

は し が き

1945 年、第二次世界大戦の終わりに原子爆弾が作られ、原子力が人類の手によって解放されてから 40 年以上を経過し、原子力は多くの分野で広く、深く利用される時代になってきた。

特に、エネルギー資源としての原子力への期待は、1973 年のオイルショック以来、世界各国において高まってきた。他方、今までに、1979 年の米国スリーマイル島原子力発電所、1986 年ソ連チェルノブイル原子力発電所の二つの大きな事故も経験し、原子力の安全問題に対する不安から、原子力開発に対する反対運動も根深いのが現状である。

わが国の将来のエネルギー問題を検討すると、石油代替エネルギー源の開発が不可欠であり、当面期待できるものとして、石炭（輸入炭）、天然ガスおよび原子力の三つが挙げられる。特に、電力の分野では、原子力発電が中心となって伸びてゆくと期待されている。

本書は、原子工学の各分野を、大学の工学系学生の教科書としてまとめたもので、都甲が 1, 4, 5 章を、岡が 2, 3, 6 章を分担執筆した。

1987 年 6 月

都 甲 泰 正

目 次



原子工学の分野

1.1	放射線利用	1
1.1.1	原子炉からの放射線利用	1
1.1.2	ラジオアイソトープ利用	3
1.1.3	加速器利用	5
1.2	エネルギー利用	6
1.2.1	動力利用	6
1.2.2	熱源利用	6
1.3	核爆発の平和利用	7
	演習問題	7



原子工学の基礎

2.1	原子と原子核	8
2.2	同位元素と放射線	10
2.3	放射性崩壊	12
2.4	原子核反応	15
2.5	結合エネルギー	16
2.6	中性子と原子核の反応	17
2.7	中性子断面積	19
	演習問題	23



3.1	原子核分裂	24
3.1.1	概 説	24
3.1.2	核分裂生成物	25
3.1.3	核分裂中性子	28
3.1.4	核分裂エネルギー	30
3.1.5	核分裂連鎖反応	31
3.1.6	転換と増殖	32
3.2	原子炉の構成	33
3.2.1	核 燃 料	33
3.2.2	冷 却 材	34
3.2.3	減 速 材	34
3.2.4	制 御 材	35
3.2.5	反 射 体	35
3.2.6	原子炉容器	35
3.2.7	生体遮へい	36
3.3	原子炉の種類	36
3.3.1	使用目的による分類	36
3.3.2	冷却材や減速材の種類による分類	37
3.3.3	核分裂を生じる中性子のエネルギーによる分類	38
3.3.4	核分裂性物質の生成の割合による分類	38
3.4	原子炉の静特性	38
3.4.1	中 性 子 束	38
3.4.2	フィックの法則	39
3.4.3	中性子拡散方程式	41
3.4.4	臨界中性子束分布	44
3.4.5	減速材, 反射体中の中性子の拡散	48
3.4.6	反射体付の原子炉	50
3.4.7	4 因 子 公 式	52
3.4.8	2 群 拡 散 方 程 式	53
3.4.9	非均質原子炉	55
3.4.10	多群拡散方程式	57
3.4.11	臨 界 計 算	58
3.5	原子炉の動特性	59

3.5.1	1点近似動特性方程式	60
3.5.2	原子炉の伝達関数	65
3.5.3	反応度のフィードバック現象	66
3.5.4	運転に伴う反応度変化	67
	演習問題	70



原子力発電

4.1	原子力発電の現状と将来	73
4.2	原子力発電の経済性	78
4.2.1	原子力発電コストの構成	78
4.2.2	発電コスト低減の努力	80
4.3	原子力発電の安全性	81
4.3.1	ま え が き	81
4.3.2	安全の哲学 (安全とは何か)	83
4.3.3	安全確保のシステム	84
4.3.4	安全基準	86
4.3.5	安全設計	88
4.3.6	安全評価	92
4.3.7	原子力発電の環境問題	97
	演習問題	99



原子力発電所

5.1	発電用原子炉の種類と特徴	101
5.1.1	軽水炉	101
5.1.2	重水炉	104
5.1.3	ガス冷却炉 (黒鉛減速ガス冷却炉)	105
5.1.4	高速炉 (高速増殖炉)	106
5.2	軽水型原子力発電所	108
5.2.1	加圧水型 (PWR)	108
5.2.2	沸騰水型 (BWR)	114
5.3	重水炉	121

5.3.1	加圧重水冷却型重水炉	121
5.3.2	沸騰軽水冷却型重水炉 (ふげん).....	123
5.4	ガス冷却炉 (黒鉛減速ガス冷却炉).....	124
5.4.1	マグノックス炉 (天然ウラン・黒鉛減速・炭酸ガス冷却炉).....	124
5.4.2	AGR (改良ガス冷却炉).....	127
5.5	高速炉 (高速増殖炉).....	127
5.5.1	ナトリウム冷却高速炉 (LMFBR).....	127
	演習問題.....	131



核融合炉

6.1	核融合反応	132
6.2	プラズマの磁場閉じ込め	137
6.3	プラズマの慣性閉じ込め	141
6.4	核融合炉	141
6.5	核分裂・核融合ハイブリッド炉	144
	演習問題.....	145

演習問題解答

参考文献

索引



原子工学の分野

原子工学の分野は、エネルギー利用と放射線利用の二つの分野に大別できる(表 1.1)。放射線利用は α 線、 β 線、 γ 線、X 線、中性子線などの放射線の持つ種々の性質を利用するものである。

他方、エネルギー利用は、原子核のもっているエネルギーを取り出して利用するもので、エネルギーの取り出し方に二つの種類がある。一つは、原子核分裂反応で、これはウランなどの重い原子核が中性子を吸収して核分裂を起こすときに放出するエネルギーを利用するものである。もう一つは、原子核融合反応で、これは、重水素、トリチウムなどの軽い原子核二つ以上が一つになるときに放出するエネルギーを利用するものである。現在、利用されているのは前者の核分裂の原子力で、後者の核融合はその実現を目ざして開発が進められている。

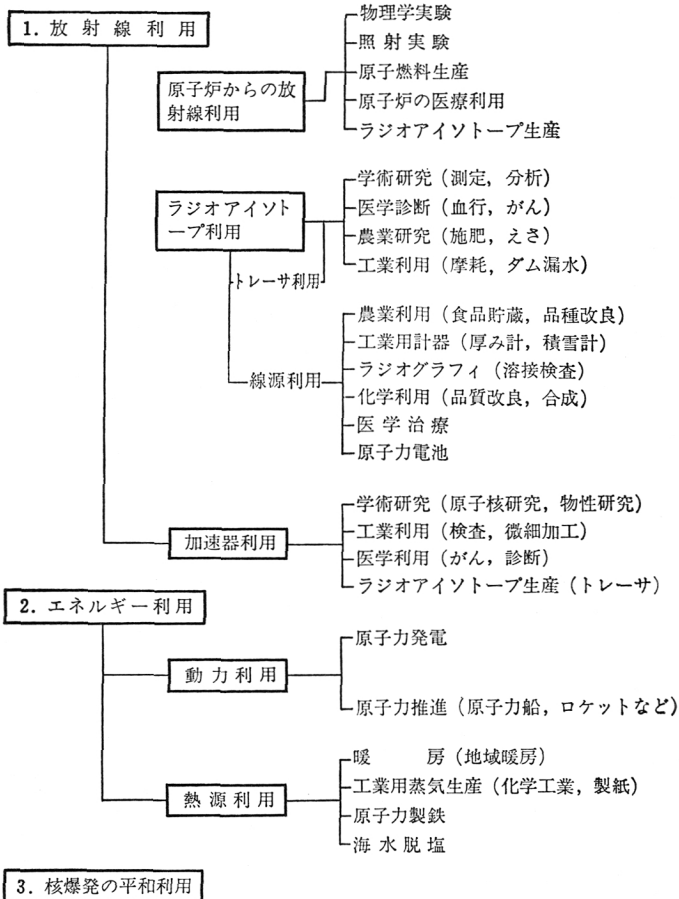
1.1 放射線利用

1.1.1 原子炉からの放射線利用

これらには、研究用原子炉(研究炉)、材料試験炉、生産用原子炉(生産炉)などの原子炉が用いられる。研究炉では、中性子の挙動、原子炉の特性研究などの物理学実験、中性子を当てることにより物質の性質がどう変化するかを研究する照射実験などが行われる。なお、材料の照射実験を目的とした原子炉を材料試験炉と呼ぶ。

また、原子炉でラジオアイソトープやプルトニウム(原子燃料の一つ)の生

表 1.1 原子工学の各分野



大型土木工事(運河建設), 天然ガスおよび油田開発・貯蔵
台風の消滅など。

産を行うことができるが、これらの生産を主目的とした原子炉を生産炉という。

たとえば、ふつうのコバルト (^{59}Co) を原子炉に入れて中性子照射を行うと ^{60}Co を生産することができる。このほか、多くの種類のラジオアイソトープの生産ができる。プルトニウム (^{239}Pu および ^{241}Pu) は、 ^{238}U が原子炉中で中性子を吸収して生産される。ウラン燃料には ^{238}U が含まれているので、原

子炉の運転を続けるとプルトニウムがひとりでに生産されることになる。

1.1.2 ラジオアイソトープ利用

放射線利用の大きな分野がラジオアイソトープの利用である。ラジオアイソトープ利用は、トレーサ利用と線源利用の二つの分野に分けることができる。

〔1〕 **トレーサ利用** トレーサ利用は、放射線はごく微量でも感度良く測定できるという放射線測定の特徴と、アイソトープ（同位元素）は、互いに全く同じ化学的挙動を示すという性質を利用したものである。学術研究、医学診断、農業研究、工業利用など広い分野で利用されている。いくつかの例を以下に示す。

- i) ^{24}Na （放射性）を少量含有する食塩水を注射すると、体外から放射線カウンタでその行き先を簡単に調べることができ、血行や心臓機能などの診断ができる。
- ii) よう素のラジオアイソトープを患者に飲ませると甲状腺に集まるので、甲状腺がんなどの診断および治療ができる。
- iii) 植物に肥料をやるときに、どの時期にどのくらいの量を与えればよいかの研究ができる。たとえば、りん酸肥料に、りんのアイソトープ（ ^{31}P ）を少量まぜておくと、後に放射線カウンタでその行き先と量を調べることができる。
- iv) 港の防波堤を築くときには、海底の砂の流れを調べる必要があるが、ラジオアイソトープを含んだ人工砂を作り、海底に投入し後に定期的にサンプルをとり放射能を測定すれば、簡単に海底砂の移動状況を知ることができる。

〔2〕 **線源利用** 放射線には、物質を透過する（一部は吸収される）性質、中性原子を電離する作用、写真乾板の感光作用、生体細胞の破壊作用（殺菌作用）などの性質があるので、ラジオアイソトープから出る放射線のこれらの性質を利用するのが線源利用である。

農業利用、工業用計測器、ラジオグラフィ、化学利用、医学治療など広い分野にわたって数多くの利用がなされているが、数例を以下に示す。

i) ^{60}Co (γ 線源)を用いて、じゃがいも、玉ねぎなどを照射すると発芽を抑止することができ、長期間貯蔵が可能になる。わが国でも北海道士幌町のポテト加工センタに ^{60}Co 照射プラントが建設されている。

また注射針など医療器具の消毒にも γ 線照射がよく用いられている。なお中性子源を用いると、誘導放射能を生じるので、原子炉をこの目的に用いることはできない。

ii) 大量の γ 線を種子に当て、突然変異を利用して品質改良を行うことができる。この目的の放射線育種試験場が“ γ フィールド”で茨城県那珂郡大宮町に建設されている。

iii) 工業用計器としては、放射線厚み計、水位計、積雪計など多くの種類が作られているが、これは、放射線が物質を透過する際に一定の割合で吸収される性質を利用したものである。

iv) 放射線が物質を透過する性質を利用したものに、ラジオグラフィがあり、これは X線検査と同じく溶接検査などに用いられる。X線装置と異なり、線源を鉛容器に入れて容易に持ち運びできるので、現場検査によく用いられる。

v) 有機化合物の合成に用いる。たとえば、ベンゼンに放射線を当てるとフェノールなどの合成が簡単にできる。

vi) 有機化合物の品質改良に用いる。たとえば、ビニール電線を γ 線照射することにより、耐熱性の大きい耐熱電線を作ることができる。

vii) 医学治療として、がん、あざなどの治療に放射線が用いられる。あざの治療には表面で吸収される β 線が、がんの治療には深部まで入る γ 線や中性子線が用いられる。がん治療には、加速器、医療用原子炉なども用いられる。

viii) ラジオアイソトープを熱源に用い、原子力電池を作ることができる。

原子力電池は、長期間、信頼度高く作動するので、無人灯台、宇宙船などに用いられる。原理は、ストロンチウム-90、ポロニウム-210 など半減期の長いラジオアイソトープを用い、それが崩壊に伴って発生する

熱を利用して、熱電気発電を行うものである。

アポロ号が初めて月に着陸したときに SNAP-27 という原子力電池を月面に残してきたが、これは種々の観測機器の電源として、50 W の電力を1年間以上供給した。SNAP-27 の重量は 20 kg であったが、同じ電源を通常の電池で得ようとする、1.8 t の重量になり、原子力電池がいかに有利かがわかる。

1.1.3 加速器利用

加速器はイオンや電子のような荷電粒子を加速し、高エネルギーにすることができる。これを標的に衝突させると、原子核反応により中性子や線などの二次粒子を発生させることができる。これらの粒子を種々の分野に利用することができる。

〔1〕 学術研究 大型の加速器を用いて、超高エネルギー粒子を作り、それを衝突させて、原子核や素粒子についての研究が行われている。また、イオンを照射して、材料の損傷の研究をしたり、中性子回折を用いて結晶構造を調べたりする物性研究も行われている。短いパルス状の電子線を用いて、速い化学反応の素過程を研究することも行われている。また、第2章で述べる中性子断面積も加速器を用いて測定されている。

〔2〕 工業利用 加速器により電子を加速して、それを標的に衝突させて X 線を発生させ、物質による X 線透過の違いを利用して、非破壊検査が行える。また X 線は可視光よりも波長が短いので、これを利用すると、より微細な線を描くことができる。これで超 LSI の製作のための微細加工を行うことができる。電子線やイオンビームを用いる微細加工も行われている。

〔3〕 医学利用 加速器により電子線、X 線を発生させ、それらががん治療に用いられている。最近は高速中性子やイオンを用いたがん治療も試みられている。

〔4〕 ラジオアイソトープ生産 小型の加速器は原子炉より手軽に利用できる、加速器を用いて短寿命の放射性同位元素を生産し、これをその場でトレーサなどに用いて研究が行われている。

1.2 エネルギー利用

現在、実用になっているのは核分裂反応による原子力の利用である。核分裂反応を制御しながら起こさせる装置が原子炉である。

1.2.1 動力利用

原子炉から得られるエネルギーは熱エネルギーとして取り出されるが、それを動力に変換して利用するものに、原子力発電および原子力推進がある。

〔1〕 原子力発電 原子力発電は、1951年 はじめてアメリカで成功して以来、急速な進歩を示し、世界各国で 50～100 万 kW クラスの原子力発電所が つぎつぎに建設された。1986年 6月末で運転中のもの 365 基（設備容量合計約 2億 7000 万 kW）、建設・計画中のものを含めると 658 基（約 5億 5000 万 kW）に達しており、全世界の電力量の約 15% を供給しており実用期に入っている。

〔2〕 原子力推進 原子力推進では、原子力船が主流である。現在、その大部分は潜水艦、航空母艦などの軍艦であり、アメリカ、ソ連などを中心に、約 300 隻が就航している。

軍艦以外では、ソ連の原子力砕氷船レーニン号、アメリカの原子力商船サバソナ号、西ドイツのオットハーン号、日本の実験船“むつ”などがあるが、経済性の理由で実用期はかなり先になろう。

原子力ロケットは宇宙船用として、アメリカで開発が行われた。地上にロケット用原子炉数基を建設し、種々の特性試験を行い技術的可能性を実証した段階で開発が中断されている。

1.2.2 熱源利用

原子炉の熱源利用としては、地域暖房、工業用蒸気生産、海水脱塩、原子力製鉄など広範囲の用途が考えられている。現在、いずれも利用の初期的段階または開発途上にあるが、将来、在来エネルギー源のひっ迫とともに、原子力の多方面の利用が脚光を浴びてこよう。

索引

【A】

アイスコンデンサ形格納容器 114
安全注入系 113
安全保護系 91
安全評価 92
安全基準 86
アルファ線 10
アスペクト比 139
圧力管 121
圧力容器 109
ALARA 87

【B】

バーナブルポイズン 112
ベータ線 11
ブランケット 142
ブレイク・イーブン 137
BWR の流量制御方式 119

【C】

遅発中性子 28
遅発中性子生成率一定近似 64
遅発中性子先行核 29
超臨界 31
中間熱交換器 127
中性粒子入射加熱 140

中性子 8
中性子生成時間 59
中性子束 39
中性子輸送理論 40
中性子寿命 59
common mode failure 90

【D】

大半径 139
第1壁 143
断面積 19
弾性散乱 18
電離放射線 10
伝達関数 66
同位元素 10
毒作用 67
ドル 60
動特性 59
DT 反応 133

【E】

液体ポイズン注入系 91
エネルギー増倍率 143

【F】

フィックの法則 39
fail-safe 設計 90
fool-proof 設計 90

【G】

外部導体系 140
外挿距離 43
ガンマ線 11
ガス冷却炉 (ガス炉) 74, 105

原子 8
原子番号 8
原子核 8
原子核分裂 24
原子核反応 15
原子炉 2, 33
——の固有の安全性 89
原子炉方程式 42
原子炉冷却系 112, 119
原子炉立地指針 86
原子炉停止系 91
原子炉容器 33
原子量 8
原子力電池 4
原子力発電コスト 78
原子力発電の安全性 81
原子力発電の環境問題 97
原子力発電の経済性 78
原子質量単位 9
減速材 33
群遷移断面積 54, 57
グラム原子量 9
逆時間方程式 62
γフィールド

【H】

半減期 14
 半二重型格納容器 114
 反応度 59
 反応度ポイド係数 89
 反応度温度係数 89
 反応度事故 94
 反応率 19, 39
 反射体 33
 発熱反応 16
 平均自由行程 22
 非弾性散乱 18
 被覆管 34
 非均質原子炉 56
 品質保証 85
 非常炉心冷却系 (ECCS)
 87, 92, 96
 非常用ガス処理系
 114, 121
 補外距離 43
 崩壊熱 27
 放射能 14
 —の環境問題 99
 放射性同位元素 10
 放射性崩壊 12
 放射性捕獲 18
 放射線 10
 放射線厚み計 4
 放射線積雪計 4
 沸騰水型 (BWR) 102

【I】

1点近似動特性方程式 60

【J】

ジェットポンプ 120

【K】

加圧水型 (PWR) 102
 壁負荷 143
 核分裂 17, 24
 核分裂エネルギー 30
 核分裂・核融合ハイブリッ
 ド炉 144
 核分裂片 25
 核分裂連鎖反応 31
 核分裂生成物 25
 格納容器
 33, 87, 92, 114, 120
 格納容器スプレイ系
 113, 120
 確率論的手法 92
 拡散方程式 41
 拡散係数 39
 拡散距離 48
 拡散理論 39
 核子 8
 核融合 17, 132
 核融合炉 141
 環境モニタリング 99
 管理放出 (controlled
 release) 99
 慣性閉じ込め 141
 カランドリヤ 104
 カスプ 138
 警報 (アラーム) 91
 ケミカルシム制御 112
 軽水炉 36, 73, 101
 研究用原子炉 (研究炉) 2
 結合エネルギー 16
 決定論的手法 92
 起動時事故 94
 幾何学的バックリング 45
 均質原子炉 55
 工学的安全防護施設 113

国際放射線防護委員会
 (ICRP) 87

高速中性子 18
 高速核分裂係数 52
 高速 (増殖) 炉 35, 38, 106
 クラス-9事故 92
 共鳴 22
 —を逃れる確率 52
 吸熱反応 16
 吸収線量 11

【M】

マグノックス炉 105
 マクロ輸送断面積 39
 ミクロ断面積 20
 未臨界 31

【N】

燃料費 79
 燃料インベントリ費 79
 燃料集合体 34, 108, 117
 燃焼度 70
 熱中性子 18
 熱中性子移動面積 55
 熱中性子利用率 53
 熱中性子炉 35
 二重サイクル BWR 104
 濃縮ウラン 33

【O】

温度係数 67
 温排水 98
 親物質 24

【P】

プラズマβ値 139
 passive な系 90
 PS コンクリート圧力容器
 (PCRV) 106

【R】

ラジオアイソトープ 2, 3
 冷却能力減少事故 96
 冷却材 33
 冷却材喪失事故 (LOCA)
 87, 94, 96
 冷水事故 94
 立地評価事故 86
 臨界 31
 臨界質量 50
 臨界集合体 37
 リスク 92
 炉心 33
 ローソン条件 137
 炉周期 63
 ループ型高速炉 127

【S】

制御棒 33

生産用原子炉 (生産炉) 2
 設計基準事故 92
 線量目標値指針 87
 線量当量 11
 セント 60
 シア 139
 資本費 78
 深層防御 (多重防護) 89
 質量欠損 16
 質量数 8
 自然放射線 82
 即発跳躍近似 64
 即発中性子 28
 即発ガンマ線 30
 小半径 139
 照射線量 11
 スクラム (緊急停止) 91
 ステラレータ 140
 static な系 90

【T】

多群拡散方程式 57
 耐震設計 92
 タンデムミラー 138
 単位容量 80
 タンク型高速炉 127
 低人口地帯 86
 転換比 32

トカマク 139
 トーラス 138
 トレーサ 2
 トリチウム増殖比 143
 トリチウム増殖材 142

【U】

運転維持費 79

【Y】

4因子公式 52
 陽子 8

【Z】

材料バックリング 42
 材料試験炉 2
 全断面積 20
 磁場閉じ込め 137
 磁気ミラー 138
 実効増倍係数 53
 増倍係数 31
 増殖比 32
 重水炉 74, 104

—著者略歴—

都 甲 泰 正
1951年 東京大学工学部電気工学科卒業
1956年 東京大学大学院修了
1956年 日本原子力研究所入所
1962年 東京大学助教授
1964年 工学博士
1968年 東京大学教授（工学部原子力工学科）
1989年 東京大学名誉教授

岡 芳 明
1969年 東京大学工学部原子力工学科卒業
1974年 東京大学大学院博士課程修了，工学博士
1978年 東京大学助教授
1989年 東京大学教授（工学部原子力工学研究施設）
現在に至る

原子工学概論

Introduction to Nuclear Engineering

© Yasumasa Togo, Yoshiaki Oka 1987

1987年 8月 25日 初版第1刷発行
2005年 8月 20日 初版第7刷発行

検印省略

著 者 都 甲 泰 正

東京都杉並区高円寺北 4-27-3

岡 芳 明

東京都文京区小日向 1-19-6

発 行 者 株式会社 コロナ社

代 表 者 牛来辰巳

112-0012 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 4-339-00131-7

(清文社，愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします