

2. 6. 4 太陽系 46 億年の歴史

宇宙の歴史は 138 億年であるが、太陽と太陽系の惑星は 46 億年前に生まれた若い星である。宇宙の初期にできたファーストスターは、超新星爆発などによって宇宙に多くの元素をばら撒き、それが元になって次の星が生まれ、星の誕生と消滅が繰り返されている。われわれの太陽は、その質量から寿命はおよそ 100 億年と推定されており、今は、星として非常に安定な時期にある。

2. 6. 4. 1 元素の合成

20 世紀になって多くの新元素が発見され、同位体が発見されて、地質の年代測定が精密に行われるようになった。現代物理学や科学技術の発達によって様々な観測手法や理論がうみだされ、地球や太陽系のことが非常に詳しく理解されるようになった。炭素や酸素などの元素の起源、生物の進化、空気の起源、などが明らかにされてきた。

アインシュタインが示したエネルギーと質量の等価の式 $E = mc^2$ から、質量が失われるとそれは莫大なエネルギーに転換されることが分かったが、これは、物質を作るためには、莫大な量のエネルギーが必要であるということも示している。宇宙は、莫大な空間とエネルギーからできており、そのエネルギーの一部は、物質に変換されて存在している。宇宙の圧倒的大部分は、空間（真空）であり、宇宙の組成は、4%が既知のバリオン（陽子や中性子などの「物質」）で残り 96%は未知のもの（ダークエネルギーとダークマター）とされている。

エネルギーから、素粒子が生まれ、素粒子から原子核や原子が作られ、それが原料となって星や銀河が生まれたが、宇宙にある原子の大半は、水素とヘリウムである。

しかし地球や太陽系の他の岩石惑星（水星、金星、火星）には、水素やヘリウム以外の元素、酸素、窒素、ケイ素、鉄などからできている。宇宙の大半は、空間とエネルギーであり、その一部が物質として存在し、その物質の大半は水素とヘリウムであるにも関わらず、地球上には、酸素や炭素や鉄など、宇宙の平均から見ると、ほとんど存在しない希少な元素が満ち溢れている。われわれが日常実感する自然は地球だけであるが、地球は、実際の自然、宇宙の平均からは大きくかけ離れた極めて不自然で特別な存在のひとつである。われわれの周りにありふれ

ている元素は、星の進化の過程で合成された特別な物質である。

軽い原子核同士が反応してより重い原子核ができる反応が「核融合反応」である。星雲から原始星が誕生し、星の内部で安定した核融合が進行し、自力で発光するようになると主系列星と呼ばれる恒星になる。太陽のような恒星の内部では、核融合反応が起こりエネルギーを放出する。

太陽で起こっている水素核融合反応（水素→重水素→ ${}^3\text{He}$ → ${}^4\text{He}$ ）には、300万Kの温度と高圧力が必要であるため、それよりも低温の太陽表面（6000K）では核融合反応は起こらない。大昔の人たちは太陽が燃えていると考えたが、太陽の表面は核融合反応が起こるような高温ではなく、中心部の核融合反応の結果生じた、莫大なエネルギーが表面に現われて、明るく輝いて見えており、太陽は燃えていない（燃えている場所は見えない）。

このような核融合反応の前後では、質量欠損が生じており、失われた質量がエネルギーに転換され、恒星は莫大な熱と光を発生する。核融合によって質量がエネルギーに転換される発熱反応は、軽い原子から順に続き、鉄原子まで続くが、鉄よりも重い元素では、核融合反応は吸熱反応となる（核分裂反応の方が発熱反応となる）ため、それ以上の反応は自然には起こらない。エネルギーを放出する反応は自発的に起こりうるが、エネルギーを必要とする反応は、どこかから、そのエネルギーを補給しない限り起こらないので、恒星が進化して新たな元素の合成工場となっても、その上限は、鉄（ ${}^{56}\text{Fe}$ ）までである。

星の中で、どの元素（原子）まで合成できるかは、恒星の質量と年齢、その他の環境によって決まるため、全ての恒星で鉄までの元素合成ができる訳ではないが、上限は鉄である。

太陽の質量の0.46~8倍の質量を持つ恒星では、水素からヘリウムが合成され、続いて、炭素などの元素が合成され、星の寿命が尽きる頃に、より重い元素が合成されていく。重い星ほど寿命が短く、軽い星ほど寿命が長い。太陽の質量では、寿命はおおよそ100億年である。現在の太陽は、誕生後（核融合が始まってから）46億年たっているが、主に水素からヘリウムが作られる核融合反応が進行中であり、太陽大気に含まれているその他の元素は、太陽起源のものではない。

太陽の質量の8倍以上の質量を持つ大きな恒星では、酸素、ネオンからマグネシウムまでの元素の合成が進み、質量が10倍以上の恒星であればケイ素や鉄の合成までが可能となる。

質量の大きい恒星は、非常に寿命が短いため、夜空に観測される星のほとんどは、質量が小さく安定した核融合を長く続けることができる主系列の恒星である。

主系列に含まれない非常に大きな質量を持つ巨大な恒星は、一気に核融合が進行

し、短寿命（数百万年程度）で超新星爆発を起こす。太陽が100億年ほどの寿命を持つことと比較すると、巨大な星の寿命は極端に短い。恒星内元素合成（核融合反応）では作ることができない重い元素は、この超新星爆発によって放出される莫大なエネルギーによって合成されるものと考えられている。

フレッド・ホイール（1915～2001年、英国）によって「超新星元素合成」の機構が提唱された（1954年）。爆発の大きなエネルギーによって、軽い原子は中性子を捕獲（ r 過程）して重くなり、その原子が崩壊することによって、より原子番号が大きな元素が合成されるという中性子捕獲過程などの元素合成が研究されている。超新星爆発によって、様々な種類の重い元素が合成され、宇宙空間にばら撒かれ、これが原料となって次世代の星が作られてきた。

夜空に突然明るい星が現れる現象、「新星（nova）」が、古代より知られており、19世紀になって、さらに明るい「超新星（supernova）」現象が発見された。超新星爆発の発生頻度は、銀河系内では100年に1回程度といわれており、観測される機会は非常に少ない。紀元185年から1604年までに7つの超新星が発見されているが、それ以降は銀河系内では超新星は観測されていない。

系外銀河（銀河系以外の銀河）の超新星爆発は、遠すぎて肉眼ではみづらいが、1885年にはじめての系外超新星が発見され（アンドロメダ銀河）、2回目の発見は1987年の大マゼラン星雲（局部銀河群のひとつで銀河系の伴銀河）の超新星爆発（SN 1987A）である。その時の宇宙ニュートリノが、日本（小柴昌俊ら、観測施設はカミオカンデ）、ロシア、米国で計測された。肉眼で見えるものとしてはケプラーの超新星（SN 1604）から380年ぶりであり、近代の天文学が初めて観測した超新星爆発ということになる。これ以降は、肉眼で見られる超新星は現われていない。

恒星内合成と超新星爆発によって作られた元素が、宇宙空間にばらまかれ、次の星の原料となる。非常に若い星である太陽の大気には様々な元素が観測されている。同じ太陽系の地球には、水素から超ウラン元素まで100種類以上の元素が存在しているが、ほとんどの元素は太陽が作ったものではなく、これまで誕生と消滅を繰り返してきた星が宇宙にばら撒いてきたものである。

2. 6. 4. 2 分子雲 (Molecular cloud)

星が作られる過程を説明する時、その原料は、宇宙にただよう「ガス」や「ちり」と表現される。この場合の「ガス」は分子や原子、「ちり」は固体のようなものがイメージされる。しかし、よく知られる大気圧の空気を、 0°C 、 1atm の理想気体とすると、体積 1cm^3 あたりの分子の数は、 2.69×10^{19} 個であるのに対して、宇宙空間では、物質が多い場所であっても、その密度は、 1cm^3 あたり水素原子 1 個程度である。宇宙空間のガスとは、われわれが知っているようなガス分子の集まりとは程遠い。宇宙にただよう「ガス」は、圧力や分子間力とは無縁のばらばらに存在する原子や分子であり、われわれが知っている気体でも液体でもない。

宇宙にただようガスが集まって密度が高くなる場所があり、これを分子雲と呼ぶ。分子雲の中でも特に密度が高い塊を「分子雲コア」と呼び、その代表的な大きさは、直径が 100 万光年（銀河系の 10 倍）、質量は太陽の 10 万倍、温度は 25K 、物質の密度は $10^5 \sim 10^6$ 個/ cm^3 ほどである。

分子雲コアは、平均的な宇宙に比べると非常に高温であり、密度は 10 万～100 万倍も高いが、地球の気温に比べると非常に低温で、地球の空気と比べると密度は 14 桁も希薄である。

非常に希薄な物質が集まっている分子雲コアも地球から観測すると後方の星の光を遮るため、黒い雲のようにみえるため「暗黒星雲、dark nebula」と呼ばれている。しかし、暗黒星雲は星雲ではなく、希薄な分子の集まりであり、まだ星がない。

密度の高い分子雲コアができると、次第に周囲のガスやちりを集めるようになる。物質の分布は、完全に対称ではないため、やがていずれかの方向に回転するようになる。回転によってつぶれ円盤状になった分子雲コアの中心には原始星が誕生し、周囲のガスを集めてさらに大きくなっていく。

原始星は、重力（位置エネルギー）によって光る（光を放出する）。原始星は誕生から数千万年の間に、重力による収縮で中心部の温度と圧力が上がり、核融合が起こる条件が整う。核融合が安定して進行する星は、明るい恒星となり、主系列星と呼ばれる「星」が誕生する。

地球から観測されるほとんどの星がいずれかのタイプの主系列星として進化するが、星が惑星系を作り、そこに生命が誕生するには、数十億年の時間が必要であり、太陽ほどのちょうどよい質量の恒星系（寿命は約 100 億年）が必要である。

2. 6. 4. 3 惑星の誕生

太陽は、ひとつの分子雲の中のガスが集まって作られたが、同じ分子雲から生まれた兄弟星は 100 個ほどあったと推定されている。しかしその所在は分かっておらず、欧州宇宙機関 ESA のガイア探査機が、太陽の兄弟星を含む銀河系の詳細な地図を作るための調査を行っている。

太陽系ができる時、ガスが集まって太陽やガス惑星（木星、土星）が形成され、チリが集まって金星や地球のような岩石惑星ができた。太陽系の惑星がどのようにしてできたのか、まだ謎が多いが、隕石や地球の地質の調査、同位体の分析、高度なコンピュータ・シミュレーションの発達などによって、惑星科学が急速に進歩している。最新の科学に基づいて太陽と太陽系 46 億年の歴史を紹介する書籍も多い。

分子雲の質量は太陽の 10 万倍ほどあり、太陽系の原料となった分子雲の「ガス」や「チリ」は、ひとつの恒星の残骸ではなく、非常に多くの恒星の残骸が集まってできていると考えられている。したがって、もしチリ（固体）がそのまま集まって太陽系が作られたのであれば、太陽系内の元素の同位体存在比は、場所によって異なっているはずである。しかし地球の鉱物、太陽系起源の隕石、月の石などに含まれる様々な元素（マグネシウムなど）を調べると、その同位体比はほぼ一定の比率になっており、太陽系内の同位体比は、どこでもあまり変わらない。このことから、原始太陽系のチリは、一度、蒸発して混じり合い、その後、成長したのと考えられている。チリの大きさは、100nm ほどと推定されるが、小さなチリの間には引力が働かず、チリどうしの「接着力」も非常に弱いため、どのようにして成長するのかよく分かっておらず、その機構を解明するための研究・実験やシミュレーションが行われている。

チリが何らかの仕組みで集まって、その大きさが 10km ほどになると「微惑星」と呼ばれ、同じ軌道上に数多くの微惑星ができる。太陽からの距離がほぼ等しい同じ軌道上にできた、いくつもの微惑星の中から、大きい微惑星が小さい微惑星を少しずつ取り込んでいくことが繰り返され、やがて、半径 3000km ほどの「原始惑星」が完成する。

天体は、このくらい大きくなると自らの質量による重力によって、形はほぼ球形になり、太陽の周りを正円軌道で周回するようになる。大きさによっては、太陽に落下して消滅する惑星や太陽系から飛び出してしまう惑星もあるが、火星軌道の内側には、数 10 個の原始惑星ができあがったと考えられている。

原始惑星ができるとき、原始太陽系全体を包んでいた円盤状のガス雲は太陽に落下したり、太陽からの紫外線で散逸したりしてやがて消失する。原始惑星を円軌道にとどめていたガス雲の力がなくなると、原始惑星同士の引力の影響が強くなり、原始惑星の軌道は楕円軌道に移行し、惑星の軌道の交差や衝突が始まる。

コンピュータ・シミュレーションによる研究によると、同じ軌道上で、何度も大きな衝突が起こり、同じ軌道上には、それぞれひとつずつの惑星が残った。火星軌道の内側には、水星（半径 2400km）、金星（半径 6000km）、地球（半径 6400km）、火星（半径 3400km）の4つの惑星が形成された。

惑星は、外側の軌道ほど周回距離が長いので、チリやガスが多く、大きくなりやすい。しかし、火星は地球の外側の軌道にあるのに質量は地球の10分の1しかない。火星が小さいことの謎は、解明されていないが、火星だけは、大きな衝突がなかったため原始惑星のまま残ったという説や木星の大きな重力による影響説などがある。

太陽、地球、太陽系の惑星は大昔から詳しく研究されてきた。地球の成り立ちについては、地質の調査、隕石の研究、月の石の研究、惑星探査などを通じて様々な研究が行われ、地球物理学や地球化学が発達してきた。

地球は46億年前に微惑星が衝突・合体を繰り返して作られた。微惑星には放射性物質が含まれ、その崩壊熱と衝突のエネルギーで高温となった地球は溶け、重い元素が中心部に沈み金属の地球の核ができた。重いものが沈む時のポテンシャルエネルギーが熱となり、これを地球の原始の熱と呼び、地球は熱を内部に溜めこんだ。一方、地殻中に大量に存在するウランとトリウムとカリウム（ ^{40}K ）は放射性物質であり、現在も崩壊熱を出し続けている。地球には、原始の熱と原子の崩壊熱があり、太陽からの輻射熱と宇宙空間への放射とがバランスしている。これまでの研究から、地球が宇宙に放出している熱は、 $44.2 \times 10^{12}\text{W}$ 、地殻中のウランとトリウムの崩壊熱は $7 \times 10^{12}\text{W}$ 、カリウムの崩壊熱は $4 \times 10^{12}\text{W}$ となっていたが、マントル中の崩壊熱が見積もられていなかった。東北大学ニュートリノ科学研究所が、旧カミオカンデを改造したカムランドを使って放射性物質の崩壊に伴って放出される「反ニュートリノ」を8年近く観測、最近、その結果を発表した。マントル中の崩壊熱は $10 \times 10^{12}\text{W}$ と見積もられ、地球内部の放射性物質の崩壊熱は合計 $21 \times 10^{12}\text{W}$ となり、宇宙に放出している熱の半分をまかなっていることが分かった。したがって、「原始の熱」が半分あり、それによって中心核は、マントルよりも高温を維持することができている。

地球の内部は地殻、マントル、核などの多層構造となっているが、中心核の上の外核のみが液体であり、その対流によって地磁気生まれ、地球は危険な太陽風


から守られている。地磁気の変化は一般の生活にも重要であるため、気象庁・地磁気観測所では地磁気の観測結果や磁気嵐速報などを公開している。惑星や衛星は、星の形成後は、他の星との衝突がない限り、宇宙空間に放熱し続け、冷えて固まるだけである。火星には大きな火山活動などがみられないが、地球は今も生きた惑星である。

カムランドの観測の結果、地球の原始の熱と原子の崩壊熱が見積もられ、地球が冷えて固まらない理由が科学的に説明された。原始の熱は、地球創世記に多くの微惑星が落下した時の運動エネルギーや重くなって沈んだ鉄の位置エネルギーなどが中心核に蓄えられたものであり、原子の熱はウランとカリウムの放射性同位体の崩壊熱である。ウランの崩壊は、地殻中でヘリウムを生成し、カリウムの崩壊は空気中にアルゴンを生成している。

1995年に「系外惑星」（太陽系以外の恒星系の惑星）が発見された。自分で光らない惑星は観測が容易ではなかったが、2008年頃より画像処理技術などが進歩し、小さな系外惑星でも発見ができるようになり、2015年までに1900個もの惑星が発見・確定されている。NASAのホームページでは系外惑星の情報が頻繁に更新されている。系外惑星の研究によって、太陽系の惑星から得られてきたこれまでの常識が覆されそうだという。異常に軽く巨大な惑星、炭素とダイヤモンドでできている惑星、公転周期が異常に長い惑星、公転軌道が逆回転の惑星など従来の理論では説明ができない惑星が次々に見つかっている。

2. 6. 5 地球 46 億年の歴史と空気の起源

図 2-6-4 に 45 億 6700 万年という地球の年表を非常に簡単に示す。地球 46 億年の歴史を解説する書籍が数多く出版され、科学番組も多い。ここでは、ロバート・ハイゼン著の『地球進化 46 億年の物語：「青い惑星」はいつかにしてできたのか』を参考にした。「第 1 章：誕生」から「第 10 章：緑の地球」までの区分と名称は、ハイゼンによる。

	138億年前	宇宙の開闢 太陽系の原料	時空の始まり、無から有へ ビッグバン 恒星の元素合成、超新星合成、分子雲		
	45億6700万年前	第1章：誕生 太陽系・地球の形成			
地質時代 冥王代	0～5000万年	第2章：大衝突	月の形成		地球とテアの衝突
	5000万～1億年	第3章：黒い地球	最初の玄武岩の殻		冷却、地殻の出現
	1億年～2億年	第4章：青い地球	海洋の形成		海の出現
	2億年～5億年	第5章：灰色の地球	最初の花崗岩の殻		大陸の出現
	5億年～10億年	第6章：生きている地球	生命の起源		炭素などの原材料 左旋性のアミノ酸・右旋性の糖
始生代	10億年～27億年	第7章：赤い地球	光合成と 大酸化イベント		生命体による酸素の発生 最初の大酸化イベント
原生代	27億年～37億年	第8章：退屈な10億年	鉱物の大変化		超大陸コロンビア 縞状鉄鉱層BIFの形成
	37億年～40億年	第9章：白い地球	全球凍結と 温暖化サイクル		第二の大酸化イベント 大気中へ酸素が出現 真核細胞の出現 超大陸ロディニアの分裂 スノーボール/ホットハウスサイクル
顕生代	40億年～ 45億4200万年	第10章：緑の地球	陸上生物圏の出現		酸素濃度の上昇、第三の大酸化 大陸の移動 五回の生物大絶滅 地球の磁場は50万年毎に反転

参考：“地球進化46億年の物語”、Rハイゼン

図 2-6-4 地球の歴史（第 3～第 10 章の名称は R ハイゼンによる）

ロバート.M.ハイゼン（1946 年～、米国）は、米国のアポロ宇宙船やソ連の探査機ルナが持ち帰った月の石を分析・研究した米国の地球物理学者で「生物が作った多様性 鉱物進化論」を提唱している。『地球進化 46 億年の物語』は、専門書ではなく、日本語版がブルーバックスとなっている一般向けの啓蒙書である。非常に丁寧で専門外の人にも分かりやすい解説になっており、このような本には珍しく、図表や写真、イラストなどが非常に少ないので、文章から想像力を働かせて学ぶ地球の歴史書である。

2. 6. 5. 1 ジャイアント・インパクト

138 億年という宇宙の年齢からすると、われわれの太陽は、宇宙が生まれて 92 億年もたってから生まれた非常に若い恒星系である。太陽の年齢は 46 億年。ほぼ同じ頃にできた地球の年齢も約 46 億年である。分子雲コアに形成された、星が自らの核融合で光り始めると、主系列星と呼ばれる恒星が誕生する。その時、回転する分子雲のいたるところにガスやチリが集まって小さな星、微惑星が生まれ、微惑星が衝突合体を繰り返して惑星が形成されていく。地球もそのようにしてできた惑星のひとつであり、多くの書籍で、地球の年齢を太陽の年齢と同じ 46 億年としている。ハイゼンの本のタイトルもそうになっているが、中を読むと、地球が生まれたのは、今から 45 億 6700 万年前であり、「地球ゼロ年」は、その後、月が形成された時、45 億 4200 万年前となっている。現在定説となっている、地球創世記のジャイアント・インパクト説のシナリオでは、46 億年よりももう少し後に原始地球が誕生、さらにその後の衝突によって月と現在の地球が掲載された時を地球の誕生、地球元年としている。

地球の唯一の衛星、「月」は最も地球に近い天体であり、地球の歴史に極めて重要な役割を果たしてきた。月の存在を考えずに、地球の誕生や、その後の環境変化、現在やこれからのことを議論することができない。

月の質量は、地球の 80 分の 1 もある。太陽系の惑星には、多くの衛星があるが、非常に大きな衛星であっても、親惑星の質量の 1000 分の 1 以下というのが普通である。月は例外的に巨大な衛星である。月は、地球上からはっきりと肉眼でも観測ができるほど大きい。

