

JAERI-Tech
2002-023



JP0250176



JRR-3高性能冷中性子源装置の検討

2002年3月

熊井 敏夫・Peng Hong LIEM*・堀口 洋二

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

JRR-3 高性能冷中性子源装置の検討

日本原子力研究所東海研究所研究炉部
熊井 敏夫・Peng Hong LIEM *・堀口 洋二

(2002年1月23日受理)

冷中性子源装置は、原子炉内に液体水素等の低温の中性子減速材を容器に入れて設置し、熱中性子をエネルギーの低い冷中性子（約 5meV）に変える装置である。

冷中性子は実験孔及び中性子導管を通して原子炉の外に取り出され、種々の物質の物性を調べるための冷中性子ビーム実験に使用されている。この実験では、実験を効率的かつ精度良く行うために、使用できる冷中性子束を大きくすることが常に求められている。

本検討は、JRR-3 高性能化計画の一環として、冷中性子源装置の減速材容器を高性能化し、冷中性子束を増加するために行つた。検討では、現在使用している減速材容器より高い冷中性子束を発生できる減速材容器のモデルをサーベイ計算で求め、そのモデルについて実用性を考慮して最適な基本仕様を決めた。

サーベイ計算では、モンテカルロ計算コード MCNP4B2 を用いて、減速材容器の形状、材料、寸法、設置位置等のパラメータを組み合わせたケースについて実験孔内の冷中性子束を求めた。実用性の考慮では、サーベイ計算で求めた高い冷中性子束のケースについて減速材容器の製作性、設置性、運転性等をも考慮して最適な基本仕様を決めた。

検討の結果、新しい船底形の減速材容器とした場合は既存の水筒形減速材容器に比べて約 2 倍高い冷中性子束が得られることが明らかになった。更に、船底形減速材容器の最適基本仕様としては、形状が実験孔に対して凹湾曲面を持つ船底形状、材料がアルミニウム合金の厚さ 1 ~ 2mm、液体水素厚さが 25mm 等であることが分かった。

東海研究所： 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

*株式会社ナイス

Investigation on the JRR-3 High Performance Cold Neutron Source

Toshio KUMAI, Peng Hong LIEM * and Youji Horiguchi

Department of Research Reactor
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 23, 2002)

Cold neutron source is a vessel containing cold neutron moderator, such as liquid hydrogen, installed in a reactor to convert thermal neutrons into cold neutrons with very low energy (approximately 5 meV). Cold neutrons are extracted out of a reactor via experimental holes and neutron guide tubes, and then utilized for cold neutron beam experiments to study various material properties. High intensities of cold neutrons are always demanded for increasing the experiments' effectiveness and accuracy.

This report describes the investigation effort for obtaining the CNS moderator cells which give higher cold neutron intensity as one part of the JRR-3 performance up-grading investigation. In the investigation, survey calculations were conducted on several moderator cell models, which give higher cold neutron intensity than the existing cell, and basic specifications of the optimal moderator cell were determined by taking into account practical aspects.

In the survey calculations using a Monte Carlo code MCNP4B2, the cold neutron spectra at the experimental hole were obtained by considering the liquid hydrogen CNS moderator cell's shapes, materials, dimensions, positions etc. as parameters to be optimized. In the investigation effort, the optimal moderator cell basic specifications are investigated taking into account other parameters not included in the survey calculations, such as the feasibility for fabrication, installation, operability etc.

Based on the investigation results, the basic specifications of a new boat-bottom-type CNS moderator cell were obtained where the new CNS moderator cell can produce cold neutron intensity about two times higher compared to the existing CNS moderator cell. The boat-bottom-type cell basic configuration has a concave surface facing the experimental holes, walls made of aluminum alloy with 1 to 2 mm thickness, and liquid hydrogen thickness of 25 mm.

Keywords: Cold Neutron Source, Cold Neutron Spectra, Liquid Hydrogen, Moderator Cell, MCNP4B2, Boat-bottom-type, Aluminum Alloy, JRR-3

* NAIS Co. Inc.

目 次

1.はじめに	1
2.サーベイ計算方法	4
2.1 サーベイ計算の方針及びセルモデル	4
2.2 サーベイ計算の体系	5
2.3 物性値及び中性子断面積	5
2.4 サーベイ計算の条件	6
3.サーベイ計算結果及び検討	16
3.1 水筒形セル	16
3.1.1 液体水素厚さの効果	16
3.1.2 器壁材の効果	16
3.1.3 アルミニウム合金器壁材厚さの効果	17
3.1.4 水筒形セルのサーベイ計算結果の検討	18
3.2 八橋形セル	18
3.2.1 脊部長さの効果	18
3.2.2 脊部径の効果	18
3.2.3 底部液体水素有無の効果	19
3.2.4 設置角度の効果	20
3.2.5 アルミニウム合金器壁材厚さの効果	21
3.2.6 八橋形セルのサーベイ計算結果の検討	21
3.3 船底形セル	22
3.3.1 液体水素厚さの効果	22
3.3.2 部位の効果	22
3.3.3 設置位置の効果	23
3.3.4 ボイド率の効果	23
3.3.5 船底形セルのサーベイ計算結果の検討	24
4.まとめ	48
謝辞	48
参考文献	49

Contents

1	Introduction	1
2	Survey Calculation Method	4
2.1	Survey Calculation Guideline and Cell Model	4
2.2	Survey Calculation Configuration	5
2.3	Material Properties and Cross Sections	5
2.4	Calculation Conditions	6
3	Survey Calculation Results and Discussion	16
3.1	Suito-type Moderator Cell	16
3.1.1	Effect of Liquid Hydrogen Thickness	16
3.1.2	Effect of Cell Wall Material	16
3.1.3	Effect of Aluminum Alloy Cell Wall Thickness	17
3.1.4	Discussion on the Suito-type Cell Survey Calculation Results	18
3.2	Yatsubashi-type Moderator Cell	18
3.2.1	Effect of Body Part Length	18
3.2.2	Effect of Body Part Diameter	18
3.2.3	Effect of Lower Part Existence	19
3.2.4	Effect of Orientation Angle	20
3.2.5	Effect of Aluminum Alloy Cell Wall Thicknes	21
3.2.6	Discussion on the Yatsubashi-type Cell Survey Calculation Results	21
3.3	Boat-Bottom-type Moderator Cell	22
3.3.1	Effect of Liquid Hydrogen Thickness	22
3.3.2	Effect of Moderator Cell Parts	22
3.3.3	Effect of Moderator Cell Position	23
3.3.4	Effect of Liquid Hydrogen Void Ratio	23
3.3.5	Discussion on the Boat-bottom-type Cell Survey Calculation Results	24
4	Conclusions	48
Acknowledgment		48
References		49

1 はじめに

冷中性子とは 5meV 以下のエネルギー又は 4 Å 以上の波長を持つ中性子であると便宜上定義されている[1]。

冷中性子源装置(以下 [CNS] という。)は、原子炉内で熱中性子(エネルギー約 25 meV、波長約 2 Å)を液体水素(温度約 20K、圧力約 0.12MPa)等の冷減速材と相互作用させて減速し、エネルギー約 5meV(波長約 4 Å)付近の冷中性子を生成し、取り出すための装置である。

JRR-3 の冷中性子ビームを使用する実験申込数は、年々増加してきて、最近ではその数は受け入れ可能数の約 2 倍に達し、実験までの待ち時間の増加が目立ってきており、実験を円滑に実施するために冷中性子源装置の高性能化が望まれている。

高性能化の一つの方法として、冷中性子源装置から取り出せる冷中性子束を増加して、実験に要する時間を短くし、一定時間内により多くの実験を行えるようにすることが考えられている。

冷中性子束を大きくするためには、原子炉の出力を増加する方法、CNS の減速材容器(以下「セル」という。)を収納している真空容器及び真空容器に密着して設置され冷中性子を取り出すビームチューブ(以下「9C」孔といふ。)を炉心側へ移動する方法等により、セルに入射する熱中性子束を増加させることが考えられる。しかし、いずれも原子炉本体設備の大きな変更となり、多額の費用及び長期の工事期間を必要とする。そこで、材料の放射線損傷に基づく寿命毎に交換するセルを高性能化し、セルで生成する冷中性子束を増加する方法について検討することにした。この方法では原子炉本体設備の変更はもちろん CNS のヘリウム冷凍容量、水素貯蔵容量、安全設備等の主要な既存設備を変更しないで、冷中性子束を増加することができる。CNS の炉内部分及び 9C 孔の配置を Fig.1.1 に示す。

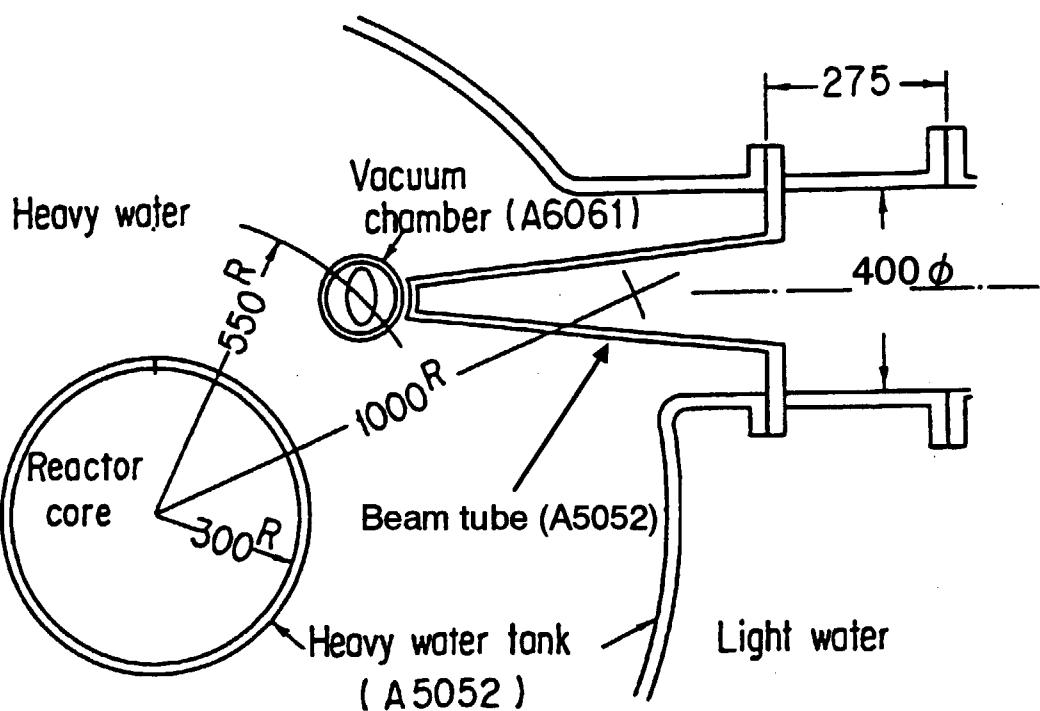
セルの高性能化に当たっては、冷中性子束の外、セルでの核発熱量・温度、セル内水素の循環性・貯溜性、セルの構造強度等についても留意しなければならない[2.3]。

CNS の重要な性能の一である冷中性子束は原子炉の炉型、出力、セルの配置(炉心・セル・実験孔の相互位置)、減速材の種類及び状態並びにセルの材料(以下「器壁材」という。)、寸法、形状、セル内水素のボイド率、液体水素のオルソ・パラ比等の多くの要因に複雑に依存している。このため、いくつかの CNS では冷中性子束を増加するためにセルの形状を二重円筒形、球形、楕円体形等に変えたり、減速材の種類を変更したりしている[4.5.6]。

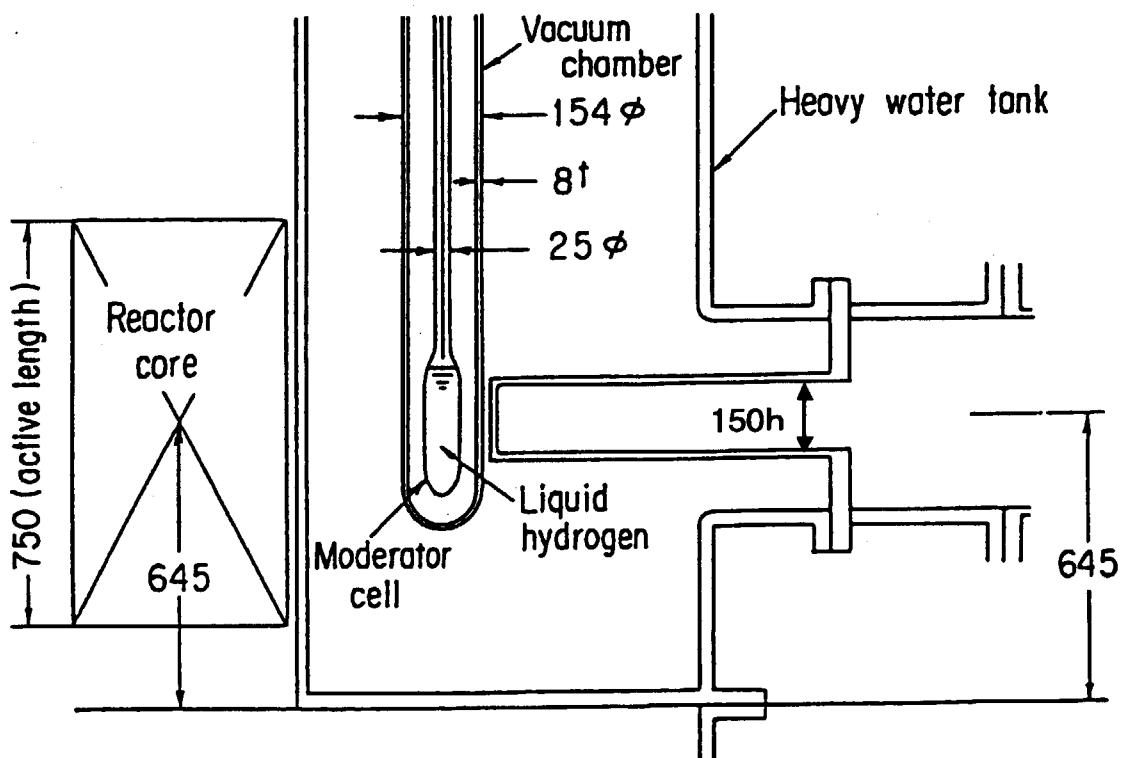
本検討では、中性子の挙動解析に世界的に広く使用されている連続エネルギーモンテカルロ計算コード MCNP4B2[7]を用い、重水タンク、真空容器、セル、9C 孔からなる計算体系において、セルの材料、寸法、形状、設置位置、セル内水素のボイド率等をパラメタとして、セルで生成され 9C 孔に取り出される中性子スペクトルをサーベイ計算した。また、このサーベイ計算結果から冷中性子エネルギー領域での中性子束を比較し、高い冷中性子束を発生できるセルモデルを求め、このセルモデルについて製作、設置、運転等の

点からも容易に実現できるセルの最適な基本仕様を決めた。

その結果、JRR-3 の CNS で現在使用しているステンレス鋼製の水筒形セル（以下「既存水筒形セル」という。）の約 2 倍の冷中性子束を生成する高性能な船底形セルの最適な基本仕様は、形状が実験孔に対して凹湾曲面を持つ船底形状、材料がアルミニウム合金の厚さ 1 ~ 2mm、液体水素厚さが 25mm 等であることが分かった。



(a) Horizontal section at mid-plane of reactor core



(b) Vertical section through center-line of beam tube

Fig. 1.1 Arrangement of cold neutron source and beam tube (dimension in mm)

2 サーベイ計算方法

2.1 サーベイ計算の方針及びセルモデル

セルの性能に関する主要な仕様である形状、寸法、材料、設置位置、液体水素厚さ、ボイド率等の各事項に対してパラメータを設定し、既存水筒形セルより高い冷中性子束を生成でき、かつ製作、設置及び運転の面からも容易に実現できるセルの基本仕様を決めるために、以下の方針でサーベイ計算を行った。

- 1) 先ず、既存セルと同じ形状である水筒形セルについて、この形状で得られる最も高い冷中性子束を見極めるため、液体水素の厚さ、器壁材及びアルミニウム合金の器壁厚さを変えてサーベイ計算する。
- 2) 次に、上記水筒形セルの最も高い冷中性子束より更に大きい冷中性子束を得るため、水筒形セルを次のイ～ニの4点で改善したセルモデルを想定する（以下「八橋形セル」という。）。そのモデルについての最も大きい冷中性子束を求めるため胴部長さ、液体水素厚さ、袖部の有無、胴部径、底部液体水素有無、設置角度、アルミニウム合金器壁材厚等を変えてサーベイ計算を進める。
 - イ、液体水素厚さを減速のために適当であると言われている厚さ約2～3cmとし、その厚さの領域を広くする。また、熱中性子束のより高い位置でかつ冷中性子が9C孔へ入射し易い位置に液体水素を配置する。
 - ロ、真空容器の垂直方向から入射してくる熱中性子も冷中性子に変換される位置に液体水素を配置する。
 - ハ、冷中性子取り出し面を9C孔に対して凹面にして1方向への指向性を持たせる。
- ニ、器壁材料として中性子吸収の少ない材質を選び、またその使用量を少なくして中性子の吸収を少なくする。
- 3) 上記2)のサーベイ計算の内高い冷中性子束を発生する八橋形セルモデルについて、さらに、製作、設置、運転等の実現性の容易さを考慮したセルを想定する（以下「船底形セル」という。）。そのセルについて高い冷中性子束が維持されていることを液体水素厚さ、器壁材厚さ、寸法、ボイド率等を変えて行うサーベイ計算で確認して、船底形セルの最適な基本仕様を決める。

水筒形セル及び想定した上記2つのセルの概略及びサーベイ計算モデルは以下の通りである。

1) 水筒形セル

水筒形セルは回転楕円体形状で、厚さは中央部が一番厚く、周辺では薄くなっている。このセルの中心軸を真空容器の中心軸に合わせて、その凸面を9C孔に正対する向きに、セルの高さ方向の中心を9C孔の中心に合わせて設置する。水筒形セルのサーベイ計算モデルをFig.2.1に示す。

2) 八橋形セル

水筒形セルを改善するために想定した八橋形セルのモデルは半円筒形状の胴部、円盤形の上部、球帽形の底部及び胴部の両横の袖部（直方体状）から構成されている。胴

部はその凹面が 9C 孔に正対する向きに、その凸面を真空容器内面から 4mm 離して設置する。底部の球帽も真空容器内面から 4mm 離して設置する。八橋形セルのサーベイ計算モデルの基本形を Fig.2.2 に示す。

3) 船底形セル

八橋形セルの内冷中性子束の高いセルのモデルについて、液体水素量、設置時の真空容器壁とのギャップ、液体水素の流動性、最高使用圧力に対する強度等の実現性をも考慮して想定した船底形セルは半円筒形の胴部、半球帽形の上部及び底部から構成されている。胴部はその凹面が 9C 孔に正対する向きに、その凸面を真空容器内面から 4mm 離して設置する。底部の半球帽も真空容器内面から 4mm 離して設置する。船底形セルのサーベイ計算モデルの基本形を Fig.2.3 に示す。

2.2 サーベイ計算の体系

本サーベイ計算における MCNP 計算体系は、Fig.2.4 及び Fig.2.5 に示すように原子炉の炉心、重水タンク、重水、真空容器、セル及び 9C 孔から構成されている。炉心と真空容器の間の重水中に計算用の熱中性子線源を設置し、9C 孔内に表面検出器を鉛直に設定している。図の点線枠内の部分が MCNP 計算体系である。

真空容器はアルミニウム合金 A6061 で 9C 孔はアルミニウム合金 A5052 で製造されている。真空容器は重水タンクに上方から垂直に挿入された外径 154 mm、内径 138 mm の底付き円筒で、その半球形の底は重水タンク底から約 500 mm、真空容器中心軸は原子炉の炉心中心から 550 mm 離れた所にそれぞれ位置している。9C 孔は横方向から重水タンク内に水平に挿入された角管で、その中心軸は炉心中心高さと一致している。真空容器と 9C 孔は相互に接続金具で直角に固定されており、この間隔は 1 mm に保たれ重水で満たされている。9C 孔の角管は高さ 150 mm 一定であり、幅は先端部で 70 mm、先端から約 650 mm 離れた重水タンクとの接続部で 177 mm である。両側面は角度 4.9° のテーパになっている。

