

宇宙用原子動力プラント SPECTRA の概念検討 (Ⅱ)

遮蔽構造の検討

1991年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

宇宙用原子動力プラントSPECTRAの概念検討 (Ⅱ)

遮蔽構造の検討

野村紀男* 羽賀一男** 大坪 章**

要 旨

可搬型炉研究の一環として、月面あるいは宇宙空間で活動を行うためのエネルギー供給源の概念検討を行っている。月面炉について前報では、径方向については月面の土であるレゴリスによって自然放射線のレベルまで減衰させることが可能であるが、軸方向については遮蔽物が原子炉の上部を覆う約2mのレゴリスと原子炉付属設備しかなく、許容できる限度まで低減することが困難であると報告した。一方軌道上炉では、遮蔽はプラントの一部として始めから備えつけていなければならない。そこで、原子炉と発電設備を結ぶ軸上に設置する遮蔽について最適な構成を求める解析を実施した。解析にあたって遮蔽厚は1m以内とし、遮蔽重量はできる限り低く抑えるという条件を設定した。

解析では、遮蔽材にベリリウム、タングステン、水素化リチウム、ステンレス鋼を用い合計厚さ90cmの多重層構造とすることにより遮蔽体から25m離れた居住区域となる場所の線量当量率の合計が $14.4\mu\text{Sv/h}$ と計算された。この値は、宇宙空間における原子炉からの影響の制限値として先に提案した $4.6\mu\text{Sv/h}$ を担保していないが、遮蔽体後方に設置される原子炉付属設備や居住区域に設けられる宇宙線の遮蔽壁により、実際には原子炉からの影響は基準値を下回ると予測される。

* 大洗工学センター 安全管理部 放射線管理課

** 大洗工学センター 技術開発部 フロンティア技術開発室

A Conceptual Design Study of Space Nuclear Power Plant SPECTRA (II)
- Investigation of shielding Structure -

Norio NOMURA* Kazuo HAGA** Akira OTSUBO**

ABSTRACT

Within a framework of transportable reactor study, a conceptual design of power source to lunar base or space station is being performed.

In the lunar base power plant SPECTRA-L, dose equivalent at the area around the reactor can be reduced till the natural back ground level by the shield of regolith. But, it is not easy to reduce the dose equivalent to an acceptable level the limit of dose equivalent from the reactor. Because shields above the reactor are only thin regolith whose thickness are 2m, and plant equipments such as boiler, condenser, alternator, and turbine. In case of SPECTRA for the space station, shield must be furnished from the beginning.

In this report, shielding structure of SPECTRA is analyzed seeking for an optimum one.

The analytical condition are as follows.

- (1) Thickness of shield is less than 1m.
- (2) Weight is as light as possible.

The finally obtained shielding structure is a layer by Beryllium, tungsten, lithium-hydrogen, and SUS304. These total thickness is 90cm. Using this shield, the dose equivalent rate at 25m apart point from the reactor, where life module will be located, is estimated to be $14.4 \mu\text{Sv/h}$. This value is more than a proposed limit of dose equivalent from the reactor ($40\text{mSv/y} : 4.6 \mu\text{Sv/h}$). But it is expected that the actual dose equivalent is less than the limit value owing to the plant equipment in the direction and the life module shield of cosmic ray.

* : Radiation Control Section, Health and Safety Division,
Oarai Engineering Center, PNC
** : Frontier Technology Development Section,
Technology Development Division,
Oarai Engineering Center, PNC

目 次

第1章	はじめに	1
第2章	線量当量限度の基準	2
2.1	地球における線量当量限度	2
2.2	宇宙における管理基準	3
第3章	可搬型炉の概要	6
第4章	原子炉周辺の遮蔽解析	7
4.1	遮蔽解析の条件（遮蔽構成のサーベイ）	7
4.2	解析手法	8
4.3	解析結果	15
4.4	評 価	23
4.5	ステンレス鋼を用いた遮蔽体構成の検討	25
4.6	居住区域における原子炉からの影響	28
第5章	遮蔽構造の重量評価	29
第6章	おわりに	30
APPENDIX	ORIGENコードによる γ 線源及び放射能の計算結果	65

表 一 覧

表 2 - 1	従事者及び一般公衆の線量当量限度勧告値	3
表 2 - 2	宇宙及び地球上における自然放射線と線量当量限度一覧表	4
表 3 - 1	宇宙用可搬型炉の仕様	6
表 4 - 1	ライブラリの群構造	9, 10
表 4 - 2	ライブラリに含まれる核種の一覧	11~13
表 4 - 3	遮蔽計算に使用したU-235核分裂スペクトル	14
表 4 - 4	タングステン領域設定位置の検討条件	15
表 4 - 5	タングステン設定位置の違いによる高速中性子束及び線量当量率	16
表 4 - 6	タングステン領域厚さの検討条件	17
表 4 - 7	タングステン領域厚さの違いによる高速中性子束及び線量当量率	18
表 4 - 8	タングステン領域2分割配置の検討条件	19
表 4 - 9	タングステン領域2分割位置の違いによる高速中性子束及び 線量当量率	19
表 4 - 10	水素化リチウム領域厚さの検討条件	20
表 4 - 11	水素化リチウム領域厚さの違いによる高速中性子束及び 線量当量率	20
表 4 - 12	水素化リチウム・タングステン多重構造の検討条件	21
表 4 - 13	水素化リチウム・タングステン多重構造の違いによる高速中性子束 及び線量当量率	22
表 4 - 14	ベリリウム領域厚さの検討条件	22
表 4 - 15	ベリリウム領域の厚さの違いによる高速中性子束及び線量当量率	23
表 4 - 16	ステンレス鋼を遮蔽に追加した場合の線量当量率	25
表 4 - 17	居住区域を想定した位置での線量当量率	26, 27
表 4 - 18	最終遮蔽構成	28
表 5 - 1	遮蔽構造の重量評価	29

図 一 覧

図 3 - 1	SPECTRAの概念図	34
図 3 - 2	SPECTRA-Lの概念図	35
図 3 - 3	LUBERの概念図	36
図 4 - 1	可搬型炉の軸方向モデル	37
図 4 - 2	1次元軸方向遮蔽計算モデル	38
図 4 - 3 (1)	ケース1全中性子束および高速中性子束の軸方向分布	39
図 4 - 3 (2)	ケース1中性子およびガンマ線線量率の軸方向分布	39
図 4 - 3 (3)	ケース1代表的な評価点の中性子スペクトル	40
図 4 - 3 (4)	ケース1代表的な評価点の2次ガンマ線スペクトル	40
図 4 - 3 (5)	ケース1代表的な評価点の1次ガンマ線スペクトル	41
図 4 - 4	炉心中心から遮蔽体までの評価点	42
図 4 - 5	タングステン設定位置に関する検討	43, 44
図 4 - 6	タングステン領域厚さに関する検討	45, 46
図 4 - 7	タングステン2分割位置に関する検討	47, 48
図 4 - 8	水素化リチウム領域厚さに関する検討	49, 50
図 4 - 9	多重層構造に関する検討	51, 52
図 4 - 10	ベリリウム領域厚さに関する検討	53, 54
図 4 - 11	ケース16の1次元計算体系	55
図 4 - 12	ケース17の1次元計算体系	56
図 4 - 13	ケース16全中性子束および高速中性子束の軸方向分布	57~59
図 4 - 14	ケース17全中性子束および高速中性子束の軸方向分布	60~62
図 4 - 15	宇宙ステーション居住区での線量率評価の概念図	63
図 5 - 1	遮蔽体構造図	64

第1章 はじめに

可搬型炉研究の一環として月面あるいは宇宙空間で活動のエネルギーの安定供給を目的とした原子炉の概念検討を行っている。それらは想定する設置箇所によりSPECTRA（軌道上）、SPECTRA-L（月面）と呼び、これまでその概念構造⁽¹⁾、⁽²⁾、原子炉打ち上げ時の安全評価⁽³⁾、宇宙空間における線量当量に関する考え方⁽⁴⁾を報告してきた。前報⁽⁴⁾では、月面原子炉を運転した時に放出される放射線についても評価している。そこでは、径方向については月面土であるレゴリスによって自然放射線のレベルまで減衰させることは可能であるが、軸方向については遮蔽物が原子炉の上部を覆う約2mのレゴリスと原子炉付属設備だけでは、人が接近できる限度まで低減することは困難であると報告している。

一方、軌道上を想定しているSPECTRAでは、居住区域の被ばくを低減するために、軸方向の遮蔽を始めから設置していることが必要である。本検討ではSPECTRAを中心に、軽量化と適切な遮蔽効果の両方の要求を満たす宇宙炉用の遮蔽構造を検討した。遮蔽設計の目標は、居住区域から原子炉までの距離が最大25m程度で利用可能とすることであり、その条件は遮蔽厚は1m以内とすること、遮蔽重量は出来る限り抑えることとした。

第2章 線量当量限度の基準

遮蔽構造の検討においては、前提となる原子炉からの線量当量限度が設定されている必要がある。地球及び宇宙における線量当量限度の基準については前報⁽⁴⁾で詳しく述べている。ここでは、基準の考え方及び基準値について簡単に説明する。

2.1 地球における線量当量限度

地上における外部放射線の管理は、放射性物質を取扱う時の被ばくを管理するものであり、自然放射線や医療による被ばくの管理には適応していない。このうち、自然放射線によって受ける被ばくは、地上で1年間に2.1mSvと評価されている。

放射線防護に関する方向付けは、ICRP (International Commission on Radiological Protection: 国際放射線防護委員会)で行われており、部門ごとにタスクグループを結成し、定期的に報告 (PUBLICATION) を実施している。放射性物質を取扱う国では、ICRPの報告を基に法律によって取扱いや使用に規制を設定している。ICRPは、ALARA (As Low As Reasonable Achievable: すべての被ばくを合理的に達成できる限り低く保つこと) の基本精神に則り、防護の最適化を図るべきであると述べている。そしてこの精神を遵守するため放射線業務従事者 (以後従事者と言う) 及び一般公衆に対し守るべき線量当量限度を勧告している。勧告では、大きく分けて外部放射線に起因する場合と、放射性物質を吸入、摂取した場合とが記載されているが、ここでは、月面等宇宙での線量当量限度を考察するため、外部放射線について記述する。

(1) 従事者及び一般公衆の線量当量限度

従事者の線量当量限度について、ICRP90年勧告 (ICRP Publication 60) では表2-1に示す線量限度勧告値を示している。

表 2 - 1 従事者及び一般公衆の線量当量限度勧告値^{a)}

Application	Dose limit	
	Occupational	Public
Effective dose ^{c)}	20mSv per year averaged over defined periods of 5 years ^{b)}	1mSv per year
Annual equivalent dose ^{d)} in the lens of the eye	150mSv	15mSv
the skin	500mSv	50mSv
the hands and feet	500mSv	-

- a) The limits apply to the sum of the relevant doses from external exposure in the specified period and the 50-year committed dose (to age 70 years for children) from intakes in the same period
- b) With the further provision that the effective dose should not exceed 50mSv in any single year. Additional restrictions apply to effective doses in single year and to the occupational exposure of pregnant women.
- c) 実効線量当量

放射線を受けた場合、臓器や組織によって確率的影響（リスク）が異なる。この場合、健康損害を考える上で、人体における全リスクが必要となってくる。そこで、各臓器または組織をTとした時、各々の組織荷重係数 W_T を定め、それらが受ける平均線量当量を H_T とすると、実効線量当量 H_E は次式で表される。

$$H_E = \sum_T W_T H_T$$

- d) 局部における線量当量

放射線を受けた場合、受けた箇所に直接影響が現れる部分の線量当量限度
実効線量当量とは、考え方が異なるため関連性はない。

2.2 宇宙における管理基準

宇宙での放射線は、地球上とは正反対の環境にある。宇宙空間では放射線のレベルが

宇宙線により無シールド時に年間0.2Sv～0.5Sv、大きくは11年周期で断続的に起きる太陽フレアにより数日間で10Svという高い値を示しており、また、太陽フレアによる放射線は実効線質係数が大きい荷電粒子がほとんどであり、また放射線場の性質・強度の変動が激しい。このように、宇宙空間では放射線のレベルが格段に高く、また月面上で活動するのは特別な任務を持った限られた人々であることから、このような特殊な環境では地上とは異なった線量当量限度を用いる必要がある。そのため、地上の外部放射線による線量当量限度の値を踏まえた上で、宇宙空間における管理基準を提案した⁽⁴⁾。この値は、宇宙における活動を無用に制限すること無く、かつ作業者の安全を考慮し、確率的影響は若干上がるものの、非確率的影響については防護するという立場で考えられてものである。表2-2に宇宙及び地球上における自然放射線と線量当量限度一覧を示す。

表2-2 宇宙及び地球上における自然放射線と線量当量限度一覧表

			自然放射線の線量当量及び限度 (mSv)				
			1週間	1カ月	1年	生涯	
自然放射線	地上				2.1 ¹⁾		
	宇宙		10 ^{4 2)}		200～500		
線量当量限度	地上	ICRP	従事者			20	
			一般公衆			1	
		国内	従事者			50	
			一般公衆			1	
限度	3) 宇宙	自然放射線に対し		40	400	～2000	
		原子炉に対し			40 ⁴⁾		

- 1) 自然放射線により受ける線量当量
- 2) 太陽フレアによる影響 (過去の測定)
- 3) 前報⁽⁴⁾における提案値
- 4) 原子炉施設周辺 (宇宙線からの影響を除く)

注：年間400mSvを基本にしてこれを超えないように管理する場合は、1日平均1mSvと

なる。また、原子炉周辺（原子炉から漏洩する放射線の影響：宇宙線による影響を除く）では、自然放射線の10%とし、その値は約0.1mSv/dとなる。

第 3 章 可搬型炉の概要

宇宙用可搬型炉では、宇宙用軌道上炉として1タイプ（SPECTRA）、月面用として出力によって2タイプ（SPECTRA-L、LUBAR）が考案されており、基本的な概念はこれまでの報告書に述べている⁽²⁾が、ここではその概要を簡単に紹介する。

SPECTRA及びSPECTRA-Lは、300kWeの電気出力を持った一体型原子炉で、前者は軌道上用原子炉としての使用目的があり、後者は月面用として前者の原子炉を一部変更したタイプである。この原子炉は、火星のような他の惑星上における可搬型炉としても利用することが可能である。LUBARは、1つの原子炉ユニットと2つの発電ユニットからなる現地組立型原子炉で、2 MWeの電気出力を有している。ここで宇宙用可搬型炉の仕様を表3-1に、各原子炉の概要図をそれぞれ図3-1、図3-2、図3-3に示す。

表 3 - 1 宇宙用可搬型炉の仕様

名称		SPECTRA	SPECTRA-L	LUBER
電気出力	k W	3 0 0	3 0 0	3, 0 0 0
熱出力	MW	2	2	2 0
設置場所		軌道上	月 面	月 面
重力加速度	G	0	1 / 6	1 / 6
目標重量	t	< 1 0	< 1 0	< 4 0
現地での組立の有無		無	無	有
環境・温度	K	真空・3	真空・1 0 0 ~ 4 0 0	
外形	直径	m	< 4. 5	ユニットで運搬* 原子炉ユニット-1 発電ユニット-2
	長さ	m	< 1 2	
寿 命	年	1 0	1 0	原子炉-1 0 発電系-3 0
燃料交換の有無		無	無	有の型も考慮

*ユニットの大きさはSPECTRA-Lと同じ

第4章 原子炉周辺の遮蔽解析

SPECTRAは軌道上炉であるため原子炉周辺の遮蔽はなく、原子炉と宇宙ステーションの間に打ち上げ時の重量を考慮し厚さ1 m程度の遮蔽を設け、さらに25 m程度の距離をおくこととしている。従って、原子炉からの放射線を防護するためには、予め設置された遮蔽の能力に掛かっている。一方SPECTRA-Lは、原子炉部を地下に埋め原子炉から発生する放射線を遮蔽する。この状態での遮蔽計算では、土壌の密度を約1 g/cm³とした場合原子炉から径方向で11.5 m離れると、原子炉からの影響は地上の自然放射線レベルまで低下した⁽¹⁾。しかし軸方向には、2 mの土壌の遮蔽と原子炉付属設備しかなく、原子炉から漏洩する放射線に対し遮蔽効果が小さいことが明かとなっている⁽⁴⁾。従って、SPECTRA-Lでも原子炉上部に入れるレゴリスだけでなく中性子に対する何らかの遮蔽を備えることが必要となる。

本報告書ではSPECTRAを対象に、どの様な遮蔽構造を採れば放射線の低減を最も効果的に行えるかを調査するため、遮蔽の材質及び厚さに関するパラメータ解析を実施した。その結果を下記に述べる。

4.1 遮蔽解析の条件（遮蔽構成のサーベイ）

可搬型炉の遮蔽は、運搬を容易にするため軽量化を図る必要がある。そこでまず中性子遮蔽材として水素化リチウム（LiH）を採用し、それに中性子反射体であるベリリウム（Be）、 γ 線遮蔽としてタングステン（W）を組み合わせる構成とした。タングステンの密度は19.1 g/ccと重量に対する影響が大きいことから、タングステン領域の効率的な配置を検討した。また全体の遮蔽体の厚みは1 m以内を目標とした。

以下に具体的な評価項目を示す。

- ① タングステン領域設定位置
- ② タングステン領域厚さ
- ③ タングステン領域2分割配置
- ④ 水素化リチウム領域厚さ
- ⑤ 水素化リチウム・タングステン多重構造

⑥ ベリリウム領域厚さ

4.2 解析手法

遮蔽体の遮蔽計算は、バルクの1次元透過計算で行った。1次元計算はANISNコードを用いてP5S12の近似で行った。使用したライブラリは、ENDF/B-IVに基づいて作成されたSCALE-3コードシステムの付属ライブラリ(27群-18GCCOUPLE)である。ここで、表4-1(1)に中性子の、表4-1(2)に γ 線の群構造を持つライブラリを示す。このライブラリは表4-2に示す核種を含み、中性子断面積ではP5成分まで、 γ 線反応断面積ではP9までの散乱展開次数を持っている。

計算モデルは図4-1の体系を1次元化したもので、その1例を図4-2に示す。炉心部分は高濃縮度ウラン燃料領域である。軸方向反射体、ガスペナム、及び冷却材プレナム部については、全てCRP(安全棒案内)配管の存在を考慮しないものとした。

線源については、以下に示す方法に基づき決定した。

① 中性子源

核分裂スペクトル(表4-3)を使用し、全体の強度はCITATIONコードによって中性子源強度に規格化する。

② γ 線源

ORIGEN-Sコードで計算した10年燃焼後の構造材、冷却材、核分裂生成物及びアクチニド核種の放出 γ 線源を用いる。

(ORIGEN-Sの計算結果についてはAPPENDIXを参照)

この計算によって得られる中性子束及び γ 線束を線量当量率に変更するためには、線量当量率変換係数が必要である。ここでは、表4-1に示す変換係数を用いた。

計算方法の流れは、まず1次元輸送計算により遮蔽体原子炉側表面における線束を求め、次いでSCALE-3システムのXSDOSEコードを用いて遮蔽体上部から25mの位置までの中性子、1次 γ 線、2次 γ 線の線量当量率の計算を行う。

表 4-1(1) ライブラリの群構造 (中性子27群)

群番号	エネルギー範囲 (eV)	線量変換係数*
1	2.000000E+07---6.434000E+06	1.49160E-04
2	6.434000E+06---3.000000E+06	1.44640E-04
3	3.000000E+06---1.850000E+06	1.27010E-04
4	1.850000E+06---1.400000E+06	1.28110E-04
5	1.400000E+06---9.000000E+05	1.29770E-04
6	9.000000E+05---4.000000E+05	1.02810E-04
7	4.000000E+05---1.000000E+05	5.11830E-05
8	1.000000E+05---1.700000E+04	1.23189E-05
9	1.700000E+04---3.000000E+03	3.83650E-06
10	3.000000E+03---5.500000E+02	3.72469E-06
11	5.500000E+02---1.000000E+02	4.01500E-06
12	1.000000E+02---3.000000E+01	4.29259E-06
13	3.000000E+01---1.000000E+01	4.47439E-06
14	1.000000E+01---3.049990E+00	4.56760E-06
15	3.049990E+00---1.770000E+00	4.55809E-06
16	1.770000E+00---1.299990E+00	4.51850E-06
17	1.299990E+00---1.129990E+00	4.48790E-06
18	1.129990E+00---1.000000E+00	4.46649E-06
19	1.000000E+00---8.000000E-01	4.43450E-06
20	8.000000E-01---4.000000E-01	4.32709E-06
21	4.000000E-01---3.250000E-01	4.19750E-06
22	3.250000E-01---2.250000E-01	4.09759E-06
23	2.250000E-01---9.99985E-02	3.83900E-06
24	9.99985E-02---5.000000E-02	3.67480E-06
25	5.000000E-02---3.000000E-02	3.67480E-06
26	3.000000E-02---9.99998E-03	3.67480E-06
27	9.99998E-03---1.000000E-05	3.67480E-06

*単位: (rem/hr)/(neutrons/cm²/sec)

表4-1(2) ライブラリの群構造 (ガンマ線18群)

番号	エネルギー範囲 (eV)	線量変換係数*
1	1.000000E+07---8.000000E+06	8.77160E-06
2	8.000000E+06---6.500000E+06	7.47849E-06
3	6.500000E+06---5.000000E+06	6.37479E-06
4	5.000000E+06---4.000000E+06	5.41360E-06
5	4.000000E+06---3.000000E+06	4.62209E-06
6	3.000000E+06---2.500000E+06	3.95960E-06
7	2.500000E+06---2.000000E+06	3.46860E-06
8	2.000000E+06---1.660000E+06	3.01920E-06
9	1.660000E+06---1.330000E+06	2.62759E-06
10	1.330000E+06---1.000000E+06	2.20510E-06
11	1.000000E+06---8.000000E+05	1.83260E-06
12	8.000000E+05---6.000000E+05	1.52280E-06
13	6.000000E+05---4.000000E+05	1.17250E-06
14	4.000000E+05---3.000000E+05	8.75940E-07
15	3.000000E+05---2.000000E+05	6.30610E-07
16	2.000000E+05---1.000000E+05	3.83380E-07
17	1.000000E+05---5.000000E+04	2.66930E-07
18	5.000000E+04---1.000000E+04	9.34720E-07

*単位: (rem/hr)/(photons/cm²/sec)

表 4-2(1) ライブラリに含まれる核種の一覧 (1/3)

番号	内 容	識別番号
1	1/V CROSS SECTIONS NORMALIZED TO 1.0 AT 0.0253 EV	999
2	H 1269 F, 1002 T 218 GP 032475(2)	1001
3	D 1120 (1004 D20 BOUND TH) 218 GP 1/E*SIGT	1002
4	HE-4 1270 218 GP WT F-1/EST-M 042375 P3 293K	2004
5	LI-6 1271 218 GP 1/E*SIGT 040375(5)	3006
6	LI-7 1272 218 GP 1/E*SIGT 040375(5)	3007
7	BE-9(1289F/1064T)P-3(296K, 900K, 1000K, 1200K)032769	4009
8	B-10 1273 218NGP 042375 P-3 293K	5010
9	B-11 1160 WT 1/EST 218NGP P-3 293K RE(042375)	5011
10	C-12 1274F, 1065T 218 GP 030476(7)	6012
11	N-14 1275 218 GP 030476(7)	7014
12	O-16 1276 218 GP 030476(7)	8016
13	F 1277 218GP 030476(7)	9019
14	NA-23 1156 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	11023
15	MG 1280 218 GP 1/E*SIGT 040375(5)	12000
16	AL-27 1193 218 GP 040375(5)	13027
17	SI 1194 218NGP WT 1/EST 042375 P3 293K	14028
18	P-31 7019 218NGP WT 1/EST 042375 P3 293K	15031
19	S-32 7020 218NGP WT 1/EST 042375 P3 293K	16032
20	CL 1149 218 GP WT 1/EST 042375 P3 293K	17000
21	K 1150 218 GP WT 1/EST 042375 P3 293K	19039
22	CA 1195 218 GP 1/E*SIGT 040375(5)	20040
23	TI 1286 218 GP WT 1/EST 042375 P3 293K	22000
24	V 1196 218 GP 1/E*SIGT 040375(5)	23051
25	CR 1191 218NGP WT 1/E P-3 293K SIGP=5+4 RE(042375)	24000
26	CR 1191 WT SS-304(1/EST) P-3 293K SP=5+4(42375)	24304
27	CR 1191 WT INCONL(1/EST) P-3 293K SP=5+4(42375)	24404
28	MN-55 1197 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	25055
29	FE 218GP RE 5-17-78(1)	26000
30	FE 1192 WT SS-304(1/EST) P-3 293K SP=5+4(42375)	26304

表4-2(2) ライブラリに含まれる核種の一覧(2/3)

番号	内 容	識別番号
31	FE 1192 WT INCONL(1/EST) P-3 293K SP=5+4(42375)'	26404
32	CO-59 1199 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	27059
33	NI 1190 218NGP WT 1/E P-3 293K SIGP=5+4 RE(042375)	28000
34	NI 1190 WT SS-304(1/EST) P-3 293K SP=5+4(42375)'	28304
35	NI 1190 WT INCONL(1/EST) P-3 293K SP=5+4(42375)'	28404
36	NAT CU (1295) SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP 8-19-77	29000
37	BR-79 (108) NEWXLACS F(.1MEV)-1/E-M(293K) 101377	35079
38	BR-81 (112) NEWXLACS F(.1MEV)-1/E-M(293K) 101377	35081
39	ZR(NAT) 7141 21 NGP WT FIS(0.1TO20)-1/E-MAX P-3	40000
40	ZR-2(1284) SIGP=5+4 NEWXLACS 293K 9-20-77 1/E WT.	40302
41	NB-93 1189 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	41093
42	MO (1287) SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP F-1/E-M P-3 293K	42000
43	AG-107 1138 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	47107
44	AG-109 1139 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	47109
45	CD 1281 WT 1/EST 218NGP P-3 293K RE(042375)	48000
46	IN-113 (445) SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	49113
47	IN-115 (449) SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	49115
48	SN 7039 WT 1/EST 218NGP P-3 293K RE(042375)	50000
49	XE-135 1294 218G F-1/E*SIGT-M 293K 7-18-78(2)	54135
50	CS-133 (1141) SIGP=5+4 XLACS2 P3 293K 111378	55133
51	BA-138 7040 218NGP WT 1/EST 042375 P3 293K	56138
52	GD (1030) SIGO=1.+5P3 293K F-1/E-M VB 61479	64000
53	DY-164 1031 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	66164
54	LU-175 1032 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	71175
55	LU-176 1033 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	71176
56	HF(NAT) 1034 218NGP WT 1/E P-3 SIGP=5+4 293K RE(042375)	72000
57	TA-181 1285 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	73181
58	W-182 1128 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	74182
59	W-183 1129 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	74183
60	W-184 1130 SIGP=5+4 NEWXLACS 218NGP P-3 293K	74184

表 4 - 2 (3) ライブラリに含まれる核種の一覧 (3 / 3)

