

JAERI - M
92-093

核融合炉の遮蔽計算における非均質効果

1992年7月

佐藤 聰・真木 紘一^{*1}・関 泰
高津 英幸・黒田 敏公^{*2}・Sergei ZIMIN^{*3}

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) で複写による実費領布をおこなって
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, Tokai-mura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

核融合炉の遮蔽計算における非均質効果

日本原子力研究所那珂研究所 ITER 開発室

佐藤 聰⁺・真木 紘一^{*1}・関 泰⁺
高津 英幸^{*}2・黒田 敏公^{*}3・Sergei ZIMIN^{*3}

(1992年6月2日受理)

トカマク型核融合炉のインボード部の超電動コイルに対する遮蔽特性評価における、均質モデルを用いた場合と非均質モデルを用いた場合との遮蔽特性の相違すなわち非均質効果を検討し、以下の結論を得た。

遮蔽体領域の厚さを 70 cm とし、遮蔽体領域を構成するステンレス鋼 (SS) と冷却水 (H_2O) 層の各々の厚さを変えた場合、各層の厚さが増加するに従い非均質効果は増加する。非均質効果は、SS/ H_2O 層の厚さが各々 2 cm / 5 mm 以下の場合超電導コイルの容器と巻線部共に 3 % 以下であり、SS/ H_2O 層の厚さが各々 12 cm / 3 cm の場合、巻線部において 20 %、コイル容器において 9 % 程度となる。

遮蔽体領域内部の SS/ H_2O 層の厚さを各々 8 cm / 2 cm とし、遮蔽体領域全体の厚さを変えた場合、厚さが増加するに従い、コイル容器と巻線部共に非均質効果は増加する。また、遮蔽体領域の厚さが増加するに従い非均質効果は飽和する傾向を示し、巻線部においては 18 %、コイル容器においては 13 % 程度になる。

遮蔽体領域、及び遮蔽体領域内部の SS/ H_2O 層の厚さを一定とし、ブランケット領域の厚さを変えた場合や補助遮蔽体であるボロンカーバイド及び鉛遮蔽体層を追加した場合には、非均質効果の変化は殆ど無い。

国際熱核融合実験炉 ITER 概念設計において検討された構造に対するインボード遮蔽体構造の非均質効果は、コイル容器における全核発熱率のピーク値で 27 %、巻線部におけるピーク値で 29 % である。ITER の遮蔽設計ではモデル化に伴う誤差に対する設計安全ファクターを 1.3 と評価しており、本検討の範囲内では、非均質効果に伴う誤差は上記範囲内にあることがわかった。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山 801-1

+ 核融合工学部

* 1 株式会社日立製作所

* 2 川崎重工業株式会社

* 3 リサーチフェロー

Heterogeneous Effects on Shielding Characteristics
In Fusion Reactor Neutronics Calculations

Satoshi SATO⁺, Koichi MAKI^{*1}, Yasushi SEKI⁺
Hideyuki TAKATSU, Toshimasa KURODA^{*2} and Sergei ZIMIN^{*3}

Department of ITER Project
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 2, 1992)

Heterogeneous effects in shielding calculations were evaluated in terms of shielding characteristics of a blanket/shield structure to superconducting magnets (SCM) of a fusion reactor. A wide range of parameters was examined such as thicknesses of individual steel/water layers composing shield region and thicknesses of shield and blanket regions and the following results were obtained.

With a constant thickness of a shield region of 70 cm, the heterogeneous effects increased with the thickness of individual steel/water layers in shield region. In the case the thicknesses of individual steel/water layers were smaller than 2cm/5mm, the heterogeneous effects both in the coil case and in the winding pack of SCM were less than 3 %. In the case the thicknesses of steel/water layers were 12cm/3cm, the heterogeneous effects in the winding pack and in the coil case were 20 % and 9 %, respectively.

The heterogeneous effects both in the coil case and in the winding pack increased with the total thickness of the shield region, and saturated at 18 % and 13 %, respectively, under the constant thickness

+ Department of Fusion Engineering Research

*1 Hitachi, Ltd.

*2 Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

*3 Research Fellow

of individual steel/water layers in the shield region of 8cm/2cm. The heterogeneous effects showed a negligible dependence on the thickness of the blanket region and on addition of supplemental shield such as boron carbide and lead layers.

The heterogeneous effects were examined for the inboard blanket of an International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) based on its conceptual design. The heterogeneous effects of nuclear heating rates in the coil case and in the winding pack were found to be 27 % and 29 %, respectively, and to be within a safety factor of 30 % for an error of modeling assumed in the conceptual design of the ITER.

Keywords: Shielding, Fusion Reactor, Neutronics Calculation,
Heterogeneous Effects, Superconducting Magnet, Blanket

目 次

1. 緒 言	1
2. 検討手法と計算モデル	2
3. 非均質効果に対するインボード部構成層厚さの効果	7
3.1 遮蔽体内の冷却水及びSS層の厚さの効果	7
3.2 遮蔽体全領域厚さの効果	9
3.3 ブランケット領域の厚さの効果	10
3.4 B ₄ C 及び Pb の補助遮蔽体層の効果	11
3.5 まとめ	11
4. 非均質領域の厚さ及び位置の効果	27
4.1 非均質領域の厚さの効果	27
4.2 非均質領域の位置の効果	29
4.3 まとめ	30
5. ITER の内側遮蔽体における非均質及びメッシュ効果	38
5.1 非均質効果	38
5.2 メッシュ効果	39
5.3 非均質効果の安全ファクターへの影響	39
5.4 まとめ	40
6. 結 言	52
謝 辞	52
参考文献	53

Contents

1. Introduction	1
2. Evaluation Method and Calculational Model	2
3. Effect of Thicknesses of Inboard Composition	7
3.1 Effect of Thicknesses of Cooling Water and SS Layers in the Shield Region	7
3.2 Effect of Total Shield Region Thicknesses	9
3.3 Effect of Blanket Region Thicknesses	10
3.4 Effect of Additional B ₄ C and Pb Layers	11
3.5 Summary	11
4. Effect of Thickness and Location of Heterogeneous Regions	27
4.1 Effect of Heterogeneous Regions Thickness	27
4.2 Effect of Heterogeneous Regions Location	29
4.3 Summary	30
5. Heterogeneous and Mesh Effects in ITER Inboard Shield Region	38
5.1 Heterogeneous Effect	38
5.2 Mesh Effect	39
5.3 Contribution to Safety Factor of Heterogeneous Effect	39
5.4 Summary	40
6. Conclusion	52
Acknowledgements	52
References	53

1. 緒 言

トカマク核融合炉において、インボード遮蔽体の厚さは装置規模に大きな影響を与える。すなわち、インボード遮蔽体の厚さが 10 cm 増加すれば、装置の主半径は概略 10 cm 程度増大する。従って、装置大型化ひいてはコストの増大を極力抑える観点からインボード遮蔽体の厚さをできる限り薄くすることが必要とされ、アウトボード遮蔽体に較べて厳しい制約を受ける。そのため、超電動コイル遮蔽に対する設計余裕はアウトボード遮蔽体に較べて少なくなり、精度の高い遮蔽特性評価が要求される。

これまで、トカマク型核融合炉における遮蔽体の設計では、主として計算の簡便さから、多くの場合非均質な遮蔽体構造を部分的に均質化したモデルで近似して取り扱ってきた¹⁾。また国際熱核融合実験炉 (ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor) の遮蔽設計においても、計算の簡便さと概念設計段階であるという事から遮蔽体構造を部分的に均質モデルで近似して取り扱ってきた^{2), 3)}。しかし、今後設計が詳細化されるにつれて、精度の高い遮蔽特性評価が要求されるものと考えられる。このような観点から、均質モデルを用いた場合と非均質モデルを用いた場合との遮蔽特性の相異（これを本報告では非均質効果と呼ぶ、定義は次章に示す。）を把握し、遮蔽設計上の安全ファクターへの影響を検討することが必要である。

本研究の目的は、インボード遮蔽体を対象として、遮蔽体主要部を構成しているステンレス鋼 SS 316 と冷却水（以下、それぞれ、SS, H₂O と記す）を各材料毎に分離した非均質モデルと、両者の構成材を混合して平均化してモデル化する均質モデルについて、超電動トロイダルコイルに対する遮蔽性能を比較し、非均質効果を評価することである。また、これらの結果に基づいて、均質モデルを用いる場合の遮蔽計算への影響を把握することである。さらに、局所的に非均質モデルにする場合の非均質効果への影響についても検討を行った。本研究では、コイルに対する遮蔽特性として、コイル容器及び巻線部に達する中性子束及びガンマ線束、またそれらに基づきコイル各部で発生する核発熱率を対象とした。計算に際しては、インボード遮蔽体における、遮蔽体領域内の SS, H₂O の各層の厚さ及び遮蔽体領域全体の厚さ、ブランケット領域の厚さ、B₄C 及びPb 遮蔽体層の有無をパラメータとした。最後に、ITER の概念設計 (CDA) において検討されたインボード構造に対する非均質効果を求め、遮蔽設計における安全ファクターへの影響を評価した。また、これらの計算に先立ちメッシュ分割数の計算結果に及ぼす効果をあらかじめ検討した。

第 2 章では、検討手法について述べる。第 3 章では、SS/H₂O 層、遮蔽体領域、ブランケット領域の各々の厚さを独立に変えた場合の非均質効果の変化について述べる。第 4 章では、局所的に遮蔽体内の一部を非均質領域とした場合の効果を検討し、第 5 章では、ITER 概念設計での内側遮蔽領域における非均質効果、また非均質効果を検討する際のメッシュ分割数の影響について述べる。また以上の結果から非均質効果の安全ファクターへの影響について述べる。

2. 検討手法と計算モデル

一般に、計算体系を構成している非均質性を考慮したモデルにより計算した量で、その体系を均質モデルで計算した物理量にたいして非均質効果を補正する場合には、“（非均質モデルによる計算値）／（均質モデルによる計算値）”の値を非均質効果として補正する。しかし、本検討では、非均質モデルによる計算値を真値と見做し、“真値からのずれ”あるいは、“真値に対する相違量”と考え、特に断りがない限り、次のような量を非均質効果として定義する。

$$\text{非均質効果 } \zeta = \frac{F_{\text{HOMO}} - F_{\text{HETERO}}}{F_{\text{HETERO}}} \quad (2.1)$$

ここで、 F_{HOMO} ：均質モデルによって得られた計算値

F_{HETERO} ：非均質モデルによって得られた計算値

である。

すなわち、非均質モデルによって得られた計算値を基準値として、“均質モデルによって得られた計算値の基準値からの相違量”を非均質効果として評価する。

計算コードは、1次元輸送計算コード ANISN⁴⁾を、群定数は中性子 125 群とガンマ線 40 群で構成されている核融合核計算用群定数セット FUSION-J 3⁵⁾を使用した。また、群定数セットの散乱断面積のルジャンドル展開のオーダについては P 5、空間の角度分割のオーダは S 8 を用いた。ANISN を用いて計算した中性子束やガンマ線束、及びこれらに FUSION-J 3 用核発熱定数 KERMA ライブラリー⁶⁾で与えられる核発熱定数を乗じて得られる核発熱率等の計算及び図形表示には APPLE-3 コード⁷⁾を使用した。

本検討で使用した計算モデルを、Fig. 2.1 に示す。Fig. 2.1 はアウトボード側の真空容器からインボード側の超電導トロイダルコイルまでの領域を1次元トーラスモデルでモデル化した図である^{3), 8)}。バックスキャッタリングを考慮するため、アウトボード側の真空容器までを考慮に入れている。インボード部の第一壁からアウトボードの領域に対しては本検討で考慮する全てのモデルにおいて共通とし、各検討項目毎にインボード部の対象領域（遮蔽体領域、ブランケット領域等）のモデルを適宜考慮した。

計算に使用した核種の原子数密度を、Table. 2.1 に示す。Table. 2.1 で構成した物質を用いて、領域毎の組成を Table. 2.2 に示すように構築した。

ITER 物理段階では平均 1.0 MW/m^2 の第一壁中性子負荷、工学段階では平均 0.8 MW/m^2 の第一壁中性子負荷での運転が予定されている⁹⁾。本検討では、今後設計が変更された場合の内外挿のし易さから、プラズマからの中性子源強度を、第一壁の平均中性子負荷を 1 MW/m^2 として次のように算出した。即ち、プラズマから外向きの中性子束 f_n は、

$$f_n = \frac{1 \text{ MW/m}^2}{14.06 \text{ MeV} \times 1.6 \times 10^{-19}} = 4.445 \times 10^{17} \text{ n/m}^2 \text{ s} = 4.445 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$$

で与えられる。トーラスモデルにおいて、インボード部及びアウトボード部の第一壁のトーラス軸からの距離（半径）をそれぞれ R_{in} , R_{out} とすると、高さ 1 cm の平円盤状のプラズマにおける中性子源強度 S_n は、プラズマから外向きの中性子束 f_n を用いて次の式で与えられる。

$$S_n = 2\pi (R_{in} + R_{out}) f_n$$

本検討で考慮したモデルでは、第一壁までの距離は全て共通で $R_{in} = 371$ cm, $R_{out} = 830$ cm である。これらの値より中性子源強度は、 $S_n = 3.355 \times 10^{17}$ n/s となる。

Table 2.1 Atomic number densities of composing materials

(10²⁴ cm⁻³)

No.	Material	Element	Number Density
1	Plasma	¹ H	1.0 × 10 ⁻¹⁰
2	Carbon	C	8.023 × 10 ⁻²
3	SS	Fe Cr Ni Mo Mn	5.727 × 10 ⁻² 1.575 × 10 ⁻² 9.848 × 10 ⁻³ 1.255 × 10 ⁻³ 1.819 × 10 ⁻³
4	H ₂ O	H O	6.700 × 10 ⁻² 3.350 × 10 ⁻²
5	Pb	Pb	3.348 × 10 ⁻²
6	Cu	Cu	8.493 × 10 ⁻²
7	Insulator	H C O N Si Al Ca	2.033 × 10 ⁻² 1.792 × 10 ⁻² 2.551 × 10 ⁻² 1.950 × 10 ⁻³ 6.884 × 10 ⁻³ 2.158 × 10 ⁻³ 2.300 × 10 ⁻³
8	Liq. He	⁴ He	1.837 × 10 ⁻²
9	B ₄ C	¹⁰ B ¹¹ B C	2.197 × 10 ⁻² 8.787 × 10 ⁻² 2.746 × 10 ⁻²
10	Li ₂ O (Natural)	⁶ Li ⁷ Li O	5.118 × 10 ⁻³ 6.385 × 10 ⁻² 3.4484 × 10 ⁻²
11	Be	Be	1.236 × 10 ⁻¹

Table 2.2 Material volume fractions of each region

 $(10^{24} \text{ cm}^{-3})$

No.	Material	Composing material	Volume fraction
12	SCM	SS Cu Insulator Liq. He	0.316 0.355 0.118 0.211
13	SS	SS	0.2
14	SS + H ₂ O	SS H ₂ O	0.7 0.3
15	SS + H ₂ O	SS H ₂ O	0.8 0.2
16	SS + H ₂ O	SS H ₂ O	0.5 0.5
17	SS + H ₂ O	SS H ₂ O	0.2 0.8
18	Breeder zone	Li ₂ O SS H ₂ O Be	0.1181 0.0579 0.0904 0.3543
19	SS + H ₂ O	SS H ₂ O	0.7778 0.2222
20	SS + H ₂ O	SS H ₂ O	0.7959 0.2041
21	SS + H ₂ O	SS H ₂ O	0.7605 0.2395
22	SS + H ₂ O	SS H ₂ O	0.8714 0.1286
23	SS + H ₂ O	SS H ₂ O	0.8071 0.1929
24	SS + H ₂ O	SS H ₂ O	0.8392 0.1608

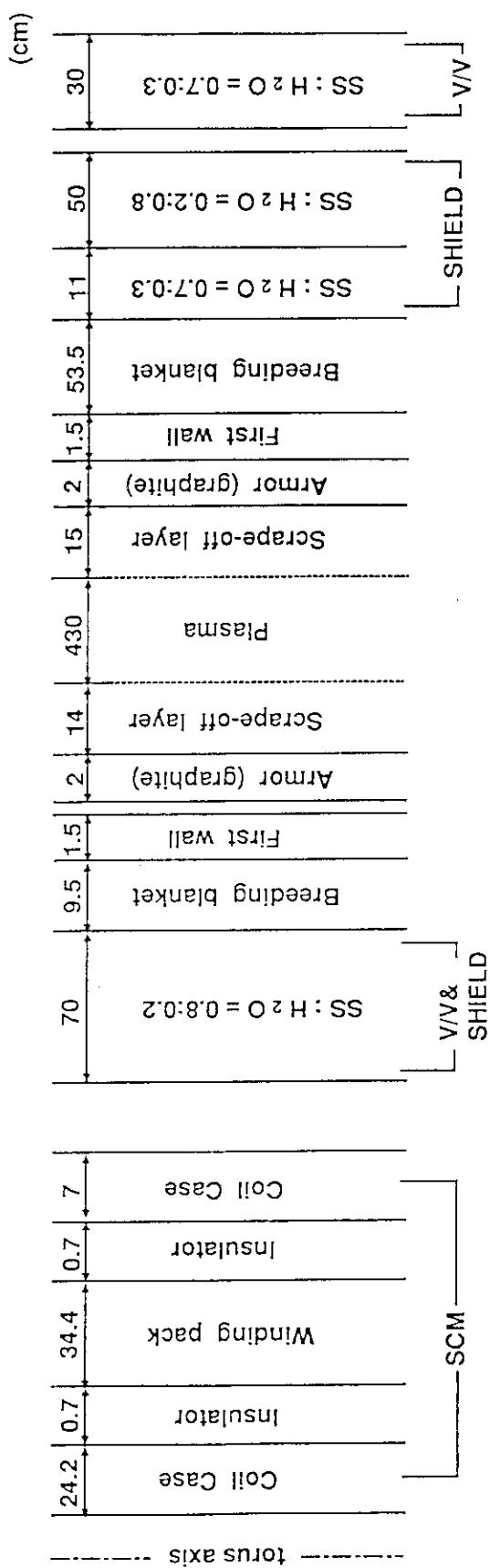


Fig. 2.1 Calculation model used for this investigation

3. 非均質効果に対するインボード部構成層厚さの効果

ITER の概念設計において検討されたインボード遮蔽体の構成は、今後の工学設計において変わるべき可能性がある。また、当然のことであるが、ITER 以外のトカマク型核融合炉（例えば異なる概念の実験炉や動力炉を指向する）のインボード遮蔽体の構成も、真空容器やブランケットの構造、遮蔽体の冷却方式等によって、多様な構造が採られるものと考えるべきである。そこで、インボード遮蔽体を構成している要素の厚さとしては、様々な場合が想定される。従って、各構成要素の厚さを変えた場合の、非均質な遮蔽体構造を均質モデルで近似して取り扱った場合、非均質効果を予め把握しておくことは、今後の遮蔽設計において有用である。また、各構成領域厚さに対する非均質効果の依存性を把握することは、未検討の遮蔽体の構成あるいは厚さに対する非均質効果を推定できるので、今後の遮蔽設計において役に立るものと考える。

この節では、トーラスの赤道面の主半径方向 1 次元円柱モデル（1 次元トーラスモデル）を用いて、インボード遮蔽体の冷却水 (H_2O) 及び SS 層、遮蔽体領域、ブランケット領域の各々の厚さを変えた場合、また B_4C 及び Pb の補助遮蔽体層を追加した場合の非均質効果を検討する。

3.1 遮蔽体内の冷却水及び SS 層の厚さの効果

ITER 概念設計におけるインボード遮蔽体の構成は、Fig. 3.1 に示すように SS と冷却水が交互に配置されている⁸⁾。超電導トロイダルコイルに対する最良の遮蔽性能を与える SS と水の組成比は 80 ~ 85 % と 20 ~ 15 % である事から⁹⁾、本章及び第 4 章で検討した全てのモデルにおいて、インボード遮蔽体の SS 層と H_2O 層の構成比を 0.8 : 0.2 とした。本節では、遮蔽体領域及びブランケット領域の厚さを一定とし、非均質モデルにおいて遮蔽体領域を構成する SS 層及び H_2O 層の各層の厚さを変えた場合の、非均質効果について検討する。本節での検討に使用した計算モデルを Fig. 3.2 に示す。(a) は、インボード遮蔽体領域を、SS と H_2O の均質混合領域とした均質モデルである。その下に示す (b) (c) は、SS と H_2O をそれぞれ各層毎に分離した非均質モデルである。いずれも SS : H_2O の構成比は均質モデルと同じ 0.8 : 0.2 としているが、(b) では SS 層の厚さを 8 cm とし、 H_2O 層の厚さを 2 cm、(c) では SS, H_2O の各層の厚さをそれぞれ 11.2 cm 及び 2.8 cm とした。ただし、この 2 ケースのみでなく、SS と H_2O の構成比を 70 cm の遮蔽体全領域で一定 (0.8 : 0.2) に保ちながら、各層の厚さを変えた場合 (SS/ H_2O = 2 cm / 5 mm, 4 cm / 1 cm) についても計算した。均質モデルと非均質モデルにおいて、遮蔽体以外の構成及び各構成領域厚さは同じである。また、次章以降の検討も含め本検討で考慮するすべてのモデルにおいて、メッシュ分割による影響をなくすため非均質モデルと均質モデルのメッシュ分割を同じものとした。Fig. 3.2 の場合の空間全体のメッシュ数は 207、インボード部のメッシュ数は 130 である。

Fig. 3.2 に示した。均質モデルと二つの非均質モデルについて得られた 14 MeV の中性子束、0.1 MeV 以上の中性子束、全中性子束、及びガンマ線束の分布を、それぞれ Fig. 3.3, Fig. 3.4,

