放射線から見える戦略なき日本の理科教育

NPO法人放射線教育フォーラム

2021年度第2回勉強会

2021年11月23日　（オンライン開催）

畠山正恒（聖光学院中学校高等学校）
hatakeyama@seiko.ac.jp

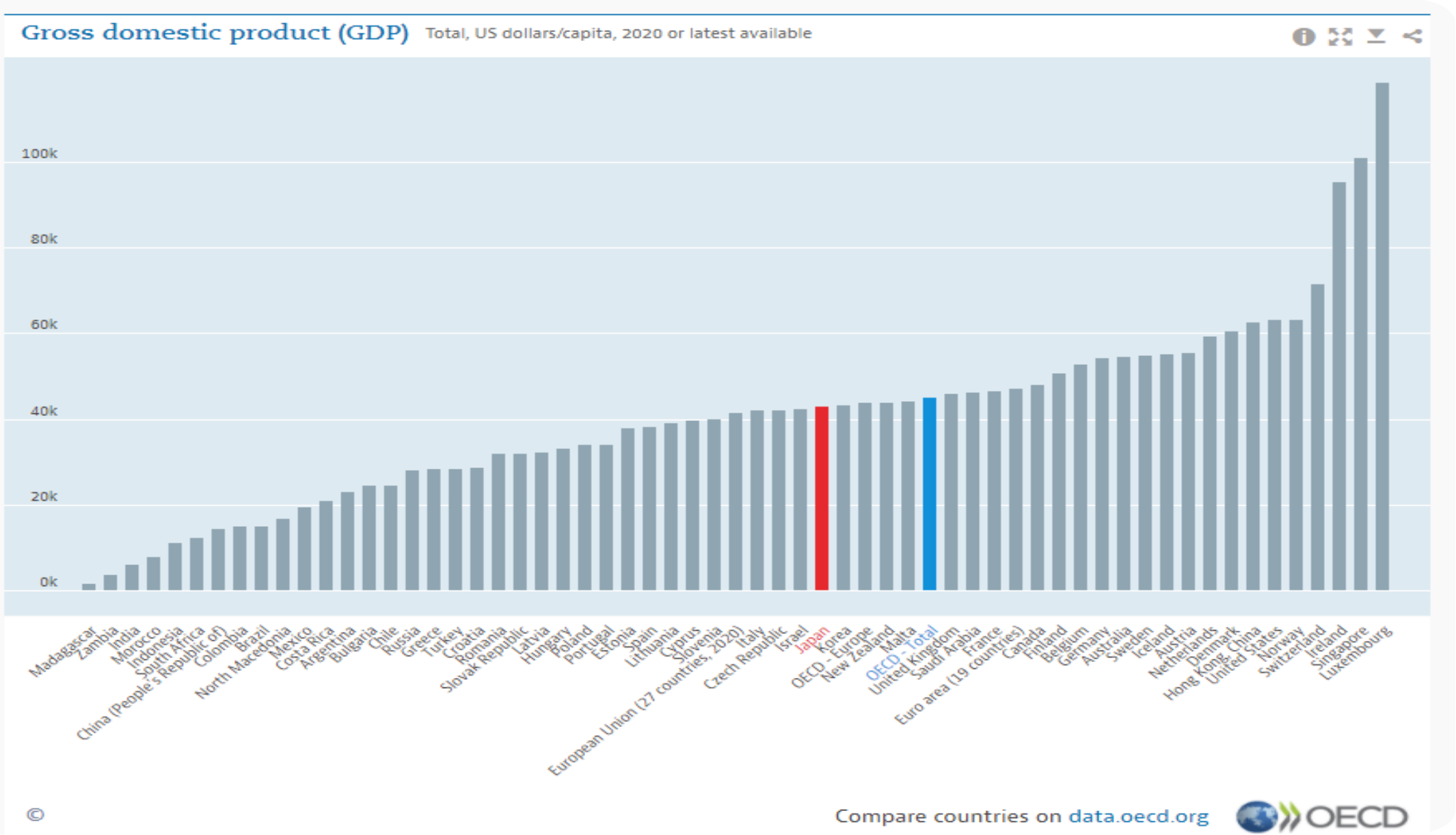
本日の内容(1)

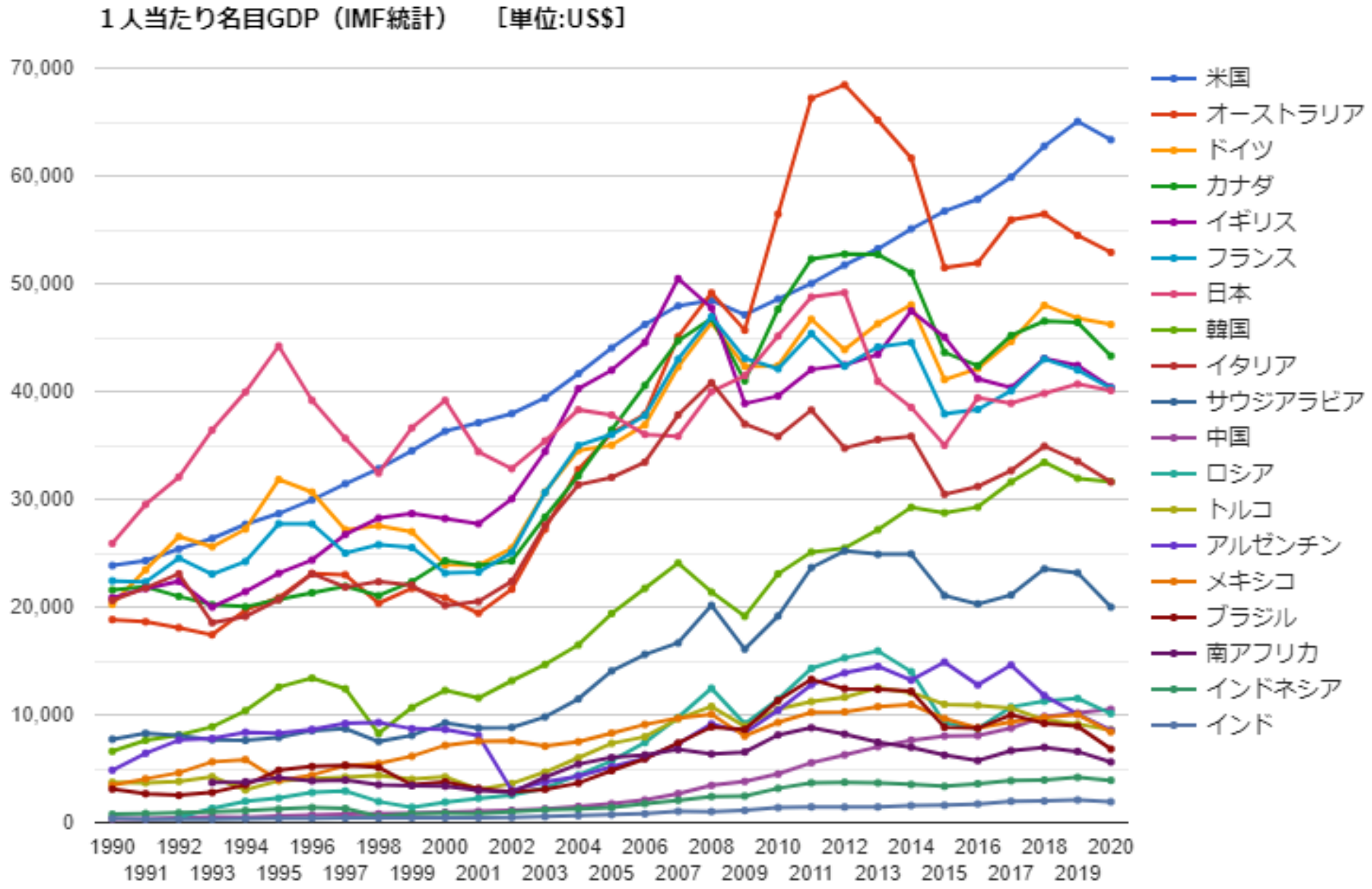
① わが国の経済的現状（一人あたりGDP）
② 教育予算の現実
③ 学習内容と所得
④ 日本が取るべき教育戦略
⑤ 日本の不都合な真実（授業時間と教員）
⑥ 米国の教育戦略（STEM教育とは）
⑦ OECDによる日本の教育評価
⑧ なぜ理系女子が少ないのか
⑨ いつから数学・理科が嫌いになるか
⑩ 嫌いになる理由

本日の内容(2)

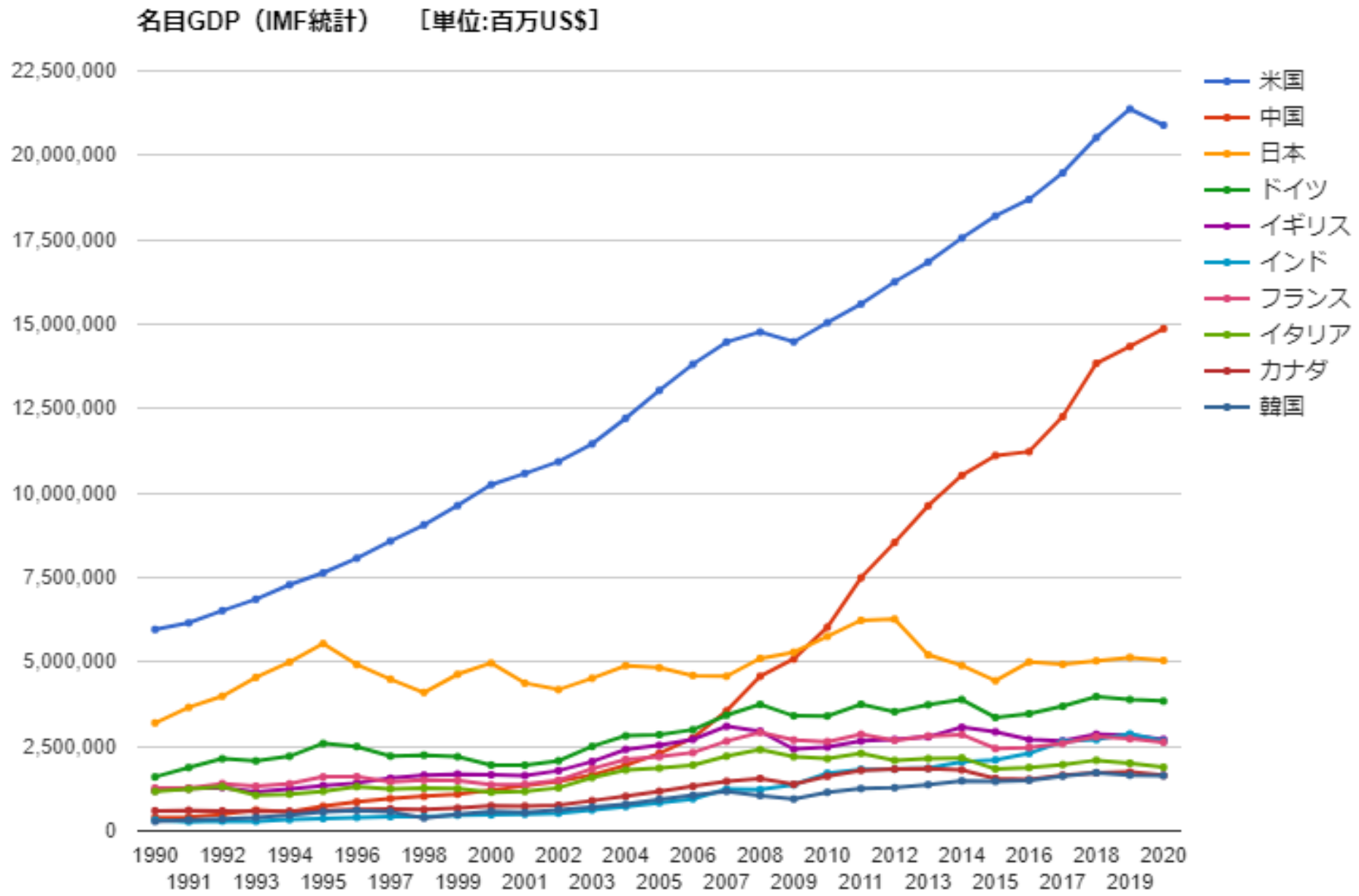
⑪　教科書を具体的に見ると
⑫　海外の教科書との比較
⑬　教科書の問題点は何か
⑭　日本の理科教育に欠けているもの
⑮　これから何をすべきか
　（このまま負け続けるのか）
⑯　日本の戦略は

① わが国の経済状況（一人あたりGDPはどの位か）



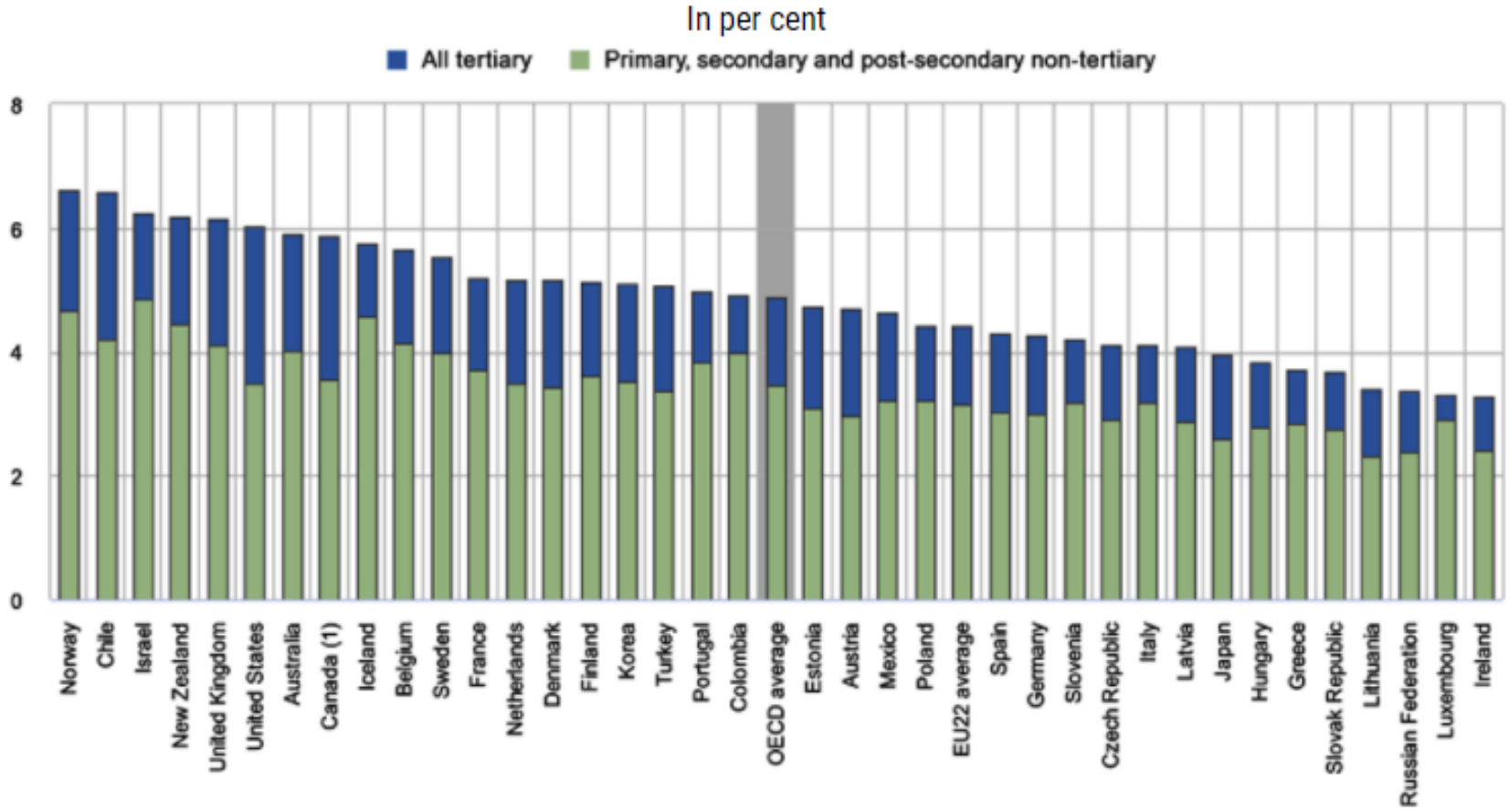


資料：GLOBAL NOTE　出典：IMF


名目GDP（IMF統計）　［単位:百万US$］
22,500,000
20,000,000
17,500,000
15,000,000
12,500,000
10,000,000
7,500,000
5,000,000
2,500,000
0
1990 1992 1994 1996 1998 2000 2002 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020
1991 1993 1995 1997 1999 2001 2003 2005 2007 2009 2011 2013 2015 2017 2019
米国
中国
日本
ドイツ
イギリス
インド
フランス
イタリア
カナダ
韓国

② 教育予算の現実 （GDPに占める教育関係支出の割合）

Figure 2. **Total expenditure on educational institutions as a percentage of GDP (2018)**

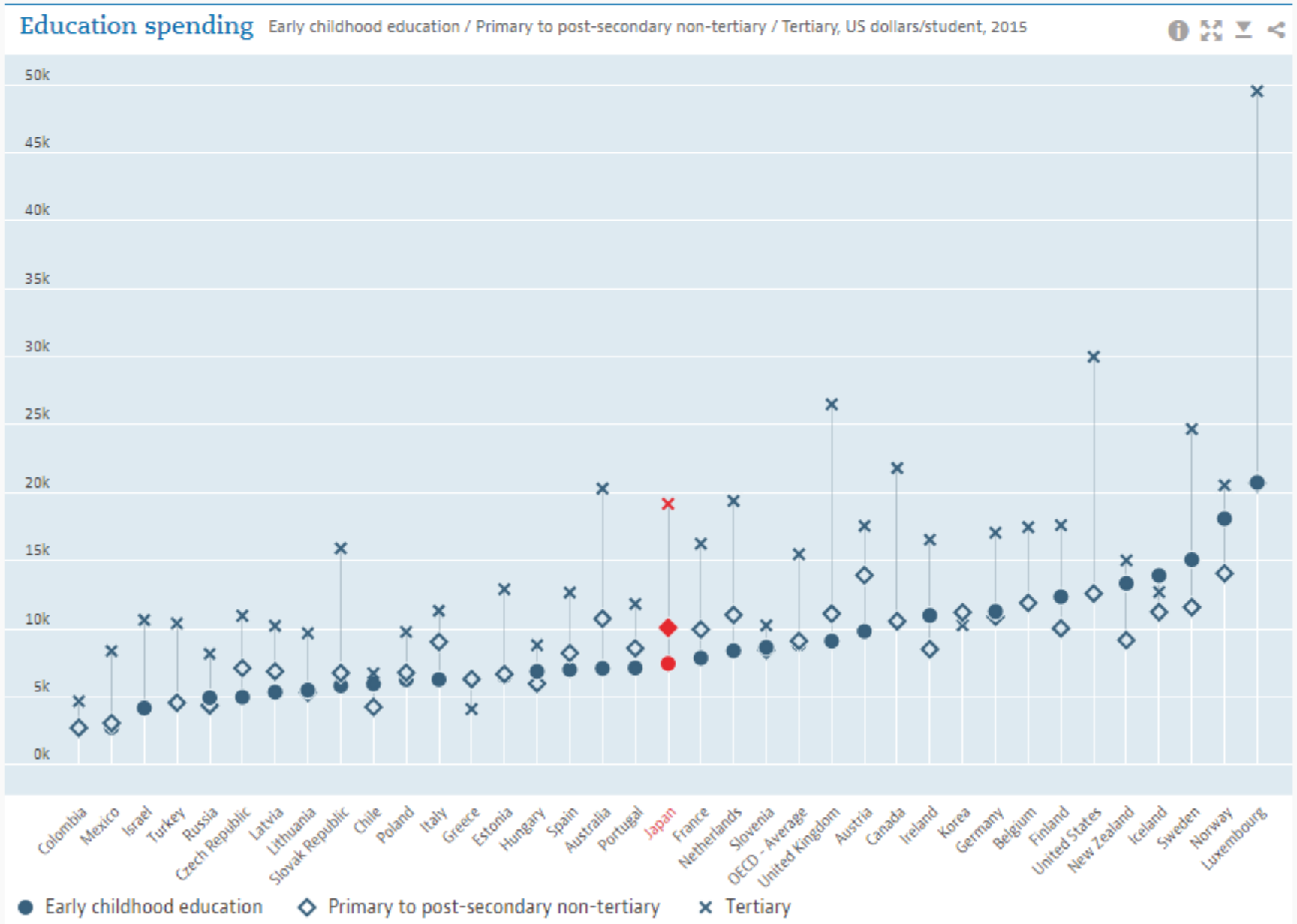


1. Primary, secondary and post-secondary non-tertiary education includes pre-primary programmes.

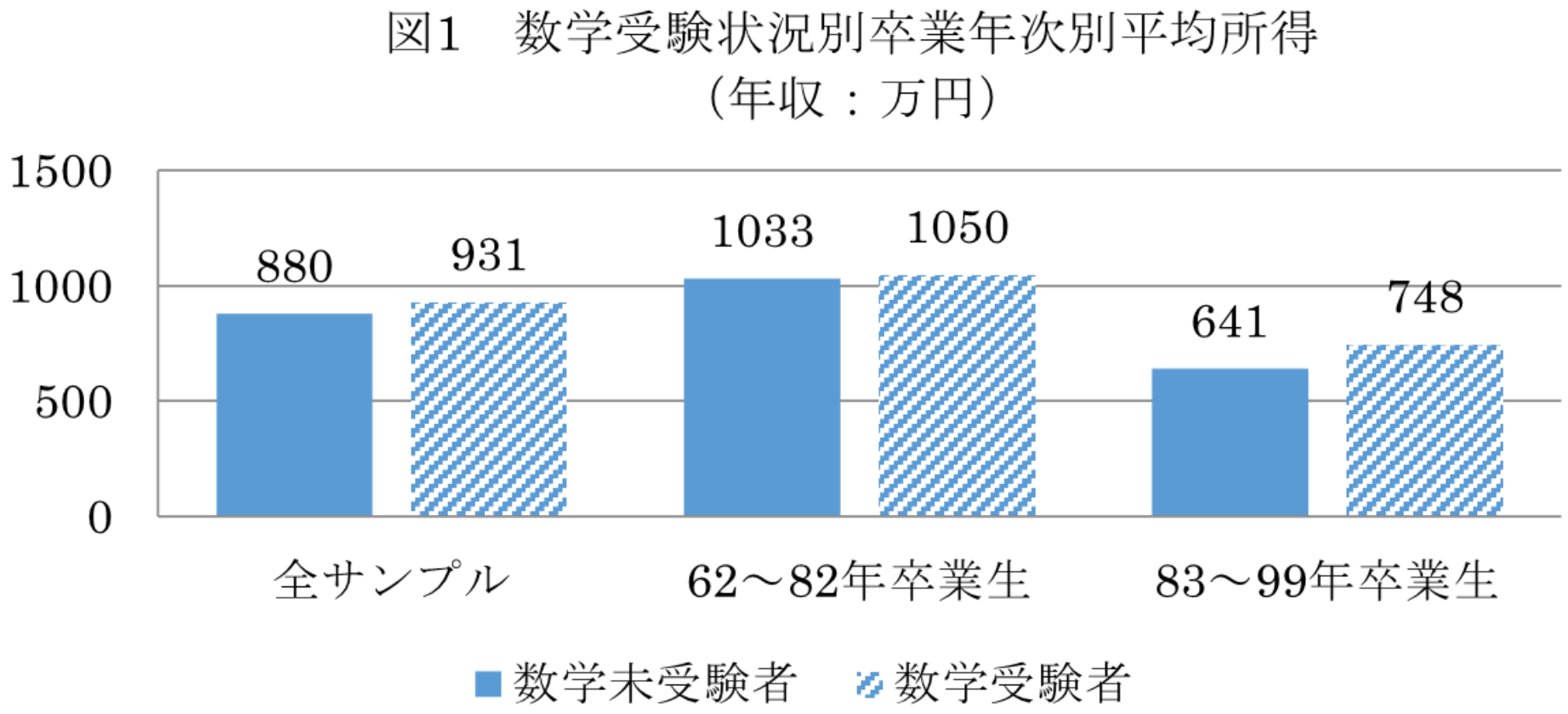
Countries are ranked in descending order of total expenditure on educational institutions as a percentage of GDP.

Source: OECD (2021), Table C2.1. See *Source* section for more information and Annex 3 for notes (https://www.oecd.org/education/education-at-a-glance/EAG2021_Annex3_ChapterC.pdf).