自転する惑星には、大きな歳差運動があり、自転軸は大きく変化するのが普通である。しかし、現在の地球には、大きな歳差運動がなく、その周期は 25800 年と長い。地球は安定して自転しているため、極端に大きな気候変動がない。これは、巨大な衛星、月の潮汐力が大きく寄与しているためであり。地球は巨大な月のおかげでぐらつかずに回転している。

大昔から月の創世の謎を探る研究が行われきた。最も長く支持されてきた有望な説は、ジョージ・ハワード・ダーウィン（1845～1912 年、イングランド）が提唱した、月は地球から分かれたという「分裂説」（1898 年）であった。ジョージ・ダーウィンは、進化生物学で有名なチャールズ・ダーウィンの息子である。分裂説の他にも、同時に星間物質から作られたという兄弟星説、別の場所にあった月が偶然接近してきたという地球捕獲説などもあったが、いずれも月と地球の力学的

関係や、物質の性質を矛盾なく説明することができなかった。

しかし、近年、様々な観測データとコンピュータ・シミュレーションによる高度な科学的研究が行われるようになり、分裂説、捕獲説などは否定され、「ジャイアント・インパクト説 (giant impact theory、大衝突説)」が最も有力な月の成因説となった。

最初のジャイアント・インパクト説は 1946 年に発表されたが、あまり注目されることがなかった。1960 年代末に有人宇宙船アポロ (米国) や無人探査機ルナ (ソ連) が持ち帰った月の石の分析が大きな決め手になって 1975 年にジャイアント・インパクト説が再提唱された。これは「月の石の証言」と呼ばれ、鉱物の科学的分析、特に酸素同位体や軽元素の分析から、月の起源の研究が進んだ。月の石の証言だけでなく、アポロ計画によって急速に発達したコンピュータ技術によって、詳細なシミュレーションが可能となり、ジャイアント・インパクト説は最も有力な学説として広く支持されるようになった。

しかし、ジャイアント・インパクトのシミュレーションは、非常に難しく、簡単にはその後の結果、すなわち現在の地球と月の関係を正確に説明することができなかった。研究が進むなかで、非常に詳細な初期値を与えると、驚くほど正確に現在を説明できることがわかってきた。ジャイアント・インパクト説のシミュレーションの解から、次のような地球創世記が描かれている。

45 億 6700 万年前、同じ軌道上に原始惑星「原始地球」と「ティア (Theia)」が生まれ、45 億 4200 万年前に、この二つの惑星は衝突した。

太陽系の創世記には、同じ軌道上 (太陽から同じ距離にある公転面) には、多数の微惑星 (planetesimal) があり、これが相互に合体して大きくなった原始惑星 (protoplanet) も数多く存在した。原始惑星同士は、同じ軌道上にあり、衝突を繰り返して次第に大きな惑星が形成されていった。その結果、現在、太陽系には、同じ軌道上には、それぞれひとつずつの惑星しか存在しない。

原始地球とティアの衝突もよくある原始惑星の衝突のひとつであり、これをジャイアント・インパクトと呼ぶ。

ティアは、太陽と地球のラグランジュ点にあった地球のトロヤ群 (Earth Trojan、地球に付随する小惑星) のひとつである。ティアは、次第に大きくなり、現在の火星と同じくらい大きな質量 (原始地球の 40% もの質量) となったため、軌道が乱れて原始地球と衝突した。

地球とティアの衝突は、中心をそれ、ティアは地球の横をかすめるように非常に浅い角度で接触したが、蒸発して消滅した。現在、ティアの痕跡はどこにもなく、シミュレーションにおける「仮想の天体」である。

ジャイアント・インパクトの結果、ティアは消滅、原始地球はより大きな惑星となった。ティアの中心核は原始地球に沈み、地球は大きな鉄のコアを持つようになった。破壊されたティアの破片と地球の大量のマントルは、宇宙空間へ飛散し消滅したが、ティアの残骸と地球のマントルが溶けて混ざりあい、地球の周辺には、新たな凝集が起こり、月が形成された。

天体には、ロッシュ限界という距離があり、それよりも近いところにある天体は惑星の潮汐力によって破壊される。彗星や小惑星が太陽系内の惑星に接近しすぎると、惑星の大きな重力によって潮汐分裂する現象が観測されている。地球のロッシュ限界は、1万8000km、地球の表面からは1万1000kmの距離であり、それより低い高度にある天体は、地球の潮汐力によって破壊されてしまう。

しかし、最初に現れた月と地球との距離は24000km、月は、地球のロッシュ限界よりもわずかに外側に形成された。月の位置がもっと近ければ、地球の潮汐力によってばらばらになりもっと小さな星が残ったのかも知れないが、月は破壊・分裂されることなく、その巨大な大きさのまま衛星として残った。なお、ロッシュ限界とは、重力で形成されている天体（液体または剛体が自重で固まっている天体）に働く潮汐力に関するものであり、人工衛星や宇宙ステーションのような物体は、溶接、接着、接合などで形が保たれているため、地球に近い低高度にあっても潮汐力で破壊されることがない。SF映画などでは、地球に接近する微小天体がロッシュ限界内に入って潮汐力でばらばらになり、その破片が、大気中で燃えて流れ星のようになって降り注ぐシーンが描写されることがある。潮汐力という力は非常に大きく、現在も月を変形させ、地球の海水も膨張する。

原始地球とティアのジャイアント・インパクトの結果生まれた二つの天体、地球（earth）と月（moon）の距離は、わずか24000km。地球の直径のわずか2倍ほどの距離にできた月の光景を地上から見る如果能够できれば、とてつもなく大きな星が見えたはずであるが、まだ地球はマグマオーシャンと呼ばれる、どろどろに溶けた表面を持つ星であり、生物は現われていない。

ティアの痕跡は全く残っていないにも関わらず、このような詳細なシナリオが示されているのは、コンピュータ・シミュレーションによる、この解のみが、現在の地球と月の関係を非常によく説明しているからである。

現在の月は、地球から38万kmも離れている。地球と月の力学的なメカニズムは次のように説明される。

惑星の公転軌道と公転速度はほとんど変わることがない。創世記の多くの惑星が太陽に落下していくか、あるいは太陽系から飛び出してしまふかのいずれかであり、軌道に残った惑星はあまり大きく軌道を変えることがない。最新の研究が

ら、惑星間で軌道が入れ替わることがあるらしいということが分かってきたが、地球に関しては創世記より軌道が変わっていない。したがって、地球の公転軌道・速度、すなわち「1年」に要する時間は、ほとんど変わっていない。

一方、創世記の地球と月の様子を計算すると、地球の自転速度は1回転に5時間、1年に1750回転（1年は1750日）、月の公転速度は1回転に84時間（1ヶ月は84時間）となる。現在の地球の自転速度は、24時間、1年は365日、1ヶ月29日であるから、創世記の地球は非常に高速で回転、月の公転速度も非常に高速であった。

地球の自転速度は、月の公転速度よりも大きく、月は地球の潮汐力によって加速され、地球と月の角運動量が保存され、月の公転エネルギーと地球の自転エネルギーの総和が保存される。太陽と惑星の関係を表すケプラーの法則を地球と月の関係にあてはめると、月はまだ定位置にない。地球と太陽の距離は大きく変わっていないが、地球と月の距離は次第に離れていく。地球も、月からの潮汐力を受けるため、次第にその自転速度が遅くなっていく。

月が誕生してから45億年間、この潮汐破壊というメカニズムが続いており、月は次第に遠ざかり、地球の自転は徐々に遅くなっている。現在も地球の自転速度は月の公転速度よりも大きいため、この関係は変わらず、この変化はこれからも続くため、1日の時間（自転速度）、1年の日数（1年間の回転数）、1ヶ月の日数（月の公転速度）は変わっていく。

地球と月の距離が、今も離れ続けていることを直接測定するために、アポロ15号（米国）とルナ17号（ソ連）が月面上に設置したレーザー反射鏡を用いた精密測定が1970年代から行われている。米国やフランスの天文台などが強力なレーザー光線を用いて地球と月の距離を測定しており、現在、月は平均38万kmの位置にあり、月面は、27日周期で10cmほど変形、平均して3.8cm/年の速度で遠ざかっていることが観測されている。日本では、潮汐力の観測のために、海上保安庁の下里水路観測所が月面の距離観測を行っている。

なお、人類が月面着陸したというのは米国の捏造であるという「アポロ計画陰謀論」というものがあり、このレーザー反射鏡（コーナークューブ）もしばしば議論的になっている。NASA当局が科学的な反論を行っているが、21世紀になって日本の「かぐや」など高精度の機器を搭載する探査機が、月面のアポロ着陸地点の詳細な撮影に成功している。

地球には、潮汐を記録するリズムタイト（縞状堆積物）という鉱物があり、その地質調査結果から月が離れる速度が推定されていたが、潮汐リズムタイトの測定結果は、レーザー反射鏡による測定結果ともよく一致している。さらに、4億年前の古代の珊瑚の化石からは、当時の地球の1年は400日以上であったことが推定されており、

このような結果からも地球の自転が次第に遅くなっていることが確認されている。

図に示すように、地球（原始地球）の形成は、地球歴では紀元前となり、現在の地球、地球歴ゼロ年は、ジャイアント・インパクトによって月が形成された時となっている。ジャイアント・インパクトという用語は、当初、地球と月の形成理論に用いられたが、現在では、太陽系の他の惑星についても、同じ用語が用いられている。金星は、公転方向と逆方向に自転しており、天王星は自転軸が横転しているが、これらも各惑星に起こったとされるジャイアント・インパクトによって説明されている。惑星の形成時、同じ軌道上には多くの微惑星が存在するため、中には大きな天体同士の衝突も多かったと考えられている。一方、惑星の順番からすると火星だけが例外的に質量が小さくなっているが、これは、火星が偶然に大きなジャイアント・インパクトを経験していないためだと考えられている。

原始地球とティアとのジャイアント・インパクトによってできた巨大な衛星・月の出現によって「奇跡の惑星」地球の歴史が始まり、地球には、海の出現、大陸の出現、生命の出現、大気の生成など大きなイベントが数多く起こることになる。

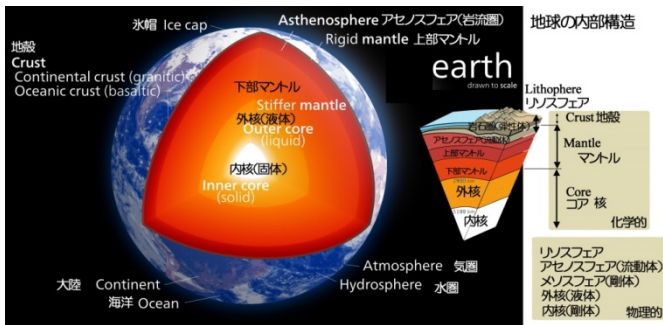


図 2-6-5-地球の構造

一般的に惑星には大きな歳差運動があり、地軸は、ぐらぐらと大きく変化するが、地球の場合は、月という大きな衛星を持つおかげで極端な地軸の傾きや大きな歳差運動がない。地球の地軸は、公転面に対して 23.43 度傾き、この絶妙な角度によって中緯度地域には暖かい季節と寒い季節があり、四季がある。日照時間が変化し夏至や冬至といった現象も起こる。巨大な衛星・月のお陰で、地球は非常に安定した星となっているが、しかし、一方では、地球ほど頻繁に大きな変化が起こる惑星は、太陽系には他にない。特に、生命、すなわち炭素を中心とした有機物の存在は、地球の進化に非常に大きく関わっている。

図 2-6-5 は、現在調べられている地球の構造である（Wikipedia の図を用いて日本

語の解説を加えた)。深部は、高温・高圧のコア（鉄とマグネシウムの合金）であり、創世記の原始の熱が寄与しているが、マントルや表層部はウランやカリウムの原子核崩壊熱によって温められている。誕生から46億年たつ地球は、今もなお冷えて固まっていない生きた惑星である。

2. 6. 5. 2 大気の世界・空気の歴史

表に太陽系の地球型惑星（岩石惑星）の大気組成を示す。

水素は、拡散しやすく質量が小さい地球型惑星の重力では留めておくことができない。水素は、宇宙空間に逃げてしまい、大気圧が極端に低い水星を例外とすると、大気中の濃度は低く、ほとんど含まれない。岩石惑星の大気には、水素が含まれないため、表面の鉱物は酸素によって酸化され、通常は錆びた「赤い惑星」となる。

水星の大気が特殊なのは、太陽に極めて近く、太陽の熱や重力による大きな影響を受けているためであるが、岩石惑星の基本的な大気は、二酸化炭素と窒素である。金星の現在の大気中の二酸化炭素濃度は96%、火星の二酸化炭素濃度は95%である。金星と火星の大気圧は大きく異なるが、組成（二酸化炭素と窒素）はよく似ている。

創世記の地球の

大気も一般的な岩石惑星と同様の組成であったと推定されている。金星と地球は質量（重力）が同程度であるため、創世記の地球の大気の量も同程度であり、大

表 2-6-2-地球型惑星の大気組成(%)

	水星	金星	地球	火星
大気圧 kPa	0.1×10^{-6}	9300	101	0.9
成分%				
水素	22		0.5ppm	
ヘリウム	6	12ppm	5.2ppm	
酸素	42		20.95	0.13
窒素		3.5	78.02	2.7
CO ₂		96.5	0.038	95.32
Ar		70ppm	0.930	1.6
Ne		7ppm	18ppm	2.5ppm
H ₂ O		0.002	1.0	0.03
Na	29			
表面温度	700/90	733/228	333/184	293/133
平均温度	440	737	288	210
自転周期	59	243	1日	1.03
公転周期	88	0.615	1年	1.88

水星の最低温度は夜間、金星の最低温度は大気上層部、地球の温度幅は地域、季節による。

気圧や組成は現在の金星と同程度であったと考えられている。

しかし、現在の金星の地表の大気圧は 93 気圧、現在の地球の大気とは大きく異なっている。

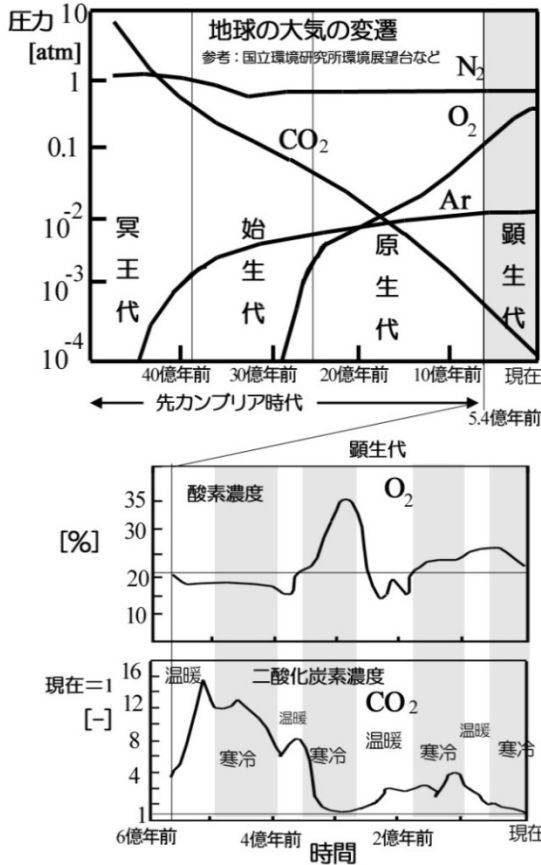


図 2-6-6-地球の大気の変遷

また、岩石惑星では、酸素は地表面の鉱物を酸化するのにほとんどが消費されてしまうため、大気には酸素はほとんど残らない。金星も火星も大気中にはほとんど酸素がない。しかし、地球には、海と生命が誕生し他の惑星とは、大きく異なる歴史をたどることになった。

地球は大量の液体の水を保有し、そのなかから生まれた生命体が作りだす酸素が全惑星的な循環を作り出し、特殊な環境が生まれた。地球の大気からは、二酸化

炭素が激減、代わりに高濃度の酸素が発生した。

金星は太陽に近いが、全体が厚い雲に覆われているため太陽からの入射エネルギーは地球よりも小さい。しかし表に示すように金星の表面温度は非常に高い。これは金星大気中の二酸化炭素による温室効果の結果であり、惑星の温暖化（温室効果ガスによる熱暴走）の研究が、非常に古くから行われている。スヴァンテ・アレニウス（1859～1927年、スウェーデン）は、金星の大気から惑星の温暖化を研究、これを理解することによって、地球の温室効果や氷河期を説明、二酸化炭素の量が地表温度に影響を与えることを示した（1896年）。現在の金星と地球では、大気圧も大気組成も大きく異なるが、アレニウスは二酸化炭素による温室効果の研究を100年以上も前に行っている。

図2-2-28に、地球の大気の変遷を示す。地球の大気の歴史については、全てが明らかになっている訳ではないが、地学の教科書には、およそこのような変化が示されている。（国立環境研究所の環境展望台・環境学習HPなどに詳しい解説がある）

上のグラフは、大気の組成を圧力（分圧、対数目盛）で示し、下のグラフは、時間軸を拡大し、直近6億年の大気中の酸素の濃度と二酸化炭素の濃度を現在の濃度を1とした相対濃度で示している。図2-2-26に示すように「地質時代」は、冥王代、始生代（太古代）、原生代と進み、顕生代となって、本格的な生物の時代がおとずれる。顕生代（けんせいだい）とは、「肉眼で見える大きさの生物が生息する時代」という意味で、今から5億4200万年前に始まったとされ、現代につながっている。（図2-2-28では、グラフの右端の部分）地球の歴史は46億年であるが、微生物を除く古生物学の歴史は、5億年ほど前から始まる。

大気の組成は、46億年間かけて大きく変化してきており、現在では、金星や火星とは全く異なる組成となっている。

原始の地球（月創世後）には、水素とヘリウムの原始大気があり、これが宇宙空間に散逸した後に、高温高圧の水蒸気の大気となり、次に、二酸化炭素と窒素を主成分とする大気が現れた。図2-2-25は、これ以降の大気の組成変化を表しており、図の左端を読むとはじめの大気は、二酸化炭素が90%、窒素が10%、圧力は10気圧ほどである。

原始地球の表面は、数多くの微惑星の衝突によって高温のマグマオーシャンとなっていたが、やがて微惑星の数が減り、地球との衝突も減り、地球は冷え始めた。大気を覆っていた水蒸気の液化が起こり、液体の水（高温高圧の液体の水）が現れ、地表面を冷やし始め、「海」が誕生した（ハイゼンによる「第4章青い地球」）。

大気の主成分である二酸化炭素が海に吸収され、石灰岩などになって海底に堆積、大気中の二酸化炭素は、指数関数的に激減した。気圧も激減、ほとんど変化しなかった窒素が大気の主成分となった。一方、ほぼ同じ大気組成であった金星の場合、太陽に近過ぎて海が形成・維持されなかったために、二酸化炭素が吸収されず、主成分は二酸化炭素のままとなった。金星大気は厚い雲に覆われ、太陽からのエネルギー流入は小さくなり、有効温度（輻射と反射から得られる天体の温度）は227Kしかないが、二酸化炭素の大気が維持されたため、温室効果が暴走して平均温度は、700Kを越える惑星となった。

二酸化炭素が激減した地球では、太陽からの強い紫外線によって水蒸気が分解、大気中に酸素が発生した。しかし発生した酸素は、全て地球表面の金属の酸化に消費され、大気中には残らなかった。

40億年前の地球は、二酸化炭素の激減によって大気圧が大きく低下、窒素と二酸化炭素に加えてわずかに増え始めたアルゴンからなる大気組成となった（図2-2-26の始生代）。

続いて、水中に生命（シアノバクテリア）が登場し、光合成が始まった。

27億年前にシアノバクテリア（藍色細菌）が大量に発生、光合成によって消費された大気中の二酸化炭素は、さらに減少した。地球は、誕生からわずか6億年後には、初めの生命が誕生、46億年の歴史のほとんどは、生命とともにある。光合成によって発生した酸素は、水中や地表面（火山活動などによってできはじめた陸地）の鉄を酸化して消費されるため、ここでも、まだ酸素は大気中には現れてこない。

紫外線によって発生した酸素も、生物によって作り出された酸素も、いずれも地球を錆びさせるために消費されてしまい大気中には酸素は残らなかった。

地球は、何度も「大酸化イベント」を経験する（ハイゼン「第7章赤い地球」）。かつて地球規模の大酸化が起こった証拠のひとつとして、それ以前の時代の岩石に含まれる試料を採取、空気中に取り出すとすぐに金属が酸化して壊れてしまう、ということがある。その時代の鉱物は酸化されておらず、大気には酸素がなかったことが分かる。

やがて一瞬にして劇的な変化（イベント）が起こることのない「第8章退屈な10億年」（ハイゼン）となるが、この時代の地球上の鉱物には多くの変化が現れ、巨大大陸が登場、分裂、移動が起こる。ここで地球規模のイベントがないというのは、数千年程度の非常に短い期間での劇的な変化がないという意味である。地球史的には、変化が乏しい退屈な時代とされるが、非常にゆっくりと大きな変化が起こっている。