9C 孔から取り出せる中性子の観測点として設定した表面検出器の位置は、9C 孔先端から約 1550 mm (炉心中心から約 2000mm) 離れた位置で、水平実験孔の水封用止板の位置である。

真空容器内は真空に保たれ、9C 孔及び水平実験孔内にはヘリウムガスが充填されている。

サーベイ計算では、真空容器内に次節で示す 3 つの異なった形状のセルを設定し、それぞれのセルのパラメータを種々組み合わせたケースについて、表面検出器に入射する中性子のスペクトルを求めた。

2.3 物性値及び中性子断面積

サーベイ計算体系を構成する液体水素、ステンレス鋼 (SUH660 相当)、アル

ミニウム合金 (A5052)、アルミニウム合金 (A6061)、重水及び軽水の組成を Table 2.1 ~ Table 2.6 に示す。

器壁材となるアルミニウム合金 (A6061) 及びステンレス鋼 (SUH660 相当) のマクロ吸収断面積は、中性子エネルギー範囲 $0.1 \sim 10 \sim 100\text{meV}$ に対して、アルミニウム合金の場合、 $8.4 \sim 1.7 \sim 1.4\text{cm}^{-1}$ 、ステンレス鋼の場合、 $70 \sim 15 \sim 13\text{cm}^{-1}$ であり、ステンレス鋼の方が約一桁大きい。

液体水素の断面積ライブラリーは、米国 NIST の NBSR の液体水素 CNS での計算で使用されたものを使用した。このライブラリーの計算値は測定値と良く一致している [9.10.11]。

液体水素のオルソ・パラ比はオルソ 65%、パラ 35% [11] とし、この混合液体水素に対する断面積のライブラリーの計算は、オルソのライブラリーとパラのライブラリーをライブラリーのディレクトリファイルに登録し、MCNP の MT カードに液体水素の組成（オルソ 65%、パラ 35%）を入力して行った。

2.4 サーベイ計算の条件

サーベイ計算では、まず、原子炉の炉心計算モデルによりセルを収納している真空容器と炉心との中間位置における中性子スペクトルを予め MCNP で計算し、次に、それをセルのサーベイ計算用の中性子線源として表面検出器の中性子スペクトルを計算した。即ち、2段階の MCNP 計算手法を用いた。これによつて中性子源では実際の中性子エネルギー分布を模擬した中性子分布を表すことができた。また、表面検出器での中性子スペクトルを数 % 以内の標準偏差で計算する時間を短縮した。MCNP コードを用いた具体的な計算フローを Fig. 2.6 に示す。

中性子のエネルギー分割については、 $1.0 \times 10^{-10} \text{ MeV} \sim 1.0 \times 10^6 \text{ MeV}$ までを 70 群とし、等レサージに分割した。また、表面検出器でのタリー（計数）の標準偏差を 5 % 以下にするように、後述の分散低減法を採用して、粒子のヒストリ数（線源から発生する粒子数）を 5×10^6 として計算した。

分散低減法として Weight Window 法を採用した。エネルギーに関する Weight Window の設定では、エネルギー境界を $1.0 \times 10^{-10} \text{ MeV} \sim 1.0 \times 10^6 \text{ MeV}$ 、 $1.0 \times 10^6 \text{ MeV} \sim 0.414 \text{ MeV}$ 、 $0.414 \text{ MeV} \sim 20 \text{ MeV}$ とした。空間に関する Weight Window の設定では位置におけるウエイトを設定することによって、全計算体系から来る中性子を計算する中性子スペクトルと冷減速材領域から直接来る中性子のみを計算する中性子スペクトルとに区別した。即ち、本計算では、冷減速材から直接来る中性子を検出の対象とし、さらに、表面検出器への入射角度を中性子導管通過可能角度に制限して計算した。この空間に対する Weight Window 分散低減法を採用することによって、表面検出器のタリーに殆ど寄与していない中性子の追跡を途中で打ち切た。これによって本作業の計算時間は、Pentium III 500 MHz で 1 ケース当たり 4 ~ 5 時間に短縮できた。計算体系の点線枠の境界に真空境界条件を適用し、計算体系の温度は 300K とした。

Table 2.1 Liquid hydrogen composition (g/cm³)

元素名	成分規制値 (%)	使用する w/o	MCNP 計算用密度
H2	100.0		0.071
合計	100.0		0.071
備考	液体水素（冷減速材）	出典	理科年表第 63 冊

Table 2.2 SUH660 equivalent alloy (NF Z6NCTDV25-15B) composition (g/cm³)

元素名	成分規制値 (%)	使用する w/o	MCNP 計算用密度
C	0.051	0.051	4.049×10^{-3}
Si	0.21	0.21	1.667×10^{-2}
Mn	0.47	0.47	3.732×10^{-2}
P	0.008	0.008	6.352×10^{-4}
S	0.002	0.002	1.588×10^{-4}
Ni	25.25	25.25	2.005
Cr	14.6	14.6	1.302
Mo	1.27	1.27	1.008×10^{-1}
V	0.28	0.28	2.223×10^{-2}
Ti	1.75	1.75	1.390×10^{-1}
Al	0.154	0.154	1.223×10^{-2}
B-10	0.0013	0.0013	1.902×10^{-5}
B-11			8.420×10^{-5}
Cu	0.06	0.06	4.764×10^{-3}
Co	0.051	0.051	4.049×10^{-3}
Fe	55.8427	55.8427	4.434
合計	100.0	100.0	7.94
備考	既存水筒形		

Table 2.3 A5052 composition (g/cm³)

元素名	成分規制値 (%)	使用する w/o	MCNP 計算用密度
Cu	≤ 0.10	0.0	
Si	0.45	0.0	
Fe		0.0	
Mn	0.1	0.0	
Mg	2.2~2.8	2.238	5.984×10^{-2}
Zn	≤ 0.1	0.0	
Cr	0.15~0.35	0.1526	4.080×10^{-3}
その他	≤ 0.15	0.0	
Al	残り	97.6094	2.60984
合計	100.0	100.0	2.67376
備考	炉心外殻、重水タンク、ビームチューブ	出典	JAERI-memo 61-333

Table 2.4 A6061 composition (g/cm³)

元素名	成分規制値 (%)	使用する w/o	MCNP 計算用密度
Cu	0.15~0.40	0.0	
Si	0.40~0.80	0.0	
Fe	≤ 0.7	0.0	
Mn	≤ 0.15	0.0	
Mg	0.8~1.2	0.8274	2.176×10^{-2}
Zn	≤ 0.25	0.0	
Cr	0.04~0.35	0.04137	1.088×10^{-3}
Ti	≤ 0.15		
その他	≤ 0.15	0.0	2.60712
Al	残り	99.131	
合計	100.0	100.0	2.629968
備考	真空容器 セル	出典	JAERI-memo 61-333

Table 2.5 Heavy water composition (g/cm³)

元素名	成分規制値 (%)	使用する w/o	MCNP 計算用密度
D			2.224×10^{-1}
O			8.833×10^{-1}
合計		100.0	1.1057
備考	重水	出典	JAERI-memo 61-333

Table 2.6 Light water composition (g/cm³)

元素名	成分規制値 (%)	使用する w/o	MCNP 計算用密度
H			1.117×10^{-1}
O			8.868×10^{-1}
合計			0.99857
備考	軽水	出典	JAERI-memo 61-333

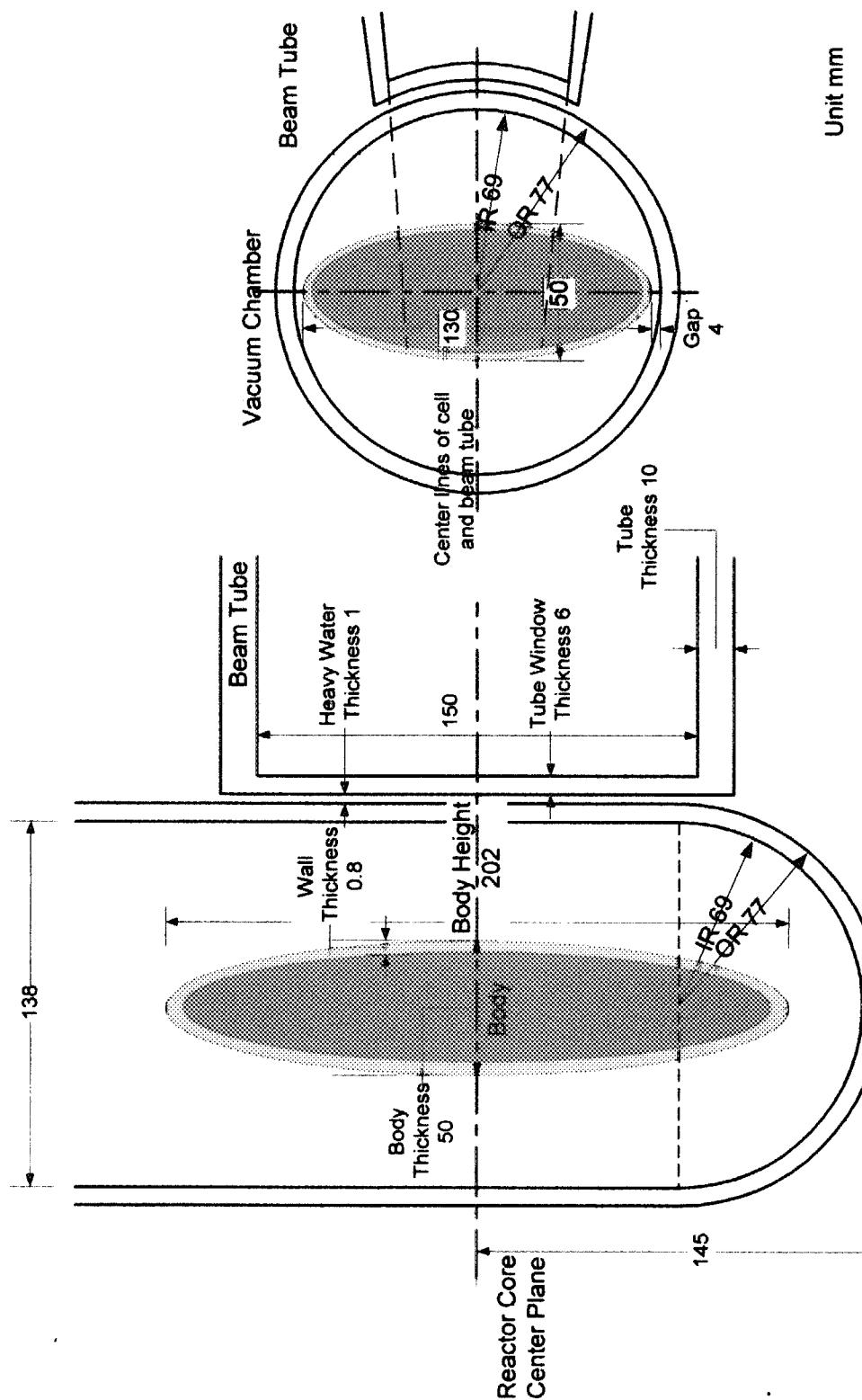


Fig. 2.1 MCNP calculational model for original sun-type moderator cell

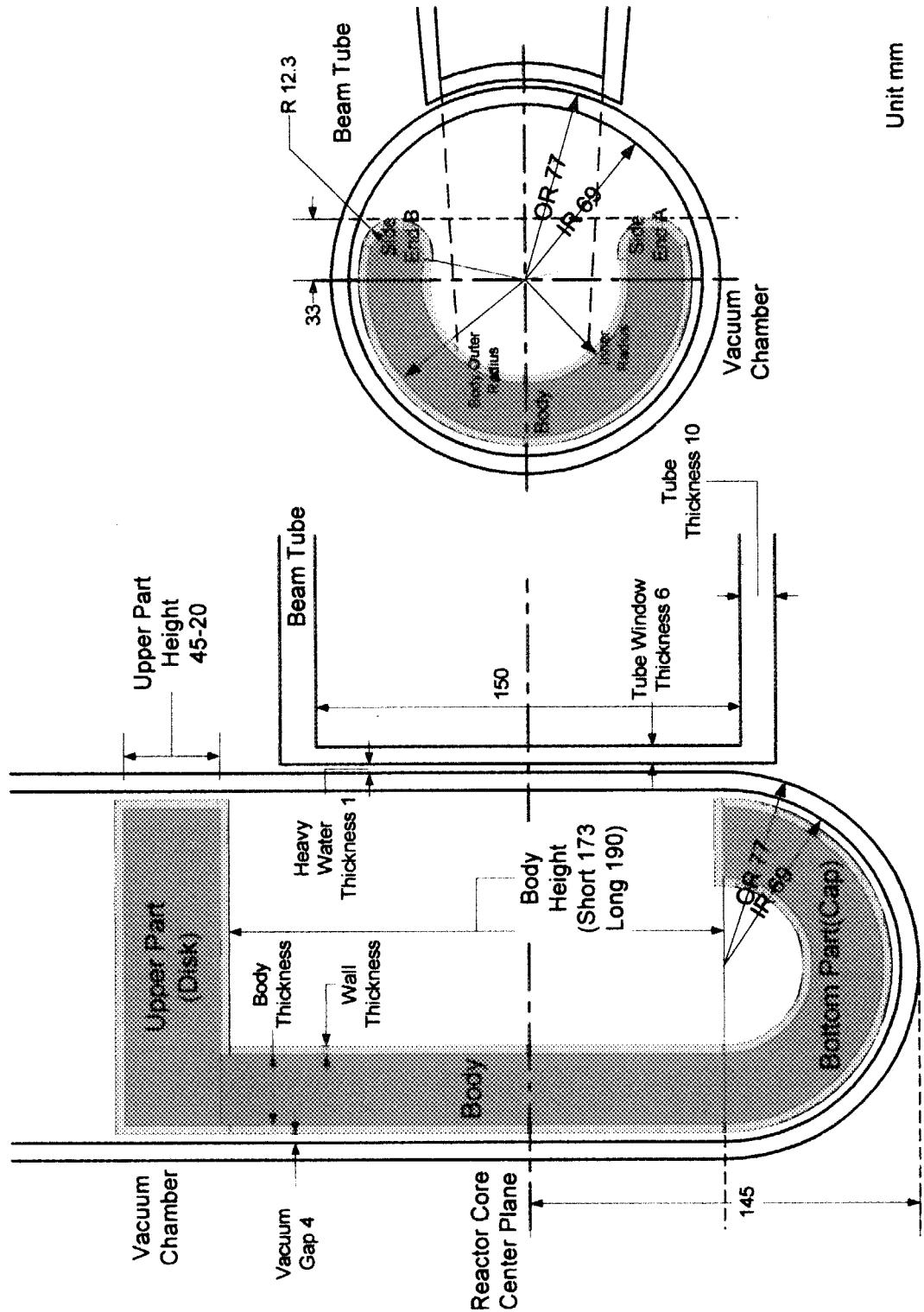


Fig. 2.2 MCNP calculational model for yatsuhashi-type moderator cell

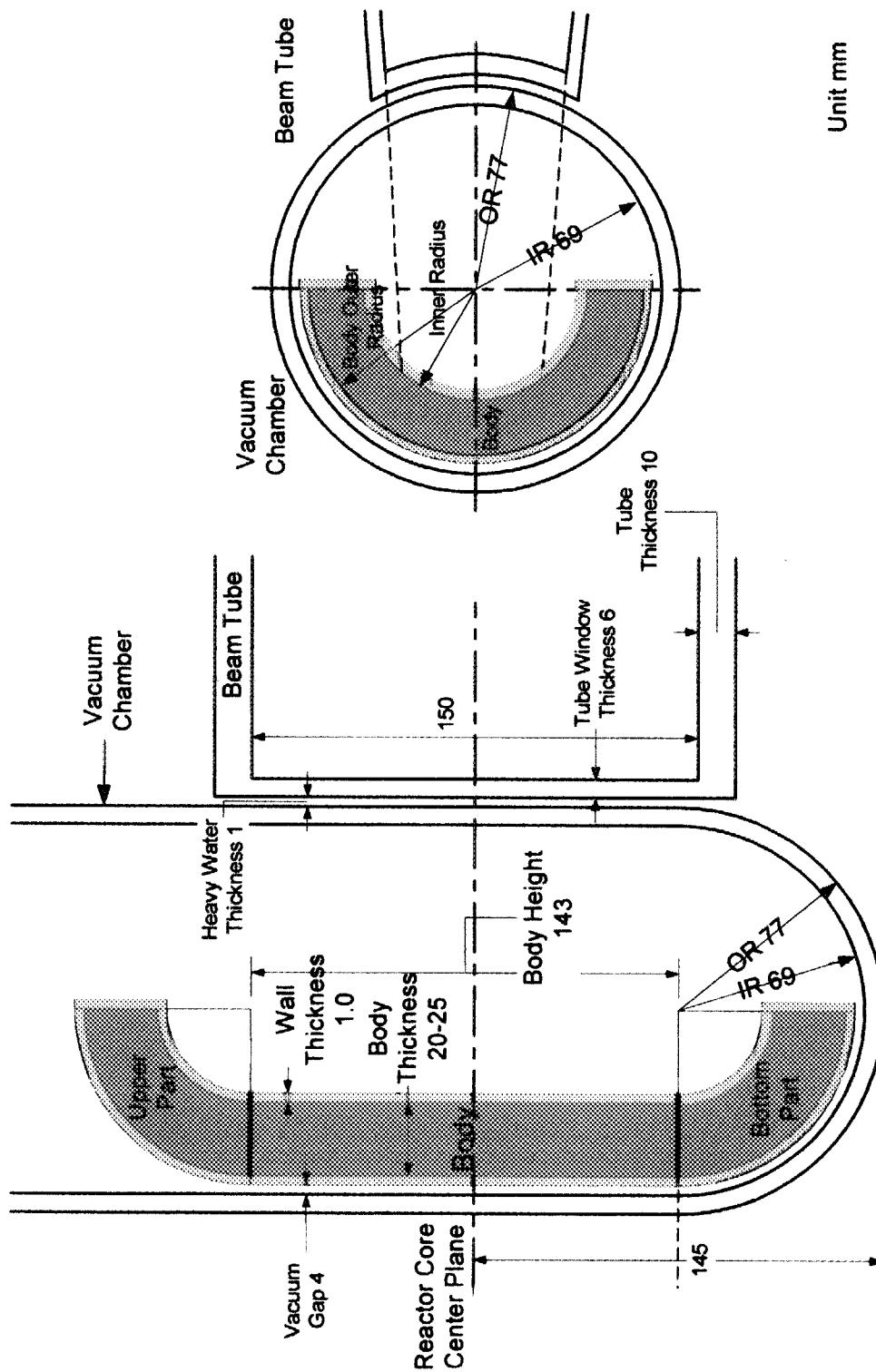


Fig. 2.3 MCNP calculational model for boat-bottom-type moderator cell

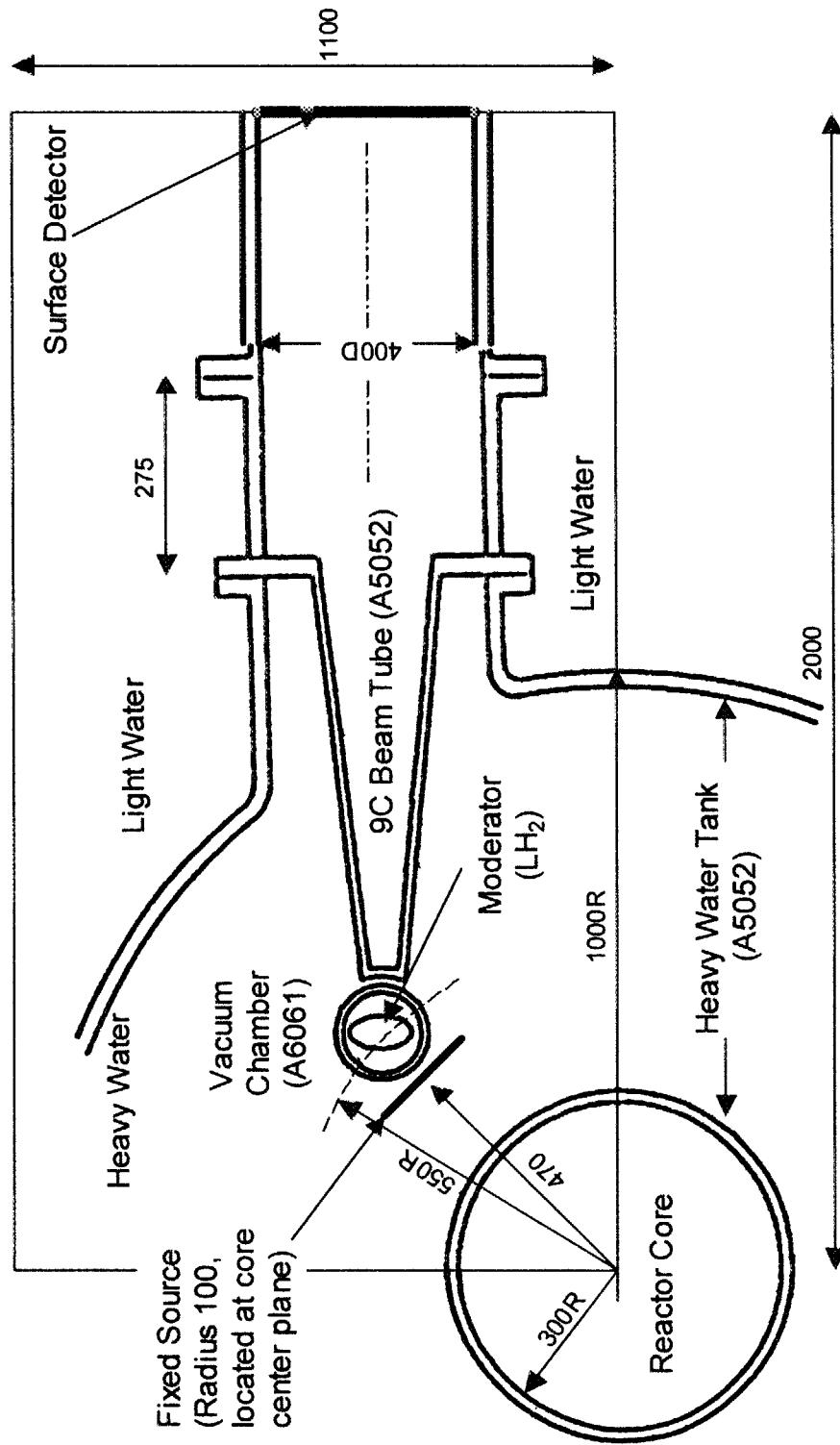


Fig. 2.4 MCNP calculational model for the whole system configuration (horizontal view)

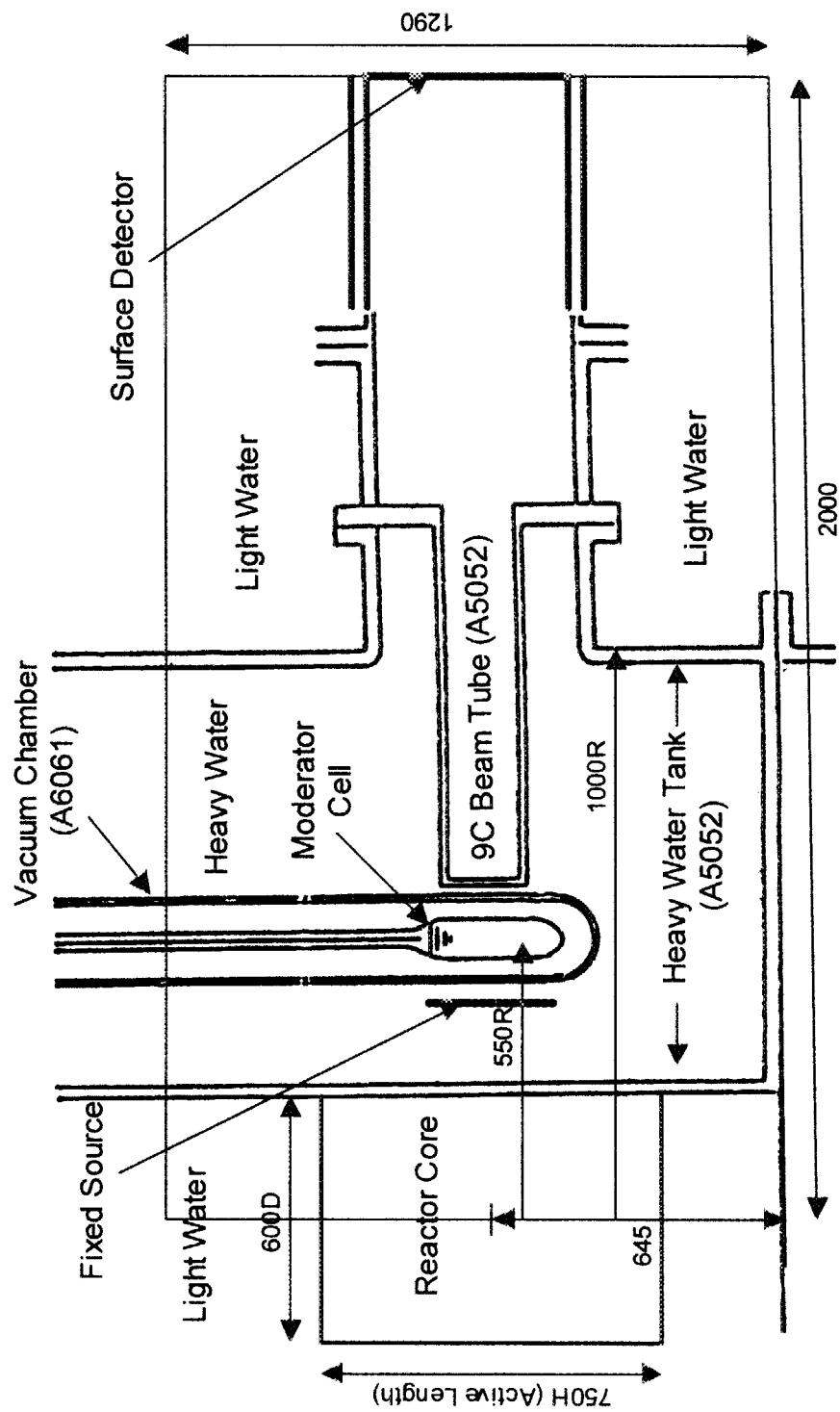


Fig. 2.5 MCNP calculational model for the whole system configuration (vertical view)

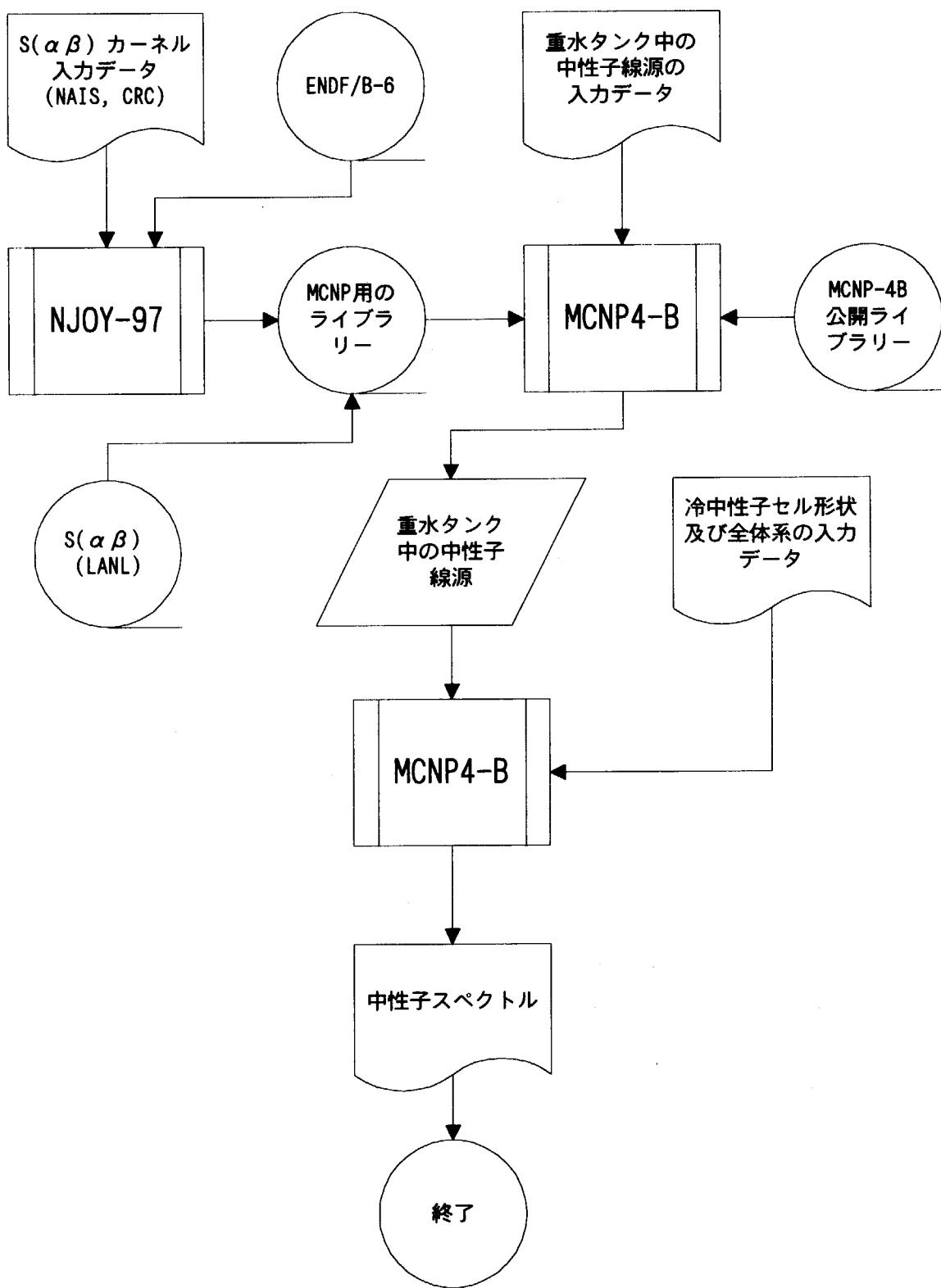


Fig. 2.6 Cold neutron spectra calculation procedure

3 サーベイ計算結果及び検討

ここでは、実施したサーベイ計算の結果及び検討の詳細を示す。

サーベイ計算を実施した水筒形セル、八橋形セル及び船底形セルの 3 つのセルについて、実施した主なサーベイ計算毎のサーベイパラメータ、計算結果等をそれぞれ Table3.1 ~ Table3.3 のサーベイ計算実施一覧表に示す。

各サーベイ計算の変動パラメータ及び計算結果を示す表中では、サーベイしたセルの中性子性能を簡便に表すために、冷中性子束及び既存水筒形比を用いている。冷中性子束は、中性子エネルギー範囲 $3.5\text{meV} \sim 4.5\text{meV}$ における最大中性子束（サーベイ計算の統計誤差 1%以下）を示し、また、既存水筒形比は、サーベイ計算したセルの冷中性子束を既存水筒形セルの冷中性子束 $2.94 \times 10^5 \text{n/cm}^2 \cdot \text{eV} \cdot \text{source}$ で割った値を示している。

中性子スペクトルについては、中性子エネルギー範囲 $0.1\text{meV} \sim 1\text{eV}$ の中性子束を示しているが、計算上の統計誤差は、エネルギー範囲 $1\text{meV} \sim 200\text{meV}$ で約 1 ~ 2%以下、その他の範囲では約 5%以下である。

3.1 水筒形セル

3.1.1 液体水素厚さの効果

イ、目的及びパラメータ

冷中性子束に対する液体水素厚さの効果を検討する。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：器壁材・ステンレス鋼（以下「SUS」とも記述する。）厚さ・0.8mm

変動パラメータ：液体水素の最大厚さ・20、25、30、35、50、60 及び 70mm

ロ、実施ケース及び結果

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び計算結果を Table3.4 に示す。中性子スペクトルの比較を Fig.3.1 に、液体水素厚さに対する冷中性子束の変化を Fig.3.2 に示す。

中性子スペクトル比較図からも明らかのように、液体水素厚さが 20 ~ 70mm の全ての中性子スペクトルは、中性子エネルギー $4 \sim 5 \text{ meV}$ にピークを持つ同じ形である。

液体水素厚に対する冷中性子束の変化を表す曲線は Fig.3.2 に示すように液体水素厚さ約 30mm でピークを形成し、液体水素厚さ 20mm の時には約 6%減少する。約 30mm より厚い場合にも中性子束は減少することが分かる。これらの減少は、ピーク値より薄い液体水素では熱中性子の減速が十分に行われないこと、ピーク値より厚い場合は液体水素に吸収される中性子が多くなるからであると考えられる。

3.1.2 器壁材の効果

イ、目的及びパラメータ

既存水筒形セルの器壁材は次に述べる必要性からステンレス鋼が選択された。

ヘリウム冷凍設備の故障等のため低温ヘリウムガスをコンデンサーへ供給できない状況においても原子炉を運転する場合（以下「CNS 無冷却運転」という。）には、セルが冷却されないため、セルの温度は約 400 °C の高温になる。この高温に耐えることを想定して耐熱性ステンレス鋼（SUH660 相当）が選択された。しかし、CNS 無冷却運転は実施していない。今後も JRR-3 の CNS 無冷却運転を行わないとすれば、器壁材をステンレス鋼からアルミニウム合金（以下「AI」とも記述する。）に変更することも可能である。また、最近の CNS では世界的に器壁材として、中性子吸収が少ないために冷中性子を多く発生することのできるアルミニウム合金が使用されるようになってきている[5,6]。これらのこどから、ステンレス鋼とアルミニウム合金の冷中性子束に与える効果を調べることにした。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：液体水素厚さ・30mm

器壁厚さ・0.8mm

変動パラメータ：器壁材・SUS 及び AI

ロ、実施ケース及び結果

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び計算結果を Table3.5 に示す。

水筒形セルのステンレス鋼と同じ厚さのアルミニウム合金（0.8mm）に置き換えて中性子束を求めた。器壁材 SUS 及び AI に対する中性子スペクトルの比較を Fig.3.3 に示す。

サーベイ計算の結果、アルミニウム合金の冷中性子束は、ステンレス鋼の値より約 20% 高くなった。これは明らかに、アルミニウム合金の中性子吸収がステンレス鋼より小さいことによる。

3.1.3 アルミニウム合金器壁材厚さの効果

イ、目的及びパラメータ

アルミニウム合金の器壁材厚さの冷中性子束への効果を検討する。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：液体水素厚さ・30mm、器壁材・AI、反射体・ベリリウム

変動パラメータ：器壁材厚さ・0.8mm、1.5mm 及び 2.0mm

ロ、実施ケース及び結果

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び計算結果を Table3.6 に示す。アルミニウム合金器壁材の厚さに対する中性子スペクトルの比較を Fig.3.4 に、また、冷中性子束の変化を Fig.3.5 に示す。

サーベイ計算の結果、器壁材厚さが厚くなる程、冷中性子束は減少する。厚さに対する冷中性子束の関係は、Fig.3.4 に示すようにほぼ直線的に減少し、0.8mm と 2.0mm の差は、約 3% 以下と僅かである事が分かった。冷中性子束の減少は、器壁材が厚くなること

により生じる中性子吸収量の増加によるものである。

3.1.4 水筒形セルのサーベイ計算結果の検討

水筒形セルの液体水素厚さ、器壁材及びアルミニウム合金器壁材厚さに対するサーベイ計算の結果、冷中性子束は液体水素厚さ約 30mm でピークになること、アルミニウム合金器壁材はステンレス鋼材より約 20%高いこと、アルミニウム合金器壁材厚さ 0.8mm と 2.0mm の差は約 3%以下であることが分かった。冷中性子束の最も高いセルは液体水素厚さ 30mm、アルミニウム合金厚さ 0.8mm のセルで、その冷中性子束は既存セルの約 1.4 倍であった。

次に、冷中性子束が水筒形セルの最高値より高いセルモデルを探すため八橋形セルについてサーベイ計算を行った。

3.2 八橋形セル

3.2.1 胴部長さの効果

イ、目的及びパラメータ

セルの小型化を図るため、冷中性子束に対する胴部長さの寄与を検討する。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：液体水素厚さ・20mm

器壁材・Al、厚さ・0.65mm

変動パラメータ：胴部長さ・190mm（以下「長胴」という。）

及び 173mm（以下「短胴」という。）{短胴は、長胴の上部を 17mm 切り詰めた物}

ロ、実施ケース及び結果

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び計算結果を Table3.7 に示す。器壁材アルミニウム合金厚さ 0.65mm の二つの胴部長さに対する中性子スペクトルの比較を Fig.3.6 に示す。

冷中性子束は、短胴の方が長胴より約 2%高くなっている。この理由は長胴の上端は、9C 孔上端より約 20mm 上方に位置し、9C 孔からの視野外になるため、9C 孔上端より上にある胴部及び上部の液体水素で生成する冷中性子は、9C 孔内の表面検出器に直接到達できないのに対して、短胴の上端は 9C 孔上端とほぼ同じ高さであり、上部液体水素により反射減速されて生成した冷中性子の一部は、表面検出器へ到達できるからであると考えられる。

3.2.2 胴部径の効果

イ、目的及びパラメータ

セル小型化を図るため、胴部径の寄与を検討する。胴部径の小型化は、セルを真空容器内に設置する時のセル壁と真空容器内壁間の十分なギャップを確保する上で大切である。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：胴部液体水素厚さ・20mm

　　胴部長さ・173mm

　　袖部・無し

　　上部及び底部の液体水素厚さ・20mm

　　器壁材・Al、厚さ・0.65mm

変動パラメータ：胴部の外径・60mm(小) 及び 65mm (大)

ロ、実施ケース及び結果

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び計算結果を Table3.8 に示す。胴部外径に対する中性子スペクトルの比較を Fig.3.7 に示す。

真空容器の内半径は、69mm であり、この中に外半径 65mm のセルを真空容器の垂直軸とセルの垂直軸を合わせて設置すると、真空容器内壁とセル器壁の設置間隔（以下「間隔」という。）は 4mm となる。この間隔は、既存水筒形セルの中心水平面の長径方向の間隔と同じであるが、水筒形セルでは長径方向のみにこの間隔を保てばよいのに対して、八橋形セルの場合は、全円周にわたってこの間隔を保たなければならず、実際の据付精度上この間隔に余裕が必要となってくる。そこでセルの冷中性子束と半径の関係を検討するため、液体水素厚さを 20mm とし、外半径 60mm（間隔 9mm）のセルについてサーベイ計算し、外半径 65mm の計算値と比較検討した。外半径を 60mm とすると内半径は 40mm となるが、この場合の内縁は 9C 孔視野から約 10mm 離れている。

サーベイ計算の結果、外半径を小さくした時の方が冷中性子束は約 9% 減少した。減少の原因として、外半径を小さくすることによりセルが真空容器壁から離れ熱中性子束が低下すること、熱中性子が液体水素へ入射する入射総面積が小さくなること、特に真空容器下方から入射する熱中性子に対しては約 17% の面積減少になること、液体水素容積が約 15% 減少すること等によると考えられる。

3.2.3 底部液体水素有無の効果

イ、目的及びパラメータ

冷中性子束に対する底部液体水素の寄与を検討する。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：胴部液体水素厚さ・20mm、胴部高さ・190mm（長胴）

　　胴半径・65mm、上部液体水素厚さ・20mm

　　器壁材・Al、器壁厚さ・0.65mm

　　袖部・無し

変動パラメータ：底部液体水素厚さ 20mm（球帽）・有及び無

ロ、実施ケース及び結果

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び計算結果を Table3.9 に示す。底部液体水素有無に対する中性子スペクトルの比較を Fig.3.8 に示す。

真空容器の底は、原子炉の炉心中心から 145mm 下の熱中性子束の高い領域の重水中に位置しており、この底から垂直方向にセルへ入射する熱中性子は、真空容器の上部から垂直に入射するものに比べて多いと考えられる。真空容器底部から入射する熱中性子は、セル底部に液体水素が有る場合はここで透過減速により冷中性子に変わり、無い場合はセルの内側を通過した後に上部液体水素まで進んでそこで反射減速により冷中性子に変わる。どちらがより有効であるかを調べるためにサーベイ計算を行った。

サーベイ計算の結果、底部の液体水素の球帽の縁は、9C 孔視野下部から視野内に約 7mm 入り込んで冷中性子の通過を妨げているにも拘わらず、底部液体水素が有る場合の冷中性子束は無い場合より約 10 % 大きくなり、底部液体水素の効果が大きいことが分かった。

3.2.4 設置角度の効果

イ、目的及び条件

セル設置時の 9C 孔に対する角度のずれが冷中性子束に与える寄与を検討する。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：胴部液体水素厚さ・20mm

底部液体水素厚さ・20mm

上部液体水素厚さ・20mm

胴部長さ・173mm、器壁材・AI、器壁厚さ・0.65mm

両袖部・無し

変動パラメータ：設置角度・0°、30°、45°（上から見てセルの中心と 9C 孔軸を結ぶ方位を零として半時計方向に回転）

胴部外半径・60mm（小）及び 65mm（大）

ロ、実施ケース及び結果

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び計算結果を Table3.10 に示す。設置角度に対する中性子スペクトルの比較を Fig.3.9 に示す。

セルを真空容器垂直軸を中心にして、9C 孔水平軸から水平に炉心側へ 30°（セル外半径 60mm の時）又は 45°（セル外半径 65mm の時）回転したときの効果を調べた。

胴部外半径が 60mm の時、回転角度を 30° とした理由は、45° 回転するとセルの炉心側横端が 9C 孔の視野内に入り込むのを避けるためである。

サーベイ計算の結果、30° 回転時の冷中性子束は、回転しないときに比べて約 8% 高く、45° 回転時は、回転しないときに比べて約 7% 減少した。いずれの回転においても 9C 孔視野内の液体水素の配置状況には変化がないことから、回転により生じる冷中性子束の変化は、9C 孔視野外の液体水素の分布状況等によるものと考えられる。45° 回転時の減少の原因是、回転により液体水素は熱中性子束のより高い所に位置するようになるが、移動した液体水素は 9C 孔の視野外となるため、表面検出器への冷中性子束の増加にはつながらず、その上、熱中性子束の高い位置に、冷中性子束増加に寄与しない液体水素が存在す

ることにより、吸収される熱中性子束が増加すること及び炉心より遠い側の横端が 9C 孔視野内に近づき、視野外の液体水素が減少し、視野内へ反射される冷中性子が減少することによると考えられる。30° 回転の場合に増加しているのは、45° 回転より両横端の視野への近接の程度が少ないため、熱中性子の吸収の増加及び反射冷中性子の減少より液体水素が熱中性子束の高い所に位置することによる冷中性子発生の増加の方が勝っているためと考えられる。

3.2.5 アルミニウム合金器壁材厚さの効果

イ、目的及び条件

セルの最高使用圧力 (0.44MPa) に耐える強度を有する器壁材厚さに対する冷中性子束の減少の程度を推定するため、器壁材厚さの寄与を検討する。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：胴部液体水素厚さ・20mm、胴部高さ・173mm、袖部・無

上部及び底部の液体水素厚さ・20mm

器壁材・Al

変動パラメータ：器壁厚さ・0.65mm、1.0mm 及び 1.5mm

ロ、実施ケース及び結果

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び計算結果を Table3.11 に示す。アルミニウム合金器壁厚さに対する中性子スペクトルの比較を Fig.3.10 に、アルミニウム器壁厚さに対する冷中性子束の変化を Fig.3.11 に示す。

サーベイ計算の結果、アルミニウム合金器壁材厚さと冷中性子束の関係は Fig.3.11 に示すように反比例の関係にあり、0.65mm と 1.5mm の差は僅か約 1 %である。このことは、アルミニウム合金の中性子吸収が少ないと示しており、セルの製作上 2mm 程度の厚さのものを使用しても 1mm 厚さの数%の中性子束減少にとどまることになる。このため、製作上の器壁材厚さに対する余裕が生じる。

3.2.6 八橋形セルのサーベイ計算結果の検討

想定した八橋形セルの冷中性子束を出来るだけ高くするためには、胴部長さを 9C 孔の高さ程度まで短くし、胴部径を大きくし、底部に液体水素を配置し、器壁材をアルミニウム合金の薄いものを使用することが効果があることが分かった。

冷中性子束の最も高い八橋形セルは短胴、液体水素厚さ 20mm、胴径 130mm、器壁材アルミニウム合金 0.65mm のモデルで、その冷中性子束は水筒形セルの最高値の約 1.5 倍、既存水筒形セル比は約 2.2 倍であった。しかし、八橋形セルは底部が球帽状であること及び上部が円盤形状であることから、液体水素量が既存水筒形セルの約 2 倍の 1300cc が多いこと、円盤形状部分の強度が弱いこと及び底部が球帽状であることから設置時に真空容器とのスペースに十分な余裕がないこと等の点において実現を容易にする観点からの改善が望まれた。このため、八橋形セルの袖部及び底部の球帽の半分を削除し、上部の円盤を

半球帽に変えた船底形セルについて更にサーベイ計算を行った。

3.3 船底形セル

3.3.1 液体水素厚さの効果

イ、目的及びパラメータ

冷中性子束に対する液体水素の厚さの寄与を検討する。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：胴部液体水素の高さ・143mm、胴部外半径・65mm

上部及び底部の半球帽の外径・65mm

器壁材・Al、厚さ・1.0mm

変動パラメータ：液体水素厚さ・15mm、17.5mm、20mm、22.5mm、25mm 及び 30mm

ロ、実施ケース及び結果

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び計算結果を Table3.12 に示す。液体水素厚さに対する中性子スペクトルの比較を Fig.3.12 に示す。また、液体水素厚さに対する冷中性子束の変化を Fig.3.13 に示す。

液体水素厚さは、上部、胴部及び底部ともセルの外形寸法を一定とし、セルの内側へ増加させた。

サーベイ計算の結果、液体水素厚さに対する冷中性子束の変化は Fig.3.13 から明らかのように、冷中性子束がピーク付近にある液体水素厚さは、20 ~ 25mm と広いことが分かった。

液体水素量は、厚さ 15mm で約 700cc、厚さ 30mm で約 1130cc である。

3.3.2 部位の効果

イ、目的及びパラメータ

セル小型化を図るため各部位が冷中性子束に与える効果を検討する。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：胴部液体水素厚さ・25mm、胴部高さ・143mm、

胴部外半径・65mm

器壁材・Al、厚さ・1.0mm

変動パラメータ：基準セルの構成（上部、胴部及び底部）から上部、底部、上部及び底部を順次削除する。

ロ、実施ケース及び結果

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び計算結果を Table3.13 に示す。削除した部位に対する中性子スペクトルの比較を Fig.3.14 に示す。

船底形セルの上部液体水素（半球帽）、底部液体水素（半球帽）及びこれら両方を削除

する三つのケースについてサーベイ計算し、それらの結果を削除しないケースと比較した。サーベイ計算の結果、上部または底部のいずれを削除しても冷中性子束は約 9% 減少すこと及び上部及び底部の両方を削除したときの減少率は約 17% と非常に大きいことが分かった。

3.3.3 設置位置の効果

イ、目的及びパラメータ

冷中性子束を高めるため及びセルの設置精度上の余裕を知るため位置の寄与を検討する。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：胴部高さ・143mm

器壁材・Al、厚さ・1.0mm

変動パラメータ：液体水素厚さ・20mm(小)、25mm(大)、

設置位置・基準位置（セルの凹面が 9C 孔に正対し、真空容器内壁とセルの壁の間隔が 4mm の位置）から 9C 孔側へ 20mm 水平移動

- ・基準位置から 9C 孔側へ 20mm 水平移動及び底部半球帽を真空器底から 20mm 離す。

回転角度・真空容器の垂直中心軸の廻りに基準角度 0° から 180° 回転

ロ、実施ケース及び結果

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び結果を Table3.14 に示す。設置位置に対する中性子スペクトルの比較を Fig.3.15 に示す。

設置位置の効果について実施した三つのケースの結果は、以下の通りである。

液体水素の厚さ 20mm のセルを基準位置から 20mm 9C 孔側へ平行移動した時（真空容器壁とセル側壁の間隔は 24mm）の冷中性子束は約 8 % 減少した。

液体水素の厚さ 20mm のセルを真空容器垂直軸を中心にして基準位置から 180° 回転した時の冷中性子束は、約 50% と大きく減少した。

液体水素の厚さ 25mm のセルを基準位置から 9C 孔側へ 10mm 水平移動すると同時に底部半球帽と真空容器壁の距離を 20mm とした時の冷中性子束は約 5% 減少した。

これら三つのケースでは、9C 孔視野内の液体水素及び器壁材の配置状況は、変化していないにもかかわらず冷中性子束は基準位置に比べて減少している。この冷中性子束の減少は、基本的には液体水素が真空容器内の熱中性子束の低い位置に置かれることによると考えられる。

3.3.4 ボイド率の効果

イ、目的及びパラメータ

CNS の運転時にはセル内でのボイドの発生は避けられないため、冷中性子束に対する

ボイド率の寄与を検討する。なお、多くの CNS で推定されているボイド率は 10 ~ 15% である[12]。

以下のパラメータ条件で 9C 孔内の中性子スペクトルを計算した。

固定パラメータ：上部、胴部及び底部の液体水素厚さ・25mm、胴部高さ・143mm、
器壁材・Al、厚さ・1.0mm

変動パラメータ：ボイド率・0 %、10 %、20 %及び 30 %（ボイドは均一に分布とする）

ロ、実施ケース、結果及び評価

実施したサーベイ計算の変動パラメータ及び結果を Table3.15 に示す。ボイド率に対する中性子スペクトルの比較を Fig.3.16 に示す。また、液体水素中にボイドが存在する場合の実効液体水素厚さ及びボイドが存在しない場合の液体水素厚さに対する冷中性子束の変化を Fig.3.17 に示す。

液体水素の厚さ 25mm のセルの液体水素中に水素ガスがボイドとして均一に存在する時の効果を、ボイド率 10%、20% 及び 30% についてサーベイ計算した。これらのボイド率に対する液体水素の実効厚さは、順に 22.5mm、20.0mm 及び 17.5mm である。

ボイド率に対する冷中性子束の関係は、Fig.3.17 に示すようにボイド率 10% をピークとする曲線になる。この曲線は、同図に示されているボイドが存在しない場合の液体水素厚さに対する曲線と比較すると、ボイド率 10% の場合同じ実効液体水素厚さに対して約 2 % 高く、実効液体水素厚さ 25.0mm ~ 20.0mm の範囲で、ボイドを含む曲線の方が液体水素厚さを変えた曲線より僅かに上にある。原因としては以下のことが考えられる。

実効液体水素厚さを変化させる場合、液体水素厚さの効果を見るサーベイ計算ではセルの厚さを液体水素の厚さに伴って変化させたが、ボイド率の効果では、セルの厚さを一定（25mm）とし、液体水素の密度を変えることにより液体水素の実効厚さを変化させたことによるセルの寸法効果と密度効果が複合した効果によると考えられる。

3.3.5 船底形セルのサーベイ計算結果の検討

船底形セルでは冷中性子束がピークとなる液体水素の厚さは、20 ~ 25mm と広いこと及び液体水素厚さが 25mm の場合ボイド率が 10% ~ 30% 存在しても冷中性子束はボイド率 0% より大きいことが分かった。

セルの上部及び下部の冷中性子束に及ぼす影響はそれぞれ約 9% であり、セルの構成上重要な部位であることが分かった。設置位置の効果としては、液体水素を熱中性子束の高い位置に配置するのが良いことを確認した。

器壁材の効果では、アルミニウム合金の場合厚さ 1.0mm と 2.0mm との冷中性子束の差はわずかであり、このことはセルの製作上好都合であるといえる。

船底形セルで最も高い冷中性子束を発生するセルモデルは液体水素厚さ 25mm、器壁材アルミニウム合金 1.0mm、ボイド率 10% のモデルであり、冷中性子束は水筒形セルの最高値の約 1.4 倍、既存水筒形比で約 2 倍であった。また、既存水筒形セルの中性子スペクトルに対する船底形セルの中性子スペクトルの比は Fig.3.18 に示すように波長 3 ~ 12 Å で約 2 以上であることが分かった。

Table 3.1 List of parametric survey calculations for suito-type moderator cell

Case	Parameters					Result	
	Moderator Thickness & Volume		Wall		Other Parameters		
	Body (mm)	Volume (cc)	Thickness (mm)	Material			
711-6k	50	792	0.8	SUS	Original Cell	2.94	
711-7k	30	475	0.8	SUS		3.57	
711-8k	20	317	0.8	SUS		3.43	
711-9k	60	950	0.8	SUS		2.69	
711-ak	30	475	0.8	Al		4.23	
711-bk	30	475	0.8	Al	Be reflector	4.47	
711-ck	30	475	1.5	Al	Be reflector	4.46	
711-dk	30	475	2.0	Al	Be reflector	4.45	
711-ek	25	396	0.8	SUS		3.64	
711-fk	35	554	0.8	SUS		3.54	
711-hk	70	1100	0.8	SUS		2.37	

Note:

* Cold neutron flux: maximum value in the range 3.5~4.5 meV

Table 3.2 List of parametric survey calculations for yatsuhashi-type moderator cell

Case	Parameters						Result	
	Moderator Part, Thickness, Position & Total Volume				Wall			
	Body (mm)	Upper Part (mm)	Bottom Part	Volume (cc)	Thickness (mm)	Material		
mnd-3k	20	20 (Be)		1026	0.65	Al	5.90	
mnf-3k	20	20 (Be)	20	1433	0.65	Al	6.50	
mng-3k	20 (short)	20 (Be)	20	1305	0.65	Al	6.64	
mnh-3k	20 (short)	20	20	1305	0.65	Al	6.41	
mnj-3k	20 (short)	20	20	1305	1.00	Al	6.37	
mnk-3k	20 (short)	20	20	1305	1.5	Al	6.31	
mnl-3k	20 (short, small)	20	20	1086	0.65	Al	5.85	
mnm-3k	20 (short,small,angle 30)	20	20	1086	0.65	Al	6.30	
mnn-3k	20 (short)	20	20	1245	0.65	Al	6.39	
mno-3k	20 (short, angle 45)	20	20	1245	0.65	Al	5.99	

Note

* Shape of parts : upper part - disk, body - yatsuhashi, bottom part - cap

* Body height : short - 173 mm, the others - 190 mm

* Outer radius of body : small - 60 mm, others - 65 mm

* Orientation angle formed by crossing center lines of cell and beam tube : angle - 45, 30 ,the others - 0°

* Cold neutron flux: maximum. value in the range 3.5~4.5 meV

* Upper part: Be - with Be reflector, the others - without Be reflector

Table 3.3 List of parametric survey calculations for boat-bottom-type moderator cell

Case	Parameters						Other	Result Cold Neutron Flux (x 1E-5 n/cm ² .eV.source)		
	Moderator Thickness & Volume				Wall					
	Body (mm)	Upper Part (mm)	Bottom Part (mm)	Volume (cc)	Thickness (mm)	Material				
ym1-3k	20	20	20	856	1.0	Al		5.84		
ym2-3k	20	20	20	856	1.0	Al	20 shifted to the beam tube	5.42		
ym3-3k	25	25	25	1003	1.0	Al		5.83		
ym4-3k	30	30	30	1127	1.0	Al		5.66		
ym3f1	25		25	791	1.0	Al		5.29		
ym3f2	25	25		791	1.0	Al		5.33		
ym3f3	25			578	1.0	Al		4.83		
ym3v1	25	25	25	903	1.0	Al	void frac 10%	5.98		
ym3v2	25	25	25	802	1.0	Al	void frac 20%	5.86		
ym3v3	25	25	25	702	1.0	Al	void frac 30%	5.74		
ym5-3k	25	25	25	1003	1.0	Al	10 shifted to the beam tube, 20 lifted up	5.57		
ym6-3k	20, angle 180	20	20	856	1.0	Al	reversed of ym3-3k	2.99		
ym7-3k	22.5	22.5	22.5	921	1.0	Al		5.84		
ym8-3k	25	25	25	1003	2.0	Al		5.81		
ym10-3k	17.5	17.5	17.5	784	1.0	Al		5.75		
ym11-3k	15	15	15	693	1.0	Al		5.52		

Note

- * Shape of parts: upper & bottom parts – half cap, body – boat bottom
- * Body height & outer radius: 143 mm & 65 mm
- * Orientation angle formed by crossing center lines of cell and beam tube
angle – 180, the others – 0
- * Cold neutron flux: max. value in the range 3.5~4.5 meV

Table 3.4 Parametric survey on the liquid hydrogen thickness
for suito-type moderator cell with 0.8 mm thick SUS wall

ケース名	変動パラメータ							計算結果（最大値）	
	液体水素厚さmm								
	20	25	30	35	50	60	70	冷中性子束 x10 ⁻⁵ n/cm ² .eV.source	既存水筒形比
711-8k	O							3.43	1.17
711-ek		O						3.64	1.24
711-7k			O					3.57	1.21
711-fk				O				3.54	1.20
711-6k					O			2.94 (基準値)	1.00
711-9k						O		2.69	0.91
711-hk							O	2.37	0.81

注：既存水筒形の液体水素の厚さは50mmである（ケース711-6k）

Table 3.5 Parametric survey on the cell wall materials for suito-type moderator
cell with 30 mm thick LH₂ and 0.8 mm thick wall

ケース名	変動パラメータ		計算結果（最大値）	
	器壁材料		冷中性子束 $\times 10^{-5}$ $n/cm^2.eV.source$	既存水筒形比
	SUS	Al		
711-7k	O		3.57	1.21
711-ak		O	4.23	1.44

Table 3.6 Parametric survey on the aluminum alloy wall thickness
for suito-type moderator cell with 30 mm thick LH₂ and Be reflector

ケース名	変動パラメータ			計算結果（最大値）	
	Al 器壁材厚さmm			冷中性子束 $\times 10^{-5}$ $n/cm^2.eV.source$	既存水筒形比
	0.8	1.5	2.0		
711-bk	O			4.47	1.52
711-ck		O		4.46	1.52
711-dk			O	4.45	1.51

Table 3.7 Parametric survey on the length of the body part for yatsuhashitype moderator
cell with 20 mm thick LH₂, 0.65 mm thick Al wall and Be reflector

ケース名	変動パラメータ		計算結果（最大値）	
	胴部長さ		冷中性子束 $\times 10^{-5}$ $n/cm^2.eV.source$	既存水筒形比
	長 190 mm	短 173 mm		
mnf-3k	O		6.50	2.21
mng-3k		O	6.64	2.26

Table 3.8 Parametric survey on the radius of the body-part for yatsuhashi-type
moderator cell with 20 mm thick LH₂ and 0.65 mm thick Al wall

ケース名	変動パラメータ		計算結果（最大値）	
	胴部の外径		冷中性子束 $\times 10^{-5}$ $n/cm^2.eV.source$	既存水筒形比
	小 60 mm	大 65 mm		
mnl-3k	O		5.85	1.99
mnn-3k		O	6.39	2.17

Table 3.9 Parametric survey on the bottom-part effects
for yatsuhashi-type moderator cell

ケース名	変動パラメータ		計算結果（最大値）	
	セル底部			
	有	無	冷中性子束 $\times 10^{-5}$ $n/cm^2.eV.source$	既存水筒形比
mnd-3k		0	5.90	2.01
mnf-3k	0		6.50	2.21

Table 3.10 Parametric survey on the orientation angle effects for yatsuhashitype
moderator cell with 20 mm thick LH₂ and 0.65 mm thick Al wall

ケース名	変動パラメータ					計算結果（最大値）	
	設置角度			胴部の外半径			
	0°	30°	45°	小 60 mm	大 65 mm	冷中性子束 $\times 10^{-5}$ $n/cm^2.eV.source$	既存水筒形比
mnl-3k	0			0		5.85	1.99
mmn-3k		0		0		6.30	2.14
mnn-3k	0				0	6.39	2.17
mno-3k			0		0	5.99	2.04

Table 3.11 Parametric survey on the aluminum alloy wall thickness
for yatsuhashi-type moderator cell with 20 mm thick LH₂ and short body

ケース名	変動パラメータ			計算結果（最大値）	
	Al 壁厚mm				
	0.65	1.0	1.5	冷中性子束 $\times 10^{-5}$ $n/cm^2.eV.source$	既存水筒形比
mnh-3k	0			6.41	2.18
mnj-3k		0		6.37	2.17
mnk-3k			0	6.31	2.15

Table 3.12 Parametric survey on the liquid hydrogen thickness
for boat-bottom-type moderator cell with Al 1.0 mm thick wall

ケース名	変動パラメータ						計算結果（最大値）	
	液体水素厚mm							
	15	17.5	20	22.5	25	30	冷中性子束 $\times 10^{-5}$ $n/cm^2.eV.source$	既存水筒形比
ym11-3k	0						5.52	1.88
ym10-3k		0					5.75	1.96
ym1-3k			0				5.84	1.99
ym7-3k				0			5.84	1.99
ym8-3k					0		5.81	1.98
ym4-3k						0	5.66	1.93

Table 3.13 Parametric survey on the cell parts contribution for boat-bottom-type
moderator cell with 25 mm thick LH₂ and 1.0 mm thick Al wall

ケース名	変動パラメータ		計算結果（最大値）	
	部位			
	上部	底部	冷中性子束 $\times 10^{-5}$ $n/cm^2.eV.source$	既存水筒形比
ym3-3k	有	有	5.83	1.98
ym3f1	無	有	5.29	1.80
ym3f2	有	無	5.33	1.81
ym3f3	無	無	4.83	1.64

Table 3.14 Parametric survey on the cell position effects for boat-bottom-type
moderator cell with Al 1.0 mm thick wall

ケース名	変動パラメータ			計算結果（最大値）	
	胴部厚さ mm	設置位置 mm	回転角度		
ym1-3k	20			5.84	1.99
ym2-3k	20	20水平		5.42	1.84
ym6-3k	20		180 °	2.99	1.02
ym3-3k	25			5.83	1.98
ym5-3k	25	10水平、 底面間隔20		5.57	1.89

Table 3.15 Parametric survey on the void ratio effects for boat-bottom-type moderator cell with 25 mm thick LH₂ and 1.0 mm thick Al wall

ケース名	変動パラメータ				計算結果（最大値）	
	ボイド率%					
	0	10	20	30	冷中性子束 $\times 10^5$ n/cm ² .eV.source	既存水筒形 比
ym3-3k	O				5.83	1.98
ym3v1		O			5.98	2.03
ym3v2			O		5.86	1.99
ym3v3				O	5.74	1.95

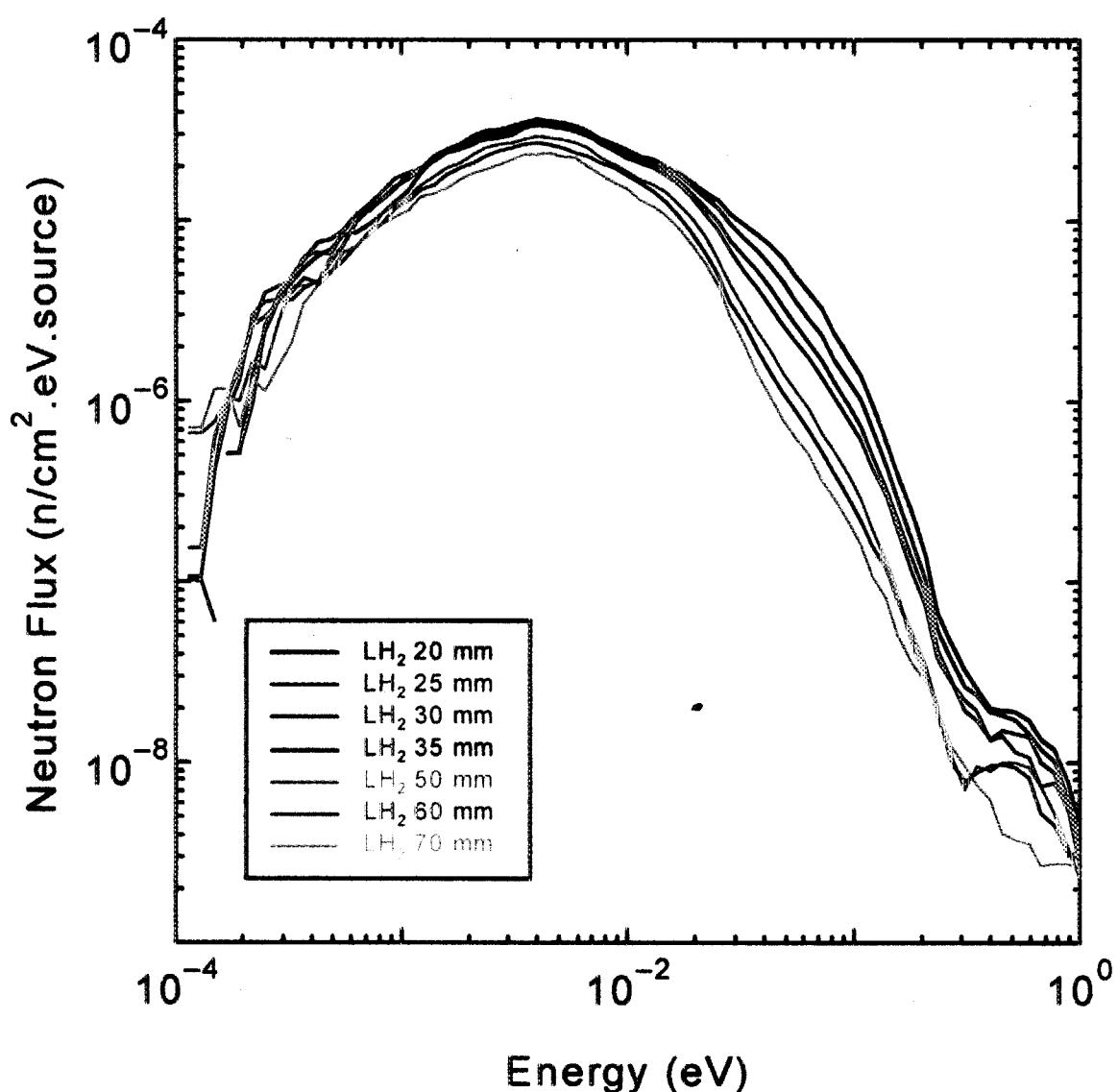


Fig. 3.1 Neutron spectra of different thickness of liquid hydrogen for suito-type moderator cell with 0.8 mm thick SUS wall

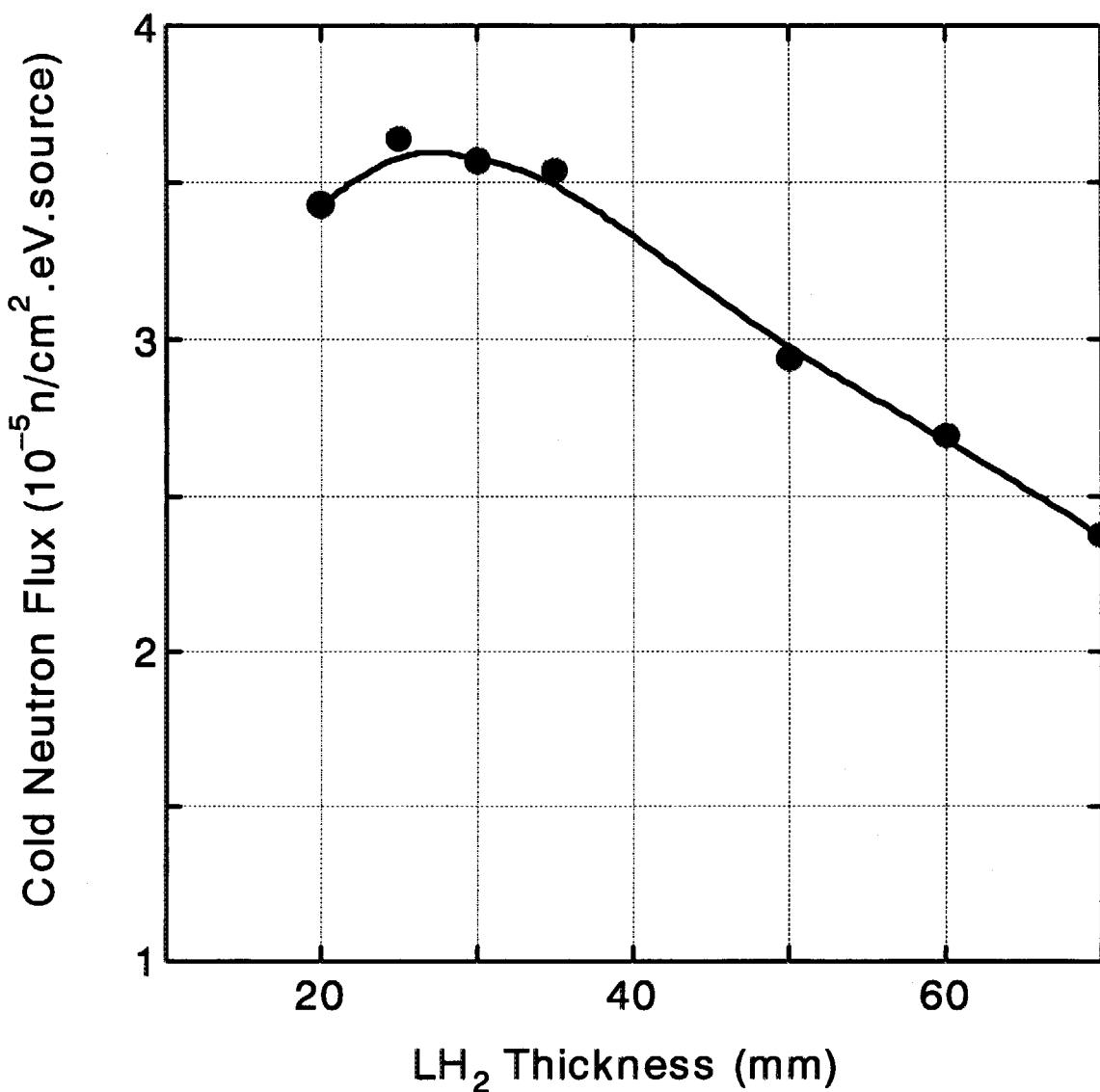


Fig. 3.2 Change of cold neutron flux as a function of liquid hydrogen thickness for suito-type moderator cell with 0.8 mm thick SUS wall

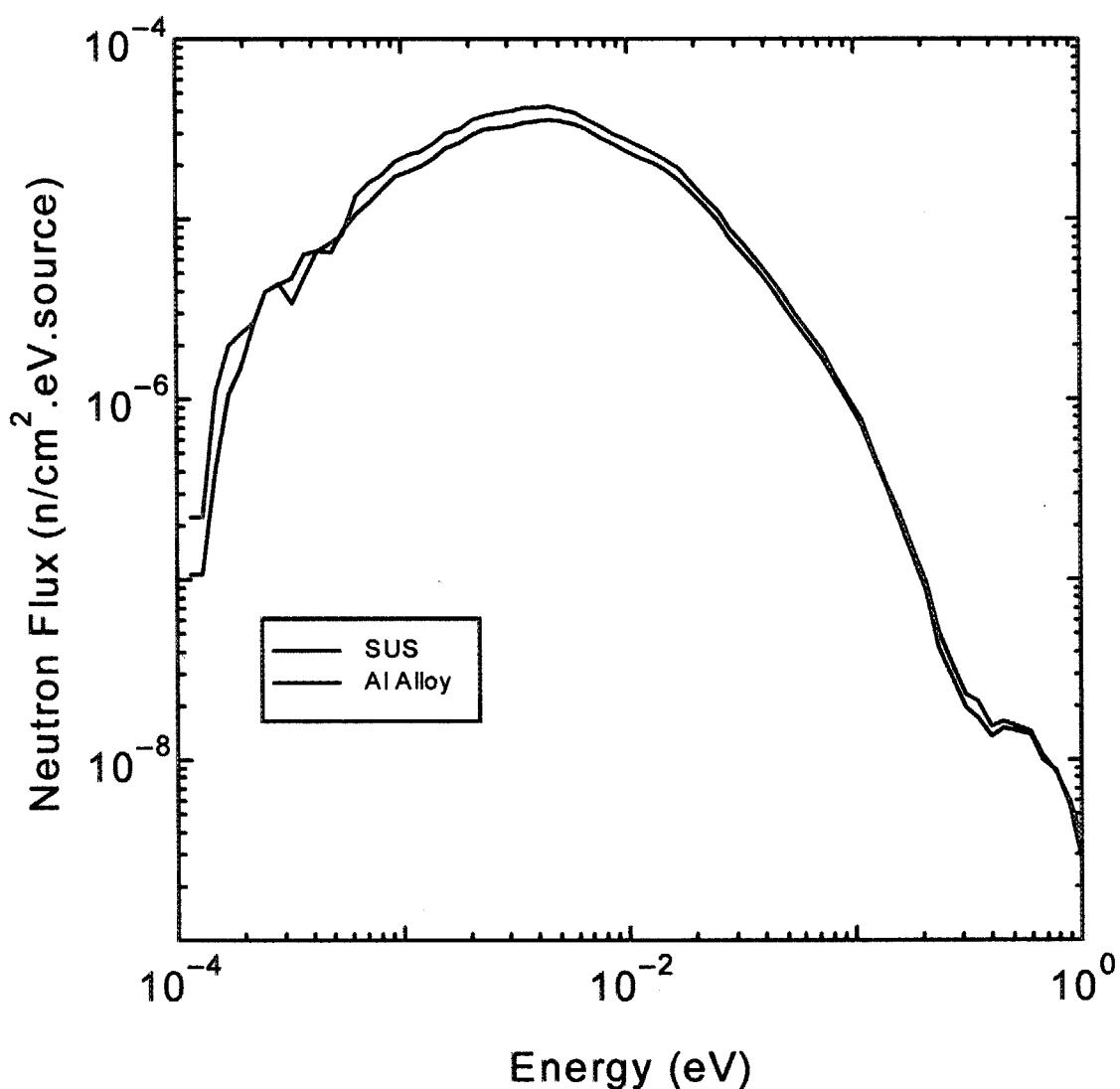


Fig. 3.3 Neutron spectra of different materials, aluminum alloy and stainless steel, for suito-type moderator cell with 30 mm thick LH₂ and 0.8 mm thick wall

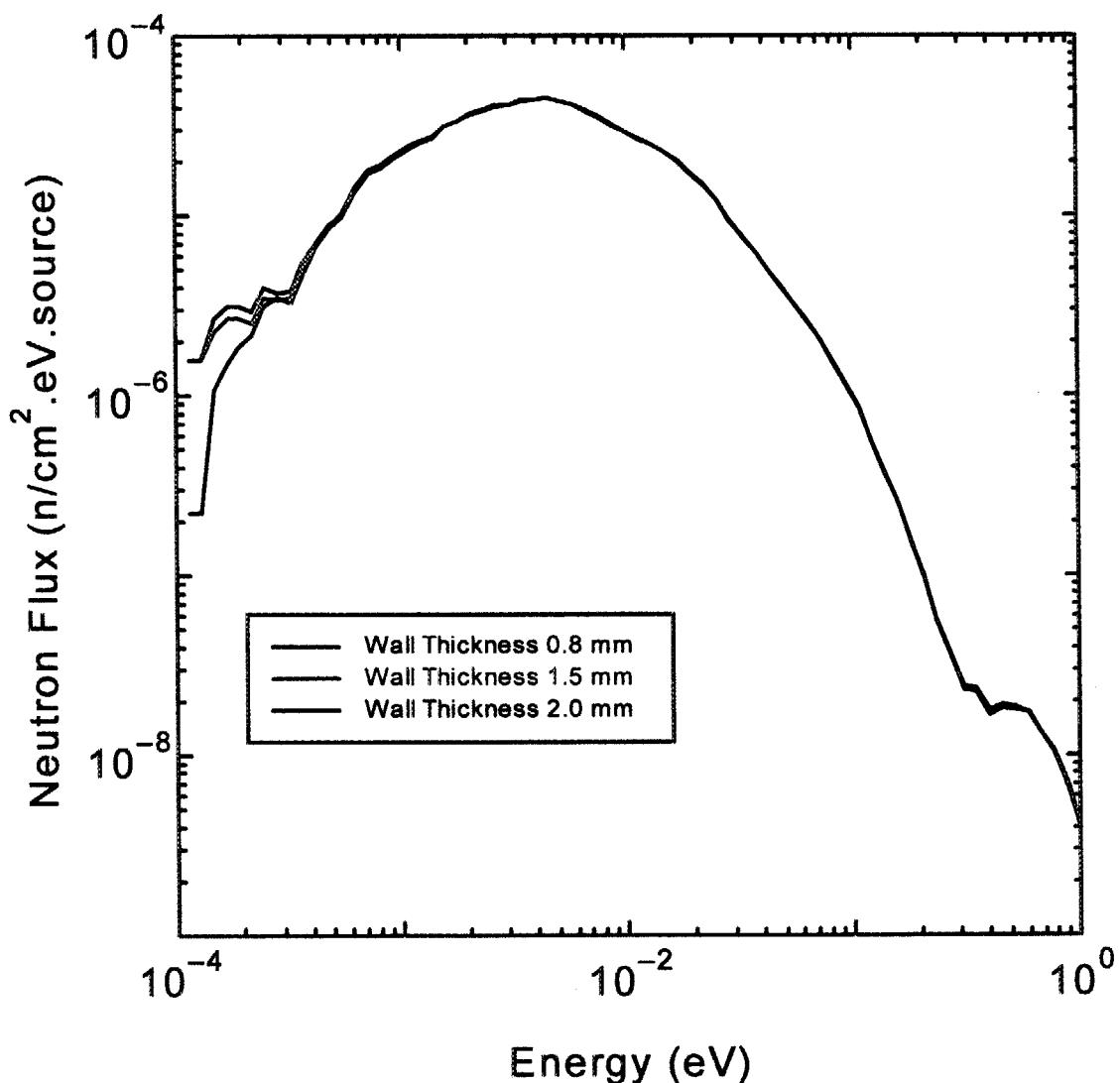


Fig. 3.4 Neutron spectra of different thickness of cell wall made of aluminum alloy for suito-type moderator cell with 30 mm thick LH₂

