

新学習指導要領に基づく高等学校教科書の

エネルギー・環境・原子力・放射線関連記述

に関する調査と提言

－地理歴史，公民，理科および工業の調査－

令和 5 年 8 月

一般社団法人 日本原子力学会
教育委員会

目 次

第1章 調査の概要	1
1. 調査の目的	1
2. 本報告書の概要	3
3. 調査した教科書	3
第2章 教科書記述への提言	5
1. 全般的な要望	5
2. 教科書記述への8項目の提言	5
3. 提言内容の解説	9
第3章 教科書の記述とコメント・修正文の例	41
第4章 調査の記録	205
1. 会議等開催記録	205
2. 教科書調査担当者および教育委員会委員	205
3. これまでに公表した報告書	207

第1章 調査の概要

2011（平成23）年3月11日に発生した東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故から早くも12年が過ぎました。帰還環境の整備により避難指示の解除が進み、福島県土に占める避難指示等区域の面積は約2.3%へ縮小したものの、復興への道筋は容易ではありません。（一社）日本原子力学会（以下、原子力学会）は事故により生業の中断や避難を強いられるなど被害を受けられた皆様に改めて心からお見舞いを申し上げますとともに、被災地の復興が順調に進展することをお祈りいたします。

1. 調査の目的

日本原子力学会教育委員会（以下、教育委員会）は、学会員の教育に関する調査・支援を行っており、その中に初等中等教育小委員会があります。同小委員会では、初等・中等教育の教科書におけるエネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述について、さらなる充実を図っていただくことを目的として、初等・中等教科書調査ワーキンググループを設置して、教科書の調査を行い、具体的な要望と提言を報告書としてまとめて公表してきました。

この活動は1995（平成7）年から現在まで約27年間にわたり、これまでに17冊の報告書を公表し、文部科学省をはじめ各教科書出版会社、（一社）教科書協会、教育界・学界などの関係各方面に提出しています。関係者がこれらの提言を評価され、教科書の編集に際して検討・反映いただくことなどにより、近年分かり易くかつ専門的な表現にも配慮された記述が増えてきたことが窺えます。原子力学会のこのような活動が、社会に貢献できたことを大きな喜びとするものです。

2018（平成30）年3月に高等学校学習指導要領（以下、学習指導要領）が改訂されました。令和4年度から高等学校で使用されている教科書は、この新学習指導要領に基づいて編集され、2019（令和元）年から2020（令和2）年にかけて検定を受け、全国自治体の各教育委員会が採択を決めたものです。表1-1に小・中・高等学校教科書の検定・採択の周期を示します。

教科書では、放射線の性質と利用、エネルギー資源としての原子力エネルギーの利用などのほか、東京電力福島第一原子力発電所事故も取り上げています。そこで、これらの教科書における放射線の性質と利用、世界各国および我が国のエネルギー資源、エネルギー、原子力利用などに関する記述のほか、事故から12年が経過した現状を踏まえ、同事故に関連した記述の調査を行い、教科書のさらなる充実を図っていただき、エネルギーや原子力に関する教育の改善に繋げることを目的として意見・提言をまとめました。

表 1-1 小・中・高等学校教科書の検定・採択の周期

年度（西暦）		H26	27	28	29	30	31/R元	2	3	4	5
学校種別等区分		(2014)	(2015)	(2016)	(2017)	(2018)	(2019)	(2020)	(2021)	(2022)	(2023)
小 学 校	検 定			◆	◎	◎				◎	
	採 択	△			▲	△	△				△
	使用開始		○			●	○	○			
中 学 校	検 定	◎			◆	◎	◎				◎
	採 択		△			▲	△	△			
	使用開始			○			●	○	○		
高 等 学 校	主として 低学年用	検 定		◎			◎	◎			
		採 択			△			△	△		
		使用開始			○				○	○	
	主として 中学年用	検 定		◎				◎	◎		
		採 択			△				△	△	
		使用開始	○			○				○	○
	主として 高学年用	検 定			◎				◎	◎	
		採 択	△			△				△	△
		使用開始		○			○				

（注） 1. ◎：検定年度

△：直近の検定で合格した教科書の初めての採択が行われる年度

○：使用開始年度（小・中学校は原則として 4 年ごと）

◆：「特別の教科 道徳」の教科書の検定年度

▲：直近の検定で合格した「特別の教科 道徳」の教科書の初めての採択が行われる年度

●：「特別の教科 道徳」の教科書の使用開始年度

2. 小学校には義務教育学校の前期課程を、中学校には義務教育学校の後期課程及び中等教育学校の前期課程を、高等学校には中等教育学校の後期課程を含む。

※太線以降は、学習指導要領（小学校学習指導要領（平成 29 年文部科学省告示第 63 号）、中学校学習指導要領（平成 29 年文部科学省告示第 64 号）及び高等学校学習指導要領（平成 30 年文部科学省告示第 68 号））改訂後の教育課程の実施に伴う教科書についてである。

※小学校における平成 30 年度、中学校における平成 31 年度においては、「特別の教科 道徳」を除く各教科の教科書についての採択が行われる。

（文部科学省 HP より）

https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/kyoukasho/gaiyou/04060901/20200831-mxt_kouhou02-1235087_01.pdf

2. 本報告書の概要

本章第1節で調査の目的を述べています。

本章第3節で今回調査した教科書の件数を示します。

第2章では教科書の記述の充実を図っていただきたいという要望を意見・提言として述べて、その解説をしています。第1節は8項目の提言の概要、第2節は各提言の詳しい解説です。

第3章では、地理歴史、公民、理科および工業の新学習指導要領の条項にあるエネルギー・環境・原子力・放射線に関連する各教科書の本文とコラム、脚注（側注）、図表の個別の記述内容とともに、これらについて調査担当者が協議して作成したコメント・修正文の案や例を示しています。

第4章は本調査の記録として、会議等開催記録、教科書調査担当者名および教育委員会委員名ならびにこれまでに公表した教科書調査報告書のリスト1)～17)を示しました。

3. 調査した教科書

高等学校の主として中学年用として、2023（令和5）年度から使用されている地理歴史（地理総合、地理探究、日本史探究、世界史探究）、公民（公共、倫理、政治・経済）、理科（物理、化学）および工業（電力技術1、工業環境技術）のすべての検定済み教科書の合計39件について調査しました。その内訳を次の表に示します。

調査した教科書の教科・分野の件数

調査した教科書	件数
地理歴史（地理総合）	1
地理歴史（地理探究）	3
地理歴史（日本史探究）	7
地理歴史（世界史探究）	7
公民（公共）	1
公民（倫理）	3
公民（政治・経済）	6
理科（物理）	7
理科（化学）	1

工業（電力技術 1）	2
工業（工業環境技術）	1

第2章 教科書記述への提言

調査結果を踏まえて、最初に全般的な要望を述べ、続いて第2節で8項目を提言します。第3節でそれぞれの項目についての詳しい解説とその背景を説明します。

1. 全般的な要望

どの教科書も出版社独自の工夫が凝らされ、高く評価します。教科書で示されるデータ・図表は論点を適正にするための非常に重要な資料となりますので、可能な限り最新のデータ・図表の使用を望みます。一部の教科書では、データが最新でないもの、本文と提示されているデータ・図表が整合していないものもありました。これらのことに気配りした編集を望みます。また、原子力・放射線についての用語・単位は正しく使用、記載、説明されることを望みます。

本文に書けない各論的な事項を、発展的に解説する手段として、コラム、由来、参考欄、脚注などで多角的に示し学習効果を高めるのはとてもよいことであると推奨します。また、新学習指導要領が提唱する「主体的・対話的で深い学び」を具体的に実践するため、探究学習・調べ学習など発展的学習について、ディベートを行わせている事例がいくつも見られましたが、生徒自らが、物事を総合的に検討するきっかけになると考えるので推奨します。パソコンを用いて検索させる学習とともに、生徒の議論の中から生徒自らの多角的な意見を引き出すような記述も望まれます。

2. 教科書記述への8項目の提言

提言1：東京電力福島第一原子力発電所事故に関する記述について

「化学」および「物理」の一部を除くほとんどの教科書で東京電力福島第一原子力発電所事故に関連した事項が記載されています。内容は国、諸機関の報告書（刊行物）、あるいはメディア情報などに基づいて記述されていますが、事故の原因や経緯等の記述に関する引用・裏付資料の選択に当たっては、極力正確で公正な取扱いをした資料を参照されることを要望します。特に、最新の科学的知見に基づいて、事故後に放射線被曝を直接の原因とする健康影響は報告されておらず、将来的に健康影響が発生する可能性も低いとの結論が得られていますので、より正確な記述をしていただくよう要望します。

また、事故後10年以上を経て、復興の一環として、地元の若者たちの将来を見据え

た新しい取組や明るい一面についても可能な範囲で紹介されることを要望します。

提言 2：国際原子力・放射線事象評価尺度に基づく事故スケールの考え方について

原子力施設の異常事象や事故については、原子力のリスクとして各教科書でよく取り上げられております。例えば、数研出版の「公共」におきましては、チェルノブイリ原子力発電所と東京電力福島第一原子力発電所の事故が取り上げられています。

また、東京書籍の「政治・経済」では、高速増殖原型炉もんじゅのナトリウム漏えい、JCO 核燃料加工施設の臨界事故、中越沖地震による東京電力柏崎刈羽原子力発電所の損傷、東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所の事故が具体例として取り上げられております。

一方、事故のスケールについては、国際原子力・放射線事象評価尺度（INES、注）にて事故の深刻度に応じて、科学的な観点でレベルが定義されており、上記異常事象・事故においてもそのレベルには大きな差があります。

（注）INES：International Nuclear and Radiological Event Scale

国際原子力・放射線事象評価尺度であり、国際原子力機関（IAEA）と経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）が設定し、各国に採用を勧告

事故の深刻度については、必ずしも社会的な取り上げられ方に比例しないことを踏まえ、INES に定義された異常事象・事故レベルを念頭に具体例を取り上げていただくように提言します。

本提言の解説に、INES のレベルの定義、具体例を記載しますので、執筆時に参考にしていただければ幸いです。なお、中越沖地震による東京電力柏崎刈羽原子力発電所の損傷につきましてはレベル 0 とされております。

提言 3：我が国および世界各国の原子力エネルギー利用の状況に関する記述について

工業、世界史探究、政治経済などの科目の一部の教科書において、原子力エネルギーの利用に係る記述の中で、核燃料（原子燃料）サイクル、高速増殖原型炉もんじゅの取扱いに触れられた教科書がありました。

我が国においては、2023 年 2 月に閣議決定された GX（グリーントランスフォーメーション）実現に向けた基本方針により、産業革命以来の化石エネルギー中心の産業構造・社会構造をクリーンエネルギー中心に転換を図ることとされました。この中には、

原子力エネルギーの利用の方針、核燃料サイクルに係る内容が含まれています。一方で、「もんじゅ」の廃炉が進められていますが、こうしたエネルギー開発に係わる経験は今後のエネルギー問題を考えるうえで、重要な意味があるものと考えられます。

GX 実現に向けた基本方針で取り上げられている政策や、それに関連する事項については、今後のエネルギー問題を考えるための参考となることから、省エネの推進、再生可能エネルギーの主電力化などと合わせて、できるだけ最新の情報を分かりやすく適切な記載で取り上げていただくことを要望します。

また、ロシアのウクライナ侵攻の影響もあり、世界各国でエネルギー安全保障の観点などから、それぞれの国の事情に応じて原子力利用に関する様々な動きがあります。こうした各国の動きは、後述する地球環境問題（温室効果ガス削減）に関する取組との関連性も深いことから、我が国の動きと同様、できるだけ最新の記載とすることを要望します。

提言 4：各エネルギー源のメリットとデメリットに関する記述について

エネルギーは食料と同じように国民生活に必須であり、持続的に確保することが重要です。このため、国はエネルギー政策基本法を 2015 年に制定し、エネルギーの安定供給や環境への適合等の目標に沿うよう定めています。特に昨今のカーボンニュートラルやロシアのウクライナ侵攻の厳しい国際環境の中で、島国日本がこれからのエネルギーを持続的に確保していくことがより重要になります。

しかし、エネルギーの問題は複雑なため、特に政治経済、公共、倫理等の社会系の教科では、新しく導入されている再生可能エネルギーや将来導入が見込まれる新エネルギーについても、メリット、デメリットを含めて解説し、理解しやすくなるような工夫をされること、さらに、供給の安定性、安全性、環境への影響（温室効果ガスの排出）についても言及されるよう要望します。

提言 5：放射性廃棄物に関連する記述について

工業、政治経済の教科書において、放射性廃棄物についての記述がありました。中には、放射性廃棄物の種類の説明を含めて詳細な記述がなされている教科書もありました。

また、高レベル放射性廃棄物については、処分場の立地の状況が記述されている教科書もありました。

徐々にではありますが、各国の処分に向けた取組が進んでおりますので、他の項目と

同様、最新の動向を踏まえた記述がなされることを要望します。

提言 6：放射線及び放射線利用に関する記述について

今回調査した教科書では、「物理」において放射線に関する記述が大変充実しており、高く評価します。その内容は、放射線の種類と性質、放射性崩壊（壊変）と半減期、放射線・放射能に関する単位、放射線被曝による人体への影響など、放射線について科学的に理解するための基礎知識が網羅されています。一部の教科書に、放射線に関する単位についての説明が不十分な教科書がありました。放射線被曝によるリスクを定量的に理解するため、正確さを失わない範囲で可能な限り分かりやすく記述されることを望みます。

また放射線の利用技術は、現在の便利で豊かな私たちの生活を舞台裏で支える技術として不可欠なものとなっています。今回調査した教科書には、身近なレントゲン写真などの医学利用だけでなく、工業、農業、科学研究など多様な分野での活用が記述されており、高く評価します。最新の技術も含めて、生徒の関心を引くような利用例を引き続き教科書に取り上げていただくことを期待します。

提言7：地球環境問題に関連した記述について

地球温暖化抑制への取組については、「パリ協定」（2016年11月発効）に基づいてCOP26（国連気候変動枠組条約第26回締約国会議、2021年11月）で示された各国の意気込み、我が国の地球温暖化対策計画の改定（2021年10月22日閣議決定）などの最新の情報が提供されることを望みます。

また、持続可能な社会の実現に必要な技術については、各発電方式における二酸化炭素排出量の比較といった定量的なデータが示されることを望みます。

提言 8：原子力エネルギー利用についての多様な学習方法の拡充について

原子力エネルギー利用には、東日本大震災が起因となった東京電力福島第一原子力発電所の事故以前、以降を問わず世界各国で賛否両論があります。それは、単に事故のリスクのみといった単一の視点だけで判断できる問題ではないからだと考えます。つまり、原子力エネルギー利用を学ぶためには、考えるべき視点が様々かつ一教科の学びで完結

しない教科横断の学びが必要になってきます。だからこそ、新しい学習指導要領の趣旨を最大限に生かして「主体的・対話的で深い学び」を展開することができる学習内容であると考えます。

指導者と教科書会社各社の創意工夫によって、次世代を生きる全ての生徒が原子力エネルギーを始めとしたエネルギー問題について、主体的・対話的で深い学びを通して、賢明な判断力を身に付けることができるようになることを期待します。

3. 提言内容の解説

提言1：東京電力福島第一原子力発電所事故に関する記述について

今般の教科書の改訂では、東京電力福島第一原子力発電所の事故に関し、おおむね正確・公平な記述になっていることを確認しましたが、次の教科書編集の際に参考にしていただきたい事項について説明します。

同事故の原因や背景については、下記の調査の結果、地震と、それによって引き起こされた津波の想定が大幅に甘かったことが原因で、すべての電源が長時間供給されなくなることへの多重の備え、炉心が損傷するような重大事故への対策、訓練が不十分であったこと、これらに対する国の規制による管理が適切でなかったことなどの安全対策が不十分であったことであると、明らかにされています。また、事故原因にかかわる技術的要因、組織・人的要因、規制要因などの背景や今後の改善点なども数多く指摘されています。

同事故に関する記述については、調査結果から明らかになったこれらの事故の原因や背景に留意いただくよう要望します。また、引用・裏付資料の選択に当たっては、以下の調査資料等を参照されることを要望します。

a. 国会事故調査委員会による事故調査報告書（2012年）

<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naiic.go.jp/>

b. 日本政府による事故調査委員会による事故調査報告書（2012年7月）

<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/index.html>

c. 福島第一原子力発電所事故その全貌と明日に向けた提言：学会事故調最終報告書（日本原子力学会，丸善出版，2014年3月発行）

d. 国際原子力機関（IAEA）「福島第一発電所事故事務局長報告（邦訳）」（2015年8月）

【事故原因の説明について】

一部の教科書に「東京電力福島第一原子力発電所では、大量の放射性物質を放出する深刻な事故が発生し」、「福島第一原発が爆発・炉心溶融（メルトダウン）事故をおこした」といった記載があります。上記調査報告書等にあるように、福島第一原子力発電所では、地震で原子炉は停止し、地震により引き起こされた津波が直接の原因と考えられており、電源および冷却施設が冠水し機能しなくなった結果、炉心溶融、発生した水素の原子炉建屋内爆発、大量の放射性物質の所外への放出が起きました。一方、東京電力福島第二原子力発電所、東北電力女川原子力発電所および日本原子力発電東海第二原子力発電所は東日本大震災による地震で原子炉は停止し、電源および冷却機能が確保されたため、炉心損傷はなく冷温停止に至りました。

これらの状況をより正確に生徒に理解させるために、たとえば「東日本大震災の際、直接的な原因と考えられる津波によって東京電力福島第一原子力発電所の事故が起きました」といった説明がなされることを提案します。

【事故後の健康への影響について】

事故後の放射線による健康影響に関して、一部の教科書では、事故後に放射線による健康影響が発生したと誤解されるおそれのある記述が見られました。事故により放射性物質が環境中に放出されて地表に沈着した結果、福島県を中心に広い地域で放射線量が上昇し、放射線による健康影響を心配する声が大きくなりました。しかし、実測された放射線量や、推定された放射性物質の放出量から、専門家の間では当初からこの事故により放射線被曝を直接の原因とする健康影響が発生することはきわめて考えにくいと言われていました。実際、2014年に発表された原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）の報告書では、科学的知見に基づいた公衆への健康影響の評価として、公衆の被曝線量が低かったため健康へのリスクは低く、がんなどの将来の健康影響の発生が増加することは予測されないと結論していました。さらに2021年に発表された報告書の改訂版では、その後に得られた新たな科学的知見も含めてより信頼性の高い評価を行い、事故後に放射線被曝を直接の原因とする健康影響は報告されておらず、将来的に健康影響が発生する可能性も低いと結論しています。また、福島県「県民健康調査」や日本学術会議の報告書でも同様の見解が示されています。これらの科学的知見は、事故後に発生した様々な社会的問題に向き合う上でも重要な知識ですので、教科書に記述する場合は公的機関・国際機関が報告する最新の科学的知見に基づき、より正確な記述をしていただくよう要望します。

（参考）

- a. 原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）2013年報告書「電離放射線の線源、影響およびリスク」

https://www.unscear.org/docs/reports/2013/14-02678_Report_2013_MainText_JP.pdf

- b. 2011 年東日本大震災後の福島第一原子力発電所における事故による放射線被ばくのレベルと影響：UNSCEAR2013 年報告書刊行後に発表された情報の影響
https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR_2020_21_Report_Vol.II_JAPANESE.pdf
- c. 福島県「県民健康調査」 <https://fukushima-mimamori.jp/outline/>
- d. 日本学術会議報告 子どもの放射線被ばくの影響と今後の課題 ―現在の科学的知見を福島で生かすために―
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h170901.pdf>

【事故の教訓と新規制基準について】

地理探究の一部の教科書で「東日本大震災以降多くの原子力発電所が稼働を停止しているため」、また、政治・経済の一部の教科書で「この事故を受けて、日本のすべての原子力発電所が稼働を停止した」などの記載がありました。これにはその理由があります。

即ち、東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、原子力規制の新たな枠組みとして、従来の行政機関が担ってきた原子力の規制や関係行政を高度化して担う組織として「原子力規制委員会」が発足しました。また、世界各国の規制基準も参考にして世界でも最も厳しいとされる「規制基準の見直し」が行われました。その結果、地震・津波対策の強化、過酷事故対策やテロ対策の厳格化、事故後の避難基準の見直しなどの改革が行われました。震災で被災しなかった発電所も含め我が国の全ての原子力発電所は、この新しい規制基準に適合して高い安全性が確認された後に順次再稼働することとしています。したがって、各原子力発電所はこの適合審査に合格するまで運転を停止しています。2023 年 8 月 2 日の時点で、11 基が再稼働済み、6 基が許可済み、10 基が新基準への適合性審査中となっています。

【地元の若者たちの将来を見据えた新しい取組について】

昨年度調査した低学年用「公共」の教科書では、事故後の 2015 年に地元の双葉郡に設立された福島県立ふたば未来学園中学校・高等学校の活動や期待される役割について紹介したり、2016 年より日本原子力研究開発機構および廃止措置人材育成高専等連携協議会の主催により開催されている、全国の高等専門学校の生徒たちが競う廃炉創造ロボコン大会について写真で伝えていました。事故後 10 年以上を経て、復興の一環として、こうした地元の若者たちの将来を見据えた新しい取組や明るい一面についても可能な範囲で紹介されることを要望します。

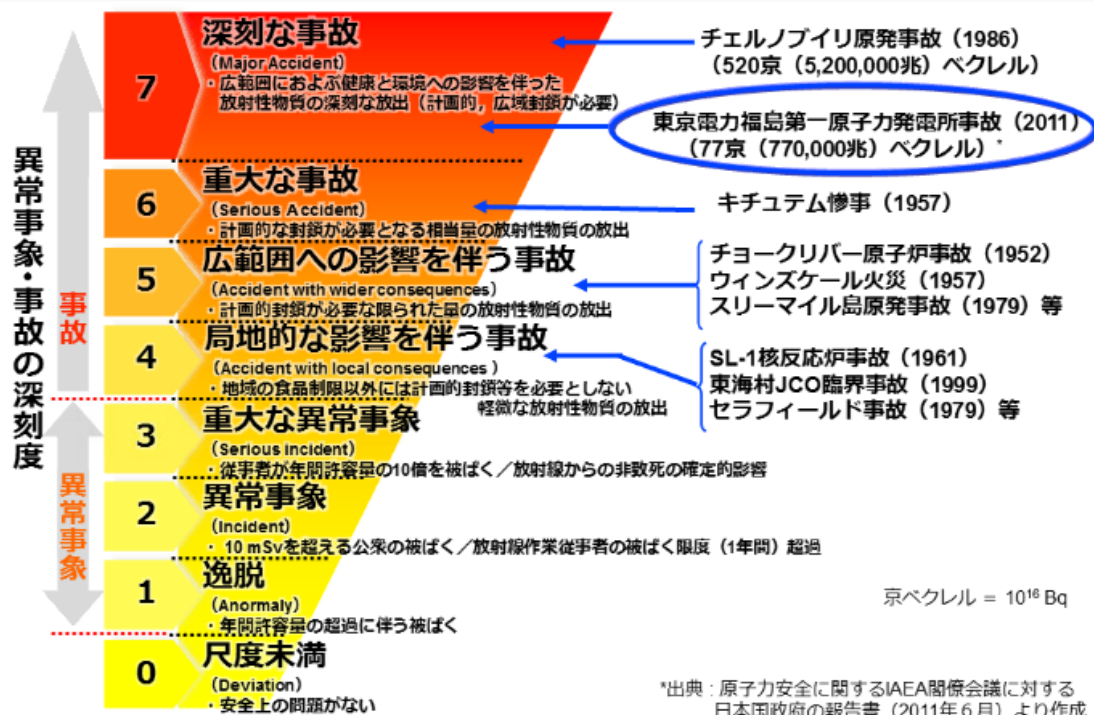
提言 2：国際原子力・放射線事象評価尺度に基づく事故スケールの考え方について

原子力施設等の異常事象や事故は、各教科書に原子力利用のリスクとして具体例が記載されています。ただ、記載されている事例が、科学的な観点で必ずしも深刻な事故ではない場合もあり、誤解を招く可能性もあると考えます。

原子力施設等の異常事象や事故は、その深刻度(放射性物質の放出規模、被曝の程度)に応じて7つのカテゴリに分類されます。国際原子力・放射線事象評価尺度 (INES) とは、原子力発電所などの事故・トラブルについて、それが安全上どの程度のものかを表す国際的な指標です。INES は国際的に共通な尺度であり、各国は、異常事象や事故をこの尺度を使って、深刻度を判定し、発表します。

大きく分けると以下の通りです。

レベル	事故・事象	定義
0	尺度未満	安全上の問題がない事象
1～3	異常事象	放射線作業従事者の限定的な被曝を伴う事象
4～7	事故	外部への放射性物質を伴う事故 特にレベル 7 は広範囲に及ぶ放射性物質の深刻な放出を伴う大きな事故であり、世界においては、チェルノブイリ原子力発電所事故（1986 年）と東京電力福島第一原子力発電所事故（2011 年）が該当



レベル	事故例
7 深刻な事故	旧ソ連・チェルノブイリ原発事故 (1986年) 日本・東京電力福島第一原子力発電所事故 (2011年)
6 大事故	平成23年4月12日にレベル7と暫定評価
5 広範囲な影響を伴う事故	英国・ウインズケール原子炉事故 (1957年) 米国・スリーマイル島発電所事故 (1979年)
4 局所的な影響を伴う事故	日本・JCO臨界事故 (1999年) フランス・サンローラン発電所事故 (1980年)
3 重大な異常事象	スペイン・バンデロス発電所火災事象 (1989年)
2 異常事象	日本・美浜発電所2号機蒸気発生器伝熱管損傷事象 (1991年)
1 逸脱	日本・「もんじゅ」ナトリウム漏れ事故 (1995年) 日本・敦賀発電所2号機1次冷却材漏れ (1999年) 日本・浜岡発電所1号機余熱除去系配管破断 (2001年) 日本・美浜原子力発電所3号機2次系配管破損事故 (2004年)
0 尺度未満	(安全上重要ではない事象)
評価対象外	(安全に関係しない事象)

海外で最高レベルのチェルノブイリ原発事故及び国内の主な事象・事故の概要は以下の通りです。

発生年	レベル	プラント	事象・事故概要
1986	7	チェルノブイリ原子力 発電所 4号機（旧ソ連）	低出力試験運転中に原子炉が不安定になり、減速材の黒鉛が発火、大量の放射性物質を放出。死者は UNSCEAR 2008 Report では事故対応の作業員が 50 名、一般公衆が 15 名と報告されている。 低出力時において不安定な炉の特性、規則違反などの安全文化の欠如などが原因。
1991	2	関西電力美浜発電所 2号機	原子炉の熱を 2 次系に伝える蒸気発生器伝熱管が破損。 伝熱管の触れ止め金具が設計通り施工されていなかったことにより振動が発生し、伝熱管が摩耗したことが原因。
1995	1	旧動力炉・核燃料開発 事業団（現日本原子力 研究開発機構） 高速増殖原型炉もんじ ゅ	2 次系（ナトリウム系）の配管が破損し、化学的に活性なナトリウムが漏えいし火災が発生。 配管に挿入されている温度計さや管の設計不備による渦振動が原因。
1999	1	日本原子力発電 敦賀発電所 2 号機	熱交換器の配管の破損により 1 次冷却水が漏えい。 温度差のある流体の混合による高サイクル熱疲労が原因。
1999	4	JCO 核燃料加工施設	加工施設内で核燃料を加工中にウラン溶液が臨界となり作業員 2 名が死亡。正しい作業手順を遵守しなかったこと（不十分な安全教育）が原因。
2001	1	中部電力浜岡原子力発 電所 1 号機	試験中に余熱除去系の配管内に蓄積していた水素が燃焼、配管が破断し蒸気が漏えい。 水素が蓄積しやすい配管構造になっていたことが原因。
2004	1	関西電力美浜発電所	2 次系復水配管部の減肉部が破損、蒸

		3号機	気が流出し、定期検査準備中の作業員5名が死亡。当該部の配管肉厚測定が長年点検対象外となっていたことが原因。
2011	7	東京電力福島第一原子力発電所 1～3号機	東日本大震災時の津波によって1～3号機の原子炉冷却系機能が喪失し、1, 3号機は原子力建屋内で水素爆発。放射性物質が大量に漏えいし、多くの住民が避難。環境への放出放射能はチェルノブイリ事故の約15%。津波高さの想定が十分でなかったことなどが原因。

国内のレベル1以上の異常な事象・事故は、上記の通り7事例であり、例えば東京書籍の「政治・経済」に記載されている中越沖地震による東京電力柏崎刈羽原子力発電所の損傷はレベル0となっています。

今後は異常な事象・事故の深刻度に誤解を与えないように、上記のINESのレベルに応じた事例の取り上げ方をさせていただくことを提言します。

<参考資料>

環境省 HP：<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h28kisoshiryo/h28kiso-02-02-01.html>
UNSCEAR 2008 Report 「SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION」

提言3：我が国および世界各国の原子力エネルギー利用の状況に関する記述について

工業、世界史探究、政治経済などの科目の一部の教科書において、原子力エネルギーの利用に係る記述の中で、核燃料（原子燃料）サイクル、高速増殖原型炉もんじゅの取扱いに触れられた教科書がありました。

我が国においては、2023年2月に閣議決定されたGX実現に向けた基本方針の中で、原子力エネルギーの利用の方針、核燃料サイクルに係る内容が含まれています。一方で、「もんじゅ」の廃炉が進められていますが、こうしたエネルギー開発に係わる経験は今後のエネルギー問題を考えるうえで、重要な意味があるものと考えられます。

GX実現に向けた基本方針で取り上げられている政策や、それに関連する事項については、今後のエネルギー問題を考えるための参考となることから、省エネルギーの推進、

再生可能エネルギーの主電力化などと合わせて、できるだけ最新の情報を分かりやすく適切な記載で取り上げていただくことを要望します。

また、ロシアのウクライナ侵攻の影響もあり、世界各国でエネルギー安全保障の観点などから、それぞれの国の事情に応じて原子力利用に関する様々な動きがあります。こうした各国の動きは、後述する地球環境問題（温室効果ガス削減）に関する取組との関連性も深いことから、我が国の動きと同様、できるだけ最新の記載とすることを要望します。

なお、関連の記載を取り上げていただいた教科書のうち、一部の教科書で誤解を与える可能性のある記述があったことから、関連する情報を以下に記載しておきますので、参考としてください。

関連する資料には、以下のものがあります。

- a. 「エネルギー政策基本法」（2002 年）
https://www.shugiin.go.jp/internet/itdb_housei.nsf/html/housei/15420020614071.htm
- b. 「エネルギー基本計画」
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/
- c. 「GX 実現に向けた基本方針～今後 10 年を見据えたロードマップ～」
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/pdf/kihon.pdf
- d. 「令和 4 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2023）」
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/>
- e. 「原子力利用に関する基本的考え方」
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/kettei230220.pdf>
- f. 経済産業省資源エネルギー庁「エネルギー危機の時代、原子力発電をどうする？」
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/anzenhosho2023_genshiryoku.html
- g. 経済産業省資源エネルギー庁「エネルギー危機の今、あらためて考えたい「エネルギー安全保障」」
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/anzenhosho2023.html>
- h. 経済産業省資源エネルギー庁「原子力政策の状況について」
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/
- i. 経済産業省資源エネルギー庁「使用済燃料のいま～核燃料サイクルの推進に向けて～」
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/shiyozuminenryo.html>
- j. 経済産業省資源エネルギー庁「2020—日本が抱えているエネルギー問題（前編）」
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2020_1.html

- k. 経済産業省資源エネルギー庁「2020—日本が抱えているエネルギー問題（後編）」
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2020_2.html
- l. 国際エネルギー機関（IEA）「World Energy Outlook 2022」
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>
（参考）国際エネルギー機関（IEA）「2022 年版世界エネルギー見通し」（WEO 2022）概要紹介 <https://www.jaif.or.jp/information/world-energy-outlook2022/>
- m. 国際エネルギー機関（IEA）「World Energy Outlook 2021 エグゼクティブサマリー」
https://iea.blob.core.windows.net/assets/aeb4863d-e4a7-4352-b371-7e4f5cdcb356/WEO2021_ES_Japanese.pdf

1) 我が国のエネルギー政策とその状況に関する記述について

エネルギー資源の乏しい我が国では、2002 年に「エネルギー政策基本法」が制定されました。エネルギーは人々の生活の安定向上、経済の維持発展に不可欠であるとともに、その利用は地域や地球環境に大きな影響を及ぼすことから国の基本的な政策を定めたものです。

翌 2003 年には、我が国のエネルギー資源をめぐる諸課題に対応する長期的、総合的な施策として「エネルギー基本計画（第 1 次）」が策定されました。海外依存による脆弱性の改善、発展途上国の需要拡大等による資源価格の不安定性への対策、温室効果ガス排出量の抑制を図ることを目指していました。

以後、エネルギー基本計画は社会環境の変化などを踏まえて、約 3 年毎に改訂されています。第 1 回改訂（2007 年、第 2 次計画）、第 2 回改訂（2010 年、第 3 次計画）です。

第 3 次計画では、「エネルギー安定供給（Energy Security）」、「環境への適合（Environment）」、「経済効率性の向上（Economic Efficiency）」、「安全性（Safety）」（3E+S）という基本方針が立てられました。

2016 年の第 4 次計画に続く 2018 年の第 5 次計画では、2030 年における電力の供給量として「長期エネルギー需給見通し」（2015 年 7 月経済産業省決定）に電源構成比率として示されている、火力 56%（天然ガス 27、石炭 26、石油 3）、再生可能エネルギー 22～24%、原子力 22～20%といったエネルギーミックスのバランスの実現を目指すことができました。

2021 年の COP26 に向けて世界各国で気候変動問題に対する関心や温室効果ガス削減の機運が高まり、我が国のエネルギー政策も影響を受けました。我が国は 2020 年 10 月には「2050 年カーボンニュートラル」を、2021 年 4 月には「2030 年度の温室効果ガス排出量の 2013 年度比 46%削減、さらに 50%削減を目指す新たな削減目標」を表明しました（詳細は提言 7 を参照）。

2021 年 10 月にはこれらを反映した第 6 次計画が策定されました。計画では、「2030 年度におけるエネルギー需給見通し」（2021 年 10 月経済産業省決定）により示された電源構成比：火力 41%（天然ガス 20、石炭 19、石油 2）、再生可能エネルギー 36～38%、原子力 20～22%を目標としています。2015 年の需給見通しに比べ、再生可能エネルギーを増やして火力を減らす一方、原子力は同レベルを維持するとしています。

第 6 次計画では、東京電力福島第一原子力発電所事故について「事故を含む東日本大震災から今年で 10 年の月日が経過した。10 年前の未曾有の大災害は、エネルギー政策を進める上での全ての原点」と記されています。我が国のエネルギー政策はこうした考え方のもとで遂行されています。

2023 年 2 月には、カーボンニュートラルの実現という国際公約、ロシアによるウク

ライナ侵攻に伴うエネルギー危機が危惧される緊迫した事態にあることを踏まえ、GX実現に向けた基本方針が閣議決定されました。「GX」即ち Green Transformation は、産業革命以来の化石エネルギー中心の産業構造・社会構造をクリーンエネルギー中心へ転換することを意味するもので、その中で、エネルギー基本計画を踏まえて原子力を活用していくことに関連し、以下のような趣旨のことが述べられています。

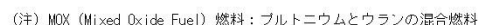
- 1) 国・事業者は、東京電力福島第一原子力発電所事故の反省と教訓を忘れることなく、安全神話からの脱却、自主的な安全性の向上、組織体制の改革、実情を踏まえた自治体等の支援、防災対策の不断の改善等による地域との共生、国民各層とのコミュニケーションの深化・充実等に、国が前面に立って取り組む。
- 2) 安定供給とカーボンニュートラルの実現の両立に向け、エネルギー基本計画に定められている 2030 年度電源構成に占める原子力比率 20-22%の確実な達成に向けて、安全性を優先し、原子力規制委員会による安全審査合格、かつ、地元の理解を得た原子炉の再稼働を進める。
- 3) 原子力の安全性向上を目指し、新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設に取り組む。
- 4) 地域の理解確保を大前提に、廃炉を決定した原発の敷地内での次世代革新炉への建替えを対象として、六ヶ所再処理工場の竣工等のバックエンド問題の進展も踏まえつつ具体化を進めていく。
- 5) 既存の原子力発電所を可能な限り活用するため、現行制度と同様に「運転期間は 40 年、延長を認める期間は 20 年」との制限を設け、原子力規制委員会による厳格な安全審査が行われることを前提に、一定の停止期間に限り、追加的な延長を認めることとする。
- 6) 六ヶ所再処理工場の竣工目標実現などの核燃料サイクル推進、廃炉の着実かつ効率的な実現に向けた知見の共有や資金確保等の仕組みの整備を進める。
- 7) 最終処分の実現に向けた国主導での国民理解の促進や自治体等への主体的な働き掛けの抜本強化のため、文献調査受入れ自治体等に対する国を挙げての支援体制の構築、実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）の体制強化、国と関係自治体との協議の場の設置、関心地域への国からの段階的な申入れ等の具体化を進める。

【原子燃料サイクル（核燃料サイクル）について】

「原子燃料サイクル（核燃料サイクル）」とは、原子力発電で使い終えた燃料（使用済燃料）から核分裂していないウランや新たに生まれたプルトニウムなどをエネルギー資源として回収し（再処理）、再び原子力発電の燃料に利用する（リサイクル）ことをいい、その実現を通じて、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の量や有害さ（放射

資源に乏しい我が国にとっては、使用済燃料を再処理することにより得られるウランやプルトニウムが「準国産エネルギー資源」となりえます。

また、日本は「原子力の利用は平和利用に限る」とし、余剰のプルトニウムをもたないことを国際的に表明しており、核燃料サイクルを通じて、プルトニウムを燃料として使用し消費することは意義があります。こうしたことから、核燃料サイクルを推進する取組が続けられています。



7-5

参考図 原子燃料サイクル

(出展:「原子力・エネルギー」図面集 (財) 日本原子力文化財団)

【高速増殖原型炉もんじゅの廃炉について】

使用済燃料から取り出したプルトニウムとウランを用いて作られた「MOX 燃料」を燃やして発電に利用するための研究開発の中核として位置づけられていたのが、「もんじゅ」です。「もんじゅ」は日本原子力研究開発機構が所有し、熱出力 71.4 万 kW、電気出力 28 万 kW で、福井県敦賀市に所在します。「もんじゅ」は、発電しながら燃えない“ウラン 238”を効率よく燃える“プルトニウム 239”に変える（核変換）ことができる高速増殖炉の開発のための原型炉です。高速増殖炉が実現できれば、この核変換（増殖）されたプルトニウムを回収することにより、消費するよりも多くの燃料を生み出すことができ、ウラン資源を数十倍も有効に利用する（可採年数を数十倍にできる）ことが可能で、より多くの進国産エネルギー獲得の視点で重要な意義のあるものとされている。

ます。

「もんじゅ」は1968年に設計を開始して以降、設計、建設、運転、保守に至る様々な経験と研究成果を得ました。しかし、1994年の初臨界後、1995年に発生した2次系ナトリウム漏えい事故、その際の通報遅れや虚偽報告・情報隠し等の不適切な対応があり、また、その後も機器の点検に係る不備等が確認されたことから、運営主体やマネジメントのあり方等について様々な懸念が指摘されました。

2016年12月、原子力関係閣僚会議において、「もんじゅ」に係る対応の課題と経験が総括*（下記参照）されたうえで、「原子炉としての運転再開はせず、今後、廃止措置に移行する」との政府方針が決定されています。その中で「もんじゅ」再開で得られる知見は、新たな方策で獲得していく方針が示され、これまでの「もんじゅ」の建設や性能試験で得られた成果、今後の廃止措置で得られる知見を最大限有効に活用して高速炉研究開発を進めることとなっています。

<*総括の概要>

- 実証炉以降の高速炉開発に資する様々な技術的成果を獲得、その過程で涵養された研究人材の厚みも相まって、高速炉開発の先進国としての地位を築いた。こうした技術や人材を最大限に有効活用し、高速炉研究開発を進めることが必要。
- 近年の情勢の変化により、再開に要する時間的・経済的コストの増大、新たな運営主体の特定を含む再開に向けた不確実性が明らかになった。また、「もんじゅ」再開で得られる知見は、新たな方策で獲得していく方針が示された。
- これまでに培われてきた人材や様々な知見・技術等を、将来の高速炉研究開発において最大限有効に活かす観点から、様々な不確実性を伴う「原子炉としての運転再開はせず」、今後、廃止措置に移行するが「もんじゅ」の持つ機能を出来る限り活用し、今後の高速炉研究開発における新たな役割を担うよう位置付ける。

2) 世界各国の状況に関する記述について

一部の教科書では世界各国の原子力エネルギーの状況について記述されており、その内容は妥当なものと確認されました。参考までに、各国の現在の原子力エネルギーの利用状況を紹介したいと思います。

東京電力福島第一原子力発電所事故の後、原子力エネルギーを利用している各国では安全性の一層の向上を図っています。そのなかで、現在原子力エネルギーを利用している将来的にも利用するとしているのは米国、フランス、中国をはじめとして26ヵ国です。このうち、中国、ロシア、インド、パキスタン、英国、韓国の6ヵ国は将来的に原子力の割合を増加させるとしています。また、現在、原子力を新たに導入して発電所を建設中なのは、トルコ、バングラデシュです。さらに、将来的に原子力発電の利用を計

画中ないし提案中なのは、エジプト、ウズベキスタン、リトアニア、ポーランド、カザフスタン、タイ、ヨルダン、サウジアラビアの8ヵ国です。

他方、将来的に原子力発電を廃止するとの国策を決定しているのは、ドイツ(2002年)、ベルギー(2003年)、スイス(2017年)の3ヵ国と台湾(2016年)です(()は決定年)。

ドイツは先進諸国の中で脱原子力発電を決めた代表格としてしばしば紹介されますが、以下のような特有の事情を抱えています。1990年の東西ドイツの統合後のロシア製の古い原子力発電所の廃止、州政府の発言力が強く連邦政府のエネルギー政策とは独自に伝統的に石炭産業のために石炭の積極的な利用が進められてきたこと、電力が不足すればヨーロッパの電力網により隣国フランスから輸入できることなどを背景に、2000年代に入る前から原子力利用に後ろ向きの傾向がありました。たとえば元東ドイツの原子炉はロシア型加圧水炉であり、旧西ドイツの安全基準を満たしていないため早くから廃炉の運命にありました。その他の原子力発電所も旧式の炉型であったり、出力が低く経済性に劣っていたりなど種々の理由から27基の原子炉が停止し、廃炉に向かっていました。ドイツの脱原子力発電への以降は東京電力福島第一原子力発電所事故以前からありました。ロシアからのガス供給が途絶することなどによりエネルギー事情が厳しさを増したことから、原子力発電3基の運転が2023年4月15日まで延長されましたが、2011年の法制化を経て、脱原発が完了しました。ウクライナ情勢の先行きが不透明な状況が続いていることもあり、停止後のエネルギーが安定に供給できるのか注目されています。

ベルギーは電力のおよそ50%を原子力発電に依存していますが、老朽化が進み隣国のドイツ、オランダからも継続運転の危険性が指摘されていました。このような中で脱原子力発電を決めました。その後の2022年3月、現在の地政学的な状況や化石燃料からの脱却を強化しようと、2025年に40年運転をむかえ閉鎖する予定だった原子力発電2基の運転を、10年間延長する方針を決定しました。

スイスでは、2011年3月に東京電力福島第一原子力発電所の事故が発生すると、連邦政府は同年5月25日に脱原発を決定しました。電力に占める水力発電の割合が6割もあること、国内でも原子力事故が起こっていることや、チェルノブイリ原子力発電所事故によって、南部を中心に放射性物質によって汚染された経験を持つこと、稼働している5基の原子力発電所の多くが老朽化していることなども脱原子力の理由として挙げられています。

台湾では、2016年の総統選挙で、「2025年の脱原発実現」を公約に掲げた民進党の蔡英文氏が初当選して以来、エネルギー転換を進めています。原子力発電所は6基(運転中、廃止措置中が各3基。他に建設完成前に密閉管理中2基。)ありますが、2025年の電源比率目標は、再生可能エネルギー20%、天然ガス発電50%、石炭火力発電30%、

原子力ゼロとしています。

原子力エネルギーを利用している各国でも様々な動きがあります。フランスでは過去2年間原子力発電量が一時的に低下していましたが、原子力産業の再活性化に関し閣僚が招集されて、新たなエネルギー計画案策定に向けた検討が始まっています。英国では、新型原子力発電所の建設等、原子力エネルギーに係る投資が政府から発表されるなどの動きが出てきています。

また、このほかの国（スウェーデンやオランダなど）でも原子力政策を見直し、原子力利用への転換等の動きがみられる国もあります。スウェーデンでは、環境法に記されている原子力関連の制限事項の撤廃が提案され、多くのサイトで原子炉の新設を可能とする動きがみられます。オランダでは、原子力エネルギー開発のための資金が予算化され、オランダにおける既存のボルッセレ原子力発電所の運転延長の準備、新しい大型原子炉2基の建設、小型モジュール型原子炉の開発等に充てられようとしています。フィンランドでは、コロナウィルス蔓延の影響などもあり遅れていましたが、オルキルオト3号機が2023年4月16日より定格運転に入っています。

上記のように、世界各国のエネルギー政策は、個々の事情、例えば、自然災害や地政学的違い、エネルギー資源の有無、政治体制、経済状況などにより異なります。欧州の多くの国々は陸続きで、電気系統やパイプラインでエネルギーの融通がしやすいのに対して、我が国はエネルギー資源に乏しい島国でほとんどのエネルギーを海外からタンカーで輸入しています。ロシアのウクライナ侵攻についても各国の政策に大きな影響を及ぼしています。このような我が国のエネルギー環境の中で原子力エネルギーの利用を、現実のデータに即して生徒に考えさせるような教科書の記述を要望します。

提言4：各エネルギー源のメリットとデメリットに関する記述について

エネルギーは食料と同じように国民生活に必須であり、持続的に確保することが重要です。このため、国はエネルギー政策基本法を2015年に制定し、エネルギーの安定供給や環境への適合等の目標に沿うよう定めています。特に昨今のカーボンニュートラル（以下、CN）やロシアのウクライナ侵攻の厳しい国際環境の中で、島国日本がこれからのエネルギーを持続的に確保していくことがより重要になります。

しかし、エネルギーの問題は複雑なため、特に政治経済、公共、倫理等の社会系の教科では、新しく導入されている再生可能エネルギー（以下、再エネ）や将来導入が見込まれる新エネルギーについても、メリット、デメリットを含めて解説し、理解しやすくなるような工夫をされること、さらに、供給の安定性、安全性、環境への影響（温室効果ガスの排出）、経済性を含めた総合的な観点及び長期的な視点からも言及されるよう

要望します。

近年は、世界的な CN 目標の動きを受けて、我が国でも温室効果ガスを排出しない太陽光発電等の再エネが広く活用されるようになり、ほとんどの教科書が再エネの説明にページを割いています。再エネには開発途上のものも含めて多くの種類がありますが、温室効果ガスを排出しないメリットがあるものの、天候に依存する不安定なものや、まだ経済的に自立していない等のデメリットもありますので、こうした利害得失の全体を正確に記述することが大切です。また、温室効果ガスを排出しない原子力発電も世界の多くの国々でその役割が再認識されています。我が国では 2011 年に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故の反省の下、原子力発電所の安全対策が強化されてきましたが、ロシアのウクライナ侵攻の影響を受けて国のエネルギー安全保障確保のため、原子力発電の必要性が再認識されています。

2050 年の CN 目標達成を目指すために、現在広く活用されている化石燃料に替えて、CO₂ を排出しない種々の新エネルギーも開発されつつありますが、これらが社会に実装されるには多くの技術的な課題や経済的な問題があります。このため、下表*は、我が国の主なエネルギー源について、開発途上のものも含めてメリットとデメリットをまとめましたので、参考にしていただきたいと思います。

* 表中の“設備割合（2021 年度）”は日本原子力文化財団の「原子力・エネルギー図面集」から、“再生可能エネルギー、水素、アンモニア”については資源・エネルギー庁資料から、それぞれ引用しました。

いま再エネ利用の拡大と新エネルギーの実用化を目指して多様な研究開発が積極的に行われています。太陽光発電については、我が国の設備量は既に中国と米国に次いで世界第 3 位（2019 年度、単位面積当たりでは世界第 1 位）となりましたが、森林等への設置に伴う環境破壊が問題視されることがあります。また、太陽光パネルの寿命は 20～25 年ですが、その機材には環境に影響する素材も含まれており、将来多量に発生する廃棄物の処理処分が課題になります。風力発電については、設備の大型化による効率向上や設置場所を陸上の他、洋上へも拡大する技術開発が行われています。我が国は EU 等と比較して風況が不利なため、洋上風力の適地はこれまで北海道や東北の一部等に限られています。浮体式洋上風力発電は、海底に固定するケーブルでなく、浮体の挙動に追従できる強力な送電ケーブルが必要な施設です。

これら太陽光や風力等の変動型再エネは、後述する“再エネ賦課金”により発電コストは比較的低いものの、総発電量に占めるシェアの拡大に伴い、これを社会で使うために多くの費用がかかります。具体的には、電源を送電線に接続するコストや送電網を増強するコスト、需要と無関係に発電する再エネを受け入れるための調整用電源（火力等）の利用率低下等のコストアップ、蓄電器を利用する場合にはそのコスト等です。また、その低いエネルギー密度から大規模導入には広大な敷地が必要となります。さらに、再エネ推進の目的で、いま国民は“再エネ賦課金”を電気料金に加えて負担しており、再エ

ネはまだ経済的に自立していないこと、また日当たりのよい大きな家に住む人が電気料金面で有利になるという逆進性の現実を理解しなければなりません。太陽光や風力の自然エネルギーは無限にあり、これらに頼るのは理想ではありますが、社会で実用化するにはいろいろな課題が存在します。

最近、CO₂削減効果があるエネルギー源として注目されている新エネルギーに水素とアンモニアがあり、研究開発が進められています。水素は燃焼させれば水になり環境には優しいので、これを燃料として発電・輸送・産業の幅広い分野の脱炭素化に活用した「水素社会」を構築することが世界的にも注目されています。しかし、水素は水や石油・ガス等多様な資源から製造可能ですが、大量の水素を安価に製造する技術や社会で広く活用するためのインフラ整備等の課題があります。アンモニアについては、輸送媒体として使用して水素そのものを製造したり、火力発電所で石炭とともに混焼させて CO₂ 排出を削減したりすることに効果的ですが、社会で実用化するには水素と同様の課題があります。この他、バイオ燃料（天ぶらの廃油も含まれます）を航空機燃料に活用して CO₂ 排出削減効果を目指す等、これから夢のある研究開発が数多くあります。いずれもメリットとデメリットの両面があることを理解できるよう配慮していただきたいと思っています。

なお、排出された CO₂ を回収したり地中に埋設したりする技術が開発され、これらは CCS 又は CCUS^(注) と呼ばれ、国内では既に 2012 年から CCS の実証実験が北海道苫小牧で行われており、米国では油田を使った CCUS が実行されています。我が国では CO₂ を多量に排出する火力発電がまだ発電事業の中心を占めていますので、これらの技術開発の進展が期待されますが、貯留した CO₂ を長期間漏出させない技術等の開発課題やコストの問題があります。

(注) CCS: Carbon dioxide Capture and Storage (二酸化炭素回収・貯留), CCUS : Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage (二酸化炭素回収・利用・貯留)

表 2-1 いろいろなエネルギー源のメリット・デメリット

エネルギー源		原理	設備割合 (2021年度)	メリット	デメリット	備考
火力発電		化石資源(石油・石炭・天然ガス)による発電	49%	・運転は気象条件に左右されない ・電力需要の変化に対応できる ・運転経験が豊富 ・発電所の設置場所に制限が少ない ・高効率の新技术(石炭ガス化複合発電(IGCC))が開発された	・CO ₂ を排出する ・燃料はほとんど輸入、資源は有限 ・燃料輸入が国際環境の影響を受け易い ・硫黄酸化物、ばいじんなどの有害物質を放出する	・第6次エネルギー基本計画では2050年脱炭素を目標 ・COP26(2021年11月)で45ヶ国が脱石炭に賛同 ・世界では今まで火力発電が主流
原子力発電		ウラン資源を用いた発電(現在使われている軽水炉ではU235の核分裂による熱を利用する)	11%	・運転時にCO ₂ を排出しない ・運転は気象条件に左右されない ・少量の燃料で大量のエネルギーを発生し、少ない面積で大容量発電が可能 ・国産技術で建設・運転できる ・プルトニウム利用により、準国産エネルギー資源を確保できる ・再処理技術と合わせて、将来の核燃料サイクルへの道筋を拓く	・核物質(濃縮ウラン)を扱うには、国際的な査察(IAEA)を受ける必要がある ・原子力事故防止の安全対策に多額のコストがかかる ・テロ対策には国家的対策が必要 ・高レベル放射性廃棄物の処分地選定が未完	・東電福島原発事故の影響を受けた国民感情があり、原発推進には国民受容性の改善が必要 ・国際的なカーボンニュートラルの動きから、原子力発電の役割を再認識する傾向が主要国に見られる ・フランスでは原子力発電が主流
再生可能エネルギー	水力発電	水力を利用した発電(水の落差を利用して水車を回転させる)	16%	・運転時にCO ₂ を排出しない ・電力需要の変化に対応できる ・国産エネルギーのため、国際情勢変化の影響を受けにくい	・渇水期に発電できない ・国内には増設できる場所がほとんどない	・電力不足時には揚水発電にも利用できる ・ノルウェーでは水力発電が主流
	太陽光発電	太陽光を半導体などを利用して電気に変換する	25%	・運転時にCO ₂ を排出しない ・資源量(太陽光)は無限にある ・国産エネルギーのため、国際情勢変化の影響を受けにくい ・社会受容性は高い	・発電は天候に依存する ・経済的に自立していない(補助金が必要) ・広い敷地面積が必要 ・太陽光パネル等の大量廃棄処理処分が将来課題になる	・太陽光パネル設置による森林等の環境破壊が問題視されることもある
	風力発電	風車による発電		・運転時にCO ₂ を排出しない ・資源量(風力)は無限にある ・国産エネルギーのため、国際情勢変化の影響を受けにくい ・社会受容性は高い	・発電は天候に依存する ・電力需要の変化に対応できない ・経済的に自立していない(補助金が必要) ・設置場所の選定と広い面積が必要	・風力発電に適した場所として、国内には北海道や九州の一部に限られる ・デンマークでは大量利用
	バイオマス発電	バイオマス資源(家畜糞等)による発電		・光合成によりCO ₂ を吸収して成長するバイオマス資源はCO ₂ を排出しないものとされている(京都議定書)	・バイオマス資源の収集・運搬・管理にコストがかかる	・循環型社会の構築、農山漁村の活性化を図れる
	地熱発電	地下の地熱エネルギーによる発電		・運転時にCO ₂ を排出しない ・長期にわたる発電が期待できる	・立地に温泉・公園等があり、それら施設への影響を評価・調整する必要がある	・八丁原地熱発電所(九州)等あり ・アイスランドは地熱発電が主流
	潮力発電	潮汐流が持つ運動エネルギーを利用		・運転時にCO ₂ を排出しない ・資源量(潮力)は豊富にある	・設置場所が限定される	・国内では試験段階だが、海外では多くの国に発電所がある
	波力発電	波の上下運動を利用する		・運転時にCO ₂ を排出しない ・資源量(波力)は豊富にある	・設置場所が限定される	・久慈波力発電所等がある
	太陽熱利用	太陽熱を集熱器で集めて利用	—	・給湯や暖房に利用できる	・エネルギー密度が小さい	・ソーラータウン久米川(東村山市)等がある
	雪氷熱利用	雪・氷を利用	—	・コストがほとんど不要	・利用できる地域や時期が限られる	・寒冷地では有効に利用可(北海道JAひばい:玄米貯蔵施設等)
	温度差利用	地下水・河川水・下水等を熱源として利用	—	・熱源は豊富に存在する	・イニシャルコストが大きい	・冷暖房用として全国に広がっている
新エネルギー	水素利用	水素を燃料として利用	開発中	・CO ₂ を排出しない ・原料(水、化石燃料等)は豊富にある	・水素製造技術の開発とコスト削減が課題 ・水素の取り扱い・運搬・貯留に安全対策を備えたインフラ整備が必要	・高温ガス炉から水素製造可能 ・将来の発電を含めた社会への活用が期待される(水素社会の構築) ・サプライチェーンの構築が課題
	アンモニア利用	アンモニアを燃料として利用又は水素製造に活用	開発中	・火力発電での混焼によりCO ₂ 排出を削減できる ・水素の製造に利用できる ・アンモニアは既に広く使われており、インフラがある	・水素製造の技術開発とコスト削減が課題 ・窒素酸化物排出への対策が必要	・サプライチェーンの構築が課題

提言 5：放射性廃棄物に関する記述について

工業、政治経済の教科書において、放射性廃棄物についての記述がありました。中には、放射性廃棄物の種類の説明を含めて詳細な記述がなされている教科書もありました。

また、高レベル放射性廃棄物については、処分場の立地の状況が記述されている教科書もありました。

徐々にではありますが、各国の処分に向けた取組が進んでおりますので、他の項目と同様、最新の動向を踏まえた記述がなされることを要望します。

なお、我が国では特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針の改定案について、意見募集が行われたところです。関連する情報を以下に紹介いたします。

最近の動向を知る上で、参考となる資料に次のものがあります。

- a. 「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について 2023年度版」

<https://www2.rwmc.or.jp/publications:hlwkj2023>

- b. 「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（令和5年4月28日閣議決定）

<https://www.meti.go.jp/press/2023/04/20230428007/20230428007-2.pdf>

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」改定の趣旨・ポイント

<https://www.meti.go.jp/press/2023/04/20230428007/20230428007.html>

（参考）「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（2015）

【我が国の放射性廃棄物の処分等に係る状況について】

我が国では、原子力発電所から発生した使用済燃料は再処理し、中に残っている核燃料物質を取り出し、再利用することを基本としています。こうすることで、核燃料資源の利用率を高くすることができるからですが、この過程でウランの核分裂で発生した核分裂生成物をガラス固化した高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）が発生します。

青森県六ヶ所村では日本原燃㈱の再処理施設が建設中ですが、我が国はこれまで海外に再処理を委託してきたことから、それに伴って発生したガラス固化体（約1800本）が海外から返還されており、同社で発生したガラス固化体（約400本）とともに、同社の高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターにおいて安全に貯蔵されています。また、日本原子力研究開発機構にも約300本のガラス固化体が保管されています。

高レベル放射性廃棄物の最終処分の方法としては地中深く埋める地層処分が計画されています。最終処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO：ニューモ）が設立され、最終処分場を立地する地点を選定するための調査を受け入れていただける自治体を公募し、科学的特性マップの公表、全国各地でのこの処分場の意義や安全性に関する対話活動の実施などの取組が行われてきました。

処分地選定にあたっては、文献調査、概要調査、精密調査と段階的に詳しい調査が行われるようになっており、各調査の実施に際しては、事前に地域の意見を聴き、意見に反して先に進まないことを基本としています。現在、北海道の寿都町、神恵内村の2町村において文献調査が行われています。

再処理施設等から発生する放射性廃棄物には、高レベル放射性廃棄物以外に超ウラン元素（ウランより原子番号の大きい元素）を含む TRU 廃棄物と呼ばれる放射性廃棄物があります。その中には、放射能が高く半減期が長いので生活環境から隔離すべきものもあり、それはガラス固化体同様、深い地中に埋設処分することが予定されています。

一方、原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物には、放射性物質濃度が低い廃液をセメント等で固めたもの、汚染された金属等をドラム缶に入れてモルタルを充填し固めたものなどがあります。そうした廃棄物は、浅い地中に埋設処分することになっており、日本原燃(株)の低レベル放射性廃棄物埋設センターで順次埋設処分が進められています。2021 年 3 月末時点でドラム缶換算で 30 万本以上の埋設が既に行われています。

このほか、ウラン濃縮・加工施設や各種研究施設から発生する放射性廃棄物もあります。各施設から発生する廃棄物の種類と処分の方法等に係る情報を表 2-2 に整理しましたので、参考にしてください。

なお、東京電力福島第一原子力発電所で事故の結果発生した放射性廃棄物等（原子炉圧力容器及び格納容器底部に溶け落ち固まった燃料デブリ、施設内外における除染活動の結果蓄積した放射性物質で汚染された物質、敷地周辺に飛散した放射性物質で汚染された土地・建物を除染する活動で発生した放射性物質で汚染された土壌等からなる指定廃棄物）については、性状、含まれる放射性物質の種類、量などの特徴が上記の廃棄物と異なることから、それぞれに応じた取扱い方法が現在検討されているところです。

〔参考：使用済燃料の保管等について〕

我が国では、原子力発電所で発生する使用済燃料は、再処理されるまで各原子力発電所の貯蔵プール等で安全を確保しながら貯蔵・管理されます。2021 年 3 月末時点でウラン重量に換算して合計 16,000 t 余りの使用済燃料が各原子力発電所で貯蔵・管理されています。

使用済燃料の貯蔵量は原子力発電所の稼働状況のほか、再処理施設の操業状況によって変化します。なお、使用済燃料を再処理せず、直接地中深くに最終処分することになっているスウェーデンやフィンランドのような国もあります。（最終処分に係る取組の状況については後述します。）

表 2-2 放射性廃棄物の種類と処分方法等の概要

廃棄物の種類			廃棄物の例	発生源	処分方法、現状等
高レベル放射性廃棄物			ガラス固化体	再処理施設	地層処分。対話活動、文献調査、概要調査、精密調査を経て、地域の意見を聞きながら処分地選定を進めることとしており、北海道の寿都町、神恵内村において文献調査が行われているところ。
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	放射性物質濃度の比較的高い廃棄物	制御棒、炉内構造物	原子力発電所	中深度処分。具体的内容は今後検討。
		放射性物質濃度の比較的低い廃棄物	廃液、フィルタ、廃器材、消耗品等を固形化		ピット処分。日本原燃(株)（六ヶ所村）低レベル放射性廃棄物埋設センターでドラム缶換算で約 34 万本の廃棄体を埋設（2022 年 3 月末時点）。
		放射性物質濃度の極めて低い廃棄物	コンクリート、金属等		トレンチ処分。動力試験炉 JPDR の廃棄物を対象に埋設実地試験実施中。東海発電所の解体廃棄物のトレンチ処分について審査中。
	超ウラン核種を含む放射性廃棄物（TRU 廃棄物）		燃料棒の部品、廃液、フィルタ	再処理施設 MOX 燃料加工施設	地層処分、中深度処分、ピット処分、トレンチ処分。
	ウラン廃棄物		消耗品、スラッジ、廃器材	ウラン濃縮・燃料加工施設	未定。
	研究施設等廃棄物		廃液、フィルタ、廃器材	研究炉、RI 使用施設等	ピット処分、トレンチ処分。国の「埋設処分業務の実施に関する基本方針」に従い、日本原子力研究開発機構で検討中。
	クリアランスレベル以下のもの		原子力発電所解体廃棄物の大部分	上に示した全ての発生源	再利用又は産業廃棄物として処分。クリアランス制度により再利用された例がある。

（参考：令和 3 年度版原子力白書）

（注：「クリアランスレベル」とは、放射能レベルがきわめて低く、人の健康に対する影響を無視できるレベル（年間 0.01 ミリシーベルト）であるものを指す。（資源エネルギー庁ホームページ））

放射性廃棄物の種類等を理解する上で参考になる情報として以下のものがあります。

a. 令和 3 年度版原子力白書

① <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2022/6-3.pdf>

② <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2022/2-2.pdf>

b. 資源エネルギー庁ホームページ

https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html

- c. 環境省「放射性物質汚染廃棄物処理情報サイト」
http://shiteihaiki.env.go.jp/radiological_contaminated_waste/
- d. 資源エネルギー庁ホームページ
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/bunkenchosa.html>
- e. 北海道ホームページ
<https://www.pref.hokkaido.lg.jp/kz/kke/bunkencyosa.html>
- f. 「なぜ、地層処分なのか」
https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/TR-20-04.pdf
- g. NUMO ホームページ「調査の状況と対話の記録」
https://www.numo.or.jp/chisoushobun/survey_status/
- h. 使用済燃料対策に関するアクションプラン（平成 27 年 10 月 6 日）最終処分関係閣僚会議
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/shiyozumi_nenryo/pdf/001_01_00.pdf

【我が国における特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針改定について】

我が国では、2015 年に、特定放射性廃棄物（ガラス固化体等地層処分の対象となるもの）の最終処分に関する基本方針として、以下の旨が閣議決定されていました。

- 1) 特定放射性廃棄物の最終処分の基本的方向（30 年～50 年間程度貯蔵後、順次、安全性を確認しつつ最終処分すること。適切な時期までに、十分な規模、年間処分能力を有する最終処分施設を設置すること等）
- 2) 概要調査地区等の選定に関する事項（法に従い概要調査地区、精密調査地区、最終処分施設建設地を選定すること。地質に関する調査、最終処分事業が地域の経済社会に及ぼす影響について関係住民の関心を踏まえ調査を行うこと。管轄する都道府県知事及び市町村長の意見を聴き、十分に尊重すること等）
- 3) 概要調査地区等の選定に係る関係住民の理解の増進のための施策に関する事項（概要調査地区等の選定に向けた活動、技術的情報等を含めた情報の積極的公開。生活様式等を踏まえた情報へのアクセス手段の多様化（説明会、資料の陳列、広報紙掲載、インターネットの活用等）、わかりやすい情報提供。関係住民の意見を聴く機会の設定と反映の努力等）
- 4) 特定放射性廃棄物の最終処分の実施に関する事項（複数の障壁（人工バリア、天然バリア）による人間環境から隔離。最終処分施設の閉鎖までの間の安全な管理が合理的に継続される範囲内での廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）

を確保すること等)

- 5) 特定放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発に関する事項（最終処分事業の安全な実施，経済性及び効率性の向上等を目的とする技術開発，安全規制・安全評価のために必要な研究開発，基盤的研究開発，処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等に関する役割分担等）
- 6) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する国民の理解の増進のための施策に関する事項（最終処分に関する知識の普及，積極的な情報公開，エネルギー，原子力，放射性廃棄物に関する広聴や広報，教育，学習の機会を増やす取組みの実施等）
- 7) その他特定放射性廃棄物の最終処分に関する重要事項（概要調査地区等に係る関係住民との共生関係を築くこと，電源三法に基づく交付金の交付，当該地域の持続的発展の総合的な支援，相互理解活動のための人材確保等）

また，2023年4月にこの基本方針が一部見直されています。その中で，関連する取組を強化すべく，以下のような旨が明記されました。

- 特定放射性廃棄物の最終処分の基本的方向に，「国は，政府一丸となって，かつ，政府の責任で取り組んでいくこと」を追記。
- 概要調査地区等の選定に関する事項に，「国は，原子力発電環境整備機構，発電用原子炉設置者等と連携しての地方公共団体等の個別訪問，住民の声の傾聴，地域の体制の構築等を通じて，全国での相互理解促進活動を強化すること及び当面の対応として現在の対象地域に加えて複数の地域で文献調査の実施を目指すこと」を追記。
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する国民の理解の増進のための施策に関する事項に，「全国知事会等の場の活用，地方公共団体との協議の場を設置しての意見の傾聴，最終処分の実現に向けた課題や対応等を議論・検討すること」を追記。
- その他特定放射性廃棄物の最終処分に関する重要事項に，「国は，関係省庁連絡会議，地方支部局連絡会議を設置し，文献調査対象地域，地方公共団体等の関心や意向を受け止め，当該地域の将来の持続的発展に向けて取り組むこと」を追記。

【諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について】

原子力施設や放射性廃棄物の状況，規制の仕方は各国で異なりますが，それぞれの国で高レベル放射性廃棄物の処分に向けた取組が行われています。上記の資料から，主要な国の状況をおおよそ読み取ることができます。

フィンランドでは、オルキオ原子力発電所とロヴィーサ原子力発電所から発生する使用済燃料を再処理せずにそのまま直接処分することとしています。2015年にフィンランド政府が使用済燃料処分場の建設許可を発給し、実施主体（ポシヴァ社）がオルキオ島のオンカロで2016年に処分場の建設を開始しています。2021年12月には処分場の操業許可の申請がなされています。

スウェーデンでは、バーゼベック、フォルクスマルク、オスカーシャム、リングハルスの4か所に原子力発電所があり、原子力発電所から発生した使用済燃料を国内1箇所に集めて中間貯蔵しています。全ての原子炉が営業運転停止に至るまでに使用済燃料の累積量はウラン換算で約12,000トンになると見込まれていて、これらの使用済燃料を再処理することなく、キャニスタに封入して地層処分の方針とされています。処分場はフォルクスマルクに建設することとしています。2022年1月にスウェーデン政府が実施主体SKB社の使用済燃料最終処分に対する事業許可を条件付きで発給しています（今後の着工には規制機関等の認可が必要）。

フランスでは、原子力発電で発生する使用済燃料を再処理しています。2006年に制定された放射性廃棄物等管理計画法において、再処理等に伴って発生する高レベル放射性廃棄物及び長寿期中レベル放射性廃棄物（TRU廃棄物など）について「可逆性のある地層処分」を行う方針を定め、検討が進められています。2023年1月、実施主体のフランス放射性廃棄物管理機関（ANDRA）が同国北東部のビュールでの地層処分場の設置許可を申請しました。

スイスでは、原子力発電で発生した使用済燃料を外国（フランス及び英国）に委託し再処理してきたのですが、その後、再処理を目的とした使用済燃料の輸出を禁止するなど措置を講じてきた経緯があります。再処理しない使用済燃料についても高レベル放射性廃棄物と定められており、ガラス固化体と併せて外国から返還されるTRU廃棄物も高レベル放射性廃棄物用の処分場で処分する予定です。2018年には、サイト選定第2段階の結果として候補エリアが3つまで絞り込まれ、2019年から各エリアで現地調査が行われました。その結果を受け、2022年9月、実施主体のNAGRAが3つの地域のうち北部レゲレンを候補地として提案しました。

カナダでは、カナダ型重水炉（CANDU炉）から発生する使用済燃料を再処理せずに高レベル放射性廃棄物として、当面60年間はサイト貯蔵または集中貯蔵を実施し、最終的には地層処分するという「適応性のある段階的管理」（APM）を長期管理アプローチとしています。2010年から9つの段階からなるサイト選定プロセスを開始しており、絞り込みが進められています。2020年1月にはサイト選定プロセスに残る自治体が2自治体に絞り込まれ、現地調査が継続しています。

ドイツでは当初、原則として使用済燃料を再処理する方針でしたが、2002年に法改正により、使用済燃料を外国の再処理施設に運搬することが禁じられ、高レベル

放射性廃棄物（ガラス固化体及び使用済燃料）を国内で地層処分する方針に変わっています。処分場に関しては、1979 年からゴアレーベン岩塩ドームにおいて高レベル放射性廃棄物の処分場候補地として探査が続けられてきましたが、2013 年に処分場サイト選定に関する新しい法律が制定され、公衆参加型の新たな手続きによりサイト選定をやり直すことになりました。2017 年にサイト選定が開始されており、2031 年ごろの処分場サイトの決定を目標としています。

提言 6 放射線及び放射線利用に関する記述について

今回調査した教科書では、放射線に関する基礎的な知識が「物理」において網羅的に記述されており、大変充実した内容となっています。しかし、一部の教科書に誤解を招きかねない記述もありましたので、より正確な記述としていただくため、以下に解説します。

東京電力福島第一原子力発電所の事故以降、放射線に関する数字が耳慣れない単位とともに数多く報道されましたが、その数字が表す影響の大小を理解できる人は少なく、社会の中で不安が高まる原因の一つとなりました。特に放射線に関する単位は、放射線に関する基礎的な知識の中でも、放射線被曝によるリスクを定量的に理解する上で重要な知識と言えます。しかし、放射線の人体への影響を定量的に表す単位の体系は複雑であり、正確さを失わない範囲で分かりやすく説明することは簡単ではありません。今回調査した「物理」の教科書では、すべての教科書で放射線に関する単位についての説明が記載されていましたが、限られた紙面の中で説明するために大変なご苦労があったことと推察します。

ただ、一部の教科書に誤解を招きかねない記述もありましたので、ここでは、次の教科書編集の際に参考にしていただくため、放射線の被曝線量に関する単位について解説します。

放射線の量に関する基本的な物理量として「吸収線量」があり、放射線によって物質が単位質量あたりに吸収するエネルギー(J/kg)として定義され、その単位はグレイ(Gy)となっています。したがって1 (Gy) の吸収線量は、物質1 (kg) あたり1 (J) のエネルギー吸収を表します。しかし、人体が放射線に被曝したとき、その影響は吸収線量の大きさだけでは決まりません。なぜなら、人体を構成する組織・臓器によって放射線に対する感受性が異なり、また放射線の種類やエネルギーによっても人体への影響が異なるからです。

そこで、吸収線量に放射線の種類による影響の違いを加味した量として「等価線量」が定義されています。等価線量の単位はシーベルト (Sv) で、次のように表されます。

$$(\text{等価線量}) = (\text{放射線加重係数}) \times (\text{吸収線量})$$

式の中にある「放射線加重係数」が放射線の種類による影響の違いを重みづけしており、表 1 に示すように、例えば X 線などの光子は 1、 α 線は 20 といった具合に、国際放射線防護委員会（ICRP）によって定められています。

さらに、人体を構成する組織・臓器ごとの放射線への感受性を考慮して、全身にわたる影響を表す量として「実効線量」が定義されています。実効線量の単位もシーベルト（Sv）で、次のように表されます。

$$(\text{実効線量}) = \Sigma \{(\text{組織加重係数}) \times (\text{等価線量})\}$$

式中の「組織加重係数」が各組織・臓器の放射線感受性の違いを重みづけしており、各組織・臓器の等価線量にその組織・臓器の組織加重係数を乗じて、全身について足し合わせた値が実効線量となります。組織加重係数も ICRP によって表 2 のように定められていて、全身について足し合わせると 1 になるよう設計されています。

等価線量と実効線量は、どちらも同じシーベルト（Sv）という単位で表しますが、その意味は上述のように異なります。自然放射線による被曝が年間平均 2.1 ミリシーベルトであるとか、一般公衆の線量限度※が年間 1 ミリシーベルトに定められているということが多くの教科書で紹介されていますが、ここで使われているシーベルトはすべて実効線量の単位を表しています。また、放射線測定器に表示される測定値がマイクロシーベルト毎時（ $\mu\text{Sv/h}$ ）の単位で表されている場合、その測定値は実効線量を安全側に評価する近似値となっています。

※ ICRP が短時間の被曝量が健康に与えるリスク（急性放射線症候群が発生する可能性がある）のしきい値の目安として、100 ミリシーベルトという数値を示しています。この線量限度は、放射線被曝の影響が積算されるとして、長期にわたる放射線被曝の健康影響を極力抑えるために定められたものです。

今回調査した教科書の中には、放射線による人体への影響を表す量として等価線量のみを記載している教科書がありましたが、同じ教科書の中で紹介されている様々な実効線量が等価線量であると誤解されるおそれがあります。そこで、放射線に関する単位の説明の中では実効線量についても触れることを提案します。例えば、実教出版の教科書では、「放射線に関する単位」の中の「Sv（シーベルト）」の説明の中で、等価線量と実効線量について簡潔に説明し、さらに図を用いて「吸収線量と等価線量と実効線量の関係」を分かりやすく示す工夫をされていて、参考になります。また、紙面の制約で等価線量と実効線量を両方とも説明できない場合は、例えば東京書籍の教科書のように実効線量の単位として Sv を説明し、教科書中で紹介されるさまざまな被曝線量の説明と齟齬が生じないようにすることを提案します。

表 2-3 放射線加重係数 (ICRP2007 年勧告)

放射線の種類	放射線加重係数
光子 (X 線, γ 線)	1
電子, μ 粒子	1
陽子, π 中間子	2
α 線, 重イオン	20
中性子	エネルギーの関数として定義

表 2-4 組織加重係数
(ICRP2007 年勧告)

組織・臓器	組織加重係数
骨髄 (赤色)	0.12
結腸	0.12
肺	0.12
胃	0.12
乳房	0.12
生殖腺	0.08
膀胱	0.04
食道	0.04
肝臓	0.04
甲状腺	0.04
骨表面	0.01
脳	0.01
唾液腺	0.01
皮ふ	0.01
残りの組織	0.12
合計	1.00

次に、放射線防護の考え方について解説します。放射線による健康影響を避けるためには、単純に放射線による被曝を最小（あるいはゼロ）にしたらいと考えると明快で、これまでに調査した教科書にはそのように受け取られかねない記述もありました。確かに、放射線被曝を伴う行為には放射線障害を引き起こすリスク

がありますが、自然放射線によるある程度の被曝は避けられないだけでなく、医学利用の例からも分かるように、放射線被曝を伴ったとしても私たちに大きな便益をもたらす行為もあります。放射線被曝を最小にするために便益をもたらす放射線利用を断念したり、他の健康リスクを増大させるような行為をしたりすると、全体としてはかえって私たちの健康リスクを増大させる結果になりかねません。そこで、放射線被曝によるリスクを減らしながら放射線利用による便益を享受するため、ICRP は放射線の防護について次のような考え方を示しています。まず放射線被曝を伴う行為は、得られる便益がリスクを上回るときのみ認められます。その上で、社会的・経済的な要因を考慮に入れて、放射線による被曝量を合理的に達成できる限り減らすことを求めています。この原則を「ALARA の原則」(ALARA: As Low As Reasonably Achievable) と呼びます。このように、放射線被曝は必ずしも最小にしたらいというものではなく、リスクと便益のバランスを考えながら全体として防護を最適化することが求められており、放射線の防護に関してはこのよう

な観点から正確な記述がなされることを要望します。

(参考) 放射線防護の考え方については、以下の文献の P10 に「正当化・最適化・線量制限」の三原則としてまとめられています。

放射線防護体系の倫理基盤 (ICRP Publication 138)

https://www.icrp.org/docs/ICRP_P138_Japanese.pdf

提言 7：地球環境問題に関連した記述について

地球環境問題は、ほとんどの教科書で様々なテーマで扱っており、また持続可能な循環型社会の必要性への言及も見られ、これらの教育を通して生徒が地球環境問題を社会との関わりをもって考えることができることは素晴らしいことです。

地球環境問題の近年最も注目されている温室効果ガスの排出制限に関しては、いくつかの教科書で国際的な取組として 2015 年 12 月にパリで開催された COP21 において採択された「パリ協定」(2016 年 11 月発効) が挙げられています。「パリ協定」では「すべての国が削減目標を 5 年ごとに提出・更新すること、更新の際には深掘りすること」と定められており、5 年後の 2021 年の COP26 (2021 年 11 月) では米国の取組が大きく積極的姿勢に転じ、同調するように中国も積極的姿勢に転じました。我が国も「2030 年に 2013 年排出の 46% (2015 年時点の目標は 26%) 削減、2050 年カーボンニュートラルを目標」を宣言し、それを明記した温暖化対策推進法の改正 (2021 年改正)、それを受け地球温暖化対策計画を改定 (2021 年 10 月 22 日閣議決定) しその実現に向け動き出しました。このように、世界の二大二酸化炭素排出国の中国、米国の両国が積極的に二酸化炭素排出抑制に転じ、我が国も極めて意欲的な目標を上げるように変わるなど、「京都議定書」(1997 年) はおろか「パリ協定」採択時 (2015 年) とともに大きく変化してきています。参考に COP26 における各国の二酸化炭素排出削減目標を表 1 に示します。しかしながら、昨年 2 月 24 日に始まったロシアによるウクライナ侵攻が、世界のエネルギー資源の流通に大きな影響を及ぼしており、COP26 で世界的に高まっていた二酸化炭素排出削減の気運が翳ることが危惧される状況にあります。

一方、地球環境問題には上記の政府間の枠組みとは別に企業等の活動をファイナンス面で応援する枠組みも近年盛んになっています。欧州委員会は 2022 年 2 月 2 日、気候変動対策に役立つ経済活動の法的基準を示す「欧州連合 (E U) タクソノミー規則」で、原子力発電と天然ガスをグリーンな経済活動に含めることを正式に提案しました。その後、欧州議会と E U 理事会での承認を経て、2023 年 1 月に発効しました。

温暖化ガスの排出抑制に関わる国際的な動向は、社会経済事情に密接に関連しダイナミックに変わる可能性があるため、各国事情などの最新の情報が提供されることを望みます。

教科書の記載を次回の改訂までに変更し、検定を受けることは困難と思われます。そこで、このようなダイナミックに変化する事項については、できれば副教材を用意するなどにより適切に最新の情報が教育現場に反映されるように努めていただくことを望みます。

また、持続可能な社会を実現するために必要な技術については、各教科書において丁

寧で客観的な記述が必要と考えます。例えば、一部の教科書にあるような各発電方式における二酸化炭素発生量の比較といった定量的なデータを示すことを望みます。参考に我が国の各種電源の二酸化炭素排出量を表 2 に示します。

表 2-5 COP26 における各国の二酸化炭素排出削減目標

出典：全国地球温暖化防止活動推進センター（JCCCA）HP

(<https://www.jccca.org/download/13233>)

国名	削減目標	今世紀中頃に向けた目標
中国	2030 年までに 60-65%削減 ^{*1} (2005 年比)	2060 年までに二酸化炭素排出実質ゼロ
EU	2030 年までに 55%以上削減 ^{*2} (1990 年比)	2050 年までに温室効果ガス排出実質ゼロ
インド	2030 年までに 45%削減 ^{*1}	2070 年までに排出量をゼロ
日本	2030 年までに 46%削減 (2013 年比)	2050 年までに温室効果ガス排出実質ゼロ
ロシア	2050 年までに約 60%削減 ^{*3} (2019 年比)	2060 年までに実質ゼロ
米国	2030 年までに 50-52%削減 ^{*2} (2005 年比)	2050 年までに温室効果ガス排出実質ゼロ

*1 GDP 当たりの二酸化炭素排出量

*2 温室効果ガスの排出量

*3 温室効果ガスの実質（森林などの吸収量を差し引いた）排出量

表 2-6 我が国の各種電源の二酸化炭素排出量（単位：g-CO₂/kWh）

出典：「地球環境のためにいま考える原子力」から抜粋，経済産業省・資源エネルギー庁

	石炭 火力	石油 火力	LNG 火力	LNG コ ンバイン ド	太 陽 光	風力	原子力	地熱	水力
発 電 燃 料燃焼	864	695	476	376	0	0	0	0	0
その他 ^{*1}	79	43	123	98	38	26	19~21	13	11
合計	943	738	599	474	38	26	19~21	13	11

*1 建設時や燃料の輸送など

提言 8：原子力エネルギー利用についての多様な学習方法の拡充について

「主体的・対話的で深い学び」をキーワードにした新しい学習指導要領が高等学校では 2022 年 4 月から全面実施されました。今回の学習指導要領では、主体的・対話的

で深い学びの実現に向けた授業改善が各教科に求められています。少々長いですが、どのような授業改善が求められているのかが示された部分をそのまま引用します。「特に、各教科・科目等において身に付けた知識及び技能を活用したり、思考力、判断力、表現力等や学びに向かう力、人間性等を発揮させたりして、学習の対象となる物事を捉え思考することにより、各教科・科目等の特質に応じた物事を捉える視点や考え方（以下「見方・考え方」という。）が鍛えられていくことに留意し、生徒が各教科・科目等の特質に応じた見方・考え方を働かせながら、知識を相互に関連付けてより深く理解したり、情報を精査して考えを形成したり、問題を見いだして解決策を考えたり、思いや考えを基に創造したりすることに向かう過程を重視した学習の充実を図ること」と示されています。

ところで、生徒が主体的に学んでいる状態とはどのような状態でしょうか。仮に生徒が意欲的に学習に取り組んでいたとしても、単に教師の指示どおりに学習しているだけならば、主体的な学習にはなっていないと思います。いくつかの考えの中から、友達との対話を通して新たな視点に気付いて自らの考えを練り直して、よりよい考えに変容させている姿や自分の考えが確かであるとの確信を深めている姿が実際の授業中に見られることが、新学習指導要領が示す「主体的・対話的で深い学び」の具体であると考えます。

さて、原子力エネルギー利用には、東日本大震災に起因した東京電力福島第一原子力発電所の事故以前、以降を問わず世界各国で賛否両論が見られます。それは、単に事故のリスクのみに着目して判断できる問題ではないからだと考えます。私たちが思いつくだけの視点を挙げても、その国のエネルギー利用の歴史、エネルギー自給率、科学技術力そのもの、科学者や技術者に対する国民の信頼感、健康や安全に対する考え方などがあると思います。このように考えるべき視点は様々で、一教科の学びで完結することはなく、教科横断の学びが必要です。

だからこそ、原子力エネルギー利用を学ぶことは、指導者と教科書会社各社の創意工夫によって、新しい学習指導要領の趣旨を最大限に生かして「主体的・対話的で深い学び」を展開することができる学習内容であると考えます。実際に、新しい学習指導要領では、地理歴史、公民、理科、保健体育、家庭、工業、家庭などの教科にエネルギー・環境・原子力・放射線に関連する記述がありますが、今回調査を行った教科書はどれも教科書会社各社の創意工夫によって、「主体的・対話的で深い学び」の実現に大いに期待が持てる教科書に仕上がっていると評価できます。

私たちは、こうした教科書を用いた優れた授業実践を通して、次世代を生きる全ての生徒がエネルギー問題についての理解を深め、賢明な判断力を身に付けることができるようになることを期待します。

以下は、今回調査を行った教科書に関して具体例を挙げて、少々の論評を行います。

例えば今回調査を行った地理探究の教科書に、「再生可能エネルギーをめぐる課題」とタイトルを掲げ、「再生可能エネルギーだけで電力を安定的に供給することは難しく、多くの国では化石燃料や原子力による発電が、常に一定量の発電を行うベース電力の役割を担っている。また、風力発電や太陽光発電の装置が景観や環境にあたえる影響や、地熱発電所の建設が温泉を枯渇させる可能性など、再生可能エネルギーの利用にともなう悪影響が懸念させることもある。また、バイオエタノールの需要拡大にともなうトウモロコシの価格高騰により、食料や飼料としての利用との競合が生じることや、燃料用作物への農地転用が進むことがほかの作物や食料生産の動向に影響をおよぼすことが懸念されている。」との記述がありました。再生可能エネルギー利用に期待を寄せる生徒は多いと思いますが、現状における再生可能エネルギー利用に関する課題をきちんと記述している点は好ましいと考えます。特に、バイオエタノールの需要拡大が食料生産の動向に影響する恐れがある点をきちんと記述している点は、世の中の様々な事象は互いに関連していることの好例であり、生徒に多面的・多角的な考察を促す上で大変好ましいと考えます。

他にも、別の地理歴史の教科書には、1973 年における我が国のエネルギー自給率が10%を切るまで低下したが、原子力発電を進めることで 2000 年には 20%を超えるまで回復したことが記述されていました。この教科書はこうした指摘を記述した直後に「『持たざる国』日本の課題」とタイトルを掲げ、我が国が資源のほとんどを輸入に頼っていること、資源の安定的な確保を目指して、外交活動や経済援助などを通じて「持てる国」との関係強化に努めてきたこと、国家間の対立や紛争が資源価格の急騰をもたらすことがあることなどがきちんと記述されていました。このように、我が国が資源の面で極めて不利な立場であることを踏まえた上で、エネルギー資源に関するリスクをできる限り回避するために、原子力を始めとしたエネルギー源の多角化が進められてきたことがきちんと記述されておりました。最後は、「福島での原発事故を契機に、エネルギー政策は新たな段階に入っている。」と結んでいました。

次代を担う生徒が、エネルギー資源に関する我が国の歴史と現実を踏まえた上で、これからどのようにしていくとよいのかを多面的・多角的に考察することのできる文章構成、段落構成となっていると同時に、東日本大震災を起因とした東京電力福島第一原子力発電所の事故を契機に、我が国のエネルギー政策をどのようにしていけばよいのかを主体的に考えさせる問いが投げ掛けられており、大変好ましいと考えます。

一方で、ある地理歴史の教科書には、「使用済み燃料や放射性廃棄物の再生処理には莫大なコストがかかるうえ、安全面でのリスクが大きいため、処分場の用地確保が難しい。」との記述がありました。おそらく処分場とは高レベル放射性廃棄物の地層処分を行う場所を指していると思われます。この地層処分を行う場所（処分場）は、現在まだ決まっていますが、既に高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）は国内に3万本相当

あることから、今後原子力発電を進めるか否かにかかわらず、地層処分事業を行う必要があります。紙幅の都合などもあったと思いますが、単に「処分場の用地確保が難しい。」とだけ記述するのではなく、「高レベル放射性廃棄物は既に国内に3万本相当あることから、処分場を建設する場所を近い将来までに決め、国内に処分場を建設していかななくてはならない。」などと記述することで、次代を担う生徒がこの問題を主体的に考えるきっかけを与えていただけると大変うれしく思います。

また、今回調査を行った政治経済の教科書に、再生可能エネルギーに関して「資源確保に問題がなく、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を排出しない太陽光、風力、波力、地熱、潮力、バイオマスなどの再生可能エネルギーの実用化も促進されている。」との記述がありました。ところが、同じ教科書の別ページの欄外に本文中よりも小さな字で、再生可能エネルギーは安定供給やコストなど改善の余地が大きいと記述されています。紙幅の都合など編集上のやむを得ない事情があったとは思いますが、現状において再生可能エネルギーが主力電源となるにはまだまだ課題が多いという現実を生徒たちが一目で捉え、そこに記述されていることを多面的・多角的に考察し、主体的に判断していただけるような紙面構成、編集を望みます。

是非、特定の価値観のみを示すのではなく、我が国のエネルギー資源をめぐる歴史など多様な視点を示しながら、映像、調べ学習、ディベートのような討論、観察・実験などの学習方法を用いながら、教科の枠を越えて内容同士の関連が理解できるような編集を大いに期待しています。

第3章 教科書の記述とコメント・修正文の例

【物理】

頁	エネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述内容	コメント・修正文の例
東京書籍 701 物理		
384	3 節 X 線 飛行機に乗るときに、手荷物検査を受けたことがあるだろうか。また、歯医者に行ったときに、診断のために何やら重いエプロンを着てレントゲン写真を撮ったことがあるだろう。これらはX線を利用した技術なのだが、そもそもX線とは何だろうか。	
384	A X線の発生 1895年、レントゲンは陰極線について研究をしている際、放電管から未知の放射線が放射されていることを発見し、この放射線をX線と名付けた。	
384	? X線には、どのような特徴があるのだろうか。	
384	X線は、波長が約 $10^{-10} \sim 10^{-12}$ m の電磁波であり、透過力が強いので、人体などの透過写真を撮るために使われている。図12のように、真空のガラス管内部に2つの電極が埋め込まれたX線管という装置で、陰極の金属を熱して発生させた電子（熱電子）を電圧で加速させ、陽極に衝突させるとX線が発生する。 X線管で発生したX線の強さと波長の関係（スペクトル）をグラフにすると、特定の波長で極端な強さを示すような特性X線（または固有X線）と、連続的な波長分布の連続X線の2種類がみられる（図13）。特性X線の波長は電子が衝突する陽極の物質によって決まっている。 一方、連続X線は、電子が減速させられたり軌道を曲げられたりしたときに失う運動エネルギーに相当しており、陽極の物質によらず波長が連続的になる。なお、電子の運動エネルギーのすべてがX線に変わると、そのエネルギーは最大になり、波長は最短になる（これを最短波長という）。 また、陽極の物質を変えずに加速電圧を大きくすると、特性X線の波長は変わらないが、最短波長が短くなる（図13）。	
384	図12 X線管 白熱させたタングステン・フィラメントを陰極とし、そこから出た電子を数万～数十万Vの電圧で加速し、陽極に衝突させる。そのとき電子がもっていたエネルギーの一部または全部がX線となって放射される。	
384	? 調べてみよう 特性X線の波長が物質によって変わる理由を調べてみよう。	
385	図13 陽極の金属を、W（タングステン）、Mo（モリブデン）、Cr（クロム）にしたときのX線スペクトル管（電子の加速電圧は35 kVで一定）	
385	図14 加速電圧を変えたときのMo（モリブデン）のX線スペクトル	
385	例題3 最短波長 右図のように、陰極のフィラメントに発生した初速度0の熱電子を高電圧Vで加速し、陽極の金属ターゲットに衝突させてX線を発生させた。プランク定数をh、光速をc、電気素量をeとする。 （1）陽極に衝突するときの電子の運動エネルギーを求めよ。 （2）陽極で発生するX線の最短波長λ_0を求めよ。	

	【解説】 (1) 電気量$-e$の電子が初速度 0 から電圧 V で加速されたので、エネルギー保存の法則から、電子の運動エネルギーは eV (2) 電子の運動エネルギーeV のすべてが X 線光子のエネルギー$\frac{hc}{\lambda_0}$となるので、$\lambda_0 = \frac{hc}{eV}$	
385	問 6 X 線管から出た X 線のスペクトルを波長ごとに観測すると、右図のような結果を得た。λ_0は最短波長を示し、λ_1, λ_2は鋭いピークを示している。 (1) λ_1, λ_2の X 線を何というか。 (2) 陽極へ衝突させる電子の加速電圧を大きくしていくと、λ_0, λ_1, λ_2の値は、図の値より大きくなるか、小さくなるか、それとも変化しないか。理由とともに答えよ。 (3) 加速電圧を 5.0×10^4 V とするとき、最短波長はいくらか。ただし、プランク定数を 6.6×10^{-34} J・s、電気素量を 1.6×10^{-19} C とする。	
386	B X 線の波動性 1912 年にラウエは結晶に X 線を当てて、図 15 のような斑点模様の写真を撮った。これは、結晶内に規則的に並ぶ原子が回折格子のようにはたらき、散乱された X 線が干渉して生じたものである。 図 16 のように、原子が間隔 d で規則正しく並んだ結晶面 A, B, C, … を考える。結晶面 A に θ の角度で波長 λ の X 線が入射すると、その強い透過性から結晶面 A だけでなく、結晶面 B や C 内の原子からも散乱され、いろいろな方向に進む。 このとき、散乱された X 線が干渉し強め合うのは、反射の法則を満たす方向で、隣り合う結晶内で反射された X 線が同位相になるところである。図 16 で回折光子のときと同じように考えると、隣り合う反射 X 線の経路差 $2d \sin \theta$ が波長の整数倍になるときに強め合い、その条件は次の式であらわされる。	
386	●ブラッグの条件 $2d \sin \theta = n\lambda$ ($n=1, 2, 3, \dots$) (8) d: 結晶面の間隔 θ: 反射するときの結晶面との角度 λ: 波長 これは、1912 年にローレンス・ブラッグによって導出されたもので、ブラッグの条件といわれる。また、θ を回折角といい、2θ は散乱による X 線の進行方向の変化を表す。この回折現象は波動に特有の現象であり、このことから、X 線が波動性をもつことがわかる。	
386	図 15 ラウエ斑点の写真（シリコン結晶）	
386	図 16 格子結晶による X 線の反射	
386	?考えてみよう 下の写真はフランクリンが撮影した、DNA のらせん構造の解析に重要な役割を果たした X 線回折写真である。この写真から、らせん構造の詳細をどのように読み取るのか考えてみよう。	
387	問 7 波長 2.0×10^{-10} m の X 線のある結晶面に平行に入射し、しだいに傾けていくと、回折角 $\theta = 20^\circ$ のときに最初の強い反射が起こった。この反射を生じた格子面の間隔はいくらか。$\sin 20^\circ = 0.34$ とする。	
387	C X 線の粒子性 1922 年、コンプトンは X 線を物質にあてたときに散乱される X 線（散乱 X 線）の波長に、もとの X 線と同じもののほかに、それよりもわずかに波長の長いものが含まれることを発見した（図 17）。この結果は、光の波動性のみ	

	では解釈できなかったが、X線の光子を用いることで説明することができた。物質に入射した光子が物質内の電子と弾性衝突したと仮定すると、その光子は電子に与えた分だけエネルギーを失い、その分だけ波長が長くなるのである。この実験結果はコンプトン効果と呼ばれ、現在ではアインシュタインの導出した光子の考え方が正しいことを示すよい例として知られている。 なお、入射X線の波長をλ、散乱X線の波長をλ'、入射X線と散乱X線のなす角をθとすると、運動量保存の法則とエネルギー保存の法則を用いることで、コンプトン効果による波長の変化は次の式で与えられる。 $\lambda' - \lambda \equiv \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta) \quad (9)$	
387	図 17 コンプトン効果の実験 コンプトンはMo（モリブデン）の特性X線の1つ（波長 0.0709 nm）を黒鉛ブロックにあてて、散乱X線の波長を測定した。散乱の角度θが大きくなるにつれて、散乱X線の波長λ'も大きくなる。	
387	コラム 社会 X線は危ない？ レントゲン写真などでは、X線が物質を透過することを利用して、表面からは直接見ることのできない内部構造を画像化している。一方で、コンプトン効果からわかるように、X線は透過するだけでなく、物質中の電子にも影響を及ぼす。物質にX線を照射すると、物質を構成している原子や分子中の電子がはじき出され、原子がイオン化したり、分子間の化学結合が切れたりする。特に、物質が生体であると、細胞中のDNAで化学結合が変わることになり、遺伝情報に狂いが生じることになる。このため、X線を安全に利用するためのルールがきちんと設けられている。	
388	例題 4 コンプトン効果 下図のように、波長λのX線光子が、静止している質量mの電子にx軸に沿って弾性衝突し、x軸と角度θをなす向きに波長λ' ($> \lambda$) となり散乱した。また、電子はx軸と角度ϕをなす向きに速さvではね飛ばされた。衝突前の電子の位置を原点としてx軸と垂直にy軸をとり、プランク定数をh、光速をc、電気素量をeとする。 (1) x方向、y方向の運動量保存の法則とエネルギー保存の法則を表す式をそれぞれ書け。 (2) 波長の変化$\lambda' - \lambda$をm、c、h、θを用いて表せ。ただし、$\lambda' \equiv \lambda$のとき、$\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} \equiv 2$と近似できることを用いること。 【解説】 (1) x方向、y方向の運動量保存の法則とエネルギー保存の法則はそれぞれ次のようになる。 $\begin{aligned} \text{x 方向} \quad \frac{h}{\lambda} &= \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + mv \cos \phi \quad \cdots \text{①} \\ \text{y 方向} \quad 0 &= \frac{h}{\lambda'} \sin \theta - mv \sin \phi \quad \cdots \text{②} \\ \text{エネルギー保存の法則} \quad \frac{hc}{\lambda} &= \frac{hc}{\lambda'} + \frac{1}{2}mv^2 \quad \cdots \text{③} \end{aligned}$ (2) ϕを消去するために、三角関数の関係式$\sin^2 \phi + \cos^2 \phi = 1$に、①、②式を変形して当てはめると、 $m^2 v^2 = \frac{h^2}{\lambda^2} + \frac{h^2}{\lambda'^2} - \frac{2h^2}{\lambda \lambda'} \cos \theta \quad \cdots \text{④}$ さらに、vを消去するために、③、④式を連立し、波長の変化$\lambda' - \lambda$について解くと、 $\lambda' - \lambda = \frac{h}{2mc} \left(\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} - 2 \cos \theta \right)$ となる。ここで、波長の変化はわずか ($\lambda' \equiv \lambda$) として、$\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} \equiv 2$を用いれば、 $\lambda' - \lambda \equiv \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$	

388	この節のポイント X線には、次の特徴がある。 ① 波長が約 $10^{-10} \sim 10^{-12}$ m の電磁波で透過力が強い。 ② 特性X線と連続X線の2種類がある。 ③ 波動性があり、結晶格子などで反射したX線は干渉し、ブラッグの条件式に従う。 ④ 粒子性があり、物質と衝突したX線はエネルギーを失い、波長が長くなる（コンプトン効果）。	
395	1 核融合するためには、陽子どうしが 10^{-15} m 程度に接近しなければならない。太陽の中心温度を 1.5×10^7 K とすると、核融合するほどに接近できそうか計算してみよう。	
395	2 原子核は、恒星での核融合によって生成されるという。核子の結合エネルギーは、鉄原子核あたりでエネルギーが最大になるため、この先の核融合は吸熱反応になってしまう。どのように鉄原子核より重い原子核が大量に生成されるのだろうか。	
395	3 γ 線を出す放射線源を霧箱に入れても、 γ 線の秘跡が見えないのはなぜだろうか。 γ 線の飛跡の代わりに、不規則で細い筋が現れることがある。これは何だろうか。	
395	物質は何からでき、宇宙はどのようにできたのか	
395	原子は輝く星の中でつくられ、私たちはその原子からできている 原子からやってくる光の理解は、ミクロの世界の新しい物理学を拓き、原子の構造を明らかにした。原子核の理解は新しいエネルギーの世界を拓き、恒星が光る仕組みを明らかにした。ミクロの世界の理解が、宇宙の理解へとつながる。	
410	3節 原子核の崩壊 永久凍土の中からはマンモスなどの古代の生物が冷凍されたまま発掘されているそう。しかしなぜ、これらの生物が古代に生きていたことがわかるのだろうか。	
410	ユカギルマンモス（頭部冷凍標本） 年代：17,800 年前／発掘：2002 年／発掘場所：サハ共和国 ウスチ・ヤンクス地区 イリン・ヴィラフチャアンニア川下流地域 特別重要文化財（ロシア連邦）	
410	A 原子核の崩壊と放射線 ウランやラジウムのような原子核は不安定であり、自然界に放射線を出してほかの原子核に変わる。これを原子核の放射性崩壊という。このように、自然に放射線を出す性質を放射能といい、放射能をもつ原子核を放射性原子核という。なお、放射線や放射線の強さは、表3のような単位で表される。	
410	？放射性原子核には、どのような特徴があるのだろうか。 天然の放射性原子核から放射される放射線には、α線、β線、そしてγ線の3種類がある。これらはもともと、図17にあるように、磁場中での曲がり方から区別された。なお、現在では、高速の物質粒子の流れ（中性子線・陽子線・重粒子線など）や高エネルギーの電磁波（X線など）も放射線と呼ばれる。表4のように、放射線によって物質を透過する能力（透過力）、物質中の原子から電子をはじきとばして原子をイオン化する能力（電離作用）などが異なる。	

410	表 3 放射線と放射能の単位		
		単位	単位の解説
	放射能の単位	ベクレル (記号 Bq)	1 秒間に放射性崩壊が起こす回数。 例：1g のラジウムのもつ放射能 (3.7×10^{10} Bq) は、1g のラジウム中で 1 秒間に 3.7×10^{10} 回の崩壊が起こることを表している。
	放射線の単位	グレイ (記号 Gy)	吸収線量の単位 放射線を受けた物質 1 kg あたりが吸収するエネルギー (= J/kg)。
		シーベルト (記号 Sv)	実効線量の単位 人体の被曝について、放射線の種類や臓器、器官による影響を考慮し、吸収線量に補正を加えたもの。
410	図 17 3 種類の放射線		
411	表 4 いろいろな放射線の特徴		
411	α 線 α 粒子と呼ばれるヘリウム原子核 (${}^4_2\text{He}$) の流れであり、正電荷 (+2e) をもつ。透過力は最も弱く、空気中では数 cm で止まるが、電離作用は最も強い。α 線を放射する放射性崩壊を α 崩壊という。α 崩壊後に原子核の質量数は 4 減り、原子番号は 2 減るので、α 崩壊は次のように書ける。 ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}^4_2\text{He} \cdots (12)$		
411	β 線 高速で運動する電子の流れであり、負電荷 (-e) を持つ。透過力は α 線よりも強く、数 mm 程度の金属板で止まる。電離作用は α 線よりも弱い。β 線を放出する放射性崩壊を β 崩壊という。なお、この β 線は原子核から放出される電子であって、原子核の周りをまわっている電子ではない。β 崩壊によって、原子核を構成する中性子は、陽子と電子と反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) に崩壊する。原子核の質量数は変わらないが、原子番号 Z は 1 だけ増すので、β 崩壊は次のように書ける。 ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + e^- + \bar{\nu}_e \cdots (13)$		
411	γ 線 X 線と同じように波長が非常に短い電磁波である。電荷をもたないので、磁場中で曲がらない。透過力は最も強く、数 cm 程度の金属板も通り抜けるが、電離作用は最も弱い。不安定な原子核から放射される γ 線は、電子の励起状態から放射される X 線と比較して、より短い波長、つまり、より高いエネルギーをもつ。γ 線を放出する反応を γ 崩壊という。γ 崩壊は原子番号も質量数も変わらないため、次のように書ける。 ${}_Z^AX \rightarrow {}_Z^AX' + \gamma \cdots (14)$		
411	①核反応式と呼ばれ、詳しくは 4 節で学習する (p. 416 参照)		
411	図 18 α 崩壊		
411	②反電子ニュートリノはレプトンという素粒子の 1 つで、電子ニュートリノの反粒子である (p. 424, 426 参照)。 $\bar{\nu}_e$ の $\bar{}$ は反粒子を表す記号である。		
411	図 19 β 崩壊		
411	図 20 γ 崩壊		
414	C 放射線の性質とその利用 放射線を直接眼で見ることができないが、強い透過力、電離作用のほかに温度を上昇させる作用 (熱作用)、写真フィルムを感光させる作用 (写真作用)、そして蛍光物質を光らせる作用 (蛍光作用) などがあることから、これらの性質を利用して検出している (表 6)。また、これら性質は、医療・工業・農業など、さまざまな分野で利用され		

	ている（表 7）。												
414	表 6 放射線の性質と検出器 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>検出器の種類</th><th>検出器の原理</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">電離作用を利用</td><td>ガイガーミュラー計数管（GM 管）</td><td>貴ガスなどの気体を入れた中空の円筒と、その芯に取り付けられた電極線から構成される。円筒の壁と芯の間には高い電圧がかけられており、放射線が通過して気体原子が電離すると、陽イオンと電子が電極に引き寄せられ電流が流れる。放射線の入射ごとの電流が流れるので、その回数をメータで測定する。</td></tr> <tr> <td>霧箱</td><td>過飽和蒸気を充満させた箱の中を放射線が通過すると、通り道の気体原子が電離し、生じたイオンが核となり、放射線の軌跡に沿って霧ができる。</td></tr> <tr> <td>蛍光作用を利用</td><td>シンチレーション検出器</td><td>放射線がシンチレーターを通過すると、分子が励起され、その分子が再び基底状態に戻るときに蛍光（シンチレーション光ともいう）が生じる。この光を、光電効果を利用した光電子増倍管で増幅・電流に変換して測定する。</td></tr> </tbody> </table>		検出器の種類	検出器の原理	電離作用を利用	ガイガーミュラー計数管（GM 管）	貴ガスなどの気体を入れた中空の円筒と、その芯に取り付けられた電極線から構成される。円筒の壁と芯の間には高い電圧がかけられており、放射線が通過して気体原子が電離すると、陽イオンと電子が電極に引き寄せられ電流が流れる。放射線の入射ごとの電流が流れるので、その回数をメータで測定する。	霧箱	過飽和蒸気を充満させた箱の中を放射線が通過すると、通り道の気体原子が電離し、生じたイオンが核となり、放射線の軌跡に沿って霧ができる。	蛍光作用を利用	シンチレーション検出器	放射線がシンチレーターを通過すると、分子が励起され、その分子が再び基底状態に戻るときに蛍光（シンチレーション光ともいう）が生じる。この光を、光電効果を利用した光電子増倍管で増幅・電流に変換して測定する。	
	検出器の種類	検出器の原理											
電離作用を利用	ガイガーミュラー計数管（GM 管）	貴ガスなどの気体を入れた中空の円筒と、その芯に取り付けられた電極線から構成される。円筒の壁と芯の間には高い電圧がかけられており、放射線が通過して気体原子が電離すると、陽イオンと電子が電極に引き寄せられ電流が流れる。放射線の入射ごとの電流が流れるので、その回数をメータで測定する。											
	霧箱	過飽和蒸気を充満させた箱の中を放射線が通過すると、通り道の気体原子が電離し、生じたイオンが核となり、放射線の軌跡に沿って霧ができる。											
蛍光作用を利用	シンチレーション検出器	放射線がシンチレーターを通過すると、分子が励起され、その分子が再び基底状態に戻るときに蛍光（シンチレーション光ともいう）が生じる。この光を、光電効果を利用した光電子増倍管で増幅・電流に変換して測定する。											
415	表 7 放射線の性質と利用												
415	また、放射線だけでなく、放射線同位体を利用することもある。例えば、医療の分野では、γ線を放射する放射性同位体を、脳や肺など検査したい特定の臓器に集まることのわかっている薬品に混ぜ、体内に注入する。すると臓器に取り込まれた放射性同位体からγ線が放射されるので、それを体外からカメラで撮影し画像処理を行うことで、放射性同位体の分布や動きをもとに、臓器の様子を知ることができる（図 23）。これは、人体内部のようすを、体内に取り込んだ小さな光源で照らし出したようなものである。 ほかにも、考古学の分野では、半減期が約 5700 年の$^{14}_6\text{C}$が年代測定に利用される。大気中の$^{14}_6\text{C}$は半減期とともに減るだけでなく、宇宙からの放射線（宇宙線）と窒素の反応によって、常に生成されているので、長い年月が経過してもほぼ一定の割合で存在している。一方、生きている動植物は代謝のために、体内に大気と同じ比率の$^{14}_6\text{C}$を持っているが、死後は代謝がなくなるために体内の$^{14}_6\text{C}$の比率は半減期とともに減っていく（図 24）。この比率の差を利用することで、枯木や死骸の年代が推定できる。												
415	この節のポイント 放射性原子核には次の特徴がある。 1 放射線を出して崩壊する 2 個数がもとの半分になるまでの時間（半減期）が種類によって異なる。 3 安定な原子核になるまで、崩壊系列に沿って崩壊し続ける。 4 医療などさまざまな分野で利用されている。												
415	図 23 画像処理をしたガンマカメラ撮影画像												
415	図 24 $^{14}_6\text{C}$の比率												
415	？考えてみよう 放射線や放射性原子核を利用するときには、その危険性についても常に考える必要がある。得られる利益と危険性												

	を天秤にかけて、危険性のほうが大きい場合は利用しないようにしよう。	
420	C 核分裂 質量数の大きい原子核が2個以上の小さい原子核に分裂することを核分裂という。核分裂は、不安定な原子核がより安定な原子核に移るときの反応である。 例えば、ウラン $^{235}_{92}\text{U}$ の原子核に（熱中性子とよばれるエネルギーの低い）中性子を当てると、 $^{235}_{92}\text{U}$ の原子核は2個の原子核に分裂し、中性子が数個発生する。この核分裂反応により、 $^{235}_{92}\text{U}$ の原子核1個あたり約 2×10^8 eV (200 MeV) の核エネルギーが放出される。	核分裂では、まれに3体に分裂することがあります(約0.01%)。
420	図 30 核分裂 核分裂後は核分裂前よりも総質量が減少するため、その差に応じたエネルギーが放出される。	
420	例題 4 核分裂 $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{141}_{56}\text{Ba} + {}^{92}_{36}\text{Kr} + 3{}_0^1\text{n}$ の核反応式で表される核分裂で放出される核エネルギーは何Jか。また、それは何MeVか。 $^{235}_{92}\text{U}$ 、 $^{141}_{56}\text{Ba}$ 、 $^{92}_{36}\text{Kr}$ の原子核、そして ${}_0^1\text{n}$ の質量をそれぞれ234.9935 u、140.8837 u、91.9064 u、1.0087 uとする。さらに、1 u = 1.66×10^{-27} kg、1 eV = 1.60×10^{-19} Jとし、光速を 3.00×10^8 m/sとする。 【解説】 反応前後の質量の差は、 $(234.9935 \text{ u} + 1.0087 \text{ u}) - (140.8837 \text{ u} + 91.9064 \text{ u} + 3 \times 1.0087 \text{ u}) = 0.1860 \text{ u}$ よって、この反応で放出される核エネルギーは、 $E = \Delta mc^2 = 0.1860 \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \approx 2.78 \times 10^{-11} \text{ J}$ また、 $\frac{E}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} = 1.74 \times 10^8 \text{ eV} = 1.74 \times 10^2 \text{ MeV}$	
420	問 12 1.0 kg のウランに中性子を当てて前述の核分裂を起こした。この反応で放出される核エネルギーは何Jか。また、これは炭素 1.0 kg の燃焼によって得られる熱エネルギー (3.7×10^7 J) の何倍か。	
420-421	連鎖反応 図 31 に示すように、1 個の原子核が核分裂すると、中性子が発生する。この発生した中性子が別の原子核にあたると、新たな核反応が起き、核分裂反応とともに再び中性子が発生する。このように、次々に核分裂反応が起こる現象を連鎖反応という。連鎖反応が一定の割合で続く状態を臨界といい、臨界に必要な物質の量を臨界量という。 連鎖反応によって多くの原子核を瞬間的に核分裂させて膨大なエネルギーを放出させるのが原子爆弾の原理である。一方、発生した中性子を吸収させて、核分裂の起こる頻度を制御しながら核エネルギーを放出させるのが原子力発電である。	
420	図 31 連鎖反応	
421	原子力発電 図 32 は原子力発電のしくみの一例である。原子炉圧力容器内には、図 33 のようなペレットでつくられた燃料棒があり、中性子を吸収する物質で作られた制御棒を出し入れすることで連鎖反応が制御されている。また、燃料棒のまわりを流れる一次系の水により、核エネルギーが熱エネルギーに変換される。原子力発電では、原子炉で得られた熱エネルギーを使って二次系の水を高圧水蒸気に変え、タービンを回すことで電気エネルギーに変換し、送電している。なお、核分裂で発生する中性子は高速であるため、次の核分裂が起こりにくい。このため、燃料棒の周りの水は中性子の速度を小さくして核分裂の起きる頻度を調整する減速材の役割も担っている。 原子力発電は二酸化炭素や硫黄酸化物などを排出しないという利点がある一方で、使用済み核燃料の処理や管理、原子炉の事故の対応などに十分に注意する必要がある。 原子力発電の安全に対するさまざまな議論は現在も行われており、これに代わる新しいエネルギー（再生可能エ	「これ（原子力発電）に代わる新しいエネルギー（再生可能エネルギー）の実用化へ向けた研究開発が進められている。」とありますが、エネルギー密度の点から再生可能エネルギーが原子力発電に代わるエネルギーとなることは考えにくく、二酸化炭素を排出しない新しいエネルギーとして研究開発が進められているのが現状です。

	ネルギー) の実用化へ向けた研究開発が進められている。	
421	図 33 ウラン燃料ペレット ウラン 235 を 3～5%に濃縮し、焼き固めたもの。燃料棒にはこのペレットが積み重ねられている。ペレット 1 つで標準的な家庭の 8～9 か月分 (石油 0.5 トン分) の電気使用量 (約 2600 kWh) をまかなえるエネルギーを出す。	
421	①減速材として、液体では水、固体では黒鉛などが用いられている。	
421	②太陽エネルギーや地熱エネルギーなどのように資源がほぼ無限に存在するエネルギーのこと。これに対して、化石燃料や核燃料などのように再利用できないエネルギーを非再生エネルギーという。	「化石燃料や核燃料などのように再利用できないエネルギーを非再生エネルギーという。」とありますが、核燃料については高速増殖炉を含む「核燃料サイクル」によって半永久的に利用できる可能性がありますので、例えば、「化石燃料などのように再利用できないエネルギーを非再生エネルギーという。」とするほうがより適切です。
422	D 核融合 2 個以上の軽い原子核が反応して、それらよりも重い原子核ができる反応を核融合という。核融合も核分裂と同様に、より安定な原子核に移るときの反応である。核融合でも、反応前後での質量の総和が減少することから、その差に相当する核エネルギーが放出される。例えば、図 34 のような重水素 ${}^2_1\text{H}$ の核融合 ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^1_1\text{p}$ では、約 4 MeV の核エネルギーが放出される。 重水素原子核 ${}^2_1\text{H}$ は正の電気量を持つことから、この核融合を起こすためには、2 つの ${}^2_1\text{H}$ を、これらの間にはたらく静電気力による反発力に打ち勝って、反応を起こす距離まで近づける必要がある。このためには、 ${}^2_1\text{H}$ どうしを非常に高速で衝突させなければならない。なお、太陽などの恒星の中心部では、高温、高密度の状態で、原子の熱運動による衝突で、核融合が自然に起こっている。	
422	図 34 核融合 核分裂と同様に、核融合の前後で総質量が減少するため、その差に応じたエネルギーが放出される。	
422	問 13 ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ の核反応で示される核融合で放出される核エネルギーは何 MeV か。ただし、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_2\text{He}$ の核子 1 個あたりの結合エネルギーを、それぞれ 1.1 MeV、2.6 MeV とする。	
422	問 14 地球の大気による吸収がないものとすれば、太陽熱に直交する 1.0 m^2 の面積が 1 秒間に受ける太陽からの放射エネルギーは約 1.4 kW である。 (1) 太陽の 1 秒間の総放射量は何 W か。太陽と地球の間の距離を $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ とする。 (2) 太陽の質量は毎秒何 kg ずつ減少しているか。ただし、光速を $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ とする。	
422	この節のポイント ・核反応が起きても、その前後で原子番号の和と質量数の和はそれぞれ変わらない。 ・原子核の質量は、それを構成する核子の質量よりも質量欠損の分だけ小さく、この分のエネルギーを結合エネルギーという。 ・原子核反応の前後で生じた結合エネルギーの差が核エネルギーとして放出される。	
422	調べてみよう 国際熱核融合実験炉 ITER (イーター) など、核融合の研究が現在も進められている。核分裂を利用した原子力発電と比べて利点もあるが、解決すべき課題もある。どのような課題があるか調べてみよう。	
実教出版 702 物理		

282	C X線 X線にはどのような性質があるのだろうか？ X線の発見 1895年、レントゲン（ドイツ）は陰極線の実験をしているとき、放電管のそばに黒い紙で包んで置いてあった写真乾板が感光していることに気づいた。彼は陰極線がぶつかったガラスの壁から未知の何かが出ていることを確かめ、これをX線と名づけた。X線は金属や骨を透過しないが、ガラスや紙を透過し、電離作用がある。また、電場や磁場で曲がらないことから荷電粒子の流れではなく、波長の短い電磁波であることがわかった。 現在では、このX線の透過作用や電離作用を利用して、X線撮影による医療診断などに利用されている。 X線のスペクトル X線を発生させるには、図15(a)のようなX線管を用いる。放出されるX線の強さと波長の関係を調べると、図15(b)のスペクトルが得られる。スペクトルは、なだらかな曲線部分の連続X線と、鋭いピークの特有X線からなる。 連続X線 X線管の陰極から出た熱電子は電圧Vで加速され、運動エネルギーeVで陽極に衝突する。加速された電子のもつ運動エネルギーの一部がX線の光子のエネルギーになり、残りは熱エネルギーに変わる。その結果、さまざまなエネルギーをもった連続X線が得られる。X線の最大のエネルギーが得られるのは、運動エネルギーがすべてX線の光子のエネルギーに変わった場合である。そのときの振動数をν_0とすれば、$h\nu_0 = eV$と表されるので、加えた電圧がVのとき、X線の最短波長λ_0は次式のようになる。 $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{hc}{eV} \quad < 15 >$ 加速電圧が大きいほど、波長の短い、エネルギーの大きなX線が発生する。エネルギーの大きなX線は透過力が強い。透過力の強いX線を硬X線、エネルギーの小さな透過力の弱いX線を軟X線という。 特性X線 特性X線は、電子の加速電圧には関係なく、電子が衝突する陽極物質の種類によって決まった波長に強く現れる（→ p. 296 参考）。	
282	②光を受けると変色する物質（感光物質）をガラスに塗ったもの。	
282	③金属などが熱せられ、エネルギーを得て飛び出した電子のこと。	
282	図14 レントゲンが撮影したX線写真	
282	図15 X線スペクトル	
283	問3 5.0×10^4 Vの電位差で電子を加速できるX線管から発生するX線の最短波長を求めよ。ただし、プランク定数 $h = 6.6 \times 10^{-34}$ J・s、光の速さ $c = 3.0 \times 10^8$ m/s、電気素量 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C とする。	
283	X線の波動性 1912年、ラウエ（ドイツ）により、X線が波動性をもち、回折・干渉する現象が発見された。図17(a)のように特定の角度で結晶に連続X線を当てると、写真フィルムに図16のような斑点が現れる。この斑点をラウエ斑点といい、X線が結晶により回折し、干渉した結果である。結晶は原子がX線の波長程度の間隔で並んだもので、X線に対してちょうど回折格子の役割を果たすのである。 ブラッグの実験 結晶は、図17(a)のように原子配列面（格子面）が等間隔dで積み重なったものと考えることができる。1つの格子面（面A）について入射X線と反射X線が反射の法則を満たすとき $PQ' = P'Q$ となり、格子面A上のすべての原子からの反射波の位相は等しくなる。入射X線は各格子面で反射するが、それぞれの反射X線が同位相になった	

	とき、干渉して強め合い、ブラッグ反射とよばれる強い反射 X 線が得られる。図 17(a) で、隣り合う格子面からの行路差は $2d \sin \theta$ であり、これが X 線の波長 λ [m] の整数倍になるときに強め合う。 $2d \sin \theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$ < 16 > 式(16)は、1912 年にブラッグ（イギリス）によって見いだされたため、ブラッグの条件といい、θ をブラッグ角という。図 17(b) に示すように、結晶にはさまざまな向きの格子面があり、これらの面がブラッグの条件を満たす方向に強い散乱 X 線が生じる。波長のわかっている X 線を用いれば、これから結晶中の原子の間隔がわかる。この方法は、現在では物質の構造解析には欠かせない手段となっている。	
283	問 4 間隔 $d = 2.8 \times 10^{-10}$ m の格子面に、ブラッグ角 30° で入射する最短波長 2.0×10^{-10} m の連続 X 線のうち、ブラッグ反射される X 線の波長を求めよ。	
283	図 16 X 線回折の実験	
283	図 17 ブラッグ反射	
284- 285	D X 線の粒子線 光と同じように X 線にも粒子線はあるのだろうか？ コンプトン散乱 X 線を物質に当てたとき、X 線はさまざまな方向に散乱される。図 18 のように、X 線を黒鉛片に入射し、さまざまな角度において散乱された X 線の波長と強度を調べた。 すると、散乱された X 線には、入射した X 線の波長 λ のほかに、入射 X 線の波長よりも長い波長 λ' を含んでいることがわかった。X 線を波動と考えると、入射 X 線と散乱 X 線の波長は同じものになるはずであり、この現象を説明することができない。アインシュタインは、振動数 ν [Hz] の電磁波は $h\nu$ [J] のエネルギーをもった光子の流れであるとする光量子仮説を発展させ、光子は次式で表される運動量 p [kg・m/s] をもつと考えた。 光子の運動量 $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ < 17 > p (kg・m/s) : 光子の運動量 h (J・s) : プランク定数, ν (Hz) : 光の振動数 c (m/s) : 真空中の光の速さ, λ (m) : 光の波長 コンプトン（アメリカ）は、物質による X 線の散乱は光子と静止している電子の弾性衝突であると考えた（1923 年）。すると、光子が電子をはね飛ばすときに、運動量とエネルギーの一部が電子に移り、光子の運動量とエネルギーが変化する。その結果、散乱 X 線の波長は長くなる。こうした波長の変化をとまなう散乱をコンプトン効果といい、式(17)の関係式の有力な証拠となった。このように、X 線には運動量とエネルギーをもつ粒子としての性質（粒子性）もあることが明らかとなった。 なお、例題 4 の計算により、波長 λ の X 線を入射したとき、入射方向から θ の方向に散乱された散乱 X 線の波長 λ' は、 $\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$ < 18 > と与えられる。この式は、実験結果とよく一致している。	
284	「散乱された角度が大きいほど、入射 X 線からの波長のずれが大きいですね。」	
284	「音波が静止した壁に当たっても、音の高さは変わらないよね？」	
284	-Image- 光子は、光の振動数に比例する運動量を持っている。	
285	例題 4 コンプトン効果	

	図のように、静止している質量 m の電子に、波長 λ の X 線を入射したとき、電子は入射方向から ϕ の方向に速さ v で飛ぶ。X 線は θ の方向に散乱されたとする。この散乱された X 線の波長を λ' とする。また、光の速さを c、プランク定数を h とする。 (1) エネルギー保存の法則により式を立てよ。 (2) x 軸方向、y 軸方向それぞれに運動量保存の法則により式を立てよ。 (3) (1)、(2) より、λ' を λ、m、c、h、θ を用いて表せ。ただし、λ' と λ が非常に近い値の場合は、$\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} \approx 2$ が成り立つものとする。	
285	解説 (1) エネルギー保存の法則より、 (答) $\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{1}{2}mv^2$ (2) x 軸方向の運動量保存の法則より、 (答) $\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + mv \cos \phi \cdots (a)$ また、y 軸方向の運動量保存の法則より、 (答) $0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \theta - mv \sin \phi \cdots (b)$ (3) (a)、(b) より、 $mv \cos \phi = \frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} \cos \theta$ $mv \sin \phi = \frac{h}{\lambda'} \sin \theta$ これらの両辺をそれぞれ 2 乗して足すと、$\sin^2 \phi + \cos^2 \phi = 1$ であるので、 $(mv)^2 = \left(\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} \cos \theta \right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'} \sin \theta \right)^2$ $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ を利用し、整理すると、 $(mv)^2 = \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'} \right)^2 - 2 \frac{h^2}{\lambda \lambda'} \cos \theta \cdots (c)$ ここで、(1) より、 $(mv)^2 = 2m \left(\frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'} \right)$ これを (c) に代入し、両辺に $\frac{\lambda \lambda'}{2mhc}$ を掛けると、 $\lambda' - \lambda = \frac{h}{2mc} \left(\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} \right) - \frac{h}{mc} \cos \theta$ ここで、与えられた近似式を利用すると、 $\lambda' - \lambda \approx \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$ (答) $\lambda' \approx \lambda + \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$	—
285	問 5 波長が 7.1×10^{-11} m の X 線の黒鉛片に入射した。プランク定数 $h = 6.6 \times 10^{-34}$ J・s、光速 $c = 3.0 \times 10^8$ m/s、電子の質量 $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg として、以下の問に答えよ。 (1) この入射 X 線の運動量を求めよ。 (2) 式(18)を利用し、散乱角 θ が 90° のときの $\lambda' - \lambda$ を求めよ。	

285	〈振り返り〉 (1) 光電効果において、限界振動数が存在するのはなぜか。 (2) X線の波動性と粒子性が現れる現象、それぞれ1つずつあげよ。	
285	わかったこと、わからなかったことを、まわりの人と議論してみよう！	
290	2節 原子と原子核 物質を、宇宙を、我々人類はどこまで理解できるのだろうか？ 古代ギリシャの哲学者は「これ以上分割できないもの」という意味でアトム（原子）と名づけたが、科学が発展する中で、原子核、陽子と中性子、さらにクォークと、より内部の構造が明らかになってきた。こうしたミクロの世界の理解は、宇宙というマクロな世界の理解とも結びついており、「物質とは何か？」、「宇宙はどうなっているのか？」という根源的な問いへの挑戦は、現在も続いている。 この節では、原子の構造が明らかになってきた経緯や、原子核がどのように反応し、原子力発電として利用されているのか学習していく。根源的な問いへの人類の挑戦の過程を理解するとともに、原子力発電などについて正しく理解できるように科学的な判断力をつけていこう。	
290	1 原子の構造 学習目標 □どのように原子核が発見され、現在のような原子模型が確立したのか理解する。 □ボーアの2つの仮説から、水素原子のエネルギー準位を導くことができる。	
290	予想してみよう 薄い金ばくに α 粒子（ヘリウムの原子核）を多数打ち込んだら、どのようなになるか？ ① α 粒子はほとんどはね返ってくる。 ② α 粒子ははね返ることなく、通り抜ける。 ③ α 粒子はほとんど通り抜けるが、まれにはね返ってくる。	
290	A 原子の構造 20世紀初頭、どのように原子模型が考えられていたのだろうか？ 1897年、J. J. トムソンは陰極線が電子の流れであることを解明し、すべての原子の中には電子が共通して含まれることが明らかになった。また、電子の質量は水素イオンの約2000分の1とわかり、質量の大部分は原子内の正電荷がもつと考えられた。 1903～1904年にJ. J. トムソンは、原子全体に一律な正電荷が広がり、その中に負の電荷をもつ電子が分布している原子模型を提案した。また、1904年に長岡半太郎は、原子の中心に正の電荷が集中し、この中心の核のまわりを電子が土星の環のように取りまいている原子模型を提案した。	
291	原子核の発見 1909年、ラザフォードとガイガーらは薄い金ばくを用いた α 粒子 (${}^4_2\text{He}$原子核) の散乱実験を行い、α 粒子の多くは素通りするが、一部が入射方向から大きく曲げられる現象を観測した。α 粒子は電子の約7300倍もの質量をもつので、電子との衝突ではほとんど曲がらないはずである。この結果からラザフォードは、原子の中心には原子の質量の大部分と正電荷をもった極めて小さな原子核があり、その大きさは 10^{-14} m より小さいと考えた。そして、原子核のまわりを電子が運動していると考えた。その後、原子番号 Z の原子の原子核は Ze^- [C] の正電荷を持ち、そのまわりに Z 個の電子が存在することがわかった。	
291	「原子の大きさが 10^{-10} m 程度に対して、原子核の大きさは 10^{-14} m 程度なので、1万分の1も大きさが違います。よって、α 粒子のほとんどが通り抜けてしまうことも納得ですね。」	
291	図 21 α 粒子の散乱実験	
291	図 22 α 粒子の散乱とラザフォードの原子模型	

	α 粒子の質量は電子の質量の約 7300 倍であり、衝突による影響はほとんどないため、電子の存在を無視して図示している。大きく散乱される α 粒子がまれに観測されることに対して、(a) のトムソン模型ではうまく説明できないが、(b) の有核原子模型ではうまく説明できる。	
291	例題 6 原子核の大きさの見積もり 原子番号 Z の原子核に α 粒子が向かっている。電気素量を e、真空中のクーロンの法則の比例定数を k_0 とし、原子核は動かないものとして次の問いに答えよ。 (1) 運動エネルギー K をもった α 粒子が十分遠方から、原子核の中心に向かっていくとき、最も近づける距離を求めよ。 (2) 5.0 MeV の運動エネルギーをもった α 粒子が十分遠方から金の原子核に向かっていくとき、最も近づける距離を求めよ。ただし、金の原子番号 $Z = 79$、$e = 1.6 \times 10^{-19}$ C、$k_0 = 9.0 \times 10^9$ N・m²/C²、1 MeV = 1.6×10^{-13} J とする。	
291	解説 (1) 原子核の中心から r の距離にある粒子の静電気力による位置エネルギー U は、「$U = k_0 \frac{qQ}{r}$」であるから、 $U = k_0 \frac{2e \cdot Ze}{r} = k_0 \frac{2Ze^2}{r}$ 力学的エネルギー保存の法則より、 $K + 0 = 0 + U$ よって、$K = U = k_0 \frac{2Ze^2}{r}$ なので、最も近づいたときの距離 R は、(答) $R = \frac{2k_0Ze^2}{K}$ (2) 上式に数値を代入すると、 $R = \frac{2 \times 9.0 \times 10^9 \times 79 \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{5.0 \times 1.6 \times 10^{-13}}$ $= 4.6 \times 10^{-14} \text{ [m]}$ (答) 4.6×10^{-14} m	
296	参考 特性 X 線の発生原理 X 線管から発生する X 線には、鋭いピークの特有 X 線が含まれていた。この特性 X 線の発生原理も、陽極の金属原子のエネルギー準位を用いて説明することができる。陰極から出た電子が陽極金属に衝突するとき、陽極金属の原子の深部にある電子をはじき出す。すると、その電子よりも外側の軌道にあり、エネルギー準位の高い位置にある電子が、空席を埋めるように落ち込んでくる。そのときエネルギー差に等しい光子、つまり X 線が放出される。これが特性 (固有) X 線である。	
296	参考 フランク・ヘルツの実験 ボーアの理論によると、室温では、原子はふつう基底状態にある。励起状態の原子のエネルギーを E_2、基底状態の原子のエネルギーを E_1 とする。そのとき、差 $E_2 - E_1$ より大きいエネルギーをもつ電子を原子に衝突させると、一部の電子は原子と非弾性衝突をして原子に $E_2 - E_1$ のエネルギーを与え、原子は励起状態となる。 1913～14 年、フランクとヘルツは、右図 (a) のような装置で実験を行い、右図 (b) に示す結果のグラフを得た。これは、次のように考察できる。 陰極 K と金網 G の間の電位差 V_0 で加速された電子は、陽極 P より 0.5 V だけ電位の高い金網 G のすき間を通り抜け、陽極 P に達する。電子の電気量の大きさを e としたとき、加速電圧 V_0 を増加させていき、eV_0 の値が水銀原子の $E_2 - E_1$ を超えると、電子の中には水銀原子と非弾性衝突をして、もっているエネルギーの一部を水銀原子に与えてしまうものが現れる。その結果、電位の高い金網 G でさえぎられ、陽極 P に到達できないものが生じるた	

	め、電流 I は減少する。 水銀原子との衝突でエネルギーを失った電子がさらに別の水銀原子と非弾性衝突をするため、約 4.9 V 間隔で電流の減少を示す。これが右図 (b) の第 2, 第 3 の谷が現れる原因である。フランク・ヘルツの実験では、波長 2.536×10^{-7} m の線スペクトルが観測された。$E_2 - E_1 = 4.9$ eV の励起状態にあった水銀原子の出す波長は、式〈32〉を変形すると $\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{4.9 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 2.5 \times 10^{-7} \text{ m}$ と求められ、実験結果と一致する。このことから、実際に水銀原子が励起されたことが確かめられた。	
297	2 原子核 学習目標 □放射性崩壊の種類とその特徴を理解する。 □放射性同位体の数がどのように変化するのか理解する。	
297	予想してみよう 目の前に半減期の短い物質と半減期の長い物質が同じ量あったとすると、どちらの方が放射線を多く浴びることになるか？ ①半減期の短い物質 ②半減期の長い物質	
297	A 原子核の構成 原子番号や質量数とは何か？ 【復習】すべての物質は原子でできている。原子は原子核と電子で構成されている。さらに原子核は、正の電荷をもつ陽子と電荷をもたない中性子で構成されており、これらの陽子と中性子を合わせて核子とよぶ。陽子の数をその原子の原子番号、陽子と中性子の数の和をその原子の質量数といい、図 30 のように表す。原子番号を Z、質量数を A、中性子の数を N とすると、次式が成り立つ。 $A = Z + N$ 質量数 = 原子番号 + 中性子数 (核子数) (陽子数) 核子と核子を結びつける力を核力という。核力は近距離ではたらき、静電気力よりもはるかに大きいため、陽子どうしに斥力がはたらくのにもかかわらず核子を結びつけ、原子核を保つことができる。	
297	「陽子の数によって元素が決まって、核子の数によって質量が決まるのでしたね」	
297	B 同位体 同位体どうしでは何が異なるか？ 【復習】同じ元素であれば同じ原子番号であるが、同じ元素でも中性子の数が異なり、質量数の異なる原子核が存在する。そのそれぞれを同位体（アイソトープ）という。例えば図 31 のように、水素であれば原子番号は 1 であるが、質量数が 1, 2, 3 のものが存在する。これらは、同じ数の電子をもっているため、どれも同じように酸素原子と化学結合して水分子をつくる。つまり、同位体の化学的性質はほとんど変わらない。	
297	「同位体どうしでは、原子から発生する光のスペクトルも同じになります。」	
297	図 30 原子番号と質量数の表し方	
297	図 31 水素の同位体	
298	原子量 原子や原子核の質量は極めて小さいため、統一原子質量単位（記号 u）を用いて表すことが多い。1 u は $^{12}_6\text{C}$ 原子 1 個の質量の $1/12$ と決められている。$^{12}_6\text{C}$ 原子 1 mol あたりの質量は 12 g であり、1 mol あたりの原子数はアボガドロ定数 N_A (6.02×10^{23} /mol) である。 $1 \text{ u} = \frac{12 \text{ g/mol}}{6.02 \times 10^{23} \text{ /mol}} \times \frac{1}{12} \approx 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad \langle 34 \rangle$	

	統一原子質量単位を用いると、陽子や中性子の質量はほぼ 1 u となる。そのため、同位体の原子の質量を統一原子質量単位で表したときの値は、その同位体の質量数に近い値となる。そのため、原子や原子核の質量を表すのに都合がよい。多くの元素には複数の同位体があるので、原子の質量を考えるときには、元素の同位体の質量の存在比による重みづけをした平均値を利用する。この平均質量の 1 u に対する比を元素の原子量という。例えば、炭素の原子量は、表 2 より次のように求められる。 $^{12}_6\text{C}$ の質量 $^{12}_6\text{C}$ の存在比 $^{13}_6\text{C}$ の質量 $^{13}_6\text{C}$ の存在比 $^{12}_6\text{C}$ の原子量 $12.000 \times 0.989 + 13.003 \times 0.011 = 12.01$	
298	問 8 表 2 を参考にして、塩素とネオンの原子量を求めよ。	
298	参考 原子核の安定性 原子核内で核子を結びつけておく核力は、近距離でしかはたらかない。その一方で、陽子どうしにはたらく静電気力は距離がある程度離れてもはたらくので、核子の数が多くなり原子核が大きくなると、静電気力の斥力によって原子核が不安定になる。そのため、原子番号が大きい原子核ほど、静電気力がはたらかない中性子の数が多くなり、核力によって原子核が安定化する傾向にある。	
298	表 2 自然界に存在する同位体と存在比	
299	放射線と崩壊の種類 放射性同位体の原子核からは α 線、β 線、γ 線などの放射線が出ている。また、核反応によって発生する中性子線や宇宙から飛んでくる原子核などの宇宙線、放電現象で発生する X 線なども放射線である。これらは物質を通り抜ける性質（透過性）があり、物質を通過するとき原子の中の電子を弾き飛ばしてイオン化させる作用（電離作用）をもっている（図 33）。α 線、β 線、γ 線を出して原子核が放射性崩壊することを、それぞれ α 崩壊、β 崩壊、γ 崩壊という。	
299	α 崩壊 α 崩壊は、不安定な原子核が α 線（α 粒子、^4_2He の原子核）を放出し、原子番号が 2、質量数が 4 減少した別の原子核になる現象である。例えば、原子番号 88 のラジウム 226 ($^{226}_{88}\text{Ra}$) は、α 崩壊をして原子番号 86 のラドン 222 ($^{222}_{86}\text{Rn}$) になる。これは、次のような核反応式とよばれる式で表される。 $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He} \quad < 35 >$ α 線は透過力が弱く、1 枚の紙を透過することができない。	
299	β 線 β 崩壊は、不安定な原子核内の中性子が β 線（電子）を放出して陽子に変わり、質量数は変化せず、原子番号が 1 増加した別の原子核になる現象である。例えば、鉛 210 ($^{210}_{82}\text{Pb}$) は、β 線を放出してビスマス 210 ($^{210}_{83}\text{Bi}$) となる。電子を記号 e^- で表すと、この核反応式は次のようになる。 $^{210}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{210}_{83}\text{Bi} + e^- (\text{電子}) \quad < 36 >$ β 線は紙を透過するが、鉛の板などは透過できない。	
299	◇ γ 線 崩壊により生じた原子核が不安定な状態（励起状態）にある場合は、余分なエネルギーを γ 線（波長の短い電磁波）の形で放出してより安定な状態になることがある。γ 崩壊では質量数、原子番号ともに変化しない。γ 線は紙や薄い金属板は透過するが、厚い鉛板やコンクリートなどで止まる。	
299	「X 線は電子が加速されたり遷移したりするときに放出されるものですが、 γ 線は原子核から放出されるものですよ。」	
299	図 32 放射線の種類 α 線と β 線は磁場からローレンツ力を受けて曲がるので、電荷をもっていることがわか	

	る。 γ 線は電荷をもっていないので、磁場によって曲げることができない。	
299	図 33 放射線の種類	
299	図 34 α 崩壊	
299	図 35 β 崩壊 実際には電子とともに反電子ニュートリノも同時に放出されている。(→p. 311)	
302	放射線に関する単位 【Bq (ベクレル)】放射性物質の放射能の強さを表す単位であり、1 Bq は 1 s 間に 1 個の割合で原子核が崩壊することを表している。例えば、食品や水 1 kg あたりに含まれる放射性物質の量を Bq/kg で表すことで、食品や水の汚染具合がわかる。同じ数の放射性同位体で比べると、半減期の短いものは、放射能は強いが短期間でその数が減少する。一方、半減期の長いものは、放射能は弱いが長期間存在して影響を及ぼす。	
302	【Gy (グレイ)】物質が放射線から受ける影響は、物質の単位質量あたりに吸収される放射線のエネルギー (吸収線量) で表される。1 Gy は、物質 1 kg あたり 1 J のエネルギーが吸収される場合の吸収線量を表す。	
302	【Sv (シーベルト)】放射線が人体に及ぼす影響は、放射線の種類により異なる。そのため、それぞれの組織や臓器ごとに受けた吸収線量に、放射線の種類を考慮した係数を掛けたものを等価線量といい、単位には Sv を用いる。さらに、組織や臓器によって放射線の影響は異なるので、等価線量に組織や臓器による感受性の違いによる重みづけをして、それらを合計したものを実効線量といい、全身への影響を表す。実効線量の単位にも Sv を用いる。	
302	人体への影響 放射線を受けることを被曝という。放射線はその電離作用によって細胞内の DNA を傷つけ、がんなどの放射線障害を引き起こすことがあるため、被曝は最小限にとどめる必要がある。私たちは、宇宙や地面、建物など体外から放射線を受け (外部被曝)、体内に取り入れた空気や食品からも放射線を受けている (内部被曝)。自然に存在する放射線や医療目的による被曝を除き、一般の人の被曝限度は法律で年間 1.0 mSv と定められている。	
302	図 38 放射能と放射線	
302	図 39 吸収線量と等価線量と実効線量の関係	
302	図 40 放射線被曝と人体への影響	
303	放射線の利用 放射線は、その性質に応じて、医療、工業、農業などさまざまな分野で広く利用されている。	
303	○透過性を利用 病院では、身体に外傷を与えることなく胸や胃などの体内の状態を診断するため、X 線撮影や CT (コンピュータ断層撮影) が利用されている。また、工業では、物品を分解することなく材料内部の欠陥や微小な傷を調べることができる非破壊検査の技術に、放射線が利用されている。	
303	○電離作用の利用 プラスチックなどの高分子材料に放射線を照射すると、放射線の電離作用により、耐熱性に優れた物質に変えることができたり、強度を高めたりすることができる。この技術が自動車のタイヤ、水泳用のビート板などに利用されている。	
303	○生物への影響の利用 がん細胞に放射線を外から照射したり、患部に放射性物質を埋め込んだりして、がん治療に利用している。農業では、植物などに放射線を当て意図的に突然変異を起こさせ、品種改良をするのに利用している。またほかにも、農作物の害虫に放射線を照射し、不妊化してから野外に放つことで、害虫の駆除に成功した事例がある。	
303	○半減期の利用 宇宙線によって生成される $^{14}_6\text{C}$ の量と、放射性崩壊してなくなる $^{14}_6\text{C}$ の量がほぼ同じなので、大気中に含まれる $^{14}_6\text{C}$	

	の割合はほぼ一定に保たれている。生きている植物に含まれる^{14}Cの割合は大気と同じだが、光合成をしなくなった植物内の^{14}Cは、半減期 5700 年のペースで減少していく。この性質を利用して、遺跡から出土した土器などの年代を、土器についた食品のこげやすすに含まれる^{14}Cの割合から推定することができる。	
303	〈振り返り〉 (1) α 崩壊, β 崩壊, γ 崩壊では、原子番号と質量数はどれだけ変化するか説明してみよう。 (2) 半減期が長い放射性同位体と短い放射性同位体では、人類にどのような影響を及ぼすか話し合ってみよう。	
304	3 原子核反応 学習目標 ☐ 原子核反応にはどのような規則性があるか説明できる。 ☐ 原子核反応ではなぜ大きなエネルギーが取り出せるのか説明できる。	
304	予想してみよう ヘリウム原子核の質量と、陽子 2 個と中性子 2 個の質量では、どちらが小さいか？ ①ヘリウム原子核 ②陽子 2 個と中性子 2 個の合計 ③どちらも同じ質量である	
304	A 質量とエネルギーの等価性 質量欠損とは何か？ さまざまな元素の同位体の質量と存在比が精密に測定され、原子核の質量は、構成する核子の質量の総和より小さいことが分かった。例えば、陽子 2 個、中性子 2 個からできているヘリウム^4_2Heの原子核の質量は、ばらばらの状態にある陽子 2 個、中性子 2 個の質量の和よりも小さい。つまり、原子番号 Z、質量数 A の原子核の質量は、陽子の質量m_pの Z 倍と中性子の質量m_nの $(A-Z)$ 倍の和より小さい。その差Δmをその原子核の質量欠損という (図 41)。 $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m \quad < 38 >$ アインシュタインが 1905 年に発表した特殊相対性理論によれば、質量とエネルギーは同等である。つまり、質量はエネルギーの形態の一つであり、質量 m [kg] の静止状態にある物体は、次式で表される静止エネルギー E [J] をもっている。 質量とエネルギーの等価性 $E = mc^2 \quad < 39 >$ E (J) : 静止エネルギー m (kg) : 質量 c (m/s) : 真空中の光速	
304	-Image- 質量はエネルギーの一形態である。	
304	問 11 質量 1 u の粒子の静止エネルギーは何 eV か。有効数字 2 桁で求めよ。ただし、$1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ とする。	
304	問 12 ^{12}C原子核の質量欠損Δmは何 u か。表 4、表 5 を参考にして答えよ。また、Δmは何 eV のエネルギーに相当するか。ただし、^{12}C原子核の質量は 11.9967 u である。	
304	表 4 電子、陽子、中性子の質量	
304	表 5 ^2_1Hと^4_2Heの質量欠損	
304	図 41 原子核の質量欠損	
305	B 原子核の結合エネルギー 質量欠損はなぜ生じるのだろうか？ 原子核に質量欠損があるということは、核子がばらばらのときに比べて、エネルギーが	

	$\Delta E = \Delta mc^2$ $< 40 >$ だけ小さくなっていることを示している。したがって、原子核をばらばらの核子にするためには、 Δmc^2 だけのエネルギーを外から与えなくてはならない。つまり、核子が結合して原子核になっているということは、質量欠損に相当する分だけエネルギーが低い状態にあることを意味する。この意味で、この $\Delta E = \Delta mc^2$ で表される質量欠損に相当するエネルギーを原子核の結合エネルギーという（図 42）。原子核の結合エネルギーを表すとき、eV の 10^6 倍の MeV という単位を用いることが多い。	
305	問 13 p. 304 表 5 より、 ${}^2_1\text{H}$ と ${}^4_2\text{He}$ それぞれの結合エネルギーは何 MeV か。また、質量欠損はそれぞれの質量の何%にあたるか。ただし、 $1\text{ u} = 1.66 \times 10^{-27}\text{ kg}$ 、 $e = 1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$ 、 $c = 3.0 \times 10^8\text{ m/s}$ とする。	
305	◇核子 1 個あたりの結合エネルギー 図 43 は、さまざまな原子核について、核子 1 個あたりの平均結合エネルギー $\frac{\Delta E}{A}$ （A：質量数、 ΔE ：結合エネルギー）を示したものである。図 43 から、質量数が 50～60 前後の鉄付近の原子核が最大の結合エネルギー（約 8.8 MeV）をもち、最も安定であることがわかる。したがって、水素などの質量数の小さな軽い原子核どうしが融合して、より質量数の大きな重い原子核を生じる核融合も、ウランのような重い原子核が複数の軽い原子核に分裂する核分裂も、全体としては、よりエネルギーの低い、より安定な状態になる現象であり、結合エネルギーの差に相当する量のエネルギーが放出される。	
305	「結合エネルギーは原子核をばらばらの核子にするために必要なエネルギーなので、結合エネルギーが大きいほど安定した原子核だといえますね。」	
305	「核分裂や核融合が起こるのは、全体としてエネルギーが低い状態に移ろうとするはたらきなのですね。」	
305	図 42 結合エネルギー	
305	図 43 核子 1 個あたりの結合エネルギー	
306	例題 8 核融合によって放出されるエネルギー 重陽子 ${}^2_1\text{H}$ とヘリウム ${}^4_2\text{He}$ 原子核の質量は、 2.0136 u と 4.0015 u である。 ${}^2_1\text{H}$ 2 個が核融合して ${}^4_2\text{He}$ になるとき、何 MeV のエネルギーが放出されるか。ただし、 $1\text{ u} = 1.66 \times 10^{-27}\text{ kg}$ 、 $e = 1.60 \times 10^{-19}\text{ C}$ 、 $c = 3.00 \times 10^8\text{ m/s}$ とする。	
306	解説 核融合による質量変化（減少）は $\Delta m = 2 \times 2.0136 - 4.0015 = 0.0257\text{ [u]}$ なので、 $\Delta m = \frac{0.0257 \times 1.66 \times 10^{-27} \times (3.00 \times 10^8)^2}{1.60 \times 10^{-19}} \approx 24.0 \times 10^6\text{ [eV]}$ （答） 24.0 MeV	
306	参考 化学結合と質量損失 結合に際して質量欠損が生じるのは、核子どうしの場合だけではない。原子やイオンなどの化学結合の場合でも、同様に質量欠損が起こる。ただし、化学変化での質量欠損は、原子・分子の質量に比べておよそ 10^{-9} 倍と小さい。これは、有効数字 9 桁以上の測定をしないと検出できず、事実上不可能である。そのため、化学変化の前後で質量は変化しないと考えても差し支えない（質量保存の法則）。これに対して、核子どうしの結合による質量欠損は、原子核の質量のおよそ 10^{-3} 倍程度である。	
306-	C 原子核反応 原子核反応にはどのような特徴があるか？	

307	分子を構成する原子の組み合わせを変えれば、物質の種類は変わる（化学変化）。これに対して、元素の種類は原子核中にある陽子の数によって決まるため、元素を変えるには原子核を構成する核子の組み合わせを変える必要がある。放射性同位体は自然に崩壊し別の元素に変わるが、原子核を人工的に変換することはできていなかった。 1919 年、ラザフォードは、α 線が窒素ガス中を通過するときに、高エネルギーの陽子が発生することを発見した。この現象では、同時に$^{17}_8\text{O}$が生じており、窒素原子核が酸素原子核に変換されたことを示している。これを式で表すと、 $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He}(\alpha \text{ 粒子}) \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}(\text{陽子}) \quad < 41 >$ 同様に、ベリリウムに α 線を当てると中性子が飛び出す。この現象は次式で表される。 $^9_4\text{Be} + ^4_2\text{He}(\alpha \text{ 粒子}) \rightarrow ^{12}_6\text{C} + ^1_0\text{n}(\text{中性子}) \quad < 42 >$ このような、原子核が別の元素の原子核になる反応を原子核反応または核反応という（図 44）。原子核反応は、複数の原子核の間で陽子と中性子が組み換わる反応である。 したがって、反応の前後で陽子の数と中性子の総数は変化しない。そのため、原子番号の和と質量数の和は反応の前後でそれぞれ等しい。また、原子番号の和が等しいことから、核内の電荷の和も等しいといえる。一般に、原子核反応では、反応の前後で核子の数と核内の電荷の量は保存される。	
306	図 44 原子核反応 原子核乾板に炭素原子核を打ち込んだときの原子核反応	
307	例題 9 核反応式 次の化学反応式の（ ）にあてはまる記号を答えよ。 (1) $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ()$ (2) $^{27}_{13}\text{Al} + ^4_2\text{He} \rightarrow () + ^1_0\text{n}$	
307	解説 (1) 質量数：$2 + 3 = 4 + A$ より、$A = 1$ 原子番号：$1 + 1 = 2 + Z$ より、$Z = 0$ 原子番号 $Z = 0$、質量数 $A = 1$ で表される粒子は中性子 n である。 (答) ^1_0n (2) 質量数：$27 + 4 = A + 1$ より、$A = 30$ 原子番号：$13 + 2 = Z + 0$、$Z = 15$ 原子番号 $Z = 15$ の元素はリン P である。 (答) $^{30}_{15}\text{P}$	
307	D 核分裂 核分裂はどのようにして起こるのだろうか？ ウラン$^{235}_{92}\text{U}$の原子核に中性子をぶつけると、ウランの半分ほどの質量をもつセシウム$^{137}_{55}\text{Cs}$などの原子核に分裂する。このように、重い原子核が分裂する核反応を核分裂という。ウラン$^{235}_{92}\text{U}$の核分裂の仕方は多数あるが、例えば次のような反応が起こる（図 45）。 $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{141}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 3^1_0\text{n} \quad < 43 >$ このとき、図 46 からわかるように、ウラン$^{235}_{92}\text{U}$のように質量数が高い原子核に比べ、鉄の質量数に近い原子核は核子 1 個あたりの結合エネルギーが大きいため、その差に相当するエネルギー（核エネルギー）が放出される。式(43)で得られるエネルギーは、$^{235}_{92}\text{U}$の原子核 1 個あたり約 200 MeV である。炭素の燃焼による熱エネルギーは、炭素原子 1 個あたり 4.2 eV であり、これに比べると、核エネルギーはその約 5000 万倍と、非常に大きい。	
307	問 14 次の核反応式の(1)～(3)にあてはまる数字または記号を答えよ。 $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{137}_{55}\text{Cs} + ^{(1)}_{(2)}(3) + 4^1_0\text{n}$	

307	図 45 核分裂 $^{235}_{92}\text{U}$ の核分裂では、ほかにも、 $^{90}_{38}\text{Sr}$, $^{93}_{40}\text{Zn}$, $^{137}_{55}\text{Cs}$, $^{133}_{54}\text{Xe}$ などが発生する。	
307	図 46 核分裂におけるエネルギーの関係	
308	例題 10 核分裂 $^{235}_{92}\text{U}$の原子核が、質量数がほぼ等しい2個の原子核(AとB)に核分裂すると、約200 MeVのエネルギーが放出されることを示せ。ただし、$^{235}_{92}\text{U}$および分裂後の原子核(AとB)の核子1個あたりの平均結合エネルギーをそれぞれ7.6 MeV, 8.5 MeVとし、中性子は放出されないものとする。	
308	解説 $^{235}_{92}\text{U}$の原子核の結合エネルギーは7.6 MeV$\times$235, 核分裂後の原子核2個の結合エネルギーの和は8.5 MeV$\times$235である。したがって、放出されるエネルギーは、 $(8.5 - 7.6) \times 235 = 2.1 \times 10^2$ MeV (答) 2.1×10^2 MeV	
308	【復習】◇原子力発電 ウラン$^{235}_{92}\text{U}$が核分裂を起こすとき、平均2～3個の中性子を放出する。この放出された中性子が別の$^{235}_{92}\text{U}$にぶつかり、新たな核分裂を引き起こす。このように核分裂が連続して起こることを連鎖反応という(図47)。 原子力発電では、核分裂の核エネルギーによって高温・高圧の水蒸気をつくり、タービンを回し電気エネルギーに変換している。なお、ウランには、$^{234}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$, $^{238}_{92}\text{U}$の3種類の同位体が天然に存在するが、このうち中性子をぶつけて核分裂が起こるのは$^{235}_{92}\text{U}$だけであり、このような物質を核分裂性物質という。 天然ウランの99.3%にもなる$^{238}_{92}\text{U}$は核分裂性をもっておらず、$^{235}_{92}\text{U}$の割合を4%程度に濃縮して燃料ペレットをつくり、核燃料として使用している。また、原子炉ではウランに衝突する中性子の数を制御棒で調整し、連鎖反応が一定の割合で止まりも増大もせずに継続するようにしている。これを臨界という。	
308	図 47 連鎖反応	
308	図 48 ウラン燃料	
308	図 49 原子力発電(沸騰水型原子炉)	
309	原子力発電の利点と問題点 原子力発電は、ウラン1 gの核分裂で石油2000 L分に相当する膨大なエネルギーを得ることができる。また発電時に、地球温暖化の原因といわれる二酸化炭素をほとんど発生させない。しかし、ひとたび事故を起こすと、甚大な放射能汚染の被害をもたらしてしまう。使用済み核燃料をどのように管理するかなどの課題も残っている。また、ウランなどの核燃料もいずれは資源が枯渇する。これらの課題もあるため、原子力発電を続けるか、なくしていくかについて、議論が続いている。	「ひとたび事故を起こすと、甚大な放射能汚染の被害をもたらしてしまう。」という記述がありますが、事故には様々な程度があり、その程度により放射性物質の放出規模も様々です。そこで、「ひとたび重大な事故を起こすと、甚大な放射能汚染の被害をもたらしてしまう。」とすることを推奨します。 原子力発電所の事故については、国際原子力機関(IAEA)と経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)が「国際原子力事象評価尺度(INES)」を定め、1992年に各国に採用を勧告しています。原子力施設等の異常事象や事故は、その深刻度に応じて7つのカテゴリに分類され、カテゴリ6(重大な事故)が「相当量の放射性物質の放出」とされております。なお、INESについては本報告書の提言2で解説しておりますので、参考にしてください。 また、「ウランなどの核燃料もいずれかは資源が枯渇

		する。これらの課題もあるため、原子力発電を続けるか、なくしていくかについて、議論が続いている。」とありますが、原子力発電の是非をめぐる議論には、資源枯渇の観点は入っていないことが多いです（高速増殖炉を含む核燃料サイクルが実現すれば資源枯渇は大きな問題ではなくなる可能性もあります）。核燃料サイクルについては本報告書の提言 3 で解説しておりますので、参考にしてください。
309	E 核融合 核融合とは何か？ 核分裂とは逆に、いくつかの軽い原子核が 1 つに融合する反応を核融合という。 図 43 のように、原子核内の核子の数が少ないと、核子 1 個あたりの結合エネルギーが小さい。そのため、軽い原子核どうしの反応で、いくつかの原子核が 1 つに融合すると、大きなエネルギーが放出される。 核融合が起こるためには、2 つの原子核が静電気力に逆らって近づく必要がある。熱運動によって静電気力に打ち勝つには、1 億 K 以上の温度にする必要がある。太陽などの恒星内部では、自らの重力によって非常に高温・高圧の状態になっており、4 個の水素原子がいくつかの反応をくり返して、最終的に 1 個のヘリウム原子核ができる核融合が起こっており、約 27 MeV のエネルギーを放出している。 $4\frac{1}{2}H \rightarrow \frac{4}{2}He + 2e^+ + 2\nu_e \quad <44>$ 現在、これと同じ核融合を利用した発電の研究も進められており、将来のエネルギー源として期待されているが、高温・高圧の状況を制御する難しさもあり、実用化には至っていない。	
309	① e^+ は陽電子（電子と質量が等しく、電荷の符号が異なる粒子）、 ν_e は電子ニュートリノを表す。	
309	問 15 太陽は毎秒 3.8×10^{26} J のエネルギーを放出している。その際、核融合した水素の質量の 0.66% が減少している。このことから、太陽では毎秒何 kg の水素が核融合をしているといえるか。	
309	<振り返り> (1) 質量欠損と結合エネルギーとの関係を、静止エネルギーという言葉を使って説明してみよう。 (2) 原子力発電では、どのように電気エネルギーをつくり出しているか説明してみよう。	
309	図 50 核融合	
309	図 51 核融合におけるエネルギーの関係	
啓林館 703 高等学校 物理		
358	A X 線の発見 1895 年、陰極線の研究をしていたレントゲンは、放電管の近くに置いた蛍光板が光っていることに気づいた。彼は、放電管から未知の何かが放射されていると考え、これを X 線と名づけた。やがて、X 線は次のような性質をもつことが明らかになった。また、後のウラエの実験とあわせて、X 線は波長のきわめて短い電磁波であることがわかった。	
358	X 線の性質 ① 蛍光物質を光らせ、写真乾板やフィルムを感光させる。 ② 直進性があり、電界や磁界では曲げられない。 ③ 物質中の原子を電離してイオンにするはたらき（電離作用）がある。 ④ 可視光線を通さない物質中でも透過する。同じ X 線を当てた時には、原子番号や密度の小さい物質ほど透過しやすい。	

358	B X線スペクトル X線は、X線管と呼ばれる装置を使い、熱せられた陰極から飛び出した電子（熱電子）を高電圧で加速して陽極に衝突させることにより発生させることができる。陽極の物質の種類や電子の加速電圧を変化させ、X線の波長と強度との関係を調べると、図12、13のようなグラフになる。このようなグラフをX線スペクトルという。X線スペクトルのうち、連続的に変化する部分を連続X線といい、鋭いピークの部分を固有X線という。	
358	図10 初期のX線写真	
358	図11 X線管によるX線の発生	
358	①光が当たって物質が反応し、化学変化を起こすことを感光といい、感光する物質を混ぜた薬品（乳剤）をガラス板に塗ったもの写真乾板という。	
359	図12 タングステン（W）、モリブデン（Mo）、クロム（Cr）のX線スペクトル（電子の加速電圧を一定にした場合）	
359	図13 MoのX線スペクトル（電子の加速電圧を変えた場合） 最短波長は加速電圧が大きくなるほど短くなる。	
359	連続X線は、電子が陽極中の原子から力を受け、急激に減速して停止することで発生する。このとき、もっていた運動エネルギーの一部、または全部が光子のエネルギーになり、残りのエネルギーは陽極の原子の熱運動を増加させ、陽極の温度が上昇する。また、連続X線には最短波長があり、その波長よりも短い範囲にはスペクトルが見られない。最短波長は陽極物質の種類によらず、電子の加速電圧が大きくなるにしたがって短くなる。 一方、固有X線は光の線スペクトルに相当する。その波長は陽極物質の種類で決まり、電子の加速電圧には関係しない。	
359	連続X線の最短波長 連続X線の最短波長は、X線にも粒子性があると考ええることで説明できる。1個の入射電子の運動エネルギーのすべてが1個のX線の光子になるとき、最もエネルギーの大きな光子（すなわち最短波長の光子）が放出される。 電気素量をe、加速電圧をV、真空中の光の速さをc、放出されるX線の最短波長を λ_0 、そのときのX線の振動数を ν_0 とすると、次式が成り立つ。 $eV = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} \text{ ゆえに、 } \lambda_0 = \frac{hc}{eV} \cdots \cdots \textcircled{1}$ 式①より、連続X線の最短波長 λ_0 は、加速電圧Vと反比例の関係にある。	
359	問5 電子の加速電圧を30k Vにしたとき、発光するX線の最短波長を求めよ。電気素量を 1.6×10^{-19} C、真空中の光の速さを 3.0×10^8 m/s、プランク定数を 6.6×10^{-34} J・sとする。	
359	② 図12で、CrのX線スペクトルに固有X線がないのは、固有X線の波長が 10×10^{-11} mより長く、図に現れないためである。また、Wに固有X線がないのは、加速電圧が陽極原子の中心部分の電子を電離するのに足りず、固有X線が生じていないためである。	
360	C X線の波動性 1 X線回折の実験 1912年、ラウエは図14(a)のようにしてX線を薄い単結晶に当てると、写真乾板に斑点状の模様ができることを発見した。この斑点はラウエ斑点とよばれ、規則正しく並んだ結晶中の原子が回折格子の役割をして、散乱したX線が干渉することによってできたものである。このような現象をX線回折という。ラウエの実験により、X線には波の性質もあることがわかり、X線は波長のきわめて短い電磁波であると考えられるようになった。	
360	図14 ラウエの実験 (a)実験装置 (b)塩化ナトリウム（NaCl）の単結晶によるラウエ斑点	
361	2 ブラッグの実験 ラウエの発見に続いて同じ年、ブラッグは、結晶中の原子によって散乱されたX線が干渉して強め合う条件を導いた。その翌年、ブラッグ父子はこの原理に基づいて、結晶構造解析の手法を確立した。	

	図 15(b)のように、結晶中に原子を連ねた平面（格子面）を考えると、1 つの格子面に対して平行な格子面が等間隔で並ぶ。X 線はこれらの平行な格子面のそれぞれによって、反射の法則を満たす方向に反射される。隣り合う 2 つの格子面で反射される X 線が同位相になるとき、平行な格子面で反射される X 線全体が強め合う。格子面の間隔を d、当てる X 線の波長を λ、入射 X 線となす角を θ とすると、経路の差が $2d\sin\theta$ になるので、X 線全体が強め合う条件は、次式で表される。	
360	① 不純物などがなく、全体が 1 つの結晶になっているものを単結晶という。	
360	② 1 つの格子面の多くの原子によって散乱される X 線は、その格子面に対して反射の法則を満たす方向で同位相になって強め合う。	
360	③ この θ は、波の反射の法則（→p. 153, p. 178）の入射角 i や反射角 j と異なり、反射面に立てた法線となす角ではないことに注意する。	
361	図 15 ブラッグの実験 X 線は結晶に入射しても、屈折しない。 (a) 実験装置 検出器を回転して、強い反射の起こる角 θ を求める。 (b) 格子面と X 線の反射の様子 格子面は、右のような面など何通りも考えることができる。	
361	ブラッグの条件 $2d \sin \theta = n\lambda \quad (4)$ d [m] 格子面の間隔 θ [rad または度] 入射 X 線と格子面のなす角 λ [m] X 線の波長 $n=1, 2, 3 \cdots$	
361	図 15(a)より、波長 λ の X 線、式(4)の条件を満たす角 θ で格子面に当たるときに、入射方向と 2θ の角をなす方向に強く反射されることがわかる。また、単結晶内には、間隔の異なる格子面のとり方が何通りもあり、X 線回折の写真には X 線が干渉して強め合う点が斑点状に多数見られる。 X 線回折に関する実験は、X 線が波の性質をもつことを証明すると同時に、原子が実在することと結晶構造の規則性を直接的に証明した。そして、式(4)より、X 線の波長 λ から格子面の間隔 d が実験的に求められるようになり、X 線回折の実験は結晶構造を知るための有力な手段となった。	
361	問 6 結晶によって X 線回折が起こるということは、X 線の波長が格子面の間隔 d と同じ程度に短いということである。$d = 2.8 \times 10^{-10}$ m のとき、X 線の波長がいくら以下なら強い反射 X 線が得られるか。	
361	【参考】X 線回折の生物学への応用 20 世紀中頃には、X 線回折は、生物をタンパク質などの分子レベルで研究する構造生物学においても広く用いられるようになった。右の図は、ロザリンド・フランクリンが撮影した DNA の X 線回折写真である。この写真が、J. ワトソン、F. クリックによる DNA の二重らせん構造の解明において、重要な役割を果たした。	
362	D X 線の粒子性 1 コンプトン効果 物質に X 線を当てると、X 線は様々な方向に散乱される。このとき、X 線を単に波長の短い電磁波と考えると、元の電磁波と同じ波長の電磁波が散乱されるはずである。しかし、散乱 X 線の中には、入射 X 線の波長 λ よりもわずかに波長の長いものが混じっていて、しかも、その中で特に強い強度を示す波長 λ' の値は、散乱角 θ が大きくなるほど大きくなることがわかった。この現象はコンプトンによって発見されたのでコンプトン効果とよばれる。	
362	図 16 コンプトン効果 (a) 実験装置（この図の θ は散乱角なので、図 15 の θ とは異なることに注意する。） (b) 散乱 X 線のスペクトルの例（入射 X 線の波長 λ が 7.1×10^{-11} m の場合）散乱角 θ が大きいほど λ' は大きい。	

362	2 光子のもつ運動量 1916 年, アインシュタインは光量子仮説を発展させ, 振動数 ν , 波長 λ の光子は, 単にエネルギー $h\nu$ をもつだけでなく, 次式で表される運動量 p を光の進む向きにもつことを主張した。	
362	光子の運動量 $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (5)$ p [kg m/s] 光子の運動量の大きさ h [J・s] プランク定数 ν [Hz] 光の振動数 c [m/s] 真空中の光の速さ λ [m] 光の波長	
363- 363	この考えに基づき, コンプトンは, 散乱 X 線の波長が入射 X 線の波長より長くなるのは, 入射 X 線の光子が物質中の電子と衝突して電子をはね飛ばし, 光子自身の運動量と運動エネルギーが減少するためであると考えた。そして, この仮説をもとに, 運動量保存の法則とエネルギー保存の法則から, 散乱角 θ と長くなった散乱 X 線の波長 λ' の関係を導いた。 コンプトンが導いた関係式は測定結果とよく一致した。さらにその後, X 線の光子によってはね飛ばされた電子も観測され, アインシュタインの主張の正しさが実証された。このようにして, X 線は運動量とエネルギーをもった粒子としての性質 (粒子性) もあることが確立された。	
363	例題 3 コンプトン効果 図のように, 波長 λ の入射 X 線が, 静止している質量 m の電子 (自由電子) に衝突し, X 線の入射方向に対して θ の方向に X 線が散乱され, ϕ の方向に速さ v ではね飛ばされたとする。真空中での光の速さを c , プランク定数を h として, 散乱された波長 λ' が次式で表されることを示せ。 $\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$ ただし, この場合, $\lambda' \cong \lambda$ で, $\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} \cong 2$ の近似が成り立つものとする。	
363	指針 X 線光子と電子との衝突現象と考え, 運動量保存の法則とエネルギー保存の法則を表す式をそれぞれつくり, これらの式から ϕ と v を消去する。 (解) 運動量保存の法則より, x 軸方向: $\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + mv \cos \phi$ よって, $mv \cos \phi = \frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} \cos \theta \cdots \textcircled{1}$ y 軸方向: $0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \theta - mv \sin \phi$ よって, $mv \sin \phi = \frac{h}{\lambda'} \sin \theta \cdots \textcircled{2}$ また, エネルギー保存の法則より, $\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{1}{2}mv^2 \cdots \textcircled{3}$ 式①, ②をそれぞれ 2 乗して足し, 「 $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ 」より, ϕ を消去すると, $m^2 v^2 = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2 - \frac{2h^2 \cos \theta}{\lambda \lambda'}$ さらに, 式③より, $m^2 v^2 = 2hmc \cdot \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda \lambda'}$ よって, $\frac{2mc}{h} \cdot \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda \lambda'} = \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda'^2} - \frac{2 \cos \theta}{\lambda \lambda'}$	

	この両辺に $\lambda\lambda'$ をかけて、 $\lambda' \equiv \lambda$ のとき、 $\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} \equiv 2$ の近似を用いると、 $\frac{mc(\lambda' - \lambda)}{h} \equiv 1$ となり、 $\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$ が得られる。 この計算結果は、 θ が大きくなるほど λ' が大きくなるという実験結果と一致する。	
363	① 物質に当たったX線の一部が光子として原子に吸収され、原子内の電子が原子外に放出される現象も起きる。この現象は一種の光電効果である。X線によって飛び出す電子は運動エネルギーが大きいので、物質中で多くのイオンを2次的につくり出す。これがX線に電離作用がある主な原因である。	
380	【参考】フランク・ヘルツの実験 フランクとヘルツは、水銀原子にもとびとびのエネルギー準位が存在することを明らかにした。2人は、放電管に水銀蒸気を封入し、陰極Cで放出された電子を電界によって陽極Pの方向に加速するようにし、Pの直前にはPよりの電位の高い網目状の電極G（グリッド）を置いた。こうして、Gを通り抜けた電子の運動エネルギーがPG間の電位差に相当するエネルギー以上でなければ、Pに到達しないようにし、CG間の電圧を変化させながら、Pに流れる電流を測定した。 図iiは、その実験結果である。CG間の電圧を増加させると電流はしだいに増加するが、ある電圧を超えたところで急激に電流が減少し、4.9 Vごとに電流値がピークを示している。また、ピークを超えた電圧付近では、放電管から波長 2.537×10^{-7} mの紫外線が放出されることが観測された。	
380	図 i 実験装置（概念図） 図 ii 加速電圧と電流の関係	
380	1 ボーアの理論による実験結果の解釈 CG間の電圧を0からしだいに増加させると、Pに到達する電子の数も多くなるので、電流が増加していく。電子はPの方向に加速される最中に水銀原子と衝突するが、水銀原子を励起させるのに必要なエネルギーより大きな運動エネルギーをもってはいけなければ、電子の運動エネルギーは衝突によって変化しない（弾性衝突）。ところが、電圧が V_1 を少し超えると励起が可能となり、水銀原子と衝突した電子の運動エネルギーは大きく失われる（非弾性衝突）。このとき、衝突はG付近で起こり、電子はGを通り抜けたところでほとんど静止するためPに到達できず、電流は急激に減少する。さらに、電圧を増加させると、電子はよりCに近い位置で衝突を起こすことができ、衝突後も十分に加速されるため、Pに到達する電子の数は増加し始める。そして、電圧 V_1 の2倍付近の V_2 をわずかに超えると、1回目の衝突後に加速された電子が再び水銀原子を励起するため、電流は減少する。 このことから、水銀原子のエネルギー準位はとびとびの値をとり、基底状態から1つ上の励起状態に移るために必要なエネルギーは4.9 eVであるといえる。また、観測された紫外線は、励起された水銀原子が基底状態に戻るときに放出された光子と考えられる。	
381	第2節 原子核と放射線 A 原子核の構成 1 原子と原子核 原子の内部では、中心に正の電荷をもつ原子核が存在し、その周りを負の電荷をもつ電子（記号 e^- ）が電気力による引力を受けて運動している。原子全体としては電気的に中性である。 原子核は電気量 $+e$ （ e は電気素量）をもつ陽子（記号 p ）と、陽子とほぼ等しい質量をもち電荷をもたない中性子（記号 n ）から構成される。陽子と中性子を総称して核子とよぶ。 陽子や中性子の質量は電子の質量の約1840倍もあり、原子の質量は原子核の質量にほぼ等しいが、原子核の大きさは 10^{-14} m程度で原子の大きさの1万分の1ほどしかない。また、正の電荷をもつ陽子どうしには、電気力	

	による斥力がはたらく。そのような陽子や電荷をもたない中性子を狭い範囲につなぎ留めるために、電気力や万有引力とは異なる、強い引力が核子の間にはたっているはずである。このような力を核力とよぶ。 原子核に含まれている陽子の数を原子番号という。原子番号によって元素の種類、すなわちこの原子の周期表での位置が決まる。また、陽子の数を Z、中性子の数を N とするとき、核子の総数 A は、$A = Z + N$ となり、これを質量数という。元素記号 X の原子核（または原子）は、${}_Z^AX$ のように表す。	
381	問 5 ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ の陽子の数と中性子の数を求めよ。	
381	図 14 原子と原子核の構成	
381	表 1 原子を構成する基本粒子	
381	図 15 原子や原子核の表し方（ヘリウムの例）	
381	①この表記法では、中性子の数 N は現れていないが、 $N = A - Z$ として求められている。また、原子番号 Z は省略されることもある。	
382	2 同位体 原子番号が同じで、質量数が異なる原子核をもつ原子どうしを、互いに同位体（アイソトープ）であるという。互いに同位体の原子核は、陽子数が等しく中性子数が異なる。例えば、水素の同位体には、水素 (${}_1^1\text{H}$)、重水素 (${}_1^2\text{H}$)、三重水素 (${}_1^3\text{H}$) がある。同位体は、原子核の周りに同じ数の電子をもつため、その化学的性質はほとんど同じである。	
382	3 統一原子質量単位 原子核や原子の質量を表すときに、炭素の同位体 ${}_{6}^{12}\text{C}$ の原子 1 個の質量の $1/12$ を質量の単位とする統一原子質量単位（記号 u）を用いることが多い。なお、$1u \equiv 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$ である。 統一原子質量単位を用いると、核子 1 個の質量は、ほぼ $1u$ に等しい。また、同位体の質量は同位体の質量数 A の値にほぼ等しくなる。${}^{12}\text{C}$ の原子 1 個の質量を 12 として、原子の質量を相対的に表した値を、その元素の原子量という。元素に同位体がある場合は、同位体の存在比に応じて加重平均した値をその元素の原子量と定める。	
382	同位体がある場合の原子量の求め方 同位体が存在する元素の原子量を、炭素を例に求めてみよう。 自然界に存在する炭素には、${}_{6}^{12}\text{C}$ の他に少量の ${}_{6}^{13}\text{C}$、さらにごく微量の ${}_{6}^{14}\text{C}$ が含まれる。そのため、これらの存在比を考慮して加重平均した炭素原子の質量は、$12u$ よりわずかに大きくなる。炭素の原子量は、${}_{6}^{14}\text{C}$ の存在比は非常に小さいので無視すると、表 2 の値より次のように求められる。 $12.000 \times 0.9893 + 13.003 \times 0.0107 = 12.01$ ${}_{6}^{12}\text{C}$ の質量 ${}_{6}^{12}\text{C}$ の存在比 ${}_{6}^{13}\text{C}$ の質量 ${}_{6}^{13}\text{C}$ の存在比 炭素の原子量	
382	① ${}_{6}^{14}\text{C}$ の存在比は 1 兆分の 1 程度である。	
383	【参考】陽子と中性子の発見 1 陽子の発見 1919 年、ラザフォードは、α 粒子を気体の窒素 (N) に入射して窒素と衝突させたとき、正の電荷をもつ粒子が出てくることを観測した。この粒子は水素 (H) の原子核であり、陽子と名付けられた。多くの元素の原子核の質量は陽子の質量のほぼ整数倍であることから、水素以外の原子でも、陽子は原子核を構成する基本的な要素であることが予想され、当初、原子核は陽子と電子からできていると考えられた。 不確定性原理によれば、陽子の質量に比べてはるかに質量の小さな電子を原子核のような狭い空間に閉じ込めると、原子核から飛び出す電子の中には、かなり大きな運動量をもつものがあると推定された。しかし、実際に β 崩壊で観測される電子の運動量は期待されたものよりずっと小さく、電子が原子核内にあるとは考えられなかった。	

383	2 中性子の発見 1930 年、ボーテらは、ポロニウム (Po) から放出される α 粒子をベリリウム (Be) に当てると、電荷をもたず物質を通り抜ける力の強い、正体不明の何かが飛び出すことを発見した。 また、キュリー夫妻の娘のイレヌ・キュリーと夫のフレデリック・ジョリオは、その正体不明の何かをパラフィン (水素を多く含む物質) にぶつけると、陽子が飛び出すことを発見した。 そして 1932 年、チャドウィックは、この実験をさらに詳しく調べ、正体不明のものが、陽子とほぼ同じ質量をもち、電氣的に中性の粒子であることを明らかにし、これを中性子と名づけた。 こうして、原子核は陽子と中性子から構成されることがわかったのである。	
383	図 i イレヌ・キュリー (右) とフレデリック・ジョリオ (左)	
383	図 ii チャドウィックとチャドウィックの中性子発見の実験	
384- 385	B 放射線とその性質 ウラン (U) やラジウム (Ra) などの原子核は、自然に放射線と呼ばれる高エネルギーの粒子や電磁波を出す。原子核が自然に放射線を出す性質を放射能といい、放射能をもった物質を放射性物質という。また、放射能をもつ同位体を放射性同位体 (ラジオアイソトープ) という。 放射線には、主なものとして α 線・β 線・γ 線の 3 種類がある、磁界中では、α 線と β 線は、図 16 に示すように曲げられるが、γ 線は曲げられない。このことから、α 線は正の電荷、β 線は負の電荷をもち、γ 線は電氣的に中性であることがわかる。詳しい研究によって、α 線は大きな運動エネルギーをもつヘリウム原子核 (α 粒子)、β 線は高速の電子、γ 線はおおむね波長が X 線より短い電磁波であることが明らかになった。 放射線が物質中に入射すると、原子中の電子をはね飛ばして物質内にイオンを生成することがある。これを放射線の電離作用という。中性子や陽子、電子などの粒子の流れ (粒子線) や X 線なども電離作用をもつので、放射線の一種とすることが多い。放射線の電離作用の強さは、放射線の種類や放射線のもつエネルギーによって異なる。 α 線のような電離作用の大きな放射線は、進行方向に沿った短い区間より多くのイオンを生成してエネルギーを失うため透過力が小さく、容易に遮蔽することができるが、生体に照射された場合には細胞などに与える影響が大きい。中性子の流れ (中性子線) は透過力が特に大きい、原子番号の小さな元素の原子核と衝突するとエネルギーを失う。このときにはね飛ばされる軽い原子核が生体に与える影響も大きいため、中性子線の被曝には注意しなければならない。	
384	図 16 磁界中での α 線、 β 線、 γ 線の進み方	
384	表 3 α 線、 β 線、 γ 線の比較 (e は電気素量)	
384	図 17 放射線の透過力 図の矢印の長さは透過力の目安を表す。	
384	Check α 線は紙や大気などによって容易に遮蔽できるが、β 線はそれより厚い物質を用いなければ遮蔽できない。γ 線を遮蔽するには鉛などの原子番号の大きな元素を含む厚い物質が有効である。中性子線は物質を透過する力がきわめて大きい、原子番号の小さな元素を含む物質 (水やパラフィンなど) によって遮蔽することができる。	
385	1 放射線の測定 人間の五感ではとらえることができない放射線を「見える」ようにし、その種類や強さ、エネルギーを測定するために、様々な放射線検出器が使われる。霧箱は、過飽和状態の蒸気中を放射線が通過する際に、気体分子がイオン化されることによってできる霧から、放射線の飛跡を観測する装置である。ガイガー・ミュラー・カウンタは、環境中の放射性物質を探す可搬型の検出器として利用されている。この他にも、様々なタイプの放射線検出器が、物理学や医療などの様々な分野で使われている。	

385	【参考】放射線の発見 1896 年、ベクレルは、黒い厚紙でくるんだ写真乾板の上にウラン (U) の化合物を置いておくと、光を当てなくても乾板が感光することから、ウラン元素から放射線が放出されることを発見した。その後、マリー・キュリーとピエール・キュリーの夫妻は、トリウム (Th) がこれによく似た放射線を出すことを見だし、さらに 1898 年、強い放射線を出すポロニウム (Po)、次いでラジウム (Ra) も発見した。現在では、原子番号が 83 以上の元素はすべて放射線を放出することが明らかになっている。	
385	① 中性子線は電荷をもたないので、電気力や磁気力の作用によってエネルギーを失わない。原子核との衝突でエネルギーを失うが、重い原子核との衝突では中性子線のエネルギーと運動量の大きさはあまり変化しないため、はね飛ばされながら物質中を進んでいく。	
368	実験 13 霧箱の制作と放射線の観察 目的 霧箱を製作して、α 線や β 線などの放射線を観察する。 原理 容器の中にアルコールを入れ、底をドライアイスで冷やすと、容器内は上方がアルコールの飽和状態、下方が過飽和状態となる。過飽和状態の中を放射線が通過すると、空気中の気体分子は電子がはね飛ばされてイオンになり、そのイオンが核となって、その周りのアルコール分子を集めて線状の霧ができる。この線状の霧が放射線の通った跡（飛跡）である。 準備 放射線源（教材用）、円形耐熱ガラス容器、ドライアイス、エタノール、懐中電灯、黒い紙、食品用ラップフィルム、ティッシュペーパー、プラスチック定規（または塩化ビニルパイプ）、ぞうきん 方法 ①ぞうきんの上に細かく砕いたドライアイス置き、その上に、耐熱ガラス容器を載せる。その際、容器の底がしっかりとドライアイスに密着するように、また、ガラス容器が水平になるように注意する。 ②容器の底面に黒い紙を敷き、ふちにティッシュペーパーをかける。 ③ティッシュペーパーにはたっぷりと、黒い紙には湿る程度にエタノールをかける。 ④容器内に放射線源を入れ、食品用ラップフィルムでふたをする。 ⑤プラスチック定規または塩化ビニルパイプをティッシュペーパーでこすって静電気を起こし、容器の上 1cm ほどの高さで水平に数回動かして容器内部の余分なイオンを取り除く。 ⑥容器側面から懐中電灯の光を内部に照射すると、容器の底面近くに放射線の飛跡を観察することができる。 考察 太くはっきり見える飛跡が α 線、細かく縮れている飛跡が β 線である。α 線と β 線の飛跡の違いを観察することができたか。また、それらの飛跡はなぜ異なるかを考察せよ。	
386	！ 放射線源に直接触れるなどの、不必要な被曝を避けるように十分に注意をする。	
386	！ 容器内に放射線源を入れなくても、ときどき容器の底面近くを走る放射線の飛跡を見ることができる。これは宇宙線など自然界に存在する放射線である。	
387	C 原子核の変化と放射線 1 放射性崩壊 放射性同位体の原子核（放射性原子核）は不安定で、放射線を放出して別の原子核に変化する。この現象を原子核の放射性崩壊（または放射性壊変）といい、α 線を放出する α 崩壊と、β 線を放出する β 崩壊がある。 α 崩壊 α 崩壊では、α 粒子（ヘリウム 4 原子核：${}^4_2\text{He}$）が α 線として放出されるので、原子核の質量数が 4 だけ減少し、原子番号が 2 だけ減少する。 β 崩壊 β 崩壊は、原子核内の中性子 1 個が陽子と電子に変わることによって起こる。このときに放出される電子の流れが β 線である。この場合、質量数は変わらず、原子番号が 1 だけ増加する。	

387	図 19 原子核の α 崩壊の例	
387	図 20 原子核の β 崩壊の例	
387	【参考】β 崩壊とニュートリノ 原子核中で中性子が陽子と電子に変化するとき、電荷をもたず非常に軽い粒子が同時に放出されることが明らかになり、この粒子は反ニュートリノと名づけられた。例えば$^{206}_{81}\text{Tl}$が β 崩壊するとき、崩壊の式は正確には次のように表される。 例 $^{206}_{81}\text{Tl} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + e^- + \bar{\nu}$ ($\bar{\nu}$は反ニュートリノを表す) このような β 崩壊では、1 個の中性子が陽子に変化する反応が起こっており、安定な同位体と比べて中性子の数が多い放射性同位体の原子核において起こる。 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ 一方、安定な同位体と比べて中性子の数が少ない放射性同位体の原子核においては、陽子が中性子に変化し、陽電子 (e^+) とニュートリノ (ν) が放出され、原子番号が 1 だけ減少した原子核が生成される反応が起こる。 $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ これを β^+崩壊といい、次のような崩壊が知られている。 例 $^{18}_9\text{F} \rightarrow ^{18}_8\text{O} + e^+ + \nu$ β^+崩壊に対して、電子 (e^-) が放出される β 崩壊を β^-崩壊とよぶこともある。	
387	Check 反ニュートリノは、ニュートリノの反粒子である。	
388	γ 線放出 α 崩壊や β 崩壊によって生成される原子核は、エネルギーの高い不安定な状態にあることが多い。これらの状態は、励起状態にある原子の場合と同様に、余分なエネルギーを電磁波として放出して安定な状態に変化する。このときに放出される波長の短い (エネルギーの大きな) 電磁波が γ 線である。	
388	2 崩壊系列 放射性崩壊した原子核は別の原子核となるが、その原子核も不安定で、放射能をもつことが多く、安定な原子核となるまでさらに崩壊を続ける。例えば、放射性同位体のウラン 238 (^{238}U) は α 崩壊してトリウム 234 (^{234}Th) になる。この ^{234}Th も β 崩壊してプロトアクチニウム 234 (^{234}Pa) になる。さらに放射性崩壊は続き、最終的には鉛 206 (^{206}Pb) になる。 このように、次々と α 線と β 線を放出して崩壊していく一連の放射性同位体の原子核の系列のことを崩壊系列とよぶ。原子核の質量数は 4 の倍数でしか変わらないため、崩壊系列には n を自然数として、質量数が $4n$, $4n+1$, $4n+2$, $4n+3$ で表される 4 種類のものがあり、それぞれトリウム系列、ネプツニウム系列、ウラン系列、アクチニウム系列という。	
388	例題 2 崩壊系列における原子核の変化 次の放射性崩壊の式は、ウラン 235 ($^{235}_{92}\text{U}$) のある崩壊系列を途中まで示している。() の中に適当な数字または文字を入れよ。 $\alpha \text{ 崩壊 } \beta \text{ 崩壊 } () \beta \text{ 崩壊}$ $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow () \text{Th} \rightarrow () \text{Pa} \rightarrow ^{227}_{89}\text{Ac} \rightarrow () ()$ 指針 α 崩壊では^4_2Heの原子核が放出され、β 崩壊では中性子が陽子に変わる。 解 α 崩壊では、原子核の質量数が 4 だけ減少し、原子番号が 2 だけ減少する。一方、β 崩壊では、原子核の質量数は変わらず、原子番号が 1 だけ増加する。 $\alpha \text{ 崩壊 } \beta \text{ 崩壊 } (\alpha \text{ 崩壊}) \beta \text{ 崩壊}$	

	${}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{(231)}\text{Th} \rightarrow {}_{91}^{(231)}\text{Pa} \rightarrow {}_{89}^{227}\text{Ac} \rightarrow {}_{90}^{(227)}\text{Th}$	
388	類題 1 ラジウム (${}_{88}^{226}\text{Ra}$) は α 崩壊と β 崩壊をそれぞれ何回か行って、最終的に安定な鉛の同位体 ${}_{82}\text{Pb}$ になる。 (1) この鉛の同位体の質量数はいくらか。次の中から選べ。 205 206 207 208 (2) ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ が ${}_{82}\text{Pb}$ となるまでに、α 崩壊と β 崩壊をそれぞれ何回行うか。	
389	図 21 崩壊系列の例 (ウラン系列)	
389	【参考】原子核の地図：核図表 図のように、中性子の数 N を横軸、陽子の数 Z を縦軸にとったグラフに、原子核 1 つ 1 つを表したものを核図表という。私たちの身近に存在する原子核は、放射性崩壊をしない安定核および半減期が 5 億年以上の不安定核をあわせた 286 種である。これ以外に、半減期の短い不安定核が約 3000 種発見されている。Z の大きな原子核では陽子より中性子が多いほうが陽子間の電気力による斥力がやわらげられ崩壊しにくくなるため、$N > Z$ の領域に多くの原子核が存在する。また、中性子を多く含むウランが核分裂して生成される原子核は、破線付近に分布し、中性子が多い不安定核領域のものが多くことがわかる。	
390	3 半減期 放射能をもった一定量の原子核は、放射性崩壊によってその数が時間とともに減少する。図 22 のように、原子核の数が初めの原子核の数 N_0 の $1/2$ になるまでに時間は、残った半分の原子核の数がさらに $1/2$ (すなわち N_0 の $1/4$) になるまでの時間に等しく、またさらにその $1/2$ (すなわち N_0 の $1/8$) になるまでの時間に等しい。この時間を半減期という。 半減期を T とすると、時間 t だけ経過したときに崩壊せずに残っている原子核の数 N は、式(12)にしたがって減少することが知られている。	
390	半減期の式 $N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \quad (12)$ N 崩壊せずに残っている原子核の数 N_0 初めの原子核の数 t 経過時間 T 半減期	
390	図 22 半減期と放射性同位体の原子核数の時間変化	
	(a) 崩壊による原子核数の変化	
	(b) 時間変化のグラフと半減期	
390	表 4 様々な放射性原子核と半減期	
390	問 6 ヨウ素 ${}_{53}^{131}\text{I}$ は半減期 8 日で β 崩壊する。32 日間で ${}_{53}^{131}\text{I}$ の原子核数は初めの何分の 1 になるか。	
390	① 中性子は、安定な原子核の中では安定に存在しているが、原子核の外に単独に取り出されると不安定になり、 β 崩壊して陽子に変わる。	
391	D 放射線の利用 1 考古学への利用 放射性同位体の含有率を測定して、遺物などの年代を推定する方法を放射年代測定という。生物などを起源にもつ過去の遺物の年代を調べるには放射性炭素年代測定が利用される。	

391	炭素年代測定法の原理 大気上層では、宇宙からの放射線（宇宙線）によって生成された中性子が大気中の窒素 14 (^{14}N) と衝突して次の反応が起こり、放射性原子核の炭素 14 (^{14}C) が生成され続けている。 $n + ^{14}\text{N} \rightarrow p + ^{14}\text{C}$ (p は陽子, n は中性子を表す。) 一方, ^{14}C は半減期約 5700 年で β 崩壊する。長い年月の間, この ^{14}C の生成と崩壊のバランスにより, 大気中の ^{14}C の数の炭素 12 (^{12}C) の数に対する割合は, 約 $1/10^{12}$ のほぼ一定値に保たれていると考えられる。酸素と結びついて二酸化炭素となった ^{14}C は, 通常二酸化炭素と一緒に光合成で植物に取り込まれる。さらに, これらの植物を食べる動物にも, その細胞中に ^{14}C が取り込まれる。このように, すべての生物は, 生きている間は, 体を構成する炭素に約 $1/10^{12}$ という一定の割合で放射性同位体 ^{14}C を含んでいると考えられる。しかし, 生物が死ぬと ^{14}C が取り込まれなくなるので, 体内の ^{14}C は崩壊していくのみとなり, $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の値は時間とともに減少していく。したがって, 枯木や死骸に含まれる $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の値から, その生物が生きていた時代を推定することができる。	
391	2 農業や工業への利用 放射線を用いた検査 放射線は透過力が大きく, 強度の減り方が物質の種類に依存する。このことを利用して, 材料や製品の内部を分解・破壊せずに調べたりすることができる (非破壊検査)。	
392	トレーサーの利用 ある物質を構成する元素の一部を放射性同位体で置きかえ, それから放出される放射線を測定することによって, その物質の生体内や環境中でのふるまいを追跡することができる。こうして用いられる放射性同位体をトレーサーといい, このような利用法をトレーサー法という。農学や生物学の分野では, リン 32 (^{32}P) が植物の養分吸収の様子を調べるのに用いられている。	
392	その他の利用 食品や農産物に放射線を照射し, 殺菌, 発芽の抑制, 熟成の抑制, 品種改良などが行われている。工業分野では, プラスチックやゴムなどの材料物質の性質を変えたり, 半導体の加工をしたりするのも放射線が利用されている。	
392	図 24 トレーサー法の例 植物中に存在する ^{32}P の分布を示す (穂に多い)。	
392	3 放射線の医学への利用 放射線を用いる病気の診断と治療には, 以下のようなものがある。また, 放射線の利用には物理学の知識と経験が求められるため, 医学物理士という専門家と医療従事者が協力して診断や治療にあたっている。	
392	CT (コンピュータ断層撮影) 人体の特定の部位を取り囲むように, 円周状あるいはらせん状に X 線を照射し, 人体を透過した X 線をコンピュータで解析して, 人体の精密な断層像を得ることができる。	
392	PET (陽電子断層撮影) がん細胞は, 正常細胞に比べてブドウ糖を多く取り込む。よって, 陽電子を放出する放射性同位体の原子核を含み, ブドウ糖と非常によく似た構造をもつ薬剤を静脈から注射すると, 薬剤を取り込んだがん細胞から陽電子が放出される。その陽電子と電子とが対消滅するときに出る光子が放出される位置を画像化することで, がんの診断に役立てることができる。CT が臓器の形態を探るのに対して, PET は細胞の代謝, すなわち組織のはたらきを映し出すという特徴がある。	
392	図 25 PET による診断画像	
393	シンチレーションカメラ 特定の放射性同位体を含む薬剤を患者の体内に注入すると, それらは体内の特定の場所に吸収されて集まる。放射性同位体の原子核の崩壊によって体内で放出された γ 線を測定器でとらえ, モニターに表示し, 患部を特定したり状況を観察したりすることができる。	
393	放射線治療 放射線の電離作用を利用すれば, 放射線を体内の腫瘍に照射してがん細胞を破壊することができる。放射線は正常な細胞も破壊するので, その損傷を最小限に抑える努力がなされている。例えば, 炭素 12 (^{12}C) などの重粒子線は, 体内を高いエネルギーで進む間は細胞に対する影響が小さく, 止まる寸前に影響が最大になるとい	

	う性質がある。この性質を利用し、ちょうど幹部の位置で停止するよう重粒子線のエネルギーを調整して照射する重粒子線治療が成功を収めている。	
393- 394	E 放射線の影響 1 放射能・放射線に関する単位 放射性物質の放射能の強さは、単位時間に崩壊する原子核の数で表し、ベクレル（記号 Bq）という単位を用いる。1 s 間に 1 個の原子核が崩壊する放射能の強さが 1 Bq である。放射能の強さは、放射性同位体の原子核数とその半減期で決まる。放射性同位体の原子核数が同じであれば、半減期が短い物質ほど放射能は強い。 物質が放射線を受けた場合の影響の大きさは、単位質量当たりのエネルギー吸収量で表し、グレイ（記号 Gy）という単位を用いる。物質 1 kg あたり 1 J のエネルギー吸収があるときの吸収線量を 1 Gy とする。放射線による人体への影響は、エネルギー吸収量だけではなく放射線の種類にもよるので、その違いを考慮した等価線量で表し、シーベルト（記号 Sv）という単位を用いる。X 線および β 線、γ 線 1 Gy は 1 Sv に相当し、α 線 1 Gy は 20Sv に相当する。 私たちが自然界から浴びる放射線を自然放射線といい、宇宙線と地球に存在する放射性同位体から出たものと合わせて、年間平均約 2.1 mSv（日本の平均値）の自然放射線を浴びている。また、それに加えて例えば、胸の X 線検診では、1 回あたり約 0.06 mSv の放射線を受けている。国際放射線防護委員会は、一般人が 1 年間に受ける放射線の量は、自然放射線以外に年間 1 mSv 以下であるようにと勧告している。	放射線の人体へ影響を表す量を等価線量（単位：Sv）として説明しています。等価線量の説明に誤りはありませんが、後段で例として紹介されている自然放射線を受ける量「年間平均 2.1mSv（日本の平均値）」、胸の X 線検診「1 回あたり約 0.06mSv」、国際放射線防護委員会による勧告「年間 1mSv 以下」はすべて等価線量ではなく、実効線量です。これらの値が等価線量であると誤解されるおそれがあります。後段の説明と整合させ、より正確な説明とするため、ここでは実効線量を紹介することを提案します（紙面の制約で等価線量と実効線量をどちらも記載出来ない場合は実効線量について記載する）。
394	2 放射線の人体への影響 放射線が生命体に及ぼす影響は、放射線を浴びた部位や量、期間によって異なる。また、被曝してから数週間以内にその影響が現れる急性障害と、ある潜伏期間の後に発がんや白内障、不妊などが現れる晩発障害とに分けられる。図 27 に示すように、急性障害は極端に多い放射線を浴びた場合に生じる。発がんは放射線を受けた生命体の子孫に現れる影響は、現在のところ、これ以下なら全くないといえる安全量の存在は確認されていない。 放射性物質が人体の外部にあり、その物質から放射線を浴びることを外部被曝という。一方、呼吸や水・食料を通して放射性物質を体内に取り込んでしまい、そこから放射線を浴びることを内部被曝という。 外部被曝をできるだけ少なくするには、放射性物質から離れる、放射性物質との間に物質を置いて放射線を遮る、放射線を受ける時間を短くする、という外部被曝の低減三原則を守ることが重要である。	「現在のところ、これ以下なら影響が全くないという安全量は確認されていない」とありますが、放射線被曝に限らずこの世に 100%の安全（ゼロリスク）はありませんので、「影響が全くない安全量」という表現は適切ではないと考えます。 またこの記述は、被曝による人体への影響のうち、確率的影響にしきい線量が確認されていないことを指しているのだと思います。実際に、100 mSv 以下の被曝によるがん死亡確率の増加は確認されていませんが（統計的に有意な増加が検出できない）、放射線防護上の考え方としては「100 mSv 以下でも被曝線量に比例して確率が増加する」という仮定を採用しています。したがって、ここでは分かっている事実のみ記述し、以下のように修正することを提案します。 「現在のところ、100 mSv 以下の被曝による影響は確認されていない。」
394	図 27 放射線の被曝量と急性障害（1 mSv は 10^{-3} Sv、「原子力・エネルギー図面集」より）	
394	① 大気中のラドン Rn、地表の岩石、食物、宇宙などからである。なお、世界平均は 2.4 mSv である。	
395	第 3 節 核反応と核エネルギー A 質量とエネルギーの等価性 1905 年、アインシュタインは、時間と空間に関する考察から特殊相対性理論を提唱し、質量とエネルギーとの間に成り立つ関係を導いた。この理論によると、質量とエネルギーは同等であり、物体がエネルギーをもつということは、それに対応する質量をもつことに相当し、またその逆も成り立つ。これを質量とエネルギーの等価性という。	

	真空中の光速を c [m/s] とすると、静止している質量 m [kg] の物体は、次式で表されるエネルギー E [J] をもつことが知られている。	
395	質量とエネルギーの等価性 $E = mc^2 \quad (13)$ E [J] 静止している物体がもつエネルギー (energy) m [kg] 物体の質量 (mass) c [m/s] 真空中の光速	
395	問 7 電子、陽子、中性子の質量をエネルギーに換算すると、それぞれ何 MeV か ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$)。有効数字 3 桁で求めよ。ただし、各粒子の質量や定数は物理定数表を参照せよ。	
395	【発展】特殊相対性理論によるエネルギーと質量の関係 特殊相対性理論によれば、速さ v で運動しているときの物体の質量 m' は、静止しているときの質量 (静止質量) を m とすると、 $m' = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ と表される。 したがって、物体のもつエネルギー E と運動量 p は、それぞれ次式で表される。 $E = m'c^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad p = m'v = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ また、 v が c に比べて十分に小さいときには、次の関係が成り立つ。 $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = mc^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$ 静止エネルギー 運動エネルギー 第 1 項は質量に伴うエネルギーを表すもので、静止エネルギーとよばれる。 第 2 項は通常の運動エネルギーである。この式は、運動をしている物体のエネルギーが静止エネルギーに運動エネルギーを加えたものに等しいことを示している。	
395	Check $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$ の関係がある。	
395	② $ a $ が 1 に比べて十分に小さいとき、 $(1 + a)^n \approx 1 + na$ (n はあまり大きくない実数) を用いた。	
398	C 原子核の結合エネルギー 原子核を構成する核子の間には強い引力である核力がはたらき、核子どうしを結びつけている。このような原子核から核子 1 つ 1 つを引きはがして、ばらばらにするためには、核力に打ち勝つ力を加えて仕事をする (原子核にエネルギーを与える) 必要がある。したがって、核子が結合して原子核を構成しているときよりも、核子がばらばらになっているときのほうが、より多くのエネルギーをもっている。つまり、質量とエネルギーの等価性により、核子の質量の総和は、核子がばらばらになっているときよりも、原子核としての核子が結合しているときのほうが小さいことがわかる。この質量の差 Δm を質量欠損という。 質量欠損に相当するエネルギー $\Delta m \cdot c^2$ を原子核の結合エネルギーという。結合エネルギーは、原子核の核子をばらばらの状態にするために与えなければならないエネルギーである。 陽子数 Z 、中性子数 N の原子核の質量を M 、陽子の質量を m_p 、中性子の質量を m_n とすると、質量欠損 Δm と結合エネルギー $\Delta m \cdot c^2$ は次の式で与えられる。 $\Delta m = Zm_p + Nm_n - M \quad (14)$ $\Delta m \cdot c^2 = Zm_pc^2 + Nm_nc^2 - Mc^2 \quad (15)$	

	質量数 $A (= Z + N)$ の原子核の核子 1 個あたりの結合エネルギー $\frac{\Delta m \cdot c^2}{A}$ の値が大きい原子核ほど安定であることが知られている。図 31 によると、質量数が 50～60 の鉄あたりの原子核が最も安定であることがわかる。	
398	図 29 質量欠損（ヘリウムの例） ヘリウム原子核の質量は、陽子 2 個と中性子 2 個をばらばらにしたときの質量の和より小さい。	
398	図 30 原子核の結合エネルギー	
399	図 31 核子 1 個あたりの結合エネルギー $\frac{\Delta m \cdot c^2}{A}$ と質量数 A の関係	
399	問 10 ${}^4_2\text{He}$ を構成する核子を 1 つ 1 つ引きはがしてばらばらにするのに必要なエネルギーはどのくらいか。図 31 をもとにしておよその値を求めよ。	
399	なるほど 化学反応のエネルギーと核反応のエネルギーとの違い Q 私たちの身近で起こっている化学反応に関係するエネルギーと、核反応に関係するエネルギーとの違いは何ですか。 A 化学反応では、原子核の外側の電子が原子や分子どうしでやりとりされ、電子の結合状態が変化します。その結果、電子と原子核の間の結合エネルギーが変化して光の放出や熱の放出・吸収がおこります。このようにして出入りするエネルギーが化学エネルギーで、その大きさは原子や分子 1 個の反応あたり数 eV です。例えば、$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ という化学反応では、原子 1 個あたり 4.08 eV のエネルギーが放出され、このエネルギーにアボガドロ数をかけると 1 mol あたり 94 kcal になります。茶碗 1 杯分の白米から得られるエネルギーが数 100 kcal であることから、生命活動に必要なエネルギーが化学反応に基づいていることが推測されるでしょう。化学反応においても、反応の前後で原子や分子の質量の和は変化しますが、$10^{-8}\%$ 程度ときわめてごくわずかです。 一方、核子の組み合わせがかわる核反応では、反応の前後で原子核の結合エネルギーが変化し、このエネルギー差に対応して γ 線の放出や熱の放出・吸収が起こります。このようにして出入りするエネルギーは核エネルギーです。その大きさは原子核 1 個の反応あたり数 MeV に達し、化学反応の約数百万倍にもなります。核反応の際の質量の和の変化は 0.1% 程度です。	
399	①反応によってできた原子核が励起状態にあれば γ 線が放出される。	
400	D 核融合と核分裂 1 核融合 図 31 によれば、核子 1 個あたりの結合エネルギーは質量数が 50～60 の原子核で最も大きい。したがって、水素などの質量数の小さい原子核どうしが融合すると、融合後の結合エネルギーが融合前の結合エネルギーの和に比べて増加するので、差に相当するエネルギーが放出される。このような核反応を核融合とよぶ。 太陽などの恒星が放出するばく大なエネルギー源は、長い間、大きな謎であったが、現在では核融合によって生成されることが知られている。太陽の内部においては、4 個の水素 (H) の原子核 (陽子) がいくつかの反応を繰り返して、最終的に 1 個のヘリウム (He) の原子核となる。 $4{}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2e^+ + 2\nu$ (e^+ は陽電子、ν はニュートリノを表す。) この核融合によって質量が減少し、1 個の ${}^4_2\text{He}$ を生じる反応あたり約 27 MeV のエネルギーが放出される。太陽が放射するエネルギーは毎秒約 3.8×10^{26} J なので、太陽では毎秒約 6000 億 kg の水素がヘリウムに変換され、質量が 40 億 kg に減少していることがわかる。太陽の質量は約 2×10^{22} 億 kg もあるから、水素が枯渇する心配は当面ない。 人工的に核融合を持続して起こすためには、温度をあげることによって、原子核の運動エネルギーを増加させて原子核どうしを衝突させる必要がある。これを目指すのが核融合炉である。	

400	図 32 核融合の例	
400	図 33 核融合反応におけるエネルギーの関係	
401	2 核分裂 図 31 によれば、質量数が鉄あたりのものよりも大きくなると、核子 1 個あたりの結合エネルギーは小さくなる。したがって、ウラン 235 (^{235}U) のような質量数の大きい原子核が分裂すると、分裂後の結合エネルギーの和が分裂前の結合エネルギーに比べて増加するので、差に相当するエネルギーが放出される。このような核反応を核分裂とよぶ。 質量数の大きな原子核が自然に核分裂を起こす確率はきわめて小さいので、自然界では核分裂はほとんど見られない。しかし、質量数の大きな原子核に中性子を衝突させると核分裂が起こることがある。例えば、^{235}U の原子核に中性子を衝突させると、質量数 140 付近と 95 付近の 2 個の原子核に分裂し、同時に 2～3 個の高速 (10^7 m/s) 程度の中性子が放出される。次の核反応はその一例である。 $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Kr} + 3{}_1^1\text{n} \quad (16)$ 核分裂では、核融合などの他の核反応に比べて、反応の前後で質量欠損の差が大きいので、1 個の原子核から生み出される核エネルギーが大きい。	
401	問 11 核子 1 個あたりの結合エネルギーは、 $^{235}_{92}\text{U}$ が 7.591 MeV、 $^{144}_{56}\text{Ba}$ が 8.266 MeV、 $^{89}_{36}\text{Kr}$ が 8.617 MeV である。式 (16) で表される核分裂反応で放出される核エネルギーを MeV 単位で求めよ。	
401	①この核分裂で放出されるエネルギーは、できたバリウム (Ba) やクリプトン (Kr) の原子核と中性子に運動エネルギー、また γ 線の光子のエネルギーとなり、そのほとんどが最終的には熱に変わる。	
402	プルトニウム 239 ($^{239}_{94}\text{Pu}$) も核分裂を起こしやすい原子核である。この原子核は、原子炉の中でウラン 238 ($^{238}_{92}\text{U}$) に中性子を当てると製造することができ、原子炉の核燃料として使うことができる。 ^{239}Pu は約 24000 年という長い半減期で α 崩壊する。人体に取り込まれると、微量でも放射線による障害を引き起こすため、取り扱いには十分な注意が必要である。	他の教科書ではあまり取り上げられていない、核燃料としてのプルトニウム (Pu) について、原子炉内で生成される仕組みや取り扱いの注意点などが説明されており、充実した記述となっています。
402	図 36 プルトニウム 239 の生成過程	
402	例題 3 核反応と核エネルギー 等しい運動エネルギーをもった 2 個の重陽子 (${}^2_1\text{H}$) が正面衝突して、 ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^3_2\text{He}$ という核反応を起こした。この核反応によって放出される核エネルギーは何 MeV か。有効数字 2 桁で答えよ。ただし、${}^2_1\text{H}$、${}^3_2\text{He}$ の原子核と ${}^1_0\text{n}$ の質量をそれぞれ 2.01355 u、3.01493 u、1.00866 u、真空中の光速を 3.00×10^8 m/s、$1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27}$ kg、$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19}$ J とする。 指針 核反応の前後の質量の減少量をもとめ、質量とエネルギーの等価性から、エネルギーを求める。 解 核反応の前後の質量の減少は、 $2.01355 \text{ u} \times 2 - (3.01493 \text{ u} + 1.00866 \text{ u}) = 1.00351 \text{ u}$ これを kg 単位に換算すると、 $1.00351 \text{ u} \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg/u} \simeq 1.66 \times 10^{-30} \text{ kg}$ よって、MeV 単位に換算して、 $1.66 \times 10^{-30} \text{ kg} \times (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 / (1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 3.28 \times 10^6 \text{ eV} \simeq 3.3 \text{ MeV}$	
402	類題 2 ^{235}U の原子核 1 個が核分裂する際に放出するエネルギーの平均値に相当する質量は 0.215 u である。 ^{235}U の原子核 1 個の質量を 235 u とし、1.0 kg の ^{235}U がすべて核分裂したときに得られるエネルギーは何 J か。また、これと同じ量のエネルギーを石油の燃焼によって得るには、何 kg の石油を燃焼させる必要があるか。ただし、石	

	油 1.0 kg が燃焼するときに発生する熱を 4.2×10^7 J, 真空中の光速を 3.0×10^8 m/s とする。	
403	E 原子力の利用と安全性 1 連鎖反応と臨界質量 図 37 のように, ウラン 235 (^{235}U) の核分裂では, 反応によって放出される複数個の中性子が, 別の ^{235}U の原子核に当たると核分裂が続けて連鎖的に起こることになる。これを核分裂の連鎖反応という。 連鎖反応を持続させるためには, ある量以上の ^{235}U がなければならない。核分裂を起こす物質が連鎖反応を持続するために必要とする最小限の量を臨界質量という。臨界質量未満では連鎖反応は起きず, 臨界質量を超えると連鎖反応が持続したり, 急速に拡大したりする。 天然ウランは, その 99.3% が中性子を吸収しても核分裂しないウラン 238 (^{238}U) で, 核分裂を起こす ^{235}U は 0.7% しか存在しない。そこで, ^{235}U の濃度を連鎖反応が持続する数% まで高めて少しずつ核エネルギーを取り出すようにしたのが原子炉である。	
403-404	2 原子炉 核分裂の連鎖反応を制御しながら持続させ, 核エネルギーを取り出す装置を原子炉という。 原子力発電では, 原子炉から取り出された核エネルギーを電気エネルギーに転換している。原子炉の圧力容器内には濃縮されたウラン化合物が入った燃料棒と, 中性子を吸収する物質を含む制御棒が配置され, 制御棒を出し入れすることによって中性子の数密度を変え, 連鎖反応の速度を制御している。核分裂によって発生した熱は, 燃料棒の周りを流れる 1 次系冷却水によって運び出され, 蒸気発生器で 2 次系冷却水を水蒸気に変えるのに使われ, 発生した水蒸気でタービンを回して発電を行う。 また, ^{235}U は遅い中性子とよく反応するので, 核分裂で放出される比較的高速の中性子を水や黒鉛などの減速材で減速することによって, 核分裂の効率を上げている。	
403	図 37 核分裂と連鎖反応	
403	図 38 原子力発電（加圧水型軽水炉）のしくみ	
404	3 安全性と放射性廃棄物 核分裂によって生成される原子核の多くは不安定であるため, 原子炉を運転した後の核燃料は強い放射能をもつ。したがって, 万が一, 放射性物質が外部に放出されると, 大きな被害が長期間, かつ広範囲に及ぶ。このため, 原子炉には何段階もの安全対策がとられているが, 安全対策の範囲とレベルを超えた事故が起こり得る。 原子炉の事故で最も深刻なものが, 炉心の温度が上昇し, 炉心が溶ける炉心溶融（メルトダウン）である。例えば, 旧ソビエトのチェルノブイリ原子力発電所事故では, 連鎖反応が制御不能になって爆発が起き, 周辺地域に大量の放射性物質が放出された。日本でも, 東北地方太平洋沖地震に際して, 福島第一原子力発電所の複数の炉心冷却機能がすべて失われて炉心溶融が起き, 原子炉内の放射性物質が外部に放出された。 このような事故を起こさないように, 原子炉を安全に管理運転していくための方策の見直しや工夫が行われているが, 安全性に関する議論は現在も続いている。また, 使用済みの核燃料や古くなって解体した原子炉の鋼材など, 長期間にわたって放射能をもち続ける放射性廃棄物を安全に処理および管理する方法も大きな課題の 1 つであるが, 数万年を超えるような長期間にわたる管理が可能かについて疑問の声もある。	「万が一, 放射性物質が外部に放出されると, 大きな被害が長期間, かつ広範囲に及ぶ。」とありますが, 放射性物質はもともと天然にも存在しますし, 原子力発電所からは通常の運転状態でも放射性物質の濃度が十分に低いこと（管理基準を下回る）を確認して排気や排水が環境中に放出されています。したがって大きな被害が発生するのは, 大量の放射性物質が外部に放出されたときですので, 「万が一, 大量の放射性物質が外部に放出されると, 大きな被害が長期間, かつ広範囲に及ぶ。」としたほうが適切です。 また, 「使用済みの核燃料や古くなって解体した原子炉の鋼材など, 長期間にわたって放射能をもち続ける放射性廃棄物を安全に処理および管理する方法も大きな課題の 1 つであるが, 数万年を超えるような長期間にわたる管理が可能かについて疑問の声もある。」とありますが, 原子力発電所から発生する放射性廃棄物には性状の異なる様々な廃棄物があり, 性状に応じて処理

		処分を定めています。本報告書の提言 5 及びその解説で放射性廃棄物について解説していますので、参考にしてください。
404	図 39 放射性廃棄物の放射能の時間変化 代表的な原子核を掲載している。	
404	①中性子を効果的に減速させるには、中性子の質量に近い質量をもつ原子核と衝突させればよい。そこで、軽水中の陽子や黒鉛（炭素）が減速材として用いられる。一方、中性子を減速したくない高速増殖炉では、質量の大きなナトリウムが減速材として用いられる。	
啓林館 705 高等学校 総合物理 2 電気と磁気 原子・分子の世界		
162	第 3 節 X 線 A X 線の発見 1895 年、陰極線の研究をしていたレントゲンは、放電管の近くに置いた蛍光板が光っていることに気づいた。彼は、放電管から未知の何かが放射されていると考え、これを X 線と名付けた。やがて、X 線は次のような性質を持つことが明らかになった。また、後のラウエの実験と合わせて、X 線は波長のきわめて短い電磁波であることが分かった。	
162	X 線の性質 1 蛍光物質を光らせ、写真乾板やフィルムを感光させる。 2 直進性があり、電解や磁界では曲げられない。 3 物質中の原子を電離してイオンにするはたらき（電離作用）がある。 4 可視光線を通さない物質中でも透過する。同じ X 線を当てた時には、原子番号や密度の小さな物質ほど透過しやすい。	
162	B X 線スペクトル X 線は X 線管とよばれる装置を使い、熱せられた陰極から飛び出した電子（熱電子）を高電圧で加速して陽極に衝突させることにより発生させることができる。陽極の物質の種類や電子の加速電圧を変化させ、X 線の波長と強度との関係を調べると、図 12、13 のようなグラフになる。このようなグラフを X 線スペクトルという。X 線スペクトルのうち、連続的に変化する部分を連続 X 線といい、鋭いピークの部分を固有 X 線という。	
162	図 11 X 線管による X 線の発生	
162	① 光が当たって物質が反応し、化学反応を起こすことを感光といい、観光する物質を混ぜた薬品（乳剤）をガラス板に塗ったものを写真乾板という。	
163	図 12 タングステン (W)、モリブデン (Mo)、クロム (Cr) の X 線スペクトル（電子の加速電圧を一定にした場合）	
163	図 13 Mo の X 線スペクトル（電子の加速電圧を変えた場合）最短波長は加速電圧が大きくなるほど短くなる。	
163	連続 X 線は、電子が陽極中の原子から力を受け、急激に減速して停止することで発生する。このとき、持っていた運動エネルギーの一部、または全部が光子のエネルギーになり、残りのエネルギーは陽極の原子の熱運動を増加させ、陽極の温度が上昇する。また、連続 X 線には最短波長があり、その波長より短い範囲にはスペクトルが見られない。最短波長は陽極物質の種類によらず、電子の加速電圧が大きくなるにしたがって短くなる。一方、固有 X 線は光の線スペクトルに相当する。その波長は陽極物質の種類で決まり、電子の加速電圧には関係しない。	
163	連続 X 線の最短波長 連続 X 線の最短波長は、X 線にも粒子性があると考えることで説明できる。1 個の入射電子の運動エネルギーのすべてが 1 個の X 線の光子になるとき、もっともエネルギーの大きな光子（すなわち最短波長の光子）が放出される。	

	電気素量を e 、加速電圧を V 、真空中の光の速さを c 、放出される X 線の最短波長を λ_0 、そのときの X 線の振動数を ν_0 とすると、次式が成り立つ。 $eV = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} \quad \text{ゆえに、} \lambda_0 = \frac{hc}{eV} \cdots \textcircled{1}$ 式①より、連続 X 線の最短波長 λ_0 は、加速電圧 V と反比例の関係にある。	
163	問 5 電子の加速電圧を 30 kV にしたとき、発生する X 線の最短波長を求めよ。電気素量を 1.6×10^{-19} C、真空中の光の速さを 3.0×10^8 m/s、プランク定数を 6.6×10^{-34} J・s とする。	
163	② 図 12 で、Cr の X 線スペクトルに固有 X 線がないのは、固有 X 線の波長が 10×10^{-11} m より長く、図にも表れないためである。また、W に固有 X 線がないのは、加速電圧が陽極電子の中心部分の電子を電離するのに足りず、固有 X 線が生じていないためである。	
164	C X 線の波動性 1 X 線回折の実験 1912 年、ラウエは図 14(a) のようにして X 線を薄い単結晶に当てると、写真乾板に斑点状の模様ができることを発見した。この斑点はラウエ斑点とよばれ、規則正しく並んだ結晶中の原子が回折格子の役割をして、散乱した X 線が干渉することによってできたものである。このような現象を X 線回折という。ラウエの実験により、X 線には波の性質もあることがわかり、X 線は波長の極めて短い電磁波であると考えられることになった。	
164	図 14 ラウエの実験 (a) 実験装置 (b) 塩化ナトリウム (NaCl) の単結晶によるラウエ斑点	
164	2 ブラッグの実験 ラウエの発見に続いて同じ年、ブラッグは、結晶中の原子によって散乱された X 線が干渉して強め合う条件を導いた。その翌年、ブラッグ父子はこの原理に基づいて、結晶構造解析の手法を確立した。図 15(b) のように、結晶中に原子を連ねた平面（格子面）を考えると、1 つの格子面に対して平行な格子面が等間隔で並ぶ。X 線はこれらの平行な格子面のそれぞれによって、反射の法則を満たす方向に反射される。隣り合う 2 つの格子面で反射される X 線が同位相になるとき、平行な格子面で反射される X 線全体が強め合う。格子面の間隔を d 、当てる X 線の波長を λ 、入射 X 線と格子面とのなす角を θ とすると、経路の差が $2d \sin \theta$ になるので、X 線全体が強め合う条件は、次式で表される。	
164	① 不純物などがなく、全体が 1 つの結晶になっているものを単結晶という。 ② 1 つの格子面の多くの原子によって散乱される X 線は、その格子面に対して反射の法則を満たす方向で同位相になって強め合う。 ③ この θ は、波の反射の法則の法則の入射角 i や反射角 j と異なり、反射面に立てた法線となす角ではないことに注意する。	
165	図 15 ブラッグの実験 X 線は結晶に入射しても、屈折しない。 (a) 実験装置 検出器を回転して、強い反射の起こる角 θ を求める。 (b) 格子面と X 線の反射の様子 格子面は、右のような面など何通りも考えることができる。	
165	ブラッグの条件 $2d \sin \theta = n\lambda \cdots (4)$ d [m] 格子面の間隔 θ [rad または度] 入射 X 線と格子面とのなす角 λ [m] X 線の波長 $n = 1, 2, 3 \cdots$	
165	図 15(a) より、波長 λ の X 線は、式(4)の条件を満たす角 θ で格子面に当たるときに、入射方向と 2θ の核をなす方向に強く反射されることがわかる。また、単結晶内には、間隔の異なる格子面のとり方が何通りもあり、X 線	

	回折の写真には X 線が干渉して強め合う点が斑点状に多数見られる。X 線回折に関する実験は、X 線が波の性質を持つことを証明すると同時に、原子が実在することと結晶構造の規則性を直接的に証明した。そして、式(4)より、X 線の波長 λ から格子面の間隔 d が実験的に求められるようになり、X 線回折の実験は結晶構造を知るための有力な手段となった。	
165	問 6 結晶によって X 線回折が起こるということは、X 線の波長が格子面の間隔 d と同じ程度に短いということである。 $d = 2.8 \times 10^{10} \text{ m}$ のとき、X 線の波長がいくら以下なら強い反射 X 線が得られるか。	
165	【参考】X 線回折の生物学への応用 20 世紀中頃には、X 線回折は、生物をタンパク質などの分子レベルで研究する構造生物学においても広く用いられるようになった。右の図は、ロザリンド・フランクリンが撮影した DNA の X 線回折写真である。この写真が、J. ワトソン、F. クリックによる DNA の二重らせん構造の解明において、重要な役割を果たした。	
166	D X 線の粒子性 1 コンプトン効果 物質に X 線を当てると、X 線は様々な方向に散乱される。このとき、X 線を単に波長の短い電磁波と考えると、元の電磁波と同じ波長の電磁波が散乱されるはずである。しかし、散乱 X 線の中には、入射 X 線の波長 λ よりもわずかに波長の長いものが混じっていて、しかも、その中で特に強い強度を示す λ' の値は、散乱角 θ が大きくなるほど大きくなることが分かった。この現象はコンプトンによって発見されたので、コンプトン効果と呼ばれる。	
166	図 6 コンプトン効果 (a) 実験装置 (この図の θ は散乱角なので、図 15 の θ とは異なることに注意する。) (b) 散乱 X 線のスペクトルの例 (入射 X 線の波長 λ が $7.1 \times 10^{-11} \text{ m}$ の場合) 散乱角 θ が大きいほど λ' は大きい。	
166- 167	2 光子の持つ運動量 1916 年、アインシュタインは光量子仮説を発展させ、振動数 ν 、波長 λ の光子は、単にエネルギー $h\nu$ をもつだけでなく、次式で表される運動量 p を光の進む向きに持つことを主張した。 光子の運動量 $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (5)$ p [kg・m/s] 光子の運動量の大きさ h [J・s] プランク定数 c [m/s] 真空中の光の速さ ν [Hz] 光の振動数 λ [m] 光の波長 この考えに基づき、コンプトンは、散乱 X 線の波長が入射 X 線の波長より長くなるのは、入射 X 線の光子が物質中の電子と衝突して電子を跳ね飛ばし、光子自身の運動量と運動エネルギーが減少するためであると考えた。そして、この仮説をもとに、運動量保存の法則とエネルギー保存の法則から、散乱角 θ と長くなった散乱 X 線の波長 λ' との関係を導いた。 コンプトンが導いた関係式は測定式とよく一致した。さらにその後、X 線の光子によって跳ね飛ばされた電子も観測され、アインシュタインの主張の正しさが実証された。このようにして、X 線には運動量とエネルギーをもった粒子としての性質 (粒子性) もあることが確立された。	
167	例題③ コンプトン効果 図のように、波長 λ の入射 X 線が、静止している質量 m の電子 (自由電子) に衝突し、X 線の入射方向に対して θ の方向に X 線が散乱され、 ϕ の方向に速さ v で電子が跳ね飛ばされたとする。真空中での光の速さを c 、プランク	

	定数を h として、散乱された X 線の波長 λ' が次式で表されることを示せ。 $\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$ ただし、この場合、$\lambda' \approx \lambda$ で、$\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} \approx 2$ の近似が成り立つものとする。	
167	指針 X 線光子と電子との衝突現象と考え、運動量保存の法則とエネルギー保存の法則を表す式をそれぞれつくり、これらの式から ϕ と v を消去する。 (解) 運動量保存の法則より、 x 軸方向：$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + mv \cos \phi$ よって、$mv \cos \phi = \frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} \cos \theta \cdots \textcircled{1}$ y 軸方向：$0 = \frac{h}{\lambda} \sin \theta - mv \sin \phi$ よって、$mv \sin \phi = \frac{h}{\lambda'} \sin \theta \cdots \textcircled{2}$ また、エネルギー保存の法則より、 $\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{1}{2}mv^2 \cdots \textcircled{3}$ 式①、②をそれぞれ 2 乗して足し、「$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$」より、$\phi$ を消去すると、 $m^2 v^2 = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2 - \frac{2h^2 \cos \theta}{\lambda \lambda'}$ さらに、式③より、$m^2 v^2 = 2hmc \cdot \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda \lambda'}$ よって、$\frac{2mc}{h} \cdot \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda \lambda'} = \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda'^2} - \frac{2 \cos \theta}{\lambda \lambda'}$ この両辺に $\lambda \lambda'$ をかけて、$\lambda' \approx \lambda$ のとき、$\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} \approx 2$ の近似を用いると、 $\frac{mc(\lambda' - \lambda)}{h} \approx 1 \text{ となり、} \lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta) \text{ が得られる。}$ この計算結果は、θ が大きくなるほど λ' が大きくなるという実験結果と一致する。	
167	① 物質に当たった X 線の一部が光子として原子に吸収され、原子内の電子が原子外に放出される現象も起きる。この現象は一種の光電効果である。X 線によって飛び出す電子は運動エネルギーが大きいので、物質中で多くのイオンを 2 次的に作り出す。これが X 線に電離作用がある主な原因である。	
184	【参考】フランク・ヘルツの実験 フランクとヘルツは、水銀原子にもとびとびのエネルギー準位が存在することを明らかにした。2 人は、放電管に水銀蒸気を封入し、陰極 C で放出された電子を電界によって陽極 P の方向に加速するようにし、P の直前には P より電位の高い網目状の電極 G (グリッド) を置いた。こうして、G を通り抜けた電子の運動エネルギーが PG 間の電位差に相当するエネルギー以上でなければ、P に到達しないようにし、CG 間の電圧を変化させながら、P に流れる電流を測定した。 図 ii は、その実験結果である。CG 間の電圧を増加させると電流はしだいに増加するが、ある電圧を超えたところで急激に電流が減少し、4.9 V ごとに電流値がピークを示している。また、ピークを越えた電圧付近では、放電管から波長 $2.537 \times 10^{-7} \text{ m}$ の紫外線が放出されることが観測された。	
184	図 i 実験装置 (概念図)	
184	図 ii 加速電圧と電流との関係	
184	1 ボーアの理論による実験結果の解釈 CG 間の電圧をからしだいに増加させると、P に到達する電子の数も多くなるので、電流が増加していく。電子は P の方向に加速される最中に水銀原子と衝突するが、水銀原子を励起するのに必要なエネルギーより大きな運動エ	

	エネルギーをもっていなければ、電子の運動エネルギーは衝突によって変化しない（弾性衝突）。ところが、電圧が V_1 を少し超えると励起が可能となり、水銀原子と衝突した電子の運動エネルギーは大きく失われる（非弾性衝突）。このとき、衝突は G 付近で起こり、電子は G を通り抜けたところでほとんど静止するため P に到達できず、電流は急激に減少する。さらに電圧を増加させると、電子はより C に近い位置で衝突を起こすことができ、衝突後も十分に加速されるため、P に到達する電子の数は増加し始める。そして、電圧が V の 2 倍付近の V_2 をわずかにえると、1 回目の衝突後に加速された電子が再び水銀原子を励起するため、電流は急激に減少する。 このことから、水銀原子のエネルギー準位はとびとびの値をとり、基底状態から 1 つ上の励起状態に移るために必要なエネルギーは 4.9 eV であるといえる。また、観測された紫外線は、励起された水銀原子が基底状態に戻るときに放出された光子と考えられる。	
185	第 2 節 原子核と放射線 A 原子核の構成 1 原子と原子核 原子の内部では、中心に正の電荷をもつ原子核が存在し、その周りを負の電荷をもつ電子（記号 e⁻）が電気力による引力を受けて運動している。原子全体としては電気的に中性である。原子核は、電気量 +e（e は電気素量）をもつ陽子（記号 p）と、陽子とほぼ等しい質量をもち電荷をもたない中性子（記号 n）から構成される。陽子と中性子を総称して核子とよぶ。陽子や中性子の質量は電子の質量の約 1840 倍もあり、原子の質量は原子核の質量にほぼ等しいが、原子核の大きさは 10^{-14} m 程度で原子の大きさの 1 万分の 1 ほどしかない。また、正の電荷をもつ陽子どうしには、電気力による斥力がはたらく。そのような陽子や電荷をもたない中性子を狭い範囲につなぎ留めるために、電気力や万有引力とは異なる、強い引力が核子の間にはたらくているはずである。このような力を核力とよぶ。原子核に含まれる陽子の数を原子番号という。原子番号によって元素の種類、すなわちこの原子の周期表での位置が決まる。また、陽子の数を Z、中性子の数を N とするため、核子の総数 A は、$A = Z + N$ となり、これを質量数という。元素記号 X の原子核（または原子）は ${}_Z^AX$ のように表す。	
185	問 5 ${}_{20}^{56}\text{Fe}$ の陽子の数と中性子の数を求めよ。	
185	図 15 原子や原子核の表し方（ヘリウムの例）	
185	①この表記法では、中性子の数 N は現れていないが、 $N = A - Z$ として求められる。また、原子番号 Z は省略されることもある。	
186	2 同位体 原子番号が同じで、質量数が異なる原子核どうしを、互いに同位体（アイソトープ）であるという。互いに同位体の原子核は、陽子数が等しく中性子数が異なる。例えば、水素の同位体には、水素、重水素、三重水素がある。同位体は、原子核の周りに同じ数の電子をもつため、その化学的性質はほとんど同じである。	
186	3 統一原子質量単位 原子核や原子の質量を表すときに、炭素の同位体 ${}^{12}_6\text{C}$ の原子 1 個の質量の 1/12 を質量の単位とする統一原子質量単位（記号 u）を用いることが多い。なお、$1\text{u} \simeq 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$ である。統一原子質量単位を用いると、核子 1 個の質量は、ほぼ 1 u に等しい。また、同位体の質量は同位体の質量数 A の値にほぼ等しくなる。${}^{12}_6\text{C}$ の原子 1 個の質量を 12 とし、原子の質量を相対的に表した値を、その元素の原子量という。元素の同位体がある場合は、同位体の存在比に応じて加重平均した値をその元素の原子量と定める。	
186	同位体がある場合の原子量の求め方 同位体が存在する元素の原子量を、炭素を例に求めてみよう。 自然界に存在する炭素には、${}^{12}_6\text{C}$ のほかに少量の ${}^{13}_6\text{C}$、さらにごく微量の ${}^{14}_6\text{C}$ が含まれている。そのため、これらの	

	存在比を考慮して加重平均した炭素原子の質量は、12 u よりわずかに大きくなる。炭素の原子量は、$^{14}_6\text{C}$ の存在比は非常に小さいので無視すると、表 2 の値より次のように求められる。 $12.000 \times 0.9893 + 13.003 \times 0.0107 = 12.01$ $^{12}_6\text{C}$ の質量 $^{12}_6\text{C}$ の存在比 $^{13}_6\text{C}$ の質量 $^{13}_6\text{C}$ の存在比 炭素の原子量	
186	① $^{12}_6\text{C}$ の存在比は 1 兆分の 1 程度である。	
187	【参考】陽子と中性子の発見 ① 陽子の発見 1919 年、ラザフォードは、α 粒子を気体の窒素 (N) に入射して窒素と衝突させたとき、正の電荷をもつ粒子が出てくることを観測した。この粒子は水素 (H) の原子核であり、陽子と名付けられた。多くの元素の原子核の質量は陽子の質量のほぼ整数倍であることから、水素以外の原子でも、陽子は原子核を構成する基本的な要素であることが予想され、当初、原子核は陽子と電子からできていると考えられた。不確定性原理によれば、陽子の質量に比べてはるかに質量の小さな電子を原子核のような狭い空間に閉じ込めると、原子核から飛び出す電子の中には、かなり大きな運動量をもつものがあると推測された。しかし、実際に β 崩壊で観測される電子の運動量は期待されたものよりずっと小さく、電子が原子核内にあるとは考えられなかった。	
187	② 中性子の発見 1930 年、ボーテらは、ポロニウム (Po) から放出される α 粒子をベリリウム (Be) にあてると、電荷をもたず物質を通り抜ける力の強い、正体不明の何かが飛び出すことを発見した。また、キュリー夫妻の娘のイレヌ・キュリーと夫のフレデリック・ジョリオは、その正体不明の何かをパラフィン (水素を多く含む物質) にぶつけると、陽子が飛び出すことを発見した。そして 1932 年、チャドウィックは、この実験をさらに詳しく調べ、正体不明のものが、陽子とほぼ同じ質量をもち、電氣的に中性の粒子であることを明らかにし、これを中性子と名付けた。こうして、原子核は陽子と中性子から構成されることが分かったのである。	
187	図 i イレヌ・キュリー (右) とフレデリック・ジョリオ (左)	
187	図 ii チャドウィックとチャドウィックの中性子発見の実験	
188	B 放射線とその性質 ウラン (U) やラジウム (Ra) などの原子核は、自然に放射線とよばれる高エネルギーの粒子や電磁波を出す。原子核が自然に放射線を出す性質を放射能といい、放射能をもった物質を放射性物質という。また、放射能をもつ同位体を放射性同位体 (ラジオアイソトープ) という。 放射線には主なものとして、α 線・β 線・γ 線の 3 種類がある。磁界中では、α 線と β 線は、図 16 に示すように曲げられるが、γ 線は曲げられない。このことから、α 線は正の電荷、β 線は負の電荷をもち、γ 線は電氣的に中性であることが分かる。詳しい研究によって、α 線は大きな運動エネルギーをもつヘリウム原子核 (α 粒子)、β 線は高速の電子、γ 線はおおむね波長が X 線より短い電磁波であることが明らかになった。 放射線が物質中に入射すると、原子中の電子をはね飛ばして物質内にイオンを生成することがある。これを放射線の電離作用という。中性子や陽子、電子などの粒子の流れ (粒子線) や X 線なども電離作用をもつので、放射線の一種とすることが多い。放射線の電離作用の強さは、放射線の種類や放射線の持つエネルギーによって異なる。	
188	図 16 磁界中での α 線、 β 線、 γ 線の進み方	
188	表 3 α 線、 β 線、 γ 線の比較	
188	図 17 放射線の透過力 図の矢印の長さは透過力の目安を表す。	
188	Check α 線は紙や大気などによって容易に遮蔽できるが、β 線はそれなりに厚い物質を用いなければ遮蔽できない。	

	γ 線を遮蔽するには鉛などの原子番号の大きな物質を含む厚い物質が有効である。中性子線は物質を透過する力がきわめて大きい、原子番号の小さな元素を含む物質（水やパラフィンなど）によって遮蔽することができる。	
189	α 線のような電離作用の大きな放射線は、進行方向に沿った短い区間により多くのイオンを生成してエネルギーを失うため透過力が小さく、容易に遮蔽することができるが、生体に照射された場合には細胞などに与える影響が大きい。中性子の流れ（中性子線）は透過力が特に大きい、原子番号の小さな元素の原子核と衝突するとエネルギーを失う。このときにはね飛ばされる軽い原子核が生体に与える影響も大きい、中性子線の被曝には注意しなければならない。	
189	1 放射線の測定 人間の五感ではとらえることができない放射線を「見える」ようにし、その種類や強さ、エネルギーを測定するために、様々な放射線検出器が使われる。霧箱は、過飽和状態の蒸気中を放射線が通過する際に、気体分子がイオン化されることによってできる霧から、放射線の飛跡を観測する装置である。ガイガー・ミュラー・カウンタは、環境中の放射性物質を探る可搬型の測定器として利用されている。この他にも、様々なタイプの放射線検出器が、物理学や医療などの様々な分野で使われている。	
189	図 18 ガイガー・ミュラー・カウンタ 放射線によってガス中の分子が電離され、電子・イオン対が生成される。電子が陽極に引き寄せられる過程で電子と衝突した分子が次々に電離されて電気信号が生じ、信号の回数から放射能の強さを測定する。	
189	【参考】放射線の発見 1896 年、ベクレルは、黒い厚紙でくるんだ写真乾板の上にウラン (U) の化合物を置いておくと、光を当てなくても乾板が感光することから、ウラン元素から放射線が放出されることを発見した。その後、マリー・キュリーとピエール・キュリーの夫妻は、トリウム (Th) がこれによく似た放射線を出すことを見だし、さらに、1898 年、強い放射線を出すポロニウム (Po)、次いでラジウム (Ra) も発見した。現在では、原子番号が 83 以上の元素はすべて放射線を放出することが明らかになっている。	
189	①中性子線は電荷をもたないので、電気力や磁力の作用によってエネルギーを失わない。原子核との衝突でエネルギーを失うが、重い原子核との衝突では中性子線のエネルギーと運動量の大きさはあまり変化しないため、はね飛ばされながら物質中を進んでいく。	
190	実験 8 霧箱の制作と放射線の観察 目的 霧箱を製作して、α 線や β 線などの放射線を観察する。 原理 容器の中にアルコールを入れ、底をドライアイスで冷やすと、容器内は上方がアルコールの飽和状態、下方が過飽和状態となる。過飽和状態の中を放射線が通過すると、空気中の気体分子は電子がはね飛ばされてイオンになり、そのイオンが核となって、その周りのアルコール分子を集めて線状の霧ができる。この線状の霧が放射線の通った跡（飛跡）である。 準備 放射線源（教材用）、円形耐熱ガラス容器、ドライアイス、エタノール、懐中電灯、黒い紙、食品用ラップフィルム、ティッシュペーパー、プラスチック定規（または塩化ビニルパイプ）、ぞうきん 方法 ①ぞうきんの上に細かく砕いたドライアイスを置き、その上に、耐熱ガラス容器を載せる。その際、容器の底がしっかりとドライアイスに密着するように、また、ガラス容器が水平になるように注意する。 ②容器の底面に黒い紙を敷き、ふちにティッシュペーパーをかける。 ③ティッシュペーパーにはたっぷりと、黒い紙には占める程度にエタノールをかける。 ④容器内に放射線源を入れ、食品用ラップフィルムでふたをする。	

	⑤プラスチック定規または、塩化ビニルパイプをティッシュペーパーでこすって静電気を起こし、容器の上 1 cm ほどの高さで水平に数回動かして容器内部の余分なイオンを取り除く。 ⑥容器の側面から懐中電灯の光を内部に照射すると、容器の底面近くに放射線の飛跡を観察することができる。 考察 太くはっきり見える飛跡が α 線、細く縮れている飛跡が β 線である。α 線と β 線の飛跡の違いを観察することができたか。また、それらの飛跡はなぜ異なるのかを考察せよ。	
190	！ 容器内に放射線源を入れなくても、ときどき容器の底面近くを走る放射線の飛跡を見ることができる。これは宇宙線など自然界に存在する放射線である。	
191	C 原子核の変化と放射線 1 放射性崩壊 放射性同位体の原子核（放射性原子核）は不安定で、放射線を放出して別の原子核に変化する。この現象を原子核の放射性崩壊（または放射性壊変）といい、α 線を放出する α 崩壊と、β 線を放出する β 崩壊がある。 α 崩壊 α 崩壊では、α 粒子（ヘリウム 4 原子核：${}^4_2\text{He}$）が α 線として放出されるので、原子核の質量数が 4 だけ減少し、原子番号が 2 だけ減少する。 β 崩壊 β 崩壊は、原子核内の中性子 1 個が陽子と電子に変わることによって起こる。このときに放出される電子の流れが β 線である。この場合、質量数は変わらず、原子番号が 1 だけ増加する。	
191	【参考】β 崩壊とニュートリノ 原子核中で中性子が陽子と電子に変化するとき、電荷をもたず非常に軽い粒子が同時に放出されることが明らかになり、この粒子は反ニュートリノと名づけられた。例えば ${}^{206}_{81}\text{Tl}$ が β 崩壊するとき、崩壊の式は正確には次のように表される。 例 ${}^{206}_{81}\text{Tl} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + e^- + \bar{\nu}$ ($\bar{\nu}$ は反ニュートリノを表す) このような β 崩壊では、1 個の中性子が陽子に変化する反応が起こっており、安定な同位体と比べて中性子の数が多い放射性同位体の原子核において起こる。 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ 一方、安定な同位体と比べて中性子の数が少ない放射性同位体の原子核においては、陽子が中性子に変化し、陽電子 (e^+) とニュートリノ (ν) が放出され、原子番号が 1 だけ減少した原子核が生成される反応が起こる。 $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ これを β^+崩壊といい、次のような崩壊が知られている。 例 ${}^{18}_9\text{F} \rightarrow {}^{18}_8\text{O} + e^+ + \nu$ β^+崩壊に対して、電子 (e^-) が放出される β 崩壊を β^-崩壊とよぶこともある。	
191	図 19 原子核の α 崩壊の例	
191	図 20 原子核の β 崩壊の例	
191	Check 反ニュートリノは、ニュートリノの反粒子である。	
192	γ 線放出 α 崩壊や β 崩壊によって生成される原子核は、エネルギーの高い不安定な状態にあることが多い。これらの状態は、励起状態にある原子の場合と同様に、余分なエネルギーを電磁波として放出して安定な状態に変化する。このときに放出される波長の短い（エネルギーの大きな）電磁波が γ 線である。	
	2 崩壊系列 放射性崩壊した原子核は別の原子核となるが、その原子核も不安定で、放射能をもつことが多く、安定な原子核となるまでさらに崩壊を続ける。例えば、放射性同位体のウラン 238 (${}^{238}\text{U}$) は α 崩壊してトリウム 234 (${}^{234}\text{Th}$) に	

	なる。この ^{234}Th も β 崩壊してプロトアクチニウム ^{234}Pa になる。さらに放射性崩壊は続き、最終的には鉛 ^{206}Pb になる。 このように、次々と α 線と β 線を放出して崩壊していく一連の放射性同位体の原子核の系列のことを崩壊系列とよぶ。原子核の質量数は 4 の倍数でしか変わらないため、崩壊系列には n を自然数として、質量数が $4n$, $4n+1$, $4n+2$, $4n+3$ で表される 4 種類のものがあり、それぞれトリウム系列、ネプツニウム系列、ウラン系列、アクチニウム系列という。	
192	例題 2 崩壊系列における原子核の変化 次の放射性崩壊の式は、ウラン $^{235}_{92}\text{U}$ のある崩壊系列を途中まで示している。() の中に適当な数字または文字を入れよ。 $\alpha \text{ 崩壊} \quad \beta \text{ 崩壊} \quad (\quad) \quad \beta \text{ 崩壊}$ $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow (\quad)\text{Th} \rightarrow (\quad)\text{Pa} \rightarrow ^{227}_{89}\text{Ac} \rightarrow (\quad)(\quad)$ 指針 α 崩壊では ^4_2He の原子核が放出され、β 崩壊では中性子が陽子に変わる。 解 α 崩壊では、原子核の質量数が 4 だけ減少し、原子番号が 2 だけ減少する。一方、β 崩壊では、原子核の質量数は変わらず、原子番号が 1 だけ増加する。 $\alpha \text{ 崩壊} \quad \beta \text{ 崩壊} \quad (\alpha \text{ 崩壊}) \quad \beta \text{ 崩壊}$ $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{(231)}_{(90)}\text{Th} \rightarrow ^{(231)}_{(91)}\text{Pa} \rightarrow ^{227}_{89}\text{Ac} \rightarrow ^{(227)}_{(90)}(\text{Th})$	
192	類題 1 ラジウム ($^{226}_{88}\text{Ra}$) は α 崩壊と β 崩壊をそれぞれ何回か行って、最終的に安定な鉛の同位体 ^{82}Pb になる。 (1) この鉛の同位体の質量数はいくらか。次の中から選べ。 205 206 207 208 (2) $^{226}_{88}\text{Ra}$ が ^{82}Pb となるまでに、α 崩壊と β 崩壊をそれぞれ何回行うか。	
193	図 21 崩壊系列の例	
193	参考 原子核の地図：核図表 図のように、中性子の数 N を横軸、陽子の数 Z を縦軸にとったグラフに、原子核 1 つ 1 つを表したものを核図表という。私たちの身近に存在する原子核は、放射性崩壊をしない安定核および半減期が 5 億年以上の不安定核を合わせた 286 種である。これ以外に、半減期の短い不安定核が約 3000 種発見されている。Z の大きな原子核では陽子より中性子が多いほうが陽子間の電気力による斥力がやわらげられ崩壊しにくくなるため、$N>Z$ の領域に多くの原子核が存在する。また、中性子を多く含むウランが核分裂して生成される原子核は、破線付近に分布し、中性子が多い不安定核領域のものが多いことが分かる。	
194	3 半減期 放射能をもった一定量の原子核は、放射性崩壊によってその数が時間とともに減少する。図 22 のように、原子核の数が初めの原子核の数 N_0 の $1/2$ になるまでに時間は、残った半分の原子核の数がさらに $1/2$ (すなわち N_0 の $1/4$) になるまでの時間に等しく、またさらにその $1/2$ (すなわち N_0 の $1/8$) になるまでの時間に等しい。この時間を半減期という。 半減期を T とすると、時間 t だけ経過したときに崩壊せずに残っている原子核の数 N は、式(12)にしたがって減少することが知られている。	
194	半減期の式 $N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \quad (12)$	

	N 崩壊せずに残っている原子核の数 N_0 初めの原子核の数 t 経過時間 T 半減期	
194	図 22 半減期と放射性同位体の原子核数の時間変化 (a) 崩壊による原子核数の変化 (b) 時間変化のグラフと半減期	
194	表 4 様々な放射性原子核と半減期	
194	問 6 ヨウ素 $^{131}_{53}\text{I}$ は半減期 8 日で β 崩壊する。32 日間で $^{131}_{53}\text{I}$ の原子核数は初めの何分の 1 になるか。	
194	① 中性子は、安定な原子核の中では安定に存在しているが、原子核の外に単独に取り出されると不安定になり、 β 崩壊して陽子に変わる。	
195	D 放射線の利用 1 考古学への利用 放射性同位体の含有率を測定して、遺物などの年代を推定する方法を放射年代測定という。生物などを起源にもつ過去の遺物の年代を調べるには放射性炭素年代測定が利用される。	
195	炭素年代測定法の原理 大気上層では、宇宙からの放射線（宇宙線）によって生成された中性子が大気中の窒素 ^{14}N と衝突して次の反応が起こり、放射性原子核の炭素 ^{14}C が生成され続けている。 $n + ^{14}\text{N} \rightarrow p + ^{14}\text{C}$ (p は陽子、n は中性子を表す。) 一方、^{14}C は半減期約 5700 年で β 崩壊する。長い年月の間、この ^{14}C の生成と崩壊のバランスにより、大気中の ^{14}C の数の炭素 ^{12}C の数に対する割合は、約 $1/10^{12}$ のほぼ一定値に保たれていると考えられる。酸素と結びついて二酸化炭素となった ^{14}C は、通常の二酸化炭素と一緒に光合成で植物に取り込まれる。さらに、これらの植物を食べる動物にも、その細胞中に ^{14}C が取り込まれる。このように、すべての生物は、生きている間は、体を構成する炭素に約 $1/10^{12}$ という一定の割合で放射性同位体 ^{14}C を含んでいると考えられる。しかし、生物が死ぬと ^{14}C が取り込まれなくなるので、体内の ^{14}C は崩壊していくのみとなり、$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の値は時間とともに減少していく。したがって、枯木や死骸に含まれる $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の値から、その生物が生きていた時代を推定することができる。	
195	図 23 炭素年代測定	
195	2 農業や工業への利用 放射線を用いた検査 放射線は透過力が大きく、強度の減り方が物質の種類に依存する。このことを利用して、材料や製品の内部を分解・破壊せずに調べたりすることができる。（非破壊検査）	
196	トレーサーの利用 ある物質を構成する元素の一部を放射性同位体で置き換え、それから放出される放射線を測定することによって、その物質の生体内や環境中でのふるまいを追跡することができる。こうして用いられる放射性同位体をトレーサーといい、このような利用法をトレーサー法という。農学や生物学の分野では、リン ^{32}P が植物の養分吸収の様子を調べるのに用いられている。 その他の利用 食品や農産物に放射線を照射し、殺菌、発芽の抑制、熟成の抑制、品種改良などが行われている。工業分野では、プラスチックやゴムなどの材料物質の性質を変えたり、半導体の加工をしたりするのも放射線が利用されている。	
196	③放射線の医学への利用 放射線を用いる病気の診断と治療には、以下のようなものがある。また、放射線の利用には物理学の知識と経験が求められるため、医学物理士という専門家と医療従事者が協力して診断や治療にあたっている。	

	CT（コンピュータ断層撮影） 人体の特定の部位を取り囲むように、円周状あるいはらせん状に X 線を照射し、人体を透過した X 線をコンピュータで解析して、人体の精密な断層像を得ることができる。 PET（陽電子断層撮影） がん細胞は、正常細胞に比べてブドウ糖を多く取り込む。よって、陽電子を放出する放射性同位体の原子核を含み、ブドウ糖と非常によく似た構造をもつ薬剤を静脈から注射すると、薬剤を取り込んだがん細胞から陽電子が放出される。その陽電子と電子とが対消滅するときに出る光子が放出される位置を画像化することで、がんの診断に役立てることができる。CT が臓器の形態を探るのに対して、PET は細胞の代謝、即ち組織の働きを映し出すという特徴がある。	
196	図 24 トレーサー法の例 植物中に存在する ^{32}P の分布を示す（穂に多い）。	
196	図 25 PET による診断画像	
197	シンチレーションカメラ 特定の放射性同位体を含む薬剤を患者の体内に注入すると、それらは体内の特定の場所に吸収されて集まる。放射性同位体の原子核の崩壊によって体内で放出された γ 線を測定器でとらえ、モニターに表示し、患部を特定したり状況を観察したりすることができる。 放射線治療 放射線の電離作用を利用すれば、放射線を体内の腫瘍に照射してがん細胞を破壊することができる。放射線は正常な細胞も破壊するので、その損傷を最小限に抑える努力がなされている。例えば、炭素 12 (^{12}C) などの重粒子線は、体内を高いエネルギーで進む間は細胞に対する影響が小さく、止まる寸前に影響が最大になるという性質がある。この性質を利用し、ちょうど患部の位置で停止するよう重粒子線のエネルギーを調整して照射する重粒子線治療が成功を収めている。	
197	E 放射線の影響 1 放射能・放射線に関する単位 放射性物質の放射能の強さは、単位時間に崩壊する原子核の数で表し、ベクレル（記号 Bq）という単位を用いる。1 s 間に 1 個の原子核が崩壊する放射能の強さが 1 Bq である。放射能の強さは、放射性同位体の原子核数とその半減期で決まる。放射性同位体の原子核数が同じであれば、半減期が短い物質ほど放射能は強い。物質が放射線を受けた場合の影響の大きさは、単位質量あたりのエネルギー吸収量で表し、グレイ (Gy) という単位を用いる。物質 1 kg あたり 1 J のエネルギー吸収があるときの吸収線量を 1 Gy とする。放射線による人体への影響は、エネルギー吸収量だけではなく放射線の種類にもよるので、その違いを考慮した等価線量で表し、シーベルト (Sv) という単位を用いる。X 線および β 線、γ 線 1 Gy は 1 Sv に相当し、α 線 1 Gy は 20 Sv に相当する。	放射線の人体へ影響を表す量を等価線量（単位：Sv）として説明しています。等価線量の説明に誤りはありませんが、後段で例として紹介されている自然放射線を受ける量「年間平均 2.1 mSv（日本の平均値）」、胸の X 線検診「1 回あたり約 0.06 mSv」、国際放射線防護委員会による勧告「年間 1 mSv 以下」はすべて等価線量ではなく、実効線量です。これらの値が等価線量であると誤解されるおそれがあります。後段の説明と整合させ、より正確な説明とするため、ここでは実効線量をを紹介することを提案します（紙面の制約で等価線量と実効線量をどちらも記載出来ない場合は実効線量について記載する）。
197	図 26 放射能・放射線に関する単位	
198	私たちが自然界から浴びる放射線を自然放射線といい、宇宙線と地球に存在する放射性同位体から出たものと合わせて、年間約 2.1 mSv（日本の平均値）の自然放射線を浴びている。また、それに加えて例えば、胸の X 線検診では、1 回あたり約 0.06 mSv の放射線を受けている。国際放射線防護委員会は、一般人が 1 年間に受ける放射線の量は、自然放射線以外に、年間 1 mSv 以下であるようにと勧告している。	
198	2 放射線の人体への影響 放射線が生命体に及ぼす影響は、放射線を浴びた部位や量、期間によって異なる。また、被曝してから数週間以内にその影響が現れる急性障害と、ある潜伏期の後に発がんや白内障、不妊などが現れる晩発障害とに分けられる。図 27 に示すように、急性障害は極端に多い放射線を浴びた場合に生じる。発がんは放射線を受けた生命体の子孫	「現在のところ、これ以下なら影響が全くないという安全量は確認されていない」とありますが、放射線被曝に限らずこの世に 100%の安全（ゼロリスク）はありませんので、「影響が全くない安全量」という表現は適

	に現れる影響は、現在のところ、これ以下なら影響が全くないといえる安全量の存在は確認されていない。 放射性物質が人体の外部にあり、その物質から放射線を浴びることを外部被曝という。一方、呼吸や水・食料を通して放射性物質を体内に取り込んでしまい、底から放射線を浴びることを内部被曝という。外部被曝をできるだけ少なくするには、放射性物質から離れる、放射性物質との間に物質を置いて放射線を遮る、放射線を受ける時間を短くする、という外部被曝の低減三原則を守ることが重要である。	切ではないと考えます。 またこの記述は、被曝による人体への影響のうち、確率的影响にしきい線量が確認されていないことを指しているのだと思います。実際に、100 mSv 以下の被曝によるがん死亡確率の増加は確認されていませんが（統計的に有意な増加が検出できない）、放射線防護上の考え方としては「100 mSv 以下でも被曝線量に比例して確率が増加する」という仮定を採用しています。したがって、ここでは分かっている事実のみ記述し、以下のように修正することを提案します。 「現在のところ、100 mSv 以下の被曝による影響は確認されていない。」
198	図 27 放射線の被曝量と急性障害	
198	①大気中のラドン Rn, 地表の岩石, 食物, 宇宙などからである。なお, 世界平均は 2.4 mSv である。	
199	第3節 核反応と核エネルギー A 質量とエネルギーの等価性 1905 年, アインシュタインは, 時間と空間に関する考察から特殊相対性理論を提唱し, 質量とエネルギーとの間に成り立つ関係を導いた。この理論によると, 質量とエネルギーは同等であり, 物体がエネルギーをもつということは, それに対応する質量をもつことに相当し, またその逆も成り立つ。これを質量とエネルギーの等価性という。 真空中の光速を c [m/s] とすると, 静止している質量 m [kg] の物体は, 次式で表されるエネルギー E [J] をもつことが知られている。	
199	質量とエネルギーの等価性 $E = mc^2 \quad (13)$ E [J] 静止している物体がもつエネルギー (energy) m [kg] 物体の質量 (mass) c [m/s] 真空中の光速	
199	問 7 電子, 陽子, 中性子の質量をエネルギーに換算すると, それぞれ何 MeV か (1 MeV = 10^6 eV)。有効数字 3 桁で求めよ。ただし, 各粒子の質量や定数は物理定数表を参照せよ。	
199	【発展】特殊相対性理論によるエネルギーと質量の関係 特殊相対性理論によれば, 速さ v で運動しているときの物体の質量 m' は, 静止しているときの質量 (静止質量) を m とすると, $m' = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ と表される。 したがって, 物体のもつエネルギー E と運動量 p は, それぞれ次式で表される。 $E = m'c^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad p = m'v = \frac{mv}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ また, v が c に比べて十分に小さいときには, 次の関係が成り立つ。 $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = mc^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$	

	静止エネルギー 運動エネルギー 第1項は質量に伴うエネルギーを表すもので、静止エネルギーとよばれる。 第2項は通常の運動エネルギーである。この式は、運動をしている物体のエネルギーが静止エネルギーに運動エネルギーを加えたものに等しいことを示している。	
199	Check $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$ の関係がある。	
199	② $ a $ が1に比べて十分に小さいとき、 $(1+a)^n \approx 1+na$ (n はあまり大きくない実数) を用いた。	
202	C 原子核の結合エネルギー 原子核を構成する核子の間には強い引力である核力がはたらき、核子どうしを結びつけている。このような原子核から核子1つ1つを引きはがして、ばらばらにするためには、核力に打ち勝つ力を加えて仕事をする（原子核にエネルギーを与える）必要がある。したがって、核子が結合して原子核を構成しているときよりも、核子がばらばらになっているときのほうが、より多くのエネルギーをもっている。つまり、質量とエネルギーの等価性により、核子の質量の総和は、核子がばらばらになっているときよりも、原子核としての核子が結合しているときのほうが小さいことがわかる。この質量の差 Δm を質量欠損という。 質量欠損に相当するエネルギー $\Delta m \cdot c^2$ を原子核の結合エネルギーという。結合エネルギーは、原子核の核子をばらばらの状態にするために与えなければならないエネルギーである。 陽子数 Z、中性子数 N の原子核の質量を M、陽子の質量を m_p、中性子の質量を m_n とすると、質量欠損 Δm と結合エネルギー $\Delta m \cdot c^2$ は次の式で与えられる。 $\Delta m = Zm_p + Nm_n - M \quad (14)$ $\Delta m \cdot c^2 = Zm_pc^2 + Nm_nc^2 - Mc^2 \quad (15)$ 質量数 A ($= Z + N$) の原子核の核子1個あたりの結合エネルギー $\frac{\Delta m \cdot c^2}{A}$ の値が大きい原子核ほど安定であることが知られている。図31によると、質量数が50～60の鉄あたりの原子核が最も安定であることがわかる。	
202	図29 質量欠損（ヘリウムの例） ヘリウムの原子核の質量は、陽子2個と中性子2個をばらばらにしたときの質量の和より小さい。	
202	図30 原子核の結合エネルギー	
203	図31 核子1個あたりの結合エネルギー $\frac{\Delta m \cdot c^2}{A}$ と質量数 A の関係	
203	問10 ${}^4_2\text{He}$ を構成する核子を1つ1つ引きはがしてばらばらにするのに必要なエネルギーはどのくらいか。図31をもとにしておよその値を求めよ。	
203	なるほど 化学反応のエネルギーと核反応のエネルギーとの違い Q 私たちの身近で起こっている化学反応に関係するエネルギーと、核反応に関係するエネルギーとの違いは何ですか。 A 化学反応では、原子核の外側の電子が原子や分子どうしでやりとりされ、電子の結合状態が変化します。その結果、電子と原子核の間の結合エネルギーが変化して光の放出や熱の放出・吸収がおこります。このようにして出入りするエネルギーが化学エネルギーで、その大きさは原子や分子1個の反応あたり数 eV です。例えば、$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ という化学反応では、原子1個あたり 4.08 eV のエネルギーが放出され、このエネルギーにアボガドロ数をかけると 1 mol あたり 94 kcal になります。茶碗1杯分の白米から得られるエネルギーが数 100 kcal であることから、生命活動に必要なエネルギーが化学反応に基づいていることが推測されるでしょう。化学反応においても、反応の前後で原子や分子の質量の和は変化しますが、$10^{-9}\%$ 程度ときわめてごくわずかです。 一方、核子の組み合わせがかわる核反応では、反応の前後で原子核の結合エネルギーが変化し、このエネルギー差	

	に対応して γ 線の放出や熱の放出・吸収が起こります。このようにして出入りするエネルギーは核エネルギーです。その大きさは原子核 1 個の反応あたり数 MeV に達し、化学反応の約数百万倍にもなります。核反応の際の質量の和の変化は 0.1%程度です。	
203	① 反応によってできた原子核が励起状態にあれば γ 線が放出される。	
204	D 核融合と核分裂 1 核融合 図 31 によれば、核子 1 個あたりの結合エネルギーは質量数が 50～60 の原子核で最も大きい。したがって、水素などの質量数の小さい原子核どうしが融合すると、融合後の結合エネルギーが融合前の結合エネルギーの和に比べて増加するので、差に相当するエネルギーが放出される。このような核反応を核融合とよぶ。 太陽などの恒星が放出するばく大なエネルギー源は、長い間、大きな謎であったが、現在では核融合によって生成されることが知られている。太陽の内部においては、4 個の水素 (H) の原子核 (陽子) がいくつかの反応を繰り返して、最終的に 1 個のヘリウム (He) の原子核となる。 $4\frac{1}{1}\text{H} \rightarrow \frac{4}{2}\text{He} + 2e^+ + 2\nu \quad (e^+ \text{は陽電子}, \nu \text{はニュートリノを表す。})$ この核融合によって質量が減少し、1 個の $\frac{4}{2}\text{He}$ を生じる反応あたり約 27 MeV のエネルギーが放出される。太陽が放射するエネルギーは毎秒約 3.8×10^{26} J なので、太陽では毎秒約 6000 億 kg の水素がヘリウムに変換され、質量が 40 億 kg に減少していることがわかる。太陽の質量は約 2×10^{22} 億 kg もあるから、水素が枯渇する心配は当面ない。 人工的に核融合を持続して起こすためには、温度をあげることによって、原子核の運動エネルギーを増加させて原子核どうしを衝突させる必要がある。これを目指すのが核融合炉である。	
204	図 32 核融合の例	
204	図 33 核融合反応におけるエネルギーの関係	
205	2 核分裂 図 31 によれば、質量数が鉄あたりのものよりも大きくなると、核子 1 個あたりの結合エネルギーは小さくなる。したがって、ウラン 235 (^{235}U) のような質量数の大きい原子核が分裂すると、分裂後の結合エネルギーの和が分裂前の結合エネルギーに比べて増加するので、差に相当するエネルギーが放出される。このような核反応を核分裂とよぶ。 質量数の大きな原子核が自然に核分裂を起こす確率はきわめて小さいので、自然界では核分裂はほとんど見られない。しかし、質量数の大きな原子核に中性子を衝突させると核分裂が起こることがある。例えば、^{235}U の原子核に中性子を衝突させると、質量数 140 付近と 95 付近の 2 個の原子核に分裂し、同時に 2～3 個の高速 (10^7 m/s) 程度の中性子が放出される。次の核反応はその一例である。 $^{235}_{92}\text{U} + \frac{1}{0}\text{n} \rightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Kr} + 3\frac{1}{0}\text{n} \quad (16)$ 核分裂では、核融合などの他の核反応に比べて、反応の前後で質量欠損の差が大きいので、1 個の原子核から生み出される核エネルギーが大きい。	
205	問 11 核子 1 個あたりの結合エネルギーは、 $^{235}_{92}\text{U}$ が 7.591 MeV、 $^{144}_{56}\text{Ba}$ が 8.266 MeV、 $^{89}_{36}\text{Kr}$ が 8.617 MeV である。式 (16) で表される核分裂反応で放出される核エネルギーを MeV 単位で求めよ。	
205	①この核分裂で放出されるエネルギーは、できたバリウム (Ba) やクリプトン (Kr) の原子核と中性子の運動エネルギー、また γ 線の光子のエネルギーとなり、そのほとんどが最終的には熱に変わる。	
205	図 34 核分裂の例	
205	図 35 核分裂反応におけるエネルギーの関係	

206	プルトニウム 239 ($^{239}_{94}\text{Pu}$) も核分裂を起こしやすい原子核である。この原子核は、原子炉の中でウラン 238 ($^{238}_{92}\text{U}$) に中性子を当てると製造することができ、原子炉の核燃料として使うことができる。^{239}Pu は約 24000 年という長い半減期で α 崩壊する。人体に取り込まれると、微量でも放射線による障害を引き起こすため、取り扱いには十分な注意が必要である。	他の教科書ではあまり取り上げられていない、核燃料としてのプルトニウム (Pu) について、原子炉内で生成される仕組みや取り扱いの注意点などが説明されており、充実した記述となっています。
206	図 36 プルトニウム 239 の生成過程	
206	例題 3 核反応と核エネルギー 等しい運動エネルギーをもった 2 個の重陽子 (^2_1H) が正面衝突して、 $^2_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^1_0\text{n} + ^3_2\text{He}$ という核反応を起こした。この核反応によって放出される核エネルギーは何 MeV か。有効数字 2 桁で答えよ。ただし、^2_1H、^3_2He の原子核と ^1_0n の質量をそれぞれ 2.01355 u、3.01493 u、1.00866 u、真空中の光速を 3.00×10^8 m/s、$1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27}$ kg、$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19}$ J とする。 指針 核反応の前後の質量の減少量をもとめ、質量とエネルギーの等価性から、エネルギーを求める。 解 核反応の前後の質量の減少は、 $2.01355 \text{ u} \times 2 - (3.01493 \text{ u} + 1.00866 \text{ u}) = 1.00351 \text{ u}$ これを kg 単位に換算すると、 $0.00351 \text{ u} \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg/u} \approx 5.83 \times 10^{-30} \text{ J}$ よって、MeV 単位に換算して、 $5.25 \times 10^{-13} \text{ J} / 1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV} = 3.28 \cdots \times 10^6 \text{ eV} \approx 3.3 \text{ MeV}$	
206	類題 2 $^{235}_{92}\text{U}$ の原子核 1 個が核分裂する際に放出するエネルギーの平均値に相当する質量は 0.215 u である。$^{235}_{92}\text{U}$ の原子核 1 個の質量を 235 u とし、1.0 kg の $^{235}_{92}\text{U}$ がすべて核分裂したときに得られるエネルギーは何 J か。また、これと同じ量のエネルギーを石油の燃焼によって得るには、何 kg の石油を燃焼させる必要があるか。ただし、石油 1.0 kg が燃焼するときに発生する熱を 4.2×10^7 J、真空中の光速を 3.0×10^8 m/s とする。	
207	E 原子力の利用と安全性 1 連鎖反応と臨界質量 図 37 のように、ウラン 235 ($^{235}_{92}\text{U}$) の核分裂では、反応によって放出される複数個の中性子が、別の $^{235}_{92}\text{U}$ の原子核に当たると核分裂が続けて連鎖的に起こることになる。これを核分裂の連鎖反応という。 連鎖反応を持続させるためには、ある量以上の $^{235}_{92}\text{U}$ がなければならない。核分裂を起こす物質が連鎖反応を持続するために必要とする最小限の量を臨界質量という。臨界質量未満では連鎖反応は起きず、臨界質量を超えると連鎖反応が持続したり、急速に拡大したりする。 天然ウランは、その 99.3% が中性子を吸収しても核分裂しないウラン 238 ($^{238}_{92}\text{U}$) で、核分裂を起こす $^{235}_{92}\text{U}$ は 0.7% しか存在しない。そこで、$^{235}_{92}\text{U}$ の濃度を連鎖反応が持続する数%まで高めて少しずつ核エネルギーを取り出すようにしたのが原子炉である。	
207	図 37 核分裂と連鎖反応	
207	2 原子炉 核分裂の連鎖反応を制御しながら持続させ、核エネルギーを取り出す装置を原子炉という。 原子力発電では、原子炉から取り出された核エネルギーを電気エネルギーに転換している。原子炉の圧力容器内には濃縮されたウラン化合物が入った燃料棒と、中性子を吸収する物質を含む制御棒が配置され、制御棒を出し入れすることによって中性子の数密度を変え、連鎖反応の速度を制御している。核分裂によって発生した熱は、燃料棒の周りを流れる 1 次系冷却水によって運び出され、蒸気発生器で 2 次系冷却水を水蒸気に変えるのに使われ、発	

	生した水蒸気でタービンを回して発電を行う。	
208	また、 ^{235}U は遅い中性子とよく反応するので、核分裂で放出される比較的高速な中性子を水や黒鉛などの減速材で減速することによって、核分裂の効率を上げている。	
208	3 安全性と放射性廃棄物 核分裂によって生成される原子核の多くは不安定であるため、原子炉を運転した後の核燃料は強い放射能をもつ。したがって、万が一、放射性物質が外部に放出されると、大きな被害が長期間、かつ広範囲に及ぶ。このため、原子炉には何段階もの安全対策がとられているが、安全対策の範囲とレベルを超えた事故が起こり得る。 原子炉の事故で最も深刻なものが、炉心の温度が上昇し、炉心が解ける炉心溶融（メルトダウン）である。例えば、旧ソビエトのチェルノブイリ原子力発電所事故では、連鎖反応が制御不能になって爆発が起き、周辺地域に大量の放射性物質が放出された。日本でも、東北地方太平洋沖地震に際して、福島第一原子力発電所の複数の炉心冷却機能がすべて失われて炉心溶融が起き、原子炉内の放射性物質が外部に放出された。 このような事故を起こさないように、原子炉を安全に管理運転していくための方策の見直しや工夫が行われているが、安全性に関する議論は現在も続いている。また、使用済みの核燃料や古くなって解体した原子炉の鋼材など長期間にわたって放射能をもち続ける放射性廃棄物を安全に処理及び管理する方法も大きな課題の1つであるが、数万年を超えるような長期間にわたる管理が可能かどうかについて疑問の声もある。	「万が一、放射性物質が外部に放出されると、大きな被害が長期間、かつ広範囲に及ぶ。」とありますが、放射性物質はもともと天然にも存在しますし、原子力発電所からは通常の運転状態でも放射性物質の濃度が十分に低いこと（管理基準を下回る）を確認して排気や排水が環境中に放出されています。したがって大きな被害が発生するのは、大量の放射性物質が外部に放出されたときですので、「万が一、大量の放射性物質が外部に放出されると、大きな被害が長期間、かつ広範囲に及ぶ。」としたほうが適切です。 「使用済みの核燃料や古くなって解体した原子炉の鋼材など、長期間にわたって放射能をもち続ける放射性廃棄物を安全に処理および管理する方法も大きな課題の1つであるが、数万年を超えるような長期間にわたる管理が可能かどうかについて疑問の声もある。」とありますが、原子力発電所から発生する放射性廃棄物には性状の異なる様々な廃棄物があり、性状に応じて処理処分を定めています。本報告書の提言5及びその解説で放射性廃棄物について解説していますので、参考してください。
208	①中性子を効果的に減速させるには、中性子の質量に近い質量をもつ原子核と衝突させればよい。そこで、軽水中の陽子や黒鉛（炭素）が減速材として用いられる。一方、中性子を減速したくない高速増殖炉では、質量の大きなナトリウムが冷却材として用いられる。	
208	図 39 放射性廃棄物の放射能の時間変化 代表的な原子核を掲載している。	
数研出版 706 物理		
370	3 X線 健康診断でのX線撮影では、X線のどのような性質を利用しているのだろうか。この節では、X線がどのような性質をもっているか理解しよう。	
370	A X線 19世紀末、レントゲン（ドイツ）は真空放電の研究を行っているとき、放電管から正体不明の、強い透過力をもつ放射線が出ることを発見し、それをX線とよんだ。X線は電離作用をもつが、電場や磁場に影響されずに直進するので、荷電粒子ではない。のちにX線は、紫外線よりさらに波長の短い電磁波であることがわかった。X線はその強い透過力（図11）を利用して、医療診断などに利用される。また、X線は蛍光物質を光らせる性質をもつ。	
370-371	B X線の発生 X線の発生には、X線管という装置がよく用いられる（図12）。電流による発熱で陰極から放出される電子（熱電子）は高い電圧によって加速され、陽極（ターゲット）に衝突する。その際1個の電子のもつエネルギーの一部ま	

	たは全部が X 線光子のエネルギーになり、残りはターゲットで発生する熱になる。図 13 は、ターゲットにモリブデンを用いた場合に発生する X 線の強さと波長の関係（スペクトル）を、模式的に示したものである。 発生する X 線のスペクトルは、ある最短の波長に始まり、それよりも長い波長を連続的に含んでおり、これを連続 X 線という。 電子のエネルギーがすべて 1 個の X 線光子のエネルギーに変わるとき、X 線光子のエネルギーは最大になり、X 線の波長は最短となる。このときの X 線の振動数を ν_0 [Hz]、波長を λ_0 [m] とする。電子の初速度を 0 とし加速電圧を V [V] とすると $eV = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} \cdots (14)$ これより、最短波長 λ_0 は、加速電圧 V によって決まることがわかる。 $\lambda_0 = \frac{hc}{eV} \cdots (15)$ 連続 X 線のほかに、特定のエネルギーをもつ X 線が強く放射され、これは固有 X 線（特性 X 線ともいう）といわれる。固有 X 線の波長はターゲットの材質によって決まっている。	
371	例題 4 X 線 図は、X 線管で発生させた X 線の強さと波長の関係を表すグラフである。X 線管の加速電圧 V (V) を求めよ。プランク定数を $h = 6.6 \times 10^{-34}$ J・s、真空中の光の速さを $c = 3.0 \times 10^8$ m/s、電気素量を $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C とする。 指針 加速電圧 V によって電子が得たエネルギー eV が、すべて X 線光子のエネルギー $E = hc/\lambda$ になるとき、その X 線の波長は最短となる。 解 X 線の最短波長を λ_0 (m) とおくと $eV = hc/\lambda_0$ よって $V = \frac{hc}{e\lambda_0}$ 図より、X 線の最短波長は $\lambda_0 = 3.0 \times 10^{-11}$ m なので $V = \frac{(6.6 \times 10^{-34}) \times (3.0 \times 10^8)}{(1.6 \times 10^{-19}) \times (3.0 \times 10^{-11})} \approx 4.1 \times 10^4 \text{ V}$	
371	類題 4 X 線管の金属電極間に 2.2×10^4 V の加速電圧を加えた。 (1) 発生する X 線の最短波長は何 m か。プランク定数を 6.6×10^{-34} J・s、真空中の光の速さを 3.0×10^8 m/s、電気素量を 1.6×10^{-19} C とする。 (2) 加速電圧を 2 倍にすると、最短波長は何 m になるか。 ヒント (2) 加速電圧を 2 倍にしたとき、最短波長が何倍になるかを考える。	
371	2 連続 X 線は物質中で電子が減速したり、向きを変えたりすることに伴って放出される。	
390	【参考】固有 X 線の発生原理 370 ページで学んだ、X 線管で発生する固有 X 線は、ターゲットの原子のエネルギー準位を考えることによって説明できる。水素原子以外の原子についても、エネルギー準位が存在し、低い方から $E_1, E_2, E_3, \dots$ というように、とびとびの値を取る。図 A に示すように、原子に衝突した電子が原子内の電子をたたき出すと、エネルギー準位に空席ができる。その空席に、よりエネルギーが高い外側の軌道にある電子が落ちこみ、エネルギーの差を X 線として放出する。これが固有 X 線である。370 ページの図 13 の 2 つの固有 X 線のうち、波長が長いほうは E_2 から E_1、波長が短いほうは E_3 から E_1 に落ちこむときに放出される X 線である。	
390	図 A 固有 X 線の放射過程	
390	コラム 固有 X 線と元素分析 1913 年、原子の固有 X 線の研究をしていたモーズリーは、X 線の振動数と原子番号の間に成り立つモーズリーの法則を発見した（図 A）。この法則は、ボーアの原子模型（1913）を支持するものであり、原子番号 Z は原子核が電	

	気素量の Z 倍の電荷を持つことを意味することを示し、ハフニウム Hf やレニウム Re など新元素の発見に導いた。 また、この法則を用いると、X 線の振動数を測定することで発生源の元素を特定する元素分析が可能になる。	
390	学んだことを説明してみよう 1 原子の構造とエネルギー準位 水素原子の電子があるエネルギー準位 E_n から、それより低いエネルギー準位 E_m に移るとき、何が放出されるか。	
391	2 原子核 同じ元素記号で表されていても異なる原子核がある。共通点と相違点は何だろうか。この節では、原子核がどのような粒子から構成されているか理解しよう。	
391	A 原子核の構成 原子は、中心にある原子核と、原子核をとりまく電子（電気量 $-e$ ）からなる。原子核は原子の 10 万分の 1 程度の大きさであり、正の電気量 e を持つ陽子（図 30）と、電気をもたない中性子（同図）とからなる。 （省略） 元素（原子の種類）は、原子核に含まれる陽子の数で決まり、その数を原子番号という。陽子と中性子を総称して核子といい、核子の総数を質量数という。原子番号（陽子の数）を Z 、中性子の数を N 、質量数を A とすると、 $A = Z + N$ である。原子や原子核は、元素記号と、その左上に質量数、左下に原子番号をつけて表される（図 31）。原子番号 Z の元素の原子核は Ze の正の電気量を持つ。 陽子どうしは静電気力で反発し合い、陽子と中性子、および中性子どうしでは静電気力がはたらかない。それにもかかわらず、核子が $10^{-15} \sim 10^{-14}$ m 程度の狭い空間に集まっているのは、核子どうしが静電気力よりはるかに強い力で引きあっているからである。この力を核力という。	
391	問 11 次の原子の、陽子の数、中性子の数をそれぞれ求めよ。 (1) ${}^1_1\text{H}$ (2) ${}^4_2\text{He}$ (3) ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ (4) ${}^{35}_{17}\text{Cl}$	
391	1 元素によって原子番号は決まっているので、左下の数字は省略することがある。	
391	図 30 原子と原子核の構成	
391	図 31 原子番号と質量数（例：炭素）	
392	B 同位体 同じ元素でも（つまり陽子の数が同じでも）、中性子の数が異なる原子がある。これらの原子をお互いに同位体（アイソトープ）という。同位体の例を表 2 に示す。 同位体を区別する場合は、 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{13}_6\text{C}$ のように質量数の違いで表す。水素 ${}^1_1\text{H}$ の原子核は陽子であり、 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ の原子核はそれぞれ重陽子、三重陽子といわれる。 イオンになっていない電気的に中性の原子中の電子の数は、陽子の数、すなわち原子番号に等しい。 一般に、同じ元素の同位体は化学的な性質がほぼ同じである。しかし、物理的性質は大きく異なることがある。また、原子が出す光の線スペクトルの波長も同位体によってわずかに異なる。	
392	C 統一原子質量単位 原子の質量は極めて小さい。そのため、 ${}^{12}_6\text{C}$ 原子 1 個の質量の $1/12$ を統一原子質量単位（記号 u ）として質量の単位に用いることがある。 $1 u = 1.66 \times 10^{-24} \text{ g} (= 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})$ (32) 問 12 ${}^{12}_6\text{C}$ 原子 1 個の質量を単位 g で表せ。 $1 u = 1.66 \times 10^{-24} \text{ g}$ とする。	
392	1 陽子は p 、中性子は n （または ${}_0n$ ）、電子は e の記号で表される。	
392	2 水素の同位体 ${}^3_1\text{H}$ の原子を重水素といい、 D と表すことがある。重水素からなる水 (D_2O) を重水という。	
393	【参考】同位体の発見	

	原子の質量は、原子を電離させてイオンにし、加速したイオンに電場や磁場を加えて、その軌道を調べることにによって求められる。 J. J. トムソンは、電場と磁場を加えた空間にイオンを入射させ、比電荷の同じイオンがスクリーン上の同じ放物線上に集まるような装置を製作した。これにより、ネオンには質量数が 20 のもののほか、質量数が 22 のものも存在することが示された。 その後、J. J. トムソンの研究室にいたアストン（イギリス）は、イオンの速さが異なっているにもかかわらず、比電荷が同じであれば、スクリーン上の一点に集中するような装置を製作した。このような装置を質量分析器という。これにより、多くの同位体を発見するとともに、それらの質量と存在比を精密に測定することが可能となった。	
393	図 A 質量分析器の原理	
393	D 原子量 $^{12}_6\text{C}$ 原子の質量は、統一原子質量単位を用いると 12 u である。この値 12 を基準として、他の原子 1 個の質量を相対的に表した値を、元素の原子量という。実際には、多くの元素には複数の同位体が存在するため、元素の原子量は、各同位体の相対的な質量にその存在比を乗じて計算した平均値として求められる。例えば炭素の原子量は、表 2 により次のように求められる。 $12 \times 0.9893 + 13.003 \times 0.0107 \approx 12.01 \quad (33)$	
393	問 13 塩素には 2 つの同位体 $^{35}_{17}\text{Cl}$ （質量 35.0 u）、 $^{37}_{17}\text{Cl}$ （質量 37.0 u）が 3 : 1 の比率で存在する。塩素の原子量を求めよ。	
393	学んだことを説明してみよう 2 原子核 同位体である 2 つの原子核を比較したとき、陽子の数と中性子の数について、どのような関係があるか。	
394	【参考】いろいろな原子核と核図表 同位体には自然界に存在するもの以外にも、人工的に作られるものがあり、これらを含めると、非常に多くの種類の原子核が存在する。図 A は縦軸に陽子数、横軸に中性子数をとった平面上に原子核を並べたもので、核図表と言われる。一つ一つのマス目が個々の原子核に対応する。 半減期が 5 億年以上の、安定な原子核は約 300 種ある。寿命が 100 万分の 1 秒程度の不安定な原子核を含めると、理論的には現在約 7000 種の原子核が存在すると予測され、それらに対する活発な研究が展開されている。実験的には、既に約 3000 種の原子核の存在が確認されている。	
394	図 A 核図表 これまでに発見された原子核を表している。■印は安定な原子核。これら以外の原子核の存在も、理論的に予想されている。	
394	コラム ニホニウム（113 番元素）の発見 自然界に存在する最大の原子番号を持つ元素は $Z = 92$ の U であるが、$Z = 114$ の近傍に比較的長い寿命の原子核が存在することが予言され、これを超重核とよび、また対応する元素を超重元素とよぶ。世界の多くの研究者が核融合反応を用いてその生成を試み、現在では $Z = 118$ までの元素が作られたと報告されている。日本でも理化学研究所の森田浩介を中心とする研究チームが、$^{209}_{83}\text{Bi} + ^{70}_{30}\text{Zn} \rightarrow ^{278}_{113} + n$ 反応を用いて、113 番元素の生成に挑戦した。超重元素生成反応が起こる確率はきわめて小さく、また、重い未知の領域の元素が生成されたことの確たる証拠をとらえることは難しい。通常はその原子核の崩壊過程を調べることによって確認する。理化学研究所の研究チームは、長時間にわたる実験の末、113 番元素生成によって期待される 6 つの連続的な α 崩壊 $^{278}_{113}\text{X} \xrightarrow{\alpha} ^{274}_{111}\text{Y} \xrightarrow{\alpha} ^{270}_{109}\text{Z} \xrightarrow{\alpha} ^{266}_{107}\text{A} \xrightarrow{\alpha} ^{262}_{105}\text{B} \xrightarrow{\alpha} ^{258}_{103}\text{C} \xrightarrow{\alpha} ^{254}_{101}\text{D}$ の観測に成功した（2012）。このうち、5 番目および 6 番目の α 崩壊が既知の崩壊と一致したため、逆算して 113	

	番元素の生成が確定した。この功績により、113 番元素の命名権が森田らに与えられ、「ニホニウム (Nh)」という名称に決定した。新元素発見は日本初、さらにはアジア初の快挙となった。	
395	3 放射線とその性質 「放射線」と「放射性物質」は明確に意味が異なる。それぞれの意味を説明できるだろうか。この節では、放射線の種類とその性質について理解しよう。	
395	A 放射線 天然に存在する原子核の中にはウラン U やラジウム Ra、炭素 ^{14}C など、不安定なものがある。これらは放射線と呼ばれる粒子の流れや波長の短い電磁波を出しながら、自然に別の原子核に変わっていく。この現象を放射性崩壊といい、自然に放射線を出す性質を放射能という。放射能を持つ同位体を放射性同位体（ラジオアイソトープ）、放射能を持つ物質を放射性物質という（図 32）。 放射線は、物質を透過し、物質中の原子から電子をはじきとばして原子をイオンにするはたらき（電離作用）を持っている。また、写真フィルムを感光させたり、蛍光物質を光らせたりする性質を持つ。 放射性同位体から出る主な放射線には、 α 線、 β 線、 γ 線の 3 種類がある（表 3）。これらは、磁場の中で異なる進み方をする（図 33）。中性子の流れである中性子線や X 線を放射線の一種である。	
395	図 32 放射性物質・放射能・放射線 放射性物質を電球のような光源に例えた。	
395	図 33 磁場内の放射線の進み方 α 線と β 線は磁場により曲げられる。一方、 γ 線は直進する。	
395	表 3 放射線の性質 中性子線は透過力が強いが、水などに含まれる水素原子核（陽子）により効果的に遮蔽される。	
396	問 14 α 線と β 線は磁場内で曲げられるが、 β 線の方が大きく曲げられる。これはなぜだろうか。粒子の初速度の大きさは等しいとみなせるものとする。	
396	霧箱（放射線の検出器の一種）を用いて放射線の軌跡を観察してみよう。	
396	実験 47 放射線の観察 エタノールの蒸気を満たした箱の中に α 線や β 線が入射すると、その電離作用により空気がイオン化される。それが核となってエタノールの蒸気が液体になることにより霧が生じ、荷電粒子の軌跡を見ることができる。 ① ガラス容器の底に色紙を敷いてエタノールを少量落とし、その上にプラスチック板（四辺から中央へ切れ込みを入れる）をかぶせる。 ② 放射性物質をガラス容器の中央に置き、ガラス容器にラップをかける。 ③ 放熱板を置いた発泡ポリスチレン容器に液体窒素を注ぎ、放熱板の上にガラス容器を乗せる。 ④ 部屋を暗くして、ガラス容器の横から懐中電灯で照らす。5 分程で飛跡が見え始める。 注意 放射性物質や液体窒素の扱いは先生の指示に従うこと。	
396	B α 崩壊・β 崩壊 α 線の放出は、原子核から陽子 2 個と中性子 2 個が ^4_2He （ α 粒子）となって出ていく現象である。この現象を α 崩壊といい、原子核は、質量数が 4、原子番号が 2 だけ小さい原子核に変わる（図 34a）。 β 線の放出は、原子核中の中性子が陽子に変化するとき電子が飛び出す現象である。この現象を β 崩壊といい、原子核は、質量数が同じで原子番号が 1 だけ大きな原子核に変わる（同図 b）。	
396	図 34 α 崩壊と β 崩壊	
397	図 35 崩壊系列（ウラン系列） 原子核が崩壊して生じる一連の原子核を崩壊系列といい、このほかに、アクチニウム系列、トリウム系列、ネプツニウム系列の 3 つの系列がある。	
397	崩壊後の原子核は不安定である場合が多く、安定な原子核になるまで α 崩壊や β 崩壊を続け、次々に新しい原	

	子核に変わっていく (図 35)。 個々の原子核には、基底状態 (エネルギーが最も低い状態) と励起状態 (エネルギーが高い状態) がある。α 崩壊や β 崩壊で生じる新しい原子核は、励起状態にあることが多い。その場合、同じ原子核の、よりエネルギーの低い状態に移ることがある。この時、エネルギーが電磁波 (γ 線) として放出される。γ 線の放出では、原子番号も質量数も変化しない。	
397	例題 6 放射性崩壊 $^{235}_{92}\text{U}$ は、α 崩壊を 7 回、β 崩壊を 4 回行って、安定な原子核になる。この原子核の原子番号 Z と質量数 A を求めよ。	
397	指針 α 崩壊では原子番号が 2、質量数が 4 減少し、β 崩壊では原子番号が 1 増加する。	
397	解 原子番号 Z = $92 - 2 \times 7 + 1 \times 4 = 82$ 質量数 A = $235 - 4 \times 7 = 207$	
397	類題 6 $^{232}_{90}\text{Th}$ は、α 崩壊を x 回、β 崩壊を y 回行って、安定な原子核 $^{208}_{82}\text{Pb}$ になる。x と y を求めよ。 ヒント β 崩壊では質量数が変化しないため、質量数の変化から α 崩壊の回数が分かる。	
397	1 正確には、中性子は $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ のように崩壊するので、 $\bar{\nu}_e$ も放出される。 $\bar{\nu}_e$ は電子ニュートリノ ν_e の反粒子で、電気量は 0、質量は無視できるほど小さい。	
398	C 半減期 原子核が放射性崩壊によって他の原子核に変わるとき、もとの原子核の数が半分になるまでの時間は、それぞれの原子核で決まっている。この時間を半減期という。初めの原子核の数を N_0 、時間 t 後に壊れないで残っている原子核の数を N、半減期を T とすると、残留率 $\frac{N}{N_0}$ について、次の式が成り立つ (図 36)。 $\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \quad (34)$ N_0 初めの原子核の数 t 経過時間 N 時間 t 後に壊れないで残っている原子核の数 T 半減期 原子核の崩壊は確率的に起こる現象である。1 個の原子核が 1 秒間に崩壊する確率は、原子核の種類によって決まっている。半減期が原子核によって決まっているのはこのためであり、半減期の間に 1 個の原子核が崩壊する確率は 1/2 である。したがって、多数の原子核の集団では、半減期 T の間に半数が崩壊し、残った原子核の半数がその後 T の間に崩壊し、そのくり返しで、原子核の数が減少していく。表 4 にいくつかの放射性原子核の半減期を示した。 半減期のモデル実験をしてみよう。	
398	表 4 いろいろな半減期 ※ 中性子は原子核内では安定に存在しうるが、単独では不安定であり、β 崩壊により陽子に変わる。	
399	例題 7 半減期 図は、放射性崩壊をする原子核 $^{226}_{88}\text{Ra}$ の残留率 (崩壊をせずに残っている原子核の割合) と時間の関係を表すグラフである。 (1) $^{226}_{88}\text{Ra}$ の半減期は何年か。 (2) 6.0 g のラジウムのうち、 3.2×10^3 年後に崩壊せずに残っているのは何 g か。 (3) $^{226}_{88}\text{Ra}$ の数が初めの 1/8 になるのは何年後か。	
399	指針 半減期の時間が経過するたび、残留率 (または崩壊していない原子核の数) が 1/2 倍になる。	
399	解 (1) 図より、半減期 (残留率が半分になる時間) は、 1.6×10^3 年 (2) 崩壊せずに残っている $^{226}_{88}\text{Ra}$ の質量を m [g] とすると、	

	$\left[\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \right] \text{ ((34) 式) より } \frac{m}{6.0} = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{3.2 \times 10^3}{1.6 \times 10^3}} = \left(\frac{1}{2} \right)^2 = \frac{1}{4}$ よって $m = \frac{1}{4} \times 6.0 = 1.5 \text{ g}$ (3) t 年後に 1/8 になったとすると, (式) $\left[\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \right] \text{ ((34) 式) より}$ $\frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2} \right)^3 = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{1.6 \times 10^3}}$ よって $t = 3 \times (1.6 \times 10^3) = 4.8 \times 10^3 \text{ 4.8} \times 10^3 \text{ 年後}$	
399	類題 放射性崩壊をする原子核がある。この原子核 8.0 g のうち, 56 日後に崩壊せずに残っていたのは 0.50 g であったとする。 (1) この原子核の半減期は何日か。 (2) 崩壊せずに残っている原子核の質量が 0.25 g になるのは, 初めから数えて何日後か。 ヒント 原子核の残留率 $\left(\frac{N}{N_0} \right)$ は, 最初の質量 8.0 g に対する残った質量 0.50 g の比に等しい。	
399	コラム 炭素の放射性同位体による年代測定 炭素の同位体 $^{14}_6\text{C}$ は不安定であり, β 崩壊によって窒素に変わる。逆に, 大気中では窒素の原子核に, 宇宙からやってくる放射線 (宇宙線) によって生じた中性子が衝突して $^{14}_6\text{C}$ が生成され, 大気中の二酸化炭素 CO_2 に含まれる $^{14}_6\text{C}$ の割合は一定に保たれている。したがって, 光合成によって CO_2 を取り込んでいる植物の $^{14}_6\text{C}$ の含有率も, 大気と同様に一定である。 植物が枯れたり伐採されると, $^{14}_6\text{C}$ は取り込まれなくなり, 半減期約 5700 年で減少していく。したがって, 遺跡などの木材に含まれる $^{14}_6\text{C}$ の残留率を調べることで, 遺跡がいつ頃のもののかを知ることができる。	
400	【参考】半減期と常用対数 放射性崩壊をする原子核について, 半減期が 8 日の場合, 元の原子核の数の になるまでの時間は $8 \text{ 日} \times 4 = 32 \text{ 日}$ となる。それでは, $\frac{1}{3}$ 倍になるまでの時間はどうなるだろうか。このとき, $\frac{1}{3} = \left(\frac{1}{2} \right)^p = \frac{1}{2^p}$, すなわち $2^p = 3$ を満たす p の値を求めればよい。両辺の常用対数をとると $\log_{10} 2^p = \log_{10} 3$ ここで, 対数の性質より $p \log_{10} 2 = \log_{10} 3 \quad \text{よって} \quad p = \frac{\log_{10} 3}{\log_{10} 2}$ $\log_{10} 2 = 0.3010, \log_{10} 3 = 0.4771 \quad \text{より}$ $p = \frac{0.4771}{0.3010} = 1.58 \cdots \approx 1.6$ となり, $8 \text{ 日} \times 1.6 \approx 13 \text{ 日}$ と求められる。 常用対数の値は, 関数電卓やインターネットなどを用いて調べることができる。	
400	実験 48 半減期のモデル実験 さいころを放射性同位体とみなし, 1 の目が出た時に放射性崩壊を起こすとみなす。 ① さいころ 100 個を紙コップに入れ, よく振って一斉にばらまく。 ② 1 の目が出たさいころを取り除き, 残ったサイコロの数 N を記録する。 ③ 残ったさいころを紙コップに戻し再びばらまく。 ④ ②～③の操作を繰り返す。残ったさいころが 10 個以下になったところで操作をやめる。	個々の放射性原子核の崩壊は確率的な現象であるが, 多数の原子核があると集団として規則性が見えてくることを実感できる, 大変良い実験です。1 個の原子核が崩壊する確率が崩壊定数に相当し, 崩壊定数と半減期の関係もよく分かりますし, 放射能がなぜ指数関数的に減るのかも (指数関数を学習していない段階でも)

	⑤ 横軸に操作の回数，縦軸に残ったさいころの数 N をとったグラフを作成する。 ⑥ グラフの形を p. 398 図 36 と比較してみよう。また，残ったさいころの数 N が 50 個になる回数 n_0 を大まかに読み取る（これが半減期に相当する）。 ⑦ 結果をまとめ，報告書を提出しよう。また，各グループの結果をそれぞれ発表しあい，グラフの形や n_0 に目立った違いがないか，確認してみよう。	理解できます。
401	D 放射線の測定単位 放射線に関して用いられる単位には，放射能の強さを表すベクレル（記号 Bq），人体などが受ける放射線の量（強さ）を表すグレイ（記号 Gy）やシーベルト（記号 Sv）などがある（表 5）。 放射線測定などでは，単位時間あたりに受ける放射線の量（線量率）を，マイクロシーベルト毎時（$\mu\text{Sv/h}$）という単位で表すことが多い。	吸収線量，等価線量，実効線量についてきちんと説明されていて，記載内容も正確です。コラムも充実しています。
401	表 5 放射線に関する単位	
401	コラム放射線の人体への影響の考え方 放射線の人体（全身）への影響を表す量に実効線量がある。 実効線量は直接測定することはできない。このため，放射線測定器などでは，実効線量に近い値である線量当量（単位：Sv）を基準にした線量率（単位：$\mu\text{Sv/h}$）が表示される。実用上は，線量率に時間をかけることで，人体が外部から放射線を受ける場合（外部被曝という）の実効線量を推定する。 一方，体内に入りこんだ放射性物質から放射線を受ける場合（内部被曝という）の実効線量の推定の仕方の一例を，次ページで紹介した。 放射線の人体への影響については，外部被ばくによる実効線量と内部被ばくによる実効線量を足した合計値が一つの指標となる。また，実効線量を用いて健康への影響を検討する場合，累計の値が重要な指標となる。	
401	1 $1\mu\text{Sv/h}$ は，1 時間で $1\mu\text{Sv} = 10^{-6}\text{Sv}$ の放射線を受けることに相当する。	
402	E 放射線の影響と利用 人体が放射線を受けることを被曝という。放射線はその電離作用によって生物の細胞に影響を及ぼし，将来のがんの発症の原因となったり，被曝量が大きい場合には急性の障害を引き起こすこともある。この影響を最小限にするには，放射線源から離れる，浴びる時間を短くする，鉛でさえぎるなどの対策をとる必要がある。一方，放射線は，非破壊検査，がんの治療，診断，農作物の品種改良など，産業・医学などの分野で幅広く活用されている。	
402	コラム 食品からの被曝の影響の考え方 放射性物質を含む食品を体内に取り込むと，内部被曝によって継続的な影響を受ける。放射性物質が体内に入ってから，人体が将来にわたって通算でどの程度影響を受けるかを表す量（預託実効線量という）を見積もる方法がある。それは，国際放射線防護委員会（ICRP）によって定められた実効線量係数を用いる方法である。例えば，18 歳以上の人が $^{137}_{55}\text{Cs}$ を口から取り込んだ場合の係数は 0.000013 mSv/Bq とされている。20 歳の人々が，1000 Bq の $^{137}_{55}\text{Cs}$ を口から取りこんだ場合，放射線の人体への影響（実効線量）は $1000\text{ Bq} \times 0.000013\text{ mSv/Bq} = 0.013\text{ mSv}$ と見積もることができる。 （参考：一般食品では放射性セシウムの基準値は 100 Bq/kg）	
402	学んだことを説明してみよう 3 放射線とその性質 (1) α 崩壊が起こるとき，原子核はどのように変化するか。 (2) β 崩壊が起こるとき，原子核はどのように変化するか。	
403	4 核反応と核エネルギー アインシュタインの相対性理論によれば，質量とエネルギーは同等であるという。	

	この節では、核反応にともなうエネルギーと質量との関係について理解しよう。	
403	A 核反応 ラザフォードは、内部に α 線源を設置した密閉した箱に窒素ガスを詰めると陽子が飛び出すことを発見し ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H} \quad (35)$ という反応が起こることをつきとめた (図 38)。このように、原子核が変わる反応を核反応、または原子核反応という。 化学反応では、原子の種類は変化せず、原子の組み合わせが変わるだけであるが、核反応では原子核が変化し、別の種類の原子ができる。 正の電気を持つ 2 つの原子核の間には遠距離では斥力の静電気力がはたらく。核反応は、2 つの原子核がこの斥力にうちかって、核力がはたらく近距離に近づいたとき、初めて起こる。そのため核反応を起こすには、2 つの原子核の間に大きな衝突のエネルギー (運動エネルギー) を与える必要がある。そのための装置が加速器である。 一方、電気を持たない中性子は他の原子核に近づきやすい。 一般に、核反応では、反応の前後で質量数の和と電気量の和は一定に保たれる	
403	問 15 ジョリオ・キュリー夫妻 (フランス) は、 α 粒子を ${}^{27}_{13}\text{Al}$ に衝突させてリンの放射性同位体 ${}^{30}_{15}\text{P}$ を作った。このときの核反応を式で表せ。	
403	図 38 核反応の発見 ラザフォードが発見した (35) 式の反応を、ブラケット (イギリス) は a のように霧箱によって写真をとることに成功した。	
406	C 核エネルギー 一般に、核反応では、原子核の質量の和が、反応の前後で変化する。この質量の和が反応によって減少する場合、反応の前後の質量差に相当するエネルギーが核エネルギーとして開放される。このとき、結合エネルギーの和は増加しており、解放される核エネルギーは、結合エネルギーの和の変化に等しい (図 41)。 核反応で解放されるエネルギーはきわめて大きい。化学反応で発生するエネルギーは、多くの場合、1 回の反応で数 eV 程度であるのに対し、核反応では数 MeV 以上のエネルギーが発生することが多い。例えば、次ページの例題 8 の ${}^1_1\text{H}$ と ${}^7_3\text{Li}$ の核反応では、1 回で約 17.4 MeV のエネルギーが発生する。これらの原子が 1 mol (数 g) ずつ反応したとすると $(17.4 \times 10^6) \times (1.60 \times 10^{-19}) \times (6.02 \times 10^{23}) \text{ J} \cong 1.68 \times 10^{12} \text{ J} \quad (38)$ という膨大なエネルギーが発生することになる。これは、石油約 40 トンを燃やしたときのエネルギーに相当する。	
406	1 ウランは放置しておいた場合にも核分裂することがあるが、中性子を照射すると核分裂が促進される。	
406	図 41 核反応 $P + Q \rightarrow R + S$ で発生する核エネルギーと結合エネルギー	
406-407	D 核分裂反応 ハーン (ドイツ) とシュトラスマン (ドイツ) は、ウランに中性子を照射したときの反応生成物の中に、ウランのほぼ半分の質量をもつバリウム ${}^{141}_{56}\text{Ba}$ などの原子核が含まれていることを発見した。 このように、1 つの原子核が、いくつかの原子核に分かれる反応を核分裂という (図 42)。 核子 1 個あたりの結合エネルギーは、質量数が 56 の鉄のあたりで最大値をとる。そのため、ウランのように質量数が大きい原子核は、1 つの原子核でいるより 2 つの原子核に分裂した方が、エネルギー的に安定である (図 43)。このことが、核分裂の起こる原因である。	
407	図 42 ウランの核分裂の一例	
407	図 43 核分裂 ($X \rightarrow 2Y$) と結合エネルギーの関係	
407	例題 8 核反応と核エネルギー	

	次の核反応で放出されるエネルギーE [MeV]を求めよ。 ${}^1_1\text{H} + {}^7_3\text{Li} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ ${}^1_1\text{H}$, ${}^7_3\text{Li}$, ${}^4_2\text{He}$原子核の質量をそれぞれ 1.0078 u, 7.0160 u, 4.0026 u, 真空中の光の速さを 3.00×10^8 m/s, 電気素量を 1.60×10^{-19} C, $1\text{u} = 1.66 \times 10^{-27}$ kg とする。	
407	指針 反応前後の質量の減少がエネルギーとして放出される。質量とエネルギーの単位に注意する ($1\text{ u} = 1.66 \times 10^{-27}$ kg, $1\text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19}$ C)。	
407	解 反応前後での質量は $(1.0078 + 7.0160) - 4.0026 \times 2 = 0.0186\text{ u}$ 「$E = mc^2$」(p. 404(37)式) より $E = \{0.0186 \times (1.66 \times 10^{-27})\} \times (3.00 \times 10^8)^2 \text{ J}$ $1\text{ MeV} = 10^6\text{ eV} = (1.60 \times 10^{-19}) \times 10^6\text{ J}$ を用いて $E = \frac{0.186 \times (1.66 \times 10^{-27}) \times (3.00 \times 10^8)^2}{(1.60 \times 10^{-19}) \times 10^6} \approx 17.4\text{ MeV}$	
407	類題 8 次の核分裂反応で放出されるエネルギーE [MeV]を求めよ。 ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{92}_{36}\text{Kr} + {}^{141}_{56}\text{Ba} + 3{}^1_0\text{n}$ ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{92}_{36}\text{Kr}$, ${}^{141}_{56}\text{Ba}$原子核, 中性子${}^1_0\text{n}$の質量をそれぞれ M_{U}, M_{Kr}, M_{Ba}, M_{n} [kg]とし, 光の速さを c [m/s]とする。 ヒント 反応前後での質量の減少を求める。その質量に相当するエネルギーが放出される。	
408-409	E 原子力発電 図 44 はウランを核燃料とするときの原子力発電の原理を示したものである。遅い中性子（熱運動と同程度の速さの中性子）が${}^{235}_{92}\text{U}$に衝突すると、図に示すようにいろいろな壊れ方の核分裂が起こる。このときいずれの場合も 200 MeV 程度のエネルギーが解放され、2～3 個の速い中性子が出る。この速い中性子が${}^{235}_{92}\text{U}$に衝突して核分裂を起こす確率は、遅い中性子の場合に比べてきわめて低い。そこで、速い中性子を、減速材（水や重水）などに衝突させて中性子を遅くして${}^{235}_{92}\text{U}$に衝突させ、新たな核分裂を起こしやすくする。このようにして次々に核分裂が起こることを、連鎖反応という。原子力発電は、原子炉で核分裂によって発生した熱を利用してタービンを回し発電する。中性子を吸収する制御棒を用いて、核分裂の連鎖反応が爆発的に起こらず持続的に起こるように制御している。連鎖反応が持続的に保たれる条件がちょうど満たされるとき、原子炉は臨界にあるといい、中性子数は一定に保たれている。原子炉の稼働は臨界近くで行われる。なお、少ない燃料では核燃料表面から中性子が核反応することなく散逸するので、連鎖反応を持続的に起こすためには核燃料の量に下限があり、臨界量と呼ばれる。 原子力発電は、火力発電のような二酸化炭素などの排出の問題はあまりないが、安全対策や放射性廃棄物の処理など難しさがある。 2011 年の東日本大震災では、福島第一原子力発電所で炉心（原子炉の中心部分）の冷却機能が失われ、炉心溶融（メルtdown）が起こり、さらに、莫大な量の放射性物質が外部に放出される、という事故が起きた。原子力発電の稼働にあたっては、このような重大事故に対する厳重かつ多重の安全対策が不可欠である。 また、原子炉内で核分裂によってできた原子核や、中性子を吸収した原子核の中には${}^{137}_{55}\text{Cs}$や${}^{90}_{38}\text{Sr}$などのように半減期が数十年のものや、${}^{237}_{93}\text{Np}$のように半減期が 2 百万年にも及ぶ原子核が含まれる。このような寿命の長い放射性廃棄物の処理は重要な課題である。	
408	1 原子力発電の核燃料には、現在${}^{235}_{92}\text{U}$または${}^{239}_{94}\text{Pu}$が用いられている。	
408	2 水素の同位体${}^2_1\text{H}$の原子を重水素といい、D と表すことがある。重水素からなる水 (D_2O) を重水という。重水に対して、通常の水を軽水と呼ぶことがある。	
408	3 臨界量は、核燃料の特性 (${}^{235}_{92}\text{U}$の含有率や形など)などで変わる。	
409	【参考】原子力発電の種類	

	現在、世界で稼働している原子炉の多くは、減速材に通常の水（軽水）を用いる軽水炉である。軽水炉は、タービンを回す水蒸気の発生のみによって、次の2つに分類される。 沸騰水型 減速材の軽水から発生する水蒸気で、直接タービンを回している。原子炉としては構造が単純である反面、放射性物質を含む水蒸気がタービンに送られるため、その漏洩防止が重要となる。 加圧水型 減速材（一次冷却水）から別系統の水（二次冷却水）に熱を伝え、その水蒸気でタービンを回している。減速材を 300℃でも沸騰しないように圧力を加えたり、熱交換をするため、構造が複雑ではあるが、タービンに放射性物質が入らない利点がある。	
409	図 A 軽水炉のしくみ	
410	F 核融合反応 太陽などの恒星では、原子核どうしが衝突して質量数の大きな原子核が生まれている。このように、より質量数の大きな原子核ができる反応を核融合という（図 45）。 核子 1 個あたりの結合エネルギーは、質量数が 56 の鉄のあたりで最大値をとる。そのため、軽い原子核どうしが反応し、より質量数の大きな原子核になるとき、結合エネルギーが増加し、その差のエネルギーが解放される（図 46）。 太陽（中心温度約 1600 万 K）の中では、4 個の水素原子核（陽子）から、いくつかの段階を経て、1 個のヘリウム原子核が生成されている。このとき、約 27 MeV のエネルギーが解放される。 $4\frac{1}{1}\text{H} + 2e^- \rightarrow \frac{4}{2}\text{He} + 2\nu_e \quad (\nu_e: \text{電子ニュートリノ}) \quad (39)$ 地上でも、安定した核融合反応を持続させることができれば、エネルギー源の 1 つとなることから、核融合の研究開発が進められている。	
410	問 17 核融合反応 $\frac{1}{1}\text{H} + \frac{1}{1}\text{H} \rightarrow \frac{2}{1}\text{H} + \frac{1}{1}\text{H}$ において放出されるエネルギー E [MeV] を求めよ。ただし、 $\frac{1}{1}\text{H}$ 、 $\frac{2}{1}\text{H}$ の核子 1 個あたりの結合エネルギーは、それぞれ 1.1 MeV, 2.8 MeV である。	
410	学んだことを説明してみよう 4 核反応とエネルギー 核反応において、反応前の質量の和より、反応後の質量の和のほうが小さいとき、放出されるエネルギーの量について説明してみよう。	
410	図 45 核融合の例	
410	図 46 核融合 ($2X \rightarrow Y$) と結合エネルギーの関係	
数研出版 708 総合物理 2 波・電気と磁気・原子		
298	【参考】いろいろな原子核と核図表 同位体には自然界に存在するもの以外にも、人工的につくられるものがあり、これらを含めると、非常に多くの種類の原子核が存在する。図 A は縦軸に陽子数、横軸に中性子数をとった平面上に原子核を並べたもので、核図表といわれる。一つ一つのマス目が、個々の原子核に対応する。 半減期（→p. 398）が 5 億年以上の、安定な原子核は約 300 種ある（図の□印）。寿命が 100 万分の 1 秒程度の不安定な原子核を含めると、理論的には現在約 7000 種の原子核が存在すると予測され、それらに対する活発な研究が展開されている。実験的には、すでに約 3000 種の原子核の存在が確認されている。	
298	図 A 核図表 これまで発見された原子核を表している。□印は安定な原子核。これ以外の原子核の存在も、理論的に予想されている。	
298	コラム ニホニウム（113 番元素）の発見 自然界に存在する最大の原子番号を持つ元素は $Z=92$ の U であるが、$Z=114$ の近傍に比較的長い寿命の原子核	

	が存在することが予言され、これを超重核と呼び、また対応する元素を超重元素と呼ぶ。世界の多くの研究者が核融合反応を用いてその生成を試み、現在では $Z = 118$ までの元素が作られたと報告されている。日本でも理化学研究所の森田浩介を中心とする研究チームが、$^{209}_{83}\text{Bi} + ^{70}_{30}\text{Zn} \rightarrow ^{278}_{113} + n$ 反応を用いて、113 番元素の生成に挑戦した。超重元素生成反応が起こる確率は極めて小さく、また重い未知の領域の元素が生成されたことの確たる証拠をとらえることは難しい。通常はその原子核の崩壊過程を調べることによって確認する。理化学研究所の研究チームは、長時間にわたる実験の末、113 番元素生成によって期待される三つの連続的な α 崩壊 $^{278}_{113}\alpha \rightarrow ^{274}_{111}\text{Rg} \alpha \rightarrow ^{270}_{109}\text{Mt} \alpha \rightarrow ^{266}_{107}\text{Bh} \alpha \rightarrow ^{262}_{105}\text{Db} \alpha \rightarrow ^{258}_{103}\text{Lr} \alpha \rightarrow ^{254}_{101}\text{Md}$ の観測に成功した (2012)。このうち 5 番目及び 6 番目の α 崩壊が既知の崩壊と一致したため、逆算して 113 番元素の生成が確定した。この功績により、113 番元素の命名権が森田らに与えられ、「ニホニウム (Nh)」という名称に決定した。新元素発見は日本初、さらにはアジア初の快挙となった。	
299	3 放射線とその性質 「放射線」と「放射性物質」は明確に意味が異なる。それぞれの意味を説明できるだろうか。この節では、放射線の種類とその性質について理解しよう。	
299	A 放射線 天然に存在する原子核の中には、ウラン U やラジウム Ra、炭素 $^{14}_6\text{C}$ など、不安定なものがある。これらは、放射線とよばれる、粒子の流れや波長の短い電磁波を出しながら、自然に別の原子核に変わっていく。この現象を放射性崩壊といい、自然に放射線を出す性質を放射能という。放射能をもつ同位体を放射性同位体 (ラジオアイソトープ)、放射能をもつ物質を放射性物質 (図 32) という。 放射線は、物質を透過し、物質中の原子から電子をはじきとばして原子をイオンにするはたらき (電離作用) をもっている。また、写真フィルムを感光させたり、蛍光物質を光らせたりする性質をもつ。放射性同位体から出るおもな放射線には、α 線、β 線、γ 線の 3 種類がある (表 3)。これらは、磁場の中で異なる進み方をする (図 33)。中性子の流れである中性子線や X 線も放射線の一種である。	
299	図 32 放射性物質・放射能・放射線 放射性物質を電球のような光源に例えた。	
299	図 33 磁場内の放射線の進み方 α 線と β 線は磁場により曲げられる。一方、 γ 線は直進する。	
299	表 3 放射線の性質 中性子線は透過力が強いが、水などに含まれる水素原子核 (陽子) により効果的に遮蔽される。	
300	問 14 α 線と β 線は磁場内で曲げられるが、 β 線のほうが大きく曲げられる。これはなぜだろうか。粒子の初速度の大きさは等しいとみなせるものとする。	
300	実験 66 放射線の観察 エタノールの蒸気を満たした箱の中に α 線や β 線が入射すると、その電離作用により空気がイオン化される。それが核になってエタノールの蒸気が液体になることにより霧が生じ、荷電粒子の飛跡を見ることができる。 ① ガラス容器の底に色紙を敷いてエタノールを少量落とし、その上にプラスチック板 (四辺から中央へ切れこみを入れる) をかぶせる。 ② 放射性物質をガラス容器の中央に置き、ガラス容器にラップをかける (a)。 ③ 放熱板を置いた発泡ポリスチレン容器 (b) に液体窒素を注ぎ、放熱板の上にガラス容器をのせる。 ④ 部屋を暗くして、ガラス容器の横から懐中電灯で照らす。5 分ほどで飛跡が見え始める。 注意 放射性物質や液体窒素の扱いは先生の指示に従うこと。	
300	図 34 α 崩壊と β 崩壊	
300-	B α 崩壊・ β 崩壊	

301	α 線の放出は、原子核から陽子 2 個と中性子 2 個が${}^4_2\text{He}$ (α 粒子) となって出ていく現象である。この現象を α 崩壊といい、原子核は、質量数が 4、原子番号が 2 だけ小さい原子核に変わる (図 34a)。 β 線の放出は、原子核中の中性子が陽子に変化するとき電子が飛び出す現象である。この現象を β 崩壊といい、原子核は、質量数が同じで原子番号が 1 だけ大きな原子核に変わる (同図 b)。 崩壊後の原子核は不安定である場合が多く、安定な原子核になる α 崩壊や β 崩壊を続け、次々に新しい原子核に変わっていく (図 35)。個々の原子核には、基底状態 (エネルギーが最も低い状態) と励起状態 (エネルギーが高い状態) がある。α 崩壊や β 崩壊で生じる新しい原子核は、励起状態にあることが多い。その場合、同じ原子核の、よりエネルギーが低い状態に移ることがある。このとき、エネルギーが電磁波 (γ 線) として放出される。γ 線の放出では、原子番号も質量数も変化しない。	
301	図 35 崩壊系列 (ウラン系列) 原子核が崩壊して生じる一連の原子核を崩壊系列といい、このほかに、アクチニウム系列、トリウム系列、ネプツニウム系列の 3 つの系列がある。	
301	例題 6 放射性崩壊 ${}^{235}_{92}\text{U}$ は、α 崩壊を 7 回、β 崩壊を 4 回行って、安定な原子核になる。この原子核の原子番号 Z と質量数 A を求めよ。 指針 α 崩壊では原子番号が 2、質量数が 4 減少し、β 崩壊では原子番号が 1 増加する。 解 原子番号 $Z = 92 - 2 \times 7 + 1 \times 4 = 82$ 質量数 $A = 235 - 4 \times 7 = 207$ 類題 6 ${}^{232}_{90}\text{Th}$ は、α 崩壊を x 回、β 崩壊を y 回行って、安定な原子核 ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ になる。x と y を求めよ。 ヒント β 崩壊では質量数が変化しないため、質量数の変化から α 崩壊の回数に分かる。	
301	1 正確には、中性子は $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ のように崩壊するので、$\bar{\nu}_e$ も放出される。$\bar{\nu}_e$ は電子ニュートリノ ν_e の反粒子で、電気量は 0、質量は無視できるほど小さい。	
302	C 半減期 原子核が放射性崩壊によって他の原子核に変わるとき、もとの原子核の数が半分になるまでの時間は、それぞれの原子核で決まっている。この時間を半減期という。初めの原子核の数を N_0、時間 t 後に壊れないで残っている原子核の数を N、半減期を T とすると、残留率 $\frac{N}{N_0}$ について、次の式が成り立つ (図 36)。 半減期 $\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$ (34) N_0 初めの原子核の数 t 経過時間 N 時間 t 後に壊れないで残っている原子核の数 T 半減期 原子核の崩壊は確率的に起こる現象である。1 個の原子核が 1 秒間に崩壊する確率は、原子核の種類によって決まっている。半減期が原子核によって決まっているのはこのためであり、半減期の間に 1 個の原子核が崩壊する確率は $1/2$ である。したがって、多数の原子核の集団では、半減期 T の間に半数が崩壊し、残った原子核の半数がその後 T の間に崩壊し、そのくり返しで、原子核の数が減少していく。表 4 にいくつかの放射性原子核の半減期を示した。 半減期のモデル実験をしてみよう。	
302	図 36 放射性元素の残留率の時間変化	
302	表 4 いろいろな半減期 ※ 中性子は原子核内では安定に存在しうが、単独では不安定であり、β 崩壊により陽子に変わる。	
303	例題 7 半減期 図は、放射性崩壊をする原子核 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ の残留率 (崩壊をせずに残っている原子核の割合) と時間の関係を表すグラフ	

	である。 (1) $^{226}_{88}\text{Ra}$の半減期は何年か。 (2) 6.0 g のラジウムのうち、3.2×10^3年後に崩壊せずに残っているのは何 g か。 (3) $^{226}_{88}\text{Ra}$の数が初めの 1/8 になるのは何年後か。	
303	指針 半減期の時間が経過するたび、残留率（または崩壊していない原子核の数）が 1/2 倍になる。	
303	解 (1) 図より、半減期（残留率が半分になる時間）は、1.6×10^3 年 (2) 崩壊せずに残っている $^{226}_{88}\text{Ra}$の質量を m [g] とすると、 $\left[\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \right] \text{ ((34) 式) より } \frac{m}{6.0} = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{3.2 \times 10^3}{1.6 \times 10^3}} = \left(\frac{1}{2} \right)^2 = \frac{1}{4}$ よって $m = \frac{1}{4} \times 6.0 = 1.5 \text{ g}$ (3) t 年後に 1/8 になったとすると、(式) $\left[\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \right]$ ((34) 式) より $\frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2} \right)^3 = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{1.6 \times 10^3}}$ よって $t = 3 \times (1.6 \times 10^3) = 4.8 \times 10^3$ 4.8×10³年後	
303	類題 放射性崩壊をする原子核がある。この原子核 8.0 g のうち、56 日後に崩壊せずに残っていたのは 0.50 g であったとする。 (1) この原子核の半減期は何日か。 (2) 崩壊せずに残っている原子核の質量が 0.25 g になるのは、初めから数えて何日後か。 ヒント 原子核の残留率 $\left(\frac{N}{N_0} \right)$ は、最初の質量 8.0 g に対する残った質量 0.50 g の比に等しい。	
303	コラム 炭素の放射性同位体による年代測定 炭素の同位体 $^{14}_6\text{C}$ は不安定であり、β 崩壊によって窒素に変わる。逆に、大気中では窒素の原子核に、宇宙からやってくる放射線（宇宙線）によって生じた中性子が衝突して $^{14}_6\text{C}$ が生成され、大気中の二酸化炭素 CO_2 に含まれる $^{14}_6\text{C}$ の割合は一定に保たれている。したがって、光合成によって CO_2 を取り込んでいる植物の $^{14}_6\text{C}$ の含有率も、大気と同様に一定である。 植物が枯れたり伐採されると、$^{14}_6\text{C}$ は取り込まれなくなり、半減期約 5700 年で減少していく。したがって、遺跡などの木材に含まれる $^{14}_6\text{C}$ の残留率を調べることで、遺跡がいつ頃のもののかを知ることができる。	
304	【参考】半減期と常用対数 放射性崩壊をする原子核について、半減期が 8 日の場合、元の原子核の数の 1/3 になるまでの時間は 8 日×4 = 32 日となる。それでは、1/3 倍になるまでの時間はどうなるだろうか。このとき、$\frac{1}{3} = \left(\frac{1}{2} \right)^p = \frac{1}{2^p}$、すなわち $2^p = 3$ を満たす p の値を求めればよい。両辺の常用対数をとると $\log_{10} 2^p = \log_{10} 3$ ここで、対数の性質より $p \log_{10} 2 = \log_{10} 3 \quad \text{よって} \quad p = \frac{\log_{10} 3}{\log_{10} 2}$ $\log_{10} 2 = 0.3010, \log_{10} 3 = 0.4771 \quad \text{より}$ $p = \frac{0.4771}{0.3010} = 1.58 \dots \approx 1.6$ となり、8 日×1.6≒13 日と求められる。	

	常用対数の値は、関数電卓やインターネットなどを用いて調べることができる。	
304	実験 48 半減期のモデル実験 さいころを放射性同位体とみなし、1 の目が出た時に放射性崩壊を起こすとみなす。 ① さいころ 100 個を紙コップに入れ、よく振って一斉にばらまく。 ② 1 の目が出たさいころを取り除き、残ったサイコロの数 N を記録する。 ③ 残ったさいころを紙コップに戻し再びばらまく。 ④ ②～③の操作を繰り返す。残ったさいころが 10 個以下になったところで操作をやめる。 ⑤ 横軸に操作の回数、縦軸に残ったさいころの数 N をとったグラフを作成する。 ⑥ グラフの形を p. 398 図 36 と比較してみよう。また、残ったさいころの数 N が 50 個になる回数 n_0 を大まかに読み取る（これが半減期に相当する）。 ⑦ 結果をまとめ、報告書を提出しよう。また、各グループの結果をそれぞれ発表しあい、グラフの形や n_0 に目立った違いがないか、確認してみよう。	
305	D 放射線の測定単位 放射線に関して用いられる単位には、放射能の強さを表すベクレル（記号 Bq）、人体などが受ける放射線の量（強さ）を表すグレイ（記号 Gy）やシーベルト（記号 Sv）などがある（表 5）。 放射線測定などでは、単位時間あたりに受ける放射線の量（線量率）を、マイクロシーベルト毎時（ $\mu\text{Sv/h}$ ）という単位で表すことが多い。	個々の放射性原子核の崩壊は確率的な現象であるが、多数の原子核があると集団として規則性が見えてくることを実感できる、大変良い実験です。1 個の原子核が崩壊する確率が崩壊定数に相当し、崩壊定数と半減期の関係もよく分かりますし、放射能がなぜ指数関数的に減るのかも（指数関数を学習していない段階でも）理解できます。
305	表 5 放射線に関する単位	吸収線量、等価線量、実効線量についてきちんと説明されていて、記載内容も正確です。コラムも充実しています。
305	コラム放射線の人体への影響の考え方 放射線の人体（全身）への影響を表す量に実効線量がある。 実効線量は直接測定することはできない。このため、放射線測定器などでは、実効線量に近い値である線量当量（単位：Sv）を基準にした線量率（単位： $\mu\text{Sv/h}$ ）が表示される。実用上は、線量率に時間をかけることで、人体が外部から放射線を受ける場合（外部被曝という）の実効線量を推定する。 一方、体内に入りこんだ放射性物質から放射線を受ける場合（内部被曝という）の実効線量の推定の仕方の一例を、次ページで紹介した。 放射線の人体への影響については、外部被ばくによる実効線量と内部被ばくによる実効線量を足した合計値が一つの指標となる。また、実効線量を用いて健康への影響を検討する場合、累計の値が重要な指標となる。	
305	1 $1\mu\text{Sv/h}$ は、1 時間で $1\mu\text{Sv} = 10^{-6}\text{Sv}$ の放射線を受けることに相当する。	
306	E 放射線の影響と利用 人体が放射線を受けることを被曝という。放射線はその電離作用によって生物の細胞に影響を及ぼし、将来のがんの発症の原因となったり、被曝量が大きい場合には急性の障害を引き起こすこともある。この影響を最小限にするには、放射線源から離れる、浴びる時間を短くする、鉛でさえぎるなどの対策をとる必要がある。一方、放射線は、非破壊検査、がんの治療、診断、農作物の品種改良など、産業・医学などの分野で幅広く活用されている。	
306	コラム 食品からの被曝の影響の考え方 放射性物質を含む食品を体内に取り込むと、内部被曝によって継続的な影響を受ける。放射性物質が体内に入っ	

	てから、人体が将来にわたって通算でどの程度影響を受けるかを表す量（預託実効線量という）を見積もる方法がある。それは、国際放射線防護委員会（ICRP）によって定められた実効線量係数を用いる方法である。例えば、18歳以上の人が$^{137}_{55}\text{Cs}$を口から取り込んだ場合の係数は0.000013 mSv/Bqとされている。20歳の人が、1000 Bqの$^{137}_{55}\text{Cs}$を口から取りこんだ場合、放射線の人体への影響（実効線量）は$1000 \text{ Bq} \times 0.000013 \text{ mSv/Bq} = 0.013 \text{ mSv}$と見積もることができる。 （参考：一般食品では放射性セシウムの基準値は100 Bq/kg）	
306	学んだことを説明してみよう 3 放射線とその性質 (1) α 崩壊が起こるとき、原子核はどのように変化するか。 (2) β 崩壊が起こるとき、原子核はどのように変化するか。	
307	4 核反応と核エネルギー アインシュタインの相対性理論によれば、質量とエネルギーは同等であるという。この節では、核反応にともなうエネルギーと質量との関係について理解しよう。	
307	A 核反応 ラザフォードは、内部に α 線源を設置した密閉した箱に窒素ガスを詰めると陽子が飛び出すことを発見し $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H} \quad (35)$ という反応が起こることをつきとめた（図38）。このように、原子核が変わる反応を核反応、または原子核反応という。 化学反応では、原子の種類は変化せず、原子の組み合わせが変わるだけであるが、核反応では原子核が変化し、別の種類の原子ができる。 正の電気を持つ2つの原子核の間には遠距離では斥力の静電気力がはたらく。核反応は、2つの原子核がこの斥力にうちかって、核力がはたらく近距離に近づいたとき、初めて起こる。そのため核反応を起こすには、2つの原子核の間に大きな衝突のエネルギー（運動エネルギー）を与える必要がある。そのための装置が加速器である。 一方、電気を持たない中性子は他の原子核に近づきやすい。 一般に、核反応では、反応の前後で質量数の和と電気量の和は一定に保たれる	
307	問 15 ジョリオ・キュリー夫妻（フランス）は、α 粒子を$^{27}_{13}\text{Al}$に衝突させてリンの放射性同位体$^{30}_{15}\text{P}$を作った。このときの核反応を式で表せ。	
307	図 38 核反応の発見 ラザフォードが発見した（35）式の反応を、ブラケット（イギリス）はaのように霧箱によって写真をとることに成功した。	
310	C 核エネルギー 一般に、核反応では、原子核の質量の和が、反応の前後で変化する。この質量の和が反応によって減少する場合、反応の前後の質量差に相当するエネルギーが核エネルギーとして開放される。このとき、結合エネルギーの和は増加しており、解放される核エネルギーは、結合エネルギーの和の変化に等しい（図41）。 核反応で解放されるエネルギーはきわめて大きい。化学反応で発生するエネルギーは、多くの場合、1回の反応で数 eV 程度であるのに対し、核反応では数 MeV 以上のエネルギーが発生することが多い。例えば、次ページの例題8の^1_1Hと^7_3Liの核反応では、1回で約17.4 MeVのエネルギーが発生する。これらの原子が1mol（数g）ずつ反応したとすると $(17.4 \times 10^6) \times (1.60 \times 10^{-19}) \times (6.02 \times 10^{23}) \text{ J} \approx 1.68 \times 10^{12} \text{ J} \quad (38)$ という膨大なエネルギーが発生することになる。これは、石油約40トンを燃やしたときのエネルギーに相当する。	
310-	D 核分裂反応	

311	ハーン（ドイツ）とシュトラスマン（ドイツ）は、ウランに中性子を照射したときの反応生成物の中に、ウランのほぼ半分の質量をもつバリウム$^{141}_{56}\text{Ba}$などの原子核が含まれていることを発見した。 このように、1つの原子核が、いくつかの原子核に分かれる反応を核分裂という（図 42）。 核子 1 個あたりの結合エネルギーは、質量数が 56 の鉄のあたりで最大値をとる。そのため、ウランのように質量数が大きい原子核は、1つの原子核でいるより 2つの原子核に分裂した方が、エネルギー的に安定である（図 43）。このことが、核分裂の起こる原因である。	
310	1 ウランは放置しておいた場合にも核分裂することがあるが、中性子を照射すると核分裂が促進される。	
310	図 41 核反応 $P + Q \rightarrow R + S$ で発生する核エネルギーと結合エネルギー	
311	例題 8 核反応と核エネルギー 次の核反応で放出されるエネルギー E [MeV] を求めよ。 $^1_1\text{H} + ^7_3\text{Li} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}$ ^1_1H, ^7_3Li, ^4_2He 原子核の質量をそれぞれ 1.0078 u, 7.0160 u, 4.0026 u, 真空中の光の速さを 3.00×10^8 m/s, 電気素量を 1.60×10^{-19} C, $1\text{u} = 1.66 \times 10^{-27}$ kg とする。 指針 反応前後の質量の減少がエネルギーとして放出される。質量とエネルギーの単位に注意する（$1\text{ u} = 1.66 \times 10^{-27}$ kg, $1\text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19}$ C）。 解 反応前後での質量は $(1.0078 + 7.0160) - 4.0026 \times 2 = 0.0186\text{ u}$ 「$E = mc^2$」(p. 404(37)式) より $E = \{0.0186 \times (1.66 \times 10^{-27})\} \times (3.00 \times 10^8)^2 \text{ J}$ $1\text{ MeV} = 10^6\text{ eV} = (1.60 \times 10^{-19}) \times 10^6\text{ J}$ を用いて $E = \frac{0.0186 \times (1.66 \times 10^{-27}) \times (3.00 \times 10^8)^2}{(1.60 \times 10^{-19}) \times 10^6} \approx 17.4\text{ MeV}$	
311	類題 8 次の核分裂反応で放出されるエネルギー E [MeV] を求めよ。 $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{92}_{36}\text{Kr} + ^{141}_{56}\text{Ba} + 3^1_0\text{n}$ $^{235}_{92}\text{U}$, $^{92}_{36}\text{Kr}$, $^{141}_{56}\text{Ba}$ 原子核, 中性子^1_0nの質量をそれぞれ M_{U}, M_{Kr}, M_{Ba}, M_{n} [kg] とし, 光の速さを c [m/s] とする。 ヒント 反応前後での質量の減少を求める。その質量に相当するエネルギーが放出される。	
312-313	E 原子力発電 図 44 はウランを核燃料とするときの原子力発電の原理を示したものである。遅い中性子（熱運動と同程度の速さの中性子）が$^{235}_{92}\text{U}$に衝突すると、図に示すようにいろいろな壊れ方の核分裂が起こる。このときいずれの場合も 200 MeV 程度のエネルギーが解放され、2~3 個の速い中性子が出る。この速い中性子が$^{235}_{92}\text{U}$に衝突して核分裂を起こす確率は、遅い中性子の場合に比べてきわめて低い。そこで、速い中性子を、減速材（水や重水）などに衝突させて中性子を遅くして$^{235}_{92}\text{U}$に衝突させ、新たな核分裂を起こしやすくする。このようにして次々に核分裂が起こることを、連鎖反応という。原子力発電は、原子炉で核分裂によって発生した熱を利用してタービンを回し発電する。中性子を吸収する制御棒を用いて、核分裂の連鎖反応が爆発的に起こらず持続的に起こるように制御している。連鎖反応が持続的に保たれる条件がちょうど満たされるとき、原子炉は臨界にあるといい、中性子数は一定に保たれている。原子炉の稼働は臨界近くで行われる。なお、少ない燃料では核燃料表面から中性子が核反応することなく散逸するので、連鎖反応を持続的に起こすためには核燃料の量に下限があり、臨界量と呼ばれる。 原子力発電は、火力発電のような二酸化炭素などの排出の問題はあまりないが、安全対策や放射性廃棄物の処理など難しさがある。 2011 年の東日本大震災では、福島第一原子力発電所で炉心（原子炉の中心部分）の冷却機能が失われ、炉心溶融（メルトダウン）が起こり、さらに、莫大な量の放射性物質が外部に放出される、という事故が起きた。原子力発	

	電の稼働にあたっては、このような重大事故に対する厳重かつ多重の安全対策が不可欠である。 また、原子炉内で核分裂によってできた原子核や、中性子を吸収した原子核の中には $^{137}_{55}\text{Cs}$ や $^{90}_{36}\text{Sr}$ などのように半減期が数十年のものや、 $^{237}_{93}\text{Np}$ のように半減期が 2 百万年にも及ぶ原子核が含まれる。このような寿命の長い放射性廃棄物の処理は重要な課題である。	
312	図 44 原子力発電の原理（連鎖反応） $^{238}_{92}\text{U}$ は核反応にほとんど関係しない。	
312	1 原子力発電の核燃料には、現在 $^{235}_{92}\text{U}$ または $^{239}_{94}\text{Pu}$ が用いられている。	
312	2 水素の同位体 ^2_1H の原子を重水素といい、D と表すことがある。重水素からなる水（ D_2O ）を重水という。重水に対して、通常の水を軽水と呼ぶことがある。	
312	3 臨界量は、核燃料の特性（ $^{235}_{92}\text{U}$ の含有率や形など）などで変わる。	
313	【参考】原子力発電の種類 現在、世界で稼働している原子炉の多くは、減速材に通常の水（軽水）を用いる軽水炉である。軽水炉は、タービンを回す水蒸気の発生のしかたによって、次の 2 つに分類される。 沸騰水型 減速材の軽水から発生する水蒸気で、直接タービンを回している。原子炉としては構造が単純である反面、放射性物質を含む水蒸気がタービンに送られるため、その漏洩防止が重要となる。 加圧水型 減速材（一次冷却水）から別系統の水（二次冷却水）に熱を伝え、その水蒸気でタービンを回している。減速材を 300℃でも沸騰しないように圧力を加えたり、熱交換をするため、構造が複雑ではあるが、タービンに放射性物質が入らない利点がある。	
313	図 A 軽水炉の仕組み	
314	F 核融合反応 太陽などの恒星では、原子核どうしが衝突して質量数の大きな原子核が生まれている。このように、より質量数の大きな原子核ができる反応を核融合という（図 45）。 核子 1 個あたりの結合エネルギーは、質量数が 56 の鉄のあたりで最大値をとる。そのため、軽い原子核どうしが反応し、より質量数の大きな原子核になるとき、結合エネルギーが増加し、その差のエネルギーが解放される（図 46）。 太陽（中心温度約 1600 万 K）の中では、4 個の水素原子核（陽子）から、いくつかの段階を経て、1 個のヘリウム原子核が生成されている。このとき、約 27 MeV のエネルギーが解放される。 $4\,^1_1\text{H} + 2\text{e}^- \rightarrow \,^4_2\text{He} + 2\nu_e \quad (\nu_e: \text{電子ニュートリノ}) \quad (39)$ 地上でも、安定した核融合反応を持続させることができれば、エネルギー源の 1 つとなることから、核融合の研究開発が進められている。	
314	図 45 核融合の例	
314	図 46 核融合（ $2X \rightarrow Y$ ）と結合エネルギーの関係	
314	問 17 核融合反応 $^2_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^3_1\text{H} + ^1_1\text{H}$ において放出されるエネルギー E [MeV]を求めよ。ただし、 ^2_1H 、 ^3_1H の核子 1 個あたりの結合エネルギーは、それぞれ 1.1 MeV, 2.8 MeV である。	
第一 709 高等学校 物理		
372	③X 線 レントゲン写真は、医療などに用いられており、X 線が利用される。X 線は、どのようにして発生し、どのような性質をもっているのだろうか。	
372	A X 線の性質 レントゲンは、1895 年、陰極線の実験中に、黒い紙で包まれた写真乾板を感光させる何かが、陽極から出ている	

	ことを発見し、これをX線とよんだ。 その後、詳しく調べられた結果、X線には、次のような性質のあることがわかった。 ①写真フィルムを感光させて、蛍光物質にあたると発光を発生させる。 ②強い透過性をもち（図13）、物質をイオン化する。 ③電場や磁場によって曲げられず、結晶によって回折、干渉する。 これらの性質などから、X線は、紫外線よりも波長の短い電磁波の一種であることがわかった。	
372-373	B X線の発生 X線は、図14のようなX線管で発生させることができる。X線管の陰極で発生した熱電子は、両極間の電圧V [V]で加速され、運動エネルギーeV [J]をもって陽極に衝突し、X線が発生する。このとき、運動エネルギーの一部がX線光子のエネルギーとなり、残りが陽極の原子の熱運動のエネルギーとなる。 X線管から放射されるX線の強さと波長の関係（スペクトル）を調べると、図15のような結果が得られる。図15のうち、なめらかな曲線で示されている部分を連続X線といい、さまざまな波長のX線が連続的に含まれている。 1個の電子の運動エネルギーeV [J]のすべてが、1個のX線光子のエネルギー$h\nu$ [J]に変わるとき、最も波長の短い（最もエネルギーの大きい）X線光子が発生する。X線の最短波長をλ_0 [m]、そのときの振動数をν_0 [Hz]、真空中の光速をc [m/s]とすると、式（12）を利用して、$eV = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$となり、$\lambda_0$は次式で表される。 $\lambda_0 = \frac{hc}{eV} \quad \cdots (14)$ 一方、図15のうち、光の線スペクトルと似た、特定の波長の強いX線を特性X線（固有X線）という。特性X線の波長は、加速電圧に関係なく、陽極の物質で決まる。	
373	例題3 X線の発生 X線管において、初速度0の電子を電圧30 kVで加速し、陽極に衝突させると、X線が発生して、図のようなスペクトルが得られた。次の各問に答えよ。ただし、電気素量を1.6×10^{-19} C、プランク定数を6.6×10^{-34} J・s、真空中の光速を3.0×10^8 m/sとする。 (1) 加速された電子のもつエネルギーは何eVか。 (2) 連続X線の最短波長は何mか。 指針 加速された電子のもつエネルギーが、すべてX線光子のエネルギーに変換されたとき、最短波長のX線が発生する。 解 (1) 電圧1 Vで加速された電子の運動エネルギーが1 eVなので、30 kVの場合は30 keVとなる。電子のエネルギーをEとすると、$E = 30 \text{ keV} = 3.0 \times 10^4 \text{ eV}$ (2) Eの単位eVをJに換算すると、 $E = 30 \text{ keV} = 3.0 \times 10^4 \text{ eV} = (3.0 \times 10^4) \times (1.6 \times 10^{-19}) = 4.8 \times 10^{-15} \text{ J}$ 最短波長λ_0のX線は、電子のエネルギーEが、すべてX線光子のエネルギー$\frac{hc}{\lambda_0}$になったときに生じる。 $\frac{hc}{\lambda_0} = E \quad \lambda_0 = \frac{hc}{E}$ したがって、$\lambda_0 = \frac{(6.6 \times 10^{-34}) \times (3.0 \times 10^8)}{4.8 \times 10^{-15}} = 4.12 \times 10^{-11} \text{ m} \quad 4.1 \times 10^{-11} \text{ m}$	
373	類題3 電子を50 kVで加速して陽極に衝突させ、X線が発生させる。衝突直前の電子の運動エネルギーは何Jか。また、発生したX線の最短波長は何mか。ただし、電気素量を1.6×10^{-19} C、プランク定数を6.6×10^{-34} J・s、真空中の光速を3.0×10^8 m/sとする。	
372	図13 X線写真（レントゲン写真）	

	骨は、ほかの部分と比較して X 線が透過しにくい。 X 線写真は、この性質を利用して撮影される。	
372	図 14 X 線の発生 陰極を加熱することで、陰極から飛び出した電子（熱電子）が、高電圧 V で加速される。電子が陽極にあたると、X 線が発生する。（→p390・plus）。	
372	①光を照射することによって、物質が化学変化をおこすことを感光という。写真乾板には、感光する物質を含む薬品（乳剤）が塗布されており、写真の現像に用いられていた。 レントゲン（1845～1923, ドイツ）X 線の発見によって、1901 年、第 1 回ノーベル物理学賞を受賞した。	
373	図 15 X 線のスペクトル 陽極物質にモリブデン（Mo）を用いている。加速電圧によって最短波長が異なる。	
392	②原子核と放射線 原子を構成する原子核には、時間の経過によってその状態が変化し、放射線を放出するものがある。原子核には、どのような特徴があるのだろうか。	
392- 393	A 原子と原子核 ○ 原子核の構成 原子核は、一般に、正電荷をもつ陽子と電荷をもたない中性子から構成されている。陽子のもつ正電荷の大きさは、電子の電荷の大きさに等しい。陽子と中性子の質量はほぼ等しく、いずれも電子の約 1840 倍である。すなわち、原子核の質量は、原子全体の質量の大部分を占めている（図 33）。 原子核を構成する陽子と中性子は、核子と総称される。また、核子と核子を結びつける力を核力という。核力は、原子核の大きさ $10^{-15} \sim 10^{-14}$ m 程度の近距離で強くはたらく。その大きさは、陽子の間にはたらく静電気力（斥力）よりもはるかに大きく、核子を結びつけている。 ○ 原子と原子核の表し方 原子の種類（元素）は、陽子の数によって決まり、その数を原子番号という。また、原子の質量は、陽子と中性子の数によってほぼ決まり、それらの数の和を質量数という。 原子番号（陽子の数）を Z, 中性子の数を N, 質量数を A とすると、それらの間の関係は、 $A = Z + N$ と表される。 原子や原子核は、元素記号の左上に質量数、左下に原子番号を添えて示される（図 34、→後見返し）。 ○ 同位体 同一元素の原子であっても、質量数が異なる原子核をもつ原子どうしを、互いに同位体（アイソトープ）であるという。 たとえば、水素の同位体には、水素 ${}^1_1\text{H}$ 、重水素 ${}^2_1\text{H}$ 、三重水素 ${}^3_1\text{H}$ がある。同位体は、質量は異なるが、その化学的な性質はほとんど同じである。また、原子や原子核を、原子番号と質量数で分類したものを核種という。たとえば、ヘリウム原子 ${}^3_2\text{He}$ と ${}^4_2\text{He}$ は、互いに同位体であるが、異なる核種である。	
393	B 原子の質量 原子や原子核の質量は非常に小さく、その単位には統一原子質量単位が用いられ、記号 u で表される。1 u は、質量数 12 の炭素原子（ ${}^{12}_6\text{C}$ ）1 個の質量の $1/12$ と定められている。 $1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 天然に存在する多くの元素には、いくつかの同位体が含まれており、各同位体の存在比は、元素によってほぼ一定である（表 2）。それぞれの元素について、各同位体の質量を統一原子質量単位で表し、これを各同位体の存在比に応じて平均した数値を、原子量という。	
393	原子量を計算しよう たとえば、塩素 Cl の原子量は、表 2 を用いて、次のように計算することができる。 有効数字を 4 桁とすると、 ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ 、 ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ の質量は、それぞれ 34.97 u, 36.97 u であり、存在比は、それぞれ 75.80%,	

	24.20%である。したがって、各同位体の存在比に応じた質量の平均値は、次のように計算される。 $34.97 \times 0.7580 + 36.97 \times 0.2420 = 35.454$ したがって、原子量は 35.45 と求められる。	
393	問 12 表 2 を用いて、炭素 C の原子量を有効数字 4 桁で求めよ。	
393	TRY 統一原子質量単位を計算しよう 1 mol あたりの炭素原子 $^{12}_6\text{C}$ の質量は、12.0 g である。アボガドロ定数を $6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$ として、 $1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ であることを導け。	
393	表 2 同位体と存在比 存在比は、各同位体の原子の数にもとづいて求められている。水素、炭素には、それぞれ ^3_1H 、 $^{14}_6\text{C}$ がごく微量存在する。	
394	C 放射線の種類と性質 ウラン $^{238}_{92}\text{U}$ やラジウム $^{226}_{88}\text{Ra}$ などの不安定な状態の原子核は、放射線とよばれるエネルギーの高い粒子や電磁波を自然に放出して、より安定な状態の原子核に変化する。このような変化を放射性崩壊、または単に崩壊（壊変）という。また、物質が自然に放射線を放出する性質は放射能とよばれ、放射能をもつ同位体を放射性同位体（ラジオアイソトープ）、放射能をもつ核種を放射性核種、放射能をもつ物質を放射性物質という。 放射性崩壊で放出される放射線には、 α 線、 β 線、 γ 線の 3 種類がある。それぞれの放射線を磁場の中に通したときの曲がる向きから、 α 線は正電荷、 β 線は負電荷をもち、 γ 線は曲がらないので、電荷をもたないことがわかる（図 35）。 α 線の飛跡を実験 14 で観察しよう。 さらに詳しい研究によって、次のことがわかっている。 α 線はエネルギーの高いヘリウム ^4_2He の原子核（ α 粒子）、 β 線はエネルギーの高い電子、 γ 線は波長のきわめて短い電磁波である（図 36）。放射線は、物質を構成する原子から電子をはじき出し、イオンをつくる作用（電離作用）を示す。この作用によって、放射線は、写真フィルムを感光させ、蛍光物質を光らせる。また、放射線には物質を透過する性質があり、その透過力は、放射線の種類によって異なる。	
394	図 35 磁場による放射線の経路	
394	図 36 放射線の透過力 放射線には、放射性崩壊で放出されるもののほかに、X 線や中性子線などがある。放射線の種類によって遮蔽方法が異なり、中性子線は透過力が大きい、水素を含む物質（水やコンクリートなど）で弱めることができる。	
395	実験 14 放射線の飛跡の観察 目的 霧箱を製作し、 α 線や β 線の飛跡を観察しよう。 準備 耐熱ガラス容器、放射線源（教材用）、ドライアイス、エタノール、食品用ラップフィルム、発泡ポリスチレン、黒画用紙、スポンジテープ、ピンセット、懐中電灯、塩化ビニル管 方法 ①図 a のように、装置を組み立て、スポンジテープにエタノールを含ませる。 ②黒画用紙の中央に、ピンセットを用いて放射線源を置き、ガラス容器をラップフィルムで覆う。 注意 放射線源に直接触れないこと。 ③懐中電灯でガラス容器を側面から照らし、容器内を観察する。 α 線や β 線がエタノールの蒸気中に入射すると、その飛跡が霧となり、白い筋として見える。 ④帯電させた塩化ビニル管を、容器の上で数回左右に動かし、容器内を観察する。	
395	図 a ガラス容器と発泡ポリスチレンの間には、ドライアイスが入れられている。	
395	D 原子核の放射性崩壊	

	原子核の放射性崩壊には、アルファ崩壊、β 崩壊、γ 崩壊がある ◎α 崩壊 原子番号と質量数が大きく、不安定な原子核は、α 線（ヘリウム${}^4_2\text{He}$の原子核）を放出することがある。この変化を、α 崩壊という。α 崩壊では、原子核は、原子番号が 2、質量数が 4 減少した原子核に変化する（図 37）。 ◎β 崩壊 中性子の数が過剰な原子核では、中性子が陽子と電子に変化し、この電子が、β 線として原子核の外に放出されることがある。この変化を、β 崩壊という。 β 崩壊では、原子核は、原子番号が 1 増加し、質量数が同じ原子核に変化する（図 38）。 ◎γ 崩壊 α 崩壊や β 崩壊がおこった後の、原子核に残された余分なエネルギーは、γ 線（電磁波）として放出され、原子核は安定な状態になる。これを γ 崩壊という。 γ 崩壊では、原子番号と質量数は変化しない。	
395	図 37 α 崩壊（例）	
395	図 38 β 崩壊（例）	
395	①この変化は、正確には$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$と表される。$\bar{\nu}_e$は、電子ニュートリノの反粒子である（p. 412～414）。ν_e、$\bar{\nu}_e$は、いずれも電荷をもたず、質量は 0 に近い。 ②β 崩壊には、電子e^-の反粒子（陽電子e^+ p. 412）を生じる別の変化もあり、これを β^+崩壊という。β^+崩壊に対して、図 3 で示されるような変化は β^-崩壊という。	
396	◎崩壊系列 ある不安定な原子核が、放射性崩壊を繰り返して、安定な原子核になるまでの放射性核種の系列を崩壊系列という。放射性崩壊のうち、質量数が変化するのは α 崩壊だけであり、質量数は、4 の倍数でしか変化しない。崩壊系列には、4 種類が知られており、トリウム ${}^{232}_{90}\text{Th}$ から始まる系列はトリウム系列、ネプツニウム ${}^{237}_{93}\text{Np}$ から始まる系列はネプツニウム系列、ウラン ${}^{238}_{92}\text{U}$ から始まる系列はウラン系列、ウラン ${}^{235}_{92}\text{U}$ （アクチノウランともいう）から始まる系列はアクチニウム系列とよばれている（図 39）。	
396	◎原子核の安定性 核子どうしを結びつける核力は、核子間の距離が、$10^{-15} \sim 10^{-14}$ m 程度以下の非常に短いときに強くはたらく。一方、陽子間の正電荷による斥力は、陽子間の距離が長くなっても、急には減少せず、原子核内ではなれた位置にある陽子間にもはたらく。そのため、陽子の数の大きい原子核が壊れないためには、より多くの中性子による核力が必要になり、安定な原子核では、質量数が大きいほど、中性子の数 N と陽子の数 Z の差が大きい。 図 40 のように、縦軸に陽子の数 Z、横軸に中性子の数 N をとり、1 つずつ原子核を表示したものを核図表という。理論的に存在が予測されている原子核は約 1 万種類あり、現在約 3000 種類のものが発見されている。	
396	図 39 崩壊系列（ウラン系列）ポロニウム ${}^{218}_{84}\text{Po}$ などの原子核には、 α 崩壊をおこすものと、 β 崩壊をおこすものがある。	
396	注意 崩壊系列と質量数 n を正の整数とすると、各系列の質量数 A は、次のように表される。 トリウム系列：$4n$ ネプツニウム系列：$4n + 1$ ウラン系列：$4n + 2$ アクチニウム系列：$4n + 3$	
396	① 炭素 ${}^{14}_6\text{C}$ の原子核のように、崩壊系列に属さない放射性核種も存在する。	
397	図 40 核図表 これまでに発見された原子核のみを示している。	
397	例題 5 原子核の崩壊	

	トリウム $^{232}_{90}\text{Th}$ が放射性崩壊を繰り返して、鉛 $^{208}_{82}\text{Pb}$ になるまでに、 α 崩壊と β 崩壊は、それぞれ何回おこるか。													
397	指針 α 崩壊では、質量数が4、原子番号が2減少し、 β 崩壊では、原子番号が1増加する。質量数が変化するの は、 α 崩壊のときだけである。													
397	解 $^{232}_{90}\text{Th}$ から $^{208}_{82}\text{Pb}$ になるまでに、質量数は、 $232-208=24$ だけ減少している。質量数が変化するの は α 崩壊だけであり、1回あたり4減少する。したがって、 崩壊の回数は、 $24/4 = 6$ 回 また、 $^{232}_{90}\text{Th}$ から $^{208}_{82}\text{Pb}$ になるまでに、原子番号は、 $90-82=8$ だけ減少している。原子番号は、1回の α 崩壊で2減 少し、1回の β 崩壊で1増加する。 α 崩壊は6回おこるので、それによる原子番号の減少分は、 $2 \times 6 = 12$ であ る。したがって、 β 崩壊の回数は、 $12-8=4$ 回													
397	別解 α 崩壊が x 回、 β 崩壊が y 回おこったとする。質量数、原子番号のそれぞれの減少分は、質量数が $4x$ 、原 子番号が $2x-y$ と表すことができる。これを用いると、 質量数： $4x = 232 - 208 \cdots \textcircled{1}$ 原子番号： $2x - y = 90 - 82 \cdots \textcircled{2}$ 式 $\textcircled{1}$ から、 $x = 6$ これを式 $\textcircled{2}$ に代入して、 $y = 4$ α 崩壊6回、 β 崩壊：4回													
397	類題5 ウラン $^{238}_{92}\text{U}$ が放射性崩壊を繰り返して、ポロニウム $^{210}_{84}\text{Po}$ になるまでに、 α 崩壊と β 崩壊はそれぞれ何回 おこるか。													
400	Plus 半減期を利用した年代測定 空気中の二酸化炭素 CO_2 には、ごく微量の放射性核種の炭素 $^{14}_6\text{C}$ が含まれる。 $^{14}_6\text{C}$ は、 β 崩壊をおこすが、宇宙か ら飛来する放射線（宇宙線）によって生じた中性子 ^1_0n と、空気中の窒素 $^{14}_7\text{N}$ の原子核とが衝突して $^{14}_6\text{C}$ が生成し、空 気中の $^{12}_6\text{C}$ に対する $^{14}_6\text{C}$ の割合は、ほぼ一定に保たれている（図a）。たとえば、植物が生きている間は、光合成によ って炭素を取り入れており、生体内の $^{12}_6\text{C}$ に対する $^{14}_6\text{C}$ の割合は、空気中と同じである。枯れると、炭素の補給が止 まり、 $^{14}_6\text{C}$ の崩壊によって、その存在比は減少していく。 $^{14}_6\text{C}$ の半減期は 5.70×10^3 年であり、遺骸に含まれる $^{14}_6\text{C}$ の存在比から、その植物が生きていた年代を求めることができる。													
400	問a 遺跡から発掘された木片を調べると、炭素 $^{12}_6\text{C}$ に対する $^{14}_6\text{C}$ の割合が、大気中の $\frac{1}{\sqrt{2}} (= (\frac{1}{2})^{\frac{1}{2}})$ 倍であった。木片の 炭素の取りこみが終わったのは、何年前と推定されるか。ただし、 $^{14}_6\text{C}$ の半減期を 5.7×10^3 年とする。													
400	図a 炭素 $^{14}_6\text{C}$ の生成と崩壊													
400	F 放射能・放射線の単位 放射能の強さを表す単位には、ベクレルがある。また、放射線の量を表す単位には、グレイ、シーベルトなどが ある（表4）。													
400	表4 放射能・放射線の単位 <table border="1"> <thead> <tr> <th>単位</th><th>記号</th><th>定義</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ベクレル (放射能の強さ)</td><td>Bq</td><td>放射性物質が放射線を出す強さ（能力）を表す単位である。1 Bq は、1 秒間に1 個の割合で原子核が崩壊するときの放射能の強さである。</td></tr> <tr> <td>グレイ (放射線の量)</td><td>Gy</td><td>放射線が物質を通過するとき、放射線のもつエネルギーの一部が物質に与えられ る。このときの、物質1 kg あたりに吸収される放射線のエネルギーを吸収線量と いい、グレイは吸収線量の単位である。1 Gy は、物質1 kg あたりに吸収される エネルギーが1 Jであることを表す。</td></tr> <tr> <td>シーベルト</td><td>Sv</td><td>放射線の人体に対する影響は、吸収線量が同じでも、放射線の種類やエネルギー</td></tr> </tbody> </table>	単位	記号	定義	ベクレル (放射能の強さ)	Bq	放射性物質が放射線を出す強さ（能力）を表す単位である。1 Bq は、1 秒間に1 個の割合で原子核が崩壊するときの放射能の強さである。	グレイ (放射線の量)	Gy	放射線が物質を通過するとき、放射線のもつエネルギーの一部が物質に与えられ る。このときの、物質1 kg あたりに吸収される放射線のエネルギーを吸収線量と いい、グレイは吸収線量の単位である。1 Gy は、物質1 kg あたりに吸収される エネルギーが1 Jであることを表す。	シーベルト	Sv	放射線の人体に対する影響は、吸収線量が同じでも、放射線の種類やエネルギー	
単位	記号	定義												
ベクレル (放射能の強さ)	Bq	放射性物質が放射線を出す強さ（能力）を表す単位である。1 Bq は、1 秒間に1 個の割合で原子核が崩壊するときの放射能の強さである。												
グレイ (放射線の量)	Gy	放射線が物質を通過するとき、放射線のもつエネルギーの一部が物質に与えられ る。このときの、物質1 kg あたりに吸収される放射線のエネルギーを吸収線量と いい、グレイは吸収線量の単位である。1 Gy は、物質1 kg あたりに吸収される エネルギーが1 Jであることを表す。												
シーベルト	Sv	放射線の人体に対する影響は、吸収線量が同じでも、放射線の種類やエネルギー												

	(放射線の量)		などによって異なる。この影響を考慮し、吸収線量に係数を乗じて補正した量を等価線量という。また、放射線を受けた人体の組織などによって影響が異なるので、それを加味した量を実効線量という。等価線量、実効線量の単位には、いずれもシーベルト（記号 Sv）が用いられる。	
400	① α 線の 1 Gy は 20 Sv の等価線量、β 線、γ 線の 1 Gy はそれぞれ 1 Sv の等価線量に相当する。 ② 放射線測定器で表示される値には、マイクロシーベルト毎時（記号 $\mu\text{Sv/h}$）の単位が用いられることが多い。これは 1 時間あたりに受ける総量を表す。$1\mu\text{Sv/h} = 10^{-6}\text{Sv/h}$ である。			
400	ベクレル（1852～1908、フランス）物理学者。放射能の強さの単位ベクレルは、彼の名に由来する。 グレイ（1905～1965、イギリス）物理学者。放射線の量の単位グレイは、彼の名に由来する。			
401	G 放射線の利用 放射線は、工業や農業、医療など、幅広い分野で利用されている。たとえば、α 線や β 線は、物体を通過すると、途中で吸収されて弱くなるので、薄膜の厚さの測定などに利用されている。γ 線や X 線、中性子線は、物体を通過する性質が強く、物体を壊さずにその内部を調べる非破壊検査などに用いられる。 わたしたちは日常生活の中で、さまざまな放射線を浴びている（図 42）。しかし、多量の放射線は、健康に悪い影響を与える。必要以上の放射線を浴びないように注意することが必要である。			
401	TRY 放射線の利用について調べよう 放射線は、さまざまなものに利用されている。どのようなものに利用されているか、文献やインターネットなどを用いて調べよ。			
401	Topic ガンマナイフ ガンマナイフは、γ 線を利用した医療用の装置である。この装置は、約 200 個の線源から放射される γ 線を、1 点に集中させることによって脳腫瘍などの病巣を壊死させるものである（図 a）。1 個の線源から放射される γ 線は弱いので、正常な組織にはほとんど影響を与えない。また、外科的な手術を行うことなく、短時間で治療を行うことができる。			
401	図 a ガンマナイフ 線源をヘルメットのように配置し、頭部の病巣に γ 線を集中させる。			
401	Check ① 放射線の種類とその性質、利用例について、それぞれ簡潔に説明せよ。 ② 半減期とは何か。簡潔に説明せよ。			
401	③ 国際放射線防護委員会によると、一般の年間線量限度は、自然放射線を除き、1 mSv 以下と定められている。また、放射線作業を行う職業の従事者については年間 50 mSv 以下、5 年間で 100 mSv 以下と定められている。			
401	シーベルト（1896～1966、スウェーデン）物理学者。放射線の量の単位シーベルトは、彼の名に由来する。			
402	探究 12 放射性物質とその半減期 目的 空気中の放射性物質の半減期を調べよう。 実験の計画情報の収集 空気中の塵には、ごく微量の放射性物質が存在し、比較的、半減期の短いものが含まれている。それらを、掃除機を利用して集め、GM 計数管（ガイガー・ミュラー計数管）を用いて、放射性物質の半減期を求める。また、文献やインターネットを利用して、空気中に含まれるおもな放射性物質とその半減期を調べ、測定した放射性物質が何であるかを考察する。			

	準備 GM 計数管，掃除機，クッキングペーパー，輪ゴム，ストップウォッチ，方眼紙（片対数目盛り） 方法 ①GM 計数管を測定状態にし，1 分間の計数を 5 回記録する。 ②掃除機の吸引ホースの口に，図 a のように，クッキングペーパーを二重にしてかぶせ，輪ゴムでとめる。 ③空気中の塵がクッキングペーパーに付着して薄黒くなるまで，30 分程度，掃除機で吸引する。 ④クッキングペーパーを吸引ホースから取り外し，薄黒くなった部分に GM 計数管をあてて，1 分ごとの計数を記録する（図 b）。測定は 30 分以上行う。 データの処理 ①方法①で得られた計数を表 a に記入し，それらの平均値 $\bar{a}$ を求める。 ②方法④で得られた計数 x_n を表に記入し，1 分間の計数 y_m を計算する。 注意 ここでの計数 x_n は，測定を開始してから n 分後までの計数の合計を示している。y_m は，測定開始の m 分後から，1 分間に観測された計数を示し，次式で表される。 $y_m = x_{m+1} - x_m - \bar{a} \quad (x_0 = 0)$ ③片対数目盛りの方眼紙を用いて，縦軸（対数目盛り）に y_m，横軸に m をとったグラフを描く（図 c）。	
402	①GM 計数管は， β 線（電子）， γ 線（光子）などの放射線の数測定する装置である。	
403	考察 まずは 1 人で考え，その後，ほかの人と話し合ってみよう。 ①y_m と m の関係を示すグラフから，放射性物質の半減期を求めよ。 ②空気中にある放射性物質は，おもに $^{222}_{86}\text{Rn}$ であると考えられる。しかし，$^{222}_{86}\text{Rn}$ は，貴ガスであり，クッキングペーパーには付着しない。次の崩壊系列のデータを参考にして，クッキングペーパーに付着した放射性物質の核種を考察せよ。	
403	Plus 対数グラフ 図 c は，片対数グラフとよばれるものである。縦軸には，y の対数 $\log_{10}y$ の値をとっており 9 目盛りごとに，1 目盛り間隔の大きさが 10 倍になる。片対数グラフを用いると，指数関数的に変化するグラフを直線で表すことができ，量と量の間の関係を考えやすくなる。	
403	3 核反応とエネルギー ？化学反応では，原子の組み換えがおこり，異なる物質が生じる。一方，原子核どうしても反応がおこる。この反応には，どのような特徴があるだろうか。	
404	A 質量欠損と結合エネルギー ◎質量欠損 ヘリウム ^4_2He の原子核は，陽子 2 個と中性子 2 個からなるが，原子核の質量は，陽子個と中性子 2 個の質量の合計よりもわずかに小さい（図 43）。一般に，原子核の質量は，それを構成する核子の質量の合計よりも小さくなる。陽子と中性子の質量をそれぞれ m_p，m_n とし，原子番号 Z，質量数 A の原子核の質量を M としとき，質量の差 ΔM は，次式で表される。 $\Delta M = Zm_p + (A - Z)m_n - M \quad \cdots (37)$ $A - Z$ は中性子の数を表す。 この ΔM を質量欠損という。	
404	◎ 結合エネルギー アインシュタインは，1905 年，相対性理論を提唱し，質量とエネルギーは同等であることを示した。	

	質量 m [kg] の物体は、真空中の光速を c [m/s] すると、静止しているときに、次に示されるエネルギー E [J] をもっている。 質量とエネルギーの等価性 $E = mc^2 \dots (38)$ (エネルギー [J] = 質量 [kg] $\times$ (真空中の光速 [m/s])²) 原子核を構成するすべての核子をばらばらに引きはなした状態のエネルギーは、それらが原子核をつくっているときのエネルギーよりも大きい (図 44)。そのエネルギーの差 ΔE [J] は、式 (37), (38) から、$\Delta E = \Delta Mc^2$ で表され、結合エネルギーとよばれる。これは、質量欠損 ΔM をエネルギーで表したものに相当する。	
404	アインシュタイン (1879~1955, ドイツ・スイス・アメリカ) p. 367	
404	図 43 質量欠損	
404	図 44 ${}^4_2\text{He}$ の原子核の結合エネルギー 陽子、中性子は、原子核としてまとまっている方が、エネルギーが小さく、安定な状態にある。核子をばらばらにするには、ΔMc^2 のエネルギーが必要である。	
405	図 45 核子 1 個あたりの結合エネルギー 核子どうしの結びつきの強さを表している。	
405	さまざまな原子核の、核子 1 個あたりの結合エネルギー $\frac{\Delta Mc^2}{A}$ と質量数 A との関係は、図 45 のようになる。核子 1 個あたりの結合エネルギーが大きいほど、核子どうしが強く結びついている。鉄 ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ で値が最大になっており、質量数 60 程度の原子核が、他の質量数の原子核よりも安定であることがわかる。	
405	例題 7 質量欠損と結合エネルギー 重水素 ${}^2_1\text{H}$ の原子核について、次の各問に答えよ。ただし、質量は、重水素の原子核が 2.01356 u、陽子が 1.00728 u、中性子が 1.00866 u とし、1 u を 1.66×10^{-27} kg、電気素量を 1.60×10^{-19} C、真空中の光速を 3.00×10^8 m/s とする。 (1) 質量欠損 ΔM は何 u か。また何 kg か。 (2) 結合エネルギー ΔE は何 MeV か。	
405	指針 質量欠損 ΔM は、(核子の質量の合計) - (原子核の質量) である。また、結合エネルギー ΔE は、$\Delta E = \Delta Mc^2$ から求められる。 解 (1) (質量欠損 ΔM) = (核子の質量の合計) - (原子核の質量) から、$\Delta M = (1.00728 + 1.00866) - 2.01356 = 0.00238$ u $\quad 2.38 \times 10^{-3}$ u また、1u = 1.66×10^{-27} kg であるから、ΔM を kg の単位で表すと、$\Delta M = (2.38 \times 10^{-3}) \times (1.66 \times 10^{-27}) = 3.950 \times 10^{-30}$ kg $\quad 3.95 \times 10^{-30}$ kg (2) 結合エネルギー ΔE [J] は、$\Delta E = \Delta Mc^2$ から、$\Delta E = (3.950 \times 10^{-30}) \times (3.00 \times 10^8)^2 = 3.555 \times 10^{-13}$ J これを MeV に換算する。 $\Delta E = \frac{3.555 \times 10^{-13}}{(1.60 \times 10^{-19}) \times 10^6} = 2.221 \text{ MeV} \quad 2.22 \text{ MeV}$	
405	電気素量 e を用いて、1 eV は、 $1\text{eV} = e [\text{C}] \times 1 \text{ V} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ M (メガ) は 10^6 を表す接頭語であり、1 MeV = $(1.60 \times 10^{-19}) \times 10^6$ J	
405	類題 7 質量 3.01494 u のヘリウム ${}^3_2\text{He}$ の原子核の質量欠損は何 u か。また、結合エネルギーは何 MeV か。ただし、陽子の質量を 1.00728 u、中性子の質量を 1.00866 u、1u を 1.66×10^{-27} kg、電気素量を 1.60×10^{-19} C、真空中の光速を 3.00×10^8 m/s とする。	

406	B 核反応 ある原子核に、大きなエネルギーをもった別の原子核や中性子などが衝突する、核子の組み替えがおこり、核種が変化することがある。このような現象を、核反応（原子核反応）という。化学反応では、原子の組みあわせが変わるだけで、原子核は変化しない。一方、核反応では、原子核が変化し、別の核種が生じる。 ？核反応には、どのような特徴があるだろうか。 ラザフォードは、1919 年、窒素による α 線の散乱を研究しているとき、α 線が到達できないほどはなれたところで、ごく少数の放射線を観測した。これは、α 線が窒素の原子核に衝突し原子核が壊れて、α 線よりも透過力の大きい陽子が放出されたためであると考えられた。このとき、窒素の原子核が酸素の原子核に変換されことは、図面の霧箱を用いた写真で確かめられる。 この核反応は、人類初の原子核の人工変換であり、次の核反応式で示される。 ${}^1_0\text{n} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H} \cdots (39)$ 核反応に、中性子 n や陽子 p などの粒子が関与するとき、核反応式では、それらの粒子の記号に、核子の数（質量数）、電気量（原子番号）に相当する数字を添えて、${}_0^1\text{n}$、${}_1^1\text{p}$（または${}_1^1\text{H}$）のように示される場合がある。 核反応は、2 つの原子核が、互いにはたらく静電気力（斥力）に逆らって、核力がはたらく近距離にまで接近したときにはじめておこる。現在の核反応の実験では、加速器を利用して、原子核などの粒子に、静電気力に打ち勝つ大きな運動エネルギーを与えている。	
406	要 核反応の特徴 核反応の前後において、核子の数（質量数）の総和と電気量（原子番号）の総和は、それぞれ一定に保たれる。	
406	問 14 次の（ ）に入る原子核を示し、核反応式を完成させよ。 (1) ${}_3^6\text{Li} + {}_0^1\text{n} \rightarrow () + {}_1^3\text{H}$ (2) ${}_{12}^{12}\text{C} + {}_1^1\text{H} \rightarrow ()$	
406	図 46 霧箱内に生じた核反応 荷電粒子の軌跡に霧が生じることによって、軌跡が観察される。多数の α 線の軌跡中に、${}^{17}_8\text{O}$ の短い軌跡と、陽子${}_1^1\text{H}$の長い軌跡が見える。	
406	① α 線は、大気中では数 cm しか進まない。 ラザフォード (1871～1937, イギリス)	
407	◎核反応によるエネルギー 核反応がおこると、核子の結合エネルギーが変わり、反応の前後で質量の総和が変化する。反応によって質量の総和が小さくなるときは、その分だけエネルギーが放出され、大きくなるときは、エネルギーが吸収される。 このように核反応などによって原子核に出入りするエネルギーを、核エネルギーという（図 47）。 原子 1 個あたりの化学反応によるエネルギーは数 eV である。一方、原子核 1 個あたりの核反応によるエネルギーは数 MeV であり、化学反応の約百万倍もの大きさとなる。	
407	図 47 核反応と核エネルギー 式 (39) で示される核反応である。結合エネルギーが減少した分、核エネルギーが吸収される。	
407	例題 8 核反応とエネルギー 静止しているリチウム${}_3^7\text{Li}$の原子核に、0.60 MeV の運動エネルギーをもった陽子${}_1^1\text{H}$をあてたところ、次のような核反応がおこった。${}_3^7\text{Li} + {}_1^1\text{H} \rightarrow 2{}_2^4\text{He}$ ${}_3^7\text{Li}$、${}_1^1\text{H}$、${}_2^4\text{He}$の原子核の質量をそれぞれ 7.0144 u、1.0073 u、4.0015 u とし、1u を 1.66×10^{-27} kg、電気素量を 1.60×10^{-19} C、真空中の光速を 3.00×10^8 m/s とする。	

	(1) 反応によって減少した質量は何 u か。 (2) 生成されたヘリウム${}^4_2\text{He}$の原子核の、運動エネルギーの和は何 MeV か。	
407	指針 核反応による質量の減少分から、放出されたエネルギーを計算し、反応の前後で、エネルギーが保存されることを利用する。 解 (1) 核反応の前後における質量の減少ΔMは、 $\Delta M = (7.0144 + 1.0073) - 2 \times 4.0015 = 0.0187 \text{ u} \quad 1.87 \times 10^{-2} \text{ u}$ (2) 核反応では、(1) のΔMに相当するエネルギーΔEが放出される。 $\Delta E = \Delta M c^2 = \{ (1.87 \times 10^{-2}) \times (1.66 \times 10^{-27}) \} \times (3.00 \times 10^8)^2 = 2.793 \times 10^{-12} \text{ J}$ これを MeV に換算する。 $\Delta E = \frac{2.793 \times 10^{-12}}{(1.60 \times 10^{-19}) \times 10^6} = 17.45 \text{ MeV}$ 反応の前後においてエネルギーは保存されるので、ΔEと反応前の${}^1_1\text{H}$の運動エネルギーの和は、2 つの${}^4_2\text{He}$の運動エネルギーの和に等しい。 $17.45 + 0.60 = 18.05 \text{ MeV} \quad 18.1 \text{ MeV}$	
407	類題 8 ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$の核反応で吸収されるエネルギーは何 MeV か。${}^{14}_7\text{N}$, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{17}_8\text{O}$, ${}^1_1\text{H}$の原子核の質量をそれぞれ 13.9993 u, 4.0015 u, 16.9948 u, 1.0073 u とし、1u を $1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$、電気素量を $1.6 \times 10^{-18} \text{ C}$、真空中の光速を $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ とする。	
408	C 核分裂 ◎核分裂の特徴 ウラン${}^{235}_{92}\text{U}$やプルトニウム${}^{239}_{94}\text{Pu}$などの原子核は、中性子を吸収すると不安定になり 2 個の原子核に分裂する (図 48)。このように、1 つの原子核が、複数の原子核に分裂する反応を核分裂という。 図 45 から、核子 1 個あたりの結合エネルギーは、質量数 56 の鉄${}^{56}_{26}\text{Fe}$で最大となる。ウラン${}^{235}_{92}\text{U}$のような、質量数の大きい原子核に核分裂がおこると、鉄の質量数により近い原子核が生じ、分裂前の結合エネルギーの和よりも分裂後の結合エネルギーの和が増大するため、この差に相当するエネルギーが放出される (図 49)。 同一元素の原子核であっても、核分裂の仕方は複数ある。ウラン${}^{235}_{92}\text{U}$の場合、たとえば、次のような反応があげられる。 ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{92}_{36}\text{Kr} + {}^{141}_{56}\text{Ba} + 3 {}^1_0\text{n} \quad \cdots (40)$ ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{103}_{42}\text{Mo} + {}^{131}_{50}\text{Sn} + 2 {}^1_0\text{n} \quad \cdots (41)$	
408	◎連鎖反応 一定量以上のウラン${}^{235}_{92}\text{U}$が存在し、核分裂で放出された中性子が、別のウラン${}^{235}_{92}\text{U}$に吸収される条件が満たされると、核分裂が次々におこる。これを核分裂の連鎖反応という (図 50)。核分裂の連鎖反応が一定の割合で継続する状態を、臨界という。	
408	図 48 核分裂 1 g の${}^{235}_{92}\text{U}$から生じるエネルギーは、およそ $8.3 \times 10^{10} \text{ J}$ であり、石油 2000 L の燃焼で生じるエネルギーにほぼ等しい。	
408	図 49 核分裂のエネルギー 式 (40) で示される核反応である。結合エネルギーが増加した分、核エネルギーが放出される。	
408	図 50 連鎖反応 核分裂がおこると、2～3 個の中性子が放出される。核分裂では、何種類もの原子核が生じるが、ここでは、それらを○で示している。	
409	◎原子力発電 原子力発電では、核分裂で生じる熱エネルギーで水を蒸発させ、水蒸気でタービンをまわして発電する (図 51)。原子炉内では、中性子を吸収する制御棒を用いて、連鎖反応を制御している。	

	原子力発電では、少量の核燃料から大量のエネルギーを得ることができる。また、発電の過程で二酸化炭素が発生しないため、地球の温暖化に与える影響が小さいとされている。 原子炉内の放射性同位体からは、強い放射線が出ており、原子炉の運転は、被曝を避けるために、常に厳しい管理のもとで行われる。また、使用済みの核燃料の大部分（95～97%）が再処理によってリサイクルが可能であるとされている。	
409	図 51 原子力発電 ウラン$^{235}_{92}\text{U}$は、遅い中性子とよく反応する。原子炉内の水は、核分裂で発生した中性子の速さを遅くし、次の核分裂をおこしやすくする減速材としての役割も果たしている。	
409	Topic 原子力発電の課題（トピック） 2011 年におこった東日本大震災では、福島第一原子力発電所において、津波の被害などによって全電源が喪失し、原子炉の冷却が制御不能となり、炉心溶融（メルトダウン）や水素爆発が発生して、大量の放射性物質が環境中放出される重大な事故が発生している（図 a）。この事故以後、自然災害や重大事故などに関して、一層厳しい対策基準が設定され、運用にあたっては慎重な姿勢が求められている。 耐用年数を経過した原子炉については、廃止措置（廃炉）が行われる。これには、使用済み核燃料の搬出・再処理・貯蔵、汚染の除去、原子炉建屋の解体などの工程に、20～30 年かかるといわれている。福島第一原子力発電所においては、周辺の汚染水の除去や溶融した核燃料の残骸の取り出しなどの事故処理を含め、廃炉の工程が 30～40 年かけて行われる予定である。 使用済みの核燃料は、再処理によって、再利用されるものと放射性廃棄物とに分けられる。放射性廃棄物は、地層処分するために密封して保管される。 わが国では、エネルギーの安定的な確保、二酸化炭素の排出量低減の観点から、原子力発電は重要な発電方法と位置付けられ、2010 年までは全発電電力量の 30%程度を担っていた。しかし、東日本大震災後は、安全面での社会的不安が以前よりも大きくなっている。一方で、水力発電も含めた再生可能エネルギーによる発電割合は 10%程度であり、化石燃料による火力発電に大きく依存しているのが現状である。	
409	図 a 事故後の福島第一原子力発電所	
410	例題 9 核分裂とエネルギー 質量 2.35 g のウラン$^{235}_{92}\text{U}$の原子核が、次の核分裂をしたとき、放出されるエネルギーは何 J か。 $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{92}_{36}\text{Kr} + {}^{141}_{56}\text{Ba} + 3{}^1_0\text{n}$ ただし、この核分裂で放出されるエネルギーは、ウラン$^{235}_{92}\text{U}$の原子核 1 個あたり、およそ 170 MeV であり、各原子の原子量は質量数に等しいとする。また、電気素量を 1.6×10^{-19} C、アボガドロ定数を 6.0×10^{23} /mol とする。 指針 1 個の原子核から放出されるエネルギーが与えられているので、2.35 g のウラン$^{235}_{92}\text{U}$の原子の数を求め、計算する。 解 2.35 g のウラン$^{235}_{92}\text{U}$の原子の数を計算すると、 $\frac{2.35}{235} \times (6.0 \times 10^{23}) = 6.0 \times 10^{21} \text{ 個}$ 2.35 g のウラン$^{235}_{92}\text{U}$の物質量は、2.35 / 235 mol である。アボガドロ定数は、1 mol あたりの原子（原子核）の数に相当する。 核分裂で放出されるエネルギーは、 $(170 \times 10^6) \times (1.6 \times 10^{-19}) \times (6.0 \times 10^{21}) = 1.63 \times 10^{11} \quad 1.6 \times 10^{11} \text{ J}$ 原子核 1 個あたりのエネルギーを、MeV から J に換算したものである。	
410	類題 9 例題 9 の核分裂で放出されるエネルギーがウラン$^{235}_{92}\text{U}$の原子核 1 個あたり、およそ 170 MeV になることを確かめよ。ただし、$^{235}_{92}\text{U}$、$^{92}_{36}\text{Kr}$、$^{141}_{56}\text{Ba}$の原子核の質量をそれぞれ 234.994 u、91.907 u、140.884 u、中性子${}^1_0\text{n}$の	

	質量を 1.009 u とする。また、1 u を 1.66×10^{-27} kg、電気素量を 1.6×10^{-19} C、真空中の光速を 3.0×10^8 m/s とする。	
410	D 核融合 質量数の小さな原子核どうしが結合すると、全体の質量が減少し、エネルギーが放出される。このような反応を、核融合という。核融合には水素 ${}^2_1\text{H}$ や ${}^3_1\text{H}$ から、ヘリウム ${}^3_2\text{He}$ や ${}^4_2\text{He}$ の原子核が生成するものがあり、たとえば、次のように示される（図 52） ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n} \cdots (42)$ ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} \cdots (43)$ 図 45 から、核子 1 個あたりの結合エネルギーは、質量数 56 の鉄 ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ で最大となる。水素のように、質量数の小さい原子核に核融合がおこると、鉄の質量数により近い原子核が生じ、反応前の結合エネルギーの和よりも反応後の結合エネルギーは増大し、この差に相当するエネルギーが放出される。	
410	図 52 核融合の原理 式 (43) の反応を示している。この反応を継続するためには、高温・高圧の状態を保つ必要がある。	
411	核融合は、原子核どうしの間にはたらく静電気力（圧力）に逆らって、原子核が接近し、衝突しなければおこらない。原子核の熱運動によって、この衝突がおこるためには、式 (42) の反応では 1 億 K 以上、式 (43) の反応では数千万 K の温度が必要である。 太陽のような恒星の内部は、自らの重力によって、非常に高温・高圧となっており、水素の原子核などの核融合が持続的におこって、莫大なエネルギーが放出されている。太陽の内部では、水素からヘリウムができるまでの反応が複数の段階にわたっておこっており、それらは、まとめて次のように示される。 $4 {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e \cdots (44)$ （ e^+ は陽電子、 ν_e は電子ニュートリノを表す（p. 412～414）。） 核融合を制御し、エネルギー源として利用するためには、温度や圧力などについて、さまざまな条件を満たさなければならない。式 (43) の核反応を持続的におこすため、いくつかの方法が研究されているが、実用化には至っていない（図 53）。	
411	図 53 核融合試験装置	
411	TRY 太陽の質量変化を考えよう 太陽の中心では、核融合が持続的におこっている。太陽が毎秒 3.9×10^{26} J のエネルギーを放射しているとする、太陽の質量は、毎秒何 kg 減少していると考えられるか。ただし、真空中の光速を 3.0×10^8 m/s とする。	
411	Topic ニホニウム（トピック） 現在、118 種類の元素が発見されている。そのうち、自然界に存在する元素は、原子番号 92 のウラン U までであり、それ以外の元素は、人工的に合成されている。 原子番号 113 の元素は、日本の研究グループによって発見され、2015 年に「ニホニウム Nh」と命名された。ニホニウムは、ビスマス ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ に、加速器で加速させた亜鉛 ${}^{70}_{30}\text{Zn}$ の原子核を衝突させ、核融合によって合成された。この原子核の半減期は、約 2 マイクロ秒（ 2×10^{-6} 秒）であり、不安定な原子核である。	
411	Check ①質量欠損と結合エネルギーについて、それぞれ簡潔に説明せよ。 ②核分裂、核融合とはどのようなものか。それぞれ簡潔に説明せよ。	
420	終章 物理学が築く未来 物理学の成果は、さまざまな分野で利用され、未来を築く新しい科学技術の基盤となっている。ここでは、今後期待されている新しい技術開発や、物理学の発展についてみていこう。	X 線を使った身近なレントゲン写真から、ミュー粒子やニュートリノを使った最新の取組まで、物理学の成果が切り開いた科学技術として生徒の興味・関心を喚

	進化する透視技術 ～人体から地球へ～ レントゲンが発見したX線は、これまで見る事ができなかった物体の内部構造を可視化した。ここでは、物体の透視技術の発展についてみていこう。	起する内容が紹介されています。
420	X線を用いた透視（レントゲン撮影） X線は、レントゲン写真などに用いられており、外側からではわからない物体の内部構造を観察することができる（図1）。X線は、電磁波であると同時に、エネルギーをもつ粒子（光子）の流れである。すなわち、X線を利用することは、光子を内部構造の観察手段として用いているともいえる。 近年、光子とは異なる粒子を用いた透視技術が登場している。具体的には、μ粒子や、ニュートリノが用いられており、それぞれの透過能力は光子と大きく異なる。	
420	μ粒子を用いた透視 μ粒子は、光子と同じく素粒子の1つであり、電子と同じ電荷をもち、電子の約200倍の質量をもつ。μ粒子は、宇宙から絶えず飛来する宇宙線が、地球の上層大気中の原子と衝突することによって生じる。このμ粒子は、常に地上に降り注いでいる。 高エネルギーのμ粒子は、X線と比べて、物質と相互作用する頻度が低く、その透過力はX線よりもさらに大きい。分厚い岩盤を貫き、その透過距離は数kmにもおよぶ。この性質を用いて人体よりもはるかに大きな物体の内部構造を探ることができる。μ粒子を用いて物体の透視像を得る技法は、ミュオグラフィーとよばれ、レントゲン技術のμ粒子版といえる。 ミュオグラフィーは、1967年に、巨大なピラミッドの内部を調べるのに用いられた。それ以来、技術の進展に伴い、対象とする物体は広がり、近年では、火山の内部構造などの透視画像を得ることができるようになってきている（図2、3）宇宙線はあらゆる方向から地球に飛来しており、粒子もさまざまな方向からやってくる。そのうち、水平方向からくるμ粒子を用いることで、火山内部の透視画像が得られる。 このほかにも、希少金属や油田などの資源探査、橋やダムなどの巨大構造物の安全性調査、小惑星の内部探査など、幅広い分野での展開が期待されており、現在、世界各国で研究が進められている。	
420	図1 レントゲン写真 レントゲン夫人の手を撮影したものである。	
421	図2 μ粒子を用いた火山内部の観測	
421	図3 薩摩硫黄島のμ粒子透視像 緑色の部分は密度が低く、ガスがたまっていると推測される。	
421	ニュートリノを用いた透視 ニュートリノは、物質とほとんど相互作用をしない。その透過力は、μ粒子よりも非常に大きく、地球をもすり抜けてしまう。検出は容易ではなく、幽霊のような粒子とも評される。ニュートリノは、宇宙線と地球大気との衝突、太陽内部の核融合で生じる。一方、地球内部においても、放射性物質が崩壊するときに、反ニュートリノが発生する。この反ニュートリノを検出し、地球内部の透視を行う技術は、ニュートリノグラフィーとよばれる。 図4は、カムランドとよばれる反ニュートリノ検出器である。検出器の中には、1000トンもの液体シンチレーターとよばれる検出用の液体がたくわえられ、反ニュートリノと液体シンチレーター中の陽子との反応を利用して、反ニュートリノの検出を行っている。 地球内部からは、およそ45TW（$=45 \times 10^{12}$ W）の膨大な熱が発生している。この熱は、地磁気、火山活動、マンテル対流といった、地球内部の活動の源と考えられている。熱量の一部は、放射性元素の崩壊に由来するもので、その存在状態を知ることが、地球内部を理解する上での重要な手がかりの1つとなる。崩壊の際に発生する反ニュートリノを検出することで、地球内部に関する新しい知識が得られつつある。	

	ニュートリノグラフィーは、地球の形成起源や進化の解明、火山の噴火や地震の予知、レアメタルの探索などへの有効性が期待されている。世界各地に検出器を設置することで、地球の“レントゲン写真”を撮るといった夢のような話の実現するかもしれない。このように、レントゲンから始まった透視技術は、地球をも対象としてさらに進化を続けている。	
421	図 4 カムランド 神岡鉱山（岐阜県飛騨市神岡町）の地下実験室にある検出器である。検出において、ノイズとなる宇宙線などの影響を弱めるため、神岡鉱山の池ノ山の山頂から約 1000 m 地下に設置されている。	

【化学】

エネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述内容		コメント・修正文の例
実教出版 704 化学		
318	話題 3 再生可能エネルギーの有効活用 2015 年に開かれた気候変動枠組条約締約国会議（COP21）で、2020 年以降の気候変動問題に関する国際的な枠組み「パリ協定」が採択された。パリ協定では、世界共通の長期目標として「世界の平均気温を、産業革命以前に比べて+2℃未満に抑えること。」、さらに、+1.5℃に抑える努力をすること。」「21 世紀後半には、温室効果ガスの排出量と（森林などによる）吸収量のバランスをとること」などを掲げている。日本も批准国であるので、この目標の達成にむけ努力しなければならない。 エネルギーの供給は、環境への適合、自給率、経済効率性の向上、安全性を同時に達成する必要がある。資源に乏しい日本では、エネルギー供給のうち、二酸化炭素排出量の多い化石燃料（石油、石炭、天然ガスなど）が 8 割以上を占めており、そのほとんどを輸入している。原子力発電は、エネルギー自給率の向上に寄与でき、さらに二酸化炭素の排出量も少ないが、2011 年の東日本大震災後、安全性が課題となっている。 そこで注目されているのが、再生可能エネルギーである。再生可能エネルギーは、太陽光・風力・水力・地熱・太陽熱・大気中の熱、その他の自然界に存在する熱・バイオマスなどを指す。再生可能エネルギーは、温室効果ガスを排出せず、永続的に利用することができ、日本国内で生産できるエネルギーである。そのため、二酸化炭素排出量の削減だけでなく、エネルギー自給率を改善することが期待できる。自然環境を活かした再生可能エネルギーは、社会を維持し発展させていくために重要なエネルギーである。しかし、再生可能エネルギーをエネルギー供給源の主軸にするには、発電コストが高い、設置場所が限られる、広い土地が必要などさまざまな課題がある。たとえば、太陽光発電や風力発電は、季節や天候によって発電量が変動するため、安定した電力供給が難しい。電気を安定に供給するためには、電圧の変化に強い製品や、一度電気を蓄えてから供給するための蓄電池の開発も求められている。 安定に持続可能な電力供給をするためには、さまざまな発電方法の特徴を最大限に活用し、バランスよく組み合わせしていく必要がある。一つのエネルギーに依存していた場合、どうなるか考えてみよう。また、興味を持った発電方法について、長所や短所、課題などを調べてみよう。	「電気を安定に供給するためには、電圧の変化に強い製品や、一度電気を蓄えてから供給するための蓄電池の開発も求められている。」とありますが、他にも、発電量の変動を吸収するために火力発電や揚水式発電のバックアップ等様々な対策が必要となっているという現状があります。 全体として、気候変動問題に関する動向や、各発電方式のメリット・デメリットがうまくまとめられています。また、最後の部分で生徒に対する重要な問いかけにつながっています。
318	【図】日本のエネルギー供給構成 10 年間で再エネ（赤）の割合は増えたが、同時に化石燃料（青系）の割合も増加した。	
318	【図】発電方法別 CO₂ 排出量 電力中央研究所「日本における発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量総合評価（2016）」より作成	

【工業】

エネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述内容		コメント・修正文の例
実教出版 740 電力技術1		
4	「電力技術1」を学ぶにあたって 電気は、私たちの生活や産業で様々な用途に利用され、いまではなくてはならないものになっている。そこで、「電力技術1」では、発電所で作られた電気がどのようにして送られるのか、さらに、屋内配線や電気設備に関する法規などについて学ぶ。 ① 電気エネルギー資源と発電方式 電気を発生させるためのエネルギー資源は、化石燃料・原子燃料・再生可能エネルギーなどがある。発電方式は、火力発電・原子力発電・再生可能エネルギーによる発電などがある。 ② 再生可能エネルギー 再生可能エネルギーとは、水・太陽光・風・地熱・バイオマスなど自然界につねに存在するエネルギーのことをいう。 電気エネルギー資源 化石燃料 石油・天然ガス・石炭などの化石燃料を燃焼し、水を沸騰させて発生させた蒸気を利用して、タービンを回転させる発電方式をいう。 原子燃料 原子燃料のウランを核分裂させて、発生した熱で水を沸騰させ、発生した蒸気を利用して、タービンを回転させる発電方式をいう。	
4	図1 電気エネルギー資源	
5	③ 電源別発電電力量の構成比 図2のように、火力発電は、国内の発電電力量の77.9%を占めているが、化石燃料はかぎりある資源であり、日本はほとんどを輸入に頼っている。原子力発電は東日本大震災以前は約30%であったが、現在は4.7%となっている。再生可能エネルギーによる発電は17.4%と年々増加傾向となっている。再生可能エネルギーによる発電は資源が枯渇せず、二酸化炭素を排出しない発電として、導入が進められている。	
5	図2 電源別発電電力量の構成比（電力調査統計などにより ISEP 作成）	何年度の構成比かを記載するとよいと思います。
5	再生可能エネルギー 水力発電 水が高いところから流れ落ちる力を利用して、水車を回転させる発電方式をいう。 太陽光 太陽電池に太陽の光を当て、直接発電する方式をいう。 風力発電 風の力で風車を回転させて、発電する方式をいう。	
6	④ 電力の発生と消費 図3に、各発電所から消費までの流れを示す。 水力・火力・原子力で発電された電力は、変圧器で超高压の275 kVまたは500 kVに昇圧される。昇圧する理由は、送電線路の電線にはわずかであるが電気抵抗があり、大電流が流れると大きな電力損失になってしまう。そこで、昇圧して、送電中の電流を小さくして送電している。 超高压で送られた電力は、超高压変電所で154 kV、一次変電所で66 kVの高压にそれぞれ降圧される。その後、配電用変電所に送られるが、一部の電力は、直接電気鉄道や大規模工場に送られる。また、太陽光発電所と風力発電所などで発電された電力も配電用変電所に送られる。 大電力を使うビルや工場などには送電損失の少ない高压で配電するが、消費電力の少ない一般家庭や商店の電圧は、安全のために低圧の100/200 Vで配電している。電力は、工場の動力や一般家庭の照明・エアコン・電子レンジ・ヒートポンプなどあらゆる分野で利用され、経済活動を支えている。	
6	図3 発電から消費までの流れ	
7	⑤ 変電所のしくみ 変電所の種類は、図3に示すように超高压変電所・一次変電所・配電用変電所などがある。変電	

	所の役割には、電圧の変換、電力系統における電力の流れの制御、送電線での短絡や地絡事故の保護などがある。送電中の電力を安全に輸送するために、変電所には図4のように各種機器が設置されている。	
7	図4 変電所の構成例 断路器 電路や変圧器が故障したり、機器を点検・修理するときに回路を切り離すために使用する。 遮断器 電路の開閉や、保護継電器と併用し過電流や短路・地路電流を遮断するために使用する。 避雷器 電力系統に落雷など異常電圧が発生したときに、電気施設を保護するために使用する。 変圧器 電圧の大きさを変換するときに使用する。	
7	⑥ 配電のしくみ 配電用変電所を経由した電気は、図5のように、6.6 kVの高圧線から柱上変圧器によって100/200 Vの電圧に変換され、引込線から各家庭に電気が送られる。また、大きなビルや学校などは、直接6.6 kVの高電圧が地中線から変電室に送られ、変電室で100/200 Vの電圧に変換し、各部屋に電気が送られる。	
7	図5 配電のしくみ	
8	⑦ 屋内配線 屋内配線は、電気を利用する需要家の施設内における電気配線である。したがって、配線工事や材料などが適切でないと火災や感電事故を起こす原因となるので、電気設備技術基準や電気用品安全法に従って施工や保守をする必要がある。図6は、一般家庭の屋内配線の例である。電気は引込線から電力量計や分電盤を経て、屋内に配線された電線によって各部屋に電気が送られる。	
8	図6 一般家庭の屋内配線と分電盤	
8	⑧ 電気に関する法規 電気に関する法律には、発電・変電・送電・配電・屋内配線などの電気事業を円滑に行うための電気事業法があり、それ以外では電気工事士法・電気工業法・電気用品安全法などがある。電気事業法には電気主任技術者、電気工事士法には電気工事士に関する規定があり、主な資格と作業範囲は次のとおりである。	
8	表1 主な資格と作業範囲	
9	第1章 発電 電気エネルギーは、熱・光・機械エネルギーなどに容易に変えることができるため、家庭電化製品や電子機器、工場の動力、交通機関、情報通信、コンピュータなどに利用され、電力はわたしたちの生活を支える社会基盤の一つとなっている。 この章では、電気エネルギー資源について理解するとともに、電力を生み出す水力発電・火力発電および原子力発電について、それらの発電方式と施設・設備・運用を学ぶ。また、地球環境にやさしい再生可能エネルギーによる発電などについて学ぶ。	
9	【写真】メガソーラ発電所 （福島県川内村、2016年2月発電開始） ・パネル設置容量約2.6 MW、定格出力約2 MW ・年間発電量は264万2800 kWhで、一般家庭約800世帯の年間消費量に相当 ・東日本大震災後に復興支援補助金で設置し、村民の帰村促進、高齢者のライフライン確保、それに伴う雇用創出に寄与	
10	この章で学ぶこと 発電方式と今後のエネルギー計画 各発電方式のおもな特徴 各発電方式は、表1のようにメリットとデメリットがあり、それぞれの特徴を生かした発電方式で電力を供給している。現在の日本はエネルギー自給率がひじょうに低いため、再生可能エネルギーによる発電などを利用するなど、国産エネルギーの開発が重要になっている。	
10	表1 各発電方式のおもな特徴	各発電方式のメリットとデメリットが端的にまとめられています。

10	エネルギーの基本計画 2018年に決定したエネルギー基本計画では、火力発電の割合を減らし、原子力発電・再生可能エネルギーによる発電の割合を増やすことを目標に掲げている（図1）。 さらに、エネルギー政策として、一次エネルギー自給率の向上・エネルギーの安定供給・発電コスト低減による経済性の向上・二酸化炭素排出量削減などの環境対策をバランスよく実現することを目指している（図2）。	
10	Column パリ協定 2015年12月にパリで開催された「国連気候変動枠組条約第21回締約国会議」（COP21）で採択された、地球温暖化対策の国際的枠組みを定めた条約である。この協定で、日本は2013年の二酸化炭素排出量を基準とし、2030年までに26%削減することが目標とされている。	2015年のパリ協定採択時の状況が記載されていますが、その5年後の2021年開催のCOP26の前に、わが国は2030年度に46%削減（2013年度比）を目指すことを表明しました。また、米国も積極的な姿勢に転換するなど、温室効果ガスの削減に関する世界の情勢はパリ協定採択時から大きく変化していますので、授業の中でできるだけ最新の情報を補足、紹介していただきたいと思います。
10	図1 資源別電源構成	
10	図2 エネルギー政策	
11	1節 エネルギー資源と電力 この節で学ぶこと 現代社会はエネルギー資源が大量消費される時代である。地球上にある有限なエネルギー資源のうち、発電に利用できる資源の有効活用について学ぶ。また、エネルギー資源の大量消費により地球環境に生じる影響についての対策を考えながら、電力の発生・利用について学ぶ。	
11	1 エネルギー資源 わたしたちの生活や産業において、エネルギーはさまざまな形に変換され利用されている。エネルギーには、一次エネルギーと二次エネルギーがある。図1におもな一次エネルギーと二次エネルギーの例を示す。一次エネルギーは、自然界に存在するエネルギーのことで、石油・石炭・天然ガスなどの化石燃料、ウランなどの原子燃料、水力・太陽光・風力などの再生可能エネルギーなどがある。二次エネルギーは、一次エネルギーから変換・加工して得られたエネルギーのことで、発電所でつくられた電気、石油から精製されたガソリン・重油・軽油、さらに天然ガスからつくられた都市ガスなどがある。	
11	図1 おもな一次エネルギーと二次エネルギーの例	
11	① 家庭生活や経済消費する全エネルギーに対する、国内で確保できるエネルギーの比率をいう。	
11-12	2 日本のエネルギー自給率 わたしたちは、エネルギーをいつでも手軽に使えるようになり、便利で快適に生活することができるようになった。しかし、日本は石油や天然ガスなどの資源に乏しく、一次エネルギーの自給率が低い国である。 日本では、かつて国産石炭や水力などの国内エネルギー資源の活用により、たとえば1960年には約6割の自給率を達成していた。しかし、その後の高度経済成長のもとでエネルギー消費量が急増した。そのため、石炭から石油への燃料転換が進んだ。石油は海外から大量に輸入され、また、石炭も輸入中心へと移行していき、エネルギー自給率は約10%に低下した。さらに、石油危機以降に天然ガスによる火力発電・原子力発電が導入された。天然ガス・原子力発電の燃料となるウランもほぼ全量が海外から輸入されているが、ウランは一度輸入すると長期間使うことができるため、準国産エネルギーと考えることができ、自給率は20%まで回復した。しかし、2011年の東日本大震災以後、原子力発電所が停止され、自給率は約6%まで低下したが、再生可能エネルギーなどの推進により、2017年の自給率は9.5%に回復した。図2に	

	日本の一次エネルギー自給率の推移を示す。	
12	① 1973 年の第 4 次中東戦争と 1979 年のイラン革命によって、石油価格の高騰が起きた。	
12	図 2 日本の一次エネルギー自給率の推移 (World Energy Balances 2018, 総合エネルギー統計 2018 により作成)	
12	図 3 は主要国の一次エネルギー自給率であるが、日本は諸外国と比較するとかなり低い値になっている。一次エネルギーの自給率が低いと資源を他国に依存しなければならず、エネルギーを安定して確保することがむずかしくなる。	
12	② 自給率 100%を超える場合は輸出していることを示す。	
12	図 3 主要国の一次エネルギー自給率 (World Energy Balances 2018, 総合エネルギー統計 2018 により作成)	
13	3 エネルギー供給と資源の確保 日本で消費される一次エネルギーの総供給量は、図 4 のように 1960～2000 年頃までは急激に上昇し、2011 年の東日本大震災以降は減少している。2017 年のエネルギー別供給構成は、図 5 のように化石燃料が全供給量の 87.5%を占めている。しかし、日本は化石燃料のエネルギー資源が乏しいため、その多くは、他国に依存している。図 6 のように石油 99.7%, 石炭 99.3%, 天然ガス 97.5%を輸入に頼っている。ここで課題になるのは石油で、輸入量の約 88%を中東地域に依存しているため、国際情勢の影響を受けやすくなっている。石炭は、輸入量の 72%をオーストラリアに依存している。また、天然ガスは比較的安定しており、オーストラリアのほか、アジア・ロシア・中東など多様な地域から輸入している。	
13	図 5 日本の一次エネルギー供給構成 (総合エネルギー統計 2018 より作成)	
13	図 4 日本の一次エネルギー総供給の推移 (総合エネルギー統計 2018 より作成)	
13	図 6 化石燃料の輸入割合 (総合エネルギー統計 2018)	
14	4 エネルギー資源の可採年数 こんにちの世界各国で利用されているエネルギー資源のうち、おもなものは石油・石炭・天然ガス・ウランである。これらの資源は、地球上に無限に存在しているわけではなく、どれも埋蔵量にかぎりがある。エネルギー資源の可採年数は、図 7 に示すように石油 50 年、石炭 132 年、天然ガス 51 年、ウラン 99 年となっている。これらの資源は、地球誕生から 50 億年かけて蓄積された資源であり、枯渇させないためにも、再生可能エネルギーなどの活用および省エネルギー技術の開発や利用を推進する必要がある。	
14	図 7 主要なエネルギー資源の可採年数 (BP 統計 2019, Uranium 2018 による)	
14	①確認可採埋蔵量のことで、現在の技術で、経済的に採掘が可能だと確認されている資源の量をいう。	
14	②埋蔵量を年間の生産量で割った値をいう。	
14	5 エネルギー資源と発電方式 電力は、各種の一次エネルギー資源からつくられる。発電方式はエネルギー資源により大きく分類すると、火力発電・原子力発電・再生可能エネルギーによる発電（水力発電・太陽光発電・風力発電・地熱発電など）のように分けられる。表 1 に各種の発電方式を示す。	
14	表 1 エネルギー資源と発電方式	
15	6 電力の供給と需要 1 供給 日本の電力供給は、図 8 のように 1950 年代までは水力発電が中心であったが、1960 年代になると安価な石油が出現して、火力発電が増加した。しかし、1970 年代に 2 度にわたる石油危機があり、原子力・天然ガス・石炭などを利用する発電方式へと転換されてきたが、1980 年代では、石油への依存度は下がり、資源の安定供給と経済性の観点から、多様な発電方式で運用されている。 原子力発電においては、2011 年の東日本大震災における地震と津波によって福島第一原子力発電所の事故が発生し、日本の原子力発電所は、定期点検などで、順次、一時停止した。その後、安全性を高める審査を通った発電所から発電が再開されている。	

	日本はエネルギー自給率が低いと、再生可能エネルギーによる発電などを推進しているが、図 8 からわかるように、現状では全発電電力量に占める割合は 8.1%である。今後は、それらの発電設備の普及拡大が急務であり、そのための取り組みが進められている。	
15	①水力以外の再生可能エネルギー。	
	②LNG, LPG ほか。	
15	図 8 電源別発電電力量構成比（電気事業連合会調べ、および電力調査統計より作成）	
16	2 需要 図 9 は、1 日の需要電力と供給を表したもので、日負荷曲線という。需要電力量は、1 日の時間帯により大きな差があるので、表 2 に示すように、それぞれの発電方式の特性を生かし、1 日の需要の変化に対応できるようにしている。とくに揚水式水力発電は夜間に水をくみ上げ、昼間のピーク時にその水を利用して発電する方式で、需要電力の平準化をはかっている。表 2 に各発電方式の需要変化に対する特性を示す。	「とくに揚水式水力発電は夜間に水をくみ上げ、昼間のピーク時にその水を利用して発電する方式で、需要電力の平準化をはかっている。」とありますが、最近では太陽光発電の規模拡大によって昼間に余剰電力が発生するようになりました。そのため、昼間に余剰電力で揚水し、太陽光発電が止まる夕方などに揚水発電を稼働して、需要を満たすことが多くなっています。次回改訂時の参考にしてください。
16	①日負荷曲線は、地域によって違いがある。また、同じ地域でも夏と冬で違いがある。	
16	7 各国の発電構成 図 10 は、各国の電源別発電電力量の構成を示したもので、それぞれの国の自然条件や生活様式エネルギー政策などが反映されている。 日本はエネルギー資源の約 90%を海外に依存しているため、資源の安定供給を確保する意味から、水力・石油・天然ガス・石炭・原子力などのエネルギーをバランスよく組み合わせた運用を行っている。アメリカ・中国は石炭の生産量が多いので、石炭火力発電が中心である。また、カナダは豊かな水資源に恵まれているため、水力発電が中心である。フランスはエネルギー自給率を高めるため、原子力発電を中心としている。	
16	②需要電力の平準化とは、時間帯や季節ごとの電力需要格差を少なくすることである。電力設備は、ピーク需要に合わせて設置されなければならないため、設備の効率的な運用には需要電力の平準化が大切である。	
16	⑥ここでいうエネルギー資源とは、産業活動や家庭生活で使われるすべての一次エネルギー資源をいう。	
16	図 9 日負荷曲線の例	かつてはこのような日負荷曲線となっていました。最近ではとくに太陽光発電の規模が大きくなり、太陽光発電の変動を火力発電と揚水式発電が調整することも多くなっています。ピーク需要を超える太陽光発電の電力を揚水式発電等で調整していることが分かる図にするとよいと思います。
16	表 2 各発電方式の需要変化に対する特性	揚水発電については前述の通り、太陽光がピーク需要を超える場合には逆もあります。
17	8 エネルギー資源と環境問題 現在、わたしたちが利用しているエネルギー資源の多くは化石燃料で、その多くは燃焼されて二酸化炭素（CO ₂ ）を発生する。その CO ₂ は大気中に放出され、地球の大気圏に滞留すると地球温暖化が進むといわれている。このような CO ₂ などのガスは温室効果ガスとよばれており、図 11 に内訳を示す。	

	世界人口はアジアやアフリカを中心に増加を続けており、図 12 に示すように、2060 年には 100 億人を突破すると推測されている。今後は、人口増加とともにエネルギー需要の増加が予想され、世界全体では CO ₂ の増加が避けられない状態である。	
17	①二酸化炭素・メタン・一酸化窒素・フロンガスなどをいう。	
17	図 10 各国の電源別発電電力量の構成比（資源エネルギー庁調べ）	
17	図 11 温室効果ガス別排出量の内訳（IPCC 第 5 次環境報告書より作成）	
17	図 12 世界人口の推移と見通し（World Population Prospects the 2019 revision より作成）	
18	今後、大気中の温室効果ガスがさらに増加し続けると、図 13 に示すように 1986～2005 年の気温変化の平均を 0.0℃とした場合、2100 年には最大で 4.8℃上昇すると予測されている。気温が上昇すると、気候変動により洪水や森林火災などが多発することや、北極や南極などの氷が溶けて海面水位が最大で 82 cm 上昇し、南太平洋の標高の低い多くの島は水没するなど、深刻な影響が推測されている。 そこで、地球環境を守るために、国際的な取り決めがなされており、現在、先進各国では CO₂ 削減目標が設定されている。日本においても、その目標達成に向けた活動が進められている。	簡潔に良くまとめていると思います。
18	①②「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）第 5 次評価報告の高位シナリオより。	
18	③国連気候変動枠組条約締約国会議の京都議定書（COP3, 1997）やパリ協定（COP21, 2015）など。	
18	図 13 地球の気温変化の予測（IPCC 第 5 次評価報告書より作成）	
18	図 14 地球再生計画（経済産業省 エネルギー'93 より）	
18	調べよう・考えよう・話し合おう 現在、CO₂ の削減目標が達成でき、図 14 の自然体ケースを進んでいる状態である。世界中では、洪水・干ばつ・森林火災などの自然災害が多発し、地球温暖化との関連が指摘され、このまま放っておくと、数十年後は取り返しのつかない状態になると推測されている。そこで、地球温暖化について調べ、どのような対策をとるべきかについて考えてみよう。 ヒント 温室効果ガス排出量の多い国とその原因、日本と世界で発生している自然災害、地球の気候変化の予測（気候変動に関する政府間パネルの第 5 次評価報告）	
18	④各国の削減目標（2030 年までの GDP あたりの CO₂ 排出） ・日本 26%削減（2013 年比） ・アメリカ 27%削減（2005 年比） ・中国 60～65%削減（2005 年比）	各国の削減目標は、2021 年の COP26 を経て大きく変わっていますので、最新の情報を授業の中で補足、紹介するとよいと思います。 また、「GDP あたりの CO₂ 排出」とありますが、ここにあげられている削減目標の中で GDP あたりの排出量として削減目標を掲げているのは中国のみです。
18	節末問題 ①化石燃料と再生可能エネルギーの代表的な資源をそれぞれ三つあげよ。 ②再生可能エネルギーによる発電の種類をあげよ。 ③温室効果ガスの種類をあげよ。	
62	4 節 原子力発電 この節で学ぶこと 原子力発電に用いる原子燃料は、化石燃料と比べて、生み出される熱エネルギーのエネルギー密度がひじょうに高く、しかも発電時に二酸化炭素を排出しないなどの特長をもっている。原子力発電では、放射性物質を扱うので、とりわけ安全性を確保するための設備・技術が必要である。ここでは、原子力発電の原理施設・設備および安全性などについて学ぶ。	

62	1 原子力発電の概要 商業用原子力発電所は、低濃縮ウランを原子燃料とし、冷却水と減速材にそれぞれ軽水を用いた軽水炉（LWR）で運転されている。軽水炉には、蒸気を原子炉の中で直接発生する沸騰水型原子炉（BWR）と、炉心は高温・高圧水で冷却して、蒸気発生器で蒸気をつくる加圧水型原子炉（PWR）とがある。 原子力発電では、図 1 のように原子炉で発生した熱でつくられた蒸気が蒸気タービンを回転させ、タービンに連結された発電機で発電する。火力発電とは、ボイラのかわりに原子炉で蒸気をつくる場所が異なるだけで、あとの発電のしくみは同じである。 原子燃料物質であるウランに速度の遅い中性子（熱中性子）が吸収されると核分裂が起き、ウランは核分裂生成物と中性子を放出する。いったん核分裂がはじまると、飛び出した中性子が次々とウランに吸収され、連続して核分裂反応が起きる。原子力発電は、この核分裂のさいに発生する熱エネルギーを利用している。 軽水炉のような核分裂炉では、炉心でウラン（^{235}U）が消費されるが、新たにプルトニウムなどの核分裂性物質が生産され、原子燃料として利用できる長所がある。原子炉で生み出される核分裂エネルギーは、化石燃料を燃焼させて生み出される熱エネルギーと比べて、エネルギー密度がひじょうに高いことが特長である。原子力発電で生み出される核分裂性物質には、人体に危険な放射性物質が多量に含まれているので、これらを安全に管理することが重要である。発電時のみならず、放射性廃棄物の安全な管理・処理・処分も重要な課題である。	「原子力発電で生み出される核分裂性物質には、人体に有害な放射性物質が多量に含まれている」とありますが、人体に有害な放射性物質は核分裂性物質だけではなく、核分裂生成物もあります。例えば、「原子力発電で生み出される放射性物質には」とするか、「原子力発電で生み出される核分裂性物質や核分裂生成物には」とすることを提案します。
62	図 1 原子力発電の概要	沸騰水型原子炉または BWR であることを追記するとよいと思います。
62	①light water 通常の水のこと	
62	②light water reactor 軽水炉では天然ウラン中の ^{235}U の濃度を 2～5%程度に濃縮して利用しており、これを低濃縮ウランという。	
62	③boiling water reactor	
62	④pressurized water reactor	
63	2 原子力発電におけるエネルギー発生のしくみ 1 原子核 原子は、図 2 に示すように、質量のほとんどを占める原子核と、それを中心に周回する軌道電子から構成されている。原子の半径はおよそ 10^{-10} m であり、原子核の半径は $10^{-15}\sim 10^{-14}\text{ m}$ である。軌道電子はクーロン力によって原子核に束縛されているため、束縛電子ともよばれる。 原子核は正電荷をもつ陽子と電荷をもたない中性子からなり、核子と総称される。陽子数を Z、中性子数を N とすると、Z を原子番号とよび、Z と N の和である核子数 A を質量数とよぶ。各原子を表記する場合、元素記号の左上に質量数、左下に原子番号をつけて表すのが一般的である。原子番号 1、質量数 1 の水素原子であれば、^1_1H、原子番号 92、質量数 235 のウラン原子であれば $^{235}_{92}\text{U}$ と表す。 原子核の構造と質量との関係は図 3 のようになる。原子番号が同じで質量数が異なる水素・重水素・三重水素や、ウラン 235 とウラン 238 のような原子を、たがいに同位体とよぶ。同位体には、その状態が維持される安定な核種と放射線（粒子線と電磁波）を放出して安定な核種に変換されるものがある。粒子線の粒子には、ヘリウムの原子核（アルファ（α）線）、電子（ベータ（β）線）、中性子（中性子線）があり、電磁波にはエネルギーが高いガンマ（γ）線とエックス（X）線、紫外線があるが、紫外線は放射線には含まれない。放射線を出す力を放射能といい、放射能を有する物質を放射性物質とよぶ。	
63	①proton ②neutron ③nucleon	

	④atomic number ⑤mass number ⑥質量を表すのに、原子質量単位 (atomic mass unit, 記号 u) が用いられる。これは炭素 ^{12}C の原子 1 個を基準とし、その $1/12$ が 1 u と定められている。1 u = 1.6605×10^{-27} kg である。陽子と中性子の質量はそれぞれ 1.007 u, 1.009 u である。 ⑦isotope 同位元素ともいう。 ⑧radioactivity ⑨radioactive substance	
63	図 2 原子の構造	
63	図 3 原子核の構造と質量	
63-64	2 質量とエネルギー 原子核の質量は、厳密には、それを構成する核子のそれぞれの質量の総和よりもわずかに小さい。たとえば、図 4 に示すようにヘリウム ^4_2He の質量 4.002 u は、2 個の陽子 ($1.007 \text{ u} \times 2$) と 2 個の中性子 ($1.009 \text{ u} \times 2$) の質量をたした質量 4.032 u よりも 0.030 u だけ小さい。この差は質量欠損とよばれ、核子の結合エネルギーに換算できる。 アインシュタインの理論によれば、質量とエネルギーは等価なものであつて、陽子と中性子が結合するときは、図 4 のように質量欠損に相当するエネルギーを外部に放出する。逆に、原子核を陽子と中性子に分解するには、質量欠損に相当するエネルギーを与える必要がある。この質量の差を m [kg]、真空中での光の速度を c ($= 3 \times 10^8$) [m/s] とすると、結合エネルギー U [J] は次のようになる。 $U = mc^2 \text{ [J]} \approx 931a \text{ [MeV]} \quad (1)$ J (ジュール) は eV (電子ボルト) に換算でき、次のような関係がある。 $1 \text{ [eV]} = 10^{-6} \text{ [MeV]} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ [J]} \quad (2)$ ウランの核分裂反応により放出されるエネルギーは、ウラン原子 1 個あたり約 200 MeV であるので、3.204×10^{-11} J となる。 このように、各種の原子核について計算し、核子 1 個あたりの結合エネルギー、すなわち平均結合エネルギーをまとめたものを図 5 に示す。質量数 60 付近の平均結合エネルギーが 9 MeV 程で最も大きく、安定な核種である。また、質量数が 60 より小さい核種は融合することでエネルギーを放出し、60 より大きい核種は分裂することでエネルギーを放出することがわかる。このような平均結合エネルギーの性質が、核融合や核分裂エネルギー利用のもととなっている。	
64	①mass defect ②bond energy ③質量 1 u = 1.66×10^{-27} kg であるから、 $a \text{ [u]} = 1.66 \times 10^{-27} a \text{ [kg]}$ よって、 $ \begin{aligned} U &= mc^2 \\ &= (1.66 \times 10^{-27} a) \text{ [kg]} \times (3 \times 10^8 \text{ [m/s]})^2 \\ &= 1.49a \times 10^{-10} \text{ [J]} \\ &= \frac{1.49a \times 10^{-10} \text{ [J]}}{1.60 \times 10^{-13} \text{ [J/MeV]}} \\ &\approx 931a \text{ [MeV]} \end{aligned} $ ④正確には、 $1 \text{ eV} = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ J}$ ⑤ $0.227 \text{ u} \times 931 \text{ MeV/u} = 211 \text{ MeV} \approx 200 \text{ MeV}$	

64	図 4 ヘリウム原子核の質量欠損	
64	図 5 平均結合エネルギー	
65	例題 1 ヘリウム原子核は、2 個の陽子と 2 個の中性子から構成されている。このヘリウム原子核の質量欠損[u]および核子 1 個あたりの結合エネルギーは何 MeV か、また何 J になるかを求めよ。ただし、ヘリウム原子核の質量は 4.002 u である。 解答 ヘリウムの陽子、中性子の質量はそれぞれ次のようになる。 (陽子) $1.007 \times 2 = 2.014$ u, (中性子) $1.009 \times 2 = 2.018$ u よって、核子の質量は、$2.014 + 2.018 = 4.032$ u となる。したがって、ヘリウム原子核の質量は、4.002 u であるから質量欠損は $4.032 - 4.002 = 0.030$ u となる。また、核子 1 個あたりの結合エネルギーは、$931 \times 0.030 / 4 \approx 7.0$ MeV となる。 一方、1 MeV は 1.60×10^{-13} J であるから、結合エネルギーは $7.0 \times 1.60 \times 10^{-13} = 1.12 \times 10^{-12}$ J となる。	
65	問 1 リチウム${}^7_3\text{Li}$の原子核は、陽子 3、中性子 4 で構成されている。この原子核の平均結合エネルギーは何 MeV か、また、何 J になるかを求めよ。ただし、${}^7_3\text{Li}$原子核の質量は 7.014 u である。	
65	3 核分裂エネルギー ${}^{235}_{92}\text{U}$ や ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ の原子核が中性子 (${}_0^1n$) を吸収すると不安定な核になり二つの核分裂生成物に分裂し、同時に 2~3 個の中性子が発生する。このような現象を核分裂という。そのさい、結合エネルギーの差に相当する多量のエネルギーが放出される。これを核分裂エネルギーという。 核分裂によってできる核分裂生成物の種類は、確率的に定まる。たとえば、図 6 に示すように、${}^{235}_{92}\text{U}$ を核分裂させると、約 7% の確率で ${}^{95}_{42}\text{Mo}$ と ${}^{139}_{57}\text{La}$ のほかに、2 個の高速中性子が生じる。この反応は次のように表される。 ${}^{235}_{92}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}^{236}_{92}\text{U}(\text{不安定}) \rightarrow {}^{95}_{42}\text{Mo} + {}^{139}_{57}\text{La} + 2{}_0^1n + 7e \quad (3)$ このときの質量の減少は 0.227 u となる。この質量欠損は、式 (1) より ${}^{235}_{92}\text{U}$ 原子 1 個あたり約 200 MeV のエネルギーに相当し、このエネルギーは、化学反応によるエネルギーとは比べものにならないほど大きい。	
65	①fission product ②nuclear fission ③nuclear fission energy ④モリブデン ⑤ランタン ⑥分裂直後は、${}^{95}_{38}\text{Sr}$ (ストロンチウム) と ${}^{139}_{54}\text{Xe}$ (キセノン) を生成する。これらの原子核内の中性子が電子 e を放出して陽子に変わり、原子番号が変わる。	
65	図 6 ウランの核分裂	
66	例題 2 原子力発電所において、${}^{235}_{92}\text{U}$ を 1 g 核分裂させたときに発生する熱量[kW・h]を求めよ。ただし、質量欠損を 0.09%、熱変換効率を 32% とする。 解答 質量欠損によって発生するエネルギーは、$U = mc^2$ で求められる。 $U = 1.0 \times 10^{-3} \times 0.09 \times 10^{-2} \times (3.0 \times 10^8)^2$ $= 8.1 \times 10^{10} \text{ J} (= \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = \text{W} \cdot \text{s})$ このうちの 32% が電気エネルギーに変換される熱量であるので $8.1 \times 10^{10} \times 0.32 = 2.6 \times 10^{10} \text{ J}$ となる。 これを [kW・h] に換算すると、発生電力量が求まる。 $\frac{2.6 \times 10^{10}}{3600} = 7200 \text{ kW} \cdot \text{h}$	

66	問2 ある家庭の電力量の使用量が1か月あたり280 kW・hとすると、1 gの $^{235}_{92}\text{U}$ の発熱量は何か月分の電力量に相当するか。	
66-67	4 連鎖反応 $^{235}_{92}\text{U}$が核分裂してできる中性子は、平均2 MeV 程度の高いエネルギーをもつ。この高速中性子は、$^{235}_{92}\text{U}$の原子核に吸収されにくく、核分裂反応を起こしにくい。しかし、高速中性子のエネルギーが0.025 eV 程度まで減少して、低速の熱中性子になると、それは$^{235}_{92}\text{U}$の原子核に吸収されやすくなり、核分裂反応が起こりやすくなる。 したがって、1 個の熱中性子が、原子燃料の原子核に吸収されて核分裂を起こし、その結果発生した高速中性子のうち、少なくとも1 個が減速して熱中性子になり、この熱中性子が別の原子核を分裂させるという反応が連続的に持続される。この現象を連鎖反応という。図7に$^{235}_{92}\text{U}$の連鎖反応を示す。	
66	①fast neutron ②thermal neutron ③一例として、Mo（モリブデン$^{95}_{42}\text{Mo}$）やLa（ランタン$^{139}_{57}\text{La}$）などが分裂によって生成される。 ④structural materials 「3 項原子力発電のしくみ」で述べる原子炉を構成する材料であり、ここでは、燃料と制御棒を除く物質をいう。	
66	図7 原子炉の中の連鎖反応	減速材、構造材、制御棒の役割が分かりやすく描かれています。
67-68	3 原子力発電のしくみ 1 原子炉の構成 核分裂により発生したエネルギーを、熱エネルギーとして利用できるようにする装置が原子炉である。核分裂反応を起こさせるために、低速の熱中性子を用いる原子炉を熱中性子炉という。一方、高速中性子を用いる原子炉を高速中性子炉という。核分裂炉の最大の長所は、燃料を消費しながら新しい原子燃料を生産できることである。 原子炉は以下のようなもので構成されている。 (1) 原子燃料 ^{235}Uや^{239}Puのように核分裂を起こし、連鎖反応を持続できる物質を核分裂性物質といい、^{238}Uや^{232}Thのように中性子を吸収して核分裂性物質になる物質を親物質という。天然ウラン中に含まれる^{235}Uは約0.7%で、残りは核分裂を起こしにくい^{238}Uである。原子炉の中では、親物質である^{238}Uは、次の反応式のように中性子^1_0n、とくに高速中性子を吸収し、電子eを放出する反応を行って、核分裂性物質である^{239}Puに転換される。なお、^{239}Puは天然には存在しない。 $^{238}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{239}_{92}\text{U} \quad (4)$ $^{239}_{92}\text{U} \rightarrow ^{239}_{93}\text{Np} + e \quad (5)$ $^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow ^{239}_{94}\text{Pu} + e \quad (6)$ このようにしてできた^{239}Puは、主として高速増殖炉の原子燃料として使用される。 (2) 減速材 高速中性子を熱中性子に減速するために、減速材が使用される。質量数の小さい物質ほど減速効果は大きい。減速材としては、減速効果が大きく、中性子吸収の小さい物質が適しており、通常、軽水・重水・黒鉛などが用いられる。 (3) 冷却材 炉心で発生した熱エネルギーを外部へ取り出すため、冷却材が使用される。冷却材としては、熱伝達特性がよく、中性子吸収が小さく、放射線に対して安定な物質が適している。軽水・重水・炭酸ガス・ヘリウムガス・液体ナトリウムなどが用いられる。 (4) 反射体 反射体は、中性子が炉心から漏れるのを防ぐためのもので、炉心のまわりを囲んでいる。反射体としては、減速材と同じように、軽水・重水・黒鉛などが用いられる。 (5) 制御棒 制御棒は、原子炉内の中性子を吸収して、中性子が原子燃料に吸収される割合を制御するためのものである。制御材としては、中性子の吸収の大きい物質、すなわちカドミウム (Cd)、ホウ素 (B)、ハフニウム (Hf)、またはこ	

	これらの合金などが用いられる。 核分裂反応によって放出される中性子のうち、平均して 1 個だけが次の核分裂を起こすとすれば、連鎖反応において核分裂反応の起こる割合は、増加も減少もしないで、一定の割合で持続される。このような状態を臨界状態という。制御棒を炉心部に出し入れして連鎖反応を定められた臨界状態に保つように制御できる。 (6) 遮へい体 遮へい体は、炉心から出る中性子、γ線（電磁波）などの人体に有害な放射線の量を、人体に対して許容できる程度まで減らすことを目的とする遮へいのための壁である。中性子の遮へい材としては減速材や制御棒に用いられる材料が、γ線の遮へい材としては質量の重い材料、たとえば、コンクリート・鉛・鉄板などがそれぞれ用いられている。 (7) 原子炉圧力容器 炉心を収める鋼製の容器で、内部の圧力を保持し、原子燃料や核分裂生成物などの放射性物質を閉じ込める機能をもっている。 (8) 原子炉格納容器 原子炉・原子炉冷却設備およびその関連設備を収納する施設であり、放射性物質を閉じ込める設備が損傷した場合に、放射性物質を閉じ込める防壁の役割を構成する。鋼製あるいは内面を鋼板で内張りされた鉄筋コンクリート製のものがある。	
67	①chain reaction ②thermal reactor ③fast reactor たんに高速炉ともいう。 ④nuclear fuel 核燃料ともいう。 ⑤fissile material Pu はプルトニウムという。 ⑥fertile material Th はトリウムという。 ⑦ネプツニウム ⑧71 ページ参照。 ⑨moderator ⑩heavy water 軽水（通常の水）の水素原子を重水素原子と置き換えたもの。 ⑪coolant	
68	2 軽水炉のしくみ 原子炉では、核分裂で発生した余剰の中性子が、^{238}U に吸収されて ^{239}Pu へ変換したり、構造材に吸収されたり、制御棒で吸収されたりして、核分裂連鎖反応を一定の割合で持続する。 軽水炉では、低濃縮ウランを図 8 に示すような二酸化ウラン (UO_2) ペレットにして、ジルコニウム合金のさやに収納したものが燃料棒として用いられている。また冷却材と減速材には軽水が用いられている。	
68	①reflector ②control rod ③critical state ④shielding ⑤reactor pressure vessel (RPV) ⑥containment vessel (CV) ⑦一般的な商業原子炉では、^{235}U の濃度を 2～5%程度に濃縮した低濃縮ウランを用いる。^{235}U の濃縮度が 20%を超えるものを高濃縮ウラン、0.2～0.3%以下のものを劣化ウランとよぶ。 ⑧直径約 10 mm、長さ約 10 mm の円筒状に焼き固めたものをいう（図 8 参照）。	
69	a 沸騰水型原子炉（BWR） 沸騰水型原子炉では、図 8 に示すように、燃料棒が 8 本×8 本または 9 本×9 本の正方格子状に配列・収納された燃料	

	集合体が用いられている。さらに、1本の制御棒を四つの燃料集合体で囲み、これを単位とするものが集められて円筒状の原子炉炉心を形づくっている。制御棒としては、ボロンカーバイド (B_4C) 粉末を充てんしたステンレス製の多数の細管を十字形に配列し、これをさらにステンレス製のさやで囲った構造のものが用いられている。図9は、原子炉圧力容器に収納された炉心、および炉心の中の燃料集合体や制御棒の配置図の例である。 図10は沸騰水型原子炉の原理図である。水は、給水入口ノズルから入り、炉心に流入し、加熱されて沸騰し、炉心の出口で蒸気と水の混ざった二相流となり、気水分離器と蒸気ドライヤで水と蒸気に分離される。7.0 MPa程度の蒸気は直接タービンに導かれ、発電に用いられる。	
69	①100万kW級の沸騰水型原子炉では、約750の燃料集合体が円筒状に配列されている。 ②炉心下部より燃料集合体の間げきに制御棒を挿入したり、間げきから制御棒を引き抜いたりすることができる。 ③two-phase flow 沸騰により発生した蒸気が水と混ざり合った流れをいう。	
69	図8 BWRの燃料棒(左)と燃料集合体(右)	
70	b 加圧水型原子炉(PWR) 加圧水型原子炉では、燃料棒が17本×17本の正方格子状に配列された燃料集合体を用いられている。制御棒は、銀-インジウム-カドミウム合金をステンレス鋼で被覆したものであり、炉心上部から燃料集合体内を上下することができる構造となっている。 図11は、加圧水型原子炉の原理図である。炉心で加圧(15.7 MPa)された冷却材をより高温(300℃)にするために、炉心を丈夫な原子炉圧力容器に入れ、加圧器によって高圧が保たれるようにしてある。炉心を冷却した高温高圧の一次冷却材は、蒸気発生器により二次系に伝熱して蒸気を発生させ、タービンを回転させ、発電をする。	
70	図10 沸騰水型原子炉の原理図	
70	図11 加圧水型原子炉の原理図	
71	c 改良型軽水炉 安全性と信頼性のさらなる向上、稼働率の向上と被ばく量の低減および運転性能の向上などをめざした改良型軽水炉が開発されている。従来の沸騰水型原子炉の再循環ポンプに替えて、原子炉圧力容器底部に直接組み込んだポンプを採用し、冷却系の外部循環配管を削除したもので、改良型沸騰水型原子炉(ABWR)とよばれている。これは、柏崎刈羽原子力発電所などに使用されている。 従来の加圧水型原子炉に比べて原子炉圧力容器内の冷却水量を増やし、燃料集合体を19本×19本の正方格子配列に変更した改良型加圧水型原子炉(APWR)も開発され、実用に向け準備が進んでいる。	
71	d 新型炉 軽水炉にかわる新型炉開発も行われている。高速増殖炉(FBR)は、核分裂により発生する高速中性子を利用する原子炉である。燃料として用いるMOX燃料中の非核分裂性^{238}Uは、速度が速い高速中性子を吸収して核分裂性の^{239}Puに変換され、核分裂を起こす。この核分裂では、消費した^{239}Pu量よりも多くの^{239}Puを生産、すなわち増殖させることができる。実用直前の実証炉まで稼働させた例はフランスとロシアのみで、日本の「もんじゅ」は原型炉に留まっている。 高温ガス炉は、セラミックスで被覆した燃料を用い、不活性なヘリウムガスを冷却材として、黒鉛を減速材として使用することで、約1000℃の高温熱エネルギーを取り出し、45%以上の高い発電効率を得ることのできる原子炉である。 重い原子であるウランやプルトニウムの核分裂反応を利用する核分裂炉に対し、軽い原子である水素やヘリウムの核融合反応を利用してエネルギーを発生させる原子炉を核融合炉とよぶ。プラズマ状態にした重水素と三重水素の原子核を、きわめて高速(1000 km/s以上)で衝突させると、核融合反応が起こったあと、ヘリウムと中性子に転換される。融合前後の質量差分だけエネルギーとして取り出すことができる。1gの重水素・三重水素の核融合反応によるエネルギーは膨大で、タンクローリー1台分の石油(約8t)に相当するといわれている。燃料を自給自足できるという点で魅力あ	「燃料を自給自足できるという点で魅力ある発電方式」とありますが、これだけでは分かり難いかも知れませんが、「燃料の重水素は海水からとれるので、自給自足でき魅力ある発電方式」と具体的に記述するとよいと思います。

	る発電方式であるが、商業炉として利用できるまでには、まだ超えるべき課題が多い。	
71	①advanced light water reactor ②インターナルポンプとよばれている。 ③advanced boiling water reactor 出力 135.6 万 kW で燃料集合体が 872 のものが実用されている。 ④advanced pressurized water reactor ⑤fast breeder reactor mixed oxide fuel 混合酸化物燃料ともいう。 ⑦運転・保守技術の蓄積を目的とする。 ⑧high temperature gas-cooled reactor ⑨軽水炉の発電効率 30%程より高い。 ⑩nuclear fusion reactor 人工太陽とも称される。 ⑪plasma	
72	4 原子燃料サイクル 1 原子燃料サイクルの概要 原子力発電所で使用したあとの燃料（使用済燃料）には、まだ燃料として利用できるウランやプルトニウムが含まれているため、これらをリサイクルすれば、長期安定的にエネルギー資源を確保することが可能となる。また、放射性廃棄物の量も減少するため、廃棄物処分にかかる負担の軽減にもつながる。図 12 に示すように、鉱山からウランを採掘して原子力発電所でウラン燃料を燃やす工程（フロントエンド）から、使用済燃料を処理してウランやプルトニウムを再利用し、それ以外の廃棄物を地層処分する工程（バックエンド）までの一連の物質循環のことを原子燃料サイクルとよぶ。2011 年に発生した福島第一原発事故を契機に見直されたエネルギー基本計画には、全電源における原子力発電の比率を 20%程度に下げるが、資源の有効利用、安全性と核拡散抵抗性、環境適合性の観点から、原子燃料サイクルを推進することが明記されている。	
72	2 燃料製造 ウラン燃料は、ウラン鉱石を採掘後、まずイエローケーキとよばれる物質に精錬される。このイエローケーキは転換工場（図 12①）にて精製され、沸点が低くガス化しやすい六フッ化ウラン（UF ₆ ）に転換される。天然ウラン中には核分裂性物質である ²³⁵ U は 0.7%程しか含まれていないため、軽水炉の燃料として使用するには、 ²³⁵ U の濃度を 2～5%程度まで高める必要がある。そこで、天然 UF ₆ は濃縮工場（②）に運ばれ、濃縮 UF ₆ が製造される。日本の濃縮工場では、同位体の質量の違いによって分離する遠心分離法が用いられている。濃縮 UF ₆ は再転換工場（③）にて濃縮二酸化ウラン（UO ₂ ）に転換されたあと、燃料成型加工工場（④）で燃料ペレットに成形される。この燃料ペレットを被覆管中に充てんすることで燃料棒とし、最終的に燃料集合体へと加工され、原子力発電所（⑤）にて使用される。一般的に 100 万 kW 級の軽水炉では年間 20～30t の燃料が消費される。	
72	①核物質や原子力施設が軍事目的に転用されることを防止、または阻止する能力のこと。 ②ウラン化合物の一種。おもな化合物は (NH ₄) ₂ U ₂ O ₇ （重ウラン酸アンモニウム）であり、ADU（ammonium diuranate）とも称される。	
73	図 12 原子燃料サイクルの概要図	
73	3 燃料再処理 原子力発電所内で 3～4 年間燃焼された核燃料は、使用済燃料として取り出され、発電所内に設置された冷却プール中に 1 年以上保管される。これにより、放射能や崩壊熱をじゅうぶんに減衰させることができる。その後、再処理工場（図 12⑥）において再処理される。燃料を硝酸に溶解させ、溶媒抽出法にてウランとプルトニウムを分離・回収する。回収したウランとプルトニウムは MOX 燃料工場（⑧）にて UO ₂ と PuO ₂ に転換され、MOX 燃料として原子力発電所で再利用される。MOX 燃料を軽水炉で使用するのをプルサーマルとよび、MOX 燃料中の ²³⁹ Pu や ²⁴¹ Pu が核分裂できるので、ウラン資源の有効利用を可能とし、余剰プルトニウムを保有しない核不拡散性にすぐれている。再処理を行うまでの間、使用済燃料は安全に使用済燃料中間貯蔵施設（⑦）に貯蔵される。2020 年現在、日本国内で貯蔵されている使	「再処理を行うまでの間、使用済み燃料は安全に使用済み燃料中間貯蔵施設（⑦）に貯蔵される。」とありますが、原子力発電所の貯蔵プールにも貯蔵されていますので、「使用済み燃料は安全に各原子力発電所（⑤）の貯蔵プールや使用済み燃料中間貯蔵施設（⑦）に貯蔵される。」としたほうがよいと思います。

	用済燃料は18000 tである。	
73	①pluthermal	
74	4 放射性廃棄物の処理・処分 原子力発電所で発生する低レベル放射性廃棄物（LLW）は、図13に示すドラム缶の中にセメントやアスファルトなどで固形化・固定化されて、低レベル放射性廃棄物処分施設（図12⑨）に輸送され埋設されている。 使用済燃料の再処理過程では、核分裂生成物を含む高レベル放射性廃棄物（HLW）が発生する。高レベル放射性廃棄物は、液体の状態で分離し、ガラス原料と高温で溶かし合わせたのち、図14に示すステンレス鋼製の容器（キャニスタ）の中でゆっくりと固化される。これをガラス固化体とよぶ。高レベル放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物貯蔵管理施設（図10）において、40年間程度冷却・貯蔵・管理されたあと、高レベル放射性廃棄物処分施設に深地層処分されることになっている。このとき、ガラス固化体（キャニスタ含む）は、オーバーパックとよばれる金属製の容器に格納され、その周囲は天然の粘土（ベントナイト）をベースとした緩衝材で充てんされる。 このような人工的なバリア機能を組み合わせることで、放射性廃棄物を長期安定的に閉じ込めることができる。 また、原子力発電所の廃炉措置により発生する解体放射性廃棄物も放射能レベルにより分離され、安全な埋設方法が検討されている。 なお、HLWにはさまざまな放射性核種が含まれ、一般的な軽水炉では、ウラン重量の体積比でプルトニウムが約1%と核分裂生成物（FP）等が約3%を占める。また、未反応の²³⁵Uが1%程度残る。これらは重量としては少なく、それぞれの半減期に従って減衰していくものの、なかには数万年以上の半減期をもつ長寿命核種も存在しており、環境や人体への潜在的有害度はひじょうに高い。このような長寿命の放射性核種を、原子炉や加速器などを用いて半減期の短い核種や安定な核種に核変換する技術が研究・開発されつつある。	「なお、HLWにはさまざまな放射性核種が含まれ、一般的な軽水炉では、ウラン重量の体積比でプルトニウムが約1%と核分裂生成物（FP）等が約3%を占める。また、未反応の²³⁵Uが1%程度残る。」とありますが、HLWは使用済み燃料から有用なプルトニウムやウランを回収した後に残る廃棄物です（使用済み燃料には、ウラン²³⁵が約1%、プルトニウムが約1%、FPが3%含まれています）。したがって、この部分は「なお、HLWにはさまざまな放射性核種が含まれる。」とすることを提案します。
74	①low level radioactive waste ②high level radioactive waste	
74	図13 LLWを収納したドラム缶	
74	図14 HLWを収納したキャニスタ	
74	③fission products ④half-life 放射能が半減するまでの期間。 ⑤long-lived fission products 例 ⁷⁹Se 2.9×10⁵年 ⁹³Zn 1.5×10⁶年 ¹³⁵Cs 2.3×10⁶年など。 ⑥nuclear transmutation	「⁹³Zn 1.5×10⁶年」は、正しくは「⁹³Zr 1.5×10⁶年」です。
75-76	5 原子力発電の安全性 原子力発電の特有の問題は、原子燃料のもつエネルギーがひじょうに大きいこと、大量の放射性物質を内蔵していること、核分裂連鎖反応が停止したあとでも、主として核分裂生成物が安定な原子核に変換する過程において、放射線とともに崩壊熱を放出することである。 原子炉自身に何らかの原因で核分裂反応が増大し、出力が増加して水の温度が上昇したとする。このとき、燃料の温度上昇にともなって²³⁸Uによる中性子の吸収が増加するドップラー効果や、水の密度が下がって高速中性子が減速されにくくなり、²³⁵Uに吸収される熱中性子の減る現象であるボイド効果などが生じる。これらの効果により、核分裂反応が減り、安定に制御されるようになっていく。このような原子炉内特有の働きを、自己制御性という。 正常な運転時はもとより、異常事象の発生下においても放射性物質が外部へ漏れることを回避するため、設計におい	「これが軽水炉の安全設計指針である。」とありますが、ここで説明されている「止める」「冷やす」「閉じ込める」機能は、「発電用原子炉施設の基本的安全機能」に定められているものです。 「安全設計指針」の一部に相当しますが全体ではありませんので、「これが軽水炉の基本的安全機能である」とするとより正確になります。参考にしてください。

	ては深層防護という概念が導入されており、図 15 に示すような原子力発電所の安全対策が講じられている。 かりに、故障や運転ミスが発生した場合でも、原子炉を自動的に停止させる装置、いわゆる「止める」機能が働くほか、一つの重要な装置が停止した場合に、これを補完するほかの装置が作動するように設計されている。また、原子炉内の水が減少した場合、緊急に炉心を冷却することができる非常用炉心冷却装置を備えており、「冷やす」機能が働く。さらに、原子炉内に「閉じ込める」ことで、周囲への放射性物質の放出を防止できる。これが軽水炉の安全設計指針である。 原子燃料の燃焼の結果生じる放射性物質は、図 16 に示すように、ペレット・被覆管・原子炉圧力容器・原子炉格納容器・原子炉建屋といった 5 重の防壁でおおわれている。これを原子力発電所の 5 重の防壁という。 さらに、原子力発電所の安全性の確保は、たんに設計段階のみならず、製造・据付段階における品質保証や運転、さらには保守・点検などあらゆる段階において、たえず実施されなければならない。	
75	①defense in depth 多重防護ということもある。	
75	図 15 安全確保のしくみ	
76	図 16 原子力発電所の 5 重の防壁 第 5 の壁 原子炉建屋 厚さ 1 m 以上のコンクリートでできた壁で、放射性物質の放出を防ぐ。 第 4 の壁 原子炉格納容器 厚さ約 30 mm の鋼製の容器。 第 3 の壁 原子炉圧力容器 厚さ約 150 mm の低合金鋼でできた容器。 第 2 の壁 被覆管 ジルコニウム合金でできた管で、放射性物質のガスの放出を防ぐ。 第 1 の壁 ペレット ウランの酸化物を高温で焼き固めたもので、放射性物質の放出を防ぐ。	
76	これらに加え、原子力発電所の過酷事故（シビアアクシデント）にも対応できるよう、以下のような規制基準が設けられている。 ・耐震・耐津波性能の向上 ・自然事象（火山・竜巻・森林火災）に対する防護対策の強化 ・電源の信頼性向上（非常用ディーゼル発電機、回線の複線化） ・可搬型放水車や放水設備設置による炉心損傷防止策 ・フィルタベント設備による格納容器の過圧破損の防止策 深層防護という基本的な考え方は変えずに、規制基準を超えた事象が発生した場合でも適切な対策が取れるような努力が続けられている。	フィルタベント設備は、格納容器の加圧破損を防止するとともに、排気中の放射性物質を低減した上で環境中に放出する機能もあります。参考にしてください。 また、「規制基準を超えた事象が発生した場合でも」は、「設計基準を超えた事象が発生した場合でも」としたほうがよいです。
76	①水素・水蒸気・放射性ヨウ素などを放出し、容器内の圧力を下げる設備。	
77	6 原子力発電所の廃止措置 廃止を決定した原子力発電所については、安全の確保を前提に、地域社会との協調をはかりつつ廃止措置が行われる。世界的に運転期間は原則 40 年と規定されており、適切な点検や保守管理を行ったうえで許認可を受ければ、国によっては最長 60 年まで運転期間を延長できる。正常に運転を終えた原子力発電所の廃止措置においては、図 17 に示すように、第 1 段階は解体準備期間で使用済核燃料の搬出と汚染状況の調査を行う。第 2 段階でタービン建屋などの原子炉周辺設備の解体撤去を行い、第 3 段階で原子炉建屋内の格納容器などを解体撤去する。第 4 段階において建屋全体の解体撤去と廃棄物の処理処分を行って廃止措置は終了となるが、30 年を超える長期間にわたる作業となる。使用済核燃料搬出後に発生する廃棄物のほとんどは、放射性廃棄物ではないものか、人体への影響がほとんどないレベルの放射性廃棄物であり、ふつうの廃棄物と同様にリサイクルあるいは処分される。一部の放射性廃棄物は、放射性物質の種類や量に応じた方法で埋設処分される。 2018 年現在、世界で 170 基を超える原子力発電所の廃止措置が進行しており、うち 20 基は安全に廃止措置が完了して	「世界的に運転期間は原則 40 年と規定されており、適切な点検や保守管理を行ったうえで許認可を受ければ、国によっては最長 60 年まで運転期間を延長できる。」とありますが、原子炉の運転期間の制限は世界的には規定されていません。米国では 40 年を管理の目安とし、以後 20 年ごとに延長申請を行い、許可が出れば延長されます。また英仏では、30 年を管理の目安とし、以後 10 年ごとに延長申請を行い、許可が出れば延長されます。延長申請の回数にいずれの国も制限はありません。

	いる。																									
77	①decommissioning 運転を終了した原子力発電所を解体・撤去するだけでなく、廃棄物の処理処分と跡地を有効利用できるよう更地に戻す作業まで行うことを「廃止措置」という。原子炉および関連する設備を解体・撤去する「廃炉」とほぼ同義で使われる。																									
77	①日本初の商業用原子力発電所である日本原子力発電（株）東海発電所）は、約 32 年の運転後、2001 年 12 月から廃止措置を推し進めており、2030 年に終了する予定である。																									
77	図 17 原子力発電所の廃止措置																									
78	Column 原子力発電所で起こった過酷事故 国際原子力事象評価尺度（INES：International Nuclear and Radiological Event Scale）によれば、原子力発電所の過酷事故は、スリーマイル島原子力発電所（アメリカ）・チェルノブイリ原子力発電所（旧ソ連）・福島第一原子力発電所（日本）の 3 件である（図 18）。表 1 に事故の概要を示す。なお、スリーマイル島原子力発電所では、1990 年までに燃料デブリを取り出すことに成功している。チェルノブイリ原子力発電所では、放射性物質の拡散防止のために、シェルター・オブジェクトやアーチ形状の閉じ込め構造物が建設され、いまもなお廃止措置が続けられている。福島第一原子力発電所では、廃炉と環境回復に向けて産官学が連携し、「廃炉国際共同研究センター」や「技術研究組合国際廃炉研究開発機構（IRID）」などが設立され、燃料デブリの取出しや、汚染水・がれき伐採木などの放射性廃棄物の処理処分ににかかわる技術開発が進んでいる。																									
78	図 18 過酷事故が発生した原子力発電所 (a) 福島第一原子力発電所発生 (b) チェルノブイリ原子力発電所 (c) スリーマイル島原子力発電所																									
78	表 1 原子力発電所過酷事故の概要 <table><tr><td></td><td>福島第一原子力発電所</td><td>チェルノブイリ原子力発電所</td><td>スリーマイル島原子力発電所</td></tr><tr><td>発生</td><td>2011 年 3 月</td><td>1986 年 4 月</td><td>1979 年 3 月</td></tr><tr><td>INES</td><td>レベル 7（1～3 号機）</td><td>レベル 7（4 号機）</td><td>レベル 5（2 号機）</td></tr><tr><td>炉型</td><td>沸騰水型軽水炉</td><td>黒鉛減速炉</td><td>加圧水型軽水炉</td></tr><tr><td>事故後の核燃料</td><td>圧力容器を突き破り、格納容器へ落下。</td><td>格納容器がない構造のため、建屋外に大量に飛散。</td><td>圧力容器内に留まる。</td></tr><tr><td>原因・事故内容</td><td>東日本大震災における津波によってすべての電源を喪失し、非常用炉心冷却装置などの冷却系が動作できなくなるとともに、海水の取水設備もなくなった。その結果、炉心冷却ができず、放射性物質が外部に放出された。</td><td>定期検査に向けて出力低下中に行った実験が原因といわれている。爆発・火災により放射性物質が外部に放出され、また、燃料そのものが飛散した。</td><td>機器の不具合と誤操作により冷却機能の損失と空だきが起き、炉心損傷が起こった。炉心にある核燃料が周囲の被覆管や構造物と反応して溶け落ち、燃料デブリが生じた。</td></tr></table>		福島第一原子力発電所	チェルノブイリ原子力発電所	スリーマイル島原子力発電所	発生	2011 年 3 月	1986 年 4 月	1979 年 3 月	INES	レベル 7（1～3 号機）	レベル 7（4 号機）	レベル 5（2 号機）	炉型	沸騰水型軽水炉	黒鉛減速炉	加圧水型軽水炉	事故後の核燃料	圧力容器を突き破り、格納容器へ落下。	格納容器がない構造のため、建屋外に大量に飛散。	圧力容器内に留まる。	原因・事故内容	東日本大震災における津波によってすべての電源を喪失し、非常用炉心冷却装置などの冷却系が動作できなくなるとともに、海水の取水設備もなくなった。その結果、炉心冷却ができず、放射性物質が外部に放出された。	定期検査に向けて出力低下中に行った実験が原因といわれている。爆発・火災により放射性物質が外部に放出され、また、燃料そのものが飛散した。	機器の不具合と誤操作により冷却機能の損失と空だきが起き、炉心損傷が起こった。炉心にある核燃料が周囲の被覆管や構造物と反応して溶け落ち、燃料デブリが生じた。	
	福島第一原子力発電所	チェルノブイリ原子力発電所	スリーマイル島原子力発電所																							
発生	2011 年 3 月	1986 年 4 月	1979 年 3 月																							
INES	レベル 7（1～3 号機）	レベル 7（4 号機）	レベル 5（2 号機）																							
炉型	沸騰水型軽水炉	黒鉛減速炉	加圧水型軽水炉																							
事故後の核燃料	圧力容器を突き破り、格納容器へ落下。	格納容器がない構造のため、建屋外に大量に飛散。	圧力容器内に留まる。																							
原因・事故内容	東日本大震災における津波によってすべての電源を喪失し、非常用炉心冷却装置などの冷却系が動作できなくなるとともに、海水の取水設備もなくなった。その結果、炉心冷却ができず、放射性物質が外部に放出された。	定期検査に向けて出力低下中に行った実験が原因といわれている。爆発・火災により放射性物質が外部に放出され、また、燃料そのものが飛散した。	機器の不具合と誤操作により冷却機能の損失と空だきが起き、炉心損傷が起こった。炉心にある核燃料が周囲の被覆管や構造物と反応して溶け落ち、燃料デブリが生じた。																							
78	①fuel debris 原子炉の事故で、炉心にある核燃料や被覆管および構造物などが過熱・熔融して冷えて固まったもの。炉心熔融物ともいう。																									
78	節末問題 1 次の文の空欄に、該当する語句を記入せよ。																									

	日本の原子力発電所で用いられている軽水炉では、水が冷却材と減速材を兼ねている。 もし、原子炉に何らかの原因で〔 ① 〕が増大して水の温度が上昇すると、燃料の温度上昇にともなって ^{238}U による中性子の吸収が増加する〔 ② 〕効果や、水の沸騰が激しくなり〔 ③ 〕の割合が低下するため熱中性子が ^{235}U に吸収されにくくなる現象である〔 ④ 〕効果などが生じて核分裂反応が減り、安定に制御される。 2 次の（１）～（６）の材料の原子力発電における役割は何か。また、それぞれには、どんな物質が用いられているか。 （１）原子燃料 （２）減速材 （３）冷却材 （４）制御棒 （５）反射体 （６）遮へい体 3 核分裂連鎖反応と臨界状態について説明せよ。 4 図 19（a）は火力発電，（b）は原子力発電の系統図である。熱の発生部分・蒸気発生部分・蒸気使用部分・発電部分について、その相違点と類似点を述べよ。	
オーム社 742 電力技術1		
5	② 原子力資源 1966 年（昭和 41 年）、わが国で最初の商業用原子力発電所（東海発電所、1998 年営業運転停止）が運転を開始してから、2011 年（平成 23 年）で 45 年がたった。2009 年（平成 21 年）の発電電力量に占める原子力発電の割合は約 29% であり、この割合をこれから高めていこうとしていた矢先、2011 年（平成 23 年）3 月 11 日の東日本大震災で、津波などによって発生した事故により原子力発電所は廃炉や運転停止となり、将来が不透明になっている。 原子力資源は、石炭と同様に地域的に偏在のないウラン鉱石であるが、わが国は、カナダ、オーストラリア、カザフスタンなどから調達している。現在わが国で、原子力発電において主として用いられている原子炉は軽水炉であり、燃料にはウラン 235 (^{235}U) の低濃縮ウランが用いられる。この原子燃料（核燃料）が核分裂反応を起こすことでつくりだす熱で水を蒸気に変え、タービンに送って発電している。原理的には、火力発電②と同じで火力発電のボイラーと同じ役割を原子炉がしていると考えればよい。 使用済みの原子燃料を再処理し、未使用のウランや新たに生まれたプルトニウムを回収し、再び燃料として利用することを原子燃料サイクル③という。このプルトニウムをウランと一緒に混合酸化物（MOX④）燃料に加工して、軽水炉で利用する方法をプルサーマルといい、国内の原子力発電所で始まっている。	
5	③核燃料サイクルともいう。	
5	④Mixed Oxide の略。	
23	3 1 発電 原子力発電	
23	「原子の力で発電するってどういうことですか？」 「原子の核分裂で発生する熱を水蒸気にして、タービンを回して発電します。」 「熱でタービンを回すのは火力発電と同じですね！」	
23	石炭や石油のような化石燃料が燃焼すると二酸化炭素や窒素酸化物が排出されるが、原子力発電は、温室効果による地球温暖化や酸性雨などの原因となるこれらの物質を排出しない。また、燃料をいったん装荷すると 1 年間燃料を取り替える必要がないので、設備利用率が高く、電力を安定供給できる。 原子力発電は、原子燃料の核分裂反応により発生する熱エネルギーで水を高圧の水蒸気に変え、この高圧水蒸気で蒸気タービンを回し、発電機で電気エネルギーに変換している。これは火力発電で学んだ火力発電と原理的には同じで、原子力発電では火力発電のボイラを原子炉に置き換え、石炭や石油など化石燃料の代わりにウランを燃料としている。	BWR の場合、燃料の入れ替え方を変えれば 10 ヶ月から 1 年半程度の間連続運転できますので、「1 年間燃料を取り替える必要がないので」は「1 年間程度燃料を取り替える必要がないので」としたほうがよいと思います。なお、1 年ごとに発電所の運転を止めているのは、タービンの法定検が理由の一つです。
23	1 原子エネルギー ① 核分裂	「原子核は陽子と中性子で構成されており、外部から他の中性子が当たると原子核が壊れやす

	原子は原子核と電子で構成されている。原子核は陽子と中性子で構成されており，外部から他の中性子が当たると原子核が壊れやすい性質をもっている。 陽子と中性子の数の和を質量数といい，陽子の数を原子番号とよぶ。同位元素とは原子番号が同じで，質量数の異なる原子のことをいう。一般に原子は，元素記号の左上に質量数を，左下に原子番号をつけて表す。 主な原子の元素記号を表 1・1 に示す。	い性質をもっている」とありますが，すべての原子核がそのような性質を持っているわけではありませんので，次のように記載することを提案します。 「原子核は陽子と中性子で構成されており，外部から他の中性子が当たると原子核が壊れやすい性質をもつものもある。」
23	表 1・1 主な原子の元素記号	
23-24	現在の原子力発電の燃料はウラン 235 ($^{235}_{92}\text{U}$) である。天然に産するウラン鉱は，ウラン 238 ($^{238}_{92}\text{U}$) が大部分を占め，ウラン 235 ($^{235}_{92}\text{U}$) ははごくわずかである。ウラン 238 は核分裂しないが，ウラン 235 は中性子の衝突により核分裂を起こす。このときに大きなエネルギーを発生する。図 1・18 に核分裂反応の例を示す。	
24	図 1・18 核分裂反応の一例 中性子の質量数は 1 であるので，中性子 1 個の衝突により質量数の合計が 236 になり，質量数 95 と 139 の原子に分裂しこの時中性子 2 個を放出する。	つねに「質量数 95 と 139 の原子」に分裂するわけではなく，分裂にはさまざまなパターンがあります。これは一例なので，「質量数 95 と 139 の原子」の前に「例えば」を入れるとよいと思います。
24	原子力発電所では，ウラン 235 を 2～4%まで濃縮した低濃縮ウランを使い，長期間にわたり少しずつエネルギーを取り出している。 原子燃料の中で核分裂が起こると，燃料の中に放射性物質がたまるので，これが外に出ないように安全上の工夫が施されている。放射線には α 線，β 線，γ 線などがあり，放射線を出す性質のことを放射能という。 放射性物質の放射能の強さがしだいに弱くなり，半分になるまでの時間を半減期といい，最後には放射能をもたない別の物質に変わる。	
24	② 連鎖反応 ウラン 235 の原子核に，エネルギー値が低く速度の遅い中性子（熱中性子）を衝突させると，原子核は熱中性子のエネルギーを吸収して核分裂を起こし，エネルギーを放出すると同時に，新たに 2 または 3 個の中性子を放出する。したがって，新たに放出した中性子のうち，1 個以上の中性子を隣接のウラン 235 の核分裂に利用できれば，図 1・18 のように，連続的に多数のウラン 235 を核分裂させること（連鎖反応）ができるので，非常に大きなエネルギーが得られる。図に示す減速材は，核分裂によって新たに生じたエネルギー値が高く速度の速い高速中性子のエネルギーの一部を吸収させて，熱中性子を得るために用いるものである。	
25	2 原子炉 核分裂により発生したエネルギーを，熱エネルギーとして利用できるようにする装置が原子炉である。原子炉の中で熱中性子を用いて核分裂反応を起こさせるものを熱中性子炉といい，高速中性子を用いるものを高速中性子炉という。	
25	① 原子炉の構成と種類 原子炉（熱中性子炉）は，図 1・19 に示すように，原子燃料，減速材，冷却材，反射材，制御棒，遮蔽材などから構成され，それぞれの役割を分担している。	
25	原子燃料は，人工的に核分裂を起こしやすいもので，天然ウランや濃縮ウランが用いられている。	
25	減速材は，核分裂によって生じた高速中性子の速度を，熱中性子の速度まで減速するために用いる。そこで中性子のエネルギーを吸収する能力が大きい材料で，軽水，重水，黒鉛などが用いられる。	
25	冷却材は，核分裂によって炉内に発生した熱エネルギーを炉外に運び出すはたらきをしている。冷却材としては，熱	

	伝達特性が良好で、中性子の吸収が少なく、放射線に対して安定な材料がよい。軽水、重水、炭酸ガス、ヘリウムガス、液体ナトリウムなどが用いられる。	
25	反射材は、炉心から漏れる中性子を反射して炉心に戻す働きをしている。反射材としては、減速材と同じ材料で、軽水、重水、黒鉛などが用いられる。	
25	制御棒は、原子炉内の熱中性子をよく吸収する、ほう素、カドミウム、ハフニウム、またはこれらの合金などを棒状にして用いる。炉心に出し入れして、原子燃料に吸収される中性子を制御するためのものである。	
25	遮蔽材は、 γ 線や中性子などの放射線から人体を守るために設けられるもので特殊な厚いコンクリート、水、鉛などが用いられる。原子炉建屋もまた同じ理由から、厚いコンクリートの壁で放射性物質を遮蔽している。	
25	原子炉は種類や形式によって表1・2のように構成材料が異なる。	
25	図1・19 原子炉の構成要素	
25	①ウラン235の含有量を人工的に増加させたものが濃縮ウランであり、含有量が1%程度のものを微濃縮ウラン、数%程度のものを低濃縮ウラン、90%程度のものを高濃縮ウランという。	ウラン濃縮度が20%以上のものを高濃縮ウランといいます。
25	②軽水とは真水のことをいう。	
25	③軽水より比重の大きい水のことをいう。	
26	表1・2 原子炉の形式と構成材料	
26	② 発電用原子炉 発電用原子炉には、減速材や冷却材の種類によって、軽水炉、ガス冷却炉、重水炉などがある。軽水炉は、原子燃料に低濃縮ウラン、冷却材と減速材に軽水を使用し、冷却方式によって、加圧水型原子炉（PWR）と沸騰水型原子炉（BWR）に分けられる。わが国の原子力発電所のほとんどはBWRを採用している。	「わが国の原子力発電所のほとんどはBWRを採用している」とありますが、BWRとPWRがほぼ半分ずつです。したがって、「わが国の原子力発電所のほとんどは軽水炉を採用している」とすることを提案します。
26	①加圧水型原子炉 図1・20は、加圧水型原子炉の原理図である。この原子炉は炉内で軽水が沸騰しないように炉全体を加圧器によって加圧してある。原子炉内で発生した高温・高圧の熱湯を熱交換器（蒸気発生器）に送り、そこで別の系統を流れている水（冷却材）を蒸気に変えてタービンに送る方式である。したがって、放射性の物質はタービン系統に持ち込まれない。なお、冷却材に用いている軽水は、減速材も兼ねている。 原子炉の圧力容器は円筒形につくられ、圧力は14.7 MPa程度である。この原子炉は軽水を冷却材に用いるので、減速能力が大きく、熱伝達特性がよい。また炉心を小形にできるなどの特長がある。	BWRと比べてPWRの炉心は小型にできますが、圧力容器全体は大型になるという特徴もあります。
26	①Pressurized Water Reactorの略。加圧水炉ともいう。	
26	②Boiling Water Reactorの略。沸騰水炉ともいう。	
26	図1・20 加圧水型原子炉の原理	
27	加圧水型原子炉は、一次冷却水中のほう素を中性子吸収材として用い、ほう素の濃度を調節し、制御棒の挿入および引き抜き操作によって加圧水型原子炉の制御を行う。	
27	②沸騰水型原子炉 図1・21は、沸騰水型原子炉の原理図である。原子炉の中で、冷却材である軽水を沸騰させ、蒸気として取り出すものである。この蒸気をそのまま蒸気タービンに送り込むので、加圧水型のように熱交換器は必要なく、系統が簡単で熱効率もよい。また、原子炉圧力容器の耐圧力を低くすることができるので、製造費が少ない利点がある。炉内の軽水は沸騰し、蒸気と水の混合体となり、気水分離器に導かれる。ここで蒸気と水に分離され、蒸気はタービンに、水は給水と混合され炉心に戻される。 沸騰水型原子炉では、炉心のボイド（蒸気の泡）の量によって出力を調節することができる。そのボイド量の調整は原	

	子炉冷却材再循環ポンプによって行う。原子炉の出力制御は、原子炉冷却剤再循環ポンプの流量制御と制御棒の挿入および引抜き操作によって行う。	
27	図 1・21 沸騰水型原子炉の原理	
27-28	3 原子燃料の有効利用と安全性 ① 原子燃料サイクル 石炭や石油などの化石燃料は、採掘したものをそのまま燃焼できた。しかし、原子燃料は採掘したウラン鉱石を製錬して用いる点と、使用済燃料から新たな燃料を生成できる点が異なる。 鉱山で採掘したウラン鉱石から使用済燃料の再処理まで、その全過程を原子燃料サイクルという。図 1・22 は軽水炉の原子燃料サイクルである。原子燃料の取扱いには高度の安全性と技術を要するが、化石燃料と異なり二酸化炭素を排出せず、使用済み燃料を再利用できることから、各国において原子燃料サイクル技術の研究開発が進められている。しかし、使用済み燃料の保管・貯蔵、再処理や放射性廃棄物の保管・貯蔵方法などの課題も多い。	
28	図 1・22 原子燃料サイクル	
28	図 1・22 に示すように鉱山で採掘したウラン鉱石を製錬工場でウラン精鉱とよばれる状態にする。転換工場では、ウランは六ふっ化ウランの状態にして、次の濃縮工場でウラン 235 の割合を高め、濃縮ウランにする。再転換・加工工場では六ふっ化ウランを二酸化ウランの状態にし、高温で焼き固めた燃料ペレットとして他の部材とともに燃料集合体に組み上げ、原子力発電所で燃料として使用される。 原子炉で使用された燃料集合体は炉心から取り出され、使用済燃料プールで一定期間冷却された後、再処理工場へ輸送される。再処理工場では、まだ使用できる（核分裂でエネルギーを取り出せる）ウランや新しく生成されたプルトニウムと核分裂生成物などに分離する。そこで回収されたウランは、再び燃料として加工される。また、プルトニウムはウランと混合した燃料（MOX 燃料）として軽水炉で燃料として用いることができる。現在国内において軽水炉での利用が計画されている。これをプルサーマル計画という。	「現在国内において軽水炉での利用が計画されている。これをプルサーマル計画という。」とありますが、プルサーマルはすでに一部の原子力発電所で実施されています。したがって「現在国内において一部の原子力発電所で使われている。これをプルサーマルという」とすることを提案します。
28	② 原子力発電所における放射性廃棄物の処理 原子力発電所では気体、液体、固体の各放射性廃棄物について、それぞれ次のような処理を行っている。	
28	①気体廃棄物 気体状の放射性物質は減衰タンクや活性炭式希ガスホールドアップ装置によって、放射性物質を一定時間とどめておくことで放射能を十分減衰させた後、フィルタを通して排気筒から放出する。その際、放射性物質の濃度を測定し、安全を確認している。	
28	①ウランの含有率が 65～70%まで製錬された黄色の粉体でイエローケーキともいう。	
29	②液体廃棄物 液体の廃棄物で放射能のきわめて低いものはその濃度を確認したうえで放出する。それ以外の液体廃棄物はろ過・脱塩した後、プラント用補給水として再利用するか、蒸発によって濃縮される。その際に蒸発した水は再利用され、残った濃縮液は固化材によって固めて固体廃棄物として処理する。	
29	③固体廃棄物 前述の液体廃棄物の濃縮廃液は、セメントなどの固化材と混合してドラム缶に詰められる。また、ろ過・脱塩装置などから出る使用済樹脂は使用済樹脂槽に貯蔵して放射能を減衰した後、ドラム缶に詰める。紙や布などの可燃性固体廃棄物は焼却設備で焼却、不燃性雑固体廃棄物は圧縮し、減容してドラム缶詰めにする。これらのドラム缶詰めされた廃棄物は、固体廃棄物貯蔵庫に貯蔵保管される。	
29	③ 発電所周辺の濃境放射線の監視測定 発電所から出る気体廃棄物や液体廃棄物の放射能は、排気筒の放射線モニタや液体廃棄物のサンプリングによって測	

	定されているが、発電所の周辺においてもモニタリングポストやモニタリングステーションとよばれる観測局で大気中の放射線や放射性物質の濃度を監視している。また、周辺の農作物、海産物、畜産物、土壌などに含まれる放射能を測定し、発電所からの放射性物質の放出の有無を確認している。	
29	4 原子力発電の安全性 原子力発電には原子炉を用いるので、平常の運転時はもちろんのこと、万一の故障発生時でも絶対に安全である必要がある。 原子炉を設計するときの安全対策としては、次のような点があげられる。 (1) 地震対策として、活断層露頭の上に安全上重要な施設を建てない。 (2) 津波対策として、海水が敷地内や重要な施設の中に入らないよう十分高い場所に設置あるいは防潮堤などを設置する。 (3) 安全機能を持つ複数の機器や設備を同時に失うことを防ぐため、発電所の外からの電源は二つ以上のルートを確保する。 (4) 蓄電池や非常用ディーゼル発電機を用意し、発電所の外には電源車を準備する。 (5) ポンプは2台以上を準備し、可搬型ポンプ車なども配備する。	「故障発生時でも絶対に安全である必要がある。」とありますが、絶対的な安全はありませんので、「絶対に」を削除するか、「十分に安全である必要がある」とすることを提案します。
30	(6) 炉内の圧力が高くなって水が入らなくなることを防ぐため、炉内のガスを外部に放出し圧力を下げる「フィルタ・ベント」などを設置する。 (7) 水素爆発を防ぐため、水素濃度を低減する装置を設置する。 (8) 放射性物質の大気中拡散を抑えるようにするため、原子炉建屋に放水する可搬型の放水砲を整備する。 安全設計で最優先に考えなければならないことは、次のように故障の防止に重点をおき、安全性と信頼性に徹底した設計を行うようにする。	
30	① 信頼性の高い材料・機器と厳重な品質管理 建設にあたり、材料・機器構造など十分検討し、製造・据付けの段階から試験・検査をする。運転に入ってから、定期的に厳重な使用中検査をする。	
30	② 安全保護装置の多重化による異常事態防止 機器の故障や誤動作は皆無にできないものである。そこで、故障を未然に防止するため、異常事態を初期段階で検知し、警報を発したり原子炉を停止したりする。このため多重の検知装置と安全保護装置を完備する。 また、原子力発電の運転時には、冷却材の循環を常時行い、炉心の温度上昇を防止しなければならない。2011年（平成23年）3月11日に発生した東日本大震災では、大津波により原子力発電所の冷却水循環用電源設備がすべて失われ、原子炉の冷却ができなくなり炉心溶融が起こるといふ深刻な重大事故が発生した。事故の収束に至るまでに膨大な時間と経費がかかるだけでなく、放射性物質が原子力発電所の周辺地域に放出され、住民や地方自治体、農水産業をはじめ各種産業に甚大な被害を与えた。放射性物質の影響は長期間にわたるとされている。この重大事故から得られた知見を生かし、これからの原子力発電所の安全性・信頼性を確保することが、より一層強く求められている。 資源が少なく、地球温暖化対策として二酸化炭素（CO ₂ ）の削減が求められるわが国において、原子力発電は安定して大電力を供給するエネルギーとして有望視されていたが、東日本大震災以降、原子力発電の安全性を疑問視する意見も国内外に多く、エネルギー供給の重点を原子力から、次節で学習する水力、太陽光、風力、地熱などの再生可能な自然エネルギーに移していくことが検討されている。	わが国は福島第一原子力発電所の事故の反省をもとに、最近まで原発依存度を可能な限り低減するという方針を執っていましたが、2023年2月に政府は「GX（グリーントランスフォーメーション）実現に向けた基本方針」を閣議決定し、エネルギーの安定供給や脱炭素社会の実現に向けて原発を最大限活用する方向へ方針を転換しました。提言3を参考にしてください。
31	③ 原子力発電所の廃止措置 以下に沸騰水型原子炉（BWR）の廃止措置の標準工程を示す。	
31	①使用済燃料の搬出	

	使用済燃料や未使用の燃料等を再処理工場や貯蔵施設等に搬出する。搬出先において、使用済燃料等は適切に管理・処理する。	
31	②系統除染 後の解体撤去作業等を行いやすくするため、化学薬品等を使って施設の配管・容器内に残存する放射性物質を可能な限り除去する。	
31	③安全貯蔵 適切な管理のもと施設を必要に応じた期間安全に貯蔵し、放射能の減衰を待ち、後の解体撤去作業等を行いやすくする。	
31	④内部の解体 放射性物質を外部に飛散させないように、まず建屋内部の配管・容器等を解体撤去する。その後、建屋内の床や壁面等の放射性物質の除去作業を行う。	
31	⑤建屋の解体 建屋内の放射性物質を目標どおり除去したことを確認したうえで、その後は通常のビル等と同様に建屋の解体作業を行う。なお、廃棄物は、放射能のレベルにより区分し、それぞれ適切に処理・処分する。	
31	①具体的な方法については、状況に応じて事業者が決定し、原子力規制委員会が安全性を確認する。	
実教出版 754 工業環境技術		
67	2節 エネルギーの利用技術と地球温暖化対策 第1章では、地球上にはさまざまなエネルギー資源があり、わが国は、その大半を輸入に依存していることを学んだ。また前節では、化石燃料の消費が地球温暖化問題と深くかかわっていることなどを学んだ。この節では、エネルギーとその利用技術の基礎を学び、低炭素や高効率のエネルギー利用技術が温暖化対策において果たす役割についても学ぶ。	
67	1 エネルギーの供給と消費 1 日本のエネルギーバランス わたしたちは、エネルギー資源を用途に合わせて加工し、エネルギーを取り出して使っている。加工する前のものの状態を一次エネルギー、加工したあとの状態を二次エネルギーとよぶ。 図1は、わが国におけるエネルギーの供給と消費の関係を示したのである。図の左側は、供給されるエネルギー資源を表している。これらの資源は、わたしたちが利用できる状態に転換（加工）され、電力やガソリンなどとして消費されている。図の右側は、どのような部門で消費されているかを表している。	
67	①最終エネルギーともいう。電力は典型的な二次エネルギーである。	
67	図1 わが国におけるエネルギーの供給と消費の関係（2018年度）	
68	(a) エネルギー供給 エネルギー供給量が最も多いものは石油である。石油の一部は原油のまま発電に使われるが、大半はガソリンや軽油、灯油などに精製されて、自動車をはじめさまざまな用途に使われる。次いで石炭と天然ガスがほぼ同じ割合で続いている。石炭は、発電や加熱用の燃料のほか、鉄鉱石から鉄をつくるさいにも大量に使われている。天然ガスは発電のほか、都市ガスとして家庭にも供給されている。	
68	(b) エネルギーの転換 図1に示されている発電・送電による損失は、廃熱として捨てられる量であり、大きな割合を占めている。また、原油からガソリンなどの石油製品に転換するさいにも、5%程度が失われる。このように、二次エネルギーの総量は、エネルギー転換時の損失のため、一次エネルギーの総量よりも少なくなる。	
68	2 一次エネルギーの構成割合 わが国では、電力のもとになる一次エネルギーとして、石油、石炭、天然ガス、原子力、水力などが組み合わされて使われている。同じ電力についても、一次エネルギーの構成は国によって大きく異なる。図2に、おもな国における電力の一次エネルギーの構成割合を示す。カナダでは水力が、フランスでは原子力が、中国	

	やインドでは石炭が大きな割合を占めていることがわかる。ドイツやイギリスでは再生可能エネルギーが約 30%を占めている。	
68	①精製した重油で発電をするものもあるが、図 1 では省略している。	
68	②2010 年度は、石油 40.1%, 石炭 22.5%, 天然ガス 19.2%, 原子力 11.3%, 水力・地熱など 6.9%であった。2010 年度末（2011 年 3 月 11 日）に発生した東北地方太平洋沖地震と津波による福島第一原子力発電所の事故以来、原子力発電所の比率が大幅に低下し、石油と天然ガスによる火力発電の割合が増えた。その後、再生可能エネルギーも増加してきた。	図 2 を引用し、「図 2 に示すように、原子力発電所の比率が大幅に低下し、石油と天然ガスによる火力発電の割合が増えた」するとよいと思います。
68	③四捨五入の関係で、合計が 100%にならない場合がある。	
68	問 1 図 2 に示す国のうち、どれか一つの国に注目し、なぜそのような構成割合になっているか。また、資源の埋蔵量や地形などの特徴、エネルギーについての各国の政策を調べてみよ。	地政学的条件や人口、経済規模などによって各国のエネルギー政策が異なることを考えることができる良問です。
68	図 2 おもな国の発電構成の割合（国際エネルギー機関の資料をもとに作成）	何年のデータかを示すとよいと思います。
69	2 エネルギー資源の利用とエネルギー供給技術 ここでは、一次エネルギーの利用の歴史に触れながら、エネルギー資源からエネルギーを供給するための技術を学ぶ。	
69	1 化石燃料 第 1 章で学んだように、世界のエネルギーの約 80%は石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料から得られている。石炭は、18 世紀にイギリスからはじまった産業革命とともに、大量に採取・利用されるようになった。一方、石油も古くからその存在が知られていたが、利用が拡大したのは、19 世紀後半になってからである。 20 世紀は石油の時代であったといっても過言ではない。自動車や航空機の普及などとともに、石油の消費量は急速に拡大した。最近では海底からの採掘もさかんに行われている（図 3(a)）。運搬には、図 3(b)のような超大型の運搬船（タンカー）が用いられている。 天然ガスはメタン CH_4 を主成分とする可燃性のガスである。その利用拡大は、石油よりもさらに遅い時期である。この一因として、産地から利用地あるいは港などの搬出拠点まで気体のまま運べる手段がパイプラインに限定されることがある。 化石燃料は、採取、輸送、利用の技術が確立しており、安定して大量に得ることができる。しかし、産地における戦乱や自然災害、需要の急速な変化などによって、価格が不安定になる場合がある。わが国は、1973 年と 1979 年の二度の石油ショックを経験してから、火力発電のおもな燃料は石油から石炭や天然ガスに変わり、石油への依存度は下がってきた。しかし、自動車や飛行機などの交通機関の燃料の多くは、石油からつくられているものを利用している。	
69	②わが国は島国であるため、天然ガスを約 -160°C に冷やして液体にし、液化天然ガス（LNG）として運搬船（図 4）で輸入している。液化することで、体積は 600 分の 1 になる。	
69	③ヨーロッパと産地であるロシアとの間では、気体のまま運べるパイプラインが発達している。	
69	図 3 石油の採掘のようすと運搬船の例	
69	図 4 LNG 運搬船	
70	2 核燃料による原子力発電 核燃料とは、原子力発電の燃料として用いるものであり、ウラン鉱石に含まれる核分裂を起こしやすいウラン 235 (^{235}U) を濃縮したものがおもに使われている。図 5 に示すように、ウラン 235 に中性子を衝突させると、核分裂が連鎖的に起こる。そのさいに発生する熱を利用して発電するのが原子力発電である。	
70	図 5 核分裂のしくみ	分かり易い図です。
70-71	核分裂を安全に制御しながら起こさせるための装置を原子炉といい、わが国では、図 6 に示すように、原子炉の熱で冷却水を沸騰させ、蒸気に変えてタービンを回す沸騰水型原子炉（BWR）と、熱を高温高压の冷却水に一度吸収させ、そ	「再処理も行われているが、全量は処理できない」とありますが、わが国では国内の原子力発

	の熱から蒸気を発生させてタービンを回す加圧水型原子炉（PWR）が使われている。原子力発電では、少量の核燃料からけた違いに大きなエネルギーを取り出すことができる。その反面、事故が起きた場合の影響は甚大となるため、きびしい安全管理が求められる。とくに、放射性物質を扱っていることや、発電に用いたあとの燃料など放射性廃棄物を長期にわたって管理しなければならないことなどの課題がある。国内で発生した使用済み燃料棒は、原子力発電所の貯蔵プールで保管されているが、その容量は限界に近づきつつある。使用済み燃料棒から再び核燃料を取り出す再処理も行われているが、全量処理できない。フィンランドでは、とくに放射能レベルの高い廃棄物を、地下深くの安定した岩盤に閉じ込める「地層処分」に着手しているが、日本では適地の選定が難航している。	電所で発生した使用済み燃料をすべて再処理する方針としています。しかし、再処理施設の建設が遅れ、いまだに操業を開始できていないという現状があります。したがってここでは、「できない」と断言するのではなく、「使用済み燃料棒から再び核燃料を取り出す再処理も行われているが、全量を処理することは難しい。」とすることを提案します。 また、フィンランドの状況が紹介されていますが、フィンランドでは再処理を行わず、使用済み燃料をそのまま地層処分する（直接処分）こととなっています。一方わが国では、使用済み燃料を再処理し、再利用可能なウランやプルトニウムを回収した後、再利用できない高レベルの放射性廃液をガラス固化体として地層処分します。そこで、「フィンランドでは、とくに放射能レベルの高い廃棄物（使用済み燃料）を、地下深くの安定した岩盤に閉じ込める「地層処分」に着手しているが、日本では適地の選定が難航している」とし、後段のコラムでガラス固化体について補足するとよいと思います。
70	①ウラン鉱石に含まれるウランの99%以上はウラン238であり、ウラン235は約0.7%にすぎない。	
70	②ウランやプルトニウムなどの質量数の多い（重い）原子核が、複数の原子核に分裂する現象のこと。	
70	③気体や液体を羽根車に吹きつけて回転させ、動力を得る装置のこと。	
70	④これらは普通の水を冷却に使うので軽水炉とよばれる。このほか、重水炉、黒鉛炉、高速増殖炉など、形式の異なる炉がある。	
70	⑤2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震と津波によって発生した福島第一原子力発電所の事故は、1986年の旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所の事故とともに、国際的な評価尺度でレベル7（深刻な事故）とされている。	
70	図6 原子炉の構造	分かり易い図です。他の教科書でも使われるとよい。
	コラム 放射線・放射能・放射性物質と放射性廃棄物 物質を形づくる原子核に何らかのエネルギーが与えられると、不安定な状態となり、すぐに安定な状態に戻ろうとする。そのさいに発生する粒子や電磁波を放射線といい、X線、α線、β線、γ線、中性子線がある。また、放射線を出す能力を放射能、放射線を持った物質を放射性物質とよぶ。 原子力発電所の運転では、放射能を持った廃棄物（放射性廃棄物）が発生する。とくに、使用済みの核燃料は、高い放射能を持っており、安全に貯蔵できるようにするための処理を行ったうえで、一時保管されている。これをさらに安全に地層深くに埋める最終処分が計画されている。また、使用済み核燃料をもう一度核燃料として利用する技術（核燃料サイクル）の研究・開発も進められている。	「物質を形づくる原子核に何らかのエネルギーが与えられると、不安定な状態となり、すぐに安定な状態に戻ろうとする。そのさいに発生する粒子や電磁波を放射線といい、X線、α線、β線、γ線、中性子線がある。」とありますが、X線は原子核から放出される放射線ではありませんので、「物質を形づくる原子や原子核に何らかのエネルギーが与えられると・・・」とすることを提案します。

		また、前段のコメントとの関係で、ガラス固化体の話が読めるようにしておいた方が、より充実した記載になると思います。例えば以下の様に記載することを提案します。 「また、使用済み核燃料をもう一度核燃料として利用する技術（核燃料サイクル）の研究・開発も進められているが、この場合でも高い放射能を持つ廃棄物（ガラス固化体）が発生する。」
71-72	3 再生可能エネルギー (a) 太陽光と太陽熱 太陽からの入射エネルギーを直接電気に変える装置に太陽電池がある。これを使った発電システムを太陽光電池という。図 7 に、太陽電池の原理と太陽光発電の例を示す。太陽の入射光の持つ時間あたりのエネルギーは、緯度や季節によって異なるが、わが国の夏季の正午前後では、地表 1 m² あたり約 1 kW である。太陽電池はこの 10～20% を電力に変えることができる。太陽光発電は、かつては費用が高いことが課題であったが、太陽電池の生産量の増加とともに価格は低下し、発電電力量あたりの費用は、火力発電や原子力発電と同程度まで低下している。一方、太陽光を集光装置で集めて水を加熱し、水蒸気を発生させて発電する太陽熱発電システムも開発が進められている。わが国では、屋根の上などに集熱パネルや集熱管を用いた装置を設置し、風呂などへの給湯に用いる太陽熱温水器が使われている（図 8）。	
71	①p 形半導体は、結晶構造の中に正孔（電子の抜けた孔）を多くもち、n 形半導体は、自由電子を多くもった半導体である。	
71	図 7 太陽電池のしくみと太陽光発電の例	
72	図 8 太陽熱を利用した給湯システムの例	
72-73	(b) 風力 風の力を風車によって利用することは、製粉や水のくみ上げのために古くから行われてきた。風力発電は、図 9 のように、風車で発電機を回すもので、こんにち、世界各地で急速に普及している。風力発電は、風力の変動につれて発電量が変化することが欠点である。安定して強い風が吹き、また野生生物など周囲の環境に影響を与えにくい適切な場所を選ぶことがたいせつである。	
72-73	①太陽から地球に届く入射光のエネルギーは約 1.37 kW/m ² であるが、太陽光が大気層を通過するときの吸収や散乱のため、地表に届くエネルギーはこれより小さくなる。朝夕や冬季は、昼間や夏季に比べて太陽の高度が低く、通り抜ける大気層が厚くなるため、地表に届くエネルギーはさらに小さくなる。	
72	②回転によって得られるエネルギーは、風速の 3 乗と受風面積に比例する。風がもつエネルギーと、実際に取り出せるエネルギーの比（パワー係数）は、理想値で 16/27 であり、実際にはさまざまなロスのため、0.4 程度である。	
72	図 9 風力発電のしくみ	
73	(c) 水力・潮力・波力 水力発電は、ダムや水路などを利用し、高い所から落下する水や、勢いよく流れる水の力で水車を回転させ、発電機を回して電力を得る方法である。図 10 に、水力発電に用いられるダムの外観例、図 11 に、水力発電のしくみを示す。 発電時には、枯渇性資源を消費せず、大気中への汚染物質や二酸化炭素の排出がないことが、火力発電に対する水力発電の利点である。一方、ダムをつくるために河川・森林の生態系や地域社会に影響を与えることが欠点である。最近では、小さな川や水路の流れを利用したマイクロ水力発電も普及しつつある。 潮力発電と波力発電は、海水の運動をエネルギーに変換する技術である。潮力発電では、河川の河口や湾の入り口などに水路を横断する壁（堰）を築き、潮の干満で生じる水位差を利用して水力発電と同様に水車を回す。	

	波力発電には、波による海面の上下動で空気を圧縮してタービンを回すものなど、いくつかの方法がある。ごく小規模なものは実用化されており、研究・開発が進められている。	
73	①水の流れて水車を回転させて製粉などに利用することは、風車と同様古くから行われてきた。	
73	②発電出力が 100 kW 未満のものをさす。10000 kW 以下のものは、小水力発電とよばれ、1000 kW 以下のものは、「新エネルギー」に認定される。	
73	③わが国では、潮の千満差が大きな場所はないが、海外で稼働している例がある。	
73	図 10 ダムの例（黒部ダム）	
73	図 11 水力発電のしくみ	
74	(d) バイオマス バイオマスとは、「生物の量」を意味する。植物が光合成によって太陽エネルギーを炭水化物に変えてたくわえたものを、エネルギー源や原材料として利用する場合に総称して用いられることばである。図 12 に、さまざまなバイオマスの変換方法と利用形態を示す。木材などを直接燃やして熱を利用することは、人類が火を使い始めて以来、最も歴史の長いエネルギーの使い方である。このほか、微生物による発酵や熱分解によってガスや油に変換するさまざまな技術が提案・開発され、実用化されている。家畜のふん尿、生ごみ、建築物を解体して生じる廃木材など、これまで廃棄物として捨てられていたバイオマスの利用も注目されている。	
74	①木材を細かく砕き、薬品に溶かして紙を生産するさいに出るパルプ黒液は、大規模に利用されているバイオマスエネルギーの一例である（製紙業での例を p. 78 で学ぶ）。	
74	図 12 バイオマスのエネルギー利用技術の例	
74	(e) 地熱 地球の内部には膨大な熱エネルギーがたくわえられている。地表から比較的浅いところにある高温の岩盤で熱せられた水や蒸気を、発電や熱源に利用するのが地熱利用技術である。火山国であるわが国は地熱資源に恵まれており、東北地方や九州地方を中心に地熱発電所が設置されている。 図 13 に、地熱発電所の例を示す。 地熱発電所は、自然環境への影響や、温泉などほかの利用への影響が普及の障害となっており、わが国全体の発電量に占める割合は 2018 年現在約 0.2%に留まっているが、資源量としてはわが国の電力需要の 10%程度をまかなえるとされている。	
74	図 13 地熱発電所の例（八丁原地熱発電所）	

【地理歴史（地理総合）】

エネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述内容		コメント・修正文の例
帝国書院 707 高校生の地理総合		
176	写真【1】夜の地球 人工衛星が撮影した夜の地球の画像をつなぎ合わせて作成している。 資料活用 明るく見えるのは、どのような地域だろうか。	
176	5 節 資源エネルギー問題 主題 私たちは生活に欠かせない資源・エネルギーをどのように生み出し、利用していくべきだろうか。	
176	1 限りある資源・エネルギー 学習課題 資源エネルギーはどこで生産され、どこで消費されているのだろうか。地域的な偏りとこれからの対応に着目しながらみていこう。	
176	資源・エネルギーの生産と消費 鉄鉱石（→巻末）やレアメタル（→p. 115）などの鉱産資源や、石油や石炭などのエネルギー資源は、私たちの生活に欠かせないものである。これらは生産地に偏りがある一方で、欧米や日本な	

	どの先進国や、インド・中国など人口規模の大きい新興国（→p. 28）において大量に消費されている。このように、資源の生産と消費には地域による偏りがあり、地球規模で資源・エネルギーの移動が生じている。 人口増加と経済発展によって、資源・エネルギーの消費は拡大しているが、生産量と埋蔵量には限りがあり、将来の枯渇が懸念されている。特に新興国の消費が急速に拡大したことで、資源・エネルギーの国際価格が上昇し、人々の暮らしに大きな影響を与えている。また、消費国の間では、資源・エネルギーの獲得をめぐるさまざまな競争が生じている。例えば石油は、西アジア諸国が生産の大半を占めるが、20世紀初めは採掘や精製の技術を持っていなかったため、欧米の国際石油資本（石油メジャー）が技術や資金を持ち込み、独占的に開発を行った。これに対して産油国では、資源を自国で開発・利用しようという資源ナショナリズムの動きが高まり、1960年に石油輸出国機構（OPEC オペック）が結成された。（→p. 108）	
176	①化石燃料・水力・風力・ウランなど、自然界にそのままで存在するものは1次エネルギー、都市ガスやガソリンなど1次エネルギーを加工したものは2次エネルギーとよばれる。	
176	②巨大な資本をもち、石油の探査・採掘・生産から輸送・精製・販売に至るまで、石油産業の全段階に携わる国際的な石油会社のこと。	
176	図【2】原油の生産国と輸入国	
176	Key Word 国際石油資本（石油メジャー） 資源ナショナリズム 石油輸出国機構（OPEC） 石油危機（オイルショック） 省エネルギー 化石燃料 再生可能エネルギー リサイクル 3R	
177	図【3】主な資源の産出国と各国のエネルギー供給（消費量） 資料活用 資源の産出国であっても1人あたりの1次エネルギー供給量が少ない国には、どのような特徴があるのだろうか。	
177	図【4】原油価格の推移	
177	図【5】シェールガスの採掘方法の模式図 シェールガスは、地下の頁岩（シェール）という地層の隙間から採掘される天然ガスである。	
177	資源・エネルギーのこれから 資源・エネルギーをめぐる状況はますます不確実さを増している。1970年代の石油危機（オイルショック）による原油価格の高騰により、それまで急速に増加してきた石油消費の伸びは緩やかになり、天然ガスや原子力などのエネルギー源の多角化が進むとともに、省エネルギーに対する関心が高まった。 1990年代に入ると、地球温暖化（→p. 182）が問題になり、温室ガスを排出する化石燃料から、繰り返し利用でき、枯渇する心配のない自然の力をエネルギー源とする再生可能エネルギーへの転換が進められるようになった。各地に風力や地熱、太陽光の発電施設が建設され、ガソリンに代わるバイオエタノールの生産も増えている。 資源・エネルギー価格が大幅に上昇した2000年代以降は、ごみを減らすリデュース、ものを繰り返し使うリユース、再資源化するリサイクルなどの3Rの取り組みが進められ、ハイブリッドエンジンやLED照明などの省電力技術も普及した。シェールガスなど、従来の油田・ガス炭田以外から産出される新しい化石燃料の開発も活発になっている（→p. 141）。	
177	③石油・石炭・天然ガスなど、地中に堆積した生物の遺骸がもとになったエネルギーのこと。炭素含有率が多く、燃焼すると二酸化炭素が発生する。	
177	④再生可能エネルギーのなかでも、水力や風力、太陽光などの自然の力を利用するエネルギーは、発電時に二酸化炭素を排出しない。	
177	確認 図【3】を見て、エネルギー消費の多い国を五つ書きだそう。	
177	説明 新たな資源・エネルギーがどのように生み出され、どのような利用が始まっているが、説明しよう。	
178	写真【1】国内最大級のメガソーラー （岡山県、瀬戸内市、2018年）年間を通して晴れる日が多い瀬戸内は、	「その発電によって、年間を通じて一般家庭約8万

	太陽光発電に適した地域である。瀬戸内海に面した塩田跡地の約 260ha の敷地に 92 万枚の太陽光パネルが敷き詰められている。その発電によって、年間を通じて一般家庭約 8 万世帯分の消費電力を供給することができる。	世帯分の消費電力」とありますが、太陽光発電は昼間の好天時しか発電できないので、1 年中発電ができるかのような誤解を招く恐れがあります。そこで、例えば、「その発電によって、一般家庭約 8 万世帯 1 年分の消費電力」とするのがより適切と考えます。
178	2 地域で異なる資源・エネルギー問題と取り組み 学習課題 私たちは資源・エネルギー問題とどのように向き合っていけばよいのだろうか。「安全と安定」に着目しながらみていこう。	
178	日本のエネルギー問題と取り組み 資源の自給率が低い日本は、エネルギーの多様化や安定供給が長年の課題となっている。1960 年代後半に国産の石炭から西アジア産の石油への転換（エネルギー革命）が進み、エネルギー自給率は大きく低下した。また 2 度の石油危機を受けて、東南アジアの天然ガスやオーストラリアの石炭など、資源の輸入先の多角化も進められた。省エネルギー技術の開発も積極的に行われ、産業用機械や家電製品、電気自動車などにおける省エネルギー技術は世界でも高い水準にある。 2011 年の福島第一原子力発電所の事故は、日本に大きな課題を投げかけた。多くの原子力発電所が稼働できない現在、火力発電が中心となっているが、脱炭素社会の実現に向けて、化石燃料の消費を削減することも求められている（→p. 182）。また、再生可能エネルギー（→p. 177）の積極的な活用が進められ、固定価格買取制度の開始によって太陽光発電が急速に増加したが、送電網や蓄電技術の改善、不安定な買取制度の見直しが課題となっている。日本では従来、大規模な発電所を中心に、長大な送電網を整備することで、安価な電力の安定供給を図る集中型のエネルギーシステムがとられていた。しかし、東日本大震災（→p. 192）などで自然災害に対する脆弱性が明らかになり、家庭や事業所が再生可能エネルギーを小規模に発電するという分散型のエネルギーシステムが各地で導入されている。	「不安定な買取制度の見直しが課題となっている。」とありますが、「不安定な買取制度」は意味が不明確です。高額で変動する再エネ賦課金が国民の負担になることが課題なので、例えば、「国民に負担を課し変動する買取制度の見直しが課題となっている。」とするのがより適切と考えます。
178	①第二次世界大戦以降の西アジアにおける豊富な石油資源の開発、タンカーの大型化による輸送費の低下、石油化学工業による石油利用技術の発展などによって起こった。	
178	②太陽光や地熱、バイオマスなど再生可能エネルギーで発電された電気を、国が定めた価格で一定期間電気業者が買い取ることを定めた制度。	
178	図【2】日本のエネルギー資源の自給率と輸入先	
178	Key Word エネルギー革命 火力発電 脱炭素社会 再生可能エネルギー 原子力発電 水力発電 バイオエタノール	
179	写真【3】デンマーク洋上風力発電施設 （コペンハーゲン近郊，2018 年）	
179	写真【4】ガソリンスタンドで売られるバイオエタノール （ブラジル，2018 年）	
179	図【5】主な国における発電量の内訳の変化 資料活用 発電量の内訳が大きく変化した国について、その背景を考えてみよう。	
179	各国のエネルギー問題と取り組み 世界のエネルギー政策は、自然環境や経済・政治の状況によって多様である。日本の原子力発電所の事故は、EU（→p. 126）各国のエネルギー政策にも影響を与えた。ドイツは 2022 年までに国内の原子力発電所をすべて廃止することを決定し、再生可能エネルギーへの転換を加速している。一方、隣国のフランスは、原子力発電を中心にエネルギー政策を進めながら、アルプス山脈などでの水力発電や、太陽光・風力などの再生可能エネルギーの活用にも積極的に取り組んでいる。火山の多いイタリアやアイスランドでは地熱発電が盛ん（→p. 199）である。海に面した平坦な国土をもつデンマークでは、安定して強い西風が吹くため、洋上を中心とした風力発電が盛んで、年間発電量の 4 割を風力でまかなう。このように EU 各国のエネルギー政策は国ご	

	とに異なるが、EU 諸国は電力網でつながっており、供給の変動に応じて相互に電力を輸出入し合っている。 一方、流量が豊富な河川に恵まれたブラジルでは、水力発電が電力の約 6 割を占めている。1970 年代からは石油危機と砂糖価格の低迷への対策として、さとうきび（→巻末）を原料とするバイオエタノールの生産と利用が推進され、国内のガソリンスタンドで燃料として販売されている。	
179	③さとうきびやとうもろこしなど、植物（バイオ）を発酵・蒸留して生成したエタノールのこと。南北アメリカで生産が盛んである。	
179	関連する SDGs の目標 資源・エネルギー問題に関連する三つ目の目標を p.163 図【2】から選んで、番号を書き入れてみよう。	
179	確認 資源の自給率が低い日本の課題を本文から二つ書き出そう。	
179	説明 再生可能エネルギーの活用はどのような国で広まっているのか、説明しよう。	
179	節の振り返り 日本では資源・エネルギー問題に対して、どのような取り組みをしていくべきだろうか。世界の事例を参考に説明しよう。	
192	（省略）・・・この際に、福島第一原子力発電所も被災し、放射性物質の放出による被害も生じた（→p.178）。この地震による一連の災害は東日本大震災とよばれる。・・・（省略）	

【地理歴史（地理探究）】

エネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述内容		コメント・修正文の例
東京書籍 701 地理探究		
77	福島第一原子力発電所の事故 21 世紀に入って発生した、最大かつ最も深刻な日本の環境問題は、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の際の津波をきっかけに、福島第一原子力発電所で発生した、放射性物質の放出をともなう事故である。原子力発電所から放出された放射性物質によって、広範囲の地域・水域が汚染された。放射性物質の除染作業は現在も継続されているが、その解決には長い時間が必要である。	「津波をきっかけに福島第一原子力発電所で発生した放射性物質の放出を伴う事故」という記述は、事故が地震そのものではなく津波によって起こったことが分かり、正確な記述であると評価できます。
77	写真【5】 事故をおこした福島第一原子力発電所（2011 年）	
104	図【1】世界のエネルギー生産の推移（世界の統計ほか） 産業革命以降、化石燃料への依存が強まるが、需要が急速に高まったのは第二次世界大戦後である。とくに 1960 年代のエネルギー革命を経て、1980 年代にかけて石油（液体燃料）の供給が急増した。第一次石油危機以降は天然ガスの供給が急増してきた。	図中のキャプションに「電気」とありますが、電気は固体燃料、液体燃料、ガスから生産される 2 次エネルギーなので、比較の対象としてあり得ないと考えます。これは例えば、「原子力」として記載すべきものではないのかと推察します。
104	図【2】 おもな資源・エネルギーの可採年数（BP 社資料ほか） 天然ガスの可採年数はほぼ一定であり、石油は可採年数が長くなっている。石炭は、新興国での消費量が増加したため 2000 年以降に可採年数が約半分になったが、近年はもち直している。このように、新たな埋蔵が確認されたり、採掘技術が進歩したりすれば、可採年数が増えることもあるが、化石燃料が有限の枯渇性エネルギー資源であることは変わらない。	本来、年度が進むに従って減るはずの可採年数が減らないのは、新たな埋蔵が確認されたり、採掘技術が進歩したりしたことによるものであり、いつかは枯渇することが明確に記載されていることは、評価できると考えます。
104	1 エネルギーの消費に地域差があるのはなぜだろうか。世界のエネルギー需要	
104	NOTE エネルギーとエネルギー資源 エネルギーは、物理学では「物体自体が蓄えた、仕事をする能力」のことであるが、人間生活との関連では産業・運輸・消費などに必要な熱・光・動力などをさす。なお、「エネルギー資源」とは、それぞれのエネルギーの源を意	

	味する。	
104	TERM ①再生可能エネルギー 太陽光，風力，地熱，水力，バイオマスなど，永続的に利用できるエネルギー。温室効果ガスを排出せず環境負荷は小さいが，供給の安定性などの面で課題もある。	再生可能エネルギーの課題として，「発電量が不安定」，「発電コストが高い」などが挙げられていますので，「供給の安定性」は「供給量の安定性」とするのがより適切と考えます。
104	暮らしを支えるエネルギー 私たちの暮らしを支えるエネルギー資源は，非枯渇性の再生可能エネルギー資源と枯渇性エネルギー資源にわけられる。再生可能エネルギー資源には，太陽光や水力，風力，薪炭材としての森林資源などがある。ただし，森林資源はその再生能力を上回って乱伐すると激減する。一方，枯渇性エネルギー資源には，原子力燃料のウランや，石炭，石油，天然ガスなどの化石燃料がある。化石燃料は，輸送が可能で大量のエネルギーを取り出すことができるが，二酸化炭素や大気汚染物質を排出するなど環境負荷が大きく，一度利用されると再生されない有限な資源である。	「枯渇性エネルギー資源には，原子力燃料のウランや，石炭・・・は，再生されない有限な資源である。」とありますが，ウランは原子燃料に加工され，使用された後，再処理して再び燃料として利用する核燃料サイクル計画を日本は持っていますので，再生されない有限な資源との記述は正しくありません。そこで，例えば，「枯渇性エネルギー資源には，石炭・・・は，再生されない有限な資源である。」とし，新しい段落で，「この他，ウランは原子燃料として使用された後，再処理して再び燃料として利用する核燃料サイクル計画を日本は持っている。」とするのがより適切と考えます。
104-105	化石燃料への依存 産業革命までは，人類はおもに薪炭や水力，風力などの再生可能エネルギーを利用してきた。産業革命がおこり，18 世紀後半に蒸気機関が改良されると，エネルギー源として石炭が大量に利用されるようになった。 20 世紀初頭の内燃機関（エンジン）の普及や科学の発達によって，動力用や化学工業用として石油の消費が増大し，1960 年代後半には，石炭に比べて熱効率がよく輸送しやすい石油の消費量が急増するエネルギー革命がおこった。2000 年以降は，中国やインドなど，石炭を多く産出する新興国の経済発展により，石炭の消費が急増している。また，化石燃料のなかでは環境負荷が小さい天然ガスの消費ものびている。 世界のエネルギー消費は急増しており，その大半は化石燃料によっている。エネルギー資源の可採年数は新たな油田などの発見や技術革新によって今後変化する可能性があるものの，私たちの生活が枯渇性エネルギー資源に依存していることは意識する必要がある。	「私たちの生活は枯渇性エネルギー資源に依存していることは意識する必要がある。」という記述は，次世代を生きる生徒にエネルギー問題を主体的に考えさせるためのよい問い掛けになっていると評価できます。可能でしたら，現在の再生可能エネルギーは安定供給に課題があることを示すとより適切と考えます。
105	図【3】 一人あたりのエネルギー消費量とおもな国のエネルギー消費の内訳（World Energy Balances2019）	
105	エネルギー消費の地域差 世界のエネルギーの消費には著しい地域差がある。こうした地域差は，エネルギー生産の地域的な偏りとあいまって，国による地球温暖化に対する姿勢の違いや，資源ナショナリズム，海底資源をめぐる領土問題などが複雑にからみあい，国際対立の一因となっている。 一人あたりの一次エネルギーの消費量は，先進国で多く，とくにアメリカやカナダで目立って多くなっている。発展途上国では少ない傾向にあるが，中東の産油国では比較的多い。また，人口が多い中国やインドでは，一人あたりのエネルギー消費量は比較的少ないものの，急速な経済成長にともない，国全体の消費量は大きくのびている。このことは，エネルギー価格の高騰をもたらすとともに，資源の枯渇をまねく危険性を増大させている。また，消費する一次エネルギーの内訳にも，国や地域による違いがみられる。これは，エネルギー資源の分布による違いに加え，自然エネルギーや原子力の利用に対する考え方や政策の違いが反映されているためである。	エネルギー消費が地域によって相違している実態が分かり易く説明されていて，評価できる内容であると考えます。 可能でしたら，原油の中東依存度，中東までの長いシーレーン，タンカー満載の原油を半日で消費してしまうこと（つまり毎日 2 隻のタンカーが日本に来ないと我が国は立ちゆかないこと），原油の国内備蓄は約半年であることなどを示し，我が国がエネルギー資源の面で極めて脆弱であることを伝えられるとより適切と考えます。
105	演習問題 図【3】によると，フランスの年間一人あたりエネルギー消費量は中国を上回っているが，一人あたり	

	CO ₂ 排出量は中国の方がフランスよりも多い。図【3】から読みとれることと関連付けて、その理由について250字以内で説明しなさい。	
105	図【4】 エネルギーの分類	
105	TERM ②資源ナショナリズム 自国内の資源による利益を自国の経済的自立や発展に利用しようとする動き。外国資本による資源開発に不満をもつ発展途上国でみられる。 ③一次エネルギー・二次エネルギー 一次エネルギーとは、自然界に存在する変換加工されていないエネルギーで、薪・石炭・石油・天然ガスなどから得られるエネルギーや、水力・原子力・地熱・太陽光・風力などをいう。これに対し、一次エネルギーを加工・変換した電気や都市ガスなどを二次エネルギーという。	
108	図【1】 世界の一人あたりの電力消費量と発電量内訳 (Energy Statistics Yearbook)	出典が何年のものかを記載することがより適切と考えます。
108	3 電力を安定して効率的に利用するためには何が必要だろうか。電力生産	
108	演習問題 図【1】を見て、アフリカの一人あたり電力消費量が少ない理由について、60字以内で説明しなさい。	
108	図【2】 おもな発電の分類	再生可能エネルギーを比較対象に加えることがより適切と考えます。 原子力は火力と比較すると必ずしも発電効率は高くないので、代わりに「少量の燃料で大量の電力を得ることができる」とするのがより適切と考えます。
108	TERM ①核燃料サイクル 核燃料を採掘して燃料体に加工し、原子炉で使用したあと、使用済み燃料や放射性廃棄物を再生処理する一連のサイクル。使用済み燃料や放射性廃棄物の再生処理には莫大なコストがかかるうえ、安全面でのリスクが大きいので、処分場の用地確保が難しい。	「原子炉で使用したあと、使用済み燃料や放射性廃棄物を再生処理する一連のサイクル。使用済み燃料や放射性廃棄物の再生処理には莫大なコストがかかるうえ、安全面でのリスクが大きいので、処分場の用地確保が難しい。」とありますが、正確な用語を用いるとともに、再処理と廃棄物処分を明確に分けて、例えば、「原子炉で使用したあと、使用済み燃料を再処理して燃料に加工し、もう一度原子炉で使用するにより、資源の有効活用を図る一連のサイクル。再処理にはコストがかかり、安全面の対策が必要となる。また、高レベル放射性廃棄物の処分場の選定が現在進められている。」とするのがより適切と考えます。
108	国ごとに異なる電力生産 電力は、一次エネルギーに比べてあつかいやすいが、発電所や変電所、送電線網などを整備して安定的に供給していくには高い技術力とコストが必要となる。そのため電力消費量は国によって大きな差があり、発電方式も一次エネルギー資源の分布やエネルギー政策の違いを反映して国ごとに異なる。 水力発電は、水流で発電機のタービンを回すため、水量の豊富な河川に立地する。水資源が豊富なノルウェー、カナダ、ブラジルなどでは主流の発電方式である。水力は古くから利用されてきた再生可能エネルギーだが、大規模なダム開発は環境や生態系の破壊をまねきやすい。 火力発電は、世界の総発電量の約7割を占める。輸入燃料に依存する国では、燃料輸送と冷却水の得やすさから、火力発電所の多くは臨海部に立地する。燃料には石炭が使われることが多かったが、天然ガスによる発電が増えており、石油による発電の割合は、石油危機以降縮小してきた。火力発電は、二酸化炭素や大気汚染物質を排出するなど、環境負荷の点で課題が大きい。	「原子力発電は、・・・広大な敷地と大量の冷却水を必要とし」とありますが、発電量が同じなら火力発電と同程度の敷地と冷却水で十分です。また、原子力は少量の燃料で大量で安価な電力生産ができるなどの利点があるので、例えば、「原子力発電は、・・・少量の燃料で大量で安価な電力生産ができ、日本では非大都市圏の沿岸部にその多くが立地する。」とするのがより適切です。 また、「原子力発電は・・・ほかの発電方式にはない問題を抱えている。」とありますが、課題克服のための取

	原子力発電は、石油資源のとばしいフランス、韓国、日本などで、石油の代替エネルギーとして積極的に導入されてきた。広大な敷地と大量の冷却水を必要とし、日本では非大都市圏の沿岸部にその多くが立地する。原子力発電は発電時に二酸化炭素を発生させないが、核燃料サイクルをめぐる課題や事故時の放射性物質の放出といった、ほかの発電方式にはない問題を抱えている。	組が図られているので、例えば、「原子力発電は・・・ほかの発電方式にはない課題があるため、より厳しい規制基準のもとで技術開発と制度改革が進められている。」とするのがより適切と考えます。
109	図【3】スマートグリッドの概念図（経済産業省資料などをもとに作成） スマートグリッドでは、ICTを活用することによって、電力系統（発電・変電・送電・配電を統合したシステム）から消費者に向けて流れる電流だけでなく、消費者から電力系統に向けて流れる余剰電力（逆電流）をコントロールすることで、電力の需要と供給を最適化する。図において電気の流れが双方になっているのは、そのためである。	電力は需要量と供給量を常に一致させないといけないということをきちんと記述しないと、余剰電力のコントロールという意味を理解できない恐れがあります。また、需要量と供給量の不一致を招けば、大規模な停電が起こる可能性があることをきちんと明記しないと、スマートグリッドという概念自体を生徒が理解できないと考えます。例えば、北海道胆振東部地震の際の大規模停電が起こったプロセスを示すなどの工夫があればより適切と考えます。
109	効率的な電力供給をめざして 一次エネルギーから電力に転換する際には、排熱などによってエネルギーが失われ、火力発電の場合、エネルギーの約60%は無駄になる。水力発電所や原子力発電所は、大消費地から遠くに立地する傾向があり、送電時のロスも大きい。近年、こうしたエネルギーのロスを減らす取り組みがはじまっている。 コージェネレーション（熱電併給）は、工場や事業所など電力が必要な場所で発電し、排熱を給湯や冷暖房などに利用することで、エネルギー効率を高めるしくみである。また、スマートグリッドは、ICT（情報通信技術）を活用して電力の需要と供給を制御し、発送電のロスを削減するしくみである。スマートグリッドにもとづく小規模分散型の電力供給システムが備わった都市は、スマートシティ（p124 TERM）とよばれ、実現に向けた実証実験が進められている。	原子力分野で最近話題となっている小型モジュール炉（SMR）は、需要地近接立地を目指していることから、SMRに触れることができればより適切と考えます。
109	原子力発電をめぐる問題 石油危機以降、原子力発電には「脱石油」を可能にするクリーンエネルギーとの評価があった。しかし、1979年のアメリカのスリーマイル島（ペンシルバニア州）と1986年のソ連のチェルノブイリ（現在のウクライナ）で発生した重大な原発事故をきっかけに不安が増大し、原子力発電を抑制する国が増えた。2000年以降、資源価格の高騰や新たな資源ナショナリズム（NOTE）を背景に、再び原子力発電を評価する動きが出ており、発展途上国でも先進国の技術を導入した原子力発電所の建設が増加した。しかし、2011年に福島原子力発電所で重大な事故が発生し、多くの住民が避難生活を余儀なくされ、農業や漁業は壊滅的な打撃を受けた。原子力発電をめぐる議論は、経済効率の問題にとどまらず、（p77）倫理的問題にまで広がっている。	「農業や漁業は壊滅的な打撃を受けた。」とありますが、現在はほとんど回復していることから、例えば、「農業や漁業は一時的に打撃を受けた。」とするのがより適切と考えます。 「原子力発電をめぐる議論は、経済効率の問題にとどまらず、（p77）倫理的問題にまで広がっている。」とありますが、課題として多くの側面があるので、例えば、「エネルギー安全保障、安全性、環境負荷、経済効率、（p77）倫理的問題にまで広がっている。」とするのがより適切と考えます。
109	NOTE 蓄電池（二次電池） スマートグリッドやスマートシティを実現するためには、電力をためておく蓄電池（二次電池）の技術開発が不可欠である。吉野彰博士ら3人のノーベル化学賞受賞につながったリチウムイオン二次電池は、軽量で効率よく電力を蓄えられるため、携帯電話や電気自動車に広く使われている。太陽光発電や風力発電の余剰電力の蓄電には、大容量の蓄電ができるナトリウム・硫黄電池などが用いられる。	蓄電池は、「一般に容量とコストに問題がある」と追記するのがより適切と考えます。
109	①近年では、都市ガスや燃料電池を組み合わせた家庭用のコージェネレーションシステムも普及し始めている。	
109	NOTE ドイツの原子力政策 ドイツでは、原子力発電所の稼働年数を最長32年とすることで脱原発の達成をめざすことが決められたが、2010年に見直され、稼働期間が延長された。しかし、福島での事故を受けて「脱原発」の世論が再び強まり、2022年までにすべての原子力発電所を稼働停止することが決まった。	

109	NOTE 新たな資源ナショナリズム 1960年代に発展途上国を中心とした産油国で高まった資源ナショナリズム（p. 105 TERM）に対し、2000年以降、資源価格の高騰を背景に、新興国で再燃している資源ナショナリズム。ロシアは、石油や天然ガスなどのエネルギー資源を国家が管理することによって、欧米にたいする影響力を強めようとしている。中国は、先端技術産業に欠かせないレアアースを戦略的資源と位置付け、その生産や輸出を管理している。	
109	TERM ②コージェネレーション（熱電併給） 工場等の排熱を蒸気や温水として、熱源・冷暖房・給湯などに利用することで、総合エネルギー効率を高める仕組み。 ③スマートグリッド ICTの活用により電力の流れを供給・需要の両側からコントロールすることで最適化する送電網。	
112	図【3】地球の平均気温と世界の二酸化炭素排出量の推移（気象庁資料ほか） 赤の線で示された平年差の5年間平均気温が傾向的に右上がりとなっており、その上がり方が近年大きくくなっている。二酸化炭素の排出量もこの50年で大きく増加している。	
112	1 日本にとってエネルギー安全保障が重要なのはなぜだろうか。化石燃料への依存と国家間の対立	
112	写真【2】高度経済成長期の日本における大気汚染（福岡県・北九州） 重化学工業が発展した1950～60年代の北九州市の大気汚染は深刻で、空はさまざまな色の排煙に覆われていた。当時こうした排煙は経済発展を象徴するものとみなされ、「七色の煙」ともよばれた。その後、北九州は、こうした公害問題を克服し、現在は環境先進都市となっている。	
112	TERM ①石油メジャー（国際石油資本） 資本金や政治力によって油田開発や採掘、原油の生産と輸送、石油精製、そして販売までのすべての段階を垂直的に統合している、少数の巨大な石油系の複合企業体。現在では、アメリカや西ヨーロッパだけではなく、西アジア諸国やロシアなどの新興の産油国においても、巨大石油資本が存在する。	
112	化石燃料の消費と環境問題 産業革命以降、人類は化石燃料を大量に消費して経済を発展させ、生活を向上させてきた。しかし、化石燃料は量に限りがある枯渇性エネルギー資源であるため、シェールオイルやシェールガスのような新しい資源が開発されたとしても、いつかは枯渇する。 また、化石燃料の大量消費は環境問題とも関連している。大気中の二酸化炭素やメタンなどは「温室効果ガス」（p. 68 TERM）とよばれ、その濃度の増大は地球温暖化の一因とみられている。産業革命以降、化石燃料の消費が増大するにつれて、大気中への二酸化炭素の排出量が増加した。それによっても大気中の温度が上昇し、過去100年間に地球の平均気温は0.5℃程度上昇した。また、化石燃料の燃焼によっても発生する硫酸化合物や窒素化合物は、光化学スモッグなどの大気汚染や酸性雨などの問題を引き起こしている。	
112 - 113	国際政治に揺れる石油 1950年代までは、アメリカや西ヨーロッパに本社を置く石油メジャー（国際石油資本）が西アジアで油田を開発し、石油の生産と流通を支配していた。 これに対して、発展途上国を中心とした産油国では、国内の資源が生み出す利益を自国の経済的目的自立や発展に利用しようとする資源ナショナリズム（p. 105 TERM）がしだいに高まった。1960年、産油国はメジャーの支配に対抗して、資源カルテルであるOPEC（石油輸出国機構）を結成した。OPECは、原油価格と産油量の決定権を握り、原油価格を引き上げて石油危機（p. 106 TERM）（オイルショック）を生じさせた。また、産油国の間では、石油メジャーの企業を国有化するなど、生産の主導権を確立する動きが強まった。 産油国側のこのような動きに対し、先進国側は、省エネルギー化を進め、石炭や天然ガス、原子力などの石油にかわる代替エネルギーの利用を増やすとともに、OPEC加盟国以外のメキシコや、ヨーロッパの北海などの油田を開発して対抗した。その結果、1980年代後半以降、イラクのクウェート侵攻と湾岸戦争の時期を除き、一時的に石油の世界的な需給が緩和され、原油価格も比較的安定した。	

	しかし、1990 年代後半以降、イラク戦争などの西アジアをめぐる紛争、石油・天然ガスを戦略的な輸出品とするロシアの動向、「世界の工場」と化した中国の石油需要の急増と資源戦略、さらにインドなどのアジアの新興国における需要の急増などにより、再び原油価格が高騰した。加えて、石油などのエネルギー資源が投機の対象となり、価格のさらなる高騰が問題となった。そのため、世界の多くの国々では、「エネルギー安全保障」が最重要課題の一つとなっている。	
113	図【3】世界の地域別原油生産量の推移（石油・天然ガス開発資料ほか） 1 バレルは約 159 リットル。	
113	図【4】原油価格の推移（U.S. Energy Information Administration ほか） 2000 年代には、石油に対する需要の増加に加え、原油に対して投機的な資金が市場に流れ込んだため、原油価格が高騰した。しかし 2008 年には、リーマンショックとよばれるグローバルな金融危機が発生すると、原油価格は世界的な需要の減少を反映して急落した。原油価格は短期間のうちに回復し、高止まりとなっていたが、2013 年ごろのシェール革命（p. 107 TERM）によってアメリカやカナダで非在来型化石燃料の生産が急増すると、原油価格は急落した。	
113	演習問題 図【3】【4】を見て、1970 年代から 1980 年代に原油の生産と消費をめぐる動向について、150 字以内で説明しなさい。	
113	写真【5】北海油田（ノルウェー沖、2012 年） 北海にある油田・ガス田の総称。第一次石油危機を契機に開発に弾みがついた。北海は、イギリス、ノルウェー、デンマーク、ドイツ、オランダそれぞれの経済水域にまたがるが、油田・ガス田の大半はイギリスとノルウェーの経済水域の境界付近にある。	
113	TERM ②エネルギー安全保障 国民生活、経済、社会活動、国防などに必要な量のエネルギーを、負担可能な価格で安定的に確保すること。エネルギーをめぐる課題は生産国と輸送ルート上にある国々それぞれの地理的条件や経済発展の度合いなどにより、国ごとに異なる。	
114	図【1】ヨーロッパ主要国と日本における再生可能エネルギー比率（IEA 資料） 再生可能エネルギーの普及が著しいヨーロッパのなかでも、デンマーク、ポルトガル、スペイン、ドイツなどでその比率が高い。	
114	図【2】小水力発電の例（岡山県津山市、2018 年） 小水力発電による電力で電気自動車（EV）の充電を行う電力の「地産地消」の例。	
114	2 再生可能エネルギーの普及を妨げているものは何だろうか。化石燃料から再生可能エネルギーへ	
114	図【3】世界の太陽光発電・風力発電・地熱発電における発電量の国別割合（Renewable energy statistics 2019）	
114	TERM ①バイオマスエネルギー 生物を起源とする有機物から得られるエネルギー。薪や木炭、間伐材といった木質バイオマスや、家畜の糞尿などの廃棄物のほか、サトウキビやトウモロコシから工業的につくられるバイオエタノールなどがある。植物由来のバイオマスの場合、燃焼によって排出される二酸化炭素の量と、植物が大気中から吸収した二酸化炭素の量は同じであるとみなせることから、カーボンニュートラル（大気中の二酸化炭素の増減に対して中立的）なエネルギーといわれる。	
114	期待される再生可能エネルギー エネルギー資源を安定的に確保し、持続可能な社会の発展を続けていくためには、国際紛争の火種ともなり、地球環境への負担が大きい化石燃料への過度な依存から脱却する必要がある。非枯渇性で地球環境への負担の少ない再生可能エネルギー（p. 104）の活用を拡大していくことは世界的な課題であり、水力、バイオマス、太陽光、太陽熱、風力、地熱、波力、潮汐などの再生可能エネルギーの開発と利用が進みつつある。 水力発電では、大きな環境負荷をとまなうダム開発にかわり、農業用水路に発電用の水車を設けるなど、小規模で分散的な発電施設の活用が注目されている。太陽光発電は、小規模で分散的な発電が可能であり、一般家庭にも広く普及している。年間を通じて偏西風を安定的に利用できる北海沿岸のドイツやデンマークでは風力発電がさかんである。変動帯に位置し火山が多く分布する国々では、地熱発電が実用化されている。また、森林資源が豊かな	

	地域では、間伐材などの木質バイオマスを熱源や発電に利用する方法が開発され、普及しつつある。	
114- 115	エネルギーの有効利用 先進国では、二度の石油危機をきっかけに、省エネルギーが推進されてきた。熱効率のよい機器の開発や、発電などで生じる蒸気や熱を回収してエネルギーに利用するコージェネレーション（p.109 TERM）などの技術革新によって、この流れをさらに推進する必要がある。また、大規模な発電装置により電力を集中して供給する形から、小規模な発電に分散して供給するシステムへの転換により、エネルギーの「地産地消」が進むことも期待されている。再利用や再生利用が難しい廃棄物については、焼却する際の熱を、熱源や発電のエネルギーとして利用する熱回収によって、エネルギーを有効に活用する方法が模索されている。	
115	再生可能エネルギーをめぐる課題 再生可能エネルギーの利用の拡大には課題も少なくない。自然エネルギーを経済的に利用できるのは、日照、風力、地熱、波力、潮汐などの条件がめぐまれている場所に限られる。そのため、再生可能エネルギーだけで電力を安定的に供給することは難しく、多くの国では化石燃料や原子力による発電が、常に一定量の発電を行うベース電力の役割を担っている。また、風力発電や太陽光発電の装置が景観や環境にあたえる影響や、地熱発電所の建設が温泉を枯渇させる可能性など、再生可能エネルギーの利用にともなう悪影響が懸念されることもある。 また、バイオエタノールの需要拡大にともなうトウモロコシの価格高騰により、食料や飼料としての利用との競合が生じることや、燃料用作物への農地転用が進むことがほかの作物や食料生産の動向に影響をおよぼすことも懸念されている。 現在得られる再生可能エネルギーは、化石燃料に比べて一般に生産コストが高く、大量の電力を安定的に得ることが難しいため、多くの国では一次エネルギーに占める再生可能エネルギーの割合は小さい。価格面の不利を克服し、普及を進めるためには、再生可能エネルギーを低コストで利用できる技術の開発を進める一方、政策面での後押しとともにエネルギーを利用する私たちの意識改革が不可欠である。	「再生可能エネルギーを巡る課題」とタイトルを付け、その問題を明確に記述している点は評価できると考えます。メリットとデメリットを考えながら、これからのエネルギーをどのようにしていけばよいかを主体的に考えるために必要な記述である。また、同様の理由で、バイオエタノールの需要拡大に伴うトウモロコシ価格の高騰に触れている点は、評価できると考えます。 ただし、重要な課題として、再生可能エネルギーの開発による環境破壊についても触れるとより適切と考えます。
115	図【5】 トウモロコシ価格とバイオエタノールの生産量の変動（IMF 資料ほか）	
115	図【6】 バイオマスエネルギーの分類 バイオマスエネルギーは、化石燃料にかわるエネルギーとして期待されている。	
115	①ブラジルやアメリカでは、バイオエタノールのおもな原料であるトウモロコシやサトウキビが作付けが急速に拡大している。（p114 TERM）	
115	TERM ② ベース電力 電力需要は季節や時間帯によって大きく変動する。ベース電力は、昼夜や季節を問わずに供給される電力であり、長期にわたって稼働し、発電単価が安く、安定した電力供給が見こめる石炭火力発電や原子力発電が適している。	デメリットに偏りがちな原子力発電のメリットを適切に記載していることは評価できると考えます。
116	図【1】 日本のおもな鉱産資源と石油備蓄基地（経済産業省資料）	
116	図【2】 日本の資源輸入相手国と自給率（日本国勢図会ほか）	
116	3 日本の資源自給率を高めるために必要なことは何だろうか。日本の資源・エネルギー問題	
116	①1970年代の二度の石油危機は、原油価格の高騰と供給の不安定化による世界経済の混乱をもたらし、日本ではこれを教訓として石油備蓄制度がつくられた。	
116	NOTE 再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度 再生可能エネルギーの普及に向けた取り組みが国際的に進むなか、日本では、電気事業者が再生可能エネルギーによる電力を固定価格で買い取ることを義務づける法律が2012年に施行された。再生可能エネルギーによる電力が確実に買い取られることから、一般家庭に太陽光発電が普及しただけでなく、多くの企業が太陽光発電事業に参入した。その結果、発電量に占める自然エネルギーの割合が高まった反面、買い取りのコストが上乗せされて電力価格がかなり上昇した。そのため、制度が見直され、2000 kW	

	以上の大規模な太陽光発電事業者については、2017 年度以降は固定価格での買い取りではなく、入札制に移行した。	
116	高い輸入依存度 現在の日本の資源自給率は、石灰石などを除くと、きわめて低い水準にある。世界各地で大規模な鉱山資源開発が進んだ結果、採掘効果に劣る日本国内の鉱山は価格競争を失い、ほとんどが閉山に追いやられた。石炭の埋蔵量は、北海道や九州を中心に比較的豊富であるが、エネルギー革命（p.115 TERM）の過程で、石炭の質が劣る炭鉱や採掘コストの高い炭鉱からつぎつぎと閉鎖された。原油や天然ガスの埋蔵量はもともととぼしく、ほぼ全量を輸入に依存している。石油の代替エネルギーとして期待された原子力発電は、東日本大震災（2011 年）以前はベース電力として発電量の約 3 割を分担していた。 ただし、資源・エネルギーの輸入依存の高さが、省資源・省エネルギーの技術開発をうながし、日本の家電や自動車産業の国際的な競争の強化につながってきた側面もある。 資源獲得競争の激化や資源ナショナリズム（p.105 TERM）の高まり、揺れ動く国際政治のなかで、資源・エネルギーをいかに安定的に確保するかが、これからの日本の大きな課題である。	
116-117	資源自給率の向上をめざして エネルギー自給率を向上させる一方で、温室ガスの削減を進めるためには、再生可能エネルギーの利用推進が必要となる。日本では東日本大震災以降多くの原子力発電所が稼働を停止しているため、その必要性はとくに大きいといえる。再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度（NOTE）は、日本において太陽光発電が急速に普及するきっかけとなった。また変動帯に位置する日本では、従来開発が進んでこなかった地熱発電への期待も大きい。さらに、森林資源が豊富な日本では、木質バイオマスの利用も有望である。再生可能エネルギーによって小規模分散型のエネルギー供給が確立すれば、ロスの少ない効率的なエネルギー利用が可能になる。 東北地方の高原に位置し、畜産と林業が主要産業である岩手県葛巻町は、エネルギーの「地産地消」の先進地である。牧場には風力発電の風車が設置され、畜産バイオマスから得たバイオガスは、発電用や熱源として使われる。また、間伐材などの木質バイオマスは、熱を加えてガス化して発電に利用されるほか、ペレット状に加工されてボイラーやストーブの燃料になる。こうした小規模分散型のエネルギー利用システムの導入に向けた実証実験は、都市においても進んでいる。	「東日本大震災以降多くの原子力発電所が稼働を停止しているため、」とありますが、新しい規制基準への適合性審査に関連して停止しているの、例えば、「東日本大震災以降多くの原子力発電所が新規規制基準への適合性審査のため稼働を停止しているため、」とするのがより適切と考えます。 2023 年 2 月に閣議決定された「GX 実現に向けた基本方針」にもあるように、自給率の向上のためには原子力の活用が不可欠としています。提言 3 を参考にしてください。
117	コラム 勿来発電所のあゆみ 福島県いわき市にある勿来発電所のあゆみは、日本のエネルギー利用の歴史をなぞっており興味深い。 勿来発電所は、常磐炭田の石炭を活用する目的で設置された原料立地の発電所であった。最も多い時期には、常磐炭田の出炭量の 60%をこの発電所が使用していた。 常磐地区の主要な炭鉱が 1970 年代に閉山すると、不足する燃料を重油で補うために設備の改善や新設が行われた。ところが、まもなくオイルショックが発生する。高コストとなった重油にかわり、1973 年から北海道の石炭の導入がはじまり、しばらくはおもな燃料として使われたが、炭鉱がつぎつぎと閉山されたことにより今ではほとんど使われていない。海外からの輸入炭は 1982 年に使用が開始され、2000 年ごろには燃料のほとんどは輸入炭となった。2011 年からはバイオマス燃料である木質バイオマス燃料である木質ペレットを石炭に混ぜている。	
117	写真【3】 勿来発電所（福島県いわき市、2016 年）	
117	新たな資源の開発 「都市鉱山」（p.111 TERM）という言葉が表すように、不要となった工業製品には、さまざまな資源がふくまれている。日本の「都市鉱山」には、世界の金の埋蔵量の 16%、銀の埋蔵量の 23%が眠っているとされ、すでに廃棄された家電から資源を回収する事業に乗りだしている企業もある。 海底資源の探査も積極的に行われている。日本近海には、レアメタルや新たなエネルギー資源とされるメタンハイドレートなどが豊富に埋蔵されている。ただし、経済的に見合うコストで利用する技術はまだ確立されていない。	

	また、海洋資源の開発は、その利益をめぐって他国との政治対立に発展する懸念もある。	
117	演習問題 日本において、化石燃料から再生可能エネルギーへの代替を進める意義について、70字以内で説明しなさい。	
117	図【4】日本海周辺のメタンハイドレートの分布（推定）（エネルギー白書2011年版）	
117	TERM ①メタンハイドレート 低温、高圧の地中でメタンガスと水が結びついてできる氷状の物質。「燃える氷」ともよばれる。	
117	5節 確認しよう 説明してみよう（用語） 以下の用語について説明してみよう。 ・資源ナショナリズム ・再生可能エネルギー ・バイオマスエネルギー ・ベース電力	
117	整理してみよう（図式化） 地熱、太陽光、風力の各発電を積極的に取り入れている国々の地理的な特徴について、以下のような表をノートに作成し、整理してみよう。 （国名） （地理的な特徴） ・地熱発電 ・太陽光発電 ・風力発電	
117	考えてみよう（文章化） 日本の資源・エネルギーの自給効率向上のために考えられることについて、以下の語句を用いて、100字程度の文章にまとめてみよう。 ・変動帯 ・森林資源 ・海底資源 ・地産地消	
帝国書院 702 新詳地理探究		
104	図【1】 エネルギーの分類 1次エネルギーのほとんどは2次エネルギーである電力に変換して利用されている。	
104	図【2】 世界のエネルギー消費量とその内訳の推移 読み解き エネルギー消費量が急増したのはいつからで、その内訳の特徴は何だろうか。	
104	3節 エネルギー・鉱産資源 節の主題 世界のエネルギー・鉱産資源の分布には、大きな偏りがある。エネルギー・鉱産資源は、どのようにして生活や産業に利用され、生産や消費の不均衡をなくすためにどのようなことが行われているのだろうか。	
104	学習課題 図【2】のように、エネルギー資源の消費量の増加は続いている。エネルギー資源はどのように利用され、その生産と消費には、どのような不均衡があるのだろうか。	
104	写真【3】 石油を輸送するパイプライン（バーレーン）	
104	用語 ① 化石燃料 石炭・石油・天然ガスなど、地中に堆積した動植物の遺骸がもとになったエネルギーのこと。数百万年から数億年かけて変化した一種の化石であることから、こうよばれる。炭素含有量が多く、燃焼すると二酸化炭素が発生する。	

	② エネルギー革命 エネルギー消費の構成が石炭から石油へと急激に転換したこと。西アジアにおける豊富な石油資源の開発などによって 1960 年代後半に起こった。	
104	1 エネルギーの種類と利用 エネルギーの種類と資源利用の変化 人間は古くからさまざまなエネルギー資源を利用してきた。エネルギー資源は、化石燃料や水力、風力、原子力燃料のウランなどの自然界に存在する 1 次エネルギーと、電力やガソリンのように 1 次エネルギーからつくられる 2 次エネルギーに分けられる (図【1】)。 産業革命以前は、木材を用いた薪や炭、水力・風力など、主に再生可能な資源を小規模に利用するにすぎなかった。しかし 18 世紀半ばに産業革命が起こり、蒸気機関や動力機械が使われるようになると、石炭の大置消費が進んだ。20 世紀に入ると、自動車の燃料や樹脂・繊維・ゴムなどの合成原料用として石油の需要が増大した。そして 1960 年代後半には、石炭に代わって石油の消費量が急増するエネルギー革命が起こった。これは、石油が石炭に比べて熱効率が高いことに加え、流体であるため扱いやすく、大型タンカーやパイプラインで大量に輸送できることなどの利点による (写真【3】)。 世界のエネルギー消費量は年々増加を続けてきた。その中心は化石燃料であり、石油の割合が最も高いが、天然ガスの消費も増えている。2000 年以降は、価格の安さと供給の安定性により石炭の利用も緩やかに増加している (図②)。一方、水力や原子力などの非化石エネルギーの消費量は、相対的には伸びていない。	
104	Key Words 化石燃料 1 次エネルギー 2 次エネルギー エネルギー革命	
105	図【4】 1 人あたりの 1 次エネルギー供給 (消費) 量 読み解き 1 人あたりのエネルギー消費量が多い国、少ない国は、どのような国・地域だろうか。	
105	図【5】 主な国の 1 次エネルギーの生産量と供給 (消費) 量 読み解き 各国の生産量と消費量のバランスを、日本と比較しながらとらえよう。	
105	生産と消費の不均衡 写真⑥の黄色の部分は夜の明かりで、人々の活動が活発な地域が明るくみえる。この写真から、私たちが暮らす東アジアのエネルギー資源の消費状況が垣間みえる。 1 人あたりのエネルギー消費量は、北米やヨーロッパ、日本などの先進国、西アジアの産油国などで大きい。また、同じ大陸であれば、冬季が寒冷となる緯度が高い地域でより消費量が大きい (図④)。 エネルギーの生産量と消費量には、国によって大きな違いがある (図⑤)。アメリカ合衆国や中国のように生産・消費ともに多い国がある一方で、サウジアラビアやロシア、日本のように、生産と消費の差が大きい国もある。エネルギーの生産量には 1 次エネルギーの埋蔵や産出の状況が直接関わっており、それに恵まれた国で大きい。エネルギーの消費量には、人口規模や経済発展の程度が強く関わっている。また、エネルギー資源は、生産量が消費量を上回る国から消費量のほうが大きい国に輸出されることで、生産と消費の不均衡が解消される。各国のエネルギー消費量の内訳は、当該国で生産される 1 次エネルギーの種類や量、エネルギー政策により違いがある。	
105	写真【6】 人工衛星がとらえた夜の日本とその周辺 読み解き 明るくみえる、また、暗くみえるのは、どのような地域だろうか。	
105	確認 石油がエネルギー資源の中心になった理由と、エネルギーの生産と消費の不均衡が起こる理由について説明しよう。	
110	図【1】世界の電力消費量と発電量 読み解き 1 人あたりの電力消費量が多いのは、どのような国・地域だろうか。	
110	学習課題 電力生産において、主要な発電方法が図⑦のように国によって異なるのは、なぜだろうか。また、それぞれの発電方法から生じる課題は何だろうか。	
110	図【2】世界の電力生産	

110	① 1979 年にアメリカ合衆国のスリーマイル島, 1986 年にウクライナ (当時はソ連) のチェルノブイリで, 原子力発電所の事故が発生した。	
110	写真【3】 使用済み核燃料の貯蔵施設 (フランス, オランジュ近郊)	この写真は使用済み核燃料には見えません。多分, 発電所の作業で生じた放射性物質を含む廃棄物 (放射性廃棄物) を封入したドラム缶と推定されます。
110	3 電力の利用 (1) 世界の電力生産 生活産業に欠かせない電力 電力は 2 次エネルギーの代表であり, 現代の私たちの生活のあらゆる場面で利用されている。電力は, 主に火力・水力・原子力を用いて生産され, 生活や産業の高度化が進むにつれて, その需要は急速に拡大している。 世界の総発電量の 6 割 (2018 年) が火力発電によるもので, 石炭や石油, 天然ガスなどが燃料として使われている。電力の生産や消費は経済活動の規模と対応しており, 生産量では中国やアメリカ合衆国, インドなどが大きく, 1 人あたりの消費量は先進国で大きい (図【1】・【2】)。	
110	国によって異なる電力生産 各国の発電方法には, その国の自然環境やエネルギー資源の有無, エネルギー政策などが反映されているため, 発電量の内訳は国によって異なる (図【7】)。 火力発電は多くの国で発電の中心であり, 石炭資源が豊富な中国やインドでは石炭が, 産油国では石油の占める割合が高いが, 世界的には天然ガスの使用が増えている。火力発電所は立地における制約が少なく, 電力需要の大きい大都市圏に立地する傾向にある。大河川があり水資源に恵まれたブラジルやカナダでは, 水力発電が主流である。原子力発電は, 石油資源の乏しいフランスや韓国などで積極的に導入されており, 特にフランスは原子力に発電の大部分を頼っている。原子力発電所の建設には, 広大な用地や大量の冷却水を確保する必要があること, さらに安全性への配慮などから, 日本や韓国では大都市から離れた人口の少ない海岸部に立地する傾向が強い。フランスでは内陸の河川沿いに立地している (写真【8】)	「原子力発電所の建設には, 広大な用地や大量の冷却水を確保する必要があること, さらに安全性への配慮などから,」とありますが, 出力が同じなら必要な用地や冷却は火力発電所と同程度なので, 例えば, 「原子力発電所の建設には, 安全性への配慮などから,」とするのがより適切と考えます。
110	Key Words 電力 火力発電 水力発電 原子力発電 水エネルギー 原子力エネルギー	
111	写真【4】 石炭を主要燃料とした火力発電所 (中国, チャンチャコウ (張家口))	
111	写真【5】 水力発電用のイタイブダム (ブラジル・パラグアイ国境)	
111	写真【6】 内陸の河川沿いに建設された原子力発電所 (フランス, ポワティエ近郊)	
111	図【7】 主な国における発電置の内訳の変化 読み解き 1990 年と 2018 年で発電量の内訳が大きく変化した国について, その理由や背景を考えよう。	
111	発電方法から生じる課題 火力発電において燃料とする石炭や石油, 天然ガスなどの化石燃料の大消費は, 環境問題を発生させる主な原因と考えられている。化石燃料の燃焼による大気中の二酸化炭素量の増加は地球温暖化につながるおそれがあり, また, 放出された硫黄酸化物や窒素酸化物は酸性雨の主な原因になる。 一方, 水エネルギーは再生可能であるとともに, ほかの方式に比べて発電にかかる費用が安く, 二酸化炭素を排出しないという利点がある。しかしダムが建設されることで, 上流部では周辺地域の水没, 下流部では水量や排砂量の減少などが生じるほか, 流域の生態系に及ぼす影響は大きく, 環境への配慮が必要である。 また, 原子力エネルギーは二酸化炭素を直接出さないエネルギーとして脚光を浴び, 各国で原子力発電所の建設が進められた。しかし, 核燃料を使用するため, 事故の防止など安全性の確保が根本的な課題になっている。また, 年々増加する使用済み核燃料や放射性廃棄物の安全な保管・処分方法の確立と, そのための費用や場所の確保も世界的な課題として残されている (写真③)。	
111	深める	「事故後, 国内の原子力発電所の多くが稼働停止状態

	原子力をめぐる選択 2011年の東日本大震災で地震・津波被害による福島第一原子力発電所の事故が起こった日本では、事故後、国内の原子力発電所の多くが稼働停止状態となっている。そのため、不足する電力供給をどのように補うかという問題に直面している。 事故以前には、原油価格の高騰や化石燃料を使う火力発電の環境負荷の大きさなどから、原子力発電の有用性を唱える動きも広がっていた。しかし、変動帯に位置する日本では、今後も大きな自然災害が発生する可能性が高く、原子力発電の安全性を懸念する声もある。	となっている。」とありますが、停止の理由にも触れて、例えば、「事故後、より厳しい新規規制基準が定められ、国内の原子力発電所は、新規規制基準に合格するまで稼働することができないため、多くの原子力発電所が稼働停止状態となっている。」とするのがより適切と考えます。 「そのため、不足する電力供給をどのように補うかという問題に直面している」とあるのは、現実の問題を直視した望ましい記述と評価できます。
111	確認 火力発電、水力発電、原子力発電の課題を、資源量や発電方法の特徴に着目して説明しよう。	
112	写真【1】 砂漠に設置された太陽光発電施設（中国、内モンゴル自治区、グブチ砂漠）	
112	写真【2】 洋上の風力発電用風車（デンマーク、コペンハーゲン沖）	
112	写真【3】 火山地帯にある地熱発電所（ニュージーランド、ワイラケイ）	
112	図【4】 世界の主な再生可能エネルギー発電量の推移 読み解き 近年、導入が進んでいる発電方法は何だろうか。	
112	図【5】 主な国の総発電量に占める再生可能エネルギーの割合 読み解き 各国で盛んな発電方法の背景について考えよう。	
112	学習問題 図【4】・【5】のように、再生可能エネルギーの導入が各国で進んでいる。その種類やエネルギーの有効利用の方法には、どのようなものがあるのだろうか。	
112	図【6】 太陽光発電・風力発電の国別生産量	
112-113	(2) 再生可能エネルギーの利用と開発 自然の力を生かす再生可能エネルギー 1970年代の石油危機（オイルショック）をきっかけにして、各国では省エネルギーの推進とともに、再生可能エネルギーの開発も行われている（図【4】・【5】）。世界の総発電量の4分の1（2018年）を占める再生可能エネルギーには、太陽光や太陽熱、風力、地熱、水力など自然の力を利用したものや、廃棄物を燃料としてリサイクルするもの、両方の特性をもつバイオマスエネルギーなどがある。 太陽光発電は、日射量の多い地域を中心に利用が進んでいる。砂漠などの広い土地で、大規模に太陽光発電を行うメガソーラーが各国で建設されている（写真【1】）。また、太陽光発電は日射が得られれば小規模な設備でも発電ができることから、一般の家庭から事業所まで広く普及している。風力発電は、電力への変換効率が高く、設備の設置費用が年々低下していることなどから、再生可能エネルギーのなかでは最も利用が進んでいる。デンマークなど、偏西風が利用できる西ヨーロッパで普及しているほか（写真【2】）、最近では中国やアメリカ合衆国での生産量が増えている（図【6】）。地熱発電は、地下にある高温高压の熱水や蒸気を利用して発電を行うものである。火山国である日本やニュージーランドにとって、地熱は重要な資源となっている（写真【3】）。再生可能エネルギーの多くは、二酸化炭素や汚染物質の排出がほとんどなく、環境への負荷を減らせるが、発電費用や供給の安定性などに課題がある。従来のエネルギーと組み合わせつつ、その利用を拡大する取り組みが各地でみられる。	「再生可能エネルギーの多くは、二酸化炭素や汚染物質の排出がほとんどなく、環境への負荷を減らせるが、発電費用や供給の安定性などに課題がある。従来のエネルギーと組み合わせつつ、その利用を拡大する取り組みが各地でみられる。」とあるのは、バランスがとれた記述だと評価できます。
113	深める バイオ燃料の課題 近年、石油の代替エネルギーの一つとしてバイオ燃料が注目されている。バイオ燃料とは、生物資源（バイオマス）を発酵・蒸留して生成されるバイオエタノールなどのアルコール燃料のことである。原料はでんぷんや糖分の多い作物で、植物であるため再生可能であり、理論上は無尽蔵の資源といえる。また、植物に含まれる炭素は、本	

	来大気中から取り込まれたものであるため、燃焼させても大気中の二酸化炭素量が増加しないという利点があり、特に自動車用燃料としての利用が実用化されている。 図⑦のように、バイオ燃料はアメリカ合衆国とブラジルで世界の生産量のほとんどを占めており、アメリカ合衆国ではとうもろこし、ブラジルではさとうきびが主に原料として利用されている。ブラジルでは、写真⑧のようにバイオエタノールはガソリンよりも価格が安く、ガソリンでもエタノールで走る自動車（フレックス燃料車）が普及している。また、アメリカ合衆国では、バイオエタノールを混ぜたガソリンが販売されている。 バイオ燃料の原料であるとうもろこしやさとうきびは、もともと食料用や飼料用に栽培されてきたため、バイオ燃料の増産は、食料や飼料の需給バランス・価格に大きな影響を与える。また、ほかの作物を栽培していた農地が燃料用作物に転換される可能性もあり、各種農産物生産や食品工業などに影響が及ぶ懸念もある。	
113	Key Words 再生可能エネルギー バイオマスエネルギー 太陽光発電 風力発電 地熱発電 リサイクルエネルギー コージェネレーションシステム 代替エネルギー バイオ燃料 バイオマス	
113	図【7】 世界のバイオ燃料生産量＊の推移 ＊ガソリンに混合されるバイオエタノールなどのバイオ燃料の総量	
113	写真【8】 バイオエタノールが販売されているガソリンスタンド（ブラジル、サンパウロ、2018年）	
113	近年、石油の代替エネルギーの一つとしてバイオ燃料が注目されている。バイオ燃料とは、生物資源（バイオマス）を発酵・蒸留して生成されるバイオエタノールなどのアルコール燃料のことである。原料はでんぷんや糖分の多い作物で、植物であるため再生可能であり、理論上は無尽蔵の資源といえる。また、植物に含まれる炭素は、本来大気中から取り込まれたものであるため、燃焼させても大気中の二酸化炭素量が増加しないという利点があり、特に自動車用燃料としての利用が実用化されている。 図【7】のように、バイオ燃料はアメリカ合衆国とブラジルで世界の生産量のほとんどを占めており、アメリカ合衆国ではとうもろこし、ブラジルではさとうきびが主に原料として利用されている。ブラジルでは、写真【8】のようにバイオエタノールはガソリンよりも価格が安く、ガソリンでもエタノールで走る自動車（フレックス燃料車）が普及している。また、アメリカ合衆国では、バイオエタノールを混ぜたガソリンが販売されている。 バイオ燃料の原料であるとうもろこしやさとうきびは、もともと食料用や飼料用に栽培されてきたため、バイオ燃料の増産は、食料や飼料の需給バランス・価格に大きな影響を与える。また、ほかの作物を栽培していた農地が燃料用作物に転換される可能性もあり、各種農産物生産や食品工業などに影響が及ぶ懸念もある。	「バイオ燃料の原料であるとうもろこしやさとうきびは、もともと食料用や飼料用に栽培されてきたため、バイオ燃料の増産は、食料や飼料の需給バランス・価格に大きな影響を与える。また、ほかの作物を栽培していた農地が燃料用作物に転換される可能性もあり、各種農産物生産や食品工業などに影響が及ぶ懸念もある。」と、バイオ燃料のデメリットをきちんと記述しており、バランスがとれた記述と評価できます。
113	エネルギーロスを減らす取り組み リサイクルエネルギーはごみを焼却する際の熱を利用して発電したり、廃プラスチックなどを溶かし燃料として利用したりするもので、廃棄物を減らす効果も期待されている。また、発電所で電力を生み出した際に発生する廃熱を給湯や冷暖房などに利用するコージェネレーションシステム（熱電併給システム）の開発と利用も、各地で進められている。従来の大規模発電では燃料が本来もっているエネルギーの約60%が失われていたが、コージェネレーションシステムではエネルギーの損失を20～25%に抑え、エネルギーロスを減らすことができる。	
	用語 ①バイオマスエネルギー 再生可能エネルギーの一種で、生物に由来するエネルギーのこと。さとうきびやとうもろこし、ひまわりなどの植物から得られるバイオエタノール、家畜の糞尿や食品廃棄物などから得られるメタンガスを主成分とするバイオガスなどがある。	
113	①電力の出力が1メガワット（1 MW = 1000 kW）以上の大規模な太陽光発電のことを、メガソーラーという。	
113	確認 火力発電や原子力発電と比較した太陽光発電・風力発電・地熱発電の特徴と、各国での導入状況について説明しよう。	

116	図【1】 炭素の循環と炭素収支 読み解き 二酸化炭素として大気中へ排出される炭素量と、大気中から陸域・海洋に吸収される炭素量の違いに注目しよう。	
116	図【2】 世界の二酸化炭素排出量の推移 読み解き 発展途上国計に着目しよう。	
116	4 節 資源・エネルギー問題 節の主題 これまでの資源・エネルギー問題は、限りある資源をどのように利用するかという考えであった。今後、資源・エネルギー問題を解決し、持続可能な社会を実現するためには、どのような考え方が必要なのだろうか。	
116	学習課題 図【2】のように、二酸化炭素排出量は増加している。資源・エネルギーの利用方法を見直し、持続可能な社会を目指すには、どうすればよいのだろうか。	持続可能な社会を目指すにはどうすればよいかを生徒に考えさせるのは良い取り組みだと評価できます。
116	図【3】 主な資源の可採年数 可採年数は確認埋蔵量を年間生産量で割って算出するため、鉱山の発見や生産量の変動で変化する。	
116	図【4】 電源別の二酸化炭素排出量	
116	1 資源・エネルギーをめぐる課題 限りある地球の資源 地球上の資源の埋蔵量には限りがあり、人間が無限に採掘できるものではない。主な資源の可採年数鉱をみると（図【3】）、人間の寿命より短いものも存在し、このまま採掘が進めば、近い将来、資源の枯渇に直面する可能性がある。新しい鉱山の開発も進められているが、海底や深い地層帯に鉱区を求めざるをえなくなっており、採掘費用や技術面での課題が増している。	
116	世界的に高まる脱炭素化の機運 先進国では、産業革命以降、大量生産・大量消費・大量廃棄の生活様式が広まり、それによって経済や産業が発展してきた。その結果、エネルギー・鉱産資源の浪費や枯渇、地球規模での環境問題の深刻化などが生じ、地球システムに大きな影響を与えることになった。特に化石燃料の大量消費は、二酸化炭素など、地球温暖化の原因と考えられる大気中の温室効果ガス増加の原因となっている（図①）。二酸化炭素の排出削減をめぐるのは、これまで排出を続け発展してきた先進国と、これから発展する権利を主張し、排出削減に前向きではない発展途上国とで足並みをそろえることが課題となっている。ヨーロッパ諸国や中国などで電気自動車の導入に力が入れているように、化石燃料の使用を抑制し、環境になるべく負荷がかからない資源の利用や発電方法の普及などを目指す脱炭素化に注目が集まっている。化石燃料の代表である石油は近代工業に不可欠な原料であるため、その利用の削減は容易ではないが、世界各国が取り組むべき課題となっている。	
116	Key Words 脱炭素 循環型社会 リデュース リユース リサイクル 静脈産業	
117	深める 食品トレーにみる循環型リサイクル 広島県福山市に本社を置くF社は、使用済み食品トレーを新しい食品トレーに生まれ変わらせる循環型リサイクルシステムを世界で最初に構築した企業として知られる。このシステムは、消費者が使用済みの食品トレーをスーパーマーケットに設置された回収用ボックスに持ち込むことから始まる。回収された食品トレーは選別工程で異物などが除去された後に、洗浄・破砕されペレットに加工される。このペレットを原料として食品トレーに再生され、再びスーパーマーケットなどに出荷される。 同社によれば、2020年12月現在、国内の9800拠点から回収を行っているが、トレーの回収率はまだ30%に過ぎず、消費者のさらなる協力が求められる。	
117	写真【5】 F社のリサイクル工場の食品トレー選別ライン（広島県、福山市）	
117	図【6】 循環型社会のしくみ 廃棄物の発生を抑え、循環的に再使用と再生利用を行うことで資源の消費を抑制することを目指す。	
117	図【7】 日本のプラスチックごみの排出量と有効性の割合 読み解き 焼却されるプラスチックごみに着目しよう。	

	う。	
117	持続可能な循環型社会の必要性 私たちは、大量生産・大量消費・大量廃棄の生活様式を見直し、持続可能な社会の実現のため、循環型社会の構築を加速化させる必要に迫られている。 循環型社会とは、図【6】のようにリデュース（廃棄物の発生抑制）、リユース（再使用）、リサイクル（再生利用）の3Rに取り組んで、資源の循環的利用を行う社会のことである。通常の生産や流通を担う産業を動脈産業とすれば、リユースやリサイクルに関わる産業は静脈産業とよばれ、廃棄物などを回収し適切に処理して動脈に戻し、資源として循環させる役割をもっている（写真【6】）。動脈産業に比べると静脈産業の市場や企業の規模は小さいが、循環型社会の実現を支える基盤として、その一層の発展が期待される。また、動脈産業側にも、製品の設計段階から再利用可能な素材を選んだり、デポジット制度などを普及させたりして、製品のリユースやリサイクルを促進する取り組みが求められている。	
117	Webの活用 日本の「容器包装リサイクル法」について調べよう。	
117	①使い捨て容器などの回収を促すために、製品を販売する際に一定の預り金（デポジット）を上乗せし、消費者が使用済み容器を返却する際に預り金を返却する制度のこと	
117	確認 これまでの生活様式と、持続可能な循環型社会の違いについて、「3R」の語句を用いて説明しよう。	
118	図【1】 日本の主な鉱産資源と石油備蓄基地	
118	図【2】 日本の資源輸入相手国と自給率	
118	学習課題 図【2】のように、日本は資源を輸入に依存してきた。資源・エネルギー問題の解決に向けて、どのような取り組みをすればよいのだろうか。	
118	図【3】 日本の1次エネルギー供給の推移 読み解き p.104 図【2】を参照して、エネルギー革命と二度の石油危機が起こった年代に着目しよう。また、2011年以降にみられる変化についても注目しよう。	
118	2 日本の資源・エネルギー問題 輸入に依存した国内の供給 日本は国土面積が小さく、鉱産資源の埋蔵量は多くはないが、分布する資源の種類は多様であり、資源の博物館とよばれることもある（図【1】）。かつてはそうした鉱産資源の採掘が各地で進められたが、現在では一部を除いて枯渇するか、採掘費用に見合った利益を得られないため、ほとんどの鉱山が閉山に至った。 石炭は、原油に比べれば埋蔵量が多く、第二次世界大戦時までは自給されていた。しかし、炭田の規模が小さく採掘可能な層も深いため、安価な輸入石炭に押され、産出は1960年代をピークに減少し続けた。現在は、北海道の釧路炭田などを残すのみとなっている。原油や天然ガスも新潟県や北海道などでわずかな産出があるものの、大部分は輸入に頼っている（図【2】）。今日、自給できる主な鉱産資源は、大分県や山口県などで産出される石灰石のみである。 このような資源小国にもかかわらず、1960年代の高度経済成長期から工業国として発展を続けてきた結果、エネルギー資源や鉱産資源の消費は増加し、日本は資源の輸入大国となった。1人あたりのエネルギー消費量も世界的にみて高い水準にあり、アフリカ諸国の平均の4倍以上（2017年）にも及んでいる。	
118-119	エネルギー・鉱産資源の安定確保に向けて 資源の輸入に依存した産業と経済は、国際情勢の変化によって影響を受けやすい。例えば1970年代に起きた二度の石油危機（オイルショック）は、世界的な原油の供給不足と価格高騰をもたらした。日本国内でも、物価の高騰や社会不安による買い占めなどが起こり、経済全体が混乱した。この	

	経験を生かし、日本は石油備蓄を進める一方で（写真【6】）、代替エネルギーの開発や、省エネルギーにも力を入れてきた。近年は、身近な再生可能エネルギーを利用するエネルギーの地産地消に取り組む自治体も増えている（写真【7】）。 日本は国内で消費するエネルギー・鉱産資源を海外からの輸入に依存せざるをえないため、その安定的な確保が重要な課題となっている。資源の安定確保には、供給国の政治・軍事情勢や、鉱山権益をめぐる供給国と消費国、あるいは消費国間の駆け引きといった不確定な要素を考慮する必要がある、日本政府はエネルギー・鉱産資源の種類や供給国の多角化を図っている。	
119	深める 日本近海の海底資源の開発 資源の安定確保が課題の日本では、陸域のみならず近海での資源探査が進められている。日本近海では、原油などのエネルギー資源、金・銀・銅やレアメタルなどの鉱産資源の存在が確認されている。なかでも、天然ガスの主成分であるメタンガスを含み、「燃える氷」とよばれるメタンハイドレードの埋蔵量は世界有数とされ、将来的には有望な資源になると考えられている。現時点では、費用面や技術面での課題が大きいために商業生産には至っておらず、試掘や調査の段階にとどまっている。また、その開発が地球環境に与える影響も未知数である。今後は、メタンハイドレードの研究を進めながら、海底火山の出口付近に存在し、銅やレアメタルなどを多く含む熱水鉱床の開発など、多角的な資源開発の取り組みが求められる。	
119	写真【4】 メタンハイドレート 低温・高圧の条件下で地中のメタンガスが固体となったもので、大陸棚の縁辺や永久凍土層の下に存在する。	
119	図【5】 日本近海のメタンハイドレートと熱水鉱床の分布	
119	写真【6】 石油備蓄基地（鹿児島県、鹿児島市） 日本各地に写真のような石油の備蓄基地がつくられている。	
119	写真【7】 海岸沿いにつくられた風力発電施設（北海道、苫前町） 強風地帯の地理的条件を生かした発電が行われている。	
119	①日本の石油備蓄は、国家備蓄・民間備蓄・産油国共同備蓄で構成される。2020年4月末現在、国家備蓄が139日分、民間備蓄が97日分、産油国共同備蓄が5日分となっている。液化石油ガス（LPG）についても、国家52日分・民間52日分の備蓄を確保している。	
119	Webの活用 日本国内で、エネルギーの地産地消に取り組んでいる自治体を探そう。	
120	写真【3】 電気自動車に蓄えた電力を家庭で利用するシステム	
120	①政府が電力会社に対して、再生可能エネルギーで発電された電力を、長期に優遇した固定価格で買い取ることを義務づけ、その費用を電気料金に上乗せする制度のこと。	
120	用語 ①スマートグリッド 家庭や地域で太陽光発電設備・電気自動車などを送電網で結び、情報通信技術（ICT）を活用して電力の需要と供給をコントロールする小規模分散型の電力供給システムのこと。	
120	確認 日本の資源・エネルギー問題を解決し、持続可能な社会を実現するためには、どのような取り組みが必要か、説明しよう。	
120	省エネルギーと持続可能なエネルギーへの取り組み 日本では、石油危機をきっかけとして省エネルギーの取り組みが進められた。産業用機械や家電製品、自動車などにおける省エネルギー技術は、世界でも高い水準にある。効率のよい発電方式や、地域全体でエネルギーを有効利用するしくみも導入されている。エアコン・冷蔵庫・テレビなどの家電製品にも、省エネルギーに関する情報が表示されるようになり、製品を選ぶ際の目安になっている。また、クールビズなど季節に合った服装を奨励して、エアコンの電力使用を抑制することによる省エネルギーの取り	

	組みなどもみられる。 一方で、東日本大震災（2011 年）や北海道胆振東部地震（2018 年）による大規模停電で、自然災害に対するエネルギー供給体制の脆弱性が明らかになり、その見直しが始まっている。例えば、再生可能エネルギーで発電された電力には固定価格買取制度が導入され、メガソーラーなどの建設が進められている。また、発電・蓄電設備を自宅に設置して電力を自給する家庭も増えており（写真【3】）、これを送電網でつなげたスマートグリッドという、持続可能な社会に向けた小規模分散型の新しいエネルギーシステムの構築も始まっている。このシステムは、地域を分散して構築されるため、災害に強い点で注目されている。	
120	Key Words 都市鉱山 省エネルギー スマートグリッド	
120	深い学び 持続可能な社会の実現に向けた資源・エネルギーの利用とはどのようなものなのか、具体的に説明しよう。	
121	持続可能な社会を目指して③ 発展途上国の農村に明かりを 未電化地域に持続可能な電力を届ける取り組み 世界では、7 億を超える人々が、電気のない生活を送っている（2019 年）。生活水準や教育の質などを向上させるために、未電化率の改善は発展途上国にとって大きな課題となっている。発展途上国の未電化地域において電力の利用を促進させるためには、どのような取り組みが必要なのだろうか。	
121	図【4】 未電化人口の割合 読み解き 未電化人口の割合が高い国は、どのような地域に多いのだろうか。	
121	図【5】 世界の地域別未電化人口	
121	図【6】 LED ランタンをレンタルするしくみ	
121	写真【7】 レンタルした LED ランタンの明かりで夜間に本を読む子ども（タンザニア）	
121	写真【8】 農村部のキオスクで LED ランタンを借りる村人（タンザニア、ダルエスサラーム近郊、2019 年）	
121	発展途上国の農村部に多い未電化地域 ・未電化人口は、サハラ以南アフリカの国々、パキスタンやバングラデシュなどのアジア諸国に多い（図【5】） ・発展途上国では、発電設備・送電網などの電力供給インフラが整っておらず、電気代の集金システムも未発達。 ・サハラ以南アフリカでは、未電化地域が多いにもかかわらず、携帯電話とモバイル送金サービスは都市部だけでなく農村部にも普及している（→p. 151, 275）。 ・タンザニアの未電化地域では、灯油ランプで明かりを確保しているが、燃料代や温室効果ガスの排出が課題。	
121	太陽光パネルを活用した小規模な電力供給事業 ・タンザニアでは、日本のスタートアップ企業（→p. 135）がキオスク（売店、写真【8】）に太陽光パネルを設置し、充電式の LED ランタンを燃料代よりも安く住民に貸し出すことにより、未電化地域に夜の明かりを届ける BOP ビジネス（→p. 270）を展開している（図【6】）。 ・LED ランタンのレンタルサービスが定着した村では、夜も仕事や家事ができるようになったり、子どもが家で勉強する時間をもてるようになったりしている（写真【7】）。温室効果ガス削減の効果も期待できる。	
121	考察 1. 発展途上国において未電化地域が多いために生じている課題として、何があるだろうか。次の語句を用いて 150 字以内で説明しよう。【生活水準 教育 温室効果ガス】 2. 発展途上国で持続可能な電力の利用を促進するためには、どのようなことが大切だろうか。	
二宮書店 703 地理探究		
100	図【1】 国別の発電量と 1 人当たり電力消費量	
100	図【2】 OECD 加盟国の電力に占める再生可能エネルギーの割合	
100		

100	4 電力の利用と変化 電力 石油や天然ガス、水力など、そのままでエネルギー源になるものを1次エネルギーとよび、電力やガソリン、都市ガスなど、利用できる形に加工、転換したものを2次エネルギーとよぶ。特に、電力は産業や日常生活に欠かせないエネルギーであるが、世界には電気の届かない無電化地域に暮らす人々が約10億人いる。世界の電力事業は1882年にニューヨークに建設された石炭火力発電所に始まり、その後、送電技術の発達によって水力発電が盛んになり、1960年代以降は重油による火力発電へ、さらに原子力発電へと発展した。水力発電は水資源が豊富なカナダやノルウェーで多く、石炭資源に恵まれた中国やドイツ、アメリカなどでは石炭を使った火力発電が多い。フランスやウクライナでは原子力発電の割合が高い（図【1】）。	
100	原子力発電の功罪 日本で原子力発電が始まったのは1963年のことで、その後、各地に相次いで原子力発電所がつくられ、2010年には全発電量の3割に達した。原子力発電は、正常に運転している限りは温室効果ガスを発生せず、大気汚染もなく、相対的にコストが低いことが利点とされてきた。また、核燃料サイクルによってウラン資源が大幅に節約できるという考え方もあった。しかし、スリーマイル原発事故やチェルノブイリ原発事故（1986年）、福島第一原発事故（2011年）（写真【3】）など、深刻な被害が繰り返されており安全性が問われている。廃炉の費用や、使用済み核燃料の貯蔵などをめぐって、原子力政策にはさまざまな議論があり、ドイツやスイスなど原発の段階的廃止を決定している国もある。	「正常に運転している限りは」とありますが、より正確な用語を用いて、「通常運転時には」がより適切と考えます。 「など、深刻な被害が繰り返されており」とありますが、重大事故の発生はこの3例だけなので、例えば、「で重大事故が発生しており」とするのがより適切と考えます。 「使用済み核燃料の貯蔵」とありますが、課題となっているのは、放射性廃棄物の処分なので、例えば、「放射性廃棄物の処分」とするのがより適切と考えます。 「原発の段階的廃止を決定している国もある。」とありますが、ドイツやスイスなどは例外で、数的には多くの国が原発を活用しているのが実態なので、例えば、「原発の段階的廃止を決定している国もあるが、多くの国で活用されている。」とするのがより適切と考えます。
100	豆知識 国により異なる電圧 日本では家庭用コンセントの電圧が100Vだが、世界的には珍しい。アメリカは120V、でヨーロッパには200V以上の国が多い。海外旅行の前には必ず確認する必要がある。	
100	イントロ 世界の電力利用にはどのような地域的特徴や問題点があるのだろうか。	
100	①核燃料サイクル 原子力発電所で使い終えた核燃料を再処理して、再び原子力発電の燃料に使うしくみ。	
100	写真【3】 福島第一原子力発電所の事故（2011年3月13日撮影） 東北地方太平洋沖地震に伴う津波により電源を喪失し、水素爆発がおき、放射性物質が大気中に放出された。	福島第一原子力発電所の事故について適切に記述しており、評価できます。
101	写真【4】 丘陵部でのメガソーラー（岩手県軽米町、2019年撮影） 一般家庭約2.6万世帯分の発電が可能である。パネル下緑化、調整池の設置など、土壌流出や洪水、景観への配慮がなされている。	
101	写真【5】 砂漠に立地する集合型の風力発電（カリフォルニア州、2017年撮影） 3,000基をこえる風車により、大型の火力発電所1基に匹敵する電力を供給している。	
101	再生可能エネルギーの促進 火力発電に使われる石炭、石油、天然ガスは、燃焼時に二酸化炭素や窒素酸化物、硫酸酸化物を排出し、環境汚染や地球温暖化をひきおこす。また、原子力発電では、事故時の放射性物質の拡散のほか、放射性廃棄物の処分も困難になっている。それに対し、自然界につねに存在し、環境への負荷も少ない再生可能エネルギーへの転換が進められている。一つは、太陽熱、太陽光、風力、潮力、波力、地熱など、自然がもつ熱	

	エネルギーや運動エネルギーを電力に変える発電方式で、水力利用についても、これまでのダムによる水力発電とは異なる小水力発電が普及している。もう一つはバイオマス発電で、間伐材などの木材チップや家畜の糞尿、食品廃棄物などを燃焼する、あるいはガス化することでタービンを回転し発電する。 再生可能エネルギーは、発電量が少なく、電力供給も不安定なものが多いため、資本投下にみあう効果が上げにくいとされてきた。しかし、太陽光パネルの低廉化や風力発電の発電効率の向上、また、固定価格買取制度の導入なども行われ、中国、アメリカ、日本、ドイツ、などで太陽光発電（写真【4】）が、また、中国、アメリカ、ドイツなどで風力発電（写真【5】）が増加している。（図【6】）。偏西風に恵まれるデンマークでは風力発電が全電力の半分近くを占めている。一方、地熱発電については、立地条件に制約が多く、火山国のインドネシアやニュージーランド、アイスランド、ケニアでは発電量を増やしている。OECD 加盟国では、電力の 25%以上を再生可能エネルギーが占めるようになってきている（水力を含む）（図【2】）。一方で、風力発電所による騒音問題や、太陽光発電所の建設による森林破壊の問題も指摘されている。	
101	ワード 1 次エネルギー 2 次エネルギー 再生可能エネルギー 小水力発電 バイオマス発電 固定価格買取制度 太陽光発電 風力発電	
101	図【6】 太陽光発電（上）と風力発電の発電設備容量の個別推移	
101	①固定価格買取制度 再生可能エネルギーで発電した電気を、電力会社が一定価格で一定期間、買い取ることを国が約束する制度。	
101	まとめと探求 ①各発電方式にはどのような長所、短所があるか整理しよう。 ②再生可能エネルギーの導入について、国による違いを調べてみよう。	各発電方式の長所と短所を生徒に整理させるのは良い取り組みだと評価できます。
102	日本を知る 日本の資源・エネルギー問題	
102	図【1】 日本の 1 次エネルギーの国内供給の推移 化石燃料への依存度が高いことがわかる。	
102	図【2】 日本の資源の輸入元と自給率 資源の分布状況に加えて、日本と相手国の関係を反映している。	
102	問いかけ 日本の資源・エネルギーの利用は、どのような課題を伴っているだろう。これまでの学習をふまえ、資源に乏しい日本がどのように対応してきたか考えてみよう。	日本の資源・エネルギーの利用における課題を生徒に考えさせるのは良い取り組みだと評価できます。
102	日本のエネルギー供給の歩み 日本は国内のエネルギー資源が乏しいにもかかわらず、第二次世界大戦後、世界屈指の工業大国そして消費大国へと奇跡の成長を遂げた。これは海外から安価な鉱産資源やエネルギー資源を輸入することができたからである。 かつての日本は、九州や北海道に大炭田をもち、1935 年の時点で 84%、1960 年でも 58%という高いエネルギー自給率を誇っていた。しかし、1960 年代以降、生産効率が悪いとして国内での石炭の採掘を縮小し、輸入に転換したうえ、主要なエネルギー源を石油に切り替えた（図【1】）。そのため、1973 年にはエネルギー自給率は 9.2%にまで低下した。その後、原子力発電を推し進めたことで、2000 年には 20%をこえるまでに回復したが、2011 年の福島第一原子力発電所の事故のあと、全原発が稼働停止したことによって、エネルギー自給率は 10%に落ち込んでいいる。現在、石炭については、九州の池島炭鉱、三池炭鉱の閉山以降、北海道で小規模な採掘が続いているのみで、石油、天然ガスについても、秋田県や新潟県などの日本海沿いで開発されているが、いずれも国内消費量からすればごくわずかにすぎない。	エネルギー自給率の経年変化を丁寧にバランスよく記述している点は評価できます。
102	「持たざる国」日本の課題 エネルギー資源だけでなく、鉱産資源についても、石灰石や砂利を除けば、資源のほとんどを輸入に頼っている（図【2】）。そのため、資源の安定確保をめざして、外交活動や経済援助を通じて「持てる国」との関係強化に努めてきた。また、輸入先を特定の国や地域に限定せず、分散させることで輸入の安定を図っている。しかし、資源に	タイトルも含めて非常に分かりやすく、内容もバランスがとれ充実しており、次世代を生きる生徒がエネルギー問題を主体的に考える上で大切な記述であると評価できます。できれば、世界地図により中東

	は偏在しているものが多く、特に、石油は西アジアへの依存度が高いため、分散化に成功しているとはいえない。国家間の対立や紛争がおきると需給のバランスが崩れ、国際価格の急騰は避けられず、大きな影響を受ける。 そうしたリスクを回避するためにエネルギー源の多角化も進められてきた。電力については、石油火力発電への依存度を減らすよう、原子力や石炭、天然ガスによる発電の割合を高めてきた。また、1日の需要の変動に合わせて、発電方法を調整するベストミックス（最適な組み合わせ）も行われている（図【5】）。同時に、エネルギー消費そのものを節約する省エネルギー化を進めたり、再生可能エネルギーの供給力を高めたりする努力が続けられている。福島での原発事故を契機に、エネルギー政策は新たな段階に入っている。	から日本までのシーレーンを示すとともに、我が国にはタンカー2隻分の原油が毎日輸入されている現実なども記述すると、我が国の置かれた厳しい現実がもつとはっきりと伝わると考えます。
102	ワード エネルギー自給率 ベストミックス 省エネルギー化 電力事業の自由化 コージェネレーションシステム 揚水式発電所 スマートグリッド 3R 5R	
103	地理の話題 地域に根ざした再生可能エネルギー 北海道十勝地域は有数の畜産地域として知られている。そこでは家畜の排泄物を活用した地域循環型エネルギーの強化と産業創出をめざす「バイオマス産業都市」構想が進められている。水力や太陽光を含め、地域で消費する電力の8割近くを自給しており、例えば鹿追町では糞尿や生ゴミを発酵させてバイオガスを精製し、電力、温熱などに転換している。電力は自家利用のほかにも売電し、温熱は施設内でチョウザメの養殖やマンゴーのハウス栽培に利用している。また、発酵後に残った液肥は、近隣の畑地に散布している。こうした取り組みは地域に根ざしたエネルギー政策として注目されている。	こうした取組は、都市部と異なりエネルギー消費量が少ない地域で可能なことを付記すればさらにバランスの取れた記述になると考えます。
103	写真【3】 バイオマスプラント（北海道鹿追町、2016年撮影）	
103	図【4】 循環型経済	
103	図【5】 1日の再生可能エネルギーへの対応の例 再生可能エネルギーの導入によって、1日の需給調整の仕方も変化している。	電力の需給調整を掲載しており、原子力がベースロード電源と呼ばれる理由も理解できる点は評価できます。
103	小規模分散型の再生可能エネルギーの導入に向けて 再生可能エネルギーの普及には、電力事業の自由化や、固定価格買取制度が大きく後押ししている。多くの発電事業者が生まれ、それによって、風力発電所や太陽光発電所、バイオマス発電所などの小規模発電所が運営されるようになった（写真【3】）。ガスによって発電し、その排熱をビル内や街区内で有効利用するコージェネレーションシステムも小規模発電として注目されている。今後、送電施設のコスト負担の問題が克服できれば、小規模発電はさらに普及するとみられている。 太陽光発電所は日照に制約されるため、昼間にしか発電できないが、需要が増大する時間帯の電力を補っているという点では大きな意味がある。夕方以降の需要の高い時間帯は、安価な夜間電力で水を汲み上げ、ピーク時に発電する揚水式発電所や、天然ガス火力発電に切り替えるなど柔軟な電力供給が可能である（図【5】）。こうした新たな試みは、従来の大規模集中型から小規模分散型に向けた動きであり、電力の流れを供給側と需要側の両方から制御し、最適化するスマートグリッドの構築も進んでいる。	
103	大量消費社会の見直し 社会全般で省電力化が進むとともに、大量生産、大量消費、大量廃棄の経済構造を見直し、環境への負荷を減らす循環型社会をめざす活動が着実に広がっている。消費者側では、モノを活かし、ゴミを減らす3R（ゴミ抑制 Reduce、再利用 Reuse、再資源化 Recycle）や5R（3R＋修理 Repair、購入しない Refuse）の活動が広がっている。企業では、設計段階から再利用を視野に入れた素材の選択や製造が進められており、日本でも線形型の経済からサーキュラーエコノミー（循環型経済）への転換を目指す取り組みが勢いづいている（図【4】）。	
103	まとめ 日本は、エネルギーの多角化、省エネルギー化という努力を払ってきた。現在、再生可能エネルギーへの	

	転換，循環型社会の実現に向けて着実に前に進んでいる。	
254	写真【1】 洋上風力発電（上，デンマーク）と集光型の太陽熱発電（スペイン） 自然エネルギーを利用した発電は，温室効果ガス削減のために増えつつあるが，それぞれの地域の自然条件にあった風力や太陽光・太陽熱などが主体となっている。	
254	図【2】 おもな国の発電エネルギー源別割合	
254	4 エネルギー・工業と貿易・交通の変化 資源とエネルギー ヨーロッパは全体として鉱産資源やエネルギー資源に乏しく，ロシアや西アジア，北アフリカ諸国などから大量に輸入している。かつての産業革命を支えた石炭は，現在はポーランドやドイツの一部で産出されている。石油の大部分は北海油田で採掘され，天然ガスの一部はロシアからパイプラインで輸入されている。 火力発電が中心のポーランド，水力発電が多いノルウェー，原子力発電に頼るフランスなど，発電の電源構成は，その国の自然条件や資源の有無などによって異なる（図【2】）。また，偏西風が安定して吹く地域では風力（写真【1】上），日射が強い地域では太陽光・太陽熱（写真【1】下）など，再生可能エネルギーによる発電量も増えている。パリ協定を受けて脱炭素社会の実現をめざす EU では，多様な発電設備を効率的に管理するスマートグリッドの構築により，環境負荷の軽減を進めている。	
304	現状の確認 日本のエネルギー資源の自給と消費の現状 □日本の1次エネルギーの自給率は1割未満で，化石燃料はほぼ全量を輸入している。1次エネルギー純輸入量は中国に次いで世界第2位で，世界のエネルギー供給量の約3%を輸入している。 □石油危機後はエネルギー源の多様化（脱石油）がはかられ，原子力と天然ガスの導入が進んだが，2011年の福島第一原子力発電所の事故後は，再び化石燃料への依存度が高まっている（図【1】）。 □2016年のパリ協定の発効によって，日本は2030年までに二酸化炭素（CO ₂ ）を2013年比で26%削減する義務が課され，政府は脱炭素社会の実現をめざして「2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする」（カーボンニュートラル）という目標を掲げている。 □福島第一原子力発電所の事故後，一時，国内すべての原子力発電所が運転を停止した。その後，新規規制基準の審査に合格した発電所から再稼働したが，安全性，もんじゅ廃炉による核燃料サイクル事業の見直し，高レベル放射性廃棄物の最終処分場の選定など課題は多い。 □2018年の北海道胆振地方東部地震では北海道全域に停電「ブラックアウト」がおきた。また，翌2019年には台風15号の暴風で千葉県で大規模な停電が発生，長期化し，住民生活に打撃を与えた。	可能でしたら，北海道胆振東部地震によって北海道全域がブラックアウトしたプロセスを丁寧に説明すると，電力の需給バランスを常に一致させる必要があるということが分かり，より適切と考えます。
304	イントロ 日本の地理的課題の一つに，生命と生活を守るためのエネルギー（特に電力）の確保があげられる。資源の乏しい日本の，エネルギーの安定確保のための課題を多面的に考えてみよう。	
304	3 国土像の探究 ～エネルギーの安定供給をめざして 課題の設定 これまで学んできた日本の姿をふり振り返り，学習のまとめとして，これからの日本の国土像を探究してみよう。班ごとに主題を設定して，日本のかかえる地理的な課題の解決の方向性や将来の国土像のあり方を多面的・多角的に探究し，その成果をポスターやレポートにまとめ，質疑応答や討論を通じてさらに考察を深めよう。A班はエネルギー問題に着目した。世界では人口の急増，産業化の進展によってエネルギー需要が増加する一方，化石燃料の消費は資源の枯渇や価格の高騰，温暖化など地球規模の環境問題を引き起こしている。自然災害の多い日本では非常時のエネルギーの供給途絶が大きな課題である。A班は「エネルギーの安定供給」を探究の主題に設定した。	「エネルギーの安定供給」は，特に現在の日本にとって重要な課題であり，優れた取組と評価できます。
304	豆知識 電力の「東西の壁」 明治初年に輸入された発電機の違いが原因で，糸魚川－富士川線を境に東側は50	

	Hz, 西側は 60 Hz と周波数が異なるため、緊急時の電力融通、相互送電が難しいという問題がある。	
305	仮説の設定 主題 国内のエネルギーの安定的な供給 主題へ問い 非常時にも強いエネルギー供給は？ 大地震・台風・噴火などの自然災害 テロや事故での発電・送電不能 資源の枯渇, 価格の急騰, 輸入制限 仮説① 備蓄や輸入の分散を図る 仮説② 新しい発電方法を開発する 仮説③ 地域での自治体制を整える	
305	仮説 地域でのエネルギーの自給体制を整える	
305	情報収集と調査 地域でのエネルギー生産の状況を調べてみよう	
305	図【2】 一次エネルギーの国内供給の推移	
305	図【3】 再生可能エネルギー設備の推移	
305	図【4】 電力の小売自由化のしくみ	
305	図【5】 都道府県別の風力発電所設備	
305	図【6】 都道府県別の太陽光発電所設備	
305	仮説の設定 エネルギーを安定的に供給し、非常時にも途絶しにくいエネルギー供給のあり方について話し合った A 班は、いくつかの仮説を立てた。そのなかから生活や産業活動のあらゆる場面で必要不可欠である電力を中心に、「地域でのエネルギー自給体制を整える」を探究すべき仮説として設定し、活動することとした。	
305	情報収集と調査 仮説（課題解決の方向性）の見通しを立てるために、日本の電力の生産・供給の現状について情報収集を行った。はじめに、日本の 1 次エネルギー供給に占める再生可能エネルギーの割合を調査した。また、再エネの増加の内訳や、都道府県別の風力と太陽光の発電量をグラフや主題図にまとめ、地域差があることを確認した。さらにエネルギーの地産地消に欠かせない電力自由化について調べた。	
305	情報源 資源エネルギー庁スペシャルコンテンツ 地球温暖化や省エネルギー、再生可能エネルギーから、エネルギーの安全保障まで、多岐にわたる最新事情を図や統計とともにわかりやすく解説している。	情報源として、公的資料である「資源エネルギー庁スペシャルコンテンツ」を挙げていることは、評価できます。
305	ポイント補説 文献調査の資料例 白書や統計集のほか、官公庁や自治体、企業の情報サイトなども参考になる。 [白書・統計集類] エネルギー白書, 電力調査統計, 再生可能エネルギー技術白書 [ウェブサイト情報] 「なっとく！再生可能エネルギー」(資源・エネルギー庁) REPOS (再生可能エネルギー情報提供システム) 各電力会社の情報サイト	情報源として、公的資料である「資源エネルギー庁」の情報を挙げていることは、評価できます。
306	分析と考察 地域で電力を自給し、非常時にも供給を絶やさないうきみを考える	
306	考察① 地域資源を活用したエネルギー生産体制を整備し、自立を進める 都道府県単位での地域電力の活用の例 (山形県) ①電力自由化を活用	

	②地域資源を有効利用 ③立地条件に即した再エネを推進	
306	考察②地区で蓄電や廃熱などの高度利用を進める 発電と廃熱を利用するコジェネレーションシステム 天然ガスで自家発電した際の廃熱を有効利用している。	
306	考察③非常時に、地域で最低限の電力を確保できるようにする 非常時は生命と健康維持が最優先。電力供給が欠かせない病院、高齢者施設、役所、避難所の電力を確保 →自家発電、蓄電（避難所の設置と運営の連携） →地域資源で発電を維持できる自家発電 →各家庭での蓄電、発電の推進、資金援助	
306	考察結果 地域の自然環境に応じた再生可能エネルギーの利用や、電力自由化を活用した地域電力会社の設立など、エネルギーの地産地消に向けた整備が始まっていることがわかった。さらに、地区単位ではエネルギーの高度利用も進められており、非常時には自治体や各家庭での発電や蓄電も有効と考えられる。	
306	①非常時だけを想定して備えるのではなく、平時にも便利に使えるものやサービスを取り入れるという考え方をフェーズフリーという。	
306	分析と考察 設定設定した仮説（課題解決の方向性）は実現可能かどうか、問題点はないか、あればどのように克服するか、ほかの解決方法はないかなど、多面的・多角的に分析・考察する。電力を自給するためには輸入資源ではなく地域資源の利用（創エネ）が鍵となるが、再生可能エネルギーについては利点だけでなく、課題の分析も必要である。また、省エネや高度利用の視点、非常時の対応①の検討も重要である。	
306	豆知識 ZEH? 政府が定めた「省エネ基準」で「ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス」の略。省エネ（無駄を省く）創エネ（自ら創る）、蓄エネ（蓄える）で、住宅のエネルギー収支をゼロにするという取り組み。	
307	まとめと発表 エネルギー自立を可能とする地域社会の構築	
307	解決への提言 地域の自然・資源・産業を活かした再生可能エネルギーの開発を進め、地域内で電力供給をまかなう「地域マイクログリッド（分散型電力網）」の構築をめざす。平時は電力会社の送配電ネットワークを利用するが、大規模停電が発生した場合は切り離し、地域単独ネットワークに切り替える。日頃から省エネ、高度利用に務めるとともに、非常時にも必要最低限のエネルギーを確保できるよう、家庭・企業・公共施設などでの発電と蓄電を推進し、エネルギー自立社会をつくる。	
307	提案と討論まとめ A班は情報収集・調査、分析・考察をもとに、非常時にも電力自給ができるエネルギー自立可能な地域社会をつくるための提言をポスターにまとめ、クラスで発表した。発表後の質疑応答と討論、ほかの班の提言内容から、地域の人口や居住問題、産業構造、防災体制など、地域がかかえるほかの課題との関連性も検討する必要があることに気づき、新たな探求テーマとすることにした。	
307	情報源 全国ご当地エネルギー協会 地域主導型の自然エネルギー開発に取り組む組織や人々を応援するサイト。ご当地エネルギーマップや具体的な事例報告などを掲載している。	
307	まとめと探求 ①地域で利用可能な再生可能エネルギーを探してみよう。 ②再生可能エネルギーの利用が進んでいる地域を取り上げ、その特徴や立地条件を調べてみよう。	

【地理歴史（日本史探究）】

エネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述内容		コメント・修正文の例
東京書籍 701 日本史探究		
300	写真【3】 事故直後のチェルノブイリ原子力発電所 1986 年 4 月、ウクライナの首都キエフ近郊のチェルノブイリ原子力発電所で事故が発生した。ソ連政府は事故をすぐに公表せず、被害拡大した。この事故がきっかけとなり、原発の見直しの議論が世界各国でみられるようになった。	
305	東日本大震災とその後の政治 2011（平成 23）年 3 月 11 日、東北沖の太平洋を震源とする、日本周辺でおきた地震としては観測史上最大のマグニチュード 9.0 の超巨大地震が発生した。はげしい揺れにつづいて巨大な津波が東北から関東の太平洋岸をおそい、約 2 万人が犠牲となった。東京電力福島第一原子力発電所では、大量の放射性物質を放出する深刻な事故が発生し、多数の住民が避難を余儀なくされた（東日本大震災）。被災地の復興と原発の事故処理のための努力は、現在もつづいている。 ～（省略）	「東京電力福島第一原子力発電所では、大量の放射性物質を放出する深刻な事故が発生し、」とありますが、事故の主因は津波なので、例えば、「東京電力福島第一原子力発電所では、津波のため大量の放射性物質を放出する深刻な事故が発生し、」とするのがより適切と考えます。
305	写真【4】 事故がおこった福島第一原子力発電所（2011 年）	
実教出版 702 日本史探究		
353	STEP UP エネルギー革命 私たちの社会が維持されるためには、多くのエネルギーを必要とする。日本社会におけるエネルギーの生産と利用はどのように変わってきたのだろうか。ここでは電力事業を中心に考えてみよう。	
353	電力の生産主体と発電方法の推移 日本の電力事業では、民間事業者が重要な役割をはたしてきた。1887（明治 20）年に民間事業者が国内初の一般供給を開始した。大正期には地域社会で住民が共同出資する小水力発電が試みられるなど、さまざまな模索があり、電力利用は普及していった。戦時期の 1938（昭和 13）年に電気事業は国家統制下におかれたが、戦後の 1951 年に 9 つの電力会社に再編された。発電方法は、高度経済成長期までは水力発電が主流であったが、1960 年代に火力がおもなエネルギー源となった。それと並行して、原油価格が安価であったことから石炭から石油への切り替えがすすんだ。	
353	石油危機と原子力発電 1973 年の石油輸出国機構（OPEC）による原油価格の大幅値上げは、工業化した先進諸国に甚大な影響を及ぼし、日本にとっても転機となった。日本はすでに 1955 年に原子力基本法を定め、原子力利用を推進していたが、その比重は小さかった。石油危機以後、国内各地の原子力発電所建設が加速した。当時、工業地帯における大規模石炭火力発電の建設は、公害への意識の高まりから住民の反対も強く、大都市から離れた場所に原子力発電所と関連施設が増加していった。そのなかで、たびたび事故がおこり、1999（平成 11）年に茨城県東海村の核燃料加工施設でおきた事故では、被曝による死者も出た。	「大都市から離れた場所に原子力発電所と関連施設が増加していった。」とありますが、「公害意識への高まり」とは直接の関連性がないので、例えば、「原子力発電所は大量の冷却水を必要とするため、また、万一の事故に備えて大都市から離れた沿海部に建設された。」とするのが適切と考えます。 「そのなかで、たびたび事故がおこり、」とありますが、当時、原子力発電所でたびたび事故がおきた事実はないので、例えば、「そのなかで、」とするのがより適切と考えます。
353	3.11 以後 2000 年代に入ると、温室効果ガス規制が強まるなか、原子力発電への再評価が国際的にみられたが、2011 年の東日本大震災によって、東京電力福島第一原子力発電所が大規模事故を引きおこした。これにより、安全とされてきた原子力発電への認識は転換し、新たなエネルギーが模索されている。発送電の分離などの電力自由化や、太陽光・風力といった再生産可能エネルギーの開発がすすみ、地域でエネルギー自給を試みる動きもみられる。	「原子力発電への認識は転換し、新たなエネルギーが模索されている。」とありますが、再エネと原子力の共存が 2023 年 2 月に閣議決定された GX 方針となっています。提言 3 を参考にしてください。 「再生産可能エネルギーの開発がすすみ、地域でエネルギー自給を試みる動きもみられる。」とありますが、各エネルギー源の特徴と課題をバランス良く示した

		め、例えば、「再生可能エネルギーの開発も進んだが、安定供給などに課題がある。」とするのがより適切と考えます。
353	図 1 地域で取り組まれる小水力発電（山梨県都留市） まちづくりの一環としてエネルギー自給に取り組む自治体や地域がある。	
353	Try あなたの住む都道府県が、近代以降どのようなエネルギー供給の歴史をたどってきたか、調べてみよう。	「あなたの住む町で」との問い掛けは、生徒に主体的に考えさせる取組として評価できます。可能でしたら、近代以降、各家庭のエネルギー消費が増加していることに目を向けさせる資料が掲載されると、さらに自分事としてエネルギーの歴史を考えることができるため、より適切と考えます。
366	写真 2 福島第一原子力発電所事故（2011 年 3 月 24 日）	
370	写真 福島第一原子力発電所事故	
実教出版 703 精選日本史探究 今につなぐ 未来をえがく		
209	図 7 鉄腕アトム 1952 年、漫画家の手塚治虫が少年雑誌に連載をはじめ、その後アニメとなって国際的な人気を得た。原子力などの科学文明や人種差別など、様々な社会問題をテーマにしていた。	
209	図 8 映画「ゴジラ」（1954 年） ゴジラは水爆実験によって目覚めた怪獣で、東京に上陸して放射能の炎を吐くという設定だった。観客動員数約 960 万人の大ヒットとなり、続編が何作も作られた。	
209	原子爆禁止運動と安保闘争 1954 年、南太平洋上でのアメリカの水爆実験により、漁船・第五福竜丸が被曝した。この事件に対して女性たちがはじめた署名運動から原子爆禁止運動が急速にもりあがり、翌年、広島で第 1 回の世界大会がひらかれた。他方、この運動に対抗してアメリカが「原子力の平和利用」を提唱すると、日本政府は原子力基本法を制定し、原子力発電の開発をはじめた。 ～（省略）	
209	図 9 第 1 回原子爆禁止世界大会（1955 年）のポスター 海外から 13 か国 52 人の代表が参加した。ポスターをてがけた丸木俊は、夫の丸木位里と連作「原爆の図」を制作している。	
209	図 10 高知県のマグロ漁船被ばくを調べる高校生たち ビキニで被ばくした地域の漁師たちから聞き取りをおこなった高校生。やがて韓国漁船にも被ばくしたのがあることを知り、地域のなかの日韓関係史に視野をひろげ、韓国やマーシャル諸島の人々と国際交流もおこなうことになった。	
222	写真 1 2011 年 3 月 11 日 この日、宮城県沖の海底を震源とした大地震がおきた。東日本の太平洋岸に大津波が発生し、関東地方では液状化現象などがみられた。また福島第一原発が爆発・炉心溶融（メルトダウン）事故をおこした。	「福島第一原発が爆発・炉心溶融事故をおこした。」とありますが、津波による炉心冷却機能の喪失、炉心の過熱から溶融と水素発生、建屋内で水素爆発したのが事故の経過なので、例えば、「福島第一原発が津波の影響で炉心溶融事故が発生し、水素爆発をおこした。」とするのがより適切と考えます。
222	写真 3 帰還困難区域 2021 年 2 月現在、28,000 以上の人々が福島県外に避難しているが、帰還の見通しがたっていない人も多い。避難先での新しい暮らしはじまり、除染後も帰還を選択しない人もいる。	
222	震災と「わたしたち」（省略）～ 2011 年 3 月 11 日、M9.0 という巨大地震が東北地方を中心とする東日本をおそった（東日本大震災）。地震と津波に加え、福島第一原子力発電所が爆発事故をおこし、複合的な災害となった。復興に向けてどのような地域社会をつくるか議論が重ねられている。	「地震と津波に加え、福島第一原子力発電所が爆発事故を起こし」とありますが、上記の事故経過も踏まえて、例えば、「地震と津波に加え、津波により福島第一原子力発電所が炉心溶融し、水素爆発する事故が起こ

		り、複合的な災害となった。」とするのがより適切と考えます。
226	地域のいまと歴史から様々な課題をさぐる ここまで歴史を学んできて、今の社会や時代の特徴がみえてきたかな？ いまのわたしたちが一番関心のあることを、歴史を通して考えることもできそうね。 図 1 はショックだった。2011 年 3 月の地震は、わたしたちにも大きな経験だった。くらしをささえるものはなにか、ということが問題になったからね。 現代のわたしたちの生活は科学や技術によってささえられている。20 世紀以降は、原子・電子の研究がすすみ、その技術がさまざまな分野に活用されるようになった。こうした技術は人間社会のあり方や考え方をどのようにかえていったのだろうか？ この教科書では、地域に視点をあてて歴史をみることも学んできました。 図 2, 3 をみてごらん。この地域がかかえる課題、この地域の歴史や未来について、どのようなことが考えられるかな。 原発がある地域はここだけではないものね。コンビナート（地域開発）や公害の歴史とも関係しそうだ。 日本では、1960 年代から原子力発電の建設・運転がはじまり、原発の「安全神話」も人々の間にうまれていった。しかし、チェルノブイリなどたびかさなる原発事故をへて「脱原発」の主張も大きくなった。放射能被害は国境を越えて問題になり、また「核のゴミ」の処分方法も十分な解決方法をみいだしていない。 エネルギーの未来や災害の問題を地域の側からみた。同時に、「伝統や文化の継承と創造」「世界のなかの日本」「社会や集団と個人」といったテーマにもつながっていく。日本史探究では、自分自身の主題を設定して問いを表現し、さまざまな史料を読んだり活用しながら仮説をたて、それを検証していく。歴史の描き方はさまざまなので、みんなで討論して深めていこう。	「たびかさなる原発事故」とありますが、「たびかさなる」ほどの高頻度ではないので、「例えば、「大きな被害をもたらした原発事故」とするものがより適切と考えます。 「核のゴミ」の処分方法も十分な解決方法をみいだしていない」とありますが、「核のゴミ」は適切な用語でなく、処分方法は確立しており、処分場が未定なのが課題なので、例えば、「核のゴミ」と呼ばれてきた高レベル放射性廃棄物の処分方法は確立しているものの、処分場がまだ決まっておらず、現在、北海道の 2 つの候補地自治体で調査が行われている。」とするのがより適切と考えます。 全体に、原子力の負の面のみが強調されていますが、原子力による安価・安定した電力供給、温室効果ガスの排出がないというメリットがあったからこそ原子力を利用してきています。2023 年 2 月に閣議決定された GX 基本方針でも再生可能エネルギーと原子力の活用が述べられています。こうした各エネルギー源のメリットとデメリットを公平かつバランス良く提供することにより、生徒に考えさせることがより適切と考えます。
226	写真 2 青森県六ヶ所村の風車群 左奥に核燃料再処理工場がみえる。2003 年から風力発電施設が稼働している。なお、六ヶ所村は満州からの引揚者が開拓にはいった地域でもある。	核燃料再処理工場に触れるなら、核燃料サイクルにとって重要な工場であることに触れるのがより適切と考えます。また、再処理が公式に認められているのは非核保有国で我が国だけであることに触れるなど、我が国が原子力の平和利用に徹してきた歴史を生徒に伝えるのがより適切と考えます。
226	写真 1 福島第一原子力発電所の事故（2011 年 3 月 24 日） 東日本大震災にともなう原発事故によって、近隣地域が放射性物質で汚染され、多くの人々移住しなければならなくなった。	
226	図 2 には何が写っているかな。よく調べたうえで、今度は図 1 をみて、何を考えるかな。 エネルギーの問題も、写真や統計、地域の記録など、さまざまな資料を使って考えてみるのが大事なんですね。	エネルギーの問題について、生徒に調べさせ、考えさせることを促している点はすぐれた取組と評価できます。
227	環境の変化はぼくたちのからだにどんな影響をもたらすだろうね。	
227	図 5 世界の平均気温の変化 地球温暖化は世界全体で取り組み課題である。1992 年から国連の気候変動枠組み条約があり、1997 年の京都議定書は先進国の温室効果ガス排出削減を義務づけている。2015 年のパリ協定はすべての国が温暖化防止対策をおこなうことを求めている。	
清水書院 704 高等学校 日本史探究		

264	激動する日本と世界 2011 年 3 月 11 日、東北地方から関東地方の太平洋岸で大地震がおき、巨大津波に加え、東京電力福島第一原子力発電所で放射性物質の漏洩をとまう事故が発生する、未曾有の複合災害となった（東日本大震災）。～（省略）	
265	図 4 日本の一次エネルギー供給割合（『数字でみる日本の 100 年』、『日本国勢図会』2020/21 より）	一次エネルギーの 10 年ごとの経年変化が示されており、「日本のエネルギーの問題点を指摘してみよう」との問い掛けがされています。日本のエネルギー事情を主体的に考える上で必須の資料であり、評価できると考えます。
265	日本のエネルギーにかかわる問題点を指摘してみよう。	主体的な教育で好ましと評価できますが、さらに、日本のエネルギー自給率、世界的なカーボン・ニュートラル対応、最近の電力危機など、生徒が考える糸口を与えるとより適切と考えます。
山川出版社 705 詳説 日本史		
346-347	高度経済成長（省略）～ 産業構造は高度化し、第一次産業の比重が下がり、第二次・第三次の比重が高まった。また、工業生産額の 3 分の 2 を重化学工業が占め、原油輸入の自由化もあって石炭から石油へのエネルギー転換が急速に進んだ（エネルギー革命）。安価な原油の安定的な供給は、高度経済成長期を支える重要な条件となった。一方、米などわずかな例外を除いて食料の輸入依存が進み、食料自給率は低下した。～（省略）	食糧自給率の経年変化が掲載されているのは大変評価できます。次世代を生きる生徒は、我が国の置かれている現状を正確に捉えて直視しなければ、未来はないからです。可能でしたら、上図のエネルギー自給率に加えて、原油の中東依存度なども掲載すると、湾岸戦争、インド洋における海上自衛隊の給油活動など、歴史的事実の意味を考える上で、有意義であると考えます。
347	④石炭産業は安価な石油におされて衰退し、「斜陽産業」と呼ばれるようになった。1960（昭和 35）年に三井鉱山三池炭鉱での大量解雇に反対する激しい争議（三池争議）が展開されたが、労働者側の敗北に終わった。以後、九州や北海道で炭鉱の閉山があいついだ。	
347	図 1 次エネルギー供給と自給率の推移 中東からの安価な原油供給により、1960～70 年代に石炭から石油へのエネルギー転換が進んだ。しかし、1970 年代初頭の第 1 次石油危機を契機に石油の比率が低下し、天然ガスや原子力の比重が高まった。（資源エネルギー庁「平成 30 年度エネルギーに関する年次報告」より作成）	
364	現代の諸課題（省略）～ 地球の温暖化や生態系の破壊など、環境破壊も深刻な問題である。1997（平成 9）年に京都で開催された気候変動枠組条約締約国会議で京都議定書が採択され、先進国の温室効果ガス排出削減目標が定められた。2015（平成 27）年の同会議におけるパリ協定では、開発途上国も含むすべての国が温室効果ガス排出削減に向けて努力することになった。また、同年には国連サミットで持続可能な開発目標（SDGs）も採択されている。この間、2000（平成 12）年には循環型社会形成推進基本法が施行され、容器包装や家電などのリサイクルが法制化された。なお、原子力は温室効果の影響が少なく、大量のエネルギーを供給することができるが、一方で 1995（平成 7）年の高速増殖炉「もんじゅ」の事故や 1999（平成 11）年の東海村（茨城県）の臨界事故、2011（平成 23）年の東日本大震災における東京電力福島第一原子力発電所の事故などによって、原子力発電の安全性に対する信頼がゆらいだ。現在、太陽光・風力・地熱・バイオマスなど再生可能エネルギーへの関心が高まっている。～（省略）	「1995（平成 7）年の高速増殖炉「もんじゅ」の事故や」とありますが、「もんじゅ」の事例は国際基準ではレベル 1 と安全上の影響度は極小で事故扱いではないので、削除するのが適切と考えます。 「再生可能エネルギーへの関心が高まっている。」とありますが、原子力と同様、エネルギー源にはメリットとデメリットがあるので、バランスよく、例えば、「再生可能エネルギーへの関心が高まっているが、安定供給などに課題がある。」とするのがより適切と考えます。
山川出版社 706 高校 日本史		

273	現代の諸課題 (省略) ～ 環境問題では、地球温暖化を防止するため、1997 (平成 9) 年に京都議定書が採択されて先進国の温室効果ガス排出削減の数値目標が定められた。さらに、2015 (平成 27) 年には、開発途上国もふくめて温室効果ガス排出削減を努力目標とするパリ協定が採択された。また、同年には国連サミットで持続可能な開発目標 (SDGs) も採択されている。 しかし、2011 (平成 23) 年 3 月 11 日の東日本大震災は、地球温暖化への影響が小さいとされる原子力発電について、安全性への信頼をゆるがす事故がおこった。大規模な津波が東北地方を中心とする太平洋岸一帯に深刻な被害を与えたが、とくに東京電力福島第一原子力発電所の事故にともなう放射性物質の放出による環境汚染は、エネルギー政策にとどまらず、今後の日本社会全体のあり方を問い直す重い課題をつきつけた。 ～ (省略)	
第一学習社 707 高等学校 日本史探究		
278	写真 2 福島第一原子力発電所事故 (2011 年 3 月)	
278	安全神話の崩壊と災害 (省略) ～ 2011 (平成 23) 年 3 月、三陸沖を震源地とするマグニチュード 9.0 の大地震が発生し、東北地方と関東地方の太平洋沿岸部を中心に甚大な被害をもたらした (東日本大震災)。津波により全電源を喪失した福島第一原子力発電所では、メルトダウン (炉心溶融) がおこって、大量の放射性物質が放出される大事故が発生し、原子力発電への国民の信頼は大きく揺らいだ。災害の多発により被災者のケアが課題となる一方、ボランティアによる積極的な救援活動がみられるようになり、また、災害から文化財を救出する試みもおこなわれている。	
280	表現 1 現代の日本におけるエネルギー事情は時代とともにどのような変化をし、人々の暮らしにどのような影響を与えただろうか。 図【1】日本の一次エネルギー国内供給構成および自給率 (%) の推移 (「エネルギー白書」) 1 石炭 写真【2】三井三池争議 (1959～60 年) 三井鉱山三池鉱業所が大量の指名解雇を通告したことに対し、労働組合側は全面ストなどで対抗したが、解雇を容認し敗北した。 2 石油 写真【3】石油化学コンビナートと公害 (四日市ぜんそく) 大気汚染による健康被害は甚大で、1972 年に被害者に対して賠償が命じられた。 3 原子力 図【4】ゴジラと鉄腕アトム 「ゴジラ」(1954 年に第 1 作公開) は核兵器がもたらす放射能の恐怖、鉄腕アトム (1963 年にアニメ放送開始) は原子力エネルギーの平和利用の象徴として、戦後の日本人に広く親しまれるキャラクターとなった。 図【5】原子力発電所 日本の原子力発電所は、1966 年の東海発電所の運転開始を皮切りに、1970 年代以降に増加し、2011 年の東日本大震災の直前には全国に 54 基存在した。現在、福島第一原子力発電所の事故の影響で、全国の原子力発電所の多くが、検査などのために運転停止となっている。	「表現 1」で、一次エネルギー国内供給構成及びエネルギー自給率の経年変化が示されているのは、我が国のエネルギー供給を考えるうえで、大変評価できると考えます。 図【5】で、「全国の原子力発電所の多くが、検査などのために運転停止となっている。」と運転停止の理由を記述していることは評価できると考えます。

【地理歴史 (世界史探究)】

エネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述内容		コメント・修正文の例
東京書籍 701 世界史探究		
352	反核運動 核兵器の拡散と戦争の脅威に対して、平和を望む国際世論が高まった。1954 年にビキニ水爆実験被災事件がおきると、原水爆禁止を求める運動が世界各国に広がり、翌 55 年に広島で原水爆禁止世界大会が、長崎で平和大会が	

	開催され、57年には世界の科学者がカナダでパグウォッシュ会議を開いて核兵器禁止をうったえた。この会議は、1955年に哲学者のラッセルと科学者のアインシュタインが、核兵器と核戦争の危険性をうったえる、ラッセル・アインシュタイン宣言を発表したのを受けて開催された。反核運動では、知識人も大きな役割を果たしたのである。	
352	日本漁船被曝を報じる新聞 アメリカが太平洋のビキニ環礁で行った水爆実験では、近くの島の人々や日本漁船の第五福竜丸の乗組員が「死の灰」をあびた。	「死の灰」をあびた。」とありますが、「死の灰」をあびて被曝した。」がより適切と考えます。
352	原子力の平和利用 20世紀に発展した原子物理学研究によって、原子核の研究が飛躍的に進展した。この研究は兵器開発に応用され、各国は核兵器の開発を競い、最初に原子爆弾の開発に成功したアメリカ合衆国は、これを広島と長崎に投下し、数十万人の命を奪った。しかし、1951年にアメリカで原子力発電がはじめられると、53年にアイゼンハワー大統領が“Atoms for peace”と題された演説を行い、原子力の平和利用への関心が高まった。1957年には原子力発電の軍事利用を防止するための国際機関として、国際原子力機関（IAEA）が設けられた。	「原子力発電の軍事利用を防止するための国際機関として、」とありますが、「原子力の平和的利用の促進とその軍事的利用を防止するための国際機関として、」がより適切です。
380	2 地球的諸問題 環境問題 20世紀には科学技術が発展したが、それによってひきおこされた環境破壊が大きな問題となり、さらに地球規模での気候変動などの問題をも生み出した。脱炭素社会の実現など、人類社会は現在多くの課題に直面している。 工業化の進展の過程で発生する、工場や自動車の排気ガスによる大気汚染は、酸性雨をもたらして森林を破壊し、フロンなどによるオゾン層の破壊は生態系に大きな影響を与えている。また、二酸化炭素などの温室効果ガスの大量発生は、地球温暖化をまねいて気候変動や海水面の上昇をもたらし、これによる砂漠化や森林の減少も大きな問題となっている。 環境問題への対処も継続的に行われている。1992年にはリオデジャネイロで国連環境開発会議（地球サミット）が開催されて、アジェンダ21とリオ宣言が採択され、「持続可能な開発」という考え方が理念として示された。1997年の第3回気候変動枠組条約締約国会議（COP3）では、京都議定書を採択して、温室効果ガス削減に向けた各国別の数値目標を定めた。その後、京都議定書からアメリカ合衆国が離脱するなどの問題もおこったが、2015年の第21回会議（COP21）では、196の国と地域が、京都議定書にかかる2020年以降の新たな温室効果ガス削減の枠組みであるパリ協定を採択した（16年発効）。世界各国は、パリ協定の精神のもとに再生可能エネルギーなどの開発を急ぎ、脱炭素社会の実現をめざしている。環境問題にかかわる主体は多岐にわたるため、国家だけでなく、企業、NGO、個人など、それぞれの取り組みが問われている。	
380	21世紀のエネルギー問題 21世紀に入り、世界のエネルギーの多様化が進行した。2011年の東日本大震災はそれをさらにおしすすめた。近年、風力発電や地熱発電のほか、サトウキビやトウモロコシから製作するバイオ燃料の開発がすすんだが、食料の量や価格に与える影響が懸念されている。また、アメリカなどで生産されるシェールガスやシェールオイルの開発がすすみ、原油価格が高い場合にとくに多く利用されるようになっていく。シェールガス、オイルの主要産出国であるアメリカに圧力をかけるために、ロシアやサウジアラビアは原油価格の引き下げをすすめ、これが産油国による原油の高価格設定にも影響を与えた。しかし、アメリカは2010年代末にサウジアラビア、ロシアを抜いて、世界最大の産油国となった。エネルギーの多様化が進み、「石油時代の終わり」の到来が予想されるなかで、消費国も価格が不安定な原油依存からの脱却が求められている。	「近年、風力発電や地熱発電のほか、サトウキビやトウモロコシから製作するバイオ燃料の開発がすすんだが、食料の量や価格に与える影響が懸念されている。」とあり、バイオ燃料が食料の量や価格に影響を与えることがきちんと記述されており、生徒が主体的に判断する上で必要な情報が適切に提供されていると評価できます。
380	原子力・核兵器の管理 1980年代までにすでに多くの問題が指摘されていた原子力は、90年代以降、環境問題が深刻化して二酸化炭素の排出量が問題視されるようになると、化石燃料を用いない環境に良いエネルギー獲得方法という評価も受けるようになった。しかし、2011年の福島第一原子力発電所事故により、ふたたび原子力発電所の安全が問われるようになり、一部の国では脱原発政策が採用されたが、新興国などには原子力重視の姿勢をかえて	

	いない国も少なくない。 ～（省略）	
実教出版 702 世界史探究		
364-365	新冷戦の重荷 （省略）～ 1986年に、チェルノブイリ原子力発電所で爆発事故がおこり、死者を含む大量の被曝者が出たとき、情報の隠ぺいが大きな問題となったことは、こうした改革に拍車をかけた。 ～（省略）	「死者を含む大量の被曝者が出たとき、」とありますが、当時は事故発生の実態を隠蔽していたことが問題となったので、例えば、「事故の発生を含む」とするのがより適切と考えます。
364	写真2 チェルノブイリ原子力発電所事故から約1か月後の1986年5月末に撮影された、事故現場の炉。炉全体をコンクリートで封じこめる作業がはじまっている。	
375	国際社会のなかの日本 1990年代以降、経済成長にかげりがみえてきた日本では、1995年1月に阪神地方で大地震がおき（阪神・淡路大震災）、2011年3月には地震と津波による東日本大震災がおきるなど、自然災害によっても甚大な被害が生じた。東日本大震災に際しては、福島第一原子力発電所が爆発事故をおこし、国のエネルギー政策が鋭く問われる事態となった。 ～（省略）	「福島第一原子力発電所が爆発事故をおこし」とありますが、事故の全体が爆発事故ではなく、事故の一過程で水素爆発を起こしたので、例えば、「福島第一原子力発電所が重大な事故をおこし」とするがより適切と考えます。
375	写真3 福島第一原子力発電所事故 この事故に起因する放射能汚染によって住んでいたところを離れなければならなくなり、いまだに元の住まいにもどれない人も多い。	
394	戦争と平和のはざまの原子力 史上初の核実験は、1945年7月に原子爆弾の実験としておこなわれ、8月には広島と長崎に実弾として投下された。1949年にはソ連も原爆実験に成功し、1952年にはアメリカが水素爆弾の実験に成功し、翌年にはソ連の水爆保有も明らかとなった。冷戦期の核兵器開発競争は、実験地の住民の被曝をまねき核兵器の廃絶を求める科学者たちのバグウォッシュ会議の開催（1957年）につながった。 世界初の原子力発電所は1951年に建設され、1950年代を通じて実用化されていった。1957年には、原子力の国際管理のために国際原子力機関（IAEA）が設立された。1973年の第1次石油危機を背景に、石油代替エネルギーとして世界各地で原子力発電所の建設がすすんだが、安全性に対する懸念も表明された。1979年アメリカのスリーマイル島原発事故、1986年ソ連のチェルノブイリ原発事故、2011年日本の福島第一原発事故は、人間が原子力を制御できるのかという問いを投げかけた。	「人間が原子力を制御できるのかという問いを投げかけた。」とありますが、事故の教訓に基づいて国際的な連携の下で安全性の向上が図られてきたのが実態なので、例えば、「事故の教訓に基づいて国際的な連携の下で安全対策の強化への動きに繋がった。」とするのがより適切と考えます。
帝国書院 703 新詳世界史探究		
323	東欧革命と「ベルリンの壁」の崩壊 （省略）～ 1986年にチェルノブイリ原子力発電所で大事故が発生すると、情報隠ぺいなど社会主義体制の欠陥が認識されるようになり、改革の動きが加速した。 ～（省略）	
343	3章 情報と科学技術によって結びつく世界 核エネルギーをめぐる動きと宇宙開発 核エネルギーおよび宇宙の平和利用と軍事利用は、並行して進んだ。科学は人類の未来をひらく可能性ももっている。 第二次世界大戦前に科学者が核エネルギー研究を志したのは、太陽に万が一にも変調が起きたとき、それを補うものがなければ人類は破滅するだろうという思いからだった。だが、核エネルギーを手にした人類は、かえって破滅のふちにみずから追いやって。核兵器の登場である。 アメリカに続いて、ソ連が1949年に原爆を保有した。するとアメリカは52年に水爆を開発し、ソ連も翌年にこれを保有するようになった。 核戦争勃発の危機感が世界に広がり、広島で第1回原水爆禁止世界大会が、次いで、核兵器廃絶を訴えるアインシュタインら科学者の声をもとにカナダで第1回バグウォッシュ会議が開かれるなど、反核平和運動が始まった。	「第二次世界大戦前に科学者が核エネルギー研究を志したのは、太陽に万が一にも変調が起きたとき、それを補うものがなければ人類は破滅するだろうという思いからだった。」とありますが、そのような客観的な事実はなく、科学的な探究心から核分裂によるエネルギー発生が発見されています。ただ、発生するエネルギーが膨大なため軍事への応用が図られ、秘密研究を経て米国の国家プロジェクトにより核兵器が開発されたのは事実です。そこで、このパラグラフは、例えば、「第二次世界大戦前の研究から、科学者は核分裂によりエネルギーが発生することを発見した。このエ

	しかし、核兵器保有を表明する国は増え続けた。 一方、太陽を補うエネルギーを、という夢は人々にも共有されてきた。広島・長崎への原爆投下を経験し、ビキニ環礁でのアメリカによる原水爆実験でも漁船が被曝（第五福竜丸事件）した日本では、被爆国であるがゆえに、平和利用への思いが強かった。原子力発電所の建設は、日本を含む全世界で進み、福島第一原発事故で安全だという考えに疑念が差し挟まれるようにもなったが、その後も建設に踏み切る国が続いている。 科学が切りひらく夢と、その軍事利用は一体で進むことが多い。宇宙開発もそうである。気象衛星と偵察衛星、そして衛星打ち上げロケットと、核弾頭搭載の弾道ミサイルは同じ技術に基づいている。しかし人類は、月そのほかの天体の軍事利用禁止（1966年の宇宙条約）や、核兵器保有国を限定させる核拡散防止条約（NPT）など、平和への取り組みをたゆまず進めてきた。	エネルギーが膨大なことに着目した秘密研究から軍事への応用が図られ、アメリカにより核兵器が開発された。」とするのがより適切と考えます。 「一方、太陽を補うエネルギーを、という夢は人々にも共有されてきた。」とありますが、上述の変更に伴い、「太陽を補うエネルギーを、という夢は人々にも共有されてきた。」は削除するのがより適切と考えます。また、「福島第一原発事故で安全だという考えに疑念が差し挟まれるようにもなったが、その後も建設に踏み切る国が続いている。」とありますが、危険なものを作り続けている国があるとの誤解を与える恐れがあります。そこで国際的な状況を反映させて、例えば、「福島第一原子力発電所の事故以降、原発の廃止を決定した国や、原発建設計画を撤回した国がある一方、エネルギー需要の高まりから、原発建設を推進している国もある。」とするのがより適切と考えます。
343	写真 4 事故の起こった福島第一原子力発電所（2011年）	
344	現代の諸課題を考える サブカルチャー作品にみる「冷戦と核エネルギー」 冷戦期に活躍した手塚治虫の漫画に、核エネルギーを扱ったものがある。朝鮮戦争期に創作された「来るべき世界」では、核兵器開発にしのぎを削る、米ソを思わせる二大国が描かれた。ベトナム戦争期に刊行された「火の鳥」未来編では核戦争が勃発し、全人類が死滅する展開となっている。未来編と同じ1960年代には、トールキンの「指輪物語」が広く読まれた。絶大な力を与え、所有者が魅入られてしまう魔法の指輪を、読者は、米ソ指導者が固執する核兵器の比喩だと考えた。70年代のデタントの時期は核戦争による終末を描く作品が減少し、新冷戦の80年代になって、映画「マッドマックス2」と、その影響を受けた「北斗の拳」や「風の谷のナウシカ」など、核戦争後を想起させる荒廃した世界を舞台にした作品が再び増加した。しかし、80年代以降の作品は、核戦争勃発の切迫感が強かった50～60年代と比べて、核戦争批判が後景に退くか、荒廃からの再生を強調する傾向が強い。福島第一原発事故後は、原発に関連する作品が増えた。	
344	【2】「シン・ゴジラ」（2016年） ビキニ水爆実験の影響で出現した1954年の初代ゴジラとは異なり、福島第一原発事故後の「シン・ゴジラ」では、放射性廃棄物に適応して核エネルギー変換器官を体内にもつに至ったゴジラが登場し、核エネルギーの平和利用に一石を投じる作品となっている。	
山川出版社 704 詳説世界史		
345	ペレストロイカから東欧革命へ （省略）～ 翌86年、人災によってチェルノブイリ原子力発電所で大規模な事故が発生すると、ゴルバチョフは「ペレストロイカ（建て直し）」をスローガンに社会主義体制の改革に着手した。 ～（省略）	
345	写真 チェルノブイリ原子力発電所の事故 現在のウクライナでおきたこの事故による被災者は数百万人におよび、被害は周辺諸国にも広がった。	
358	科学技術の進歩と環境問題 Q 20世紀以降の科学技術の革新は、人類の生活をどのようにかえたのだろうか。 20世紀には、科学技術のめざましい革新がおこり、それは広範な地域で生活水準の向上をもたらしたが、同時	「原子力発電のリスクが浮き彫りになるなか、」とありますが、事故の教訓に基づいて安全性向上が図られて来たのが実態なので、例えば、「事故の教訓に基づく

	に、環境破壊をはじめとする新たな問題も生み出した。 20 世紀初めに、アインシュタインの相対性理論などによって時間と空間の認識が大きくかわり、また、物質の構造を解明する量子力学も急成長した。その結果、物質を構成する微粒子とその動きが解明され、ついで核分裂により膨大なエネルギーが発生することも実証されて、原子爆弾の開発に結びついた。第二次世界大戦後に原子力発電の開発も進められたが、1979 年にはアメリカ合衆国のスリーマイル島原子力発電所で放射能もれ事故が生じ、ついで 86 年にソ連・チェルノブイリ原子力発電所、さらに 2011 年に東京電力福島第一原子力発電所で、メルトダウン（炉心溶融）と放射性物質の放出をともなう深刻な事故が発生した。こうして原子力発電のリスクが浮き彫りになるなか、水力・風力・太陽エネルギーによる発電を増やす努力も進められている。また、第二次世界大戦中には、ナイロンなどの化学繊維やプラスチックなどの人工素材を生産する石油化学も発達し、戦後にこれらの素材は世界中に普及した。	リスク低減に向けた取組が進められ原子力の安全向上が図られるとともに、」とするのがより適切と考えます。
358	写真 東京電力福島第一原子力発電所の事故 2011（平成 23）年 3 月の東日本大震災による津波の影響で、福島第 1 原子力発電所では炉心溶融をともなう大規模な事故が発生した。さらに放射能もれなどの被害によって、周辺地域での生活は困難なものとなった。	
359	写真 太陽光発電 メガソーラーと呼ばれる大規模なもの以外にも、小規模な電力網を村落単位で整備し、貧困など社会問題の解決をめざす動きもある。インド、2011 年撮影。	
山川出版社 705 高校世界史		
266	写真 2 チェルノブイリ原発事故 この事故による被災者は数百万人、被害は周辺諸国にも広がった。 Q なぜ、この事故を契機に改革が本格化したのだろうか。	
266	ペレストロイカから東欧革命へ（省略）～ ゴルバチョフが提唱した情報公開（グラスノスチ）や国内の改革（ペレストロイカ）は、翌 86 年のチェルノブイリ原子力発電所の事故を契機に本格化した。～（省略）	
277	科学技術の進歩と環境問題 20 世紀には、科学技術のめざましい革新がおこり、生活水準の向上をもたらしたが、同時に環境破壊をはじめとする新たな問題も生み出した。20 世紀初めに、アインシュタインの相対性理論などによって、時間と空間の認識が大きく変わった。また、物質の構造を解明する量子力学の急成長は、原子爆弾の開発に結び付いた。第二次世界大戦後には原子力発電も進められたが、原発事故の発生により原子力発電のリスクが浮き彫りになった。また、第二次世界大戦中には、化学繊維や人口を素材を生産する、石油化学も発達した。～（省略）	
277	①1979 年にはアメリカ合衆国のスリーマイル島原子力発電所で、86 年にはソ連・チェルノブイリ原子力発電所で、さらに 2011 年には東京電力福島第一原子力発電所で深刻な事故が発生した。	「深刻な事故」とありますが、国際基準では、スリーマイル島がレベル 5、チェルノブイリと東京電力福島第一がレベル 7 です。ただし、いずれもシビアアクシデントに分類されるので、原子力規制委員会が用いる「重大事故」とするのがより適切と考えます。
山川出版社 706 新世界史		
370	新冷戦と冷戦の終結（省略）～ 86 年におこったチェルノブイリ原子力発電所の事故は、ソ連社会の人命軽視の体質を露呈するとともに、西側との協力の必要性を明らかにした。～（省略）	
371	写真 チェルノブイリ原子力発電所事故 グラスノスチ政策をとるゴルバチョフは自国の原発事故を世界に公表し、危機を訴えた。	「グラスノスチ政策をとるゴルバチョフは自国の原発事故を世界に公表し、危機を訴えた。」とありますが、事故に関する情報を遅ればせながら公開しただけで、特に「危機を訴えた」訳ではないので、例えば、「グラスノスチ（情報公開）政策をとるゴルバチョフ

		は自国の原発事故に関する情報を世界に公表した。」とするがより適切と考えます。
387	知識基盤社会（省略）～ しかし、新たな問題も生まれている。核兵器や生物・化学兵器のような大量破壊兵器が開発され、原子力発電所の危険はチェルノブイリ原子力発電所事故や東日本大震災における東京電力福島第一原子力発電所の事故（2011 年）からも明らかである。インターネットの普及は一方で IT（情報技術）格差を生み出し、他方でサイバー攻撃のような危険と背中合わせである。遺伝子の操作やクローン技術については、どこまで人間に適用するかに関し倫理的な疑念が存在する。とくに大量の情報を瞬時に伝達する 5G（第 5 世代移動通信システム）や、大量のデータを記憶・学習・処理する AI（人工知能）の登場によって、たとえば車の自動運転が可能になるなど、これらの高度技術とともにサイバー空間や宇宙が重要性を増す一方で、国際政治におけるアメリカと中国の覇権争いが激化している。その結果、政府が高度技術に関わる経済政策で関与と統制を強化する兆候が見られる。～（省略）	「原子力発電所の危険はチェルノブイリ原子力発電所事故や東日本大震災における東京電力福島第一原子力発電所の事故（2011 年）からも明らかである。」とありますが、事故の教訓等に基づき安全性の向上が図られているので、いつも危険との誤解を受ける恐れがあります。そこで、例えば、「チェルノブイリ原子力発電所事故や東日本大震災における東京電力福島第一原子力発電所の事故（2011 年）から、原子力発電所は、重大な事故が起きる可能性があることが明らかとなった。」とするのがより適切と考えます。
第一学習社 707 高等学校 世界史探究		
252	写真 1 福島第一原子力発電所事故（2011 年）	
253	図 5 100 万 kW の発電設備を 1 年間運転するために必要な燃料 事故が起きるリスクや、廃炉にかかるコストなどは無視されている。	「事故が起きるリスクや、廃炉にかかるコストなどは無視されている。」とありますが、図 5 は元々リスクやコストとは関係なく、必要な燃料の重量を示したもののなので、この部分は削除するのが適切と考えます。なお、原子力発電所の事故が起きるリスクや廃炉にかかるコストは公表されています。
253	図 6 川内原発の原子炉（鹿児島）	
253	図 7 廃止措置への移行が決定された高速増殖原型炉「もんじゅ」（福井） 使用済みの核燃料を再利用する研究開発のために建設されたのだが、事故が相次いだため、2016 年に廃止が決定された。	「使用済みの核燃料を再利用する研究開発のために建設されたのだが、事故が相次いだため、」とありますが、「もんじゅ」の研究開発の目的は核燃料サイクルの確立であり、不具合事象は起きたが事故は起きておらず、また、廃止理由は政府の方針によるものなので、例えば、「国内における核燃料サイクルの確立を図る研究開発のために建設されたが、政府方針により、」とするのがより適切と考えます。
253	原子力発電とその課題 核のエネルギーを人為的にコントロールすることで、人類は原子力発電という新たな動力源をも手になることになった。1954 年にソ連が世界に先駆けて民生用の原子力発電所を稼働させてから、化石燃料にたよらず長期にわたって安定的に電力を供給でき、大気汚染の心配もないとされた原発は、欧米や日本など主要な先進諸国に広まっていった。しかし 1986 年のチェルノブイリ原子力発電所事故や 2011 年の東日本大震災での福島第一原子力発電所事故などに明らかのように、いったん大きな事故おきると制御不能となる原発は、放射性物質による汚染が長く残り、深刻な犠牲と危機をひきおこす。また、原子炉は高濃度の放射性廃棄物を生み出すが、これをどのように処分するのかも大きな課題になっている。 このように、原子力の利用や宇宙開発は、一方では私たちの日常生活を支えるエネルギーの供給や、未知の宇宙の解明を可能にしたが、他方で人類を絶滅させかねない軍事的な破壊力をもたらした。	「いったん大きな事故おきると制御不能となる原発は、放射性物質による汚染が長く残り、深刻な犠牲と危機をひきおこす。」とありますが、福島第一の事故ではある程度は制御され、かつ、健康への影響は見られなく、また、今後は事故の教訓等に基づき安全性の向上が図られているので、例えば、「いったん大きな事故おきると原発は、放射性物質による汚染が長く残る可能性がある。」とするのがより適切と考えます。 「原子炉は高濃度の放射性廃棄物を生み出すが、これをどのように処分するのかも大きな課題になってい

		る。」とありますが、より正確な用語を用いるとともに、放射性廃棄物処分の現状に基づき、例えば、「原子炉で使われた使用済み燃料から出る高レベル放射性廃棄物の処分方法は決まっているが、国内での処分場所が決まっていないという課題がある。」とするのがより適切と考えます。
253	図8 フィンランドで建設中の放射性廃棄物最終処分場「オンカロ」 高レベルの放射性廃棄物を地中深くに埋設し、10 万年にわたって保管するための施設。	高レベル放射性廃棄物の最終処分の問題を海外の事例も含めて紹介している点は優れていると評価できます。可能でしたら、今後我が国が脱原発政策に転換したとしても、これまでに国内で発生した高レベル放射性廃棄物の処分をしなければならないことを記述するとより適切と考えます。
253	問いのステップ③原子力が人類にはたす功罪をあげてみよう。	

【公民（公共）】

エネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述内容			コメント・修正文の例	
数研出版 713 新版 公共				
49	4 原子力発電の現状と課題 石油危機をきっかけに、世界の国々では石油への依存度を引き下げるための取り組みが行われた。石油の代替エネルギーとして天然ガスや原子力が導入され、省エネルギーの取り組みも進められた。 しかし、原子力発電においては、旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所や日本の福島第一原子力発電所などで、重大事故がいくつも発生している。そのため日本では、今後の原子力発電のあり方が問われている。			
49	事故のあった発電所			
	スリーマイル島原子力発電所 (アメリカ)	1979 年、燃料が溶融し、炉心が大規模に損傷する事故が起こった。		
	チェルノブイリ原子力発電所 (旧ソ連)	1986 年、原子炉が破損する大規模な事故が起こった。		
	福島第一原子力発電所	2011 年、東日本大震災での地震と津波による被害により、炉心溶融や水素爆発といった深刻な事故が起こった。		
49	【図】日本の原子力発電所の分布 (2020 年。「エネルギー白書」などによる)			

【公民（倫理）】

エネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述内容		コメント・修正文の例
東京書籍 701 倫理		
213-214	環境問題の深刻化 （省略）～ また、高度な科学技術をもった人間の活動が、一瞬にして自然と人間の生存に対して壊滅的な影響をおよぼすこともある。2011 年 3 月 11 日の東日本大震災は、巨大地震と大津波によって、自然の猛威を知らしめたが、それにつづく福島第一原子力発電所の事故は、地球環境におよぼす人為的な力の大きさを知らしめた。（省略）	「高度な科学技術をもった人間の活動が、一瞬にして自然と人間の生存に対して壊滅的な影響をおよぼすこともある」の例として、福島第一原子力発電所の事故を取り上げていますが、誤解を受ける恐れがありま

		す。2014 年に発表された原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）の報告書では、科学的知見に基づいた公衆への健康影響の評価として、公衆の被曝線量が低かったため健康へのリスクは低く、がんなどの将来の健康影響の発生が増加することは予測されないと結論しています。そこで、「壊滅的な」は削除する方がより適切な記述と考えます。
215	環境倫理の思想	本節における記載振り、特に、世代間倫理についての記述は、原子力発電で発生する放射性廃棄物の処分問題にも適用できる、応用性の高い優れた記述であると評価できます。
清水書院 703 高等学校 新倫理		
215	科学技術社会の光と影 現代は、科学技術が私たちの生活のすみずみにまで浸透し、科学技術なしには立ちゆかなくなっている社会である（科学技術社会）。科学技術の発展は、私たちの生活に高い利便性をもたらす一方で、影を落とす側面も併せもっている。たとえば、原子力爆弾の投下や原子力発電所の事故によって、私たちの社会は一瞬で終わる可能性がある。また、電車や自動車の利用はつねに交通事故の危険を孕み、パソコンの使用は絶えずコンピューターウィルスの脅威に曝されている。私たちは、科学技術の発展をただ礼賛するのではなく、その善し悪しについて深く議論し、社会に対する影響を慎重に見定めてゆかねばならぬ	「原子力爆弾の投下や原子力発電所の事故によって、私たちの社会は一瞬で終わる可能性がある」とありますが、戦争での極限状況である「原子力爆弾の投下」と平和利用であり社会が一瞬で終わることはあり得ない「原子力発電所の事故」を同列に置いているのは誤解を受ける恐れがあります。そこで、後段にも「原子力爆弾」について触れていることから、文全体の趣旨から、例えば、「原子力爆弾の投下によって、私たちの社会は一瞬で終わる可能性がある」とするのがより適切と考えます。
215	科学技術開発と倫理 しかし、人間が科学技術それ自体の善し悪しについて考えることなどできるのだろうか。ある科学技術が社会によい影響をあたえるかどうかは、その使い方しだいなのではないか。 けれども、このように科学技術を価値中立的なものとして見る考え方は、事実を正確にとらえていない。なぜなら、現代においては、個々の科学技術の大半は、特定の社会的なニーズを背景にして開発されているものだからである。たとえば免疫抑制技術は、臓器移植の実現を求める人々の強力なニーズによって生まれたものである。また、原子力爆弾も、特定の国家が軍事的な優位を得ることを目的として生み出したものである。太陽電池などのエコ技術も、環境保全に価値を認める世論を背景に開発がすすめられている。 このようにして生み出される科学技術は、はじめから特定の価値観や利害関係と結びついている。したがって、新たな科学技術の開発にあたっては、その目的の妥当性や社会におよぼす影響について、十分に議論をつくす必要がある。どのような科学技術を生み出していくかということについては、社会を構成する私たちの一人ひとりが責任を負っているのである。	「このようにして生み出される科学技術は、はじめから特定の価値観や利害関係と結びついている。」とあり、例示の技術はこれに該当しますが、相対性理論や放射線の発見のように、科学技術の中には純粋な真理の探求や全くの偶然から発見されるものもあり、すべての科学技術が特定の価値観や利害関係と結びついているわけではありません。そこで、例えば、「このように、科学技術の中には特定の価値観や利害関係と結びついて開発されたものもある。」とするのがより適切と考えます。
215	写真 コンビニエンスストアの駐車場に設置された太陽光パネル（神奈川県 相模原市）	
第一学習社 705 高等学校 倫理		
207	対話 私たちの生活に重大な影響をおよぼす現代技術に、私たちは、どのように向きあっていくべきなのだろうか。 2011 年 3 月、東日本大震災により福島第一原子力発電所が大きな被害を受け、大量の放射性物質が広い範囲に放出されるという深刻な事故が発生した。被災地では健康被害に加え、住民や農産物への風評被害も深刻な問題	タイトルを含め、福島第一事故を題材にして原子力政策の意思決定にどのように関与していったらよいかという問を投げかける優れた内容であり、主体的な学

	となった。科学技術には、想定外のことがおこる可能性がつねにあり、原子力発電所がひとたび事故をおこせば、多くの人々の生活やふるさとがうばわれることにつながる。私たちはどのように原子力政策の意思決定に関与していったらよいだろうか。	びを大切にする新学習指導要領の趣旨を生かしている」と評価できます。 ただ、「被災地では健康被害に加え、住民や農産物への風評被害も深刻な問題となった。」とありますが、2021 年に発表された原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）の報告書では、事故後に放射線被曝を直接の原因とする健康影響は報告されておらず、将来的に健康影響が発生する可能性も低いと結論しています。そこで、例えば、「被災地では、住民や農産物への風評被害も問題となった。」とするのがより適切と考えます。 全体に原子力発電のリスクのみが述べられていますが、原子力政策の意思決定のためには、原子力利用による安価で大量の電力や二酸化炭素の放出がないなどのベネフィット（利益）とリスクのバランスを考えることが大事であることを生徒に理解させることがより適切と考えます。
207	写真【3】福島第一原子力発電所の事故（福島県）	
207	将来世代に対する責任 将来世代の人々に対して、現代世代には、どのような責任があるのだろうか。 化石燃料にかわるエネルギー源として、原子力発電があるが、原子力発電には課題も多い。1986 年のチェルノブイリ原子力発電所（ウクライナ）や 2011 年の福島第一原子力発電所の事故、放射性物質漏れの問題など、安全性に対する懸念や根強い反対がある。また、放射性廃棄物の処理や管理の問題もある。原子力エネルギーを取りだせば取りだすほど危険な放射性廃棄物は蓄積されていく。その放射能が危険レベル以下になるまでに数万年かかるともいわれている。現在の世代が快適に暮らすために生みだすこうした負の遺産は、これから生まれてくる人々にとって重大な脅威となる。そもそも近代の倫理とは、生活をともにする人々の間でのルールであり、まだ生まれていない人々に対する危害について配慮する必要はなかった。しかし、現代の技術は、将来世代の人々の安全、健康、福利を脅かすほどの影響力をもつに至った。ドイツの哲学者ハンス・ヨナスは、責任は力の大きさに比例するので、現代世代には、自らの行為がおよぼす危害から将来世代を守る責任があると主張した。こうした責任の原型は、自ら生んだ子どもに対する親の責任と義務にあるという。世代間倫理の意義は、責任を負うべき対象を現在から将来世代にまで拡張することにある。私たちは自分と直接かわり合わないことにはあまり関心をもたないものであるが、現代世代には、将来世代がこうむる可能性のある害悪を想像して恐怖を感じる心がまえを育み、彼らの生存を脅かすような事態を回避する責任と義務がある。	「将来世代に対する責任」というタイトルは、将来世代を生き、さらにその先の世代につないでいく生徒への問い掛けとして大変適切であると評価できます。内容も、原子力発電で発生する放射性廃棄物の処分問題を例とした優れた記述であると評価できます。 ただし、全体に原子力のデメリットのみが列挙されており、原子力の利用は化石資源枯渇後も安定したエネルギー供給を可能とするなどのベネフィットについても記載して、公平な情報を提供することにより、生徒に考えさせるのがより適切と考えます。 特に、「放射性廃棄物の処理や管理の問題もある。」とありますが、処理や管理は特に問題はなく、処分場が未定なことが課題なので、例えば、「原子力発電所の運転に伴って発生する高レベル放射性廃棄物の最終処分場の建設場所が国内で決まっていない課題もある。」とするのがより適切と考えます。
192-193	東日本大震災と防災への取り組み 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、三陸沖を震源とするマグニチュードの海溝型地震であった。この地震では日本の広域で揺れが観測され、最大震度は 7 に達した。さらに東日本の太平洋沿岸一帯を襲う巨大な津波を発生させ、死者・行方不明者が 1 万 8000 人を超える大災害となった。リアス海岸が広がる三陸海岸では、海岸の港を中心に発達していた町の市街地が壊滅的な被害を受けた。海岸が複雑に入り組んだリアス海岸は、薄の奥に行くほど幅が狭くなり、水深も浅くなるため、津波の高さが急	「この際に、福島第一原子力発電所も被災し、放射性物質の放出による災害も生じた。」とありますが、可能でしたら、事故の経過を少々補って、例えば、「この津波により、福島第一原子力発電所の原子炉に必要

	に高くなることがある。宮古市田老地区のように、多くの人の想定を上回る高さの津波が押し寄せ、標高 30 m 以上まで津波が達した場所もあった。砂浜海岸が続く宮城県南部や福島県北部の海浜地域でも、内陸の標高 10 m 近くまで津波が押し寄せ、住宅地や農地が飲み込まれた。この際に、福島第一原子力発電所も被災し、放射性物質の放出による災害も生じた。この地震による一連の災害は東日本大震災とよばれる。 三陸海岸では、防潮堤や避難場所に指定されていた建物までもが津波の被害を受けた。このため震災後は、海岸近くの低地を商工業用地として、住宅の建設を規制する一方で、丘陵を切り開いた高台に住宅地を造成するなど、住民の声を反映した新たなまちづくりが進められている。	な電源が喪失し、炉心溶融から放射性物質が放出された災害も発生した。」とするのがより適切と考えます。
192	図 3 東日本大震災に関する主な動き（2011 年 3 月 11 日）	

【公民（政治・経済）】

エネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述内容		コメント・修正文の例
東京書籍 701 政治・経済		
130	公害から環境問題へ（省略）～ いっぽう、東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故は、大量の放射性物質を拡散させ、広い範囲にわたる環境汚染を引き起こし、その対策が急務とされている。	
223	2 地球環境問題 地球環境問題とはどのような問題だろうか。 地球環境問題への対応をめぐる、国際社会にはどのような利害対立があるだろうか。 脱炭素社会の構築に向けて各国政府や私たちにはどのような取り組みができるだろうか。	
223	グローバル化とそのガバナンス グローバル化とは、ヒト・モノ・カネ・情報のみならず、汚染・感染症などさまざまな現象が国境を越えて広がることである。それが進むにつれ、経済・環境・貧困・人権などの地球規模の課題（グローバル・イシュー）が発生し、さまざまなリスクが連動する時代となった。これらは一国だけで対処できるものではなく、多くの国や主体が協力してはじめて解決する問題であり、世界的な取り組みが必要となる。	
223	地球環境問題とは もとより自然に働きかけて生きてきた人類は、地球の環境・生態系を破壊し、自らの生存の基盤を脅かすに至った。地球環境問題とは、発展や開発が引き起こす自然の破壊や汚染、それがもたらす人体や生態系への悪影響が世代を超えて地球規模に及ぶ事態をさす。 家庭や工場、交通手段が排出する二酸化炭素などは大気圏の気温を上昇させる効果をもち（温室効果ガス）、また二酸化炭素を吸収して酸素を供給する熱帯林が減少することで、地球温暖化が引き起こされる。その結果、海面や海水温の上昇、ひいては、台風の大形化やゲリラ豪雨（局所的大雨）などの異常気象などをもたらしている。また、窒素酸化物や硫黄酸化物の排出は酸性雨のおもな原因になっている。いっぽう、エアコンや冷蔵庫などに使用されたフロンガスはオゾン層を破壊する。オゾン層は太陽光線に含まれる、生物にとって有害な紫外線を吸収する性質をもつ。	
223	図 1 温暖化による海面上昇で水没の危機にあるツバル（フナフティ）	
223	図 2 酸性雨の影響で立ち枯れた森林（チェコ）	
223	図 3 南極上空のオゾンホール推移（気象庁資料）	
224	原子力エネルギーは、原子力発電所が重大事故におちいらない場合でも、環境破壊を引き起こしうる。原発から生み出される放射性廃棄物は自然界に存在せず、長期にわたり安全に管理することが難しいからである。～（省略）	「原子力エネルギーは、原子力発電所が重大事故におちいらない場合でも、環境破壊を引き起こしうる。原発から生み出される放射性廃棄物は自然界に存在せず、長期にわたり安全に管理することが難しいからである。」とありますが、環境破壊は全ての技術に共通す

		るもので原子力に限りません。また、放射性廃棄物処分の技術は確立しており、国内での処分場が未定なことが課題なので、例えば、「原子力については、環境中に地球温暖化ガスを放出しない大きな利点があるが、原発から生み出される放射性廃棄物は自然界には存在しない核種を含み、長期にわたり安全に処分する必要がある。」とするがより適切と考えます。
224-225	地球環境保護の取り組みと課題（省略）～ 冷戦終結後、国際協力は加速した。1992年、172か国の政府代表とNGO代表らが参加して、ブラジルのリオデジャネイロで国連環境開発会議（地球サミット）が開かれ、「持続可能な開発」に向けて、地球規模のパートナーシップを構築することを宣言した。そこでは、気候変動枠組み条約（地球温暖化防止条約）や生物多様性条約が採択されたほか、具体的な行動計画であるアジェンダ 21 も採択され、地球環境保護の国際的枠組みが作られた。 いっぽう、環境保護のあり方をめぐり、利害の対立も生じた。最も大きいのは、発展途上国と先進国の対立である。これを緩和する方法として、環境を維持しながら開発を進めるという「持続可能な開発」という考え方がある。しかし、持続可能な開発に関する世界首脳会議（ヨハネスブルク会議）でも対立は表面化した。先進国間でも環境保護が国内経済に与える影響をめぐって対立があり、先進国に温室効果ガスの排出削減を義務づけた京都議定書からは、2001年、アメリカが離脱を表明した。 さらに、2015年の気候変動枠組み条約の締約国会議（COP21）で採択されたパリ協定では、発展途上国を含むすべての締約国が温室効果ガスの排出削減に取り組むこととなった。しかし、その達成は義務化されず、2020年にアメリカが離脱した。 脱炭素社会の構築のために、ヨーロッパ諸国の一部や日本などでは、環境税を導入して、温室効果ガスの排出削減を図っている。そのほかにも、京都議定書で導入された排出量取引やクリーン開発メカニズム（CDM）、パリ協定に盛り込まれた二国間クレジット制度（JCM）など、市場メカニズムや開発・技術援助を通じて世界全体の脱炭素化を後押しするしくみもある。	地球環境保護に関するこれまでの経緯や課題について適切に記載されており、評価できる内容と考えます。
225	⑤アジェンダ 21 地球環境問題について各国が共通の責任をもつが、その発生の経緯や技術力・資金力の差に配慮し、発展途上国よりも先進国のほうがより重い責任を負うべきとする「共通だが差異のある責任」の考えが示された。	
225	⑥「持続可能な開発」 「将来の世代のニーズを満たしつつ、現在の世代のニーズも満足させるような開発」のこと。1987年の「環境と開発に関する世界委員会（ブルントラント委員会）」の報告書「我ら共有の未来」で定式化された。	
225	⑦京都議定書 1997年の第3回締約国会議（COP3）で採択され、先進国に2008～12年間の温室効果ガス排出削減を義務づけた。2012年のCOP18では、京都議定書の8年間の延長が決定されたが、日本は参加しなかった。	
225	⑧パリ協定 世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つ目標を設定したうえで、1.5℃に抑えるよう努めること、すべての国が温室効果ガス削減目標を5年ごとに提出・更新し、世界全体で実施条件を再検討することなどが定められた。	
225	⑨環境税 化石燃料に課税する炭素税など、環境悪化の原因となる物質の排出や消費の抑制のために課す税のこと。日本では2012年に地球温暖化対策税が導入された。	
224	図6 世界の二酸化炭素排出量（左）と、おもな国の一人当たり二酸化炭素排出量（右）（エネルギー・経済統計要覧）	

225	図7 京都議定書とパリ協定 日本は「2050年までに排出量実質ゼロ」を宣言し、削減目標として「2030年までに46%削減（2013年度比）」を掲げている。	
225	図8 市場メカニズムを活用した排出削減のしくみ	
226	3 資源・エネルギー問題 資源・エネルギー問題に関してどのような課題があるのだろうか。 原子力発電に関して、日本および各国はどのような政策をとっているだろうか。 日本のこれからのエネルギー供給はどうあるべきだろうか。	
226- 227	世界の資源・エネルギー 資源には、石炭や石油などの化石燃料や、鉄鉱石などの鉱物資源、森林などの生物資源などがある。化石燃料や鉱物資源は有限であり、いずれ枯渇してしまうといわれている（枯渇性資源）。また、天然に存在する地域に偏りがある（資源の偏在性）ために、これらをめぐって多くの問題が表面化し、それをめぐる紛争も各地で頻発している。近年、レアメタルやレアアースなどの希少金属が注目されており、資源の輸出国の中には、それらを外交の手段とする国もある。 熱源や動力になる石油や太陽光などをエネルギー資源という。産業革命後のエネルギー資源は石炭が担っていたが、1960年代には石油にとって代わられた（エネルギー革命）。しかし、2度の石油危機をきっかけに、1980年代以降、天然ガスや原子力などの石油代替エネルギーの割合が増えてきた。また、資源確保に問題がなく、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を排出しない太陽光、風力、波力、地熱、潮力、バイオマスなどの再生可能エネルギーの実用化も促進されている。近年、頁岩とよばれる層（シェール層）から採取されるシェールガス（天然ガス）やシェールオイルの開発が進み、新たなエネルギー資源として利用されている。	「再生可能エネルギーの実用化も促進されている。」とありますが、再生可能エネルギーはいくつかの弱点から量的には実用化が実現していない現状から、例えば、「再生可能エネルギーの実用化が促進されているが、出力が弱い、天候に左右されて出力が安定しないなどの欠点が克服できておらず、主要な電源とはなっていないのが現状である。」とするのがより適切と考えます。
227- 228	日本の資源・エネルギー問題 日本における一次エネルギーの供給は、現在も化石燃料に大きく依存している。また、エネルギー資源のほとんどを輸入に頼っている。日本は1966年に商業用の原子力発電所が運転を開始し、原子力を石油代替エネルギーの中心に位置づけ、原子力発電を推進してきた。また、原子力発電の結果生み出されるプルトニウムを燃料とする核燃料サイクルの開発を掲げ、高速増殖炉「もんじゅ」の導入やプルサーマル計画を推進してきた。 しかし、「もんじゅ」のナトリウム漏れ事故、茨城県東海村での臨界事故、新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の破損事故などが発生した。核燃料サイクルの中心的プロジェクトである「もんじゅ」は、安全性のみならず、実用性や費用、さらに核兵器に転用可能なプルトニウムの蓄積が問題とされ、2016年に廃炉が決定された。しかしながら、政府は核燃料サイクルの考え自体を放棄していない。 2011年の東日本大震災にともなう福島第一原子力発電所の事故は、原発の「安全神話」を打ち壊し、人間が原子力を完全に制御できないことを世界に向けて明らかにした。原発事故は、一度起こると放射性物質による汚染が数十年も続き、その影響が広範囲にわたる。事故から10年ほどたって、福島県の県内外の避難者はいまだに3万6000人にもものぼる（2021年3月現在）。また、放射性物質の放出や食品問題まで、原発事故は国際問題にも発展する。世界的には、原発を推進する国が後を絶たないものの、事故を契機にドイツなど原子力発電の利用を見直す国も出てきており、市民レベルでの反原発運動も世界各地で展開された。 日本では、賛否が分かれるなか、2015年より原子力発電所の再稼働が始まったが、現在でも放射性廃棄物の有効な処理方法は確立されておらず、老朽化した原子炉の扱いなど多くの問題が残されている。また、政府は原発の海外への輸出推進を掲げているが、採算や人材などの面で問題を抱えている。	「高速増殖炉「もんじゅ」とありますが、正確には「高速増殖原型炉「もんじゅ」」です。 「新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の破損事故」とありますが、そのような事故は起きていないので、この部分は削除するのが適切です。 「核燃料サイクルの中心的プロジェクトである「もんじゅ」は、安全性のみならず、実用性や費用、さらに核兵器に転用可能なプルトニウムの蓄積が問題とされ、2016年に廃炉が決定された。しかしながら、政府は核燃料サイクルの考え自体を放棄していない。」とありますが、政府の公式見解に基づいて、例えば、「核燃料サイクルの中心的プロジェクトである「もんじゅ」は、運転再開までの時間と費用、新たな運営主体の特定が難しいこと等が問題とされ、「もんじゅ」再開で得られる知見を新たな方策で獲得していく方針が示されたことから、2016年に廃炉が決定された。」とするのがより適切と考えます。 「現在でも放射性廃棄物の有効な処理方法は確立されておらず、老朽化した原子炉の扱いなど多くの問題が残されている。」とありますが、低レベル放射性廃棄物の処分方法は確立されています。高レベル放射性廃

		棄物の処分技術は確立されていますが、国内では処分地がまだ決まっておらず、現在、北海道の二町村にて候補地の調査が進められています。課題はいくつかあるものの、特に「多い」わけではありません。そこで、例えば、「現在、高レベル放射性廃棄物の処理場が未定であることや、老朽化した原子炉の扱いなどいくつかの課題がある。」とするのがより適切と考えます。
226	②バイオマス 植物や動物のふん・し尿など、生物由来の有機性資源のこと。それを利用した燃料をバイオ燃料という。	
227	③一次エネルギー 一次エネルギーとは、自然界に存在する変換・加工されていないエネルギーのことで、天然ガスや石油・石炭などの化石燃料、ウラン、水力、風力などがある。二次エネルギーは、都市ガスや電気、ガソリンなど、一次エネルギーを加工したものをさす。	
227	④核燃料サイクル 原子力発電所の使用済み核燃料から抽出されたウランやプルトニウムを、再び燃料として利用するしくみ。プルサーマル計画では、抽出されたプルトニウムをウランと混合して燃料（MOX 燃料）をつくり、利用することを計画した。	
226	図 1 エネルギーの種類と位置づけ	
226	図 2 おもなエネルギー資源の分布と消費量（BP 統計ほか） 1 人あたりのエネルギー消費量の多い国はどの地域に分布しているだろうか。	
227	図 3 福島第一原子力発電所の事故の様子（福島県大熊町、2011 年 3 月）津波による全電源損失により核燃料を冷却できなくなり、建屋での水素爆発や炉心溶融（メルトダウン）が発生、大量の放射性物質が放出された。	
227	図 4 世界の一次エネルギー消費量の推移（エネルギー白書ほか）	
227	図 5 日本の一次エネルギー供給の推移（総合エネルギー統計） 2010 年度以降に原子力の割合が急減したのはなぜだろうか。	
228	資源・エネルギー問題の解決に向けて 今日、世界のエネルギー資源の多くを先進国が消費しているが、経済発展のめざましい中国やインドなどの新興国を中心にエネルギー需要が急激に高まっている。一方で、地球温暖化防止のため、二酸化炭素を排出する化石燃料の利用抑制に加え、再生可能エネルギーの利用促進のために法制・税制の整備に取り組む国も多い。日本でも、固定価格買取制度（FIT）を導入し、再生可能エネルギーの普及を企図した。また、地域独占だった電力会社から送配電事業を分離する発送電分離が行われ、電力の自由化が図られている。 さらに、コージェネレーション（熱電併給）などエネルギーの効率的な利用を図ることも重要になる。近年、情報通信技術（ICT）を活用して、電力の需要と供給をコントロールするスマートグリッド（賢い送電網）や、それを利用したスマートシティ構想も注目されている。日本の高い技術を駆使するとともに、省資源・省エネルギーへの取り組みなどを市民が主体となって進めていくことが求められている。	
229	トピック 日本のエネルギー供給はどうあるべきか 世界では一次エネルギーの大半を石油、天然ガス、石炭などの化石燃料に依存しており、その枯渇と地球環境への影響が問題となっている。また、発展途上国・新興国のエネルギー消費が急増し、代替となるエネルギーの開発が必要とされている。 日本もまた、化石燃料の利用を通じて地球環境に負荷をかけている（日本一国でアフリカ大陸全体に匹敵する二酸化炭素を排出）。なかでも発電量あたりの二酸化炭素排出量が天然ガスの約 2 倍となる石炭の利用が問題視されている。	「原発の危険性を世界に示した。」とありますが、一方で事故の教訓に基づき安全性向上が図られたので、例えば、「原発の危険性を世界に示した一方、安全生向上に向けた取組が国際連携により強化された。」とするのがより適切と考えます。 「他方、世界には老朽化した原子炉が多く存在し、放射性廃棄物による環境汚染も懸念される。」とありま

	化石燃料に代わるものと期待される原子力発電は、世界の発電量の約 10%を占める（2017 年）。原子力発電は大量のエネルギーを安定して供給できる反面、有害な放射性物質を大量に発生させる。1979 年のアメリカのスリーマイル島、1986 年のソ連（現在のウクライナ）のチェルノブイリ発電所、そして 2011 年に起こった福島第一原子力発電所の事故は、原発の危険性を世界に示した。これらを契機にドイツやイタリアなど脱原発を選ぶ国が増えるという、フランスやアメリカ、日本などは原発を維持し、中国やインドなどは原発を推進している。他方で、世界には老朽化した原子炉が多く存在し、放射性廃棄物による環境汚染も懸念される。 そこで、地球環境に対する負荷が少ない太陽光、風力、地熱、潮力、バイオマスなどの再生可能エネルギーが注目を集めている。風力についてはドイツ、アメリカ、中国などが大量に発電している。日本では、2011 年に風力や太陽光などによる電力の買い取りを電力会社に義務づける再生可能エネルギー特別措置法が成立したが、普及は限定的で、安定供給やコストなど改善の余地は大きい。 2015 年のパリ協定の目標を達成するためには、温室効果ガスの排出を 2050 年までに実質ゼロに抑える必要がある。日本も 2020 年にそれを公約したが、原子力や石炭の扱いから、水素発電のような技術革新まで、取り組むべき課題が山積している。 ①原子力発電について、世界の国々では対応が分かれている。廃止と維持・推進の両方の考え方について、解決すべき課題をあげてみよう。 ②将来のエネルギー供給の在り方について話し合ってみよう。	すが、放射性廃棄物による環境汚染の可能性は小さく、むしろ廃炉ビジネスが世界的な新たな潮流なので、例えば、「他方、世界には長期利用を経て廃炉になる原子炉が多く存在することから、新たに廃炉ビジネスが生まれている。」とするのがより適切と考えます。
228	⑤原子力発電所の再稼働 2014 年の第 4 次エネルギー基本計画以降、日本では原子力を、石炭などと並ぶベースロード電源（一日の電力需要の最低水準を継続的にまかなう電源）に位置づけている。	
228	⑥放射性廃棄物の処分 特に高レベル放射性廃棄物については、人が触れる恐れのない地下深くに地層処分することが求められるが、その最終処分場は世界にまだ一つも存在せず、各国で処分場の調査・選定・建設の手続きが検討されている。日本でも 2002 年から全国の地方公共団体を対象に調査の公募が行われている。	「地下深くに地層処分することが求められるが、その最終処分場は世界にまだ一つも存在せず、各国で処分場の調査・選定・建設の手続きが検討されている。」とありますが、フィンランドで最終処分場が建設中などの現状に沿って、例えば、「地下深くに地層処分することが求められる。その最終処分場はフィンランドで建設中のものもあり、現在各国で処分場の調査・選定・建設の手続きが進められている。」とするのがより適切と考えます。 「日本でも 2002 年から全国の地方公共団体を対象に調査の公募が行われている。」とありますが、現状に沿って、例えば、「日本でも 2002 年から全国の地方公共団体を対象に調査の公募が行われ、2021 年に応募した北海道の二町村にてそれぞれ調査が進められている。」とするのがより適切と考えます。
228	⑦固定価格買取制度 再生可能エネルギーで発電した電気を、電力会社が一定の価格で買い取る制度。	
228	図 6 日本再生可能エネルギー発電量の推移（資源エネルギー庁資料） 2013 年以降に発電量が急速に伸びているのはなぜだろうか。	再生可能エネルギー発電量が 2013 年以降伸びていることはよく分かる図ですが、量的に主要な電源になるには全く不十分であることが伝わらず、十分な発電量があるような誤解を与えるグラフでとっています。そこで、例えば、火力・原子力・水力など主要

		な電源の発電量と比較できるような図とするとより適切と考えます。
228	図 7 日本の原子力発電所 日本の原子力発電所のうち運転中のものはどれくらいあるだろうか。	
228	図 8 スマートグリッドの仕組み	
229	図 9 おもな国の電源別発電量 （エネルギー・経済統計要覧） 数値は各国内での発電量のみのものなので、電力輸出入は含まれていない。	
229	図 10 おもな発電方法の特徴 水力、波力、潮力、バイオマスについても、特徴を考え、比較してみよう。	
実教出版 702 詳述政治・経済		
228	環境保全をめぐる国際協力 地球環境問題は、国境をこえる空間的広がりをもつことから、国際協力なしには解決できない。そのために国際会議を積み重ねて、問題解決に向けた合意を形成する努力がおこなわれてきた。その代表例として、1987 年のオゾン層保護に関するモントリオール議定書、1997 年の地球温暖化防止に関する京都議定書、そして 2010 年の生物多様性に関する名古屋議定書をあげることができる。 なかでも地球温暖化防止は、最も注目された取り組みである。1997 年に気候変動枠組条約締約国が集まって開かれた第 3 回締約国会議（COP3）で、京都議定書が採択された。これは、先進国全体で 1990 年比 5.2%の温室効果ガスの排出削減義務を課した。しかし、中国など排出量が顕著に増加しつつある新興国が含まれていなかったため、2015 年にパリ協定が採択され、世界 196 か国・地域が参加した。これは、産業革命前からの世界平均気温の上昇を 2℃未満に抑え、今世紀後半までに実質的に排出ゼロ（人為的な温室効果ガス排出量から森林等による吸収源を差し引いた排出量をゼロにすること）の実現をうたった。これにより人類社会は、低炭素をこえて脱炭素をめざすことになった。	
229	エネルギー政策の変革 世界のエネルギーをめぐる状況は、大きな変革期にある。一時エネルギー消費では化石燃料（石油、石炭、天然ガス）依存度がまだ大きいものの、2000 年以降は原子力比率が低下し、再生可能エネルギー（再エネ）比率が上昇する傾向が明確に表れている。電力の電源構成でも先進国では 1990 年以降、石炭、石油、原子力の発電に占める比率が減少し、他方で再エネと天然ガスの比率が急速に上昇した。石炭比率の高い新興・発展途上国でも今後、先進国と同様の変化が見込まれる。 こうした変化の背景として、2011 年の福島第一原発事故により安全規制が強まり、国際的に原子力発電のコストが上昇したこと、パリ協定など温暖化防止の国際的な取り組みが進展し、化石燃料（とりわけ石炭と石油）への依存が減少していること、そして固定価格買取制度（FIT）により、再エネ発電が政策的に促進したことをあげることができる。 日本でも再エネ発電の総発電量に占める比率は FIT の導入の効果もあって、2010 年の 10%から 2018 年の 18%へと拡大した。しかし、再エネの発電コストは低下しているものの諸外国に比べてまだ高く、発電、変電、送電、配電システムの受け入れ容量が不足しているといった課題があるため、日本は再エネ比率でほかの先進国におくれを取っている。	「先進国では 1990 年以降、石炭、石油、原子力の発電に占める比率が減少し、」とありますが、米国のようにほぼ横ばい、フランスのように一時的に微減後微増、英国のように一旦減少して近年は増加、日本のように 2010 年まで増加して福島第一事故後に急減など、国や時代によってまちまちなので、「原子力」を削除するのがより適切と考えます。 「といった課題があるため、日本は再エネ比率でほかの先進国におくれを取っている。」とありますが、太陽光発電設備の設置量は、我が国は、米国、中国に次ぎ世界第 3 位なので、後半は削除して「といった課題がある。」とするのがより適切と考えます。
228	③2020 年、菅内閣は 2050 年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロとすることを表明した。また、中国も 2060 年までに実質ゼロとすることを国連演説のなかで表明した。	
229	① 再生可能エネルギー・・・太陽光・風力・水力・地熱・バイオマスなど、エネルギー源として永続的に利用することができるもの。利用にあたって、温室効果ガスを実質的に排出しない。	

229	② 固定価格買取制度・・・再エネ発電を一定の価格で電力会社に買い取らせる制度。その費用は電力料金に上乗せして、電力消費者に転嫁される。	「電力消費者に転嫁される。」ときちんと書かれている点は大変評価できます。可能でしたら、電力というライフラインの料金が、固定価格買い取り制度によってある種の逆進性を持つことの問題提起がされるとさらに評価できると考えます。
229	図2 世界の一次エネルギー消費割合の推移 BP 資料による。	
229	図3 主要国の発電電力量の電源構成 2019 年。IEA 資料による。	電源構成が掲載されている点は非常に評価できます。可能でしたら、電源構成の経年変化も掲載できればさらに評価できると考えます。
242	4 地球環境と資源エネルギー問題 私たちの文明は化石燃料に深く根ざしており、脱炭素化には莫大な費用がかかる。どうすれば「経済成長と環境保全のトレードオフ」を乗り越えて、温暖化防止を進めることができるだろうか。	
242	図1 地球の年平均気温の変化	
242	図2 世界の二酸化炭素排出量の推移	
242	地球温暖化問題に対して、先進国と途上国のどちらが責任を負うべきか。もし途上国が、先進国と同等の責任を担うなら、彼らにとって環境保全は、「経済成長への制約」となってしまう。また成長は、途上国にとって貧困問題を解決していく手段でもある。このため、成長を抑制してでも環境保全を優先するという考え方は途上国では受け入れがたい。環境保全と経済成長の両立をはかろうとする先進国の立場と、大きく対立する点である。SDGs は、こうした途上国の置かれたジレンマを解消しようとするなかから出てきた考え方である。途上国の成長の権利を保障し、それでいわば「原資」をかせぎながらも環境に配慮しつつ、貧困問題を解決していくための戦略として、途上国と先進国の双方に受け入れられている。 温暖化問題に対してより大きな責任をもつ先進国は、途上国よりも早く「脱炭素化」を達成する必要がある。2050 年までに実質排出ゼロを達成するのは容易ではないが、化石燃料を使用する発電、産業、輸送の各部門での大幅な排出削減がむしろ経済成長をもたらす「新しい経済モデル」への移行が急務である。	地球環境問題の本質が良く記述されていて、非常に評価できます。
243	CASE1 途上国の成長と地球破壊 途上国についても、最初は成長とともに汚染が増大するが、国民所得が一定の水準に達すると汚染が減少していく、環境クズネッツカーブが観察されてきた。中国は発展とともに都市の激しい大気汚染を克服しつつあるように見える。 とはいえ、必ずしも環境クズネッツカーブに沿う必要はない。発展の初期段階で、先進国から最新の技術や政策・制度を導入することで、環境を破壊せず成長する経路を目指すこともできる。例えば、発電コストが化石燃料を下回るようになった再エネで電力をまかなえば、温室効果ガスの排出を避けつつエネルギー供給をおこなうことは可能である。途上国はこうして、温室効果ガスの排出を抑制しながら経済成長を追求できる。	
243	CASE2 技術革新と地球環境 実は、先進主要国はすでに環境税や排出取引制度を導入し、環境保全へのインセンティブを与えることで、成長はするけれども温室効果ガスの排出は減少する「デカップリング（切り離し）」を達成しつつある。 その背景には、産業で技術革新と産業構造転換が進んだこと、交通では自動車の燃費が向上し、ハイブリッド車や電気自動車への移行が進んでいること、何よりも電力で化石燃料による発電が減少し、再生可能エネルギーによる発電が急増している点があげられる。これらの転換に対する投資が活発化し、新しい環境エネルギー産業で雇用と所得がもたらされ、経済成長につながっている。	

243	TRY ・先進国のデカップリングや途上国の環境クズネッツカーブを統計データで確かめてみよう。また、どのような要因でこれらが可能になったのか、議論してみよう。 ・途上国が CASE1 のような発展経路をたどるためには、先進国と途上国の国際協力も必要である。先進国が途上国のために何ができるか考えてみよう。	
243	図 3 環境クズネッツカーブ	
243	図 4 GDP と二酸化炭素排出量の関係 IEA 資料による。	
実教出版 703 最新政治・経済		
150	6 地球環境問題、資源エネルギー問題 化石燃料の大量消費とその理由 エネルギーとは、熱源や動力源、あるいは原材料となるものである。エネルギーの供給源は、化石燃料、原子力、再生可能エネルギーに大別される。いずれも、自然界に存在するため、一次エネルギーという。これに対して、一次エネルギーから得られるガソリンや電力などは二次エネルギーとよばれる。 世界の一次エネルギーの消費量は、20 世紀なかばから激増しているが、その大半は化石燃料でまかなわれており、原子力や再生可能エネルギーは少ない。また、一次エネルギー消費量のうち 4 割弱が、発電に使われている。 原子力や、バイオマス以外の再生可能エネルギーは、通常、電力会社が電力という形にしなければ利用できない。他方、化石燃料は企業や個人が直接つかうことができ、電気にする必要もなく貯蔵も容易である。このため、とくに輸送部門で、動力源として多用されている。また、化石燃料は、産業部門（鉄鋼や化学産業など）でも、製造過程で、または原材料として、多く必要とされている。化石燃料が一次エネルギー消費量の大半を占めている理由は、その特性にあるといえる。	
150	化石燃料はなぜ大量消費されるのか。また、大量消費にともなう課題の解決に向け、どのような取り組みが進んでいるのだろうか。	
150	1 一次エネルギー 化石燃料としては、石炭、石油、天然ガスがある。また、再生可能エネルギーには、風力、水力、太陽光、地熱、バイオマスなどがある。	
150	2 輸送部門 輸送部門を構成するものとしては、鉄道、自動車、飛行機、船舶などがある。	
150-151	パリ協定と持続可能な開発目標 強みの多い化石燃料にも、弱点はある。とくに、燃焼時に温室効果ガスである CO ₂ （二酸化炭素）を多く発生させ、地球温暖化の主因となっていることは、最大の弱点である。そこで、2015 年に採択されたパリ協定では、温室効果ガスの排出量を 21 世紀後半の早い時期に実質ゼロとし、産業革命前からの気温上昇を 2℃未満（できれば 1.5℃未満）におさえることを目標としている。脱炭素社会の形成は、わたしたちにつきつけられた重大な課題である。 他方で、わたしたちは、文明社会を維持・発展させていくという課題もかかえている。持続可能な開発目標（SDGs）は、2030 年までに地球上から貧困と飢餓の撲滅、保健医療を通じた健康と福祉の推進、きれいな水と衛生へのアクセス確保などを目指すとしており、これには鉄鋼や化学製品、輸送機関などを要する。つまり、化石燃料と手を切って SDGs を達成することは、非現実的である。では、どうすれば、脱炭素社会の形成と化石燃料の利用を、両立できるのだろうか。	
151	「負の排出」頼みのパリ協定 まず、化石燃料に由来する CO ₂ を、なるべく大気中に排出しないようにする必要がある。その方法としては、火力発電所や製鉄所などから出る CO ₂ を回収し、地下に埋める CCS（CO ₂ 回収・貯留）がある。すでに一部で実用化されているが、広範な実証実験と普及が急がれる。 しかし、これだけでは人為起源の CO ₂ の大気中への排出はなくなるらない。そこで、大気中に排出・蓄積された CO ₂ を回収・吸収するネガティブ・エミッション（負の排出）が必要だと考えられている。つまり、パリ協定がめざす	

	「排出量が実質ゼロの状態」とは、排出量と回収・吸収量が等しい状態のことを意味している。ただし、2℃目標の達成には、実質ゼロの実現では不十分で、回収・吸収量が排出量を上まわる状態の維持がほぼ必須とされているが、その方法と展開は、まだ不確実である。	
151	温室効果ガス 温室効果ガスには、CO ₂ のほか、メタン、一酸化二窒素、フロンガスなどがある。地球温暖化に最も大きく影響を及ぼしているのは、化石燃料に由来する CO ₂ である。	
151	3 地球温暖化防止への取り組み 1992年にブラジルのリオデジャネイロで地球サミット（国連環境開発会議）が開催され、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることをめざす「気候変動枠組条約」が採択された。同条約の1997年の第3回締約国会議（COP3）では、先進国に温室効果ガス削減を義務づける京都議定書が採択されたが、途上国に削減義務がなく、大きな成果を上げられなかった。このため、2015年のCOP21で、パリ協定が採択され、翌年に発効した。同協定では、すべての国が温室効果ガスの自主削減目標を誓約したうえで、専門家による評価を受け、5年ごとに目標を再提出していくことが定められている。	
151	TRY パリ協定にもとづく各国の二酸化炭素削減目標を調べ、日本がその目標を実現するためにはどのような手段があるか、話し合ってみよう。	生徒で話し合ってみよう。考えさせるのは良い取組と評価できます。
150	図1 世界の一次エネルギー消費量の推移 日本エネルギー経済研究所資料による。	世界の一次エネルギーの経年変化が分かるグラフで、本文の内容を理解する上で必須の良い資料となっていると評価できます。
150	図2 おもな再生可能エネルギー 太陽光・太陽熱・風力・水力・バイオマス・地熱・氷雪熱・波力・海流・海洋温度差など、自然界にある素材を電源に利用する。	
151	図3 日本がめざす「実質ゼロ」の取り組み 日本経済新聞社による。	
151	図4 世界のCO₂排出量の実質ゼロからマイナスへの移行 2010年代から世界のCO ₂ 排出量が減少し、2030年頃からはネガティブ・エミッション（負の排出）による回収・吸収が本格化すると想定したシナリオ。実線は、排出量から回収・吸収量を引いた量であり、2070年頃からは、これがマイナスになる（回収・吸収量が排出量を上まわる）状態となることが想定されている。	
清水書院 704 高等学校 政治・経済		
170	4. 安心・安全な社会を実現するには？ 私たちの毎日の暮らしが成り立つためには、私たちの生きる社会が安全で安心できることが前提である。では「安全・安心な社会」とはどういう社会なのか。私たちの今日の暮らしが明日も保障されている社会であること、あるいは私たちの生命や財産が守られる社会であることなどを思い浮かべよう。私たち一人ひとりが個人として尊重されなければ基本的人権の保障はあり得ず、「安全・安心な社会」は実現されることはない。	
170	不測の事態に 대응 私たちは予測不可能な世界に生きている。東日本大震災では地震の発生は不可避であったが、被害を最小限にする工夫は可能だ。今後想定される南海地震などでは地震そのものによる被害を最小限に抑える工夫のみならず、地震にともなって発生する火災や津波などからの被害を最小限にするための工夫も必要だ。さらに震災から復興するだけの社会の力も蓄えておかねばならない。 よく指摘されるのは、自助、共助（互助）、公助、すなわち、災害時に自分の安全はまず自分が守り、次に地域の人たちと協力して地域を守るための備えと行動、さらに国や地方公共団体など行政を中心とした災害への備え、である。	「食料安全保障が叫ばれるゆえんである。人口が減少し少子高齢化がさらに進むと」とありますが、我が国の食料自給率は約30%、エネルギー自給率は約10%であることから、後者の重要性は無視できないので、例えば、「食料安全保障が叫ばれるゆえんである。また、エネルギー自給率が先進国中最低の日本では、国際情勢の変化でエネルギーの輸入が止まると電気が止まり死活問題に発展しかねない。このため、エネルギー安全保障の重要性も認識しておく必要がある。人口が

	しかし、安全・安心な社会を作るにはもう少し別の視点も必要だろう。これまで学習してきた内容を振り返れば、南海地震が発生すると復興のために 10 兆円規模の財政出動を 10 年単位で実行しなければならない。そのためには財政が赤字体質で支えられるのか。あるいは、紛争が起きて日本が海外から食料を輸入できなくなった場合には、食料自給率の低い日本は、いわば兵糧攻めにあう可能性がある。食料自給率の低さが私たちの安全・安心を揺さぶる。食料安全保障が叫ばれるゆえんである。人口が減少し少子高齢化がさらに進むと、社会保障制度が対応できなくなるのではないかという懸念がある。気候変動にともなう災害が急増しているという指摘もある。	減少し少子高齢化がさらに進むと」と付記するのがより適切と考えます。
170-171	事故の確率 「安全・安心な社会を実現する」にあたり、私たちはリスクを考える必要がある。災害や事故では、リスクは「事故の確率」×「被害の大きさ」で定義される。 原子力は、普及する過程において、大事故の可能性は極めて低いと考えられていた。しかし、1986 年には旧ソ連のチェルノブイリで、2011 年には福島第一原子力発電所で、現実の大事故は起きた。 リスクの第一の変数「事故の確率」には、数量データにもとづき統計的に定義できるものと、できないものがある。定義できる例は、「今後 1 万年のうちにマグニチュード 8 以上の大地震が生じる確率」のような自然現象などの不確かさだ。定義できない例は、「今後 10 年間、原子力発電所を大津波が来そうな場所で稼働させ続けるのか否か」のような人間の作為が決定する事柄だ。人間の作為が決定をする場合は統計的に計算ができないことが多い。	「定義できない例は、「今後 10 年間、原子力発電所を大津波が来そうな場所で稼働させ続けるのか否か」のような人間の作為が決定する事柄だ。」とありますが、これはそもそも確率の単位となっていないので、例えば、「今後 10 年間、原子力発電所を稼働させ続けた場合にテロにより重大事故が発生する確率」のような人間の作為が関連する事例だ。」とするのがより適切と考えます。
171	被害の広がり リスクの第二の変数である「被害の大きさ」は際限がなく大きくなる傾向がある。福島第一原子力発電所の事故では、拡散した放射性物質が周辺地域を長きにわたり帰還困難地区とした。人々は避難生活を続けざるを得ず、農業や漁業も莫大な損害を受けた。除染作業にも費用がかかる。廃炉の実現までにどれだけの時間と費用がかかるだろうか。	「リスクの第二の変数である「被害の大きさ」は際限がなく大きくなる傾向がある。」とあるが、特にそのような傾向はなくケースバイケースなので、例えば、「リスクの第二の変数である「被害の大きさ」は、第一の変数が極めて小さい場合でも、大きくなる場合がある。」とするのがより適切と考えます。
171	損失負担と防災・減災 費用を負担するのは誰か。事故がもたらす損失や新たな費用は膨大で、事故を起こした電力会社の負担能力をこえる。保険会社がすべてを補償してくれることもない。その結果、政府が国民の税金を使って肩代わりするか、被害者に損失の負担を強いる事態になりかねない。 災害の発生を防ぐことできなくても、災害による被害を可能な限り小さくする減災はできる。減災は損害負担を小さくし、結果として、私たちの生命を守り、安全・安心な社会を実現することになる。	
171	探求と構想 ①安全・安心な社会をはばむ要因にはどのようなものがあるか。具体的にあげてみよう。また、その阻害要因をなくすために、あるいは影響を小さくするためにどのような対策がとれるか、考えてみよう。 ②福島第一原発の周辺地域の住民は避難生活を余儀なくされた。その損失は誰がどこまで補償すべきであるのか、考えてみよう。 ③「安全・安心な社会」の実現に必要な政治や経済の役割を、まとめてみよう。	
171	図 1 福島第一原子力発電所 3 号機 水素爆発で大破した原子炉建屋のようす。(2011 年 3 月 15 日)「東京電力提供」	「水素爆発で大破した原子炉建屋」と正確に記述されている点は評価できます。
240	5. 地球環境を守る資源・エネルギー開発とは？ 石油など化石燃料の大量使用によって大気中の二酸化炭素 (CO₂) 濃度が上昇したことが、地球温暖化の主要な原因といわれている。温暖化の進行によって、海面の上昇食料生産や人の健康への影響、異常気象などが心配される。	

240	気候変動の問題とこれまでの国際社会のおもな取り組み 1992 年、ブラジルで開かれた国連環境開発会議（地球サミット）では、気候変動枠組条約が採択され、地球温暖化対策に世界全体で取り組むことが合意された。この条約にもとづき、1995 年から毎年、気候変動枠組条約締約国会議（COP）が開催されている。1997 年に京都で開催された気候変動枠組条約第 3 回締約国会議（COP3）では、二酸化炭素など温室効果ガスの削減を先進国に割り当てた京都議定書が合意された。 ところが、この議定書の発効に向けたうごきのなかで、自国の経済活動が制約されることを嫌ったアメリカは合意から離脱した。また、二酸化炭素の排出量が世界の上位となった中国やインドは、先進国ではないためその削減を義務づけられていなかったことなどから、京都議定書の枠組みを全面的に見直す必要が生じた。 2015 年、パリで開かれた COP21 において、京都議定書に代わる地球温暖化対策のルールが採択された（パリ協定）。この協定には 197 の国・地域が参加し、世界共通の長期目標として、産業革命前からの気温上昇を 2℃未満とすることなどが定められた。また、先進国に発展途上国向けの資金支援を義務づけた。 パリ協定は、温暖化対策にすべての国が参加するという歴史的な合意であったが、自国内での雇用創出を優先するアメリカのトランプ前大統領は、この協定から離脱した。しかし、2020 年の大統領選挙に勝利したバイデン現大統領は就任早々、パリ協定への復帰を決断している。	
240-241	再生可能エネルギー・クリーンエネルギー 地球温暖化対策は、資源・エネルギー問題と密接にかかわっている。一般に、資源・エネルギー問題については、「3E+S」が基本的視点として重要である。すなわち、安全（Safety）を前提としたうえで、安定的（energy security）に低コスト（economy）で、環境保全（environmental conservation）を図りながら、どのように資源・エネルギーを確保するかということである。 たとえば、石炭を使った火力発電は、天候に左右されないなど供給の安定性にはすぐれているが、二酸化炭素や窒素酸化物などを排出するため環境への負荷が懸念される。一方、太陽光や風力など再生可能エネルギーは、発電時に二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギーであるとされるが、自然条件に発電量が依存するなど安定供給に課題がある。原子力発電は安定的で大量の電力供給が可能であるが、放射性廃棄物の処理の問題や安全性への懸念がある。 このように、いずれの資源・エネルギーにもメリット・デメリットがあるため、それらをどのように組み合わせで使うのがよいのか、エネルギーミックスの最適化を検討する必要がある。	全体にそれぞれのエネルギーについて、その光と影をバランス良く説明しており、好ましい内容になっていると評価できます。 ただし、「安全（Safety）を前提としたうえで、安定的（energy security）に低コスト（economy）で、環境保全（environmental conservation）を図りながら、」とありますが、より厳密には、「安全性（safety）を大前提としたうえで、安定供給（energy security）、経済効率性（economic efficiency）、環境適合性（environment）を同時に達成しながら、」とするのがより適切と考えます。
241	SDGs の観点で問題解決 現在世代が豊かに暮らすために、有限な資源・エネルギーを使い尽くしてしまうことは、持続可能な開発とはいえない。現在世代の経済活動によって、温暖化という負の遺産を将来世代に押しつけることも問題である。 2015 年の国連持続可能な開発サミットで採択された SDGs（持続可能な開発目標）では、「気候変動に具体的な対策を」（目標 13）とともに、「エネルギーをみんなに、そしてクリーンに」（目標 7）が盛り込まれた。この目標の実現のために、私たちは何ができるであろうか。 一般に、経済活動を優先すれば、地球環境の保全が困難になることは明確である。そのため、すでに豊かな生活を実現している先進国と、「貧困をなくそう」（目標 1）という課題に取り組んでいる発展途上国との間では、温暖化対策をめぐる利害対立が存在する。また、同じ国内であっても、従事している産業などによって、温暖化対策のあり方については意見の相違がある。 「誰も置き去りにしない」。この SDGs の理念を実現する具体策を、考えたい。	
241	探求と構想 ①2020 年 11 月、アメリカはパリ協定から離脱したが、この理由を調べてみよう。	

	②2050年の日本のエネルギー・ミックスかはどうあるべき、「3E+S」をふまえて検討してみよう。	
241	図1 世界の二酸化炭素(CO ₂)排出量 2016年の世界の総排出量は323億tで、1990に比べて100億t以上増加している。 (「世界国勢図会」2019/20年版)	
数研出版 705 政治・経済		
218- 219	資源・エネルギー問題 資源やエネルギーを日本はどのように確保したらよいだろうか。 資源・エネルギーに関する根本的問題は、その偏在性と有限性(枯渇性)である。石油や石炭などの化石燃料や鉄鉱石・銅・レアメタルなどの鉱物資源といった天然資源の多くは発展途上国にあり、その多くを利用しているのは先進国である。とくに石油は、1950年代後半からのエネルギー革命を背景に、先進国で大量に利用され、重化学工業を拡大させた。かつて世界の石油事業を支配していたのも先進国の国際石油資本(メジャー)であった。しかし、第四次中東戦争をきっかけに、産油国は価格の引き上げと生産削減を実施し、世界経済に大きな衝撃を与えた(第一次石油危機)。 こうした流れのなかで、先進国は省資源・省エネルギーに取り組むことになった。しかし、その方針は、経済的に豊かな生活を求める発展途上国と必ずしも同じではなく、資源を枯渇させず、途上国の豊かさにも貢献できるように新しい技術の開発が求められている。もっとも実用化が進んだ石油代替エネルギーは原子力エネルギーであるが、その安全性や放射性廃棄物の処理などで深刻な問題も抱えている。 現在、低炭素社会の実現を目指している日本では、環境税の導入といった政策が実施されている。このほかにも、天然ガスなどを燃料とし、発電すると同時に排熱を効率的に利用して、給湯や冷暖房を行うコージェネレーションや、情報通信技術(ICT)を活用して電力の需要側と供給側をコントロールして最適化するスマートグリッドの導入も進められている。	「もっとも実用化が進んだ石油代替エネルギーは原子力エネルギーであるが、その安全性や放射性廃棄物の処理などで深刻な問題も抱えている。」とありますが、前半はその通りで評価できます。ただし、放射性廃棄物の処理には問題がなく、処分では国内で処分場が未定との課題がありますが、「深刻な問題も抱えている」はオーバーな表現なので、例えば、「もっとも実用化が進んだ石油代替エネルギーは原子力エネルギーであるが、その安全性や放射性廃棄物の処分などで課題がある。」とするのがより適切と考えます。
219	石油代替エネルギーの問題 石油に代わるエネルギー源としては、①現実に入手が可能、②価格が安い、③供給が安定している、④量的に豊富、⑤安全で環境問題の心配がないなどの条件を満たしていることが望ましい。しかし、これらすべての条件を満たすエネルギー源は現在のところ存在しない。原子力は、供給も安定し、地球温暖化の要因である炭酸ガスの発生もなく、実用化が進んだが、アメリカのスリーマイル島原発事故や旧ソ連のチェルノブイリ原発事故、日本でも、東海村臨界事故や東日本大震災にともなう福島第一原発事故などの重大な事故が起こったために、新たな原発の建設は減少している。そのなかで、太陽光・地熱・風力・波力・バイオマスなどの再生可能エネルギーの開発に関心が集まっているが、技術的な問題もあり供給が安定しないなどの課題がある。	原子力発電が事故の影響で新增設が減少していることに触れる一方、再生可能エネルギーは供給が安定しないことがきちんと書かれていることから、生徒が主体的に判断するための情報をきちんと提供できていると評価できます。
218	③石油依存度 エネルギー革命の結果、日本は石油消費量の99%以上を輸入に依存するなど、海外依存度が上昇した。また、レアメタルや石炭・鉄鉱石など鉱物資源の輸入依存度も高い。	
219	①環境税 すべての化石燃料の利用に対して、二酸化炭素の排出量に応じた税率を課す地球温暖化対策税が2012年に導入された。	
218	図 世界の地域別エネルギー消費量の推移 (資源エネルギー「エネルギー白書2020」による)	
218	図 世界のエネルギー源別消費量の推移 (資源エネルギー庁「エネルギー白書2020」による)	エネルギー源別消費の経年変化が分かる資料であり、本文の内容を理解する上で必須の資料となっていると評価できます。
219	図 エネルギーの定義 (資源エネルギー庁資料による)	
219	図 日本の原子力発電所の分布 (2018年。「エネルギー白書」などによる)	
第一学習社 706 高等学校 政治・経済		
224	地球環境問題への取り組み	

	地球環境問題をめぐる国際会議 環境問題に対する初の国際会議として、1972 年スウェーデンのストックホルムで国際人間環境会議が開催された。この会議は「かけがえのない地球」をスローガンに掲げ、人間環境宣言を採択し、国連環境計画（UNEP）の設置を決定した。 1992 年にブラジルのリオデジャネイロで開かれた国連環境開発会議（地球サミット）では、「持続可能な開発」を基本理念とした「リオ宣言」が採択され、その行動計画としてアジェンダ 21 が策定された。また、温暖化防止のための気候変動枠組み条約が締結された。そのほか、生物多様性の保全と遺伝資源の持続的利用や、その利益の公平な分配のための生物多様性条約が採択された。なお、同年に発効したバーゼル条約では、有機廃棄物の国境を超える移動やその処分が規制されることになった。 2002 年には、南アフリカ共和国のヨハネスブルクで環境・開発サミットが開かれ、「持続可能な開発」などに向けて、具体的な実施計画とヨハネスブルク宣言が採択された。その後、2012 年に開かれた「持続可能な開発会議」（リオ+20）では、経済成長と環境保全を両立させる「グリーン経済」が提唱された。	
224	京都議定書からパリ協定へ 1997 年の気候変動枠組み条約第 3 回締約国会議（COP3）では、先進国の温室効果ガス排出削減目標や、国際排出量取引の導入が盛り込まれた京都議定書が採択された。しかし、京都議定書はアメリカが離脱し、発展途上国には削減義務が課せられないなど、課題が残された。また、京都議定書は 2013 年以降も延長されたが、日本・ロシア・カナダはこの延長を拒否し、削減義務を負わないことになった。 2015 年にパリで開かれた COP21 では、2020 年以降の枠組みとなるパリ協定が採択された。この協定では、発展途上国を含むすべての国が自主的に削減目標を設定し、その達成に向けた対策をとることが求められている。日本は 2030 年度の温室効果ガスの排出を 2013 年度の水準から 26%削減することを目標としている。そして、2050 年までに、温室効果ガスの増加を全体として実質ゼロにするカーボンニュートラルの社会の実現を目指すとしている。 地球環境問題は各国の利害が絡みあっている。この問題を解決するためには、各国が「共通だが差異のある責任」をいっそう共有することが重要である。	
224	地球環境問題の取り組みに関する国際的な原則 持続可能な開発 「将来の世代の欲求を満たしつつ、現在の世代の欲求も満足させるような開発」のこと。環境と開発は対立するものではなく、共存できるものであり、環境保全を考慮した節度ある開発が重要であるという考え方に基づいている。 共通だが差異のある責任 地球環境問題に対しては、どの国も共通して責任を負い、開発に際しては環境への配慮が求められる。しかし、先進国と発展途上国の間には技術力や資金力に差があることや、これまでの環境悪化の原因はおもに先進国にあることから、各国の取り組み方に差異を設けるべきであるとする考え方。リオ宣言で取り上げられた。	
224	表 7 環境保全に関する国際条約 ※批准年は日本が批准した年を示す。	
224	国際気候変動枠組み条約締結国会議（COP） 過去の COP の開催状況と結果について、環境省のウェブサイトで公表している。	
225	資源・エネルギー問題への取り組み 日本の原子力政策 日本では、原子力基本法が 1955 年に制定されて以降、原子力発電所（原発）の建設が進み、エネルギー消費に占める原子力の割合が増加した。2002 年にはエネルギーの安定的な確保を目的とするエネルギー政策基本法が制定されたが、その後も核燃料サイクルをはじめとする原発の推進は、日本のエネルギー政策の基本方針とされてきた。	全体に原子力発電のメリット、デメリットが簡潔に示されており、生徒にとって読みやすい教科書になっていると評価できます。また、世界における原子力発電所の運転基数、建設・計画基数のグラフも各国の考え方がよく分かるので、大変よい資料であると評価できます。

	核燃料サイクル 原子力発電所から排出された使用済み核燃料を再処理して、ウランやプルトニウムを取り出し、再び核燃料として使用する一連の流れのこと。通常の原子力発電所（軽水炉）を利用するプルサーマルと、高速炉を利用する方法があり、日本でのプルサーマルは 2009 年に本格的に開始された。しかし、高速炉は実用化のめどが立っていない。 原子力エネルギーは、火力発電に比べて発電コストが安定している。また、発電時に二酸化炭素などの温室効果ガスを排出しないため、地球温暖化対策に効果がある。しかし、放射性物質による汚染事故や放射性廃棄物の処理など、安全面で課題がある。実際に、2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災では、福島第一原発が被災し、大量の放射性物質が飛散するという深刻な事故が起きた。この事故を受けて、日本のすべての原子力発電所が稼働を停止した。 事故後、政府は原発ゼロをめざしたが、その後に策定されたエネルギー基本計画では、原子力発電は重要な「ベースロード電源」と位置づけられ、安全性を確認した上で再稼働させるとした。 なお、世界的には、原発の廃止を決定したドイツや、原発建設計画を撤回したイタリアのような国がある。一方、エネルギー需要の高まりから、原発建設を推進している国もある。	ただし、「この事故を受けて、日本のすべての原子力発電所が稼働を停止した。」とありますが、停止の理由も付記して、例えば、「この事故を受けて、日本のすべての原子力発電所は、事故を受けて定められたより厳しい規制基準への適合が確認されるまで稼働を停止することとなった。」とするのがより適切と考えます。また、「原発の廃止を決定したドイツや、原発建設計画を撤回したイタリアのような国がある。」とありますが、ドイツは原子力撤退は福島第一事故の前に決定しており、イタリアは、チェルノブイリ事故後の 1990 年に原子力から既に撤退しているの、福島第一原発事故との関連性はありません。ベルギーやスイスは福島第一原発事故後に原子力撤退を決めたので、例えば、「原発の廃止を決定したベルギーやスイスのような国がある。」とするのがより適切と考えます。 「一方、エネルギー需要の高まりから、原発建設を推進している国もある。」とありますが、最近の世界の実態を反映させて、例えば、「一方、エネルギー需要の高まりや脱炭素化の動きから、多くの国で原発が活用されている。」とするのがより適切と考えます。
225	新エネルギーとエネルギー政策 日本は資源の多くを外国に依存している。そのため、エネルギー安全保障の観点から、クリーンエネルギーの開発や省エネルギーにいつそう努力する必要がある。現在、太陽光・太陽熱・風力・地熱・バイオマスなどの新エネルギー（再生可能エネルギー）や、水素を活用した燃料電池の研究などが進められている。これらの開発には、発電効率やコストなどの課題を克服していく必要がある。このほか、発電時の排熱を冷暖房や給湯に利用するコージェネレーション（熱電併給）システムの導入も進められている。 電力事業のあり方も見直されている。再生可能エネルギーの普及を進めるため、固定価格買取制度が 2012 年に導入され、企業や家庭で再生可能エネルギーによって発電された電力は、電力会社が一定価格で買い取っている。また、2020 年からは、電力会社から送配電事業を分離（発送電分離）し、電力自由化を進めている。そのほか、コンピュータで電力需要を瞬時に把握して、家庭や企業に効率よく電気を送れるようにするスマートグリッド（次世代送電網）も開発され、エネルギー利用の効率化に役立っている。	
225	図 8 各国の原子力発電設備（「世界国勢図会」2020/21 年度版ほか）	
225	図 9 太陽光発電	
225	図 10 発送電分離後の電力供給の流れ	
234	1 地球環境問題の現状 相互に絡みあう地球環境問題 地球環境問題は人類最大の課題の一つであり、その解決には、国の利害をこえて取り組む必要がある。 地球環境問題の具体的な事例として、地球温暖化があげられる。工業化や都市化により、石油や石炭などの化石燃料が大量に消費されている。そのため、二酸化炭素など温室効果ガスの排出量が年々増大し、地球温暖化が進ん	

	でいる。気温の上昇は、極地の氷の融解や異常気象をもたらし、ひいては、低地の水没や内陸の乾燥化による山火事の発生、生物多様性の喪失といった問題を引き起こしている。 このほか、冷蔵庫の冷媒や洗浄剤、スプレーなどに大量に使用されてきたフロンガスは、オゾン層の破壊をもたらしてきた。また、乱獲や環境汚染などによる野生生物種の減少、工場や自動車、家庭などから大気中に放出される硫黄酸化物や窒素酸化物を原因とした酸性雨による被害、過耕作や無秩序な森林の伐採などによる砂漠化や熱帯林の減少も深刻となっている。熱帯林の減少は野生生物種を減少させ、生態系を破壊するだけではなく、地球温暖化を促進する原因ともなる。 このように、地球温暖化、オゾン層の破壊、野生生物種の減少、酸性雨、砂漠化、熱帯林の減少などの地球環境問題は、個別に存在しているのではなく、相互に関連し、複雑に絡みあっている。そして、その被害や影響が国境をこえて地球的問題群の一つを形成している。	
234	図 2 地球の限界を示す「プラネタリー・バウンダリー」の考え方で表現された現在の地球の状況（環境省資料）	
234	図 3 融解が進む北極圏の海氷（2005 年）黄色の太線内は、1979 年時点での海氷部分。	
235	地球温暖化とエネルギー問題の関連性 国連気候変動に関する政府 パネル（IPCC）が 2013 年に発表した報告書では、1880～2012 年において、世界の平均気温 0.85℃上昇し、今世紀末には 1986～2005 年と比べて最大 4.8℃上昇すると予測されている。また、この影響で、世界の平均海面水位は、今世紀末には 1986～2005 年と比べて最大 0.82 m 上昇すると予測されている。 地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排出を抑制するためには、主要なエネルギー源を石油や石炭などの化石燃料から再生可能エネルギーに転換していくことが求められている。しかし、多くの国では、いまだに化石燃料が主要なエネルギー源となっている。また、温室効果ガスに対して国際的な法的拘束力のある排出規制を導入することについては、おもに先進国と発展途上国との対立によって難航している。	
235	図 4 各国の一人当たりの二酸化炭素排出量と二酸化炭素排出割合（「世界国勢図会」2020/21 年度版）	
235	図 5 世界の平均気温の推移（環境省資料）	
235	図 6 主な国の 1 次エネルギー（BP 統計） 自然に存在する 1 次エネルギーは、加工されて電気や都市ガスなどの 2 次エネルギーに変換される。	
235	地球環境問題や資源・エネルギー問題の解決のための視点 地球環境問題や資源・エネルギー問題を解決するためには、低炭素社会・循環型社会を実現する必要がある。そのためには、右の①～⑥の観点を踏まえて、新技術の開発やその利用によって、家庭や企業が省資源・省エネルギーの推進に取り組まなければならない。特に、日本では、安全性、安定供給、効率性、環境適合性の 4 つを「3E+S」として、エネルギー政策の基本的な視点と位置づけている。	
235	①安全性 原子力発電は、発電所の事故の際の放射性物質による汚染の被害など、安全性が問われている。 ②安定供給 エネルギー資源は地球上に偏在している。日本に輸入されている原油の多くは中東の産油国に依存しており、安定供給の面で課題がある。 ③効率性 電力の供給においては、省資源・省エネルギーを推進して、希少な資源・エネルギーをより効率よく活用することが求められている。 ④環境適合性 環境への負荷を減らした製品づくりが望まれている。企業は製品の生産から流通・廃棄までのすべての段階での環境適合性を意識する必要がある。 ⑤国際性 環境問題は国境をこえ、地球全体に影響を及ぼす。グローバル化した現代においては、地球的な視野で環境問題を考える必要がある。 ⑥経済成長 資源・エネルギーの消費は持続可能性を考慮するとともに、イノベーションや新技術の開発は環境へ	原子力発電の安全性の問題が挙げられているので、再エネについても問題点を記すことによりバランスを取るため、安定供給の最後に「また、再生可能エネルギーの太陽光や風力は天候に依存しており、安定供給上の課題がある。」と付記するのがより適切と考えます。

	の負荷を減らす方向で進めなければならない。	
235	図 7 「3E+S」(資源エネルギー庁資料参照)	
235	CHECK 地球環境問題や資源・エネルギー問題を考えるための基本的な視点には、どのようなことがあるのだろうか。	
236	日本政府による地球温暖化への取り組みとその課題 国連環境計画 (UNEP) は、パリ協定の「気温の上昇を産業革命から 1.5℃以内に抑える」という目標を達成するためには、温室効果ガス排出量を 2020 年から 30 年の間に、前年比で年間 7.6% ずつ減らす必要があるとしている。また、現段階での各国の削減目標を達成しても、世界の平均気温は今世紀末には 3.2℃も上昇することになると警告している。このため、各国政府はそれぞれの削減目標を大幅に強化する必要がある。 日本国内における政策としては、2012 年から環境税の一種として「地球温暖化対策税」が石油石炭税に上乗せされる形で導入されている。また、建築物省エネ法では、一定規模以上の建築物に対して、省エネ基準への適合を求めている。 さらに、2020 年には、2050 年までに二酸化炭素の排出を実質ゼロとするカーボンニュートラルの実現をめざすという日本政府の目標が掲げられ、2030 年なかばまでにガソリン車の販売を禁止して、電気自動車や燃料電池車などの「非ガソリン車」を普及させる方針も発表されている。	
236	図 13 温暖化対策に消極的な日本に「化石賞」を授与する環境 NGO (2019 年) 日本は、温室効果ガス排出削減目標が不十分であることや、石油火力発電に依存し続けているとして、環境 NGO などから批判されている。石油火力発電の輸出に対する公的支援については、相手国が温暖化対策に取り組むことを前提に支援するとしているが、より厳格な輸出規制や輸出禁止政策をとるべきとする見方もある。	
236	図 14 日本と共同で研究を進めているタイのバイオマスエネルギー施設 バイオマスとは、木くずや生ごみなどの動植物に由来するエネルギーのこと。サトウキビやトウモロコシなどの植物から作られるバイオエタノールは、自動車の燃料などに用いられている。資源に乏しい国のエネルギー源として生活環境の改善にも寄与している。	
236	図 15 水素ステーションと燃料電池バス ハイブリッド自動車や電気自動車、省エネルギーの家電製品のほか、再生可能エネルギーによる技術開発が地球環境問題の解決に寄与すると期待されている。家庭の太陽光発電で余った電気を電力会社が買い取るしくみも制度化された。今後、水素を利用した燃料電池の普及などが期待されている。	
236	地球環境の保全に向けた国際協力と企業の取り組み 先進国は環境への負荷を低減するための技術を発展途上国に提供し、すべての国が地球環境問題の解決に向けて協力関係を築いていくことが期待されている。その際には、環境保全と経済発展とを対立させて捉えるのではなく、両立させることのできるような支援やしきみを模索する必要がある。たとえば、発展途上国の焼畑耕作は熱帯林の減少をもたらし、地球温暖化の原因にもなっている。そこで、先進国が ODA などの技術支援によって発展途上国の農業の近代化を図ることで、森林の減少に歯止めをかけることができると同時に、農業の生産性を向上させることもできる。 企業もまた、地球環境問題の解決のための役割が大きい。たとえば、風力発電、太陽光発電、地熱発電、バイオマスなど再生可能エネルギーの分野で世界的に事業を展開することで、地球温暖化対策に貢献できる。また、このような事業展開は、発展途上国の生活環境を向上させるためのインフラ整備としても、期待が高まっている。さらに、高額な燃料電池車なども、技術開発によって価格の引き下げを実現することで、大幅に普及させることができる。一方、投資家も ESG 投資を積極的に活用することで、環境に配慮している企業の技術開発を支援することができる。	
238	スマートシティ 内閣府、総務省、経済産業省、国土交通省は、スマートシティの取り組みを官民連携で進めるた	

	めに、企業・研究機関・地方公共団体・関係負傷などを会員とする団体を設立し、その取り組みをウェブサイトで公表している。	
239	4 課題の解決方法を構想する 構想 地球環境を資源・エネルギー問題については、人間尊重と持続可能な開発の立場から、どのような取り組みが求められているのだろうか、自分の考えを説明したり論述したりしよう。	
239	地球環境と資源・エネルギー問題に関する〇〇さんの提言例 政府は 2050 年までに、カーボンニュートラル・脱炭素社会を実現する方針を打ち出している。そこで、日本で脱炭素に向けて求められる取り組みを考えたい。 提言① 再生可能エネルギーによる発電を増やす 火力発電に代わる電源として、原子力や再生可能エネルギーが考えられる。この二つの電源について安全性・安定供給・効率性からみると、原子力発電は安定供給に優れている反面、災害時などでの安全性が確保されているとはいえず、また、運転の維持に多額の費用が掛かるという点で効率性にも疑問が残る。一方、再生可能エネルギー発電は安全性に優れているが、天候の影響を受けやすく、発電コストが高いなど、安定供給や効率性の面で課題がある。 ただし、人間尊重と持続可能な開発の立場から考えれば、安全性を最優先するべきであり、この点で、今後は再生可能エネルギーによる発電を中心とする必要がある。再生可能エネルギーの安定供給や効率性については、政府は補助金などの優遇措置によって民間企業の技術開発を促進させることで、この問題を解消できるように努めるべきである。 提言② 自立・分散型社会を構築する 火力や原子力による発電所は海岸沿いに集中して建設されているが、東日本大震災で見られたように、このような大規模集中型の電力システムは、災害に対し脆弱な側面をもっている。また、大規模な発電設備で作られた電力は、送電の途中で半分以上が失われ、無駄になっている（送電ロス）。 そこで、既存の発電施設を活用しつつ、地域や工場ごとに再生可能エネルギーによる発電設備を作ったり、家庭やオフィスで水素エネルギーを利用した燃料電池（エネファーム）を導入したりすることで、自立・分散型社会をめざすことが提唱されている。 また、先端技術を駆使して電力の無駄をなくし、環境に配慮した「スマートシティ」の構築によって、効率的な社会生活をめざす必要がある。このためには、行政と企業・研究機関・NPO・地域住民が連携して取り組まなければならない。「スマートシティ」を実現すれば、環境やエネルギー問題のほか、高齢化による地域の課題にも対応できるだろう。	「原子力発電は安定供給に優れている反面、災害時などでの安全性が確保されているとはいえず、また、運転の維持に多額の費用が掛かるという点で効率性にも疑問が残る。」とありますが、事故の教訓に基づいて安全性の向上が図られており、燃料費は極小なのでランニングコストは低い特徴があります。ただし、新規制基準への適合のため、追加した安全設備には多くの経費を必要としています。そこで、例えば、「原子力発電は安定供給に優れている反面、原子力規制委員会が策定した新規制基準への適合のために、事業者は多くの経営資源を必要とする。」とするのがより適切と考えます。 「安全性を最優先するべきであり、この点で、今後は再生可能エネルギーによる発電を中心とする必要がある。」とありますが、2023 年 2 月の閣議決定「GX 実現に向けた基本方針」では、再生可能エネルギーの主力電源化とともに原子力の活用を挙げています。提言 3 を参考にしてください。
239	図 16 地熱発電（大分県） 日本では、地熱発電の建設候補地の多くが国立公園内にある。そのため、地熱発電の開発は景観や自然環境の保全との調和を十分に図る必要がある。	
239	図 17 日本の電源別電力量の推移 （電気事業連合会資料）	
239	図 18 自立・分散型ネットワークの概念図 （埼玉県資料参照）	
239	地球環境と資源・エネルギー問題について、個人や消費者の立場からの取り組みを調べた上で、どのような手段が効果的なのか、私たちに求められている行動のあり方をまとめてみよう。	自分自身の行動のあり方を生徒に考えさせるのは良い取組と評価できます。

第4章 調査の記録

1. 会議等開催記録

本調査に関して、原子力学会教育委員会教科書調査ワーキンググループ(調査担当者)を置き、ワーキンググループ会議をオンラインにて開催し、随時メールで担当者間の意見交換を行って調査を進めた。また、教育委員会に活動を報告しつつ調査を進めた。

令和4年12月2日(金)第1回教科書調査ワーキンググループ会議

調査および解析の方針について意見交換を行い、調査の分担、作業スケジュールなどを決めた。

令和5年1月30日(月)第2回教科書調査ワーキンググループ会議

調査結果の解析・意見交換を行い、報告書の取りまとめ案の作成を行った。

令和5年3月2日(木)第3回教科書調査ワーキンググループ会議

調査結果の解析・意見交換を行い、報告書の取りまとめ案の改定、執筆分担を行った。

令和5年5月11日(木)第4回教科書調査ワーキンググループ会議

調査結果の解析・意見交換を行い、報告書の取りまとめを行った。

2. 教科書調査担当者および教育委員会委員

教科書調査担当者 *教科書調査WG主査

: 技術士(原子力・放射線部門), (公社)日本技術士会員

委員氏名	所 属
杉本 純	元京都大学*
岡田 往子	原子力委員会, 東京都市大学
掛布 智久	(公財)日本科学技術振興財団
笠井 重夫 #	元(株)東芝, 技術士事務所ヤサキ
阪口 友祥	(国研)日本原子力研究開発機構
菊池 裕彦 #	三菱重工業(株)
木藤 啓子	(一社)日本原子力産業協会
櫻井 俊吾 #	元(株)東芝電力システム社
羽澄 大介	名古屋市立西前田小学校

藤本 望	九州大学
松永 一郎	(一社) 日本原子力学会シニアネットワーク連絡会
芳中 一行 #	(国研) 日本原子力研究開発機構
若杉 和彦	(一社) 日本原子力学会シニアネットワーク連絡会
若林 源一郎	近畿大学

調査協力

安藤 仁	(株) 科学新聞社
オブザーバ	
実松 由紀	原子力発電環境整備機構

教育委員会委員

委員氏名	所属
林 巧	(国研) 量子科学技術研究開発機構 (委員長)
塩満 典子	広島大学 (副委員長)
岡田 融	東京電力ホールディングス (株)
宮村 浩子	(国研) 日本原子力研究開発機構
石川 博久	(公財) 原子力安全研究協会
岩田 憲幸	久留米工業高等専門学校
宇埜 正美	福井大学
金川 説子	三菱重工業 (株)
坂上 千春	(一社) 日本原子力産業協会
高田 英治	富士電機 (株)
中田 よしみ	東京大学
藤原 充啓	東北大学
松澤 泰弘	東京電力ホールディングス (株)
湯口 康弘	東芝エネルギーシステムズ (株)
吉田 克己	東京工業大学
吉田 拓真	日立 GE ニュークリア・エナジー (株)
芳中 一行	(国研) 日本原子力研究開発機構
吉橋 幸子	名古屋大学
若林 源一郎	近畿大学
渥美 寿雄	近畿大学 (特別委員)
越塚 誠一	東京大学 (特別委員)
山岡 聖典	岡山大学 (特別委員)

3. これまでに公表した報告書

- 1) 「初等・中等教育における「エネルギー」の扱いと高等学校学習指導要領に関する要望書」平成 8 年 5 月 日本原子力学会
- 2) 「参考資料高等学校教科書の中の原子力に関する不適切な記述例」平成 8 年 5 月 日本原子力学会
- 3) 「参考資料高等学校, 中学校教科書の中の原子力に関する不適切な記述例」平成 16 年 12 月 日本原子力学会
- 4) 「初等・中等教科書および学習指導要領におけるエネルギー・原子力の扱いに関する要望書」平成 17 年 8 月 日本原子力学会
- 5) 「新学習指導要領に基づく小中学校教科書のエネルギー関連記述に関する提言」平成 21 年 1 月 日本原子力学会
- 6) 「新学習指導要領に基づく高等学校教科書のエネルギー関連記述に関する提言」平成 22 年 1 月 日本原子力学会
- 7) 「新学習指導要領に基づく小学校教科書のエネルギー関連記述に関する調査と提言」平成 23 年 1 月 日本原子力学会
- 8) 「新学習指導要領に基づく中学校教科書のエネルギー関連記述に関する調査と提言」平成 24 年 3 月 日本原子力学会
- 9) 「新学習指導要領に基づく高等学校教科書のエネルギー関連記述に関する調査と提言」平成 25 年 3 月 日本原子力学会
- 10) 「新学習指導要領に基づく高等学校教科書の原子力関連記述に関する調査と提言」平成 27 年 3 月 日本原子力学会
- 11) 「新学習指導要領に基づく中学校教科書の原子力関連記述に関する調査と提言」平成 28 年 6 月 日本原子力学会
- 12) 「新学習指導要領に基づく高等学校教科書のエネルギー・環境・原子力・放射線関連記述に関する調査と提言―地理歴史科・公民科の調査―」平成 29 年 6 月 日本原子力学会
- 13) 「高等学校理科教科書のエネルギー・環境・原子力・放射線関連記述に関する調査と提言―科学と人間生活・物理基礎・物理の調査―」平成 30 年 7 月 日本原子力学会
- 14) 「高等学校の地理歴史, 公民教科書のエネルギー・環境・原子力関連記述に関する調査と提言―世界史, 日本史, 地理, 現代社会, 倫理, 政治・経済教科書の調査―」2019 (令和元) 年 6 月 日本原子力学会
- 15) 「新学習指導要領に基づく小学校社会・理科教科書のエネルギー・原子力関連記述に関する調査と提言」2020 (令和 2) 年 6 月 日本原子力学会

- 16)「新学習指導要領に基づく中学校教科書のエネルギー・環境・原子力・放射線関連記述に関する調査と提言－社会，理科，保健体育，技術・家庭の調査－」2021（令和 3）年 7 月日本原子力学会
- 17)「新学習指導要領に基づく高等学校教科書のエネルギー・環境・原子力・放射線関連記述に関する調査と提言－地理歴史，公民，理科，保健体育，家庭および工業の調査－」2022（令和 4）年 8 月日本原子力学会

【平成 21 年 1 月以降の報告書は日本原子力学会の下記 URL で閲覧できます】

https://www.aesj.net/committee/permanent/educational_committee

【本報告書に関する問合せ先】日本原子力学会教育委員会（日本原子力学会事務局）

<https://www.aesj.net/>