大陸間海洋は変化し、海水中の酸素は、全ての鉄イオンを酸化し、縞状鉄鉱床

(Banded Iron Formation、BIF)を形成した。BIFは、顕生代以前(先カンブリア紀)に海底に堆積した酸化鉄の堆積鉱床であり、38億年~19億年前の年代の地層から鉄鉱石が産出している。現在、採掘される鉄鉱石の大半がこの時に作られたものである。それ以降の時代には、BIFは形成されておらず、地球表面上の鉄は全て酸化された。その後、鉄を全て酸化し海水中で飽和になった酸素の大気中への放出が始まり、大気中の酸素濃度が急激に上昇し、酸素、アルゴン、二酸化炭素の濃度がほとんど同じになった。(図2-2-27、20億年前)

二酸化炭素の減少は、さらに続き、アルゴンの増加も続くが、酸素の増加がアルゴンの増加を上回り、酸素は窒素に次ぐ成分になっていく。大気中の酸素が増え、オゾンが発生することによって太陽からの紫外線が遮られ、徐々に陸上生物が息息可能な環境ができてくるが、まだ酸素濃度が低いため、オゾンは地表付近にある。酸素がない時代の生物からみると猛毒の酸素やオゾンが地球を覆い始める。

7億年ほど前から、スノーボールアースとホットハウス・アースと呼ばれる全球凍結と温暖化のサイクルの繰り返しが始まる(ハイゼン「第9章白い地球」)。スノーボールアース仮説は、20世紀末に提唱された新しい仮説である。それまでの定説は、スノーボールアースはなかったというもので、もし地球の水が全て氷る全球凍結が起こると、太陽光線を反射し、熱を吸収しなくなり、正のフィードバックが働いて凍結からは抜け出せなくなるが、現在、地球に海が存在することは、これまでには、全球凍結が一度もなかった、というものであった。新たなスノーボールアース仮説では、火山活動による温暖化ガスの蓄積などによって全球凍結からの脱出が可能と考え、全球凍結と温暖化のサイクルによって生物の大量絶滅と急速な進化が繰り返され、酸素呼吸をする生物や多細胞生物が出現したと考えられている。

4億年前に、酸素濃度の上昇によって、地表付近にあったオゾンが押し上げられ、上空にオゾン層(ozonosphereまたはozone layer)が形成された。オゾン層は、太陽からの有害な波長を持つ紫外線の多くを吸収し、地上の生態系を保護するようになった。太陽圏内は、太陽からの強力な危険な放射線に曝されているが、大気とオゾン層の形成によって地球表面は生物にとって安全な場所となっていた。現在のオゾン層は、成層圏に多く存在し、特に高度20~25kmのところまで濃くなっている。

レイリー卿(ジョン・ウィリアム・ストラット)は、下層大気では、紫外線が遮閉されないことを発見し、紫外線の多くは、高層大気で遮閉されていることを発見した(1913年)。

ゴードン・ドブソン（1889～1976年、英国）は、隕石の研究から対流圏と成層圏の界面付近で急激な温度上昇があることを発見し、その理由を、紫外線とオゾンの反応によるものとして、オゾン層の存在を証明した（1920年）。現在、オゾン層のオゾンの量は、「ドブソン単位（D.U.）」、 0°C 、1atm に換算した時のオゾン層の厚さとして示されるようになっている。たとえば、300D.U.とは、地表 1atm に 3mm のオゾンの層があることに相当し、上空のオゾン層が、220D.U.以下の状態となれば「オゾンホール」が発生しているとされる。化学物質としてのオゾンが発見されたのは1839年と古いが、大気中にオゾン層があることが発見されてからはまだ100年もたっていない。オゾン層で最も濃度が高い部分のオゾン濃度は10ppm程度。オゾンは強い酸化作用が産業利用されているが、毒性ガスであるため、多くの国では作業環境基準を0.05～0.1ppm以下としている。

誕生期から対数グラフ上で直線状に激減してきた二酸化炭素は、6億年前くらいには、大気の主成分ではなく微量成分となった。図 2-2-27 の下のグラフには、直近6億年を拡大した二酸化炭素の変遷を示しているが、何度も二酸化炭素の増加減少が繰返えされ、この間に、温暖化と寒冷化も繰返えされている。温暖化・寒冷化に関わる因子としては、水蒸気と二酸化炭素の影響が大きいと考えられている。また、メタンハイドレートから突然噴き出すメタンも大きく影響したと考えられている。現在、メタンハイドレートが海底や永久凍土など、様々なところで発見されているが、メタンの温暖化係数は非常に大きいため、もし、メタンハイドレートから大量のメタンが放出されると、極めて大きな気候変動が起こると考えられる。

顕生代を細かくみると、古い方から、古生代（カンブリア紀、デボン紀、石炭紀など6分類）、中生代（三畳紀、ジュラ紀、白亜紀）、新生代（古第三紀、新第三紀、第四紀）となっている。顕生代のはじめは、まだ現在のような酸素濃度にはなっていないが、主成分は現在と同じ、窒素、酸素、アルゴンの順となっており、大気圧も同程度である。

顕生代以降も気温は大きく変化しており温暖期と寒冷期を繰り返しているが、この間に二酸化炭素の濃度も非常に大きく変化している。現在の大気中の二酸化炭素濃度は300～400ppmと非常に低いが、過去6億年間の濃度は数倍から15倍程度と高く、この間の植物の光合成と大気中の高い酸素濃度が関係していると思われる。

生物は大絶滅（ほとんどの種が絶滅するイベント）を何度か繰り返しているが、最も大きいものは約2億5千万年前、生物の95%が地球上から消えたとされている。ハイゼンの解説では、その原因は今も研究中とされているが、NHKが作った

テレビの特集番組「地球大進化~46億年・人類への旅(2003年)」では、(ほぼ断定的に)、次のように説明している。

地球の核からマントルにかけて起こったスーパーブルームによって地表面に直径1000kmほどの溶岩が噴出、地殻中にあった大量のメタンハイドレートが大気中に噴出、莫大な量の温暖化ガスの噴出によって気温は50℃以上も上昇、メタンは空気中の酸素と反応して、それまで30%以上もあった酸素濃度は急激に低下、高温、低酸素となった地球環境の急変によってほとんどの生物が絶滅したという。図2-2-28でも酸素濃度がいきなり低下、二酸化炭素濃度が上昇している。スーパーブルームを説明するブルームテクトニクスは1990年代に日本の研究者が提唱した地球物理学の学説である。

顕生代・新生代・第四紀は、今から258万8000年前に始まり(人類の祖先はおよそ200万年前に出現)、そのうち最も新しい「完新世」が今から11,700年前に始まり、1万年後に最終氷期が終わり、現代に至っている。(右のグラフの右端でほとんど表示されない)。なお、完新世の開始は、第四紀学会によってグリーンランドの氷床で定義されており、酸素同位体比などから判別できるという。

地球は、非常に活発に変化する生きた惑星であり、顕生代に入ってもなお大陸は分裂・移動を続けており、大きな地殻変動、気候変動が繰り返されている。

近年、議論されている地球の温暖化や寒冷化、急激な気候変動は、これまでの地球の歴史からみると極めてわずかな変化であり、観測期間も非常に短いため、その解析や今後の予測には大規模なコンピュータシミュレーションが行われている。過去に何度もあった大きな環境変化が起これば、人類の文明の持続可能性や存続が危うくなるため、社会的には地球温暖化や寒冷化の影響は非常に大きいと考えられている。「人為的なものに起因する気候の変動」が研究されている。

気候モデルや地球温暖化に関する報告書、IPCC評価報告書が発行されているが、あまりにも複雑で素人には簡単には理解ができない。地球の温暖化、寒冷化に最も大きな影響を与えているのは太陽であるが、太陽の活動は一定しておらず100年単位や1000年単位の周期での変動も起こっている。次に影響が大きいのは海洋であり、水蒸気は最も大きな温室効果ガスであり、雲の発生は寒冷化の原因にもなり得る。メタンハイドレート、火山ガス、二酸化炭素などの温室効果ガスの影響も重要である。様々な要因が絡み合っている複雑な問題を解くために世界から多くの研究者が集まって、議論が行われている。

気圏、水圏、地圏における大きな物質と熱の循環が、地球環境(気候変動)に大きな影響をおよぼしており、その詳細なメカニズムの研究が待たれる。

空気分離プロセスを考える時に、原料空気中に含まれるアルゴンの濃度は、非常

に重要であるが、地球史の教科書にはほとんど出てこない。地球の大気の歴史の主役は、もっぱら酸素と二酸化炭素である。多くの書籍では、ここに示したように酸素と二酸化炭素の関係から大気（空気）を説明しているが、創世期よりずっと変化していない窒素と、最初からずっと増え続けているアルゴンについては、ほとんど触れられないことがない。もし説明があるとしても、「アルゴンはカリウムの一部が変化した」との記述にとどまることが多い。

地球のアルゴンの起源については、第3章に示す。

補足 2-21：地球史に用いられる単位 Ma

地質や天文の本を読むと Ma という単位をよくみかける。これは Megaannum の略で、今から百万年前という意味である。現在から数えた年数には year ではなく annum という単位が用いられ、ka (1000 年前)、Ga (10 億年前) など SI の別の接頭語とも組み合わされる。mya (million year ago) という表記もあったが、近代の地質学では、推奨されておらず Ma (メガアナム、100 万年前) と書くのが一般的。

Ma や Ga は、BP (before present、現在よりの年代測定) という指標に用いられるが、どこを現在とするかというのが問題となる。一般的には、生物学、言語学では文字通り現在を基点とし、地質学では 1950 年を基点とすることになっている。これは、 ^{14}C 年代測定法が 1950 年頃に確立されたこと、大気圏内の核実験によって、1952 年以降の年代測定には ^{14}C が使用できなくなったことから、基点が 1950 年とされるようになっている。1950 年以降の地質年代については ^{14}C が用いられず、地質年代の時計は止まったままで、BP にはマイナスがない。

補足 2-22：紫外線の人体への影響

太陽光線に含まれる紫外線は、ヒトが紫外線に被曝した時の影響などから、波長によって3種類、UV-A (波長 315~380nm)、UV-B (315~280nm)、UV-C (200~280nm) に分けられている。地上に届く紫外線のほとんどが UV-A である。

UV-A (315~380nm) は、オゾン層を通過、5.6%が大気を通過して地表に届き、冬季、朝夕でも減衰しない。真皮層に届き、細胞の活性化に寄与し、タンパク質の変成、皮膚の老化促進などを起こす。

UV-B は、ほとんどがオゾン層によって遮閉されるが、一部が地表に届く（地上に届く紫外線の10%ほど）。表皮層に影響するため、色素細胞がメラニンを作って防御し日焼けが起こる。ビタミン D も生成する。皮膚の炎症や皮膚がんの原因と

なり、強い UV-B は、目の細胞に極めて有害なため、電気溶接作業や雪山では、UV-B 防御のための保護メガネが必要である。

UV-C (200~280nm) は、生物の DNA の吸収スペクトルが 250nm 付近にあるため、生体への破壊性が強く、非常に危険である。通常は、オゾン層と酸素分子によって遮閉され、ほとんど地表には届かないため、あまり注意が払われることがなかったが、近年はオゾン層破壊が問題となっている。オゾンホールができると危険な UV-C が地上に届き、多くの生物に著しい影響を与えると考えられている。太陽光以外では、UV-C は、強い殺菌作用があり、滅菌・殺菌装置などに使用されている。

VUV (10~200nm) は、3 つの紫外線よりもさらに波長が短い高エネルギー紫外線であるが、酸素や窒素分子に吸収され地上には届かない。真空中しか進めないという意味で、真空紫外線 (vacuum ultraviolet) と呼ばれる。

PA 分類 (Protection grade of UVA) : UVA 防御力の指標。日焼け後すぐに黒くなる即時黒化現象をもとに算出される。PA から PA++++まで 5 段階表示。

SPF (Sun Protection Factor) : UVB 防御力の指標。被験者が紅斑を引き起こす最小の紫外線量に比べ、塗布時に何倍の紫外線にまで耐えられるかを示す指標。

2. 6. 5. 3 水の歴史

空気と同じく水は重要な資源である。

地球の歴史は46億年前に始まるが、原始の海はかなり早い時期に形成されている。原始地球とティアのジャイアント・インパクトによって、地球と月ができたが、誕生時の地球の表面は、マグマの熱と二酸化炭素の温室効果で非常に高温であり、原始大気の組成は二酸化炭素と窒素と水蒸気であった。地球軌道ににあった微惑星は、次々と地球に落下・衝突していったが、やがてその数も減って、衝突の回数も減ってきたため、衝突のエネルギーが減少、地球は冷え始めた。惑星は、他の星との衝突がない限りはエネルギーが補充されず、宇宙空間へ放熱し冷えて固まっていくのが普通である。しかし、地球は創世記の原始の熱が中心にあり、表面にも放射性物質の崩壊熱があるため、46億年たった現在も活発に活動を続ける生きた星である。

宇宙の中で生命が誕生するのに適した環境と考えられている天文学上の領域を「ハビタブルゾーン(HZ, habitable zone)」と呼ぶ。恒星に非常に近い惑星では、水は気体となり、恒星から遠い惑星では水は固体となり、ちょうど液体の水が存在できる場所は限られている。現在の太陽系では、金星は太陽に近すぎ、火星は遠すぎる。太陽系の多くの惑星、衛星が水分子を持っているが、水が液体で存在できるハビタブルゾーンの天体は地球だけである。しかし、地球も創世記は非常に高温であったため、液体の水は存在することができなかった。

微惑星の衝突が減り、地球が冷却に転じると、大気中の水蒸気の液化が始まった。最初の雨は300°Cの液体の水となって地上に降り注いだ。高温高圧の大気の中、最初の雨は高温である。(水の臨界温度は374°C、臨界圧力は、22MPa)。

推定では、地球全土に降った雨の降雨量は年間10000mm、これが1000年ほど続き、地表面は水に覆われた。蒸発がなければ、1000年間で水深10000mにもなる大量の液体の水である。地表を覆っていたどろどろに溶けた岩石の海、マグマ・オーシャンは、雨によって冷やされて固化し、その上に原始の海が誕生した。

これまでに発見された火山岩から最古の海の証拠が得られており、海の形成は約43億年前と推定されている。誕生からわずか3億年で、既に地球には水(海)が形成された。地球の表面は、全て水で覆われた(陸地はまだない)。

大気の主成分である二酸化炭素は海水に溶解、急激に大気中の二酸化炭素濃度が減少したため、温室効果が低減して、さらに地球の温度は下がり大気の圧力も急激に低下した。

水は、様々な物質を溶かすため、地球内部の物質を溶かした海は強酸性であったが、やがて、カルシウムやナトリウムなどを溶かして中和、中性の海が形成されていった。

その後、火山活動によって陸地が形成されるようになり、地球全てを覆っていた海は縮小していった。しかし、原始の海が形成されてから現在まで、43億年間、海は一度も消失することなく存続している。ただし、約8億年～6億年前に、海洋が全て凍結する「全球凍結」が起り、この期間は、液体の海ではなく固体の海になっている。全球凍結後に、大規模な大陸形成が起り、大陸から供給されるナトリウムやカルシウムが海に溶け込み、現在のような塩分濃度の高い海が形成された。

現在、地球の表面の71%の面積は水で覆われており、大きな循環が起っている。この水循環の中には、いくつかの貯水空間がある。図2-2-26に地球の貯水空間を示す。空間の大きさに大きな偏りがあるため、円グラフは左から順に小さな空間を拡大して示している。

一番左のグラフが示すように、塩水は、地球表面の水の量の97.8%を占める。ここでは塩水を3つに分けた資料を出典としたが、海、塩水地下水、塩湖を合計して「海」を98%とする書物も多い。最大の塩湖、カスピ海は、元は同じ地球の海であったが、大陸移動によって内陸湖となり、海とは異なる歴史をたどったため、現在では、海と塩分濃度や生態系などが異なっている。水の星地球の貯水空間のほとんどが海である。

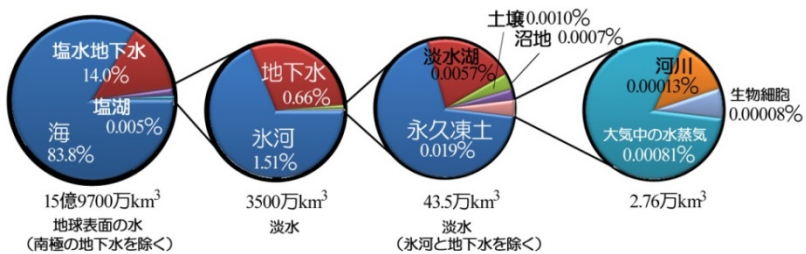


図2-6-7-地球の貯水空間

データは、ジャン・マトリコン著「水の歴史」(創元社、2014年)より

陸上生物、特に水を大量に必要とする人間にとって、水と塩化ナトリウムは、両方が不可欠な物質である。しかし、塩化ナトリウムを大量に含む海水は、人間の生命活動に適さない水である。海水には3.4%の塩分が含まれ、そのうち77.9%が塩化ナトリウムである。これに対して、ヒトと多くの脊椎動物の体の塩分濃度は、

約0.9%であり、これは、現在の生物が現われた時（今から5億年くらい前）の海の塩分濃度に近い。現在の海水の塩分濃度は、これよりもかなり高く、陸上生物は海水中では生きていけない。

海の中の動物は、海水の非常に高い浸透圧から細胞を守る仕組みを持ち、餌から水を補給するだけでなく、海水から余分な塩分を除去して真水を手に入れる高効率の腎臓を持っているため、淡水が得られない環境でも生きていける。

しかし、ヒトは、水も塩も両方必要としているのに、それを海水から直接摂取できるようにはできていない。ヒトの体は、必要な水分は真水（淡水）から、必要な塩分は固体の食塩（食物）からそれぞれ摂取しなければ、生きていけないようにできている。したがって、これだけ大量に存在する海水（塩水）は、人間にとっては、水資源にも塩の資源にもならない。水と塩が分離されて初めて使える資源となる。

「水資源」は、淡水（freshwater、定義として塩分濃度が0.05%以下の水）である。しかし淡水は2.6%しかない。しかも、その大半は氷河と地下水である。図に示すように地球の水の全量は14億 km^3 近くもあるが、海水、氷河、地下水を除く水は、わずか29万 km^3 しか存在しない。地球は水の惑星であるが、陸上生物が利用できる水（真水）は、淡水湖、土壌、水蒸気（降雨、降雪）、川などに限られ、全体の水の量からみるとわずかである。

真水は、21世紀に不足が最も懸念される資源のひとつである。

人間が暮らしていくために必要な水資源（淡水）の多くは、陸地への降水、降雪による水のうち蒸発せずに河川に流れ込んだ「水の流量」に依存している。面積の多くを占める海の上に降る雨は使えず、陸地に降る雨も海に流れ出ると塩水になる。陸に降る雨が海に出るまでの間の流量だけが頼りである。

水不足を表わす指標に「取水水資源比」がある。

取水水資源比＝年間取水量（＝水需要量）／年間河川流量（＝水資源量）

この値は、資源量に対する需要量の比であり、数値が大きいほど水不足となり、40%を越えると水不足が深刻になるとされている。図は、国立環境研究所地球環境研究センターの「ココが知りたい地球温暖化」に掲載されている取水水資源比を示した世界地図である。

河川流量の少ない地域、降水量の少ない地域、人口の多い地域（需要量の多い地域）などで水不足が深刻になっているという。

近年は、アフリカとアジアの途上国において、人口の増加と経済の急成長による一人あたりの生活用水需要量急増が、深刻な水不足を招いている。

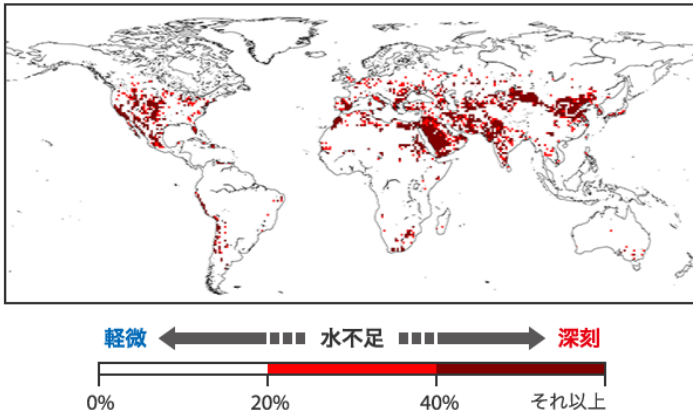


図 2-6-8-「取水水資源比」が示す水不足が深刻な地域

地図をよく見ると日本も例外ではない。比較的降水量の多い日本でも、一人あたりの水資源量は、調査 156 カ国中 91 位、水資源利用率は 49 位である。日本には、無尽蔵なものを無駄遣いすることを「湯水のごとく使う」とする慣用表現があるが、実際には水資源に恵まれている訳ではない。日本の場合、降雨量のうち 1/3 は蒸発、大陸とは異なり河川が非常に短いため、降った雨はすぐに海に流れ出てしまうため取水量は降雨量の 13%にしか過ぎない。一人あたりの水資源量は世界平均の 1/4、イラクと同程度である。

