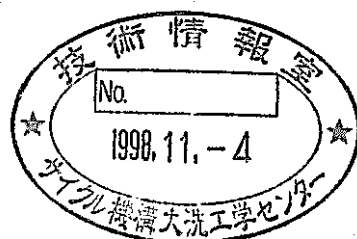


臨界実験装置廃止措置の データベースの拡充（その1）に係わる調査

（動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書）

1998年9月



財団法人 原子力施設デコミッショニング研究協会

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)

1998 年 9 月

臨界実験装置廃止措置の

データベースの拡充（その 1）に係わる調査

宮坂 靖彦^{*}、渡辺 正秋^{*}
福村 信男^{*}、丹治 和拓^{**}

要 旨

本報告書は、将来臨界実験装置「DCA」の廃止措置解体計画書立案に資するため技術的検討、放射線強度分布および放射能インベントリの予備的評価を行ったものである。

廃止措置に係わる技術的検討結果から、廃止措置の方針は、原子炉停止前に少なくとも 1～2 年前に決定し、臨界実験装置の特徴である中性子束レベルが低いことを考え燃料、中性子源、重水および建家の再利用が得策であることがわかった。

放射線強度分布の評価は、最新の断面積ライブラリー JENDL3.1 を組み込んだ 1 次元輸送コード ANISN-JR および 2 次元輸送コード DOT3.5 を用い、炉心を含んだ DCA 炉室内の高さ 25m、直径 19m（2 次元円筒モデル）の全領域を対象として計算することにより実施した。この結果炉心タンクの外表面での最大熱中性子束は、約 $10^8 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ （1kw 時）、炉室 1 階天井では約 $10^6 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、生体遮蔽体である炉室扉内側では $10^3 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、床表面では約 $10^4 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ が得られた。これらの値は、エリアモニター実測値から評価した値とオーダ一的に一致する。

放射能インベントリ評価は、放射性核種生成崩壊計算コード ORIGEN-MD により、上記で得られた中性子束の評価値を用い、炉心構造材の主要核種についてその生成量を計算することにより実施した。その結果半減期の比較的長い ^3H の重水減速材中で、比放射能は、約 1.5Bq/g 、構造材の ^{60}Co で最大約 $1.4 \times 10^{-2} \text{Bq/g}$ で IAEA のドラフト案での無条件クリアランスレベル以下となった。

一方、運転停止直後の全放射能インベントリは約 $5.6 \times 10^{11} \text{Bq}$ となったが、これらはいずれも半減期の短い核種で占められているが、半減期が 10 数年程度のトリチウムの放射エネルギーは、 $4.2 \times 10^6 \text{Bq}$ となり、冷却期間が長くなると無視できなくなる。

・本報告書は、(財)原子力施設デコミッショニング研究協会が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：10C0936

事業団担当部課室及び担当者：大洗工学センター実験炉部 清野英昭殿

^{*}財団法人 原子力施設デコミッショニング研究協会 企画調査部

^{**}株式会社 原子力システム ソフトセンター開発部

目次

1. はじめに	1
2. 臨界実験装置の概要	3
3. 廃止措置計画の検討	13
3.1 解体の基本方針	14
3.1.1 DCA 解体の基本方針	14
3.1.2 DCA 解体にあたっての基本的考え方	14
3.1.3 解体撤去の範囲	15
3.2 解体の方法	16
3.2.1 解体手続き	16
3.2.2 解体手順と解体方法	16
3.2.3 解体撤去工事工程	16
3.3 核燃料物質の処分方法	17
3.4 安全対策	18
3.4.1 一般安全対策	18
3.4.2 放射線安全対策	19
3.5 放射線管理	20
3.5.1 作業環境の管理	20
3.5.2 被曝管理	20
3.6 放射性廃棄物管理	21
3.6.1 気体廃棄物	21
3.6.2 液体廃棄物	21
3.6.3 固体廃棄物	22
3.6.4 放射性廃棄物と放射性廃棄物でない廃棄物	22
3.6.5 放射性固体廃棄物の処分法	24
3.7 公衆の実効線量評価	24
3.7.1 外部被曝評価	24
3.7.2 内部被曝評価	25
3.8 技術的能力	25
3.8.1 要員の配置	25
3.8.2 管理組織	25
3.9 トリチウムの処分	26
3.9.1 気体廃棄物としてのトリチウムの処分	26
3.9.2 液体廃棄物としてのトリチウムの処分	26
3.9.3 固体廃棄物としてのトリチウムの処分	26
3.10 DCA 解体における効率的な解体手順	26
3.10.1 解体撤去の時期	26

3.10.2 解体撤去の手順	27
3.11 必要な計算コード等の列挙と概要説明	28
3.12 その他の必要な事項	28
3.13 今後の課題	28
4. 放射線強度分布の評価	33
4.1 群定数の計算	33
4.1.1 前提条件	33
4.1.2 計算体系	34
4.1.3 結果と評価	34
4.2 断面積とライブラリー	37
4.3 輸送計算方法	45
4.4 中性子束分布の計算	53
4.4.1 炉室内中性子束分布	53
4.4.1.1 前提条件	53
4.4.1.2 計算体系	53
4.4.1.3 結果と評価	53
4.4.2 炉心内中性子束分布	55
4.4.2.1 前提条件	55
4.4.2.2 計算体系	55
4.4.2.3 結果と評価	55
5. 放射能インベントリの評価	111
5.1 前提条件	111
5.1.1 放射能インベントリ計算	111
5.1.2 飽和係数の計算	112
5.2 計算体系	113
5.3 結果と評価	113
5.4 評価方法	116
6. まとめ	156
参考文献	158
付録（代表的な計算コードの入力データ）	159

表リスト

表 1.1	「DCA」のマイルストーン	2
表 2.1	重水臨界実験装置の主要目	7
表 3.1	解体手順解体方法（完全解体の場合）	29
表 3.2	DCA 原子炉施設解体撤去工事概略工程	30
表 3.3	IAEA 無条件と EU 再利用等のクリアランスレベルの比較 (代表核種)	31
表 4.1	追加工作成されたライブラリの収納核種一覧	57
表 4.2	TABLE OF NEUTRON ENERGY GROUP STRUCTURE (1/3)	58
表 4.2	TABLE OF NEUTRON ENERGY GROUP STRUCTURE (2/3)	59
表 4.2	TABLE OF NEUTRON ENERGY GROUP STRUCTURE (3/3)	60
表 4.3	縮約後のエネルギー群構造	61
表 4.4	炉心構造体および生体遮蔽の原子個数密度一覧表	62
表 4.5	群定数セットの現状	63
表 4.6	TABLE OF GAMMA ENERGY GROUP STRUCTURE	64
表 4.7	Processed nuclides and their code number in JSSTD - Library (1/2) ..	65
表 4.7	Processed nuclides and their code number in JSSTD - Library (2/2) ..	66
表 4.8	代表的な Sn 法による輸送計算コード	67
表 5.1	物質組成データ (1/3)	126
表 5.1	物質組成データ (2/3)	127
表 5.1	物質組成データ (3/3)	128
表 5.2	各構造材の材質、体積、重量	129
表 5.3	放射能インベントリ計算箇所	130
表 5.4	炉心構造材の比放射能 (1/2)	131
表 5.4	炉心構造材の比放射能 (2/2)	132
表 5.5	炉心構造材の比放射能 (1/14)	133
表 5.5	炉心構造材の比放射能 (2/14)	134
表 5.5	炉心構造材の比放射能 (3/14)	135
表 5.5	炉心構造材の比放射能 (4/14)	136
表 5.5	炉心構造材の比放射能 (5/14)	137
表 5.5	炉心構造材の比放射能 (6/14)	138
表 5.5	炉心構造材の比放射能 (7/14)	139
表 5.5	炉心構造材の比放射能 (8/14)	140

表 5.5	炉心構造材の比放射能(9/14)	141
表 5.5	炉心構造材の比放射能(10/14)	142
表 5.5	炉心構造材の比放射能(11/14)	143
表 5.5	炉心構造材の比放射能(12/14)	144
表 5.5	炉心構造材の比放射能(13/14)	145
表 5.5	炉心構造材の比放射能(14/14)	146
表 5.6	炉心構造材の全放射能(1/2)	147
表 5.6	炉心構造材の全放射能(2/2)	148
表 5.7	生体遮蔽体の全放射エネルギー	149
表 5.8	炉心構造材の飽和係数(AI)	150
表 5.9	炉心構造材の飽和係数(AI+B ₄ C)	151
表 5.10	炉心構造材の飽和係数(D ₂ O)	152

図リスト

図 2.1	建家配置図	8
図 2.2	原子炉建家断面図	9
図 2.3	主要系統説明図	10
図 2.4	重水臨界実験装置概要説明図	11
図 2.5	炉心構造説明図（未臨界測定実験体系）	12
図 3.1	解体手続きの手順	32
図 4.1	COSMARD における管理データ計算の概念図	68
図 4.2	計算の流れ図	69
図 4.3	1.2w/o 二酸化ウラン 28 本燃料集合体形状	70
図 4.4	2.7w/o 二酸化ウラン 36 本燃料集合体形状	71
図 4.5	1.2w/o 二酸化ウラン燃料棒	72
図 4.6	カランドリア管	73
図 4.7	炉心構成	74
図 4.8	DCA 建屋	75
図 4.9	炉心タンク	76
図 4.10	半径方向 1 次元モデル（重水モデル）	77
図 4.11	半径方向 1 次元モデル（空気モデル）	78
図 4.12	半径方向 1 次元モデル（生体遮蔽部）	79
図 4.13	上部軸方向 1 元モデル（アルミニウムモデル）	80
図 4.14	上部軸方向 1 元モデル （アルミニウム＋コンクリートモデル）	81
図 4.15	下部軸方向 1 元モデル（空気モデル）	82
図 4.16	下部軸方向 1 元モデル（空気＋コンクリートモデル）	83
図 4.17	半径方向 1 次元中性子束分布（重水モデル）	84
図 4.18	半径方向 1 次元中性子束分布（空気モデル）	85
図 4.19	半径方向 1 次元中性子束分布（生体遮蔽体部）	86
図 4.20	上部軸方向 1 次元中性子束分布（アルミニウムモデル）	87
図 4.21	上部軸方向 1 次元中性子束分布 （アルミニウム＋コンクリートモデル）	88
図 4.22	下部軸方向 1 次元中性子束分布（空気モデル）	89
図 4.23	下部軸方向 1 次元中性子束分布 （空気＋コンクリートモデル）	90
図 4.24	1 次元球状における空間と 角度メッシュのダイヤモンド差分配率	91
図 4.25	2 次元中性束計算モデル(1)	92
図 4.25	2 次元中性子束計算モデル(2)	93

図 4.25	2次元中性子束計算モデル(3)	94
図 4.25	2次元中性子束計算モデル(4)	95
図 4.25	2次元中性子束計算モデル(5)	96
図 4.25	2次元中性子束計算モデル(6)	97
図 4.26	2次元中性子束分布(速中性子エネルギー領域)	98
図 4.27	2次元中性子束分布(中間エネルギー領域)	99
図 4.28	2次元中性子束分布(熱中性子エネルギー領域)	100
図 4.29	2次元中性子束分布(全エネルギー領域)	101
図 4.30	半径方向中性子束分布(炉心中心)	102
図 4.31	半径方向中性子束分布(炉室2階近傍)	103
図 4.32	半径方向中性子束分布(地下1階近傍)	104
図 4.33	炉心内2次元中性子束計算モデル(1)	105
図 4.33	炉心内2次元中性子束計算モデル(2)	106
図 4.34	炉心内2次元中性子束分布(速中性子エネルギー領域) ...	107
図 4.35	炉心内2次元中性子束分布(中間エネルギー領域)	108
図 4.36	炉心内2次元中性子束分布(熱中性子エネルギー領域) ...	109
図 4.37	炉心内2次元中性子束分布(全エネルギー領域)	110
図 5.1	放射能インベントリ計算モデル(1)	153
図 5.1	放射能インベントリ計算モデル(2)	154
図 5.2	nfプログラムの機能関連図	155

1. はじめに

本報告書は、臨界実験装置廃止措置のデータベース拡充（その 1）に係わる調査結果をまとめたものである。

即ち、臨界実験装置の将来の廃止措置に必要な原子炉等規制法に基づく解体届け等作成時の骨格となる解体作業の方法、構造物放射能強度、放射性廃棄物発生量、非放射性廃棄物発生量等のデータベース拡充を目的として実施したものである。

重水臨界実験装置(DCA)は、新型転換炉(ATR)の炉物理に関する研究開発を行なうために建設された最大熱出力 1kW の臨界実験装置で、ATR の炉心部を模擬した構造に作られており、減速材の重水水位調整によって臨界の保持、反応度制御を行う原子炉である。

DCA の設計は、動力炉・核燃料開発事業団（動燃）設立以前から日本原子力研究所（原研）で実施され、動燃設立（1967 年[昭和 42 年]10 月）後動燃に引き継がれ、安全審査を経て 1968 年[昭和 43 年]12 月に建設に着手し、1969 年[昭和 44 年]12 月初臨界を達成した。

初臨界後 ATR 原型炉「ふげん」の建設、運転および ATR 実証炉の設計に役立てるため多くの炉物理データを蓄積してきた。しかし、1995 年[平成 7 年]8 月 25 日原子力委員会の「新型転換炉実証炉建設計画の見直しについて」により ATR 実証炉建設計画の中止が決定され、その後、動燃改革検討委員会の新たな基本的方向性に基づき、1998 年[平成 10 年]2 月原子力委員会は ATR 原型炉「ふげん」を平成 10 年度から 5 年間運転を続け、平成 14 年度に永久停止することを決定した。これにより ATR の研究開発プロジェクトは終了することになる。

この間に DCA は原型炉「ふげん」を対象にウラン燃料装荷炉心の実験にまず主眼を置き次いで「ふげん」および実証炉を対象としたプルトニウム燃料装荷炉心の実験に重点を移し、種々の炉物理データを蓄積してきた。これらのデータを基に核計算コードの精度向上と炉物理現象の解明を図り、「ふげん」の運転管理および実証炉の核設計コードの開発・改良に役立て、特に ATR の安全性に重要な炉物理量である冷却材ボイド反応度の負側移行効果をプルトニウム炉心で初めて明らかにし、「ふげん」の 1 次冷却材ループ数の簡素化およびプルトニウム燃焼炉心の炉心管理向上に役立てた。

現在は、アジア地域等からの研修生受け入れや未臨界度測定技術開発のための実験を鋭意進めており、1998 年[平成 10 年]3 月時点で約 2,900 回の臨界回数を数えている。

表 1.1 に DCA のマイルストーンを示す。

表1.1 「DCA」のマイルストーン

昭和42年	6月	DCA建設計画作成
昭和43年	3月	概念設計完成
昭和43年	4月～11月	詳細設計完成
昭和43年	12月	着工
昭和44年	12月	完成
昭和44年	12月 28日	初臨界
昭和45年	4月	原型炉ウラン炉心試験開始
昭和47年	7月	原型炉プルトニウム炉心試験開始
昭和52年	7月	ATR大型炉のための試験開始
昭和55年	6月	ATR実証炉のための予備試験開始
昭和58年	3月	ATR実証炉のための試験開始
昭和62年	12月	電源開発（株）からの受託試験開始
平成5年	～平成7年5月	未臨界度測定試験のための改造
平成7年	6月～現在	未臨界度測定試験開始

2. 臨界実験装置の概要

DCA 炉心部はアルミ製の円筒型炉心タンク本体、燃料集合体、ウラン・アルミニウム合金燃料体、カランドリア管、圧力管、制御棒、安全棒、上部、下部グリッド板、下部吸収体、起動用中性子源挿入管、パルス中性子発生装置挿入管および各種実験用スリーブ管等を要素として構成される。未臨界度測定実験体系においては、炉心構成要素としてさらに炉心中心タンク、試験体容器及び燃料棒が追加される。

カランドリア管は上部グリッド板に固定され、その内には圧力管、さらにその中に燃料集合体が収められている。なお、ウラン・アルミニウム合金燃料体は上部グリッド板に固定、直接重水中に挿入される。

未臨界度測定実験に使用する炉心中央タンクを装荷して行う実験体系を未臨界度測定実験体系、また、その他の実験体系を ATR 実験体系と称している。

炉心ではカランドリア管を格子状に配列し、その格子間隔は、炉心タンク上部、下部グリッド板のカランドリア管固定孔の間隔で定められる。格子間隔を変更する場合は、両グリッド板を交換する。炉心の大きさは、高さ約 2,000mm（燃料棒有効高さ）、直径約 3,000mm となっている。

重水減速材は、炉心タンク底部より主として高速および低速の 2 段給水速度で供給され、その水位は重水水位指示計での設定値および溢流管で制限される。圧力管内には実験目的に応じて冷却材（模擬液）が注入される。

制御棒、安全棒の挿入、引き抜きは上部グリッド板に固定された駆動装置で炉心タンク上部より行われる。

必要に応じ、下部グリッド板の下には下部吸収体に取り付けられる。

起動用中性子源挿入管、パルス中性子発生装置挿入管および水平方向実験用スリーブ管は炉心タンク側面より挿入される。各種垂直方向実験用スリーブ管は上部グリッド板より吊り下げられる。炉心部周辺には各種検出器、水位制限スイッチが配置される。

ATR 実験体系においては格子間隔は 20cm、22.5cm、24.2cm 及び 25cm の 4 種のグリッド板（格子板）が使用される。燃料装荷量は臨界重水水位が 80cm 以上になるように制限される。

未臨界測定実験体系においては炉心タンク中央部に炉心中央タンクを装荷し、格子間隔 20cm のグリッド板で上下を固定する。炉心中央タンクのある領域を試験体領域、また、その周りをドライバー領域と称する。

ドライバー領域には最大 136 体の燃料集合体が装荷される。炉心中央タンク内には測定対象である燃料棒の入った試験体容器を装荷し、その中に減速材を供給することにより、試験体の実効増倍率を調整する。試験体内の燃料棒の本数、配列は各種制限値を超えないように制限される。炉心中心タンクと試験体容器の間の空間には測定器を設置することができる。

表 2.1 に DCA の主要諸元を示す。

次に計測制御装置系統施設の設備のうち核計装設備は、起動系、出力系及び安全系より構成される。また DCA の適正かつ安全な運転を行うため、重水

系プロセス計装、ガス系プロセス計装、試験体減速材供給系プロセス計装等が設けられている。これらのプロセス計装は装置各部の温度、圧力、流量、水位、炉回り空間線量当量率等を測定し、必要に応じて制御盤等に、指示、記録するとともに重要度に応じ、インターロックが作動し、警報、スクラム信号が発せられる。

安全保護回路は、スクラム信号を発し、スクラム信号によって安全棒の落下、重水ダンプ弁開を行い、原子炉を停止する。

重水臨界実験装置の制御は重水水位を変化させることによって行う他、実験目的に応じ、制御棒を使用して行う。制御材は、炉心タンク内重水及び制御棒から構成され、重水水位制御装置の制御材駆動設備は炉心タンクへの重水の給排水を制御するための設備で、重水水位を手動又は自動で制御でき、定められた水位を超えて給水することのない構造となっている。

また、制御棒駆動装置は制御棒を炉心へ出し入れするための設備で、制御棒位置を手動又は自動で制御できる構造となっている。

非常用制御装置として重水ダンプ装置、安全棒及び試験体急速排水装置が設けられている。

重水ダンプ設備は、重水ダンプ弁および配管より構成し、炉心タンク下部に2回路設置する。核計装等からのスクラム信号により自動的に開放弁を開き重水を緊急排出する。

試験体急速排水装置は、ダンプ弁、エゼクタ、配管等より構成し、試験体容器下部に設置され、核計装等からのスクラム信号により自動的にダンプ弁を開き、エゼクタを作動させ、試験体内の減速材を緊急排出する。

核燃料物質貯蔵設備のうち、燃料貯蔵庫(A)には、ウランの燃料棒を貯蔵する燃料棒貯蔵棚、燃料集合体を貯蔵する燃料懸架台、試験燃料体を保管する試験燃料体格納容器、燃料ペレット格納容器及び燃料棒格納容器を設けている。

また、燃料貯蔵庫(B)には、プルトニウムまたはウランの燃料棒を貯蔵する燃料棒貯蔵棚、燃料集合体を貯蔵する燃料懸架台、試験燃料体を保管する試験燃料体格納容器、燃料ペレット格納容器及び燃料棒格納容器を設けている。

原子炉格納施設は、地下1階、地上2階で、鉄筋コンクリート構造となっている。スパン(壁心)は約14m×約15m、軒高約18mで、壁厚は約1.35m以上、ただし軒高約10m以上は約0.5m、天井は約0.3mである。床は厚さ約2mのスラブ構造となっている。

図2.1にDCAの建家配置図を、図2.2に原子炉建家断面図を示す。また主要系統図を図2.3に示す。さらに中性子束分布計算および放射能インベントリ計算のモデル化に重要な炉室内の構造および炉心配置図を図2.4と図2.5に示す。

一方、放射性廃棄物の廃棄施設と放射線管理施設の構造および設備は以下のようにになっている。

気体廃棄物の気体廃棄設備は炉室、燃料取扱室(A)、燃料貯蔵庫(A)、重水系室及び軽水・ガス系室の換気を行う管理区域(A)系統と燃料取扱室(B)及び燃料貯蔵庫(B)の換気を行う管理区域(B)系統より構成されている。各系統からの排気はフィルタを通した後、排気中の放射能レベルを常時監視しながらそれぞれ排気口(A)、排気口(B)より排気されるようになっている。試験体からの排気は炉室排気ダクトに導かれ HEPA フィルタを通過した後、排気口(A)より、また、燃料棒分解洗浄設備（グローブボックス）からの排気は2段の HEPA フィルタを通過した後、排気口(B)より排出されるようになっている。

管理区域(A)系統の排気は原子炉建屋の屋上北東位置に設けられる排気口(A)より排出される。

管理区域(B)系統の排気は燃料取扱室 (B)の南側に設けられる排気口(B)より排出される。

管理区域で発生する放射性廃液は廃液タンクに一次貯留し、サンプリングにより廃液中の放射性物質の濃度を測定した後、高速実験炉「常陽」の液体廃棄物の排気施設に搬出されるようになっているが、現在までに廃液を廃棄した実績はない。

廃棄物の処理能力としては、廃液タンクの貯留容量は、約 10m³ となっている。

管理区域で発生する放射性固体廃棄物は廃棄物保管庫内に一時保管後、廃棄物処理建屋に運搬し処理する。

放射線管理施設の屋内管理用の設備としては以下のものがある。

- ・エリアモニタ

ガンマ線エリアモニタ又は中性子エリアモニタは、管理区域内の必要箇所及び制御室に設けられ、放射線監視盤に集中表示されている。

- ・ダストモニタ

プルトニウムダストモニタは、管理区域内の必要箇所に設けられ、放射線監視盤に集中表示されている。

一方、屋外管理用の主要な設備としては以下のものがある。

- ・排気モニタ

排気モニタが排気口(A)、排気口(B)に設けられ、排気中の放射性物質濃度が放射線監視盤に集中表示されている。

- ・野外管理用固定モニタ（高速実験炉と共用）

野外管理用固定モニタが周辺監視区域境界近傍に設けられ、周辺監視区域境界の線量当量率の監視が行われている。

運転停止中でかつ炉心タンク内に燃料が装荷されている状態で、上記エリアモニタによる空間線量率の測定値は、最大で炉心タンク外側表面から 1m 付近で約 9.5 μ Sv/h となっている。

また、炉室内の床表面汚染のスミア値は、約 4×10^{-1} Bq/cm² 以下で床汚染はない現状となっている。

一方、最大熱出力 1kw で運転中での空間線量率は、炉室 1 階のエリアモニ

タの実測値で中性子について約 0.4Sv/h となっている。これから炉心タンク表面の中性子束に換算すると中性子エネルギーが 0.11~0.15MeV として約 $10^7 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ となる。一方、 γ 線量率は、炉室 1 階壁のところで、0.1Sv/h となっており、中性子の約 1/4 となっている。

また、重水中のトリチウム濃度は、現在 2Bq/cc となっており、重水を海外から購入した時点の値とほぼ同じ値となっている。

表2.1 重水臨界実験装置の主要目

項 目	要 目
形式	クラスタ燃料装荷、圧力管型
最大出力	1kW/年間積算出力50kWh以下
原子炉本体	
炉心タンク	アルミニウム製円筒 直径約3m,高さ約3.5m
カランドリア管	アルミニウム製 外径:124mm,137mm,145mm,160mm,210mm
圧力管	アルミニウム製 外径:108mm,117mm,125mm,140mm,190mm
格子形状	正方
格子間隔	20cm,22.5cm,24.2cm,25cm (上部グリッド板の交換にて変更)
燃料体	
構造	クラスター状 (28本、36本、54本、60本) または単ピン
燃料体有効長	約2m
ウラン燃料棒	ペレット:二酸化ウラン 濃縮度:0.7w/o,1.2w/o,1.5w/o,2.2w/o,2.7w/o,および3.2w/o 被覆材:アルミニウムおよびジルカロイ-2 (昇温実験用はSUS)
プルトニウム燃料棒	ペレット:天然ウランにプルトニウムを富化した混合酸化物または12w/o235U 富化度:標準級プルトニウム1.2w/o,1.5w/o,原子炉級プルトニウム1.4w/o,1.5w/o,1.9w/o,2.3w/o,および4.1w/oまたは30.0w/o以下 被覆材:ジルカロイ-2またはSUS
減速材	重水 保有量 約20t,80℃まで昇温可能、ボロン溶解可能
冷却材	軽水および軽水・重水混合液 (ボイドが発生した状態を模擬する) 中央13チャンネル中の軽水は80℃まで循環昇温可能 (昇温実験用は中央1チャンネルHeガス加熱で600℃まで循環昇温可能)
制御系	
重水水位制御	高速給排水 給水速度10 l/sec 低速給排水 給水速度2 l/sec 反応度給排水 給水速度1 l/sec 水位制御給排水 給水速度5 l/min
制御棒挿入位置制御	制御棒:外径70mmおよび8.5mmのカドミウム円筒吸収体各2本、最大使用本数2本 制御駆動速度:0~18mm/sec
緊急停止系	
安全棒自由落下	安全棒:外径70mmのカドミウム円筒吸収体、数量4本または6本、試験急速排水20mm/sec
減速材ダンプ	水位降下速度:約34mm/sec,試験体急速排水20mm/sec
計測系	
計測関係	線形出力系(CIC) 2系統 対数出力系(CIC) 1系統 起動系 (^{10}B 比例計算管) 2系統 γ 線系 (電離箱) 1系統
プロセス計測系	重水系 (水位、温度、流量、伝導度) 軽水系 (温度、流量) ガス系 (流量、温度、圧力)
起動用中性子源	Am-Be10Ci

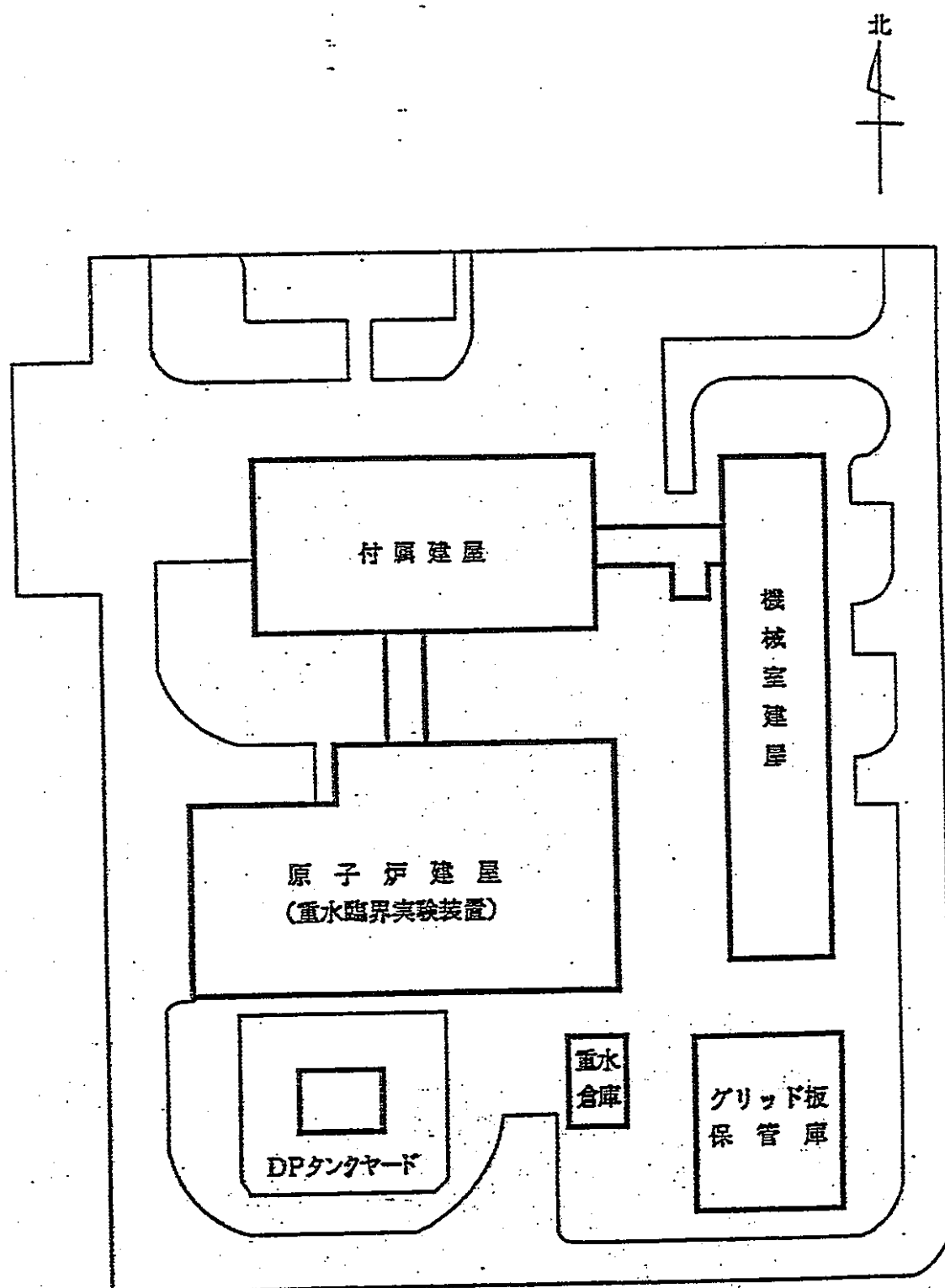


図2.1 建家配置図

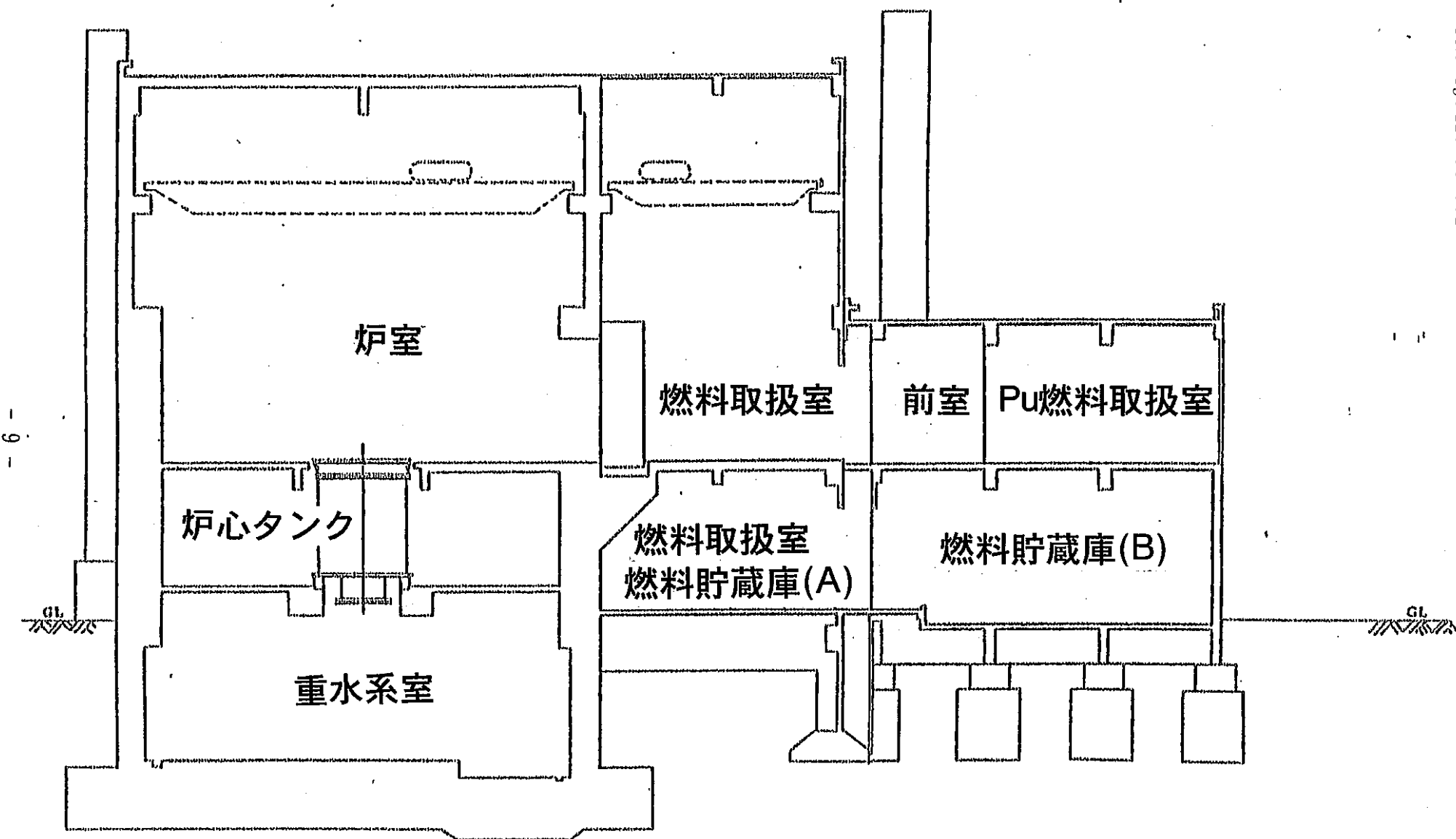


図2.2 原子炉建家断面図

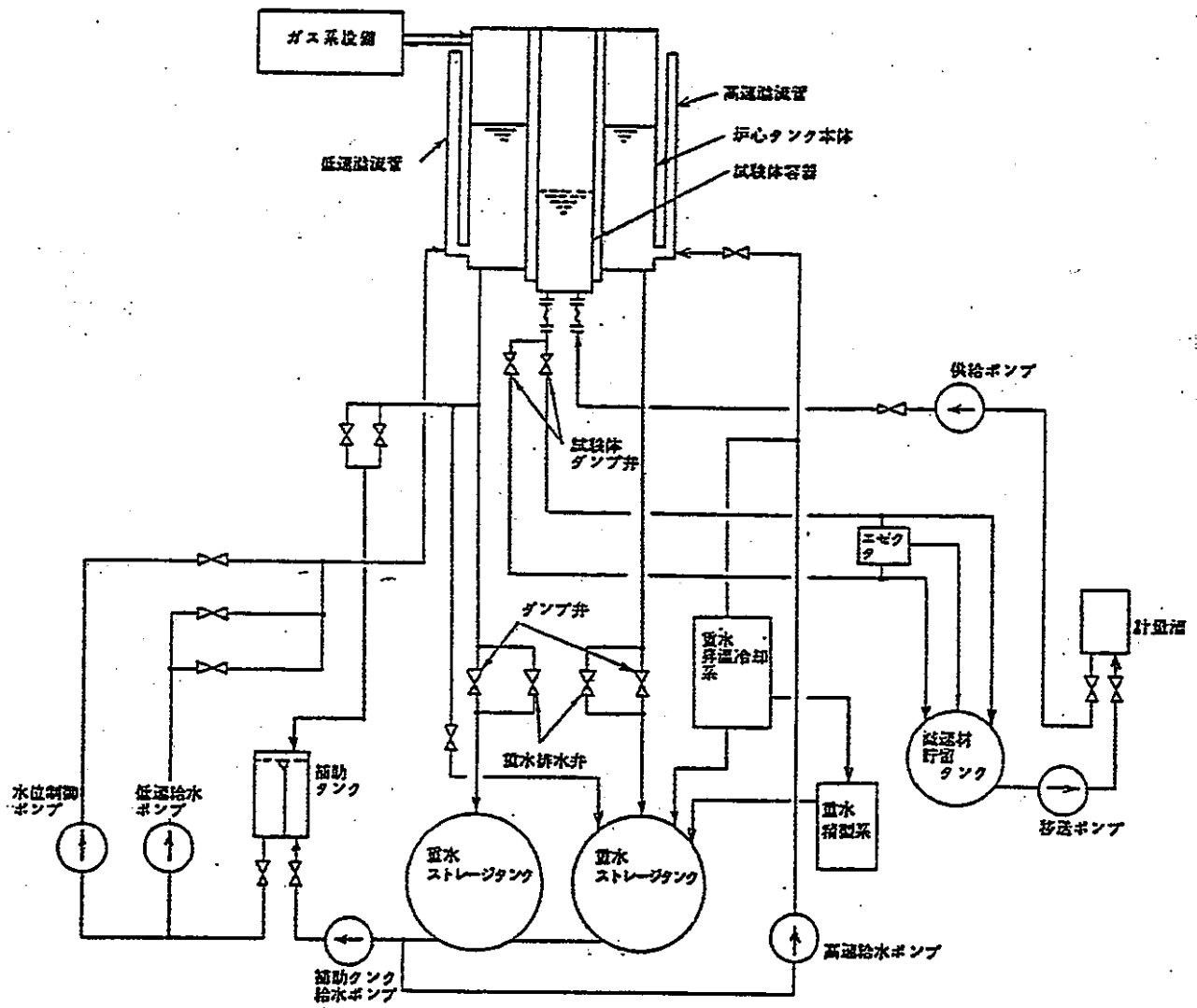


図2.3 主要系統説明図

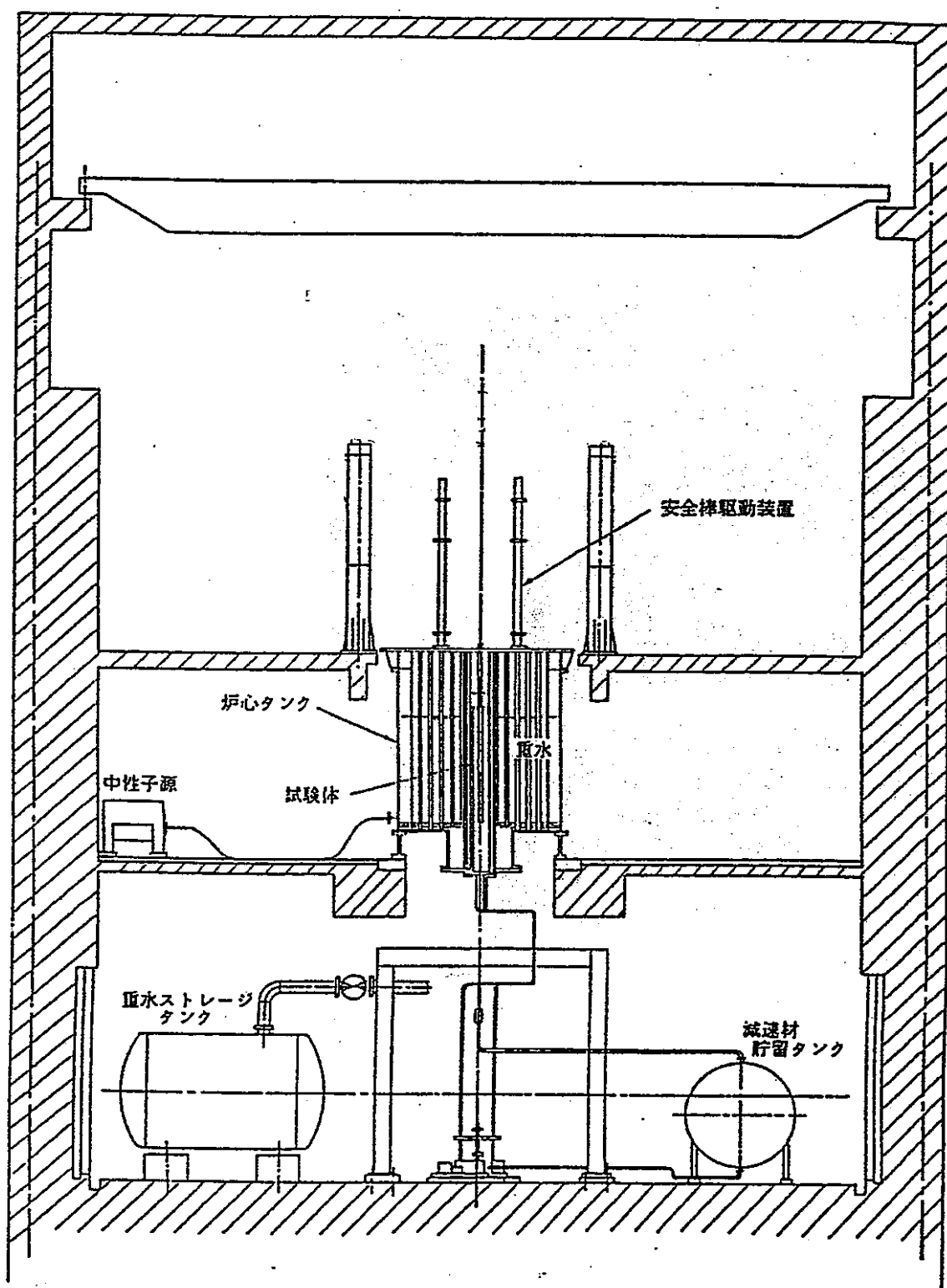


図2.4 重水臨界実験装置
概要説明図

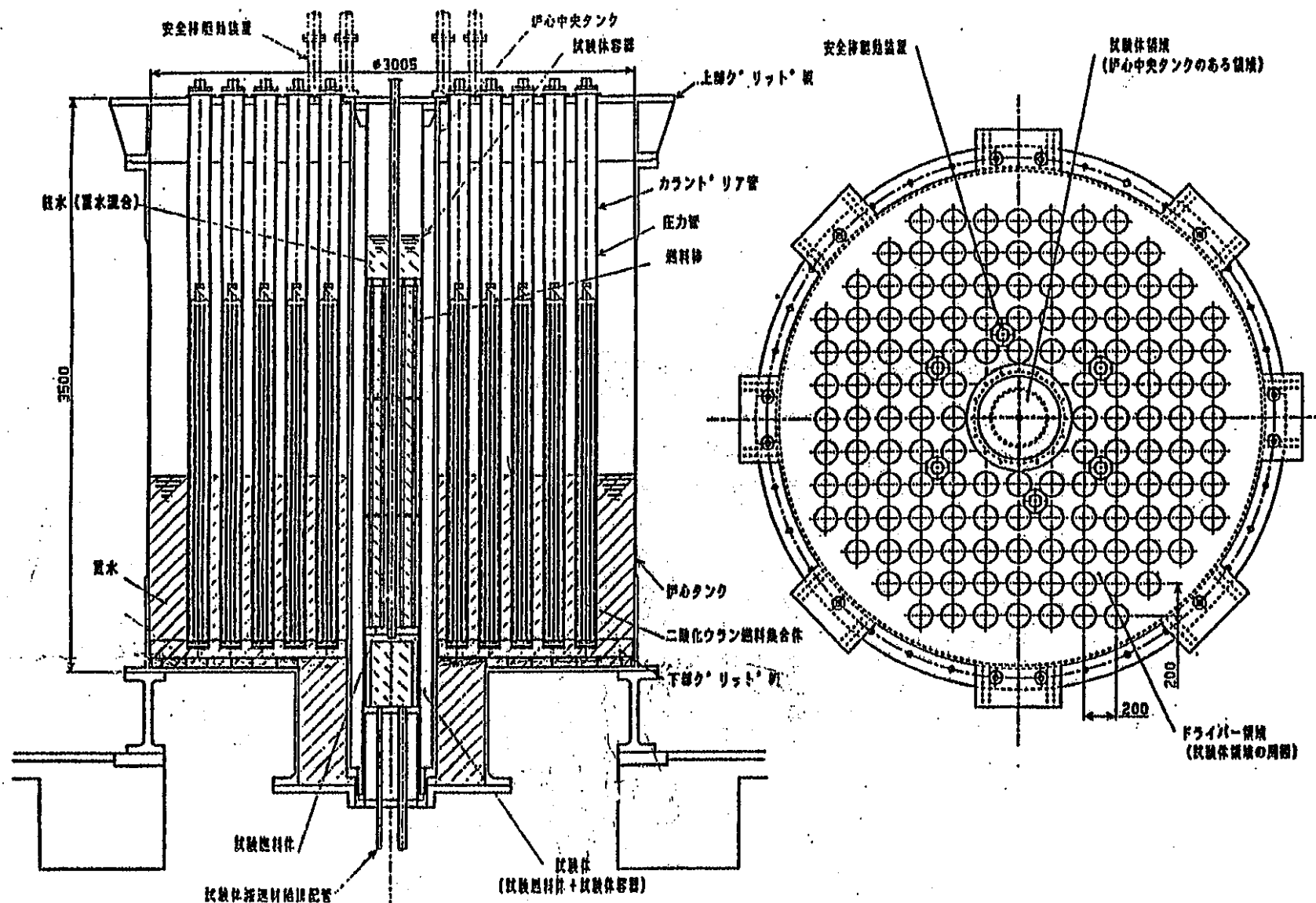


図2.5 炉心構造説明図
(未臨界度測定実験体系)

3. 廃止措置計画の検討

DCA 原子炉施設の廃止措置計画の検討にあたっては、以下に示す様な施設の実態にあるものと認識した。

(1) DCA は臨界実験装置の特徴

- ① 出力が最大 1kW と小さく、運転時間も 50 時間/年と短い。
- ② 炉心タンク、カランドリア管、重水タンク・配管等の主要な機器類の材質はアルミニウム合金である。
- ③ 減速材、反射材に重水が使用されている。
- ④ 燃料は、燃焼度が無視できる程度に低く、新品同様に取り扱うことができる。

(2) 基本的な認識

上に示した DCA 原子炉施設の特徴から以下の様に認識する。

- ① 炉心領域の構造材放射化の程度が極めて小さく、従って炉心タンク周辺の線量当量率も低いレベルにあることから、運転終了後に「即時解体」することが出来る。
- ② 解体作業時の外部被曝抑制の観点からは、遠隔操作、遮蔽体の設置等の特別な装備は不要と判断できる。
- ③ 内部被曝の観点から見ると系統に重水が使われていたことから、重水系統の機器配管類並びに建家コンクリートのトリチウム汚染が想定される。よって、汚染測定を行い、その結果に応じて「除染」を必要とすることが想定される。
- ④ 原子炉本体を始め主要機器類の材料がアルミニウム合金であることから、これ等の解体（切断）にはバンドソー、ニブラ等の機械的工法を適用することが妥当である。プラズマ切断等の熱的工法は能率面で機械的工法より優れている反面、ヒューム、ドロス等の発生があり、これ等を閉じ込め、拡散させないためのグリーンハウスの設置、作業者の全面マスク着用等の面で重装備を強いられるほか、二次廃棄物の増大等にもつながることから、総合的には機械的工法を適用する方が、より有利と判断できる。

3.1 解体の基本方針

3.1.1 DCA 解体の基本方針

重水臨界実験装置（DCA）の解体にあたっては、原子安全委員会が日本原子力研究所の動力試験炉（JPDR）解体にあたって昭和 60 年 12 月 19 日に決定した指針「原子炉施設の解体に係る安全確保の基本的考え方—JPDR の解体にあたって—」を参考に、DCA 原子炉施設の実態に合わせて安全かつ合理的な解体計画を策定し、これに基づいて実施する。

3.1.2 DCA 解体にあたっての基本的考え方

(1) 解体の方法—解体は三つの段階に区分して行う。

- ・ 第 1 段階では、炉心から燃料及び中性子源を取り出し、系統から重水を抜取り、必要に応じて除染を行う。
- ・ 第 2 段階では原子炉本体等の原子炉施設に属する機器類を解体撤去し、床面、壁面等の汚染測定を行い、必要に応じて除染し、管理区域を解除する。
- ・ 第 3 段階では原子炉施設に属する建家を解体撤去し、撤去跡に残存放射能がないことを確認し、整地して解体撤去を完了する。

(2) 核燃料物質の処分

- ・ 燃料工場で再加工し、他の原子炉用燃料へ転用する。

(3) 放射性廃棄物の処理処分

- ・ 気体 ; 既存又は仮設排気設備で処理し、排気口から放出する。
- ・ 液体 ; 日本原子力研究所・大洗研究所の廃棄物管理施設へ送水し、処理する。
- ・ 固体 ; 材質及び放射能レベルにより区分し、容器へ収納して日本原子力研究所・大洗研究所の廃棄物管理施設で保管（廃棄）する。

(4) 被曝低減

解体期間を通して、周辺公衆並びに放射線業務従事者の被曝を、法律の定める線量当量限度以下に抑制すると共に、ALARA の勧告を尊重し被曝低減に努める。

(5) 解体中の原子炉施設の維持管理

- ・ 解体の進捗に応じて、施設の保安確保上その機器に求められる機能・性能を維持するように管理する。

- ・ 解体の進捗に伴い、変化する施設の状況に応じて適宜、保安規定等を見直し、安全確保に努める。

(6) その他

- ・ 既存の建家は、解体作業、廃棄物の一時的な保管場所等に有効利用を図る。このため建家の解体時期は、工程の最終段階に設定する。
- ・ 既存の電源設備・換気設備等のユーティリティ設備並びに放射線管理設備等は、解体期間中を通して有効利用を図る。このため、これ等ユーティリティ設備の解体時期は、工程の最終段階に設定する。

3.1.3 解体撤去の範囲

DCA 原子炉施設の解体撤去の範囲は、解体後の跡地又は建家の利用（転用）計画のあり方に依存する。ここでは、考えられる 3 ケースを列挙する。なお、DCA 原子炉施設は炉出力、運転履歴から放射能インベントリが小さく、線量率も低いレベルにあることから放射能の減衰を待つ意味がなく、運転停止後「即時解体」することが可能であり、維持管理等のコストの面から見れば、即時解体方式が合理的である。

(1) 完全解体

この解体方式は、DCA 原子炉施設に属する設備機器並びに建家の全てを解体撤去し、建家撤去跡の敷地に残存放射能がないことを確認して、跡地を用途制限なしで利用できる様にする方式である。

(2) 部分解体・建家再利用

この解体方式は、DCA 原子炉施設に属する設備機器類の全てを解体撤去し、機器類撤去跡の建家の室内を除染し、残存放射能のないことを確認して管理区域を解除し、建家を用途制限なしで再利用する方式である。

(3) 部分解体・建家転用

この解体方式は、DCA 原子炉施設に属する設備機器類の内、給排水設備、換気設備等のユーティリティ設備以外の設備を解体撤去し、建家及び既存のユーティリティ設備を核燃料使用施設、RI 使用施設等に転用する方式である。

3.2 解体の方法

3.2.1 解体手続き

解体の手続きの手順を図 3.1 に示す。

3.2.2 解体手順と解体方法

解体の手順と方法を表 3.1 に示す。

3.2.3 解体撤去工事工程

DCA 原子炉施設解体撤去工事の概略工程を表 3.2 に示す。

3.3 核燃料物質の処分方法

DCA の使用済燃料は、原子炉の出力が最大 1kW と極めて小さく、運転時間も 50 時間／年と極めて短いことから、燃焼度も極めて小さく、無視できる程度と推定され、新燃料並に取り扱うことができるものと仮定する。この前提に立脚し、DCA の使用済燃料は以下の様に処分する。

DCA 使用済燃料の処分方法

燃料の種類	処分の方法
高濃縮ウラン燃料	動力炉核燃料開発事業団東海事業所又は、他の燃料メーカーで粉末に戻し、低濃縮度の粉末とブレンドして、商用軽水炉燃料等に転用する。
低濃縮ウラン燃料	動力炉核燃料開発事業団東海事業所又は、他の燃料メーカーで粉末に戻し、商用軽水炉燃料に転用する。
MOX燃料	動力炉核燃料開発事業団東海事業所プルトニウム燃料製造工場 で粉末に戻し、プルサーマル燃料に再加工し、商用軽水炉燃料に転用する。
プルトニウム 試験体燃料	動力炉核燃料開発事業団・大洗工学センタの高速実験炉「常陽」の燃料に転用する。

参考事例

国内の臨界実験装置の廃止措置において、使用済燃料の処分方法として燃料加工メーカーで再加工した実績がある。DCA の燃料処分方法の参考となる事例である。

3.4 安全対策

3.4.1 一般安全対策

解体撤去作業に当たっては、労働安全衛生法と関連法規等を遵守して、安全確保に努める。なお、解体期間を通して有効利用を図る既存の機器設備については、原子炉供用中に準じた維持管理を行う。

(1) 火災・爆発対策

消防法、高圧ガス取締法等の規定するところにより、引火物、ガスボンベ等の貯蔵と取り扱いを行う。火災警報設備、消火設備等は既存設備を有効に利用する。火気使用に際しては、所内規定に従って管理し、火災・爆発が発生しないように管理する。

(2) 停電対策

原子炉運転中と異なり、解体の段階での停電が直ちに施設の安全に重大な影響を及ぼすことは無いが、非常用電源装置を解体するまでの期間は、非常用電源装置を待機状態におくことにより、照明等の必要な電源を確保する。非常用電源装置の解体時期は、工程上原子炉本体、重水系統機器類等原子炉施設に属する設備機器類の解体撤去後に配置することとし、当該電源装置解体時には、必要に応じて仮設電源装置で対応する。

なお、停電発生時は非常用の照明は確保されるが、作業は中断し、使用中の電気設備のスイッチを切り、作業者は作業区域から退出する。停電復旧時は作業区域の放射線サーベイを行い、安全を確認後作業を再開する。

(3) 感電防止対策

電気系統の解体に係る作業は、「電気作業届」により管理し、当該系統の電源遮断を確認して作業に入る。電源盤、操作盤には誤投入防止タグを取付け、感電を防止する。

(4) 墜落、落下防止

足場を構築する様な高所作業及び開口部近辺の作業では、作業者の墜落、工具等の機材の落下防止のため、手摺り、巾木等の設置、安全ベルト着用、安全ネット設置等の対策により、墜落、落下事故を防止する。

(5) 粉塵障害対策

粉塵の発生する作業に当たっては、湿式工法の採用、HEPA フィルタ付き局所排風機の設置、防塵マスク・保護眼鏡着用等により、作業者の粉塵障害を防止する。

(6) 閉所作業の安全対策

タンク、ピット等の内部での作業に当たっては、立入り前及び作業中に環境測定を行い作業環境の安全性を確認すると共に、必要に応じて、換気を行う。

(7) 自然事象に対する対策

解体作業中に地震、台風等の自然事象による二次的な災害を防止するため、解体の進捗によって変化する施設の状況に応じて、安全対策に配慮した作業計画を立て、施工管理を行う。