番号	内 容	識別番号
61	W-186 1131 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	74186
62	RE-185 1083 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	75185
63	RE-187 1084 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	75187
64	AU-197 1283 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	79197
65	PB 1288 218NGP 042375 P-3 293K	82000
66	TH-232 1296 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	90232
67	PA-233 1297 218 GP WT F-1/E-M 090376 P3 293K	91233
68	U-233 1260 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	92233
69	U-234 1043 SIGO=5+4 NEWLACS P-3 293K F-1/E-M(1.+5)	92234
70	U-235 1261 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K(3)	92235
71	U-236 1163 SIGO=5+4 NEWLACS P-3 293K F-1/E-M(1.+5)	92236
72	U-238 218GP RE 5-17-78(1)	92238
73	NP-237 1263 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	93237
74	PU-238 1050 SIGO=5+4 NEWLACS P-3 293K F-1/E-M(1.+5)	94238
75	PU-239 1264 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	94239
76	PU-240 1265 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 273K	94240
77	PU-241 1266 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	94241
78	PU-242 1161 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	94242
79	AM-241 1056 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	95241
80	AM-243 1057 218 GP WT F-1/E-M 090376 P3 293K	95243
81	CM-244 1162 SIGP=5+4 NEWLACS 218NGP P-3 293K	96244
82	FAKE DATA SET OF DOSE FACTORS	500000

表4-3 遮蔽計算に使用したU-235核分裂スペクトル

群番号	エネルギー範囲 (eV)	核分裂スペクトル
1	2.000000E+07---6.434000E+06	2.10738E-02
2	6.434000E+06---3.000000E+06	1.88303E-01
3	3.000000E+06---1.850000E+06	2.14893E-01
4	1.850000E+06---1.400000E+06	1.24533E-01
5	1.400000E+06---9.000000E+05	1.66156E-01
6	9.000000E+05---4.000000E+05	1.80470E-01
7	4.000000E+05---1.000000E+05	8.96510E-02
8	1.000000E+05---1.700000E+04	1.38468E-02
9	1.700000E+04---3.000000E+03	1.00559E-03
10	3.000000E+03---5.500000E+02	7.46985E-05
11	5.500000E+02---1.000000E+02	5.87688E-06
12	1.000000E+02---3.000000E+01	4.12842E-07
13	3.000000E+01---1.000000E+01	6.55556E-08
14	1.000000E+01---3.049990E+00	1.29914E-08
15	3.049990E+00---1.770000E+00	1.46817E-09
16	1.770000E+00---1.299990E+00	4.31105E-10
17	1.299990E+00---1.129990E+00	1.38837E-10
18	1.129990E+00---1.000000E+00	9.94033E-11
19	1.000000E+00---8.000000E-01	1.40535E-10
20	8.000000E-01---4.000000E-01	2.28524E-10
21	4.000000E-01---3.250000E-01	3.34486E-11
22	3.250000E-01---2.250000E-01	3.88080E-11
23	2.250000E-01---9.99985E-02	3.71047E-11
24	9.99985E-02---5.000000E-02	1.00994E-11
25	5.000000E-02---3.000000E-02	2.95645E-12
26	3.000000E-02---9.99998E-03	2.07308E-12
27	9.99998E-03---1.000000E-05	4.94026E-13

4.3 解析結果

原子炉は10年間連続運転され、宇宙ステーションの実験施設及び居住区域に電力を供給する。この時の炉心における中性子束密度は炉心中心で 2.14×10^{14} (n/cm²/sec)であった⁽⁴⁾。この値を基に遮蔽体の種々の構成について検討した。

(1) タングステン領域設定位置の検討

遮蔽体を炉心側からBe/LiH/W/LiHとした構成で、 γ 線遮蔽としてのタングステンの最も効果的な位置についての検討を実施した。計算ケースは表4-4の通りである。

表4-4 タングステン領域設定位置の検討条件

単位：cm

ケース番号	Be領域厚	LiH領域厚	W領域厚	LiH領域厚
1	5	30	5	30
2	5	45	5	15
3	5	15	5	45

図4-3にはケース1における(1)中性子束の軸方向分布、(2)中性子及び γ 線の線量当量率の軸方向分布及び(3)代表的な評価点の中性子、(4)2次 γ 線及び(5)1次 γ 線のスペクトルを示す。以下に簡単な解説を行う。

(a) ケース1の全中性子束及び高速中性子束の分布 (図4-3(1))

中性子束は、炉心から下部反射体、ガスペナム、下部プレナム部と離れるに従い減衰する。下部プレナム部ではその下側のベリリウム反射体により中性子が反射されて減衰が小さくなっている。遮蔽体領域に入ると中性子束は大きく減衰し、高速中性子束でも6桁程度減衰している。こうして遮蔽体外側では炉心中心部に比べ約8桁減衰している。

(b) ケース1の線量当量率の減衰曲線 (図4-3(2))

中性子の線量当量率は、高速中性子束の減衰曲線に従って低下している。一方、 γ 線の線量当量率は複雑な分布を示している。特に2次 γ 線は炉心を出た領域で増

大し、水素化リチウム中では緩慢な減衰であるがタングステンでは2桁の減衰が認められる。

(c) ケース1の中性子及び γ 線スペクトル (図4-3(3)、4-3(4)、4-3(5))

各々の図には、図4-4に示す炉心中心から遮蔽体までの6箇所の評価点における中性子、2次 γ 線、1次 γ 線のスペクトルが示されている。この図から、①原子炉容器内では中性子スペクトルは硬いが遮蔽体に入ると水素化リチウムで減速され急速に1/E型に変わる、②eV領域では水素による中性子の散乱が起こり低エネルギー側の中性子線束が減少する、③2次 γ 線及び1次 γ 線のスペクトルは炉心内では数10keVにピークを持つことがわる。

(d) 検討結果

ケース1～3について遮蔽体下端での高速中性子束及び線量当量率をまとめたものを表4-5に、それらの軸方向分布を図4-5(1)～(4)に示す。

表4-5 タングステン設定位置の違いによる高速中性子束及び線量当量率

ケース	高速中性子束 (n/cm ² /sec)	線量当量率		
		中性子線 (Sv/h)	2次 γ 線 (Sv/h)	1次 γ 線 (Sv/h)
1	1.13×10 ⁶ (1.00)	1.39 (1.00)	38.7 (1.00)	0.15 (1.00)
2	1.30×10 ⁶ (1.16)	1.58 (1.14)	35.5 (0.92)	0.14 (0.93)
3	1.12×10 ⁶ (1.00)	1.38 (0.99)	46.5 (1.20)	0.16 (1.09)

注：()内はケース1を基準とした時の比

この評価からタングステン位置の違いによる効果はあまり見られなかった。しかし、ケース1と比較してケース2は γ 線の線量当量率は低下するが中性子の線量当量率が増加している。ケース3は γ 線の線量当量率は増加し中性子の線量当量率が変わらな

い。従って、水酸化リチウム領域の中央にタングステンを設定したケース1を採用する。

(2) タングステン領域厚さの検討

(1)の評価結果からケース1で遮蔽体下端の線量当量率を支配しているものは2次 γ 線であること、またタングステンは γ 線を効率的に減衰させることがわかったため、ケース1を基準にタングステン領域厚さを変更した時の線量当量率の減衰を検討する。計算のケースは表4-6の通りで、4cmから10cmまで変えた。

表4-6 タングステン領域厚さの検討条件

単位：cm

ケース番号	Be領域厚	LiH領域厚	W領域厚	LiH領域厚
1	5	30	5	30
4	5	30	4	30
5	5	30	6	30
6	5	30	8	30
7	5	30	10	30

(d) 検討結果

ケース1～7について遮蔽体下端での高速中性子束及び線量当量率をまとめたものを表4-7に、それらの軸方向分布を図4-6(1)～(4)に示す。

表4-7 タングステン領域厚さの違いによる高速中性子束及び線量当量率

ケース	高速中性子束 (n/cm ² /sec)	線量当量率		
		中性子線 (Sv/h)	2次γ線 (Sv/h)	1次γ線 (Sv/h)
1	1.13 × 10 ⁶ (1.00)	1.39 (1.00)	38.7 (1.00)	0.15 (1.00)
4	1.42 × 10 ⁶ (1.26)	1.75 (1.26)	88.1 (2.28)	0.33 (2.33)
5	9.01 × 10 ⁵ (0.80)	1.10 (0.80)	17.2 (0.44)	6.72 × 10 ⁻² (0.45)
6	5.63 × 10 ⁵ (0.50)	0.691 (0.50)	3.55 (0.09)	1.38 × 10 ⁻² (0.09)
7	3.56 × 10 ⁵ (0.32)	0.435 (0.31)	0.799 (0.02)	2.86 × 10 ⁻³ (0.02)

注：（ ）内はケース1を基準とした時の比

この評価から以下の項目が明かとなった。

- ① 高速中性子はタングステン領域で減速し、厚さをケース1の2倍（ケース7：10cm）とすると高速中性子束及び中性子線量当量率はいずれも1/3程度に減衰する。
- ② 2次γ線に注目すると、タングステン領域厚さを2倍にした場合線量当量率が約2桁低下し、中性子の線量当量率と同じ程度となる。従って、タングステン領域設定厚さの検討結果では、最も厚いケース7が良い。
- (3) タングステン領域2分割配置の検討結果
前項ではタングステン領域厚さを変化させるとγ線の線量当量率が大きく減少することが明かとなった。しかしこの場合密度の大きいタングステンの重量が増大しそれに伴って遮蔽体重量が増加する。そこでより効率的な遮蔽体構成の有無を検討するために、ケース1と同じ厚さ（5cm）で、タングステンを2分割した場合の計算を行う。計算のケースは以下の通りで、2分割した残りのタングステンを遮蔽体の最後部に置

いた場合の効果进行调查した。

表 4-8 タングステン領域 2 分割配置の検討条件

単位：cm

ケース番号	Be 領域厚	LiH 領域厚	W 領域厚	LiH 領域厚	W 領域厚
1	5	30	5	30	—
8	5	45	2	15	3
9	5	15	3	45	2

ケース 1、8、9 について遮蔽体下端での高速中性子束及び線量当量率をまとめたものを表 4-9 に、それらの軸方向分布を図 4-7 (1)~(4) に示す。

表 4-9 タングステン領域 2 分割位置の違いによる高速中性子束及び線量当量率

ケース	高速中性子束 (n/cm ² /sec)	線量当量率		
		中性子線 (Sv/h)	2 次 γ 線 (Sv/h)	1 次 γ 線 (Sv/h)
1	1.13×10 ⁶ (1.00)	1.39 (1.00)	38.7 (1.00)	0.149 (1.00)
8	1.59×10 ⁶ (1.41)	1.77 (1.28)	49.1 (1.27)	0.190 (1.28)
9	1.29×10 ⁶ (1.14)	1.48 (1.07)	49.1 (1.27)	0.189 (1.27)

注：() 内はケース 1 を基準とした時の比

この評価からケース 8、9 の中性子及び γ 線の線量当量率はケース 1 と比較していずれも増加した。従って、タングステン領域の 2 分割配置は有効でないことが明らかとなった。

(4) 水素化リチウム領域厚さの検討

水素化リチウムは中性子遮蔽性能が良く、中性子の線量当量を低減させるにはこの領域の厚さを増加させるのが効率的である。特に、水素化リチウムの密度は 0.74g/cm^3 とタングステンに比べてはるかに小さいため厚さを増加させても遮蔽体重量に対する影響は小さい。そこで、ケース1を基準に水素化リチウム領域の厚さを増加させた時の遮蔽性能を検討する。計算のケースは表4-10の通りで、端部の水素化リチウムを50cmまで厚くした。

表4-10 水素化リチウム領域厚さの検討条件

単位：cm

ケース番号	Be領域厚	LiH領域厚	W領域厚	LiH領域厚
1	5	30	5	30
10	5	30	5	40
11	5	30	5	50

ケース1、10、11について遮蔽体下端での高速中性子束及び線量当量率をまとめたものを表4-11に、それらの軸方向分布を図4-8(1)~(4)に示す。

表4-11 水素化リチウム領域厚さの違いによる高速中性子束及び線量当量率

ケース	高速中性子束 ($\text{n/cm}^2/\text{sec}$)	線量当量率		
		中性子線 (Sv/h)	2次 γ 線 (Sv/h)	1次 γ 線 (Sv/h)
1	1.13×10^6 (1.00)	1.39 (1.00)	38.7 (1.00)	0.149 (1.00)
10	3.07×10^5 (0.27)	0.382 (0.28)	31.6 (0.82)	0.123 (0.83)
11	9.86×10^4 (0.09)	0.124 (0.09)	25.6 (0.66)	0.100 (0.67)

注：()内はケース1を基準とした時の比

ケース11の結果から水素化リチウム領域厚さを20cm増加させることにより、中性子の線量当量率は1桁以上低下し、同時に γ 線の線量当量率も約30%低下することが明らかとなった。

(5) 水素化リチウム・タングステン多重構造の検討

(1)~(4)の検討結果から2次 γ 線の線量当量率を中性子の線量当量率と同じ程度まで低減させるには、①タングステンは水素化リチウムの中間に配置し、その厚さを10cm程度まで広げる必要があること、②タングステン領域の2分割化は有効でないこと、③水素化リチウムはできる限り厚くするのが良いことが明かとなった。しかし、水素化リチウムの融点は約686℃と低いこと、構造的な強度は低いことから、②の結論にもかかわらず水素化リチウムの前後にタングステンを構造材として持ち込み、タングステン領域の多重層化を図る必要があることも考えられる。そこで水素化リチウムを4分割し、ベリリウム層の直後を含む各々の領域の間に2cmのタングステン領域を設けた場合(ケース12)とベリリウム層の直後と水素化リチウムの前後及び中間にタングステン領域を設けた場合(ケース13)の計算を実施する。計算の条件を表4-12に示す。

表4-12 水素化リチウム・タングステン多重構造の検討条件

単位：cm

ケース番号	Be厚	W厚	LiH厚	W厚	LiH厚	W厚
7	5	-	30	10	30	-
12	5	2	(15	2	15	2) × 2
13	5	4	30	4	30	2

ケース7、12、13について遮蔽体下端での高速中性子束及び線量当量率をまとめたものを表4-13に、それらの軸方向分布を図4-9(1)~(4)に示す。

表 4-13 水素化リチウム・タングステン多重構造の違いによる
高速中性子束及び線量当量率

ケース	高速中性子束 (n/cm ² /sec)	線量当量率		
		中性子線 (Sv/h)	2次γ線 (Sv/h)	1次γ線 (Sv/h)
7	3.56 × 10 ⁵ (1.00)	0.435 (1.00)	0.799 (1.00)	2.86 × 10 ⁻³ (1.00)
12	4.06 × 10 ⁵ (1.21)	0.465 (1.07)	2.10 (2.63)	3.53 × 10 ⁻³ (1.23)
13	3.99 × 10 ⁵ (1.19)	0.459 (1.06)	4.77 (5.97)	3.51 × 10 ⁻³ (1.23)

注：（ ）内はケース1を基準とした時の比

この結果から、ケース12、13の2次γ線は増大し特にケース13で2次γ線の線量当量率がケース7の6倍となっていることが注目される。この結果から、ベリリウム直後のタングステン領域厚さは構造上許される範囲で薄くし、水素化リチウム領域の直後のタングステン領域の厚さを増加させることが必要であることがわかる。

(6) ベリリウム領域厚さの検討

ベリリウムは、タングステンに比べて比重が小さい（20℃の時：Be=1.857、W=19.24）ために厚みの設定に比較的自由度がある。また、中性子の反射性能も高いため中性子を減速させて水素化リチウム領域での減衰を増すことが期待できる。そこでベリリウム領域厚さを2倍として計算を実施する。また同時に後方の水素化リチウムの厚さを10cm増加させたものも計算する。計算のケースは表4-14の通りである。

表 4-14 ベリリウム領域厚さの検討条件

単位：cm

ケース番号	Be厚	W厚	LiH厚	W厚	LiH厚	W厚
13	5	4	30	4	30	2
14	10	4	30	4	30	2
15	10	4	30	4	40	2

ケース13、14、15について遮蔽体下端での高速中性子束及び線量当量率をまとめたものを表4-15に、それらの軸方向分布を図4-10(1)~(4)に示す。

表4-15 ベリリウム領域の厚さの違いによる高速中性子束及び線量当量率

ケース	高速中性子束 (n/cm ² /sec)	線量当量率		
		中性子線 (Sv/h)	2次γ線 (Sv/h)	1次γ線 (Sv/h)
13	3.99 × 10 ⁵ (1.00)	0.459 (1.00)	4.77 (1.00)	3.51 × 10 ⁻³ (1.00)
14	1.99 × 10 ⁵ (0.50)	0.231 (0.50)	3.31 (0.69)	2.68 × 10 ⁻³ (0.76)
15	1.70 × 10 ⁴ (0.43)	1.99 × 10 ⁻² (0.04)	2.06 (0.43)	1.64 × 10 ⁻³ (0.47)

注：()内はケース1を基準とした時の比

この結果から、ベリリウム領域厚さを5 cmから10 cmに変更することにより、中性子の線量当量率については1/2、γ線については30%程度の低減を図れることがわかった。また、ケース14及び15から水素化リチウム厚さを増加させた方がより効率的であることがわかった。

4.4 評価

4.3のパラメータ解析の結果から得られた知見を以下にまとめる。

① タングステン領域設定位置

タングステン領域は、水素化リチウムの領域の中間に設けるのが効果的である。

② タングステン領域厚さ

タングstenはγ線の遮蔽体として優れており厚さを増加させるほど線量当量率を低下させることができる。今回の解析では、この厚さを5 cmから10 cmにすることでγ線の線量当量率を2桁下げることができた。

③ タングステン領域 2 分割配置

タングステン領域を分割配置することは、中性子及び γ 線の遮蔽構成として効果的でない。

④ 水素化リチウム領域厚さ

水素化リチウム領域の厚さを合計62cmから20cm増加させることにより、中性子の線量当量率を1桁下げることができる。

⑤ 水素化リチウム・タングステン多層構造

構造面の制約から水素化リチウムとタングステンの多層化が必要になることが予想される。この場合、層の数、領域の厚さは2次 γ 線の線量当量率に大きく影響するため十分な検討が必要である。

⑥ ベリリウム領域厚さ

ベリリウム領域厚さを増大させると中性子及び γ 線の線量当量率の低減が期待できる。ただし水素化リチウム程の性能は有していない。

中性子束の遮蔽については、水素化リチウム領域の厚みを増すことが必要である一方、2次 γ 線の線量当量率を効果的に減衰させることが重要である。上記のサーベイ計算から放射線の減衰挙動に関して以下の情報が得られている。

① 中性子の線量当量率は遮蔽に水素化リチウムを用いることにより6桁以上の減衰を期待することができるが、水素化リチウムとの n 、 γ 反応により2次 γ 線の線量当量率が高くなる。逆に2次 γ 線の線量当量率を下げるため水素化リチウムの厚さを下げタングステンの厚さを上げると中性子の線量当量率が上がってしまう。そこで、中性子を良く遮蔽し、2次 γ 線の発生が少なく γ 線も良く遮蔽する遮蔽材を用いた複合遮蔽体を考案する必要がある。

② タングステンの γ 線遮蔽性能は高いが重量と材料の加工性の悪さを考慮すると大量の使用は現実的でない。

今回のサーベイからは、タングステン、ベリリウム、水素化リチウムを用いた場合の遮蔽体構造は、強度の面も考慮するとケース15の組み合わせが最も適している。しかしながら、この構造では2次 γ 線の線量当量率が全体の99%を占めており、全線量当量率も2.08Sv/hと高く、このままでは先に報告した原子炉からの影響に対する基

準案⁽⁴⁾を担保することはできない。このため、タングステン、ベリリウム、水素化リチウム以外の材料を利用し、さらに線量当量率の低減を図る必要がある。

4.5 ステンレス鋼を用いた遮蔽体構成の検討

前節の検討結果からタングステン、ベリリウム、水素化リチウム以外の材料として中性子及び γ 線の双方に遮蔽効果が高いステンレス鋼を組み合わせた遮蔽体構成を検討する。

計算は、ケース16、17としその計算体系をそれぞれ図4-11及び図4-12に示す。ケース16はケース7でベリリウム領域後方に10cm厚のステンレス鋼(SUS304)の領域を設定しており、ケース17は更に5cm厚のタングステン層を最後部に追加した場合である。ケース16及び17の計算結果をそれぞれ図4-13(1)~(5)、図4-14(1)~(5)に示す。この結果ステンレス鋼を設けた領域で中性子及び γ 線が大きく減衰していることがわかる。また、ケース7、16、17について遮蔽体下端での高速中性子束及び線量当量率をまとめたものを表4-16に示す。

表4-16 ステンレス鋼を遮蔽に追加した場合の線量当量率

ケース	高速中性子束 (n/cm ² /sec)	線量当量率		
		中性子線 (Sv/h)	2次 γ 線 (Sv/h)	1次 γ 線 (Sv/h)
7	3.56×10^5 (1.00)	0.435 (1.00)	0.799 (1.00)	2.86×10^{-3} (1.00)
16	5.86×10^4 (0.16)	7.19×10^{-2} (0.17)	0.162 (0.20)	2.30×10^{-4} (0.08)
17	3.53×10^4 (0.10)	3.67×10^{-2} (0.08)	4.59×10^{-3} (0.0057)	6.34×10^{-6} (0.0022)

注：()内はケース1を基準とした時の比

ケース16と17とではタングステンの厚さが5cm違うだけであるが、2次 γ 線の線量当

表4-17(1) 居住区域を想定した位置での線量当量率

	遮蔽体からの				合計 (rem/h)	遮蔽体直前の 3D/1D比
	距離(cm)	中性子線量率 (rem/h)	2次 γ 線線量 率(rem/h)	1次 γ 線線量 率(rem/h)		
CASE1						2.461E-01
1	5.00E+02	1.14E+00	6.81E+01	3.35E-01	6.96E+01	
2	1.00E+03	2.91E-01	1.74E+01	8.56E-02	1.78E+01	
3	2.00E+03	7.31E-02	4.38E+00	2.15E-02	4.47E+00	
4	2.50E+03	4.68E-02	2.80E+00	1.38E-02	2.86E+00	
CASE2						2.461E-01
1	5.00E+02	1.31E+00	6.77E+01	3.32E-01	6.93E+01	
2	1.00E+03	3.35E-01	1.73E+01	8.49E-02	1.77E+01	
3	2.00E+03	8.44E-02	4.35E+00	2.13E-02	4.45E+00	
4	2.50E+03	5.40E-02	2.79E+00	1.37E-02	2.85E+00	
CASE3						2.461E-01
1	5.00E+02	1.13E+00	7.43E+01	3.38E-01	7.57E+01	
2	1.00E+03	2.88E-01	1.90E+01	8.64E-02	1.94E+01	
3	2.00E+03	7.25E-02	4.77E+00	2.17E-02	4.87E+00	
4	2.50E+03	4.64E-02	3.06E+00	1.39E-02	3.12E+00	
CASE4						2.461E-01
1	5.00E+02	1.44E+00	1.47E+02	7.30E-01	1.49E+02	
2	1.00E+03	3.67E-01	3.75E+01	1.87E-01	3.80E+01	
3	2.00E+03	9.23E-02	9.42E+00	4.69E-02	9.56E+00	
4	2.50E+03	5.91E-02	6.03E+00	3.01E-02	6.12E+00	
CASE5						2.474E-01
1	5.00E+02	9.07E-01	3.19E+01	1.55E-01	3.30E+01	
2	1.00E+03	2.32E-01	8.15E+00	3.95E-02	8.42E+00	
3	2.00E+03	5.83E-02	2.05E+00	9.94E-03	2.12E+00	
4	2.50E+03	3.73E-02	1.31E+00	6.37E-03	1.36E+00	
CASE6						2.474E-01
1	5.00E+02	5.71E-01	7.01E+00	3.28E-02	7.62E+00	
2	1.00E+03	1.46E-01	1.79E+00	8.38E-03	1.95E+00	
3	2.00E+03	3.67E-02	4.51E-01	2.11E-03	4.89E-01	
4	2.50E+03	2.35E-02	2.89E-01	1.35E-03	3.13E-01	
CASE7						2.462E-01
1	5.00E+02	3.57E-01	1.58E+00	6.94E-03	1.95E+00	
2	1.00E+03	9.14E-02	4.05E-01	1.77E-03	4.98E-01	
3	2.00E+03	2.30E-02	1.02E-01	4.46E-04	1.25E-01	
4	2.50E+03	1.47E-02	6.52E-02	2.85E-04	8.02E-02	
CASE8						2.461E-01
1	5.00E+02	1.41E+00	6.70E+01	3.29E-01	6.87E+01	
2	1.00E+03	3.59E-01	1.71E+01	8.40E-02	1.76E+01	
3	2.00E+03	9.03E-02	4.30E+00	2.11E-02	4.42E+00	
4	2.50E+03	5.79E-02	2.76E+00	1.35E-02	2.83E+00	
CASE9						2.462E-01
1	5.00E+02	1.22E+00	6.66E+01	3.28E-01	6.81E+01	
2	1.00E+03	3.11E-01	1.70E+01	8.38E-02	1.74E+01	
3	2.00E+03	7.83E-02	4.28E+00	2.11E-02	4.38E+00	
4	2.50E+03	5.01E-02	2.74E+00	1.35E-02	2.80E+00	
CASE10						2.475E-01
1	5.00E+02	3.12E-01	5.51E+01	2.66E-01	5.57E+01	
2	1.00E+03	7.97E-02	1.41E+01	6.80E-02	1.42E+01	
3	2.00E+03	2.00E-02	3.54E+00	1.71E-02	3.58E+00	
4	2.50E+03	1.28E-02	2.27E+00	1.09E-02	2.29E+00	

表 4-17(2) 居住区域を想定した位置での線量当量率

	遮蔽体からの 距離(cm)	中性子線量率 (rem/h)	2次γ線線量 率(rem/h)	1次γ線線量 率(rem/h)	合計 (rem/h)	遮蔽体直前の 3D/1D比
CASE11						2.461E-01
1	5.00E+02	1.03E-01	4.41E+01	2.09E-01	4.44E+01	
2	1.00E+03	2.64E-02	1.13E+01	5.34E-02	1.13E+01	
3	2.00E+03	6.63E-03	2.83E+00	1.34E-02	2.85E+00	
4	2.50E+03	4.25E-03	1.81E+00	8.60E-03	1.83E+00	
CASE12						2.415E-01
1	5.00E+02	3.74E-01	3.19E+00	6.53E-03	3.57E+00	
2	1.00E+03	9.56E-02	8.15E-01	1.67E-03	9.13E-01	
3	2.00E+03	2.40E-02	2.05E-01	4.20E-04	2.29E-01	
4	2.50E+03	1.54E-02	1.31E-01	2.69E-04	1.47E-01	
CASE13						2.389E-01
1	5.00E+02	3.66E-01	6.68E+00	6.41E-03	7.05E+00	
2	1.00E+03	9.36E-02	1.71E+00	1.64E-03	1.80E+00	
3	2.00E+03	2.35E-02	4.29E-01	4.12E-04	4.53E-01	
4	2.50E+03	1.51E-02	2.75E-01	2.64E-04	2.90E-01	
CASE14						2.381E-01
1	5.00E+02	1.86E-01	4.72E+00	4.87E-03	4.91E+00	
2	1.00E+03	4.76E-02	1.21E+00	1.24E-03	1.25E+00	
3	2.00E+03	1.20E-02	3.03E-01	3.13E-04	3.15E-01	
4	2.50E+03	7.66E-03	1.94E-01	2.00E-04	2.02E-01	
CASE15						2.380E-01
1	5.00E+02	1.61E-02	3.05E+00	3.00E-03	3.07E+00	
2	1.00E+03	4.10E-03	7.79E-01	7.67E-04	7.84E-01	
3	2.00E+03	1.03E-03	1.96E-01	1.93E-04	1.97E-01	
4	2.50E+03	6.61E-04	1.26E-01	1.23E-04	1.26E-01	
CASE16						2.462E-01
1	5.00E+02	6.67E-02	3.47E-01	5.88E-04	4.14E-01	
2	1.00E+03	1.70E-02	8.86E-02	1.50E-04	1.06E-01	
3	2.00E+03	4.29E-03	2.23E-02	3.78E-05	2.66E-02	
4	2.50E+03	2.75E-03	1.43E-02	2.42E-05	1.70E-02	
CASE17						2.462E-01
1	5.00E+02	2.70E-02	8.05E-03	1.27E-05	3.50E-02	
2	1.00E+03	6.89E-03	2.06E-03	3.25E-06	8.96E-03	
3	2.00E+03	1.73E-03	5.17E-04	8.18E-07	2.25E-03	
4	2.50E+03	1.11E-03	3.31E-04	5.24E-07	1.44E-03	

