

9 原子核の物理 核融合と核分裂の果て

ある時期まで、原子力発電は「人類の夢の産物」とも言われていた。放射線対策は必要になるが、莫大なエネルギーを手中にすることができるからである。

9.1 原子核と放射線 — 放射性崩壊と半減期

9.1.1 原子核の構造

元素記号

すべての物質は、100 種類ほどの元素から成り立っている。元素は原子の構造で区別されていて、原子は原子核と電子からできている。そして、原子核は陽子と中性子から構成されている。電子は負の、陽子は正の電荷を持っていて、中性子は電荷ゼロである。元素は陽子の数で区別されていて、陽子の数を原子番号という。

原子は電氣的に中性になっているので、電子の数 = 陽子の数である。電子の質量は、陽子・中性子（2 者を合わせて核子という）と比べて格段に小さい。そのため、元素の質量は陽子と中性子の数の和として質量数で表す。

定義 元素記号

元素記号 X は、左上側に質量数 (= 陽子数 + 中性子数)、左下側に原子番号 (= 陽子数) を記入して、次のように表す。

$${}^A_Z X = \begin{matrix} \text{質量数} \\ \text{原子番号} \end{matrix} \text{元素記号} \quad (1)$$

水素は ${}^1_1\text{H}$ 、ヘリウムは ${}^4_2\text{He}$ 、中性子は ${}_0^1\text{n}$ となる。水素の原子核は陽子そのものである。ヘリウムの原子核は α 粒子とも呼ばれる。

電気の正体 \Rightarrow §8.1.2
 原子番号
 (atomic number)
 核子
 (nucleon)
 質量数
 (mass number)

単位

核子は小さいので、質量は原子質量単位 [u] を用いて表すことも多い。1u は、炭素 ${}^{12}_6\text{C}$ 原子 1 個の質量の 1/12 で、
 $1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-24} \text{ kg}$
 である。

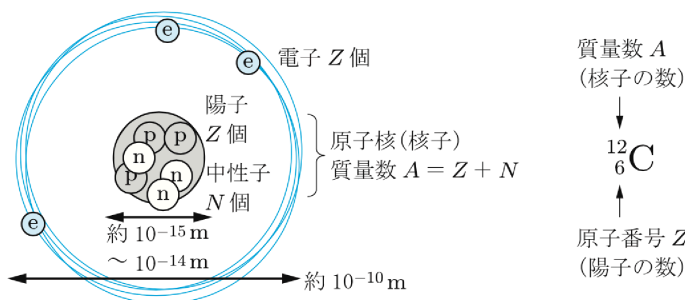


図 1: 原子の構成と元素記号の表し方。

周期表

原子番号の順に、性質が似ている元素を縦になるように並べたものが周期表である。現在は原子番号 118 番まで知られている。

周期表
(periodic table)

表 1: 周期表

Period	1 IA	2 IIA	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB	13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA
1	H 水素 1.008	He ヘリウム 4.003																
2	Li リチウム 6.941	Be ベリリウム 9.012											B 硼素 10.81	C 炭素 12.01	N 窒素 14.01	O 酸素 16.00	F フッ素 19.00	Ne ネオン 20.18
3	Na ナトリウム 22.99	Mg マグネシウム 24.31											Al アルミニウム 26.98	Si ケイ素 28.09	P リン 30.97	S 硫黄 32.07	Cl 塩素 35.45	Ar アルゴン 39.95
4	K カリウム 39.10	Ca カルシウム 40.08	Sc スカンジウム 44.96	Ti チタン 47.87	V バナジウム 50.94	Cr クロム 51.99	Mn マンガン 54.94	Fe 鉄 55.85	Co コバルト 58.93	Ni ニッケル 58.69	Cu 銅 63.55	Zn 亜鉛 65.41	Ga ガリウム 69.72	Ge ケルゲン 72.64	As ヒ素 74.92	Se セレン 78.96	Br 臭素 79.90	Kr クリプトン 83.80
5	Rb ルビウム 85.47	Sr ストロンチウム 87.62	Y イットリウム 88.91	Zr ジルコニウム 91.22	Nb ニオブ 92.91	Mo モリブデン 95.94	Tc テクネチウム 98	Ru ルテチウム 101.1	Rh ロジウム 102.9	Pd パラジウム 106.4	Ag 銀 107.9	Cd カドミウム 112.4	In インジウム 114.8	Sn スズ 118.7	Sb ヒ素 121.8	Te テルル 127.6	I ヨウ素 126.9	Xe キセノン 131.3
6	Cs セシウム 132.9	Ba バリウム 137.3	La ランタン 138.9	Hf ハフニウム 178.5	Ta タンタル 180.9	W タングステン 183.8	Re レニウム 186.2	Os オスマニウム 190.2	Ir イリジウム 192.2	Pt 白金 195.1	Au 金 197.0	Hg 水銀 200.6	Tl タリウム 204.4	Pb 鉛 207.2	Bi ヒ素 208.9	Po ポロニウム 209	At アスタチン 210	Rn ラドン 222
7	Fr フランシウム 223	Ra ラジウム 226	Ac アクチニウム 227	Rf ラザフォード 261	Db ドブニウム 262	Sg シーボグム 266	Bh ボヘリウム 264	Hs ハッセル 277	Mt メンデル 268	Ds ダームシュテット 281	Rg レイトネン 272	Cn コペルニシウム 285	Uut ウンニウム 284	Fl フルロウ 289	Uup ウンペンニウム 288	Lv リフソウ 292	Uus ウンセグニウム 293	Uuo ウンオクニウム 294
			lanthanides (rare earth metals)															actinides

表 2: 電子, 陽子, 中性子のデータ .

