

目 次

1 工学システムのリスクと安全性	1
1.1 リスク, その認知と受容	1
1.2 リスクと安全解析の概要	7
1.3 二つの歴史的原子炉事故	10
1.4 リスクの定義	10
1.5 信頼性, 可用性, 保全性, 安全性	12
1.6 本書の構成	16
参考文献	16
2 事象の確率	19
2.1 事 象	19
2.2 イベントツリー解析と最小カットセット	21
2.3 確 率	23
2.3.1 確率の解釈	23
2.3.2 確率に対する公理的アプローチ	25
2.3.3 事象の論理積	26
2.3.4 事象の論理和	27
2.3.5 確率の分解則	31

2.4	時間に依存しない確率と時間に依存する確率	32
2.5	時間に依存しない確率	33
2.5.1	はじめに	33
2.5.2	時間に依存しない確率分布	35
2.6	正規分布	40
2.7	信頼度関数	44
2.8	時間に依存する確率分布	53
2.8.1	アーラン分布と指数分布	53
2.8.2	ガンマ分布	54
2.8.3	対数正規分布	56
2.8.4	ワイブル分布	59
2.8.5	一般化した“バスタブ”分布	61
2.8.6	時間依存確率分布の選択	61
2.9	極値の確率分布	64
2.10	故障解析のための確率モデル	66
	参考文献	67
	演習問題	68
3	信頼性データ	75
3.1	推定論	75
3.1.1	積率推定法	76
3.1.2	最尤推定法	78
3.1.3	最大エントロピー法	80
3.1.4	推定量の比較	82
3.2	ベイズ法によるデータの更新	83
3.2.1	ベイズの公式	83
3.2.2	ベイズの公式の応用	84
3.3	中心極限定理と仮説検定	89
3.3.1	中心極限定理の解釈	90

3.3.2	中心極限定理による仮説検定	92
3.4	信頼性の定量化	94
3.4.1	信頼性定量化のための中心極限定理	94
3.4.2	信頼性の工学的定量化	96
3.4.3	信頼性定量化のための χ^2 分布	99
3.4.4	3方法の比較とまとめ	100
	参考文献	101
	演習問題	102
4	複合系の信頼性	107
4.1	直列系とアクティブな並列系	107
4.1.1	独立要素からなるシステム	107
4.1.2	冗長要素を備えたシステム	111
4.1.3	フェールセーフとフェールデンジャー	113
4.2	待機要素を備えたシステム	117
4.3	分解解析法	121
4.4	シグナルフローグラフによる解析	126
4.5	カットセット解析	128
	参考文献	131
	演習問題	131
5	修復のあるシステムの可用性および信頼性	137
5.1	はじめに	137
5.2	マルコフ手法	139
5.2.1	マルコフの支配方程式	139
5.2.2	マルコフ支配方程式の解法	142
5.2.3	基礎的な例	145
5.3	可用性解析	149

5.3.1	遷移率行列の作成に関する規則	149
5.3.2	可用性遷移率行列	150
5.3.3	時間依存の可用性の例	156
5.3.4	定常状態の可用性	159
5.4	信頼性解析	162
5.4.1	信頼性遷移率行列	162
5.4.2	時間依存の信頼性の例	164
5.4.3	故障までの平均時間	164
5.5	マルコフモデルのさらなる利用方法	167
5.5.1	システム状態間の不完全な切替え	168
5.5.2	ハザード率が一定でないシステム	171
	参考文献	172
	演習問題	172

6 確率論的リスク評価 177

6.1	故障モード	178
6.2	故障事象の分類	179
6.2.1	一次故障／二次故障／コマンド故障	179
6.2.2	共通原因故障	179
6.2.3	人的過誤	185
6.3	故障データ	187
6.3.1	ハードウェアの故障	187
6.3.2	人的過誤	188
6.4	故障とその影響の結合	190
6.4.1	帰納的手法	190
6.4.2	イベントツリー解析	192
6.5	フォールトツリー解析	194
6.5.1	はじめに	194
6.5.2	フォールトツリーの構築	195

6.5.3	定性的フォールトツリー解析	197
6.5.4	定量的フォールトツリー解析	201
6.5.5	共通原因故障とフォールトツリー解析	204
6.6	マスターロジックダイアグラム	206
6.7	不確かさと重要度の解析	209
6.7.1	PRAにおける不確かさの種類	209
6.7.2	確率論的不確かさ解析	210
6.7.3	感度解析と重要度解析	210
	参考文献	211
	演習問題	213

7 PRAのための計算プログラム 219

7.1	SAPHIRE コードのフォールトツリー	219
7.1.1	ゲート変換とツリーの再構築	220
7.1.2	ツリーの単純化	222
7.1.3	フォールトツリーの展開と簡略化	224
7.2	SAPHIRE コードによるフォールトツリーとイベントツリーの評価	224
7.3	SAPHIRE コードのその他の特徴	226
7.4	その他の PRA コード	227
7.5	二分決定図のアルゴリズム	229
7.5.1	BDD アルゴリズムの基本形式	229
7.5.2	BDD 形式の一般化	232
7.5.3	ゼロサプレス型 BDD のアルゴリズムと FTREX コード	238
	参考文献	238
	演習問題	239

8 原子力発電所の安全解析 241

8.1	原子力発電所の工学的安全施設	241
-----	----------------	-----

8.1.1	加圧水型原子炉	242
8.1.2	沸騰水型原子炉	255
8.2	事故分類と一般設計目標	262
8.2.1	発電所の運転状態	262
8.2.2	10 CFR 50 における事故の分類	263
8.2.3	一般設計指針と安全目標	265
8.3	設計基準事故：大破断 LOCA	267
8.3.1	PWR におけるコールドレグ LBLOCA の典型的事象	268
8.3.2	ECCS の仕様	272
8.3.3	コードのスケーリング，適用，不確実性評価	275
8.4	シビアアクシデント（クラス 9）	281
8.5	スクラム失敗を伴う異常な過渡事象	282
8.5.1	ATWS 問題の歴史と背景	282
8.5.2	ATWS 問題の解消	285
8.5.3	軽水炉における反応度出力係数	287
8.6	放射線源と大気拡散	293
8.6.1	放射性物質のソースターム	294
8.6.2	放射性プルームの大気拡散	295
8.6.3	線量率計算のための簡単なモデル	300
8.7	放射線被ばくの生物学的影響	304
	参考文献	304
	演習問題	306
9	原子力発電所の主な事故と事象	311
9.1	スリーマイル島 2 号機の事故	311
9.1.1	事故の経過—1979 年 3 月	311
9.1.2	事故の教訓とフォローアップ	312
9.2	PWR における原子炉圧力容器内事故の進展	316
9.2.1	炉心の露出と温度上昇	318

9.2.2	被覆管の酸化	320
9.2.3	被覆管の溶融と燃料の液化	321
9.2.4	溶融炉心の崩壊と移動	324
9.2.5	圧力容器の破損	325
9.3	チェルノブイリ事故	325
9.3.1	事故の原因と本質—1986 年 4 月	325
9.3.2	事故の経過	327
9.3.3	事故で放出されたエネルギーの推定	328
9.3.4	事故の影響	329
9.3.5	スリーマイル島事故とチェルノブイリ事故の比較	330
9.4	福島発電所事故	331
9.4.1	事故の概要—2011 年 3 月	331
9.4.2	各号機ごとの事故の進展と対応	334
9.4.3	事故による放射能の概要	335
9.4.4	事故の意味合いとフォローアップ	336
9.5	セーラム発電所のスクラム失敗事象	338
9.5.1	セーラム炉事象の経過と原因	338
9.5.2	セーラム炉のスクラム失敗事象の教訓とフォローアップ	341
9.6	ラサール発電所の遷移事象	343
9.6.1	ラサール炉における核連成密度波振動	343
9.6.2	核連成密度波振動の簡単なモデル	346
9.6.3	ラサール炉事象の意味合いとフォローアップ	349
9.7	デービス-ベッセ炉の潜在的 LOCA 事象	350
9.7.1	事象の背景と進展	350
9.7.2	デービス-ベッセ炉停止先延ばしに対する NRC 許可の決定	353
9.7.3	デービス-ベッセ炉事象の原因とフォローアップ	356
	参考文献	357
	演習問題	360

10 原子力発電所のPRA研究	363
10.1 WASH-1400 原子炉安全研究	364
10.2 シビアアクシデントリスクの評価：NUREG-1150	372
10.2.1 NUREG-1150 研究の背景とその範囲	372
10.2.2 NUREG-1150 手法の概要	374
10.2.3 事故発生頻度解析	377
10.2.4 事故進展解析	381
10.2.5 放射性核種移行解析	386
10.2.6 オフサイトの事故影響解析	390
10.2.7 不確実性解析	393
10.2.8 リスクの統合	395
10.2.9 NUREG-1150 についての追加的な視点とコメント	399
10.3 NUREG-1150 の構造における単純化PRA	402
10.3.1 単純化PRAモデルに関する記述	402
10.3.2 パラメータ研究および単純化PRAモデルへのコメント	407
参考文献	409
演習問題	410
11 受動的安全性を備えた先進原子力エネルギーシステム	411
11.1 EBR-II における受動的安全性の実証試験	411
11.1.1 EBR-II 一次冷却系と簡略化モデル	412
11.1.2 無防備の流量喪失試験と除熱源喪失試験	420
11.1.3 簡略化された燃料チャンネル解析	424
11.1.4 EBR-II の受動的安全性実証試験の意義	426
11.2 第3+世代原子力発電所の安全性	427
11.2.1 API1000 の設計の特長	428
11.2.2 API1000 の小破断 LOCA 解析	431

11.2.3 高経済性単純化沸騰水型原子炉	436
11.2.4 SBWR の受動的安全格納容器の信頼性定量化	440
11.3 第4世代の原子力発電所	449
11.3.1 ナトリウム冷却高速炉	449
11.3.2 高速炉の仮想的炉心損傷事故	453
11.3.3 VHTR と現象同定重要度ランクテーブル	461
参考文献	464
演習問題	466
12 リスク情報を活用した規制と信頼性を重視した保全	469
12.1 原子力発電所規制のためのリスク指標	469
12.1.1 リスク情報を活用した規制と許認可の原則	470
12.1.2 リスク情報を活用した意思決定における不確実性	474
12.1.3 リスク情報を活用した規制におけるその他の取組み	475
12.2 信頼性重視保全	477
12.2.1 予防保全のための最適化戦略	477
12.2.2 信頼性重視保全の枠組み	480
12.2.3 費用便益に関する考察	482
参考文献	484
演習問題	485
13 動的イベントツリー解析	487
13.1 動的イベントツリー解析の基本的特徴	487
13.2 連続的イベントツリーの定式化	492
13.2.1 確率論的バランス方程式の導出	492
13.2.2 確率論的バランス方程式の積分形	494
13.2.3 確率論的バランス方程式の数値解	497
13.3 パラメータ推定のためのセル写像法	499

13.3.1	ベイズの再帰的關係の導出	499
13.3.2	動的イベントツリー構築のための CCM 技術	503
13.4	機器劣化の診断	508
13.4.1	機器診断のためのベイズ-フレームワーク	508
13.4.2	確率論的診断アルゴリズムの実施	511
	参考文献	516
	演習問題	517

付録 A 原子炉の放射能と線源 519

A.1	核分裂生成物の蓄積量と崩壊熱	519
A.2	放射線被ばくによる健康影響	522
	参考文献	525

付録 B 幾つかの特殊関数 527

B.1	ガンマ関数	527
B.2	誤差関数	529
	参考文献	529

付録 C 故障率データ例 531

付録 D 線形カルマンフィルターのアルゴリズム 535

	参考文献	540
--	----------------	-----

演習問題略解 541

索引 549