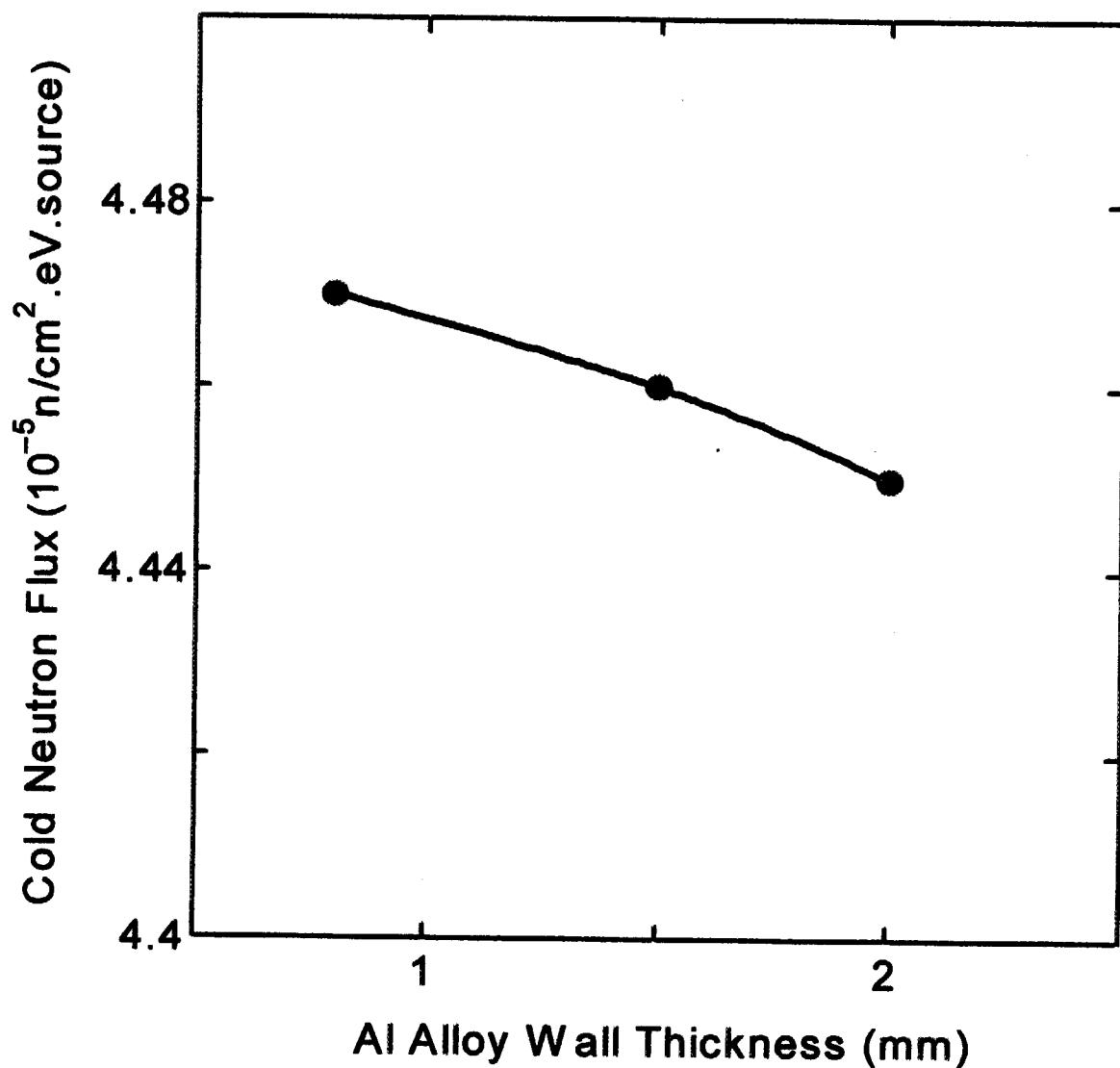


Fig. 3.5 Change of cold neutron flux as a function of aluminum alloy wall thickness for suito-type moderator cell with 30 mm thick LH₂

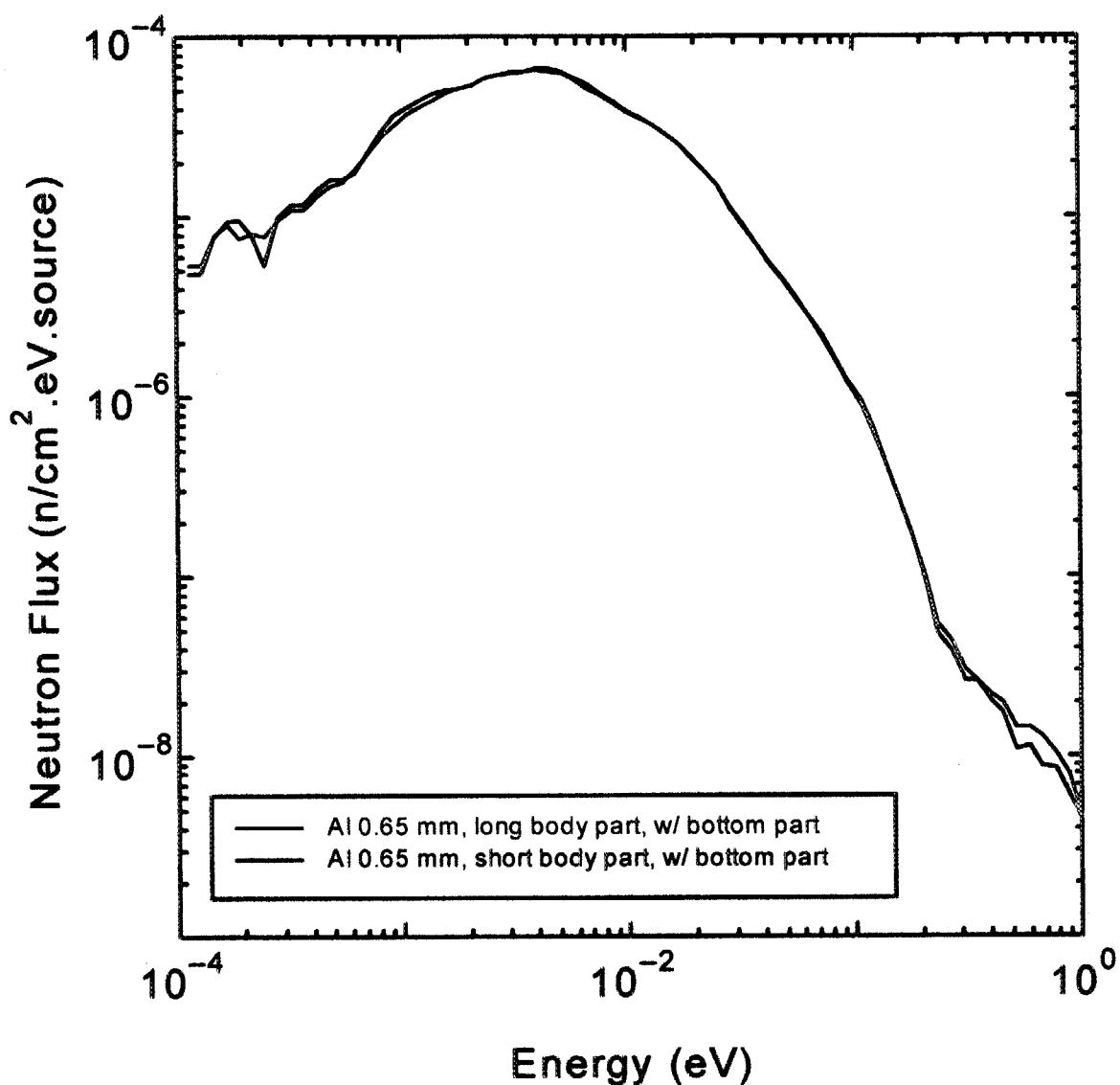


Fig. 3.6 Neutron spectra as a function of length of the body-part for yatsuhashi-type moderator cell with 20 mm thick LH₂ and Be reflector

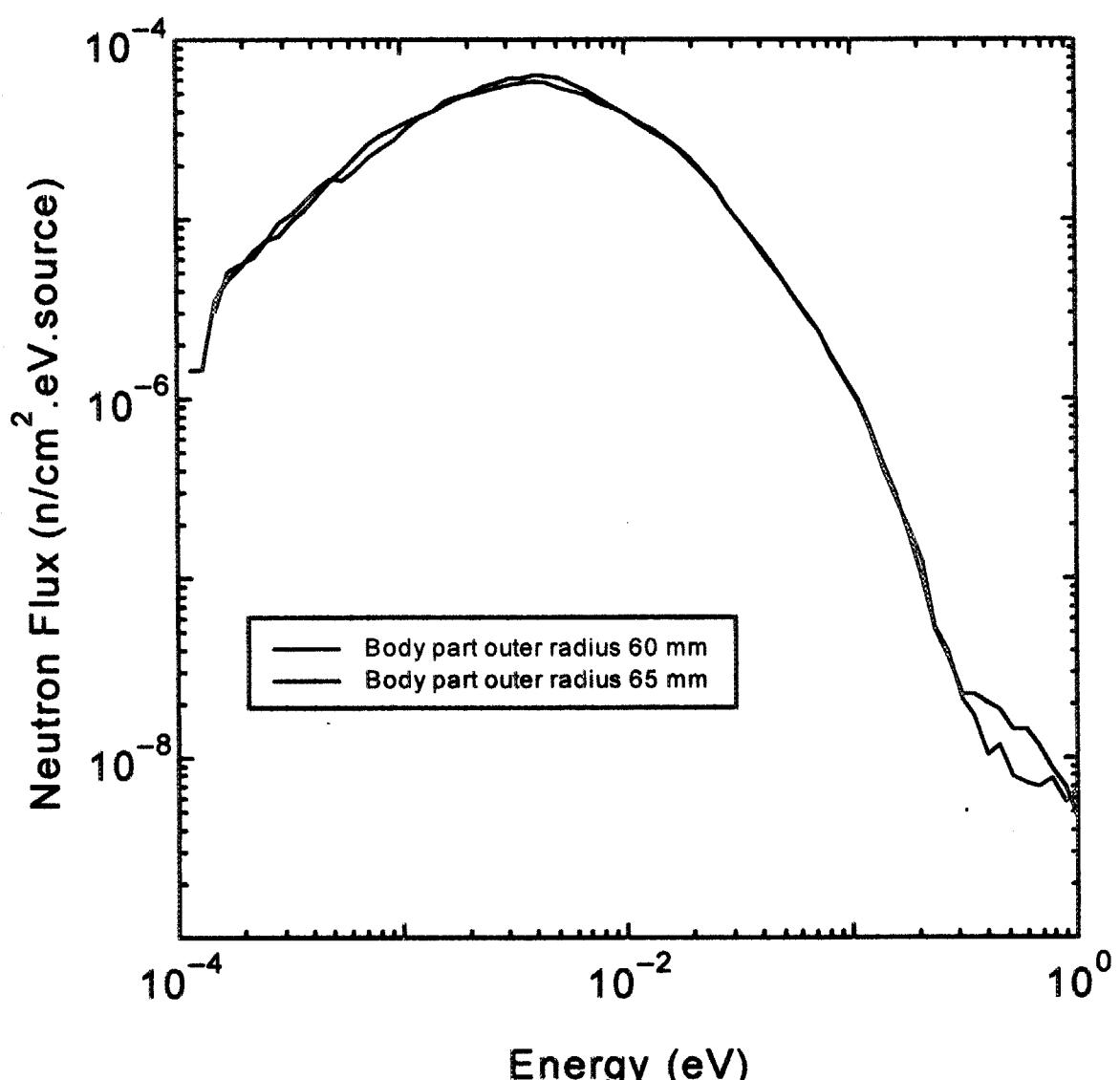


Fig. 3.7 Effect of outer radius of the short body-part for yatsuhashi-type moderator cell with 20 mm thick LH₂ and 0.65 mm thick Al wall

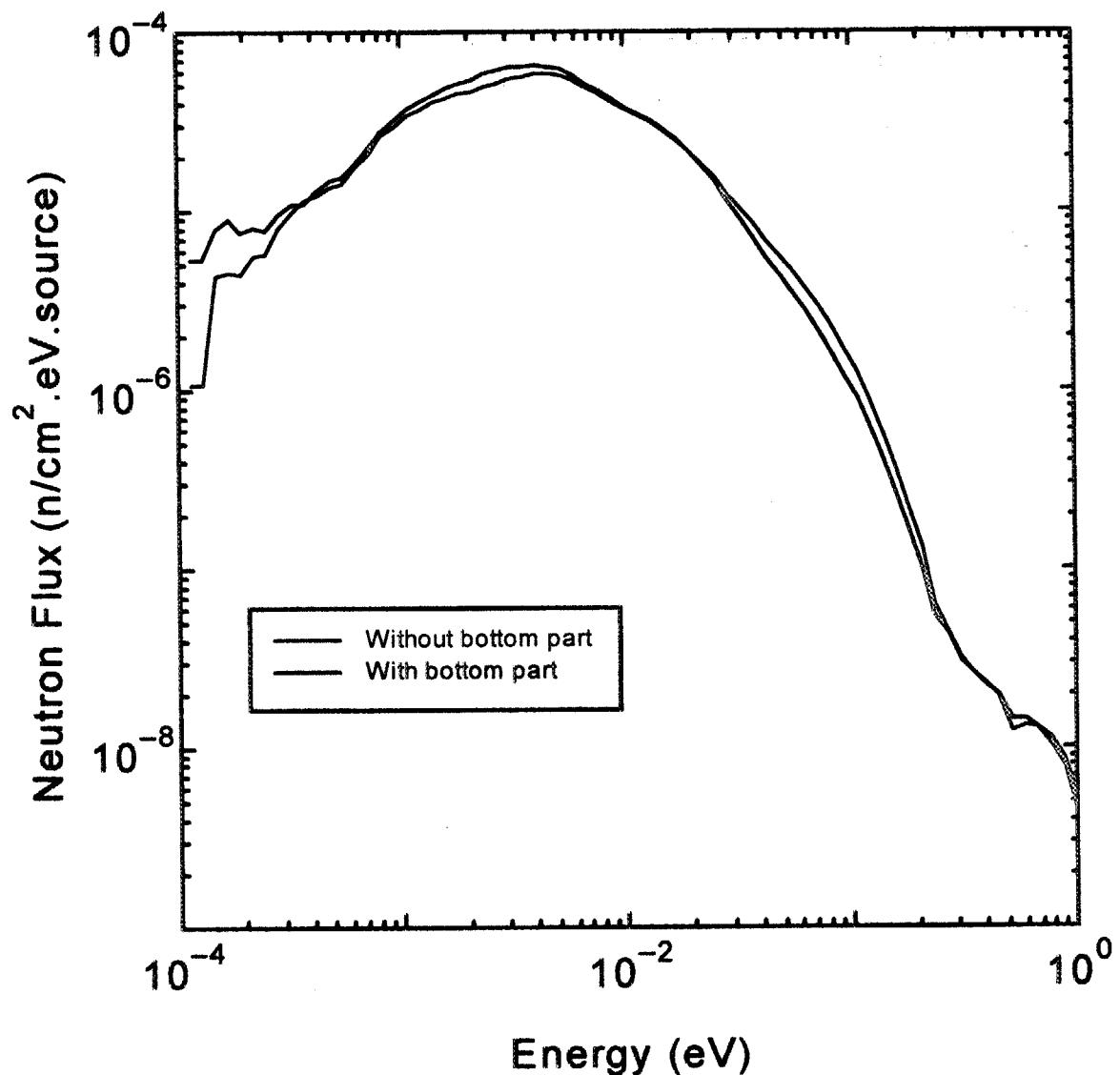


Fig. 3.8 Effect of the bottom-part existence on the neutron spectra for yatsuhashi-type moderator cell with 20 mm thick LH₂, 0.65 mm thick Al wall and long body

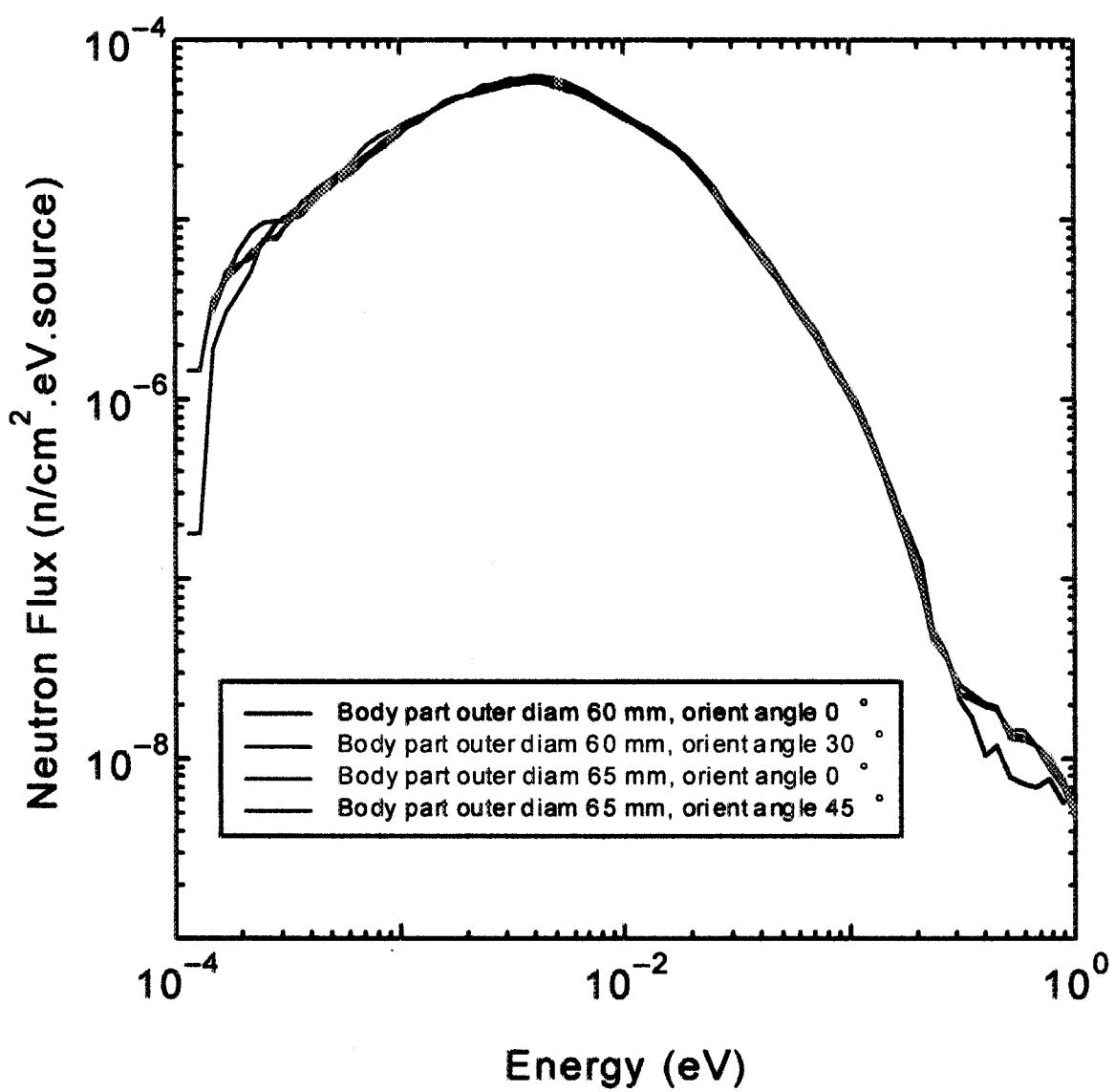


Fig. 3.9 Neutron spectra of different orientation angles for yatsuhashi-type moderator cell with 20 mm thick LH_2 , 0.65 mm thick Al wall and short body