3.4.2 放射線安全対策

DCA 原子炉施設の現状は、前出の通り作業環境の空間線量当量率は数 μ Sv/hr 程度の極めて低いレベルにあり、外部被曝抑制（低減化）の観点から遠隔操作、仮設遮蔽体設置等の特別な措置は不要と判断される。

一方、重水を使用していたことから炉心タンク、重水系統機器・配管等の内面並びに建家の床コンクリート等にトリチウム汚染の可能性のあることが想定される。重水抜取り後に汚染測定を行い、必要に応じて除染を行う。

除染及び解体作業時の内部被曝を防止するため、粉塵発生が少ない機械的切断工法、湿式工法を採用すると共に、必要に応じて呼吸保護具を着用する。

また、粉塵が発生する可能性のある作業を行う場合は、汚染防止囲いグリーンハウスを設置し、その内部で行う。

3.5 放射線管理

作業環境の放射線監視及び被曝管理、放射性廃棄物管理、放射線業務従事者等の管理区域出入管理等並びに周辺環境の放射線監視等の放射線管理は、基本的には原子炉供用期間中と同様に、保安規定に基づいて実施し、法令で定める線量当量限度等を超えないように管理する。放射線管理設備は工程上可能な限り既存設備を有効に利用するものとし、この間は原子炉供用期間中と同様に設備を維持管理する。解体工事の進捗に伴い、既存の放射線管理設備を解体撤去する段階では、必要に応じて仮設設備を設置して対応する。

3.5.1 作業環境の管理

作業環境の線量当量率、表面密度（汚染密度）は定期的に測定し、異常のないことを確認する。作業環境の空気中の放射性物質の濃度は連続的に監視し、異常のないことを確認する。解体の進捗に伴い、作業環境の線量率等に変化が予想される場合は、その都度測定し、安全確保上必要な措置を講ずる。

3.5.2 被曝管理

(1) 放射線業務従事者の被曝管理

DCA 原子炉施設は運転履歴から炉心構造物等の放射化の程度が極めて低く、運転停止後数日で炉心タンク周辺の線量当量率は数 μ Sv/h 程度となることから、従事者の被曝低減のため、遠隔操作、仮設遮蔽等は不要と判断できる。一方、減速材・反射材として重水が使われていたことから、炉心タンク、重水系統等にはトリチウム汚染が考えられる。

被曝管理はこれ等の状況を踏まえて行うこととなる。

作業の実施に当たっては、作業環境の線量率、表面密度、空気中の放射性物質濃度等を事前に把握し、作業分析に基づく合理的な作業手順を構築し、計画被曝線量を設定し、従事者の被曝低減を図るものとする。外部被曝線量は、TLD バッジと APD（警報付きポケット線量計）を併用して管理する。内部被曝のおそれのある事象が発生した場合は、バイオアッセイ法及びフォールボデイ測定によって確認する。なお、空気汚染が予測される作業に当たっては、呼吸保護具等を着用し、内部被曝を防止する。

(2) 周辺公衆の被曝管理

燃料をはじめ、炉内構造物等の放射化の程度が極めて小さいことから、これ等を線源とする周辺監視区域境界への直達 γ 線及びスカイシャイン γ 線の影響は無視できる。

管理区域からの排気は、既存の排気系統のHEPA フィルタで濾過処理し、排気中の放射性物質濃度を監視しながら、排気口から大気中に放出する。

解体作業では、機器類の解体ではバンドソー等粉塵発生が少ない機械的工法、建家コンクリートの除染が必要な場合は湿式工法を採用し、粉塵発生を抑制すると共に、必要に応じてHEPA フィルタを装備した局所排気装置により濾過処理し、既存排気設備を経由して二重に濾過処理し、放射性粉塵の放出を抑制することにより、呼吸摂取、食物摂取による周辺公衆の内部被曝を抑制する。なお、周辺公衆の被曝評価は、原子力安全委員会が定めた「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」及び「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する指針」並びに「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量当量評価について」に準拠して行う。

3.6 放射性廃棄物管理

3.6.1 気体廃棄物

管理区域からの排気は、原子炉供用期間中と同様に、既存の排気系統のフィルタで濾過処理して、排気中の放射能濃度を監視しながら排気口から大気中に放出する。

既存の排気処理設備を解体撤去する段階では、必要に応じて仮設排気処理設備を設置して対応する。

3.6.2 液体廃棄物

液体廃棄物としては圧力管内の軽水、重水系統の除染廃液、管理区域出口手洗い水等が発生する。これ等の液体廃棄物は既存の廃液タンクに一時貯蔵し、サンプリングにより廃液中の放射性物質濃度を測定した後、日本原子力研究所大洗研究所の廃棄物管理施設へ移送する。既存の廃液タンクを解体撤去する段階では、必要に応じて仮設タンクを設置する。

3.6.3 固体廃棄物

放射性固体廃棄物は、材質及び放射能レベルにより区分し、原則として 200 リットルドラム缶、1m³鋼製角型容器等に収納し、容器表面に容器表面及び表面から 1m 離れた位置の線量当量率、収納品名、重量、主要核種、放射エネルギー、収納日等の情報を表示する。

容器収納が困難な廃棄物については開口部密閉、梱包等汚染拡大防止措置を講ずる。

これ等の廃棄物は、一時的に DCA 施設内に設定する「一時保管場所」に保管し、建家解体着手前までに、日本原子力研究所大洗研究所の廃棄物管理施設へ移送する。

3.6.4 放射性廃棄物と放射性廃棄物でない廃棄物^{*1)}

(1) 放射性廃棄物

「放射性廃棄物」とは、核燃料物質又は核燃料物質で汚染された物で、廃棄しようとするものをいう。(試験炉規則第 1 条の 2 第 1 項第 2 号に定義されている。)

(2) 放射性廃棄物でない廃棄物・管理区域から発生する非放射性廃棄物

非放射性廃棄物として取り扱うことができる廃棄物は、「核燃料物質で汚染されていないことが明らかなもの」でなければならない。

日本原子力研究所は試験研究用原子力発電所(JPDR)の解体に当たり、非放射性廃棄物として取り扱うための基本的な考え方を整理し、これに適合するものを「非放射性廃棄物」として区分した。非放射性廃棄物の基本的な考え方を①、②に示す。

①管理区域は、基本的には人の被曝管理を目的として設定されるものである。実際には法令の定める基準に加えて、建家の構造、管理の難易性等を勘案して、余裕をもって広く設定されていることが多い。結果的には、過去に汚染の発生する作業の履歴がなく、汚染の履歴のない区域があり得る。この様な区域に設置された機器、構造材、コンクリート等は非放射性廃棄物とすることができる。

②汚染された区域に設置された機器、構造材、コンクリート等であっても、汚染した部分(又はそのおそれのある部分)が限定されており、当該汚染部を容易に分離できるものは、当該汚染部分を分離すれば非放射性廃棄物とすることができる。

JPDR の解体時の非放射性廃棄物は上記①、②の考え方に従って以下に示す条件を設定し、条件への適合性を対象品目毎に具体的に検討し、非放射性廃棄物を区分した。

条件1:使用履歴、設置状況等から汚染のないことが明らかであって、そのことが測定によって確認されたもの。

条件2:使用履歴、設置状況等から汚染部分が限定されていることが明らかであって、当該汚染部分が分離され、そのことが測定によって確認されたもの。

注記

*1): 放射性廃棄物でない廃棄物

ここでいう放射性廃棄物でない廃棄物とは、原子力安全委員会の放射性廃棄物安全基準専門部会で検討が進められているクリアランスレベル廃棄物^{*2)}とは異なり使用履歴上汚染の可能性のない廃棄物であり、念のための測定により、汚染がないことを確認したものをいう。

*2): クリアランスレベル廃棄物

原子炉施設の解体により発生する放射性廃棄物の大部分は、放射能として環境への影響を与える恐れがない、極めて低いレベルの廃棄物であり、一般の産業廃棄物と同様に処分または再利用できると考えられている。

このような、放射性廃棄物として取り扱う必要のない廃棄物を区分するため、クリアランスレベル（区分値）について平成9年度から、原子力安全委員会において検討が進められている。

一方、放射性廃棄物のクリアランスレベル（無条件）については、1996年IAEAが中間報告(TECDOC-855)を公表している。また、EU委員会は、1998年5月、放射性金属スクラップの再利用基準及び工具、装置等の直接再使用基準を放射線防護No.89で勧告している。さらに、OECD/NEAのデコミッショニングプロジェクト参加グループが、放射性金属廃棄物の再利用・再使用に関する無条件及び限定付再利用に関する基準を、1996年

に提案している。

このように、国内外における放射性廃棄物の規制除外に関する動きは活発化しており、諸外国では既に、再利用等も現実に行われている。

参考までに、代表的な核種の IAEA 無条件と EU 再利用のクリアランスレベルを表 3.3 に示す。

3.6.5 放射性固体廃棄物の処分法

(1) 放射性固体廃棄物の処分

3.6.3 項に述べた通り、放射性固体廃棄物は材質、放射能レベルにより区分し、その区分に従って 200 リットルドラム缶、1 m³ 鋼製角型容器等の廃棄物容器に収納し、当面は日本原子力研究所・大洗研究所の廃棄物管理施設へ移送して、保管する。将来、研究所等から発生する低レベル固体廃棄物を受入れ、埋設処分する施設が設置されれば、ここに処分を依頼する。

なお、「放射性廃棄物でない廃棄物」は、再使用または再資源等として再利用する。再使用又は再利用できない廃棄物は、産業廃棄物として処分する。

(2) 有害物質の処分

DCA 原子炉施設には、炉心タンクをはじめとしてアルミニウム合金が多用されている。

アルミニウムをベースとする合金類は埋設処分した場合に、有害なガスが発生することから、埋設処分には適せず、一般の産業廃棄物の仕分けでは、資源としてリサイクルされている。放射性廃棄物としてのアルミニウム合金の処分は、当面は保管廃棄し、将来放射能の減衰を待ってクリアランスレベルに該当した時点で、一般の産業廃棄物としてのアルミニウム合金と同様に、資源としてリサイクルすることが考えられる。

なお、鉛等の重金属類廃棄物も同様に有害物質であることから、同様に資源としてリサイクルすることが合理的であると考えられる。

3.7 公衆の実効線量評価

3.7.1 外部被曝評価

3.5.2 項(2) 周辺公衆の被曝管理で述べた様に、DCA 原子炉施設の線源となる残存放射能は極めて少なく、周辺監視区域境界の公衆に与える直達 γ 線及びスカイシャイン γ 線による外部実効線量当量は、無視できる程度に小さいものと推定される。

3.7.2 内部被曝評価

解体作業で発生する粉塵等に含まれる放射性物質の一部が、管理区域排気処理系統のHEPA フィルタを通り抜けて排気筒から大気中に放出され、監視区域境界周辺の公衆が呼吸摂取、食物摂取を通して内部被曝を受ける可能性が考えられる。

周辺公衆の内部被曝による実効線量当量の評価は、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」及び「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」並びに「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量当量評価について」に準拠して行うものとする。

3.8 技術的能力

3.8.1 要員の配置

原子炉施設の解体を管理、運営する視点から解体実施組織に求められる技術的能力としては、当該施設の運転、保守の経験を有し、施設に精通した要員が配置されていることが望まれる。また、粉塵発生、閉所作業等工事段階の作業環境を管理するため、作業環境測定士が配置されていることが望ましいが、これは、解体工事受注者に求めることが合理的である。原子炉施設の解体が完了するまでは、法的には「解体中の原子炉施設」と位置づけられているため、原子炉主任技術者を配置しておく必要がある。

3.8.2 管理組織

解体の実施体制は、工事及び工程の管理、安全管理及び放射線管理、廃棄物管理、機材調達等多方面にわたり、これ等の組織が有機的に連携して行くことが求められる。解体に係る品質保証体制も整備する必要がある。これ等のことから、解体の管理組織としては「DCA 解体プロジェクト」を組織することが望ましいと判断する。

3.9 トリチウムの処分

減速材に重水を使用していることから、重水中には放射化により生成されるトリチウムが含まれる。このトリチウムは気体状、液体状及び配管、機器類等の表面並びに建家コンクリートの表面等に付着・浸透し、結果としてトリチウムで汚染した固体状の 3 態の形で存在する。純粋にトリチウムを分離し、固定する技術は確立していない現状にある。

3.9.1 気体廃棄物としてのトリチウムの処分

管理区域内の排気と一緒に希釈し、気体廃棄物として HEPA フィルタを通して濾過処理し、排気ガスモニタ・排気ダストモニタにより放射能濃度を監視しながら、排気口より放出する。

3.9.2 液体廃棄物としてのトリチウムの処分

重水系統の除染廃液等に含まれるトリチウムを含む廃液は、液体廃棄物として、他の管理区域内で発生する廃液と一緒に廃液タンクに一時的に貯留し、サンプリングにより放射能濃度を測定し、 $3.7 \times 10^5 \text{Bq/cc}$ 未満のものは、日本原子力研究所・大洗研究所の廃棄物管理施設へ移送し、処分する。このレベル以上の場合は、高速実験炉「常陽」へ移送し、希釈等の処理を行った上で日本原子力研究所・大洗研究所の廃棄物管理施設へ移送して、処分する。

3.9.3 固体廃棄物としてのトリチウムの処分

重水系統の機器類等の金属、建家コンクリート等トリチウムで汚染している金属、コンクリート等は、固体廃棄物として材質と放射能レベルによって区分し、所定の容器へ収納し、日本原子力研究所の廃棄物管理施設へ移送し、保管廃棄する。

3.10 DCA 解体における効率的な解体手順

3.10.1 解体撤去の時期

DCA 原子炉施設は前にも述べた様に原子炉の出力が小さく、運転時間も短いことから炉心領域の放射化の程度が極めて低く、炉心タンク周辺の線量当量率も数 μ Sv/hr と低いレベルにある。

このような施設の状況から、放射能の減衰を待つ意味はなく、かつ、運転終了後の施設の維持管理を考慮した場合、DCA 原子炉施設の解体は運転終了後に、「即時解体」することが最も合理的である。

3.10.2 解体撤去の手順

DCA 原子炉施設の解体撤去は大きく三段階に区分して行う。第一段階で炉心から燃料、中性子源及び重水を抜き取り、第二段階で炉心タンク等全ての機器類を解体撤去し、撤去跡の建家内を除染して管理区域を解除し、第三段階で建家を解体撤去して解体を完了する。

工事の段階	主な工事内容
第一段階 燃料取出し	・炉心から全ての燃料を抜き取る・再加工し転用を図る・施設外へ搬出 ・中性子源取り出し・RI として再利用する・施設外へ搬出^{*1)} ・重水抜き取り・「ふげん」へ転用する・施設外へ搬出
第二段階 機器類撤去 管理区域 解除	・系統除染・炉心タンクを含む重水系統の汚染測定と除染 ・機器類の解体撤去→カランドリア管、圧力管、安全棒、炉心タンク 重水系配管・タンク・ポンプ、核計装設備 軽水系配管・タンク・ポンプ、ガス系設備 その他換気系・給排水設備等全ての機器類 ・コンクリート床、壁、天井の汚染測定と除染・管理区域解除
第三段階 建家解体	・建家解体撤去・撤去跡に残存放射能の無い事を測定により確認 ・整地・解体完了

注記 *1) 解体における中性子源の取扱事例

- ① JPDR :Am-Be ・放射性固体廃棄物として保管廃棄
 ②原子力船「むつ」:Sb-Be(Th-Be)Sb-Be ・RI として再利用

3.11 必要な計算コード等の列挙と概要説明

(1) 残存放射能計算のための放射化放射能評価コード

- ① ANISN-JR ; 一次元計算用中性子縮約群定数を求める。
- ② DOT 3.5 ; 中性子束分布を求める。
- ③ QAD ; 遮蔽計算・速中性子及び γ 線の透過計算に適用する。
- ④ ORIGEN ; 燃料の燃焼に伴うRIの生成・消滅の計算に適用する。

3.12 その他必要な事項

該当事項なし

3.13 今後の課題

(1) 解体撤去の範囲決定・敷地、建家の利用計画策定

(2) DCA 原子炉施設の物量データ整備

- ・機器リスト（数量、材質、寸法、重量、放射能レベル区分、放射能量）
- ・建家リスト（構造、寸法、コンクリート比重、重量、埋設配管位置及び寸法）

(3) 解体廃棄物保管場所の確保

解体の特徴の一つとして、短期間に大量の廃棄物が発生することが挙げられる。

放射性固体廃棄物、非放射性固体廃棄物の一次的な保管場所並びに最終的な処分場所を何処にするか、放射性固体廃棄物の受皿として、従来通り原研が引き受けてくれるのか否か、関係者間で協議・決定しておく必要がある。

表 3.1

解体手順書・解体方法 (完全解体の場合)

手順	解体対象機器・構築物等	材質	数量	解体の方法
1	燃料取り出し	—	165 体	燃料交換機を用いて炉心から取り出し、所定の保管庫へ収納する。 解体終了前までに施設外へ搬出する。(再処理・転用等)
2	重水抜取り	—	約 30m ³	炉心タンク、重水系統から重水を抜き取る。抜き取った重水は、ドラム缶へ収納し所定の場所へ保管する。解体終了前までに施設外へ搬出する。
3	汚染測定	—	—	炉心タンク、カランドリア管、重水系統等重水と接触した履歴を有する面について汚染測定を行い、記録する。
4	重水系統除染	—	—	手順#3において、汚染(トリチウムが想定される。)が確認された場合、必要に応じて、系統除染を行う。
5	燃料交換機	炭素鋼	1 組	①梁材、柱材等の固定ボルトを外し、分解する。 ②念のため汚染のないことを測定により確認し、管理区域外へ搬出する。 (放射化はしていないものと仮定する。)
6	制御棒・安全棒駆動装置	ステンレス	8 体	①制御棒・安全棒と駆動軸を切り離す。 ②上部グリッド板から駆動装置を取り外し、グリーンハウス内で「細断」し、容器へ収納する。切断はバンドソー等の機械的工法を用いる。
7	制御棒・安全棒	Cd-Al	8 体	炉心タンクから制御棒及び安全棒を抜き取り、グリーンハウス内で「細断」し、容器へ収納する。切断はバンドソー等の機械的工法を用いる。
8	カランドリア管・圧力管	アルミ合金	165 組	①カランドリア管の上部グリッド板への固定ボルトを外し、カランドリア管を圧力管と一体で炉心から取り外す。圧力管から軽水を抜き取り、廃液タンクへ移す。 ②圧力管とカランドリア管を一体でグリーンハウスに搬入し、「細断」して容器へ収納する。切断にはバンドソーを使用する。
9	グリッド板 ・ATR 実験系 ・未臨界実験系	アルミ合金 ステンレス	4 組 1 組	①炉心タンクへの取付けボルトを外し、上部及び下部グリッド板を炉心タンクから取り出し、グリーンハウス内で「細断」して容器へ収納する。切断にはニブラ、レスプロソー等の機械的工法を使用する。 ②他の炉心組み替え用グリッド板についても、同様に細断し容器へ収納する。
10	炉心タンク	アルミ合金	1 基	①炉心タンクの周辺を汚染拡散防止のため養生する。 ②炉心タンクへの接続配管フランジのボルトを外し、縁切りする。 ③炉心タンク外表面に切断線を罫書き(約10角)、切断線に沿ってニブラ又はレスプロソー等の機械的工法で「切断」し、容器へ収納する。 ④炉心タンク底板についても同様とする。
11	重水系統設備 ・タンク類 ・ポンプ類 ・配管類 (重水精製設備を含む)	アルミ合金 及び ステンレス	1 式	①タンク類は接続配管フランジのボルトを外し、表面に切断線を罫書き、これに沿ってニブラ又はレスプロソー等の機械的工法で切断し、容器へ収納する。 ②ポンプ類は接続配管フランジのボルトを外し、開口部に閉止板を取付け、電動機を外して容器へ収納する。 ③配管は、機器類との取り付けフランジのボルトを外し、スプールの姿でグリーンハウスへ持ち込み、細断して容器へ収納する。
12	軽水系統設備 ・タンク類 ・ポンプ類 ・配管類	ステンレス	1 式	解体の方法は、重水系統設備に同じ。
13	ガス系統設備 ・タンク・加熱器類 ・ブロウ ・配管類	ステンレス	1 式	解体の方法は、重水系統設備に同じ。 この系統は使用履歴上からは汚染はないものと推定される。 念のため測定により汚染のないことを確認し、管理区域外へ搬出する。
14	ユーテリテイ設備 ・廃気・排水設備	炭素鋼	1 式	解体の方法は、重水系統設備に同じ。 使用履歴上汚染の可能性が否定できない。
	ユーテリテイ設備 ・給気・給水設備	炭素鋼	1 式	解体の方法は、重水系統設備に同じ。 使用履歴上汚染の可能性なし、確認測定の上、管理区域外へ搬出する。
15	制御室設備 ・制御盤・計器等	—	1 式	非管理区域に設置されており、解体し再資源等として利用する。
16	建家 ・クレーン設備 ・建家躯体	炭素鋼 鉄筋・鉄骨 コンクリート	1 式	・天井走行クレーンは汚染の無いことを確認後解体し、搬出する。 ・機器類を解体撤去した後、床、壁、天井面の汚染測定(Hに着目)を行い、汚染部を除去し、残存放射能がないことを確認して、管理区域を解除する。 ・ジャイアントブレーカ、大型圧砕機等の重機を用い、建家を解体撤去する。 ・鉄筋、鉄骨とコンクリートを分離する。鉄筋、鉄骨は資源として再利用し、コンクリート中の骨材(砂利)は再生利用する。 ・建家撤去跡の敷地に残存放射能がないことを確認し、解体工事を完了する。
17	解体完了手続き	—	—	●DCA 原子炉施設を設置許可書上から抹消し、廃止措置を完了する。

表3. 2

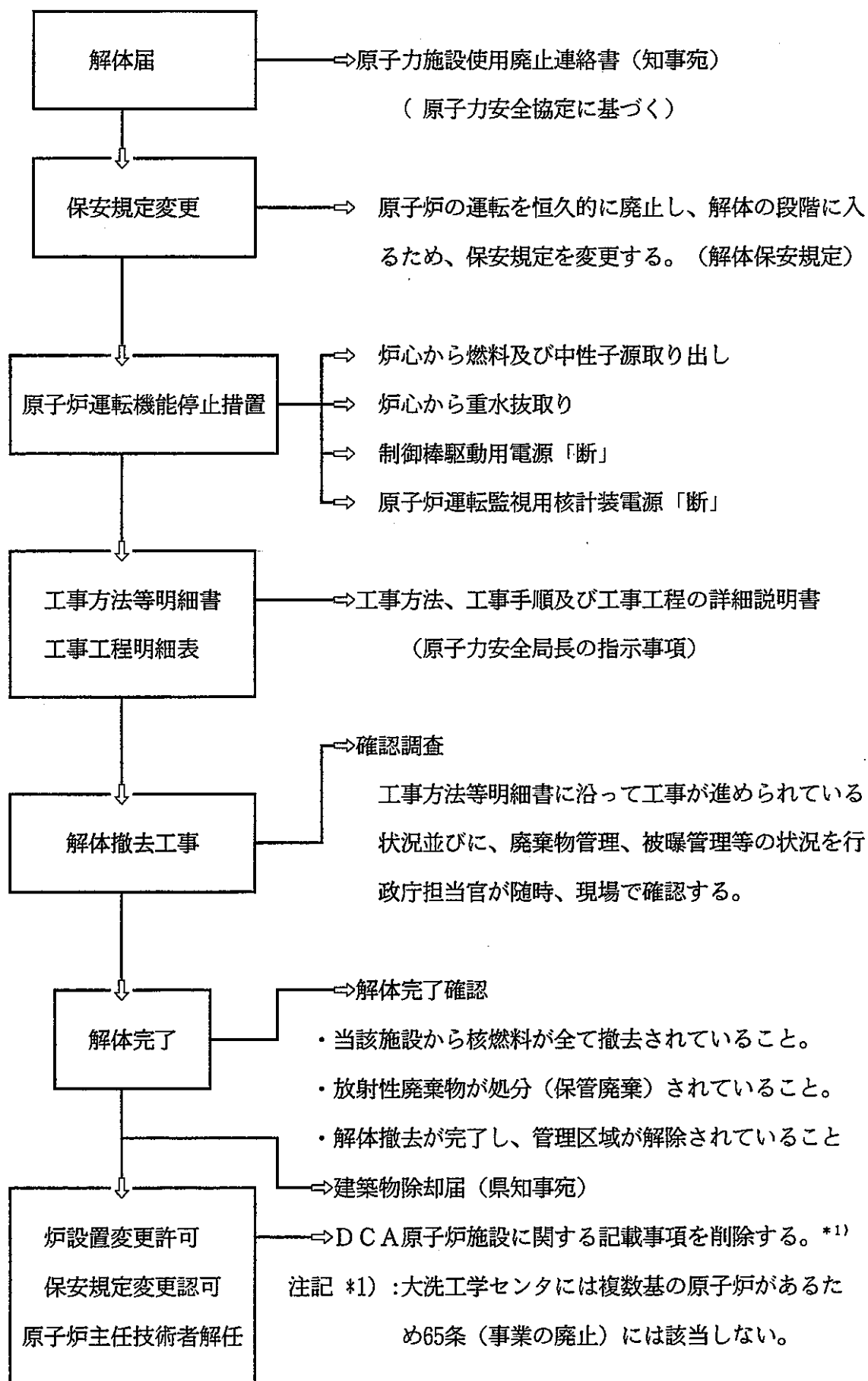
D C A 原子炉施設解体撤去工事概略工程

解体届提出⇒▲

項目	月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2F	工事準備 ・床壁養生 燃料・中性子源取出し 機器類解体撤去 ・燃料交換機用架台 ・制御棒・安全棒（含駆動部） ・カランドリア管・圧力管 ・格子板（上部・下部） ・軽水サージタンク・配管 ・燃料体分解プール内機器類		==	==									
1F	工事準備 ・床壁養生 機器類解体撤去 ・炉心タンク周辺機器 ・炉心タンク ・炉心タンクペデスタル		==	(除染) ==		==	==	==					
BF	工事準備 ・床壁養生 ・細断場所設定（グリーンハウス） 重水抜き取り 系統除染 重水タンク・ポンプ・配管 イオン交換塔・配管		==	==	==	==	==						
その他	燃料取扱・貯蔵施設 制御室設備 その他の施設・設備						==	==	==				
共通	放射線管理・監視設備撤去 給排気設備撤去 給排水設備撤去								==	==	==		
建家	汚染測定・除染 解体撤去									==	==	==	==

表3.3 IAEA無条件とEU再利用等のクリアランスレベルの比較（代表核種）

条件	IAEA(TECDOC-855より)		EU (放射線防護No.89)		
	無条件		再利用		直接再利用
核種	濃度範囲(Bq/g)	代表値(Bq/g)	濃度(Bq/g)	表面汚染密度 (Bq/cm ²)	表面汚染 (Bq/cm ²)
Mn-54	0.1~<1.0	0.3	1	10	10
Co-60			1	10	1
Nb-94			1	10	1
Cs-137			1	100	10
U-235			1	1	1
U-238			1	1	1
Pu-239			1	0.1	0.1
Co-58	≥1.0~<10	3	1	10	10
Sr-90			10	10	10
Ir-192			1	10	10
I-129	≥10~<100	30	1	10	10
Pu-241			10	10	10
C-14	≥100~<1,000	300	100	1,000	1,000
Fe-55			10,000	10,000	1,000
H-3	≥1,000~<10,000	3,000	1,000	100,000	10,000
Ni-63			10,000	10,000	1,000



解体手続きの手順

4. 放射線強度分布の評価

今回の一連の計算評価は、煩雑な手順を省略化するため群定数処理から放射能インベントリ評価まで一貫して計算できるようシステム化された（原研が科学技術庁からの受託研究として開発した）原子力デコミッション管理のための計算コードシステム COSMARD を用いて実施した。本システムの概念図を図 4.1 に示す。この中の放射能インベントリの計算システムを図 4.2 に示す。同図の種々のコードについては、後述する。

4.1 群定数の計算

4.1.1 前提条件

中性子束分布計算を行うために必要な領域依存の群定数を作成する計算を行った。

使用した計算条件を以下に示す。

計算条件

使用コード	: 1 次元 Sn コード (ANISN-JR)
群定数ライブラリ	: JSSTD (P ₀ 展開次数 5、中性子エネルギー群数 22)
解析モデル	: 径方向 — 無限円筒 (Sn 分点: 8)
	: 最大メッシュ数 — 460 メッシュ
	: 軸方向 — 無限平板 (Sn 分点: 8)
	: 最大メッシュ数 — 312 メッシュ
中性子スペクトル	: U235 の核分裂スペクトル
境界条件	: 炉心中心 — 反射条件
	: 炉室境界外側 — 真空 (反射なし) 条件

その他の条件

- ・線源強度は、以下の式を用いて 1kw 時における値を求めた。

$$F = 1.0 \times 10^3 \text{ (watt)} \times 3.15 \times 10^{10} \text{ (fiss/watt} \cdot \text{sec)} \times 2.5 \text{ (n/fiss)}$$

$$= 7.88 \times 10^{13} \text{ (n/sec)}$$
- ・径方向の計算では、線源強度 (7.88×10^{13} n/sec) に、線源の燃料棒有効高さで割った値を規格化因子とした。
- ・軸方向の計算では、線源強度 (7.88×10^{13} n/sec) に、線源の円面積で割った値を規格化因子とした。
- ・炉心内の出力分布は、一様とした。
- ・炉心については、ウラン、重水、炉内構成物質（アルミニウム等）で均質化を行った。
- ・上部グリッド板下の非燃料領域（カランドリア管及び圧力管）については、

空気とアルミニウムで均質化を行った。

- ・下部グリッド板と吸収板の領域については、空気と炭化ボロンおよびアルミニウムで均質化を行った。
- ・コンクリート、空気、炭素鋼等は組成も含め、一般的に遮蔽計算で使用されている数値を採用した。

4.2 節と 4.3 節で述べるように、Sn 法を用いた計算コードでは、中性子と各物質が相互作用する確率を与えるための断面積が必要である。本計算では JSSTD L ライブラリを使用した。

本ライブラリに収用されている核種は、64 核種であるが、原研が 1995 年に表 4.1 に示した核種（なお、この核種については重複している核種もある。）においてライブラリを追加作成した。本計算では、この追加作成された JSSTD L ライブラリを使用した。

また、中性子エネルギー群は表 4.2 に示したように 295 群であるが、後述するユーティリティコードを用いて 22 群への縮約を行った。縮約する際に参照した中性子エネルギー群は、遮蔽計算でよく使用されている DLC-23E ライブラリの中性子エネルギー群である。そのために、中性子エネルギーは 14MeV $\sim$ 0.00001ev までの範囲で考慮した。

縮約後のエネルギー群を表 4.3 に示す。

4.1.2 計算体系

計算モデルに作成するのに当たり使用した図面などを図 4.3 $\sim$ 図 4.9 に示すとともに、作成した計算モデルを図 4.10 $\sim$ 図 4.16 に示す。さらに、計算で使用了各領域の原子個数密度を表 4.4 に示す。

4.1.3 結果と評価

計算結果を図 4.17 $\sim$ 図 4.23 に示す。

これらの計算結果は、図 4.10 から図 4.16 に示した計算モデル図に対応したものである。本コードは 1 次元モデルの計算のため半径方向モデルでは軸方向無限となっており、逆に軸方向 1 次元モデルでは半径方向は無限となっている。

図 4.17 の計算結果は、図 4.10 の計算モデルから算出したものである。このモデルを 2 次元計算モデル図の図 4.2.5 に対応させると図 4.25(4)の半径方向の T 記号が均質炉心領域、7 記号が重水反射体領域、D 記号が炉心タンクアルミニウム領域、J 記号が空気領域、P 記号がコンクリート領域となっている。

図 4.18 の計算結果は、同様に 2 次元計算モデル図に対応させると、図 4.25(3)

の 4 記号が図 4.11 の均質炉心領域を表している。何故ならば、半径方向 1 次元モデルでは、前述したように軸方向無限モデルとなっているためである。また、この場合図 4.11 から均質炉心領域の隣接領域は、重水ではなく空気領域となっているのは、図 4.25(3)から明らかなように記号 L で表示されている空気領域を示しているためである。ここでは重水領域がなくなっているからである。また図 4.11 でコンクリートの外側が空気領域となっているが、これは図 4.25(3)の記号 Q で表示された領域を表している。これは 2 次元計算で R 記号で表示されている生体遮蔽体領域をモデル化するためがあるのでその隣接領域の空気領域を考慮したためである。

図 4.12 の計算モデル図は、図 4.25(2)のモデル図に対応している。即ち、図 4.12 の中央領域の空気領域は、図 4.25(2)の F 記号の領域を表している。また記号 LL 領域は、図 4.12 の鋼鉄領域を表し、同じく記号 R はコンクリート領域を表している。このような計算モデルを採用することにより生体遮蔽体領域の放射化量を保守的に評価することができる。

以上を考慮し、図 4.17 から図 4.19 の結果を相互比較すると以下のことがわかる。

これらの図から炉心部の中性子領域は、炉心領域内はいずれも中間エネルギー領域が最大で次いで熱中性子束、高速中性子束となっている。これは、炉心は核燃料が入っているため線源となっており、また減速材である重水は、燃料と均質に混合されたモデルとなっているため、一般的な ATR 炉心の核計算モデルとなっている燃料領域と減速材領域が分離され非均質になっている場合と比べ減速が弱められている。従って炉心領域では、中間エネルギー領域、熱中性子エネルギー領域、高速中性子エネルギー領域の順に中性子束が小さくなっている。ところが炉心領域に隣接して重水反射体領域を設けたモデルでの図 4.17 の結果では、重水の減速材効果が顕著に表れ、この領域を空気領域とした図 4.18 と図 4.19 の両結果に比べ熱中性子束分布はピークをもつ形となっている。次の領域である広い空気領域では、減速および反射効果がないため、これらの中性子束分布は、そのまま距離とともに一様に減衰する分布となっている。ところが端のコンクリート領域では、水素をかなり含んでいるため、減速効果が大きく熱中性子束のピークを持つ分布となっている。この傾向は、前述の空気領域で中間エネルギー領域の中性子束が多い図 4.19 では顕著であるが、空気領域で熱中性子束が多い図 4.17 ではコンクリート領域での熱中性子束のピークは顕著に現れていない。これは、コンクリート領域の H は、中間エネルギー領域の中性子に対し減速効果を発揮するが、熱中性子に対しては吸収効果となり、むしろ中性子束は減少するためである。

次に、軸方向の中性子束分布について考察する。

図 4.13 の上部軸方向モデルの均質炉心領域の隣接領域は、均質アルミニウム、空気領域となっている。これは燃料を挿入している圧力管、カランドリア管の上部領域をモデル化している。即ち、燃料長は約 2m であるため、その上部はカラ管になっているため、このようなモデルとした。この領域は図 4.25(3)の記号 A の領域に相当する。次のアルミニウム領域は、炉心タンク上部のグリッド板をモデル化している。これは図 4.25(3)の記号 A の領域に相当する。天井のコンクリートは、図 4.25(1)の記号 M の領域に相当する。

図 4.14 の場合、図 4.13 と異なるのは、中間領域にコンクリート領域を設けたことである。これは、図 4.25(3)に示した記号 B のコンクリート領域の群定数を求めるため記号 A のアルミニウム領域に隣接してモデル化したためである。

図 4.15 の下部領域モデルでは、図 4.25(4)の記号 Z で表示されている下部吸収体をモデル化しているため均質炉心領域に隣接して B_4C 領域を設けている。また図 4.15 の最下部のコンクリート領域は、図 4.25(5)の記号 C の領域、即ち炉室地下 1 階の床面をモデル化している。

図 4.16 のモデルでは、図 4.15 と異なっているのは、中間領域にコンクリート領域を設けたことと最下端部の床面のコンクリート領域がない点である。これは、図 4.25(5)の記号 1 で表示されているコンクリート領域の群定数を算出するためにコンクリート領域を設けたためである。一方、この場合の床面のコンクリート領域は、中間のコンクリート領域の群定数で代用できるためモデル化をしていない。

以上を考慮して、図 4.20 から図 4.23 の結果を比較検討してみる。

炉心内の中性子分布は、当然のことながら既述したように半径方向分布の場合と同様でいづれも中性子束は中間エネルギー領域が最大で、次に熱中性子束、速中性子束となっている。一方、 B_4C 領域では、 ^{10}B 熱中性子吸収断面積が大きいこと、約 7 桁も熱中性子束が減少していることがわかる。このため半径方向分布の考察で記述したようにコンクリート領域では、いづれも H の減速効果のため、熱中性子束のピークがあらわれている。

4.2 断面積とライブラリー

中性子と物質との相互作用には種々の形式があり、これらの各形式の反応は同じ確率で生ずるわけではないから、特定の反応が発生する割合を定量的に取り扱う概念を導入する必要がある。中性子がある物質を通過し、相互作用を起こす確率を定量的に表現するためには、的の大きさ（断面積）を目安とすると直感的に判り易いため、原子核の（反応）断面積で表す。

一方、物質中の中性子輸送は、ボルツマン輸送方程式を解くことにより求められ、この計算に用いる断面積として群定数と言う概念が使用される。

現在では種々の目的に沿った群定数ライブラリが整備されており、これらのライブラリのうち適切なものを選択することにより比較的簡単に輸送計算を行うことが可能である。

基本的には、各々の中性子およびガンマ線エネルギーにおける断面積を直接輸送計算に用いれば最も良いが、1960年代に米国で開発された数値解法による輸送計算方法では、その当時の電子計算機の性能等の制約により、群定数と言う概念が取入れられ、現在に至っている。群定数は、あるエネルギーの範囲で断面積を平均化した量として以下のように定義される。

$$\langle \sigma_x \rangle_g = \int_{\Delta E_g} \sigma_x(E) \phi(E) dE / \int_{\Delta E_g} \phi(E) dE$$

$$\langle \sigma_L(g, g') \rangle = \int_{\Delta E_g} dE \int_{\Delta E_{g'}} \sigma_L(E, E') \phi(E) dE' / \int_{\Delta E_g} \phi(E) dE$$

ここで、 $\langle \sigma_x \rangle_g$ は反応の x のエネルギー群 g の群定数を示し、 $\langle \sigma_L(g, g') \rangle$ はエネルギー群 g から g' に散乱される L 次のルジャンドル展開係数である。 ϕ は平均化処理を行う際の重み関数であり、中性子の場合は体系内の中性子エネルギースペクトルまたは標準的なスペクトル（例えば、fission neutron spectrum + $1/E$ + thermal Maxwellian）を用いるのが一般的である。

この平均化処理で最も重要な点は、そのエネルギー範囲における種々の反応率が保存されることである。しかしながら中性子の場合は、多くの共鳴反応により、体系内のエネルギースペクトルは、上記の標準的なスペクトルとは大きく異なるため、標準的なスペクトルで作成した中性子群定数はこの反応率を厳密に保存しない。この問題点を改善するため、現在ではエネルギー群数を非常に多くしたり、自己遮へい係数を取り入れて、エネルギー群の概念から生ずる近似誤差を小さくする配慮がなされている。

中性子断面積はガンマ線断面積のように反応過程が単純でなく、多くの反応過程から成立し、しかも多くの共鳴構造を持っているため、輸送計算の中で断面積を処理することは、計算時間の点から得策ではない。そのため、断面積処理コードを用いて群定数を作成し、輸送計算に使用する方法が採られている。

断面積処理は大別して、以下に示す8つの処理プロセスから成り立っている。

1) 分離共鳴および非分離共鳴断面積処理

- 2) スムース断面積処理
- 3) ドップラー処理
- 4) 自己遮へい係数処理
- 5) 二次ガンマ線生成断面積処理
- 6) 散乱マトリクス処理
- 7) ガンマ線断面積処理
- 8) 実効巨視的断面積処理

評価済核データファイルから群定数を作成する処理コードには種々の機能が要求される。1 つの処理コードでそれらの全てを実行することは容易でないことが理解できる。そのため、最近の断面積処理コードは全てモジュール化された計算コードシステムとなっており、必要なデータは幾つかの処理モジュール群を組み合わせて作成する方法が採用されている。

現在、良く用いられている、これらの断面積処理コードシステムの概要を以下に示す。

1) AMPX

AMPX コードシステムは、1972 年に米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) が開発し、近代的な断面積コードシステムとしては、最も最初に開発されたものであり、他の断面積処理コードに多大な影響をもたらしたコードシステムである。AMPX は中性子とガンマ線の結合群定数を作成するコードシステムであり、ORNL で開発された従来の SUPERTOG、GAMLEG、POPOP4 に替わるものである。ここで、近代的と述べたのは、AMPX が point - wise 断面積処理、自己遮へい処理と言う概念を初めて取入れたことと、初めてモジュラー化したコードシステムの形態を採用したことによる。散乱マトリクスは従来のルジャンドル展開法を採用している。現在では、AMPX は幾つかの改良を経て SCALE コードシステムに組み込まれ、米国の多くの機関で遮へい安全解析に用いられている。

2) MINX

MINX は、1976 年に米国ロスアラモス国立研究所 (LASL) で開発された、中性子群定数を作成するコードシステムである。AMPX と同様に point - wise 断面積処理を採用しているが、自己遮へい処理は APMX と異なり、現在の標準的な断面積処理コードに用いられている自己遮へい係数の概念が用いられている。後述する有名な群定数セットである Vitamine - C は中性子群定数は MINX、ガンマ線群定数は AMPX で作成されている。現在、MINX は下記の NJOY に発展したため、単独ではあまり用いられないが、現在の断面積処理コードの原型となっている点で意義がある。

3) NJOY

NJOY は、1978 年に米国ロスアラモス国立研究所 (LASL) で開発された、中性子とガンマ線の結合群定数を作成するコードシステムである。中性子断面積処理は MINX を原型にしており、これは MINX の次のアルファベットをコード名に採用していることから理解できる。

4) PROF-GROUP-G/B

PROF-GROUP-G/B は 1986 年に日本原子力研究所 (原研) で開発された、中性子とガンマ線の結合群定数を作成するコードシステムであり、JENDL - 3 による JSSTD 295n + 104 γ ライブラリを作成したコードシステムである。このコードシステムは原型が PROF - GROUP-G であり、JAERI - FAST SET と呼ばれる高速炉心設計用標準群定数を作成した有名なシステムである。その後、PROF - GROUP - G / 2、PROF - DD 等に大幅に変更され、現在の PROF - GROUP - G / B に至っている。ガンマ線の群定数は下記に示す RADHEAT - V3 コードシステムの GAMLEG - JR コードを採用して作成されている。

5) RADHEAT-V3

RADHEAT-V3 は 1977 年に原研で開発されたコードシステムであり、ORNL で開発された SUPERTOG、GAMLEG、POPOP4 コードを改良した SUPERTOG - JR、GAMLEG - JR、POPOP4 - JR に自己遮へい係数を算出する FFACTOR コードを結合したモジュラーコードシステムである。

6) RADHEAT - V4

RADHEAT - V4 は 1989 年に原研で開発されたコードシステムであり、上記の RADHEAT - V3 コードシステムを大幅に改良したモジュラーコードシステムである。point - wise 断面積処理、自己遮へい係数処理は NJOY と同様な処理を行うが、散乱マトリクスは、従来のルジャンドル展開形式の他に DDX の形式で作成可能である。また、KERMA 係数、DPA 断面積を算出するコードシステムである。ガンマ線群定数は PHOTX、DLC - 15 ライブラリを用いて作成され、二次ガンマ線生成群定数は JENDL - 3、ENDF/B - IV, V および POPOP4 ライブラリから作成可能である。

中性子評価済核データファイルは、微視的断面積を格納したものであり、前節で示した断面積処理コードによって輸送計算用の群定数を作成する。中性子核データとして現在有名なものは、JENDL、ENDF/B、JEF の 3 つである。

1) JENDL

JENDL は原研が中心となって、日本国内の産・学・官の核データ専門家が一致協力して作成した中性子評価済核データファイルであり、日本の代表的な核データライブラリである。1977 年に初版である JENDL-1 が完成し、その格納核種数は 72 であった。その後、1982 年に改訂版 JENDL-2 が、JENDL-3 が 1989 年に公開された。さらに、JENDL-3 rev.1 が 1990 年に公開され現在に至って

いる。核種数は 324 となり、熱中性子炉、高速炉、核融合炉から遮へい工学に至る広範囲な中性子断面積データが格納されている。

2) ENDF/B

ENDF/B は米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)が中心となって作成した中性子評価済核データファイルであり、米国の代表的な核データライブラリであると同時に世界中で最も標準的なものである。1968年に初版である ENDF/B-I が完成し、その後、中性子核データの測定/評価の進展に伴い 1970 年に ENDF/B-II、1972 年に ENDF/B-III、1975 年に ENDF/B-IV、1979 年に ENDF/B-V、1989 年に ENDF/B-VI が改訂版として完成し、現在に至っている。

3) JEF

JEF は英仏独蘭が中心となって全欧州(EC)が共同で作成した中性子評価済核データファイルであり、現在 JEF-2 が完成し公開されており、欧州中心で用いられている。

4) ガンマ線断面積ライブラリ

ガンマ線断面積のデータとしては、DLC-15 ライブラリがある。エネルギー範囲は、1KeV~100MeV であり、100 元素についての各反応毎の断面積が ENDF/B フォーマットで格納されている。また、最近では 1982 年に Berger & Hubbell が評価した 1KeV~100GeV までのデータを格納した DLC-136/PHOTX Version2 が 1988 年に作成され公開されている。

以上述べたように、輸送計算に用いる群定数を各問題別に作成することは、多大な時間を要することから、幾つかの目的別に標準的な群定数セットが作成され、公開されている。ここでは、比較的良く用いられている群定数セットの現状を述べる。

表 4.5 に群定数セットの名称とエネルギー群数および作成に用いた核データファイルと断面積処理コード名を示してある。ここで DLC と記載されているものは、米国の ORNL に所属している RSIC (Radiation Shielding Information Center) が採用しているデータライブラリの識別番号 (Data Library Collection number) を意味し、この番号を持っているものは RSIC に登録され、世界中に配付されていることを示している。

この中で、DLC-23 は使用済燃料の輸送容器の遮へい解析のために整備されたもので、輸送容器中での典型的な中性子エネルギースペクトルを用いて 22 群に縮約された群定数である。国内でも比較的良く用いられているが、前述の自己遮へい係数が全く考慮されておらず、また適用対象外にも使用されているのは問題がある。

VITAMIN - C は米国でも標準的な群定数ライブラリであり、核融合炉設計のためにより高いエネルギー領域に群構造を拡張した VITAMIN - E と共に良く用

いられている。

JSD100/120 は原子力船「むつ」の遮へいモックアップ実験の解析、高速実験炉「常陽」の遮へい解析に用いられた群定数で国内では歴史もあり広く用いられている。その後、断面積処理コードの大幅な改定に伴い、JSD1000、SSL90A/B ライブラリが整備されている。

FUSION-J3 は核融合炉の核設計のために整備された群定数であり、少数群ライブラリである FUSION40 と共に核融合設計に用いられている。

また、JENDL-3 より作成された標準的なライブラリである JSSTD L がある。今回の放射線強度分布の評価には本ライブラリを用いた。

本ライブラリシステムは、中性子とガンマ線の結合した炉定数として、Sn 計算コード(DOT, ANISN)用、かつ、群構造も国内で標準的に使用されている殆ど全ての群構造をカバーするという特色を有している。また、ライブラリーは温度依存(T)、組成依存(σ_0)の自己共鳴遮へい因子を内蔵しており、燃料や構造等の共鳴構造を有している核種に対してはより正確な取扱が可能となっている。

また、295 群のライブラリーから出発して、少数群へ f-table も含めてライブラリー自身を縮約するコード、及び 295 群ライブラリーもしくはそれから作られた少数群ライブラリーから Sn 計算で必要となる領域依存のマクロ断面積を作成するコードも公開されており、断面積セットとユーティリティーコードとがカップルしたライブラリーシステムである。

群構造は、中性子 295 群、ガンマ線 104 群で国内で使用されている以下に示す群構造をすべて含んでいる。

中性子データ

群定数ライブラリー名	群数
JSD-100	100
BERMUDA-121	121
FNS-125	125
VITAMINE-C	171
VITAMINE-J (E+C)	175
GICX-42	42
JFS-NEW	70
GAM-123 (Fast only)	92
MGCL-137 (Fast only)	91
WIMS-69 (Fast only)	28

ガンマ線データ

群定数ライブラリー名	群数
CSEWG-94	94
LANL-12	12
STEINER-21	21
STRAKER-22	22
LANL-48	48
LANL-24	24
BERMUDA-36	36
HONEYCOMB-15	15

中性子エネルギー 295 群の構造を表 4.2 に示したが、ガンマ線エネルギー 104 群の群構造を表 4.6 に示す。

スペクトルの加重関数 (Weighting Function) は、以下のようにになっている。

熱群 : Thermal - energy group (1.0E-5 eV ~ 0.3224 eV) Maxwell

それ以外 : Fast - energy group (0.3224 eV ~ 2.0E+7 eV) では 1/E

非等方性 (P1 展開次数) Anisotropy は、P5 で、P1 scattering matrices は、

σ_e (elastic) 弾性散乱

$\sigma_{non-elastic}$ 弾性散乱以外

の 2 種類に分けて収容している。これは、次に述べる自己共鳴遮へい因子を弾性散乱断面積に対して反映させる為である。

共鳴自己遮へい因子

1. 媒質温度

4 点 (Kelvin)

300.K 600.K 900.K 2100.K

2. σ_0 back ground cross section

9 点 (barn)

0. 0.17783 1.0 10. 100. 1000. 1.0E+4 1.0E+5 1.0E+6

3. 考慮する核反応断面積

4 つの reactions

σ_t (total)

σ_f (fission)

σ_c (capture: (n, γ) only),

σ_e (elastic)

2 次ガンマ線生成断面積

収容されている reaction は

total gamma

capture(MT:102)

fission(MT:18)

other than capture and fission $((n, n'), (n, p), (n, \alpha), \dots)$

total gamma = capture + fission + other than capture and fission

こうした reaction 毎のデータの収容は中性子断面積に対する f-table データとの関係から収容されている。収容されている核種の一覧を表 4.7 に示す。

JSSTD L ライブラリーの UTILITY コード群として以下のものがある。

中性子ライブラリー用

1) CONVJSS

JSSTD L LIBRARY (Binary Data File) と BCD File (Portable Library) との相互変換コード。

JSSTD L ライブラリーは binary であるので、BCD へ落とししたり、その逆の BCD から Binary への変換機能を持つ。ライブラリーの移植の際に必要なコード。

2) CONDNSJ

JSSTD L LIBRARY (BINARY) をそれと equivalent な少数群ライブラリーへ縮約するコード。

3) MACROJ

JSSTD L LIBRARY (BINARY) を用いて、領域依存の DOT, ANISN 用マクロ断面積ファイルを作成するコード。領域毎の核種 ID (コードナンバー) と組成の入力により、媒質温度、 σ_0 についての自己共鳴遮へい因子の内挿 (f-table search) を行い組成依存のマクロ断面積を作成する。f-table search には cubic spline をもちいている。出力データは、DOT の入力ファイルとなる。

ガンマ線生成断面積及びガンマ線ライブラリー用

1) CONVJGG

中性子用の CONVJSS と同じ機能、目的を持つコードである。

中性子ライブラリーとガンマ線ライブラリーでは、内部データ構造が違いため別コードとなっている。

2) CONDNSJG

JSSTD L LIBRARY (BINARY) をそれと equivalent な少数群ライブラリーへ縮約するコード。利用者が必要とする少数群ライブラリーの作成コード。

3) MACROJG

JSSTD LIBRARY (BINARY) (中性子及びガンマ線ライブラリー) を用いて、領域依存の DOT, ANISN 用マクロ断面積ファイルを作成するコード。領域毎の核種 ID (コードナンバー) と組成の入力により、媒質温度、 σ_0 についての自己共鳴遮へい因子の内挿 (f-table search) を行い組成依存のマクロ断面積を作成する。f-table search には cubic spline をもちいている。出力データは、DOT の入力ファイルとなる。

加速器遮へいのように比較的高エネルギー (数 100MeV) の中性子輸送計算には米国 ORNL で整備された DLC-87/HILO、DLC-119/HILO86 が用いられる。

このように、遮へい設計を行う際には、その目的に合致した群定数セットを用いることにより、簡単に輸送計算を実行することが可能である。しかしながら、目的に一致しない群定数を用いた場合には、その結果は何等保障されないため、使用する際には十分注意する必要がある。

4.3 輸送計算方法

物質中の中性子挙動を計算する基礎方程式として、ボルツマンの輸送方程式が用いられる。この方程式は、ボルツマンが 1872 年種々の非平衡状態にある気体の原子の速度分布関数の正確な表現のために中性子気体中の荷電粒子や固体中の粒子、疑似粒子など非常に多種類の粒子について、その運動を記述するのに用いられている。

このボルツマン方程式は、物質中の運動する粒子の分布状態を表すため位置ベクトル $\underline{r}$ と速度ベクトル $\underline{v}$ に対する直交座標軸系がつくる 6 次元位相空間での分布関数の概念を用いて導かれている。

今、空間点 $\underline{r}$ の位置で運動方向が $\underline{\Omega}$ 、エネルギーが E の状態の中性子角度束密度を $\phi(\underline{r}, \underline{\Omega}, E)$ とし、中性子の巨視的全段面積を $\Sigma(\underline{r}, E)$ とし、また、散乱などの相互作用によりエネルギーと角度変化をもたらす確率を $\Sigma s(\underline{r}, E^1 \rightarrow E, \underline{\Omega}^1 \rightarrow \underline{\Omega})$ とすると、定常状態に於ける中性子輸送方法は次の偏微分・積分方程式となる。

$$\underline{\Omega} \cdot \nabla \phi(\underline{r}, \underline{\Omega}, E) + \Sigma(\underline{r}, E) \phi(\underline{r}, \underline{\Omega}, E) = \int_0^\infty dE^1 \int_{4\pi} d\underline{\Omega}^1 \Sigma s(\underline{r}, E^1 \rightarrow E, \underline{\Omega}^1 \rightarrow \underline{\Omega}) \phi(\underline{r}, \underline{\Omega}^1, E^1) + S(\underline{r}, \underline{\Omega}, E)$$

この式は線形方程式であり、可逆性が保障される。

一方、偏微分方程式の理論から良く知られるように、 $\underline{\Omega}$ に沿った特性曲線（ここでは直線となる）を導入し特性曲線のパラメーターを $s(\underline{r}^1 = \underline{r} - s\underline{\Omega})$ とすると解曲面上では、

$$d\phi/ds = \underline{\Omega} \cdot \nabla \phi$$

となる。偏微分・積分方程式の $\underline{\Omega}$ を固定し s に関して積分し直すと、

$$\phi(\underline{r}, E, \underline{\Omega}) = \int_0^\infty \exp\{-\Sigma(\underline{r} - s\underline{\Omega}, E) \cdot s\} Q(\underline{r} - s\underline{\Omega}, E, \underline{\Omega}) ds$$

