

JAERI-M

87-036

核融合炉増殖ブランケット試験体の
核特性に関する予備解析
(JMTR/OWL-2試験)

1987年3月

島川 聰司・河村 弘・永岡 芳春
斎藤 実

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)高野高速印刷

核融合炉増殖ブランケット試験体の核特性に関する予備解析
(JMT-R / OWL-2 試験)

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部
島川 聰司・河村 弘・永岡 芳春・齊藤 実

(1987年2月5日受理)

本報告書は、材料試験炉（JMT-R）の水ループOWL-2で照射される核融合炉増殖ブランケット試験体について、S R A C コードシステムを用いて行った予備核計算結果を記したものである。核融合炉増殖ブランケット試験体の照射は、核融合炉増殖ブランケットの設計のための工学的データを得るために計画されている。増殖ブランケット試験体には Li_2O が充填されており、その充填部の大きさは、直径が 9.6.3 mm で長さが 500 mm である。

本核計算により得た主な結果を以下に示す。

- トリチウム生成速度は約 3.9 Ci/day である。
- トリチウム生成について、熱外中性子の全中性子に対する寄与率は約 3.5 % である。
- Li_2O の充填率が 20 % 以上の場合、トリチウム生成速度はほぼ一定となる。

<キーワード> 核融合炉、ブランケット、JMT-R、OWL-2、トリチウム生成速度、S R A C コードシステム

Preliminary Analysis for Tritium Production Characteristics of
Simulated Blanket Module with Lithium Oxide Breeder
irradiated in JMTR OWL-2

Satoshi SHIMAKAWA, Hiroshi KAWAMURA,
Yoshiharu NAGAOKA and Minoru SAITO

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

(Received February 5, 1987)

The present paper describes the results of neutronics calculation using SRAC code system for the simulated blanket module. The calculations were conducted preliminary to irradiation test of the simulated blanket module in the water loop, called OWL-2, of the Japan Materials Testing Reactor (JMTR). The irradiation test has been planned in order to obtain the engineering data for the design of a blanket of a fusion reactor. The simulated blanket module consists of the lithium oxide pebbles packed in a size of 96.3 mm in diameter and 500 mm in length. The summarized results are as follows;

- The Tritium production rate was about 39 Ci/day.
- The contribution of the epi-thermal neutron for the tritium production was about 35 percent as much as that of the total neutron.
- When the packing rate of the lithium oxide was more than 20 %, the increase of the tritium production rate was negligible.

Keywords: JMTR, Fusion Reactor, Blanket, Tritium Production Rate, SRAC Code, Neutronics Calculation

目 次

1. 序 論	1
2. 解析手法	2
2.1 概 要	2
2.2 増殖ブランケット試験体の仕様	3
2.3 核計算コード	3
2.4 単位セル計算法	3
2.5 炉心計算法	4
3. 解析結果及び検討	5
3.1 Li ₂ O ベブル充填率	5
3.2 冷却管配置	7
3.3 照射温度	9
3.4 照射場熱中性子束勾配	10
3.5 热外中性子反応	11
3.6 原子炉への影響	12
4. 結 論	13
謝辞	14
参考文献	15
記号表	16

Contents

1. Introduction	1
2. calculation Method	2
2.1 General	2
2.2 Specification of Blanket Test Module	3
2.3 Neutronics Calculation Code	3
2.4 Unit Cell Calculation	3
2.5 Core Calculation	4
3. Results and Discussions	5
3.1 Packing Rate of Lithium Oxide Pebbles	5
3.2 Location of Cooling Tubes	7
3.3 Irradiation Temperature	9
3.4 Neutron Flux Distribution	10
3.5 Epi-thermal Neutron Reaction	11
3.6 Effects on Reactor Characteristics	12
4. Conclusion	13
Acknowledgement	14
Reference	15
Nomenclature	16

1. 序 論

核融合炉用トリチウム増殖ブランケット（以後、増殖ブランケットと称す。）に関する研究開発は、諸外国においても各機関で精力的に進められている。^{1), 2), 3)} 原研では増殖ブランケット材として、トリチウム増殖性能、熱伝導性等に優れている酸化リチウム（Li₂O）を第1候補材に選定し、炉設計及び材料性能確認の両面から増殖ブランケット材の研究開発が進められている。⁴⁾

増殖ブランケット材の研究開発項目には、中性子工学実験を必要不可欠とするものが多い。現在、その研究のための中性子源としては、加速器タイプと核分裂炉（以後、原子炉と称す。）タンクが利用可能である。原子炉を利用した中性子工学実験の場合、加速器のように核融合炉の中性子スペクトルを模擬できないという欠点があるが、加速器では照射できないような大型試料の照射挙動を研究することが可能である。これまで、原子炉を利用した材料性能確認試験では、原研の JRR-2 あるいは JRR-4 等が利用されており、基礎的データの蓄積が着実に進められている。^{5), 6)} しかしながら、これらの試験は、極めて小規模なものであるため、核融合炉の設計及び運転条件に対応した工学的データ（増殖ブランケットの核・熱特性、トリチウムの生成・回収特性等に資するデータベース）を得るには限界がある。

そこで、概念設計段階である核融合炉増殖ブランケットの形状、寸法等をできる限り模擬した試験体による照射試験が要求され、JMT-R の OWL-2 ループを利用した増殖ブランケット性能確認試験が原研で提案された。本試験で可能な増殖ブランケット試験体形状は、最大直径 100 mm、最大長さ 750 mm の円筒形である。

増殖ブランケット照射試験を実施する場合、事前に試験時の中性子照射量やトリチウム生成量等を推定し、原子炉への影響を確認しておく必要がある。特に、Li のように熱中性子に対する吸収断面積が大きい核種を含有し、しかも寸法の大きな試料を原子炉で照射する場合、照射試料を装荷することにより、その周囲の中性子場に大きな変化が生じる。さらに試料の自己遮蔽効果による試料自身の中性子照射量の変化も無視できない。このようなことから、核特性をあらかじめ検討することは極めて重要である。

本報告書では、増殖ブランケット試験体特性、照射場特性、トリチウム生成特性について SRAC コードシステムを用いて得られた結果について述べる。特に、i) Li₂O ペブル充填率、ii) 冷却管配置、iii) 照射温度、iv) 照射場熱中性子束勾配、v) 热外中性子反応が、上記の核特性に及ぼす影響を調べた。ここで得られた結果は、増殖ブランケット試験体設計に反映されるものである。

2. 解析手法

2.1 概要

本解析を行うにあたり、検討した核特性を以下に示す3つの特性に分類した。

- 増殖ブランケット試験体特性
- 照射場特性
- トリチウム生成特性

ここで増殖ブランケット試験体特性（以後、試験体特性と称す。）とは ^{6}Li の実効断面積や単位セル内の詳細中性子束分布（相対分布）等を、照射場特性とは OWL-2 ループの中性子照射条件、即ちセル平均中性子束や中性子束の勾配等を、またトリチウム生成特性とは上記の2つの特性から得られるトリチウム生成速度とその分布や発熱分布等である。

解析手順を Fig. 1 に示す。まず増殖ブランケット試験体及びそれを組み込む OWL-2 の組成、形状を入力データとし、単位セル計算（中性子スペクトル計算及び群定数の作成を行う。）により、試験体特性を検討した。次にセル計算によって作成した群定数及び原子炉の構成（構造、組成）データを用いて炉心計算を行ない、OWL-2 の照射場特性を検討した。最後に照射試料核特性及び照射場特性からトリチウム生成特性を検討した。

このようにして、照射試料のトリチウム生成特性を検討したが、現時点では増殖ブランケット試験体の仕様や OWL-2 での照射条件が決定していないため、以下の条件をパラメータにして Fig. 1 の手順をくり返し計算することにより、それらの影響を検討した。

増殖ブランケット試験体の仕様として

- Li_2O ペブル充填率
- 冷却管配置

OWL-2 での照射条件として

- 増殖材及び冷却水の温度
- 照射場熱中性子束勾配
- 熱外中性子反応

また、増殖ブランケット試験体を OWL-2 ループに装荷することによる JMT-R 炉心に与える影響を調べるため、次の検討も実施した。

- 原子炉過剰反応度
- 炉内中性子束変化

本章では、増殖ブランケット試験体の仕様及び解析手法について述べる。

2.2 増殖ブランケット試験体の仕様

増殖ブランケット試験体の基本的な仕様を、以下のように仮定した。

- ・構造 — Li_2O ペブル集合体タイプ
- ・組成 — ペブル密度 (2.02 g/cm^3)
天然 Li を使用 (${}^6\text{Li}$ 存在比 : 7.42 at-\%)
- ・形状 — Li_2O 増殖材領域の直径 9.63 mm
同 長さ 50.0 mm

なお、照射条件やペブル充填率などの影響を調べる際の計算モデルの詳細な仕様は、3章の各節でそれぞれ述べる。

2.3 核計算コード

本解析は、日本原子力研究所で開発・整備された SRAC コードシステム⁷⁾を用いて行った。SRAC コードシステムは熱中性子炉の核設計と解析を行うためのコードであり、中性子断面積ライブラリーとそのための処理コード、種々の輸送・拡散理論コード及び燃焼計算コード等で構成されている。SRAC コードシステムの JMT-R 炉心解析の適応性は、JMT-R C (JMT-R の臨界実験装置)における臨界実験結果とそれに対応する解析結果を比較することにより検証されている^{8), 9)}。また、現在、JMT-R のサイクル毎の運転計画や JMT-R 燃料の濃縮度低減化に関する予備解析に SRAC コードシステムは使われている。

研究炉や試験炉の解析手法は、炉心を小さなゾーンに分割し、それを単位セルとしてそのセル毎に中性子束分布（エネルギースペクトル及び空間分布）を計算し、セルを均質化して原子炉全体の中性子束分布や K_{eff} 等を計算するという方法が一般的である^{10), 11)}。JMT-R の炉心解析もこのような手法を採用している。今回用いたコードを以下に示す。

- 単位セル計算 : P I J コード（衝突確率法によるスペクトル解析コード）
- 炉心計算 : CITATION コード（2次元体系拡散計算コード）
- 中性子断面積ライブラリーは ENDF/B-Vを主体に、 ^{235}U , ^{238}U 核種については ENDF/B-Vのデータを使用した。

2.4 単位セル計算

単位セル計算では、高速群 26 群と熱群 37 群に分割した多群法により均質化計算を行い、高速群 3 群と熱群 1 群の合計 4 群の少数群定数に縮約した。この少数エネルギー群の構成は、第 1 群 : 1.0 MeV 以上、第 2 群 : $1.83 \text{ keV} \sim 1.0 \text{ MeV}$ 、第 3 群 : $0.683 \text{ eV} \sim 1.83 \text{ keV}$ および第 4 群 : 0.683 eV 以下である。

増殖ブランケット試験体のセル計算で得られる試験体特性を以下に示す。

- ・ ${}^6\text{Li}$ のマクロおよびミクロ実効断面積
- ・セル内の相対的中性子束分布

2.5 炉心計算

前節で述べたセル計算を各セルについて行い、セル毎の群定数を用いて、2次元炉心計算を行った。J MTR の炉心配置を Fig. 2 に示す¹²⁾。なお、本計算の際の炉心配置は第 66 サイクルのものを使用した。この炉心は、ウラン濃縮度 9.3 % の燃料要素で構成されている。

炉心計算により得られる照射場特性を以下に示す。

- セル平均中性子束
- 照射場の中性子束勾配

以上のようにして得た試験体核特性及び照射場特性から、トリチウム生成特性を求めた。各種特性の検討結果については次章で述べる。

3. 解析結果及び検討

3.1 Li₂Oペブル充填率

増殖材となる Li₂O は、ペブル状に成形し (ϕ 3.0 ~ ϕ 5.0 mm の球状)，円筒状のステンレススチール製の容器に入れて照射する計画であるため，その場合ペブルとペブルの間に隙が生じる。また試験中，Li の燃焼により，Li の量が減少してゆく。このように，単位容積当たりの Li 量は固定されていない。そこで，Li₂O の理論密度に対する Li₂O ペブル充填率を計算パラメータとし，それが各種特性に与える影響について調べた。

3.1.1 セル計算モデル

Li₂O の理論密度を 2.02 g/cm³ とし，理論密度に対する Li₂O ペブル充填率を 10%，20%，40%，55%，70%，100%とした増殖プランケット試験体が OWL-2 ループに装荷された場合のセル計算を行なった。計算のモデル化にあたっては，単純に Li₂O を充填率で均質に薄めて ⁶Li，⁷Li，¹⁶O それぞれの原子個数密度を算出し，Li₂O 試料部の入力とした。以後，この均質化された Li₂O ペブル集合体部分を増殖材領域と称す。

計算モデルは，一次元円筒モデルであり，Fig. 3 にそのモデル化を示す。なお，対象セルとセル外側の構成との非均一性を考慮するために，スペクトル補正領域をセル外側に設定した。

3.1.2 増殖材領域熱中性子束分布

Fig. 4 に，Li₂O ペブル充填率 10%，55%，100% の場合の増殖材領域熱中性子束分布を示す。Li (特に ⁶Li) の熱中性子反応断面積が大きいため，Li₂O ペブル充填率を上げると増殖材領域の熱中性子束分布の減衰 (ディプレッション) も大きくなっていることがわかる。特に Li₂O ペブル充填率が 100% である場合，増殖材の中心における熱中性子束が増殖材表面より約 3 ケタも低くなっている。

3.1.3 実効断面積

熱中性子に対する，増殖材領域平均の ⁶Li ミクロ実効反応断面積 $\bar{\sigma}_a^{6\text{Li}}$ ，同マクロ実効反応断面積 $\bar{\Sigma}_a^{6\text{Li}}$ 及びセル平均吸収断面積 $\bar{\Sigma}_A^{\text{Cell}}$ の Li₂O ペブル充填率に対する変化を Fig. 5 に示す。この図からわかるように， $\bar{\sigma}_a^{6\text{Li}}$ 及び $\bar{\Sigma}_A^{\text{Cell}}$ は Li₂O ペブル充填率が 20% 以上になるとほとんど変化していない。一方， $\bar{\Sigma}_a^{6\text{Li}}$ は $\bar{\sigma}_a^{6\text{Li}}$ がほぼ一定であるため，充填率に比例している。 $(\bar{\Sigma}_a^{6\text{Li}} = {}^6\text{Li}_N \cdot \bar{\sigma}_a^{6\text{Li}})$ ，ここで ⁶Li_N は ⁶Li の原子個数密度である。)

$\bar{\sigma}_a^{6\text{Li}}$ は，中性子エネルギー 0.0253 eV での (n, α) 反応断面積 940 barn に比べて，その約半分の 530 barn と評価された。これは，主に ⁶Li の (n, α) 反応による自己遮蔽のため，中性子スペクトルが硬くなるためである。

3.1.4 热中性子束とトリチウム生成速度

セル平均熱中性子束 $\bar{\phi}_{th}^{Cell}$ および、 $\bar{\phi}_{th}^{Cell}$ に対する増殖材領域の平均熱中性子束 $\bar{\phi}_{th}^{Li_2O}$ の比で定義した熱中性子ディプレッション F_{th} の Li_2O ペブル充填率による変化を Fig. 6 に示す。 F_{th} は、以下に示す式で定義した。

$$F_{th} = \frac{\left(\int_{Cell}^{Li_2O} \phi_{th}(r) \cdot V(r) dr \right) / V_{Li_2O}}{\left(\int_{Cell}^{Cell} \phi_{th}(r) \cdot V(r) dr \right) / V_{Cell}} = \frac{\bar{\phi}_{th}^{Li_2O}}{\bar{\phi}_{th}^{Cell}} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 V_{Li_2O} 及び V_{Cell} はそれぞれ、 増殖材体積及びセル体積である。 $\phi_{th}(r)$ 及び $V(r)$ は、 それぞれ半径 r における熱中性子束及び体積である。

Fig. 6 からわかるように、 Li_2O ペブル充填率を増しても $\bar{\phi}_{th}^{Cell}$ はゆるやかにしか減少しない。一方、 F_{th} は充填率が 10%～40%では急激な減少が見られるが、 充填率が 40%以上では比較的ゆるやかな減少となる。この曲線から、 F_{th} は Li_2O ペブル充填率に反比例していることがわかる。

前記の(1)式に示されるように、 増殖材領域の平均熱中性子束 $\bar{\phi}_{th}^{Li_2O}$ は、 $\bar{\phi}_{th}^{Cell}$ に F_{th} を乗じたものであるため、 炉心計算結果から得られる $\bar{\phi}_{th}^{Cell}$ とセル計算結果から得られる F_{th} により、 $\bar{\phi}_{th}^{Li_2O}$ が決定できる。 $\bar{\phi}_{th}^{Li_2O}$ 及び次式により得られるトリチウム生成速度 A_T (1日当りのトリチウム生成量、 Ci/day) の Li_2O ペブル充填率による変化を Fig. 7 に示す。

$$A_T \text{ (Ci/day)} = \frac{8.64 \times 10^{-4} \cdot \lambda \cdot V_{Li_2O}}{3.70 \times 10^{10}} \cdot \sum_a^{Li_2O} \cdot \bar{\phi}_{th}^{Li_2O} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、 λ はトリチウムの崩壊定数 ($1.79 \times 10^{-9} \text{ S}^{-1}$) である。

Li_2O ペブル充填率を増すと、 $\bar{\phi}_{th}^{Li_2O}$ は減少傾向にあるが、 前節で述べたように $\sum_a^{Li_2O}$ が増加してゆくため、 充填率 20%以上ではトリチウム生成速度 A_T は約 25 Ci と一定になる。このようにトリチウム生成速度が Li_2O ペブル充填率、 すなわち Li 量に依存しなくなる主な理由は、 増殖材領域が大きく、 Li の自己遮蔽効果によりトリチウム生成のほとんどが増殖材表面層で起こるためである。これは、 熱中性子及び熱中性子よりもわずかに大きなエネルギーをもつ中性子についての現象であり、 3.5 節で述べるように熱外中性子、 特に高エネルギー中性子によるトリチウム生成への寄与が少ないため、 トリチウム生成と充填率の関係は前述のとおり一定となる。

熱中性子によるトリチウム生成速度が約 25 Ci/day と 6Li の装荷量 (40～200 g) に比べてかなり低くなる原因是、 増殖ブランケットの寸法が大きく、 形状が塊状であるためである。なお、 トリチウム生成速度 25 Ci/day に対する核発熱量は約 4.6 KW である。この核発熱量には、 対象とする中性子が熱中性子であるため、 反応エネルギー (Q 値) のみだけを考慮しており、 反応前の中性子エネルギーの寄与 (Kerma) は考慮していない。

Li_2O ペブル充填率に対する各特性の変化を Table 1 に示す。

3.1.5 トリチウム生成速度分布と核発熱分布

Li_2O ペブル充填率に対するトリチウム生成速度分布を Fig. 8 及び Table 2 に示す。また、

Table 2 の領域番号と増殖材領域分割との対応を Fig. 9 に示す。

Fig. 8 から明らかなように、 Li_2O ペブル充填率が大きくなるとトリチウム生成量は、増殖材領域表面へ集中する。ここで、図中縦軸のトリチウム生成割合は、増殖材の全トリチウム生成量に対する百分率である。充填率 10 %以上では、表面から 16 mm 内側までの領域内に全トリチウム生成量の 70 %以上が集中する。また、充填率が 55 %以上では、表面から 7 mm 内側までの領域内に全トリチウム生成量の 85 %以上が集中する。

一方、核発熱分布はトリチウム生成速度分布と同様の分布をもつ。 Li_2O ペブル充填率に対する核発熱密度の分布を Fig. 10 及び Table 3 に示す。ここで縦軸は、核発熱密度比（発熱密度 w/cm^3 を増殖材領域平均発熱密度で除した値）で表わした。この結果、 Li_2O ペブル充填率 55 %の場合、増殖材表面の発熱密度は増殖材領域平均値 (1.2 w/cm^3) の 4.6 倍の 5.5 w/cm^3 となる。なお、この発熱密度は、熱中性子による ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応の Q 値 (4.8 MeV) のみを考慮しているため、現実には以下に示すような補正をする必要がある。

① 热外中性子による核発熱 (n, α 反応)

② 中性子線及び γ 線の Kerma

①については 3.5 節で検討するが、②については今後の検討課題とした。

3.2 冷却管配置

核融合炉用トリチウム増殖ブランケットの設計概念の主流を占めているのは、チューブ・イン・シェル型と呼ばれるものであり、 Li_2O ペブル等増殖材を冷却管のまわりに充填した構造である。J M T R で照射される増殖ブランケット試験体も上記のように増殖材領域に冷却管が配置されることになる。そこで本章では、前章で扱ったブランケット試験体モデルをもとに、増殖材領域に冷却管を配置したモデルを作り、その影響の検討を行なった。

3.2.1 セル計算モデル

増殖ブランケット試験体の Li_2O ペブル充填率は、理論密度の 55 %に固定した。 Li_2O ペブル温度及び冷却水温度は、325 K (J M T R の一次冷却水温度とはほぼ同じ) とした。セル計算モデルを Fig. 11 に示す。

Fig. 11 に見られるように、冷却管は増殖材の中心部に 1 本及び環状に 8 本の合計 9 本を配置した。これらの冷却管は全て外径 10.5 mm, 内径 8.1 mm のステンレススチール (SUS 316) 製とした。

冷却管が配置されたため、前節の冷却管の配置されていない場合に比べて、 Li_2O 増殖材の体積は約 10 %減少した。

3.2.2 増殖材領域熱中性子束分布

増殖材領域の熱中性子束分布を Fig. 12 に示す。ここで実線は冷却管が配置された場合の熱中性子束分布を、点線は、前者と同じ Li_2O ペブル充填率 (55 %) であり、冷却管が配置されない場合の分布である。なお、炉心計算より得た中性子束で規格化することにより、縦軸は熱中性子束の絶対値で表わした。

冷却管を流れる冷却水により中性子が減速されるため (H_2O の H 原子が熱中性子の Slow-down Source となる), 冷却管付近で熱中性子のもりあがりが見られる。このため, 増殖材領域の平均熱中性子束は, 冷却管が配置されない場合と比べて, 1.22 倍になった。なお, 実際に熱中性子束が増加したのは, 増殖材領域の表面部ではなく, 中心部 (内部) である。

3.2.3 実効断面積

増殖材領域の平均ミクロ実効反応断面積 $\bar{\sigma}_a^{^6Li}$ は, 冷却管を配置した場合, 3.5 % 減少した。冷却水の減速効果により中性子エネルギースペクトルが軟化することを考えると, このように実効断面積が減少することは, 一見矛盾しているように思える。しかしながら, この $\bar{\sigma}_a^{^6Li}$ 自体, 増殖材領域の熱中性子束分布で平均化していることを考えると, $\bar{\sigma}_a^{^6Li}$ の減少は当然の結果である。即ち, $\bar{\sigma}_a^{^6Li}$ は次式で定義している。

$$\bar{\sigma}_a^{^6Li} = \frac{\int_{L_{i_2}O}^{L_{i_2}O} \hat{\sigma}_a^{^6Li}(r) \cdot \phi_{th}(r) \cdot V(r) dr}{\int_{L_{i_2}O}^{L_{i_2}O} \phi_{th}(r) \cdot V(r) dr} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで, r は半径を, $V(r)$ は半径 r における体積を表す。

また, 半径 r におけるミクロ実効断面積 $\hat{\sigma}_a^{^6Li}(r)$ は, 次式で定義している。

$$\hat{\sigma}_a^{^6Li}(r) = \frac{\int_0^{E_{th}} \sigma_a^{^6Li}(r, E) \cdot \phi(r, E) dE}{\int_0^{E_{th}} \phi(r, E) dE} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで, $\sigma_a^{^6Li}(r, E)$ は半径 r における微分反応断面積を, $\phi(r, E)$ は中性子スペクトルを示す。 E_{th} は, 热中性子の上限エネルギーであり, ここでは 0.683 eV と設定した。

断面積に対する中性子スペクトルの情報は, (4)式の中で考慮されており, (3)式の $\phi(r)$ の項を除いて体積平均処理を行なうと (即ち熱中性子束分布がフラットであると仮定した場合), $\bar{\sigma}_a^{^6Li}$ は冷却管がない場合に比べて 4 % 増加する。これは, Fig. 13 の増殖材領域のミクロ実効断面積分布を見れば, 明らかである。しかし, 実際には, 増殖材領域の熱中性子束は, Fig. 12 のような分布をもっている。そのため, (3)式には熱中性子束分布の項 $\phi_{th}(r)$ が必要となる。冷却管を配置した場合, 热中性子束の増加が増殖材内部で生じているが, この増加が生じている領域は, 実効断面積が増殖材の平均実効断面積に比べて小さいため, 热中性子束分布での平均処理を行なった場合, 結果として, $\bar{\sigma}_a^{^6Li}$ は減少することになる。なお, セル平均吸収断面積 $\bar{\Sigma}_A^{Cell}$ は, 増殖材領域で熱中性子束が増加したことにより, 約 2 % 増加した。

3.2.4 热中性子束とトリチウム生成速度

OWL-2 セルの平均熱中性子束 $\bar{\phi}_{th}^{cell}$ は, 冷却管を配置したことにより, 約 1 % 減少した。これは, セル平均吸収断面積 $\bar{\Sigma}_A^{cell}$ がわずかに増加したためである。一方, 热中性子束ディブ

レッショングファクター F_{th} を増殖材領域の熱中性子束分布 (Fig. 12) から求めると 0.0555 となり、増殖材領域の平均熱中性子束 $\bar{\phi}_{th}^{Li_2O}$ は、 $1.145 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となった。この値は、冷却管の配置されない場合に比べて 22 % 大きい。

トリチウム生成速度は、3.1.4 の(2)式を用いて算出すると、約 26 Ci / day となった。冷却管を配置したことにより、トリチウム生成速度はわずか 5 % 程度増加したに過ぎなかった。詳細に見ると、

$$\begin{array}{ll} \bar{\Sigma}_a^{Li} & : 0.965 \text{ 倍} \\ V & : 0.893 \text{ 倍} \\ \bar{\phi}_{th}^{B_{dr}} & : 1.22 \text{ 倍} \end{array} \left\{ \begin{array}{ll} \bar{\phi}_{th}^{\text{cell}} & : 0.988 \text{ 倍} \\ F_{th} & : 1.24 \text{ 倍} \end{array} \right.$$

となる。即ち、冷却管配置による中性子減速効果は、増殖材体積が減少したため、かなり打ち消されていることがわかる。今回の解析で仮定した冷却管配置モデルが実際の試験時に使用される増殖ブランケット試験体と大きく変わらない限り、冷却管配置によるトリチウム生成量へ及ぼす影響は小さい。なお、冷却管の直径が小さく、増殖材領域に多数配置されるような試験体構造にすれば、トリチウム生成速度はかなり増加すると見込まれる。

以上の結果を Table 4 に示す。

3.2.5 トリチウム生成速度分布と核発熱分布

トリチウム生成速度分布と核発熱密度分布を Fig. 14 及び Table 5 に示す。Fig. 14 を見た限りでは、冷却管配置の影響はほとんどない。Fig. 14 のトリチウム生成速度の部分を拡大し、縦軸を生成速度 (Ci / day) で表わしたものを作成して Fig. 15 に示す。Fig. 15 からトリチウム生成速度分布は、冷却管を配置しない場合に比べて増殖材領域の内部でわずかに増加した。

核発熱密度分布もトリチウム生成速度分布と同様に増殖材内部でわずかに増加した。増殖材表面では、冷却管配置による影響はほとんどない。

3.3 照射温度

増殖材温度のトリチウム生成量に及ぼす影響がかなり小さいことは、容易に予想できる。即ち、増殖材を構成している Li が非常に軽い核であり、しかも狭い共鳴反応をもたないので、増殖材温度のドップラー効果が小さくなるためである。

一方、増殖材に近接して配置される冷却管を流れる冷却水の温度は、トリチウム生成量評価の際に検討すべきパラメータである。冷却水の温度が上昇すると当然、冷却水の密度が減少し、冷却水の水素原子密度が減少する。そして、水素原子密度の減少は、中性子の減速効果の減少を引き起すため、冷却管付近での中性子スペクトル変化（スペクトルの硬化）が生じる。このため、冷却管付近でのトリチウム生成量の減少が起こる。

本節では、増殖材温度及び冷却水温度のトリチウム生成へ及ぼす影響の検討について述べる。

3.3.1 増殖材温度

増殖ブランケット試験体照射中に、トリチウム回収を行なう（即ち、トリチウム回収 *in-situ* 試験）場合、増殖材温度はトリチウム放出特性が良好な温度範囲である約700～1100Kに制御される。従って、検討を行なうにあたって、増殖材温度は、325K, 600K, 900K, 1200Kの4種類の温度に設定した。セル計算モデルは、Fig. 3に示したものと同じ（冷却管配置なし）とし、増殖材領域の温度を前述のように入力した。

Table 6に示す計算結果とおり、増殖材領域の温度変化は、トリチウム生成速度に影響を及ぼさないことがわかった。

3.3.2 冷却水温度

OWL-2ループを流れる冷却水の条件は、BWRモードとすると次のとおりであり、増殖ブランケット試験体の照射試験もこれに近い条件になると思われる。

- 冷却水温度：543K（沸騰水モードは560K）
- 冷却水圧力：73.0 kg/cm²G
- 冷却水流量：1100 kg/min
- 蒸気含有率：最大20%

本検討では、冷却水を飽和水として扱い、冷却水温度を325K（1kg/cm²），450K（9.1kg/cm²）及び600K（123kg/cm²）と設定した。セル計算モデルは、Fig. 11に示したものと同じく、冷却管が9本配置されたモデルとし、冷却管を流れる冷却水を上述のように設定した。

Table 7に計算結果を示す。この計算結果により325Kから450Kの冷却水温度変化がトリチウム生成速度に及ぼす影響は、わずか2%の減少にすぎないことがわかった。なお、450Kから600Kに冷却水温度を上げても、トリチウム生成速度は変化しない。

このように、冷却水温度のトリチウム生成速度への影響が小さい理由は、冷却管の配置された増殖材内部におけるトリチウム生成量が、増殖材表面に比べて少ないためである。冷却管をより外側へ、即ち増殖材表面近くに配置すれば、冷却水温度の影響も大きくなると思われる。

3.4 照射場熱中性子束勾配

JMT-R炉心の第1群から第4群の中性子束分布をFig. 16からFig. 19にそれぞれ示す。これらを見ると特に熱中性子、即ち第4群の分布がかなり複雑であることがわかる。このように中性子束は炉心において巨視的な分布をもっているが、さらにこれまで示したようにセル内においても中性子束は平亘な分布ではない。ここまで計算では、炉心マクロ中性子分布を考慮せずに、セル内の円周方向積分平均した中性子束分布を用いてトリチウム生成量を評価した。しかし実際は、炉心マクロ中性子束分布により、原子炉中心に向いている増殖材表面とその反対側の増殖材表面とではトリチウム生成量が異なる。そこで、この炉心マクロ分布に起因する照射場中性子束勾配のトリチウム生成速度分布等に及ぼす影響について検討した。なお、検討の対象は最もこの影響が大きい熱中性子束とした。

Fig. 19に示した炉心マクロ熱中性子束分布を計算するにあたってOWL-2セル計算モデルは、Li₂Oペブル充填率55%，冷却管なし、冷却水及び増殖材温度325Kである。このときOWL-2位置熱中性子束勾配をFig. 20に示す。

OWL-2でのマクロ分布（Fig. 20）と増殖材領域ミクロ分布（Fig. 4の充填率55%）を合成すると、Fig. 21に示すようになる。増殖ブランケット試験体照射時には、このような熱中性子束分布となる。これによると、増殖材表面におけるトリチウム生成速度は、炉心方向の表と裏では約4倍（熱中性子による寄与のみ）も異なる。

3.5 热外中性子反応

一般に、直径10mm程度のLi含有試料を熱中性子炉で照射した場合のトリチウム生成量評価は、熱中性子照射量に注目して解析されている。これは、 ^6Li の(n, α)反応断面積が中性子エネルギー=0.0253eVで約940 barnと大きく、1MeV付近まで $1/v$ 則に従って減少してゆき、しかも熱中性子炉のように熱中性子割合が多い場合、熱中性子反応がトリチウム生成に支配的となるため、このような解析方法は妥当である。増殖材直径10mm程度の試料に対しては、熱外中性子によるトリチウム生成への寄与は全生成量の1%程度となる。

JMTRは熱中性子炉であるため、前述のようなことから熱中性子のみを対象とすれば十分と考えられるが、本解析で対象としているような寸法の大きな増殖ブランケット試験体（直径約100mm）については、熱外中性子の寄与を考慮する必要がある。即ち、試験体寸法が大きいことから、Li量が多く熱中性子が大量に吸収されるので、増殖材付近における熱中性子割合が小さくなる。Table 8に各エネルギー毎の中性子束を示す。この表は $^6\text{Li}_2O$ ペブル充填率55%で、冷却管のない増殖ブランケット試験体がOWL-2に装荷された場合のものである。増殖材領域の第3群（0.683eV～183KeV）の中性子束は、第4群（0.683eV以下：熱中性子）の中性子束に比べて約30倍の値となる。そのため、第3群に対する ^6Li の実効反応断面積が数barn程度でも、トリチウム生成には十分寄与する。また、Fig. 22に示すように第4群以外の、即ち第3群も含めた増殖材領域における中性子束はほとんど減衰（ディプレッション）が起こっていない。

そこで本節では、第4群の熱中性子以外により生成されるトリチウム量を算出した。結果をTable 9に示す。第1群及び第2群、即ち183KeV以上のエネルギーをもつ中性子によるトリチウム生成速度は、0.5Ci/dayであり、全トリチウム生成速度のわずか1%程度である。一方、第3群の中性子、即ち0.683eVから183KeVの範囲のエネルギーをもつ中性子によるトリチウム生成速度は、全体の約35%を占める13.7Ci/dayである。なお、第4群、0.683eV以下のエネルギーをもつ中性子によるトリチウム生成速度は先にも述べたとおり24.7Ci/dayであり、これは全体の64%に相当する。このようなことから、183KeV以上の中性子反応のトリチウム生成への寄与は無視できるが、183KeV以下の中性子反応については慎重に取扱うべきであることがわかった。

第3群の中性子によるトリチウム生成速度分布をFig. 22(b)に示す。Fig. 23(a)の熱中性子によるトリチウム生成速度分布と比較して増殖材内部でもトリチウムの生成が起こっている。このことは、中性子束分布が、Fig. 21のようになっていることから理解できる。Fig. 22(c)に第3群及び第4群、即ち183KeV以下のエネルギーをもつ中性子によるトリチウム生成速度分布を示す。これらの結果は、Table 10にまとめた。

以上の検討から、増殖ブランケット試験体のトリチウム生成速度は約3.9Ci/dayとなった。

なお、 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ 反応で生じるHeガスの生成速度は $1.2 \times 10^{-3} \text{ mol}/\text{day}$ である。

3.6 原子炉への影響

増殖ブランケット試験体はかなり寸法が大きいため、試験体周辺はもとより、少なからずJMT-Rの炉心特性に影響を及ぼすものと思われる。本節では、増殖ブランケット試験体がOWL-2に装荷された場合のJMT-R核特性への影響について検討した。検討項目は原子炉過剰反応度の変化及び炉内中性子束分布の変化の2項目とした。

3.6.1 原子炉過剰反応度

試験体の種類別の原子炉過剰反応度の計算結果をTable 1 1に示す。過剰反応度は、冷却管配置の有無やLi₂Oペブル充填率の差違によらず一定となった。これは増殖ブランケット試験体が装荷されるOWL-2の位置が炉中心から離れているため、反応度への影響をほとんど及ぼさないと考えられる。なお、過剰反応度の変化は0.02%△K/Kの減少である。

3.6.2 中性子束分布

増殖プランケット試験体 (Li_2O ペブル充填率 5.5%, 冷却管 9 本配置) が OWL-2 に装荷された際の炉内中性子束分布は、Fig. 16 から Fig. 19 にエネルギー群毎に示した。増殖プランケット試験体が OWL-2 に装荷されていない場合と装荷された場合の比較を簡単にするために、Fig. 23 から Fig. 26 に中性子束の変化量分布 (%) を示す。

変化量 D_f は次の式で定義した。

$$D_f = \left(\frac{\phi_B}{\phi_A} - 1 \right) \times 100 \quad (\%) \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここで、 ϕ_A は増殖ブランケット試験体が装荷されていない場合の中性子束であり、 ϕ_B は装荷された場合の中性子束である。なお、恒心配置は IMTR 第 6.6 cv の炉心配置である。

各エネルギー群の中性子束とも、OWL-2付近で著しい変化が生じているが、OWL-2付近以外では中性子束の変化は±1%以下である。なお、第1群、第2群及び第3群の中性子束はOWL-2付近で増加している。この理由は、試験体が装荷されない場合、OWL-2には冷却水だけが存在し、この冷却水による高エネルギー中性子の減速効果が強いが、試験体が装荷されることにより減速効果が弱くなるためである。一方、熱中性子である第4群の中性子束は、主に⁶Liの吸収により中性子束がOWL-2付近で減少している。

結果として、OWL-2に近接する照射孔については、中性子束の変化を考慮する必要があるが、OWL-2から離れた場所での中性子束変化はまったく考慮する必要がないことがわかった。

ここまでまとめを Table 1.2 に示す。

4. 結 論

本予備解析により、天然 Li を用いた Li_2O ペブルを充填した増殖ブランケット試験体（増殖材部直徑 9.6.3 mm, 長さ 500 mm）を JMTR の水ループ OWL - 2 で照射した場合の試験体核特性が明らかになった。

1) トリチウム生成速度

トリチウム生成速度は約 3.9 Ci / day である。その内分けは、熱中性子寄与分が約 6.5% (24.7 Ci/day) であり、熱外中性子寄与分が約 3.5% (14.2 Ci/day) である。このように熱中性子炉である JMTR で照射するにもかかわらず熱外中性子寄与分が 3.5% にも達する主な理由は、増殖ブランケット試験体の直徑が大きく熱中性子に対して、パーテーションや自己遮蔽が生じるためである。

また、このトリチウム生成速度に対する核発熱量は約 7 kW であり、He ガス生成速度は 1.2 mol / day である。

2) Li_2O ペブル充填率

Li_2O ペブル充填率のトリチウム生成速度に及ぼす影響は、充填率が 20% 以上ではほとんど無視できる。これは充填率 20% 以上で自己遮蔽効果が強くなり、 ^6Li 原子個数の増加によるトリチウム生成速度の増加を打消すためである。即ち、トリチウム生成速度はほぼ一定となる。

3) 冷却管配置

増殖材領域に冷却管（外径 10.5 mm, 内径 8.1 mm ステンレス製, 管内は軽水）を 9 本配置した場合、管付近の熱中性子束レベルが上がり、トリチウム生成速度が約 5% 増加する。

4) 照射温度

^6Li , ^7Li は軽い核であり共鳴反応をもたないため、 Li_2O 増殖材温度を 325 K から 1200 K の範囲で変化させても、トリチウム生成速度に影響を及ぼさない。

一方、冷却水温度を 325 K から 450 K に変化させると熱中性子への減速効果が弱まり、即ち熱中性子束レベルが下がり、トリチウム生成速度が数 2% 減少する。さらに冷却水温度を 600 K まで変化させても、トリチウム生成速度は 450 K のときの値とほとんど変わらない。

5) 水ループ OWL - 2 における中性子束勾配により、炉中心に面した増殖材表面とその反対側表面とのトリチウム生成速度の比は 4 : 1 となる。

6) トリチウム生成速度の時間依存性

^6Li 原子の 1 日間照射による燃焼率（減少率）は 0.1% 以下であることから、トリチウム生成速度の時間依存性はほとんどない。JMTR で 100 日間照射しても ^6Li の減少は 10% 以下である。

Li_2O ペブル充填率にほとんど依存しないことを考慮すれば、 ${}^6\text{Li}$ の10%の減少がトリチウム生成速度に影響を及ぼさないことは容易に予想できる。

7) 原子炉への影響

増殖ブランケット試験体装荷による過剰反応度の低下は0.02% $\Delta K/K$ であり、この程度の反応度変化はJMT-Rの運転上無視できる。このように反応度変化が微小である理由は、試験体装荷位置（即ちOWL-2）が炉中心から離れているためである。

一方、装荷に伴う中性子束分布の変動は、OWL-2に近接する照射孔以外では、±1%以下である。

これらのことから、増殖ブランケット試験体を炉心に装荷したことによるJMT-Rの照射性能の低下は起こらないことがわかる。

本予備解析結果の予測精度は、これまで増殖ブランケット試験体のように大きな寸法で強い吸収体を照射した経験がないため、議論できない。従って、より正確に予測するために、JMT-R C (JMT-Rの臨界実験装置、出力100W) を用いて核的模擬実験を行う必要がある。なお、トリチウム生成速度の値は、誤差20%程度として扱うことが妥当と思われる。

また、本予備解析で対象としたJMT-Rの炉心は、93%濃縮ウランを用いた燃料要素で構成されている炉心としたが、濃縮ブランケット試験体の照射が行われる頃には20%濃縮ウラン燃料要素で構成される炉心であろう。この燃料要素のウラン濃縮度の違いによるトリチウム生成速度への影響については今後検討が必要である。概算的には15~30%程度のトリチウム生成速度の減少が見込まれる。

さらに今後の検討項目として、 ${}^6\text{Li}$ 含有率を操作した Li_2O (即ち濃縮リチウムや劣化リチウム) を用いて試験体を照射する場合の解析を予定している。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、材料試験炉部長 岡本芳三氏、同次長 山本 章氏、同計画課 須藤高史氏および臨界プラズマ研究部炉設計研究室の東稔達三氏に多く助言をいただいた。また、計画課の小向文作氏および小池須美男氏にデータ処理等で助力していただいた。以上、記して謝意を表します。

Li_2O ペブル充填率にほとんど依存しないことを考慮すれば、 ${}^6\text{Li}$ の10%の減少がトリチウム生成速度に影響を及ぼさないことは容易に予想できる。

7) 原子炉への影響

増殖ブランケット試験体装荷による過剰反応度の低下は0.02% $\Delta K/K$ であり、この程度の反応度変化はJMT-Rの運転上無視できる。このように反応度変化が微小である理由は、試験体装荷位置（即ちOWL-2）が炉中心から離れているためである。

一方、装荷に伴う中性子束分布の変動は、OWL-2に近接する照射孔以外では、±1%以下である。

これらのことから、増殖ブランケット試験体を炉心に装荷したことによるJMT-Rの照射性能の低下は起こらないことがわかる。

本予備解析結果の予測精度は、これまで増殖ブランケット試験体のように大きな寸法で強い吸収体を照射した経験がないため、議論できない。従って、より正確に予測するために、JMT-RC (JMT-Rの臨界実験装置、出力100W) を用いて核的模擬実験を行う必要がある。なお、トリチウム生成速度の値は、誤差20%程度として扱うことが妥当と思われる。

また、本予備解析で対象としたJMT-Rの炉心は、93%濃縮ウランを用いた燃料要素で構成されている炉心としたが、濃縮ブランケット試験体の照射が行われる頃には20%濃縮ウラン燃料要素で構成される炉心であろう。この燃料要素のウラン濃縮度の違いによるトリチウム生成速度への影響については今後検討が必要である。概算的には15~30%程度のトリチウム生成速度の減少が見込まれる。

さらに今後の検討項目として、 ${}^6\text{Li}$ 含有率を操作した Li_2O (即ち濃縮リチウムや劣化リチウム) を用いて試験体を照射する場合の解析を予定している。

謝　　辞

本報告をまとめるにあたり、材料試験炉部長　岡本芳三氏、同次長　山本　章氏、同計画課　須藤高史氏および臨界プラズマ研究部炉設計研究室の東稔達三氏に多く助言をいただいた。また、計画課の小向文作氏および小池須美男氏にデータ処理等で助力していただいた。以上、記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 班目春樹：“米国における核融合炉技術の評価活動「FINESS E」”，日本原子力学会誌，27，989（1985）
- 2) 秦 和夫：“核融合炉におけるトリチウム増殖と燃料サイクルの自己充足”，日本原子力学会誌，27，996（1985）
- 3) R. D. Santos, E. M. Azevedo and R. C. O. Silva : "Neutronics Calculations of the INTOR Blanket with Austenitic Steel as Structural Material and Low-Z Coating ", J. Nucl. Mater., 133 & 134, 858 (1985)
- 4) 臨界プラズマ研究部：JAERI-M 85-178，“準定常核融合実験炉（FER-Q）概念設計報告書（その2）”（1985）
- 5) 渡辺 齊, 倉沢利昌他：JAERI-M 82-136, “酸化リチウム高照射試験(1)”（1982）
- 6) 竹下英文, 吉田 浩, 倉沢利昌他：JAERI-M 86-130, “酸化リチウムの照射下トリチウム放出試験”（1986）
- 7) K. Tsuchihashi, Y. Ishiguro et al. : JAERI 1302, "Revised SRAC Code System" (1986)
- 8) Y. Nagaoka, K. Takeda, S. Shimakawa et al. : JAERI-M 84-073, "Critical Experiments of JMTRC MEU Cores", Proc. Int'l Mtg. on RERTR, 360 (1983)
- 9) S. Shimakawa, Y. Nagaoka, S. Koike et al. :"Critical Experiments of JMTRC MEU Core (II)", Proc. Int'l Mtg. on RERTR, Netherlands, 353 (1985)
- 10) 鶴田晴通, 市川博喜, 岩崎淳一：JAERI-M 84-099, “JRR-3改造炉の核設計”，（1984）
- 11) 永岡芳春：JAERI-M 6661, “JMTR 運転中の熱中性子束変動の評価”（1976）
- 12) 材料試験炉部：JAERI-M 83-053, “JMTR 照射ハンドブック”，（1983）

記 号 表

略 号

ϕ	中性子束
Σ	巨視的断面積
σ	微視的断面積
N	原子個数
F	ディプレッション因子
V	体積
A	生成速度
Q	発熱量

添 字

a	反応
A	吸收
Cell	単位セル
th	熱中性子
T	トリチウム

Table 1 Li₂Oペブル充填率に対する核特性変化（冷却管なし、熱中性子寄与分）

項目	Li ₂ Oペブル 充填率	10%	20%	40%	55%	70%	100%
ΣA_{cell} ($\times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$)	7.06	7.11	7.14	7.22	7.24	7.27	
$\bar{\Sigma} a^{6\text{Li}}$ (cm^{-1})	0.323	0.634	1.26	1.73	2.20	3.15	
$\bar{\sigma} a^{6\text{Li}}$ (barn)	545	536	533	532	532	532	
ϕ_{th}^{cell} ($\times 10^{13} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.15	2.12	2.11	2.09	2.07	2.05	
$\phi_{th}^{Li_2O}$ ($\times 10^{13} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.452	0.250	0.129	0.0937	0.0734	0.0512	
F th (-)	0.213	0.118	0.0612	0.0449	0.0354	0.0250	
N T ($\times 10^{15} \text{s}^{-1}$)	5.31	5.78	5.92	5.91	5.89	5.87	
A T (Ci/day)	21.6	24.2	24.7	24.7	24.6	24.5	
Q T (kW)	4.13	4.44	4.55	4.54	4.53	4.51	

Table 2 Li₂Oペブル充填率に対するトリチウム生成割合分布（冷却管なし、熱中性子寄与分）

領域			Li ₂ Oペブル充填率					
番号	半径 (mm)	Li ₂ O体積 (%)	10 % (生成%)	20 % (生成%)	40 % (生成%)	55 % (生成%)	70 % (生成%)	100 % (生成%)
1	5.25	1.2	0.6	0.2	-	-	-	-
2	10.62	3.7	1.8	0.7	0.1	-	-	-
3	15.99	6.2	3.2	1.3	0.2	-	-	-
4	21.36	8.7	5.0	2.3	0.5	0.2	0.1	-
5	26.73	11.1	7.3	4.0	1.2	0.5	0.2	0.1
6	32.10	13.6	10.6	6.9	2.7	1.4	0.7	0.3
7	37.47	16.1	15.2	12.3	6.9	4.3	2.7	1.0
8	41.03	12.1	13.8	13.6	10.3	7.7	5.7	3.1
9	44.59	13.1	18.0	21.6	22.0	20.0	17.5	12.8
10	48.15	14.2	24.5	37.1	56.0	65.8	73.0	82.6

Li₂O体積: 3642 cm³

Table 3 Li₂Oペブル充填率に対する核発熱密度分布(冷却管なし、熱中性子寄与分)

Li ₂ Oペブル充填率			10%	20%	40%	55%	70%	100%
増殖材平均核発熱密度 (W/cm ³)			1.13	1.22	1.25	1.25	1.24	1.24
領域								
番号	半径 (mm)	Li ₂ O体積 (%)						
1	5.25	1.2	0.487	0.169	0.025	0.009	0.005	0.002
2	10.62	3.7	0.493	0.183	0.029	0.011	0.005	0.003
3	15.99	6.2	0.526	0.214	0.040	0.015	0.007	0.003
4	21.36	8.7	0.580	0.268	0.061	0.024	0.011	0.004
5	26.73	11.1	0.659	0.357	0.106	0.046	0.022	0.008
6	32.10	13.6	0.775	0.507	0.201	0.103	0.055	0.019
7	37.47	16.1	0.944	0.766	0.427	0.266	0.167	0.070
8	41.03	12.1	1.142	1.130	0.854	0.641	0.472	0.255
9	44.59	13.1	1.372	1.639	1.673	1.519	1.331	0.975
10	48.15	14.2	1.718	2.605	3.932	5.123	5.123	5.798

Li₂O体積:3642cm³

Table 4 核特性変化 (Li₂Oペブル充填率55%, 冷却管 $\phi 10.5\text{ mm} \times 9$ 本, 热中性子寄与分)

項目	冷却管なし	冷却管あり
ΣA_{cell} ($\times 10^{-2}\text{ cm}^{-1}$)	7.22	7.37
$\Sigma a_{^6\text{Li}}$ (cm^{-1})	1.73	1.67
$\sigma a_{^6\text{Li}}$ (barn)	532	514
ϕ_{th} ($\times 10^{13}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.09	2.06
$\phi_{^6\text{Li}_2\text{O}}$ ($\times 10^{13}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.0937	0.114
F _{th} (-)	0.0449	0.0555
N _T ($\times 10^{15}\text{ s}^{-1}$)	5.91	6.23
A _T (Ci/day)	24.7	26.0
Q _T (kW)	4.54	4.78

Table 5 トリチウム生成割合分布及び核発熱密度分布 (Li_2O ペブル充填率 5.5 %,
冷却管 $\phi 1.05 \text{ mm} \times 9$ 本, 熱中性子寄与分)

領域			トリチウム 生成割合分布 (生成 %)	核発熱密度 分布 ** (-)
番号	半径 (mm)	Li_2O 体積 (%)		
1	5.25	0.0 *	-	-
2	10.62	4.1	0.5	0.133
3	15.99	6.9	0.4	0.055
4	21.36	9.7	0.6	0.064
5	26.73	12.4	1.8	0.141
6	32.10	10.2 *	2.4	0.239
7	37.47	12.5 *	4.7	0.374
8	41.03	13.5	8.5	0.629
9	44.59	14.7	19.3	1.308
10	48.15	16.0	61.8	3.787

* : 冷却管の配置された領域

** : 増殖材平均核発熱密度(1.47 W/cm^3)を 1.0 とした。

Li_2O 体積: 3252 cm^3

Table 6 増殖材温度に対する核特性変化 (Li_2O ペブル充填率 55 %, 冷却管なし,
熱中性子寄与分)

増殖材温度 項目	325 K	600 K	900 K	1200 K
ΣA_{cell} ($\times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$)	7.22	7.22	7.22	7.21
$\Sigma a_{^6\text{Li}}$ (cm^{-1})	1.73	1.73	1.73	1.72
$\sigma a_{^6\text{Li}}$ (barn)	532	531	530	529
$\phi_{\text{th}}_{\text{cell}}$ ($\times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.09	2.09	2.09	2.09
$\phi_{\text{th}}_{\text{Li}_2\text{O}}$ ($\times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.0937	0.0938	0.0940	0.0941
F th (-)	0.0449	0.0449	0.0450	0.0451
N T ($\times 10^{15} \text{ s}^{-1}$)	5.91	5.91	5.91	5.92
A T (Ci/day)	24.7	24.7	24.7	24.7
Q T (kW)	4.54	4.54	4.54	4.54

Table 7 冷却水温度に対する核特性変化 (Li₂Oペブル充填率 5.5%, 冷却管 $\phi 1.05\text{mm} \times 9$ 本, 热中性子寄与分)

冷却材 温度 項 目	3 2 5 K	4 5 0 K	6 0 0 K
$\bar{\Sigma} A_{\text{cell}}$ $(\times 10^{-2}\text{cm}^{-1})$	7.37	7.26	7.26
$\bar{\Sigma} a^{^6\text{Li}}$ (cm^{-1})	1.67	1.70	1.70
$\bar{\sigma} a^{^6\text{Li}}$ (barn)	514	523	522
$\bar{\phi}_{\text{th}}^{\text{cell}}$ $(\times 10^{13}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	2.06	2.09	2.09
$\bar{\phi}_{\text{th}}^{^6\text{Li}_2\text{O}}$ $(\times 10^{13}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	0.115	0.110	0.110
F th (-)	0.0555	0.0525	0.0525
N T $(\times 10^{15}\text{s}^{-1})$	6.23	6.07	6.07
A T (Ci/day)	26.0	25.4	25.4
Q T (kW)	4.78	4.66	4.66

Table 8 増殖ブランケット試験体を装荷した場合のOWL-2領域の中性子束変化
(Li₂Oペブル充填率55%, 冷却管なし)

中性子エネルギー群	試験体なし	試験体あり	
	セル平均 中性子束 (cm ⁻² ・s ⁻¹)	セル平均 中性子束 (cm ⁻² ・s ⁻¹)	増殖材平均 中性子束 (cm ⁻² ・s ⁻¹)
第1群 (> 1.0 MeV)	3.09x10 ¹²	4.12x10 ¹²	4.39x10 ¹²
第2群 (183keV - 1.0MeV)	4.81x10 ¹²	9.28x10 ¹²	9.92x10 ¹²
第3群 (0.683eV - 183keV)	1.90x10 ¹³	3.12x10 ¹³	2.54x10 ¹³
第4群 (< 0.683 eV)	4.65x10 ¹³	2.09x10 ¹³	9.37x10 ¹¹

Table 9 中性子エネルギー別の核特性 (Li₂Oペブル充填率55%,
冷却管なし)

項目	中性子 エネルギー	第1群 (>1.0MeV)	第2群 (183KeV - 1.0MeV)	第3群 (0.683eV - 183KeV)	第4群 (<0.683eV)	合計
ΣA_{cell} ($\times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$)	0.0672	0.111	1.13	7.22	-	
$\Sigma a_{^6\text{Li}}$ (cm^{-1})	0.0008	0.003	0.035	1.73	-	
$\sigma a_{^6\text{Li}}$ (barn)	0.26	0.91	10.9	532	-	
ϕ_{cell} ($\times 10^{13} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.412	0.928	3.12	2.09	-	
$\phi_{\text{Li}_2\text{O}}$ ($\times 10^{13} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.439	0.992	2.54	0.0937	-	
F (-)	1.067	1.069	0.817	0.0449	-	
NT ($\times 10^{15} \text{s}^{-1}$)	0.013	0.106	3.27	5.92	9.31	
AT (Ci/day)	0.06	0.44	13.7	24.7	38.9	
QT (kW)	0.010	0.081	2.51	4.54	7.14	

Table 10 中性子エネルギー 183 keV 以下の中性子によるトリチウム生成速度の分布
(Li₂O ペブル充填率 5.5%, 冷却管なし)

番号	領域		第3群 (0.683eV - 183keV)	第4群 (<0.683eV)	合計 (<183keV)
	半径 (mm)	Li ₂ O体積 (%)			
1	5.25	1.2	0.12	-	0.12
2	10.62	3.7	0.37	0.01	0.38
3	15.99	6.2	0.63	0.02	0.65
4	21.36	8.7	0.92	0.05	0.97
5	26.73	11.1	1.26	0.12	1.38
6	32.10	13.6	1.66	0.34	2.00
7	37.47	16.1	2.15	1.06	3.21
8	41.03	12.1	1.78	1.91	3.69
9	44.59	13.1	2.15	4.93	7.08
10	48.15	14.2	2.65	16.24	18.89
合計			13.69	24.68	38.37

Table 11 増殖ブランケット試験体装荷による原子炉反応度変化

炉心状態		実効増倍率 K_{eff}	過剰反応度 ρ_{ex} (% $\Delta k/k$)	過剰反応度の 変化 $\Delta \rho_{ex}$ (% $\Delta k/k$)
OWL-2 無装荷		1.1324	11.69	-
試 験 体 装 荷	ペブル充填率 55% 冷却管 9本配置	1.1321	11.67	-0.02
	ペブル充填率 55% 冷却管なし	1.1321	11.67	-0.02
	ペブル充填率 100% 冷却管なし	1.1321	11.67	-0.02

Table 1.2 増殖ブランケット試験体の核特性予備解析結果

項目	内 容								
炉心装荷位置	OWL-2 (KL-3, 4)								
試験体寸法	$\phi 96.3\text{mm} \times 500\text{mm}$ (冷却管 $\phi 10.5\text{mm} \times 9$ 本)								
増殖材温度	325 K								
増殖材組成	Li2O ベブルタイプ								
ベブル充填率	55%								
Li2O 重量	3.6 kg								
中性子束	<table> <tr> <td>第1群 ($>1.0\text{MeV}$)</td><td>$4.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$</td></tr> <tr> <td>第2群 ($183\text{KeV}-1.0\text{MeV}$)</td><td>$9.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$</td></tr> <tr> <td>第3群 ($0.683\text{eV}-183\text{KeV}$)</td><td>$2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$</td></tr> <tr> <td>第4群 ($<0.683\text{eV}$)</td><td>$9.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$</td></tr> </table>	第1群 ($>1.0\text{MeV}$)	$4.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	第2群 ($183\text{KeV}-1.0\text{MeV}$)	$9.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	第3群 ($0.683\text{eV}-183\text{KeV}$)	$2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	第4群 ($<0.683\text{eV}$)	$9.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
第1群 ($>1.0\text{MeV}$)	$4.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$								
第2群 ($183\text{KeV}-1.0\text{MeV}$)	$9.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$								
第3群 ($0.683\text{eV}-183\text{KeV}$)	$2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$								
第4群 ($<0.683\text{eV}$)	$9.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$								
トリチウム生成速度	39 Ci/day								
核発熱量	7.1 kW								
Heガス生成速度	$1.2 \times 10^{-3} \text{ mol/day}$								
原子炉反応度変化	-0.02 % $\Delta k/k$								

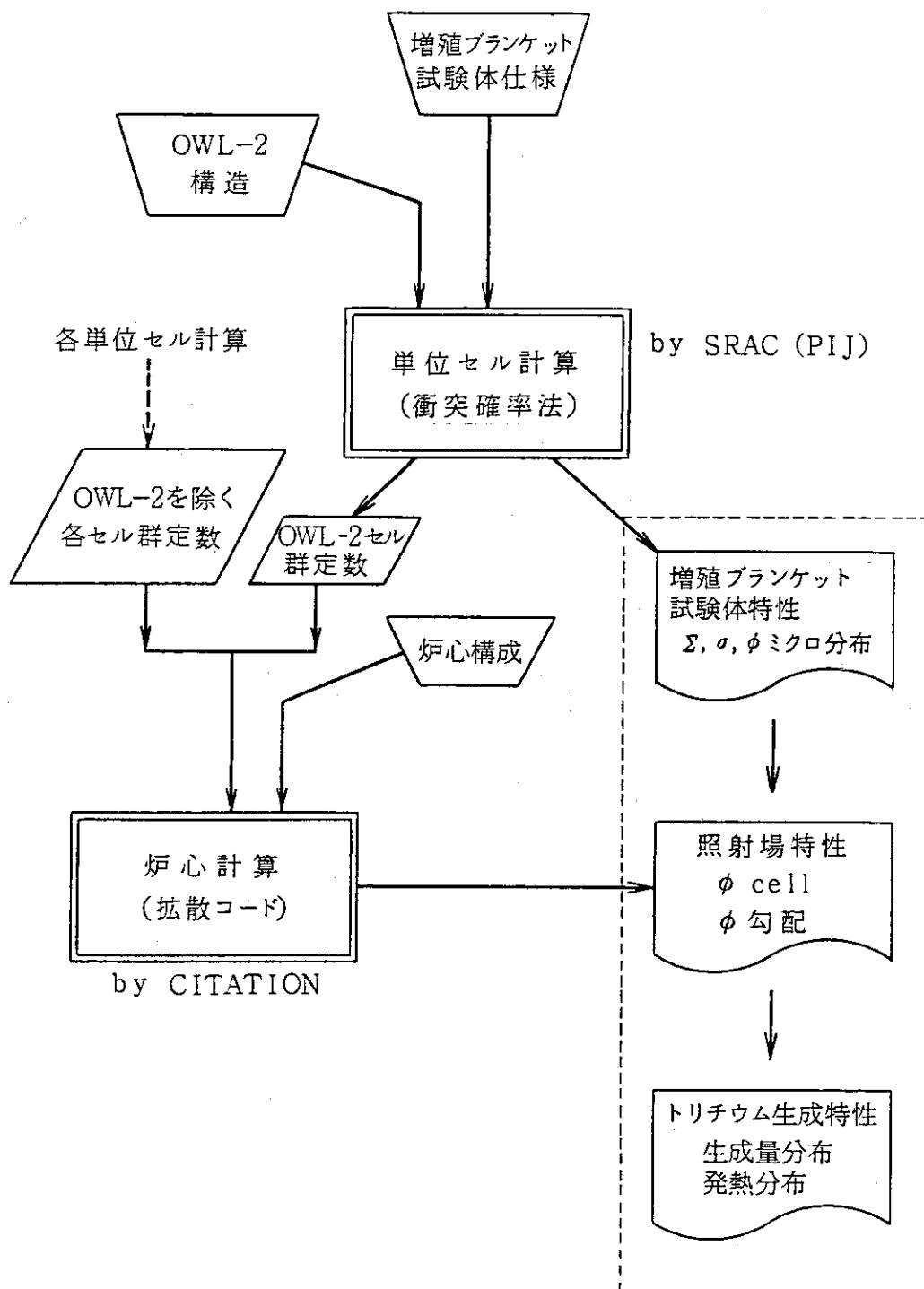
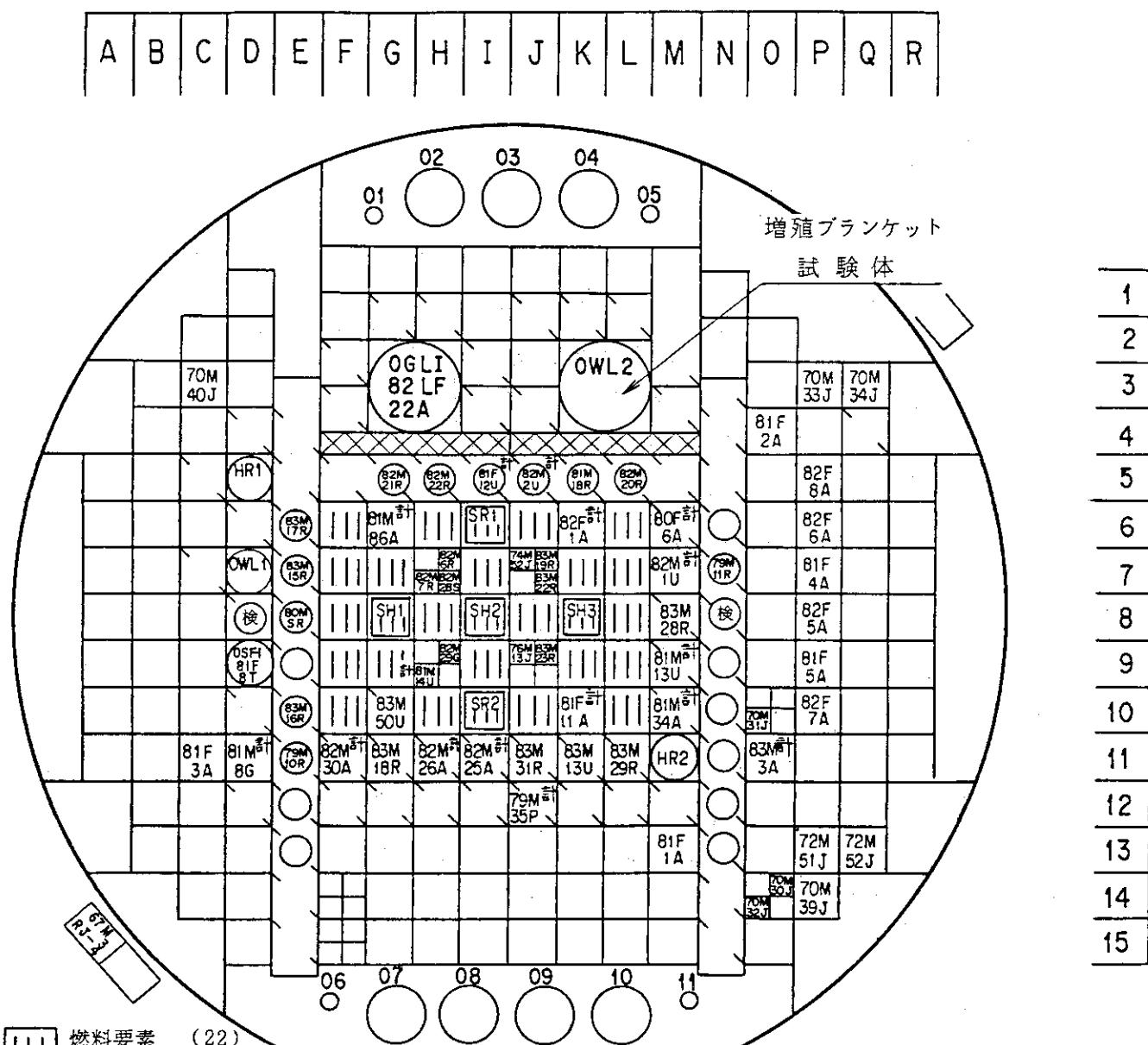


Fig. 1 特性解析フロー チャート



燃料要素 (22)
燃料フォロワ (5)

ベリリウム反射体要素 (38)

アルミニウム反射体要素 (123)
アルミニウム専用反射体 (4)

Fig. 2 J M T R 第 6 6 サイクル炉心装荷図

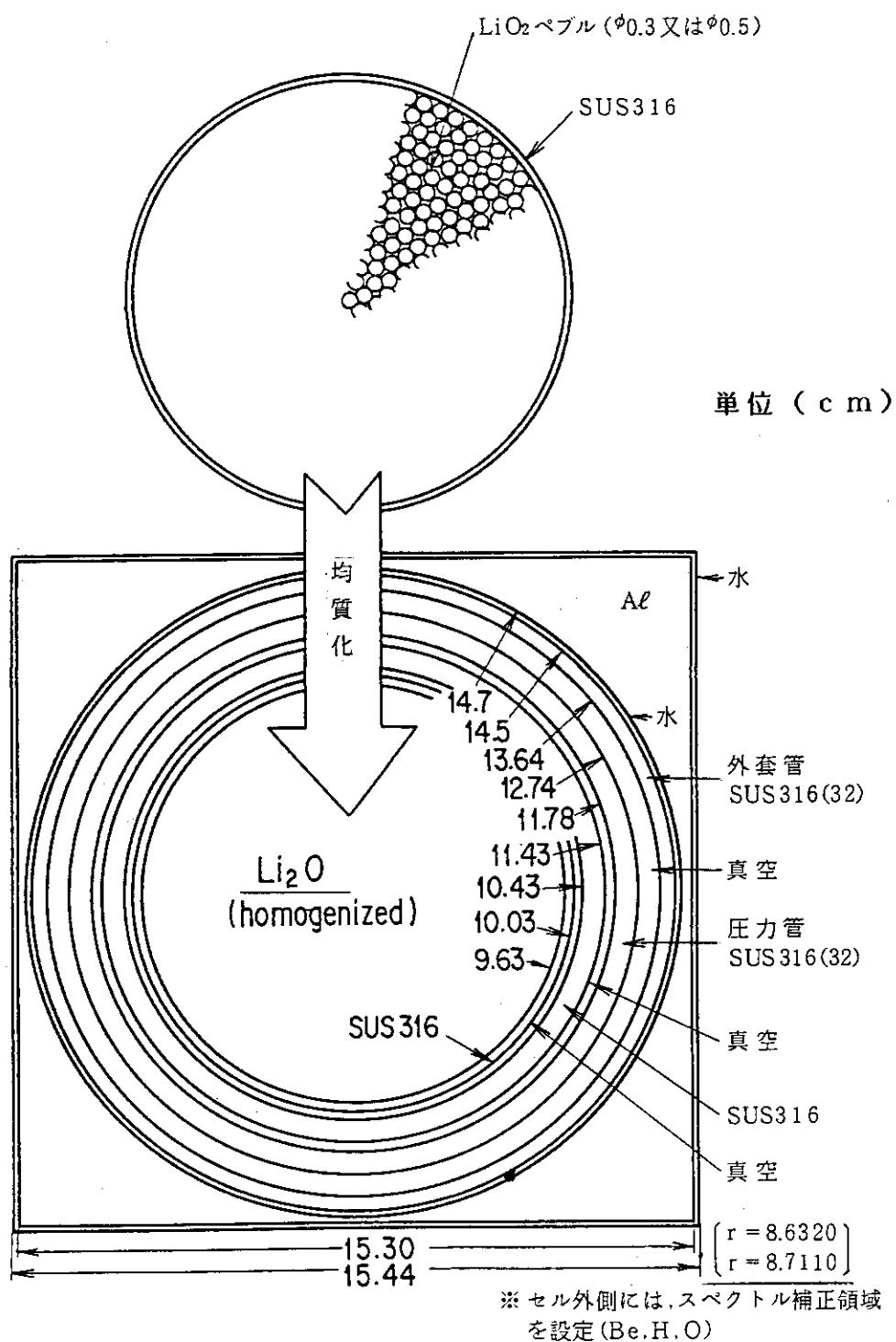
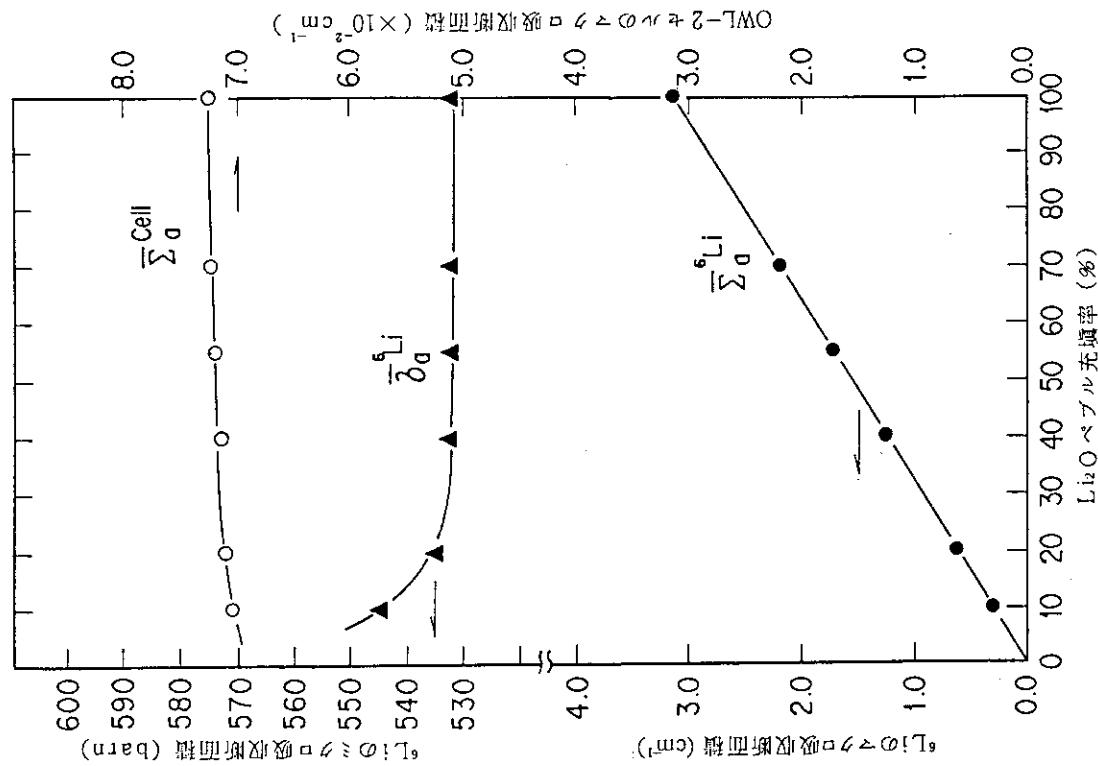
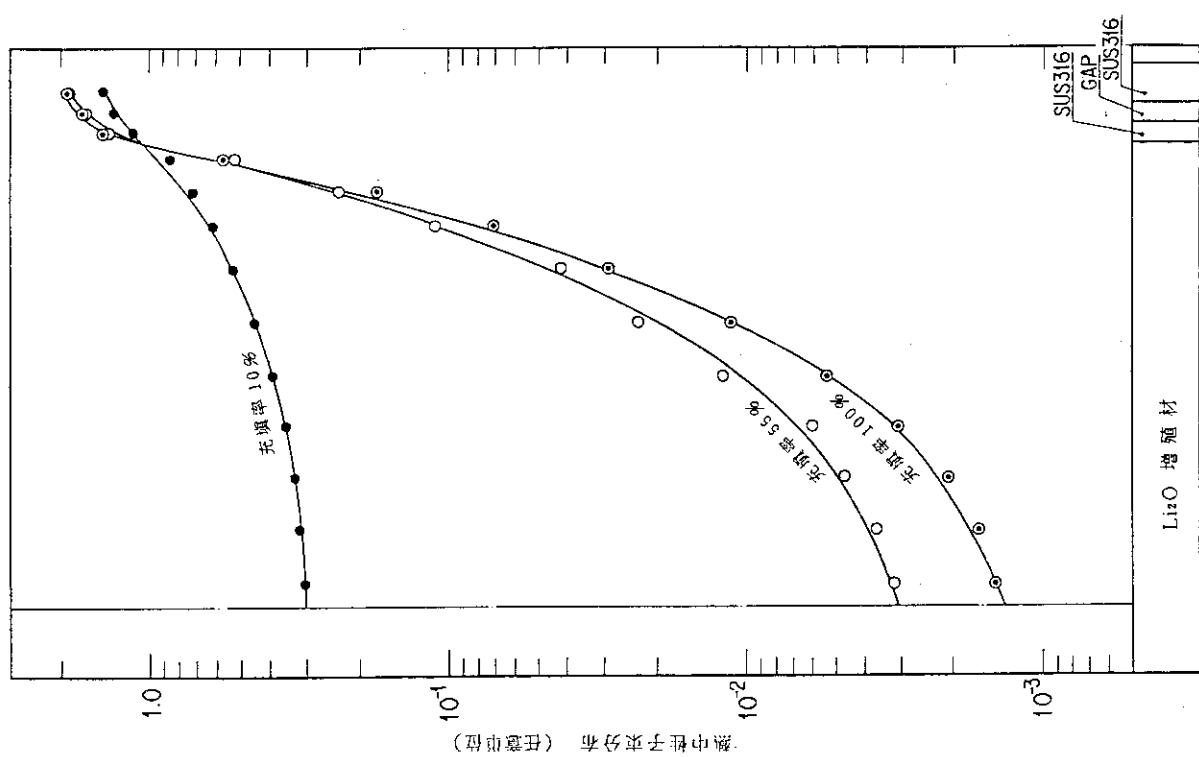
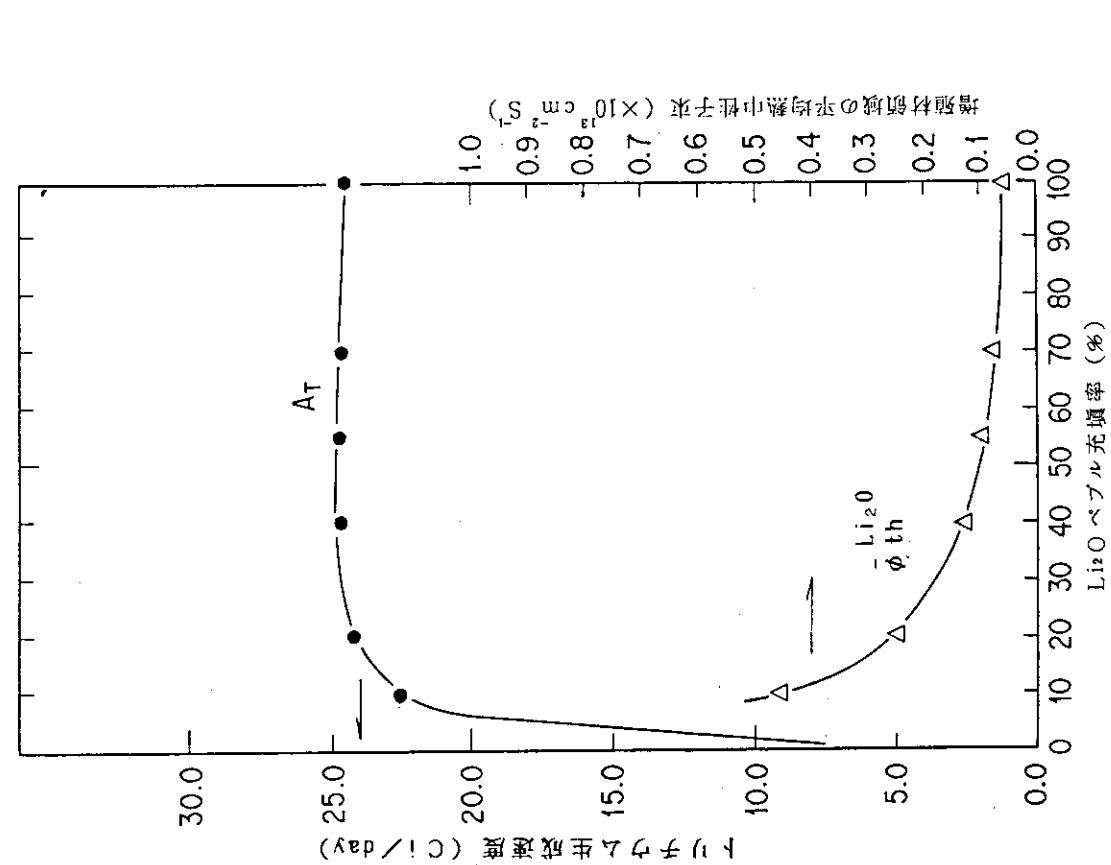
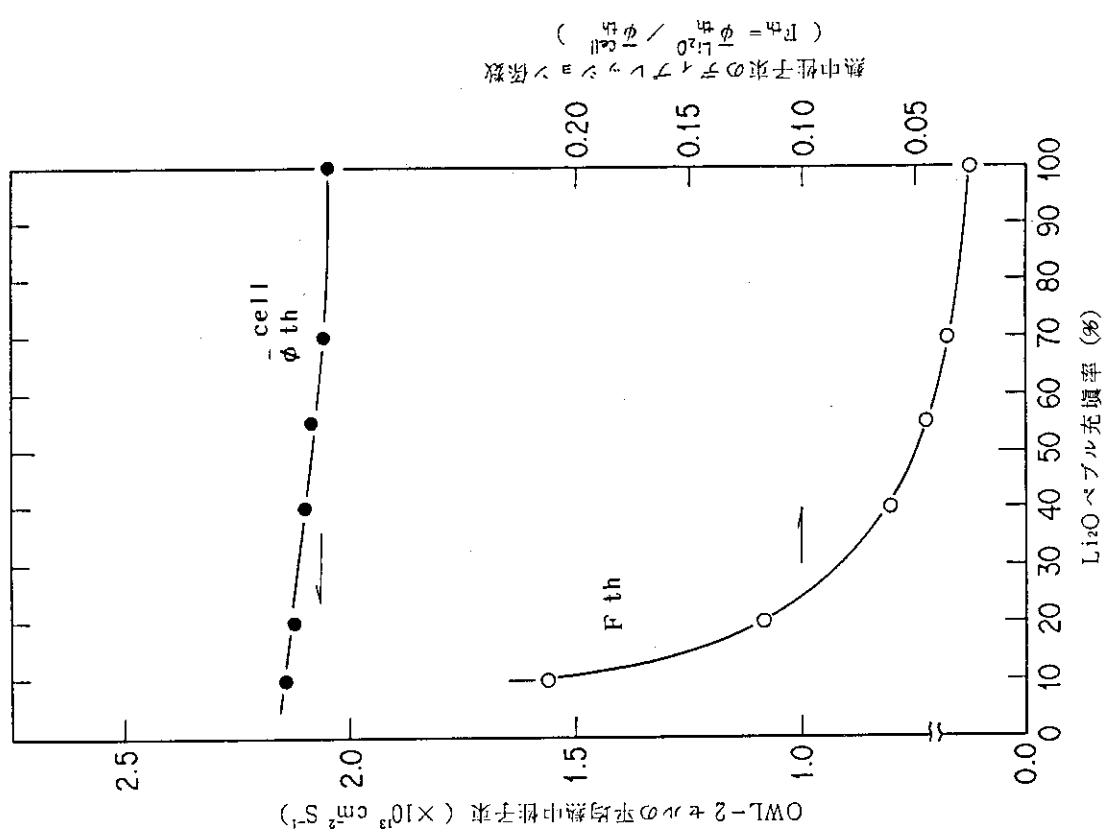


Fig. 3 OWL-2 ループでの増殖ブランケット試験体のセル計算モデル

Fig. 5 Li_2O ベブル充填率に対する核特性変化(1)Fig. 4 Li_2O ベブル充填率 1.0 %, 5.5 %, 10.0 % に対する
増殖材領域熱中性子束分布 (冷却管なし)

Fig. 7 Li_2O ペブル充填率に対する核特性変化(3)Fig. 6 Li_2O ペブル充填率に対する核特性変化(2)

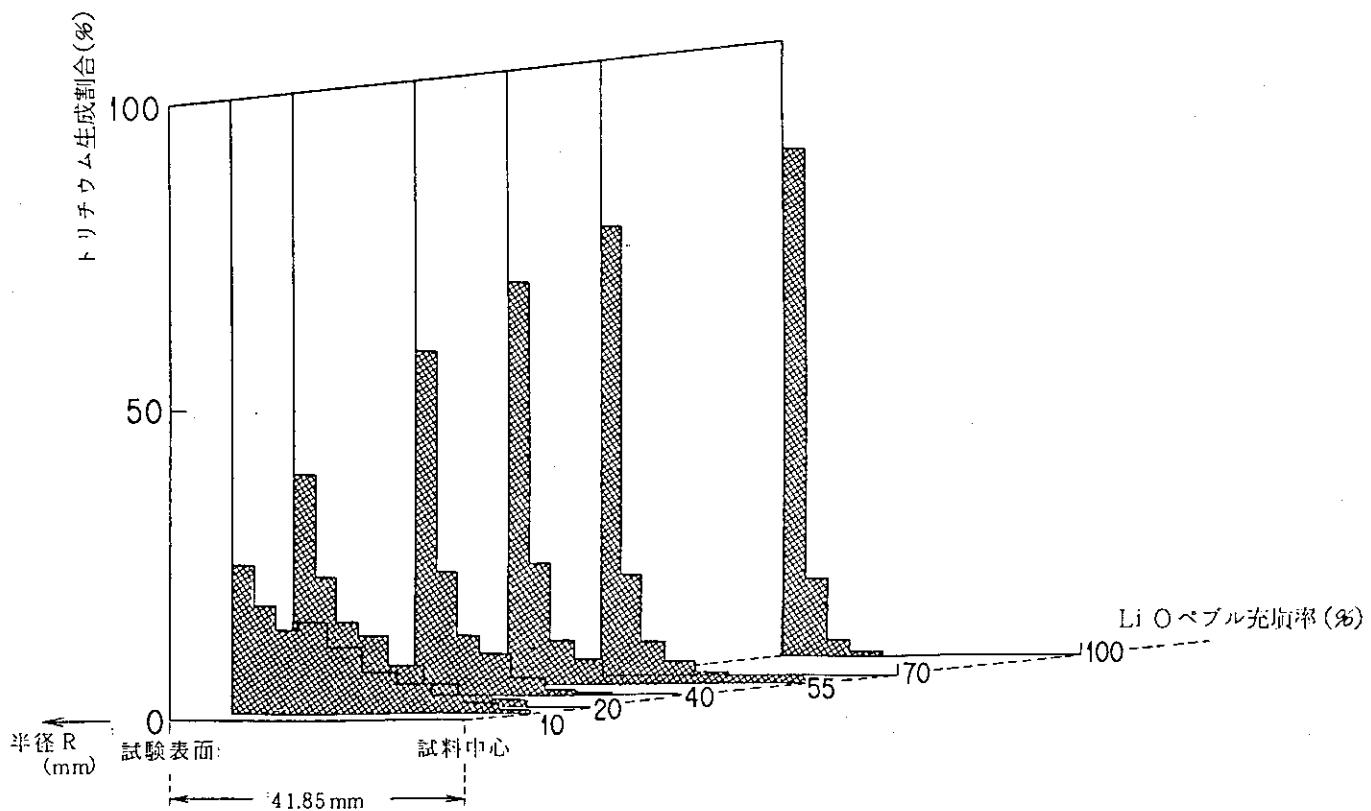
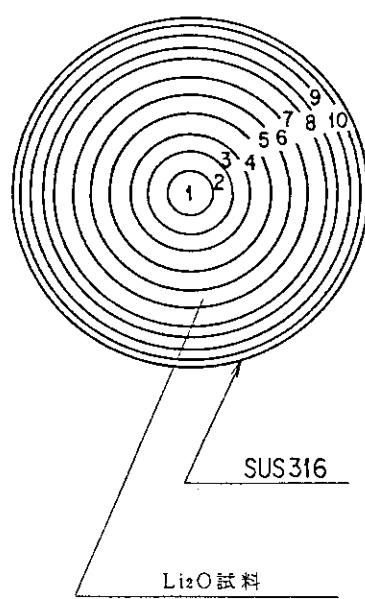
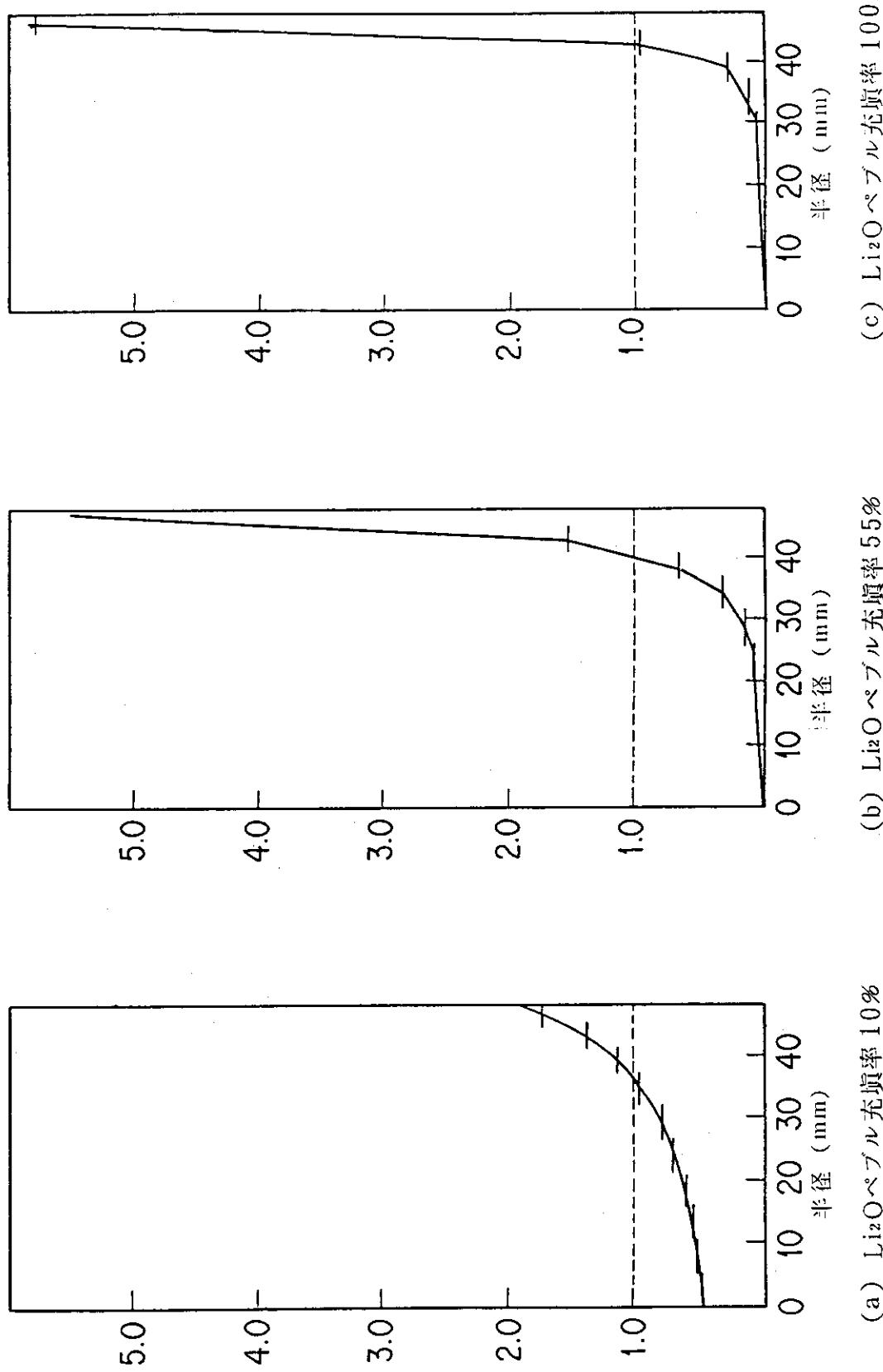
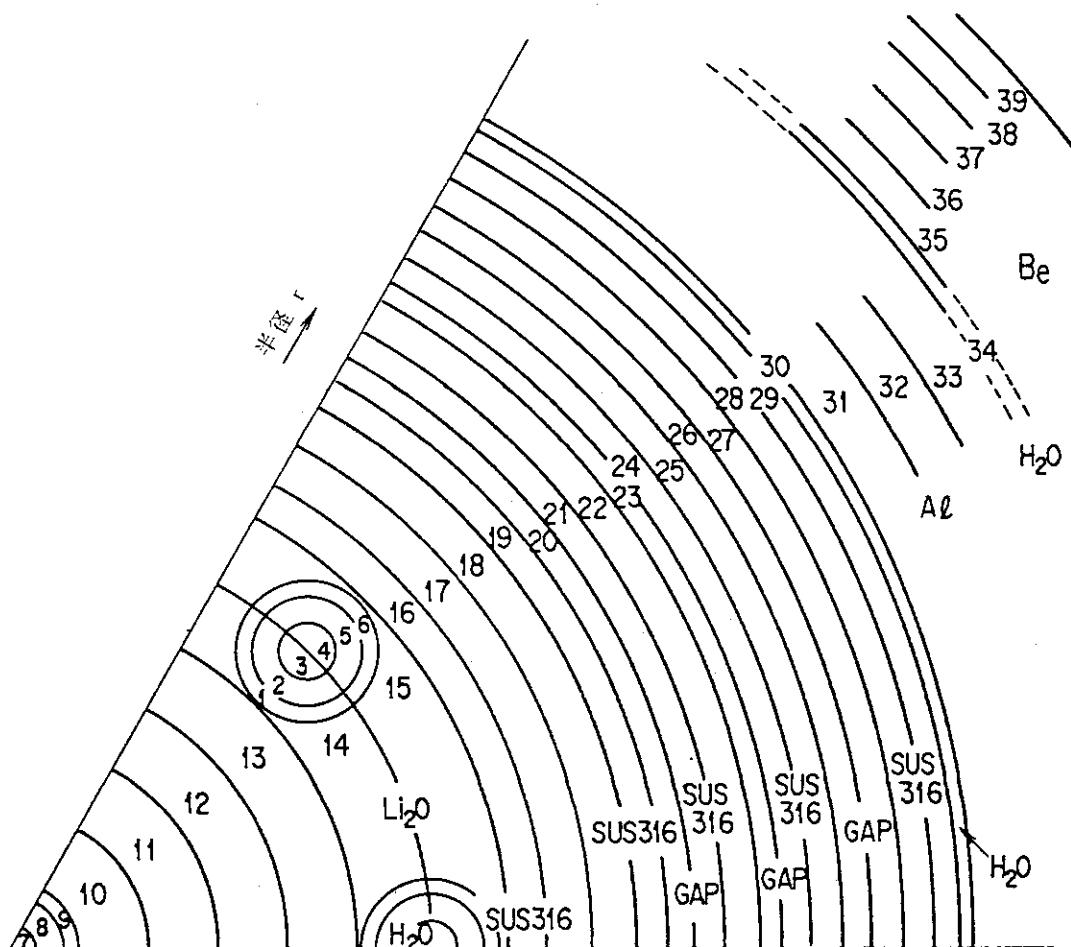
Fig. 8 Li₂Oペブル充填率に対するトリチウム生成割合

Fig. 9 増殖材領域の分割と領域番号

Fig. 10 Li_2O ペブル充填率に対する核発熱密度分布



図中の数字は計算用メッシュ番号

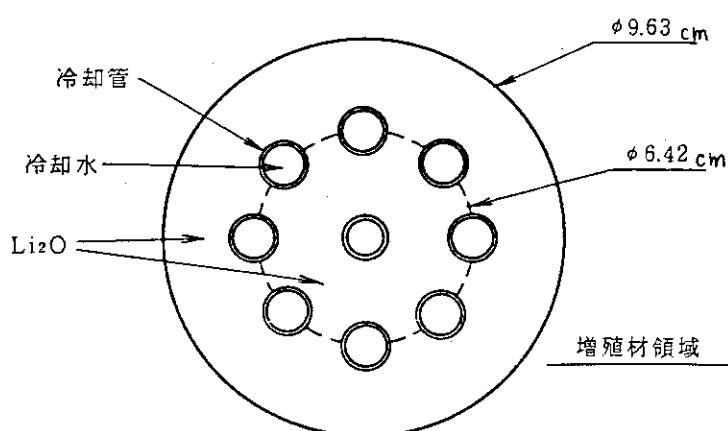


Fig. 1 1 冷却管 9本が配管された場合のセル計算モデル

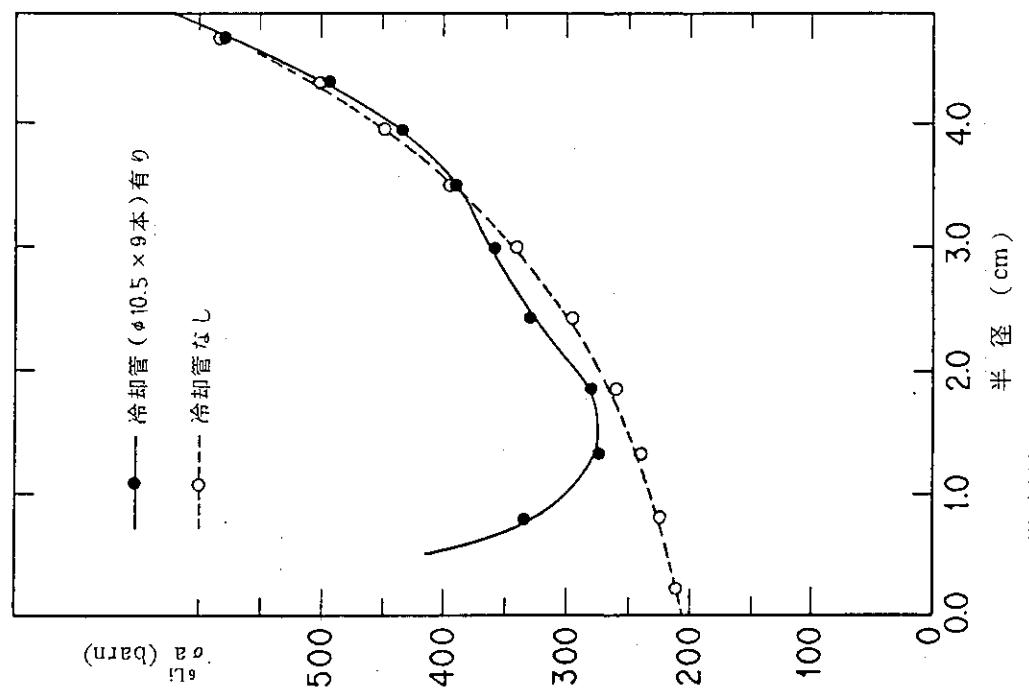


Fig. 1.3 増殖材領域の熱中性子による (n , α) 反応断面積 (Li_2O ベブル充填率 5 5 %)

