

JAERI - M

90-067

NSRR高速炉燃料実験における  
各種燃料の発熱量の予測評価

1990年4月

中村 武彦・更田 豊志・傍島 真・細山田龍二\*

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

JAERI-M 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、お申しこしください。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。

JAERI-M reports are 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, 1990

---

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

NSRR 高速炉燃料実験における各種燃料の発熱量の予測評価

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部  
中村 武彦・更田 豊志・傍島 真・細山田龍二\*

(1990年3月2日受理)

NSRR では高速炉の研究開発に資する為に、事故時の高速炉燃料の挙動を調べる実験を計画している。高速炉燃料は、被覆管がステンレス鋼であり、燃料ペレットも酸化物のほか炭化物、窒化物、さらに金属燃料も考えられており、冷却材が化学的に活性なナトリウムである。また、高速炉燃料実験用のナトリウムカプセル及びループは、運転温度が高く、断熱材や中性子減速材を備えた複雑な構造となり、従来の水カプセル等とは大幅に異なったものとなる。本報告では、これらの実験物を用いて、高速炉燃料を NSRR で中性子照射した場合の中性子輸送計算を行い、燃料ピン径、ウラン濃縮度、プルトニウム富化度等の異なる各種実験燃料に与え得る発熱量を評価し、NSRR 高速炉燃料実験の適用範囲を定量化した。また、実験物を中性子経済の優れた設計とするため、構造材や減速材等の核的性質の評価を併せて行った。計算の結果、もんじゅ仕様の混合酸化物燃料に対しピーク発熱量  $517 \text{ cal/g}$  ( $2.16 \text{ kJ/g}$ ) の発熱量を与えることが可能である事。中性子減速材として水素化ジルコニウムばかりではなく、ポリエチレンが有望である事等が判明した。

Estimation of Energy Deposition in Various Test Fuels  
in the NSRR FBR Fuel Tests

Takehiko NAKAMURA, Toyoshi FUKETA, Makoto SOBAJIMA  
and Ryuji HOSOYAMADA\*

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

(Received March 2, 1990)

A Series of transient tests on Fast Breeder Reactor (FBR) fuel is being planned at Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) in order to investigate FBR fuel behavior under accident conditions. The transient behavior of FBR fuel has been found quite different from those of LWR fuel, due to the difference in cladding materials and in chemical forms of fuel and coolant. Carbides, Nitrides and Metal fuels as well as Oxide fuels are considered for fuel in FBRs. Coolant is liquid sodium which is chemically active. Sodium loops and stagnant sodium capsules are being designed for the FBR fuel tests. These test rigs are quite different in structure from water capsules which are currently used for the NSRR tests. Sodium loops and capsules will be operated at higher temperatures and will have neutron moderators and thermal insulators. Neutron transport calculations in the NSRR with these test rigs containing typical FBR fuel pins were performed. Energy depositions in the fuel with various pin sizes, Uranium 235 enrichment and plutonium enrichment effects are evaluated through the calculations.

Test range of the NSRR FBR fuel tests were summarized quantitatively. Effects of structural materials and neutron moderator on

---

\* Customer Engineers Co.

energy depositions in the test fuel pins were also estimated to design test rigs effective in neutron economy. The results showed that a "Monju" type mixed oxide fuel will be subjected to an energy deposition of up to 517 cal/g (2.16 kJ/g) in the NSRR FBR fuel tests. Polyethylene was found effective for neutron moderator as well as Zirconium Hydride.

Keywords: NSRR, FBR, Fuel Failure Test, TOP, LOF, Energy Deposition

## 目 次

1. 概 要 .....	1
2. 計算方法 .....	2
2.1 NSRR 炉心のモデル化 .....	2
2.1.1 炉心燃料 .....	3
2.1.2 制御棒 .....	3
2.2 水カプセル体系のモデル化 .....	4
2.2.1 単ピン燃料実験 .....	4
2.2.2 バンドル燃料実験 .....	5
2.2.3 群数・Sn 分点・メッシュの決定 .....	5
2.3 ナトリウムカプセル体系のモデル化 .....	6
2.3.1 単ピン燃料実験 .....	7
2.3.2 バンドル燃料実験 .....	7
3. 結 果 .....	8
3.1 水カプセル体系の解析 .....	8
3.1.1 単ピン燃料実験 .....	8
3.1.2 バンドル燃料実験 .....	9
3.2 ナトリウムカプセル体系の解析 .....	9
3.2.1 燃料パラメータ効果 .....	9
3.2.1.1 燃料組成 .....	9
3.2.1.2 燃料径 .....	10
3.2.1.3 バンドル体系 .....	11
3.2.2 カプセル構造の効果 .....	11
3.2.2.1 構造材 .....	12
3.2.2.2 減速材 .....	12
4. 考 察 .....	14
4.1 解析精度の評価 .....	14
4.2 実験範囲の定量化 .....	15
5. 結 論 .....	16
参考文献 .....	17
付録 A NSRR 炉心モデル化時の各領域の原子数密度 .....	65
付録 B 水カプセル体系モデル化時の代表的領域の原子数密度 .....	75
付録 C ナトリウムカプセル体系モデル化時の代表的領域の原子数密度 .....	81

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Methods .....	2
2.1 Modeling of NSRR Core .....	2
2.1.1 Driver Fuel .....	3
2.1.2 Control Rods .....	3
2.2 Modeling of Water Capsules .....	4
2.2.1 Single Pin Tests .....	4
2.2.2 Bundle Test .....	5
2.2.3 Calculation Parameters (Energy Groups, Sn, Mesh Size) .....	5
2.3 Modeling of Sodium Capsule .....	6
2.3.1 Single Pin Test .....	7
2.3.2 Bundle Test .....	7
3. Results .....	8
3.1 Water Capsule Tests .....	8
3.1.1 Single Pin Tests .....	8
3.1.2 Bunde Tests .....	9
3.2 Sodium Capsule Tests .....	9
3.2.1 Fuel Parameter .....	9
3.2.1.1 Fuel Composition .....	9
3.2.1.2 Pin Size .....	10
3.2.1.3 Bundle Effect .....	11
3.2.2 Capsule Structure .....	11
3.2.2.1 Structural Materials .....	12
3.2.2.2 Moderator .....	12
4. Discussion .....	14
4.1 Accuracy .....	14
4.2 Test Range .....	15
5. Conclusions .....	16
References .....	17
Appendix A Atomic Densities in Various Sections of the NSRR for Neutronic Calculations .....	65
Appendix B Atomic Densities in the Water Capsule .....	75
Appendix C Atomic Densities in the Sodium Capsule .....	81

## 1. 概 要

原研 NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) では、原力子安全委員会の年次計画(1985～1990)に添って燃料破損実験に必要なナトリウム・カプセル及びループ、その他の実験物取扱設備の設計及び実験範囲の検討を行ってきている<sup>1)</sup>。本報では、核解析の結果を基に、NSRR 高速炉燃料破損実験において、各種の高速炉燃料に与え得る発熱量とその分布を示し、同実験の実施可能範囲を示す。

NSRR パルス炉であり、過出力事故(TOP)を模擬した半値幅数 ms といった速いパルス運転のほか、昭和63年度に行われた改造により、ゆるやかなランプ出力運転等も可能である。同炉心中央部の直径約 220 mm の実験孔を利用して、TOP あるいは流量喪失事故(LOF)を模擬した条件での実験を行うためのカプセル及びループの設計を進めている。カプセル及びループの概略(案)を図 1, 2<sup>1)</sup>に示す。実験に使用する燃料は単ピンもしくは、7 本バンドルであり、酸化物燃料ばかりでなく、炭化物、窒化物あるいは金属燃料を使用した実験が計画されている。炭化物燃料は、熱伝導度が酸化物燃料に比べ 6～7 倍大きいため、燃料被覆管表面温度を同一レベルに保つつつ燃料ピン径を酸化物燃料に比べて太くする事が出来る<sup>2)</sup>。また、金属燃料は照射によるスウェーリングや、燃料と被覆管の低温での共晶反応による破損等の問題によりあまり利用されて来なかつたが、ジルコニウムを添加した燃料の出現により問題点がかなり解決され再び注目され始めている。金属燃料は密度・熱伝導度が大きく、また、事故時に燃料が破損した場合にも FCI (Fuel Coolant Interaction) による衝撃圧力等の破壊力が発生し難いという長所を有している。

種々の燃料棒の NSRR 実験時の発熱特性を調べるために、中性子輸送コードによる炉心核解析を行った。同時に照射カプセルの設計に反映させるため、構造・材質・減速材等の効果の評価も行った。炉心解析は SRAC コードシステム<sup>3)</sup>を用い、衝突確率法及び ANISN を用いて 9 群に縮約した巨視的断面積を使用し、R-Z もしくは R-θ 2 次元の輸送計算を TWOTRAN-II により行い、実験燃料の発熱量を評価した。

この結果、各種の燃料をナトリウムカプセル中で照射した場合、NSRR の最大積分出力に近い 100 MWs で運転した際の、実験燃料の平均発熱量及び発熱分布を評価した。また、NSRR 高速炉燃料実験カプセル及びループでは、中性子減速材として水素化ジルコニウム ( $ZrH_2$ ) 等の使用が検討されているが、減速材を用いずに NSRR 炉心から入射する比較的硬い中性子だけの場合には、発熱量が半減するとの結果が得られており、同炉で行う燃料破損実験では、減速材を用いて、熱中性子を利用する事が効果的である事が判明した。また、実験燃料は、NSRR 炉心高さと同じ 380 mm 長(燃料部)のものを計画しているが、その場合軸方向ピーキング係数は、1.2 度程と予想された。

今まで行われている同種の CABRI 実験によると、実験条件に依存するが、燃料の破損しきい値は新燃料で 1.0～1.4 KJ/g・fuel、照射済み燃料では 0.062～0.88 KJ/g・fuel 程度まで下がると見られ、NSRR は燃料を破損させるに十分な能力を有していると考えられる。NSRR では

多種の出力変化及びループ流量変化を組み合わせた条件で、各種の燃料挙動の究明が可能であり、国内施設の利点を生かして、国産燃料の挙動究明に力を発揮するとともに、得られたデータから高速炉の安全評価指針を策定するなどの面で貢献し得るものと考えられる。

## 2. 計 算 方 法

NSRR は米国 GA 社によって開発された TRIGA-ACPR (Annular-Core Pulse Reactor) を改造したパルス炉であり、炉心本体は、図 3 に示すように原子炉プールの下部に設置されている。NSRR の特徴の一つは、炉心中央を貫通する内径約 220 mm の実験孔を有していることであり、これに、実験用のカプセル等を挿入して照射実験を行っている。図 4 に炉心の断面図を示す。本図から分かるように、炉心に原子炉出力を制御するための制御棒 8 本（調整棒 6 本、安全棒 2 本）とパルス出力を発生させるためのトランジエント棒 3 本が設けられている。パルス運転は、このトランジエント棒の急速引抜によって行うが、中性子エネルギースペクトルの硬化現象による大きな負の温度係数によって、安全にパルス出力が制御される。表 1 に NSRR の主要特性を示す。

NSRR は、300 kWまでの定常運転、4.7 ドルまでの単一パルス運転及び 10 MWまでの台形パルス運転等の種々の運転が可能である。実験孔に入れた実験燃料に与えられる発熱量は、実験燃料の濃縮度、形状、寸法、被覆管の材質等、燃料の特性、また、冷却材密度（温度、圧力）ならびに実験カプセル等の実験体系が同一条件ならば、原子炉のパルス積分出力に比例する。したがって、本報告では、実験燃料の発熱量を炉心本体の積分出力との比、つまり炉心出力 100 MWs 当りの発熱量として評価した。

実験は、実験燃料をカプセル内に収納してパルス照射することによって実施する。このカプセルは、実験燃料が破損しても、破損片や核分裂生成物が外部に放出されないよう実験の安全を確保すると共に、実験燃料の冷却条件等の実験条件を設定するよう設計されている。このため、種々の実験条件を作り出せるよう、これまでに大気圧水カプセル（図 5）、高温高圧カプセル、高温高圧ループ等の装置を開発してきた。

本報告では、設計が進められているナトリウムカプセル（図 1）やナトリウムループ（図 2）を実験孔に装着してパルス照射を行った際の中性子の輸送計算を行い、実験燃料中の核分裂数により発熱量を評価した。また、評価手法の妥当性を検討するため、これまでに行われた大気圧水カプセル実験の解析を併せて行い、実験燃料発熱量の実測値との比較検討を行った。

### 2.1 NSRR 炉心のモデル化

NSRR の炉心（図 3, 4）を R-Z 2 次元の計算体系をモデル化するために、炉心及びその周辺を図 6 に示す各領域に分け、それぞれの領域に対して 9 群の群定数（巨視的反応断面積のセット）を求めた。その手順は、まず炉心を単位セルに分け、単位燃料セルの群定数を衝突確率法で

多種の出力変化及びループ流量変化を組み合わせた条件で、各種の燃料挙動の究明が可能であり、国内施設の利点を生かして、国産燃料の挙動究明に力を発揮するとともに、得られたデータから高速炉の安全評価指針を策定するなどの面で貢献し得るものと考えられる。

## 2. 計 算 方 法

NSRR は米国 GA 社によって開発された TRIGA-ACPR (Annular-Core Pulse Reactor) を改造したパルス炉であり、炉心本体は、図 3 に示すように原子炉プールの下部に設置されている。NSRR の特徴の一つは、炉心中央を貫通する内径約 220 mm の実験孔を有していることであり、これに、実験用のカプセル等を挿入して照射実験を行っている。図 4 に炉心の断面図を示す。本図から分かるように、炉心に原子炉出力を制御するための制御棒 8 本（調整棒 6 本、安全棒 2 本）とパルス出力を発生させるためのトランジエント棒 3 本が設けられている。パルス運転は、このトランジエント棒の急速引抜によって行うが、中性子エネルギースペクトルの硬化現象による大きな負の温度係数によって、安全にパルス出力が制御される。表 1 に NSRR の主要特性を示す。

NSRR は、300 kWまでの定常運転、4.7 ドルまでの単一パルス運転及び 10 MWまでの台形パルス運転等の種々の運転が可能である。実験孔に入れた実験燃料に与えられる発熱量は、実験燃料の濃縮度、形状、寸法、被覆管の材質等、燃料の特性、また、冷却材密度（温度、圧力）ならびに実験カプセル等の実験体系が同一条件ならば、原子炉のパルス積分出力に比例する。したがって、本報告では、実験燃料の発熱量を炉心本体の積分出力との比、つまり炉心出力 100 MWs 当りの発熱量として評価した。

実験は、実験燃料をカプセル内に収納してパルス照射することによって実施する。このカプセルは、実験燃料が破損しても、破損片や核分裂生成物が外部に放出されないよう実験の安全を確保すると共に、実験燃料の冷却条件等の実験条件を設定するよう設計されている。このため、種々の実験条件を作り出せるよう、これまでに大気圧水カプセル（図 5）、高温高圧カプセル、高温高圧ループ等の装置を開発してきた。

本報告では、設計が進められているナトリウムカプセル（図 1）やナトリウムループ（図 2）を実験孔に装着してパルス照射を行った際の中性子の輸送計算を行い、実験燃料中の核分裂数により発熱量を評価した。また、評価手法の妥当性を検討するため、これまでに行われた大気圧水カプセル実験の解析を併せて行い、実験燃料発熱量の実測値との比較検討を行った。

### 2.1 NSRR 炉心のモデル化

NSRR の炉心（図 3, 4）を R-Z 2 次元の計算体系をモデル化するために、炉心及びその周辺を図 6 に示す各領域に分け、それぞれの領域に対して 9 群の群定数（巨視的反応断面積のセット）を求めた。その手順は、まず炉心を単位セルに分け、単位燃料セルの群定数を衝突確率法で

求めた。次に炉心燃料部を中心として、R 方向（炉心半径方向）、Z 方向（炉心高さ方向）への中性子の一次元輸送計算を行い、両方向に存在する物質の群定数を計算した。一次元の輸送計画で求められない部分の群定数については、SRAC コードシステム内蔵スペクトルを用いて縮約を行った。この縮約反応断面積（群定数）を用いて 2 次元輸送計算を行い、炉心及び実験燃料の発熱量を評価した。

NSRR の炉心は、水素化ジルコニウム ( $ZrH_{1.6}$ ) にウランを固溶させた燃料体をステンレス鋼被覆管で覆った特殊なものである。燃料体中の水素が中性子減速材として働いているため、パルス運転時に燃料が高温となつた場合、水素の減速性能が著しく低下するため非常に大きな負の反応温度係数を持つ。このため安全なパルス運転が可能となっている。図 7 に燃料棒形状を示す。NSRR 炉心には同燃料棒が三角配列に 157 本配置されており、単位燃料セルは図 8 に示す六角形となる。同単位燃料セルに対し SRAC コードシステムの衝突確率法を適用し、SRAC のバブルックライブリでは高速中性子 74 群、熱中性子 48 群のエネルギー群別に用意されている反応断面積を高速域 24 群、熱域 37 群に縮約した。

上述の単位燃料セルを中心にして、図 6 に示した半径方向及び軸方向について、一次元の中性子輸送計算を行った。半径方向及び軸方向の計算体系を図 9 及び図 10 にそれぞれ示す。中性子輸送計算は SRAC コードシステム中の ANISN コードを用いて行い、得られた中性子スペクトルを用いて各領域での反応断面積（群定数）を高速域 4 群、熱域 5 群の 9 群に縮約した。また、これらの 1 次元輸送計算にからなかった領域の群定数については、SRAC コードシステム内蔵スペクトルを用いて、直接 9 群に縮約した。9 群のエネルギー構造を表 2 に示す。

### 2.1.1 炉心燃料

NSRR 炉心の余剰反応度は、臨界特性試験<sup>1)</sup>で調べられ 8.5 ドルであると言われている。制御棒全引抜きであるこの炉心の状態を TWOTRAN-II で解析した。結果を表 3 で示す。TWOTRAN-II による炉心解析は、余剰反応度で 9.5 ドルと計算し、実測値に比べて 11 % の過大評価となっている。NSRR 炉心燃料体の水素化ジルコニウムは、 $ZrH_{1.6}$  の化学形をしているが、高温になると水素の一部が解離する。そこで水素の 10 % が解離していると仮定した計算を行った。この結果は、余剰反応度を 8.6 ドルと評価し、実測値とよく一致した。実験の NSRR 炉心の燃料体の現状は不明であるが、本解析では、使用した各種物性値の不確かさの調整代として燃料中の水素の解離度を使う事にした。つまり、以後の解析ではすべて水素ジルコニウム燃料体の水素は 10 % 解離しているものと仮定して計算を行った。

### 2.1.2 制御棒

NSRR では、制御棒として、燃料フォロワの付いた調整棒及び安全棒と、空気フォロワの付いたトランジェント棒が使われている。これらの制御棒は図 6 に示すとおり同心円筒状に体系化し、この時体積が一定となる様にした。このためモデル化された制御棒の表面積は実物の表面積より大きくなり、制御棒による中性子吸収が大きすぎる結果となるため、吸収物質である  $B_4C$  の密度を変え、制御棒効果を調整した。調整棒位置を炉心下端から 27.3 cm とした場合、 $B_4C$  の密度と実際の 1.02 % とする事で炉心の反応度はよく実測値と一致した。表 4 に結果を示す。

同じ  $B_4C$  密度で調整棒位置を炉心下端から 12.3 cm 位置まで挿入した体系での計算結果は、実測に比べて反応度を 1 ドル過大評価している。しかし、制御棒挿入位置によって毎回  $B_4C$  密度を調整する事は非常に手間がかかり、また、実験燃料の発熱量を評価するのが目的である今回の解析では、実験燃料と炉心部の出力バランスが求まればよく、炉心の反応度自体はあまり重要でないため、以後の解析では、23.7 cm 位置で調整した  $B_4C$  密度（実際の 1.02 %）を使って求めた制御棒の群定数を制御棒位置にかかわらず用いた。また、制御棒の群定数は図 9 の空気フォロワー部の内側に吸収体領域を設けた体系で 1 次元の輸送計算 (ANISN) を行い求めた。以上全ての計算において輸送計算の Sn 分点は 8 とした。NSRR 炉心をモデル化した際の各領域の原子数密度等については付録 A にまとめる。

## 2.2 水カプセル体系のモデル化

NSRR 実験では、炉心中央にある直径約 220 mm の実験孔に実験にカプセルもしくはループを装着し、原子炉を運転して実験燃料を過熱し、事故時の燃料挙動を調べている。この時の炉心の出力は CIC やフィション・エンバ等の原子炉計装系によって実験毎に測定されるので、実験燃料の発熱量を推定するためには実験燃料と炉心の出力バランス、つまり出力比（発熱比）が計算によって求まればよい。即ち、

$$\text{実験燃料の発熱量 (積分値)} = \frac{\text{実験燃料出力 (計算値)}}{\text{炉心出力 (計算値)}} \times \text{炉心積分出力 (実測値)}$$

によって、ある炉心積分に対応して実験燃料の発熱量が推定される。

TWOTRAN-II コードによる中性子輸送計算では各領域のメッシュ内の平均中性子フラックスが得られる。実験燃料の平均発熱量は、この 9 群の中性子フラックスに同じく 9 群の巨視的核分裂断面積を乗じ、実験燃料の半径方向ならびに軸方向に平均した核分裂数に 1 核分裂あたり 204 MeV の核分裂エネルギーを乗じたものである。

### 2.2.1 単ピニン燃料実験

NSRR では、これまで各種の水カプセル及びループを用いて軽水炉燃料の事故時挙動を調べる実験が行われており、これらの実験では、実験燃料の発熱量と NSRR 炉心の積分出力の関係が実験的に求められている。つまり、照射実験終了後実験燃料の  $\gamma$  線測定を行い、パルス照射により生じた核分裂生成物 (FP) 核種の量を定量し、この値から実験燃料棒内での核分裂及び発熱量を求めている<sup>5)</sup>。こうした実験値を基に、本報告で行っている発熱量の推定手法の妥当性を確認し、推定積度を評価するために水カプセルを用いて行った 4 つの実験の解析を行った。実験の選択に当っては実験燃料の種類、カプセル構造を多様化させる目的で以下の 4 つを選んだ。

実験番号 206-32 10 % 濃縮燃料 大気圧水カプセル  
(図 5-(1))

実験番号 701-8<sup>5)</sup> 混合酸化物燃料 2 重カプセル  
(図 5-(2))

実験番号 702-2<sup>5)</sup> 混合酸化物燃料 2重カプセル

(図5-(2))

実験番号 260-1<sup>5)</sup> 20 % 濃縮燃料 内部容器付大気圧

水カプセル

これらの実験のうち、実験番号 260-1 では、実験燃料の入った内径 72 mm、肉厚 2.4 mm の内部容器を図 5-(1) に示した大気圧水カプセル中に納めた 2 重管構造で実験が行われた。また、実験番号 701-8 で使われた燃料はプルトニウム富化度 6.33 % であり、実験番号 702-2 で使われた燃料では富化度は 10 % であった。表 5 にこれら 4 実験で使われた実験燃料の諸元をまとめた。図 11 に実験番号 701-8 の体系を R-Z 2 次元にモデル化した例を示す。図中に示された各領域の群定数は 2.1 節と同様に、炉心高さの半径方向にある領域については ANISN コードによる一次元輸送計算により求めた中性子スペクトルを用いて縮約した。その他の領域については SRAC コードシステムの内蔵スペクトルを用いて縮約した。

### 2.2.2 バンドル燃料実験

以上の実験は、実験燃料棒 1 本の体系で行われたものであるが、NSRR 実験の場合 7 本バンドル体系で行われた実験も幾つかある。高速炉燃料実験においても最大 7 本までのバンドル体系の実験が予定されているため、7 本バンドル体系の実験解析を行った。7 本バンドル体系の場合 R-Z 2 次元では外側燃料を正確に取扱えないため、解析は R-θ 2 次元で行った。図 12 に R-θ 2 次元にモデル化した実験物及び炉心のモデルを示す。この解析においても Sn 分点は 8 とした。また、群定数を縮約する際には、図 13 に示すとおり外側燃料の中心軸を通る方向に ANIS N コードによる一次元輸送計算を行い得られた中性子スペクトルを用いて行った。また、同実験に使用された燃料は、内側燃料が濃縮度 20 %、外側燃料が濃縮度 10 % の酸化ウラン燃料であるが、寸法、ピッチ等について原型炉「もんじゅ」仕様のものである。表 6 に燃料の諸元を示す。また、この燃料は次章で説明するナトリウムカプセル体系での発熱量評価における標準のペレット及び被覆管径を有している。水カプセル体系をモデル化した際の各領域の原子数密度等については付録 B にまとめる。

### 2.2.3 群数・Sn 分点・メッシュの決定

中性子輸送計算の結果に影響する技術的問題として、体系モデル化する際の近似の程度、群定数の作成法（群定数、縮約法等）に加え、計算技術的な問題として Sn 分点やメッシュ数がある。ここでは、群定数の群数、Sn 分点、メッシュ数の効果を示し、本報で使用したこれらの値の妥当性を説明する。

中性子の輸送計算を行う場合、中性子エネルギーを多群に分けそれぞれの群に属する中性子の物質との反応による吸収、発生や群間移動を計算する。当然群定数は多い程よい近似となるが、複雑な体系の計算をする場合には膨大な計算時間、記憶容量を必要とするため、一般的に個々の領域で群定数を仮定した中性子スペクトル、あるいは一次元輸送計算で求めた中性子スペクトルを使って縮約し、全体の計算は、縮約した小数群による計算が行われている。縮約に使用された

中性子スペクトルが妥当なものであれば、計算結果は小数群による計算であっても問題はない。この点を確認するため、NSRR 炉心について（実験孔内は空気とした）9 群及び 19 群の計算を行った。結果を図14に示す。同図に示される通り、9 群あるいは 19 群で評価された NSRR 炉心での中性子分布にはほとんど差が見られず、9 群の計算で十分であることが分かる。

中性子束の非等方性が大きい場合、角度度数を離散化してボルツマン方程式を解き角度依存の中性子束を求める手法がとられる。この方向性の分割数を示すのが  $S_n$  分点である。 $S_n$  分点を多くとればより複雑な角度依存性を持つ体系を取扱う事が出来る。 $S_n$  分点の効果を調べるために、水カプセル実験の体系（実験番号 206-32）を用いて、分点が 4, 8, 16 の場合の計算を行った。結果を表 7 及び図 15 にまとめた。計算の結果は分点が 8 以上であれば、結果にほとんど差がないことを示しており  $S_n$  分点の数は 8 で十分であると言える。

モデル化した体系各領域のメッシュ分割数の効果を、炉心部、実験カプセル部について調べた。体系は水カプセル実験体系を用いた。結果は表 8 にまとめた。同表中で ⑬ ⑭ で示された炉心を囲む水反射体や炉心燃料 ⑫ のメッシュ数を増やした場合、炉心の余剰反応度つまり実効増倍数は変化するものの、実験燃料の発熱量（炉心と実験燃料の発熱比）にはほとんど変化がない事が分かる。メッシュ分割数が実験燃料の発熱量に効果を持つ領域に、表 8 中にケース 1, 5, 6 で示された、水カプセル内の水領域がある。③ で示された水領域のメッシュ数を 6 から 12 に増やすことにより、実験燃料の発熱量は 413 cal/g から 421 cal/g に増加している。メッシュ数をさらに 2 倍の 24 と増やしても発熱量はほとんど変わらず 423 cal/g に留まっており、水カプセル領域のメッシュ数は 12 で十分であると考えられる。水カプセル領域 ③ は幅 5.264 cm であり、メッシュ数 6, 12, 24 の場合のメッシュ幅はそれぞれ 0.88 cm, 0.44 cm, 0.22 cm である。水中での熱中性子の巨視的断面積の逆数  $1/\sum t$  は約 0.2 cm があるので、この結果より、メッシュの取り方としては

$$\text{メッシュ幅} = \frac{1 \sim 2}{\sum t}$$

となる様にすれば十分であると考える。構造や素材の全く異なったナトリウムカプセル体系の計算時には、上の関係を目安としてメッシュ分割数を決めた。

### 2.3 ナトリウムカプセル体系のモデル化

NSRR 実験では、実験孔はブラックストラップとなり中性子束が炉心に比べて高くなる設計となっているが、実験物中の中性子束は、減速材による効果やステンレス鋼等の構造材による吸収によりかなり変化する。こうした効果を調べるために、図 1 に示した NSRR 高速炉燃料実験用ナトリウムカプセルを R-Z, もしくは R-θ の 2 次元にモデル化して NSRR 炉心を含めた中性子の輸送計算を行った。計算で調べた主要なパラメータを以下に示す。付録 C にナトリウムカプセル体系の計算で用いた物質の組成、密度原子数密度等をまとめる。

燃料条件 酸化ウラン燃料 ( $^{235}\text{U}$  濃縮度)  
混合酸化物燃料 (Pu 富化度, 燃料径)

金属燃料	
炭化物燃料	
窒化物燃料	
構造材	ステンレス鋼（厚さ）
	ジルカロイ（厚さ）
減速材	水素化ジルコニウム（厚さ）
	有機物（ポリエチレン等、密度）
	ベリリウム金属

燃料条件をパラメータに計算する場合実験用ナトリウムカプセルは図 16 に示す一定の体系を行った。つまり、減速材は水素化ジルコニウムとし、厚さ 40 mm であり、内外カプセル肉厚はそれぞれ 4 mm 及び 3 mm とした。また、酸化物燃料の密度は理論密度の 95 % とした。ここで混合酸化物燃料の Pu 富化度は  $\text{PuO}_2 / (\text{Pu} \cdot \text{U}) \text{ O}_2 (\text{W/O})$  と定義した。プルトニウムの同位体比は全ての燃料について  $^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} : ^{241}\text{Pu} = 70 : 25 : 5$  とした。また、 $^{235}\text{U}$  濃縮度は 0.3 % とし、劣化ウラン相当とした。混合酸化物燃料密度は理論密度の 85 % とした。

### 2.3.1 単ピン燃料実験

ナトリウムカプセルを R-Z 2 次元にモデル化した例を図 16 に示す。ナトリウムループ（図 2）についても同様のモデル化を行い計算を行ったが、いずれの実験物も炉心部に入る試験部の形状に大差はなく、構造材の肉厚、減速材の寸法等が同じであれば、計算結果に大きな差は見られなかったので、本報告では、説明を分り易くするためナトリウムカプセル体系での計算にまとめて示す。また、実験物のうち、実験燃料、ナトリウム冷却材、カプセル胴部、減速材等の炉心高さ位置にある領域の群定数は炉心を含めた中性子一次元輸送解析によって求めた。その他の部分は、構成物質を均質化し、SRAC コードシステムの内蔵中性子スペクトルを用いて縮約した。図 17 に炉心全体を含む R-Z 2 次元輸送計算の体系を示す。

### 2.3.2 バンドル燃料実験

NSRR 高速炉燃料実験では最大 7 本までの燃料を組み込める実験物を計画している。この際、7 本バンドルに組んだ内側燃料及び外側燃料の平均発熱量や発熱分布等を推定するために、R-θ 2 次元体系での中性子輸送計算を TWOTRAN-II コードを使って行った。この計算では、燃料の寸法、ピッチ等は原型炉「もんじゅ」の仕様とした。燃料ペレットについては、酸化物燃料とし、内側燃料を 20 % 濃縮で固定し外側燃料の濃縮度を 10 % 及び 20 % とする 2 ケースの計算を行い、内外燃料の発熱量と濃縮度の関係を調べた。図 18 に R-θ 2 次元体系モデルを示す。また、同様の手法を用いて 3 本バンドル体系での発熱量評価も行った。この場合燃料は、全て 20 % 濃縮の酸化物燃料とした。図 19 に 3 本ピンバンドルの構成を示す。

### 3. 結 果

#### 3.1 水カプセル体系の解析

##### 3.1.1 単ピン燃料実験

大気圧水カプセルを用いて行われた4つの実験に対する4つの単ピン燃料実験について、R-Z2次元中性子輸送計算で得られた実験燃料の発熱量を表9にまとめる。計算で得られた平均発熱量は、実験で得られた測定値に比べて最大で11%のばらつきを示しているものの比較的よく実験結果を再現しているといえる。

実験番号701-8で使用された混合酸化物燃料は、核分裂性物質（フィッスル）として、<sup>235</sup>U(0.59%，熱中性子による核分裂断面積約506 barn), <sup>239</sup>Pu(3.63%，熱中性子による核分裂断面積約694 barn), <sup>241</sup>Pu(0.41%，熱中性子による核分裂断面積約936 barn)を含んでおり、アクチニド元素中の核分裂性物質の割合が4.63%となっている。核分裂数は核分裂性物質の数と核分裂断面積の積（巨視的核分裂断面積）に比例するので、プルトニウムによる核分裂の効果を、核分裂断面積の比で補正して<sup>235</sup>U当量を下式により求めると、6.33%となる。

$$\Sigma \frac{\text{核種 } i \text{ の核分裂断面積}}{\text{ }^{235}\text{U の核分裂断面積}} \cdot \text{核種 } i \text{ の濃度}$$

NSRR実験では、1重の大気圧水カプセルを用いて5%濃縮のUO<sub>2</sub>燃料を照射する実験が数多く行われており、実験により多少のばらつきはあるものの実験燃料の発熱量は、炉心積分出力100MWs当たり平均で315 cal/gであった。実験番号701-8の燃料は寸法、フィッスルの量ともこれらの5%濃縮UO<sub>2</sub>燃料とほぼ同じであることを考えると、その発熱量が、計算・実験とも315 cal/gをやや下回っている事は、内カプセルによる吸収の効果が表れているためと考えられ、定性的に妥当な結果であると言える。

実験番号702-2で使用された燃料では、含まれるアクチニド元素中の核分裂性物質の割合は14.95%であり、<sup>235</sup>U当量では18.61%となりほぼ20%濃縮燃料と同等であるが、燃料寸法は8×8BWR型（ペレット外径10.6 mm）に比べて太く、直接他のNSRR実験結果との比較は困難である。

実験番号260-1は20%濃縮14×14PWR型燃料を使った実験であり、肉厚2.4 mmの内部カプセルを使った点を除けば類似の実験が多い。内部カプセルを使わない条件での同燃料の発熱量はNSRR炉心積分出力100MWs当たり540±50 calと評価されており（実験値）、実験番号206-1の結果は計算・実験値ともほぼ合理的な値を示していると言える。以上、R-Z2次元体系での解析結果は実験物や燃料の種類によって多少のバラツキはあるものの概ね実験結果と一致している。

### 3.1.2 バンドル燃料実験

7本バンドル体系の発熱量評価は、図18に示すように実験物を含む原子炉の水平断面をR-θ2次元にモデル化した体系での計算を行った。結果を表10にまとめる。本表の結果は図18に示すとおり炉心垂平面のうち30°分（全体の1/12）をモデル化して0°面と30°面で完全反射として行った計算結果であるが、60°、90°と反射面を広げた計算でも結果に差はなく30°分のモデル化で十分であることが分かった。また、R-θ2次元計算を行う場合に炉心のZ方向の高さを表すパラメータとしてバックリングがある。表10に、バックリング値をNSRR炉心高さである38.1cmを中心に変化させて実験値と比較した。計算結果は全体に実験結果と比べて発熱量を小さめに評価しており、炉心高さに相当するバックリングを無限大とした場合に於いても約10%実験結果を下回っている。炉心と外側燃料の発熱比は、バックリングによらずほぼ一定であるが、中心の20%濃縮燃料の発熱量を実験値よりやや大きく見積る傾向にある。本解析は1つの体系における実験結果と計算結果の比較に過ぎず、これをもって計算結果が過小評価になる原因を推定するのは困難である。しかし、基本的にはR-θ2次元体系による制約から領域毎に異なるであろう軸方向（Z方向）への中性子の漏れをバックリングという1つの値で模擬せざるを得ない事に由来している物と考える。そこで今後の解析では、バックリングも単なるパラメータの1つと考え、表10に示した実験体系の解析で最も実験値と近い値を示しているバックリング無限大を採用し、実験値のない高速炉燃料実験物の解析を行うものとする。その場合、少なくとも10%程度の推定誤差は十分にあり得るものと考えられる。

## 3.2 ナトリウムカプセル体系の解析

NSRR高速炉燃料実験を行うナトリウムカプセル及びナトリウムループは現在設計中であり、基本的な構造はほぼ固まっているものの容器肉厚等の細い仕様は未確定の部分が多い。こうした実験物の構造、さらには実験燃料の組成や寸法によって実験燃料の発熱量は炉心出力が一定であっても種々に変化する。ここでは発熱量に最も効果のある実験燃料自身の組成・寸法による実験燃料の発熱量の変化をカプセルの構造を一定とした条件で示した。次に、燃料を標準仕様で一定条件とした場合のカプセル構造材及び減速材の与える効果をまとめた。

### 3.2.1 燃料パラメータ効果

#### 3.2.1.1 燃料組成

NSRR高速炉燃料実験での使用が検討されている5種類（酸化ウラン燃料、混合酸化物燃料、炭化物燃料、窒化物燃料、金属燃料）のうち酸化ウラン燃料は取扱いが容易であることから、各種の仕様の燃料の製作が可能であり各種パラメータ実験や燃料破損時に発生する破壊力を評価する目的の実験への使用が検討されている。 $^{235}\text{U}$ 濃縮度を、パラメータに酸化ウラン燃料の発熱量を評価した。表11に結果をまとめる。表11に示した燃料の寸法はすべてもんじゅ仕様（表6参照、ただし、スタック長は380mm）とした。

酸化物燃料中の $^{235}\text{U}$ の濃縮度と平均発熱量の関係を、水素化ジルコニウム減速材の厚さの効果を含めて図20に示す。減速材の効果については、3.2.2.2項で詳しく説明する。

混合酸化物燃料を用いた場合の実験燃料の発熱量についても、Pu 富化度をパラメータに計算した。結果を同じく表 11 にまとめる。混合酸化物燃料の平均発熱量の Pu 富化度依存性を図 21 に示す。

照射済燃料としては「もんじゅ」仕様の混合酸化物燃料が  $5.2 \times 10^4$  MWD/tまで燃焼した場合の発熱量の評価を行い、表 10 に示した。燃焼による燃料組成の変化は、ORIGEN-2 コード<sup>12</sup>を用いて評価を行った。燃料組成は、燃焼前には Pu 富化度 22 % (U は劣化ウラン) のものであり、核分裂性物質 ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) の割合は、表 12 に示す様に全体で燃焼前 16 % だったものが、燃焼後には約 15 % に減少している。核分裂性物質の割合には大きな変化は見られないものの、 $^{131}\text{Xe}$  等の毒物質の蓄積により発熱量は Pu 富化度 24 % の新燃料に比べて 2 割程度減少している。表 12 に示した核分裂生成物は、ORIGEN-2 コードによる燃焼計算で得られたもののうち、巨視的吸収断面積の大きいものを選んだ結果である。また、燃焼後冷却時間は 2 年とした。実験燃料の群定数作成に当っては、表 12 に示したこれら全ての核分裂生成物を考慮した。

炭化物燃料は、(Pu-U) C<sub>1.0</sub> の化学形であり理論密度は 13.58 g/cm<sup>3</sup> である。本報告では、標準寸法としての「もんじゅ」仕様の燃料ピン径の場合の発熱量評価に加え、米国 EBR-II を用いた実験に使用された寸法の燃料の場合（太径燃料）の評価も行った。太径燃料のペレット外径は 8.2 mm である。燃料の仕様は表 13 にまとめた。

混合窒化物燃料 (Pu, U) N<sub>1.0</sub> についても、炭化物燃料と同様に発熱量を標準径と太径の 2 種類の燃料に対して評価した。窒化物燃料は炭化物燃料よりさらに密度が大きく、理論密度は 14.32 g/cm<sup>3</sup> である。燃料の仕様及び解析結果を表 13 にまとめた。

図 22 に炭化物及び窒化物燃料の半径方向ならびに軸方向発熱分布を、各種酸化物燃料の発熱分布と比較して示した。

NSRR 実験においても、将来金属燃料を対象にした実験計画が考えられている。そこで本報告書においても、米国 EBR-II 炉において使用されている金属燃料 (U-19Pu-10Zr) を対象にした発熱量評価を行った。表 14 に金属燃料の仕様をまとめる。解析の結果は燃料中のアクチニド元素の割合が多く、しかも高濃縮燃料である事から実験により投入可能な発熱量は大きく、金属燃料の発熱量は、炉心出力 100 MW<sub>s</sub> 当り軸方向平均値で 613 cal/g (2.57 KJ/g) であった。軸方向のピーキング係数は、他の燃料と同じく 1.23 であった。また、燃料半径方向の軸方向のディプレッションは大きく、燃料中央部での半径方向ピーキング係数は約 3.8 であった。図 23 に金属燃料の半径方向及び軸方向発熱分布を 20 % 濃縮 UO<sub>2</sub> 燃料と比較して示す。

### 3.2.1.2 燃料径

実験燃料の径が発熱量及び半径方向のピーキング係数に及ぼす効果を定量化するため、4 種類の燃料径で発熱量評価を行い比較した。考慮したピン径は、常陽-Mark II 仕様の 5.5 mm, もんじゅ仕様の 6.5 mm, CABRI 実験用燃料ピン仕様の 7.6 mm, Super-Phenix 炉仕様の 8.65 mm である。各燃料の仕様を表 15 にまとめた。全ての燃料について、ペレットは富化度 30 % の混合酸化物燃料とし、被覆管は全て SUS316 として計算を行った。得られた平均及び軸方向ピーケ部での発熱量を表 15 にまとめ、半径方向発熱分布を図 24 にまとめた。この結果、ペレット直徑が大きい場合、熱中性子のペレット外周部での中性子の吸収により中央部での発熱量のへこみ（ディプレッション）が増し平均発熱量が下がり、Super Phenix 仕様の場合、もんじゅ仕様に

比べて約 20 % 減となることが示された。半径方向のピーキング係数は、Super Phenix 仕様で 1.75 程度ともんじゅ仕様燃料の 1.7 倍と比べてやや大きくなる事が明かとなった。

### 3.2.1.3 バンドル体系

以上示して来た発熱量は、すべて単ピン燃料実験の場合であるが、より現実的な燃料及び流路の配置条件として 7 本及び 3 本バンドル体系で行った解析の結果を以下に示す。

NSRR 実験では、実験燃料が炉心中央部の実験孔中心に位置しており、実験燃料は炉心で発生し向心状に実験孔に入射する中性子によって過熱されるため、バンドル体系で行う実験では外側燃料の陰となる中心燃料は外側燃料に比べて発熱量が小さくなる。このため 7 本バンドル体系では、中心と外側の濃縮度を調整することにより燃料棒の発熱量の均一化が図られる。その効果を調べるために中心燃料を 20 % 濃縮の酸化ウラン燃料として、外側酸化ウラン燃料の濃縮度を 10 % 及び 20 % とした場合の実験燃料の発熱量をそれぞれ体系 1 及び体系 2 とし、表 16 にまとめた。7 本バンドル体系の実験では、中心燃料の 1 部が外側燃料の影部に位置するため、実験燃料の発熱分布は方向により大きく異なる。そこで燃料の発熱の不均一さを示す目安として、それぞれの体系に対して、中心及び外側燃料それぞれの平均発熱量に対する最大発熱部及び最低発熱部の発熱量の比を表 16 に併せて示した。本計算では、中心燃料 (30° 分、つまり 1 / 12 断面) を 64 メッシュ、外側燃料 (90° 分、つまり 1 / 2 断面) を 142 メッシュに分割しており、表 16 に示した発熱係数は、メッシュ内平均発熱量の断面平均発熱量に対する値である。さらに詳しい発熱分布を体系 1、体系 2 について、中心燃料と外側燃料のそれぞれを表 17 から表 20 にまとめた。これらの表より外側はかなり大きな発熱分布を持っているが、中心燃料は単ピン実験の場合と比べても比較的均一な発熱分布となっている事が分かる。7 本バンドル体系の実験では、燃料棒一本当たりの発熱量は小さくなるものの、より実際的な体系を模擬しているといった面で大きなメリットを持っている。

また、バンドル構成の最小単位である 3 本ピン体系での発熱量の評価結果は、半径方向平均  $1.44 \text{ kJ/g}$  ( $3.44 \text{ cal/g}$ ) であった。単ピン体系での同じ 20 % 濃縮燃料の発熱量は  $1.81 \text{ kJ/g}$  であり、3 本バンドルでは単ピンに比べ約 20 % 減少している。前述の 7 本バンドル体系 (20 % 濃縮燃料を 6 本の 10 % 濃縮燃料で囲んだ体系) では、単ピンに比べて約 40 % 減の  $1.11 \text{ kJ/g}$  であったので、3 本バンドルは発熱量の減少はかなり小さく抑えられる事が分かる。一方、表 21 に 3 本バンドル体系での燃料断面の発熱分布を示すが、これに見られる様にいわゆる局所ピーキング係数は、最大 / 平均及び最小 / 平均それぞれ 1.36 と 0.82 であり、7 本バンドル体系に比べると 1 からのずれが大きく、発熱量の平坦化という点からは 3 本バンドル体系の効果は 7 本バンドル体系に比べて劣っている事が分かる。

### 3.2.2 カプセル構造の効果

ナトリウムカプセル及びループの主要な構造材としては、2 重になるカプセル本体の素材となるステンレス鋼あるいはジルカロイ、中性子減速材、断熱材等がある。構造材ではないものの実験燃料周辺に大量に存在するものとしてナトリウム冷却材がある。こうした物質による中性子の吸収・減速等の効果を定量化する目的で、内カプセルの材質、肉厚の効果、減速材の材質・厚さ等の効果、さらにナトリウム冷却材層の厚さの効果を調べた。結果の概略を表 22 にまとめる。同

表の結果は、図16, 17に示した基本ナトリウムカプセル体系においてそれぞれの個別設計要素を変化させて行った発熱評価計算の結果を比べたものである。実験燃料は一連のパラメータサーベイを通して一定としたが、多くの場合、20%濃縮の $\text{UO}_2$ 燃料あるいは富化度30%の( $\text{Pu}\cdot\text{U}$ ) $\text{O}_2$ 燃料とした。以下表22をまとめる基になった計算結果について詳しく述べる。

### 3.2.2.1 構造材

内カプセル材質をステンレス鋼からジルカロイに変更する事により、肉厚を4mmと変えなければ実験燃料の発熱量は同じ照射条件において約10%高くなる。ジルカロイの肉厚を8mmとするとステンレス鋼カプセル(肉厚4mm)の場合と同等となる。これらの結果から構造材をジルカロイすることの利点は小さいといえる。また、内カプセルのステンレス鋼の肉厚は実験燃料の発熱量と逆比例し、肉厚が1mm厚くなるにつれ実験燃料の発熱量は5%減少する事が判明した。また、ナトリウム減速材の厚さを18mmから5mmに変化させてもほとんど実験燃料の発熱量に影響しない事も分かった。これらの結果を計算条件も含めて表23にまとめた。

### 3.2.2.2 減速材

実験燃料の発熱量に大きく効くものに中性子減速材がある。これまでの計算では全て、水素化ジルコニウム材で厚さ40mmのものを考えてきたが、ここで減速材の厚さをパラメータにした計算を行った。結果を表24にまとめた。また、実験燃料の半径方向の発熱分布を図25に示す。これらの図表より、減速材なしの体系では実験燃料の発熱量が半減する事が分る。さらに、燃料中心部での発熱量の低下(ディプレッション)が減速材が厚くなるにつれやや大きくなる傾向を見せている事が分る。しかし、ピーリング係数は、減速材なしの体系で1.6だったものが、減速材40mmでも1.7に過ぎない。これは、減速材なしの場合でも実験燃料の発熱は熱中性子による核分裂によって主に発生しているためだと考えられる。 $^{239}\text{Pu}$ や $^{241}\text{Pu}$ の場合、高速中性子による核分裂断面積は、熱中性子による核分裂断面積に比べて2ケタ以上小さい。図26に燃料表面位置における炉心高さ方向(Z軸方向)の中性子分布を示すが、同図に観られるとおり、減速材なしの場合でも高速中性子束は熱中性子束に比べ数10倍大きいだけに留まっている。このことから、NSRR実験において、実験燃料の発熱量をより大きく取りたい場合には、積極的に減速材を用い熱中性子化する必要がある事が分る。図27に減速材厚さと実験燃料(Pu富化度30%, もんじゅ仕様)の平均発熱量の関係を示す。水素化ジルコニウムを減速材として使用した場合、減速材の厚さは40mmより大きい方がより効果よく実験燃料を発熱出来る事が分る。他の熱料に対して行った計算から、減速材厚さが50mm程度で発熱量はほぼ最大になる事が知られているが、減速材厚さを40mmから50mmに変更する事による発熱量の上昇は約5%と小さい。NSRR高速炉燃料実験用ナトリウムカプセルでは、実験孔の大きさ(直径約22cm)の点から減速材の厚さとしては最大40mm程度を考えているが、本計算の結果では、水素化ジルコニウムが $\text{ZrH}_2$ で密度が $5.61 \text{ g/cm}^3$ のものであれば厚さ40mmではほぼ十分と言える。しかし、水素化ジルコニウムは焼結して作るので、水素含有量、密度等は製作工程によって変化し得る。中性子の減速性能は主として水素原子密度で決まるので、水素含有量や密度の異なるものについては補正を行って評価する必要がある。簡単には、例えば密度が10%小さい水素化ジルコニウムを使用した場合には、図27で減速材厚さを実際の寸法よりも10%減少させて見る事により評価出来るものと考えられる。

次に、他の減速材候補としてベリリウム金属の減速性能を調べる計算を行った。計算の結果 20 % 濃縮の  $\text{UO}_2$  実験燃料に対して平均発熱量は、197 cal/g (0.83 kJ/g) となり、水素化ジルコニウムを使用した場合に比べ 45 % 小さい値を示し、減速材なしの場合と大差なかった。ベリリウムの質量数 9 であり、原子核が重すぎるため中性子の減速にあまり寄与しないものと考えられる。NSRR 実験のように寸法的制約の大きい条件では、減速効率の悪いベリリウム金属は減速材としては不適当である。

第 3 の減速材候補として有機物減速材を考えた。有機物減速材としては、ポリエチレンが米国の PBE 実験に使われている実績がある。仕様出来る可能性のある化合物の特徴をまとめると、

ポリエチレン	密 度 : 0.91 ~ 0.96 g/cm <sup>3</sup>
(-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> -) <sub>n</sub>	融 点 : 120 ~ 140°C
	熱分解点 : 320 ~ 330°C
	発火点 : ~ 340°C
	H/C = 2
ポリスチレン	密 度 : 1.05 ~ 1.07 g/cm <sup>3</sup>
(-CH(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> )CH <sub>2</sub> -) <sub>n</sub>	密 度 : ガラス転移温度 : 82°C
	H/C = 1
ポリプロピレン	密 度 : 0.90 ~ 0.91 g/cm <sup>3</sup>
(-CH <sub>3</sub> CHCH <sub>2</sub> -) <sub>n</sub>	融 点 : 1650 ~ 176°C
	H/C = 2

等となる。こうした減速材の核的な性質は主に密度と H/C で決まる。そこで、これらの中で現実的に使用出来る可能性が最も高いポリエチレンを中心に考え、密度と H/C をパラメータに、減速材として有効に利用出来る化合物の条件の定量化と減速性能の評価を行うため計算を実施した。図 28 に減速材の密度を 0.8 ~ 1.2 g/cm<sup>3</sup> に変化させた場合の 20 % 濃縮  $\text{UO}_2$  燃料の軸方向ピーク部での発熱量を示した。減速材物質は H/C = 2 とし、厚さを 40 mm とした。計算の結果、密度が 1 g/cm<sup>3</sup> で発熱量は最大となり、1 以上では減速過剰となり吸収による損失のため発熱量は漸減している。この結果は逆に言えば H/C = 2 のポリエチレンの様な減速材では（密度が 1 g/cm<sup>3</sup> 程度のものの場合）、減速材は 40 mm が最適な厚さである事を示している。また、密度が 0.95 g/cm<sup>3</sup> のポリエチレンを使用すると水素化ジルコニウムを使用した場合に比べて、同じ減速材厚さ 40 mm であっても発熱量は約 15 % 増加し軸方向平均値で 402 cal/g (1.69 kJ/g)，軸方向ピーク部で 498 cal/g (2.09 kJ/g) であった。また、H/C を変化させた場合の実験燃料の発熱量を図 29 まとめる。同図から、H/C = 1 以上の有機物はその密度が 1 g/cm<sup>3</sup> 程度あれば、水素化ジルコニウム以上の減速性能を持つ事が分る。有機物減速材の性能に関する評価結果を表 25 にまとめる。以上の結果から、ポリエチレンを代表とする有機物減速材が核的には十分な性能を有している事が判明した。しかしナトリウムカプセルにおいては、減速材も 100 °C 程度の高温にさらされる事が予想されるため、有機物減速材の採用に当っては、高温条件での熱的・機械的性質等の十分な調査が必要であると考えられる。

以上検討してきた減速材 3 種類、水素化ジルコニウム、ベリリウム金属、有機物（代表としてポリエチレン）の減速性能の温度による変化を調べた。減速材温度としては、350 K (77 °C)，

400 K (127 °C), 450 K (177 °C) の 3 点を考えて、20 % 濃縮の標準寸法の燃料の発熱量を求め、表 26 にまとめた。本計算では核的な反応断面の温度変化のみを考え、減速材物質の膨張は考慮していない。計算の結果、水素化ジルコニウムとポリエチレン減速材の場合 450 K において 350 K の場合と比べて、実験燃料の発熱量はやや増加しているものの 5 % 未満であり、減速材の熱膨張により原子数密度が小さくなり、減速材厚さが実効的に少し小さくなる点を考慮すると、減速材温度の実験燃料発熱量に与える影響は小さく無視できるものと考えられる。

## 4. 考察

### 4.1 解析精度の評価

本解析における発熱量の推定評価のための計算は R-Z 2 次元及び R-θ 2 次元の 2 種類の体系を用いて行った。R-Z 及び R-θ 体系では、それぞれ単ピン実験 4 ケース、7 本バンドル実験 1 ケースの実験解析を行い、 $\gamma$  線測定によって求めた発熱量の実測値との比較を 3.1 節で行った。比較の結果をまとめてみると、R-Z 2 次元体系では、 $^{235}\text{U}$  の濃縮度や Pu 富化度、さらに燃料や実験用水カプセルの寸法が種々異なる条件において、最大 11 % 実測値からのずれを示しているものの、計算による推定値はよく実験結果を再現しているものと言える。これら 4 ケースのうち、最大の違いを示したケースは、20 % 濃縮の  $\text{UO}_2$  燃料で 2 重カプセル内で照射した実験でその程度は 11 % である。20 % 濃縮燃料を使用した実験では、実験燃料の発熱量は内部カプセルを使わない場合で炉心積分出力 100 MWs 当り  $540 \pm 50 \text{ cal/g}$  という値が求められており、6 実験を調べた平均として 9 % のバラツキを示している。この 20 % 濃縮燃料を使用した実験での実測値のバラツキは、10 % 濃縮燃料に対する値  $436 \pm 14 \text{ cal/g}$  (バラツキは約 3 %) に比べて大きい。実測値におけるバラツキの原因は現時点では明らかでないが、計算による推定値と誤差も実測値のバラツキと大差なく、解析精度はかなり高いものと思われる。また、表 9 に見られる様に過大・過小評価のいずれの傾向はなく、結論として、R-Z 2 次元計算では、燃料の組成等の条件が明らかな場合には  $\pm$  約 10 % の精度で信頼出来るものと考えられる。ただし、燃焼のすんだ燃料の発熱量解析では、予備計算となる燃焼計算 (ORIGEN-2 コード) の精度が明らかでなく、また実測値との比較を行っていないので推定誤差は、やや大きいものと判断せざるをいない。

一方、R-θ 2 次元の計算では、1 ケースのみ実測値との比較が行われている。その例では計算値と実測値に比べ約 10 % の過小評価となっている。R-θ 2 次元体系での計算では Z 軸 (炉心高さ方向) の構造を考慮出来ないため、Z 軸方向への中性子の漏れ量はバックリング値で調整する事になる。NSRR 炉心は高さは 38.1 cm と小さいが上下部に黒鉛リフレクターを設けているため、バックリング値をそのまま 38.1 cm とすると 20 % 近く発熱量を過小評価する事となった (表 10 参照)。その結果バックリングを大きくとる事にしたが、バックリング  $\infty$  においても約 10 % の過小評価になっており、この原因としては軸方向への漏れだけでなく、群定数等他の原

400 K (127 °C), 450 K (177 °C) の 3 点を考えて、20 % 濃縮の標準寸法の燃料の発熱量を求め、表 26 にまとめた。本計算では核的な反応断面の温度変化のみを考え、減速材物質の膨張は考慮していない。計算の結果、水素化ジルコニウムとポリエチレン減速材の場合 450 K において 350 K の場合と比べて、実験燃料の発熱量はやや増加しているものの 5 % 未満であり、減速材の熱膨張により原子数密度が小さくなり、減速材厚さが実効的に少し小さくなる点を考慮すると、減速材温度の実験燃料発熱量に与える影響は小さく無視できるものと考えられる。

## 4. 考察

### 4.1 解析精度の評価

本解析における発熱量の推定評価のための計算は R-Z 2 次元及び R-θ 2 次元の 2 種類の体系を用いて行った。R-Z 及び R-θ 体系では、それぞれ単ピン実験 4 ケース、7 本バンドル実験 1 ケースの実験解析を行い、 $\gamma$  線測定によって求めた発熱量の実測値との比較を 3.1 節で行った。比較の結果をまとめてみると、R-Z 2 次元体系では、 $^{235}\text{U}$  の濃縮度や Pu 富化度、さらに燃料や実験用水カプセルの寸法が種々異なる条件において、最大 11 % 実測値からのずれを示しているものの、計算による推定値はよく実験結果を再現しているものと言える。これら 4 ケースのうち、最大の違いを示したケースは、20 % 濃縮の  $\text{UO}_2$  燃料で 2 重カプセル内で照射した実験でその程度は 11 % である。20 % 濃縮燃料を使用した実験では、実験燃料の発熱量は内部カプセルを使わない場合で炉心積分出力 100 MWs 当り  $540 \pm 50 \text{ cal/g}$  という値が求められており、6 実験を調べた平均として 9 % のバラツキを示している。この 20 % 濃縮燃料を使用した実験での実測値のバラツキは、10 % 濃縮燃料に対する値  $436 \pm 14 \text{ cal/g}$  (バラツキは約 3 %) に比べて大きい。実測値におけるバラツキの原因は現時点では明らかでないが、計算による推定値と誤差も実測値のバラツキと大差なく、解析精度はかなり高いものと思われる。また、表 9 に見られる様に過大・過小評価のいずれの傾向はなく、結論として、R-Z 2 次元計算では、燃料の組成等の条件が明らかな場合には  $\pm$  約 10 % の精度で信頼出来るものと考えられる。ただし、燃焼のすんだ燃料の発熱量解析では、予備計算となる燃焼計算 (ORIGEN-2 コード) の精度が明らかでなく、また実測値との比較を行っていないので推定誤差は、やや大きいものと判断せざるをいない。

一方、R-θ 2 次元の計算では、1 ケースのみ実測値との比較が行われている。その例では計算値と実測値に比べ約 10 % の過小評価となっている。R-θ 2 次元体系での計算では Z 軸 (炉心高さ方向) の構造を考慮出来ないため、Z 軸方向への中性子の漏れ量はバックリング値で調整する事になる。NSRR 炉心は高さは 38.1 cm と小さいが上下部に黒鉛リフレクターを設けているため、バックリング値をそのまま 38.1 cm とすると 20 % 近く発熱量を過小評価する事となった (表 10 参照)。その結果バックリングを大きくとる事にしたが、バックリング  $\infty$  においても約 10 % の過小評価になっており、この原因としては軸方向への漏れだけでなく、群定数等他の原

因も考慮する必要があるものと思われる。R-θ 体系での計算による発熱量の推定精度をより正確に評価するためには、より多くの実験解析を行い実測値との比較検討を進める必要があるが、現状では約 15 % 程度の誤差を持つものと考えられる。

#### 4.2 実験範囲の定量化

高速炉燃料の過出力事故 (Transient Over Power : TOP) 条件での破損挙動を調べる実験は、これまで米国 TREAT 炉やフランスの CABRI 炉を用いて幾つか行われている。これらの実験で得られた結果と NSRR における高速炉燃料の範囲の関係を考察する。

米国 TREAT 炉を用いて行われた高速炉燃料破損実験は、過出力事故 (TOP) 条件のみならず流量喪失事故 (Loss of Flow : LOF) 条件を含め、種々の燃料に対して、幾つかのループ及びカプセルを用いて実験数には限りがあるが多岐にわたる実験がなされている。これらの実験のうち代表的なものとして、S シリーズ実験では、燃料破損時に発生する破壊力が測定された。同実験シリーズでは、未照射の  $\text{UO}_2$  燃料に比較的大きい発熱量が投入された。また、E & H シリーズ実験では照射済 ( $\text{Pu-U}$ )  $\text{O}_2$  燃料を含めて多種の燃料が Mark-II ループと呼ばれるナトリウムループ中で照射され、より現実的な条件で燃料の破損挙動が調べられた。同実験シリーズでは、燃料の破損時刻が圧力測定により同定されており、破損時の燃料エンタルピが評価されている。図 30 に燃焼度をパラメータに燃料の破損エンタルピをまとめて示す。同実験シリーズで用いられた燃料は文献 9 に示される様に寸法、 $\text{Pu}$  富過度等を様々に変化している。そのため、燃焼度だけでは実験は十分に整理は出来ないものの、燃焼度 0 の新燃料は 1 ~ 1.8 kJ/g で破損し、燃焼度 3 ~ 5 % の照射燃料では 0.8 ~ 1.2 kJ/g で破損する事が分る。図 30 中 ( $\text{Pu-U}$ )  $\text{O}_2$  燃料実験の破損エンタルピを黒丸で、 $\text{UO}_2$  燃料のものを白丸で示した。また、例として、NSRR 実験において現在考へてられている標準的な実験カプセルを用いてもんじゅ仕様の燃料の照射実験を行った場合の推定発熱量を破線で示した。TREAT 実験結果が燃料エンタルピであるのに対し NSRR 実験の推定値は除熱を考慮しない発熱量であり、直接比較は出来ないが、NSRR でのパルス照射による瞬時加熱では最大エンタルピは投入発熱量の 80 ~ 90 % に達するものと考えられる。したがって、TREAT 実験結果との比較では、NSRR 実験において燃料を破損に至らしめる条件が十分に達成出来るものと考えられる。

フランスの Cadarache 研究所で行われている CABRI 実験では、TOP 条件及び LOF 状態からの TOP 条件 (Transient Under Cooling Over Power : TUCOP) での燃料挙動が、それぞれ A 型試験、B 型試験として行われている。B 型実験では LOF の条件より破損しきい値は低下するので、A 型試験結果のみを燃焼度の関数として図 31 にまとめた。図 31 中黒丸は破損を、白丸は非破損を示す。図 30 中に示した破損しきい値は 1 部の実験について公表されている燃料破損時の発熱量を結んだ線である。図 30 から、燃焼度 0 の新燃料の破損しきい値は 1.0 kJ/g 程度であり、燃焼が進むにつれやや下がる傾向が読み取れる。NSRR 実験におけるもんじゅ仕様燃料に与え得る最大発熱量は破損しきい値を十分上回っている。