ただし、

$$Q(\underline{r} - s\underline{\Omega}, E, \underline{\Omega}) = \int_0^\infty dE^1 \int_{4\pi} d\underline{\Omega}^1 \Sigma s(E^1 \rightarrow E, \underline{\Omega}^1 \rightarrow \underline{\Omega}) \phi(\underline{r} - s\underline{\Omega}, E^1, \underline{\Omega}^1) + S(\underline{r} - s\underline{\Omega}, E, \underline{\Omega})$$

となる。これが積分表現の中性子輸送方程式である。

ここで、 $(\underline{r}, E, \underline{\Omega})$ は Neumann 級数として以下のように展開すると、

$$\phi(\underline{r}, E, \underline{\Omega}) = \phi_0(\underline{r}, E, \underline{\Omega}) + \phi_1(\underline{r}, E, \underline{\Omega}) + \phi_2(\underline{r}, E, \underline{\Omega}) + \dots$$

前述の積分方程式は以下のようなになる。

$$\phi_n(\underline{r}, E, \underline{\Omega}) = \int_0^\infty \exp(-\Sigma(\underline{r} - s\underline{\Omega})s) ds \int_0^\infty dE^1 \int_{4\pi} d\underline{\Omega}^1 \Sigma s(E^1 \rightarrow E, \underline{\Omega}^1 \rightarrow \underline{\Omega}) \phi_{n-1}(\underline{r} - s\underline{\Omega}, E^1, \underline{\Omega}^1) \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

ここで、 $\phi_0(\underline{r}, E, \underline{\Omega}) = S(\underline{r}, E, \underline{\Omega})$

なお、以上の微分・積分型の輸送方程式、あるいは、積分型の方程式を、厳密に解くことは難しいので、各々近似的な解法が考案されている。この近似的数値解法を方程式の形で分類すると下記のとおりである。

微分・積分型：SN 法、拡散近似法、有限要素法

積分型：直接積分型、モンテカルロ法、Invariant Imbedding 法

ここでは、今回の放射線強度分布の評価のための計算に用いた上記微分・積分型の方程式解法である S_N 法について概説する。

S_N 法は 1953 年に米国ロスアラモス国立研究所の Carlson が開発した解法で、体系を表示する座標と放射線粒子の進行方向を表す角度座標を離散化して、偏微分型のボルツマンの輸送方程式を解く方法である。この数値解法は角度座標の離散化を単位球の表面において N 個の Segment で分割することから、ディクリートオーディネイト S_N 法 (Discrete-Ordinates S_N method) または単に SN 法と呼ばれている。

ボルツマン輸送方程式は空間と速度の 6 次元位相空間内の微小体積要素中における粒子の平均状態を示すものである。即ちある微小体積要素内で、核分裂や他の要素における散乱により粒子が生成し、また他の要素への漏洩、吸収あるいは、散乱により粒子が消滅する収支結果を、その微小体積要素内で定義される粒子密度の関係式として導出されたものである。

ここでは、輸送方程式を解く手法として離散化する方法の概略を示す。簡単のため、空間座標として球形状を考慮した定常状態の輸送方程式を取り扱う。球形状に於て物質の性質は原点からの距離の函数として変化するため、定常状態の輸送方程式は、空間的には 2 つの変数のみ考慮すればよい。即ち、球の原点からの距離 r 及び原点から点 r へのベクトル方向と粒子の進行方法との成す角度の方向余弦 μ ($\mu = (1/r) \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\Omega}$) である。

この条件において、微小の位相空間要素は次のようになる。

$$\text{微小空間要素} = dV \cdot d\mu \cdot dE = 4\pi r^2 dr d\mu dE$$

ここで、ある有限な半径、角度、エネルギーにおける有限差分要素は、上式を積分することによって求めることができる。

$$\begin{aligned} \text{有限差分要素} &= V_I \cdot \Delta\mu_D \Delta E_G \\ &= \frac{4\pi}{3} (r_{i+1}^3 - r_i^3) (\mu_{d+1} - \mu_d) (E_{g+1} - E_g) \end{aligned}$$

ここで、添字 I は空間メッシュ番号、 D は角度メッシュ番号、 G はエネルギー群を示し、小文字はそれぞれの有限差分要素の境界における値を示す。

一次元球形状における定常状態のボルツマン輸送方程式は以下のように表示される。

$$\begin{aligned} &\frac{\mu}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 \phi(r, \mu, E)] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \mu} [(1 - \mu^2) \phi(r, \mu, E)] + \Sigma_t(r, E) \phi(r, \mu, E) \\ &= s(r, \mu, E) + \int_{-1}^{+1} \int_0^\infty \Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \mu \omega) \phi(r, E', \mu') dE' d\mu' \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

$\phi(r, \mu, E)$ = 半径 r における単位体積、 μ における単位角度余弦、エネルギー E における単位エネルギーに対する線束

$\Sigma_t(r, E)$ = 半径 r 、エネルギー E における巨視的全断面積

$\Sigma_s(\gamma, E' \rightarrow E, \mu_0) dE' d\mu' =$ エネルギー E' の粒子が散乱角余弦 μ_0 で散乱して、エネルギー E となる散乱断面積

$\mu_0 =$ 散乱角の余弦 $= \Omega \cdot \Omega'$

$\Omega \cdot \Omega' =$ 散乱後と散乱前の単位方向ベクトル

$S(\gamma, \mu, E) =$ 単位体積、単位角度余弦、単位エネルギーにおける線源項

(1) 式の各項に対して、以下のような積分オペレータを作用させ、有限差分要素における積分値を求める。

積分オペレーター $=$

$$\int_{\Gamma \in \Gamma} \int_{\mu \in \Delta \mu D} \int_{E \in \Delta E G} 4\pi r^2 dr d\mu dE$$

散乱の角度依存性をルジャンドル関数の展開関数で表示し、積分を平均値の定理で近似すると、(1) 式は (2) 式となる。

ここで (1) 式右辺の第 2 項の積分を以下のように近似した。

$$= \frac{V_I \Delta \mu D}{2} \sum_{G'=1}^L \sum_{n=0}^N P_n(\underline{\mu} D) \sum_{G' \rightarrow G}^{n,1} \sum_{D'=1}^M \phi_{G',I,D'} P_n(\underline{\mu} D') \Delta \mu D$$

従って (1) 式は以下となる。

$$\begin{aligned} & \underline{\mu} D (A_{i+1} \phi_{G,I,i+1,D} - A_i \phi_{G,I,i,D}) + \frac{1}{\Delta \mu D} (B_{I,d+1} \phi_{G,I,d+1} - B_{I,d} \phi_{G,I,d}) + V_I \sum_{G',I,D} \phi_{G',I,D} \\ & = V_I S_{G,I,D} + \frac{V_I}{2} \sum_{n=0}^N P_n(\underline{\mu} D) \sum_{G'=1}^L \sum_{G' \rightarrow G}^{n,1(\text{mod})} \sum_{D'=1}^M \phi_{G',I,D'} P_n(\underline{\mu} D') \Delta \mu D' \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、

$$\sum_{G'=G}^{n,1(\text{mod})} = \sum_{G' \rightarrow G}^{n,1} + (2n+1) \left(\sum_{G,1}^i - \sum_{G,1}^n \right) \omega_{G,G'}$$

$$A_i = 4\pi r_i^2$$

$$B_{I,d+1} = B_{I,d} - \underline{\mu}_D \Delta \underline{\mu}_D (A_{i+1} - A_i)$$

$$B_{I,M+1} = 0$$

$$(\mu_{d+1}^2 - \mu_d^2) = 2 \underline{\mu}_D \Delta \underline{\mu}_D$$

$$V_I = \frac{4\pi}{3} (r_{i+1}^3 - r_i^3) \quad 1G=G'$$

$$0G, G' = \{ \quad 0G \neq G' \}$$

(2) 式は一次元球形状のボルツマン輸送方程式から導いたが、実際には一般的な表式であり、 A_i および V_i を以下のように定義することによって、他の幾何形状にも適用できる。

$$A_i = 1.0$$

$$V_i = \Delta \gamma I \quad \} 1 \text{次元平板形}$$

$$A_i = 2\pi \gamma i$$

$V_i = \pi (\gamma_{i+1}^2 - \gamma_i^2)$ } 1次元円柱形状

(2)式は、各メッシュの中心点と境界点の両者における線束 ϕ を含んでおり、ここまでは解くべき未知数が多い。そのため、各メッシュの中心点と境界点における線束の値に対する適切な関係式を与える必要がある。この関係式として、ダイヤモンド差分法と呼ばれる有名な関係式がある。

$$\phi_{G.I.D} = A \phi_{G.i+1.D} + (1-A) \phi_{G.i.d} \quad (\text{for } \mu > 0)$$

$$\phi_{G.I.D} = (1-A) \phi_{G.i+1.D} + A \phi_{G.i.d} \quad (\text{for } \mu < 0)$$

$$\phi_{G.I.D} = B \phi_{G.i+1.D} + (1-B) \phi_{G.i.d}$$

ここで、A および B は定数であり、1/2 から 1 の範囲で任意に設定できる。図 4.24 にこの条件を用いた空間メッシュと角度メッシュの関係を示す。これが一般的なダイヤモンド差分方程式であり、この関係を用いると以下のように書き直すことができる。

$$\phi_{G.i+1.D} = 2 \phi_{G.I.D} - \phi_{G.i.d} \quad (\text{for } \mu > 0)$$

$$\phi_{G.I.D} = 2 \phi_{G.I.D} - \phi_{G.i+1.D} \quad (\text{for } \mu < 0)$$

$$\phi_{G.I.d+1} = 2 \phi_{G.I.D} - \phi_{G.i.d}$$

この方程式は現在の Sn 法による計算コードの最も基本的なものとなっている。これを各々の空間および角度メッシュについて解くためには、 $\mu > 0$ の場合と $\mu < 0$ の場合に分けて、(2)式に代入すると、 $\mu > 0$ の場合、中心点の線束 $\phi_{G.I.D}$ は以下に示すように直接求めることができる。

$$\phi_{G.I.D} = [\mu D (A_{i+1} + A_i) \phi_{G.I.D} + (1/\Delta \mu D) (B_{I,d+1} + B_{I,D}) \phi_{G.I.d+1} + V_i S'_{G.I.D}] \times [\mu D (2A_{i+1}) + (2B_{I,d+1}/\Delta \mu D) + V_i S \Sigma'_{G.I}]^{-1} \quad (3)$$

ここで、線源項 $S'_{G.I.D}$ は固定線源 (inscattering source) を含んでいる。

次に、得られた $\phi_{G.I.D}$ を用いて、境界点の $\phi_{G.i+1.D}$ と $\phi_{G.I.d+1}$ を求め、これらを(3)式に代入して、隣接する空間メッシュ中心点の $\phi_{G.i+1.D}$ を求める。この操作を繰り返すことにより、全ての線束を求めることができる。なお、体系の境界における値は、与えられた境界条件より決定される。また、最初の角度分点に対する初期値の $\phi_{G.I.M}$ は $\mu = -1$ においてのみ、 $B_{I,D}$ を変形して得るか、もしくは $B_{I,M+1} = 0$ とすることにより与える。

SN 法では通常エネルギーは多群として取扱い、角度をパラメータに持つ関数はルジャンドル展開し表現する。この為 SN 法での計算量は空間メッシュ点数、角度分点数、エネルギー群数、ルジャンドル展開項数の全てに依存し大きなものとなる。従って効率よく SN 計算を行うためにはパラメータの設定を含めた計算モデルを、目的に応じて適宜作成する必要がある。以下に参考となる情報を掲げる。

(1)空間メッシュと差分近似

空間メッシュ数は次元数の累積に比例するので、なるべく低次元モデルにし、対称性等を利用して総数を減らす。計算資源が足りないときには形状を分割しブーストラップ計算モデルとして実行する。メッシュ幅の制約は差分近似式に依存して多少異なる。差分近似式は、(a)ダイヤモンド、(b)重み付き、及び(c)ステップ、があり近似の精度はメッシュ幅が十分小さい場合には(a)が最もよく順に悪くなる。一方メッシュ幅の大きさによって負の角度

線束を算出する可能性は(a)が一番高く(c)は負になりえない。計算精度を保つためにはメッシュ幅 Δr は平均自由行程 $\{1/\sigma t\}$ の2倍を越えないこと、また隣合うメッシュ幅が2倍を越えないことが目安になる。

(2) 角度分点とルジャンドル展開

SNコードで散乱断面積を零とした計算結果と解析解との比較によって非散乱線束の精度が検証でき、深い透過に対して誤差が大きいことが知られている。特にダクト・ストリーミング問題など非散乱線が支配的になるような場合では、幾何学的な誤差が加算されないようにダクトを直視できる角度を考慮して該当角度近辺の分点が細くなるよう調整する。また、ストリーミング体系でなくとも、二次元以上の比較的大きな体系ではray effectと呼ばれる線束の空間脈動が線源から遠い場所で生じる。これらの問題点を解決するためには、SNの次数を多くすると共に、特定の方向に対して角度分点を多く採った、バイアスされたSN分点セットが良く採用されている。また、ray effectを防止するために、初期衝突線源(first collision source)を用いる場合もある。これは、レイエフェクト解消法の1つの手段として有効であり、二次元SNコードTWOTRANや、DOT或はDORTでは同ルーチンが内蔵されている。

低次のルジャンドル展開近似では局所的にピークとなる角度分布関数は過大、過小を繰り返す波状表現となり負の関数値を算出することもある。微分散乱断面積の角度分布関数が該当するような物質の場合、ルジャンドル展開項数はできるだけ大きめにとる必要がある。また、角度束をルジャンドル展開で近似したSN計算ではレイエフェクトのもう一つの原因にもなる。このため球面展開法表現の補正項として疑似線源項を付加し、レイエフェクトの解消を図ったものとして例えば、二次元SNコードTWOTRANや三次元SNコードENSEMBLEがある。

更に、ルジャンドル展開近似による微分散乱断面積が負になる問題为了避免するため、微分散乱断面積の値を計算に必要なSN分点毎に直接与えるものとしてRADHEAT-V4システムのDIAC(一次元)やESPRIT(二次元)NITRANがある。これらのコードは、線源の非等方性が強い場合にも精度良く計算できる。ANISONやDOTコードに比べて難点は、断面積及び角度束のデータ容量が増大すること、計算時間も長大化することである。

表4.8に現在日本国内で良く用いられている公開されたSN輸送計算コードの一覧を示す。

離散座標(Discrete Ordinates)SN法のANISNコードは、米国オークリッジ国立研究所(ORNL)のW.A.Engle Jr.がDFTコードの開発経験を生かして作成し、1967年に発表した多群一次元輸送計算コードである。SN法は特に中性子遮蔽計算を目的とした手法ではないがANISNコードは当初から遮蔽計算を念頭において開発、更に改良がなされており、我が国でも1970年頃から中性子の透過、減衰計算に使用されて来ている。ガンマ線と異なり、中性子の透過計算では簡易計算に限界があるため、ANISNコードは中性子の遮蔽計算に最も多く使用されているコードということが出来、米国や我が国のみならず全世界で膨大な使用実

績を持っている。

ANISN コードは、平板、円柱、または球状の一次元体系の放射線束分布を計算する。

計算に必要なデータとしては、

- (1) 群定数 (核定数)
- (2) 角度分点
- (3) 線源分布
- (4) 体系データ
- (5) 計算条件 (繰り返し計算の収束判定条件など)

がある。ここで入力データ作成の際、ANISN コードの開発当時のフォートラン言語では、制約が強かったため、フィールドを限定せず、繰り返し入力、等差数値などを簡略化してデータ作成ができる FIDO Format 用のサブルーチンが内蔵されており、現在でも有用な入力形式と言える。

(1) 核定数は、ルジャンドル関数展開された多群群定数を使用する。SN 法計算は、放射線粒子の種別とは無関係に計算できるようになっているので、中性子だけでなくガンマ線についても適用可能であり、群定数を準備すればガンマ線の分布のほか、中性子とガンマ線の結合した計算も可能である。中性子-ガンマ線の結合計算の場合には、 (n, γ) 反応などで発生する、二次ガンマ線分布が、中性子束分布と共に得られる。

群定数のファイル形式は"material-wise"または"group-independent"の2種があり、データの読み込みが異なるので、使用の際注意が必要である。

"material-wise"形式のファイルは、各領域の群定数を領域毎に並べたファイルで、一方、"group-independent"形式のファイルとは、群定数をエネルギー群毎に並べたものである。

"material-wise"形式のファイルは断面積ファイルとしての観点からは、考えやすく取り扱いに便利な形式であり、領域毎の断面積データの追加や編集が簡単に行える。しかしながら、計算の流れは、エネルギーの第一群から領域全体を対象に計算が始まり、第一群の計算が収束の条件で終了し、第二群の計算に移る、これをエネルギー群数すべてに渡り計算するよにコード化されている為、"group-independent"形式のファイルの方が便利である。輸送計算に使用する断面積データは、散乱マトリックスを含み、特にエネルギー群数が大きくなると膨大な容量となり、計算機の記憶領域の大きさが問題となる。"group-independent"形式の場合、補助記憶に格納しておき、当面必要なエネルギー群のデータだけをメインメモリに格納することによってメモリの節約が可能で補助記憶とのアクセス回数も少なくてすむ。

"material-wise"形式から"group-independent"形式への変換は、補助的コード'TAPEMAKER'または'ZIP'を利用することで可能である。但し、'TAPEMAKER'コードも単なるデータの並べ換えではあるが、予想以上の計算時間を必要とするため、メインメモリに格納できるデータ量から、エネルギー群数と領域とを考慮して"material-wise"形式か"group-independent"形式かの選択を決定する。

ANISN コードでは、二次元 SN コード DOT、或いはモンテカルロ法コード MORSE

等の遮蔽計算コードと共通に利用できる群定数データファイルが準備されている。これらのファイルで角度依存のデータはルジャンドル関数近似で与えられているが、ORNL で作成されたファイルと DTF、TWOTRAN などの SN コードを開発した米国の LANL (Los Alamos National Laboratory) で利用するファイルではファクターで $(2L+1)/2$ だけ異なっている。但し L はルジャンドル関数の展開次数である。SN コードにより計算する場合、計算コードと群定数データファイルとの整合性を十分配慮して使用する必要がある。

(2) 角度分点は、SN コードに固有な入力であり、中性子の移動する方向を示すパラメータと数値積分のための重みのセットである。通常、6 或は 8 分点 (S-6 或いは S-8 と呼ばれる) などを使用し、マニュアルに記載された数値を其のまま使用できる。

(3) 線源は、指定した領域の空間メッシュで発生する各エネルギー群の中性子個数 (中性子の場合)、又は、指定した単一メッシュにおける各エネルギー群の角度束として与えられる。後者は通常 "shell source" と呼ばれており、空間メッシュ幅を小さくとって (例えば 1mm)、境界角度束入力として使用することが多い。

(4) 体系データとは、空間メッシュ分割のデータであり、座標と共に領域番号の指定を通じて、各メッシュ点での媒質が指定される。

(5) 計算条件としては、差分式の種類、収束条件、境界条件等を指定する必要がある。

差分式には、大別すると "step-difference"、"linear-difference"、"weighted-difference" の 3 種類があり、前 2 種を組み合わせる計算する場合もある。一般的に "step-difference" は負の線束算出を防止するための便法で精度が悪く、"linear-difference" はメッシュ幅が制約条件以内だったら、精度が一番良いが、メッシュ幅を大きくすると負の線束となる可能性があり、計算の収束が不安定である。"weighted-difference" は両者の中間に位置するもので、負の線束が出ないようにメッシュ幅の制約条件を緩和した分、精度を犠牲にするものである。

ANISN コードは、外部線源からの減速透過計算だけではなく、臨界計算も可能である。但し、どちらかと言えば臨界計算は不得手であり、収束の安定性に問題があったり、版によっては正常に計算出来ない例もある。

DOT コードは、主として中性子遮蔽計算を念頭においた二次元版の SN コードであり、ANISN 同様、米国の ORNL で F.R. Mynatt 等によって開発された。DOT と ANISN は同じ研究機関で開発されたことから、入力方法 (FDO format) や群定数ライブラリーは共通であり、一連のコードとして使用することができる。また手法が同じこともあって、両コード共通に言えることが多いが以下では特に DOT コードに対して注意すべき点を強調して述べる。

DOT コードは開発当初から改訂が念頭におかれ、現在 DOT4 コードや最新版 DORT 等のシリーズも公開されているが、ここでは、我が国で最も使用経験の豊富な DOT3.5 について概説する。筆者が使用経験があり、利用しているのはアセンブラーで書かれたサブルーチンを含む IBM 版であるが、遮蔽計算に対しては、非常に安定したコードであり、国産の汎用機 FACOM で使用しても全く問題

なかった。

DOT コードは二次元矩形 X-Y、円柱 R-Z、円柱 R- Θ 座標体系の放射線分布を計算する。計算には次のデータ入力が必要である。

- (1) 群定数 (核定数)
- (2) 角度分点
- (3) 線源分布
- (4) 体系データ
- (5) 計算条件

(1) 計算に使用する核定数は、ANISN コードと共通のルジャンドル展開された多群定数で、中性子とガンマ線を結合した計算も可能である。群定数はカード入力或いは、外部ファイルから "material-wise" 形式か "group-independent" 形式で入力される。

(2) 角度分点は中性子の移動する方向を示すパラメータである。通常の遮蔽物内の中性子分布計算では S-30 (一次元の S-6 に相当する)、または S-48 (同 S-8 相当) の分点を使用される。DOT コードで必要な角度分点を準備するための補助コードとして DOQ コードがある。

DOT コードでは、中性子の流れが非対称性として取り扱えるので、通常の遮蔽物質内の中性子透過問題の他に、ボイド領域内におけるストリーミングの計算が可能となる。ストリーミングを評価するためには、中性子が流れる方向での角度束を効率よく計算するために、この方向に多くの分点をとった、所謂バイアスされた角度分点を用いる。バイアスされた角度分点は、DOQ コードで得られた分点と、補助コード ADOQ を用いて計算して求められる。

(3) DOT3.5 コードの線源は、下記の 3 種類の形式で入力可能である。

- a) 体積分布線源
- b) 境界線源
- c) 初回衝突線源 ("first collision source")

a) 体積分布線源では、核空間メッシュにおける中性子発生数を与える。そして各メッシュ各エネルギー群毎に発生個数を与える方法と、空間分布とエネルギースペクトルを分離して与える方法とがある。後者は、例えば原子炉の炉心で、空間分布としては出力密度分布を使用し、エネルギー分布としては核分裂スペクトルを使用する事によって入力できる。

b) 境界線源は、内部又は外側の境界に於て線源の一次元分布を与えるものである。内部境界は全部の角度分点に渡り角度束に対応するエネルギー依存の一次元空間分布を与え、外側境界では、計算領域に向かう内向きの角度分布についてのみ角度束を与える。なお、DORT コードでは、複数の境界における線源分布の指定が可能であるが、DOT3.5 コードでは、一個の境界に限定される。

c) 初回衝突線源では、円柱座標系の Z 軸上の一点で線源のエネルギー分布を与え、そこから計算領域内の初回衝突による線源分布が計算される。SN 法では、座標軸と平行な角度分点を採用することが出来ないため、解析的に一回散乱を計算し、SN 法の計算につなぐ事により計算精度を上げる方法で、ビーム上の線源を用いた遮蔽実験の解析などで有用性が実証されている。

4.4 中性束分布の計算

DCA の放射化放射能を求めるために、炉室内における炉構造物や生体遮蔽物中の中性子束分布を求めた。さらに、炉心タンク内の中性子束分布も求めた。以下に、それら計算で用いた計算条件を示す。

4.4.1 炉室内中性子束分布

4.4.1.1 前提条件

計算条件

使用コード : 2次元 Sn コード (DOT3.5)
 群定数ライブラリ : ANISN-JR で作成した 22 群のマクロ断面積を使用
 解析モデル : 円筒体系 (Sn 分点 : 48)
 : R 方向メッシュ数 — 255 メッシュ
 : Z 軸メッシュ数 — 474 メッシュ
 中性子スペクトル : U235 の核分裂スペクトル
 境界条件 : 炉心中心 — 反射条件
 : 炉室境界右側 — 真空 (反射なし) 条件
 : 炉室境界上側 — 真空 (反射なし) 条件
 : 炉室境界下側 — 真空 (反射なし) 条件

その他の条件

- ・ 線源強度は、ANISN-JR で求めた同じ値 ($7.88 \times 10^{13} \text{n/sec}$) を使用した。
- ・ 炉心内の出力分布は、系方向及び軸方向とも一様とした。
- ・ 炉室内にある階段やクレーンなどの構造物については、放射能インベントリが小さいと思われるので無視した。
- ・ メッシュ幅は、重水が含まれる領域で 0.1~2.23cm、コンクリートが含まれる領域で最大メッシュ幅が 3.0cm、空気が含まれる領域で最大メッシュ幅が 10cm とした。

4.4.1.2 計算体系

作成した計算モデルを図 4.25 に示す。

4.4.1.3 結果と評価

計算結果を図 4.26~図 4.32 に示す。

図 4.26 から図 4.28 までは、中性子エネルギーの高速、中速、熱領域のそれぞれの中性子束分布を示している。図 4.29 は、これら 3 領域の値の合計を示した。

図 4.30 から図 4.32 までは上記 2 次元分布図の主要な領域部を半径方向に平面図示したものである。図 4.26 から図 4.28 の炉心内の結果は、前節で考察した 1 次元の ANISN の結果と傾向は良く一致している。即ち中間エネルギー領域の中性子束が一番多く、次いで熱中性子束、速中性子束となる。炉心内の総中性子束は、図 4.29 から炉心タンク表面で約 $10^8 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ となり、第 2 章で記述したように放射線管理用の炉室内のエリアモニターの値から類推した値とほぼ一致している。さらなる炉心内の詳細な計算結果としては次節に述べる。

また、天井方向への中性子束の広がり大きく、特に中間エネルギー領域の中性子束の広がり大きく天井で約 $10^3 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ となる。また、炉室 1 階の天井近辺での中性子束、特に中間エネルギー領域および熱中性子領域の中性子束の横方向の広がり大きい。これは、燃料有効長の 1/2 近傍で軸方向の中性子束はピークになっているため、この中性子束が横方向にもれている形となっている。

この中性子束は、約 $10^6 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ となっており、炉室 1 階の天井付近の放射化を検討する必要があると思われる。このためには、天井をコンクリートボーリングで試料分析をする必要がある。

一方生体遮蔽体である炉室扉内側付近では、図 4.29 からわかるように総中性子束は、 $10^3 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 程度あり、特に速中性子束が多くあることがわかる（図 4.26 参照）。また、炉心下部方向では、下部グリッド板下に B_4C を含んだプレートがあるため図 4.28 からわかるように熱中性子はかなり吸収されているが、中間エネルギー領域の中性子束は炉室地下 1 階の床面まで多く広がっていることがわかる。このため床表面で総中性子束は約 $10^4 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 程度となっており、この床の放射化も検討する必要があると思われる。

図 4.30 から図 4.32 までの結果は、上記 2 次元の結果を平面的に径方向にプロットしたものであるため上記 2 次元の結果と当然のことながら対応している。しかし詳細にこれらの結果をみると図 4.30 と図 4.32 から明らかなように値は非常に小さいが炉室内壁の外側、即ち燃料取扱室 2 階の空間で中性子束のピークが生じている分布形となっている。この原因を検討する。上述したように今回の計算結果は 2 次元の計算結果であるため、図 4.26 から図 4.29 の結果を検討すればよい。これらの図から生体遮蔽体領域で全中性子束が遮蔽されると、その外側では、当然中性子束がなくなるはずである。また遮蔽能力が小さくなると中性子束は外側に一様にもれるはずである。しかし遮蔽扉近傍の中性子束分布を詳細に観察してみると、遮蔽扉とコンクリートの境界部で中性子束が外側にもれている傾向を示している。即ちこの境界部で若干の隙間が生じている可能性がある。このため中性子束のピークが生じていると思われる。しかし値としては、生体遮蔽体や壁の遮蔽効果があり非常に小さい。

4.4.2 炉心内中性子束分布

4.4.2.1 前提条件

計算条件

- 使用コード : 2次元 Sn コード(DOT3.5)
- 群定数ライブラリ : ANISN-JR で作成した 22 群のマクロ断面積を使用
- 解析モデル : 円筒体系 (Sn 分点: 48)
 - : R 方向メッシュ数 — 65 メッシュ
 - : Z 軸メッシュ数 — 154 メッシュ
- 中性子スペクトル : U235 の核分裂スペクトル
- 境界条件 : 炉心中心 — 反射条件
 - : 炉心タンク境界右側 — 真空 (反射なし) 条件
 - : 炉心タンク境界上側 — 真空 (反射なし) 条件
 - : 炉心タンク境界下側 — 真空 (反射なし) 条件

その他の条件

- ・ 線源強度は、ANISN-JR で求めた同じ値 ($7.88 \times 10^{13} \text{n/sec}$) を使用した。
- ・ 炉心内の出力分布は、径方向及び軸方向とも一様とした。

4.4.2.2 計算体系

作成した計算モデルを図 4.33 に示す。

4.4.2.3 結果と評価

計算結果を図 4.34～図 4.37 に示す。

この計算は、図 4.33 の 2 次元計算モデル図からわかるように、前節の炉室内中性子束分布の 2 次元計算モデルを炉心のみに適用したモデルとなっている。従って炉心内のメッシュ分割は同一となっているが、当然のことながら炉心タンク境界の境界条件は、4.4.2.1 節の前提条件で述べたように真空条件となっている。

図 4.34 から図 4.37 の結果は、炉心内中性子束分布の結果のところで検討した傾向と当然ながら同じ傾向を示している。しかし今回の計算結果は、炉心内をより詳細に描写されているため中性子束分布の挙動がより鮮明になっている。

図 4.34 は速中性子束分布を表示しているが、これは中性子源分布と同等である。即ち、今回採用した径方向、軸方向一様とした出力分布の均質モデルのため R と Z 方向ともに一様分布となっている。

しかし、図 4.35 での中間エネルギー領域では、炉心内の速中性子の減速に

より中性子束は増加している。約 45° 方向では、分布は半欠けの形になっているが、これはこの領域では、速中性子束分布からもわかるように速中性子束のもれが大きいいため中間エネルギー領域の中性子束が炉心中央領域に比べ少なくなっている。これは 45° 位置から真空境界を見込む領域が広いことからうなずける。

一方、図 4.36 の熱中性子束分布は径方向、軸方向ともにほぼ一様なきれいな形になっている。但し径方向の端近傍では、重水反射体の領域のためやや盛りあがった形になっている。また炉心下部領域では、既述したように B_4C の吸収板があるため熱中性子の吸収が大きく熱中性束としてはかなり低い値となっている。従って図 4.37 の全中性束は、ほぼ速中性子束と中間エネルギー領域の中性束により決定されている。同図の結果から炉心タンク外側表面の全中性子束は、 $10^8 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ のオーダーで第 2 章に記述したエリアモニターの測定値から類推した値とほぼ同じで今回の計算結果は、妥当であることを示している。

表4.1 追加作成されたライブラリの収容核種一覧

No	元素	核種ID	No	元素	核種ID
1	H-1	119	21	V	2319
2	H-2	129	22	Cr	2409
3	Li-6	369	23	Mn	2559
4	Li-7	379	24	Fe	2609
5	Be	498	25	Ni	2809
6	B-10	508	26	Cu	2909
7	B-11	518	27	Zr	4009
8	C	629	28	Nb	4139
9	N	749	29	Mo	4209
10	O	869	30	Cd	4809
11	F	999	31	Eu	6309
12	Na	1139	32	Hf	7209
13	Mg	1209	33	Ta	7319
14	Al	1379	34	W	7409
15	Si	1409	35	Pb	8209
16	P	1519	36	Bi	8399
17	S	1609	37	U-235	9259
18	K	1909	38	U-238	9289
19	Ca	2009	39	Pu-239	9499
20	Ti	2209			

表4.2 TABLE OF NEUTRON ENERGY GROUP STRUCTURE (1/3)

TABLE OF NEUTRON ENERGY GROUP STRUCTURE

GROUP	UP-ENERGY	LETHAGY	DELTA-U	GROUP	UP-ENERGY	LETHAGY	DELTA-U	GROUP	UP-ENERGY	LETHAGY	DELTA-U
1	1.96403E+07	-3.38527E-01	1.25001E-01	41	1.08120E+07	2.58400E-01	1.55757E-02	81	4.06570E+06	1.23647E+00	1.62916E-02
2	1.73325E+07	-2.13526E-01	2.49969E-02	42	1.06449E+07	2.73976E-01	1.24969E-02	82	4.00000E+06	1.25276E+00	2.12109E-02
3	1.69046E+07	-1.88529E-01	2.50020E-02	43	1.05127E+07	2.86473E-01	3.11538E-03	83	3.91605E+06	1.27397E+00	6.24996E-02
4	1.64872E+07	-1.63527E-01	1.56613E-02	44	1.04800E+07	2.89588E-01	1.56757E-02	84	3.67879E+06	1.33647E+00	6.25010E-02
5	1.62310E+07	-1.47866E-01	1.55851E-02	45	1.03170E+07	3.05264E-01	1.56299E-02	85	3.45590E+06	1.39897E+00	3.74981E-02
6	1.59800E+07	-1.32281E-01	1.56411E-02	46	1.01570E+07	3.20894E-01	1.55780E-02	86	3.32871E+06	1.43647E+00	2.50012E-02
7	1.57320E+07	-1.16640E-01	3.11316E-03	47	1.00000E+07	3.36472E-01	5.00005E-02	87	3.24652E+06	1.46147E+00	2.49979E-02
8	1.56831E+07	-1.13526E-01	1.24989E-02	48	9.51229E+06	3.86472E-01	1.24996E-02	88	3.16637E+06	1.48647E+00	3.75033E-02
9	1.54883E+07	-1.01028E-01	1.56366E-02	49	9.39413E+06	3.98972E-01	8.56643E-03	89	3.04982E+06	1.52397E+00	1.24982E-02
10	1.52480E+07	-8.53910E-02	1.55985E-02	50	9.31400E+06	4.07538E-01	2.89340E-02	90	3.01194E+06	1.53647E+00	4.99986E-02
11	1.50120E+07	-6.97926E-02	6.26124E-03	51	9.04837E+06	4.36472E-01	2.49995E-02	91	2.86505E+06	1.58647E+00	5.00000E-02
12	1.49183E+07	-6.35314E-02	9.38141E-03	52	8.82497E+06	4.61471E-01	2.50001E-02	92	2.72532E+06	1.63647E+00	1.25021E-02
13	1.47790E+07	-5.41499E-02	1.56231E-02	53	8.60708E+06	4.86472E-01	3.75002E-02	93	2.69146E+06	1.64897E+00	3.74997E-02
14	1.45499E+07	-3.85268E-02	1.56477E-02	54	8.29029E+06	5.23972E-01	3.53932E-03	94	2.59240E+06	1.68647E+00	2.50014E-02
15	1.43240E+07	-2.28792E-02	9.34964E-03	55	8.26100E+06	5.27511E-01	8.96028E-03	95	2.52839E+06	1.71147E+00	1.12920E-02
16	1.41907E+07	-1.35295E-02	6.27024E-03	56	8.18731E+06	5.36472E-01	5.00000E-02	96	2.50000E+06	1.72277E+00	1.37055E-02
17	1.41020E+07	-7.25931E-03	1.56516E-02	57	7.78801E+06	5.86472E-01	5.00006E-02	97	2.46597E+06	1.73647E+00	3.32981E-02
18	1.38830E+07	8.39136E-03	3.08046E-03	58	7.40818E+06	6.36472E-01	1.25006E-02	98	2.38521E+06	1.76977E+00	4.20554E-03
19	1.38403E+07	1.14724E-02	8.73002E-03	59	7.31615E+06	6.48973E-01	3.74993E-02	99	2.37520E+06	1.77398E+00	4.19793E-03
20	1.37200E+07	2.02022E-02	3.76802E-03	60	7.04688E+06	6.86472E-01	2.50003E-02	100	2.36525E+06	1.77817E+00	8.29991E-03
21	1.36684E+07	2.39700E-02	1.25007E-02	61	6.87289E+06	7.11472E-01	2.49997E-02	101	2.34570E+06	1.78647E+00	1.66966E-02
22	1.34986E+07	3.64705E-02	3.16088E-03	62	6.70320E+06	7.36472E-01	1.66706E-02	102	2.30686E+06	1.80317E+00	3.33029E-02
23	1.34560E+07	3.96314E-02	1.55785E-02	63	6.59238E+06	7.53143E-01	1.41123E-02	103	2.23130E+06	1.83647E+00	4.99992E-02
24	1.32480E+07	5.52102E-02	1.56717E-02	64	6.50000E+06	7.67255E-01	6.71791E-03	104	2.12248E+06	1.88647E+00	1.25020E-02
25	1.30420E+07	7.08823E-02	1.56096E-02	65	6.45648E+06	7.73973E-01	1.24995E-02	105	2.09611E+06	1.89897E+00	3.74958E-02
26	1.28400E+07	8.64919E-02	1.56198E-02	66	6.37628E+06	7.86472E-01	4.99992E-02	106	2.01897E+06	1.93647E+00	2.50109E-02
27	1.26410E+07	1.02111E-01	9.36258E-03	67	6.06531E+06	8.36472E-01	5.00003E-02	107	1.96910E+06	1.96148E+00	2.49910E-02
28	1.25232E+07	1.11474E-01	6.26400E-03	68	5.76950E+06	8.86472E-01	1.25018E-02	108	1.92050E+06	1.98647E+00	2.61125E-02
29	1.24450E+07	1.17738E-01	1.56298E-02	69	5.69782E+06	8.98974E-01	3.74979E-02	109	1.87100E+06	2.01258E+00	1.13902E-02
30	1.22520E+07	1.33367E-01	3.10641E-03	70	5.48812E+06	9.36471E-01	2.50015E-02	110	1.84981E+06	2.02397E+00	1.24952E-02
31	1.22140E+07	1.36474E-01	1.24980E-02	71	5.35261E+06	9.61473E-01	2.49988E-02	111	1.82684E+06	2.03647E+00	5.00023E-02
32	1.20623E+07	1.48972E-01	1.56495E-02	72	5.22046E+06	9.86471E-01	2.35411E-02	112	1.73774E+06	2.08647E+00	4.99997E-02
33	1.18750E+07	1.64621E-01	1.56161E-02	73	5.09900E+06	1.01001E+00	1.39605E-02	113	1.65299E+06	2.13647E+00	1.25039E-02
34	1.16910E+07	1.80238E-01	6.23791E-03	74	5.02831E+06	1.02397E+00	1.24995E-02	114	1.63245E+06	2.14898E+00	3.74979E-02
35	1.16183E+07	1.86476E-01	9.36523E-03	75	4.96585E+06	1.03647E+00	4.99985E-02	115	1.57237E+06	2.18647E+00	2.50053E-02
36	1.15100E+07	1.95841E-01	1.56298E-02	76	4.72367E+06	1.08647E+00	4.49594E-02	116	1.53354E+06	2.21148E+00	2.49912E-02
37	1.13315E+07	2.11471E-01	1.56090E-02	77	4.51600E+06	1.13143E+00	5.04153E-03	117	1.49569E+06	2.23647E+00	3.75072E-02
38	1.11560E+07	2.27079E-01	9.39326E-03	78	4.49329E+06	1.13647E+00	1.25008E-02	118	1.44063E+06	2.27398E+00	1.24960E-02
39	1.10517E+07	2.36473E-01	6.23569E-03	79	4.43747E+06	1.14897E+00	6.24994E-02	119	1.42274E+06	2.28647E+00	1.61124E-02
40	1.09830E+07	2.42708E-01	1.56920E-02	80	4.16862E+06	1.21147E+00	2.49991E-02	120	1.40000E+06	2.30258E+00	3.38892E-02

表4.2 TABLE OF NEUTRON ENERGY GROUP STRUCTURE (2/3)

GROUP	UP-ENERGY	LETHAGY	DELTA-U	GROUP	UP-ENERGY	LETHAGY	DELTA-U	GROUP	UP-ENERGY	LETHAGY	DELTA-U
121	1.35335E+06	2.33647E+00	4.99972E-02	161	2.98491E+05	3.84807E+00	4.29748E-03	201	4.65000E+04	5.70736E+00	4.11168E-03
122	1.28735E+06	2.38647E+00	1.25065E-02	162	2.97211E+05	3.85237E+00	9.10222E-03	202	4.63092E+04	5.71147E+00	1.25001E-01
123	1.27135E+06	2.39898E+00	3.74978E-02	163	2.94518E+05	3.86147E+00	2.49977E-02	203	4.08677E+04	5.83647E+00	1.25012E-01
124	1.22456E+06	2.43648E+00	2.50046E-02	164	2.87247E+05	3.88647E+00	1.48956E-02	204	3.60652E+04	5.96148E+00	4.99878E-02
125	1.19432E+06	2.46148E+00	2.49933E-02	165	2.83000E+05	3.90137E+00	3.51074E-02	205	3.43067E+04	6.01147E+00	7.50005E-02
126	1.16484E+06	2.48647E+00	3.75066E-02	166	2.73237E+05	3.93647E+00	2.50104E-02	206	3.18278E+04	6.08647E+00	1.10397E-01
127	1.12196E+06	2.52398E+00	1.24935E-02	167	2.66488E+05	3.96148E+00	7.49900E-02	207	2.85011E+04	6.19687E+00	1.46145E-02
128	1.10803E+06	2.53647E+00	4.62034E-02	168	2.47235E+05	4.03647E+00	5.00009E-02	208	2.80876E+04	6.21148E+00	3.94876E-02
129	1.05800E+06	2.58268E+00	3.80691E-03	169	2.35177E+05	4.08647E+00	4.99968E-02	209	2.70001E+04	6.25097E+00	3.55005E-02
130	1.05398E+06	2.58648E+00	4.99869E-02	170	2.23708E+05	4.13647E+00	5.00030E-02	210	2.60584E+04	6.28647E+00	5.00007E-02
131	1.00259E+06	2.63647E+00	4.17018E-02	171	2.12797E+05	4.18647E+00	2.50098E-02	211	2.47875E+04	6.33647E+00	2.49998E-02
132	9.61640E+05	2.67817E+00	3.33083E-02	172	2.07541E+05	4.21148E+00	2.49891E-02	212	2.41755E+04	6.36147E+00	2.50002E-02
133	9.30137E+05	2.71148E+00	2.49910E-02	173	2.02419E+05	4.23647E+00	1.20225E-02	213	2.35786E+04	6.38647E+00	7.49998E-02
134	9.07180E+05	2.73647E+00	5.00004E-02	174	2.00000E+05	4.24850E+00	3.79771E-02	214	2.18749E+04	6.46147E+00	1.72869E-02
135	8.62936E+05	2.78647E+00	5.00002E-02	175	1.92547E+05	4.28647E+00	5.00020E-02	215	2.15000E+04	6.47876E+00	1.07715E-01
136	8.20850E+05	2.83647E+00	2.57287E-02	176	1.83156E+05	4.33647E+00	4.99965E-02	216	1.93045E+04	6.58647E+00	1.25010E-01
137	8.00000E+05	2.86220E+00	2.42709E-02	177	1.74224E+05	4.38647E+00	5.00000E-02	217	1.70360E+04	6.71148E+00	1.24988E-01
138	7.80817E+05	2.88647E+00	5.00002E-02	178	1.65727E+05	4.43647E+00	2.50136E-02	218	1.50344E+04	6.83647E+00	2.50000E-01
139	7.42736E+05	2.93647E+00	2.50094E-02	179	1.61633E+05	4.46148E+00	2.49891E-02	219	1.17088E+04	7.08647E+00	9.99962E-02
140	7.24391E+05	2.96148E+00	2.49911E-02	180	1.57644E+05	4.48647E+00	4.99975E-02	220	1.05946E+04	7.18647E+00	5.77595E-02
141	7.06512E+05	2.98647E+00	5.00000E-02	181	1.49956E+05	4.53647E+00	5.00040E-02	221	1.00000E+04	7.24423E+00	9.22447E-02
142	6.72055E+05	3.03647E+00	4.99992E-02	182	1.42642E+05	4.58647E+00	1.15782E-02	222	9.11882E+03	7.33647E+00	2.50001E-01
143	6.39279E+05	3.08647E+00	5.00000E-02	183	1.41000E+05	4.59805E+00	3.84165E-02	223	7.10174E+03	7.58647E+00	2.50000E-01
144	6.08101E+05	3.13647E+00	4.99993E-02	184	1.35686E+05	4.63647E+00	5.00040E-02	224	5.53084E+03	7.83647E+00	1.73473E-01
145	5.78444E+05	3.18647E+00	2.17477E-02	185	1.29068E+05	4.68647E+00	2.50103E-02	225	4.65000E+03	8.00994E+00	7.65277E-02
146	5.66000E+05	3.20822E+00	3.26331E-03	186	1.25880E+05	4.71148E+00	2.49920E-02	226	4.30742E+03	8.08647E+00	1.49998E-01
147	5.64156E+05	3.21148E+00	2.49908E-02	187	1.22773E+05	4.73648E+00	4.99940E-02	227	3.70744E+03	8.23647E+00	5.21363E-02
148	5.50232E+05	3.23647E+00	4.99998E-02	188	1.16786E+05	4.78647E+00	5.00025E-02	228	3.51910E+03	8.28861E+00	4.78639E-02
149	5.23397E+05	3.28647E+00	4.57322E-02	189	1.11090E+05	4.83647E+00	1.05171E-01	229	3.35463E+03	8.33647E+00	1.00002E-01
150	5.00000E+05	3.33220E+00	4.26713E-03	190	1.00000E+05	4.94164E+00	1.98291E-02	230	3.03539E+03	8.43647E+00	9.99979E-02
151	4.97871E+05	3.33647E+00	1.00001E-01	191	9.80366E+04	4.96147E+00	1.25002E-01	231	2.74654E+03	8.53647E+00	4.99999E-02
152	4.50492E+05	3.43647E+00	2.50098E-02	192	8.65169E+04	5.08647E+00	4.75003E-02	232	2.61259E+03	8.58647E+00	5.00011E-02
153	4.39365E+05	3.46148E+00	7.49903E-02	193	8.25034E+04	5.13397E+00	3.70987E-02	233	2.48517E+03	8.63647E+00	1.00002E-01
154	4.07622E+05	3.53647E+00	1.88758E-02	194	7.94987E+04	5.17107E+00	4.04109E-02	234	2.24867E+03	8.73647E+00	4.10863E-03
155	4.00000E+05	3.55535E+00	3.11244E-02	195	7.63501E+04	5.21148E+00	5.86896E-02	235	2.23945E+03	8.74058E+00	4.07625E-02
156	3.87742E+05	3.58647E+00	4.99990E-02	196	7.19981E+04	5.27017E+00	6.63011E-02	236	2.15000E+03	8.78134E+00	5.51293E-02
157	3.68832E+05	3.63647E+00	7.50102E-02	197	6.73794E+04	5.33647E+00	1.25010E-01	237	2.03468E+03	8.83647E+00	2.50000E-01
158	3.42178E+05	3.71148E+00	2.49898E-02	198	5.94615E+04	5.46148E+00	4.99882E-02	238	1.58461E+03	9.08647E+00	1.06096E-01
159	3.33733E+05	3.73647E+00	1.00000E-01	199	5.65622E+04	5.51147E+00	7.50002E-02	239	1.42510E+03	9.19257E+00	1.43900E-01
160	3.01974E+05	3.83647E+00	1.16012E-02	200	5.24752E+04	5.58647E+00	1.20888E-01	240	1.23410E+03	9.33647E+00	2.10342E-01

表4.2 TABLE OF NEUTRON ENERGY GROUP STRUCTURE (3/3)

GROUP	UP-ENERGY	LETHAGY	DELTA-U	GROUP	UP-ENERGY	LETHAGY	DELTA-U
241	1.00000E+03	9.54681E+00	3.96602E-02	281	2.38237E+00	1.55865E+01	1.02628E-01
242	9.61116E+02	9.58647E+00	5.80652E-02	282	2.15000E+00	1.56891E+01	1.47373E-01
243	9.06898E+02	9.64454E+00	1.91935E-01	283	1.85539E+00	1.58365E+01	2.49999E-01
244	7.48518E+02	9.83647E+00	2.49999E-01	284	1.44498E+00	1.60865E+01	2.50001E-01
245	5.82947E+02	1.00865E+01	2.26059E-01	285	1.12535E+00	1.63365E+01	1.18094E-01
246	4.65000E+02	1.03125E+01	2.39424E-02	286	1.00000E+00	1.64546E+01	1.31904E-01
247	4.53999E+02	1.03365E+01	2.12020E-01	287	8.76425E-01	1.65865E+01	2.50001E-01
248	3.67262E+02	1.05485E+01	3.79799E-02	288	6.82560E-01	1.68365E+01	2.50001E-01
249	3.53575E+02	1.05865E+01	2.50002E-01	289	5.31578E-01	1.70865E+01	1.33813E-01
250	2.75364E+02	1.08365E+01	2.49999E-01	290	4.65000E-01	1.72203E+01	1.16186E-01
251	2.14454E+02	1.10865E+01	2.50000E-01	291	4.13994E-01	1.73365E+01	2.50018E-01
252	1.67017E+02	1.13365E+01	1.15977E-01	292	3.22413E-01	1.75865E+01	4.05196E-01
253	1.48728E+02	1.14524E+01	1.34023E-01	293	2.15000E-01	1.79917E+01	7.65467E-01
254	1.30073E+02	1.15865E+01	2.50000E-01	294	1.00000E-01	1.87572E+01	4.60517E+00
255	1.01301E+02	1.18365E+01	1.29261E-02	295	1.00000E-03	2.33623E+01	4.60516E+00
256	1.00000E+02	1.18494E+01	2.37075E-01	296	1.00001E-05	2.79675E+01	0.0
257	7.88932E+01	1.20865E+01	4.39439E-02				
258	7.55014E+01	1.21304E+01	2.06056E-01				
259	6.14421E+01	1.23365E+01	2.45811E-01				
260	4.80520E+01	1.25823E+01	4.18770E-03				
261	4.78512E+01	1.25865E+01	2.86438E-02				
262	4.65000E+01	1.26151E+01	2.21358E-01				
263	3.72665E+01	1.28365E+01	2.49999E-01				
264	2.90232E+01	1.30865E+01	4.66630E-02				
265	2.77000E+01	1.31331E+01	2.03336E-01				
266	2.26033E+01	1.33365E+01	5.00431E-02				
267	2.15000E+01	1.33865E+01	1.99955E-01				
268	1.76035E+01	1.35865E+01	9.75111E-02				
269	1.59680E+01	1.36840E+01	1.52490E-01				
270	1.37096E+01	1.38365E+01	2.50005E-01				
271	1.06770E+01	1.40865E+01	6.55068E-02				
272	1.00000E+01	1.41520E+01	1.23763E-02				
273	9.87700E+00	1.41644E+01	1.72113E-01				
274	8.31529E+00	1.43365E+01	2.50001E-01				
275	6.47595E+00	1.45865E+01	2.49999E-01				
276	5.04348E+00	1.48365E+01	8.12292E-02				
277	4.65000E+00	1.49177E+01	1.50573E-01				
278	4.00000E+00	1.50683E+01	1.81995E-02				
279	3.92786E+00	1.50865E+01	2.50000E-01				
280	3.05902E+00	1.53365E+01	2.49999E-01				

表4.3 縮約後のエネルギー群構造

Gr	上限エネルギー (eV)	下限エネルギー (eV)	備考
1	1.49E+07	1.22E+07	速中性子エネルギー領域
2	1.22E+07	1.00E+07	
3	1.00E+07	8.19E+06	
4	8.19E+06	6.38E+06	
5	6.38E+06	4.97E+06	
6	4.97E+06	4.07E+06	
7	4.07E+06	3.01E+06	
8	3.01E+06	2.47E+06	
9	2.47E+06	2.23E+06	
10	2.23E+06	1.83E+06	
11	1.83E+06	1.11E+06	
12	1.11E+06	5.50E+05	
13	5.50E+05	1.11E+05	中間エネルギー領域
14	1.11E+05	3.36E+03	
15	3.36E+03	5.83E+02	
16	5.83E+02	1.01E+02	
17	1.01E+02	2.90E+01	
18	2.90E+01	1.00E+01	
19	1.00E+01	3.06E+00	
20	3.06E+00	1.13E+00	
21	1.13E+00	4.14E-01	
22	4.14E-01	1.00E-05	熱中性子エネルギー領域

表4.4 炉心構造体および生体遮蔽の原子個数密度一覧表

(単位: atoms/barn・cm)

構造材番号	1	2	3	4	5	6	7	8
構造材名	均質炉心	重水	均質Al、 空気	Al (A5052材)	均質Al、 B ₄ C、Air	空気	コンクリート	遮蔽扉 (SS41)
密度(g/cm ³)		1.1078		2.673		1.20E-03	2.30E+00	7.85E+00
H	2.115E-04	3.009E-04	5.900E-09		2.784E-09	7.200E-09	5.717E-03	
D	4.208E-02	5.987E-02						
B-10					9.809E-04			
B-11					3.949E-03			
C	1.372E-07		6.436E-07		1.231E-03	7.584E-07		8.265E-04
N	6.828E-06		3.204E-05		1.512E-05	3.910E-05		
O	2.667E-02	3.008E-02	8.631E-06		4.072E-06	1.053E-05	4.393E-02	
Mg	1.249E-04		7.803E-05	1.788E-03	9.870E-04		6.554E-05	
Al	4.033E-03		2.519E-03	5.772E-02	3.186E-02		2.290E-04	
Si				3.439E-05			1.904E-02	5.050E-05
P								2.289E-05
S							3.024E-05	4.128E-05
Ca							2.374E-03	
Cr				5.573E-05				
Mn				1.172E-05				9.810E-04
Fe				6.053E-05			6.791E-04	8.429E-02
Cu				1.013E-05				
Zr	9.311E-05							
U-235	4.076E-05							
U-238	2.722E-03							

表4.5 群定数セットの現状

Library Name	Groups	Pl	Laboratory	Processing Code	Base Library	Remarks
DLC-23 (CASK-81)	22n, 18g	P3	ORNL	SUPERTOG(n) POPOP4 MUG(g)	ENDF/B-II, III POPOP4	29 Materials ANISN format
DLC-37 (EPR)	100n, 21g	P8	ORNL	AMPX	ENDF/B-IV	47 Materials ANISN format
DLC-41 (VITAMIN-C)	171n, 36g	P3	ORNL	MINX(n) AMPX(g)	ENDF/B-IV ENDF/B-IV	66 Materials f-table
DLC-51 (JSD100/120)	100n, 20g	P5	JAERI	RADHEAT-V3	ENDF/B-IV	38 Materials
DLC-60 (MACKLIB-IV)	171n, 36g		ANL, ORNL	AMPX	ENDF/B-IV	49 materials KERMA, Damage
DLC-87 (HILO)	66n, 21g	P5	ORNL	AMPX	ENDF/B-IV	16 materials up to 400MeV
DLC-92 (GICX-40)	42n, 21g	P5	JAERI	RADHEAT-V3	ENDF/B-III, IV POPOP4	40 materials KERMA factor
DLC-113 (VITAMIN-E)	174n, 38g	P8	ORNL	AMPX	ENDF/B-V	77 materials
DLC-119 (HILO86)	66n, 22g	P5	ORNL	AMPX	ENDF/B-V	17 materials up to 400MeV
JSSTD	295n, 104g	P5	JAERI	PROF-GROUCH-G/B	JENDL-3	64 materials
JSD1000	100n, 20g	DDX	JAERI	RADHEAT-V4	ENDF/B-IV	42 materials
SSL90A	120n, 18g	DDX	JAERI	RADHEAT-V4	JENDL-3	43 materials
SSL90B	22n, 18g	DDX	JAERI	RADHEAT-V4	JENDL-3	43 materials
FUSION-J3	125n, 40g	P5	JAERI	NJOY	JENDL-3	40 materials KERMA factor
FUSION-40	42n, 21g	P5	JAERI	NJOY	JENDL-3	40 materials KERMA factor