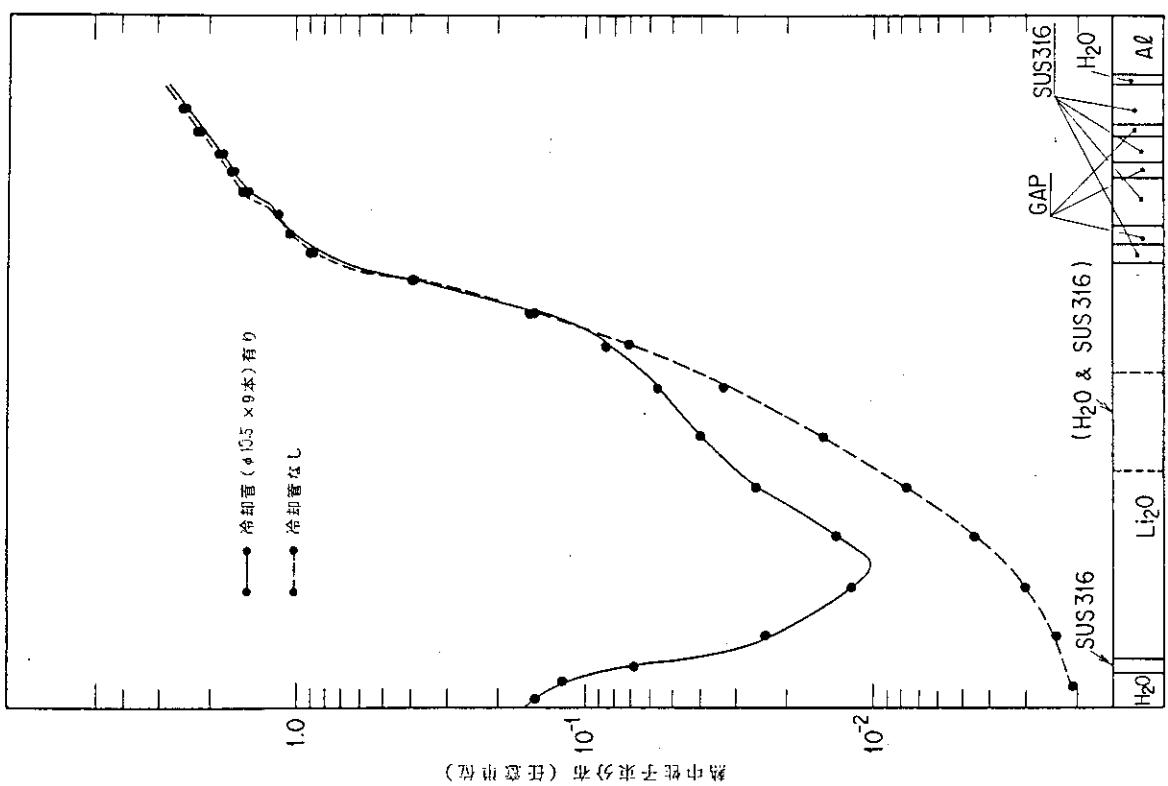


Fig. 1.2 寒却管 9 本が配置された場合の熱中性子束分布 (Li_2O ベブル充填率 5 5 %)

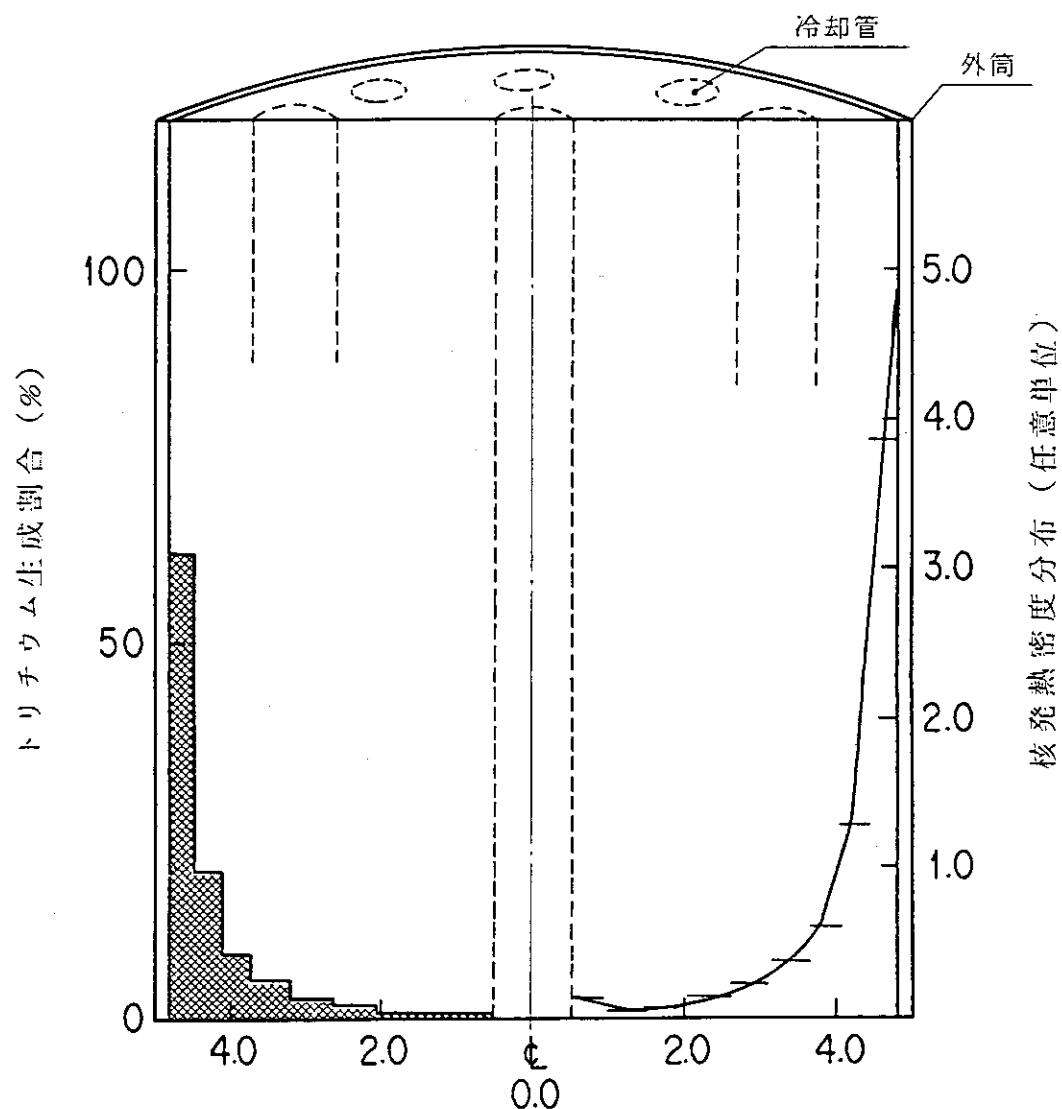


Fig. 14 トリチウム生成割合（左部）と核発熱密度分布（右部）（冷却管 9 本が配置されており、 Li_2O ペブル充填率は 55 %）

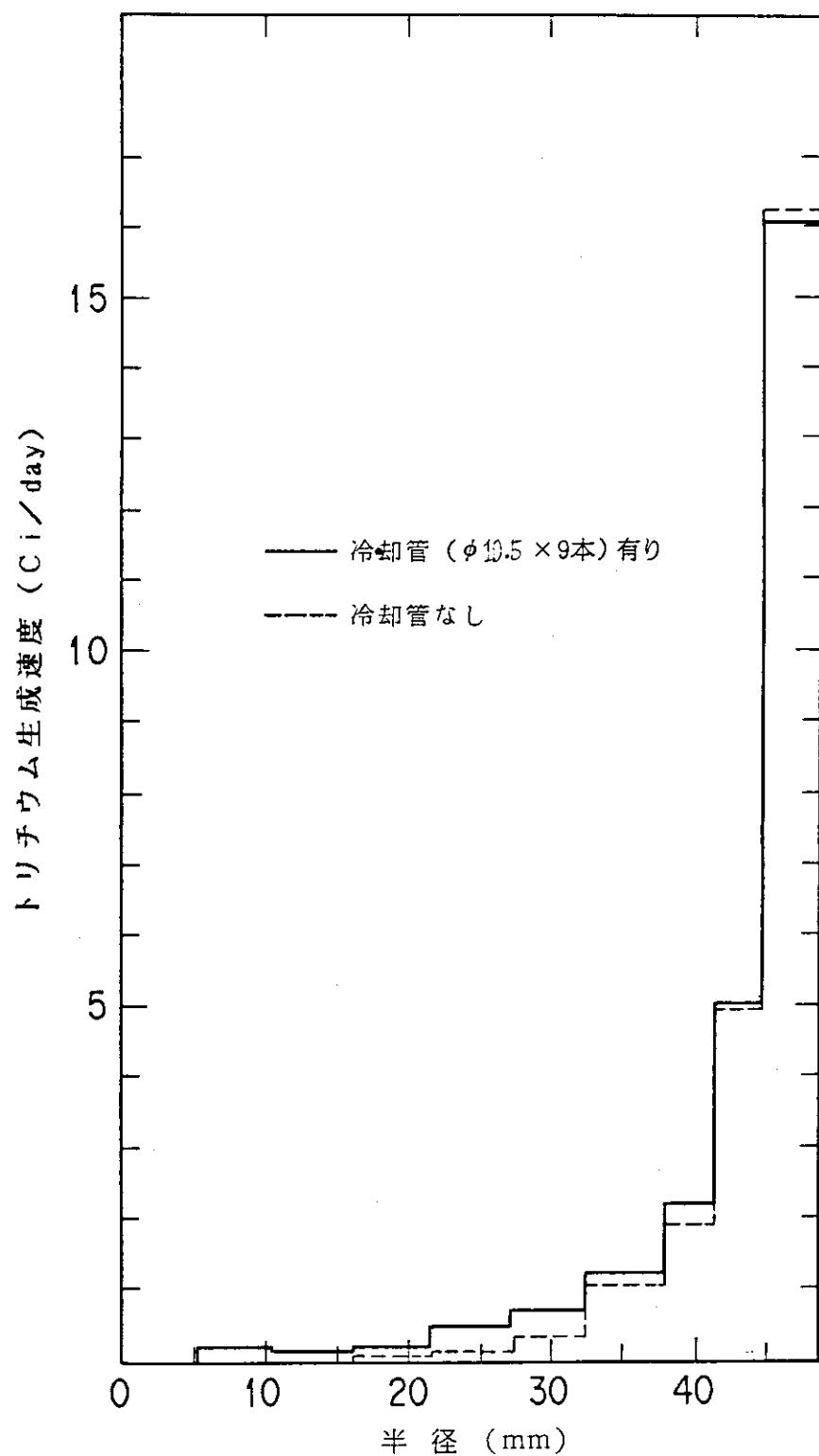
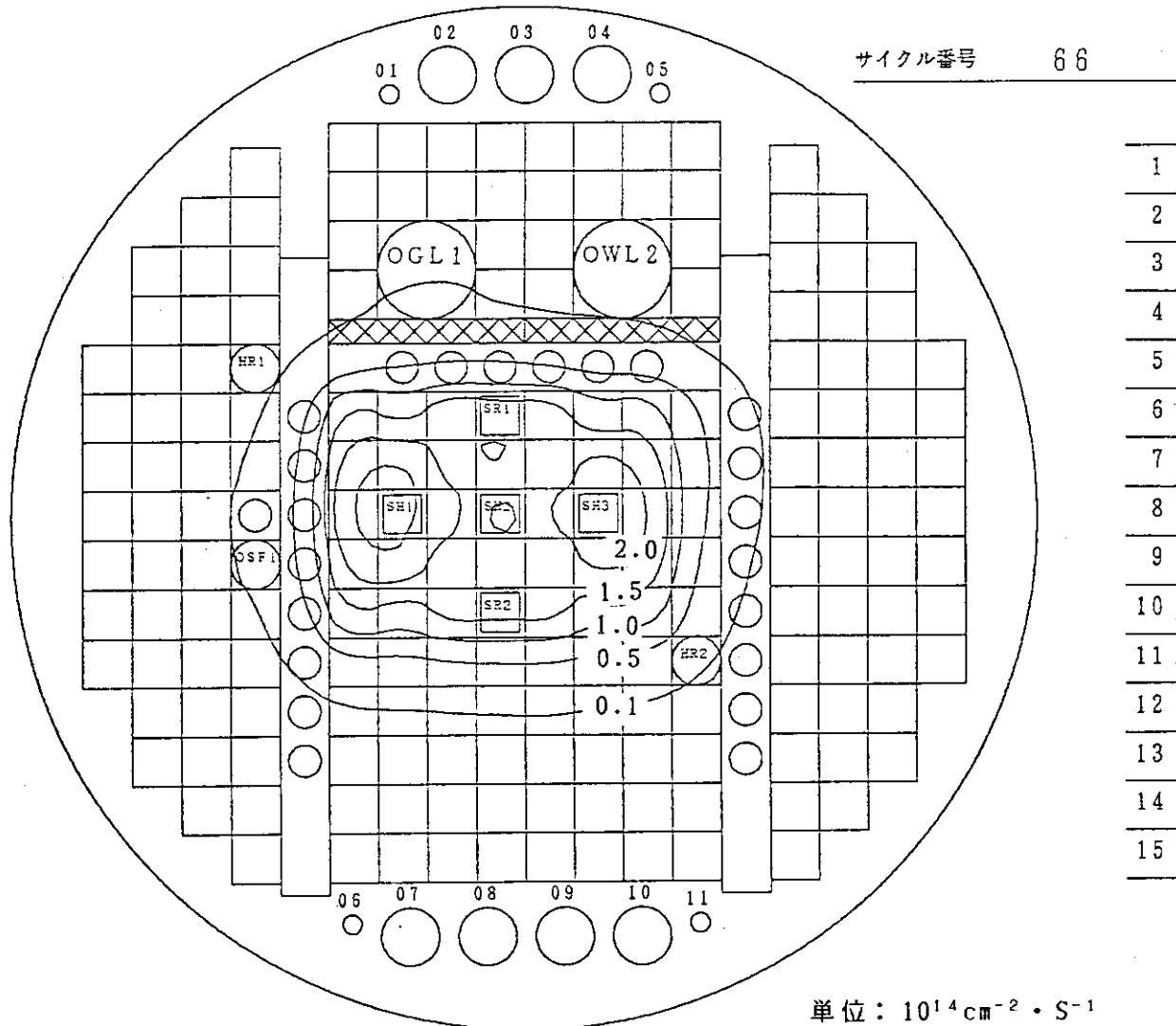


Fig. 15 冷却管 9 本が配置された場合のトリチウム生成速度の分布

フラックスマップ ($> 1 \cdot 0 \text{ MeV}$)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

日付 - 86年11月18日



66-CYCLE

FILE=J3858.BKTMAP.DATA

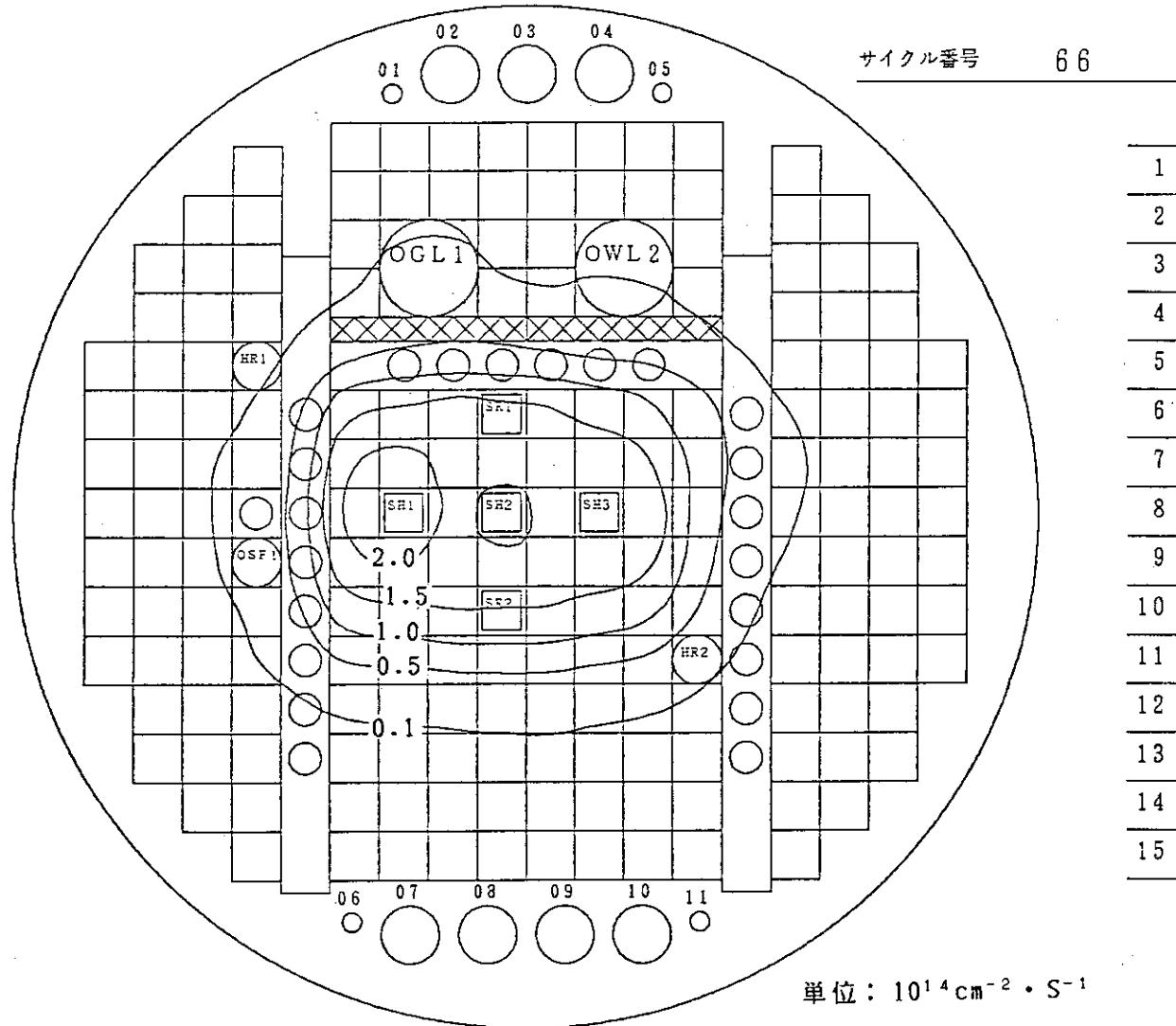
使用コード: CITATION

Fig. 16 増殖ブランケット試験体がOWL-2に装荷された場合の炉内中性子束分布(中性子エネルギー: 1.0 MeV以上)

フラックスマップ (183 keV ~ 1.0 MeV)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

