

3.4 ヘリウムの発見

ヘリウムは、アルゴンと同じ周期表 18 族の希ガスであり、空気中に存在し、産業ガスとして広く利用されている。しかし、深冷空気分離装置では製造されておらず、物性、資源、製造方法など、工業的には、アルゴンとの相違点が多い。

ヘリウムは、自然界（宇宙）では、水素について 2 番目に多い元素であり、最初にその存在が見出されたのは、皆既日食中の太陽光の観測である。

ウィリアム・ウォラストン（1766～1828 年、イングランド）が太陽光のスペクトル（輝線）に暗線を発見した（1802 年）。

ヨゼフ・フォン・フ라운ホーファー（1787～1826 年、ドイツ）も太陽光に暗線を発見（1814 年）、系統的にこれを研究した。これは、太陽大気に含まれる元素や地球の空気に含まれる元素によって特定の波長の光が吸収されて起こる現象であり、この線は「フ라운ホーファー線」と呼ばれるようになった。

光をプリズムや回折格子で波長に展開、そのスペクトル（輝線）を研究する分光学が 18～19 世紀にかけて発達したが、スペクトルの中に現れる暗線（吸収線）であるフ라운ホーファー線を研究することによって遠くのことを調べることができるようになり、太陽光線から太陽がどのような元素を含んでいるのかを詳細に調べられるようになった。（2.2.3.2 銀河、 10^{21} m～を参照）

1868 年、インドで観測された皆既日食の時に、ピエール・ジャンサン（1824～1907 年、フランス）が太陽彩層の光から波長 587.49nm の暗線を観測した。この暗線は、現在は D₃ 線と呼ばれ、波長は 587.565nm である。

なお、彩層（chromosphere）とは、恒星の表層部分で、光球の上側、コロナの下側に位置する薄いガス層であり、太陽光線が強いため地上からは肉眼では観測できないが、皆既日食時には、赤く輝き観測が可能となる。現在は、太陽観測衛星「ひので」（2006 年打ち上げ、地球からの高度 680km の太陽同期軌道）によって、その構造の調査が進められている。

ジャンサンと同じ年、サー・ノーマン・ロッキヤー（1836～1920 年、イングランド）も、英国で太陽光のスペクトルを分析し、これは地球上には存在しない元素であると結論付けた。

ロッキヤーとエドワード・フラン克蘭ド（1825～1899 年、イングランド）が、これを「ヘリウム」（helium、ギリシャ語で太陽）と名付けた（1868 年）。新元素ヘリウムは、天文学者のロッキヤーと化学者のフラン克蘭ドによって、太陽の中から発見された。

ロッキヤーは、この翌年にネイチャー誌を創刊（1859年）、レイリーが、ネイチャー誌に、「化学窒素の密度よりも大気窒素の密度の方が大きい」という論文を投稿をし、アルゴン発見のきっかけとなったのは1894年である。アルゴンよりもかなり前にヘリウムが発見されていることになるが、それは地球上ではない。太陽にしかない物質はとても新元素と呼べるものではなかった。

ロッキヤーらによるヘリウム発見の翌年、ドミトリ・メンデレーエフ（1834～1907年、ロシア）が、最初の63個の元素の周期表を完成させた。その時、水素の次の2番目の元素は空欄であった。ここに入るヘリウムという名前の新しい元素は、太陽光球の4分の1を占めるほど大量にあったが、地球上では長い間発見されず、周期表の空欄は、すぐには埋まらなかった。

地球上にない元素では、その性質を調べることもできず、周期表に書き込むことができなかったが、ロッキヤーは、ヘリウムは太陽にのみ存在する元素であり地球には存在しないという仮説をたて、化学界では、ヘリウムは「仮想元素」として承認された。

1882年、ルイーシ・パルミエーリ（1807～1896年、イタリア）が、火山の溶岩中にD₃線スペクトルを発見、地球にもヘリウムがあるらしいと思われた。

1890年、米国地質調査所のウィリアム・ヒレブランド（1853～1925年、米国）が、閃ウラン鉱から化学的反応性のないガスを発見した。しかし、この時に調べたスペクトルから窒素だと断定されたため、ヘリウムの発見には至らなかった。

1895年、ヒレブランドの報告を読んだラムゼーは、これは窒素ではないと推測して、クレーベ石（閃ウラン鉱や希土類元素を多く含む鉱石）を入手、硫酸処理などを経て窒素ガスを除去、残留ガスの中からヘリウムを発見し、分離に成功した。ヘリウムは、太陽光から発見されて30年もたって、ようやく、地球上で発見された。これは、レイリー・ラムゼーが空気からアルゴンを発見し（1894年）、これを正式に発表してからわずか2ヶ月後のできごとであった。仮想元素であったヘリウムは地球にも存在し、ラムゼーは1895年のたった2ヶ月の間にアルゴンとヘリウムという2つの重要な新元素の発見を報告したのである。

ヒレブランドはラムゼーに宛てた手紙の中で、ヘリウムを見逃した失敗の原因について次のように述べたという。

「化学的研究には多くの時間を費やしたが、規定の役所の仕事からそれ以上の時間を割くことができなかった」「明るい輝線を発見していたが、判別ができず、放電管の真空度が変わると少しスペクトルが変動するので異常現象をそのせいにして

しまった」「チームの誰かが新元素かも知れないと言った言葉を否認してしまった」地質調査所という役所の仕事、実験結果を詳細に調べなかったこと、おそらく若手の技術者の突拍子もない話を本気にしなかったこと、など現代人でも思い当たるようないくつかの理由によってヒレブランドは大発見を見逃してしまったということのようである（ただし、その後、天然ガスの中から不燃性のガスを発見、地下に大量に存在するヘリウムの採掘・商業化に成功したのは米国である）。

1895年には、ハインリヒ・カイザー（1853～1940年、ドイツ）が、鉱泉の湧出ガス中に D_3 線スペクトルを発見、空気中にもヘリウムがあると報告した。

レイリーは、空気中のアルゴンの中に D_3 線がみられないと報告、ラムゼーも空気中のヘリウムの存在を信じなかった。レイリーとラムゼーはアルゴンを探して空気を詳細に研究してきており、それまでに発見されていない空気中のヘリウムの存在を信じることでできなかったのである。

しかし、3年後、ラムゼーの研究室では、粗製ネオン中にヘリウムを検出、ラムゼーは自ら空気中にヘリウムが存在することを証明した。それまでの常識を覆して数々の希ガスを発見してきたラムゼーは、一旦は信じなかった空気中のヘリウムの存在を認めたのである。（鉱泉にはウランやラジウムが含まれ、近くの空気中のヘリウムの濃度が他の場所よりも高かったためと思われる）

空気からヘリウムを発見したハインリヒ・カイザーは、分光学の権威であり、化学におけるスペクトルの膨大な地図を製作し、その名前は、波数の単位、カイザー[cm^{-1}]として知られている（旧 cgs 単位、非 SI）。

また、カイザーは、「Adsorption」（英語は adsorption、和訳は「吸着」）という言葉を作り出した（1881年）ことでも知られる。化学工学の分離技術の中で最も広く用いられている操作は、蒸留と吸着であるが、蒸留が古代の錬金術の時代から存在する古い技術であるのに対して、「吸着」は、非常に新しい科学であり、その言葉が作られ、吸着現象（表面科学）が研究されるようになったのは19世紀末のことである。

ラムゼーは閃ウラン鉱から、カイザーは空気からヘリウムを発見、ヘリウムは仮想の元素ではなく、実在する元素となった。

ヘリウムが発見された「閃ウラン鉱（ウラナイト、uraninite）」は、10種類ほどある天然ウラン鉱石のひとつであり、希土類元素やトリウムなどを含み、多くの研究者がこれを研究対象とし、マリ・キュリーとピエール・キュリーがラジウム