量率が2桁近く低下する。

4.6 居住区域における原子炉からの影響

ケース1～17で得られた遮蔽下部で漏洩した線量当量率を基に遮蔽体から離れた位置における線量当量率について、その距離をパラメータとして計算した結果を表4-17に示す。計算はXSDOSEコードにより図4-15のモデルで行ったもので、各ケース毎に遮蔽体から5m、10m、20m、25mの4種類の距離に置ける線量当量率を把握することができる。今回の解析から最終遮蔽構成として合計の線量当量率が最も小さいケース17を選び、その内容を改めて表4-18に示す。

表4-18 最終遮蔽構成（ケース17）

材 料	厚 さ
ベリリウム	5 cm
ステンレス鋼	10 cm
水素化リチウム	30 cm
タングステン	10 cm
水素化リチウム	30 cm
タングステン	5 cm
厚 さ 合 計	90 cm

表2-2に示すように宇宙における原子炉からの影響を40mSv/y未満に抑えるとする基準案を報告者らは提案しているが、その値は1時間あたり4.16 μ Svとなる。ケース17の遮蔽体から25m離れた場所の線量当量率の合計は14.4 μ Sv/hと基準を担保していないが、遮蔽体後方に設置される原子炉付属設備や居住区域に設けられる宇宙線の遮蔽壁により原子炉からの放射線の影響は基準値未満となることが予測される。一方月面においては、原子炉周辺に立ち入り制限区域を設定したり、遮蔽体の上からレゴリスを覆うことによって原子炉からの影響をさらに低減することが可能である。

第 5 章 遮蔽構造の重量評価

前章で最終的に定められたSPECTRAの遮蔽構造の重量評価を行う。遮蔽体はベリリウム、ステンレス鋼、水素化リチウム、タングステンで構成された複合体であり、形状は円錐形の頭部を切り取った形で、上部に原子炉が設置される。ここで、遮蔽体の構造図を図5-1に示す。遮蔽体の端面の直径は原子炉側が100cmでプラント側が130cmである。この形状を基に表5-1に遮蔽構造の重量評価を示す。

表 5 - 1 遮蔽構造の重量評価

構 成 物	厚さ (cm)	比重 (20 ℃)	容積 (cm ³)	重量 (kg)
ベリリウム	5	1. 8 5 7	3.98×10^4	7 4
ステンレス鋼 (SUS304)	1 0	7. 9 6 8 *	8.40×10^4	2 2 6
水素化リチウム	3 0	0. 7 4	2.85×10^5	2 1 1
タングステン	1 0	1 9. 2 4	1.07×10^5	2 0 6 0
水素化リチウム	3 0	0. 7 4	3.59×10^5	2 6 5
タングステン	5	1 9. 2 4	6.53×10^4	1 2 5 7
合 計	9 0	—	9.40×10^5	4 5 3 6

* : 25℃の時の値

この結果から、遮蔽構造の総重量は約4.5 tとなった。

第6章 おわりに

SPBCTRAの原子炉から漏洩する放射線は中性子で $4.7 \times 10^7 \text{ Sv/h}$ 、2次 γ 線で $8.0 \times 10^4 \text{ Sv/h}$ 、1次 γ 線で $2.0 \times 10^5 \text{ Sv/h}$ と宇宙線をはるかに超えるほど高く、遮蔽をしない場合は数km以上離さなくては利用できない。そこで少なくとも居住区域から原子炉まで25m程度で利用可能とするための遮蔽設計を実施した。その条件は、以下に示す2項である。

- ① 遮蔽厚は1 m以内とすること。
- ② 遮蔽重量はできる限り低く抑えること。

これを基に遮蔽材料の調査した結果、タングステン、ベリリウム、水素化リチウムが有望であり、これらを用いて遮蔽設計のパラメータサーベイを実施した結果以下に示す知見が得られた。

① タングステン領域設定位置

タングステン領域は、水素化リチウムの領域の直後に設ける方が効果的である。

② タングステン領域厚さ

タングstenは γ 線の遮蔽体として優れており厚さを増加させるほど線量当量率を低下させることができる。今回の解析では、この厚さを5 cmから10 cmにすることで線量当量率を2桁下げることができることがわかった。

③ タングステン領域2分割配置

タングsten領域を2分割することは、中性子及び γ 線の遮蔽構成として効果的でない。

④ 水素化リチウム領域厚さ

水素化リチウム領域の厚さを60 cmから20 cm増加させることにより、中性子の線量当量率を1桁下げることができる。

⑤ 水素化リチウム・タングステン多重層構造

構造面の必要から水素化リチウムとタングstenの多層化が避けられないことも考えられる。この場合、層の数、領域の厚さは2次 γ 線の線量当量率に大きく影響するため十分な検討が必要である。

⑥ ベリリウム領域厚さ

ベリリウム領域厚さを増大させると中性子及び γ 線の線量当量率の低減が期待できる。
ただし水素化リチウム程の性能は有していない。

しかしながら、上記の材料及び構造では2次 γ 線の線量当量率が全体の99%を占め、全線量当量率も 2.08Sv/h と高く、このままでは宇宙における線量当量限度の $1/10$ とした原子炉からの影響に対する基準案(40mSv/y)を担保することはできない。そこで、タングステン、ベリリウム、水素化リチウム以外の材料としてステンレス鋼を組み合わせた遮蔽体構成を検討した。

その結果、ベリリウムの後方にステンレス鋼を用い、後方のタングステンの厚さを5 cm厚くすることにより線量当量率が2桁近く低下することが明かとなった。

このような遮蔽構成では、居住区域における原子炉からの影響は、遮蔽体から25m離れた場所の線量当量率の合計で $14.4\mu\text{Sv/h}$ となり、原子炉からの影響に関する報告者らの基準案である $4.6\mu\text{Sv/h}$ には達していないが、遮蔽体後方に設置される原子炉付属設備や居住区域に設けられる宇宙線の遮蔽壁により原子炉からの影響は基準値未満となることが予測される。また、月面においては、原子炉周辺に立ち入り制限区域を設定したり、遮蔽体の上からレゴリスを覆うことによって、原子炉からの影響をさらに低減することが可能である。

以上により、今回評価を実施した多重構造遮蔽体を設置することにより原子炉からの影響を容認可能なレベルまで低減することが可能であることが明かとなった。

謝 辞

SPECTRA及びSPECTRA-Lの作図に関して原子カシステム株式会社の引地拓夫氏（現もんじゅ事務所常駐）の協力を得た。また、遮蔽計算では臨界工学試験室 大谷暢夫室長、三菱総合研究所 角田和弘氏の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 神戸 満 他、「宇宙用原子動力プラントSPECTRAの概念検討」、PNC SN 9410 90-044、1990年4月。
- (2) 羽賀一男 他「月面動力プラントの概念検討」、1991年。
- (3) 野村紀男、羽賀一男、大坪 章、「月面動力プラントSPECTRA-Lの概念検討（I）
－打ち上げ失敗時の安全評価」、PNC ZN-9410 91-100、1991年3月。
- (4) 野村紀男、羽賀一男、大坪 章、「月面可搬型炉SPECTRA-Lの概念検討（II）－宇
宙空間に関する線量当量限度の考え方」、PNC ZN-9410 91-XXX、1991年3月。

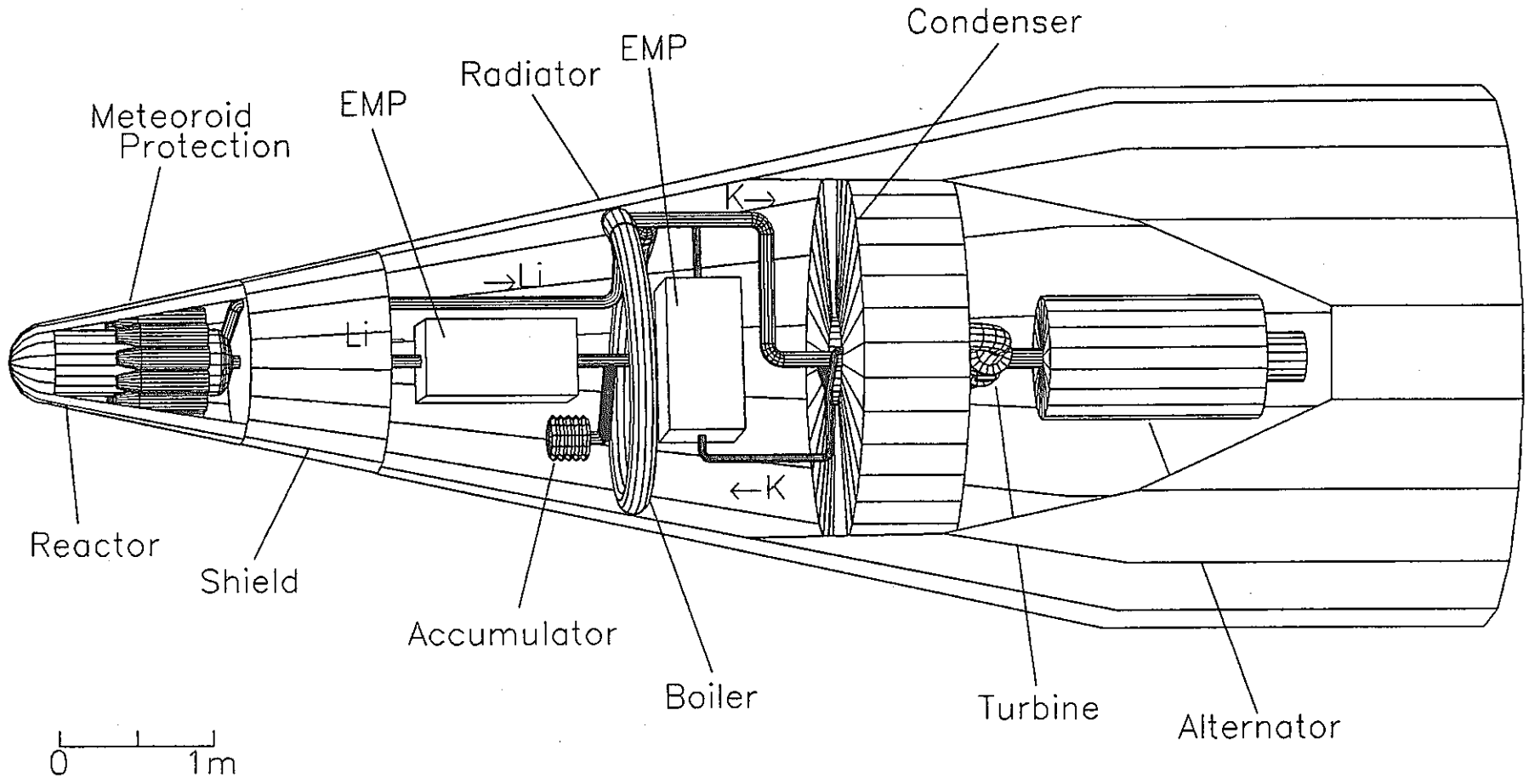


図 3 - 1 SPECTRAの概念図

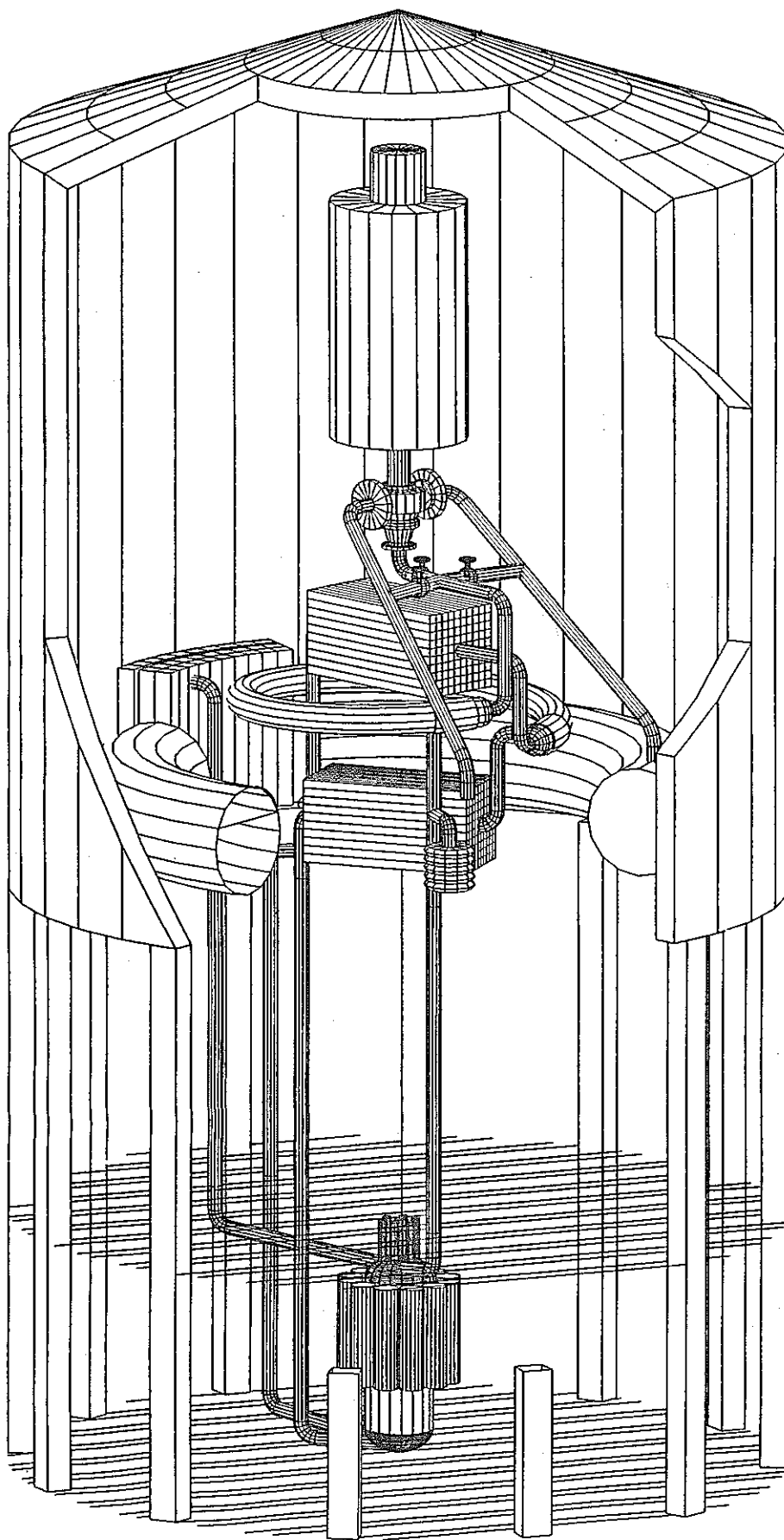
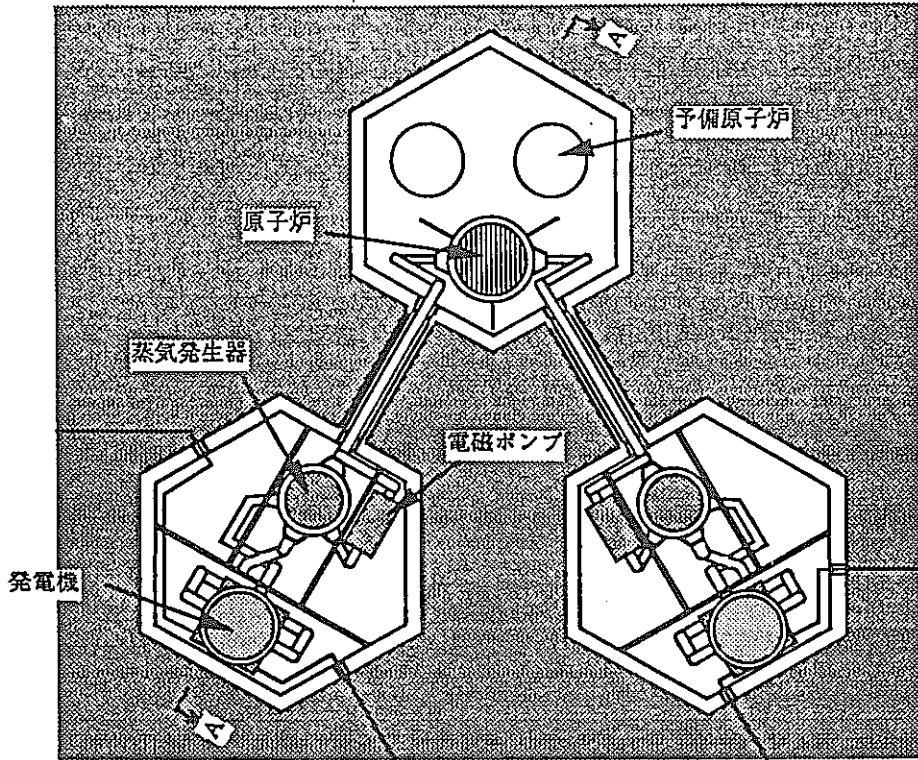
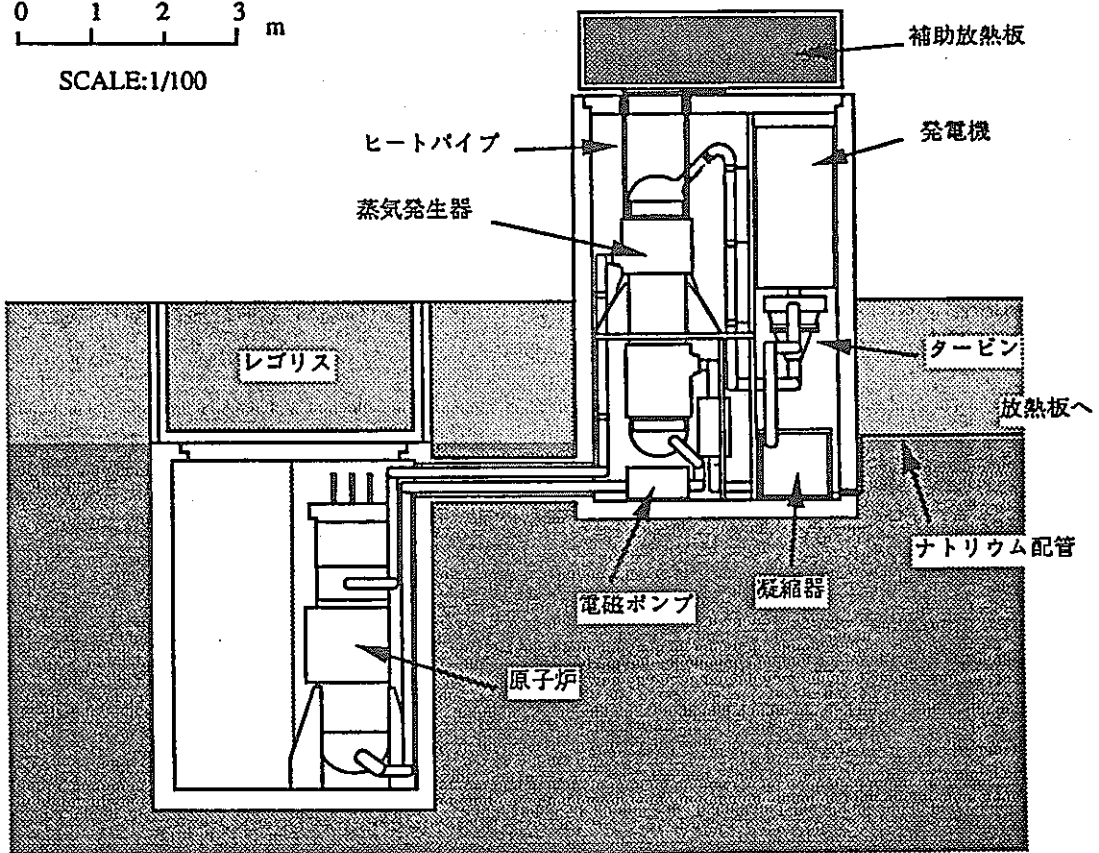


図 3 - 2 SPECTRA - L の概念図



(a) 平面図

0 1 2 3 m
SCALE:1/100



(b) A - A 断面図

図 3 - 3 LUBERの概念図

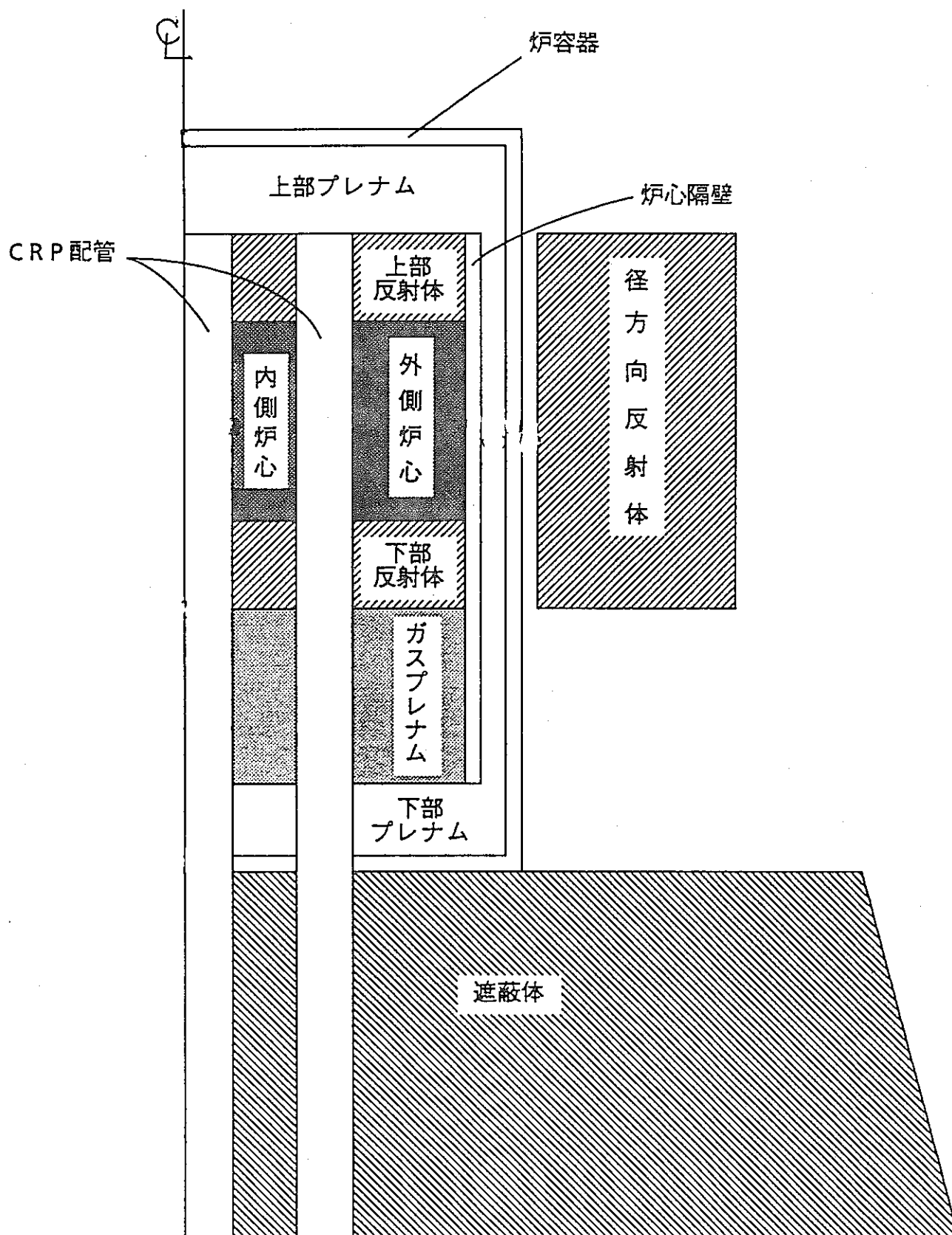


図4-1 可搬型炉の軸方向モデル

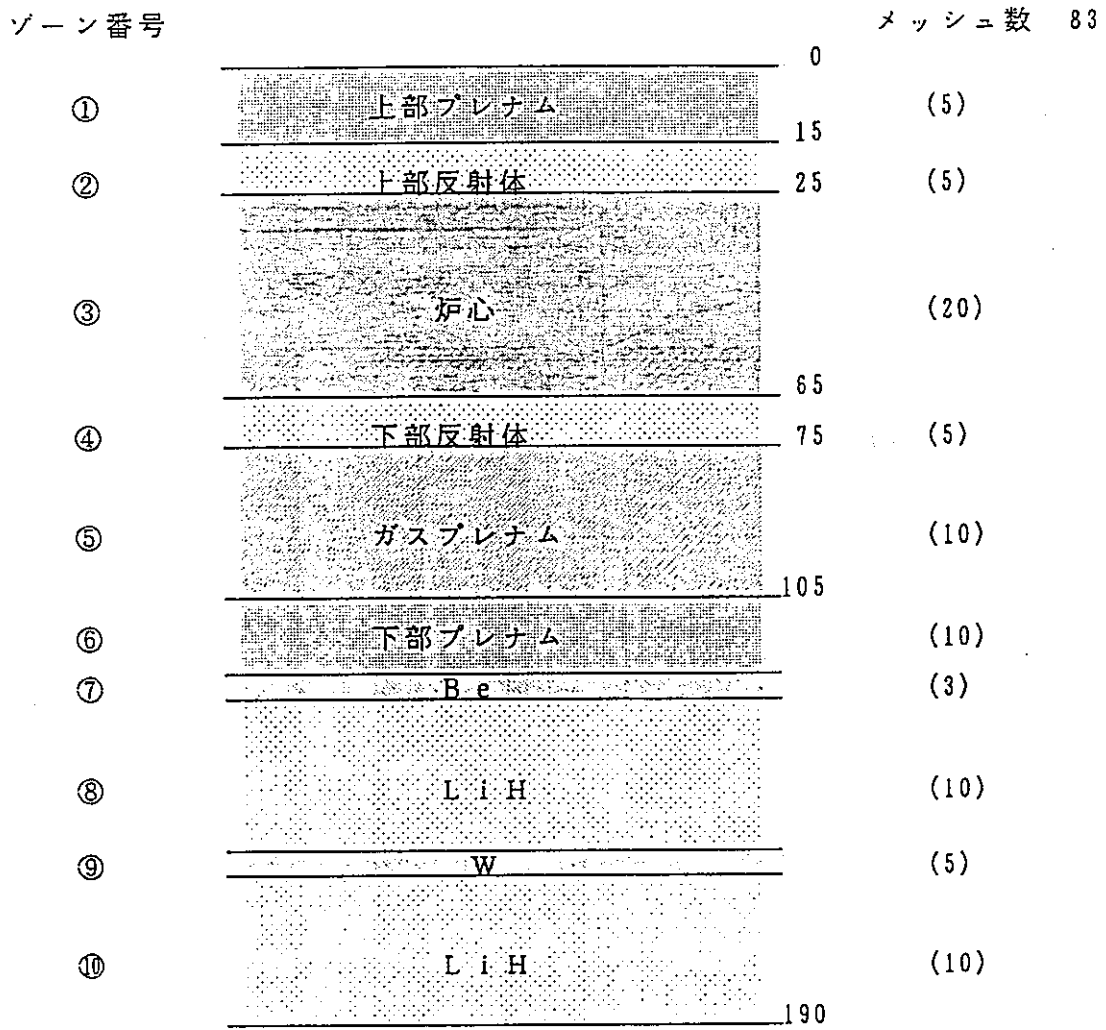


図4-2 1次元軸方向遮蔽計算モデル (CASE No.1)

