



# 中性子遮蔽設計ハンドブック

## 目次

はしがき

執筆者および監修者名簿

頁

1. 概説	1
2. 中性子源	9
2.1 中性子源の種類	9
2.2 アイソトープ線源	10
2.2.1 自発核分裂	10
2.2.2 ( $\alpha, n$ )反応	11
2.2.3 ( $\gamma, n$ )反応	11
2.3 核分裂炉における中性子源	13
2.3.1 中性子核分裂	13
2.3.2 $^{170}\text{O}$ の放射化	17
2.4 核融合炉における中性子源	18
2.4.1 Q値としきい値	18
2.4.2 生成中性子のエネルギー	19
2.5 核燃料再処理施設における中性子源	21
2.5.1 中性子源強度の燃料燃焼度・冷却時間への依存性	21
2.5.2 自発核分裂と( $\alpha, n$ )反応による中性子源の基礎データ	22
2.5.3 中性子源強度の算出法	23
3. 断面積とライブラリー	33
3.1 断面積	33
3.1.1 断面積の定義	33
3.1.2 断面積の種類	35
3.2 群定数	44
3.2.1 群定数の定義	44
3.2.2 断面積処理	44
3.2.3 断面積処理コード	55
3.3 断面積データライブラリー	57
3.3.1 評価済核データファイル	58
3.3.2 特殊目的核データファイル	59
3.3.3 その他の核データファイル	59
3.3.4 群定数セット	60
4. 輸送計算法	69
4.1 ボルツマン輸送方程式の基礎概念	69
4.1.1 緒言	69
4.1.2 位相空間と分布関数	69
4.1.3 中性子輸送方程式の導出	72
4.1.4 遮蔽計算コードで用いる輸送方程式	74
4.1.5 境界条件	75
4.1.6 基本形状に対するドリフト項の表現	76
4.1.7 積分表現	77
4.2 Invariant Imbedding 法	80
4.2.1 序論	80
4.2.2 応答関数の基本式	80
4.2.3 I.I.法コード SLDN	82
4.3 $S_N$ 法	86
4.3.1 序論	88
4.3.2 基本式	86
4.3.3 差分近似式	88
4.3.4 数値解法	88
4.3.5 $S_N$ 法における注意点	90
4.3.6 一次元コード ANISN	91

4.3.7	二次元コード DOT	94
4.4	直接積分法	99
4.4.1	序論	99
4.4.2	基本式	99
4.4.3	数値解法上の仮定と近似	100
4.4.4	PALLAS コード	103
4.4.5	PALLAS コードの計算の流れ	105
4.5	モンテカルロ法	107
4.5.1	連続エネルギーボルツマン輸送方程式	108
4.5.2	多群ボルツマン輸送方程式	109
4.5.3	インポートランスサンプリング	110
4.5.4	バイアス(biasing)	113
4.5.5	ルシアンルーレットとスプリッティング	115
4.5.6	指数変換(exponential transform)	115
4.5.7	期待値法	116
4.5.8	モンテカルロ計算(フォワード)の流れ	118
4.5.9	Adjoint Monte Carlo 計算と Forward Monte Carlo 計算との対応	121
4.5.10	MORSE-CG コードと MCNP コードの特徴	123
4.6	アルベド輸送計算法	127
4.6.1	序論	127
4.6.2	基本式	128
4.6.3	中性子アルベドデータの基本的性質と計算	131
4.6.4	適用例	133
4.7	除去拡散法	138
4.8	遮蔽計算コードシステム	142
4.8.1	高速炉遮蔽解析システム	142
4.8.2	遮蔽安全評価計算コードシステム RADHEAT-V4	148
4.8.3	アルベド輸送計算コードシステム	155
4.8.4	放射線遮蔽総合評価コードシステム	158
5.	中性子測定法	161
5.1	中性子と物質との相互作用	161
5.2	中性子検出器	166
5.2.1	荷電粒子反応による中性子検出器	166
5.2.2	核分裂計数管	169
5.2.3	放射化検出器	171
5.2.4	陽子反跳型検出器	174
5.2.5	その他の検出器	176
5.3	遮蔽実験法とスペクトル測定	177
5.3.1	飛行時間法	177
5.3.2	波高分布法	179
5.3.3	多数放射化箔法	181
6.	中性子透過実験と解析	185
6.1	原子炉一般	185
6.1.1	PCAベンチマーク実験	185
6.1.2	JRR-4「むつ」モックアップ実験	186
6.2	高速炉	192
6.2.1	ナトリウム透過実験とその解析	192
6.2.2	鉄透過実験とその解析	193
6.2.3	ステンレス鋼透過実験とその解析	195
6.2.4	GCFR 模擬実験とその解析	195
6.3	D-T核融合炉	204
6.3.1	OKTAVIAN 透過実験	204
6.3.2	ORNL ステンレス鋼透過実験	205
6.3.3	FNSでの鉄深層部透過実験	206
6.4	キャスク	219
6.4.1	湿式型キャスクベンチマーク実験	219
6.4.2	乾式型キャスクベンチマーク実験	220
6.5	遮蔽定数評価のためのベンチマーク実験	227