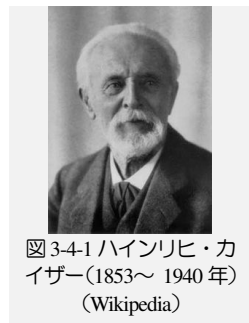


図 3-4-1 ハインリヒ・カイザー(1853～1940年)
(Wikipedia)

やポロニウムを発見したことで知られる。

6つの希ガスのうち、一番軽いヘリウムと一番重いラドンは鉱物（ウラン鉱石）から発見され、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノンは空気から発見された。

ヘリウム（地球上のヘリウム）とネオンはラムゼー、アルゴンはレイリーとラムゼー、クリプトンとキセノンはラムゼーとモーリス・トラバースによって発見されており、ラドン以外の希ガスの発見にはラムゼーが関わっている。

1907年、アーネスト・ラザフォード（1871～1937年、ニュージーランド、英国）は、新元素ヘリウムがガラス管を透過することを発見、これがアルファ線（アルファ粒子）であることを発見した。

ウランの崩壊によって生成されるラジウムは、さらにアルファ崩壊（ α 崩壊）してラドンになるが、この時、放出されるアルファ線（ α 線、 α 粒子）がヘリウム（ ${}^4\text{He}$ ）の原子核そのものであるということが示された。

ヘリウムには、 ${}^3\text{He}$ と ${}^4\text{He}$ の同位体が存在するため、ヘリウム原子核と α 粒子は同義ではないが、 ${}^3\text{He}$ の存在比が非常に小さいため、「 α 線、 α 粒子＝ヘリウム・イオン、ヘリウム原子核」という関係が定着している。

現代の科学技術を支える素粒子物理学は、19世紀末から20世紀にかけてのヘリウムの発見、 ${}^4\text{He}$ 原子核である α 線を用いた研究に始まり、ヘリウムが果たした貢献は非常に大きい。これらの研究は、同じ時代の熱力学の研究、ガスの液化、分離・精製技術、低温技術や高真空技術と相互に密接に関係している。

表にアルゴンとヘリウムおよび関連技術の年表を示す。

表 3-4-1 アルゴン・ヘリウムとガス関連技術の年表

時代	出来事	関係者
1 世紀	酸化ウランの利用	イタリアのガラス細工着色・工芸職人
1789 年	ウランの発見 (閃ウラン鉱から)	マルティン・クラプロート (独)
1828 年	トリウムの発見 (トール石から)	イエンス・ベルセリウス (スウェーデン)
1868 年	ヘリウムの発見 (太陽光から)	ピエール・ジャンサン (仏) ロッキヤー (英)
1894 年	アルゴンの発見 (空気から)	レイリー卿、ウィリアム・ラムゼー (英)
1895 年	ヘリウムの発見 (閃ウラン鉱から)	W・ラムゼー (英)
	空気の液化・リンデサイクル	カール・フォン・リンデ (独)
1896 年	放射線の発見 (ウランから)	アンリ・ベクレル (仏)
1897 年	電子の発見	ジョゼフ・ジョン・トムソン (英)
1898 年	トリウム系列アルファ崩壊の発見	マリー・キュリー (ポーランド)
	ネオン、クリプトン、キセノンの発見	W・ラムゼー (英)
	ガンマ線の発見	ポール・ヴィラール (仏)
1901 年	空気の液化・クロードサイクル	ジョルジュ・クロード (仏)
1902 年	天然ガスからヘリウムの発見	米国カンザス州
1905 年	カリウムの放射性崩壊の発見	J.J. トムソン
	元素の崩壊の発見	アーネスト・ラザフォード
1908 年	ヘリウムの液化	ハイケ・カメルリング・オネス (蘭)
1910 年	深冷空気分離ダブルカラムの発明	C・リンデ、フリードリヒ・リンデ
1911 年	陽子の発見	E・ラザフォード
1913 年	安定同位体の発見 (ネオン同位体)	J.J. トムソン
1916 年	ヘリウムの国家備蓄計画発動	米国政府
1927 年	不確定性原理	ヴェルナー・ハイゼンベルク (ドイツ)
	α 崩壊の量子論	ジョージ・ガモフ (ウクライナ)
1928 年	中性子の発見 (α 線照射)	ジェームズ・チャドウィック (英)
1930 年	陽電子の発見	カール・デイヴィッド・アンダーソン
1932 年	液体ヘリウムの超流動を発見	ピョートル・カピッツァ (ソ連)

補足 3-2：ロッキヤーのヘリウム発見とラムゼーのヘリウム発見

一般にはヘリウムの発見者はロッキヤーとされているが、前述の奥野久輝先生は次のように記述している。「ロッキヤーらをヘリウムの発見者とするのは、いささか問題がある。ロッキヤーは、自分の著書の中でもヘリウムについて全く論じることがなく、D₃線については、おそらく水素の別の形態ではないかとしており、ヘリウムという名前をつけた本人がほとんど無視していた仮想の元素を実際の元素とした本当のヘリウム発見者はラムゼーである」という。

ラムゼーは、自身がレイリーと発見した新元素アルゴンが化合物を作らないことが、化学の常識を外れており、なんとか化学反応を起こそうと様々な試みを行い、ことごとく失敗していた。そこで、天然の鉱物の中にアルゴンの化合物があるのではないかと考え、他の研究者がよく報告しているクレーベ石 (cleveite) を入手し、これを調べている時に偶然ヘリウムを発見した。

1895年、ネイチャー誌には、次のような記事が載った。

「われわれ(編集局)は、ラムゼー教授から次の報告を受けた。『予は、アルゴンの化合物に対する手がかりを探し求めている。・・・クレーベ石はノルウェーに産する希産の鉱物で、ヒルブランドはこれを希硫酸と温めると窒素を放出すると述べている。・・・予は、もしこの窒素と称せられるものが実はアルゴンであるとわかったら、ウランをアルゴンと化合させることができるか、試みるつもりであった。・・・試料気体について・・・残留気体はアルゴンとヘリウムの混合物より成るものであった！強く輝く黄色線は、ヘリウム線と一致する・・・予は、目下この気体を集めつつあるので、近くその性質について発表できるであろう。』

ヒルブランドは、新元素ヘリウムを発見していたにも関わらず見落としたことになるが、ラムゼー教授の発見に対して祝辞を送り、鉱山に関わる役人である自分には研究の時間がなかったこと、部下が新元素ではないかと提案していたことを握りつぶしてしまったことを後悔していると述べている。

なお、閃ウラン鉱の変種である希土閃ウラン鉱には、クレーベ石という名前がつけられているが、由来となっているパール・テオドル・クレーベ(1840~1905年、スウェーデン)は、農芸化学の研究者であり、多くの植物の学名の命名者として知られている。ネオジム、プラセオジムの混合物を見出し、新元素ホルミウムとツリウムを発見している。

3. 5 原子核の崩壊とアルゴンの生成・ヘリウムの生成

地球創世記に存在していた希ガスはほとんど失われており、現在、地球上に存在している希ガスのほとんどは、核変換（原子核の崩壊）によって生成されている。

アルゴンは、カリウムを親物質として、電子捕獲（EC 崩壊）という、珍しくはないが、やや馴染みのない崩壊過程で生成され、ヘリウムは、主にウランを親物質とするアルファ崩壊（ α 崩壊）という、自然界にごくありふれた反応に伴って生成されている。地球上の希ガスを理解するためには、原子核崩壊の理解が必要である。

われわれを取り巻く放射線には、いくつかの種類に分類され、①一次宇宙放射線（宇宙線や太陽から来る粒子）、②これらの粒子と地球大気との反応による二次宇宙放射線（空気シャワー、オーロラ）、③非電離放射線（太陽光線、紫外線、電磁波）、④人工のX線・粒子線（医療診断用、非破壊検査用）、中性子線（原子炉等）などが知られている。

宇宙からやってくる放射線、人工の放射線、の他に地球上（地表面、地殻、水圏）のいたるところに原子核崩壊に伴う放射線がある。

原子核の崩壊に伴って放射線が放出され、 α 崩壊から α 線、 β 崩壊の一部から β 線が放出され、 γ 崩壊やIT崩壊（核異性体転）からは γ 線、EC崩壊からは特性X線が放出される。

原子核が崩壊する時、ひとつの原子核から2つ以上の反応性生物ができるが、軽い方の生成物は、電子や陽電子など種類が限られているため、その種類によつて壊変形式が分類整理されている。大きく分けると、①粒子（中性子や α 粒子のような大きな粒子）を放出する粒子放出崩壊、②ベータ崩壊（電子のような小さな粒子）、③崩壊によって核種が変わらない核種不変崩壊があり、その他に④制動放射による放射線（電磁波）の発生がある。

図3-5-1に原子核の主な崩壊モードを示す。

粒子放出崩壊では、 α 崩壊が最もよく知られている。

原子核の中から α 粒子が飛び出す現象は、通常は超えられない障壁を量子が染み出すトンネル効果としてガモフによって示された（1928年）。

β 崩壊には、何種類かの崩壊モードがあり、その中には β 線を出さないものもあるので少々ややこしい。 β^- 崩壊から放出される放射線は、電子線であるが、測定されるエネルギーはばらばらで、電子のエネルギーにはなっておらず、一時はエネルギー保存則の破れまで検討されたが、観測されない電荷が中性の粒子がある

とパウリが予測、その後、ニュートリノが発見された。

アルゴンとヘリウムの生成に関わるβ崩壊とα崩壊については、次節以降に、もう少し詳しくみていく。

粒子放出崩壊

① α崩壊
(ガモフがトンネル効果によって説明)

②中性子放出 ③陽子放出 ④自発核分裂(超重元素) ⑤クラスタ崩壊(重粒子)

ベータ崩壊 (パウリがニュートリノを予言しベータ崩壊を説明)

① β⁻崩壊
電子 反電子ニュートリノ

② β⁺崩壊
陽電子 電子ニュートリノ

③軌道電子捕獲
EC崩壊またはε崩壊
(湯川が提案) 電子ニュートリノ

④二重β崩壊 ⑤二重電子捕獲

核種不変過程による崩壊

①γ崩壊 ガンマ線(電磁波、光)
②核異性体転移
③内部転換

制動放射 (テスラが発見)

①人工X線 → 非破壊検査、レントゲン検査、X線CT、X線回折
②シンクロトロン放射(電磁波) → KEKフォトンファクトリー、SPring-8
③チェレンコフ放射(チェレンコフ効果) → カミオカンデ、水冷却炉

ヘリウム生成

① ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}^{2+}$

① ${}_{19}^{40}\text{K} \xrightarrow{\beta^-} {}_{20}^{40}\text{Ca}$

② ${}_{9}^{18}\text{F} \xrightarrow{\beta^+} {}_8^{18}\text{O}$
PET診断

③ ${}_{19}^{40}\text{K} \xrightarrow{\epsilon} {}_{18}^{40}\text{Ar}$

アルゴン生成

図 3-5-1-原子核の主な崩壊モード

3. 5. 1 ベータ崩壊 (β^- 崩壊、beta decay) とニュートリノ (neutrino)

ベータ崩壊 (β 崩壊) は、原子核の中から電子 (β^- 崩壊) または陽電子 (β^+ 崩壊) が飛び出して「原子番号が変わり、質量数が変化しない」崩壊モードである。

アーネスト・ラザフォード (1871~1937 年、ニュージーランド、イングランド) は、原子核が崩壊して陽子と電子が放出される現象を発見した (1898 年)。

電子の流れは、電子線あるいは β 線とも呼ばれ、この反応は β 崩壊と呼ばれた。電子はその前年 JJ トムソンによって発見されていた。

α 崩壊や γ 崩壊のエネルギーがとびとびの値をとるのに対して β 崩壊のエネルギー分布は連続的に現われ、反応の前後でエネルギー保存則と角運動量保存則が成立しないことが問題となった。 β 崩壊が発見された当初の大きな謎である。

ヴォルフガング・パウリ (1900~1958 年、オーストリア) は、何か、普通の方法では観測されない未発見の粒子が存在すると考えて、 β 線のエネルギーの連続性を説明した (1931 年、パウリのニュートリノ仮説)。

エンリコ・フェルミ (1901~1954 年、イタリア) は、パウリが予想した粒子は、中性子が崩壊する時に陽子とともに放出される電気的に中性な新粒子であると考え、「ニュートリノ」(中性微子) と名付けた。

電気的に中性な粒子は観測が難しいが、電荷のない中性子 (neutron) の存在は、アーネスト・ラザフォードによって予想され (1920 年)、ジェームズ・チャドウィック (1891~1974 年、イングランド) によって発見された (1932 年)。しかし、電気的に中性で、質量が非常に小さいと予想されたニュートリノの検出は困難であった。

ニールス・ボーア (1885~1962 年、デンマーク) は、原子核内部の粒子にはエネルギー保存則が成り立たないという大胆な仮説をたて、パウリの仮想粒子に反対した (1934 年)。

ボーアという人は、大胆な提案で知られる。原子の中の軌道電子が原子核に墜落しない理由を考えたとき、ボーアは、電子の軌道はとびとびであり外側の電子は内側の電子に遮られて落ちることができないと提唱し、位相の揃った軌道のみが許されるというボーアの原子模型が作られた。ド・ブロイは量子である電子の波としての性質を記述、物質波の概念を確立した。

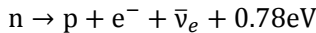
また、物理学の確率性と決定論をめぐる論争では、ボーアは、「不確定」は自然の本質であり「原理」であるという解釈によって決定論を唱えるアインシュタイン

ンと激しく論争し、結果、量子力学の発展に大きな貢献をした。しかし、原子核の中ではエネルギー保存則が成り立たないというポーアの大胆な仮説は、ニュートリノの発見によってパウリの仮説が証明され、不発に終わった。

パウリの予言から20年以上たち、20世紀も中盤になって、フレデリック・ライネス(1918~1998年、米国)とクライド・カワン(1919~1974年、米国)が、ついにニュートリノを発見した(1953年)。ライネスらは、原子炉から出るニュートリノを陽子・中性子と反応させて荷電粒子を発生させる方法で検出、原子炉の運転と信号の増減を計測して、観測値が理論の予測と一致することを示してニュートリノの存在を実証した。

ニュートリノの発見によって、β崩壊におけるエネルギー保存則と角運動量保存則が成立し、β崩壊の謎が解かれ、物質の構造を調べる研究が進んだ。

中性子の平均寿命は、約886.7秒(15分)であり、β崩壊する。

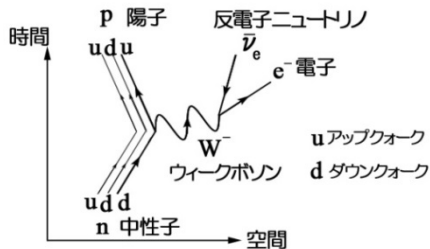


中性子は、このように短時間で崩壊するが、原子核の中にある時の中性子は安定である。したがって、宇宙を作っている原子は短時間のうちに崩壊せずに維持されている。

図3-5-2にひとつの中性子がβ崩壊して3つの粒子になる様子を図示する。

一番上の図は、量子色力学(別項)におけるバレンス・クォークモデルに従って標準のファインマンダイアグラムの書式で表したものである。

縦軸が時間、横軸が空間、中性子を構成するダウンクォークのひとつがアップクォークに変わり中性子が陽子に変換、そこで現れる波(ウィークボソン)から電子と反電子ニュートリノが生成される。



中性子のβ崩壊のファインマンダイアグラム

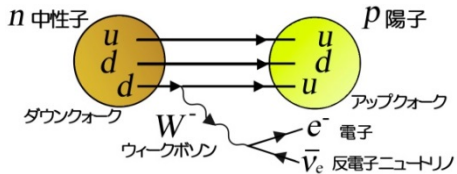


図3-5-2-中性子のβ崩壊

下の図は、ファインマンダイアグラムではなく、時空の表現があいまいであるが、粒子と波のイメージで示したもので、直感的には分かりやすい。

不安定な核種では、原子核の中の中性子が核の外に飛び出すことがあり、単独の中性子は不安定であり、 β^- 崩壊が起こる。(低い確率であるが、原子核の中の中性子が直接 β^- 崩壊することもある。)

図 3-5-3 に不安定な原子核の β^- 崩壊の様子を示す。

原子核の中の中性子が β^- 崩壊すると、陽子が残り、電子と反電子ニュートリノが放出されるため、原子核の原子番号がひとつ増え、質量数は変わらないという「 β^- 崩壊」が起こる。

なお、この図は、反応の過程を省略して反応の前後の結果だけを示したものであり、 β^- 崩壊で、原子番号がひとつ増えて、別の元素の原子に変わるということを粒子のイメージとして示している。また図にあるように、複合粒子（陽子、中性子）や素粒子（電子、ニュートリノ）が球体の粒子ということではない。

カリウム 40 (^{40}K) が地球の空気中のアルゴン 40 (^{40}Ar) の親物質であることを示したが、カリウム 40 は、89.2%の確率で起こる β^- 崩壊で、原子番号がひとつ増えて、カルシウム ^{40}Ca に壊変し、残り 10.8%の確率で EC 崩壊し、原子番号がひとつ減ってアルゴン ^{40}Ar に壊変する。

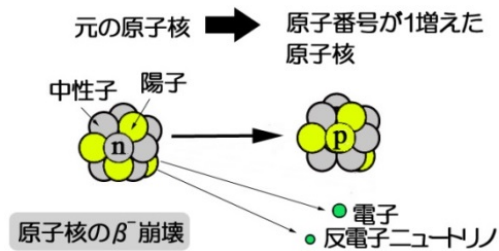


図 3-5-3-不安定な原子核の β^- 崩壊

β^- 崩壊を説明したニュートリノの研究は、その後も続けられ、1987年には、小柴昌俊らが3種類のニュートリノの質量を発表、2002年に「宇宙ニュートリノの検出に対するパイオニア的貢献」によってノーベル物理学賞を受賞した。2015年には、ニュートリノ振動の発見によって梶田隆章とアーサー・B・マクドナルドがノーベル物理学賞を受賞している。この時、使用された神岡研究施設のカミオカンデとスーパーカミオカンデには、巨大な超純水水槽と特殊な光電子増倍管が設置去られており、装置の本来の目的はニュートリノの検出ではないが、宇宙ニュートリノを検出した巨大な施設や最先端の測定技術が報道され、広く知られるようになった。

3. 5. 2 ベータ崩壊 (β^+ 崩壊) と PET 診断

PET (Positron Emission Tomography) 診断の普及によって、「ペット診断」や「ポジトロン断層法」という言葉が広く知られるようになった。これは β^+ 崩壊を利用した画像診断技術である。

β^+ 崩壊は、陽子過多の原子核から陽電子がひとつ飛び出し、 β^- 崩壊とは逆に、原子番号がひとつ減る崩壊モードである。陽子が中性子に変わり、放出される粒子は、 β^- 崩壊とは対称のものになる。電子ではなく陽電子、反電子ニュートリノではなく電子ニュートリノとなる。

陽電子 (ポジトロン) を利用した断層像は、比較的古い技術であり、1950 年代より研究が行われていた。1975 年に PET 装置が開発され、1980 年代から画質向上が進み、1990 年代後半から臨床利用が広まり、現在は、保険診療が適用されるまでになった。先進医療のひとつとされていたが、歴史の長い診断法である。

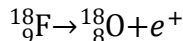
陽電子は、電子の反粒子 (反物質) である。電子とは逆の電荷を持つ粒子であるため、電荷のない中性の反粒子と比べると、分かりやすく、検出しやすい。陽電子は、その対消滅現象が高校の物理の教科書にもあり、最も古くから知られている反粒子であるが、PET 診断が普及するまでは、広く知られることがなかった。

造影剤の原料となる ^{18}O 同位体の製造には、深冷空気分離装置の技術が利用されているので、PET 診断法について少し紹介する。

^{18}F -PET 診断法は、 ^{18}F という疑似物質 (グルコース・アナログ) を放射性薬剤 (一種の造影剤) として人体に投与して、がんなどを非常に高精度に撮影する検査法である。薬剤の正式名称は、フルオロ・デオキシ・グルコース fluorodeoxy glucose (^{18}F) であるが、長いので、FDG または ^{18}F -FDG、 ^{18}F FDG で通じる。

投与された ^{18}F FDG は、がん細胞に集まり、 ^{18}F の β^+ 崩壊が利用される。

図 3-5-1 の β^+ 崩壊の例は、この時の、フッ素 ^{18}F が崩壊して酸素 ^{18}O が生成されるモードを示している。放射性的な薬剤に含まれる ^{18}F が崩壊し、そこから陽電子が放出される。



β^+ 崩壊によって原子核から飛び出す陽電子 (e^+) は、反粒子であるから、短時間のうちに周囲にある電子と反応、対消滅して γ 線が生成される。 γ 線のエネルギーは、通常の X 線診断に比べて 5~10 倍大きく、透過力が強いので、吸収や散乱の影響が少なく体外から観測され、基本的には 180 度の方向に同時に二つの光子 (γ 線) が放出されるため、これを検出器 (ガンマカメラ) で同時測定するこ

とによって詳細な画像を得ることができる。

PET 診断は、放射性薬剤を用いるものの、比較的、侵襲性（invasion、生体を傷つけること）が低く、画像からは形状の情報だけでなく、生理学的情報も得られるといわれている。

放出される陽電子は、その飛程（発生した位置から消滅する位置までわずかに飛ぶ）によるずれや、対消滅の γ 線が完全に180度にならない角度揺動（ゆらぎ）があるため、その解像度には限界があるとされるが、技術の進歩によって、解像度は3~5mmにまで向上している。PETの理論解像度1mmを目指した3次元放射線検出器の開発も行われている。

PET 診断の薬剤はおよそ次のようにして製造される。

PET 専用の小型サイクロトロン（円形の陽子加速器、7~20MeV のものが市販されている）で陽子を加速、水（ H_2^{18}O ）に照射して ^{18}O を ^{18}F に変換し、FDG 自動合成装置で診断用薬剤が作られる。 ^{18}F の半減期が109.8分とあまり長くないため、核変換後2~4時間以内に完了するよう、製薬・投与・検査までの工程が迅速に行われるシステムが構築されている。検査場所と同じ場所で診断用薬剤を製造する方法と診断用薬剤を製造する専門の場所から周辺の検査機関にデリバリーする方法があり、PET 用薬剤を製造、使用するところをPET センターと呼んでいる。

β^+ 崩壊をする核種は、この他に ^{15}O （半減期2分）、 ^{13}N （同10分）、 ^{11}C （同20分）などがあり、研究用・診断用に用いられているが、いずれも半減期が ^{18}F より短いため、診断には ^{18}F FDG-PET が利用されることが多い。

日本国内のPET 施設は、287ヶ所（2012年、日本核医学会推定、診療以外の基礎研究施設を含む）となっている。

^{18}F は ^{18}F FDG 以外のPET 薬剤にも用いられ、 ^{18}F -フルオロドーパがドーパミンの測定に利用されている。

PET 診断を類似の診断方法と比較すると次のようになる。

X線CTは、透過したX線量の割合から体内吸収係数の分布を画像とするもので、得られる値は1種類である。PETでは、光子（ γ 線）が体内から放射されるため、体内放射能濃度分布と吸収係数分布の2種類のデータが得られる。

一方、X線では、体外から放射線の方向を制御できるが、PETの場合は、体内からの放射線であるため方向の制御はできない。

もうひとつの相違点は、X線は電流を計測しているのに対して、PETではパルス信号を検出している点である。検出器によってパルス信号を計数する時に、対消滅の確率的要素が含まれるため、これがノイズになりPET特有の画像処理技術が必

要となる。

PET 診断では、放射性薬剤 ^{18}F FDG を投与するため、内部被曝があるが、X 線 CT に比べると被曝量が少ない。また、X 線 CT で全身の検査をしようとするれば、検査範囲に応じて照射量が増え、被曝量が増すのに対して、PET の場合は、投与量以上の被曝はない。

最近よく知られるようになった核医学検査法に、SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography、単一光子放射断層撮像法、スペクト) がある。テクネチウムの核異性体 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は、 β 線を出さず、単一 γ 線を放射するので、これをスキャンし体内の放射能分布を測定することができる。 ^{123}I (半減期 13 時間)、 ^{131}I (半減期 8 日) なども使用される。SPECT は PET に比べて薬剤の製造が比較的容易であり、サイクロトロンのような大掛かりな設備を必要としないこと、半減期が比較的長いことが特長である ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ で約 6 時間、 ^{123}I は約 13 時間、これに対して PET 用の ^{18}F は約 110 分)。PET の薬剤製造に用いられるていない。しかし、SPECT は、単一のガンマカメラをスキャンさせ幾何学的なコリメータを使用するため、解像度を上げると感度が低下、解像度と感度を同時に向上させることが難しいとされる。これに対して、PET は、二つの γ 線の同時測定法が電気的コリメータとなって解像度を上げるため、感度を落とさずに解像度を上げることができるという長所がある。

^{18}F は、 β^+ 崩壊する核種の中では長寿命とはいっても、保存は効かない。そこで、PET センターに、原料の安定同位体 ^{18}O を用意しておき (H_2^{18}O)、必要に応じて薬剤が製造される。

酸素の天然存在比 (空気中) は、 ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O が、99.757%、370ppm、2040ppm であるが、FDG 用原料には ^{18}O を 98%含む水が必要である。 ^{18}O を濃縮するために専用の同位体分離装置が用いられる。海外では、水の蒸留分離によって ^{18}O が生産されているが、日本では、深冷空気分離装置の技術を利用した深冷分離法で生産されている。

酸素の蒸留における分離係数 (蒸気圧比) は、 ^{18}O を最も多く含む成分である $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ では、 $^{16}\text{O}_2/^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ で 1.006 であり、これは非常に 1 に近く、空気分離のアルゴン/酸素系 (1.2~1.5) よりもはるかに分離しにくい系である。なお、分離係数は、蒸気圧が低い $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ の方を分母にし、最も標準的な分子 $^{16}\text{O}_2$ を分子にしている。(ここで $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ という表記は、通常は O_2 と書かれる分子式を、同位体の違いを明示したものであり、分子としては酸素 O_2 である。)

われわれが開発した装置は、 $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ を濃縮する深冷分離装置と、濃縮した酸素

分子 $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ 中の酸素原子をシャッフルして入れ替えて、新たに $^{18}\text{O}_2$ を生成する装置「同位体スクランブラ」と、生成した $^{18}\text{O}_2$ をさらに濃縮する深冷分離装置を組み合わせた独自の方式となっている。この深冷分離装置も深冷空気分離装置と同様、圧力を制御しており、各部の温度を細かく制御する蒸留塔ではないが、圧力 1atm における純物質の沸点は、 $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ でおおよそ 90K、 $^{18}\text{O}_2$ でおおよそ 90.1K と非常に近いことから、分離のしにくさが想像できる。

なお、水を用いる場合は、低圧（標準大気圧よりも低い圧力）であれば、分離係数 ($\text{H}_2^{16}\text{O}/\text{H}_2^{18}\text{O}$) が、酸素の分離係数 ($^{16}\text{O}_2/^{16}\text{O}^{18}\text{O}$) とほぼ等しくなり、分離のしにくさは同程度となる。

水を用いた分離法と比べると、酸素を用いる分離法にはいくつかの利点があり、蒸発潜熱が小さいため省エネの設計がしやすいこと、水素原子を含まないため水素同位体の影響がないこと、大気圧よりも高い圧力で運転できること、機器の腐蝕や経年劣化の恐れがないこと（深冷空気分離装置と同程度）、最適なカスケードを用いて起動時間を短縮することができること、などが特長として挙げられる。

不利な点としては、酸素が二原子分子であるためスクランブラが必要となること、高圧ガス保安法が適用される（日本の場合）ため、装置費用と保守費用が深冷空気分離装置と同等にかかることなどが挙げられるが、特に大きな問題とはならず、既に3装置が日本国内で稼働している。

3. 5. 3 ベータ崩壊 (EC 変換) とアルゴンの生成

原子核が崩壊を起こす確率は、半減期あるいは寿命として示されるが、複数の崩壊の種類があるとき、どのような崩壊をするかも確率による。 ^{40}K の β^- 崩壊 (崩壊確率 89.1%) では原子番号がひとつ増えて ^{40}Ca が生成され残りの崩壊 (崩壊確率 10.8%) では、原子番号がひとつ減って ^{40}Ar が生成される。

^{40}K が ^{40}Ar になる反応は、軌道電子捕獲 (electron capture、EC 崩壊) である。自然界にありふれており、珍しくはないが、あまり広くは知られていない。

これは、原子の軌道電子が原子核に捕獲されて原子核内の陽子と反応、中性子に変わり (したがって原子番号がひとつ減る)、電子ニュートリノが放出される反応である。外からみると、原子番号がひとつ減るので β^+ 崩壊のようにもみえるが、陽電子の放出とその後の対消滅は観測されず、 β^+ 崩壊ではない。

β^+ 崩壊は、親核種 (parent nuclide) と娘核種 (daughter nuclide) の間のエネルギー差が、放出される「電子+陽電子の質量」より大きくなければ起こりにくい。ここでは親核種 ^{40}K 、娘核種 ^{40}Ar である。

しかし、親核種と娘核種のエネルギー差が小さく、確率的にはほとんど起こらないはずの β^+ 崩壊に似た原子番号がひとつ減るといふ崩壊現象が見出された。湯川秀樹は、これを軌道電子の捕獲過程によるものと提唱 (1935 年)、その後、この理論は実験的に確認され、実際にこの崩壊過程は珍しくはないことも分かった。

軌道電子捕獲は、EC 崩壊 (electron capture decay) あるいは ϵ 崩壊とも呼ばれ、原子核が軌道電子のひとつを捕獲し、原子番号がひとつ減る (原子核の陽子がひとつ減る) 「 β 線を出さない β 崩壊モード」と分類されている。原子核に捕獲されて空いた電子軌道を埋めるために別の軌道から電子が遷移し、この時に特性 X 線が放射されるため、反応全体としては放射性崩壊となる。

表に β 崩壊を簡単にまとめる。 β 崩壊は、主に 3 種類あり、 β^- 崩壊は β 線を出し、 β^+ 崩壊で観測されるのは陽電子が対消滅して生成した γ 線、電子捕獲では β 線が出ずに X 線が出る。少し不思議だが、 β 線が直接観測される β 崩壊は β^- 崩壊だけである。

表には、3 つの β 崩壊のほかに二重 β 崩壊も示している。 β 崩壊が起きるためには、変化後の原子核が元の原子核より大きな結合エネルギーを持たなければならないが、それが 2 つ原子番号が大きい原子の核種の間で起こることがある。この場合は原子核内の 2 つの中性子が同時に陽子に壊変する二重 β 崩壊が起こることにな

り、極めて稀にしか起こらず、可能性のある60種類の同位体のうち、これまでに確認されているものは10種類である。

表 3-5-1-ベータ崩壊の種類

ベータ崩壊	放出される粒子		残るもの	通常観測されるもの	備考
β^- 崩壊	電子	反電子ニュートリノ	原子番号がひとつ小さい原子	電子 (β 線)	パウリの仮説
β^+ 崩壊	陽電子	電子ニュートリノ	原子番号がひとつ小さい原子	陽電子対消滅に伴う γ 線	^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F 、 ^{121}I など
電子捕獲 (EC 崩壊)		電子ニュートリノ	原子番号がひとつ小さい原子	特性 X 線	^{40}K など 湯川の仮説
二重 β^- 崩壊	電子 $\times 2$	反電子ニュートリノ $\times 2$ 、 あるいはなし	原子番号が 2 つ小さい原子		^{76}Ge など。 研究途上
二重電子捕獲		電子ニュートリノ $\times 2$	原子番号が 2 つ小さい原子		^{78}Kr など。 研究途上

レイリー、ラムゼーによって空気中に存在するアルゴンが発見されたのは、120年前、湯川によってその生成機構が説明されたのはわずか80年前のことである。

β^+ 崩壊はPET診断に利用され、 β 崩壊の一種であるEC崩壊によって空気中にアルゴンが生成されている。 β 崩壊は、深冷空気分離と関係が深い。

3. 5. 4 アルファ崩壊とヘリウムの生成

ヘリウムの供給源である α 崩壊は、原子核から α 粒子(${}^4\text{He}$ 原子核)が飛び出し、元の原子核の質量数が4、原子番号が2減る反応である。

アルゴンの生成は、親核種(${}^{40}\text{K}$)のEC崩壊による娘核種(${}^{40}\text{Ar}$)への変換というたったひとつの生成過程に限定されるが、ヘリウムは、 α 崩壊の娘核種ではなく α 崩壊そのものであるから、ヘリウムが生成される過程は非常に多い。

α 崩壊は自然界にありふれた現象であるが、初めは、原子核の中から α 粒子がどのようにして飛び出してくるのか、その機構が理解されていなかった。 α 粒子はトンネル効果によって原子核の障壁を越えて原子核の外に飛び出し α 崩壊が起きていることが、ジョージ・ガモフ(1904~1968年、ロシア・米国)によって見出された(1928年)。

「(量子)トンネル効果」は、古典的には乗り越えることができないポテンシャル障壁を量子が乗り越える現象である。

トンネル効果は、量子の持つ粒子性と波動性という二面性から引き起こされ、不確定性原理によって説明されている。

古典力学では、粒子が壁を乗り越えようとするときに必要なエネルギーを必要とするが、量子力学では、量子の不確定性によって、壁の向こう側に量子が現われる確率はゼロではない。量子は未来からエネルギーを借りてきて、障壁を越えてからそのエネルギーを返却することができる、という説明もある。

原子核の中から飛び出すことができないはずの α 粒子は、トンネル効果によって放出され、自然界には、非常に多くの α 崩壊がある。

α 崩壊以外のトンネル効果も珍しいものではなく、身近な実用例としては、トンネルダイオード(エサキダイオード、1957年、江崎玲於奈、黒瀬百合子が発明)やフラッシュメモリー(1980年、舛岡富士雄が発明)、走査型トンネル顕微鏡(1982年、ゲルト・ビーニツヒ、ハインリッヒ・ローラーが発明)などがある。

図に代表的なアクチノイド・アルファ崩壊系列のひとつであるウラン崩壊系列を示す。原子核の崩壊系列は、様々な書籍に掲載され詳細な情報・数値が示されているが、ここでは、非常に簡単に示すことにした。アイソトープ手帳や理科年表などを参考に半減期の概略値を示し、 α 線のエネルギーと同時に放出される γ 線は省略した。ひとつの核種に対して、複数の崩壊モードがある場合の崩壊確率の数値も省略し、確率が高い方の線幅を広くした。かなり簡略化しているので詳細は教科書などを参照願う。

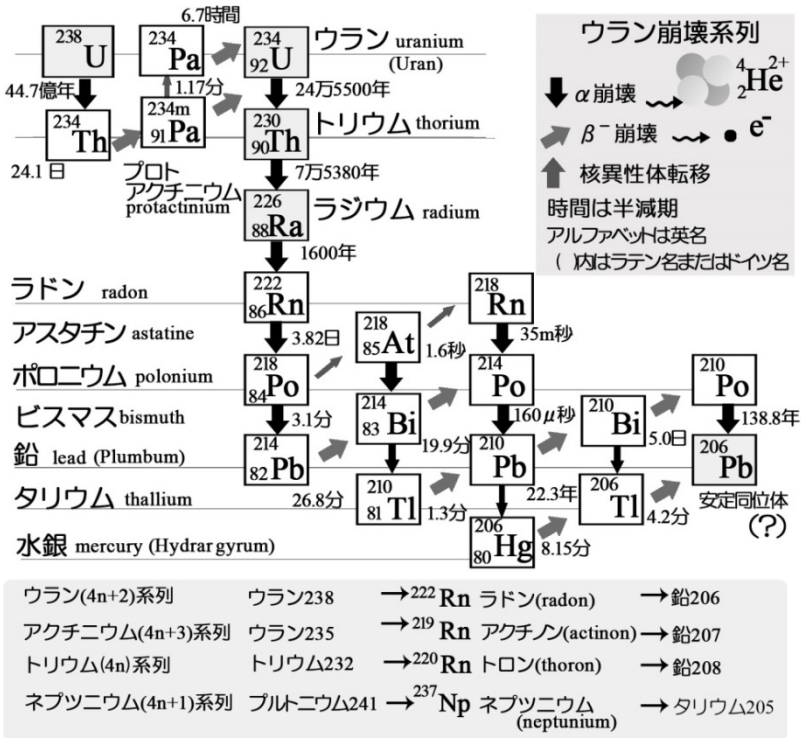


図 3-5-4 ウラン崩壊系列 (${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{206}\text{Pb}$)

図中の上から下へ向かう縦の矢印がα崩壊、右斜め上方向への矢印がβ崩壊である。準安定同位体(核異性体) ${}^{234m}\text{Pa}$ のみ例外的に上向き矢印(IT崩壊あるいは核異性体転移、Isomeric transition)がある。原子番号も質量数も変わっていないが図中では縦に並べている。

ウラン崩壊系列は、ウラン238(${}^{238}\text{U}$)から始まり、α崩壊とβ崩壊を繰り返し、安定同位体である鉛206(${}^{206}\text{Pb}$)で完結している。

非常に多くの核種がα崩壊をし、ヘリウムも発生源となるが、半減期の長い同位体がより多く存在するため、ヘリウムの主要な供給源は、 ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{234}\text{U}$ 、 ${}^{230}\text{Th}$ 、 ${}^{226}\text{Ra}$ の4つの同位体ということになる。

希ガスのラドンは、全ての原子が放射性同位体であるが、ウラン崩壊系列の ${}^{222}\text{Rn}$ が多く、通常ラドンといえばこの222を指す(図の左から3列目、上から4段目)。

^{220}Rn は、別名トロンとも呼ばれ、自然界の至る所にラドンとトロンの2つが発生するため、ヒトが自然界から受ける放射線被曝量のおよそ半分がラドンとトロンによるもので残り半分がカリウム40とされている。

ここに示したアクチノイド系列という言葉は、産業ガスの商材からは、あまりなじみがないが、ウラン、プルトニウム、水銀、鉛、ラドン、ラジウムなどの元素名は一般にも広く知られている。

トリウムは、現在は核燃料としては使用されていないが、溶接電極材料、るつぼ、触媒など工業的に用いられており、ネオジミウム（ネオジウム）やセリウムなどと同じ鉱物に含まれ、レアアースの鉱山から同時に産出されることでも知られる。

ビスマスは超電導物質材料、ポロニウム、タリウムは毒性物質としても知られている。アクチノイド系元素やその同位体の名前は比較的よく知られている。

なお、図中の鉛206 (^{206}Pb) に？マークがついているのは、最新の研究から鉛には安定同位体がひとつも存在しないのではないかとということも検討されているためである。鉛206 (^{206}Pb) もウラン崩壊系列の最終生成物ではなく、もう一度 α 崩壊して水銀202 (^{202}Hg) となって安定するのではないかとということが研究されている。

3. 5. 5 ヘリウムとウラン

α 崩壊は、図 3-5-4 に示したウラン崩壊系列の他にアクチニウム系列、トリウム系列、ネプツニウム系列という 4 つのアクチノイド崩壊系列が一般的である。この他にもジスプロシウム系列、サマリウム系列、ネオジミウム系列などの崩壊系列があるが、ウランは、地球上に非常に広く分布し、天然ウランの組成は、ウラン 238 (^{238}U) が 99.3%、ウラン 235 (^{235}U) が 0.7% であるから、自然界には、 ^{238}U から始まるウラン崩壊系列が非常に多く存在し、ヘリウムの多くが、この崩壊系列から生成されている。

ウランは、酸化物などが核燃料として利用されており、金属材料としては身近ではないが、鉱物としては普遍的な物質であり、地殻や水中に満遍なく存在する微量元素である。日本語では、英語のウラニウム (uranium) とドイツ語のウラン (Uran) のいずれの用語も使われている。

大昔、創世記の地球はもっと熱く、どろどろに溶けた状態から徐々に冷えてきたと考えられている。地球科学が発達してきた時、多くの学者が、この熱い地球が冷えて今の状態になったとして、地球の年齢を推定してきた。

アイザック・ニュートン (1642~1727 年、イングランド) は、地球と同じ大きさの鉄の火の玉が 17 世紀の地球と同じ温度になるのに 5 万年かかると計算した。最初の地球の温度は不明ながら、ニュートンの時代、地球は鉄の融点から冷え始めて、5 万年の時がたっていると見積もられたのである。

ジョゼフ・フーリエ (1768~1830 年、フランス) は、熱伝導の研究から地球の年齢を計算する方法を示し、後年、フーリエが残した方法で他の研究者が求めた値から、地球の年齢は、1 億年とされた。

ジュール=トムソン効果で知られるウィリアム・トムソン (ケルビン卿、1824~1907 年、アイルランド) は、地球ができた時の様子が分からないため、最初の温度は分からないものの、岩石の融点、地球が固化し始めた時点から現在 (19 世紀) までの時間を計算できるとし、岩石の熱伝導率、地下の温度分布、などを調査し、地球の年齢がおよそ 1 億年 (数千万年から 4 億年の間) であると計算した。

ウィリアム・トムソンが示した、地球年齢 1 億年説 (1862 年) は広く信じられるようになった。なお「ケルビンの地球 1 億年説」という言葉が知られるが、トムソンがケルビン卿を名乗るのは 30 年後の 1892 年であるから、「ウィリアム・トムソンの地球 1 億年説」とするのが正解である。

ウィリアム・トムソンは、古典物理学の大家であるが、地球物理学でも知られている。地球の年齢の推定や、月の潮汐力によって変形する地球の硬さの推算など

を行っている。ウィリアム・トムソンの地球 1 億年説と当時の地質学や生物の進化論とは相容れない部分が多くあり、非常に大きな議論が起こったが、現在の最新の科学では、地球の年齢は 45.4 億年と推定されており、ウィリアム・トムソンの計算は大きく間違っている。

ウィリアム・トムソンほどの天才的な科学者であっても、全く計算があっていないのは、地球内部にある様々な放射性物質が産み出す崩壊熱を考慮していないためである。もし、地球の内部に放射性物質の崩壊熱がなく、トムソンの計算通りであれば、地球は 40 億年以上も前に放熱によって冷えて凍り付いているはずであるが、地球は今も活動を続ける生きた惑星である。

アーネスト・ラザフォード (1871~ 1937 年、ニュージーランド、英国) は、放射性物質が崩壊する時に熱を発生することを見出し、地球の内部で熱が発生しているため地球の年齢や寿命はトムソンが推定した値よりもはるかに長いことを示した。ラザフォードは、ウランから α 線と β 線を発見 (1898 年)、放射性元素 (※) の崩壊から「半減期」の概念を提唱 (1900 年)、放射性元素変換説を提唱 (1902 年)、ガイガーと共同で α 粒子の計数測定に成功 (1907 年、20 年後にガイガー=ミュラー計数管として実用化)、ノーベル化学賞を受賞 (1908 年) した。(※当初は同位体という概念がなく、放射性は特定の元素が持つ性質だと考えられたため、そのような物質を放射性元素と呼んだ時期があった。現在では放射性や安定は元素の性質ではなく特定の核種が持つ性質であり、同位体という分類がなされる。)

原子核の崩壊に関する研究を推し進めていたラザフォードは、ケルビン卿を名乗るようになったトムソンと対面、両者が地球の年齢について議論した。その時 (1904 年)、古典物理学の大家ケルビンは 80 歳、ラザフォードは 33 歳であった。

ラザフォードは、岩石中のウランとヘリウムの量からその岩石の年齢を推算する方法を示し、ケルビンが示した地球の年齢よりもはるかに古い岩石を提示した。

しかし、ケルビンは、ラザフォードが示した原子の放射性崩壊を認めず、目の前に示された 1 億年より古い岩石の存在を認めず、自説を曲げなかった。

時代は、まさに古典物理学から現代物理学へと変わりつつあった。ケルビンという名前は、熱力学温度や色温度を表わす単位として残り、今も物理学の世界ではさん然と輝く名前であるが、ケルビン卿自身は、希ガスの発見、量子力学、原子核崩壊、相対性理論など 19 世紀末から 20 世紀初頭につながる現代物理学の時代を全く認めていなかった。

希ガスは分子間力が小さく、非常に液化しにくい物質であるため、超低温の分野では欠かせない物質である。これらの物質を取り扱うときの温度は、セルシウス

度のような慣習温度の使用は不適切であり、科学的温度である熱力学温度「ケルビン」が用いられる。しかし、ヘリウム、ネオン、アルゴンなど新時代になって発見された物質（元素）や現代物理学にとって、ケルビン卿の名前は、非常に違和感がある。熱力学温度の提唱に多大な貢献をしたウィリアム・トムソンであるが、その晩年の名前ケルビンと希ガスは非常に相性がよくない。ラザフォードらの新しい科学を認め、電子やネオンの安定同位体を発見したもうひとりのトムソン、JJ トムソン（1856～1940）の方が20世紀の物理学にはふさわしい名前と言えるが、温度の単位はトムソンではなくケルビンである。ウィリアム・トムソンは1824年生まれ、J.J. トムソンは1856年生まれ、アーネスト・ラザフォードは1871年生まれである。