ただし、取水水資源比の指標は 1 年間の値を用いているため、一時的な洪水や季節変動を考慮することができず、本当の水不足を表わすことができていないという評価もなされるようになり、累積取水需要比という新しい指標が研究されている。

年間の河川流量が、非常に大きくても季節によっては必要な水が取水できていない地域が、東南アジア、インド、アフリカなどに多くあり、季節変動を考慮した指標を用いると、水不足が深刻な地域はさらに広がるといわれている。

空気と水は、いずれもヒトの生存に必須のものである。空気は、全ての人に平等な資源である。場所によっては大気汚染があったり、高地では気圧が低かったりということがあがるが、基本的には、どこでもいつでも同じ組成の空気が手に入る。これに対して、水は地理的、社会的に非常に不均衡な資源である。

地球の陸地を流れる水（淡水）の量は、年間 40000km^3 と見積もられ、60 億人の人口で割ると、ひとり当たり利用可能な水の量は 6700m^3 となる。しかし現実の数字は全く異なる。たとえば、アマゾン川流域の人口は全世界の 0.3%であるのに降

水量は全世界の15%である。これに対して、中国の人口は、全世界の21%、降水量は全世界の0.3%しかない。降水量と人口は連動しておらず、雨の多い地域に人口が集中しているというのではない。古代の四大文明（メソポタミア、エジプト、インダス、中国）は、いずれも大河の近くに興ったが、現在の人口密集地帯は必ずしも水が豊富なところにあるわけではない。

いくつかの地域では水不足が深刻化し、複数の国にまたがって流れている河川が多いため、水資源をめぐる国際紛争も絶えない。世界には200以上の国際河川があり、多くの川がいくつもの国を通過し、300以上の河川に関する国際条約があり、国境線の3分の1が河川か湖である。多くの国家が、大きな河川を中心に形成されており、国際紛争の元になっている。これは、日本や英国のように陸地で国境を接していない島国には理解が難しいが、川の支配をめぐる争いは古くから世界中にあり、国連の調査によると、川や地下水をめぐる紛争は世界に300以上あるという。

「20世紀は石油紛争の時代であったが、21世紀は水紛争の時代になる（セラゲルディン世界銀行副総裁）」という予測もある。

国土交通省・水資源政策の政策評価に関する検討委員会に提出された資料「水資源に関する世界の現状、日本の現状」によると、世界の水問題の現状は次のようになっている。

- ・12億人が安全な飲料水を得ることができない。
- ・24億人が下水道等の衛生施設を持っていない。
- ・年間約200万人の子供が水に由来する病気で死亡している。
- ・世界の人口は2025年には80億人に達し、水需要も37%増加する。
- ・日本の降水量は、世界平均の約2倍、人口一人あたりでは世界平均の1/4
- ・日本の水資源量は、世界平均の1/2

世界で深刻化する水問題（飲料水、衛生問題）、水政策について議論することを目的とする世界水フォーラム（World Water Forum、WWF）が1997年より3年毎に開催されている。これは、民間のシンクタンクである世界水会議（World Water Council、WWC）によって運営されており、国連の正式会議ではないが、各国の政府関係者や政府代表が参加しているため、世界の水問題とその政策に関する議論に大きな影響を与えている。日本の上下水道のシステムは、地方自治体主体で開発・運営が行われており、民間企業が一括して引き受けるという例はない。世界的にみると水ビジネスは、国家に後押しされた民間事業が多くなっており、特に欧州と米国では、水供給の民営化が進んでいる。3大水メジャー、ヴェオリア・

エンバイロメント（フランス）、スエズ・リヨネーズ（フランス）、テムズ・ウォーター（英国）の年間売り上げは4兆円を超えている。

ロバート・ボイルの説明のところで、ボイルが発見した水の不思議な性質について触れた。水を他の物質と比べると、その性質には特異なものが非常に多く、全てが科学的に説明されている訳ではない。これまでに知られている水の特徴をまとめると次のようになる。

- 1) 融点が高い。地球上の多くの場所で液体である
- 2) 沸点が高い。大気組成の中では唯一常温で液体になる。
- 3) 臨界温度が高い
- 4) 分子量が小さい物質であるが、分子間相互作用が強い。
- 5) 表面張力が大きい（樹木が大気圧のヘッド以上に水を吸い上げることが可能）
- 6) 粘度が大きい。
- 7) 蒸発潜熱が大きい。
- 8) 4°Cで液体の密度が最大になる。圧力を加えると密度最大の温度が低くなる。
- 9) 融ける時に収縮し、凍る時に膨張する（氷が水に浮く、岩石に浸食が起こる）。
- 10) 圧力を加えると融点が下がる。
- 11) 温度を下げると粘度が大きく増加する。
- 12) 圧力を加えると粘度が下がる。極小値があり、加圧すると粘度が増加する。
- 13) 圧縮率が小さい。
- 14) 膨張率が小さい。
- 15) 比熱が大きい（36°Cで極大）。
- 16) 融解熱が-17°Cで極大になる。
- 17) 熱伝導率は130°Cで最大になる。
- 18) 音速が74°Cで最大になる。
- 19) 電気伝導は230°Cで極大、高温で減少する。
- 20) 誘電率が大きい。
- 21) 水溶液は理想溶液でない。
- 22) 非極性気体の溶解度は、温度を上げると減少し、再び増加に転じる。
- 23) 容易に過冷却にでき、過冷却水には2つの相と第二臨界点がある。
- 24) 電場中でのH⁺/OH⁻イオンの移動度が異常に大きい。
- 25) 水ほど多くの物質を溶かすことのできる液体（溶媒）は他にない。
- 26) 結晶水や水酸基の形で他の結晶や鉱物と結合することができる。非常に安定で、結晶水は200°C、水酸基になったものは600°C以上で加熱分解する。
- 27) 非常に多くの氷の形がある（10種類以上の安定相と準安定相）
- 28) 氷は温度が下がると収縮するが、63Kで膨張に転じる。
- 29) クラスレート・ハイドレート（氷包摂化合物）の構造が何種類もある。
- 30) 2種類の非晶質氷がある。
- 31) お湯は冷水よりも速く凍る。Mpemba効果、タンザニアの中学生エラスト・B・ムベンバが発見（1963年）。理由は未解明

32) 白く凍った氷は、透き通った氷よりも速く融ける。

2.7 素粒子と複合粒子

元素は原子からなり、原子は、原子核と電子からなる。20世紀の初頭に、いくつかの原子模型が提案され、原子核は太陽のようなもので、そのまわりをまわる電子は惑星が回っているようなものという、ラザフォードの原子模型が実際の原子のイメージに近づいた。しかし、量子力学とボーアの原子模型によって、電子は粒子の状態でぐるぐると丸い軌道を回っているのではなく、物質波として波動関数の確率として存在していることが分かった。

小さな階層、 10^9m のメソスコピックよりもさらに小さなミクロスコピックな階層を調べることによって、量子の振る舞いが研究され、量子力学が発展したが、物質の究極である素粒子の研究は今も続けられており、実験物理学の分野には産業ガスの重要顧客が少なくない。

2.7.1 素粒子 (elementary particle)

「基本粒子」(fundamental particle) とは、「内部構造を持たないひとつの粒子」(particle) と定義され、一般的には「素粒子」(elementary particle) と呼ばれることが多い。

素粒子は、物質を構成する、「内部構造を持たない最小の単位」である。

量子は、「物理量の最小単位」であり、素粒子は「物質の最小単位」である。

半世紀ほど前までは、原子核を構成する中性子、陽子、中間子なども素粒子だと思われたことがあるが、現在これらの粒子は内部構造を持ち、より小さな素粒子からなる複合粒子とされている。もし陽子や中性子を素粒子と紹介している本があれば、かなり古い情報に基づいているということになる。

素粒子である電子やクォークは非常に小さく、階層は 10^{-18}m よりも小さい。しかも、この値は、実際の大きさではなく、実験的な上限値がおそらくこのあたりにあるだろうと思われるものが公表されているため、実際はもっと小さいのかも知れない。

素粒子は、内部構造を持たないため「空間的大きさ」を持たないという考えもあり、大きさよりも質量 (単位はエネルギーと同じ) の値を議論されることが多い。電子は点電荷として取り扱っても問題ないことが多いため、大きさが定義されなくてもかまわない、クォークは「クォークの閉じ込め」によって単独では取り出せない素粒子であるから、大きさを議論することがない、といった感じで、特に素粒子の大きさを探求しようと言う研究は聞かれない。

素粒子は、1964年に予言されたヒッグス粒子が2013年に確認されたため、現在は17種類あり、これによって物質の「標準模型 (Standard Model)」が構成されている。

大昔から、物質を構成する基本単位が探索され、物質の根源を探る研究が続けられている。火や水や空気が基本物質だと思われたことがあった。科学が進歩し、空気はいくつかの分子の混合物であり、水は水素と酸素の化合物であることが分かり、やがて、これらの内部構造物である「元素 (element)」の概念にたどり着いた。

元素は、ドミトリ・メンデレーエフ (1834~1907年、ロシア) が元素の周期表を作った時 (1869年) には、いくつもの空欄があったが、未発見の元素は、予言通り次々と埋まり、現在は人工のものを含め118種類が確認されている。

基本物質とするには、数が多いが、物質としての性質を失わない最小単位としての「元素」の存在は、非常に重要な知見となり、周期表は、化学のバイブルとも呼ばれ、化学分野における、反応の分類や体系化、比較の枠組みを与え、元素の性質を簡潔に表わした。

元素は、物質の性質を表わす普通名詞であり、かつては、水素、酸素、炭素などの元素名を社名に入れた会社も多く存在した。

元素を粒子としてみた場合の最小単位は原子(atom)である。

元素と原子は混同されることが多いが、元素は、ある性質を持つ物質の概念であり、数えることはできない。これに対して原子は、「粒子」であり、個数を数えることができる。たとえば、酸素原子には天然に3つの安定同位体が存在し、その混合物が酸素元素という概念を作り出している。

原子は、それ以上分割できない究極のものと考えられ、19世紀までは基本粒子とされていた。ドイツ語のAtomは、分割できないものという意味のギリシア語が語源である。目に見えない小さな何かが、物質を作っていると考えられ、化学の世界に元素の概念が持ち込まれた時、最小単位としての分子や原子が考え出された。

しかし、20世紀になって原子の構造が研究され、原子はさらに分割可能な内部構造を持っており、基本粒子 (素粒子) ではないことが分かった。

原子は原子核と電子から構成されていることが分かり、電子はそれ以上分割できなかったが、原子核はさらに分割ができる複合粒子であることが分かった。

原子核は核子 (陽子と中性子) からなることが分かった。世界中に多くの読者がいるジョージ・ガモフのガモフ全集には、「陽子や中性子のような核子は素粒子」

であると書かれている。ガモフ全集は、1946年英国版が日本語に訳され、科学の情報が少ない時代に、日本でも多くの読者に読まれ、子供たちの科学啓蒙書となったが、その時、素粒子として紹介された陽子は、その後、内部構造を持つことが分かり、素粒子ではないことが分かった。

量子はド・ブローイやボーアが示したように、物質波という波でもあるため、素粒子とは本当に大きさがある「粒子」なのか分からなくなってきたが、「素粒子」はどんどん小さくなっていった。

陽子や中性子の仲間である「バリオン」や「中間子(メソン)」、これらを合わせて「ハドロン」と呼ぶが、原子核の内部の研究のために行われた加速器実験からは、非常に多くの種類のハドロンが発見されるようになった。

元素の数よりも多いハドロンが現れると、これでは、一体何が基本物質(素粒子)なのか分からなくなったが、1960年代には、ハドロンの内部構造が調べられて、ハドロンを構成する素粒子であるクォークのモデルにたどり着いた。

南部陽一郎やゲルマンらの時代に量子色力学(QCD)が確立され、クォークに色荷(電荷や磁荷のようなチャージの一種)の概念が導入された。原子核の中にはプラスの電荷を持つ陽子が含まれており、プラス同士に働く大きな斥力で原子核がバラバラにならないための引力(核力)が必要であり、これが量子色力学によって説明された。

クォークは極めて強い相互作用で結び付けられているため単独で取り出すことはできないが、様々な加速器実験などを経てその存在が証明されている。

現在、3世代6種類のクォークがあることが分かっているが、最後の3つのクォークが小林・益川理論によって予言され(小林誠と益川敏英、1973年)、その存在が1995年に実験によって確認された。理論から35年、実験から13年たってノーベル物理学賞が授与された(2008年)。

産業ガスの領域は、素粒子物理学とはあまり関係がないように思われるかも知れないが、歴史的には、元素の発見、ガスの冷却・液化、超低温技術、真空技術、これらの関連技術と素粒子研究は、非常に密接に関わっている。素粒子研究・高エネルギー研究は、現在も、低温機器、超高純度ガス、ガスの精製装置などを通じて、産業ガスとの関係が強い。

物質の構造を、ガス分子から素粒子まで順番に階層を追って整理する。

- ガスは単原子分子(希ガス)あるいは多原子分子からなる気体である。(10¹⁰m)
 - 分子は原子(10⁻¹⁴m)と分子間力からなる
 - 原子は原子核(10⁻¹⁵m)と電子(<10⁻¹⁸m)からなる。
 - 電子は、「素粒子」である

- 原子核は、核子と核力（強い相互作用）からなる、「複合粒子」である。
- 原子核の核子には、陽子と中性子（バリオン）がある
- 原子核の陽子の数が原子番号であり、この数が「元素」を決める。
- 元素は118種類。第113番のウンウントリウムは二ホニウムになる予定。
- 核子の数の合計が原子の質量数である。
- 同じ元素の原子核は質量数によって異なる「核種」として区別される。
- 原子核は、陽子と中性子をからなる。例外は、中性子を持たない水素（ ^1H ）とリチウム3（ ^6Li ）の2つ。
- 核力を生む「強い相互作用」グルーオンは素粒子である
- 最近見つかったヒッグス粒子を含めて、素粒子は、17種類
- 仮想上の素粒子や未発見の素粒子がある。超対称性粒子、重力子など。

図に、現在よく知られている素粒子の標準模型を示す。

非常に多くの種類の化学物質が、100種類ほどの元素の組み合わせからなり、元素は原子（異なる核種の同位体）からなり、原子は電子と原子核からできており、原子核は、核子（中性子と陽子）と強い相互作用からなることが分かっている。

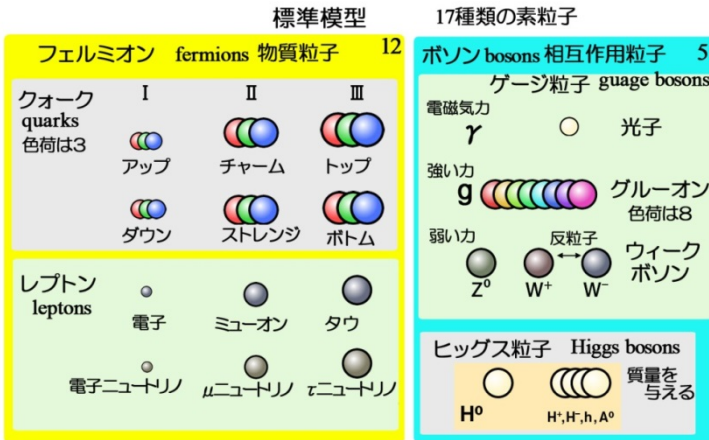


図 2-7-1 素粒子の標準模型（イラストはHiggstanを利用）

ニコラ・カビボ、小林誠、益川敏英の3名がクォークの世代間混合を提唱し、クォークが3つの世代に6種類存在することが分かった。（図の左上）

レプトンは、電荷を持つ荷電レプトンが3種類（電子、ミューオン、タウ粒子）、それぞれの名称に対応した中性レプトンが3種類（電子ニュートリノ、ミュー・ニ

ニュートリノ、タウ・ニュートリノ) がある(図の左下)。

なお、ニュートリノという名前の素粒子がある訳ではなく、共通の性質を持つ3つの中性レプトンを表わす時に「ニュートリノ」という名称が用いられており、それぞれニュートリノには、個別に素粒子としての名前、電子ニュートリノ、 μ ニュートリノ、 τ ニュートリノという名称がある。

レプトンは、合計で6種類あるが、レプトンの3世代構造は、順番に質量が大きくなっている。たとえば、ミューオンは、かつて湯川秀樹が予言した中間子(「ミュー中間子」)だと思われたが、中間子の性質を持たず、その後レプトンであると分かった素粒子である。ミューオンは、電荷が電子と全く同じで、多くの性質が電子に似ている荷電レプトンであるが、電子の206倍もの質量を持っている。電子の仲間であるが、電子に比べて非常に重い素粒子である。

素粒子は17種類あるが、物理学者でなければ、これを全て理解する必要はなさそうである。原子を作るのは、電子、原子核(陽子と中性子は2種類のクォークとグルーオン)と原子核中の核子を結びつけるグルーオンからなるので、アップクォーク、ダウンクォーク、電子の3つの物質粒子(フェルミオン)に光子とグルーオン(ボソン)の2つの力を伝える粒子を加えた合計5種類が重要な素粒子である。要するに、物質の究極をつきつめていくと、アップクォーク、ダウンクォーク、グルーオン、光子、電子の5つから成ると理解すればよさそうである。しかし比較的身近な光子と電子以外の素粒子は、やはりイメージするのが難しい。

なお、図に、クォークとグルーオンが複数あるように示されているが、これは色荷(しきか、color charge)による違いを表しており、素粒子の種類が増えている訳ではない。色荷は、量子色力学における量子状態を区別する量子数のひとつであり、クォークとグルーオンが色荷を持つ。電荷、色荷、スピンなどは、量子の性質を表わす自由度であり、理解しやすいように人間の持つ直感にあてはめて考えられた量子数である。スピンといっても粒子が回転しているのではないように、色荷といっても素粒子に色があるという訳ではない。

なお標準モデルでは、ウィークボソンは粒子と反粒子を両示すようになっているため、図には素粒子が19個あるようにみえるが、種類としては18、重力子が未発見であることを考慮すると、現在の素粒子は17種類である。

原子核という非常に小さな空間に陽子や中性子がぎっしり詰まっていることは、当初、非常に不思議なことであった。陽子はプラス1の電荷を持つため反発するはずであるが、核力という非常に強い力がこれらの斥力に打ち勝って原子核を形

成している。核力は、非常に強いいため、実験や理解が難しく、初めは中間子がこれを受けもつと考えられた（湯川秀樹の中間子論）が、1960年代には、グルーオンの強い相互作用によるものということが明らかとなった。

陽子や中性子の中には、クォークがぎっしり詰まっているが、これもグルーオンを介した強い相互作用によって結びついており、クォークの「閉じ込め」は、混色の組み合わせが無色の時に起こる。

電荷が、プラスとマイナスの中性で安定するように、クォークからなるハドロン（バリオンとメソン）は、色荷が無色の組合せだけが安定して存在することができる。クォークは3色の色荷をもち、反粒子は、それぞれの補色が対応し、3色の組み合わせで無色、あるいは2色の組み合わせで無色となるものが安定となる。グルーオンは、3原色の組み合わせから無色を除いた8色の色荷をもつ。

宇宙創世記の物質の起源が研究されており、それによると、時空が始まり、ビッグバン後の最初の高温の宇宙は、クォークや電子がばらばらに存在し、クォークやグルーオンのスープのような状態（クォークグルーオンプラズマ、QGP）であったとされる。その後、宇宙の温度が低下し、クォークの閉じ込めが始まり、その結果、陽子や中性子が作られ、さらに温度が下がって、原子が作られ、物質が作られた。宇宙が作られた最初の元素は、水素、ヘリウムなどの軽元素だけであったが、やがて星の進化が始まり、星の誕生・消滅の繰り返しによって、重い元素が合成されていった。

素粒子の研究によって、宇宙（時空）と物質の起源の探求が行われている。

2. 7. 2 量子の統計性

量子は、粒子であり波動であり、それまでとは異なる統計力学が必要となった。素粒子や素粒子を組み合わせで作られる複合粒子は、量子統計力学で取り扱われるようになった。

古典的な統計力学は、系の微視的な物理法則から巨視的な性質を導き出すのに用いられる。通常の気体や液体の分子は、極めてその数が多いため、分子の集団として統計的に取り扱うことができ、分子間力が分かれば、古典力学で分子の挙動を取り扱うことができる。

マクスウェル・ボルツマン分布が、熱力学的エントロピーと統計力学を結び付けていることが知られている。しかし、金属内の電子や超流動などの量子効果が現れるような場合、粒子の取り扱いには、古典的な統計力学ではなく量子統計力学的な取り扱いが必要となる。