	記号	電気量	質量 [kg]	質量 [u]	質量比
電子	e electron	-e	$9.10938188 \times 10^{-31}$ kg	1/1823 u	1
陽子	p proton	+e	$1.67262158 \times 10^{-27}$ kg	1.00728 u	1836.15
中性子	n neutron	0	$1.67492735 \times 10^{-27}$ kg	1.00866 u	1838.68

同位体

原子番号が同じでも, 中性子数が違う原子が存在する. それらを同位体という. 同位体には, 安定なもの不安定で他のものに崩壊していくものがある. 例えば, 炭素は, ほとんどが中性子が 6 個の炭素 12 ($^{12}_6\text{C}$) であるが, 微量ながら中性子が 7 個の炭素 13 ($^{13}_6\text{C}$) や 中性子が 8 個の炭素 14 ($^{14}_6\text{C}$) が存在する.

同位体
(isotope)

表 3: 同位体の例 .

名称	記号	陽子の数	中性子の数	質量 (u)	存在比	半減期
水素	水素1(軽水素)	^1_1H	0	1.0078	0.999885	
	水素2(重水素)	$^2_1\text{H}, \text{D}$	1	2.0141	0.000115	
	水素3(三重水素)	$^3_1\text{H}, \text{T}$	2	3.0160	微量	12.32年でヘリウム3に
炭素	炭素12	$^{12}_6\text{C}$	6	12	0.9893	
	炭素13	$^{13}_6\text{C}$	7	13.0034	0.0107	
	炭素14	$^{14}_6\text{C}$	8	14.0032	微量	5730年で窒素14に
ウラン	ウラン234	$^{234}_{92}\text{U}$	142	234.0409	0.000054	25万5千年でトリウム230へ
	ウラン235	$^{235}_{92}\text{U}$	143	235.0439	0.007204	7億380万年でトリウム231へ
	ウラン238	$^{238}_{92}\text{U}$	146	238.0508	0.992742	44億6800万年でトリウム234へ

同位体を含めると, 安定な核と不安定な核をあわせて, 現在では, 約 3000 種類の原子核が確認されている. 図 2 は, それらを示した「核図表」である. 縦軸に陽子数, 横軸に中性子数をとって原子核を並べたものだ.

核図表

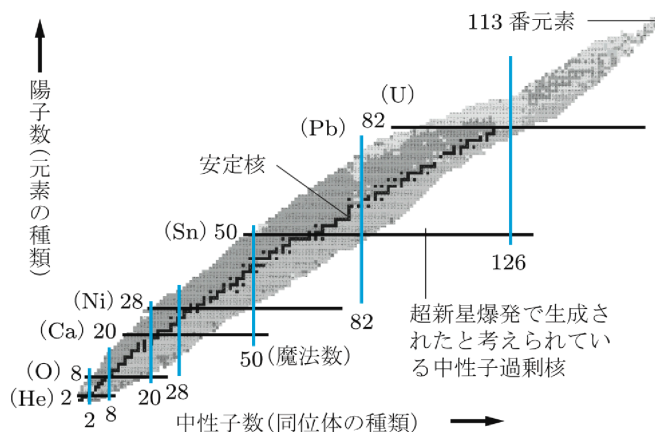


図 2: 核図表 縦軸が陽子数, 横軸が中性子数. 下の段から, H, He, Li, Be, ... と周期表の順に元素が対応する. 安定な原子核が中央付近の黒い箇所を示されている. 不安定な原子核が多数存在することがわかる.

9.1.2 放射性崩壊

放射線・放射能

自然界には、ウラン ${}_{92}\text{U}$ や ラジウム ${}_{88}\text{Ra}$ のように、不安定な原子核があり、放置しておくとな粒子や電磁波などの放射線を出して、別の原子核に変化する。この現象を放射性崩壊という。

定義 放射線・放射能

放射線は物質を透過する力を持った粒子の光線である。放射線は発見順に、 α 線（正体は He 原子核）、 β 線（電子）、 γ 線（波長の短い電磁波、光）や X 線（波長の短い不可視な電磁波）などと呼ばれ、それぞれ透過力や磁場中での進み方が異なる。

放射線を出す性質のことを放射能といい、この能力をもった物質のことを放射性物質という。放射能をもつ同位体を放射性同位体という。

放射線
(radiation)
放射性崩壊
(radioactive decay)
放射性同位体
(radioisotope)

α 線 (α -rays)
 β 線 (β -rays)
 γ 線 (γ -rays)

原子核から ${}^4_2\text{He}$ 原子核を分離して α 線として放出する現象を α 崩壊という。原子核の中の 1 つの中性子が陽子に変化し、電子が飛び出す現象が β 線の正体である。この過程を β 崩壊という。

α 崩壊 (α -decay)
 β 崩壊 (β -decay)

表 4: 放射線の種類 .