6.5.1	Winfrith 鉄ベンチマーク実験	227
6.5.2	黒鉛透過実験 (Profioの実験)	228
6.5.3	EURACOS ナトリウム透過実験	229
6.5.4	KfK 鉄球ベンチマーク実験	230
6.5.5	LLNL 球透過実験 (鉄球のベンチマーク実験)	231
7.	中性子ストリーミング	253
7.1	中性子ストリーミングの概説	253
7.2	ストリーミング解析手法	255
7.2.1	ストリーミング中性子評価簡易計算式	255
7.2.2	$S_n$ 法による解析	283
7.2.3	モンテカルロ法による解析	301
7.2.4	アルベド輸送計算法による解析	307
7.2.5	モンテカルロカップリング法による解析	318
7.2.6	フォワード・アジョイントカップリング法による解析	329
7.2.7	DOT-DOMINO-MORSE カップリング法による解析	337
7.3	ダクトおよびスリットストリーミングの実験と解析	343
7.3.1	核分裂炉軸対称配置 (水中円筒ダクト問題)	343
7.3.2	核分裂炉軸対称配置 (円環状空隙問題)	344
7.3.3	核分裂炉軸対称配置 (ギャップ幅が狭く長い円環ダクト)	345
7.3.4	核分裂炉非軸対称配置 (水中円環ダクト)	346
7.3.5	核分裂炉非軸対称配置 (1回屈曲ダクト)	348
7.3.6	核分裂炉非軸対称配置 (2回屈曲ダクト)	349
7.3.7	核分裂炉非軸対称配置 (コンクリート中円筒ダクト)	350
7.3.8	核融合炉における多重スリット	351
7.3.9	核融合炉各種配置 (ダクトおよびスリット)	352
8.	中性子スカイシャイン	375
8.1	中性子スカイシャインの概要	375
8.2	計算手法および計算コード	376
8.2.1	簡易計算法	376
8.2.2	計算コードによる方法	379
8.3	計算例および測定値との比較	388
8.3.1	原子炉からのスカイシャイン	388
8.3.2	核融合炉および加速器からのスカイシャイン	395
8.4	線源評価法	406
9.	遮蔽材	411
9.1	コンクリート	411
9.2	水	411
9.3	鉛	411
9.4	グラファイト	412
9.5	鉄	412
9.6	ほう素	412
9.7	ポリエチレン	413
9.8	水素化リチウム	413
9.9	水素化チタン、水素化ジルコニウム	413
10.	放射化	435
10.1	概要	435
10.2	放射化対象核種と誘導放射能	436
10.3	放射化計算コードシステム	440
10.3.1	核分裂炉 (ORIGEN2, DCHAIN2)	440
10.3.2	核融合炉 (THIDA-2)	441
10.4	計算と実験との比較	449
10.4.1	核分裂炉	449
10.4.2	核融合炉	454
10.5	低放射化のための対策	462
10.5.1	核分裂炉	462
10.5.2	核融合炉	464

11. 遮蔽設計例	467
11.1 遮蔽設計の一般的な進め方	467
11.1.1 基本的な考え方	467
11.1.2 遮蔽設計の進め方	469
11.2 JRR-3 改造炉 (JRR-3M)	473
11.2.1 概要	473
11.2.2 遮蔽設備と遮蔽設計基本方針	473
11.2.3 原子炉本体の遮蔽設計	474
11.2.4 実験孔設備の遮蔽設計	476
11.2.5 実験値による遮蔽設計の評価	477
11.3 軽水炉	494
11.3.1 PWR (加圧水型軽水炉)	494
(概要、中性子遮蔽設計上の課題、主遮蔽計算例、 詳細解析の例、中性子測定および解析例)	
11.3.2 BWR (沸騰水型軽水炉)	503
(概要、中性子遮蔽設計上の課題、主遮蔽計算例、 詳細解析の例、中性子測定および解析例)	
11.4 高速増殖炉	510
11.4.1 高速増殖炉の概要	510
11.4.2 中性子遮蔽設計上の課題	511
11.4.3 主遮蔽設計例	513
11.4.4 詳細解析の例	513
11.4.5 中性子測定および解析例	514
11.5 新型転換炉ふげん発電所	521
11.5.1 新型転換炉ふげん発電所の概要	521
11.5.2 遮蔽設計上の課題	521
11.5.3 遮蔽計算	522
11.5.4 遮蔽解析の詳細化	523
11.5.5 測定と計算値との比較	524
11.6 船用炉	528
11.6.1 原子力船「むつ」	528
(概要、建造時の遮蔽構造、遮蔽改修設計、 設計計算と実測値との比較)	
11.6.2 次世代船用炉	548
(概要、碎氷船用原子炉 MRX、 深海科学調査船用原子炉 DRX)	
11.7 核融合炉	555
11.7.1 核融合炉の概要	555
11.7.2 遮蔽設計の課題と設計基準	556
11.7.3 核融合炉核計算用ツール	558
11.7.4 超電導マグネットの遮蔽設計	559
11.7.5 生体遮蔽	564
11.8 燃料輸送キャスク	579
11.8.1 燃料輸送キャスクの概要	579
11.8.2 遮蔽設計上の課題	579
(設計基準、線源評価)	
11.8.3 湿式キャスク	580
(湿式キャスクの概要、遮蔽計算例)	
11.8.4 乾式キャスク	582
(乾式キャスクの概要、遮蔽計算例、測定および解析例)	
11.9 再処理施設	596
11.9.1 再処理施設の概要	596
11.9.2 再処理施設の遮蔽設計	596
11.9.3 遮蔽安全設計の流れ	597
12. 放射線防護の考え方	605
12.1 国際放射線防護委員会勧告26(ICRP Publ.26)の考え方	605
12.2 国際放射線防護委員会勧告60(ICRP Publ.60)の考え方	606
12.3 国内法に見られる遮蔽安全の考え方	608
[付録] 単位の換算率表	613