

JAERI-Tech

96-025



^{239}Pu 高濃度のプルトニウムを装荷した
ペブルベッド型高温ガス炉の温度係数の検討

1996年6月

徳原一実・山下清信・新藤隆一・藤本 望

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力公済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)高野高速印刷

^{239}Pu 高濃度のプルトニウムを装荷した
ペブルベッド型高温ガス炉の温度係数の検討

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

徳原 一実・山下 清信・新藤 隆一
藤本 望

(1996年5月13日受理)

ペブルベッド型高温ガス炉に ^{239}Pu 高濃度のプルトニウムを装荷した場合、温度係数が正になると言う問題があった。そこで、このプルトニウムを劣化U等の親物質と混合せずに、全炉心にこの燃料のみを装荷する炉心を対象として、温度係数を負にする方法を検討した。

検討の結果、熱領域に共鳴捕獲反応を持つ核種 (E_r) を炉心に添加すれば、温度係数が負になることを確認した。また、この場合には燃料球の燃焼度が低下するが、 E_r を添加せずとも、 Pu の装荷量を増大して熱中性子束のピークを小さくすれば、燃焼度の低下なしに温度係数を負にできることを明らかにした。

Study on Temperature Coefficients of Reactivity for Pebble Bed Type
HTGRs Loaded with highly ^{239}Pu -enriched Plutonium

Kazumi TOKUHARA, Kiyonobu YAMASHITA, Ryuichi SHINDO
and Nozomu FUJIMOTO

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 13, 1996)

The temperature coefficients of reactivity for pebble bed type HTGRs loaded with highly ^{239}Pu -enriched plutonium were positive in certain temperature region. Therefore, we have studied the method to make the temperature coefficients negative. The core fully loaded with highly ^{239}Pu -enriched plutonium not mixed with fertile material like uranium is selected for this study.

From the study, we have confirmed that the temperature coefficients of reactivity can be made negative with loss of fuel burnup if the core is loaded with material containing a nuclide such as erbium which has resonance absorption in the thermal neutron energy region. Furthermore, we have made clear that if the thermal neutron flux peak is decreased by increasing the amount of plutonium, the temperature coefficients of reactivity can be made negative without loss of fuel burnup.

Keywords : Temperature Coefficient, Weapons-grade Plutonium, Pebble Bed Type HTGR, Nuclear Characteristics, Thermal Reactor

目 次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 1. 概 要 | 1 |
| 2. 温度係数の検討 | 2 |
| 2.1 兵器級のPuを装荷した炉心の等温温度係数 | 2 |
| 2.2 Thの添加が温度係数に及ぼす効果 | 3 |
| 2.3 Erの添加が等温温度係数に及ぼす効果 | 5 |
| 2.4 Puの装荷量を増大することが等温温度係数に及ぼす効果 | 6 |
| 2.5 燃料部の圧縮が等温温度係数に及ぼす効果 | 6 |
| 3. ま と め | 8 |
| 謝 辞 | 9 |
| 参考文献 | 9 |
| 付 録 | 29 |

Contents

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Outline | 1 |
| 2. Study on Temperature Coefficients of Reactivity | 2 |
| 2.1 Temperature Coefficients of The Core Loaded with Weapons-grade Pu | 2 |
| 2.2 Effect of Th Addition on Temperature Coefficients | 3 |
| 2.3 Effect of Er Addition on Temperature Coefficients | 5 |
| 2.4 Effect of Pu Increase in Amount on Temperature Coefficients | 6 |
| 2.5 Effect of Compression of Fuel Zone of Temperature Coefficients | 6 |
| 3. Conclusion | 8 |
| Acknowledgments | 9 |
| References | 9 |
| Appendix | 29 |

1. 概要

核兵器の解体より出てくるプルトニウム（以下、兵器級Puと略称）処理のオプションの一つとして、原子炉を用いた兵器級Puの消滅が考えられている¹⁾。兵器級Puは核分裂性核種である²³⁹Puの含有率が96%と高いため、一般にはこのPu燃料を装荷した原子炉は、同じ燃焼度を得る場合、初期過剰反応度が低濃縮ウラン燃料（以下、低濃縮U燃料と略称）の炉心よりも高くなり、過剰反応度の抑制が困難であることが予想される。原子炉の運転中でも燃料の連続交換が可能なペブルベッド型高温ガス炉は、原理的にこの過剰反応度を必要としないため、高燃焼度を達成でき、兵器級Puの高消滅が可能である^{2), 3)}。しかし、熱中性子炉に兵器級Puを装荷した場合、温度係数が正になるという問題を抱えており、ペブルベッド型高温ガス炉も同じである。そこで、兵器級Puを装荷した本原子炉の温度係数を負の方向に改善する対策を検討した。本検討では、Puを劣化U等の親物質と混合しないPuのみの燃料を用い、全炉心にこのPu燃料を装荷した場合を対象とした。解析には高温ガス炉等の核特性解析コードシステムのSRAC⁴⁾を使用した。

検討の結果、熱領域に共鳴捕獲反応を持つ核種（Er）を炉心に添加すれば、温度係数が負になる⁵⁾ことを確認した。また、この場合には燃料球の燃焼度が低下するが、Erを添加せずとも、Puの装荷量を増大して熱中性子束のピークを低減すれば、燃焼度の低下なしに温度係数を負にできることを明らかにした。

以下、第2章では、兵器級Puを装荷した炉心の温度係数が正になる原因を考察し、これを解決する改善策として、Thを炉心に添加する効果、Erを炉心に添加する効果、炉心に装荷するPuの量を増大する効果、及び、燃料粒子が充填されている燃料球のマトリックス部を中心部に向けて圧縮する効果（以下、燃料部の圧縮と略称）を、それぞれ検討した。第3章では、これらの検討結果のまとめについて述べる。

2. 温度係数の検討

温度係数は、原子炉を安全に運転するに際して強い影響を及ぼすため、原子炉の設計では重要な特性である。兵器級のPuは熱中性子炉で採用されている低濃縮ウラン燃料（低濃縮U燃料）とは組成が大きく異なるため、これを燃料として装荷した炉心の温度係数の特性は、従来の熱中性子炉とは大巾に異なるものとなる。従って、熱中性子炉で兵器級のPuを消滅することを考えた場合、兵器級のPuを装荷した炉心の温度係数の新たな検討が必須である。

以下では、兵器級のPuを装荷したペブルベッド型高温ガス炉（熱中性子炉）の温度係数の問題点を摘出し、この問題点の対策を検討した。対策として検討した内容は、兵器級のPuを装荷した炉心の温度係数が、Thの添加、Erの添加、Puの装荷量の増加、及び、燃料部の圧縮により受ける効果である。また、出力変化に対しては、燃料温度の変化の後に減速材温度が変化する。従って、温度係数は燃料温度の変化と減速材温度の変化を分離して検討すべきであるが、本検討ではこの2つの温度が同時に変化する場合の等温温度係数を検討した。

2.1 兵器級のPuを装荷した炉心の等温温度係数

高温ガス炉に使われる従来の燃料は、核分裂性物質としてU-235、親物質としてU-238又はTh-232を使用している。U-235、U-238及びTh-232は熱中性子領域では単調減少する全反応断面積を有している。一方、兵器級のPuは約94%が核分裂性物質のPu-239であり、残り6%が親物質のPu-240である。Pu-239及びPu-240は熱中性子領域に大きな共鳴反応を有しており、これらの反応断面積は単調減少しない。

従来の低濃縮U燃料と兵器級のPu燃料を比較した場合、前者には90%以上の多量の親物質が存在するのに対し、後者には10%未満しか親物質が存在しない。親物質はドップラー効果により温度係数を負の方向に大きくするため、この物質が少ない兵器級のPu燃料ではU燃料に比べドップラー係数が正の方向に大きくなると予想される。また、Pu燃料では、共鳴反応により減速材温度効果が影響を受け、熱中性子領域のPu-239の核分裂の共鳴反応が最大となる温度近傍では減速材温度係数は低濃縮U燃料に比べ正の方向に大きくなると予想される。

兵器級のPu燃料で比較した場合、減速材温度係数の絶対値の方がドップラー係数の絶対値よりも大きいため、等温温度係数には減速材温度効果の影響が大きく出る。例えば、兵器級のPuを装荷したペブルベッド型高温ガス炉のドップラー係数、減速材温度係数及び等温温度係数はTable 1、Fig. 1の通りであり、等温温度係数には減速材温度効果の影響が大きく出ている。従って、兵器級のPu燃料を装荷した炉心の等温温度係数の特性を評価するには、減速材温度効果のもととなる熱中性子領域の主要な核種の各種反応率を検討すればよい。

兵器級のPuの中で、熱中性子領域での核反応を生じる主要な核種は、Pu-239、Pu-2

40及び核分裂生成物のXe-135である。これらはいずれも熱中性子領域に大きな反応断面積を持っている。Pu-239は0.3eVに核分裂の共鳴反応があり、Pu-240は1eVに中性子捕獲の共鳴反応を持つ。Xe-135は0.1eVを境としてエネルギーの増大とともに急激に減少する中性子捕獲の断面積を持っている。これら兵器級のPu中の主要な核種の断面積をFig. 2に示す。熱中性子領域の反応率は、この断面積と熱中性子束との積から求まる。熱中性子束分布は上記核種の共鳴反応よりも低エネルギー側にピークを持った分布になっており、このピークは燃焼とともに大きくなり、温度の上昇とともに高エネルギー側に移行する。兵器級のPuをペブルベッド型高温ガス炉に装荷した場合の中性子エネルギースペクトルの例をFig. 3及びFig. 4に示し、このスペクトルの燃焼及び温度に対する変化をそれぞれFig. 5及びFig. 6に示す。これらの例は、ペブルベッド型高温ガス炉の1燃料球あたりに0.5gの兵器級のPuを装荷した場合のものである。

燃焼が進行すると中性子スペクトルがソフト化する。このため、上記の断面積の特性と熱中性子束の変化から、中性子束と断面積との相関でPu-239の共鳴核分裂効果とXe-135の吸収効果が大きく現れる温度領域（温度領域Lと略称）では、Pu-239の熱中性子領域の共鳴による核分裂反応、及び、Xe-135による中性子吸収率減少の効果が強調され、Pu-240による共鳴吸収効果が大きく現れる温度領域（温度領域Hと略称）では、Pu-240の熱中性子領域の共鳴による中性子吸収反応が強調されることが分かる。従って、燃焼とともに等温温度係数は、温度領域Lで正の方向に大きくなり、温度領域Hで負の方向に大きくなると予想される。ペブルベッド型高温ガス炉に兵器級Puを装荷した場合の等温温度係数の例をTable 2とFig. 7に示す。

この例から分かるように、燃焼中期以降では等温温度係数が正になる温度領域が生ずる。これは、原子炉の運転上問題になるため、設計上の対策が必要である。次節以降に、この対策の検討結果を述べる。

2.2 Thの添加が温度係数に及ぼす効果

兵器級のPuを装荷した炉心の温度係数が正になる要因の一つは、親物質が少ないために起こるドップラー効果の減少である。そこで、本節では、Puの生成が殆ど無視しうる親物質であるThを、炉心に装荷した場合の等温温度係数の改善効果を検討した。

1)兵器級のPuとThを混合して装荷した場合

まず、兵器級PuとThを同一燃料に混合して装荷した場合の検討について述べる。

Th燃料の中で減速材温度効果に寄与する主な核種としては、Th-232と核変換により生成されるU-233がある。Fig. 8に、兵器級Pu燃料とTh燃料中に存在する主要な核種の熱領域の全断面積と中性子スペクトルとの関係の例を示す。中性子スペクトルは、1燃料球に0.5gの兵器級Puを装荷した平衡状態近傍のペブルベッド型高温ガス炉のものである。この図より明らかなように、Th-232は捕獲断面積が熱領域で緩やかに $1/v$ で減少しているため、温度が上昇した場合、熱中性子スペクトルが高エネルギー側へシフ

トすることにより、中性子の吸収率が減少する。このため、Th-232は減速材温度効果に対しては正の反応度効果を持つ。U-233はTh-232とは逆に、核分裂断面積が熱領域で緩やかに減少しているため、温度が上昇した場合、中性子の核分裂反応が減少する。このため、U-233は減速材温度効果に対しては負の反応度効果を持つ。U-233の温度効果の例をTable 3とFig. 9に示す。この例は、1燃料球に0.5gの兵器級Puを装荷した平衡状態近傍の低温(300K)の炉心に1燃料球に6gのThを添加したものである。燃焼初期ではU-233が存在しないため、Thによる減速材温度効果は正の方向に働く。燃焼が進むとU-233が生成され、負の方向に働く減速材温度効果が加わるが、U-233の生成量はTh-232の約2%と少ないため、Th-232とU-233の減速材温度効果は加算しても正の方向に働く。また、負の方向に働くドップラー効果は減速材温度効果よりも弱いため、ドップラー効果と減速材温度効果を加算した等温温度係数は、Thの添加により正の方向に大きくなる。この例としてFig. 1と同じ条件の炉心にThを6g添加した場合をTable 4とFig. 10に示す。但し、この例では、燃焼により生じるU-233の効果を除いている。Fig. 1とFig. 10の比較では、温度領域LでのThによるドップラー効果は、Th添加前に比べ2割程度しか大きくない。これに対し、同じ温度近傍での減速材温度効果は、Fig. 1に比べFig. 10では8割程度大きくなり、ドップラー効果より影響が大きい。従って、等温温度係数はThの添加によりThの添加前に比べ正の方向に大きくなっている。

また、ドップラー効果と減速材温度効果はThの添加量の増加とともに大きくなるが、ドップラー効果にはThの添加量の増加により自己遮へいが効いてくるため、Thの添加量を増大すると、Thの添加に対して遮へい効果の弱い減速材温度効果の方が支配的になる。従って、ドップラー効果と減速材温度効果の和である等温温度係数がThの添加により正の方向に大きくなる効果は、Thの添加量が増す程大きくなる。この例として、Thを1燃料球あたり18g添加した場合の兵器級Puを装荷した平衡状態近傍の炉心の温度係数の内訳を、Table 5とFig. 11に示す。Thを18g添加した場合は、Thを1燃料球あたり6g添加したFig. 10の例に比べ、600K近傍で、ドップラー効果は1割程度、減速材温度効果は9割程度、それぞれ負の方向と正の方向に大きくなっている。従って、Thを18g添加した場合はThを6g添加した場合に比べ、ドップラー効果の増加よりも減速材温度効果の増加の方が大きいため、600K近傍の等温温度係数は正の方向に2.5倍程度大きくなっている。

以上から、兵器級のPuを装荷した炉心にThを添加した場合、等温温度係数は正の方向に大きくなり、この効果はThの添加量が多い程大きい。また、この傾向は燃焼が進んでも変わらない。Table 6, Fig. 12及びFig. 13には、炉心に1個当たり6gのThを含む燃料球を添加した場合の等温温度係数の例を示した。Fig. 12は燃焼初期のものであり、Fig. 13は平衡状態近傍のものである。

2)兵器級のPuとThを分離して装荷した場合

Thと兵器級のPuを分離して2個分のPuを1つの燃料球に装荷した場合には、Pu燃料球の熱中性子領域の遮へい効果が強くなるため、減速材温度係数に対して正の方

向に働くXe-135の効果及びPu-239の効果弱められ、等温温度係数が負になると考えた。そこで、ここでは、兵器級のPuとThを分離して別々の燃料球に装荷した場合の効果について検討した。

Pu燃料球とTh燃料球を分離すれば、Pu燃料球中の核種に対する遮へい効果が大きくなり、Th燃料球中の核種に対する遮へい効果が小さくなる。この結果、Pu燃料球内の熱中性子束が小さくなるとともに、Pu-239及びPu-240の熱領域の共鳴の実効断面積が小さくなり、PuとThを混合した場合に比べ、温度領域Lでは温度係数が負の方向に大きくなり、温度領域Hでは温度係数は正の方向に大きくなる。一方、Th燃料中に生成し、減速材温度係数に対しては負の効果を持つU-233の熱領域の断面積は、Puの共鳴反応による遮へい効果が弱くなるため大きくなる。このため、U-233による中性子吸収率が減少する温度近傍では、温度係数は、U-233により負の方向に移行する。Fig. 14とFig. 15には、兵器級PuとThを分離した場合と混合した場合の吸収断面積と中性子束の比較例を示す。この例は、1燃料球に0.5gの兵器級Puを装荷した平衡状態近傍のペブルベッド型高温ガス炉に、1個当たり6gのThを含む燃料球を分離して装荷した場合と、炉心全体での減速比を保存するように、燃料球に兵器級Puを0.25gとThを3g混合装荷した場合との比較である。縦軸は、混合した場合に対する分離した場合の吸収断面積と中性子束の相対比である。Fig. 14は、Xe-135の中性子吸収率の減少効果とPu-239の核分裂の効果効くと思われる600Kでの比較であり、Fig. 15は、Pu-240の捕獲の効果効くと思われる1200K近傍の比較である。どちらの温度の場合も、Pu-239の断面積が支配的である0.3eVとPu-240の断面積が支配的である1eVで実効吸収断面積は、兵器級のPuとThを分離した場合の方が混合した場合よりも小さくなっている。また、炉心平均の熱中性子束は、兵器級のPuとThを分離した場合の方が混合した場合よりも小さい。同じ条件での兵器級のPuとThを分離して装荷した場合の等温温度係数の例をTable 7及びFig. 16に示す。Fig. 16で比較の対象としたPuとThを混合した場合の温度係数は、分離した場合と重金属量を同じにするため、燃料球中のPuは0.25gであり、Thは3gである。Table 8に計算結果を示した。この例では、等温温度係数は、Xe-135の中性子吸収率の減少効果とPu-239の核分裂の効果効くと思われる600K近傍で、混合燃料球よりも分離燃料球の方が負の方向に大きく、Pu-240の捕獲の効果効くと思われる1200K近傍で、混合燃料球よりも分離燃料球の方が正の方向に大きい。

従って、炉心全体での減速比を保存した場合、兵器級のPuとThを分離して装荷すれば、等温温度係数は、これらの燃料を混合して装荷した場合に比べ、温度領域Lでは負の方向に大きく、温度領域Hでは正の方向に大きくなる。

2.3 Erの添加が等温温度係数に及ぼす効果

等温温度係数が正になる主要な原因は、温度上昇によるXe-135の吸収反応の急激な減少とPu-239による核分裂の共鳴反応の増大であった。これらの反応は、0.1eV近傍のエネルギー領域で起こるため、この高エネルギー側に強い共鳴吸収を持つ物質を添加すれ

ば、燃料球の燃焼度は低下するが、Xe-135とPu-239の効果を打ち消す作用が働き、温度係数は負の方向に大きくなると考えた⁵⁾。そこで、兵器級のPuを装荷した炉心へ0.5eV近傍に大きな共鳴吸収を持つEr-167を添加した場合に、等温温度係数が受ける効果を検討した。

Fig. 17にEr-167と兵器級のPuを構成する各核種の断面積及び熱中性子のエネルギースペクトルを示した。この図では、温度が上昇すると中性子エネルギースペクトルのピークが高エネルギー側に移行するため、Xe-135の吸収反応が減少し、Pu-239による核分裂共鳴反応が増大する一方で、Er-167による共鳴吸収が増大する。また、さらに温度が上昇し、中性子エネルギースペクトルのピークが高エネルギー側に移行すると、Pu-240による共鳴吸収が増大している。Table 9, Fig. 18 及び Fig. 19に兵器級のPuを装荷したペブルベッド型高温ガス炉の炉心に、Er-167を添加した場合の等温温度係数の例を示した。Fig. 18は燃焼初期であり、Fig. 19は平衡状態近傍である。この例では、燃焼の初期と中期とも全温度範囲に渡って等温温度係数が負の方向に改善されている。

2.4 Puの装荷量を増大することが等温温度係数に及ぼす効果

等温温度係数が正になる主要な原因は、温度が上昇した場合に熱中性子束が高エネルギー側に移行することで引き起こされる、Xe-135の吸収反応の急激な減少とPu-239による核分裂の共鳴反応の増大にあった。これらの反応の変化はいずれも熱中性子束分布のピークの移行により起こるため、熱中性子束分布のピークを抑制する工夫を行えば、温度係数が正になる現象は改善されることが考えられる。Pu-240とPu-239は熱領域に強い共鳴吸収を持っているため、これらの装荷量を増大すれば、熱中性子束のピークを抑制することが可能である。この場合、燃焼度の増大とともに熱中性子束のピークが再び現れる可能性があるが、ペブルベッド型炉では燃料球の最大燃焼度の半分程度で原子炉が平衡状態になるため、初期の装荷量が多い限り熱中性子束のピークが再び現れることはない。この一例として、燃料球1個に24gのPuを装荷した場合の平衡状態近傍の全エネルギー範囲の中性子スペクトル、及び、熱中性子領域の中性子スペクトルとXe-135、Pu-239及びPu-240の全断面積との関係を、それぞれFig. 20とFig. 21に示す。また、燃料球一個に0.5gのPuを装荷した場合と24g装荷した場合の温度係数の比較を、Table 10、Fig. 22及びFig. 23に一例として示す。Fig. 22は燃焼初期の場合の温度係数であり、Fig. 23は平衡状態近傍の場合のものである。どちらの場合も温度係数はほぼ全温度範囲にわたって負の一定値をとっており、Xe-135、Pu-239及びPu-240の効果が大きく現れていない。また、平衡状態近傍に温度係数が正になる現象は、燃料球一個に装荷するPuの量を増大することで改善されている。

2.5 燃料部の圧縮が等温温度係数に及ぼす効果

Pu-239の核分裂の共鳴反応が熱中性子領域に存在することが等温温度係数を正にする

原因の一つであるため、Pu-239の共鳴反応を小さくする方策により、等温温度係数を負の方向に改善可能と考えた。そこで、この方法の一つとして、燃料球のマトリックス部（被覆燃料粒子が均一に充填されている部分）を、燃料の量を保存しながらこの半径を小さくすることにより圧縮し、共鳴による遮へい効果を大きくしてPu-239の共鳴反応を小さくすることを考えた。この可能性を検討するために、マトリックス部の半径を2.5cmから0.6cmに圧縮した場合の等温温度係数を一例として取り上げた。Puの量を保存してこのマトリックス部を小さく圧縮した場合の等温温度係数を、Table 11、Fig. 24及びFig. 25に示す。マトリックス部の半径が2.5cmの場合には、マトリックス内の燃料粒子の充填率が1.3 vol%であり、半径が0.69cmの場合には充填率が60 vol%である。Fig. 24は燃焼初期の場合であり、Fig. 25は平衡状態近傍の場合である。燃焼初期では、燃料部を小さく圧縮しても、等温温度係数は燃料部を圧縮する前と殆ど変化ない。これは、等温温度係数を正の方向に働かせる主要な核種はXe-135とPu-239であるが、前者が後者よりも効果が大きく、しかも、燃焼初期ではXe-135が存在しないためである。燃焼初期以外では、燃料部の圧縮は全温度範囲で温度係数を正の方向に大きくする。燃料部を圧縮すると、Pu-239を含めた燃料中の共鳴核種に対する遮へい効果が增大するとともに中性子の減速効果も増大するが、前者はPu-240による共鳴反応が最大となる温度近傍を除き、等温温度係数に対して負の効果を持ち、後者は上記温度近傍を除き、等温温度係数に対して正の効果を持つ。本ケースでは、後者の効果が大きいため、等温温度係数は正の方向に大きくなっている。Fig. 26には、この例の場合の中性子スペクトルと吸収断面積のマトリックス部を小さく圧縮する前後の変化を示した。

以上から、予想に反して燃料の量を保存して燃料部を小さく圧縮しても、等温温度係数が負の方向に改善されることは困難と思われる。

3. まとめ

兵器級Puを装荷したペブルベッド型高温ガス炉の温度係数は、正になる可能性があった。この主原因は、熱エネルギー領域のXe-135の捕獲反応及びPu-239の核分裂反応にあることを明らかにした。そこで、この温度係数を負にする対策として、炉心へのThの添加、Erの添加、Puの装荷量の増大、及び、燃料粒子を充填した燃料部（マトリックス部）の圧縮を検討した。

ドップラー効果を期待して炉心へThを添加した場合の検討では、Thの添加により等温温度係数は正の方向に大きくなり、この効果はThの添加量が多い程大きいことを明らかにした。また、Th燃料とPu燃料を分離して装荷すれば、上記効果が緩和されることも明らかにした。いずれにしても、Thを添加することにより温度係数を負に改善するのは困難であることが明らかになった。

Xe-135とPu-239の反応を緩和するために、熱領域に共鳴吸収を持つErを炉心へ添加した場合の検討では、全温度範囲に渡って等温温度係数が負の方向に改善できる⁵⁾ことを確認した。

熱中性子束のピークを抑制し、温度変化に対する熱領域の反応率を小さくするためにPuの装荷量を増大した場合の検討では、温度係数は負の方向に改善されることを明らかにした。

Pu-239の共鳴反応を弱めるために、燃料部を小さく圧縮した場合の検討では、燃料部を圧縮しても、黒鉛が多くなるため温度係数を負の方向に改善することは困難であることを明らかにした。

以上から、熱領域に共鳴捕獲反応を持つ核種(Er)を炉心に添加すれば、温度係数が負になることを確認した。また、この場合には燃料球の燃焼度が低下するが、Erを添加せずとも、Puの装荷量を増大して熱中性子束のピークを低減すれば、燃焼度の低下なしに温度係数を負にできることを明らかにした。Table 12に検討結果のまとめを示す。

謝辞

本検討を行うにあたり、御指導頂いた、高温工学試験研究炉開発部長田中利幸氏および同部H T T R原子炉開発室塩沢周策氏に深く感謝します。また、S R A Cの使用方法について御助言下さった原子炉工学部原子炉システム研究室の秋江氏に感謝します。

参考文献

- 1) USDOE : " PLUTONIUM DISPOSITION STUDY" ,(1993)
- 2) 山下 清信 他 : " 燃焼用燃料球と増殖用燃料球を用いたペブルベッド型高温ガス炉による兵器級プルトニウムの消滅" , 日本原子力学会誌, 36, 9, 865-868, (1994)
- 3) Yamashita, K., et al. : " Plutonium Destruction with Pebble Bed Type HTGRs using Pu Burner Balls and Breeder Balls " , Technical Committee Meeting on "Unconventional Options for Pu Disposition", 7-11 November Russia(1994)
- 4) Tsuchihashi, K., et al. : " Revised SRAC Code System" , JAERI 1302, (1986)
- 5) R. K. Lane, et al. : " CORE PHYSICS CHARACTERISTICS AND DESIGN OPTIONS FOR THE PLUTONIUM CONSUMING MHTGR(PC-MHTGR)" , PROCEEDINGS OF THE 1994 TOPICAL MEETING ON ADVANCES IN REACTOR PHYSICS, 11-15 April Knoxville Tennessee (1994)

謝辞

本検討を行うにあたり、御指導頂いた、高温工学試験研究炉開発部長田中利幸氏および同部H T T R原子炉開発室塩沢周策氏に深く感謝します。また、S R A Cの使用方法について御助言下さった原子炉工学部原子炉システム研究室の秋江氏に感謝します。

参考文献

- 1) USDOE : " PLUTONIUM DISPOSITION STUDY" ,(1993)
- 2) 山下 清信 他 : " 燃焼用燃料球と増殖用燃料球を用いたペブルベッド型高温ガス炉による兵器級プルトニウムの消滅" , 日本原子力学会誌, 36, 9, 865-868, (1994)
- 3) Yamashita, K., et al. : " Plutonium Destruction with Pebble Bed Type HTGRs using Pu Burner Balls and Breeder Balls " , Technical Committee Meeting on "Unconventional Options for Pu Disposition", 7-11 November Russia(1994)
- 4) Tsuchihashi, K., et al. : " Revised SRAC Code System" , JAERI 1302, (1986)
- 5) R. K. Lane, et al. : " CORE PHYSICS CHARACTERISTICS AND DESIGN OPTIONS FOR THE PLUTONIUM CONSUMING MHTGR(PC-MHTGR)" , PROCEEDINGS OF THE 1994 TOPICAL MEETING ON ADVANCES IN REACTOR PHYSICS, 11-15 April Knoxville Tennessee (1994)

Table 1 兵器級Puのみを装荷した場合の温度係数の内訳(燃焼度=300 GWD/T)

| ケース名 | 温度効果 | 減速材温度(K) | 燃料温度(K) | 増倍率 | 温度係数 ($\Delta\rho/k$) | 単一球セル | |
|---------|---------|----------|---------|--------|----------------------------|----------------------------|-----|
| | | | | | | 温度係数 ($\Delta\rho/k$) | 増倍率 |
| TCRES64 | | 300 | 300 | 1.4762 | -1.15 × 10 ⁻⁵ | | |
| 65 | | " | 400 | 1.4737 | -1.06 × 10 ⁻⁵ | | |
| 66 | | " | 500 | 1.4714 | -8.79 × 10 ⁻⁶ | | |
| 67 | ドップラ-効果 | " | 600 | 1.4695 | -6.81 × 10 ⁻⁶ | | |
| 68 | | " | 900 | 1.4651 | -4.82 × 10 ⁻⁶ | | |
| 69 | | " | 1200 | 1.4620 | -3.75 × 10 ⁻⁶ | | |
| 70 | | " | 1600 | 1.4588 | | | |
| TCRES71 | | 300 | 300 | 1.4762 | -1.38 × 10 ⁻⁵ | | |
| 72 | | 400 | " | 1.4732 | 7.36 × 10 ⁻⁶ | | |
| 73 | | 500 | " | 1.4748 | 1.29 × 10 ⁻⁵ | | |
| 74 | 減速材温度効果 | 600 | " | 1.4776 | 1.06 × 10 ⁻⁵ | | |
| 75 | | 900 | " | 1.4846 | -3.48 × 10 ⁻⁶ | | |
| 76 | | 1200 | " | 1.4823 | -3.07 × 10 ⁻⁶ | | |
| 77 | | 1600 | " | 1.4558 | | | |
| TCRES50 | | 300 | 300 | 1.4762 | -2.58 × 10 ⁻⁵ | | |
| 51 | | 400 | 400 | 1.4706 | -2.78 × 10 ⁻⁶ | | |
| 52 | | 500 | 500 | 1.4700 | 3.70 × 10 ⁻⁶ | | |
| 53 | 等温度係数 | 600 | 600 | 1.4708 | 3.23 × 10 ⁻⁶ | | |
| 54 | | 900 | 900 | 1.4729 | -1.02 × 10 ⁻⁵ | | |
| 55 | | 1200 | 1200 | 1.4663 | -3.99 × 10 ⁻⁶ | | |
| 56 | | 1600 | 1600 | 1.4328 | | | |
| TCRES57 | | 300 | 300 | 1.2690 | 4.38 × 10 ⁻⁵ | | |
| 58 | | 400 | 400 | 1.2761 | 8.74 × 10 ⁻⁵ | | |
| 59 | | 500 | 500 | 1.2905 | 9.14 × 10 ⁻⁵ | | |
| 60 | 等温度係数 | 600 | 600 | 1.3059 | 5.64 × 10 ⁻⁵ | | |
| 61 | | 900 | 900 | 1.3354 | -1.40 × 10 ⁻⁵ | | |
| 62 | | 1200 | 1200 | 1.3279 | -1.10 × 10 ⁻⁴ | | |
| 63 | | 1600 | 1600 | 1.2556 | | | |

注)・Puの装荷量は0.5g/球
 ・Thはなしとした
 ・温度係数 = $\{ (k' - k) / (k \cdot k') \} / \Delta T$
 ・温度係数 = $\{ (増倍率の差) / (増倍率の積) \} / 温度差$

Table 2 兵器級Puのみを装荷した場合の等温度係数

| ケース名 | Pu (g/球) | 燃焼度(GWD/T) | 減速材温度(K) | 燃料温度(K) | 増倍率 | 等温度係数 ($\Delta\rho/k$) | 単一球セル | |
|---------|----------|------------|----------|---------|--------|-----------------------------|----------------------------|-----|
| | | | | | | | 温度係数 ($\Delta\rho/k$) | 増倍率 |
| TCRES43 | | | 300 | 300 | 1.7652 | -5.41 × 10 ⁻⁵ | | |
| 44 | | | 400 | 400 | 1.7485 | -5.58 × 10 ⁻⁵ | | |
| 45 | | | 500 | 500 | 1.7316 | -5.35 × 10 ⁻⁵ | | |
| 46 | | 0 | 600 | 600 | 1.7157 | -4.22 × 10 ⁻⁵ | | |
| 47 | | | 900 | 900 | 1.6792 | -2.61 × 10 ⁻⁵ | | |
| 48 | | | 1200 | 1200 | 1.6574 | -2.41 × 10 ⁻⁵ | | |
| 49 | | | 1600 | 1600 | 1.6313 | | | |
| TCRES50 | | | 300 | 300 | 1.4762 | -2.58 × 10 ⁻⁵ | | |
| 51 | | | 400 | 400 | 1.4706 | -2.78 × 10 ⁻⁶ | | |
| 52 | | | 500 | 500 | 1.4700 | 3.70 × 10 ⁻⁶ | | |
| 53 | 0.5 | 300 | 600 | 600 | 1.4708 | 3.23 × 10 ⁻⁶ | | |
| 54 | | | 900 | 900 | 1.4729 | -1.02 × 10 ⁻⁵ | | |
| 55 | | | 1200 | 1200 | 1.4663 | -3.99 × 10 ⁻⁶ | | |
| 56 | | | 1600 | 1600 | 1.4328 | | | |
| TCRES57 | | | 300 | 300 | 1.2690 | 4.38 × 10 ⁻⁵ | | |
| 58 | | | 400 | 400 | 1.2761 | 8.74 × 10 ⁻⁵ | | |
| 59 | | | 500 | 500 | 1.2905 | 9.14 × 10 ⁻⁵ | | |
| 60 | | 600 | 600 | 600 | 1.3059 | 5.64 × 10 ⁻⁵ | | |
| 61 | | | 900 | 900 | 1.3354 | -1.40 × 10 ⁻⁵ | | |
| 62 | | | 1200 | 1200 | 1.3279 | -1.10 × 10 ⁻⁴ | | |
| 63 | | | 1600 | 1600 | 1.2556 | | | |

注)・温度係数 = $\{ (増倍率の差) / (増倍率の積) \} / 温度差$
 = $\{ (k' - k) / (k \cdot k') \} / \Delta T$

Table 4 PuにThを混合装荷した場合の温度係数の内訳
(燃焼度=300 GWD/T)

| ケース名 | 温度効果 | 減速材温度(K) | 燃料温度(K) | 増倍率 | 温度係数 ($\Delta\rho/k$) |
|---------|---------|----------|---------|--------|----------------------------|
| TCTH 22 | | 300 | 300 | 1.4318 | -1.42×10^{-5} |
| 23 | | " | 400 | 1.4289 | -1.22×10^{-5} |
| 24 | | " | 500 | 1.4264 | -1.08×10^{-5} |
| 25 | ドップラー効果 | " | 600 | 1.4242 | -8.41×10^{-6} |
| 26 | | " | 900 | 1.4191 | -6.31×10^{-6} |
| 27 | | " | 1200 | 1.4153 | -5.13×10^{-6} |
| 28 | | " | 1600 | 1.4112 | |
| TCTH 29 | | 300 | 300 | 1.4318 | -5.37×10^{-6} |
| 30 | | 400 | " | 1.4307 | 1.75×10^{-5} |
| 31 | | 500 | " | 1.4343 | 2.33×10^{-5} |
| 32 | 減速材温度効果 | 600 | " | 1.4391 | 1.92×10^{-5} |
| 33 | | 900 | " | 1.4511 | 7.91×10^{-7} |
| 34 | | 1200 | " | 1.4516 | -2.92×10^{-5} |
| 35 | | 1600 | " | 1.4274 | |
| TCTH 01 | | 300 | 300 | 1.4318 | -1.96×10^{-5} |
| 02 | | 400 | 400 | 1.4278 | 5.39×10^{-6} |
| 03 | | 500 | 500 | 1.4289 | 1.27×10^{-5} |
| 04 | 等温度効果 | 600 | 600 | 1.4315 | 1.02×10^{-5} |
| 05 | | 900 | 900 | 1.4378 | -7.28×10^{-6} |
| 06 | | 1200 | 1200 | 1.4333 | -4.00×10^{-5} |
| 07 | | 1600 | 1600 | 1.4012 | |

注) ・Puの装荷量は0.5g/球
 ・Thの装荷量は6.0g/球
 ・U-233はなしとした
 ・温度係数 = $\{ (k' - k) / (k \cdot k') \} / \Delta T$

Table 3 Thより生成したU233が等温度係数に
及ぼす効果(燃焼度=300 GWD/T)

| ケース名 | U233 | 減速材温度(K) | 燃料温度(K) | 増倍率 | 等温度係数 ($\Delta\rho/k$) |
|---------|------|----------|---------|--------|-----------------------------|
| TCTH 01 | | 300 | 300 | 1.4318 | -1.96×10^{-5} |
| 02 | | 400 | 400 | 1.4278 | 5.39×10^{-6} |
| 03 | | 500 | 500 | 1.4289 | 1.27×10^{-5} |
| 04 | なし | 600 | 600 | 1.4315 | 1.02×10^{-5} |
| 05 | | 900 | 900 | 1.4378 | -7.28×10^{-6} |
| 06 | | 1200 | 1200 | 1.4333 | -4.00×10^{-5} |
| 07 | | 1600 | 1600 | 1.4012 | |
| TCTH01 | | 300 | 300 | 1.4587 | -2.36×10^{-6} |
| 02 | | 400 | 400 | 1.4537 | -1.42×10^{-6} |
| 03 | | 500 | 500 | 1.4534 | 4.73×10^{-6} |
| 04 | あり | 600 | 600 | 1.4544 | 3.93×10^{-6} |
| 05 | | 900 | 900 | 1.4569 | -9.94×10^{-6} |
| 06 | | 1200 | 1200 | 1.4506 | -3.94×10^{-5} |
| 07 | | 1600 | 1600 | 1.4182 | |

注) ・Puの装荷量は0.5g/球
 ・混合するThは6g/球
 ・温度係数 = $\{ (k' - k) / (k \cdot k') \} / \Delta T$

Table 5 PuにThを混合装荷した場合の温度係数の内訳
(燃焼度=300 GWD/T)

| ケース名 | 温度効果 | 減速材温度(K) | 燃料温度(K) | 増倍率 | 温度係数 ($\Delta\rho/k$) | |
|---------|---------|----------|---------|--------|----------------------------|------------------------|
| | | | | | -1.63×10^{-5} | -1.42×10^{-5} |
| TCTH 36 | | 300 | 300 | 1.3598 | | |
| 37 | | " | 400 | 1.3568 | | |
| 38 | | " | 500 | 1.3542 | | |
| 39 | ドップラー効果 | " | 600 | 1.3520 | | |
| 40 | | " | 900 | 1.3468 | | |
| 41 | | " | 1200 | 1.3429 | | |
| 42 | | " | 1600 | 1.3387 | | |
| TCTH 43 | | 300 | 300 | 1.3598 | | |
| 44 | | 400 | " | 1.3619 | | |
| 45 | | 500 | " | 1.3690 | | |
| 46 | 減速材温度効果 | 600 | " | 1.3772 | | |
| 47 | | 900 | " | 1.3976 | | |
| 48 | | 1200 | " | 1.4032 | | |
| 49 | | 1600 | " | 1.3832 | | |
| TCTH 50 | | 300 | 300 | 1.3598 | | |
| 51 | | 400 | 400 | 1.3589 | | |
| 52 | | 500 | 500 | 1.3634 | | |
| 53 | 等温温度効果 | 600 | 600 | 1.3693 | | |
| 54 | | 900 | 900 | 1.3837 | | |
| 55 | | 1200 | 1200 | 1.3839 | | |
| 56 | | 1600 | 1600 | 1.3555 | | |

注) ・Puの装荷量は10.5g/球
 ・Thの装荷量は18g/球
 ・U-233 はなしとした
 ・温度係数 = $\{ (k' - k) / (k \cdot k') \} / \Delta T$

Table 6 Pu燃料のみの炉心にThを添加する効果

| ケース名 | 燃焼度(GWD/T) | 減速材温度(K) | 燃料温度(K) | 増倍率 | 備考 | 等温温度係数 ($\Delta\rho/k$) | |
|---------|------------|----------|---------|--------|--------|------------------------------|------------------------|
| | | | | | | -5.15×10^{-5} | -5.17×10^{-5} |
| TCTH 15 | | 300 | 300 | 1.7256 | U233なし | | |
| 16 | | 400 | 400 | 1.7104 | " | | |
| 17 | | 500 | 500 | 1.6954 | " | | |
| 18 | 0 | 600 | 600 | 1.6813 | " | | |
| 19 | | 900 | 900 | 1.6488 | " | | |
| 20 | | 1200 | 1200 | 1.6288 | " | | |
| 21 | | 1600 | 1600 | 1.6033 | " | | |
| TCTH01 | | 300 | 300 | 1.4587 | U233あり | | |
| 02 | | 400 | 400 | 1.4537 | " | | |
| 03 | | 500 | 500 | 1.4534 | " | | |
| 04 | 300 | 600 | 600 | 1.4544 | " | | |
| 05 | | 900 | 900 | 1.4569 | " | | |
| 06 | | 1200 | 1200 | 1.4506 | " | | |
| 07 | | 1600 | 1600 | 1.4182 | " | | |

注) ・Puの装荷量は10.5g/球
 ・Thの装荷量は46g/球
 ・温度係数 = $\{ (k' - k) / (k \cdot k') \} / \Delta T$

Table 7 PuとThを分離する効果(燃焼度=300 GWD/T)

スーパーセル

| ケース名 | Pu (g/球) | 減速材温度(K) | 燃料温度(K) | 増倍率 | 等温温度係数 ($\Delta\rho/K$) |
|---------|----------|----------|---------|--------|------------------------------|
| TCSEP36 | | 3 0 0 | 3 0 0 | 1.3835 | -1.31×10^{-5} |
| 37 | | 4 0 0 | 4 0 0 | 1.3810 | 1.93×10^{-5} |
| 38 | | 5 0 0 | 5 0 0 | 1.3847 | 3.32×10^{-5} |
| 39 | 0.5 | 6 0 0 | 6 0 0 | 1.3911 | 3.25×10^{-6} |
| 40 | | 9 0 0 | 9 0 0 | 1.4102 | 8.35×10^{-6} |
| 41 | | 1 2 0 0 | 1 2 0 0 | 1.4152 | -2.66×10^{-5} |
| 42 | | 1 6 0 0 | 1 6 0 0 | 1.3942 | |

注) ・Pu球とTh球の装荷比率は1:1
 ・装荷するThは6g/球
 ・U-233はありとした
 ・Table 8 に対し、炉心内のPuとThの総量を保存
 ・温度係数 = $\{ (k' - k) / (k \cdot k') \} / \Delta T$

Table 8 PuとThを混合した場合の等温温度係数
(燃焼度=300 GWD/T)

スーパーセル

| ケース名 | Pu (g/球) | 減速材温度(K) | 燃料温度(K) | 増倍率 | 等温温度係数 ($\Delta\rho/K$) |
|---------|----------|----------|---------|--------|------------------------------|
| TCMIX36 | | 3 0 0 | 3 0 0 | 1.3891 | -1.35×10^{-5} |
| 37 | | 4 0 0 | 4 0 0 | 1.3865 | 2.64×10^{-5} |
| 38 | | 5 0 0 | 5 0 0 | 1.3916 | 4.21×10^{-5} |
| 39 | 0.25 | 6 0 0 | 6 0 0 | 1.3998 | 3.70×10^{-6} |
| 40 | | 9 0 0 | 9 0 0 | 1.4219 | 4.77×10^{-6} |
| 41 | | 1 2 0 0 | 1 2 0 0 | 1.4248 | -4.12×10^{-5} |
| 42 | | 1 6 0 0 | 1 6 0 0 | 1.3921 | |

注) ・混合するThは3g/球
 ・温度係数 = $\{ (k' - k) / (k \cdot k') \} / \Delta T$

Table 9 熱領域の共鳴吸収体(Er)添加の効果

単一球セル

| ケース名 | Er (g/球) | 燃焼度(GWD/T) | 減速材温度(K) | 燃料温度(K) | 増倍率 | 等温温度係数 ($\Delta\rho/K$) |
|---------|----------|------------|----------|---------|--------|------------------------------|
| TCRES22 | | | 3 0 0 | 3 0 0 | 1.5800 | -7.83×10^{-5} |
| 23 | | | 4 0 0 | 4 0 0 | 1.5607 | -6.47×10^{-5} |
| 24 | | | 5 0 0 | 5 0 0 | 1.5451 | -7.24×10^{-5} |
| 25 | | 0 | 6 0 0 | 6 0 0 | 1.5280 | -7.38×10^{-5} |
| 26 | | | 9 0 0 | 9 0 0 | 1.4780 | -6.10×10^{-5} |
| 27 | | | 1 2 0 0 | 1 2 0 0 | 1.4391 | -6.75×10^{-5} |
| 28 | | | 1 6 0 0 | 1 6 0 0 | 1.3853 | |
| TCRES29 | 0.035 | | 3 0 0 | 3 0 0 | 1.2871 | -5.72×10^{-5} |
| 30 | | | 4 0 0 | 4 0 0 | 1.2777 | -1.47×10^{-5} |
| 31 | | | 5 0 0 | 5 0 0 | 1.2753 | -2.34×10^{-5} |
| 32 | | 3 0 0 | 6 0 0 | 6 0 0 | 1.2715 | -5.04×10^{-5} |
| 33 | | | 9 0 0 | 9 0 0 | 1.2475 | -7.71×10^{-5} |
| 34 | | | 1 2 0 0 | 1 2 0 0 | 1.2125 | -1.21×10^{-4} |
| 35 | | | 1 6 0 0 | 1 6 0 0 | 1.1455 | |

注) ・Puの装荷量は0.5g/球
 ・温度係数 = $\{ (k' - k) / (k \cdot k') \} / \Delta T$

Table 10 Pu装荷量の増大による中性子スペクトルの
ハード化の効果

単一球セル

| ケース名 | Pu (g/球) | 燃焼度 (GWD/T) | 減速材温度 (K) | 燃料温度 (K) | 増倍率 | 等温度係数 ($\Delta\rho/k$) |
|--------|----------|-------------|-----------|----------|--------|-----------------------------|
| TCSPO1 | | | 300 | 300 | 1.7436 | -1.81×10^{-5} |
| 02 | | | 400 | 400 | 1.7381 | -1.36×10^{-5} |
| 03 | | | 500 | 500 | 1.7340 | -1.13×10^{-5} |
| 04 | | 0 | 600 | 600 | 1.7306 | -8.50×10^{-6} |
| 05 | | | 900 | 900 | 1.7230 | -5.74×10^{-6} |
| 06 | | | 1200 | 1200 | 1.7179 | -4.25×10^{-6} |
| 07 | | | 1600 | 1600 | 1.7129 | |
| TCSPO8 | 2.4 | | 300 | 300 | 1.4143 | -8.01×10^{-5} |
| 09 | | | 400 | 400 | 1.4127 | -5.01×10^{-5} |
| 10 | | | 500 | 500 | 1.4117 | -4.52×10^{-5} |
| 11 | | 300 | 600 | 600 | 1.4108 | -3.52×10^{-5} |
| 12 | | | 900 | 900 | 1.4087 | -1.85×10^{-5} |
| 13 | | | 1200 | 1200 | 1.4076 | |
| 14 | | | 1600 | 1600 | 1.4061 | -1.89×10^{-5} |

注) ・温度係数 = $\{ (増倍率の差) / (増倍率の積) \} / \Delta T$
 = $\{ (k' - k) / (k \cdot k') \} / \Delta T$

Table 11 燃料部を圧縮する効果

単一球セル

| ケース名 | 燃料部半径 (cm) | 燃焼度 (GWD/T) | 減速材温度 (K) | 燃料温度 (K) | 増倍率 | 等温度係数 ($\Delta\rho/k$) |
|---------|------------|-------------|-----------|----------|--------|-----------------------------|
| TCCON22 | | | 300 | 300 | 1.8083 | -5.47×10^{-5} |
| 23 | | | 400 | 400 | 1.7906 | -5.51×10^{-5} |
| 24 | | | 500 | 500 | 1.7731 | -5.23×10^{-5} |
| 25 | | 0 | 600 | 600 | 1.7568 | -4.17×10^{-5} |
| 26 | | | 900 | 900 | 1.7190 | -2.71×10^{-5} |
| 27 | | | 1200 | 1200 | 1.6953 | -2.55×10^{-5} |
| 28 | | | 1600 | 1600 | 1.6665 | |
| TCCON29 | 0.69 | | 300 | 300 | 1.5102 | -1.76×10^{-5} |
| 30 | | | 400 | 400 | 1.5062 | 5.29×10^{-6} |
| 31 | | | 500 | 500 | 1.5074 | 1.27×10^{-5} |
| 32 | | 300 | 600 | 600 | 1.5103 | 1.16×10^{-5} |
| 33 | | | 900 | 900 | 1.5183 | -3.18×10^{-5} |
| 34 | | | 1200 | 1200 | 1.5161 | |
| 35 | | | 1600 | 1600 | 1.4881 | -3.10×10^{-5} |

注) ・Puの装荷量は0.5g/球
 ・温度係数 = $\{ (増倍率の差) / (増倍率の積) \} / \Delta T$
 = $\{ (k' - k) / (k \cdot k') \} / \Delta T$

Table 12 兵器級Puを装荷したペブルベッド型高温ガス炉の温度係数の改善

| 検討項目 | 検討結果 | 結論 |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Thの添加 | 1. Pu燃料とTh燃料を混合して装荷した場合 →・等温温度係数は正の方向に大 ・上記効果はThの添加量が多いほど大 2. Pu燃料とTh燃料を分離して装荷した場合 →・上記項目1の効果が緩和 | Erを炉心に添加すれば温度係数を負にすることが可能であるが、この場合には燃料球の燃焼度が低下する。しかし、Erを添加せずともPuの装荷量を増大すれば、燃焼度の低下なしに温度係数を負にすることが可能である。 |
| Erの添加 | ・全温度範囲に渡って等温温度係数が負の方向に改善 ・燃焼度が低下 | |
| Pu装荷量の増大 | ・等温温度係数は負の方向に改善 ・燃焼度は低下せず | |
| 燃料部の圧縮 | ・等温温度係数を負の方向へ改善するのは困難 | |

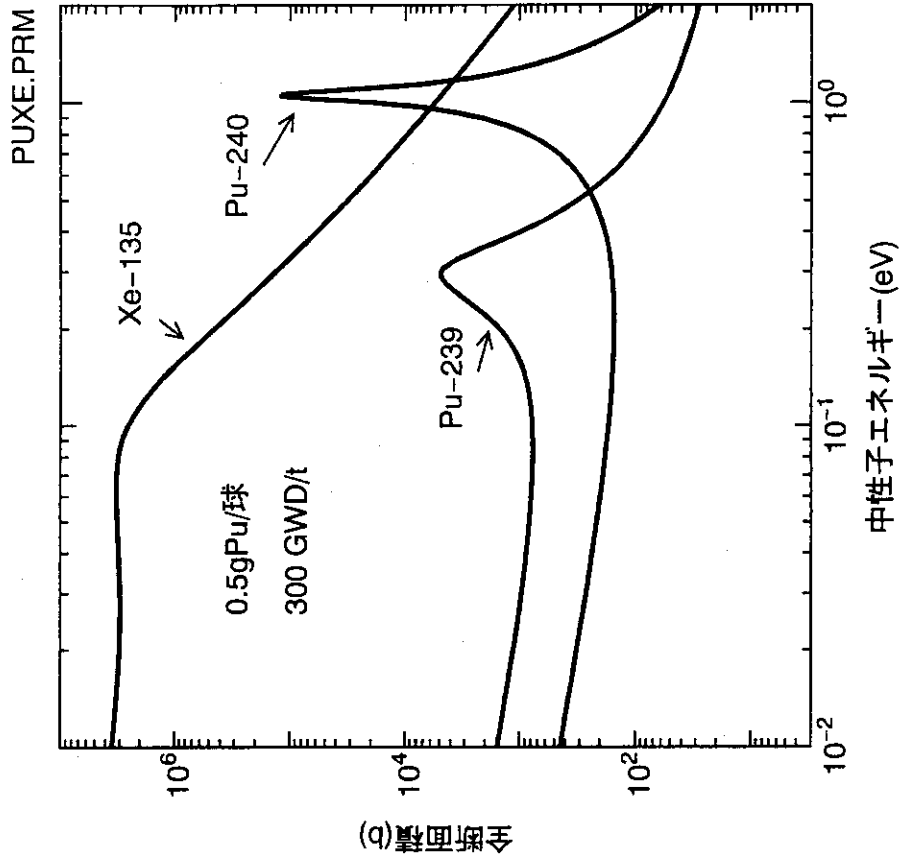


Fig. 2 兵器級Pu中の主要な核種のマイクロ全断面積

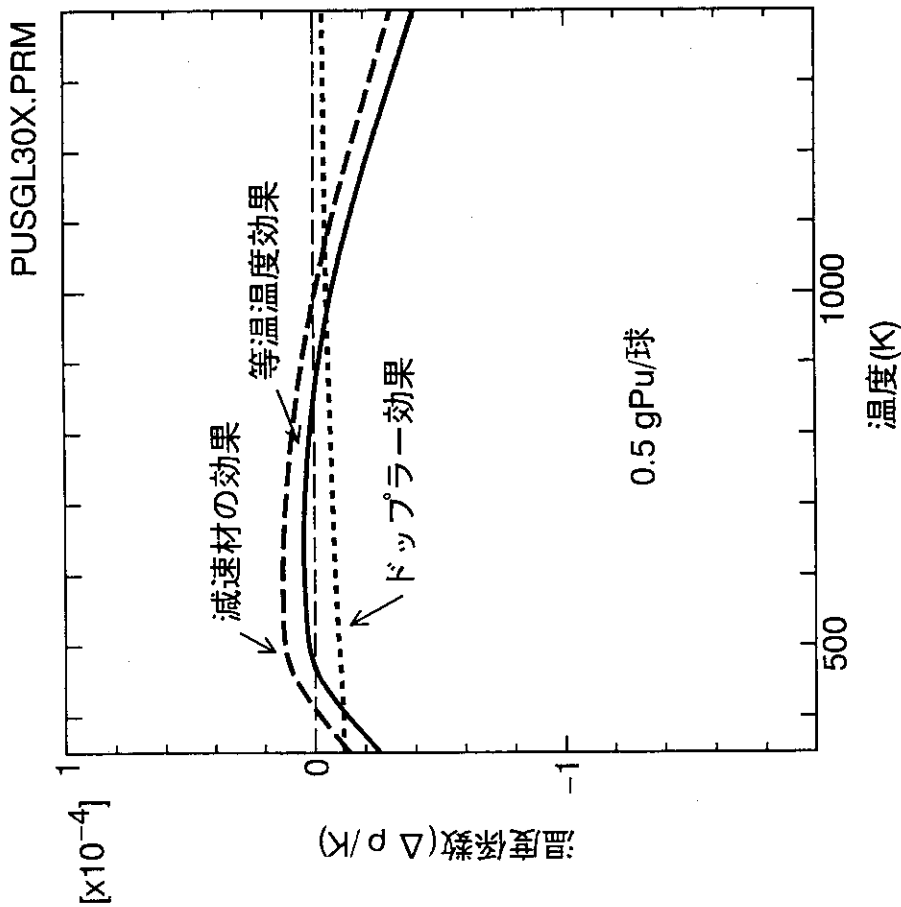


Fig. 1 Puのみを装荷した場合の温度係数の内訳
(0.5gPu/球; 300 GWD/T)

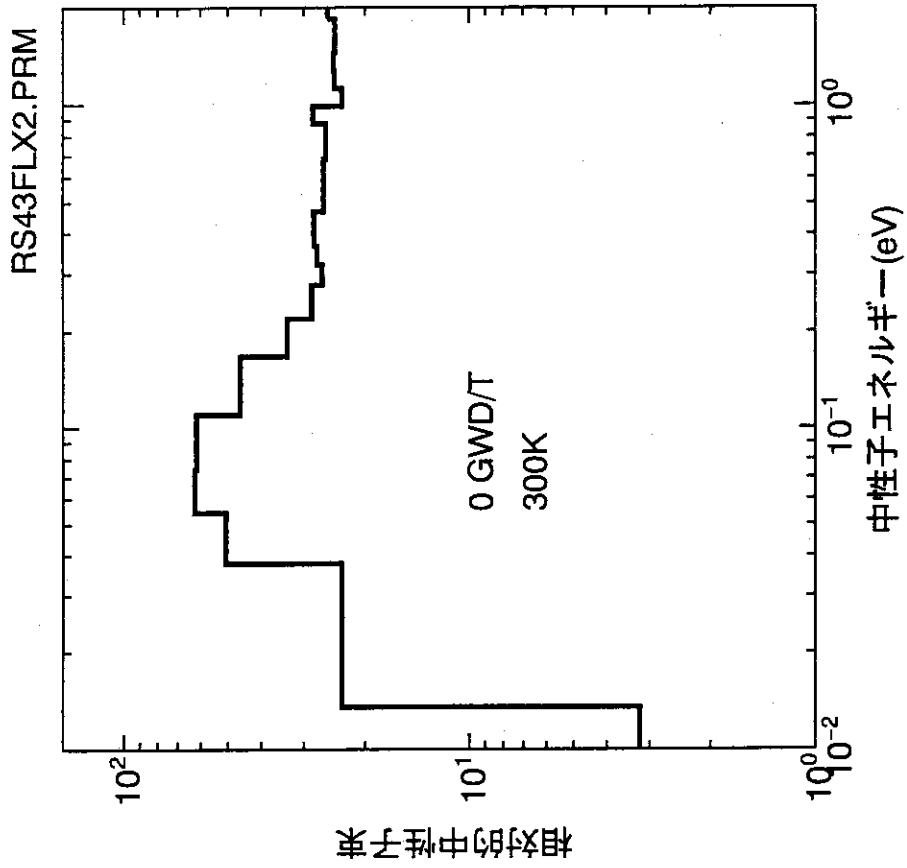


Fig. 4 基準になる中性子スペクトル
(熱エネルギー領域)

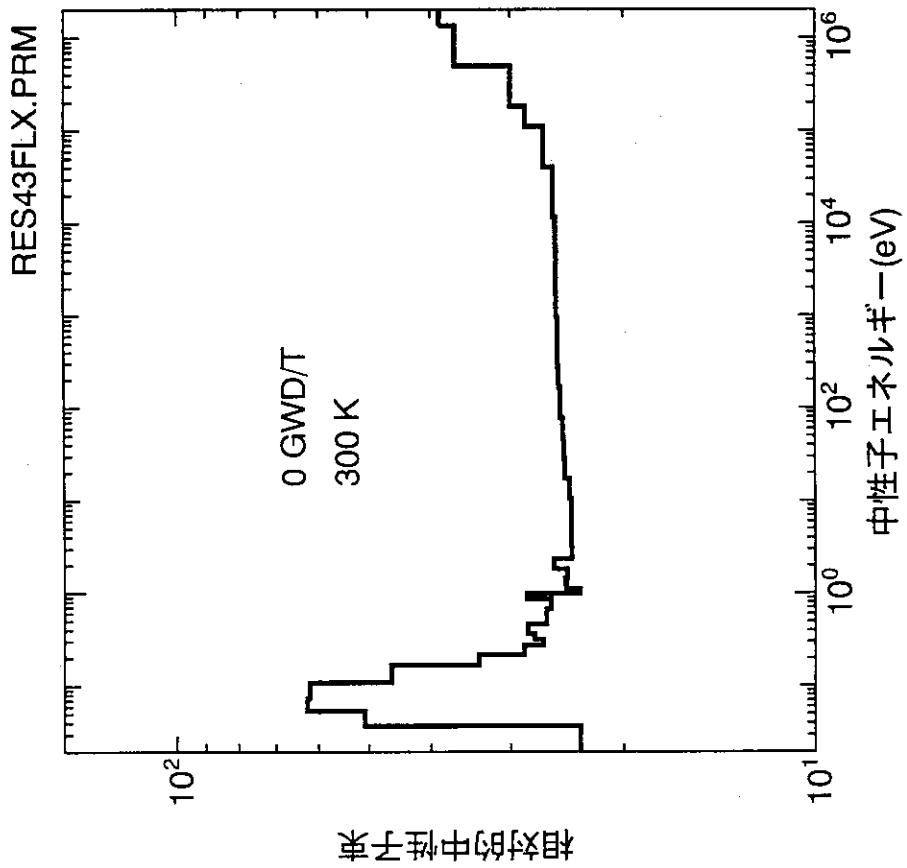


Fig. 3 基準になる中性子スペクトル
(全エネルギー領域)

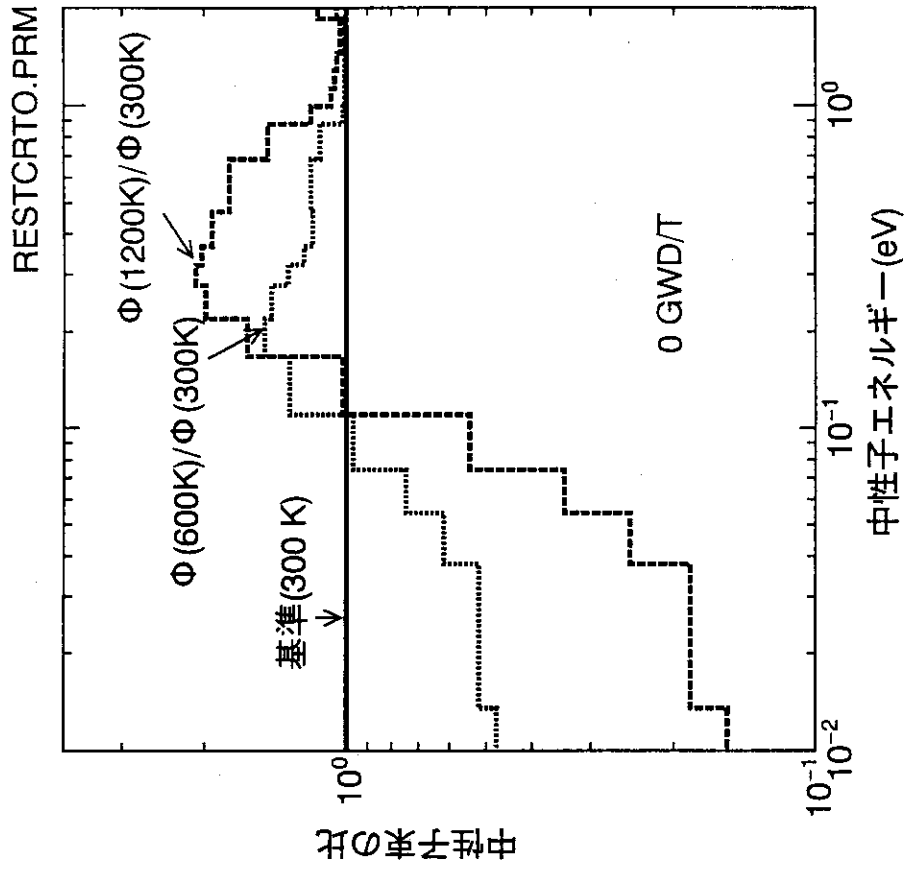


Fig. 6 低温(300K)を基準とした場合の温度に対する熱中性子エネルギースペクトルの変化

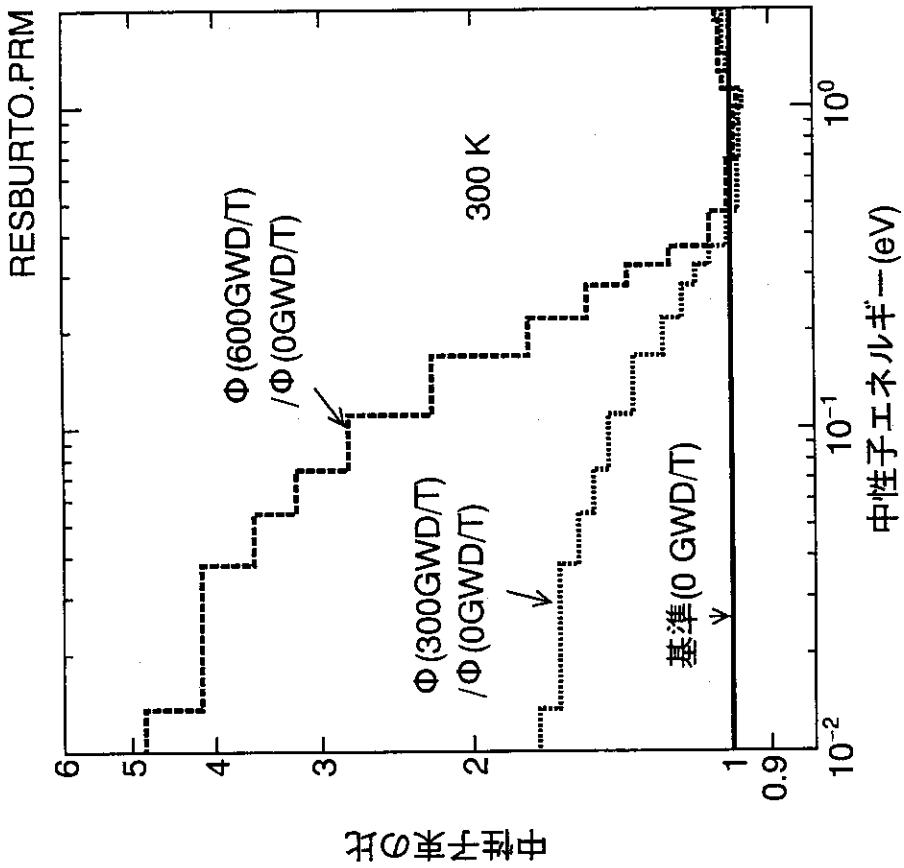


Fig. 5 燃焼初期(0GWD/T)を基準とした場合の燃焼に対する熱中性子エネルギースペクトルの変化

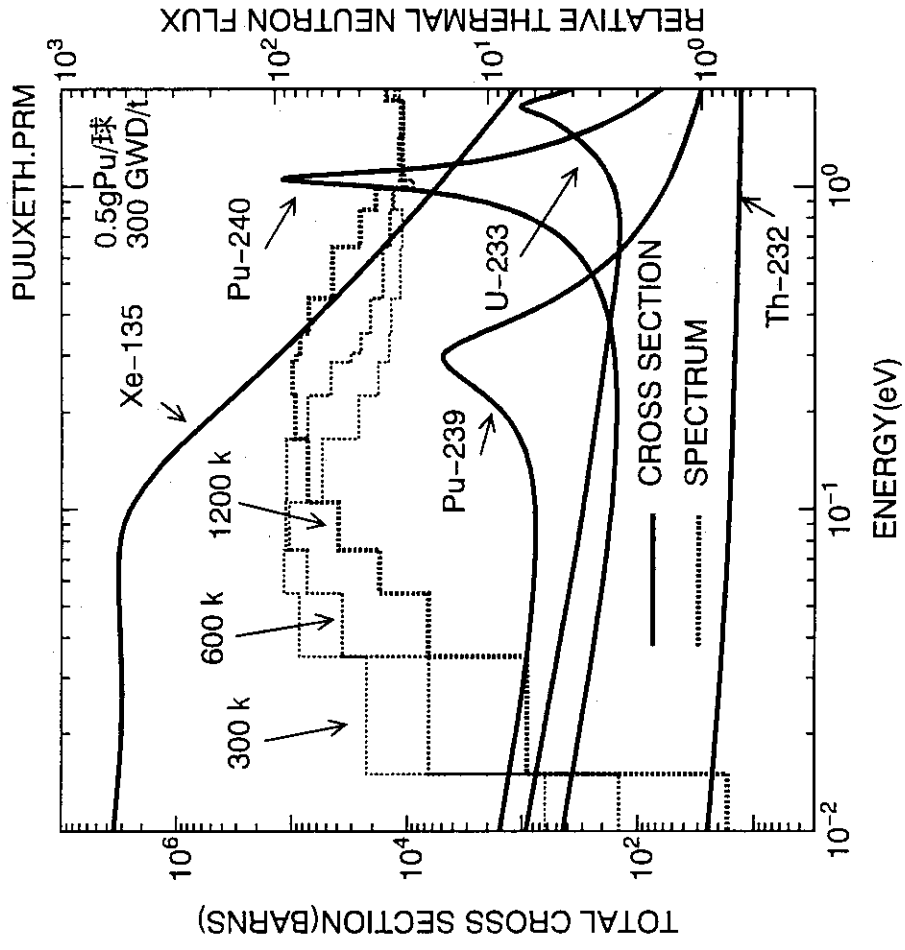


Fig. 8 兵器級PuにThを添加した場合の全断面積と中性子スペクトルとの関係

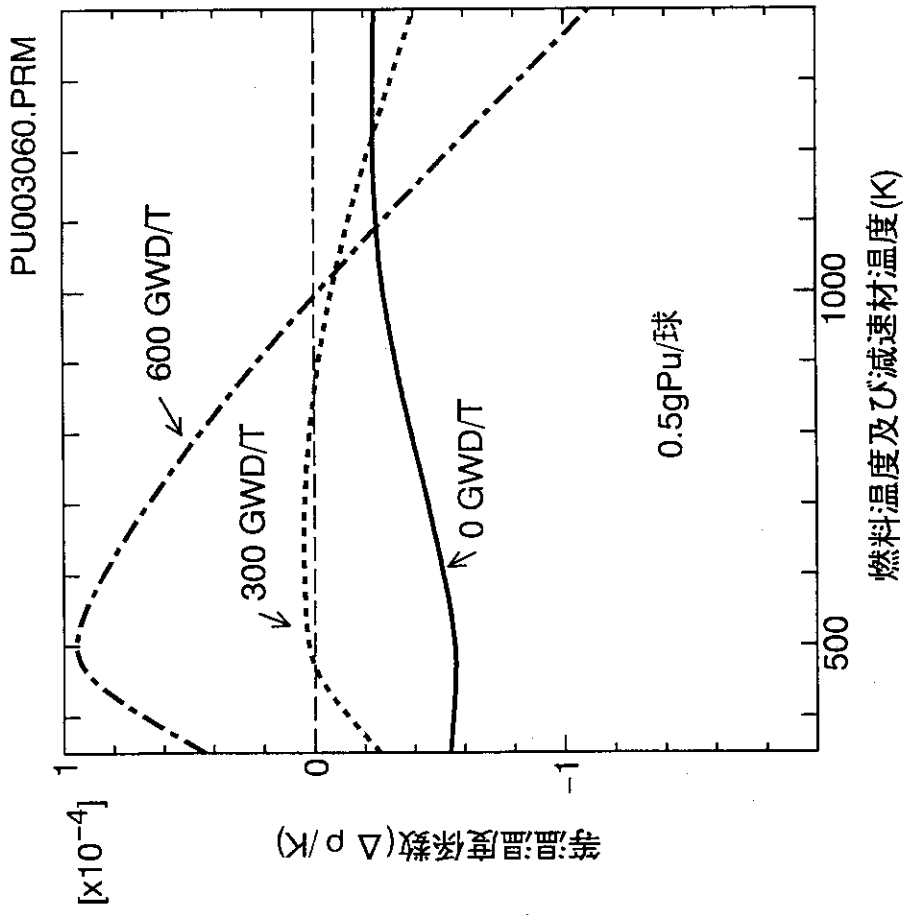


Fig. 7 兵器級Puのみを装荷した場合の等温度係数 (0.5gPu/球)

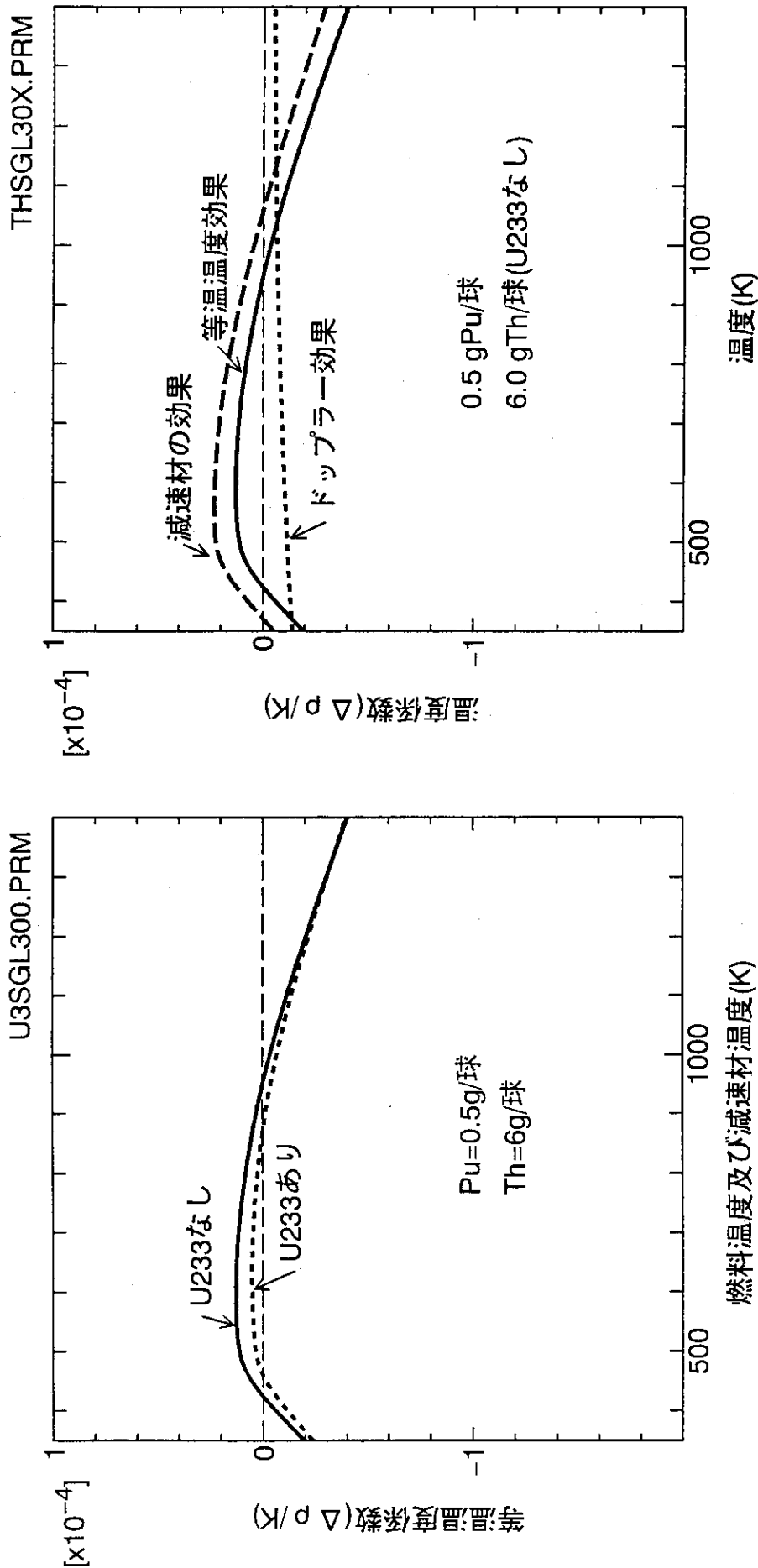


Fig. 9 U233が等温温度係数に及ぼす効果
(PuとThを混合装荷; 300 GW/D/T)

Fig. 10 PuにThを装荷した場合の温度係数の内訳
(PuとThを混合装荷; 300 GW/D/T)

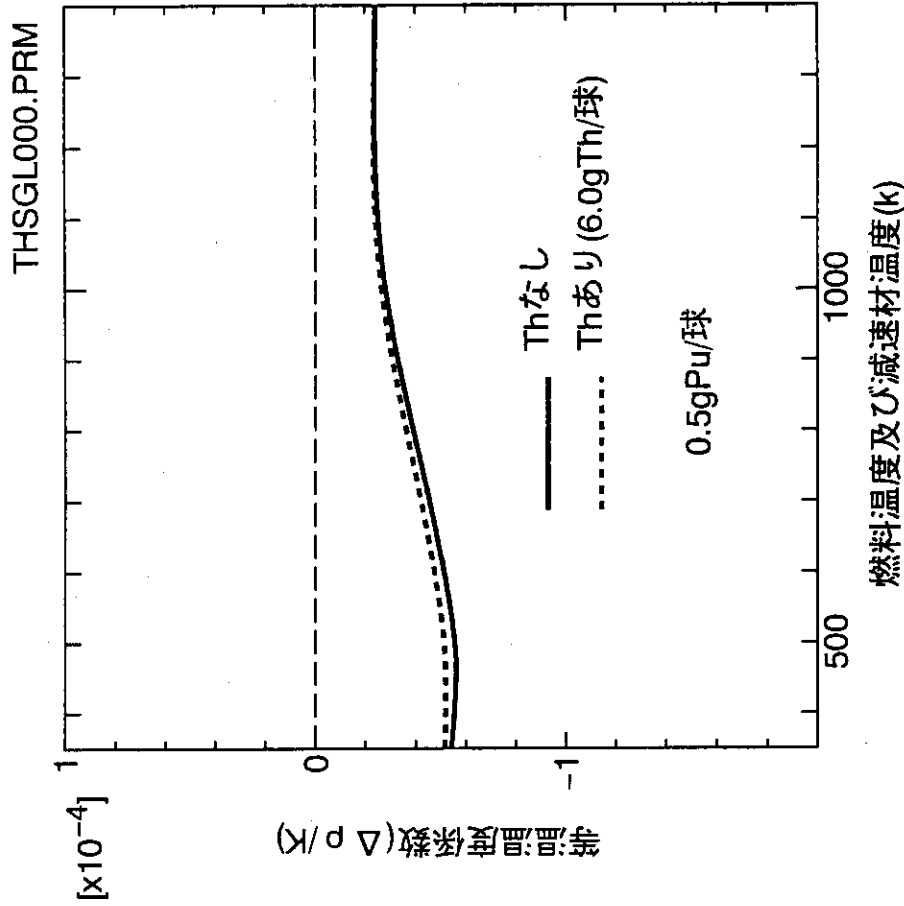


Fig. 12 Thの添加が等温度係数に及ぼす効果 (PuとThを混合装荷; 0 GWD/T)

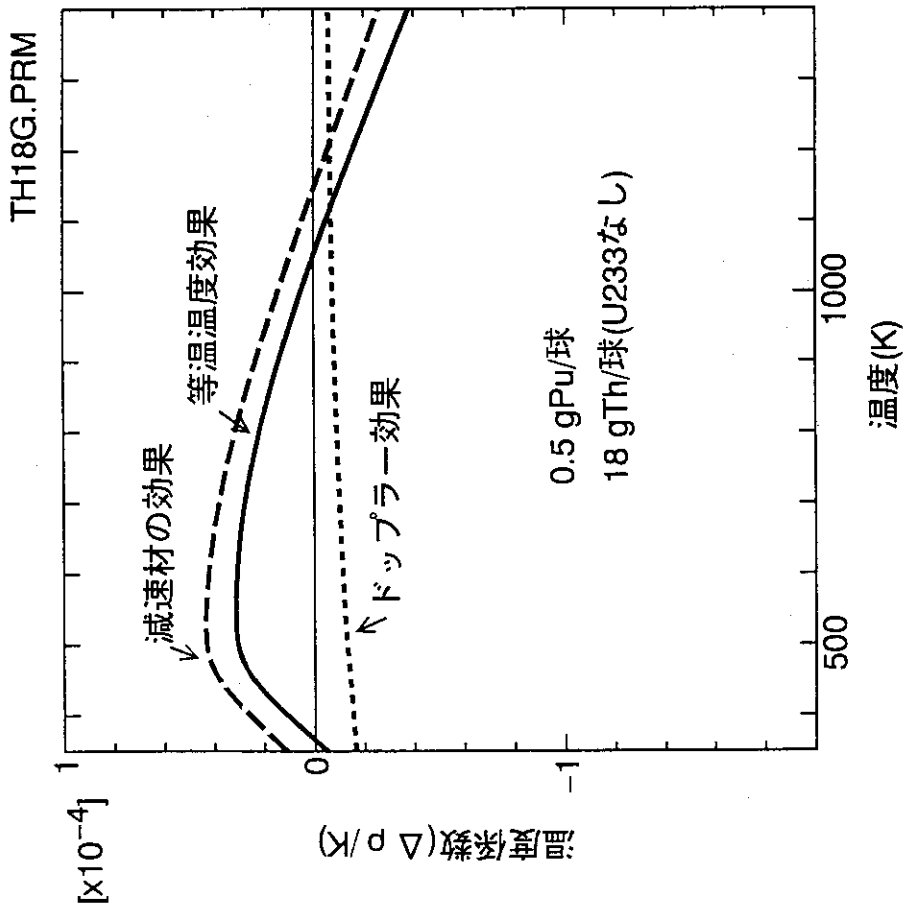


Fig. 11 PuにThを装荷した場合の温度係数の内訳 (PuとThを混合装荷; 300 GWD/T)

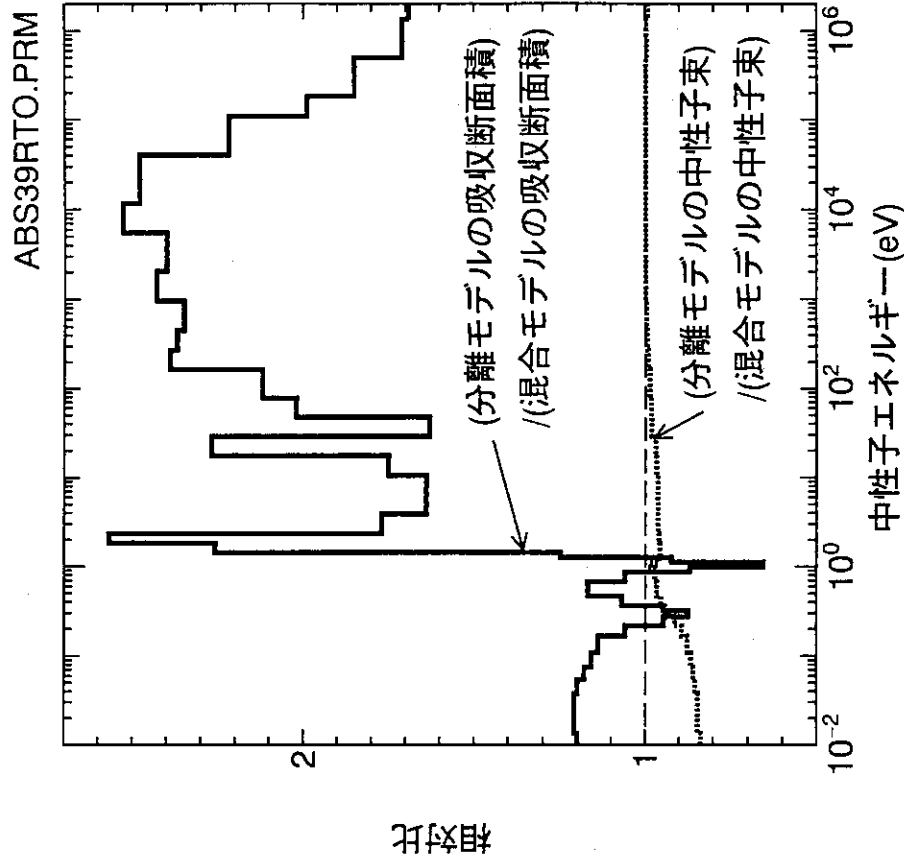


Fig. 14 PuとThを分離することが格子平均マクロ吸収断面積と中性子束に及ぼす影響 (300 GWD/T; 600K)

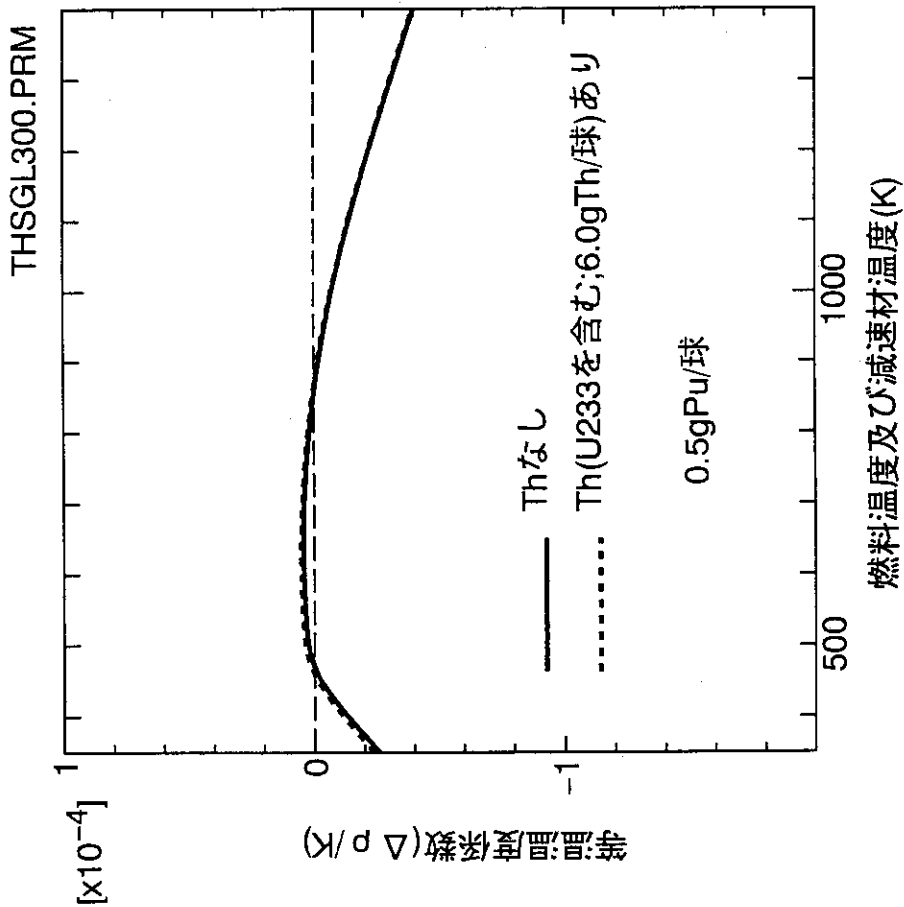


Fig. 13 Th(U233を含む)の添加が等温温度係数に及ぼす効果 (PuとThを混合装荷; 300 GWD/T)

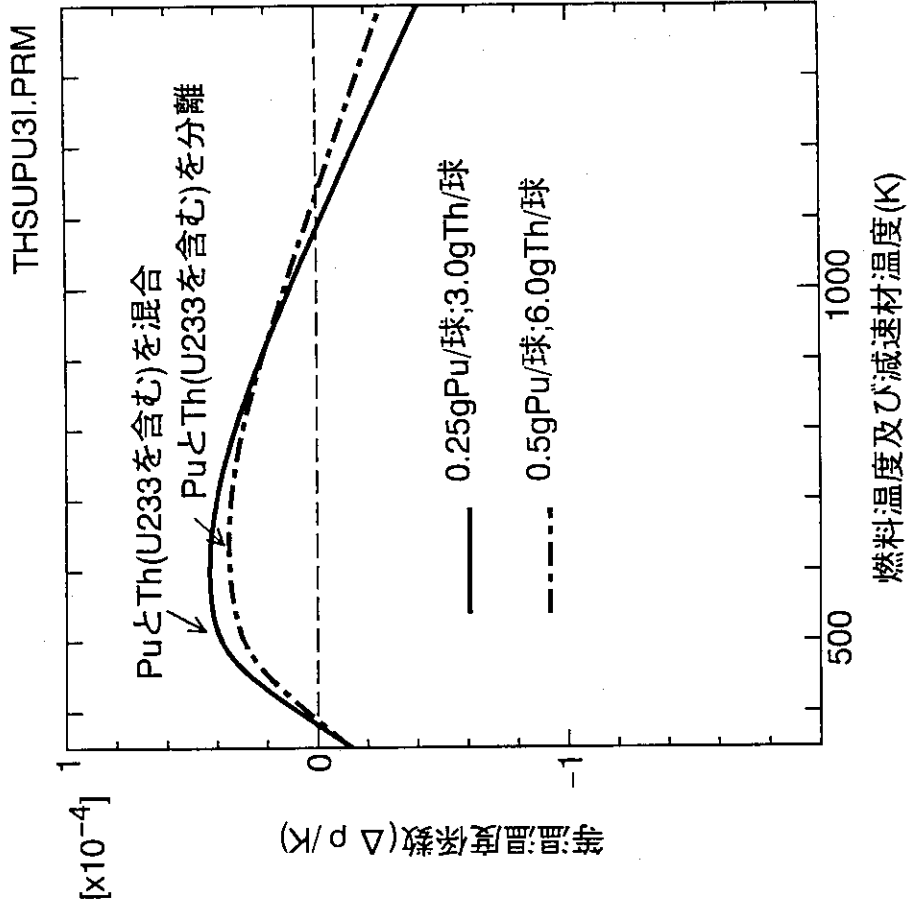


Fig. 16 PuとTh(U233を含む)を分離する効果
(300 GWD/T)

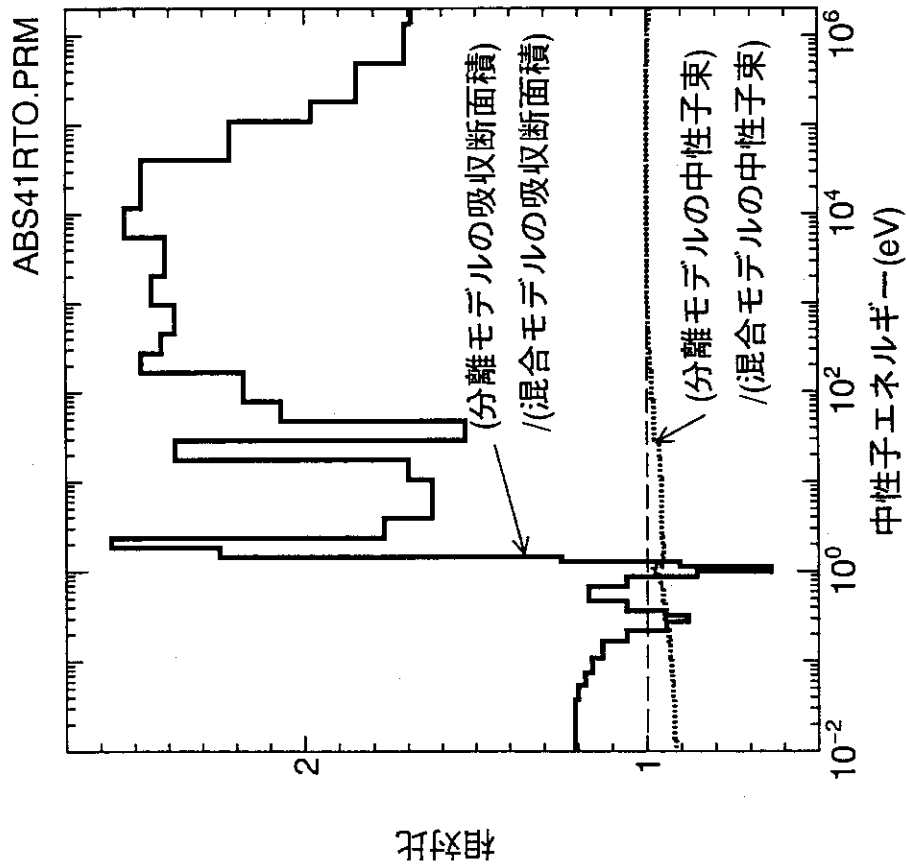


Fig. 15 PuとThを分離することが格子平均マクロ
吸収断面積と中性子束に及ぼす影響
(300 GWD/T; 1200K)

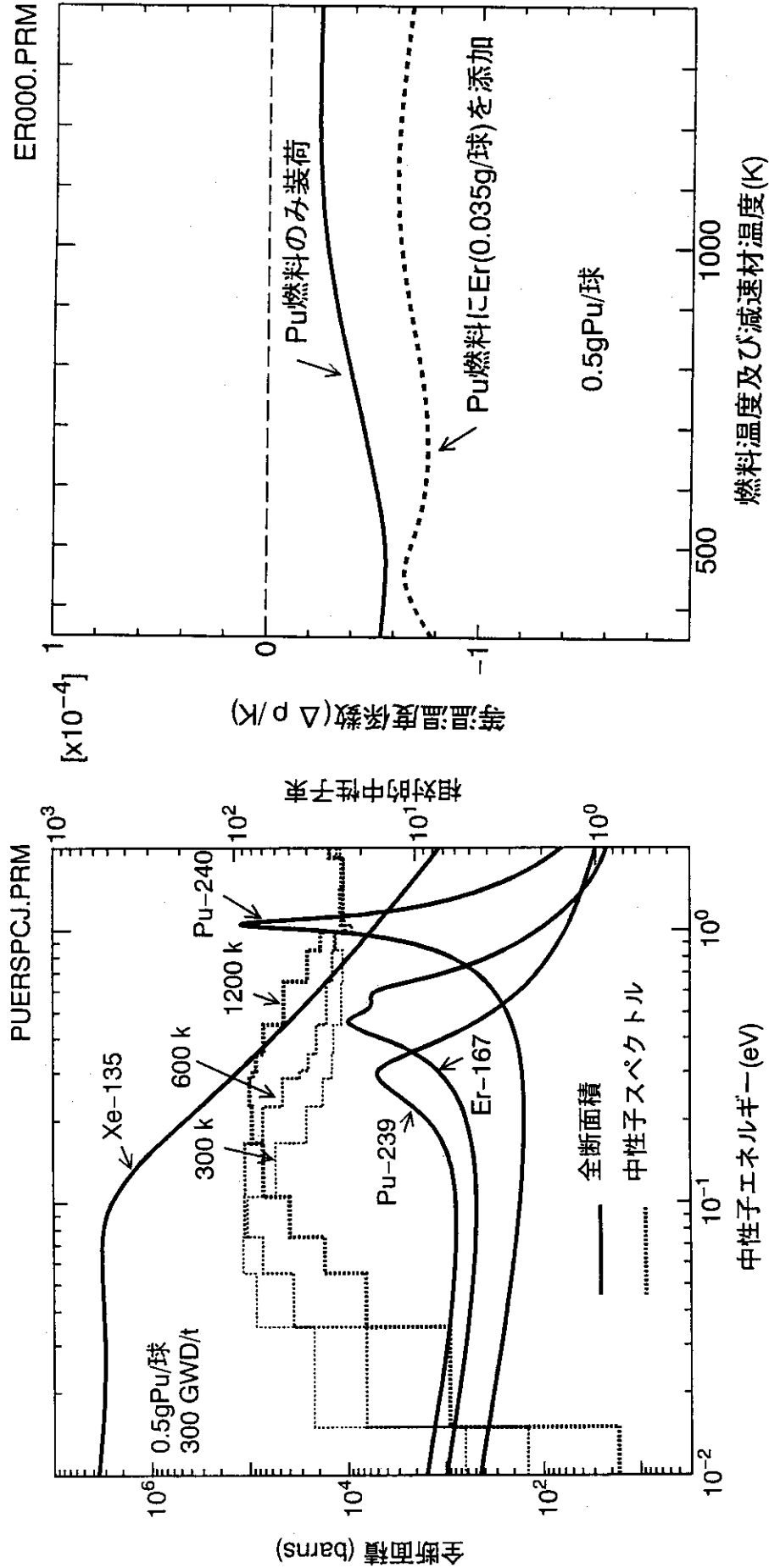


Fig. 18 Erの添加が等温度係数に及ぼす効果 (0 GWD/T)

Fig. 17 兵器級PuにErを添加した場合の全断面積と中性子スペクトルとの関係

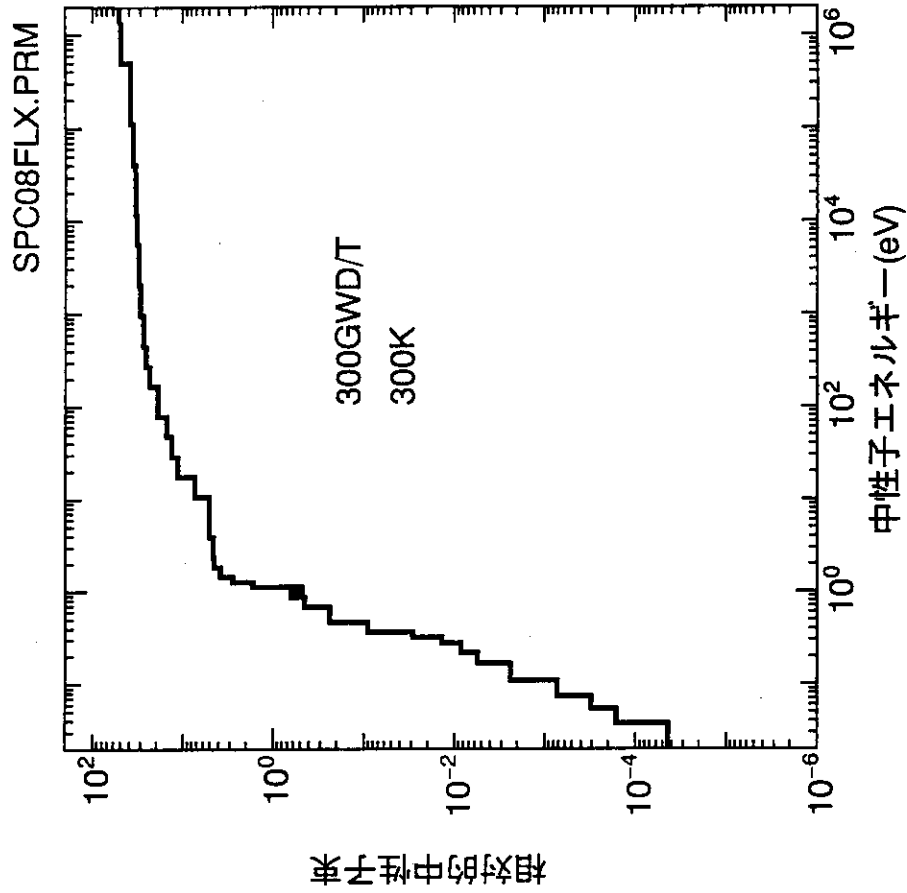


Fig. 19 Erの添加が等温温度係数に及ぼす効果
(300 GWD/T)

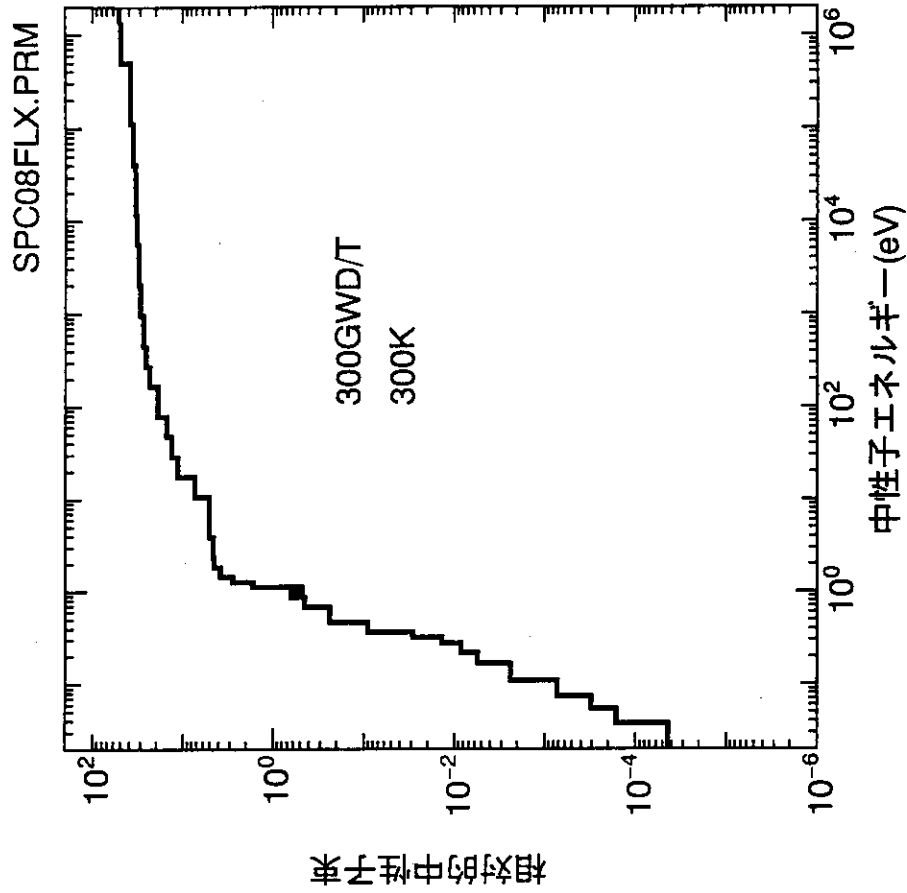


Fig. 20 中性子スペクトル

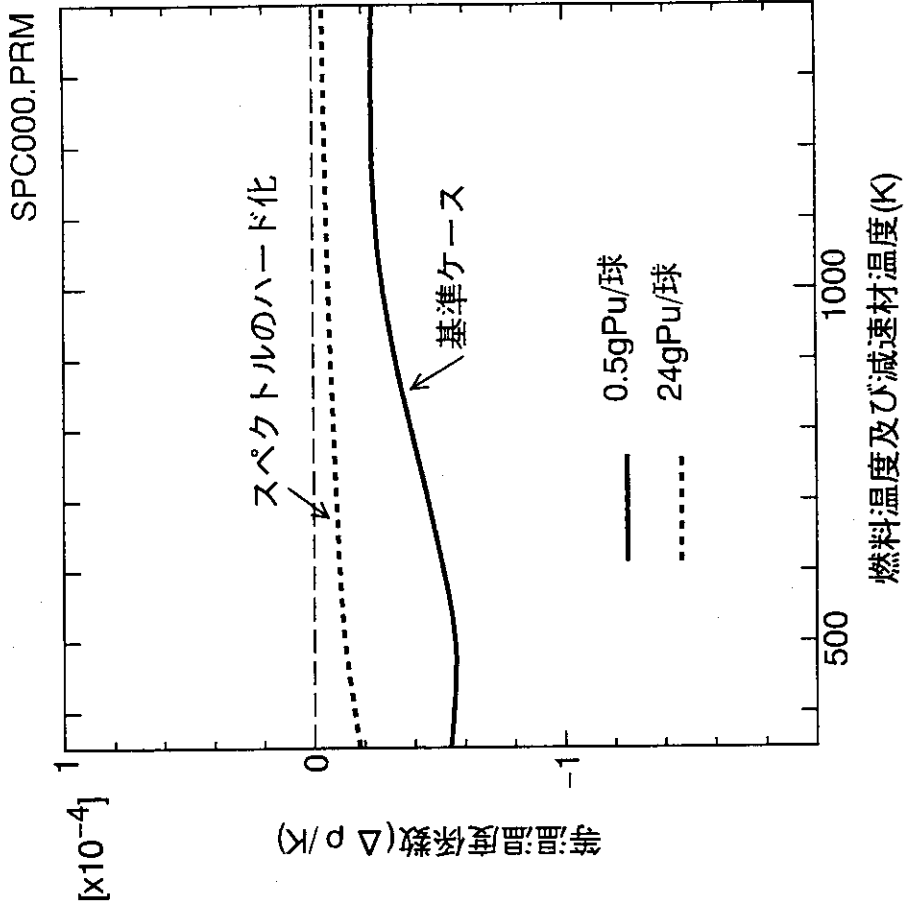


Fig. 22 スペクトルのハード化が等温度係数に及ぼす効果 (0 GWD/T)

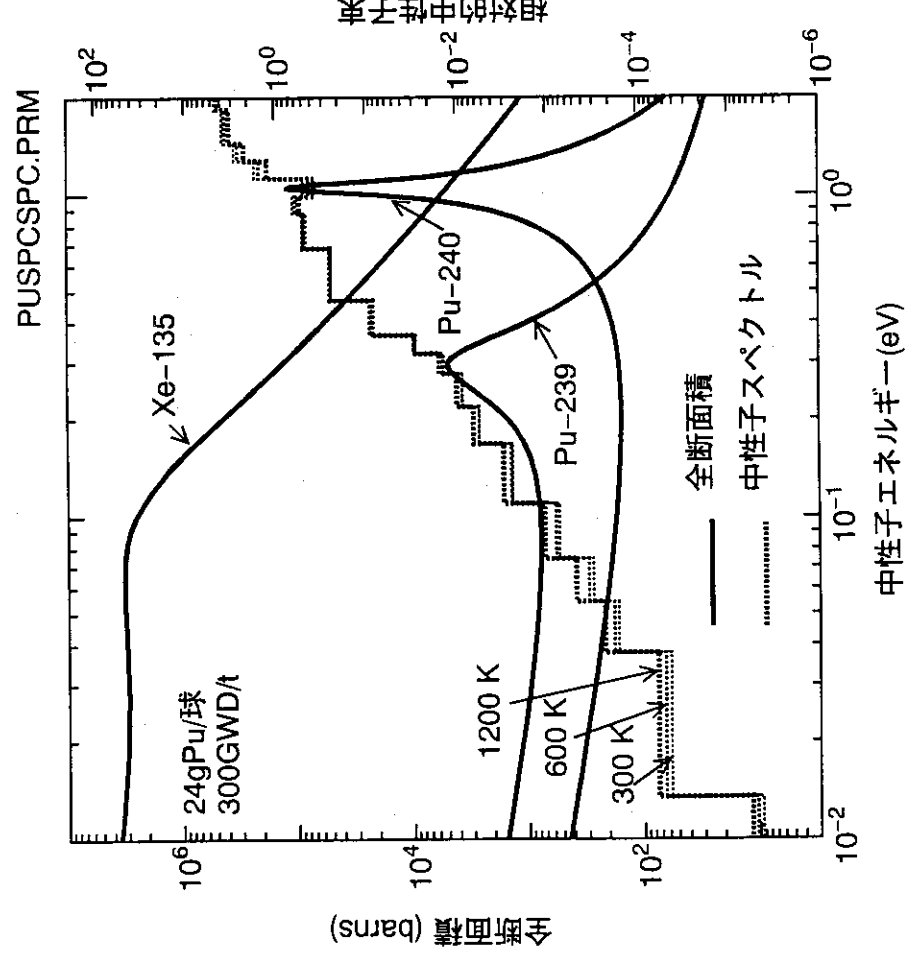


Fig. 21 多量の兵器級Puを装荷した場合の全断面積と中性子スペクトルとの関係

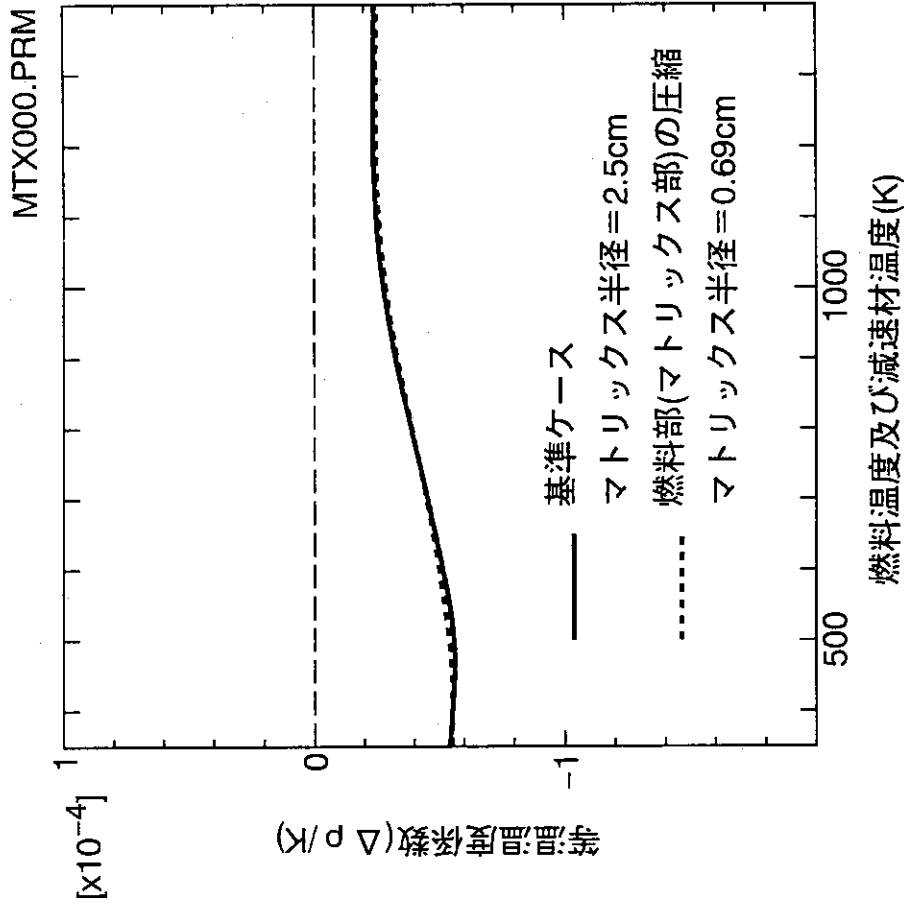


Fig. 24 燃料部を圧縮することが等温温度係数に及ぼす効果 (0 GWD/T)

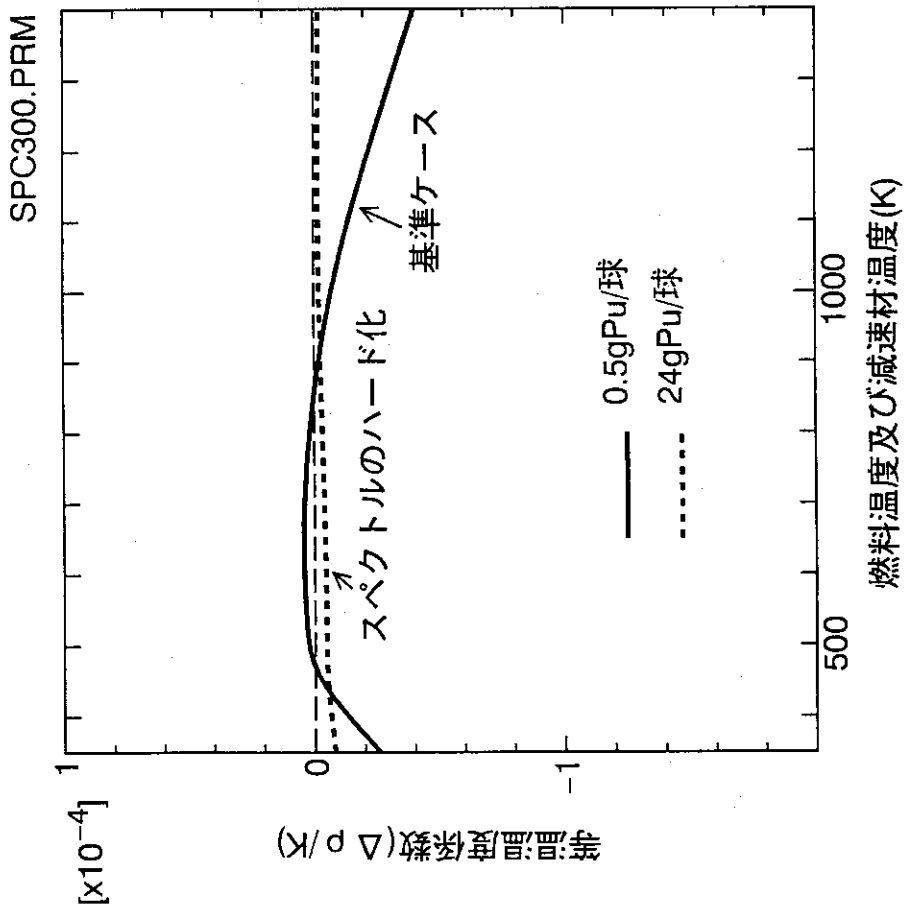


Fig. 23 スペクトルのハード化が等温温度係数に及ぼす効果 (300 GWD/T)

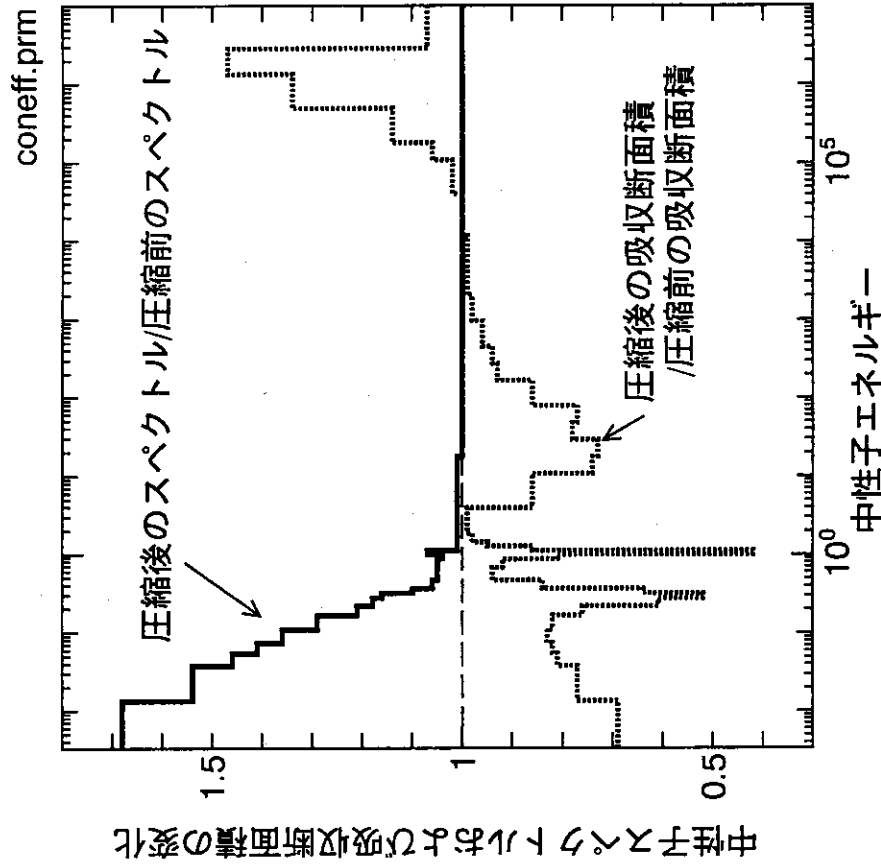


Fig. 26 燃料領域の圧縮による中性子スペクトルおよび吸収断面積の変化

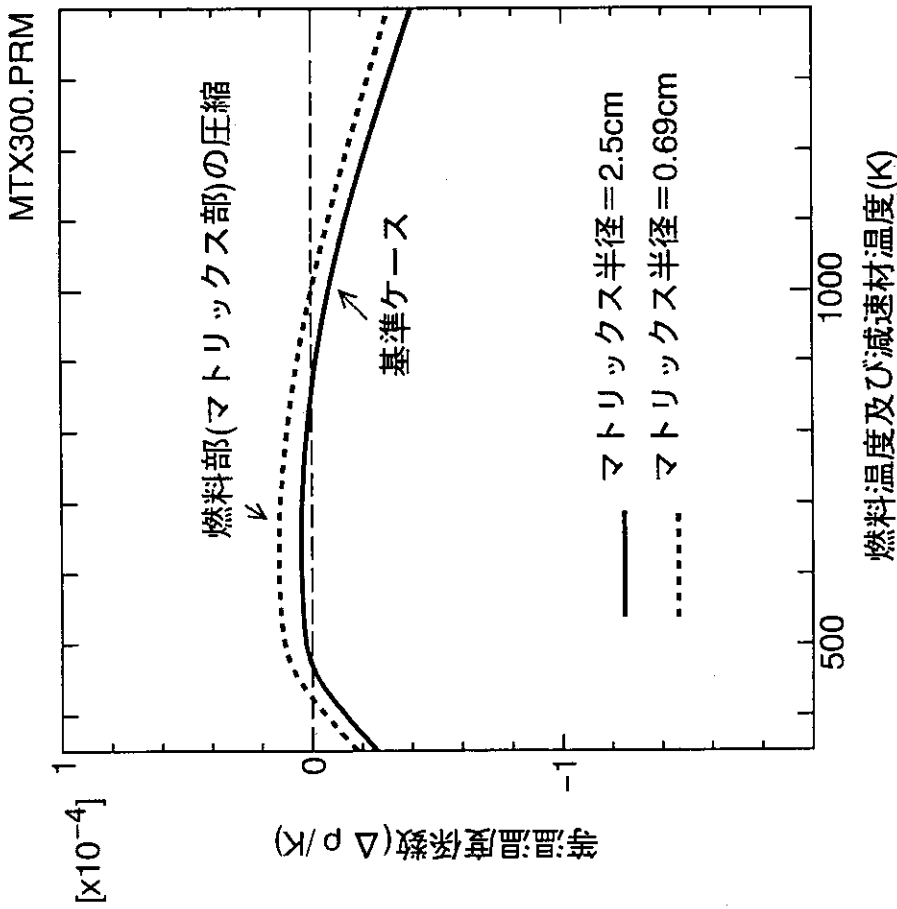


Fig. 25 燃料部を圧縮することが等温温度係数に及ぼす効果 (300 GWD/T)

付録

| | |
|-------------------------------------|------------|
| 1. 解析で使⽤したPu燃料球の仕様 | Table A-1 |
| 2. 解析で使⽤したエネルギー群構造 | Table A-2 |
| 3. 単一球セルの温度係数解析モデル | Fig. A-1 |
| 4. スーパーセルの温度係数解析モデル (Pu, Th混合体系) | Fig. A-2 |
| 5. スーパーセルの温度係数解析モデル (Pu, Th分離体系) | Fig. A-3 |
| 6. 燃焼計算 (原子数密度計算) モデル | Fig. A-4 |
| 7. 各領域の原子数密度 (Pu, Th混合体系) | Table A-3 |
| 8. 平衡状態近傍の原子数密度 (Pu, Th混合体系) | Table A-4 |
| 9. 各領域の原子数密度 (Pu, Th分離体系) | Table A-5 |
| 10. 平衡状態近傍の原子数密度 (Pu, Th分離体系) | Table A-6 |
| 11. 各領域の原子数密度 (Erの添加) | Table A-7 |
| 12. 平衡状態近傍の原子数密度 (Erの添加) | Table A-8 |
| 13. 各領域の原子数密度 (スペクトルのハード化) | Table A-9 |
| 14. 平衡状態近傍の原子数密度 (スペクトルのハード化) | Table A-10 |
| 15. 燃焼計算用原子数密度 (OGWD/T; Pu, Th混合体系) | Table A-11 |
| 16. 燃焼計算用原子数密度 (OGWD/T; Pu, Th分離体系) | Table A-12 |
| 17. 燃焼計算用原子数密度 (OGWD/T; Erの添加) | Table A-13 |
| 18. 燃焼計算用原子数密度 (OGWD/T; スペクトルのハード化) | Table A-14 |
| 19. 温度と中性子束との関係 | Fig. A-5 |
| 20. 温度と中性子吸収率との関係 | Fig. A-6 |
| 21. 温度と核分裂率との関係 | Fig. A-7 |
| 22. Th添加による中性子スペクトルの変化 | Fig. A-8 |
| 23. 単一球セルモデルとスーパーセルモデルの比較 | Fig. A-9 |

Table A-1 燃料仕様

| 項目 | 単位 | Pu燃料 ¹⁾ |
|---------------|------------------------|--------------------|
| ・燃料核 | | |
| 材質 | — | PuO ₂ |
| Pu-239/Pu-240 | wt% | 96/4 |
| 半径 | cm | 0.0275 |
| 密度 | g/cm ³ | 2.91 |
| ・被覆層材質（密度） | | |
| 第1層 | — (g/cm ³) | 1.1 |
| 第2層 | — (g/cm ³) | 1.7 |
| 第3層 | — (g/cm ³) | 3.18 |
| 第4層 | — (g/cm ³) | 2.0 |
| ・被覆層厚さ | | |
| 第1層 | cm | 0.0021 |
| 第2層 | cm | 0.0045 |
| 第3層 | cm | 0.0041 |
| 第4層 | cm | 0.0062 |
| ・燃料球 | | |
| マトリックス領域内半径 | cm | 0 |
| マトリックス領域外半径 | cm | 2.5 |
| 燃料球半径 | cm | 3.0 |
| グラファイト密度 | g/cm ³ | |
| マトリックス | | 1.7 |
| 黒鉛殻部 | | 1.7 |

1) Nucl. Technol., 23, 240, (1974) に基づく

Table A-2 エネルギー群構造 (SRAC)

| 高速中性子群 | | | 熱中性子群 | | |
|--------|--------------------|---------------------|--------|-----------------------|-----------------------|
| エネルギー群 | エネルギー (eV) | | エネルギー群 | エネルギー (eV) | |
| | 上限 | 下限 | | 上限 | 下限 |
| 1 | 10^7 | 2.87×10^6 | 2 1 | $2.38 \times 10^0*$ | 1.85×10^0 |
| 2 | 2.87×10^6 | 1.35×10^6 | 2 2 | 1.85×10^0 | 1.45×10^0 |
| 3 | 1.35×10^6 | 4.98×10^5 | 2 3 | 1.45×10^0 | 1.28×10^0 |
| 4 | 4.98×10^5 | 1.83×10^5 | 2 4 | 1.28×10^0 | 1.13×10^0 |
| 5 | 1.83×10^5 | 1.11×10^5 | 2 5 | 1.13×10^0 | 9.93×10^{-1} |
| 6 | 1.11×10^5 | 4.09×10^4 | 2 6 | 9.93×10^{-1} | 8.76×10^{-1} |
| 7 | 4.09×10^4 | 1.17×10^4 | 2 7 | 8.76×10^{-1} | 6.83×10^{-1} |
| 8 | 1.17×10^4 | 5.53×10^3 | 2 8 | 6.83×10^{-1} | 4.69×10^{-1} |
| 9 | 5.53×10^3 | 2.04×10^3 | 2 9 | 4.69×10^{-1} | 3.65×10^{-1} |
| 1 0 | 2.04×10^3 | 9.61×10^2 | 3 0 | 3.65×10^{-1} | 3.20×10^{-1} |
| 1 1 | 9.61×10^2 | 4.54×10^2 | 3 1 | 3.20×10^{-1} | 2.77×10^{-1} |
| 1 2 | 4.54×10^2 | 2.75×10^2 | 3 2 | 2.77×10^{-1} | 2.19×10^{-1} |
| 1 3 | 2.75×10^2 | 1.67×10^2 | 3 3 | 2.19×10^{-1} | 1.67×10^{-1} |
| 1 4 | 1.67×10^2 | 7.89×10^1 | 3 4 | 1.67×10^{-1} | 1.10×10^{-1} |
| 1 5 | 7.89×10^1 | 4.79×10^1 | 3 5 | 1.10×10^{-1} | 7.43×10^{-2} |
| 1 6 | 4.79×10^1 | 2.90×10^1 | 3 6 | 7.43×10^{-2} | 5.45×10^{-2} |
| 1 7 | 2.90×10^1 | 1.76×10^1 | 3 7 | 5.45×10^{-2} | 3.78×10^{-2} |
| 1 8 | 1.76×10^1 | 1.07×10^1 | 3 8 | 3.78×10^{-2} | 1.35×10^{-2} |
| 1 9 | 1.07×10^1 | 3.93×10^0 | 3 9 | 1.35×10^{-2} | 3.34×10^{-3} |
| 2 0 | 3.93×10^0 | $2.38 \times 10^0*$ | 4 0 | 3.34×10^{-3} | — |

* カットオフエネルギー

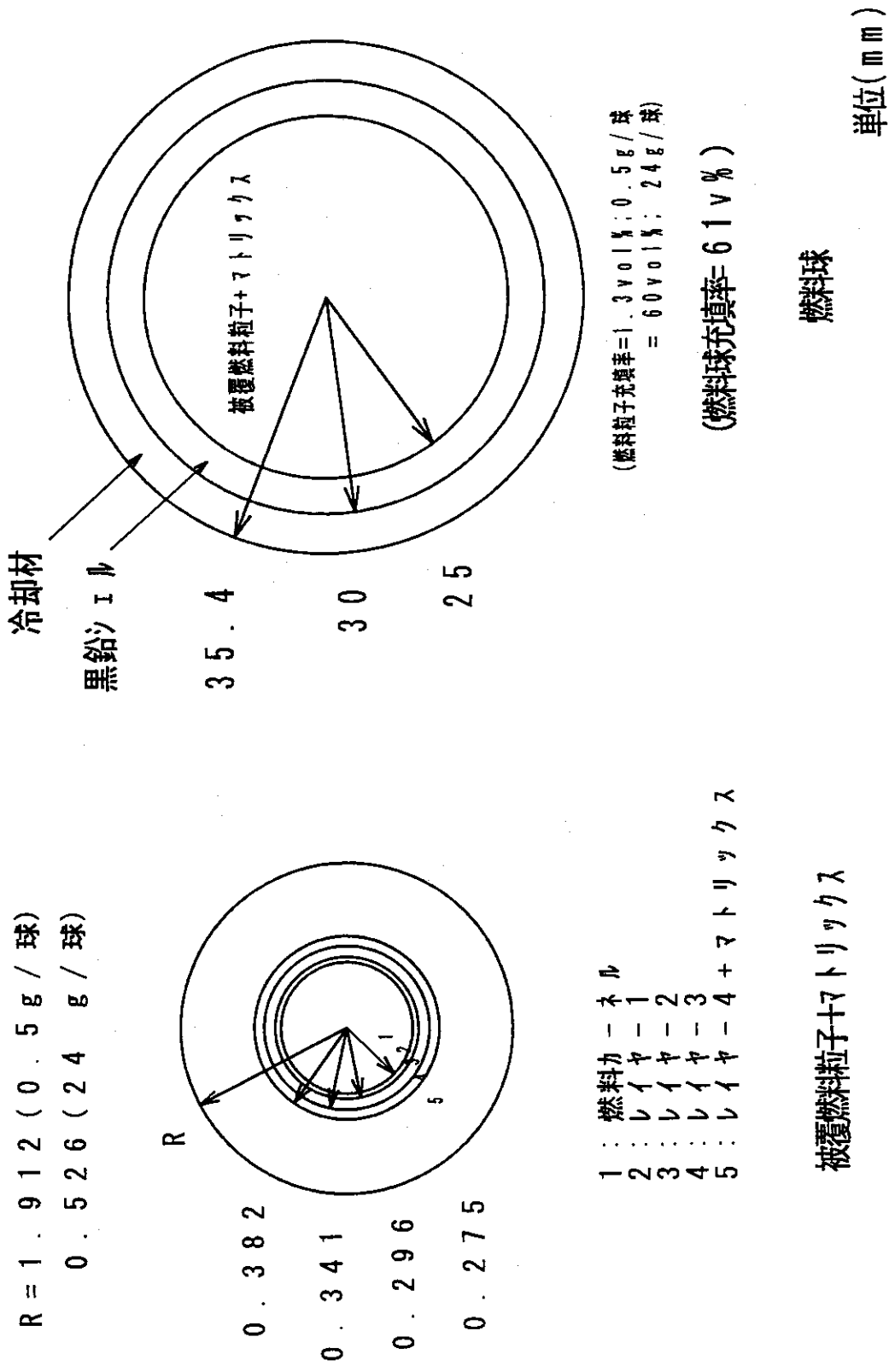


Fig. A-1 単一球セルの温度係数解析モデル(その1)

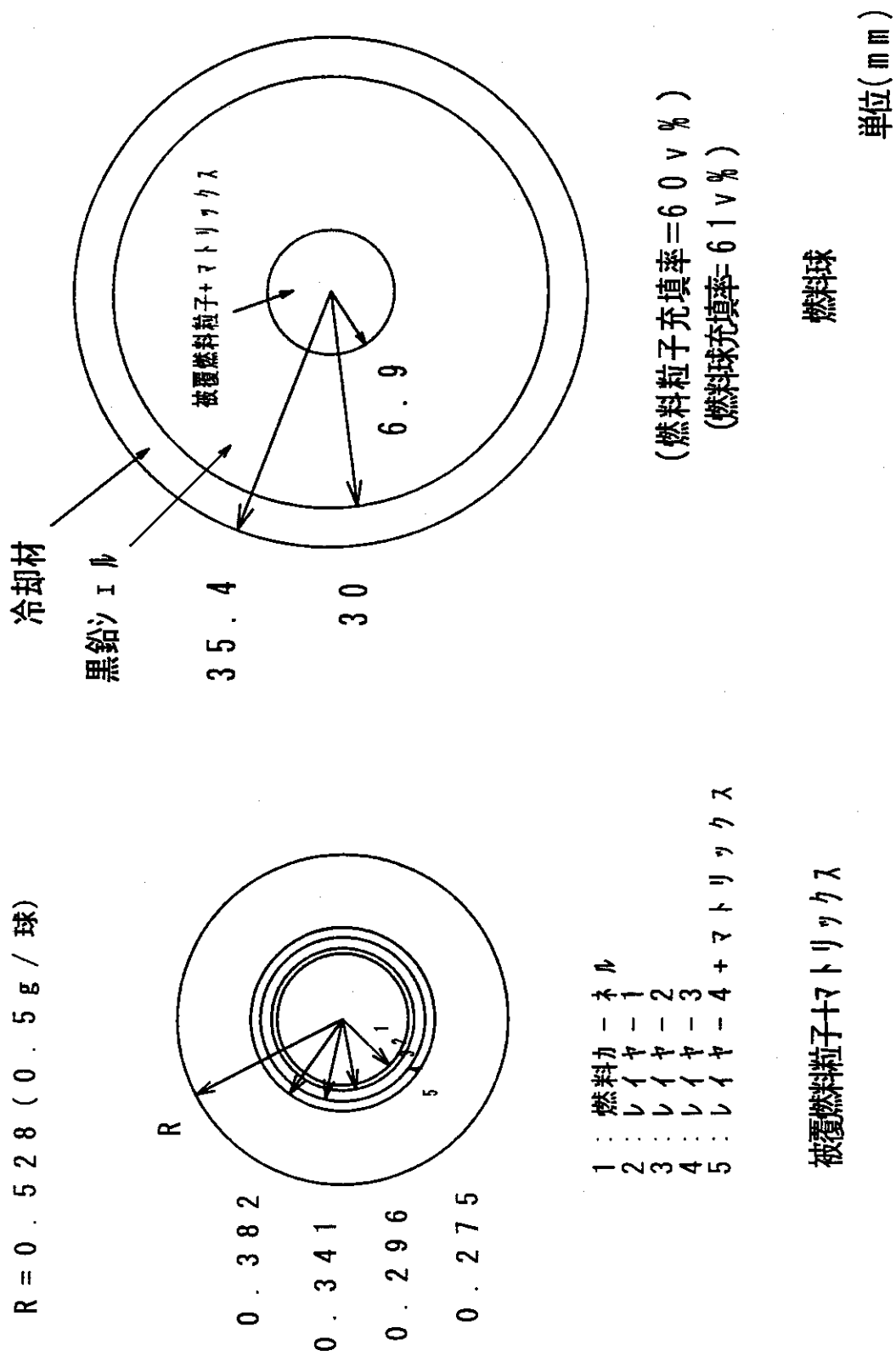


Fig. A-1 単一球セルの温度係数解析モデル(その2)

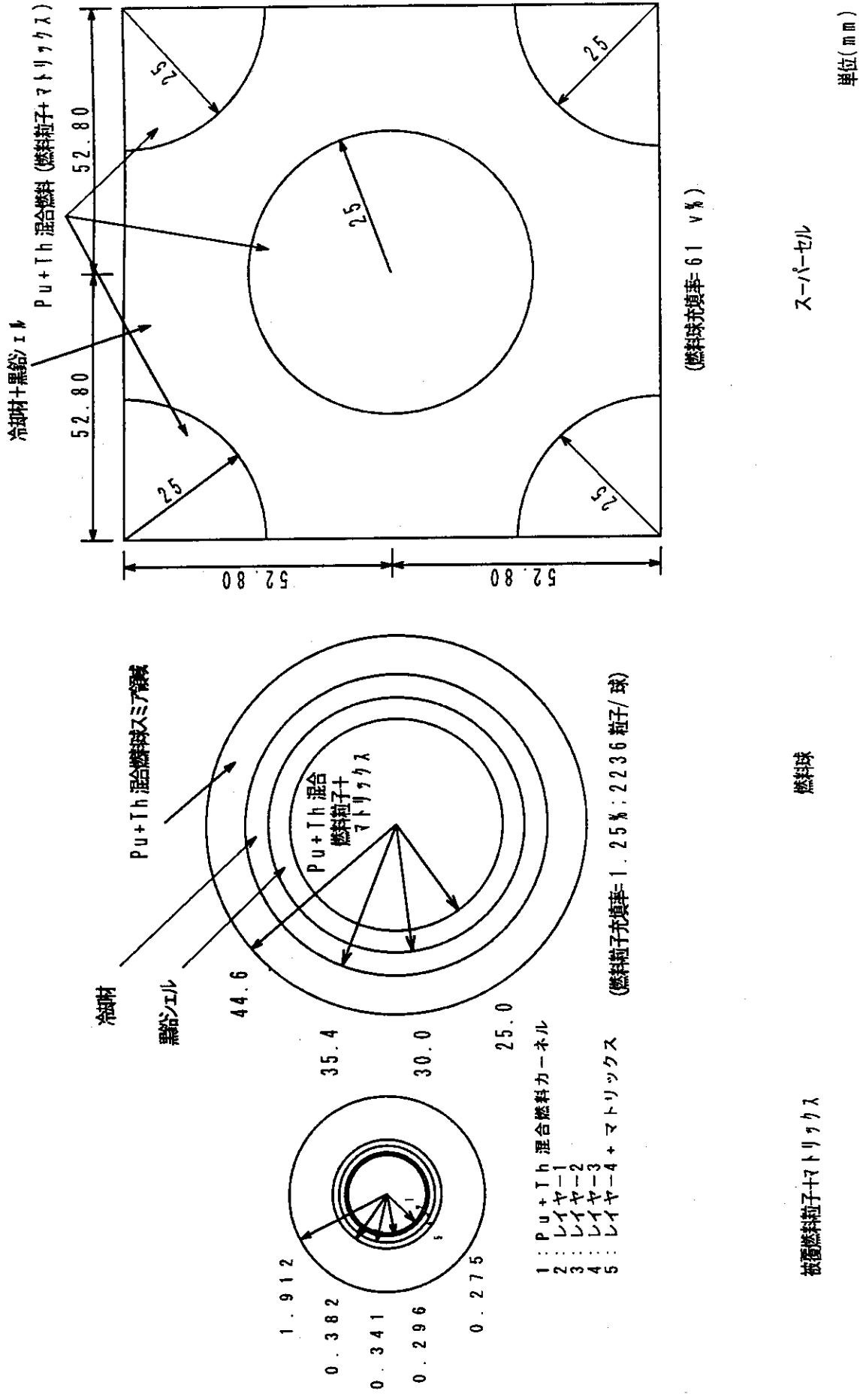


Fig. A-2 スーパーセルの温度係数解析モデル (Pu, Th混合体系)

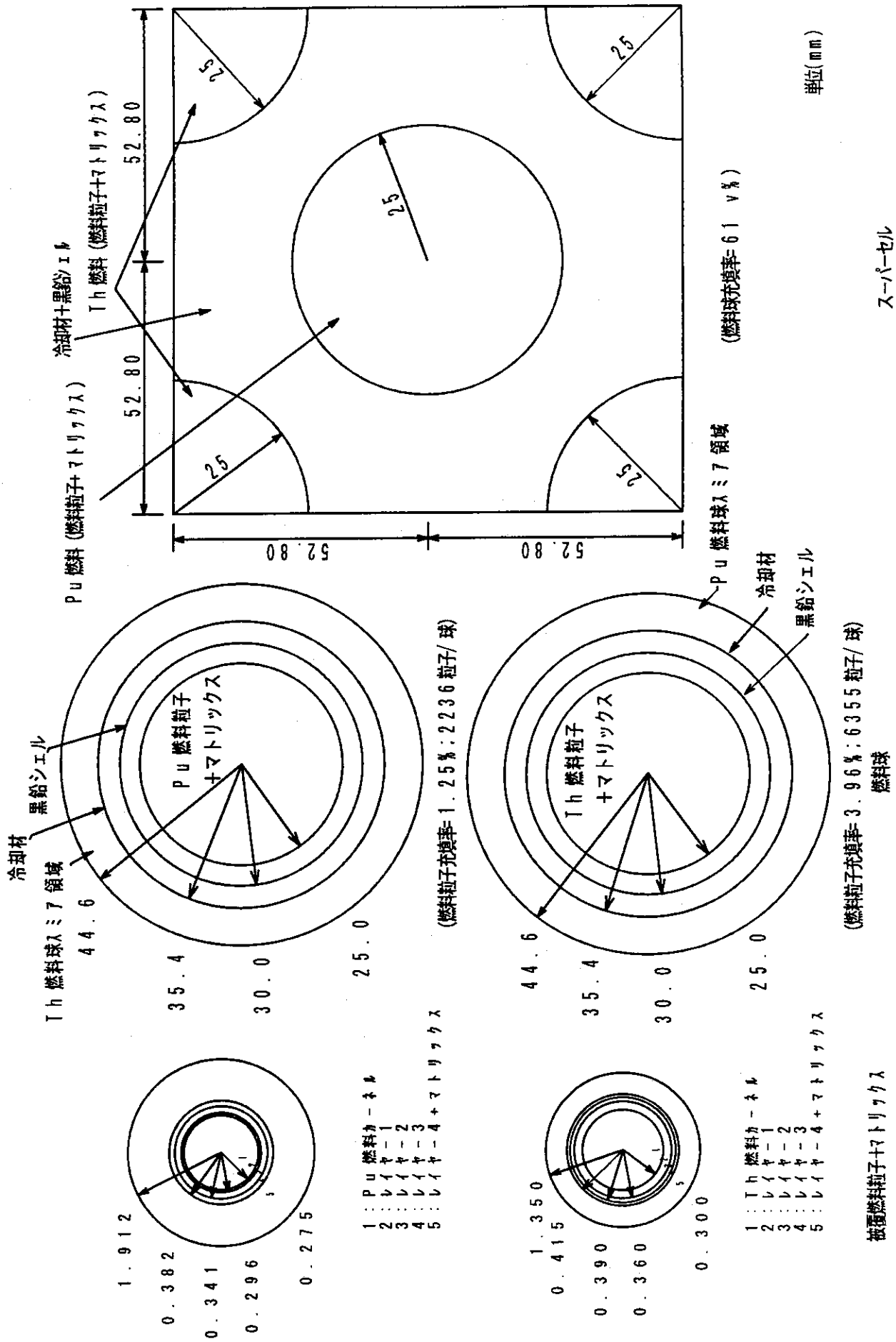


Fig. A-3 スーパーセルの温度係数解析モデル (Pu, Th分離体系)

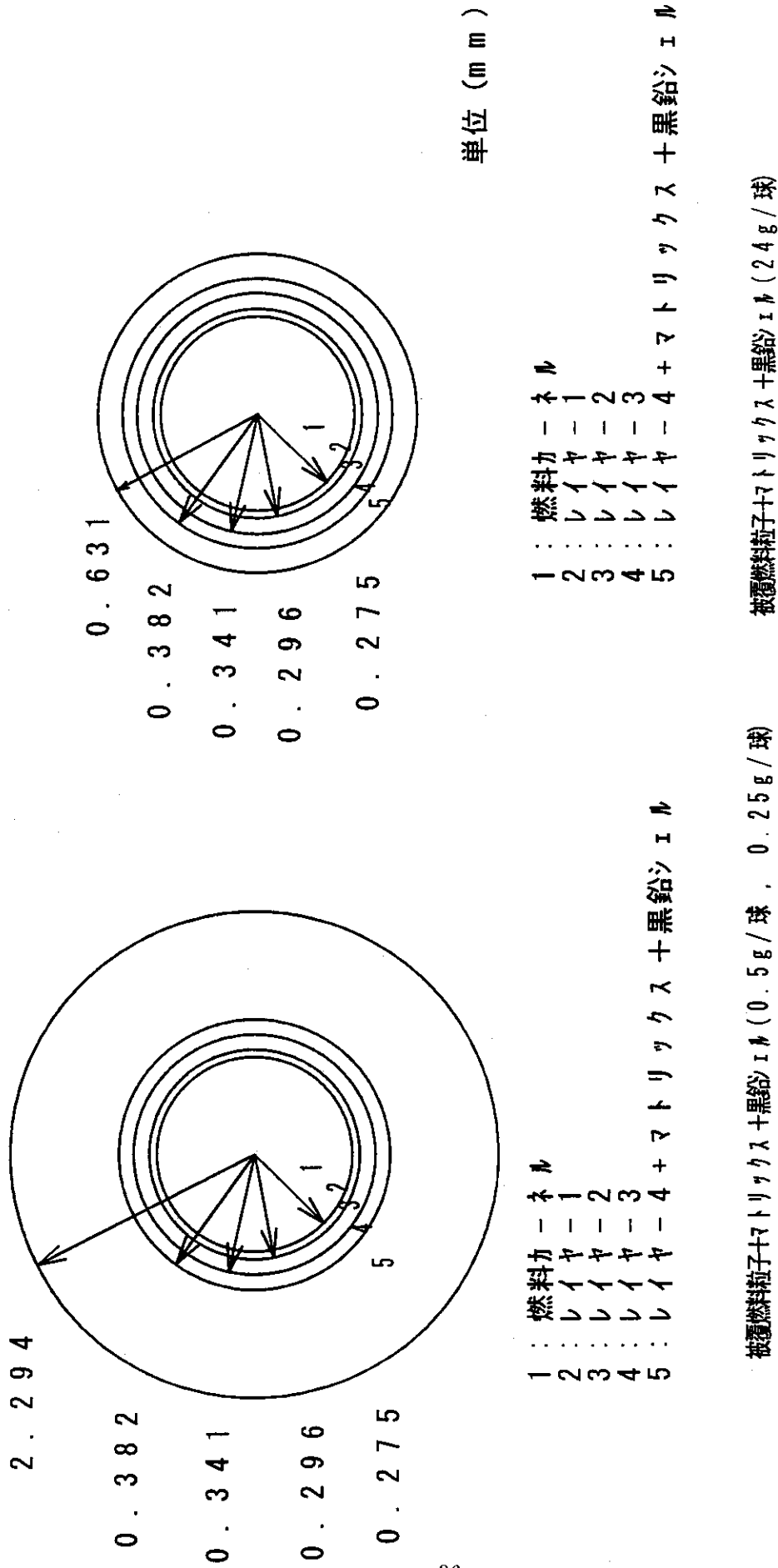


Fig. A-4 燃焼計算 (原子数密度計算) モデル

Table A-3 各領域の原子数密度

— 温度係数の検討 (Pu, Th混合体系) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) | 備考 |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|
| (Pu+Th) 混合燃料 カーネル* | ²³⁹ Pu | 3.04 × 10 ⁻³ | 燃焼初期(0 GWD/l)のみ |
| | ²⁴⁰ Pu | 1.94 × 10 ⁻⁴ | |
| | ²³² Th | 1.08 × 10 ⁻² | |
| | ¹⁸ O | 2.81 × 10 ⁻² | |
| 第1被覆層 | ¹² C | 5.52 × 10 ⁻² | 燃焼初期・中期・末期共通 |
| 第2被覆層 | ¹² C | 8.53 × 10 ⁻² | 同上 |
| 第3被覆層 | ¹² C | 4.78 × 10 ⁻² | 同上 |
| | Si | 4.78 × 10 ⁻² | |
| 第4被覆層 + 7材 + 7材 | ¹² C | 8.54 × 10 ⁻² | 同上 |
| 黒鉛シエル | ¹² C | 8.53 × 10 ⁻² | 同上 |
| | ¹² C | 1.00 × 10 ⁻²⁰ | |
| 冷却材 (Void) | ¹² C | 1.00 × 10 ⁻²⁰ | 同上 |
| (Pu+Th) 混合燃料球スミア領域* | ²³⁹ Pu | 3.18 × 10 ⁻⁵ | 燃焼初期(0 GWD/l)のみ |
| | ²⁴⁰ Pu | 2.03 × 10 ⁻⁷ | |
| | ²³² Th | 4.19 × 10 ⁻⁵ | |
| | ¹⁸ O | 9.05 × 10 ⁻⁵ | |
| | ¹² C | 5.19 × 10 ⁻² | |
| Si | 3.87 × 10 ⁻⁵ | | |

(注) Th燃料粒子の被覆層はPu燃料粒子と同じとした

* 平衡状態近傍(300 GWD/l) についてはTable A-4 参照

Table A-4 平衡状態近傍の原子数密度 (1/2)
— 燃料粒子単位での燃焼 (Pu-Th混合体系) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 300 GWD/l |
| (Pu+Th) 混合燃料 カーネル | ²³⁹ Pu | 1.52 × 10 ⁻³ |
| | ²⁴⁰ Pu | 5.74 × 10 ⁻⁴ |
| | ²⁴¹ Pu | 1.57 × 10 ⁻⁴ |
| | ²⁴² Pu | 9.18 × 10 ⁻⁶ |
| | ²⁴¹ Am | 1.07 × 10 ⁻⁶ |
| | ²⁴³ Am | 1.92 × 10 ⁻⁷ |
| | ¹⁰¹ Ru | 5.77 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹⁰² Rh | 6.44 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹⁰³ Pd | 5.24 × 10 ⁻⁶ |
| | ¹³¹ Xe | 3.60 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹³⁵ Xe | 8.34 × 10 ⁻⁸ |
| | ¹³⁷ Cs | 6.73 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹⁴⁷ Pm | 1.76 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹⁴⁸ Sm | 7.27 × 10 ⁻⁷ |
| ¹⁵⁰ Sm | 1.37 × 10 ⁻⁵ | |
| ¹⁵¹ Sm | 3.67 × 10 ⁻⁶ | |
| ²³² Th | 1.08 × 10 ⁻² | |
| ²³³ U | 2.16 × 10 ⁻⁴ | |
| ¹⁸ O | 2.81 × 10 ⁻² | |

Table A-4 平衡状態近傍の原子数密度 (2/2)
 燃料粒子単位での燃焼 (Pu-Th混合体系)

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) | |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------|--|
| | | 300 GWD/l | |
| (Pu,Th)混合 燃料球スミア 領域 | ²³⁹ Pu | 2.61 × 10 ⁹ | |
| | ²⁴⁰ Pu | 9.89 × 10 ⁷ | |
| | ²⁴¹ Pu | 2.71 × 10 ⁷ | |
| | ²⁴² Pu | 1.58 × 10 ⁸ | |
| | ²⁴¹ Am | 1.84 × 10 ⁸ | |
| | ²⁴³ Am | 3.30 × 10 ¹⁰ | |
| | ¹⁰¹ Ru | 9.93 × 10 ⁻⁸ | |
| | ¹⁰³ Rh | 1.11 × 10 ⁻⁷ | |
| | ¹⁰⁵ Pd | 9.03 × 10 ⁻⁸ | |
| | ¹³¹ Xe | 6.21 × 10 ⁻⁴ | |
| | ¹³⁵ Xe | 1.44 × 10 ⁻¹⁰ | |
| | ¹³³ Cs | 1.16 × 10 ⁻⁷ | |
| | ¹⁴⁷ Pm | 3.03 × 10 ⁻⁸ | |
| | ¹⁴⁹ Sm | 1.25 × 10 ⁻⁸ | |
| | ¹⁵⁰ Sm | 2.36 × 10 ⁻⁸ | |
| ¹⁵¹ Sm | 6.32 × 10 ⁻⁹ | | |
| | ²³² Th | 4.19 × 10 ⁻⁵ | |
| | ²³³ U | 8.38 × 10 ⁻⁷ | |
| | ¹⁶ O | 9.05 × 10 ⁻⁵ | |
| | ¹² C | 5.19 × 10 ⁻² | |
| | Si | 3.87 × 10 ⁻⁵ | |

Table A-5 各領域の原子数密度 (1/2)
 温度係数の検討 (Pu, Th分離体系)

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) | 備考 |
|-------------------------|-------------------|--------------------------|------------------|
| Pu燃料カーネル | ²³⁹ Pu | 6.08 × 10 ⁻³ | 燃焼初期(0 GWD /l)のみ |
| | ²⁴⁰ Pu | 3.88 × 10 ⁻⁴ | |
| | ¹⁶ O | 1.29 × 10 ⁻² | |
| 第1被覆層 | ¹² C | 5.52 × 10 ⁻² | 燃焼初期・中期・末期共通 |
| 第2被覆層 | ¹² C | 8.53 × 10 ⁻² | 同上 |
| 第3被覆層 | ¹² C | 4.78 × 10 ⁻² | 同上 |
| | Si | 4.78 × 10 ⁻² | |
| 第4被覆層+7H ₂ O | ¹² C | 8.54 × 10 ⁻² | 同上 |
| 黒鉛シェル | ¹² C | 8.53 × 10 ⁻² | 同上 |
| | ¹² C | 1.00 × 10 ⁻²⁰ | |
| 冷却材 (Void) | ¹² C | 1.00 × 10 ⁻²⁰ | 同上 |
| Th燃料球 スミア領域 | ²³² Th | 8.38 × 10 ⁻⁵ | 燃焼初期(0 GWD /l)のみ |
| | ¹⁶ O | 1.68 × 10 ⁻⁴ | |
| | ¹² C | 5.16 × 10 ⁻² | |
| | Si | 8.38 × 10 ⁻⁵ | |

* 平衡状態近傍(300 GWD/l)についてはTable A-6 参照

Table A-6 平衡状態近傍の原子数密度(1/2)
— 燃料粒子単位での燃焼(Pu-Th分離体系) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 300 GWD/l |
| Pu燃料カーネル | ²³⁹ Pu | 3.07 × 10 ⁻³ |
| | ²⁴⁰ Pu | 9.82 × 10 ⁻⁴ |
| | ²⁴¹ Pu | 4.31 × 10 ⁻⁴ |
| | ²⁴² Pu | 2.59 × 10 ⁻⁵ |
| | ²⁴¹ Am | 2.97 × 10 ⁻⁶ |
| | ²⁴³ Am | 1.01 × 10 ⁻⁶ |
| | ¹⁰¹ Ru | 1.15 × 10 ⁻⁴ |
| | ¹⁰² Rh | 1.25 × 10 ⁻⁴ |
| | ¹⁰⁵ Pd | 1.05 × 10 ⁻⁴ |
| | ¹³¹ Xe | 7.01 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹³⁵ Xe | 1.78 × 10 ⁻⁷ |
| | ¹³³ Cs | 1.33 × 10 ⁻⁴ |
| | ¹⁴⁷ Pm | 3.31 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹⁴⁹ Sm | 1.58 × 10 ⁻⁶ |
| | ¹⁵⁰ Sm | 2.72 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹⁵¹ Sm | 7.33 × 10 ⁻⁶ |
| ¹⁶ O | 1.29 × 10 ⁻² | |
| Th燃料カーネル | ²³² Th | 2.17 × 10 ⁻² |
| | ²³³ U | 4.33 × 10 ⁻⁴ |
| | O | 4.33 × 10 ⁻² |

Table A-5 各領域の原子数密度(2/2)
— 温度係数の検討(Pu, Th分離体系) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) | 備考 |
|----------------|-------------------|--------------------------|-----------------|
| Th燃料カーネル | ²³² Th | 2.17 × 10 ⁻² | 燃焼初期(0 GWD/l)のみ |
| | ¹⁶ O | 4.33 × 10 ⁻² | |
| 第1核覆層 | ¹² C | 5.52 × 10 ⁻² | 燃焼初期・中期・末期共通 |
| 第2核覆層 | ¹² C | 9.28 × 10 ⁻² | 同上 |
| 第3核覆層 | ¹² C | 4.81 × 10 ⁻² | 同上 |
| | Si | 4.81 × 10 ⁻² | |
| 第4核覆層+7H+7X | ¹² C | 8.54 × 10 ⁻² | 同上 |
| 黒鉛シェル | ¹² C | 8.53 × 10 ⁻² | 同上 |
| 冷却材(Void) | ¹² C | 1.00 × 10 ⁻²⁰ | 同上 |
| Pu燃料球 スミア領域 | ²³⁹ Pu | 6.38 × 10 ⁻⁸ | 燃焼初期(0 GWD/l)のみ |
| | ²⁴⁰ Pu | 4.05 × 10 ⁻⁷ | |
| | ¹⁶ O | 1.36 × 10 ⁻⁵ | |
| | ¹² C | 5.19 × 10 ⁻² | |
| | Si | 3.87 × 10 ⁻⁵ | |

* 平衡状態近傍(300 GWD/l)についてはTable A-6 参照

Table A-6 平衡状態近傍の原子数密度 (2/2)
 — 燃料粒子単位での燃焼 (Pu-Th分離体系) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 300 GWD/l |
| Pu燃料球 スミア領域 | ²³⁹ Pu | 5.29 × 10 ¹⁶ |
| | ²⁴⁰ Pu | 1.69 × 10 ¹⁶ |
| | ²⁴¹ Pu | 7.43 × 10 ¹⁷ |
| | ²⁴² Pu | 4.47 × 10 ⁻⁸ |
| | ²⁴¹ Am | 5.11 × 10 ⁻⁶ |
| | ²⁴³ Am | 1.75 × 10 ⁻⁸ |
| | ¹⁰¹ Ru | 1.87 × 10 ⁻⁷ |
| | ¹⁰³ Rh | 2.15 × 10 ⁻⁷ |
| | ¹⁰⁵ Pd | 1.80 × 10 ⁻⁷ |
| | ¹³¹ Xe | 1.21 × 10 ⁷ |
| | ¹³⁵ Xe | 3.07 × 10 ¹⁰ |
| | ¹³³ Cs | 2.29 × 10 ⁻⁷ |
| | ¹⁴⁷ Pm | 5.71 × 10 ⁻⁸ |
| | ¹⁴⁹ Sm | 2.71 × 10 ⁻⁸ |
| | ¹⁵⁰ Sm | 4.68 × 10 ⁻⁸ |
| ¹⁵¹ Sm | 1.26 × 10 ⁻⁸ | |
| Th燃料球 スミア領域 | ¹⁸ O | 1.36 × 10 ²⁵ |
| | ¹² C | 5.19 × 10 ²² |
| | Si | 3.87 × 10 ²⁵ |
| Th燃料球 スミア領域 | ²³² Th | 8.38 × 10 ¹⁶ |
| | ²³³ U | 1.68 × 10 ¹⁶ |
| | ¹⁶ O | 1.68 × 10 ²⁵ |
| | ¹² C | 5.16 × 10 ²² |
| | Si | 8.38 × 10 ²⁵ |

Table A-7 各領域の原子数密度
 — 温度係数の検討 (Erの添加) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) | 備考 |
|------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| (Pu+Er)燃料 カーネル ^{*1} (Erは燃焼しな いとした) | ²³⁹ Pu | 6.08 × 10 ¹⁶ | 燃焼初期(0 GWD/l)のみ ← ²³⁹ Pu/10 |
| | ²⁴⁰ Pu | 3.88 × 10 ¹⁶ | |
| | ¹⁶⁷ Er | 6.08 × 10 ¹⁶ × ² | |
| | ¹⁶⁰ | 1.29 × 10 ²² | |
| 第1被覆層 | ¹² C | 5.52 × 10 ²² | 燃焼初期・平衡 状態共通 |
| 第2被覆層 | ¹² C | 8.53 × 10 ²² | 同上 |
| 第3被覆層 | ¹² C | 4.78 × 10 ²² | 同上 |
| | Si | 4.78 × 10 ²² | |
| 第4被覆層+リフレク タ | ¹² C | 8.54 × 10 ²² | 同上 |
| 黒鉛シェル | ¹² C | 8.53 × 10 ²² | 同上 |
| 冷却材 (Void) | ¹² C | 1.00 × 10 ²⁰ | 同上 |

*1 平衡状態近傍(300 GWD/l)についてはTable A-8 参照

*2 0.035 g/球

Table A-8 平衡状態近傍の原子数密度
— 燃料粒子単位での燃焼(Erの添加) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) |
|----------|-------------------|----------------------------|
| | | 300 GWD/l |
| Pu燃料カーネル | ²³⁹ Pu | 3.07 × 10 ⁻³ |
| | ²⁴⁰ Pu | 9.84 × 10 ⁻⁴ |
| | ²⁴¹ Pu | 4.27 × 10 ⁻⁴ |
| | ²⁴² Pu | 2.61 × 10 ⁻⁵ |
| | ²⁴³ Am | 5.88 × 10 ⁻⁶ |
| | ²⁴⁴ Am | 1.02 × 10 ⁻⁶ |
| | ¹⁰¹ Ru | 1.15 × 10 ⁻⁴ |
| | ¹⁰² Rh | 1.25 × 10 ⁻⁴ |
| | ¹⁰⁵ Pd | 1.05 × 10 ⁻⁴ |
| | ¹³¹ Xe | 7.01 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹³⁵ Xe | 1.34 × 10 ⁻⁷ |
| | ¹³³ Cs | 1.33 × 10 ⁻⁴ |
| | ¹⁴⁷ Pm | 3.16 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹⁴⁹ Sm | 1.57 × 10 ⁻⁶ |
| | ¹⁵⁰ Sm | 2.72 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹⁵¹ Sm | 7.31 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹⁵⁷ Er | 6.08 × 10 ⁻⁴ *1 |
| | O | 1.29 × 10 ⁻² |

*1 0.035 gEr/球

Table A-9 各領域の原子数密度
— 温度係数の検討(スペクトルのハード化) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) | 備考 |
|-------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|
| Pu燃料カーネル | ²³⁹ Pu | 6.08 × 10 ⁻³ | 燃焼初期(0 GWD/l)のみ |
| | ²⁴⁰ Pu | 3.88 × 10 ⁻⁴ | |
| | ¹⁶ O | 1.29 × 10 ⁻² | |
| 第1被覆層 | ¹² C | 5.52 × 10 ⁻² | 燃焼初期・平衡状態共通 |
| 第2被覆層 | ¹² C | 8.53 × 10 ⁻² | 同上 |
| 第3被覆層 | ¹² C | 4.78 × 10 ⁻² | 同上 |
| | Si | 4.78 × 10 ⁻² | |
| 第4被覆層+7H ₂ O | ¹² C | 9.06 × 10 ⁻² | 同上 |
| 黒鉛シェル | ¹² C | 3.39 × 10 ⁻² | 同上 |
| 冷却材(Void) | ¹² C | 1.00 × 10 ⁻²⁰ | 同上 |

注) 燃料粒子の充填が60 vol%に相当(24 gPu/燃料球; 1.071 × 10⁵ 粒子/球)

* 平衡状態近傍(300 GWD/l)についてはTable A-1 参照

Table A-10 平衡状態近傍の原子数密度
 — 燃料粒子単位での燃焼(スペクトルのハード化) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 3.00 GWD/l |
| Pu燃料カーネル | ²³⁹ Pu | 3.12 × 10 ⁻³ |
| | ²⁴⁰ Pu | 8.94 × 10 ⁻⁴ |
| | ²⁴¹ Pu | 2.38 × 10 ⁻⁴ |
| | ²⁴² Pu | 6.31 × 10 ⁻⁵ |
| | ²⁴³ Am | 1.64 × 10 ⁻⁴ |
| | ²⁴⁴ Am | 1.18 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹⁰¹ Ru | 1.03 × 10 ⁻⁴ |
| | ¹⁰² Rh | 1.08 × 10 ⁻⁴ |
| | ¹⁰⁵ Pd | 9.42 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹³¹ Xe | 4.62 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹³⁵ Xe | 5.75 × 10 ⁻⁹ |
| | ¹³⁵ Cs | 1.11 × 10 ⁻⁴ |
| | ¹⁴⁷ Pm | 3.30 × 10 ⁻⁹ |
| | ¹⁴⁹ Sm | 1.13 × 10 ⁻⁵ |
| | ¹⁵¹ Sm | 1.53 × 10 ⁻⁵ |
| ¹⁵¹ Sm | 6.76 × 10 ⁻⁸ | |
| ¹⁶ O | 2.81 × 10 ⁻² | |

Table A-11 燃焼計算用原子数密度(0 GWD/T)
 — 燃料粒子単位での燃焼(Pu-Th混合体系) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) |
|--------------------------------------------|-------------------|-------------------------|
| (Pu+Th)混合燃料 カーネル (Th燃料は燃焼し ないとした) | ²³⁹ Pu | 3.04 × 10 ⁻³ |
| | ²⁴⁰ Pu | 1.94 × 10 ⁻⁴ |
| | ²³² Th | — |
| | ¹⁶ O | 2.81 × 10 ⁻² |
| 第1被覆層 | ¹² C | 5.52 × 10 ⁻² |
| 第2被覆層 | ¹² C | 8.53 × 10 ⁻² |
| 第3被覆層 | ¹² C | 4.78 × 10 ⁻² |
| | Si | 4.78 × 10 ⁻² |
| 第4被覆層+7Hf+3 +黒鉛シールド | ¹² C | 8.53 × 10 ⁻² |

Table A-12 燃焼計算用原子数密度 (0 GWD/T)
 — 燃料粒子単位での燃焼 (Pu-Th分離体系) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Pu燃料カネル | ²³⁹ Pu | 6.08×10^{-3} |
| | ²⁴⁰ Pu | 3.88×10^{-4} |
| | ¹⁶ O | 1.29×10^{-2} |
| 第1被覆層 | ¹² C | 5.52×10^{-2} |
| 第2被覆層 | ¹² C | 8.53×10^{-2} |
| 第3被覆層 | ¹² C | 4.78×10^{-2} |
| | Si | 4.78×10^{-2} |
| 第4被覆層+7H ₂ O +黒鉛シド | ¹² C | 8.53×10^{-2} |

Table A-13 燃焼計算用原子数密度 (0 GWD/T)
 — 燃料粒子単位での燃焼 (Erの添加) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Pu燃料カネル | ²³⁹ Pu | 6.08×10^{-3} |
| | ²⁴⁰ Pu | 3.88×10^{-4} |
| | ¹⁵⁷ Er | — |
| | ¹⁶ O | 1.29×10^{-2} |
| 第1被覆層 | ¹² C | 5.52×10^{-2} |
| 第2被覆層 | ¹² C | 8.53×10^{-2} |
| 第3被覆層 | ¹² C | 4.78×10^{-2} |
| | Si | 4.78×10^{-2} |
| 第4被覆層+7H ₂ O +黒鉛シド | ¹² C | 8.53×10^{-2} |

Table A-14 燃焼計算用原子数密度 (0 GWD/T)
 — 燃料粒子単位での燃焼 (スペクトルのハード化) —

| 領域 | 核種 | 原子数密度 (1/b·cm) |
|----------------------|-------------------|-----------------------|
| Pu燃料カーネル | ²³⁹ Pu | 6.08×10^{-3} |
| | ²⁴⁰ Pu | 3.88×10^{-4} |
| | ¹⁶ O | 1.29×10^{-2} |
| 第1被覆層 | ¹² C | 5.52×10^{-2} |
| 第2被覆層 | ¹² C | 8.53×10^{-2} |
| 第3被覆層 | ¹² C | 4.78×10^{-2} |
| | Si | 4.78×10^{-2} |
| 第4被覆層+7Hガス +黒鉛シース | ¹² C | 8.53×10^{-2} |

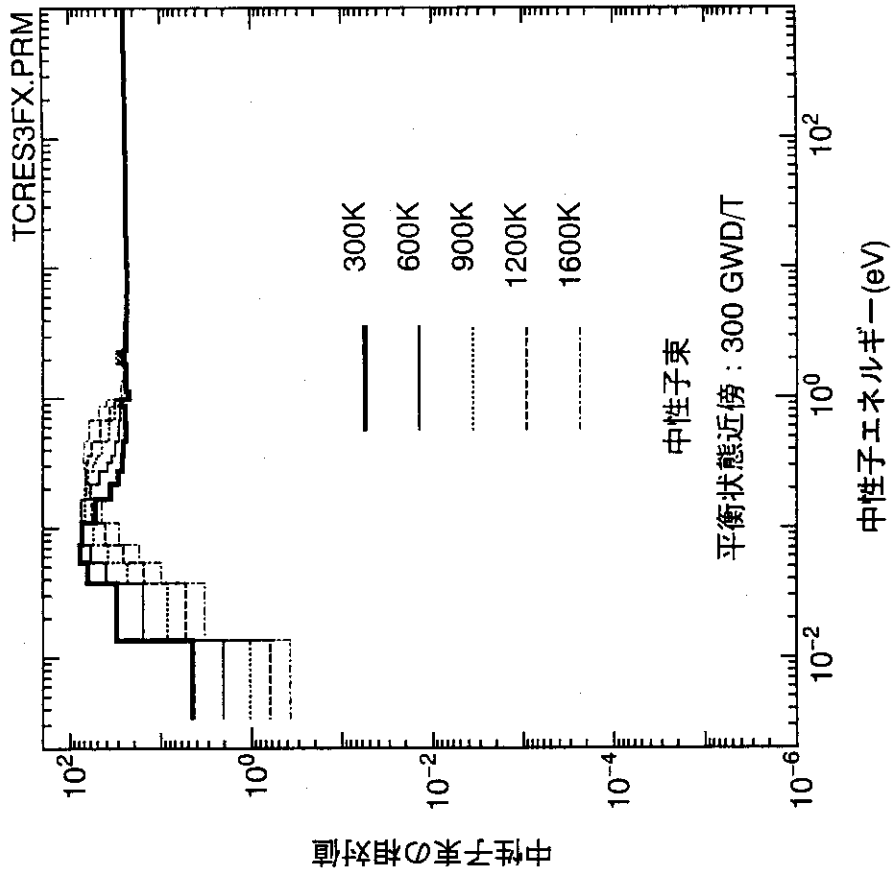


Fig. A-5 温度と中性子束との関係(2/3)
(Erの添加)

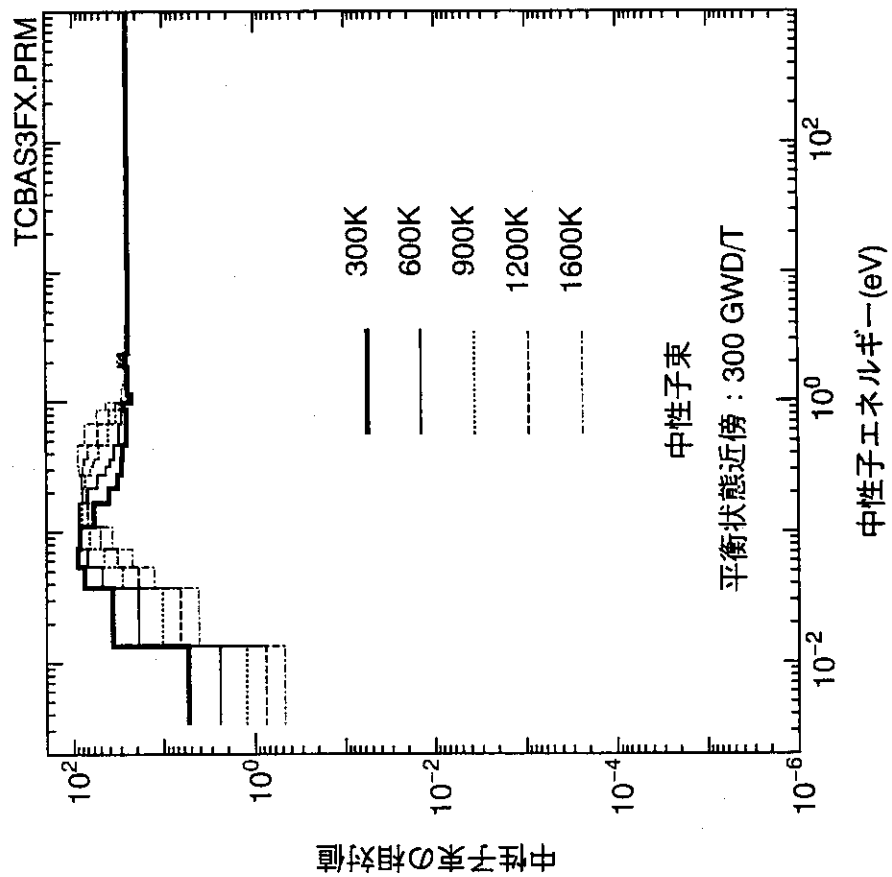


Fig. A-5 温度と中性子束との関係(1/3)
(基準ケース)

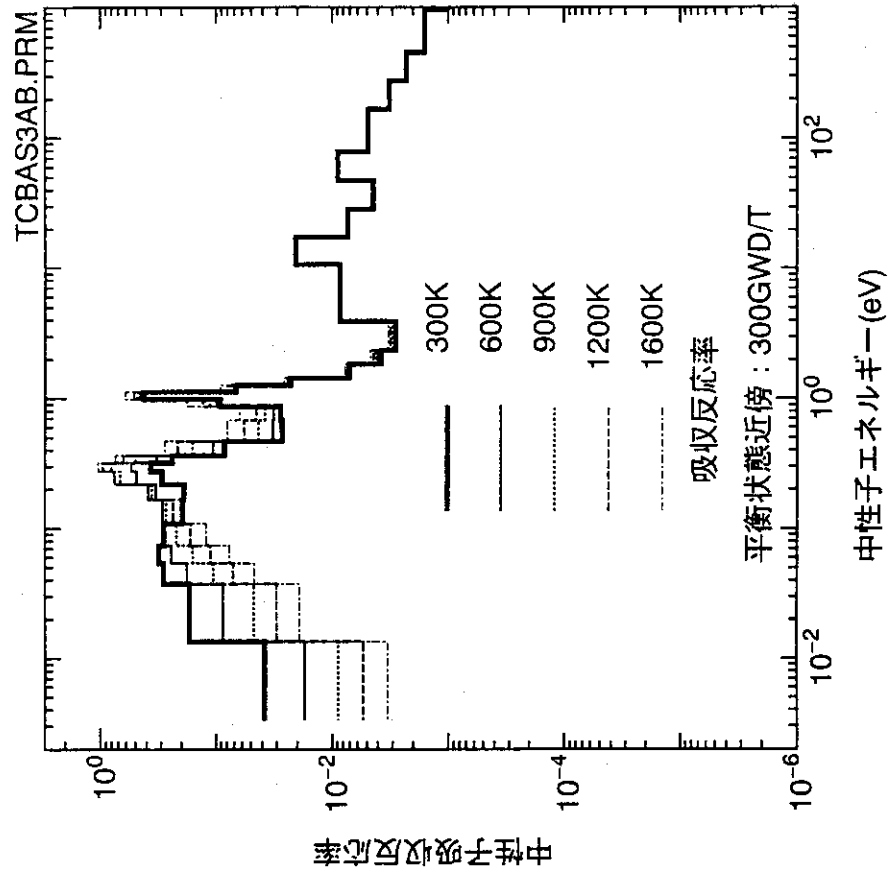


Fig. A-6 温度と中性子吸収反応率との関係(1/3)
(基準ケース)

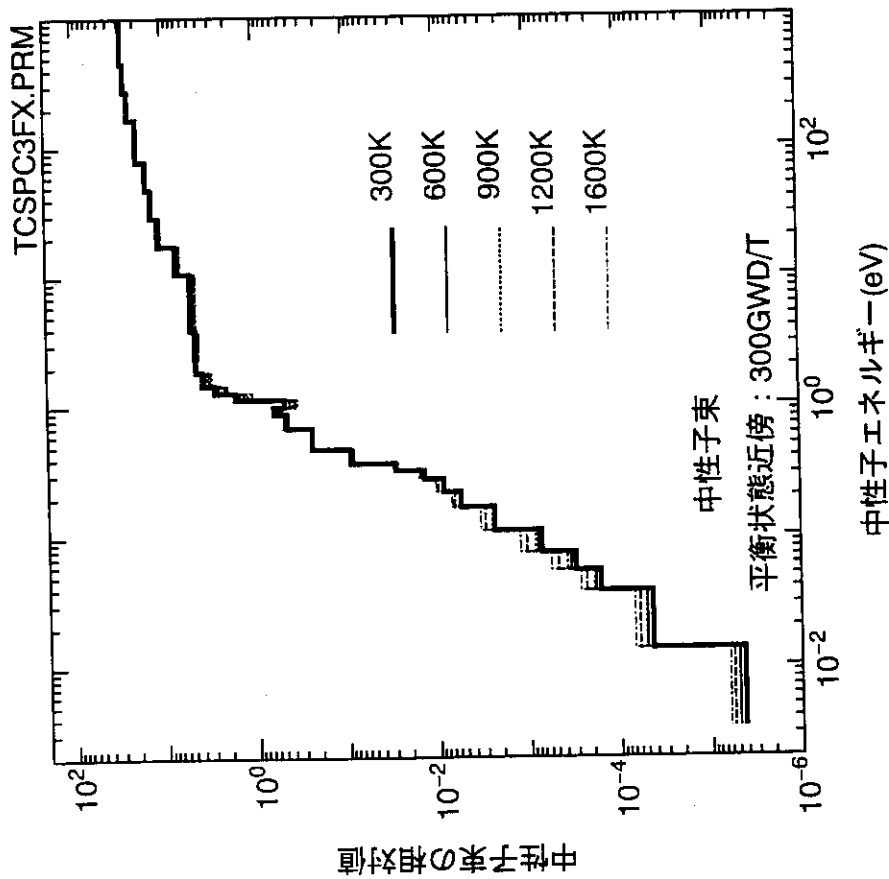


Fig. A-5 温度と中性子束との関係(3/3)
(スペクトルのハード化)

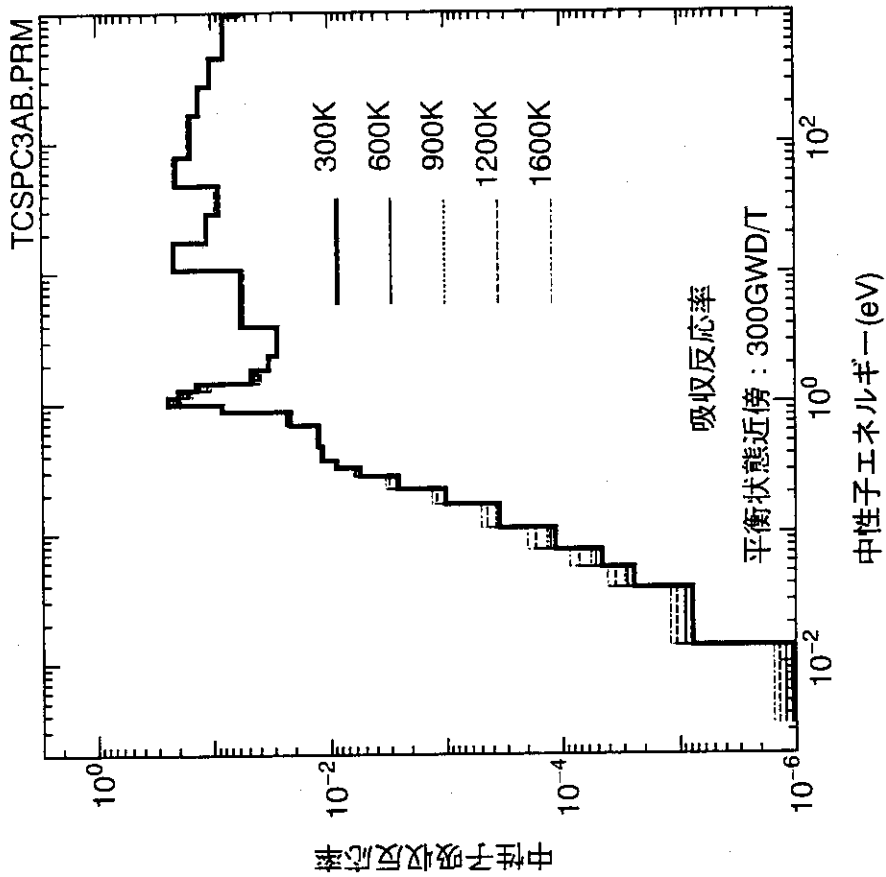


Fig. A-6 温度と中性子吸収反応率との関係 (3/3)
(スペクトルのハード化)

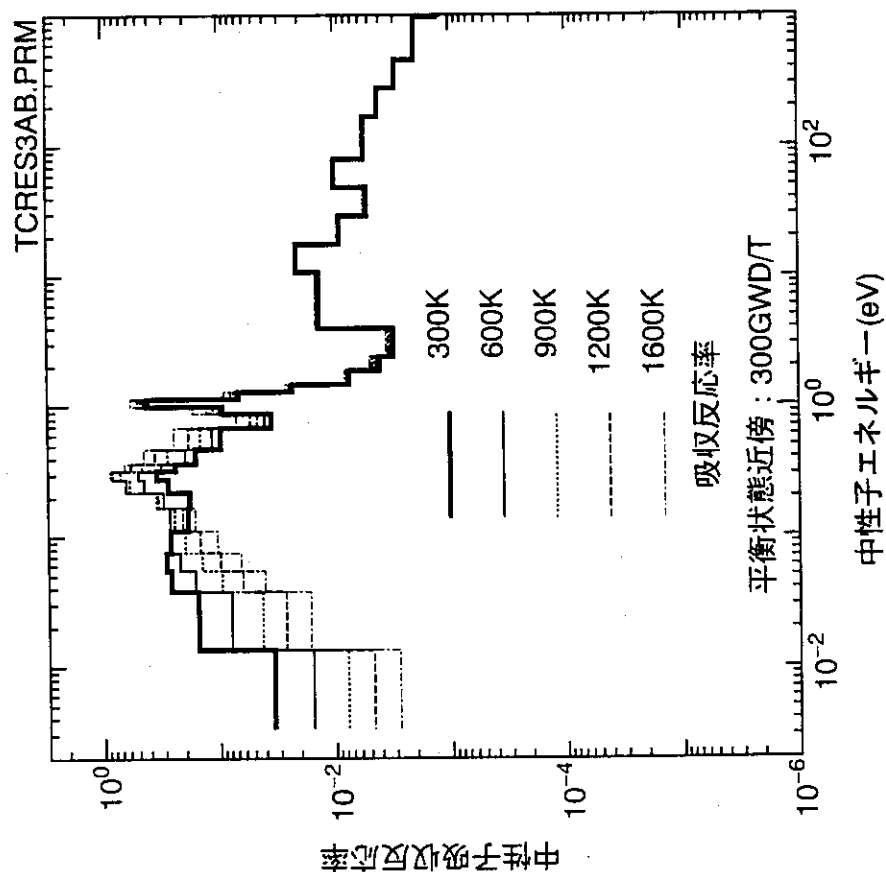


Fig. A-6 温度と中性子吸収反応率との関係 (2/3)
(Erの添加)

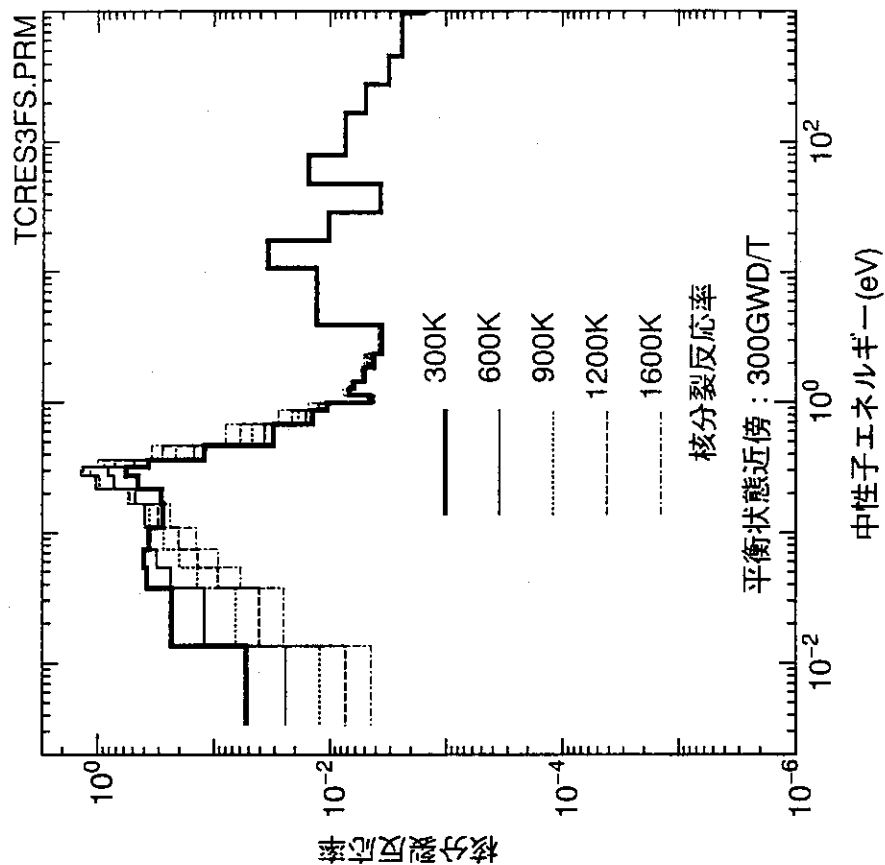


Fig. A-7 温度と核分裂反応率との関係(2/3)
(Erの添加)

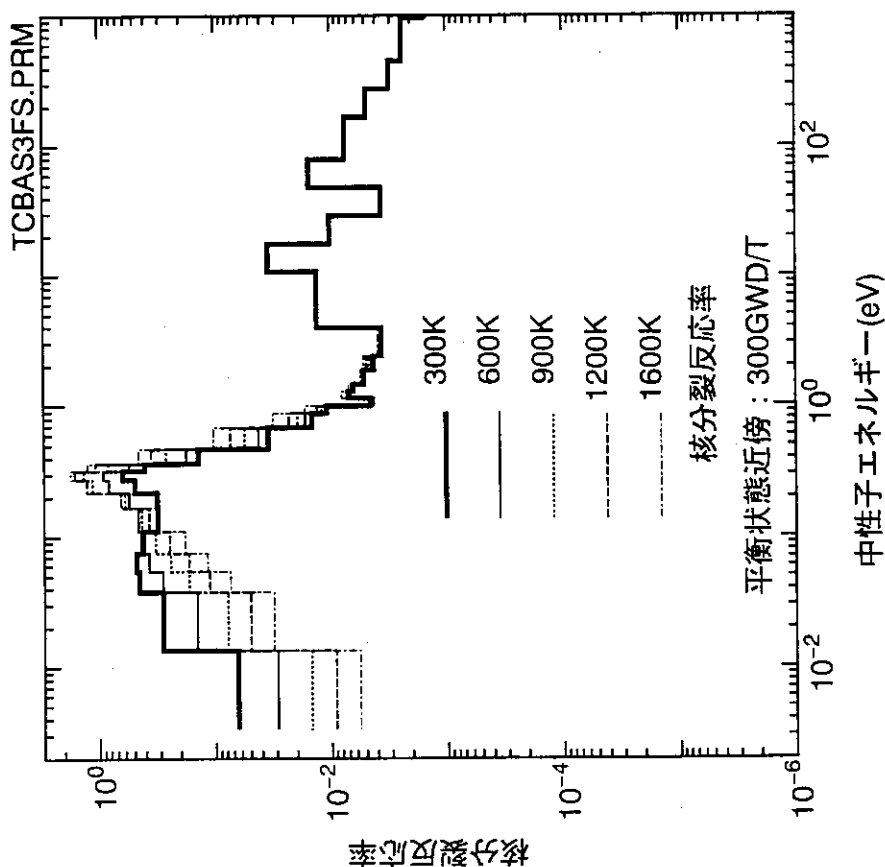


Fig. A-7 温度と核分裂反応率との関係(1/3)
(標準ケース)

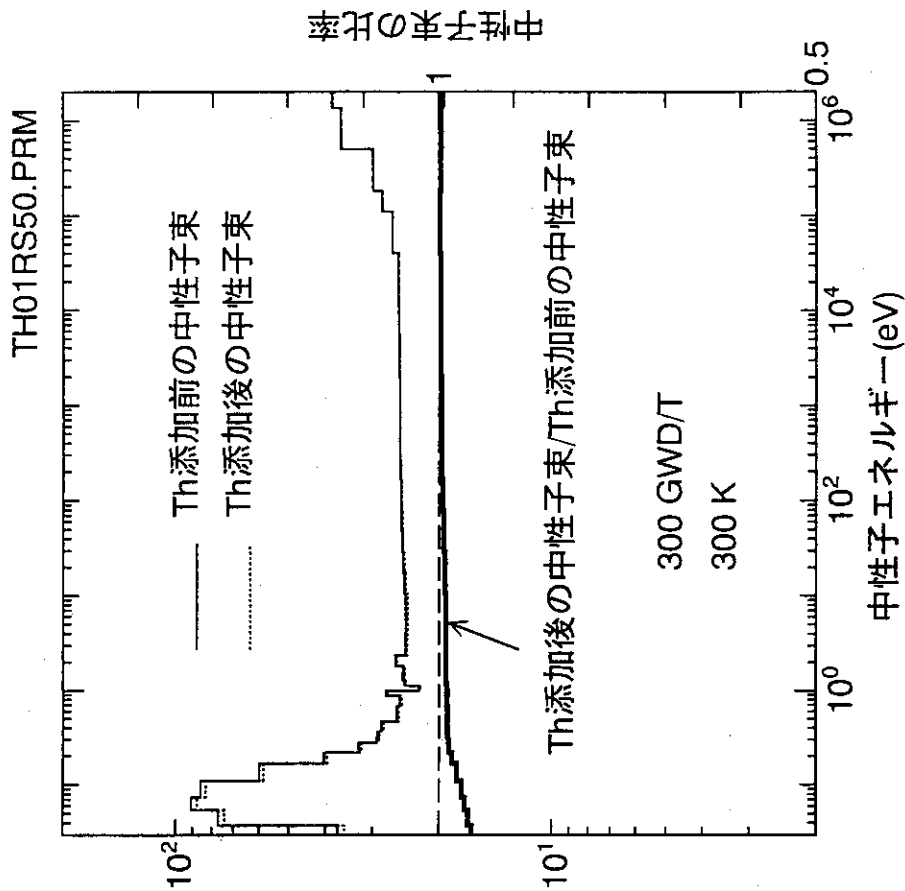


Fig. A-8 Th添加による中性子スペクトルの変化

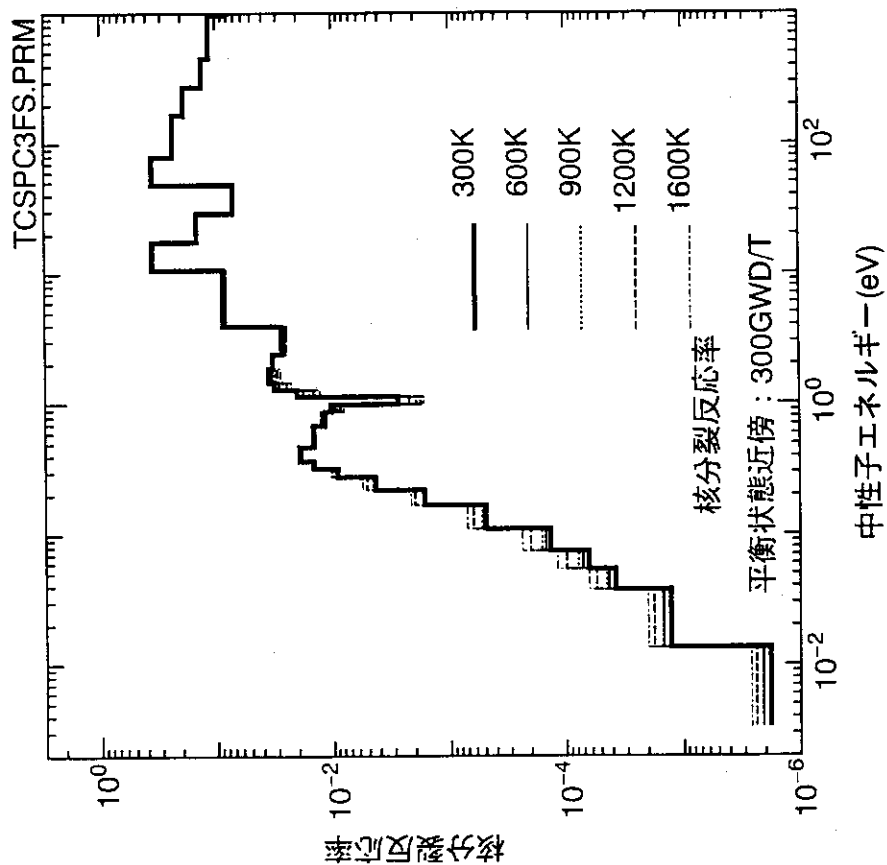


Fig. A-7 温度と核分裂反応率との関係(3/3)
(スペクトルのハード化)

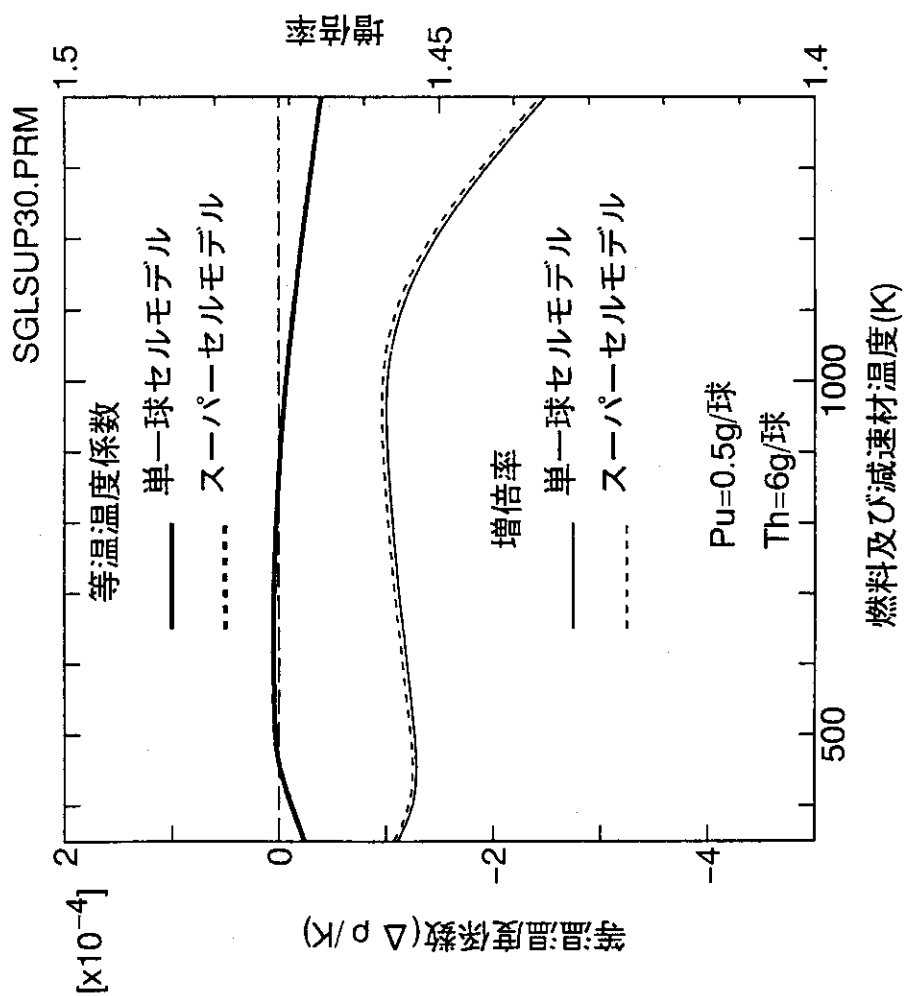


Fig. A-9 単一球セルモデルとスーパーセルモデルの比較 (Th(U233)添加; 300 GWD/T)