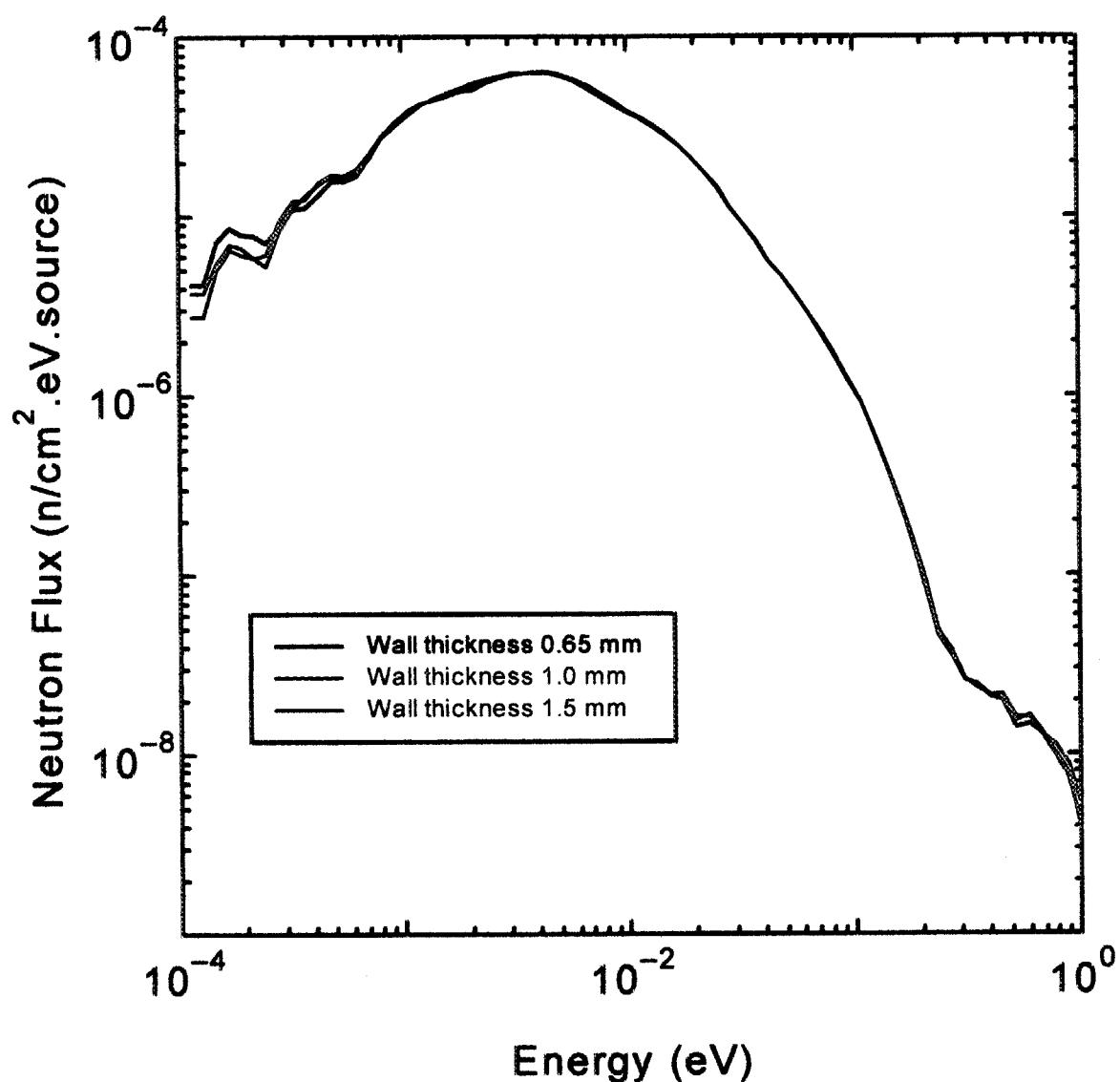


Fig. 3.10 Neutron spectra as a function of aluminum alloy wall thickness for yatsuhashi-type moderator cell with 20 mm thick LH₂ and short body

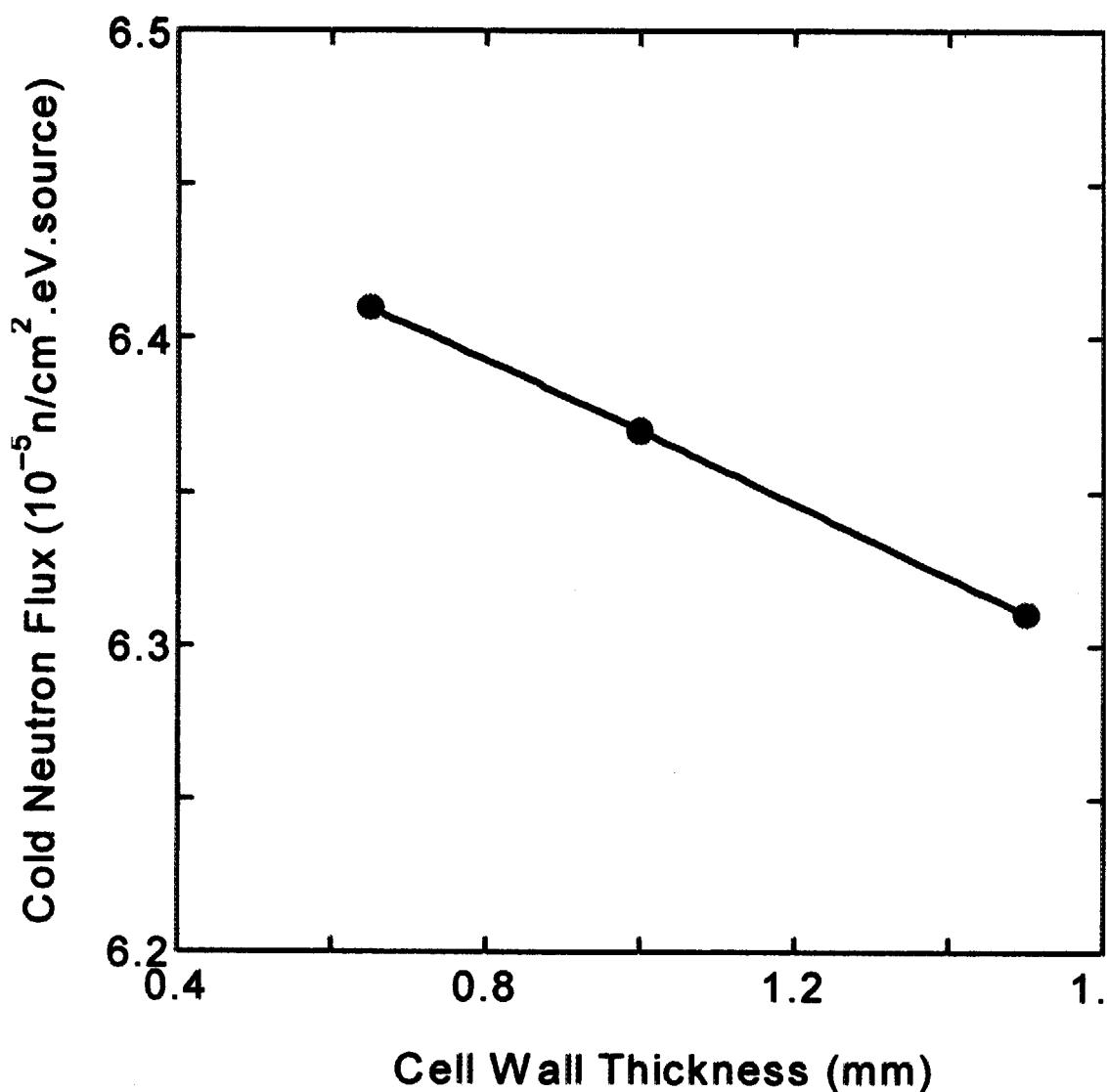


Fig. 3.11 Change of cold neutron flux as a function of aluminum alloy
wall thickness for yatsuhashi-type moderator cell

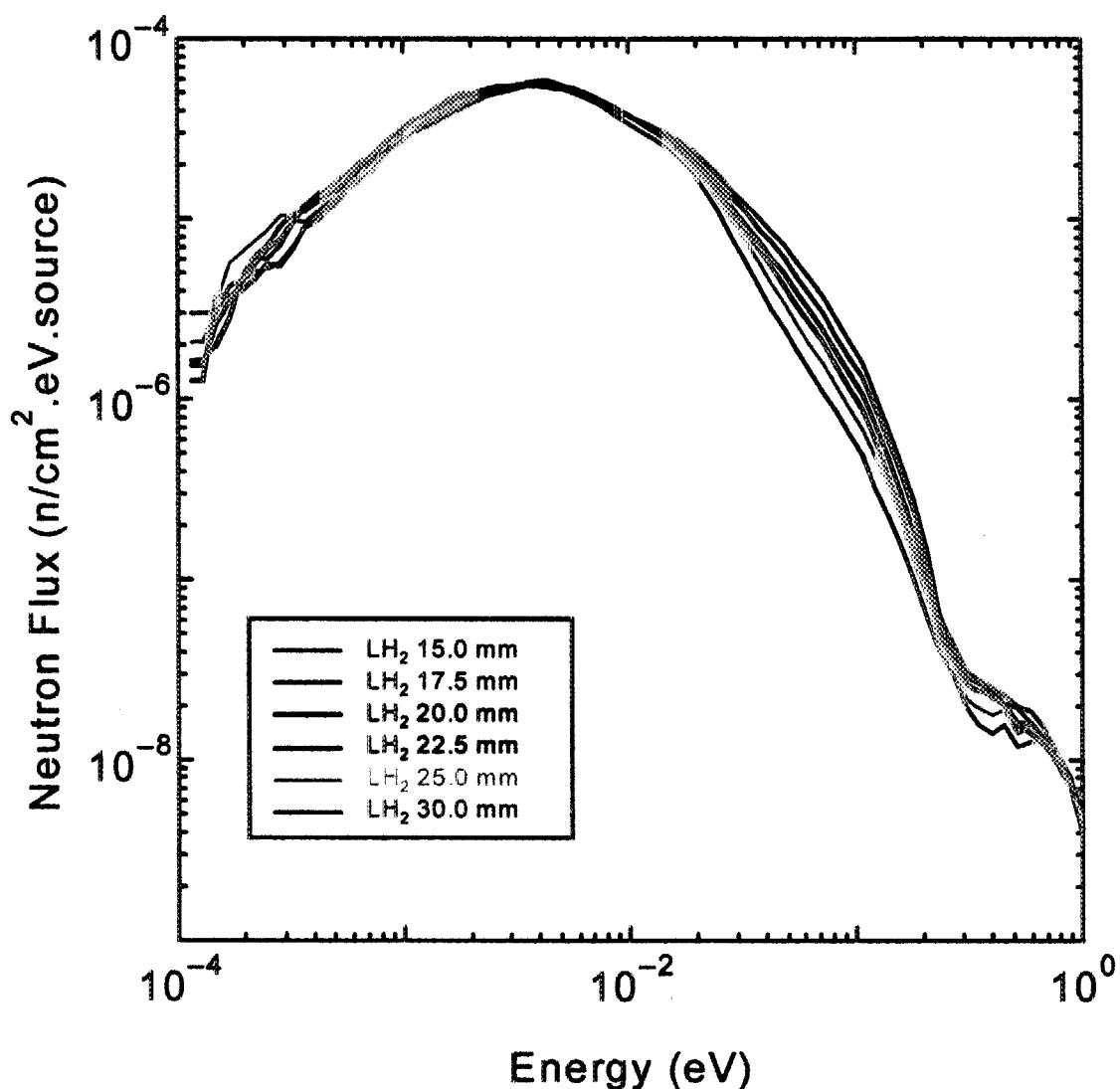


Fig. 3.12 Neutron spectra as a function of liquid hydrogen thickness
for bottom-boat-type moderator cell with 1.0 mm thick Al wall

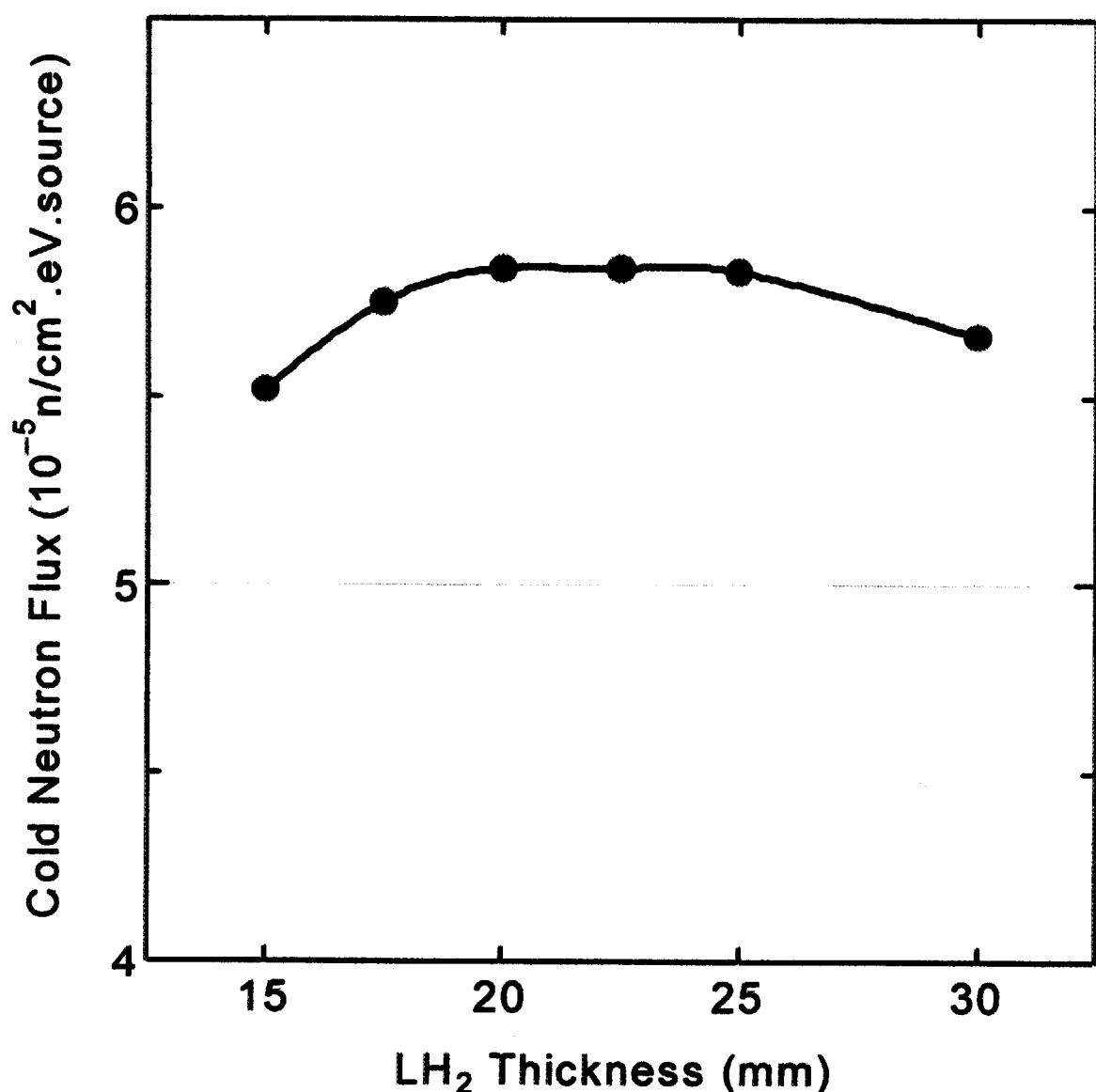


Fig. 3.13 Change of cold neutron flux as a function of liquid hydrogen thickness for bottom-boat-type moderator cell with 1.0 mm thick Al wall

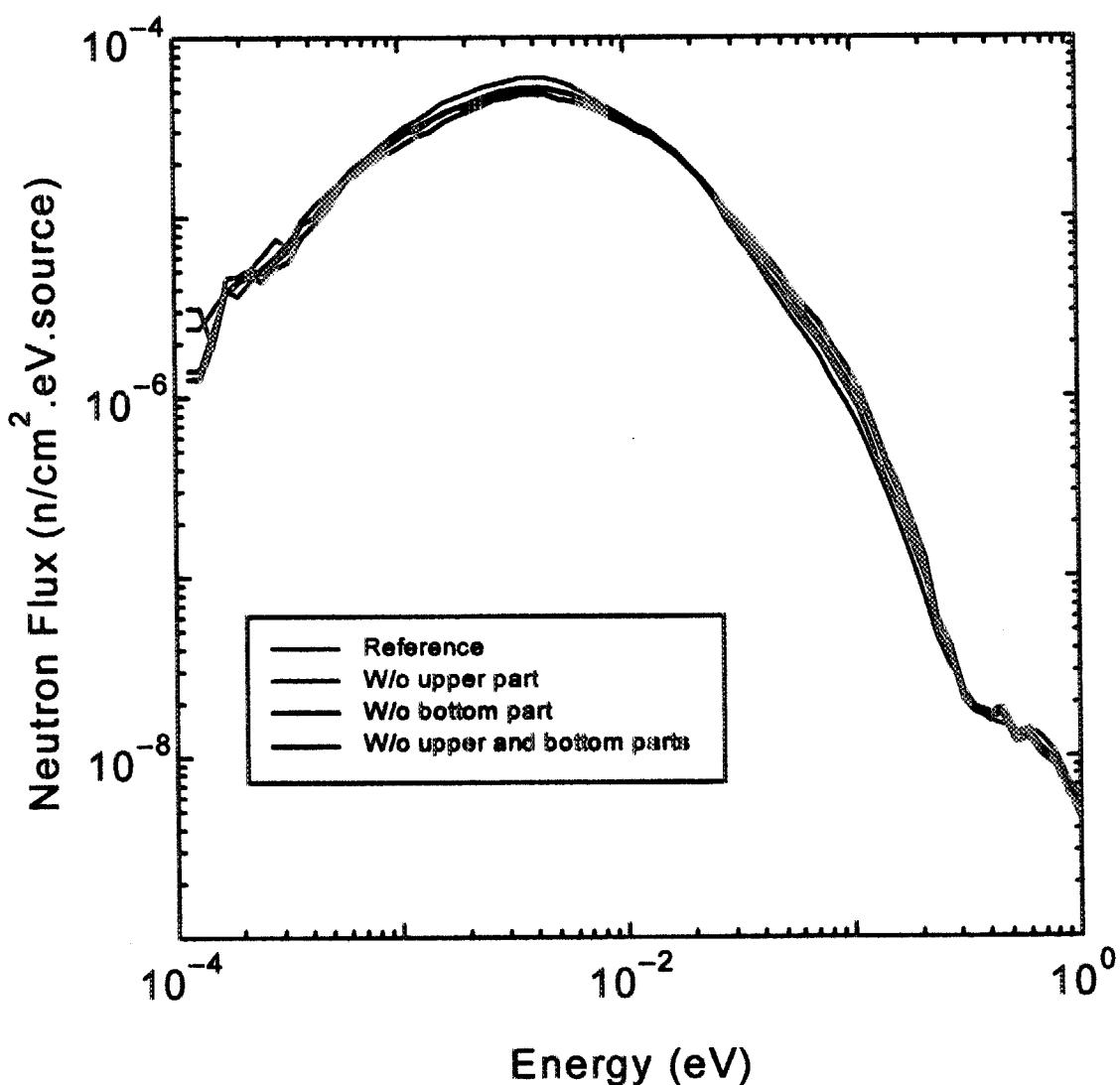


Fig. 3.14 Effect of the cell parts on the neutron spectra for boat-bottom-type moderator cell with 25 mm thick LH₂ and 1.0 mm thick Al wall

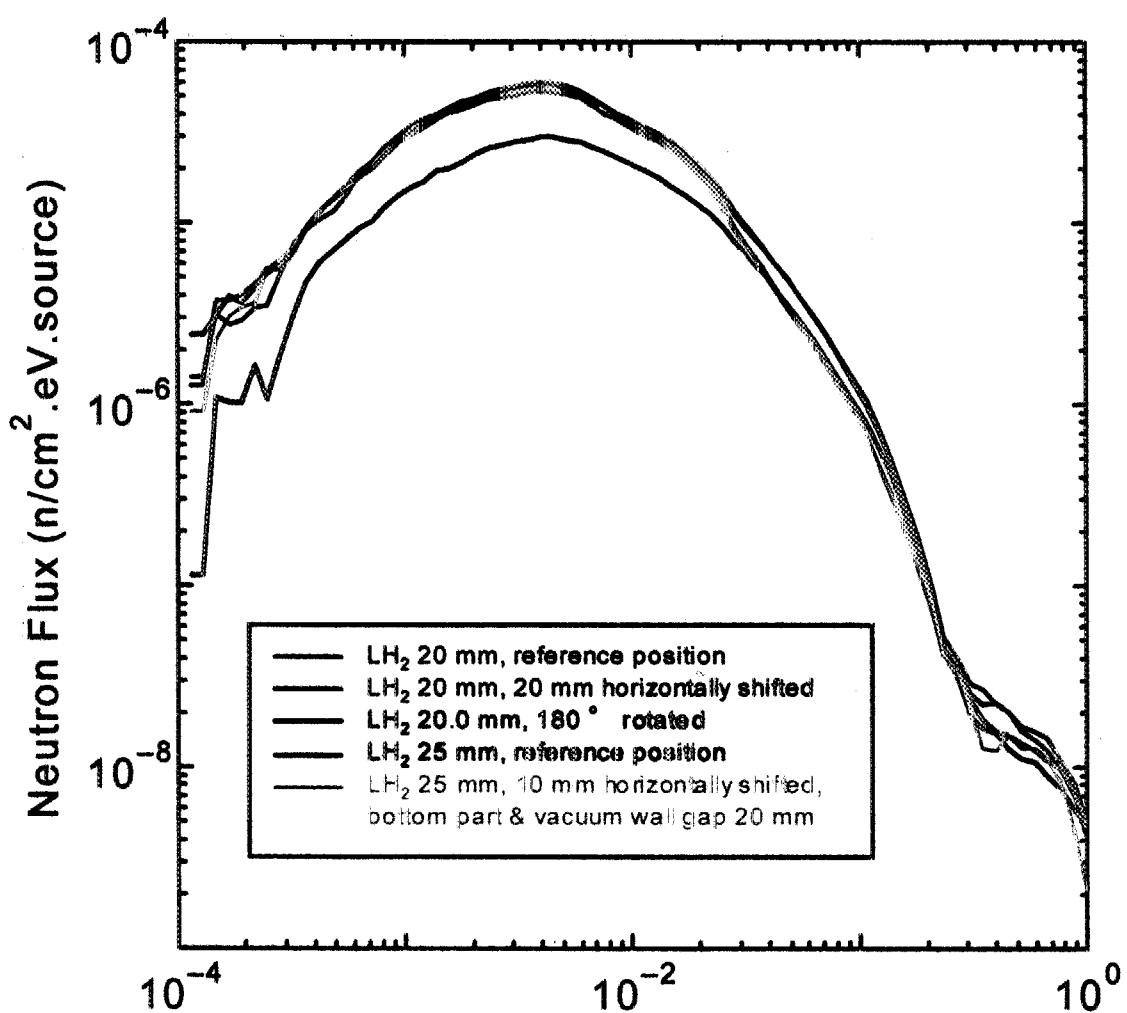


Fig. 3.15 Neutron spectra as a function of cell position for boat-bottom-type moderator cell with 1.0 mm thick Al wall

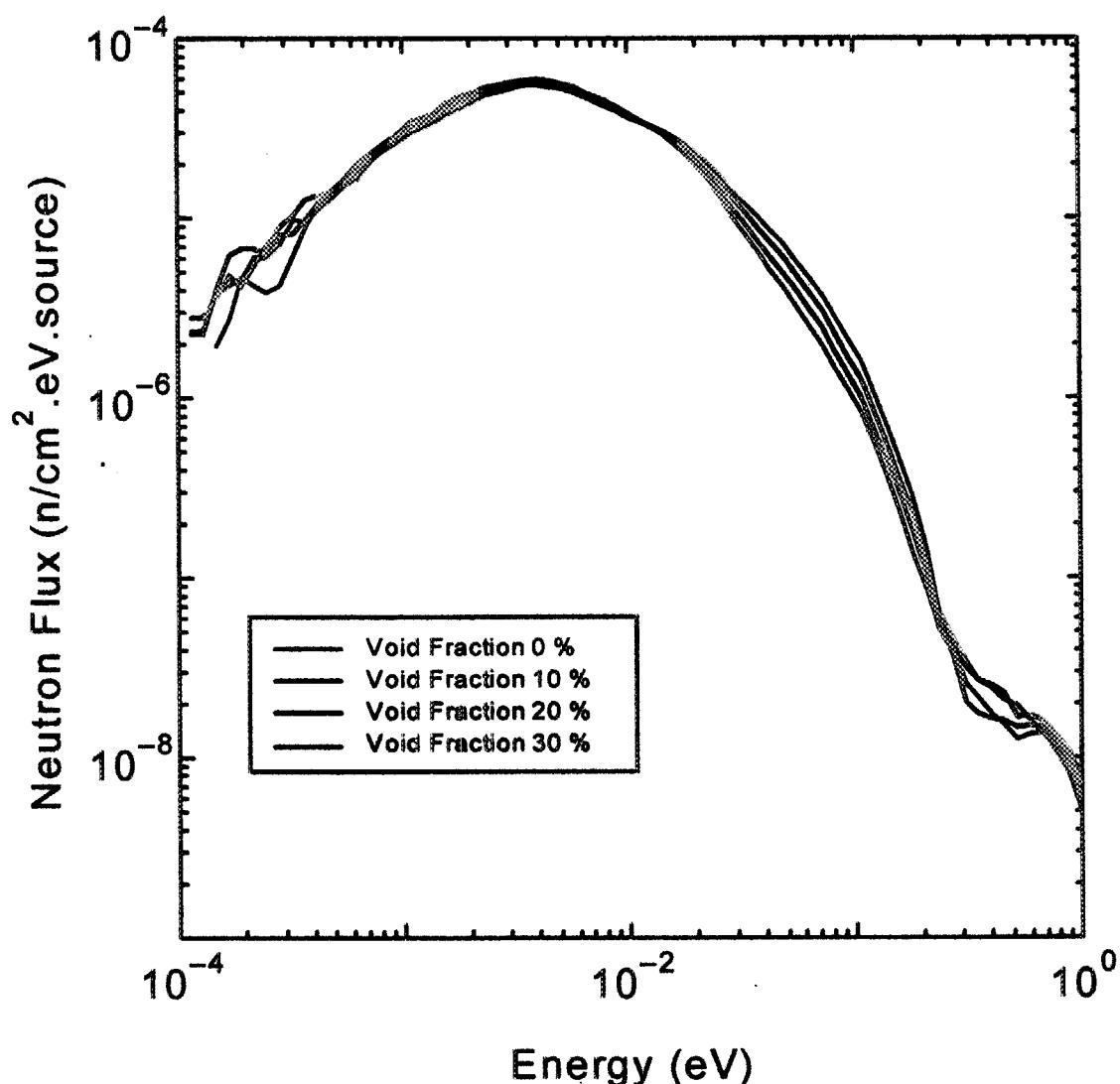


Fig. 3.16 Neutron spectra as a function of liquid hydrogen void ratio for boat-bottom-type moderator cell with 25 mm thick LH₂ and 1.0 mm thick Al wall

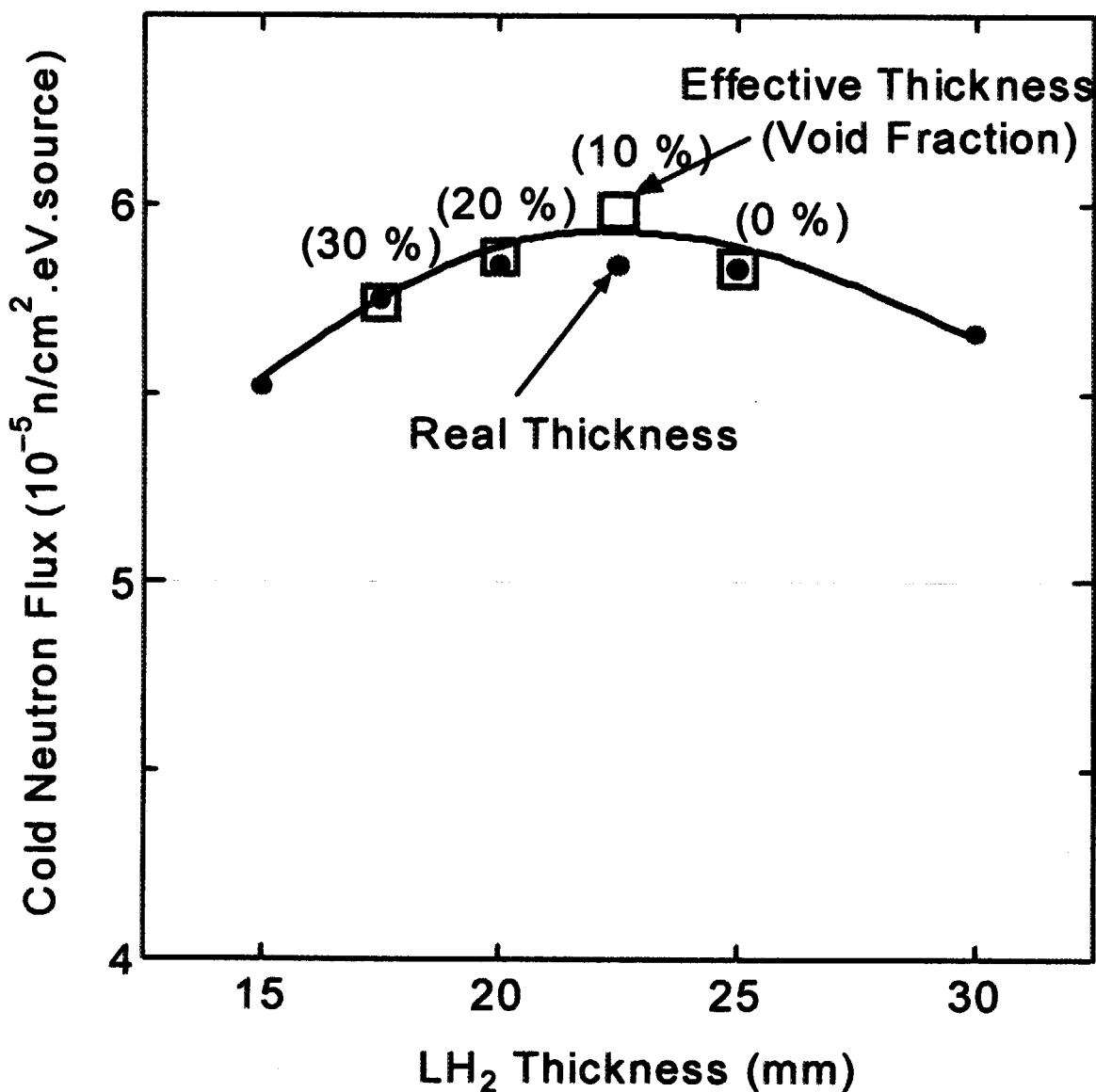


Fig. 3.17 Cold neutron flux dependency on the liquid hydrogen thickness and void ratio for boat-bottom-type moderator cell with 1.0 mm thick Al wall

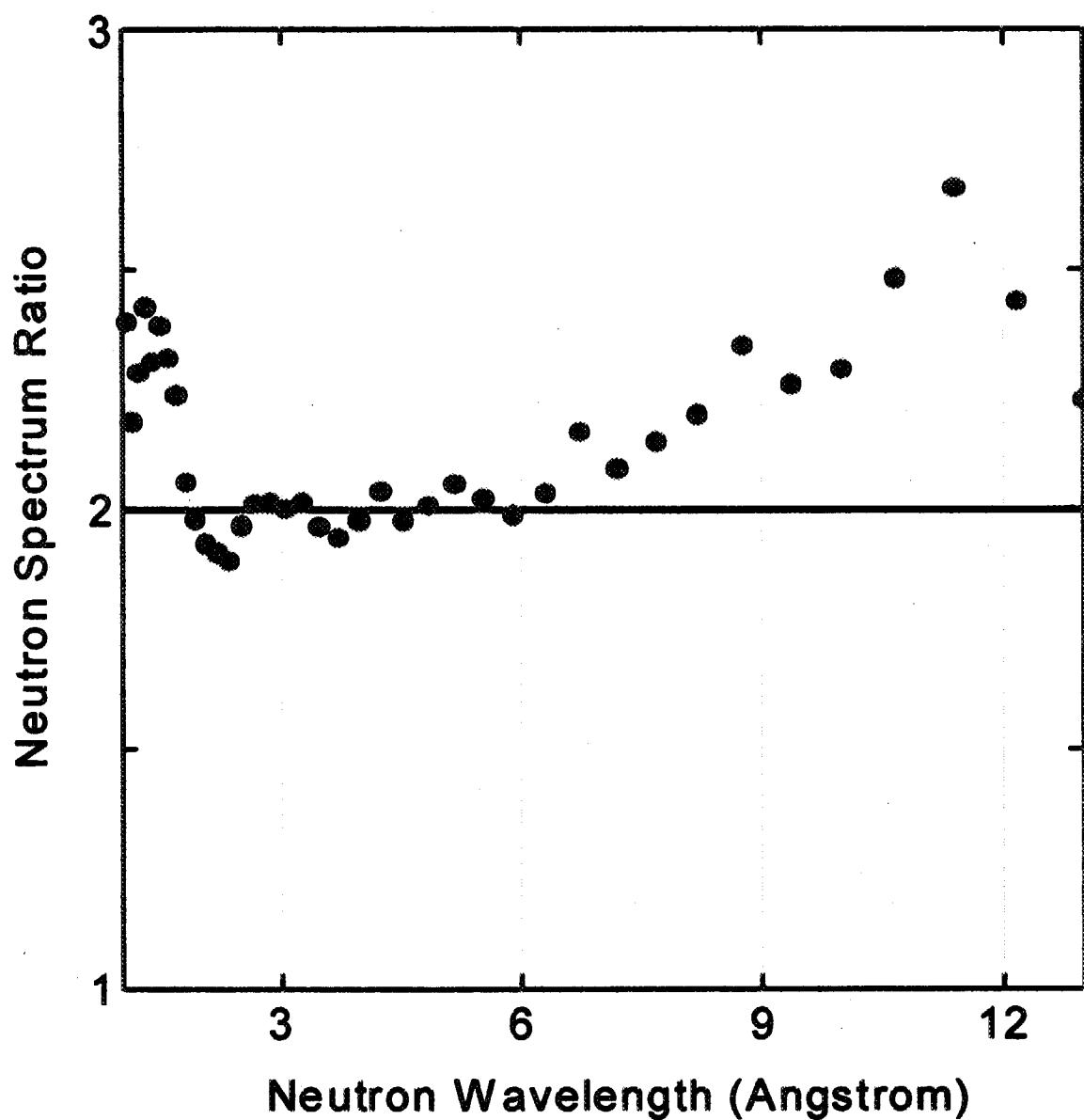


Fig. 3.18 Neutron spectra ratio between boat-bottom-type and
the original suito-type moderator cells

4 まとめ

JRR-3 の CNS を高性能化するため、計算コード MCNP4B2 を用いてセルの材料、寸法、形状、設置位置、ボイド率等をパラメーターとし、9C 孔へ取り出すことのできる冷中性子束を求めるサーベイ計算を行った。計算から、既存の水筒形セルより高い冷中性子束を生成し、取り出すことができるセルモデル（八橋形セル）を求めた。このセルモデルについて、セルを容易に実用化するために必要な条件を考慮して更に改善を行い、より実現性の高いセルモデル（船底形セル）を見い出した。その実用性の高いセルモデルについて高い冷中性子束を維持していることを確認すると共に同モデルの最適な基本仕様を決めた。

水筒形セルの発生する最も高い冷中性子束は液体水素厚さ 30mm、アルミニウム合金厚さ 0.8mm のセルで、その冷中性子束は既存水筒形セルの約 1.4 倍であった。次に、この値より高い冷中性子束を求めて行った八橋形セルのサーベイ計算では、短胴、液体水素厚さ 20mm、胴径 130mm、器壁材アルミニウム合金 0.65mm のモデルの最高冷中性子束は水筒形セルモデルの最高冷中性子束の約 1.5 倍（既存水筒形比は約 2.2 倍）であり、この値は水筒形セルではどのような改良を加えても得ることができない高い冷中性子束であることが分かった。八橋形セルモデルの実用化を容易にするため、製作、設置、運転等の観点からセルの上部、底部等の形状、寸法等を改善し船底形セルのモデルを得た。このセルモデルについて高い冷中性子束を維持していることを確認するサーベイ計算を行った。その結果、船底形セルで最も高い冷中性子束を発生するセルモデルの冷中性子束は水筒形セルの最高値の約 1.4 倍（既存水筒形比で約 2 倍）であり、高い冷中性子束が維持されていることが分かった。また、この実用性の高いセルの最適な基本仕様は、形状が 9C 孔に対して凹湾曲面を持つ船底形状、材料がアルミニウム合金の厚さ 1 ~ 2mm、液体水素厚さが 25mm、ボイド率が約 10% 等であることが分かった。

今後、船底形セルの JRR-3 の CNS への適用に当たっては、使用条件下における核発熱解析、温度解析、熱流動実験、強度試験等を行う予定である。

謝辞

JRR-3 冷中性子源装置の高性能化を進めるに当たり、実施体制で研究炉部の高柳政二部長及び海江田圭右前研究炉部長には特別な配慮を頂きました。また、本報告書をまとめるに当たり、御指導下さった研究炉部の小林晋昇次長、桜井文雄 JRR-3 管理課長には深く感謝いたします。

株式会社ナイスの内藤淑孝氏及び江連秀夫氏には報告書の作成に対して多大なご協力を頂きましたことに感謝いたします。

参考文献

1. Webb, F.J., "Cold Neutron Sources", *Reactor Science and Technology*, Vol. 17 (1963).
2. 熊井敏夫、他, "JRR-3M 改造炉の冷中性子源装置のための二重式閉ループサーモサイホン実験(II)", JAERI-M 89-114 (1989)
3. 熊井敏夫、他, "JRR-3M 冷中性子源装置の運転経験", 弥生研究会、発表要旨集、平成5年3月、東大炉
4. Ageron, P., "Etude de Faisabilite d'une Source Froide Annulaire Pour deux Canaux du Reacteur ORPHEE", ILL/89/175 (June 1989)
5. Farnoux, B. and Mazier, M., Proc. of the fourth Meeting of the International Group on Research Reactor, IGORR-IV, CONF-9505218, Gatlinburg, Tennessee (1995)
6. Rowe, J.M., Kopetka, P. and Williams, R.E., "Performances of the Liquid Hydrogen Cold Neutron Source", Proc. of the Fifth Meeting of the International Group on Research Reactor, IGORR-V, November 1996, Aix en Provence, French
7. Breismester J.F. (Ed.), "MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B", LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory (1997)
8. Farnoux, B. and Maziere, M., "New Cold Neutron Sources of the Orphee Reactor", Proc. of the Fifth Asian Symposium on Research Reactors, May 1996, KAERI, Taejon, The Republic of Korea
9. Williams, R.E., NIST Center for Neutron Research, Gaithersburg, MD, USA, Private Communications
10. Williams, R.E., Kopetka, P. and Rowe, J.M., "An Advanced Liquid Hydrogen Cold Neutron Source", Proc. of the Seventh Meeting of the International Group on Research Reactor, IGORR-VII, October 1999, Patagonia, Argentina
11. Williams, R.E., Kopetka, P. and Rowe, J.M., "The Liquid Hydrogen Moderator at the NIST Research Reactor", Proc. of the International Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, September 1997, Argonne National Laboratory, USA
12. Siegwarth, J.D., et al., "Thermal-Hydraulic Test of a Liquid Hydrogen Cold Neutron Source", NIST-IR 5026

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}C$	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
ト	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	\AA
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

換算表

力	$N (= 10^5 \text{ dyn})$	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s/m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	$MPa (= 10 \text{ bar})$	kgf/cm^2	atm	$mmHg (\text{Torr})$	$lbf/in^2 (\text{psi})$
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	$J (= 10^7 \text{ erg})$	$kgf \cdot m$	$kW \cdot h$	cal(計量法)	Btu	ft-lbf	eV	$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J}$ (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15°C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仮馬力)
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 735.499 W
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

JRR-3高性能中性子源被覆の検討



古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています