



# 目 次

## 第 I 編 エネルギーと原子力

法貴 四郎

### 1 章 エネルギー総説

一文字正三

1・1 宇宙のエネルギー	3
1・2 生命とエネルギー	4
1・3 人間社会とエネルギー	4
〔1〕 文化の発展とエネルギー	4
〔2〕 人間生活とエネルギー	4
〔3〕 エネルギー需要の将来	5
〔4〕 食糧と人口問題	5
1・4 エネルギー資源	5
〔1〕 石 油	6
〔2〕 オイルサンド, オイルシェール	7
〔3〕 天然ガス	7
〔4〕 石 炭	7
〔5〕 水 力	7
〔6〕 自然エネルギー	7
〔7〕 ウ ラ ン	7
〔8〕 核融合エネルギー資源	8
1・5 エネルギー需給	8
〔1〕 世界のエネルギー事情	8
〔2〕 日本のエネルギー事情	9
1・6 エネルギーと環境	11
〔1〕 化石燃料の燃焼生成物の影響	12
〔2〕 放射線および放射性廃棄物	12
〔3〕 廃熱および温廃水の影響	13
〔4〕 自然環境の破壊等	13
〔5〕 社会環境との調和	14
1・7 自然エネルギーとソフトエネルギーパス	14
参考文献	14

### 2 章 原子力総説

一文字正三

2・1 原子力の基礎	16
------------	----

[1] 核分裂	16
[2] 核融合	16
2・2 原子力発電	16
[1] 原子力発電	16
[2] 原子力発電の現状	17
2・3 核燃料サイクル	20
[1] 核燃料サイクル	20
[2] 核燃料サイクルの現状	20
2・4 原子力施設の安全と環境	22
[1] 放射線障害	22
[2] 環境放射線と許容線量	22
[3] 原子力施設の安全性	23
[4] 核燃料サイクルと放射性廃棄物	23
2・5 放射線利用その他	24
[1] 熱エネルギーの直接利用	24
[2] 船用原子炉	24
[3] 放射線の利用	24
2・6 核融合の開発	25
2・7 原子力と国際関係	26
[1] 核不拡散担保のための国際協力	26
[2] 原子力平和利用推進のための国際協力	26
2・8 原子力の将来	26
[1] エネルギー政策の中の原子力	26
[2] 原子力の将来	26
[3] 原子力の将来の問題点	27
参考文献	28

## 第Ⅱ編 原子力の基礎

安 成弘

### 1章 原子核の物理

1・1 原子核の構造	31
[1] 概論	31
[2] 単位	31
[3] 原子核の大きさと形	31
[4] 原子核の角運動量	32
[5] 反転性	32
[6] 原子核の電磁モーメント	32
[7] 原子核の質量	33
[8] 核力	33
[9] 原子核模型	33
1・2 原子核の崩壊	34
[1] 概論	34
[2] 崩壊確率, 寿命, 半減期	34

菊池 康之

[3]	放射 性 核	34
[4]	$\alpha$ 崩 壊	35
[5]	$\beta$ 崩 壊	36
[6]	$\gamma$ 崩 壊	37
1・3	原 子 核 反 応	38
[1]	核 反 応 の 基 本 的 事 項	38
[2]	複 合 核 反 応	40
[3]	光 学 模 型	43
1・4	核 分 裂	43
[1]	概 論	43
[2]	核 分 裂 の エ ネ ル ギ ー	43
[3]	質 量 分 布	44
[4]	電 荷 分 布	44
[5]	即 発 中 性 子	44
[6]	遅 発 中 性 子	45
[7]	核 分 裂 の メ カ ニ ズ ム	45
[8]	中 性 子 に よ る 核 分 裂 反 応	47
[9]	自 発 核 分 裂	47
1・5	核 融 合	48
[1]	核 融 合 反 応 と エ ネ ル ギ ー	48
[2]	核 融 合 反 応 断 面 積	48
[3]	熱 核 融 合 反 応 と 平 均 核 反 応 率	49
[4]	恒 星 内 の 核 融 合 反 応	49

## 2章 中性子の反応

山室 信弘・関本 博

2・1	中 性 子 の 性 質 と 反 応 の 断 面 積	50
[1]	中 性 子 の 性 質	50
[2]	中 性 子 断 面 積	50
2・2	中 性 子 に よ る 核 反 応	51
[1]	中 性 子 エ ネ ル ギ ー に よ る 核 反 応 の 変 化	51
[2]	中 性 子 断 面 積 の 測 定 と 評 価	54
2・3	核 分 裂 と 連 鎖 反 応	54
[1]	連 鎖 反 応	54
[2]	無 限 媒 質 中 で の 中 性 子 の 一 周 期	55
2・4	中 性 子 の 減 速 と 拡 散	55
[1]	中 性 子 密 度 と 中 性 子 束	55
[2]	中 性 子 輸 送 方 程 式	56
[3]	中 性 子 の 減 速	57
[4]	中 性 子 の 拡 散	59
	参 考 文 献	64

### 3章 放射線と放射線計測の基礎

若林 宏明

3・1	アイソトープおよび放射線	65
[1]	概    要	65
[2]	崩壊形式	65
[3]	放射性崩壊	67
3・2	放射線と物質との相互作用	68
[1]	$\alpha$ 線と物質との相互作用	68
[2]	電子と物質との相互作用	69
[3]	$\gamma$ 線と物質との相互作用	70
3・3	放射線の単位	72
[1]	放    射    能	72
[2]	照    射    線    量	72
[3]	吸    収    線    量	72
[4]	フルエンス	72
[5]	エネルギーフルエンス	72
[6]	カ    ー    マ	72
[7]	線エネルギー付与	72
3・4	放射線の測定	73
[1]	概    要	73
[2]	放射線検出器, 検出系	73
	参 考 文 献	78

### 4章 原子力の化学

石樽 顕吉・上野 馨・小林 義威・立川 圓造・藤野 威男・横山 淳・吉田 善行

4・1	序    論	79
4・2	核燃料サイクル関連の化学分離	80
[1]	化    学    分    離	80
[2]	同位体分離	81
[3]	材料の純化・精製	83
[4]	トリチウムの化学	84
[5]	アクチノイドの化学	86
[6]	廃棄物の化学	87
4・3	原子炉の化学	89
[1]	高    温    化    学	89
[2]	放射線化学	90
[3]	炉内化学反応	91
	参 考 文 献	92