Fig. 3.5 に示す。ここで横軸はトーラス中心からの距離であり、 $R = 287 \sim 357$ cm の領域がインボード遮蔽体、 $R = 385 \sim 815$ cm がプラズマ領域である。○印は 14 MeV の中性子束、△印は 0.1 MeV 以上の中性子束、□印は全中性子束、×印はガンマ線束を示す。また、中性子による核発熱率、ガンマ線による核発熱率、全核発熱率のそれぞれの分布を、均質モデル及び二つの非均質モデルについてそれぞれ Fig. 3.6, Fig. 3.7, Fig. 3.8 に示す。Fig. 3.3 ～ Fig. 3.8 の結果から、非均質モデル遮蔽体領域においては、中性子束及び中性子による核発熱率は、SS 層において減少しているのに対して、 H_2O 層では殆ど変化がない事が判る。

SS/ H_2O の各層の厚さを 8 cm / 2 cm とした場合及び 11.2 cm / 2.8 cm とした場合の、超電導コイル容器及び巻線部における中性子束、ガンマ線束、核発熱率に対する非均質効果を Table 3.1 に示す。Table 3.1 から、14 MeV 中性子束に関しては、均質モデルと非均質モデルによる違いがほとんどない事が判る。

SS と H_2O の構成比を 0.8 : 0.2 及び遮蔽体領域の全厚さ 70 cm に保ちながら、遮蔽体領域における SS 及び H_2O の各層の厚さを上述した各ケースと同様に変えた場合の非均質効果を Fig. 3.9 に示す。横軸は SS 層の厚さ、及び H_2O 層の厚さを示し、縦軸が (2.1) 式で定義した非均質効果（以下、本章では単に非均質効果と呼ぶ。）の値である。●印はコイル容器における全核発熱率のピーク値に対する非均質効果、□印は巻線部における全核発熱率のピーク値に対する非均質効果を示す。全核発熱率とは中性子及びガンマ線による核発熱率の和である。Fig. 3.9 に示される様に、コイル容器、巻線部のいずれにおいても、均質モデルは非均質モデルと較べて核発熱率を過小評価する傾向にあり、非均質効果は負となる。その理由は以下の様に考えられる。

H_2O 中の水素原子 (H) による散乱反応と SS 中の鉄原子 (Fe) による吸収反応が、均質モデルの場合は両方起こるが、非均質モデルの場合にはどちらか一方に限定される。散乱反応もしくは吸収反応どちらかに限定されると、 H_2O あるいは SS のどちらかの層内では中性子のエネルギー領域によっては散乱あるいは吸収反応率が小さくなり、そのため散乱反応と吸収反応が両方起こる場合に較べて、全反応率は小さくなる。従って均質モデルの方が、中性子の散乱・吸収の頻度が多くなる。その結果、コイル（及び遮蔽体の後部領域）に達する中性子数を均質モデルと非均質モデルで比較した場合、均質モデルの方が小さくなるので、非均質モデルの場合と較べて核発熱率を過小評価するものと考えられる。

コイル容器、巻線部共に SS 及び H_2O の各層の厚さを薄くするにつれて非均質効果が小さくなり、Fig. 3.9 から次のようなことがわかる。即ち、SS 層の厚さが 4 cm（この場合 H_2O 層の厚さが 1 cm）とした場合には非均質効果は -5 ～ -6 %、SS 層の厚さが 2 cm (H_2O 層の厚さが 5 mm) とした場合には非均質効果は -2 % 程度になる。SS 及び H_2O の各層の厚さが中性子吸収及び散乱の平均自由行程（本モデルの場合、H においては 7.5 mm, Fe においては 8.7 cm）より薄くなる事によって、非均質効果は小さくなるものと考えられる。その理由は、中性子が構成の異なる数層を通過する間に 1 回の反応が起こるようになり、SS あるいは H_2O の特定の層内で反応が起こらず、数層に渡って平均して反応が起こるからである。一般に、非均質効果が大きくなるのは、非均質層の厚さが平均自由行程と同程度になる時である。

Fig. 3.9 から、SS 層の厚さが 4 cm (H_2O 層の厚さが 1 cm) 以下の場合、SS 及び H_2O の各層の厚さとコイル容器と巻線部における核発熱率の非均質効果の関係はほぼ同じであることが

わかる。しかし、SS層の厚さが4 cm (H_2O 層の厚さが1 cm) 以上の場合、SS及び H_2O の層厚さが厚くなるにつれて、コイル容器における非均質効果は飽和して行くのに対し、巻線部における非均質効果は増加し続けている。その結果SS層の厚さが11.2 cm (H_2O 層の厚さが2.8 cm) の場合、コイル容器における非均質効果は-9%程度であるのに対して、巻線部における非均質効果は-20%程度になる。

その理由は H_2O に対する反応の観点から以下の様に考えられている。Fig. 3.2に示した様に、巻線部と遮蔽体の間にコイル容器が存在するので、達巻線部に達する中性子は、コイル容器に達する中性子と較べて、遮蔽体領域に存在した中性子の中でコイル容器を通過した中性子である。従って、コイル容器での核発熱に寄与する中性子と較べて、巻線部に到達し核発熱に主に寄与する中性子は、遮蔽体領域ではエネルギーの高い中性子である。中性子に対するHの散乱断面積は、~20 keVまでは20 barnで一定である。20 keV以上になると散乱断面積は減少し、200 keVで10 barn, 1 MeVで4 barn, 10 MeVで1 barnになる。中性子の平均自由行程は巨視的断面積に反比例するので、中性子のエネルギーが高くなるに従って、Hに対する中性子の平均自由行程は長くなる。本モデルにおけるHに対する中性子の平均自由行程は、20 barnで7.5 mm, 10 barnで1.5 cm, 4 barnで3.7 cmとなる。故に、巻線部での核発熱に寄与する中性子は、コイル容器での核発熱に寄与する中性子に較べて、遮蔽体領域において平均自由行程の長い中性子となる。 H_2O 層の厚さが中性子の平均自由行程より厚くなると非均質効果は大きくなる。コイル容器では、 H_2O 層の厚さが厚くなるにつれて非均質効果は増加しているが次第に飽和している。これは、中性子の平均自由行程より H_2O 層の厚さを充分に厚く採っているため、非均質効果はこの値以上大きくならないからである。

一方、巻線部の非均質効果は、 H_2O 層の厚さが厚くなても飽和する事無く増加している。これは、巻線部での核発熱に寄与する中性子は、遮蔽体領域において、コイル容器での核発熱に寄与する中性子に較べて平均自由行程の長い中性子なので、本モデルの範囲(H_2O 層の厚さが~2.8 cm)では、 H_2O 層の厚さが中性子の平均自由行程より充分に厚くなつてない為と考えられる。従って、 H_2O 層の厚さを本モデルで検討した厚さ以上に厚くすると、巻線部の非均質効果もコイル容器の非均質効果同様に、飽和するものと考えられる。

3.2 遮蔽体全領域厚さの効果

本節では、遮蔽体領域におけるSS層の厚さが8 cm, H_2O 層の厚さが2 cmを一定とし、遮蔽体領域全体の厚さを変えた場合の非均質効果を検討する。使用したインボード遮蔽体の計算モデルをFig. 3.10に示す。Fig. 3.2と同様、(a)が均質モデルであり、その下に示す二つのモデル図(b)(c)が非均質モデルである。(b)は遮蔽体領域が40 cmの場合、(c)は遮蔽体領域が70 cmの場合である。計算に際しては、遮蔽体領域全体の厚さをパラメータとし、10 cm~120 cmの厚さに対して数ケースを計算した。このとき遮蔽体領域の厚さと非均質効果の関係をFig. 3.11に示す。横軸は遮蔽体領域の厚さ、縦軸は非均質効果の値である。また前節同様●はコイル容器における全核発熱率のピーク値に対する非均質効果、□印は巻線部における全核発熱率に対する非均質効果を示す。

コイル容器における非均質効果は遮蔽体領域の厚さが 40 cm 以上の場合、巻線部においては厚さが 20 cm 以上の場合、コイル容器、巻線部共に遮蔽体領域が厚くなるにつれて非均質効果は大きくなる。また遮蔽体領域の厚さが増加するに従って、非均質効果の増加の割合は小さくなり非均質効果は飽和し、コイル容器において -13 %、巻線部において -18 % 程度になる。遮蔽体領域が厚くなるに従って、非均質効果が飽和する理由は以下の様に考えられる。中性子に対する H の散乱断面積は、20 keV 以下では一定であるのに対して、20 keV 以上になるとエネルギーの増加と共に減少していく。従って、中性子のエネルギーが 20 keV 以上の場合、エネルギーによって散乱断面積が減少するので、非均質効果は大きくなり易い。従って、遮蔽体領域を厚くした場合非均質効果はエネルギーが高い中性子の比率の多い遮蔽体の前部領域（プラズマ側の領域）で大きくなり、エネルギーの低い中性子が多く含まれる遮蔽体の後部領域（コイル側の領域）では非均質効果は小さくなる。そのため遮蔽体領域が厚くなるに従い、非均質効果の増加の割合は小さくなり非均質効果は飽和するものと考えられる。また遮蔽体領域を厚くした場合、遮蔽体の後部領域では中性子のエネルギーが Fe の共鳴領域よりも低くなる事も、非均質効果が飽和する理由の一つであると考えられる。

コイル容器における全核発熱率のピーク値に対しては遮蔽体領域の厚さが 40 cm 以下の場合、また巻線部においては遮蔽体領域の厚さが 10 cm 以下の場合、それ以上の場合は逆に、均質モデルは非均質に較べて核発熱率を過大評価する傾向にある。その理由は以下の様に考えられる。

以前（非均質モデルと較べて、均質モデルの方が、核発熱を過小評価する理由）にも述べた様に、非均質モデルと較べて、均質モデルの場合、中性子の散乱・吸収の頻度が多い、故に、遮蔽体領域で中性子スペクトルの差がなければ、均質モデルの場合、より多くのガンマ線が発生する。従って以下の様になる。遮蔽体領域が ITER 概念設計で検討された 70 cm より極端に薄く無い場合、コイル（及び遮蔽体の後部領域）に達する中性子数は、均質モデルで求めた中性子数の方が少なくなるので、均質モデルの場合、コイルにおける核発熱率が低くなる。しかし、遮蔽体領域が極端に薄い場合、均質モデルと非均質モデルで、遮蔽体領域において中性子スペクトルには顕著な差が生じない。故に、遮蔽体領域で発生するガンマ線は、均質モデルで求めたガンマ線の方が多くなるので、均質モデルの場合、コイルにおける核発熱率が高くなる。また遮蔽体領域が極端に薄い場合、中性子のエネルギーが高く、Fe の共鳴領域よりも高いエネルギー領域に多くの中性子が存在している。均質モデルの場合には、非均質モデルの場合よりもプラズマから離れた領域（換言すれば、均質モデルの場合、遮蔽体のコイル側の端に H₂O 層がある。），すなわち構造体との反応で中性子のエネルギーが低くなる領域において、H で散乱される反応が起こる。その結果、均質モデルの場合、共鳴領域に存在する中性子数が多くなるので Fe の吸収反応の頻度が多くなり、核発熱率が高くなるものと考えられる。

3.3 ブランケット領域の厚さの効果

3.1, 3.2 節では、ブランケット領域の厚さを一定として非均質効果を検討したが、本節ではブランケット領域の厚さを変えた場合の非均質効果を検討する。Fig. 3.12 にブランケット領域の厚さを変えた場合の 1 次元均質モデルを示す。(a) はブランケット領域の厚さが 9.5 cm の場合、

(b) はプランケットが無い場合、(c) はプランケット領域の厚さが 19.5 cm の場合のモデルである。ただし、計算はプランケット領域の厚さを 0 cm（プランケットが無い場合）及び 9.5 cm, 19.5 cm, 29.5 cm とした場合の 4 ケースについて行った。均質、非均質両モデルにおいて、インボーデ遮蔽体領域の厚さは 70 cm とし、非均質モデルでは厚さ 8 cm の SS 層と厚さ 2 cm の H₂O 層が交互に配置されたモデルとした。プランケット領域の厚さと非均質効果の関係を Fig. 3.13 に示す。横軸はプランケット領域の厚さ、縦軸は非均質効果の値を示す。また前節同様●印はコイル容器における全核発熱率のピーク値に対する非均質効果、□印が巻線部における全核発熱率のピーク値に対する非均質効果を示す。非均質効果は、コイル容器においては -8 %、巻線部においては -13 ~ 14 % であり、プランケット領域の厚さに対する依存性は殆どない事が判る。

3.4 B₄C 及び Pb の補助遮蔽体層の効果

ITER の概念設計では、インボーデ領域において、真空容器の外側（コイル側）にボロン・カーバイド（B₄C）及び鉛（Pb）の遮蔽体層を設置している。一方、3.1, 3.2, 3.3 節で計算したモデルではいずれもこの B₄C 及び Pb の遮蔽体層を設置していない。本節では B₄C 及び Pb の補助遮蔽体層を設置した場合の非均質効果を検討する。B₄C 及び Pb の補助遮蔽体層を設置した場合の 1 次元均質モデルを Fig. 3.14 に示す。均質、非均質両モデル共にインボーデ遮蔽体の厚さを 65 cm とし、非均質モデルではインボーデ遮蔽体領域において厚さ 4 cm の SS 層と厚さ 1 cm の H₂O 層を交互に配置した。B₄C 及び Pb の補助遮蔽体層がない場合の非均質効果と、B₄C 及び Pb の補助遮蔽体層を設置した場合の非均質効果をそれぞれ Table. 3.2, Table 3.3 に示す。B₄C 及び Pb の補助遮蔽体層がない場合のモデルは 3.1 節で計算したモデルであり、均質モデル、非均質モデル共にインボーデ遮蔽体領域の厚さは 70 cm で、非均質モデルは B₄C 及び Pb の補助遮蔽体層を設置した場合と同様に、インボーデ遮蔽体領域において厚さ 4 cm の SS 層と厚さ 1 cm の H₂O 層が交互に配置されたモデルである。B₄C 及び Pb の補助遮蔽体層を設置しても設置しない場合と較べて非均質効果は殆ど変わらず、B₄C 及び Pb 遮蔽体層の及ぼす影響は少ない事が判る。

3.5 まとめ

トーラス赤道面の径方向 1 次元円柱モデル（1 次元トーラスモデル）を用いて、コイル容器と巻線部における核発熱率のピーク値に対する非均質効果を評価した結果、以下の結論を得た。

- (1) 遮蔽体領域の厚さ 70 cm、プランケット領域の厚さ 9.5 cm、遮蔽体領域における SS と H₂O の構成比 0.8 : 0.2 を一定とし、SS 及び H₂O 層の厚さを変えた非均質モデルの場合、各層の厚さが増加するに従い非均質効果は増加する。
- (2) 本検討の範囲内ではコイル容器における非均質効果は飽和する傾向を示すのに対して、巻線部における非均質効果は単調増加する傾向を示す。SS/H₂O 層の厚さが 2 cm/5 mm 以下の場合、コイル容器と巻線部共に非均質効果は -3 % 以下である。また、SS/H₂O 層の厚さが 12 cm/3 cm の場合、非均質効果は巻線部において -20 %、コイル容器において

- 9 %程度となる。

- (3) ブランケット領域の厚さを 9.5 cm, また非均質モデルにおける SS 及び H₂O 層の厚さをそれぞれ 8 cm 及び 2 cm とし, 遮蔽体領域全体の厚さを変えた場合, 厚さが増加するに従い, コイル容器と巻線部共に非均質効果は増加する。
- (4) コイル容器と巻線部共に, 遮蔽体領域の厚さが増加するに従い非均質効果は飽和し, 巷線部においては -18%, コイル容器においては -13 %程度になる。遮蔽体領域の厚さを薄くした場合(コイル容器においては遮蔽体領域の厚さを 40 cm 以下, 巷線部においては 10 cm 以下とした場合) 非均質モデルと均質モデルの全核発熱率のピーク値は均質モデルの方が高くなり, 均質モデルは非均質モデルに較べて核発熱率を過大評価する傾向となる。
- (5) 遮蔽体領域の厚さを 70 cm, 非均質モデルにおける SS 及び H₂O の各層の厚さをそれぞれ 8 cm 及び 2 cm で一定とし, ブランケット領域の厚さを変えた場合, ブランケット領域の厚さに依存せず非均質効果はコイル容器においては -8 %, 巷線部においては -13 % ~ -14 %である。
- (6) B₄C 及び Pb の補助遮蔽体層の有無による非均質効果の相違は殆ど見られない。
- (7) 以上の結果から, 全核発熱率のピーク値に対しては SS 及び H₂O の各層の厚さを増加させた場合の巷線部の非均質効果を除いて, 非均質効果は -20 % 以下である事が明かとなつた。

Table 3.1 Heterogeneous Effect

◎ Thickness of SS/H₂O : 8 cm/2 cm

	Peak Value		Total Value	
	Coil Case	Winding Pack	Coil Case	Winding Pack
Neutron flux				
14MeV	-0.87%	-0.74%	-0.68%	-0.47%
Above 0.1MeV	-27%	-20%	-23%	-17%
Total	-18%	-23%	-21%	-21%
Total gamma ray flux	-9.0%	-13%	-9.0%	-17%
Nuclear heating rate				
Neutron	-11%	-13%	-10%	-12%
Gamma Ray	-7.7%	-14%	-8.3%	-18%
Total	-7.8%	-14%	-8.3%	-17%

◎ Thickness of SS/H₂O : 11.2 cm/2.8 cm

	Peak Value		Total Value	
	Coil Case	Winding Pack.	Coil Case	Winding Pack
Neutron flux				
14MeV	-0.79%	-0.59%	-0.60%	-0.45%
Above 0.1MeV	-35%	-28%	-32%	-24%
Total	-27%	-32%	-30%	-29%
Total gamma ray flux	-11%	-18%	-12%	-24%
Nuclear heating rate				
Neutron	-15%	-18%	-15%	-17%
Gamma Ray	-8.7%	-20%	-11%	-25%
Total	-8.8%	-20%	-11%	-25%

Table 3.2 Heterogeneous effect of inboard shield without additional B₄C and Pb layer on neutron and gamma fluxes, and nuclear heating rates in coil case and winding pack

	Peak Value		Total Value	
	Coil Case	Winding Pack	Coil Case	Winding Pack
Neutron flux				
14MeV	-0.73%	-0.65%	-0.57%	-0.39%
Above 0.1MeV	-12%	-8.6%	-10%	-7.2%
Total	-7.4%	-9.5%	-8.4%	-8.8%
Total gamma ray flux	-5.1%	-5.4%	-4.5%	-6.8%
Nuclear heating rate				
Neutron	-4.4%	-5.3%	-4.2%	-4.7%
Gamma Ray	-5.2%	-5.8%	-4.6%	-7.3%
Total	-5.2%	-5.8%	-4.6%	-7.2%

Table 3.3 Heterogeneous effect of inboard shield with additional B₄C and Pb layer on neutron and gamma fluxes, and nuclear heating rates in coil case and winding pack

	Peak Value		Total Value	
	Coil Case	Winding Pack	Coil Case	Winding Pack
Neutron flux				
14MeV	-0.49%	-0.55%	-0.47%	-0.31%
Above 0.1MeV	-8.3%	-7.0%	-8.0%	-5.4%
Total	-7.8%	-8.3%	-8.0%	-7.5%
Total gamma ray flux	-3.7%	-5.8%	-4.3%	-6.7%
Nuclear heating rate				
Neutron	-3.6%	-4.6%	-3.7%	-4.2%
Gamma Ray	-4.4%	-6.5%	-5.0%	-7.2%
Total	-4.3%	-6.4%	-4.9%	-7.0%