教育支出は、学校、大学、その他の公立および私立の教育機関に対する支出が該当します。支出には、教育機関で提供される学生・生徒・児童および家族に対する指導およびそれに付随するサービスが含まれます。支出は、学生・生徒・児童1人当たりの支出額（米ドル）と、対GDP比で表記されます。



③ 学習内容と所得 （大学入試で数学を使うと年収が多い）



学習科目選択と大学卒業後の所得　　神戸大学　西村和雄より

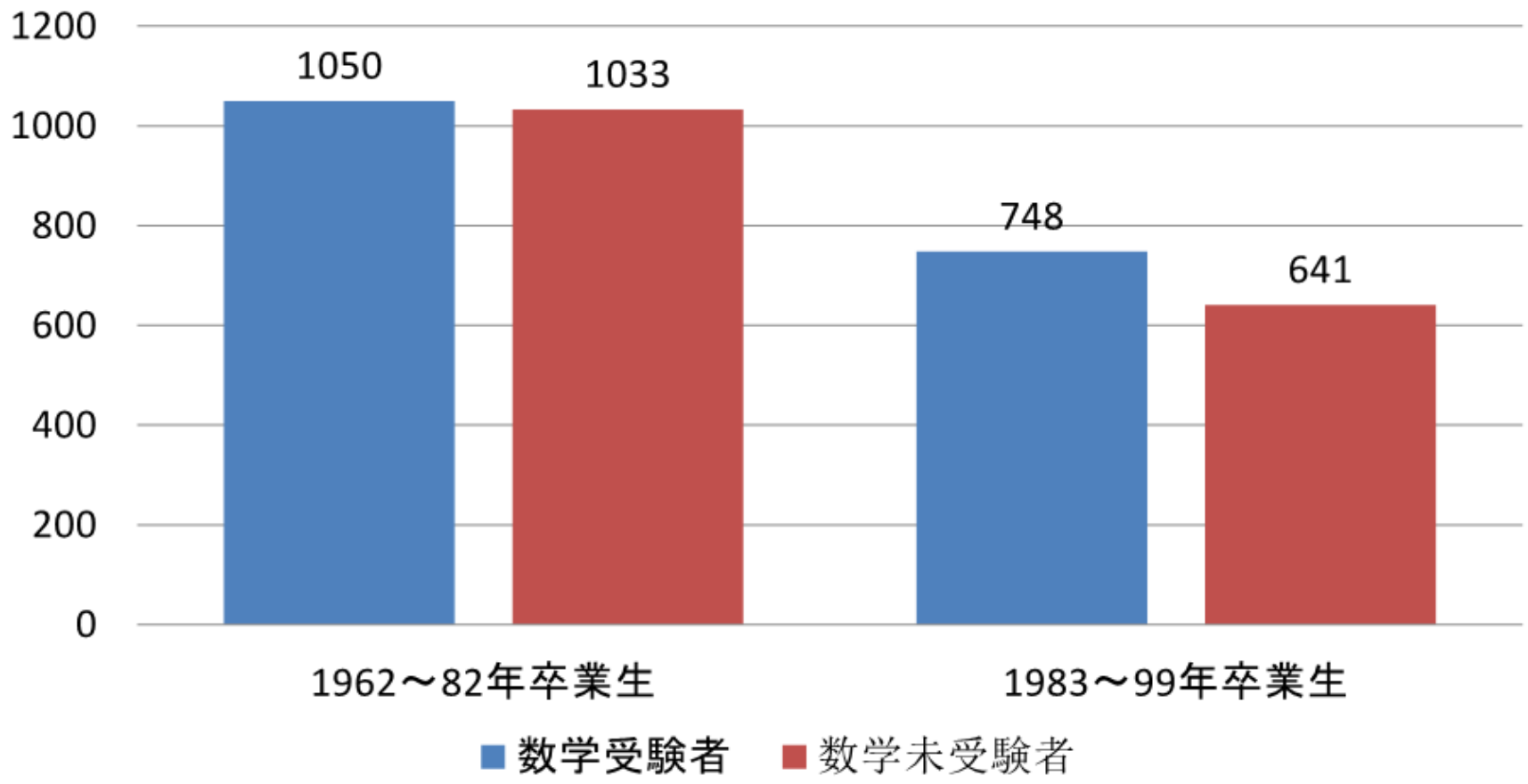
https://www.rieti.go.jp/jp/events/13061101/pdf/nishimura.pdf　より抜粋

「学習内容・科目選択と将来所得」

RIETI ファカルティーフェロー
神戸大学特命教授・京都大学特任教授
西村和雄

独立行政法人経済産業研究所「活力ある日本経済社会構築のための基礎的研究」

2000年調査：数学受験・未受験と所得

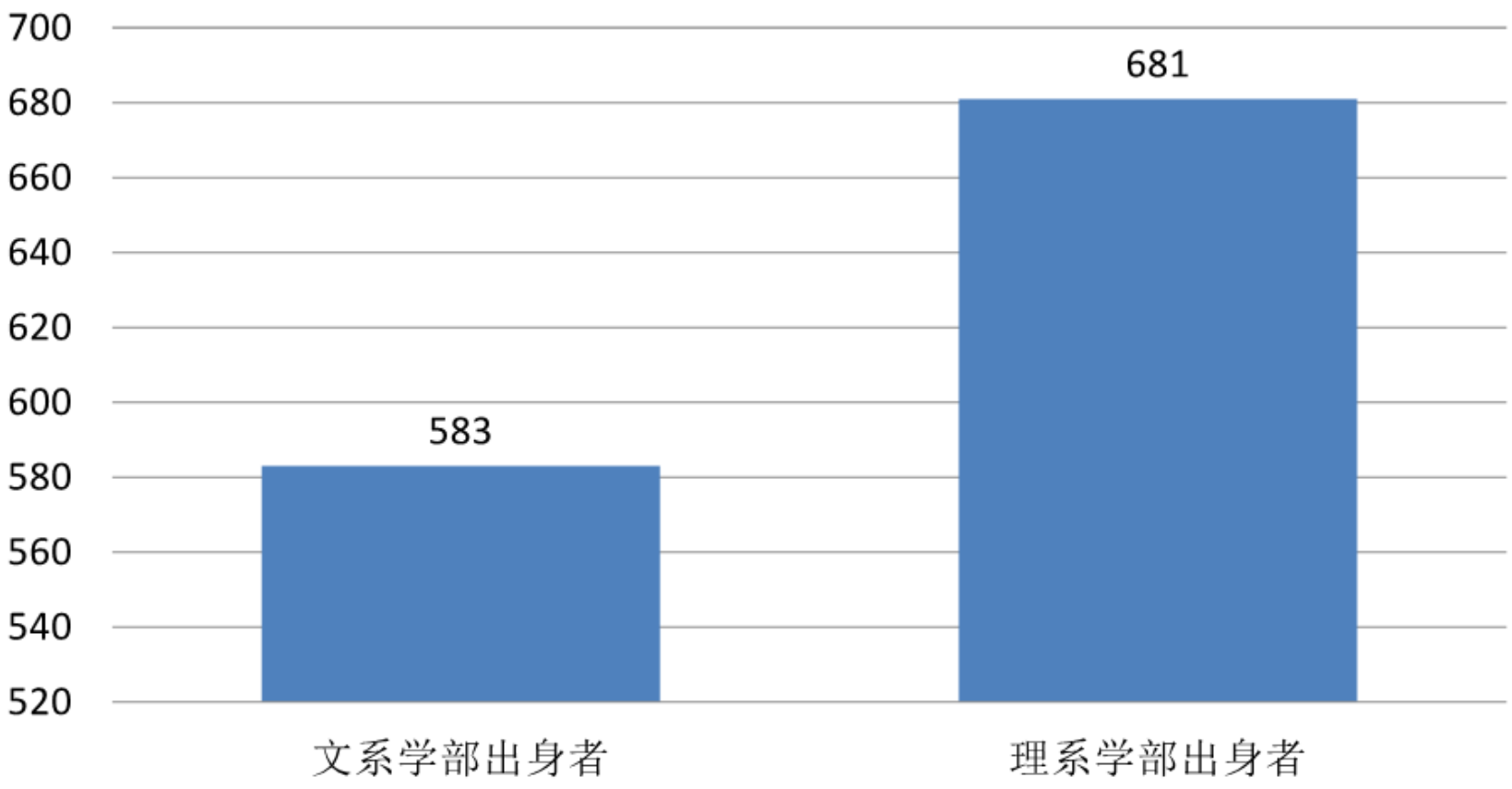


【論文】浦坂純子・西村和雄・平田純一・八木匡［2002］
「数学学習と大学教育・所得・昇進」
『**日本経済研究**』（日本経済研究センター）46号，pp.22-43

調査概要

プロジェクト	「人材育成に関するアンケート調査」
実施時期	2008年6月
調査方法	WEB調査（Gooリサーチによる）
配信数	6870サンプル （大卒以上の学歴を持つサンプルにのみ配信）
有効回答数	2152サンプル
回収率	31.3%
分析対象	有所得の就業者1611サンプル

出身学部別平均所得（万円）



得られた知見

- 理系学部出身者の所得
  - 全ての入学難易度で文系学部出身者より高い

- 入学難易度による所得の大学間格差
  - 文系学部出身者＞理系学部出身者

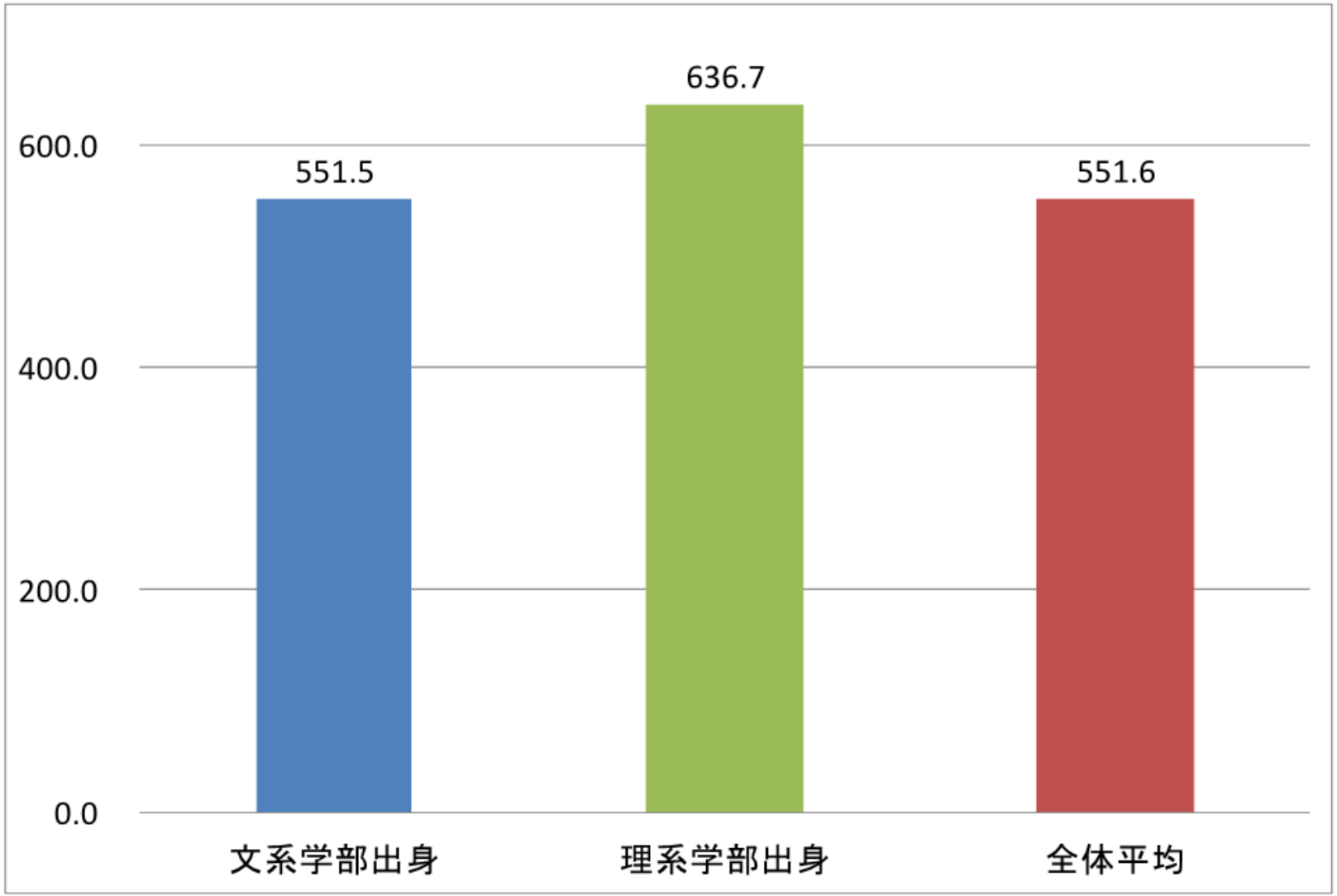
- 難易度Aの文科系学部出身者で数学を受験して いない者と、難易度Bの理科系学部出身者を比較すると、後者の所得が全ての年齢で高い。

Hirata, J., Nishimura K., Urasaka J. and Yagi T.（2013）, “Mathematics & Science Education and Income: An Empirical Study”, ***Journal of Reviews on Global Economics*, 2, 1-8.**

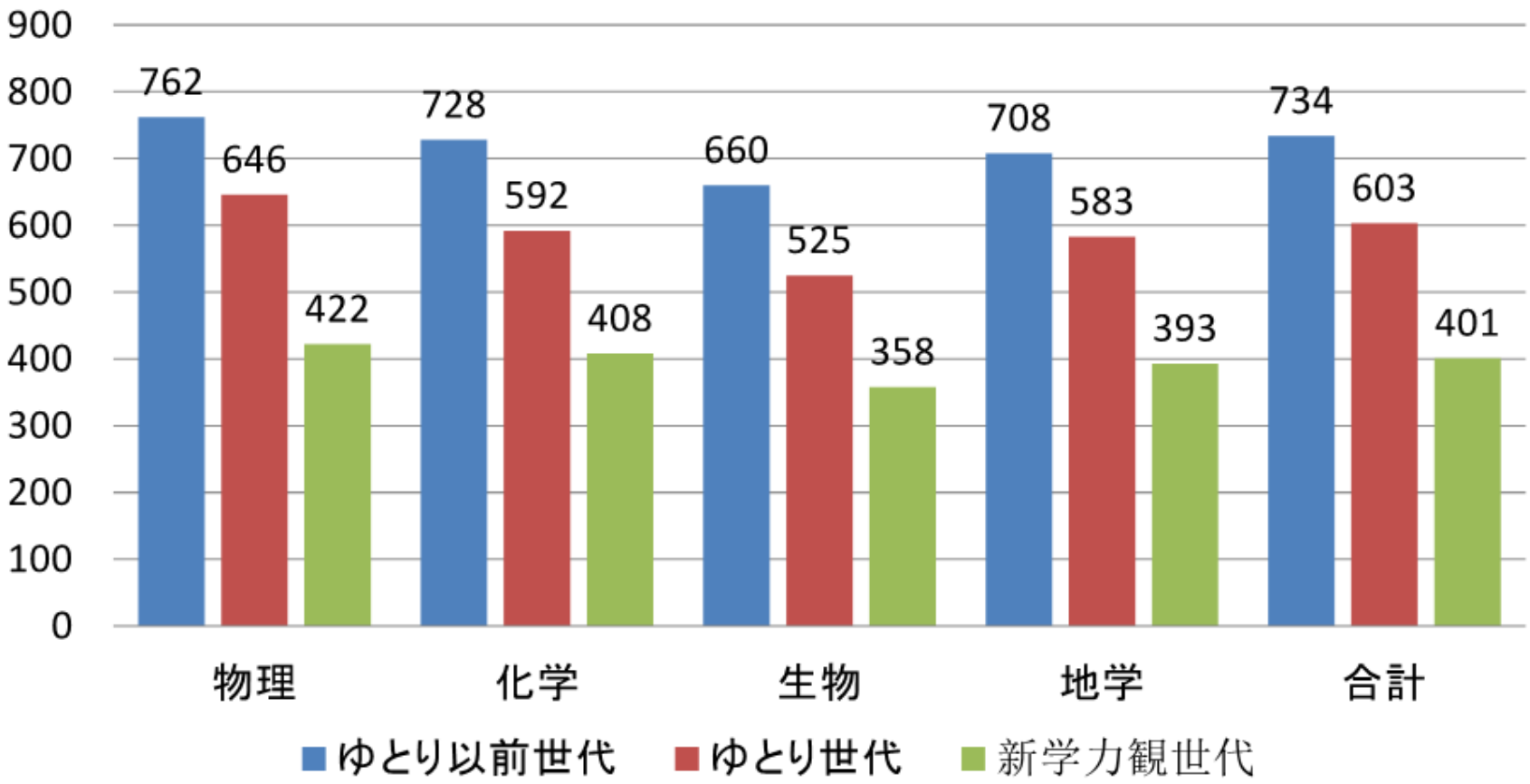
学習指導要領の変遷

キーワード	改訂（高校）	実施（高校）	該当者	該当サンプル数	該当サンプル数（就業者）
	1955年12月	1956年度	1940年4月生～	5016（ゆとり以前）	4520
教科学習の系統性	1960年10月	1963年度	1947年4月生～		
教育課程の現代化	1970年10月	1973年度	1957年4月生～		
ゆとりと充実	1978年8月	1982年度	1966年4月生～	4440（ゆとり）	3771
新学力観	1989年3月	1994年度	1978年4月生～	1943（新学力観）	1696
生きる力	1999年3月	2003年度	1987年4月生～	0	0

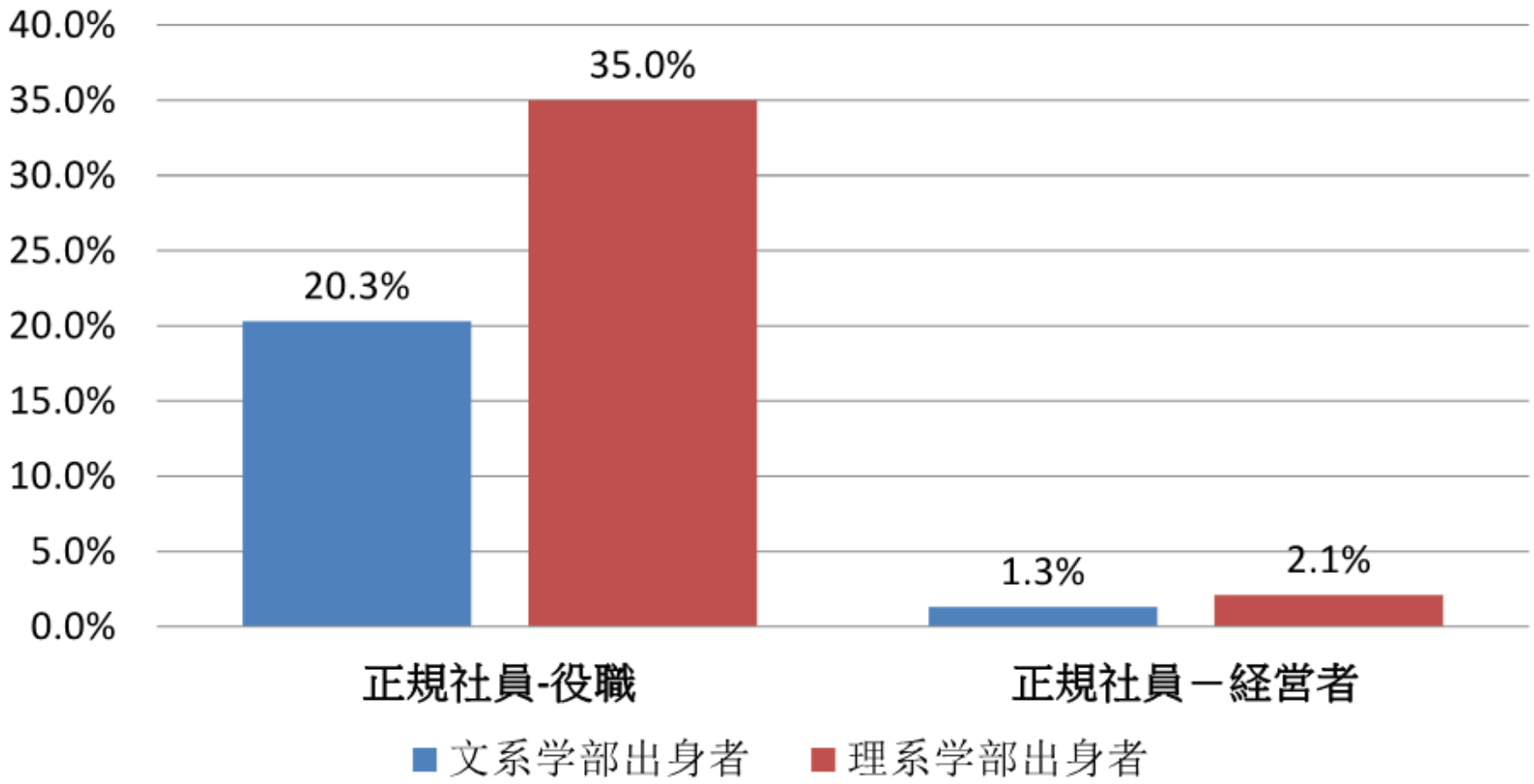
文系・理系学部出身別平均所得（万円）



理系学部出身者の理科の得意科目別
平均所得（世代別：万円）



理系で高い役職者・経営者比率



④　日本が取るべき教育戦略

理系進学者を増やす

具体的に何をすべきか考えてみよう？

⑤　日本の不都合な真実（授業時間）

私たちは小中高でどのくらい理科を学んできたのか

小学校入学年度	最小時間	標準的な時間	最大時間
2002	617	646	734
1996	673	703	790
1994	694	723	840
1992	694	811	957
1985	827	944	1060
1980	827	1060	1294
1973	938	1171	1404
1964	996	1171	1521
1961	1142	1171	1434
1955	1151	1180	1559

学習指導要領に基づく理科学習時間数　　第4回大阪市大FD研究会　根本泰雄より一部抜粋

小中学校での授業時間数

小学校の標準授業時数

	1年	2年	3年	4年	5年	6年
国語	306	315	245	245	175	175
社会	-	-	70	90	100	105
算数	136	175	175	175	175	175
理科	-	-	90	105	105	105
生活	102	105	-	-	-	-
音楽	68	70	60	60	50	50
図画工作	68	70	60	60	50	50
家庭	-	-	-	-	60	55
体育	102	105	105	105	90	90
特別の教科道徳	34	35	35	35	35	35
特別活動	34	35	35	35	35	35
総合的な学習の時間	-	-	70	70	70	70
外国語活動	-	-	35	35	-	-
外国語	-	-	-	-	70	70
合計	850	910	980	1015	1015	1015

備考
一　この表の授業時数の一単位時間は、四十五分とする。
二　特別活動の授業時数は、小学校学習指導要領で定める学級活動（学校給食に係るものを除く。）に充てるものとする。
三　第五十条第二項の場合において、特別の教科である道徳のほかに宗教を加えるときは、宗教の授業時数をもつてこの表の特別の教科である道徳の授業時数の一部に代えることができる。（別表第二から別表第二の三まで及び別表第四の場合においても同様とする。）

中学校の標準授業時数

	1年	2年	3年
国語	140	140	105
社会	105	105	140
数学	140	105	140
理科	105	140	140
音楽	45	35	35
美術	45	35	35
保健体育	105	105	105
技術・家庭	70	70	35
外国語	140	140	140
特別の教科である道徳	35	35	35
総合的な学習の時間	50	70	70
特別活動	35	35	35
合計	1015	1015	1015

備考
一　この表の授業時数の一単位時間は、五十分とする。
二　特別活動の授業時数は、中学校学習指導要領で定める学級活動（学校給食に係るものを除く。）に充てるものとする。

小学校1年と2年は理科社会授業無し　生活科

文科省HP

理科授業時間数の比較

日本とイングランドの義務教育理科授業時間数

	5歳	6歳	7歳	8歳	9歳	10歳	11歳	12歳	13歳	14歳	15歳	計	
日本		0	0	70	90	95	95	105	105	80		640	
英国	72	72	96	96	96	96	108	108	108	90	90	1032	5%
										180	180	1212	80%
										270	270	1392	15%

イングランドで理系コースを取ると1392時間
日本の高校1年で4単位理科を取ると640＋140の計780時間

高校2年生から理系に進み、残りの2単位＋4単位×2科目＝10単位履修すると
780＋350＝1130時間

日本の理科教育が進んでいると思ったら大きな間違い

⑤　日本の不都合な真実（カリキュラム）

日本のカリキュラムは義務教育（小中）と高等学校との連携がない

米国は高等学校まで義務教育

幼稚園から高校3年生までの一貫した科学教育を考えている

K-12（最近はP-12）という教育の考え方をしている（K-12は小学校1年生から高校3年生まで、P-12は幼稚園から高校3年生までを考えている）

日本の理科教育は小学校3年生から

高等学校に物理・化学・生物・地学を網羅した「科学基礎」のような科目がないため、国民として身につけて欲しいキーコンピテンシー（最低限の資質・能力）が設定できない

⑤　日本の不都合な真実（教員問題/日本の危機）

教員免許法の改正で教員免許取得が大変
（修士課程まで進まないと中学・高校両方の免許は取得不可能）

↓

理学系の院生が教員免許を取らない
（工学系は数学は取れるが、理科免許は取れない）

↓

高校理科をきちんと**教えられる教員が激減**

↓

教員の採用難（退職者で補うところが急増）

⑥米国の教育戦略（STEM教育とは）

1　米国の国際競争力を回復させたい
　⇒理数系に進学する生徒を増やす
　⇒教育改革が必要（州による教育格差を是正することも目的）

2　2010年　米国科学アカデミー，米国科学振興協会などが
NGSS（Next Generation Science Standards／次世代科学スタンダード）作成へ

目的：STEM領域を専攻するように興味を持ってもらう
NGSSは小学校から高校まで（K-12という）の科学教育のフレームワーク
＊科学を学ぶ体系を示した　（K-12：　幼稚園から12年生までの意味）

3　2013年　ホワイトハウス（オバマ政権）発表：アメリカが世界でリーダーシップを発揮するためには、科学、技術、工学、数学（STEM）分野で世界レベルの人材を育成することが不可欠

＊STEM教育の充実が米国の科学・技術分野の優位性を維持できる（人材数まで示す）

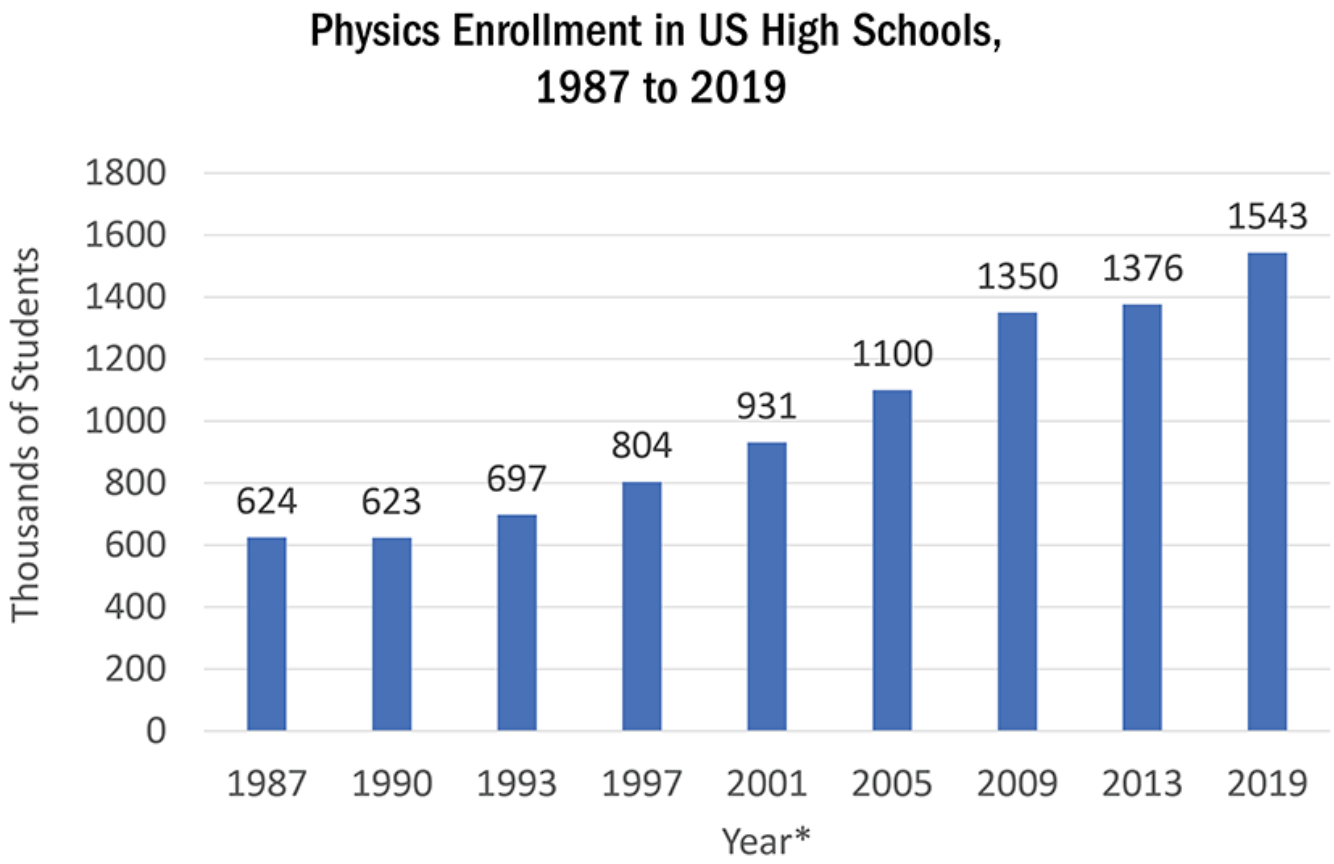
＊女性のSTEM分野の学生や研究者の支援は、世界に先駆けて革新的な技術を開発し、教育を行い、建設を行うための戦略に不可欠

（STEM分野の仕事に就いている女性は、非STEM分野の仕事に就いている女性に比べて33%も多くの収入を得ている）

4　科学・技術・工学・数学の複合／統合教育を模索
　新しい境界領域の分野／ビジネスを先んずる

STEM教育が国際競争力を維持し、男女間格差を減らすという「国家戦略」

米国物理学協会（American Institute of Physics、略称：AIP）の取り組み
STEM教育に併せて物理授業の充実・拡大に注力



*Intervals between years of study range from three to six years.