表4.6 TABLE OF GAMMA ENERGY GROUP STRUCTURE

GROUP	UP-ENERGY	LETHAGY	DELTA-U	GROUP	UP-ENERGY	LETHAGY	DELTA-U	GROUP	UP-ENERGY	LETHAGY	DELTA-U
1	5.00000E+07	-1.27297E+00	5.10826E-01	41	2.50000E+06	1.72277E+00	6.91358E-02	81	3.00000E+05	3.84303E+00	1.43101E-01
2	3.00000E+07	-7.62140E-01	4.05465E-01	42	2.33300E+06	1.79190E+00	3.62248E-02	82	2.60000E+05	3.98613E+00	1.67054E-01
3	2.00000E+07	-3.56675E-01	1.62519E-01	43	2.25000E+06	1.82813E+00	3.80481E-02	83	2.20000E+05	4.15318E+00	9.53102E-02
4	1.70000E+07	-1.94156E-01	1.94156E-01	44	2.16600E+06	1.86617E+00	7.97350E-02	84	2.00000E+05	4.24850E+00	5.12933E-02
5	1.40000E+07	0.0	1.54151E-01	45	2.00000E+06	1.94591E+00	6.45385E-02	85	1.90000E+05	4.29979E+00	1.71850E-01
6	1.20000E+07	1.54150E-01	8.70114E-02	46	1.87500E+06	2.01045E+00	6.89929E-02	86	1.60000E+05	4.47164E+00	6.45385E-02
7	1.10000E+07	2.41162E-01	3.70413E-02	47	1.75000E+06	2.07944E+00	5.27982E-02	87	1.50000E+05	4.53618E+00	6.89929E-02
8	1.06000E+07	2.78203E-01	5.82689E-02	48	1.66000E+06	2.13224E+00	3.68140E-02	88	1.40000E+05	4.60517E+00	1.54151E-01
9	1.00000E+07	3.36472E-01	4.60440E-02	49	1.60000E+06	2.16905E+00	6.45385E-02	89	1.20000E+05	4.75932E+00	1.82322E-01
10	9.55000E+06	3.82516E-01	5.93166E-02	50	1.50000E+06	2.23359E+00	5.48082E-02	90	1.00000E+05	4.94164E+00	1.05361E-01
11	9.00000E+06	4.41833E-01	5.71584E-02	51	1.42000E+06	2.28840E+00	3.22032E-02	91	9.00000E+04	5.04700E+00	1.17783E-01
12	8.50000E+06	4.98991E-01	6.06247E-02	52	1.37500E+06	2.32060E+00	3.32748E-02	92	8.00000E+04	5.16479E+00	6.45385E-02
13	8.00000E+06	5.59616E-01	3.17487E-02	53	1.33000E+06	2.35388E+00	6.20354E-02	93	7.50000E+04	5.22932E+00	1.43101E-01
14	7.75000E+06	5.91364E-01	3.27899E-02	54	1.25000E+06	2.41591E+00	4.08220E-02	94	6.50000E+04	5.37243E+00	8.00428E-02
15	7.50000E+06	6.24154E-01	3.39016E-02	55	1.20000E+06	2.45674E+00	6.45385E-02	95	6.00000E+04	5.45247E+00	8.70114E-02
16	7.25000E+06	6.58056E-01	3.50913E-02	56	1.12500E+06	2.52127E+00	1.17783E-01	96	5.50000E+04	5.53948E+00	2.00671E-01
17	7.00000E+06	6.93147E-01	3.63677E-02	57	1.00000E+06	2.63906E+00	1.05361E-01	97	4.50000E+04	5.74015E+00	1.17783E-01
18	6.75000E+06	7.29515E-01	3.77404E-02	58	9.00000E+05	2.74442E+00	3.96653E-02	98	4.00000E+04	5.85793E+00	1.33531E-01
19	6.50000E+06	7.67255E-01	3.92207E-02	59	8.65000E+05	2.78408E+00	4.73462E-02	99	3.50000E+04	5.99146E+00	1.54151E-01
20	6.25000E+06	8.06476E-01	4.08220E-02	60	8.25000E+05	2.83143E+00	3.07717E-02	100	3.00000E+04	6.14561E+00	4.05465E-01
21	6.00000E+06	8.47298E-01	4.25596E-02	61	8.00000E+05	2.86220E+00	6.45385E-02	101	2.00000E+04	6.55108E+00	2.87682E-01
22	5.75000E+06	8.89857E-01	4.44518E-02	62	7.50000E+05	2.92674E+00	6.89929E-02	102	1.50000E+04	6.83876E+00	4.05465E-01
23	5.50000E+06	9.34309E-01	1.83492E-02	63	7.00000E+05	2.99573E+00	3.63677E-02	103	1.00000E+04	7.24423E+00	6.93147E-01
24	5.40000E+06	9.52658E-01	3.77404E-02	64	6.75000E+05	3.03210E+00	3.77404E-02	104	5.00000E+03	7.93738E+00	1.60944E+00
25	5.20000E+06	9.90399E-01	3.92207E-02	65	6.50000E+05	3.06984E+00	3.92207E-02	105	1.00000E+03	9.54681E+00	0.0
26	5.00000E+06	1.02962E+00	6.18754E-02	66	6.25000E+05	3.10906E+00	4.08220E-02				
27	4.70000E+06	1.09149E+00	4.34852E-02	67	6.00000E+05	3.14988E+00	4.25596E-02				
28	4.50000E+06	1.13498E+00	2.24729E-02	68	5.75000E+05	3.19244E+00	4.44518E-02				
29	4.40000E+06	1.15745E+00	4.65200E-02	69	5.50000E+05	3.23689E+00	4.65200E-02				
30	4.20000E+06	1.20397E+00	4.87902E-02	70	5.25000E+05	3.28341E+00	9.56951E-03				
31	4.00000E+06	1.25276E+00	2.53178E-02	71	5.20000E+05	3.29298E+00	1.55042E-02				
32	3.90000E+06	1.27808E+00	2.59755E-02	72	5.12000E+05	3.30849E+00	3.91390E-03				
33	3.80000E+06	1.30406E+00	4.02739E-02	73	5.10000E+05	3.31240E+00	1.98027E-02				
34	3.65000E+06	1.34433E+00	4.19642E-02	74	5.00000E+05	3.33220E+00	1.05361E-01				
35	3.50000E+06	1.38629E+00	4.88902E-02	75	4.50000E+05	3.43756E+00	5.71584E-02				
36	3.33300E+06	1.43518E+00	5.14039E-02	76	4.25000E+05	3.49472E+00	6.06247E-02				
37	3.16600E+06	1.48659E+00	5.38567E-02	77	4.00000E+05	3.55535E+00	6.45385E-02				
38	3.00000E+06	1.54045E+00	5.72761E-02	78	3.75000E+05	3.61989E+00	6.89929E-02				
39	2.83300E+06	1.59772E+00	6.07570E-02	79	3.50000E+05	3.68888E+00	7.41080E-02				
40	2.66600E+06	1.65848E+00	6.42885E-02	80	3.25000E+05	3.76299E+00	8.00428E-02				

表4.7 Processed nuclides and their code number in JSSTD L - Library (1/2)

NO.	NUCLIDE	MAT	NCODE	Gamma Prod.
1	1-H - 1	3011	117	yes
2	1-H - 2	3012	127	yes(B4)< 124>
3	2-He- 3	3021	237	
4	2-He- 4	3022	247	
5	3-Li- 6	3031	367	yes
6	3-Li- 7	3032	377	yes
7	4-Be- 9	3041	497	yes
8	5-B - 10	3051	507	yes
9	5-B - 11	3052	517	yes
10	6-C - 12	3061	607	yes
11	7-N - 14	3071	707	yes
12	8-O - 16	3081	807	yes
13	9-F - 19	3091	907	yes NO DATA GIVEN
14	11-Na	3091	1107	yes
15	12-Mg	3120	1207	yes
16	13-Al- 27	3131	1307	yes
17	14-Si	3140	1407	yes(B6)
18	15-P - 31	3151	1507	
19	16-S	3160	1607	
20	19-K	3190	1907	yes(B6)<1908>
21	20-Ca	3200	2007	yes
22	22-Ti	3220	2207	yes
23	23-V - 51	3231	2307	yes NO DATA GIVEN
24	24-Cr	3240	2407	yes
25	25-Mn- 55	3251	2557	yes
26	26-Fe	3260	2607	yes
27	28-Ni	3280	2807	yes
28	29-Cu	3290	2907	yes
29	31-Ga	3290	3108	
30	40-Zr	3400	4007	yes
31	41-Nb- 93	3411	4137	yes
32	42-Mo	3420	4207	yes
33	48-Cd	3480	4807	yes(ENDL84)<4802>

表4.7 Processed nuclides and their code number in JSSTD L - Library (2/2)

NO.	NUCLIDE	MAT	NCODE	Gamma Prod.
34	63-Eu	3630	6307	yes
35	72-Hf	3720	7207	yes
36	73-Ta-181	3731	7307	yes<7317>
37	74-W	3740	7407	yes
38	82-Pb	3820	8207	yes
39	83-Bi-209	3831	8397	yes
40	90-Th-232	3905	9027	
41	92-U -233	3922	9237	
42	92-U -234	3923	9247	
43	92-U -235	3924	9257	yes
44	92-U -236	3925	9267	
45	92-U -238	3926	9287	yes
46	93-Np-237	3931	9377	
47	93-Np-239	3932	9397	
48	94-Pu-240	3944	9407	
49	94-Pu-241	3945	9417	
50	94-Pu-242	3946	9427	
51	94-Pu-236	3941	9467	
52	94-Pu-238	3942	9487	
53	94-Pu-239	3943	9497	yes
54	95-Am-241	3951	9517	
55	95-Am-243	3954	9537	
56	95-Am-242	3952	9597	
57	96-Cm-242	3962	9627	
58	96-Cm-243	3963	9637	
59	96-Cm-244	3964	9647	
60	96-Cm-245	3965	9657	
61	96-Cm-246	3966	9667	
62	96-Cm-247	3967	9677	
63	96-Cm-248	3968	9687	

表 4.8 代表的なS n法による輸送計算コード

コード名	開発機関	幾何形状	特徴
ANISN-ORNL	ORNL	1次元 平板・球・円柱	代表的な一次元S n計算コード DTF-IVを原型としている。
ANISN-W	WH	1次元 平板・球・円柱	ANISN-ORNLの改良版
ANISN-JR	JAERI	1次元 平板・球・円柱	ANISN-ORNLの改良版 RADHEAT-V3コードシステムに組み込まれている。
DOT3.5 DOT3.5E	ORNL	2次元 (X, Y), (R, Z), (R, θ)	代表的な二次元S n計算コード DOT, DOT II, DOT IIIの改良版
DOT4.2 DOT4.3	ORNL	2次元 (X, Y), (R, Z), (R, θ)	DOT3.5の改良版
DORT	ORNL	2次元 (X, Y), (R, Z), (R, θ)	DORTを原型としている
TWOTRAN II	LASL	2次元 (X, Y), (R, Z), (R, θ)	代表的な二次元S n計算コード
TWOTRAN- SPHERE	LASL	2次元 (X, Y), (R, Z), (R, θ)	TWOTRAN- II の改良版
TRIDENT	LASL	2次元 (X, Y), (R, Z),	三角メッシュによる二次元S n 計算コード
TWODANT-SYS	LASL	1、2次元 (X, Y), (R, Z), (R, θ)	ONEDANT, TWODANT, TWOHEXの統合 計算コードシステム
TORT	ORNL	2、3次元 (X, Y, Z), (R, θ , Z)	代表的な三次元S n計算コード DOTを原型としている

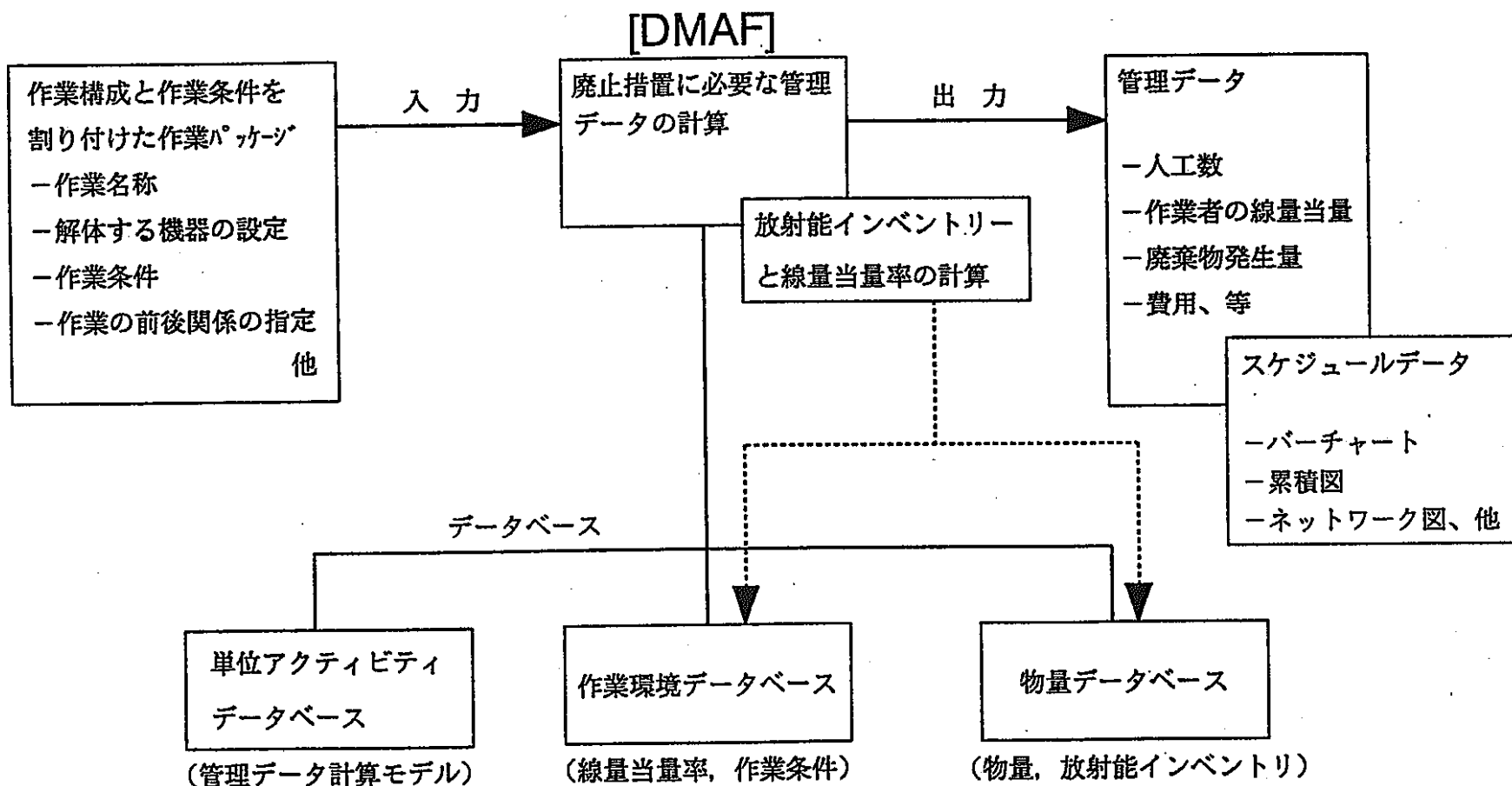


図4.1 COSMARDにおける管理データ計算の概念図

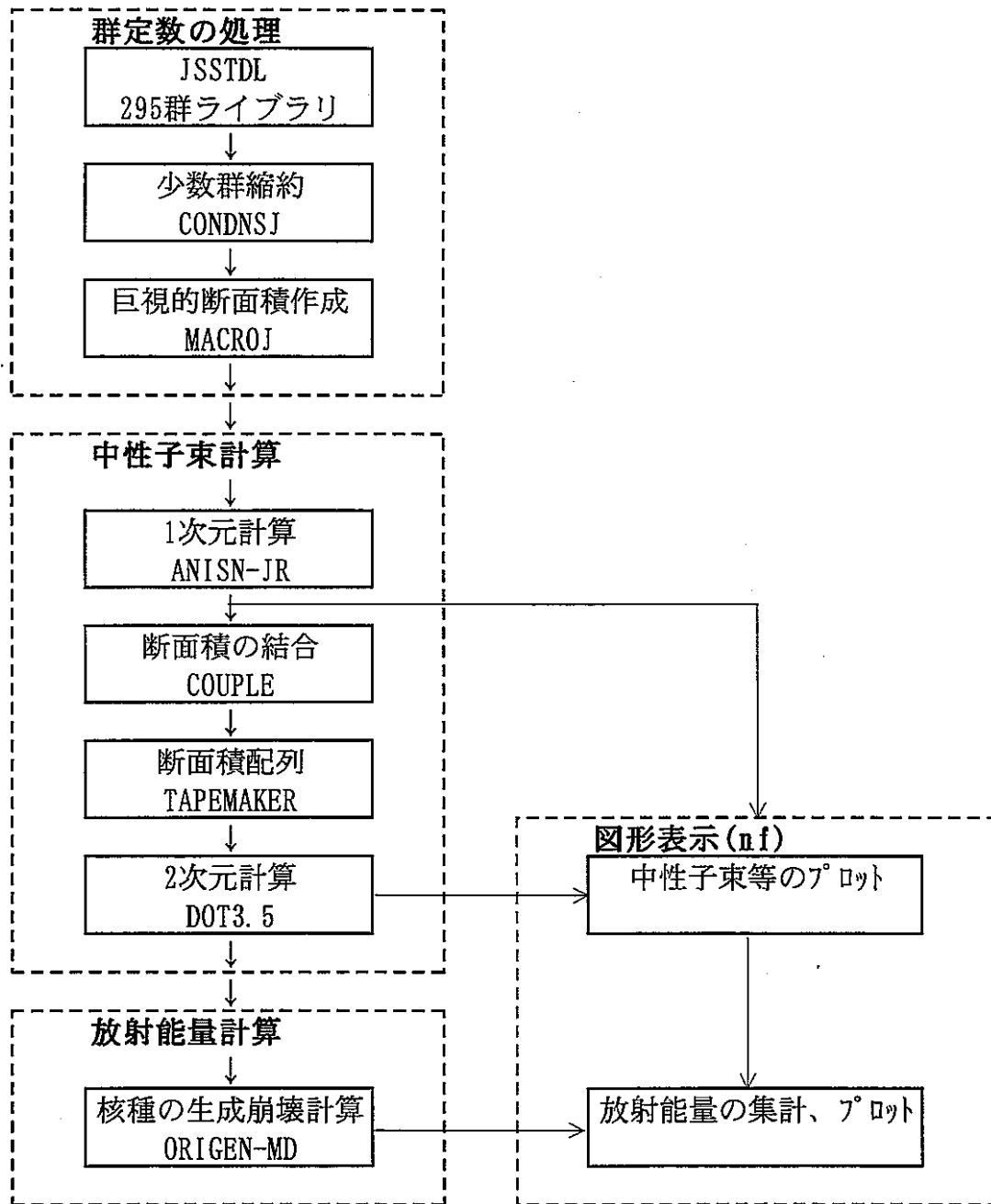


図4.2 計算の流れ図

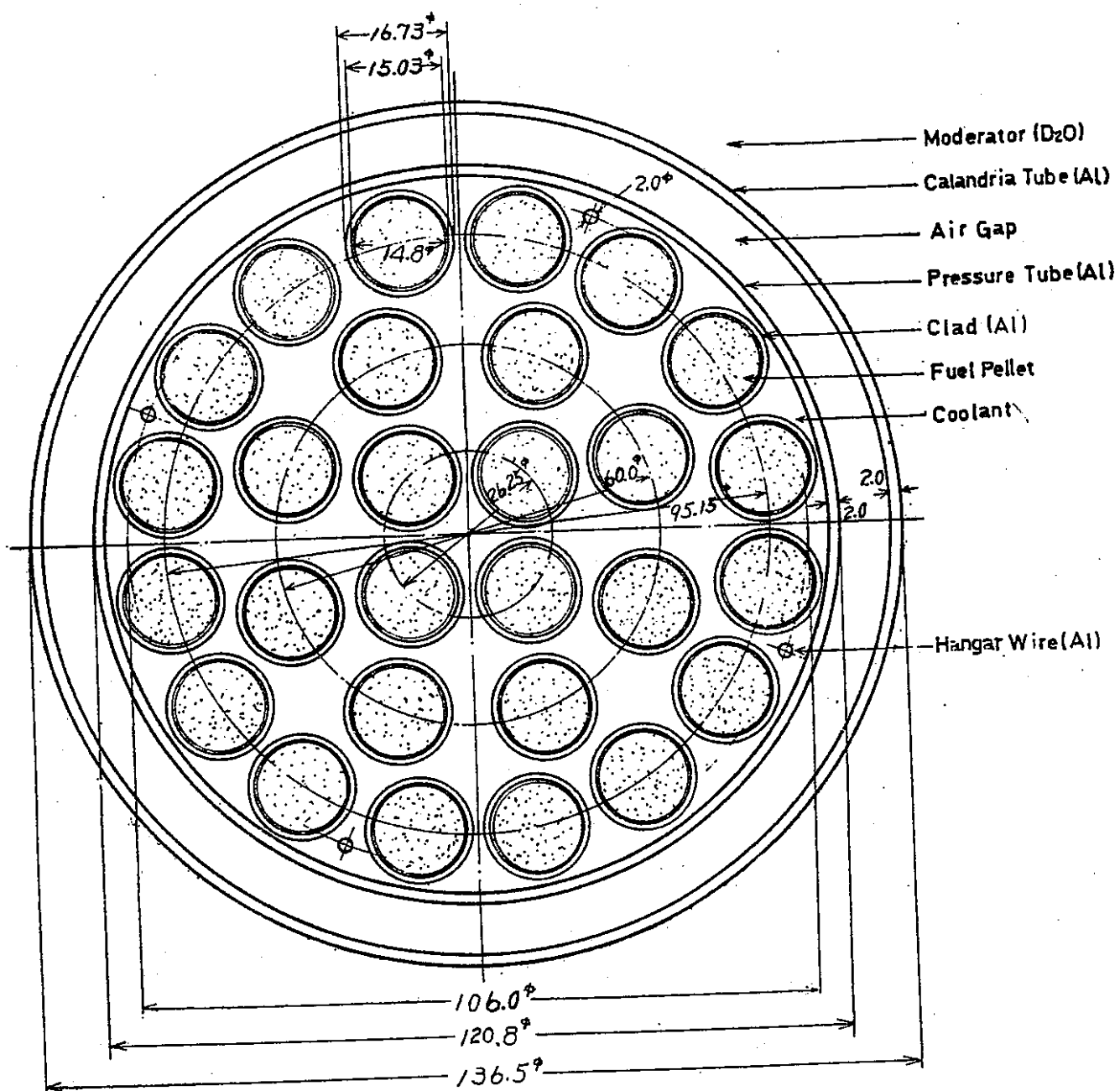


図4.3 1.2w/o二酸化ウラン28本燃料集合体形状

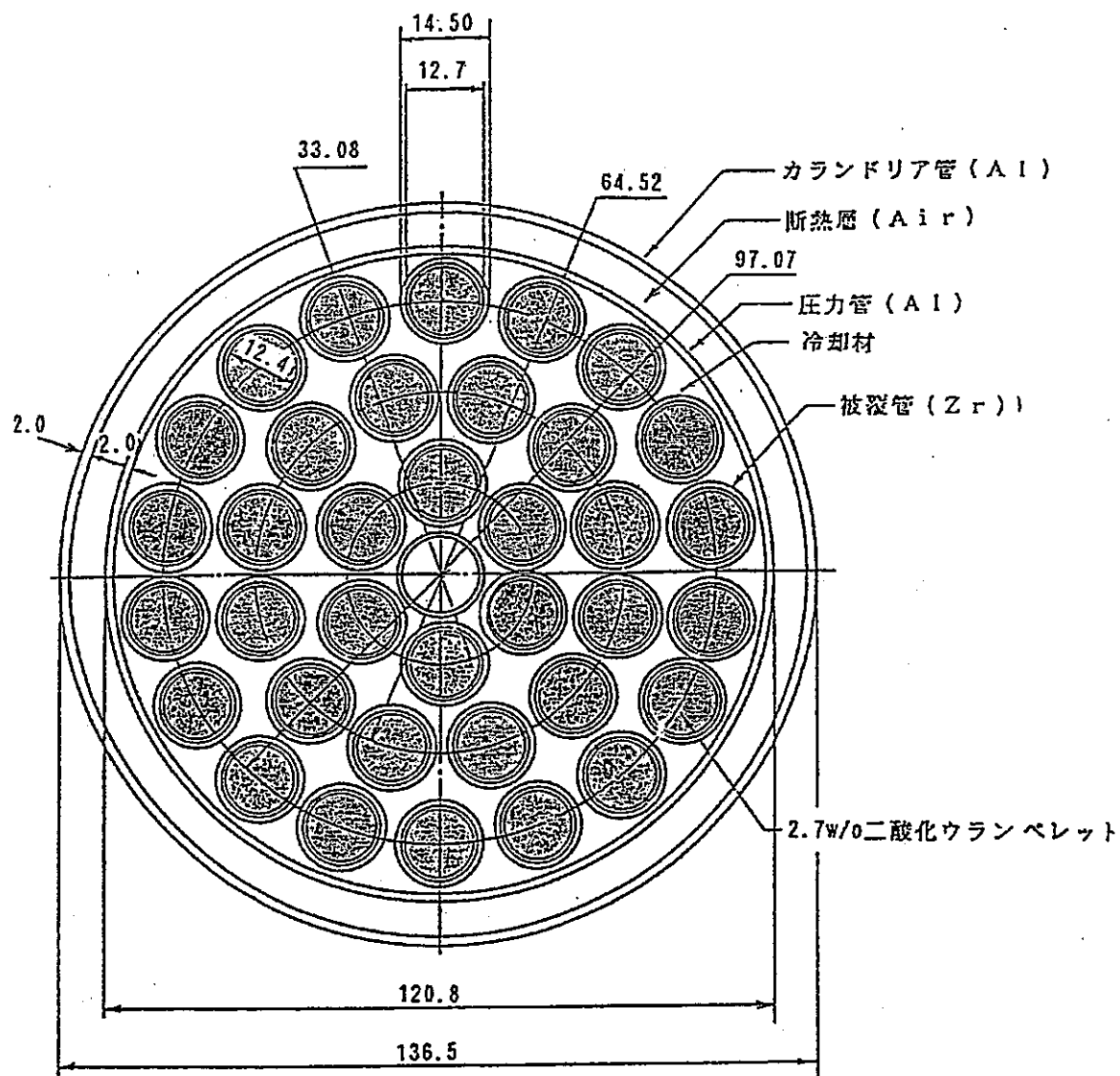
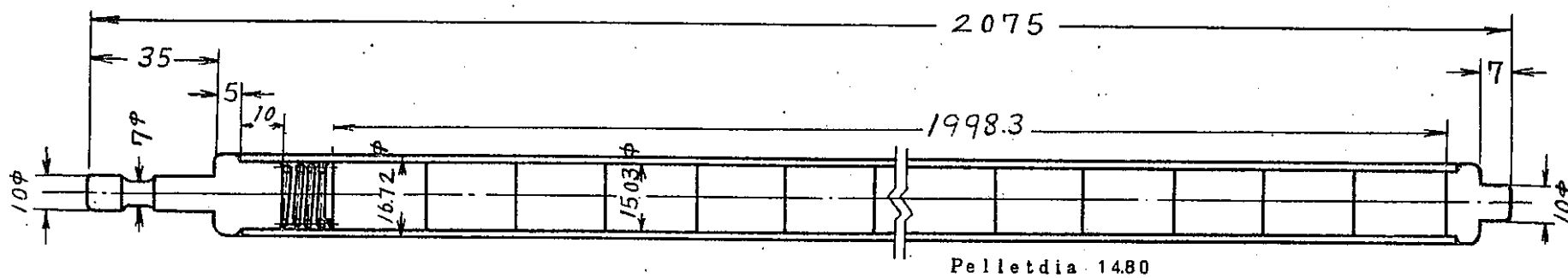
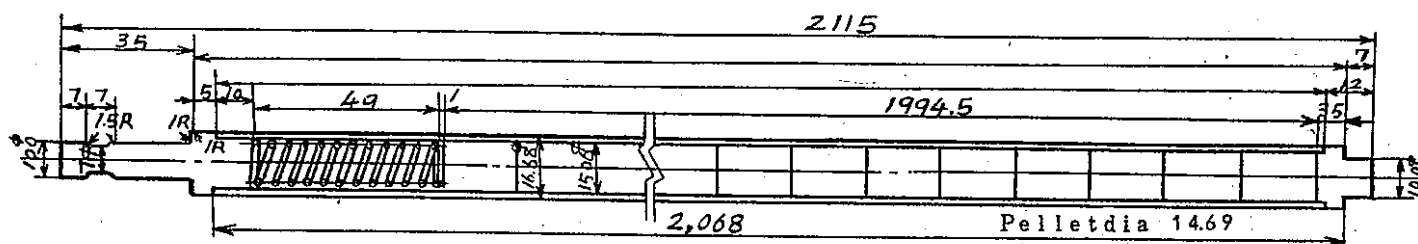


図4.4 2.7w/o二酸化ウラン36本燃料集合体形状



(a) 1.2w/o UO_2 fuel rod



(b) PuO_2 - UO_2 fuel rod

図4.5 1.2w/o二酸化ウラン燃料棒

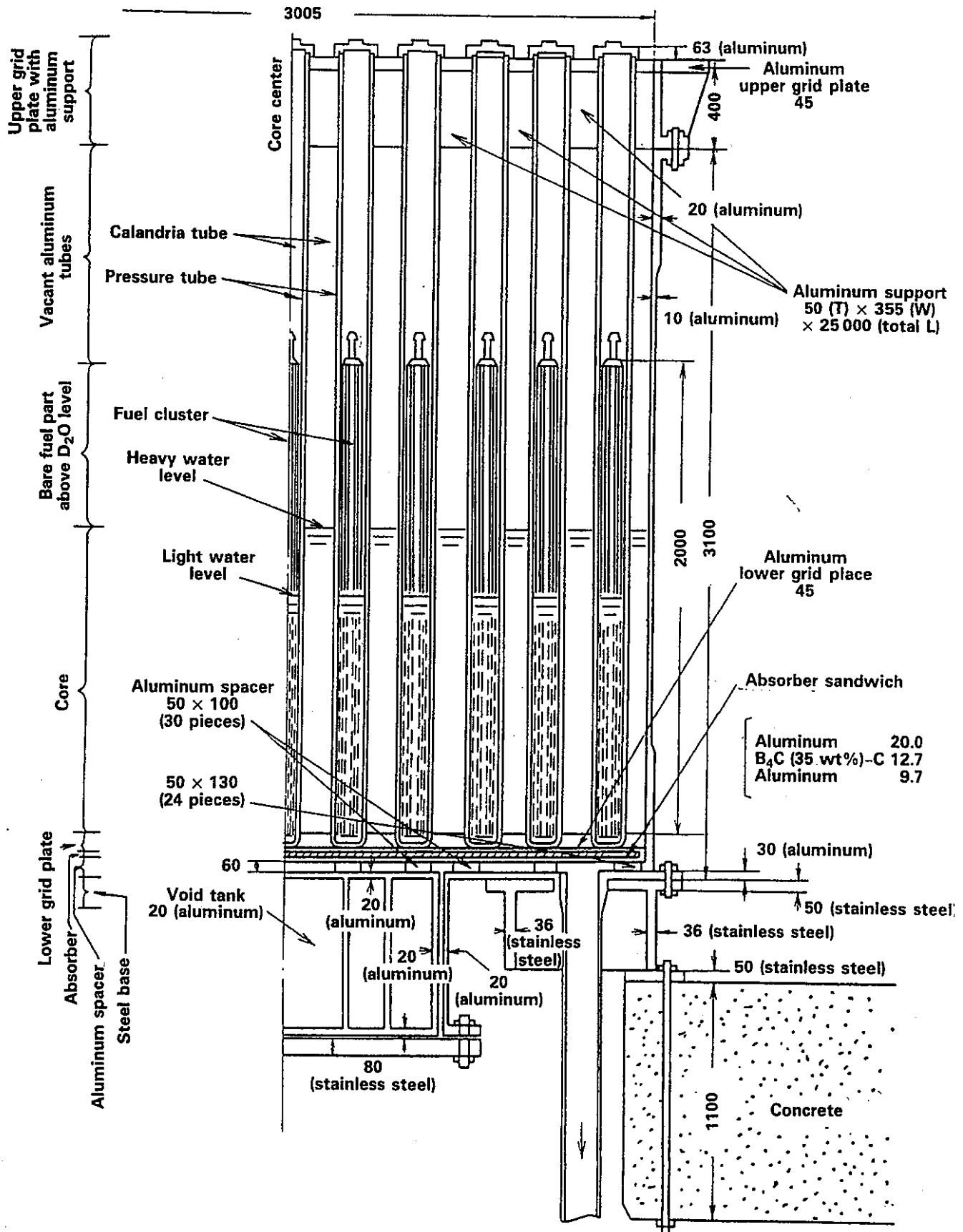


図4.7 炉心構成

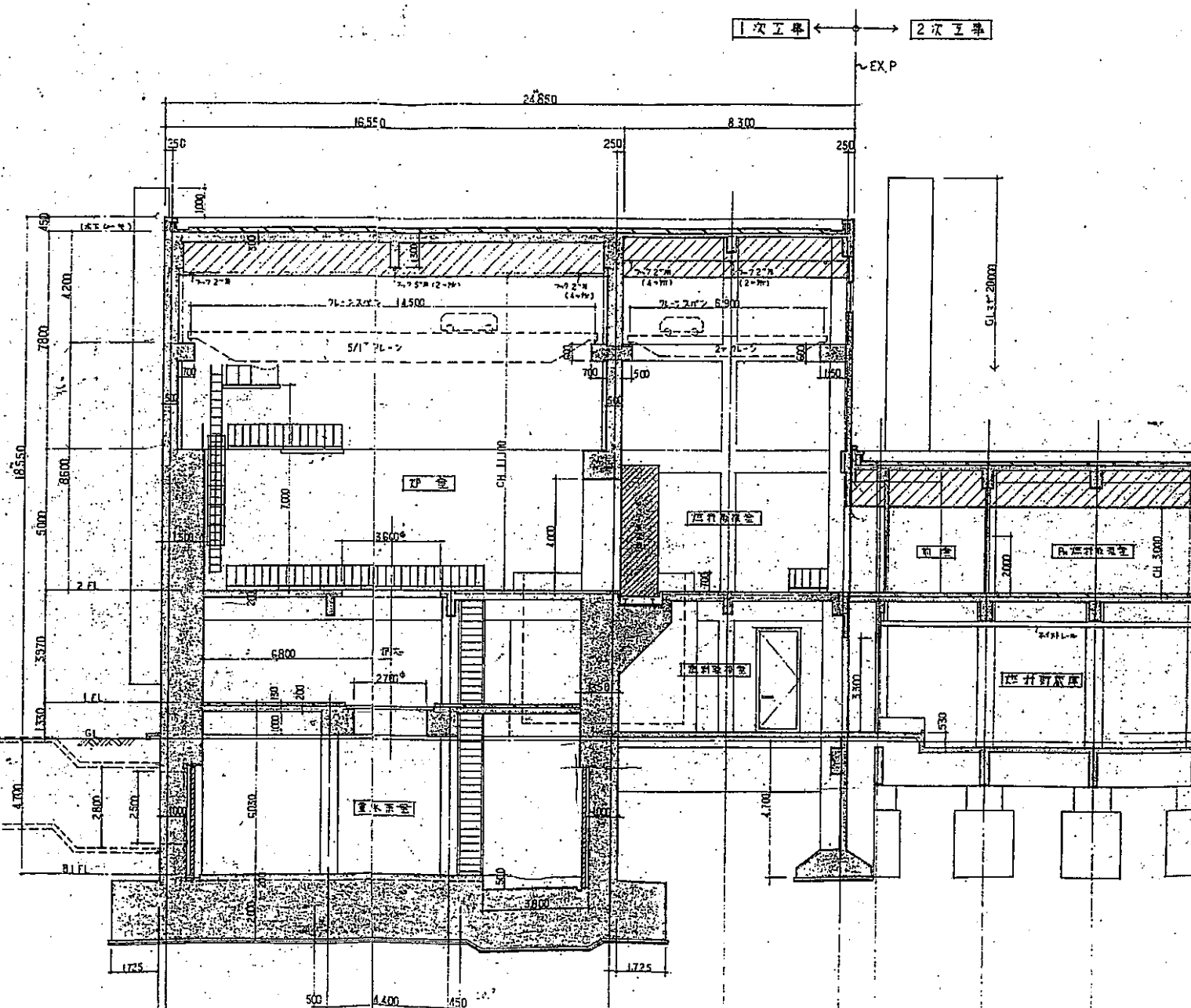


図4.8 DCA建屋

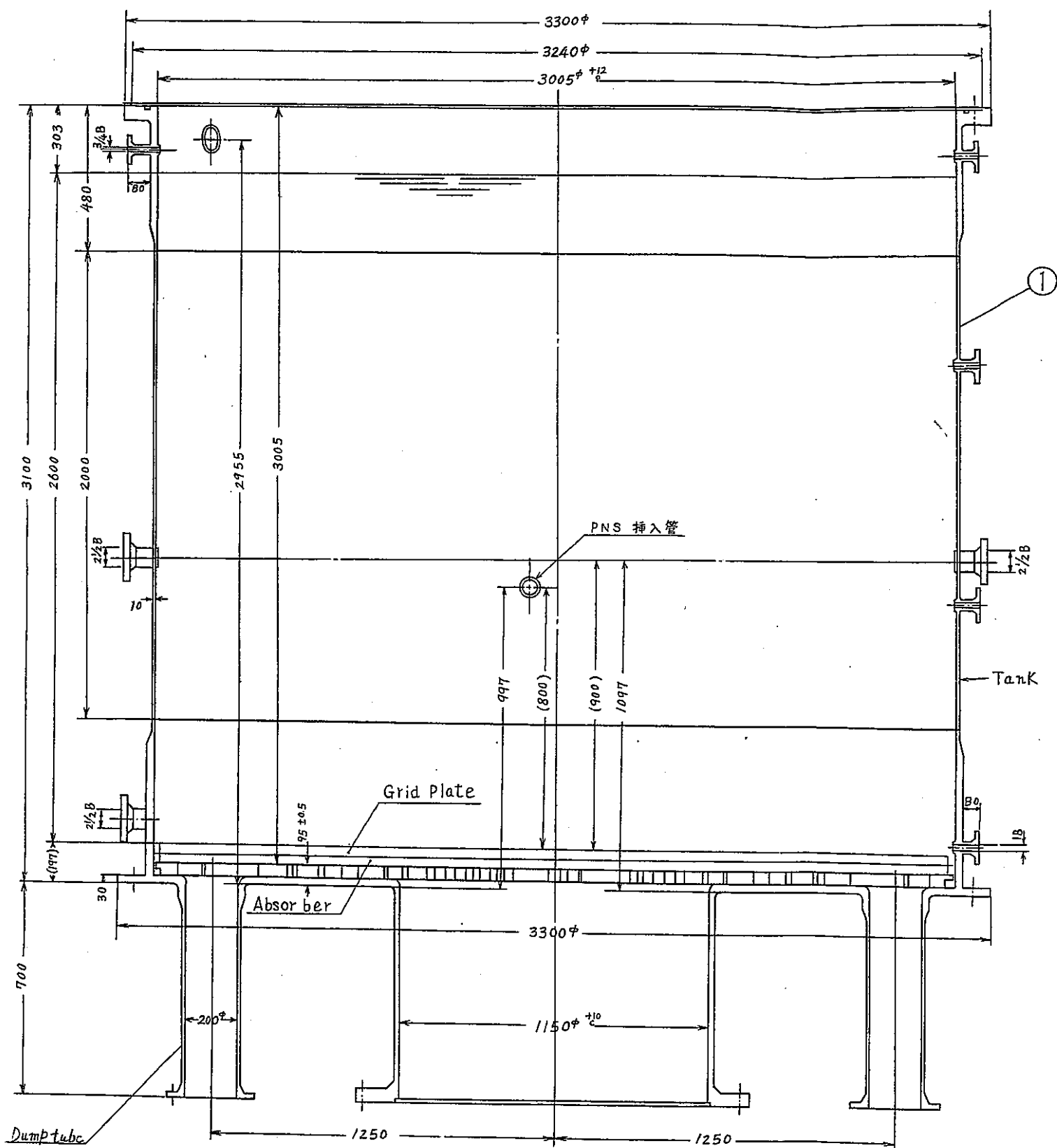


図4.9 炉心タンク

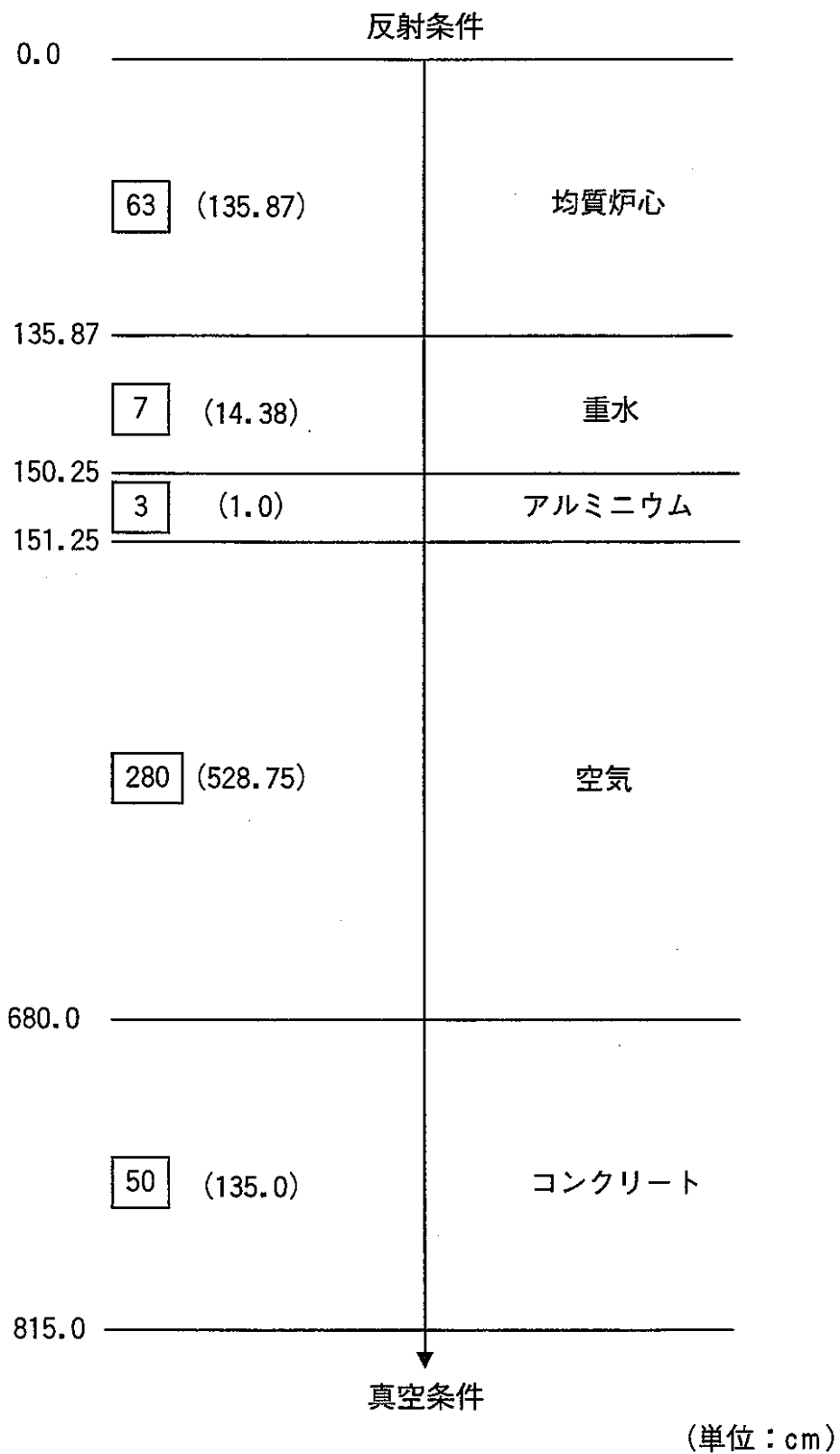


図4.10 半径方向1次元モデル (重水モデル)

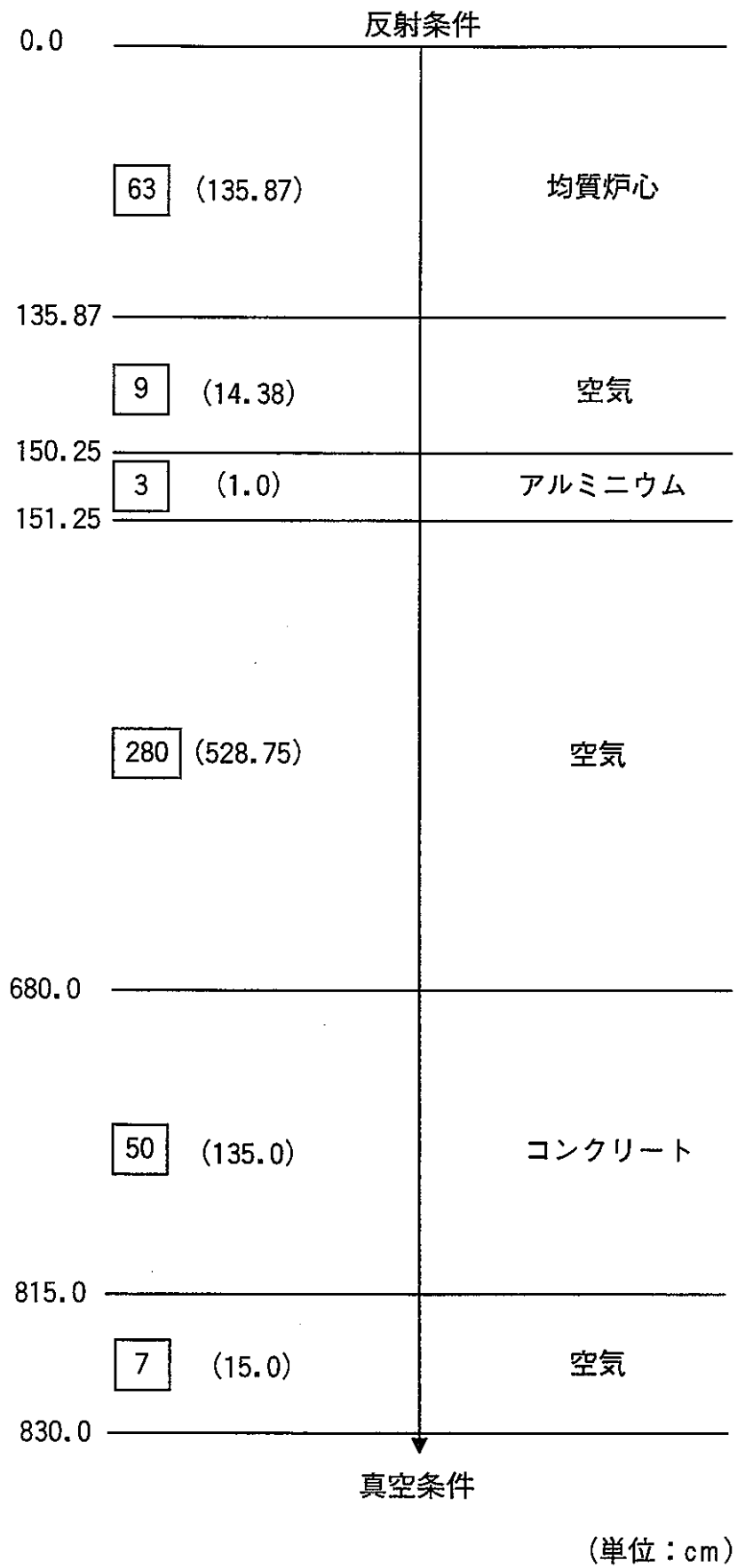


図4.11 半径方向1次元モデル(空気モデル)

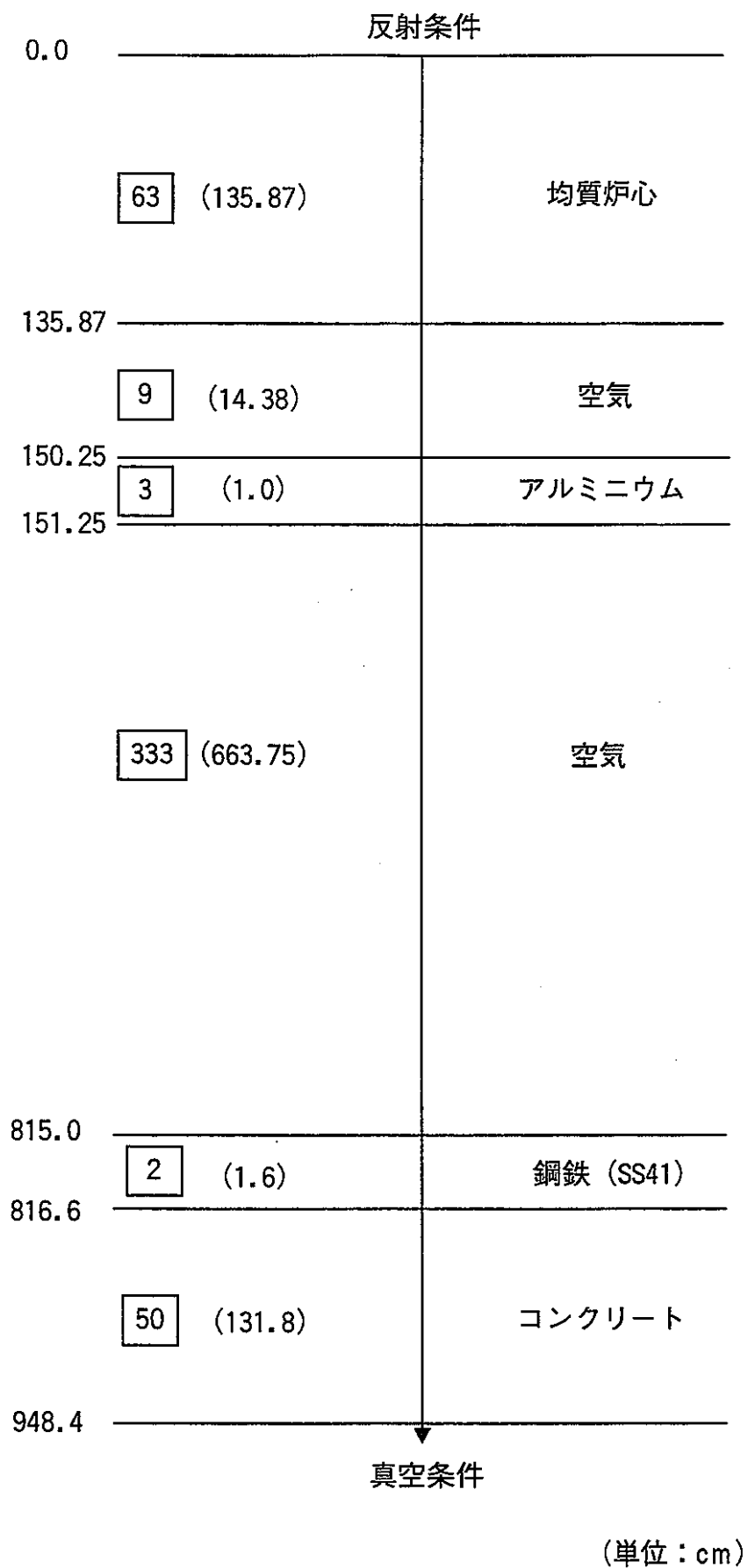
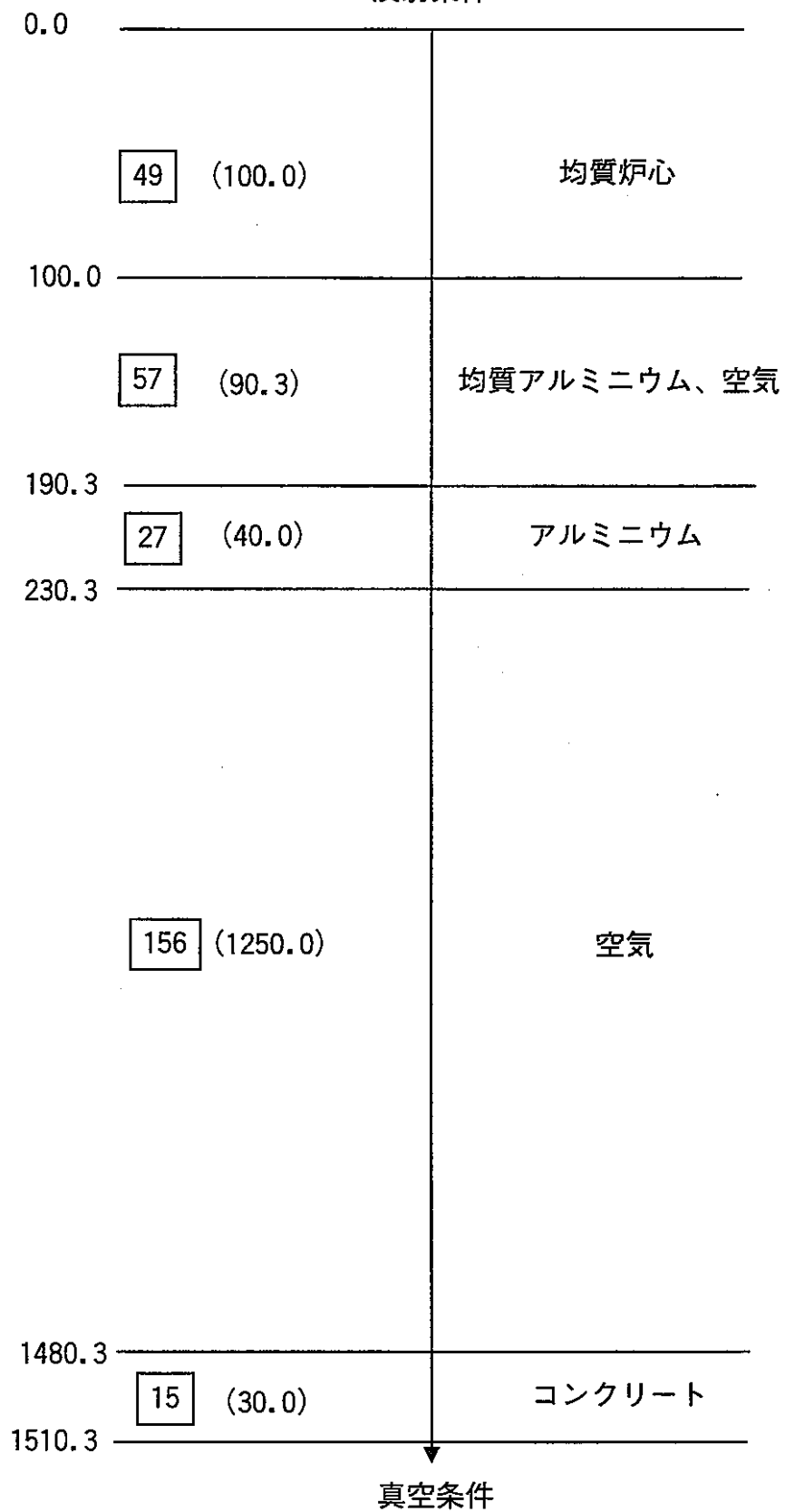
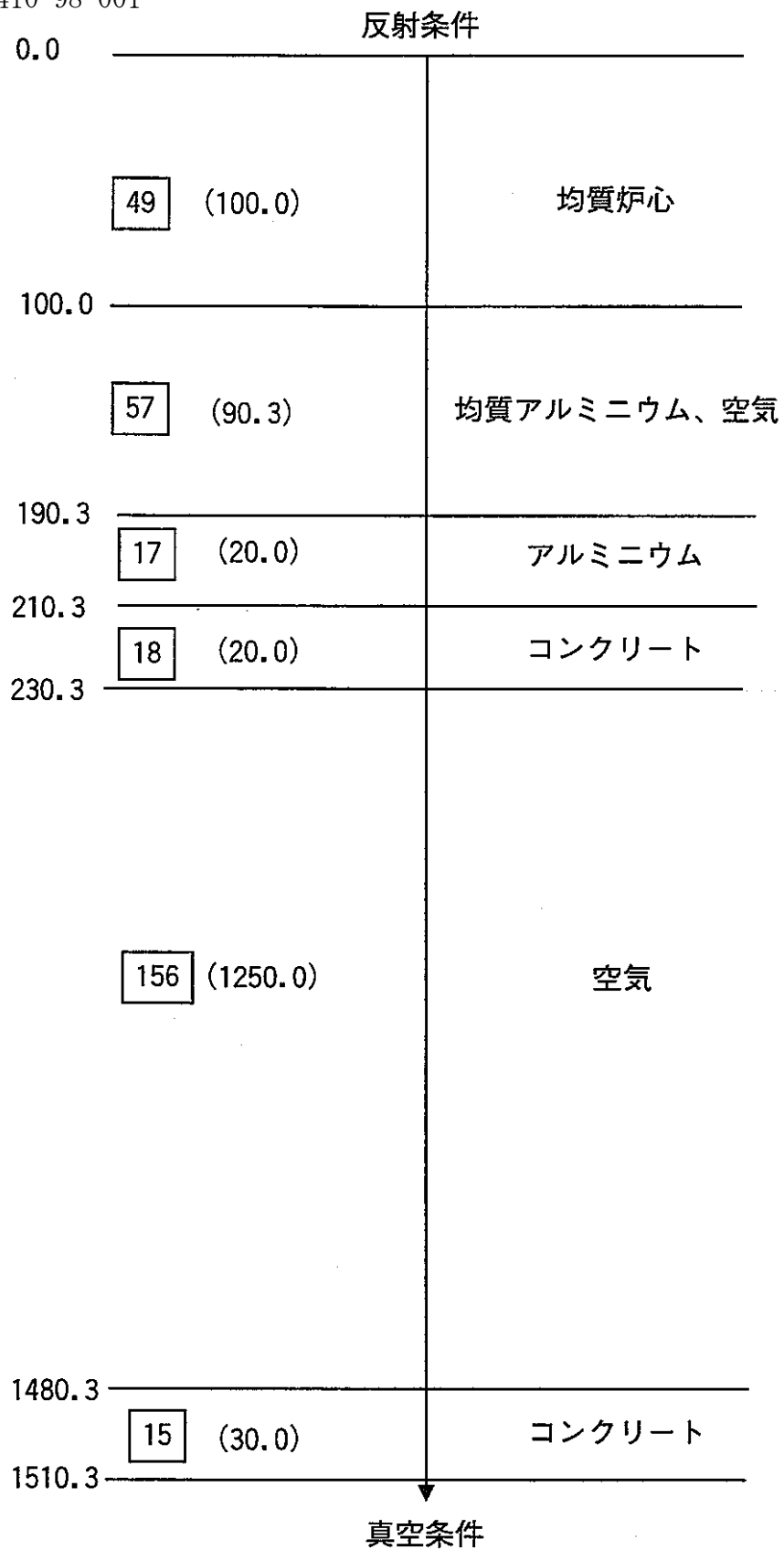


図4.12 半径方向1次元モデル(生体遮蔽体部)



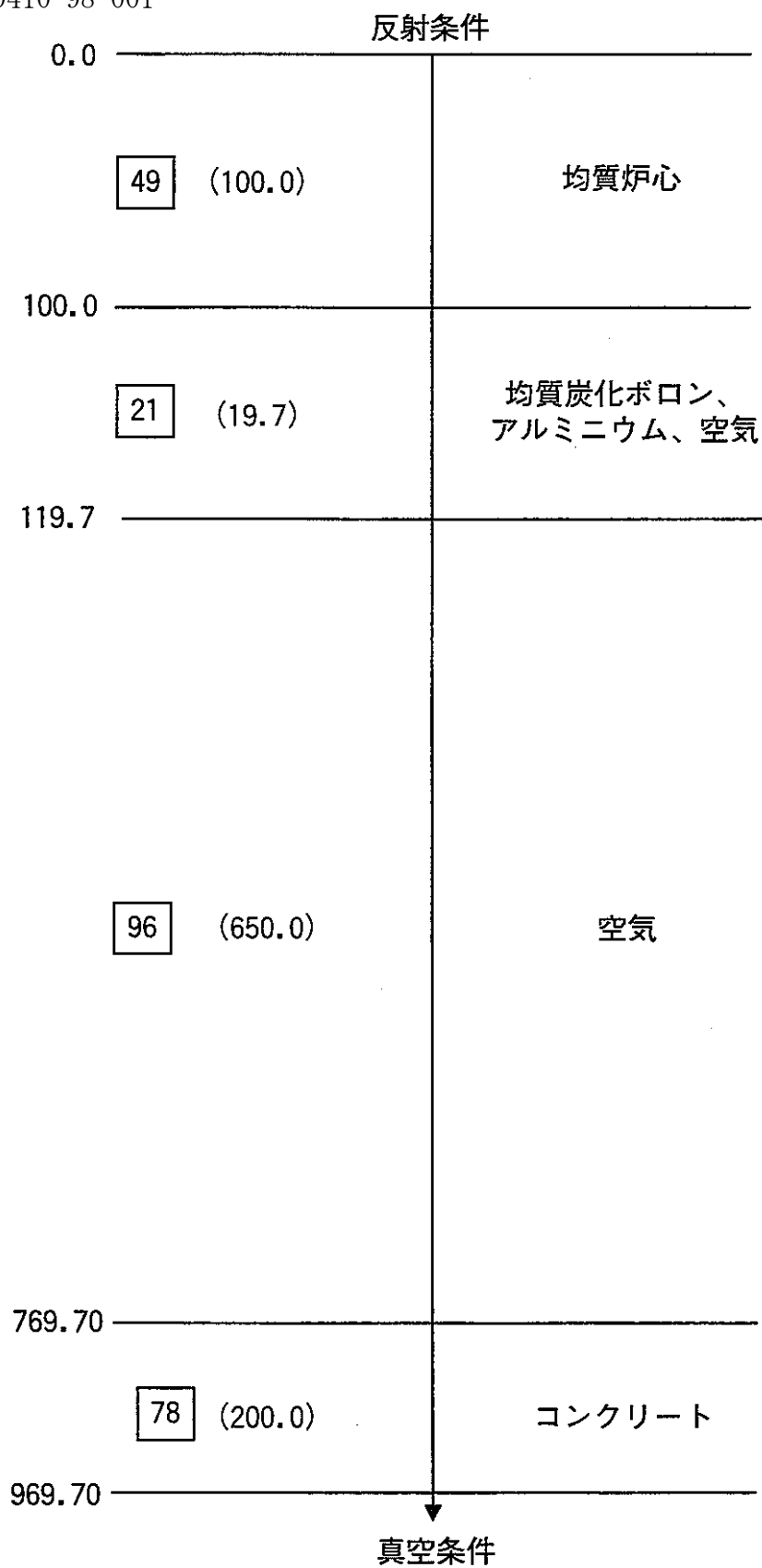
(単位: cm)

図4.13 上部軸方向1次元モデル(アルミニウムモデル)



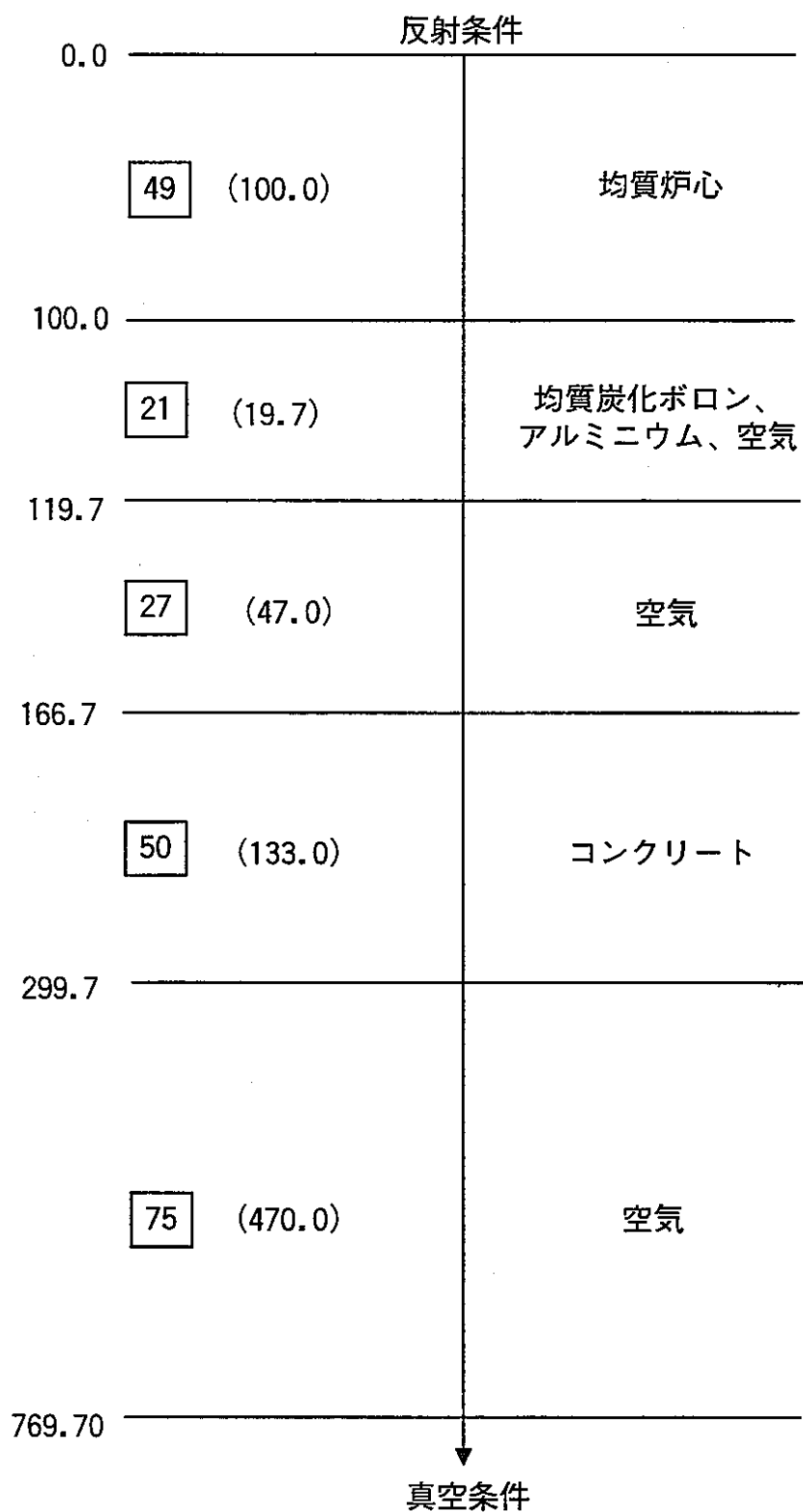
(単位: cm)

図4.14 上部軸方向1次元モデル
(アルミニウム+コンクリートモデル)



(単位: cm)

図4.15 下部軸方向1次元モデル(空気モデル)



(単位：cm)

図4.16 下部軸方向1次元モデル
(空気+コンクリートモデル)

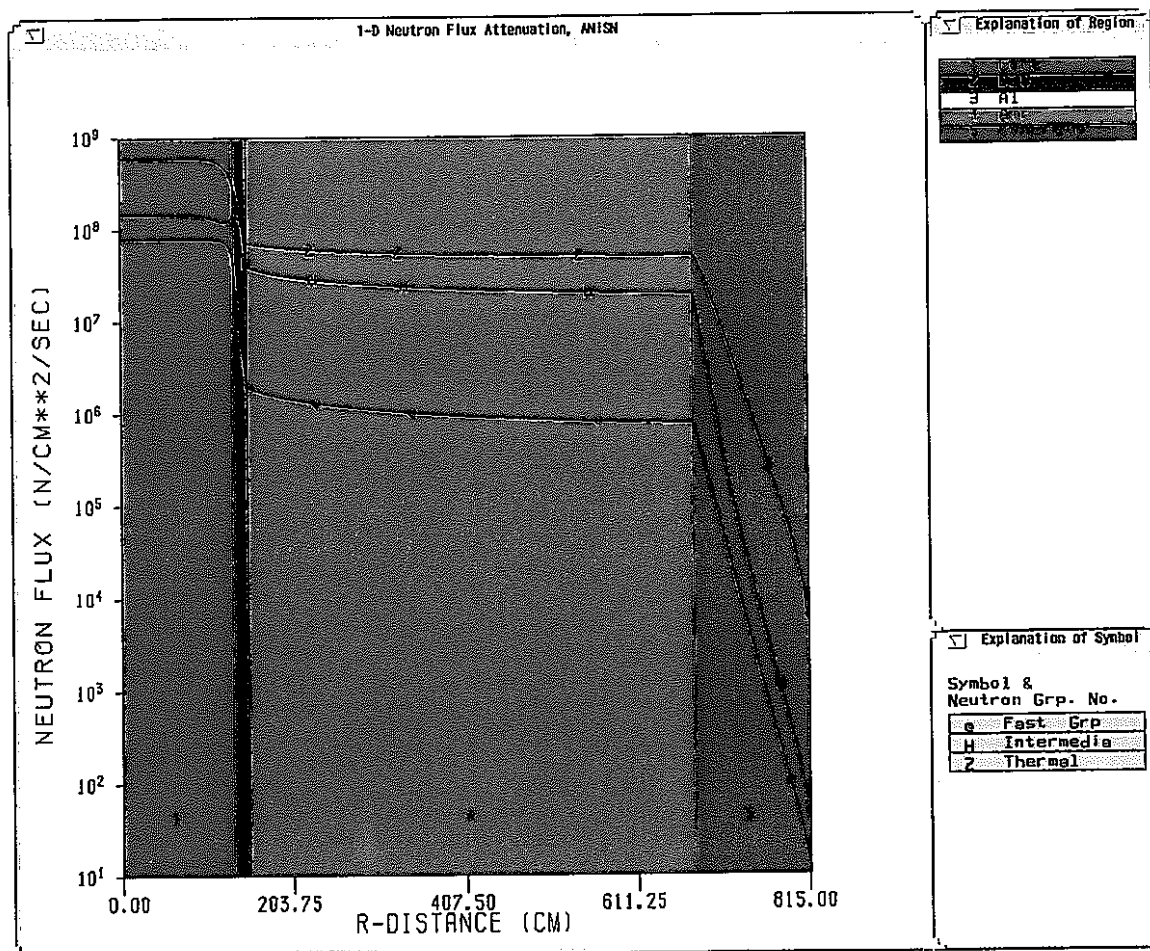


図 4.17 半径方向 1 次元中性子束分布(重水モデル)

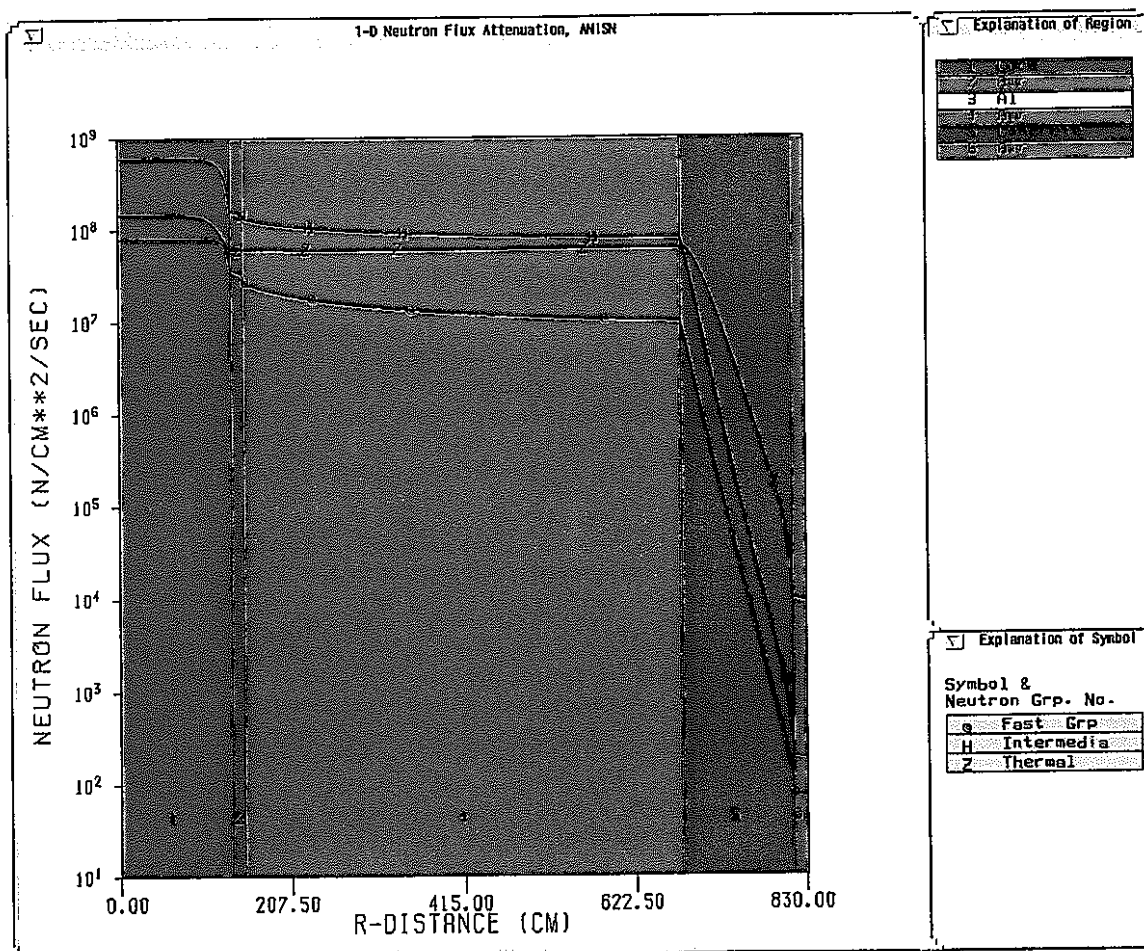


図 4.18 半径方向 1 次元中性子束分布(空気モデル)

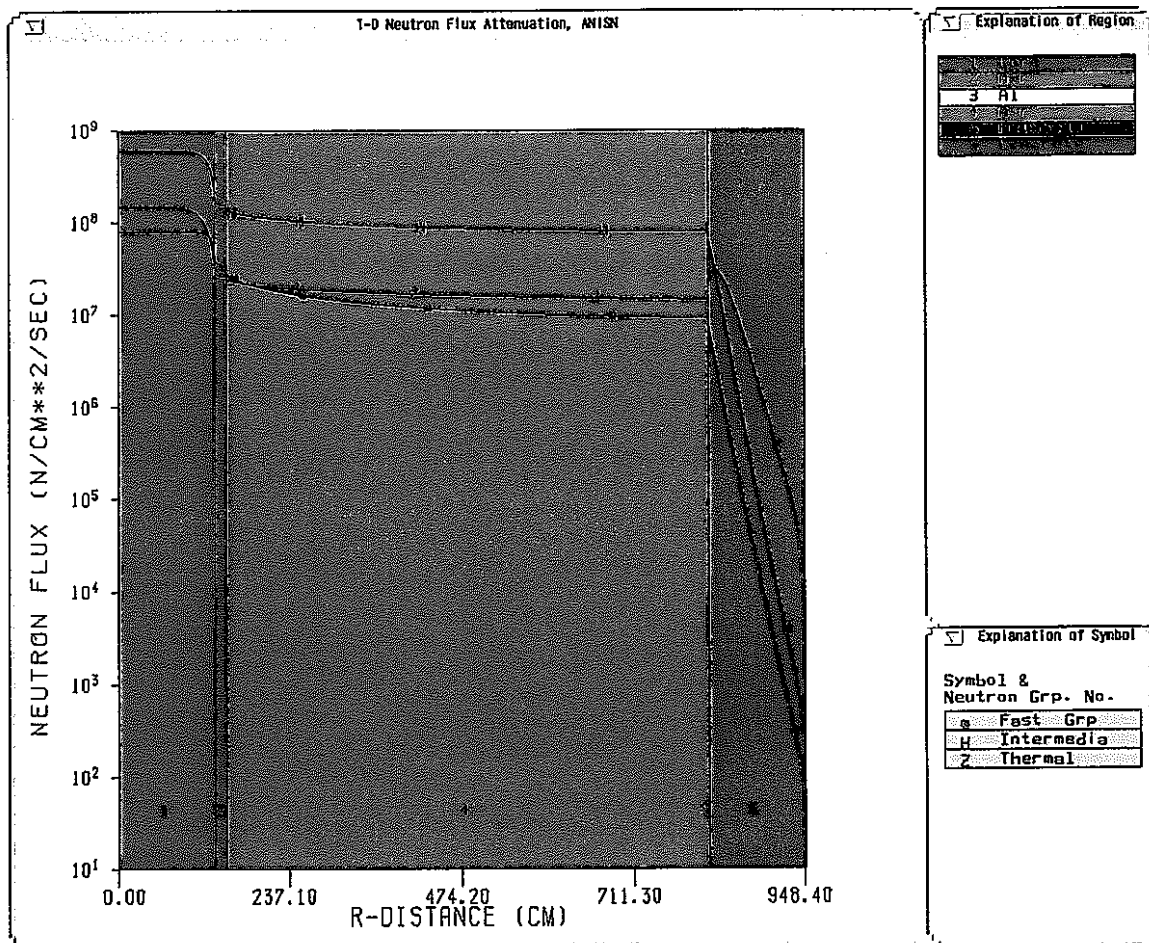


图 4.19 半径方向 1 次元中性子束分布(生体遮蔽部)

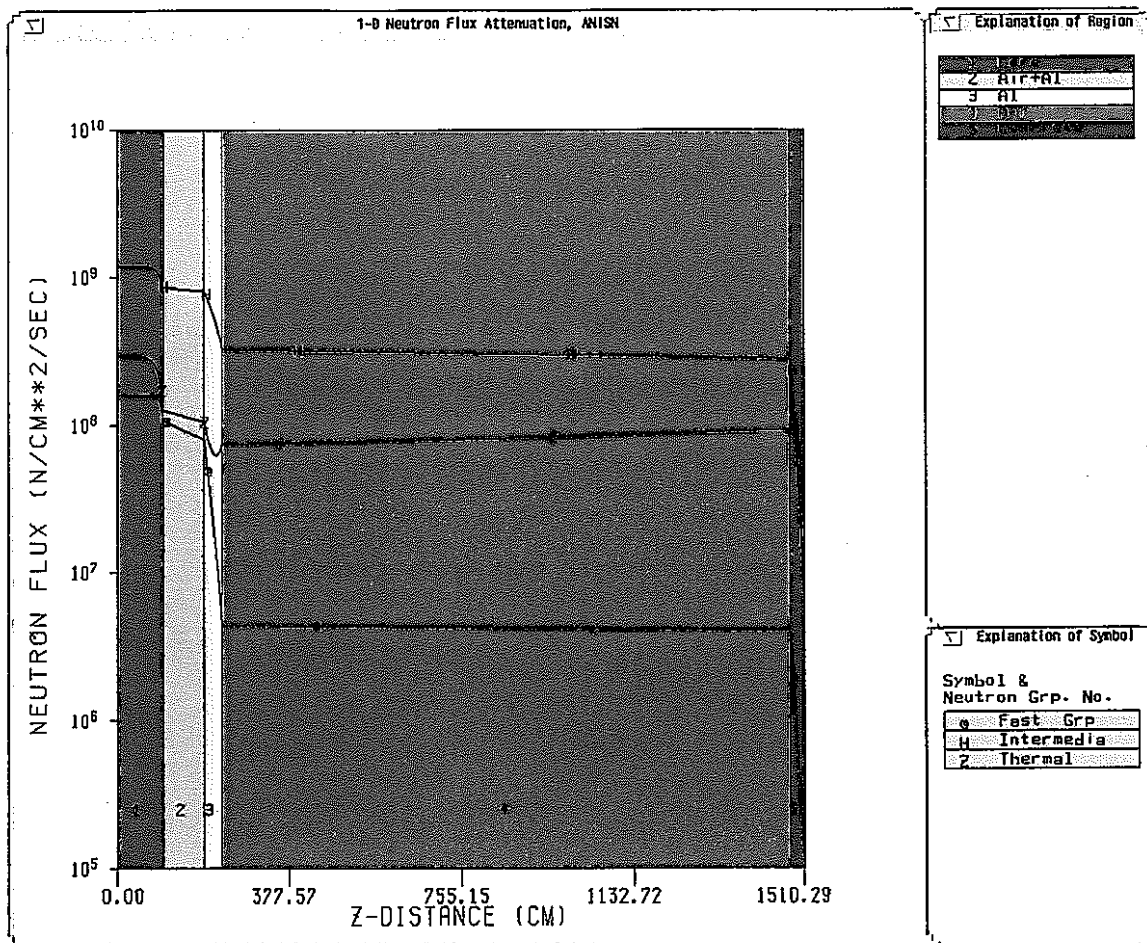


図 4.20 上部軸方向 1 次元中性子束分布(アルミニウムモデル)

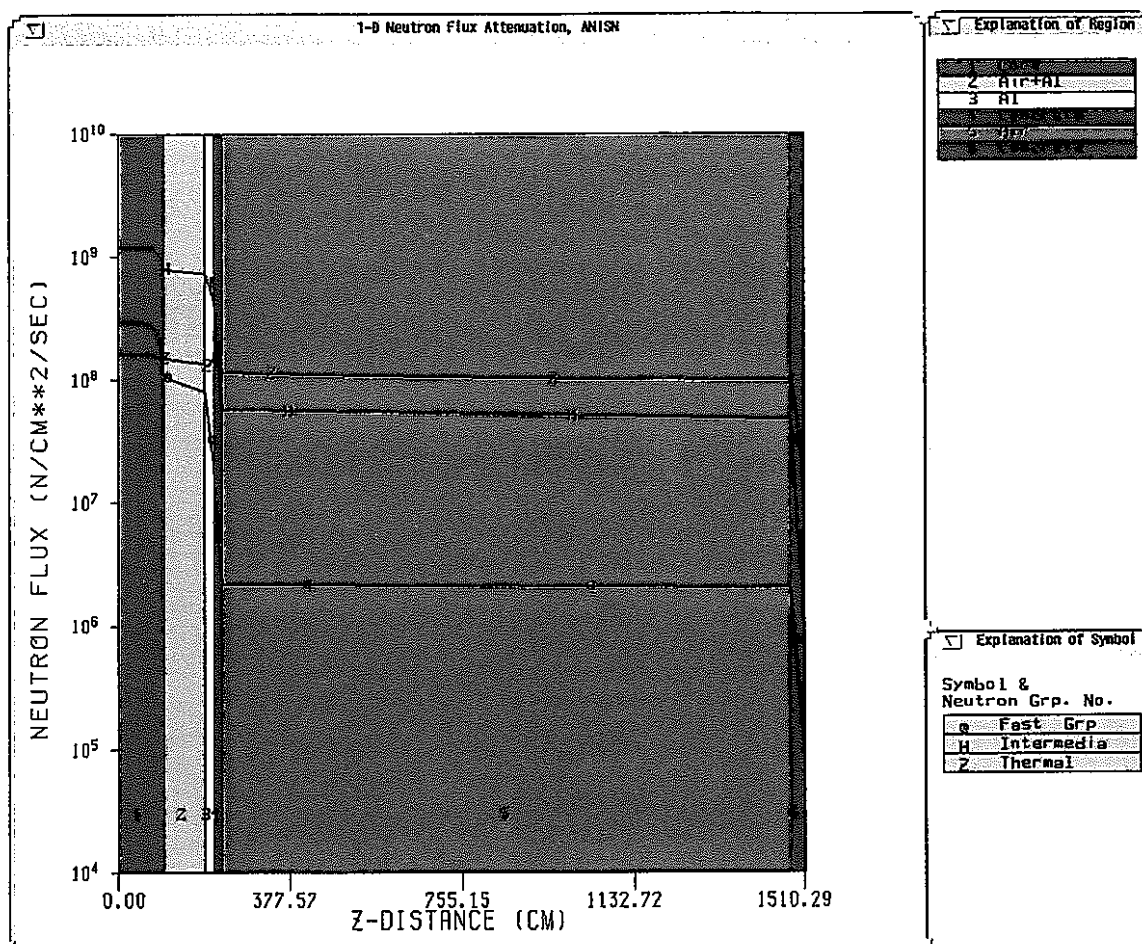


図 4.21 上部軸方向 1 次元中性子束分布
(アルミニウム+コンクリートモデル)

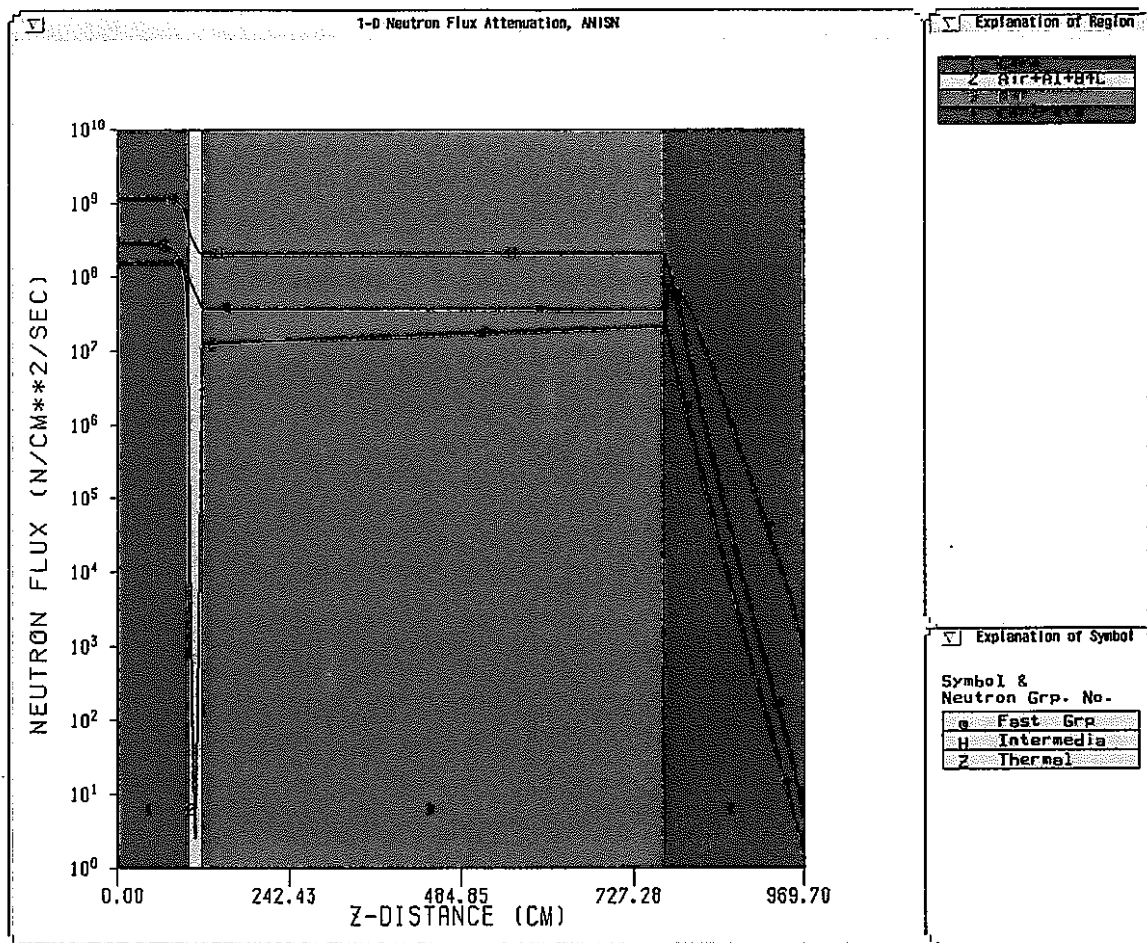


図 4.22 下部軸方向 1 次元中性子束分布(空気モデル)

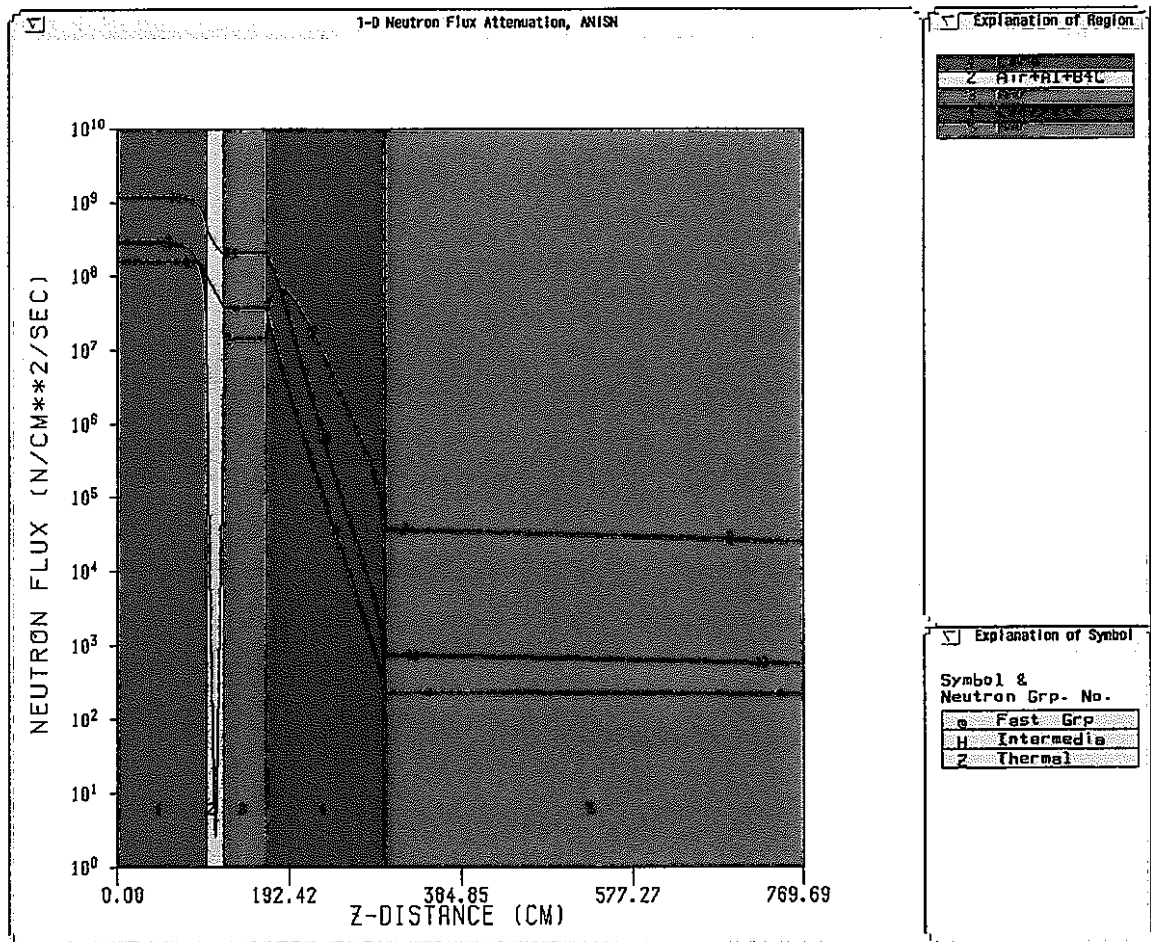


図 4.23 下部軸方向 1 次元中性子束分布
(空気+コンクリートモデル)

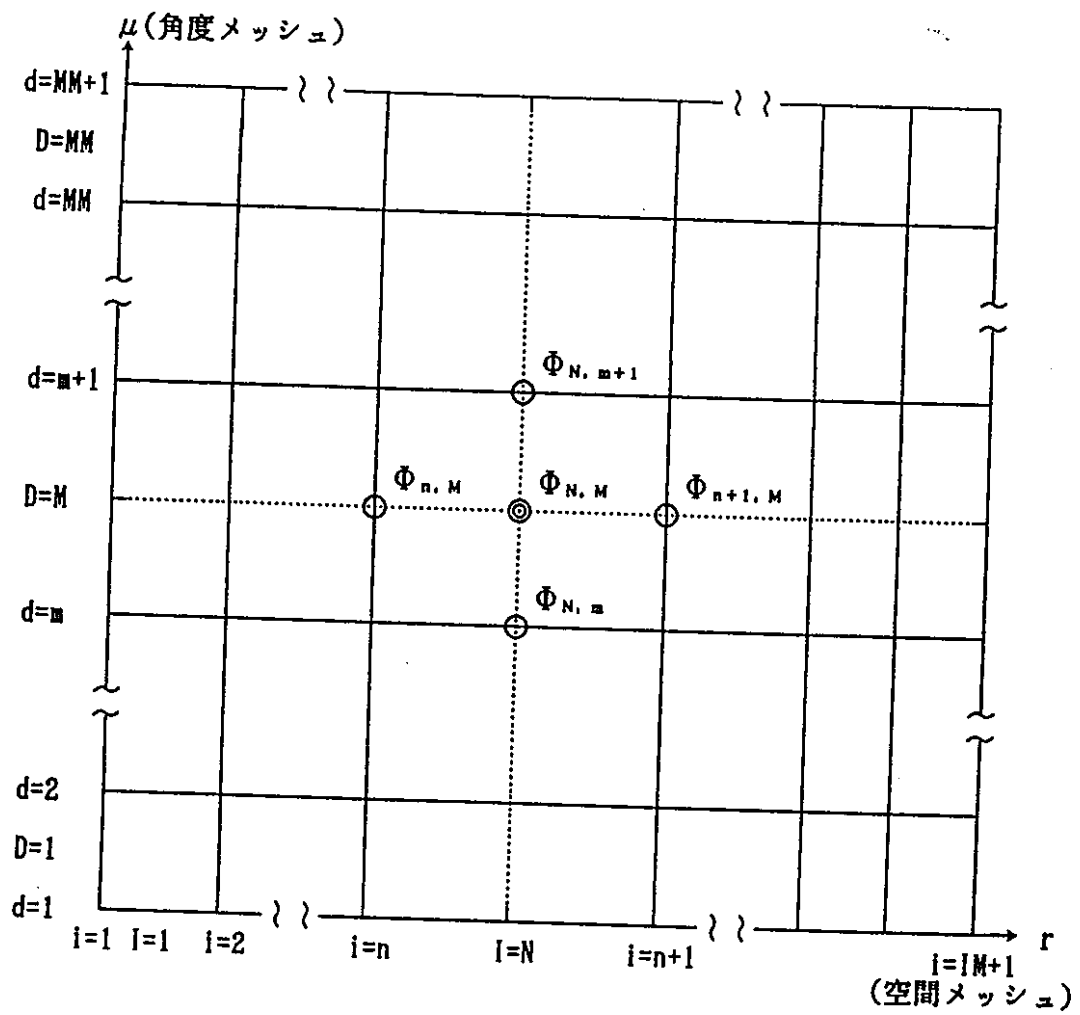


図4.24 一次元球形状における空間と角度メッシュのダイヤモンド差分配率

OMATL NUMBER BY INTERVAL -MAPR-

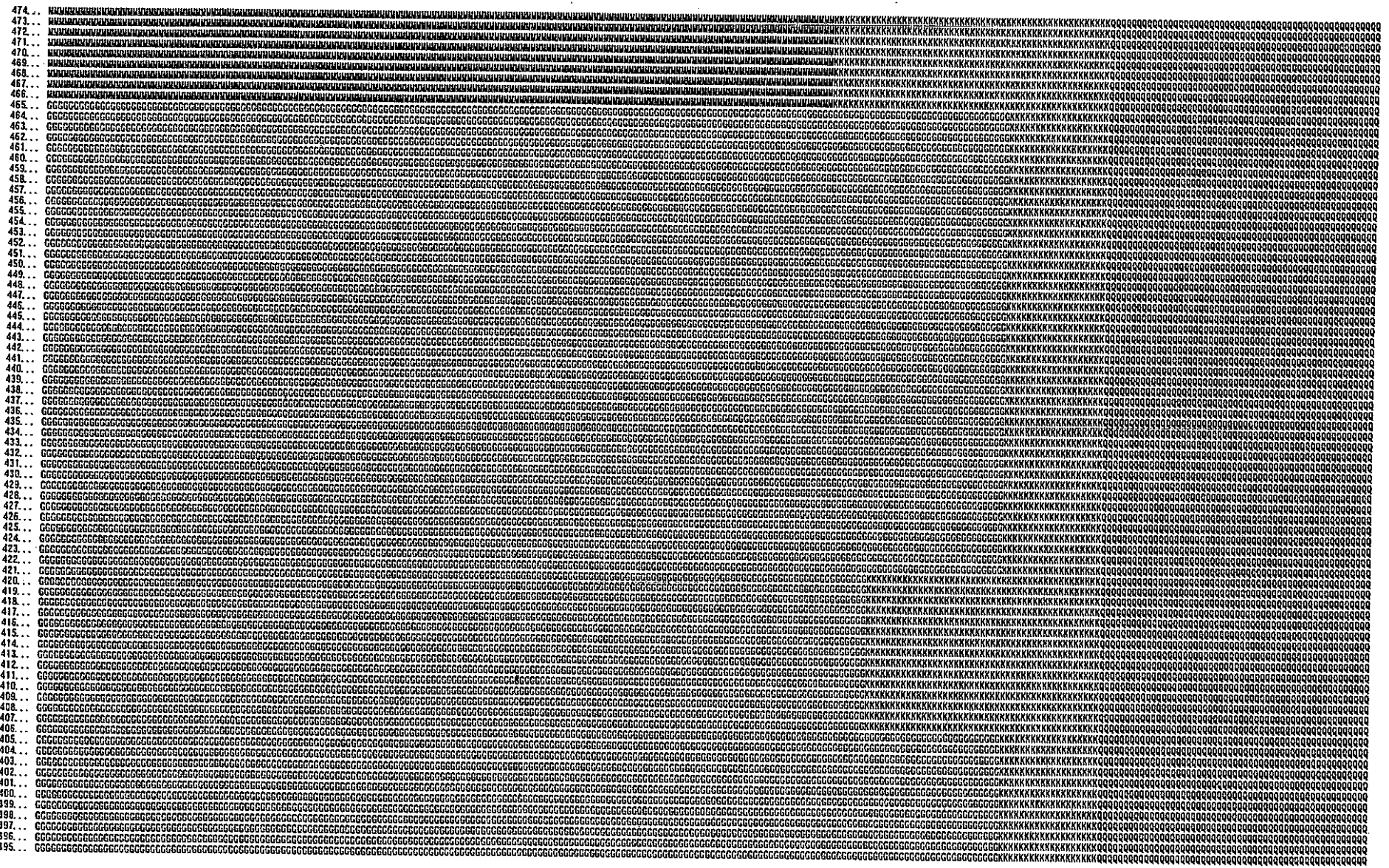


図4.25 2次元中性子束計算モデル(1)

図4.25 2次元中性子束計算モデル(2)

図4.25 2次元中性子束計算モデル(3)

図4.25 2次元中性子束計算モデル(4)

図4.25 2次元中性子束計算モデル(5)

Table of material

C = Concrete	B = Al	P = Concrete	F = Air
K = Concrete	E = Air	X = Core	L = Fe(SS41)
Q = Air	Z = Al+Air+B4C	4 = Al+Air	R = Concrete
6 = Air	T = Core	2 = Air	N = Concrete
7 = Air	7 = D2O	B = Concrete	
1 = Concrete	D = Al	A = Al	
U = Air	J = Air	G = Air	

図4.25 2次元中性子束計算モデル(6)

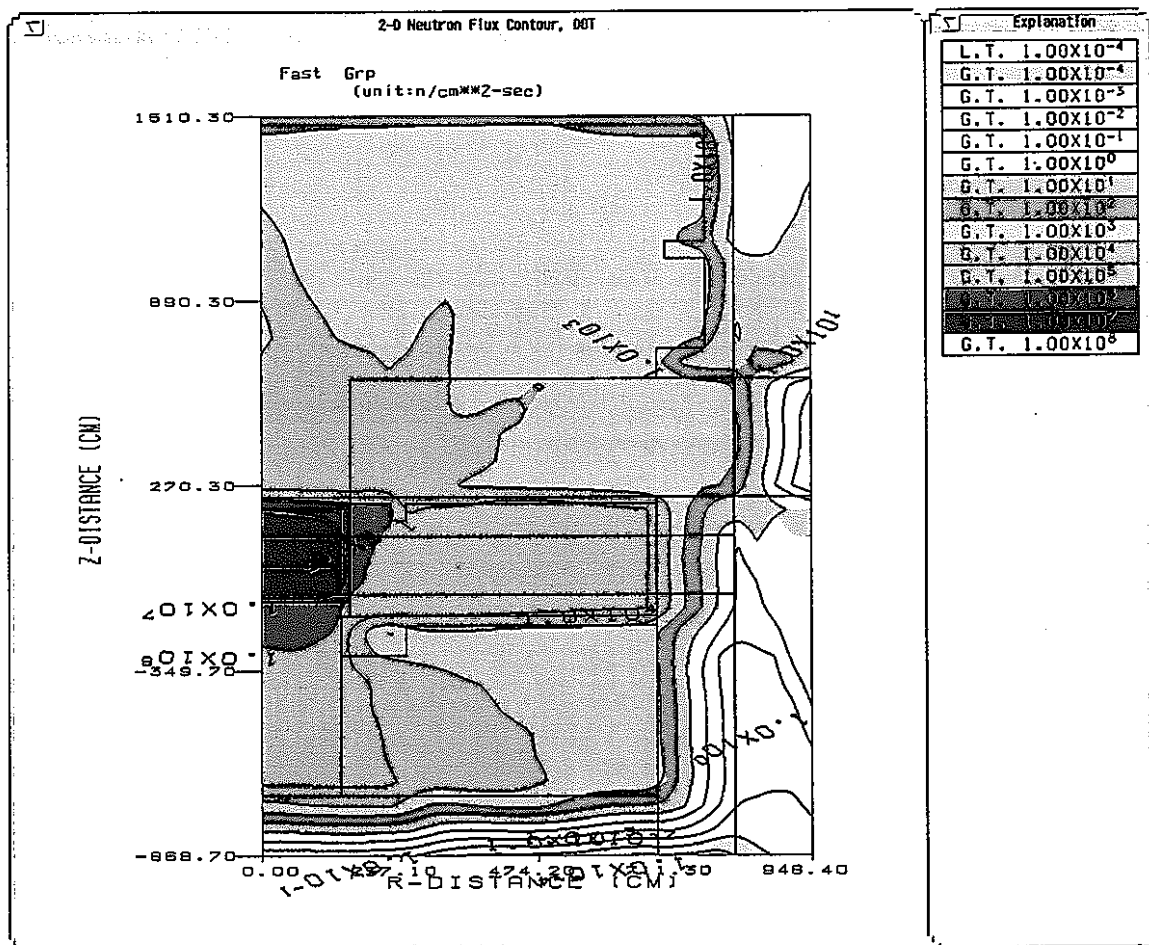


図 4.26 2次元中性子束分布(速中性子エネルギー領域)

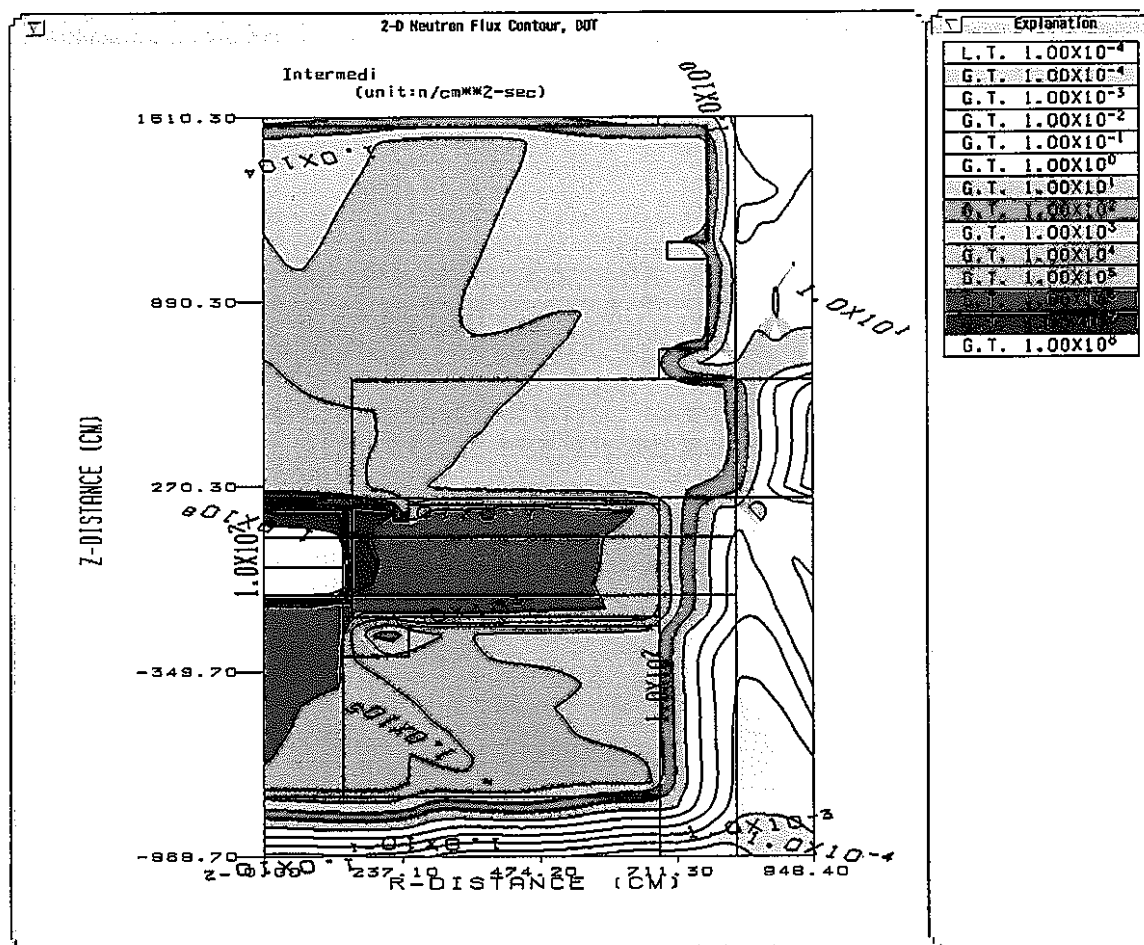


図 4.27 2次元中性子束分布(中間エネルギー領域)

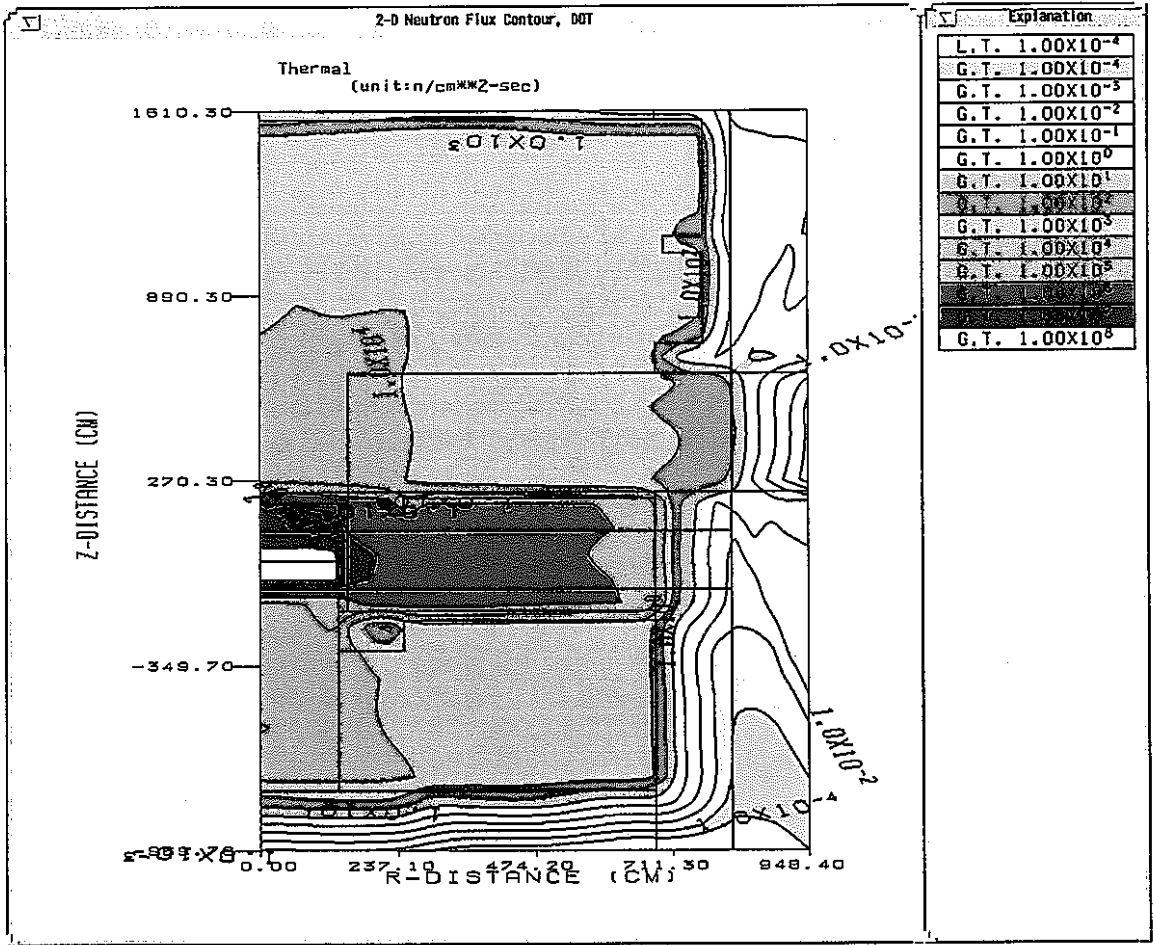


図 4.28 2次元中性子束分布(熱中性子エネルギー領域)

