

JAERI-M

9844

ガドリニア燃料の炉物理特性に
関する実験的研究

1981年12月

松浦祥次郎・小林 岩夫・古田 敏郎*
鳥羽 正男*・津田 勝弘*

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。

入手の間合わせは、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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute. 1981

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

ガドリニア燃料の炉物理特性に関する実験的研究

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

松浦祥次郎⁺・小林 岩夫・古田 敏郎^{*}

鳥羽 正男^{*}・津田 勝弘^{*}

(1981年11月20日受理)

ガドリニア入り二酸化ウラン($Gd_2O_3-UO_2$)燃料棒の炉物理特性に関して一連の臨界実験がなされた。実験は、ガドリニア含有量がそれぞれ、0.0, 0.05, 0.25, 1.5, 3.0 w/oの5種の試験燃料棒を用いて、円環炉心、正方格子炉心、JPDR模擬炉心の3種の炉心でなされた。反応度効果、出力分布、放射化率分布、温度係数等が測定された。測定値に対比すべき理論値がFTA(JPDR用 $Gd_2O_3-UO_2$ 試験集合体)設計手法により計算され、その妥当性が検討された。既して、計算値は測定値とよい一致を示した。

ガドリニアの熱中性子吸収は強い飽和特性を有し、含有量1.5 w/oではほぼ飽和に達することが、反応度効果、出力分布、放射化率分布の測定により確認された。また、飽和状態において、出力は通常燃料の20%程度に低下すること、ガドリニアによる出力の低下と負反応度効果の間には直線的な関係があること、ガドリニア入り燃料棒間の相互干渉効果は出力分布にはほとんど認められず、反応度効果についても高々15%程度であること等がガドリニア入り燃料棒の炉物理的特性として示された。

+ 原子炉工学部

* 原子燃料工業株式会社

Physical characteristics of $Gd_2O_3-UO_2$ fuel in LWR

Shojiro MATSUURA⁺, Iwao KOBAYASHI, Toshiro FURUTA*
Masao TOBA* and Katsuhiko TSUDA*

Division of Reactor Safety,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 20, 1981)

A series of critical experiments in light water lattice were carried out on five kinds of Gadolinia-Uranium dioxide ($Gd_2O_3-UO_2$) test fuel rods containing 0.0, 0.05, 0.25, 1.50, 3.00 weight % of Gd_2O_3 in $Gd_2O_3-UO_2$. Reactivity effect, power distribution, neutron flux distribution, and temperature coefficient were measured for three types of lattices which were in shapes of annular, rectangular parallelepiped, and JPDR mockup core.

The theoretical values corresponding to the measured ones were obtained by means of the design method for the FTA which is the test fuel assembly with $Gd_2O_3-UO_2$ rods for JPDR, and the accuracy was checked. In general, the calculated values were in good agreement with the measured ones.

Besides, the following characteristics of $Gd_2O_3-UO_2$ rods are recognized both in measurement and calculation, i.e. (1) the effect due to gadolinia on reactivity, power distribution, and thermal neutron flux distribution are steeply saturating; the gadolinia content of only 1.50 weight % is enough to reach the almost saturated condition, (2) the relative power becomes 20% to that of normal fuel under the saturated condition, (3) the relation between the negative reactivity and the power depression effect due to gadolinia is almost linear, and (4) the interference on power depression between the adjacent gadolinia loaded rods is almost negligible, and that on reactivity effect is 15% at most.

Keywords; BWR, Gadolinium, UO_2 , Fuel Rods, Lattice Experiment, Critical Experiment, Power Distribution, Activation Distribution
Reactivity, Temperature Reactivity, Calculation, THERMOS, WDSN

+ Division of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment, JAERI
* Nuclear Fuel Industries, Ltd.

目 次

1. 序	1
2. 実 験	3
2.1 実験装置と試験燃料	3
2.1.1 炉心構成	3
2.1.2 試験燃料	4
2.2 実験方法と結果	12
2.2.1 反応度効果	12
2.2.2 出力分布	19
2.2.3 放射化率分布の測定	38
2.2.4 反応度の温度係数	44
3. 計 算	49
3.1 計算の方法	49
3.1.1 計算の概要	49
3.1.2 セル群定数	49
3.1.3 構造材群定数	50
3.1.4 炉心計算	51
3.2 計算結果と実験結果との対比	56
3.2.1 反応度効果	56
3.2.2 出力分布	58
3.2.3 放射化率分布	68
3.2.4 反応度の温度係数	77
4. 考 察	80
4.1 実験および計算上の問題点	80
4.1.1 計算方法の差について	80
4.1.2 放射化率測定上の問題点	82
4.1.3 円環炉心における反応度変化の計算	84
4.2 $Gd_2O_3-UO_2$ 燃料の諸特性	88
4.2.1 ガドリニア濃度と反応度効果	88
4.2.2 反応度効果と出力減少の関係	88
4.2.3 放射化率分布と出力分布	89
4.2.4 ガドリニア燃料相互間の干渉性	90
4.2.5 放射化率分布の測定結果の考察	92
5. 結 論	103
謝 辞	103
参考文献	104
Appendix	
1. 放射化率分布測定データ	106
2. 原子個数密度	122

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	3
2.1 Experimental facilities and test fuel rods	3
2.1.1 Core structure	3
2.1.2 Test fuel rods	4
2.2 Experimental method and results	12
2.2.1 Reactivity effect	12
2.2.2 Power distribution	19
2.2.3 Activation distribution	38
2.2.4 Temperature reactivity coefficient	44
3. Calculation	49
3.1 Calculational method	49
3.1.1 Calculational procedure	49
3.1.2 Group constant of cell	49
3.1.3 Group constant of structural materials	50
3.1.4 Calculation of core	51
3.2 Comparison between calculational and experimental results	56
3.2.1 Reactivity effect	56
3.2.2 Power distribution	58
3.2.3 Activation distribution	68
3.2.4 Temperature reactivity coefficient	77
4. Discussion	80
4.1 Discussion on experiment and calculation	80
4.1.1 Comparison between THERMOS and WDSN	80
4.1.2 Discussion on measurement of activation distribution	82
4.1.3 Calculation of reactivity change of an annular core	84
4.2 Characteristics of $Gd_2O_3-UO_2$ fuel rods	88
4.2.1 Gd content vs. reactivity effect	88
4.2.2 Decrease of relative power and reactivity due to Gd content ..	88
4.2.3 Relation between activation and power distribution	89
4.2.4 Interaction between $Gd_2O_3-UO_2$ fuel rods	90
4.2.5 Discussion on the measurement results of activation distribution	92

5. Results	103
Acknowledgements	103
References	104
Appendix	
1. Data of activation distribution	106
2. Atomic number densities used in calculation	122

List of Figures

1. Vertical cross-section of TCA
2. TCA plan view
3. Plan view of annular core
4. Name list of 21*21 square lattice
5. JPDR mock-up core
6. Assembly configuration of JPDR mock-up core
7. Fuel rods
8. Water level worth in rectangular core
9. Water level worth in annular core
10. Negative reactivity effect due to gadolinia
11. Sequence of the fuel rods for the power distribution measurement
12. Counting system of gamma ray from fission products
13. Averaged F.P. gamma ray decay curve
14. Counting rate drift of scintillation counter
15. Horizontal power distribution (Run #4933)
16. Horizontal power distribution (Run #4934)
17. Horizontal power distribution (Run #4935)
18. Horizontal power distribution (Run #4936)
19. Horizontal power distribution (Run #4937)
20. Horizontal power distribution (Run #4938)
21. Horizontal power distribution (Run #4939)
22. Horizontal power distribution (Run #4940)
23. Horizontal power distribution (Run #4941)
24. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4894)
25. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4888)
26. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4889)
27. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4891)
28. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4892)
29. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4893)
30. Capture cross section of probe wire

31. Decay scheme of ^{165}Dy and ^{198}Au
32. Detector wire insertion in test fuel
33. Neutron activation traverses throughout test fuel (Gd_2O_3) in the annular core measured with Dysprosium wire
34. Neutron activation traverses throughout test fuel (Gd_2O_3) in the annular core measured with Gold wire
35. Intracell neutron activation traverses measured with Dysprosium wire
36. Intracell neutron activation traverses measured with Gold wire
37. Core configuration for measurement on temperature coefficient
38. Reactivity change of core with temperature change
39. Calculation scheme
40. Microscopic cross section of special nuclides
41. Scattering cross section of Hydrogen (Nelkin kernel)
42. Rod cell geometry in regular lattice for THERMOS and WDSN
43. Rod cell geometry in annular core for THERMOS and WDSN
44. Typical mesh specification of regular lattice
45. Typical mesh specification of JPDR mock-up core
46. Geometry of THERMOS-SLAB for calculation of cross-sectional variation due to water thickness
47. Comparison of calculated and measured power distribution in 21×21 regular lattice (Run #4933)
48. Comparison of calculated and measured power distribution in 21×21 regular lattice (Run #4934)
49. Comparison of calculated and measured power distribution in 21×21 regular lattice (Run #4935)
50. Comparison of calculated and measured power distribution in 21×21 regular lattice (Run #4936)
51. Comparison of calculated and measured power distribution in 21×21 regular lattice (Run #4947)
52. Comparison of calculated and measured power distribution in 21×21 regular lattice (Run #4938)
53. Comparison of calculated and measured power distribution in 21×21 regular lattice (Run #4939)
54. Comparison of calculated and measured power distribution in 21×21 regular lattice (Run #4940)
55. Comparison of calculated and measured power distribution in 21×21 regular lattice (Run #4941)
56. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4894)

57. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4888)
58. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4889)
59. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4891)
60. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4892)
61. Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4893)
62. Activation traverse of D_y wire ; Sample A in regular lattice
63. Activation traverse of D_y wire ; Sample B in regular lattice
64. Activation traverse of D_y wire ; Sample C in regular lattice
65. Activation traverse of D_y wire ; Sample D in regular lattice
66. Activation traverse of D_y wire ; Sample E in regular lattice
67. Activation traverse of D_y wire ; Sample A in annular core
68. Activation traverse of D_y wire ; Sample B in annular core
69. Activation traverse of D_y wire ; Sample C in annular core
70. Activation traverse of D_y wire ; Sample D in annular core
71. Activation traverse of D_y wire ; Sample E in annular core
72. Activation traverse of Au wire ; Sample A in annular core
73. Activation traverse of Au wire ; Sample B in annular core
74. Activation traverse of Au wire ; Sample C in annular core
75. Activation traverse of Au wire ; Sample D in annular core
76. Activation traverse of Au wire ; Sample E in annular core
77. Temperature dependence of reactivity of regular core with one sample
78. Temperature dependence of reactivity of annular core
79. Reactivity vs. Gd_2O_3 content of a test fuel rod in annular core
80. Reactivity vs. Gd_2O_3 content of a test fuel rod in regular lattice core
81. Corrected activation traverse of D_y wire ; Sample A in annular core
82. Corrected activation traverse of D_y wire ; Sample B in annular core
83. Relative power depression vs. reactivity change due to Gd content
84. Interference of 2 sample rods on reactivity (regular lattice core)
85. Reactivity worth vs. position -- 1 rod/ass'y in JPDR mock-up core
86. Power depression (3-e-D)
87. Power depression (3-f-D)
88. Power depression (3-g-D)
89. Neutron activation traverses measured with dysprosium wire and fitting function in moderator region
90. α/q , β/q values vs. measured reactivity

List of Tables

1. Fuel specification (as built)
2. Reactivity worth of test fuel
3. Reactivity change with temperature
4. Different temperature dependence for different sample
5. Rod cell geometry in regular lattice
6. Rod cell geometry in annular core for THERMOS and WDSN
7. Geometry of annular core (calculated by FOG))
8. Variation of cross-section due to water thickness for core peripheral cell
9. Temperature coefficient of reactivity of regular core with 18 rods of sample D
10. Temperature coefficient of reactivity of regular core with one rod of sample D
11. Temperature coefficient of reactivity of annular core
12. Thermal group constants rod cell calculated by WDSN
13. Power depression and relation of power to activation
14. The ratio of equivalent reactivity worth of sample B to that of sample D
15. Mutual interference of reactivity effect
16. Nuclear constants of driver fuel adjacent to test fuel
17. Power depression factor P of sample rod D in square lattice core
18. α/q and β/q values for measured neutron density distributions

List of Photographs

1. General view of TCA
2. Upper grid structure
3. Test fuel and detector wire

1. 序

古河電工株式会社は昭和46年にガドリニア入り燃料集合体の開発を計画し、その試験燃料集合体（FTA）の照射試験をJPDRで実施することを日本原子力研究所に委託した。日本原子力研究所は受託研究契約にもとづき、「ガドリニア入り燃料照射に関する研究」を実施することになった。この研究の一環として、ガドリニア入り燃料棒およびそれが装荷された炉心の炉物理特性を核設計法がいかに正確に評価できるかということを検証するための一連の臨界実験がTCAを用いて実施された。その後昭和47年に実験および解析を終了し、48年にJAERI-memo 5138としてまとめた。ガドリニア入り燃料の解析法についてはその後多くの改良がなされているが、本報告書では当時の解析結果が実験結果を説明するのに十分意味があると考えられるため、このたびMレポートとして刊行するに際しては当時の解析結果に何ら手を加えなかった。

ガドリニウムは、熱外エネルギー領域の中性子に対しては吸収断面積が比較的小さいが、熱中子に対しては極端に大きい吸収断面積を有している。例えば、天然の存在比 15.68% の $^{157}_{64}\text{Gd}$ の熱中子（2,200 m/sec）に対する吸収断面積は 254,000 バーンと評価されている。このため、これがごく少量混入した場合でも、その混入材の自己遮蔽性は強いものとなるので、精度のよい計算をするのはきわめて困難である。一方、GE社ではすでに実用化段階に入っているにもかかわらず、設計手法を検証するための炉物理実験データなどはまだほとんど公開されていない。このためJPDRでのFTA照射に先立ち、その設計法を検証するための臨界実験を行なうこととなった。したがって、この仕事での第一義的な目的はFTAの設計法がどういう誤差を有するか、その誤差は設計上でどう評価されねばならないかということについての結論を得ることにあり、ガドリニア入り燃料に対する計算精度を向上させるための手法についてはこの仕事には含まれておらず、問題点としての指摘にとどめられている。

臨界実験を実施するに当たって、特に次の点が考慮された。まず、測定対象とする炉物理量として、等価反応度、熱中子束分布、熱外中子束分布、出力分布および反応度の温度係数が着目された。これは、これらの量が、動力炉の燃料集合体設計において最も重要な量であることと、実験値と計算値との一対一対応が明確にできるからである。ガドリニウム入り燃料としては、ガドリニアの含有量をパラメトリックに変更したもの5種類が用いられ、ガドリニウムの濃度による自己遮蔽性の変化が把握できるようにされた。測定体系としては、3種の炉心が用いられた。すなわち、円環炉心、正方格子炉心、JPDR模擬炉心である。円環炉心の実験では、主として、ガドリニア濃度—等価反応度—熱中子束分布の歪みの関係が追求され、設計計算のうちの熱中子領域の計算のみを検証することを目的とした。正方格子炉心では、ガドリニア入り燃料が、最も単純な配置で体系に挿入された場合について、実験と計算との対比を主目的とし、あわせて、ガドリニア入り燃料が体系におよぼす効果、たとえば、出力分布の歪みの割合、ガドリニア入り燃料の相互干渉性等を一般的に把握することを目的とした。最後のJPDR模擬炉心での実験では、JPDRに装荷されるFTAに

かなり近い模擬燃料集合体がいられ、かなり複雑な形状に対する計算精度が検討された。

実験は、当初予定のものが昭和46年12月1日より昭和47年2月17日にわたって実施された。その後、さらに温度係数に関する測定が追加され、全測定は3月10日に終了した。

この仕事は、前記受託研究の一部として、原研動力試験炉部開発室（現在：安全工学部臨界安全研究室）TCAグループと、古河電気工業KK原子力部（現在：原子燃料工業KK）との協力のもとになされたものである。

2. 実 験

2.1 実験装置と試験燃料

2.1.1 炉心構成

炉心は Fig. 1, Fig. 2 および Photo. 1, Photo. 2 に示されるようにステンレス製の円筒形タンク (1,832 mm ϕ × 2,078 mmH) 内に上部および下部格子板によって燃料棒を垂直に支持する構造になっている。格子板には一定の格子ピッチで燃料棒の位置を決める孔があげられており燃料棒の上部端栓と下部端栓がここで位置決めされる。炉の運転制御は減速材の水位を増減することにより行なわれる。

(1) 円環炉心

炉心の中央部に52の燃料棒セルに相当する内部減速材領域を有する炉心で、外周燃料棒の配置は円筒形状をなす円環炉心が構成された。Fig. 3 にこの炉心の代表的な形が示されている。試験燃料は炉心の中心に挿入される。外周の燃料棒の数と配列によって臨界水位が異なるが、内部減速材の等価直径は 15.90 cm であり、燃料装荷領域の等価厚さ 16.42 cm, 等価外径 48.75 cm とすると中心部に何等試料を入れずかつ減速材を冠水状態としたときはほぼ臨界に達する。この炉心は中央の試料の核分裂性物質の反応度効果が比較的大きく、中心部にかなり広い熱中性子束分布の平坦な部分を有するという特徴をもっている。また内部減速材の中の大部分の中性子は熱化されていると考えてよい。¹⁾

(2) 正方格子炉心

燃料棒同士がピッチ 19.56 mm の正方格子を形作るように配列されかつ炉心の水平断面が正方形をなす最も単純な体系の炉心が組まれた。炉心の大きさは反応度測定と出力分布測定に適当な臨界水位が得られ、しかも予定された試験燃料の挿入の仕方にかかわらず同じ大きさの炉心を使うことができる21行21列の炉心が使用された。数多くのケースについて測定が行なわれたため、便宜的に各炉心に名称が与えられており、その略号による炉心の区別が Fig. 4 に示されている。略号の規約は以下に述べられている。

(i) S-X (21×21 square lattice with Single X-type fuel rod の略)。21行21列の正方格子の中心に1本の種類 X の試験燃料を挿入した体系であり、X は試験燃料の種類すなわち A, B, C, D, E のいずれかをあらわす。試験燃料の説明は次節に述べられている。

(ii) D-x-X (21×21 square lattice with Double-X-type fuel rods, pattern X の略)。これは21行21列の正方格子の中に x 型の配置で2本の種類 X の試験燃料棒が並べられた体系である。x は a, b, c, d, e の中のいずれかをあらわす。e 型以外は2本の試験燃料棒が対角線方向に揃えて並べられている。a, b, c, d の違いは2本の試験燃料棒の間の距離にある。a では互いに隣接しているが、b では1本、c では2本、d では3本のドライバ燃料棒をそれぞれ介して試験燃料棒が並べられている。X は試験燃料棒の種類であり、B または D のいずれかである。

(iii) T-x-X (21×21 square lattice with Triple X type fuel rods, pattern xの略)。これは21行21列の正方格子の中に3本の種類Xの試験燃料をx型の配置で並べた体系である。aはa, b, cのいずれかであり、XはBまたはDをあらわす。配置はFig. 4に示されている。

(iv) M-x (21×21 square lattice with Multiple D type fuel rods, pattern xの略)。これは21行21列の正方格子の中に18本の種類Dの試験燃料が挿入された体系である。配列の型xはD-xに対応しており、21行21列の正方格子を7行7列のサブブロック9個に分割したとき、その各々に2本の試験燃料がD-x型の配列で並べられたものである。xはa, b, cのいずれかをあらわす。

(3) J P D R 模擬炉心

序文で述べられているようにF T Aの設計計算の精度を検討する目的と、実際に試験燃料がB W R炉心に装荷されたときの反応度効果および出力分布に関する基礎的なデータを得るためにJ P D R炉心を模擬する体系が組まれた。これは制御棒フォーローワーとそのまわりの4つの対称な燃料集合体とさらにその外側の臨界調整領域からなり、J P D Rの1つのチムニー・セルを模擬するものである。燃料集合体は6行6列の矩形の配列の燃料棒と一辺122 mmのアルミニウム製チャンネルボックスから構成されている (Fig. 5)。試験燃料の特性を明らかにするためと計算体系の簡単化のために制御棒とポイズンカーテンは使用されていない。

J P D R 模擬炉心は使用された試験燃料の種類と装荷の位置を変えていくつかの型の炉心が組まれたが、この各々が略号によって区別されてFig. 6に示されている。その一般的な規約は試験燃料の集合体あたりの装荷本数と装荷位置と種類によって分類することである。すなわち1-x-Xまたは3-x-Xと書かれ、1は試験燃料の本数が1集合体当たり1本であることをあらわし、3は試験燃料の本数が1集合体当たり3本であることをあらわす。xは試験燃料の配置を示し、Xはその種類をあらわす。XはBまたはDのいずれかである。試験燃料は4つの集合体に対称的に装荷されるのが望ましいがB型の燃料は3-x-Bの炉心では1つの集合体だけに装荷されている。試験燃料の全く装荷されていない炉心は例外的にCLEANと表現する。

2.1.2 試験燃料

燃料棒は26UG・Gd₂O₃-UO₂ および26PA・UO₂ と略称される2種類のものが用いられた。これらの燃料棒の仕様はTable 1およびFig. 7に示される。

(1) 26UG・Gd₂O₃-UO₂ 燃料棒 (試験燃料棒)

燃料体はウランとガドリニウムの混合酸化物からなるペレットで、ガドリニアの濃度は0.05, 0.25, 1.5および3.0 w/oの5種類である。燃料ペレットはアルミニウム製被覆管に収められており、上、下両端はO-リング2重封じによる端栓で密封し、ピンで被覆管に固定されている。なお実験上の目的から燃料要素の直径方向に放射化試料挿入用の実験孔を設けたものもある。ガドリニア濃度が、0.0, 0.05, 0.25, 1.5, 3.0 w/oの順にA, B, C, D, E燃料棒と呼称する。

(2) 26 PA・UO₂ 燃料棒 (ドライバー燃料棒)

26 PA・UO₂ 燃料棒は炉心を臨界にするためのドライバー領域を構成している。殆んど大部分はペレット型燃料が用いられたが、ごく一部にはこれと核的に等価な仕様を有する26 SA・UO₂ 燃料棒 (スウェージ型燃料棒) が用いられた場合もある。

Table 1 Fuel specification (as built)

Type	26 PA・UO ₂	26 SA・UO ₂	26 UG・Gd ₂ O ₃ - UO ₂				
	pellet	swaged	A	B	C	D	E
Fuel	sintered pellet	compacted powder	sintered pellet				
Enrichment (w/o)	2.596	2.580	2.585				
Gd ₂ O ₃ content (w/o)	0	0	0	0.05	0.25	1.49	2.98
Density (g/cm ³)	10.40	10.06	10.26	10.44	10.27	10.11	10.24
Diameter (mm)	12.5	12.75	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
UO ₂ Wt/rod (gr)	1.840	1.840	1.807	1.837	1.816	1.781	1.815
Active length (mm)	1441.5 ± 3	1466 ⁺⁰ - 25.4	1,442 ± 0.5				
Clad	Al	Al	Al				
Clad I.D. (mm)	12.65	12.75	12.65				
Clad thickness (mm)	0.76	0.71	0.76				

REACTOR ARRANGEMENT	
PART	PART NO.
FUEL ROD	201
SAFETY SHEET	204
SUPERSTRUCTURE	301
CORE TANK	302
SAFETY SHEET DRIVE	303
SAFETY SHEET GUIDE	304
GRID SHEET, LOWER	305
GRID SHEET, UPPER	306
FUEL SUPPORT PLATE	308
SUPPORT COLUMN	309
SUPPORT COLUMN STUD	310
FINE WATER LEVEL CONTROL	311
SOURCE POSITION CONTROL	312
CONTROL ROD DRIVE MECHANISM	314
FINE WATER LEVEL CONTROL	315
FLANGE AND HARDWARE	316
SAFETY SHEET COUPLER	317
SAFETY SHEET MAGNET	318
SAFETY SHEET HANGER	319
GRID SHEET SUPPORT, UPPER	321
GRID SHEET SUPPORT, LOWER	322
GRID SHEET CENTER BOLT	323
SENSOR HOLDER	327
FLGAL SWITCH	500

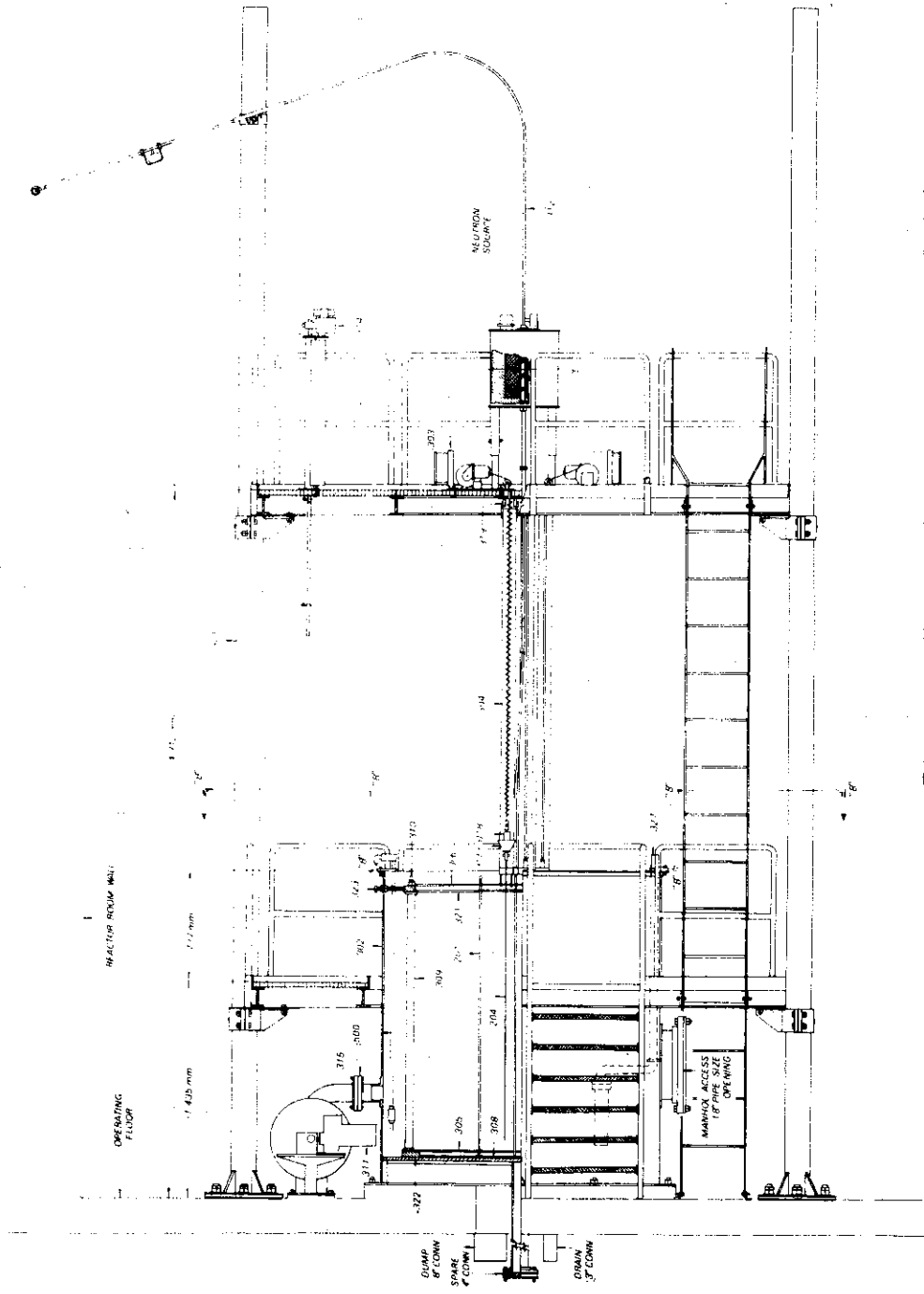


Fig. 1 Vertical cross-section of TCA

REACTOR ARRANGEMENT 2	
PART	PART NO.
SUPERSTRUCTURE	301
CORE TANK	302
GRID SHEET, UPPER	306
GRID SHEET, UPPER PLUG	301
FUEL SUPPORT PLATE	308
SUPPORT COLUMN STUD	310
FINE WATER LEVEL CONTROL	311
FINE WATER LEVEL CONTROL	311
FLANGE AND HARDWARE	315
GRID SHEET SUPPORT, UPPER	321
GRID SHEET CENTER BOLT	323
SENSOR HOLDER	327

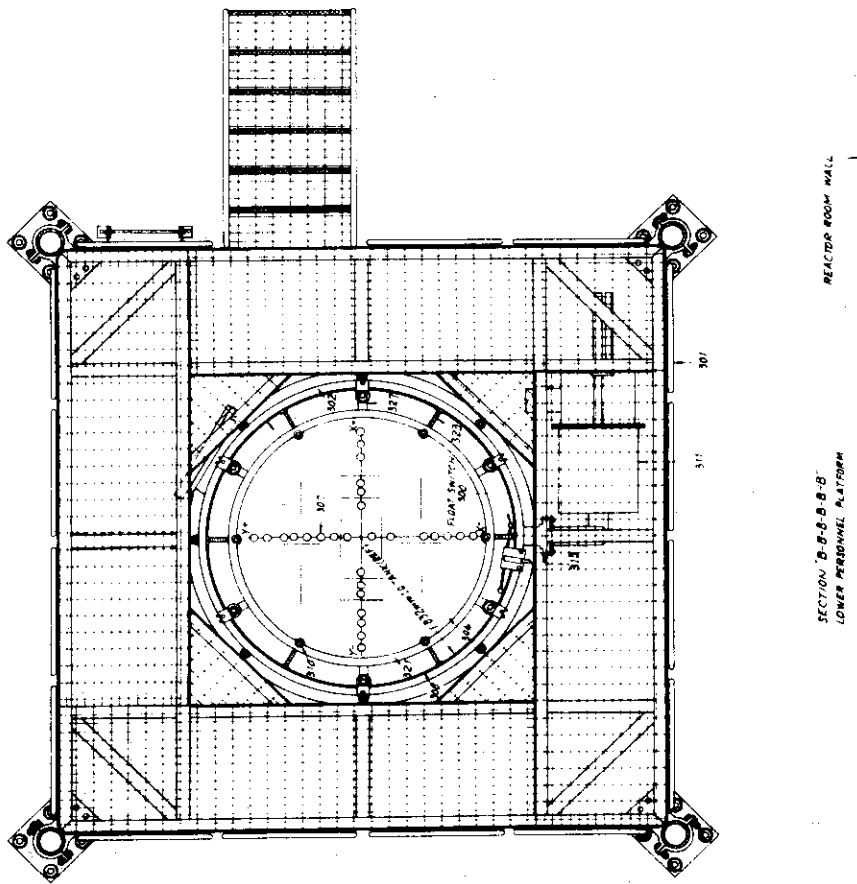
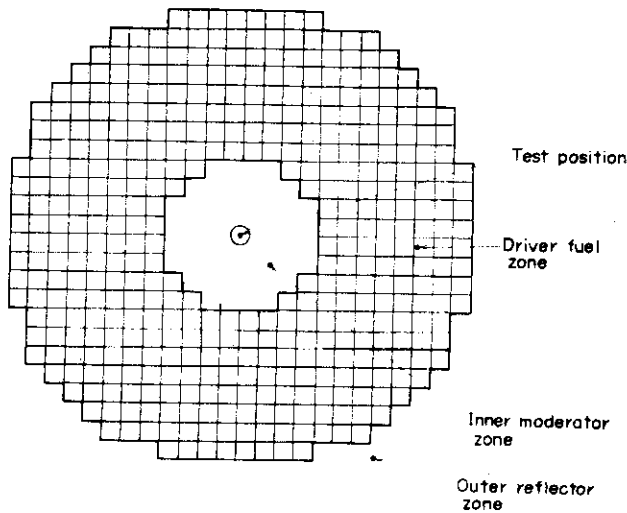


Fig. 2 TCA plan view



□ Indicates a unit cell consisted of moderator and a fuel rod
 The volume ratio V_{H_2O}/V_{UO_2} is 1.84. The fuel is 26% UO_2 with $12.5mm^{\phi}$ and $1441mm$.

Fig. 3 Plan view of annular core

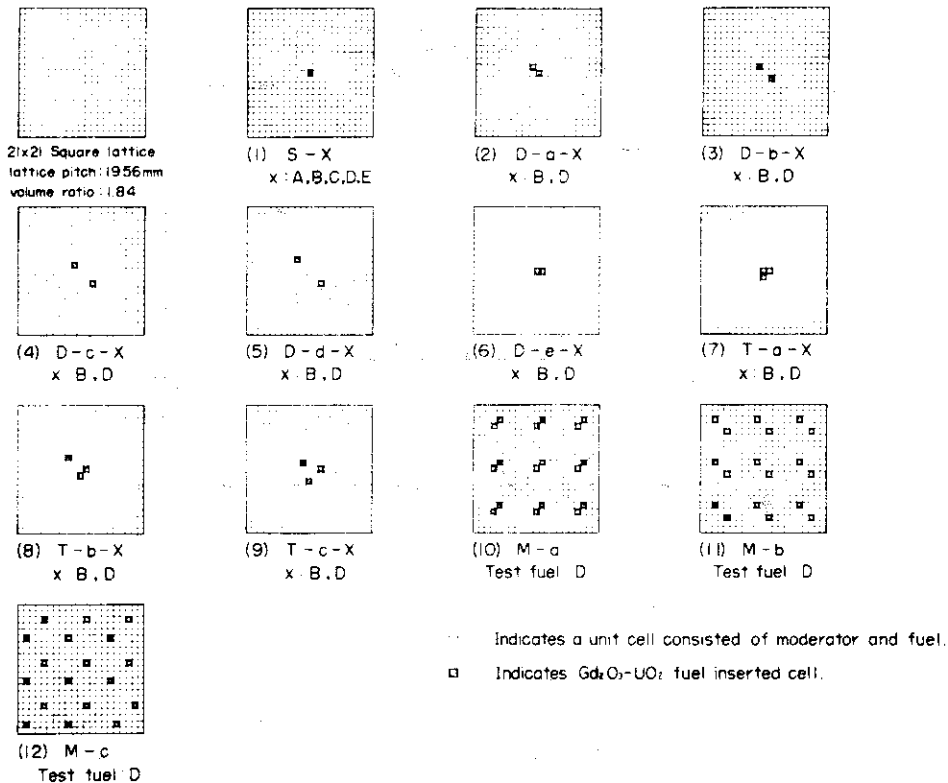
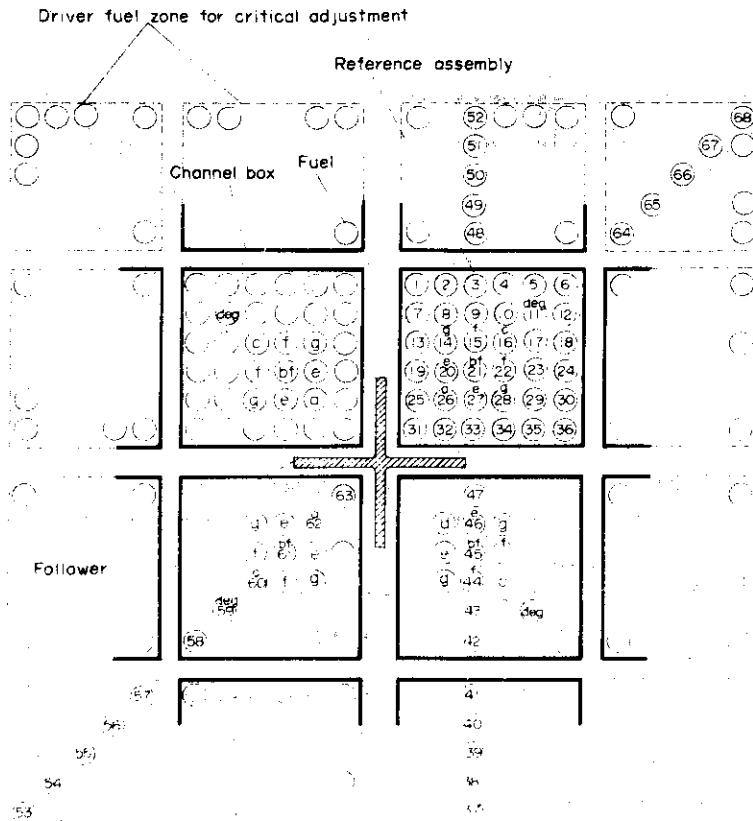


Fig. 4 Name list of 21 x 21 square lattice



Core identification

- a --- 1-a-B, 1-a-D
- b --- 1-b-B, 1-b-D
- c --- 1-c-B, 1-c-D
- d --- 1-d-B, 1-d-D
- e --- 3-e-B, 3-e-D
- f --- 3-f-B, 3-f-D
- g --- 3-g-B, 3-g-D

- Serial number is the sequence of r-scanning in power distribution measurement
- In these cases B-type fuel rods are inserted in one of four assemblies

Fig. 5 JPDR mock-up core

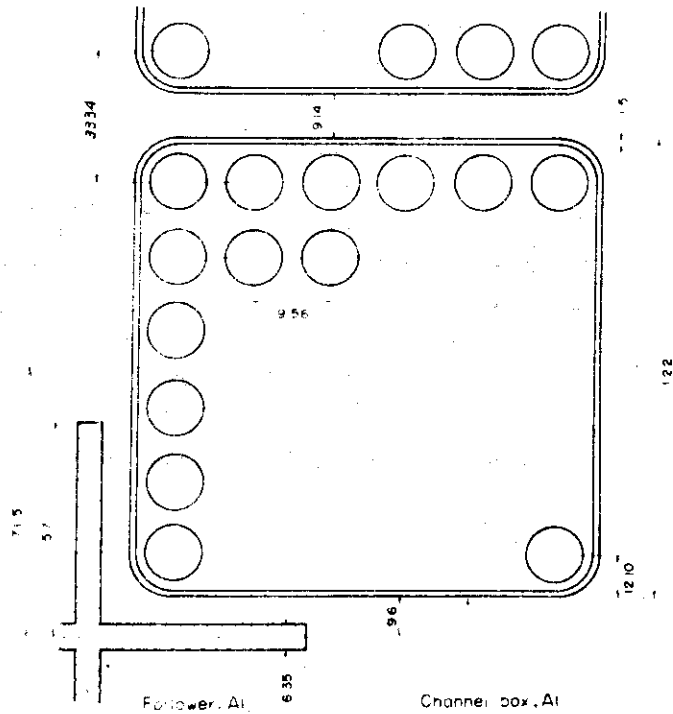
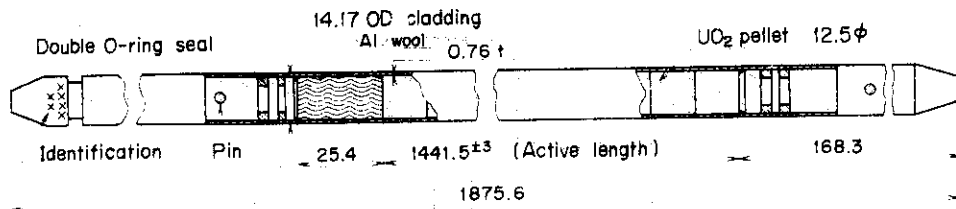
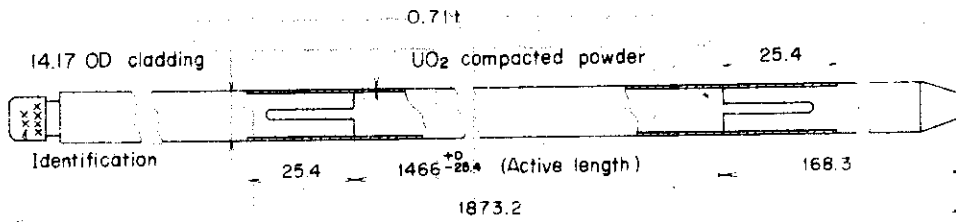


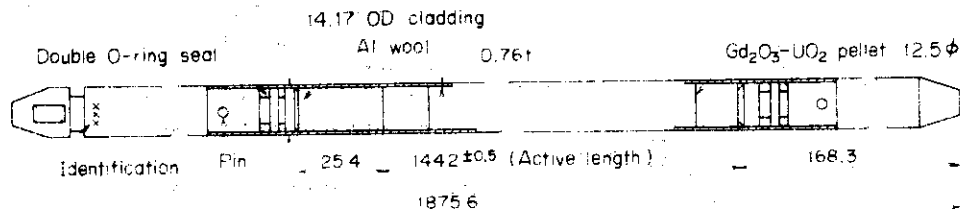
Fig. 6 Assembly configuration of JPDR mock-up core



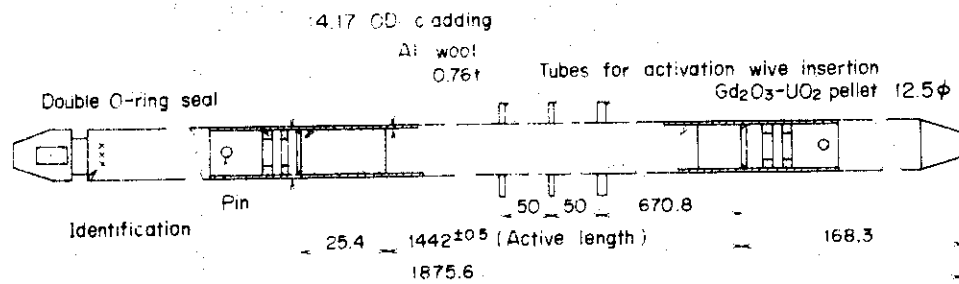
26 PA-UO₂ fuel rod (pellet type)



26 PA-UO₂ fuel rod (swaged type)



26 UG-Gd₂O₃-UO₂ fuel rod



26 UG-Gd₂O₃-UO₂ fuel rod (for activation measurement)

Fig. 7 Fuel rods

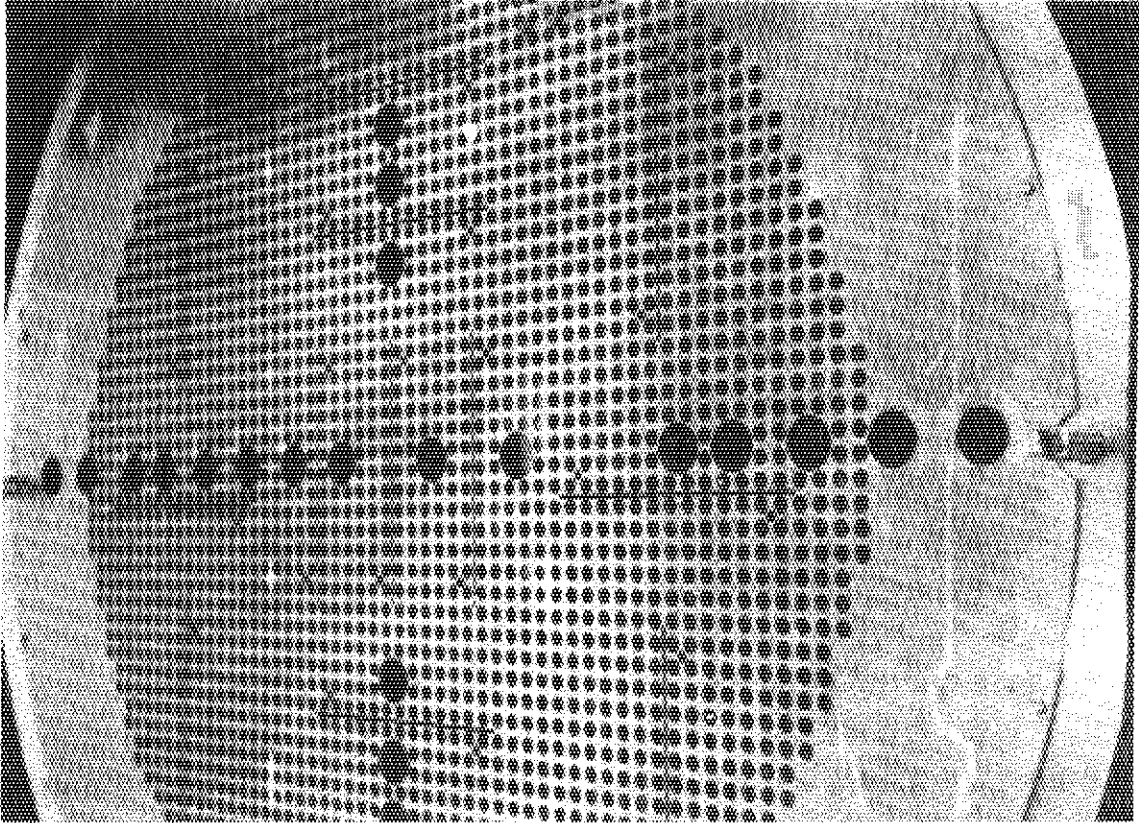


Photo. 2 Upper grid structure

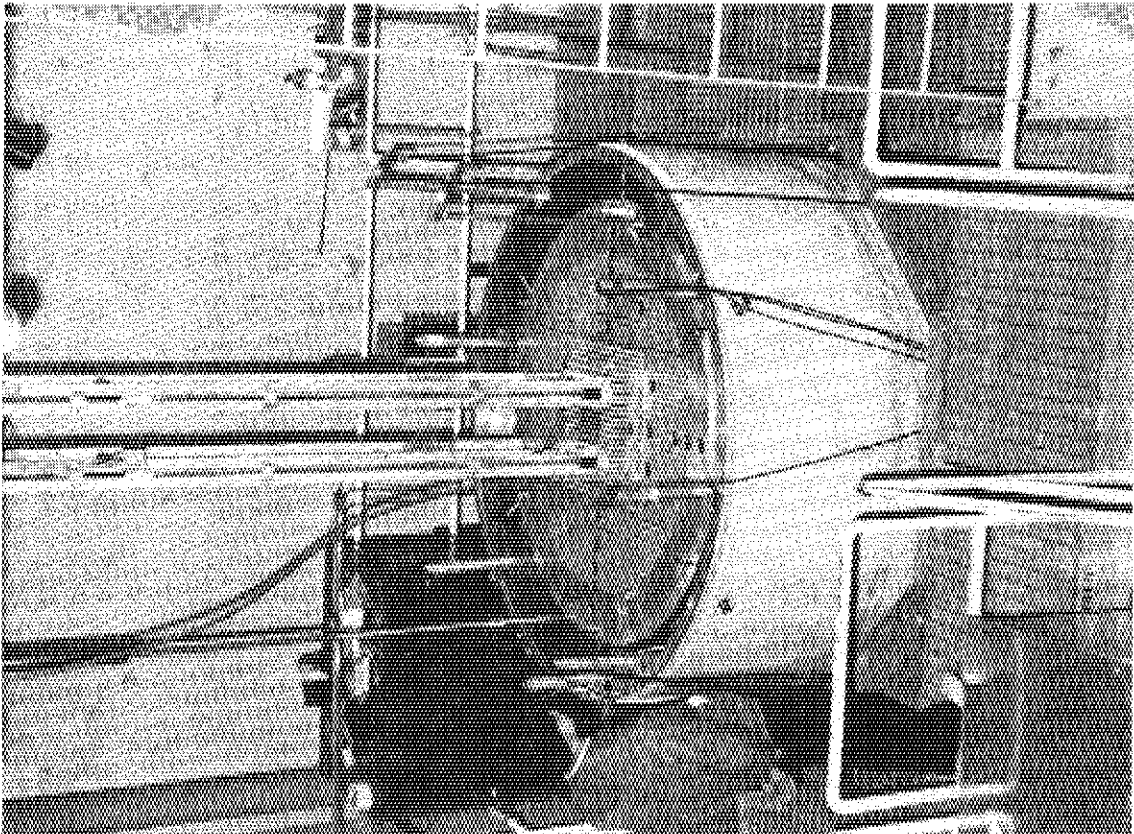


Photo. 1 General view of TCA

2.2 実験方法と結果

2.2.1 反応度効果

可燃性毒物の重要な特性のひとつは、体系の増倍係数に与える効果である。この効果は、ある炉心体系に、毒物試料を入れた場合と、毒物がない場合とのその体系の反応度差、すなわち毒物の等価反応度によって表現できる。等価反応度は実験的にも理論的にも比較的簡単に得ることができる。理論計算上での実効遅発中性子発生割合 (β_{eff}) の評価が正確な場合は、等価反応度の測定値と計算値の直接的な比較は容易にできる。

ガドリニア入り燃料において重要なことは、燃焼の初期にどれだけの炉心反応度抑制効果を有するかということと、燃焼と共にその反応度抑制能力がどのように減少するかということである。また、測定値と計算値との比較において重要なことは、ガドリニア濃度により計算精度がどのように変化するかということである。これらの点についての知見を得るために、円環炉心、正方格子炉心、JPDR模擬炉心の3種の炉心においてガドリニア入り燃料の等価反応度が測定された。

(1) 測定方法

等価反応度の測定にはいくつかの方法があるが、この一連の実験ではもっぱら水位法が用いられた。これは、この実験に用いられたような炉心では、炉水位（燃料有効部下端から水面までの高さ） h の変化 Δh と反応度変化 $\Delta \rho$ とが明確に対応しており、しかもその対応は、炉の格子の構成が定まれば、炉の水平断面の形状や大きさにはほとんど影響されないという実験的事実によっている。

いま、ある水平断面を有する炉心が h_0 で臨界であったとする。水位を Δh_1 だけ微小変化させ、炉水位を $h_1 = h_0 + \Delta h_1$ としたときの反応度 $\Delta \rho_1$ はベリオド法によって測定できる。これをくり返し、 $\Delta h_2, \Delta h_3, \dots$ に対して、それぞれベリオド法で $\Delta \rho_2, \Delta \rho_3, \dots$ を測定すると炉水位 h_0 の附近での水位 h と反応度 ρ の関係が得られる。さらに、炉周辺の燃料棒を加えたり、減じたりすることによって、異なった臨界水位について、それぞれの附近での炉水位と反応度の関係を得ることができる。これらの結果を相互に接続すれば、あるどこかの水位を基準にして、かなり広い範囲にわたって水位と反応度の関係を得ることができる。どこの水位を基準にとるかは本質的な問題ではなく、実際上は、測定に便利のように基準をきめればよい。例えば、Fig. 8 と Fig. 9 とに、正方格子炉心と円環炉心とでの水位と反応度との関係を示す。これらはいずれも測定値である。前者は、水位計指示* 650.0 mmを、後者は 1350.0 mmを基準にとり、そこから水位を上昇すれば反応度がどのように付加されるかを示している。

これによって、目的とする試料の等価反応度は次のように得られる。今、サンプルAはガドリニアの入っていない通常燃料、サンプルBはガドリニアが x w/o 入った毒物燃料とする。サンプルAを炉心のP位置に入れたときの臨界水位を H_A 、サンプルBをPに入れたときの臨界水位を H_B とすると、図上で H_A に対応する R_A と、 H_B に対応する R_B の差 ($R_A - R_B$) が x w/o のガドリニア含有量に対応する等価反応度である。なお、このとき実験的に得られる

* 炉水位（燃料有効部下端から水面までの高さ）= 水位計指示 - 248.3 mm

反応度の単位はドル単位であるので、計算値を実験値と比較する場合は、 $\% \Delta k/k$ 単位の計算値を実効遅発中性子発生割合 β_{eff} で割ってドル単位に変換する必要がある。