AIP | American Institute of Physics

aip.org/statistics

Physics-Taking and Physics Availability in US High Schools, 1987 to 2019

		Proportion of Seniors Attending School Where Physics is Offered…		
School Year	Physics-Taking Rate*	Every Year	Every Other Year	Rarely or Never
1986–87	20%	91%	5%	4%
1996–97	28%	94%	2%	4%
2004–05	33%	93%	3%	4%
2008–09	37%	92%	4%	4%
2012–13	39%	91%	3%	6%
2018–19	42%	84%	9%	7%

* The physics-taking rate is the proportion of seniors who will have taken at least one physics class prior to graduation.

K−12の実例（NGSSのサイトより）

理解を示す学生は、次のことができます。

HS-PS1-8. **原子核の組成と核分裂、核融合、放射性崩壊の過程で放出されるエネルギーの変化を説明するモデル**を開発する。[明確化声明:画像や図表などの単純な定性的モデルに重点を置く』と、他の種類の変換に対して核プロセスで放出されるエネルギーの規模に重点を置く。評価の境界: 評価には、放出されたエネルギーの定量的な計算は含まれません。評価はアルファ、ベータ、ガンマ放射性崩壊に限定されます。

上記のパフォーマンス期待は、*K-12*科学教育のためのNRC文書Aフレームワークから以下の要素を使用して開発されました。

理工学実践	懲戒コアアイデア	クロスカットの概念
モデルの開発と使用 9-12 のモデリングは K–8 に基づいて構築され、自然界と設計された世界におけるシステムとそのコンポーネント間の変数間の関係を予測および表示するモデルの使用、合成、開発に進みます。 • システム間またはシステムのコンポーネント間の関係を示す証拠に基づくモデルを開発します。	**PS1.C: 核プロセス** • 核融合、核分裂、不安定核の放射性崩壊を含む核プロセスは、エネルギーの放出または吸収を伴う。中性子と陽子の総数は、核プロセスで変化しません。	**エネルギーと物質** • 核プロセスでは原子は保存されないが、陽子と中性子の総数は保存される。

このグレードバンド内の他の*DDC*への接続:
HS.PS3.A; HS.PS3.B ; ***HS.PS3.C*** ; ***HS.PS3.D*** ; ***HS.ESS1.A; HS.ESS1.C***

グレードバンド全体にわたる*DCB*のアーティキュレーション:
さん。PS1.A; MS.PS1.B ;***さん。ESS2.A***

共通コア状態標準接続:
数学 -

MP.4	数学をモデル化する。*(HS-PS1-8)*
HSN-Q.A.1	問題を理解し、複数のステップの問題の解決策を導く方法としてユニットを使用し、数式で一貫して単位を選択して解釈し、グラフとデータ表示でスケールと原点を選択して解釈します。(HS-PS1-8)
HSN-Q.A.2	説明的なモデリングの目的で適切な数量を定義します。(HS-PS1-8)
HSN-Q.A.3	数量を報告する場合の測定の制限に適した正確さのレベルを選択します。*(HS-PS1-8)*

* アスタリスクでマークされたパフォーマンスの期待は、実践または懲戒コアアイデアを通じて工学と伝統的な科学コンテンツを統合します。

「学問的コアアイデア」と題されたセクションは、*K-12*科学教育のための枠組み:実践、横断的概念、コアアイデアから逐語的に再現されています。統合され、米国科学アカデミーの許可を得て転載。

・グレード8（中学2年）の終わりまでに。

核融合は、2つの核の融合をもたらし、より大きな核を形成し、原子当たりのエネルギーがどの化学プロセスよりも多く放出される。それは非常に高温および圧力の条件の下でのみ発生する。

星の核で起こる核融合は、それらの恒星から(光として)放出されるエネルギーを提供し、原始水素からより巨大な原子のすべてを生成する。したがって、地球と宇宙全体で見つかった元素(水素と原始ヘリウムの大部分を除く)は、核融合プロセスによって星や超新星で形成された。

・グレード12（高校3年）の終わりまでに。

核融合、核分裂、不安定核の放射能崩壊を含む核プロセスは、核結合エネルギーの変化を伴う。中性子と陽子の総数は、核プロセスで変化しない。核相互作用は、核の安定性とプロセスを決定する。自然な放射性崩壊は、特徴的な指数関数的崩壊法則に従う。核の寿命は、存在する同位体比から岩石やその他の材料の年齢を放射年代測定で決定できる。

the National Academies Pressより

⑦　OECDによる教育評価（国別教育報告）

研究分野ごとの大学入学者の分布における男女差は大きい。ほとんどのOECD諸国では、科学、技術、工学、数学（STEM）の特定の分野で女性の存在感が薄い傾向にある。

2019年、日本の工学・製造・建設分野の新規大学入学者に占める**女性の割合は16％で、OECD諸国の中で最も低い割合となった。**

理工系の女性 日本最下位

大学入学割合 自然科学27%、工学16%

経済協力開発機構（OECD）が加盟各国の大学など高等教育機関の入学者に占める女性の割合を調べたところ、日本は平均を大きく下回り、「自然科学・数学・統計学」の分野で27%、「工学・製造・建築」で16%と、比較可能な36カ国でいずれも最下位だった。理工系の女子学生の少なさは日本の課題で、OECDは「男女で著しい差が生じている。女性に理工系分野に進む夢を与える必要がある」と指摘した。

OECDは2019年時点の「STEM」（科学・技術・工学・数学）分野の入学者に占める女性割合を調査。日本は18年度分を報告した。

「自然科学・数学・統計学」分野の36カ国の平均は52%。最も高いのはスロバキアの65%で、ポーランド63%、チェコとリトアニアの60%と続いた。日本は、2番目に低いベルギーの40%にも大きく離された。「工学

主なOECD加盟国の高等教育機関の入学者に占める女性割合

[分野] 自然科学・数学・統計学	
スロバキア	65
ポーランド	63
チェコ、リトアニア	60
英国	57
OECD平均	52
韓国	48
ベルギー	40
日本	27

[分野] 工学・製造・建築	
アイスランド	39
ポーランド	36
ギリシャ	33
OECD平均	26
フランス、英国	25
ドイツ、韓国	21
チリ	18
日本	16

※単位は%、米国はデータなし

2021年10月08日　産経新聞

⑧　なぜ理系女子が少ないのか

1　数学・理科が不得意（不得意になって行った）

2　高校での理科授業が難しい（本質が分からないので難しい）

3　生徒自身が働くことの意味をよく理解していない（賃金格差？）

4　社会全体の問題（これからも今までと同じように生活できると思い込んでいる）

⑨　いつから数学・理科が嫌いになるか
⑩　嫌いになる理由

- 小学校？　算数のつまずき　**これはずっと引きずる**
  分数，小数，割合，図形　＋「やり方を覚える」教育

- 中学校　数学の苦手度拡大　暗記では対応不能へ
  理科は化学式　圧力　電圧電流　etc

- 高等学校　小学校・中学校の歪みが集中
  不幸なことに本質に触れたことがない
  「アハ」体験を持てない．　理解できた感激を味わっていない．
  教科書を読んでも分からない

つまづく生徒へのメッセージ

- 生物はCの化合物，岩石はSiの化合物でできている。これは必然。

- 星雲は密度10^2～10^6/cm^{3}の世界
  「化学」で考えている世界は2.7×10^{19}/cm^{3}の世界

- 化学式／化学反応が分からない君へ
  あなたの考える化合物は宇宙のどこかにあるかも　地上にはない
  地上にない物質は沢山見つかっている

- 「物理」で欠けている自然観　　宇宙を支配する4つの力
  宇宙のエネルギーはいろいろな形で現れている　　物質　電磁波　熱　などなど

⑪　教科書を具体的に見ると（放射線関連事項はどこに出ている？）

- 原子と原子核は「物理」
- 電磁波は「物理基礎」と「物理」両方に登場

（物理基礎の履修率は約6割→電磁波は全国民が学習していない，
物理の履修率は2割）

- 放射性同位体は「化学基礎」
- 中学校2年生ではクルックス管とX線が登場
- 中学3年生で放射線・原子力発電

中学校理科は系統的に学べない構造になっている

＊中学で発展になっている項目 ⇒ 高校で選択しないと学習はしない・できない

物理基礎での電磁波　啓林館

3 電磁波

電波は電磁波の一種。
電波の知識を深めよう。

A 電磁波の発生

現代社会の中で，私たちは，いろいろな場面で電波を利用しながら生活をしている。テレビ・ラジオ・携帯電話などでは，すべて電波によって情報のやりとりをしている。初期の通信装置の原理を実験 24 で学ぼう。

マクスウェルは，電磁気の法則から電気と磁気の振動が空間を波として伝わることを予言した。これを **電磁波** とよぶ。電波はこの一種である。

B 電磁波の種類と利用

電磁波には電波以外に，可視光線，赤外線，紫外線，X 線，γ（ガンマ）線などがある。これらは，波動としての電磁波の波長・周波数（振動数[1]）の違いで種類の違いが生じている（表 1）。

真空中を伝わる電磁波の速さは，真空中の光の速さ c と同じである。

$c = 3.00 \times 10^8$ m/s（秒速 30 万キロメートル）

また，電磁波は波なので，速さ c〔m/s〕と周波数 f〔Hz〕と波長 λ〔m〕との間に波の基本式がなりたつ。

$$c = f\lambda \qquad c：速さ〔m/s〕，f：周波数〔Hz〕，\lambda：波長〔m〕 \quad \langle 2 \rangle$$

この式から，電磁波は周波数が小さいほど波長が大きく，逆に周波数が大きいほど波長が小さいことがわかる。

実験 24 コヒーラの実験

ライター着火の火花放電で電磁波が生じ，アルミホイルの接点で放電して電流が流れるようになる。

[1] 電磁波では，振動数のかわりに周波数ということが多い。

表 1　電磁波の利用

名称		波長	周波数	利用の例
電波	超長波（VLF）	100 ～ 10 km	3 ～ 30 kHz	
	長波（LF）	10 ～ 1 km	30 ～ 300 kHz	船舶，航空機用通信
	中波（MF）	1 km ～ 100 m	300 ～ 3000 kHz	ラジオ AM 放送
	短波（HF）	100 ～ 10 m	3 ～ 30 MHz	ラジオ短波放送
	超短波（VHF）	10 ～ 1 m	30 ～ 300 MHz	ラジオ FM 放送，テレビ放送（アナログ波）
	極超短波（UHF）（マイクロ波）	1 m ～ 10 cm	300 ～ 3000 MHz	テレビ放送（地上波デジタル），携帯電話，電子レンジ
	センチ波（SHF）（マイクロ波）	10 ～ 1 cm	3 ～ 30 GHz	電話中継，衛星放送
	ミリ波（EHF）（マイクロ波）	1 cm ～ 1 mm	30 ～ 300 GHz	電話中継
	サブミリ波（マイクロ波）	1 mm ～ 100 μm	300 ～ 3000 GHz	
赤外線		100 μm ～約 770 nm	（省略）	赤外線写真，乾燥，赤外線リモコン
可視光線		約770 ～ 約380 nm		光学機器，光通信
紫外線		約380 ～ 1 nm		殺菌灯
X 線		10 ～ 0.01 nm*		X 線写真，材料検査，医療
γ 線		0.1 nm 未満*		材料検査，医療

＊　X 線と γ 線の波長は一部重なるが，X 線は原子から，γ 線は原子核から出る。

電波の発生の仕方を考えると，振動する電流の振動数が，発生する電波の周波数になる。たとえば 1000 kHz の AM 放送の電波の場合は，送信アンテナの中で電子が 1 秒間に 100 万回（1×10^6 回）振動している。受信のときは，受信アンテナの自由電子が，空間を伝わってきた電磁波の電気的な振動を受けて，100 万回振動するのである。

電波に情報を載せるのは，オンオフのデジタル信号にしたり，電波の振幅をかえたり，周波数を微少に変化させたりすることで実現している。ラジオやテレビの電波も，携帯電話の電波も，無線 LAN もすべてこれらの応用である。このため，周波数の大きい電波の方が情報量が増える。ラジオ放送よりもテレビ放送，さらにはデジタル放送や携帯電話の電波の方が周波数が大きく波長が短い。

練習 3　ある AM 放送の電波の周波数を 1000 kHz として，この電波の波長を求めよ。
〔300 m〕

練習 4　第 3 世代携帯電話（3 G）の電波の波長は，約 15 cm である。この電波の周波数を求めよ。
〔約 2 GHz〕

物理基礎での原子力

D 原子力

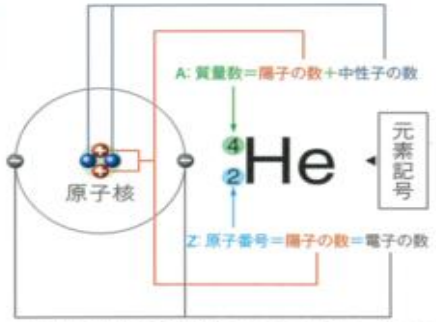
■原子　すべての物質は原子で構成されており，原子は**原子核**と**電子**から構成されている。さらに原子核は，正の電荷をもつ**陽子**と，電荷をもたない**中性子**から構成されている。

陽子の数を，その原子の**原子番号**といい，陽子の数と中性子の数の和を，その原子の**質量数**という。

■同位体　原子にはさまざまな種類がある。原子番号が同じであっても質量数が異なる原子もあり，それぞれを**同位体**（**アイソトープ**）という。たとえば，原子番号92のウランには，質量数234，235，238の3種類の同位体が存在する。

練習 1　$^{235}_{92}U$ の陽子の数と中性子の数を求めよ。[92 個，143 個]

■原子核の崩壊　原子核が不安定で，**放射線**を出して別の原子核にかわるものがある。このような性質をもつ同位体を**放射性同位体**（**ラジオアイソトープ**）といい，ほかの原子核にかわることを原子核の**崩壊**という。



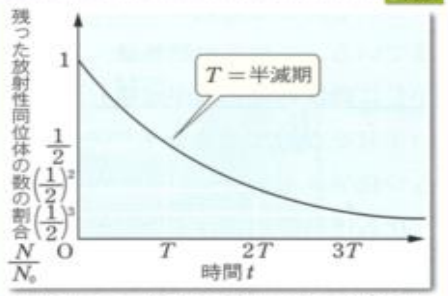
元素とは同じ原子番号をもつ原子の総称で，その種類を元素記号で表す。原子の種類を表す場合，原子番号を元素記号の左下，質量数を左上にかく。

図 4　原子の構造と種類の表し方

元素	同位体	質量 (u)	存在比(%)
水素	^{1}H	1.008	99.985
	^{2}H	2.014	0.015
炭素	^{12}C	12	98.90
	^{13}C	13.003	1.10
ウラン	^{234}U	234.041	0.005
	^{235}U	235.044	0.720
	^{238}U	238.051	99.275

図 5　同位体の種類

発展



崩壊によって，原子核がもとの数の半分になるまでの時間を**半減期**といい，原子核の種類によって決まっている。

図 6　半減期

■放射線と放射能　放射性同位体が崩壊するとき，放射線を放出して，より安定な原子核になる。この放射線を出す能力のことを**放射能**という。

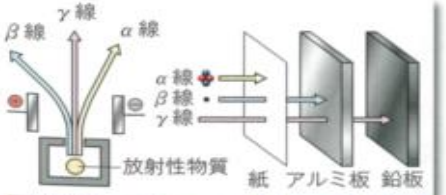
放射能の強さはBq（ベクレル），物質が放射線を受けるときに吸収するエネルギーの量はGy（グレイ）という単位で表される。また，放射線が人体に及ぼす影響を示すときは，Sv（シーベルト）という単位を用いる。

表 1　放射性同位体の種類　発展

同位体	崩壊の型	半減期
$^{3}_{1}$H	β	12.3 年
$^{14}_{6}$C	β	5.73×10^{3} 年
$^{40}_{19}$K	β	1.27×10^{9} 年
$^{60}_{27}$Co	β	5.271 年
$^{90}_{38}$Sr	β	28.8 年
$^{131}_{53}$I	β	8.021 日
$^{134}_{55}$Cs	β	2.062 年
$^{226}_{88}$Ra	α	1.60×10^{3} 年
$^{232}_{90}$Th	α	1.41×10^{10} 年
$^{238}_{92}$U	α	4.468×10^{9} 年
$^{239}_{94}$Pu	α	2.411×10^{4} 年

崩壊により原子核がもとの数の半分になるまでの時間を半減期という。

■放射線の種類　放射線には，構成粒子の違いにより，α（アルファ）線，β（ベータ）線，γ（ガンマ）線がある。ほかに中性子線，X線などがある。



放射線	実体	電荷	透過力
α 線	$^{4}_{2}$He 原子核	＋	小
β 線	電子	－	中
γ 線	電磁波	なし	大

図 7　放射線の種類

■放射線の利用　放射線には，宇宙から届く宇宙線や自然界に存在する放射性同位体から放出される**自然放射線**と，人為的につくられた**人工放射線**がある。

放射線は，植物の品種改良，美術工芸品などの非破壊検査，がんの検査や治療など，産業や医学などのさまざまな分野で幅広く利用されている。放射線は利用価値が高い反面，生物の細胞を傷つける作用もあり，人体にがんや突然変異を起こさせるなど悪影響も与える。

図 8　照射および未照射の野菜

■原子核エネルギー　原子核がほかの原子核にかわる反応を，**核反応**という。核反応の中には，重い原子核が分裂する**核分裂**や，軽い原子核どうしが1つの原子核に融合する**核融合**がある。これらの核反応が起こると，非常に大きなエネルギーが放出される。このエネルギーを，**原子核エネルギー**という。

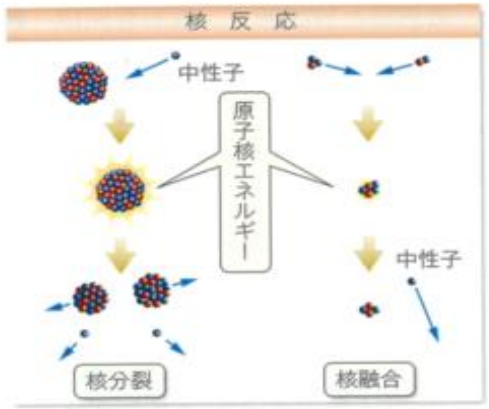
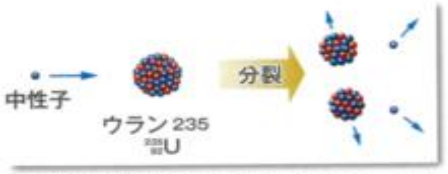


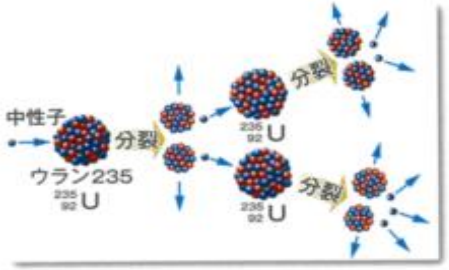
図9　核分裂と核融合

■核分裂と連鎖反応　ウランの原子核に中性子を照射すると，ウランのほぼ半分の質量をもつバリウム $^{141}_{56}Ba$ などの原子核に分裂する。

ウラン $^{235}_{92}U$ のほかにプルトニウム $^{239}_{94}Pu$ などの原子核も核分裂反応を起こす。これらの物質は，中性子を吸収して核分裂を起こすときに，中性子を2，3個放出する。この放出された中性子は，別の原子核に吸収され，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。また，この連鎖反応が継続して起こる状態になったときを**臨界状態**に達したという。



重い原子核に中性子が吸収されると，別の原子核に分裂する。
図10　核分裂



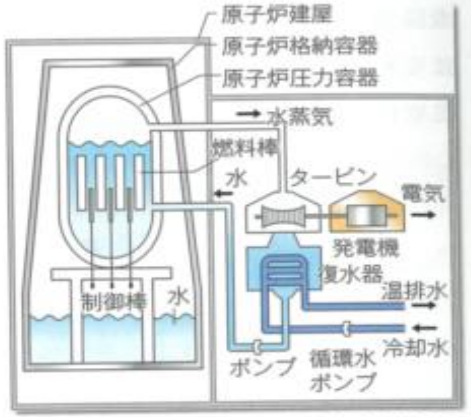
核分裂によって放出された中性子が別の原子核の分裂を引き起こす。
図11　連鎖反応

■核融合　軽い原子核どうしの反応で，いくつかの原子核が1つに融合して大きなエネルギーを出す反応が，核融合である。

軽い原子核どうしが衝突すると，融合して別の重い原子核となる。
図12　核融合

太陽などの恒星のエネルギー源は，内部で起こる核融合である。恒星の内部では4つの水素原子核が核融合を起こし，1つのヘリウム原子核と2つの陽電子[1]になるという核融合が起こっている。

■原子力発電　**原子力発電**は，原子炉内で核分裂させ，原子核エネルギーから得た熱によって高温・高圧の水蒸気をつくり，これを利用してタービンを回し，電気エネルギーに変換している(図13)。



ウランなどを核分裂させて得た熱を利用して発電する。
図13　原子力発電(沸騰水型原子炉)

■原子力発電の利点と問題点

原子力発電では，ウラン1gの核分裂で石油2000L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，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，放射能もれや，制御不能による暴走など，周辺に大量の放射性物質が放出されて，放射能汚染の被害にあう可能性がある。また，**使用済み核燃料**や，古くなって解体した原子炉の材料は，強い放射能をもっている。このような**核廃棄物**を，長期間にわたって安全に管理することは難しい。これらの課題についても考えていかなければならない。

[1] 電子と同じ質量をもつが，正の電荷をもつ粒子である。

高校物理での電磁波項目　すべて見せます

5 電磁波
electromagnetic wave

電磁波とはどのようなものだろうか。

A 電磁場の法則

電場と磁場は，互いに密接に関連し合っている。そこで，電場と磁場を一組のものとみなし，これを **電磁場** (electromagnetic field) という。p.266 で学んだように，電磁誘導の法則は次のように表現できる。

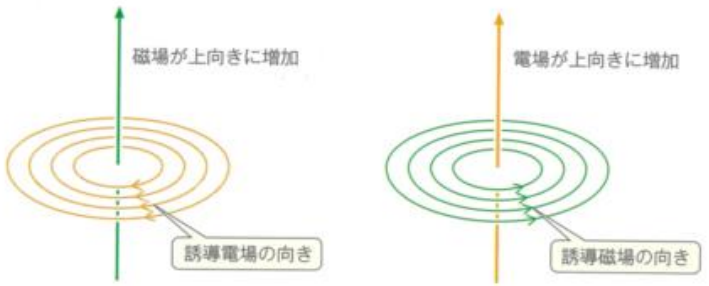
① **磁場が時間的に変化すると，そのまわりに電場が誘導される。**

電磁誘導で生じた誘導電場の電気力線は，始点も終点もない閉じた曲線で，電流のつくる磁場に似ている。変動磁場と誘導電場の関係は図 24 (a)のようになる。 ▶p.271

ところで，このままでは電場と磁場の関係が対等でないことに気がつく。マクスウェル(▲1831-1879, イギリス)は，①と逆の関係になる次の法則がつけ加えられなければならないと考えた。そうすることによって，電磁場に関する法則が矛盾なくなりたつことを示した。

② **電場が時間的に変化すると，そのまわりに磁場が誘導される。**

電場の時間的な変化は，電場の増加の向きに仮想的に電流が流れた場合と同じはたらきがある。変動電場と誘導磁場の関係は図 24 (b)のようになる。



(a) 電磁誘導　　(b) マクスウェルの考えた効果

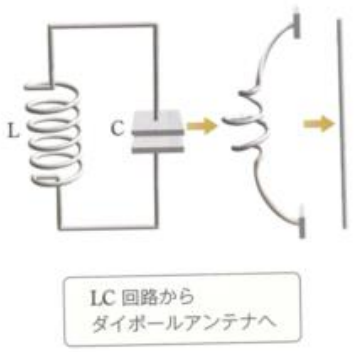
磁場と電場の変動に対して，うず状の誘導電場と磁場が生じる。ただし，うずの向きは逆向きである。