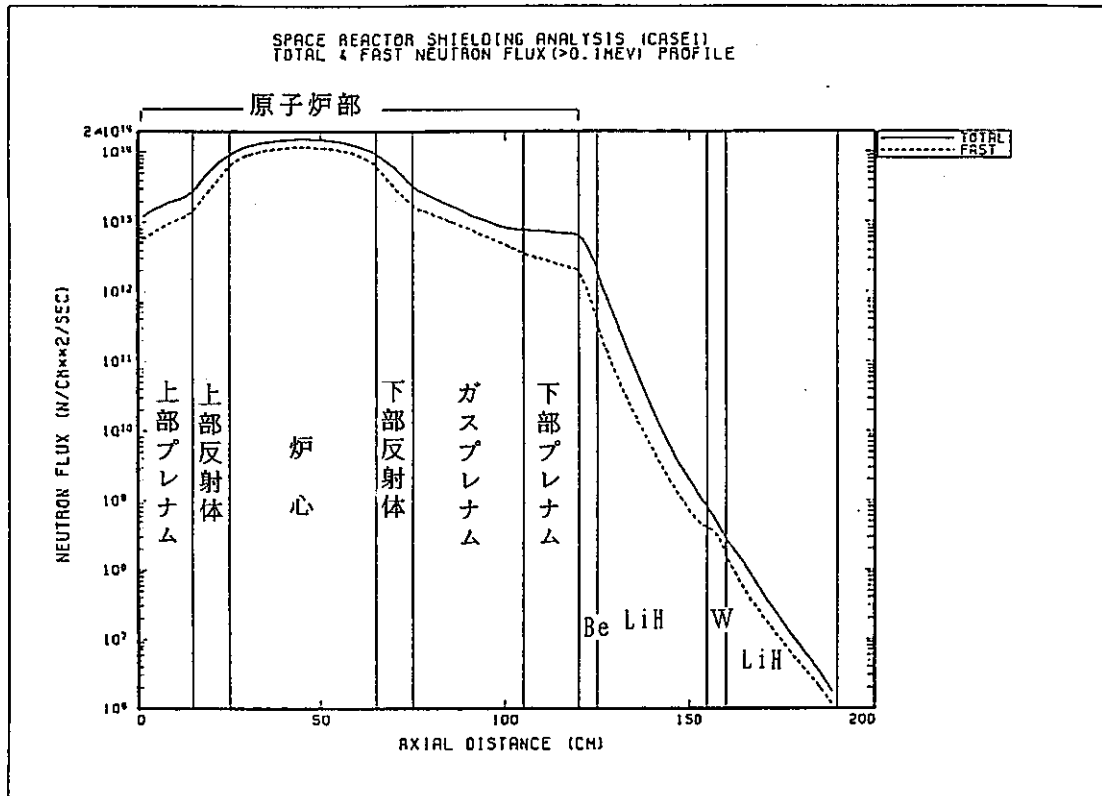


図 4 - 3 (1) ケース 1 全中性子束および高速中性子束の軸方向分布

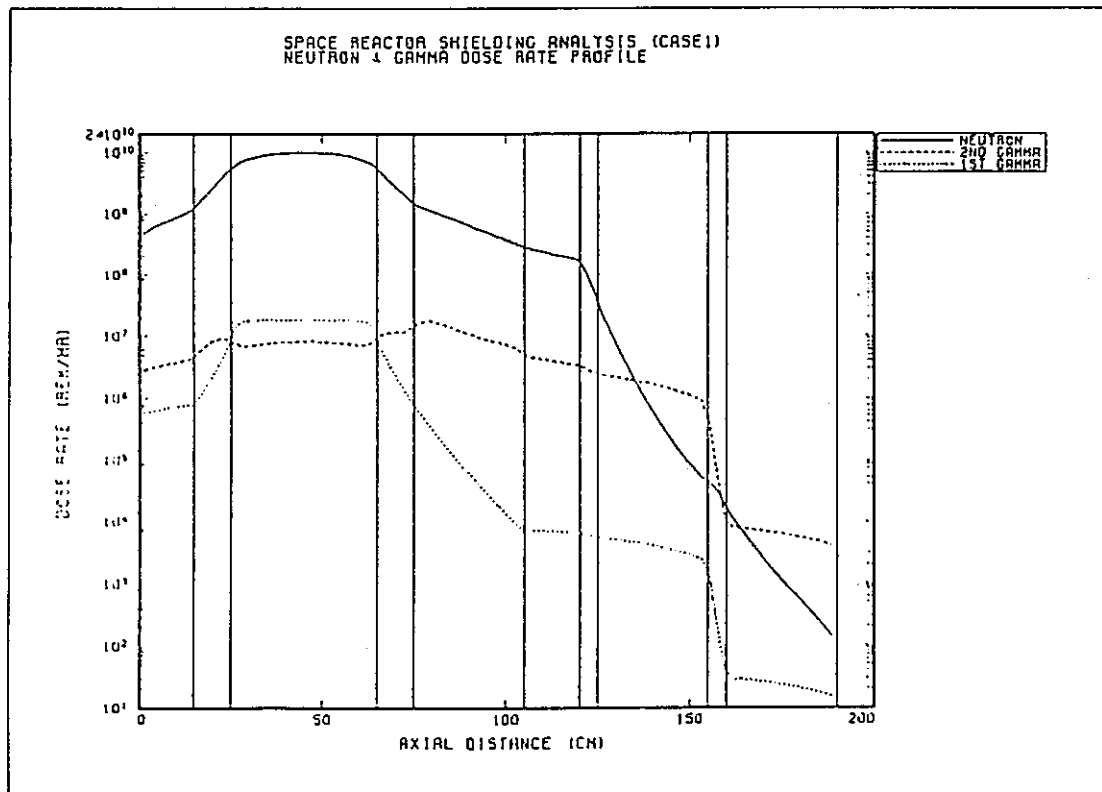


図 4 - 3 (2) ケース 1 中性子およびガンマ線線量率の軸方向分布

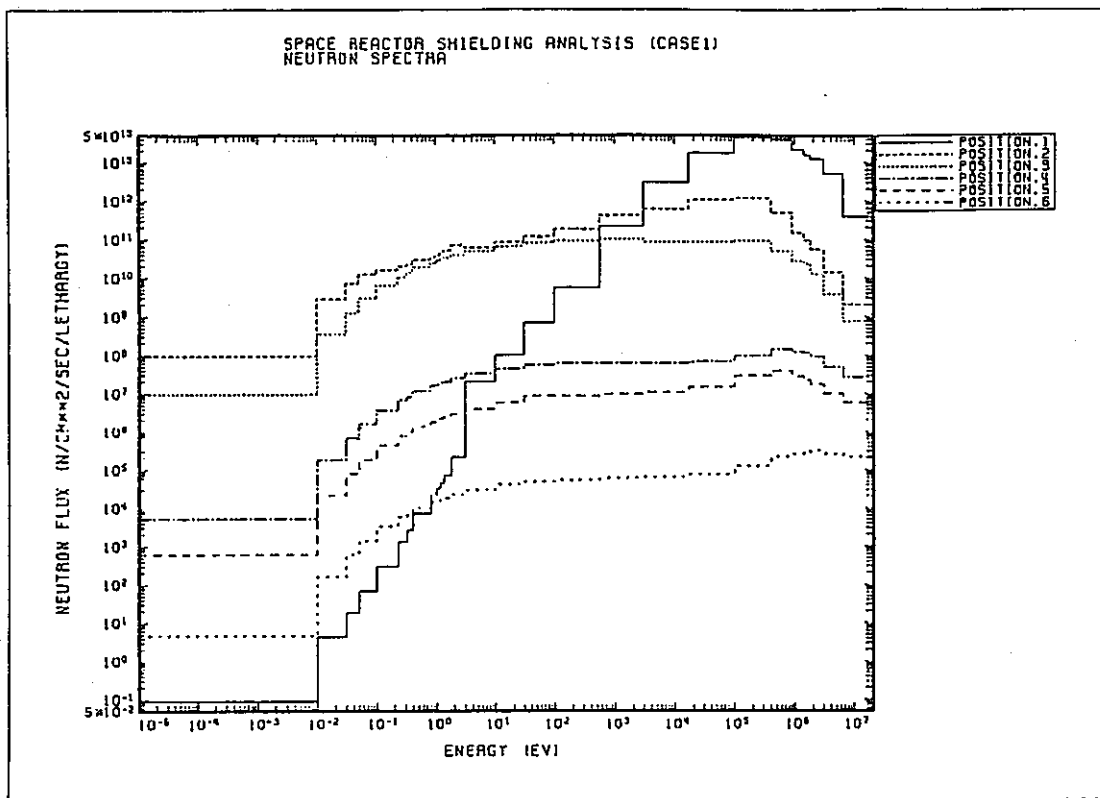


図 4 - 3 (3) ケース 1 代表的な評価点の中性子スペクトル

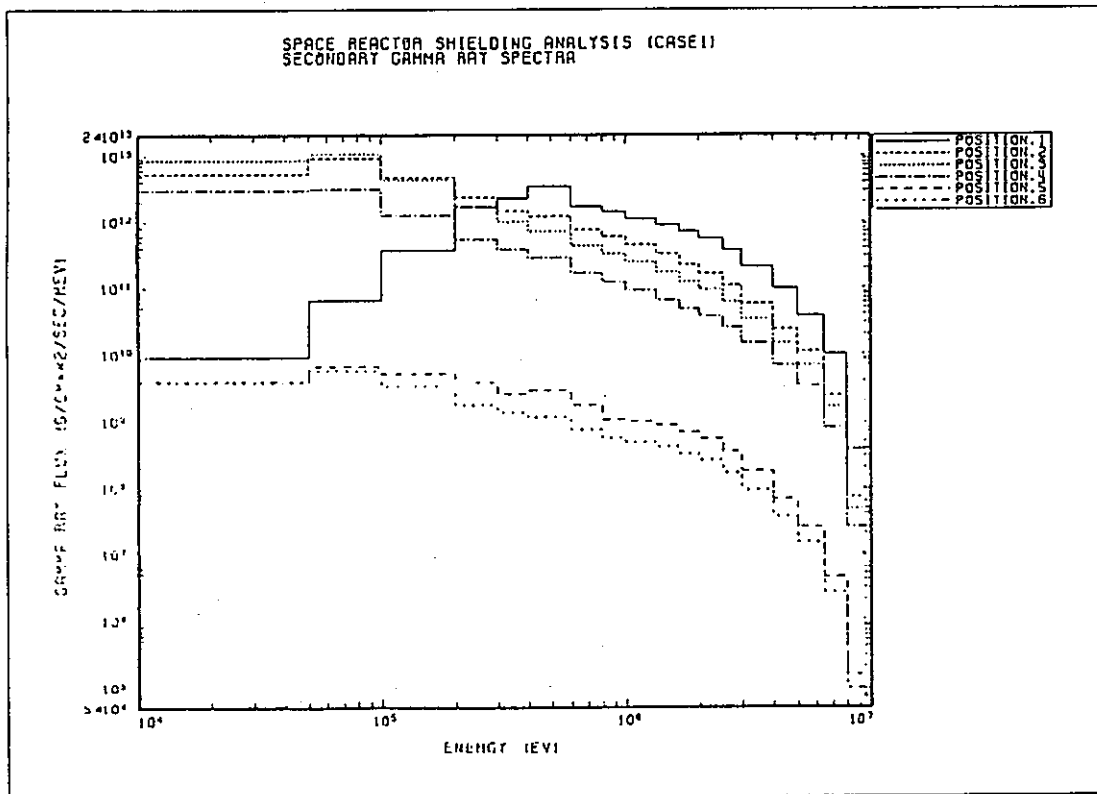


図 4 - 3 (4) ケース 1 代表的な評価点の 2 次ガンマ線スペクトル

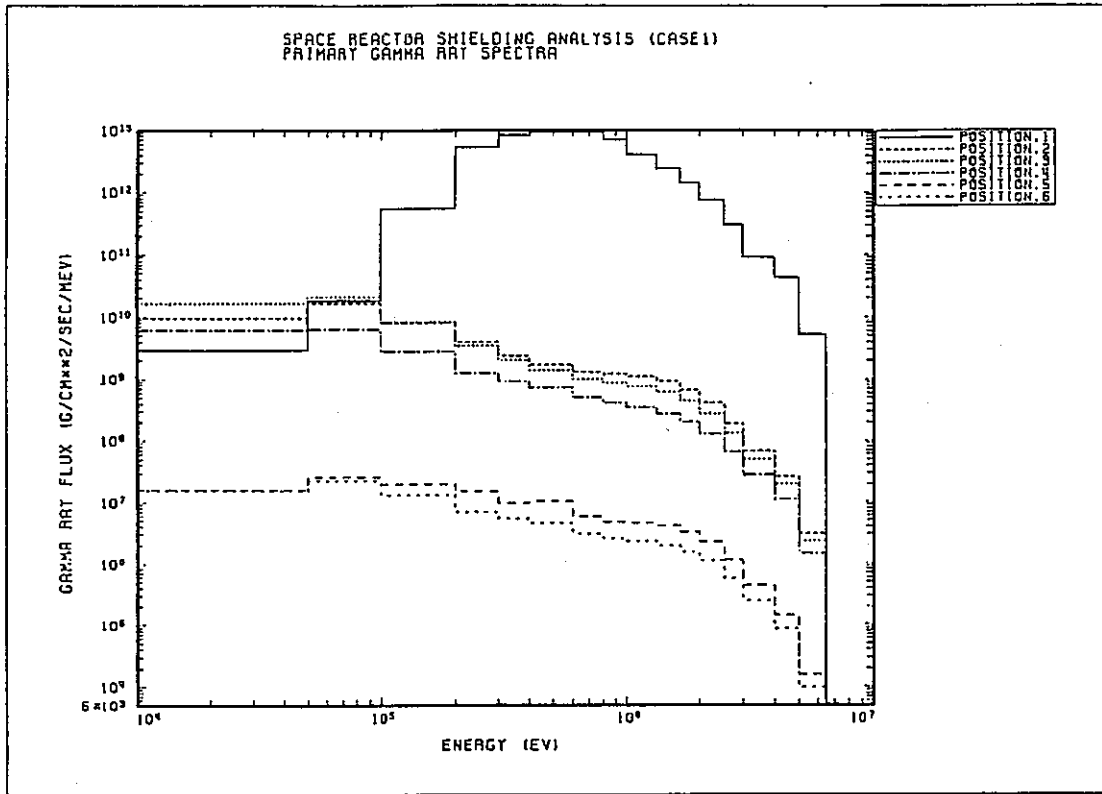


図 4 - 3 (5) ケース 1 代表的な評価点の 1 次ガンマ線スペクトル

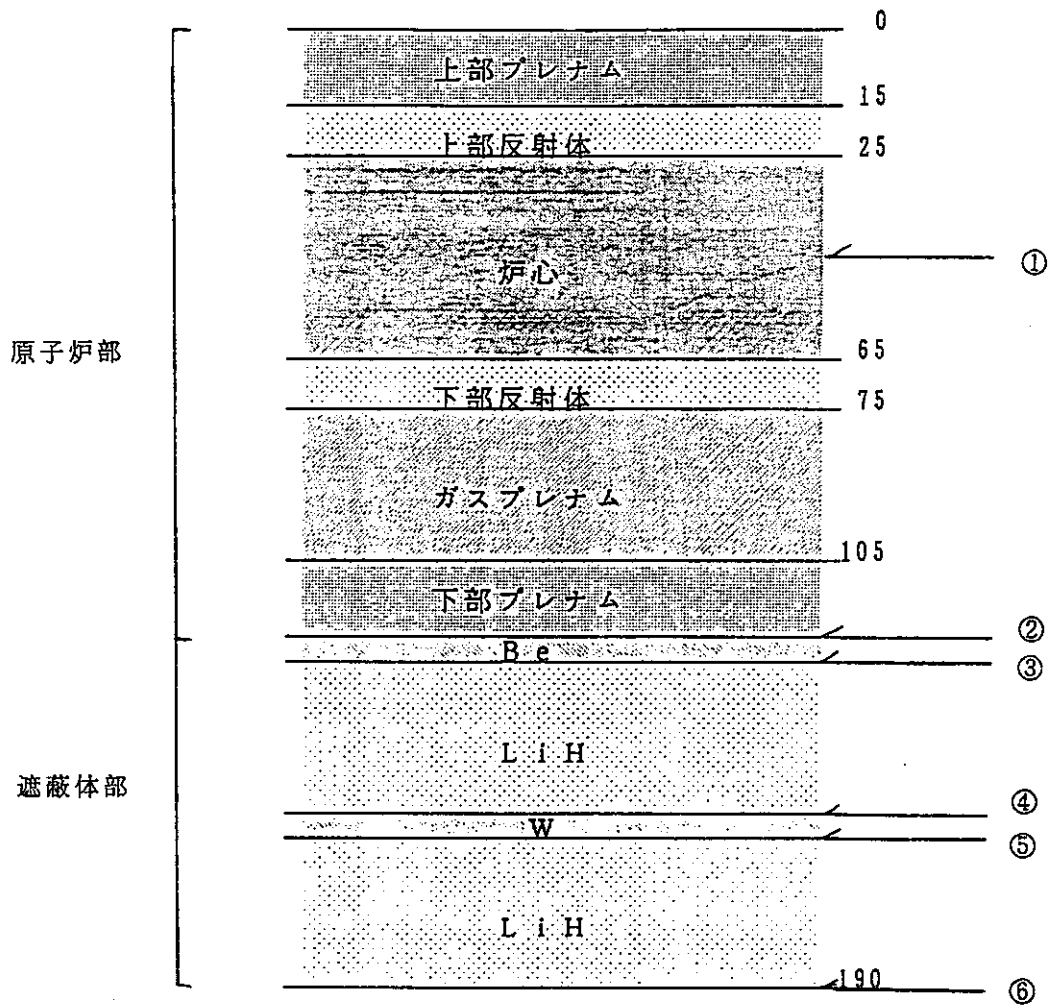


図4-4 炉心中心から遮蔽体までの評価点

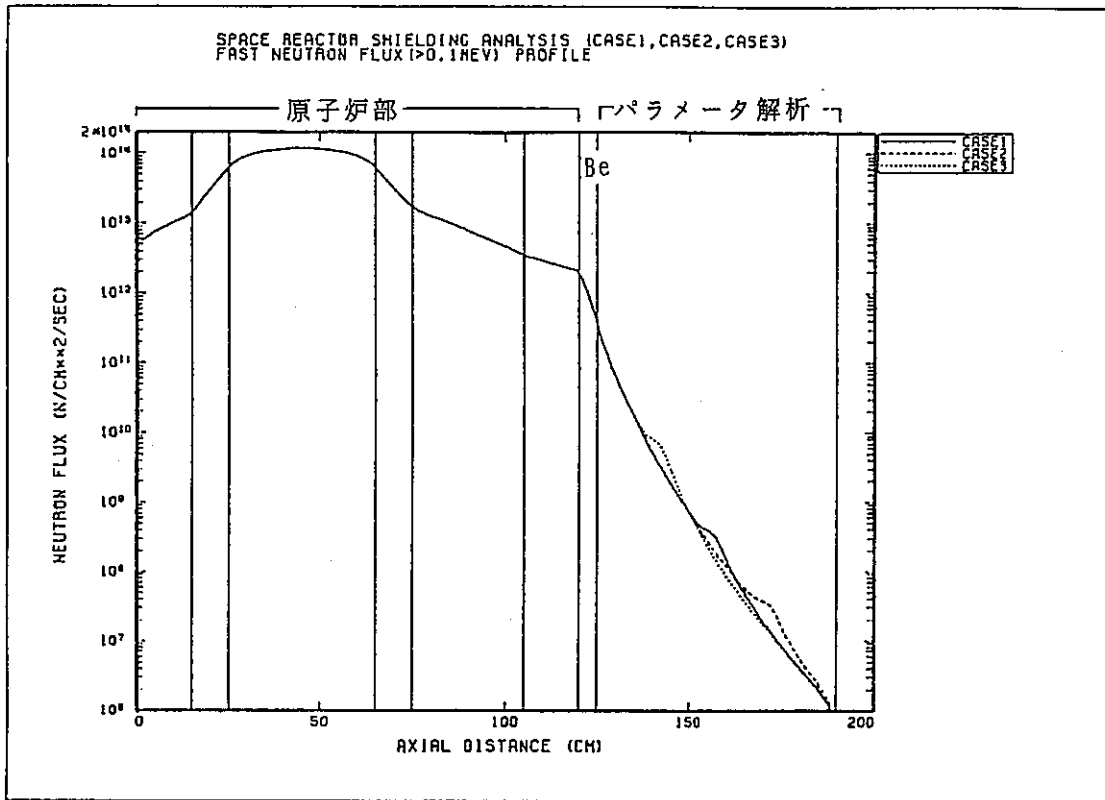


図 4 - 5 (1) タングステン設定位置に関する検討：高速中性子束の軸方向分布

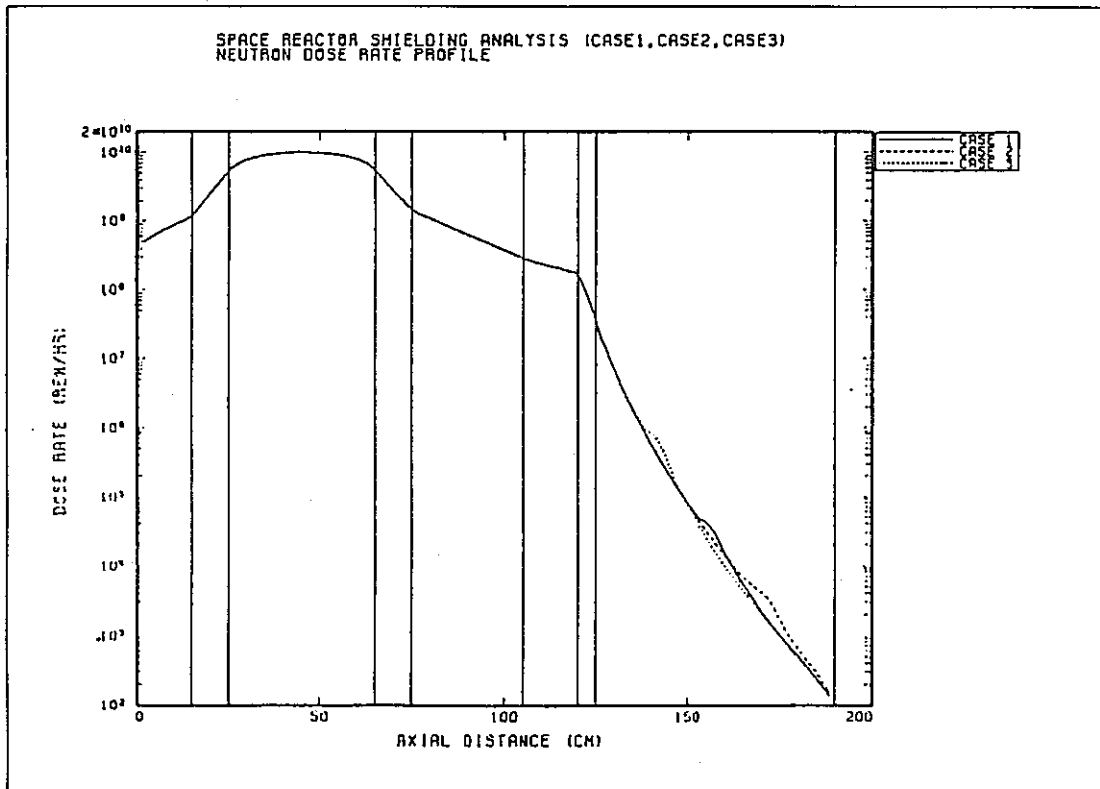


図 4 - 5 (2) タングステン設定位置に関する検討：中性子線量率の軸方向分布

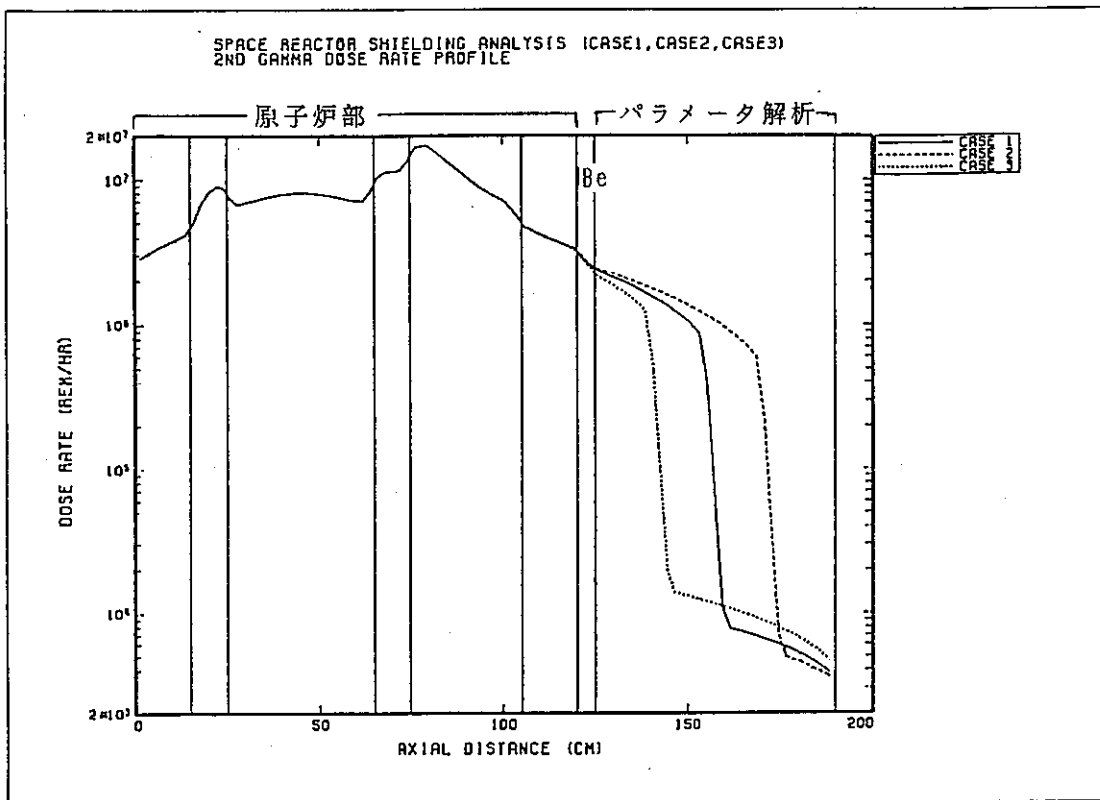


図 4 - 5 (3) タングステン設定位置に関する検討：2次ガンマ線線量率の軸方向分布

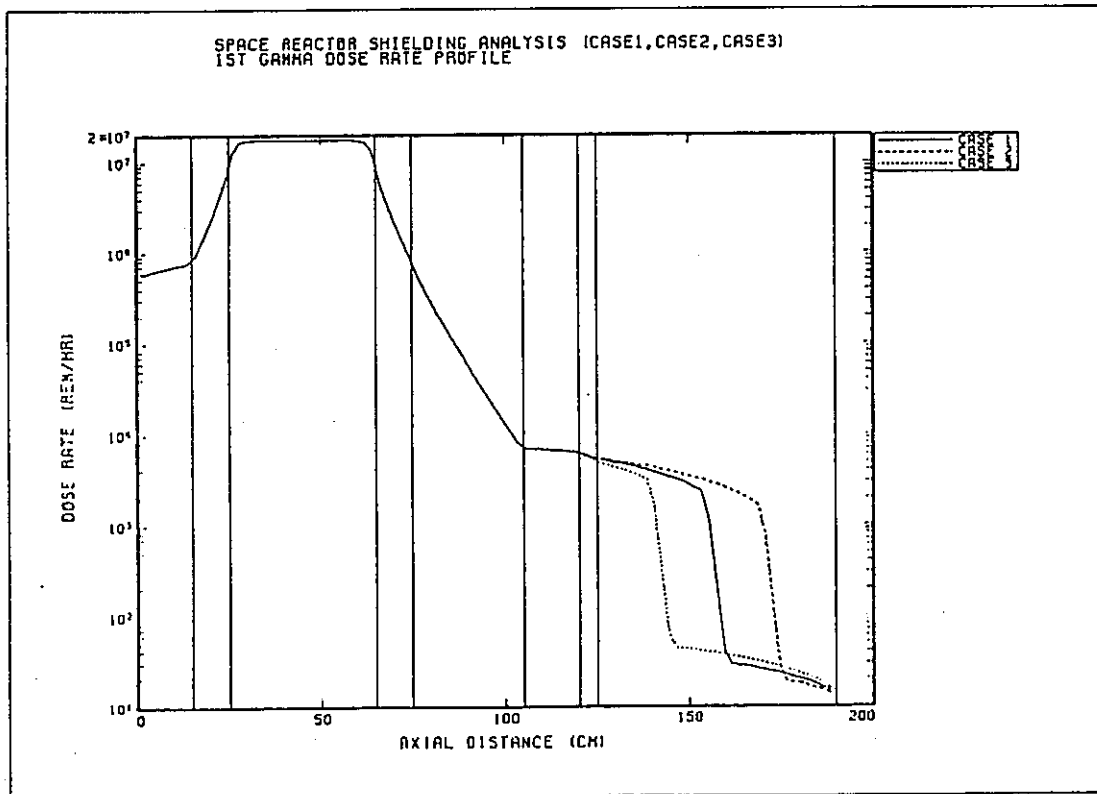


図 4 - 5 (4) タングステン設定位置に関する検討：1次ガンマ線線量率の軸方向分布

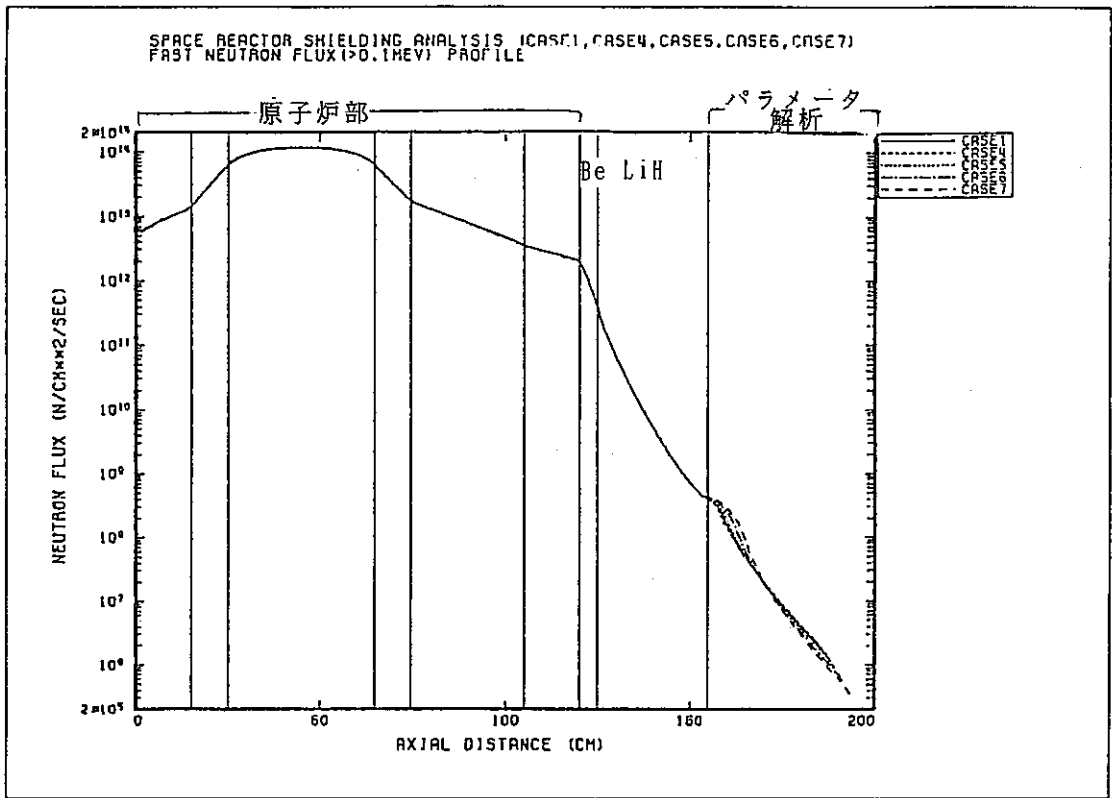


図 4 - 6 (1) タングステン領域厚さに関する検討：高速中性子束の軸方向分布

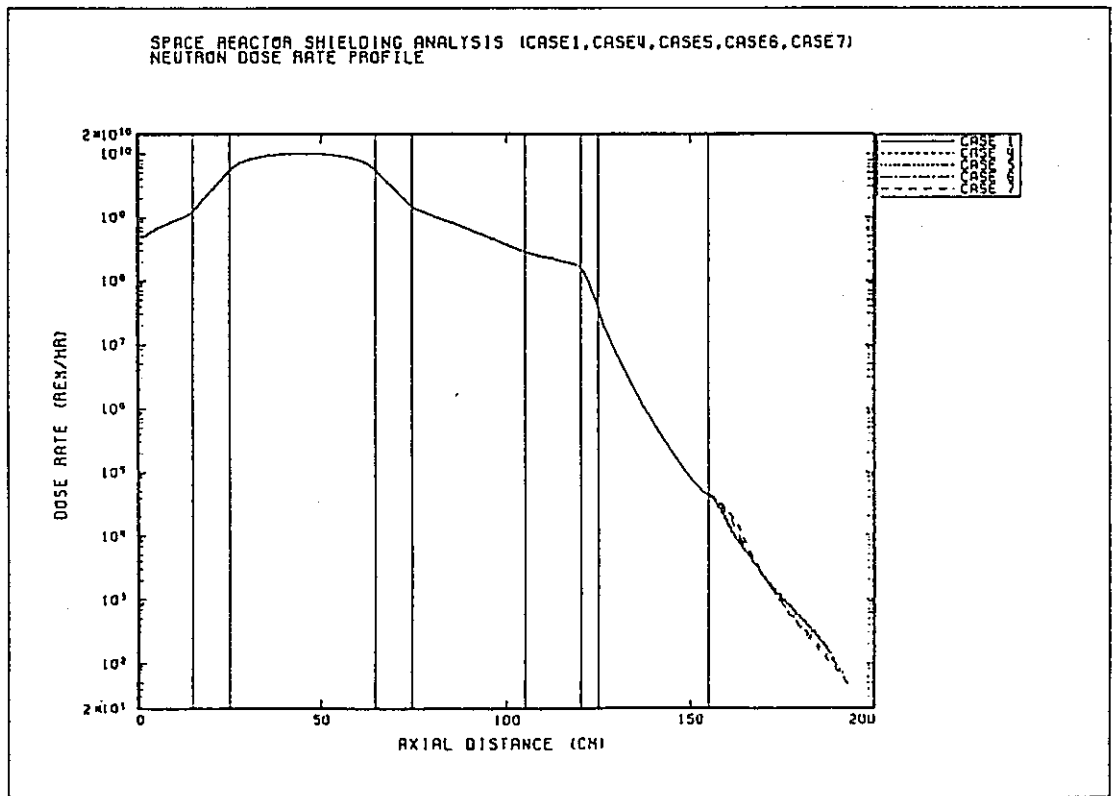


図 4 - 6 (2) タングステン領域厚さに関する検討：中性子線量率の軸方向分布

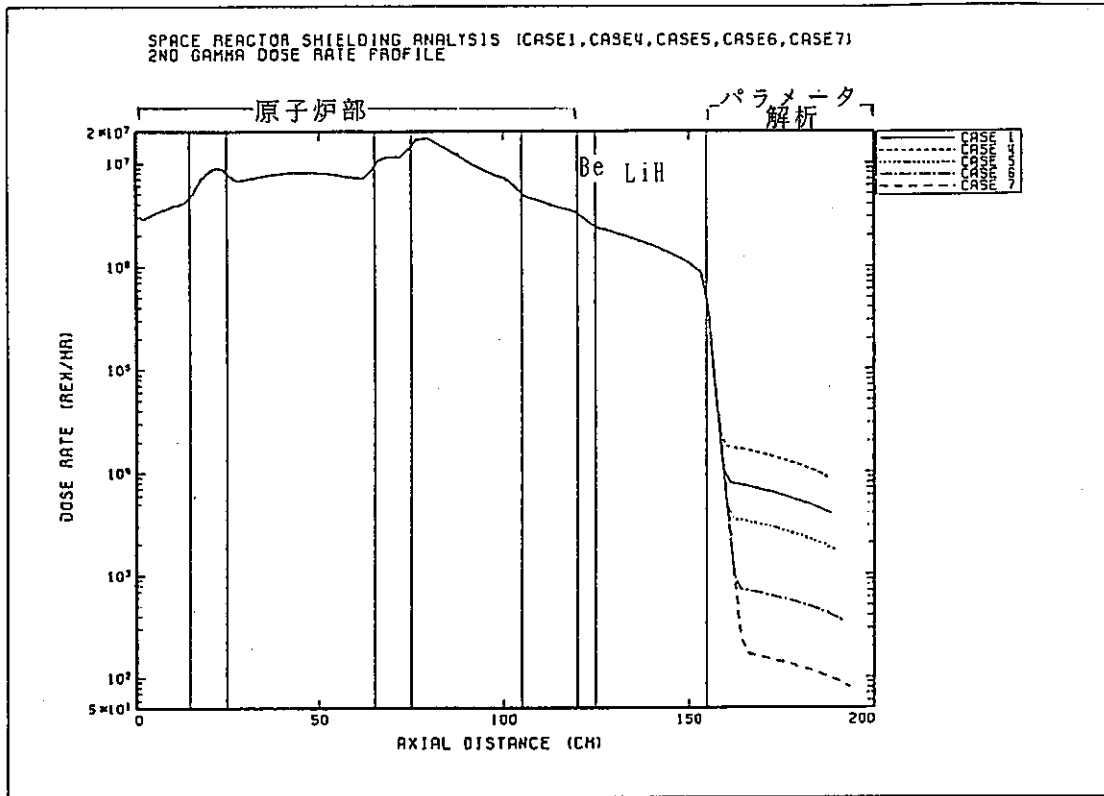


図 4 - 6 (3) タングステン領域厚さに関する検討：2次ガンマ線線量率の軸方向分布

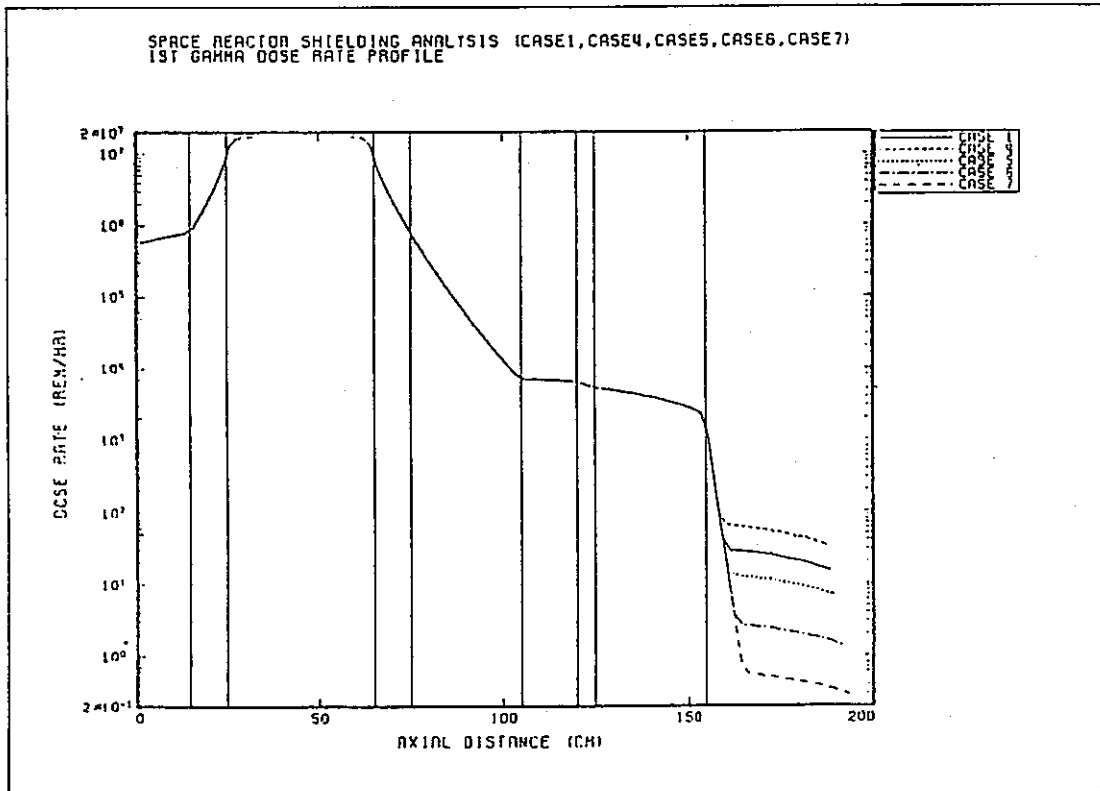


図 4 - 6 (4) タングステン領域厚さに関する検討：1次ガンマ線線量率の軸方向分布

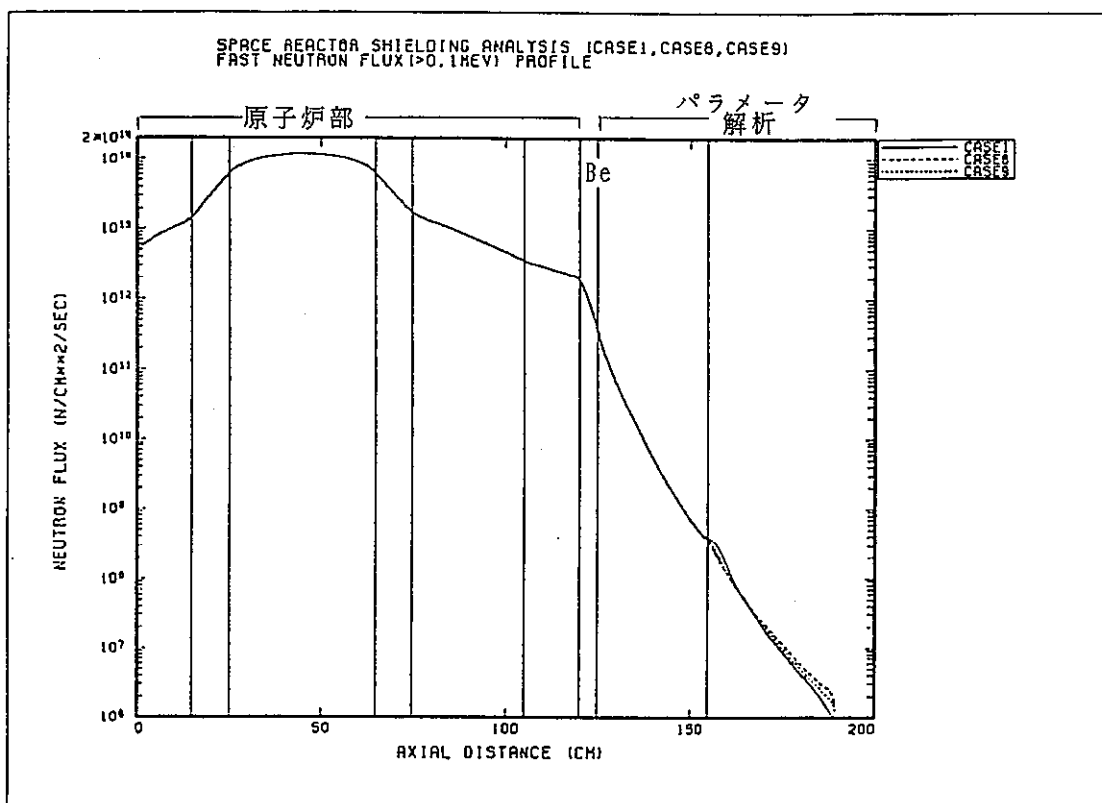


図 4-7 (1) タングステン 2 分割位置に関する検討：高速中性子束の軸方向分布

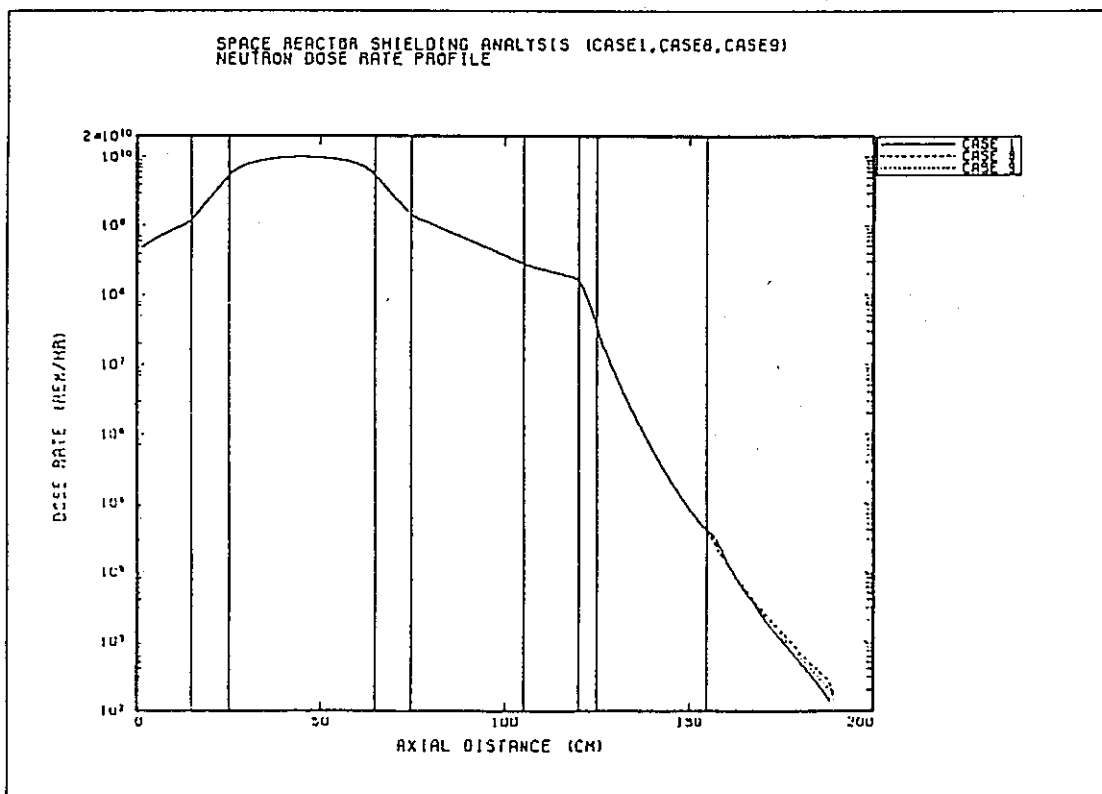


図 4-7 (2) タングステン 2 分割位置に関する検討：中性子線量率の軸方向分布

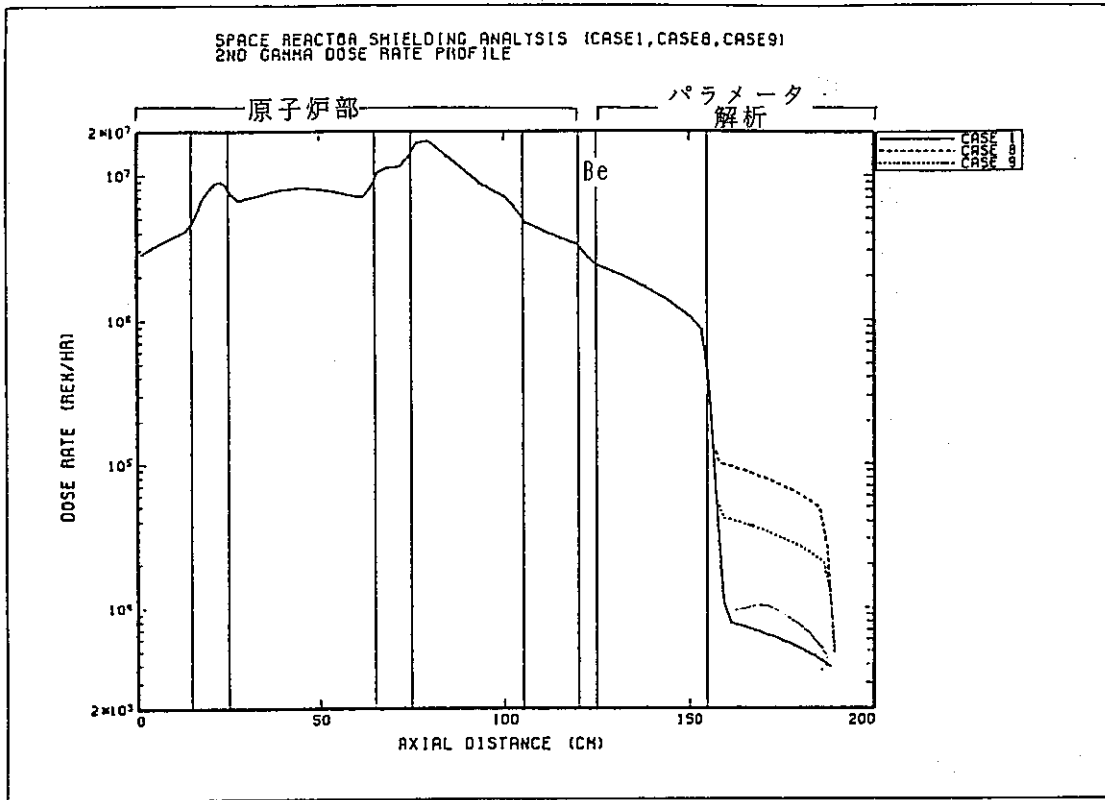


図 4 - 7 (3) タングステン 2 分割位置に関する検討 : 2 次ガンマ線線量率の軸方向分布

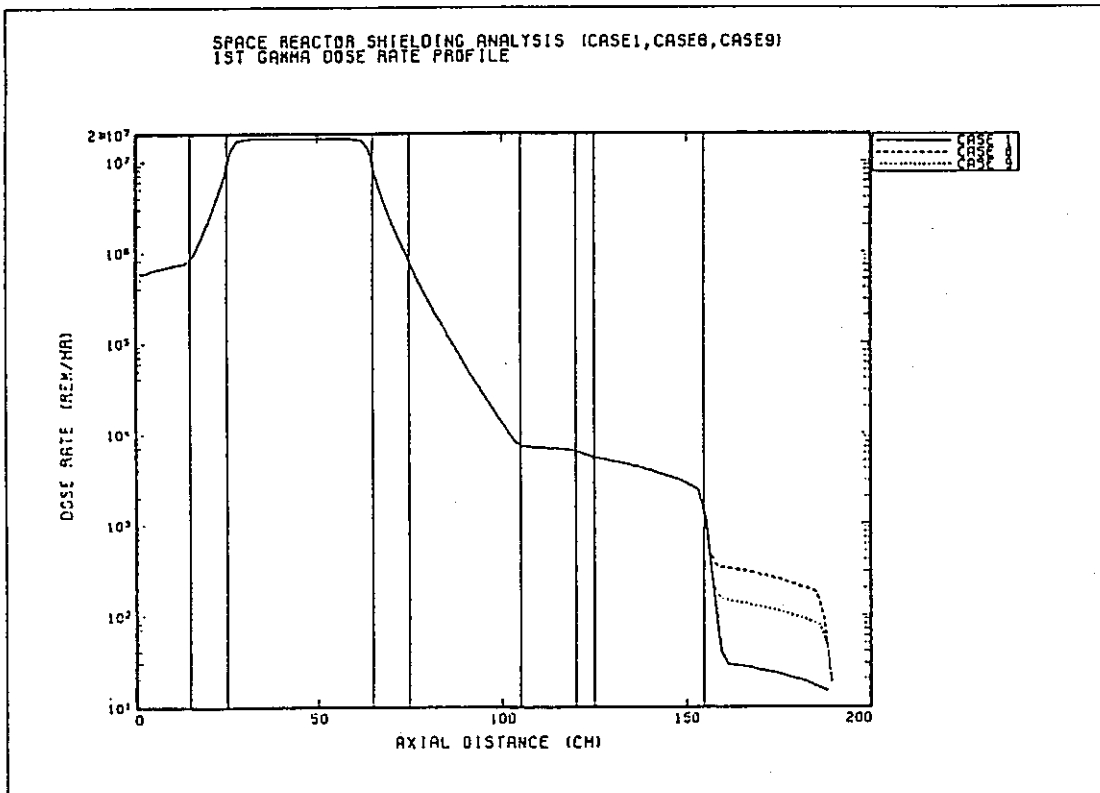


図 4 - 7 (4) タングステン 2 分割位置に関する検討 : 1 次ガンマ線線量率の軸方向分布