円環炉心の測定については Fig. 9 の結果が、正方格子炉心と J P D R 模擬炉心の測定については Fig. 8 の結果が用いられた。

(2) 測定結果

(i) 円環炉心における測定

前節に述べられているように、この測定で用いた円環炉心は炉心中央部に半径約 8 cm のほぼ円柱状の内部減速材領域を有している。試料はこの内部減速材の中央にドライバ燃料と平行になるよう垂直軸に沿って挿入され、その等価反応度が測定された。この炉心は、中心に挿入された試料の核分裂による反応度効果を大きく示すこと、またそこでの反応はほとんど熱中性子によるものであることが特徴である。

(ii) 正方格子炉心における測定

この炉心の格子は J P D R 模擬炉心集合体の格子間隔と同じ間隔で出来ている。この炉心で得られた測定値は格子体系に毒物試料が持ち込まれた時の反応度効果を最も単純な条件で示しているものであり、集合体に毒物が持ち込まれた場合の効果を解釈するための実験的基礎を与えている。この炉心での測定には次の 4 種類のものがある。いずれも 21 行 21 列の炉心でなされた。

- (イ) シングル・ロッド測定：これは、炉の中心に 1 本ずつサンプルを入れ、その反応度効果を比較したもので、結果はガドリニア濃度の効果を端的に示している。
- (ロ) ダブルロッド測定：これは、2 本の試料の反応度効果の干渉性がロッドの間隔とどのような関係があるのかを見るためになされた測定で、試料の B (0.05 w/o $Gd_2O_3 - UO_2$) と D (1.5 w/o $Gd_2O_3 - UO_2$) についてなされた。
- (ハ) トリプルロッド測定：J P D R へ装荷されるガドリニア入り燃料使用の試験集合体 (F T A) は 3 本のガドリニア入り燃料が挿入される。この効果をより単純な形で把握するためになされた測定で、3 本のロッドの干渉性についても測定された。サンプルは B と D がそれぞれ用いられた。
- (ニ) マルチロッド測定：21 行 21 列の炉心を、 7×7 の小格子が 9 個集まって出来たものと考え、この小格子毎に 2 本のガドリニア入り燃料を配置した時の炉心全体の増倍度の低下を見ること、および(ロ)の結果との対比を通じて、毒物の局所的な効果と全体的な効果の関連を得るためになされた測定である。サンプル D についてのみ測定された。

(iii) J P D R 模擬炉心における測定

これは、F T A の模擬集合体 4 体を中央に配置し、周辺をドライバでとりかこんだ炉心に関してなされた測定で、次の 2 種のものがある。

- (イ) シングルロッド測定：4 集合体の各 1 本にガドリニア入り燃料を炉中心に対して対称な位置に 1 本ずつ挿入して反応度効果が測定された。測定は、ロッド位置を集合体の対角線に沿った 4 カ所の位置に変えてなされた。サンプルは B と D が採用された。
- (ロ) トリプルロッド測定：集合体内に 3 本のガドリニア入り燃料を挿入した測定で、

3本のロッドの相対配置を3種変更してなされた。サンプルBについては、1つの集合体にだけロッドが挿入されたが、サンプルDについては4つの集合体のそれぞれに、対称になるよう挿入された。

以上(i), (ii), (iii)の測定結果は、いずれも計算値と共に Table 2 に示されている。シングルロッドについて測定した結果は Fig. 10 にも示されている。

(3) 測定誤差

この測定における実験誤差は、臨界水位の決定の不確定さと、ペリオド法にもとづいてつくられた水位-反応度換算値の不確定さとに起因する。臨界水位は、どんな場合でも±0.1 mmの精度では十分に決定でき、かつ水位の等価反応度は、この一連の測定では高々4 ¢/mmであるので、臨界水位の決定における誤差は±0.4 ¢程度である。一方、水位-反応度換算値の不確定さはペリオド法における誤差の積み重なりによるものである。ペリオド法では20 ¢程度の反応度を±0.2 ¢の精度で測定できる。これより大きい反応度は直接的に測定するのは困難になるので、この程度で測定された値の積み重ねで、より大きい反応度は測定されることになる。従って、もっとも単純に考えれば、この誤差の積み重なりは、

$$E = \sqrt{R/0.2 \cdot 0.2 \text{ ¢}} \quad \dots\dots (2.1)$$

ただし、Rはドル単位で表わされた測定値

EはRに対するセント単位の誤差

と評価される。これより反応度測定の誤差はすべての場合について高々数 ¢以内と考えられる。

Table 2 Reactivity worth of test fuel

(1) annular core and regular lattice core

pattern	sample	k _{eff}	Δρ _m (¢)	Δρ _c (¢)	Δρ _c /Δρ _m	remarks	
center of annular core (1)	A	1.0141 ⁽²⁾	-	-	-	(1) number of driver fuel 440	
		1.0057 ⁽³⁾					
	B	1.0105	55.5	48.4 ⁽²⁾	0.86 ⁽²⁾		(2) upper figure ... ST-2 • FOG
		1.0021		48.8	0.88		
	C	1.0078	97.5	84.4	0.86		
0.9994		85.0		0.87			
D	1.0066	117.8	101.0	0.85	(4) core size 21×21		
	0.9982		101.9	0.87			
E	1.0065	121.4	102.5	0.84		(5) upper figure ... ST-2 -ADC	
	0.9980		104.5	0.86			
center of regular lattice core (4)	A	0.9958 ⁽⁵⁾	-	-			-
		1.0169 ⁽⁶⁾					
	B	0.9927	40.0	41.7	1.04		
		1.0140		39.6	0.99		
	C	0.9901	78.2	77.7	0.99		
1.0112		76.5		0.98			
D	0.9877	103.9	109.1	1.05			
	1.0093		101.6	0.98			
E	0.9878	112.1	107.2	0.96			
	1.0088		108.4	0.97			

Table 2 (つづき) Reactivity worth of test fuel
(1) annular core and regular lattice core

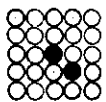
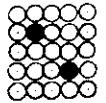
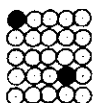
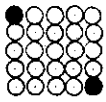
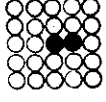
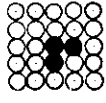
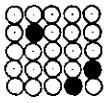
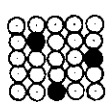
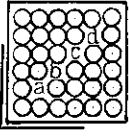
pattern	sample	k_{eff}	$\Delta\rho_m(\text{¢})$	$\Delta\rho_c(\text{¢})$	$\Delta\rho_c/\Delta\rho_m$	remarks
D - a ⁽⁷⁾ 	B	0.9899 ⁽⁸⁾ ₍₉₎	76.7	79.8	1.04	(7) core size 21 × 21 (8) ST-2--ADC (9) water level 46 cm
	D	0.9810	191.1	201.1	1.05	
D - d 	B	0.9898	75.2	80.4	1.07	
	D	0.9804	194.0	209.0	1.08	
D - c 	B	0.9900	71.2	77.7	1.09	
	D	0.9808	189.0	203.7	1.08	
D - d 	B	0.9902	70.9	74.9	1.06	
	D	0.9812	183.7	197.1	1.07	
D - e 	B	0.9899	72.4	78.8	1.09	
	D	0.9815	175.9	193.3	1.10	
T - a 	B	0.9873	109.6	114.6	1.05	
	D	0.9760	248.2	269.1	1.08	
T - b 	B	0.9871	110.7	117.0	1.06	
	D	0.9740	279.9	296.7	1.06	
T - c 	B	0.9870	110.3	118.3	1.07	
	D	0.9735	284.1	304.6	1.07	
M - a ⁽¹⁰⁾	D	0.9367	834.1	837.5	1.00	(10) 18 test fuel rods
M - b	D	0.9344	864.2	871.6	1.01	
M - c	D	0.9394	869.4	797.6	0.92	

Table 2 (つづき) Reactivity worth of test fuel
(2) J P D R mock-up core

pattern	sample	k_{eff}	$\Delta\rho_m$ (¢)	$\Delta\rho_c$ (¢)	$\Delta\rho_c/\Delta\rho_m$	remarks
	A	1.0066 ⁽¹⁾ ₍₂₎	-	-	-	(1) water level 45 cm (2) ST-2·ADC
	1-a-B	0.9974	124.5	123.7	0.99	
	1-a-D	0.9834	311.4	315.4	1.01	
	1-b-B	0.9985	103.0	107.8	1.05	
	1-b-D	0.9857	268.3	278.7	1.04	
	1-c-B	0.9994	93.9	95.5	1.02	
	1-c-D	0.9880	237.3	251.8	1.06	
	1-d-B	0.99997	84.9	88.4	1.04	
1-d-D	0.98961	220.2	226.5	1.03		
	3-e-B	1.0012	74.2	71.4	0.96	
	3-e-D	0.9501	774.8	797.8	1.03	
	3-f-B	1.0016	65.4	66.1	1.01	
	3-f-D	0.9574	643.3	689.6	1.07	
	3-g-B	1.0013	71.7	70.0	0.98	
	3-g-D	0.9495	773.4	806.5	1.04	

k_{eff} : calculated effective multiplication factor
 $\Delta\rho_m$: measured equivalent reactivity worth in ¢
 $\Delta\rho_c$: calculated equivalent reactivity worth in ¢

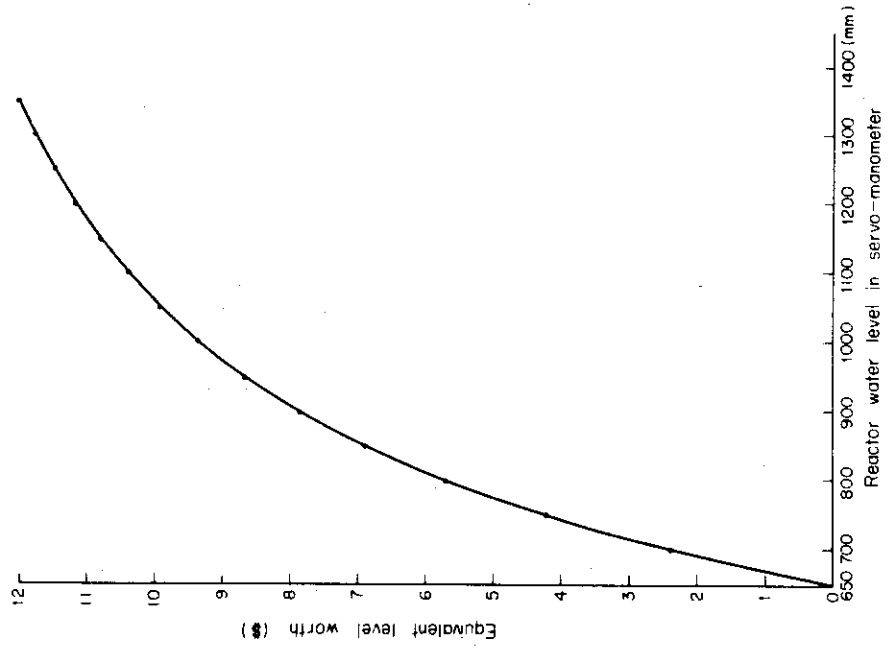


Fig. 8 Water level worth in rectangular core

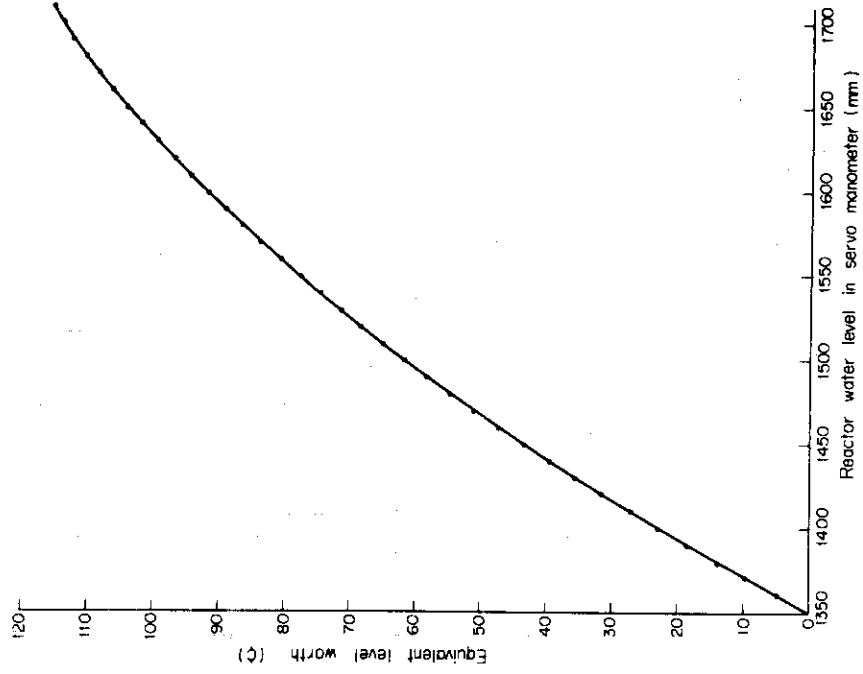


Fig. 9 Water level worth in annular core

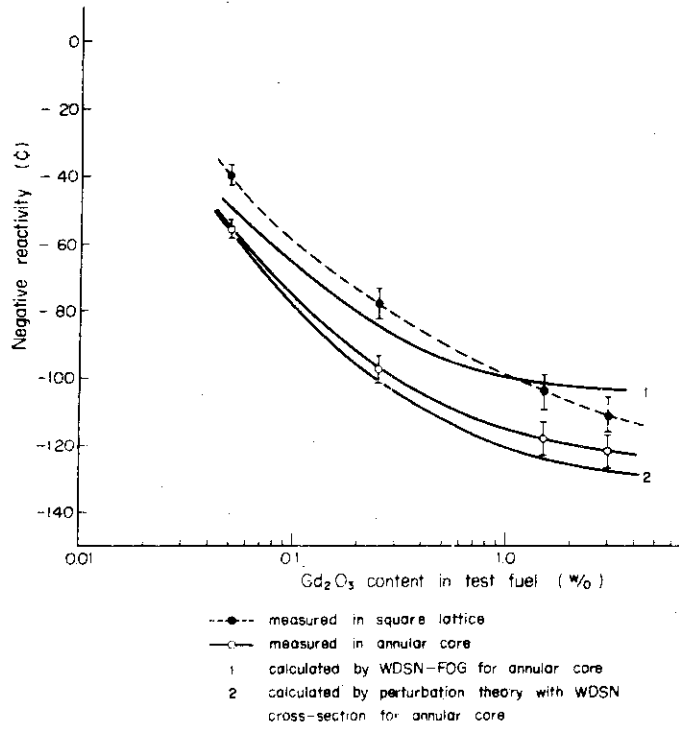


Fig.10 Negative reactivity effect due to gadolinium

2.2.2 出力分布

試験燃料棒のガドリニアの含有量と、その炉心の中での配置を変えて相対的な出力分布に関するパラメータ・サーベイが行なわれた。出力分布の測定の目的は、

- (イ) ガドリニアの濃度と燃料棒の出力の関係はどうか。
- (ロ) ガドリニア入り試験燃料棒の炉心内における配置によって出力分布にどのような影響を与えるか。
- (ハ) (イ), (ロ)のような効果を通常の計算法で追跡できるか。

の問題に答えることである。最初に単純な正方格子炉心を用いて、単一試験燃料棒に関して(イ)の測定がサンプルA, B, C, D, Eの全種類について行なわれた。つぎに(ロ)に関してサンプルDの試験燃料棒を用いて、2本および18本の試験燃料が各種の配置で正方格子内に装荷された場合について多数の測定がなされた。最後にBWR炉心に可燃性毒物入り燃料棒が装荷される場合について設計上の知見を得るためJPDR模擬炉心を使った測定が行なわれた。

出力分布の測定法は放射化法的一种としてよく用いられている燃料スキャンニング法がある。この方法は核分裂生成物(FP)の量が核分裂数と比例することに基づいている。この方法が通常の放射化法と異なる点はFP γ 線の照射後の時間減衰が単純な函数に表現できないことにあるが、これについてはすでに実験的に補正するための減衰因子の表が作成されている。²⁾

(1) 測定の方法

炉は約100~150ワット・分の照射運転がなされた。炉停止後約30分から120分の間に測定する燃料棒がFig.11,あるいはFig.6に示される順序で取り出され、そのFPの発生する γ 線がNaI(Tl) γ 線検出器によって計数された。FP γ スキャンナーはFig.12, Photo.3に示されるように、NaI(Tl)検出器を鉛の遮蔽体で蔽い、幅約20mmのスリットから燃料棒のFP γ 線が入射する構造をなしている。増幅器のディスクリミネーターレベルは各測定の前に標準線源によって校正され、0.6 MeVに設定された。燃料棒の軸方向測定位置は、軸方向中性子束分布の最大となる位置とし、炉心の臨界水位から計算して求められた。燃料棒は照射を行なう前に比較的高い γ 線のバックグラウンドを有しているため、照射運転の直前に全測定燃料棒について、このバックグラウンドが計数された。 γ 線測定系は測定中にゲインのドリフトが起る。このドリフトを監視する目的で、同一の燃料棒(モニター燃料)の γ 線の測定が一定時間毎に繰り返された。

(2) ガンマ線測定値の処理

燃料棒の測定された γ 線強度に測定系のゲインドリフト・バックグラウンド、時間減衰の補正がなされ、相対出力が求められた。この際、相対出力は、測定された燃料棒の補正済み計数の平均を基準として規格化された。なお、測定系の分解時間は計数率に対して充分短いものであったので、その補正はなされなかった。

(イ) 時間減衰の補正

時間減衰曲線は低濃縮二酸化ウラン燃料について数多くの測定を行なった結果、燃料の濃縮度や寸法等によらずFig.13に示される曲線であらわされることがわかっている。時間減衰の補正にはこの曲線を数値化した校正表が用いられた。この補正係数の誤差は±3%程度である。

(ロ) バックグラウンドの補正

燃料棒が照射前に有する γ 線のバックグラウンドは500 count/20 sec から2000 count/20 sec であり、照射後に測定した γ 線の強度に対して最大約10%を占めている。このバックグラウンドは測定中に変化することはほとんどないので照射後の γ 線から単純に差引くことができる。

(ハ) ゲインドリフトの補正

計数系のドリフトは、各測定について同じように生ずるわけではないので、各測定について計数系のゲインドリフトによる見かけの計数の時間的増減を補正する必要があった。ある特定の燃料、例えばそのガンマスキャン測定で一番最初に計数する燃料をモニターとして定め、このモニターのみは、そのガンマスキャン測定の最初から終りまでを通じて、一定間隔ごとに繰り返し計数をとることとする。これらの計数にFig.13に示されている減衰因子の補正を行なうと、もしドリフトが生じていなければ、補正結果は時間経過に対して一定値を示す。ドリフトがあれば、補正結果は時間経過に対して増減を示す。したがって、モニター燃料の計数値に上の補正がされた結果に時間に対する1次式のドリフト補正を行なった。このドリフトはゲイン増加の方向に起り、それによる計数率の増加は、ガンマスキャン中の100分間で最大5%程度であった。

Fig.14にゲインドリフトの一例が示されている。なおモニター燃料は、Fig.11, Fig.6に示されている測定番号(1)の燃料棒を用い、5本測定または、10本測定ごとにモニター燃料棒の測定が行なわれた。

(3) 測定結果

(i) 正方格子炉心における測定

(イ) シングルロード測定： 正方格子炉心(21行21列)の中心に試験燃料A, B, C, D, Eの試験燃料棒が挿入され出力分布が測定された。この測定に用いられた炉心の形と燃料棒の測定における順序はFig.11の(1)に示されるものである。Fig.15~Fig.19に測定結果がST-2-ADCによる計算結果とともに示されている。この測定結果は毒物であるガドリニウムの濃度と試験燃料棒の出力およびそのまわりの燃料棒の出力の関係を示すものである。

(ロ) ダブルロード測定： これは2本の試験燃料Dの燃料棒の相互の間隔を変えて出力分布の変化をみる測定である。Fig.11の(2)~(4)に示されるように対角線方向に2本の試験燃料棒の間隔が変えられて測定がなされた。Fig.20~Fig.22に測定結果が計算値とともに示されている。

(ハ) マルチロード測定： これはFig.11の(5)に見られるように、試験燃料Dの分散配置を行なって測定されたものである。結果をFig.23に示す。

(ii) J P D R 模擬炉心における測定

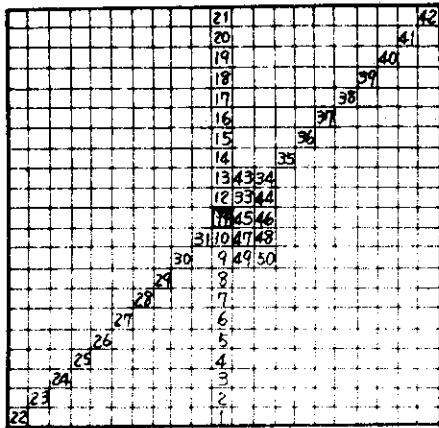
この測定は実用上の観点からなされたものであり、試験燃料D(1.5 w/o Gd_2O_3)の試験燃料棒が使われ、集合体の中に毒物入り燃料が挿入されたときの出力分布の知見を得るものであった。試験燃料Dが選ばれた理由は、この濃度のものが炉心の初期反応度抑制効果と集合体あたりの平均燃焼度の向上という本来の毒物入り燃料棒の必要とする条件に最も近い性質を有し、かつF T Aの設計条件にも近いということであった。

(イ) シングルロッド測定：これは36本の燃料棒で構成されているJPDR模擬集合体の対角線上に1本の試験燃料Dの燃料棒が全炉心について対称的に装荷されたときの測定である。照射された燃料棒の出力は1集合体(reference assembly)の中の全数と他の領域の代表的な位置を選んでFig. 6に示される順序で測定された。測定結果はFig. 25, Fig. 26に計算値とともに示されている。ただしFig. 24に示されるものは試験燃料なしの炉心の出力分布である。

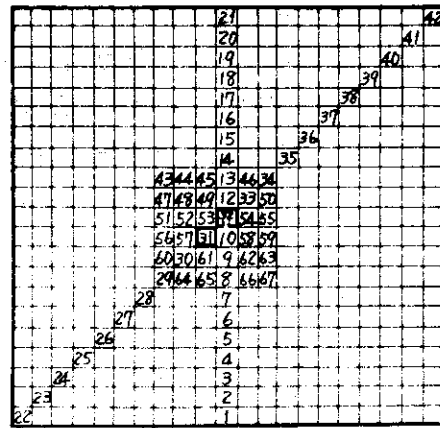
(ロ) トリプルロッド測定：これは1集合体あたり3本の試験燃料Dの燃料棒が装荷された場合の測定であり、体系としてはこの一連の実験で最も複雑であり、かつ実用的なものに近い配置のものである。測定結果がFig. 27～Fig. 29に計算値とともに示されている。

(4) 測定誤差

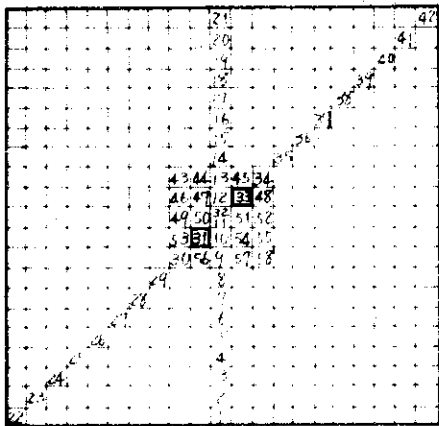
本測定における誤差は比較的大きく最大約5%とみるべきであろう。誤差の主要な原因は燃料棒の曲がり等に起因するものであり、この誤差を小さくすることは実際上できないので今回の実験ではこれ以上の精度は望めない。放射線計測上の統計誤差は高々1%に過ぎない。測定系のゲインドリフトを補正した後でも、全体に出力分布の傾き(集合体ごとに数%の差)が認められる。これは水ギャップ等の幾何学的寸法のずれによるものであらうと推察される。



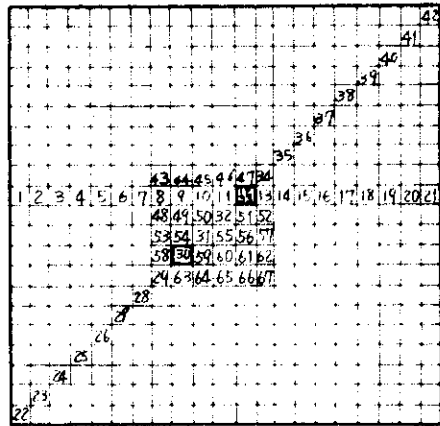
(1) S-A,S-B,S-C,S-D,S-E



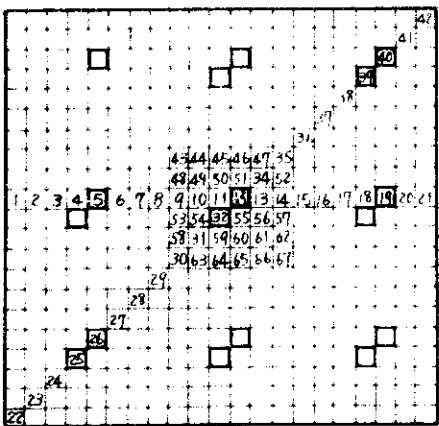
(2) D-a-D



(3) D-b-D



(4) D-c-D



(5) M-a-D

Fig. 11 Sequence of the fuel rods for the power distribution measurement

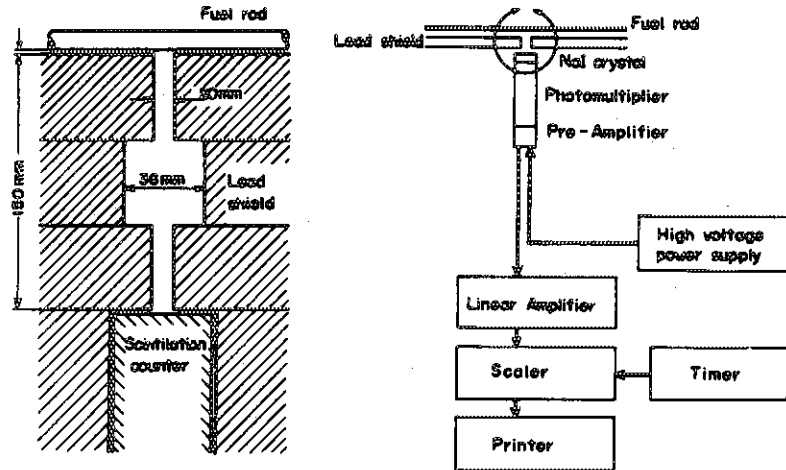


Fig. 12 Counting system of gamma ray from fission products

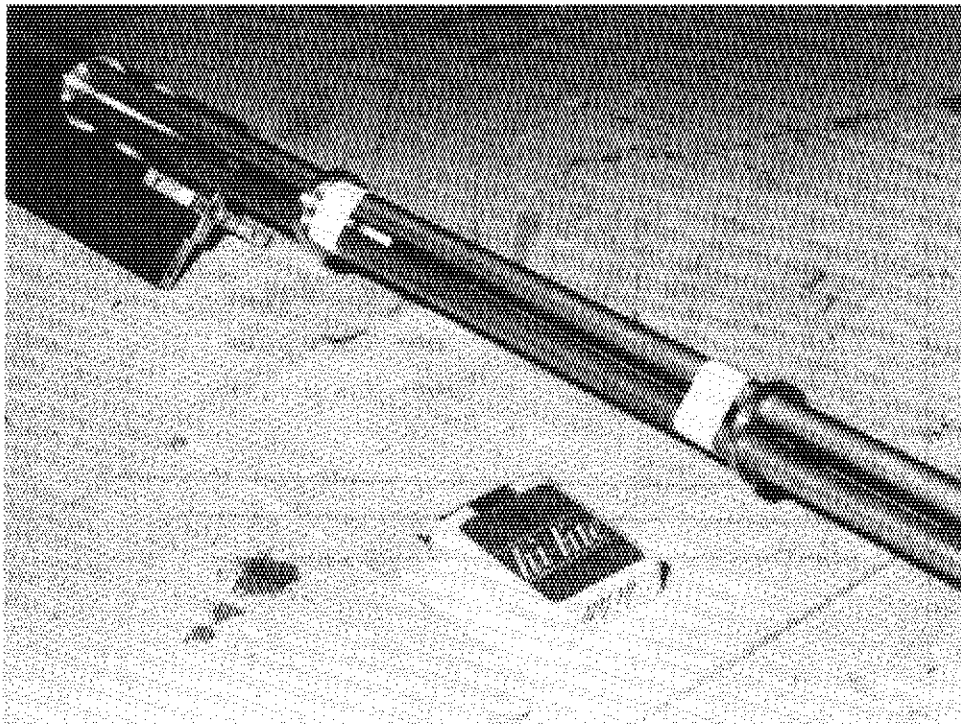


Photo. 3 Test fuel and detector wire

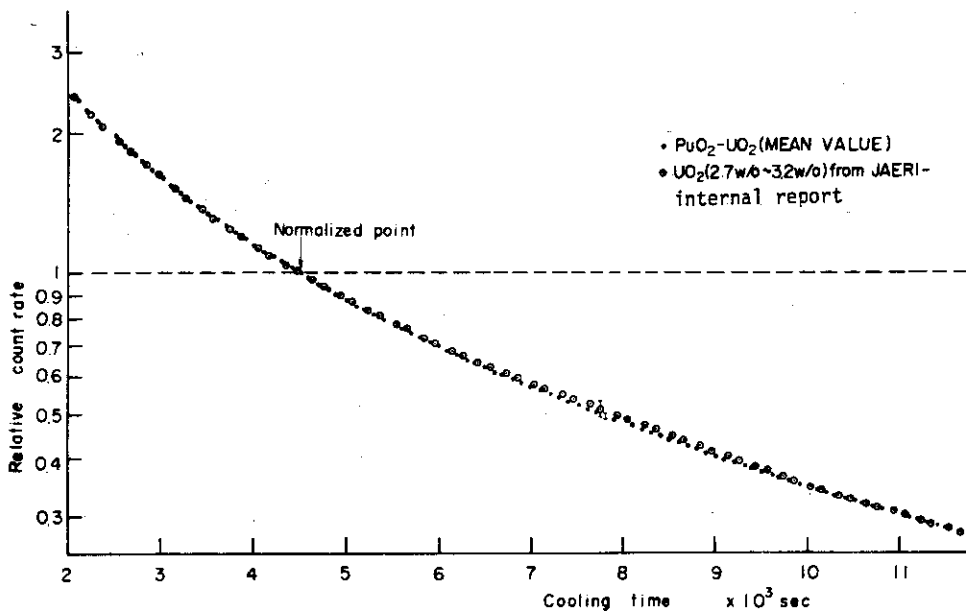


Fig. 13 Averaged F.P. gamma ray decay curve

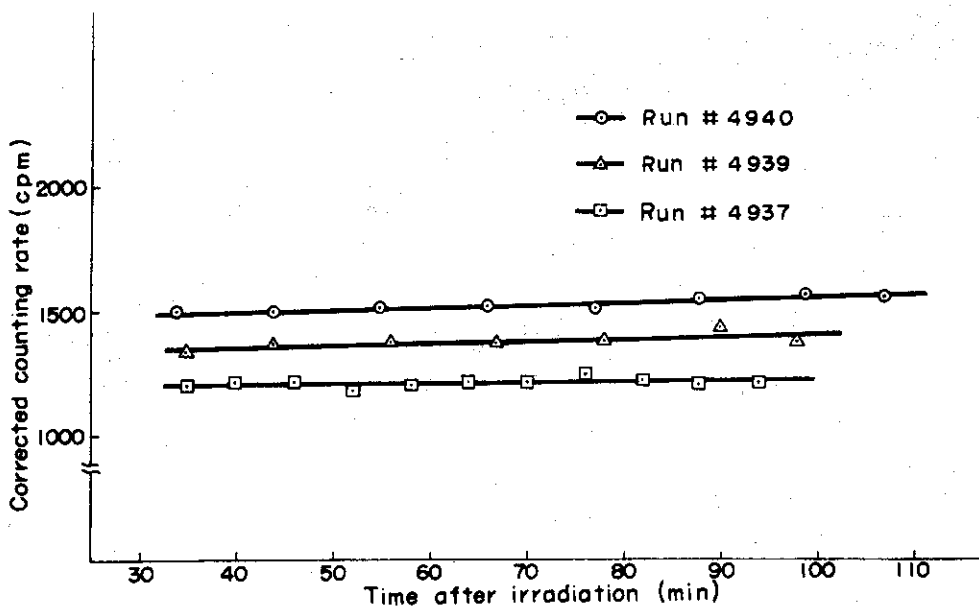


Fig. 14 Counting rate drift of scintillation counter

core S-A

1268									
1260									
1255									
1262	1257								
1254	1249								
1277	1261								
1239	1233	1211							
1231	1226	1205							
1267	1225	1191							
1201									
1195									
1208									
1149									
1144									
1157									
1082									
1079									
1076									
1004									
1001									
1008									
0915									
0915									
0915									
0821									
0826									
0834									
0748									
0758									
0782									
0949									
0967									
0902									

THERMOS } Calculated value
 WDSN }
 Measured value

Fig. 15 Horizontal power distribution (Run #4933)

core S-B

0915									
0880									
0889									
1239	1252								
1220	1235								
1227	1228								
1248	1243	1225							
1231	1229	1213							
1246	1210	1212							
1216									
1204									
1249									
1163									
1158									
1197									
1095									
1095									
1103									
1016									
1018									
1013									
0926									
0932									
0931									
0831									
0843									
0870									
0757									
0774									
0793									
0960									
0988									
0913									

THERMOS } Calculated value
 WDSN }
 Measured value

Fig. 16 Horizontal power distribution (Run #4934)

core S-C

0.560									
0.522									
0.528									
1.201	1.243			THERMOS					
1.187	1.223			WDSN					
1.165	1.219								
1.250	1.249	1.236							
1.229	1.232	1.221							
1.266	1.223	1.208							
1.229			1.168						
1.213			1.162						
1.275									
1.181				1.070					
1.171				1.070					
1.209				1.059					
1.112					0.948				
1.110					0.958				
1.130					0.932				
1.032						0.816			
1.035						0.828			
1.052						0.812			
0.940							0.676		
0.949							0.691		
0.968							0.686		
0.844								0.545	
0.858								0.563	
0.879								0.528	
0.769									0.448
0.789									0.471
0.825									0.473
0.975									0.575
1.009									0.612
0.957									0.566

Fig. 17 Horizontal power distribution (Run #4935)

core S-D

0.327									
0.299									
0.300									
1.176	1.235			THERMOS					
1.161	1.211			WDSN					
1.154	1.236								
1.250	1.252	1.245							
1.228	1.232	1.226							
1.253	1.249	1.230							
1.238			1.181						
1.219			1.171						
1.232			1.169						
1.193				1.081					
1.179				1.082					
1.179				1.106					
1.123					0.958				
1.120					0.968				
1.116					0.944				
1.042						0.824			
1.046						0.839			
1.047						0.821			
0.950							0.683		
0.959							0.701		
0.964							0.710		
0.852								0.550	
0.869								0.572	
0.866								0.552	
0.777									0.453
0.800									0.479
0.812									0.484
0.985									0.581
1.022									0.622
0.949									0.571

Fig. 18 Horizontal power distribution (Run #4936)

core S-E

0.278									
0.252									
0.248									
1.179	1.236								
1.153	1.208								
1.154	1.221								
1.251	1.254	1.245							
1.226	1.233	1.227							
1.268	1.247	1.242							
1.238			1.182						
1.220			1.173						
1.242			1.164						
1.194				1.082					
1.181				1.085					
1.194				1.087					
1.125					0.959				
1.123					0.971				
1.135					0.955				
1.044						0.825			
1.048						0.842			
1.075						0.817			
0.951							0.684		
0.962							0.704		
0.948							0.698		
0.853								0.551	
0.872								0.574	
0.870								0.550	
0.777									0.453
0.803									0.480
0.812									0.479
0.986									0.582
1.026									0.624
0.936									0.582

Fig. 19 Horizontal power distribution
(Run #4937)

Run no 4939
core D-b-D

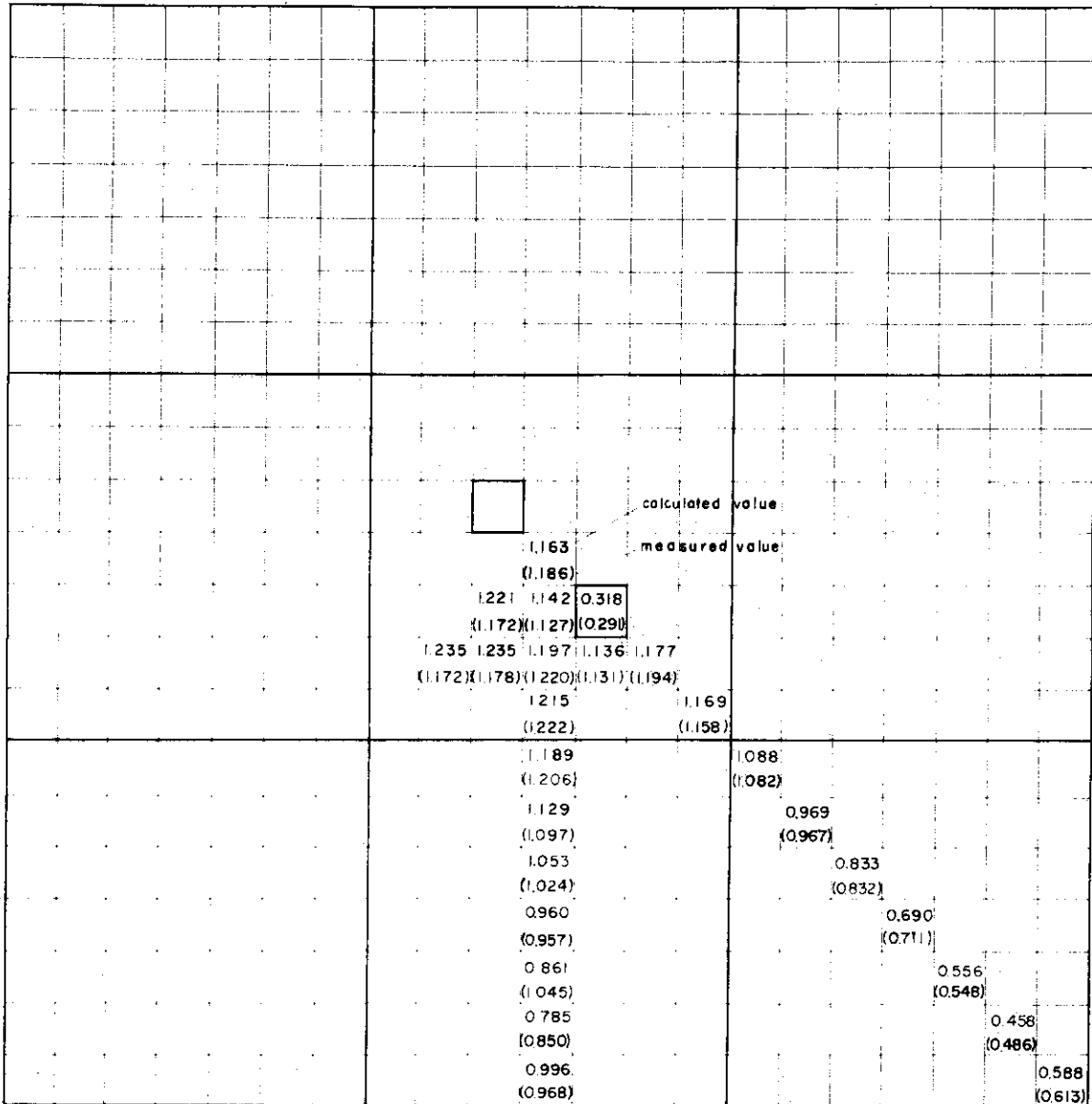


Fig. 21 Horizontal power distribution (Run #4939)

Run no 4940
core D-C-D

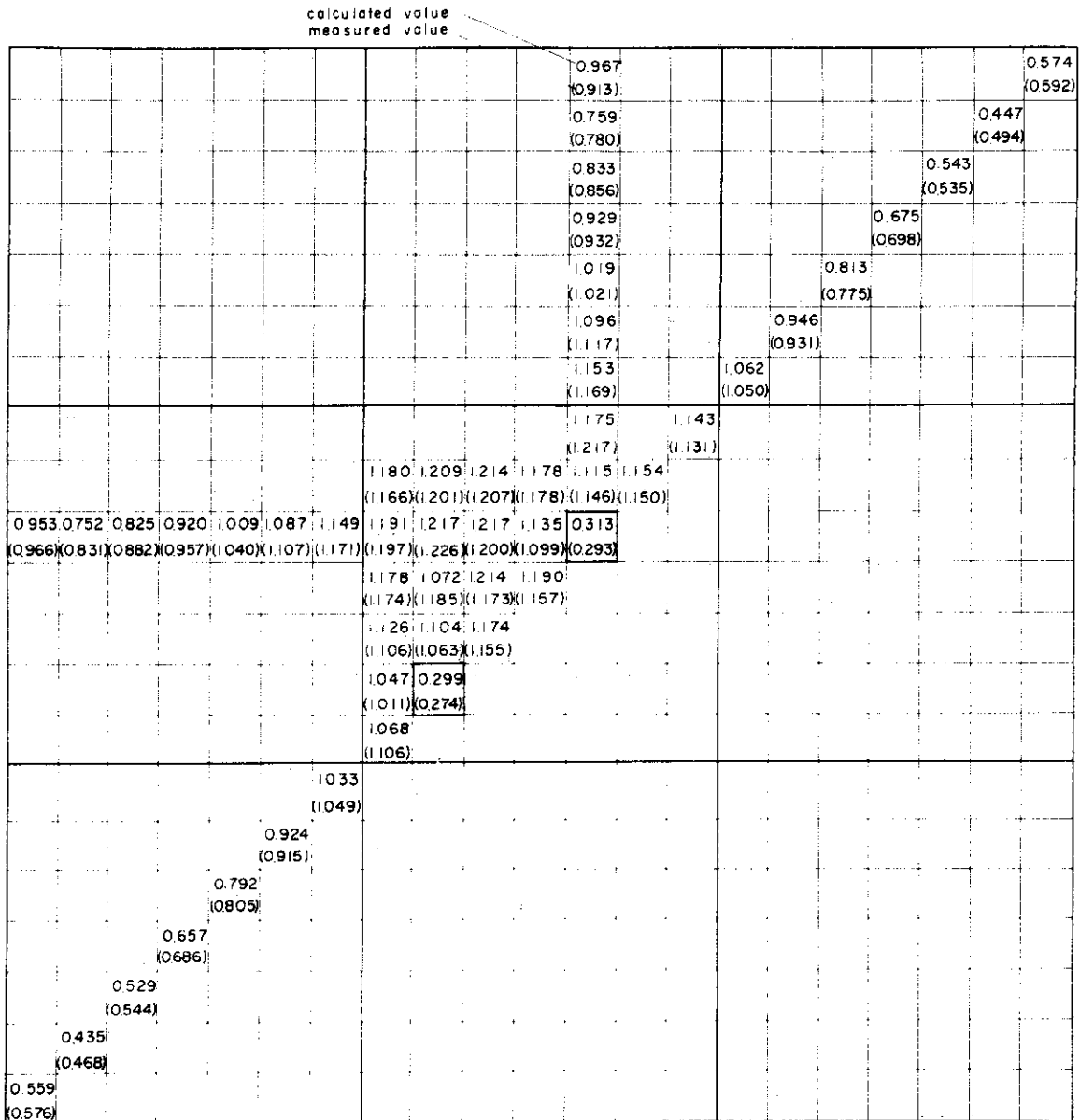


Fig. 22 Horizontal power distribution (Run #4940)

Run no. 4941

Core M-a-D

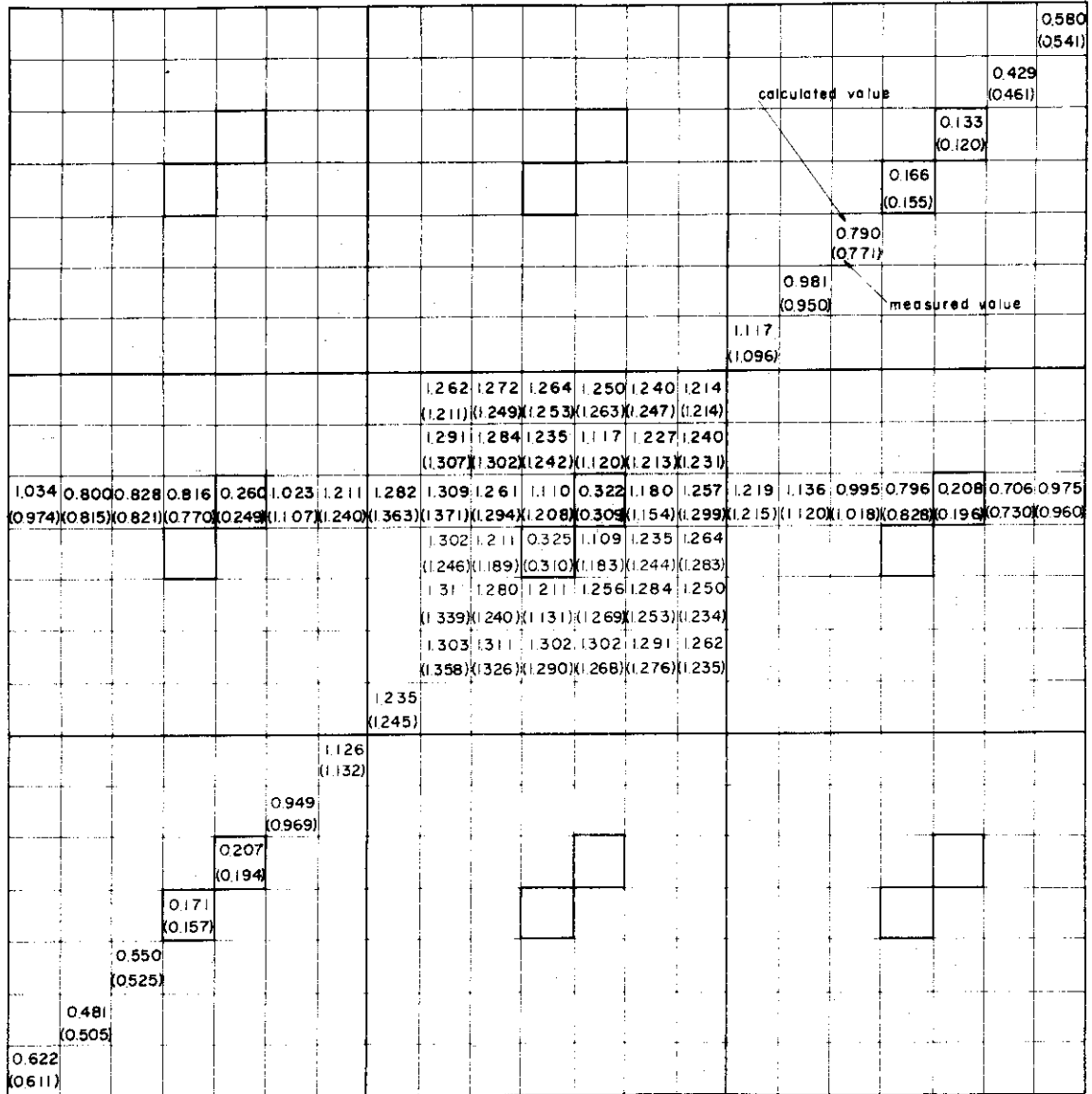


Fig. 23 Horizontal power distribution (Run #4941)

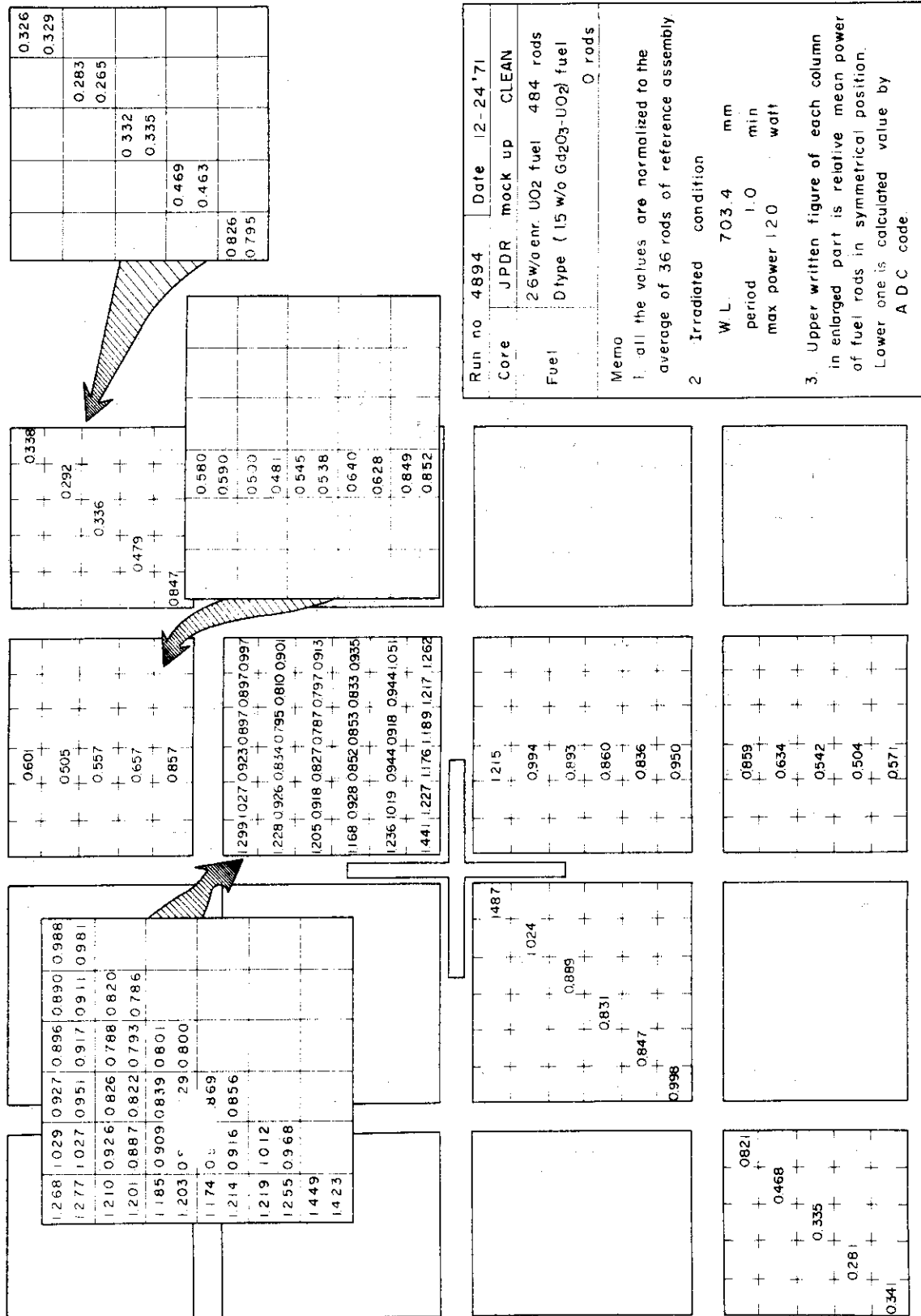


Fig. 24 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4894)

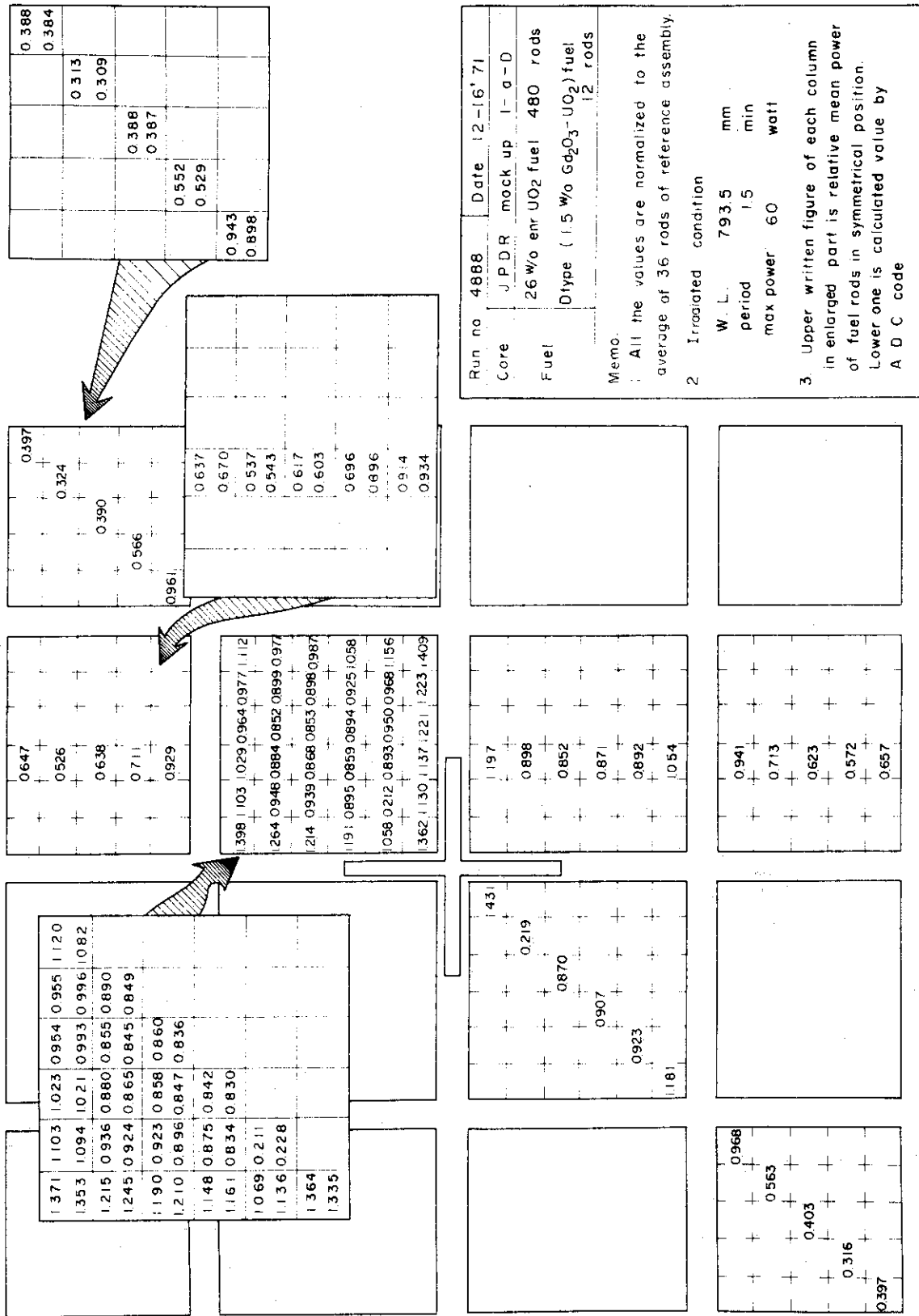


Fig. 25 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4888)

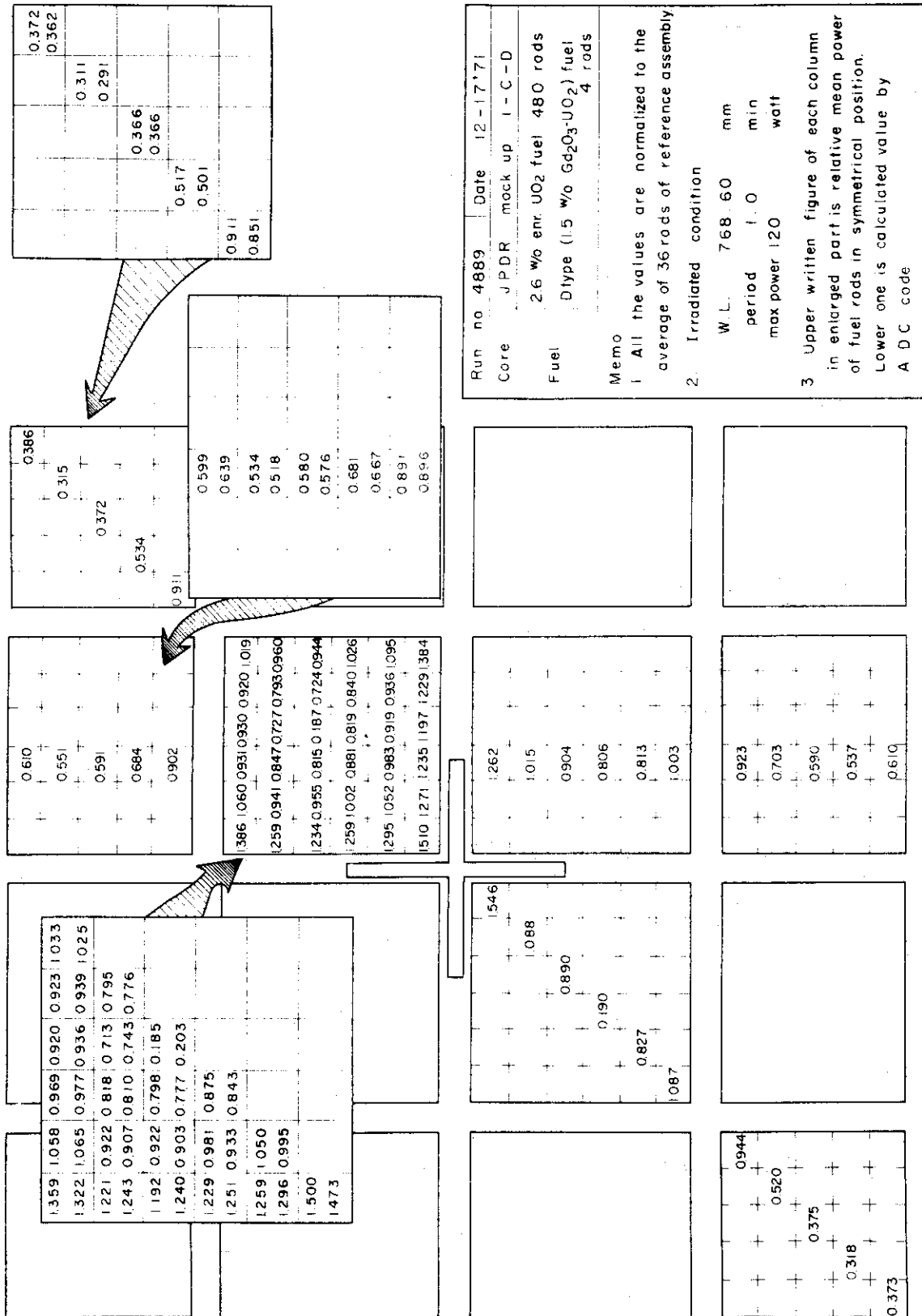


Fig. 26 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4889)

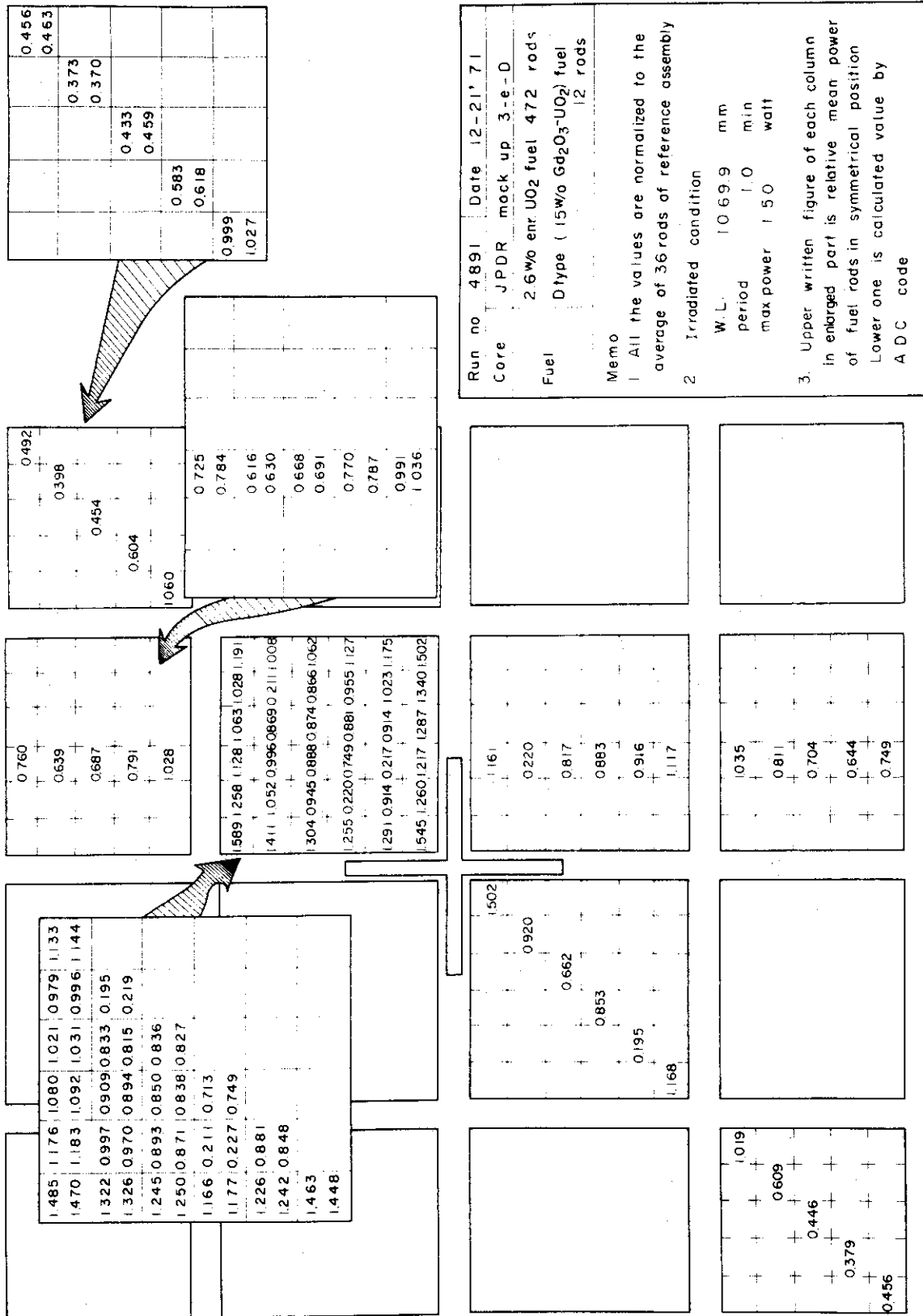


Fig. 27 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4891)

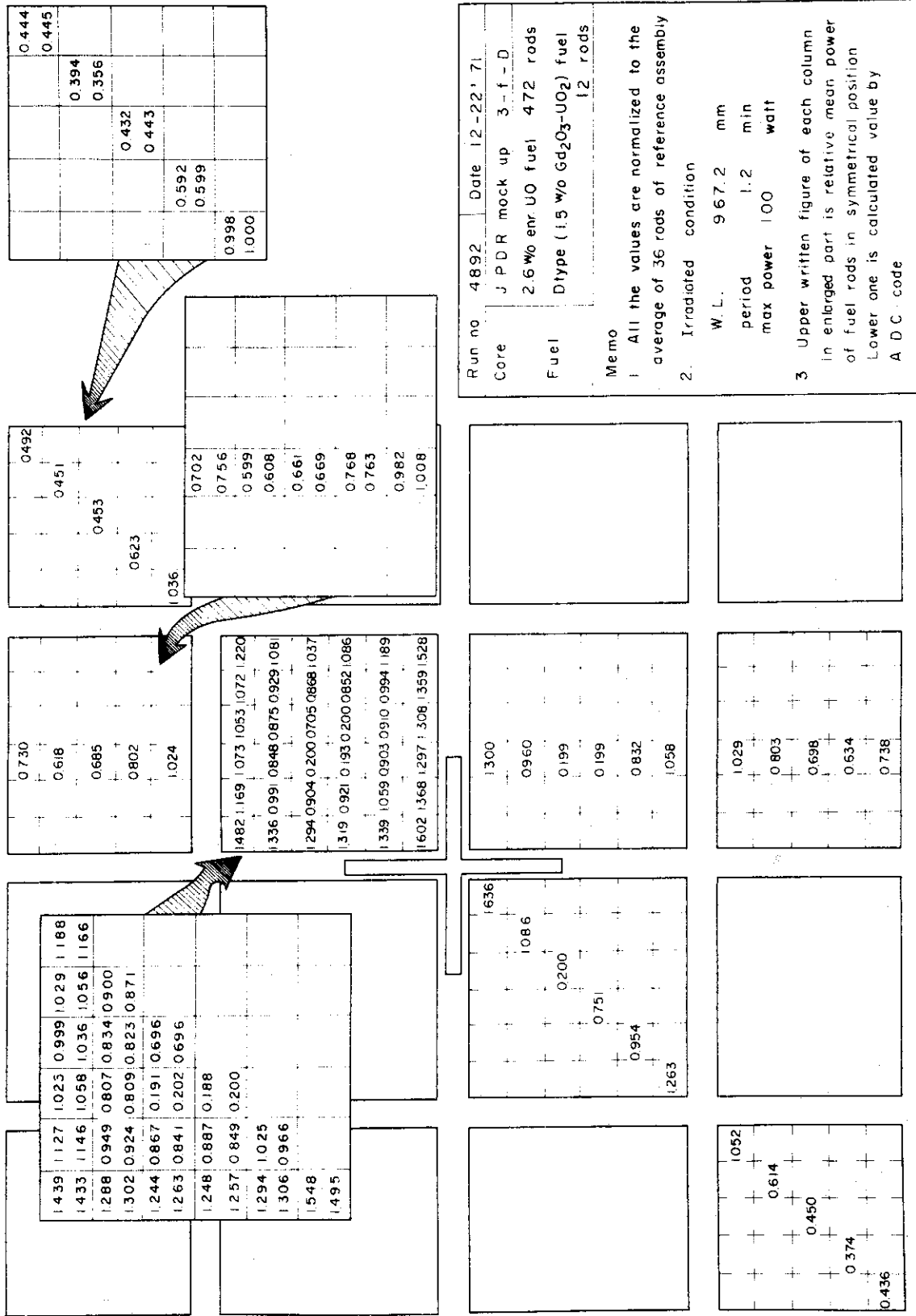


Fig. 28 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4892)

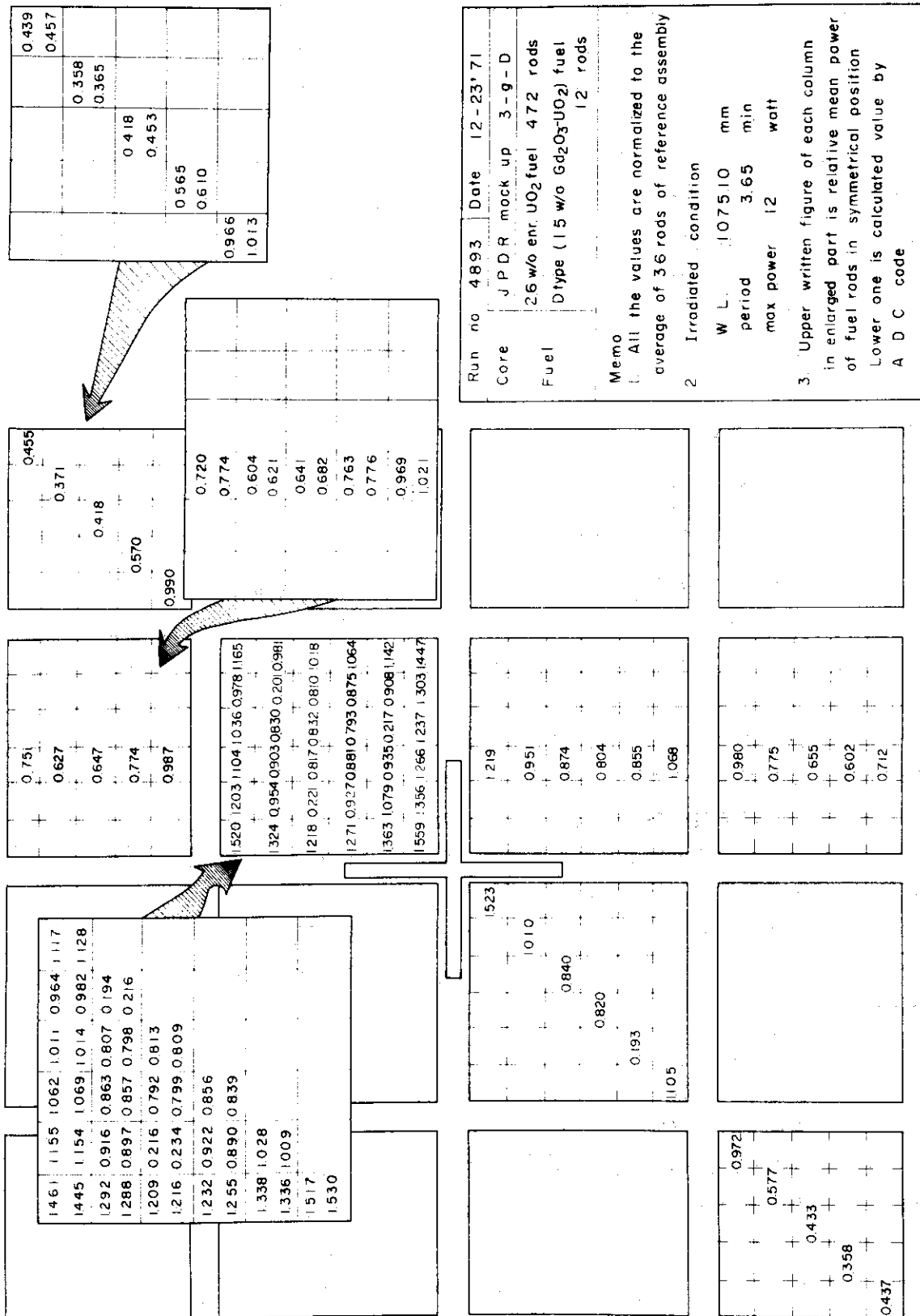


Fig. 29 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4893)

2.2.3 放射化率分布の測定

燃料棒の中の中性子束分布を知ることによりガドリニウムの中性子に対する強吸収体の性質が直接的に示される。また中性子束分布は核計算の結果の中で最も基本的な量のひとつでありガドリニアの混入された燃料棒に対する計算の適否を与えることから、何らかの中性子束分布の知見を得ることは重要である。理論計算によって得られる最も基本的な量は中性子密度の各点、各エネルギーごとの値 $n(r, E)$ である。しかしこの量は実験的に精度よく得ることは極めて困難である³⁾ため、 $n(r, E)$ のエネルギーに対する積分量に相当する積分反応量の測定が放射化法によってなされた。放射化法による中性子束分布の測定の原理は放射化される原子の個数が中性子束に比例することによる。放射化断面積 $\sigma_{act}(v)$ の試料が中性子束 $n v$ と t 時間反応したときの放射性核種の生成量 N_a はつぎの式で与えられる。

$$N_a = \frac{\Phi \cdot N^1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.2)$$

$$\text{ただし, } \Phi = \int_0^\infty n v \sigma_{act}(v) dv$$

ここに、 N^1 は中性子束にさらされている全原子数

λ は放射性核種 N_a の崩壊定数

放射線の測定は、NaI(Tl) γ 線検出器によって行なわれた。放射化試料として用いられたディスプロシウムと金はいずれも、中性子の (n, γ) 反応によって放射性同位体に変換されて β 崩壊を起こし、それに伴って γ 線が発生するが、この崩壊の半減期は測定に相当である。

試験燃料の軸方向の中央部3カ所に細い穴をあけてディスプロシウム・アルミニウム合金、裸の金、カドミウムを巻いた金の3種類のワイヤが挿入され、炉内で照射された。測定は最初に円環炉心の中心に試験燃料を挿入して行なわれた。これは円環炉心の内部減速核領域における中性子がほとんど熱中性子ばかりであるため、マックスウエル分布に近いスペクトル構造をもつ中性子束に対する試験燃料中のガドリニウムの中性子吸収に関する知見を得ることができるからである。つぎに試験燃料が燃料格子の中心に挿入された場合について測定がなされた。この測定の格子は円環炉心の場合と比較してより複雑な中性子スペクトルを持ち、集合体の中に試験燃料が挿入されたときの中性子束分布に近い条件を有している。

(1) ワイヤ検出器

ディスプロシウムと金は放射化法の熱中性子検出器として広く用いられており、放射化断面積が大きく、中性子の吸収によって生まれた核種の崩壊の半減期が相当であることから、その γ 線または β 線を計数して中性子束に関する情報を簡単に得ることができる。いずれも放射化断面積は中性子の低エネルギー領域ではほぼ $1/v$ 則に従うので、放射化率はそのまま中性子密度を与える。ディスプロシウムはアルミニウムとの合金(10% Dy-A ℓ)のワイヤが用いられ、その直径は0.75 mmであった。金は、直径が0.4 mmの裸のワイヤと、同じものにカドミウムの板(厚さ0.1 mm)を約5回巻きつけたものが使用された。金の放射化断面積はディスプロシウムと異なり、エネルギー約5 eVの付近に大きい共鳴吸収のピークを有する。金のワイヤにカドミウムのカバーを巻きつけた目的は、熱エネルギー領域と共鳴エネ

ルギー領域とに放射化率を分けるためである。ディスプロシウムと金の吸収断面積が、Fig. 30に示されている。また(n, γ)反応で生じたディスプロシウムの同位体 (^{165}Dy)と金の同位体 (^{198}Au)の崩壊図式がFig. 31に示されている。ディスプロシウム (^{165}Dy)の β 崩壊の半減期は約140分であり、この崩壊に伴う γ 線のうち主なものはそのエネルギーが、0.09 MeV, 1.02 MeV, 0.36 MeVの3種類である。金 (^{198}Au)の β 崩壊の半減期は2.7日であり、その γ 線のエネルギーは0.41 MeVである。

ワイヤはステンレスの細い管の中に挿入された (Fig. 32)。ステンレス細管はあらかじめ試験燃料の中心を通る直径方向に被覆管とペレットを貫通した穴の中に固定されており、上方からディスプロシウム、裸の金、カドミウムを巻いた金の順序で3本のワイヤが挿入される構造をなしている。ワイヤとステンレス細管の間はエナメルラッカーが塗られ、またステンレス細管と燃料の被覆管との隙間はエポキシ系の樹脂で固められて水の浸入が防止されている。Photo 3に正方格子に組み込まれる前の試験燃料とワイヤの状態が示されている。

(2) 照 射

円環炉心または正方格子炉心の中央部の中性子束分布の平坦な位置にワイヤの挿入された試験燃料が装荷され、臨界状態で600 Wminから1000 Wminの照射運転が行なわれた。放射化試料のワイヤは試験燃料の軸方向の中心部に取り付けられており、この位置に軸方向中性子束分布のピークとなるところが一致するためには、臨界水位は冠水状態、つまり燃料棒の有効部より充分水位が高い状態でなければならない。同じ大きさの炉心では試験燃料のガドリニアの濃度によって水位が大きく変化するので、炉心の周辺のドライバ燃料の数を変えて各運転ごとに臨界調整が行なわれた。

(3) 放射化試料の重量測定と γ 線計数

照射されたワイヤは燃料棒の外に取り出され、その全長と全重量が測定され、燃料棒の中にあった部分は2 mmの等間隔に、水の中にあった部分は3 mmの等間隔に切断されたアクリル製のケースに収められた。放射化試料の γ 線は井戸型NaI(Tl)検出器によって数回計数された。計数値にバックグラウンド、測定系の分解時間(3.8 μs)軸方向中性子束分布による照射量の違い、重量による試料の相対感度の違いを補正して放射化率が求められた。重量測定は0.003 mgの精度を有する自動直示天秤によって行なわれた。試料の位置の割り出しは重量で行なわれた。つぎの式は重量から位置を求めるものであり、切断前のワイヤの重量と試料の重量の総和に誤差が生じた場合、その誤差をすべての試料に均等に分配するように考慮されている。

$$L_k = \left| \frac{1}{2} - \frac{\left(m_k + \frac{M - M_c}{N} \right)}{2M} - \sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{m_k + \frac{M - M_c}{N}}{M} \right) \right| \cdot L \quad (2.3)$$

- ここに、
 m_k : k番目の試料の重料
 L_k : k番目の試料の中心からの位置
 M : 切断前のワイヤの重量
 M_c : 試料の重量の総和
 N : 試料の総数
 L : 切断前のワイヤの全長

放射化率の測定誤差は、重量の測定誤差と γ 線の計数誤差をもとにしてつぎの式で評価された。

$$\sigma_A = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_w^2} \quad (2.4)$$

ここに、 σ_A : 放射化率の相対誤差

$$\sigma_w = \frac{\pi}{2\bar{w}} (|w_1 - \bar{w}| + |w_2 - \bar{w}|)$$

w_1, w_2, \bar{w} : 重量の測定値とその平均値

σ_c : γ 線計数の相対誤差 (バックグラウンドの計数誤差と2回にわたる放射化試料の γ 線計数誤差)

(4) 測定結果

測定の誤差は重量よりも γ 線計数上の誤差が相対的に大きな割合を占める。重量の測定は誤差0.5%以内で行なわれている。 γ 線の計数の相対誤差は約0.5%から10%の範囲にある。試験燃料の中では高い計数率がとれないために大きな誤差を生じる。燃料中の放射化試料の誤差の全ての平均をとると試験燃料Eで約3%であった。水の中の放射化試料については平均1%であった。

円環炉心における放射化率分布の測定結果が、ディスプロシウムワイヤを用いた場合にFig.33に、金のワイヤによる測定結果がFig.34に示されている。試験燃料の違いによる区別をあらわすために測定値は、適当な関数にあてはめて、燃料棒の中心から3.5 cm離れたところで規格化されている。正方格子炉心における測定では、ディスプロシウムによる測定結果がFig.35に示されており、金による測定結果がFig.36に示されている。Appendix 1に全てのケースについて各放射化試料の重量と γ 線計数の測定値および誤差の計算値がまとめて示されている。

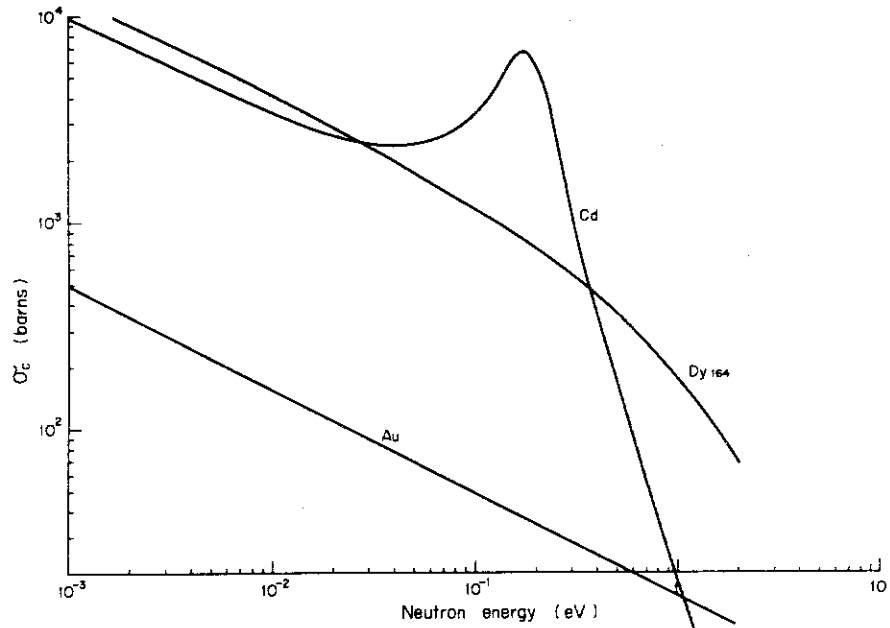


Fig. 30 Capture cross-section of probe wire

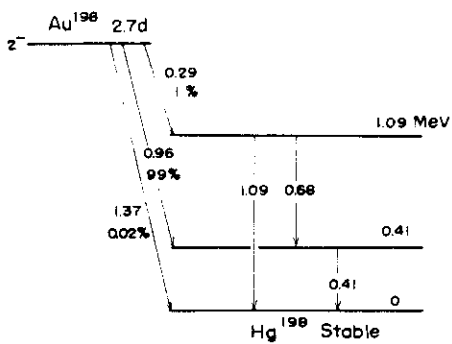
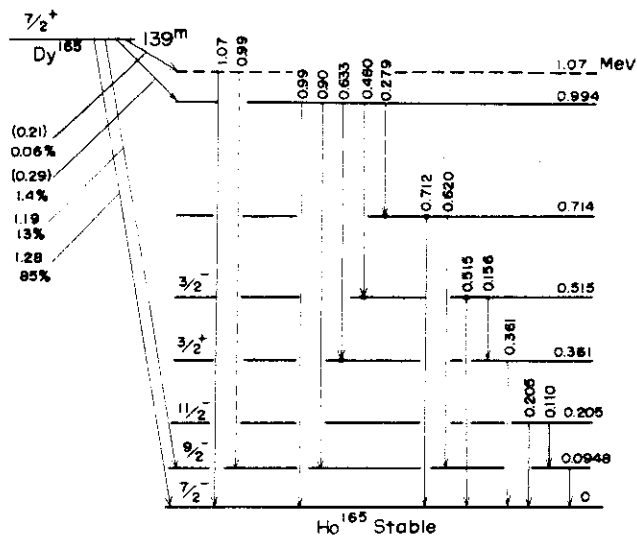


Fig. 31 Decay scheme of 165-Dy and 198-Au

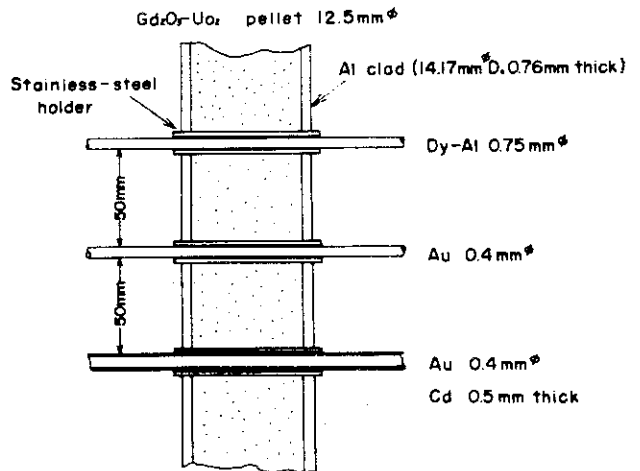


Fig. 32 Detector wire insertion in test fuel

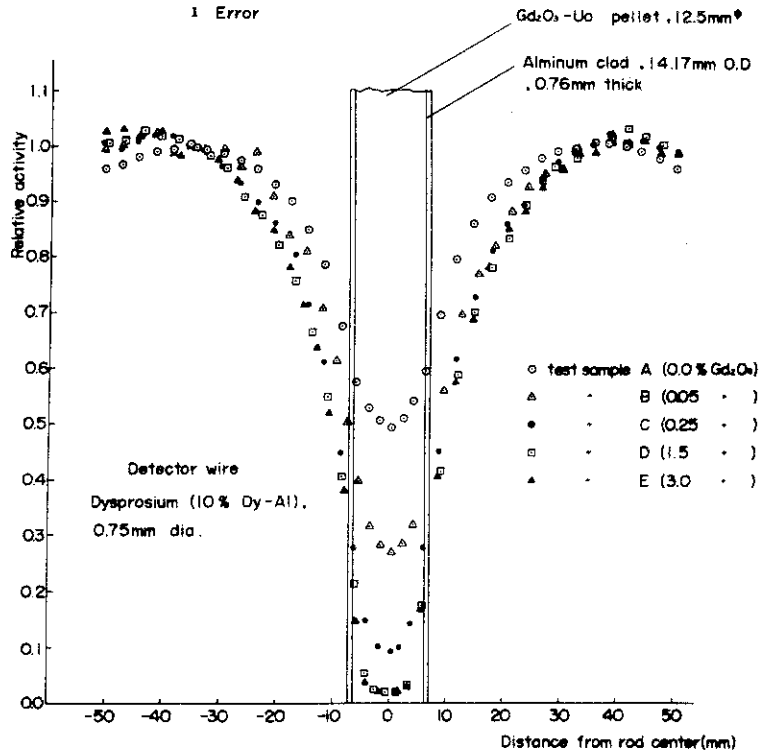


Fig. 33 Neutron activation traverses throughout test fuel (Gd_2O_3) in the annular core measured with Dysprosium wire

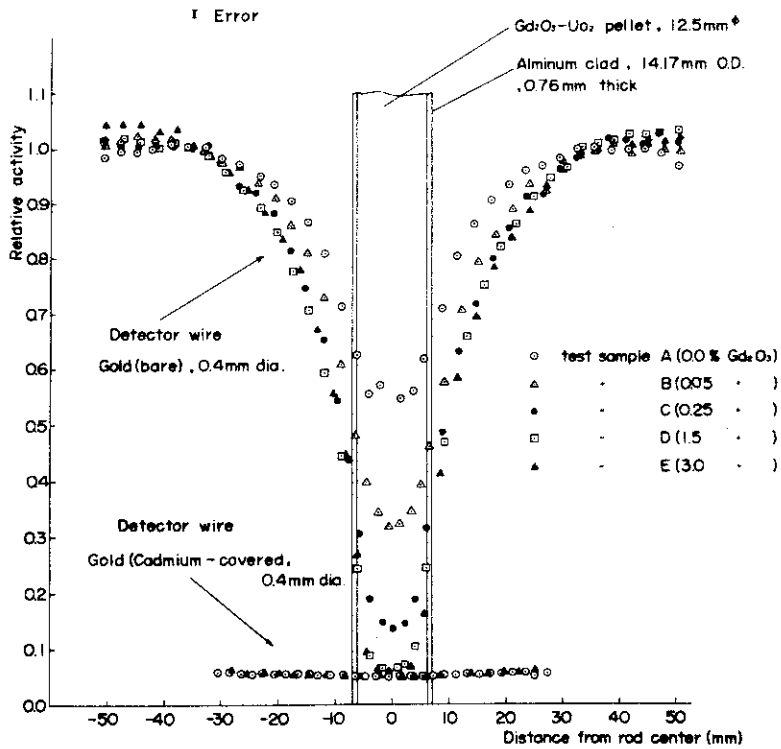


Fig. 34 Neutron activation traverses throughout test fuel (Gd_2O_3) in the annular core measured with Gold wire

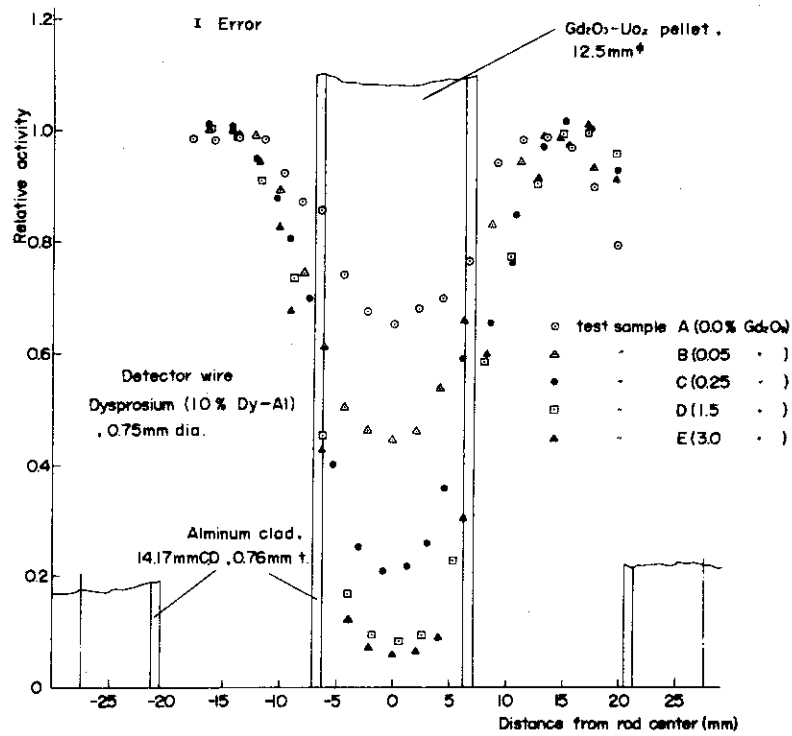


Fig. 35 Intracell neutron activation traverses measured with Dysprosium wire

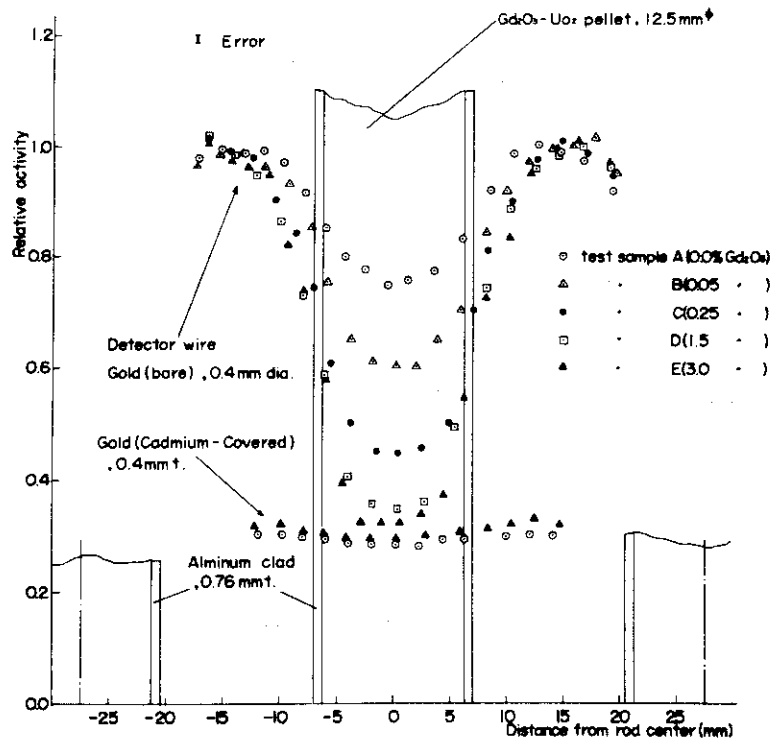


Fig. 36 Intracell neutron activation traverses measured with Gold wire

2.2.4 反応度の温度係数

この一連の実験に用いた2.6%濃縮 UO_2 格子は減速材対燃料体積比が1.84であり、この格子で構成された無限大体系の増倍係数 k_∞ は負の温度係数を有する。有限体系の炉心では、炉からの中性子の漏洩の温度依存性の影響が入るため、増倍係数 k_{eff} の温度係数は無限体系のそれとはやや異なったものとなる。一般に軽水動力炉は、その反応度の温度係数は少なくとも100℃以上では負になるように設計されている。この実験に用いた格子で構成された正方断面を有する直方体炉心は、20℃前後より上の温度範囲で負の温度係数を有する。

上のような炉心にガドリニア燃料のような強吸収体を入れた場合、温度係数には、次のような相反する事情が考えられる。ガドリニウムの核断面積の特性のみを考えると、約0.1eV以上の中性子エネルギー領域では吸収断面積が急激に減少するので、炉の温度係数に正の寄与をすることが予想される。このことは、ガドリニア燃料の単位格子に関する増倍係数の温度依存の計算値にも認められる。これはいわば、ガドリニア燃料のみで構成されたような仮想的な格子の温度依存性である。しかし、ガドリニア燃料の周辺が UO_2 格子であるような場合には、温度上昇により、ガドリニア燃料周辺での中性子の平均自由行程が増加し、このためガドリニア燃料への流れ込みが増加し、炉心全体としての負の温度係数がかえってより大きくなるということもあり得る。このこともまた計算値に認められる傾向である。

以上のような事情で、ガドリニア燃料のような特性の吸収体が入った体系の反応度の温度係数は興味深いものであり、かつ理論計算手法を検証するためのよい材料にもなる。このような観点から2、3のケースについて温度係数が測定された。

(1) 測定方法

詳細な測定の対象とされた炉心は外形がほぼ20行20列の正方断面を有する直方体炉心内にD型ガドリニア燃料(1.5 w/o $\text{Gd}_2\text{O}_3 - \text{UO}_2$)を18本分散装荷した炉心であった。この炉心については、約11℃から約70℃の範囲にわたって測定された。この他にも、補助的なデータを得るために、ほぼ17行17列の炉心の中心にD型あるいはB型ガドリニア燃料(0.05 w/o $\text{Gd}_2\text{O}_3 - \text{UO}_2$)を1本だけ挿入した場合、および円環炉心の中心にA、BあるいはD型の試験燃料を1本だけ挿入した場合について測定がなされた。測定の方法を、D型燃料18本を挿入した炉心について説明する。他のケースについても測定方法は同様である。

炉心形状、試験燃料配置をFig.37に示す。測定に先立ち、炉心周辺に温度計と、反応度調整用の制御棒が配置された。温度計は、炉心タンク内側面にとりつけられている通常運転用の抵抗温度計の他に、それぞれ高さを変えて、4個のクロメル・アルメル熱電対と3個の白金抵抗温度計が配置された。これら相互の関係および較正值を考慮して平均温度が推定された。測定を効率的にするため、炉心外側面の1カ所に反応度調整用の制御棒(5.9 w/o UO_2 燃料棒)が配置され、あらかじめ較正された。これは、全挿入状態で、全引抜状態に対して6.53¢の反応度を付加することができるものであった。

反応度の測定はすべて水位を炉心有効部上端より約11 cm 上昇させた冠水状態でペリオドを測定する方法でなされた。温度上昇実験では炉心タンクの水温と、サーボマンメタの水柱水温とが異なるため、サーボマンメタの指示を水位として採用できない。従って、炉心タンク内の水位上昇停止スイッチの設定を調整し、つねに上記の水位で水位上昇が停止するようにされた。

まず、約11℃の水温状態で炉が冠水時に約14~15¢の反応度を有するように炉心外周調整燃料が追加された。次に温度が約5℃上昇され、再び冠水状態で炉周期が測定された。この手続がくり返され、冠水で反応度が小さくなりすぎると制御棒により反応度が付加された。さらに温度上昇によって、炉心反応度が減少すると、同一温度のまま外周に燃料が追加され、反応度が付加された。追加された燃料の等価反応度は、同一水温での燃料追加前後のペリオド測定結果で得られた。この手続が70℃までくり返された。

他のケースについても、炉心形状と温度変化の回数が少ないだけで、測定方法は同じである。

(2) 測定結果

D型試験燃料18本を装荷した炉心についての、炉心温度上昇にともなう反応度減少の測定結果を、計算値と共にTable 3およびFig.38に示す。この結果を、かりに2次の実験式にあてはめると、測定値と計算値のそれぞれについて次の式が得られる。

$$\text{測定値： } \rho_M = -1.537 \times 10^{-4} T^2 - 0.286 \times 10^{-2} T + 0.114 \quad (2.5)$$

$$\text{計算値： } \rho_c = -1.327 \times 10^{-4} T^2 - 0.343 \times 10^{-2} T + 0.123 \quad (2.6)$$

ただし、ここで ρ は炉心が20℃において臨界状態（反応度=0）にあるものとし、温度変化にともなう炉心反応度の増減をドル単位で示している。またTは炉心温度を℃単位で示している。反応度の温度係数は、これを温度Tに微分して得られる。すなわち

$$\text{測定値： } \Delta \rho_M / \Delta T = -3.074 \times 10^{-4} T - 0.286 \times 10^{-2} \quad (2.7)$$

$$\text{計算値： } \Delta \rho_c / \Delta T = -2.654 \times 10^{-4} T - 0.343 \times 10^{-2} \quad (2.8)$$

となる。この結果は、計算値の方が測定値より、炉心温度上昇にともなう反応度減少をやや低く見積ることを示している。しかし、その差は実用上は差支えない程度のものである。

他のケースはそれぞれ、試験燃料のGd含有量によってどのように温度係数が異なるかということを示している。基準状態に対する反応度差として結果をTable 4に示す。いずれもGd含有量の多いD型の方がB型より温度係数をより負の方向に移動させる傾向を有することを示している。

Table 3 Reactivity change with temperature

Temperature °C	Integrated reactivity change	
	measured ρ_M (¢)	calculated ρ_c (¢)
11.0	+ 4.97	—
15.1	+ 2.92	—
20.0	—	0.00
20.6	— 0.81	—
26.1	— 6.69	—
29.7	— 10.48	—
30.5	— 11.36	—
35.9	— 18.36	—
40.0	—	— 22.18
40.1	— 24.63	—
40.8	— 25.63	—
45.7	— 34.13	—
46.2	— 34.97	—
50.7	— 42.78	—
53.9	— 49.38	—
55.5	— 52.74	—
59.4	— 60.41	—
60.0	—	— 56.50
60.9	— 63.40	—
65.2	— 72.06	—
65.5	— 72.71	—
69.7	— 82.58	—
80.0	—	— 99.91

The core was $20 \times 20 \sim 20 \times 21$ square lattice with 18 gadolinia rods of D type

Table 4 Different temperature dependence of different sample

Shape of core	No. of driver fuel 26 PAUO_2	Type of sample	moderator temperature	Reactivity change
Square core	$17 \times 17 - 11$ = 280	non (=26 PAUO_2)	19.4 °C	0.00 C
			36.1	- 2.53
	$17 \times 17 - 9$ = 278		41.9	- 9.94
Square core	$17 \times 17 - 1 - 4$ = 284	B type	56.8	- 27.14
			19.5	0.00
	$17 \times 17 - 1 - 2$ = 286		35.3	- 4.88
Square core	$17 \times 17 - 1 + 5$ = 293	D type	42.1	- 9.18
			57.4	- 25.46
	$17 \times 17 - 1 + 7$ = 295		19.4	0.00
annular core	422 420	A type	35.3	- 8.08
			42.5	- 17.44
annular core	430 430	B type	57.2	- 36.12
			17.8	0.00
annular core	440 440	D type	36.7	+ 22.57
			17.8	0.00
annular core	430 430	B type	35.4	+ 18.00
			17.8	0.00
annular core	440 440	D type	35.0	+ 13.47
			35.0	+ 13.47

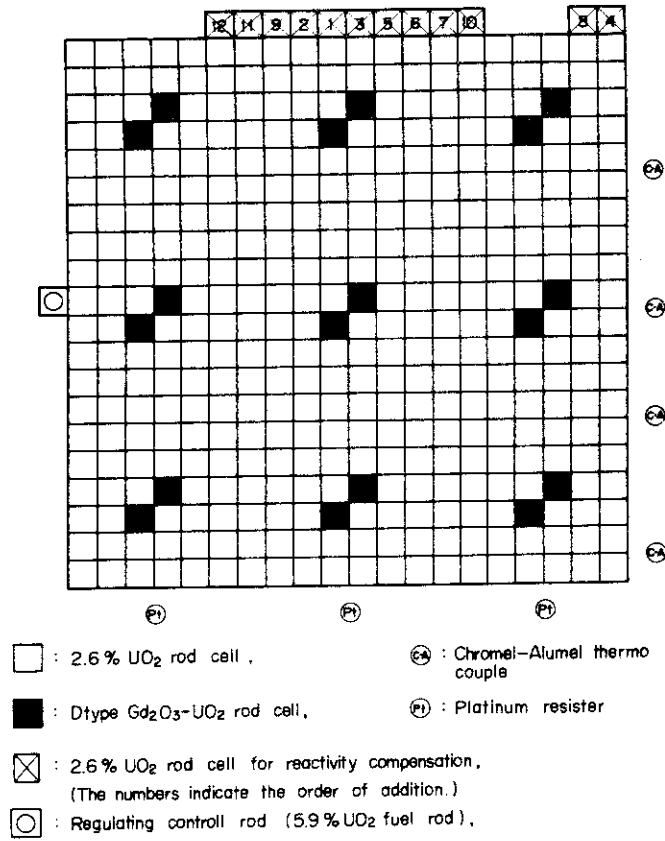


Fig. 37 Core configuration for the measurement on temperature coefficient.