⇑図 24　真空中の電磁場の性質

B 電磁波の放射

図 20 のように，LC 回路にあるきっかけを与えると，式〈34〉で与えられる固有周波数の電気振動が生じる。図 25 のように，コンデンサーの極板を小さくして広げ，コイルの巻数を小さくしていくと，コンデンサーの電気容量とコイルの自己インダクタンスが小さくなり，高い周波数の電気振動が生じる。究極的に 1 本の有限な導体棒(ダイポールアンテナ)にすると，コンデンサーやコイル内に閉じ込められていた電場と磁場の磁束密度が広い空間に解放される。アンテナでの電気振動によって，電場と磁場が時間的に変動すると，図 24 に従って，それぞれ変動する誘導磁場と誘導電場を生じる。その後，誘導磁場と誘導電場は相互に誘導し合って，波となって空間を広がっていく。この波を **電磁波** (electromagnetic wave) という。電磁波はマクスウェルによって理論的に予言され，ヘルツによってその存在が実験的に証明された。

図 25 からわかるように，有限の長さの導線は LC 回路とみなすことができ，周波数の高い固有周波数をもつ。図 26 のように，導線に電荷を与えると，導線に固有周波数と等しい電気振動が生じ，電磁波が放射される。エネルギーの供給がないので，すみやかに減衰し，離れたところに置いた短波ラジオから短い音が聞こえる。



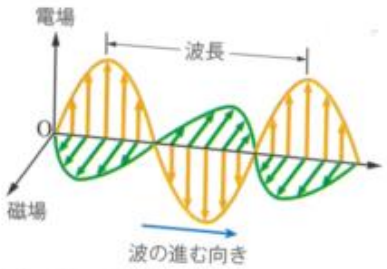
⇑図 25　ダイポールアンテナ

帯電した孤立導体を導線に接触させると，導線にごく短時間，振動電流が流れ，電磁波が放射される。

⇑図 26　単純な電波の放射と受信

C 電磁波の性質

▶横波　電磁波は図25のアンテナに垂直な方向に最も強く放射される。図27に示すように，振動する電場と振動する磁場は互いに垂直である。



⇑図27　電磁波の伝わり方

アンテナから十分離れると，図27のように，電場が最大のときに磁場も最大となり，逆に電場が最小のときに磁場も最小となる。このように，電磁波においては，電場と磁場の位相がそろい，**横波**となって空間を伝わる。電磁波は波としての共通の性質をもっている。 ▶p.131 transverse wave

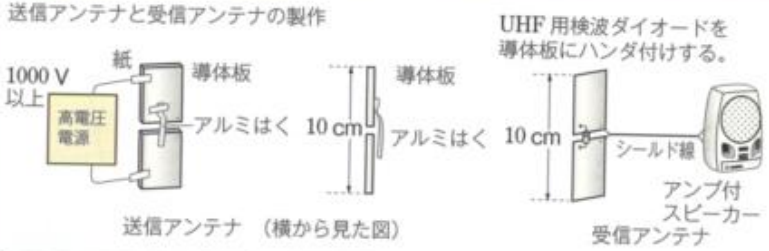
▶電磁波の伝わる速さ　電磁波の伝わる速さ c は，真空の誘電率 ε_0〔$C^2/(N\cdot m^2)$〕と透磁率 μ_0〔N/A^2〕で定まり，次式で表される。

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3.0 \times 10^8\ \mathrm{m/s} \qquad \langle 37 \rangle$$

c は光速と等しく，光やX線，γ 線なども電磁波である。

実験39　電磁波の性質

送信アンテナと受信アンテナの製作

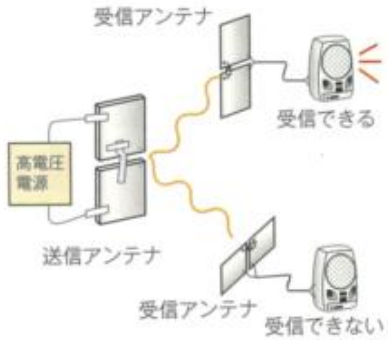


高電圧をかけると，アルミはくが引きよせられ一瞬導体板と導通する。このとき高周波の電気振動が生じ，電磁波が放射される。

この発振器と受信器で，電波のかたより，透過と反射(木板　プラスチック板，金属板などを間に置く)，回折などを調べてみよう。

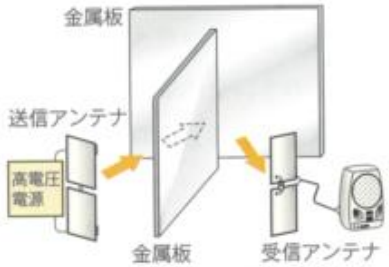
⚠注意点
高電圧電源の端子には直接手を触れないこと。

▶かたより　図28のように，受信アンテナと送信アンテナが平行な場合は，受信電波の強さが最大であるが，受信アンテナを回転させると徐々に弱くなり，90°のときに最小となる。これは，送信アンテナから放射される電波も，受信アンテナが受信できる電波も，電場はアンテナに平行なかたよりをもつ横波であることを示す。



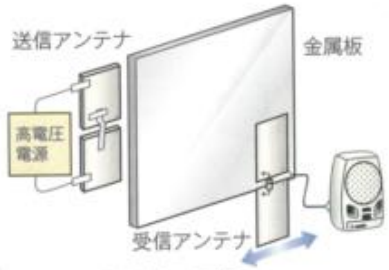
⇑図28　電波のかたより

▶反射と屈折　電波は金属板を透過することはできない。金属板で反射されるからである。金属板で反射された電波の入射角と反射角は等しく，反射の法則がなりたつ。また，電波は空気中からパラフィンなどへ進むとき屈折する。これは，パラフィン中を伝わる電波の速さが真空中より遅いために起こる現象である。 ▶p.142 ▶p.142 ▶p.142



⇑図29　電波の反射と屈折

▶回折　図30のように，送信アンテナと受信アンテナの間に金属板を置き，受信アンテナを金属板に沿って動かすと，金属板の端に近いところでは電波を受信できる。これは，電波が回折するからである。 ▶p.141



⇑図30　電波の回折

⇨電波のかたより，透過と反射，回折を調べてみよう。実験39

▶干渉　電波は互いに重なり合って干渉する。 ▶p.137

⇨電波の干渉を調べてみよう。p.294 実験40

D 電波の利用

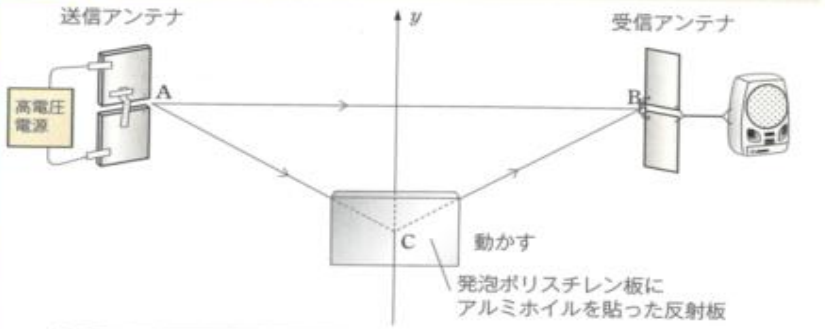
テレビ放送や携帯電話から送信するときは，電気振動を減衰させないようにエネルギーを供給し，放射する電波に情報をのせている。

テレビや携帯電話では到達した電波からどのように情報を復元しているのだろうか。受信アンテナに到達した電場はアンテナ内の自由電子に電気力を及ぼし，電波と等しい周波数で振動させる。この電子の振動による振動電流を増幅して情報をとり出すのである。

電磁波は，周波数ごとにさまざまな分野で利用されている。一般に，周波数が高いほど，より多くの情報を送信することができる。表2のように，テレビ放送や携帯電話は，ラジオ放送よりも周波数が高く，波長の短い電磁波を利用している。しかし，波は波長が短いほど回折しにくいため，高周波数の電磁波ほど障害物の影響を大きく受ける。

光は非常に周波数の高い電磁波なので，きわめて高密度の情報送信が可能である。全反射を利用した光ファイバーを使うことで，広く通信に利用されている。さらに波長の短いX線，γ線も医療，工業などで利用されている。

実験 40 電波の干渉



反射板を y 方向に動かし，A→B へ直接伝わる電波と反射板を介して A→C→B の経路で伝わる電波を干渉させ，受信の強弱を観察しよう。

表2 電磁波の利用

名称		波長	周波数	利用の例
電波	超長波(VLF)	100～10 km	3～30 kHz	
	長波(LF)	10～1 km	30～300 kHz	船舶，航空機用通信
	中波(MF)	1 km～100 m	300～3000 kHz	ラジオ AM 放送
	短波(HF)	100～10 m	3～30 MHz	ラジオ短波放送
	超短波(VHF)	10～1 m	30～300 MHz	ラジオ FM 放送
	極超短波(UHF) マイクロ波	1 m～10 cm	300～3000 MHz	テレビ放送，携帯電話，電子レンジ
	センチ波(SHF) マイクロ波	10～1 cm	3～30 GHz	電話中継，衛星放送
	ミリ波(EHF) マイクロ波	1 cm～1 mm	30～300 GHz	電話中継
	サブミリ波 マイクロ波	1 mm～100 μm	300～3000 GHz	
赤外線		100 μm～約770 nm	(省略)	赤外線写真，乾燥，赤外線リモコン
可視光線		約770～約380 nm		光学機器
紫外線		約380～1 nm		殺菌灯
X線		10～0.01 nm		X線写真，材料検査，医療
γ線[1]		0.1 nm未満		材料検査，医療

E 熱放射

物体を熱すると発光するようになり，その色は温度が上がるにつれて赤から黄色，そしてしだいに青白くなる。熱した物体は光を出していないときでも，電磁波(赤外線)を放射しているため，離れている人にも温かく感じる。熱した物体が電磁波を放射する現象を **熱放射** (thermal radiation) という。

物体中の電子やイオンの熱運動のために，まわりの電磁場は時間的に変化して電磁波が放射される。粒子の運動は不規則であるため，放射される電磁波はいろいろな波長の波が混ざったものになる。すべての波長の光を吸収する理想的な物体(黒体という)の場合，各波長のエネルギー分布は温度だけで決まり，図31のようになる。

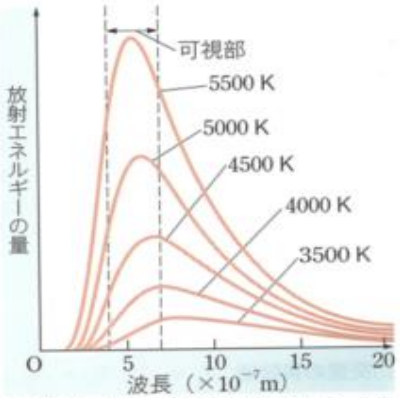


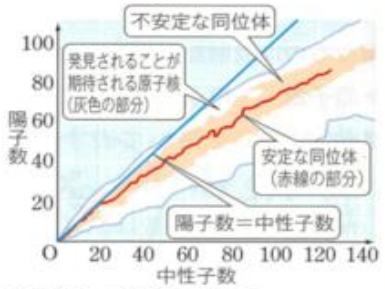
図31 黒体からの熱放射のエネルギー分布

[1] おもに放射性物質から出る。

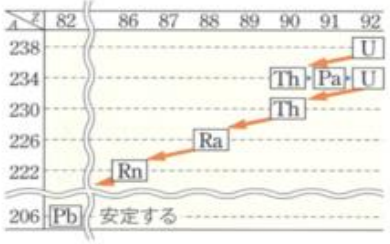
説明はここまでです

C 原子核の崩壊と放射線

不安定な原子核が放射線を出してより安定な原子核に変わることを原子核の **放射性崩壊**(radioactive decay)(またはたんに崩壊)という。放射線を出す能力を **放射能**(radioactivity)といい，放射能をもつ物質を **放射性物質**(radioactive substance)という。放出された放射線のエネルギーは，最終的に周囲に与えられる熱になる。この熱を **崩壊熱**(decay heat)という。



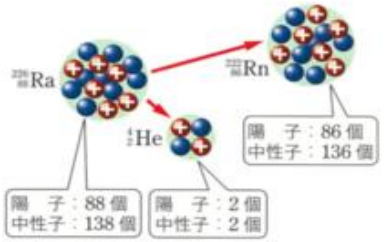
⬆図 12　不安定な同位体



⬆図 13　ウラン系列

▶崩壊系列　崩壊してできた原子核が不安定な場合，さらに崩壊が起こり，安定な原子核に至るまで続く。この原子核の系列を **崩壊系列**(decay series)という。崩壊系列は，ウラン系列(図 13)，トリウム系列など，4 つの系列がある。

▶崩壊の種類と放射線　原子核の崩壊の種類には **α 崩壊**(α-decay)(図 14)，**β 崩壊**(β-decay)，**γ 崩壊**(γ-decay)がある。



⬆図 14　α 崩壊

▶α 崩壊　α 崩壊は，不安定な原子核が α 線(α 粒子，$^{4}_{2}$He の原子核)を放出し，原子番号が 2，質量数が 4 少ない別の原子核になる現象である。たとえば，原子番号 88 のラジウム 226($^{226}_{88}$Ra)は，α 崩壊をして原子番号 86 のラドン 222($^{222}_{86}$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。

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}\ (\alpha\ 粒子) \qquad \langle 15 \rangle$$

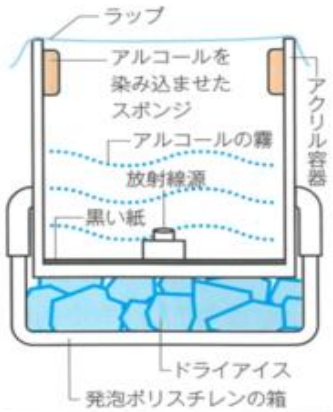
α 線は透過力が弱く，1 枚の紙を透過することができない。

▶β 崩壊　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，質量数は同じで，原子番号が 1 大きい別の原子核になる現象である。たとえば，鉛 210($^{210}_{82}$Pb)は，β 線を放出してビスマス 210($^{210}_{83}$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。

$$^{210}_{82}\mathrm{Pb} \rightarrow {}^{210}_{83}\mathrm{Bi} + e^-\ (電子) \qquad \langle 16 \rangle$$

β 線は紙は透過するが，鉛の板などは透過できない。

実験 44　霧箱による放射線の観察



準備するもの
アクリル容器，スポンジ，ラップ，発泡ポリスチレンの箱，アルコール，黒い紙，ドライアイス，放射線源

▶γ 崩壊　崩壊によって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 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。⇨放射線を観察しよう。実験 44

▶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 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を表す。たとえば，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。

● **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**(absorbed dose))で表される。1 Gy は，物体 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。

● **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。それを考慮した係数を吸収線量にかけたものを **等価線量**(equivalent dose)といい，単位には Sv を用いる。

原子核はこのような内容です

D 半減期

放射性同位体は，原子核の崩壊によってより安定な原子核へと変わっていく。この崩壊はいつも一定の確率で起こり，その原子核ができてからの時間や原子核の数に関係がない。その結果，もとの原子核の数が半分になるまでの時間は，放射性同位体の種類によって決まっている。この時間を **半減期**（half life）という（図 15，表 2）。

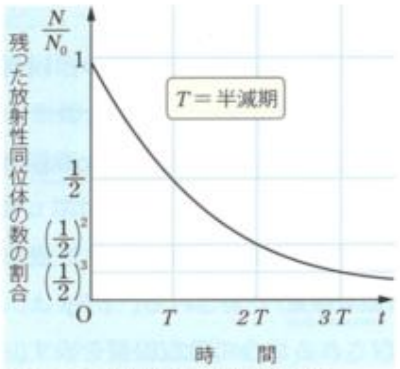
ある放射性同位体が時刻 $t = 0$ に N_0 個あったとすると，時刻 t におけるその放射性同位体の数は次のようになる。

$$N = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \qquad (T：半減期) \qquad \langle 17 \rangle$$

たとえば，半減期 5700 年の $^{14}_{6}\mathrm{C}$ が 1 g あったとすると，原子数と質量は比例するので，11400 年後に残っている $^{14}_{6}\mathrm{C}$ の質量 m〔g〕は次のようになる。

$$m = 1\,\mathrm{g} \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{11400}{5700}} = 1\,\mathrm{g} \times \left(\frac{1}{2}\right)^{2} = 0.25\,\mathrm{g}$$

練習 3 $^{131}_{53}\mathrm{I}$ の半減期を 8.0 日としたとき，$^{131}_{53}\mathrm{I}$ の原子数が $\frac{1}{8}$ になるには，何日かかるか。 〔24 日〕



↑図 15　放射性同位体の半減期

↓表 2　放射性同位体の半減期の例

同位体	崩壊の型	半減期
$^{3}_{1}\mathrm{H}$	β	12.3 年
$^{14}_{6}\mathrm{C}$	β	5.70×10^{3} 年
$^{40}_{19}\mathrm{K}$	β	1.25×10^{9} 年
$^{60}_{27}\mathrm{Co}$	β	5.27 年
$^{90}_{38}\mathrm{Sr}$	β	28.8 年
$^{131}_{53}\mathrm{I}$	β	8.02 日
$^{134}_{55}\mathrm{Cs}$	β	2.07 年
$^{137}_{55}\mathrm{Cs}$	β	30.2 年
$^{226}_{88}\mathrm{Ra}$	α	1.60×10^{3} 年
$^{232}_{90}\mathrm{Th}$	α	1.41×10^{10} 年
$^{238}_{92}\mathrm{U}$	α	4.47×10^{9} 年
$^{239}_{94}\mathrm{Pu}$	α	2.41×10^{4} 年

3 原子核反応

Atomic reaction

原子核反応について学習しよう。

A 質量とエネルギーの等価性

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わかった。たとえば，陽子 2 個，中性子 2 個からできているヘリウム $^{4}_{2}\mathrm{He}$ 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 m 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**（mass defect）という（図 16）。

$$\Delta m = Zm_\mathrm{p} + (A - Z)m_\mathrm{n} - m \qquad \langle 18 \rangle$$

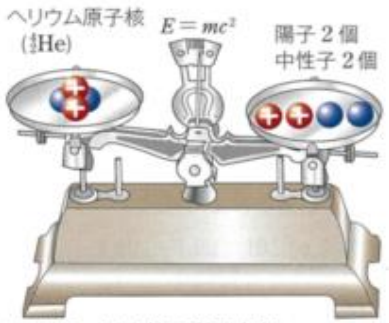
アインシュタインが 1905 年に発表した特殊相対性理論によれば，質量はエネルギーの形態の一つで，質量 m〔kg〕の物体は次式で表される **静止エネルギー**（rest energy）E〔J〕をもっている。

$$E = mc^2 \qquad \langle 19 \rangle$$

E〔J〕：静止エネルギー（rest energy）
m〔kg〕：質量（mass），c〔m/s〕：真空中の光速（light speed）

練習 4 質量 1 u の粒子の静止エネルギーは何 eV か。有効数字 2 けたで求めよ。ただし，$1\,\mathrm{u} = 1.66 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$，$e = 1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$，$c = 3.0 \times 10^{8}\,\mathrm{m/s}$ とする。 〔9.3×10^{8} eV〕

練習 5 $^{12}_{6}\mathrm{C}$ 原子核の質量欠損 Δm は何 u か。表 3，表 4 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，$^{12}_{6}\mathrm{C}$ 原子核の質量は 11.9967 u である。 〔0.0993 u，9.2×10^{7} eV〕



↑図 16　原子核の質量欠損

↓表 3　電子，陽子，中性子の質量

	質量
電子の質量（u）	0.00055
陽子の質量（u）	1.0073
中性子の質量（u）	1.0087

↓表 4　$^{2}_{1}\mathrm{H}$ と $^{4}_{2}\mathrm{He}$ の質量欠損

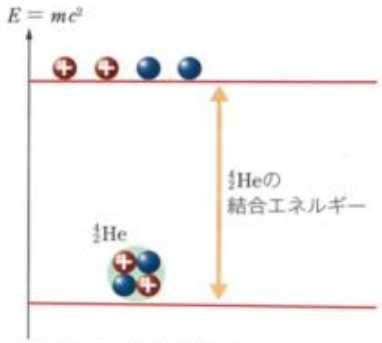
	$^{2}_{1}\mathrm{H}$	$^{4}_{2}\mathrm{He}$
核子の質量の和（u）	2.0160	4.0320
原子核の質量（u）	2.0136	4.0015
質量欠損（u）	0.0024	0.0305

B 原子核の結合エネルギー

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

$$\Delta E = \Delta mc^2 \qquad \langle 20 \rangle$$

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**（binding energy）という（図17）。原子核の結合エネルギーを表すとき，eV（エレクトロンボルト）の 10^6 倍の MeV（メガエレクトロンボルト）という単位を用いることが多い。



↑図17　結合エネルギー

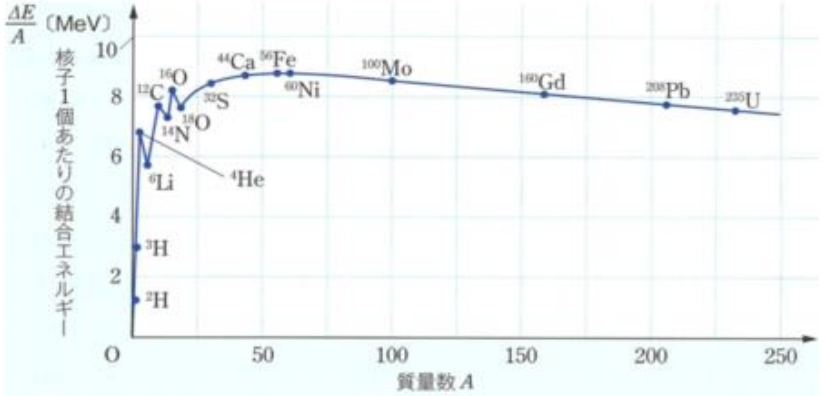
練習 6　p.339 表4より，$^2_1$H と $^4_2$He それぞれの結合エネルギーは何 MeV か。また，質量欠損はそれぞれの質量の何%にあたるか。ただし，$c = 3.0 \times 10^8$ m/s とする。　[$^2_1$H：2.2 MeV，0.12%，$^4_2$He：28 MeV，0.76%]

参考　化学結合と質量欠損

結合に際して質量欠損が生じるのは，核子どうしの結合の場合だけではない。原子やイオンの結合などの化学的な現象の場合でも，同様に質量欠損が起こる。ただし，化学的な現象による質量欠損は，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，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。

▶核子1個あたりの結合エネルギー　図18は，いろいろな原子核について，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18から，質量数60前後の原子核が最大の結合エネルギー（約8.6 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（▶p.345）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（▶p.343）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。



↑図18　核子1個あたりの結合エネルギー

例題 2　**核融合によって放出されるエネルギー**

重陽子 $^2_1$H とヘリウム $^4_2$He 原子核の質量は，2.0136 u と 4.0015 u である。$^2_1$H 2個が核融合して $^4_2$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 u = 1.66×10^{-27} kg，$e = 1.60 \times 10^{-19}$ C，$c = 3.00 \times 10^8$ m/s とする。

解　核融合による質量変化（減少）は $\Delta m = 2 \times 2.0136\,\text{u} - 4.0015\,\text{u} = 0.0257\,\text{u}$

1 eV = 1.60×10^{-19} J だから，

$$\Delta E = \frac{0.0257\,\text{u} \times 1.66 \times 10^{-27}\,\text{kg} \times (3.00 \times 10^8\,\text{m/s})^2}{1.60 \times 10^{-19}\,\text{J/eV}} \fallingdotseq 24.0 \times 10^6\,\text{eV}$$

$$= 24.0\,\text{MeV}$$ 答

素粒子は

4 素粒子
Elementary particle

素粒子とはどのようなものだろうか？

A 素粒子の存在

物質は最小単位「原子」から構成されるというデモクリトスたちの考えは，ドルトン（▲1766-1844，イギリス）により「原子説」としてよみがえった。しかし，原子も陽子と中性子からなる原子核と電子から構成される。これらの粒子は，原子に代わる最小構成要素と考えられ，のちに発見された **ニュートリノ**（neutrino）とともに **素粒子**（elementary particle）と名づけられた。また，質量は同じであるが電荷などの性質が逆の反粒子も存在し，ディラック（▲1902-1984，イギリス）により予言された電子の反粒子である陽電子は，1932年アンダーソン（▲1905-1988，アメリカ）により発見された。宇宙線観測や高エネルギー加速器実験により，湯川秀樹（▲1907-1981，日本）の予言したパイ中間子など，20世紀には数多くの新しい素粒子の発見がもたらされた。

素粒子は相互作用により粒子の種類が変わったり，別の粒子が現れたりする。たとえば，中性子が陽子に変わる β 崩壊（▶p.337），$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ では，電子，反電子ニュートリノが新たに現れる。また，原子における光子の放出・吸収のように，素粒子は新しく生まれたり消滅したりする。このように，素粒子は永遠不滅の存在ではないが，素粒子の反応においても，反応の前後で静止質量エネルギーを含めたエネルギー，運動量，および電荷の総和はそれぞれ保存される。

表5 おもな素粒子

名称	記号	電荷	反粒子	静止質量エネルギー(MeV)	平均寿命(s)
光子	γ	0	γ	$< 1 \times 10^{-24}$	安定
電子	e^-	$-e$	e^+	0.510998928(11)	安定
ミュー粒子	μ^-	$-e$	μ^+	105.658715(35)	$2.1969811(22) \times 10^{-6}$
電子ニュートリノ	ν_e	0	$\bar{\nu}_e$	$< 2 \times 10^{-6}$	振動*
ミューニュートリノ	ν_μ	0	$\bar{\nu}_\mu$	< 0.19	振動*
パイ中間子	π^+	e	π^-	139.57018(35)	$2.6033(5) \times 10^{-8}$
	π^0	0	π^0	134.9766(6)	$8.52(18) \times 10^{-17}$
陽子	p	e	$\bar{p}$	938.272046(21)	安定
中性子	n	0	$\bar{n}$	939.56379(21)	880.3(1.1)

