

放射線の発生と 原子炉内で起こる核反応

1-1	原子から分子を作る結合力の種類と強さ	010
1-2	原子の構造と表記	012
1-3	放射線の種類	014
1-4	同位体原子にある違い	016
1-5	放射線量を表す単位	018
1-6	原子核反応の例	020
1-7	地球内部で起こる原子核の崩壊と熱発生	022
1-8	核分裂反応で発生する特殊な元素、核種	024
1-9	崩壊系列	026
1-10	$E=mc^2$ の関係式、波長とエネルギーの関係	028
1-11	核力、強い力の起源	030
1-12	原子核の質量欠損と 核子間の結合エネルギーの関係	032
1-13	核燃料核種では 核分裂と中性子吸収反応が同時に進む	034
1-14	原子炉内で中性子を減速させる理由	036
1-15	熱中性子と高速中性子の違い	038
1-16	核分裂の連鎖反応と 核反応により発生する熱の大きさ	040
1-17	化石燃料の燃焼との発熱量の大きさの違い	042
1-18	原子炉中の中性子の動きと臨界とは何か	044
1-19	原子炉内で中性子増倍率を 1 に制御するには	046
1-20	反応度を使った核分裂反応の制御	048

1-21	水冷却核分裂原子炉の構成	050
1-22	軽水炉を含めた原子炉全般の世界の運転状況	052

第2章

放射線の利用と 放射線の人体への影響

2-1	X線の診断への利用	056
2-2	X線あるいは中性子回折による 結晶構造の解析	058
2-3	X線と中性子線の回折と内部透視像の比較	060
2-4	電子線の電子顕微鏡への応用	062
2-5	放射線による殺菌作用	064
2-6	強い酸化力を使った環境汚染物質の 放射線分解	066
2-7	放射線照射による材料の性能向上と 線源の幅広い利用	068
2-8	医療分野における高エネルギー放射線の利用	070
2-9	同位体を用いた年代測定法	072
2-10	放射線利用のまとめとその他の放射線利用例	074
2-11	放射線被曝の2つの形態、 放射線の人体への影響の分類	076
2-12	放射線防護の原則と外部被曝を 避けるための方策	078
2-13	内部被曝量の把握	080
2-14	預託実効線量の考え方と低線量率での 人の被曝影響	082

2-15	吸収線量グレイ Gy と実効線量シーベルト Sv	084
2-16	放射線被曝の確定的影響と被曝線量との関係	086
2-17	確率的影響と実効線量との関係	088
2-18	自然放射線の起源と自然放射線被曝量	090
2-19	過去の放射性核種取扱中の 職業被曝事故の例	092
2-20	放射線の遺伝的影響と線量限度の設定	094
2-21	環境中の放射性核種の移行	096
2-22	放射性核種の管理、 取扱施設からの排気、排水管理	098

第3章

原子力発電を安全に 稼働するための方策

3-1	原子力発電の必要性を証明するために	102
3-2	世界各国の電源構成の現状	104
3-3	日本のこれまでの原子力発電所の導入状況	106
3-4	日本の発電原子炉の現在の稼働状況	108
3-5	原子力発電のための ウラン資源の安定確保状況	110
3-6	原子炉燃料としてのプルトニウム	112
3-7	兵器級ウランと兵器級プルトニウム	114
3-8	原子炉の熱的安定性の確保	116
3-9	燃料取り出し後の崩壊熱の 長期間の放出と回収	118

3-10	原子炉緊急時の安全確保の原則	120
3-11	改善した非常用炉心冷却設備 (ECCS) の設置	122
3-12	原子炉の多重防護策	124
3-13	深層防護の構成と防護レベル	126
3-14	決定論的安全評価から 確率論的安全評価へ (絶対安全思想からALARP へ)	128
3-15	炉心損傷頻度 CDF、格納容器機能喪失頻度 CFF、 早期大規模放出頻度 LERF の内容	130
3-16	フォルトツリー (FT) と イベントツリー (ET) を使った原子炉安全性評価	132
3-17	原子炉機器の重要度	134
3-18	地震への備え	136
3-19	津波と火災防護への対応	138
3-20	過去の原子炉事故と異常事象発生頻度	140
3-21	トランスサイエンス (科学では答えられない課題)	142

第 4 章

原子力発電から出る 放射性廃棄物の管理と処分

4-1	核燃料サイクルの必要性	146
4-2	燃料利用率とウラン資源獲得	148
4-3	ウラン濃縮	150
4-4	ウラン燃料棒の製造と燃焼度	152
4-5	使用済み燃料の一時貯蔵	154
4-6	湿式再処理法	156

4-7	混合酸化物 (MOX) 燃料の有効利用、 プルサーマル運転	158
4-8	超ウラン元素 (マイナーアクチノイド) 核種の 分離と燃焼	160
4-9	放射性廃棄物の分類	162
4-10	気体と液体廃棄物の処理と処分	164
4-11	放射性固体廃棄物の分別と処分	166
4-12	高レベル廃棄物の最終処分	168
4-13	原子炉の稼働延長	170
4-14	原子炉の廃炉	172
4-15	原子力発電全体の発電単価と 他の発電方式との比較	174

第 5 章

新しいタイプの原子炉

5-1	これまでの軽水炉を さらに安全にした改良型軽水炉	178
5-2	高温ガス炉を使って原子炉熱の利用を広げる	180
5-3	古くて新しいタイプの熔融塩炉	182
5-4	燃料を燃やしながら 新たに燃料を作る高速増殖炉	184
5-5	小型で高性能のモジュラー炉 (SMR)	186
5-6	加速器駆動の原子炉	188
5-7	新しいタイプの燃料を使うトリウム原子炉	190
5-8	次世代高性能の第 4 世代原子炉	192
5-9	核融合炉の成立条件	194

付録

放射線発見の歴史.....	196
発電原子炉誕生までの核分裂反応発見と核爆弾開発の歴史.....	198
原子力平和利用への道（発電原子炉の歴史）.....	201
あとがき.....	206



1-1 原子から分子を作る結合力の種類と強さ

地球上のすべての物質は、小さな「原子」からできています。原子はいくつかが集まると「分子」になり、分子の種類は原子の組み合わせ方が無限であるため、事実上無限に存在します。

原子は、原子核とその周りを回る電子から構成されており、その原子核はさらに、小さな陽子や中性子が集まってできています(図1-1)。放射線の多くはこの原子核の内部から放出されます。

分子ができるとき、原子同士は主に以下の3種類の方法で結びついています(図1-2)。いずれの場合も電子が大きな役割を果たしています。

- (1) **イオン結合**：片方の原子がもう片方の原子の電子を奪い、互いにプラス(正)とマイナス(負)のイオンに変わり、クーロン力で結びつく結合です。

代表例：塩化ナトリウム(NaCl)

- (2) **共有結合**：2つの原子に共通に含まれる電子を互いに自らの軌道に共有しあって結びつく結合です。

代表例：二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)

- (3) **金属結合**：多数の原子が結びつき、立体的結晶構造となり、多くの原子が互いに規則的につながりあい、自由電子と呼ぶ電子が複数の原子結合間を自由に動き回ることができる結合です。

代表例：アルミ(Al)、銀(Ag)

いずれの結合も強く原子間で結合しているため、結合を切るために数千から数万度まで温度を上げる必要があり、一つの分子をバラバラの原子状態にするのに必要なエネルギーを解離エネルギー

ギと呼びます。放射線はこの解離エネルギーの50~100万倍のエネルギーを持っており、とても強力であるということがわかります。

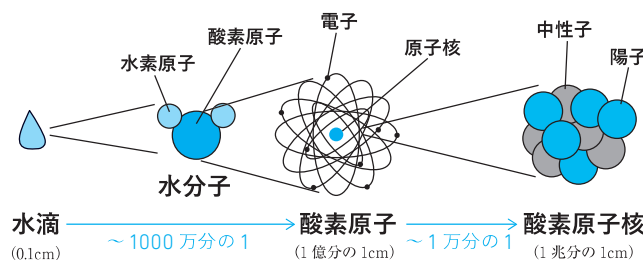


図1-1 物質—分子—原子—原子核のつながり

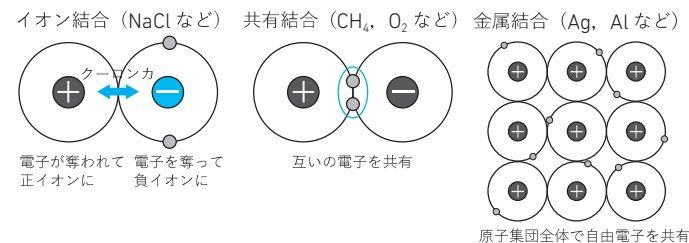


図1-2 原子同士を結合し分子を形成する仕方





1-2 原子の構造と表記

原子はすべて似た構造をし、今では20世紀初めに提案されたボーアの原子模型が一般的なモデルになっています。これは、中心に原子核があり、原子核を中心に電子が周回するモデルです(図1-3)。

原子核は質量がほぼ同じである陽子と中性子からできていて、陽子と中性子は原子核中で強く結合しています。原子質量の大部分は中心の原子核にあります。この原子核中の陽子数を原子番号(Z)と呼びます。周回している電子数は基本的に陽子数と同じです。原子の性質は陽子と電子の数、電子配置によって決まります。

中性子は陽子と同じか少し大きな数が原子核に含まれます。同じ元素でも原子核に含まれる中性子の数が異なるものを**同位体**と呼び、放射線を理解する上で重要なものとなります。代表的元素の同位体と自然存在率は表1-1です。

元素を記載するとき、元素記号の左下に原子番号Zを書き、左上に陽子と中性子の数の合計である質量数Aを記載します(例えば A_ZM)。原子番号Zを省略し、 AM と書くこともあります。陽子と中性子の数を合わせて質量数(A)と呼ぶため、中性子数は $A - Z$ と表せます。

電子の殻軌道のK殻、L殻、M殻、N殻は順に最大2個、8個、18個、32個まで電子が入り、基本的に内側軌道から順に入ります。外側の軌道に行くほどエネルギーは高くなっているため、なんらかの要因で内側の電子が軌道から飛ばされたときは、外側の電子が内側の軌道に配置されます。その際に放出されるエネルギーがX線と呼ばれる放射線の一種です。

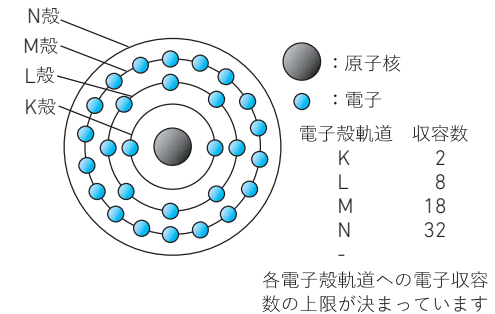


図1-3 ボーアの原子模型

表1-1 代表的元素の同位体を表す記号と自然存在率

原子番号	元素名	同位体 (自然存在率) (青い字は放射性を持つ)
1	水素	${}^1_1\text{H}$ (0.99985), ${}^2_1\text{H}$ (0.00015), ${}^3_1\text{H}$ ($\sim 1 \times 10^{-18}$)
2	ヘリウム	${}^3_2\text{He}$ (1.3×10^{-6}), ${}^4_2\text{He}$ (0.999999)
3	リチウム	${}^6_3\text{Li}$ (0.0759), ${}^7_3\text{Li}$ (0.9241)
5	ホウ素	${}^{10}_5\text{B}$ (0.199), ${}^{11}_5\text{B}$ (0.801)
6	炭素	${}^{12}_6\text{C}$ (0.9893), ${}^{13}_6\text{C}$ (0.0107), ${}^{14}_6\text{C}$ (1.2×10^{-12})
8	酸素	${}^{16}_8\text{O}$ (0.99757), ${}^{17}_8\text{O}$ (0.00038), ${}^{18}_8\text{O}$ (0.00205)
11	ナトリウム	${}^{23}_{11}\text{Na}$ (1)
90	トリウム	${}^{232}_{90}\text{Th}$ (1)
92	ウラン	${}^{234}_{92}\text{U}$ (0.000055), ${}^{235}_{92}\text{U}$ (0.0072), ${}^{238}_{92}\text{U}$ (0.992745)





1-3 放射線の種類

不安定な原子核は安定な原子核に変化しようとします。その際に放出するものを放射線といい、この変化のことを**崩壊**と呼びます。外部からやってきた電子などが、原子核や電子軌道に衝突や干渉したとき、もともと原子核が不安定なとき、がパターンとしてあります。

図1-4のように、放射線は大きく分けて、粒子線（ α 線、 β 線、中性子線、陽子線など）と電磁波（X線、 γ 線）に分類でき、特に α 線、 β 線、 γ 線を放出する崩壊を **α 崩壊**、 **β 崩壊**、 **γ 崩壊**と呼びます。

α 線：2個の陽子と2個の中性子が一つになったヘリウム原子核の粒子線であり、大きな原子核の α 崩壊過程や原子核にイオン化した原子や中性子が衝突すると α 線が放出されます。物質と相互作用が強く、紙1枚程度でエネルギーを失い止まります（図1-5）。

β 線：負の電荷を持つ電子線であり、原子核の β 崩壊により発生します。核内で中性子が陽子に変わり、ニュートリノという粒子が発生します。原子番号が1増

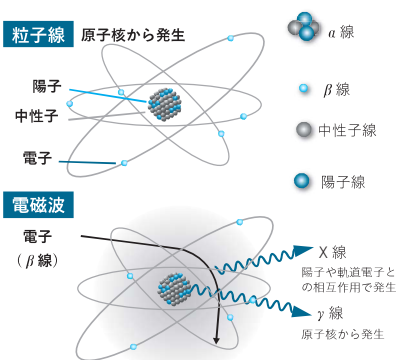


図1-4 放射線の種類

え、質量数は変わりません。アルミニウムなどの薄い金属板で遮蔽できます。

γ 線：電磁放射線であり、質量はなく、光と同じ性質を示します。原子核が高エネルギー状態から安定状態に移るとき放出され、物質への透過力が高く、鉛や鉄の厚い板で遮蔽できます。

中性子線：電荷を持たない中性子の流れのことです。原子核と直接相互作用し、原子核反応を起こす可能性の高い粒子です。中性子を止めるには、軽い原子の水素を多く含む材料（水やコンクリートなど）を使用します。

陽子線：正の電荷をもつ粒子で、原子核と直接相互作用します。透過力は α 線と β 線の間です。

X線： γ 線と同じ電磁放射線であり、自由電子が陽子や軌道電子と相互作用しX線が発生します。電子線の進行方向を曲げる際にX線放出する場合と、内側の軌道電子を弾き飛ばし、外側電子軌道から内側に変化する際にエネルギーの決まったX線が発生します。鉄や鉛の厚い板で遮蔽できます。

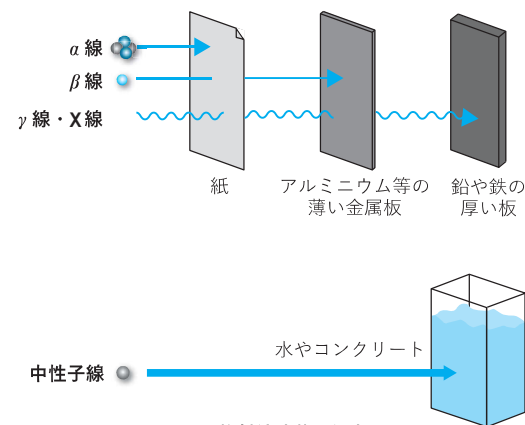


図1-5 放射線遮蔽の仕方





1-4 同位体原子にある違い

同位体は中性子数のみが異なり、原子を構成する陽子や電子の数は同じであるため、化学的性質は同位体間でほぼ同じです。しかし、同位体間の物理的な性質に少し違いがあり、中には放射線を放出して安定原子に変化するものもあります。

水素を例にとると、同位体には重水素と三重水素（トリチウム）があります（図1-6）。三重水素のみ放射性があり、半減期が12年で β 崩壊し、ヘリウム-3, ${}^3\text{He}$ に崩壊します。トリチウムは、大気中に微量ですが一定の割合で存在します。大気中の宇宙線によって作られるものや原子炉によって作られるものは、 ${}^3\text{He}$ に崩壊する量とつり合っているため、極端な増減はありません。

酸素同位体には、陽子数が8で共通、中性子数が8, 9, 10の3種類の同位体があり、3種類とも安定同位体であり、大気中、水中の酸素が含まれる至るところで決まった濃度の酸素同位体が含まれています。酸素同位体も化学的性質は同じですが、蒸気圧がわずかに同位体間で異なり、水中濃度と蒸気中の蒸気圧濃度を比べると、重い同位体 ${}^{18}\text{O}$ や ${}^2\text{H}$ の濃度が、水中の方でわずかに高い状態になります。したがって、海水が蒸発して雲となり、海岸に近い場所で雨として降水する場合と内陸深い位置で降水する場合とでわずかな同位体間の違いが現れ、海と山の河川間の水の循環過程を調べるために同位体差を調べる手法が使われています。

図1-7に示す $\delta^{18}\text{O}$ や $\delta^2\text{H}$ の記号はそれぞれ ${}^{18}\text{O}$ と ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^2\text{H}$ と ${}^1\text{H}$ の同位体比の標準物質からのずれを1000倍したパーミル値(‰)であり、内陸効果、高度効果、緯度効果の違いに基づいて、大気循環過程が調べられています。

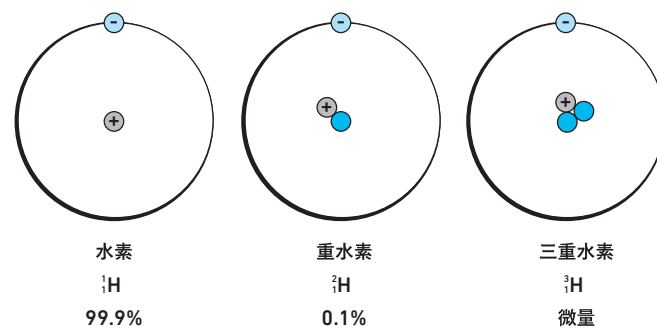


図1-6 水素同位体原子中の陽子⊕、中性子●、電子⊖の配置

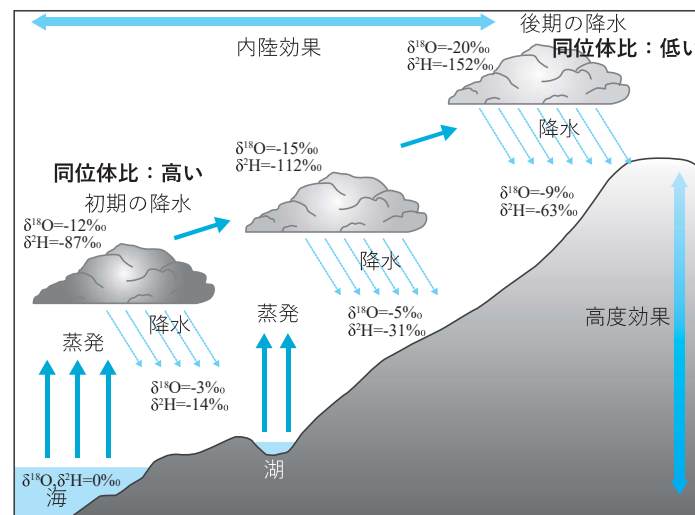


図1-7 酸素と水素同位体濃度差を測定し大気（水）循環を観察





1-5 放射線量を表す単位

強いエネルギーの放射線を物質や人が受け、放射線照射によりどの程度の影響を受けるかを表す放射線量が状況に応じていくつか定義されています。図1-8と表1-2は、放射線が原子核や放射線発生装置から発生し、人に届くまでに放射線量を把握するために決められた単位です。

まず発生する放射線源の強さを表し、1秒間にいくつの放射線を放出するかを示す量がベクレル (Bq) です。放射線が空気中を通過する際、放射線エネルギーが空気分子の結合エネルギーに比べてずっと高いので、空気を分解し電離します。放射線の強さを表すのに、この電離量に基づいてクーロン/キログラム (C/kg) 単位の照射線量を使います。空気分子一つを自由電子と陽イオンに分解するため必要な荷電粒子エネルギーは34eV (1eV=1.6x10⁻¹⁹J) です。

空気中を飛んだ放射線が物質あるいは人体を照射し、そこでエネルギーを与え、与えたエネルギーをJ/kg単位で表した量を、吸収線量グレイ (Gy) で表します。ここまでの放射線源強度Bq、照射線量C/kg、吸収線量Gyはどの測定器を使っても同じ値になります。しかし、同じ線量を被曝しても被曝した臓器によって影響が異なります。そこで、放射線の人体への影響を定量的に表す量を2つの加重係数を考慮して実効線量シーベルト Svと呼んで表します。2つの加重係数については、後の放射線影響の節で説明します。

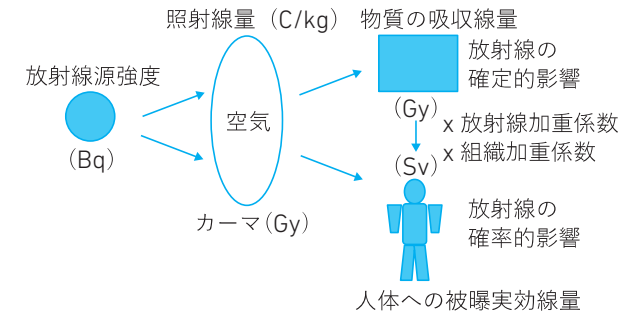


図 1-8 放射線量を定める単位の関係

表 1-2 放射線量の単位

	放射線源強度	照射線量	吸収線量	実効線量
単位	Bq	C/kg	Gy (J/kg)	Sv
呼び方	ベクレル	クーロン / キログラム	グレイ	シーベルト
定義	原子核が崩壊し、放射性物質から1秒間あたり放射線を何個放出するかを表す	X線, γ線の電離放射線が、空気1kgあたりどれだけ電離してイオンにするかを表す	放射線照射により物質が吸収するエネルギー量で、被曝後すぐ症状が出る確定的影響の程度を表す	放射線の違いや被曝を受ける体組織の違いを考慮し放射線被曝でどれだけ癌になりやすいかを表す





1-6 原子核反応の例

原子核は普通安定状態にあります。大気圏外からシャワー状に絶えず飛来する宇宙線が衝突し、中性子 1_0n や陽子 1_1p が発生し、図1-9のように発生粒子が大気原子に衝突し別の原子核に崩壊することがあります。窒素原子に中性子が衝突し大気上層中で水素同位体の放射性トリチウム ${}^3_1\text{H}$ や炭素同位体 ${}^{14}_6\text{C}$ が作られます。 ${}^3_1\text{H}$ 、 ${}^{14}_6\text{C}$ 生成量は他の同位体に比べてわずかです（1-1参照）。

原子番号92のウラン同位体の一つ ${}^{235}_{92}\text{U}$ は自然岩石に含まれる原子の一つですが、中性子がこの原子核に衝突すると、図1-10に示すように、非常に短い時間で原子核内部に中性子を取り込み、複合核を形成します。その直後1秒よりずっと短い時間内で2つの原子核に分裂し熱を発生します。非常に小さい確率ですが、3体に分かれる場合もあります。核分裂で生まれた原子核を核分裂生成物と呼び、その分布が図1-11です。2つの大きなピークで表されており、概ね等確率で二つの物質が生成されます。

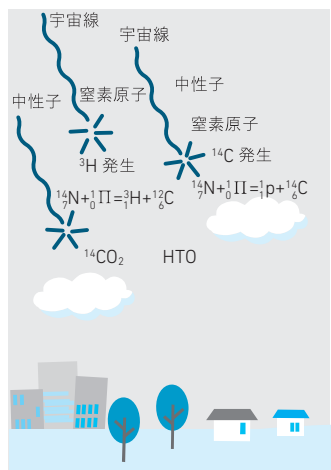


図 1-9 宇宙線による放射性核種発生

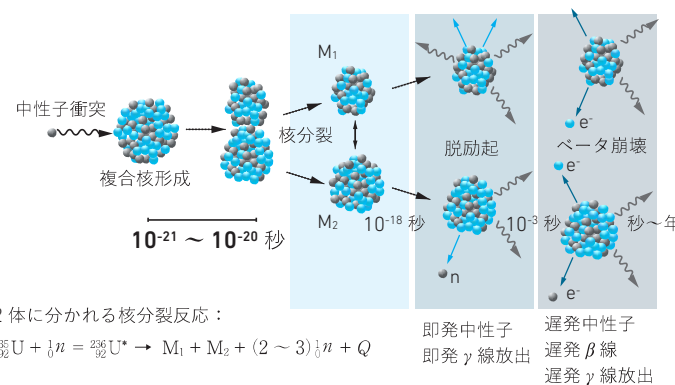


図 1-10 核分裂反応の時間的な変化

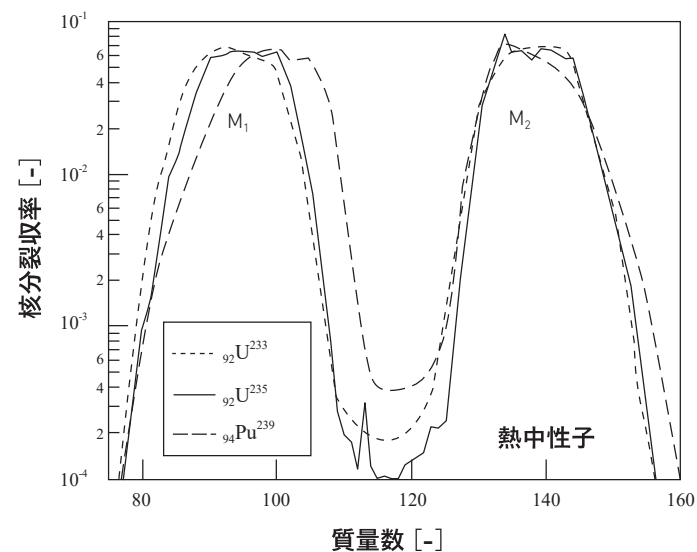


図 1-11 複合核形成後の核分裂収率





1-7 地球内部で起こる原子核の崩壊と熱発生

地球内部は、外側から順に固体岩石からなる地殻、液体のマントル、鉄やニッケルを主成分とする溶融金属の外核、同様の成分で固体金属の内核から構成されています。図1-12は地球内部の予想される温度分布です。地殻上層部の主要成分である花崗岩は、ウランやトリウムの含有率が比較的高いため、最も発熱量が多く、地球の発熱の主要要素となります。地殻下層部の玄武岩やマントル上層部のカンラン岩も少しではありますが熱源となる核種が含まれています。

それぞれの岩石の発熱量は表1-3です。地球中心に近い外核と内核は数千度もの温度になっていますが、放射性核種は少ないと見積もられています。マントルは岩石が溶けた状態になり、対流していると考えられ、この流動が地表面の地震や火山活動を誘発します。地球内部で生じる発熱の大部分は放射性元素の崩壊に伴う β 線や α 線のエネルギーが熱に変わることで生まれていると考えられています。発熱源の放射性元素は、ウラン-235、ウラン-238、トリウム-232、カリウム-40などの長寿命核種からなっていて、地殻やマントルに多く含まれ、そこから崩壊熱を発生します。この発熱の証拠は、地球内部から β 崩壊に伴うニュートリノが検出されることから証明されています。放射性核種のうち、ウランやトリウムは崩壊した後の娘核種も崩壊が続くため、発熱量はその分大きくなります。

なお、岩石中のウラン鉱物は長く動かず留まっており、崩壊生成物も近傍にあるため、その生成割合から岩石の生成年代評価が行われています。また鉱石は高レベルガラス固化体に核種が留ま

ることを表しています。

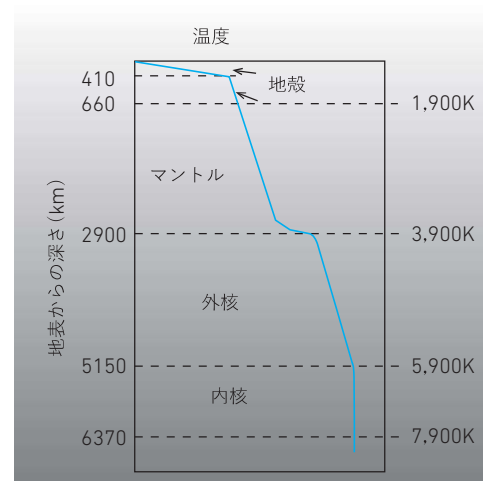


図 1-12 地球内部の温度

表 1-3 岩石の発熱量比較

岩石の種類	発熱速度
花崗岩	$1.1 \times 10^{-9} \text{W/kg}$
玄武岩	$1.6 \times 10^{-10} \text{W/kg}$
カンラン岩	$1.2 \times 10^{-12} \text{W/kg}$
鉄隕石	$\sim 1 \times 10^{-13} \text{W/kg}$





1-8 核分裂反応で発生する特殊な元素、核種

周期律表で原子番号92番目ウランUまでが自然元素で、自然環境にある元素で、それ以上の番号のものは人工元素です。地殻内や原子炉内の核分裂反応で作られる核分裂生成物原子の分布は質量数で決まり、原子量が95付近と140付近が中心です(図1-11)。周期律表欄外に書かれたランタノイド元素(ランタン₅₇Laからルテチウム₇₁Lu)が核分裂生成物に多く現れ、同じように欄外のアクチノイド元素(アクチニウム₈₉Acからの超ウラン元素)が核燃料物質としてしばしば現れます。

自然元素の中でも原子番号61番プロメチウム₆₁Pmと85番アスタチン₈₅Atはいずれの同位体も放射性であり、安定同位体が自然界に存在せず、核分裂生成物あるいはそこからの崩壊過程に現れるのみで、発生してまもなく別の元素に崩壊します。

核分裂によって発生する核分裂生成物の収率を、原子量を横軸に図1-11に示すように、ほとんどの核種の同位体は中性子が多い状態で生成するため、多くの原子核は不安定であり、次々と α 崩壊や β 崩壊し、安定な原子に崩壊していきます。半減期が数日から数年の核分裂生成物がもし原子力発電所事故などで施設外に放出されると、放射線が高く、発生する核分裂収率の高い核種が環境への影響が高い元素になります。表1-4に原子炉内の核分裂で発生する核種の中で核分裂収率が高く、半減期が数日から数年に及ぶ核種をまとめています。次節以降の説明において、核分裂生成物として核種名が挙げられる可能性のある核種となります。化学反応と違って、核分裂反応で生成した原子核は、原子が安定になる電子数が不足した特殊な原子状態です。原子核自体は電子

状態にかかわらず、安定な原子核に向かって α 、 β 崩壊を続け、生成物核種から固有の半減期によって安定な核種に変わっていきます。半減期は、温度や圧力で変わらず、核種によって決まった値になります。

表 1-4 主な核分裂生成物核種の収率と半減期

核種	元素名	原子番号	核分裂収率	半減期
⁸⁵ Kr	クリプトン	36	0.2%	10.7 年
⁸⁹ Sr	ストロンチウム	38	5.75%	50.5 日
⁹⁰ Sr	ストロンチウム	38	5.73%	28.9 年
⁹³ Zr	ジルコニウム	40	6.3%	153 万年
⁹⁹ Tc	テクネチウム	43	6.05%	21.1 万年
¹²⁹ I	ヨウ素	53	0.54%	1,570 万年
¹³¹ I	ヨウ素	53	2.8%	8.0 日
¹³² Te	テルル	52	4.3%	3.2 日
¹³³ Xe	キセノン	54	6.7%	5.2 日
¹³⁵ I	ヨウ素	53	6.3%	6.6 時間
¹³⁴ Cs	セシウム	55	6.7%	2.1 年
¹³⁷ Cs	セシウム	55	6.2%	30.2 年
¹⁴⁴ Ce	セリウム	58	2.1%	284 日
¹⁴⁷ Pm	プロメチウム	61	2.27%	2.6 年





1-9 崩壊系列

前節で地球上に自然に存在する核種として崩壊系列核種があると説明しました。もう少し詳しく内容を説明すると、現在地球には、3つの崩壊系列が存在します。崩壊系列核種の変化は図1-13です。起点核種をU-238としPb-206を最終核種とするウラン系列（ $4n+2$ 系列）、U-235を起点としPb-207を最終核種とするアクチニウム系列（ $4n+3$ 系列）、Th-232を起点としPb-208を最終核種とするトリウム系列（ $4n$ 系列）の3つの系列が存在します。もう一つネプチニウム系列（ $4n+1$ 系列）が過去にありましたが、 ^{241}Pu あるいは ^{237}Np を起点とし ^{205}Tl で終わるこの系列核種の半減期が他の系列核種に比べて短く、現在は最終の安定核種を除いて自然界に存在しません。崩壊系列にある核種は、 α 崩壊して質量数が4、原子番号が2減り、あるいは β 崩壊すると質量数はそのまま、原子番号が1増えるかなので、崩壊核種はすべて同じ系列のままで推移します。

途中いずれの崩壊系列も気体核種のラドン $_{86}\text{Rn}$ を経由します。系列核種は花崗岩などの岩石に含まれるので、コンクリート建造物内やトンネル中などでラドン同位体核種（ ^{220}Rn をトロン、 ^{219}Rn をアクチノン、 ^{222}Rn をラドンと区別して呼んでいます）からの被曝が人体への自然被曝の主要な寄与になります。

崩壊系列上の放射性核種は放射平衡という状態にあります。これは親核種の放射性核種が崩壊してできた次の核種（娘核種）との放射能が時間的に変わらず一定の値で推移する状態を表しています。

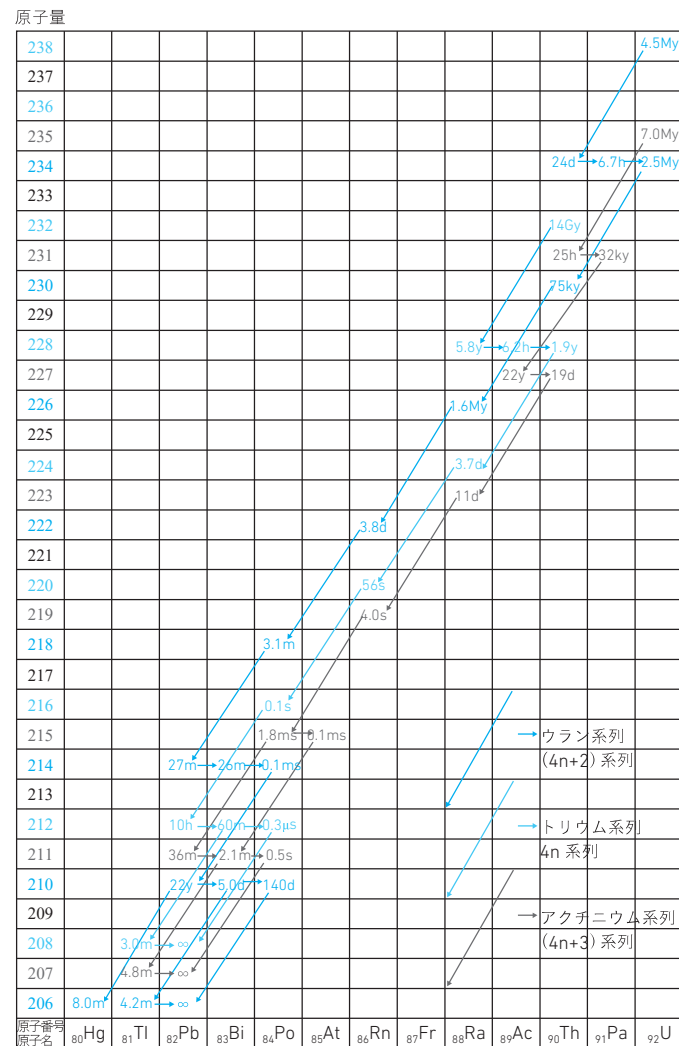


図 1-13 3種類の崩壊系列（数字は半減期を示す）





1-10 $E=mc^2$ の関係式、波長とエネルギーの関係

原子核反応により発生する大きな核熱と放射線の発生の起源について考えます。アインシュタインは20世紀初頭、**図1-14**に示されるマイケルソン・モーリーの実験結果に注目しました。この実験では、光が異なる光路を通っても光速が一定であり、地球の運動方向や速度に関係しないことが示されました。この結果を基に、アインシュタインは「光速は一定であり、どのような速度で移動しても、座標系を変えても同じ値をとる」ことに気づきました。このことから、彼は質量とエネルギーが等価であるという関係を導きました。

彼が導いた結果は、物体は静止していても静止質量 m_0 に光速 c の2乗をかけたエネルギー $E=m_0c^2$ を持つというものです。光速が大まかに 3×10^8 m/sであるため、原子レベルの小さな質量でもどれだけ大きなエネルギーを持っているかがわかります。これが、原子核反応により発生する大きなエネルギーの起源になります。

さらに、運動する粒子は粒子としての性質と波動としての性質を併せ持ち、特定の波長を示すこともわかりました。この波長は、粒子の運動エネルギーに依存し、運動エネルギーが大きくなるほど波長が短くなることが示されています。

図1-15では、光速に近い速度で運動する放射線と粒子の運動エネルギーと波長の関係を表しています。 β 線 ($m_e c^2=0.511\text{MeV}$) と中性子線 ($m_n c^2=940\text{MeV}$) 微小粒子、光速で伝搬する電磁波(静止質量0)について、運動エネルギーが増加するにつれて波長が短くなる性質がわかります。

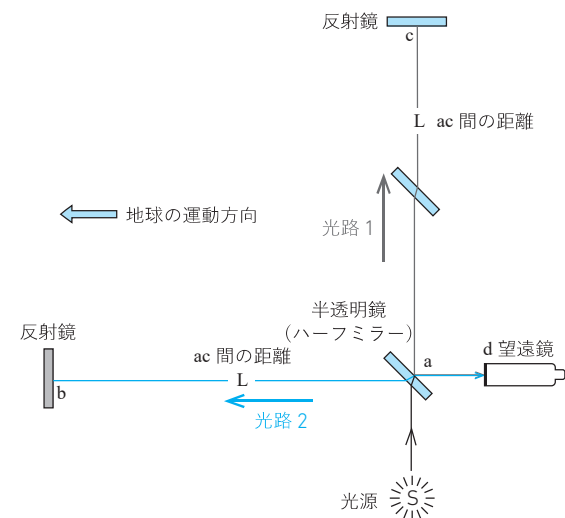


図 1-14 地球の運動方向に関わらず光速が一定であることを証明するマイケルソン・モーリーの実験配置図

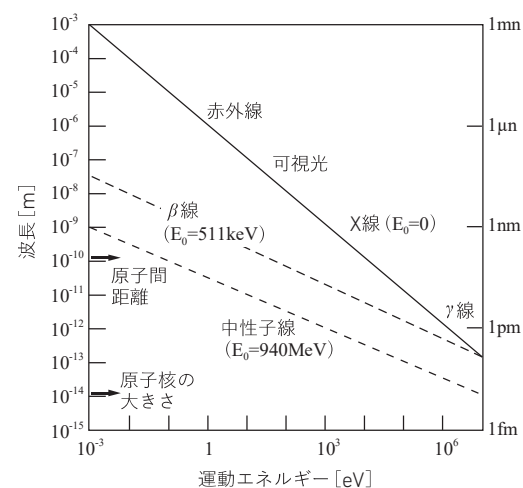


図 1-15 放射線・粒子の運動エネルギーと波長の関係





1-11 核力、強い力の起源

ボーアの原子模型（図1-3）では、原子内の電子軌道の安定性を説明するため、電子が円軌道を1周回る長さ $2\pi r$ が電子の波長 λ_e の整数倍となる場合に安定すると考えました。この関係は $2\pi r = n\lambda_e$ で表され、 $n=1,2,3,\dots$ と値が大きくなるにつれて、外側の電子軌道を表しています。この仮定に基づき、電子の波動性を用いて水素原子の軌道電子のエネルギーを正確に予測することに成功しました。

ボーアの原子模型は視覚的に理解しやすい一方で、いくつかの欠点もあります。最大の問題点は、負電荷を持つ電子が正電荷を持つ原子核の周りを円軌道で回ると、電磁波を放出してエネルギーを失うため、軌道が崩壊してしまう点です。この問題を解決するために量子力学が生まれました。

量子力学では、電子の波動性を取り入れることで、電子が粒子性と波動性を持つことを理論的に説明しました。また、電子の位置は確率的にしか決定できないため、電子軌道は明確な線ではなく「電子雲」として表されることがわかりました。これにより、原子の安定性がより正確に理解されるようになりました。

さらに、原子核の構造に関しても重要な発見がありました。原子核には正電荷を持つ陽子と電荷を持たない中性子が詰まっていますが、同じ正電荷を持つ陽子同士が反発するため、特別な「核力」が存在しなければ核の構造は維持できません。この核力は、陽子と中性子の間で π 中間子という粒子を交換することで生じる非常に強い力であることが、湯川秀樹によって解明されました（図1-16）。

具体的には、 π 中間子の軌道半径 r 、質量 m_π 、エネルギー E_π を電子軌道の波動性の仮定に基づいて計算したところ、核内での強い力が及ぶ距離（約 $2 \times 10^{-15}\text{m}$ ）を代入した結果、 $E_\pi = 139\text{ MeV}$ という値が得られ、実験結果と一致しました。この一致は、核力と π 中間子の存在を理論的に裏付ける重要な成果です（図1-17）。

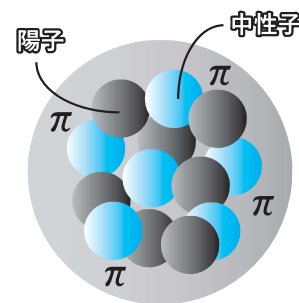
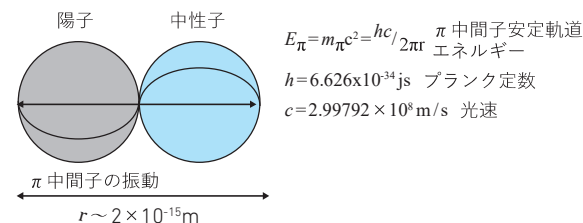


図1-16 原子核内の微細な構造

（原子核中で π 中間子による強い力が働き、中性子と陽子からなる原子核の密集状態が保持されます。その後、素粒子論に基づき、強い力は一般に素粒子が担うように発展修正されました。）



π 中間子が原子核中で陽子と中性子の間を光速で波形状に振動し両方の核子を安定に結合させる働きをします。

図1-17 強い力を作る π 中間子の予測





1-12 原子核の質量欠損と核子間の結合エネルギーの関係

核反応では非常に大きな熱エネルギーが発生します。このエネルギーは、原子核を構成する中性子や陽子間に働く強い結合力（結合エネルギー）の変化によって生まれます。核反応の前後で原子核の質量にわずかな差が生じ、この「質量欠損」に相当する質量がエネルギーに変換されます。

質量欠損とは、原子核を構成する陽子や中性子の質量の合計と、実際の原子核の質量との差を指します。具体的には、バラバラな粒子の状態と比べて、まとまった原子核の方が質量がわずかに小さくなります。この質量の減少分がエネルギーとして放出されます。図1-18では、質量欠損のイメージ図で、図1-19では質量数ごとの原子核の結合エネルギーが描かれています。図1-19によれば、鉄原子（質量数60前後）が最も安定しており、核分裂や核融合による質量欠損がエネルギーの発生につながることがわ

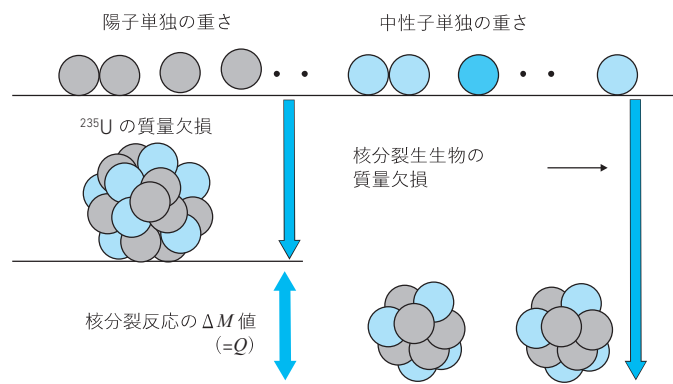


図 1-18 原子核質量欠損と核分裂反応の ΔM 値の関係

かります。

例えば、ウラン235の核分裂では、中性子1個が原子核に吸収されて反応が起こります。このとき、反応前のウランと中性子の質量の合計と、反応後に生成される核分裂生成物の質量の合計にわずかな差が生じます。この質量差がエネルギーに変換され、放出される β 線や γ 線、生成物の運動エネルギーとして現れ、最終的に熱エネルギーとなります。

ウラン235の核分裂では、反応前後の質量差は約0.2原子質量単位 (amu) です。この質量欠損は、ウラン原子核の結合エネルギーが分裂後の生成物の結合エネルギーより小さいために生じます。そのため、結合エネルギーの差が核分裂エネルギーとして利用されます。ただし、核反応では粒子数が変化せず、粒子数の保存則が成り立っています。

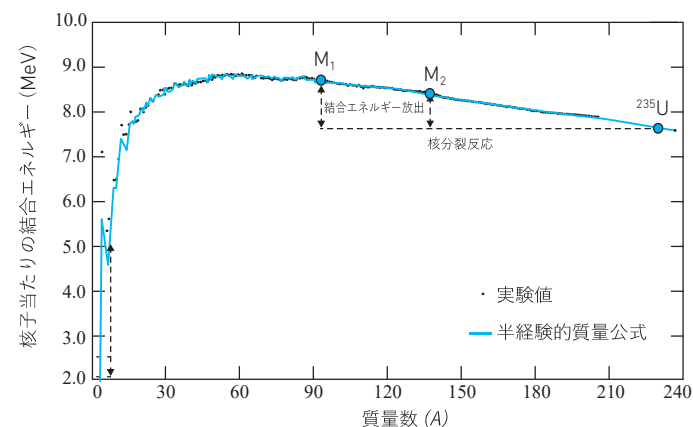


図 1-19 1 核種あたりの結合エネルギー（縦軸は $\Delta M/A$ ）。





1-13 核燃料核種では核分裂と中性子吸収反応が同時に進む

ウランには、同位体である ^{238}U と ^{235}U の2種類が存在します (^{234}U は濃度が非常に低いため無視します)。中性子がウラン原子に近づくと、中性子は電荷を持たないため電子とは相互作用せず、素通りして原子核に接近します。このとき、中性子は原子核と衝突して跳ね返る (散乱)、原子核に吸収される (捕獲)、または核反応を引き起こす (核分裂など) のいずれかの反応を起こします。これらの反応は確率的に進み、中性子のエネルギーによってどの反応が起こるかが決まります。(図 1-20)

中性子が原子核に衝突して跳ね返る散乱反応には、弾性散乱と非弾性散乱があります。弾性散乱では、中性子と原子核全体がエネルギーを保存しつつ衝突し、炭素 (^{12}C) や重水素 (^2H) などで多く見られます。一方、非弾性散乱では、中性子の一部のエネルギーが原子核に渡され、原子核が高いエネルギー状態 (励起状態) になります。この場合、運動エネルギーは減少します。特殊な例として、ベリリウム (^9Be) では中性子衝突により2個の中性子を放出する ($n,2n$) 反応が起こることがあります。

中性子が原子核に吸収される場合、原子核は中性子を1つ多く持つ同位体に変化します。捕獲後の同位体は多くの場合放射

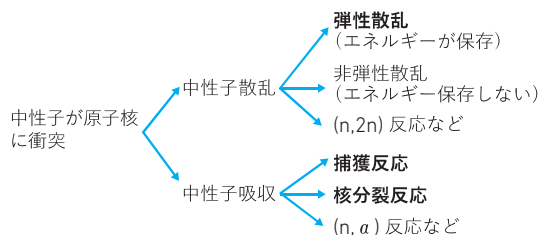
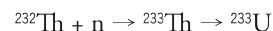


図 1-20 中性子と原子核との衝突後の反応 (黒字は原子炉内で起こる反応を示します)

性を持ち、さらに別の原子核へと崩壊します。例えば、ホウ素 (^{10}B) は (n, α) 反応を起こし、中性子を吸収した ^{10}B がヘリウム (^4He) とリチウム (^7Li) に分裂します。この反応は、 $^{10}\text{B} + n \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Li}$ のように表され、反応前後で陽子数と中性子数は保存されます。

自然界に存在する核種の中で ^{235}U は唯一、エネルギーの低い中性子である熱中性子で核分裂を起こすことができます。 ^{235}U が中性子を吸収すると、核分裂反応を起こし、核分裂生成物に分裂します。一方、天然に存在するトリウム (^{232}Th) や ^{238}U は中性子を捕獲すると、それぞれ ^{233}Th や ^{239}U に変わります。その後、2回の β 崩壊を経て、核分裂性の ^{233}U や ^{239}Pu になります。この一連の反応は以下のように表されます：



中性子は自然環境には存在せず、これらの反応は主に原子炉内で進行します (図 1-21 参照)。

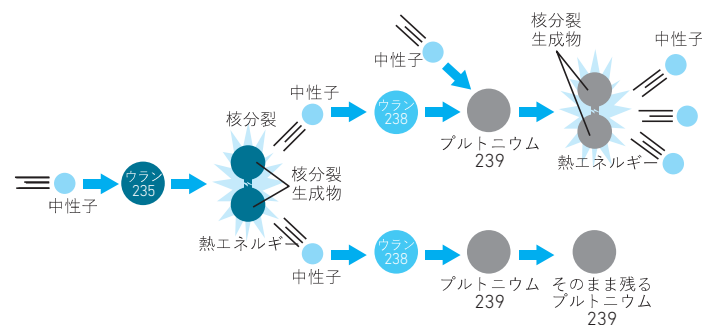


図 1-21 核反応中性子による ^{239}Pu の生成





1-14 原子炉内で中性子を減速させる理由

ウラン原子核 ^{235}U が核分裂すると、光速の約 $1/15$ の速さを持つ高速中性子が放出されます。この高速中性子では次のウラン原子核との核分裂反応の確率が低く、効率よく反応を進めるためには「熱中性子」と呼ばれる低速状態の中性子に減速させる必要があります。具体的には、図 1-22 に示すようにエネルギーを元の $1/10^8$ 程度、速度で約 $1/10^4$ に減少させる必要があります。

中性子が減速するには、原子核との衝突でエネルギーを失う必要があります。相手の原子核が重い場合（例えば、鉛などの重原子核）、中性子が衝突してもほとんどエネルギーを失いません。一方、相手が水素原子核のように中性子とほぼ同じ質量の原子核である場合、中性子が正面衝突すると、その運動エネルギーをほぼ完全に水素原子核に渡し、自身は停止します。ただし、実際には様々な角度で衝突が起こるため、平均的には中性子の速度は衝突ごとに元の速度の約半分に減少します。

減速材としては軽い原子核を含み、中性子を吸収せず反射する性質を持つものが適しています。減速材の密度を考慮すると、液体や固体が望ましいため、水や重水が広く用いられています。水は減速材と冷却材を兼ねるため一般的に用いられますが、H原子が中性子をわずかに吸収するため、重水素を多く含む重水が利用されることもあります。

ヘリウム He も減速効果を持ちますが、気体であるため密度を高めることが難しく、減速材としてはあまり利用されません。一方、黒鉛 C は高温に耐える安定性を持ち、中性子が多い環境でも劣化しにくいいため、高温原子炉で広く使用されています。ただ

し、黒鉛を減速材に使用する場合、中性子を熱中性子まで減速させるには 150 ～ 200 回程度の衝突が必要です（表 1-5）。

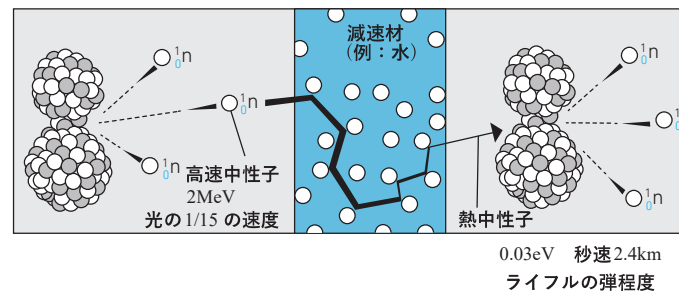


図 1-22 核分裂から放出された中性子の減速

表 1-5 中性子と原子核との衝突回数と初期の何分の一に減速するかの計算例

相手原子核	5	10	20	30	40	50/ 回数
水素 (A=1)	0.031	0.001	1×10^{-6}	~ 0	~ 0	~ 0
重水素 (A=2)	0.131	0.017	0.0003	5×10^{-6}	9×10^{-8}	~ 0
ヘリウム (A=4)	0.328	0.107	0.011	0.0012	0.0001	1.4×10^{-5}
炭素 (A=12)	0.670	0.449	0.202	0.091	0.0407	0.018





1-15 熱中性子と高速中性子の違い

ウランが核分裂した直後に放出される中性子は、前節に示したように、1回の核分裂で平均2.4個の中性子が放出され、合計で約5MeV (1MeV = 100万電子ボルト、1eV = 1.6×10^{-19} J) のエネルギーを持ちます。これにより、1個あたり約2MeVのエネルギーを持ちます。この速度は光速の1/15程度という非常に高速です。放出された高速中性子は、周囲の減速材や構造材と衝突することでエネルギーを失い、周囲の物質の温度を高めながら自身も徐々に減速します。最終的に原子炉の温度と同じ状態になり、「熱中性子」となります。この時点で速度は初速の1/9,000にまで減少し、約2,200m/sと見積もられます。安定化した後も、中性子は周囲の物質と熱のやり取りを行いながら、特定のエネルギー分布を持つことになります (図1-23)。

原子の大きさや電子軌道の広がりをピコメートル ($1\text{pm} = 10^{-12}\text{m}$) 単位で比較すると、原子の大きさはおよそ100pm程度であるのに対し、原子核の大きさは0.01pm程度しかありません。このように、直径で約10,000倍もの大きさの違いがあるため、一見すると、中性子が原子の電子雲を通過して原子核に衝突し、核反応を引き起こす確率は非常に低いように思えます。しかし、図1-24および図1-16に示されるように、微視的な世界では量子力学的な性質が重要になります。

粒子が運動する際、運動量 (速度) に反比例して波長が短くなります。この波長の変化により、粒子の性質と波の性質が同時に現れることになります。中性子のエネルギーが低くなるにつれて波長は長くなり、その結果、原子核全体や原子全体との相互作用

が増大します。これにより、熱中性子状態では核反応が効率的に進むことが可能になります。この現象は量子論の独特な考え方であり、高速中性子が熱中性子に減速する過程で、原子炉内の核反応を促進する重要な要因となっています。

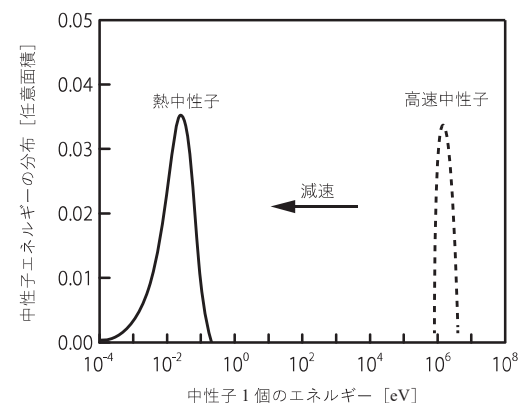


図1-23 熱中性子と高速中性子 (面積を規格化して表しています)

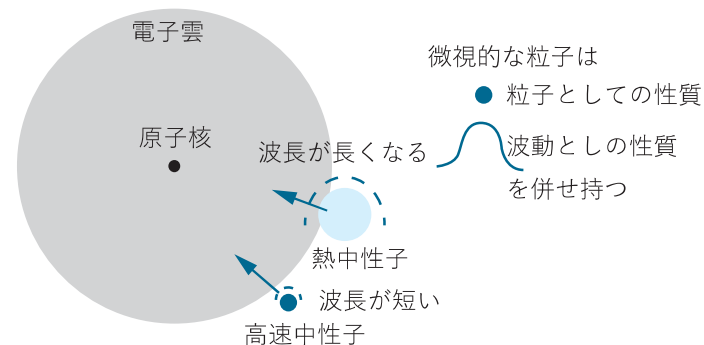


図1-24 中性子と原子核との相互作用の速度による違い





1-16 核分裂の連鎖反応と核反応により発生する熱の大きさ

ウラン核分裂反応では、大量のエネルギーが発生します。このエネルギーは、核分裂生成物や中性子の運動エネルギー、核分裂と同時に発生する γ 線や β 線に分配されます。その具体的なエネルギー分配については表1-6にまとめられています。エネルギーは非常に大きな値となるため、粒子1個や放射線1個あたりのエネルギーをMeV単位（1MeV = 100万電子ボルト）で表すほか、放射線がアボガドロ数（ 6.022×10^{23} 個）発生する場合の総エネルギーをTJ/mol（テラジュール毎モル）単位で示しています。参考として、空気1分子を解離するのに必要なエネルギーは約34eVであり、1MeVのエネルギーを持つ放射線は空気分子約29,000個を解離できる力を持ちます。

核分裂反応は以下のようにいくつかの過程に分かれます。最初に、ウラン-235の原子核がM1とM2という2つの核分裂生成物

図1-6 核分裂エネルギーの分配

エネルギー放出形	MeV 単位 ^{*1)}	TJ/mol 単位 ^{*2)}
核分裂生成物運動エネルギー	~169 MeV	~16.3 TJ/mol
即発中性子運動エネルギー	~5 MeV	~0.48 TJ/mol
即発 γ 線エネルギー	~7 MeV	~0.67 TJ/mol
遅発 β 線エネルギー	~7 MeV	~0.67 TJ/mol
遅発 γ 線エネルギー	~6 MeV	~0.58 TJ/mol
ニュートリノ（中性微子）	~9 MeV	~0.87 TJ/mol
合計 （ニュートリノ以外）	203 MeV (194 MeV)	19.6 TJ/mol (18.7 TJ/mol)

^{*1)}: MeV=1.602x10⁻¹³J の換算式によってエネルギー換算します。

^{*2)}:1TJ(テラジュール) は 1x10¹²J を意味します。

と2～3個の中性子に分裂します。この即発中性子と同時に γ 線や β 線も放出されます。また、核分裂生成物（M1またはM2）から数秒以内に放出される「遅発中性子」や「遅発 β 線」「遅発 γ 線」も重要です。遅発中性子は、核分裂後0.1秒から最大55秒以内に発生し、全体の0.65%程度とごくわずかですが、核分裂反応の制御に重要な役割を果たします。一方、遅発 β 線や遅発 γ 線は、核分裂が終了してから数時間から数年の長い期間にわたり継続して発生します。

即発中性子と遅発中性子を合わせると、1回の核分裂で発生する中性子の数は平均して2.4個となります。このように小数点がつくのは、2個の場合と3個の場合が混在しているためであり、実際には1回の核分裂で放出される中性子の数は整数（2個または3個）です。これらの中性子のうち、次の核分裂に使用されるのはちょうど1個で、残りの中性子は他の原子核に吸収されるか、原子炉外へ漏れてしまいます。この「ちょうど1個が次の核分裂を引き起こす」という状態が「**臨界状態**」と呼ばれるものであり、この状態が保たれることで核反応が継続して進行します。（図1-25）

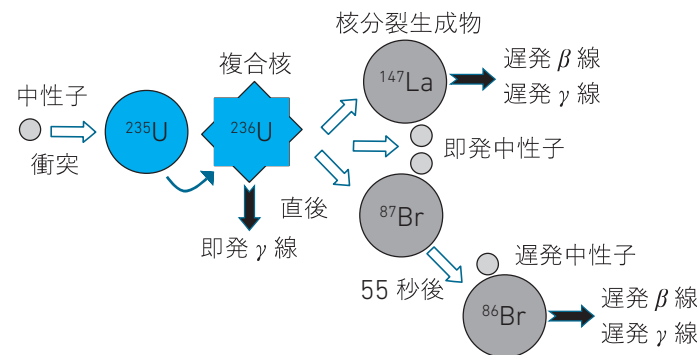


図1-25 核分裂反応と即発中性子、即発 γ 線、遅発中性子、遅発 β 線、遅発 γ 線の発生の様子





1-17 化石燃料の燃焼との発熱量の 大きさの違い

核分裂反応では非常に大きな発熱が生じます。この発熱量を他の反応で発生する熱量と比較してみます。前節で求めたように、ウラン ^{235}U の核分裂による熱量は、ニュートリノによる損失分を除いた発電可能なエネルギーとして、1核分裂あたり 194MeV ($1\text{MeV} = 100\text{万電子ボルト}$)です。この値をアボガドロ数 (6.022×10^{23} 個) の ^{235}U が核分裂する場合に換算すると、 $1.96 \times 10^{13} \text{ J/mol-}^{235}\text{U}$ となります。しかし、天然ウランは ^{235}U をわずか0.72%しか含まないため、天然ウラン1モルあたりの発熱量は $1.41 \times 10^{11} \text{ J/mol-天然ウラン}$ に減少します。

一方、金属ウランが大気中酸素と化学反応を起こして八酸化三ウラン (U_3O_8) に変わる際の反応熱は、 $1.19 \times 10^6 \text{ J/mol}$ です。核分裂による反応熱と比較すると、その比は約12万倍に達し、核分裂反応の発熱がいかに高エネルギーであるかがわかります。

また、化石燃料と比較すると、石炭を燃焼させた場合の燃焼反応熱は 394 kJ/mol であり、炭素1gあたりの発熱量は 32.8 kJ/g です。一方、ウラン核分裂では同じ1gあたり約18,000倍の発熱量を示します。図1-27には、大型発電所（発電量1GWe、熱効率33%）で運転した際のウラン核燃料と石炭、石油、天然ガスの燃料消費量の比較が示されています。

原子力発電と火力発電の仕組みは、加熱部分に違いがあるものの、冷却水を蒸気に変え、蒸気でタービンを回して発電し、復水器で再び水に戻す点は共通しています。火力発電ではボイラーを使用し、原子力発電では炉心とその役割を果たします。この基本的な発電システムは、十分に経験のある技術であり、図1-26が

火力発電の蒸気循環システムです。

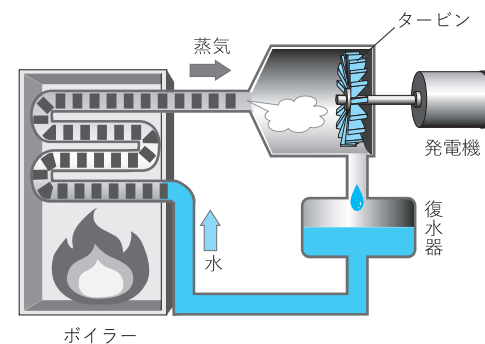
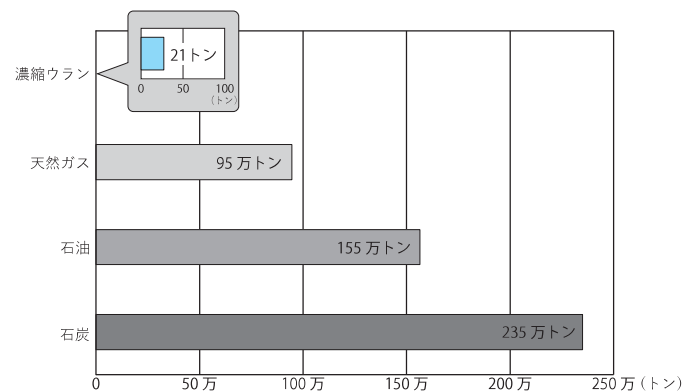


図 1-26 火力発電システム

100 万 kW の発電所を 1 年間運転するために必要な燃料



出典：資源エネルギー庁「原子力 2010」より作成

図 1-27 核分裂炉と化石燃料火力発電所の燃料消費量の違い





1-18 原子炉中の中性子の動きと臨界とは何か

核分裂物質をエネルギー生産に利用するためには、以下の条件を満たす必要があります。

- (1) 中性子を捕獲した後、高確率で核分裂反応を起こすこと
- (2) 核反応で発生した中性子が連鎖反応を引き起こすこと
- (3) 結合エネルギーが放出され、核分裂により十分な発熱が得られること
- (4) 半減期が長く、取り扱いが可能であること
- (5) 地球上に十分な天然資源として存在すること

条件(5)を除くと、核分裂の可能性のある核種として、 ^{232}Th 、 ^{233}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Np 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{244}Cm などが挙げられます。これらの核種について、天然存在率、質量欠損、中性子吸収後の複合核からの核反応のしきいエネルギーは表1-7です。天然に存在し、核分裂の可能性のある核種は ^{232}Th 、 ^{235}U 、 ^{238}U ですが、 ^{232}Th と ^{238}U は通常の熱中性子炉では核分裂を起こさず、高速増殖炉のような特別な炉でのみ核分裂します。そのため、現在利用可能な核種は ^{235}U です。また、 ^{232}Th と ^{238}U を利用して ^{233}U と ^{239}Pu を生成すれば、新たに核分裂炉での利用が可能となります。

^{235}U は天然存在率がわずか0.72%であるため、軽水炉で使用する場合は核反応の確率を上げるために3～5%に濃縮して燃料とします。このように、上記の5つの条件をすべて満たす核種は ^{235}U のみです。一方、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu 、 ^{233}U は熱中性子で核分裂しますが、(5)の条件を満たさず、人工的に生成する必要があります。

^{235}U の中性子連鎖反応は、臨界状態で次のように進みます。

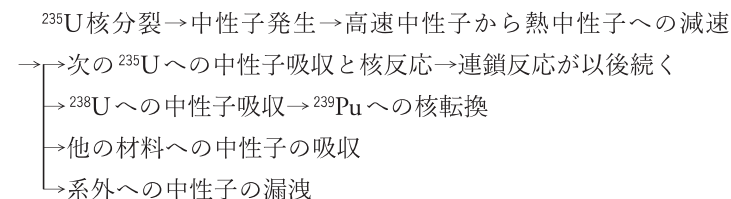


表 1-7 複合核の結合と臨界エネルギー、核反応のしきいエネルギー

核種	天然存在率	中性子吸収後の複合核	核反応臨界エネルギー	中性子結合エネルギー	中性子しきいエネルギー*
トリウム ^{232}Th	100%	^{233}Th	6.5MeV	5.1MeV	1.4MeV
ウラン ^{233}U	0	^{234}U	4.6MeV	6.6MeV	0
ウラン ^{235}U	0.72%	^{236}U	5.3MeV	6.4MeV	0
ウラン ^{238}U	99.28%	^{239}U	5.5MeV	4.9MeV	0.6MeV
プルトニウム ^{239}Pu	0	^{240}Pu	4.0MeV	6.4MeV	0

*(中性子しきいエネルギー)は核分裂が起こるエネルギーで、(核反応臨界エネルギー)－(中性子結合エネルギー)の関係から求めます。値が負であれば、しきいエネルギーは0となります。





1-19 原子炉内で中性子増倍率を1に制御するには

核分裂反応では、最初の核分裂から次の核分裂連鎖反応までに中性子数が増加します。この変化は、燃料の ^{235}U 濃縮度、減速材や冷却材、構造材、炉の形状などに依存します。核分裂で発生した中性子のうち、ちょうど1個が次の ^{235}U 原子核に衝突して核分裂を引き起こし、連鎖反応が進みますが、残りの中性子は減速途中で構造材に吸収されたり外部へ漏れたりします。中性子連鎖反応を適切に制御し、次の核分裂に必要な中性子数を1個に保つ状態が「臨界状態」です。

臨界状態の指標として「中性子増倍率 k 」が使われます。この増倍率は、ある世代で発生した中性子数を直前の世代で発生した中性子数で割った値です。増倍率が1のグラフ、原子炉は安定した臨界状態にあります。一方、1より大きければ中性子数が増加し、1より小さければ減少していきます。(図1-28)

燃料中の ^{235}U が消費されるにつれて濃縮度が低下し、増倍率が変化します。この変化を補うため、制御棒を挿入して中性子を吸収し、臨界

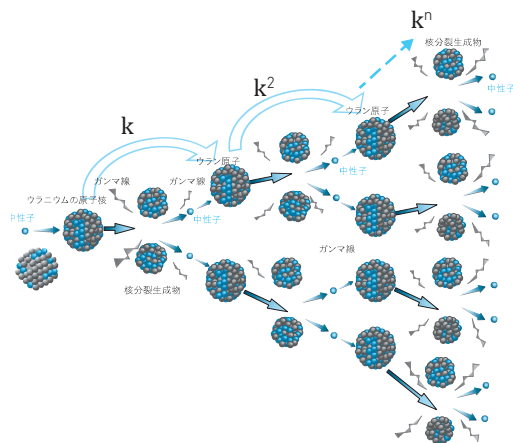


図 1-28 連鎖反応の進行

状態を維持します。中性子は原子炉内で発生、散乱、減速、吸収を繰り返し、やがて熱平衡状態に達します。この中性子の分布や運動を「中性子束」で表します。

中性子には即発中性子と遅発中性子の2種類があり、即発中性子は非常に短時間で減速します。一方、遅発中性子は核分裂生成物の崩壊によって数秒から数十秒かけて発生します。この遅発中性子の存在により、中性子寿命が延び、制御棒を操作して原子炉を安定に制御する余裕が生まれます。(図1-29) この仕組みにより、原子炉は核爆弾のような暴走を防ぎ、安全に制御可能となっています。

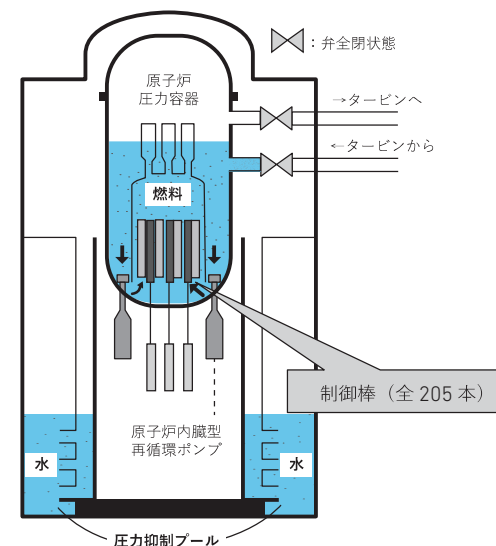


図 1-29 原子炉への制御棒の挿入方法





1-20 反応度を使った核分裂反応の制御

原子炉では中性子増倍率を1に制御することが基本ですが、これをより正確に表現するために「**反応度**」という指標が使われます。反応度は、実際の中性子増倍率を基に、臨界条件からのずれを数値で示します。この計算には、原子炉炉心からの中性子漏れを考慮した「有効中性子増倍率」が使用されます。

反応度がゼロであれば臨界状態で、核分裂反応が安定して進行します。一方、反応度が負の値であれば臨界未満で出力が減少し、正の値であれば臨界を超えて出力が増加します。例えば、反応度がわずかに正（0.01）になれば、原子炉は臨界を超えて加速し始めるため、非常に慎重な制御が必要です。

現代の原子炉では、即発中性子だけで反応が進む「即発臨界」を防ぐことが必須条件です。即発臨界は反応が制御不能になる危険な状態であり、通常運転中や緊急時にもこの状態に達しない設計が求められます。反応度の単位は「ドル」と呼ばれ、1ドルが即発臨界を表します。原子炉の出力は、通常数セントの反応度を操作することで調整されます。

さらに、原子炉には温度変化に応じた自己制御機能が備わっています。燃料温度が上昇すると膨張により密度が低下し、自然に反応度が減少する「反応度温度係数」が働きます。加えて、燃料温度上昇時に燃料原子の熱振動が中性子吸収を促進する「ドップラー効果」、冷却水の沸騰で中性子減速効果が減少する「ボイド係数」も反応度を低下させる重要な役割を果たします。これらの効果により、温度上昇が過剰にならないよう自動的に反応が抑制され、原子炉の安全性が確保されています。（図1-30, 図1-31）

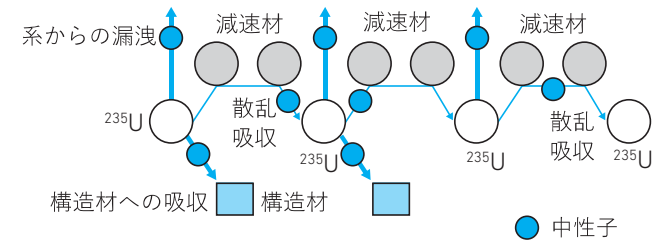


図 1-30 中性子の減速過程と散乱吸収過程

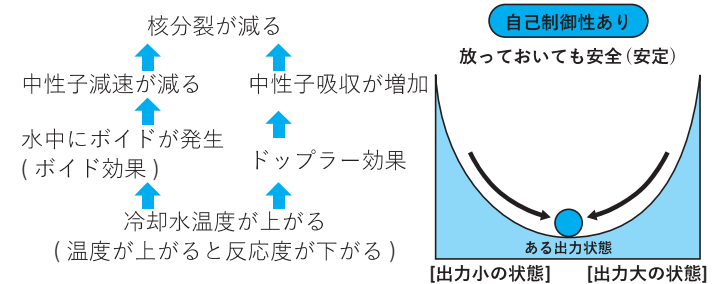


図 1-31 原子炉の自律的な制御の仕組み





1-21 水冷却核分裂原子炉の構成

加圧水型炉（PWR）は軽水炉の代表的なタイプであり、その発電システムは核燃料、減速材、冷却材、制御材、反射材、遮蔽材、冷却水循環系などで構成されています（図1-32）。核燃料には、核分裂効率を高めるために天然ウラン ^{235}U （濃度0.72%）を3～5%に濃縮した低濃縮ウラン酸化物（ UO_2 ）が使用されます。一方、重水炉（HWR）や炭酸ガス冷却炉（GCR）では、中性子吸収が少ない減速材を使用するため、濃縮を必要としない天然ウランが用いられることもあります。また、 ^{235}U や ^{239}Pu は核燃料物質と呼ばれる一方、 ^{238}U や ^{232}Th は中性子を吸収して ^{239}Pu や ^{233}U に変換されるため、核燃料親物質と呼ばれます。核燃料は被覆管に封入され、核分裂生成物を閉じ込める役割を果たします。

核分裂直後の中性子は高速であり、そのままでは効率的に核反応を起こせません。そのため、水が減速材として用いられ、中性子を衝突させて減速させることで核分裂確率を高めます。また、水は冷却材としても機能し、PWRでは1次冷却材が炉心から核熱を回収し、2次冷却材で蒸気を発生させて発電します。一方、沸騰水型炉（BWR）は1次冷却材を直接蒸気としてタービンに送り、発電に利用します。

中性子吸収能力の高いボロン化合物、ハフニウム、カドミウムが制御材として使用され、中性子束を調整して臨界状態を維持します。さらに、冷却材やグラファイトが反射材として用いられ、中性子の漏洩を防ぎ効率を向上させます。遮蔽材にはコンクリートや金属が使用され、放射線の漏洩を防ぎます。冷却水循環系では冷却材を高圧に保つ必要があり、PWRでは140気圧、BWRで

は70気圧に維持されます。これにより、安全で効率的な発電が可能になります。

加圧水型炉（PWR）原子力発電のしくみ

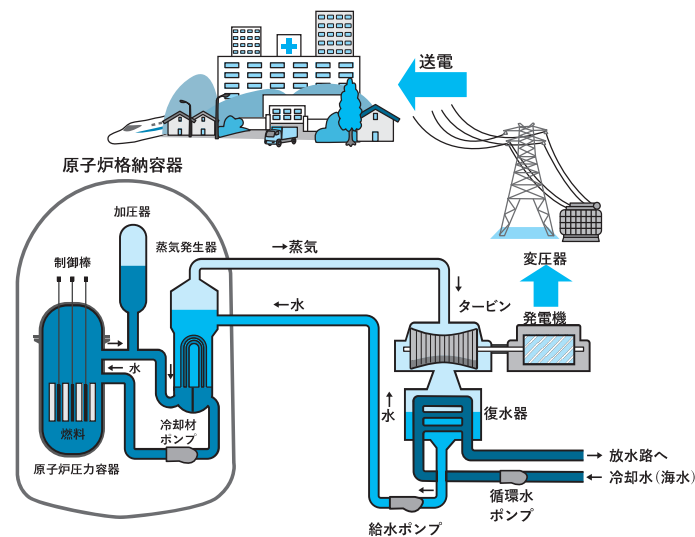


図1-32 軽水炉（PWR）の発電システム





1-22 軽水炉を含めた原子炉全般の 世界の運転状況

現在世界で稼働している原子炉のタイプを区分すると、2023年の世界原子力機構によるデータブックから表1-8のようにまとめられます。表に挙げた主要タイプ原子炉の使用材料を表1-9で比較しています。PWRとBWRは日本の主要発電原子炉であり、基本的な水の冷却システム、燃料、制御棒の配置は図1-33です。高温ガス炉（HTR）と高速増殖炉（FBR）の内容は5章で説明します。重水炉（HWR）はカナダが設計した天然ウラン燃料を使う原子炉であり、ガス炉（GCR）はイギリスにより設計され、日本で最初に稼働した原子炉です。しかし、その後改良され、改良型ガス炉（AGR）のみが現在運転されています。

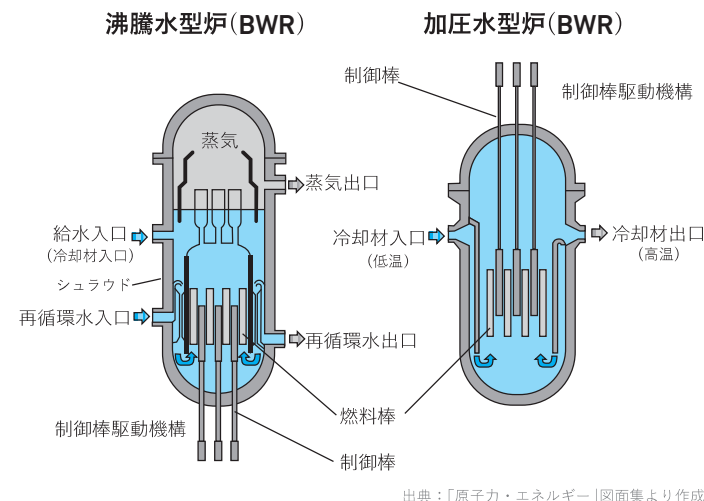
表 1-8 世界で運転中（休止中も含めて）の発電用原子炉の台数（2023 年現在）

原子炉の型式	台数	発電量
加圧水型熱中性子炉 (PWR)	302	287GWe
沸騰水型熱中性子炉 (BWR)	63	64.1GWe
重水減速熱中性子炉 (HWR)	49	24.5GWe
改良型ガス冷却炉 (GCR, AGR)	14	7.7GWe
黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉 (LWGR, ロシア RBMK)(ロシアでのみ稼働)	12	8.4GWe
高速増殖炉 (FBR)	2	1.4GWe
計	442	393GWe

表 1-9 原子炉で用いられる減速材と冷却材の使用材料

炉型式	核分裂性物質	核燃料親物質	減速材	冷却材分子	被覆材
PWR	低濃縮ウラン ($^{235}\text{UO}_2$)	$^{238}\text{UO}_2$	H_2O	H_2O (液体)	ジルカロイ合金
BWR	低濃縮ウラン ($^{235}\text{UO}_2$)	$^{238}\text{UO}_2$	H_2O	H_2O (蒸気 + 液)	ジルカロイ合金
HWR	天然ウラン ($^{235}\text{UO}_2$)	$^{238}\text{UO}_2$	D_2O	H_2O	ジルカロイ合金
HTR	低濃縮ウラン ($^{235}\text{UO}_2$)	$^{238}\text{UO}_2$	C	He	三重被覆燃料
GCR	天然ウラン (金属 U)	^{238}U	C	CO_2	マグノックス合金
FBR	天然ウラン Pu 酸化物	$^{238}\text{UO}_2$	なし	Na	ステンレス鋼

PWR: 加圧水型、BWR: 沸騰水型、HWR: 重水炉、HTR: 高温ガス炉、GCR: 炭酸ガス冷却炉、FBR: 高速増殖炉



出典：「原子力・エネルギー」図面集より作成

図 1-33 BWR(左)とPWR(右)の炉心燃料、冷却材、制御棒配置の違い