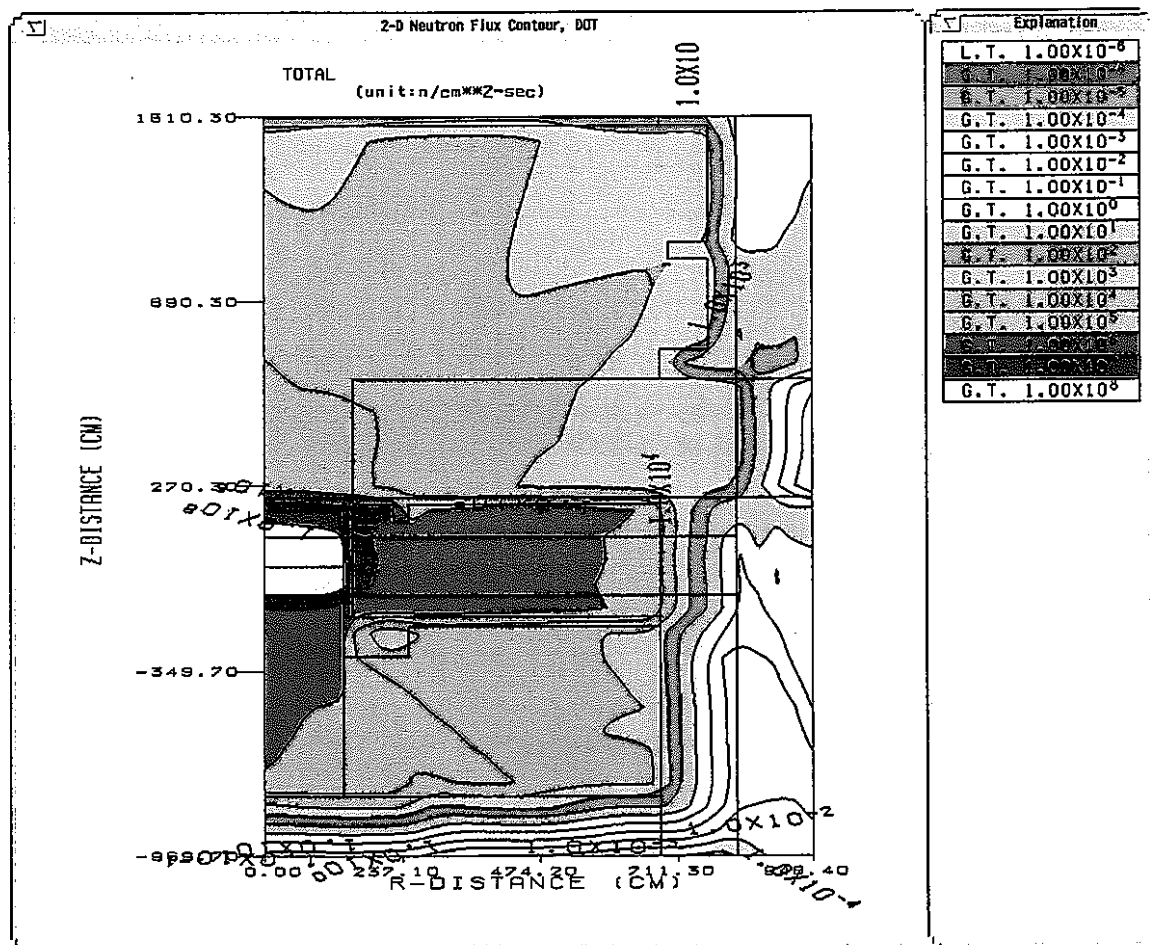


図 4.29 2次元中性子束分布(全エネルギー領域)

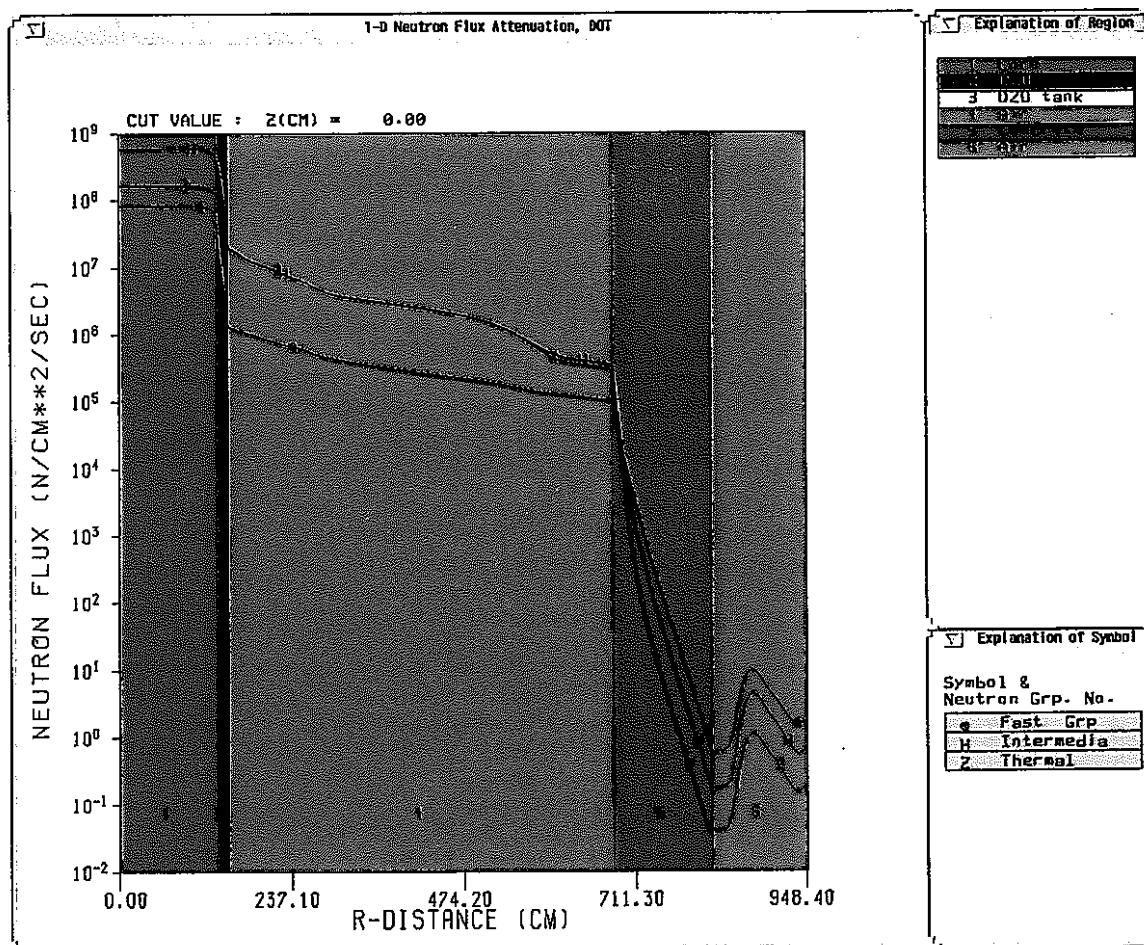


图 4.30 半径方向中性子束分布(炉心中心)

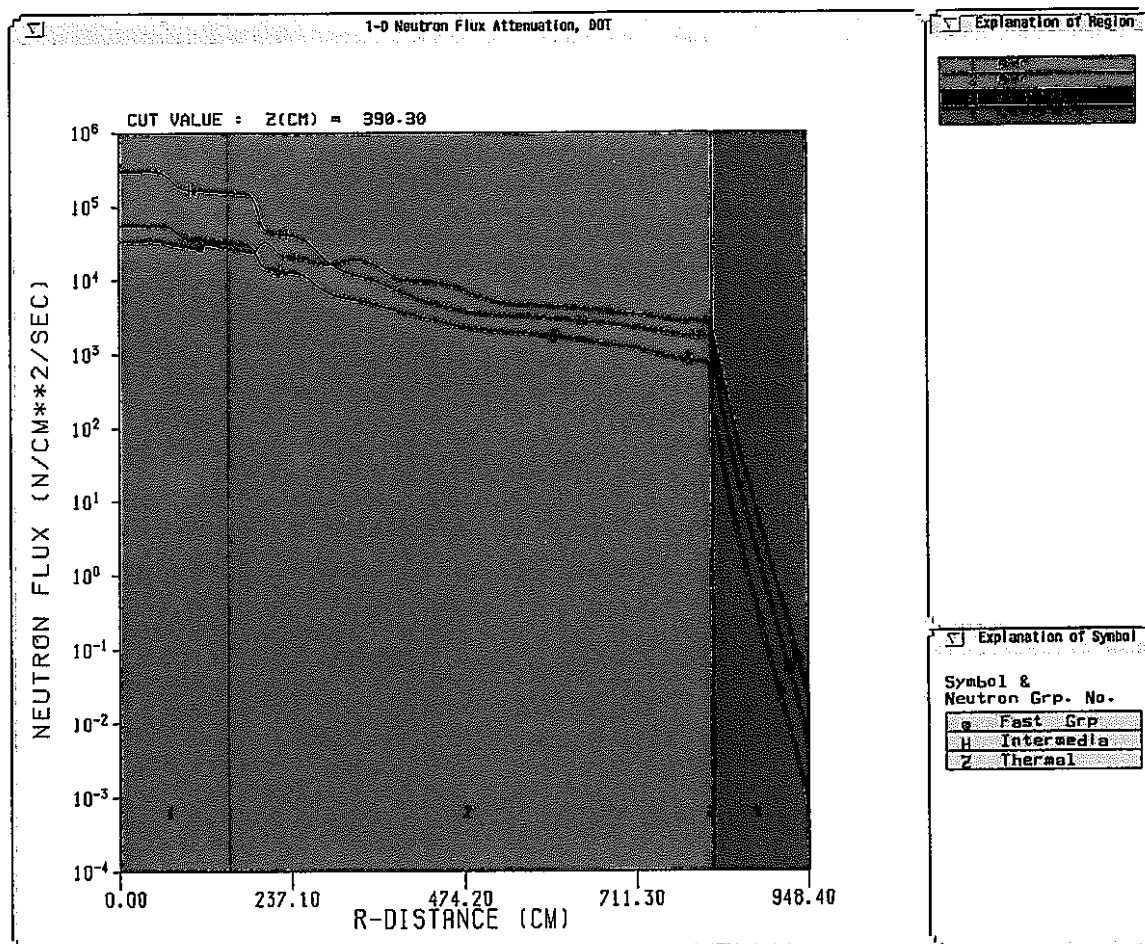


图 4.31 半径方向中性子束分布(炉心 2 階近傍)

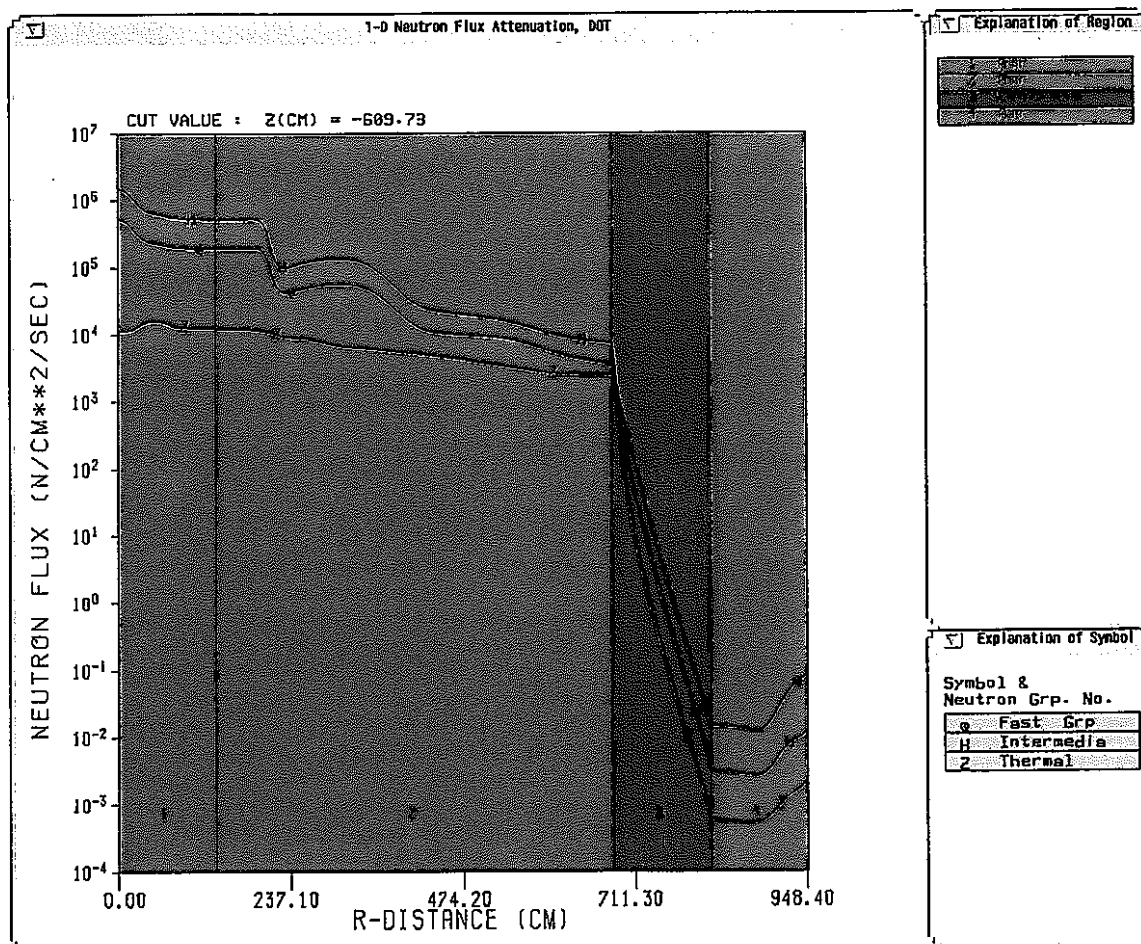


图 4.32 半径方向中性子束分布(地下 1 階近傍)

QUAL NUMBER BY INTERVAL -MAPR-

[illegible]

図4.33 炉心内2次元中性子束計算モデル(1)

[illegible]

Table of material

8 = Al
Z = Al+Air+B4C
T = Core
7 = D2O
D = Al
X = Core
4 = Al+Air
2 = Air
A = Al

図4.33 炉心内2次元中性子束計算モデル(2)

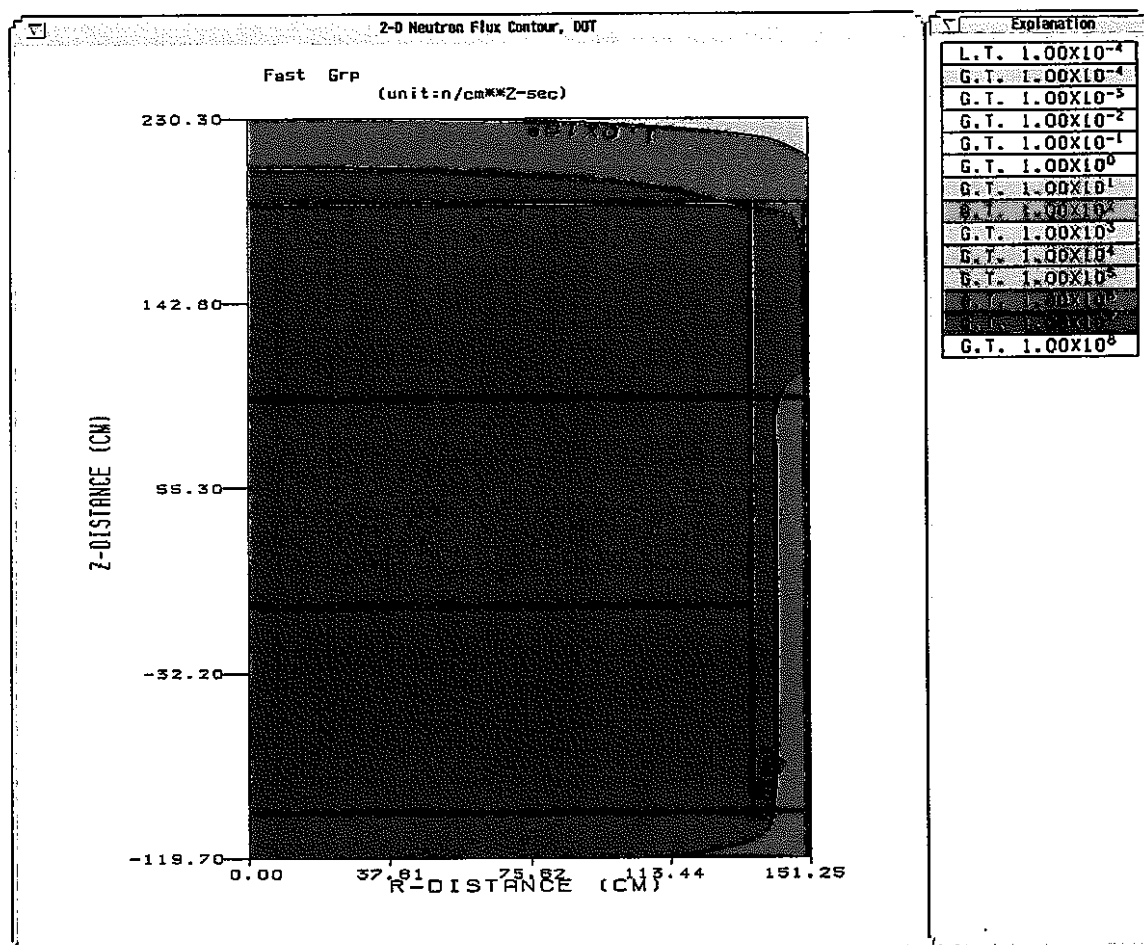


図 4.34 炉心内 2 次元中性子束分布(速中性子エネルギー領域)

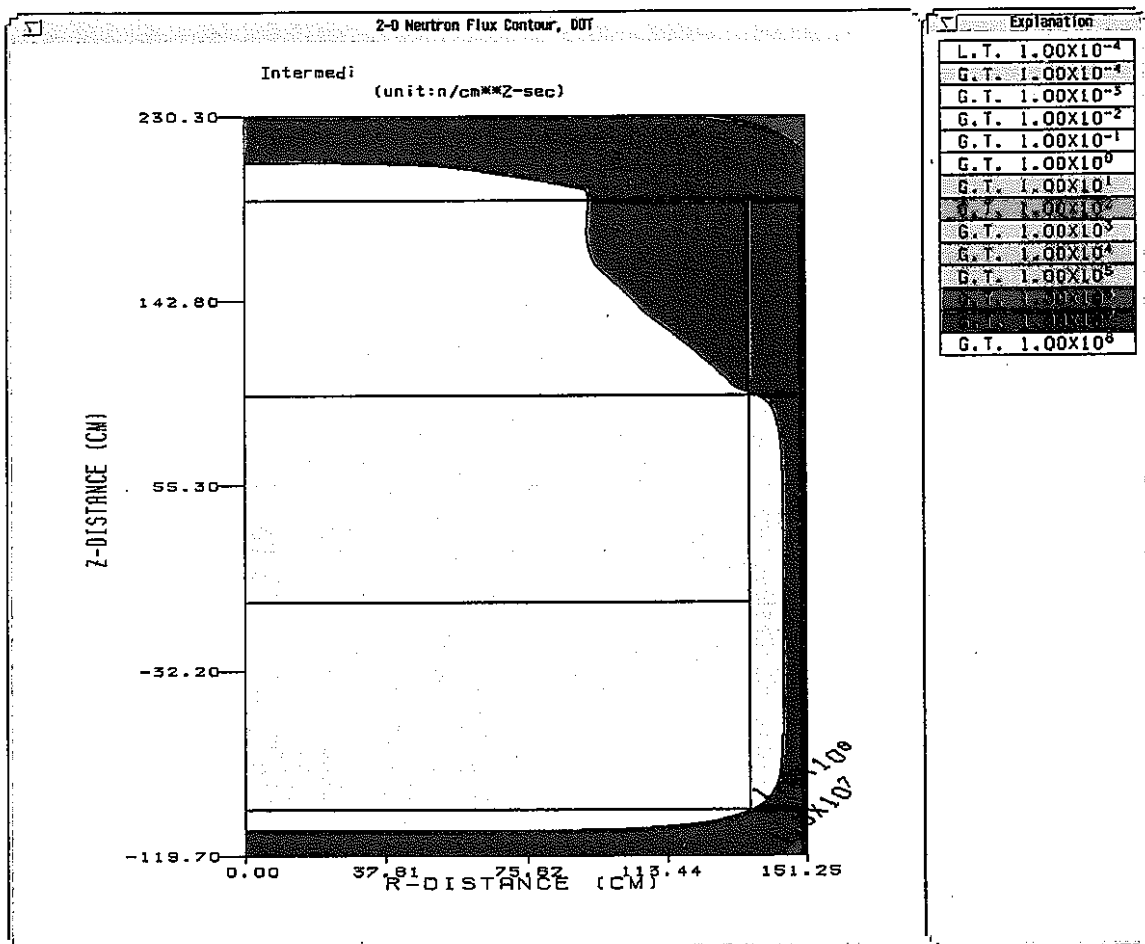


図 4.35 炉心内 2 次元中性子束分布(中間エネルギー領域)

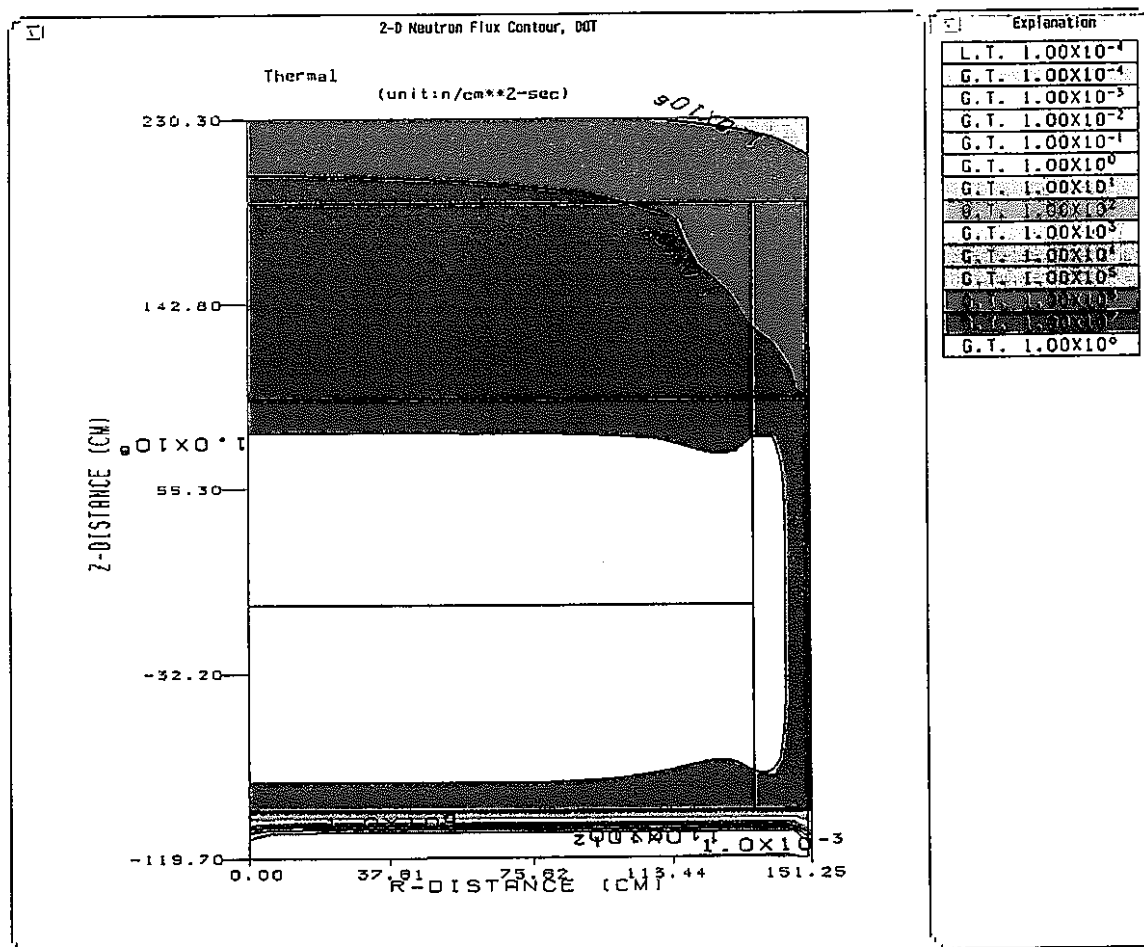


図 4.36 炉心内 2 次元中性子束分布(熱中性子エネルギー領域)

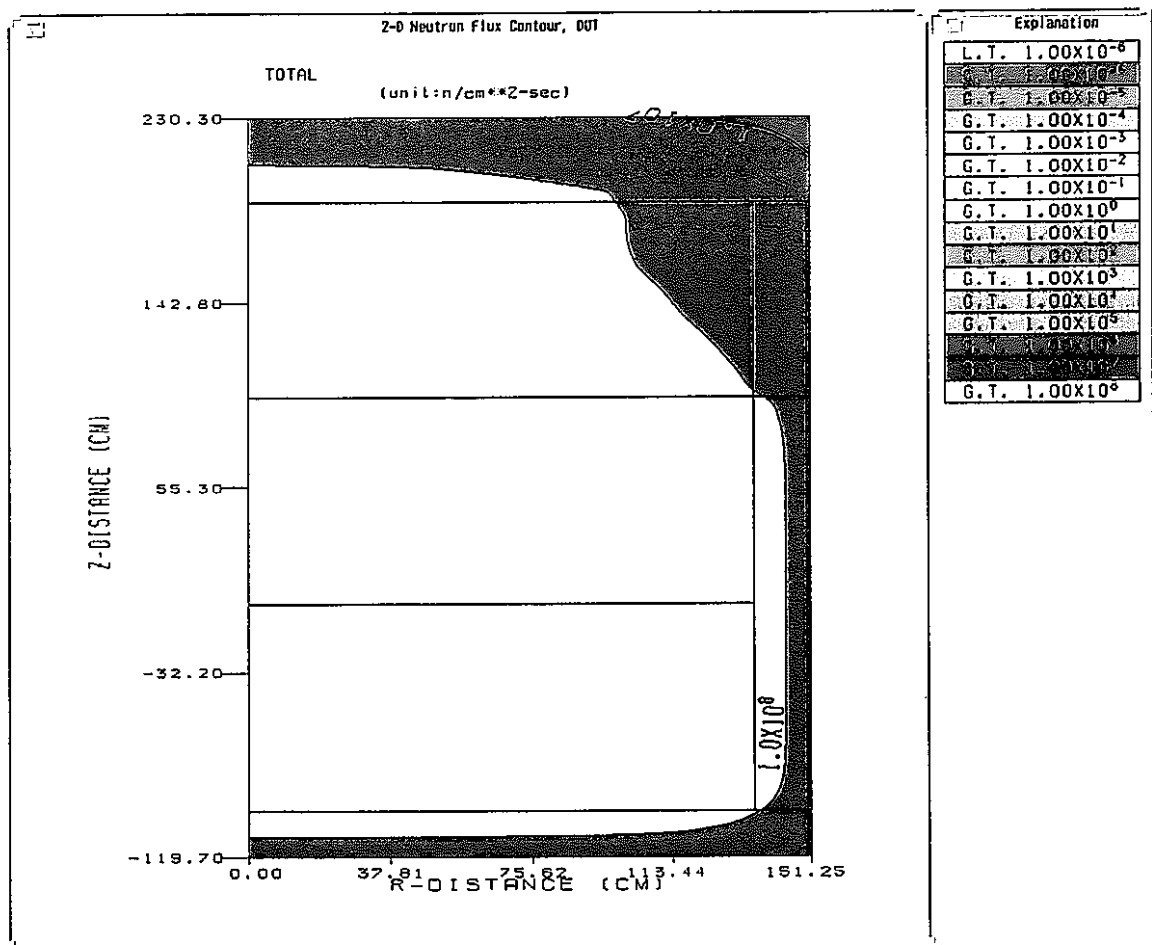


図 4.37 炉心内 2 次元中性子束分布(全エネルギー領域)

5 放射能インベントリの評価

5.1 前提条件

先に行った炉室内における炉心構造材や生体遮蔽物体の中性子束分布を用いて、放射化放射能の計算を行った。さらに、炉心構造材については、重要な核種の飽和係数を求める計算を行った。

以下に、それら計算で用いた計算条件を示す。

5.1.1 放射能インベントリ計算

計算条件

使用コード : 燃焼計算コード (ORIGEN-MD)

炉出力 : 1kw

運転時間 : 50 時間

放射能評価時期 : 原子炉停止直後 (50 時間後)

その他の条件

- ・ 放射能インベントリ評価構造物は、以下に示す物を評価した。

また、これらの物質の組成データを表 5.1 に示す。ただしアクチニド核種である Th、U は除外した。さらに総放射エネルギーを求めるために使用した体積及び重量を表 5.2 に示す。

1) 炉心構造材

- 反射体 (D_2O)
- Upper grid (Al)
- Al タンク (重水位置)
- Al タンク (空気位置)
- Lower grid (Al+B₄C)

2) 炉室構造材

- 生体遮蔽扉 (Fe)
- 1 階炉心近傍 (コンクリート)
- 2 階炉心近傍 (コンクリート)
- 生体遮蔽扉近傍 (コンクリート)
- 地下 1 階 (コンクリート)
- 天井 (コンクリート)
- 壁 [炉心半径方向] (コンクリート)

- ・ 比放射能を求めるときの中性子フラックスは、それら構造材で高い箇所の

1 領域当たりのフラックスを用いた。

5.1.2 飽和係数の計算

計算条件

使用コード : 燃焼計算コード (ORIGEN-MD)
 炉出力 : 1kw
 運転時間 : 50 時間、100 時間、500 時間、1000 年
 放射能評価時期 : 原子炉停止直後
 (50 時間後、100 時間後、500 時間後、1000 年後)

その他の条件

- ・ 飽和係数を求める放射能インベントリ評価構造物は、以下に示す物を評価した。

また、それらの物質の組成データを表 5.1 に示す。ただしアクチニド核種である Th、U は除外した。

- 反射体 (D₂O)
- Upper grid (Al)
- Lower grid (Al+B₄C)

- ・ 飽和係数は、以下の式により求められる。

$$A = [1 - \exp(-\lambda T)] A_0$$

ここで、照射時間 T 後の生成物の放射能を A とし、 λ は崩壊定数、 A_0 は飽和放射能である。つまり、飽和係数 $[1 - \exp(-\lambda T)]$ は A/A_0 で求めることができる。

そこで、 A_0 を求める時間が必要であるが、その時間は λ の逆数で類推できる。しかし、照射時間を無限にとれば必ず飽和放射能を得られることができるので、本評価では無限の値として 1000 年として飽和係数を求めた。

- ・ 飽和係数を求める核種は、半減期が 1 カ月以上及び生成量が多い主要な β , γ 放出核種とした。ただし Cr は、半減期が 1 カ月以下の核種であるが、重要な核種であるために飽和係数を求める核種に含めた。以下に求める核種を示す。

³H、¹⁴C、²⁴Na、²⁸Al、⁵¹Cr、⁵⁴Mn、⁵⁶Mn、⁵⁵Fe、⁵⁹Fe、⁶⁰Co、⁶³Ni、⁶⁵Zn

・比放射能を求めるときの中性子フラックスは、それら構造材で高い箇所の 1 領域当たりのフラックスを用いた。

5.2 計算体系

計算モデルを図 5.1 に示すともに、計算箇所を表 5.3 に示す。

5.3 結果と評価

既述したように、中性子束分布の今回の計算結果は、放射線管理設備の中性子エリアモニタからの実測値から類推した中性子束の結果とほぼ一致し、計算が妥当であることが明らかとなった。従ってこの中性子束分布の計算結果を用い、後述する第 5.4 節の方法により各核種の放射能インベントリおよび主要核種の飽和係数を評価した。

各核種の放射能インベントリ結果を表 5.4 から表 5.8 に、また主要核種の飽和係数を表 5.8 から表 5.10 にそれぞれ示した。

表 5.4 は、炉心造材のうち主要な構造材である重水、上部グリッド板、下部グリッド板および炉心タンクに対する比放射能結果を示している。炉心タンクについては、材料は同一であるが重水反射体がある領域（炉心領域）とない領域（非燃料領域）の 2 つの領域に区分して評価した。これは、解体を実施する場合、放射化量の量により解体手順が変わるためそれに資するためである。表 5.5 は、炉室構造材のうち主要な箇所での比放射能結果を示している。

これらの比放射能結果から算出した全放射エネルギーの結果が表 5.6 と表 5.7 である。

比放射能を算出した材料の組成については、動燃から提示されたものを用いた。

表 5.4 の結果について検討する。

重水反射体の ^3H 比放射能は、表 5.4 から 1.46Bq/g となっており、これは第 2 章で記述した重水の比放射能測定値約 2Bq/cc とほぼ同じ値となっている。計算は、 1kw50 時間運転直後の値であり、実際よりは大きく評価している。過去の DCA 運転履歴によると年間 1kw50 時間近く運転したことおよび ^3H の半減期が 12.3 年と長いことを考慮すると計算結果は、現実離れた数字となっていないと思われる。従って測定値に近い値になっていると考えられる。

また上、下部グリッド板および炉心タンクについては、主要材質はアルミニウムのため、これらについては、まとめて考察する。

第 3 章では、主要核種の IAEA および EU のクリアランスレベルの参考値が示されているが、表 5.4 の結果から代表核種については、これらクリアランスレベルの無条件の範囲に入るものはないことがわかる。しかし表 5.4 の結果を詳

細にながめてみると、当然のことながら ^{28}Al の生成量はかなり多く、最大 10^5Bq/g 程度となっている。次に多いのは ^{27}Mg で最大 10^3Bq/g 、 ^{56}Mn 等と続くが、これらはいずれも半減期が非常に短く（時間のオーダー）解体開始時期および放出放射線エネルギーを考えると問題になる量ではない。

次に表 5.5 の炉室構造材の比放射能について考察する。これらは、第 4 章で考察したように中性子束レベルが非常に小さいところであるため比放射能としては、非常に小さく表 5.4 の炉心構造材の比放射能と比較しても小さいことがわかる。炉室構造材の大半を占めるコンクリート材には、表からもわかるように他の鋼材に含まれている ^{55}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu などの主要核種以外にトリチウムが生成されているが、その比放射能は、2 階炉心近傍のコンクリートで $5.6 \times 10^{-2}\text{Bq/g}$ となっており、他の場所に比べ高い数値となっている。このためコアボーリングを実施し、試料分析を実施した方が良いと思われる。

以上の比放射能の結果と各構造材の重量を用い、全放射エネルギーを評価した結果が表 5.6 表 5.7 に示されている。表 5.6 から炉心構造材の全放射エネルギーは $5.6 \times 10^{11}\text{Bq}$ となることがわかる。内訳をみると上部グリッド板が最大となっており、次いで下部グリッド板となっている。総放射エネルギーの大半は、半減期の短い核種で占められており、冷却期間が長くなると消滅するものがほとんどである。一方重水中のトリチウム放射エネルギーは、表 5.6 の結果から $4.2 \times 10^6\text{Bq}$ となっているが、これは重水反射体部のみの重水として評価しているため過小評価となっているが、DCA 系統内重水量も考慮して総重量約 20t とすると、生成トリチウム量は、約 $3 \times 10^7\text{Bq}$ となり、半減期が長いため、解体作業を検討する場合一考する必要がある。

ちなみに、他の研究炉の運転停止直後の放射化放射エネルギーは、原子力船「むつ」で $5 \times 10^{15}\text{Bq}$ 、JRR-3 で $2 \times 10^{16}\text{Bq}$ 、115 万 kWe の BWR（30 年間運転）で $2 \times 10^{17}\text{Bq}$ となっている。DCA の場合熱出力 1kW の臨界装置であるため、当然のことながら $5.6 \times 10^{11}\text{Bq}$ 程度におさまっている。

次に、飽和係数について考察する。

表 5.8 から表 5.10 は、炉心構造材（アルミニウム）、炉心構造材（アルミニウム + B_4C ）および重水中に生成された主要核種の飽和係数を示したものである。

これらの結果から、半減期が短い核種（ ^{24}Na 、 ^{28}Al 、 ^{56}Mn ）では 500 時間までの照射で既に飽和値に達していることがわかる。これらの核種はいずれも半減期は時間のオーダー以下である。一方、半減期が日や年オーダーになると 500 時間位の照射では飽和値に達しないが 1,000 年も照射すれば ^{63}Ni （半減期約 100 年）でも飽和している。但し半減期約 5.7×10^3 年の ^{14}C は別である。この核種は年代測定に使われている核種であり、DCA の照射位置では 10^5 年も照射すれば飽和に達し、その値は $9.3 \times 10^{-2}\text{Bq/g}$ となる。

一般に核反応による放射性核種の生成量は次式から求められる。

$$N^* = \frac{Nf\sigma(1-e^{-\lambda t})}{\lambda}$$

$$A = Nf\sigma(1-e^{-\lambda t})$$

$$A = Nf\sigma \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{t/T} \right\}$$

ここで、

N^*	時間 t の照射によって生成する放射性核種の原子数
N	ターゲットの中の着目した安定核種あるいはある元素の原子数
f	線束密度 [$\text{cm}^{-2}, \text{s}^{-1}$]
σ	核反応断面積 [b] ($1\text{b}=1 \times 10^{-24} \text{cm}^2$)
	N を安定核種の原子数とする場合…原子断面積 [σ_{is}]
	N をターゲットの中のある元素の原子数とする場合… 原子断面積 [σ_{at}]

$$\sigma_{at} = \frac{a}{100} \cdot \sigma_{is}$$

λ	生成核種の壊変定数
A	照射終了時における放射能
t	照射時間
T	半減期。

上式から明らかなように、

$t \ll$ のとき $N^* \rightarrow Nf\sigma t$, $A \rightarrow Nf\sigma \lambda t$

$t \gg$ のとき $N^* \rightarrow Nf\sigma / \lambda$, $A \rightarrow Nf\sigma$

となる。

従って照射時間が半減期に比べ十分短い核種の場合、飽和係数 A/A_0 (但し、 A_0 は飽和放射能) は、上式から λt に比例することがわかる。ちなみに表 5.8 表 5.9 に示された半減期の長い ^{63}Ni の 500 時間照射では上式から求めた飽和係数は、 0.4×10^{-3} 程度となり今回の計算値と良く一致している。

逆に照射時間が半減期に比べ十分長い核種の場合、上式から当然 $A/A_0=1.0$ となり、表 5.8 および表 5.9 の結果は、そのとおりになっている。

以上の検討結果から、飽和係数を簡単に評価する場合、DCA を対象とすると上式で評価できることが明らかとなった。

5.4 評価方法

原子炉から発生した中性子は周辺の機器や構造物、冷却材、及び空気との核反応により、これらの材料中に放射性同位体を生成する。この現象が放射化であり、生成した放射性同位体は誘導放射能と呼ばれる。

誘導放射体は核種によってその半減期が大きく異なる。そのため、炉の運転時に放射能が強く炉の停止後直ちに減衰する核種、炉の停止後もしばらく残り保守・点検時に作業員への被曝を起こす核種、および廃炉後も長期間残り放射性廃棄物として管理し続けなければならない核種がある。あるいは、運転時にも冷却材の循環によってその中の誘導放射能が炉の遮蔽体の外側に移動したり、炉室内の放射化された空気の排気によって、施設外の公衆への被曝の危険性を生じる。したがって、いつの時点でのどの様な人々に対する被曝を問題にするかによって、注目する誘導放射能の核種も異なってくる。

ある場所に生成される誘導放射能 i の量 dX_i/dt は次式で概略表現できる。

$$\frac{dX_i}{dt} = \int \phi(E) \sum_k f_{ik} \sigma_k(E) X_k dE + \sum_j l_{ij} \lambda_j X_j - \left\{ \lambda_i + \int \phi(E) \sigma_i(E) dE \right\} X_i$$

ただし、 X_i は生成誘導放射能 i の原子数密度、 X_k はターゲット核種 k の原子数密度、 $\phi(E)$ はその場所での中性子エネルギースペクトル、 $\sigma_k(E)$ は核種 k の中性子吸収面積、 f_{ik} は核種 k に吸収されたとき核種 k を生成する割合、 λ_i は崩壊定数及び l_{ij} は核種 j が崩壊したとき核種 i を生成する割合である。ここで注意しなければならないことは、放射化断面積が核種によって大きく異なることである。そのため、一般の遮蔽計算では注目されない微量元素であっても、放射化量は他の元素と同等又は最も主要な誘導放射能を生成することがある。

(例えば、ステンレススチール中の Mn, Co, Nb、コンクリート中の Li, Sc, Co, Cs, Eu) したがって、微量元素に対しても注意を払い、化学分析等によりその含有量を明らかにする必要がある。その他、長半減期のもの、強いガンマ線を出すものにも注意が必要である。

誘導放射能を生成する主な反応は、一般に熱中性子などの低エネルギー中性子によって起こる (n, γ) 反応、数 MeV 以上の高エネルギー中性子によって起こる (n, p) 反応、 $(n, 2n)$ 反応、 (n, np) 反応、 (n, d) 反応および (n, α) 反応がある。

現在、核分裂炉の周辺構造物の放射化を計算する汎用コードで一般に公開されているものはなく、遮蔽設計者が必要に応じて既存の核燃料燃焼コードを改良して使用しているのが実状である。それらのコードには、ORIGEN, DCHAIN 等がある。前者は米国 ORNL で開発され、後者は原研で開発されたものである。

これらの計算コードは燃料計算コードと呼ばれ、任意の照射・冷却時における核種組成を計算し、生成された放射性同位元素から放出される種々の放射線の強度及びエネルギー分布を算出する機能を持っている。核分裂生成核種等で

取り扱う核種数が膨大であることから、体系は 1 点炉で近似の連立微分方程式で前述の式となる。

以下に今回の評価に用いた ORIGIN コードの概要について紹介をする。ORIGIN は、前述の式の解法として指数関数の級数展開を利用した Matrix Exponential 法を用いている。

ORIGIN コードは 1960 年代の終りから 1970 年代の始めにかけて米国オークリッジ国立研究所(ORNL)で開発され、1970 年代の始めに RSIC から公開された。公開されると ORIGIN コードは当初予期した範囲を越えて、環境評価、安全評価用のソースデータ作成に用いられ、これに伴って主に核データライブラリーの改訂がその後行われている。現在 ORIGIN コードとして最も新しいバージョンは 1979 年に RSIC よりリリースされた ORIGIN-79(CCC=217)である。一方、1980 年には ORIGIN コードの全く異なるバージョンである ORIGIN-2 が RSIC よりリリースされている。この様に ORIGIN コードは公開されて後、主として核データライブラリーの改訂が行われてきているが、計算手法、原子炉モデル等は変わっていない。

ORIGIN2 に収納されている核データライブラリーは一群の中性子反応断面積ライブラリー（核分裂収率を含む。）、生成核種の崩壊データライブラリー及び光子データライブラリーの 3 つに大きく分けられる。一群の中性子反応断面積は炉型、燃料の種類、燃焼度等に依存するため、それらに応じて 39 個のファイルが用意されている(PWR, BWR, LMFBR, CANDU, 2200m/s 断面積, U, Pu, Th 等)。さらに各ファイルには核分裂とアクチノイド生成のデータに加えて、放射化のデータが収納されている。放射化データは天然に依存する核種のほとんどを用意している(1H から 210Po までの 394 核種)が、これらはジルカロイなどの燃料構造材と燃料中の低原子番号不純物を扱うことを意図しているようである。

原子炉周辺構造材の放射化計算を上記のコードを用いて行う場合、下記の点に注意する必要がある。

ORIGIN2 の放射化断面積は 2200m/s 断面積を除き、燃焼期間を考慮して平均化された炉心の中性子スペクトルで一群に縮約されたものであるため、遮蔽計算のためには含水量及び温度による熱群スペクトルの差異も含めて、周辺構造材中での中性子スペクトルを考慮した断面積を使う必要がある。

コードではあらかじめ原子炉型及び燃料組成に対応した実効断面積ライブラリが用意されている。下記には ORIGIN2 コードで断面積ライブラリの種類を示す。

軽水炉(PWR, BWR) : U 燃料、U-Pu 燃料、U-Th 燃料

LMFBR : U-Pu 燃料、U-Pu-Th 燃料、U-Th 燃料

CANDU : 天然ウラン燃料、微濃縮ウラン燃料

熱中性子断面積 (2200m/s 中性子)

また、ORIGEN-S コードでは 1 次元体系の中性子輸送計算で求めた多群の中性子スペクトルを用いて実効断面積を算出することができる。

次に計算の流れに従って使用上の注意点を述べる。

1) ライブラリの選択、初期組成の入力等

炉型及び燃料の組合せに応じて実効断面積ライブラリを選択する。ORIGEN 及び ORIGEN-JR コードではスペクトルインデックスを用いて実効断面積の調整ができる。一方、ORIGEN2 コード等では実効断面積の調整はできないので、炉型及び燃料の組み合わせが既存のライブラリと異なる場合には改めて計算により断面積ライブラリを作成する必要がある。即ち、計算で得られた炉心スペクトルを重みとして断面積ライブラリを作成している。

次に、燃料及び構造材の初期組成を重量（グラム）或いは原子数（グラム原子）単位で入力する。放射化量の計算では構造材中に含まれる微量不純物量の推定が重要であり、構造材のミルシートにデータがない場合には最大値を使わざるをえない。注目元素としては、鋼材中のコバルト、コンクリート中のユウロピウム、 ^{14}C の発生に關与する燃料中の窒素等がある。微少量の構造材を低中性子束で照射する場合には計算誤差のため、正しい結果が得られないことがある。

2) 燃焼計算

燃料モデルに従って時間ステップ状の比出力或いは中性子束を入力して、燃料の燃焼或いは構造材の放射化を計算する。比出力を入力すると計算機内で時間平均の中性子束を計算するため、時間間隔の取り方によって計算結果が異なる場合がある。サンプル入力では照射ステップ燃焼度が 500MWd/t 以下に相当する時間間隔になっている。

3) 冷却計算

燃焼燃料、照射構造材等の放射性同位元素の減衰を計算するステップであり、燃焼計算ステップと異なり時間間隔の影響は小さい。

4) 再処理過程

ORIGEN2 コードでは、燃焼・冷却後の使用済燃料等を再処理工程に従ってウラン-プルトニウム成分、FP 成分等に分離することができる。分配係数については典型的な値が内蔵されているが、ユーザーが入力することも可能である。

以下に、放射能インベントリ評価に重要な断面積ライブラリについて述べる。ORIGEN コードを用いて燃焼計算を行う場合、対象とする原子炉を指定する必

要がある。

ORIGEN コードで指定できる炉型は次の 4 種類である。

- (1) 軽水炉 (LWR)
- (2) 高温ガス炉 (HTGR)
- (3) 溶融塩増殖炉 (MSBR)
- (4) 高速炉 (LMFBR)

これらの原子炉で使用する中性子断面積は、それぞれの代表的中性子スペクトルで平均化したものが、ライブラリーとして登録されている。

ここでは、今回対象としている熱中性子炉について述べる。熱中性子炉の実効断面積を計算するのに 3 群モデルを採用している。燃料中の体積平均の中性子スペクトルは熱中性子炉全て同じエネルギー依存性を示すが、その大きさが異なっている。3 群中の中性子束は、次の分布

Thermal region : マックスウェル・ボルツマン分布

Resonance region : $1/E$ 分布

Fast region : 核分裂スペクトル分布

に従うと仮定している。即ち、

$$\begin{aligned}\phi_1(E) &= \frac{E}{(KT)^2} \cdot e^{-E/KT} & 0 &\leq \\ \phi_2(E) &= \frac{1}{E} & 0.5\text{eV} \leq E < 1\text{MeV} \\ \phi_3(E) &= F(E) & 1\text{MeV} \leq E\end{aligned}$$

ここで、 $F(E)$ は核分裂スペクトルで $0.484e^{-E}\sin\sqrt{2E}$ に等しく、 K はボルツマン定数、 T は中性子温度である。

各群の実効断面積を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ とすれば、

$$\sigma_1 = \int_0^\infty \sigma(E) \phi_1(E) dE = \int_0^\infty \sigma(E) \frac{E}{(KT)^2} e^{-E/KT} dE$$

$1/v$ 吸収体:

$$= \left\{ \begin{array}{l} \sigma_0 \sqrt{\frac{\pi T_0}{4T}} \\ \text{非 } 1/v \text{ 吸収体:} \end{array} \right.$$

$$g \sigma_0 \sqrt{\frac{\pi T_0}{4T}}$$

ここで、 σ_0 は、2,200m/s 断面積、 g は非 $1/v$ 係数、 RI は共鳴積分で温度および共鳴自己遮へいの効果で補正したものであり、 σ_{fast} は核分裂スペクトルで

平均した断面積である。

これらの計算結果の反応率は次の様になる。

$$R = g\sigma_0 \sqrt{\frac{\pi T_0}{4T}} \sigma_1 + RI\phi_2 + \sigma_{\text{fast}}\phi_3$$

ここで ϕ_1 は全熱中性子束、 ϕ_2 は単位レサージ当たりの共鳴中性子束、 ϕ_3 は 1MeV 以上の速中性子束である。

ここで次の量を定義する。

$$\alpha = \phi_2 / \phi_1$$

$$\beta = \gamma \phi_3 / \phi_1$$

すると、前式の全反応率は次の様になる。

$$R = (g\sigma_0 \sqrt{\frac{\pi T_0}{4T}} + \alpha RI + \beta \sigma_{\text{fast}}) \phi_1$$

$$= \sigma_{\text{eff}} \phi_1$$

ここで、

$$\sigma_{\text{eff}} = g\sigma_0 \sqrt{\frac{\pi T_0}{4T}} + \alpha RI + \beta \sigma_{\text{fast}}$$

を実効断面積とする。 γ は 1MeV 以上の核分裂スペクトルの割合の逆数で ORIGIN では 1.45 としている。

ORIGIN では σ_0 , RI , σ_{fast} をあらかじめファイルに保存しており、 σ_{eff} の決定には、

$\sqrt{\pi T_0/4T}$, α , β を入力することで行う。 $g\sigma_0$, RI , σ_{fast} は各炉型毎に代表的な値を LWR, HTGR, MSBR の 3 種類についてファイルされている。

ORIGIN ではこれらの入力値はスペクトル指標と呼ばれ、それぞれ次の変数名で示される。

$$THERM = \sqrt{\frac{\pi T_0}{4T}}$$

$$RES = \alpha$$

$$FAST = \beta$$

これらの変数名を用い、各反応の実効断面積は次式で計算される。

$$\sigma_{\text{eff}}(n, \gamma) = g\sigma_0(n, \gamma) \cdot THERM + RI(n, \gamma) \cdot RES$$

$$\sigma_{\text{eff}}(n, f) = g\sigma_0(n, \gamma) \cdot THERM + RI(n, \gamma) \cdot RES + \sigma_f(n, f) \cdot FAST$$

$$\sigma_{\text{eff}}(n, 2n) = \sigma_f(n, 2n) \cdot FAST$$

$$\sigma_{\text{eff}}(n, \alpha) = g\sigma_0(n, \alpha) \cdot THERM + RI(n, \alpha) \cdot RES + \sigma_f(n, \alpha) \cdot FAST$$

$$\sigma_{\text{eff}}(n, p) = g\sigma_0(n, p) \cdot THERM + RI(n, p) \cdot RES + \sigma_f(n, p) \cdot FAST$$

スペクトル指標 THERM, RES, FAST の値として以下のような値が見られる。

Type of Fuel	THERM	RES	FAST
LWR with enriched U (PWR)	0.632	0.333	2.000
LWR with recycled Pu (PWR)	0.050	0.550	4.000
HTGR with U & Th	0.466	0.120	0.580
HTGR with recycle Pu & Th	0.369	0.198	1.160
PWR with enriched U	0.614	0.138	1.410
BWR with enriched U	0.609	0.137	1.390

この表から、スペクトル指標は炉型によってももちろん異なるが、燃料の種類によっても異なることがわかる。また同じ炉型、燃料であってもスペクトル指標の値が異なっている。

スペクトル指標は、炉型、燃料の種類が同じでも、燃料が進むにつれ（即ち時間がたつにつれ）変化する。ORIGEN ではスペクトル指標を時間依存の形で入力できないので、どの時点のスペクトル指標を用いるかが問題となる。

スペクトル指標は ORIGEN コードの入力の中で重要なパラメーターであり、これにより燃焼計算結果が異なってくる。このため、スペクトル指標を合理的に算出することが重要となる。

ここではこれらスペクトル指標を合理的に算出する ATR の核設計等に用いられた詳細格子計算コード WIMS-D を使用した場合について述べる。

(1) FAST, RES の算出法

FAST, RES を算出するには、中性子束 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 が必要となる。この中性子束を求めるため、ATR の核設計に用いられた WIMS-D コードから算出する方法を述べる。WIMS-D コードは、69 群の中性子束を計算する。従って ORIGEN コードの熱、共鳴、高速の各領域に対応するよう、WIMS-D69 群の各群を対応づける。

WIMS-D コードで計算される中性子束 ϕ_i をもとに以下の量が計算される。

$$\phi_1 = \sum_{i=47}^{69} \phi_i$$

$$\phi_2 = \sum_{i=6}^{46} \phi_i / \ln \frac{Eu}{E_L}$$

$$\phi_3 = \sum_{i=1}^5 \phi_i$$

ここで、Eu=0.821MeV, EL=0.5eV である。以上より FAST, RES は次式で求まる。

$$FAST = 1.45 \times \frac{\phi_3}{\phi_1}$$

$$RES = \frac{\phi_2}{\phi_1}$$

(2) THERM の算出法

ORIGEN コードの熱群の断面積の定義は次の通りである。

$$\bar{\sigma}_0 = g\sigma_0 \sqrt{\frac{\pi T_0}{4T}} = g\sigma_0 \cdot THERM$$

$g\sigma_0$: 2200m/s 断面積

T_0 : 273° K

$$THERM = \sqrt{\frac{\pi T_0}{4T}}$$

T : 中性子温度

THERM を求めるには中性子温度の T の算出が必要となる。上式は 1/v 吸収体を対象に熱中性子がマックスウェル・ボルツマン分布をしているという前提で導入される。マックスウェル・ボルツマン分布 $m(v)$ をしている中性子の平均速度 $\underline{v}$ は次式で表される。

$$\underline{v} = \int_0^\infty v \cdot m(v) dv = 2 \left(\frac{2kT}{\pi m} \right)^{1/2}$$

ここで、

k : ボルツマン定数

m : 中性子の質量

従って、中性子温度 T は次のようになる。

$$T = \frac{1}{8} \cdot \frac{\pi m}{k} \cdot \underline{v}^2$$

$K = 1.38054 \times 10^{-16} \text{ erg/}^\circ \text{ K}$, $m = 1.674818 \times 10^{-24} \text{ g}$ として、

$T = 230.58 \underline{v}^2 (^\circ \text{ K})$

ここで、 $\underline{v}$ は 2200m/s を 1 とする単位である。上式で $\underline{v}$ がわかると中性子温度 T が求まる。

WIMS コードでは中性子の速度は計算されない。WIMS で計算される中性子束から中性子の速度を計算する方法は以下のとおりである。

エネルギー i 群の上限、下限のエネルギーを E_i^U, E_i^L (eV) とし、i 群の平均エネルギー E_i を次のように定義する。

$$\bar{E}_i = \frac{E''_i + E^L_i}{2} (eV)$$

この $\bar{E}_i$ をもとに i 群の中性子速度 v_i を次式から求める。

$$v_i = \sqrt{\frac{\bar{E}_i}{0.0253}}$$

v_i は 2200m/s を 1 とした単位で求まる。各群の v_i と中性子束 ϕ_i から、熱中性子の平均速度 $\bar{v}$ を次式より求める。

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=47}^{69} \phi_i}{\sum_{i=47}^{69} \frac{\phi_i}{v_i}}$$

熱中性子として WIMS の 47～69 群を対象とする。上式で求まる $\bar{v}$ を用いると中性子温度 T が求まり、THERM が計算できる。

このように ORIGIN コードを用い放射能インベントリを評価するためには煩雑な手順が必要である。

今回の放射能インベントリ評価は、これら煩雑な手順を省略化するため群定数処理から放射能インベントリ評価まで一貫して計算出来るようシステム化された（原研が科学技術庁からの受託研究として開発した）原子炉デコミッショニング管理のための計算コードシステム COSMARD を用いて実施した。ここでは、第 4 章で記述しなかった核種生成崩壊計算コード ORIGIN-MD と中性子束表示および放射化量経時変化表示プログラム nf について記述する。

ORIGIN-MD は、原子炉の構造物に残存する放射能インベントリ評価することを目的に、核種生成崩壊計算コード ORIGIN を改良したものである。本コードシステムでは、ORIGIN に以下の機能を追加してある。ORIGIN については、既に述べた。

- ・ ANISN-JR 及び DOT3.5 で求めた中性子束と体系データをファイルから入力する。中性子束を高速、中速及び熱中性子束に分け、ORIGIN の計算に必要なとなる実効放射化断面積を作成するために必要な指標を自動的に求める機能を追加した。ORIGIN では、記述したように熱中性子炉体系の場合、以下のような指標を用いて実効放射化断面積を作成する。

$$THERM = \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{T_0}{T}}$$

($T_0=293.16^\circ \text{K}$, T =物質の温度)

RES=単位レサジー当たりの共鳴中性子束と熱中性子束との比

FAST=1MeV 以上の中性子束と熱中性子束との比の 1.45 倍

- ・ ORIGIN の持つ連続化学処理、連続燃料供給オプション等の機能の削除、

中性子束（または熱出力）を ANISN-JR または DOT3.5 の出力結果から直接読むこと等により、入力データを少なくしてある。

- ・中性子束の評価点（メッシュ点）を必要数指定することにより、1 回の計算で複数箇所（但し、同一材質に限る）の放射能インベントリを計算できるようにしてある。

- ・放射能濃度だけをファイル出力し、図表化処理コード nf への受け渡しができるようにしてある。

なお、ANISN-JR 及び DOT3.5 で計算した中性子束は、上述したように ORIGIN の計算に用いる指標（THERM, RES, FAST）及び熱中性子束を計算するために利用する。ORIGIN では、高速中性子のエネルギーは 1MeV 以上、熱中性子は 0.876eV 以下としているため、中性子束の輸送計算における群構造の群境界はこれに合わせておく必要があるが、1MeV 及び 0.876eV に近い値を境界にするようにしてある。

n, f プログラムの機能を図 5.2 に示す。

本プログラムは、ANISN-JR、DOT3.5 コードにより計算された中性子束分布の表示、及び ORIGIN-MD コードにより計算された放射能濃度の経時変化を表示する機能をもつ。

本システムの基本的な機能は以下のものである。

①中性子束分布計算のための領域区分図の表示

ANISN-JR 及び DOT3.5 コードからの出力フラックスファイルを用いて、ANISN-JR の場合には 1 次元の領域分布図、DOT3.5 コードの場合には 1 次元(R(X) 方向または Z(Y) 方向) 及び 2 次元の領域区分図を表示する。

②中性子束減衰図の表示

上記の出力フラックスファイルを用いて、ANISN-JR と DOT3.5 による計算結果である中性子束分布を図形表示する。

a. ANISN-JR プログラムによる中性子束空間分布の表示

単一エネルギー群の中性子または中性子束の集計値（指定した中性子束エネルギー群について中性子束を足し合わせたもの）について中性子束空間分布図（中性子束の減衰図：上述した領域区分図に対応して、炉心からの距離を関数にして中性子束分布を図形表示する）を作成する。

b. DOT3.5 プログラムによる中性子束空間分布の表示

DOT の 2 次元計算体系において、ユーザー指定の位置[R(X)座標または Z(Y)座標]と方向[Z(X)方向または R(X)方向]から、単一エネルギー群毎及び中性子束の集計値の減衰図を作成する。

③中性子束コンター図の表示

単一エネルギー群の中性子束及び中性子束の集計値について、上述した領域

区分図（2次元）に対応して中性子束のコンター図の作成を行う。

④放射能濃度の時間変化の表示

ORIGEN-MD コードにより計算される放射化機器の放射能濃度（Bq/g）の時間変化（炉停止後の冷却時間に対する放射能濃度の時間減衰）を CRT 画面上に表示する。

この場合表示の形式として、「指定核種毎」及び「指定した放射能濃度レベル以上の核種」の 2 通りの形式で、放射能濃度の時間減衰を表示する。（全核種合計の放射能濃度は常に表示される）。

CRT 上には、核種名、核種の分類（軽核種、重核種、核分裂生成物、アルファ崩壊核種）についての情報も同時に表示する。

表5.1 物質組成データ(1/3)

(単位:wt%)

材質	重水	炭素鋼	アルミニウム	コンクリート
適用部所	反射体	生体遮蔽扉	Upper grid Lower grid	天井など
密度(g/cm ³)	1.108E+00	7.850E+00	2.700E+00	2.200E+00
H	5.036E-04			6.100E-01
D	2.002E-01			
Li		3.000E-05		2.000E-03
Be				
B				2.000E-03
C		2.500E-01		
N		8.400E-03		1.200E-02
O	7.993E-01			4.370E+01
F				6.250E-02
Na		2.300E-03		7.390E-01
Mg			2.400E+00	
Al		3.300E-02	9.700E+01	3.100E+00
Si		4.000E-02	1.100E-01	1.680E+01
P		3.500E-02		5.000E-01
S		4.000E-02		3.100E-01
Cl		4.000E-03		4.500E-03
K		1.200E-03		7.500E-01
Ca		1.400E-03		1.830E+01
Sc		2.600E-05		6.500E-04
Ti		2.000E-04	1.800E-03	2.120E-01
V		8.000E-03		1.030E-02
Cr		1.700E-01	1.700E-01	1.090E-02
Mn		1.020E+00	2.000E-02	3.770E-02
Fe		9.800E+01	2.700E-01	3.900E+00
Co		1.220E-02	3.000E-04	9.800E-04
Ni		6.600E-01		3.800E-03
Cu		1.270E-01	3.000E-02	2.500E-03
Zn		1.000E-02	1.000E-02	7.500E-03
Ga		8.000E-03		8.800E-04
Ge				1.500E-04
As		5.320E-02		7.900E-04
Se		7.000E-05		9.200E-05
Br		8.500E-05		2.400E-04
Rb		4.800E-03		3.500E-03

表5.1 物質組成データ(2/3)

(単位:wt%)

材質	重水	炭素鋼	アルミニウム	コンクリート
適用部所	反射体	生体遮蔽扉	Upper grid Lower grid	天井など
密度(g/cm ³)	1.108E+00	7.850E+00	2.700E+00	2.200E+00
Sr		1.500E-05		4.380E-02
Y		2.000E-03		1.820E-03
Zr		1.000E-03		7.100E-03
Nb		1.880E-03		4.300E-04
Mo		5.600E-01		1.030E-03
Pd				3.000E-04
Ag		2.000E-04		2.000E-05
Cd				3.000E-05
In				
Sn				7.000E-04
Sb		1.100E-03		1.800E-04
I				5.000E-05
Cs		2.000E-05		1.300E-04
Ba		2.730E-02		9.500E-02
La		1.000E-05		1.300E-03
Ce		1.000E-04		2.430E-03
Pr				8.200E-04
Nd				2.800E-03
Sm		1.700E-06		2.000E-04
Eu		3.100E-06		5.500E-05
Gd				5.400E-04
Tb		4.500E-05		4.100E-05
Dy				2.300E-04
Ho		8.000E-05		9.000E-05
Er				
Yb		1.000E-04		1.400E-04
Lu		2.000E-05		2.700E-05
Hf		2.100E-05		2.200E-04
Ta		1.300E-05		4.400E-05
W		5.500E-04		1.400E-04
Au				4.000E-07
Hg				8.000E-06
Tl				4.500E-05
Pb		8.200E-02		6.100E-03

表5.1 物質組成データ(3/3)

(単位:wt%)

材質	重水	炭素鋼	アルミニウム	コンクリート
適用部所	反射体	生体遮蔽扉	Upper grid Lower grid	天井など
密度(g/cm ³)	1.108E+00	7.850E+00	2.700E+00	2.200E+00
Bi				1.700E-05
Th		1.800E-05		3.500E-04
U		2.000E-05	1.300E-05	2.700E-04

表5.2 各構造材の材質、体積、重量

アルミニウム (Upper grid)		密度	2.673 g/cm ³		
	全体積	2.875E+06 cm ³			
半径	151.25 cm		全重量	7.684E+06 g	
(アルミタンク[重水位置])					
	全体積	1.894E+05 cm ³	全重量	5.064E+05 g	
内半径	150.25 cm	1.418E+07 cm ³			
外半径	151.25 cm	1.437E+07 cm ³			
高さ	200 cm				
(アルミタンク[空気位置])					
	全体積	8.553E+04 cm ³	全重量	2.286E+05 g	
内半径	150.25 cm	6.404E+06 cm ³			
外半径	151.25 cm	6.490E+06 cm ³			
高さ	90.3 cm				
Lower grid					
アルミニウム		全重量	2.050E+06 g		
炭化ボロン		全重量	1.579E+05 g		
重水					
	密度	1.1078 g/cm ³			
	全体積	2.585E+06 cm ³	全重量	2.864E+06 g	
内半径	135.87 cm	1.160E+07 cm ³			
外半径	150.25 cm	1.418E+07 cm ³			
高さ	200 cm				
鉄(SS41)					
	密度	7.85 g/cm ³			
	全体積	2.240E+05 cm ³	全重量	1.758E+06 g	
幅	1.6 cm				
長さ	350 cm				
高さ	400 cm				

表 5.3 放射能インベントリ計算箇所

計算箇所	材質	メッシュ範囲	
		半径方向	軸方向
反射体	重水	48:48	196:196
Upper grid	アルミニウム	1:1	277:277
アルミタンク (重水位置) (空気位置)	アルミニウム	65:65 65:65	196:196 262:262
Lower grid	アルミニウム, 炭化ボロン	1:1	149:149
生体遮蔽扉	鉄(SS41)	204:204	319:319
1 階炉心近傍	コンクリート	57:57	122:122
2 階炉心近傍	コンクリート	66:66	286:286
生体遮蔽扉近傍	コンクリート	151:151	294:294
地下 1 階	コンクリート	1:1	30:30
天井	コンクリート	1:1	466:466
壁 (炉心半径方向)	コンクリート	151:151	196:196

表5.4 炉心構造材の比放射能(1/2)

(単位: Bq/g)

核種	反射体 (D ₂ O)	Upper Gird (Al)	Alタンク (重水位置)	Alタンク (空気位置)	Lower Gird (Al+B ₄ C)
線束値 (n/cm ² /sec)	1.62E+08	9.62E+06	2.31E+07	7.30E+06	1.43E+06
H 3	1.460E+00	—	—	—	—
HE 6	—	—	—	—	5.420E-12
LI 8	—	—	—	—	5.610E+00
BE 8	—	—	—	—	5.610E+00
BE 10	—	—	—	—	2.360E-07
BE 11	—	—	—	—	3.360E-14
B 12	—	—	—	—	1.720E+01
C 14	—	—	—	—	6.430E-08
C 15	—	—	—	—	2.100E-20
N 16	—	—	—	—	3.280E-42
F 20	—	1.520E-15	5.870E-17	6.640E-16	1.260E-14
NE 23	—	1.740E+00	3.410E-01	1.150E+00	4.810E+00
NA 24	—	1.170E+02	2.290E+01	7.710E+01	3.240E+02
NA 24M	—	1.190E-12	5.100E-13	5.880E-13	1.300E-12
NA 25	—	1.050E+00	2.060E-01	6.930E-01	2.910E+00
MG 27	—	6.200E+02	1.700E+02	4.120E+02	1.660E+03
MG 28	—	3.920E-15	2.570E-15	1.970E-15	1.560E-15
AL 28	—	5.420E+04	1.060E+05	3.970E+04	3.120E+04
AL 29	—	2.650E-02	5.200E-03	1.750E-02	7.340E-02
AL 30	—	2.550E-05	5.000E-06	1.680E-05	7.060E-05
SI 31	—	9.140E-01	1.690E+00	6.640E-01	6.230E-01
K 44	—	1.020E-19	3.930E-21	4.450E-20	8.430E-19
CA 45	—	1.430E-07	2.800E-08	9.420E-08	3.950E-07
SC 46	—	3.470E-05	6.840E-06	2.300E-05	9.630E-05
SC 47	—	1.100E-03	2.160E-04	7.280E-04	3.050E-03
SC 48	—	1.690E-04	3.310E-05	1.110E-04	4.700E-04
SC 49	—	2.540E-04	4.990E-05	1.680E-04	7.030E-04
SC 50	—	5.340E-06	1.050E-06	3.530E-06	1.480E-05
TI 51	—	2.320E-02	4.600E-02	1.700E-02	1.290E-02
V 50	—	1.890E-20	3.720E-21	1.250E-20	5.250E-20
V 52	—	1.190E-01	2.340E-02	7.870E-02	3.300E-01
V 53	—	1.640E-03	3.220E-04	1.080E-03	4.550E-03
V 54	—	1.650E-05	3.240E-06	1.090E-05	4.560E-05
CR 51	—	6.900E+00	1.440E+01	5.110E+00	3.080E+00
CR 55	—	1.700E+00	3.520E+00	1.260E+00	7.940E-01
MN 54	—	4.710E-03	9.250E-04	3.110E-03	1.310E-02
MN 56	—	3.480E+02	6.360E+02	2.520E+02	2.460E+02
MN 57	—	2.260E-03	4.450E-04	1.500E-03	6.280E-03
MN 58	—	8.490E-06	1.670E-06	5.610E-06	2.350E-05
FE 55	—	5.910E-02	1.220E-01	4.370E-02	2.810E-02
FE 59	—	4.140E-02	7.600E-02	3.000E-02	2.900E-02
CO 60	—	9.020E-03	1.380E-02	6.390E-03	9.050E-03
CO 60M	—	6.440E+00	9.870E+00	4.560E+00	6.450E+00
CO 61	—	2.610E-12	4.840E-12	1.270E-12	3.710E-12
CO 62	—	1.160E-03	2.280E-04	7.680E-04	3.220E-03
NI 63	—	6.720E-06	1.330E-06	4.450E-06	1.860E-05

表5.4 炉心構造材の比放射能(2/2)

(単位:Bq/g)

核種	反射体 (D ₂ O)	Upper Gird (Al)	Alタンク (重水位置)	Alタンク (空気位置)	Lower Gird (Al+B ₄ C)
NI 65	—	2.830E-03	6.230E-04	1.870E-03	7.760E-03
CU 64	—	9.960E+01	1.810E+02	7.220E+01	7.170E+01
CU 66	—	2.300E+01	4.160E+01	1.670E+01	1.670E+01
CU 67	—	5.000E-14	2.170E-13	2.750E-14	5.400E-15
ZN 65	—	2.970E-02	4.730E-02	2.110E-02	2.800E-02
ZN 69	—	3.410E+00	4.540E+00	2.370E+00	4.090E+00
ZN 69M	—	2.110E-01	2.810E-01	1.470E-01	2.540E-01
ZN 71	—	4.000E-03	9.600E-03	3.030E-03	5.520E-04
ZN 71M	—	4.190E-04	1.010E-03	3.190E-04	5.790E-05
GA 70	—	4.270E-11	4.930E-11	1.980E-11	9.170E-11
GA 72	—	4.080E-21	9.820E-21	2.100E-21	9.280E-22
GA 72M	—	3.520E-15	8.470E-15	1.810E-15	8.000E-16
GE 71	—	4.690E-33	1.070E-32	1.600E-33	6.050E-33
GE 71M	—	3.390E-25	7.750E-25	1.160E-25	4.370E-25

表5.5 炉室構造材の比放射能(1/14)

(単位:Bq/g)

核種	生体遮蔽扉 (Fe)	1階炉心近傍 (コンクリート)	2階炉心近傍 (コンクリート)	生体遮蔽扉近傍 (コンクリート)
線束値 (n/cm ² /sec)	5.11E+02	1.85E+05	1.34E+06	1.28E+03
H 3	2.910E-07	9.820E-03	5.640E-02	5.290E-05
HE 6	2.580E-08	7.490E-04	3.040E-04	2.330E-06
LI 8	4.150E-07	1.320E-02	8.120E-02	7.680E-05
BE 8	4.150E-07	1.320E-02	8.120E-02	7.680E-05
BE 10	1.810E-14	1.220E-11	8.810E-11	8.410E-14
BE 11	9.240E-25	2.240E-19	1.180E-17	1.070E-23
B 12	5.530E-10	8.930E-04	6.470E-03	6.180E-06
C 14	1.660E-09	1.250E-06	7.800E-06	7.700E-09
C 15	8.260E-11	6.940E-02	2.820E-02	2.160E-04
N 16	1.420E-10	8.770E-01	3.560E-01	2.720E-03
O 19	—	4.960E-02	3.190E-02	1.450E-04
F 20	1.050E-06	2.540E-01	4.030E-01	7.520E-04
NE 23	1.340E-06	1.870E-01	7.580E-02	5.810E-04
NA 24	2.580E-04	4.140E+01	2.280E+02	2.150E-01
NA 24M	1.160E-04	1.950E+01	1.090E+02	1.020E-01
NA 25	2.130E-23	1.500E-15	2.460E-16	1.450E-20
MG 27	7.250E-05	2.980E+00	1.210E+00	9.240E-03
MG 28	2.430E-26	3.620E-19	1.060E-18	7.770E-24
AL 28	1.030E-03	7.210E+01	2.490E+02	2.770E-01
AL 29	3.450E-06	6.310E-01	2.560E-01	1.960E-03
AL 30	3.320E-09	6.070E-04	2.460E-04	1.880E-06
SI 31	6.900E-04	8.810E+00	2.060E+01	2.990E-02
P 32	1.900E-04	9.030E-01	2.590E+00	3.610E-03
P 33	6.600E-04	2.230E+00	9.030E-01	6.920E-03
P 34	1.270E-06	2.440E-03	9.900E-04	7.590E-06
S 35	6.730E-06	6.030E-03	3.110E-02	2.950E-05
S 37	1.970E-07	2.840E-04	1.630E-03	1.730E-06
CL 36	3.620E-10	2.520E-07	1.200E-06	1.210E-09
CL 38	3.190E-05	1.470E-02	1.070E-01	1.020E-04
CL 38M	3.670E-07	1.700E-04	1.230E-03	1.170E-06
AR 37	1.830E-07	1.040E+00	6.770E-01	3.360E-03
AR 39	5.780E-10	1.650E-04	6.700E-05	5.140E-07
AR 41	—	2.730E-03	1.100E-03	6.170E-06
K 40	3.760E-04	2.660E-01	2.660E-01	2.660E-01
K 42	9.600E-06	4.700E+00	1.750E+01	1.700E-02
K 43	—	1.470E-02	5.960E-03	4.520E-05
K 44	1.100E-09	6.240E-03	2.530E-03	1.940E-05
CA 41	1.540E-12	1.140E-05	5.810E-05	5.370E-08
CA 45	1.930E-08	1.480E-01	7.250E-01	6.670E-04
CA 47	—	4.810E-03	2.500E-02	2.310E-05
CA 49	1.840E-07	9.890E-01	7.160E+00	6.840E-03
SC 46	4.990E-07	7.450E-03	3.620E-02	3.540E-05
SC 46M	1.650E-05	2.270E-01	1.200E+00	1.110E-03
SC 47	—	2.120E-02	1.300E-02	6.730E-05
SC 48	—	3.120E-03	1.260E-03	1.000E-05
SC 49	1.950E-07	9.940E-01	7.170E+00	6.860E-03

表5.5 炉室構造材の比放射能(2/14)

(単位:Bq/g)

核種	生体遮蔽扉 (Fe)	1階炉心近傍 (コンクリート)	2階炉心近傍 (コンクリート)	生体遮蔽扉近傍 (コンクリート)
SC 50	2.130E-10	9.820E-05	3.980E-05	3.050E-07
TI 51	4.940E-07	8.170E-02	3.810E-01	3.490E-04
V 50	1.230E-09	1.800E-09	1.800E-09	1.800E-09
V 52	2.440E-03	1.770E+00	8.700E+00	8.010E-03
V 53	5.880E-07	1.640E-05	6.650E-06	5.100E-08
V 54	5.900E-09	1.650E-07	6.680E-08	5.120E-10
CR 51	5.810E-04	1.660E-02	6.550E-02	7.180E-05
CR 55	2.270E-04	5.380E-03	1.650E-02	2.160E-05
MN 54	6.130E-04	1.060E-02	4.300E-03	3.300E-05
MN 56	8.750E-01	2.260E+01	8.830E+01	8.040E-02
MN 57	2.950E-04	5.100E-03	2.070E-03	1.590E-05
MN 58	1.110E-06	1.910E-05	7.760E-06	5.950E-08
FE 55	1.070E-03	2.460E-02	1.220E-01	1.130E-04
FE 59	7.200E-04	2.010E-02	8.060E-02	7.220E-05
CO 58	3.260E-04	8.170E-04	3.310E-04	2.540E-06
CO 60	1.680E-05	1.180E-03	3.630E-03	3.110E-06
CO 60M	1.190E-02	8.440E-01	2.590E+00	2.220E-03
CO 61	5.720E-07	1.570E-05	5.820E-07	7.180E-20
CO 62	2.550E-06	1.710E-05	6.930E-06	5.310E-08
NI 59	5.220E-09	1.690E-08	8.690E-08	8.040E-11
NI 63	3.380E-07	1.160E-06	5.480E-06	5.310E-09
NI 65	6.300E-04	2.310E-03	1.020E-02	7.540E-06
CU 64	2.010E-02	2.830E-01	1.110E+00	9.940E-04
CU 66	4.640E-03	6.560E-02	2.560E-01	2.290E-04
CU 67	5.360E-22	2.740E-18	7.770E-17	6.630E-23
ZN 65	1.360E-06	8.650E-04	2.800E-03	2.420E-06
ZN 69	1.490E-04	1.140E-01	2.960E-01	2.440E-04
ZN 69M	8.850E-06	7.040E-03	1.830E-02	1.530E-05
ZN 71	2.100E-07	6.460E-05	4.680E-04	4.470E-07
ZN 71M	—	6.860E-06	4.910E-05	—
GA 70	1.100E-03	1.640E-01	2.960E-01	2.180E-04
GA 72	1.490E-03	2.060E-01	4.130E-01	3.170E-04
GA 72M	5.050E-05	6.960E-03	1.400E-02	1.070E-05
GE 71	9.690E-28	3.310E-04	1.520E-03	1.410E-06
GE 71M	3.040E-20	2.350E-04	1.080E-03	9.830E-07
GE 75	—	7.300E-04	2.820E-03	6.190E-06
GE 75M	—	2.710E-04	1.050E-03	9.410E-07
GE 77	—	2.100E-04	3.450E-04	3.120E-10
GE 77M	—	2.800E-04	4.610E-04	3.260E-07
AS 76	2.870E-02	6.200E-01	1.020E+00	7.230E-04
AS 77	—	2.240E-04	3.670E-04	2.880E-10
SE 75	5.080E-08	9.330E-05	1.620E-04	1.170E-07
SE 77M	4.990E-06	3.570E-03	1.900E-02	1.760E-05
SE 79	1.740E-16	1.130E-10	2.260E-10	1.730E-13
SE 79M	5.070E-07	8.360E-04	1.680E-03	1.280E-06
SE 81	1.270E-06	1.640E-03	4.430E-03	3.690E-06
SE 81M	1.910E-07	2.470E-04	6.690E-04	5.570E-07
SE 83	8.470E-09	4.570E-06	3.310E-05	3.160E-08

表5.5 炉室構造材の比放射能(3/14)

(単位:Bq/g)

核種	生体遮蔽扉 (Fe)	1階炉心近傍 (コンクリート)	2階炉心近傍 (コンクリート)	生体遮蔽扉近傍 (コンクリート)
SE 83M	1.260E-09	6.800E-07	4.920E-06	4.700E-09
BR 80	6.720E-05	2.740E-01	4.670E-01	3.340E-04
BR 80M	1.480E-05	6.410E-02	1.090E-01	7.740E-05
BR 82	1.450E-05	6.240E-02	9.730E-02	6.660E-05
BR 82M	2.110E-05	9.030E-02	1.410E-01	9.710E-05
BR 83	9.970E-10	3.680E-06	3.720E-05	3.720E-09
KR 81	1.380E-31	5.430E-25	2.180E-24	1.250E-30
KR 81M	4.840E-20	1.910E-13	7.660E-13	4.410E-19
RB 86	2.020E-05	2.200E-02	3.520E-02	2.460E-05
RB 86M	2.960E-05	3.210E-02	5.140E-02	3.580E-05
RB 87	4.090E-02	3.380E-02	3.380E-02	3.380E-02
RB 88	2.790E-05	3.040E-02	4.840E-02	3.370E-05
RB 89	1.920E-23	7.580E-18	8.750E-17	5.830E-23
SR 85	1.260E-11	8.610E-04	1.440E-03	1.030E-06
SR 85M	6.450E-09	2.720E-02	4.540E-02	3.230E-05
SR 87M	—	2.950E-01	6.530E-01	5.140E-04
SR 89	1.190E-26	7.870E-04	1.450E-03	1.080E-06
SR 91	—	1.410E-06	—	—
SR 93	1.760E-12	5.440E-09	2.200E-09	1.690E-11
Y 89M	1.070E-30	7.080E-08	1.300E-07	9.710E-11
Y 90	3.890E-05	2.290E-02	1.010E-01	9.180E-05
Y 90M	—	4.030E-05	1.890E-04	—
Y 91	—	5.200E-07	2.000E-07	—
Y 92	—	1.620E-05	8.160E-06	—
Y 93	6.990E-14	2.160E-10	8.760E-11	6.710E-13
Y 94	3.640E-10	1.130E-06	4.570E-07	3.500E-09
Y 96	2.340E-12	7.240E-09	2.930E-09	2.250E-11
ZR 93	2.180E-14	3.420E-11	1.040E-10	8.910E-14
ZR 95	5.400E-08	1.310E-04	2.790E-04	2.180E-07
ZR 97	—	1.200E-02	1.590E-02	1.040E-05
NB 92	1.450E-05	1.160E-05	4.780E-06	—
NB 94	3.880E-11	1.100E-08	2.110E-08	1.590E-11
NB 95	9.340E-08	2.700E-06	5.620E-06	0.000E+00
NB 95M	0.000E+00	1.900E-07	7.590E-07	0.000E+00
NB 96	2.630E-06	1.690E-06	1.590E-02	—
NB 97	1.370E-06	1.210E-02	1.510E-02	1.040E-05
NB 97M	—	1.140E-02	6.870E-08	9.870E-06
NB 98	2.120E-07	1.700E-07	3.480E-09	5.270E-10
NB100	1.070E-08	8.580E-09	2.720E-09	2.660E-11
MO 93	6.090E-10	1.590E-09	1.170E-02	1.960E-12
MO 99	2.770E-03	8.330E-03	8.010E-03	8.050E-06
MO101	1.840E-03	5.130E-03	1.180E-10	5.530E-06
TC 99	2.790E-11	8.400E-11	1.210E-13	6.260E-14
TC100	1.360E-17	5.440E-14	8.010E-03	4.420E-20
TC101	1.840E-03	5.130E-03	3.310E-15	5.530E-06
RH104	—	2.370E-16	2.430E-16	—
RH104M	—	1.740E-17	1.610E-31	—
RH105	—	1.590E-33	4.790E-40	—

表5.5 炉室構造材の比放射能(4/14)

(単位:Bq/g)

核種	生体遮蔽扉 (Fe)	1階炉心近傍 (コンクリート)	2階炉心近傍 (コンクリート)	生体遮蔽扉近傍 (コンクリート)
RH106	—	1.160E-42	8.150E-05	—
PD103	—	1.130E-05	5.160E-12	—
PD107	—	3.300E-12	3.890E-04	3.560E-15
PD107M	—	2.490E-04	3.540E-01	2.680E-07
PD109	3.030E-24	2.290E-01	6.280E-03	2.430E-04
PD109M	3.460E-22	4.070E-03	5.670E-04	4.300E-06
PD111	—	7.830E-05	5.160E-05	5.040E-07
PD111M	—	7.180E-06	3.970E-02	—
AG108	1.480E-04	1.410E-02	1.080E-07	3.340E-05
AG108M	4.050E-10	3.850E-08	6.520E-08	9.110E-11
AG109M	—	9.000E-09	2.610E-01	—
AG110	1.090E-03	1.630E-01	9.370E-05	1.830E-04
AG110M	3.930E-07	5.830E-05	9.960E-05	6.560E-08
AG111	—	1.370E-05	5.800E-04	3.260E-09
AG111M	—	8.010E-05	2.460E-05	5.040E-07
CD107	—	4.220E-06	6.520E-08	—
CD109	—	9.000E-09	4.600E-05	—
CD111M	1.760E-20	1.890E-05	1.170E-03	3.740E-08
CD115	—	8.420E-04	9.730E-06	2.560E-07
CD115M	—	7.020E-06	1.430E-05	—
CD117	—	7.640E-06	5.180E-06	—
CD119	1.150E-27	9.250E-10	3.750E-10	2.870E-12
CD121	—	2.910E-10	1.180E-10	9.040E-13
IN113M	—	1.250E-05	2.300E-05	0.000E+00
IN114	—	9.700E-08	3.930E-08	3.010E-10
IN115	—	3.090E-21	4.290E-21	0.000E+00
IN116	—	3.500E-07	1.420E-07	1.090E-09
IN116M	—	4.280E-14	9.480E-14	—
IN117	—	7.750E-06	1.370E-05	1.040E-09
IN117M	—	6.300E-06	7.730E-06	—
IN118	—	1.180E-07	4.770E-08	3.660E-10
IN119	1.760E-49	8.410E-08	3.410E-08	2.610E-10
IN119M	1.150E-27	9.250E-10	3.750E-10	2.870E-12
IN120	3.210E-46	1.080E-24	3.190E-24	2.330E-29
IN120M	4.820E-46	1.630E-24	4.780E-24	3.500E-29
IN121	—	2.910E-10	1.180E-10	9.040E-13
SN113	—	1.740E-05	2.630E-05	1.790E-08
SN113M	—	6.100E-04	9.230E-04	6.260E-07
SN117M	—	1.150E-03	1.500E-03	9.460E-07
SN119M	—	7.250E-05	9.510E-05	5.950E-08
SN121	—	2.850E-03	4.990E-03	3.940E-06
SN121M	—	1.470E-09	2.570E-09	—
SN123	—	3.050E-06	7.710E-06	—
SN123M	7.640E-25	1.470E-06	3.710E-06	3.040E-09
SN125	—	1.320E-05	1.850E-05	—
SN125M	—	3.020E-03	4.220E-03	2.750E-06
SB122	3.390E-04	8.870E-02	1.290E-01	8.580E-05
SB122M	7.410E-06	1.940E-03	2.820E-03	1.880E-06

表5.5 炉室構造材の比放射能(5/14)

(単位:Bq/g)

核種	生体遮蔽扉 (Fe)	1階炉心近傍 (コンクリート)	2階炉心近傍 (コンクリート)	生体遮蔽扉近傍 (コンクリート)
SB124	1.050E-05	2.730E-03	3.980E-03	2.650E-06
SB124M	1.100E-06	2.870E-04	4.180E-04	2.780E-07
SB125	—	4.490E-06	6.280E-06	4.070E-09
SB126M	—	1.020E-16	7.650E-16	4.620E-22
TE125M	—	0.000E+00	0.000E+00	—
TE129	—	2.620E-16	7.750E-16	3.980E-22
I128	—	7.600E-02	1.150E-01	7.780E-05
I129	—	3.000E-27	8.860E-27	4.550E-33
I130	—	1.160E-31	1.240E-30	5.640E-40
I130M	—	1.720E-29	1.850E-28	8.400E-38
CS131	1.580E-07	1.180E-03	2.030E-03	1.480E-06
CS134	1.110E-07	1.050E-03	1.750E-03	1.240E-06
CS134M	6.520E-06	4.350E-02	7.250E-02	5.290E-05
BA131	3.380E-06	1.630E-02	2.810E-02	2.030E-05
BA131M	5.420E-06	2.650E-02	4.580E-02	3.310E-05
BA133	2.400E-09	3.520E-06	2.550E-05	2.420E-08
BA133M	—	2.940E-04	2.130E-03	2.190E-06
BA135M	6.420E-06	2.900E-02	4.980E-02	3.550E-05
BA136M	2.780E-06	1.450E-02	2.300E-02	1.600E-05
BA137M	7.830E-07	2.810E-03	7.170E-03	5.880E-06
BA139	1.570E-04	3.150E-01	1.540E+00	1.410E-03
LA137	—	1.450E-10	2.590E-10	1.780E-13
LA138	7.480E-08	1.100E-05	1.100E-05	1.100E-05
LA140	1.220E-06	1.370E-01	4.940E-01	4.360E-04
CE137	—	2.960E-03	5.300E-03	3.610E-06
CE137M	—	2.690E-04	4.810E-04	—
CE139	1.020E-15	5.530E-07	4.010E-06	7.010E-14
CE139M	7.160E-11	7.140E-07	5.170E-06	4.940E-09
CE141	—	1.620E-03	9.400E-03	8.860E-06
CE143	—	2.450E-03	1.090E-02	1.030E-05
PR142	—	1.490E-01	5.590E-01	4.970E-04
PR142M	—	4.760E-02	1.790E-01	1.590E-04
PR143	—	1.470E-04	6.540E-04	5.610E-07
PR144	—	1.250E-14	1.670E-13	1.220E-19
ND144	—	2.860E-07	2.860E-07	2.860E-07
ND147	—	2.280E-03	6.670E-03	5.740E-06
ND149	—	2.980E-02	5.680E-02	3.890E-05
ND151	—	2.080E-02	3.550E-02	2.550E-05
PM145	—	0.000E+00	0.000E+00	—
PM147	—	1.750E-06	5.140E-06	3.340E-09
PM149	—	1.370E-02	2.620E-02	1.980E-05
PM151	—	1.500E-02	2.560E-02	1.830E-05
PM152	—	2.480E-13	3.070E-12	2.090E-18
SM145	—	1.330E-07	9.670E-07	—
SM147	2.110E-06	2.810E-04	2.810E-04	2.810E-04
SM148	5.540E-10	7.390E-08	7.390E-08	7.390E-08
SM149	2.050E-10	2.730E-08	2.730E-08	2.730E-08
SM151	—	2.680E-06	6.630E-06	5.410E-09

表5.5 炉室構造材の比放射能(6/14)

(単位:Bq/g)

核種	生体遮蔽層 (Fe)	1階炉心近傍 (コンクリート)	2階炉心近傍 (コンクリート)	生体遮蔽層近傍 (コンクリート)
SM153	4.620E-06	7.460E-01	1.220E+00	8.590E-04
SM155	9.390E-08	1.330E-02	2.810E-02	2.190E-05
EU152	4.100E-08	3.850E-04	2.110E-03	1.970E-06
EU152M	7.070E-05	6.660E-01	3.660E+00	3.410E-03
EU154	9.000E-09	1.790E-04	4.130E-04	3.300E-07
EU155	2.470E-12	1.090E-05	2.290E-05	1.790E-08
GD152	1.500E-21	1.390E-17	7.660E-17	7.140E-20
GD159	1.310E-05	6.310E-02	1.230E-01	9.250E-05
GD161	—	7.300E-03	1.330E-02	9.770E-06
GD162	—	1.170E-14	1.540E-13	1.090E-19
TB157	—	1.870E-08	2.750E-08	—
TB160	2.140E-06	2.920E-03	4.620E-03	3.220E-06
TB161	—	1.380E-03	2.510E-03	1.900E-06
TB162	1.890E-11	8.730E-09	6.320E-08	6.040E-11
DY157	—	9.070E-04	1.340E-03	—
DY159	—	2.530E-06	6.850E-06	—
DY165	2.020E-05	1.360E+00	8.720E+00	8.250E-03
DY165M	—	8.620E-01	5.530E+00	5.230E-03
H0166	2.170E-04	3.570E-01	5.850E-01	4.140E-04
H0166M	4.000E-11	6.570E-08	1.080E-07	7.610E-11
ER167M	2.820E-19	4.060E-13	1.790E-12	1.050E-18
TM170	—	1.360E-27	3.950E-27	5.840E-34
TM170M	—	4.240E-15	1.230E-14	3.980E-21
YB169	1.100E-06	2.070E-03	3.790E-03	2.810E-06
YB175	1.070E-05	8.450E-03	4.260E-02	3.930E-05
YB175M	2.570E-05	2.060E-02	1.040E-01	9.590E-05
YB177	—	1.060E-03	2.970E-03	—
LU176	1.290E-05	1.980E-05	1.980E-05	1.980E-05
LU176M	5.440E-05	1.210E-01	1.740E-01	1.150E-04
LU177	3.780E-06	3.100E-03	1.490E-02	1.370E-05
LU177M	—	4.610E-07	2.270E-06	—
HF175	—	4.340E-05	1.650E-04	1.470E-07
HF178M	4.100E-07	6.560E-03	1.020E-02	6.970E-06
HF179M	3.260E-05	5.280E-01	8.020E-01	5.460E-04
HF180M	—	1.040E-03	1.730E-03	—
HF181	9.050E-08	9.900E-04	2.480E-03	2.030E-06
TA180	7.220E-11	2.770E-10	2.770E-10	2.770E-10
TA182	5.160E-07	2.800E-03	4.050E-03	2.690E-06
TA182M	2.020E-08	1.100E-04	1.590E-04	1.060E-07
W181	—	2.820E-06	3.910E-06	—
W185	2.630E-07	8.750E-05	1.660E-04	1.250E-07
W185M	1.520E-08	5.050E-06	9.580E-06	7.180E-09
W187	3.040E-04	1.120E-01	1.860E-01	1.320E-04
RE187	1.480E-17	5.450E-15	9.070E-15	6.460E-18
RE188	4.420E-20	1.590E-14	6.220E-14	3.540E-20
RE188M	2.300E-18	8.280E-13	3.230E-12	1.850E-18
AU198	—	1.750E-03	2.820E-03	2.080E-06
HG197	—	9.660E-05	6.160E-04	1.850E-07

表5.5 炉室構造材の比放射能(7/14)

(単位:Bq/g)

核種	生体遮蔽扉 (Fe)	1階炉心近傍 (コンクリート)	2階炉心近傍 (コンクリート)	生体遮蔽扉近傍 (コンクリート)
HG197M	—	7.300E-06	4.300E-05	—
HG199M	—	3.440E-06	4.950E-06	3.270E-09
HG203	—	4.180E-06	1.690E-05	—
HG205	—	1.290E-06	9.310E-06	8.890E-09
TL204	—	4.190E-06	1.030E-05	8.360E-09
TL206	—	1.540E-04	3.020E-04	2.290E-07
PB204	5.470E-09	4.610E-10	4.610E-10	4.610E-10
PB205	2.320E-15	1.650E-13	4.620E-13	3.870E-16
PB209	2.700E-04	8.200E-03	5.940E-02	5.490E-05
BI210	—	3.350E-06	6.960E-06	—
BI210M	—	1.260E-14	2.610E-14	—
BI211	—	1.830E-20	2.750E-19	—
PO210	—	1.150E-08	2.890E-08	—
PO211	—	1.010E-21	1.830E-20	—
PO211M	—	1.600E-23	2.920E-22	—

表5.5 炉室構造材の比放射能(8/14)

(単位:Bq/g)

核種	地下1階 (コンクリート)	天井 (コンクリート)	壁[炉心半径方向] (コンクリート)
線束値 (n/cm ² /sec)	2.52E+04	6.26E+02	2.67E+05
H 3	1.180E-03	2.610E-05	1.090E-02
HE 6	4.990E-05	1.380E-06	6.190E-05
LI 8	1.640E-03	3.780E-05	1.590E-02
BE 8	1.640E-03	3.780E-05	1.590E-02
BE 10	1.660E-12	4.110E-14	1.750E-11
BE 11	4.160E-21	2.570E-24	4.670E-19
B 12	1.220E-04	3.020E-06	1.290E-03
C 14	1.570E-07	3.800E-09	1.540E-06
C 15	4.630E-03	1.280E-04	5.740E-03
N 16	5.840E-02	1.620E-03	7.250E-02
O 19	3.400E-03	8.510E-05	5.700E-03
F 20	1.960E-02	4.200E-04	7.100E-02
NE 23	1.250E-02	3.450E-04	1.550E-02
NA 24	4.850E+00	1.060E-01	4.400E+01
NA 24M	2.300E+00	5.010E-02	2.100E+01
NA 25	6.640E-18	5.100E-21	1.020E-17
MG 27	1.980E-01	5.490E-03	2.460E-01
MG 28	3.280E-21	2.260E-24	4.310E-20
AL 28	6.910E+00	1.430E-01	4.650E+01
AL 29	4.200E-02	1.160E-03	5.220E-02
AL 30	4.040E-05	1.120E-06	5.020E-05
SI 31	7.470E-01	1.610E-02	3.790E+00
P 32	8.200E-02	1.920E-03	4.970E-01
P 33	1.480E-01	4.110E-03	1.840E-01
P 34	1.630E-04	4.510E-06	2.020E-04
S 35	6.840E-04	1.460E-05	5.960E-03
S 37	3.440E-05	8.660E-07	3.260E-04
CL 36	2.770E-08	6.060E-10	2.310E-07
CL 38	2.010E-03	4.990E-05	2.130E-02
CL 38M	2.310E-05	5.740E-07	2.450E-04
AR 37	7.160E-02	1.970E-03	1.370E-01
AR 39	1.100E-05	3.050E-07	1.370E-05
AR 41	1.780E-04	8.070E-06	2.240E-04
K 40	2.660E-01	2.660E-01	2.660E-01
K 42	4.600E-01	8.630E-03	3.200E+00
K 43	9.800E-04	2.680E-05	1.220E-03
K 44	4.160E-04	1.150E-05	5.160E-04
CA 41	1.280E-06	2.650E-08	1.100E-05
CA 45	1.630E-02	3.300E-04	1.370E-01
CA 47	5.460E-04	1.150E-05	4.760E-03
CA 49	1.350E-01	3.350E-03	1.430E+00
SC 46	8.230E-04	1.760E-05	6.930E-03
SC 46M	2.600E-02	5.480E-04	2.290E-01
SC 47	1.450E-03	3.950E-05	2.590E-03
SC 48	2.080E-04	6.170E-06	2.580E-04
SC 49	1.350E-01	3.360E-03	1.430E+00

表5.5 炉室構造材の比放射能(9/14)

(単位:Bq/g)

核種	地下1階 (コンクリート)	天井 (コンクリート)	壁[炉心半径方向] (コンクリート)
SC 50	6.540E-06	1.810E-07	8.120E-06
TI 51	8.800E-03	1.730E-04	7.140E-02
V 50	1.800E-09	1.800E-09	1.800E-09
V 52	1.950E-01	3.960E-03	1.640E+00
V 53	1.090E-06	3.030E-08	1.360E-06
V 54	1.100E-08	3.040E-10	1.360E-08
CR 51	1.680E-03	3.670E-05	1.250E-02
CR 55	4.990E-04	1.140E-05	3.150E-03
MN 54	7.070E-04	1.960E-05	8.780E-04
MN 56	2.250E+00	4.020E-02	1.600E+01
MN 57	3.400E-04	9.420E-06	4.220E-04
MN 58	1.280E-06	3.530E-08	1.580E-06
FE 55	2.730E-03	5.570E-05	2.320E-02
FE 59	2.020E-03	3.600E-05	1.460E-02
CO 58	5.440E-05	1.510E-06	6.750E-05
CO 60	1.060E-04	1.570E-06	6.160E-04
CO 60M	7.610E-02	1.120E-03	4.400E-01
CO 61	1.060E-16	1.870E-20	2.730E-15
CO 62	1.140E-06	3.150E-08	1.410E-06
NI 59	1.910E-09	3.970E-11	1.650E-08
NI 63	1.260E-07	2.650E-09	1.040E-06
NI 65	2.450E-04	5.970E-06	1.910E-03
CU 64	2.820E-02	4.960E-04	2.010E-01
CU 66	6.520E-03	1.140E-04	4.630E-02
CU 67	3.710E-20	1.620E-23	2.800E-18
ZN 65	7.950E-05	1.220E-06	4.820E-04
ZN 69	9.650E-03	1.250E-04	4.750E-02
ZN 69M	5.980E-04	7.400E-06	2.940E-03
ZN 71	8.800E-06	2.190E-07	9.320E-05
ZN 71M	—	—	9.900E-06
GA 70	1.250E-02	1.160E-04	3.960E-02
GA 72	1.610E-02	1.660E-04	5.890E-02
GA 72M	5.450E-04	5.600E-06	1.990E-03
GE 71	3.540E-05	6.980E-07	2.840E-04
GE 71M	2.510E-05	4.870E-07	2.010E-04
GE 75	7.460E-05	1.390E-08	5.110E-04
GE 75M	2.690E-05	4.700E-07	1.900E-04
GE 77	1.590E-05	1.680E-10	4.280E-05
GE 77M	2.080E-05	1.760E-07	5.770E-05
AS 76	4.610E-02	3.900E-04	1.280E-01
AS 77	1.690E-05	1.550E-10	4.610E-05
SE 75	7.040E-06	6.280E-08	2.110E-05
SE 77M	4.110E-04	8.700E-06	3.640E-03
SE 79	8.830E-12	9.070E-14	3.220E-11
SE 79M	6.540E-05	6.720E-07	2.390E-04
SE 81	1.410E-04	1.880E-06	7.220E-04
SE 81M	2.130E-05	2.840E-07	1.090E-04
SE 83	6.220E-07	1.550E-08	6.590E-06

表5.5 炉室構造材の比放射能(10/14)

(単位:Bq/g)

核種	地下1階 (コンクリート)	天井 (コンクリート)	壁[炉心半径方向] (コンクリート)
SE 83M	9.260E-08	2.300E-09	9.810E-07
BR 80	2.060E-02	1.800E-04	6.000E-02
BR 80M	4.800E-03	4.270E-05	1.400E-02
BR 82	4.580E-03	3.620E-05	1.170E-02
BR 82M	6.620E-03	5.280E-05	1.690E-02
BR 83	7.330E-08	1.820E-09	5.910E-06
KR 81	3.340E-27	3.480E-31	4.310E-26
KR 81M	1.180E-15	1.230E-19	1.520E-14
RB 86	1.620E-03	1.330E-05	4.320E-03
RB 86M	2.370E-03	1.940E-05	6.300E-03
RB 87	3.380E-02	3.380E-02	3.380E-02
RB 88	2.240E-03	1.830E-05	5.920E-03
RB 89	7.620E-20	1.540E-23	2.130E-18
SR 85	6.420E-05	5.520E-07	1.820E-04
SR 85M	2.030E-03	1.740E-05	5.750E-03
SR 87M	2.380E-02	2.690E-04	9.790E-02
SR 89	6.020E-05	5.720E-07	1.960E-04
SR 91	—	—	—
SR 93	3.620E-10	1.000E-11	4.500E-10
Y 89M	5.420E-09	5.150E-11	1.770E-08
Y 90	2.400E-03	4.560E-05	1.870E-02
Y 90M	6.370E-06	—	3.520E-05
Y 91	1.650E-08	—	4.080E-08
Y 92	—	—	2.790E-06
Y 93	1.440E-11	3.990E-13	1.790E-11
Y 94	7.500E-08	2.080E-09	9.310E-08
Y 96	4.820E-10	1.340E-11	5.980E-10
ZR 93	3.060E-12	4.510E-14	1.750E-11
ZR 95	1.050E-05	1.140E-07	4.100E-05
ZR 97	8.510E-04	5.490E-06	1.610E-03
NB 92	7.860E-07	—	9.760E-07
NB 94	8.510E-10	8.400E-12	2.940E-09
NB 95	1.620E-07	0.000E+00	8.260E-07
NB 95M	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
NB 96	—	—	—
NB 97	8.540E-04	5.510E-06	1.620E-03
NB 97M	8.090E-04	5.210E-06	1.530E-03
NB 98	1.130E-08	3.130E-10	1.400E-08
NB100	5.710E-10	1.580E-11	7.090E-10
MO 93	1.190E-10	—	3.510E-10
MO 99	5.970E-04	4.470E-06	1.280E-03
MO101	3.770E-04	3.010E-06	9.630E-04
TC 99	6.020E-12	3.480E-14	1.290E-11
TC100	2.870E-16	1.330E-20	1.590E-15
TC101	3.770E-04	3.010E-06	9.630E-04
RH104	—	—	9.190E-17
RH104M	—	—	6.740E-18
RH105	—	—	8.890E-34

表5.5 炉室構造材の比放射能(11/14)

(単位:Bq/g)

核種	地下1階 (コンクリート)	天井 (コンクリート)	壁[炉心半径方向] (コンクリート)
RH106	—	—	4.830E-43
PD103	1.550E-06	—	1.620E-05
PD107	2.420E-13	1.940E-15	6.200E-13
PD107M	1.830E-05	1.460E-07	4.680E-05
PD109	1.680E-02	1.320E-04	4.200E-02
PD109M	2.980E-04	2.350E-06	7.460E-04
PD111	9.920E-06	2.470E-07	1.120E-04
PD111M	—	—	9.250E-06
AG108	1.230E-03	1.700E-05	6.560E-03
AG108M	3.360E-09	4.630E-11	1.790E-08
AG109M	—	—	1.300E-08
AG110	1.200E-02	9.890E-05	3.210E-02
AG110M	4.310E-06	3.550E-08	1.150E-05
AG111	1.760E-06	1.590E-09	1.990E-05
AG111M	9.920E-06	2.470E-07	1.150E-04
CD107	—	—	4.310E-06
CD109	—	—	1.300E-08
CD111M	1.570E-06	1.920E-08	7.210E-06
CD115	5.990E-05	—	1.250E-04
CD115M	5.020E-07	—	1.050E-06
CD117	—	—	—
CD119	6.160E-11	1.710E-12	7.650E-11
CD121	1.940E-11	5.370E-13	2.410E-11
IN113M	0.000E+00	—	8.040E-07
IN114	6.460E-09	1.790E-10	8.020E-09
IN115	2.230E-22	—	4.650E-22
IN116	2.330E-08	6.470E-10	2.900E-08
IN116M	2.280E-16	—	1.260E-15
IN117	2.240E-08	6.190E-10	1.160E-06
IN117M	—	—	2.410E-06
IN118	7.840E-09	2.170E-10	9.730E-09
IN119	5.600E-09	1.550E-10	6.950E-09
IN119M	6.160E-11	1.710E-12	7.650E-11
IN120	9.840E-27	6.770E-30	1.290E-25
IN120M	1.480E-26	1.020E-29	1.940E-25
IN121	1.940E-11	5.370E-13	2.410E-11
SN113	1.270E-06	—	3.080E-06
SN113M	4.450E-05	3.430E-07	1.080E-04
SN117M	8.120E-05	5.350E-07	1.500E-04
SN119M	5.120E-06	3.360E-08	9.620E-06
SN121	2.160E-04	1.440E-06	6.530E-04
SN121M	1.110E-10	—	3.360E-10
SN123	2.560E-07	—	1.220E-06
SN123M	1.230E-07	1.560E-09	5.890E-07
SN125	9.650E-07	—	2.050E-06
SN125M	2.160E-04	1.530E-06	4.580E-04
SB122	6.400E-03	4.730E-05	1.460E-02
SB122M	1.400E-04	1.040E-06	3.190E-04

表5.5 炉室構造材の比放射能(12/14)

(単位:Bq/g)

核種	地下1階 (コンクリート)	天井 (コンクリート)	壁[炉心半径方向] (コンクリート)
SB124	1.970E-04	1.460E-06	4.490E-04
SB124M	2.080E-05	1.530E-07	4.720E-05
SB125	3.210E-07	2.270E-09	6.810E-07
SB126M	8.410E-19	1.270E-22	1.590E-17
TE125M	0.000E+00	—	0.000E+00
TE129	1.490E-18	1.150E-22	1.270E-17
I128	5.530E-03	4.260E-05	1.340E-02
I129	1.700E-29	1.310E-33	1.450E-28
I130	6.310E-35	8.130E-41	3.620E-33
I130M	9.390E-33	1.210E-38	5.390E-31
CS131	8.840E-05	7.020E-07	2.640E-04
CS134	7.810E-05	6.690E-07	2.210E-04
CS134M	3.240E-03	2.640E-05	9.170E-03
BA131	1.220E-03	1.090E-05	3.660E-03
BA131M	1.990E-03	1.770E-05	5.950E-03
BA133	4.790E-07	1.170E-08	5.080E-06
BA133M	3.990E-05	3.760E-07	4.250E-04
BA135M	2.180E-03	1.900E-05	6.430E-03
BA136M	1.070E-03	8.680E-06	2.800E-03
BA137M	2.370E-04	3.020E-06	1.140E-03
BA139	3.470E-02	7.030E-04	2.900E-01
LA137	1.100E-11	9.320E-14	3.440E-11
LA138	1.100E-05	1.100E-05	1.100E-05
LA140	1.310E-02	2.180E-04	8.760E-02
CE137	2.250E-04	1.890E-06	7.050E-04
CE137M	2.020E-05	—	6.350E-05
CE139	7.540E-08	3.430E-14	7.990E-07
CE139M	9.730E-08	2.420E-09	1.030E-06
CE141	1.950E-04	4.360E-06	1.820E-03
CE143	2.580E-04	5.330E-06	2.020E-03
PR142	1.450E-02	2.490E-04	1.000E-01
PR142M	4.650E-03	7.940E-05	3.210E-02
PR143	1.550E-05	2.600E-07	1.210E-04
PR144	1.170E-16	2.860E-20	5.230E-15
ND144	2.860E-07	2.860E-07	2.860E-07
ND147	2.010E-04	2.910E-06	1.120E-03
ND149	2.300E-03	2.690E-05	7.870E-03
ND151	1.560E-03	1.370E-05	4.580E-03
PM145	0.000E+00	—	0.000E+00
PM147	1.560E-07	1.410E-09	8.600E-07
PM149	1.060E-03	1.050E-05	3.630E-03
PM151	1.120E-03	1.030E-05	3.310E-03
PM152	2.530E-15	5.750E-19	7.890E-14
SM145	1.820E-08	—	1.930E-07
SM147	2.810E-04	2.810E-04	2.810E-04
SM148	7.390E-08	7.390E-08	7.390E-08
SM149	2.730E-08	2.730E-08	2.730E-08
SM151	2.230E-07	2.760E-09	1.040E-06