## 第III編 原子炉の技術

吉島 重和

## 1章 原子炉の核特性

	水田 宏
1・1 原子炉の臨界条件	97
〔1〕 格子系での無限増倍率	97
〔2〕 臨界方程式と臨界条件	98
〔3〕 反応度と反応度バランス	99
1・2 原子炉内の中性子スペクトル	99
〔1〕 中性子スペクトルの概説	99
〔2〕 高速/共鳴中性子スペクトル	100
〔3〕 熱中性子スペクトル	102
1・3 原子炉の動的ふるまい	103
〔1〕 即発中性子による時間的变化	103
〔2〕 遅発中性子の効果	104
1・4 原子炉の反応度係数	105
〔1〕 減速材/冷却材の反応度係数	105
〔2〕 燃料温度係数	106
〔3〕 その他の反応度効果	107
1・5 燃料燃焼および増殖	107
〔1〕 燃焼度と転換率/増殖率	108
〔2〕 重核種の生成崩壊系列	108
〔3〕 燃焼方程式	109
〔4〕 核分裂生成物の毒作用	110
〔5〕 可燃性毒物の燃焼効果	111
1・6 原子炉の種類	112
〔1〕 原子炉の分類	112
〔2〕 核的に見た原子炉の種類	113
1・7 核計算法の基礎	113
〔1〕 輸送方程式	113
〔2〕 拡散方程式	114
〔3〕 熱中性子炉核計算スキーム	115
〔4〕 高速炉核計算スキーム	117
参考文献	117

## 2章 原子炉の構成と特性

	宮本 俊樹
2・1 原子炉の構成	119
〔1〕 核燃料	119
〔2〕 減速材	119
〔3〕 冷却材	119
〔4〕 制御材	120

[5] 炉 心	120
[6] 反 射 体	120
[7] ブランケット	120
[8] 遮 蔽 材	120
2・2 原子炉の設計	121
[1] 概 説	121
[2] 設 計 指 針	121
[3] 設 計 基 準	121
[4] 炉 心 設 計	123
[5] 設 計 諸 元	131
2・3 原子炉の流動および伝熱	131
[1] 概 説	131
[2] 原子炉の熱発生	131
[3] 燃料要素内の温度分布	134
[4] 冷却材への熱伝達	136
[5] 冷却材の流動特性	140
2・4 原子炉の遮蔽	143
[1] 遮蔽設計の基準	143
[2] 放 射 線 源	144
[3] 中性子の減衰	150
[4] $\gamma$ 線の減衰	151
2・5 原子炉の安全性および安全施設	154
[1] 原子炉の安全性	154
[2] 原子炉の安全施設	155
[3] 原子カプラントの安全解析	157
参 考 文 献	159

### 3章 原子炉の燃料

	藤 林 徹
3・1 概 説	161
3・2 燃料の構造	161
[1] BWRの燃料	161
[2] PWRの燃料	162
[3] ATRの燃料	163
[4] FBRの燃料	163
[5] HTGRの燃料	164
3・3 燃料の設計	164
[1] 燃料設計の流れ	164
[2] 設 計 基 準	164
[3] 設 計 解 析	165
3・4 燃料の材料	166
[1] 概 説	166
[2] ジルコニウム合金被覆材	167
[3] その他の被覆材	168
参 考 文 献	168

## 4章 原子炉の材料と水化学

寺澤 倫孝・長尾 博之・矢島 正美

4・1 原子炉構成材料	170
〔1〕 概説	170
〔2〕 減速材	171
〔3〕 反射材	171
〔4〕 冷却材	172
〔5〕 制御材	173
〔6〕 遮蔽材	174
〔7〕 構造材	174
4・2 原子炉材料の照射損傷	179
〔1〕 概説	179
〔2〕 中性子照射損傷の理論	180
〔3〕 中性子照射による機械的性質の変化	180
〔4〕 スエリングと照射クリープ	182
4・3 原子炉材料の腐食	182
〔1〕 概説	182
〔2〕 ステンレス鋼配管の応力腐食割れ	182
〔3〕 蒸気発生器伝熱管の腐食損傷	184
〔4〕 インコネル X 750 製高強度部品の応力腐食割れ	185
〔5〕 高速増殖炉材料のナトリウム腐食	185
4・4 原子炉の水化学	186
〔1〕 加圧水型発電所	186
〔2〕 沸騰水型発電所	189
〔3〕 ガス冷却炉	192
参考文献	193

## 5章 計測と制御

伊藤 睦

5・1 計測と制御の方法	195
〔1〕 計測と制御の対象	195
〔2〕 原子炉計測の方法	195
〔3〕 原子炉の制御	195
〔4〕 プロセス計算機応用	195
5・2 反応度制御	195
〔1〕 反応度制御の方法	195
〔2〕 反応度制御方法の比較	196
〔3〕 反応度制御装置が必要とする機能	197
5・3 核計装	197
〔1〕 概要	197
〔2〕 中性子源領域の計装系	198
〔3〕 中間出力領域の計装系	198
〔4〕 出力領域の計装系	200



[5]	炉内核計装	200
5・4	プロセス計装とその他の計装	201
[1]	プロセス計装	201
[2]	炉内計装	202
[3]	放射線モニタ	203
5・5	原子炉の起動・運転および停止	203
[1]	通常起動, 定常運転と停止	203
[2]	運転訓練用シミュレータ	205
5・6	動特性	205
[1]	概要	205
[2]	零出力炉の動特性	205
[3]	炉心動特性	206
[4]	プラント動特性	208
5・7	プラント制御	209
[1]	概要	209
[2]	炉出力制御の原理	209
[3]	主要なプラント制御系	210
[4]	安全保護系	212
5・8	プロセス計算機応用	214
[1]	概要	214
[2]	監視警報機能	214
[3]	性能計算	214
[4]	CRT表示機能	214
[5]	運転の自動化	215
5・9	運転員支援システム	216
[1]	概要	216
[2]	運転支援システム	216
[3]	安全状態表示システム	216
[4]	知識工学応用	217
	参考文献	217

## 6章 原子炉プラントの機器施設

安藤 博・北村 哲男・藤田 元嗣

6・1	原子炉系機器	218
[1]	概論	218
[2]	P W R	218
[3]	B W R	221
[4]	ガス冷却炉	224
6・2	原子炉容器	227
[1]	概論	227
[2]	P W R	229
[3]	B W R	229
[4]	ガス冷却炉	230
6・3	制御棒および制御棒駆動機構	231
[1]	概論	231

[2] P W R .....	231
[3] B W R .....	232
[4] ガス冷却炉 .....	234
6・4 非常用炉心冷却系機器 .....	235
[1] 概 論 .....	235
[2] P W R .....	235
[3] B W R .....	236
[4] ガス冷却炉 .....	237
6・5 原子炉格納容器 .....	238
[1] 概 論 .....	238
[2] P W R .....	238
[3] B W R .....	240
[4] ガス冷却炉 .....	242
6・6 燃料取扱い機器 .....	242
[1] 概 論 .....	242
[2] P W R .....	242
[3] B W R .....	243
[4] ガス冷却炉 .....	244
6・7 自動機器・ロボット .....	245
[1] 概 論 .....	245
[2] P W R .....	245
[3] B W R .....	246
6・8 放射性廃棄物処理装置 .....	246
[1] 概 論 .....	246
[2] P W R .....	247
[3] B W R .....	248
[4] ガス冷却炉 .....	249
[5] 処 理 機 器 .....	249
6・9 原子カプラント補助設備 .....	250
[1] 原子炉補助系 .....	250
[2] 換気空調系 .....	251
[3] その他の設備 .....	252
[4] 原子力発電所用ポンプ .....	252
6・10 配管・弁類 .....	252
[1] 配 管 .....	252
[2] 弁 類 .....	253
6・11 原子カプラントの設計 .....	254
[1] 設計上考慮すべき事項 .....	254
[2] 原子カプラントの設計手法 .....	254
参 考 文 献 .....	254

## 7章 原子カプラントの基準・規格

7・1 法律に基づく基準体系 .....	255
[1] 電気事業法関係の基準体系 .....	255

[ 2 ]	原子炉等規制法関係の基準体系	255
[ 3 ]	その他の関連法規および技術基準	255
7・2	電気事業法関係規則・基準	255
[ 1 ]	電気事業法施行規則	255
[ 2 ]	発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令（通産省令第 62 号）	256
[ 3 ]	発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（通産省告示第 501 号）	256
[ 4 ]	発電用核燃料物質に関する技術基準（通産省令第 63 号）	257
[ 5 ]	電気工作物の溶接に関する技術基準（通産省令第 81 号）	257
[ 6 ]	溶接の方法の認可について（61 資庁第 8100 号）	258
7・3	原子炉等規制法関係基準	258
[ 1 ]	核燃料物質の加工の事業に関する規則，使用済燃料の再処理施設の事業に関する規則，核燃料物質の使用等に関する規則	258
[ 2 ]	加工施設の設計および工事の方法の技術基準に関する総理府令，再処理施設の設計および工事の方法の技術基準に関する総理府令	258
[ 3 ]	加工施設，再処理施設，および使用施設等の溶接の技術基準に関する総理府令と加工施設，再処理施設の溶接の方法の認可について（長官通達 61 安局（核規）第 590 号）	258
7・4	その他の関連法規および技術基準	259
[ 1 ]	建築基準法	259
[ 2 ]	労働安全衛生法	259
[ 3 ]	消 防 法	259
[ 4 ]	高圧ガス取締法	259
7・5	民間規程・指針	259

## 第 IV 編 原子力発電の技術

岩越 米助

### 1 章 原子力発電プラントの設計・建設

藤江 孝夫・鳥海 安義

1・1	原子力発電の歴史	263
[ 1 ]	はじめに	263
[ 2 ]	軍事利用の優先	263
[ 3 ]	原子動力の揺籃期	263
[ 4 ]	ジュネーブ会議と原子力ブーム	264
[ 5 ]	軽水炉の実用化	264
[ 6 ]	軽水炉の変遷	266
[ 7 ]	わが国の軽水炉の変遷	269
[ 8 ]	世界の原子力発電の現状	269
[ 9 ]	わが国の原子力発電の現状	270
1・2	原子力発電所の計画	273
[ 1 ]	はじめに	273
[ 2 ]	許認可の概要	273
[ 3 ]	環境調査および環境審査	276
[ 4 ]	基本計画	278
[ 5 ]	配置計画	279
[ 6 ]	機器設備の設計	281

[ 7 ]	耐震設計	281
[ 8 ]	建屋設計	282
[ 9 ]	安全設計	282
[10]	放射線管理	283
[11]	品質保証	284
[12]	主要工程の作成	284
[13]	仮設計画	284
[14]	要員計画および訓練計画	285
[15]	供給範囲の決定と発注	285
1・3	原子力発電所の工事	286
[ 1 ]	はじめに	286
[ 2 ]	土木・建築工事	287
[ 3 ]	機械・電気工事	288
[ 4 ]	試験および検査	292
1・4	原子力発電所の起動試験	294
[ 1 ]	はじめに	294
[ 2 ]	燃料体の検査	294
[ 3 ]	BWRの起動試験	294
[ 4 ]	PWRの起動試験	296
[ 5 ]	使用前検査	297
	参考文献	298

## 2章 原子力発電所の運転・保守

水野 政明

2・1	原子力発電所の運転	299
[ 1 ]	各国の原子力発電所運転実績	299
[ 2 ]	わが国の原子力発電所の運転体制	305
[ 3 ]	運転員の教育・訓練および資格認定制度	305
[ 4 ]	運転管理	307
2・2	原子力発電所の保守	316
[ 1 ]	わが国の原子力発電所の保守体制	316
[ 2 ]	保修員の教育・訓練	316
[ 3 ]	保守における品質保証活動	316
[ 4 ]	定期検査	320

## 3章 原子力発電の経済性

鈴木 岑二

3・1	原子力発電の経済性の現状	323
[ 1 ]	原子力発電原価の動向	323
[ 2 ]	原子力発電と火力発電の競合関係	324
3・2	建設費	325
[ 1 ]	原子力発電の建設費の推移	325
[ 2 ]	建設費の変動要因	326

