

JAERI-M

6460

核融合実験炉ブランケットの核特性

1976年3月

飯田 浩正・関 泰・井手 隆裕*

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

核融合実験炉ブランケットの核特性

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

飯田浩正・関 泰・井手隆裕*

(1976年2月10日受理)

1次元輸送計算コード、2次元輸送計算コードを用いて、核融合実験炉の核特性について検討した。その結果トリチウム増殖比として0.81を得た。また増殖比を大きくするためには、ブランケット構造材の体積率を減らす事が最も効果的である事が分った。

ブランケットの放射線発熱分布について、1次元計算と2次元計算の結果を比較した。その結果両者は良く一致する事が分った。

Neutronics of the blanket in a JAERI Experimental Fusion Reactor

Hiromasa IIDA, Yasushi SEKI, Takahiro IDE*

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, JAERI

(Received February 10, 1976)

Neutronics properties of the blanket in a JAERI Experimental Fusion Reactor (JXFR) have been studied by one- and two-dimensional transport codes. In the design, a tritium breeding ratio of 0.81 is obtainable. Parametric analysis shows that reduction of the volume ratio of blanket structure is effective in increasing the breeding ratio.

The distributions of nuclear heating in the blanket by one- and two-dimensional transport codes are in agreement.

* Sumitomo Heavy Industries Ltd.

目 次

1. 序言.....	1
2. 実験炉ブランケット構造と計算法.....	2
3. トリチウム増殖比.....	6
3.1 1次元計算.....	6
3.2 2次元計算.....	6
3.3 2次元計算の補正.....	11
3.4 設計パラメータの与える効果.....	15
4. 放射線発熱.....	17
5. 結言.....	17

謝辞

参考文献

1. 序 言

近い将来建設が予定されている核融合実験炉は、現在予備設計が進められている。炉の特色としては、寸法がコンパクトである事、トリチウム増殖材として固体 Li_2O を用い He ガスで冷却する事、融合反応出力は 100MW であり、準定常運転を目指している事などが挙げられる。この報告書は、実験炉ブランケットの核特性に関しての計算結果をまとめたものであり、計算内容はトリチウム増殖比と放射線発熱についてである。

トリチウムの再生産は、実験炉を定常、または準定常運転をするものとする限り重要なものである。例えば、核融合出力 100MW、880秒運転 1000秒周期、稼働率 50% と仮定すると毎年 2.5 kg のトリチウムを消費する事になる。一方核分裂炉でトリチウムを生産すると、出力 100MWt のナトリウム冷却高速炉を用いた試算では数百 g/年程度であり¹⁾、消費量全てを供給する事は困難である。従ってブランケットにおいてトリチウムを再生産することが望ましく、増殖比は大きい程良い。この設計においても、装置の機能を損わない範囲で、なるべく大きな増殖比を目指す事とする。すなわち実験炉は各コンポーネントが充分機能を果たす事を確認するのが主目的であるから、トリチウム増殖比は、トリチウムの不足分が外部から供給できる範囲内であれば良いと思われる。実験炉に最低限必要とされるトリチウム増殖比は、今後トリチウムの供給がどの程度可能であるかによって決るのであろう。

実験炉は寸法をコンパクトにするため、トラス内側は超電導磁石の遮蔽専用ブランケットとなり、トリチウム増殖材を含まず、トラス外側のブランケットと組成の異なるものとなった (Fig. 2.1 参照)。その様な体系を取り扱うため、2次元計算コードを使用し、ブランケットの組成の違いを考慮した。また2次元計算コードを使用して、非均質効果も評価した。更に、構造材体積率、 Li_2O 密度などの、トリチウム増殖比に与える効果についても検討した。

今のところ、ブランケット内発熱は、発電に利用することは考えていないので、熱除却の対象となるだけである。また実験炉の場合、プラズマの補助加熱のための、インジェクション・パワーが大きく (20~50MW)、かつダイバータをつけない設計であるため、荷電粒子、X線等による第1壁表面における発熱が比較的大きい。全出力 120~150MW のうち 40~70MW の出力が第1壁表面において発生する。従って、第1壁の除熱が最も問題となるが、全発熱の大半を占める中性子、 γ 線によるブランケット内発熱の分布についても精度良く求めておく必要がある。ここでは、1次元計算と2次元計算の比較を行い、2次元計算結果の妥当性を調べた。

2. 実験炉ブランケット構造と計算法

Fig. 2.1に実験炉の概念図を示す。プラズマ主半径6.75m, アスペクト比4.5であり, トロイダルコイルはコンスタント・テンションD型である。ブランケットの構造は, ほぼ実用炉²⁾ブランケットを小型化したものと言えるが, 核特性評価上実用炉と最も異なる点は, トーラス内側のブランケットがトリチウム増殖材を含まず, 専ら超電導磁石の遮蔽に重点を置き, SUS, B₄C等の混合物となっている事である。これは炉の寸法をコンパクトにするため, トーラス内側の超電導磁石, プラズマ間の空間をできるだけ狭くした事に起因している。

トーラス内側の遮蔽専用ブランケット(インナーブランケットと呼ぶ)は, プラズマ中心軸からの見込み角度120°の領域に有り, 体積はブランケット全体の約2/7を占める。残りの5/7を占めるブランケット(アウターブランケットと呼ぶ)にはLi₂Oが装荷されている。Fig. 2.2, Fig. 2.3にインナーブランケット, アウターブランケットの構造図を示す。容器はステンレス鋼で出来ており, プラズマに面する表面はグラファイトでコーティングしてある。

ブランケット容器の大きさ, 形状は位置によって異なるが核計算に当ってはFig. 2.2, Fig. 2.3の2種類で代表させた。Fig. 2.2はトーラスの最も内側のブランケットであり, Fig. 2.3はトーラスの最も外側から60°内側に入ったところのブランケットである。

トリチウム増殖比, 放射線発熱分布計算に当っては, インナーブランケットとアウターブランケットの組成の違いを考慮する必要があると, 2次元輸送計算コードを使う事とした。標準的標準的な計算法として, 先ず1次元計算を行い, その結果得られた中性子束, γ 線束を重みとし, 小数群の中性子・ γ 線断面積を求め, それを2次元計算に用いた。1次元計算は, 小数群の中性子断面積を求めるためだけでなく, 2次元計算結果の妥当性を確認するための標準計算として必要である。すなわち2次元計算では, 形状以外に関する近似が悪くなるので, 計算結果の妥当性を確認するため, 1次元で取り扱える様な単純な形状で2次元計算を行い, 1次元計算結果と比較しておく必要がある。

Fig. 2.4にトリチウム増殖比, 放射線発熱計算のフローチャートを示す。全体としてはRADHEATコードシステム³⁾に基いている。若干異なる点は, 中性子発熱断面積の計算にMACK⁴⁾を用いている事と, ANISN⁵⁾で縮約した中性子群定数がTWO TRAN-GG⁶⁾に入力できる様にした点である。