表5.5 炉室構造材の比放射能(13/14)

(単位:Bq/g)

核種	地下1階 (コンクリート)	天井 (コンクリート)	壁[炉心半径方向] (コンクリート)
SM153	5.530E-02	4.640E-04	1.520E-01
SM155	1.060E-03	1.140E-05	4.120E-03
EU152	4.500E-05	9.710E-07	4.070E-04
EU152M	7.780E-02	1.680E-03	7.040E-01
EU154	1.460E-05	1.710E-07	6.310E-05
EU155	8.630E-07	9.310E-09	3.360E-06
GD152	1.630E-18	3.520E-20	1.470E-17
GD159	4.900E-03	4.840E-05	1.720E-02
GD161	5.560E-04	5.190E-06	1.780E-03
GD162	1.220E-16	2.830E-20	4.140E-15
TB157	1.350E-09	—	3.140E-09
TB160	2.150E-04	1.750E-06	5.620E-04
TB161	1.050E-04	1.010E-06	3.370E-04
TB162	1.190E-09	2.950E-11	1.260E-08
DY157	6.680E-05	—	1.520E-04
DY159	2.180E-07	—	1.120E-06
DY165	1.730E-01	4.040E-03	1.710E+00
DY165M	1.090E-01	2.560E-03	1.090E+00
H0166	2.650E-02	2.230E-04	7.320E-02
H0166M	4.880E-09	4.110E-11	1.350E-08
ER167M	2.590E-15	2.880E-19	3.630E-14
TM170	7.660E-30	—	6.520E-29
TM170M	2.380E-17	—	2.030E-16
YB169	1.580E-04	1.490E-06	5.100E-04
YB175	9.450E-04	1.940E-05	8.090E-03
YB175M	2.300E-03	4.740E-05	1.970E-02
YB177	9.410E-05	—	4.950E-04
LU176	1.980E-05	1.980E-05	1.980E-05
LU176M	8.730E-03	6.210E-05	1.930E-02
LU177	3.390E-04	6.690E-06	2.800E-03
LU177M	5.100E-08	—	4.290E-07
HF175	4.270E-06	7.350E-08	2.960E-05
HF178M	4.800E-04	3.800E-06	1.210E-03
HF179M	3.850E-02	2.980E-04	9.420E-02
HF180M	7.750E-05	—	2.170E-04
HF181	8.290E-05	1.040E-06	3.910E-04
TA180	2.770E-10	2.770E-10	2.770E-10
TA182	2.020E-04	1.490E-06	4.550E-04
TA182M	7.920E-06	5.820E-08	1.790E-05
W181	2.010E-07	—	4.210E-07
W185	6.760E-06	6.580E-08	2.290E-05
W185M	3.900E-07	3.790E-09	1.320E-06
W187	8.320E-03	7.070E-05	2.350E-02
RE187	4.060E-16	3.490E-18	1.150E-15
RE188	9.740E-17	9.880E-21	1.210E-15
RE188M	5.060E-15	5.160E-19	6.290E-14
AU198	1.290E-04	1.130E-06	3.470E-04
HG197	1.220E-05	—	1.210E-04

表5.5 炉室構造材の比放射能(14/14)

(単位:Bq/g)

核種	地下1階 (コンクリート)	天井 (コンクリート)	壁[炉心半径方向] (コンクリート)
HG197M	—	—	8.940E-06
HG199M	2.480E-07	1.810E-09	5.510E-07
HG203	4.220E-07	—	3.090E-06
HG205	1.750E-07	4.350E-09	1.850E-06
TL204	3.490E-07	4.300E-09	1.610E-06
TL206	1.200E-05	1.200E-07	4.240E-05
PB204	4.610E-10	4.610E-10	4.610E-10
PB205	1.440E-14	1.970E-16	7.600E-14
PB209	1.120E-03	2.690E-05	1.180E-02
BI210	—	—	1.010E-06
BI210M	—	—	3.790E-15
BI211	—	—	7.970E-21
PO210	—	—	0.000E+00
PO211	—	—	2.230E-23
PO211M	—	—	—

表5.6 炉心構造材の全放射エネルギー(1/2)

(単位:Bq)

核種	反射体 (D ₂ O)	Upper Gird (Al)	Alタンク (重水位置)	Alタンク (空気位置)	Lower Gird (Al+B ₄ C)	Total
重量(g)	2.864E+06	7.684E+06	5.064E+05	2.286E+05	2.208E+06	—
H 3	4.181E+06	—	—	—	—	4.181E+06
HE 6	—	—	—	—	1.197E-05	1.197E-05
LI 8	—	—	—	—	1.239E+07	1.239E+07
BE 8	—	—	—	—	1.239E+07	1.239E+07
BE 10	—	—	—	—	5.211E-01	5.211E-01
BE 11	—	—	—	—	7.418E-08	7.418E-08
B 12	—	—	—	—	3.798E+07	3.798E+07
C 14	—	—	—	—	1.420E-01	1.420E-01
C 15	—	—	—	—	4.637E-14	4.637E-14
N 16	—	—	—	—	7.242E-36	7.242E-36
F 20	—	1.168E-08	2.972E-11	1.518E-10	2.782E-08	3.968E-08
NE 23	—	1.337E+07	1.727E+05	2.629E+05	1.062E+07	2.443E+07
NA 24	—	8.991E+08	1.160E+07	1.763E+07	7.154E+08	1.644E+09
NA 24M	—	9.144E-06	2.582E-07	1.344E-07	2.870E-06	1.241E-05
NA 25	—	8.068E+06	1.043E+05	1.584E+05	6.425E+06	1.476E+07
MG 27	—	4.764E+09	8.608E+07	9.419E+07	3.665E+09	8.610E+09
MG 28	—	3.012E-08	1.301E-09	4.504E-10	3.444E-09	3.532E-08
AL 28	—	4.165E+11	5.367E+10	9.076E+09	6.889E+10	5.481E+11
AL 29	—	2.036E+05	2.633E+03	4.001E+03	1.621E+05	3.723E+05
AL 30	—	1.959E+02	2.532E+00	3.841E+00	1.559E+02	3.582E+02
SI 31	—	7.023E+06	8.558E+05	1.518E+05	1.376E+06	9.406E+06
K 44	—	7.838E-13	1.990E-15	1.017E-14	1.861E-12	2.657E-12
CA 45	—	1.099E+00	1.418E-02	2.154E-02	8.721E-01	2.007E+00
SC 46	—	2.666E+02	3.464E+00	5.258E+00	2.126E+02	4.880E+02
SC 47	—	8.453E+03	1.094E+02	1.664E+02	6.734E+03	1.546E+04
SC 48	—	1.299E+03	1.676E+01	2.538E+01	1.038E+03	2.378E+03
SC 49	—	1.952E+03	2.527E+01	3.841E+01	1.552E+03	3.568E+03
SC 50	—	4.103E+01	5.317E-01	8.070E-01	3.268E+01	7.505E+01
TI 51	—	1.783E+05	2.329E+04	3.887E+03	2.848E+04	2.339E+05
V 50	—	1.452E-13	1.884E-15	2.858E-15	1.159E-13	2.659E-13
V 52	—	9.144E+05	1.185E+04	1.799E+04	7.286E+05	1.673E+06
V 53	—	1.260E+04	1.631E+02	2.469E+02	1.005E+04	2.306E+04
V 54	—	1.268E+02	1.641E+00	2.492E+00	1.007E+02	2.316E+02
CR 51	—	5.302E+07	7.292E+06	1.168E+06	6.800E+06	6.828E+07
CR 55	—	1.306E+07	1.782E+06	2.881E+05	1.753E+06	1.689E+07
MN 54	—	3.619E+04	4.684E+02	7.110E+02	2.892E+04	6.630E+04
MN 56	—	2.674E+09	3.220E+08	5.761E+07	5.431E+08	3.597E+09
MN 57	—	1.737E+04	2.253E+02	3.429E+02	1.387E+04	3.180E+04
MN 58	—	6.524E+01	8.456E-01	1.283E+00	5.189E+01	1.193E+02
FE 55	—	4.541E+05	6.178E+04	9.991E+03	6.204E+04	5.879E+05
FE 59	—	3.181E+05	3.848E+04	6.859E+03	6.403E+04	4.275E+05
CO 60	—	6.931E+04	6.988E+03	1.461E+03	1.998E+04	9.774E+04
CO 60M	—	4.949E+07	4.998E+06	1.043E+06	1.424E+07	6.977E+07
CO 61	—	2.006E-05	2.451E-06	2.904E-07	8.191E-06	3.099E-05
CO 62	—	8.914E+03	1.155E+02	1.756E+02	7.109E+03	1.631E+04
NI 63	—	5.164E+01	6.735E-01	1.017E+00	4.107E+01	9.440E+01
NI 65	—	2.175E+04	3.155E+02	4.275E+02	1.713E+04	3.962E+04
CU 64	—	7.653E+08	9.165E+07	1.651E+07	1.583E+08	1.032E+09

表5.6 炉心構造材の全放射能量(2/2)

(単位:Bq)

核種	反射体 (D ₂ O)	Upper Gird (Al)	Alタンク (重水位置)	Alタンク (空気位置)	Lower Gird (Al+B ₄ C)	Total
CU 66	—	1.767E+08	2.106E+07	3.818E+06	3.687E+07	2.385E+08
CU 67	—	3.842E-07	1.099E-07	6.287E-09	1.192E-08	5.123E-07
ZN 65	—	2.282E+05	2.395E+04	4.824E+03	6.182E+04	3.188E+05
ZN 69	—	2.620E+07	2.299E+06	5.418E+05	9.030E+06	3.807E+07
ZN 69M	—	1.621E+06	1.423E+05	3.361E+04	5.608E+05	2.358E+06
ZN 71	—	3.074E+04	4.861E+03	6.927E+02	1.219E+03	3.751E+04
ZN 71M	—	3.220E+03	5.114E+02	7.293E+01	1.278E+02	3.932E+03
GA 70	—	3.281E-04	2.496E-05	4.527E-06	2.025E-04	5.601E-04
GA 72	—	3.135E-14	4.973E-15	4.801E-16	2.049E-15	3.885E-14
GA 72M	—	2.705E-08	4.289E-09	4.138E-10	1.766E-09	3.352E-08
GE 71	—	3.604E-26	5.418E-27	3.658E-28	1.336E-26	5.518E-26
GE 71M	—	2.605E-18	3.924E-19	2.652E-20	9.648E-19	3.989E-18
Total	4.181E+06	4.259E+11	5.423E+10	9.270E+09	7.412E+10	5.636E+11

表5.7 生体遮蔽屏の全放射能量

(単位:Bq)

核種	生体遮蔽屏 (Fe)	核種	生体遮蔽屏 (Fe)	核種	生体遮蔽屏 (Fe)	核種	生体遮蔽屏 (Fe)
重量(g)	1.758E+06	重量(g)	1.758E+06	重量(g)	1.758E+06	重量(g)	1.758E+06
H 3	5.117E-01	MN 54	1.078E+03	SR 85M	1.134E-02	BA136M	4.888E+00
HE 6	4.537E-02	MN 56	1.539E+06	SR 89	2.092E-20	BA137M	1.377E+00
LI 8	7.297E-01	MN 57	5.187E+02	SR 93	3.095E-06	BA139	2.761E+02
BE 8	7.297E-01	MN 58	1.952E+00	Y 89M	1.881E-24	LA138	1.315E-01
BE 10	3.183E-08	FE 55	1.881E+03	Y 90	6.840E+01	LA140	2.145E+00
BE 11	1.625E-18	FE 59	1.266E+03	Y 93	1.229E-07	CE139	1.794E-09
B 12	9.724E-04	CO 58	5.732E+02	Y 94	6.401E-04	CE139M	1.259E-04
C 14	2.919E-03	CO 60	2.954E+01	Y 96	4.115E-06	SM147	3.710E+00
C 15	1.452E-04	CO 60M	2.092E+04	ZR 93	3.833E-08	SM148	9.742E-04
N 16	2.497E-04	CO 61	1.006E+00	ZR 95	9.495E-02	SM149	3.605E-04
F 20	1.846E+00	CO 62	4.484E+00	NB 92	2.550E+01	SM153	8.124E+00
NE 23	2.356E+00	NI 59	9.179E-03	NB 94	6.823E-05	SM155	1.651E-01
NA 24	4.537E+02	NI 63	5.943E-01	NB 95	1.642E-01	EU152	7.209E-02
NA 24M	2.040E+02	NI 65	1.108E+03	NB 95M	0.000E+00	EU152M	1.243E+02
NA 25	3.745E-17	CU 64	3.534E+04	NB 96	4.625E+00	EU154	1.583E-02
MG 27	1.275E+02	CU 66	8.159E+03	NB 97	2.409E+00	EU155	4.343E-06
MG 28	4.273E-20	CU 67	9.425E-16	NB 98	3.728E-01	GD152	2.638E-15
AL 28	1.811E+03	ZN 65	2.391E+00	NB100	1.881E-02	GD159	2.304E+01
AL 29	6.066E+00	ZN 69	2.620E+02	MO 93	1.071E-03	TB160	3.763E+00
AL 30	5.838E-03	ZN 69M	1.556E+01	MO 99	4.871E+03	TB162	3.323E-05
SI 31	1.213E+03	ZN 71	3.693E-01	MO101	3.235E+03	DY165	3.552E+01
P 32	3.341E+02	GA 70	1.934E+03	TC 99	4.906E-05	H0166	3.816E+02
P 33	1.161E+03	GA 72	2.620E+03	TC100	2.391E-11	H0166M	7.034E-05
P 34	2.233E+00	GA 72M	8.880E+01	TC101	3.235E+03	ER167M	4.959E-13
S 35	1.183E+01	GE 71	1.704E-21	PD109	5.328E-18	YB169	1.934E+00
S 37	3.464E-01	GE 71M	5.346E-14	PD109M	6.084E-16	YB175	1.881E+01
CL 36	6.365E-04	AS 76	5.047E+04	AG108	2.602E+02	YB175M	4.519E+01
CL 38	5.609E+01	SE 75	8.933E-02	AG108M	7.122E-04	LU176	2.268E+01
CL 38M	6.453E-01	SE 77M	8.774E+00	AG110	1.917E+03	LU176M	9.566E+01
AR 37	3.218E-01	SE 79	3.060E-10	AG110M	6.911E-01	LU177	6.647E+00
AR 39	1.016E-03	SE 79M	8.915E-01	CD111M	3.095E-14	HF178M	7.209E-01
K 40	6.612E+02	SE 81	2.233E+00	CD119	2.022E-21	HF179M	5.732E+01
K 42	1.688E+01	SE 81M	3.359E-01	IN119	3.095E-43	HF181	1.591E-01
K 44	1.934E-03	SE 83	1.489E-02	IN119M	2.022E-21	TA180	1.270E-04
CA 41	2.708E-06	SE 83M	2.216E-03	IN120	5.644E-40	TA182	9.073E-01
CA 45	3.394E-02	BR 80	1.182E+02	IN120M	8.475E-40	TA182M	3.552E-02
CA 49	3.235E-01	BR 80M	2.602E+01	SN123M	1.343E-18	W185	4.625E-01
SC 46	8.774E-01	BR 82	2.550E+01	SB122	5.961E+02	W185M	2.673E-02
SC 46M	2.901E+01	BR 82M	3.710E+01	SB122M	1.303E+01	W187	5.346E+02
SC 49	3.429E-01	BR 83	1.753E-03	SB124	1.846E+01	RE187	2.602E-11
SC 50	3.745E-04	KR 81	2.427E-25	SB124M	1.934E+00	RE188	7.772E-14
TI 51	8.686E-01	KR 81M	8.511E-14	CS131	2.778E-01	RE188M	4.044E-12
V 50	2.163E-03	RB 86	3.552E+01	CS134	1.952E-01	PB204	9.618E-03
V 52	4.290E+03	RB 86M	5.205E+01	CS134M	1.146E+01	PB205	4.079E-09
V 53	1.034E+00	RB 87	7.192E+04	BA131	5.943E+00	PB209	4.748E+02
V 54	1.037E-02	RB 88	4.906E+01	BA131M	9.531E+00	Total	1.765E+06
CR 51	1.022E+03	RB 89	3.376E-17	BA133	4.220E-03		
CR 55	3.992E+02	SR 85	2.216E-05	BA135M	1.129E+01		

表5.8 炉心構造材の飽和係数(AI)

(単位:Bq/g)

核種	照射時間			
	50h	100h	500h	1000y
NA 24 飽和係数	1.170E+02 0.900	1.280E+02 0.985	1.300E+02 1.000	1.300E+02 —
AL 28 飽和係数	5.420E+04 1.000	5.420E+04 1.000	5.420E+04 1.000	5.420E+04 —
CR 51 飽和係数	6.900E+00 0.051	1.340E+01 0.099	5.520E+01 0.406	1.360E+02 —
MN 54 飽和係数	4.710E-03 0.005	9.390E-03 0.009	4.610E-02 0.047	9.900E-01 —
MN 56 飽和係数	3.480E+02 1.000	3.480E+02 1.000	3.480E+02 1.000	3.480E+02 —
FE 55 飽和係数	5.910E-02 0.002	1.180E-01 0.003	5.870E-01 0.015	3.890E+01 —
FE 59 飽和係数	4.140E-02 0.032	8.150E-02 0.062	3.600E-01 0.275	1.310E+00 —
CO 60 飽和係数	9.020E-03 0.001	1.800E-02 0.002	8.930E-02 0.008	1.190E+01 —
NI 63 飽和係数	6.720E-06 0.00004	1.340E-05 0.00009	6.720E-05 0.00043	1.560E-01 —
ZN 65 飽和係数	2.970E-02 0.006	5.920E-02 0.012	2.890E-01 0.057	5.050E+00 —

表5.9 炉心構造材の飽和係数($Al+B_4C$)

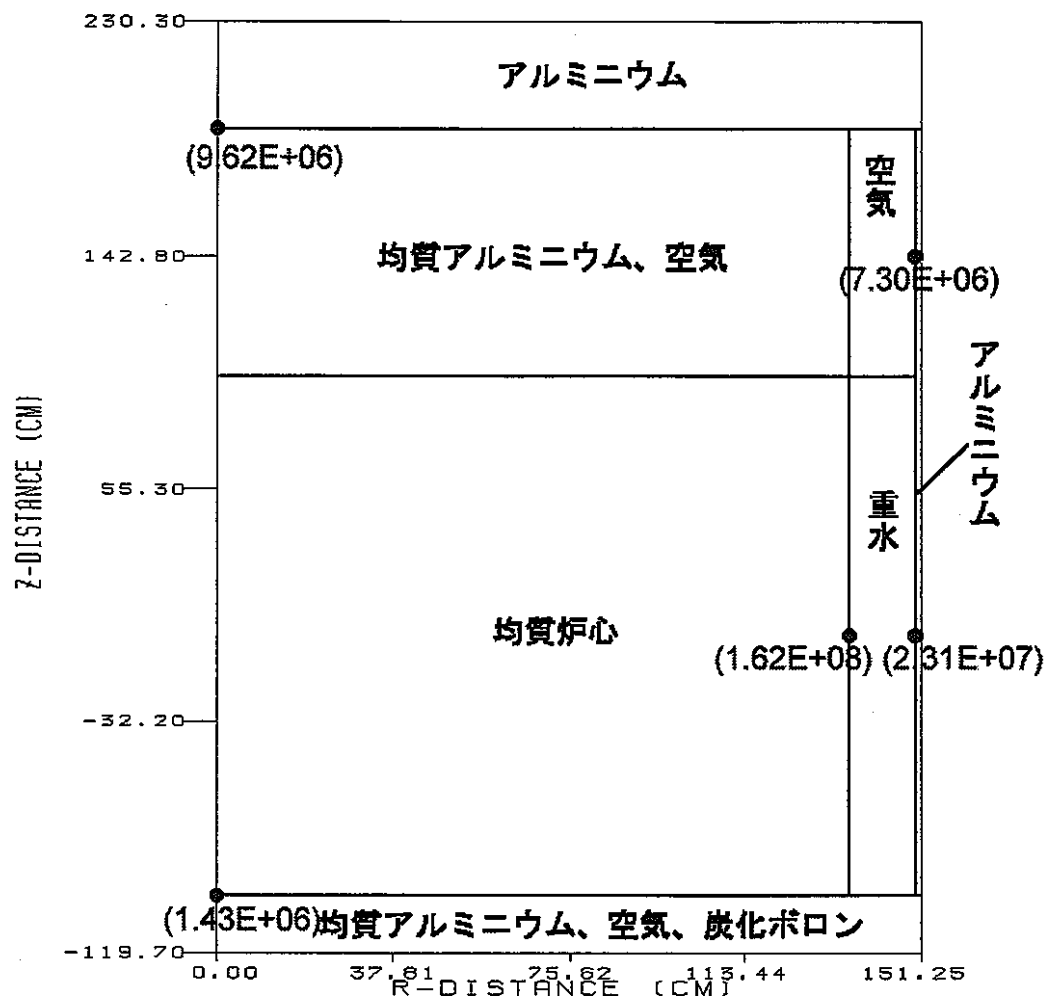
(単位:Bq/g)

核種	照射時間			
	50h	100h	500h	1000y
C 14 飽和係数	6.430E-08 6.066E-06	1.290E-07 1.217E-05	6.430E-07 6.066E-05	1.060E-02 —
NA 24 飽和係数	3.240E+02 9.025E-01	3.560E+02 9.916E-01	3.590E+02 1.000E+00	3.590E+02 —
AL 28 飽和係数	3.120E+04 1.000E+00	3.120E+04 1.000E+00	3.120E+04 1.000E+00	3.120E+04 —
CR 51 飽和係数	3.080E+00 5.066E-02	5.990E+00 9.852E-02	2.460E+01 4.046E-01	6.080E+01 —
MN 54 飽和係数	1.310E-02 4.764E-03	2.600E-02 9.455E-03	1.280E-01 4.655E-02	2.750E+00 —
MN 56 飽和係数	2.460E+02 1.000E+00	2.460E+02 1.000E+00	2.460E+02 1.000E+00	2.460E+02 —
FE 55 飽和係数	2.810E-02 1.519E-03	5.610E-02 3.032E-03	2.790E-01 1.508E-02	1.850E+01 —
FE 59 飽和係数	2.900E-02 3.162E-02	5.700E-02 6.216E-02	2.520E-01 2.748E-01	9.170E-01 —
CO 60 飽和係数	9.050E-03 7.605E-04	1.800E-02 1.513E-03	8.960E-02 7.529E-03	1.190E+01 —
NI 63 飽和係数	1.860E-05 4.296E-05	3.730E-05 8.614E-05	1.860E-04 4.296E-04	4.330E-01 —
ZN 65 飽和係数	2.800E-02 5.882E-03	5.570E-02 1.170E-02	2.720E-01 5.714E-02	4.760E+00 —

表5.10 炉心構造材の飽和係数(D₂O)

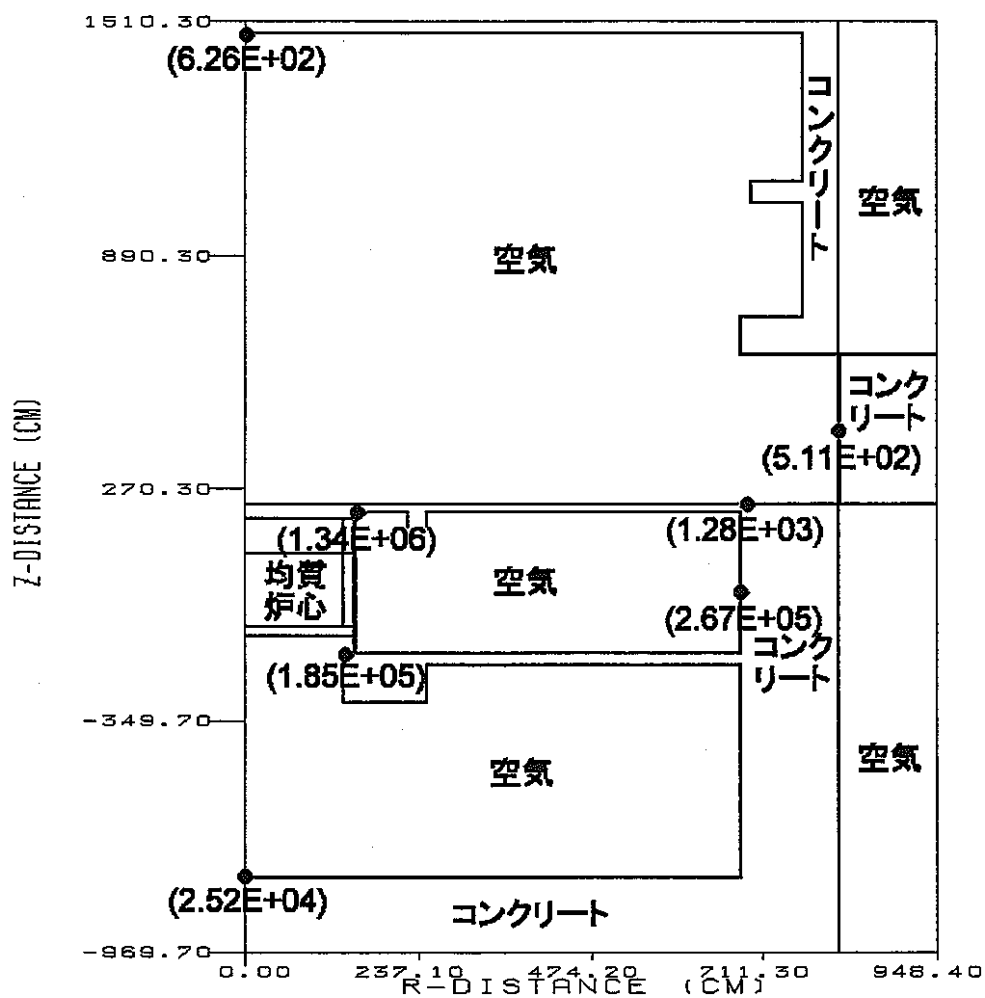
(単位:Bq/g)

核種	照射時間			
	50h	100h	500h	1000y
H 3	1.46E+00	2.92E+00	1.46E+01	4.65E+03
飽和係数	0.00031	0.00063	0.00314	—



カッコ内の値は評価に使用した中性子フラックスである

図 5.1 放射能インベントリ計算モデル(1)



カッコ内の値は評価に使用した中性子フラックスである

図 5.1 放射能インベントリ計算モデル(2)

6. まとめ

本報告書は、将来臨界実験装置「DCA」の廃止措置解体計画書の立案に資するため、技術的検討、放射線強度分布及び放射能インベントリの予備評価をまとめたものである。

「DCA」の炉心は、原子炉建家内に高さ約 2m×直径約 3m のものが設置されており、燃料集合体が最大 165 体装荷可能であり、炉心部の重水は約 12t である。この重水は、系統を含めると約 20t である。

本計算によると、炉心タンク外表面の全中性束は $10^8 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、炉室 1 階の天井では約 $10^6 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、生体遮蔽体である炉室扉内側では $10^3 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、床表面では約 $10^4 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ オーダーの値が得られた。これらの値は、エリアモニターの実測値などとオーダー的に一致する。

放射能インベントリ評価は、廃止措置を検討する基礎データとなる。本予備計算では炉心構造材の放射化の全放射エネルギーは、約 $5.6 \times 10^{11} \text{Bq}$ あり、これらはいずれも日単位程度の半減期の短い核種で占められている。この値は、原子力船「むつ」の $5 \times 10^{15} \text{Bq}$ 、JRR-3 の $2 \times 10^{16} \text{Bq}$ に比べ約 4～5 桁小さい。このうちトリチウム量は約 $3 \times 10^7 \text{Bq}$ であり、総放射エネルギーへ占める割合は小さいが半減期が 12.3 年と長いと冷却期間が長くなると無視できなくなる。

今後、計算と合わせて炉室内の中性子束分布、各構造物及び生体遮蔽体を含む建家構造材の放射能測定は、廃棄物の放射能区分毎の発生量を評価する上で必須の事項である。

「DCA」の場合、建家が遮蔽の役割を持っているので建家構造物の中性子照射レベルを十分に調査することは、特に、重要である。放射化レベルがどの程度あるかを調査することにより、放射性廃棄物量の大幅な低減のための基礎データとなる。

現在、国においては、無条件クリアランスレベル制定のための検討が行われている。例えば、IAEA ドラフト案でのコバルト 60 の無条件クリアランスレベルの値は、 $0.1 \sim 1.0 \text{Bq/g}$ の範囲としている。

放射性廃棄物として取り扱う解体廃棄物量は、今後、制定されるクリアランスレベルによって大きく影響を受ける。

「DCA」の場合、中性子束レベルが低く、かつ、多くの構造材にアルミニウム材も使用されているのでクリアランスレベルが制定されれば、放射化廃棄物の大幅な低減が期待できる。従って、できるだけ正確な計算と測定による整合したデータの取得は、必須のことと考えられる。

解体を完了させるには、使用している燃料、中性子源、重水などの撤去が必要である。いずれも再使用、再利用が可能であると考えられるので、これらの処分に関する計画を前もって決めておく必要がある。

燃料については、FP 量が無視できる範囲内であると推定できることから、当然、再生利用への道が優先して考えられる。

建家及び建家付属のユーリテリティ設備等の撤去範囲については、解体後の跡地又は建家の利用計画と合わせて検討する必要がある。

建家の利用目的としては、核燃料使用施設又は RI 施設転用あるいは、建家内を必要に応じて除染し、管理区域を解除し、コールド施設への転用等が考えられる。

廃止措置の方針は、原子炉停止前に少なくとも 1～2 年前に決めておくことが肝要である。解体届は、解体方法を含む全体計画を記述する必要があり、燃料、重水、中性子源等の処分計画も要求される。

「DCA」は、1969 年初臨界以来、約 30 年を経て、「ふげん」の建設、運転等、基礎技術の確立に多くの役割を果たし、当初の使命を終えようとするこの時期に廃止措置の道筋を整理しておくことは、大切なことである。

臨界実験装置は、出力が低く、放射能レベルも、極めて低いことから、即時解体が合理的であり、諸外国及び我が国もすでに 4 基の廃止措置を実施しているので、これらの事例も参考となるだろう。

「DCA」の解体は、特段の放射線防護対策を必要としないことから実質 1 年以内で実施できるだろう。しかし、燃料、減速材（重水）、解体廃棄物の処分方針が決められなければ、結果的に長期にわたり安全管理を続けることになる。

今後も放射線レベルの確認、解体物の比放射能および物量データの整備など、計画立案の基礎データを着実に手に入れる努力をするとともに、確固たるシナリオを構築することが必要である。

最後に、本調査に当たって、「DCA」現場調査及び「DCA」関係資料を提供していただき、また、「DCA」関係者との議論をふまえて報告書をまとめることができたことに感謝します。また、本報告書が「DCA」廃止措置計画立案にの第一歩の資料として活用されれば幸いである。

参考文献

本報告書を作成するに当たり、使用した主な参考文献を以下に示す。

- (1) 原子炉設置変更許可申請書;(昭和 43 年 7 月 18 日(平成 4 年 5 月 22 日 変更
その 12 まで))
- (2) 核燃料施設安全性研究委員会編;遮蔽安全ガイド資料 基礎編;JAERI-Tech
94-036(1994 年 12 月)
- (3) 「放射線挙動工学」研究専門委員会編;中性子遮蔽設計ハンドブック(1993 年 4
月)
- (4) 村上他;放射線データブック;地人書館(昭和 57 年)
- (5) Satoshi YANAGIHARA;COSMARD:The Code System for Management
of JPDR Decommissioning ; Journal of Nuclear Science and
Technology,Vol30,No9(1993)
- (6) K.KOYAMA, et al.;“ANISN-JR,A ONE-DIMENSIONAL DISCRETE
ORDINATES CODE FOR NEUTRON AND GAMMA-RAY TRANSPORT
CALCULATIONS;JAERI-M 6954(1977)
- (7) Rhoades,W.A. et al.;DOT3.5 Two Dimensional Discrete Ordinates
Radiation Transport Code;CCC-276(1977)
- (8) M.J.Bell;ORIGEN-The ORNL Isotope Generation and Depletion Code;
CCC-217(1973)

付 録

代表的な計算コードの入力データ

1. ANISN-JR

- ・ 半径方向 1 次元計算モデル (重水モデル)
- ・ 上部軸方向 1 次元計算モデル (アルミニウムモデル)
- ・ 下部軸方向 1 次元計算モデル (空気モデル)

2. DOT3.5

- ・ 2 次元中性子束計算モデル

3. ORIGEN-MD

- ・ Upper grid(AI)の放射能インベントリ

半径方向 1 次元計算モデル(重水モデル)の入力データ

```

0      0      0      0
0      0      0      22      22      0      0      0      0      1      0      0      5
23
1.492E7  1.221E7  1.000E7  8.187E6  6.376E6  4.966E6  4.066E6  3.012E6
2.466E6  2.231E6  1.827E6  1.108E6  5.502E5  1.111E5  3.355E3  5.829E2
1.013E2  2.902E1  1.000E1  3.059E0  1.125E0  4.140E-1  1.000E-5
0      1      2      0      22      25
DCA INPUT DATA(dcar1.inp),Radial-1(D2O),JSTTDL-22(DCA),1998/7/29
'control card
15$$
1      0      5      8      2
1      0      5      403      0
22      3      4      25      0
0      48      48      0      0
1      0      0      35      0
0      0      0      20      1
0      1      0      1      0      0
16**
2R0.00  0.0001  1.4209  3R0.0  3.94E+11  2R0.0  0.0002  F0.0
T
13$$
'core macro
100 101 102 103 104 105
'D2O macro
200 201 202 203 204 205
'Al + Air macro
300 301 302 303 304 305
'Al macro
400 401 402 403 404 405
'Al + B4C + Air macro
500 501 502 503 504 505
'Air macro
600 601 602 603 604 605
'Conc macro
700 701 702 703 704 705
'SS41 macro
800 801 802 803 804 805
T
17**
63R2.655E-05      340R0.0
63R1.972E-04      340R0.0
63R9.716E-04      340R0.0
63R3.981E-03      340R0.0
63R1.290E-02      340R0.0
63R2.837E-02      340R0.0
63R5.430E-02      340R0.0
63R8.654E-02      340R0.0
63R1.061E-01      340R0.0
63R1.252E-01      340R0.0
63R1.629E-01      340R0.0
63R1.900E-01      340R0.0
63R1.535E-01      340R0.0
63R4.983E-02      340R0.0
63R1.360E-02      340R0.0
63R5.670E-03      340R0.0
63R2.679E-03      340R0.0
63R1.507E-03      340R0.0
63R8.587E-04      340R0.0
63R4.955E-04      340R0.0
63R3.005E-04      340R0.0
63R5.195E-05      340R0.0
T
3*
F      1.0
T
1*

```

```

r      0.0
4**
'Core
  0.0  1.20  1.45  1.74  2.09  2.51  3.02  3.63  4.37  5.25  6.31  7.59
  9.13 10.98 13.20 47I15.87 135.87
'D2O
  5I136.87 150.25
'Al
  150.47 150.71 151.25
'Air
  152.50 152.81 153.21 153.70 154.31 155.08 156.04
  21I157.25 99I180.0 49I280.0 99I380.0 680.0
'Conc
  681.31 681.72 682.25 682.95 683.87 685.08 686.66 688.73 691.44
  39I695.00 815.0
5** F 1.0
6**
  0.0 6.04938E-2 4.53704E-2 1N2 1N4
  0.0 4.53704E-2 4.62962E-2 4.53704E-2 1N3
  0.0 4R4.53704E-2
  0.0 2R6.04938E-2
7**
  -0.9759000 -0.9511897 -0.7867958 -0.5773503 -0.2182179 1M4
  -0.8164965 -0.7867957 -0.5773503 -0.2182179 1M3
  -0.6172134 -0.5773503 -0.2182179 1M2
  -0.3086067 -0.2182179 1M1
8$$
  63R1 7R2 3R3 280R4 50R5
9$$
  1 7 19 31 37
19$$ F5
27$$
  2 3 4 25 0
28$$
  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
  11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
  21 22
T

```

上部軸方向 1 次元計算モデル(アルミニウムモデル)の入力データ

```

0      0      0      0
0      0      0      22      22      0      0      0      0      1      0      0      5
23
1.492E7  1.221E7  1.000E7  8.187E6  6.376E6  4.966E6  4.066E6  3.012E6
2.466E6  2.231E6  1.827E6  1.108E6  5.502E5  1.111E5  3.355E3  5.829E2
1.013E2  2.902E1  1.000E1  3.059E0  1.125E0  4.140E-1  1.000E-5
0      1      2      0      22      25
DCA INPUT DATA(dcax1.inp), Axial-1(up), JSTTDL-22(DCA), 1998/8/26
'control card
15$$
1      0      5      8      1
1      0      5      304      0
22     3      4      25      0
0      48     48      0      0
1      0      0      35      0
0      0      0      20      1
0      1      0      1      0      0
16**
2R0.00  0.0001  1.4209  3R0.0  1.36E+09  2R0.0  0.0002  F0.0
T
13$$
'core macro
100 101 102 103 104 105
'D2O macro
200 201 202 203 204 205
'Al + Air macro
300 301 302 303 304 305
'Al macro
400 401 402 403 404 405
'Al + B4C + Air macro
500 501 502 503 504 505
'Air macro
600 601 602 603 604 605
'Conc macro
700 701 702 703 704 705
'SS41 macro
800 801 802 803 804 805
T
17**
49R2.655E-05      255R0.0
49R1.972E-04      255R0.0
49R9.716E-04      255R0.0
49R3.981E-03      255R0.0
49R1.290E-02      255R0.0
49R2.837E-02      255R0.0
49R5.430E-02      255R0.0
49R8.654E-02      255R0.0
49R1.061E-01      255R0.0
49R1.252E-01      255R0.0
49R1.629E-01      255R0.0
49R1.900E-01      255R0.0
49R1.535E-01      255R0.0
49R4.983E-02      255R0.0
49R1.360E-02      255R0.0
49R5.670E-03      255R0.0
49R2.679E-03      255R0.0
49R1.507E-03      255R0.0
49R8.587E-04      255R0.0
49R4.955E-04      255R0.0
49R3.005E-04      255R0.0
49R5.195E-05      255R0.0
T
3*
F      1.0
T
1*

```

PNC-TJ9410 98-001

```
F      0.0
4**
'Core
  0.0  1.20  1.43  1.72  2.06  2.47  2.95  3.54  4.24  5.08  6.08  7.29
  8.73 10.45 12.52 33I15.00 100.0
'Air+Al
 101.25 101.56 101.96 102.45 103.06 103.83 104.79
 3I106.00 9I110.30 34I120.30 190.30
'Al
 190.51 190.76 8I191.30 14I200.30 230.30
'Air
 231.55 231.86 232.25 232.75 233.36 234.13 235.09
 3I236.29 4I240.29 4I250.29 6I265.29 109I300.29
14I1400.29 1475.29 1478.29 1480.29
'Conc
 1481.61 1482.01 1482.55 1483.25 1484.17 1485.37 1486.95
 1489.02 1491.74 4I1495.29 1510.29
5**  F  1.0
6**  0.0      0.0604938  0.0907407  0.1370371  0.2117284  1N4
7** -0.9759 -0.9511897 -0.7867958 -0.5773503 -0.2182179  1M4
8$$
 49R1  57R2  27R3  156R4  15R5
9$$
  1      13      19      31      37
19$$      F5
27$$
  2  3  4  25  0
28$$
  1  2  3  4  5  6  7  8  9 10
 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
 21 22
T
```

下部軸方向1次元計算モデル(空気モデル)の入力データ

```

0      0      0      0
0      0      0      22      22      0      0      0      0      1      0      0      5
23
1.492E7  1.221E7  1.000E7  8.187E6  6.376E6  4.966E6  4.066E6  3.012E6
2.466E6  2.231E6  1.827E6  1.108E6  5.502E5  1.111E5  3.355E3  5.829E2
1.013E2  2.902E1  1.000E1  3.059E0  1.125E0  4.140E-1  1.000E-5
0      1      2      0      22      25
DCA INPUT DATA(dcax3.inp),Axial-3(Air),JSTTDL-22(DCA),1998/7/30
'control card
15$$
1      0      5      8      1
1      0      4      244      0
22      3      4      25      0
0      48      48      0      0
1      0      0      35      0
0      0      0      20      1
0      1      0      1      0      0
16**
2R0.00  0.0001  1.4209  3R0.0  1.36E+09  2R0.0  0.0002  F0.0
T
13$$
'core macro
100 101 102 103 104 105
'D20 macro
200 201 202 203 204 205
'Al + Air macro
300 301 302 303 304 305
'Al macro
400 401 402 403 404 405
'Al + B4C + Air macro
500 501 502 503 504 505
'Air macro
600 601 602 603 604 605
'Conc macro
700 701 702 703 704 705
'SS41 macro
800 801 802 803 804 805
T
17**
49R2.655E-05  195R0.0
49R1.972E-04  195R0.0
49R9.716E-04  195R0.0
49R3.981E-03  195R0.0
49R1.290E-02  195R0.0
49R2.837E-02  195R0.0
49R5.430E-02  195R0.0
49R8.654E-02  195R0.0
49R1.061E-01  195R0.0
49R1.252E-01  195R0.0
49R1.629E-01  195R0.0
49R1.900E-01  195R0.0
49R1.535E-01  195R0.0
49R4.983E-02  195R0.0
49R1.360E-02  195R0.0
49R5.670E-03  195R0.0
49R2.679E-03  195R0.0
49R1.507E-03  195R0.0
49R8.587E-04  195R0.0
49R4.955E-04  195R0.0
49R3.005E-04  195R0.0
49R5.195E-05  195R0.0
T
3*
F      1.0
T
1*

```

PNC-TJ9410 98-001

```
F      0.0
4**
'Core
  0.0  1.20  1.43  1.72  2.06  2.47  2.95  3.54  4.24  5.08  6.08  7.29
  8.73 10.45 12.52 33I15.00 100.0
'Air+B4C+Al
 101.28 101.64 102.11 102.70 103.47 104.45
 13I105.70 119.70
'Air
 120.95 121.26 121.66 122.15 122.76 123.53 124.49
 3I125.70 4I129.70 4I139.70 6I154.70 49I189.70 14I689.70
 764.70 767.70 769.70
'Conc
 770.88 771.09 771.34 771.64 772.00 772.41 772.90 773.48
 774.17 774.98 775.94 777.07 778.40 779.98 781.84 784.03
 786.63 59I789.70 969.70
5**  F  1.0
6**  0.0      0.0604938  0.0907407  0.1370371  0.2117284  1N4
7** -0.9759 -0.9511897 -0.7867958 -0.5773503 -0.2182179 1M4
8$$
 49R1  21R2    96R3    78R4
9$$
  1      25      31      37
19$$      F5
27$$
  2    3    4    25    0
28$$
  1    2    3    4    5    6    7    8    9   10
 11   12   13   14   15   16   17   18   19   20
 21   22
T
```

2次元中性子束計算モデルの入力データ

```

22 1 22 9 22
1.492E7 1.221E7 1.000E7 8.187E6 6.376E6
4.966E6 4.066E6 3.012E6 2.466E6 2.231E6
1.827E6 1.108E6 5.502E5 1.111E5 3.355E3
5.829E2 1.013E2 2.902E1 1.000E1 3.059E0
1.125E0 4.140E-1 1.000E-5
DCA NEUTRON FLUX FOR ORIGEN-MD, JSSTD L-22 (DCA) 1998/9/8
61$$
0 5 37 255 474 22 3 4 25 0
0 222 222 1 48 1 1 0 0 0
1 30 -30 3 0 2 0 0 0 0
1 0 0 0 3 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 8 100
2 1 4 0 0 0 0 0 0 0 0
62$$
2 3 4 14 15 9 10 11 12 13
8 128 0 0
63**
7.88E13 0.01 0.01 11000.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.001
T
7** -0.30861 -0.21822 1M1
-0.61721 -0.57735 -0.21822 1M2
-0.81650 -0.78680 -0.57735 -0.21822 1M3
-0.97590 -0.95119 -0.78680 -0.57735 -0.21822 1M4
-0.30861 -0.21822 1M1
-0.61721 -0.57735 -0.21822 1M2
-0.81650 -0.78680 -0.57735 -0.21822 1M3
-0.97590 -0.95119 -0.78680 -0.57735 -0.21822 1M4
3R-0.95119 5R-0.78680 7R-0.57735 9R-0.21822
3R0.95119 5R0.78680 7R0.57735 9R0.21822
T
6** 0.0 2R0.30247-1 0. 4R0.22685-1 0. .22685-1 .23148-1
.22685-1 1N3 0. .30247-1 .22685-1 .22685-1
.30247-1 1N4 0. 2R0.30247E-01 0.0 4R0.22685E-01 0.0
.22685E-01 .23148E-01 .22685E-01 1N4 .30247E-01 .22685E-01
.22685E-01 .30247E-01 1N4
T
' JSSTD L-22 DCA Version
13$$
6R1000 6R1001 6R1002 6R1003 6R1004
6R2000 6R2001 6R2002 6R2003 6R2004 6R2005
6R3000 6R3001 6R3002 6R3003 6R3004 6R3005
6R4000 6R4001 6R4002 6R4003 6R4004
6R5000 6R5001 6R5002 6R5003 6R5004 6R5005
6R6000 6R6001 6R6002 6R6003
6R7000 6R7001 6R7002 6R7003 6R7004
T
' NEUTRON SOURCE HERE
17**
2.655E-05
1.972E-04
9.716E-04
3.981E-03
1.290E-02
2.837E-02
5.430E-02
8.654E-02
1.061E-01
1.252E-01
1.629E-01
1.900E-01
1.535E-01
4.983E-02

```

```

1.360E-02
5.670E-03
2.679E-03
1.507E-03
8.587E-04
4.955E-04
3.005E-04
5.195E-05
T
17**
  57R1.0 198R0.0
  T
17**
  149R0.0 92R1.0 233R0.0
  T
31$$ F5
  T
3** F0.0
  T
1**
  F0.0
  ***Z-MESH BNDRY**
2**
'Lower Conc (200cm)
-969.70 1I-967.70 16I-957.70 -787.70 -782.70 -779.70
-777.20 -775.32 -773.92 -772.86 -772.07 -771.48
-771.03
'Air or Conc(470cm)
-769.70 -766.70 44I-761.70 -311.70 -306.70 -303.70
-302.22 -301.29
'Air or Conc(100cm)
-299.70 16I-297.70 -212.70 -209.70 -207.20 -205.32
-203.92 -202.86 -202.07 -201.48 -201.03
'Air or Conc;1FL(33cm)
-199.70 -198.70 8I-196.70 -169.70 -167.70
'Air or AL or Conc(47cm)
-166.70 -165.70 12I-163.70 -124.70 -122.62 -121.41
'Absorber + Al or Conc or Air (19.73cm)
-119.70 -118.70 3I-116.70 -104.70 -102.81 -101.68
'Core(100cm)
43I-98.12 -1.0 -0.88
'Core(100cm)
0.0 0.88 43I1.0 98.12
'Al + Air or Conc or Air(53.67cm)
101.54 102.38 14I103.67 148.67 1I150.67 153.67
'Al + Air or Conc or Air(36.63cm)
155.55 157.20 8I160.30 187.30 189.30 190.30
'Al or Conc or Air(20cm)
192.01 193.22 3I195.30 207.30 209.30 210.30
'Al or Conc or Air;2FL(20cm)
212.01 213.22 3I215.30 227.30 229.30 230.30
'Conc or Air(400cm)
231.63 232.08 232.67 233.46 234.52 235.92 237.80
240.30 243.30 36I248.30 1I618.30 628.30 630.30
'Conc or Air(100cm)
631.63 632.08 632.67 633.46 634.52 635.92 637.80
640.30 16I643.30 728.30 730.30
'Conc or Air(300cm)
732.12 733.60 736.30 739.30 27I744.30 1024.30
1028.30 1030.30
'Conc or Air(60cm)
1032.12 1033.60 1036.30 8I1039.30 1084.30
1088.30 1090.30
'Conc or Air(390cm)
1092.12 1093.60 1096.30 1099.30 36I1104.30 1474.30
1478.30 1480.30

```

```

'Conc(30cm)
1482.12 1483.60 511486.30 1510.30
'**R-MESH BNDRY**
4**
'Core(135cm)
0.0 1.50 2.24 3.34 5115.00 135.00
'Core(0.87cm)
135.87
'D2O(14.38cm)
51136.87 150.25
'Al(1.0cm)
151.25
'Air or Conc(71.25cm)
152.78 153.58 154.80 156.66 191159.50
219.50 221.50 222.50
'Air or Conc(25.8cm)
61224.30 245.30 247.30 248.30
'Air or Conc(431.7cm)
250.19 251.85 255.00 258.00 401263.00
673.00 678.00 680.00
'Air or Conc(15.0cm)
680.50 681.50 21683.00 692.00 694.00
695.00
'Air or Conc(70.0cm)
696.59 697.52 201699.00 762.00 764.00
765.00
'Air or Conc(50.0cm)
766.71 767.92 131770.00 812.00 814.00
815.00
'Fe(1.6cm)
815.60 816.60
'Conc(131.8cm)
817.88 818.24 818.70 819.28 820.04 821.00
822.23 823.80 825.82 391828.40 948.40
5**
F1.0 E
' REGION NUMBER FOR EACH MESH
8$$
'Conc-Air (200cm)
56R32 1R32 7R32 1R32 27R32 10R32 48R32 8R10 26R10
19R10 2R11 50R11
29Q255
'Air-Conc(470cm)
56R31 1R37 7R37 1R37 27R37 10R37 48R37 8R10 26R10
19R10 2R11 50R11
51Q255
'Air-Conc-Air-Conc-Air(100cm)
56R31 1R36 7R36 1R36 27R36 10R36 48R37 8R10 26R10
19R10 2R11 50R11
26Q255
'Air-Conc-Air(33cm)
56R31 1R36 7R36 1R36 27R36 10R36 48R36 8R10 26R10
19R10 2R11 50R11
12Q255
'Air-Al-Conc-Air(47cm)
56R31 1R35 7R35 1R8 27R9 10R9 48R9 8R10 26R10
19R10 2R11 50R11
17Q255
'Absorber + Al-Al-Conc-Air (19.73cm)
56R30 1R30 7R30 1R8 27R9 10R9 48R9 8R10 26R10
19R10 2R11 50R11
8Q255
'Core-D20-Al-Air-Conc-Air(100cm)
56R29 1R29 7R2 1R3 27R4 10R4 48R4 8R5 26R5
19R5 2R11 50R11
45Q255

```

```

'Core-D20-Al-Air-Conc-Air(100cm)
  56R18  1R18  7R2  1R3  27R4  10R4  48R4  8R5  26R5
  19R5   2R11  50R11
  45Q255
'Al + Air-Air-Al-Air-Conc-Air(53.67cm)
  56R19  1R19  7R7  1R8  27R9  10R9  48R9  8R10  26R10
  19R10  2R11  50R11
  20Q255
'Al + Air-Air-Al-Air-Conc-Air-Conc-Air(36.63cm)
  56R19  1R19  7R7  1R8  27R9  10R26  48R9  8R10  26R10
  19R10  2R11  50R11
  13Q255
'Al-Air-Conc-Air-Conc-Air(20cm)
  56R20  1R20  7R20  1R20  27R9  10R26  48R9  8R10  26R10
  19R10  2R11  50R11
  8Q255
'Al-Conc-Air(20cm)
  56R20  1R20  7R20  1R20  27R26  10R26  48R26  8R10  26R10
  19R10  2R11  50R11
  8Q255
'Air-Fe-Conc(400cm)
  56R21  1R21  7R21  1R21  27R15  10R15  48R15  8R15  26R15
  19R15  2R16  50R17
  49Q255
'Air-Conc-Air(100cm)
  56R21  1R21  7R21  1R21  27R21  10R21  48R21  8R10  26R10
  19R10  2R11  50R11
  26Q255
'Air-Conc-Air(300cm)
  56R21  1R21  7R21  1R21  27R21  10R21  48R21  8R21  26R21
  19R10  2R11  50R11
  34Q255
'Air-Conc-Air(60cm)
  56R21  1R21  7R21  1R21  27R21  10R21  48R21  8R21  26R10
  19R10  2R11  50R11
  14Q255
'Air-Conc-Air(390cm)
  56R21  1R21  7R21  1R21  27R21  10R21  48R21  8R21  26R21
  19R10  2R11  50R11
  43Q255
'Conc-Air(30cm)
  56R22  1R22  7R22  1R22  27R22  10R22  48R22  8R10  26R10
  19R10  2R11  50R11
  8Q255
'  MAT NUMBER OF EACH REGION
9$$
  -1  -7  -13  -19  -25
  -31 -37 -43 -49 -55 -61
  -67 -73 -79 -85 -91 -97
  -103 -109 -115 -121 -127
  -133 -139 -145 -151 -157 -163
  -169 -175 -181 -187
  -193 -199 -205 -211 -217
28$$
  F30
  T

```

Upper grid(AI)の放射能インベントリの入力データ

```

      2      1      1
      1      1 277 277 300.0
1.492E7 1.221E7 1.000E7 8.187E6 6.376E6 4.966E6 4.066E6 3.012E6
2.466E6 2.231E6 1.827E6 1.108E6 5.502E5 1.111E5 3.355E3 5.829E2
1.013E2 2.902E1 1.000E1 3.059E0 1.125E0 4.140E-1 1.000E-5
DCA Activity Calculation(50h) for AI(Uper grid):1998/9/3
      2 2 2 0 0 0 0 10
      4 4 0
      0 2 1
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
1.0      1.0      1.0      1.0
45000.0 90000.0 135000.0 180000.0
1.0 365.0
1.0e-30 1.0e-30 1.0e-30 1.0e-30 1.0e-30 1.0 1.0
120000 2.400E-02
130000 9.699E-01
140000 1.100E-03
220000 1.800E-05
240000 1.700E-03
250000 2.000E-04
260000 2.700E-03
270000 3.000E-06
290000 3.000E-04
300000 9.999E-05

```