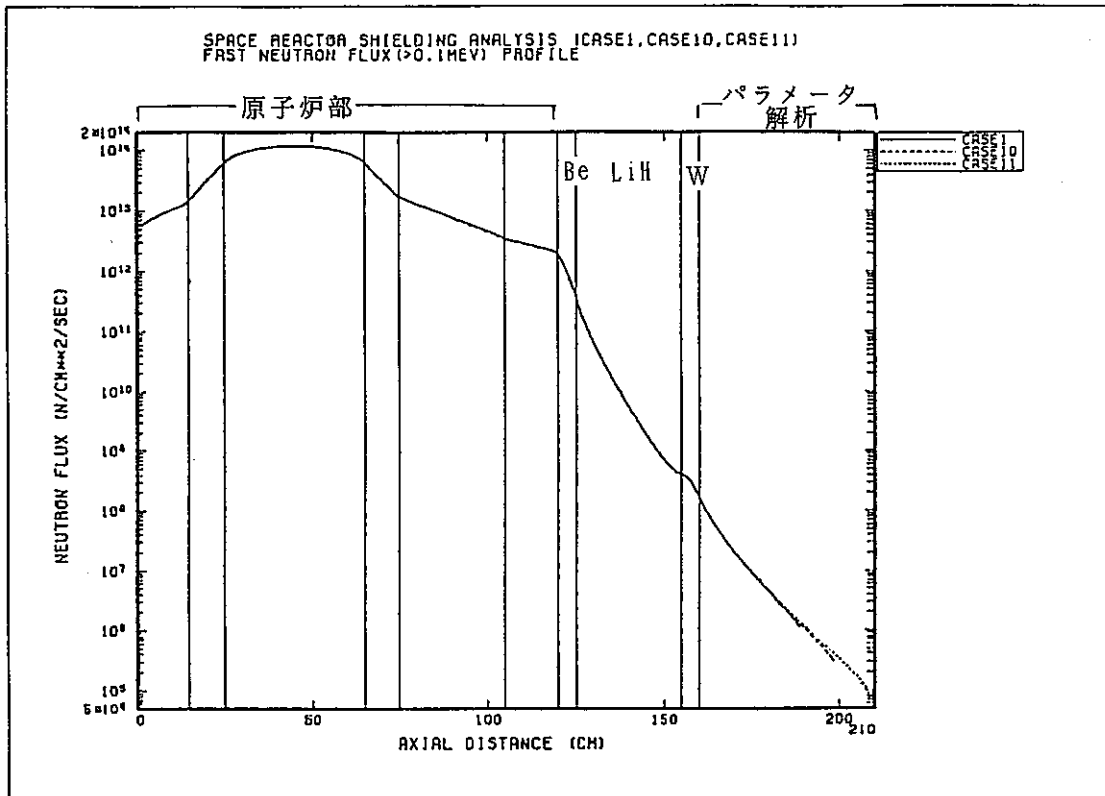


図 4 - 8 (1) 水素化リチウム領域厚さに関する検討：高速中性子束の軸方向分布

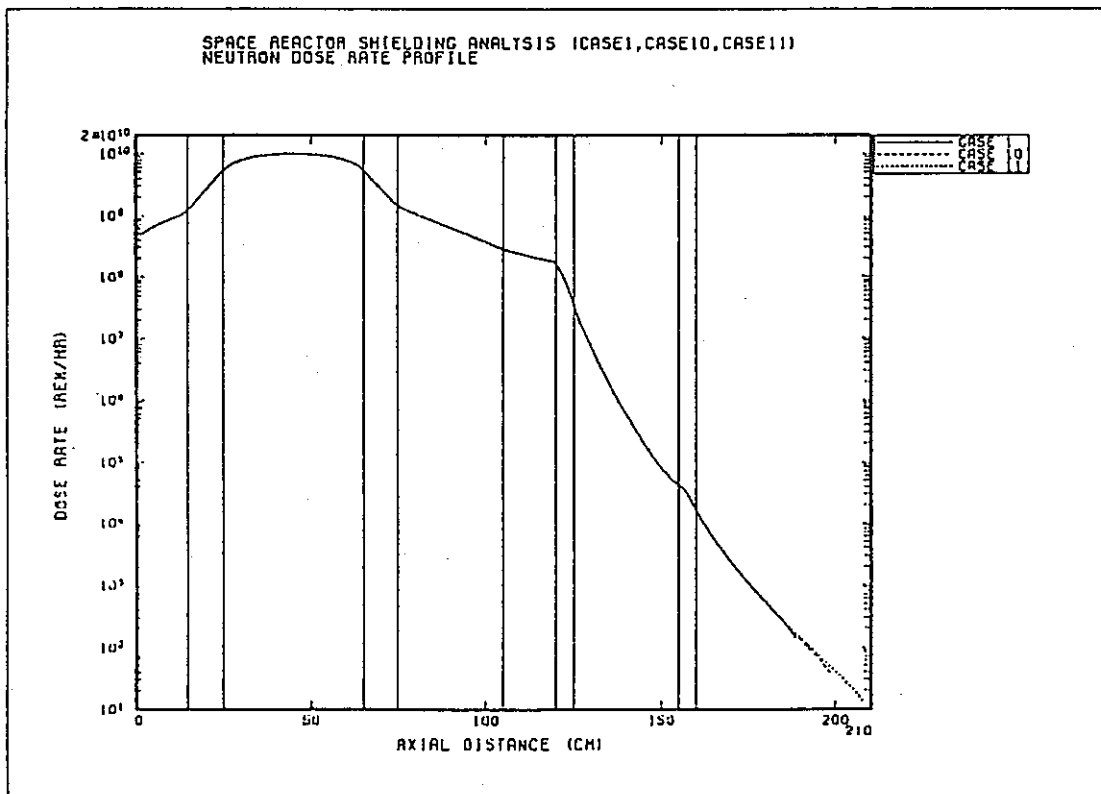


図 4 - 8 (2) 水素化リチウム領域厚さに関する検討：中性子線量率の軸方向分布

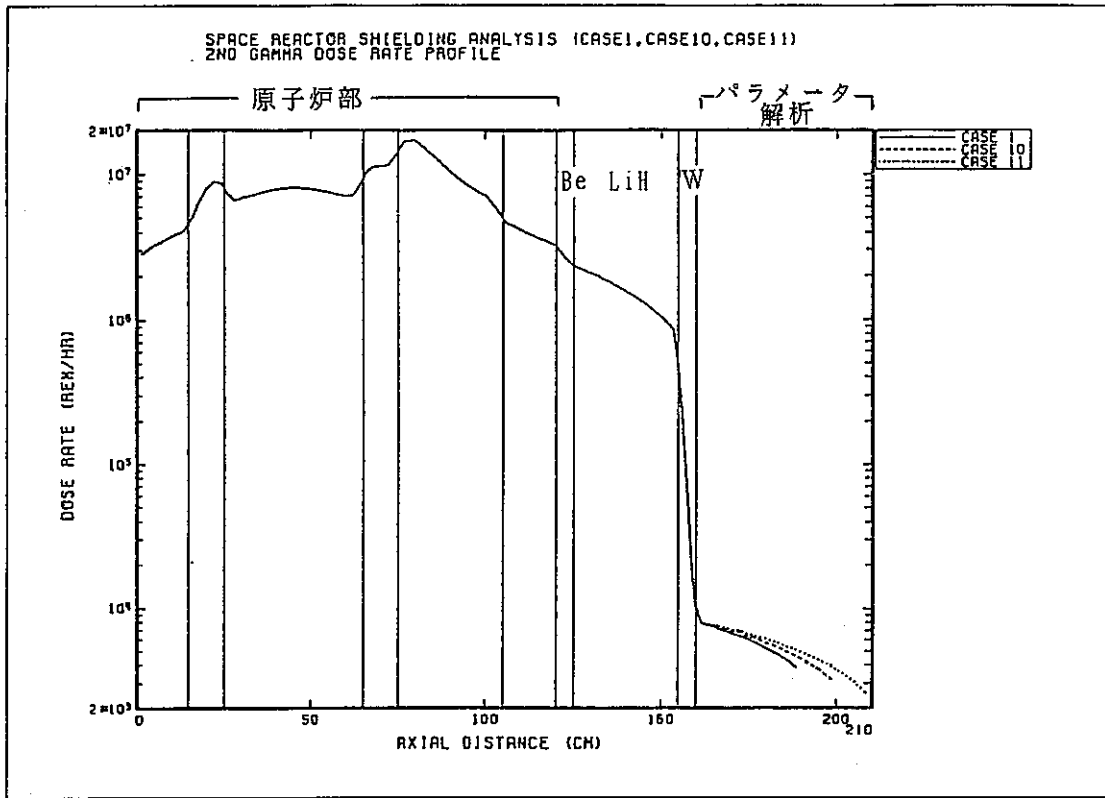


図 4 - 8 (3) 水素化リチウム領域厚さに関する検討：2次ガンマ線線量率の軸方向分布

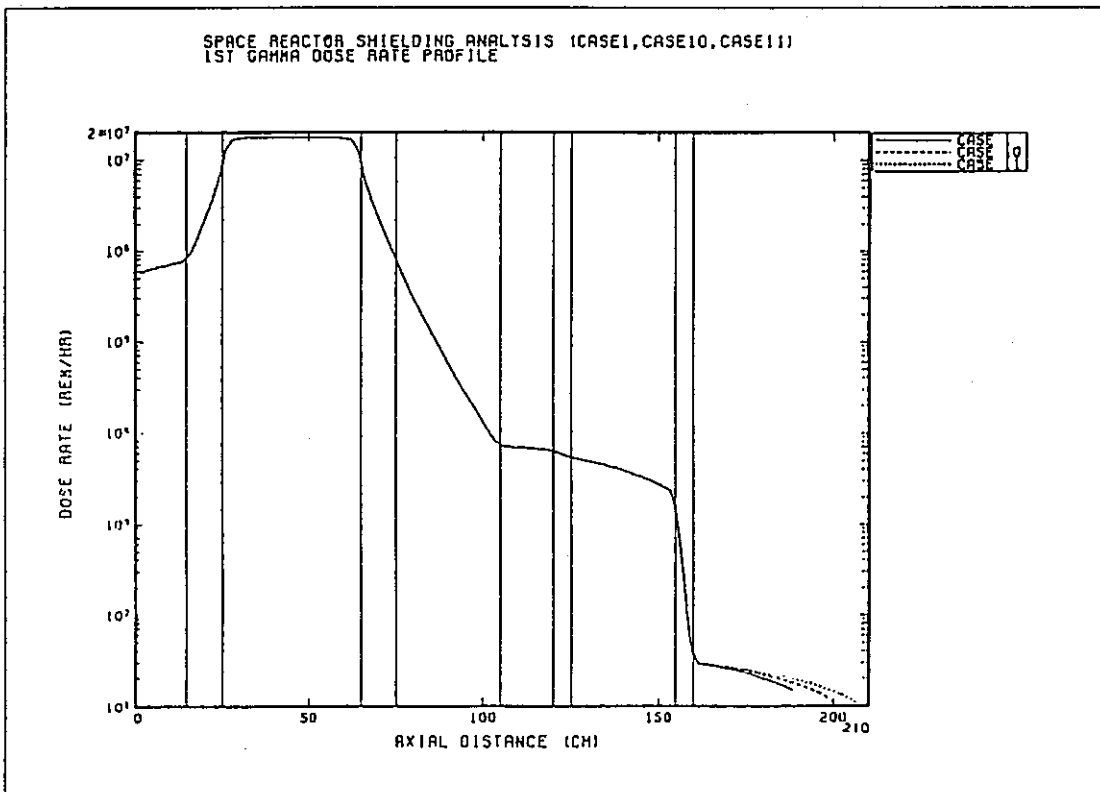


図 4 - 8 (4) 水素化リチウム領域厚さに関する検討：1次ガンマ線線量率の軸方向分布

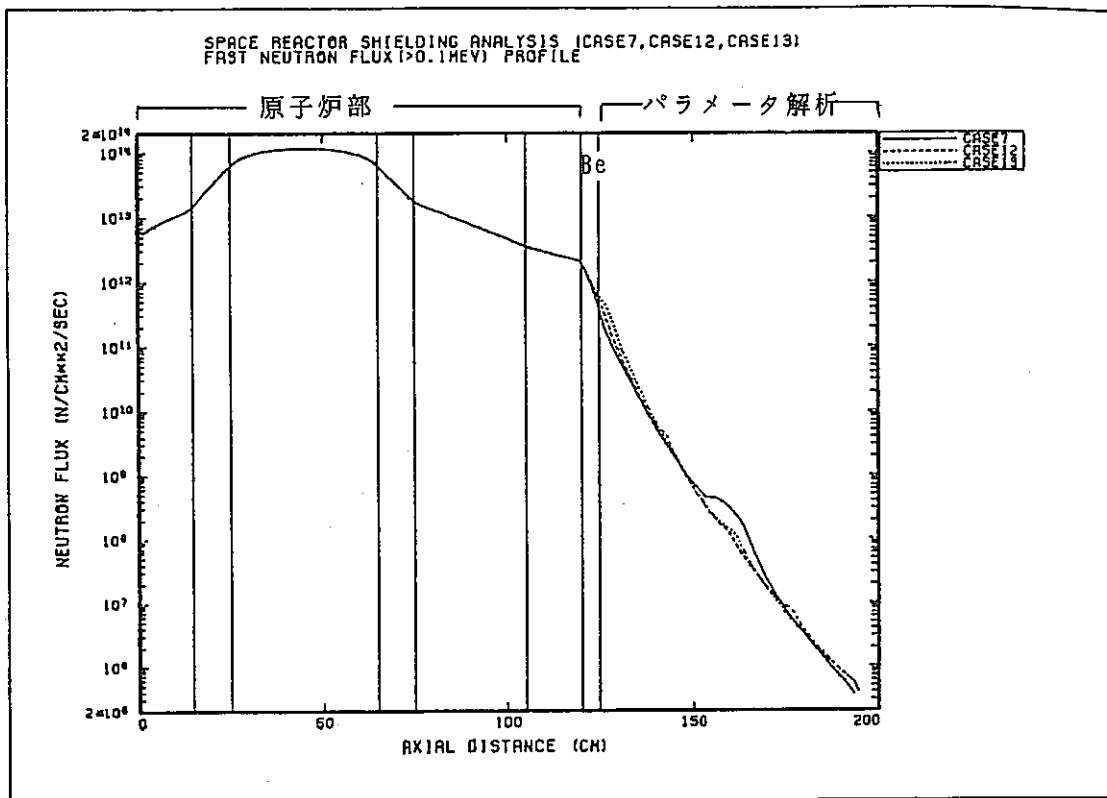


図 4 - 9 (1) 多重層構造に関する検討：高速中性子束の軸方向分布

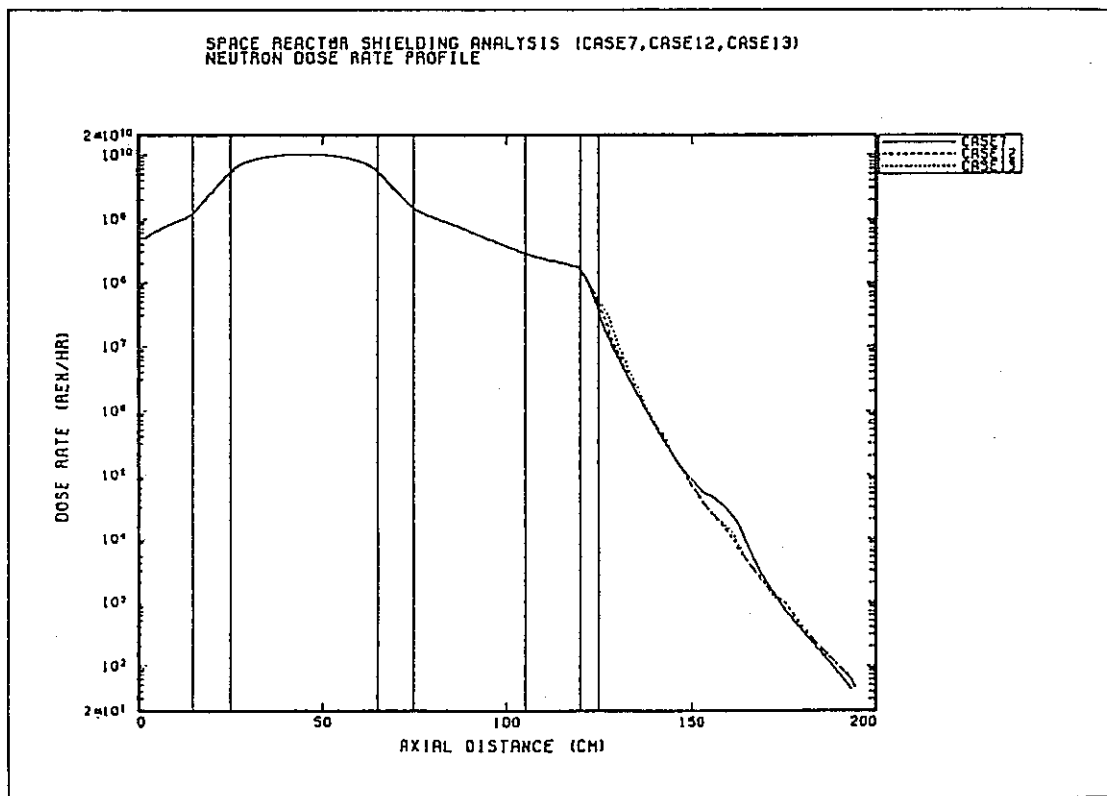


図 4 - 9 (2) 多重層構造に関する検討：中性子線量率の軸方向分布

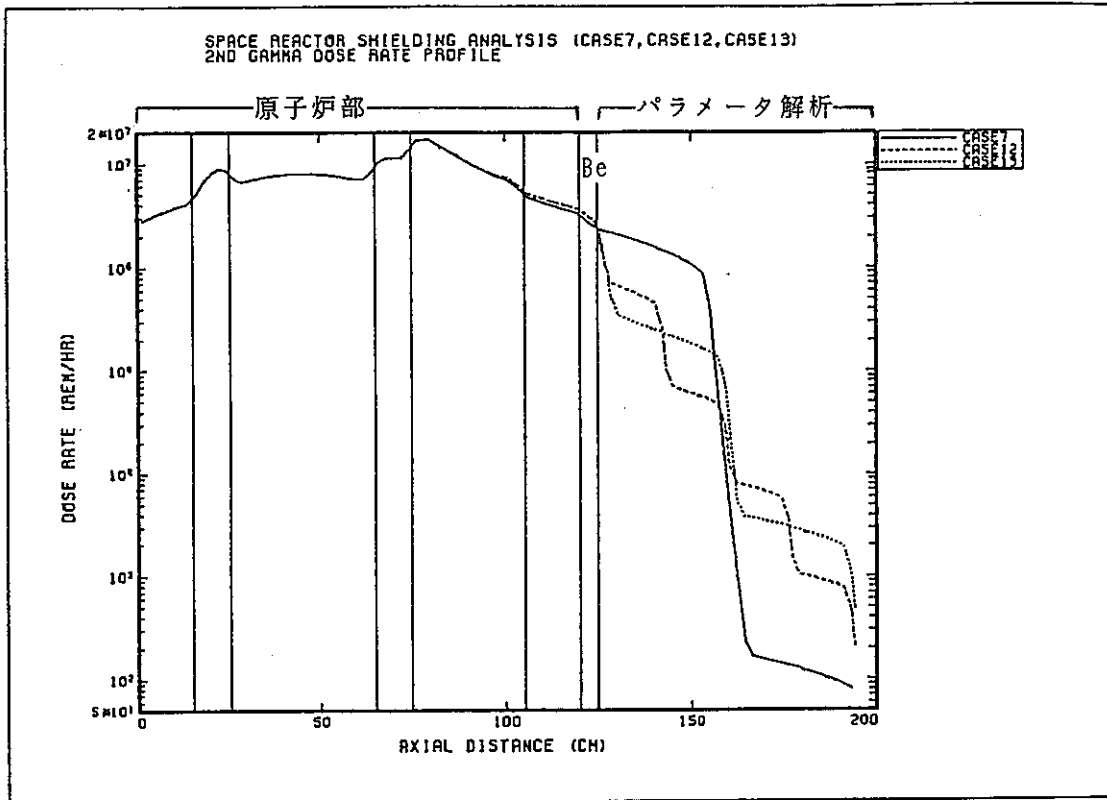


図 4 - 9 (3) 多重層構造に関する検討：2次ガンマ線線量率の軸方向分布

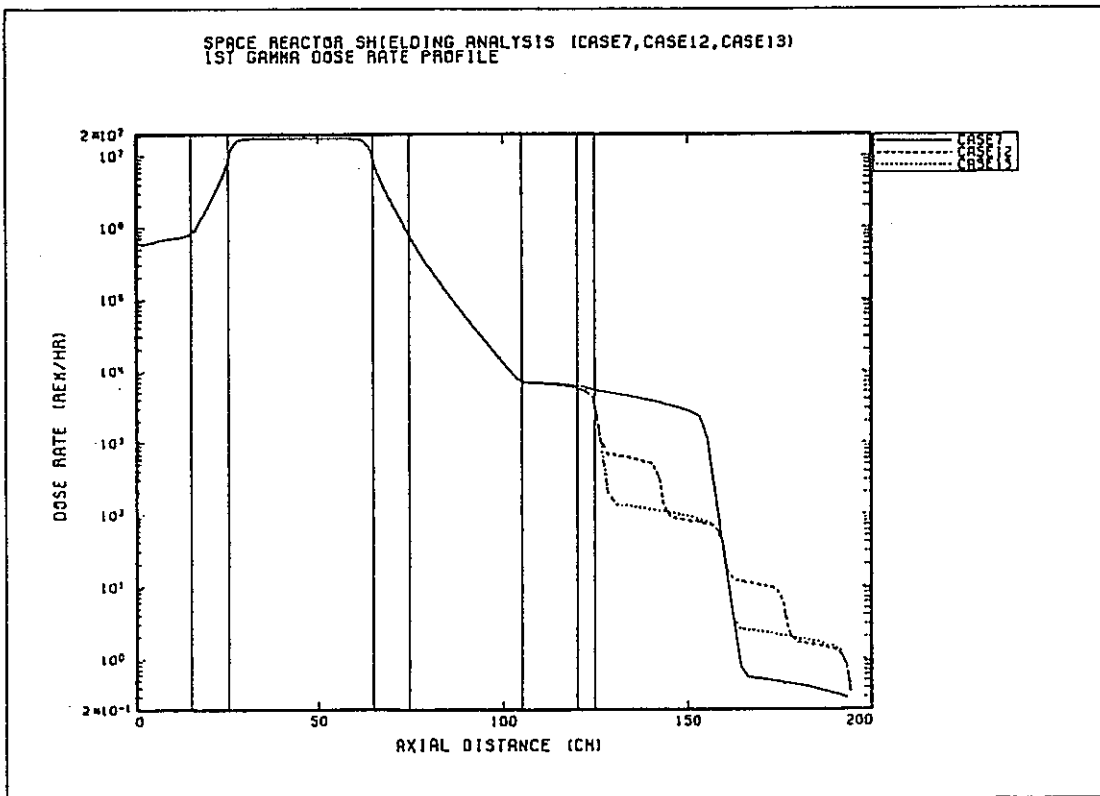


図 4 - 9 (4) 多重層構造に関する検討：1次ガンマ線線量率の軸方向分布

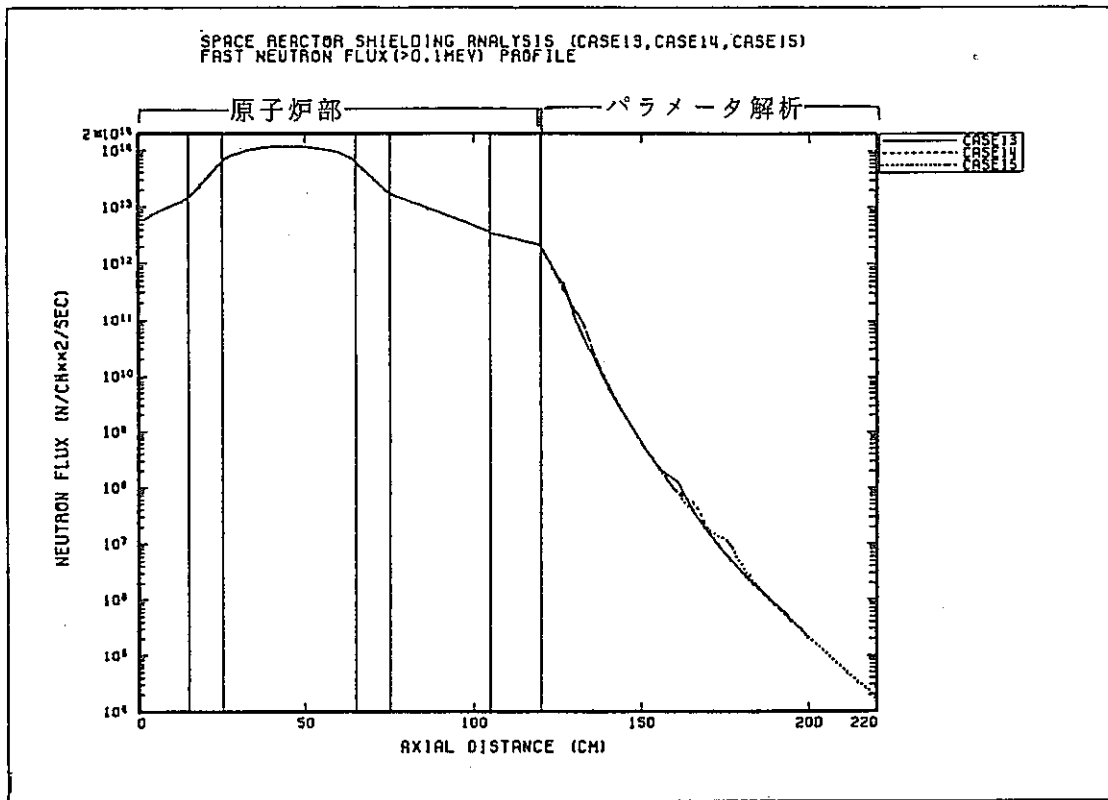


図4-10(1) ベリリウム領域厚さに関する検討：高速中性子束の軸方向分布

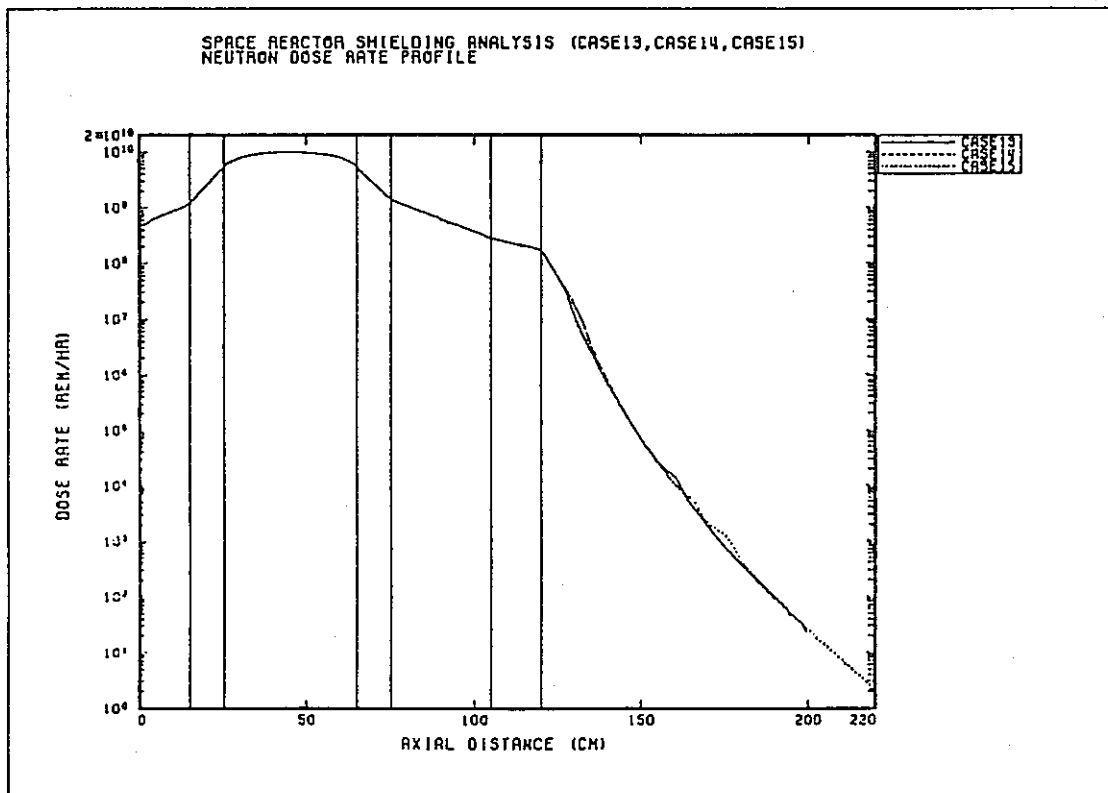


図4-10(2) ベリリウム領域厚さに関する検討：中性子線量率の軸方向分布

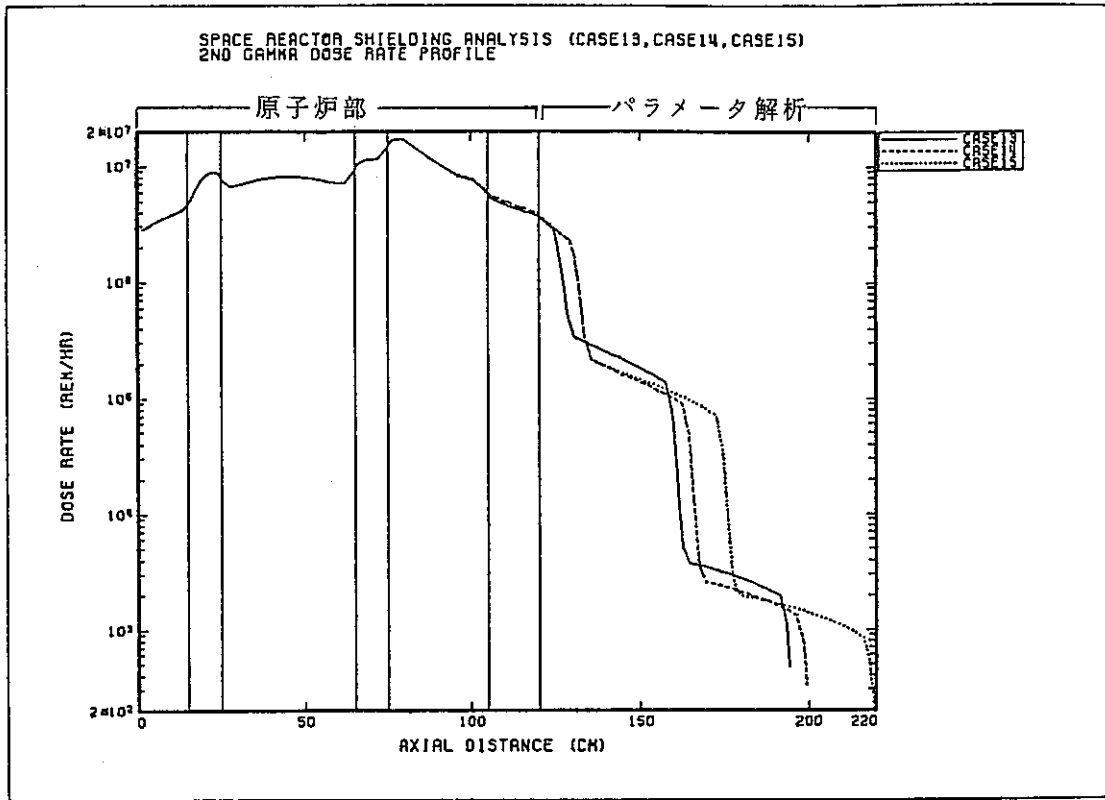


図 4-10(3) ベリリウム領域厚さに関する検討：2次ガンマ線線量率の軸方向分布

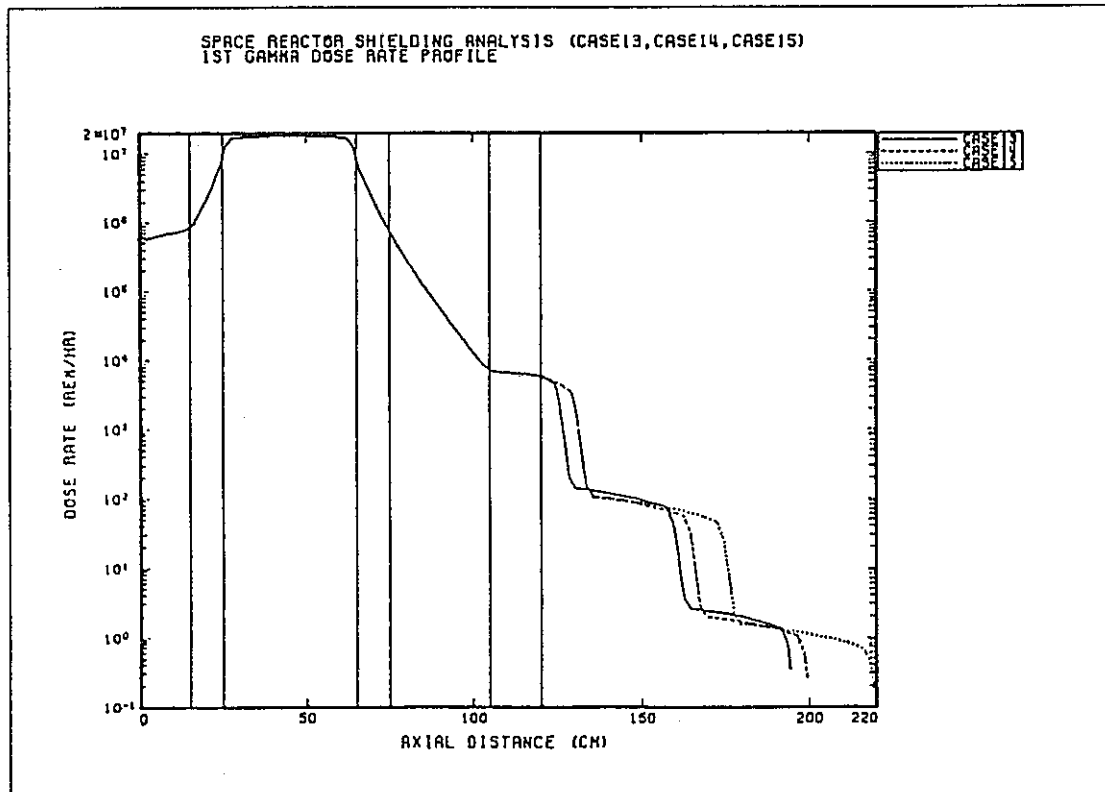


図 4-10(4) ベリリウム領域厚さに関する検討：1次ガンマ線線量率の軸方向分布

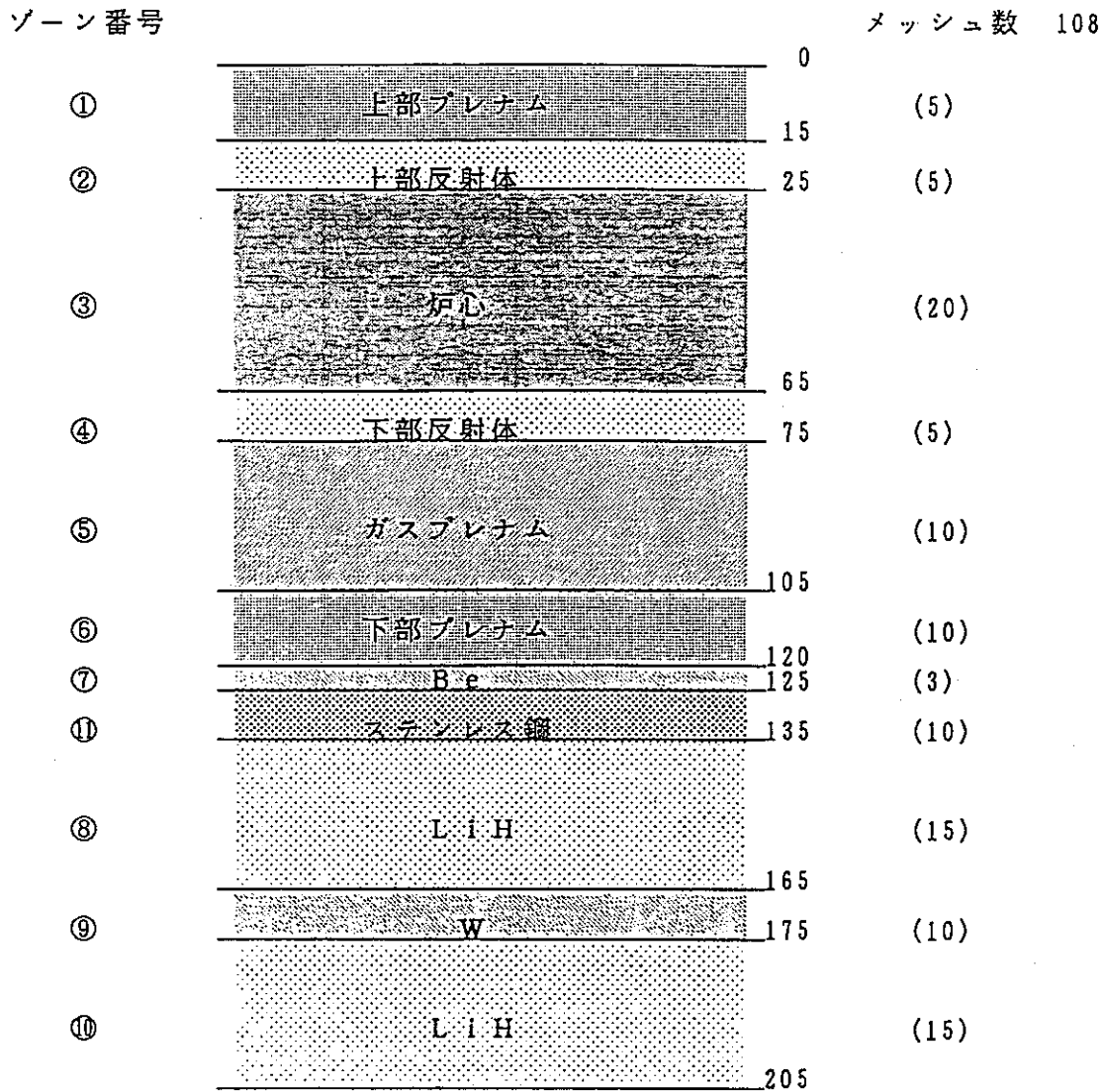


図4-11 ケース16の1次元計算体系

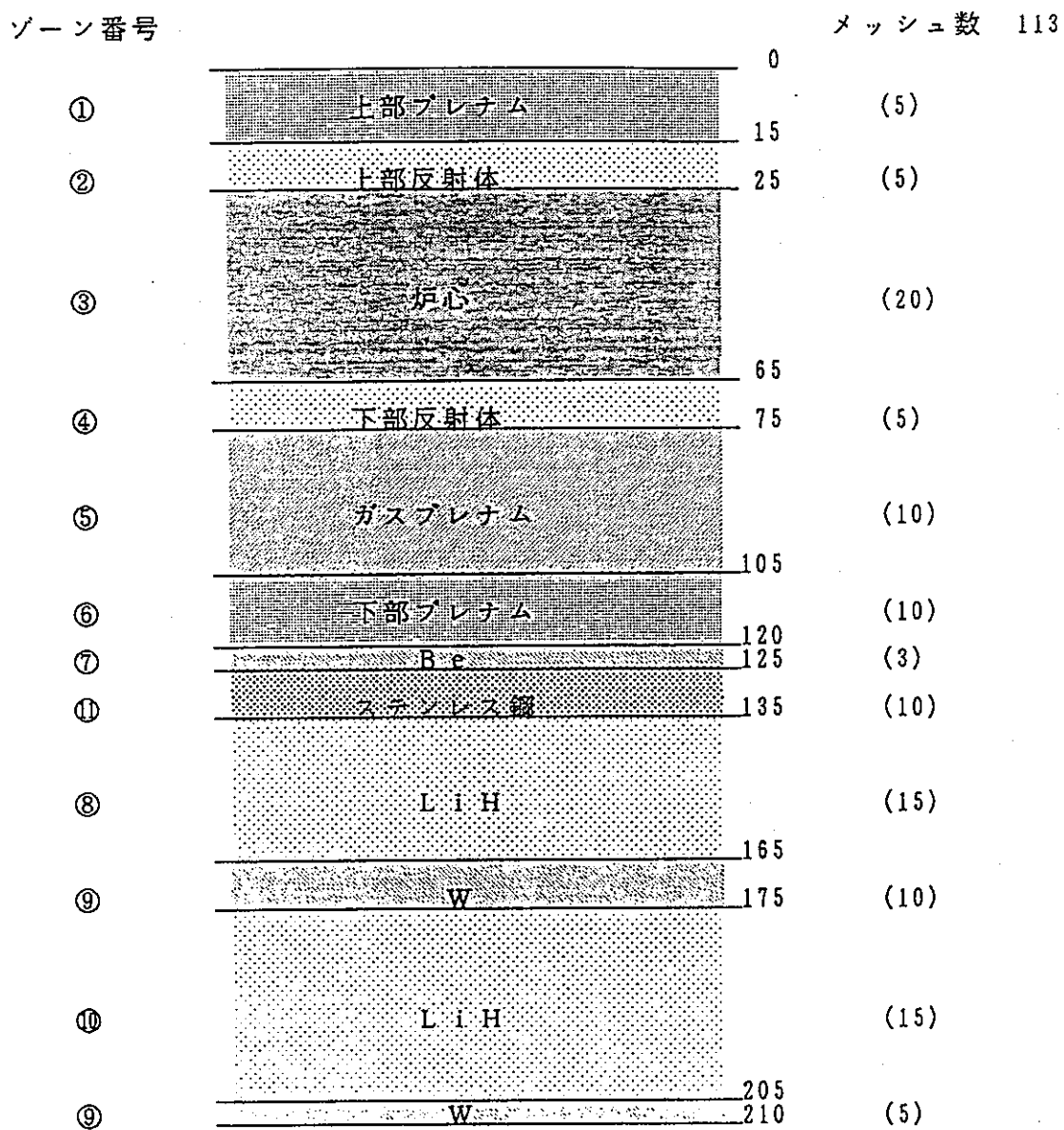


図 4-12 ケース17の1次元計算体系

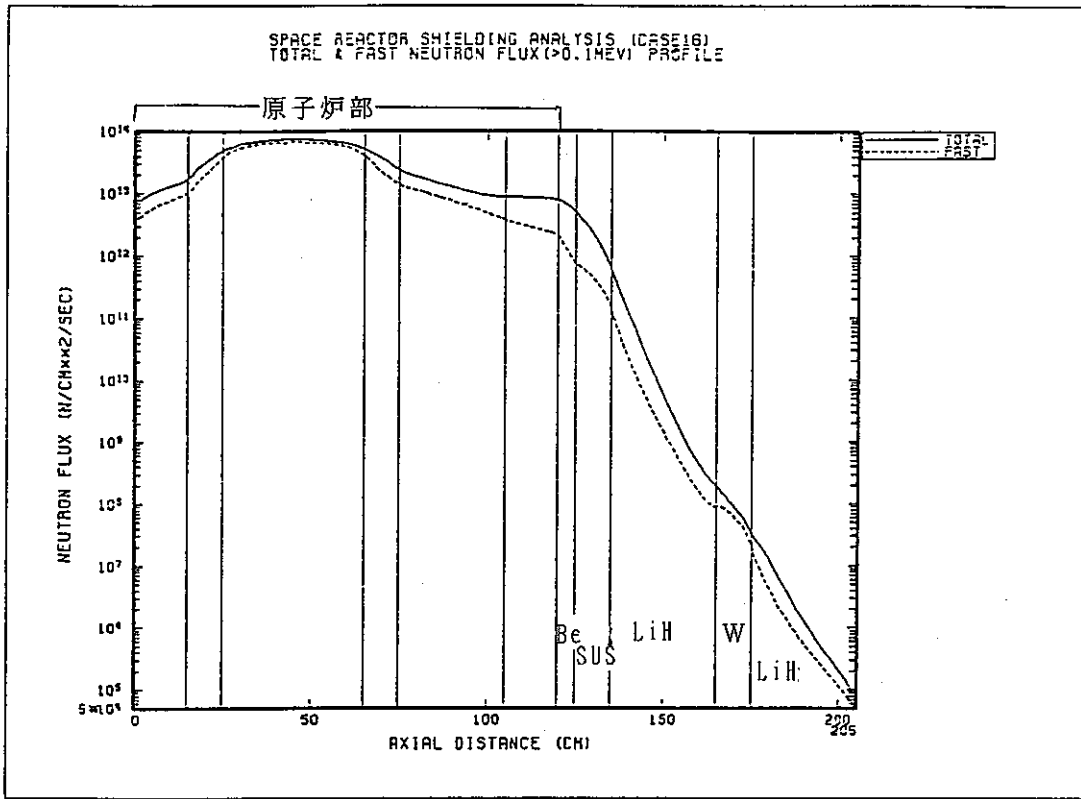


図 4-13(1) ケース16全中性子束および高速中性子束の軸方向分布

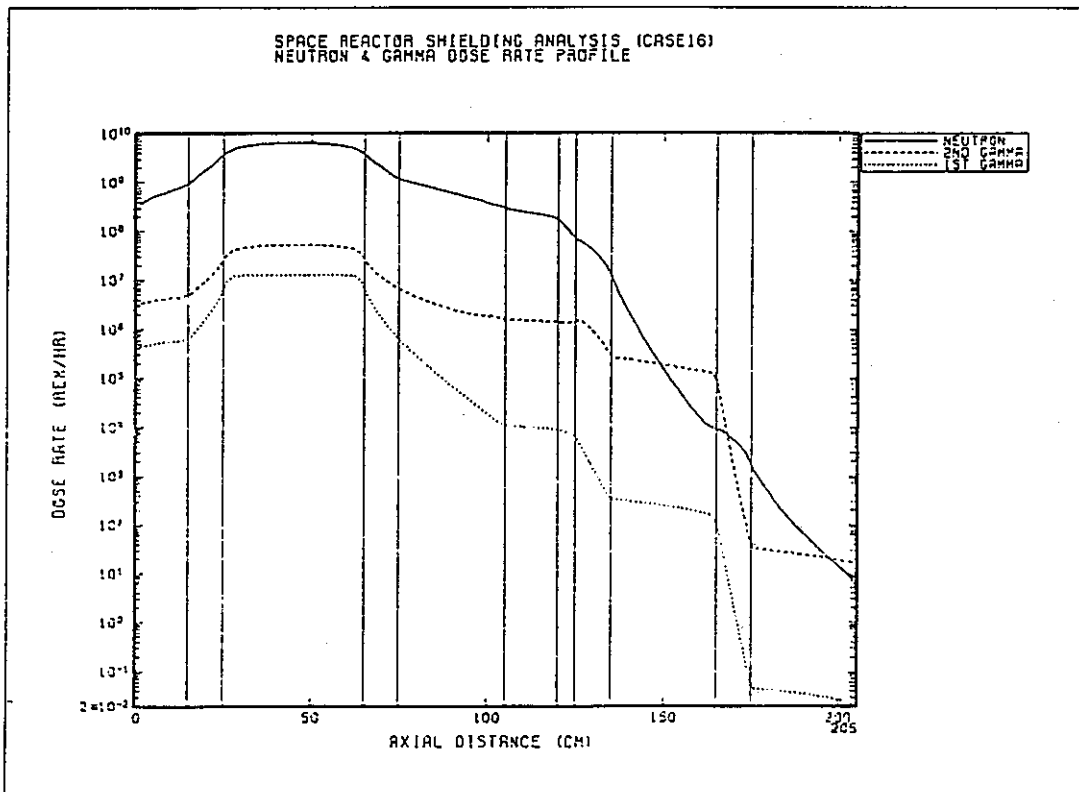


図 4-13(2) ケース16中性子およびガンマ線線量率の軸方向分布

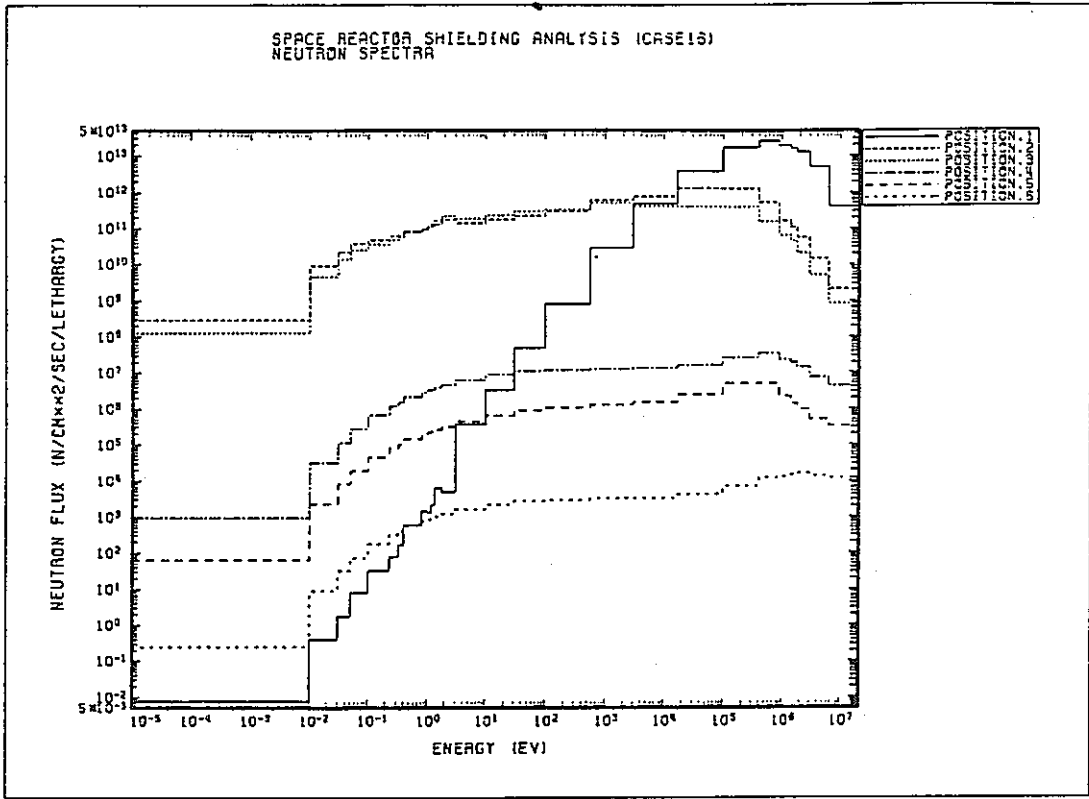


図 4-13(3) ケース16代表的な評価点の中性子スペクトル

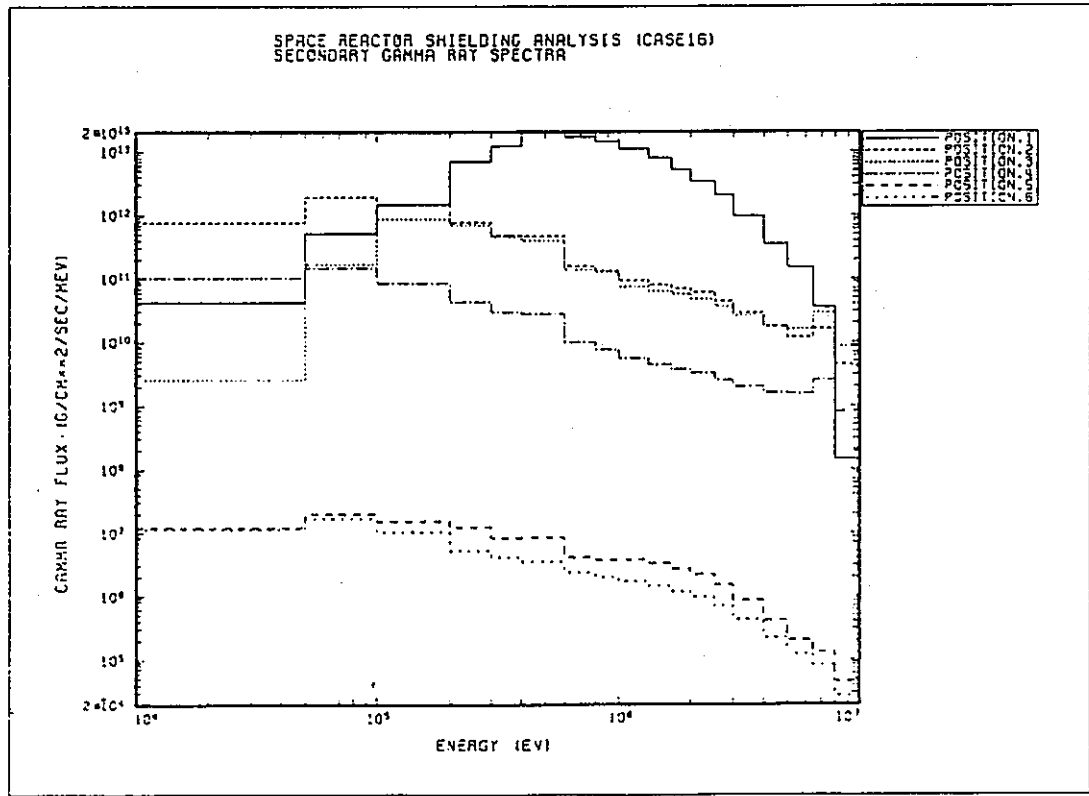


図 4-13(4) ケース16代表的な評価点の2次ガンマ線スペクトル

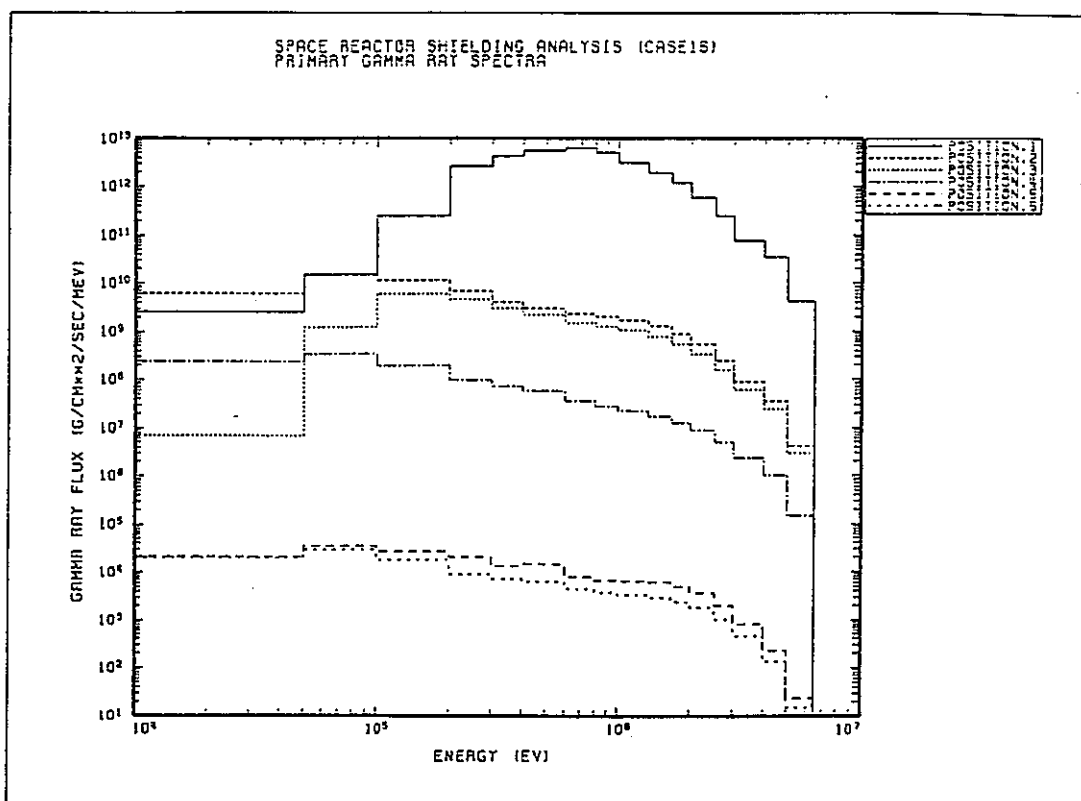


図 4 - 13(5) ケース16代表的な評価点の1次ガンマ線スペクトル

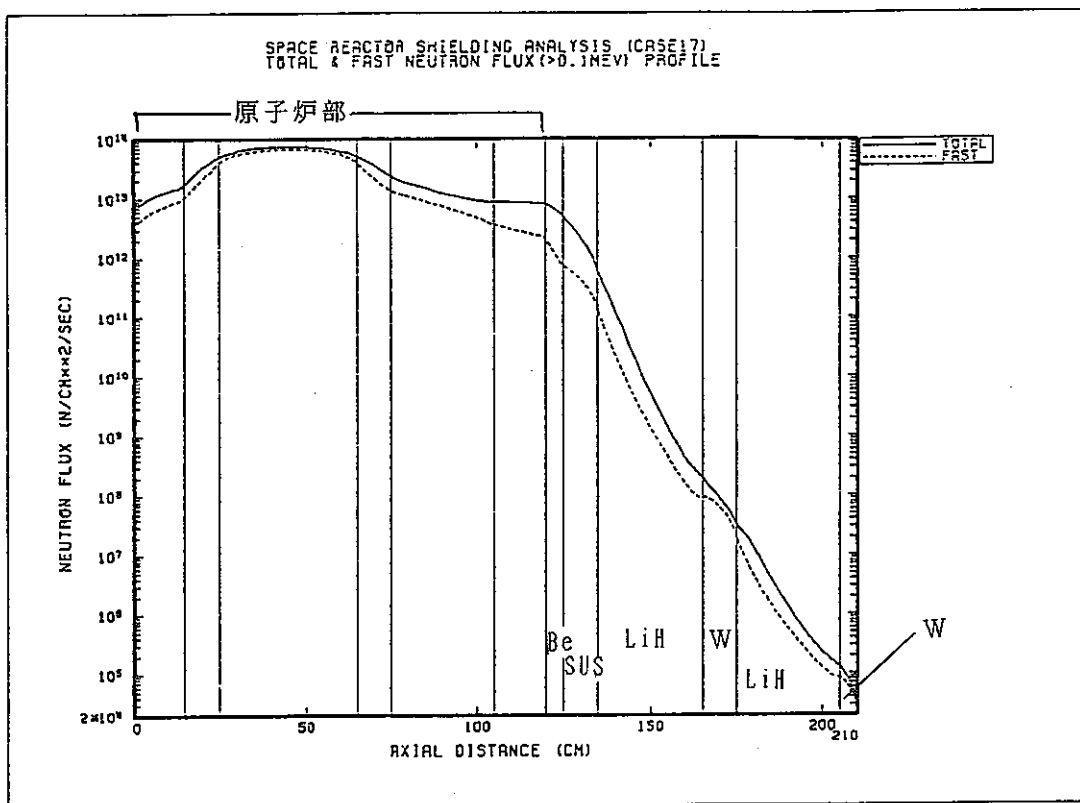