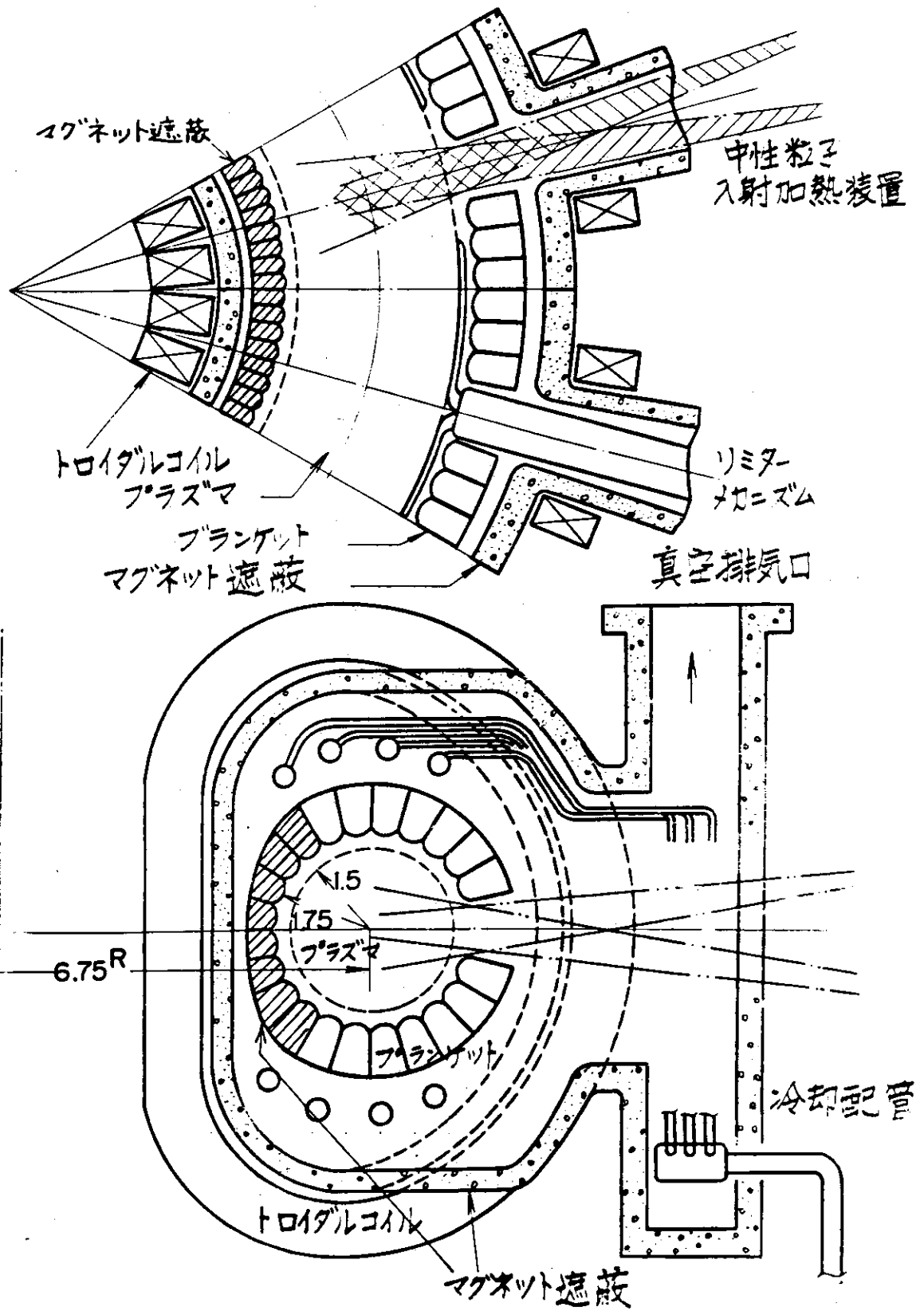


Fig. 2.1 核融合実験炉概念図

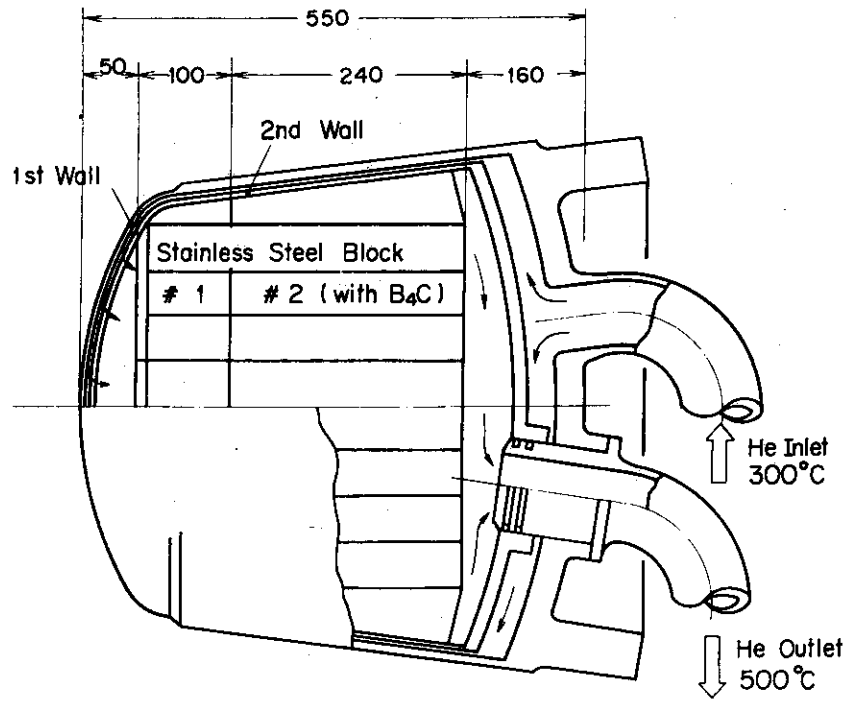


Fig. 2.2 インナーブランケット構造図

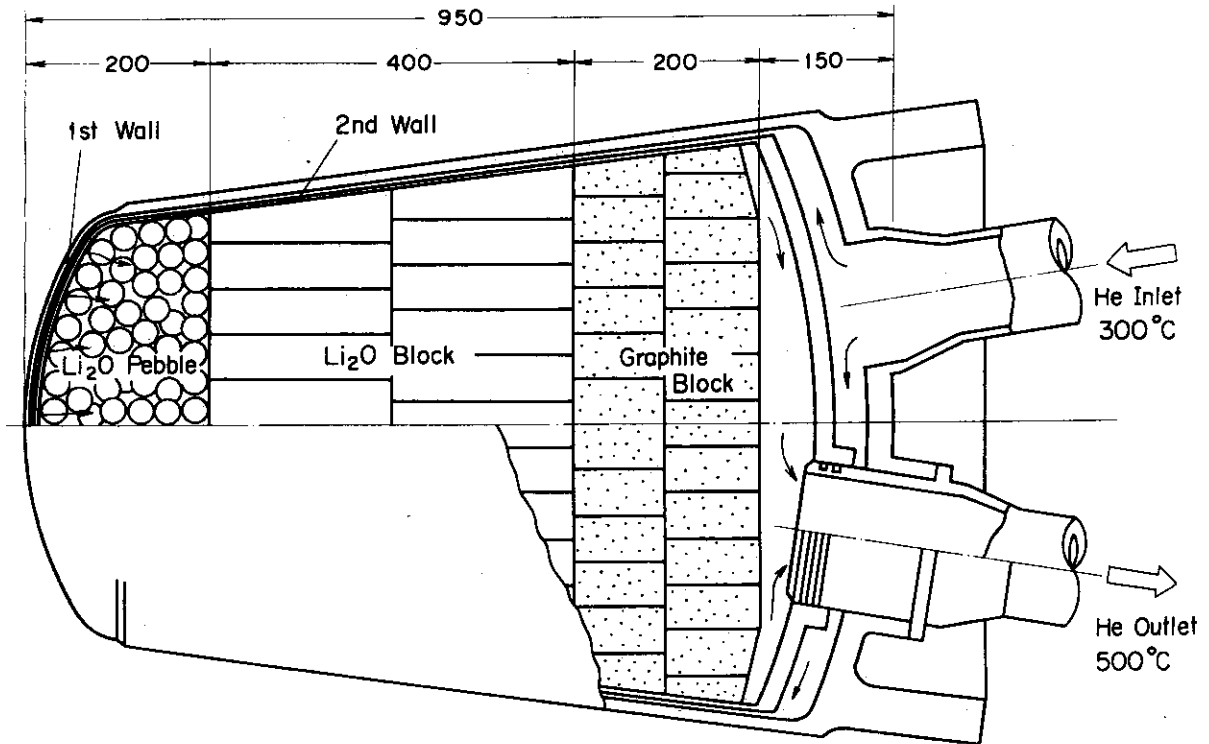
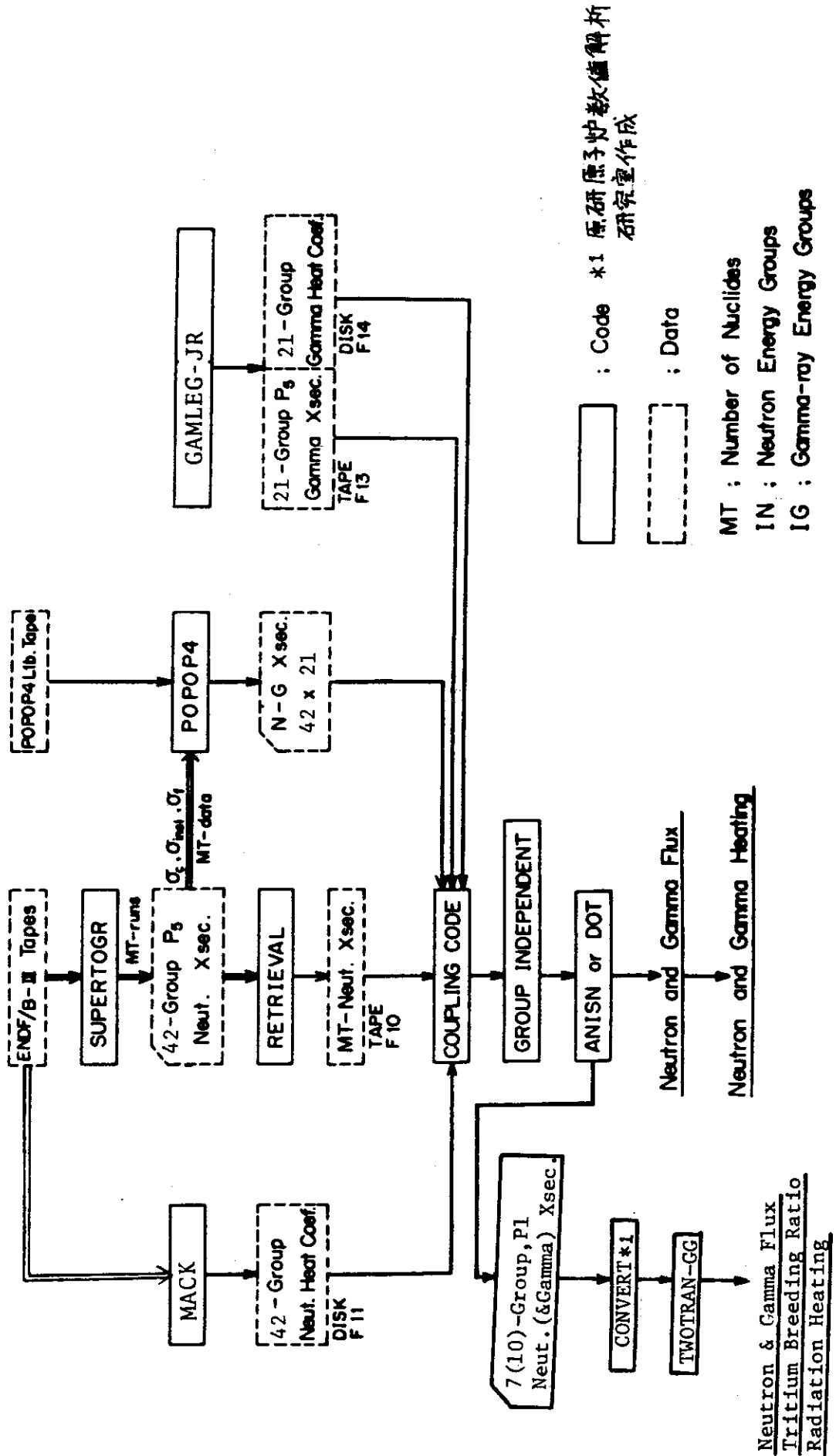