	正体	電気量	質量 [kg]	透過力	電離作用
α 線	${}^4_2\text{He}$ 原子核	$+2e$	6.65×10^{-27} kg	弱	強
β 線	電子	$-e$	9.11×10^{-31} kg	中	中
γ 線	電磁波	0	0	強	弱

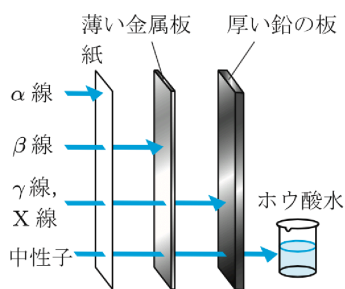


図 3: 放射線の透過力の違い

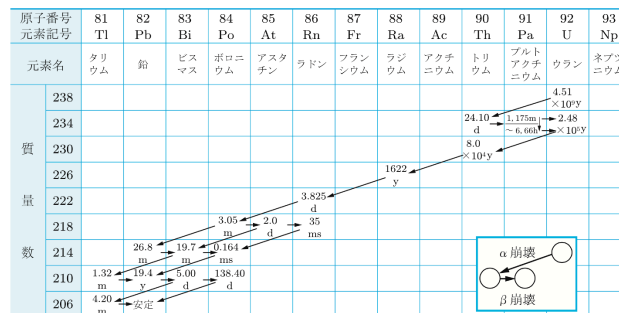


図 4: ウランから始まる崩壊系列。ウラン 238 (${}^{238}_{92}\text{U}$) は、 α 崩壊してトリウム 234 (${}^{234}_{90}\text{T}$) に変化する。その後、 β 崩壊してプロトアクチニウム 234 (${}^{234}_{91}\text{Pa}$) に変化する。その後も放射性崩壊を続け、長い年月の後、安定な鉛 206 (${}^{206}_{82}\text{Pb}$) に至る。

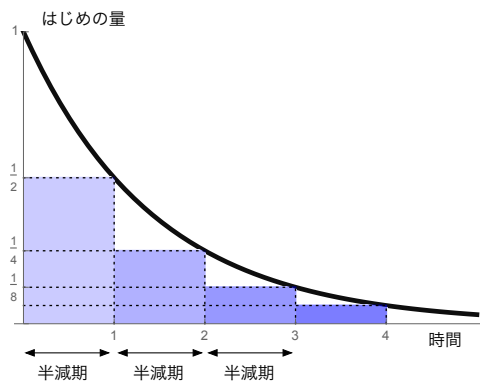


図 5: 同じ時間ごとに半分の量になる様子。半減期の倍でゼロになるわけではなく、元の量の半分になりながら、次第にゼロに近づいていくことに注意。

表 5: 主な放射性物質の半減期。(中性子は原子核内にあるものは安定だが、単独に取り出すと不安定で β 崩壊して陽子に変化する。)

原子核	崩壊の型	半減期
n	単体の中性子	β 10.4 分
$^{14}_6\text{C}$	自然	β 5.73×10^3 年
$^{32}_{15}\text{P}$	人工	β 14.26 日
$^{60}_{27}\text{Co}$	人工	β 5.271 年
$^{90}_{38}\text{Sr}$	人工	β 28.78 年
$^{131}_{53}\text{I}$	人工	β 8.1 日
$^{137}_{55}\text{Cs}$	人工	β 30.07 年
$^{235}_{92}\text{U}$	自然	α 7.04×10^8 年
$^{238}_{92}\text{U}$	自然	α 4.47×10^9 年

半減期

原子核の崩壊は確率的におきる。もとの原子核のうち、半数が崩壊して別の原子核になるまでの時間は原子核ごとに決まっている(表 5)。この時間を半減期という。たとえば、ヨウ素 ^{131}I の半減期は 8.1 日である。1 日後に最初の量の 90% になり、8 日後に 50%、30 日後で 1/13、60 日後で 1/170 になる。

半減期
(half-decay time)

Topic

放射性炭素年代測定法

炭素 ^{12}C には、安定な同位体 ^{13}C と不安定な同位体 ^{14}C が存在する。両者は空気中に一定の割合で含まれていて、生物、例えば樹木が呼吸していれば樹木中にもその割合で取り込まれる。樹木が切られ木材となると、木材は新たに内部に炭素を取り入れなくなる。

^{14}C は 5730 年の半減期で放射線を放出しながら ^{14}N に壊変するので、後年、木材からどれだけの量の放射線が放出されているかを計測することにより、内部に含まれる $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の存在比がわかり、樹木が切り倒された年代が測定できることになる。この方法により、生物遺骸があれば、数万年前までの年代測定が可能になるという。

日本で 2000 年にスクープされた旧石器発掘に関する捏造事件は、出土した石器に対して有効な年代測定法がないために第三者の検証ができなかったことが、事件を大きくさせた。

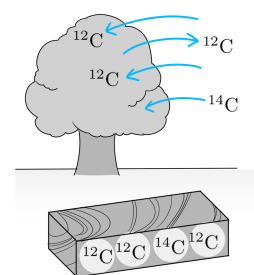


図 6: 放射性炭素年代測定法。呼吸していた樹木が材木になると、 ^{14}C が閉じ込められ、放射性壊変で徐々に減ってゆく。 ^{14}C の含有量で材木の年代がわかる。

9.2 核反応 — 核分裂と核融合

原子核反応は、日常の生活範囲で見られるような化学反応（分子どうしが組み替えを起こす反応）と違い、元素が他の元素に変化する高エネルギー反応である。

質量とエネルギーの等価性

1905年、アインシュタインは、光の速度に近いときの物理法則を考えることによって、特殊相対性理論を構築した。この理論で得られた結論は、質量そのものがエネルギーである、という事実だった。おそらく、世界で最も有名な数式は、次のものである。

法則 質量とエネルギーの等価性

質量はエネルギーと同義であり、転化できる。

$$E = mc^2 \quad (2)$$

$$\text{質量エネルギー [J]} = \text{質量 [kg]} \times (\text{光速 [m/s]})^2$$

これは、世の中から質量が m 減るならば、それに相当する mc^2 のエネルギーが運動あるいは熱エネルギーに転化することを意味する。化学反応では、反応の前後の質量差は無視できるほど小さい（全質量の 10^{-8} %程度）が、原子核反応ではその効果が顕著に現れる（全質量の 0.1 ~ 1 %程度）。

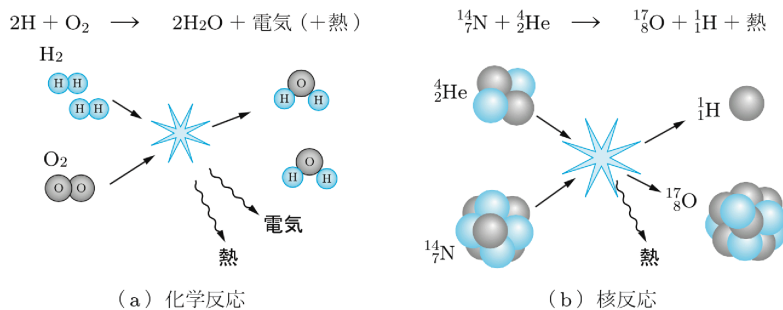


図 8: 化学反応と核反応 化学反応は分子の組み替えで、実験室レベル。核反応は原子核の組み替えで、原子爆弾や水素爆弾、原子力発電や太陽の中心。エネルギーレベルがまったく異なる。

日常生活では、質量保存則が成立していると考えて差し支えないが、原子爆弾・水素爆弾・原子力発電などの原子核反応では、わずかな量の物質がエネルギーに転化することで莫大なエネルギーが発生する。



図 7: アインシュタイン

Albert Einstein
(1879–1955)

特殊相対性理論
(special theory of relativity)

質量とエネルギーの等価性
(Equivalence of energy and mass)

原子核反応

原子核反応には、次の 2 種類がある。

定義 核融合・核分裂

- 核融合：軽い原子核どうしが合体して重い原子核になる核反応
(太陽の輝く原理, 水素爆弾)
- 核分裂：重い原子核が軽い原子核に分裂する核反応
(原子爆弾, 原子力発電)

核反応
(nuclear reaction)

このような核反応が生じる原因は、原子核の結合エネルギーの差にある。

山の上から川が流れていくように、自然界は、なるべくエネルギーを放出し、合計が小さいエネルギー状態にある方を好む。原子核は、陽子と中性子が結合することによって、それぞれがばらばらに存在するよりも質量エネルギー ($E = mc^2$) の和が小さくて済む。これを質量欠損とよぶ。エネルギー的に得するわけだ。

結合エネルギー
(binding energy)
質量欠損
(mass defect)

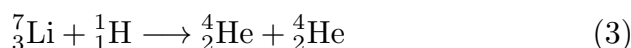
例 ${}^4_2\text{He}$ は、中性子が 2 個、陽子が 2 個から成り立っているが、それぞれ個々の粒子の質量の和は、

$$(2 \times 1.67262158 + 2 \times 1.67492735) \times 10^{-27} = 6.6950 \times 10^{-27} \text{kg}$$

である。しかし、 ${}^4_2\text{He}$ の質量は、 $6.6447 \times 10^{-27} \text{kg}$ であり、質量欠損の大きさは、 $\Delta m = 5.03 \times 10^{-29} \text{kg}$ である。

核反応が生じるのは、反応の前後で全体のエネルギーが小さくなるからだ。

例 核反応



が発生するのは、 ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H}$ でいるよりも、 ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ となる方が全体のエネルギーが低くなるからである (図 9)。

核反応では物質がなくなるわけではないので、反応の前後で質量数や原子番号の和は等しい。(3) で確かめてみよう。

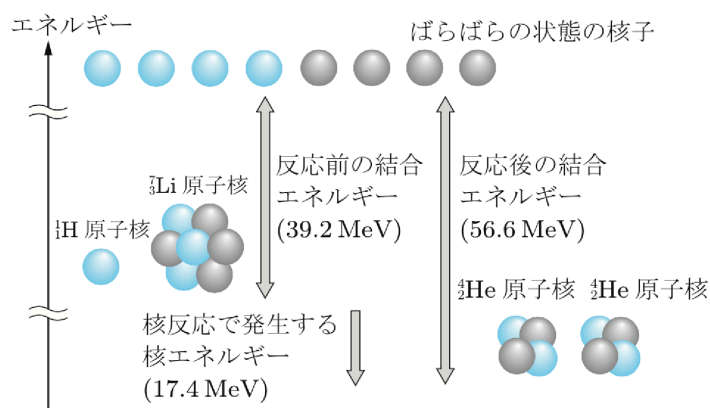
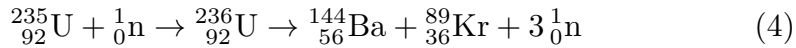


図 9: 核反応で発生する核エネルギーと結合エネルギーの関係。

核分裂

核分裂が人工的に初めて実現したのは、不幸なことに原子爆弾であった。第二次世界大戦中、枢軸国側の原子爆弾開発計画に焦りを感じたアメリカは、マンハッタン計画の名のもとに、科学者・技術者を密かに総動員して原子爆弾の製造を行った。1945年7月16日に実験を成功させ、広島と長崎に投下した。

原子爆弾で起こされる核分裂は、ウラン 235 がバリウムとクリプトンに分裂する反応で、反応式は



である。式の両辺で質量数は保存していても、それぞれの原子核を作る結合エネルギーの総和の差が、アインシュタインの質量公式 (2) にしたがって放出されることになる。

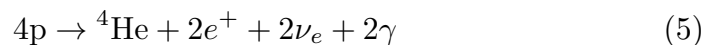
反応式からは、中性子を介して連鎖反応が起きることがわかる。ひとたび反応がおきて中性子が発生すれば、その中性子が次のウランと結合して核分裂を引き起こす。つまり、反応を途中で止めることは難しい。

広島に投下された原子爆弾で核分裂を起こしたのは、爆弾に詰められていたウラン 235 (10~35 kg) のうち、わずか 1 kg 弱だったそうだ。それでも、広島市を壊滅させ、当時の人口 35 万人の半数が被爆から 4 ヶ月以内に亡くなった。

現代の原子力発電では、上記の反応を利用して、発生する熱エネルギーで蒸気を作り、タービンを回して発電する。人工的に核反応を制御するために、ウラン 235 を 3% から 5% (残りはウラン 238) に濃縮したものをしている。

核融合

核融合は、太陽など、恒星の光るエネルギー源である。星は、星間ガスが収縮してできた水素分子の分子雲が種となって誕生すると考えられている。分子雲が重力的作用によってさらに高密度に収縮し、温度上昇により核融合反応に点火する。星の内部で起こされる水素の燃焼過程には主経路がいくつかあるが、結果的に



という形にまとめられる。 e^+ 、 ν_e 、 γ は、それぞれ陽電子、電子ニュートリノ、光子である。陽子 p は、反応の途中でも生成されるので、これも連鎖反応になる。核融合反応は、水素爆弾の原理でもある。平和利用として、核融合炉による発電も研究されているが、反応が開始するのに必要なエネルギー (しきい値) が高く制御技術も難しいため、実用化されるまでにはまだ遠いようだ。

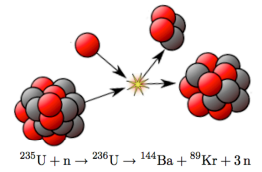


図 10: 核分裂
(nuclear fission)

マンハッタン計画
(Manhattan Project)

連鎖反応
(radical reaction)

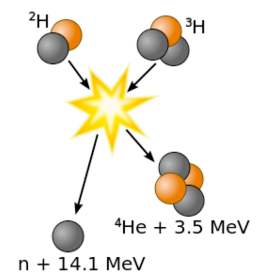


図 11: 核融合
(nuclear fusion)

核分裂と核融合はどこまで進むか

核分裂・核融合のどちらでも原子核反応が進行する理由は、鉄 ^{56}Fe が、もっとも安定な原子核だからだ。

図 12 は、横軸に質量数（おおよそ原子番号順）、縦軸に結合エネルギーをとって、主な元素の結合の強さを表したものだ。縦軸の上の方ほど結合力が強い。つまり、H, He, Li, … と進む核融合は、鉄まで合成されるとそれ以上核融合は進まずに終了する。核分裂も鉄まで分裂すると終了することになる。

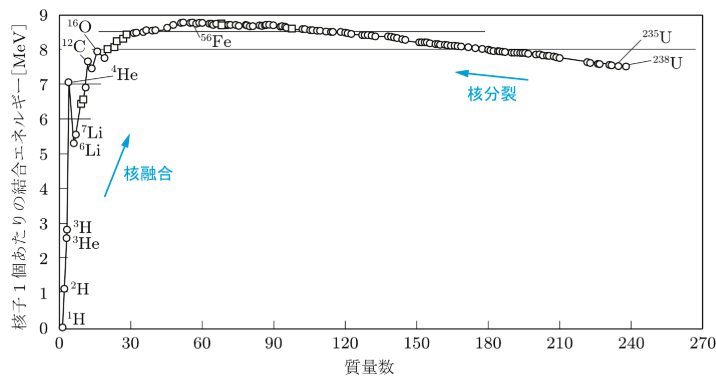


図 12: 核子 1 個あたりの結合エネルギーと質量数。

コラム

コラム 26 (酸素がない宇宙で太陽が燃えているのは何故?)

太陽系の起源は約 50 億年前と考えられている。物理学がそろう始めた 19 世紀末、太陽のエネルギー源は何か、という大問題が解けずにいた。(当時、太陽の年齢は 3 億年以上ということしかわかっていなかったが) 単純に化学反応で説明するには寿命が長すぎたのだ。ケルビンとヘルムホルツ (von Helmholtz, H.L.F. 1821–94) は「太陽は大きな重力で収縮しているため、周囲に熱を放出する」という説を考えたが、それでも太陽年齢は 2000 万年以上にはならなかった。

決定的な理論となったのは、アインシュタインが 1905 年に提出した相対性理論による、 $E = mc^2$ という式である。この式から、1920 年、天文学者エディントン (Eddington, A.S. 1882–1944) は、太陽内部での水素からヘリウムへの核融合の可能性を指摘している。太陽が水素でみたまわっていることが 1925 年にわかり、1930 年代に物理学者チャンドラセカール (Chandrasekhar, S. 1910–95) とベータ (Bethe, H. 1906–2005) によって核融合の理論が進むと、太陽のエネルギー源が核融合反応であることがようやく明らかになる。

このコラムのタイトルにした疑問はよく科学館に寄せられる質問だそう。核融合反応は物理的な結合エネルギーの組み替えで発生している反応であり、化学的燃焼とは違うので酸素は不要なのである。

9.3 人体に対する放射線の影響 — 未知な要素の多い現実

自然界には、放射線がある程度存在しており、皆無ではない。どれだけ人体が被曝すると危険なのか、という明確な数字がわかっているわけでもない。

放射能と放射線の測定単位

§9.1.2 で述べたように、放射線を出す性質のことを放射能という。この能力をもった物質のことを放射性物質という。これらの違いは、よく電球で例えられる。「電球（放射性物質）は、光を出す能力（放射能）を持っており、実際に光（放射線）を出す」（図 13）。

放射能と放射線量の測定には次の単位が使われる。

- ベクレル [Bq] は放射能の強さの単位。1 秒間に 1 個の原子核が崩壊するとき、1 Bq.
- グレイ [Gy] は放射線が物質に与えるエネルギー（吸収線量）の単位。物質 1 kg あたり、1 J のエネルギーを吸収するとき、1 Gy。

被曝量の測定単位

人体が放射線を受けることを被曝という。人体への影響は、被曝した吸収線量が同じでも放射線の種類やエネルギーによって、また被曝する器官や臓器によっても異なる。そこで、表 6 の係数で補正した

$$\text{等価線量 [Sv]} = \text{吸収線量} \times \text{放射線の種類やエネルギーに応じた係数} \quad (6)$$

および

$$\text{実行線量 [Sv]} = \sum_{\text{全身}} (\text{等価線量} \times \text{臓器ごとの係数}) \quad (7)$$

を用いる。シーベルト (Sv) は、これらの線量の単位である。

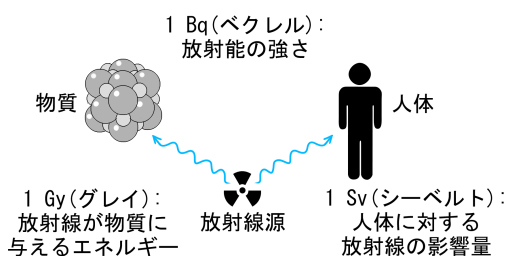


図 14: 放射能と放射線量の単位。

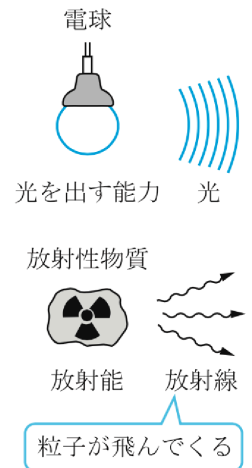


図 13: 放射能と放射線。

Antoine Becquerel (1852–1908)
Louis H. Gray (1905–65)
Rolf M. Sievert (1896–1966)

等価線量を計算する際の係数

α 線: $1 \text{ Sv} = \frac{1}{20} \text{ Gy}$
 β 線: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$
 γ 線: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$

表 6: 測定された Bq から、 μSv に変換する係数。例えば、成人が ^{134}Cs 由来の放射能 1000 Bq を含む食品を食べた場合、 $1000 \times 0.019 = 19 \mu\text{Sv}$ の放射線量を受け取ったことになる。

	幼児	少年	青年	成人
ヨウ素 ^{131}I	0.075	0.038	0.025	0.016
ヨウ素 ^{133}I	0.017	0.0072	0.0049	0.0031
セシウム ^{134}Cs	0.013	0.014	0.019	0.019
セシウム ^{137}Cs	0.0097	0.01	0.013	0.013

人体に対する影響

皮膚に近いところや細胞分裂のさかんなところほど（骨髄・リンパ節などの造血器官や生殖腺など）放射線の影響が大きいとされている。しかし、被曝の危険性について、明確な数字がわかっているわけでもない。

$mSv = 10^{-3} Sv$
 (ミリ)
 $\mu Sv = 10^{-6} Sv$
 (マイクロ)