日付 - 86年11月18日



66-CYCLE

FILE=J3858.BKTMAP.DATA

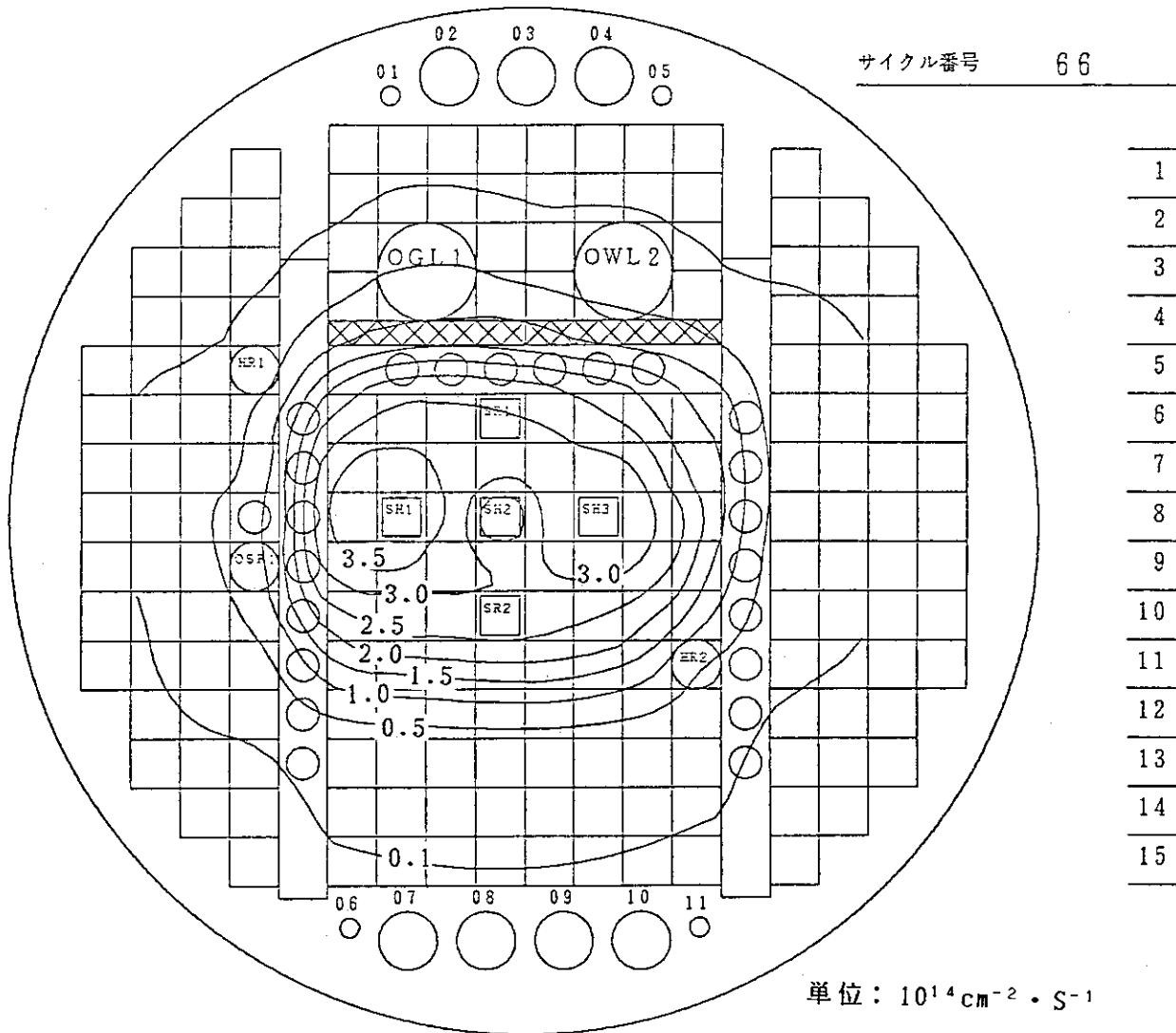
使用コード: CITATION

Fig. 17 増殖ブランケット試験体がOWL-2に装荷された場合の炉内中性子分布
(中性子エネルギー: 183 keV ~ 1.0 MeV)

フラックスマップ (0・6826 eV ~ 183 keV)

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R

日付-86年11月18日



66-CYCLE

FILE=J3858.BKTMAP, DATA

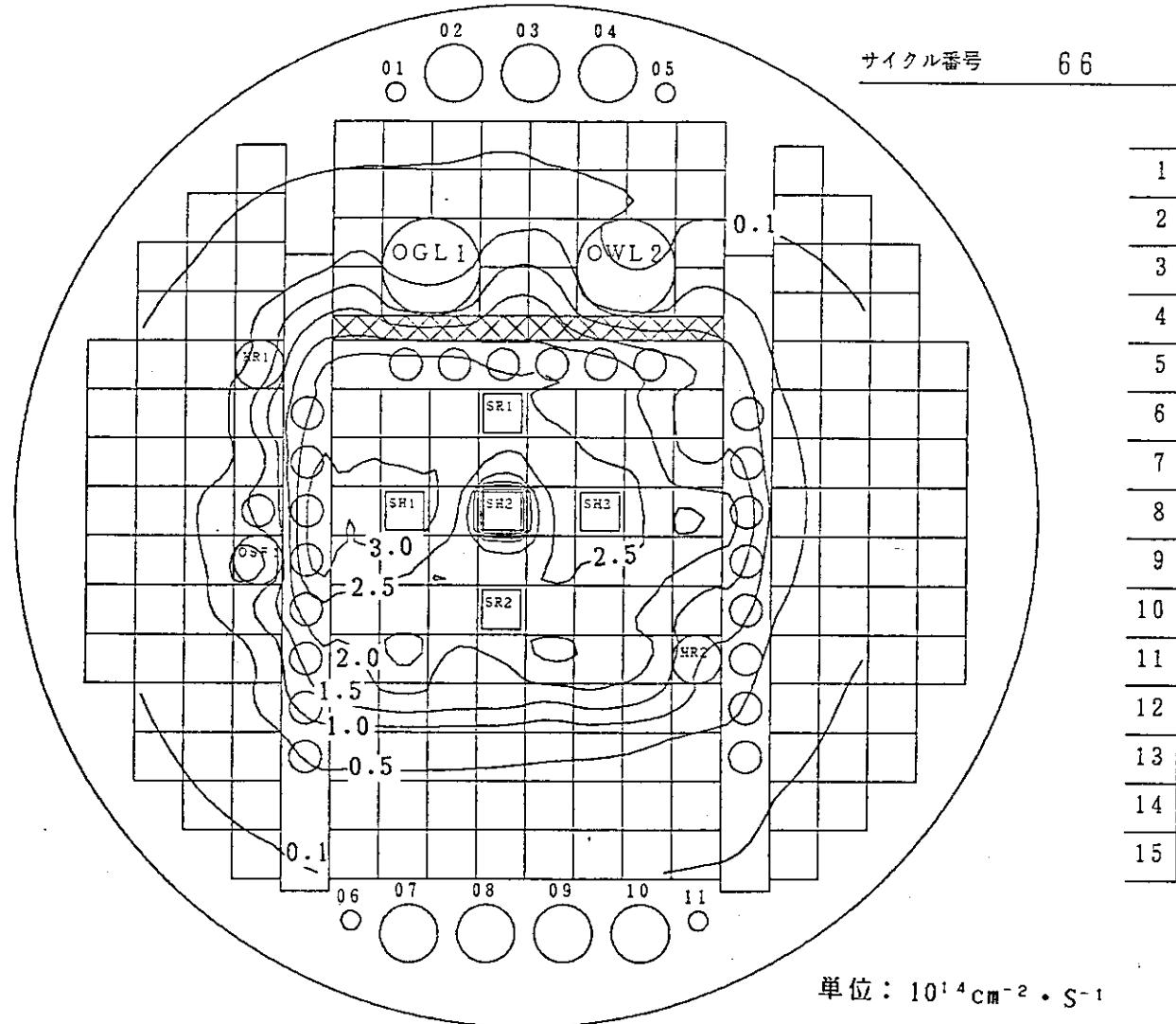
使用コード: CITATION

Fig. 18 増殖ブランケット試験体がOWL-2に装荷された場合の炉内中性子束分布
 (中性子エネルギー: 0.6826 eV ~ 183 keV)

フラックスマップ ($< 0.6826 \text{ eV}$)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

日付 - 86年11月18日



66-CYCLE

FILE=J3858.BKTMAP.DATA

使用コード: CITATION

Fig. 19 増殖ブランケット試験体がOWL-2に装荷された場合の炉内中性子束分布
(中性子エネルギー: 0.6826 eV 以下)

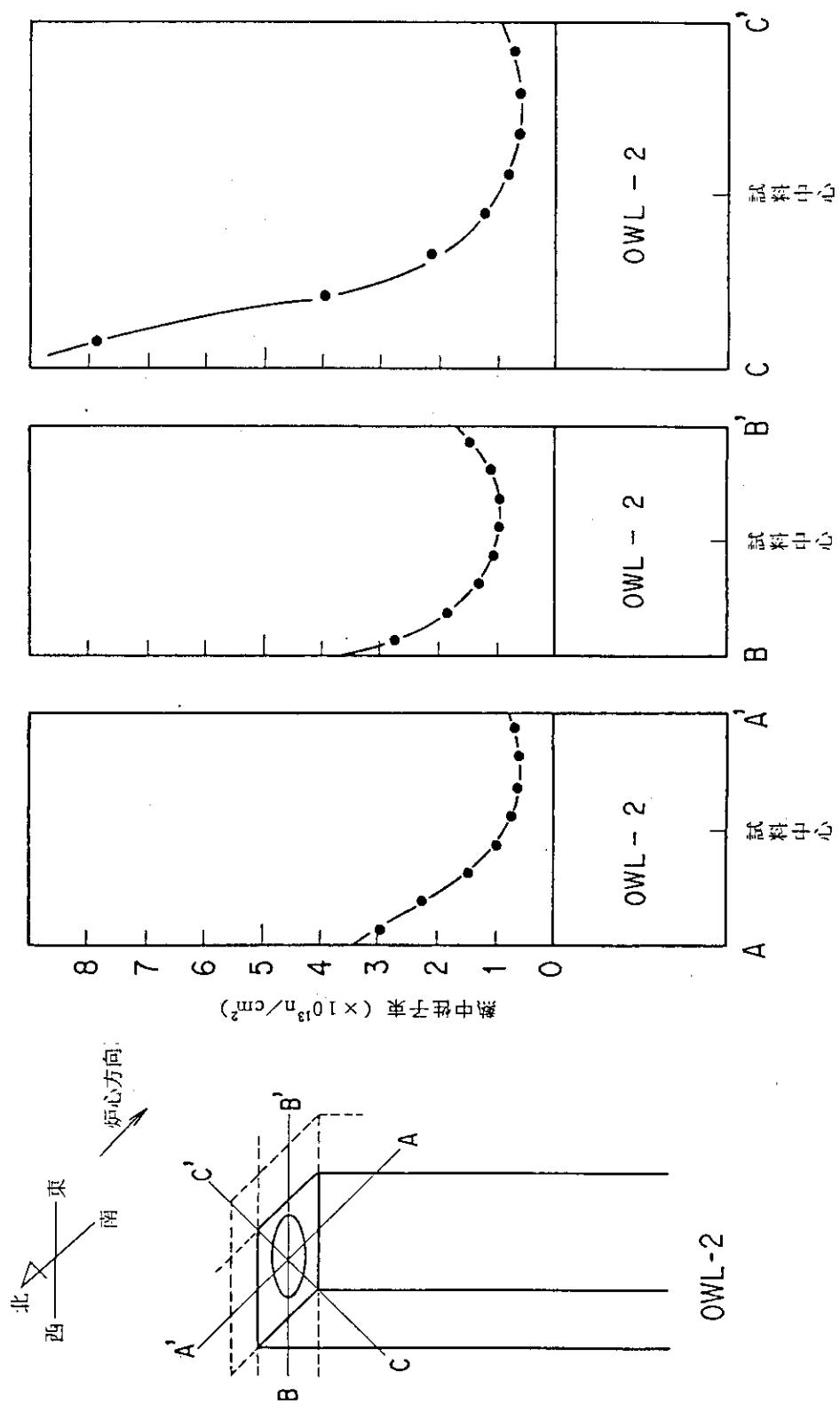


Fig. 2.0 OWL-2 における熱中性子束勾配 (増殖ブランケット試験体装荷時, 冷却管なし, Li_2O ペブル充填率 5 %)

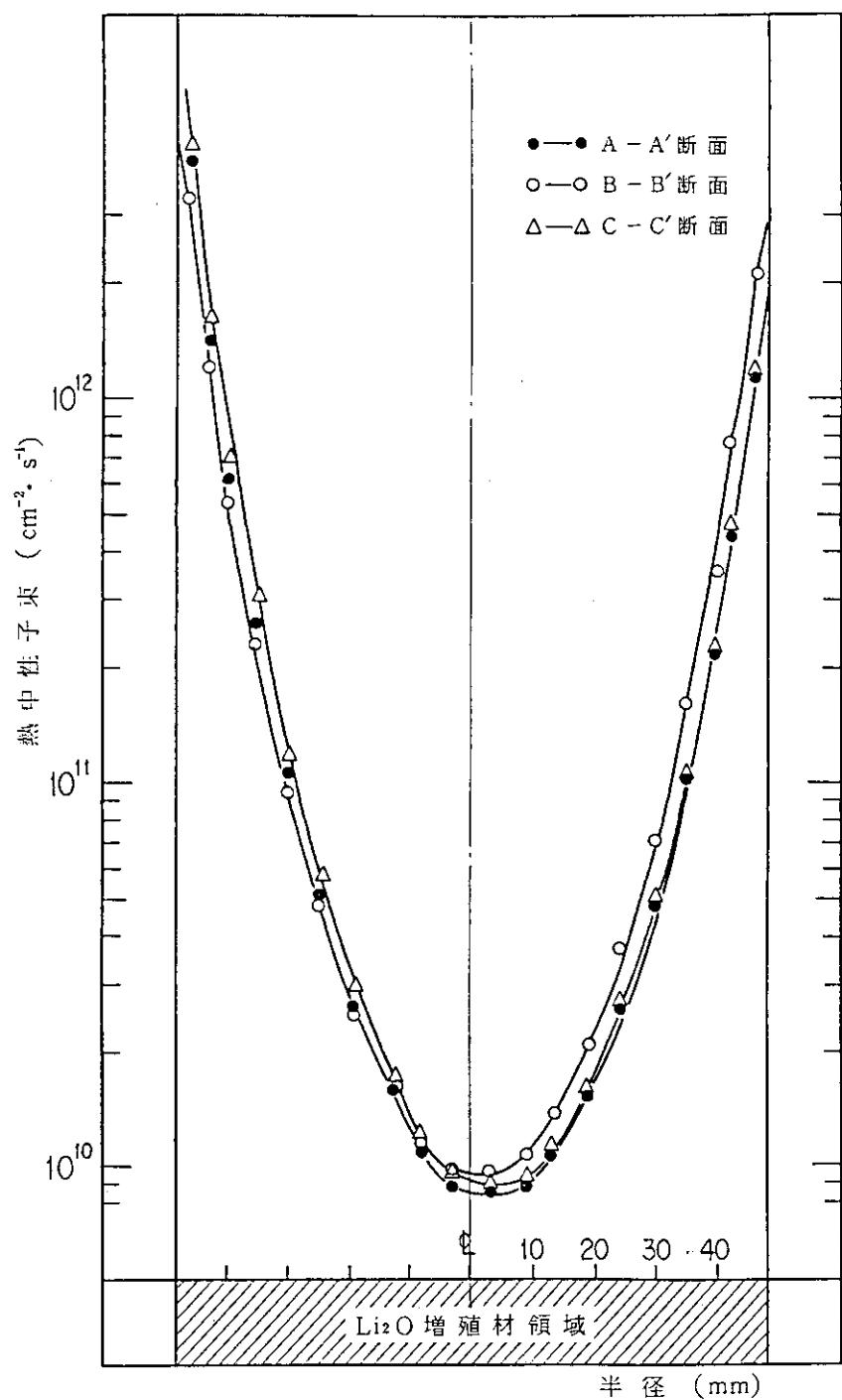


Fig. 21 照射場熱中性子勾配を考慮した増殖材領域熱中性子束分布（冷却管なし, Li_2O ベブル充填率 5.5%）

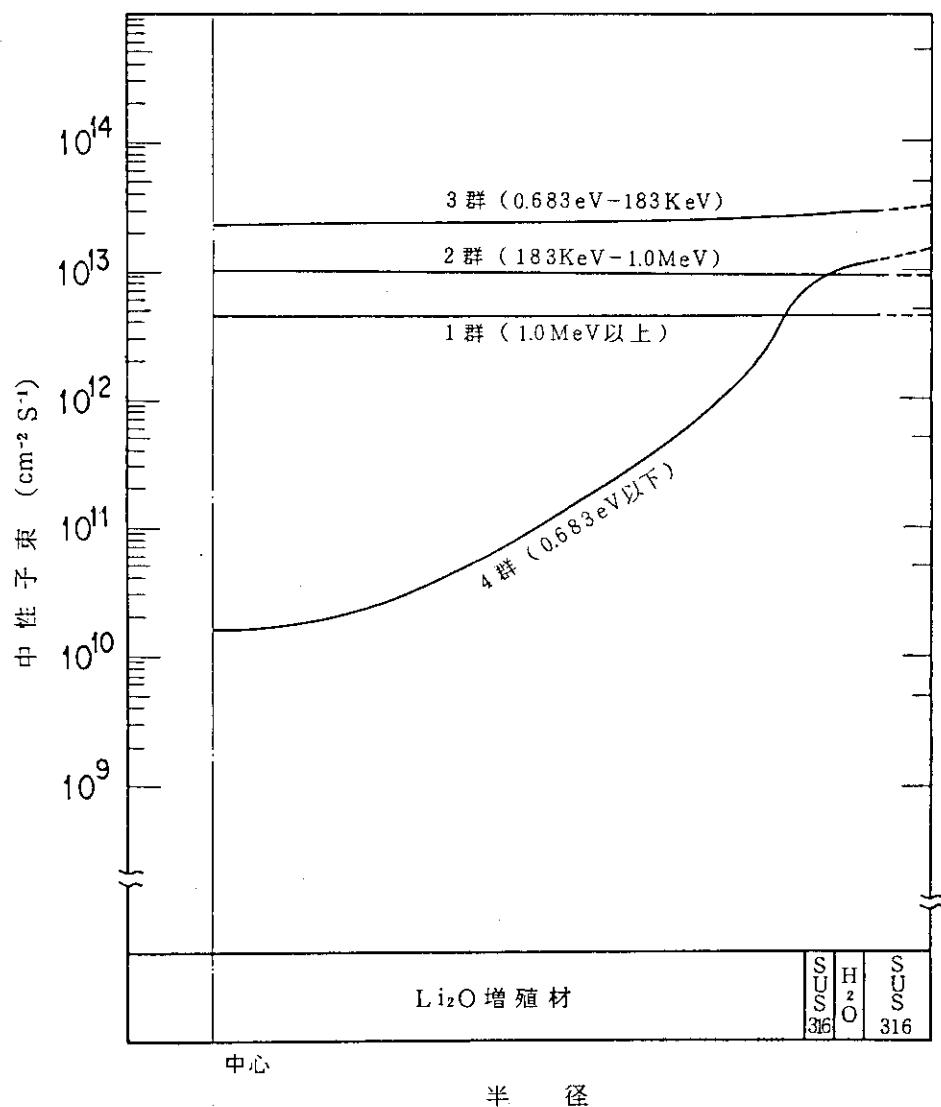


Fig. 2.2 中性子エネルギー別の増殖材領域中性子束分布 (冷却管なし, Li_2O ペブル充填率 55%)