電子ニュートリノがミューニュートリノに変化し，また電子ニュートリノに戻るというように，ニュートリノは種類間で振動しながら伝播する。このことからニュートリノは質量をもつことがわかった（2015年ノーベル物理学賞）。

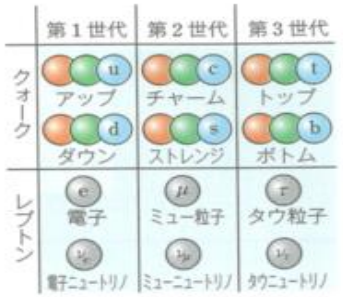
B 物質を構成する基本粒子

素粒子をより基本的に理解するため，クォークという仮想粒子が考えられたが，実験によりその存在が実証され，物質を構成する **基本粒子**（fundamental particle）と考えられている。現在では，基本粒子だけでなく，基本粒子から構成された陽子などの複合粒子も含め，総称して素粒子とよぶ。

物質を構成する基本粒子は，強い力がはたらくかどうかで **クォーク**（quark）と **レプトン**（lepton）に分類される。クォークには強い力がはたらき，電荷 $\frac{2e}{3}$ をもつアップ(u)，チャーム(c)，トップ(t)と電荷 $-\frac{e}{3}$ をもつダウン(d)，ストレンジ(s)，ボトム(b)の6種類がある。

一方，強い力がはたらかないレプトンも，電荷 $-e$ をもつ電子(e)，ミュー粒子(μ)，タウ粒子(τ)とそれぞれに対応する電気的に中性な3種のニュートリノ(ν_e，ν_μ，ν_τ)の6種類がある。

強い力のはたらく素粒子（**ハドロン**（hadron））は，原子核を構成する陽子，中性子などの **バリオン**（baryon）とパイ中間子などの **メソン**（meson）に分類される。バリオンは3つのクォークから構成され，メソンはクォークと反クォークからできている（図25）。クォークは，ハドロンの中でのみ存在でき，単独でとり出すことはできない。このため，クォークや反クォークの電荷は分数で表されるが，ハドロンの電荷は必ず電気素量 e の整数倍になる。



クォークは，質量の違いにより3世代に分類されている。また，それぞれのクォークは，3色で表されるカラー電荷とよばれる状態を区別する量をもつ。レプトンもまた，3世代に分類されている。

図24 素粒子標準模型の基本粒子Ⅰ（物質を構成する基本粒子）

陽子は2つのuクォークと1つのdクォークから，中性子は2つのdクォークと1つのuクォークからなる。またπ^+はuクォークとdクォークの反粒子から構成される。

図25 ハドロンの構造

C 力を媒介する基本粒子と素粒子統一理論

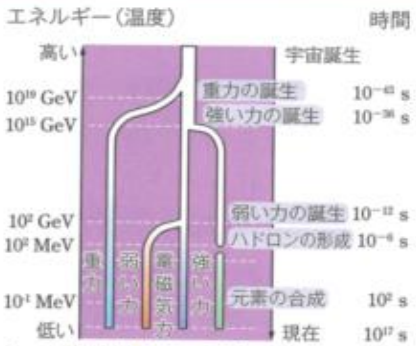
現代科学では，基本的な力は基本粒子が媒介することではたらくと考えられている。この力を媒介する基本粒子は **ゲージ粒子**（gauge boson）とよばれ，クォークやレプトンなどの物質を構成する基本粒子とは別に分類される（図26）。弱い力，電磁気力，強い力の3つの力に重力（万有引力）を加えた4つの基本的な力が自然界には存在するが，重力を媒介する重力子はまだ発見されていない。

電荷をもつ素粒子間にはたらく電磁気力は光子が媒介する。また，ミクロな世界では，β崩壊などで重要となる弱い力やクォーク間にはたらく強い力が存在する。これらの弱い力や強い力では，ウィークボソン（Wボソン，Zボソン）やグルーオンとよばれるゲージ粒子がそれぞれの力を伝える。2012年には，各粒子の質量の起源となるヒッグス粒子が発見され，基本粒子から構成される素粒子標準模型とよばれる素粒子物理学の基礎となる考え方が裏付けられた。

↑図26　素粒子標準模型の基本粒子Ⅱ（力を媒介するゲージ粒子と質量の起源となるヒッグス粒子）

話題　4つの力の統一と宇宙の進化

素粒子標準模型においては，電磁気力と弱い力は一つの力に統一して理解することができ，電弱理論とよばれる。宇宙誕生直後のエネルギー（温度）の高い状態では一つに統一されていた力が，エネルギー（温度）が低くなり，ヒッグス粒子がより安定な状態に落ちつくと，ウィークボソンが質量を得て，電磁気力と弱い力という異なる2つの力にわかれたと考えられている。



4つの基本的な力の分岐

さらに，この素粒子標準模型の考え方を拡張し，強い力を含めたり，重力をも含めたすべての力を統一的に理解しようとする試みが行われている。この考えでは，宇宙の初めには4つの基本的な力が一つに統一されており，宇宙の進化とともに4つの力に分岐してきたことになる。

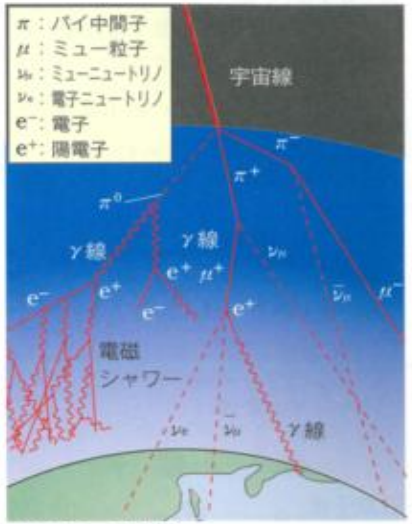
D 宇宙線

私たちは日常，自然放射線を受けている。自然放射線には，地殻中の放射性同位体の崩壊による大地からの放射線のほかに，気球を用いた測定で宇宙から地球に降り注いでいる放射線があることがわかっている。この宇宙からくる放射線を **宇宙線**（cosmic rays）という。宇宙線の正体は高エネルギーの粒子であり，その大部分は陽子であるが，ほかの原子核，電子，光子（γ線），ニュートリノなども含まれる。中には 10^{20} eV にも及ぶ非常に高いエネルギーをもつものや，地球を貫くほどの透過力をもつものもある。▶後見返し4

⇨宇宙線を観察しよう。実験45

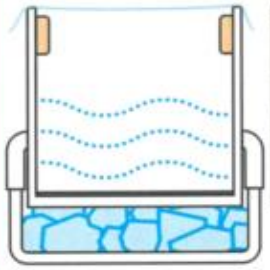
これらの粒子は，大気上層の原子核と衝突し，いろいろな素粒子（二次宇宙線）をつくり出す（図27）。この二次宇宙線の量は，手のひらを1分間におよそ100個通過する程度である。

地上に届く宇宙線の約70％はミュー粒子である。このミュー粒子は，比較的透過性が高いため，レントゲン写真のように火山の内部を写し出す研究などが進められている（図28）。

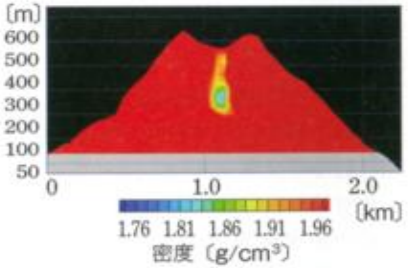


↑図27　宇宙線

実験45　霧箱による宇宙線の観察



実験44で作成した霧箱を用いて，宇宙線を観測してみよう。



↑図28　薩摩硫黄島の透視画像

⑫ 海外の教科書との比較

＊AIPは高校物理のテキスト評価も行っている

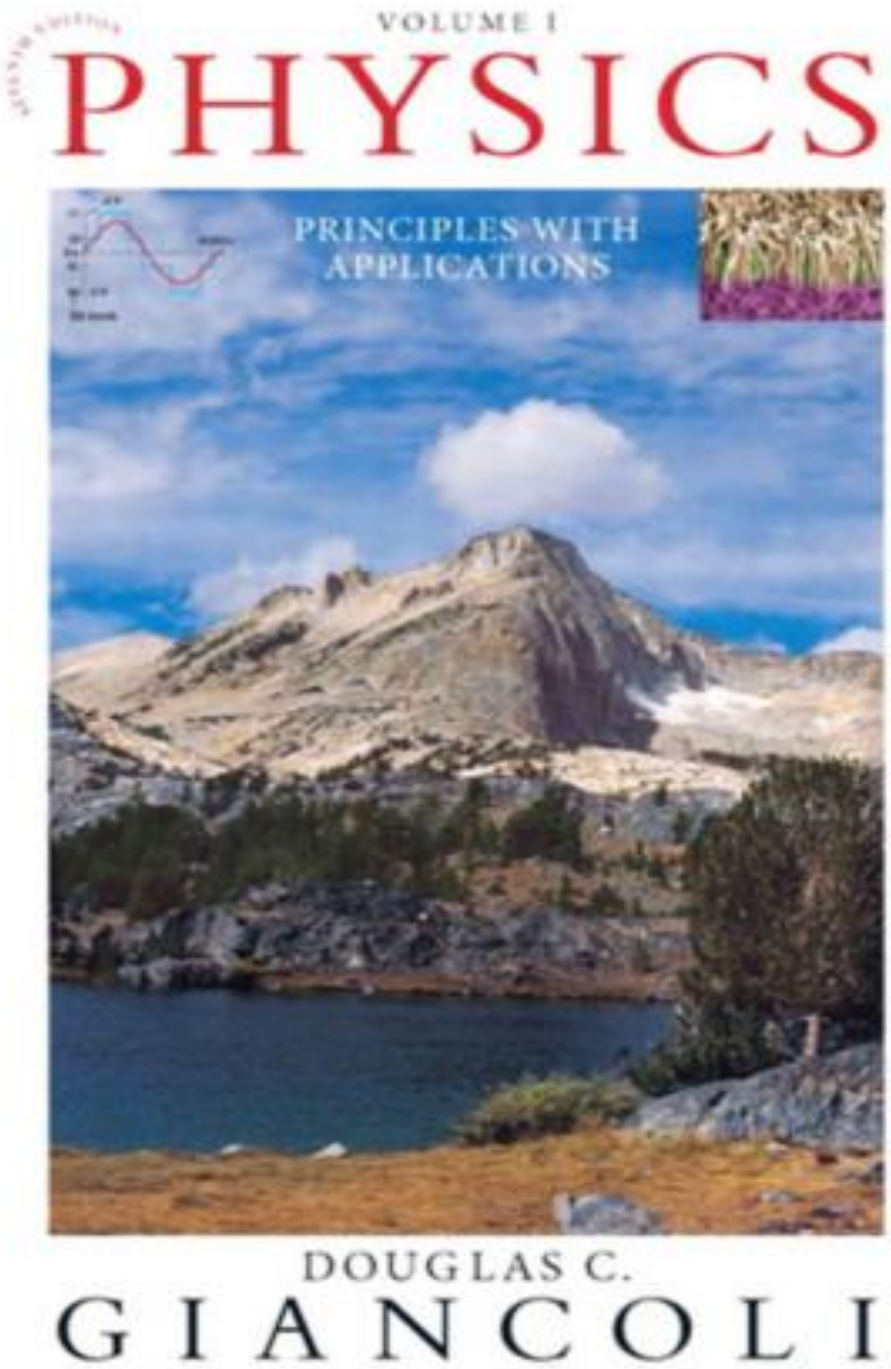
Teachers' Ratings of Textbooks for Regular Physics, U.S. High Schools, 2012–2013.

Course: Regular Physics	How well did this textbook work for this course? Quite well %	Somewhat well %	Not very well or Not well at all %
Conceptual Physics (Hewitt / Addison-Wesley) *(n=326)*	39	44	17
Physics: Principles with Applications (Giancoli / Prentice Hall) *(n=90)*	31	51	18
Holt Physics (Serway, Faughn / Holt McDougal) *(n=71)*	36	45	19
Physics Principles and Problems (Zitzewitz / McGraw Hill) *(n=316)*	29	50	21

Ratings based on a four-point scale: Quite well, Somewhat well, Not very well, Not well at all

Differences are not statistically significant

http://www.aip.org/statistics



https://www.docdroid.net/OFMOth4/giancoli-physics-principles-7th-ed-pdf でダウンロード可能

以下に、ブラッグの式とCTのページを紹介

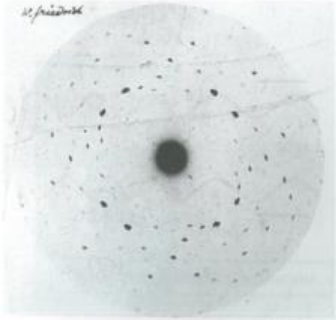


FIGURE 25–37 This X-ray diffraction pattern is one of the first observed by Max von Laue in 1912 when he aimed a beam of X-rays at a zinc sulfide crystal. The diffraction pattern was detected directly on a photographic plate.

Investigations into the nature of X-rays indicated they were not charged particles (such as electrons) since they could not be deflected by electric or magnetic fields. It was suggested that they might be a form of invisible light. However, they showed no diffraction or interference effects using ordinary gratings. Indeed, if their wavelengths were much smaller than the typical grating spacing of 10^{-6} m ($= 10^{3}$ nm), no effects would be expected. Around 1912, Max von Laue (1879–1960) suggested that if the atoms in a crystal were arranged in a regular array (see Fig. 13–2a), such a crystal might serve as a diffraction grating for very short wavelengths on the order of the spacing between atoms, estimated to be about 10^{-10} m ($= 10^{-1}$ nm). Experiments soon showed that X-rays scattered from a crystal did indeed show the peaks and valleys of a diffraction pattern (Fig. 25–37). Thus it was shown, in a single blow, that X-rays have a wave nature and that atoms are arranged in a regular way in crystals. Today, X-rays are recognized as electromagnetic radiation with wavelengths in the range of about 10^{-2} nm to 10 nm, the range readily produced in an X-ray tube.

*X-Ray Diffraction

We saw in Sections 25–7 and 25–8 that light of shorter wavelength provides greater resolution when we are examining an object microscopically. Since X-rays have much shorter wavelengths than visible light, they should in principle offer much greater resolution. However, there seems to be no effective material to use as lenses for the very short wavelengths of X-rays. Instead, the clever but complicated technique of **X-ray diffraction** (or **crystallography**) has proved very effective for examining the microscopic world of atoms and molecules. In a simple crystal such as NaCl, the atoms are arranged in an orderly cubical fashion, Fig. 25–38, with atoms spaced a distance d apart. Suppose that a beam of X-rays is incident on the crystal at an angle ϕ to the surface, and that the two rays shown are reflected from two subsequent planes of atoms as shown. The two rays will constructively interfere if the extra distance ray I travels is a whole number of wavelengths farther than the distance ray II travels. This extra distance is $2d \sin\phi$. Therefore, constructive interference will occur when

$$m\lambda = 2d \sin\phi, \qquad m = 1, 2, 3, \cdots, \tag{25–10}$$

where m can be any integer. (Notice that ϕ is *not* the angle with respect to the normal to the surface.) This is called the **Bragg equation** after W. L. Bragg (1890–1971), who derived it and who, together with his father, W. H. Bragg (1862–1942), developed the theory and technique of X-ray diffraction by crystals in 1912–1913. If the X-ray wavelength is known and the angle ϕ is measured, the distance d between atoms can be obtained. This is the basis for X-ray crystallography.

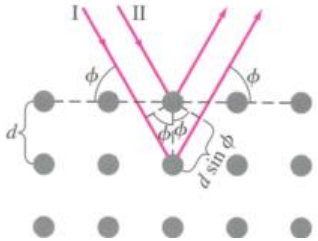


FIGURE 25–38 X-ray diffraction by a crystal.

*25–12 X-Ray Imaging and Computed Tomography (CT Scan)

*Normal X-Ray Image

For a conventional medical or dental X-ray photograph, the X-rays emerging from the tube (Fig. 25–36) pass through the body and are detected on photographic film, a digital sensor, or a fluorescent screen, Fig. 25–41. The rays travel in very nearly straight lines through the body with minimal deviation since at X-ray wavelengths there is little diffraction or refraction. There is absorption (and scattering), however; and the difference in absorption by different structures in the body is what gives rise to the image produced by the transmitted rays. The less the absorption, the greater the transmission and the darker the film. The image is, in a sense, a "shadow" of what the rays have passed through. The X-ray image is *not* produced by focusing rays with lenses as for the instruments discussed earlier in this Chapter.

*Tomography Images (CT)

In conventional X-ray images, a body's thickness is projected onto film or a sensor; structures overlap and in many cases are difficult to distinguish. In the 1970s, a revolutionary X-ray technique was developed called **computed tomography** (CT), which produces an image of a *slice* through the body. (The word **tomography** comes from the Greek: *tomos* = slice, *graph* = picture.) Structures and lesions previously impossible to visualize can now be seen with remarkable clarity. The principle behind CT is shown in Fig. 25–42: a thin collimated (parallel) beam of X-rays passes through the body to a detector that measures the transmitted intensity. Measurements are made at a large number of points as the source and detector are moved past the body together. The apparatus is then rotated slightly about the body axis and again scanned; this is repeated at (perhaps) 1° intervals for 180°. The intensity of the transmitted beam for the many points of each scan, and for each angle, is sent to a computer that reconstructs the image of the slice. Note that the imaged slice is perpendicular to the long axis of the body. For this reason, CT is sometimes called **computerized axial tomography** (CAT), although the abbreviation CAT, as in CAT scan, can also be read as **computer-assisted tomography**.

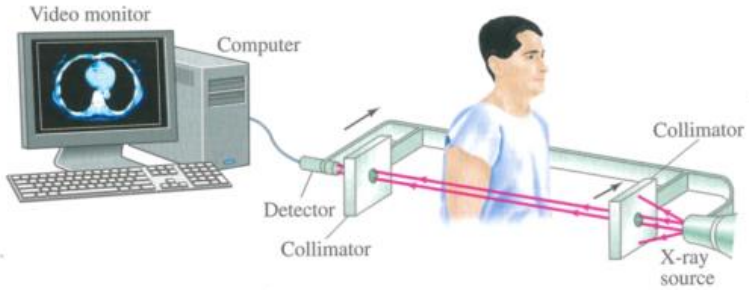


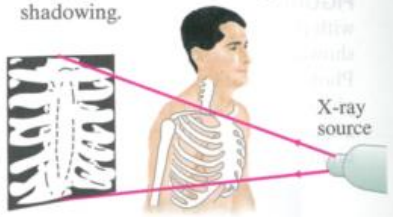
FIGURE 25–42 Tomographic imaging: the X-ray source and detector move together across the body, the transmitted intensity being measured at a large number of points. Then the "source-detector" assembly is rotated slightly (say, 1°) around a vertical axis, and another scan is made. This process is repeated for perhaps 180°. The computer reconstructs the image of the slice and it is presented on a TV or computer monitor.

of DNA molecules taken by Rosalind Franklin in the early 1950s. The cross of spots suggested that DNA is a helix.

PHYSICS APPLIED
Normal X-ray image

CAUTION
Normal X-ray image is a sort of shadow (no lenses are involved)

FIGURE 25–41 Conventional X-ray imaging, which is essentially shadowing.



PHYSICS APPLIED
Computed tomography images (CT or CAT scans)

ブラッグの式を比較すると

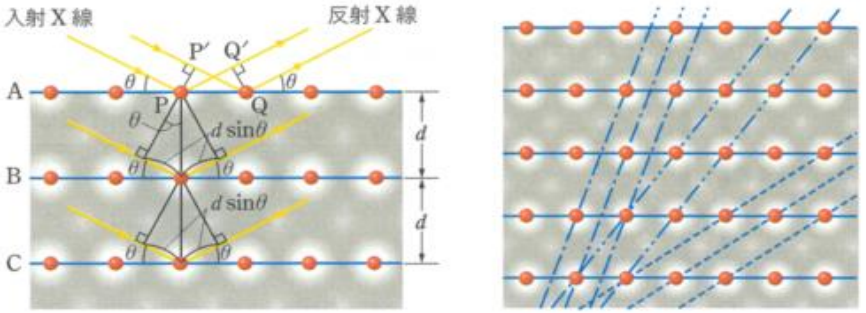
▶**ブラッグの実験**　結晶は，図 14 (a)のように原子配列面(格子面)が等間隔 d で積み重なったものと考えることができる。1 つの格子面(面 A)について入射 X 線と反射 X 線が反射の法則を満たすとき PQ′ = P′Q となり，格子面 A 上のすべての原子からの反射波の位相は等しくなる。入射 X 線は各格子面で反射するが，それぞれの反射 X 線が同位相になったとき，干渉して強め合い，**ブラッグ反射** (Bragg reflection) とよばれる強い反射 X 線が得られる。図 14 (a)で，隣り合う格子面からの行路差は $2d\sin\theta$ であり，これが X 線の波長 λ〔m〕の整数倍になるときに強め合う。

$$2d\sin\theta = n\lambda (n = 1, 2, 3, \cdots) \qquad \langle 16 \rangle$$

式〈16〉は，1912 年にブラッグによってみいだされたため，ブラッグの条件といい，θ を **ブラッグ角** (Bragg angle) という。図 14 (b)に示すように，結晶にはいろいろ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。

▲1890-1971, イギリス

練習 2　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。
〔2.8×10^{-10} m〕



(a) ブラッグ反射　　(b) いろいろな向きの原子の配列面(格子面)

⬆図 14　ブラッグ反射

D　X 線の粒子性

▶**コンプトン効果**　X 線を物質に当てたときに散乱された X 線を調べると，入射した波長よりも長い波長の X 線が含まれる。この現象は X 線を波動と考えただけでは理解できない。

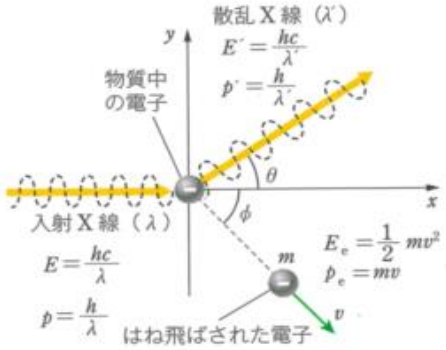
アインシュタインは，振動数 ν〔Hz〕の電磁波は $h\nu$〔J〕のエネルギーをもった光子の流れであるとする光量子仮説を発展させ，光子は次式で表される運動量 p をもつと考えた。

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \qquad \langle 17 \rangle$$

p〔kg·m/s〕：光子の運動量，c〔m/s〕：真空中の光速
h〔J·s〕：プランク定数，λ〔m〕：光子の波長
ν〔Hz〕：光子の振動数

コンプトンは，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伴う散乱を **コンプトン効果** (Compton effect) といい，X 線の粒子性，とくに式〈17〉の関係式の有力な証拠となった。

▲1892-1962, アメリカ



エネルギー保存の法則

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{1}{2}mv^2 \cdots ①$$

運動量保存の法則

$$x\text{方向：}\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'}\cos\theta + mv\cos\phi \cdots ②$$

$$y\text{方向：}0 = \frac{h}{\lambda'}\sin\theta - mv\sin\phi \cdots ③$$

上の式①～③より，λ' と λ の差が非常に小さいとき
$\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$ となる。

⬆図 15　コンプトン効果

半減期

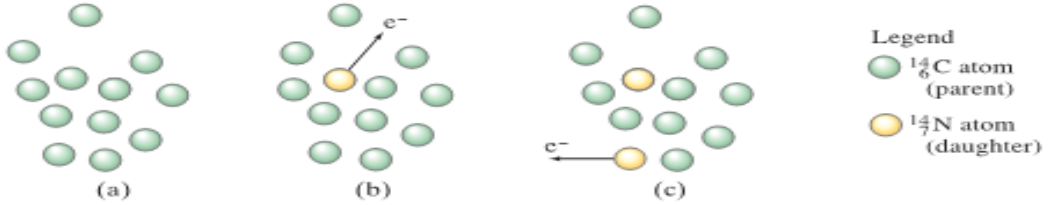


FIGURE 30–9 Radioactive nuclei decay one by one. Hence, the number of parent nuclei in a sample is continually decreasing. When a $^{14}_{6}C$ nucleus emits an electron (b), the nucleus becomes a $^{14}_{7}N$ nucleus. Another decays in (c).

The number of decays that occur in the short time interval Δt is designated ΔN because each decay that occurs corresponds to a decrease by one in the number N of parent nuclei present. That is, radioactive decay is a "one-shot" process, Fig. 30–9. Once a particular parent nucleus decays into its daughter, it cannot do it again.

Exponential Decay

Equation 30–3a or b can be solved for N (using calculus) and the result is

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \qquad \textbf{(30–4)}$$

where N_0 is the number of parent nuclei present at any chosen time $t = 0$, and N is the number remaining after a time t. The symbol e is the natural exponential (encountered earlier in Sections 19–6 and 21–12) whose value is $e = 2.718\cdots$. Thus the number of parent nuclei in a sample decreases exponentially in time. This is shown in Fig. 30–10a for the decay of $^{14}_{6}C$. Equation 30–4 is called the **radioactive decay law**.

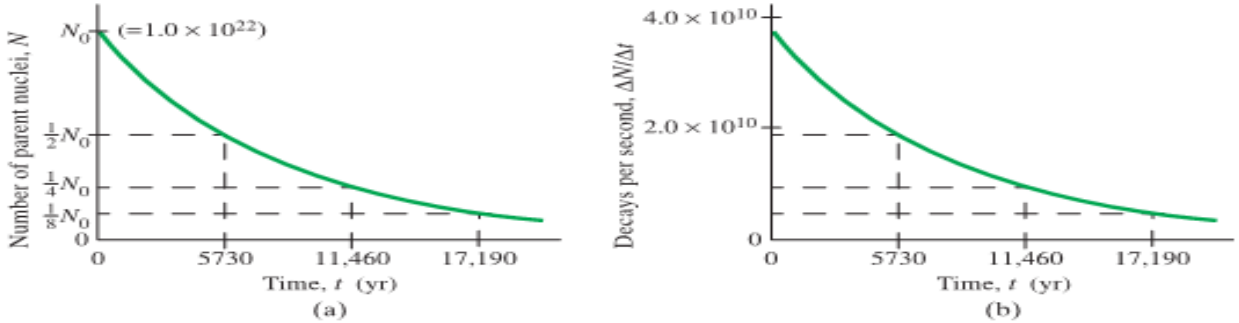


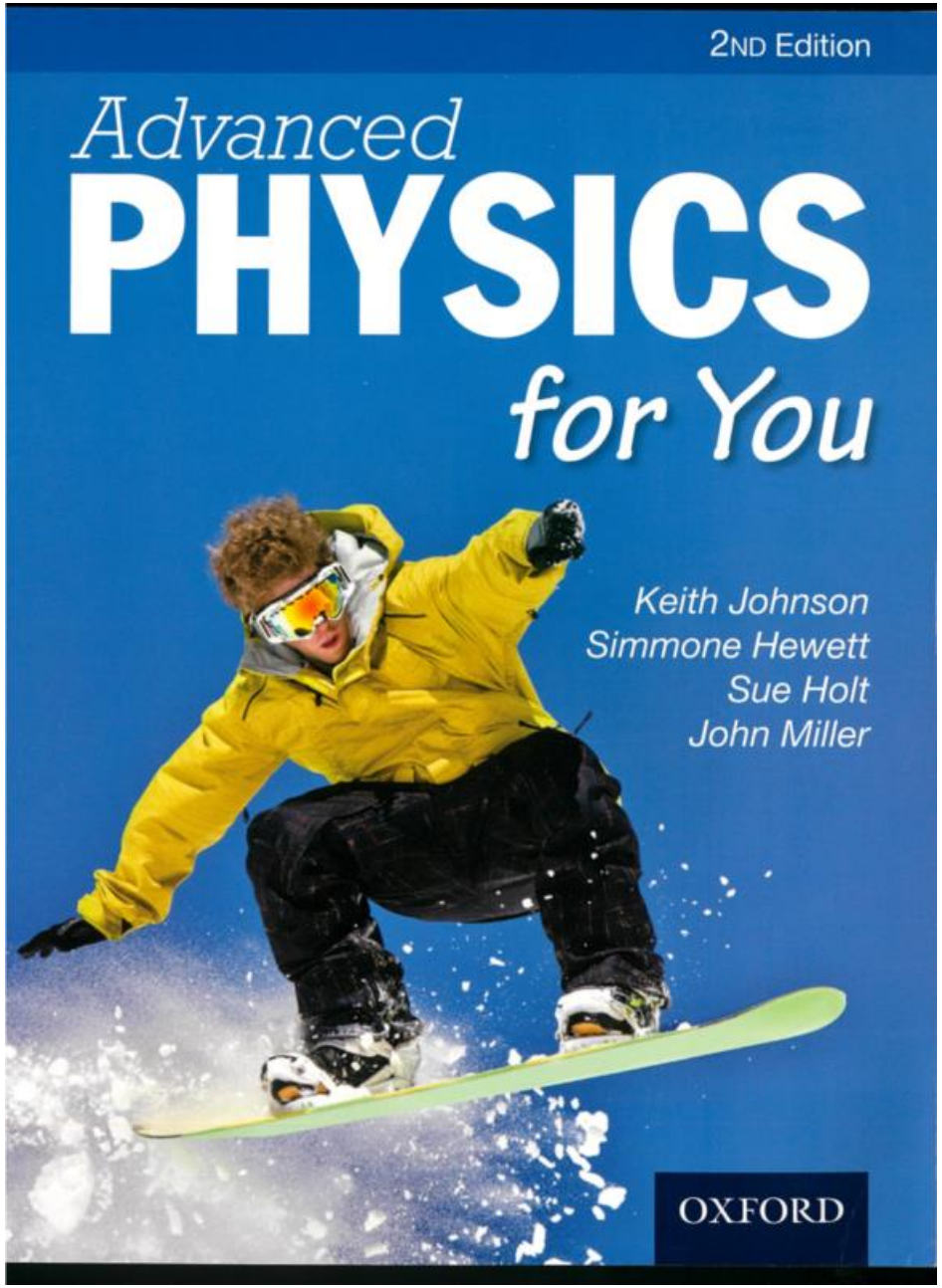
FIGURE 30–10 (a) The number N of parent nuclei in a given sample of $^{14}_{6}C$ decreases exponentially. We assume a sample that has $N_0 = 1.00 \times 10^{22}$ nuclei. (b) The number of decays per second also decreases exponentially. The half-life of $^{14}_{6}C$ is 5730 yr, which means that the number of parent nuclei, N, and the rate of decay, $\Delta N/\Delta t$, decrease by half every 5730 yr.

The number of decays per second, or decay rate R, is the magnitude of $\Delta N/\Delta t$, and is also called the **activity** of the sample. The magnitude (always positive) of a quantity is often indicated using vertical lines. The magnitude of $\Delta N/\Delta t$ is written $|\Delta N/\Delta t|$ and it is proportional to N (see Eq. 30–3b). So it too decreases exponentially in time at the same rate (Fig. 30–10b). The activity of a pure sample at time t is

$$R = \left|\frac{\Delta N}{\Delta t}\right| = R_0 e^{-\lambda t}, \qquad \textbf{(30–5)}$$

where $R_0 = |\Delta N/\Delta t|_0$ is the activity at $t = 0$.

Equation 30–5 is also referred to as the **radioactive decay law** (as is Eq. 30–4).



英国の教科書

Advanced Physics for you

この本は秀逸です

英国はInstitute of Physicsが教科書や教授内容をしっかりサポートしています.
ぜひ、HPを見て下さい

Contents

Mechanics

1. Basic Ideas 6
Units, checking equations
Significant figures
Vectors and scalars
Adding and resolving vectors

2. Looking at Forces 18
Weight and other forces
Friction, drag, viscosity, Stokes' Law
Lift, pressure, upthrust, Archimedes' principle
Free-body force diagrams
Physics at work: Friction and Racing cars

3. Turning Effects of Forces 32
Moments, conditions for equilibrium
Couples, centre of mass

4. Describing Motion 38
Displacement–time graphs
Velocity–time graphs
Equations of motion
Falling under gravity, g, projectiles

5. Newton's Laws and Momentum 52
First law, inertia
Second law, momentum
Third law, pairs of forces
Impulse, conservation of momentum
Physics at work: Car safety

6. Work, Energy and Power 68
Kinetic energy, potential energy
Conservation of energy
Efficiency; kinetic energy and momentum
Elastic and inelastic collisions

7.* Circular Motion 76
Centripetal force, radians
Horizontal and vertical circles
Physics at work: Bobsleighs and Space stations

8.* Gravitational Forces and Fields 86
Gravitational force, inverse-square law
Gravitational field, potential energy
Physics at work: Satellites and Space-probes

9.* Simple Harmonic Motion 100
Oscillations, period, frequency
Simple pendulum, mass on a spring
Damping, resonance
Physics at work: Falling bridges and Cooking

Further Questions on Mechanics 114

Waves

10. Wave Motion 122
Wavelength, period, frequency
Amplitude, energy, phase
Electromagnetic radiation, speed of light
Longitudinal, transverse, polarisation
Physics of hearing, decibels
Physics at work: Earthquakes

11. Reflection and Refraction 138
Particles or waves, Snell's Law, refractive index
Total internal reflection, optical fibres
Lenses and curved mirrors, ray diagrams
Human eye, defects, spectacles
Physics at work: Optical fibres and Telescopes

12. Interference and Diffraction 158
Superposition, phase, path difference
Stationary waves, nodes and anti-nodes
Diffraction, resolution
Physics at work: Radio astronomy
Interference, Young's slits, diffraction grating
Physics at work: Holograms and Soap bubbles

Further Questions on Waves 180

Matter and Molecules

13. Materials 184
Density, crystal structure, size of atoms
Hooke's law, stress and strain
Young modulus, properties of materials
Physics at work: Composite materials

14.* Thermodynamics 198
Internal energy, measuring temperature
Specific heat capacity, specific latent heat
Physics at work: Marathons and Heat pumps

15.* Gases and Kinetic Theory 209
Pressure in gases, Boyle's Law
Absolute zero, Avogadro constant, ideal gases
Physics at work: Scuba diving and Ballooning

Further Questions on Matter & Molecules 222

Chapters marked * are usually not in AS, only in A-level.

For more details of which sections you need to study for your particular examination, see page 506, and download the relevant 'Specification Map' from www.oxfordsecondary.co.uk/advancedforyou

Electricity and Magnetism

16. Current and Charge 226
Conduction of electricity, flow of charge
Energy transfer and p.d.
Resistance and resistivity
Physics at work: Shocks and Electric cars

17 Electric circuits 244
Resistors in series and parallel
Potential divider, potentiometer
E.m.f. and internal resistance
Kirchhoff's Law

18.* Magnetic Fields 256
Magnetic flux density
Coils, solenoids, electromagnets
Magnetic force on a wire; moving charges
Physics at work: Magnetic trains

19.* Electromagnetic Induction 270
Magnetic flux
Faraday's Law, Lenz's Law
A.c. generator
Physics at work: Metal detectors

20.* Alternating Current 280
r.m.s. values, cathode-ray oscilloscope
Transformer, national grid,
Rectification, diodes

21.* Electric Fields 288
Electric charges, charging by friction
Electric fields, electric potential
Physics at work: Crop-spraying, Photocopiers

22.* Capacitors 300
Charge and discharge
Capacitance, time constant
Physics at work: Designing capacitors

Further Questions on Electricity 312

Quantum Physics

23. Electrons and Photons 320
Thermionic emission; Thomson; Millikan
Photo-electric effect, Planck's equation

24.* Spectra and Energy Levels 337
Black-body radiation, Wien's Law, Stefan's Law
Continuous spectrum and line spectra; laser

Further Questions on Quantum Physics 352

Nuclear Physics

25.* Radioactivity 354
Atomic structure, isotopes, detectors
α, β, γ radiation, decay, half-life

26.* Nuclear Energy 374
$E = mc^2$, binding energy, fission, fusion
Physics at work: Nuclear waste

27. Particle Physics 384
Quarks & leptons; Feynman diagrams
Physics at work: Identifying particles

Further Questions on Nuclear Physics 394

Modern Physics

28.* Special Relativity 398
Time dilation, length contraction, relativistic mass

29.* Astrophysics 408
Classifying stars, Doppler, Hubble, the Big Bang

30.* Medical Imaging Techniques 423
X-ray imaging, tracers, ultrasound, MRI scans

Further Questions on Modern Physics 442

Extra Sections

Synoptic (cross-topic) Questions 446
including Practical Questions

Study Skills 456
Making Progress in Physics
Revision Technique, Examination Technique

Doing Your Practical Work 466

Check Your Maths 472
Graphs, equations, exponentials, spreadsheets

Hints and Answers 487

Examination Syllabus Coverage 506

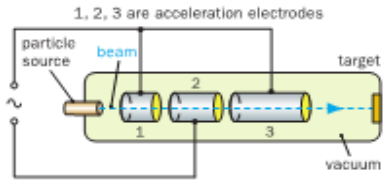
Index 508

Physics at work: Particle accelerators

Particle physicists can create new particles by colliding other particles together. To do this, the colliding particles need to be given large amounts of energy by an **accelerator.** Accelerators use electric fields to accelerate particles such as protons to energies much greater than the 2000 eV of the electron gun on page 321.

Linear accelerator or 'linac'

This accelerates particles in a straight line:
The cylindrical electrodes are connected to an alternating supply so that they are alternately positive and negative. The frequency of the p.d. is set so that as the particles emerge from each electrode they are accelerated across the next gap.
Why do the electrodes get progressively longer? To keep in step with the alternating p.d., the particles must take the same time to travel through each electrode. As the particles get faster the tubes must get longer. The accelerator may be 3 km long!
A linear accelerator can accelerate electrons to about 50 GeV.



A linear accelerator.

Cyclotron

A cyclotron consists of two semicircular metal 'dees' separated by a small gap. When a charged particle enters the cyclotron, a perpendicular magnetic field makes it move along a circular path at a steady speed. Each time the particle reaches the gap between the dees, an alternating p.d. accelerates it across.

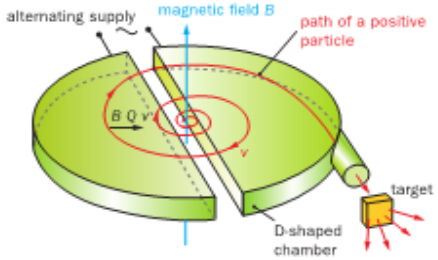
The force on a moving charged particle in a magnetic field is given by $\boldsymbol{F = B\,Q\,v}$ (see page 264). Since this provides the centripetal force ($\boldsymbol{F = m\,v^2/r}$, see page 80), we can write:

$$\frac{m v^{\cancel{2}}}{r} = BQ\cancel{v} \qquad \therefore \quad v = \frac{BQr}{m}$$

This shows that the velocity is proportional to the radius, so as the particles get faster they spiral outwards. The time spent in each dee stays the same (see the coloured box):

So the alternating p.d. must reverse every $\frac{\pi m}{BQ}$ seconds.

Cyclotrons are used to accelerate heavy particles such as protons and α-particles. These can reach energies of about 25 MeV.



How long does a particle take to travel along its semicircular path within each dee?

$$\text{time} = \frac{\text{distance}}{\text{speed}} = \frac{\pi r}{BQr/m} = \frac{\pi m}{BQ}$$

This is independent of the speed and radius. See also page 265.

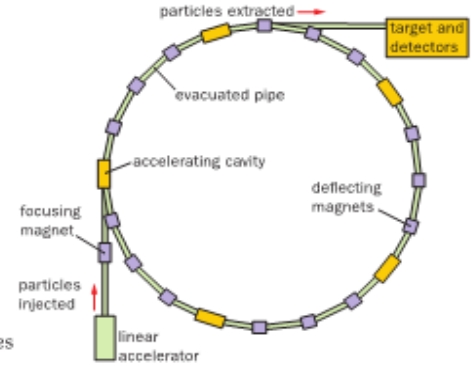
Synchrotron

In modern accelerators, particles travel at speeds close to the speed of light. At these very high speeds, Einstein's theory of **special relativity** (see Chapter 28) is needed to explain the way in which particles move. As particles approach the speed of light, a constant force does not produce a constant acceleration – you cannot use $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ in special relativity!

Synchrotrons contain electromagnets which keep the particles moving in a circle. Regions of electric field at various points around the loop give the particles extra energy, in 'pushes' synchronised with the arrival of pulses of particles.

As the particles gain energy, the magnetic field is increased to keep them moving in a circle of constant radius.

Synchrotrons can accelerate particles such as protons to energies of more than 1000 GeV.



A synchrotron.

Annihilation

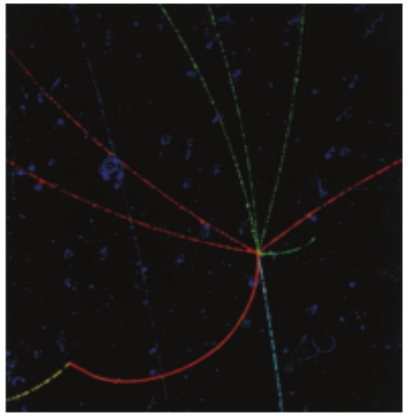
Why does antimatter not last long? As soon as an antiparticle meets its particle, the two destroy each other. Their mass is converted to energy. This is called **annihilation**.

For example, when an electron and a positron collide, they annihilate, producing two γ-ray photons of energy:

$$^{0}_{-1}e^- + {}^{0}_{+1}e^+ \rightarrow 2\,{}^{0}_{0}\gamma$$

Why are two photons produced? One photon could conserve charge and mass/energy. But ***momentum*** must also be conserved, and for that to happen, two photons are needed.
If an electron and positron with the same speed collide head-on, the total momentum before the collision is zero.
For zero momentum after the collision, we must have two identical photons moving in opposite directions.

When sufficient energy is available, annihilation can produce short-lived particles. The energy is converted back into ***matter***. This is how new particles are created in accelerator experiments.


An antiproton (blue) collides with a proton in the bubble chamber liquid. The annihilation creates 4 positive (red) and 4 negative (green) particles.

Example 1
An electron and positron with negligible kinetic energy annihilate and produce two identical γ-ray photons. Calculate a) the energy released and b) the frequency of the γ-photons.
Rest mass of an electron = 9.11×10^{-31} kg $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J s $c = 3.00 \times 10^{8}$ m s^{-1}

(a) Using Einstein's equation (see page 375),
$\boldsymbol{E = mc^2} = (2 \times 9.11 \times 10^{-31}\text{ kg}) \times (3.00 \times 10^{8}\text{ m s}^{-1})^2 = \underline{1.64 \times 10^{-13}\text{ J}}$

(b) Using Planck's equation $\boldsymbol{E = hf}$ (see page 328),
Energy of each photon $= \frac{1}{2} \times 1.64 \times 10^{-13}$ J $\therefore\ f = \frac{E}{h} = \frac{\frac{1}{2} \times 1.64 \times 10^{-13}\text{ J}}{6.63 \times 10^{-34}\text{ J s}} = \underline{1.24 \times 10^{20}\text{ Hz}}$

Pair production

Pair production is the opposite of annihilation. High-energy photons can vanish, creating particle–antiparticle pairs in their place.
For example, a γ-ray can produce an electron–positron pair:

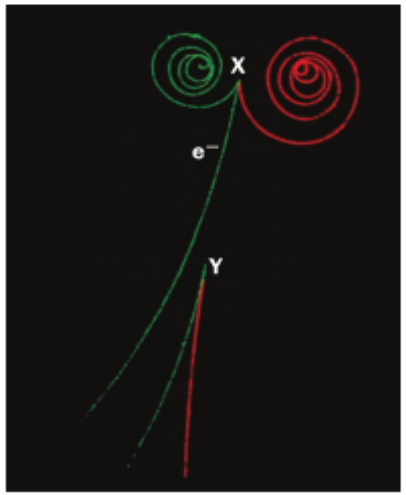
$$^{0}_{0}\gamma \rightarrow {}^{0}_{-1}e^- + {}^{0}_{+1}e^+$$

A third particle such as an atomic nucleus or electron is often involved indirectly. This recoils, carrying away some of the photon energy.

The photograph shows the creation of electron–positron pairs at X and Y in a bubble chamber (see page 359). The tracks are curved due to a magnetic field. They are shown in green (electrons) and red (positrons). Notice that the γ-ray photons leave no tracks as they are uncharged.

In event X, a third particle is involved. (This is an electron ejected from the bubble chamber liquid during the interaction.)

Why are the tracks at X more curved than at Y?
In event X the ejected electron carries off some of the energy.
This leaves less energy for the electron–positron pair.
The lower the energy (and speed) of the particles produced, the more they are deflected in the magnetic field. This is why their paths curve more.



B 磁場中の荷電粒子の運動

図16のように，一様な磁場中で，磁場に垂直に運動する電子は円運動をする。

質量 m〔kg〕，電気量 q〔C〕の荷電粒子が，磁束密度の大きさが B〔T〕の一様な磁場中で，磁場と垂直に速さ v〔m/s〕で運動を始めたとする。粒子が受けるローレンツ力の大きさ $f = qvB$ はつねに粒子の運動方向に垂直なので，粒子の速さは一定で向きだけが変わる。この力が向心力になって，粒子は等速円運動を行う。p.64 式〈9〉から，円の半径を R〔m〕とすれば，円運動の運動方程式は次式で表される。

$$m\frac{v^2}{R} = qvB \qquad \langle 16 \rangle$$

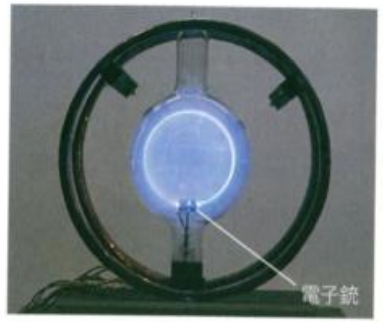
ゆえに，円の半径 R は

$$R = \frac{mv}{qB} \qquad \langle 17 \rangle$$

となる。また，円運動の周期 T〔s〕は，

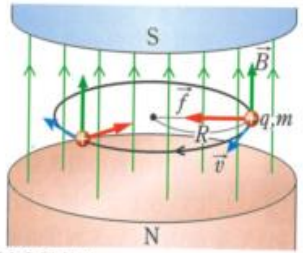
$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \qquad \langle 18 \rangle$$

となり，粒子の速さ v と円の半径 R に無関係な定まった値になる。

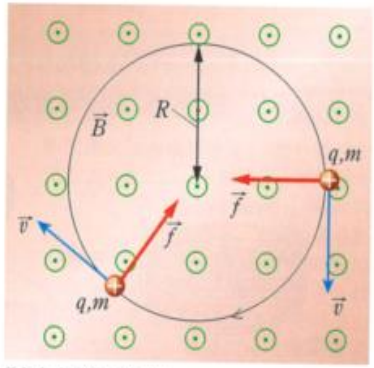


2つの円形コイルの中心付近の磁場は，紙面に垂直で一様である。

⬆図16　磁場中の電子の運動



(a) 横から見た図



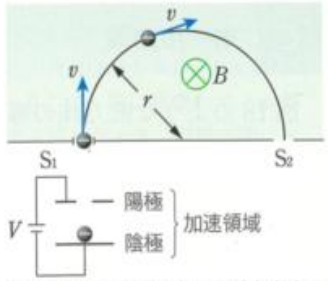
(b) 真上から見た図

⬆図17　磁場中の荷電粒子の運動

問4　一様な磁場で斜めに運動を始めた電子はどのような運動をするか。

例題4　電子の比電荷

図のような真空容器内の装置で，電子を電圧 V で加速し，スリット S_1 から，磁束密度の大きさが B の一様な磁場の中に，垂直に入射させた。電子は，磁場中で半径 r の半円を描き，スリット S_2 から出てくることが検出された。電子の質量を m，電気量の大きさを e としたとき，比電荷 $\frac{e}{m}$ を求めよ。



電子を電圧 V で加速して磁束密度の大きさが B の磁場に入射する。

解　電子の速さを v とすると，電場のする仕事 eV が電子の運動エネルギーになるので，$eV = \frac{1}{2}mv^2$。また，ローレンツ力 evB が向心力となって等速円運動をするから，$m\frac{v^2}{r} = evB$

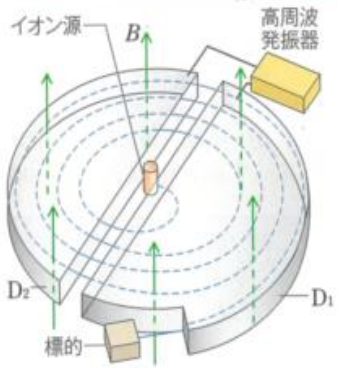
この2つの式より，v を消去すると，$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2r^2}$ 答

電子の電気量の大きさと質量の比 $\frac{e}{m}$ を電子の比電荷という。

類題4　磁束密度の向きを例題4と逆向きにして，質量 M，電気量の大きさが e の陽イオンを電圧 V で加速し，S_1 から入射させ S_2 から出てくるようにしたい。磁束密度を例題4の何倍にすればよいか。　$\left[\sqrt{\frac{M}{m}}\text{倍}\right]$

参考　サイクロトロン

図のように，真空中でDの形をした金属製の箱 D_1，D_2 を，それに垂直な磁場の中に置き，両者に高周波電圧を加える。D_1 と D_2 の隙間に正イオンがあるとき，D_1 の電圧が負であれば，イオンは静電気力で引かれ D_1 に入射する。D_1 の内部の電場は0のため，イオンは，磁束密度 B を受けて円運動をする。D_1 内を運動する間に，D_1，D_2 に加えられていた電圧が反対になれば，イオンは D_2 へ入る際に新たな加速を受け，より大きな速度で，より大きな半径の半円を描く。式〈18〉より，円運動の周期は半径や速さに関係ないので，円運動の周期と高周波発振器の周期が等しければ，この装置は加速器としてはたらく。これがサイクロトロンである。



サイクロトロンの紹介を比較してください.

その後は崩壊と半減期をご覧下さい.

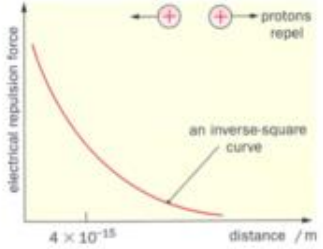
Radioactive decay

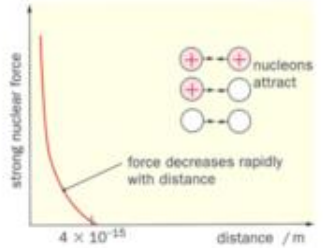
Most of the atoms that we find in our world have stable nuclei. Yet all nuclei (except hydrogen) contain at least two protons, and the positively charged protons ***repel*** each other.
In fact, using Coulomb's law (page 290) you can show that the force between two protons 2×10^{-15} m apart is about 50 N!
So why doesn't the nucleus blow apart?

The answer is that there is another force between nucleons.
This is the **strong nuclear force**.
It is about 100 times as strong as the electric repulsive force, but acts only over very short distances, as shown on the graph:
The strong nuclear force is ***attractive*** (at distances greater than about 0.5×10^{-15} m) and so it holds the nucleons together.

In stable nuclei the effects of these forces are balanced, but an imbalance makes the nucleus unstable.

The atoms of radioactive materials have ***un***stable nuclei.
In radioactive decay an unstable nucleus attempts to become more stable by emitting α, β or γ radiation.
When an unstable **parent nucleus** emits an α or β-particle, it is left with a ***different*** number of protons and neutrons.
This new nucleus is called the **daughter nucleus**.





Alpha-decay

An α-particle is a helium nucleus and is written $^{4}_{2}\mathbf{He}$ or $^{4}_{2}\alpha$.
It consists of 2 protons and 2 neutrons.

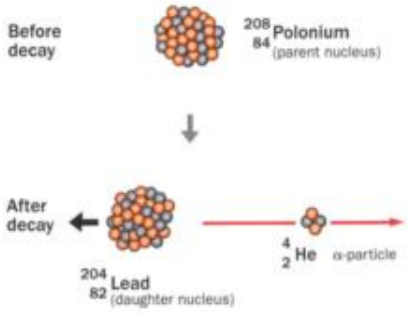
When an unstable nucleus decays by emitting an α-particle, it loses 4 nucleons and so ***its nucleon number decreases by 4***.
Also, since it loses 2 protons, ***its proton number decreases by 2***.

The nuclear equation is: $^{A}_{Z}\mathbf{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathbf{Y} + {}^{4}_{2}\mathbf{He}$

Note that the top numbers balance on each side of the equation. So do the bottom numbers.

For example, polonium-208 emits an α-particle and becomes an isotope of lead (Pb): $^{208}_{84}\mathbf{Po} \rightarrow {}^{204}_{82}\mathbf{Pb} + {}^{4}_{2}\mathbf{He}$

This decay is shown in the diagram:

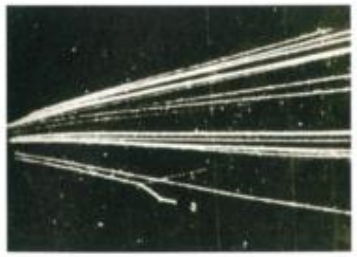


Every decay of a Po-208 nucleus releases 5.1 MeV of energy. This energy appears as kinetic energy of the ejected α-particle and of the daughter nucleus, which recoils.

The α-particle has most of the energy. Can you explain why? Think about a massive cannon firing a very small shell. The tiny shell has a much higher velocity than the recoiling cannon and it carries away most of the kinetic energy.

Each α-particle from Po-208 has about the ***same*** kinetic energy – almost 5.1 MeV. In fact, nearly all α-emitting nuclides eject most of their α-particles with a single energy value, and this energy value is characteristic of the nuclide.

The photo shows some α-particle tracks in a cloud chamber:



α-particle tracks

Beta-decay

Many radioactive nuclides (radionuclides) decay by β-emission.
This is the emission of an electron ***from the nucleus.***
But there are no electrons in the nucleus!
What happens is this: one of the neutrons changes into a proton (which stays in the nucleus) ***and*** an electron (which is emitted as a β-particle).
This means that ***the proton number increases by 1***, while the total nucleon number remains the ***same***.

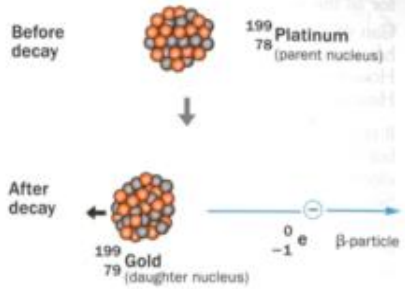
The nuclear equation is: $^{A}_{Z}\mathbf{X} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathbf{Y} + {}^{0}_{-1}\mathbf{e}$

Notice again, the top numbers balance, as do the bottom ones.

For example, platinum-199 changes to gold-199 by β-decay, like this:

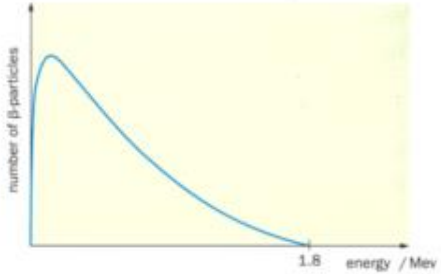
$$^{199}_{78}\mathbf{Pt} \rightarrow {}^{199}_{79}\mathbf{Au} + {}^{0}_{-1}\mathbf{e}$$

This decay is shown in the diagram.



Every decay of a Pt-199 nucleus releases 1.8 MeV of energy.
As with α-decay, this energy appears as kinetic energy.
You might expect all the β-particles from the decay of Pt-199 to be emitted with almost 1.8 MeV of kinetic energy.
In fact this does not happen!
The graph shows that the β-particles from Pt-199 are emitted with a ***range*** of kinetic energies up to a maximum of 1.8 MeV.

How can we explain this spread of energies?
In 1930, Wolfgang Pauli suggested that as the nucleus decays ***another*** particle is emitted in addition to the electron.
The energy released in the nuclear decay is then shared randomly between the electron and the second particle.
This second particle must have no charge and almost no mass.
It is called an **antineutrino** and given the symbol $\bar{\nu}$ ('nu-bar').

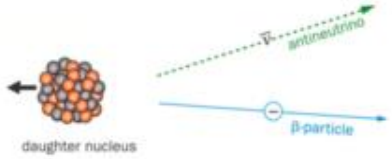


If we include the antineutrino in the equation for β-decay, we get:

$$^{199}_{78}\mathbf{Pt} \rightarrow {}^{199}_{79}\mathbf{Au} + {}^{0}_{-1}\mathbf{e} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$$

Notice that the numbers on the top, and the bottom, still balance.

All β-emitters produce β-particles with a range of energies up to a maximum value. This value is characteristic of the nuclide.



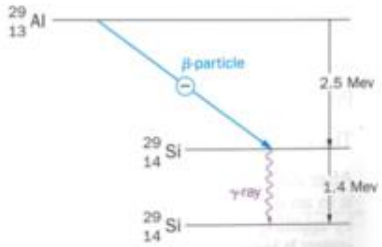
Gamma emission

Gamma emission does not change the structure of the nucleus, but it does make the nucleus more stable, because it reduces the energy of the nucleus.

This is what happens:
A nucleus that has emitted an α or β-particle is often left in an **excited state**. It loses its surplus energy by emitting a γ-ray.

In the example, aluminium-29 changes to silicon-29 by first emitting a β-particle and then a γ-photon of energy 1.4 MeV:

The energy, and therefore the wavelength, of the γ-rays emitted by a radionuclide are characteristic of that nuclide (see page 344).



The decay constant, λ

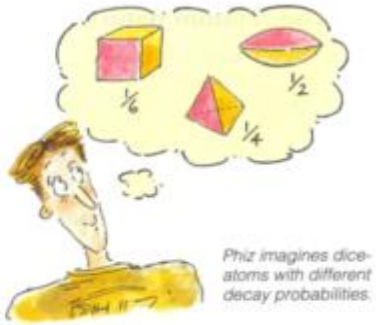
A dice-atom has a $\frac{1}{6}$ chance of decay per throw. Similarly:

The decay constant λ of a radionuclide is the probability that an individual nucleus will decay within a unit of time.

Since λ is the chance per unit time, its unit is s^{-1}, h^{-1}, day^{-1}, etc.

If the value of λ for a particular nuclide is $0.2\ s^{-1}$, then in one second each nucleus has a 0.2 or $\frac{1}{5}$ chance of decay. In a sample of 1000 nuclei, 200 will have decayed after 1 second.

The value of λ is a constant for any particular nuclide. Can you see that the value of λ is zero for a stable nuclide?



Phiz imagines dice-atoms with different decay probabilities.

Activity, A

The activity A of a source is the number of its nuclei that decay in unit time.

Since each decay produces ionising radiation, the activity of a source also tells you the number of ionising particles that it emits in unit time.

Activity can be measured in decays per hour, per day etc., but the SI unit of activity is the **becquerel (Bq)**.
1 Bq is an activity of 1 decay per second: $1\ Bq = 1\ s^{-1}$.

The activity of a sample must depend on the decay constant λ of the nuclide. The greater the probability of decay, the more nuclei that decay in unit time. Also, the activity will increase if there are more undecayed nuclei in the sample. In fact:

$$\underset{(s^{-1})}{\text{Activity, } A} = \underset{(s^{-1})}{\text{decay constant, } \lambda} \times \text{number of undecayed nuclei, } N \quad \text{or} \quad \boxed{A = \lambda N}$$

You will see this equation written like this: $\boxed{\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N}$

ΔN is the number of nuclei that decay in time Δt,

and so $\frac{\Delta N}{\Delta t}$ is the activity A.

The − sign tells us that N decreases as time passes.

Example 3
A sample of a radionuclide initially contains 200 000 nuclei. Its decay constant is $0.30\ s^{-1}$. What is the initial activity?

$A = \lambda N$

$A = 0.30\ s^{-1} \times 200\,000 = \underline{60\,000\ s^{-1}}$

Measuring the decay of protactinium-234

The protactinium emits β-particles which pass through the walls of the plastic bottle. They are then detected by the G–M tube. You should record the count rate every 10 s for several minutes. (Remember to deduct the background count from each result.)

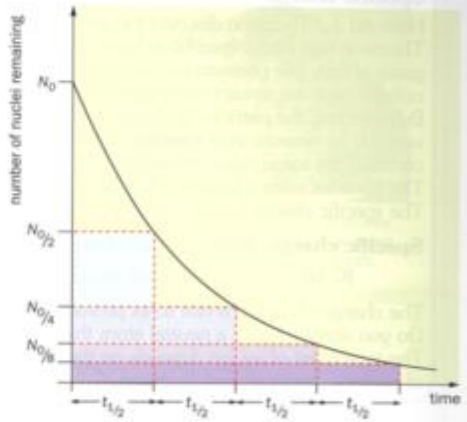
Does this method record the activity of the protactinium? No, not all the β-particles emitted by the protactinium are detected and so the count rate is lower than the activity of the source. If we assume that we always detect the same percentage of the emitted radiation, the count rate is proportional to the activity.

You will find that the count rate falls, because as time goes by there are fewer and fewer protactinium nuclei left to decay.

It takes 72 s for the activity to fall to half. After another 72 s it has halved again. And after another 72 s it halves yet again.

Exponential decay

Experiments like that on the facing page show that the number of nuclei in a sample always decreases in the same way. The graph shows this decrease:
Do you recognise the shape of the graph?
It has the same form as the one from the dice-atom experiment.
It takes a time $t_{\frac{1}{2}}$ for the number of nuclei to fall from N_0 to $N_0/2$.
Can you see it takes the same time for the number of undecayed nuclei to fall from $N_0/2$ to $N_0/4$, and from $N_0/4$ to $N_0/8$?



The time $t_{\frac{1}{2}}$ is called the **half-life** of the radioactive nuclide.
It is the time taken for half the radioactive nuclei to decay.
The half-lives of different radionuclides vary widely, from fractions of a second up to millions of years.

This graph is an **exponential decay curve** because the number of nuclei always falls by the same fraction in the same time.
The equation for this curve is:

$$\boxed{N = N_0\, e^{-\lambda t}}$$

where: N = the number of nuclei at time t
N_0 = the original number of nuclei
λ = the decay constant
See also page 484.

We can also write: $\boxed{A = A_0\, e^{-\lambda t}}$ and $\boxed{C = C_0\, e^{-\lambda t}}$

since the activity A is proportional to the number of nuclei present ($A = \lambda N$) and the recorded count rate C is proportional to the activity (see facing page).

For spreadsheet modelling of this, see pages 482 and 486.

The decay constant and the half life

How does the decay constant of a nuclide affect its half-life? The higher the probability of decay λ, the more rapidly the nuclide decays, and so the shorter its half-life. In fact:

$$\boxed{t_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda}}$$

More details are given in the box:

- Take care with the units. If λ is in s^{-1}, t and $t_{\frac{1}{2}}$ must be in s.
- The exponential equation no longer applies when only a few nuclei remain, because of the random nature of the decay.

Deriving the link between λ and $t_{\frac{1}{2}}$:

Rearranging $N = N_0\, e^{-\lambda t}$ gives: $\frac{N_0}{N} = e^{\lambda t}$

When $t = t_{\frac{1}{2}}$, $N = N_0/2$ so: $\frac{N_0}{N_0/2} = e^{\lambda t_{\frac{1}{2}}}$

Therefore: $2 = e^{\lambda t_{\frac{1}{2}}}$

taking logs to base e: $\ln 2 = \lambda t_{\frac{1}{2}}$

So: $t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$

Example 4
A radionuclide has a half-life of 55.0 s.
Initially a sample of the nuclide contains 5000 nuclei.
a) What is the decay constant for this nuclide?
b) How many nuclei remain undecayed after 200 s?

a) $t_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda}$ so: $55.0 = \frac{0.693}{\lambda}$

$\therefore\ \lambda = \frac{0.693}{55.0\ s} = \underline{1.26 \times 10^{-2}\ s^{-1}}$

b) $N = N_0\, e^{-\lambda t}$

$N = 5000 \times e^{-1.26 \times 10^{-2} \times 200}$

$N = 5000 \times e^{-2.52}$

$N = \underline{400 \text{ nuclei}}$

calculator hint: you want the value of e^x when $x = -2.52$

日本の中学校教科書の実例

出版社はすべて啓林館

意欲的な記述も見られるが、高校理科教育への接続は他人任せ.

高校物理（4単位理系向け）の選択者は約20%

中学3年生 「エネルギー資源とその利用」からは、科学の記述と技術の記述が境界なく一体化している.

（日本の「理科」が諸外国の「科学」とは異なる実例. 海外の教科書では技術的な事項や関連事項は欄外に集中して記述することが多い）

中学1年理科　太陽光については中学1年の「光による現象」の最後に発展で登場、「高校物理へ」と記述されているが・・・　高校物理の履修率は？？？

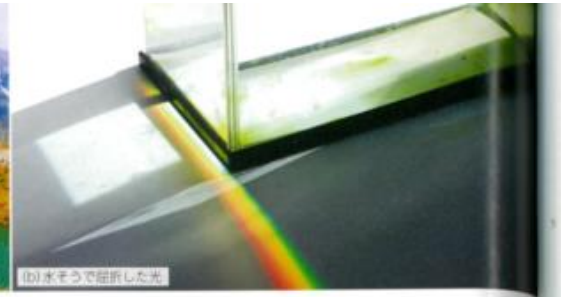
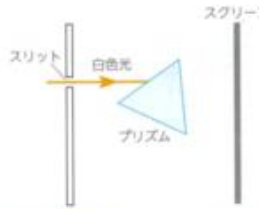


図24 太陽の光がいろいろな色の光に分かれる現象

ためしてみよう

プリズムに光を当てる実験（強い光注意）

1. 光源装置から出た光を，いろいろな角度からプリズムに当てる。
2. 屈折した光をスクリーンに当て，スクリーンに映った光のようすを調べる。



別の方法にトライ

プリズムではなく，台形ガラスを用いてもよい。

❶ プリズム
ガラスなどの透明な物質でできた，三角柱などの多面体。

図26 色の見え方
かさの表面からの青色の光が目に届くと，青色だと感じる。

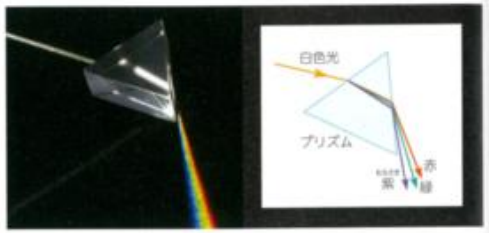


図25 プリズムで屈折した光

光の色

太陽や白熱電灯から出た光は白色光とよばれ，いろいろな色の光が混ざっている。

太陽の光からできる虹には，いろいろな色の光が見える（図24 (a)）。また，水の入った水そうに太陽の光が当たると，ガラスや付近の壁に虹のような複数の色の光の帯が見えることがある（図24 (b)）。これは，白色光が空気と水などの境界を進むとき，混ざっていたそれぞれの色の光が，異なる角度で屈折するからである。プリズム❶を使うと，白色光が色ごとに分かれるようすが見られる（図25）。

また，図26のかさが青色に見えるのは，白色光に混ざっている青色の光が，物体の表面で強く反射され，それ以外の色の光の多くは物体の表面で吸収されるからである。

お仕事ラボ

水泳競技を撮影するには

アーティスティックスイミングなどの放送では，以前は水中と空気中の動きを同時に撮影した映像は見られませんでした。その理由は，光の屈折です。通常，水中と空気中を１つのカメラで撮影すると，光の屈折によって，物体の水中にある部分が拡大されて見え，違和感のある映像になってしまいます。この問題を解決するために，日本の放送局（NHK）で２台のカメラを組み合わせた「ツインズカム」というシステムが開発されました。これにより，水中と空気中を別々のカメラで撮影した映像を組み合わせることで，違和感のない映像にすることができるようになりました。

ツインズカム

アーティスティックスイミング

１つのカメラによる映像

ツインズカムによる映像

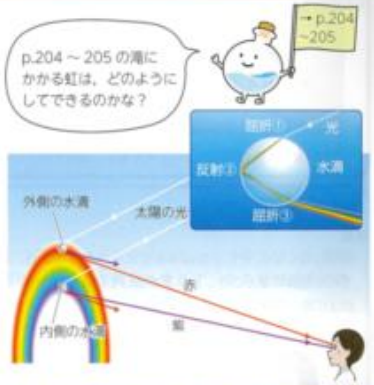
深めるラボ（発展）

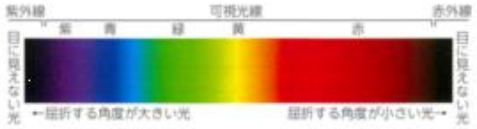
虹と太陽の光 [高校物理へ]

雨が降った後の空などに見られる虹は，どのようにしてできるのでしょうか。

雨が上がって日がさしても，遠方ではまだ雨が降っている場合，空気中にはたくさんの水滴が存在します。太陽の光が水滴に入ると，右図のように，水滴で①屈折→②反射→③屈折をして進みます。光は色によって屈折する角度が異なるため，いろいろな色の光に分かれて空気中に出ていきます。虹は，このようにしてたくさんの水滴からいろいろな色の光が分かれて出るときに見えます。晴れた日に太陽を背にして，ホースで霧状の水をまいたときや，水しぶきのあがる滝でも，同じしくみで虹ができます。

太陽の光はプリズムで色の帯に分かれます。この目に見える光（可視光線）の色の帯の，赤色の外側には赤外線，紫色の外側には紫外線という，目に見えない光もふくまれています。





ここからX線が始まる　中学2年

図31 雷（東京都文京区）
上空で氷の結晶がぶつかり合い，雲の上層に＋の電気，下層に－の電気がたまる。

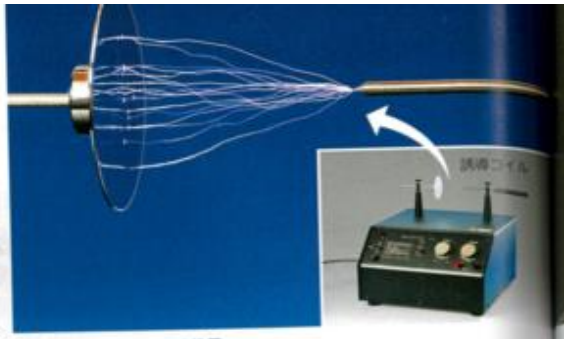


図32 誘導コイルによる放電
誘導コイルは数万Vの電圧を発生させることができる。非常に大きな電圧なので，感電しないように注意する。

図33 クロス真空計での放電のようす
放電管の中は気体の圧力❷が小さく保たれていて，放電管に誘導コイルで電圧を加えると，圧力のちがいにより異なる放電のようすが観察できる。

❶ 放電管
放電管とは，ガラスなどの容器内の気体の圧力を小さくし，2つ以上の金属の電極を入れたもののことで，いろいろな形がある。ネオン管も放電管の一種である。
❷ 圧力とその単位については p.74～75 を参照。

3. 電流の正体

雷は，雲にたまった静電気が，ふつうは電気が流れない空気中を一気に流れる自然現象である。また，図32のように，誘導コイルを用いて非常に大きな電圧を発生させると，小さな雷のような現象を見ることができる。このように，電気が空間を移動したり，たまっていた電気が流れ出したりする現象を**放電**という。前ページの実験で，ネオン管や蛍光灯が点灯したのは，下じきやポリ塩化ビニルパイプにたまった静電気が放電したためである。

? 放電中にはどのようなことが起きているのだろうか。

図33のクロス真空計の放電管❶に，誘導コイルで非常に大きな電圧を加えると，圧力❷の小さい気体の中を電流が流れる。このような現象を**真空放電**という。放電管内の気体の圧力によって，放電のようすが変化する。

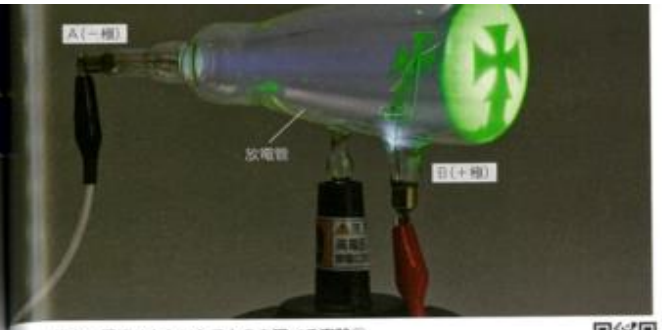


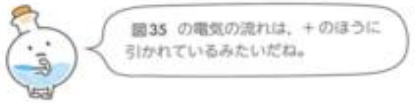
図34 電流のもとになるものを調べる実験①
AB間に高い電圧を加える。なお，放電管内の気体の圧力は，図33の放電管fと同じぐらいである。

図36のように真空ポンプを使うと，放電管内の気体の圧力の変化に応じて放電のようすが変わるのを観察することができる。放電管内の気体の圧力が非常に小さくなると，図33の放電管fのように＋極側のガラス壁が黄緑色に光るようになる。

図34の放電管で，AB間に高い電圧を加えると，十字板の影ができる。また，図35の放電管の電極X，Yに電圧を加えると，明るいすじが曲がる。図34や図35から，電流のもとになるものについて，どのようなことがわかるだろうか。

考えてみよう

❶ 図34の十字板の影のでき方から，電流のもとになるものはA(－極)とB(＋極)のどちらから出ていると考えられるか。
❷ 図34や図35から，電流のもとになるものはどのような種類の電気をもっていると考えられるか。



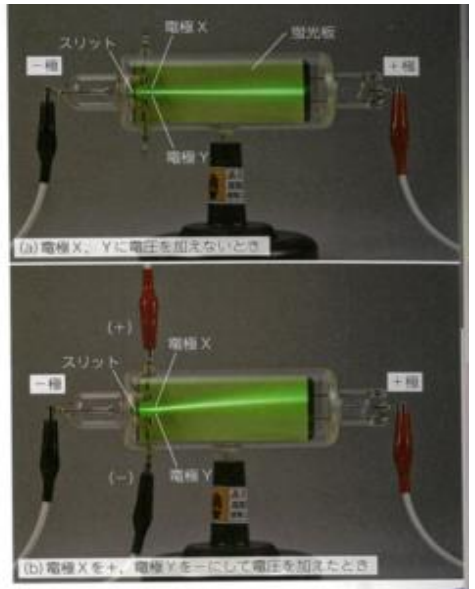


図35 電流のもとになるものを調べる実験②
スリットを通りぬけた電流のもとになるものが蛍光板に当たると，まわりよりも明るいすじが蛍光板上に現れる。

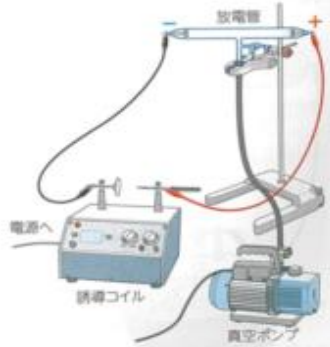


図36 放電管と真空ポンプを使って放電のようすを調べる装置

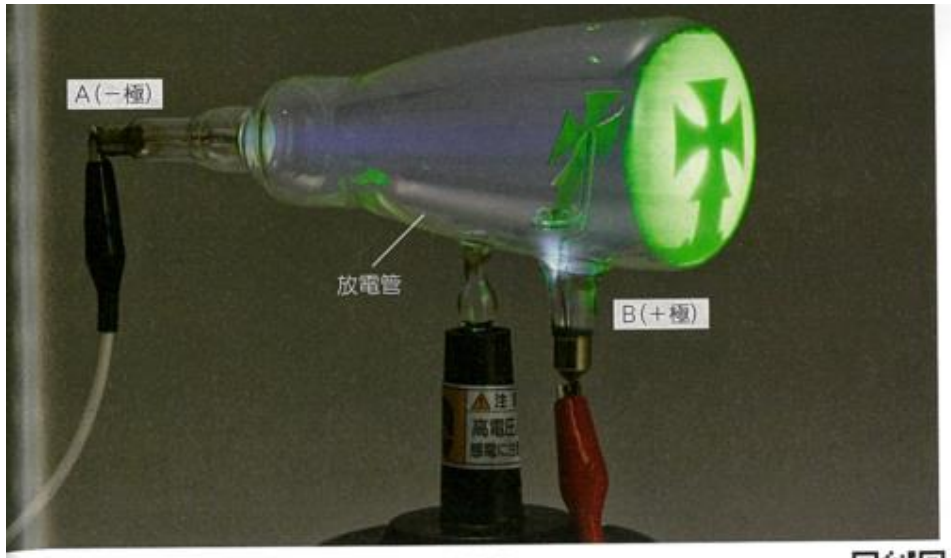


図34　電流のもとになるものを調べる実験①
AB間に高い電圧を加える。なお，放電管内の気体の圧力は，**図33** の放電管fと同じぐらいである。

図36 のように真空ポンプを使うと，放電管内の気体の圧力の変化に応じて放電のようすが変わるのを観察することができる。放電管内の気体の圧力が非常に小さくなると，**図33** の放電管fのように＋極側のガラス壁が黄緑色に光るようになる。

図34 の放電管で，ＡＢ間に高い電圧を加えると，十字板の影ができる。また，**図35** の放電管の電極Ｘ，Ｙに電圧を加えると，明るいすじが曲がる。**図34** や **図35** から，電流のもとになるものについて，どのようなことがわかるだろうか。