3・3	運 転 費	329
[1]	原子力発電の運転費の推移	329
[2]	運転費の変動とその要因	329
3・4	原子力発電の燃料費	330
[1]	原子力発電の燃料費実績	330
[2]	原子力発電の燃料費の現状	331
[3]	ウラン精鉱	331
[4]	UF <sub>6</sub> への転換	331
[5]	ウラン濃縮	332
[6]	成形加工	332
[7]	再処理費	332
[8]	再処理サイクルとワンスルー方式	332
3・5	廃炉措置費と放射性廃棄物処分費	333
[1]	廃炉措置費	333
[2]	放射性廃棄物処分費	333
3・6	原子力発電の経済性の展望	333
[1]	原子力発電の経済性の展望	333
[2]	将来における軽水炉技術の向上とその経済的効果	334
3・7	新型動力炉の経済性	335
[1]	高速増殖炉	335
[2]	新型転換炉	335

## 4章 核燃料の管理

久家 靖史

4・1	発電所の運転と燃料の管理	336
[1]	運転サイクルの長期化と燃料取替え	336
[2]	原子炉熱出力の評価	336
[3]	燃料燃焼度	337
[4]	燃料の安全設計	337
4・2	炉心管理	339
[1]	炉心管理の解析手法	339
[2]	燃料取替計画	340
[3]	原子炉の反応度制御と制御棒運用計画	343
[4]	出力分布管理	345
4・3	燃料の健全性	346
[1]	燃料の使用実績	346
[2]	炉水の放射能濃度の監視	347
[3]	<sup>131</sup> Iの追加放出量の測定	348
[4]	燃料シッピング検査	348
4・4	高性能燃料とMOX燃料の開発	349
[1]	高性能燃料の開発	349
[2]	プルトニウム・サーマル利用	351
4・5	核燃料の計量管理	352
[1]	計量管理の概要	352
[2]	燃料の組成変化	353

参考文献	354
------	-----

## 5章 廃止措置

	枝 久雄
5・1 廃止措置の概念	355
〔1〕 廃止措置の意義	355
〔2〕 廃止措置の方式	355
〔3〕 廃止措置への対処	356
5・2 諸外国の状況	356
〔1〕 アメリカ	356
〔2〕 西ドイツ	358
〔3〕 フランス	358
〔4〕 イギリス	358
5・3 原子炉施設解体にかかわる技術開発	358
5・4 廃止措置に伴う廃棄物の処理・処分	359
5・5 廃止措置の例	360
〔1〕 B W R	360
〔2〕 P W R	360
〔3〕 ガス炉	361
〔4〕 研究炉	361
参考文献	362

## 6章 各種の動力炉

	清水 勝利
6・1 原子力発電プラントの型式	363
〔1〕 原子力発電プラントの分類	363
〔2〕 原子力発電プラントの種類	364
6・2 ガス冷却炉	364
〔1〕 開発の歴史と現状	364
〔2〕 プラントの概要	365
〔3〕 プラントの仕様と特徴	366
6・3 改良型ガス冷却炉	367
〔1〕 開発の歴史と現状	367
〔2〕 プラントの概要	368
〔3〕 プラントの仕様と特徴	368
6・4 高温ガス炉	369
〔1〕 開発の歴史と現状	369
〔2〕 プラントの概要	370
〔3〕 プラントの仕様と特徴	371
6・5 ソ連型軽水炉	372
〔1〕 黒鉛減速・沸騰水型軽水炉	372
〔2〕 加圧水型軽水炉	374
6・6 カナダ型重水炉 (CANDU 炉)	376

〔1〕 開発の歴史と現状	376
〔2〕 プラントの概要	377
〔3〕 プラントの仕様と特徴	378
参考文献	379

## 7章 技術の高度化

清水 勝利・服部 拓也

7・1 運転技術の高度化	380
〔1〕 軽水炉定着化への努力	380
〔2〕 長期運転サイクル	382
〔3〕 運転性の向上	384
〔4〕 長寿命化	386
7・2 軽水炉のプルサーマル利用	387
〔1〕 プルサーマル利用の意義	387
〔2〕 諸外国の計画	387
〔3〕 わが国の計画	388
〔4〕 MOX 燃料の設計	388
7・3 改良型の発電用原子炉	390
〔1〕 開発の経緯と現状	390
〔2〕 A B W R	391
〔3〕 A P W R	391
参考文献	393

## 第 V 編 開発炉と研究炉

石川 寛・望月 恵一

### 1章 新型転換炉

山内 一

1・1 新型転換炉の特性	397
1・2 新型転換炉の概要	399
〔1〕 プラント概要	399
〔2〕 炉 心	399
〔3〕 燃 料	402
〔4〕 設 備	402
〔5〕 実 証 炉	405
1・3 運転管理	406
参考文献	407

## 2章 高速増殖炉

	相澤 清人・今津 彰・加納 茂機・加納 巖・亀井 満・甲野 啓一 高橋 克郎・谷山 洋・古橋 晃・松野 義明・柚原 俊一・吉見 宏孝	
2・1	高速増殖炉の概要	408
〔1〕	高速増殖炉の原理と開発略史	408
〔2〕	高速増殖炉の特徴と必要性	409
2・2	高速増殖炉の開発状況	410
〔1〕	日 本	410
〔2〕	海 外	412
〔3〕	主要な高速炉一覧表	413
2・3	高速増殖炉の技術	413
〔1〕	炉物理・核設計	413
〔2〕	プラントシステムの設計	415
〔3〕	核燃料およびサイクル	418
〔4〕	ナトリウム工学	420
〔5〕	機器・構造工学	425
〔6〕	安全工学	429
2・4	おわりに	431
	参考文献	431

## 3章 高温ガス炉

佐野川好母

3・1	研究開発の動向	433
3・2	西ドイツにおける開発	433
3・3	アメリカにおける開発	435
3・4	ソ連における開発	436
3・5	中国における開発	437
3・6	日本における開発	438
	参考文献	439

## 4章 各種の原子炉

金子 義彦

4・1	固有安全炉	441
4・2	宇宙用原子炉	443
4・3	高転換軽水炉	445
4・4	ガス冷却高速炉	447
4・5	トリウム燃料炉	448
4・6	熔融塩炉	449
	参考文献	450



## 5章 研究炉，臨界実験装置，材料試験炉

	朝岡 卓見・金子 義彦・二村 嘉明・山本 章
5・1 研究炉	451
〔1〕 研究炉の定義と特徴	451
〔2〕 研究炉の分類と構造	451
〔3〕 研究炉の現状	453
5・2 臨界実験装置	456
〔1〕 臨界実験装置の定義	456
〔2〕 臨界実験装置の特徴	456
〔3〕 臨界実験装置の現状	458
5・3 材料試験炉	458
〔1〕 材料試験炉の定義	458
〔2〕 材料試験炉の現状	459
参考文献	460

## 第VI編 核燃料サイクルの技術

中村 康治・渡邊 昌介

### 1章 核燃料サイクル

	小泉 益通・中村 康治
1・1 核種の転換と超ウラン元素の生成	465
〔1〕 核燃料の歴史	465
〔2〕 化石燃料と核燃料の特長	465
〔3〕 天然の放射性壊変	466
〔4〕 超ウラン元素の生成	467
1・2 核燃料サイクルによる資源の有効利用——同一炉へのリサイクル	468
〔1〕 核燃料サイクルの概念	468
〔2〕 核燃料サイクルの意義	469
〔3〕 生産炉におけるウランリサイクル	470
〔4〕 マグノックス原子炉におけるウランリサイクル	470
〔5〕 軽水炉の核燃料サイクル	471
〔6〕 軽水炉リサイクル燃料の技術的問題	471
〔7〕 トリウム燃料サイクル	474
〔8〕 高速増殖炉の核燃料サイクル	474
1・3 核燃料サイクルによる資源の有効利用——他形式の炉へのリサイクル	475
〔1〕 熱中性子炉から高速増殖炉へ	475
〔2〕 熱中性子炉から熱中性子炉へ	475
〔3〕 プルトニウム価値	475
1・4 核燃料サイクルの制約要因	477
〔1〕 核不拡散政策	477
〔2〕 環境影響とパブリックアクセプタンス問題	477
〔3〕 経済性問題	478
〔4〕 設備能力のアンバランス	479

1・5	軽水炉から高速増殖炉へ	479
1・6	軽水炉核燃料サイクルの経済性	479
	〔1〕 発電コストに占める核燃料サイクル費の割合	479
	〔2〕 核燃料サイクルの各工程と費用	480
	〔3〕 核燃料サイクル費	480
1・7	使用済燃料の長期貯蔵と直接処分	481
	〔1〕 必然性と対策	481
	〔2〕 長期貯蔵と処分	482
	参考文献	483

## 2章 核燃料の探鉱・採鉱・製錬・転換

橋本 好一

2・1	核燃料（ウラン、トリウム）資源	484
	〔1〕 ウランおよびトリウムの地球化学	484
	〔2〕 ウラン資源	484
	〔3〕 トリウム資源	488
2・2	ウラン資源の探鉱	490
	〔1〕 地質鉱床概査	490
	〔2〕 鉱床精査	491
	〔3〕 企業化探鉱	491
	〔4〕 フィージビリティスタディ	492
	〔5〕 ウラン探鉱開発の歴史	492
2・3	ウラン資源の採掘	494
	〔1〕 露天採鉱法	494
	〔2〕 地下採鉱法	494
	〔3〕 溶液による採鉱法	494
	〔4〕 採鉱上の留意事項	495
2・4	ウランの製錬・転換	495
	〔1〕 ウランの選鉱	495
	〔2〕 ウランの粗製錬	495
	〔3〕 ウランの精製錬・転換	495
	参考文献	497

## 3章 ウランの濃縮

玉井 浄

3・1	ウラン濃縮	498
	〔1〕 分離係数	498
	〔2〕 カット	498
	〔3〕 カスケード	498
	〔4〕 分離能力および分離作業量	499
3・2	カスケードの最適廃棄濃度	499
3・3	ガス拡散法	500
	〔1〕 ガス拡散法の原理	500

〔2〕	ガス拡散法の濃縮プラント	501
3・4	遠心分離法	501
〔1〕	遠心分離法の原理	501
〔2〕	遠心分離法の濃縮プラント	502
3・5	ノズル法	503
〔1〕	ノズル法の原理	503
〔2〕	ノズル法の開発状況	503
3・6	レーザ法	503
〔1〕	原子法	503
〔2〕	分子法	505
3・7	化学法	505
〔1〕	化学法の原理	505
〔2〕	化学法の開発状況	505
	参考文献	506

## 4章 核燃料の加工

城戸 達郎・小泉 益通・永井 信行・中村 康治・藤重 晴昭

4・1	UF <sub>6</sub> から UO <sub>2</sub> , UF <sub>4</sub> への再転換の工程	507
〔1〕	まえがき	507
〔2〕	UF <sub>6</sub> から UO <sub>2</sub> への再転換プロセス	507
4・2	軽水炉燃料の加工	511
〔1〕	軽水炉燃料設計・加工法の進歩	511
〔2〕	種類と形状・構造	512
〔3〕	製造検査工程	514
〔4〕	UO <sub>2</sub> ペレットの製造と検査	514
〔5〕	ジルカロイ燃料被覆管の製造と検査	518
〔6〕	燃料棒の製造と検査	520
〔7〕	燃料集合体部品の製造と検査	521
〔8〕	燃料集合体組立と検査	522
〔9〕	ジルカロイ燃料チャネルの製造と検査	523
〔10〕	プルトニウム燃料加工の特異点	523
〔11〕	燃料加工工場	525
4・3	軽水炉燃料加工工場で発生する廃棄物	525
〔1〕	ウラン燃料加工の廃棄物	525
〔2〕	プルトニウム燃料加工の廃棄物	525
〔3〕	プルトニウム燃料加工からの固体廃棄物処理技術開発	525
4・4	ATR 燃料の加工	526
〔1〕	概 要	526
〔2〕	構造上の特徴	526
〔3〕	ATR 燃料の製造法	527
4・5	マグノックス燃料の加工	527
〔1〕	構 造	527
〔2〕	金属ウラン燃料の加工	527
〔3〕	被覆と燃料体加工	527
4・6	高温ガス炉燃料の加工	528

〔1〕 構 造 .....	528
〔2〕 製 造 法 .....	528
4・7 高速炉燃料の加工 .....	529
〔1〕 概 要 .....	529
〔2〕 構造上の特徴 .....	529
〔3〕 高速炉燃料の製造法 .....	529
〔4〕 プルトニウムの取扱管理 .....	530
4・8 研究炉燃料の加工 .....	530
〔1〕 MTR 型研究炉燃料の構造 .....	530
〔2〕 製 造 法 .....	531
〔3〕 品 質 管 理 .....	531
参考文献 .....	532

## 5章 核燃料の照射挙動と照射後試験

岩本 多實・平田 實徳

5・1 核燃料の照射特性 .....	533
〔1〕 核燃料の基礎的性質 .....	534
〔2〕 F P 挙 動 .....	536
〔3〕 実用燃料のふるまい .....	539
5・2 照射試験施設 .....	540
〔1〕 試験炉・研究炉 .....	541
〔2〕 キャプセル照射装置 .....	541
〔3〕 インパイルループ .....	545
5・3 照射後試験 .....	545
〔1〕 キャプセルによる照射試料の試験 .....	545
〔2〕 実炉燃料の照射後試験 .....	548
〔3〕 照射後試験後の処理 .....	549
参考文献 .....	551

## 6章 核燃料の再処理

小泉 忠義・松岡 伸吾・松本 憲一・山本 正男

6・1 軽水炉燃料の再処理 .....	553
〔1〕 各国とわが国の現状 .....	553
〔2〕 使用済燃料受入・貯蔵 .....	558
〔3〕 燃料集合体のせん断 .....	559
〔4〕 燃料溶解，清澄，ハル貯蔵 .....	560
〔5〕 溶媒抽出 .....	562
〔6〕 製品の転換 .....	565
〔7〕 高レベルおよび中レベル放射性廃液の処理 .....	566
〔8〕 低レベル放射性廃液の処理 .....	569
〔9〕 オフガス処理と環境影響低減化の技術開発 .....	572
6・2 高速炉燃料の再処理 .....	573
〔1〕 高速炉燃料再処理の特徴 .....	573

〔2〕 わが国の開発の現状	574
〔3〕 世界の開発状況	575
〔4〕 将来的見通し	576
6・3 六ヶ所原子燃料サイクル施設の概要	577
参考文献	579

## 7章 核燃料・放射性同位元素の輸送

菊池 三郎・久家 靖史・久保 稔

7・1 核物質輸送の安全と防護	580
〔1〕 核燃料輸送物の技術基準	580
〔2〕 核燃料輸送時の防護措置	581
7・2 新燃料の輸送と使用済燃料の輸送	581
〔1〕 新燃料の輸送	581
〔2〕 使用済燃料の輸送	582
7・3 高濃縮ウラン、プルトニウムの輸送	583
〔1〕 核燃料物質輸送に関する分類	583
〔2〕 高濃縮ウラン、プルトニウムの輸送の特徴	583
7・4 放射性同位元素の輸送	586

## 8章 放射性廃棄物の貯蔵・処理・処分

金田 久・阪田 貞弘・渡邊 昌介

8・1 廃棄物処分の考え方と各国の現状	587
〔1〕 廃棄物処分の考え方	587
〔2〕 各国の現状	588
8・2 低レベル廃棄物の最終貯蔵と処分	591
〔1〕 低レベル廃棄物の発生量と貯蔵量	591
〔2〕 低レベル廃棄物の処分	592
〔3〕 廃棄物埋設の事業化	592
8・3 高レベルガラス固化体の貯蔵と処分	593
〔1〕 貯蔵と処分の違い	593
〔2〕 貯蔵	593
〔3〕 処分	594
参考文献	597

## 第VII編 原子力の利用

佐々木白眉

### 1章 熱源としての利用

佐野川好母

1・1 核熱利用の見通し	601
1・2 核熱利用の現状	601

[1] 低温熱源としての利用	601
[2] 低温熱源としての利用の現状	601
[3] 高温熱源としての利用計画	602
1・3 高温ガス炉を利用した高温核熱利用	603
[1] 原子力製鉄	604
[2] アルミニウム精錬	604
[3] 化学工業	604
[4] 石炭のガス化	606
[5] 水素製造	606
[6] 重質油の回収	607
[7] ケミカル・ヒートパイプ	608
参考文献	608

## 2章 原子力船

横村 武宣

2・1 世界における原子力船開発	609
[1] 概 況	609
[2] アメリカ	609
[3] 西ドイツ	612
[4] イギリス	612
[5] フランス	612
[6] カナダ	613
[7] ソ 連	613
2・2 わが国における原子力船開発	613
[1] 「むつ」の建造	613
[2] 「むつ」の概要	614
[3] 「むつ」の出力上昇試験および遮蔽改修	616
[4] 関根浜新定係港の建設	617
[5] 「むつ」の実験計画	617
2・3 原子力船の運航および安全性	618
[1] 原子力船の特質	618
[2] 適用法規等	618
[3] 船の特質に関連する法規等	620
2・4 船用炉の用途	620
2・5 船用炉の研究開発	621
[1] 船用炉の分類	621
[2] 世界における船用炉開発	621
[3] わが国における船用炉研究開発	624
参考文献	626

## 3章 未来の各種利用

松浦祥次郎

3・1 核燃発の平和利用	627
--------------	-----

[1]	技術開発の背景と経過	627
[2]	核爆発の利用法	628
[3]	貯水池の築造	629
[4]	ガス井火災の抑止	629
[5]	油田あるいはガス田の活性化	629
[6]	地熱の利用	629
[7]	原油貯蔵用地下空洞の築造	629
[8]	運河あるいはダム建設	629
3・2	核分裂のレーザ発振への利用	630
3・3	RI電源の宇宙利用	630
3・4	バージ型原子力プラント	631
	参考文献	632

## 4章 高エネルギー加速器とその利用

更田豊治郎

[1]	強力中性子源	633
[2]	核燃料増殖と超ウラン元素廃棄物の消滅処理	634
[3]	放射光源	635
	参考文献	635

## 第VIII編 放射線およびアイソトープ利用

武久 正昭

### 1章 放射線照射の利用

舘野 之男・田村 直幸・町 末男

1・1	放射線化学反応と放射線源	639
[1]	放射線化学反応	639
[2]	放射線照射利用に使われる線源	641
[3]	放射性核種線源	641
[4]	電子加速器	642
[5]	照射施設	644
[6]	照射物体中の線量分布	645
[7]	線量測定	646
1・2	工業利用	647
[1]	工業利用の発展	647
[2]	工業利用の実際例	647
[3]	工業利用を目指した研究開発	650
1・3	農業利用	651
[1]	食品照射	651
[2]	品種改良	655
[3]	害虫防除	656
1・4	医学利用	657
[1]	診断利用	657

[2] 治療利用 .....	658
参考文献 .....	660

## 2章 アイソトープの利用

	四方 英治・館野 之男・富永 洋
2・1 製 造 .....	662
[1] ラジオアイソトープ製造の流れ .....	662
[2] 核 反 応 .....	662
[3] ターゲット .....	665
[4] 照 射 .....	666
[5] 照射後処理 .....	666
[6] 検 査 .....	667
[7] 標識化合物の合成 .....	667
[8] 超小型サイクロトロンによる RI 製造 .....	668
[9] 安定同位体 .....	669
2・2 利 用 .....	669
[1] トレーサ利用 .....	670
[2] 放射線応用計測・検査 .....	672
2・3 医学利用 .....	676
[1] 体内利用と体外利用 .....	676
[2] 体内診断用放射性薬剤 .....	677
[3] イメージング機器 .....	678
[4] 核医学データ処理装置 .....	680
[5] 体外利用放射性医薬品 .....	681
[6] 治療利用 .....	681
参考文献 .....	684

## 第 IX 編 原子力の安全と環境

村主 進

### 1章 原子炉施設の安全

	石川 迪夫・佐藤 一男・村主 進・数土 幸夫
1・1 安全審査および安全基準 .....	689
[1] 安全確保の基本方針 .....	689
[2] 安全審査および安全規制 .....	690
[3] 安全審査指針 .....	693
1・2 原子炉安全工学 .....	693
[1] 圧力容器および配管の健全性・安全性 .....	694
[2] 冷却材喪失事故に関する工学的安全性 .....	695
[3] 反応度事故に関する安全性 .....	699
[4] 限界熱流束と限界熱流束比 .....	701
1・3 安全解析 .....	703
[1] 安全解析の目的 .....	703



〔2〕 安全解析の手法	704
〔3〕 安全解析コードと解析例	707
参考文献	712

## 2章 核燃料施設の安全性

辻野 毅・内藤 俣孝・前田 充

2・1 安全審査および安全基準	714
〔1〕 安全確保の基本的考え方	714
〔2〕 安全規制	714
〔3〕 安全基準	714
2・2 核燃料施設安全工学	716
〔1〕 核燃料施設の安全特性	716
〔2〕 平常時の安全性	716
〔3〕 事故時の安全性	718
2・3 安全解析	721
〔1〕 安全評価の目的と内容	721
〔2〕 安全解析の方法	722
参考文献	724

## 3章 放射線の人体に対する影響と線量限度

藤田 稔

3・1 放射線の人体に対する影響	725
〔1〕 放射線の影響の現れる過程	725
〔2〕 放射線の線量、種類、効果の関係	726
〔3〕 放射線の人体に及ぼす影響	726
3・2 線量当量の限度	728
〔1〕 線量当量限度の考え方	728
〔2〕 線量当量限度の大きさ	729
3・3 食物連鎖を通しての被ばく	731
〔1〕 放射性廃棄物の環境中の移行	732
〔2〕 周辺公衆が受ける被ばく線量の計算	732
参考文献	734

## 4章 放射線の防護と管理

吉田 芳和

4・1 放射線防護	735
〔1〕 放射線防護の基本的条件	735
〔2〕 外部被ばくの防護	735
〔3〕 放射線の遮蔽	736
〔4〕 内部被ばくの防護	738
〔5〕 放射性汚染の防護	739

4・2	放射線モニタリング	740
[1]	放射線モニタリングの原則	740
[2]	管理区域の設定と管理	741
[3]	作業環境のモニタリング	742
[4]	個人モニタリング	746
[5]	排気・排水のモニタリング	748
[6]	施設外の環境モニタリング	749
4・3	事故時対策と防災対策	750
[1]	事故に対する一般的対策	750
[2]	防災対策	751
	参考文献	753

## 5章 環 境

今井 和彦

5・1	気象と海洋	754
[1]	大 気	754
[2]	海 洋	756
5・2	解析コード	756
[1]	大気中の移流・拡散計算モデル	757
[2]	海洋中の拡散モデル	758
[3]	地圏中の拡散移行モデル	758
5・3	環境放射能	759
[1]	放射性核種の起源	759
[2]	気圏における放射性核種	762
[3]	水圏における放射性核種	762
[4]	地圏における放射性核種	763
[5]	被ばく線量への寄与	763
5・4	事故時の放出放射能	763
	参考文献	766

## 第 X 編 核融合の開発

関口 忠

## 1章 総 論

関口 忠

1・1	核融合動力炉に利用の可能性がある核融合反応	769
1・2	核融合動力炉実現へのアプローチ	770
[1]	制御熱核融合の意味	770
[2]	磁気閉込めと慣性閉込め	770
1・3	核融合動力炉におけるエネルギー収支の条件	771
[1]	パワー増倍率	771
[2]	核融合出力密度	771
[3]	所要パワー入力	772

〔4〕	パワー増幅率の表式	772
〔5〕	ローソンの条件—零出力炉と臨界炉心プラズマ	772
〔6〕	炉心自己点火条件	773
1・4	核融合動力炉および同プラントシステムの概念構成	773
1・5	核融合動力炉開発の現段階と今後の研究開発課題	774
〔1〕	現在の状況	774
〔2〕	主要開発課題	775
〔3〕	わが国の研究開発体制	775

## 2章 炉心プラズマ物理と炉心工学技術

桂井 誠・中井 貞雄

2・1	序	777
2・2	磁気閉込め方式の原理と分類	777
〔1〕	原理	777
〔2〕	磁気閉込め方式の分類	777
2・3	各種磁気閉込め装置の動作原理	778
〔1〕	トカマク型	778
〔2〕	ヘリカル系	779
〔3〕	ピンチ	780
〔4〕	ミラー装置	780
2・4	磁気閉込めプラズマの物理	781
〔1〕	平衡	781
〔2〕	安定性	782
〔3〕	拡散	782
2・5	慣性閉込め方式	783
〔1〕	これまでの経緯	783
〔2〕	原理	783
〔3〕	レーザとプラズマの相互作用	784
〔4〕	ベレット爆縮実験	784
〔5〕	エネルギードライブ	785
2・6	炉心工学, 技術	785
〔1〕	炉心プラズマ加熱と電流駆動技術	785
〔2〕	燃料注入技術	786
〔3〕	排気, 回収技術	787
〔4〕	炉心制御技術	787
〔5〕	超伝導コイル技術	787
	参考文献	788