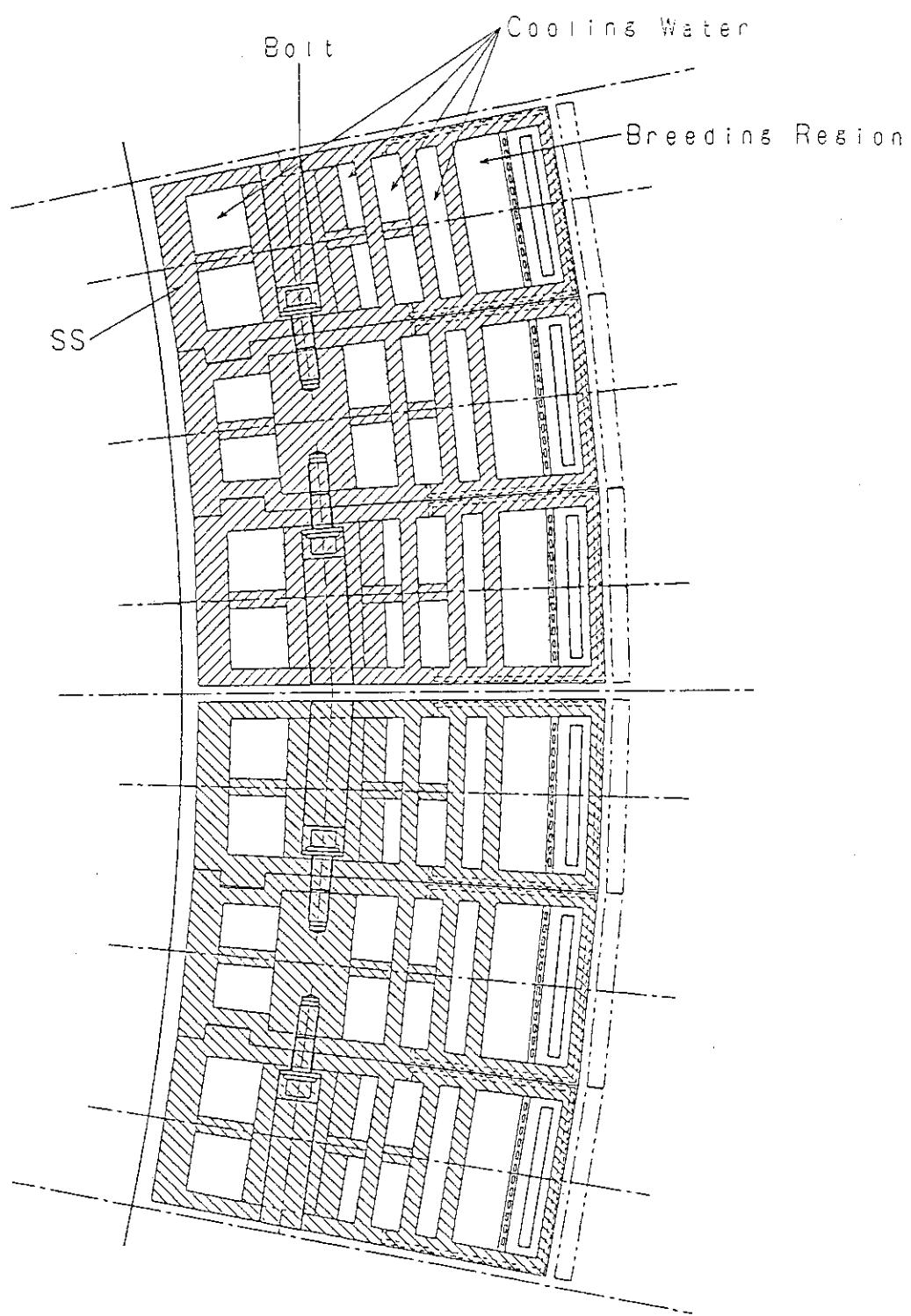


Fig. 3.1 Construction of ITER Inboard Shield

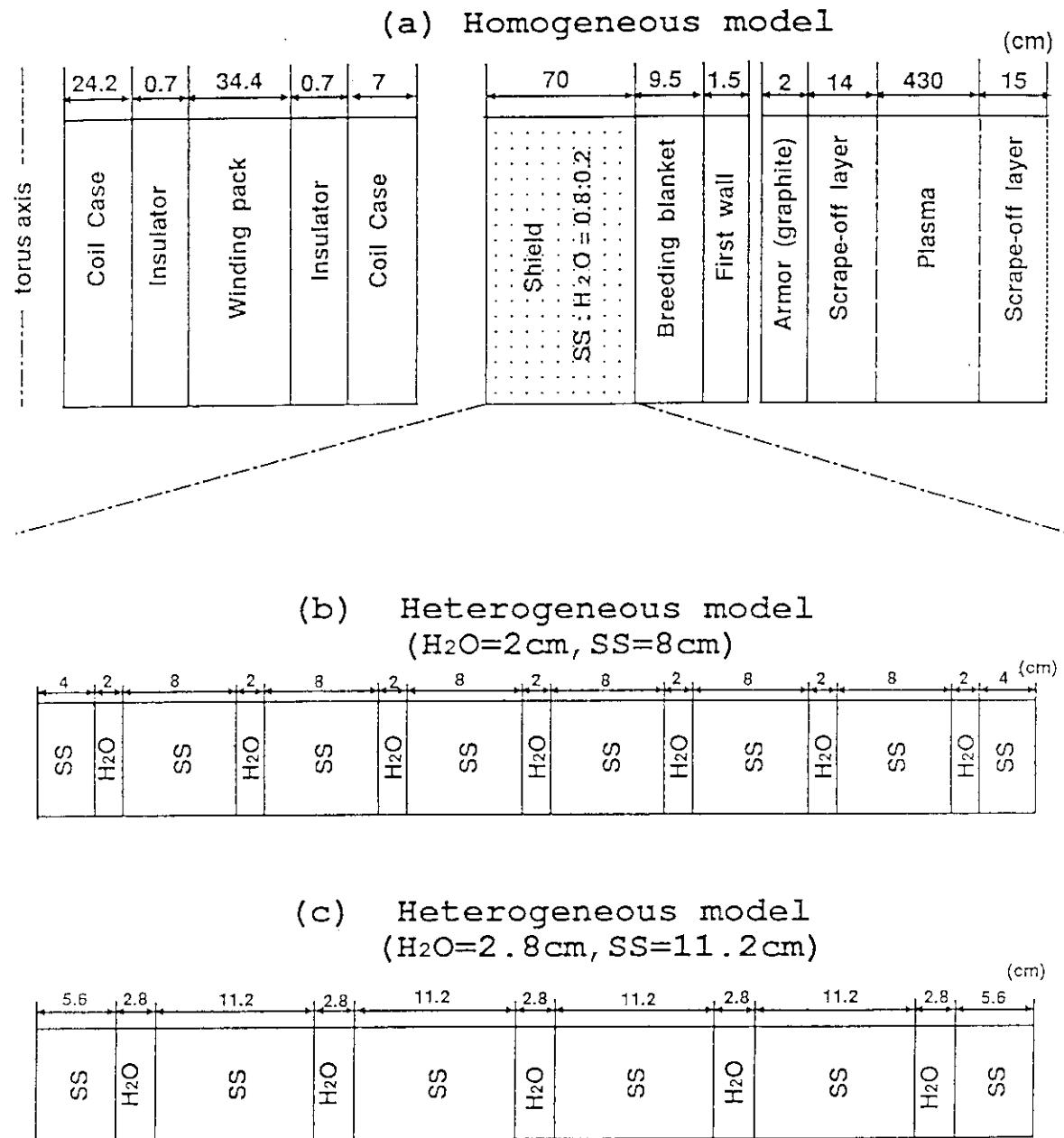


Fig. 3.2 Homogeneous and heterogeneous models of inboard shield region

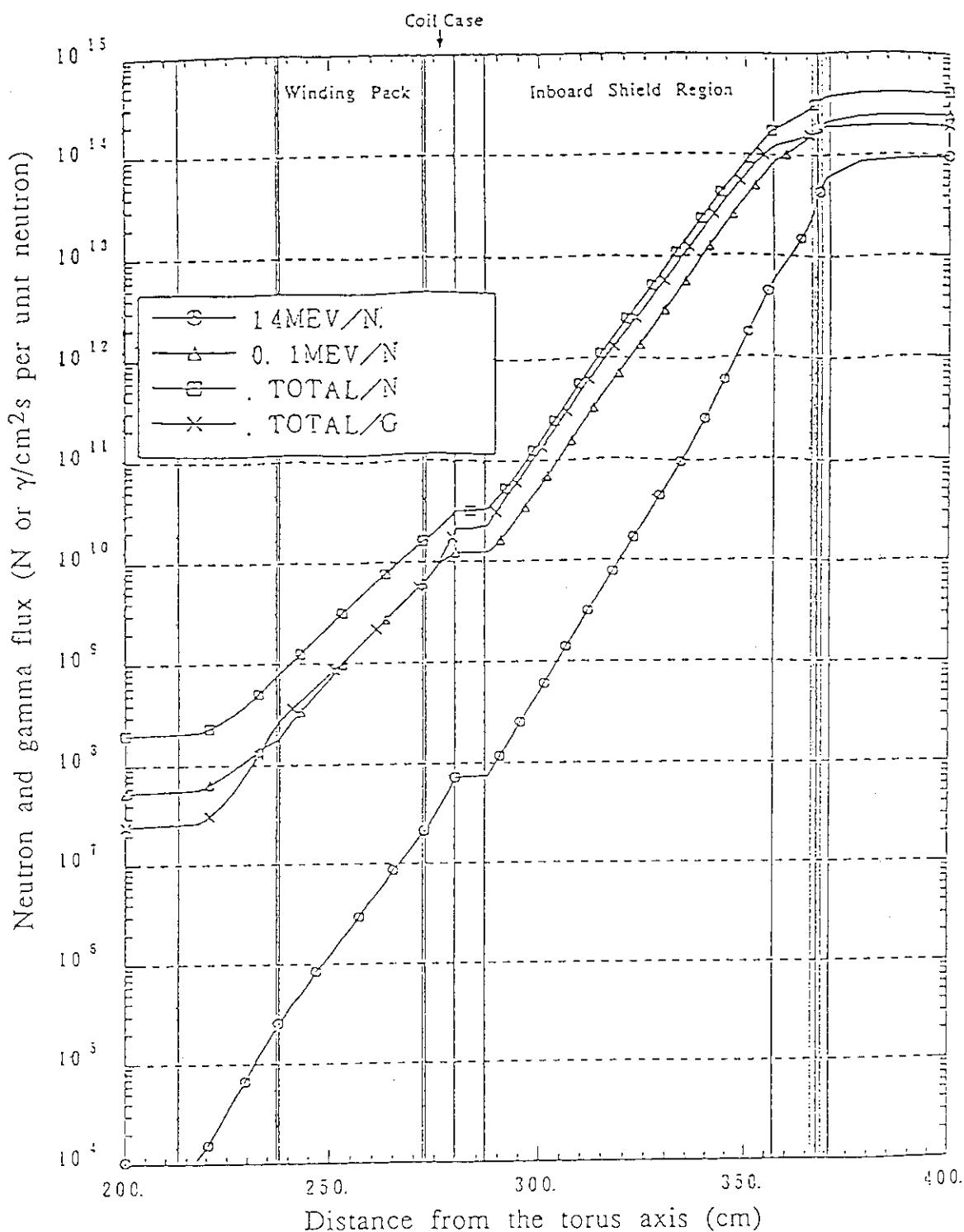


Fig. 3.3 Distribution of neutron and total gamma ray fluxes in homogeneous model (Neutron first wall loading=1MW/m²)

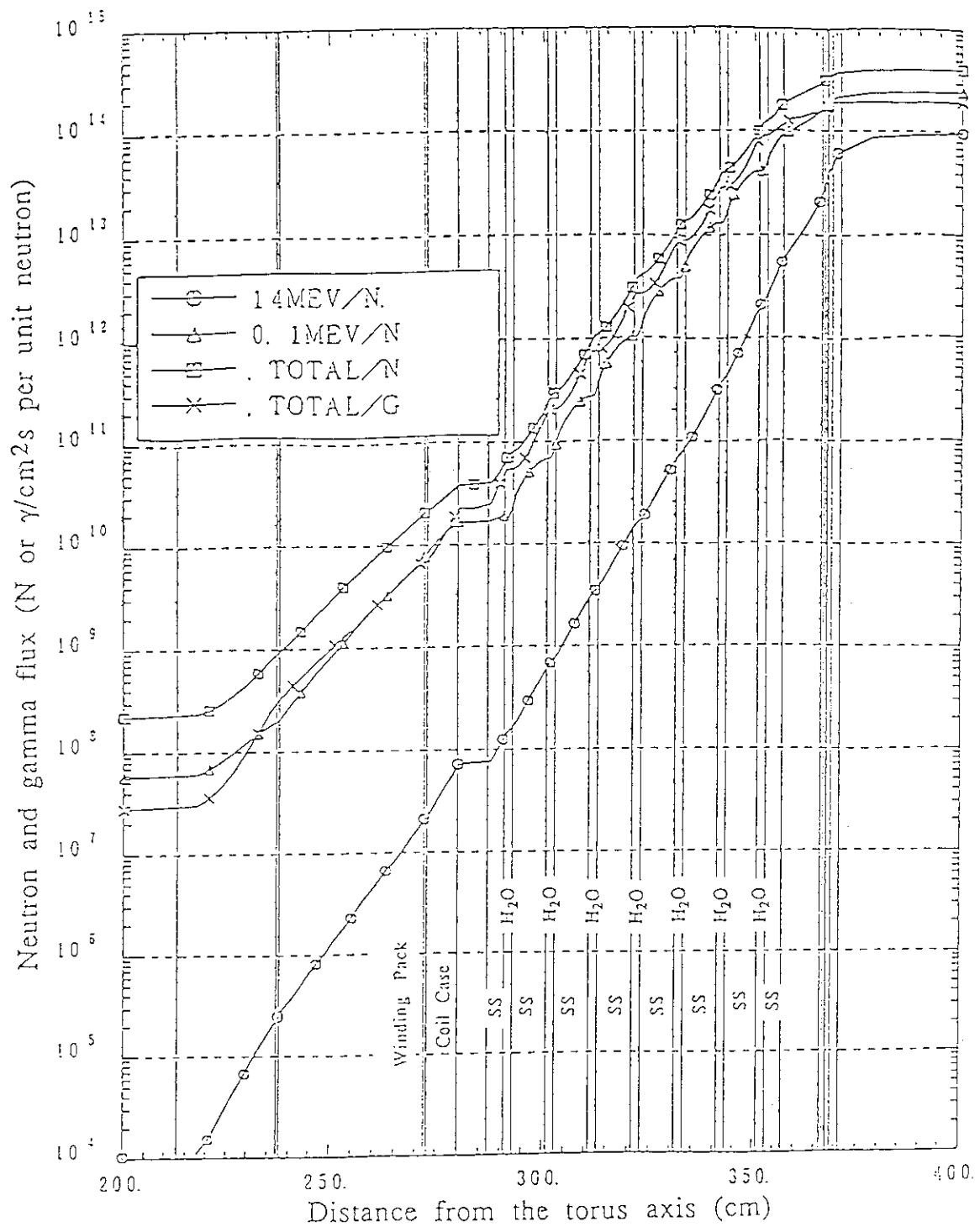


Fig. 3.4 Distribution of neutron and total gamma ray fluxes in heterogeneous model ($H_2O=2\text{cm}$, $SS=8\text{cm}$, Neutron first wall loading= 1MW/m^2)

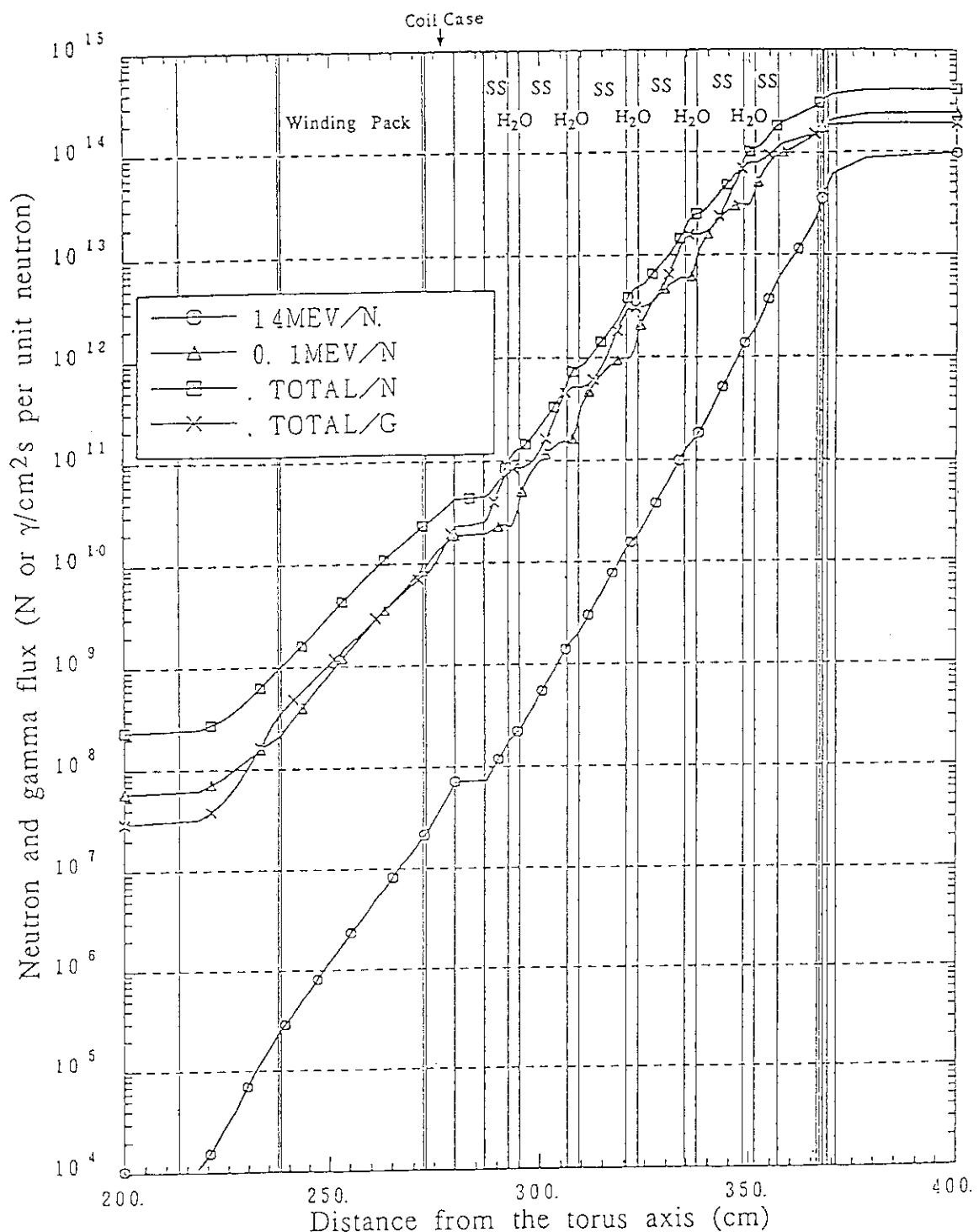


Fig. 3.5 Distribution of neutron and total gamma ray fluxes in heterogeneous model ($H_2O=2.8\text{cm}$, $SS=11.2\text{cm}$, Neutron first wall loading= 1MW/m^2)

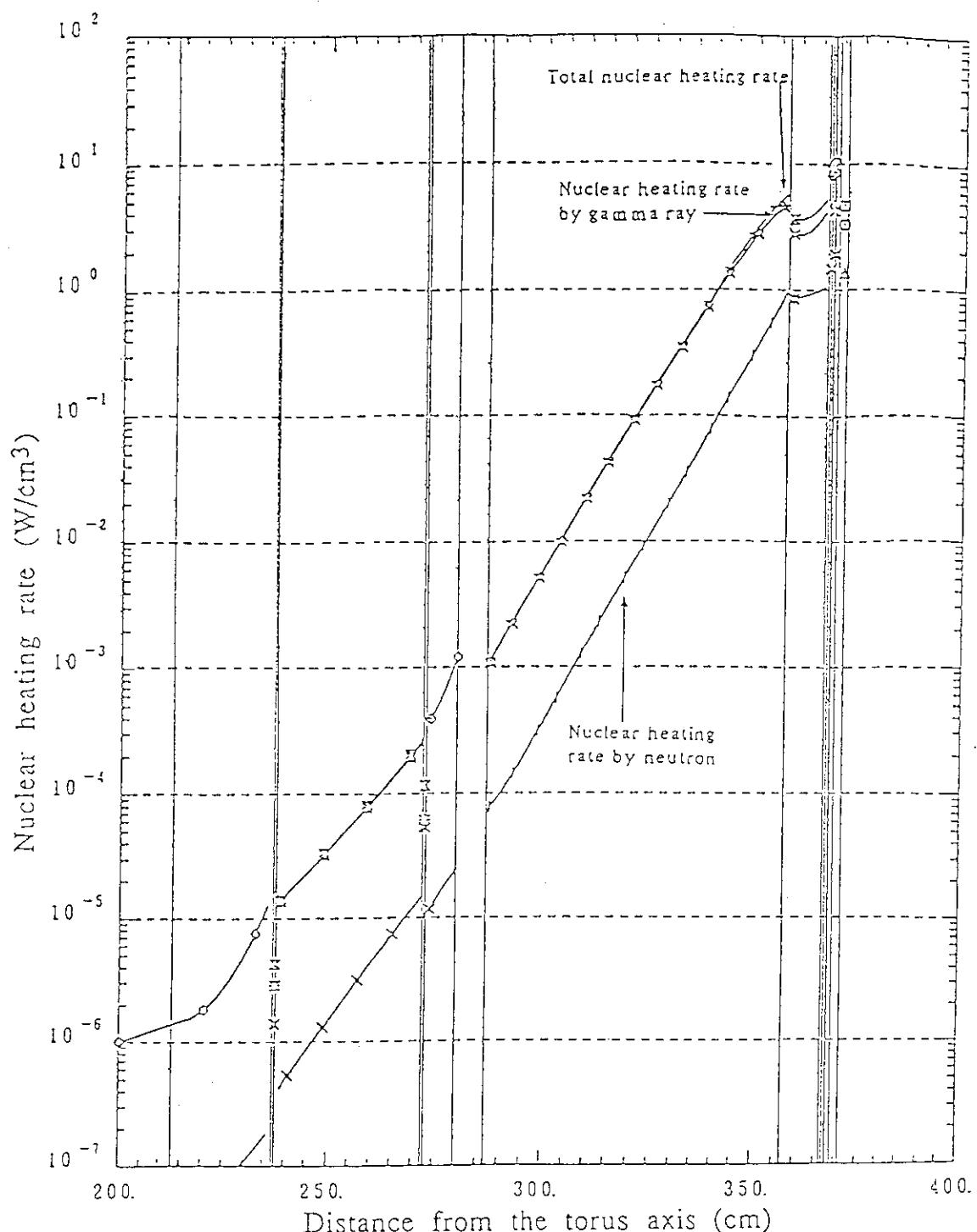


Fig. 3.6 Distribution of nuclear heating rate in homogeneous model
(Neutron first wall loading=1MW/m²)