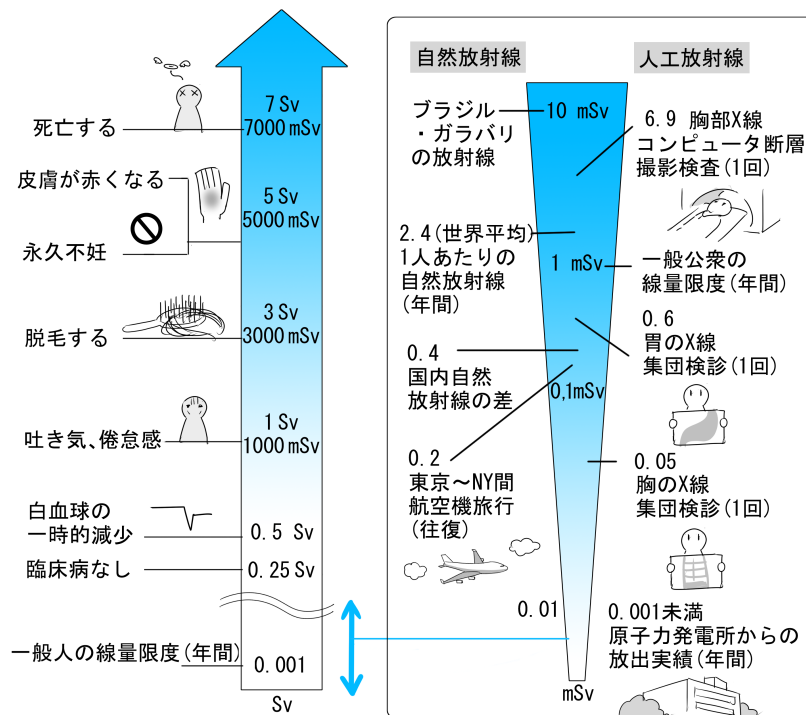


図 15: 人体に対する被曝の影響。図の左側は致死量に至るスケール，図の右側は日常生活で存在するスケールを拡大したもの。自然界に存在する放射線と人工的な放射線がある。

食品中の放射性物質

放射性物質が体内に入ると一定期間体内に残るので、内部被曝になる。2012年4月から厚生労働省は、「長期的な観点から、より一層、食品の安全と安心を確保するために」食品に対する安全基準を変更した(図16)。上限を下げて厳しくしたもので、内部被曝が、年間を通じて1 mSvを超えない値になるように設定されている。この基準値を上回ったものは出荷できない。

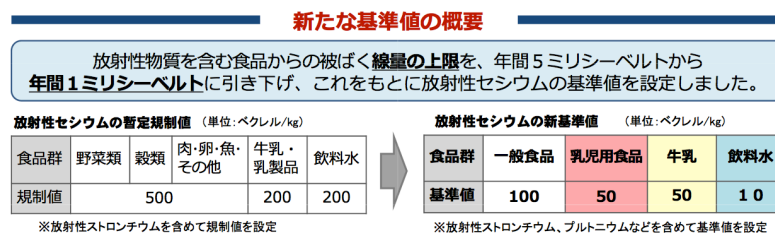


図 16: 食品に対する厚生労働省の新基準(2012年4月から)。[厚生労働省 web ページ]

福島第一原子力発電所からの放射線

2011年3月11日、東日本大震災の津波で被災した福島第一原子力発電所から、大量の放射性物質が大気中に放出された。その量はヨウ素¹³¹Iとセシウム¹³⁷Csに換算した合計値として、63京Bq(*1)とも90京Bq(*2)とも言われている(京 = 10¹⁶)。原発から半径20km以内は、警戒区域とされ2年後の現在でも立ち入りが制限されている。事故発生後1年の推定積算放射線量 20 mSv (3.2 μSv/h) を目安に特定避難勧奨がされている。事故後1年間の積算放射線量の推計は最高で508.1 mSv(大熊町小入野)だった。原子炉建屋の間にある排気筒では、10 Sv (1時間浴び続けると、高い確率で死亡する線量)も記録されている。

(*1) 原子力安全・保安院,
(2011年4月12日)
(*2) 東京電力福島原子
力発電所事故調査委員会.
(2012年7月5日)

原子力エネルギーの長所と短所

原子力を利用した発電には良い面も悪い面もある。簡単にまとめると、次のようになる。

- 長所 (a) 火力発電よりもコストの安い電力が得られる。
(b) 硫化物などの大気汚染の原因となる物質を出さない。
(c) 原料の調達できる場所が世界に広く分布している。
- 短所 (a) 原子炉から出る灰や廃棄物は放射能を帯びていて、処理が難しい。
(b) 兵器に転用される危険性がある。
(c) プルトニウムは化学的にも毒性がある。
(d) ひとたび事故が起こると何世代にもわたる負の遺産になる。

Topic 放射性廃棄物の問題

原子力発電所や核燃料製造施設などからは、利用後の放射性同位体が廃棄物として発生する。また、病院の検査部門からはガンマ線源の廃棄物が発生する。このような放射性物質を含む廃棄物を放射性廃棄物という。

多量の放射線被曝は人体にとって害になる。原子力発電では、燃焼されずに残るウラン 238/235 の他、ストロンチウムやセシウムなどが発生する。これらは表5に示したように、いずれも半減期が長く、中には半減期数万年の原子核も存在する。後世の人類の負担にならないように処理する必要があるが、結局は隔離・保管するしか方法がない。

日本の方針では、放射性廃棄物を再処理してウラン 238/235 とプルトニウムを取り出した後、残った高レベル放射性廃棄物をガラス固化して地上管理施設で冷却・保管し(30年~50年)、その後は地層処分して数年以上に渡り隔離・保管することになっている。

コラム 27 (鉄より原子番号の大きな元素はどこでできた?)