図 4-14(1) ケース17全中性子束および高速中性子束の軸方向分布

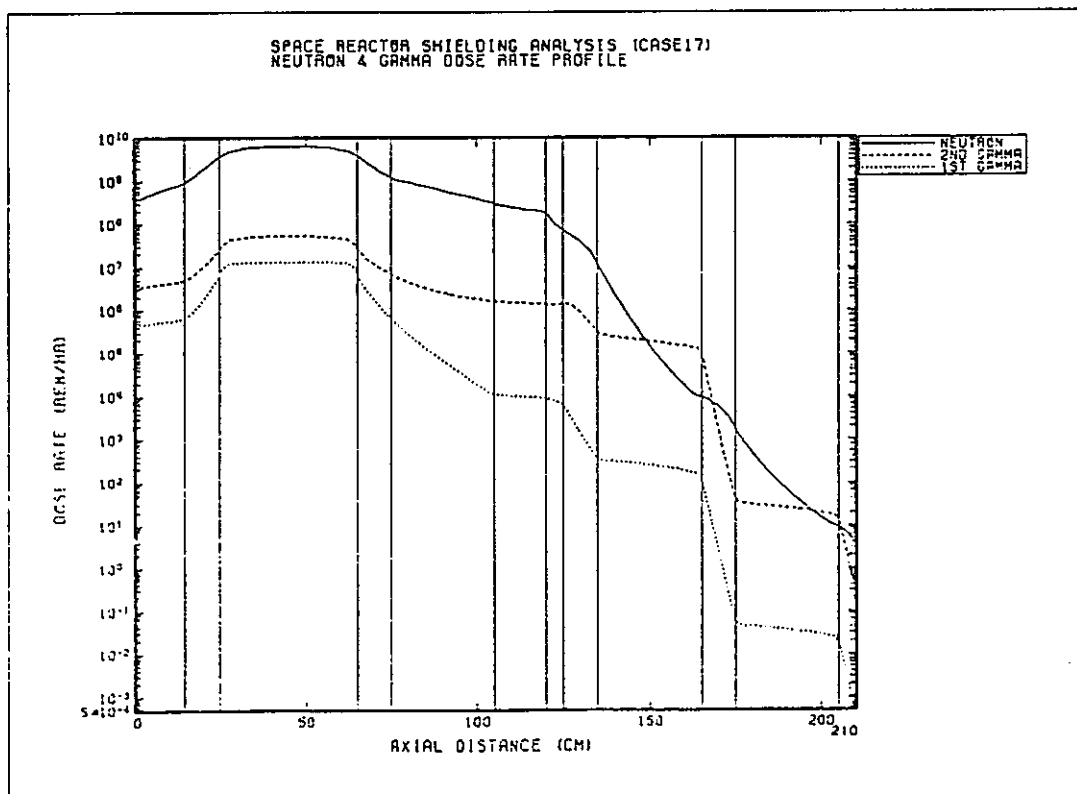


図 4-14(2) ケース17中性子およびガンマ線線量率の軸方向分布

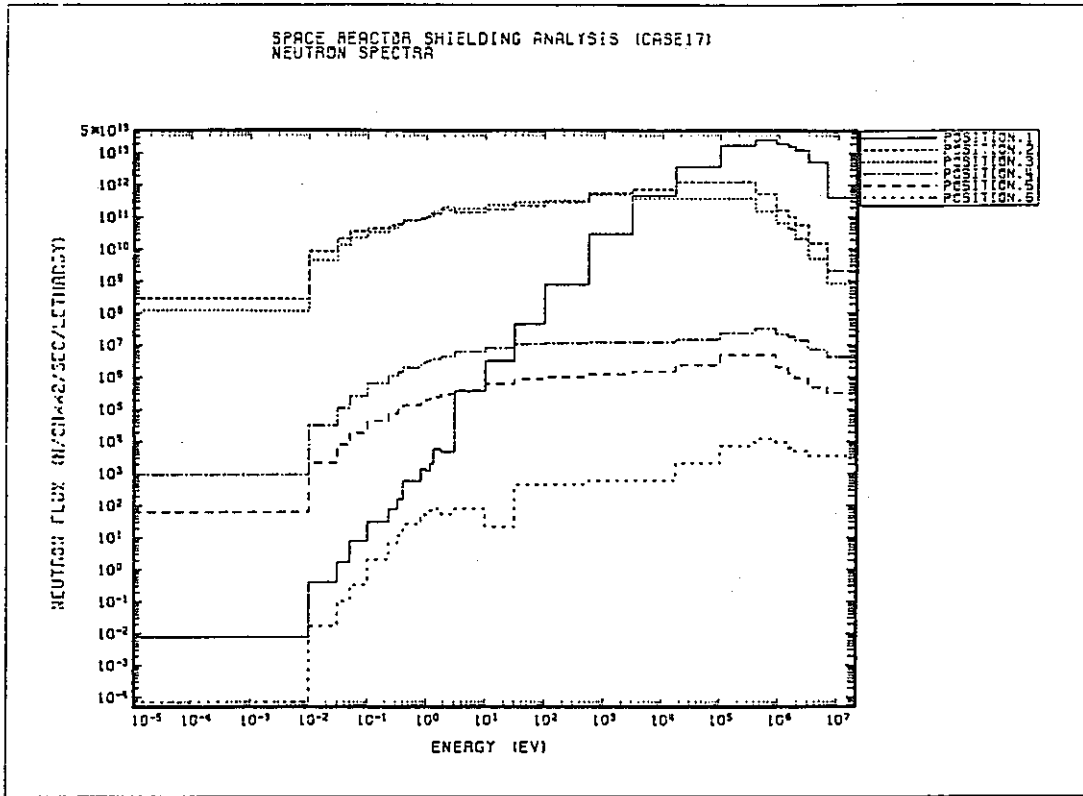


図 4-14(3) ケース17代表的な評価点の中性子スペクトル

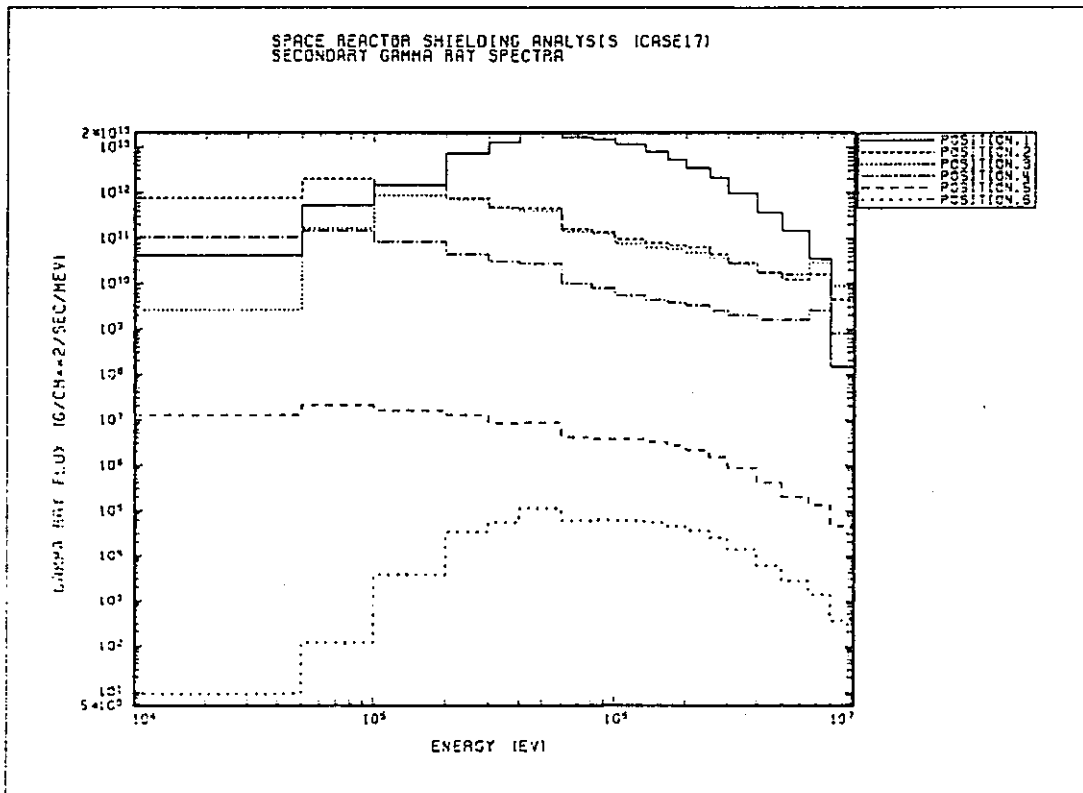


図 4-14(4) ケース17代表的な評価点の2次ガンマ線スペクトル

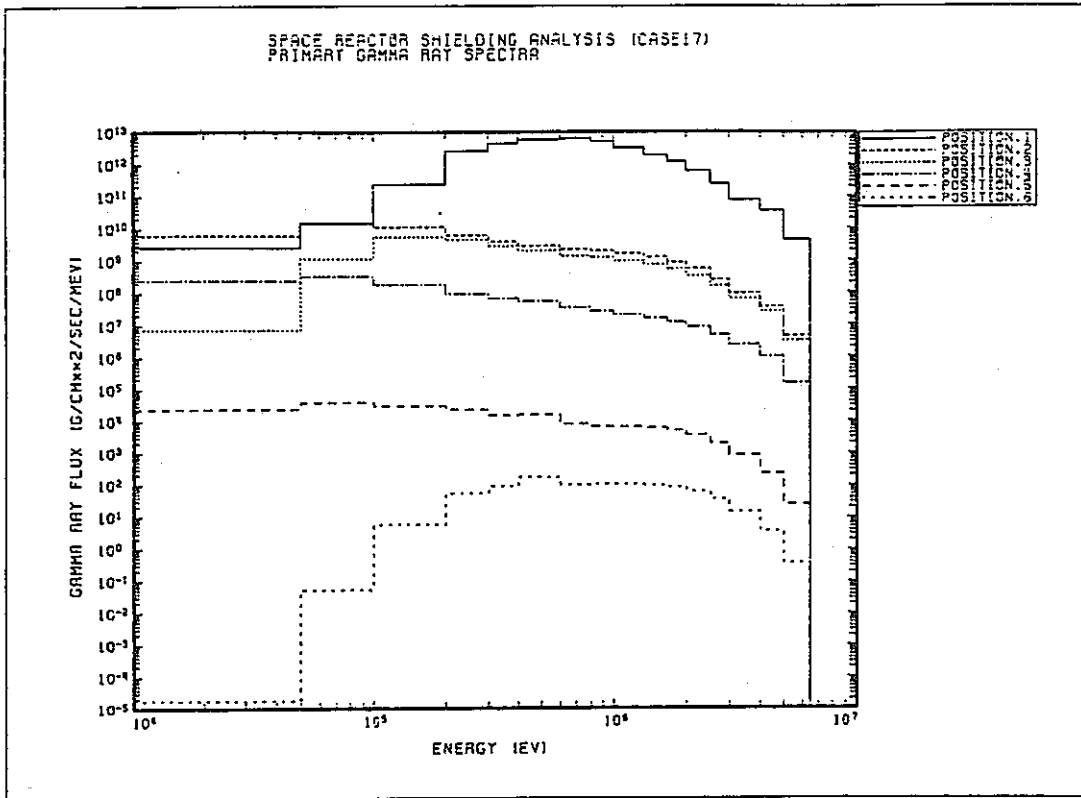


図 4-14(5) ケース17代表的な評価点の1次ガンマ線スペクトル

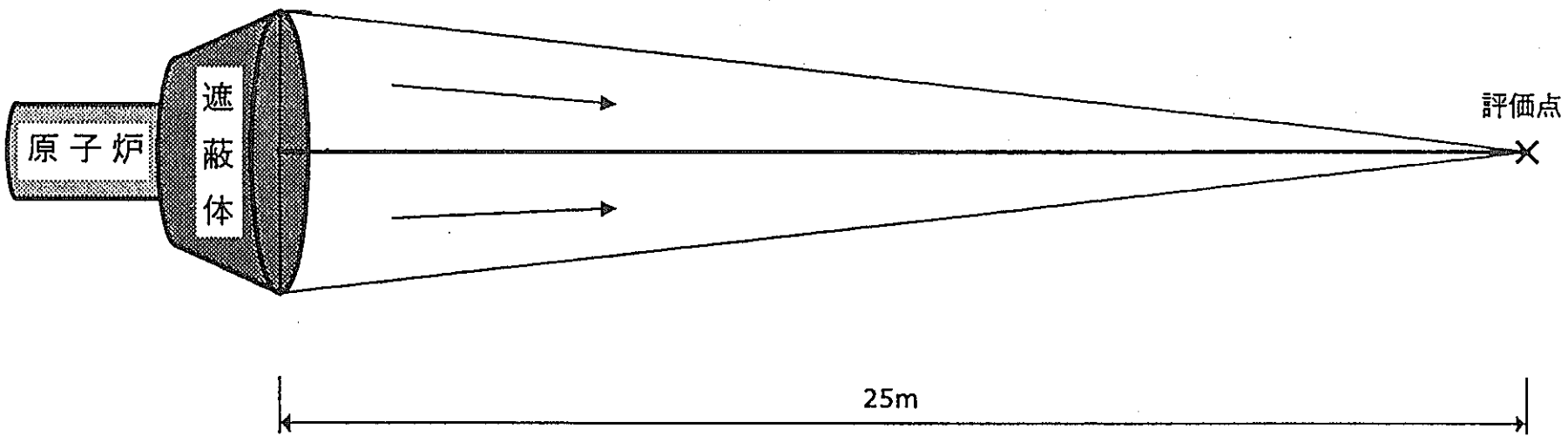


図4-15 宇宙ステーション居住区での線量率評価の概念図

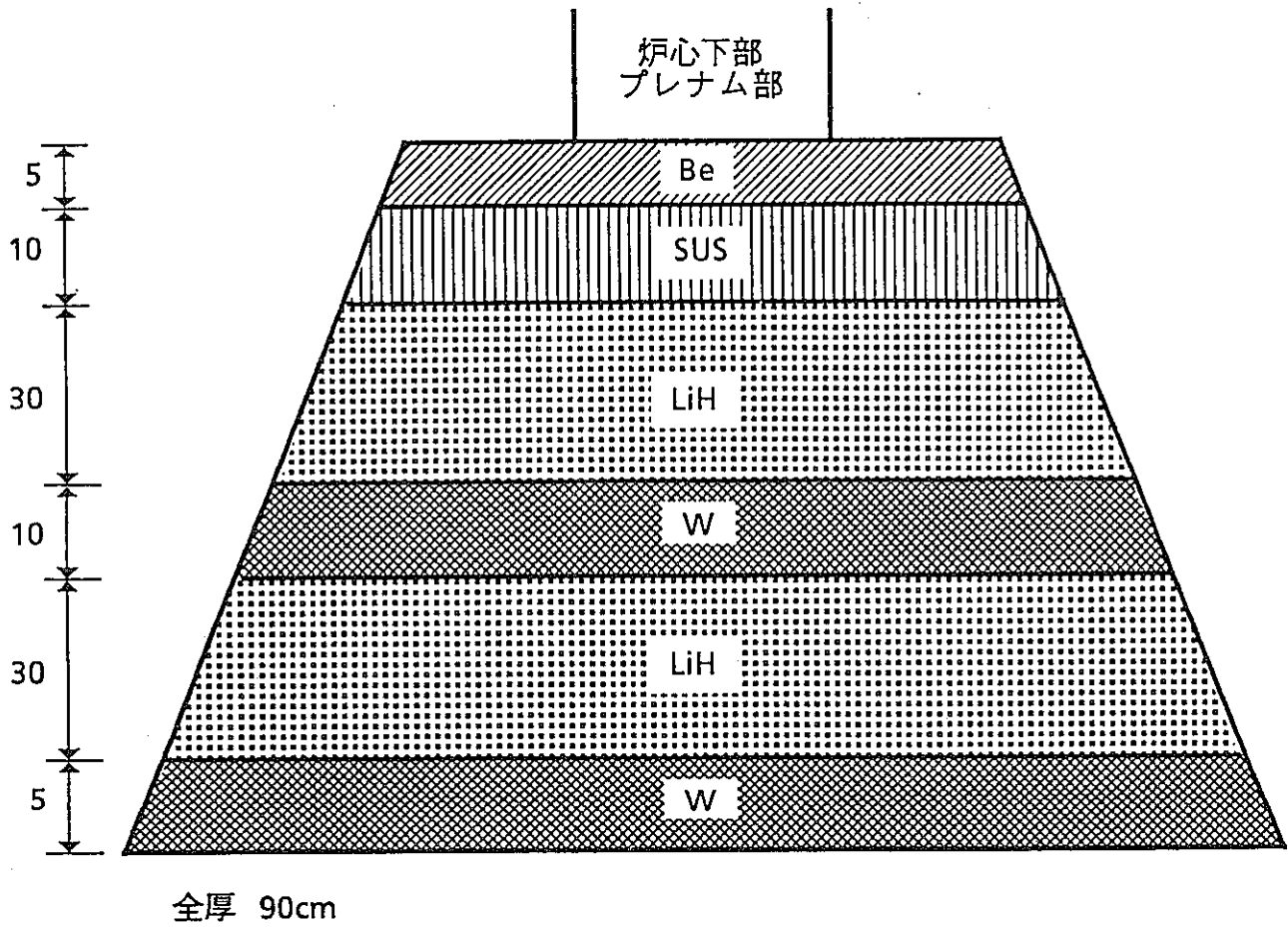


図 5 - 1 遮蔽体構造図

APPENDIX ORIGENコードによる γ 線源及び放射能の計算結果

燃焼に伴って生成される γ 線源の強度及びスペクトルを評価するため、SCALE-3システムに格納されているORIGEN-Sコードを用いて γ 線源及び放射能の計算を実施した。

1) 入力データ

(a) 炉内構成要素

炉内に挿荷される燃料、冷却材(Li-7)及び構造材の重量は以下の通りである。ただし、炉内の軸方向は上下反射体まで、径方向は炉心バレルまでを計算範囲としている。

表A-1 ORIGENコード計算条件

条件項目		条件値
連続運転時間		10年
原子炉出力		2.00MW
核燃料物質	各物質の総重量	235-U : 185.96 kg 238-U : 22.56 kg 14-N : 23.48 kg
構造材		96-Mo : 201.40 kg 185-Re : 89.52 kg 187-Re : 151.48 kg
冷却材		7-Li : 29.32 kg
制御棒材		9-Be : 26.88 kg

(b) パラメータ、THERM、RES、FASTの決定

ORIGEN-Sコードでは、スペクトルを反映した1群実効断面積を作るため、スペクトル情報として3種類のパラメータTHERM(熱中性子領域)、RES(共鳴領域)、FAST(速中性子領域)を与える。ここでは、これらのパラメータをCITATIONコードで計算した中性子スペクトルを用いて計算した。以下に各パラメータの定義とその結果を次

に示す。

$$\text{THERM} \approx 0.15906 \sum_i^n \frac{\phi_i}{\sqrt{E_i}} / \sum_i^n \phi_i \quad (i \text{ は熱群})$$

$$= 2.83$$

$$\text{RES} \approx 0.06892 \sum_i^n \phi_i / \phi_{th} \quad (m \text{ は共鳴群})$$

$$= 150.5$$

$$\text{FAST} \approx 1.45 \sum_i^k \phi_i / \phi_{th} \quad (k \text{ は高速群})$$

$$= 1351$$

(2) 燃焼計算の結果

(a) 運転期間（10年間）の組成変化

10年間 2 MWt で運転した時の経過年数毎のアクチニドの組成（グラム・アトム単位）を表 A-2 に示す。燃焼末期では U-234、U-236、Np-237 などが比較的多く生成している。

(b) 運転期間末期の γ 線スペクトル

10年間 2 MWt で運転した直後の γ 線源強度を表 A-3 に示す。放射化物と核分裂生成物とは 0.3 MeV 以上の γ 線スペクトルが計算されたが、アクチニド核種では 0.01 MeV からスペクトルが計算されている。これらのデータから遮蔽計算に必要なエネルギー群別にスペクトル分析を実施した結果を図 A-1 に示す。図では核分裂生成物と放射化物の合計の寄与分を破線で、アクチニド寄与分を点線で示した。この図から 500 keV から 1 MeV にピークを持つスペクトルが得られた。

(c) 運転停止直後の放射能

ORIGEN-S コードでは、運転停止直後の放射能の量を計算することができる。表 A-4 に運転停止直後の構造材放射化生成物の放射能を、表 A-5 に核分裂生成物の放射能を、表 A-6 にアクチニド核種の放射能を示す。また、表-7 に放射能強度の合計を示す。表 A-7 を見ると原子炉停止後に放射能強度が最も高いのは構造材放射物で全体の 73% を占めており、次いで核分裂性物質で 27% 残りがアクチノイドとなっている。

表 A-2 10年間の照射に伴うアクチニド核種の組成変化

核種	初装荷	燃 焼 期 間									
		1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年
U232	0.0	7.84E-07	3.16E-06	7.15E-06	1.28E-05	2.02E-05	2.93E-05	4.02E-05	5.29E-05	6.75E-05	8.40E-05
U233	0.0	1.93E-03	4.06E-03	6.39E-03	8.93E-03	1.17E-02	1.46E-02	1.78E-02	2.12E-02	2.48E-02	2.86E-02
U234	0.0	5.81E-01	1.16E+00	1.75E+00	2.33E+00	2.91E+00	3.49E+00	4.08E+00	4.66E+00	5.25E+00	5.83E+00
U235	7.91E+02	7.88E+02	7.85E+02	7.81E+02	7.78E+02	7.74E+02	7.71E+02	7.68E+02	7.64E+02	7.61E+02	7.57E+02
U236	0.0	6.14E-01	1.23E+00	1.84E+00	2.46E+00	3.07E+00	3.69E+00	4.31E+00	4.93E+00	5.54E+00	6.16E+00
U237	0.0	1.28E-03	1.31E-03	1.33E-03	1.35E-03	1.37E-03	1.40E-03	1.42E-03	1.44E-03	1.46E-03	1.49E-03
U238	4.74E+01	4.73E+01	4.73E+01	4.72E+01	4.71E+01	4.70E+01	4.70E+01	4.69E+01	4.68E+01	4.68E+01	4.67E+01
NP237	0.0	4.66E-02	9.53E-02	1.45E-01	1.95E-01	2.46E-01	2.97E-01	3.50E-01	4.03E-01	4.57E-01	5.12E-01
NP239	0.0	1.79E-04	1.80E-04	1.81E-04	1.82E-04	1.83E-04	1.84E-04	1.85E-04	1.85E-04	1.86E-04	1.87E-04