Fig. 2.3 アウターブランケット構造図



*1 原研原子炉数値解析
研究室作成

MT ; Number of Nuclides
IN ; Neutron Energy Groups
IG ; Gamma-ray Energy Groups

Fig. 2.4 核計算フローチャート

3. トリチウム増殖比

3.1 1次元計算

インナーブランケットとアウトーブランケットの計算モデルと各領域の組成をそれぞれ Fig. 3.1, 3.2, Table 3.1に示す。Fig. 3.1のモデルは、ブランケットの組成が全てアウトーブランケットと同じものとなり、トリチウム増殖比を実際の場合より過大評価する事になっている。ブランケットより外側の冷却系配管、遮蔽材（コンクリート、鉛）はブランケット部の中性子束、 γ 線束にほとんど影響を与えないので省略してある。Fig. 3.2は全ブランケットの組成をインナーブランケットのものとした場合でトリチウム増殖比は当然0.0となる。

アウトーブランケットの先端部に装荷されているペブル状 Li_2O は充填率が低く50%である。この部分の構造材体積率*は14.6%であり、 Li_2O 体積率*32.3%の約1/3となっている。また、ブロック状 Li_2O の領域では構造材体積比が17.2%と更に大きい、 Li_2O の充填率が90%と高いため、 Li_2O 体積率72.2%の約1/4である。実験炉において構造材の占める体積率が大きいのは、構造強度設計上の要請である⁷⁾。他の設計例では構造材体積率は10%以下である。

Table 3.2, Table 3.3に1次元計算の条件と中性子・ γ 線エネルギー群構造をそれぞれ示す。

Fig. 3.1の1次元モデルで計算した場合のトリチウム生成率分布をFig. 3.3に示す。プラズマに近いペブル状 Li_2O の領域で生成率が小さいのは、充填されている Li_2O の絶対量が小さいからである。またプラズマに最も近い点においても、 $\text{Li}^7(n, n\alpha)t$ 反応による生成率が、 $\text{Li}^6(n, \alpha)t$ 反応による生成率を越えないのは、構造材の体積率が大きいからである。すなわち、構造材体積率が大きいと、ブランケットに入射した14.1MeVが $\text{Li}^7(n, n\alpha)t$ 反応を起さずに、低いエネルギーに減速していく確率が大きくなるからである。

ブランケット全体としては、トリチウム増殖比は1.04となり、かなり低い値である。構造的に強固な設計においては、トリチウム増殖比も低くなる事を示している。

3.2 2次元計算

2次元輸送計算コードTWO TRAN-GGで計算した場合の計算モデルと計算条件をそれぞれ Fig. 3.4とTable 3.4に示す。空間座標をR-Zとした為、トーラス効果を考慮する事ができるが、円形であるべきプラズマ断面を正方形で模擬する事となった。原理的には空間メッシュ点間隔を小さくし、小さな長方形の集合として円形断面を近似的に表わす事が出来る。このようにすることによりプラズマ断面が円形に限らず、任意の断面形状の模擬が可能で、空間メッシュ点を無限に大きく出来れば、体系模擬を完全に出来る。しかし現実には計算機記憶容量、計算時間の関係で現在のところ断面を正方形で模擬するのが精一杯である。

* 構造材(Li_2O)体積率: 構造材(Li_2O)体積 / (Li_2O 体積 + 構造材体積 + He体積)

Table 3.1 各領域の核種個数密度

	S.S.	S.S. +B ₄ C	VACUUM or PLASMA	CARBON COATING	PEBBLE Li ₂ O REGION	BLOCK Li ₂ O REGION	GRAPHITE REFLECTOR
Ni	9.848 ⁻³	6.401 ⁻³			8.617 ⁻⁴	1.690 ⁻³	1.182 ⁻³
Cr	1.575 ⁻²	1.024 ⁻²			1.378 ⁻³	2.703 ⁻³	1.890 ⁻³
Mo	1.255 ⁻³	8.158 ⁻⁴			1.098 ⁻⁴	2.154 ⁻⁴	1.506 ⁻⁴
Fe	5.909 ⁻²	3.841 ⁻²			5.170 ⁻³	1.014 ⁻²	7.091 ⁻³
B ¹⁰		1.501 ⁻²					
C		4.741 ⁻³		8.374 ⁻²			5.761 ⁻²
H _e		1.900 ⁻⁵	1.000 ⁻¹¹		2.700 ⁻⁵	1.06 ⁻⁵	1.920 ⁻⁵
Li ⁶					1.022 ⁻³	3.045 ⁻³	
Li ⁷					1.275 ⁻²	3.799 ⁻²	
O					6.885 ⁻³	2.052 ⁻²	

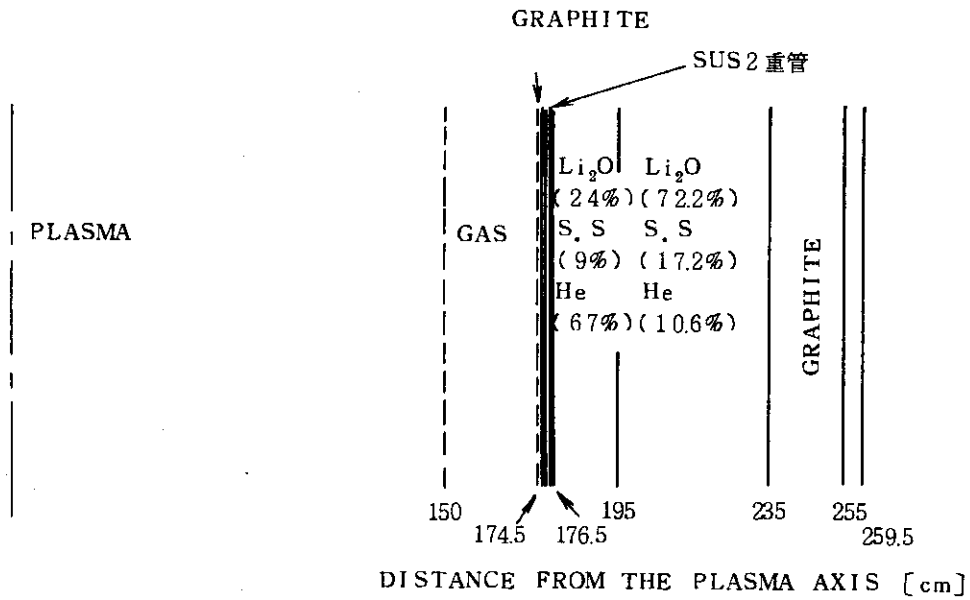


Fig. 3.1 アウターブランケット1次元モデル

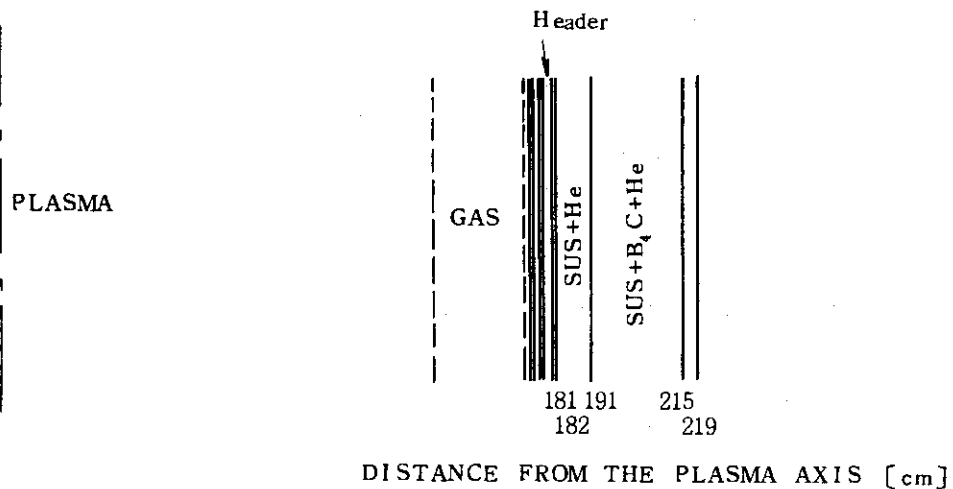


Fig. 3.2 インナーブランケット1次元モデル

各領域の体積が実際の炉と等しくなる様にしてあるため、領域の厚さが実際の値より若干小さくなっている。中性子、 γ 線の群構造はTable 3.5に示す。

計算の結果、トリチウム増殖比0.81を得た。しかし、この値には、(1) 群数を縮約した事、非等方散乱の近似次数をP1までとしたこと、空間メッシュ点を粗くしたこと、(2) プラズマ断面形状を正方形とした事による誤差に関する補正を行う必要がある。また2次元計算に限らないが、ブランケット容器とLi₂Oとを均一に混合して単一の組成として扱った誤差も考慮に入れる必要がある。以下にこれらの点について検討し補正を行う。