以上、TREAT 実験及び CABRI 実験との比較によると燃料の破損しきい値は、燃料の仕様、加熱条件等によりかなり異なる事も考えられるが、NSRR 実験では燃料破損に必要な発熱条件

を達成する事は可能であると考えられる。ただし、表 11 に示した様に燃料の仕様によっては、あまり大きな発熱量は得られない場合もあるので、そうした場合には、中性子経済を向上させるための実験カプセルの改良、例えばポリエチレン減速材の採用等を検討する必要があろう。また、7 本バンドル実験は主として流量喪失 (LOF) 条件での燃料損傷挙動の究明を目的として行われることになる。

NSRR は昭和64年度に行なった改造により、図 32 に示す様な多様な原子炉の運転が可能となっている。台形パルス運転を行いつつ流量を減少させる事により LOF 実験も可能であるが、原子炉を 10 MW 運転した場合のもんじゅ仕様燃料 (Pu 富化度 30 %) のピーク線出力密度は約 470 W/cm と最大発熱領域の定常運転並であるので、定常運転を模擬出来る時間は 10 秒程度に制限される。また、定常運転状態から TOP 実験では、図 32 に示す合成パルス運転 (下から 2 番目) を行う事になるが、NSRR 炉心の積分出力が 110 MWs に制限されているため定出力部が長くなると十分なパルス運転が行えなくなる。このため、NSRR 実験において定常運転での燃料棒の温度分布を模擬するためには、冷却材流量を下げ、実験燃料の線出力 (つまり NSRR 炉出力) を落とした状態で定常運転時に近い温度分布を達成する事も考慮する必要がある。こうした実験時の燃料挙動を定量的に推定するためには、今回の評価で得られた発熱量及びその分布を入力として伝熱計算を行い、主々の原子炉運転パターン及び冷却材条件における燃料の温度挙動について、実験マトリックスと対応させてゆく必要がある。

## 5. 結論

NSRR 高速炉燃料実験で計画されているナトリウムカプセル等の実験物を想定した炉心内中性子輸送計算を行い、同実験で使用が予定されている種々の実験燃料の発熱挙動を評価した。また同時に、減速材や構造材の組成や厚さといった、実験物の設計上のパラメータが実験燃料の発熱量に及ぼす効果を定量的に評価した。

計算の結果、標準的なナトリウムカプセル (水素化ジルコニウム減速材 40 mm 厚を使用、内外カプセルはステンレス鋼製でそれぞれ 4 mm, 3 mm 厚) を使用して、もんじゅ仕様の燃料 (被覆管外径 6.5 mm, スタック長 380 mm, プルトニウム富化度 30 %) を NSRR においてパルス照射した場合、炉心積分出力が 100 MWs となる単一パルス運転を行う事により瞬時に 525 cal/g (2.2 kJ/g) のピーク発熱量を実験燃料に与える事が判明した。同発熱量は、米国の TRE AT 炉やフランスの CABRI 炉で行われた実験の結果から判断すると燃料を破損させるに十分な発熱量であると考えられる。出力 10 MW の台形パルス運転を行なった場合、先述のもんじゅ仕様燃料ではピーク線出力約 470 W/cm が達成され、最大出力領域の定常運転条件が模擬出来るものと考えられる。しかし、台形及び合成パルス運転では NSRR 炉心の積分出力は 110 MWs に制限されるため、10 MW 運転は最長でも 10 秒程度である。この件から、定常運転状態からの過出力事故を模擬した実験で行うためには、実験物の中性子経済の向上を図る事や、冷却材流量と線出力を落とした条件で定常状態に近い燃料温度状態を達成し、定常状態を模擬するために費や

を達成する事は可能であると考えられる。ただし、表 11 に示した様に燃料の仕様によっては、あまり大きな発熱量は得られない場合もあるので、そうした場合には、中性子経済を向上させるための実験カプセルの改良、例えばポリエチレン減速材の採用等を検討する必要があろう。また、7 本バンドル実験は主として流量喪失 (LOF) 条件での燃料損傷挙動の究明を目的として行われることになる。

NSRR は昭和64年度に行なった改造により、図 32 に示す様な多様な原子炉の運転が可能となっている。台形パルス運転を行いつつ流量を減少させる事により LOF 実験も可能であるが、原子炉を 10 MW 運転した場合のもんじゅ仕様燃料 (Pu 富化度 30 %) のピーク線出力密度は約 470 W/cm と最大発熱領域の定常運転並であるので、定常運転を模擬出来る時間は 10 秒程度に制限される。また、定常運転状態から TOP 実験では、図 32 に示す合成パルス運転 (下から 2 番目) を行う事になるが、NSRR 炉心の積分出力が 110 MWs に制限されているため定出力部が長くなると十分なパルス運転が行えなくなる。このため、NSRR 実験において定常運転での燃料棒の温度分布を模擬するためには、冷却材流量を下げ、実験燃料の線出力 (つまり NSRR 炉出力) を落とした状態で定常運転時に近い温度分布を達成する事も考慮する必要がある。こうした実験時の燃料挙動を定量的に推定するためには、今回の評価で得られた発熱量及びその分布を入力として伝熱計算を行い、主々の原子炉運転パターン及び冷却材条件における燃料の温度挙動について、実験マトリックスと対応させてゆく必要がある。

## 5. 結論

NSRR 高速炉燃料実験で計画されているナトリウムカプセル等の実験物を想定した炉心内中性子輸送計算を行い、同実験で使用が予定されている種々の実験燃料の発熱挙動を評価した。また同時に、減速材や構造材の組成や厚さといった、実験物の設計上のパラメータが実験燃料の発熱量に及ぼす効果を定量的に評価した。

計算の結果、標準的なナトリウムカプセル (水素化ジルコニウム減速材 40 mm 厚を使用、内外カプセルはステンレス鋼製でそれぞれ 4 mm, 3 mm 厚) を使用して、もんじゅ仕様の燃料 (被覆管外径 6.5 mm, スタック長 380 mm, プルトニウム富化度 30 %) を NSRR においてパルス照射した場合、炉心積分出力が 100 MWs となる単一パルス運転を行う事により瞬時に 525 cal/g (2.2 kJ/g) のピーク発熱量を実験燃料に与える事が判明した。同発熱量は、米国の TRE AT 炉やフランスの CABRI 炉で行われた実験の結果から判断すると燃料を破損させるに十分な発熱量であると考えられる。出力 10 MW の台形パルス運転を行なった場合、先述のもんじゅ仕様燃料ではピーク線出力約 470 W/cm が達成され、最大出力領域の定常運転条件が模擬出来るものと考えられる。しかし、台形及び合成パルス運転では NSRR 炉心の積分出力は 110 MWs に制限されるため、10 MW 運転は最長でも 10 秒程度である。この件から、定常運転状態からの過出力事故を模擬した実験で行うためには、実験物の中性子経済の向上を図る事や、冷却材流量と線出力を落とした条件で定常状態に近い燃料温度状態を達成し、定常状態を模擬するために費や

させる炉心の積分出力を小さく保つことなどの工夫が必要となる。NSRR 高速炉燃料実験のより詳しい計画立案のためには、本解析で得られた発熱挙動をベースとして、燃料棒の温度挙動のスコーピング計算等を行う事が必要と考えられる。

## 参 考 文 献

- (1) 傍島眞, 更田豊志, 笹島栄夫, 山崎利, 能丸博磁, 中村武彦, 藤城俊夫「高速炉の事故時燃料挙動に関する研究の現状とNSRRにおける計画」, JAERI-M 88-158, 1988.
- (2) 半田宗男, 鈴木康文「高速炉用ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料の開発現状」日本原子力学会誌 (1984) Vol. 26 No. 1.
- (3) Keiichiro Tsuchihashi Yukio Ishiguro, Kunio Kaneko and Masaru Ido, "Revised SRAC System", JAERI 1302, 1986.
- (4) NSRR 管理室, 反応度安全研究室「NSRR 臨界及び特性試験報告 (II, 零出力試験)」, JAERI-M 6791, 1976.
- (5) 柳原敏, 鈴木敏夫 「NSRR 実験における特殊燃料（破壊力測定, ガドリニア入り, ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料）の発熱量評価」, JAERI-M 85-208, 1986.
- (6) 石森富太郎編 「原子炉工学講座3=原子炉物理」, 培風館.
- (7) A, G, Croff "ORIGEN2-A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depiction Code", ORNL-5621.
- (8) 石島清見, 私信.
- (9) R. W. Wright et al., "Summary of Autoclave TRWAT Test on Molten-Fuel Coolant Interaction", CONF-740401, Proc. Fast Reactor Safety Meeting, April 2-4, 1974 Beverly Hills, California USA.
- (10) L. W. Deitrich et al., "Summary and Evaluation of Fuel Dynamics Transient Overpower Experiment : Status 1974", ANL-44-44.
- (11) Kussmaul, G. et al., "The CABRI Project-Overall Status and Achievement", Proc. Conf. on Sci. Technol. of Fast Reactor Safety, Guernsey, Vol. 1, (1986), 103-108.
- (12) 稲辺輝雄ら, 「改良型パルス運転のためのNSRR 計測制御系統施設の安全設計」JAERI-M 88-113 (1988年6月)

させる炉心の積分出力を小さく保つことなどの工夫が必要となる。NSRR 高速炉燃料実験のより詳しい計画立案のためには、本解析で得られた発熱挙動をベースとして、燃料棒の温度挙動のスコーピング計算等を行う事が必要と考えられる。

## 参 考 文 献

- (1) 傍島眞, 更田豊志, 笹島栄夫, 山崎利, 能丸博磁, 中村武彦, 藤城俊夫「高速炉の事故時燃料挙動に関する研究の現状とNSRRにおける計画」, JAERI-M 88-158, 1988.
- (2) 半田宗男, 鈴木康文「高速炉用ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料の開発現状」日本原子力学会誌 (1984) Vol. 26 No. 1.
- (3) Keiichiro Tsuchihashi Yukio Ishiguro, Kunio Kaneko and Masaru Ido, "Revised SRAC System", JAERI 1302, 1986.
- (4) NSRR 管理室, 反応度安全研究室「NSRR 臨界及び特性試験報告 (II, 零出力試験)」, JAERI-M 6791, 1976.
- (5) 柳原敏, 鈴木敏夫 「NSRR 実験における特殊燃料（破壊力測定, ガドリニア入り, ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料）の発熱量評価」, JAERI-M 85-208, 1986.
- (6) 石森富太郎編 「原子炉工学講座 3 = 原子炉物理」, 培風館.
- (7) A, G, Croff "ORIGEN2-A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depiction Code", ORNL-5621.
- (8) 石島清見, 私信.
- (9) R. W. Wright et al., "Summary of Autoclave TRWAT Test on Molten-Fuel Coolant Interaction", CONF-740401, Proc. Fast Reactor Safety Meeting, April 2-4, 1974 Beverly Hills, California USA.
- (10) L. W. Deitrich et al., "Summary and Evaluation of Fuel Dynamics Transient Overpower Experiment : Status 1974", ANL-44-44.
- (11) Kussmaul, G. et al., "The CABRI Project-Overall Status and Achievement", Proc. Conf. on Sci. Technol. of Fast Reactor Safety, Guernsey, Vol. 1, (1986), 103-108.
- (12) 稲辺輝雄ら, 「改良型パルス運転のためのNSRR 計測制御系統施設の安全設計」JAERI-M 88-113 (1988年6月)

表1 NSRR の特性

(1)	<u>Reactor Type;</u>	Modified TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor)
(2)	<u>Reactor Vessel;</u>	3.6 <sup>m</sup> (wide) × 4.5 <sup>m</sup> (long) × 9 <sup>m</sup> (deep) open pool
(3)	<u>Fuel;</u>	
	Fuel type	12 wt% U-ZrH fuel
	Fuel enrichment	20 wt% U-235
	Clad material	Stainless steel
	Fuel diameter	3.56 cm
	Clad diameter	3.76 cm O.D.
	Length of fuel section	38 cm
	Number of fuel rods	157 (including 8 fuel-followed control rods)
	Equivalent core diameter	62 cm
(4)	<u>Control Rods;</u>	
	Number	8 (including 2 safety rods)
	Type	Fuel followered type
	Poison material	Natural B <sub>4</sub> C
	Rod drive	Rack and pinion drive
(5)	<u>Transient Rods;</u>	
	Number	2 fast transient rods and 1 adjustable transient rod
	Type	Air followered type
	Poison material	92% enriched B <sub>4</sub> C
	Rod drive	Fast : Pneumatic Adjustable: Rack and pinion & Pneumatic
(6)	<u>Core Performance;</u>	
a)	Steady state operation	
	Steady state power	300 KW
b)	Pulse operation	
	Max. peak power	21,100 MW
	Max. burst energy	117 MW-sec
	Max. reactivity insertion	3.4% Δk (\$4.67)
	Min. period	1.17 msec
	Pulse width	4.4 msec (1/2 peak power)
	Neutron life time	30 μsec
(7)	<u>Experiment Tube;</u>	
	Inside diameter	22 cm

表2 セル計算および炉心計算時の中性子エネルギー群構造

107G Library		61群	9群		
Group	Upper energy(eV)	セル	炉心		
1	$1.000 \times 10^7$				
2	$7.7880 \times 10^6$	1			
3	6.0653				
4	4.7237				
5	3.6788	2			
6	2.8650				
7	2.2313				
8	1.7377	3	1		
9	1.3534				
10	1.0540				
11	$8.2085 \times 10^5$	4			
12	6.3928				
13	4.9787	5			
14	3.8774				
15	3.0197	6			
16	2.3518				
17	1.8316				
18	1.4264	7			
19	1.1109				
20	$8.6517 \times 10^4$	8			
21	6.7379				
22	5.2475				
23	4.0868				
24	3.1828	9			
25	2.4788		2		
26	1.9305				
27	1.5034	10			
28	1.1709				
29	$9.1188 \times 10^3$				
30	7.1017	11			
31	5.5308				
32	4.3074				
33	3.3546	12			
34	2.6126				
35	2.0347				
36	1.5846	13			
37	1.2341				
38	$9.6112 \times 10^2$				
39	7.4852	14			
40	5.8295				
41	4.5400				
42	3.5358	15			
43	2.7536				
44	2.1445				
45	1.6702	16	3		
46	1.3007				
47	1.0130				
48	$7.8893 \times 10^1$	17			
49	6.1442				
50	4.7851				
51	3.7267	18			
52	2.9023				
53	2.2603				
54	1.7603	19			
55	1.3710				

107G Library		61群	9群		
Group	Upper energy(eV)	セル	炉心		
56	$1.0677 \times 10^1$				
57	8.3153			20	
58	6.4760				
59	5.0435				
60	3.9279		21		
61	3.0590				
62	2.3824				
63	1.8554		22	4	
64	1.6374				
65	1.4450				
66	1.2752		23		
67	1.1254				
68	$9.9312 \times 10^{-1}$				
69	8.7642		24		
70	7.7344				
71	6.8256		25	1	
72	6.0236		26	2	
73	5.3158		27	3	
74	4.6912		28	4	
75	4.1399		29	5	
76	3.8926		30	6	
77	3.6528		31	7	
78	3.4206		32	8	
79	3.1961		33	9	
80	2.9792		34	10	
81	2.7699		35	11	
82	2.5683		36	12	
83	2.3742		37	13	
84	2.1878		38	14	
85	2.0090		39	15	
86	1.8378		40	16	
87	1.6743		41	17	
88	1.5183		42	18	
89	1.3700		43	19	
90	1.2293		44	20	
91	1.0963		45	21	
92	$9.7080 \times 10^{-2}$		46	22	
93	8.5397		47	23	
94	7.4276		48	24	
95	6.4017		49	25	
96	5.4520		50	26	
97	4.5785		51	27	
98	3.7813		52	28	
99	3.0602		53	29	
100	2.4154		54	30	
101	1.8467		55	31	
102	1.3543		56	32	
103	$9.3805 \times 10^{-3}$		57	33	
104	5.9804		58	34	
105	3.3423		59	35	
106	1.4663		60	36	
107	$3.5238 \times 10^{-4}$		61	37	

表3 NSRR炉心の余剰反応度の評価  
(水素化ジルコニウム燃料体中の水素解離による効果)

水素解離	項目	計算値 (C)	実測値 (E)	$(C/E - 1) \times 100$
なし	Keff	1.0692	1.0622	0.66
	ΔK(\$)	9.479	8.52	11.25
10%解離	Keff	1.06252	1.0622	0.03
	ΔK(\$)	8.564	8.521	0.51

表4 調整棒位置による反応度価値の評価  
(B<sub>4</sub>C密度を実際の1.02%とした場合)

調整棒位置 (cm)	Keff (計算値)	調整棒反応度価値 ΔK	
		計算値	実測値
38.1	1.06252	—	
23.7	1.04192	0.0206 (2.82\$)	(2.85\$)
12.3	1.00424	0.0583 (7.99\$)	(7.00\$)

表5 大気圧水カプセル実験に使用された実験燃料の諸元

	実験番号			
	206-32	701-8	702-2	260-1
燃料ペレット				
外径 (mm)	9.29	9.31	12.40	9.29
密度 (% TD)	95	95.4	95.0	95
Pu O <sub>2</sub> / UO <sub>2</sub> (重量比)	0 / 100	6.33 / 93.67	10 / 90	0 / 100
235 U 濃縮度	10	0.71	10	20
プルトニウムの組成 (%)				
238 Pu		0.8	0.4	
239 Pu		65.0	73.3	
240 Pu		21.7	18.4	
241 Pu		7.3	6.3	
242 Pu		3.0	1.7	
241 Am		2.2	3.1	
スタック長 (mm)	135	110	117	135
天然UO <sub>2</sub> エンド	0	22	22	0
ペレット長 (mm)				
被覆管				
材質	Zircaloy 4	Zircaloy 4	Zircaloy 4	Zircaloy 4
外径 (mm)	10.72	10.72	14.50	10.72
肉厚 (mm)	0.62	0.62	0.9	0.62
全長 (mm)	265	230	212	265
プレナムガス	He 気圧	He 気圧	He 気圧	He 気圧

表 6 「もんじゅ」仕様実験燃料棒の諸元

「もんじゅ」仕様 短尺燃料棒	
燃料ペレット	
外径 (mm)	5.41
密度 (% TD)	0.95
$^{235}\text{U}$ 濃縮度	10, 20
$\text{PuO}_2/\text{UO}_2$	0 / 100
スタック長 (mm)	135
天然 $\text{UO}_2$ エンド	0
ペレット長 (mm)	
被覆管	
材質	タイプ316ステンレス鋼
外径 (mm)	6.50
肉厚 (mm)	0.47
全長 (mm)	265
プレナムガス	He 1気圧

表 7 中性子輸送計算における Sn 分点の効果

Sn 分点	実効増倍率		実験燃料発熱量	
	$k_\infty$	計算値 / 実測値	Cal/g• $\text{UO}_2$	計算値 / 実測値
4	1.0291	1.31	230	0.89
8	1.0265	1.19	235	0.91
16	1.0261	1.18	236	0.91

表8 中性子輸送計算におけるメッシュ効果の評価

ケ ー ス	径 方 向 メ ッ シ ュ 数													反応度 (差)	発熱量 (比)	
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭		
1	4	1	6	1	1	4	1	3	1	1	1	2	2	2	5.02 (0.6)	413 (0.974)
2	4	1	6	1	1	4	1	3	1	1	1	2	4	8	5.26 (0.84)	412 (0.971)
3	4	1	6	1	1	4	1	3	1	1	1	2	8	16	5.27 (0.85)	411 (0.969)
4	4	1	6	1	1	4	1	20	1	1	1	12	2	2	5.39 (0.97)	413 (0.974)
5	4	1	12	1	1	4	1	3	1	1	1	2	2	2	5.03 (0.61)	421 (0.992)
6	4	1	24	1	1	4	1	3	1	1	1	2	2	2	5.03 (0.61)	423 (0.997)
7	4	1	6	1	1	4	1	3	1	1	1	2	2	2	5.04 (0.62)	413 (0.974)
Z 方向試験燃料部				4	から	8	メッシュに変更									
8	4	1	6	1	1	4	4	10	1	1	1	3	4	8	5.64 (1.22)	412 (0.971)
9	4	1	12	1	2	8	4	10	1	1	1	3	4	8	5.67 (1.25)	419 (0.988)
10	4	1	12	1	2	8	1	3	1	1	1	2	4	8	5.29 (0.87)	419 (0.988)
11	8	1	12	1	2	8	1	3	1	1	1	2	4	8	5.29 (0.87)	419 (0.988)
12	4	1	24	1	1	4	1	20	1	1	1	12	2	2	5.40 (0.98)	422 (0.995)
13	4	1	12	1	1	4	1	3	1	1	1	2	4	8	5.26 (0.84)	419 (0.988)

①：試験燃料 (0.4645 : 0.116)

②：Gap+Clad (0.0715 : 0.0715)

③：カプセル内水 (5.264 : 0.877)

④：カプセル内水 (0.2 : 0.2)

⑤：カプセル容器 (0.7 : 0.7)

⑥：空気 (4.095 : 1.02375)

⑦：Air+Al+SUS+H<sub>2</sub>O (2.6185 : 2.6185)

⑧：炉心燃料 (10.3368 : 3.4456)

⑨：炉心燃料 (0.2038 : 0.2038)

⑩：制御棒 (上部: B<sub>4</sub>C 下部: 炉心燃料) (0.6015 : 0.6015)

⑪：トランジエント棒 (空気フォロワー) (0.2953 : 0.2953)

⑫：炉心燃料 (6.1 : 3.05)

⑬：水 (10.0 : 5.0)

⑭：水 (20.0 : 10.0)

• \* : 変更領域  
 • ( ) 実験値との比較  
 実験値: 反応度 4.42 \$  
 発熱量 424  
 (cal/g·UO<sub>2</sub>)

(領域幅 cm : 基準ケースメッシュ幅 cm)

表9 大気圧水カプセル実験の発熱量評価計算の結果と実測値との比較

実験番号	発熱量 (cal/g Fuel)			炉出力 (実測値) (MW s)	調整棒 位置 (mm)	実験燃料ペレット		実験カプセル壁厚		炉心積分出力 100 MW S 当たりの発熱量	
	計算値	実測値	計算値			組成	外径 (mm)	内カプセル (mm)	外カプセル (mm)	計算値	実測値
			実測値							(cal/g)	(cal/g)
E 206-32	258	257	1.00	58.9	225	UO <sub>2</sub> 20% E	9.29	0	7	438	436
E 701-8	149	145	1.03	52.0	219	Pu-UO <sub>2</sub> (6.8% Pu)	9.31	4	7	287	279
E 702-2	141	129	1.09	47.7	210	Pu-UO <sub>2</sub> (10% Pu)	12.4	4	7	296	270
E 260-1	131	148	0.89	27.6	190	UO <sub>2</sub> 20% E	9.29	2.4	7	475	536

表10 R - θ 2次元体系での7本バンドル発熱量評価結果

パックリング (cm)	実験燃料発熱量(炉心積分出力100 MW S当り)				中心／外側発熱比	
	計算値(cal/g)		実験値との比		計算	実験
	中心	外側	中心	外側		
9.525	175	154	0.45	0.43	1.14	1.08
19.05	270	235	0.70	0.66	1.15	1.08
38.1	327	286	0.84	0.80	1.14	1.08
76.2	351	307	0.91	0.86	1.14	1.08
∞	364	318	0.94	0.89	1.14	1.08

表11 N S R R 高速炉燃料実験における各種燃料の推定発熱量  
(炉心積分出力 100 MWS 当り)

実験 燃 料			発熱ピーグ部での半径方向平均発熱量
種類	濃縮度・Pu富化度 (w/o)	本数	cal/g·fuel kJ/g·fuel
UO <sub>2</sub>	5	単ピン	155 0.648
	10	"	264 1.10
	15	"	344 1.44
	20	"	431 1.81
	30	"	517 2.16
(Pu-U)O <sub>2</sub>	18	"	433 1.81
	24	"	487 2.04
	30	"	525 2.20
照射済 (燃焼度 $5.2 \times 10^4$ MWd/t)	初期 22	"	380 1.59
(Pu-U)C	30	"	462 1.94
(Pu-U)N	30	"	439 1.85
U-19Pu-10Zr	19	"	759 3.16
UO <sub>2</sub>	20	内 264	1.11
	10	外 195	0.82
7 本			

表12 燃焼済「もんじゅ」仕様燃料の原子数密度

燃焼計算はORIGEN-IIコードにより行い、生成されたFP核種は、  
巨視的中性子吸収面積の大きいものを選んで発熱計算に用いた。

元 素	原 子 数 密 度 [cm <sup>-3</sup> ]	
	燃 焼 前	燃 焼 後 ( $5.2 \times 10^4$ MW D/t)
ア ク チ ニ ド 元 素	<sup>235</sup> U	$5.005 \times 10^{19}$ ( 0.0024 )
	<sup>238</sup> U	$1.617 \times 10^{22}$ ( 0.7755 )
	<sup>239</sup> Pu	$2.694 \times 10^{21}$ ( 0.1292 )
	<sup>240</sup> Pu	$1.109 \times 10^{21}$ ( 0.0532 )
	<sup>241</sup> Pu	$5.860 \times 10^{20}$ ( 0.0281 )
	<sup>242</sup> Pu	$1.835 \times 10^{20}$ ( 0.0088 )
	<sup>241</sup> Am	$5.839 \times 10^{19}$ ( 0.0028 )
核 分 裂 生 成 物	<sup>16</sup> O	$4.171 \times 10^{20}$
	<sup>95</sup> Mo	$4.860 \times 10^{19}$
	<sup>105</sup> Pd	$5.055 \times 10^{19}$
	<sup>109</sup> Ag	$1.837 \times 10^{19}$
	<sup>113</sup> Cd	$2.773 \times 10^{18}$
	<sup>131</sup> Xe	$4.156 \times 10^{19}$
	<sup>133</sup> Cs	$6.837 \times 10^{18}$
	<sup>135</sup> Cs	$7.562 \times 10^{19}$
	<sup>139</sup> La	$6.116 \times 10^{19}$
	<sup>141</sup> Pa	$5.651 \times 10^{19}$
	<sup>143</sup> Nd	$4.52 \times 10^{19}$
	<sup>145</sup> Nd	$3.225 \times 10^{19}$
	<sup>147</sup> Sm	$9.684 \times 10^{18}$
	<sup>148</sup> Nd	$1.869 \times 10^{19}$
	<sup>149</sup> Sm	$1.35 \times 10^{19}$
	<sup>154</sup> Gd	$1.108 \times 10^{17}$
	<sup>155</sup> Gd	$6.203 \times 10^{17}$
	<sup>156</sup> Gd	$1.911 \times 10^{18}$
	<sup>157</sup> Gd	$9.715 \times 10^{17}$
	<sup>158</sup> Gd	$9.899 \times 10^{17}$
	<sup>160</sup> Gd	$2.881 \times 10^{17}$

表13 混合炭化物燃料および混合窒化物燃料の仕様およびNSRR実験時に予測される発熱量(炉心積分出力100MWS当たり)

仕様及び評価項目	炭化物燃料		窒化物燃料	
	標準燃料	太径燃料	標準燃料	太径燃料
燃料	Pu 富化度 (w/o)	30		30
	Pu 組成 ( $^{239}\text{Pu}$ : $^{240}\text{Pu}$ : $^{241}\text{Pu}$ )	70 : 25 : 5	70 : 25 : 5	
	$^{235}\text{U}$ 濃縮度 (w/o)	0.3		0.3
	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	11.54 (85% TD)	12.17 (85% TD)	
	化厚形	(Pu, U) C <sub>1.0</sub>	(Pu, U) N <sub>1.0</sub>	
	ペレット外形 (mm)	5.41	8.2	5.41
	スタック長 (mm)	380		380
	被覆材	SUS 316		SUS 316
被覆管	外径 (mm)	6.5	9.4	6.5
	内径 (mm)	5.56	8.4	5.56
解析結果	ギャップガス	He		He
	平均発熱量 (kJ/g)	1.58	1.17	1.50
	(cal/g)	376	279	357
	軸方向ピーク部での発熱量 (kJ/g)	1.95	1.44	1.85
	(cal/g)	464	344	441
	軸方向ピーキング係数	1.23	1.23	1.23

表14 金属燃料の仕様(EBR-II燃料相当)

仕 様		金 属 燃 料
燃 料	Pu 富化度 (w/o)	19
	Pu組成 ( $^{239}\text{Pu}$ : $^{240}\text{Pu}$ : $^{241}\text{Pu}$ )	70 : 25 : 5
	$^{235}\text{U}$ 濃縮度 (w/o)	57
	密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	10.8 (75% TD)
	化 厚 形	U-19Pu-10Zr
	ペレット外径	4.32
被 覆 管	ス タ ッ ク 長	380
	被 覆 材	316 SS
	外 径 (mm)	5.84
	内 径 (mm)	5.078
被 覆 管	ギャップボンド材	Na

表15 燃料径による実験燃料の発熱量の変化

仕様・結果	燃料タイプ	常陽 MkII	もんじゅ	C A B R I	Super Phenix
仕 様	被覆管 外径 (mm)	5.5	6.5	7.6	8.65
	内径 (mm)	4.8	5.6	6.6	7.25
	内厚 (mm)	0.35	0.45	0.5	0.7
	材料	316	316	316	316
計 算 結 果	ペレット直徑 (mm)	4.6	5.4	6.4	7.0
	平均発熱量*(kJ/g) (cal/g)	2.02 481	1.79 427	1.58 376	1.46 347
	発熱ピーク部 (kJ/g)	2.45	2.21	1.95	1.80
	発 热 量*(cal/g)	583	527	465	429
計 算 結 果	軸方向ピーキング係数	1.23	1.23	1.23	1.23
	半径方向ピーキング係数	1.55	1.7	1.75	1.75
	平均線出力** (W/cm)	313	382	474	524
	ピーク線出力** (W/cm)	385	470	583	645

\* 炉心積分出力 100 MWs 当り

\*\* 炉心出力 10 MW 時

表16 7本バンドル体系での実験燃料の発熱量(炉心積分出力100MWS当り)

	体 系 2		体 系 1	
	中心燃料(20% E)	外側燃料(20% E)	中心 (20% E)	外側 (10% E)
軸方向ピーク部 1) での発熱量 KJ/g (cal/g)	0.86 (204)	1.16 (275)	1.11 (265)	0.82 (195)
中心燃料 外側燃料		0.74		1.36
半径方向ホット スポットの発熱 係数 2)	1.13	1.51	1.11	1.25
半径方向コール ドスポットの発 熱係数 3)	0.79	0.78	0.83	0.88

1) 断面平均の発熱量

2) ホットスポットでの発熱量／断面平均の発熱量

3) コードスポットでの発熱量／断面平均の発熱量

表17 ナトリウムカプセルを用いて7本パンドル燃料を照射した場合の中心燃料の発熱分布  
 (中心燃料20%濃縮, 外側燃料10%濃縮) 発熱量は炉心積分出力 100 MWS 当り, 単位は J/cc。

体 系 1	R 方 向 距 離 (cm)			平 均 值		
	3.381E-02	1.014E-01	1.691E-01	2.367E-01	J / cc	
$\Theta$ 方 向 角 度 (°)	1.40	4.626E+04	5.111E+04	5.180E+04	5.627E+04	5.328E+04
	4.18	4.617E+04	5.076E+04	5.184E+04	5.689E+04	5.349E+04
	6.95	4.599E+04	5.013E+04	5.175E+04	5.789E+04	5.377E+04
	9.25	4.581E+04	4.946E+04	5.154E+04	5.870E+04	5.393E+04
	11.12	4.565E+04	4.884E+04	5.128E+04	5.913E+04	5.390E+04
	12.85	4.550E+04	4.820E+04	5.102E+04	5.930E+04	5.377E+04
	14.47	4.538E+04	4.753E+04	5.080E+04	5.931E+04	5.357E+04
	15.98	4.528E+04	4.686E+04	5.063E+04	5.922E+04	5.335E+04
	17.39	4.520E+04	4.624E+04	5.051E+04	5.901E+04	5.309E+04
	18.76	4.512E+04	4.568E+04	5.033E+04	5.874E+04	5.281E+04
	20.12	4.504E+04	4.526E+04	5.002E+04	5.846E+04	5.251E+04
	21.71	4.495E+04	4.492E+04	4.959E+04	5.797E+04	5.209E+04
	23.47	4.485E+04	4.467E+04	4.914E+04	5.726E+04	5.159E+04
	25.31	4.476E+04	4.452E+04	4.881E+04	5.655E+04	5.114E+04
	27.18	4.470E+04	4.441E+04	4.864E+04	5.597E+04	5.081E+04
	29.05	4.466E+04	4.436E+04	4.858E+04	5.568E+04	5.065E+04
平 均	4.542E+04	4.745E+04	5.052E+04	5.773E+04	5.328E+04	5.273E+04

表18 ナトリウムカプセルを用いて7本バンドル燃料を照射した場合の外側実験燃料の発熱分布  
 (中心燃料20%濃縮、外側燃料10%濃縮) 発熱量は炉心積分出力 100 MWS 当り、単位は  $J/cm^2$ 。  
 表中下段の値は外側燃料平均値との比

体 系 1	$\Theta$	θ 方 向 角 度 (°)										
		1.39	4.17	6.95	9.27	11.12	12.86	14.48	15.99	17.39	18.77	20.12
R	0.495	$3.488E+04$	$3.493E+04$	$3.524E+04$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.8966911	0.8980954	0.9065401	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.505	$3.453E+04$	$3.463E+04$	$3.498E+04$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.8878015	0.8902825	0.8993759	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.515	$3.435E+04$	$3.447E+04$	$3.477E+04$	$3.521E+04$	$3.570E+04$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.8831124	0.8863229	0.8939407	0.9051800	0.9179441	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.525	$3.428E+04$	$3.439E+04$	$3.460E+04$	$3.494E+04$	$3.539E+04$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.8812943	0.8840522	0.8895167	0.8983060	0.9099399	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.545	$3.416E+04$	$3.427E+04$	$3.450E+04$	$3.474E+04$	$3.510E+04$	$3.547E+04$	$3.602E+04$	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.8782964	0.8812076	0.8869782	0.8932756	0.9024894	0.9118572	0.9260927	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F	0.565	$3.412E+04$	$3.414E+04$	$3.439E+04$	$3.458E+04$	$3.490E+04$	$3.528E+04$	$3.572E+04$	$3.634E+04$	$3.710E+04$	0.0	0.0
	0.8771574	0.8842677	0.8877690	0.8920034	0.8972859	0.9070368	0.9184765	0.9343560	0.9539374	0.0	0.0	0.0
	0.590	$3.404E+04$	$3.419E+04$	$3.443E+04$	$3.466E+04$	$3.494E+04$	$3.534E+04$	$3.575E+04$	$3.624E+04$	$3.696E+04$	0.0	0.0
	0.8763226	0.8790889	0.8851687	0.8911951	0.8984379	0.9084758	0.9192494	0.9317105	0.9503071	0.0	0.0	0.0
	0.635	$3.425E+04$	$3.444E+04$	$3.468E+04$	$3.499E+04$	$3.524E+04$	$3.560E+04$	$3.602E+04$	$3.650E+04$	$3.707E+04$	$3.770E+04$	$3.849E+04$
	0.8806255	0.8853572	0.8917559	0.8997244	0.9059252	0.9143839	0.9261279	0.9383676	0.9531003	0.9692613	0.9895871	0.9951003
	0.685	$3.466E+04$	$3.487E+04$	$3.517E+04$	$3.547E+04$	$3.583E+04$	$3.623E+04$	$3.669E+04$	$3.720E+04$	$3.775E+04$	$3.846E+04$	$3.949E+04$
	0.8911759	0.8965228	0.9041630	0.9120595	0.9211918	0.9315116	0.9434010	0.9565048	0.9705461	0.9888878	1.0152740	1.0152740
	0.735	$3.534E+04$	$3.561E+04$	$3.595E+04$	$3.630E+04$	$3.671E+04$	$3.721E+04$	$3.778E+04$	$3.845E+04$	$3.904E+04$	$3.988E+04$	$4.109E+04$
	0.9086215	0.9154162	0.9252905	0.9332289	0.9439143	0.955746	0.9712653	0.9886219	1.0036993	1.0261156	1.0564213	1.0564213
D	0.785	$3.668E+04$	$3.688E+04$	$3.720E+04$	$3.759E+04$	$3.805E+04$	$3.844E+04$	$3.884E+04$	$3.931E+04$	$3.989E+04$	$4.040E+04$	$4.193E+04$
	0.9431280	0.9478058	0.9565160	0.9665642	0.9782624	0.9934363	1.0107307	1.0293779	1.0511656	1.0780649	1.1119347	1.1119347
	0.815	$3.765E+04$	$3.791E+04$	$3.817E+04$	$3.851E+04$	$3.898E+04$	$3.963E+04$	$4.036E+04$	$4.109E+04$	$4.223E+04$	$4.394E+04$	$4.564E+04$
	0.9679971	0.9747473	0.9813435	0.9901850	1.0020552	1.0188532	1.0375767	1.0565386	1.0857172	1.0	0.0	0.0
	0.838E+04	$3.860E+04$	$3.893E+04$	$3.939E+04$	$3.985E+04$	$4.056E+04$	$4.134E+04$	$4.206E+04$	$4.240E+04$	$4.340E+04$	$4.430E+04$	$4.532E+04$
	0.9867086	0.9925286	1.0010214	1.0126419	1.0244884	1.0427284	1.0629368	1.0814228	1.1157560	1.0	0.0	0.0
	0.865	$3.951E+04$	$3.969E+04$	$4.011E+04$	$4.070E+04$	$4.130E+04$	$4.211E+04$	$4.304E+04$	$4.408E+04$	$4.555E+04$	$4.708E+04$	$4.855E+04$
	1.0159197	1.0204840	1.0311623	1.0462847	1.0618687	1.0826578	1.1066809	1.13352111	1.1710930	1.0	0.0	0.0
	0.890	$4.046E+04$	$4.076E+04$	$4.126E+04$	$4.181E+04$	$4.247E+04$	$4.321E+04$	$4.441E+04$	$4.565E+04$	$4.685E+04$	$4.805E+04$	$4.925E+04$
	1.0401154	1.0479994	1.0609140	1.0750437	1.0920143	1.1109104	1.1417408	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(cm)	0.920	$4.194E+04$	$4.214E+04$	$4.273E+04$	$4.338E+04$	$4.431E+04$	$4.537E+04$	$4.673E+04$	$4.813E+04$	$4.953E+04$	$5.093E+04$	$5.233E+04$
	1.0782833	1.0835075	1.0986261	1.1153517	1.1392794	1.1665173	1.2015553	1.2015553	1.2015553	1.2015553	1.2015553	1.2015553
	0.945	$4.324E+04$	$4.337E+04$	$4.405E+04$	$4.478E+04$	$4.605E+04$	$4.665E+04$	$4.725E+04$	$4.785E+04$	$4.845E+04$	$4.905E+04$	$4.965E+04$
	1.1118202	1.1151333	1.1326017	1.1514301	1.1838913	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.960	$4.404E+04$	$4.430E+04$	$4.518E+04$	$4.623E+04$	$4.759E+04$	$4.895E+04$	$4.985E+04$	$5.075E+04$	$5.165E+04$	$5.255E+04$	$5.345E+04$
	1.1321592	1.138904	1.1615467	1.1886749	1.2235565	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.980	$4.549E+04$	$4.577E+04$	$4.672E+04$	$4.772E+04$	$4.872E+04$	$4.972E+04$	$5.072E+04$	$5.172E+04$	$5.272E+04$	$5.372E+04$	$5.472E+04$
	1.1695824	1.1767740	1.2012072	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1.000	$4.758E+04$	$4.779E+04$	$4.864E+04$	$4.954E+04$	$5.044E+04$	$5.134E+04$	$5.224E+04$	$5.314E+04$	$5.404E+04$	$5.494E+04$	$5.584E+04$
	1.22335610	1.2286930	1.2506256	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

AVERAGE POWER  $3.88951E+04$

表19 ナトリウムカプセルを用いて7本パンドル燃料を照射した場合の中心燃料の発熱分布  
 (中心燃料20%濃縮, 外側燃料20%濃縮) 発熱量は炉心積分出力 100 MWS 当り, 単位は J/cc。

体 系 2	R 方 向 距 離 (cm)				平 均 値	
	3.381E-02	1.014E-01	1.691E-01	2.367E-01	J/cc	Cal/cc
θ	1.47	3.674E+04	4.242E+04	4.086E+04	4.159E+04	4.121E+04
	4.18	3.655E+04	4.182E+04	4.111E+04	4.255E+04	4.159E+04
	6.95	3.627E+04	4.078E+04	4.110E+04	4.430E+04	4.214E+04
	9.25	3.600E+04	3.970E+04	4.077E+04	4.581E+04	4.247E+04
	11.12	3.576E+04	3.876E+04	4.031E+04	4.647E+04	4.243E+04
	12.85	3.553E+04	3.784E+04	3.983E+04	4.670E+04	4.219E+04
	14.47	3.534E+04	3.691E+04	3.941E+04	4.673E+04	4.189E+04
	15.98	3.519E+04	3.595E+04	3.914E+04	4.656E+04	4.154E+04
	17.39	3.507E+04	3.503E+04	3.901E+04	4.616E+04	4.115E+04
	18.76	3.496E+04	3.421E+04	3.880E+04	4.571E+04	4.072E+04
	20.12	3.484E+04	3.360E+04	3.835E+04	4.528E+04	4.028E+04
	21.71	3.469E+04	3.317E+04	3.765E+04	4.452E+04	3.963E+04
	23.47	3.453E+04	3.289E+04	3.691E+04	4.334E+04	3.882E+04
(°)	25.31	3.440E+04	3.275E+04	3.640E+04	4.208E+04	3.807E+04
	27.18	3.430E+04	3.264E+04	3.619E+04	4.101E+04	3.751E+04
	29.05	3.425E+04	3.258E+04	3.612E+04	4.050E+04	3.725E+04
	均	3.541E+04	3.691E+04	3.906E+04	4.405E+04	4.121E+04

表20 ナトリウムカプセルを用いて7本パンドル燃料を照射した場合の外側実験燃料の発熱分布  
 (中心燃料20%濃縮, 外側燃料20%濃縮) 発熱量は炉心積分出力 100 MW S 当り, 単位は J/cc。  
 表中下段の値は外側燃料平均値との比

体 系 2		θ 方 向 角 度 (°)							20.12	
		1.39	4.17	6.95	9.27	11.12	12.86	14.48	15.99	
R 方 向 距 離 (cm)	0.495	4.645E+04	4.669E+04	4.750E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.505	0.8391866	0.8435656	0.8581803	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.515	4.567E+04	4.661E+04	4.661E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.525	4.487E+04	4.510E+04	4.595E+04	4.720E+04	4.849E+04	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.535	0.8107274	0.8148460	0.8302878	0.8528712	0.8761402	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.545	4.450E+04	4.476E+04	4.539E+04	4.757E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.555	0.8039728	0.807773	0.8200744	0.8366104	0.8595624	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.565	4.391E+04	4.421E+04	4.486E+04	4.550E+04	4.664E+04	4.768E+04	4.926E+04	0.0	0.0
	0.575	0.7932857	0.7988510	0.8105580	0.8220627	0.8427400	0.8613749	0.8896662	0.0	0.0
	0.585	4.355E+04	4.359E+04	4.431E+04	4.486E+04	4.585E+04	4.688E+04	4.812E+04	4.997E+04	5.250E+04
前方	0.590	4.314E+04	4.346E+04	4.413E+04	4.477E+04	4.554E+04	4.673E+04	4.792E+04	4.927E+04	5.167E+04
	0.635	4.310E+04	4.364E+04	4.430E+04	4.514E+04	4.580E+04	4.677E+04	4.818E+04	4.959E+04	5.139E+04
	0.785	0.7786735	0.7883857	0.8003939	0.8156074	0.8274074	0.8449733	0.8704807	0.8960515	0.9285098
	0.685	4.378E+04	4.438E+04	4.509E+04	4.592E+04	4.695E+04	4.806E+04	4.949E+04	5.109E+04	5.266E+04
	0.735	4.519E+04	4.584E+04	4.691E+04	4.767E+04	4.888E+04	5.036E+04	5.197E+04	5.397E+04	5.597E+04
	0.835	0.8164715	0.8281786	0.8474610	0.8612704	0.8831121	0.9099253	0.9389158	0.9751690	1.0077009
	0.785	4.830E+04	4.876E+04	4.922E+04	5.084E+04	5.213E+04	5.390E+04	5.588E+04	5.815E+04	6.050E+04
	0.865	5.060E+04	5.146E+04	5.207E+04	5.314E+04	5.446E+04	5.636E+04	5.868E+04	6.110E+04	6.504E+04
	0.890	0.9142572	0.9298269	0.9407379	0.9610095	0.9839786	1.0182447	1.0602217	1.103648	1.1750937
	0.920	5.248E+04	5.318E+04	5.410E+04	5.551E+04	5.685E+04	5.902E+04	6.151E+04	6.373E+04	6.834E+04
( cm )	0.945	5.798E+04	5.890E+04	6.053E+04	6.220E+04	6.430E+04	6.648E+04	6.902E+04	7.2011414	7.2781076
	1.0475769	1.0642109	1.0935574	1.1237249	1.1617956	1.2011414	1.2781076	0.0	0.0	0.0
	0.960	6.227E+04	6.292E+04	6.481E+04	6.690E+04	7.007E+04	7.351E+04	7.811E+04	0.0	0.0
	0.980	7.333E+04	7.397E+04	7.723E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1.000	8.055E+04	8.104E+04	8.363E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		1.4553299	1.4642029	1.5110435	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

AVERAGE POWER 5.53480E+04

表21 ナトリウムカプセルを用いて3本バシンドル燃料(20%濃縮)を照射した場合の発熱量分布  
発熱量は炉心積分出力 100 MWS 当り、単位は  $J/cm^2$ 。また表中下段の値は平均値との比。

		$\theta$ 方 向 角 度 (°)															
		1.64	4.93	8.22	11.5	14.2	16.2	18.2	20.1	21.8	23.5	25.1	26.6	28.0	29.2	30.1	31.0
R	0.235	3.502E+04	1.475E+04	3.340E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	0.245	1.0221786	1.01455473	1.0175110	1.0335501	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	0.255	3.382E+04	3.375E+04	3.385E+04	3.435E+04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	0.265	0.9873154	0.9853066	0.9862100	1.0027714	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	0.275	3.309E+04	3.311E+04	3.304E+04	3.344E+04	3.359E+04	3.354E+04	3.352E+04	3.354E+04	3.352E+04							
	0.285	0.9668268	0.9668274	0.9668274	0.9668274	0.9668274	0.9668274	0.9668274	0.9668274	0.9668274	0.9668274	0.9668274	0.9668274	0.9668274	0.9668274	0.9668274	
	0.295	3.243E+04	3.247E+04	3.245E+04	3.278E+04	3.315E+04											
	0.305	0.9186285	0.9191443	0.9215444	0.9292031	0.9359203	0.9359203	0.9359203	0.9359203	0.9359203	0.9359203	0.9359203	0.9359203	0.9359203	0.9359203	0.9359203	
	0.315	3.089E+04	3.075E+04	3.075E+04	3.088E+04	3.116E+04											
	0.325	0.9018354	0.8975558	0.8970937	0.9013106	0.9095999	0.9095999	0.9095999	0.9095999	0.9095999	0.9095999	0.9095999	0.9095999	0.9095999	0.9095999	0.9095999	
F	0.235	2.999E+04	2.999E+04	2.999E+04	3.022E+04												
	0.245	0.87522603	0.8785185	0.8821647	0.89058707	0.9058707	0.9101045	0.9161996	0.9161996	0.9161996	0.9161996	0.9161996	0.9161996	0.9161996	0.9161996	0.9161996	
	0.255	2.8555E+04	2.8722E+04	2.8985E+04	2.929E+04	2.977E+04	3.023E+04	3.071E+04	3.122E+04	3.191E+04	3.276E+04	3.453E+04	3.673E+04	3.754E+04	3.754E+04	3.754E+04	
	0.265	0.83464782	0.84469795	0.8551296	0.86682358	0.88682358	0.9051296	0.9295999	0.9420270	0.9516640	0.95646087	0.9802252	1.00855440	1.0410241	1.0722648	1.1243616	1.1691979
	0.275	2.797E+04	2.822E+04	2.844E+04	2.884E+04	2.923E+04	2.963E+04	3.030E+04	3.102E+04	3.162E+04	3.240E+04	3.317E+04	3.394E+04	3.437E+04	3.518E+04	3.594E+04	
	0.285	0.8165288	0.8322376	0.83302035	0.8518379	0.85519814	0.85519819	0.85519819	0.85519819	0.85519819	0.85519819	0.85519819	0.85519819	0.85519819	0.85519819	0.85519819	
	0.295	2.747E+04	2.784E+04	2.814E+04	2.844E+04	2.884E+04	2.923E+04	2.963E+04	3.010E+04	3.102E+04	3.162E+04	3.240E+04	3.317E+04	3.394E+04	3.476E+04	3.56683022	
	0.305	0.8092155	0.82949858	0.84003043	0.8513703	0.86620695	0.87242666	0.87842666	0.88442666	0.89042666	0.89642666	0.90242666	0.90842666	0.91442666	0.92042666	0.92642666	
	0.315	2.684E+04	2.715E+04	2.741E+04	2.777E+04	2.813E+04	2.844E+04	2.874E+04	2.905E+04	2.936E+04	2.967E+04	3.008E+04	3.049E+04	3.097E+04	3.140E+04	3.190E+04	
	0.325	0.8031386	0.83546616	0.85417676	0.86797815	0.88679815	0.9051593	0.9296130	0.9420938	0.9542893	0.9662893	0.9872898	1.0082898	1.0318898	1.05544917	1.09229441	1.1225245
H	0.235	2.942E+04	2.954E+04														
	0.245	0.8195509	0.83622183	0.84715901	0.86368114	0.88215910	0.90215910	0.9215910	0.94065419	0.96065419	0.98065455	1.00965455	1.03100950	1.0477110	1.06591317	1.1120772	1.1713499
	0.255	2.802E+04	2.812E+04	2.824E+04	2.844E+04	2.864E+04	2.884E+04	2.904E+04	2.924E+04	2.944E+04	2.964E+04	2.984E+04	3.004E+04	3.024E+04	3.044E+04	3.064E+04	
	0.265	0.8092155	0.83098558	0.84003043	0.8513703	0.86620695	0.87242666	0.87842666	0.88442666	0.89042666	0.89642666	0.90242666	0.90842666	0.91442666	0.92042666	0.92642666	
	0.275	2.744E+04	2.774E+04	2.804E+04	2.834E+04	2.864E+04	2.894E+04	2.924E+04	2.954E+04	2.984E+04	3.014E+04	3.044E+04	3.074E+04	3.104E+04	3.134E+04	3.164E+04	
	0.285	0.8031386	0.83464616	0.85417676	0.86797815	0.88679815	0.9051593	0.9296130	0.9420938	0.9542893	0.9662893	0.9872898	1.0082898	1.0318898	1.05544917	1.09229441	1.1225245
	0.295	2.734E+04	2.764E+04	2.794E+04	2.824E+04	2.854E+04	2.884E+04	2.914E+04	2.944E+04	2.974E+04	3.004E+04	3.034E+04	3.064E+04	3.094E+04	3.1243616	3.1643616	
	0.305	0.8092155	0.83622183	0.84715901	0.86368114	0.88215910	0.90215910	0.9215910	0.94065419	0.96065419	0.98065455	1.00965455	1.03100950	1.0477110	1.06591317	1.1225245	1.1691979
	0.315	2.724E+04	2.754E+04	2.784E+04	2.814E+04	2.844E+04	2.874E+04	2.904E+04	2.934E+04	2.964E+04	2.994E+04	3.024E+04	3.054E+04	3.084E+04	3.114E+04	3.144E+04	
	0.325	0.8031386	0.83464616	0.85417676	0.86797815	0.88679815	0.9051593	0.9296130	0.9420938	0.9542893	0.9662893	0.9872898	1.0082898	1.0318898	1.05544917	1.09229441	1.1225245
D	0.235	2.724E+04	2.754E+04	2.784E+04	2.814E+04	2.844E+04	2.874E+04	2.904E+04	2.934E+04	2.964E+04	2.994E+04	3.024E+04	3.054E+04	3.084E+04	3.114E+04	3.144E+04	
	0.245	0.8092155	0.83622183	0.84715901	0.86368114	0.88215910	0.90215910	0.9215910	0.94065419	0.96065419	0.98065455	1.00965455	1.03100950	1.0477110	1.06591317	1.1225245	1.1691979
	0.255	2.714E+04	2.744E+04	2.774E+04	2.804E+04	2.834E+04	2.864E+04	2.894E+04	2.924E+04	2.954E+04	2.984E+04	3.014E+04	3.044E+04	3.074E+04	3.104E+04	3.134E+04	
	0.265	0.8092155	0.83622183	0.84715901	0.86368114	0.88215910	0.90215910	0.9215910	0.94065419	0.96065419	0.98065455	1.00965455	1.03100950	1.0477110	1.06591317	1.1225245	1.1691979
	0.275	2.704E+04	2.734E+04	2.764E+04	2.794E+04	2.824E+04	2.854E+04	2.884E+04	2.914E+04	2.944E+04	2.974E+04	3.004E+04	3.034E+04	3.064E+04	3.094E+04	3.1243616	
	0.285	0.8092155	0.83622183	0.84715901	0.86368114	0.88215910	0.90215910	0.9215910	0.94065419	0.96065419	0.98065455	1.00965455	1.03100950	1.0477110	1.06591317	1.1225245	1.1691979
	0.295	2.694E+04	2.724E+04	2.754E+04	2.784E+04	2.814E+04	2.844E+04	2.874E+04	2.904E+04	2.934E+04	2.964E+04	2.994E+04	3.024E+04	3.054E+04	3.084E+04	3.114E+04	
	0.305	0.8092155	0.83622183	0.84715901	0.86368114	0.88215910	0.90215910	0.9215910	0.94065419	0.96065419	0.98065455	1.00965455	1.03100950	1.0477110	1.06591317	1.1225245	1.1691979
	0.315	2.684E+04	2.714E+04	2.744E+04	2.774E+04	2.804E+04	2.834E+04	2.864E+04	2.894E+04	2.924E+04	2.954E+04	2.984E+04	3.014E+04	3.044E+04	3.074E+04	3.104E+04	
	0.325	0.8092155	0.83622183	0.84715901	0.86368114	0.88215910	0.90215910	0.9215910	0.94065419	0.96065419	0.98065455	1.00965455	1.03100950	1.0477110	1.06591317	1.1225245	1.1691979
R'	0.235	2.684E+04	2.714E+04	2.744E+04	2.774E+04	2.804E+04	2.834E+04	2.864E+04	2.894E+04	2.924E+04	2.954E+04	2.984E+04	3.014E+04	3.044E+04	3.074E+04	3.104E+04	
	0.245	0.8092155	0.83622183	0.84715901	0.86368114	0.88215910	0.90215910	0.9215910	0.94065419	0.96065419	0.98065455	1.00965455	1.03100950	1.0477110	1.06591317	1.1225245	1.1691979
	0.255	2.674E+04	2.704E+04	2.734E+04	2.764E+04	2.794E+04	2.824E+04	2.854E+04	2.884E+04	2.914E+04	2.944E+04	2.974E+04	3.004E+04	3.034E+04	3.064E+04	3.094E+04	
	0.265	0.8092155	0.83622183	0.84715901	0.86368114	0.88215910	0.90215910	0.9215910	0.94065419								

表22 実験カプセル設計パラメータの実験燃料発熱量に及ぼす効果のまとめ

パラメータ		発熱量に及ぼす効果	備考
内カプセル材質	ステンレス鋼 (4 mm) Zry (4 mm)	基準 +10%	Zry 8 mmでSUS 4 mmと同じ
内カプセル肉厚	ステンレス鋼 4 mm 8 mm	基準 -20%	肉厚 1 mm増で -5%
減速材	なし ベリリウム金属 ZrH <sub>2</sub> (4 cm) ポリエチレン (4 cm)	-50% -45% 基準 +15%	ベリリウムは減速材として不適当
Na冷却材	厚さ 5 mm 18 mm	基準 -4%	ほとんど効果なし

表23 ナトリウムカプセル構造材の素材、厚さの実験燃料発熱量への効果

(実験燃料は20%濃縮UO<sub>2</sub>、もんじゅ寸法。減速材はZrH 4 cm厚とし、発熱量は炉心積分出力 100 MWS当り)

内カプセル		Na冷却材 厚さ(mm)	実験燃料平均発熱量		比較項目
材質	肉厚(mm)		cal/g	kJ/g	
ステンレス鋼 (SUS 316)	4	18	350	1.47	ステンレス鋼厚さ
	8	18	285	1.19	
ジルカロイ	4	18	386	1.62	ジルカロイ厚さ
	8	18	346	1.45	
	12	18	308	1.29	
	16	18	273	1.15	
ステンレス鋼	4	5	364	1.53	Na厚さ

表24 水素化ジルコニウム減速材の厚さによる実験燃料発熱量の変化  
 (発熱量は炉心積分出力 100 MWS 当り)

ZrH <sup>a</sup> 減速材厚さ (mm)	平均発熱量		軸方向 ピーキング係数	半径方向 ピーキング係数
	cal/g・Fuel	kJ/g・Fuel		
40	427	1.79	1.23	1.7
20	355	1.49	1.19	1.65
0	198	0.831	1.13	1.6

a : 水素化ジルコニウムは ZrH<sub>2</sub>O としその密度は 5.61 g/cm<sup>3</sup>とした。

b : 実験燃料の富化度30%の (Pu, U)O<sub>2</sub> とし、もんじゅ仕様の寸法とした。

また実験物の寸法は図6, 7に示した標準のものとした。

表25 有機物減速材を使用した場合の実験燃料の発熱量  
 (炉心積分出力 100 MWS 当り)

有機物減速材 <sup>a</sup>	実験燃料 <sup>b</sup> 平均発熱量			軸方向 ピーキング係数	備考
	H / C	密度(g/cm <sup>3</sup> )	( cal/g )	( kJ/g )	
2	0.8	394	1.65	1.24	
2	0.9	401	1.68	1.24	ポリプロピレン
2	0.95	402	1.69	1.24	ポリエチレン
2	1.0	403	1.69	1.24	
2	1.2	398	1.67	1.24	
0.5	1.0	292	1.23	1.22	
1.0	1.0	365	1.53	1.23	ポリスチレン
1.5	1.0	396	1.66	1.24	
2.0	1.0	403	1.69	1.24	
水素化ジルコニウム <sup>a</sup>		347	1.46	1.23	

a : 減速材厚さは40mm

b : 実験燃料は20%濃縮UO<sub>2</sub>、寸法はもんじゅ仕様

表26 各種減速材の減速性能の温度による変化

減速材	温 度 K	制御棒 全引抜き 反応度 \$	制御棒挿入		発熱量 cal/gUO <sub>2</sub>	軸方向ピーキング係数
			位置 mm	反応度 \$		
水素化ジルコニウム	350	6.45	250	4.14	338	415
	400	6.69	248	4.13	347	429
	450	6.84	245	4.11	355	438
ベリリウム金属	350	10.36	145	3.33	197	234
	400	10.39	143	3.25	196	232
	450	10.42	142	3.24	193	228
ポリエチレン	350	6.28	263	4.13	394	487
	400	6.35	262	4.23	402	498
	450	6.45	257	4.18	411	510

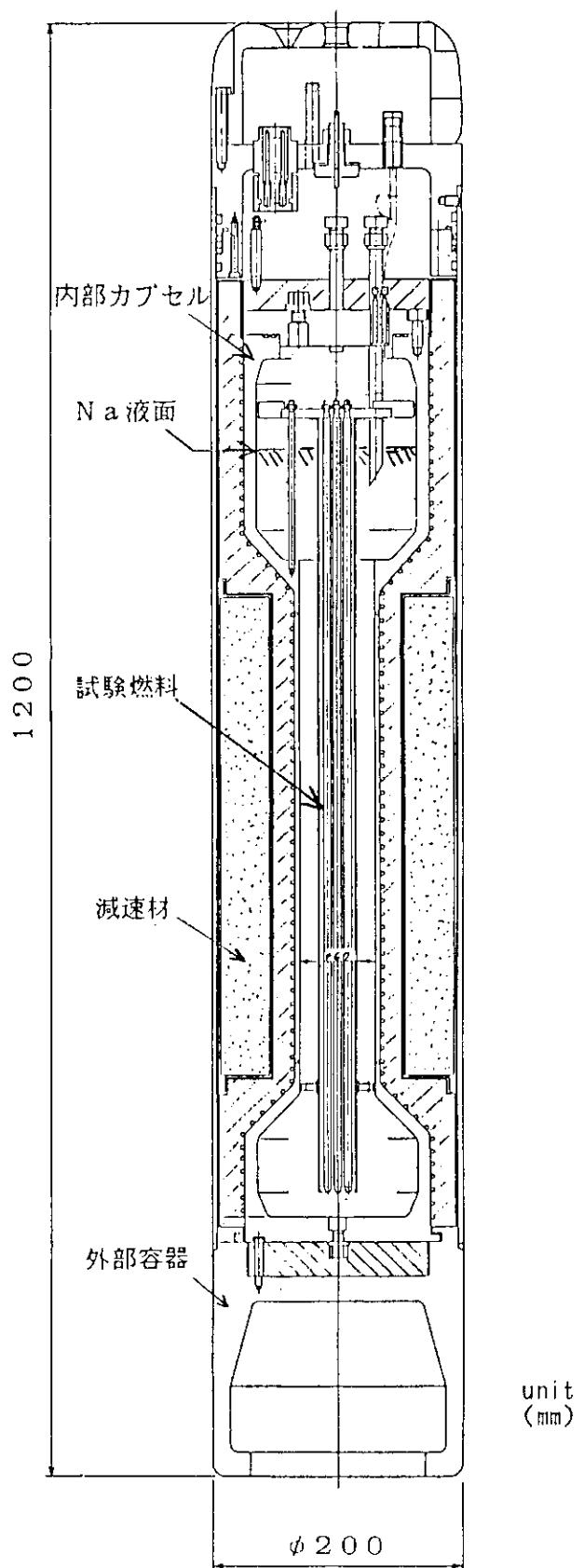


図 1 NSRR 高速炉燃料実験用ナトリウムカプセル概略図

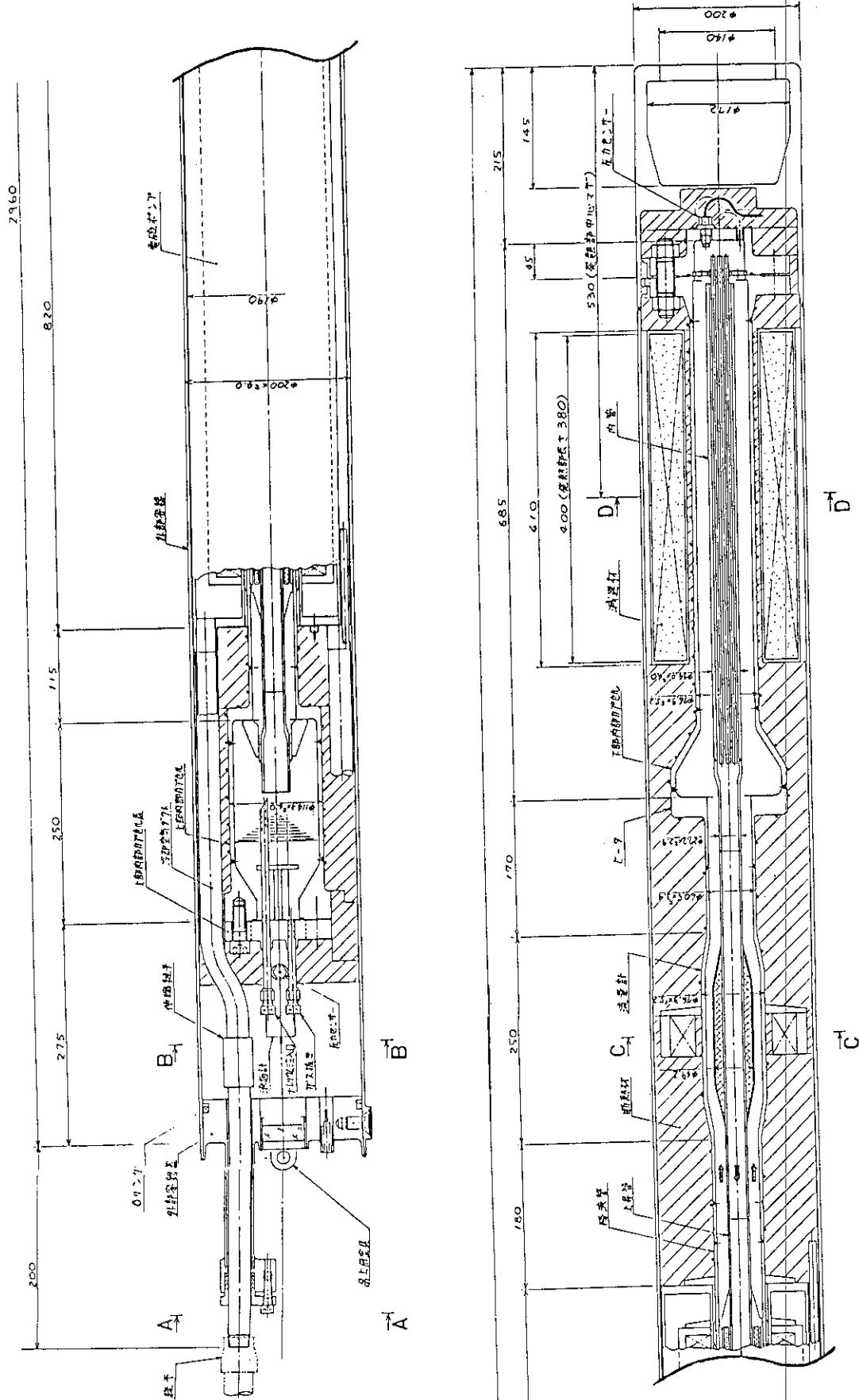


図2 NSRR高速炉燃料実験用ナトリウムループ概略図

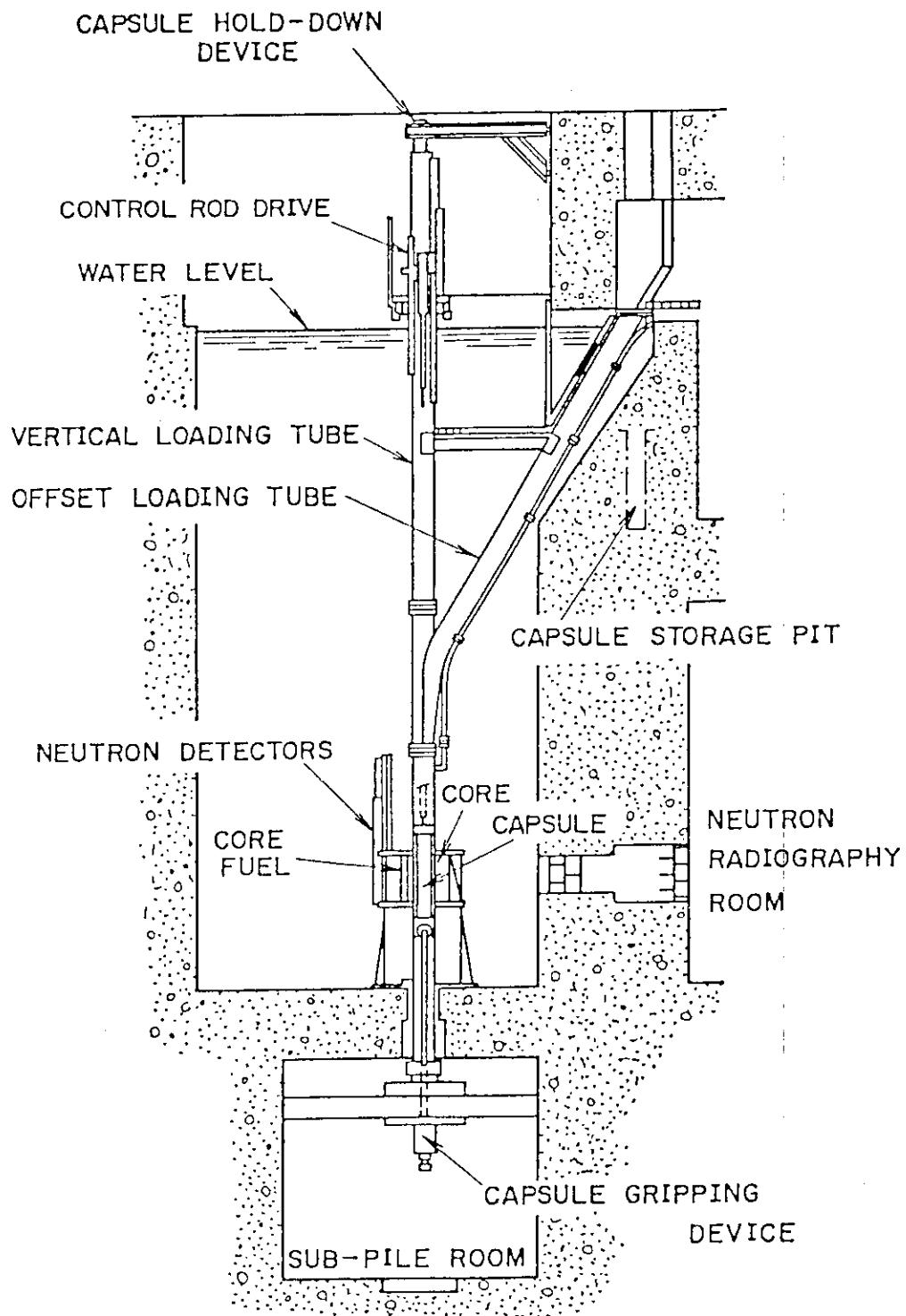


図3 NSRR 炉心の概略

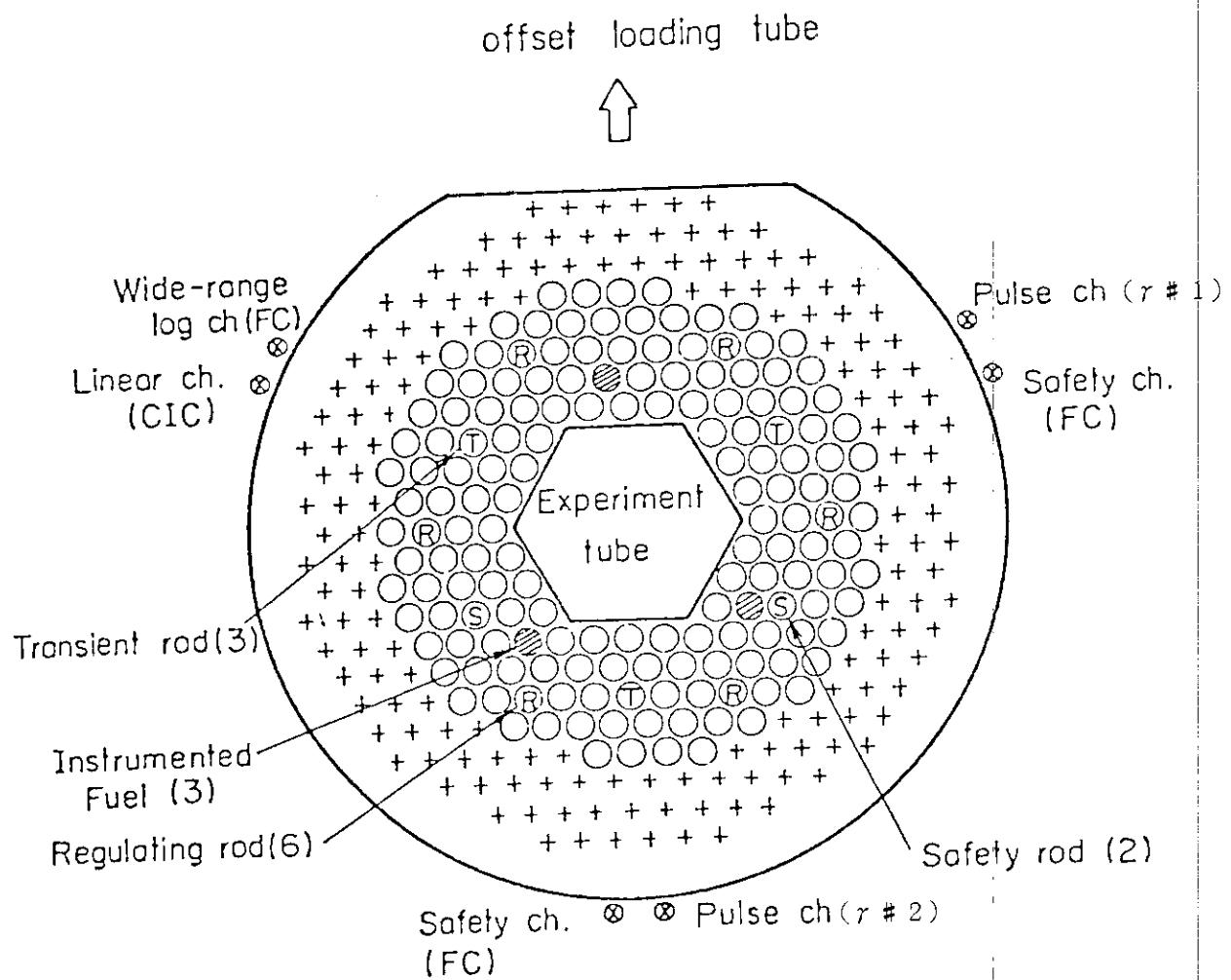
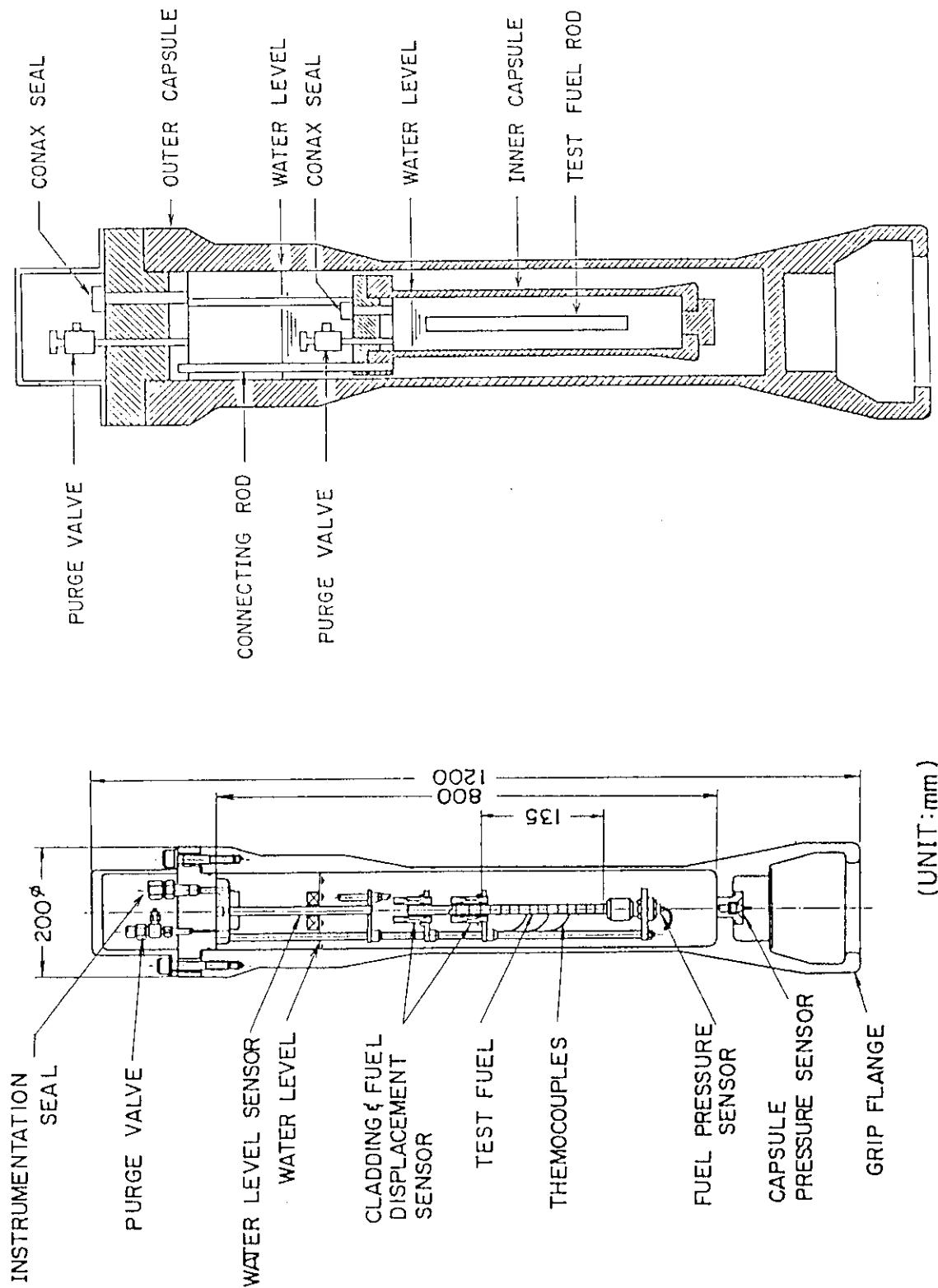


図4 N S R R 炉心の断面図



(2) 混合酸化物燃料実験用太気圧水力セルの概略

(1) 1重カプセル

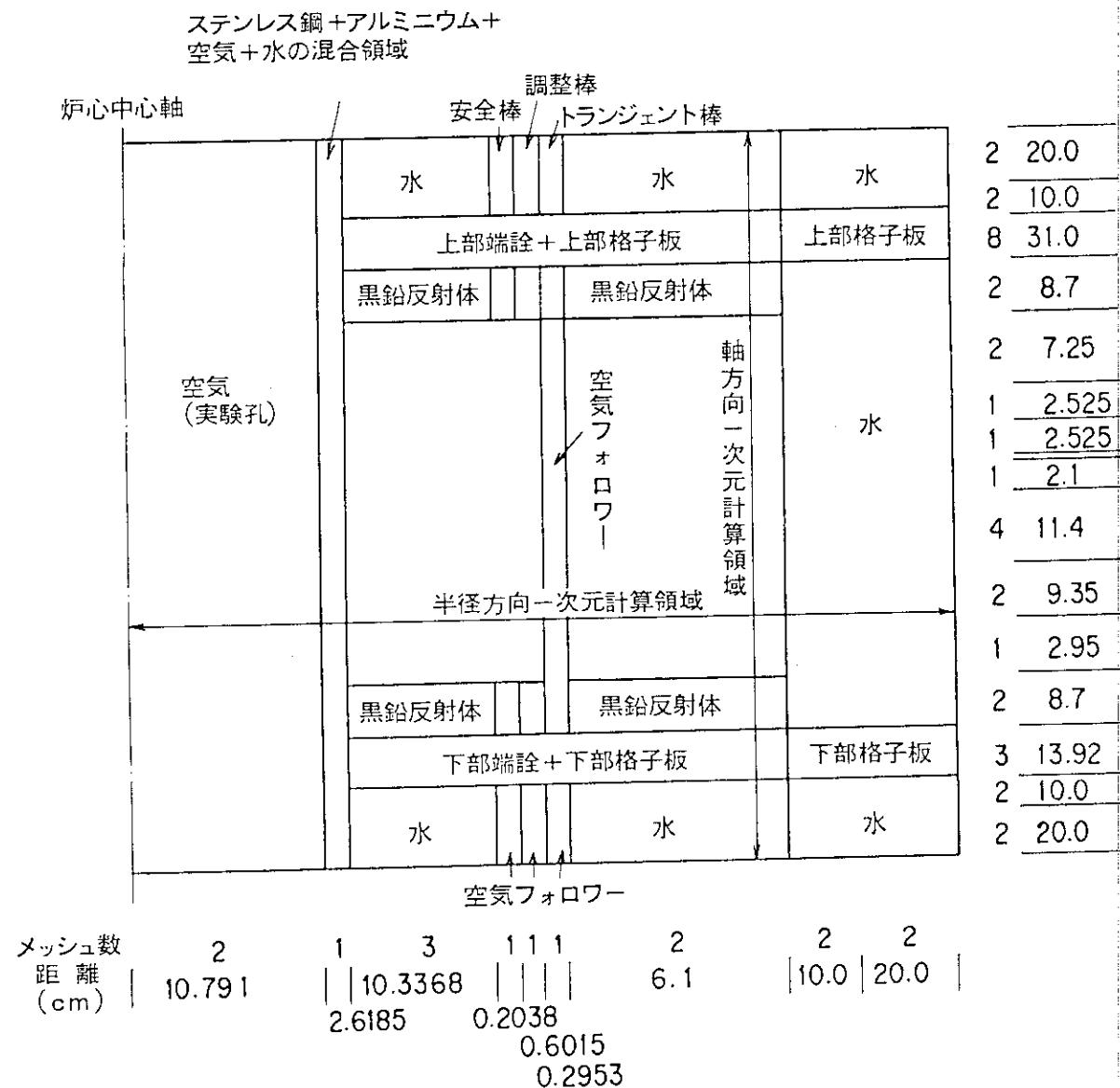


図6 NSRR炉心のR-Z 2次元モデル (TWOTRAN-IIによる中性子輸送計算用)

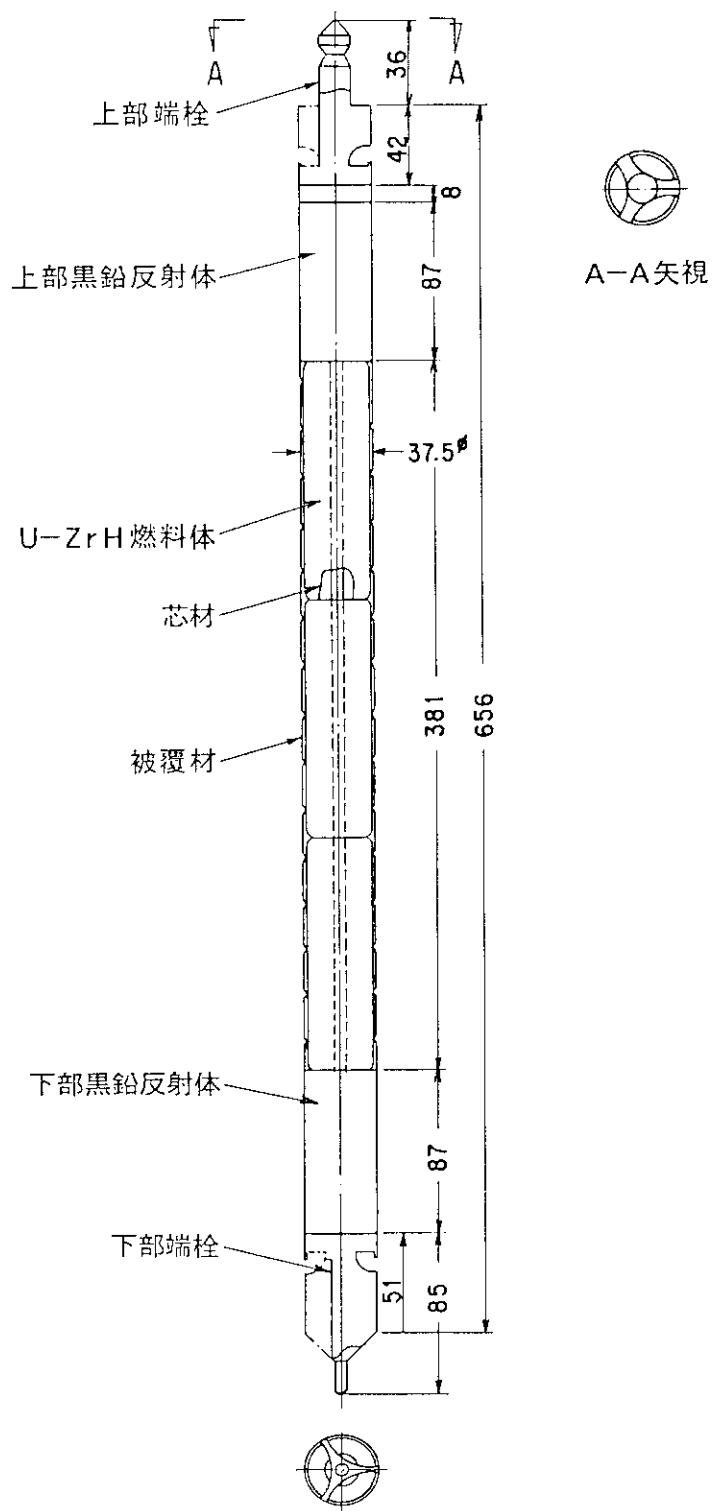


図7 N S R R 炉心燃料棒

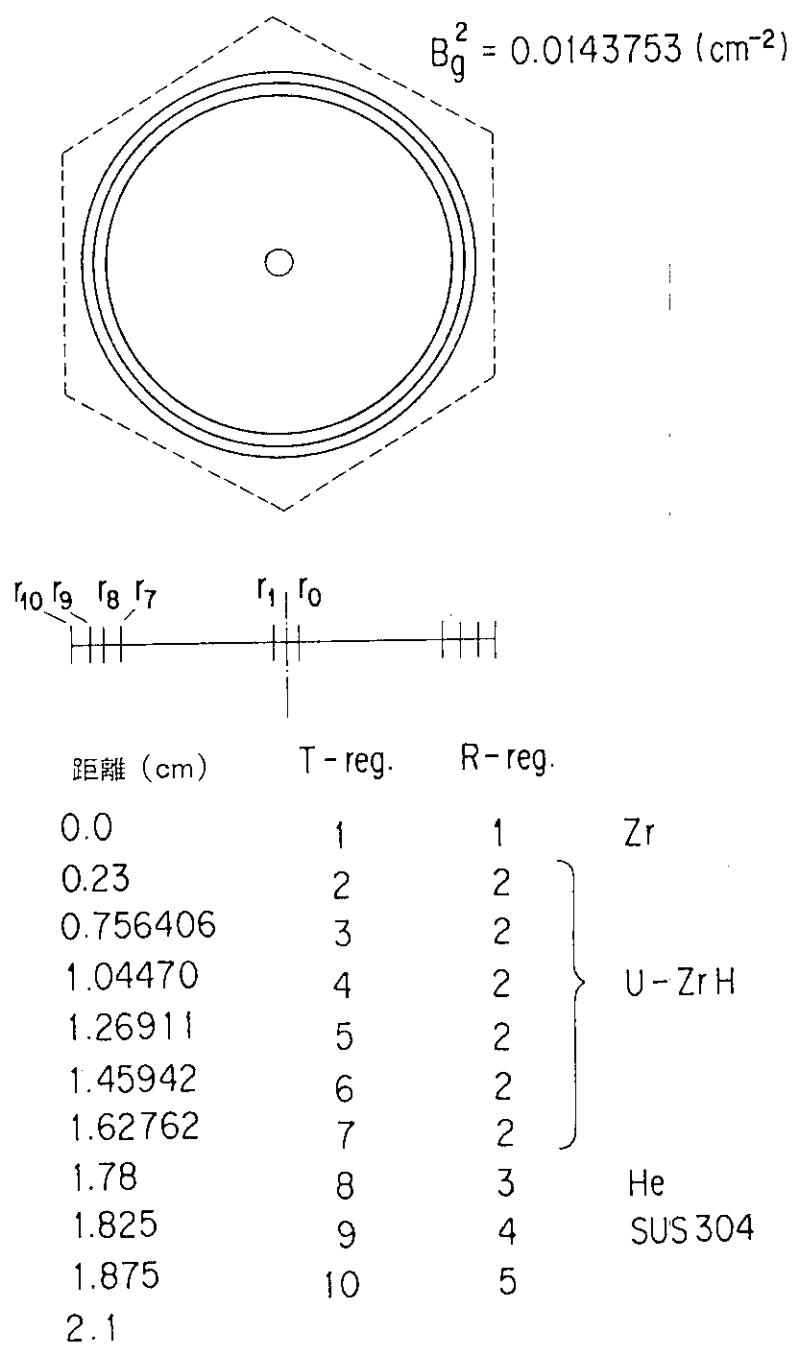
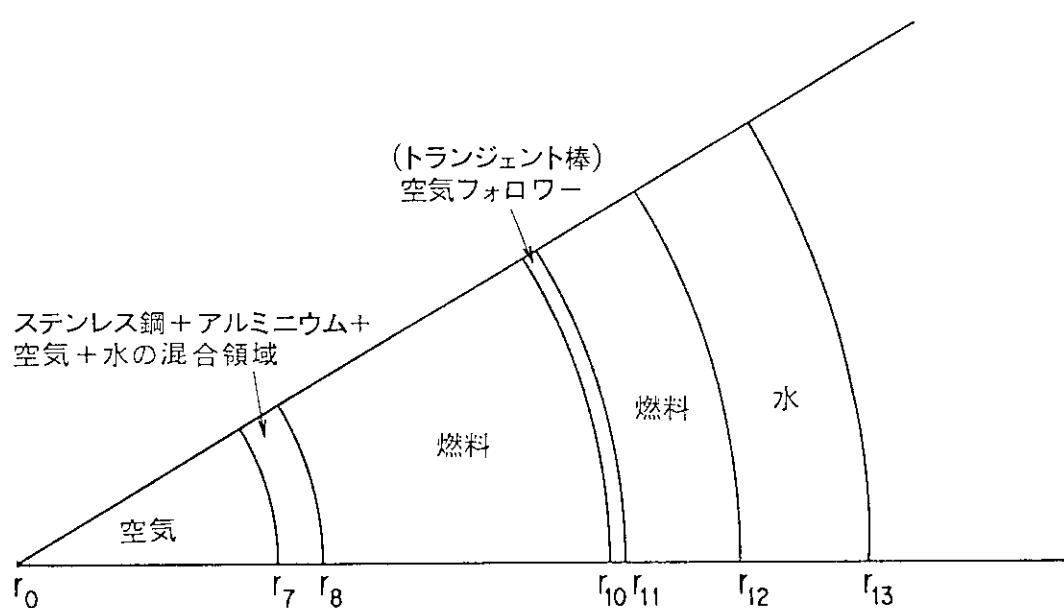


図8 NSRR炉心の単位燃料セル

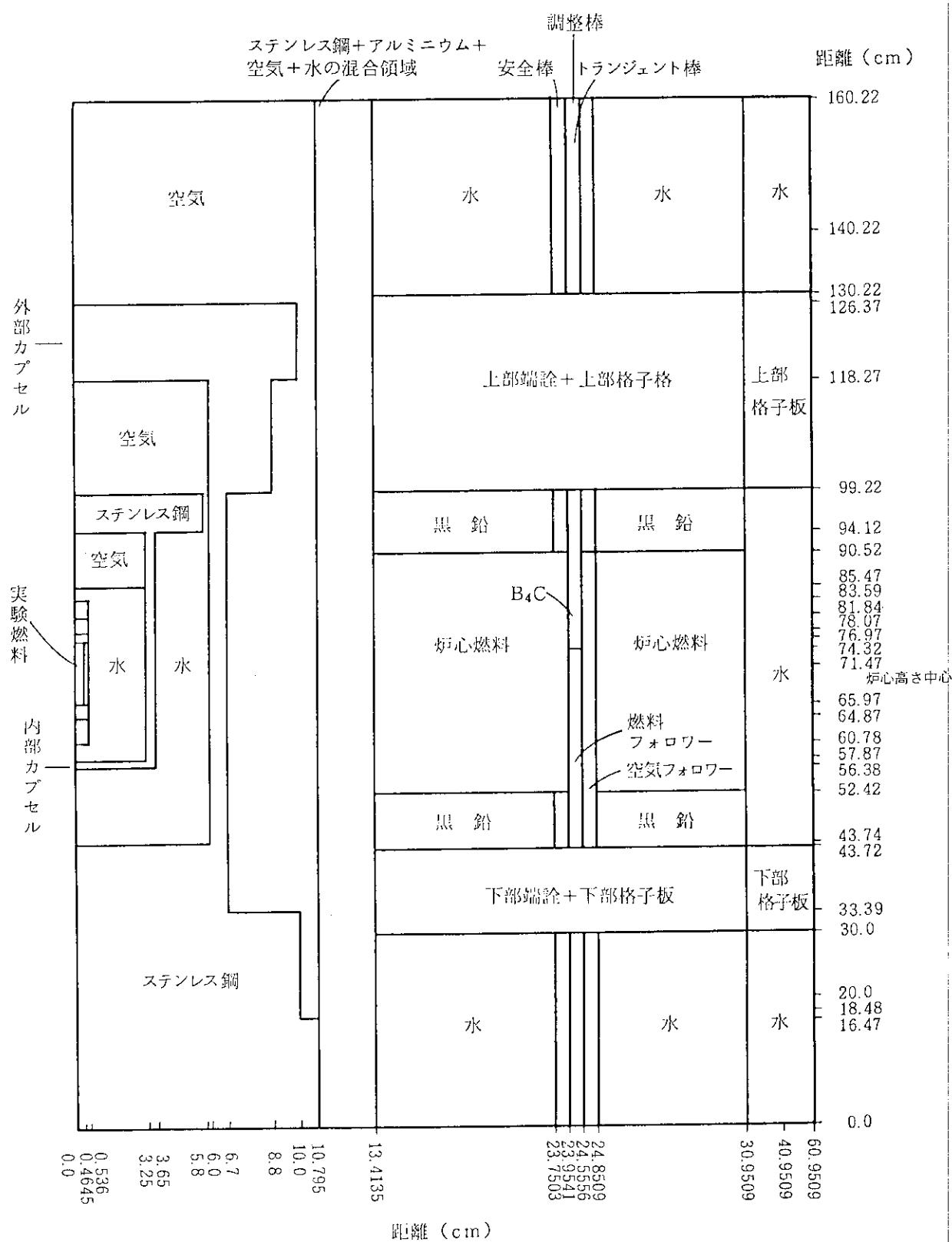


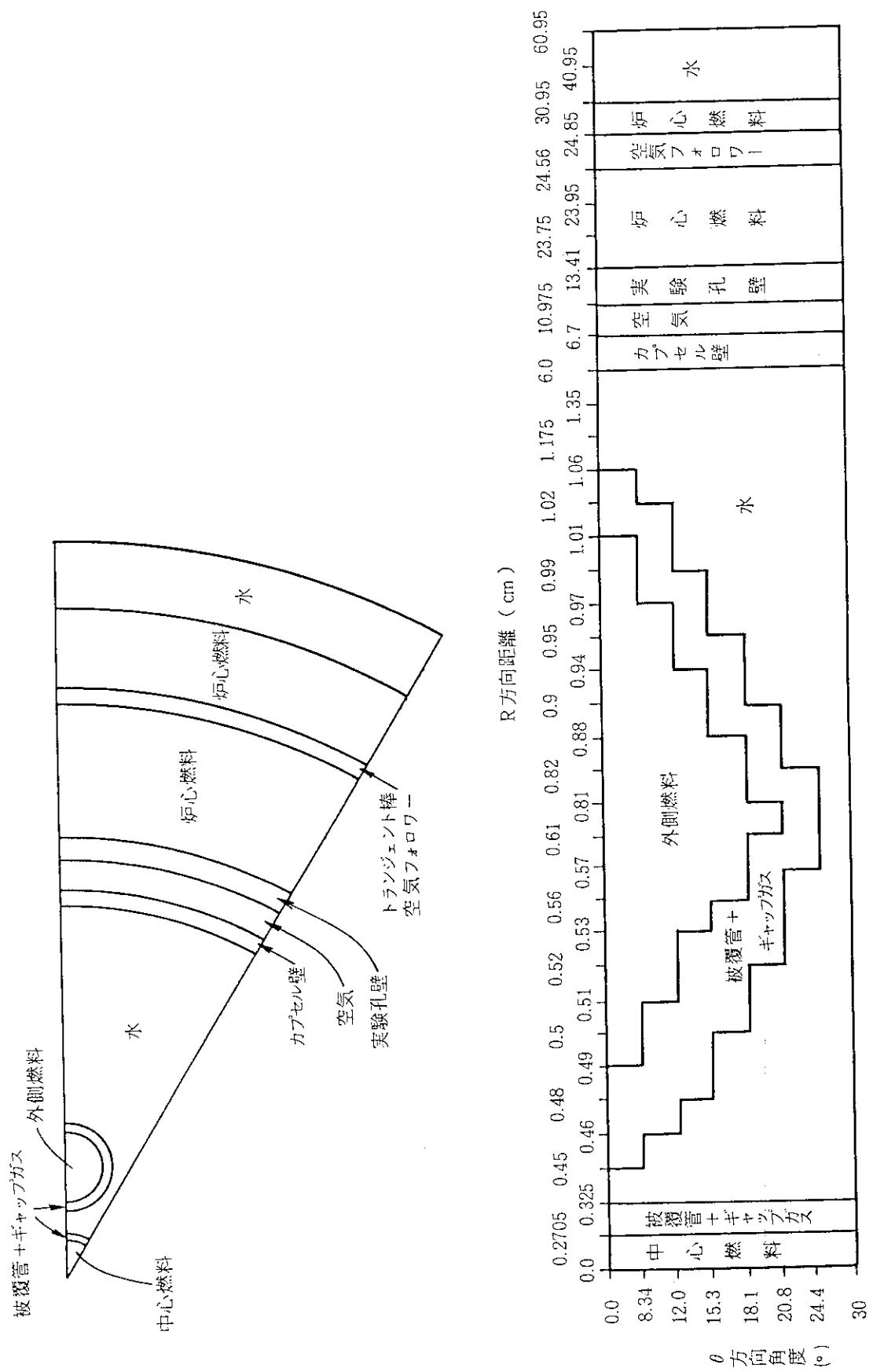
	距離 (cm)	メッシュ数	X-reg
$r_0$	0.0	1	1
$r_1$	0.2705	1	1
$r_2$	0.28	1	1
$r_3$	0.325	1	1
$r_4$	2.15	2	1
$r_5$	9.3	1	1
$r_6$	10.0	1	1
$r_7$	10.795	1	2
$r_8$	13.4135	4	3
$r_9$	23.9541	1	4
$r_{10}$	24.5556	1	5
$r_{11}$	24.8506	2	6
$r_{12}$	30.9509	4	7
$r_{13}$	50.0		

図9 NSRR炉心の半径方向一次元輸送計算用の体系 (ANISNコード)

	距離 (cm)	メッシュ数
	0.0	
$H_2O$		12
	30.0	
上部端詮 +上部格子板		12
	61.0	
グラファイト		4
	69.7	
燃料		15
	107.8	
グラファイト		4
	116.5	
下部端詮 +下部格子板		5
	130.22	
$H_2O$		12
	160.22	

図10 NSRR炉心の軸方向一次元輸送計算用の体系(ANISNコード)





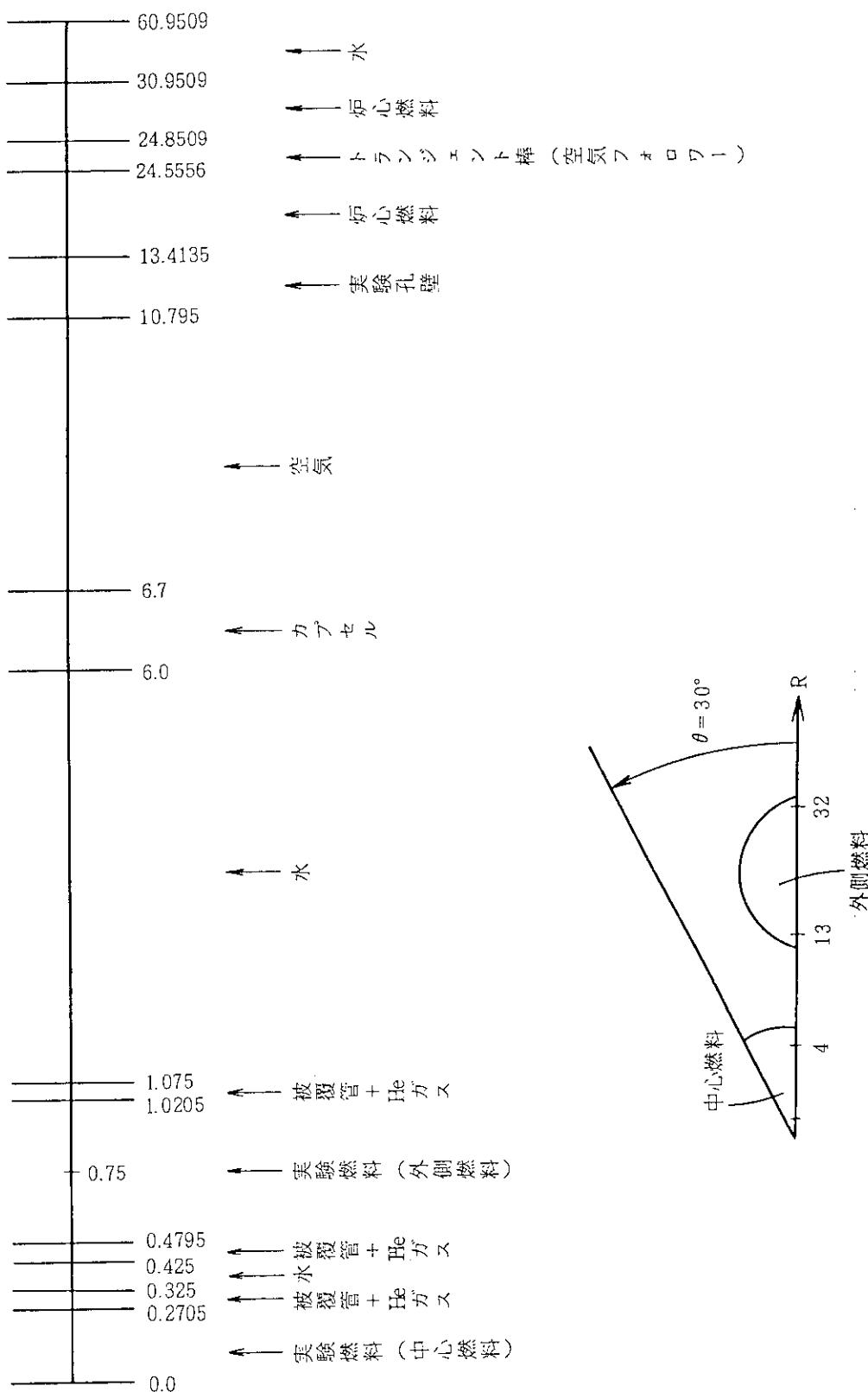


図13 7本パンドル体系での群定数作成用 1次元輸送計算モデル  
(水カプセル体系, ANISN計算用)

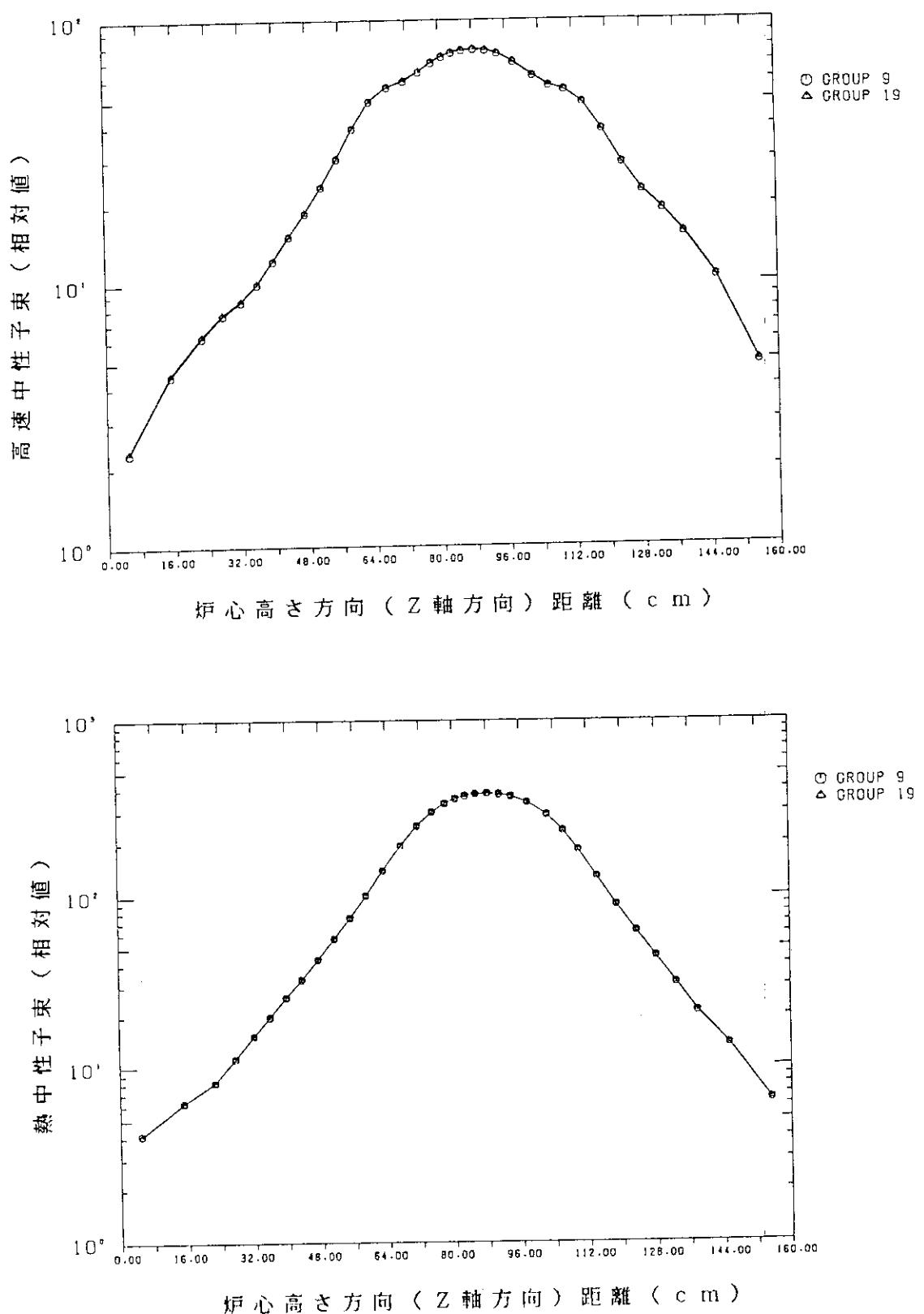


図14 中性子輸送計算における縮約群数依存性  
実験孔内垂直方向 (Z 軸方向) 中性子分布 (実験孔内は空気)

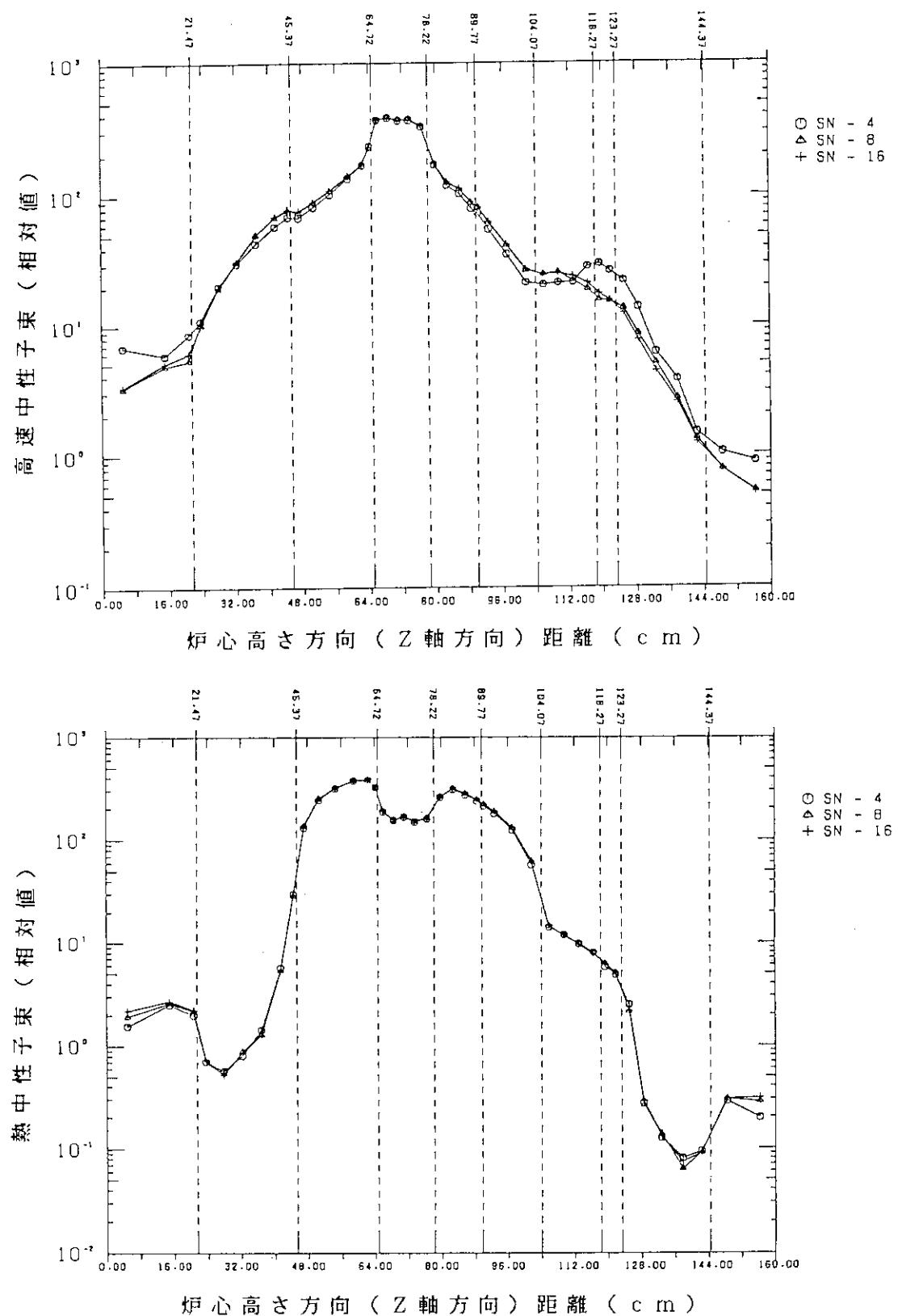
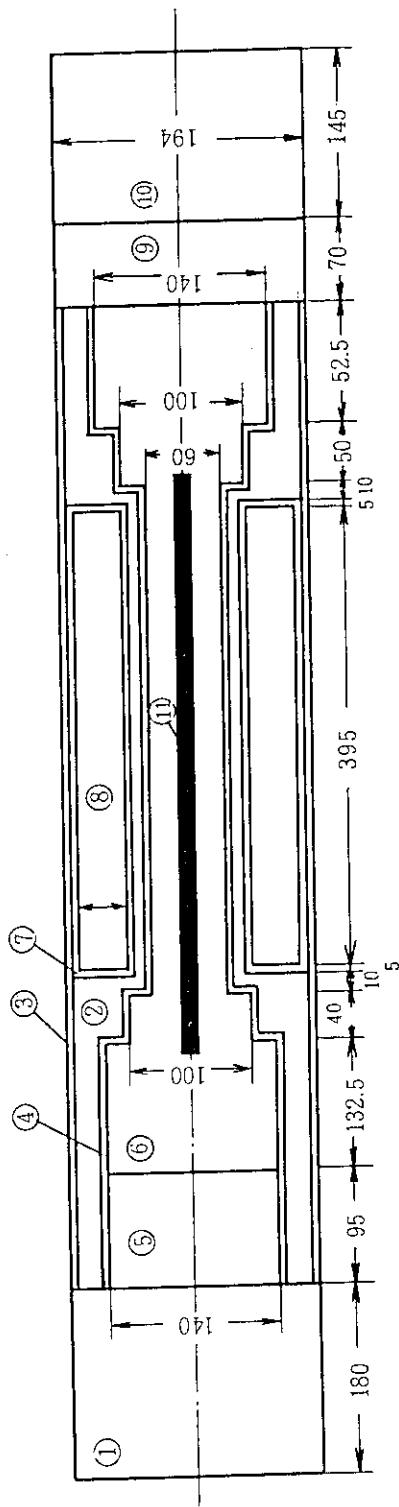
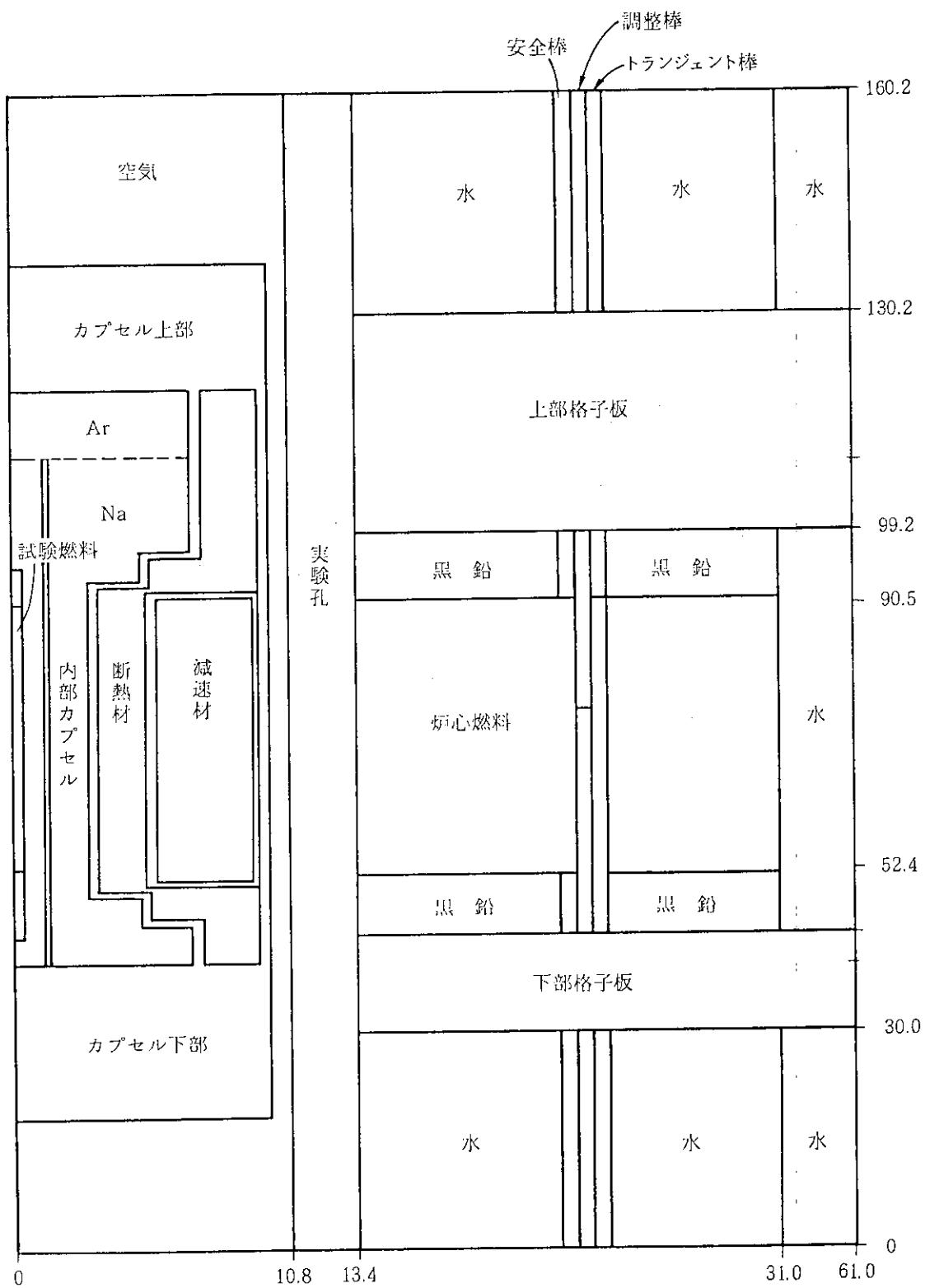


図15 中性子輸送計算のSn分点依存性  
実験カプセル内燃料表面位置での垂直方向（Z軸方向）中性子分布



番号	名 称	材 料
①	外部容器ふた	SUS304
②	断熱材	アルミファイバー
③	外部容器	SUS304
④	内部容器	SUS316
⑤	ガス	Ar
⑥	Na	Na
⑦	減速材容器	Al
⑧	減速材	ZrH
⑨	圧力セッサ一部	SUS304
⑩	下部	SUS304
⑪	実験燃料	

図16 ナトリウムカプセルのR-Z 2次元モデル(代表例)



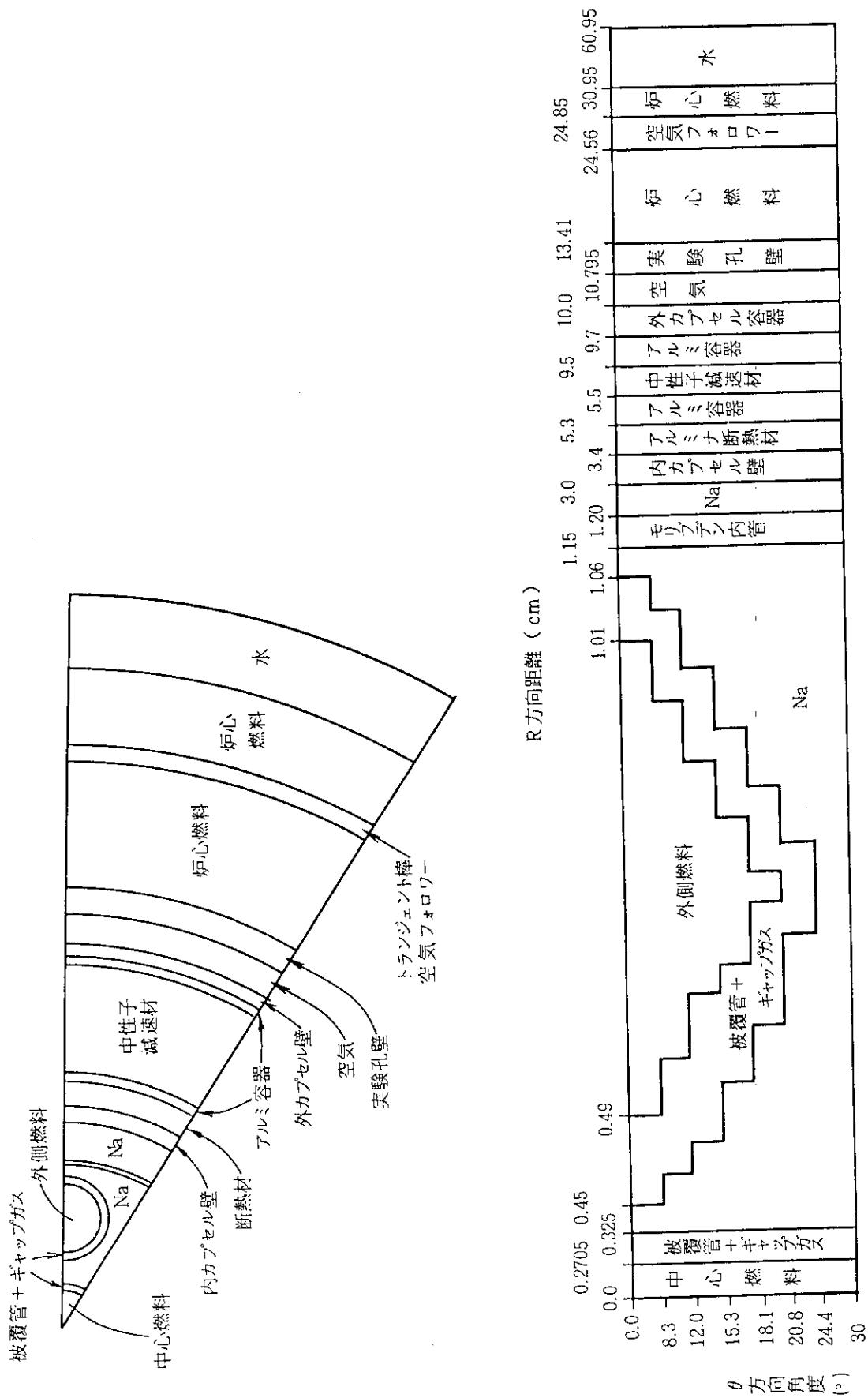


図18 ナトリウムカプセル7本パンドル体系のR-θ 2次元中性子輸送計算モデル (FOTTRAN - II計算用)

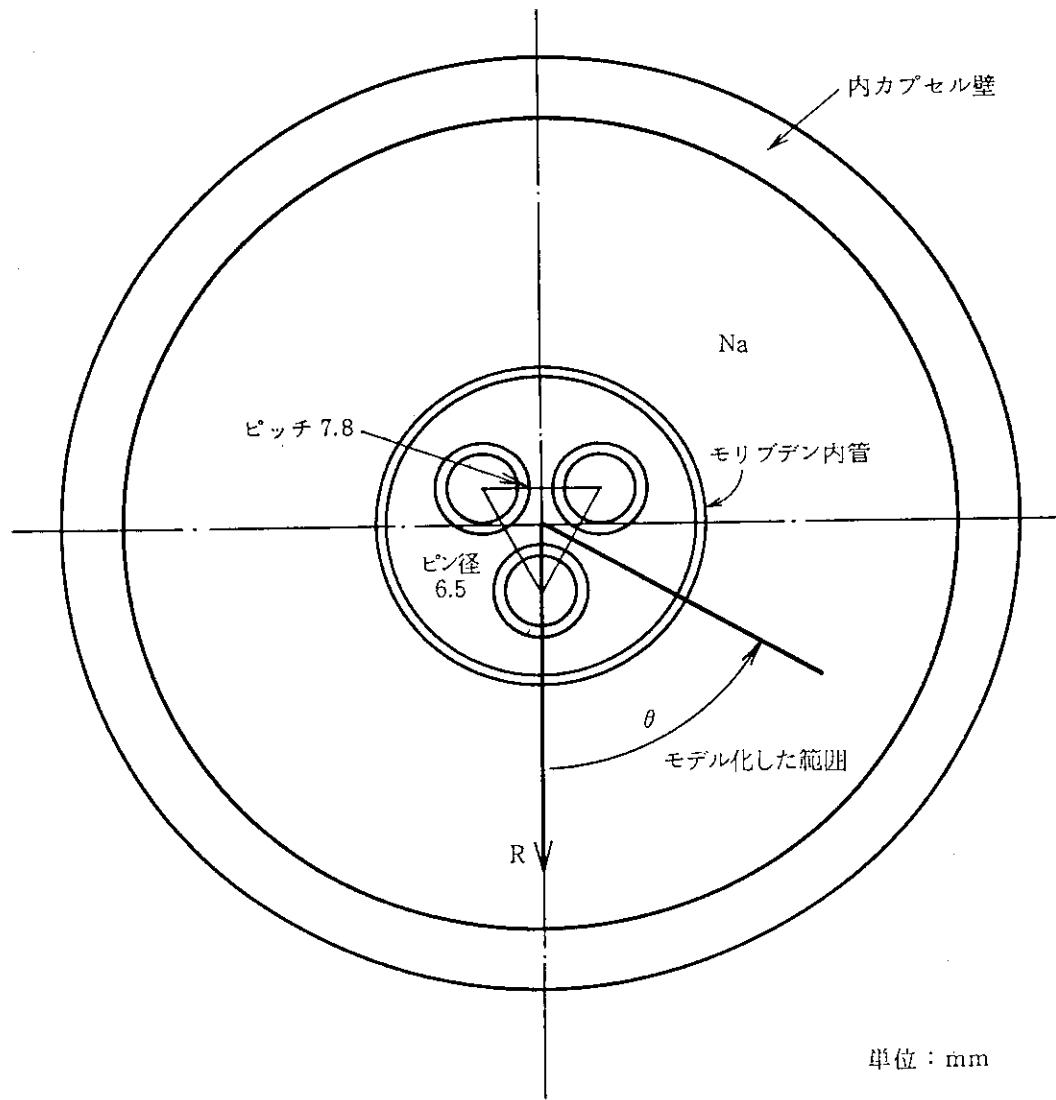


図19 ナトリウムカプセルにおける3本バンドル体系  
燃料ピンの中心を通るナトリウムカプセル中心軸を $\theta = 0$  とし $60^\circ$ の範囲をモデル化した。

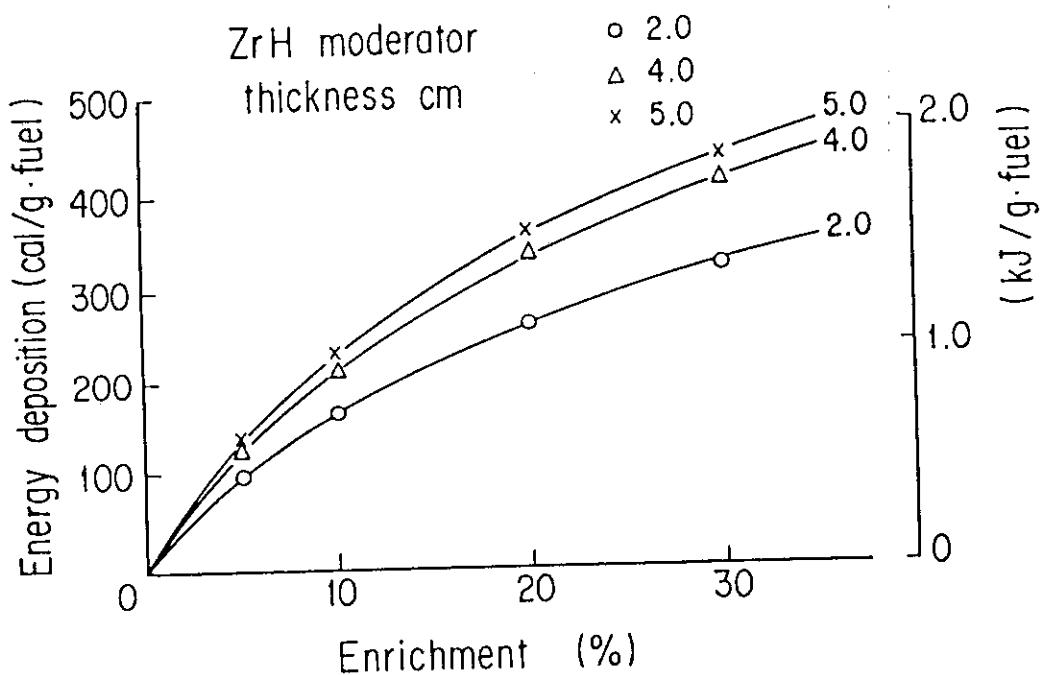
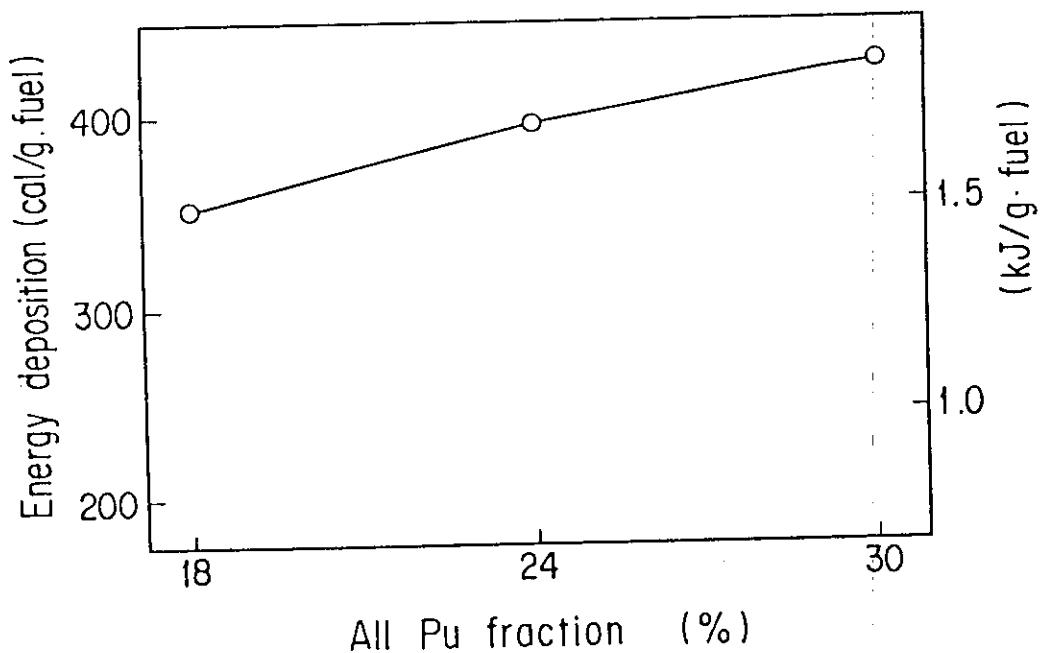
図20  $^{235}\text{U}$ の濃縮度による酸化物燃料の平均発熱量の変化

図21 Pu富化度による混合酸化物燃料の平均発熱量の変化

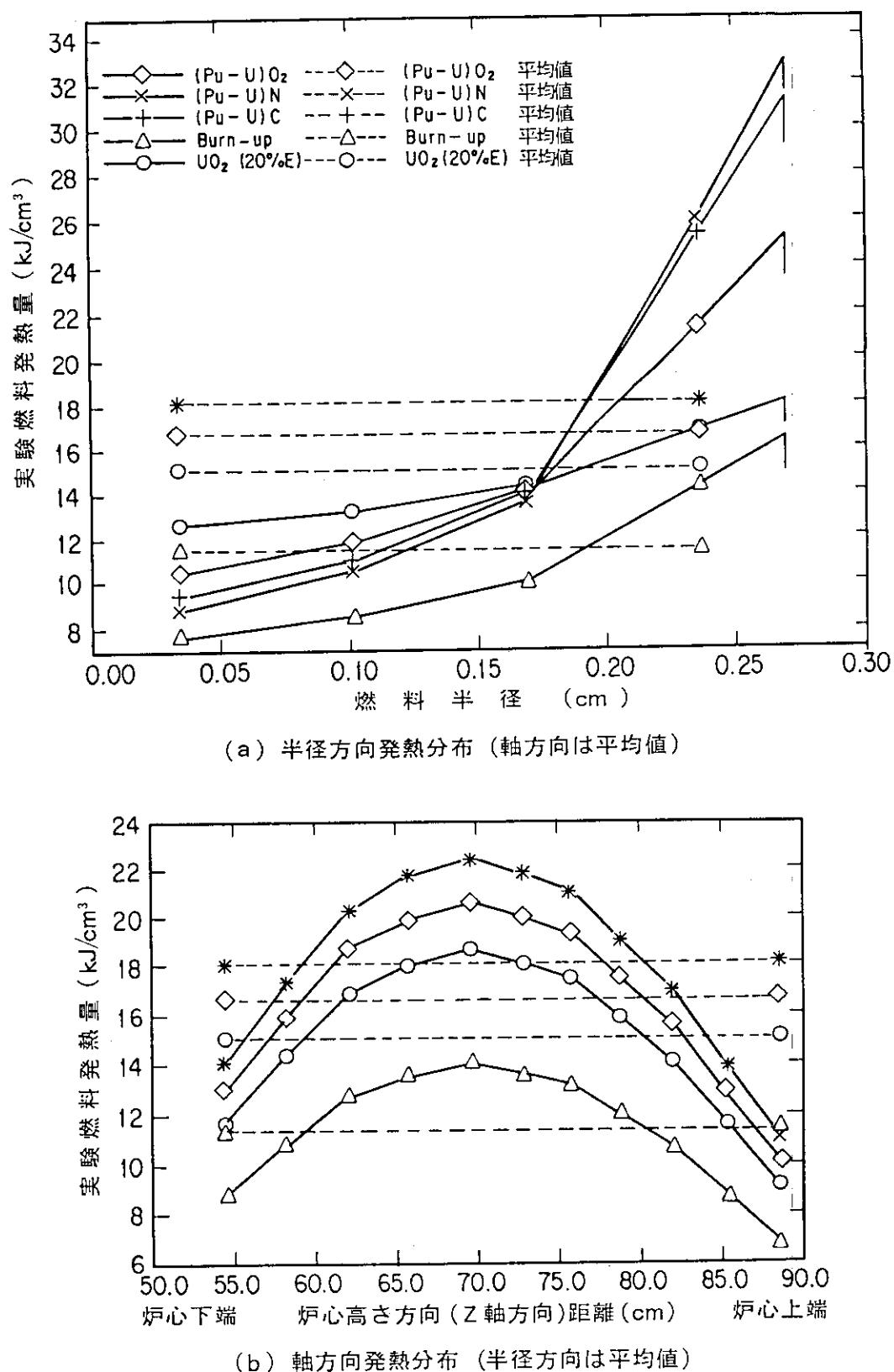
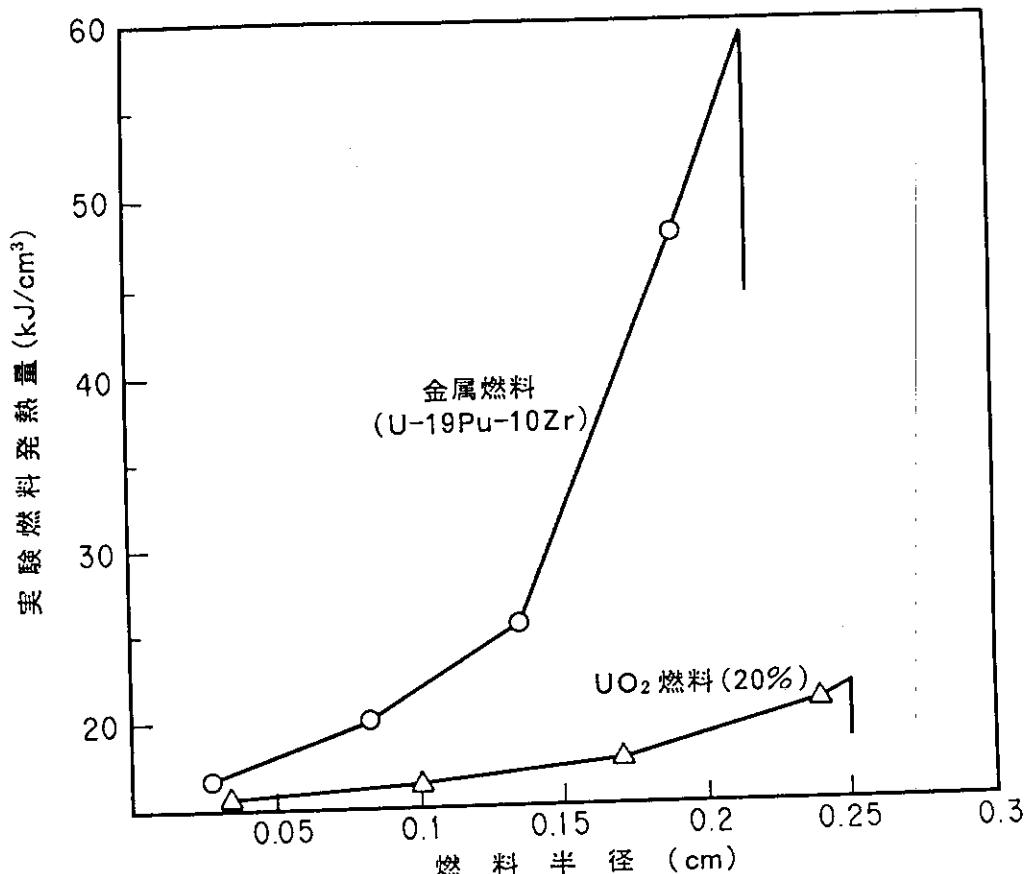
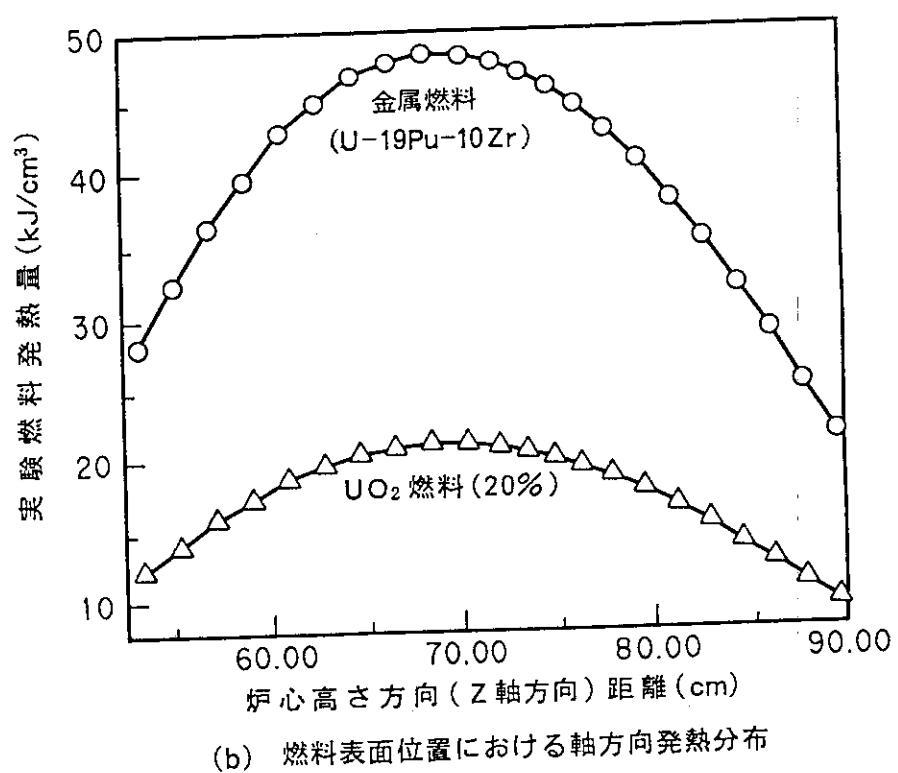


図22 炭化物燃料および窒化物燃料の発熱分布の各種酸化物燃料との比較



(a) 炉心高さ中心位置における半径方向発熱分布



(b) 燃料表面位置における軸方向発熱分布

図23 金属燃料の半径方径方向および軸方向発熱分布

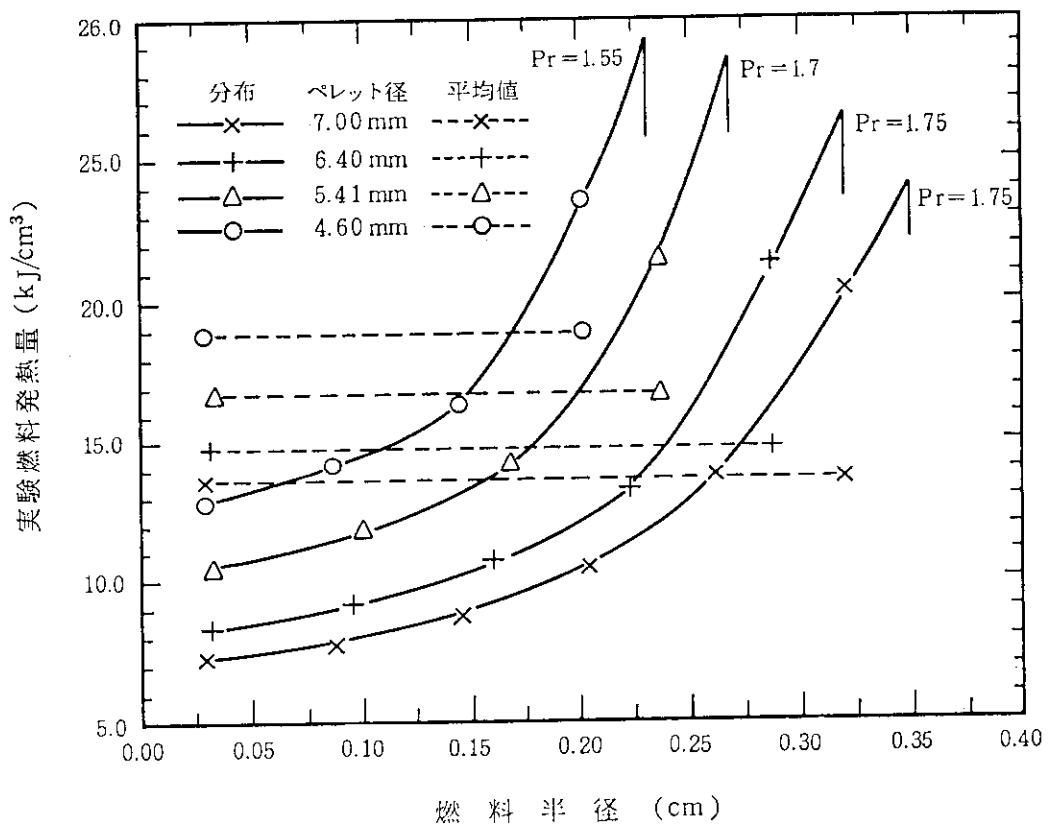


図24 燃料径による半径方向発熱分布の変化

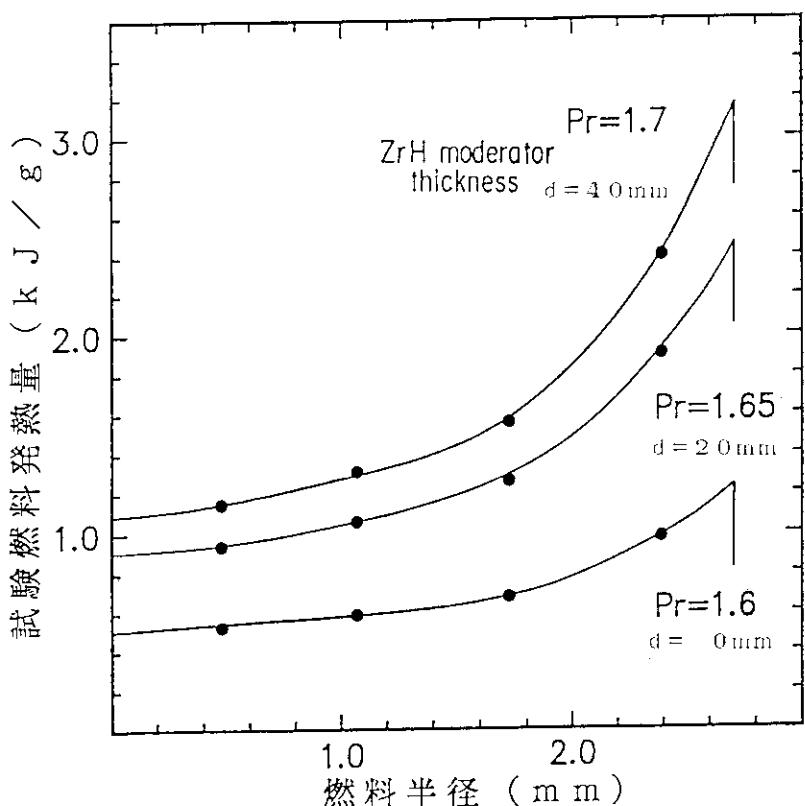


図25 水素化ジルコニウム減速材の厚さによる半径方向発熱分布の変化

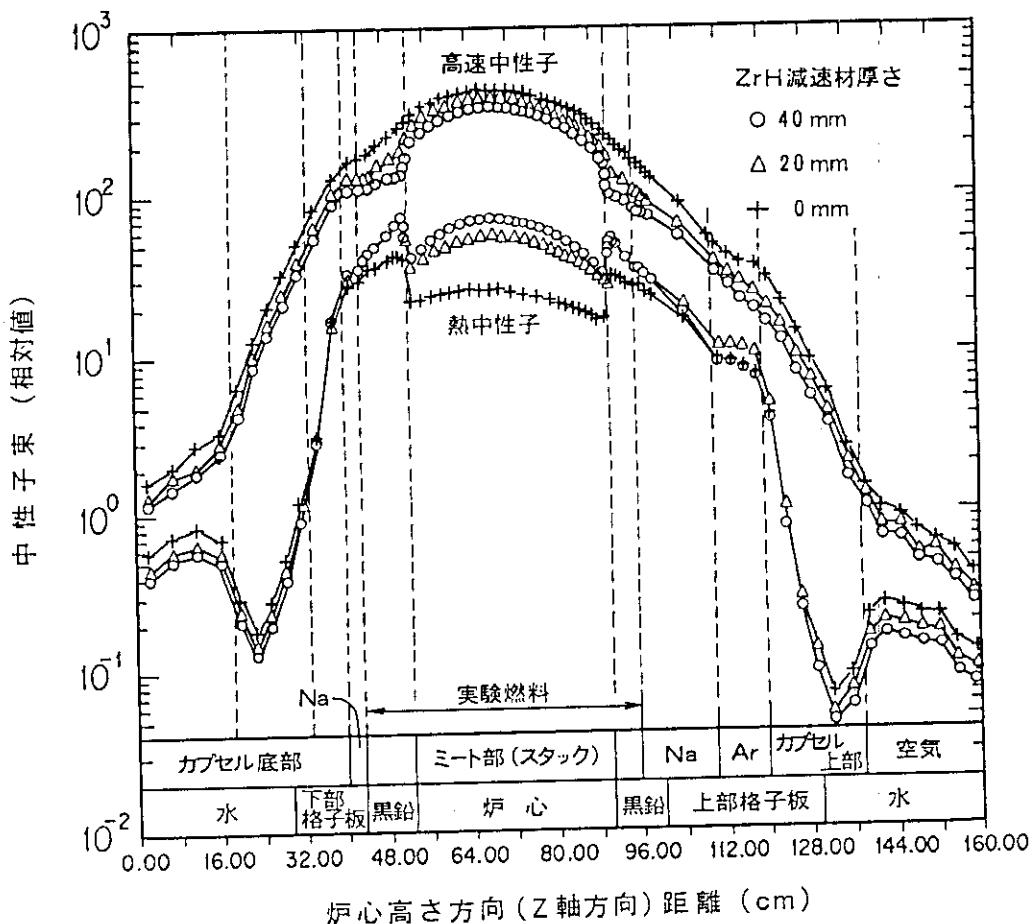


図26 減速材の厚さによる実験燃料位置（表面）での高速および熱中性子束の変化

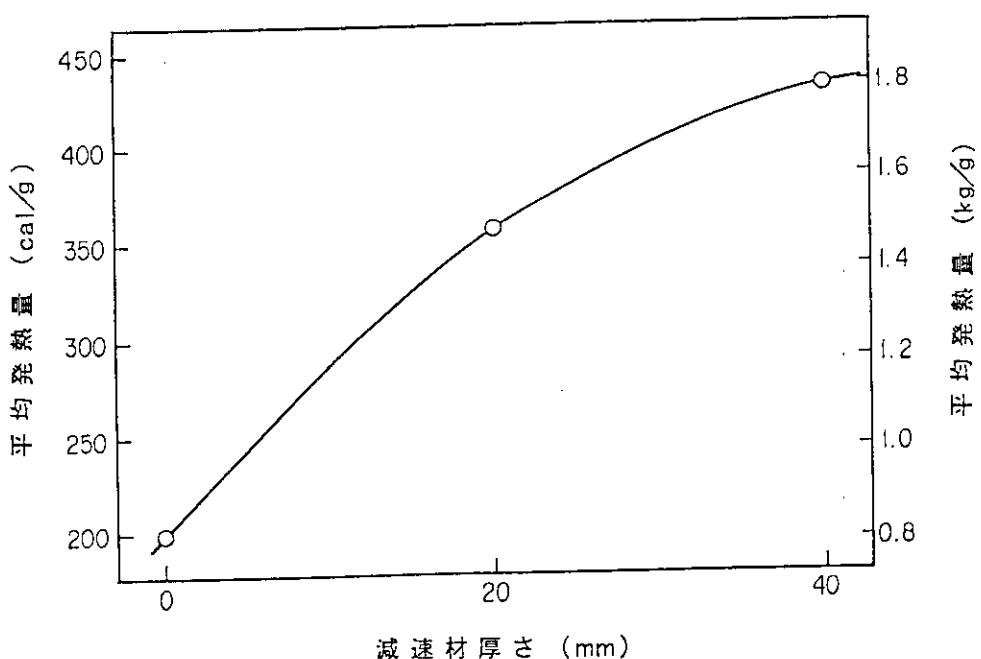


図27 減速材の厚さによる実験燃料の平均発熱量（炉心積分出力 100 MWs 当り）の変化  
実験燃料は富化度30%の  $(Pu, U)O_2$  燃料、寸法はもんじゅ仕様。

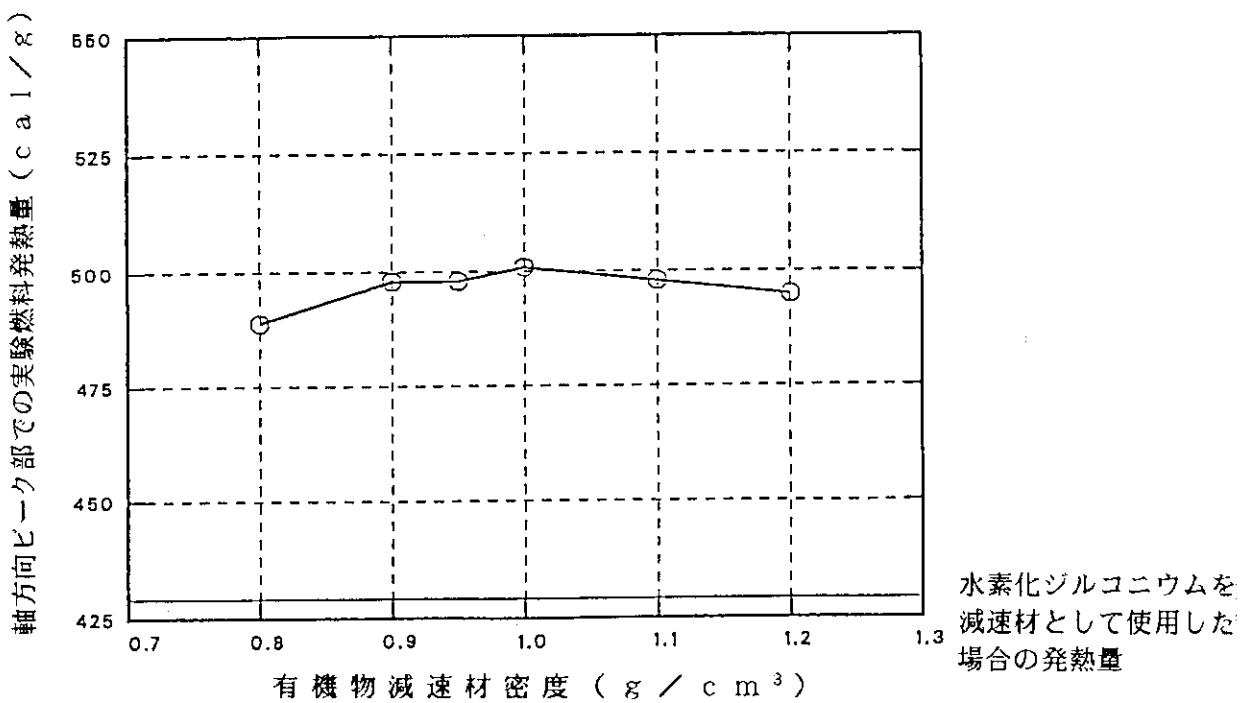


図28 有機物減速材の密度による減速性能の変化  
(H/C = 2.0, 減速材厚さ40mmとした時のUO<sub>2</sub> (20% E) 燃料の発熱量)

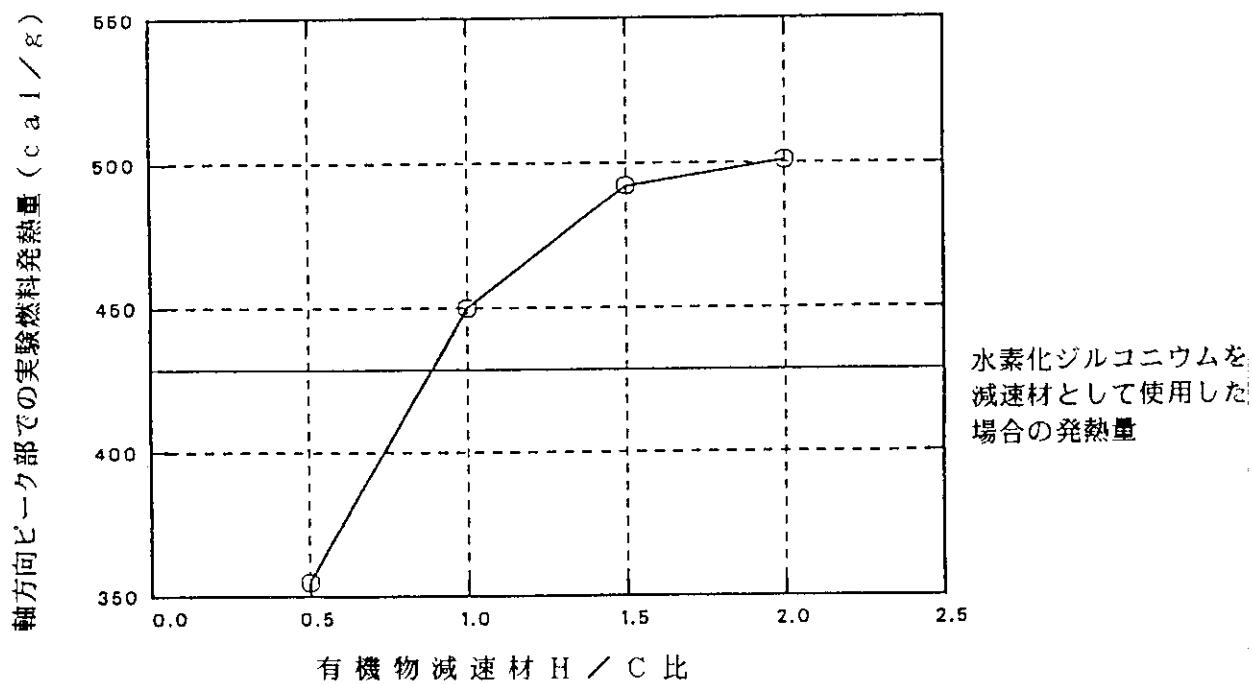


図29 有機物減速材のH/Cによる減速性能の変化  
(密度 = 1.0, 減速材厚さ40mmとした時のUO<sub>2</sub> (20% E) 燃料の発熱量)

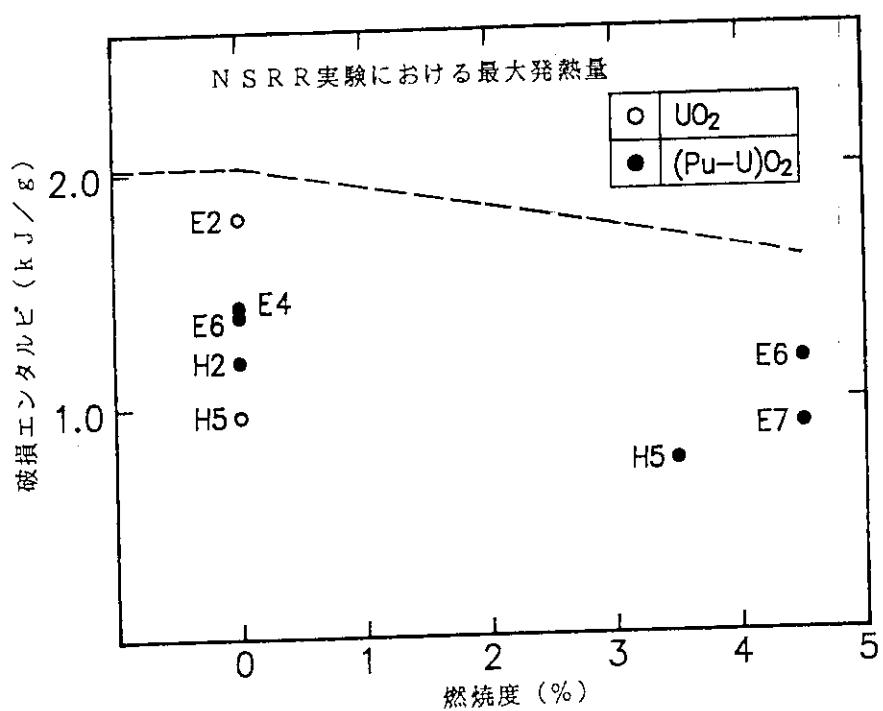


図30 TREAT実験における高速炉燃料の破損しきい値

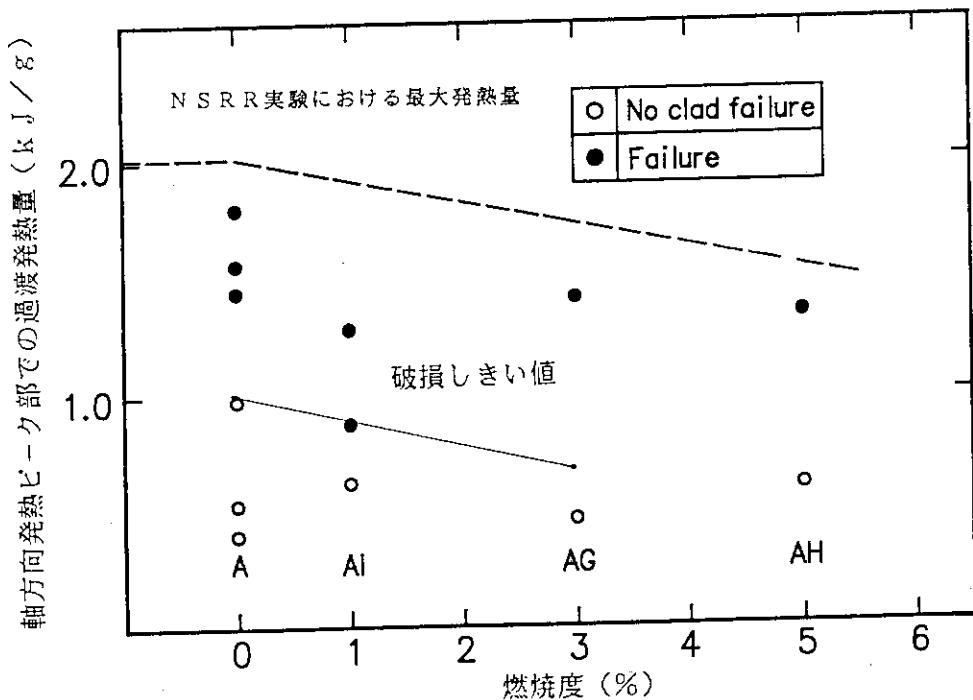


図31 CABRI実験 (Aシリーズ) の結果

運転の種類	運転モード	原子炉出力特性の代表例
定出力運転	定出力運転	<p>炉出力 300 kW 時間</p>
	単一パルス運転	<p>炉出力 23,000 MW 積分出力 130 MW·s 時間</p>
パルス運転	台形パルス運転	<p>炉出力 10MW 積分出力 110 MW·s 時間</p>
		<p>炉出力 積分出力 110 MW·s 23,000 MW 10MW 時間</p>
合成パルス運転		<p>炉出力 23,000 MW 積分出力 110 MW·s 10MW 時間</p>
		<p>炉出力 23,000 MW 積分出力 110 MW·s 10MW 時間</p>

図32 NSRRの運転の種類と運転モード及び炉出力特性の代表例<sup>11)</sup>

付録A N S R R 炉心モデル化時の各領域の原子数密度

## U-ZrHの組成

$^{235}\text{U}$ 重量	: 52 g／本	$N_A = 6.022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
$^{235}\text{U}$ 濃縮度	: 20 w/o	$M_{235} = 235.04392$
$\text{U}/(\text{ZrH} + \text{U})$	: 12 w/o	$M_{238} = 238.05077$
ZrH	: ZrH <sub>1.60</sub>	$M_{\text{zr}} = 91.22374$
		$M_{\text{H}} = 1.00782519$

---

$$\begin{aligned} {}^{235}\text{U 密度} &= \frac{52}{\pi \{(3.56 \times 0.5)^2 - (0.46 \times 0.5)^2\} \times 38.1} = (0.139444) \text{ g/cm}^3 \\ \text{U 密度} &= 0.144808 / 0.2 = (0.697220) \text{ g/cm}^3 \\ {}^{238}\text{U 密度} &= 0.724040 \times 0.8 = (0.557776) \text{ g/cm}^3 \\ \text{U-ZrH 密度} &= 0.724040 / 0.12 = (5.81017) \text{ g/cm}^3 \\ \text{ZrH 密度} &= 6.03367 \times 0.88 = (5.11295) \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

個数密度 ( $\times 10^{24}$  個/ $\text{cm}^3$ )

$$\begin{aligned} {}^{235}\text{U} &= 0.144808 / M_{235} \times N_A \times 10^{-24} = 3.57269 \times 10^{-4} \\ {}^{238}\text{U} &= 0.579232 / M_{238} \times N_A \times 10^{-24} = 1.41102 \times 10^{-3} \\ \text{Zr} &= 5.30963 / \{ 91.22374 + 1.00782519 \times 1.6 \} \\ &\quad \times N_A \times 10^{-24} = 3.31664 \times 10^{-2} \\ \text{H} &= 3.44422 \times 10^{-2} \times 1.6 = 5.30662 \times 10^{-2} \\ &\quad (52 \text{ g}) \end{aligned}$$

## 黒鉛反射体部均質密度

i) 全領域面積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \times 4.2^2 = 15.2767 \text{ cm}^2$$

ii) 黒鉛部面積

$$(3.56/2)^2 \pi = 9.95382 \text{ cm}^2$$

( 0.651569 )

iii) キャップ部面積

$$\pi \left\{ (3.65/2)^2 - (3.56/2)^2 \right\} = 0.509645 \text{ cm}^2$$

( 0.0333610 )

iv) SUS 304 部面積

$$\pi \left\{ (3.75/2)^2 - (3.65/2)^2 \right\} = 0.581195 \text{ cm}^2$$

( 0.0380446 )

v) H<sub>2</sub>O 部面積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \times 4.2^2 - \pi \left( \frac{3.75}{2} \right)^2 = 4.23203 \text{ cm}^2$$

( 0.277025 )

個数密度 ( $\times 10^{24}$  個/ $\text{cm}^3$ )

$$\text{H} = 6.6644 \times 10^{-2} \times 0.277025 = 1.84621 \times 10^{-2}$$

$$\text{O} = 3.3322 \times 10^{-2} \times 0.277025 + 1.01045 \times 10^{-5} \times 0.033361 = 9.23136 \times 10^{-3}$$

$$\text{N} = 3.78624 \times 10^{-5} \times 0.033361 = 1.26313 \times 10^{-6}$$

$$\text{C} = 8.38068 \times 10^{-2} \times 0.651569 = 5.46059 \times 10^{-2}$$

(  $4.91453 \times 10^{-2}$  ) 10 w/o 減黒鉛密度

$$\text{Mn} = 1.50008 \times 10^{-3} \times 0.0380446 = 5.70699 \times 10^{-5}$$

$$\text{Ni} = 7.41727 \times 10^{-3} \times 0.0380446 = 2.82187 \times 10^{-4}$$

$$\text{Cr} = 1.72076 \times 10^{-2} \times 0.0380446 = 6.54656 \times 10^{-4}$$

$$\text{Fe} = 5.90264 \times 10^{-2} \times 0.0380446 = 2.24564 \times 10^{-3}$$

## U-ZrHx中の水素の解離

i) Hが10%ギャップに解離した場合

燃 料

$$H = 5.30662 \times 10^{-2} \times 0.9 = 4.77596 \times 10^{-2}$$

ギャップ

$$H = \frac{5.30662 \times 10^{-2} \times 0.1 \times (1.78^2 - 0.23^2) \cdot \pi \cdot 38.1}{(1.825^2 - 1.78^2) \cdot \pi \cdot (38.1 + 8.7 \times 2)} = 6.99616 \times 10^{-2}$$

( 燃 料 )

$$6.99616 \times 10^{-2} \times 0.033361 = 2.33399 \times 10^{-3}$$

( 黒鉛反射体 )

## 調整棒吸收体部均質密度

i) 全領域面積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4.2^2 = 15.2767 \text{ cm}^2$$

ii) 天然B<sub>4</sub>C部面積

$$\pi (3.63/2)^2 = 10.3491 \text{ cm}^2$$

( 0.677444 )

iii) ギャップ部面積

$$\pi \{ (3.65/2)^2 - (3.63/2)^2 \} = 0.114354 \text{ cm}^2$$

( 7.48552 × 10<sup>-3</sup> )

iv) SUS 304部面積

$$\pi \{ (3.75/2)^2 - (3.65/2)^2 \} = 0.581195 \text{ cm}^2$$

( 0.0380446 )

v) H<sub>2</sub>O部面積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4.2^2 - (3.75/2)^2 \pi = 4.23203 \text{ cm}^2$$

( 0.277025 )

個数密度 (×10<sup>24</sup>個/cm<sup>3</sup>)

$$B^{10} = 2.05171 \times 10^{-2} \times 0.677444 = 1.38992 \times 10^{-2}$$

$$B^{11} = 8.41085 \times 10^{-2} \times 0.677444 = 5.69788 \times 10^{-2}$$

$$C = 2.61564 \times 10^{-2} \times 0.677444 = 1.77195 \times 10^{-2}$$

$$N = 3.78624 \times 10^{-5} \times 7.48552 \times 10^{-3} = 2.83420 \times 10^{-7}$$

$$H = 6.66440 \times 10^{-2} \times 0.277025 = 1.84621 \times 10^{-2}$$

$$O = 3.33220 \times 10^{-2} \times 0.277025 + 1.01045 \times 10^{-5} \times 7.48552 \times 10^{-3} = 9.23110 \times 10^{-3}$$

$$Mn = 1.50008 \times 10^{-3} \times 0.0380446 = 5.70699 \times 10^{-5}$$

$$Ni = 7.41727 \times 10^{-3} \times 0.0380446 = 2.82187 \times 10^{-4}$$

$$Cr = 1.72076 \times 10^{-2} \times 0.0380446 = 6.54656 \times 10^{-4}$$

$$Fe = 5.90264 \times 10^{-2} \times 0.0380446 = 2.24564 \times 10^{-3}$$

## 空気フォロワ一部均質密度（トランジエント棒）

i) 全領域面積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4.2^2 = 15.2767 \text{ cm}^2$$

ii)  $A\ell$  部面積

$$\pi \left( \left( \frac{3.81}{2} \right)^2 - \left( \frac{3.63}{2} \right)^2 \right) + \pi \left( \left( \frac{3.49}{2} \right)^2 - \left( \frac{3.31}{2} \right)^2 \right) = 2.01313 \text{ cm}^2 \\ (0.131778)$$

iii)  $H_2O$  部面積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4.2^2 - \pi \left( \frac{3.81}{2} \right)^2 = 3.87577 \text{ cm}^2 \\ (0.253705)$$

iv) 空気部面積

$$\pi \left( \left( \frac{3.63}{2} \right)^2 - \left( \frac{3.49}{2} \right)^2 \right) + \left( \frac{3.31}{2} \right)^2 \cdot \pi = 9.38780 \text{ cm}^2 \\ (0.614518)$$

個数密度 ( $\times 10^{24}$  個/ $\text{cm}^3$ )

$$H = 6.6644 \times 10^{-2} \times 0.253705 = 1.69079 \times 10^{-2}$$

$$O = 3.3322 \times 10^{-2} \times 0.253705 + 1.01045 \times 10^{-5} \times 0.614518 = 8.46017 \times 10^{-3}$$

$$N = 3.78624 \times 10^{-5} \times 0.614518 = 2.32671 \times 10^{-5}$$

$$A\ell = 6.02617 \times 10^{-2} \times 0.131778 = 7.94117 \times 10^{-3}$$

上部格子板 + H<sub>2</sub>O 部均質密度

i) 全領域体積

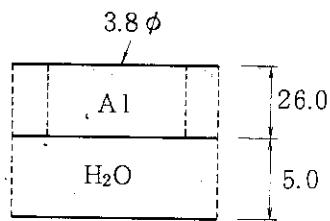
$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4.2^2 \cdot 31.0 = 473.577 \text{ cm}^3$$

ii) Aℓ 部体積

$$\left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4.2^2 - \pi \left( \frac{3.8}{2} \right)^2 \right\} \times 26 = 102.324 \text{ cm}^3 \\ (0.216066)$$

iii) H<sub>2</sub>O 部体積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4.2^2 \times 5 + \pi \left( \frac{3.8}{2} \right)^2 \times 26 = 371.253 \text{ cm}^3 \\ (0.783933)$$

個数密度

$$H = 6.6644 \times 10^{-2} \times 0.783933 = 5.22444 \times 10^{-2}$$

$$O = 3.3322 \times 10^{-2} \times 0.783933 = 2.61222 \times 10^{-2}$$

$$A\ell = 6.02617 \times 0.216066 = 1.30205 \times 10^{-2}$$

下部格子板 + H<sub>2</sub>O 部均質密度

i) 全領域体積

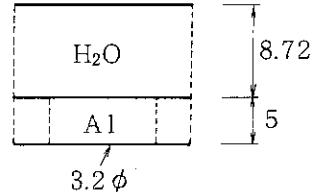
$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4.2 \cdot 13.72 = 209.596$$

ii) Aℓ 部体積

$$\left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4.2^2 - \pi \left( \frac{3.2}{2} \right)^2 \right\} \times 5.0 = 173.425 \\ (0.827425)$$

iii) H<sub>2</sub>O 部体積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \times 4.2^2 \times 8.72 + \pi \left( \frac{3.2}{2} \right)^2 \times 5.0 = 173.425 \\ (0.827425)$$

個数密度

$$H = 6.6644 \times 10^{-2} \times 0.827425 = 5.51429 \times 10^{-2}$$

$$O = 3.3322 \times 10^{-2} \times 0.827425 = 2.75715 \times 10^{-2}$$

$$A\ell = 6.02617 \times 10^{-2} \times 0.172575 = 1.03997 \times 10^{-2}$$

**実験孔壁部均質密度**

A<sub>ℓ</sub> 外壁の最短距離は 24.625 cm であるが燃料セルと重なるので 24.2487 cm として計算する。

i) A<sub>ℓ</sub> 部面積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \times 24.2487^2 - \frac{\sqrt{3}}{2} 22.9787^2 = 51.9432 \text{ cm}^2 \\ (0.260836)$$

ii) SUS 304 部面積

$$\pi \{ 11.43^2 - 10.795^2 \} = 44.3369 \text{ cm}^2 \\ (0.222640)$$

iii) Air 部面積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \times 22.9787^2 - 11.43^2 \times \pi = 46.8462 \text{ cm}^2 \\ (0.235241)$$

iv) H<sub>2</sub>O 部面積

$$37 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4.2^2 - \frac{\sqrt{3}}{2} \times 24.2487^2 = 56.015 \text{ cm}^2 \\ (0.281283)$$

v) 全領域面積

$$37 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4.2^2 - \pi \times 10.795^2 = 199.14131 \text{ cm}^2$$

**個数密度**

$$H = 6.6644 \times 10^{-2} \times 0.281283 = 1.87458 \times 10^{-3}$$

$$O = 3.3322 \times 10^{-2} \times 0.281283 \times 1.01045 \times 10^{-5} \times 0.235241 = 9.37529 \times 10^{-3}$$

$$N = 3.78624 \times 10^{-5} \times 0.235241 = 8.90679 \times 10^{-6}$$

$$A\ell = 6.02617 \times 10^{-2} \times 0.260836 = 1.57184 \times 10^{-2}$$

$$Mn = 1.50008 \times 10^{-3} \times 0.22264 = 3.33978 \times 10^{-4}$$

$$Ni = 7.41727 \times 10^{-3} \times 0.22264 = 1.65138 \times 10^{-3}$$

$$Cr = 1.72076 \times 10^{-2} \times 0.22264 = 3.83110 \times 10^{-3}$$

$$Fe = 5.90264 \times 10^{-2} \times 0.22264 = 1.31416 \times 10^{-2}$$

## 上部端栓 + 上部格子板部均質密度

i) 全領域体積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \times 4.2^2 \times 31 = 473.577 \text{ cm}^3$$

ii) Aℓ 部体積

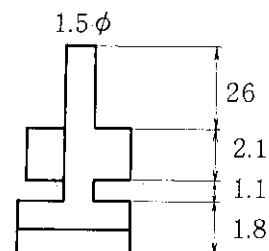
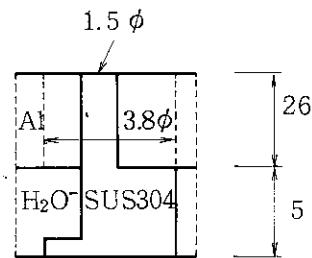
$$\left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} \times 4.2^2 - \pi (3.8/2)^2 \right\} \times 26 = 102.324 \text{ cm}^3 \\ (0.216066)$$

iii) SUS304 部体積

$$\begin{aligned} & \pi \times \left(\frac{1.5}{2}\right)^2 \times 26 + \pi \cdot \left(\frac{3.75}{2}\right)^2 \times 1.8 \\ & + \pi \times \left(\frac{1.5}{2}\right)^2 \times 1.1 + \\ & \pi \times \left(\frac{1.5}{2}\right)^2 \times 2.1 + 0.7 \times 1.125 \times 2.1 \times 3 = 76.4423 \text{ cm}^3 \\ & (0.161415) \end{aligned}$$

iv) H<sub>2</sub>O 部

$$473.577 - 102.324 - 76.4423 = 294.811 \\ (0.622519)$$

個数密度 ( $\times 10^{24}$  個  $\times \text{cm}^3$ )

$$H = 6.6644 \times 10^{-2} \times 0.622519 = 4.14872 \times 10^{-2}$$

$$O = 3.3322 \times 10^{-2} \times 0.622519 = 2.07436 \times 10^{-2}$$

$$A\ell = 6.02617 \times 10^{-2} \times 0.216066 = 1.30205 \times 10^{-2}$$

$$Mn = 1.50008 \times 10^{-3} \times 0.161415 = 2.42135 \times 10^{-4}$$

$$Ni = 7.41727 \times 10^{-3} \times 0.161415 = 1.19726 \times 10^{-3}$$

$$Cr = 1.72076 \times 10^{-2} \times 0.161415 = 2.77756 \times 10^{-3}$$

$$Fe = 5.90264 \times 10^{-2} \times 0.161415 = 9.72775 \times 10^{-3}$$

## 下部端栓 + 下部格子板部均質密度

i) 全領域体積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \times 4.2^2 \times 13.72 = 209.596 \text{ cm}^3$$

ii) Al 部体積

$$\left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} \times 4.2^2 - \pi \times \left( \frac{3.2}{2} \right)^2 \right\} \times 5 = 36.1711 \text{ cm}^3$$

( 0.172575 )

iii) SUS 部体積

$$\begin{aligned} & \pi \times \left( \frac{3.75}{2} \right)^2 \times 0.9 + \pi \times \left( \frac{1.5}{2} \right)^2 \times 5.8 \\ & + 3 \times 0.36 \times 1.152 \times 3.3 + \frac{3}{2} \times 0.36 \times 1.125 \times 1.5 \\ & + \pi \times 0.32^2 \times 1.8 = 25.6894 \text{ cm}^3 \\ & \quad ( 0.704860 ) \end{aligned}$$

iv) H<sub>2</sub>O 部体積

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \times 4.2^2 \times 13.72 - 36.1711 - 25.6894 = 147.736 \text{ cm}^3$$

( 0.704860 )

個数密度 ( $\times 10^{24}$  個/cm<sup>3</sup>)

$$H = 6.6644 \times 10^{-2} \times 0.704860 = 4.69747 \times 10^{-2}$$

$$O = 3.3322 \times 10^{-2} \times 0.704860 = 2.34873 \times 10^{-2}$$

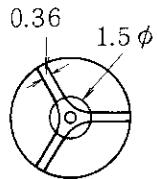
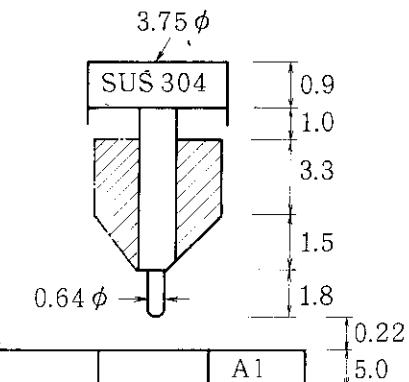
$$Al = 6.02617 \times 10^{-2} \times 0.172575 = 1.03997 \times 10^{-2}$$

$$Mn = 1.50008 \times 10^{-3} \times 0.122566 = 1.83859 \times 10^{-4}$$

$$Ni = 7.41727 \times 10^{-3} \times 0.122566 = 9.09105 \times 10^{-4}$$

$$Cr = 1.72076 \times 10^{-2} \times 0.122566 = 2.10907 \times 10^{-3}$$

$$Fe = 5.90264 \times 10^{-2} \times 0.122566 = 7.23463 \times 10^{-3}$$



付録B 水カプセル体系モデル化時の  
代表的領域の原子数密度

## 水力プロセス系原子数密度表、その1

(単位  $\times 10^{24}$  個/cc)

核種	$UO_2$ ベレット (実験No.206-32)	SUS304	A1 (2.7 g/cm <sup>3</sup> )	He (1気圧) (0.000179 g/cm <sup>3</sup> )	ジルカロイ-4 (6.55 g/cm <sup>3</sup> )	ジルカロイ-2 (6.55 g/cm <sup>3</sup> )
U-235	$2.35947 \times 10^{-3}$					
U-238	$2.06918 \times 10^{-2}$					
O	$4.62031 \times 10^{-2}$					
Mn		$1.50003 \times 10^{-3}$				
Ni		$7.41727 \times 10^{-3}$			$3.35820 \times 10^{-5}$	
Cr		$1.72076 \times 10^{-2}$		$7.58064 \times 10^{-5}$	$7.58604 \times 10^{-5}$	
Fe		$5.90264 \times 10^{-2}$		$1.41259 \times 10^{-4}$	$8.47554 \times 10^{-5}$	
Sn				$4.98497 \times 10^{-4}$	$4.98497 \times 10^{-4}$	
Zr				$4.24626 \times 10^{-2}$	$4.24756 \times 10^{-2}$	
Al			$6.02617 \times 10^{-2}$			
Nb						
He				$2.69311 \times 10^{-5}$ (He u 断面積ライナ リ-kiinore 0とく)		
Ti						
H						

水力プロセル体系原子数密度表、その2

(単位  $\times 10^{24} \text{ 原子/cc}$ )

核種	インコネル X-700 (8.25 g/cm³)	鉄 (7.37 g/cm³)	H₂O (20°C) (0.996585 g/cm³)	空気 (20°C, 1気圧)
U - 235				
U - 238				
O			$3.33220 \times 10^{-2}$	$1.01045 \times 10^{-5}$
Mn				
Ni	$6.26856 \times 10^{-2}$			
Cr	$1.43324 \times 10^{-2}$			
Fe	$6.22725 \times 10^{-3}$	$8.48626 \times 10^{-2}$		
Sn				
Zr				
Al	$1.10478 \times 10^{-3}$			
Nb	$4.27803 \times 10^{-4}$			
He				
Ti	$2.59300 \times 10^{-3}$			
H			$6.66440 \times 10^{-2}$	
N				$3.78624 \times 10^{-5}$

## 水力セル体系原子数密度表、その3

(単位  $\times 10^{24} \text{ 原子/cc}$ )

核種	燃料棒 上部、下部端栓	燃料棒 スプリング	燃料棒 ムーフィントマーカ	燃料棒 変位測定用コア	燃料棒 スペーサー	燃料棒 He + 被覆管
U-235						
U-238						
O						
Mn						
Ni	$1.88057 \times 10^{-3}$	$2.52201 \times 10^{-5}$				
Cr	$7.58604 \times 10^{-5}$	$4.46510 \times 10^{-4}$	$7.35087 \times 10^{-5}$	$1.65376 \times 10^{-5}$	$7.58604 \times 10^{-5}$	$6.64537 \times 10^{-5}$
Fe	$1.41259 \times 10^{-4}$	$2.17613 \times 10^{-4}$	$9.44458 \times 10^{-5}$	$6.37626 \times 10^{-2}$	$1.36880 \times 10^{-4}$	$1.2374 \times 10^{-4}$
Sn	$4.98497 \times 10^{-4}$	$1.03672 \times 10^{-4}$	$4.83044 \times 10^{-4}$	$1.03672 \times 10^{-4}$	$4.83044 \times 10^{-4}$	$4.3668 \times 10^{-4}$
Zr	$4.24626 \times 10^{-2}$	$9.25685 \times 10^{-3}$	$4.11463 \times 10^{-2}$	$9.25685 \times 10^{-3}$	$4.11463 \times 10^{-2}$	$3.71972 \times 10^{-2}$
Al (Sn + 断面積計算 Zr と計算値)	$3.31434 \times 10^{-5}$					
Nb		$1.28341 \times 10^{-5}$				
He		$2.02522 \times 10^{-5}$	$8.34864 \times 10^{-7}$	$8.34864 \times 10^{-7}$	$8.34864 \times 10^{-7}$	$3.33945 \times 10^{-6}$
Ti		$7.77900 \times 10^{-5}$				
H						

## 水力プロセス原子数密度表，表4

(単位  $\times 10^{24}$  原子/cm<sup>3</sup>)

核種	天然 UO <sub>2</sub>	10% 濃縮 UO <sub>2</sub> 実験番号 206-32	20% 濃縮 UO <sub>2</sub> 実験番号 260-1	混合酸化物(1次) 実験番号 701-8	混合酸化物(2次) 実験番号 702-2
U-235	$5.638 \times 10^{-5}$	$2.329 \times 10^{-3}$	$4.701 \times 10^{-3}$	$1.788 \times 10^{-4}$	$2.410 \times 10^{-3}$
U-238	$2.783 \times 10^{-2}$	$2.069 \times 10^{-2}$	$1.857 \times 10^{-2}$	$2.470 \times 10^{-2}$	$2.142 \times 10^{-2}$
Pu-239				$1.133 \times 10^{-3}$	$2.011 \times 10^{-3}$
Pu-240				$3.907 \times 10^{-4}$	$5.136 \times 10^{-4}$
Pu-241				$1.262 \times 10^{-4}$	$1.714 \times 10^{-4}$
Pu-242				$5.166 \times 10^{-5}$	$4.606 \times 10^{-5}$
Am-241				$3.804 \times 10^{-5}$	$8.433 \times 10^{-5}$
O	$5.577 \times 10^{-2}$	$4.620 \times 10^{-2}$	$4.653 \times 10^{-2}$	$5.323 \times 10^{-2}$	$5.331 \times 10^{-2}$

付録C ナトリウムカプセル体系モデル化時の  
代表的領域の原子数密度

ナトリウムカプセル体系原子数密度表、その1

JAERI-M 90-067

核種	下部セシサ-+断熱材	燃料上部	燃料下部	$\text{Na}_{600^\circ\text{C}}$	S USS 304	S USS 316
U-235						
U-238						
O	$2.33326 \times 10^{-2}$					
Mn	$1.00005 \times 10^{-3}$	$1.12461 \times 10^{-3}$	$4.333840 \times 10^{-4}$		$1.50008 \times 10^{-3}$	$1.50008 \times 10^{-3}$
Ni	$6.08082 \times 10^{-3}$	$7.76104 \times 10^{-3}$	$2.35248 \times 10^{-3}$		$7.41727 \times 10^{-3}$	$1.08252 \times 10^{-2}$
Cr	$1.08680 \times 10^{-2}$	$1.17310 \times 10^{-2}$	$5.35248 \times 10^{-3}$		$1.72076 \times 10^{-2}$	$1.533963 \times 10^{-2}$
Fe	$3.80158 \times 10^{-2}$	$4.16659 \times 10^{-2}$	$3.47197 \times 10^{-2}$		$5.90264 \times 10^{-2}$	$5.50211 \times 10^{-2}$
Sn						
Zr						
Al	$1.55551 \times 10^{-2}$					
Nb						
He		$6.74077 \times 10^{-6}$	$9.25194 \times 10^{-6}$			
Ti		(He ハライド-珪酸塩共存)				
H						
Mo	$4.09260 \times 10^{-4}$	$7.85401 \times 10^{-4}$	$1.31985 \times 10^{-4}$			$1.22778 \times 10^{-3}$
Na				$3.13478 \times 10^{-3}$	$2.11652 \times 10^{-2}$	
Ar						

## ナトリウムカバーセル体系原子数密度表、その2

核種	空気 20°C 1気圧	M <sub>0</sub>	ZrHx 密度 5.61g/cm <sup>3</sup>	$\eta_{\text{ミヤビ-Al}^2\text{O}_3}$ 230°C (TD5%)	Ar 230°C 1気圧	A <sub>1</sub> 2.7 g/cc
U-235						
U-238						
O	$1.01045 \times 10^{-5}$			$3.49989 \times 10^{-3}$		
Mn						
Ni						
Cr						
Fe						
Sn						
Zr				$3.63118 \times 10^{-2}$		
Al				$2.33326 \times 10^{-3}$	$6.02617 \times 10^{-2}$	
Nb						
He						
Ti						
H				$6.53612 \times 10^{-2}$		
Mo				$6.40242 \times 10^{-2}$		
N	$3.73824 \times 10^{-5}$				$1.44675 \times 10^{-5}$	
Na					Ar# ライブリ- 水素 NとLi。	
Ar						

## ナトリウムカプセル体系原子数密度表，その3

	ジルカロイ4	ベリリウム	ボリエチレン	有機物 $H/C = 1.0$	有機物 $H/C = 0.5$
密度( $g/cm^3$ )	6.55	1.85	0.95	1.0	1.0
H		$8.157 \times 10^{-2}$	$4.626 \times 10^{-2}$	$2.406 \times 10^{-2}$	
C		$4.079 \times 10^{-2}$	$4.626 \times 10^{-9}$	$4.812 \times 10^{-2}$	
Be		$1.236 \times 10^{-2}$			
Ni	$3.358 \times 10^{-5}$				
Cr	$7.586 \times 10^{-5}$				
Fe	$8.476 \times 10^{-5}$				
Sn	$4.985 \times 10^{-4}$				
Zr	$4.248 \times 10^{-2}$				

## ナトリウムカプセル体系原子数密度表，その4

	UO <sub>2</sub> 燃料 5%濃縮	UO <sub>2</sub> 燃料 15%濃縮	UO <sub>2</sub> 燃料 30%濃縮	(Pu, U)O <sub>2</sub> 燃料 Pu富化度18%	(Pu, U)O <sub>2</sub> 燃料 Pu富化度24%
密度( $g/cm^3$ )	1.041	1.041	1.041	1.105	1.108
U-235	$1.176 \times 10^{-3}$	$3.526 \times 10^{-3}$	$7.050 \times 10^{-3}$	$5.225 \times 10^{-5}$	$4.856 \times 10^{-5}$
U-238	$2.205 \times 10^{-2}$	$1.973 \times 10^{-2}$	$1.624 \times 10^{-2}$	$1.715 \times 10^{-2}$	$1.593 \times 10^{-2}$
Pu-239				$2.633 \times 10^{-3}$	$3.520 \times 10^{-3}$
Pu-240				$9.365 \times 10^{-4}$	$1.252 \times 10^{-3}$
Pu-241				$1.865 \times 10^{-4}$	$2.494 \times 10^{-4}$
Pu-242					
Am-241					
C					
N					
O	$4.646 \times 10^{-2}$	$4.651 \times 10^{-2}$	$4.659 \times 10^{-2}$	$4.149 \times 10^{-2}$	$4.149 \times 10^{-2}$

## ナトリウムカプセル体系原子数密度表、その5

密度(g/cm <sup>3</sup> )	(Pu, U)O <sub>2</sub> 燃料 Pu富化度 30%	(Pu, U)C燃料 Pu富化度 30%	(Pu, U)N燃料 Pu富化度 30%	金属燃料 U-19Pu-10Zr	金属燃料被覆管
11.11	11.54	12.17	10.73	7.82	
U-235	4.485 × 10 <sup>-5</sup>	6.212 × 10 <sup>-5</sup>	6.550 × 10 <sup>-5</sup>	1.112 × 10 <sup>-2</sup>	
U-238	1.472 × 10 <sup>-2</sup>	2.038 × 10 <sup>-2</sup>	2.149 × 10 <sup>-2</sup>	8.285 × 10 <sup>-3</sup>	
Pu-239	4.413 × 10 <sup>-3</sup>	6.108 × 10 <sup>-3</sup>	6.441 × 10 <sup>-3</sup>	3.594 × 10 <sup>-3</sup>	
Pu-240	1.569 × 10 <sup>-3</sup>	2.172 × 10 <sup>-3</sup>	2.291 × 10 <sup>-3</sup>	1.278 × 10 <sup>-3</sup>	
Pu-241	3.126 × 10 <sup>-4</sup>	4.327 × 10 <sup>-4</sup>	4.562 × 10 <sup>-4</sup>	2.546 × 10 <sup>-4</sup>	
Pu-242					
Zr				7.080 × 10 <sup>-3</sup>	
C					
N					
O	2.940 × 10 <sup>-2</sup>				
C <sub>r</sub>					
Mo					
W					
V					
Fe					
				7.249 × 10 <sup>-2</sup>	