粒子は2つの統計性のいずれかを持つ。ひとつは、フェルミオン(フェルミ粒子)、もうひとつは、ボソン(ボース粒子)と呼ばれる。

量子の統計性は、場の量子論において重要となるが、特に低温物理学、超流動現象の理解に必要な知見であり、統計性の異なる液体ヘリウムの物性を利用した「超低温希釈冷凍機」が実用化されている。

ボソンは、ボース・アインシュタイン統計に従い、フェルミオンは、フェルミ・ディラック統計に従う粒子として定義される。フェルミオンは、フェルミ分布関数で一つのエネルギー準位にある粒子の数が与えられ、ひとつの状態にひとつしか粒子は存在できないパウリの排他原理に従う粒子であり、スピン角運動量の大きさが半整数 ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$) の量子力学的粒子である(ここで、スピンの単位はプランク単位)。

フェルミオンの代表は、スピン $1/2$ の電子である。排他原理によって原子の軌道電子はひとつの状態にひとつしか存在できないため、同じ軌道上には逆向きのスピンを持つ電子が二つずつしか存在できないことがよく知られている。フェルミオンはエンリコ・フェルミ(1901~1954年、イタリア)に由来する。

ボソン(ボース粒子)は、整数のスピンを持つ量子力学的粒子であり、排他原理に従わないため、1つの体系内であっても同一の量子状態をいくつもの粒子がとることができる。

ボース=アインシュタイン分布関数は、一つのエネルギー準位に入る粒子の数(占有数)を理論的に与える式で、サティエンドラ・ボース(1894~1974年、インド)が見出し(1925年)、ボースの提案に基づいてアインシュタインがまとめたもので、「多数の粒子が1つの量子状態を占めることで現れる物質の状態」をボース=アインシュタイン凝縮とよぶ。

量子の統計性をより簡単な表現で置き換えると、フェルミオンは「物質粒子」、ボソンは「波」、あるいは「相互作用粒子」と考えることができる。たとえば光子はボソン(波)であるから、レーザー光は、同じ状態をいくらでも重ね合わせることが可能となり、強い光を作りだすことができる。

図は、素粒子をフェルミオン/ボソンに分けて示しているが、この統計性は、素粒子だけでなく、複合粒子である核子、原子核などの量子にもあてはまる。

液体ヘリウムは、液体であり、普通は「物質」に見えるが、超流動状態のヘリウムは、量子の「波・ボソン」の性質を持つ。粘性がゼロとなった超流動ヘリウムは、原子1個の隙間を漏れ出し、壁をよじ登るといふ「超流動現象」を示すが、これは、液体ヘリウムがある温度以下になると、物質ではなく波の性質を強く示すようになるためである。

アインシュタインによってボース粒子のボース凝縮（超伝導、超流動、理想ボース気体）が予言されたが、ピョートル・カピッツァ（1894～1984年、ロシア）によってヘリウム4の超流動性が発見され（1937年）、フリッツ・ロンドン（1900～1954年、ドイツ）によって理想ボース気体としてのヘリウム4の転移温度（ボース凝縮温度）が理論的に導かれた（1938年）。

微視的な現象である量子効果は、低温状態（分子や原子の熱運動が小さい状態）でなければ観測することができないが、ヘリウムの場合、絶対零度近辺まで低温にしても（加圧しなければ）固化しないため、液体の状態で、量子効果を巨視的に観察することができる。

素粒子の統計性は、フェルミオン（半整数スピン）とボソン（整数スピン）がスピンから簡単に判別できるが、ヘリウム原子のような複合粒子の統計性については、場の量子論から次のようなルールが得られている。

- ①ボソン（整数スピン）は、いくつ集めても複合粒子はボソンである。
- ②フェルミオン（半整数スピン）は偶数個集まるとボソン（整数スピン）に変わる。
- ③フェルミオン（半整数スピン）は奇数個集まるとフェルミオン（半整数スピン）のままである。

波（ボソン）をいくつ重ねても波であるが、粒子（フェルミオン）が二つ組み合わせられると波になる。たとえば、クォークは、フェルミオンであり、クォークが奇数個集まってできる「バリオン」（陽子や中性子）はフェルミオンである。

原子核は、核子（フェルミオン）と核子をつなぐ素粒子グルーオン（ボソン）からなるので、原子核の統計性は、核子の数の偶数・奇数で決まる。原子核の核子の数は、質量数であるから、原子核の統計性は、原子番号（元素の種類）に関係なく、質量数が偶数か奇数かで決まることになる。

たとえば、質量数が偶数である ^4He 、 ^{40}Ar や ^{16}O 、 ^{18}O はボソン、奇数である ^3He や ^{17}O はフェルミオンである。

非常に多くの原子が、 ^4He と同じボソン（波）であるが、微視的な量子効果が巨視的に観測されるのは、超低温に限られた条件下であるため、超流動は ^4He 特有の現象である。アルゴンや酸素は超低温では固化しており、液体ヘリウム、 ^4He のような超流動を観測することはできない。

なお、 ^3He は、フェルミオンであり、ボース凝縮をしないため液化しても超流動は起こさないが、さらに低温にすると、2個の原子が対になって超伝導や超流動現象を起こすことが1972年に発見された。

2. 7. 3 複合粒子・ハドロン (hadron)

強い相互作用で結びつけられた粒子をハドロンと呼ぶ。

茨城県東海村にある J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) には、大規模なハドロン実験施設がある。

欧州の CERN には、LHC (Large Hadron Collider、大型ハドロン衝突型加速器) があり、ヒッグス粒子の探索などを行っている。ハドロンという言葉自体は、日本語に約されることなく、そのまま報道され、それほど珍しくはない。

ハドロンには 3 つのクォークからなる「バリオン (核子など)」のグループと 2 つのクォークからなる「メソン (中間子)」のグループがある。ここで、ハドロンを構成するクォークの数を 3 つ、2 つとしているが、これは、価クォーク (バレンス・クォーク) の数であって実際のクォークの数ではない。ハドロンの中には、シークォーク (クォークの海) があり、無数のクォークと反クォークが互いに打ち消し合っていて、ペアになっていない価クォークあるいは反価クォークが 2 個あるいは 3 個あり、これがハドロンを性格づけている。

価 (valence) とは、実質的に結合や物性に深く関わっている部分を示している。たとえば、原子の内側の軌道電子は、あまり反応に関与しないので、最外殻の電子を価電子 (valence electron) と呼び、化学反応では、「価電子」の数で議論することが多い。クォークも価クォークが重要となるが、クォーク同士は、強い相互作用で結びついており単独では取り出すことが出来ないため、特に価クォークとは呼ばずに単にクォークと呼ぶことも多い。

陽子や中性子は、アップクォークとダウンクォーク 3 つが組み合わされて作られているが、3 つのクォークの質量を合計した値は、陽子や中性子の質量の 1/50 ほどにしかならない。ハドロンの中には、それだけ強い相互作用による結合エネルギー (=質量) がある。

単独で存在する自由粒子の場合、安定なのは陽子だけで、その他のハドロンは全て不安定である。

中性子も平均寿命 887 秒 (15 分) で崩壊して陽子になるが、原子の中の中性子は原子核の中にあり、ここでは安定である。

発見されているバリオンは、陽子、中性以外にも、ラムダ粒子、シグマ粒子、グザイ粒子、オメガ粒子など非常に数が多い。

中間子 (メソン) は、クォーク 2 個からなるハドロンであり、2 個で無色となるためクォークの色価は補色関係になっている。全ての中間子は不安定で寿命が短く (ほとんどがナノ秒)、パイ中間子、エータ中間子、K 中間子 (ケーオン)、などこ

ちらも種類が多い。中間子は、ボソンであるため排他原理に従わず、相互作用を媒介する粒子として働く。湯川秀樹（1907～1981年、日本）が理論的に予言（1935年）、セシル・パウエル（1903～1969年、イングランド）がパイ中間子を発見した（1947年）、いずれもノーベル物理学賞を受賞した、湯川（1949年）、パウエル（1950年）。

2. 7. 4 複合粒子・原子核 (atomic nucleus)

バリオンのほとんどが寿命の短い複合粒子であるが、陽子だけは、非常に寿命が長い。宇宙ニュートリノの観測で有名になった岐阜県神岡鉱山地下にあるカミオカンデ (KAMIOKANDE) は、本来は、核子の崩壊実験 (Kamioka Neutron Decay Experiment、神岡核子崩壊実験) を行う陽子寿命測定装置である。カミオカンデやスーパーカミオカンデは、大統一理論の候補の多くが予想する「陽子崩壊」を観測することが目的で計画・建設されたが、現在まで、陽子崩壊は観測されず、陽子の寿命は 10^{33} 年以上とされている。

原子核は、最も安定な陽子と中性子という二種類の核子が強く結びついてできている。中性子は不安定なバリオンであり、8分ほどの寿命で崩壊するが、原子核の中にある時は、安定しているため、原子核中の中性子は崩壊しない。

原子核の中の陽子の数が原子番号であり、元素を特徴づけ、原子番号順に並べて表にしたのが元素の周期表である。

水素 (${}^1\text{H}$) とリチウム 3 (${}^3\text{Li}$) を除く全ての核種は原子核に中性子を持っており、原子番号 (陽子数) と中性子数を合計した数が質量数であり、この2つの例外を除くと、質量数は原子番号よりも大きい。

陽子の数 (原子番号) が同じで中性子の数が異なる原子核同士を同位体 (isotope) と呼ぶ。

まれに、自然界 (地球上) にひとつの核種しか存在しない元素 (単核種元素)、ひとつしか安定同位体がない元素 (モノアイソトピック元素) などがあるが、放射性同位体や人工の元素も含めると、核種がひとつだけという元素は存在せず、全ての元素は、非常に数多くの同位体から構成されている。

最も同位体の数が少ない水素で 7、最も多いバリウムでは 40 あり、元素の種類が 118 種類であるのに対して同位体の数は 3160 種類ほどもある。核異性体と呼ばれる崩壊しても元の核種と同じ元素のままである準安定核種も多く、非常に多くの核種が知られている。地球上で確認されている安定同位体が 242 種、天然に存在する放射性同位体が 31 種あるので、人工でない天然の核種は約 270 種ということに

なり、核種のうちの多くが天然のものではなく人工の原子である。

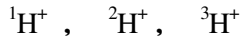
同位体の化学式と粒子記号についてまとめておく。次の記号は、ヘリウムの+2価のイオン（ α 粒子）である。



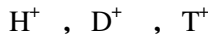
左上付き添え字が「質量数」、左下付き添え字が「原子番号」、右上付き添え字が「電荷」である。記号 He でヘリウムであることが分かるので、左下の原子番号は、省略されることが多い。

量子は、非常に多種類の「量子数」を持つため、全ての量子数を粒子記号の中に表示することはできないが、量子数の中で、電荷だけは例外的にこのように数値で示される。ただし、電荷のプラス1とマイナス1の場合、1を書かないのが通例である。

たとえば、3つの水素同位体の水素イオンは次のように書ける。



水素イオンは、次のように書くこともできる。



これは、質量数2の水素の同位体は、「重水素」（デューテリウム、deuterium）、質量数3の水素の同位体は「三重水素」（トリチウム、トリトン、tritium）、という固有の名称と固有の粒子記号を持つため、他の元素の粒子記号には、あまりみられない特別な表記である。なお質量数1の水素同位体を同じように並べると、プロチウム（protium）となるが、この用語はあまり用いられることがなく、水素元素と同じ「水素」（hydrogen）を質量数1の水素同位体の記号に用い、「軽水素」「普通の水素」とも呼ばれる。

水素の他に同位体が固有の名称を持つ核種がある。ラドンには、アクチノン、トロン、ラドンがあり、ラジウムにはアクチニウムX、トリウムX、メソトリウム、ラジウムがある。ただし、水素のように固有の記号まで持つものは珍しい。

同位体を明記する必要がある分子の表記は、次のようになる



元素記号の右下付き添え字は、一般によく用いられる化学式の原子数である。

これは水の分子であるが、水素原子が2つあり、水素には固有の記号があるので、

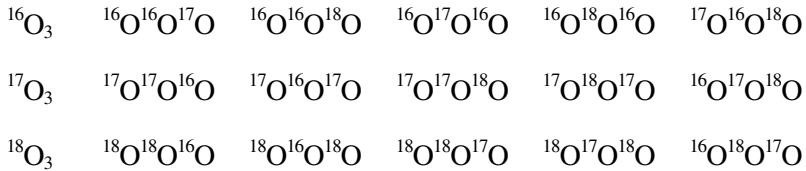
このような表記が分かりやすい。

水素同位体以外の同位体には、固有の記号がないため、水素よりも表記が煩雑になる。酸素分子は次のようになる。



前後対称のもの、たとえば ${}^{16}\text{O}^{17}\text{O}$ と ${}^{17}\text{O}^{16}\text{O}$ を同じ分子として数えるため、全部で6種類の分子となっている。

オゾンの場合、3原子となるため、もう少し煩雑になる。



素粒子や、その他の複合粒子（原子核、原子、分子）もほぼ同じようなルールで粒子記号が使われる。

複合粒子：	陽子	p
	中性子	n
素粒子：	電子	e^- または β^-
	電子ニュートリノ	ν_e
	アップクォーク	$u^{+2/3}$
	ダウンクォーク	$d^{-1/3}$

反粒子は、基本的に記号の上にバーをつけて表す。

複合粒子：	反陽子	\bar{p}
	反中性子	\bar{n}
素粒子：	反電子ニュートリノ	$\bar{\nu}_e$

反粒子のうち、電子のような荷電レプトンや荷電中間子の反粒子は、符号を反転して次のように示される。

複合粒子：	反ミューオン	μ^-
	反 π 中間子	π^-
素粒子：	陽電子	e^+ または β^+

反粒子がもとの粒子と同じという場合は、粒子記号も区別されず同じ記号が用いられる。

光子は、ガンマ線の記号あるいは次のような光量子の式の形で示される。

$$\gamma \text{ または } h\nu \rightarrow \text{光子}$$

アルファ粒子は、固有の粒子記号がないため、ヘリウムイオンの記号が使用される。



核異性体は、質量数の次に m (metastable) をつけて、次のような表記となる。



これは、ウラン崩壊系列の核種のひとつである「プロトアクチニウム 234 メタステーブル」を表わしている。この核種は、半減期 1.17 分で、基底状態のプロトアクチニウム 234 (${}^{234}\text{Pa}$) に壊変するか、あるいは ${}^{234}\text{U}$ に崩壊する。

同位体や粒子記号は、添え字が多く煩雑ではあるが、化学式や原子、粒子の表記法は決めごとなので、これを勝手に変えることはできない。添え字の位置や表記法などを自分勝手に変えてしまうのは、(自分のノート以外では) ルール違反である。

特に普段から、 CO_2 や N_2 を CO2 や N2 と書く癖のある人は要注意である。 CO_2 を CO2 と書いてもたぶん意味は通じるが、 ${}^{18}\text{O}$ を 18O と書くと、読めないか、あるいは意味が正確に伝わらない。同位体を表記するときは、上付き添え字、下付き添え字、添え字の左右、など、くれぐれもルールを逸脱しないよう注意する必要がある。

2. 7. 5 同位体 (isotope)

産業ガスの取扱い製品に「安定同位体 (SI : stable isotope)」がある。同位体について、あらためて整理する。

2. 7. 5. 1 安定同位体 (SI)

「同位体 (isotope)」とは、同じ「元素 (element)」であって、異なる「原子核 (nucleus)」を持つ「原子 (atom)」である。

しばしば、元素と原子は混同されるが、元素は、ある性質を持つ物質（化学種）の概念であり、原子は元素を構成する（同じ性質の）最小の粒子である。元素は概念であるから数えることができないが、原子は粒子であり個数を数えることができるところが、基本的に異なる。

元素が同じということは、原子核が持つ陽子の数が等しいということであり、原子番号が等しい化学種は化学的性質がほぼ同じである。同位体とは、原子番号が同じで質量数が異なる原子のことであり、同位体同士では、原子核が持つ中性子の数が異なる。

同位体やその他の性質を区別するために特定の原子の種類を「核種 (nuclide)」と呼ぶ。元素の種類は、周期表に 118 番目まで示されるが、ひとつの元素が数十の核種を持つため、核種を表わす「核図表」に示される核種は、表示が困難なほど多い。Wikipedia で「核種の一覧」「Table of nuclides」を検索すると膨大な量の核種が表示される（日本語版はレイアウトが異なる）。

同位体同士は、化学種としては、同じであるが、質量（原子量）が異なることから、わずかに性質が異なるため、それを利用する産業上のニーズがある。産業ガスとして取り扱うことができるのは「安定同位体 SI」である。

ただし、産業ガスの業界で、単に「エスアイ」と言えば、日常的に用いられる用語として、国際単位系 (SI)、ケイ素 (Si)、安定同位体 (SI) の3つがあるため、注意が必要である。短い単語であり、口語ではほとんど区別されることないため、いきなり「エスアイ」と言うという意味が伝わらないことも多い。

元素のシリコン (Si, Silicon) は、日本語の「ケイ素」もよく用いられるが、半導体材料ガスや電子機材の分野では単に「エスアイ」と呼ばれることも多い。ファインセラミックの分野で注目される「窒化ケイ素 (Si_3C_4)」は、「エスアイシー」「シリコンナイトライド」と呼ばれることが多い。なお、シリコン (ケイ素) は、人工の高分子化合物「シリコーン (silicone)」と綴りや発音がよく似ているため、

混同されやすく、注意が必要である。

安定同位体の場合は、単に「エスアイ」と呼ばれることが多く、用語としては単位のSIとは全く区別がつかない。場面や前後の文脈から判断するしかない。

基本的には、全ての原子（核種）が崩壊するが、極めて寿命が長く半減期が定義されていないもの、あるいは崩壊が実験的に確認されていないものを「安定同位体」と呼ぶ。これに対して、比較的短い間に崩壊するものを「放射性同位体（RI：radio isotope）」と呼ぶ。

また、安定ではないが、励起状態が比較的長い原子を「準安定原子」（meta-stable atom）または「核異性体」（nuclear isomer）と呼ぶ。

名称に統一感はないが、核種には3種類の同位体があり、安定同位体（SI）、放射性同位体（RI）、核異性体の3つのうちのいずれかに分類される。

核異性体は γ 線を放出して基底状態に戻るが、この変換は、 γ 崩壊とは異なるため、核異性体転移と呼

ばれる。核異性体は、放射性同位体のような崩壊をしないため、RIではないがSIでもない。

非常に多くの同位体があるため、周期表に示される元素の種類は、118種類であるが、核種は2000～3000種類ほどある。

時折「同位体を持つ元素もある」という解説をみかけるが、これは大間違いで、全ての元素が数多くの同位体を持ち、同位体を持たない元素はない。

このように、同一の元素の中に3種類の同位体があるので、「安定同位元素」「放射性同位元素」という呼び方は用語の使い方としては正しくない。天然に存在する同位体が全て安定な場合「安定同位元素」、安定同位体がなく全てが放射性同位体と核異性体である場合に「放射性同位元素」と書かれた時代があったが、安定や放射性は元素の特性ではないので、この表現方法は正しくはない。

全ての元素が多くの同位体を持つが、「天然（地球上）に存在する同位体がひとつしかない」という元素がいくつか知られている。天然の同位体がひとつしかない「単核種元素」が22種あるが、これらの元素も、短寿命核種や人工核種など多

表 2-7-1 元素の同位体の種類

安定同位体 Stable isotope (SI)	崩壊が観測されていない、あるいは、比較的半減期が長く、安定とされる核種
放射性同位体	安定同位体でないもの
放射性同位体 radio isotope (RI)	崩壊が観測され、比較的半減期が短く放射線を出す核種
核異性体 nuclear isomer	原子核がある程度の時間、励起した状態を保っている原子核。準安定核とも呼ぶ

くの同位体を持つ。安定同位体がひとつしかない「モノアイソトピック元素」は、7種ある。

多くの元素が、天然に複数の安定同位体を持っているため、産業ガス業界が製造・供給しているガスは、たとえ「超高純度のガス」であっても、実際は、天然に存在する同位体からなる分子の混合ガスになっており、核種という意味では純ガス（純物質）ではない。

通常は、同位体の存在を考慮せず、ひとつの化学種（元素）として、酸素分子、窒素分子、アルゴン原子として製造・販売されているため、同位体としてみると、純ガスではなく混合ガスである。

たとえば、酸素には天然に3種類の安定同位体が存在するため、酸素分子には、6種類の組合せ（ $^{16}\text{O}_2$ 、 $^{16}\text{O}^{17}\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ 、 $^{17}\text{O}_2$ 、 $^{17}\text{O}^{18}\text{O}$ 、 $^{18}\text{O}_2$ ）があり、「純酸素ガス」であっても、これらを混合した酸素ガスということになる。

窒素は、天然に2種類の安定同位体があるので、「純窒素ガス」も3種類の安定同位体窒素分子（ $^{14}\text{N}_2$ 、 $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$ 、 $^{15}\text{N}_2$ ）の混合物となっている。