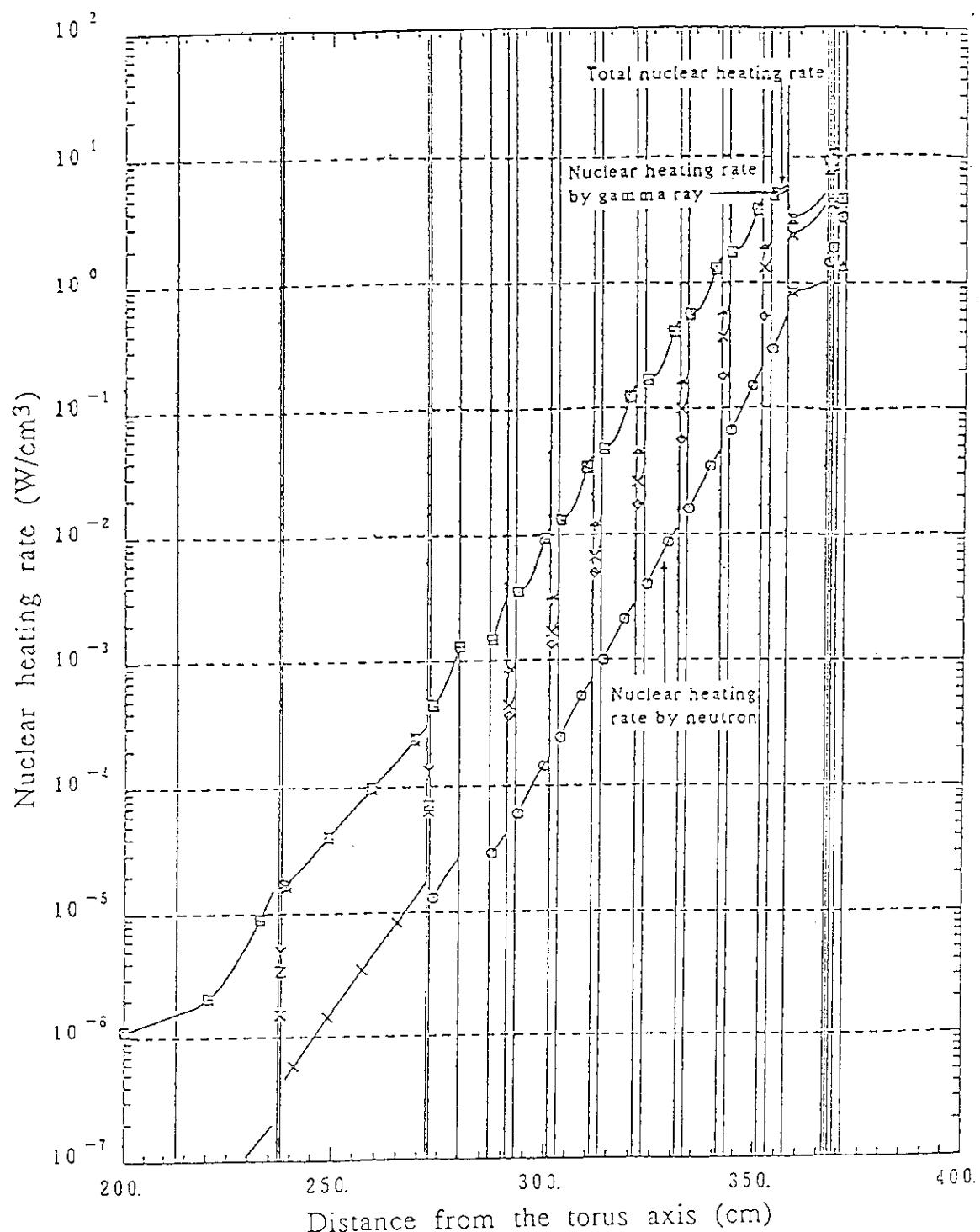


Fig. 3.7 Distribution of nuclear heating rate in heterogeneous model
 $(H_2O=2\text{cm}, SS=8\text{cm}, \text{Neutron first wall loading}=1\text{MW/m}^2)$

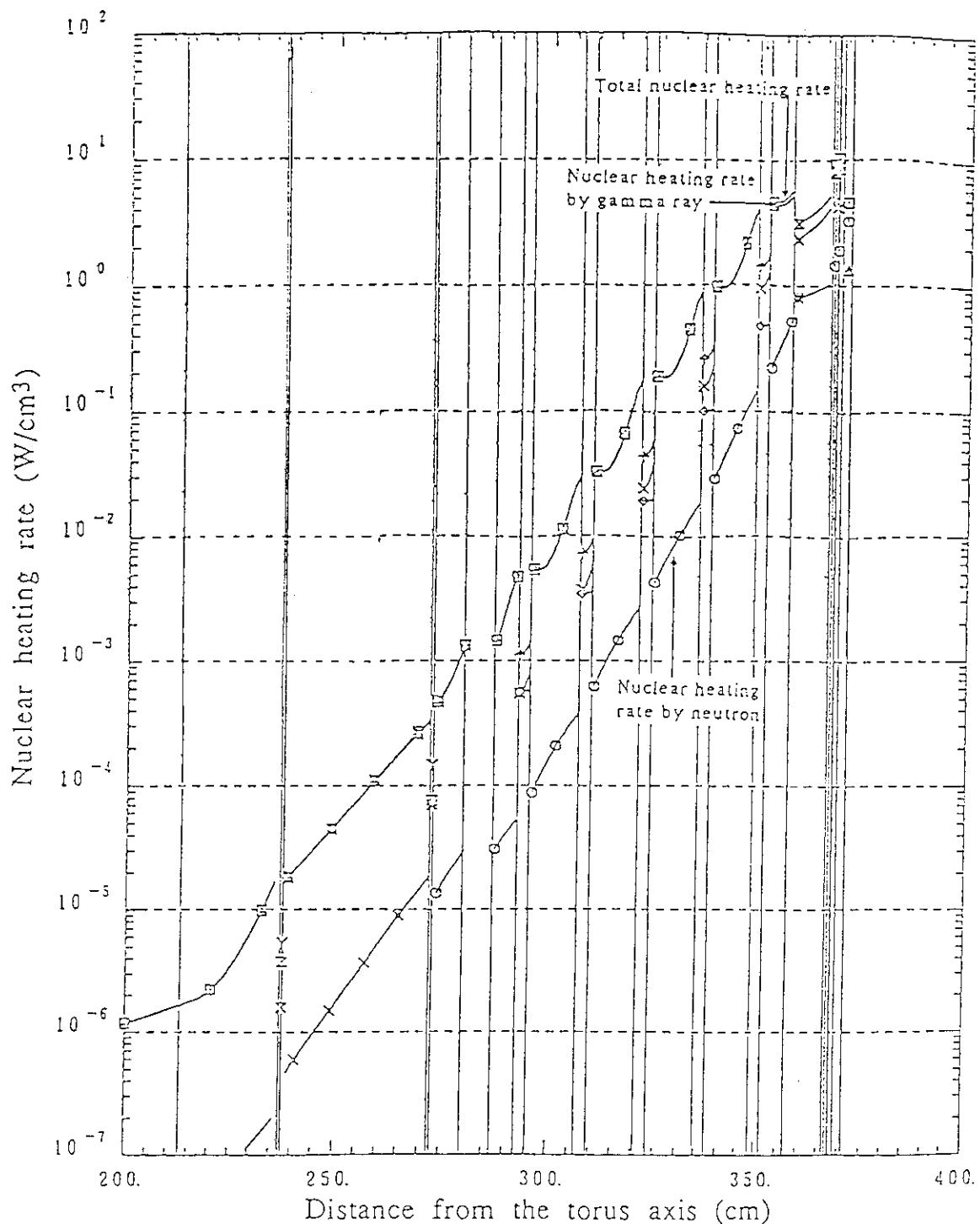


Fig. 3.8 Distribution of nuclear heating rate in heterogeneous model
($H_2O=2.8\text{cm}$, $SS=11.2\text{cm}$, Neutron first wall loading= 1MW/m^2)

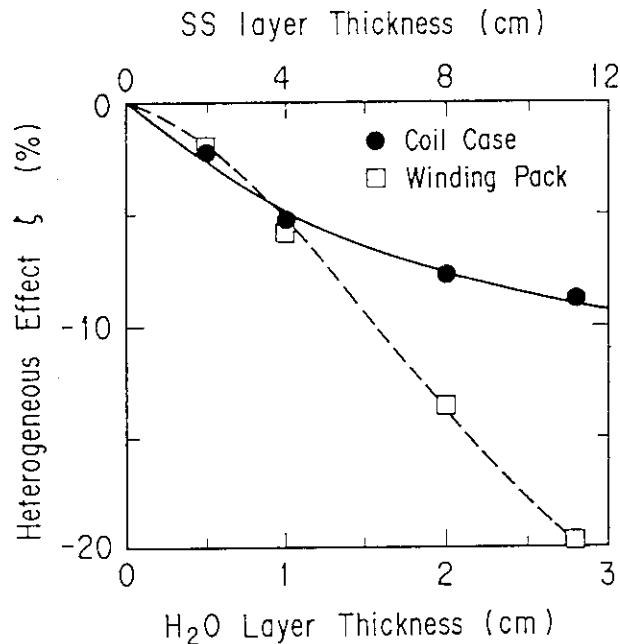


Fig. 3.9 Heterogeneous effect on peak nuclear heating rates in the coil case and the winding pack of superconducting magnets as a function of H₂O/SS layer thicknesses (Shield thickness =70cm, SS:H₂O=0.8:0.2)

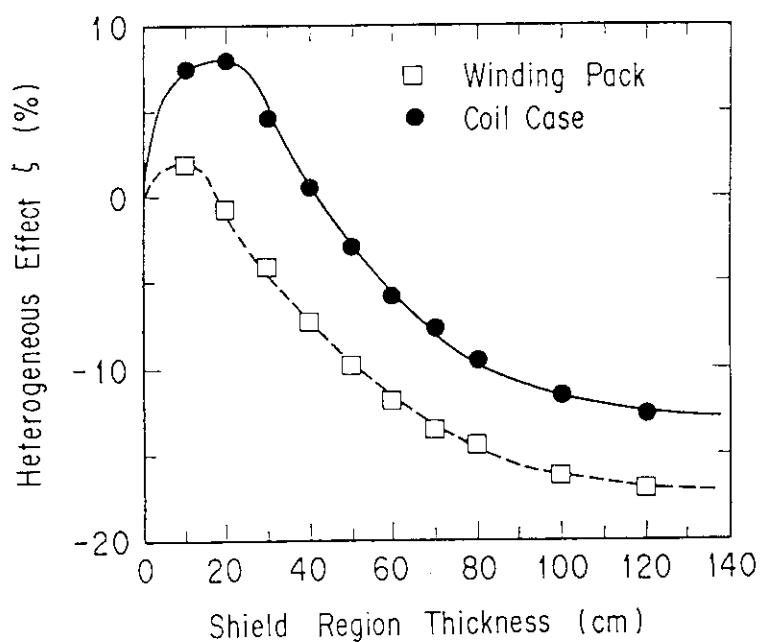


Fig. 3.11 Heterogeneous effect on peak nuclear heating rate in the coil case and the winding pack of superconducting magnets as a function of the shield region thickness (SS layer 8cm, H₂O layer 2cm)

(a) Homogeneous model

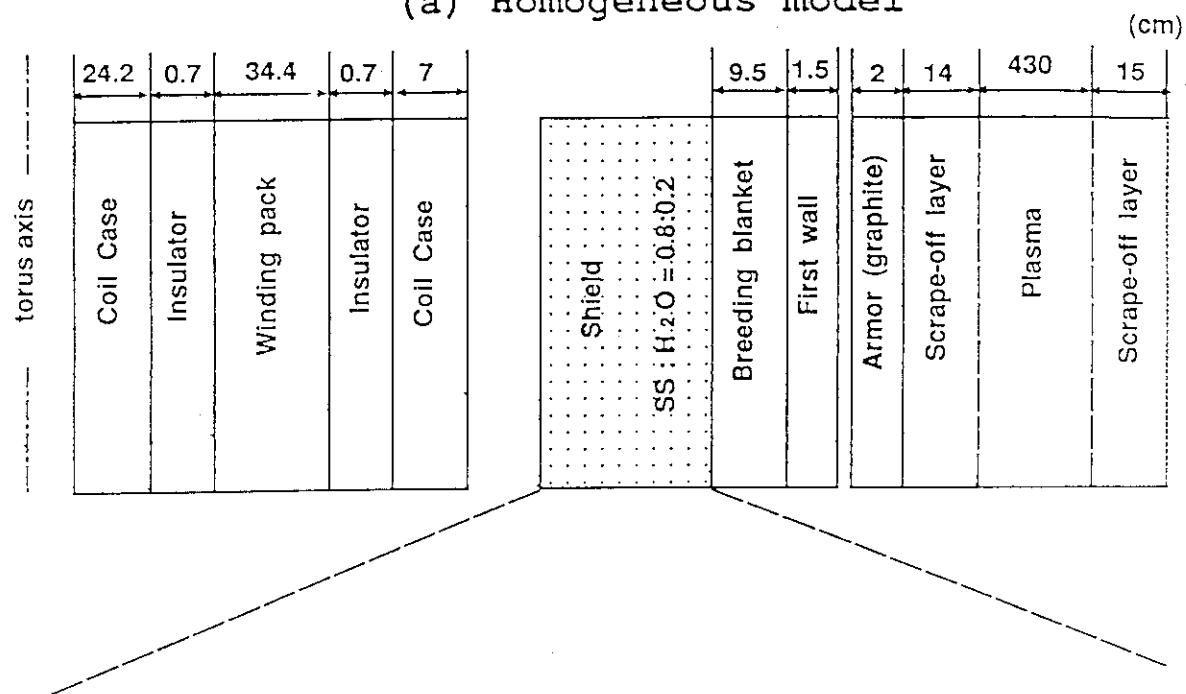
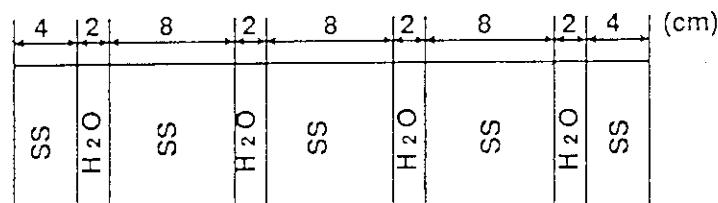
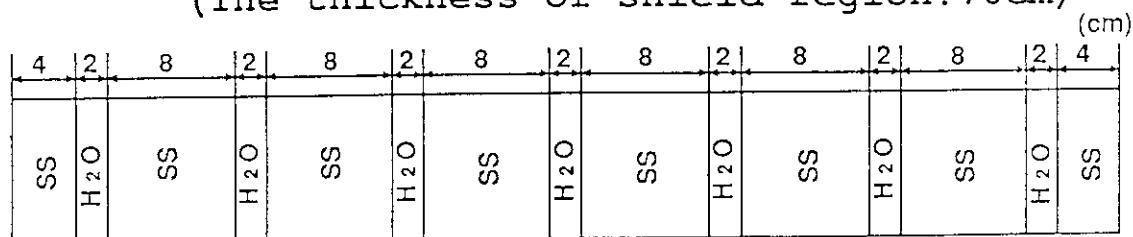
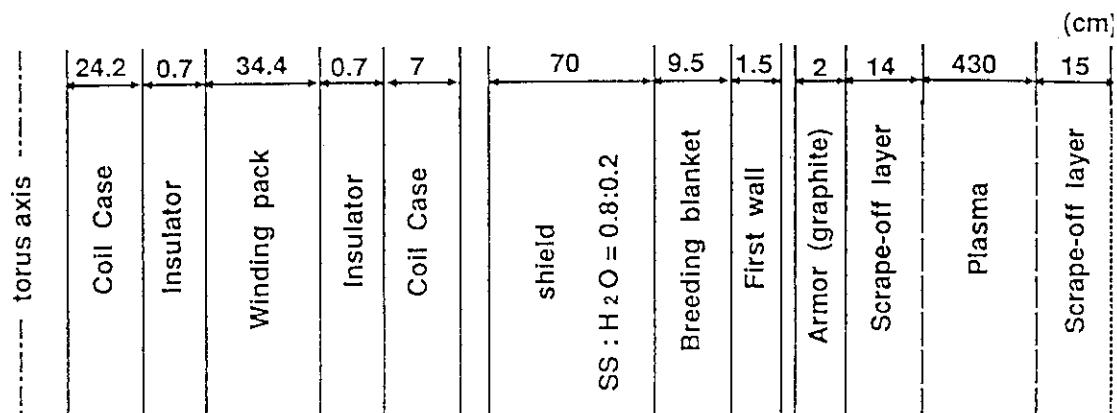
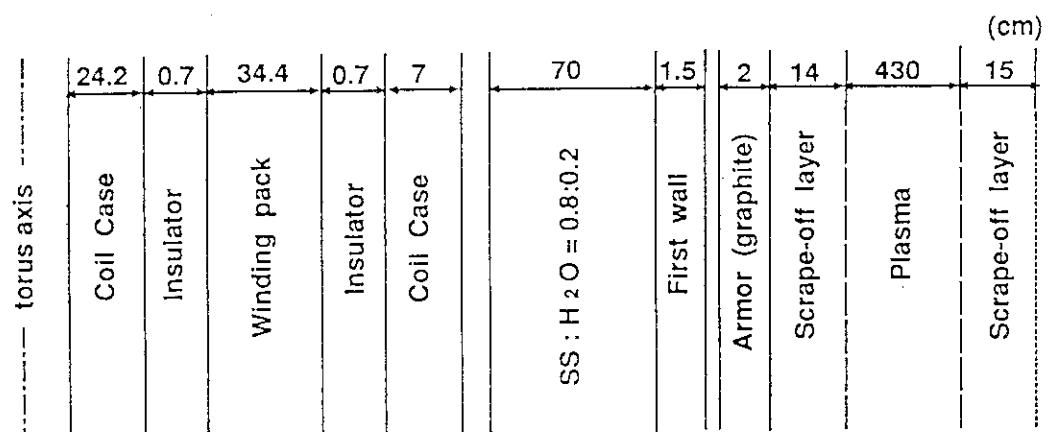
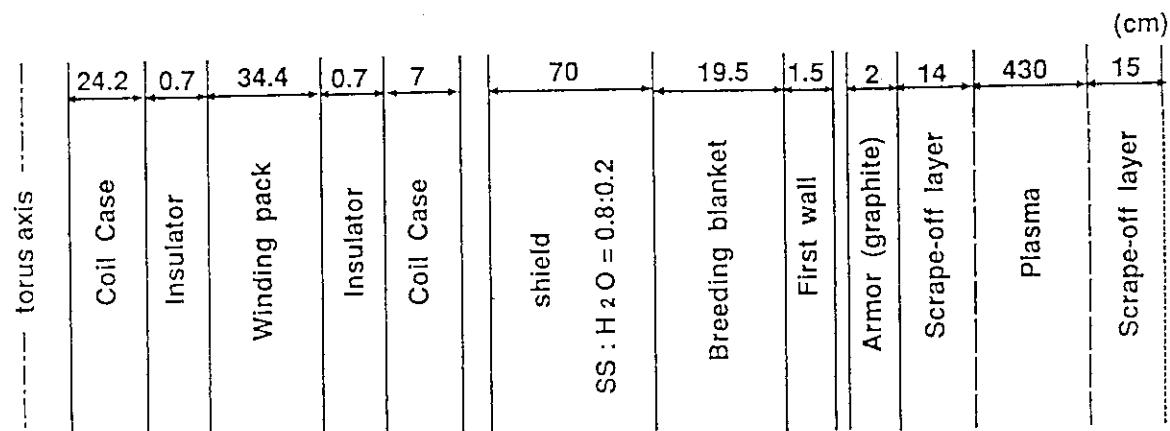
(b) Heterogeneous model
(The thickness of shield region: 40cm)(c) Heterogeneous model
(The thickness of shield region: 70cm)

Fig. 3.10 Homogeneous and heterogeneous models with various thickness of inboard shield region



(a) Thickness of blanket region: 9.5cm

(b) Thickness of blanket region: 0cm
(Blanket isn't existing)

(c) Thickness of blanket region: 19.5cm

Fig. 3.12 Homogeneous model of the inboard shield with various thickness of blanket region

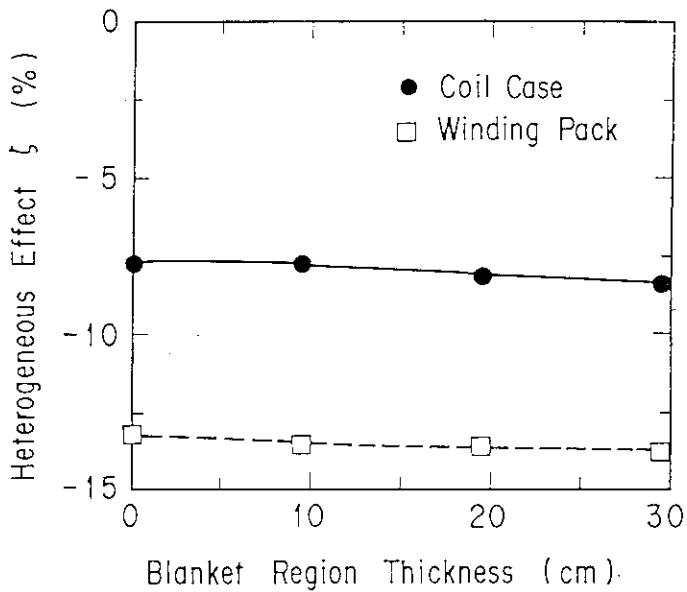


Fig. 3.13 Heterogeneous effect on peak nuclear heating rates in the coil case and the winding pack of superconducting magnets as a function of the blanket region thickness (Shield thickness 70cm, SS layer 8cm, H_2O layer 2cm)

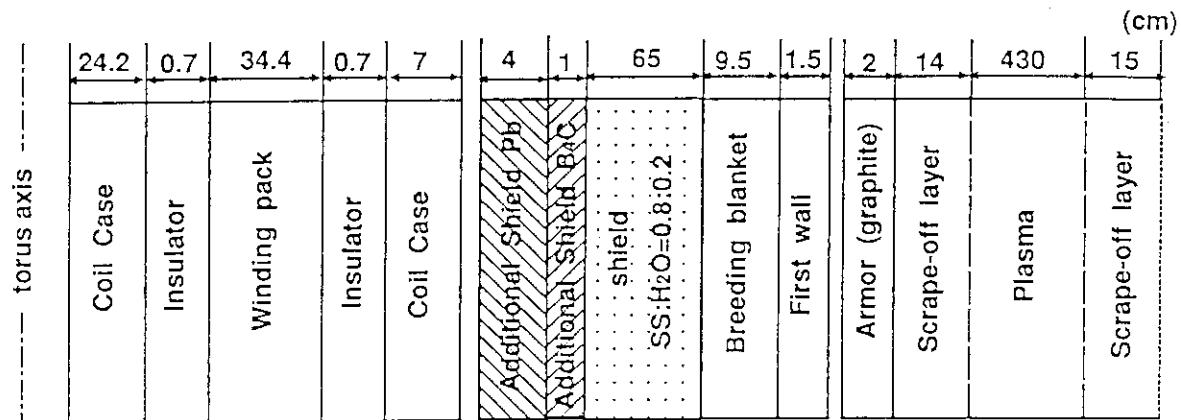


Fig. 3.14 Homogeneous model in additional of B_4C and Pb layers

4. 非均質領域の厚さ及び位置の効果

第3章においてSS/H₂O層の厚さ及び遮蔽体領域の厚さ、プランケット領域の厚さ、B₄C/Pb遮蔽体層の設置等が非均質効果に及ぼす影響を検討した。その結果を踏まえて、本章では、非均質な体系を均質モデルで近似して遮蔽設計する際に、局所的に非均質領域としたモデルでの超電導マグネットの核発熱率への影響について検討する。第3章で検討した簡単な体系の場合の様に全領域を非均質モデルとする事は計算時間が長くなり現実的には困難なので、局所的に非均質領域を採用したモデルを用いた場合の影響を把握しておくことは、将来、複雑な体系を所定の精度で遮蔽計算する場合において有用である。特に、2次元及び3次元モデルによって、遮蔽計算をする際には、本章で得られる知見は有効である。

4.1 非均質領域の厚さの効果

本節では、プランケット領域の厚さを29.5 cm、インボード遮蔽体の厚さを90 cmとし、インボート遮蔽体を局所的に非均質領域とした場合について、非均質領域の厚さと非均質効果の関係について検討する。局所的に非均質領域とする方法として、コイル側を局所的に非均質領域とする方法と、プランケット側を局所的に非均質領域とする方法の2通りを考える。すなわち、非均質モデルとして取り扱う領域の厚さを、コイル側から非均質領域を広げる場合とプランケット側から非均質領域を広げる場合について検討する。コイル側から非均質領域を広げる場合には、非均質領域におけるSS層の厚さが8 cm (H₂O層の厚さが2 cm; SS : H₂Oの構成比0.8 : 0.2)の場合とSS層の厚さが12 cm (H₂O層の厚さが3 cm)の場合について計算した。一方、プランケット側から非均質領域を広げる場合は、非均質領域におけるSS層の厚さが12 cm (H₂O層の厚さが3 cm)の場合について計算した。コイル側から非均質領域を広げる場合の計算モデルをFig. 4.1、プランケット側から非均質領域を広げる場合の計算モデルをFig. 4.2に示す。Fig. 4.1, Fig. 4.2共に、(a)が1次元均質モデルであり、(b), (c)が局所的に非均質な領域を設けたモデルである。またFig. 4.1, Fig. 4.2共に、(b), (c)はコイル(プランケット)側の遮蔽体表面からそれぞれ15 cm及び45 cmまでを非均質モデルとした。本章においては、非均質効果を2通りの評価方法により評価する。一つは全領域を均質にしたモデルに対する非均質効果、もう一つは全領域を非均質にしたモデルに対する非均質効果である。全領域を均質にしたモデルに対する非均質効果は、次式で定義する。

$$\zeta_{\text{HOMO}} = \frac{F_{\text{HOMO}} - F_{\text{LOCAL HETERO}}}{F_{\text{LOCAL HETERO}}}$$

F_{HOMO} : 全領域を均質にしたモデルによって得られた計算値

$F_{\text{LOCAL HETERO}}$: 局所的に非均質にしたモデルによって得られた計算値

一方全領域を非均質にしたモデルに対する非均質効果は、次式で定義する。

$$\zeta_{\text{HETERO}} = \frac{F_{\text{LOCAL HETERO}} - F_{\text{HETERO}}}{F_{\text{HETERO}}}$$

F_{HETERO} : 全領域を非均質にしたモデルによって得られた計算値

第2章でも述べた通り、非均質効果は全領域を非均質にしたモデルによって得られた計算値を基準値としており、全領域を非均質にしたモデルによって得られた計算値はより真値に近いものと考えられる。 ζ_{HETERO} は、局的に非均質モデルとした場合と全領域を非均質モデルとした場合との誤差を与える。全領域を均質モデルとして取り扱った場合と局的に非均質モデルとして取り扱った場合の比較においては、後者の方がより真値に近いものと考えられる。一方全領域を均質にしたモデルは計算上簡易なモデルであり、局的に非均質にした領域が厚くなるに従って真値には近くなるが計算に要する時間が増大する。 ζ_{HOMO} は、局的に非均質モデルとした場合と計算上簡易なモデルによる結果との誤差を与える。そこで ζ_{HETERO} , ζ_{HOMO} の2通りの計算方法により、局的に非均質にしたモデルによって得られた計算値に対して、真値に近い値との誤差と計算上簡易なモデルによる結果との誤差を評価した。

コイル側から非均質領域を広げた場合の非均質領域の厚さと非均質効果の関係を Fig. 4.3 ~ 4.6 に示す。Fig. 4.3, Fig. 4.4 は ζ_{HOMO} , Fig. 4.5, Fig. 4.6 は ζ_{HETERO} の結果である。Fig. 4.3, Fig. 4.5 は SS 層の厚さが 12 cm (H_2O 層の厚さが 3 cm) の場合の結果である。Fig. 4.4, Fig. 4.6 は SS 層の厚さが 8 cm (H_2O 層の厚さが 2 cm) の場合の結果である。いずれの場合も、横軸はインボード遮蔽体のコイル側の端面からの非均質領域の厚さを示す。●印はコイル容器における全核発熱率のピーク値に対する非均質効果、□印は巻線部における全核発熱率のピーク値に対する非均質効果を示す。

コイル側から 30 cm 以上の厚さを非均質にした場合、コイル容器における ζ_{HOMO} は、非均質領域を広げると共に増大し次第に飽和する傾向を示す。 ζ_{HETERO} は、非均質領域を広げると共に減少する。非均質モデルとして取り扱う領域がブランケット側に近づくにつれて、モデル（均質モデル、非均質モデル）の違いによる計算結果の差が小さくなる傾向が見られる。従って、局的に非均質な領域を設けて取り扱う場合、ブランケット側よりもコイル側に近い方が非均質領域としては効果的であり計算精度を高める事ができる。

コイル容器における全核発熱率のピーク値は、コイル側から 30 cm 以下の厚さを非均質にした場合、3.2 節で述べた遮蔽体領域の厚さを薄くした場合と同様の傾向がみられる。すなわちコイル側から 30 cm 以上の厚さを非均質にした場合とは逆に、全領域を均質にしたモデルは局的に非均質モデルと較べて核発熱率を過大評価する傾向にあり、 ζ_{HOMO} は正となる。その理由は以下の通りである。均質モデルと局的に非均質にしたモデルとの間で、局的に非均質にした領域が極端に薄い場合、3.2 節で述べた通り中性子スペクトルに大きな差が生じない。故に、遮蔽体領域において中性子反応がより効率よく起こり、ガンマ線が発生する均質モデルの方が核発熱率が高くなると考える。

コイル側から非均質領域を広げた場合の巻線部における非均質領域の厚さと非均質効果の関係は、コイル容器における非均質領域の厚さと非均質効果の関係と、同様な傾向がみられる。すな

わち ζ_{HOMO} は、非均質領域を広げると共に増大し、次第に飽和する傾向を示し、 ζ_{HETERO} は、非均質領域を広げると共に減少する。しかし非均質効果の値は多少異なり、非均質領域の厚さが 40 cm 以上の場合、巻線部における ζ_{HOMO} はコイル容器における ζ_{HOMO} と較べて、非均質領域における SS 層の厚さが 12 cm (H_2O 層の厚さが 3 cm) の場合 - 10 ~ - 14 %、非均質領域における SS 層の厚さが 8 cm (H_2O 層の厚さが 2 cm) の場合 - 4 ~ - 7 % 大きくなっている。また全領域を均質にしたモデルの場合の核発熱率が過大評価となる非均質領域の厚さが、コイル容器の場合と巻線部の場合で異なる。

プランケット側から広げた場合の非均質領域の厚さと非均質効果の関係に関し、 ζ_{HOMO} を Fig. 4.7、 ζ_{HETERO} を Fig. 4.8 に示す。いずれの場合も横軸はインボード遮蔽体におけるプランケット側から変化させた非均質領域の厚さを示す。●印はコイル容器における全核発熱率のピーク値に対する非均質効果、□印は巻線部における全核発熱率のピーク値に対する非均質効果を示す。

非均質領域の厚さが 60 cm 以上の場合のコイル容器における非均質効果を除き、 ζ_{HOMO} は、非均質領域を広げると増大し、広げるにつれてまたその増大率も増加する。 ζ_{HETERO} は、非均質領域を広げると減少し、広げるにつれてその減少率は増加する。増大率や減少率が増加する事からも、非均質モデルとして取り扱う領域がプランケット側に近づくにつれて、領域でのモデルの違いによる計算結果の差が小さくなる傾向が見られる。

4.2 非均質領域の位置の効果

前節では、非均質とする領域を遮蔽体の端面から厚さを変えていくことで、非均質領域の厚さ及び非均質領域の位置の効果について検討した。本節では、非均質領域の厚さを一定とし、インボード遮蔽体内における非均質領域の位置を変えることにより、非均質領域の位置のみの効果を更に詳細に調べる。ここではインボード遮蔽体の厚さを 90 cm、そのうち 75 cm を均質領域、15 cm を SS (6 cm) + H_2O (3 cm) + SS (6 cm) で構成される非均質領域とし、その非均質領域を、インボード遮蔽体 90 cm を 6 分割した各位置に移動させた。プランケット領域の厚さは 29.5 cm とした。本節で検討したモデルを Fig. 4.9 に示す。Fig. 4.1, Fig. 4.2 同様、(a) が均質モデルであり、(b), (c) が局所的に非均質な領域を設けたモデルである。Fig. 4.9 (b) はコイル側から 15 cm ~ 30 cm の間を、(c) は 45 cm ~ 60 cm の間を非均質領域にした場合である。非均質領域の位置を変えた場合の、非均質効果との関係を Fig. 4.10, Fig. 4.11 に示す。Fig. 4.10, Fig. 4.11 が ζ_{HETERO} の結果である。横軸は非均質領域の位置を示しており、インボード遮蔽体のコイル側の端と、非均質領域のプランケット側の端との距離である。●印はコイル容器における全核発熱率のピーク値に対する非均質効果、□印が巻線部における全核発熱率のピーク値に対する非均質効果を示す。コイル容器における非均質効果の変化と巻線部における非均質効果の変化は共に、コイル側から 15 cm を非均質とした場合を除き、非均質領域をコイル容器から遠ざけるに従い、 ζ_{HOMO} は減少し、 ζ_{HETERO} は増大する。この事からも前節で述べた様に、均質モデルとして取り扱う領域がプランケット側に近づくにつれて、モデルの違いによる計算結果の差が小さくなる事が判る。

4.3 まとめ

遮蔽体領域の厚さ及びブランケット領域の厚さ、遮蔽体領域における SS/H₂O の構成比、非均質領域における SS/H₂O の各層の厚さをそれぞれ一定とし、非均質領域の厚さや位置を変えた場合の非均質効果から、ブランケットに近い遮蔽体領域を非均質モデルとして取り扱う場合の方が、コイルに近い遮蔽体領域に較べて、モデル（均質モデル、非均質モデル）の違いによる計算結果の差が小さくなる傾向が見られる。従って、局所的に非均質な領域を設けて取り扱う場合、ブランケット側よりもコイル側に近い方が効果的であり計算精度を高められる事が判った。また遮蔽体領域の厚さが 90 cm の場合、コイル容器においてはコイル側から 30 cm 以下を非均質とした場合、巻線部においてはコイル側から 10 cm 以下を非均質とした場合、全領域を均質にしたモデルは局所的に非均質にしたモデルに較べて核発熱率を過大評価する傾向にある。

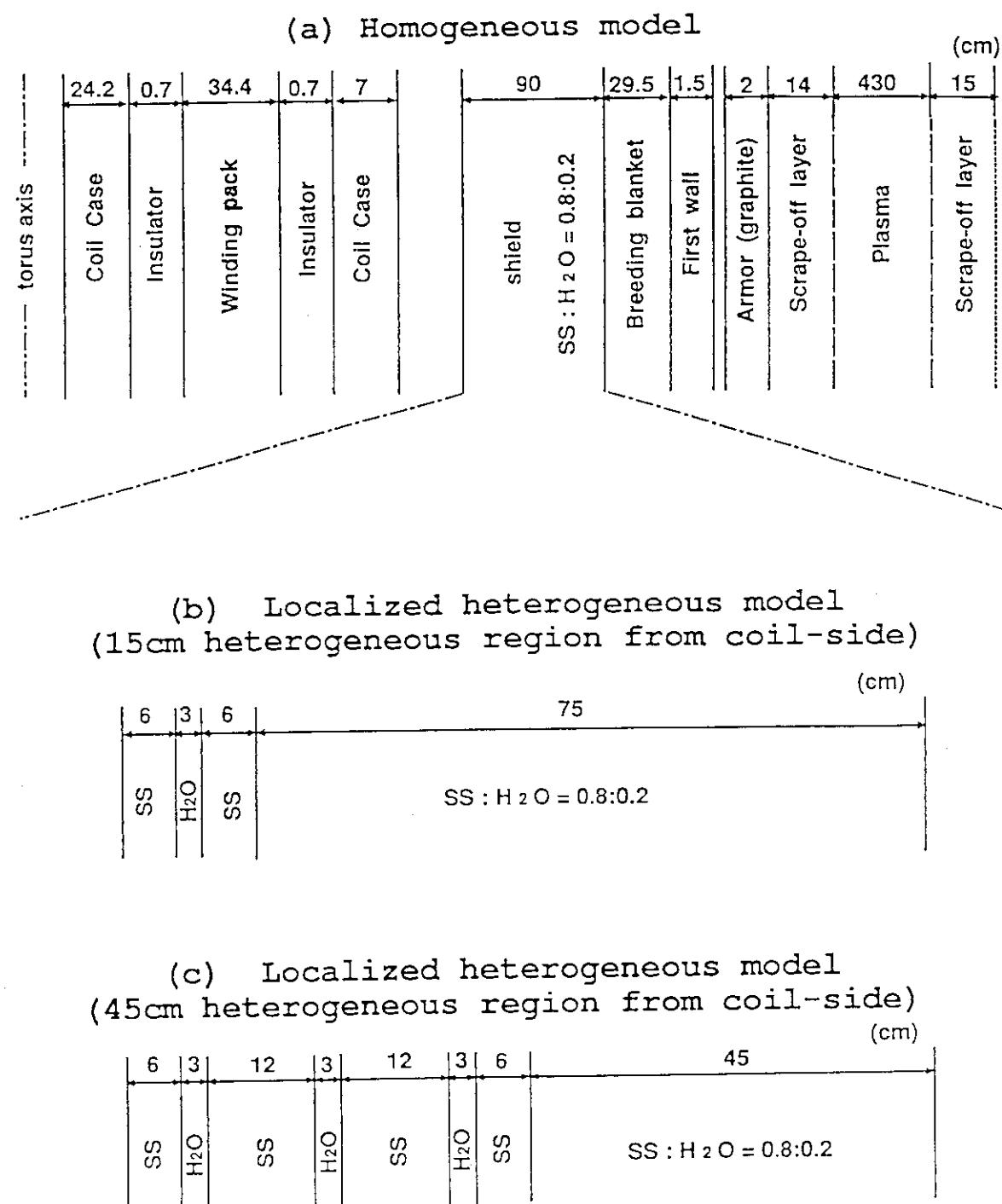


Fig. 4.1 Calculation models with various heterogeneous region thicknesses from coil-side

(a) Homogeneous model

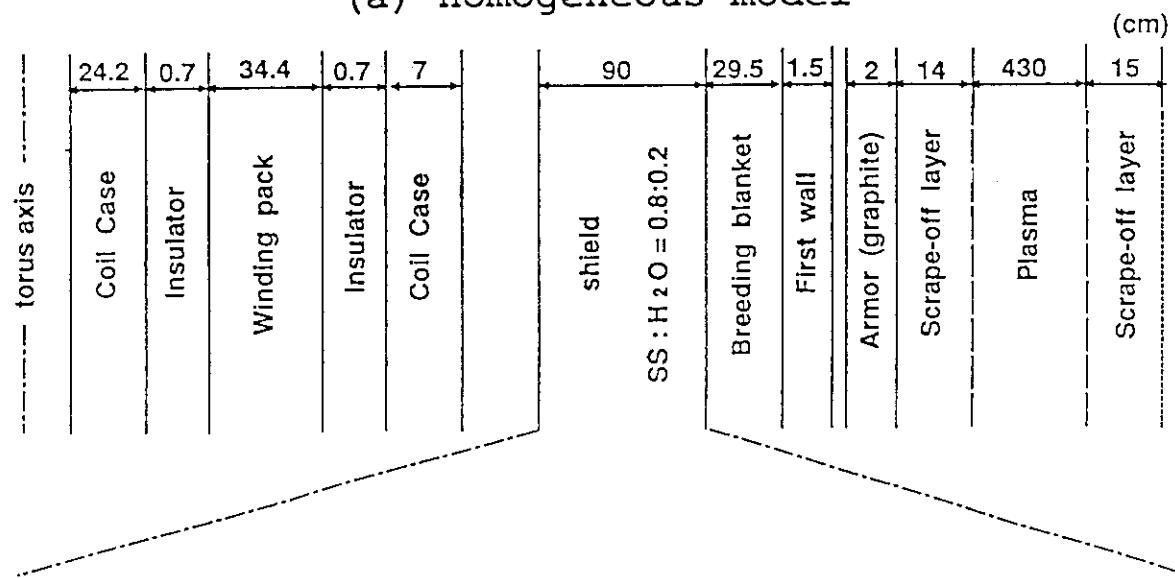
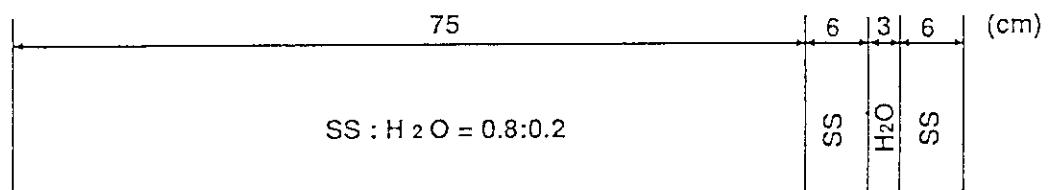
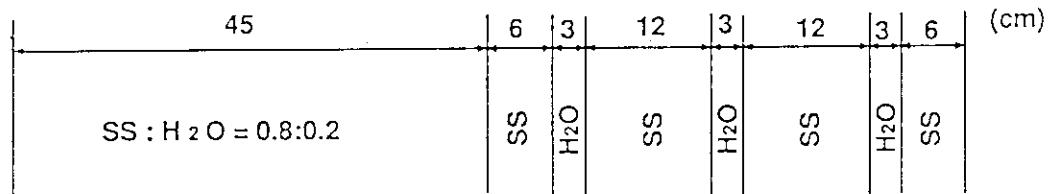
(b) Localized heterogeneous model
(15cm heterogeneous region from blanket-side)(c) Localized heterogeneous model
(45cm heterogeneous region from blanket-side)

Fig. 4.2 Calculation models with various heterogeneous region thicknesses from blanket-side

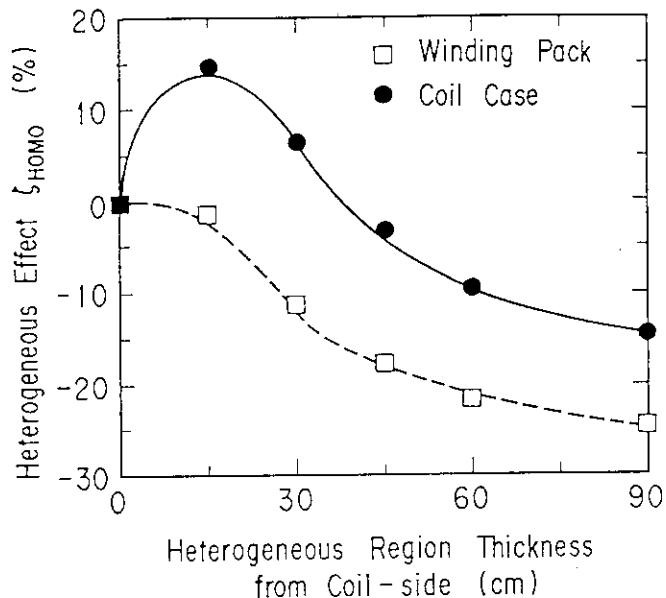


Fig. 4.3 Heterogeneous effect ξ_{HOMO} on peak nuclear heating rate in the coil case and the winding pack of superconducting magnets as a function of heterogeneous region thickness (SS layer 12cm, H_2O layer 3cm)

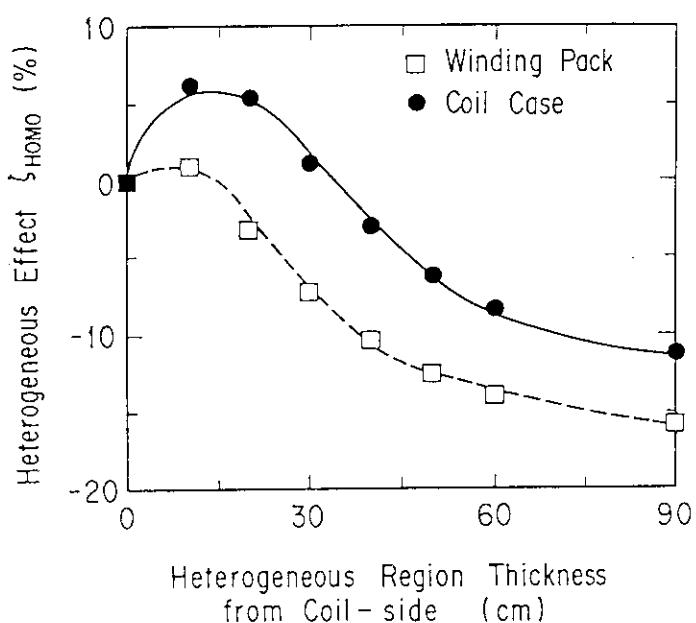


Fig. 4.4 Heterogeneous effect ξ_{HOMO} on peak nuclear heating rate in the coil case and the winding pack of superconducting magnets as a function of heterogeneous region thickness (SS layer 8cm, H_2O layer 2cm)