PU238	0.0	2.54E-05	1.04E-04	2.37E-04	4.25E-04	6.69E-04	9.70E-04	1.33E-03	1.75E-03	2.23E-03	2.77E-03
PU239	0.0	1.90E-02	3.83E-02	5.76E-02	7.69E-02	9.63E-02	1.16E-01	1.35E-01	1.54E-01	1.74E-01	1.93E-01
PU240	0.0	6.78E-06	2.70E-05	6.07E-05	1.08E-04	1.70E-04	2.45E-04	3.35E-04	4.40E-04	5.59E-04	6.93E-04
PU241	0.0	1.29E-09	1.01E-08	3.37E-08	7.93E-08	1.54E-07	2.65E-07	4.19E-07	6.22E-07	8.82E-07	1.21E-06
PU242	0.0	1.95E-13	3.06E-12	1.54E-11	4.88E-11	1.19E-10	2.48E-10	4.62E-10	7.91E-10	1.27E-09	1.95E-09
AM241	0.0	1.55E-11	2.40E-10	1.20E-09	3.76E-09	9.11E-09	1.88E-08	3.46E-08	5.88E-08	9.37E-08	1.42E-07

(注) ORIGEN-Sコードによる計算値

単位は、グラム・アトム (モル数) である

表 A - 3 10年運転後の炉心部のガンマ線線源強度

エネルギー (MeV)	放射化物 (photons/s)	核分裂生成物 (photons/s)	アクチニド (photons/s)	合計 (photons/s)
1.00E-02			1.42E+15	1.42E+15
3.00E-02			6.61E+13	6.61E+13
5.50E-02			4.78E+14	4.78E+14
8.50E-02			5.68E+14	5.68E+14
1.20E-01			4.56E+14	4.56E+14
1.70E-01			2.72E+13	2.72E+13
3.00E-01	1.39E+16	3.18E+16	3.13E+14	4.60E+16
6.50E-01	9.24E+15	7.23E+16	5.87E+12	8.15E+16
1.13E+00	1.91E+15	2.39E+16	5.88E+12	2.58E+16
1.57E+00	5.49E+14	1.25E+16	3.32E+08	1.30E+16
2.00E+00	1.69E+14	3.75E+15	8.76E+06	3.92E+15
2.40E+00	5.95E+13	3.19E+15	1.78E+03	3.25E+15
2.80E+00	1.21E+13	9.26E+14	3.05E+09	9.38E+14
3.25E+00	1.12E+12	6.72E+14	2.92E+02	6.73E+14
3.75E+00	8.58E+08	3.64E+14	1.57E+02	3.64E+14
4.25E+00	1.32E+07	4.23E+14	8.64E+01	4.23E+14
4.75E+00	6.61E+06	9.42E+13	4.79E+01	9.42E+13
5.50E+00	4.90E+06	9.61E+13	4.11E+01	9.61E+13
合計	2.58E+16	1.50E+17	3.34E+15	1.79E+17

(注) ORIGIN-Sコードによる計算値

エネルギーは群代表値

強度は炉心全体での値