通常は、同じ化学種であり、特に区別せず、同位体比の分析も行われずに、単に酸素や窒素として販売されている。

ガスの同位体を区別して販売したり、分析したりするのが、安定同位体商品（SIガスビジネス）である。化学種は同じでも、原子量が異なることによって生じる用途に対して、SIが供給されている。

2. 7. 5. 2 天然存在比

人工的ではない天然に存在する同位体の割合を「天然存在比(natural abundance)」と呼ぶ。

「天然に存在する」とは、地球の表面に存在するという意味であり、自然界を意味しているものではなく、地球の現在の値である。

星の成因（星の原料となった分子雲の元素）やその後の天体（星や惑星）の歴史によって元素の同位体比が異なるため、隕石や月の石など、他の天体のサンプルの分析では、いくつかの元素の同位体比が測定されている。地球上でも、サンプリングされる場所によって、同位体の存在比がわずかに異なることがあり、詳細な分析が地球科学（地球物理、地球化学、自然史）に利用されている。天然存在比は、地球上の現在の平均値であり、様々な同位体研究の基本となる値である。

天然存在比は、安定同位体に限定しているのではなく、放射性同位体を含む場合もあるため、したがって、天然存在比は長い年月でみると変化する。

たとえば、ウランには、安定同位体が存在しないが、地球上には、普遍的にウランが存在するため、ウラン同位体のうち半減期が長い3つの同位体(放射性同位体)に対して天然存在比が求められている。

表 2-7-2 に示すようにウランの大半が ^{238}U で、その半減期は現在の地球の年齢とほぼ同じ 45 億年である。一般的に半減期が 10 億年以上の核種は安定とみなされることが多いが、 ^{238}U の場合は、このように長い半減期であっても放射性同位体とされ、ウラン元素は、全て放射性物質とされている。ただし、ウランは、様々なところに分布しているため、放射性物質として取り扱われるのは、ウランの濃度が高く量が集まっている場合だけである。わずかでもウランが含まれている物質を放射性物質とみなすと、海水や土壌、地下水、鉱物、地下資源など地球上のほとんどのものが放射性物質になってしまうため、ウラン鉱石や精製されたウラン、核物質として濃縮されたものが放射性物質ということになる。

また、最も身近な放射性同位体であるカリウム ^{40}K の場合、半減期は 12 億 5000 万年と ^{238}U よりも短く、量も非常に多いが、カリウムは放射性物質とはされていない。カリウムは豊富に存在し、生物に必須のミネラルであり、カリウムから発せられる放射線と生物は共存するしている。放射性同位体を多く含む元素が、必ずしも放射性物質として取り扱われるということではない。

金属の元素の中には、崩壊が確認されて半減期が求められていても放射性同位体とされていないものや、放射性同位体の天然存在比がそれなりに高くても、元素を放射性物質として取り扱わないものなどがある。「安定同位体—放射性同位体の区分」や「非放射性物質—放射性物質の取り扱いの区分」は、科学的根拠や実状に合わせて取り決められているが、はっきりとした数字で線が引かれているものではない。

酸素には、 ^{12}O から ^{28}O までの 17 種類の同位体があるが、天然には質量数 16、17、18 の 3 種類の安定同位体があり、この 3 つの合計を 100% として天然存在比が示されている。これ以外の酸素の同位体は、半減期が短く、崩壊が速いため天然存在比の中には含まれない。したがって、天然の酸素元素には、放射性同位体が含まれていない。

表 2-7-3 に、酸素同位体の天然存在比と酸素同位体の半減期を示す。

同位体の存在比は、地球上どこでも同じという訳ではないため、同位体分離を行

表 2-7-2-ウランの天然存在比

原子	半減期	天然存在比
^{234}U	24.6 万年	54ppm
^{235}U	7 億 380 万年	7204ppm
^{238}U	44 億 6800 万年	99.28%

う場合、原料中の存在比が特定の核種に偏っていると有利・不利があるが、酸素は ^{17}O が370~400ppm、 ^{18}O が1880~2220ppmの範囲にあり、工業原料として考えた場合、どの酸素原料を用いてもほとんど変わらない。

酸素原子から酸素分子が作られる時、結合の相手を選ばないため、確率的に同等に組み合わせられて酸素同位体の分子となる。このような同位体間の反応の違いがないものを「同位体効果がない」という。

表2-7-4に、天然存在比の酸素原子からなる酸素分子の割合を示す。

ここで、表に示されている酸素分子のうち、 $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ と $^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ の組合せは同じ分子となるから、両方の組合せを合計して $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ としている。 $^{16}\text{O}^{17}\text{O}$ 、 $^{17}\text{O}^{16}\text{O}$ や $^{17}\text{O}^{18}\text{O}$ 、 $^{18}\text{O}^{17}\text{O}$ も同様である。

特定の同位体を分子に組み込むことを同位体標識 (isotope labeling) と

呼び、安定同位体を組み込んだ化学種を「同位体標識化合物 (stable isotope labeled compounds)」と呼ぶ。

用途に応じた様々な同位体標識化合物が商品として作られている。

安定同位体ビジネス (SI 事業) というのは、酸素や炭素などの元素の特定の核種を濃縮し、その濃度 (同位体構成比) を明らかにし、あるいは、特定の同位体で標識した化合物を販売するものである。

なお、一般に販売されるガスは、同位体の混合比を明示していないが、必ずしも天然存在比になっていないので、注意が必要である。特に水素ガスは、その製造工程で同位体間の反応に差が出やすい (同位体効果が大きい) ため、容器に充填されている濃度は、一般に報告されている水素の天然存在比からはずれていることが多い。水素原子の天然存在比は、軽水素 H が99.9885%、重水素 D が115ppm であるから、その原子から作られる水素分子は、HD : 230ppm D_2 : 0.013ppm となるはずであるが、石炭や石油から水素を製造する工程や、電気分解や蒸留操作における

表 2-7-3 酸素の天然存在比など

原子	天然存在比	半減期
^{15}O	—	122 秒
^{16}O	99.759 %	—
^{17}O	370 ppm	—
^{18}O	2040 ppm	—
^{13}O	—	0.0088 秒
^{14}O	—	71 秒
^{15}O	—	122 秒
^{19}O	—	26.4 秒

表 2-7-4 天然存在比の酸素からなる酸素分子

分子	天然存在比	備考
$^{16}\text{O}^{16}\text{O}$	99.519 %	$^{16}\text{O}_2$ とも書く
$^{16}\text{O}^{17}\text{O}$	740 ppm	$^{17}\text{O}^{16}\text{O}$ 含む
$^{16}\text{O}^{18}\text{O}$	4070 ppm	$^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ を含む
$^{17}\text{O}^{17}\text{O}$	0.1 ppm	$^{17}\text{O}_2$ とも書く
$^{17}\text{O}^{18}\text{O}$	1.5 ppm	$^{18}\text{O}^{17}\text{O}$ を含む
$^{18}\text{O}^{18}\text{O}$	4.2 ppm	$^{18}\text{O}_2$ とも書く

同位体効果が大きいいため、濃度が偏りやすい。

酸素や窒素の場合は、原料が空気であり、深冷空気分離プロセスの中では、ほとんど同位体が濃縮されないため、販売されている酸素ガスと窒素ガスの同位体組成は、報告されている天然存在比とほぼ等しいと考えられる。

2. 7. 5. 3 放射性同位体 (radio isotopes)

全ての元素が数多くの同位体を持ち、いずれも放射性同位体を持つ。同位体を存在量ではなく種類数で見ると、ほとんどの同位体が放射性同位体であり、安定同位体の数は少ない。酸素であれば、17種類の同位体のうち安定同位体はわずか3つしかない。

安定同位体だけという元素は存在しないが、安定同位体が存在しないという元素は比較的多い。特に重い(原子番号が大きい)元素の場合、安定同位体が存在しないことが多く、ビスマス(原子番号83)よりも原子番号が大きい元素には、安定同位体が存在しない。これよりも軽い元素(原子番号が82より小さな元素)には、基本的に安定同位体が存在するが、テクネチウム(原子番号43)とプロメチウム(原子番号61)の二つの元素は、例外的に安定同位体がない。

放射性同位体 RI は、崩壊する時に放射線を発するため、管理方法や管轄する法令が安定同位体 SI とは異なり、製造・販売ルートも異なるため、産業ガス業界の取扱品目には RI がない。なお、これまでも示したように、科学的に放射性同位体とされているもの全てが放射性物質として取り扱われるのではないため、ここに示す RI とは放射性物質として指定される物質を意味している。

RI の多くが放射線源として利用されて、ほとんどが輸入され、「密封 RI」として流通している(非密封 RI は全体の0.002%)。

図 2-7-2 に、日本アイソトープ協会がまとめ

た 2007 年の密封 RI の分野別供給量を示す。総量は 1400 億メガベクレル (1.42×10^{11} MBq)、民間企業への供給が 91% を占める。RI は、研究用や医療用が多いと思われるが、実際は、民間企業での利用が圧倒的に多く、産業用に幅広く利用されている。

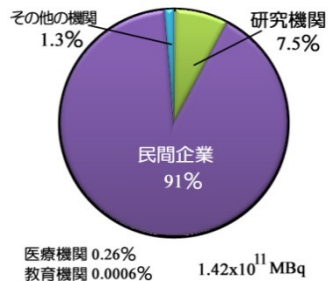


図 2-7-2-密封 RI の供給量

この量は RI の「放射能」であり、ベクレルという単位も使い慣れていないと、なかなかピンとこないので、ラジウム (^{226}Ra) の質量に換算してみる。ラジウム 1g は、1Ci(キュリー) = $3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ に相当するので、1年間の供給量 $1.42 \times 10^{11}\text{MBq}$ は、ラジウムに換算すると 3.94Mg (3940kg) になる。

図 2-7-3 に非密封 RI の供給量を示す。非密封 RI は密封 RI の出荷量より 5 桁も少なくラジウムの重さに換算すると 62g となる。そのうち 4% が医療用であるから、放射性薬剤の供給量は、RI の市場全体から見ると極めて少ないということが分かる。

法令上は、安定同位体と放射性同位体（放射性物質）の区分があるが、科学的な「安定同位体」と「放射性同位体」の線引きは分かりにくい。

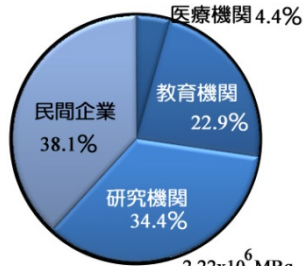
強い放射線を発して人体や生物などに影響を与える放射性同位体を一般的に「放射性物質」あるいは「放射能」と呼び管理が行われているが、自然界には、非常に多種類の放射性同位体が存在しており、実験的に崩壊が観測され、数値の上では有限の半減期が求められている放射性同位体であっても、放射性物質とされないことがある。単純に、原子核の崩壊（半減期や寿命の特定）＝放射性同位体＝放射性物質とはなっていない。

詳細な研究が進むほど、安定同位体の数が減り、放射性同位体の数が増える傾向にあり、ビスマスも 2003 年までは、安定同位体が存在する最も重い元素とされていたが、現在は全て放射性同位体である。ただし天然存在比 100% の ^{209}Bi の測定された半減期は 1.9×10^{19} 年と非常に長い。ビスマスは、熱電素子、高温超電導、医薬品などに利用されている放射性物質として取り扱われることはない。

ビスマスだけではないので、具体例をいくつか示す。トリウム（原子番号 90）は、安定同位体が存在せず、全ての核種が放射性同位体である。しかし、溶接電極（トリウム-タングステン電極）などに利用されており、放射線を出すからといって必ずしも放射性物質として管理されている訳ではない。

天然の鉄やネオジミウムなども放射性物質として取り扱われず、工業的に広く利用されている。

鉄には、34 種類の同位体があり、4 種類の安定同位体から天然存在比が決められている。このうち質量数 56、57、58 の 3 つは、半減期が報告されていないため



2.22x10⁶ MBq
分野別非密封 RI の供給数量
図 2-7-3-非密封 RI の供給量

義上も安定であるが、質量数 54 の鉄（存在比 5.8%）は、 3.1×10^{22} 年以上という半減期が報告されている。この場合は、崩壊が確認されているため、厳密に言えば、放射性同位体であるが、半減期が非常に長いので安定同位体とされ、天然の鉄は放射性物質とはみなされない。

高性能磁石材料として知られるネオジミウム（ネオジム、原子番号 60）は、51 種類の同位体のうち 7 種類が天然に存在比しているが、そのうち 3 種類については、半減期が報告されている（ ^{144}Nd : 2.29×10^{15} 年、存在比 23.8%、 ^{150}Nd : 6.7×10^{18} 年、存在比 5.6%、など）。天然に存在するネオジミウムのうち約 65%が安定同位体とされているが、残り 35%は、放射性同位体ということになる。しかし、一般的には、天然のネオジミウムは、放射性物質としては取り扱われておらず、磁石材料として多用されている。なお、ネオジミウムはドイツ語のネオジムという名前も普及しており、英語のウラニウムとドイツ語のウランの両方が使われているのに似ている。

天然のカリウムには、質量数 40 の放射性同位体が、比較的多く（存在比 0.01%）含まれている。カリウム 40（ ^{40}K ）は、地球の空気のアルゴンの親物質であり、明らかに放射性物質である。しかし、生物は、カリウムなしには生きられないため、 ^{40}K による内部被曝は避けようがない。カリウムの摂取を控えることは不可能であり、外部被曝を防ぐためにカリウム源に近づかないということも非現実的である。カリウムからの放射線は、避けようがなく、取り扱い上は放射性物質ではない。

ウランは、地球上に普遍的に存在するため、これが崩壊して発生するラドンは、希ガスとして空気中に放出されている。ただし、空気中の濃度が安定しておらず半減期も短いため、空気の組成表には含まれていない。（最も寿命が長い ^{222}Rn で半減期は 3.8 日）。ラドンは、半減期は短いですが、親物質であるウランが自然界に多く発生し続けているため、自然界（空気中）に多く存在し、ヒトの内部被曝量としてはカリウムに匹敵すると考えられている。しかし、避けることができないカリウムとは異なり、できるだけ空気中に発生したラドンを吸引しないようにするという取り組みが可能であるため、ラドンは放射性物質として取り扱われている。ラドンの発生源となるウランやラジウムに近づかないことが重要であるが、ラドン被曝の可能性は、屋内の方が大きいため、欧米では、不動産取引における環境ラドンの測定値の提示の制度や、住宅の建築に際してラドン被曝を抑えるためのガイドラインなどがある。

放射性物質は、工業、農業、医療など様々なところで利用されているが、放射性物質として指定されているものとそうでないものがある。放射性物質として指定されているものは、それだけ人や物への影響が大きいと考えられ、取り扱う時には、

法令を遵守し、科学的な知識と被曝を避けるための十分な注意が必要である。

2.7.5.4 半減期・寿命・比放射能

ある数のものが減って、その個数が半分になるまでの時間を半減期 (half-life) と呼ぶ。崩壊して数が減る様々なものに対して、半減期という考えが用いられるが、最もよく知られているのは、原子核の崩壊である。崩壊する原子核の個数は、その時の原子核の数に比例する。

原子核の崩壊は、「微小時間 dt 」の間に「崩壊する確率 λdt 」を用いて、次の放射壊変の方程式で表わされる。

$$dN(t)/dt = -\lambda N(t)$$

ここで、 N は時間 t における核種の個数、 λ は崩壊定数 (decay constant) と呼ばれる核種固有の値である。崩壊定数は時間の逆数の次元を持つ。

時間0の時の個数を N_0 とすると上式の解は、

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

となるから、半減期の定義より

$$N(t_{1/2}) = N_0/2 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

となり、半減期 ($t_{1/2}$) と崩壊定数の間には、次の関係がある。

$$t_{1/2} = \ln(2)/\lambda = 0.693/\lambda$$

よく知られる同位体の半減期は、トリチウムで 12.3 年、ヨウ素 131 で 8.02 日、カリウム 40 で 12.48 億年、ウラン 238 で 45 億年などとなっている。PET 診断に用いられる、フッ素 18 では 110 分である。半減期は、崩壊の速さの度合いを表す指標であり、工学的には、ほとんどのこの値で原子核の安定、不安定を議論することができ、一般的に、安定な原子は半減期が長く、不安定な原子は半減期が短い。

一方、素粒子物理学などの理論物理学では、半減期は用いられることがなく崩壊の速さを表わす指標として、平均寿命 τ が用いられる。粒子の平均寿命は、崩壊せずに残っている粒子の数が、 $1/e$ になるまでの時間として定義される。

$$N = N_0 (1/e)^{t/\tau} = N_0 e^{-t/\tau}$$

したがって、平均寿命 τ と崩壊定数 λ 、半減期 $t_{1/2}$ の間には、次のような簡単な関係がある

$$\tau = 1/\lambda \quad \tau = t_{1/2}/\ln(2) = 1.442t_{1/2} \quad t_{1/2} = 0.693\tau$$

工学的に用いられる半減期は、物理学で用いられる平均寿命より少し数値が小さいだけである。

なお、半減期や粒子の寿命は、粒子が持つ物性値であるが、個々の粒子については全て等しい。

特に素粒子には、新しいとか古いという概念はなく、全て同じ確率で崩壊が進むため、生成直後の粒子も生成から時間がたった粒子も全く同じ寿命を持ち「不老不死」という、われわれの階層（生物界）からみると非常に不思議な性質を持っている。素粒子の寿命は、ミューオン 2.2×10^{-6} 秒、タウ粒子 290×10^{-15} 秒、光子 6.4×10^{24} 年以上、と極端である。ここで、光子は撮像素子やヒトの網膜細胞などと反応すると消滅する（光ではなくなる）が、素粒子の寿命とはこのような反応による消滅は含まない自然消滅が考慮されている。素粒子以外の粒子の寿命の測定も試みられているが、スーパーカミオカンデでは、その建設の目的である陽子の崩壊がまだ確認されておらず、陽子の寿命は、 10^{34} 年以上（10 年以上の観測の結果）とされている。現在は、ハイパーカミオカンデが計画中である。

半減期の表記には、 10^9 年（10 億年）以上の大きな数字が示されることがあるが、これは当然のことながら、10 億年間測定して元の核種が半分になったという結果ではない。多数の原子を観測し、確認された原子核の崩壊の結果から、崩壊の確率が求められるため、このような大きな数値を得ることができる。寿命が長く崩壊が少ない場合は、カミオカンデのような巨大な装置で外界からの影響を極力少なくした観測が行われることになる。

天然の放射性同位体は、様々な測定に用いられており、特に地層の年代測定がよく知られている。植物が枯れる、溶岩が固化するなどの原因で物質移動が行われなくなった状態から放射性同位体の崩壊が進み、他の核種に変換していくと、外界との物質移動がないまま、同位体の存在比が変化するため、核種特有の半減期からその痕跡を追うことができ、組成が固定された時代を推測することができる。

親核種を P 、崩壊によって生成した娘核種を D と表記し、量も同じ記号を用いると、時間 t 後のそれぞれの核種の量は、

$$D = P_0 - P = P_0(1 - e^{-\lambda t}) = P(e^{\lambda t} - 1)$$

となり、測定しようとする年代は、

$$t = \ln(1 + D/P)/\lambda$$

となり、娘核 D と親核 P の量の測定値と崩壊定数から経過時間が求められる。

地球年代化学 (geochronology) では、地層の順序から求める相対年代法が用いられてきたが、19 世紀末から 20 世紀初頭にかけて、ベクレルが天然の放射線を発見し、ラザフォードが鉱物中のウランとヘリウム量の量から鉱物の年代を求める方法を見出してからは、放射性同位体年代法、すなわち絶対年代法が取り入れられるようになった。

20 世紀中盤以降、天然の放射性同位体を用いた放射年代測定法 (radiometric dating) が、科学の重要なツールとなっている。放射年代測定法が実用的になった理由としては、高精度質量分析計が開発されたこと、同位体希釈法が開発され高純度濃縮トレーサーが生産可能になったこと、極微量分析の技術が進歩したこと、同じ試料を複数の方法で年代測定できるようになったこと、などが挙げられる。

地質年代の測定に用いられる最もよく知られる同位体の親核種は ^{40}K である。

娘核種が ^{40}Ca の場合は $\text{K}-\text{Ca}$ 法、娘核種が ^{40}Ar の場合は、 $\text{K}-\text{Ar}$ 法あるいは $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法がある。 ^{40}K の半減期が約 13 億年であり、地球の年齢が 46 億年であることから比較的使いやすくとされている。マグマが溶けているときは、放散されている Ar がマグマが冷えて固まった時点から閉じ込められるようになり、採取した溶岩から $\text{K}-\text{Ar}$ 法によってマグマの固化年代が推定できる。

^{40}K は EC 崩壊 (軌道電子捕獲) と β^- 崩壊でそれぞれ別の娘核種を作るため $\text{K}-\text{Ar}$ 法では、次式を用いて年代を求める。

$$t = \frac{1}{\lambda_E + \lambda_\beta} \ln \left(1 + \frac{\lambda_E + \lambda_\beta}{\lambda_E} \frac{^{40}\text{Ar}}{^{40}\text{K}} \right)$$

ここで、 λ_E は ^{40}K が EC 崩壊する時の崩壊定数、 λ_β は ^{40}K が β^- 崩壊する時の崩壊定数であり、これを足し合わせた $\lambda_E + \lambda_\beta$ が ^{40}K の崩壊定数である。

もうひとつの $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法は、試料をそのまま測定するのではなく、試料に高速中性子を照射、 $^{39}\text{K}(\text{n,p})^{39}\text{Ar}$ 反応によって ^{39}Ar を発生させ、その時の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 比を求めることによって行われる。この時、試料と同時に照射した標準試料の同位体比と比較して ^{40}Ar を求めるため、 ^{40}K 起源の ^{40}Ar の絶対量を必要とせず、少ない試料でも測定できること、誤差が生じにくいことなどの利点がある。中性子線源を必要とするが、実験室では非常に多く用いられる測定法であり、他の天体からの貴重な試料の年代測定に多くの実績がある。

なお、あまり短い年代測定では、発生するアルゴンの量が少ないため、高い精度

の測定が難しく、1万年以下の年代では $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法よりもK-Ar法の方がよいとされている。

ウランやラドンは地下水中に比較的多く含まれるため、地下の構造の解析などに用いられる。ウランは、石炭や石油の燃焼、リン酸肥料による排出、海水にも含まれるため、自然界の流れや人為的な物質移動など様々な環境調査に利用されている。

なお、放射性物質が生物の体内に取り込まれた場合は、代謝によって放射性物質が体外に排出されるため、物理的崩壊による半減期だけでなく、「生物学的な半減期 (biological half-life)」を合わせた有効半減期から放射線の影響が評価される。

$$\frac{1}{t_{1/2,eff}} = \frac{1}{t_{1/2,phy}} + \frac{1}{t_{1/2,bio}}$$

「2.2.1.4 階層の観測(4) 光と電気による観測」の項で、フランスの物理学一家、ベクレル家の業績について記した。しかし、太陽光発電に利用される「ベクレル効果」は日本では「PV効果」の名称の方がよく知られており、ベクレルという名前は、主に、アントワーヌ・アンリ・ベクレルに因む放射能（放射性物質の量を表わす）の単位「ベクレル (Bq)」が知られる。特に、日本の東京電力の福島第一原子力発電所の事故以降、この言葉がよく知られるようになった。

ベクレル Bq は、ヘルツ Hz と全く同じ定義、単位時間に起こる物理現象の回数を表わす SI の単位である。毎秒何個という定義が非常にはっきりとした物理量であり、ヘルツは周波数などに用いられるが、放射性物質の崩壊（放射性壊変）の速度を表わす場合に限って、ヘルツではなくベクレルを用いることになっている。ベクレルは、毎秒の壊変数（崩壊速度）であるが、これが放射能（放射性物質の量）を表わす単位として用いられている。

かつて、放射能を表わす単位は、キュリー (Ci) というマリ・キュリー／ピエール・キュリーに因んだ単位が用いられていた。これは初期の放射線の研究に用いられた、ラジウム (^{226}Ra) の 1g に相当する放射能である。SI では、単位を決める定義には、特定の物質を使用しないという方向性が示され、1953年に、Ci は、数値を変えずにラジウムを用いないものに定義が変わった。物質を用いる定義では、その純度を正確に決めることが難しく、技術の進歩によって、将来、定義値が変わってしまうことをふせぐために、ラジウム 1g に相当する放射能がこの時点で固定され、キュリーという単位が再定義された。

1975年にSIの多くの単位が、特定の物質に由来しない定義を用いるように変更されたが、この時、放射能もラジウム由来ではなく、1秒当たりの壊変数で表わすことになった。この時、放射性崩壊に限っては、ヘルツ Hz ではなく、ベクレル

Bq という固有の名称を用いることが決められた。

アンリ・ベクレル、マリ・キュリー、ピエール・キュリーは、共同でノーベル物理学賞を受賞したが、彼らが発見した放射能という現象の測定単位は、キュリーの名前から彼らの学位指導教官であったベクレルへ名前へ変更された。

キュリーは 1g という物質の量から出発しているので、その量と放射能は直接結びつかないものの、比較的イメージしやすいものであった。一方、ベクレルは、個数であるため、物理学的には非常に明快な定義であるが、非常にイメージしにくい単位となった。ベクレルは、個数であるから、崩壊の結果、飛び出してくる放射線の種類やエネルギーといった量は別にカウントしなければならないが、その個数そのものの桁が非常に分かりにくいのである。

物質の量 1 モルに含まれる粒子（原子や分子）の数を表わすためのアヴォガドロ定数は非常に大きい。個数を数えるということは、このアヴォガドロ定数を相手にするということになり、放射能を原子核の壊変数、個数で表わすと非常に大きな数値となる。

ラジウム 1g は 1 キュリー (1Ci) であるが、これを壊変数で表わすと、 3.7×10^{10} Bq (37 ギガベクレル) という非常に大きな数字になる。1g のラジウムは、放射能としては、比較的大きな量であるため、報道など実際の使用では、マイクロ・キュリーやマイクロ・マイクロ・キュリーが使われることが多かった。(ピコという接頭語に馴染みがない時代は、 10^{-12} を表わすのにマイクロが二重重ねられていた)。マイクロ・キュリーという単位が分かりにくくても、1グラムというのは、何となく想像ができた。これがベクレル Bq になると、今度は、逆に非常に大きな数字となり、大きいのか小さいのか、専門家でなければすぐには理解できない単位になった。

放射性物質の漏洩を報道では、「何京 (けい) ベクレルの放射能の放出」などといった見出しもあった。1 京 10^{16} は非常に大きな数字である。莫大な量 (物質) が漏れたように感じるが、アヴォガドロ定数は、1 京よりも 7 桁も大きい。慣れないと大きいのか小さいのかまるで分からない。そこで、管理値や平常時の値との比較が行われたりするが、やはり、何 g だとか何トンだとかいった慣れた数値ではないので非常に分かりにくい。

ベクレルという単位だけでは、放射能を実感しにくいいため、ベクレルを具体的な放射性物質の質量に換算してみる。

ここでは、1 リットルの水に 100Bq の放射性物質が含まれる場合を考える。

放射性セシウム ^{134}Cs の比放射能 (単位質量あたりの放射能) は、 4.8×10^{13} Bq/g であるから、100Bq の ^{134}Cs の質量は、 2×10^{-12} g、1 リットルの水に溶けている時

の重量分率は、 2×10^{-15} となる。1pptが 10^{-9} であるから、これは1pptの1ppmということになり、1リットル中に ^{134}Cs 100ベクレルという濃度は化学物質の量としては測定が不可能なほど希薄である。1リットル中に1ギガベクレル含まれているとすれば、10pptの濃度になるが、それでも化学分析は難しい。

$$dN(t)/dt = -\lambda N(t) \text{ 時間 } t \text{ における壊変速度}$$

$$N(t)m/N_A \text{ 時間 } t \text{ における物質の量 (質量)}$$

ここで、 N_A : アヴォガドロ定数 $[\text{mol}^{-1}]$ 、 m : 原子量 $[\text{g/mol}]$ である

崩壊速度を質量で割って比放射能 A を求めると (壊変速度は放射能が減る方向の速度なので符号のマイナスを消して)

$$A = \lambda N_A / m$$

崩壊定数よりも、一般には半減期の方がよく知られているので、 $\lambda = \ln(2)/t_{1/2}$ より

$$A = \ln(2)N_A / (t_{1/2} \cdot m) = 4.2 \times 10^{23} / (t_{1/2} \cdot m)$$

ある物質(核種)の原子量と半減期が分かれば、その物質の比放射能が求められ、1グラムが何ベクレルに相当するかを計算でき、比放射能の逆数をとれば、1ベクレルが何グラムに相当するかが分かり、それがたとえば水の中に含まれているのであれば、ベクレルで示された濃度が、質量分率に換算できる。

表 2-7-5 に、よく知られる核種の1ベクレルあたりの質量(比放射能の逆数)と、それぞれ100Bqの量が水に含まれている場合のおよその濃度(重量比)を示す。ベクレルが毎秒の値であるから計算に用いる半減期も秒を用いるが、表記は日や年で示している。

核種の質量、アヴォガドロ定数、壊変速度(半減期)の関係から、1ベクレルあたりの質量は極めて小さい。これを1リットル(1000g)の水中100ベクレルとした場合の濃度は、一般的な化学分析では検出不可能なほど小さい。pptのさらにppbという値は放射線の検出以外の方法では測定ができない。

国(厚生労働省)が、除染業務に従事する労働者の放射線障害防止のために作成したガイドラインでは、汚染土壌をセシウムの放射能濃度が10,000Bq/kg以上のものと定義している。半減期の長いセシウム137の場合で10,000Bqは3.12ngに相当するので1kgに対する重量比は、約3ppq(3×10^{-12})となる。化学物質の量としてみれば、極めて少量であっても、放射性物質としては影響を考慮しなければならない汚染物質ということになる。

表 2-7-5-放射性物質の質量とベクレル

核種名	半減期	1ベクレルあたりの質量 g/Bq	水1リットル中に100Bq含まれる物質の濃度(質量分率)
トリチウム	12.3年	2.79×10^{-15}	0.3pptの百万分の1
炭素 14	5700年	6.02×10^{-12}	0.6ppmの百万分の1
カリウム 40	1.25×10^9 年	8×10^{-6}	0.8ppm
コバルト 60	5.27年	2.39×10^{-14}	2pptの百万分の1
ストロンチウム 90	28.9年	1.96×10^{-13}	20pptの百万分の1
ヨウ素 131	8.02日	2.17×10^{-16}	0.02pptの百万分の1
セシウム 134	2.06年	2.09×10^{-14}	2pptの百万分の1
セシウム 137	30.1年	3.12×10^{-13}	30pptの百万分の1

放射線計測が他の分析法に比べていかに高感度であるかということがよく分かるが、同時に、ベクレルが示す、毎秒1回崩壊という単位の取り扱いの難しさも分かる。

壊変速度、ベクレル(Bq)を用いると、放射能の量(放射性物質の数や濃度)を定量的に表わすことはできるが、環境問題としては、放射線による被曝の影響が非常に重要である。

放射線の影響・効果は、放射性物質の種類、放射線の種類、放射線のエネルギーによって異なり、また、放射する側の放射能の評価だけでなく、放射線に曝露される側の吸収量の指標が重要である。

物質への影響を考慮する場合は、「吸収線量」、単位はグレイ、Gyが用いられ、生物への影響を考慮する場合は、確率的影響も考慮した「実効線量」、単位はシーベルト、Svが用いられる。これも東京電力の事故以来、空間線量を時間当たりのSvで表わし、被曝積算量を年間あたりのSvで表わすことで、シーベルトという言葉が広く知られるようになった。

Gyは、かつてradと呼ばれていたもの、Svはremと呼ばれていたものが、SI単位として新たに定義された(1979年)ものであり、基本的にはcgs単位系からMKS単位系に変えたものであり、 $1\text{Gy}=100\text{rad}$ 、 $1\text{Sv}=100\text{rem}$ と簡単な換算となっている。通商産業省令では、シーベルトは、「グレイで表した吸収線量の値に省令で定める係数を乗じた値」であり、その係数は、1(X線、 γ 線、 β 線)、5(陽子線)、20(α 線)、5~20(中性子線、エネルギーによる)の値をとる、とされている。

Gy は、放射線生物学の分野を開いたルイス・ハロルド・グレイ（1905～1965年、イングランド）、Sv は、放射線が人体に与える影響、放射線防護の研究を行ったロルフ・マキシミアン・シーベルト（1896～1966年、スウェーデン）に因んで、固有の名前が与えられているが、Gy も Sv も同じ次元を持ち、J/kg と書くこともできる。

食品などに含まれる放射性物質の内部被曝量を推定するために、放射性物質の種類、摂取経路、年齢によって、放射能 (Bq) と実効線量 (Sv) の関係を表わす「実効線量係数」が取り決められている。たとえば、セシウム 137 の成人の経口摂取であれば、 1.9×10^{-5} mSv/Bq という値である。これに食品中の放射能の濃度 (Bq/kg) と年間摂食量 (kg/y) を掛けると内部被曝量 (mSv/y) が求められる。

事故が起こるまでは、一般の人の間には、放射能や放射線に対する興味や理解があまりなく、これらの違いが理解されず、ガイガーカウンター (Geiger-Müller counter) のような計数管 (カウンター、エネルギーが分からないためそのままでは実効線量が得られない) と放射線量を測定する線量計 (放射線検出器、radiation dosimeter) が混同され、大きく混乱した。その後、正しい情報が伝わるようになり、ベクレルという放射能の単位とシーベルトという放射線 (生物学的影響を考慮した吸収線量) の単位の意味や、計数管と線量計の用途の違いが、認知されるようになった。ただし、人々の関心事は、人体への影響であるため、シーベルトが広まったのに対して、グレイはほとんど認知されず、ベクレルもその桁の大きさから理解が難しいものになった。

2. 7. 5. 5 安定同位体の濃縮

原子や分子はナノスケールのひと桁下の階層であり、原子核はさらに4桁も小さい階層にあるが、元素を同位体別に議論する中性子の階層はさらにもうひと桁小さい。これだけ階層が異なると、化学の道具では、同位体を直接操作することはできず、分離や分析を行うには、原子核スケールの道具を用意するか、原子核の違いが、上の階層に及ぼす現象を利用する。

一般的には「原子核の重さの違い」が用いられる。

原子や分子の質量のほとんどは、原子核が占めるので、核種が異なると原子と分子の質量が異なる。同位体を分離する時には、この質量の違いを利用して直接遠心分離で分離することもあるが、質量の違いによって、上の階層（化学の階層）に対して、ごくわずかな違いが現れることがあるため、これが利用されることがある。

同位体は、同じ化学種であるから、一般的には、同位体間の物性の違いは非常に小さいが、分子間力（気液平衡）や拡散速度、反応速度、吸着速度などに違いが生じることがあり、これを利用して同位体分離が行われる。

軽い元素の同位体の場合、質量比が大きいいため気液平衡に比較的大きな違いが出やすく、蒸留分離によって同位体を分離することがある。プロセス流体としては、 H_2 、 N_2 、 CO 、 O_2 、 H_2O 、 CH_4 などが選ばれるが、一般の化学物質の蒸留分離比べると非常に分離しにくい。同位体の濃縮は、物理学というよりは化学工学の分野の技術である。

2. 7. 5. 6 同位体の分子

アイソトポログ (isotopologues) : 同位体化合物において、同位体の数が異なる分子をアイソトポログと呼ぶ。

たとえば、 CH_4 、 CH_3D (CH_3^3H)、 CH_2D_2 (CH_2^2H_2) は、メタンのアイソトポログである。いずれもメタンであるが、水素と重水素の数が異なる分子である。

天然に存在する酸素の3種類の安定同位体からなるオソンのアイソトポログは表 2-7-6 のようになる。表の右の列には、見やすいように、酸素の原子量の一桁目を並べて書いているが、正式な表記法という訳ではない。

アイソトポマー (isotopomer) : 同位体異性体。同位体比率が等しく同位体の位置が異なるアイソトポログをアイソトポマーと呼ぶ。たとえば、メチルアミン、 $\text{CH}_3\text{-NHD}$ と $\text{CH}_2\text{D-NH}_2$ は、同一のアイソトポログであるが、異なるアイソトポマーである。

表 2-7-6-オソンのアイソトポログ

組成式		組み合わせ
$^{16}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$	$^{16}\text{O}_3$	666
$^{17}\text{O}^{17}\text{O}^{17}\text{O}$	$^{17}\text{O}_3$	777
$^{18}\text{O}^{18}\text{O}^{18}\text{O}$	$^{18}\text{O}_3$	888
$^{16}\text{O}^{16}\text{O}^{17}\text{O}$	$^{16}\text{O}_2^{17}\text{O}$	667
$^{17}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$		676
$^{16}\text{O}^{17}\text{O}^{16}\text{O}$	$^{16}\text{O}_2^{17}\text{O}$	668
$^{16}\text{O}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$		686
$^{18}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$		677
$^{16}\text{O}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$	$^{16}\text{O}^{17}\text{O}_2$	677
$^{16}\text{O}^{17}\text{O}^{17}\text{O}$		767
$^{17}\text{O}^{17}\text{O}^{16}\text{O}$	$^{17}\text{O}_2^{18}\text{O}$	778
$^{17}\text{O}^{16}\text{O}^{17}\text{O}$		787
$^{17}\text{O}^{17}\text{O}^{18}\text{O}$		688
$^{18}\text{O}^{17}\text{O}^{17}\text{O}$	$^{16}\text{O}^{18}\text{O}_2$	868
$^{17}\text{O}^{18}\text{O}^{17}\text{O}$		788
$^{16}\text{O}^{18}\text{O}^{18}\text{O}$	$^{17}\text{O}^{18}\text{O}_2$	878
$^{18}\text{O}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$		678
$^{18}\text{O}^{18}\text{O}^{17}\text{O}$		768
$^{16}\text{O}^{17}\text{O}^{18}\text{O}$	$^{16}\text{O}^{17}\text{O}^{18}\text{O}$	687
$^{18}\text{O}^{17}\text{O}^{16}\text{O}$		678
$^{17}\text{O}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$		687
$^{18}\text{O}^{16}\text{O}^{17}\text{O}$		687
$^{16}\text{O}^{18}\text{O}^{17}\text{O}$		
$^{17}\text{O}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$		

2. 7. 6 複合粒子・原子 (atom)

原子は、原子核と電子からなるというのは、今では常識であるが、原子の構造を示す原子模型は、それほど古くからある訳ではない。

理想気体の法則で知られるドルトンが、不可分なものとして atom (原子) の概念を考えたのは 1810 年である。

ファラデーがイオンを提唱したのが 1830 年、陰極線が発見され、電子が発見されたのは 1875 年であるが、原子は小さく、その中の構造を調べる研究はなかなか進まなかった。

原子は、それ以上小さなものはない最小単位と考えられたが、元素には多くの種類があるため、異なった原子が存在し、その構造が存在すると考えられ、原子模型が提案された。

図 2-7-4 は、ジュール＝トムソン効果で知られるウィリアム・トムソンが考えたトムソンの原子模型「スイカ型モデル」である (1901 年)。スイカのような原子があり、その中には数百～数万という多くの電子があり、全体として電氣的に中性となっていると考えられた。

図 2-7-5 は、次にジョゼフ・ジョン・トムソン (JJ トムソン) が考えた「プラム・プディングモデル」である (1905 年)。このモデルは、日本語ではブドウパンモデルとも言われる。電子は、原子の中を回転運動しており、このモデルでも電子の数は非常に多い。書籍によっては、二人のトムソンを混同して、JJ トムソンのスイカモデルとしているものがあるが、W トムソンがスイカモデル、JJ トムソンがブドウパンモデルである。

図 2-7-6 は、長岡半太郎の土星モデルがある (1903 年)。これは、同じ頃のバランの核-惑星モデルと

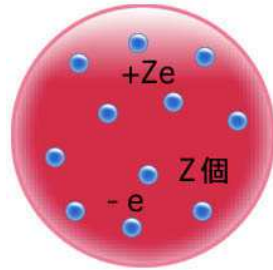


図 2-7-4-ウィリアム・トムソンの原子模型

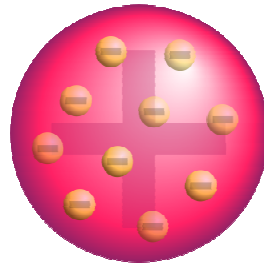


図 2-7-5-JJ トムソンの原子模型

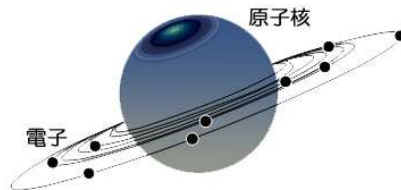


図 2-7-6-長岡半太郎の原子模型

も似ており、大きな土星のような原子核があり、電子はそのまわりを土星の輪のようにして回っているというモデルである。かなり電子の数は減ってきて、現在の原子モデルにも近づいてきたが、まだ実際の観測結果や実験結果を説明するには至っていない。

図 2-7-7 は、ラザフォードの太陽系モデルである。(1911 年)

原子核研究の父と呼ばれるアーネスト・ラザフォードには、数々の業績があるが、原子にアルファ線をあて、これの散乱を調べることによって、原子核は、原子の中心にあり、原子に比べると、極めて小さいことを突き止めた。

原子核は太陽系における太陽のような大きさと、電子は惑星のようにその周りをまわっていると考えたこのモデルは、電子の数も少なく、現在の原子モデルに極めて近い。

しかし、電子がいつまでも軌道上を運動することを説明できておらず、量子力学が必要となった。

図 2-7-7 は、ニールス・ボーアが考えたボーアの原子模型である (1913 年)。

ボーアの模型は、電子が、ただの粒子ではなく、量子であり、とびとびの軌道があり、不確定性原理によって位置と運動量は不確定、「波動方程式の解が電子の存在」であるということを示した。ボーアは、電子を波と考え、粒子である電子がエネルギーを失って原子核に墜落しない理由を説明した。

