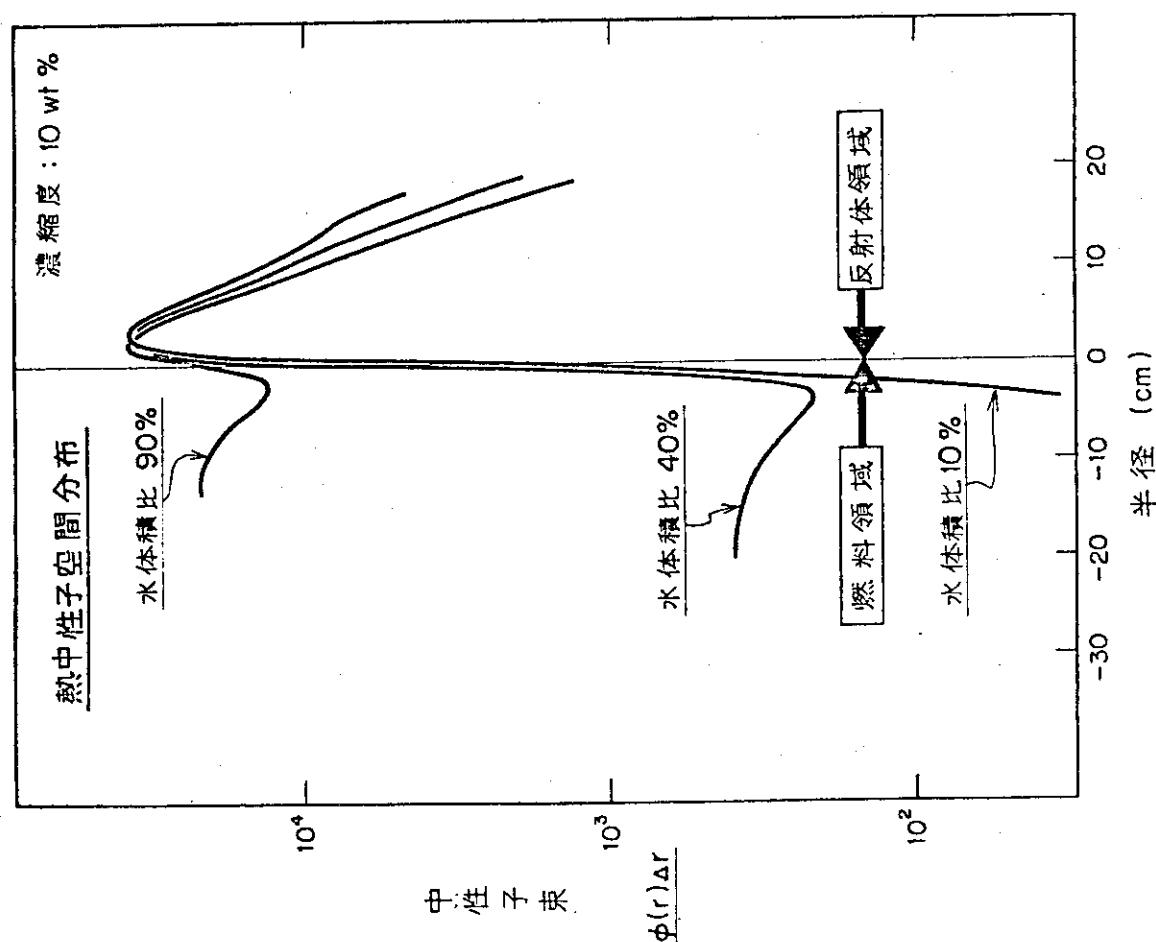


第7図 反射体厚みの効果



第8図 メッシュ幅の効果



第12図 中性子吸收材の混入率とUO₂臨界質量

第11図 水体積比が変化した時の熱中性子空間分布