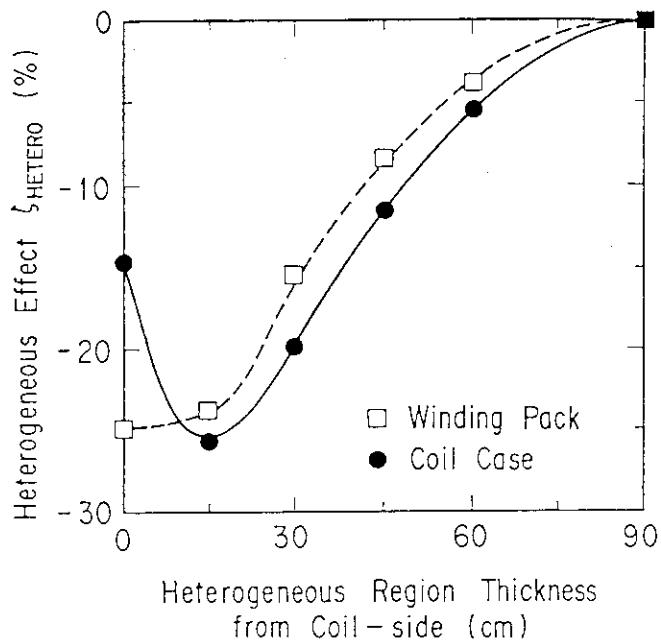


Fig. 4.5 Heterogeneous effect ζ_{HETERO} on peak nuclear heating rate in the coil case and the winding pack of superconducting magnets as a function of heterogeneous region thickness (SS layer 12cm, H_2O layer 3cm)

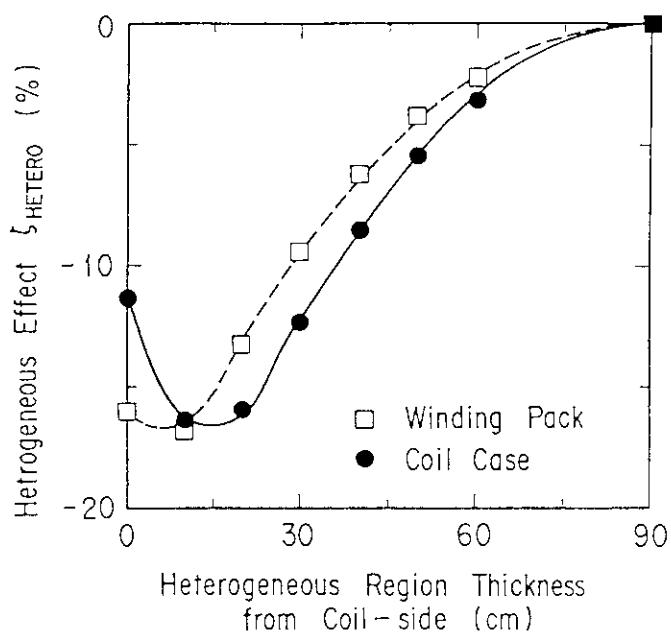


Fig. 4.6 Heterogeneous effect ζ_{HETERO} on peak nuclear heating rate in the coil case and the winding pack of superconducting magnets as a function of heterogeneous region thickness (SS layer 8cm, H_2O layer 2cm)

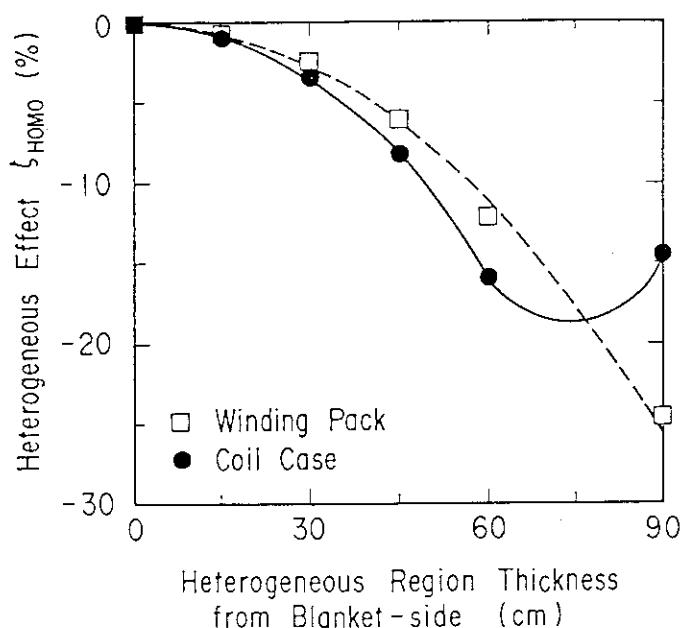


Fig. 4.7 Heterogeneous effect ξ_{HOMO} on peak nuclear heating rate in the coil case and the winding pack of superconducting magnets as a function of heterogeneous region thickness (SS layer 12cm, H_2O layer 3cm)

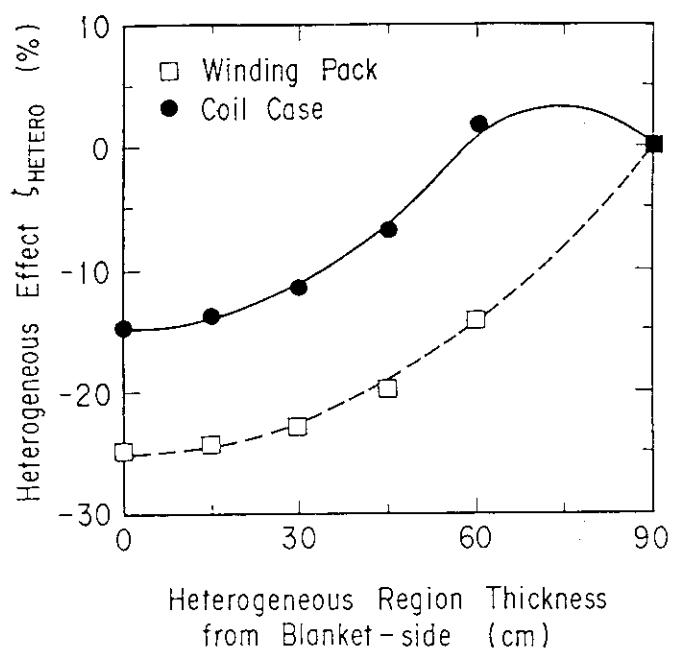


Fig. 4.8 Heterogeneous effect ξ_{HETERO} on peak nuclear heating rate in the coil case and the winding pack of superconducting magnets as a function of heterogeneous region thickness (SS layer 12cm, H_2O layer 3cm)

(a) Homogeneous model

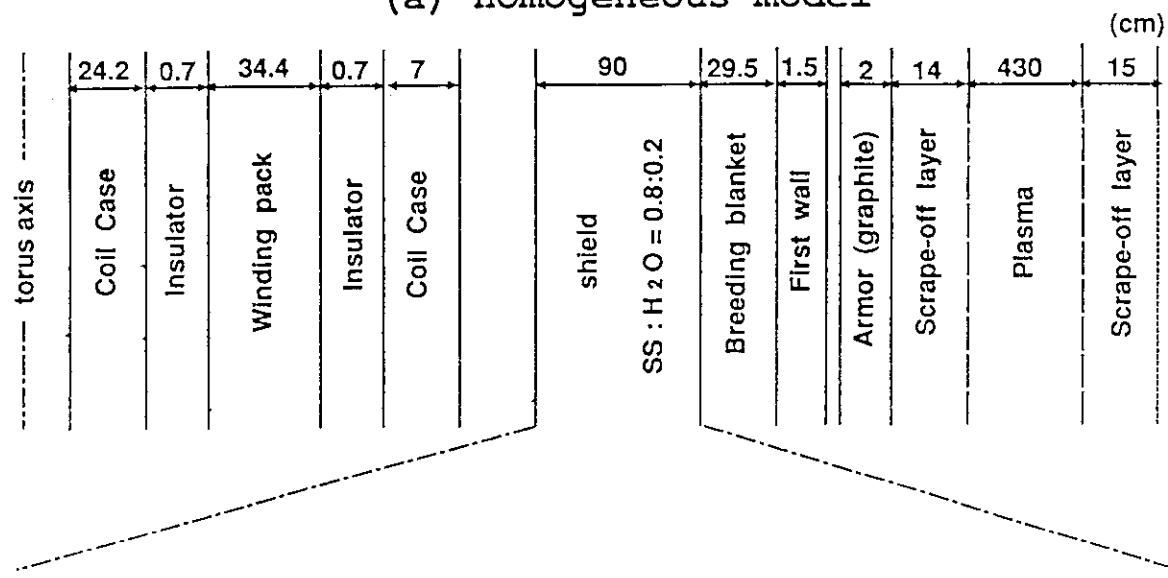
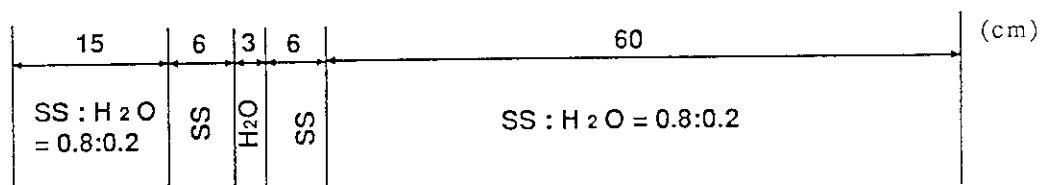
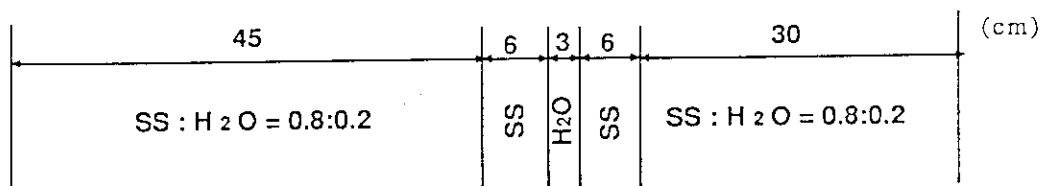
(b) Localized heterogeneous model
(Heterogeneous region: 15-30cm from coil-side)(c) Localized heterogeneous model
(Heterogeneous region: 45-60cm from coil-side)

Fig. 4.9 Calculation models with various heterogeneous region position

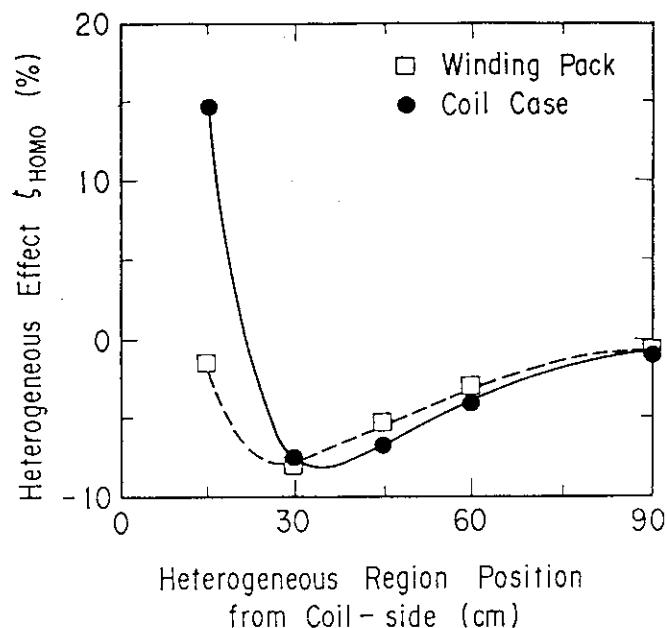


Fig. 4.10 Heterogeneous effect ξ_{HOMO} on peak nuclear heating rate in the coil case and the winding pack of superconducting magnets as a function of heterogeneous region position (SS layer 12cm, H_2O layer 3cm)

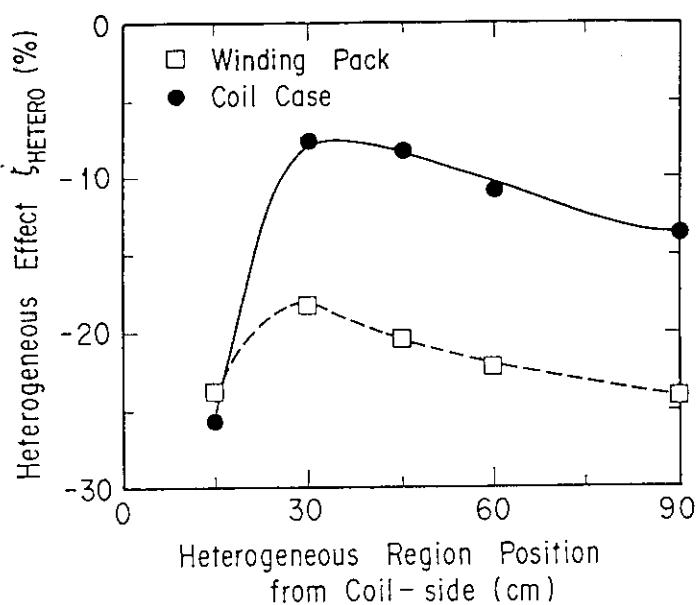


Fig. 4.11 Heterogeneous effect ξ_{HETERO} on peak nuclear heating rate in the coil case and the winding pack of superconducting magnets as a function of heterogeneous region position (SS layer 12cm, H_2O layer 3cm)

5. ITER の内側遮蔽体における非均質及びメッシュ効果

第3章、第4章において遮蔽体に対する一般的な非均質効果を検討した。本章ではこれらの結果を踏まえ、国際熱核融合実験炉（ITER）の概念設計におけるインボード遮蔽構造での非均質効果について検討する。また非均質効果に及ぼすメッシュ分割数の影響も計算精度を把握するという観点から重用であり、非均質効果と併せて検討する。

5.1 非均質効果

ITER 概念設計において検討されたインボード遮蔽体に対する赤道面の径方向 1 次元モデルを Fig. 5.1 に示す。Fig. 5.1 の (b) は実設計を反映した非均質モデル、(c) は均質モデルである。中性子束、及びガンマ線束の分布を均質モデルと非均質モデルについて、それぞれ Fig. 5.2、Fig. 5.3 に示す。横軸はトーラス中心からの距離を示し、 $R = 385 \sim 815$ cm の領域がプラズマ、 $R = 287 \sim 357$ cm の領域がインボード遮蔽体領域である。○印は 14 MeV の中性子束、△印は 0.1 MeV 以上の中性子束、□印は全中性子束、×印はガンマ線束を示す。核発熱分布を均質モデル、非均質モデルについてそれぞれ Fig. 5.4、Fig. 5.5 に示す。またインボードの超電導トロイダルコイルの容器及び巻線部における、中性子束と核発熱率のピーク値と積分値に対する非均質効果を Table. 5.1 に示す。

ITER 概念設計において検討された構造に対する非均質効果は、第3章や第4章で論じた非均質効果と較べて大きい値となっている。3.1章で述べた様に、 H_2O 層や SS 層が厚くなるに従い非均質効果が大きくなれる為、トーラス軸からの距離 $R = 325.9 \sim 340.3$ cm の領域に存在する厚さ 14.4 cm の SS 層が、非均質効果を大きくしていると考えられる。そこで、厚さ 14.4 cm の SS 層を Fig. 5.6、Fig. 5.7 に示すモデルに変えた場合の非均質効果を調べた。Fig. 5.6 のモデルは厚さ 1 cm の H_2O 層を 1 層、Fig. 5.7 のモデルは厚さ 1 cm の H_2O 層を 2 層、それぞれ厚さ 14.4 cm の SS 層の中に挿入したものである。

Fig. 5.6、Fig. 5.7 のモデルの場合の非均質効果をそれぞれ Table. 5.2、Table. 5.3 に示す。Table. 5.2、Table. 5.3 から、1 層あたりの SS の厚さを薄くすると非均質効果は小さくなり、第3章で論じた非均質効果と同程度になる。すなわち、ITER の概念設計において検討されたモデルでは、トーラス軸からの距離 $R = 325.9$ cm ~ 340.3 cm の領域に存在する厚さ 14.4 cm の SS 層により非均質効果が大きくなっていることが判る。

しかし Fig. 3.8 に示したコイル容器での全核発熱率のピーク値に対する SS 層の厚さと非均質効果の関係からは、SS 層の厚さが 15 cm の場合でも非均質効果は -10 % 程度である事が予想され、Table. 5.1 に示す非均質効果の 1/3 程度である。第3章、第4章で検討した非均質モデルは、等しい厚さの SS 及び H_2O 層が規則的に交互に配置されているモデルであるのに対して、Fig. 5.1 は、異なる厚さの SS 及び H_2O 層が不均一に配置されている構造であって、これが両者の差の原因と考えられる。今後は、不均一に SS 層と H_2O 層が配置された構造に対する非均

質効果の検討も行う必要がある。

第4章において局所的に非均質なモデルとした場合の非均質効果を議論したが、ITERの構造に対しても局所的に非均質とした場合の効果を調べた。すなわち、Fig.5.1の均質モデルにおいて、トーラス軸から距離 $R = 325.9\text{ cm} \sim 340.3\text{ cm}$ の領域のみ実構造を反映させ非均質領域（厚さ 14.4 cm のSS層）とし、その他の領域を均質領域としたモデルを考えた。このモデルをFig.5.8に、また本モデルによる非均質効果をTable.5.4に示す。Table.5.1とTable.5.4を比較すると、厚さ 14.4 cm のSS層のみを非均質モデルとする事により、全領域を均質としたモデルに比べ、 -30% 程度から -13% 程度にまでに非均質効果が減少する事が分かる。以上より、3.1で検討したこととも考え合わせ、SSあるいはH₂Oの層が中性子の平均自由行程よりも厚くなる場合には、その領域（層）のみを非均質として取り扱うことで、計算精度の向上を達成できる。

5.2 メッシュ効果

本報告におけるこれまでの検討では均質モデルと非均質モデルを比較する際、メッシュ分割の影響を避ける為同じメッシュ分割とした。しかし、遮蔽設計において均質モデルを採用する利点の一つは、非均質モデルに較べてメッシュ分割数を削減でき、計算が簡便になる事である。そこで、均質モデルの妥当性の検討に際しては、均質モデルと非均質モデルでそれぞれのモデルに適したメッシュ分割数（非均質モデルの方が細かく領域分けしているので、メッシュ分割数は多くなる。）とする事が有意義である。

本節ではFig.5.1に示した均質モデルのインボード遮蔽体（ $R=287\text{ cm} \sim 357\text{ cm}$ ）のメッシュ分割数を変えた場合のコイル容器での核発熱率のピーク値に対する影響を検討する事とし、メッシュ間隔は中性子の平均自由行程以下とする。核発熱率のピーク値とメッシュ分割数との関係をFig.5.9に示す。横軸はメッシュ分割数の二乗の逆数及びメッシュ分割数を示す。■印は中性子による核発熱率、○印はガンマ線による核発熱率、●印は全核発熱率を示す。それぞれの核発熱率につき、メッシュ分割数が無限大の場合の漸近値、すなわち横軸（下）の値が無限小の場合の漸近値をFig.5.9から外挿して算出する。これによりメッシュ効果を、次式で定義する。

$$\text{メッシュ効果} = \frac{\text{有限なメッシュ分割数の場合の核発熱率} - \text{核発熱率の漸近値}}{\text{核発熱率の漸近値}}$$

メッシュ効果とメッシュ分割数との関係をFig.5.10に示す。

Fig.5.10からメッシュ分割を中性子の平均自由行程以内にすれば、メッシュ分割数が無限大の場合の値に対する有限なメッシュ分割による誤差は最大でも3%以下であり、メッシュ分割による誤差は非均質効果に較べて十分小さく、非均質効果を考慮する上で問題ない事がわかる。

5.3 非均質効果の安全ファクターへの影響

ITERの遮蔽設計では、コイルにおける核特性（発熱、中性子束、線量率等）のピーク値にして計算結果に対する安全ファクター3、積分値に関して計算結果に対する安全ファクター2を

採用している。安全ファクターの内容としては、積分値、ピーク値共にモデル化による誤差を1.3としている。今回得られた結果では、ITERの概念設計において検討されたインボード遮蔽体に対する非均質効果は、コイル容器、巻線部共に30%以下であり、ITERで採用しているモデル化による誤差の範囲内にある。しかし、モデル化による誤差は、非均質効果以外にも、1次元モデルを使用する為に生じる誤差など様々な要因が考えられる。今後、その他の要因による誤差を評価し、今回得られた結果をも踏まえて、遮蔽設計におけるモデル化による誤差、並びに遮蔽設計全体の安全ファクターを検討していく必要がある。また、安全ファクターの検討と共に、設計の進捗状況（精度の高い遮蔽計算の要求等）にも合わせ、遮蔽設計の際、非均質として考慮すべき領域についても検討する必要がある。

5.4 まとめ

- (1) ITERの概念設計において検討されたインボード遮蔽体の非均質効果は、コイル容器における核発熱率のピーク値に対して-27%，巻線部で-29%である。
- (2) 上述の非均質効果の値は、第3章、第4章で検討したモデルの非均質効果と較べて大きい。その理由の一つとして、厚さ14.4cmのSS層による効果が大きい。厚さ14.4cmのSS層のみを非均質とし、その他の領域を均質としたモデルの非均質効果は、コイル容器における核発熱率のピーク値で-8.2%，巻線部で-13%となり、非均質効果は全領域を均質としたモデルの1/2～1/3に減少し、第3章、第4章で検討した非均質効果と同程度になる。
- (3) ITERで検討された構造の非均質効果の値が大きい理由の一つとして、異なる厚さのSS及びH₂O層が不均一に配置されているモデルであるという点が考えられる。今後、この点に関する検討を行っていく必要がある。
- (4) メッシュ分割による誤差は、メッシュ分割を中性子の平均自由行程以内にすれば、最大でも3%以下であり、非均質効果に較べて十分小さい事が分かった。
- (5) ITERの遮蔽設計ではモデル化による誤差に対する安全ファクターを1.3としており、ITERにおいて検討されたインボード遮蔽体の構造に対する非均質効果は、許容される誤差の範囲内にあることが判った。しかしながらモデル化による誤差には他の要因も考えられるで、今後これらを含めた安全ファクターの定量的な検討が必要である。