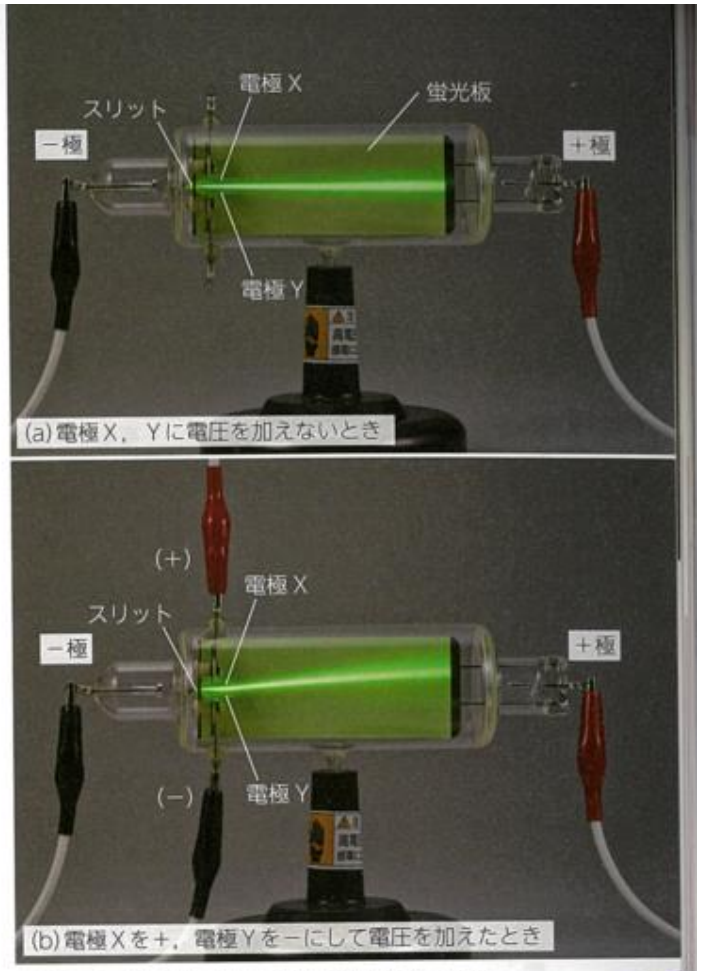


図35　電流のもとになるものを調べる実験②
スリットを通りぬけた電流のもとになるものが蛍光板に当たると，まわりよりも明るいすじが蛍光板上に現れる。

クルックス管

図37 十字板入り放電管と電子のモデル
－極側から出た電子が十字板に当たり，そのうしろに影をつくる。ガラス壁に衝突した電子は，＋極側に移動していく。

❶ 陰極線（電子線）
電池や電源装置の－極と接続した電極を陰極といい，電流のもとになるものを，はじめは陰極線とよんだ。陰極線は1876年に発見されたが，1897年にその正体が電子であることがわかったので，現在は陰極線のことを電子線とよぶことが多い。

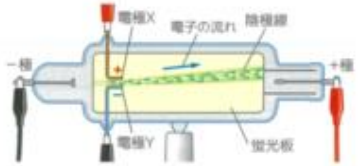


図38 電子と電極の向きのモデル

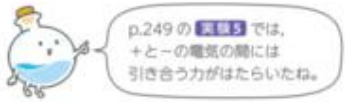


図39 放電管内の電子の移動

前ページの 図34 で，十字板の影ができることから，電流が流れている放電管内では，－極側の電極から電流のもとになるものが出て，＋極側に向かっていると考えられる（図37）。この電流のもとになるものの流れは，－極（陰極）から出ていることから**陰極線**と名づけられた❶。

また，前ページの 図35 のように，－極から＋極に向かう向きに平行な電極X，Yを入れた放電管では，電流のもとになるものが，その進路に平行な2つの電極のうち，＋のほうに引かれて曲がることがわかる（図38）。これらのことから，放電管内の電流のもとになるものは，－の電気をもっていると考えられる。

多くの人々が研究した結果，電流は－極から飛び出してくる質量をもった非常に小さな粒子の流れであり，放電管内の－極側の電極に使われる金属の種類や，放電管内の気体の種類を変えても，その性質はいつも同じであることがわかっている。この電流のもとになる粒子のことを**電子**という。

電子の性質をまとめると，次のようになる。

電子の性質

❶ 質量をもつ非常に小さな粒子である。
❷ －（負）の電気をもっている。

前ページの 図36 の真空放電では，放電管をふくむ回路全体に電流が流れている。このとき，放電管内では，－極側から＋極側に向かって電子が移動している（図39）。

電流と電子の移動

図40 のように，金属中には自由に動き回れる電子がたくさん存在する。電子1個1個は－の電気をもっているが，金属中にはそれを打ち消す＋の電気も存在するので，金属全体では＋と－のどちらの電気も帯びていない。このような状態を**電気的に中性**という。

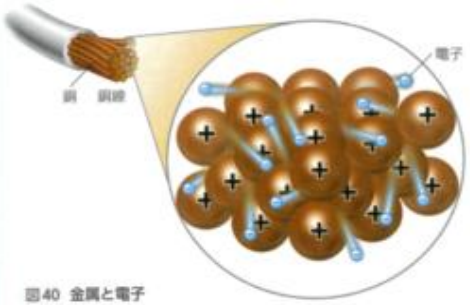


図40 金属と電子

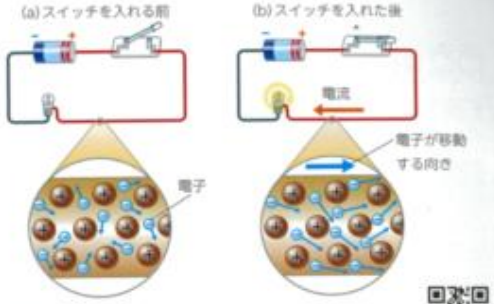


図41 金属中の電流と電子
電子が移動する向きと電流の向きは逆である。

考えてみよう

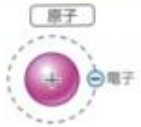
図40 で，金属に電圧が加わっていないときと加わっているときで，自由に動き回れる電子の動きはどうちがうだろうか。

図41 のような回路で，スイッチを入れて金属の両端に電圧を加えると，いろいろな向きに動き回っていた電子は－の電気をもっているため＋極の向きに引かれ，全体として＋極のほうへ移動する❷。このような電子の移動が電流である。電流が流れているときの電子が移動する向きは－極から＋極の向きであり，電流の向き（＋極から－極の向き）とは逆である。

また，摩擦によって静電気が起こるときには，物体間で電子が受けわたしされ，電子をわたした物体が＋の電気を帯び，受けとった物体が－の電気を帯びる（図42）。

発展

原子と電子の関係 中3へ



すべての物質は原子からできている（p.155参照）。この原子の中に電子がある。電子の質量は原子の質量よりはるかに小さく，水素原子のおよそ1800分の1である。

金属中では，電子の一部が原子からはなれて自由に動き回っている（自由電子）。自由電子が原子からはなれた後には，＋の電気を帯びた粒子が残る。

なるほど

電流の向きと電子の移動の向きが逆なわけ

電圧が加わっている導線中では，電子は－極から＋極に向かって動く。このことがわかったのは，電流の向きについての約束を決めた時代より後のことなので，電流の向きと電子が動く向きが逆になってしまったのである。

❷ 金属中と不導体中の電子
金属中には，ばく大な数の自由に動き回れる電子が存在している。一方，不導体（絶縁体）には自由に動ける電子が存在しないため，電圧を加えても電流はほとんど流れない。

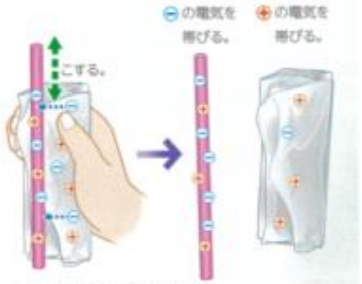


図42 静電気が起こるしくみ
ストローをティッシュペーパーでこすると，ティッシュペーパーは電子をわたすので＋の電気を帯び，ストローは電子を受けとるので－の電気を帯びる。

陰極線の説明

4. 放射線の発見とその利用

1895年，ドイツのレントゲンは，真空放電の実験を行っているときに，放電管から目に見えない何かが出ているのを発見し，これを**X（エックス）線**❶と名づけた。

翌年，フランスのベクレルが，ウランという物質からも，X線に似た目に見えない**放射線**が出ていることを発見した❷。また，マリー・キュリーとピエール・キュリーは，放射線を出す物質を研究し，新たにポロニウムとラジウムという物質を発見した。このように放射線を出す物質を**放射性物質**という。

放射線は目に見えないが，わたしたちの身のまわりにある食物や岩石，温泉などからも出ていて，これらは自然放射線とよばれる。放射線には，X線，**α（アルファ）線**，**β（ベータ）線**，**γ（ガンマ）線**などがある❸。

? 放射線にはどのような性質があり，どのように利用されているのだろうか。

放射線には，物質を透過する性質があり，物質や放射線の量，種類によって透過する力（透過力）が異なっている（図44）。

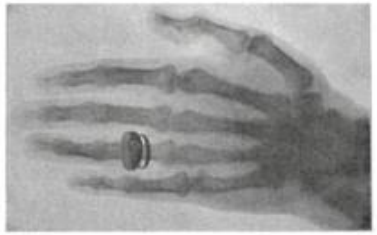
科学史

レントゲン

1845～1923年
ドイツ

X線の透過力を利用して，レントゲンは骨の撮影に成功した。

下図はレントゲンが撮影した初期のX線写真。



❶ p.252～253のような放電管の中にも，微量のX線が出るものがあるので，注意する。

❷ 放射能
放射線を出す能力を放射能という。

❸ このほかに中性子線などがある。くわしくは中学校3年で学習する。

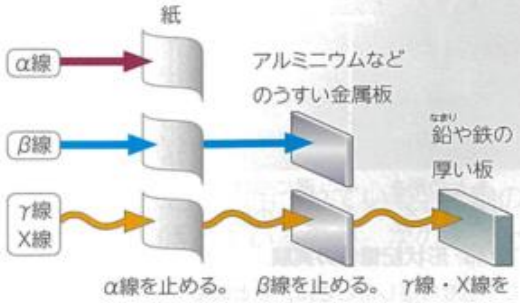


図44 放射線の種類と透過力

真空放電の説明後、X線の発見

これで終わり

図45 放射線のいろいろな利用

図46 形状記憶性の実験
ある温度に達したときに，もとの形にもどろうとする性質を，形状記憶性という。

放射線はさまざまな場面で利用されている（図45）。

医療では，X線が腫瘍の発見や歯や骨の異常の診断に利用されており，がん治療にも放射線が使われることがある。また，加熱したり薬品を使用したりしなくても殺菌することができるため，医療器具の滅菌にも放射線が利用されている。

農業では，ジャガイモに放射線を照射して芽の成長をおさえて保存期間を大幅に長くしたり，害虫の駆除に利用したりしている。工業では，タンク内の水量の測定や，調べるのが困難な高温の鉄板などの厚さの測定に使われている。

また，放射線を当てると 図46 のように物質の性質が変わるものがあり，電線ケーブルの被覆材や熱収縮チューブ，自動車のタイヤなどをつくるのにも利用されている。

このように，放射線はさまざまな場面で利用されている一方で，生物が放射線を浴びる（被曝する）と，健康な細胞が傷ついてしまう可能性がある。放射線や放射性物質のあつかいには，細心の注意や配慮が必要である。

お仕事ラボ

旅行かばんを開けずに中身を調べる

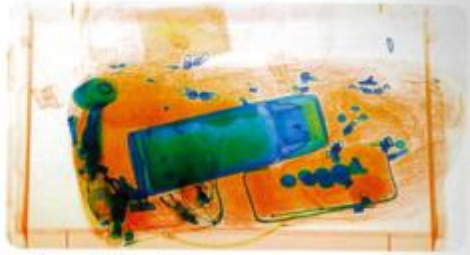
空港では，飛行機に乗る前に，手荷物の中に機内に持ちこみが禁止されているものがないかを調べる仕事をしている人がいます。

どのように手荷物を調べているのですか？

X線を利用した検査装置でかばんを開けずに調べています。検査装置は，X線を透過させる量のちがいから，プラスチックやアルミニウム，鉄などを区別して画像にすることができます。その画像を見て，お客さまの手荷物に刃物や火薬類などの危険物が入っていないか確認しています。かばんの中のものが重なっていて見にくいときは，中の物を出して見せてもらうこともあります。

作業中に被曝の心配はないのですか？

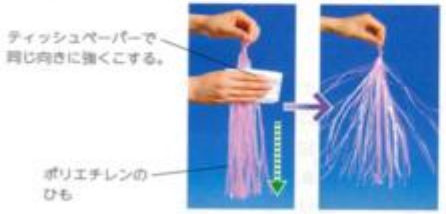
検査装置は，おもにX線の物質を透過する性質や，物質を光らせる性質を利用しています。生物に害がある性質はおさえるように設計されています。さらに念のため，X線がもれないように，防護カーテンをとりつけることで，安全性を高めています。また，X線はつねに発生しているのではなく，手荷物が装置の中にあるときだけ発生するしくみになっています。



X線で撮影したかばんの画像
X線で検査した結果を，材質によって異なる色で表示している。なお，この画像は実際に空港で検査された画像ではない。

基本のチェック

1. 細かく引きさいたポリエチレンのひもを，ティッシュペーパーでこすると，ポリエチレンのひもが広がる。この理由を説明しなさい。 （→p.250）



2. 用語の確認 「放電」とはどのような現象か説明しなさい。 （→p.252）

3. 用語をつなぐ 次の2つの用語を使って，電圧を加えたときに導線内を移動する電子の向き，および，流れる電流の向きについて説明しなさい。
「＋極」「－極」 （→p.255）

4. X線やα線，β線，γ線などを何というか。 （→p.257）

5. X線は医療での診断などに利用されている。X線のどのような性質が利用されているのか，次の書き出しに続けて書きなさい。
・物質を～ （→p.257～258）

中学3年　エネルギー資源とその利用（ここから原発と放射線が登場）

5章 エネルギー資源とその利用

限りあるエネルギー資源を有効に利用し，次の世代へ引きついでいくには，どのような考え方を身につけねばならないだろうか。

風力発電と太陽光発電（沖縄県宮古島市）

つながる学び

わたしたちの身のまわりには，電気をいろいろなエネルギーに変換している道具がある。

光へ：蛍光灯，ＬＥＤ電球，豆電球など
熱へ：電熱線など
音へ：電子オルゴール，スピーカーなど
運動へ：モーターなど　[小6][中2]

1. 生活を支えるエネルギー

これまで学んできたように，わたしたちはエネルギーをさまざまな形に変換して利用し，便利な生活を送っている。

？ 1日にどれぐらいのエネルギーを使い，それをどのように得ているのだろうか。

人類のエネルギー使用量は，18世紀後半の産業革命のころから急速に増加しはじめた（図73）。現在の日本人1人あたりの消費する電力量を見ると，1日におよそ21.5 kWh，60 Wの電球15個を1日中つけたままにするほどのエネルギーを消費していることになる（図74）。

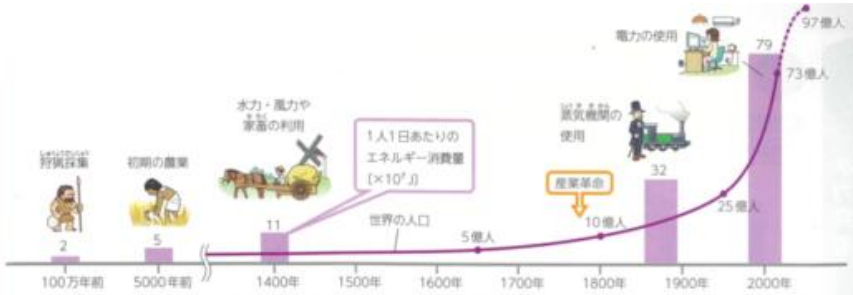


図73 世界の人口の推移と1人1日あたりのエネルギー消費量　97億人は，2050年における人口の予測値。『エネルギー・経済統計要覧 2018』，『エネルギー白書 2012』，『原子力・エネルギー図面集』より。

このエネルギーの多くは，石油や石炭，天然ガスなどの大量消費によってまかなわれている（図75）。これらのエネルギー資源は，大昔に生きていた動植物の遺骸などの有機物が，数百万年から数億年の長い年月を経て変化したものであり，**化石燃料**とよばれる。化石燃料以外のエネルギー資源としては，ウランなどの放射性物質も利用されている。さらに，太陽光や風力，地熱などの再生可能なエネルギーの開発や利用が進められている。

化石燃料をエネルギー資源として使うとき，その多くは発電所などで電気エネルギーに変換されている。また，ウランなどの核燃料がもつ核エネルギーも，原子力発電所で電気エネルギーに変換されている（図76）。エネルギー資源の多くが電気エネルギーに変換されるのは，電気エネルギーが送電線を通して簡単に輸送でき，いろいろなエネルギーに変換しやすく，エネルギーを使用する場所で廃棄物がほとんど出ないなど，利用しやすいエネルギーだからである。エネルギー資源の有効利用を考えるとき，発電方法と電気の利用についてよく考える必要がある。

話し合ってみよう

火力（石油，石炭，天然ガス）や水力，原子力，地熱，太陽光，風力による発電のしくみを調べ，各発電方法の長所や短所を話し合ってみよう。

図74 1人が1日に消費する電力量（2015年）
1 kWhは約3.6 × 10⁶ Jである。『Key world energy statistics (2017)』より。

図75 日本で1年間に使用されているエネルギー資源の種類とその割合（2016年）
化石燃料やウランなど，使った分だけ減少するものを枯渇性エネルギーという。一方，水力や風力，太陽光など，自然現象を利用していて減少することがないものを再生可能エネルギーという。『平成28年度総合エネルギー統計速報』より。

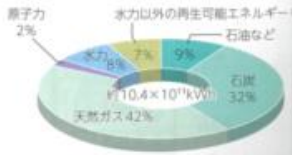


図76 日本で1年間に電気エネルギーに変換されるエネルギー資源の種類とその割合（2016年）
『エネルギー白書 2018』より。

発電の話

水力発電

しくみ　ダムにためた水を落下させて，発電機を回転させる。

ダムの水：位置エネルギー → 水車・発電機 → 電気エネルギー

長所
- 発電時に化石燃料を使わないので，二酸化炭素や汚染物質を排出しない。
- エネルギーの変換効率が非常に高い。

短所
- 大規模なものはダムの建設が必要で，設置場所が限られる。
- 山林破壊などの環境への影響や，ダムの底にたまる土砂などの問題がある。

火力発電

しくみ　化石燃料をボイラーで燃焼させ，水を高温・高圧の水蒸気にして発電機を回転させる。

石油：化学エネルギー → ボイラー → 熱エネルギー → タービン・発電機 → 電気エネルギー

長所
- 燃料を調整することで，発電量を容易に調整できる。

短所
- 大量の化石燃料を燃焼させるので，二酸化炭素が排出される。

原子力発電

しくみ　ウランなどが核分裂するときのエネルギーを利用して，水を高温・高圧の水蒸気にして発電機を回転させる。

ウラン：核エネルギー → 原子炉 → 熱エネルギー → タービン・発電機 → 電気エネルギー

長所
- 少量の核燃料から大量の電気エネルギーが得られる。
- 大量の電力を一定の割合で供給できる。
- 発電時に二酸化炭素を排出しない。

短所
- 運転中の原子炉内の核燃料や，使用ずみ核燃料からは大量の放射線が発生する。核燃料は厳しい管理が必要である。
- 事故時の影響が，広範囲かつ長期間にわたる。

地熱発電

長所
- 発電時に化石燃料を使わないので，二酸化炭素や汚染物質を排出しない。

短所
- 火山や温泉の近くなどに，設置場所が限られる。

しくみ　地下深くの熱で高温になった水から水蒸気をとり出し，発電機を回転させる。

地下の水：熱エネルギー → タービン・発電機 → 電気エネルギー

太陽光発電

長所
- 発電時に化石燃料を使わないので，二酸化炭素や汚染物質を排出しない。

短所
- 時間帯や天候により発電量が大きく変化する。
- じゅうぶんな発電量を確保するには，広大な設置場所が必要である。

しくみ　光電池（太陽電池）で太陽光を受けて，光エネルギーを直接電気エネルギーに変える。

太陽光：光エネルギー → 光電池 → 電気エネルギー

風力発電

長所
- 発電時に化石燃料を使わないので，二酸化炭素や汚染物質を排出しない。

短所
- 風により発電量が大きく変化する。
- 風車の回転で騒音や振動が発生する。
- 風がよくふく場所であることが必要で，設置場所が限られる。

しくみ　自然の風の力で風車を回し，発電機を回転させる。

風：運動エネルギー → 風車・発電機 → 電気エネルギー

図77 いろいろな発電方法　発電機は，中学校2年で学んだように，電磁誘導によって電流を発生させている。

放射線再登場　放射線はエネルギー利用上の課題か？

図78 エネルギー資源の採掘可能な年数（ウランは2015年，その他は2016年の予測値）
年数は，確認されている採掘可能な埋蔵量をその年の生産量で割って予測している。

図79 大気汚染によるスモッグ（中国）
直径2.5μm（2.5mmの1000分の1）以下の微小粒子状物質「PM 2.5」による。中国の石炭火力発電所の排出ガスがおもな原因といわれている。

図80 爆発した福島第一原子力発電所
2011年3月の東北地方太平洋沖地震の直後，原子炉内に閉じこめておかなければならない放射性物質が，水素の爆発などによって大量に外部へ放出された。その結果，土壌や水，空気，農作物，建物など，広範囲が汚染された。

2. エネルギー利用上の課題

わたしたちの豊かな生活やさまざまな産業は，エネルギー資源の大量消費によって支えられている。

？ エネルギーを利用するときに，どのようなことが問題となるのだろうか。

考えてみよう

図78，図79，図80を見て，エネルギーを利用するときにどのようなことが問題となるか，考えてみよう。

おもなエネルギー資源である化石燃料や，原子力発電に必要なウランは，埋蔵量に限りがある。

化石燃料をそのまま燃やすと，硫黄酸化物や窒素酸化物といった汚染物質が大気中に放出される。大気汚染が起こると，生物に大きな健康被害をもたらす。また，化石燃料を燃やしたときに発生する二酸化炭素は，地球温暖化の原因の1つと考えられている。気温の上昇は，生物や環境へ影響を与えたり，海水面の上昇によって低い土地を水没させたりするおそれもある。

ウランなどの放射性物質が出す放射線は，生物や環境に影響をおよぼすおそれがある。事故などで原子力発電所から外部に放射性物質が放出されると，広範囲に長期間にわたって強い放射線が発生し，生物や環境に大きな影響を与える。

風力などの再生可能エネルギーを利用するときも，騒音など周囲の人々の生活に影響を与えるおそれがある。

このように，エネルギーを利用するときには，社会全体として解決しなければならない問題が存在する。

放射線の種類と性質

中学校2年で，放射線にはX線やα線，β線，γ線などがあることを学んだ。X線やγ線は電磁波❶の一種であり，α線はヘリウムの原子核の流れ，β線は電子の流れである。このほか，放射線には中性子の流れである**中性子線**もある（図81）。

放射性物質が放射線を出す能力を放射能という。放射性物質の原子核は不安定なので，放射線を出して自然に別の原子核に変わる（壊変する）。1秒間に1個の割合で原子核が壊変して放射線を出すとき，その放射性物質の放射能の強さを1ベクレル（記号Bq）という。

放射線は人類が誕生する以前から自然界に存在し，身のまわりにある岩石や食物，温泉などからも放射線が出ている。また，宇宙からも地球に降り注いでいる。これらを自然放射線とよぶ❷。

放射線は目では見えないが，放射線測定器や霧箱を使って調べることができる（図82）。

❶ 電磁波
電磁波のなかまには，光やテレビ放送で使う電波などがある。

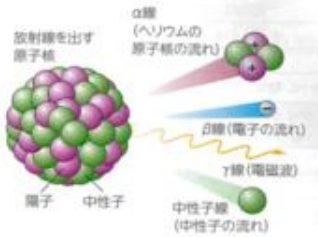


図81 おもな放射線
この図はモデルであり，1つの原子核からあらゆる放射線が出ているわけではない。

❷ 自然放射線と人工放射線
自然放射線に対し，人工的につくられた放射線を人工放射線という。

① 下の図のように，掃除機のホースの先にティッシュペーパーをとりつけ，10分ほど吸い続け，空気中にある自然の放射性物質をティッシュペーパーに集める。
② 放射線測定器のスイッチを入れ，放射性物質を集めたティッシュペーパーからの放射線量を測定する。10秒ごとに値が変化するので，1分後に値を読みとる。
③ ティッシュペーパーと測定器の間に金属板や水，アクリル板などのしゃへい物を置いたときの放射線量を②と同様に測定し，値を比べる。

図82 放射線を調べる実験

ティッシュペーパーと放射線測定器の距離を変えると，値はどうなるかな。

霧箱という装置を使うと，放射線が通った跡を見ることができる。

⑬　日本の高校教科書の問題点

1.　一度学んで理解した人の為の備忘録

解説が少ない。ひとりで教科書を読んで学習できない。
行間を読め！といった記述内容。　とてもひとりでは学習できない

2. 教員も行間を読めない

本質を語るのではなく、「この問題はこうやって解く」という指導になる
⇒　面白くない／興味が湧かない

なぜそうなのか？？？

理由は検定教科書

検定が悪いのではなく、教科書の単価が決まっていることが問題

↓

ページ数が限られるので、内容を飛ばして書くしかない

（行間が読めないと理解不能な教科書）

教科書のページ数は？

日本　実教出版（サイズA5）　基礎物理P.303　物理P.383

合計 P.686　　＊サイズが半分なので実質的な差は・・・

米国　Giancoli-Physics　P.1058（サイズA4）

（これより易しいテキストを前年にやっている）

英国　Advanced Physics for you（サイズA4）　P.512

A-Level AQA Physics（サイズA4）　P.722　合計 P.1234

⑭日本の理科教育に欠けているもの

1　授業時間数が少ない

2　幼稚園から高校までの科学教育に
　ストーリーがない（人材教育の戦略なし）

3　高校理科教員のレベルダウン
　（ネガティブスパイラル状態に陥っている.　後継者不足）

4　教科書が貧弱（説明が丁寧ではない）

私の感じていること

① 日本の大学は入学時点で、周回遅れ

② 海外の一流大学入学者と比較して、本質を理解している学生が圧倒的に少ない
（試験にパスすることが教育目標になっているため）

③ 教育は国家の基本戦略、今の日本に戦略なし
現状では日本はどんどん貧しくなっていく
STEM人材を増やさないと豊になれない

⑮　これから何をすべきか

- 幼稚園から高校までの一貫した科学教育を早く構築する
- 中学・高校の授業に使える教材／資料、オープンアクセス化（フォーラムのHPをフルに使い、様々な教材／資料提供を）
- 米国・カナダ・英国などの教育内容（テキスト／キーコンピテンシー）の徹底研究
- 行間を読まなくても（読めなくても）内容が理解できる無検定教科書を作りましょう

⑯　日本の戦略は？（今すぐ求められているものは何か）

- 科学教育（理科教育）が国益に直結することを認識させる
- STEM人材を増やす
- 優秀な人材を教育現場に！
- 教育目標のその先を国民に示す