ルイ・ド・ブロイカ物質波の概念を提唱 (1923 年)、エルヴィン・シュレーディンガーがシュレーディンガー方程式を解くことによって、電子の運動を量子力学によって説明するまで (1926 年) 少し時間がかかったが、現在、最も正しい原子模型とされている。

ボーアの原子模型は、電子が波であるため、非常に図になりにくい。波は原子核の周りを一周して、位相がずれることなく一致したもののだけが、電子の軌道として許されるため、図にすると図 2-7-8 に示すようになる。

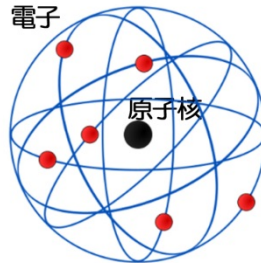


図 2-7-7-ラザフォードの原子模型

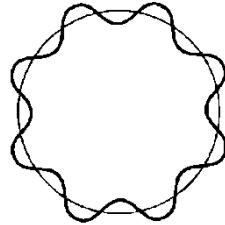


図 2-7-8-ボーアの原子模型

波である電子の表現は、視覚的には難しいためラザフォードのモデルが今でもよく利用されている。

図 2-7-9 は、米国の高校の教科書にあるリチウムの原子モデルであるが、こちらの方が直感的に分かりやすいため、現在も教育の現場などでは多用されており、原子力関係機関などのロゴにもこのようなイメージ図が使われることが多い。

この図にあるような、電子や陽子が球形であるとか、電子の軌道がこのようになっているかは、ただのイメージであって科学的な根拠がない。何といっても、電子と原子核の大きさの比率が著しく合っていないので大きな誤解を生みそうである。このイラストよりもボーアの原子模型の方が実際には近いのだが、原子を絵にするとどうしてもこのようなイメージになってしまうのである。

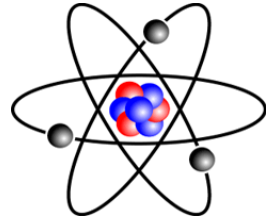


図 2-7-9-教育用の原子模型のイメージ

2. 7. 7 複合粒子・分子

原子は、いくつかの例外をのぞくと複数の原子が組み合わされて分子の状態で存在する。

例外のひとつが希ガスである。希ガスの原子は、最外殻の電子軌道が電子で埋まっており価電子がゼロであり、単原子のまま安定に存在することができる。

もうひとつの例外は、非常に低圧の状態における単原子分子である。地球の高層大気では、圧力が低く隣の分子までの距離があって反応の相手がないため、単原子やラジカルがそのまま存在することができる。例外といっても、宇宙ではそれが普通であって、地球上のように原子がたくさん存在する環境の方が、場所としては少ない。

高層の大気である熱圏は、高度 80~800km にあり、大気の密度が低いいため、分子は十分に混合されず、「重い分子が下に」、「軽い分子が上に」、下から窒素、酸素、ヘリウムといった具合に分離されたまま存在している。窒素よりも酸素の方が軽く上にあるのは、窒素は分子、酸素は単原子分子として存在しているためで

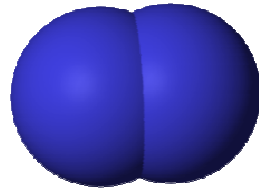


図 2-5-10-窒素分子のモデル

ある。

宇宙空間や低圧の状態では、単原子分子や二原子分子が安定して存在できるため、星間物質の中には、非常に多くの二原子分子が見つかっているが、地球上では二原子分子と希ガスを除く単原子分子は不安定であるため、種類としては非常に少ない。

空気の大半が、窒素 N_2 と酸素 O_2 であり、工業的にありふれている水素 H_2 や一酸化炭素 CO も二原子分子で存在しているので、二原子分子が安定しているように考えてしまうと、化学的に安定なのはもっと分子数が多い多原子分子であり、自然界では、二原子分子の種類の方が少ない。周囲には、二原子分子のガスの量が多いためつい勘違いしてしまう。

窒素や酸素のような同じ原子同士の二原子分子を「等核二原子分子」と呼び、極性のない完全な共有結合で分子を構成している。

ここで、化学結合の種類について簡単にまとめておく。

- 分子内結合
 - 共有結合
 - 配位結合
 - 金属間結合
- 分子集団を構成する結合
 - イオン結合
 - 金属結合
 - 水素結合
 - ファンデルワールス結合

分子内結合は、共有結合のような強い化学結合によって行われ、電子密度の局在や非局在によって結合の種類が異なっている。

共有結合は、その名の通り、価電子 (valence electron) を原子同士が共有することによって形成されており、非常に結合力が強い。価電子が原子軌道から分子軌道へ遷移している。

配位結合は、一方の原子から結合電子が分子軌道に供給され、共有結合に似ている。金属錯体などに多い。

イオン結合は、陽イオンと陰イオンの間の静電引力による結合でイオン結晶が形成される。塩化ナトリウムなどがよく知られる。

金属結合は、金属結晶の中を自由電子が動き回りクーロン力で結びついたものである。

水素結合は、共有結合で結びついた水素原子が周囲の窒素、酸素、フッ素などの

孤立電子対と作る相互作用（引力）による結合。共有結合やイオン結合よりはかなり弱い結合力である。

ファンデルワールスカは、分子間にはたらく「物理的」力であり、電荷などに起因しない相互作用を総称している。水素結合よりもさらに小さい。気体が液化できるのは、分子間力による。

2.8 物理学用語とトピック

(1) 電子ボルト (エレクトロンボルト)

SI 単位におけるエネルギーの単位はJ ジュールである。

力学、工学、産業、経済分野では様々なエネルギーの単位が用いられるが、物理学の素粒子の分野では電子ボルト (electron volt、eV) が用いられる。素粒子以外にも、原子核やその他の複合粒子、物性物理、化学反応の分野でもこの電子ボルトが広く用いられている。

定義としては、電子1個が1Vの電圧で加速される時の運動エネルギーである。

電子1個の電荷 (e、素電荷、電気素量) を SI 単位 (クーロン) で表わすと、 $1e = 1.6021766208 \times 10^{-19} \text{C}$ 、エネルギーと電荷、電圧の関係は、 $1\text{J} = 1\text{C} \times 1\text{V}$ であるから、 $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{J}$ となる。

電子ボルトは、「電子1個」に対応するエネルギーであるから、非常に小さな数値をとる。

特殊相対性理論より、 $E = mc^2$ であるから、1eVのエネルギーを静止質量に換算することができ、 $1\text{eV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-36} \text{kg}$ となる。気体分子運動論から、エネルギーはボルツマン定数 k を用いて、熱力学温度 T に換算できる ($E = kT$) ので、 $1\text{eV}/k = 1.16 \times 10^4 \text{K}$ となる。

エレクトロンボルトは非常に小さなエネルギーであるが、電子1個あたりということと、温度に換算すると非常に大きな値になることに注意が必要である。粒子1個を分かりやすい数字、たとえばアヴォガドロ定数 (1モル) の粒子に置き換えたり、質量 1kg あたりの量を求めたりする時は、桁数が非常に大きく変わるので、換算には注意しなければならない。

電子1個の質量は、 $9.109 \times 10^{-31} \text{kg}$ 、であるが、この値よりも、エネルギーに換算した $0.511 \text{MeV}/c^2$ の値が用いられることが多い。

ここで、MeV は百万電子ボルトであるが日本では「メブ」と呼ばれることがある。日本語は、長い外来語から省略形を作り出すことが多く、エレクトロンボルトでは長いので、keV、GeV、TeV をケブ、ジェブ、テブなどと呼ぶことがある。

1eV は化学反応や電池可視光のエネルギー、1keV は真空放電、電子、イオン、X線などのエネルギー、1MeV は放射性物質から放射される粒子のエネルギーレベルとなる。

電子の質量は 0.511MeV であるから、空間にこのレベルのエネルギーがあれば、エネルギーから物質 (電子) と反物質 (陽電子) を対生成したりできることになる。

対消滅によって γ 線になる時もこのレベルのエネルギーである。

陽子1個の質量は、 $1.672 \times 10^{-27} \text{kg}$ 、エネルギーに換算すると $0.938 \text{ GeV}/c^2$ とであるから 1 GeV のエネルギーというのは陽子や中性子などの粒子の反応実験に関わる数値となる。小林・益川理論で予言されていた第3世代のクォーク、トップクォークの質量は極端に大きく 175 GeV 、2012年に発見されたヒッグス粒子の質量は 126 GeV とされている。

(2) 対称性

2008年に3人の日本人にノーベル物理学賞が授与された。(ただし、南部陽一郎は米国籍)

理論物理学では、湯川秀樹、朝永振一郎以来のこととなったが、南部陽一郎先生の「素粒子物理学および原子核物理学における自発的対称性の破れの機構の発見」と小林誠、益川敏英先生の「自然界においてクォークが少なくとも3世代以上存在することを予言する、対称性の破れの起源の発見」という日本語の意味が分からなかった日本人も多かったと思う。たまたま同じ年に受賞したため、3人が同じ研究をしていたと勘違いした人もいるかもしれない。物理の本を読んでいると頻繁に現れる、この「対称性」という言葉は、数学、芸術、経済学などの対称性とは少し異なるため、慣れないと分かりにくい。対称性(シンメトリー、symmetry)とは、ある変換に関して不変である性質である。

よく知られる空間の対称性として鏡像対称性がある。ある鏡像面の鏡像が元の図形と一致する時、鏡像対称性がある。回転対称性や並進対称性などがある。動物や人工物の造形では、左右対称というものが多い。人間もほぼ左右対称、自動車や飛行機などの移動乗物もほぼ左右対称であるから画像を反転させても気づかないことがある。この場合、前後や上下にはほとんど対称性がないので、対称性は座標軸によって異なっている。

数学では、点対称、線対称、面対称が知られており、たとえば2次元線対称では、円、正多角形、長方形、3次元では、球、立方体、正四面体などが代表的な図形である。物理学における対称性も、ある変換に対する「不変性」を意味する。変換とは、たとえば、磁場は回転すると、プラスとマイナスが、自らと逆の場になるので、このような場合は、回転反対称性の性質を持ち、回転に対する不変性がない。

もう少し例を考えると、たとえば、原子がばらばらに配置され、磁気モーメントが相殺されて全体で磁性がない状態と、磁気モーメントが一定方向にそろっていて強磁性を持つ場合を比較すると、前者は、(方向がばらばらで)対称性が高く、後者の方は(方向が揃っているため)対称性が低いと言える。

同じ物質の気体と固体を比較すると、気体の方が対称性が高く、固体の中でも結晶よりも非晶質の方が対称性が高い。

造形などで、本来は、対称と予想されるものがそうでない場合、asymmetry、非対称と言われるが、物理学では、対称性がなくなることを symmetry breaking あるいは symmetry violation、と言い、日本語では「対称性の破れ」と言う。

対称性の破れは、日常生活や他の分野では聞かず、物理学特有の表現であるため、ここに最初のハードルがある。

気体の液化や液体の固化など、分子の対称性が大きく破れる時、「相転移」が起こり、一般的に大きなエネルギーの出入り（凝縮熱、融解熱）を伴う。気体—液体—固体の状態、結晶—アモルファスの場合は、相転移を「相変化」と呼ぶこともあり、蒸発や液化の場合は、相転移よりも相変化の方がよく使われる。

南部陽一郎先生は、理論物理学において数々の業績があり、特に強い相互作用の研究（「量子色力学」）や「ひも理論」の提唱（現在は「超ひも理論」）で知られるが、最先端の理論は、まだノーベル賞では評価できないこともあったためか、1960年代に行った研究の中から「自発的対称性の破れの機構の発見」で受賞したと思われる。

対称性の破れには大きく分けて「明示的な対称性の破れ」と「自発的対称性の破れ」が知られている。

「明示的な対称性の破れ」は、記述される運動方程式における対称性の破れを意味し、例としては、ゼーマン効果が知られている。磁場の中におかれた原子のスペクトルが分裂する現象で、ローレンツとゼーマンがノーベル物理学賞を受賞したのは1902年であり、かなり古くから知られる。

「自発的対称性の破れ」(spontaneous symmetry breaking) とは、運動方程式（具体的にはエネルギー作用子であるハミルトニアン）が対称性を持つが真空の対称性が破れていることを意味する。

真空の対称性というのは、少し分かりにくいですが、物理学における「自発的」とは、他の原因による結果ではなく、たまたまそれ自体で、ひとりで起こる現象を指しているので、自発的対称性の破れとは、対称性をもつ不安定な系の対称性が破れてより低い対称性の状態になることを意味する。

自発的対称性の破れの説明によく用いられる例が、ワインボトルの底のような形の中心が盛り上がったポテンシャルである。最もポテンシャルが高い瓶の底の真ん中（対称）にあった粒子が、より安定な状態（エネルギーが低い状態）を探していずれかの方向に転げ落ちた時、その粒子は中心からはずれて対称性が破れる。この粒子は、何かに押されて転げ落ちたのではなく「自発的」に落ちている。ワインボ

トルの底を小さなエネルギーで転がることができる、この粒子を量子化したものを南部ゴールドストーン・ボソン（南部ゴールドストーン粒子）と言う。

南部ゴールドストーン・ボソンは、素粒子ではなく、自発的対称性が破れた時に現れる粒子で、物理的には現われず、ヒッグス機構の中でゲージ場と結合する。ヒッグス場を示すヒッグス粒子は、17番目の素粒子として2012年に存在が確認されている。

われわれの工学分野では、エネルギーの保存、運動量の保存、質量の保存などが重要な保存則であるが、より基礎的な物理学では、対称性の保存や対称性の破れの研究が重要で、その他の保存則はより基本的な保存則から導かれることも多い。南部陽一郎による自発的対称性の破れの機構発見以降も、物理学の大きなテーマとなっている。

小林・益川理論で示されたのは「CP対称性の破れ」と呼ばれるもので、宇宙や物質の成り立ちに関する示唆も与える。

C対称性とはチャージ対称性あるいは荷電共役とも呼ばれ、電荷における対称性であり、全ての粒子が反粒子に変換された宇宙と言える。P対称性（パリティ対称性）とは、全ての粒子が鏡像で作られた宇宙である。合わせてCP対称性という。さらに、T対称性（時間対称性）というのがあり、時間の向き（エントロピーの方向）が逆の宇宙を指す。

物理学では、基本的に対称性が保存されることを想定して研究が行われる。しかし、C対称性を破る粒子が発見され、P対称性が破れることも発見され（1950年代）、しばらくは、CP二つの対称性の合計が保存されると信じられてきたが、CP対称性も破れることがK中間子の崩壊から発見された（1964年→1980年ノーベル物理学賞）。

CP対称性が保存されずに破れることが分かり物理学の大きな課題となったが、これを説明したのが小林・益川理論（1973年）である。この時、予言された3つのクォークが発見され、日本のKEKや米国のSLAC国立加速器研究所の実験を通じて、この理論の正しさが証明され、2008年のノーベル賞になった。

宇宙が生まれた時、空間のエネルギーから物質と反物質が生まれたが、CP対称性が保たれ、そのほとんどが対消滅しエネルギーにもどった。

しかし、反物質よりもわずかに多かった物質（100億個のペアに対して1個くらいの割合で）が残り、その結果、素粒子や物質が生まれ、宇宙には星や銀河が生まれた。もし物質と反物質の数が同じで対称性を持っていたら、宇宙には物質は生まれなかったが、CP対称性が破れたため、宇宙に物質が生まれ、反物質は消えた、ということが小林先生の解説本にある。

T対称性も破れることが見出されており、全ての物理現象でCPT対称性が保存されるというCPT定理(1951年、ジュリアン・シュウィンガー)も提唱されている。

超対称性(supersymmetry)、超対称性粒子の研究が行われている。

超対称性とはフェルミオンとボソンの対称性を意味する。既知のフェルミオンに対する対称性粒子である未知のボソン、既知のボソンに対する未知のフェルミオンが対応し、超対称性パートナーと呼ばれる。素粒子は、ヒッグス粒子の発見によって17種類とされているが、数え方は他にもあり、超対称性の概念を入れていくとフェルミオンだけでも反フェルミオン、右巻きと左巻き、と一気に何倍にも数が増えてしまう。現在のところ超対称性粒子は発見されていないが、そのうちのひとつニュートラリーノがダークマターの候補とする研究がある。

最近、盛んに聞くようになったダークマターは、今のところ、未知の暗黒物質「ダークマター」のみであり、正体不明のままとされている。答えに近づいている学者もいるとは思いますが、なんととってもあまりにも大きな話であり、いつ答えが示されるのか定かではない。

図は、最新の観測による宇宙の組成である。図中のバリオンやニュートリノが現在明らかになっている「物質」であり、全体の5%ほどを占め、銀河や星を構成する物質はその10分の1ほどである。ダークマターは既知の物質のおよそ5倍も存在する未知の物質である。

エネルギーと質量は等価であるから組成の中には、物質とエネルギーの両方が含まれており、未知のエネルギー、ダークエネルギーは、ダークマターのさらに3倍ほどの量が見積もられている。

20世紀後半になって宇宙の大規模構造が発見され(1986年)、その質量が見積もられたが、観測される物質の質量とは、大きな差があり、これを補う物質、ダークマター(暗黒物質)の存在が仮定された。さらに宇宙の加速膨張が発見され(ビッグバン膨張ではなく第二のインフレーション)、インフレーション理論のためにダークエネルギー(暗黒エネルギー)の概念が導入された。理論から導かれたダークエネルギーとダークマターの量は、その後の観測結果とほぼ一致しているが、それを構成するものが何であるのか正体は不明である。

宇宙の73%がダークエネルギー(暗黒エネルギー)と呼ばれる未知のエネルギー、残りが物質である。物質は、全体の27%、物質の85%がダークマター(暗黒物質)と呼ばれる未知の物質で全体の23%を占める。

ダークエネルギー、ダークマターは暗黒といっても、黒いものや暗黒星雲のように光を遮るものではない。観測・特定できていない未知のエネルギーと物質なの

でこう呼ばれる。

候補はいくつかあり、正体が分かった時には別の名前になるかもしれない。

バリオン（ハドロンのうち3つのクォークからなる複合粒子、原子核をつくる陽子や中性子など）が4.4%。バリオン非対称性によって反物質はゼロである。

ニュートリノは、0.1~1.5%、ニュートリノの質量は非常に小さいが、数が多いため全体の量が非常に多い。

物質（ハドロンやレプトン）の一部が、集まって星や銀河を作っており、これが0.5%である。したがって、宇宙を構成する物質・エネルギーのうち95%が未知のもので、既知の物質・エネルギーは合計しても5%というところになる。

観測可能な宇宙の中には、莫大な数の銀河とそこに含まれる非常に多くの恒星があるが、それでも宇宙全体の0.5%にしかない。

しかもその大半は水素とヘリウム原子核からなるので、その他の元素は、ゼロではないもののほとんどゼロに近い。

地球のような岩石惑星は、鉄や酸素やケイ素など、宇宙の組成表には全く表れない極めてわずかな元素を主成分としている。地球の自然は宇宙の不自然であり、地球の常識は宇宙の非常識と言えるほど、宇宙の全体図は地球とはかけ離れている。

ダークエネルギーを除く残りの粒子の分布を考えると、その密度、 1m^3 あたりの粒子数は、概略、光子とニュートリノが 3×10^8 個、陽子と電子が0.3個、中性子が0.05個、ダークマターが0.01~0.1個ほどになる。

光子は素粒子であるが、ボソン（相互作用粒子）であってフェルミオン（物質を作る粒子）ではないので、物質を作る粒子としては、ニュートリノが圧倒的に多いことが分かる。陽子や電子より9桁も密度が大きい。

特に、太陽のような恒星のまわりには莫大な量のニュートリノが放出されているため、地球上では人の体ほどの大きさに対して、毎秒数百兆個のニュートリノが通過している。しかしニュートリノは、重力や電磁力とは相互作用がないため、全く感じることができず、通常の方法では観測・計測することができない。

マイクロ波背景放射（CMB）の観測によると、宇宙は極めて平坦で、3K宇宙中の100万分の1Kほどのわずかな温度ゆらぎが測定されて、宇宙の大規模構造、銀河や星の配置とボイドと呼ばれるほとんど何も無い空間の地図ができています。

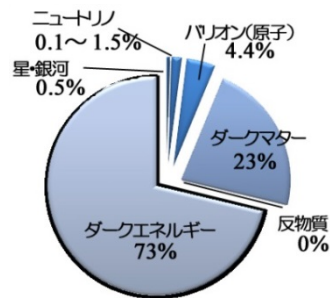


図 2-8-1-宇宙の組成

宇宙は、非常に対称性が高く、わずかに対称性が破れたところから物質や星が生まれている。素粒子物理学における対称性の破れの研究成果が、宇宙の起源の解明を一步前進させたが、具体的な反応や具体的な粒子については、まだこれからの課題となっている。