Table 5.1 Heterogeneous Effect in ITER Inboard Region

	Peak Value		Total Value	
	Coil Case	Winding Pack	Coil Case	Winding Pack
14MeV Neutron flux	-0.17%	-0.12%	-0.091%	-0.031%
Nuclear heating rate				
Neutron	-13%	-16%	-13%	-14%
Gamma Ray	-28%	-30%	-28%	-28%
Total	-29%	-29%	-27%	-27%

Table 5.2 Heterogeneous Effect in Fig. 5.6 Model

	Peak Value		Total Value	
	Coil Case	Winding Pack	Coil Case	Winding Pack
14MeV Neutron flux	-0.33%	-0.27%	-0.24%	-0.18%
Nuclear heating rate				
Neutron	-8.5%	-11%	-9.0%	-9.8%
Gamma Ray	-19%	-21%	-19%	-20%
Total	-18%	-20%	-19%	-20%

Table 5.3 Heterogeneous Effect in Fig. 5.7 Model

	Peak Value		Total Value	
	Coil Case	Winding Pack	Coil Case	Winding Pack
14MeV Neutron flux	-0.35%	-0.30%	-0.27%	-0.21%
Nuclear heating rate				
Neutron	-5.9%	-7.7%	-6.2%	-5.9%
Gamma Ray	-14%	-15%	-14%	-15%
Total	-13%	-15%	-13%	-14%

Table 5.4 Heterogeneous Effect in Fig. 5.8 Model

	Peak Value		Total Value	
	Coil Case	Winding Pack	Coil Case	Winding Pack
14MeV Neutron flux	-0.25%	-0.24%	-0.21%	-0.19%
Nuclear heating rate				
Neutron	-5.8%	-6.8%	-6.0%	-5.9%
Gamma Ray	-8.5%	-14%	-11%	-13%
Total	-8.2%	-13%	-11%	-13%

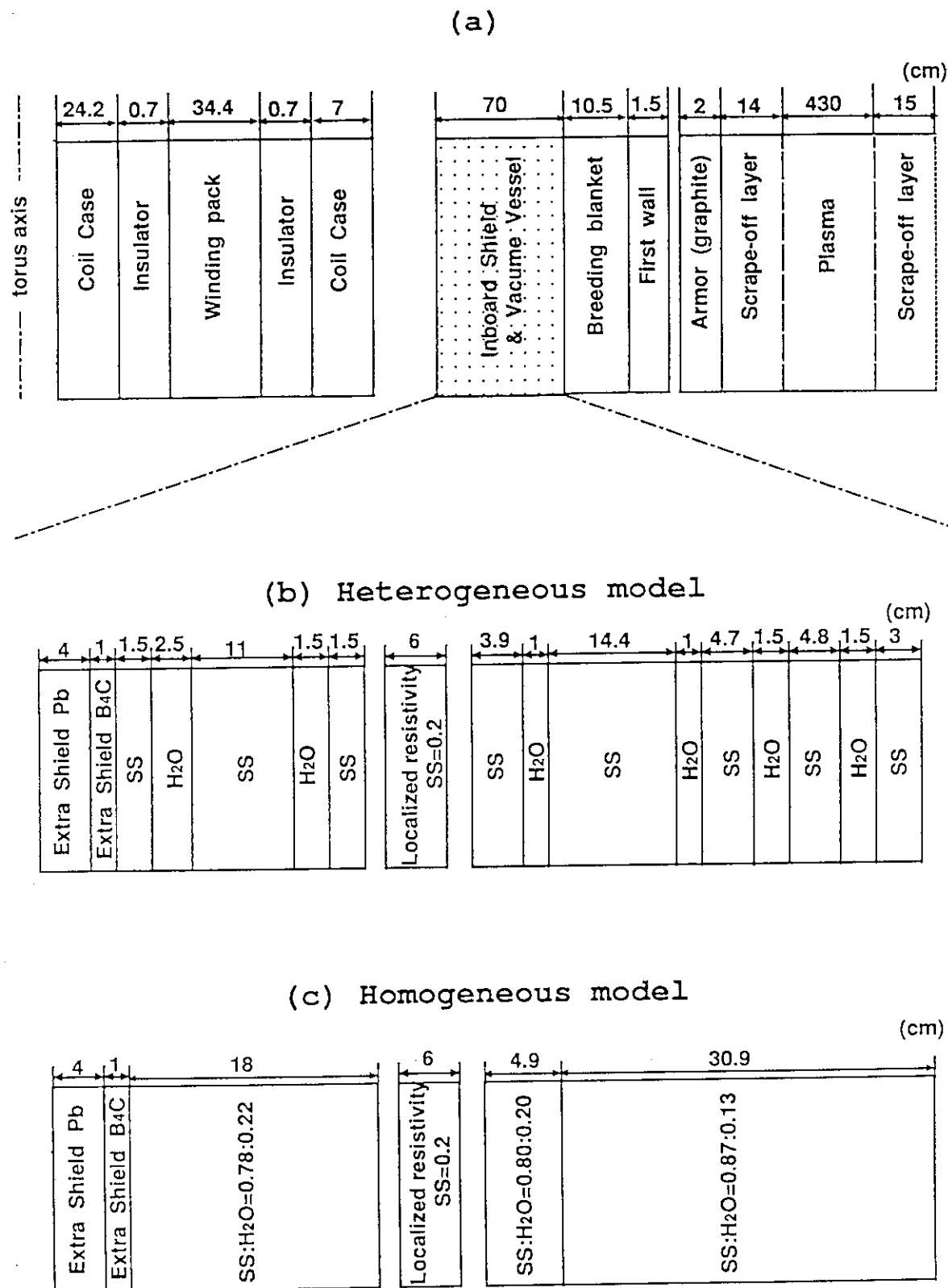


Fig. 5.1 ITER inboard model

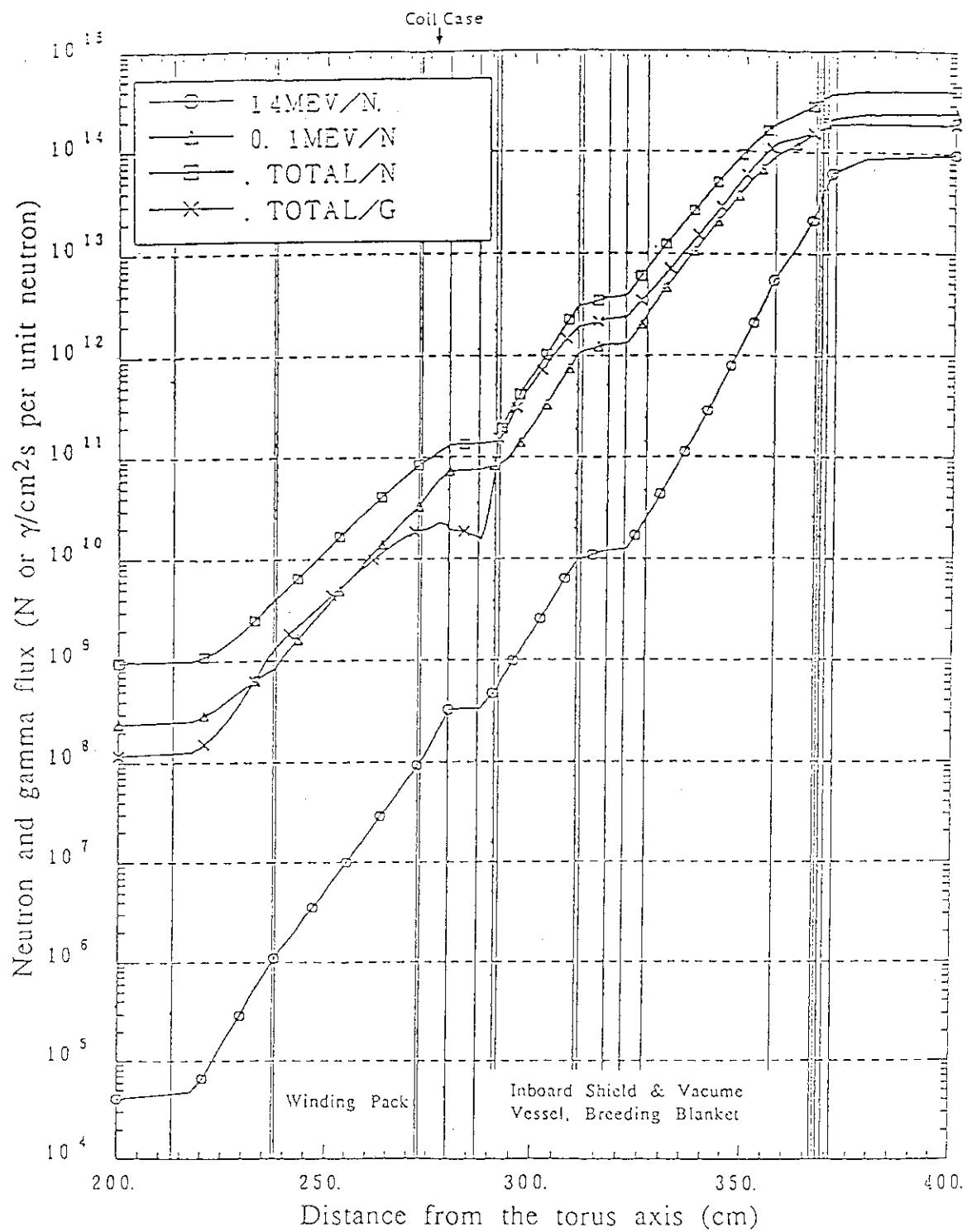


Fig. 5.2 Distribution of neutron and total gamma ray fluxes in ITER inboard region with homogeneous model (Neutron first wall loading=1MW/m²)

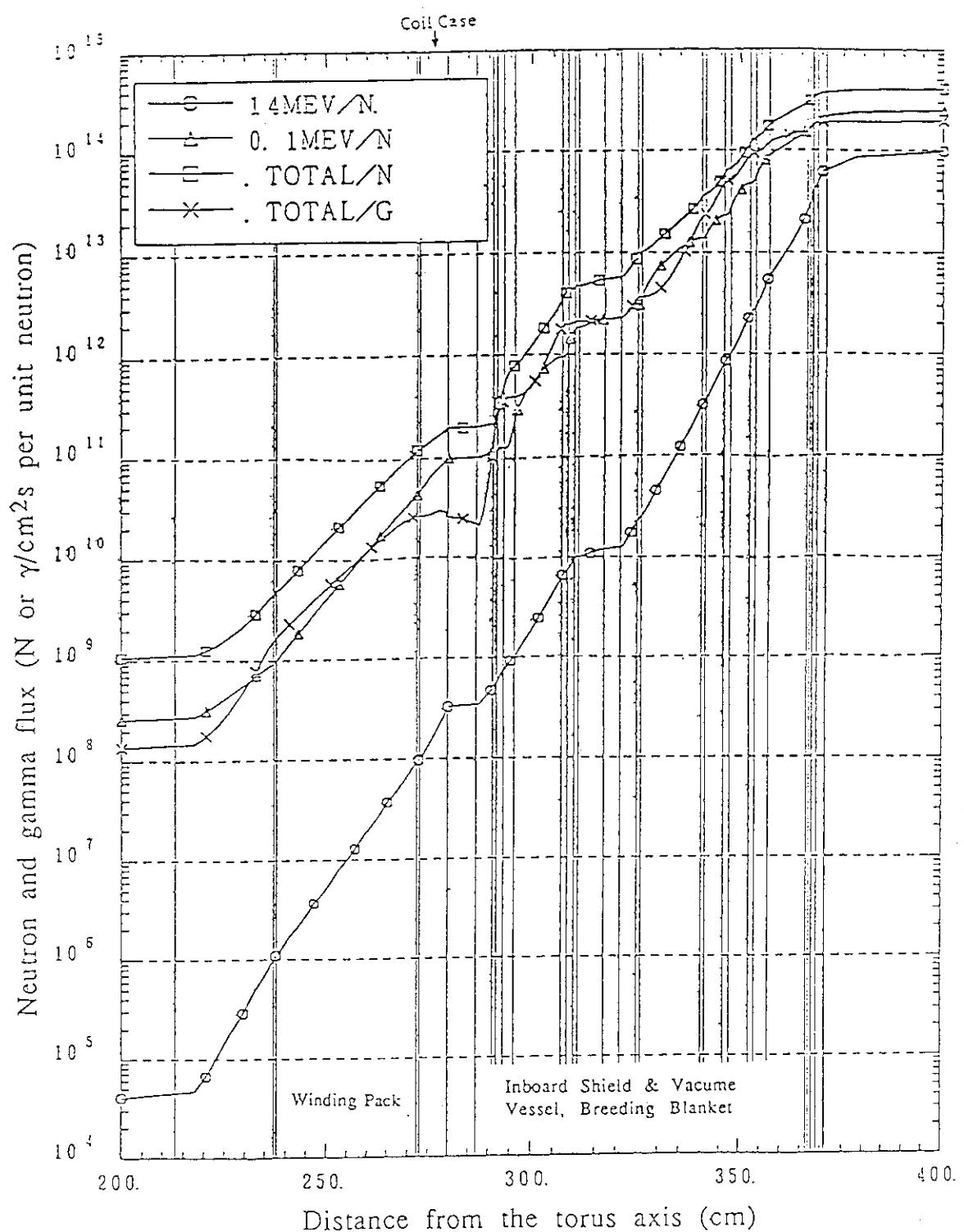


Fig. 5.3 Distribution of neutron and total gamma ray fluxes in ITER inboard region with heterogeneous model (Neutron first wall loading=1MW/m²)

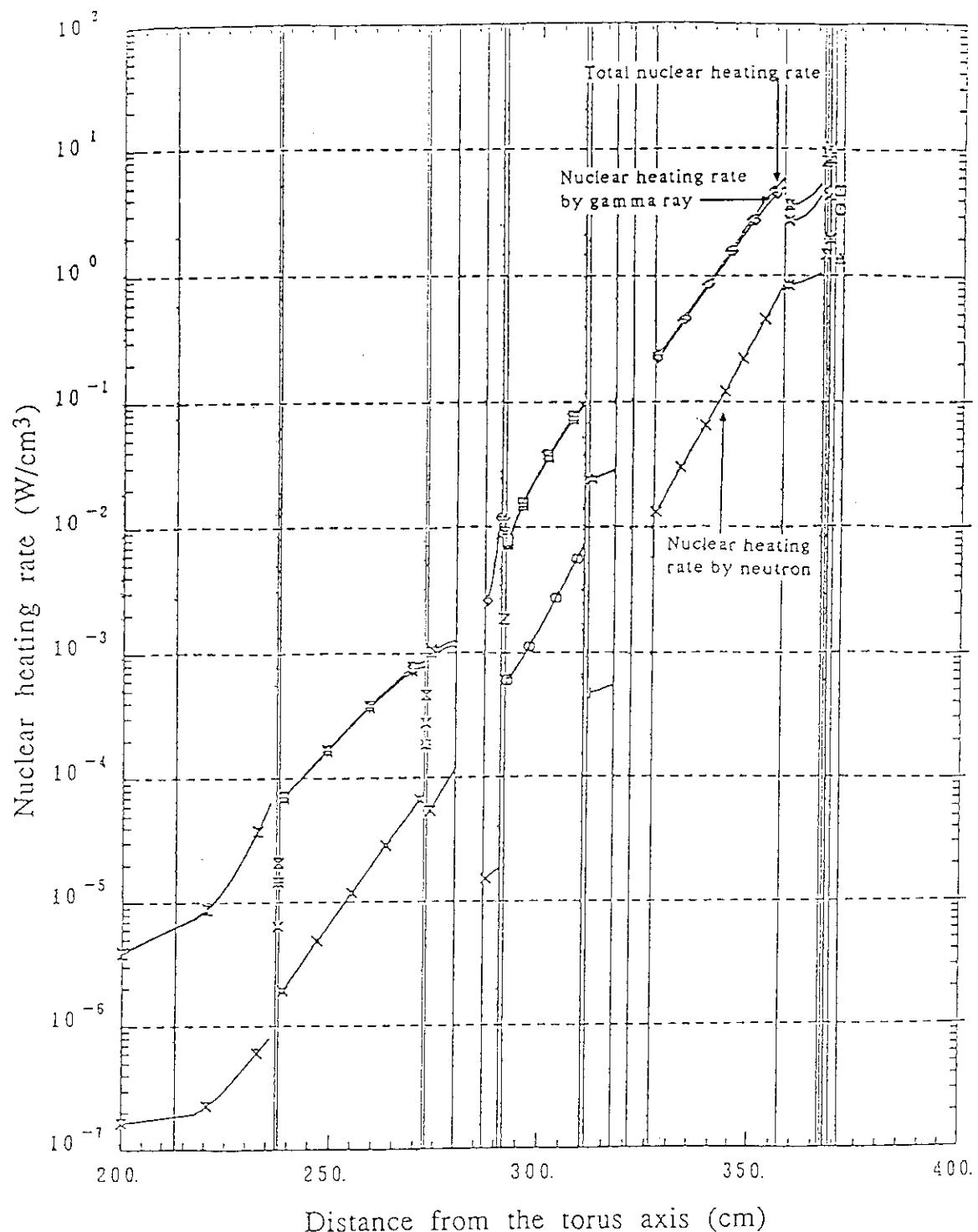


Fig. 5.4 Distribution of nuclear heating rate in ITER inboard region with homogeneous model (Neutron first wall loading=1MW/m²)

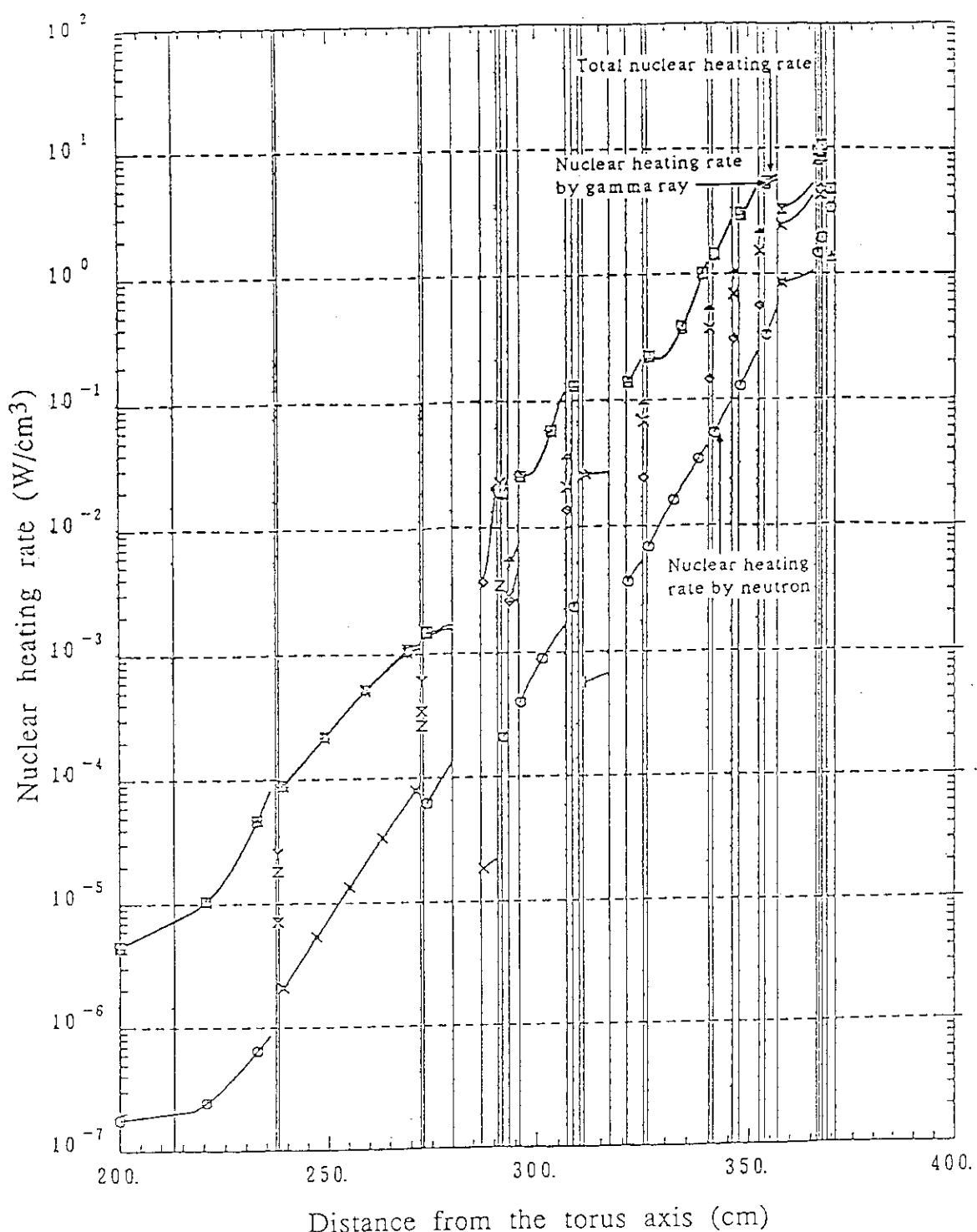
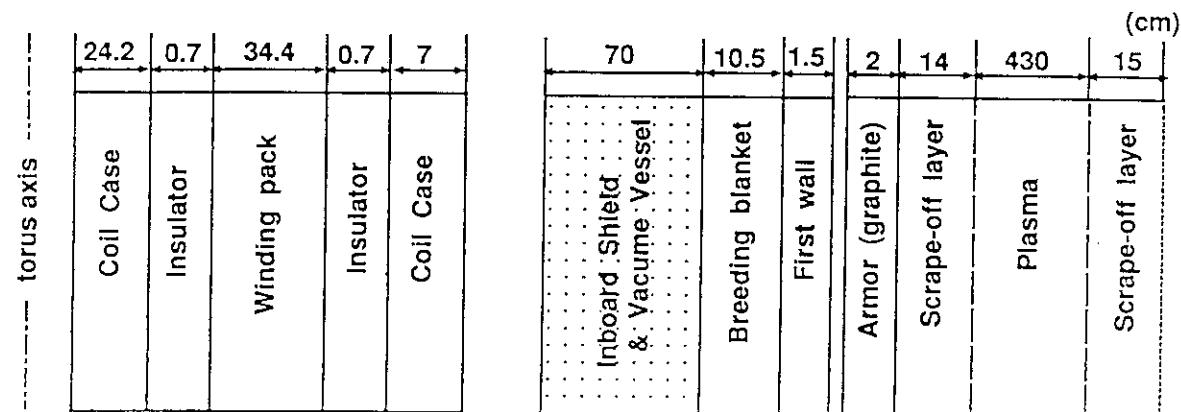
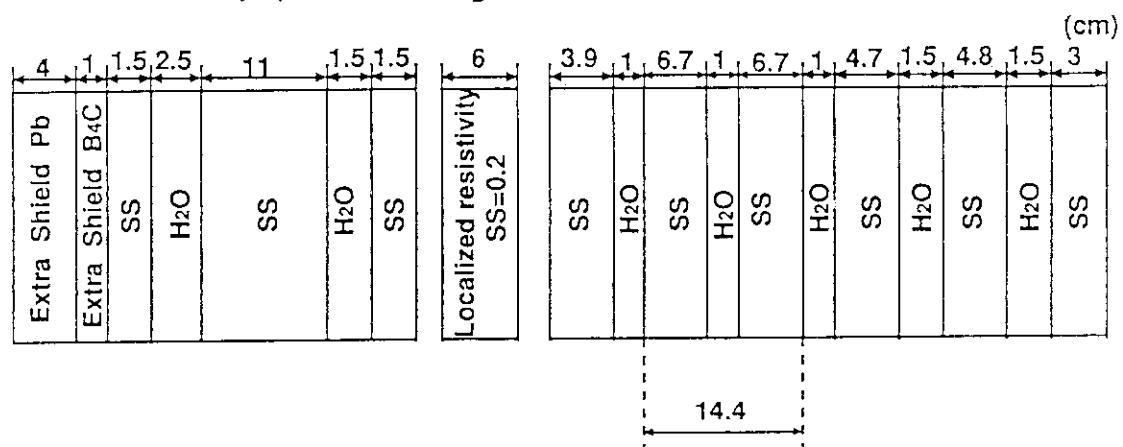


Fig. 5.5 Distribution of nuclear heating rate in ITER inboard region with heterogeneous model (Neutron first wall loading=1MW/m²)

(a)



(b) Heterogeneous model



(c) Homogeneous model

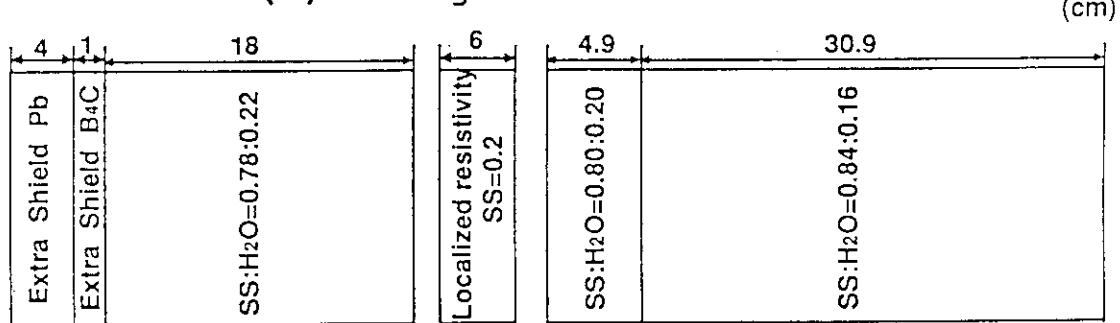


Fig. 5.6 ITER inboard with modified heterogeneous shield model-1

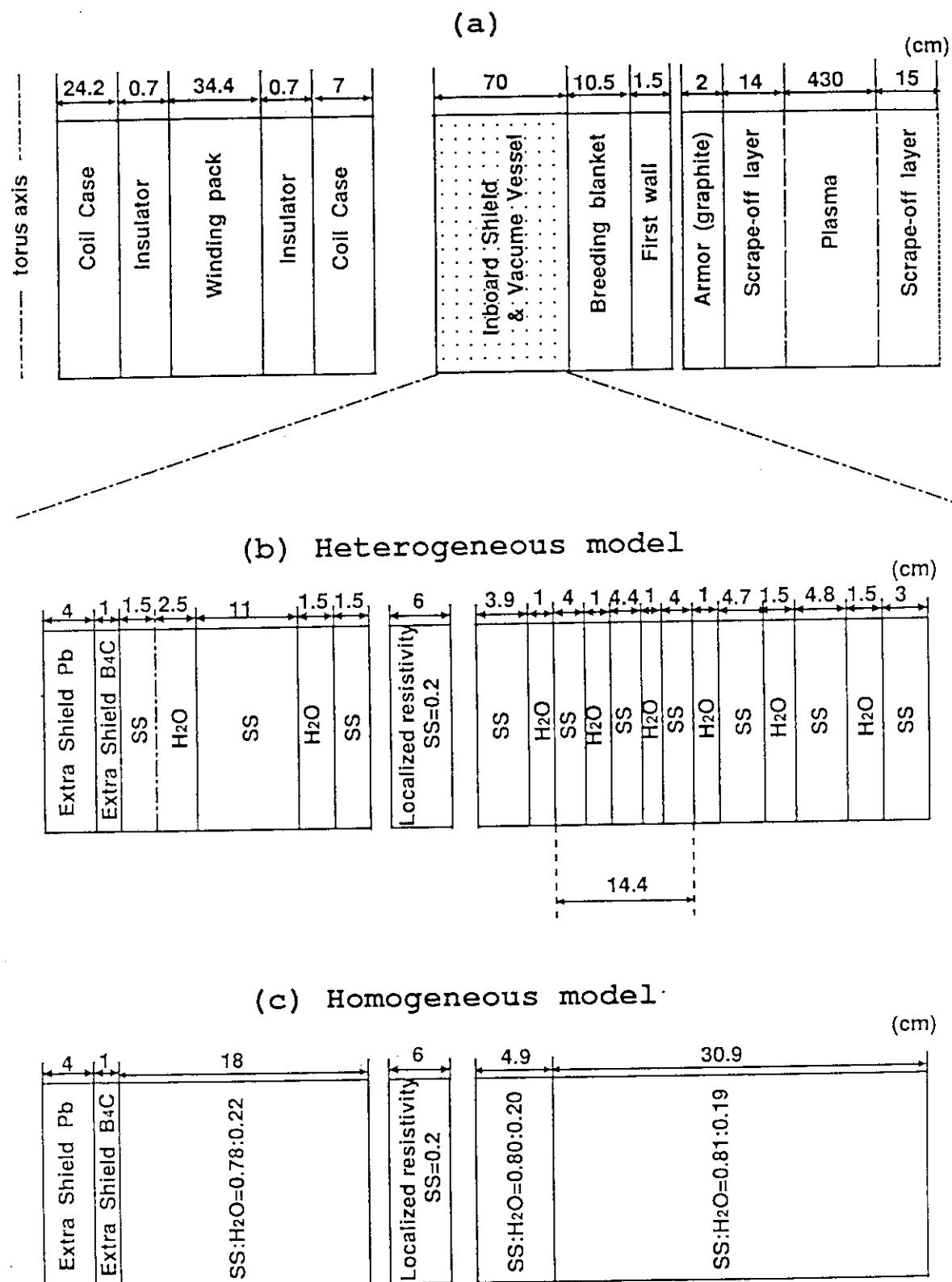


Fig. 5.7 ITER inboard with modified heterogeneous shield model-2

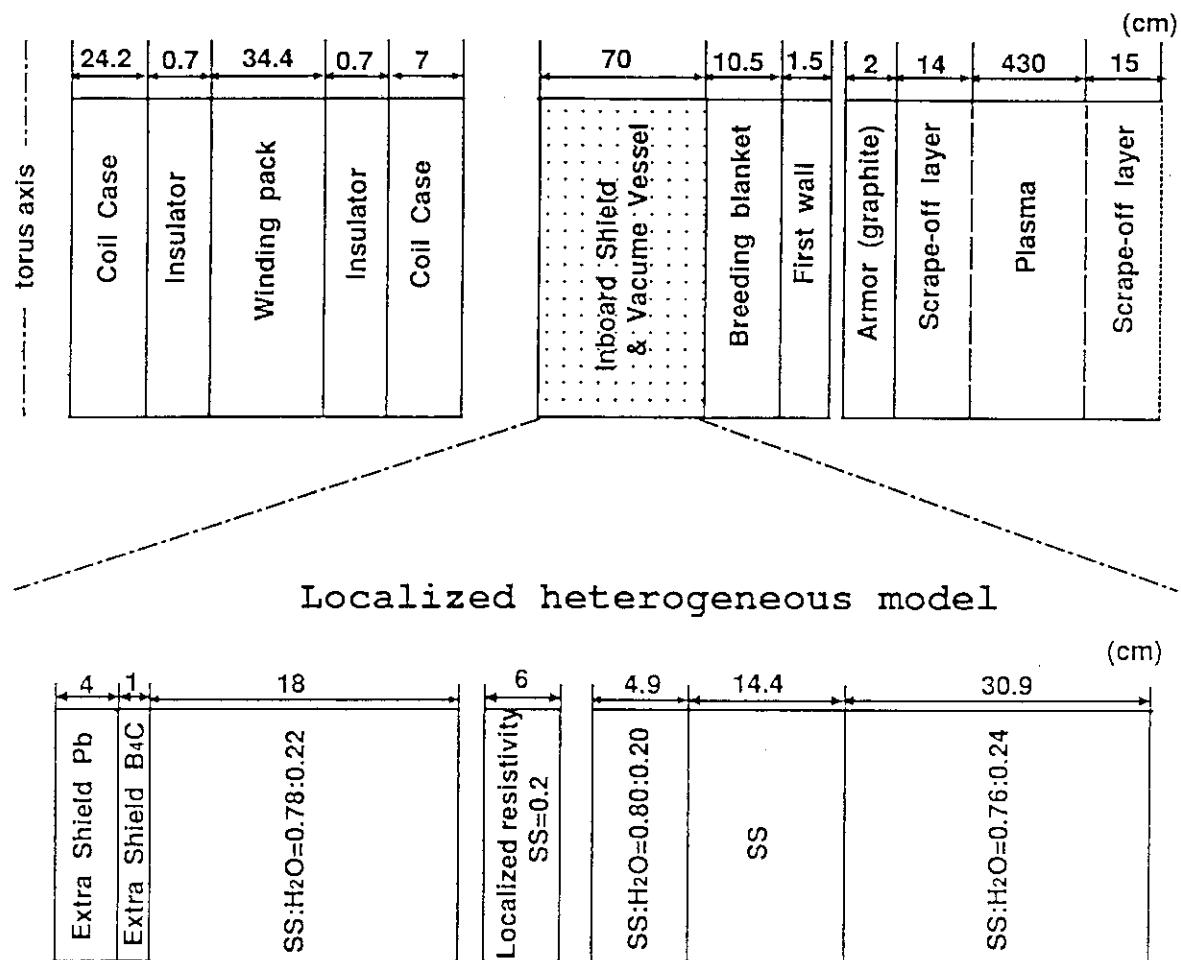


Fig. 5.8 ITER inboard model

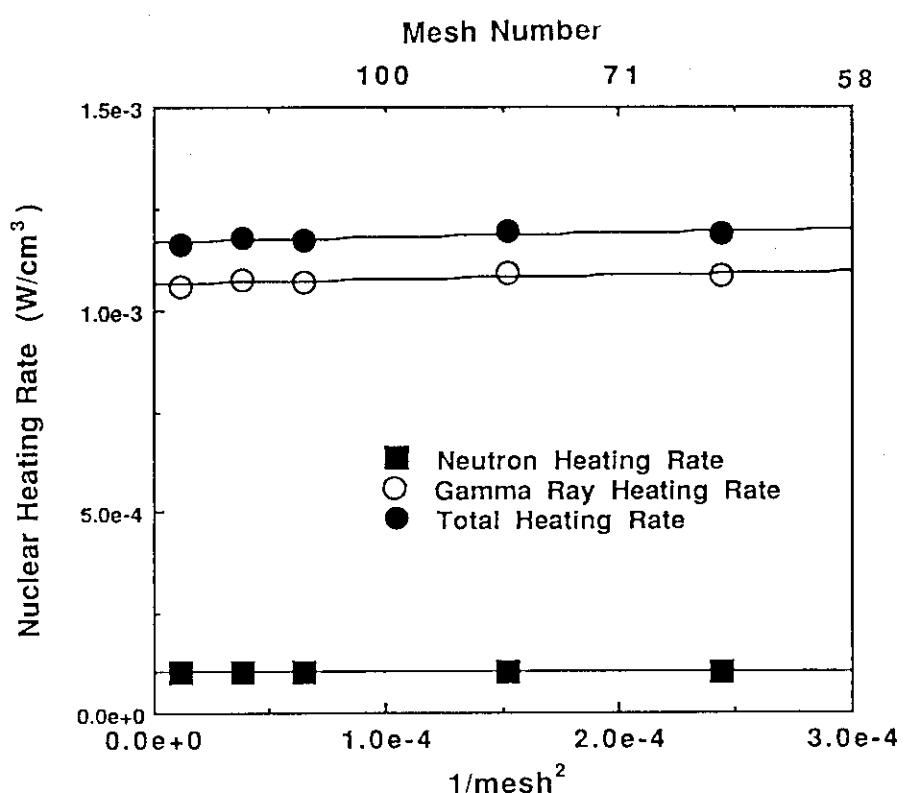


Fig. 5.9 Dependence of peak heating rate in the coil case on mesh number in homogeneous model

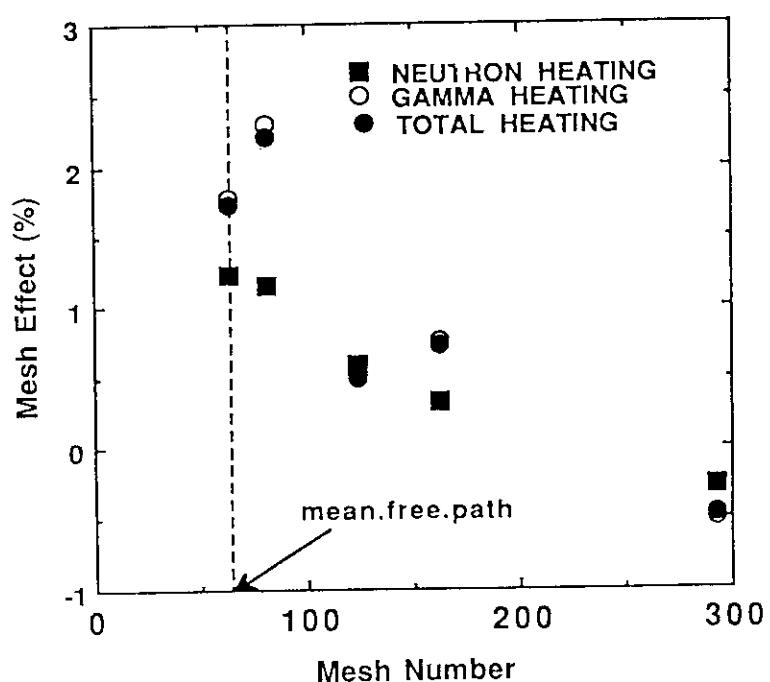


Fig. 5.10 Mesh Effect in homogeneous model on heating rates in the coil case

6. 結 言

トカマク型核融合炉を対象に、インボード部の遮蔽特性評価において、SS/H₂O層及び遮蔽体領域、プランケット領域、非均質領域の各々の厚さ、及び非均質領域の位置を変えた場合等のモデル化における非均質効果への影響を検討した。また、ITER概念設計において検討された構造における非均質効果についても検討した。その結果、以下の結論がえられた。

- (1) 遮蔽体領域内部のSS/H₂O層や遮蔽体領域の厚さを変えた場合、厚さが増加するに従い非均質効果は大きくなる。一方、プランケット領域の厚さを変えた場合やB₄C及びPb遮蔽体層を追加した場合には、非均質効果の変化は殆どない。また、各種パラメータを変えた場合の非均質効果の結果から、SS/H₂O層を12cm/3cm以上に厚くした場合の巻線部の非均質効果を除くと、非均質効果は-20%以下に抑えられる。
- (2) 多くの場合、均質モデルは非均質モデルに比べて、コイルでの核発熱率を過小評価する傾向にあるが、遮蔽体領域が極端に薄い場合(30cm以下)には、非均質モデルと均質モデルの全核発熱率のピーク値は逆転し、均質モデルは、非均質モデルと比較して、核発熱率を過大評価する。
- (3) ITER概念設計において検討された構造に対するインボード遮蔽体構造の非均質効果は、コイル容器における全核発熱率のピーク値で-27%，巻線部におけるピーク値で-29%で、今回検討したその他のモデルの非均質効果と較べて大きい。これは、ITER遮蔽体構造において、14.4cmと厚いSS層が含まれている事と、異なる厚さのSS及びH₂O層が不均一に配置されている為である。今後、不均一な厚さのSS層とH₂O層で構成される遮蔽体構造の非均質効果について検討する必要がある。
- (4) ITERの遮蔽設計ではモデル化による誤差に対する設計安全ファクターを1.3と評価しており、非均質効果に伴う誤差は、許容範囲内にあることがわかった。しかし、モデル化による誤差には他の要因も考えられる事から、今後これらを含めた安全ファクターの定量的な検討が必要である。また、メッシュ分割による誤差は、メッシュ分割を中性子の平均自由行程以内にすれば、最大でも3%以下であり、非均質効果に較べて十分小さい事が分かった。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、ITER開発室の方々には有意義な助言を戴き、感謝の意を表します。また、多くのご支援を頂いた松田慎三郎ITER開発室計画管理グループリーダに感謝いたします。

6. 結 言

トカマク型核融合炉を対象に、インボード部の遮蔽特性評価において、SS/H₂O層及び遮蔽体領域、プランケット領域、非均質領域の各々の厚さ、及び非均質領域の位置を変えた場合等のモデル化における非均質効果への影響を検討した。また、ITER概念設計において検討された構造における非均質効果についても検討した。その結果、以下の結論がえられた。

- (1) 遮蔽体領域内部のSS/H₂O層や遮蔽体領域の厚さを変えた場合、厚さが増加するに従い非均質効果は大きくなる。一方、プランケット領域の厚さを変えた場合やB₄C及びPb遮蔽体層を追加した場合には、非均質効果の変化は殆どない。また、各種パラメータを変えた場合の非均質効果の結果から、SS/H₂O層を12cm/3cm以上に厚くした場合の巻線部の非均質効果を除くと、非均質効果は-20%以下に抑えられる。
- (2) 多くの場合、均質モデルは非均質モデルに比べて、コイルでの核発熱率を過小評価する傾向にあるが、遮蔽体領域が極端に薄い場合(30cm以下)には、非均質モデルと均質モデルの全核発熱率のピーク値は逆転し、均質モデルは、非均質モデルと比較して、核発熱率を過大評価する。
- (3) ITER概念設計において検討された構造に対するインボード遮蔽体構造の非均質効果は、コイル容器における全核発熱率のピーク値で-27%，巻線部におけるピーク値で-29%で、今回検討したその他のモデルの非均質効果と較べて大きい。これは、ITER遮蔽体構造において、14.4cmと厚いSS層が含まれている事と、異なる厚さのSS及びH₂O層が不均一に配置されている為である。今後、不均一な厚さのSS層とH₂O層で構成される遮蔽体構造の非均質効果について検討する必要がある。
- (4) ITERの遮蔽設計ではモデル化による誤差に対する設計安全ファクターを1.3と評価しており、非均質効果に伴う誤差は、許容範囲内にあることがわかった。しかし、モデル化による誤差には他の要因も考えられる事から、今後これらを含めた安全ファクターの定量的な検討が必要である。また、メッシュ分割による誤差は、メッシュ分割を中性子の平均自由行程以内にすれば、最大でも3%以下であり、非均質効果に較べて十分小さい事が分かった。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、ITER開発室の方々には有意義な助言を戴き、感謝の意を表します。また、多くのご支援を頂いた松田慎三郎ITER開発室計画管理グループリーダに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 臨界プラズマ研究部：“準定常核融合実験炉（FER-Q）概念設計報告書（その2）（昭和59年度標準設計）”，JAERI-M 85-178.（第2分冊）(1985).
- 2) 真木紘一ほか：“核融合実験炉における炉心部の遮蔽設計”，JAERI-M 91-017 (1991).
- 3) K. MAKI, et al.：“JAPANESE CONTRIBUTIONS TO ITER SHIELDING NEUTRONICS DESIGN”，JAERI-M 91-046 (1991).
- 4) W. W. Engle：“A User's Manual for ANISN, A One-Dimensional Discrete Ordinate Transport Code with Anisotropic Scattering”，K-1963, Union Carbide Corporation, Computing Technology Center (1976).
- 5) 真木紘一ほか：“JENDL-3をベースとした核融合炉核計算用群定数セットFUSION-J3の作成”，JAERI-M 91-072 (1991).
- 6) 真木紘一ほか：“核発熱定数KERMAライブラリーの作成—核融合群定数セットFUSION-J3用核発熱定数ライブラリー”，JAERI-M 91-073 (1991).
- 7) 川崎弘光ほか：“APPLE-3：中性子束，ガンマ線束，スペクトル，反応率分布のプロットティングコードAPPLEの改良とマニュアルの整備”，JAERI-M 91-058 (1991).
- 8) IAEA：“ITER BLANKET, SHIELD AND MATERIAL DATA BASE”，ITER DOCUMENTATION SERIES, NO. 29, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 1991.
- 9) IAEA：“ITER CONCEPTUAL DESIGN REPORT”，ITER DOCUMENTATION SERIES, NO. 29, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 1991.