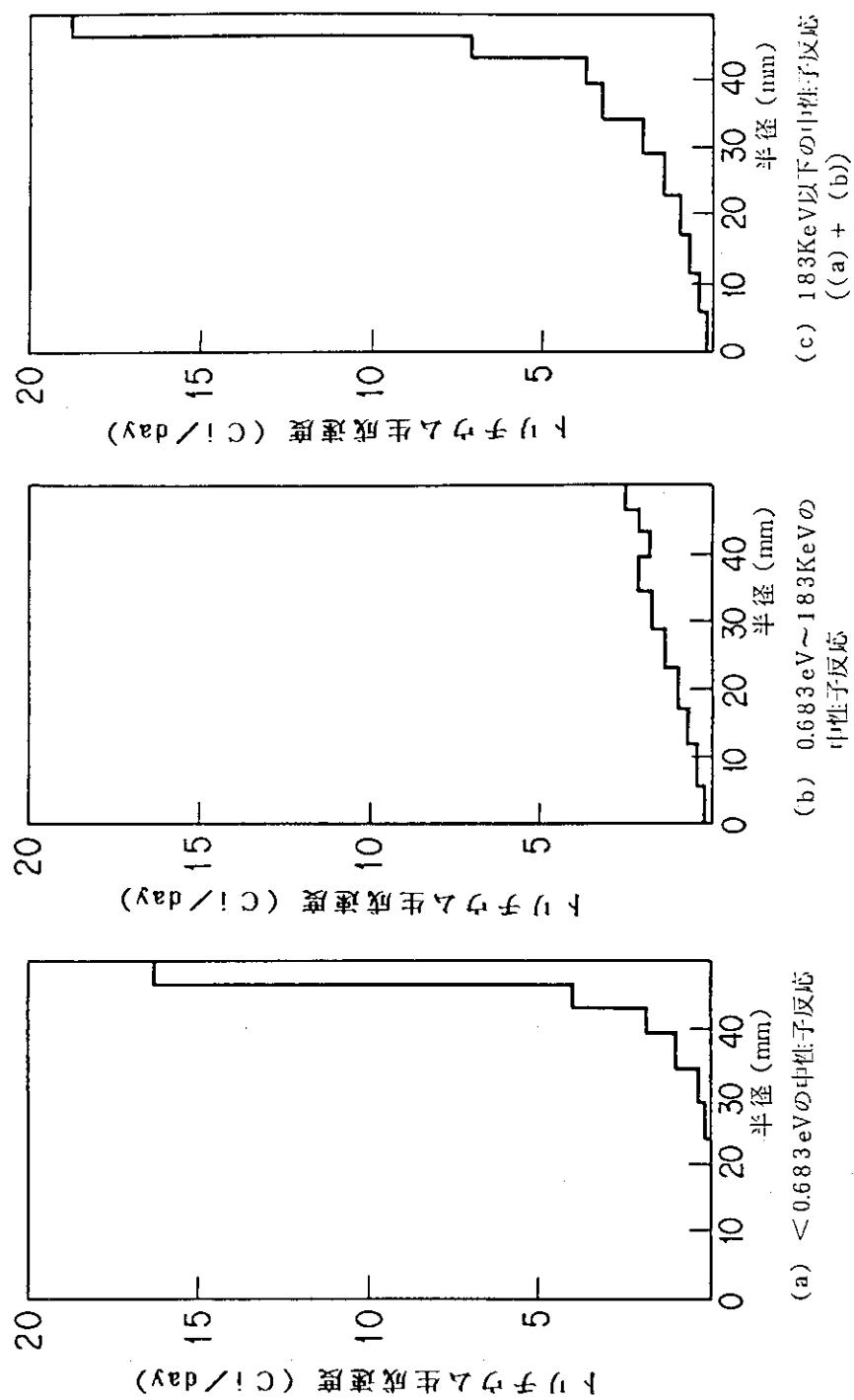


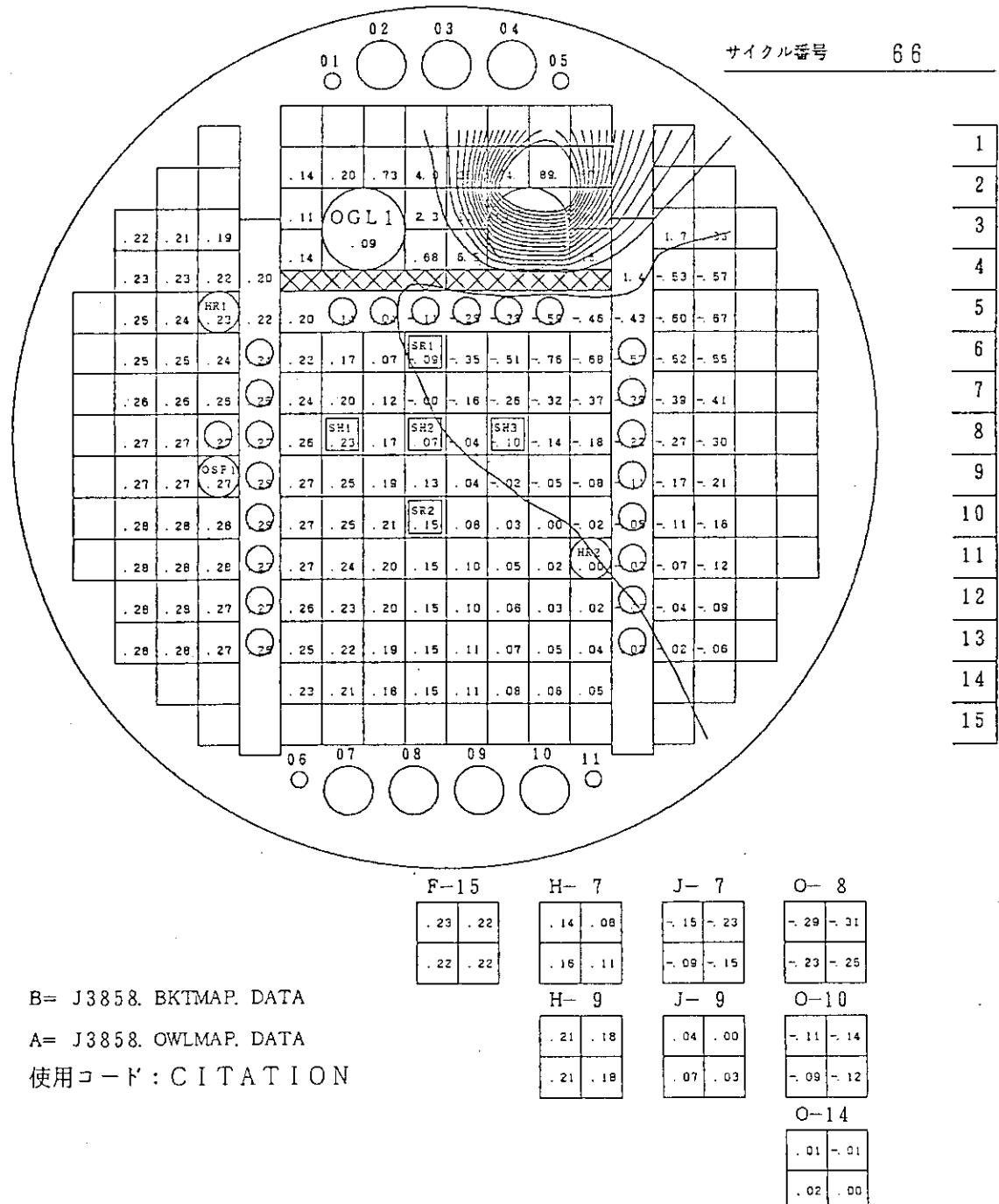
Fig. 2.3 トリチウム生成速度の増殖材領域方向分布（冷却管なし, Li_2O
ペブル充填率 5 5 %）

フラックスの変化 (> 1.0 MeV)

セルー平均値 $(B/A-1) \times 100$ (%)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

日付 - 86年11月18日



B= J3858. BKTMAP. DATA

A= J3858. OWLMPA. DATA

使用コード : CITATION

Fig. 24 増殖ブランケット試験体が装荷されたことによる炉内中性子束分布の変化 (中性子エネルギー : 1.0 MeV以上)

フラックスの変化 (183 keV ~ 1.0 MeV)

セルー平均値 (B/A-1) × 100 (%)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

日付 - 86年11月18日

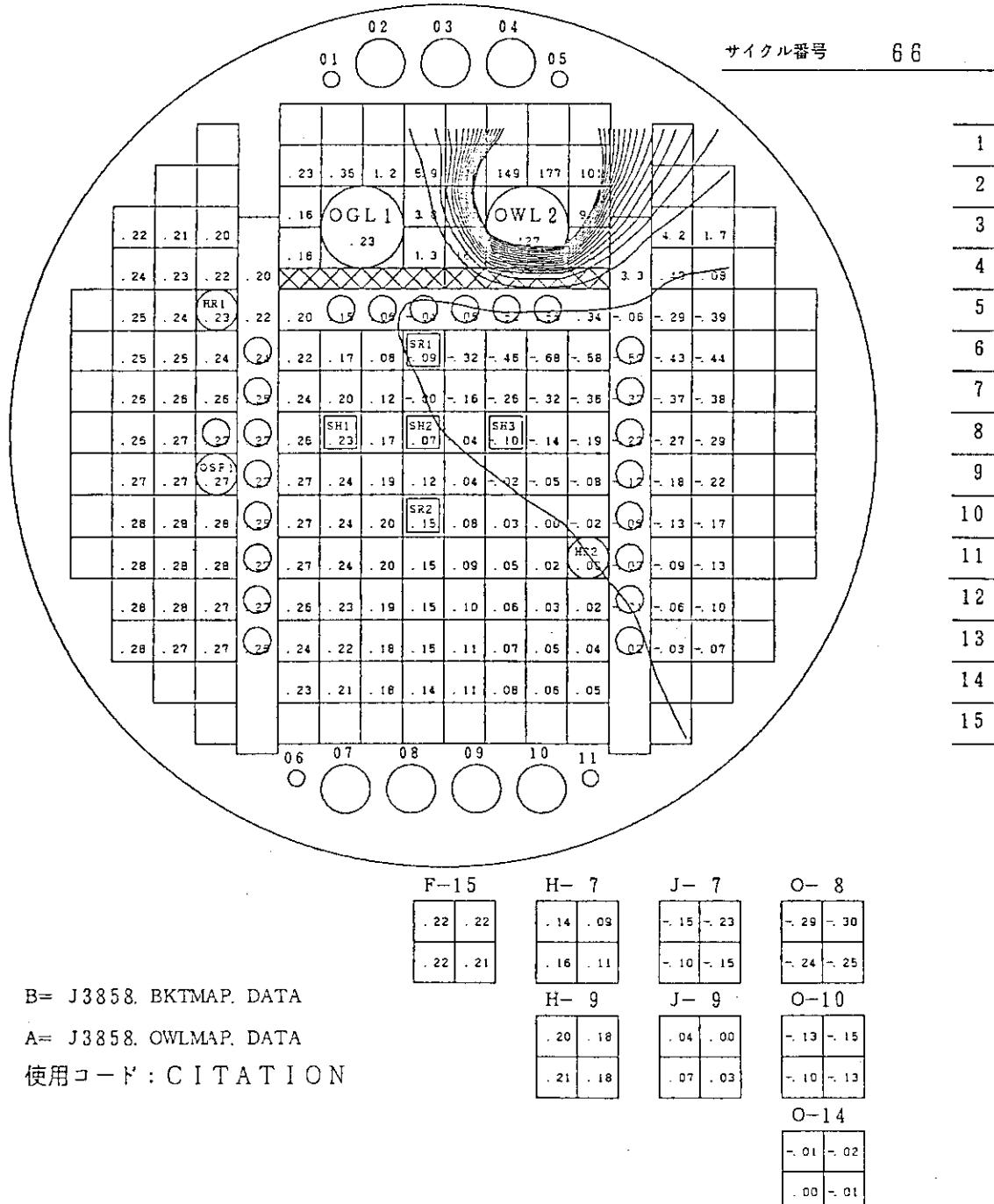


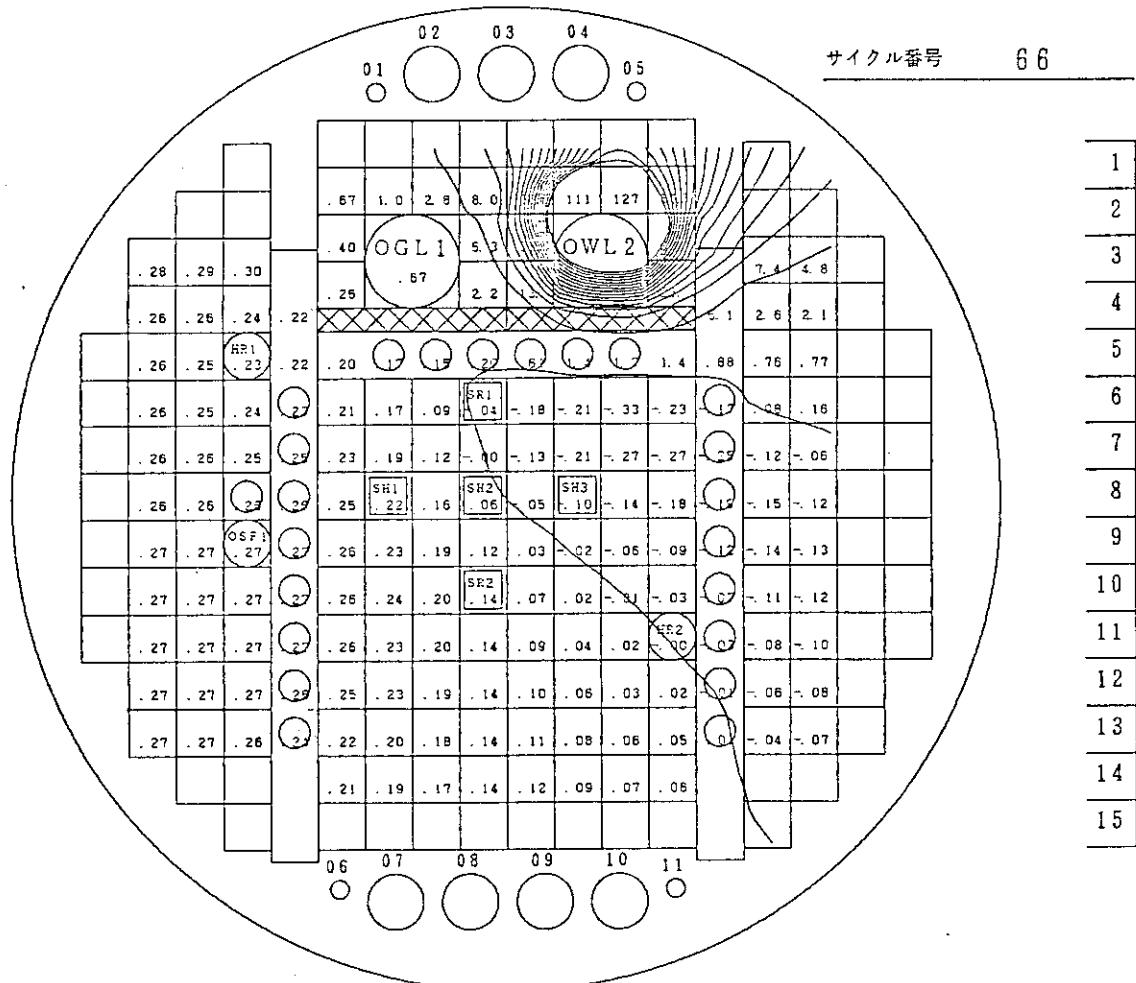
Fig. 25 増殖ブランケット試験体が装荷されたことによる炉内中性子束分布の変化
(中性子エネルギー : 183 keV ~ 1.0 MeV)

フラックスの変化 (0.6826 eV ~ 183 keV)

セルー平均値 (B/A-1) × 100 (%)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

日付 - 86年11月18日



B= J3858. BKTMAP. DATA

A= J3858. OWL MAP. DATA

使用コード : CITATION

F-15	H- 7	J- 7	O- 8
.21 .20	.13 .09	-.12 -.17	-.17 -.15
.20 .20	.14 .11	-.09 -.13	-.16 -.15
	H- 9	J- 9	O-10
	.20 .17	.03 .00	-.11 -.12
	.20 .18	.05 .03	-.10 -.11
	O-14		
	-.02 -.04		
	-.01 -.03		

Fig. 26 増殖ブランケット試験体が装荷されたことによる炉内中性子束分布の変化
(中性子エネルギー : 0.6826 eV ~ 183 keV)

フラックスの変化 (< 0.6826 eV)

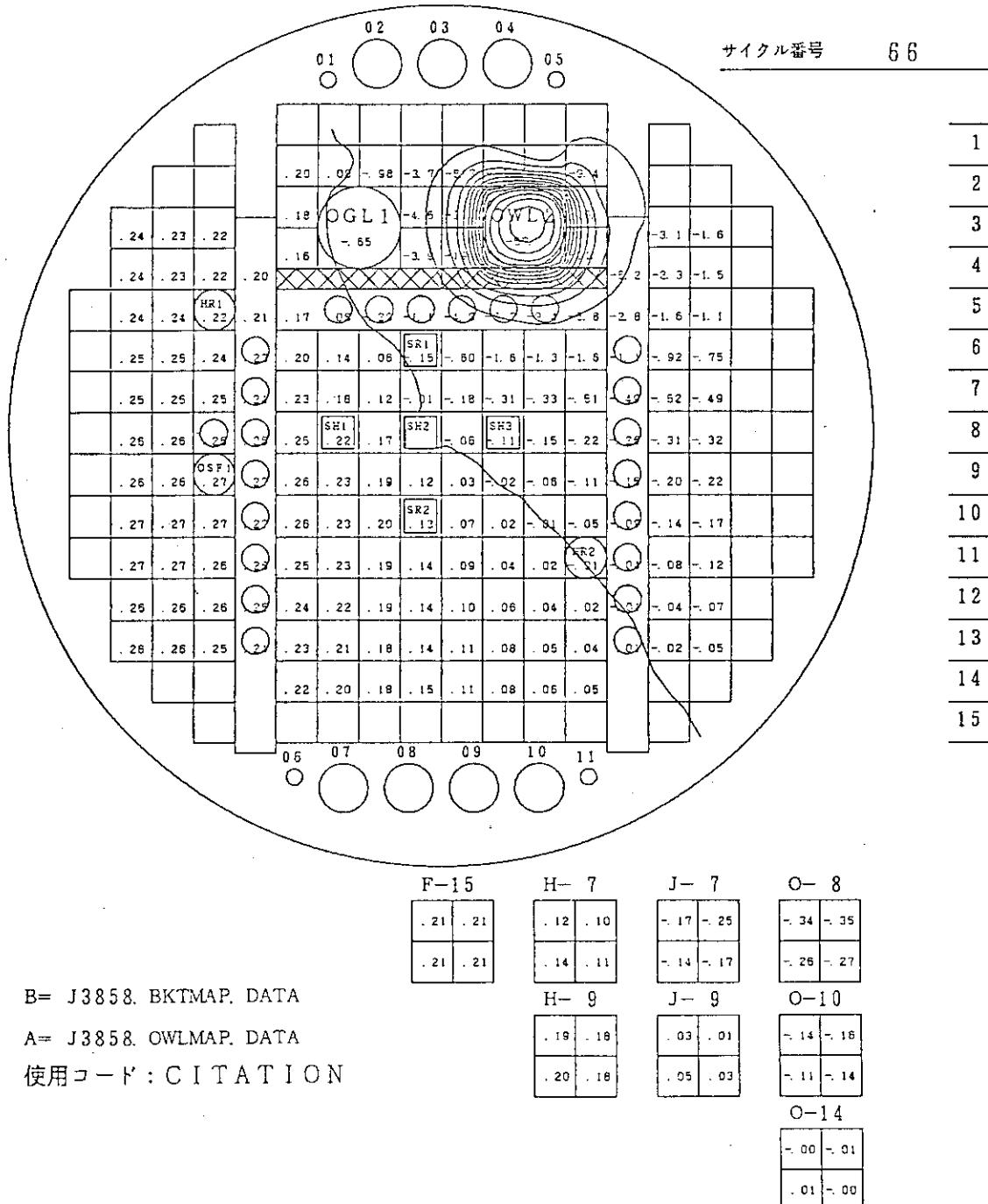
セルー平均値 (B/A-1) x 100 (%)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

日付 - 86年11月18日

サイクル番号

66



B= J3858. BKTMAP. DATA

A= J3858. OWL MAP. DATA

使用コード: CITATION

Fig. 27 増殖ブランケット試験体が装荷されたことによる炉内中性子束分布の変化
(中性子エネルギー : 0.6826 eV以下)