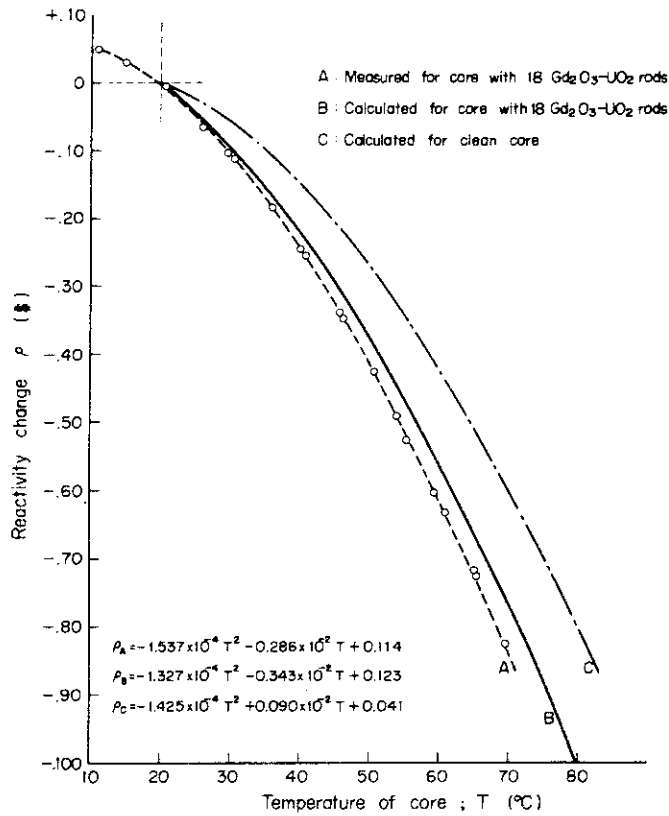


Fig. 38 Reactivity change vs. temperature for the core loaded with 18 gadolinia rods of D type

3. 計 算

3.1 計算の方法

3.1.1 計算の概要

計算は、F T A の設計に用いられている方法で行なわれた。計算の手法が Fig. 39 にフローチャートで示されている。まずスペクトル計算コードにより燃料棒セル、構造材、反射体の少数群定数が作成された。このとき得られた燃料棒内およびその近辺の中性子束分布から放射化率分布が求まり、実験値と比較された。次いで拡散コードにより全炉心解析が行なわれ、反応度、出力分布が実測値と比較検討された。

燃料棒セルの少数群定数作成のためのスペクトル計算には S T - 2⁴⁾ コードおよび W D S N^{5),6)} コードが使用された。S T - 2 コードはガドリニアを混入した燃料棒セル計算のために U G M G - 42 と 35 群 T H E R M O S - C Y L I N D E R^{7),8)} とを組み合わせて作成されたコードである。U G M G - 42 は M U F T^{9),11)} 型のコードである。核定数ライブラリーは U G M G - 42 にはシグマ委員会作成のものが、¹²⁾ T H E R M O S には E N D F / B¹³⁾ から作成されたものが用いられた。E N D F / B から作成されたガドリニウムのライブラリーは参考文献(14)に記されているが、代表的な元素の熱群の断面積を Fig. 40 に示す。また熱群の水素の散乱はネルキンモデル¹⁵⁾により取り扱われ、G A K E R コードにより処理された。このネルキンモデルにより得られた水素の散乱断面積が Fig. 41 に示されている。

核定数は 3 群に縮約された。そのエネルギー範囲は

1 群 (高速群)	10 MeV ~ 5.53 keV
2 群 (熱外群)	5.53 keV ~ 1.855 eV
3 群 (熱群)	1.855 eV ~ 6.25×10^{-5} eV

である。

3.1.2 セル群定数

燃料棒セルの群定数は S T - 2 コードにより作成された。正方格子内の燃料棒の計算体系は T H E R M O S では Fig. 42 に示すような 4 領域モデルである。試験燃料はガドリニアの強い毒作用のため中性子の吸収が著しく大であるので、近傍の燃料棒セルからの中性子が流れ込むことになる。それゆえ単一燃料棒セルの境界条件を表面で完全反射とすることはできない。このため周囲 8 本の燃料棒セルの組成を均質化した領域を単一燃料棒セルの外部に巻き付け、その最外面さらに仮想的な重い散乱核の層をまきつけ、セル境界で実質的に等方反射となるようにした。なおセル平均の群定数は単一燃料棒セル内のみで平均し、境界条件を適当にするため巻き付けた外部均質化領域は含まれていない。また円環炉心内の単一燃料棒セルに対しては、周囲の水の外半径を 3.5 cm にとった。この理由は半径約 3.5 cm の位置で中性子密度の勾配がほぼ 0 になることが実験的に知られているためである。

熱群に対しては W D S N コードにより同様の解析を行ない比較検討した。W D S N の計算

に用いた幾何学的モデルを Fig. 42 および Fig. 43 に示す。正方格子の計算には ST-2 の場合と変えて、均質化領域をさらに細かく水と均質化領域に分けた。この理由は放射化率分布の実測値と THERMOS (ST-2) との計算値とを比較した結果、このように分割した方が近似が良いと判断されたためである。なお SN 次数は 6 とした。

正方格子および円環炉心における燃料セルの計算に用いられた領域の区分と方法を Table 5 および 6 に示す。

UGMG-42 による高速群、熱外群の計算は正方格子内、円環炉心内ともに単一燃料棒セルの領域内で行なった。

セル群定数作成に用いた元素の個数密度を Appendix 2 に示す。

Table 5 Rod cell geometry in regular lattice

Code	Region No.	Region name	Mesh	Equivalent radius
THERMOS	1	Pellet	8	0.625 cm
	2	Cladding	2	0.7086
	3	Water	5	1.1036
	4	Mixture	4	3.3107
W D S N	1	Pellet	7	0.625 cm
	2	Cladding	1	0.7086
	3	Water	6	1.1036
	4	Water	3	1.4075
	5	Mixture	3	3.3107

Table 6 Rod cell geometry in annular core for THERMOS and WDSN

No.	Name	THERMOS		W D S N	
		Mesh Point	Equivalent Radius	Mesh Point	Equivalent Radius
1	Pellet	8	0.625 cm	7	0.625 cm
2	Cladding	2	0.7086	1	0.7086
3	Water	5	1.1036	6	1.1036
4	Water	2	3.5036	6	3.5036

3.1.3 構造材群定数

J P D R 模擬炉心に使われたアルミニウム合金製 (61S) のチャンネルボックスおよび制

御棒フォロワーはUGMG-42およびTHERMOS-SLABにより群定数が作成された。この計算の幾何学的体系は実験炉心の集合体セルが使用された。

高速群の水の核定数は水だけの体系でUGMG-42によるスペクトル計算が行なわれた。また熱群に対してはTHERMOS-SLABによる集合体セルの解析が行なわれ、燃料から充分離れた位置(3 cm)での水の定数が採用された。

3.1.4 炉心計算

円環炉心の計算には1次元拡散コードFOG¹⁶⁾が用いられた。正方格子炉心およびJPDR模擬炉心には2次元拡散コードADC-3¹⁷⁾およびPDQ-5¹⁸⁾が使用された。ADC-3とPDQ-5の計算結果には問題となるような差はみられなかった。

炉心解析の際使用する縦方向バックリング(B_z^2)は、実測により得られた臨界水位(H_{eff})と反射体節約($2\lambda_z = 12.0 \pm 0.1$ cm)から次式で計算した値が用いられた。

$$B_z^2 = \pi^2 / (H_{eff} + 2\lambda_z)^2 \quad (3.1)$$

また横方向反射体としての水の厚さは40 cmが取られた。

固有値の収束判定の条件はFOGに対して 10^{-6} 、ADC-3には 10^{-5} が用いられた。

円環炉心は①試験燃料棒セル、②ギャップ水、③ドライバー燃料、④反射体、の4領域に分け、各領域の実際の面積と計算に用いる円環状の領域の面積が等しくなるように領域の外半径が決められた。メッシュの取りかたはTable 7に示されている。

正方格子炉心は、①試験燃料棒セル、②ドライバー燃料、③反射体の3領域に分割された。実験が行なわれた正方格子炉心の燃料棒配列は17行17列、20行20列および21行21列であった。計算を行なった炉心体系の例がFig. 44に示されている。

JPDR模擬炉心は上記の領域の他に制御棒フォロワーとチャンネルボックスの計5領域で計算された。実験に使われたチャンネルボックスの内寸法は119 mm×119 mmであるので19.56 mmピッチの正方格子が6行6列並びとなるとチャンネルボックスと正方格子間に0.82 mmの水ギャップを生じることになる。この点を考慮して、計算上チャンネルボックスは1.5 mm厚のアルミ板の両側に0.82 mmの水を付けたものが使われた。計算を行なった炉心の幾何形状がFig. 45に示されている。

Table 7 Geometry of Annular Core (Calculated by FOG)

Region		Mesh Point	Thickness (cm)	Outer Radius (cm)	Remarks
No.	Name				
1	Sample Rod	5	1.1036	1.1036	440 Rods
2	Gap Water	10	6.854	7.958	
3	Driver Zone	20	16.52	24.48	
4	Reflector	11	40.0	64.48	

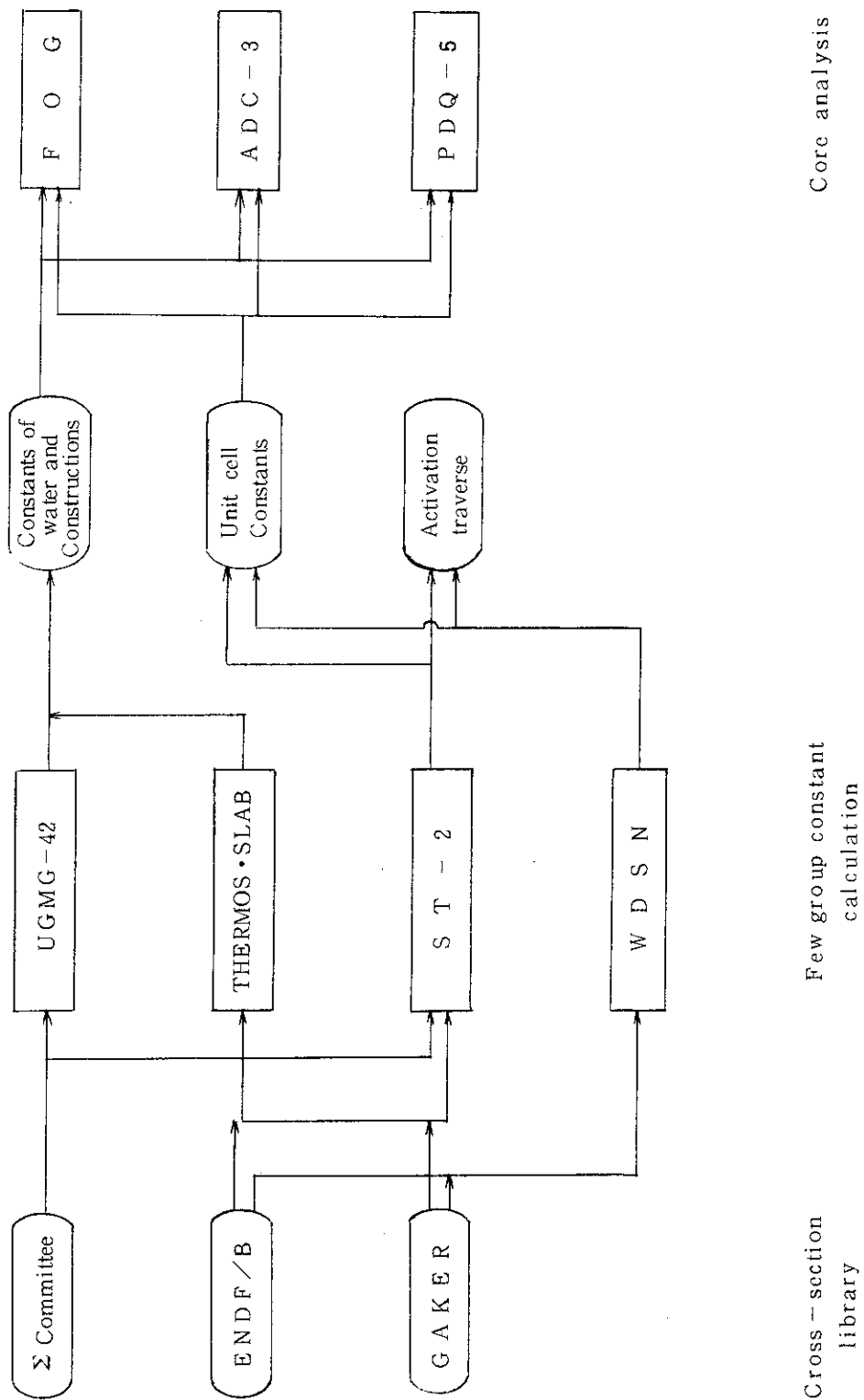


Fig. 39 Calculational scheme

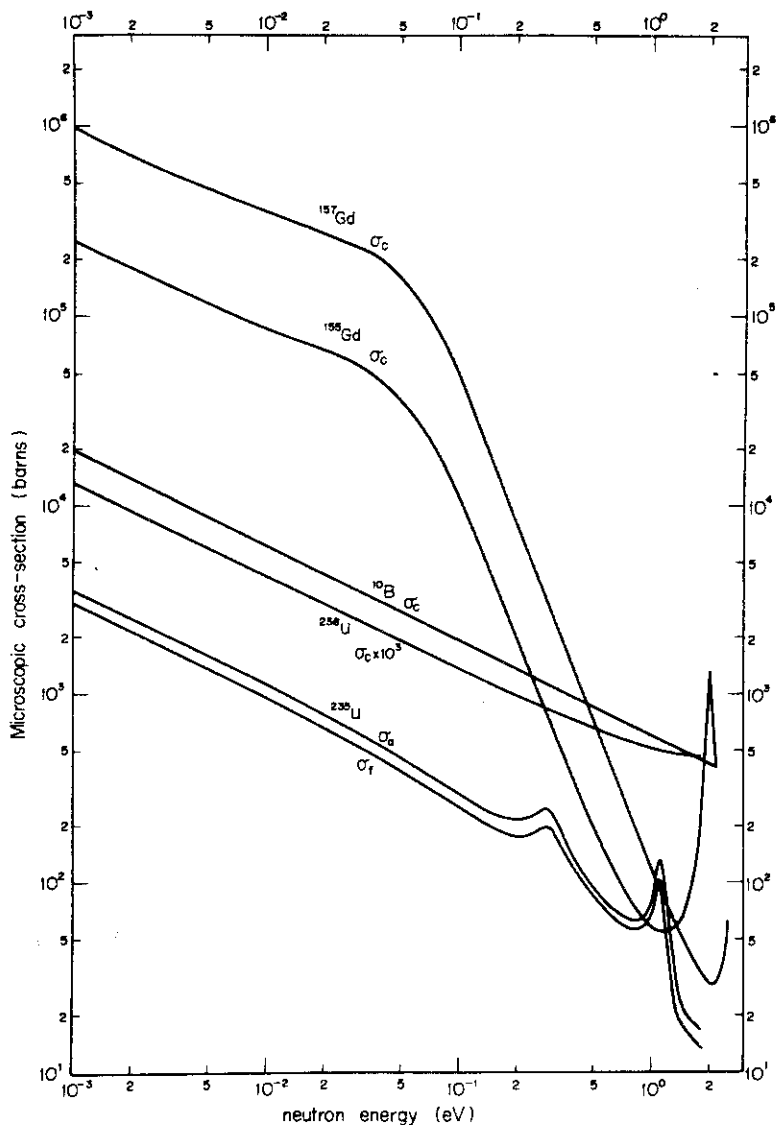


Fig. 40 Microscopic cross-section of special nuclides

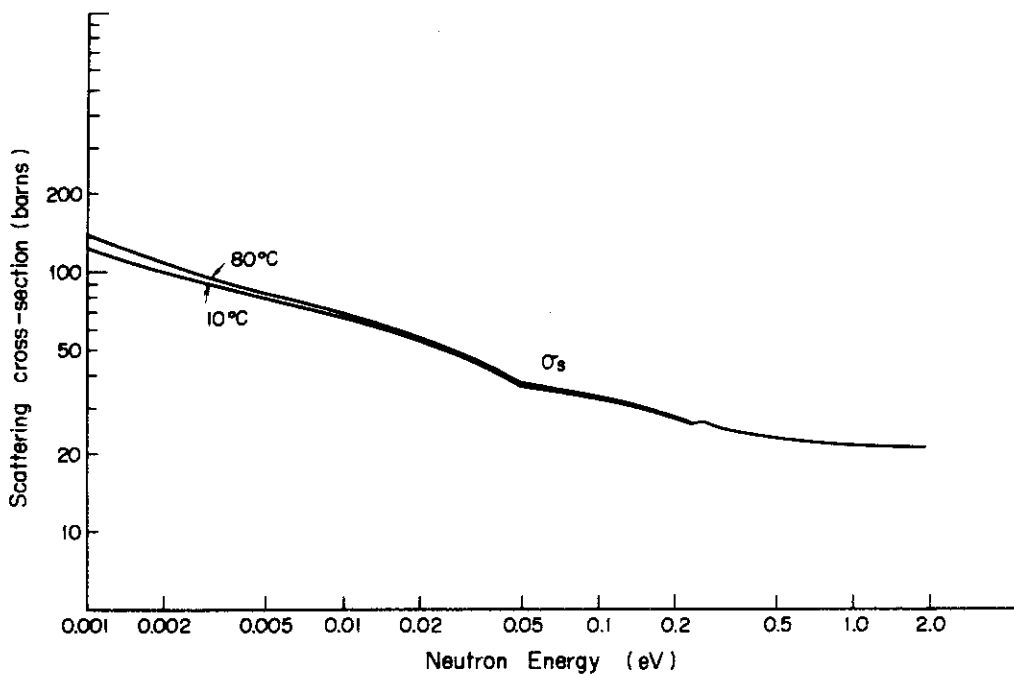


Fig. 41 Scattering cross-section of hydrogen (Nelkin kernel)

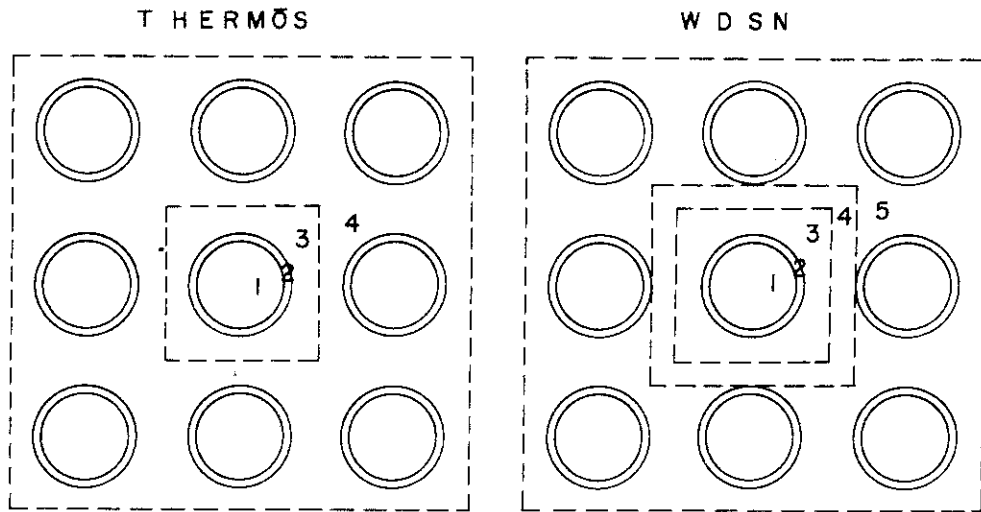


Fig. 42 Rod cell geometry in regular lattice for THERMOS and WDSN

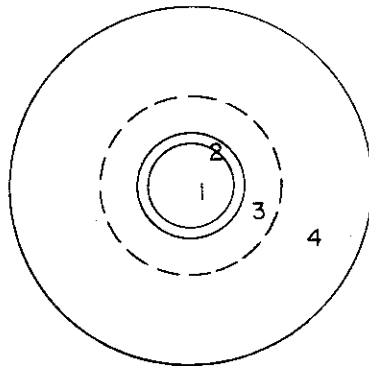


Fig. 43 Rod cell geometry in annular core for THERMOS and WDSN

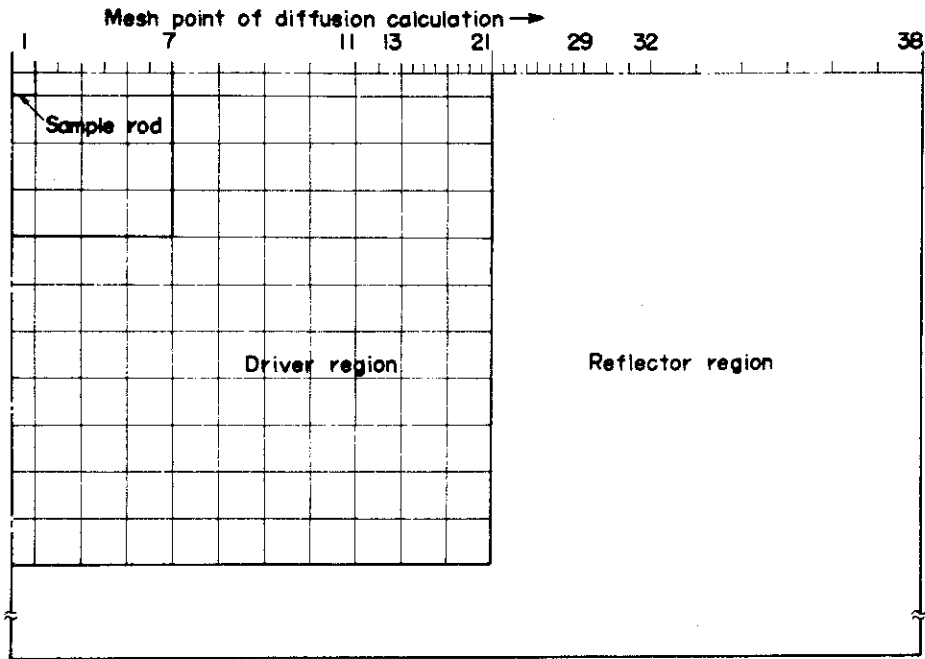


Fig. 44 Typical mesh specification of regular lattice

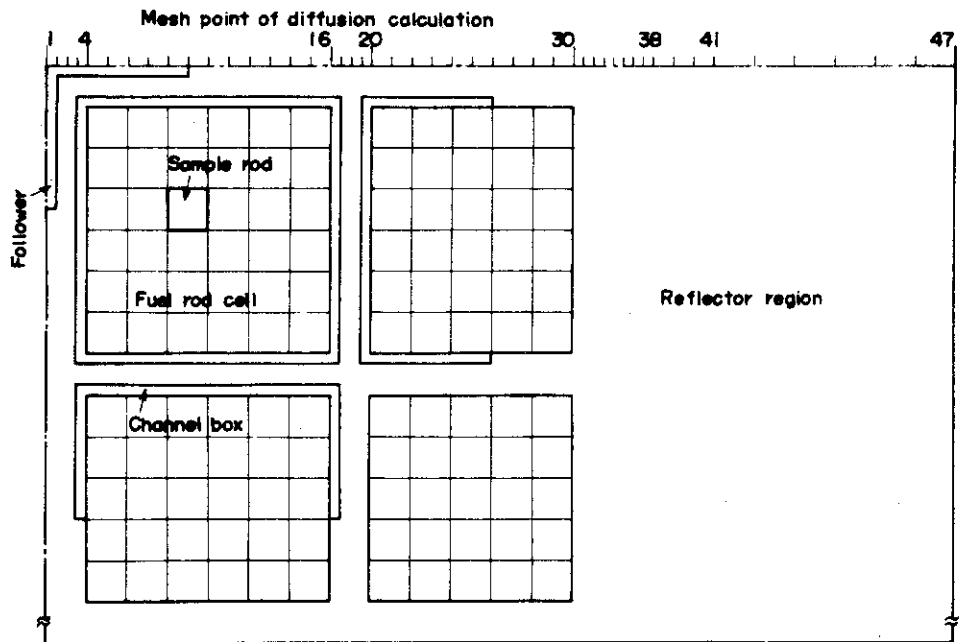


Fig. 45 Typical mesh specification of JPDR mock-up core

3.2 計算結果と実験結果との対比

3.2.1 反応度効果

試験燃料棒の反応度効果は、炉心の拡散計算によって得られる実効増倍係数の差として計算された。実験では臨界水位の差、すなわち縦方向バックリングの差から反応度効果を測定しているが、計算では一定の縦方向バックリングをインプットし、実験炉心の実効増倍係数を求めている。インプットした縦方向バックリングは、ガドリニア入り燃料棒がない場合 (Clean core) の臨界水位に相当する値である。したがってガドリニア入り燃料が挿入された場合、すなわちサンプルAが挿入された場合の実効増倍係数は測定値 (1.0) と比較される。

円環炉心、正方格子炉心、JPDR模擬炉心における反応度効果がTable 2に測定値と比較して示されている。反応度は単位の測定値と比較するために

$$\delta \rho_c = \frac{\Delta k}{1 + \Delta k} \cdot \frac{1}{\beta_{eff}} \quad (3.2)$$

によって変換された。ここで $\beta_{eff} = 0.0075$ が使用された。

A燃料挿入時の実効増倍係数の誤差は、円環炉心ではST-2・FOGで+1.4%、正方格子炉心ではST-2・ADC-3で-0.4%およびJPDR模擬炉心では+0.7% $\Delta k/k$ である。

Table 8 Variation of cross-section due to water thickness for core peripheral cell

Water thickness	D	Σ_a	$\nu \Sigma_f$
6.42 mm	0.9653	1.073	1.076
1.282 mm	0.9423	1.122	1.126
35.0 mm	0.9126	1.183	1.189

Table 9 Temperature coefficient of reactivity of regular core with 18 rods of sample D

Core	Temp (C)	k_{eff}	$\Delta \rho$ (%)	$\Delta \rho$ (C)
20 × 20 with 18 rods of Sample D	20	1.0032	0	0
	40	1.0015	-0.167	-22.2
	60	0.9989	-0.425	-56.7
	80	0.9957	-0.751	-100.1
20 × 21 with 18 rods of Sample D	20	1.011	0	0
	40	1.0096	-0.166	-22.1
	60	1.0071	-0.422	-56.3
	80	1.0038	-0.748	-99.7

Table 9 つづき

Core	Temp (C)	k_{eff}	$\Delta \rho (\%)$	$\Delta \rho (C)$
20 × 21 Clean core	20	1.0785	0	0
	40	1.0774	- 0.110	- 14.7
	60	1.0753	- 0.318	- 42.3
	80	1.0725	- 0.598	- 79.8
20 × 21 difference between clean and 18 rod core	20	-	0	0
	40	-	- 0.056	- 7.4
	60	-	- 0.105	- 14.0
	80	-	- 0.150	- 19.9

Table 10 Temperature coefficient of reactivity of regular core with one rod of sample D

Code	Sample	Temp(C)	k_{eff}	$\Delta \rho (\%)$	$\Delta \rho (C)$
ADC	A (Clean)	20	1.0858	0	0.0
		40	1.0847	- 0.107	- 14.2
		60	1.0827	- 0.307	- 40.9
		80	1.0800	- 0.576	- 76.8
	D	20	1.0774	0	0.0
		40	1.0764	- 0.109	- 14.5
		60	1.0743	- 0.311	- 41.4
		80	1.0716	- 0.581	- 77.4
FOG	A (Clean)	20	1.0067	0	0.0
		40	1.0054	- 0.214	- 16.5
		60	1.0031	- 0.358	- 47.7
		80	0.9999	- 0.673	- 89.7
	B	20	1.0026	0	0.0
		40	1.0014	- 0.119	- 15.9
		60	0.9991	- 0.347	- 46.2
		80	0.9961	- 0.655	- 87.3
	D	20	0.9958	0	0.0
		40	0.9945	- 0.128	- 17.0
		60	0.9921	- 0.363	- 48.4
		80	0.9890	- 0.678	- 90.4

FOGで計算された円環炉心内の反応度効果は、測定値より15%前後小さな値となっている。

THERMOS (ST-2) の核定数を用いて正方格子炉心内に試験燃料が1~3本挿入された場合の反応度効果を計算した結果では、計算値が測定値よりも5~10%大きな値となっている。試験燃料が18本挿入された場合の反応度効果と計算値と測定値との差が他の場合と異なった傾向を示しているが、この原因は拡散計算の際のメッシュ点の取りかたが粗かったためであろうと考えられる。18本挿入した炉心は非対称形状なので反射体も含めた全炉心について2次元拡散計算を行なったため、メッシュ点を細く切れなかったものである。

J P D R 模擬炉心での計算値と測定値の一致も他のケースとほぼ同様である。

結局、円環炉心での測定値を除いて、他のすべてのケースについて、反応度効果の計算値 $\Delta \rho_m$ に対して、 $\Delta \rho_c / \Delta \rho_m = 1.04 \pm 0.05$ であった。これは、計算値が系統的に負反応度効果をやや大きく見積っていることを示している。

3.2.2 出力分布

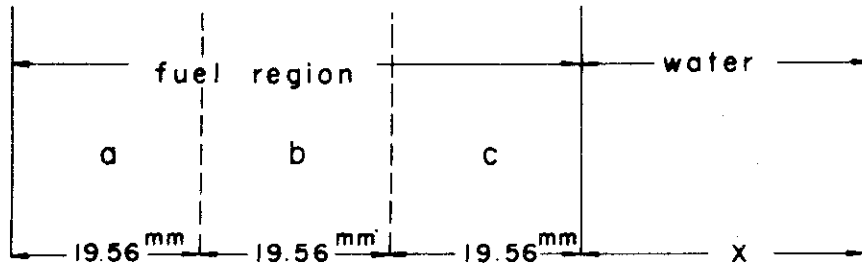
出力分布は反応度効果を求める拡散計算から同時に得られる。炉心周辺部にある燃料棒については周囲の水の効果により中心部の燃料棒と実効断面積が異なり出力が大きくなる。したがって周辺部燃料棒に対しては以下に述べるような取り扱いがなされている。

まず THERMOS-SLAB により Fig.46 に示されるような燃料と水の2領域でスペクトル計算が行なわれた。反射体の水の厚さは J P D R 模擬炉心のギャップ水に対しては水の中の子平均自由行程約 4 mm よりも十分に大きい 35 mm 厚とした。この理由は平均自由行程の6倍以上とれば、それ以上厚くしても燃料棒の実効断面積にほとんど影響がないからである。また燃料領域は、燃料ペレット、被覆材、減速材を混合した組成でその厚さは格子状に並んだ燃料棒セル3層分である。反射体から十分離れた(中性子平均自由行程の6倍以上)燃料領域内では反射体の水の効果は無視し得るほど小さい。燃料領域内の平均自由行程は約 6 mm であるから、Fig.46において反射体から 39 mm 離れたセル a は中心部燃料棒の実効断面積を、c は周辺部燃料棒の実効断面積を有するとみることができる。

上の計算によって得られた a と c の実効断面積の差から周辺部燃料棒の核定数に対する補正係数が求まる。拡散計算を行なう場合の周辺部燃料棒に対しては、ST-2 で得られた中心部燃料棒核定数に上の計算で求めた補正係数を掛けたものが核定数として使われた。補正係数は Table 8 に示されている。

なお、上記の補正が全炉心の反応度に与える変化は $0.1\% \Delta k/k$ 以下、試験燃料棒の反応度効果に与える影響は無視し得るほど小さいものであった。

出力分布の計算結果は測定値とともに数値が Fig.15 ~ Fig.29 に示されており、Fig.47 ~ Fig.61 にその対角線方向の出力分布が示されている。計算値と測定値との差は 5% 以下である。



X = 6.42 mm for narrow gap of JPDR mock-up core
 X = 12.82 mm for wide gap of JPDR mock-up core
 X = 35.0 mm for core periphery

Fig. 46 Geometry of THERMOS-SLAB for calculation of cross-sectional variation due to water thickness

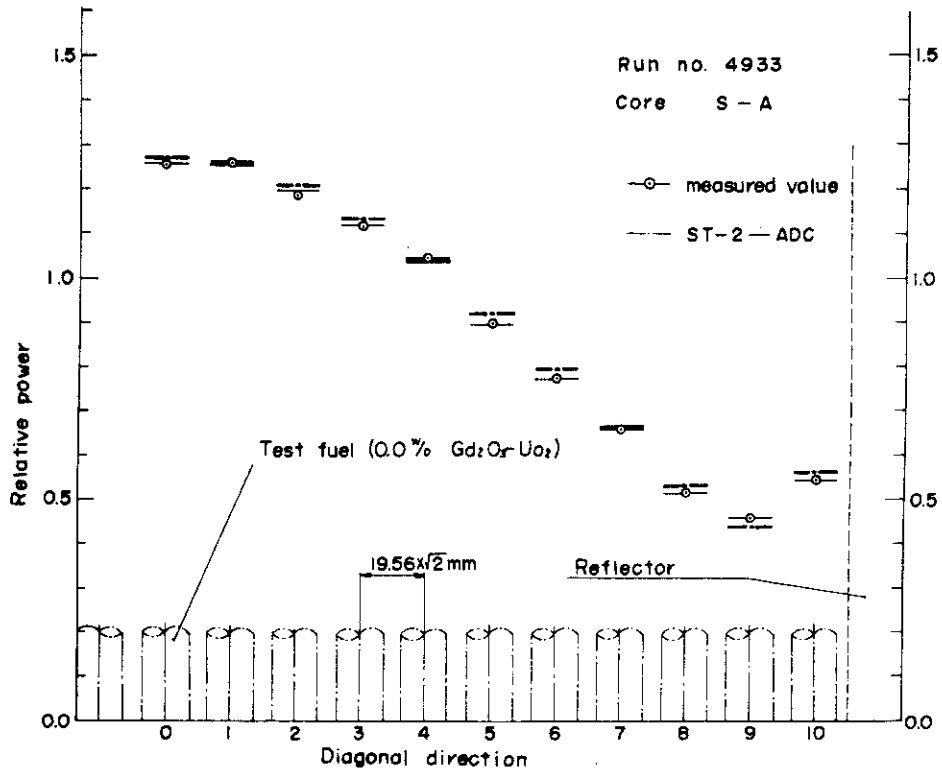


Fig. 47 Comparison of calculated and measured power distribution in 21×21 regular lattice (Run #4933)

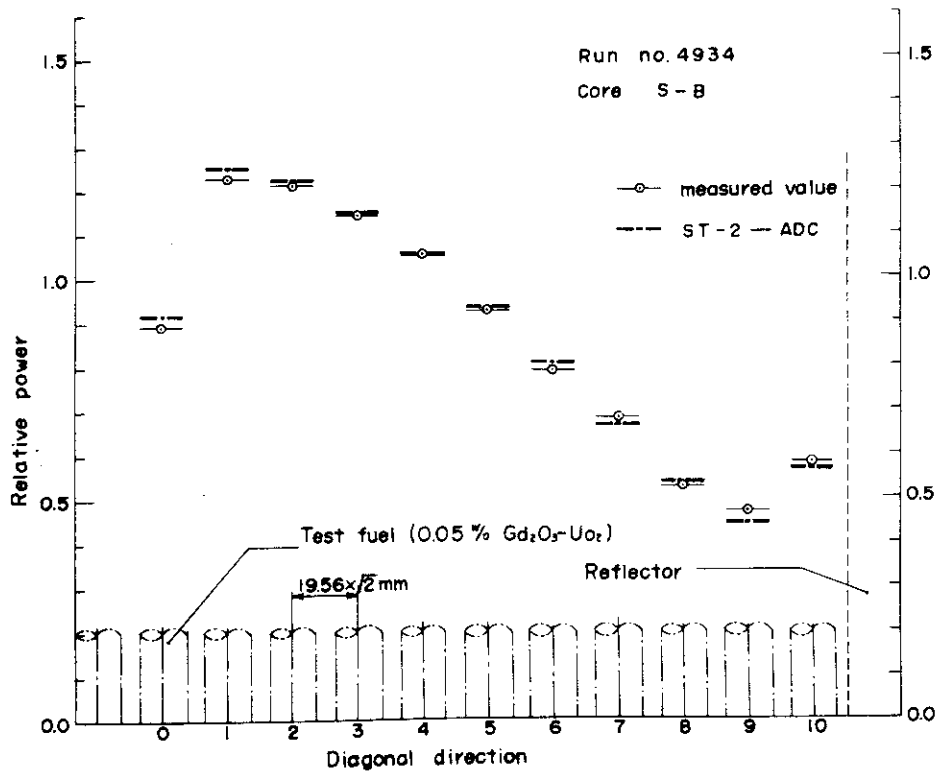


Fig. 48 Comparison of calculated and measured power distribution in 21×21 regular lattice (Run #4934)

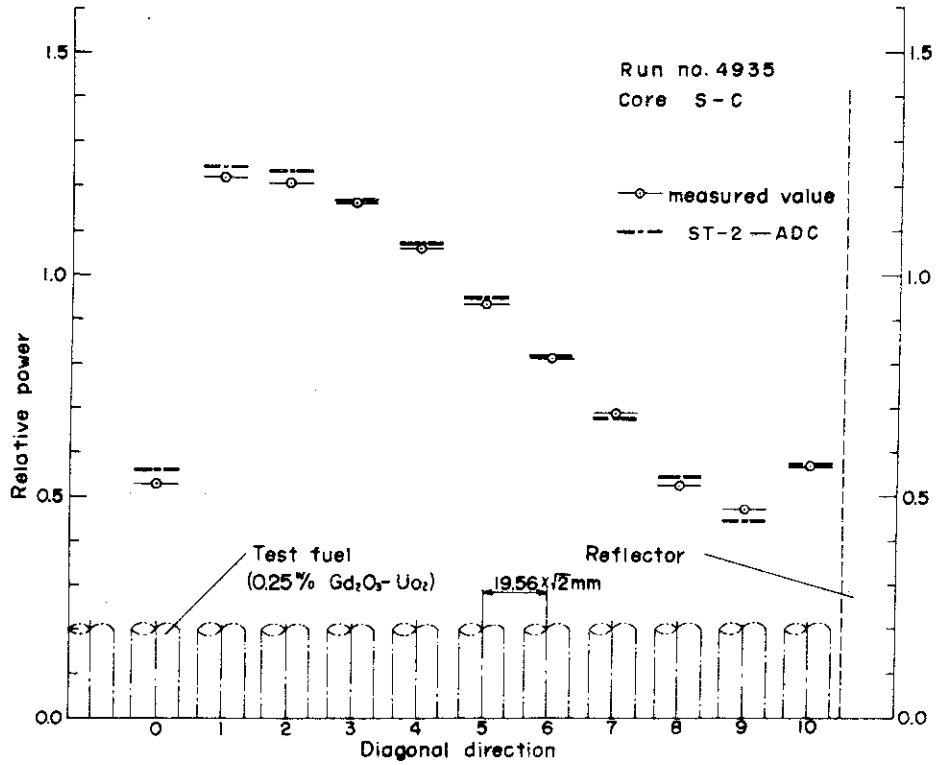


Fig. 49 Comparison of calculated and measured power distribution in 21 x 21 regular lattice (Run #4935)

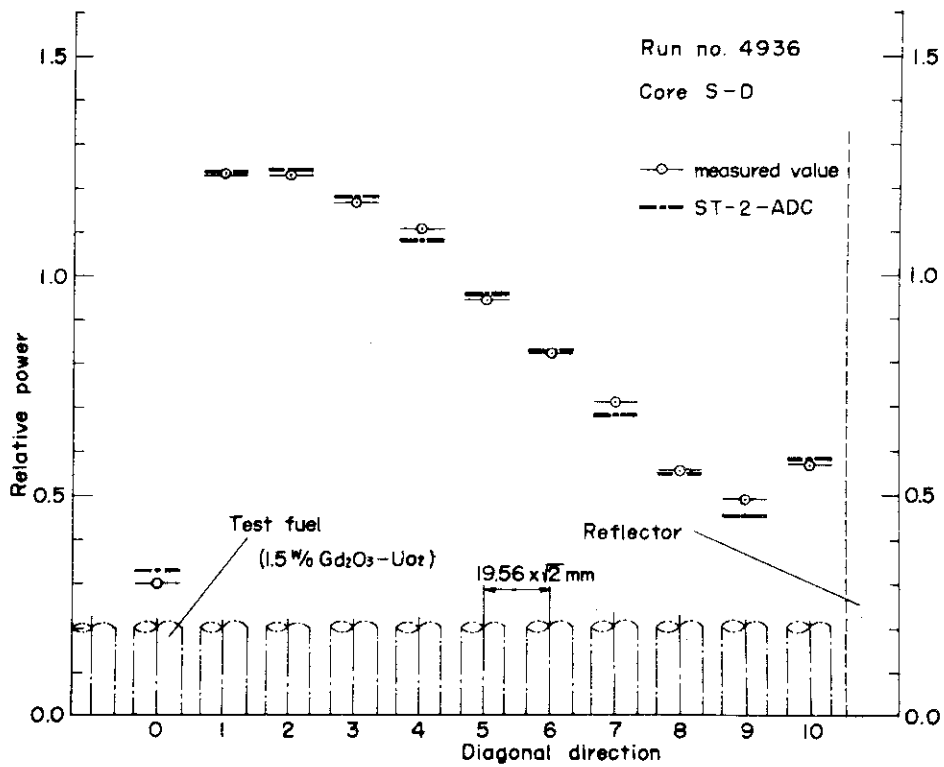


Fig. 50. Comparison of calculated and measured power distribution in 21 x 21 regular lattice (Run #4936)

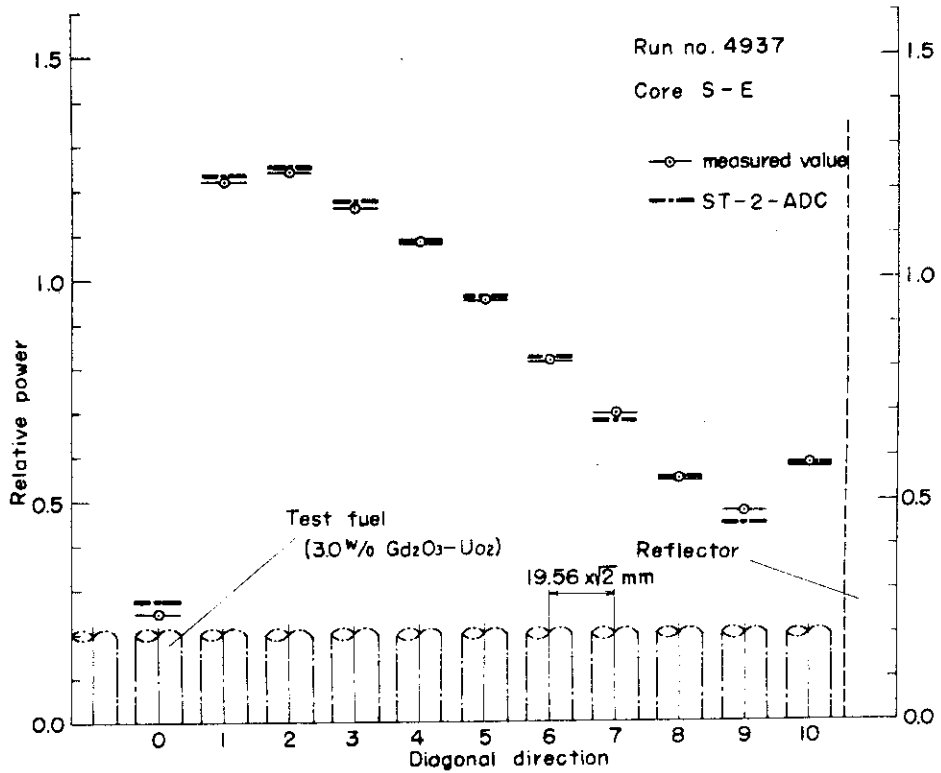


Fig. 51 Comparison of calculated and measured power distribution in 21 x 21 regular lattice (Run #4937)

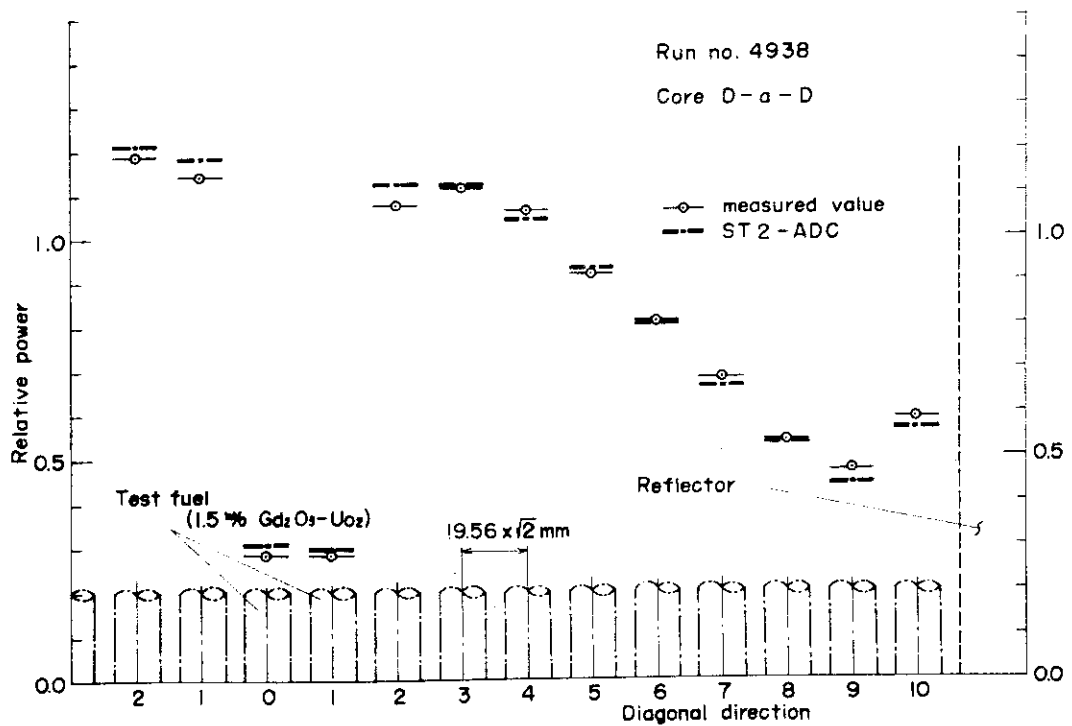


Fig. 52 Comparison of calculated and measured power distribution in 21 x 21 regular lattice (Run #4938)

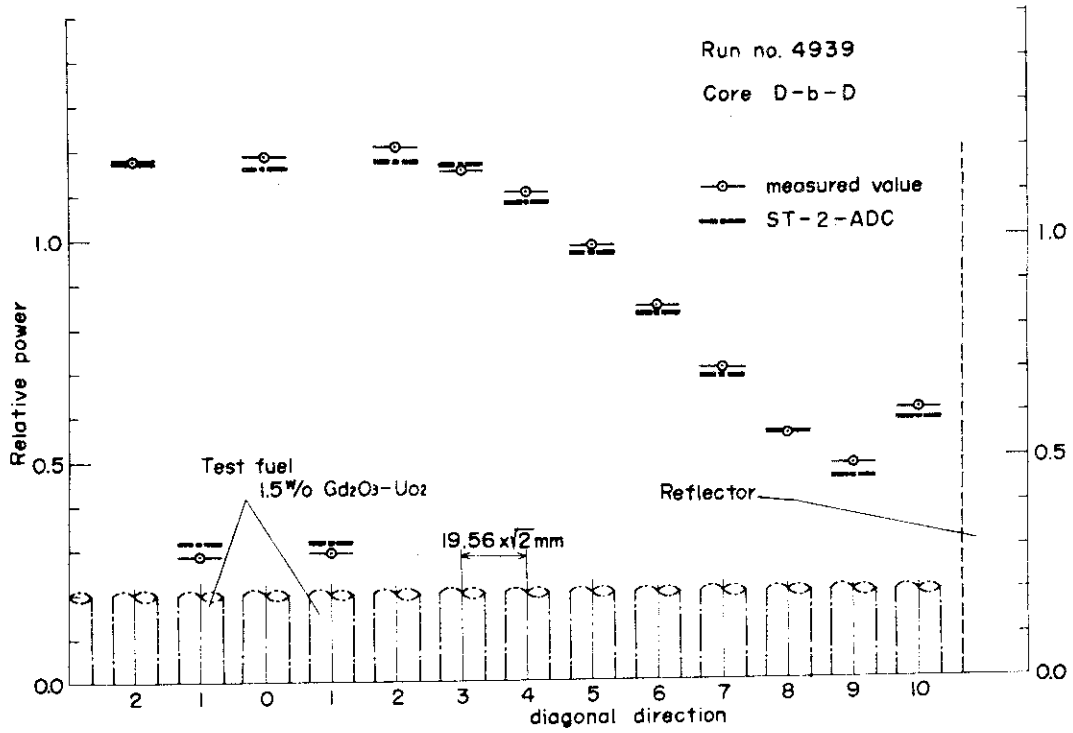


Fig. 53 Comparison of calculated and measured power distribution in 21 x 21 regular lattice (Run #4939)

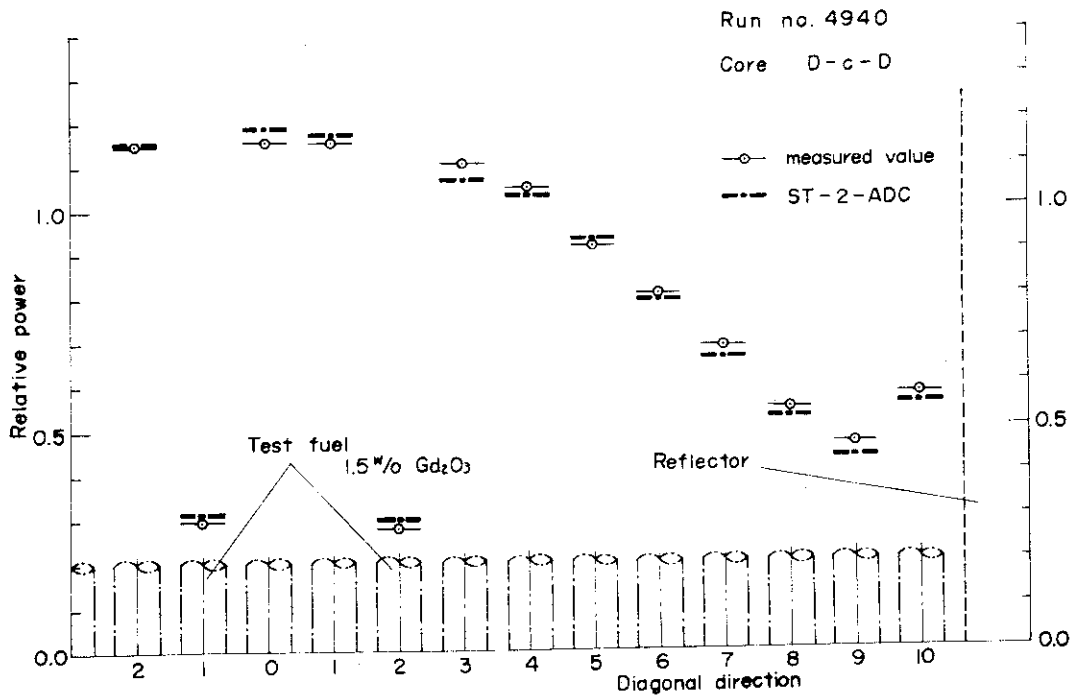


Fig. 54 Comparison of calculated and measured power distribution in 21 x 21 regular lattice (Run #4940)

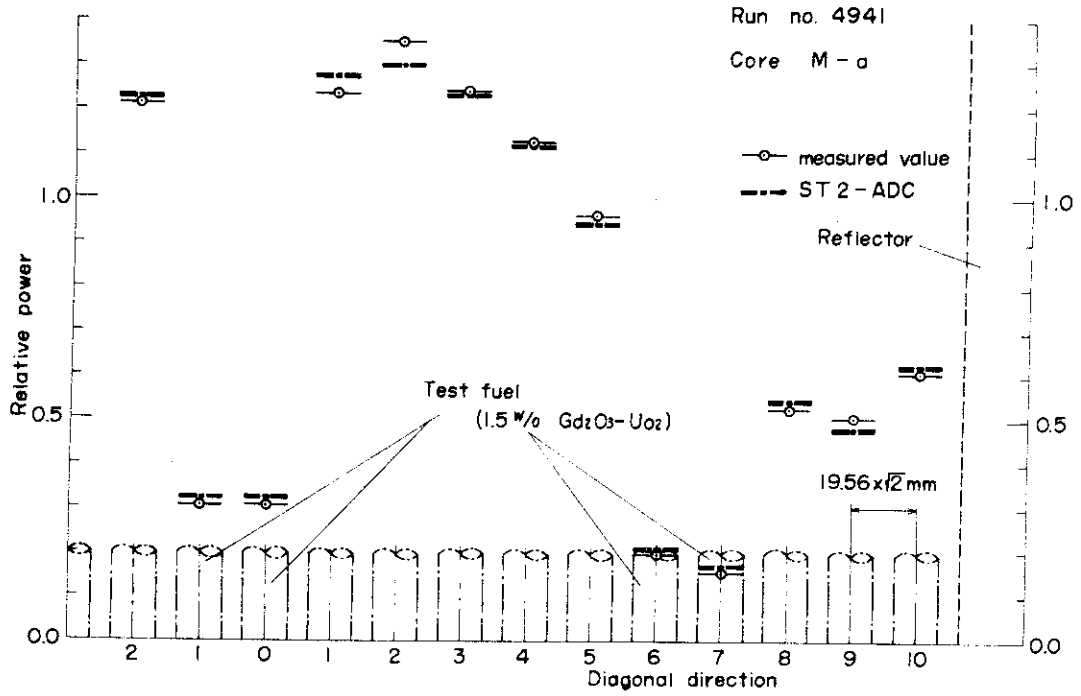


Fig. 55 Comparison of calculated and measured power distribution in 21 x 21 regular lattice (Run #4941)

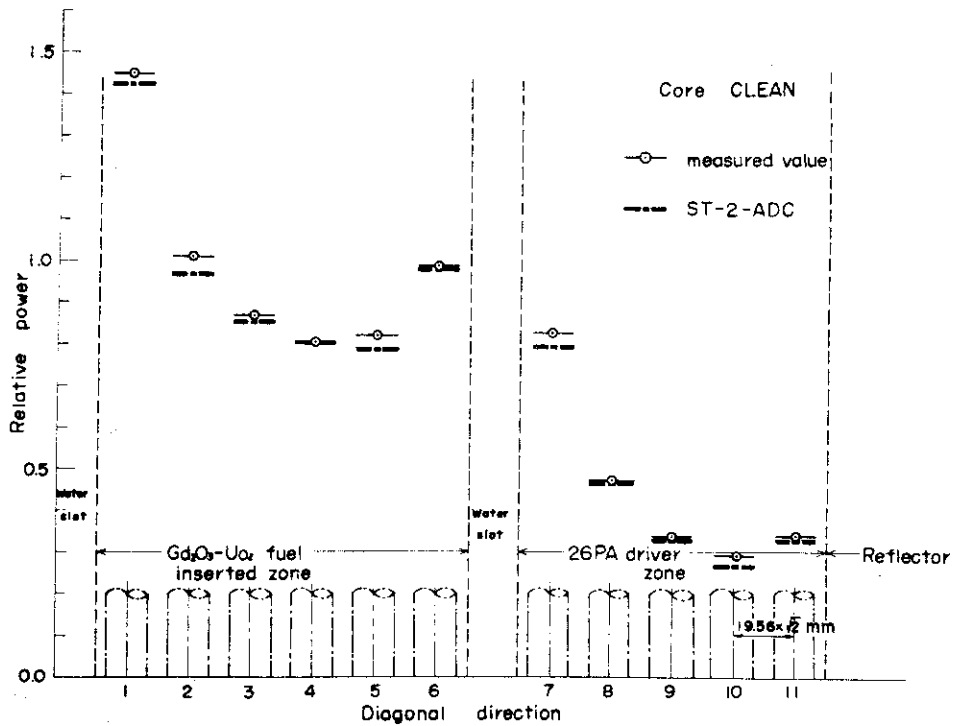


Fig. 56 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4894)

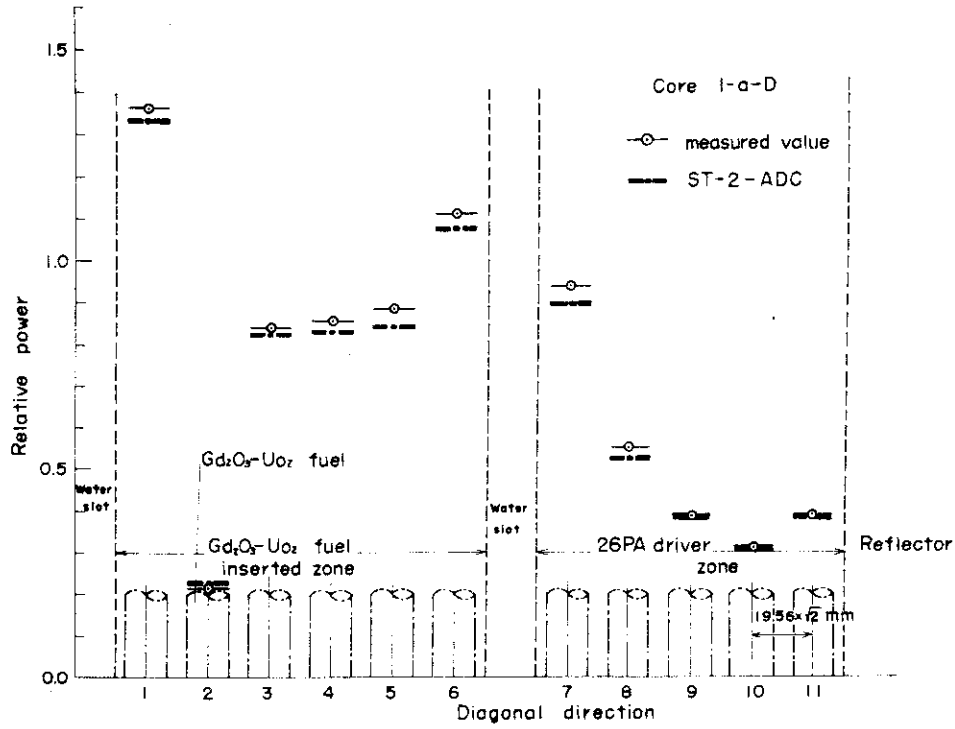


Fig. 57 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4888)

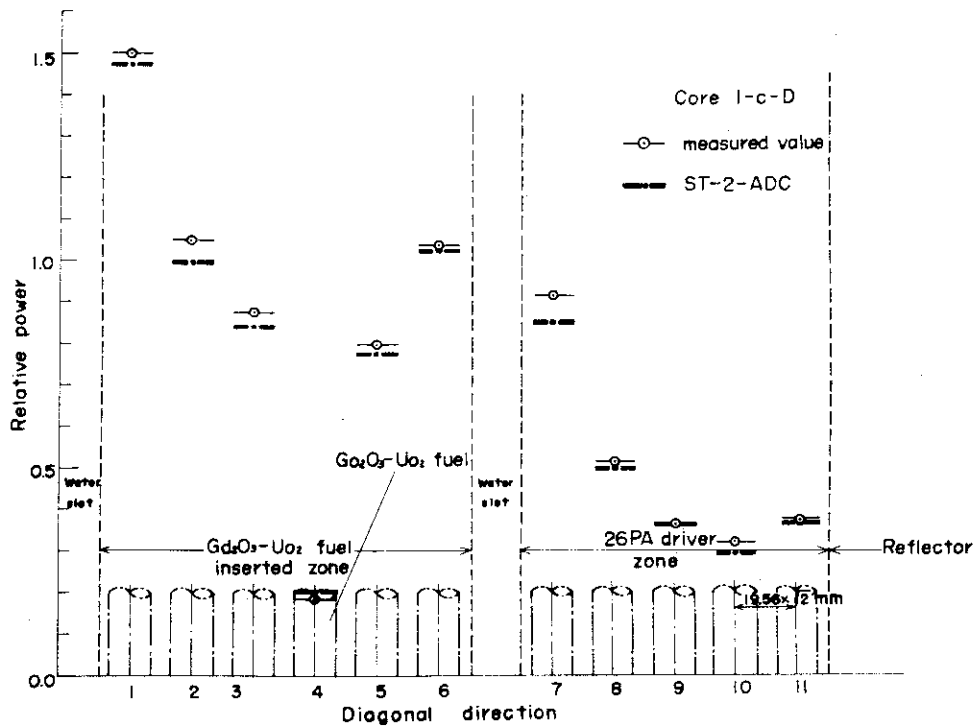


Fig. 58 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4889)

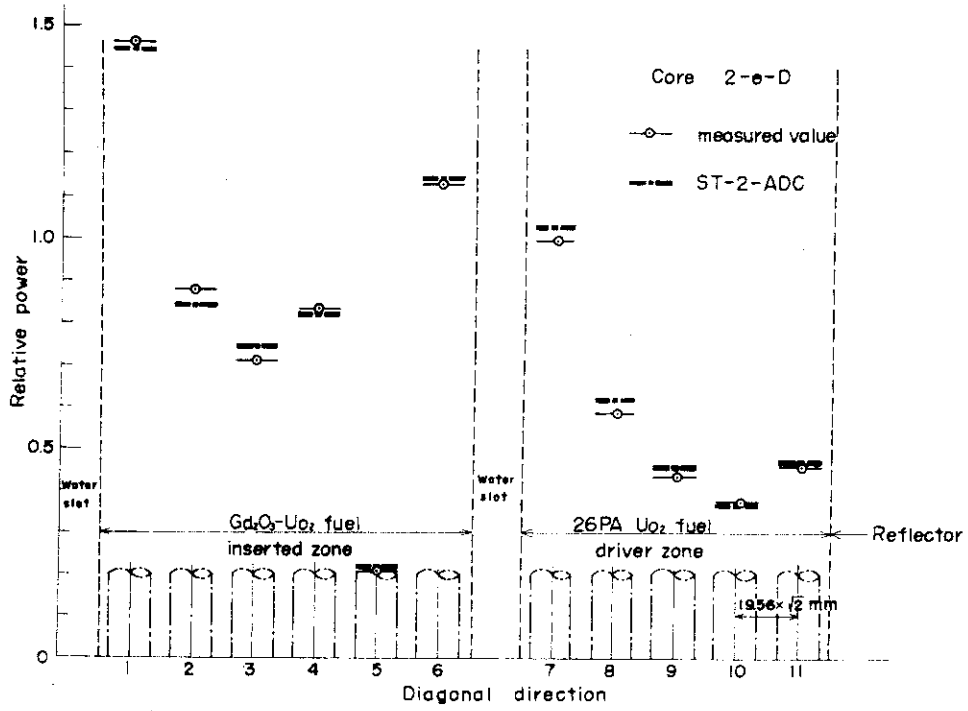


Fig. 59 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4891)

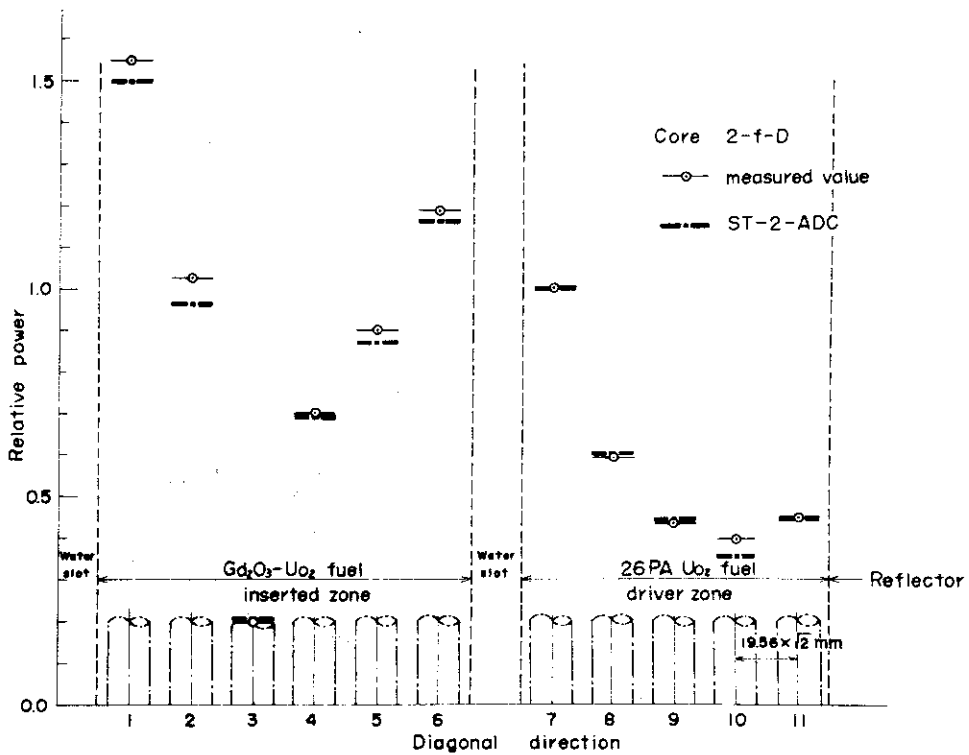


Fig. 60 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4892)

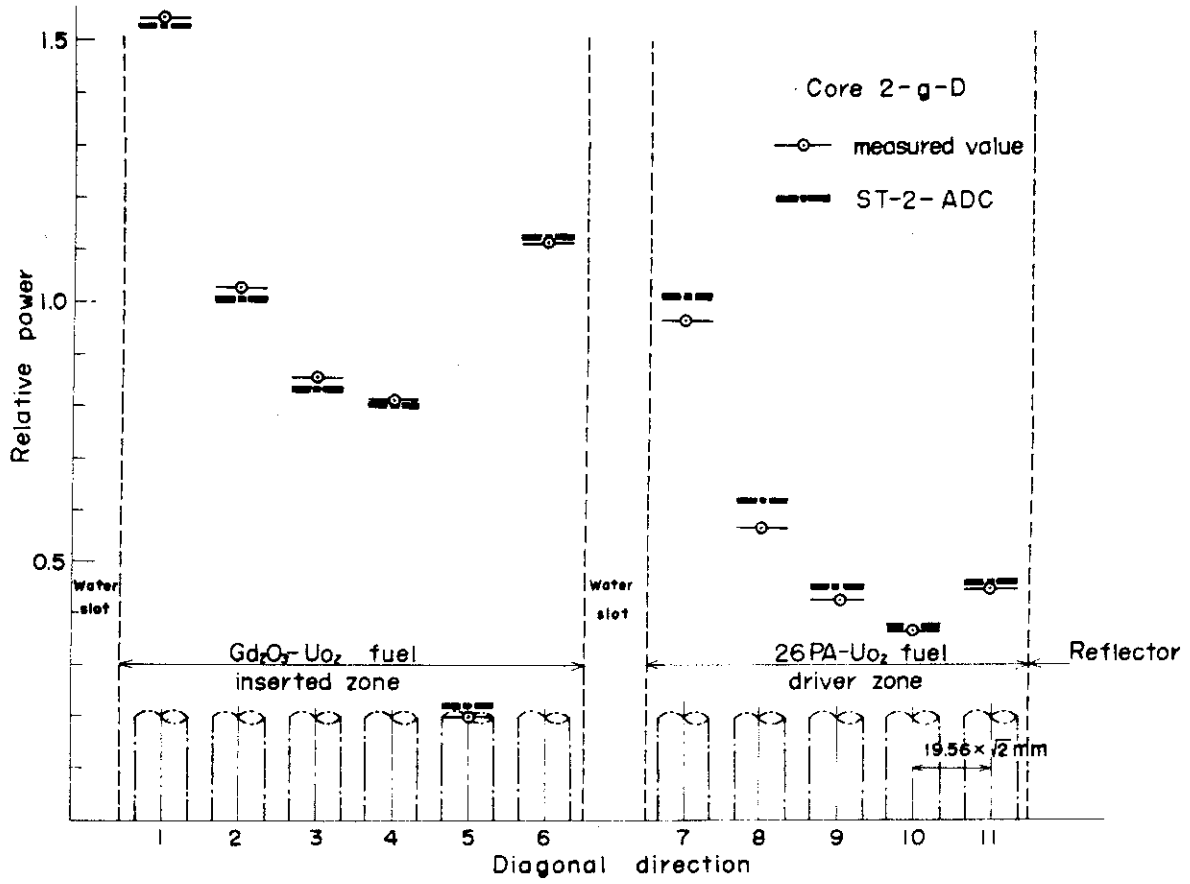


Fig. 61 Comparison of calculated and measured power distribution in JPDR mock-up core (Run #4893)

3.2.3 放射化率分布

放射化率分布はST-2の中のTHERMOSの中性子束分布から計算された。またWDSNコードにより同様の計算が行なわれ、比較された。WDSNではSN次数は6として計算された。ワイヤ検出器 ^{164}Dy および ^{198}Au の捕獲断面積 σ_c はENDF/Bのデータが採用された。Fig.30に ^{164}Dy と ^{198}Au の捕獲断面積が示されている。

ディスプレイウムワイヤの放射化率分布の計算結果は測定値と比較してFig.62～Fig.71に示されている。また金ワイヤの放射化率分布の計算結果が測定値と比較してFig.72～Fig.76に示されている。ここで金ワイヤの測定値としては、裸の金の測定値とカドミウム遮蔽された金の測定値の差が用いられている。なお、測定値も計算値もともに、境界の値が1.0となるように規格化された。

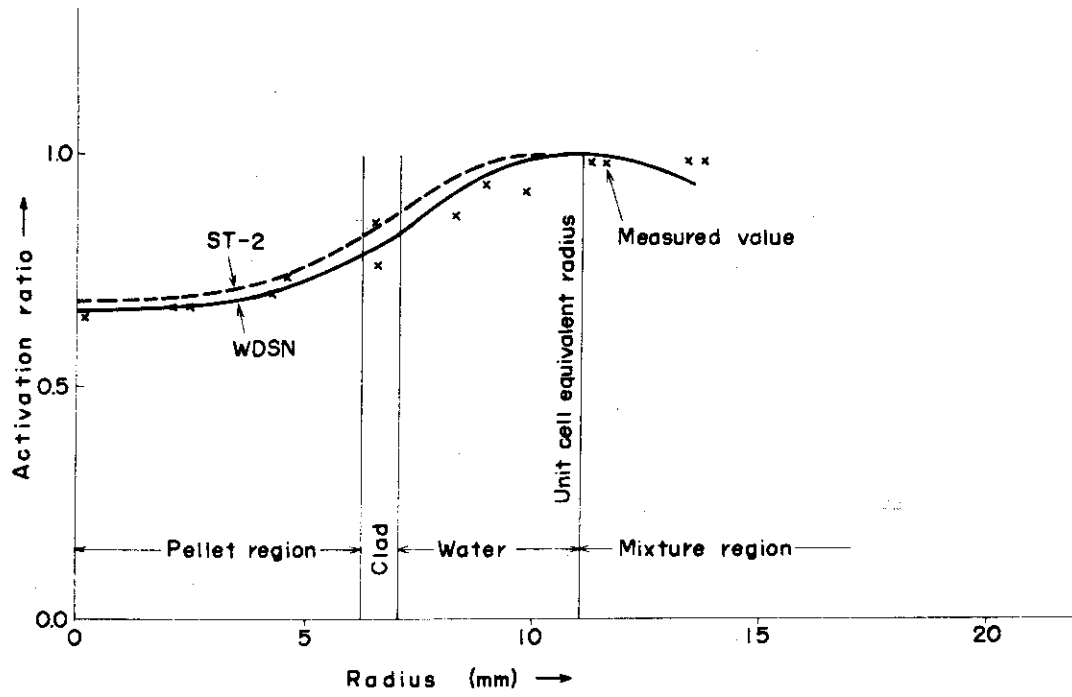


Fig. 62 Activation traverse of Dy wire ; Sample A in regular lattice

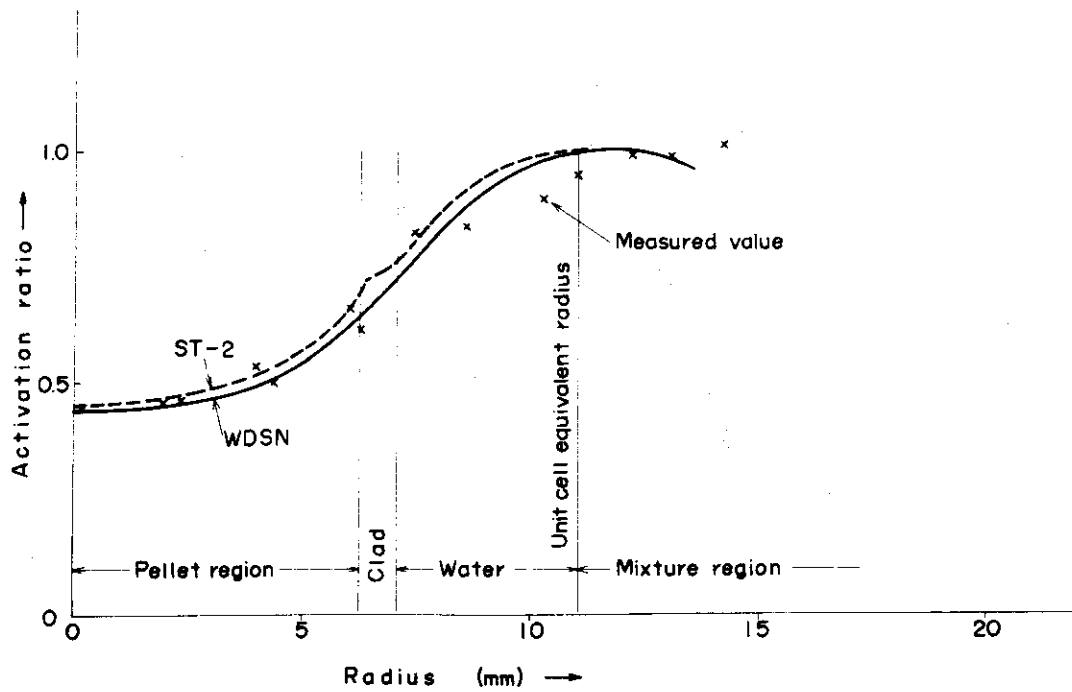


Fig. 63 Activation traverse of Dy wire ; Sample B in regular lattice

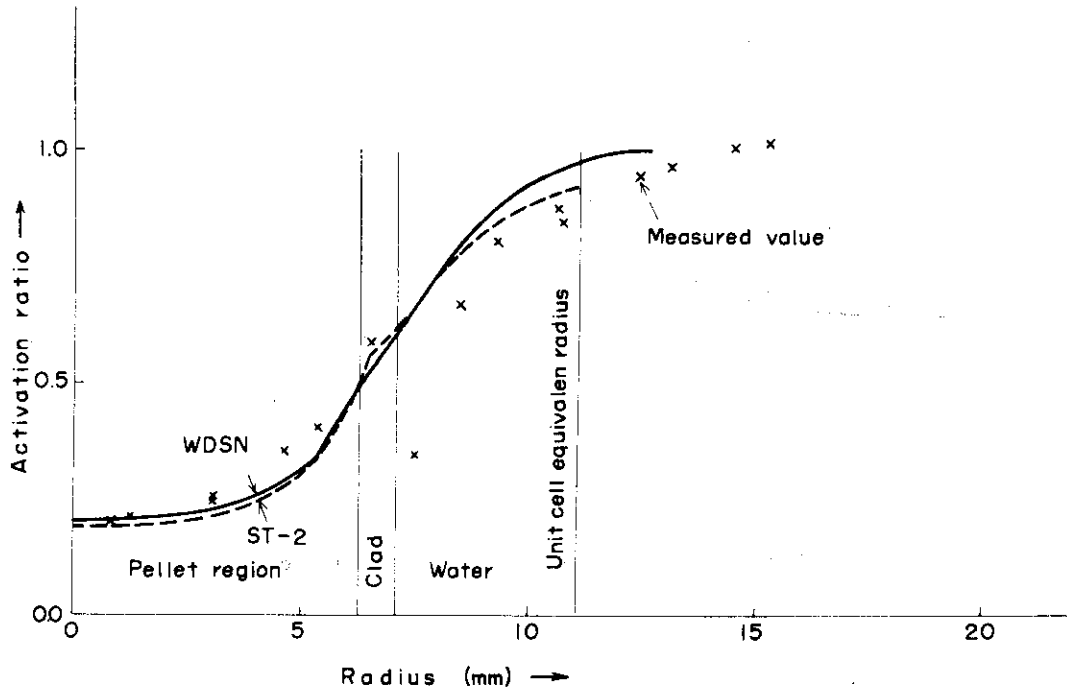


Fig. 64 Activation traverse of Dy wire ; Sample C in regular lattice

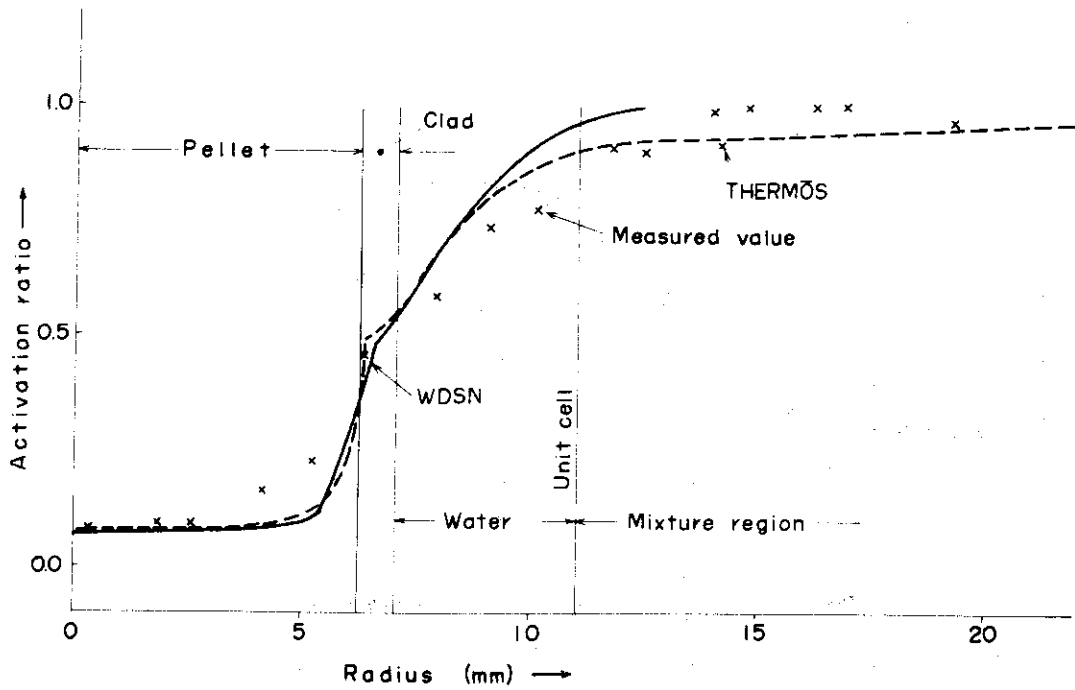


Fig. 65. Activation traverse of Dy wire ; Sample D in regular lattice

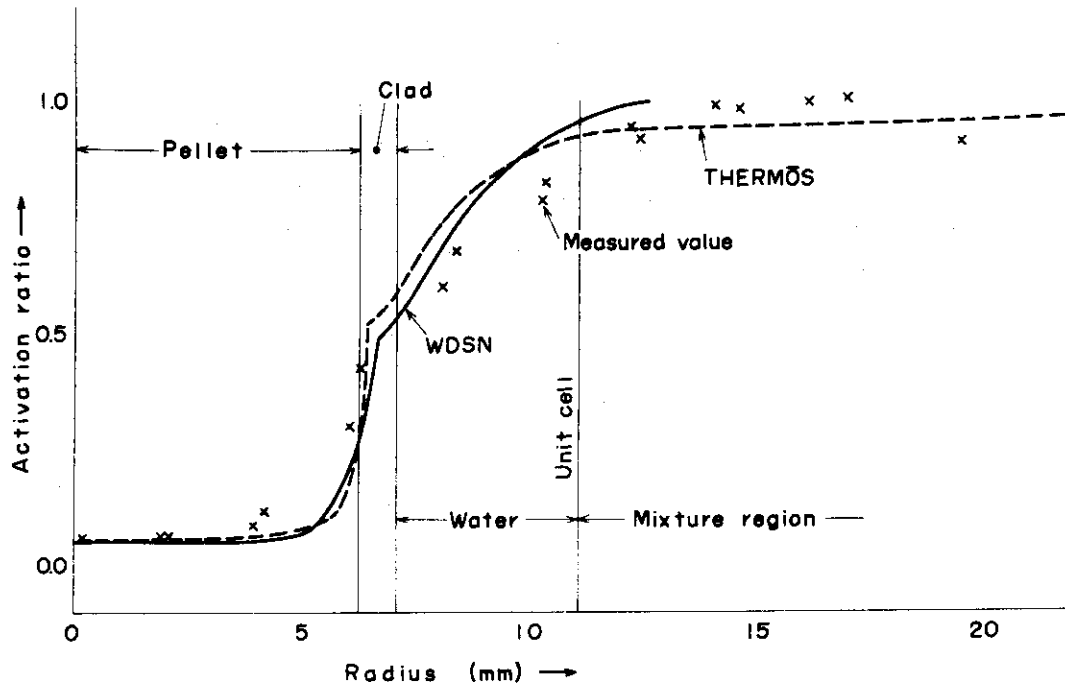


Fig. 66 Activation traverse of Dy wire ; Sample E in regular lattice

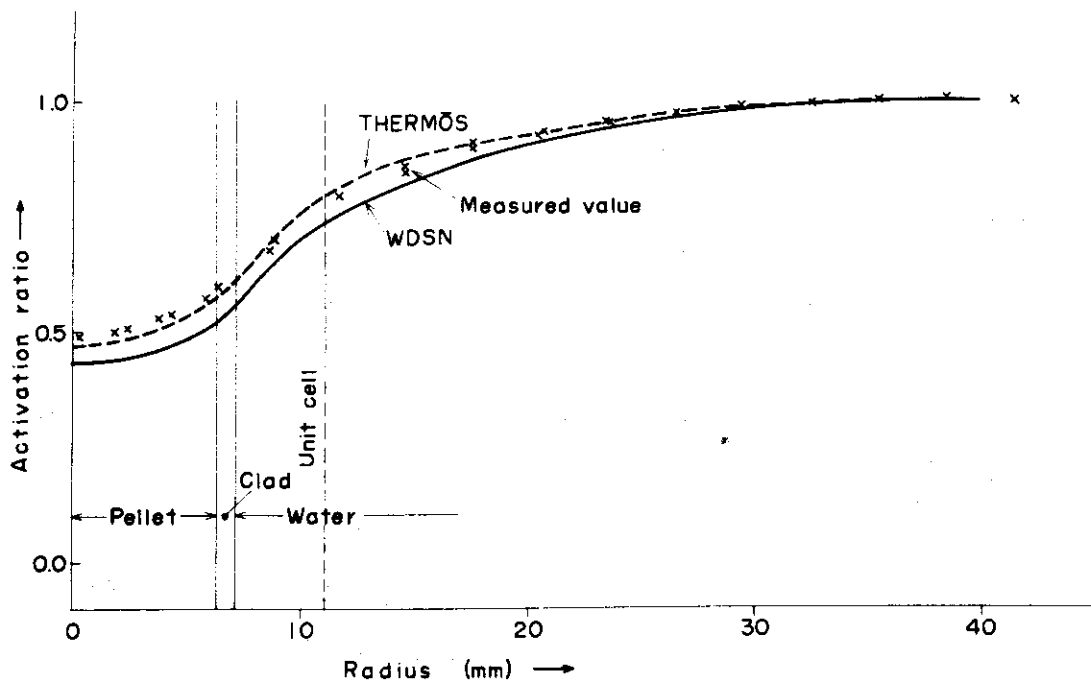


Fig. 67 Activation traverse of Dy wire ; Sample A in annular core

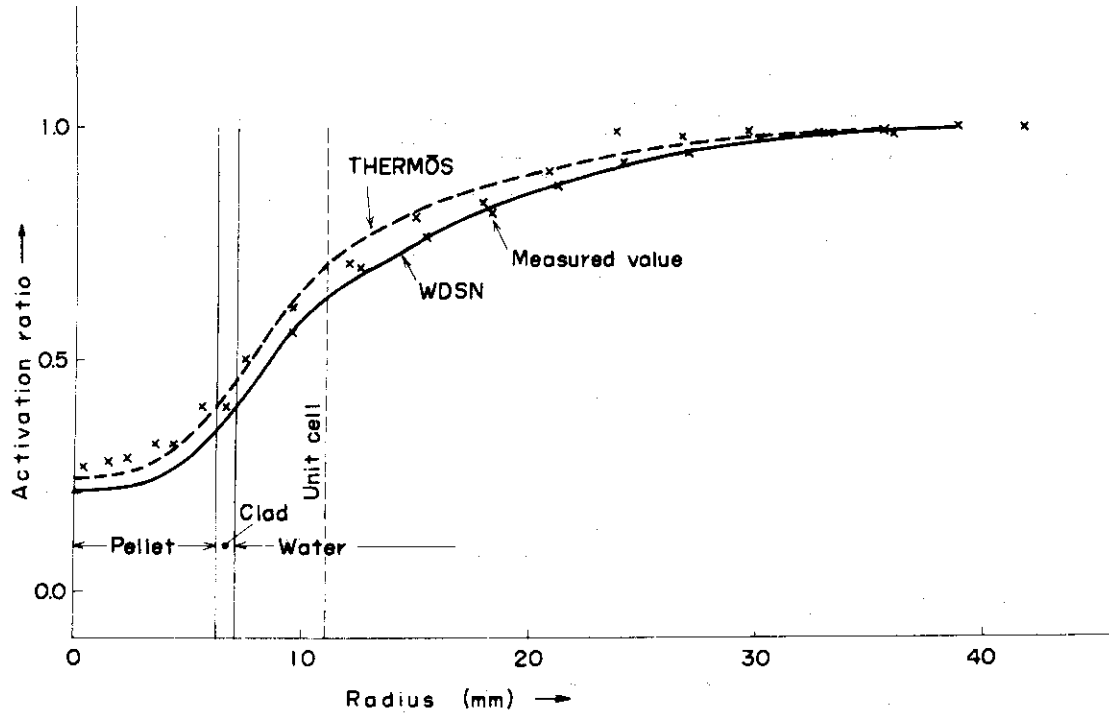


Fig. 68 Activation traverse of Dy wire ; Sample B in annular core

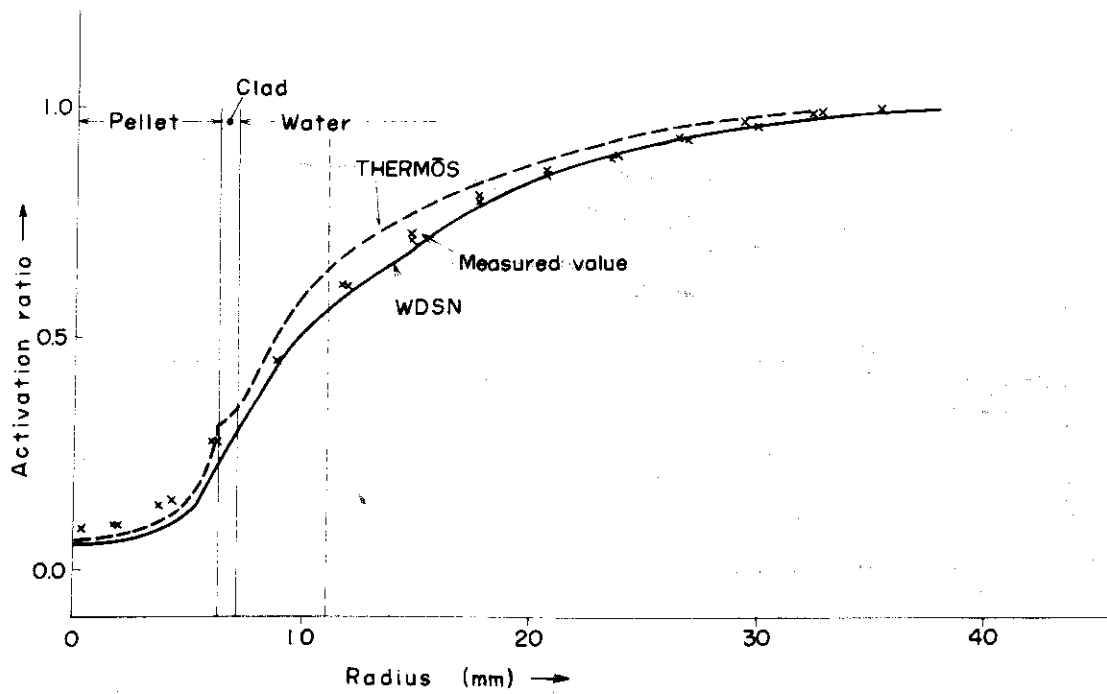


Fig. 69 Activation traverse of Dy wire ; Sample C in annular core

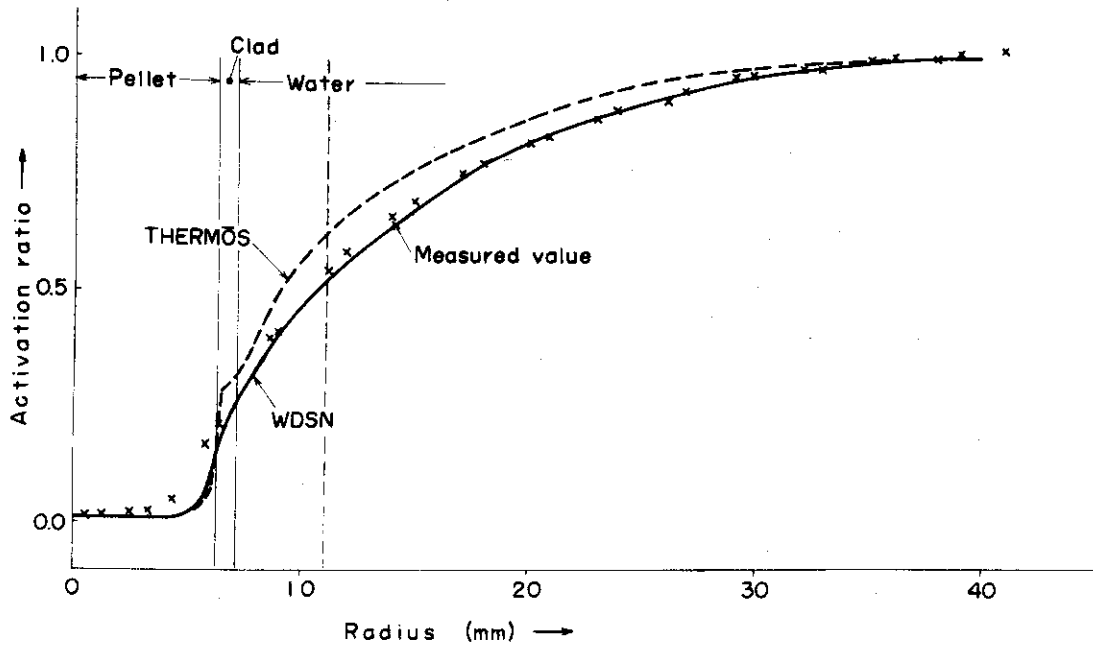


Fig. 70 Activation traverse of Dy wire ; Sample D in annular core

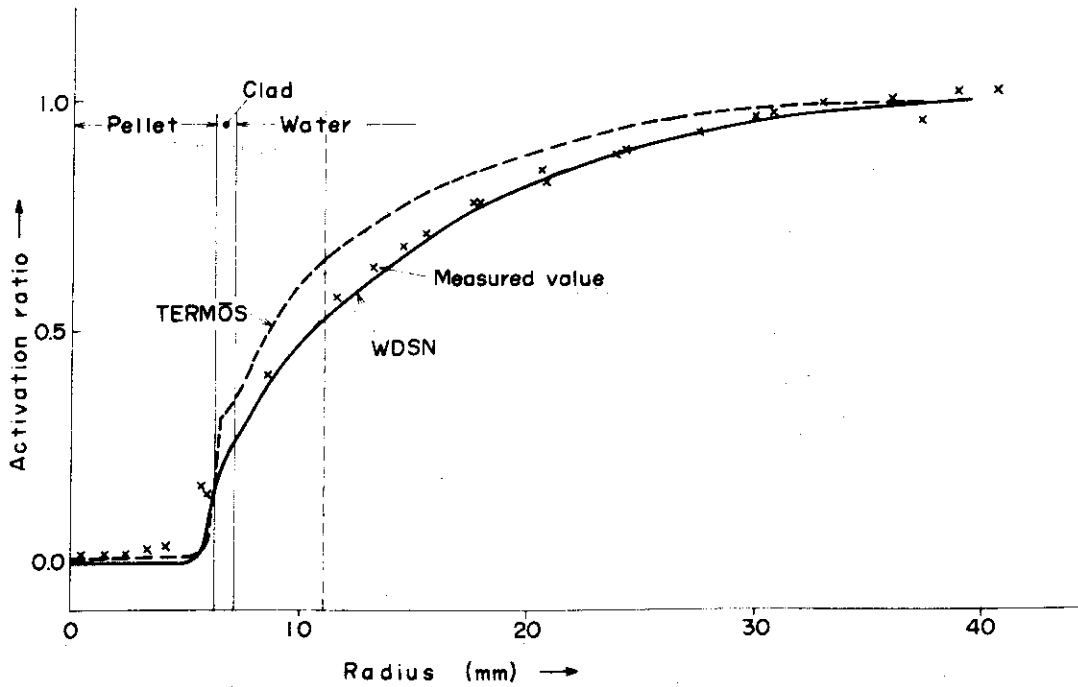


Fig. 71 Activation traverse of Dy wire ; Sample E in annular core

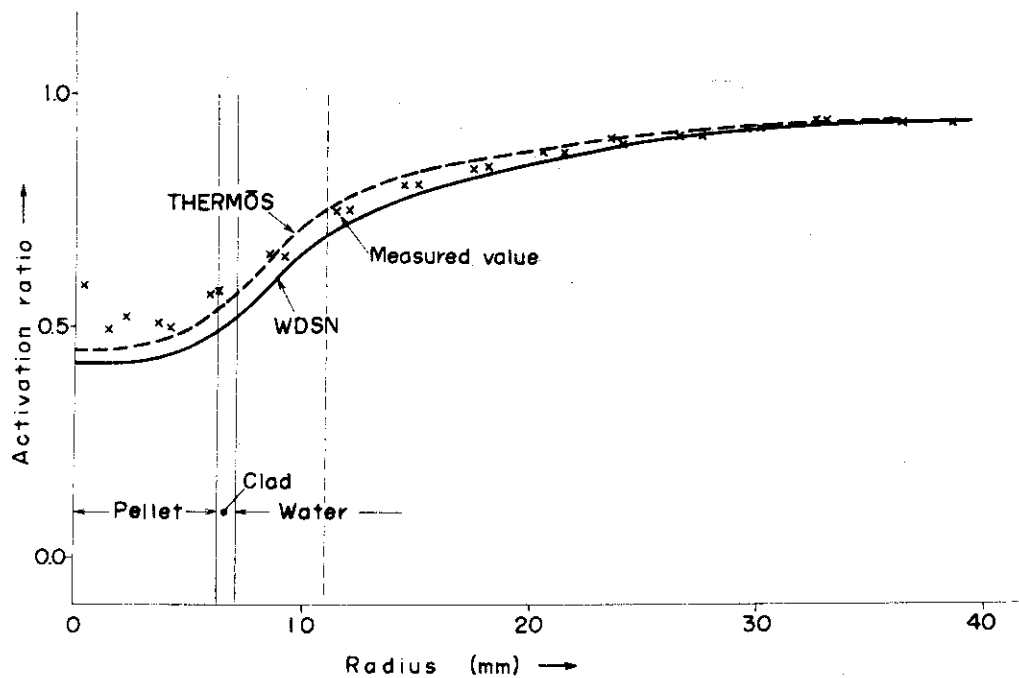


Fig. 72 Activation traverse of Au wire ; Sample A in annular core

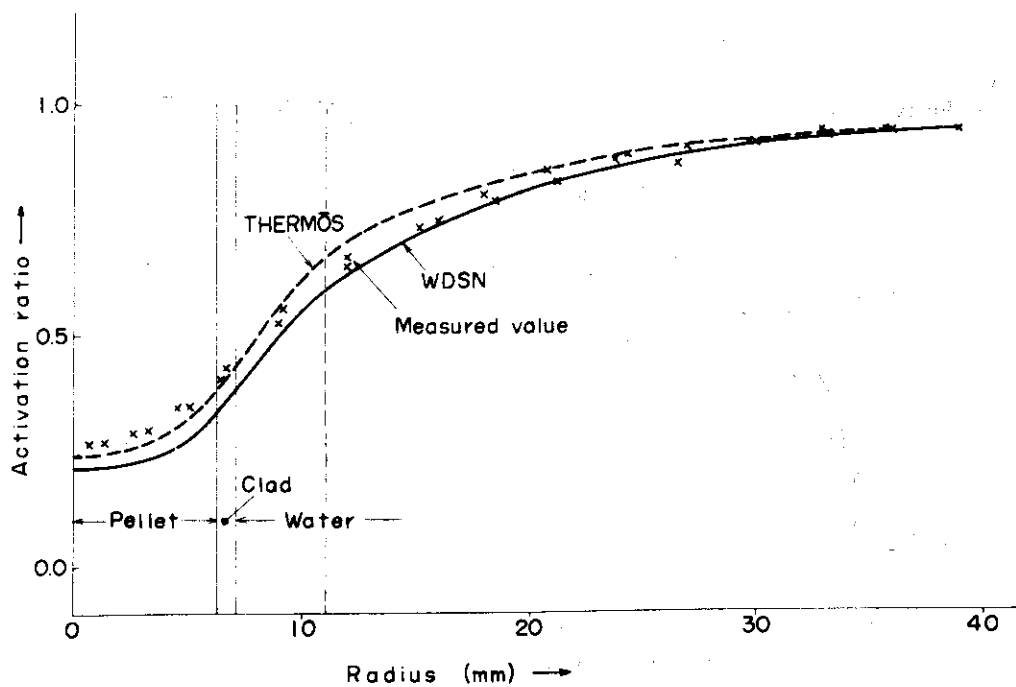


Fig. 73 Activation traverse of Au wire ; Sample B in annular core

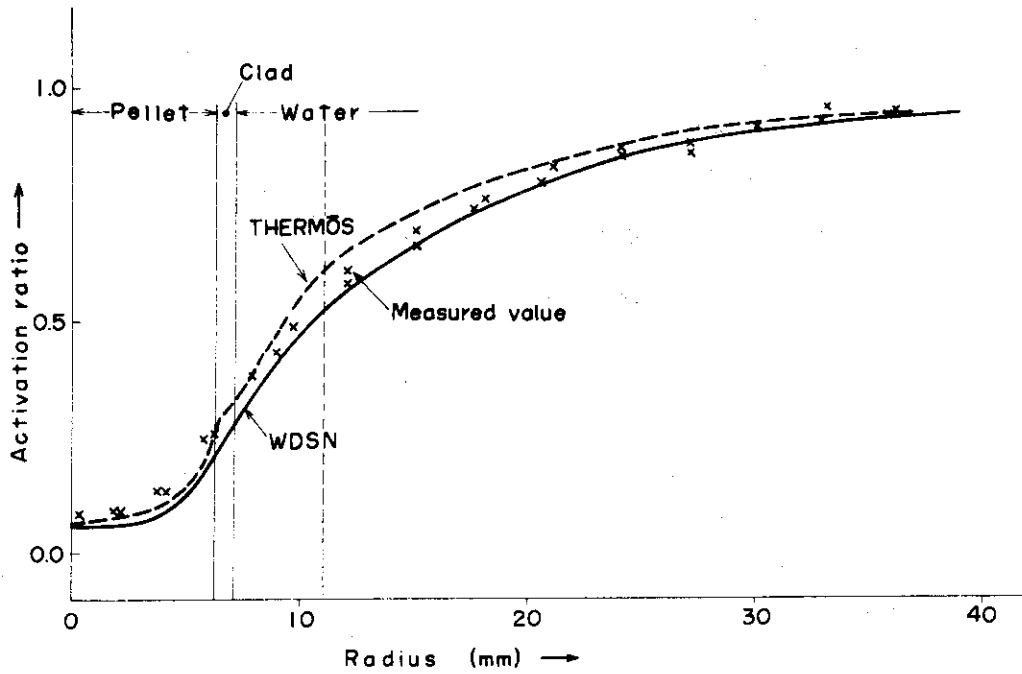


Fig. 74 Activation traverse of Au wire ; Sample C in annular core

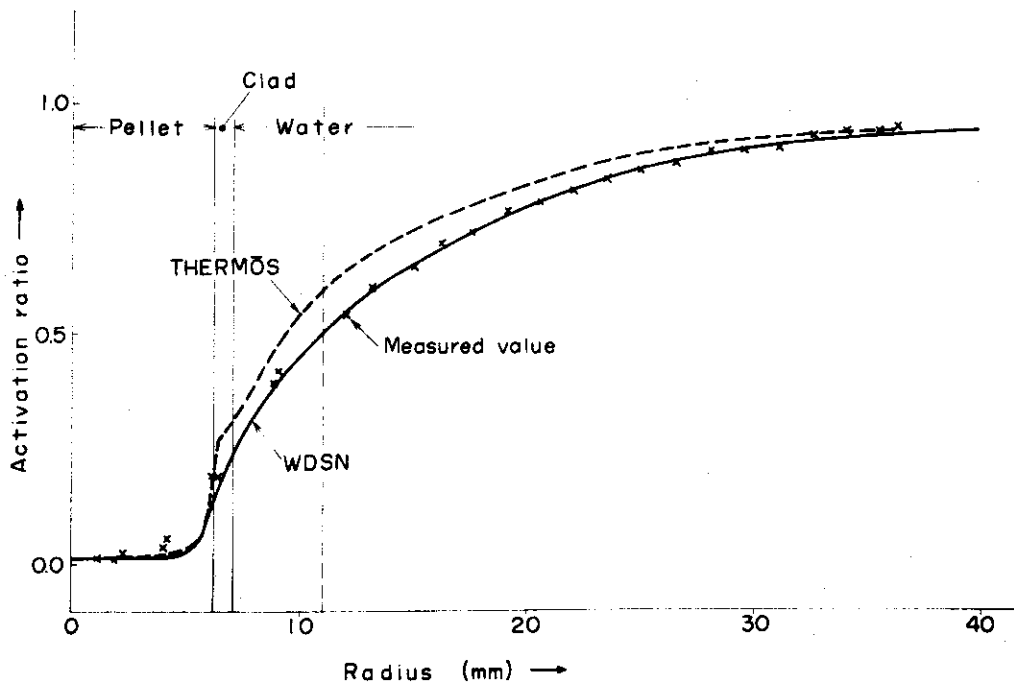


Fig. 75 Activation traverse of Au wire ; Sample D in annular core

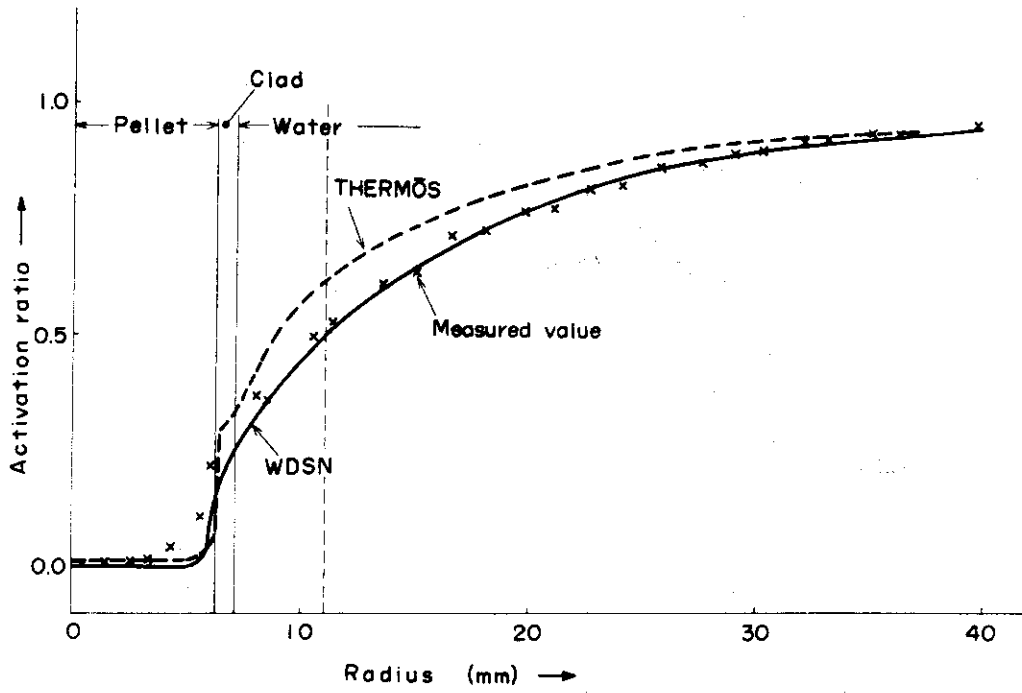


Fig. 76 Activation traverse of Au wire ; Sample E in annular core

3.2.4 反応度温度係数

(1) M-a 炉心の反応度温度係数

20行20列の正方格子炉心にD型の試験燃料18本を入れた実験 (Fig. 37) は追加燃料本数が1~12本の範囲で行なわれた。この実験の解析は、下記の3種の炉心について行なわれた。