核融合も核分裂も、エネルギー的に一番安定な鉄 ^{56}Fe まで反応が進むことを説明した。宇宙の歴史は、ビッグバンと呼ばれる大爆発で1つの点から始まったことが分かっている。137億年前の誕生直後の宇宙は、高温の素粒子が飛び回る空間で満たされていたが、宇宙の膨張と共に温度が冷え、素粒子が徐々に結合して元素になっていった。

宇宙を満たしている元素の大部分は、水素とヘリウムである。これらのガスが重力によって集まると核融合で点火して燃える星となる。こうして太陽は50億年間、輝いている。だが、水素がヘリウムに、ヘリウムがリチウムに、といった核融合サイクルは鉄までいくと終了する。星は鉄のコアを中心に残して冷却してゆくはずだ。鉄以上の原子番号をもつ元素は、宇宙のどこで作られたのだろうか。

この答えは、超新星爆発と呼ばれる星の一生の最後の大爆発である、と考えられている。ここでは、星(恒星; 燃えて輝く星)の行く末について説明しよう。

恒星はガスの塊である。星の大きさを決めるのは、星の質量による重力(引力)と、核融合燃焼によるガスの膨張する力(斥力)のつりあいである(正確にはガスの圧力勾配である)。核融合でエネルギーを放出していく星は、質量をエネルギーに転換していくので、次第に軽くなる。したがって、重力が弱くなり、星は徐々に大きく膨らむことになる。

燃料がなくなった星は冷却を始める。そうすると、外向きの力がなくなるので星は縮み始めることになる(重力崩壊)。どこまで収縮するのは、はじめの星の大きさによって違う運命になる。

- 星の質量が太陽程度であれば、星はゆっくりと冷却し、自身の重力を電子の縮退圧(電子の取りうる最小エネルギー)で支えられる高密度な星、白色矮星 (white dwarf) になる。およそ地球の大きさに太陽質量の $1/4$ 程度が凝縮する星である。
- 星の質量が太陽の1.4倍以上あると、電子では支えられない。星は重力崩壊を起こし、急激につぶれてゆき、中心部の鉄の原子は押しつぶされて電子と陽子が合体して電気的に中性になる。中性子だけの塊になり、中性子星 (neutron star) になる。半径10kmほどに太陽程度の質量が詰め込まれた非常に高密度な星である。
- もっとたくさんの物質が中心部の中性子コアに重力崩壊してきたらどうなるだろうか。ものすごい速度で落下してきた物質は突然硬い中性子のコアにぶつかるとはねかえされることになる。これが超新星爆発だ。多量の物質が高密度の小さな領域に集まって一度に大きなエネルギーが解放されることになり、この瞬間に鉄以上の原子が形成されることになる。
- 超新星爆発の後には、中心部には中性子星が残されるか、あるいは中性子も潰されてブラックホール (black-hole) と呼ばれる光さえも脱出できない強い重力の塊になると考えられている。ブラックホールになり得るのは、星の質量が太陽の25倍以上のときだと計算されている。

我々の地球や体内で、鉄よりも重い元素が存在しているのは、かつて宇宙のどこかで超新星爆発で合成された物質が、拡散されたあと再び重力で集まって地球を形成したからなのだ。

コラム 28 (フェルメールの贋作事件)

オランダの画家フェルメール (Johannes Vermeer, 1632–75) は寡作で、現存する作品は 30 数点と少ない。歴史的に贋作事件が続いている。

19 世紀、絵画研究家 Thoré Bürger (トレ・ビュルガー) が Vermeer の作品として認定した絵画は 70 点以上にのぼる。しかし、これらの作品の多くは、その後の研究によって別人の作であることが明らかになり、次々と作品リストから取り除かれていった。20 世紀に入ると、このような動きと逆行するように Vermeer の贋作が現れてくる。中でも最大のスキャンダルといわれるのが Han van Meegeren (ハン・ファン・メーヘレン) による一連の贋作事件である。

この事件は 1945 年ナチス・ドイツの国家元帥 Hermann W. Göring (ヘルマン・ゲーリング) の妻の居城から Vermeer の贋作『キリストと悔恨の女』が押収されたことに端を発する。売却経路の追及によって、Meegeren が逮捕された。オランダの至宝を敵国に売り渡した売国奴としてである。ところが、Meegeren はこの作品は自らが描いた贋作であると告白した。そしてさらに多数の Vermeer の贋作を世に送り出しており、その中には『エマオのキリスト』も含まれていると述べた。『エマオのキリスト』は 1938 年にロッテルダム のボイマンス美術館が購入したものであり、購入額の 54 万ギルダーはオランダ絵画としては過去最高額であった。

絵画の絵の具から放出される放射線測定の結果は、これらの作品が 200 年以上も前のものではないことを示していた。しかし、当初 Meegeren の告白が受け入れられなかったため、彼は法廷で衆人環視の中、贋作を作ってみせたという。『エマオのキリスト』は、現在でもボイマンス美術館の一画に展示されている。

参考 『謎解きフェルメール』(小林頼子・朽木ゆり子著, 新潮社, 2003 年)

書名と発売日決定のお知らせ

本講座のプリントの内容を含んだ書籍が、ようやく完成しました。

真貝寿明著
 日常の「なぜ」に答える物理学
 森北出版, 2200 円 (税別),
 2015 年 10 月 1 日発売
 ISBN 978-4-627-15611-1
 菊版 280 ページ, 図版 400 点以上