## 3章 核融合ブランケット構成技術

関 昌弘・関 泰・東稔 達三

3・1	序	789
〔1〕	ブランケット等の機能	789
〔2〕	負荷形態	789

3・2 核的基本特性	790
〔1〕 核設計の役割と核特性上の特徴	790
〔2〕 核データと問題点	790
〔3〕 ブランケット核特性の計算法	791
〔4〕 中性子束, $\gamma$ 線束分布, 発熱分布の計算例	791
3・3 冷却方式と発電プラント	791
〔1〕 水冷却	792
〔2〕 ヘリウムガス冷却	792
〔3〕 液体金属冷却	792
〔4〕 発電プラント	793
3・4 トリチウムに関する諸技術	793
〔1〕 トリチウムの性質	793
〔2〕 核融合炉におけるトリチウムサイクル	793
〔3〕 トリチウム取扱い技術	794
3・5 ブランケット構造—トリチウム増殖技術	795
〔1〕 ブランケットに要求される主要課題	795
〔2〕 使用材料	795
〔3〕 固体増殖ブランケットの構造概念	795
3・6 高熱流束機器	796
参考文献	797

## 4章 核融合炉用諸材料

白石 健介・諸住正太郎

4・1 序	798
4・2 プラズマ-壁相互作用	798
4・3 高熱流束材料	798
4・4 ブランケット構造材料	799
〔1〕 オーステナイトステンレス鋼	799
〔2〕 高クロムフェライト鋼	800
〔3〕 バナジウム合金	801
4・5 トリチウム増殖材料	802
〔1〕 固体増殖材料	802
〔2〕 中性子増倍材	803
〔3〕 液体増殖材料	803
4・6 セラミック材料	804
4・7 超伝導磁石材料	805
〔1〕 超伝導線材	805
〔2〕 安定化材料	806
〔3〕 有機絶縁材料	806
〔4〕 構造材料	807
4・8 研究開発上の諸問題	807
〔1〕 実験炉の材料	807
〔2〕 動力炉の材料	808
参考文献	809

## 5章 各種炉心プラズマ形式に基づく核融合炉およびプラントの概念設計例

田村 早苗・東稔 達三・三好 昭一・中井 貞雄

5・1 低 $\beta$ トーラス炉	812
〔1〕 炉心プラズマ設計	813
〔2〕 工学設計	815
5・2 開放型炉	816
5・3 慣性閉込め型炉	817
参考文献	819

## 6章 核融合炉開発上のシステム工学的課題

近藤 駿介

6・1 システム工学的課題	820
6・2 環境適合性	820
6・3 安全性	820
〔1〕 放射線源の大きさ	820
〔2〕 平常時安全	822
〔3〕 事故時安全—想定事故	822
6・4 核融合炉に対する資源制約と経済性	823
〔1〕 資源制約	823
〔2〕 経済性	823
6・5 研究開発戦略のシステム分析	824
〔1〕 材料照射試験用 14 MeV 中性子源	825
〔2〕 初期トリチウムインベントリーの確保	826
〔3〕 より高度の核融合炉への展望	827
6・6 新型エネルギー変換技術	827
参考文献	827

## 第 XI 編 原子力関係法令その他

石塚 貢

## 1章 法 令

山元 孝二

1・1 原子力関係の国内法体系	831
1・2 原子力基本法（昭和 30 年法律第 186 号）	832
1・3 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）	834
〔1〕 目的及び構成	834
〔2〕 製錬の事業に関する規制（第 2 章）	834
〔3〕 加工の事業に関する規制（第 3 章）	834
〔4〕 原子炉の設置、運転等に関する規制（第 4 章）	835
〔5〕 再処理の事業に関する規制（第 5 章）	837
〔6〕 廃棄の事業に関する規制（第 5 章の 2）	837

[ 7 ] 核燃料物質等の使用等に関する規制（第 6 章）	838
[ 8 ] 国際規制物資の使用に関する規制（第 6 章の 2）	839
[ 9 ] 指定検査機関等（第 6 章の 3）	839
[10] その他の規定（第 7 章, 第 8 章等）	841
[11] 原子力施設にかかわる訴訟の状況	841
1・4 電気事業法（昭和 39 年法律第 170 号）	841
1・5 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（昭和 32 年法律第 167 号）	842
1・6 災害対策基本法（昭和 36 年法律第 223 号）	844
1・7 原子力損害の賠償に関する法律（昭和 36 年法律第 147 号）	844
[ 1 ] 目 的	844
[ 2 ] 定 義	844
[ 3 ] 原子力損害賠償責任	844
[ 4 ] 損害賠償措置	845
[ 5 ] 国の措置	846
[ 6 ] そ の 他	846
1・8 電 源 三 法	847
[ 1 ] 発電用施設周辺地域整備法（昭和 49 年法律第 78 号）	847
[ 2 ] 電源開発促進税法（昭和 49 年法律第 79 号）	847
[ 3 ] 電源開発促進対策特別会計法（昭和 49 年法律第 80 号）	847

## 2 章 核 拡 散 の 防 止

	内藤 香
2・1 核不拡散体制確立の経緯	849
[ 1 ] 核拡散防止条約の成立	849
[ 2 ] NPT 成立以後の核不拡散強化の動き	850
2・2 保障措置	850
[ 1 ] IAEA 保障措置の種類	850
[ 2 ] NPT 保障措置体制	851
[ 3 ] 国内保障措置体制	852
2・3 核物質防護	852
[ 1 ] 核物質防護	852
[ 2 ] 国際的動向	853
[ 3 ] わが国における現状	853

## 3 章 国際協力・国際条約

	内藤 香
3・1 多国間協力	855
[ 1 ] 国際機関	855
[ 2 ] その他の多国間協力	857
3・2 二国間協力	858
[ 1 ] 協力の枠組	858
[ 2 ] 二国間原子力協定	859
[ 3 ] 具体的な研究協力等の事例	859

3・3 国際条約	860
〔1〕 核不拡散に関する条約	860
〔2〕 安全・環境保全にかかわる条約	860
〔3〕 原子力損害賠償に関する条約	861

## 付 録

---

---

1. 単位換算表	865
2. 基本定数	891
3. 元素の周期律表	892
4. アイソトープ表	894
5. 原子力略号	898
6. 原子力年表	917

## 索 引

---

---

索 引	927
-----	-----