- ① D型燃料18本入り20行20列炉心
- ② D型燃料18本入り20行21列炉心
- ③ 基準炉心20行21列炉心

使用したコードは2次元拡散コードADC-3で、縦方向バックリングは水位157cmに対応した値

$$B_z^2 = 4.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$$

が用いられた。計算結果が測定値と比較してTable 9およびFig.38に示されている。

20行20列炉心と20行21列炉心で反応度温度係数の差は無視できる程度である。

なお反応度差 Δk はドル単位の測定値と比較するために(3.2)式によって換算された。

(2) 正方格子炉心(S型)の反応度変化

正方格子炉心(S-A, S-B, S-D)の反応度温度変化を求める実験は、17行16列の炉心に6~24本の燃料棒を追加して測定された。この実験に対する計算体系は燃料棒本数が実験範囲の中央に当る17行17列炉心で行なわれた。この実験に対する解析はADC-3による2次元拡散計算の他に、比較のために炉心を等価円に置きかえFOGによる1次元拡散計算も行なわれた。縦方向バックリングは $B_z^2 = 4.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ が用いられた。

計算結果をTable 10およびFig.77に示す。ガドリニアの濃度に対する反応度温度変化の差は測定値と比較すると非常に小さい。反応度変化が試験燃料D, A, Bの順で小さくなっている点は実験値と一致している。

(3) 円環炉心の反応度温度効果

円環炉心 (Fig. 3) の反応度温度変化を求める実験はドライバー燃料棒本数420~440の範囲で、実験水位は1600mm (C. W. L) で行なわれた。これに応じて解析はドライバー燃料440本、縦方向バックリング $4.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ の体系で行なわれた。計算コードはFOGが用いられた。

計算結果がTable 11およびFig.78に示されている。

Table 11 Temperature coefficient of reactivity
of annular core

Sample	Temp(C)	k_{eff}	$\Delta \rho (\%)$	$\Delta \rho (C)$
A ($Gd_2O_3 = 0.0$ w/o)	20	0.9951	0	0
	40	0.9961	0.055	7.4
	60	0.9959	0.034	4.6
	80	0.9952	-0.038	-5.1
B ($Cd_2O_3 = 0.05$ w/o)	20	0.9921	0	0
	40	0.9925	0.046	6.2
	80	0.9914	-0.071	-9.5
D ($Gd_2O_3 = 1.5$ w/o)	20	0.9883	0	0
	40	0.9885	0.026	3.4
	80	0.9868	-0.144	-19.2

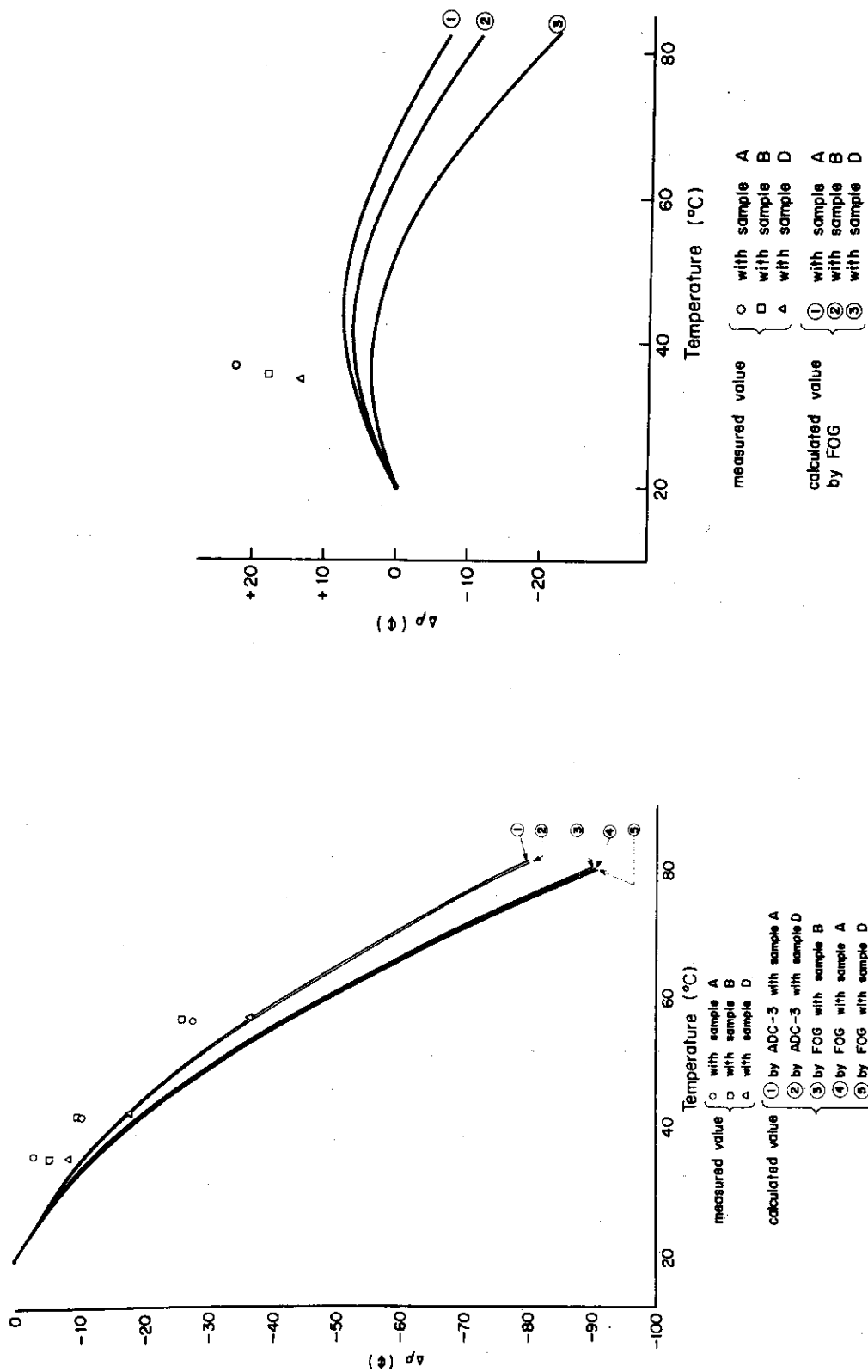


Fig. 77 Temperature dependence of reactivity of square core with one test rod at center

Fig. 78 Temperature dependence of reactivity of annular core with one test rod at the center

4. 考 察

4.1 実験および計算上の問題点

第2章と3章に、実験結果とその解析結果が実験項目ごとに記載された。本章では実験と計算の対比から生じた問題点に対する考察および反応度効果、出力分布、放射化率分布の相互の関連から明らかにされた $Gd_2O_3-UO_2$ 燃料の炉物理特性が述べられる。

4.1.1 計算方法の差について

第3章に述べられているように、臨界量、反応度効果、放射化率分布、出力分布の計算結果において、THERMOSによるものとWDSNによるものとの間でわずかの差が見られる。これらの計算において、高速群の核定数はいずれもUGMG-42の計算を使い、水その他構造材の核定数も同一のものを使用しているため、両者の差はもっぱら燃料棒セルの核定数に原因がある。

輸送方程式を解く際にTHERMOSではスカラーの中性子束を考えているが、WDSNでは中性子の角度成分も含めたベクトル中性子束を考慮している。しかし両方の計算で散乱は等方向性を仮定しているため、吸収、散乱、分裂の空間分布は、本来一致すべきものである。

ただし臨界条件の取り扱いには両コードで差がある。WDSNでは表面の境界条件を正しく計算できるが、THERMOSではセルの外側に重散乱核を巻き付けて実際のゼロ微分条件に近くなるように工夫している。ここでは重散乱核は $\Sigma_s X$ (厚さ)に0.5が用いられている。したがって境界に到達した中性子のほとんどが重散乱核によって、全ての方向に等方に散乱される。

両コードにおいて境界条件に対する取り扱いに上記のような差があるが、正規格子内セルでは境界と試験燃料セルの間にドライバー燃料8本分の体積を有する緩衝層が巻き付けてあるため、境界条件の差が燃料セルの核定数に与える影響はわずかであると考えられる。円環炉心においてもセルの外側の水の厚さは中性子の平均自由行程の約7倍であるため境界条件が燃料セルの断面積に与える影響は少ないと考えられる。Table 12にWDSNによって計算された燃料セルの熱群定数がTHERMOSによるものと比較されている。

(1) 反応度の検討

円環炉心でのガドリニア燃料の反応度効果はFig.79に見られるようにTHERMOSとWDSNの計算結果に有意な差は見られない。

正方格子炉心内のガドリニア燃料の反応度効果は、THERMOSの計算結果ではFig.80に見られるように、E燃料がD燃料より小さな値を示している。この理由は燃料棒セルの吸収断面積がE燃料がD燃料より小さいことによるものである。このようにガドリニアの混入量に対して、吸収断面積が逆転する現象は、物理的には有り得ないが、計算上は次の理由によって生じるものである。燃料ペレット内の Σ_a はD燃料で 1.28 cm^{-1} 、E燃料では 1.63 cm^{-1} となりE燃料の方が大きくなっている。しかしセル平均の断面積を計算するための(中性子束)×(体積)はD燃料で3.08(任意単位)、E燃料では2.35であり、中性子束の減少が断面積の増加を上回っている。したがってE燃料のセル平均の吸収断面積がD燃料より小さくなったものである。

Table 12 Thermal group constants of rod cell calculated by WDSN

Core	Sample	D	Σ_a	$\nu \Sigma_f$	$\nu \Sigma_f / \Sigma_a$
Annular	A	0.20285 (1.185)	0.10719 (1.013)	0.16918 (1.012)	(0.999)
	B	0.18637 (1.151)	0.18246 (1.020)	0.12646 (1.013)	(0.994)
	C	0.16378 (1.078)	0.28492 (1.030)	0.06764 (1.015)	(0.985)
	D	0.14665 (1.015)	0.35914 (1.094)	0.02152 (1.039)	(0.949)
	E	0.14338 (1.012)	0.37191 (1.218)	0.01320 (1.107)	(0.909)
Regular lattice	A	0.24517 (1.181)	0.08631 (1.073)	0.13565 (1.072)	(1.000)
	B	0.23538 (1.157)	0.13514 (1.085)	0.10208 (1.055)	(0.972)
	C	0.21917 (1.105)	0.19865 (1.087)	0.06096 (1.025)	(0.943)
	D	0.20124 (1.054)	0.25762 (1.121)	0.02859 (1.013)	(0.904)
	E	0.19553 (1.053)	0.27613 (1.239)	0.02122 (1.008)	(0.814)

(1) $\nu = 2.430$ for all cases

(2) Lower numeric in () are ratio of WDSN/THERMOS

このような特異な現象は例外としても、全てのガドリニアの濃度に対してWDSNによる反応度効果計算値はTHERMOSによる値より低めである (Fig.80)。放射化率分布を見ると計算では燃料ペレット内の中性子束が表面において急速に減少してしまうことが認められる。したがって燃料棒セルの Σ_a はこの計算ではTHERMOS, WDSNとも実際より小さく見積られていると思われる。これが計算では反応度効果が小さめに評価される理由であろう。

(2) 出力分布

いま、A型試料の相対出力を1.0に規格化して、同じ場所に挿入したときの他の試料の相対出力を P_x とする。すなわち

$$P_x = \frac{\sum_{f_i} \phi_i}{\sum_{f_0} \phi_0} \quad (4.1)$$

ただし添字0はA燃料を、iは他の燃料を表わす。ここで中性子束 ϕ_i , ϕ_0 は試料から充分離れた点で同一のレベルに合わせる。

THERMOSおよびWDSNで計算した核定数を用いて、正規格子内で2次元拡散により求めた P_x をTable 13に示す。(表中 P_3 , aは干渉の項で述べる。)

出力分布はWDSNでは測定値より小さめに、THERMOSでは大きめに計算されており、

WDSNの方がいくぶん測定値に近い。しかしいずれの計算値も P_x の測定値との差が 0.02 以内であるから良く一致していると言える。

Table 13 Power depression and relation of power and activation

Sample		A	B	C	D	E
Experiment	Relative power P_x	1.000	0.696	0.415	0.244	0.200
	" P_3	0.870	0.571	0.291	0.120	0.082
	Activation a	0.63	0.46	0.29	0.15	0.092
	ratio P_3/a	1.38	1.24	1.00	0.80	0.89
ST-2(THERMOS) •ADC-3	P_x	1.000	0.713	0.433	0.251	0.213
	P_3	0.870	0.585	0.303	0.123	0.087
	a	0.74	0.535	0.275	0.095	1.29
	P_3/a	1.18	1.09	1.10	1.29	1.34
WDSN•ADC-3	P_x	1.000	0.694	0.409	0.233	0.196
	P_3	0.870	0.569	0.286	0.114	0.080
	a	0.71	0.51	0.26	0.085	0.055
	P_3/a	1.23	1.12	1.10	1.34	1.46

THERMOSとWDSNの差は物理的な計算モデルの違いによるものではなく、数値解析上の差によるものと考えられ、反応度、放射化率分布、出力分布といったものは本来は両者の解が一致すべきものである。両者の差は数値解析上、収束計算の技術上の問題（例えばWDSNではある空間のあるエネルギー群では負の中性子束が解として得られるが、それに対する適切な処置が行なわれていない。また空間メッシュの切り方はどれ位が妥当か）によるものと考えられる。両方のコードの計算結果に差があるとしてもその差は小さいものであり、ガドリニア入り燃料棒の解析には、いずれも使用できるものと言える。

4.1.2 放射化率測定上の問題点

ワイヤの放射化データを整理、解析する上で問題となることは、測定しようとしている中性子場をワイヤが乱してしまうことにより理想的な放射化量が得られないことにある。現実的に問題となるのは(i)ワイヤによる中性子束ひずみ因子、(ii)ストリーミングの2点である。いずれも放射化率分布の計算と実測の比較において考察されるべきことである。つまり(i)、(ii)の効果が適当に補正されてはじめて計算値と実測値の対比が直接的なものとなる。Fig.62～Fig.76に見られる計算と実測の比較において全般的に認められる傾向は水の中で両者を合わせると燃料の中で実測値が計算値より高めであり、被覆管に近いほどその差は大きい。この傾向は上記の原因によるものとして、定性的に説明することは可能であるが定量的な評価は現段階ではきわめて困難である。箔検出器については理論的・実験的にその解析方法が確

立されているが、ワイヤ検出器に関する解析の方法はほとんどないというのが現状である。したがってここでは問題点が指摘されるに止まらざるを得ない。

(i) ワイヤの中性子束ひずみ：これはワイヤが中性子を吸収することからそのまわりの中性子束が低下し、またワイヤの自己遮蔽効果のためワイヤ内の中性子束にひずみが起り理想的な反応率が得られない効果をあらわす。一般的に放射化試料によって攪乱を受けた時の中性子束ひずみ因子 f は次式で定義されている。

$$f = \frac{\int d\mathbf{r} \int dE \sigma_{act}(E) \phi(E; \mathbf{r})}{\int d\mathbf{r} \int dE \sigma_{act}(E) \phi_0(E; \mathbf{r})} \quad (4.2)$$

ただし、 $\phi_0(E; \mathbf{r})$: 攪乱を受けない時の中性子束
 $\phi(E; \mathbf{r})$: 攪乱を受けた時の中性子束
 $\sigma_{act}(E)$: 放射化断面積

f は種々の方法で評価されている。箔検出器については Dalton-Osborn の方法が、実測値に最もよく合うと認められている。¹⁹⁾ ワイヤ検出器については、理論的にも、実験的にもほとんどこの因子の研究はなされていない。

ある体系内で放射化率分布を測定する場合、その体系の媒質が一様であり、かつ検出器の形状、材質も同一であれば、上記の f は一定と考えられるので、 f についての補正をしなくても、測定された放射化率分布は、攪乱のない理想的な放射化率分布と同形と考えてよい。体系が媒質 I と II で構成される時は、ひずみ因子はそれぞれの中で f_I 、 f_{II} となる。また I と II の境界付近では、 f_I と f_{II} の間の値 $f(r)$ をとることになる。したがって、このような場合に、理想的な放射化率分布と同形のものを得るためには、I か II のどこかの位置を基準として f の差異について測定値を補正しなければならない。たとえば、I 中に基準位置を置くなれば II 中および境界の測定値に、 f_I/f_{II} および $f_I(r)$ を乗じなければならない。円環炉心中央での測定と同様な条件のもとで、同じ Dy ワイヤを用いて TCA でなされた実験²⁰⁾ によれば、26 PA・UO₂ 中心を基準としたとき、燃料から離れた水中での f_I/f_{II} は 1.077 ± 0.015 と得られている。この値を用いて、サンプル A と B の測定値を補正したものを Fig.81, Fig.82 に示す。ただし、境界付近の測定値はないので、水中の検出器にはすべて同一の補正因子を用いる。

(ii) ストリーミング：これは燃料棒を直径方向に貫通させたステンレス細管、およびワイヤ検出器の吸収断面積が、燃料体の断面積より小さい時には、細管、ワイヤに沿って流れ込む中性子流が、放射化率分布測定において無視できなくなる効果である。これは、燃料棒表面近くでの放射化率分布測定値を見かけ上大きくすることになる。この効果は、放射化率分布の測定値と計算値の差、とくに、燃料棒表面近くでの分布のちがいを説明する要素のひとつである。しかし、この効果の定量的評価は、理論的にも、実験的にも、きわめて困難でここでは、定性的な推論程度にとどまらざるを得ない。

例えば、円環炉心でなされた燃料棒内外の放射化率分布測定においては、試験燃料 A, B ではワイヤの断面積の方が燃料の断面積より大きいので、この効果は細管のためだけに生ずるにすぎず、大きくはない。しかし、試験燃料 D, E では、燃料の断面積がずっと大きいので、この効果がいちじるしくなる可能性がある。測定値と計算値を比較すると、D, E は燃

料表面近くでその差がA, Bより大きく, かつ計算値の方が測定値より表面近くでの勾配が大きい。この差異の原因のひとつは, 測定値にストリーミングの効果が含まれていることにあると考えられる。

4.1.3 円環炉心における反応度変化の計算

円環炉心の中心にガドリニア入り試験燃料を挿入した体系の反応度変化の実測値に対し, ST-2-FOG, あるいはWDSN-FOGによる計算値との間に大きな差がある (Table 2)。これは正方格子炉心の中心に1本の試験燃料を挿入した体系における場合は, 実測値と計算値がよく一致していることと対照的である (Table 2)。円環炉心における炉心反応度計算値の誤差が, スペクトル計算 (ST-2, WDSN) に起因するものであるか, あるいは拡散計算 (FOG) に起因するものであるかを調べるため簡単な摂動計算によってWDSNによって求められた核定数と中性子束分布が評価された。その結果反応度変化の計算値の誤差はその大部分が拡散計算によるものであることが示された。

(1) 摂動法

体系の吸収断面積, 核分裂断面積等がわずかに変化したときの体系の増倍係数に与える影響は次式で評価される。²¹⁾

$$\Delta k/k = \int d\mathbf{x} \left[\nu \Delta \Sigma_{\text{fission}} \Psi_f^* \Psi_f - \Delta \Sigma_t \Psi_f^* \Psi_f - \Delta \Sigma_t (\Psi_f^* - \Psi_t^*) \cdot \Psi_f - \text{grad } \Psi_t^* (\Delta D_t) \text{grad } \Psi_f^* - \text{grad } \Psi_f^* (\Delta D_f) \text{grad } \Psi_f \right] / H \quad (4.3)$$

ここに, $H = \int d\mathbf{x} \Sigma_{\text{fission}} \Psi_f^* \Psi_f$

- $\Delta k/k$: 実効増倍率の変化 (反応度変化)
- Ψ_f : 高速中性子束
- Ψ_f^* : Ψ_f の随伴中性子束
- Ψ_t : 熱中性子束
- Ψ_t^* : Ψ_t の随伴中性子束
- $\Delta \Sigma_t$: 熱中性子吸収断面積の変化
- $\Delta \Sigma_{\text{fission}}$: 核分裂断面積の変化
- ΔD_t : 熱群の拡散係数の変化
- ΔD_f : 高速群の拡散係数の変化
- ν : 核分裂ごとの平均中性子放出数

摂動が吸収体による場合は, 主として熱エネルギーの吸収断面積の変化 $\Delta \Sigma_t$ が顕著である。我々の体系に上式を適用する場合 $\Delta \Sigma_t$ の他に核分裂断面積の変化 $\Delta \Sigma_{\text{fission}}$ は当然考慮するが, 拡散係数の変化 ΔD はすべて無視する。そうすると (4.3) 式は次式のように簡単になる。

$$\begin{aligned} \Delta k/k &= \int d\mathbf{x} \left[\nu \Delta \Sigma_{\text{fission}} \Psi_f^* \Psi_f - \Delta \Sigma_t \Psi_f^* \Psi_f \right] / H \\ &= \frac{\Delta V \Psi_t^* \cdot (\varepsilon \cdot \Psi_t)}{H} \left[\nu \Delta \Sigma_{\text{fission}} \cdot \frac{\Psi_f^*}{\Psi_t^*} - \Delta \Sigma_t \right] \quad (4.4) \end{aligned}$$

ここに ΔV は吸収断面積、および核分裂断面積の変化が起る領域の体積であり、 ϵ は中性子束が摂動を受けたときに熱中性子束 Ψ_1 に対して及ぼす効果をあらわす。つまり摂動法では中性子束 Ψ_1 に対してほとんど変化が生じないと仮定するが、ガドリニウムの強吸収体の性質を考慮して中性子束のひずみが生じることを許し、その大きさを $\epsilon \Sigma_1$ であるとする。中性子束 Ψ_1 、 Ψ_2 等は場所によって変わるが体系からみて小さな領域 ΔV の中では変化がないと仮定してもさしつかえない。

(2) 摂動法による試験燃料棒の反応度変化

(4.4)式によって定義された方法により試験燃料棒の反応度変化 $\Delta k/k$ が計算された。 ϵ はWDSNのスペクトル計算によって得られる熱中性子束のひずみ率、すなわち(燃料棒内の平均熱中性子束)/(燃料棒セルの境界における熱中性子束)によって与えられた。また随伴中性子束の比率 Ψ_2^*/Ψ_1^* は測定値 2.590^* が用いられた。 $\nu \Delta \Sigma_{fission}$ 、 $\Delta \Sigma_1$ はWDSNによる計算値が用いられた。 $\Delta \Sigma_1$ は円環炉心の中心にサンプルのないときの水の吸収断面積 Σ_a とサンプルを挿入したときの燃料棒セルの熱エネルギー吸収断面積 Σ_1 の差 $\Delta \Sigma_1 = \Sigma_1 - \Sigma_a$ として求められた。同様に $\nu \Delta \Sigma_{fission}$ は燃料棒セルの核分裂断面積 $\nu \Sigma_{fission}$ が与えられた。つぎに(4.4)式における比例定数 $\Delta V \Psi_2^* \Psi_1 / H$ を求めるためサンプルA(ガドリニアなしの試験燃料棒)の反応度変化 $\Delta k/k$ に対し実測値 $88.11 \text{ } \text{C}$ を与えて $402.8 \text{ } \text{C cm}$ が得られた。以上のようにしてWDSNによる計算値、 $\Delta \Sigma_1$ 、 $\nu \Delta \Sigma_{fission}$ 、 ϵ を使い、サンプルAを基準にしたときのサンプルB、C、D、Eの反応度変化が(4.4)式によって評価され、その結果がWDSN-FOGによる計算値と並べてFig. 10に示されている。WDSN-摂動法による反応度値は大きく評価されており、その誤差は小さい($0.7 \text{ } \text{C} \sim 5.6 \text{ } \text{C}$)。したがってWDSN-摂動法はWDSNによって得られた燃料棒セル平均核定数と中性子束分布(ϵ の評価に用いられた)が正しかったことを示している。

* 劣化ウラン燃料棒を使って反応度値の測定をくりかえし(4.4)式の括弧の中が0になるように外挿して得た。

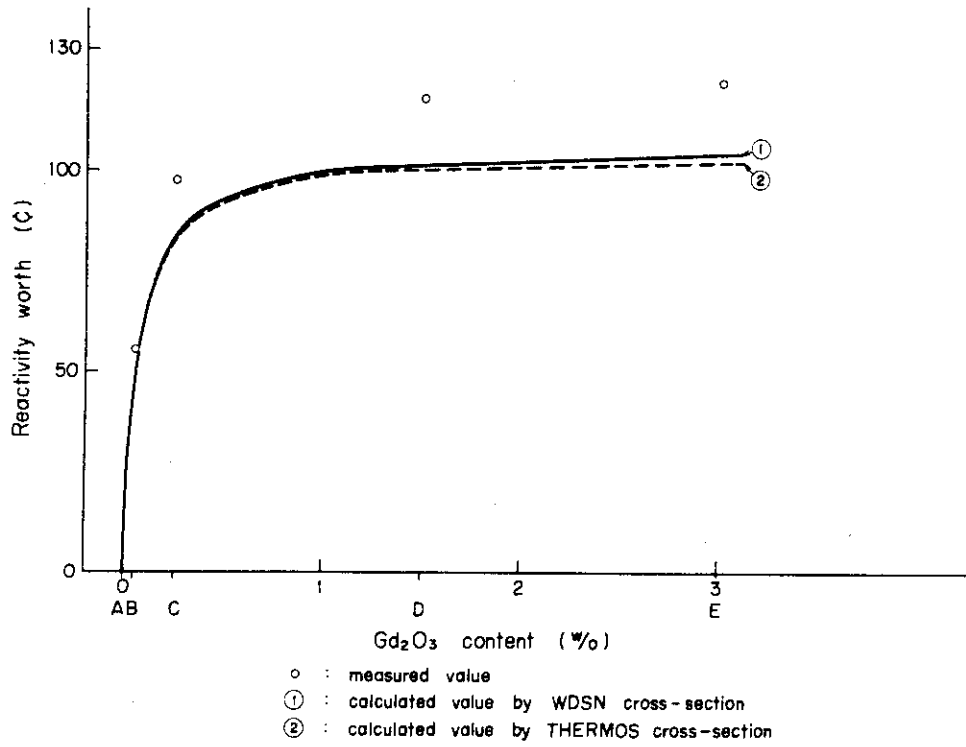


Fig. 79 Reactivity vs Gd₂O₃ content of test rod in annular core

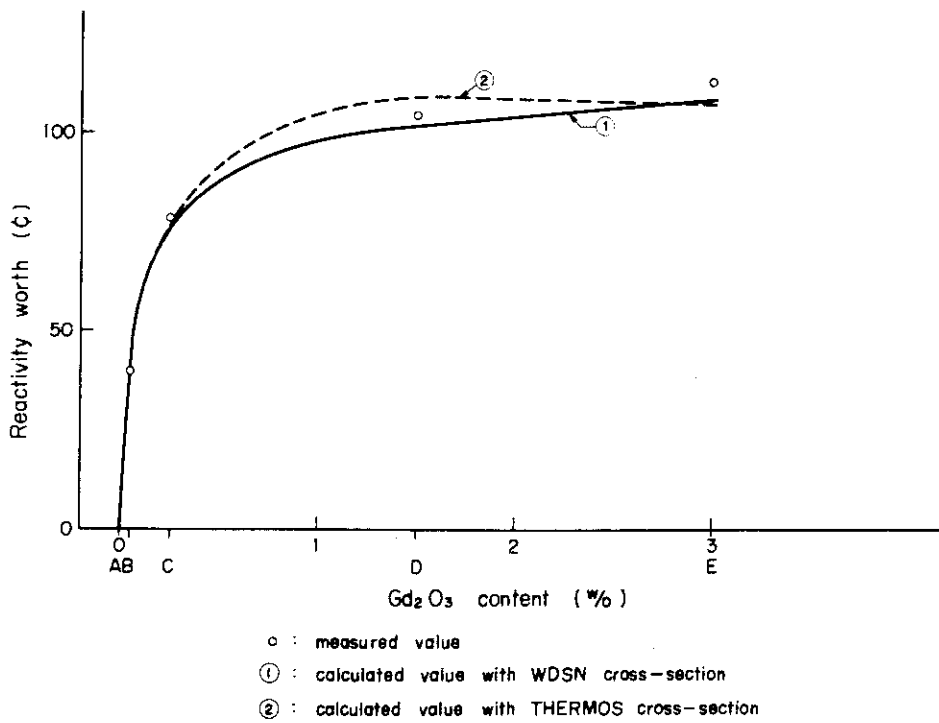


Fig. 80 Reactivity vs. Gd₂O₃ content of test rod in square lattice core

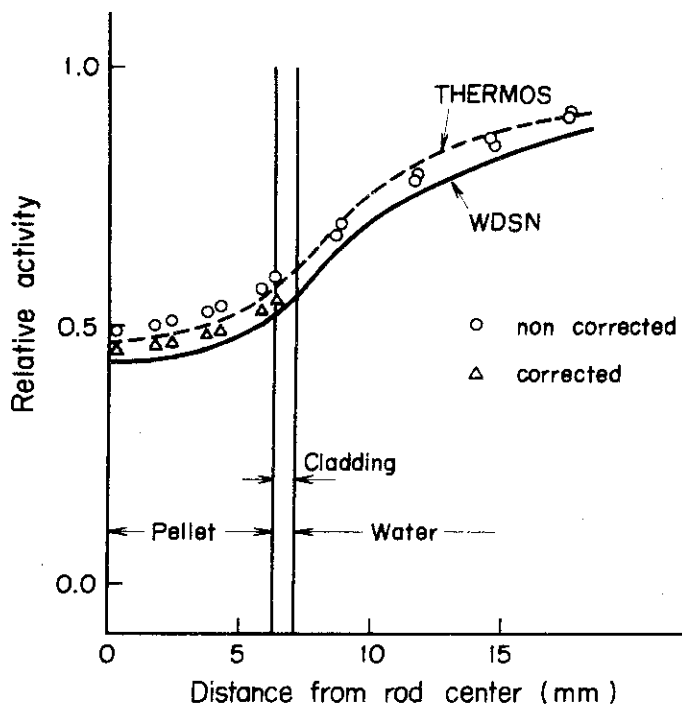


Fig. 81 Corrected activation traverse of Dy wire : Sample A in annular core

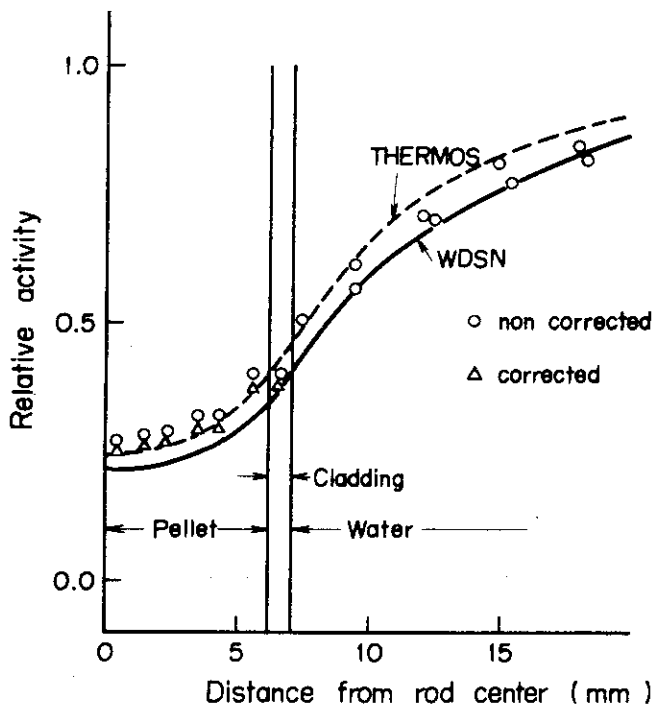


Fig. 82 Corrected activation traverse of Dy wire : Sample B in annular core

4.2 Gd₂O₃-UO₂燃料の諸特性

4.2.1 ガドリニア濃度と反応度効果

円環炉心および正方格子炉心で得られたガドリニア濃度と反応度効果の関係は Fig.10 に示されている。試料挿入場所の中性子スペクトル、および反応度効果の重み関数の値が双方の炉では異なっているため、図上の曲線の形はやや異なっているが、いずれもガドリニウムの自己遮蔽のため、強い飽和特性を示しており、ガドリニア含有量が 1.50 w/o でほとんど飽和に達することが認められる。この曲線は、燃焼による吸収性ガドリニウムの減少によってガドリニアの反応度抑制効果が減少していく大体の過程を示唆していると考えられる。

この濃度と反応度効果の関係は、1本のGd₂O₃-UO₂燃料棒が装荷された場合のみでなく、複数本が装荷された場合にも、ほとんどそのまま成立すると考えてよいことが Table 14 に示されている。この Table は、正方格子炉心と J P D R 模擬炉心とで測定された反応度効果について、B型とD型の試料が同じ配置に挿入された時の反応度効果の比を一覧表にしたものである。ここに認められるのは、複数本の試料が挿入された時でも、試料相互が適当に離れていて、干渉効果が少なければ、上の比は炉心形状によらずほぼ一定で、かつその値は正方格子に単一试料を挿入して測定された値と等しいことである。また、たとえ試料相互が近接して干渉効果が無視できない場合でもその比は、上の一定値から大きく離れないことも認められる。

したがって、炉心の基本格子が一定であれば、正規格子体系でも、集合体体系でもGd₂O₃-UO₂燃料棒のガドリニア濃度と反応度効果の関係、すなわち、飽和状態での反応度効果を 1.0 として表わした相対的反應度効果と濃度の関係は同一であり、これは正規格子に試験燃料棒を 1本挿入した場合に得られる関係で代表されうる。そして、この関係は、挿入本数や配置によっても変わらない。

ただし、上の結果は、ガドリニウムが一様に分散しているペレットについて得られたものであり、一方実際のガドリニウムの燃焼は表面から内部へと進むので、燃焼にともなう反応度抑制効果の減少は、ここで示された傾向とやや異なる可能性がある。この点は、今後、燃焼分布を推定した計算によって追跡されるべきであろう。測定値と計算値との比較で認められるように、両者の一致は、AからEのすべての試料に対して比較的よいので、ガドリニウムの残留分布が適切に推定されれば、計算値は燃焼による反応度抑制効果の減少に対して、よい推定値を与えることができると考えられる。

4.2.2 反応度効果と出力減少の関係

いま、A型試料の相対出力を 1.0 に規格化して、他の試料での相対出力 P_x を定義する。これと、各試料による反応度減少の関係を示すと測定値と計算値の双方について、Fig.83のごとくなる。これは、ほとんど直線的とも言えるような単純な関係となっている。この関係は、吸収性ガドリニウムの減少にともなう出力の回復と、反応度抑制効果の減少との相関を端的に示している。この関係は、ガドリニウムの燃焼にともなう集合体内の出力分布変化と、炉の反応度回復の様子を示唆するものとして、きわめて興味深い関係と考えられる。

なお、計算値については、熱群核定数として THERMOS の値を用いた場合は、Fig.83に

見られるように、試料Eの値が直線からずれている。これは、中性子束の自己遮蔽効果が過大に評価されているためであろうと推察される。

Table 14 The ratio of equivalent reactivity of sample B to that of sample D

loaded pattern	equivalent reactivity worth (C)		$\frac{\Delta \rho_B}{\Delta \rho_D}$
	sample B; $\Delta \rho_B$	sample D; $\Delta \rho_D$	
S-X	40.0	103.9	0.385
D-a-X	76.7	191.1	0.401
D-b-X	75.2	194.0	0.388
D-c-X	71.2	189.0	0.377
D-d-X	70.9	183.7	0.386
D-e-X	72.4	175.9	0.412
T-a-X	109.6	248.2	0.442
T-b-X	110.7	279.9	0.395
T-c-X	110.3	284.1	0.388
1-a-X	124.5	311.4	0.400
1-b-X	103.0	268.3	0.384
1-c-X	93.9	237.3	0.396
1-d-X	84.9	220.2	0.386
3-a-X	296.8*	774.8	0.383
3-b-X	261.6*	643.3	0.407
3-c-X	286.8*	773.4	0.371

These are four times of measured value.

4.2.3 放射化率分布と出力分布

放射化率は測定ワイヤ自身による中性子束の歪みを見れば(2.2)式で表わされる。

いま、測定ワイヤの断面積 σ_{act} は中性子エネルギーEに対してほぼ $1/\sqrt{E}$ に比例している。一方 ^{235}U の核分裂断面積 σ_f も熱群ではほぼ $1/\sqrt{E}$ に比例している。したがって放射化率分布と出力分布は熱中性子領域のみを考えれば近似的に一致するものである。ここで熱外群中性子束が放射化率に与える影響は無視し得るほど小さいが、出力に対しては無視し得ない。そこでADC-3の結果を用いて出力Pを熱中性子による出力 P_3 と熱外中性子による出力 P_1 とに分離し、 P_3 と放射化率分布の減少aとを比較してみる。aは放射化率分布 $N_a(r)$ に対して

$$a = \int_{\text{pellet}} N_a(r) \cdot r \cdot dr / \int_{\text{pellet}} r \cdot dr \quad (4.5)$$

とした値である。ここで $N_a(r)$ はセルの境界で1.0となるように規格化する。測定値には、測定ワイヤを挿入したことによる中性子束歪について4.1.2(i)に述べた補正がなされている。

結果はTable 13に示されている。サンプルA～Cに対しては出力の減少と放射化率の減少とが一致する傾向を示している。サンプルD, Eではこの傾向からはずれているが、この原因は1 eV近くから上のエネルギーに対して ^{235}U と ^{168}Dy で中性子断面積の形が異なっているためである。すなわちガドリニアの混入が多く、中性子スペクトルが硬くなると ^{235}U は1.1 eV付近に共鳴吸収の山を持つので出力はあまり減少しないが、放射化率分布は急速に減少するので差が大きくなるものである。

4.2.4 ガドリニア燃料相互間の干渉性

反応度効果については先に示したTable 14において、試験燃料相互間の距離が近いものは、一定数よりややずれていることが認められる。これは、相互の干渉によるものと考えられる。この点をさらに明確にするため、2本の試験燃料によるD-x-X型の測定値につき、それぞれの燃料位置での反応度重み関数値 W_i の逆数を測定値に乗じて、すべての試験燃料が同一条件で測定された場合に変換して調べてみる。反応度重み関数は、炉心中心値を1.0に規格化し、他の場所では、相対出力の二乗、もしくは $\phi^2 = \cos^2 Bx \cdot \cos^2 By$ 、ただし、 $B^2 = (\pi/X + 2\lambda)^2 = (\pi/1.956 \times 21 + 2 \times 7.22)^2 = 0.0032$ xおよびyは、試験炉心の中心からのxおよびy座標(cm)を示すもの、として定義する。この結果をTable 15およびFig. 84に示す。いま、X型を1本、および2本組として挿入したときの反応度減少を $\Delta\rho(X)$ および $\Delta\rho(2X)$ を表わし、干渉効果を $F_I = \{ \Delta\rho(2X) - 2\Delta\rho(X) \} / 2\Delta\rho(X)$ と定義する。これによれば、干渉効果は試験燃料相互間の距離がD型でも3ピッチ(約6 cm)、B型では2ピッチ(約4 cm)以上となれば約5%以下になり、逆に隣接の場合で約15%および8%程度であることを示している。このことは、燃料集合体寸法を単位として取扱うようなときは、相互の干渉を無視しても事実上さしつかえがないことを示している。これはまた、JPDR模擬炉心の測定値においても、また正方格子炉心でのM-x-D型配置の測定においても認められる。

2次元拡散計算により求めた反応度効果を用いて、上記の F_I を求めた結果をFig. 84に示す。計算値の場合も同様に試料相互間距離で2ピッチ(約4 cm)離れば干渉効果は4%以下の小さな値となることが認められる。計算による干渉効果と実測値とは若干の差が見られるがB燃料の場合で3%以下、D燃料の場合で5%以下であるから、これは計算および測定上の範囲内で一致しているといえる。

JPDR模擬炉心ではFig. 85に示されているように計算値、実測値とも集合体相互間で干渉は見られない。

上記の計算を行なう場合、試料に隣接するドライバー燃料セルの核定数にはドライバー燃料のみで構成された格子の核定数を用いている。しかし、やや詳細に考えると、ドライバー燃料が吸収の強い2本の試料に隣接されたような場合には、そのドライバー燃料セルのスペクトルが硬化し、そのために断面積に変化が起り、それが反応度にいく分の影響を与えることが予想される。この影響の程度を見るための試算がなされた。仮想的に、1本のドライバー燃料が8本の試料に隣接してとりかこまれたような体系を考え、この体系を3.1.2で述べたのと同じ手法を用いてWDSNで計算した。試料をA, B, C, Dとしたときのドライバー燃料セルの核定数計算結果が、Table 16に示されている。試料がAのときの値が、ドライバー

Table 15 Mutual interference of reactivity effect

loading pattern	distance between test rods (cm)	statistical weight			X = B			X = D		
		W ₁	W ₂	W ₁ +W ₂	ρ _B (Φ)	2ρ _B /(W ₁ +W ₂)	F _I	ρ _D (Φ)	2ρ _D /(W ₁ +W ₂)	F _I
D-a-X	2.77	1.0000	0.9757	1.9757	76.7	77.6	-3.0	191.1	193.4	-6.9
D-b-X	5.53	0.9757	0.9757	1.9515	75.2	77.1	-4.6	194.0	198.8	-4.3
D-c-X	8.30	0.9757	0.9058	1.8816	71.2	75.7	-5.4	189.0	200.9	-3.3
D-d-X	11.06	0.9058	0.9058	1.8117	70.9	78.3	-2.1	183.7	202.8	-2.4
D-e-X	1.956	0.9878	1.0000	1.9878	72.4	72.8	-9.0	175.9	177.0	-14.8

ρ_x : measured equivalent reactivity worth

$$W_1 = \cos^2 Bx \cos^2 By, \quad B = \left(\frac{\pi}{X+2\lambda} \right) = 0.05659$$

x, y : Cartesian coordinat of test fuel rod

$$F_I = \{ \Delta \rho(2X) - 2\Delta \rho(X) \} / 2\Delta \rho(X), \quad \Delta \rho(2X) \equiv 2\rho_x / (W_1 + W_2), \quad \Delta \rho(X) = \Delta \rho_m(S-X) \text{ in Table 2}$$

$$2\Delta \rho(B) = 80.0 \Phi, \quad 2\Delta \rho(D) = 207.8 \Phi$$

燃料のみでできた格子の値に等価である。

この結果は、E型の試料にとりかこまれたような場合には、ドライバー燃料の Σ_a に約3%の変化が生じ、また、このような状態と等価なセルだけで出来た格子の k_{∞} は、もとの状態の格子の k_{∞} と約2%変化することを示している。しかし、実験の体系では、ドライバー燃料が試料に隣接しても、その方向に張る角度は、高々全周の数分の1以下であり、また、そのような状態にあるドライバー燃料数は臨界格子の中で10分の1にも達しない。したがって、実験体系での k_{eff} に対するこの影響は0.1%以下と考えられる。すなわち、試料に隣接するドライバー燃料の核定数変化による等価反応度変化は非常に小さく、これまで行なってきたように、この核定数変化を無視して計算しても特に問題ないものと考えられる。

Table 16 Power depression factor P of Sample rod D in square lattice core

Position	Experiment	Calculation
	0.228	0.238
	0.223	0.244
	0.229	0.244

The factor P means the ratio of the relative power of sample rod D to that of the usual driver fuel.

次に出力分布に対する相互干渉を見る。試験燃料が2本以上挿入された体系に対して、試験燃料から充分離れた燃料棒の出力を基準とし、A燃料に対するガドリニア燃料棒の相対出力Pを求めてみる。

正方格子炉心D-a-D, D-b-D, D-c-Dは2本の試験燃料のうち1本は常に同一の場所に位置している。この燃料のPを求めるとTable 17のようになる。この結果から、干渉はほとんど認められない。

同様の方法でJ P D R模擬炉心3-e-D, 3-f-D, 3-g-Dの相対出力Pを求めてみるとFig.86~88に示すような値となる。燃料配置によらずPがほとんど一定であるのは、干渉がほとんどないためと考えられる。

4.2.5 放射化率分布の測定結果の考察

円環炉心における放射化率分布の測定結果と反応度の測定結果が初等拡散方程式によって結びつけられて考察された。以下にその方法とそれから言えるガドリニア入り二酸化ウラン燃料の諸性質が述べられている。正方格子中のガドリニア入り燃料セルの放射化率分布は通

Table 17 Nuclear constants of driver fuel adjacent to test fuel

adjacent fuel	Σ_a	D
A	0.080449	0.20766
B	0.079563	0.20927
C	0.078766	0.21075
D	0.078314	0.21160
E	0.078219	0.21178

常のように簡単な円筒近似による解釈が許されないのでその取り扱い方は今後の課題とされ、ここではとくに取り上げられていない。

測定結果に示されているようにガドリニア入りウランペレットの中で熱中性子は極めてよく吸収されて、その密度分布に大きな歪みが起っている。D型やE型のように相当に濃度の高いガドリニアの含まれた試験燃料では放射化率分布に差異は認められず (Fig. 89), また反応度の測定結果にも中性子の吸収に対する飽和現象が明らかに示されている (Fig. 10)。熱中性子は黒体に近いD型やE型の試験燃料では、ペレット表面に近いところで殆んど吸収されていると考えられる。

このような著しい現象に対して水の中での放射化率分布は比較的緩やかな現象を呈し、ペレット表面に近いところでの中性子束分布の勾配 ($\partial \phi / \partial r$) はあまり変化していないことが示されている (Fig. 75, Fig. 76)。このことは測定された中性子密度分布に対して拡散的取り扱いを可能にする。ST-2のスペクトル計算によって示されるが相当に濃いガドリニアの入った試験燃料においても水の中での中性子スペクトル分布はMaxwell分布からのずれは小さい。したがって熱中性子が水の中での放射化率分布に主要な影響を与えており、検出器として使用されたディスプロシウムまたは金の放射化断面積がいずれも熱中性子に対して $1/v$ 則を示すことから、水の中での放射化率分布は中性子の密度分布 $N(r)$ をあらわしていると考えられる。平均熱中性子速度を \bar{v} とすると水の中での密度分布はつぎの式であらわすことができる。

$$D \nabla^2 \bar{v} N(r) - \Sigma_a \bar{v} N(r) + S(r) = 0 \quad (4.6)$$

$N(r)$: 熱中性子密度分布

D : 水の拡散定数

Σ_a : 水の吸収断面積

$S(r)$: 中性子源分布

円環炉心を円筒状の体系として扱い、試験燃料とドライバー燃料の水領域の中ではD, Σ_a は定数とし、中性子源分布 $S(r)$ は今の場合高速中性子の減速によって生まれる熱中性子であるから水の中では一様に分布しているを見なしてさしつかえない。したがって (4.6) 式は、

$$\frac{1}{r^2} \frac{d^2}{dr^2} N(r) + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} N(r) - k^2 N(r) + Q = 0 \quad (4.7)$$

$$k : \sqrt{\Sigma_a / D}$$

$$Q : S(r) / \bar{v} D = \text{Constant}$$

とあらわされるこの解は q, α, β を定数として、

$$N(r) = q - \alpha I_0(Kr) - \beta K_0(Kr) \quad (4.8)$$

$I_0(Kr)$: 0 次の第 1 種変形ベッセル関数

$K_0(Kr)$: 0 次の第 2 種変形ベッセル関数

となる。 q, α, β はこのままではいずれも未定であるが、それぞれ物理的な意味をもっている。 q は高速中性子の減速によって生まれる熱中性子の数を示している。 α, β は以下に示されるようにそれぞれドライバー燃料の熱中性子の吸収の強さ、試験燃料の熱中性子の吸収の強さを示す。

中性子の拡散による空間分布は、中性子源分布とその拡散の積分核を与えることによって上述された方法によるものと同等の結果を与えられる。いま扱われるモデルでは中性子源分布は、中性子の減速によって生まれる正の中性子源と、燃料の中性子の吸収を負の中性子源とするもので与えられる。水の中での中性子の密度分布は一様な高速中性子の減速によって生じた熱中性子と燃料からの負の中性子の拡散によって生じた中性子の両者の寄与で形づくられる。すなわち、(4.8)式の α, β の意味は次の式で表現される。

$$\alpha = \frac{1}{2\pi D} \int_{R_1}^{R_2} dr' Q(r') K_0(Kr')$$

$$\beta = \frac{1}{2\pi D} \int_0^{R_0} dr' Q(r') I_0(Kr')$$

ただし、 D : 拡散定数
 K : $1/L$ (L は拡散距離)
 $Q(r)$: 吸収 (負の中性子源) の強さ
 R_0 : 試験燃料のペレット半径
 R_1, R_2 : ドライバー燃料領域内の内、外半径

α, β を決める上式に注意すると、 α がドライバーの中性子吸収量を示し、 β が試験燃料の中性子の吸収量を示していることが明らかにされる。ここで考えている $Q(r)$ は燃料の中性子の巨視的吸収断面積 Σ_a に相当するとみてよいであろう。

試験燃料の測定された等価反応度 (2.2.1 項参照) と中性子の吸収量は直接に関係している。(4.8) 式に測定された中性子の放射化率分布 (水の中での測定のみ) をあてはめて定数 α, β, q が求められた。このとき水の拡散距離は文献^{1), 22)}によるものが採用され、2.88 cm または 2.676 cm が与えられた。Table 18 と Fig. 89 にこの結果が示されている。また炉心の中

心に試験燃料が挿入されていないときの放射化率分布^{*})を同様にあてはめた結果は α/q に対して0.142(±0.006)を得た。このとき β/q は当然0である。Table 23に示されたディスプロシウムワイヤによる測定に対応する α/q の値と0.142が誤差の範囲で一致しているとみなしてよい。

以上のことからつぎのことがいえる。

- (i) 拡散方程式の解(4.8)式の定数の比 α/q , β/q はそれぞれドライバー燃料の中性子の吸収, 試験燃料の中性子の吸収の強さをあらわすパラメータである。
- (ii) β/q は測定された試験燃料の等価反応度と比例する。
- (iii) 燃料の熱中性子吸収の能力は等価反応度 $\Delta\rho$ と β/q の関係からサンプルD(1.5 w/o Gd₂O₃-UO₂)の燃料を境として急速に落ちる。これは燃料のペレット表面で中性子が吸収されてしまう自己遮蔽の結果である。
- (iv) カドミウム切断エネルギー以上の放射化率の分布から約0.5 eV以上の中性子は水の中で平坦な分布を示す。ペレットの中ではわずかに歪んで小さくなる。この歪みの大きさはガドリニアの濃度に影響されない。これはガドリニアの熱中性子吸収の選択性をあらわすものである。

Table 18 α/q and β/q values for measured neutron density distribution

Upper figure of each α/q or β/q column is corresponds to diffusion length (L) 2.88 cm, and lower one for 2.676 cm

fuel	probe measured reactivity	Dysprosium		Gold (bare)	
		α/q	β/q	α/q	β/q
A	0.0 ^(C)	0.138(±0.005)	0.258(±0.004)	0.106(±0.006)	0.246(±0.005)
		0.124(")	0.266(")	0.095(±0.005)	0.253(")
B	-55.51	0.123(±0.01)	0.348(±0.01)	0.101(±0.009)	0.333(±0.008)
		0.109(")	0.360(")	0.089(")	0.344(")
C	-97.29	0.137(±0.008)	0.403(±0.008)	0.101(±0.008)	0.395(±0.007)
		0.122(±0.007)	0.419(")	0.088(±0.007)	0.409(")
D	-117.57	0.105(±0.010)	0.437(±0.010)	0.104(±0.007)	0.423(±0.007)
		0.092(±0.009)	0.453(")	0.091(±0.006)	0.438(")
E	-121.15	0.129(±0.012)	0.434(±0.012)	0.087(±0.011)	0.420(±0.010)
		0.115(±0.011)	0.450(")	0.076(±0.097)	0.434(")

*) 試験燃料のない炉心での放射化率分布の測定はTCAにおいて本実験以前にディスプロシウムのフォイルを使って行なわれた。

4.2.6 今後の問題

今回の実験結果は、ガドリニア含有量と反応度効果および出力減少との間にはかなり簡単な関係があることを示している。これは、ガドリニア入り燃料が実際に炉内で燃焼する場合においても、ガドリニア燃料の負反応度効果の減少と相対出力の上昇との間には比較的簡単な関係が存在するかもしれないことを示唆している。

しかしながら、今回の実験結果はガドリニアが均質に分散した試験燃料について得られたものであり、一方燃焼にともなうガドリニウムの減少は燃料棒内で一様であるとは考えられない。むしろ、1.5, 3.0 w/o のガドリニア燃料に関する放射化率分布の測定結果を見ると、ガドリニウムの強い自己遮蔽のため、熱中性子吸収の大部分は、燃料ペレット外表面近くのごく薄い層でなされていると考えられる。すなわち、燃焼につれてガドリニウムはペレット外表面から内部にむかって徐々に環状に減少していくものと考えられる。このように非均質に燃焼が進むことを考慮した上での、燃焼にともなう負反応度効果の減少と、相対出力の回復についての評価を今後に行なう必要がある。

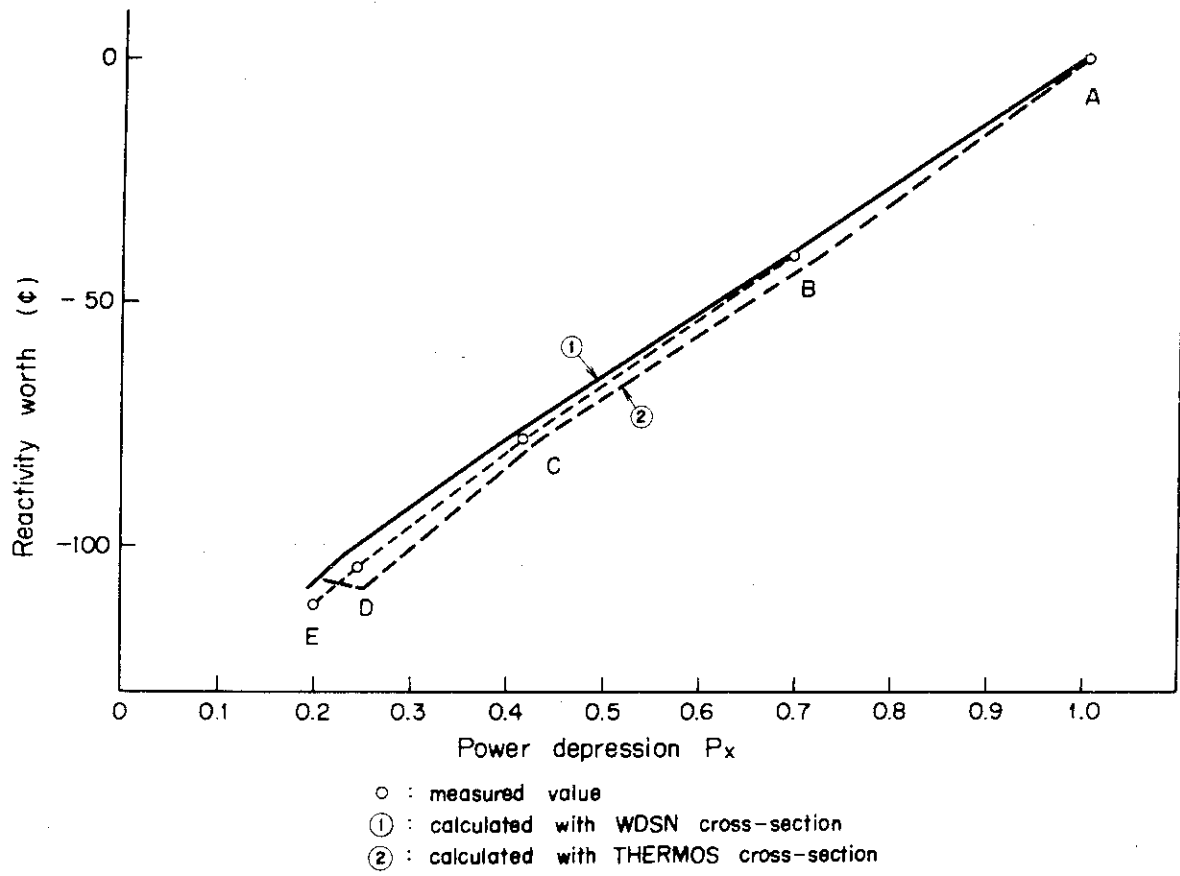


Fig. 83 Relative power depression vs reactivity change due to Gd_2O_3

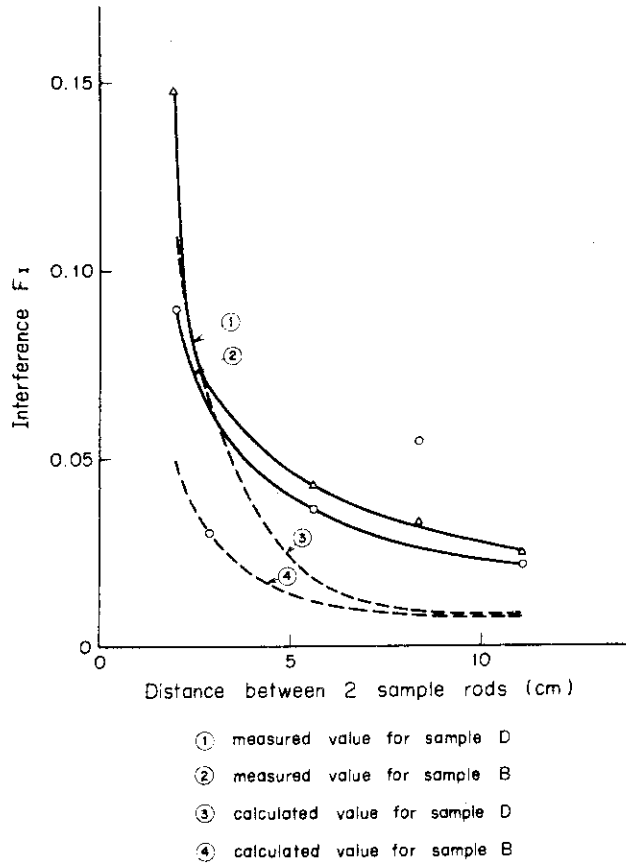


Fig. 84 Interference of two sample rods on reactivity

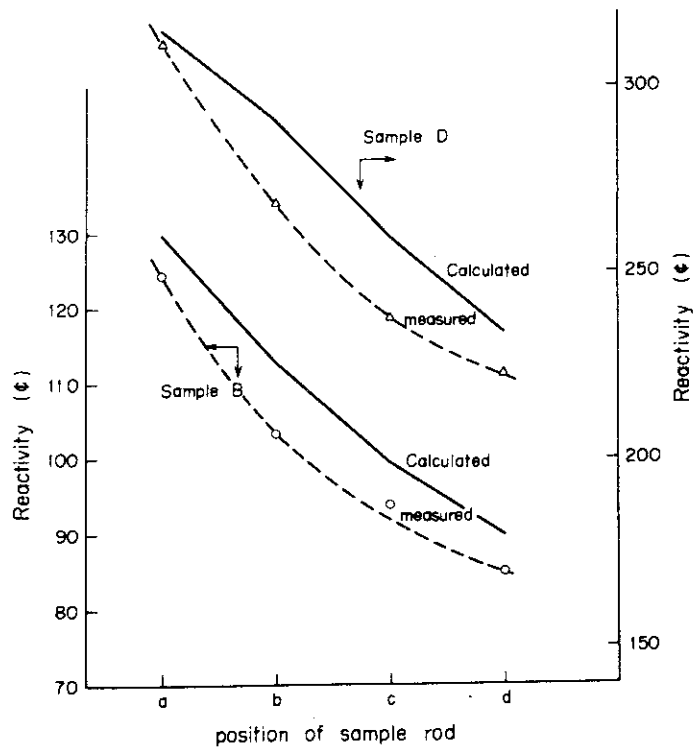


Fig. 85 Reactivity worth vs. position
 1 rod/Ass'y in JPDR mock-up core

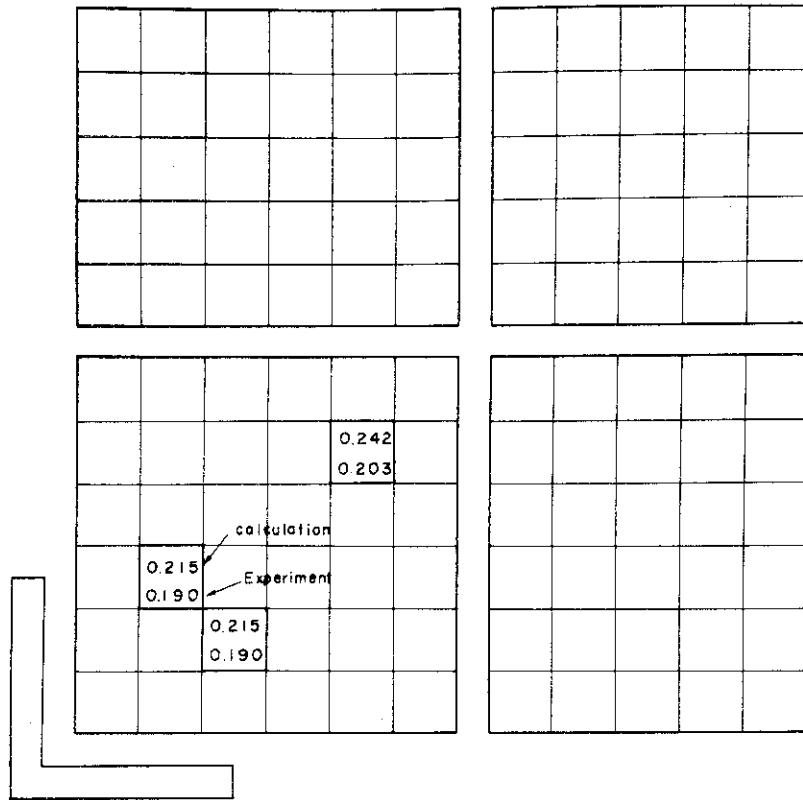


Fig. 86 Power depletion (3-e-D)

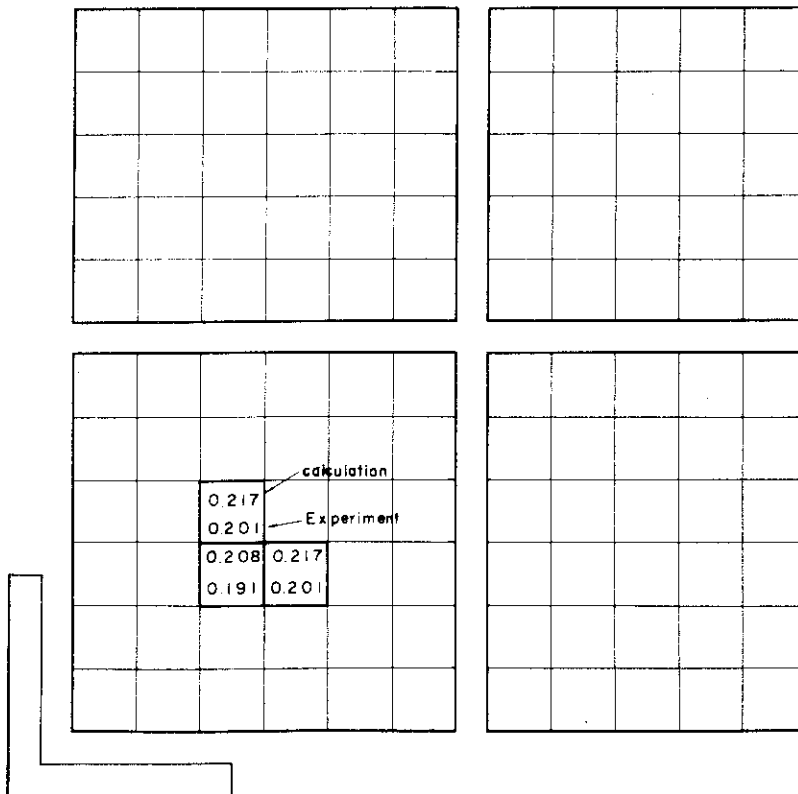


Fig. 87 Power depletion (3-f-D)

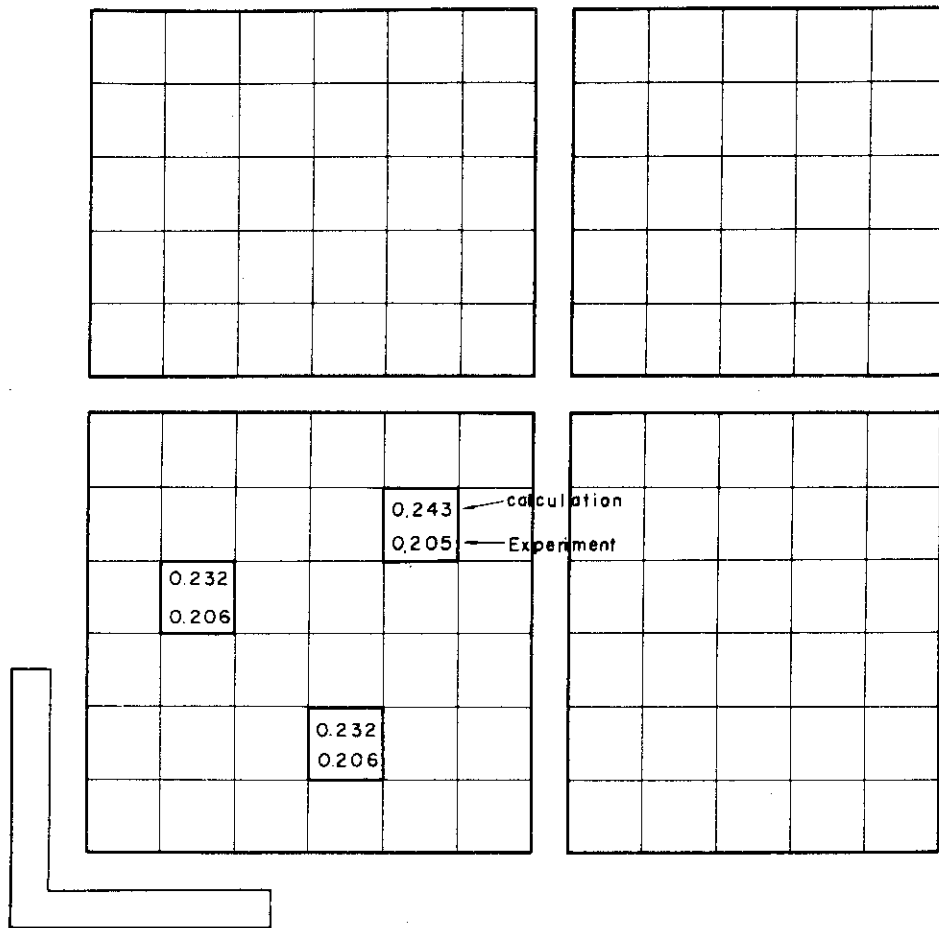


Fig. 88 Power depletion (3-g-D)

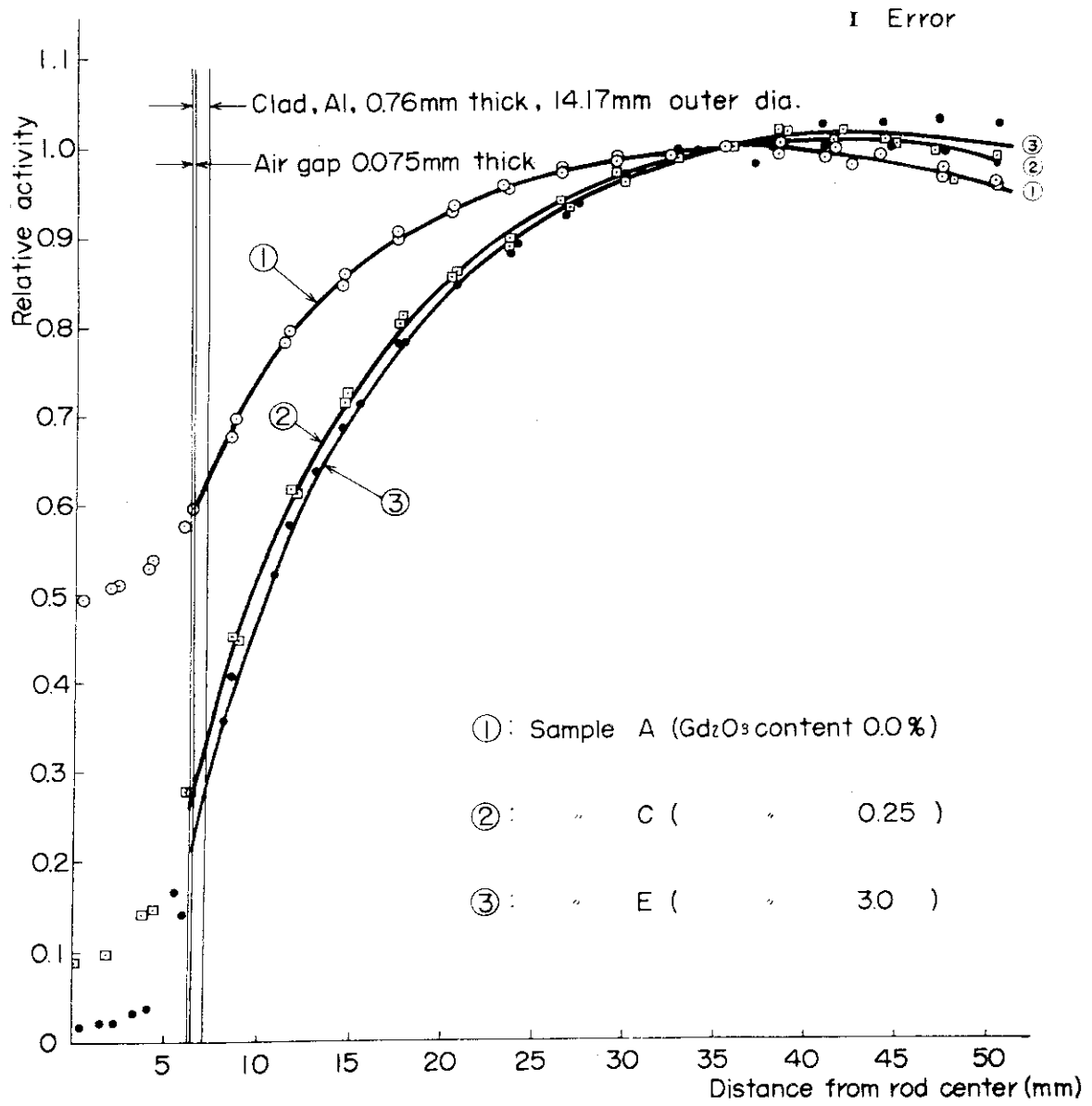


Fig. 89 Neutron activation traverses measured with Dysprosium wire and fitting function in moderator region

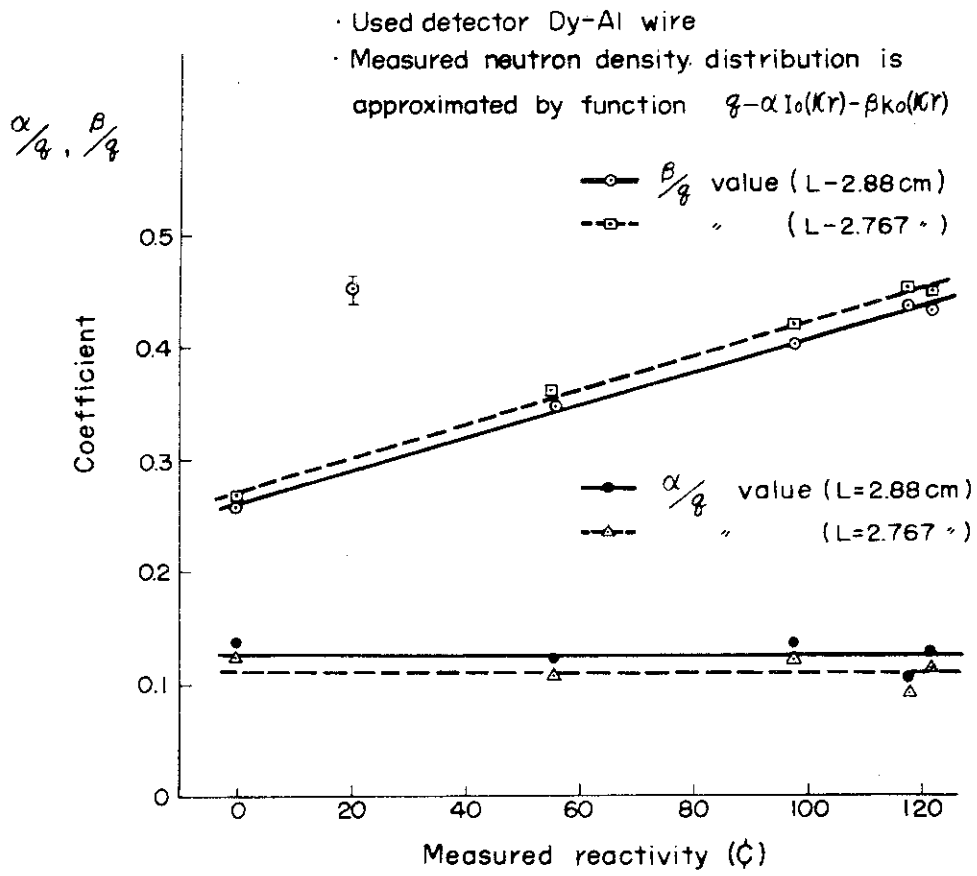


Fig. 90 $\alpha/q, \beta/q$ values vs. measured reactivity

5. 結 論

この臨界実験の目的は序に述べられたように、次の2点に置かれていた。

1) J P D RでのF T A (ガドリニア入り試験燃料集合体)の照射に先立ち、その設計法を検証する。

2) $Gd_2O_3-UO_2$ 燃料棒の装荷された格子のより一般的な炉物理特性を把握する。

実験対象となった UO_2 格子はBWRとして典型的なものである。このような体系に与えるガドリニア入り燃料棒の本数およびガドリニアの濃度が反応度効果および出力分布に与える影響に関して、実験および解析の結果次のような事項が明らかとなった。

1) ガドリニウムの中性子に対する強い選択吸収性が明らかにされた。

2) 約0.5 eV以上の中性子はガドリニウムの吸収に寄与しない。

3) ガドリニウムによる反応度減少は、 Gd_2O_3 含有量1.5 w/o程度ではほとんど飽和に達する。これは放射率分布、出力についても同じ濃度ではほとんど飽和に達することが明らかにされた。

4) 試料相互間の干渉効果は、反応度に関しては、試料相互間距離が約5 cm以上離れていれば5%以下となり、出力分布に関しては、實際上ほとんど無視できる。

また相互に隣接していても、反応度に関しては高濃度の燃料で約15%、低濃度では約8%程度である。出力に対する干渉効果は小さく、高濃度の燃料棒が隣接した場合で3%以下である。またJ P D R集合体に $Gd_2O_3-UO_2$ が一部装荷された場合に、集合体相互の間では反応度、出力とも干渉効果は認められない。

5) 円環炉心での測定によれば、ガドリニア入り燃料棒の中性子の吸収量と反応度効果との間には、直線的な関係があることを示している。

6) Gdによる反応度減少と出力減少の間には、ガドリニアが燃料中に均質に分散している場合には、ほぼ直線と考えられる単純な関係が認められた。これは、動力炉内でのGdの燃焼による消耗にともなう反応度の回復と出力の回復との間の基本的な関連性を示唆しているものと考えられる。

謝 辞

この共同研究を進めるにあたり、種々御指導をいただいた村主進原子力安全解析所長(旧; 日本原子力研究所動力試験炉部長)、小山内正夫動力試験炉部長(旧; 開発室長)ならびに山本達郎原子燃料工業(株)東海製造所長(旧; 古河電工(株)原子力部開発課長)の方々に深く感謝します。

$Gd_2O_3-UO_2$ 燃料棒の製作にあたって種々御協力をいただいた西川和幸原子燃料工業(株)第二原子力部長(旧; 古河電工原子力部製造係長)およびその他製造、加工、分析各グループの諸氏、また UO_2 中の Gd_2O_3 の分析法の確立に御骨折りいただいた日本原子力研究所・橋谷

5. 結 論

この臨界実験の目的は序に述べられたように、次の2点に置かれていた。

1) J P D RでのF T A (ガドリニア入り試験燃料集合体)の照射に先立ち、その設計法を検証する。

2) $Gd_2O_3-UO_2$ 燃料棒の装荷された格子のより一般的な炉物理特性を把握する。

実験対象となった UO_2 格子はBWRとして典型的なものである。このような体系に与えるガドリニア入り燃料棒の本数およびガドリニアの濃度が反応度効果および出力分布に与える影響に関して、実験および解析の結果次のような事項が明らかとなった。

1) ガドリニウムの中性子に対する強い選択吸収性が明らかにされた。

2) 約0.5 eV以上の中性子はガドリニウムの吸収に寄与しない。

3) ガドリニウムによる反応度減少は、 Gd_2O_3 含有量1.5 w/o程度ではほとんど飽和に達する。これは放射化率分布、出力についても同じ濃度ではほとんど飽和に達することが明らかにされた。

4) 試料相互間の干渉効果は、反応度に関しては、試料相互間距離が約5 cm以上離れていれば5%以下となり、出力分布に関しては、實際上ほとんど無視できる。

また相互に隣接していても、反応度に関しては高濃度の燃料で約15%、低濃度では約8%程度である。出力に対する干渉効果は小さく、高濃度の燃料棒が隣接した場合で3%以下である。またJ P D R集合体に $Gd_2O_3-UO_2$ が一部装荷された場合に、集合体相互の間では反応度、出力とも干渉効果は認められない。

5) 円環炉心での測定によれば、ガドリニア入り燃料棒の中性子の吸収量と反応度効果との間には、直線的な関係があることを示している。

6) Gdによる反応度減少と出力減少の間には、ガドリニアが燃料中に均質に分散している場合には、ほぼ直線と考えられる単純な関係が認められた。これは、動力炉内でのGdの燃焼による消耗にともなう反応度の回復と出力の回復との間の基本的な関連性を示唆しているものと考えられる。

謝 辞

この共同研究を進めるにあたり、種々御指導をいただいた村主進原子力安全解析所長(旧; 日本原子力研究所動力試験炉部長)、小山内正夫動力試験炉部長(旧; 開発室長)ならびに山本達郎原子燃料工業(株)東海製造所長(旧; 古河電工(株)原子力部開発課長)の方々に深く感謝します。

$Gd_2O_3-UO_2$ 燃料棒の製作にあたって種々御協力をいただいた西川和幸原子燃料工業(株)第二原子力部長(旧; 古河電工原子力部製造係長)およびその他製造、加工、分析各グループの諸氏、また UO_2 中の Gd_2O_3 の分析法の確立に御骨折りいただいた日本原子力研究所・橋谷

博主任研究員と分析センターの諸氏等，多くの方々に深く感謝いたします。

TCA実験を直接担当された日本原子力研究所TCAグループ鶴田晴通，須崎武則，大野秋男，村上清信および原子燃料工業㈱の磯村俊嶽の諸氏に深甚の感謝を捧げます。

参 考 文 献

- (1) 日本原子力学会編「原子炉物理実験」コロナ社(1969)
- (2) 松浦祥次郎他「核分裂生成物によるガンマ線の減衰曲線」, Internal Report
- (3) R. J. J. Stanmiller et. al. "Neutron Thermalization in Reactor Lattice Cells" An NPY-Project Report IAEA Vienna (1966)
- (4) 鳥羽正男，内藤俣孝「燃料棒セル内中性子エネルギースペクトル計算コード：ST-1, ST-2」JAERI-M 4874 (1972)
- (5) S. Francesson "The Winfrith DSN Programme" AEEW-R 273 (1963)
- (6) J.R. Askew et. al. "Some Important in the Discrete Ordinate Method of B.G. Carlson for Solving the Neutron Transport Equation" AEEW-R-161
- (7) H. C. Honeck "A Thermalization Transport Theory Code for Reactor Lattice Calculations" BNL-5826
- (8) G. G. Poncelet "LASER-A Depletion Program for Lattice Calculations based on MUFT and THERMOS" WCAP-6073, (1966)
- (9) Henry Bohl et. al. "MUFT-4 Fast Neutron Spectrum Code for the IBM-704" WAPD-TM-72 (1957)
- (10) 桂木学，他「速中性子常数コード7044 UGMG」JAERI-1104 (1966)
- (11) 高野秀機，他「共鳴積分計算コードMAYMAY-IIと速中性子定数コードUGMGの改良」, Internal Report
- (12) シグマ研究委員会 "Production of Group Constant for Reactor Analysis" JAERI-1176 (1969)
- (13) Henry C. Honeck et. al. "Specifications for an Evaluated Nuclear Data File for Reactor Applications" BNL-50066 (1966)
- (14) 鳥羽正男，内藤俣孝「UGMG-THERMOS計算のためのガドリニウムの炉定数」, Internal Report
- (15) M. Nelkin Nucl. Sci. Eng. 7 (1960)
- (16) H. P. Flatt "The FOG One-Dimensional Neutron Diffusion Equation Codes" NAA-SR-6104 (1961)
- (17) Akimoto M., Naito Y.; "General Dimensional Neutron Diffusion Calculation Codes : ADC." JAERI-1260
- (18) L. A. Hageman and C. J. Pfeifer "The Utilization of the Neutron Diffusion PDQ-5" WAPD-TM-395 (1965)
- (19) 古橋 晃；原子力学会誌vol. 14 No. 11, P. 797 (1962)

博主任研究員と分析センターの諸氏等，多くの方々に深く感謝いたします。

TCA実験を直接担当された日本原子力研究所TCAグループ鶴田晴通，須崎武則，大野秋男，村上清信および原子燃料工業㈱の磯村俊嶽の諸氏に深甚の感謝を捧げます。

参 考 文 献

- (1) 日本原子力学会編「原子炉物理実験」コロナ社(1969)
- (2) 松浦祥次郎他「核分裂生成物によるガンマ線の減衰曲線」, Internal Report
- (3) R. J. J. Stanmiller et. al. "Neutron Thermalization in Reactor Lattice Cells" An NPY-Project Report IAEA Vienna (1966)
- (4) 鳥羽正男, 内藤倣孝「燃料棒セル内中性子エネルギースペクトル計算コード: ST-1, ST-2」JAERI-M 4874 (1972)
- (5) S. Francesson "The Winfrith DSN Programme" AEEW-R 273 (1963)
- (6) J.R. Askew et. al. "Some Important in the Discrete Ordinate Method of B.G. Carlson for Solving the Neutron Transport Equation" AEEW-R-161
- (7) H. C. Honeck "A Thermalization Transport Theory Code for Reactor Lattice Calculations" BNL-5826
- (8) G. G. Poncelet "LASER-A Depletion Program for Lattice Calculations based on MUFT and THERMOS" WCAP-6073, (1966)
- (9) Henry Bohl et. al. "MUFT-4 Fast Neutron Spectrum Code for the IBM-704" WAPD-TM-72 (1957)
- (10) 桂木学, 他「速中性子常数コード7044 UGMG」JAERI-1104 (1966)
- (11) 高野秀機, 他「共鳴積分計算コードMAYMAY-IIと速中性子定数コードUGMGの改良」, Internal Report
- (12) シグマ研究委員会 "Production of Group Constant for Reactor Analysis" JAERI-1176 (1969)
- (13) Henry C. Honeck et. al. "Specifications for an Evaluated Nuclear Data File for Reactor Applications" BNL-50066 (1966)
- (14) 鳥羽正男, 内藤倣孝「UGMG-THERMOS計算のためのガドリニウムの炉定数」, Internal Report
- (15) M. Nelkin Nucl. Sci. Eng. 7 (1960)
- (16) H. P. Flatt "The FOG One-Dimensional Neutron Diffusion Equation Codes" NAA-SR-6104 (1961)
- (17) Akimoto M., Naito Y.; "General Dimensional Neutron Diffusion Calculation Codes: ADC." JAERI-1260
- (18) L. A. Hageman and C. J. Pfeifer "The Utilization of the Neutron Diffusion PDQ-5" WAPD-TM-395 (1965)
- (19) 古橋 晃; 原子力学会誌 vol. 14 No. 11, P. 797 (1962)

- 20) 須崎武則；“ワイヤ検出器使用上の問題点” 昭和45年炉物理分科会, A 21
- 21) A.M.Weinberg, E.P.Wigner “The Physical Theory of Neutron Chain Reactions” The University of Chicago Press (1958)
- 22) K.Beckurts, K.Wirtz, “Neutron Physics”, Springer Verlag

Appendix 1 放射化率分布測定データ

Dy-A ℓ ワイヤおよび裸の金とカドミウムをかぶせた金による測定結果が示されている。
表中の記号の意味は下記のとおりである。

distance	: 試験燃料の中心から測定点までの距離
weight	: 切断されたワイヤの重量の測定値
σ_w	: 本文中に定義されている重量の測定値の標準偏差
corrected count	: サンプルの γ 線の計数値に時間的減衰の割合, バックグラウンドの補正, 軸方向中性子束分布の補正, 検出器の不感時間による計数率の補正を行なったもの
σ_c	: 上記の計数値の標準偏差
activation	: (corrected count)/(weight) の値を本文中に述べられた方法で規格化したもの
σ_a	: 上記の量の標準偏差

Table 1.2 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core

no.	distance (mm)	weight (mg)	sample probe		corrected count	σ_c	activation	σ_a
			0.05% Gd ₂ O ₃	Dysprosium				
1	-50.57	4.173	0.014	0.9957	70528.1	253.6	0.9957	0.005
2	-47.52	4.175	0.003	0.9943	71175.3	255.1	1.0043	0.004
3	-44.46	4.192	0.027	1.0197	72538.4	258.2	1.0197	0.007
4	-41.49	3.933	0.012	0.9866	68488.6	251.2	1.0258	0.005
5	-38.59	3.992	0.011	0.9866	66849.6	248.7	0.9866	0.005
6	-35.64	4.059	0.008	0.9970	68695.1	252.6	0.9970	0.004
7	-32.66	4.108	0.002	0.9934	69271.4	254.2	0.9934	0.004
8	-29.62	4.204	0.005	0.9957	71053.7	258.0	0.9957	0.004
9	-26.67	3.865	0.012	0.9660	63373.5	244.2	0.9660	0.005
10	-23.78	4.023	0.001	0.9934	64154.1	246.1	0.9934	0.004
11	-20.85	3.981	0.005	0.9104	61521.5	241.5	0.9104	0.004
12	-17.88	4.141	0.002	0.8406	59087.8	237.3	0.8406	0.003
13	-14.90	4.025	0.011	0.8110	55406.1	230.3	0.8110	0.004
14	-11.97	3.967	0.003	0.7091	47756.4	214.3	0.7091	0.003
15	-9.47	2.876	0.022	0.6168	30113.5	171.2	0.6168	0.006
16	-7.50	2.510	0.004	0.5037	21536.7	145.6	0.5037	0.003
17	-5.55	2.822	0.009	0.4003	19172.3	137.9	0.4003	0.003
18	-3.49	2.810	0.014	0.3190	15214.5	123.6	0.3190	0.003
19	-1.49	2.652	0.008	0.2835	12764.3	113.9	0.2835	0.003
20	0.39	2.498	0.002	0.2712	11499.9	108.7	0.2712	0.003
21	2.29	2.683	0.004	0.2879	13114.1	115.8	0.2879	0.003
22	4.29	2.784	0.007	0.3202	15131.7	124.3	0.3202	0.012
23	6.55	3.394	0.006	0.4090	23568.3	154.1	0.4090	0.003
24	9.46	4.568	0.0	0.5616	43540.7	208.7	0.5616	0.003
25	12.50	3.753	0.004	0.6977	44449.2	211.3	0.6977	0.003
26	15.40	4.169	0.003	0.7720	54637.6	234.4	0.7720	0.003
27	18.33	3.847	0.005	0.8218	53659.8	232.7	0.8218	0.004
28	21.16	3.901	0.015	0.8844	58565.4	243.5	0.8844	0.005
29	24.11	4.161	0.008	0.9296	65665.6	258.1	0.9296	0.004
30	27.09	3.965	0.004	0.9511	64008.2	255.5	0.9511	0.004
31	30.07	4.207	0.005	0.9616	68669.1	265.1	0.9616	0.004
32	33.09	4.036	0.004	0.9886	67733.6	263.8	0.9886	0.004
33	35.94	3.758	0.005	0.9885	63055.6	255.0	0.9885	0.004
34	38.76	3.955	0.003	1.0043	67425.6	264.2	1.0043	0.004
35	41.67	3.987	0.002	1.0029	67869.5	265.6	1.0029	0.004
36	47.42	3.967	0.008	0.9883	67068.0	264.9	0.9883	0.004
37	50.51	4.345	0.002	0.9891	72943.9	276.6	0.9891	0.004

Table 1.1 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core

no.	distance (mm)	weight (mg)	sample probe		corrected count	σ_c	activation	σ_a
			0.0% Gd ₂ O ₃	Dysprosium				
1	-50.32	3.910	0.008	0.9599	268224.4	844.2	0.9599	0.004
2	-47.38	4.120	0.004	0.9778	287854.0	876.3	0.9778	0.003
3	-44.42	3.991	0.002	1.0003	282651.3	869.6	1.0003	0.003
4	-41.46	4.081	0.002	1.0003	291688.0	884.7	1.0003	0.003
5	-38.48	4.080	0.001	0.9957	292238.5	888.2	1.0057	0.003
6	-35.54	3.954	0.024	1.0003	282655.4	873.0	1.0003	0.007
7	-32.49	4.377	0.005	0.9937	310781.0	917.0	0.9937	0.003
8	-29.44	3.982	0.004	0.9916	282183.1	874.5	0.9916	0.003
9	-26.49	4.073	0.008	0.9775	284527.8	879.2	0.9775	0.004
10	-23.56	3.937	0.003	0.9558	268919.7	855.7	0.9558	0.003
11	-20.61	4.136	0.004	0.9361	276632.4	869.1	0.9361	0.003
12	-17.57	4.168	0.008	0.9084	270558.8	860.8	0.9084	0.003
13	-14.58	4.014	0.007	0.8603	246730.5	823.5	0.8603	0.003
14	-11.66	3.969	0.006	0.7966	225947.2	788.9	0.7966	0.003
15	-8.76	3.950	0.006	0.6972	196808.1	737.3	0.6972	0.003
16	-6.27	2.874	0.007	0.5955	122290.3	582.1	0.5955	0.003
17	-4.28	2.572	0.016	0.5400	99240.1	525.4	0.5400	0.004
18	-2.34	2.726	0.013	0.5102	99390.8	526.6	0.5102	0.004
19	-0.34	2.740	0.101	0.4937	96648.1	520.0	0.4937	0.018
20	1.76	3.008	0.014	0.5066	108885.3	552.4	0.5066	0.004
21	3.72	2.345	0.027	0.5295	88715.7	499.7	0.5295	0.007
22	5.82	3.416	0.004	0.5760	140616.4	629.4	0.5760	0.003
23	8.58	4.106	0.002	0.6758	198259.4	748.4	0.6758	0.003
24	11.57	4.092	0.005	0.7836	229115.2	805.9	0.7836	0.003
25	14.59	4.146	0.014	0.8486	251400.1	845.4	0.8486	0.004
26	17.54	3.929	0.011	0.9002	252725.9	848.7	0.9002	0.004
27	20.50	4.164	0.004	0.9298	276651.2	889.8	0.9298	0.003
28	23.60	4.302	0.003	0.9382	294579.3	919.6	0.9382	0.003
29	26.57	3.839	0.002	0.9736	267064.6	876.4	0.9736	0.003
30	29.49	4.134	0.013	0.9838	290622.1	915.6	0.9838	0.004
31	32.49	4.076	0.004	0.9922	288992.9	914.2	0.9922	0.003
32	35.42	3.929	0.007	1.0027	281509.2	903.3	1.0027	0.004
33	38.38	4.166	0.001	0.9909	295014.1	926.0	0.9909	0.003
34	41.47	4.284	0.005	0.9894	302851.8	939.4	0.9894	0.003
35	44.51	4.013	0.001	0.9799	281015.2	905.8	0.9799	0.003
36	47.42	3.967	0.008	0.9651	273594.3	894.9	0.9651	0.004
37	50.31	3.930	0.006	0.9589	269298.0	888.9	0.9589	0.004

Table 1.4 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core
sample 1.5% Gd₂O₃
probe Dysprosium

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-50.43	4.613	0.005	83524.1	350.5	1.0050	0.004
2	-47.06	4.566	0.004	83102.1	349.2	1.0101	0.004
3	-43.86	4.172	0.007	77404.3	338.3	1.0298	0.005
4	-40.85	4.010	0.001	73565.2	329.9	1.0181	0.005
5	-37.88	4.099	0.004	73945.3	330.7	1.0012	0.005
6	-34.90	3.997	0.008	71860.5	327.4	0.9978	0.005
7	-31.99	3.946	0.004	69711.1	322.5	0.9805	0.005
8	-29.03	4.121	0.004	71553.8	327.1	0.9637	0.004
9	-25.97	4.205	0.004	68829.5	321.0	0.9085	0.004
10	-22.88	4.209	0.004	66560.6	315.9	0.8776	0.004
11	-19.89	3.929	0.009	58185.2	296.5	0.8220	0.005
12	-16.95	4.099	0.005	56053.4	291.2	0.7590	0.004
13	-13.94	4.094	0.009	49113.9	273.1	0.6659	0.004
14	-11.13	3.564	0.001	35294.4	200.1	0.5496	0.003
15	-8.55	3.455	0.005	25299.5	170.5	0.4064	0.003
16	-6.27	2.743	0.021	10616.2	112.9	0.2148	0.003
17	-4.34	2.524	0.005	2405.0	60.0	0.0529	0.001
18	-2.51	2.462	0.004	1080.6	46.1	0.0244	0.001
19	-0.65	2.598	0.007	869.9	43.6	0.0186	0.001
20	1.30	2.694	0.008	933.8	44.5	0.0192	0.001
21	3.28	2.711	0.009	1615.2	52.6	0.0331	0.001
22	5.76	4.022	0.005	12705.6	124.0	0.1753	0.002
23	8.83	4.350	0.005	32567.4	195.2	0.4155	0.003
24	11.94	4.135	0.003	43834.9	226.1	0.5883	0.003
25	14.94	4.035	0.004	51015.5	283.7	0.7017	0.004
26	17.91	4.048	0.003	56996.5	299.2	0.7814	0.004
27	20.82	3.874	0.006	58285.8	303.4	0.8350	0.005
28	23.76	4.147	0.004	66990.3	325.4	0.8966	0.004
29	26.74	3.962	0.004	66814.3	325.6	0.9360	0.005
30	29.72	4.159	0.006	72271.5	339.3	0.9644	0.005
31	32.82	4.283	0.002	75622.2	347.3	0.9806	0.005
32	35.88	4.063	0.009	73622.7	342.7	1.0057	0.005
33	38.82	3.942	0.009	71787.1	338.6	1.0108	0.005
34	41.79	4.153	0.004	77183.6	352.1	1.0315	0.005
35	44.82	4.098	0.0	75135.5	347.1	1.0176	0.005
36	47.89	4.272	0.004	77296.2	352.8	1.0043	0.005
37	50.79	3.625	0.444	69832.9	336.0	1.0691	0.131

Table 1.3 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core
sample 0.25% Gd₂O₃
probe Dysprosium

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-50.87	3.744	0.019	140062.1	562.1	1.0047	0.007
2	-47.97	4.145	0.002	148695.3	581.0	0.9634	0.004
3	-44.89	4.212	0.013	157783.7	598.8	1.0059	0.005
4	-41.80	4.179	0.004	159008.6	602.0	1.0217	0.004
5	-38.81	3.948	0.009	149769.5	584.6	1.0188	0.005
6	-35.83	4.156	0.002	154940.4	595.6	1.0012	0.004
7	-32.85	3.927	0.009	144695.9	576.3	0.9895	0.005
8	-29.96	3.931	0.007	140865.0	569.1	0.9624	0.004
9	-26.88	4.421	0.003	153817.8	595.5	0.9343	0.004
10	-23.65	4.372	0.013	146503.2	581.8	0.8998	0.005
11	-20.69	3.644	0.015	116873.3	520.0	0.8613	0.005
12	-17.73	4.410	0.008	131818.2	552.8	0.8027	0.004
13	-14.74	3.709	0.003	98662.1	478.8	0.7143	0.004
14	-11.90	4.003	0.006	91098.4	460.5	0.6111	0.003
15	-8.83	4.333	0.005	72457.6	411.5	0.4491	0.003
16	-6.25	2.677	0.002	27521.0	219.1	0.2761	0.002
17	-4.23	2.825	0.018	15532.6	166.3	0.1477	0.002
18	-1.94	3.411	0.022	12459.1	123.4	0.0981	0.001
19	0.04	1.954	0.004	6600.0	91.6	0.0907	0.001
20	1.75	2.707	0.012	10004.3	111.6	0.0993	0.001
21	3.72	2.666	0.0	14109.2	131.8	0.1421	0.001
22	6.00	3.531	0.020	36441.5	209.8	0.2771	0.002
23	8.68	3.753	0.009	63008.6	389.4	0.4509	0.003
24	11.71	4.468	0.009	102628.4	497.2	0.6169	0.003
25	14.83	4.001	0.011	108594.8	512.2	0.7289	0.004
26	17.76	3.973	0.006	120325.8	539.6	0.8133	0.004
27	20.69	3.990	0.001	127691.3	556.5	0.8594	0.004
28	23.56	3.792	0.012	126205.1	553.8	0.8938	0.005
29	26.48	4.415	0.012	145248.5	594.8	0.9411	0.005
30	29.42	3.846	0.010	139394.8	583.2	0.9732	0.005
31	32.36	4.119	0.003	152189.9	610.1	0.9922	0.004
32	35.38	4.099	0.003	152794.9	612.0	1.0010	0.004
33	38.39	4.067	0.0	154579.3	616.1	1.0207	0.004
34	41.35	3.968	0.004	148906.2	605.3	1.0077	0.004
35	44.32	4.121	0.002	154748.9	617.7	1.0085	0.004
36	47.20	3.690	0.004	137146.1	582.1	0.9982	0.004
37	50.40	5.013	0.001	18494.1	676.9	0.9904	0.004

Table 1.6 activation traverses throughout the fuel rod in the annular core
sample 0.0% Gd₂O₃ probe Gold(bare)

no.	distance (mm)	weight (mg)	w _w	corrected count	o _c	activation	o _a
1	-50.83	10.255	0.012	108592.1	438.6	0.9842	0.004
2	-47.95	11.229	0.002	120148.2	461.4	0.9945	0.004
3	-44.96	11.125	0.005	118699.2	458.7	0.9917	0.004
4	-42.03	10.792	0.027	116114.6	453.7	1.0001	0.005
5	-39.04	11.557	0.013	125449.2	471.8	1.0089	0.004
6	-35.99	11.260	0.012	121458.3	464.0	1.0026	0.004
7	-32.99	11.201	0.002	121035.0	463.2	1.0044	0.004
8	-30.06	10.634	0.074	112209.9	446.0	0.9807	0.008
9	-27.03	12.043	0.010	125890.1	472.5	0.9716	0.004
10	-23.92	11.221	0.009	114702.3	451.0	0.9501	0.004
11	-20.95	10.935	0.006	109903.5	441.5	0.9341	0.004
12	-17.91	11.803	0.009	114877.2	451.4	0.9046	0.004
13	-14.92	10.589	0.005	98720.4	418.4	0.8665	0.004
14	-11.95	11.580	0.014	100774.4	422.7	0.8089	0.004
15	-8.89	11.307	0.012	86627.1	392.0	0.7121	0.003
16	-6.26	8.381	0.007	56505.3	316.8	0.6267	0.004
17	-4.17	7.204	0.003	42718.6	275.7	0.5511	0.004
18	-2.20	7.509	0.010	46197.9	286.7	0.5718	0.004
19	-0.38	6.073	0.006	41851.7	273.0	0.6405	0.004
20	1.44	7.529	0.003	44234.0	280.6	0.5460	0.003
21	3.54	8.214	0.014	49509.6	296.7	0.5602	0.003
22	5.93	9.651	0.005	64368.1	338.1	0.6199	0.003
23	8.76	11.469	0.002	87624.7	394.3	0.7101	0.003
24	11.54	9.314	0.009	80674.3	378.4	0.8051	0.004
25	14.41	12.138	0.006	112446.3	446.8	0.8610	0.003
26	17.55	11.338	0.009	109879.1	441.7	0.9008	0.004
27	20.60	11.486	0.007	115403.0	452.7	0.9339	0.004
28	23.59	10.846	0.012	112121.9	446.2	0.9608	0.004
29	26.59	11.600	0.012	120739.2	463.1	0.9674	0.004
30	29.66	11.367	0.012	120180.9	462.0	0.9827	0.004
31	32.61	10.679	0.015	114844.1	451.6	0.9995	0.004
32	35.58	11.502	0.002	124139.3	469.6	1.0032	0.004
33	38.61	11.150	0.012	119658.1	461.1	0.9975	0.004
34	41.61	11.240	0.001	120567.3	462.8	0.9970	0.004
35	44.54	10.705	0.009	115121.6	452.2	0.9996	0.004
36	47.37	10.417	0.003	110150.9	442.4	0.9828	0.004
37	50.48	12.857	0.005	133819.2	487.7	0.9674	0.004

Table 1.5 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core
sample 3.0% Gd₂O₃ probe Dysprosium

no.	distance (mm)	weight (mg)	w _w	corrected count	o _c	activation	o _a
1	-50.50	4.384	0.005	72720.7	280.0	1.0272	0.004
2	-47.29	4.384	0.004	73053.8	281.1	1.0319	0.004
3	-44.06	4.434	0.008	73471.1	282.5	1.0260	0.004
4	-40.80	4.475	0.004	74172.1	284.1	1.0264	0.004
5	-37.41	4.760	0.001	73621.3	284.0	0.9577	0.004
6	-34.03	4.470	0.003	71903.0	280.9	0.9960	0.004
7	-30.76	4.466	0.006	70352.2	277.8	0.9754	0.004
8	-27.47	4.520	0.009	68368.9	274.6	0.9367	0.004
9	-24.15	4.560	0.007	65741.4	269.7	0.8928	0.004
10	-20.83	4.511	0.007	61669.4	261.5	0.8466	0.004
11	-17.94	3.371	0.007	42536.4	217.7	0.7814	0.004
12	-15.50	3.312	0.005	38142.3	206.4	0.7131	0.004
13	-13.12	3.184	0.002	32830.1	192.1	0.6385	0.004
14	-10.73	3.347	0.009	28136.4	178.3	0.5206	0.004
15	-8.16	3.678	0.009	21192.2	155.2	0.3568	0.003
16	-5.89	2.517	0.002	5991.7	84.4	0.1474	0.002
17	-4.07	2.470	0.006	1453.3	45.3	0.0364	0.001
18	-2.26	2.459	0.003	789.3	36.3	0.0199	0.001
19	-0.39	2.642	0.006	749.2	35.8	0.0176	0.001
20	1.48	2.473	0.007	821.3	36.9	0.0206	0.001
21	3.24	2.357	0.004	1207.2	42.5	0.0317	0.001
22	5.55	3.949	0.005	10716.1	112.6	0.1680	0.002
23	8.49	4.075	0.002	26811.3	176.4	0.4074	0.003
24	11.45	4.021	0.004	37405.0	208.4	0.5760	0.003
25	14.49	4.286	0.003	47532.1	235.2	0.6867	0.003
26	17.59	4.175	0.005	52683.9	247.8	0.7814	0.004
27	20.63	4.113	0.001	56628.6	257.2	0.8525	0.004
28	23.69	4.243	0.004	60508.0	266.3	0.8831	0.004
29	26.78	4.216	0.004	63021.8	272.5	0.9256	0.004
30	29.86	4.196	0.004	65616.5	278.2	0.9685	0.004
31	32.92	4.164	0.012	67154.5	282.0	0.9986	0.005
32	35.93	4.057	0.009	65922.3	279.9	1.0062	0.004
33	38.90	4.064	0.004	66990.4	282.9	1.0208	0.004
34	41.82	3.892	0.011	63266.9	275.1	1.0066	0.005
35	44.69	3.967	0.002	64537.6	278.4	1.0074	0.004
36	47.58	3.916	0.008	62877.5	275.4	0.9942	0.005
37	50.56	4.216	0.007	67197.6	285.1	0.9870	0.005

Table 1.7 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core sample 0.05% Gd₂O₃ probe Gold(bare)

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-50.57	10.192	0.004	32423.0	144.7	1.0056	0.005
2	-47.91	11.333	0.019	36289.6	153.0	1.0122	0.005
3	-44.94	10.973	0.009	35532.7	163.7	1.0236	0.005
4	-41.95	11.537	0.002	37052.6	167.1	1.0152	0.005
5	-38.97	10.839	0.004	34836.6	162.0	1.0160	0.005
6	-36.04	11.211	0.009	35552.5	163.7	1.0025	0.005
7	-33.01	11.558	0.0	36397.8	165.6	0.9955	0.005
8	-30.00	11.047	0.001	34074.3	160.4	0.9750	0.005
9	-26.99	11.563	0.001	35347.4	163.3	0.9663	0.004
10	-23.91	11.585	0.006	34374.9	161.0	0.9379	0.004
11	-20.92	10.919	0.010	31370.9	153.9	0.9082	0.005
12	-18.00	11.009	0.011	29951.9	150.4	0.8600	0.004
13	-15.08	10.968	0.016	28046.7	145.6	0.8083	0.004
14	-12.10	11.468	0.013	26453.4	141.5	0.7292	0.004
15	-9.19	10.417	0.003	20080.2	114.4	0.6093	0.003
16	-6.69	8.389	0.0	12954.3	92.3	0.4811	0.003
17	-4.56	7.569	0.003	9482.5	79.3	0.3960	0.003
18	-2.59	7.252	0.003	7863.5	72.5	0.3427	0.003
19	-0.65	7.396	0.001	7445.5	70.7	0.3182	0.003
20	1.27	7.017	0.013	7150.8	69.4	0.3221	0.003
21	3.29	8.219	0.012	8974.8	77.4	0.3452	0.003
22	5.08	5.257	0.020	6622.8	66.9	0.3982	0.004
23	6.51	5.484	0.003	7995.8	73.2	0.4609	0.004
24	9.02	13.374	0.004	24349.5	136.1	0.5755	0.003
25	12.22	10.730	0.018	24022.3	135.3	0.7077	0.004
26	15.17	11.499	0.009	28693.3	147.4	0.7922	0.004
27	18.20	11.325	0.026	30176.1	151.5	0.8423	0.005
28	21.18	11.042	0.009	31083.8	153.6	0.8899	0.004
29	24.12	11.060	0.004	32675.6	157.6	0.9339	0.005
30	27.04	10.944	0.010	31989.0	155.5	0.9240	0.005
31	30.05	11.687	0.001	36172.2	165.5	0.9784	0.004
32	33.09	11.096	0.005	34958.5	163.0	0.9959	0.005
33	36.02	10.946	0.020	34487.4	161.6	0.9959	0.005
34	39.02	11.604	0.005	36975.4	167.6	1.0073	0.005
35	41.99	10.757	0.003	33222.1	159.8	0.9909	0.005
36	44.92	11.292	0.007	35959.5	165.0	1.0067	0.005
37	47.94	11.390	0.003	35935.2	165.0	0.9973	0.005
38	50.79	10.035	0.005	31569.6	154.7	0.9945	0.005

Table 1.8 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core sample 0.25% Gd₂O₃ probe Gold(bare)

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-50.79	11.301	0.003	47534.5	287.9	1.0169	0.006
2	-47.75	11.398	0.031	47398.9	287.5	1.0054	0.007
3	-44.80	10.719	0.013	45286.4	281.0	1.0214	0.006
4	-41.86	11.230	0.010	47669.5	288.3	1.0263	0.006
5	-38.89	11.003	0.012	46769.1	285.6	1.0277	0.006
6	-35.94	11.096	0.007	45972.3	283.2	1.0017	0.006
7	-32.98	11.063	0.001	46021.2	283.3	1.0057	0.006
8	-30.06	10.763	0.009	43238.7	274.7	0.9713	0.006
9	-27.16	10.947	0.018	42188.4	271.3	0.9318	0.006
10	-24.16	11.446	0.010	43459.1	275.4	0.9180	0.006
11	-21.12	11.301	0.001	41203.9	268.2	0.8815	0.006
12	-18.16	10.877	0.003	36621.5	252.9	0.8140	0.006
13	-15.21	11.180	0.005	34511.8	245.6	0.7464	0.005
14	-12.18	11.508	0.002	31094.7	233.2	0.6533	0.005
15	-9.71	6.930	0.018	15551.3	165.7	0.5426	0.006
16	-7.83	7.109	0.012	12863.5	107.0	0.4375	0.004
17	-5.82	7.958	0.012	10014.0	94.8	0.3042	0.003
18	-3.85	6.800	0.001	5326.1	70.2	0.1894	0.002
19	-1.87	7.973	0.008	4824.7	67.1	0.1463	0.002
20	0.15	7.152	0.003	4004.9	61.6	0.1354	0.002
21	2.09	7.367	0.010	4421.8	64.4	0.1449	0.002
22	4.02	7.055	0.004	5497.4	71.3	0.1884	0.002
23	6.18	9.118	0.012	11826.7	145.0	0.3136	0.004
24	8.89	11.139	0.002	22428.0	198.5	0.4868	0.004
25	11.79	10.549	0.010	27569.4	219.8	0.6319	0.005
26	14.73	11.476	0.001	34034.3	244.1	0.7170	0.005
27	17.79	11.359	0.006	37520.6	256.2	0.7986	0.005
28	20.74	10.753	0.001	38029.7	257.9	0.8551	0.006
29	23.68	11.251	0.002	42435.1	272.4	0.9119	0.006
30	26.69	11.273	0.005	42727.3	273.3	0.9164	0.006
31	29.67	10.949	0.009	43604.9	276.1	0.9629	0.006
32	32.57	10.762	0.002	43714.5	276.5	0.9821	0.006
33	35.42	10.581	0.001	43824.4	276.8	1.0014	0.006
34	38.32	11.144	0.013	46994.2	286.6	1.0195	0.006
35	41.34	11.402	0.004	47807.9	289.1	1.0137	0.006
36	44.34	11.037	0.004	45950.8	283.5	1.0066	0.006
37	47.31	11.188	0.002	47520.1	288.2	1.0269	0.006
38	50.55	13.071	0.003	54517.8	308.7	1.0084	0.006

Table 1.9 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core sample 1.5% Gd₂O₃ probe Gold(bare)

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-50.57	11.326	0.008	33837.8	198.6	1.0145	0.006
2	-47.51	11.615	0.003	34846.7	201.6	1.0187	0.006
3	-44.35	12.130	0.003	36127.0	205.4	1.0113	0.006
4	-41.28	10.905	0.004	32122.6	193.5	1.0002	0.006
5	-38.36	11.047	0.001	32869.9	195.9	1.0104	0.006
6	-35.40	11.235	0.001	33098.5	196.6	1.0004	0.006
7	-32.43	11.008	0.005	32002.0	193.3	0.9872	0.006
8	-29.45	11.379	0.003	32108.5	193.6	0.9582	0.006
9	-26.46	11.099	0.005	30228.8	187.9	0.9249	0.006
10	-23.48	11.275	0.005	29571.6	186.0	0.8906	0.006
11	-20.46	11.393	0.008	28391.5	182.2	0.8462	0.005
12	-17.60	10.148	0.001	23199.8	164.9	0.7763	0.006
13	-14.83	10.635	0.015	22175.0	152.1	0.7080	0.005
14	-11.97	10.837	0.012	18869.3	140.5	0.5912	0.004
15	-8.86	12.501	0.002	16373.5	131.0	0.4448	0.004
16	-6.16	7.824	0.007	5534.0	77.6	0.2402	0.003
17	-4.06	7.973	0.005	2078.8	49.7	0.0885	0.002
18	-1.96	7.810	0.010	1523.5	43.6	0.0662	0.002
19	0.11	7.720	0.007	1428.7	42.5	0.0628	0.002
20	2.20	7.993	0.005	1648.0	45.0	0.0700	0.002
21	4.15	6.679	0.010	2057.1	49.5	0.1046	0.003
22	5.90	6.452	0.014	4610.3	71.2	0.2426	0.004
23	9.07	17.392	0.029	24025.2	158.3	0.4691	0.003
24	13.09	12.768	0.007	24854.4	170.7	0.6610	0.005
25	16.20	10.592	0.010	23497.7	166.1	0.7533	0.005
26	19.02	10.618	0.004	25704.6	173.6	0.8221	0.006
27	21.93	11.244	0.004	28583.9	182.9	0.8632	0.006
28	24.93	11.289	0.011	30319.0	188.6	0.9120	0.006
29	27.88	10.821	0.006	30172.9	188.1	0.9468	0.006
30	30.75	10.760	0.012	30579.1	189.2	0.9651	0.006
31	33.48	9.758	0.014	28824.1	183.9	1.0031	0.007
32	36.20	10.653	0.0	31728.3	192.6	1.0114	0.006
33	39.03	10.584	0.003	31606.1	192.3	1.0140	0.006
34	41.89	10.904	0.004	32951.3	196.5	1.0261	0.006
35	44.76	10.691	0.034	32298.2	194.4	1.0258	0.007
36	47.65	10.982	0.002	33172.9	197.1	1.0257	0.006
37	50.79	11.142	0.006	33906.0	199.4	1.0333	0.006

Table 1.10 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core sample 3.0% Gd₂O₃ probe Gold(bare)

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-50.57	11.464	0.003	40383.5	203.3	1.0434	0.005
2	-47.47	11.412	0.001	40232.7	203.0	1.0440	0.005
3	-44.35	11.972	0.004	41779.3	206.8	1.0334	0.005
4	-41.22	11.575	0.009	40411.2	203.4	1.0339	0.005
5	-38.13	11.583	0.005	40486.8	203.6	1.0352	0.005
6	-35.01	11.787	0.004	39934.8	202.3	1.0034	0.005
7	-31.87	11.763	0.012	39168.5	200.3	0.9861	0.005
8	-28.75	11.688	0.003	37735.0	196.7	0.9561	0.005
9	-25.66	11.457	0.0	35688.8	191.3	0.9225	0.005
10	-22.59	11.590	0.009	34614.7	188.4	0.8845	0.005
11	-19.50	11.541	0.004	32535.9	182.7	0.8349	0.005
12	-16.36	12.040	0.006	31731.9	180.5	0.7805	0.004
13	-13.28	11.064	0.005	25049.2	160.6	0.6705	0.004
14	-10.45	10.152	0.003	19124.6	140.6	0.5579	0.004
15	-8.03	7.982	0.004	11363.3	109.0	0.4216	0.004
16	-6.08	6.888	0.011	6017.5	80.3	0.2665	0.004
17	-4.30	6.681	0.003	2090.1	49.6	0.0926	0.002
18	-2.49	6.909	0.005	1493.7	43.1	0.0640	0.002
19	-0.57	7.492	0.012	1461.4	42.7	0.0578	0.002
20	1.39	7.228	0.070	1501.1	43.2	0.0615	0.002
21	3.29	6.991	0.010	1530.6	43.5	0.0648	0.002
22	5.57	10.120	0.012	5503.3	77.0	0.1610	0.002
23	8.48	11.707	0.014	16297.2	130.0	0.4123	0.003
24	11.65	12.085	0.010	23825.5	156.7	0.5838	0.004
25	14.78	11.389	0.011	26753.1	166.0	0.6957	0.004
26	17.85	11.679	0.021	30885.8	178.2	0.7832	0.005
27	20.98	11.811	0.009	33442.9	185.4	0.8386	0.005
28	24.14	11.821	0.009	35415.7	190.8	0.8873	0.005
29	27.18	11.033	0.001	34704.6	188.9	0.9315	0.005
30	30.15	11.208	0.013	36435.7	193.5	0.9627	0.005
31	33.12	11.109	0.004	36998.6	195.0	0.9863	0.005
32	36.16	11.707	0.014	39427.5	201.3	0.9974	0.005
33	39.20	11.044	0.005	37676.2	196.8	1.0103	0.005
34	42.17	11.239	0.004	38304.5	198.4	1.0093	0.005
35	45.14	11.032	0.004	37842.3	197.2	1.0159	0.005
36	48.07	10.963	0.012	37457.6	196.2	1.0118	0.005
37	50.79	9.451	0.014	32558.2	183.1	1.0202	0.006

Table 1.11 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core
sample 0.0% Gd₂O₃
probe Gold(Cadmium)

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-34.67	5.822	0.012	11874.1	80.9	0.1907	0.0014
2	-32.77	8.391	0.015	5478.0	56.9	0.0610	0.0006
3	-30.64	7.582	0.013	4713.9	53.3	0.0581	0.0007
4	-28.61	7.605	0.019	4739.8	53.4	0.0583	0.0007
5	-26.58	7.540	0.0	4525.4	52.4	0.0561	0.0006
6	-24.65	6.926	0.009	4073.7	50.1	0.0550	0.0007
7	-22.78	7.079	0.001	4226.7	50.9	0.0558	0.0007
8	-20.77	7.964	0.010	4738.6	53.5	0.0556	0.0006
9	-18.64	7.902	0.093	4563.7	52.6	0.0540	0.0009
10	-16.59	7.476	0.011	4416.4	51.9	0.0552	0.0007
11	-14.61	7.293	0.006	4213.3	50.9	0.0540	0.0007
12	-12.77	6.532	0.017	3632.3	47.8	0.0520	0.0007
13	-10.82	8.068	0.006	4478.2	52.2	0.0519	0.0006
14	-8.60	8.527	0.005	4815.5	53.9	0.0528	0.0006
15	-6.57	6.952	0.002	3554.8	47.4	0.0500	0.0007
16	-4.75	6.952	0.002	3701.4	48.2	0.0498	0.0006
17	-2.73	8.195	0.006	4399.0	51.8	0.0502	0.0006
18	-0.61	7.649	0.004	4099.8	50.3	0.0501	0.0006
19	1.42	7.498	0.011	3974.7	49.7	0.0496	0.0006
20	3.44	7.610	0.005	4193.8	50.8	0.0515	0.0006
21	5.39	6.990	0.009	3809.0	48.8	0.0510	0.0007
22	7.24	6.887	0.004	3830.7	49.0	0.0520	0.0007
23	9.21	7.810	0.013	4375.8	51.8	0.0524	0.0006
24	11.27	7.597	0.001	4358.9	51.7	0.0536	0.0006
25	13.27	7.353	0.012	4236.1	51.1	0.0539	0.0007
26	15.23	7.350	0.010	4210.7	51.0	0.0536	0.0007
27	17.24	7.716	0.017	4482.1	52.3	0.0543	0.0006
28	19.24	7.229	0.002	4327.7	51.6	0.0559	0.0007
29	21.17	7.217	0.005	4379.4	51.8	0.0567	0.0007
30	23.17	7.727	0.009	4706.2	53.5	0.0569	0.0007
31	25.15	7.086	0.003	4352.5	51.7	0.0574	0.0007
32	27.22	8.389	0.026	5031.5	55.0	0.0561	0.0006
33	29.29	7.080	0.001	4470.9	52.3	0.0590	0.0007
34	31.20	7.197	0.008	4496.6	52.5	0.0584	0.0007
35	33.11	7.129	0.0	4653.1	53.2	0.0610	0.0007
36	34.76	5.187	0.027	7879.7	67.2	0.1420	0.0014

Table 1.12 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core
sample 0.05% Gd₂O₃
probe Gold(Cadmium)

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-33.75	11.930	0.011	4077.4	48.2	0.1087	0.0013
2	-30.67	11.105	0.001	2040.0	35.6	0.0384	0.0010
3	-27.68	11.190	0.004	2027.7	35.5	0.0576	0.0010
4	-24.69	11.121	0.006	2004.9	35.4	0.0573	0.0010
5	-21.71	11.109	0.004	1936.6	34.9	0.0554	0.0010
6	-18.73	11.152	0.005	1909.0	34.7	0.0544	0.0010
7	-15.73	11.273	0.006	1901.1	34.6	0.0536	0.0010
8	-12.74	11.014	0.002	1877.3	34.4	0.0542	0.0010
9	-10.30	7.249	0.003	1234.8	29.2	0.0542	0.0013
10	-8.23	8.216	0.001	1330.1	30.0	0.0515	0.0012
11	-6.24	6.603	0.027	1076.3	27.8	0.0518	0.0014
12	-4.40	7.156	0.0	1178.1	28.7	0.0524	0.0013
13	-2.42	7.648	0.003	1233.0	29.2	0.0513	0.0012
14	-0.41	7.356	0.003	1171.4	28.6	0.0506	0.0012
15	1.62	7.823	0.021	1259.5	29.4	0.0512	0.0012
16	3.60	6.969	0.007	1130.5	28.3	0.0516	0.0013
17	5.88	10.092	0.003	1715.3	33.2	0.0540	0.0010
18	8.97	12.949	0.035	2114.5	36.2	0.0519	0.0009
19	12.22	11.325	0.007	1893.9	34.6	0.0532	0.0010
20	15.31	11.728	0.004	2083.1	36.0	0.0565	0.0010
21	18.27	10.386	0.005	1889.5	34.6	0.0579	0.0011
22	21.18	11.317	0.006	2052.1	35.8	0.0577	0.0010
23	24.16	10.951	0.006	2020.9	35.6	0.0587	0.0010
24	27.10	11.025	0.002	2110.7	36.2	0.0609	0.0010
25	30.21	12.169	0.002	2347.5	37.9	0.0613	0.0010
26	32.89	7.840	0.006	1527.4	31.8	0.0619	0.0013
27	34.65	5.268	0.0013	1984.4	35.3	0.1198	0.0022

Table 1.14 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core

no.	distance (mm)	weight (mg)	ω_w	corrected count	α_c	sample probe	
						1.5% Gd ₂ O ₃ Gold	α_a
1	-33.80	11.859	0.017	3839.0	46.5	0.1132	0.0014
2	-30.71	11.653	0.0	2080.3	35.6	0.0610	0.0010
3	-27.56	11.942	0.001	2095.9	35.7	0.0600	0.0010
4	-24.62	10.146	0.009	1720.7	33.0	0.0579	0.0011
5	-21.94	9.946	0.0	1706.9	32.9	0.0586	0.0011
6	-19.25	10.227	0.002	1621.7	32.2	0.0542	0.0011
7	-16.54	10.096	0.004	1616.9	32.2	0.0547	0.0011
8	-13.86	10.001	0.0	1586.7	31.9	0.0542	0.0011
9	-11.19	10.029	0.005	1544.5	31.6	0.0526	0.0011
10	-8.44	10.602	0.004	1537.7	31.6	0.0495	0.0010
11	-6.02	7.605	0.004	1112.6	27.9	0.0500	0.0013
12	-4.01	7.490	0.004	1068.7	27.5	0.0487	0.0013
13	-2.06	7.118	0.005	1026.2	27.1	0.0492	0.0013
14	-0.10	7.611	0.004	1092.9	27.8	0.0490	0.0012
15	1.93	7.599	0.003	1057.1	27.4	0.0475	0.0012
16	3.87	6.981	0.007	997.9	26.9	0.0488	0.0013
17	5.89	8.184	0.007	1203.0	28.8	0.0502	0.0012
18	8.50	11.415	0.014	1695.7	32.8	0.0507	0.0010
19	11.58	11.653	0.011	1748.6	33.3	0.0513	0.0010
20	14.67	11.544	0.005	1798.6	33.6	0.0532	0.0010
21	17.71	11.226	0.009	1804.3	33.7	0.0549	0.0010
22	20.76	11.666	0.014	1849.3	34.0	0.0542	0.0010
23	23.77	10.931	0.025	1783.0	33.5	0.0557	0.0011
24	26.70	11.057	0.005	2022.9	35.3	0.0625	0.0011
25	29.57	10.456	0.004	1762.4	33.4	0.0576	0.0011
26	32.15	8.903	0.005	1668.0	32.7	0.0640	0.0013
27	34.34	7.559	0.003	2895.3	41.1	0.1308	0.0019

Table 1.13 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core

no.	distance (mm)	weight (mg)	ω_w	corrected count	α_c	sample probe	
						0.25% Gd ₂ O ₃ Gold	α_a
1	-33.49	14.748	0.001	3163.1	43.6	0.0522	0.0007
2	-30.17	10.225	0.002	2474.7	39.3	0.0589	0.0009
3	-27.23	11.835	0.014	2747.3	41.0	0.0565	0.0008
4	-24.24	10.659	0.004	2494.9	39.4	0.0570	0.0009
5	-21.26	11.732	0.008	2663.0	40.5	0.0552	0.0008
6	-18.37	10.051	0.008	2280.7	38.0	0.0552	0.0009
7	-15.42	12.105	0.012	2686.9	40.7	0.0540	0.0008
8	-12.34	11.058	0.003	2444.2	39.1	0.0538	0.0009
9	-9.14	12.980	0.002	2837.5	41.6	0.0532	0.0008
10	-6.45	7.289	0.007	1581.6	32.8	0.0528	0.0011
11	-4.46	7.680	0.027	1614.9	33.1	0.0511	0.0011
12	-2.51	6.962	0.005	1421.1	31.5	0.0496	0.0011
13	-0.59	7.459	0.004	1526.5	32.4	0.0498	0.0011
14	1.34	7.098	0.005	1503.4	32.2	0.0515	0.0011
15	3.25	7.222	0.005	1556.0	32.6	0.0524	0.0011
16	5.75	11.624	0.008	2449.8	39.2	0.0513	0.0008
17	8.70	10.548	0.008	2307.7	38.2	0.0532	0.0009
18	11.67	11.746	0.014	2688.4	40.7	0.0557	0.0008
19	14.73	11.255	0.002	2527.1	39.7	0.0546	0.0009
20	17.84	10.649	0.008	2411.2	38.9	0.0551	0.0009
21	20.60	11.609	0.004	2704.2	40.8	0.0567	0.0009
22	23.60	10.986	0.027	2574.2	40.0	0.0570	0.0009
23	26.42	10.216	0.001	2423.8	39.0	0.0577	0.0009
24	29.34	11.687	0.007	2809.6	41.5	0.0585	0.0009
25	33.17	17.139	0.023	8701.8	69.4	0.1235	0.0010

Table 1.16 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample 0.0% Gd₂O₃ probe Dysprosium

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-17.83	2.122	0.006	20164.3	124.4	0.9855	0.0067
2	-15.91	3.002	0.006	28445.5	146.7	0.9827	0.0055
3	-13.71	2.894	0.011	27523.0	144.7	0.9865	0.0063
4	-11.60	2.742	0.005	25995.8	141.1	0.9834	0.0057
5	-9.84	1.975	0.009	17573.7	117.0	0.9230	0.0074
6	-8.28	2.206	0.003	18545.8	121.0	0.8719	0.0058
7	-6.54	2.435	0.009	20127.0	126.3	0.8574	0.0062
8	-4.60	2.770	0.002	19778.5	127.6	0.7407	0.0048
9	-2.43	3.033	0.004	19811.0	127.7	0.6776	0.0044
10	-0.14	3.070	0.007	19265.3	126.4	0.6509	0.0045
11	2.09	2.913	0.004	18988.6	126.1	0.6762	0.0046
12	4.28	2.925	0.007	19856.2	128.9	0.7042	0.0049
13	6.58	3.227	0.003	23732.5	140.3	0.7628	0.0046
14	8.96	3.129	0.002	28405.3	148.9	0.9417	0.0050
15	11.22	2.909	0.007	27595.5	147.2	0.9840	0.0058
16	13.39	2.912	0.001	27739.6	148.2	0.9880	0.0053
17	15.54	2.882	0.002	26433.6	145.1	0.9716	0.0054
18	17.63	2.770	0.002	24213.2	139.4	0.9067	0.0053
19	19.62	2.557	0.012	19643.0	126.5	0.7967	0.0063

Table 1.15 Activation traverses throughout the fuel rod in the annular core
sample 3.0% Gd₂O₃ probe Gold(Cadmium)

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-33.95	10.661	0.003	4102.0	35.0	0.1146	0.0010
2	-31.14	10.432	0.001	2132.0	26.9	0.0609	0.0008
3	-28.36	10.399	0.010	2043.6	26.4	0.0585	0.0008
4	-25.52	10.888	0.012	2017.2	26.3	0.0552	0.0007
5	-22.60	10.939	0.012	2063.0	26.6	0.0562	0.0007
6	-19.88	9.416	0.012	1740.9	25.0	0.0551	0.0008
7	-17.35	9.609	0.012	1723.6	24.9	0.0534	0.0008
8	-14.60	10.935	0.002	1969.0	26.1	0.0536	0.0007
9	-11.67	11.070	0.014	1945.6	29.6	0.0524	0.0007
10	-8.65	11.053	0.008	1935.0	26.0	0.0501	0.0007
11	-6.19	6.934	0.005	1158.7	21.8	0.0498	0.0009
12	-4.30	7.257	0.009	1172.3	21.9	0.0481	0.0009
13	-2.34	7.490	0.008	1258.9	22.4	0.0501	0.0009
14	-0.42	6.876	0.004	1088.4	21.4	0.0472	0.0009
15	1.51	7.752	0.009	1203.6	22.1	0.0474	0.0009
16	3.55	7.762	0.002	1256.0	22.4	0.0482	0.0009
17	5.85	9.437	0.007	1575.5	24.2	0.0497	0.0008
18	8.51	10.495	0.006	1778.9	25.2	0.0505	0.0007
19	11.25	10.080	0.002	1769.6	25.2	0.0523	0.0007
20	13.97	10.301	0.005	1816.1	25.4	0.0525	0.0007
21	16.80	10.869	0.005	1986.2	26.3	0.0544	0.0007
22	19.60	10.116	0.006	1922.6	26.1	0.0566	0.0008
23	22.33	10.314	0.006	1934.9	26.2	0.0559	0.0008
24	25.07	10.236	0.004	2022.2	26.6	0.0589	0.0008
25	30.79	10.743	0.001	2216.4	27.6	0.0615	0.0008
26	33.80	11.794	0.004	4879.0	38.2	0.1232	0.0010

Table 1.17 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample 0.05% Gd₂O₃ probe Dysprosium

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-17.47	2.844	0.0	26832.7	169.1	0.9384	0.0059
2	-15.32	2.983	0.004	29312.3	176.8	0.9772	0.0061
3	-13.14	2.932	0.004	29211.0	176.8	0.9908	0.0062
4	-11.06	2.694	0.010	25644.2	166.2	0.9466	0.0070
5	-8.56	4.086	0.012	34214.4	191.6	0.8329	0.0053
6	-6.03	2.762	0.004	18322.5	141.8	0.6598	0.0052
7	-4.01	2.694	0.0	14545.8	127.3	0.5370	0.0047
8	-2.00	2.763	0.005	12781.0	120.0	0.4601	0.0044
9	0.15	3.065	0.003	13700.7	124.2	0.4445	0.0040
10	2.33	2.822	0.0	13126.5	121.9	0.4626	0.0043
11	4.37	2.723	0.009	13806.5	125.0	0.5043	0.0049
12	6.29	2.475	0.012	15287.4	131.4	0.6142	0.0060
13	8.23	2.790	0.009	20958.1	153.1	0.7471	0.0060
14	10.29	2.800	0.006	25166.3	167.5	0.8938	0.0063
15	12.32	2.692	0.003	26878.9	173.2	0.9929	0.0065
16	14.30	2.669	0.001	27263.9	174.7	1.0158	0.0065
17	16.46	3.188	0.005	32430.8	190.3	1.0118	0.0062
18	10.11	3.974	0.007	37052.3	203.5	0.9274	0.0054

Table 1.18 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample 0.25% Gd₂O₃ probe Dysprosium

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-16.51	2.814	0.005	68352.6	356.4	1.0111	0.0056
2	-14.45	2.911	0.002	70439.9	362.6	1.0073	0.0052
3	-12.34	2.939	0.007	67116.0	354.7	0.9506	0.0055
4	-10.61	1.899	0.007	40054.8	276.3	0.8780	0.0069
5	-9.25	1.928	0.003	37437.1	267.8	0.8081	0.0059
6	-7.51	2.929	0.004	24541.9	189.4	0.3488	0.0027
7	-5.36	3.060	0.004	29438.0	207.3	0.4004	0.0029
8	-3.08	3.250	0.005	19574.6	171.7	0.2507	0.0022
9	-0.85	2.928	0.004	14625.3	150.3	0.2079	0.0022
10	1.26	2.945	0.003	15312.0	154.3	0.2164	0.0022
11	3.03	1.984	0.002	12278.2	139.7	0.2576	0.0029
12	4.65	2.543	0.006	21805.2	182.1	0.3569	0.0031
13	6.50	2.625	0.044	37341.4	273.0	0.5922	0.0109
14	8.48	2.879	0.011	45414.3	300.6	0.6566	0.0050
15	10.72	3.345	0.003	68259.4	367.4	0.8493	0.0046
16	13.05	3.105	0.001	72482.2	378.9	0.9716	0.0051
17	15.23	2.947	0.009	72127.4	378.7	1.0188	0.0062
18	17.37	2.994	0.003	72402.7	380.0	1.0065	0.0054
19	19.52	2.947	0.001	65955.7	363.7	0.9315	0.0051

Table 1.19 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample probe 1.5% Gd₂O₃ Dysprosium

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected	σ_c	activation	σ_a
1	-16.26	3.157	0.004	43407.8	214.1	1.0013	0.0051
2	-14.00	2.952	0.004	40065.2	206.1	0.9883	0.0053
3	-11.82	2.936	0.003	36758.7	198.0	0.9117	0.0050
4	-9.08	4.467	0.004	45226.0	219.6	0.7374	0.0036
5	-6.33	2.994	0.002	18642.1	142.8	0.4535	0.0035
6	-4.13	2.944	0.008	6723.6	88.8	0.1663	0.0022
7	-1.83	3.268	0.005	4167.8	52.4	0.0929	0.0012
8	0.45	2.917	0.004	3266.5	47.8	0.0815	0.0012
9	2.60	2.894	0.004	3672.7	50.2	0.0924	0.0013
10	5.25	4.259	0.004	13338.1	88.0	0.2281	0.0015
11	7.93	3.000	0.010	24143.8	164.5	0.5860	0.0044
12	10.15	3.005	0.004	31949.5	188.9	0.7744	0.0047
13	12.49	3.331	0.007	41461.3	215.0	0.9065	0.0051
14	14.79	2.897	0.006	39684.3	210.8	0.9975	0.0057
15	16.96	2.975	0.004	41032.4	214.6	1.0044	0.0055
16	19.32	3.400	0.005	45045.3	225.1	0.9649	0.0051

Table 1.20 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample probe 3.0% Gd₂O₃ Dysprosium

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-16.08	2.955	0.009	30143.4	178.9	1.0011	0.0067
2	-14.05	2.575	0.008	26056.1	166.9	0.9929	0.0071
3	-12.19	2.462	0.010	23750.2	159.8	0.9466	0.0074
4	-10.29	2.698	0.015	22814.8	157.0	0.8298	0.0074
5	-8.37	2.532	0.006	17493.8	138.4	0.6779	0.0056
6	-6.31	3.057	0.004	13369.5	122.0	0.4292	0.0039
7	-4.13	2.858	0.004	3491.9	67.1	0.1199	0.0023
8	-2.07	2.746	0.005	1969.2	54.0	0.0704	0.0019
9	-0.02	2.831	0.007	1704.2	51.4	0.0591	0.0018
10	1.96	2.524	0.004	1658.3	51.0	0.0645	0.0020
11	3.95	2.884	0.0	2615.4	60.3	0.0890	0.0021
12	6.04	2.793	0.008	8625.0	100.5	0.3030	0.0036
13	8.13	2.883	0.007	17597.2	140.8	0.5990	0.0050
14	10.24	2.850	0.002	22952.1	160.3	0.7904	0.0055
15	12.39	2.993	0.001	27977.8	176.7	0.9173	0.0058
16	14.54	2.848	0.002	28615.1	179.0	0.9861	0.0062
17	16.94	3.655	0.009	37736.5	205.2	1.0133	0.0060
18	19.43	3.117	0.004	29067.9	181.0	0.9152	0.0058

Table 1.21 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample probe 0.0% Gd₂O₃ Gold(bare)

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	oc	activation	σ_a
1	-17.23	7.024	0.004	16556.2	110.8	0.9784	0.0066
2	-15.30	7.381	0.0	17685.8	114.4	0.9946	0.0064
3	-13.36	7.098	0.005	16891.6	111.9	0.9878	0.0066
4	-11.61	5.990	0.010	14299.2	103.2	0.9908	0.0073
5	-9.81	7.410	0.007	17311.9	113.3	0.9698	0.0064
6	-7.86	7.150	0.005	15768.8	108.2	0.9154	0.0063
7	-6.05	6.329	0.002	12991.4	98.5	0.8520	0.0065
8	-4.30	6.751	0.004	13036.1	98.7	0.8015	0.0061
9	-2.50	6.666	0.006	12492.6	96.7	0.7778	0.0061
10	-0.68	6.907	0.002	12434.8	96.5	0.7473	0.0058
11	1.19	7.046	0.002	12856.2	98.1	0.7574	0.0058
12	3.41	9.559	0.003	17858.4	115.1	0.7754	0.0050
13	6.12	10.616	0.011	21293.3	125.4	0.8326	0.0050
14	8.55	7.498	0.007	16619.3	111.1	0.9200	0.0062
15	10.60	7.799	0.004	18527.3	117.2	0.9861	0.0063
16	12.74	8.179	0.008	19770.5	121.0	1.0033	0.0062
17	14.74	6.791	0.004	16194.8	109.7	0.9898	0.0067
18	16.85	8.909	0.002	20898.5	124.3	0.9737	0.0058
19	19.31	9.455	0.005	20944.4	124.5	0.9195	0.0055

Table 1.22 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample probe 0.05% Gd₂O₃ Gold(bare)

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	oc	activation	σ_a
1	-17.54	7.375	0.003	10457.9	90.5	0.9646	0.0084
2	-15.58	7.309	0.003	10611.3	91.0	0.9876	0.0085
3	-13.61	7.472	0.005	10860.9	92.1	0.9888	0.0084
4	-11.67	7.124	0.008	10090.1	88.6	0.9634	0.0085
5	-9.80	6.918	0.011	9476.3	86.2	0.9318	0.0086
6	-7.87	7.505	0.004	9426.9	86.0	0.8545	0.0078
7	-5.81	7.962	0.009	8849.9	83.4	0.7561	0.0072
8	-3.77	7.354	0.004	7079.9	75.0	0.6549	0.0069
9	-1.85	7.025	0.001	6317.3	71.2	0.6117	0.0069
10	0.05	7.228	0.001	6433.4	71.7	0.6054	0.0068
11	1.92	6.851	0.002	6076.3	69.7	0.6034	0.0069
12	3.78	7.084	0.005	6800.5	73.5	0.6530	0.0071
13	5.89	8.765	0.003	9085.0	84.3	0.7051	0.0065
14	8.03	7.257	0.007	8970.8	83.9	0.8409	0.0079
15	9.98	7.387	0.004	9973.8	88.1	0.9185	0.0081
16	11.95	7.399	0.003	10596.6	91.0	0.9742	0.0084
17	13.90	7.216	0.006	10590.5	90.8	0.9983	0.0086
18	15.83	7.239	0.002	10964.6	92.5	1.0304	0.0087
19	17.74	7.110	0.003	10619.8	91.3	1.0160	0.0087
20	19.63	7.094	0.002	9940.5	88.3	0.9532	0.0085

Table 1.23 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample probe 0.25% Gd₂O₃ Gold(bare)

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-16.65	7.975	0.012	16553.8	111.9	1.0121	0.0070
2	-14.55	7.686	0.006	15620.9	108.7	0.9909	0.0069
3	-12.55	7.283	0.005	14594.0	105.2	0.9771	0.0071
4	-10.51	7.893	0.006	14598.9	105.2	0.9018	0.0065
5	-8.77	5.059	0.002	8739.9	75.8	0.8424	0.0073
6	-7.21	6.611	0.006	10104.6	81.2	0.7452	0.0060
7	-5.60	5.390	0.002	6717.4	64.4	0.6077	0.0058
8	-3.81	7.965	0.009	8265.3	67.1	0.5060	0.0041
9	-1.69	7.843	0.001	7250.8	63.1	0.4508	0.0039
10	0.39	7.649	0.0	7027.7	62.2	0.4480	0.0040
11	2.46	7.766	0.005	7266.9	63.2	0.4563	0.0040
12	4.89	10.355	0.002	11361.5	78.2	0.5350	0.0037
13	6.99	5.357	0.003	7760.3	69.0	0.7063	0.0063
14	8.54	6.151	0.007	10222.9	78.8	0.8104	0.0063
15	10.49	8.431	0.004	15577.4	108.7	0.9009	0.0063
16	12.73	8.275	0.008	16596.5	112.2	0.9779	0.0067
17	14.94	8.148	0.001	16906.2	113.2	1.0117	0.0068
18	17.07	7.755	0.008	15732.0	109.3	0.9891	0.0069
19	19.34	9.202	0.003	17920.7	116.5	0.9495	0.0062

Table 1.24 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample probe 1.5% Gd₂O₃ Gold(bare)

no.	distance (mm)	weight (mg)	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-16.43	8.137	0.009	22471.1	151.7	1.0118	0.0069
2	-14.27	7.949	0.005	21349.5	147.9	0.9840	0.0068
3	-12.24	7.242	0.001	18760.0	138.8	0.9490	0.0070
4	-10.15	8.308	0.006	19600.3	141.8	0.8643	0.0063
5	-8.11	6.888	0.005	13722.1	119.1	0.7299	0.0064
6	-6.19	7.454	0.004	11850.7	110.9	0.5824	0.0055
7	-4.14	7.815	0.005	8679.3	95.4	0.4069	0.0045
8	-1.94	8.627	0.002	8409.2	66.9	0.3571	0.0028
9	0.39	8.763	0.003	8354.7	66.7	0.3493	0.0028
10	2.68	8.259	0.009	8121.6	65.8	0.3603	0.0029
11	5.38	11.900	0.004	16065.4	111.7	0.4946	0.0034
12	8.05	8.047	0.010	16352.3	129.8	0.7445	0.0060
13	10.24	8.240	0.012	19739.4	142.4	0.8776	0.0064
14	12.44	8.159	0.004	21410.3	148.2	0.9614	0.0067
15	14.59	7.909	0.0	21261.0	147.7	0.9849	0.0068
16	16.71	7.908	0.004	21587.2	148.8	1.0002	0.0069
17	19.18	10.450	0.004	27450.5	167.6	0.9624	0.0059

Table 1.25 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample 3.0% Gd₂O₃ probe Gold(bare)

no.	distance mm	weight mg	σ_w	corrected count	σ_c	activation σ_a
1	-16.44	7.327	0.0	16212.1	130.5	1.0094
2	-14.61	6.362	0.004	13592.5	120.1	0.9746
3	-12.81	7.131	0.004	15022.6	125.9	0.9610
4	-11.07	5.895	0.007	11616.6	111.5	0.8990
5	-9.49	5.942	0.003	10723.4	107.4	0.8232
6	-8.00	5.172	0.004	8377.1	95.9	0.7389
7	-6.39	6.851	0.005	8767.5	97.9	0.5838
8	-4.60	6.581	0.003	5585.1	69.8	0.3871
9	-2.84	6.536	0.003	4621.8	64.1	0.3226
10	-1.11	6.422	0.003	4527.3	63.5	0.3216
11	0.69	7.030	0.004	5032.6	66.7	0.3226
12	2.47	6.310	0.009	4661.0	64.7	0.3370
13	4.34	7.714	0.008	6258.1	73.2	0.3701
14	6.26	6.595	0.007	7909.7	81.5	0.5471
15	8.18	7.776	0.004	12404.1	115.1	0.7277
16	10.27	7.920	0.009	14443.6	123.7	0.8320
17	12.34	7.560	0.008	15800.8	129.1	0.9534
18	14.34	7.357	0.001	16101.8	130.3	0.9984
19	16.38	7.930	0.006	17560.6	135.8	1.0102
20	19.01	11.743	0.010	24987.2	161.0	0.9707

Table 1.26 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample 0.0% Gd₂O₃ probe Gold(Cadmium)

no.	distance mm	weight mg	σ_w	corrected count	σ_c	activation σ_a
1	-14.04	6.995	0.004	6698.5	52.8	0.3999
2	-11.91	8.921	0.002	6438.5	51.9	0.3014
3	-9.86	6.358	0.0	4585.6	44.5	0.3012
4	-8.13	6.589	0.001	4687.3	45.0	0.2970
5	-6.13	8.347	0.003	5831.4	49.5	0.2917
6	-4.00	7.516	0.011	5108.0	46.7	0.2838
7	-1.90	8.182	0.001	5534.3	48.5	0.2824
8	0.22	7.624	0.0	5153.3	47.0	0.2822
9	2.35	8.339	0.010	5587.8	48.6	0.2798
10	4.41	7.043	0.006	4893.5	46.0	0.2901
11	6.29	6.946	0.004	4827.1	45.6	0.2902
12	8.10	6.592	0.012	5636.0	48.9	0.3570
13	9.99	7.558	0.012	5406.2	48.0	0.2987
14	12.02	7.533	0.012	5447.2	48.2	0.3019
15	14.16	8.502	0.003	6093.7	50.6	0.2993
16	16.60	9.693	0.004	7011.7	54.1	0.3020
17	19.24	10.007	0.008	7144.1	54.5	0.2981

Table 1.27 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
 sample 0.05% Gd₂O₃
 probe Gold(Cadmium)

no.	distance mm	weight mg	σ_w	corrected count	σ_c	activation σ_a
1	-14.38	7.749	0.002	6153.1	57.6	0.5434
2	-12.38	7.156	0.006	3299.1	43.2	0.3155
3	-10.30	8.320	0.004	3894.0	46.6	0.3203
4	-8.04	8.518	0.001	4021.5	47.3	0.3231
5	-5.94	7.096	0.010	3157.5	42.4	0.3045
6	-4.04	7.069	0.001	3489.6	44.3	0.3378
7	-2.16	6.951	0.0	3077.5	41.9	0.3030
8	-0.24	7.303	0.003	3202.0	42.7	0.3000
9	1.65	6.751	0.013	2933.7	41.1	0.2974
10	3.52	7.185	0.005	3160.4	42.4	0.3010
11	5.64	8.628	1.767	4282.5	48.7	0.3397
12	7.80	7.421	0.008	3424.1	44.0	0.3157
13	9.75	7.093	0.002	3319.1	43.4	0.3202
14	11.71	7.487	0.009	3434.2	44.1	0.3139
15	13.61	6.682	0.003	3241.0	42.9	0.3319
16	15.48	7.211	0.0	3464.8	44.3	0.3288
17	17.39	7.007	0.012	3268.4	43.1	0.3192
18	19.45	8.366	0.003	4442.5	49.6	0.3634

Table 1.28 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
 sample 0.25% Gd₂O₃
 probe Gold(Cadmium)

no.	distance mm	weight mg	σ_w	corrected count	σ_c	activation σ_a
1	-13.54	8.849	0.006	6903.3	53.8	0.3826
2	-11.31	7.813	0.012	5148.2	53.9	0.3232
3	-9.17	8.208	0.005	5376.1	55.0	0.3213
4	-7.57	3.753	0.007	2449.8	28.4	0.3202
5	-5.92	8.625	0.004	5544.9	55.8	0.3153
6	-3.62	8.571	0.004	5305.0	54.7	0.3036
7	-1.27	9.017	0.004	5752.8	56.8	0.3129
8	1.08	8.554	0.004	4960.8	53.1	0.2845
9	3.32	8.198	0.005	5382.7	55.1	0.3221
10	5.57	10.117	0.001	6354.0	59.5	0.3081
11	8.31	8.880	0.011	5744.2	56.8	0.3173
12	10.57	8.080	0.005	5348.5	55.0	0.3247
13	12.82	8.706	0.001	5766.7	56.9	0.3249
14	15.10	8.348	0.003	5559.3	56.0	0.3266
15	17.27	7.929	0.002	5181.8	54.2	0.3206
16	19.45	8.396	0.002	6472.5	60.1	0.3781

Table 1.29 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample probe 1.5% Gd₂O₃ Gold(Cadmium)

no.	distance mm	weight mg	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-13.69	8.054	0.004	8849.6	83.7	0.4050	0.0038
2	-11.53	8.101	0.004	7119.0	62.0	0.3239	0.0028
3	-8.82	12.097	0.004	10683.2	75.2	0.3255	0.0023
4	-6.15	7.871	0.007	6696.0	60.2	0.3135	0.0028
5	-4.01	8.090	0.012	6710.9	60.3	0.3057	0.0028
6	-1.88	7.797	0.008	6423.6	59.1	0.3036	0.0028
7	0.20	7.752	0.004	6372.1	58.9	0.3029	0.0028
8	2.29	7.879	0.0	6454.2	59.2	0.3019	0.0028
9	4.38	7.696	0.003	6365.3	58.9	0.3048	0.0028
10	6.24	6.231	0.005	5336.3	54.3	0.3157	0.0032
11	8.15	7.962	0.004	6965.5	61.4	0.3224	0.0028
12	10.26	7.854	0.006	6924.4	61.2	0.3249	0.0029
13	12.41	8.150	0.009	7203.2	62.4	0.3258	0.0028
14	14.54	7.753	0.003	6881.4	61.1	0.3271	0.0029
15	16.61	7.745	0.0	7017.7	61.6	0.3340	0.0029
16	19.11	10.922	0.001	10701.5	75.3	0.3611	0.0025

Table 1.30 Activation traverses throughout the fuel rod in the regular lattice
sample probe 3.0% Gd₂O₃ Gold(Cadmium)

no.	distance mm	weight mg	σ_w	corrected count	σ_c	activation	σ_a
1	-14.27	6.755	0.004	6963.5	63.6	0.4731	0.0043
2	-12.30	7.987	0.004	5558.9	57.8	0.3194	0.0033
3	-9.97	9.417	0.007	6647.1	62.4	0.3239	0.0030
4	-7.91	5.935	0.006	3961.1	50.3	0.3063	0.0039
5	-6.14	7.321	0.010	4896.3	54.8	0.3069	0.0035
6	-4.15	7.522	0.006	4835.8	54.5	0.2950	0.0033
7	-2.00	8.595	0.009	5536.0	57.7	0.2956	0.0031
8	0.32	8.737	0.0	5564.7	57.8	0.2923	0.0030
9	2.98	11.084	0.004	7243.1	64.8	0.2999	0.0027
10	5.87	10.552	0.008	7080.0	64.1	0.3079	0.0028
11	8.30	7.597	0.011	5173.0	56.1	0.3125	0.0034
12	10.41	8.154	0.007	5755.3	58.7	0.3239	0.0033
13	12.68	8.838	0.007	6389.1	61.4	0.3318	0.0032
14	14.89	7.660	0.007	5350.2	56.9	0.3205	0.0034
15	17.16	9.294	0.005	6623.5	62.3	0.3271	0.0031
16	19.49	8.134	0.001	6842.2	63.2	0.3860	0.0036

Appendix 2 電子個数密度

Table 2.1 Atomic number density of fuel pellet
($\times 10^{24}$ N/cm³)

Gd ₂ O ₃ content	0.0 w/o	0.05 w/o	0.25 w/o	1.5 w/o	3.0 w/o
²³⁵ U	6.086×10^{-4}	6.083×10^{-4}	6.071×10^{-4}	5.995×10^{-4}	5.903×10^{-4}
²³⁸ U	2.255×10^{-2}	2.254×10^{-2}	2.249×10^{-2}	2.221×10^{-2}	2.187×10^{-2}
¹⁵⁵ Gd	1.0×10^{-10}	2.521×10^{-6}	1.261×10^{-5}	7.564×10^{-5}	1.513×10^{-4}
¹⁵⁷ Gd	1.0×10^{-10}	2.684×10^{-6}	1.342×10^{-5}	8.051×10^{-5}	1.610×10^{-4}
O	4.632×10^{-2}	4.632×10^{-2}	4.633×10^{-2}	4.639×10^{-2}	4.647×10^{-2}

Table 2.2 Atomic number density ($\times 10^{24}$ N/cm³)

Region	Clad & Gap	Reflector	Mixture	Channel box Follower
H	0	20 °C	3.690×10^{-2}	0
		40 °C		
		60 °C		
		80 °C		
O	0	20 °C	3.457×10^{-2}	0
		40 °C		
		60 °C		
		80 °C		
Aℓ	5.492×10^{-2}	0 0	5.454×10^{-3}	6.034×10^{-3}
²³⁵ U	0	0	2.118×10^{-4}	0
²³⁸ U	0	0	7.847×10^{-3}	0