

第 1 章 原子炉の物理

内容

第1章 原子炉の物理.....	1
1.1 原子炉とは	3
1.2 原子炉で生じる主要な物理現象.....	5
1.2.1 核的現象	5
1.2.2 熱水力的現象.....	5
1.2.3 化学的現象	6
1.2.4 機械的現象	6
1.2.5 材料的現象	6
1.3 原子炉の物理とは.....	7
1.4 本教科書の構成	7

【この章のポイント】

- ・ 原子炉の内部では、核分裂に代表される核反応のみならず、様々な物理現象が発生している。
- ・ 原子炉の物理は、核分裂反応などの原子核反応を中心として、原子炉で生じる物理現象を扱う学問分野である。
- ・ 核分裂連鎖反応の制御は、原子力安全の基本であり、従って原子炉の物理は、原子力安全の重要な基盤を担う。

1.1 原子炉とは

【この節のポイント】

- ・ 原子炉は、①核燃料物質を燃料として使用する装置で、②核分裂の連鎖反応を制御することができ、③中性子源を用いることなくその反応の平衡状態を維持できるものである。

そもそも、**原子炉 (nuclear reactor)** が原子炉であるための必須の要件は何であろうか？これは、一見簡単な問いに見えるが、実は奥が深い。この問いに対して根拠を持って答えることが出来れば、それだけで原子炉の物理の基礎の基礎は習得できていると言えるぐらいである。核燃料を使用していること？核分裂が連鎖的に発生していること？中性子が飛び交っていること？発電していること？放射線を出すこと？

日本における原子力の法体系における最上位の**原子力基本法 (Atomic Energy Basic Act)**において、「原子炉」は以下の様に定義されている。

『「原子炉」とは、核燃料物質を燃料として使用する装置をいう。ただし、政令で定めるものを除く。』

これから、原子炉が核燃料物質を使用する装置であることは必要な要件の一つであることが分かる。この文中の政令は「核燃料物質、核原料物質、原子炉及び放射線の定義に関する政令」を指しており、この政令を見ると、以下の文章が記載されている。

『原子力基本法第三条第四号ただし書の政令で定めるものは、原子核分裂の連鎖反応を制御することができ、かつ、その反応の平衡状態を中性子源を用いることなく持続することができ、又は持続するおそれのある装置以外のものとする。』

原子力基本法からたどっていくと、二重否定の構造になっており、非常に分かりにくいのが、結局のところ、法律では以下の三要件を満たすものを原子炉と定義していることになる。

- ・ 核燃料物質を燃料として使用する
- ・ 核分裂の連鎖反応を制御することができる
- ・ 核分裂の連鎖反応の平衡状態を、中性子源なしに持続可能、あるいは持続の可能性のある

一番目の要件は、一般的な認識と合致するであろう。すなわち、ウランやプルトニウムと

いった**核燃料 (nuclear fuel)** を使用している、ということである。

二番目の要件は、原子炉の物理に深く関係する。二番目の要件では、原子炉が原子炉であるためには、**核分裂 (nuclear fission) の連鎖反応 (chain reaction)** を制御可能であることが示されている。言い換えると、制御しない (制御できない) 形で核分裂の連鎖反応を使用する装置は、原子炉とは呼べないということである。

三番目の要件は、「**臨界 (critical)**」になるもののみが原子炉といえる、ということを示している。核分裂が発生しうる物質があれば、それが少量であったとしても、核分裂の連鎖反応はある確率で発生する。ただし、この場合、連鎖反応が永久に継続することはなく、途中で停止する。しかし、中性子源からの中性子の供給があれば、供給された中性子を起点とした連鎖反応が次々に起こり続けるため、見かけ上、核分裂の連鎖反応を「平衡状態」に維持することが可能になる。外部から中性子源を新たに供給するという形でしか連鎖反応を維持できない装置は原子炉とは呼べない、ということである。近年、加速器を用いて中性子を発生させ、その中性子を未臨界状態の炉に打ち込んで運転を行う「加速器駆動未臨界炉」が提案されている。この施設が、「核分裂の連鎖反応の平衡状態を中性子源なしに持続できない」ということであれば、これは原子炉とは異なった「未臨界炉」という位置づけになる。

【コラム】原子力基本法

原子力関係の法律は、原子力関係の専攻における講義、あるいは、原子炉主任技術者や核燃料取扱主任者などの勉強でしか接する機会がないかもしれない。しかしながら、特に原子力基本法は、広く原子力に関係する人が知っておくべき事項が書かれている。以下に、原子力基本法第三条までを引用する。この機会に読み返しておこう。

第一章 総則

(目的)

第一条 この法律は、原子力の研究、開発及び利用 (以下「原子力利用」という。) を推進することによつて、将来におけるエネルギー資源を確保し、学術の進歩と産業の振興とを図り、もつて人類社会の福祉と国民生活の水準向上とに寄与することを目的とする。

(基本方針)

第二条 原子力利用は、平和の目的に限り、安全の確保を旨として、民主的な運営の下に、自主的にこれを行うものとし、その成果を公開し、進んで国際協力に資するものとする。

2 前項の安全の確保については、確立された国際的な基準を踏まえ、国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに我が国の安全保障に資することを目的として、行うものとする。

(定義)

第三条 この法律において次に掲げる用語は、次の定義に従うものとする。

一 「原子力」とは、原子核変換の過程において原子核から放出されるすべての種類のエネルギーをいう。

- 二 「核燃料物質」とは、ウラン、トリウム等原子核分裂の過程において高エネルギーを放出する物質であつて、政令で定めるものをいう。
- 三 「核原料物質」とは、ウラン鉱、トリウム鉱その他核燃料物質の原料となる物質であつて、政令で定めるものをいう。
- 四 「原子炉」とは、核燃料物質を燃料として使用する装置をいう。ただし、政令で定めるものを除く。
- 五 「放射線」とは、電磁波又は粒子線のうち、直接又は間接に空気を電離する能力をもつもので、政令で定めるものをいう。

1.2 原子炉で生じる主要な物理現象

原子炉内部では、中性子と原子核との相互作用（原子核反応）をはじめとする、様々な物理現象が生じる。世の中には様々な工学システムがあるが、原子炉ほど多種多様な物理現象が生じるシステムはまれであろう。

原子炉の物理は、中性子と原子核の反応を中心に扱うが、原子核反応、例えば原子炉の炉心における核分裂の起こりやすさ、中性子の吸収のされやすさなどは、原子炉内で生じる様々な物理現象の影響を受ける。なぜならば、これらの物理現象により温度、幾何形状及び物質組成が変化するためである。そのため、原子炉の物理では原子炉で生じる種々の物理現象を考慮しなければならない。第12章において、様々な物理現象の相互作用について説明するが、以下では、その概要を示す。

1.2.1 核的現象

原子炉における中核的な物理現象は、中性子がウランなどの重たい原子核と衝突する際にある割合で発生する**核分裂反応 (nuclear fission reaction)**とそれから発生する中性子と原子核の**核反応 (nuclear reaction)**である。また、核分裂反応をはじめとした中性子と原子核の反応により発生した新たな原子核は不安定なものも多く、時間とともに他の原子核に変化(**崩壊 (decay)**)する特徴がある。この際、様々な種類の**放射線 (radiation)**を放出する。本教科書の第2章以降では、主として核的現象に関する説明を行うが、核的現象に及ぼす様々な物理現象も併せて紹介する。

1.2.2 熱水力的現象

原子炉における主要な発熱源は、核分裂反応そのものからの発熱及び核分裂で発生した放射性物質から放出される放射線が周囲の物質に吸収されることで発生する**崩壊熱 (decay heat)**である。原子炉においては、発熱は主として核燃料で発生し、発生した熱エネルギーは被覆管を通じて冷却材に伝達される。冷却材は炉心内を循環し、温度上昇とそれに伴う密度減少、沸騰、炉心部材の振動（流体振動）など、熱の授受と流れに起因する様々な物理現象を発生させる。

また、事故時において、炉心の冷却が不十分になった場合は、核燃料や被覆管が非常に高温になり、熔融などの相変化が生じる。

これらの熱水力的現象は、物質の温度や密度の変化を通じて、原子炉で生じる中性子と原子核の反応に影響を与える。

1.2.3 化学的現象

原子炉内には核燃料・制御棒・炉心を形成する構造材といった種々の物質が存在し、一般的に高温高压で強放射線場でもある。そのため、複雑な化学反応が促進されやすい環境となっている。核分裂反応で生成する物質の一部は、腐食性を示すものがある。また、水を冷却材として使用している場合には、高温の被覆管が水と反応して腐食や酸化が発生する可能性がある。このため、被覆管における化学反応は、被覆管の健全性の観点から非常に重要である。

また、水を冷却材として使用している原子炉では、水に含まれる微量の不純物が被覆管に析出し、水垢（クラッド、crud）と呼ばれる皮膜が生成されることがある。この皮膜は、被覆管の伝熱性能を低下させるとともに、被覆管の寿命に影響を及ぼす。また、この皮膜内には中性子を吸収する物質が含まれていることがあり、原子炉の核的な振る舞いに影響を与えることがある。

事故時に炉心が冷却できなくなると、燃料及び被覆管が非常に高温になる。軽水炉で使用されているジルコニウム合金製の被覆管は、高温になると水蒸気と反応し、酸化ジルコニウムを生じ、水素を放出する。このジルコニウム-水反応は発熱を伴う化学反応であり、炉心が大きく損傷・溶融する過酷事故において重要となる。また、発生した水素は、原子炉の安全性に大きな脅威となり得る。

1.2.4 機械的現象

原子炉の温度と圧力は室温大気圧から運転時の高温高压、さらに事故条件まで広い範囲で変化する。温度が変化すると物質は膨張し、幾何形状が変化する。この幾何形状の変化や圧力の変化のため、原子炉を構成する材料に様々な力（応力）が生じる。この機械的な力は、被覆管を破損させる要因となり得る。また、燃料などの幾何形状や冷却材の圧力変化は、核的な反応に影響を与える。

燃料ペレット内で発生する核分裂で生成する物質には、ある割合で希ガスや高温で揮発しやすいものが含まれており、これらがペレットから放出されることにより、被覆管の内圧を増加させることが知られている。

1.2.5 材料的現象

原子炉内は、中性子をはじめとする放射線が飛び交っており、原子炉内の材料はこれらの放射線にさらされる。特に、原子炉を構成する材料が中性子にさらされると、様々な材料的な変化を引き起こすことに留意しなければならない。

軽水炉の被覆管は、ジルコニウムの合金でできているが、ジルコニウム合金は、中性子の照射を受けると、長さが伸びることが知られている。つまり中性子線の照射により、被覆管

が「成長する」のである。これは照射成長と呼ばれている。この照射成長により、燃料棒を束ねた燃料集合体が曲がることもあり、これは原子炉の性能に影響を与える。

動力用軽水炉の原子炉容器は鉄鋼(低炭素鋼)できているが、中性子の照射を受けると、硬く脆くなる性質がある。そのため、原子炉容器にどの程度中性子があつたのかを評価することが行われる。

1.3 原子炉の物理とは

1.2節で述べたように、原子炉においては様々な物理現象が生じる。**原子炉の物理 (physics of reactors)** においては、核分裂反応を中核とする中性子と原子核の反応を中心として、この反応に影響を与える様々な物理現象を取り扱う。

従来の「**原子炉物理**」は「**reactor physics**」と表記され、主として原子炉内で生じる中性子の挙動と原子核との反応を予測する学問体系である。これに対し、原子炉の物理は **Physics of reactors** であり、原子核反応を中核としつつ原子炉で発生している物理を幅広く取り扱う。

福島第一原子力発電所事故は、社会に深刻な影響を与え、その影響は今なお甚大である。原子炉物理は中性子と原子核の反応を扱っていることから、原子炉の緊急停止(スクラム)が成功することで原子炉物理のミッションは果たされたと考える向きもあるかもしれないが、それだけでは不十分であろう。原子力安全との関連を考えたとき、「中性子と原子核の反応」のみに着目するだけでは全く不十分であり、安全確保のためには、原子炉内で生じる物理現象を幅広く理解することが肝要である。

本教科書は、このような反省の上に立ち、従来の原子炉物理を包絡する形で、「原子炉の物理」について、特に発生している現象を理解することを目的にしてまとめられたものである。

なお、本教科書では、物理現象そのものの解説に注力し、原子炉の特性を予測するためのモデル化と解析方法については取り扱わない。

1.4 本教科書の構成

第1章では、原子炉の物理を概説するとともに各章の概要を示す。

第2章では、原子炉の物理に関連する原子力開発の歴史を振り返り、原子炉の物理の歴史的背景を述べる。これは、現在の原子炉技術の体系を理解するための情報として重要である。

第3章では、中性子と原子核の反応を理解するため、原子核反応の基礎となる原子核物理の概要を説明する。

第4章では、中性子と原子核の反応の起こりやすさを表す指標として「断面積」という考え方を説明するとともに、中性子と原子核との種々の反応について述べる。

第5章では、核分裂エネルギー発生の中核である核分裂反応とその連鎖反応について説明する。また、核分裂で発生した放射性物質から放出される放射線が源となる崩壊熱について説明する。

第6章では、原子炉を原子炉たらしめる概念の一つである臨界について説明する。また、原子炉における中性子の増加率・減少率を代表するパラメータとして、増倍率という概念を説明する。

第7章では、原子炉の物理における主役である中性子に焦点を当て、発生から消滅までその一生を説明する。

第8章では、原子炉の運転とともに核燃料の組成が変化する燃焼について説明する。原子炉内で核燃料と酸素が結合するいわゆる燃焼反応は発生しないが、核分裂反応により熱を発生させるプロセスを燃焼反応になぞらえている。

第9章では、秒～分程度の短い時間における原子炉の動的な振る舞いについて説明する。原子炉からの制御棒の引き抜き・挿入に伴う原子炉の出力の変化など、安全上重要な項目となる。

第10章では、代表的な原子力プラントとして、加圧水型軽水炉と沸騰水型軽水炉の概要を説明する。

第11章では、核燃料で発生した熱がどのように輸送され、発電などの用途に利用されるか、また発電プラントを運転することによって燃料ペレットや被覆管で起こる事象について説明する。

第12章では、原子炉内で発生している様々な物理現象間の相互作用について説明する。

第13章では、原子炉の物理の基礎データ取得に用いる極低出力の原子炉（臨界集合体）について説明を行う。

第14章では、原子炉のうち、材料の照射などに使用する様々なタイプの試験研究炉について説明する。

第15章では、原子力プラントの安全確保に必要な基本的な考え方及び原子炉の物理と原子力安全の考え方の関係を説明する。

第16章では、核燃料施設における安全確保、特に臨界安全についての基本的な考え方を説明する。