Table 3.2 ANISN計算条件

角度分割 近似次数	非等方散乱 近似次数	中性子 エネルギー群数	γ 数 エネルギー群数	収束条件
S8	P5	42	21	10 ⁻⁴

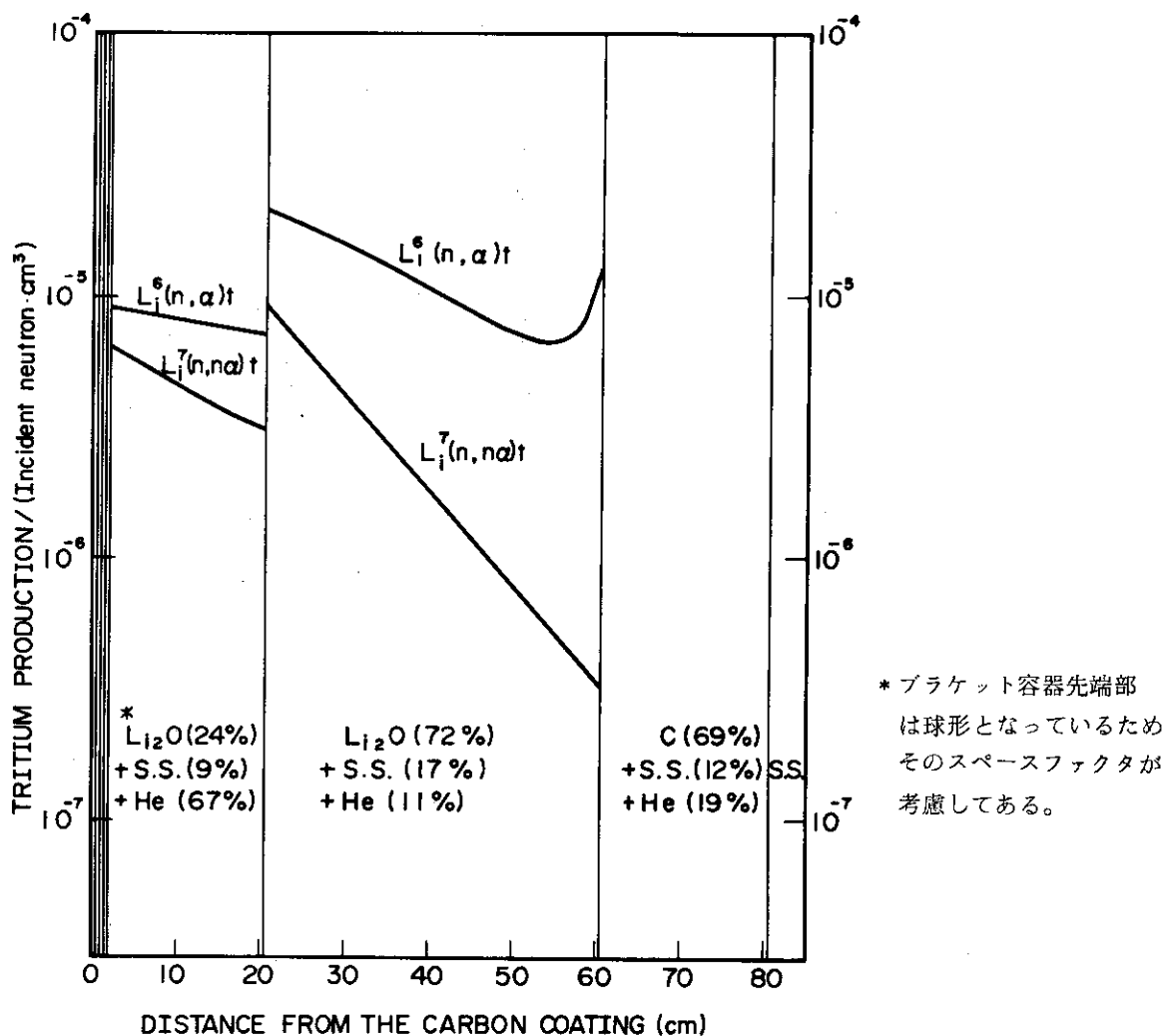


Fig. 3.3 トリチウム生成率分布

Table 3.3 ANISNエネルギー群構造

Group	UPPER Energy	Group	UPPER Energy
	Neutron		Neutron
1	15.000 MeV	34	1000.0 eV
2	13.720	35	46.5
3	12.549	36	21.5
4	11.478	37	10.0
5	10.500	38	4.65
6	9.314	39	2.15
7	8.261	40	1.00
8	7.328	41	0.465
9	6.500	42	0.215
10	5.757	end	0.001
11	5.099		Gamma
12	4.516	43	1400 MeV
13	4.000	44	1200
14	3.162	45	1000
15	2.500	46	800
16	1.871	47	750
17	1.400	48	700
18	1.058	49	650
19	0.800	50	600
20	0.566	51	550
21	0.400	52	500
22	0.283	53	450
23	0.200	54	400
24	0.141	55	350
25	1000 KeV	56	300
26	46.5	57	250
27	21.5	58	200
28	10.0	59	150
29	4.65	60	100
30	2.15	61	0.40
31	1.00	62	0.20
32	0.465	63	0.10
33	0.215	end	0.01

Table 3.4 TWOTRAN-GG計算条件

角度分割 近似次数	非等方散乱 近似次数	中性子 エネルギー群数	γ 線 エネルギー群数	収束条件
S8	P1	7	3	10^{-3}

Table 3.5 TWOTRAN-GGエネルギー群構造

GROUP	UPPER ENERGY	GROUP	UPPER ENERGY
	NEUTRON		NEUTRON
1	1500 MeV	END	0.001 eV
2	1372		GAMMA RAY
3	7.328	8	14.0 MeV
4	2500	9	6.0
5	2830 KeV	10	2.5
6	465	END	0.01
7	21.5 eV		

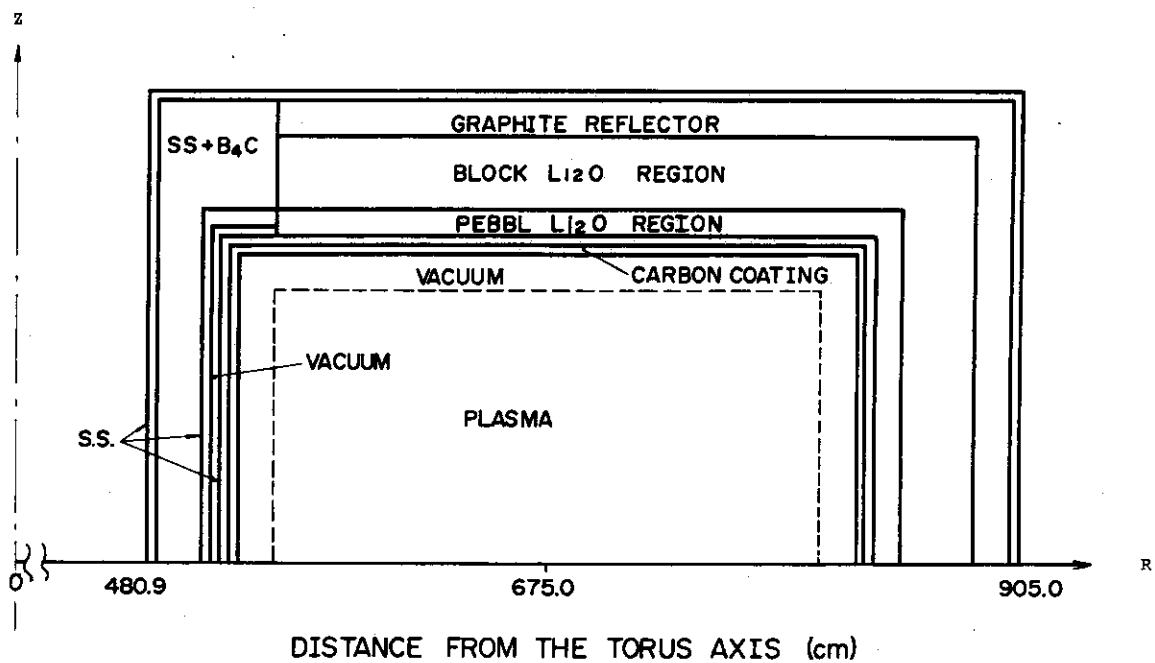


Fig. 3.4 実験炉 2次元計算モデル

3.3 2次元計算結果の補正

上記の問題点に関して補正を行う為、Fig. 3.5 に示す各計算モデルについて計算し、トリチウム増殖比を求めた。計算結果の一覧表を Table 3.6 に示す。Fig. 3.5 の各モデルは単純化して描いたものであり、実際にはプラズマとブランケットの間には空間があり、ブランケットも Fig. 3.1, Fig. 3.4 に示した構造として計算している。

Table 3.6 各モデル計算結果一覧表

	計算コード	座表系	プラズマ断面形状	ブランケット	トリチウム増殖比	備考
case 1	ANISN	R	円	Outer	1.04	
case 2	同上	同上	板	Outer & Inner	0.75	
case 3	TWOTRAN	R- θ	円	Outer	1.05	
case 4	同上	同上	同上	Outer & Inner	0.72	
case 5	同上	R-Z	正方形	Outer	1.04	
case 6	同上	同上	同上	Outer & Inner	0.84	
case 7	同上	同上	同上	Outer & Inner	0.76	曲率 0. case 4 と比較のため

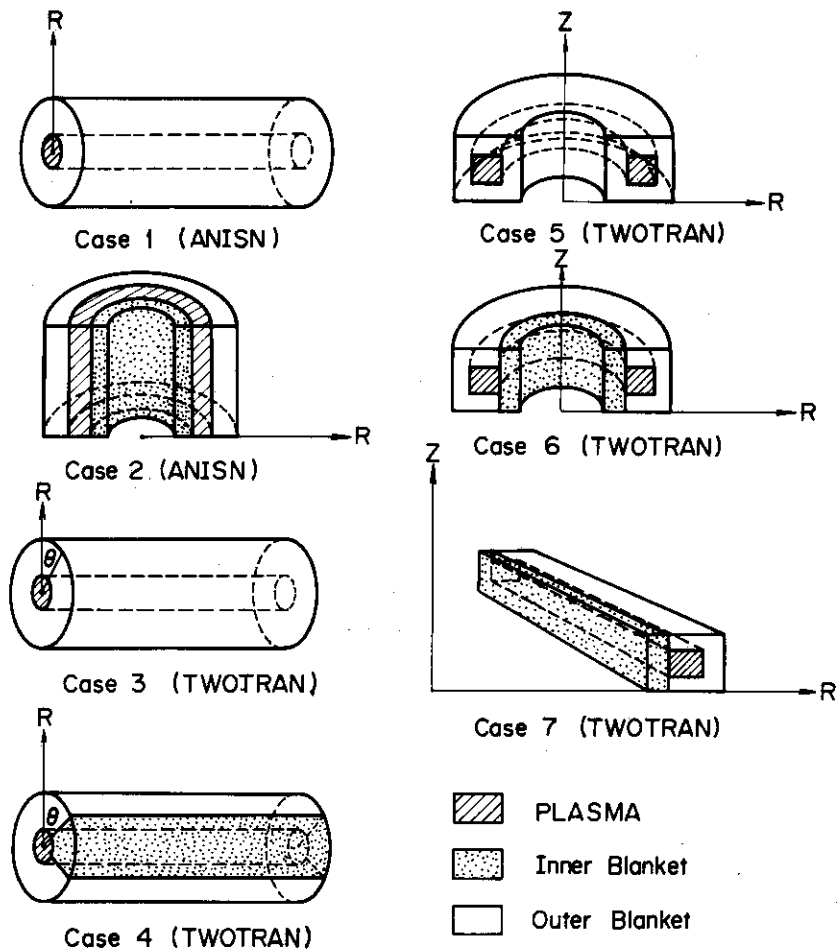


Fig. 3.5 実験炉ブランケット計算モデル

計算条件の補正

Fig. 3.5 case 1 に示したのは ANISN を用いた 1 次元計算で、今回行った計算のうちでは形状模擬以外の計算条件が最も良いものである。この計算で得られたトリチウム増殖比をこの体系の正確なトリチウム増殖比であるとして、同様な体系についての 2 次元計算値の妥当性を調べた。2 次元計算としては $R-Z$ 座表のもの、 $R-\theta$ 座表のものについて行った。標準計算 case 1 に対応するものは、各々 $R-Z$ モデル case 3 と $R-\theta$ モデル case 5 である。これらのモデルでは、プラズマから放出された中性子が、全部 case 1 と同じ組成のブランケットに入射するから、トリチウム増殖比は同じ値となるべきである。Table 3.6 に見られる様にこれらの結果にはほとんど差が無い。従って、空間座表を 2 次元にした為に他の計算条件が悪くなった事に対する補正は必要無い事が分った。

プラズマ断面形状の補正

2 次元 $R-Z$ 座表で計算した場合の、第 1 壁中性子束分布を Fig. 3.6 に示す。これから分かる様にこの計算ではアスペクト比が無限大の場合でも第 1 壁の中性子束は平坦でない分布を持っている。しかし、実際は断面が円形であるからアスペクト比が無限大であればこの分布は平坦でなければならない。 Li_2O を含むアウターブランケットは、この分布の一部にあるわけだから、この第 1 壁中性子束分布が正確に計算されていない事は、トリチウム増殖比の計算に直接誤差となって現れる。ここではこの誤差に関しての補正を行う。

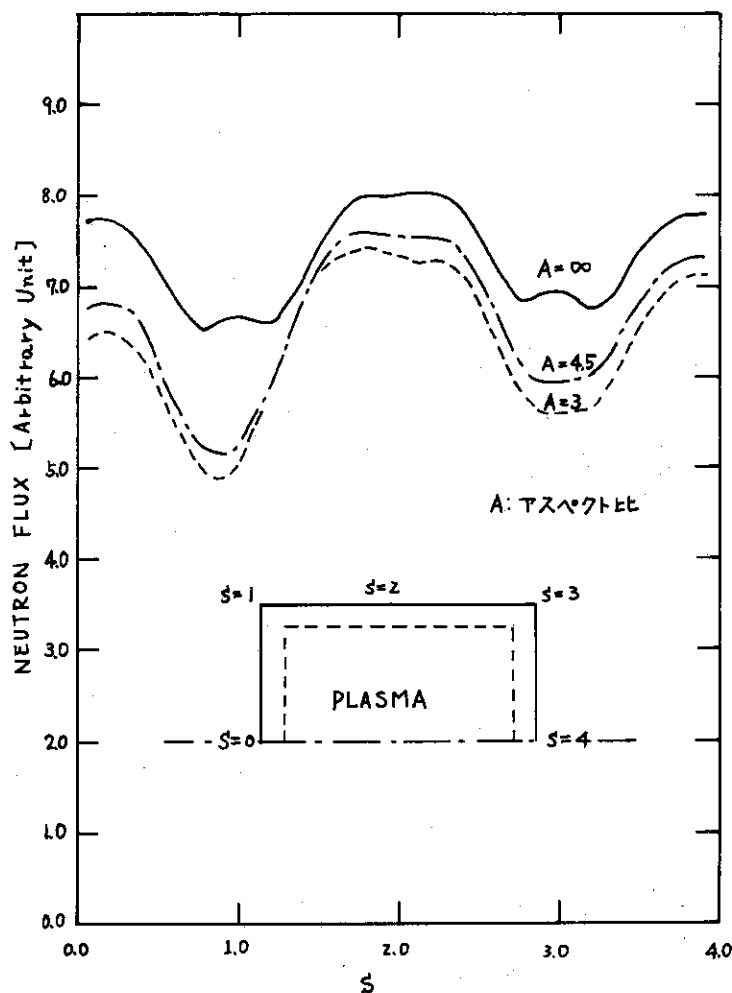


Fig. 3.6 第 1 壁中性子束分布

Fig. 3.5 の case 6 は Fig. 3.4 の 2次元計算モデルに相当する。case 4 は 2次元 R- θ モデルであり、プラズマ断面形状は正確に扱われているが、アスペクト比が無限大となっている。case 7 は case 6 のモデルにおいて主半径を無限大としアスペクト比を無限大としたものである。case 4 と case 7 は良く似たモデルであり違いはプラズマ断面形状のみである。この両者を比較する事により補正値を求めた。この結果補正値は 0.95 となった。

case 4 で得られたトリチウム増殖比が、case 3 で得られた値に $\frac{2}{3}$ を乗じた値より若干大きくなっている事は注目すべき事である。すなわち、インナブランケットにより若干の中性子が反射されアウトブランケットに入射した事を示している。これによってトリチウム増殖比が増加している分は 3% 弱である。

非均質効果

ブランケットは Fig. 2.3 に示した様にかなり大きな壺形容器 (約 60 cm³) により構成されている。1次元計算、2次元計算とも、この容器を容器壁も含めて均一に混合した媒質が層状に並んだものとして扱っている。容器内で中性子束は媒質によって異なる分布を持つはずであり、これを無視する事は結果に大きな影響を持つ場合がある⁸⁾。この効果を評価するため Fig. 3.7 の計算モデルを考え検討した。これは TWOTRAN-GG を用い、R- θ 座表によりアウトブランケットを容器壁の領域と容器内の領域に分けて計算したものである。 θ 方向の境界条件は反射条件、すなわち $\frac{d\phi}{d\theta} = 0$ である。ペブル状 Li₂O、ブロック状 Li₂O はそれぞれ薄いステンレス鋼でキャンニングしてあるが、容器内では均一に混合しているものとして計算している。計算の結果トリチウム増殖比 1.06 を得た。すなわち、ブランケット容器壁と Li₂O とを均一に混合して取り扱う事は 2% トリチウム増殖比を過小評価する事になる。

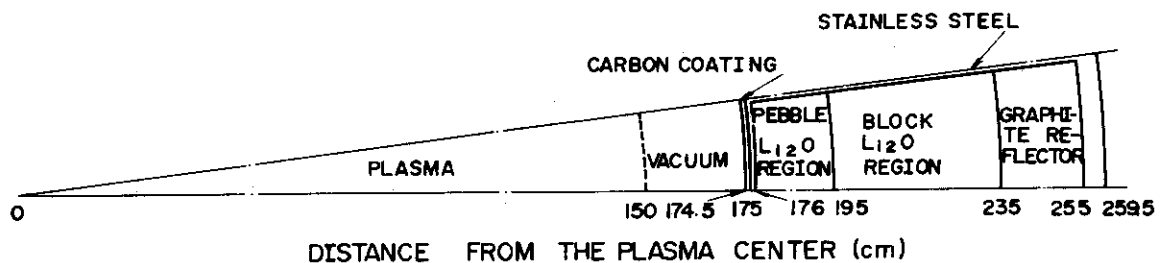


Fig. 3.7 実験炉非均質計算モデル

Fig. 3.8 にブランケット容器内の中性子束 (第 1 群, 第 6 群) 分布を示す。第 1 群 (13.72 MeV < E < 15.00 MeV) は $Li^7(n, n\alpha)t$ 反応が最も多く起る群であり、 $Li^6(n, \alpha)t$ 反応は第 6 群 (2.15 eV < E < 4.65 KeV) で最も多く起る。空間メッシュ点 1.5 はペブル状 Li₂O 領域の最もプラズマに近い点であり、空間メッシュ点 3.4 はブロック状 Li₂O 領域の最もプラズマに遠い点 (すなわちグラファイト反射体領域との境いの点) である。

第 1 群中性子束分布の特徴は、容器壁内で低く Li₂O 領域で高くなる事である。第 1 群のエネルギー範囲においては $Li^7(n, n'\alpha)t$ 反応は構造材による散乱反応と競合するが、構造材

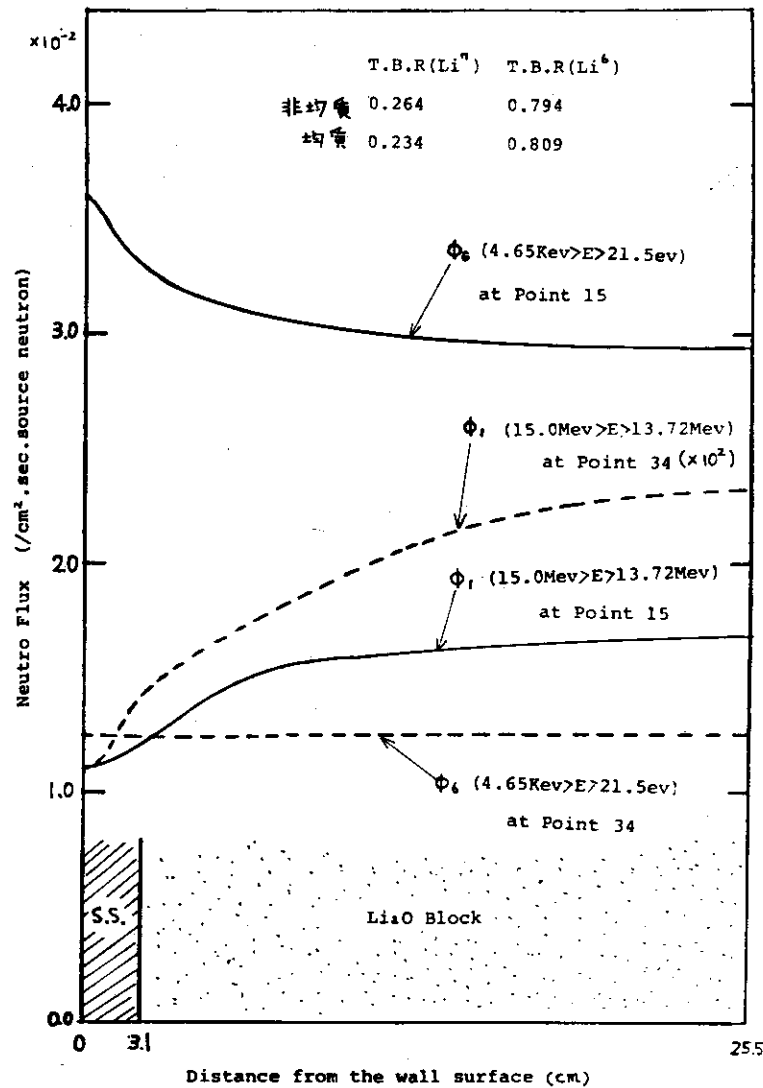


Fig. 3.8 ブランケット内中性子束分布

の散乱断面積の方が大きいため、容器壁中の第1群中性子束が相対的に小さくなる。そしてプラズマから離れるに従って、この傾向は当然大きくなる。プラズマから最も離れた点（空間メッシュ点34）においては容器壁中の中性子束はLi₂O領域中央の中性子束の約1/2である。ブランケット容器壁とLi₂Oを均一に混合する事は、この空間分布を考慮に入れない事であり、この結果Li⁷(n, n'α)t反応の個数を14%過小評価した。

第6群のエネルギー範囲においては、中性子束分布は第1群と逆の傾向を示す。すなわちLi⁶による中性子の吸収効果が大きく、ステンレス鋼のそれを上回る為、容器壁において中性子束が相対的に大きくなる。この中性子束分布を無視する事は、Li⁶(n, α)t反応数を過大評価する事になる。しかし、グラファイト反射体領域においては、Li₂O領域とは逆の分布となる為、その境界においては中性子束分布はほぼ平坦になる。この為Li⁶(n, α)t反応数の過大評価は量的に大きな値とならずに2%にとどまっている。

Li⁷(n, n'α)t反応個数の過小評価と、Li⁶(n, α)t反応個数の過大評価が互いに相殺し、正

味としては非均質効果の補正値は1.02となったわけである。この補正値はブランケット構造、材質に対する依存性が大きい。特にLi⁶を濃縮して使う場合は、Li⁶(n, α)t 反応個数の過大評価の効果が大きくなり、補正値は1.0よりかなり小さくなる可能性があるから注意が必要である。

補正のまとめ

Fig. 3.4 のモデルで行った2次元計算の結果に、プラズマ断面形状の補正と非均質効果の補正を行うと、実験炉トリチウム増殖比として0.81を得る。これ以外に必要な補正としては、真空排気孔がある事の補正、機械式リミッターが第1壁を部分的に被っている事の補正が考えられるが共に少なく、トリチウム増殖比は減少する方向である。

ここでは、補正されるべき2次元計算値はFig. 3.5のCase 6に相当するモデルの値を選んだが、これをFig. 3.5のCase 4に相当するモデルに選ぶことも出来、結果は当然同じ事になる。ただし、その場合プラズマ断面形状の補正を行う必要は無く、トラス効果の補正が必要である。この場合Fig. 3.5のCase 6とCase 7からトラス効果は1.11となる。

3.4 設計パラメータの与える効果

今後更に設計を進めるに際しての資料とする為、設計パラメータを変化させた場合、トリチウム増殖比がどの様になるかを調べた。選んだパラメータは(1)第1壁表面のカーボンコーティングの厚さ、(2)Li₂O密度、(3)ペブル部材質(Li₂O or Be)、(4)ブランケット構造材体積(5)トリチウム増殖材の種類(Li₂O or Li)である。トリチウム増殖比の相対的变化さえ分かれば良いから、計算は1次元コードANISNを用いた。ただし(4)についてのみ2次元計算コードTWOTRAN-GGも用いて検討した。

(1)、(2)、(3)に関する計算結果をTable 3.7に示す。カーボンコーティングの厚さはトリチウム増殖比にはほとんど影響を与えない。Li₂O密度は大きい方が良いのは当然である。実際にはLi₂Oからトリチウムがどれだけ分離できるかによって密度が決定されるであろう。もし理論密度の80%でもトリチウムがLi₂Oから容易に分離されるならトリチウム増殖比は4%増加する。ペブル部材質をBeに変えるとトリチウム増殖比はやはり4%増加する。Beを用いる

Table 3.7 トリチウム増殖比パラメータサーベイ

	第1壁 Carbon Coating 厚さ (mm)	Li ₂ O密度 (%T.D)	PEBBLE 部材質	トリチウム増殖比
設計点	5	70	Li ₂ O	1.04
Case 1	2	-	-	1.05
Case 2	10	-	-	1.02
Case 3	-	60	-	0.96
Case 4	-	80	-	1.08
Case 5	-	-	Be	1.08

事により何ら不都合を生じないならば、その使用も検討に値する。

構造材の体積率はトリチウム増殖比にかなりの影響を与える。Fig. 3.9 に容器壁の体積率をパラメータとしたグラフを示す。構造材としては、この他に Li_2O のキャンニング等に使っているステンレス鋼6%がある。従って横軸の0点は、構造材体積率6%に相当し、設計点は構造材体積率約18%に相当する。構造材体積率を6%にする事が出来ればトリチウム増殖比は1.2%増加する。他の炉では構造材体積率5%で設計した例もあるが⁹⁾、実際にどこまで減少させられるかは、構造設計が更に詳細化されるのを待つ事になる。

トリチウム増殖材として Li_2O の代りに液体リチウムを使用した場合について検討した。計算は1次元コードANISNを用い、Fig. 3.5 Case 1 のモデルで行った。その結果トリチウム増殖比は1.10となり、かなり増加した(0.06)。ただし、ブランケット容器の構造はFig. 2.3と同じであり、 Li_2O とHeが置かれている空間に液体リチウムを充填したとして計算している。また液体リチウム中にはステンレス鋼6%が構造材として存在していると仮定した。 Li_2O もステンレス鋼でキャンニングしてあり体積比は6%だから構造材の体積率を両者同じにした事になる。固体 Li_2O から液体リチウムに変ればブランケット構造全体が大きく変るはずであるが、その点に関しては考慮してない。必要な構造材体積率が同じであり、液体リチウムの場合はHe部分が存在しないと仮定するなら、液体リチウムの方が Li_2O よりトリチウム増殖比を大きくできる。

今後の検討事項

実験炉のトリチウム増殖比を大きくするには、インナーブランケット領域の縮小も考えられる。プラズマ中心軸から見込む角度 120° の中にあるインナーブランケットを、 90° の中に縮小すればトリチウム増殖比は1.0%増加するであろう。しかし、その場合はトーラス内側の超電導磁石の遮蔽が苦しくなるものと予想される。

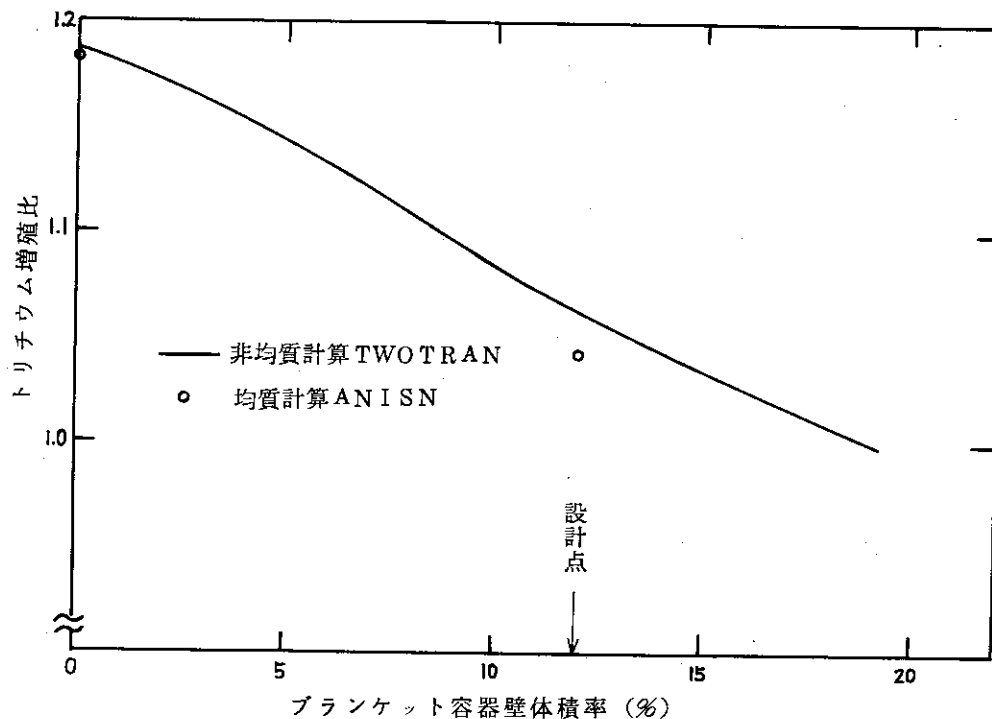


Fig. 3.9 ブランケット容器壁体積率のトリチウム増殖比に与える効果

4. 放射線発熱

ANISNによるインナーおよびアウトーブランケットモデルにおける放射線発熱の1次元計算結果をTable 4.1, Table 4.2に示す。14.1 MeVの中性子1ケが入射した場合の発熱は、インナーブランケットモデルで13.8 MeV, アウトーブランケットモデルで16.5 MeVである。アウトーブランケットでの発熱が大きいのは発熱反応である $\text{Li}^6(n, \alpha)t$ 反応が多く起るからである。

ブランケット全体としては、 $13.8 \sim 16.5 \text{ MeV} / (14 \text{ MeV neutron})$ となる。インナーブランケットでの発熱13.8 MeVとアウトーブランケットでの発熱16.5 MeVに適当な重みを乗じて加算すれば、もっと正確な発熱量が得られる。重みとして、①プラズマ中心軸から見込む角度 θ をとれば $15.6 \text{ MeV} / (14 \text{ MeV neutron})$, ②体積比2:5をとれば $15.7 \text{ MeV} / (14 \text{ MeV neutron})$, ③トリチウム増殖比(1.06-0.81):0.81をとれば $15.9 \text{ MeV} / (14 \text{ MeV neutron})$ となる。

Fig. 4.1とFig. 4.2に1次元計算と2次元計算の発熱分布を示した。今後設計が詳細化した場合ブランケット中の発熱、超電導磁石中の発熱の計算にも2次元コードの使用が必要となる。現時点で両者を比較しておく事は意味がある。Fig. 4.1とFig. 4.2に見られる様に1次元計算と2次元計算の結果は良く一致する。特にインナーブランケットでの一致が良い。アウトーブランケットにおいては、 Li_2O 領域で2次元計算の方が若干高い値を与える。

5. 結 言

核融合実験炉ブランケットのトリチウム増殖比、放射線発熱に関して1次元、2次元計算を行い次の結論を得た。

- (1) 設計点におけるトリチウム増殖比は0.81となった。
- (2) ブランケットの非均質効果を考慮するとトリチウム増殖比は約2%大きくなる。
- (3) 2次元計算において、円形であるプラズマ断面を正方形で模擬した場合5%トリチウム増殖比を過大評価する。
- (4) トーラス形状のプラズマを無限円柱で近似すると10%トリチウム増殖比を過小評価する。
- (5) 1次元計算における計算条件(中性子エネルギー群数42, S8, P5)と2次元計算における計算条件(中性子エネルギー群数7, S8, P1)では結果に有意な差が無かった。
- (6) ブランケットの構造材体積率、 Li_2O 密度はトリチウム増殖比に与える影響が大きい。
- (7) 固体 Li_2O を液体Liに置き変えた場合、構造材体積率が変わらず、Heで冷却しないとすればトリチウム増殖比はかなり増加する。
- (8) ブランケット内での放射線発熱は $15.6 \sim 15.9 \text{ MeV} / 14 \text{ MeV neutron}$ である。
- (9) ブランケットにおける放射線発熱分布は、1次元計算と2次元計算の結果が良く一致する。

4. 放射線発熱

ANISNによるインナーおよびアウトーブランケットモデルにおける放射線発熱の1次元計算結果をTable 4.1, Table 4.2に示す。14.1 MeVの中性子1ケが入射した場合の発熱は、インナーブランケットモデルで13.8 MeV, アウトーブランケットモデルで16.5 MeVである。アウトーブランケットでの発熱が大きいのは発熱反応である $\text{Li}^6(n, \alpha)t$ 反応が多く起るからである。

ブランケット全体としては、 $13.8 \sim 16.5 \text{ MeV} / (14 \text{ MeV neutron})$ となる。インナーブランケットでの発熱13.8 MeVとアウトーブランケットでの発熱16.5 MeVに適当な重みを乗じて加算すれば、もっと正確な発熱量が得られる。重みとして、①プラズマ中心軸から見込む角度 θ をとれば $15.6 \text{ MeV} / (14 \text{ MeV neutron})$, ②体積比2:5をとれば $15.7 \text{ MeV} / (14 \text{ MeV neutron})$, ③トリチウム増殖比(1.06-0.81):0.81をとれば $15.9 \text{ MeV} / (14 \text{ MeV neutron})$ となる。

Fig. 4.1とFig. 4.2に1次元計算と2次元計算の発熱分布を示した。今後設計が詳細化した場合ブランケット中の発熱、超電導磁石中の発熱の計算にも2次元コードの使用が必要となる。現時点で両者を比較しておく事は意味がある。Fig. 4.1とFig. 4.2に見られる様に1次元計算と2次元計算の結果は良く一致する。特にインナーブランケットでの一致が良い。アウトーブランケットにおいては、 Li_2O 領域で2次元計算の方が若干高い値を与える。

5. 結 言

核融合実験炉ブランケットのトリチウム増殖比、放射線発熱に関して1次元、2次元計算を行い次の結論を得た。

- (1) 設計点におけるトリチウム増殖比は0.81となった。
- (2) ブランケットの非均質効果を考慮するとトリチウム増殖比は約2%大きくなる。
- (3) 2次元計算において、円形であるプラズマ断面を正方形で模擬した場合5%トリチウム増殖比を過大評価する。
- (4) トーラス形状のプラズマを無限円柱で近似すると10%トリチウム増殖比を過小評価する。
- (5) 1次元計算における計算条件(中性子エネルギー群数42, S8, P5)と2次元計算における計算条件(中性子エネルギー群数7, S8, P1)では結果に有意な差が無かった。
- (6) ブランケットの構造材体積率、 Li_2O 密度はトリチウム増殖比に与える影響が大きい。
- (7) 固体 Li_2O を液体Liに置き変えた場合、構造材体積率が変わらず、Heで冷却しないとすればトリチウム増殖比はかなり増加する。
- (8) ブランケット内での放射線発熱は $15.6 \sim 15.9 \text{ MeV} / 14 \text{ MeV neutron}$ である。
- (9) ブランケットにおける放射線発熱分布は、1次元計算と2次元計算の結果が良く一致する。

Table 4.1 インナーブランケット放射線発熱

Zone No. (k)	Material	Radiation Heating (MeV/14 MeV neutron)		
		Neutron $\int H_n \phi_n dV_k$	Gamma-ray $\int H_\gamma \phi_\gamma dV_k$	Total $\int (H_n \phi_n + H_\gamma \phi_\gamma) dV_k$
1	Vacuum*	8.15×10^{-9}	3.69×10^{-10}	8.52×10^{-9}
2	Vacuum*	2.32×10^{-9}	1.39×10^{-10}	2.46×10^{-9}
3	Carbon coating	3.47×10^{-1}	8.12×10^{-2}	4.29×10^{-1}
4	Stainless steel	5.36×10^{-1}	8.71×10^{-1}	1.40
5	Helium	4.10×10^{-3}	3.03×10^{-4}	4.40×10^{-3}
6	Stainless steel	4.11×10^{-1}	8.22×10^{-1}	1.23
7	S.S. (90%)	1.53	3.90	5.43
8	S.S. (65%)+B ₄ C(16%)	3.27	1.95	5.23
9	Stainless steel	1.41×10^{-2}	6.42×10^{-2}	7.83×10^{-2}
1~9	Blanket total	6.11	7.69	13.80 (98%)
10	Vacuum*	3.63×10^{-11}	3.78×10^{-12}	4.01×10^{-11}
11	Heavy concrete	1.43×10^{-1}	1.00×10^{-1}	2.43×10^{-1}
12	Lead	4.32×10^{-5}	1.99×10^{-3}	2.03×10^{-3}
13	Vacuum*	1.63×10^{-13}	5.57×10^{-15}	1.68×10^{-3}
14	Super insulation	9.84×10^{-5}	9.42×10^{-5}	1.93×10^{-5}
15	S.C.M.	2.36×10^{-4}	1.93×10^{-3}	2.16×10^{-3}
16	Super insulation	4.25×10^{-9}	1.86×10^{-8}	2.28×10^{-8}
10~16	Shield and magnet	0.14	0.11	0.25 (2%)
1~16	Total	6.25 (45%)	7.80 (55%)	14.05

*Vacuum is filled with 10^{13} atoms·cm⁻³ of helium

Table 4.2 アウターブランケット放射線発熱

Zone No. (k)	Material	Radiation Heating (MeV/14 MeV neutron)		
		Neutron $\int H_n \phi_n dV_k$	Gamma-ray $\int H_\gamma \phi_\gamma dV_k$	Total $\int (H_n \phi_n + H_\gamma \phi_\gamma) dV_k$
1	Vacuum*	7.75×10^{-9}	3.88×10^{-10}	8.14×10^{-9}
2	Vacuum*	2.18×10^{-9}	1.48×10^{-10}	2.33×10^{-9}
3	Carbon coating	2.38×10^{-1}	8.73×10^{-2}	4.25×10^{-1}
4	Stainless steel	5.50×10^{-1}	9.52×10^{-1}	1.50
5	Li ₂ O(24%), s.s.(9%)	3.22	1.89	5.12
6	Li ₂ O(72%), s.s.(17%)	5.99	3.01	9.00
7	C(69%), s.s.(12%)	9.12×10^{-2}	2.31×10^{-1}	3.23×10^{-1}
8	Stainless steel	5.41×10^{-3}	1.09×10^{-1}	1.11×10^{-1}
1~8	Blanket total	10.20	6.29	16.49 (99%)
9	Vacuum*	1.70×10^{-11}	6.19×10^{-12}	2.32×10^{-11}
10	Heavy concrete	6.94×10^{-2}	7.49×10^{-2}	1.44×10^{-1}
11	Lead	5.07×10^{-6}	3.89×10^{-4}	3.94×10^{-4}
12	Vacuum*	1.94×10^{-14}	6.55×10^{-16}	2.01×10^{-14}
13	Super insulation	9.96×10^{-6}	1.09×10^{-5}	2.09×10^{-5}
14	S.C.M.	2.43×10^{-5}	2.20×10^{-4}	2.44×10^{-4}
15	Super insulation	4.77×10^{-10}	2.17×10^{-9}	2.65×10^{-9}
9~15	Shield and magnet	0.07	0.07	0.14 (1%)
1~15	Total	10.27 (62%)	6.36 (38%)	16.63

*Vacuum is filled with 10^{13} atoms·cm⁻³ of helium

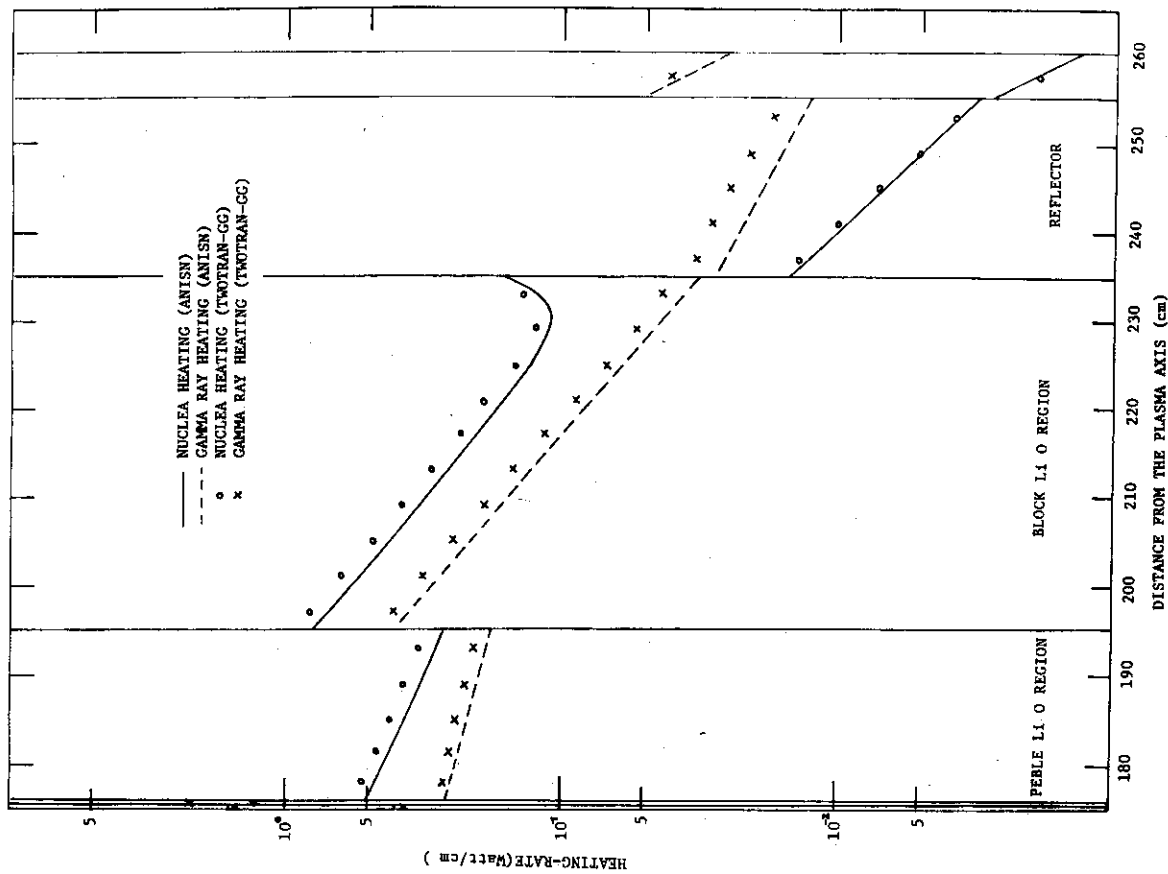


Fig. 4.2 実験炉アウターブランケット出力分布

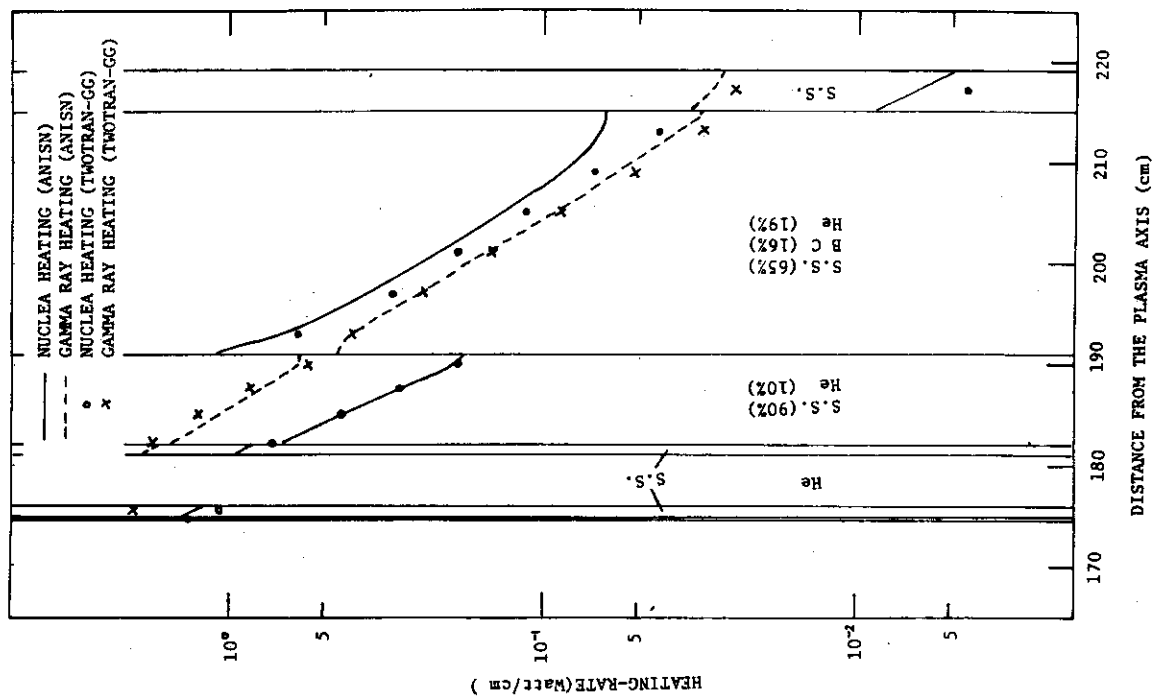


Fig. 4.1 実験炉インナーブランケット出力分布

謝 辞

原子炉数值解析研究室の田次 吉氏にはTWOTRANの使用に関して援助を頂いた。また、迫淳炉設計研究室室長、森茂核融合研究部部長には有益な助言を頂いた。ここに深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 関泰, 田中吉左右, 迫淳 JAERI-M 6150 (1975)
- 2) K. SAKO et al JAERI-M 5502 (1973)
- 3) S. MIYASAKA et al , JAERI-M 5794 (1974)
- 4) M. A. ABDOV et al , ORNL-TM-3994 (1972)
- 5) W. W. Jr ENGLE K-1693 (1967)
- 6) K. D. LATHROP LA-4600 (1972)
- 7) 迫淳他 公刊予定
- 8) MAGDI M. H. RAGHEB et al UWFD-92 (1975)
- 9) G. L. KULCINSKI et al UWFD-68 (1973)
- 10) W. DANNER IPP 4/101 (1972)
- 11) G. BECKER et al Z. Physik 269, 41-46 (1974)
- 12) 森山正敏, 関泰, 前川洋 JAERI-M 6072 (1975)