ウランは、地球の熱バランスに寄与し地球の温度を決めている重要な元素のひとつである。地殻中には重量比2.4ppm 含まれ、海水1リットル中には3.3 μg （重量比3.2ppb）が溶存している。

しかし、もし地球内部（深部）に、地殻中と同じ濃度のウランが存在すると、ケルビンが示した計算とは逆に、地球は冷えるのではなく温度は上昇し続けることになる。そうすると、創世記の地球は、非常に低温であったということになるが、多くの観測からそうはなっておらず、創世記の地球の方が熱く、現在は冷却が進んでいる。したがって、地球の奥深くには、地殻中のように多くのウランが存在しないと考えるのが正しいようである。

鉱物としてのウランは、固体の岩石中の結晶に入りにくい「不適合元素」と呼ばれる性質がある。マントルは、マントル対流現象があり、地球物理としては流体と扱われるが、地球化学における化学物質としては固体として扱われる。したがって、ウランは固体であるマントルではなく液体（高温の溶融体）であるマグマに濃縮されることになる。ウラン濃度は、マントル（固体）中で低く、マグマ（溶融体）中で高くなり、マグマが冷えて固まった地殻中のウラン濃度は地球深部の濃度よりも高くなった考えられる。

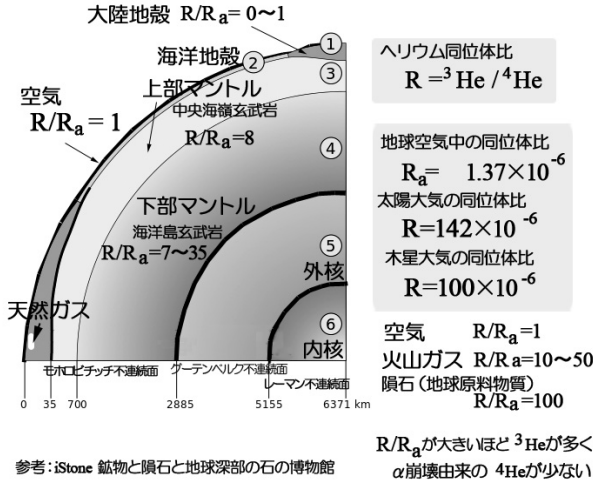
ウランが α 崩壊しヘリウムが生成されるが、それは地球深部ではなくより浅い地殻中ということになる。生成したヘリウムは大気中に拡散、多くは宇宙空間へと散逸していると考えられ、空気中には約5ppmのヘリウムが残っている。

α 崩壊によって生成されるヘリウムは ${}^4\text{He}$ であるから、もうひとつの安定同位体 ${}^3\text{He}$ との割合を調べることによってウランの分布を推定することができる。

図3-5-5に ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 同位体比のおよその分布を示す。（少々、大雑把な数値も含まれているようであり、詳細に興味がある人は地球物理学、地球化学の専門書を参

照されたい)

空気中、地殻中、マントル中などの同位体比が調べられているが、現在の技術では、まだマントルの直接採取ができないので、マントル中の値は、地表面に現れた岩石を採取して得られた分析結果である。



参考: iStone 鉱物と隕石と地球深部の石の博物館

図 3-5-5-ヘリウム同位体比 $^3\text{He}/^4\text{He}$

なお、さらに深部の組成については、サンプリングすることができないため数値は不明であるが、最近になって、反ニュートリノ観測装置である東北大学のカムランドによって地球内部の放射性物質の量が推定されるようになった。

図の右に示すように、太陽と木星では、ヘリウム同位体比 R は、ほぼ同じであるが、地球の空気中の同位体比は、これらの 100 分の 1 程度と非常に小さく ^3He は、ヘリウムのうちの 1.37ppm しかない。

地球の空気中のヘリウムは、 α 崩壊由来のヘリウムがほとんどであり、太陽のヘリウム同位体比とは大きく異なり、創世記のヘリウムは、ほとんど残っていないことが示されている。

空気中の同位体比 R_a を 1 とした時の同位体比の比 R/R_a は、空気中の ^3He に比べて、どの程度 ^3He が多いか、すなわち ^4He が少ないかということを示している。

たとえば、火山ガスの R/R_a は空気中の 10~50 倍あり、この値が大きいということは ^4He が少ない、アルファ崩壊が少ない、すなわちウランが少ないということの意味している。

大陸地殻中では、Ra は空気中と同じ 1 に近いが、上部および下部マントル中ではその値が大きく、マントル中にはウランが少ないことを示している。ヘリウムの同位体比の調査から、ウランは地球の表面の地殻中に多く存在し、深部には多くないということが分かる。

ウランは普遍的に存在するが、精製されたものが核燃料に用いられるため、特殊なものと思われがちである。

しかし、ウランそのものは世界中どこにでも存在し、日本にもウラン鉱石があるが、鉱山としては採算性がとれないため商業的な開発がされていないだけである。

他の鉱物資源と同様、産業用としては製錬に有利で採算がとれる高品位ウラン鉱石を多く産出する鉱山が優先して開発されるため、現在のウラン生産国は 18 ケ国となっている（カザフスタン、カナダ、オーストラリア、ニジェール、ナミビア、ロシア、ウズベキスタン、米国、中国、マラウイ他 8 か国）。

ウランは、前述の濃度で、地殻中に約 10^{14} トン（1,000 億トン）、海水中に約 40 億トン存在するのに対して、現在の価格における可採埋蔵量は、およそ 533 万トン（2012 年の年間生産量約 5.8 万トンに対して 92 年分）とされている。

可採埋蔵量は、ウランの総量の約 2000 万分の 1、海水中の量に対しても 750 分の 1 しかない。この数値の大きな開きは、ウランはあらゆる岩石中に普遍的に存在し大量に存在するが、

商業ベースに乗る高品位ウラン鉱は非常に少ないことを表わしている。地殻のいたるところにウランの α 崩壊があり、その結果、ヘリウムが放出されており、空気中に、5ppm のヘリウムが存在している。地球のアルゴンとヘリウムの起源について、もう一度簡単に数値を表 3-5-1 にまとめる。

表 3-5-1-アルゴン同位体・ヘリウム同位体の太陽大気存在比と（地球）天然存在比

核種	太陽大気	天然存在比	地球の増減
^{36}Ar	0.842	0.0034	—
^{38}Ar	0.158	0.00063	
$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	0.188	0.185	変化なし
^{40}Ar	0.000260	0.996	
$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	0.000309	292.9	300 万倍※
^3He	0.000142	0.00000137	—
^4He	0.999858	0.99999863	
$^4\text{He}/^3\text{He}$	7.0×10^3	7.3×10^5	103 倍※

※「増減」は、創世記の地球の同位体比は、現在の太陽大気と等しく、 ^{40}Ar と ^4He 以外の同位体の量は変化していないと仮定した場合の概算値。

補足 3-3：地球の放熱と熱源

地球創世記、数多くの微惑星が衝突、そのエネルギーと微惑星がもっていた放射性物質の崩壊熱によって、地球全体はマグマオーシャンと呼ばれる、岩石がどろどろに溶けた状態であったと推定されている。

重い鉄元素が中心に向かって沈み、やがて微惑星がなくなり、大きな衝突もなくなってきたところから、地球は冷え始めたと考えられている。最近の研究から、40～42 億年前の火成岩中のジルコンが調査され、これが生成された時の環境が推定されるようになった。46 億年前に誕生した地球は、わずか6 億年後には、表面が冷えて固まり、既に液体の水も存在していたのではないかとされている（2008 年、UCLA の M ホプキンスら）。

その後、地球には大きな天体の衝突による外からの大きなエネルギー供給がなく、宇宙へ熱を放出し続けている。地球の放熱は 44.2 兆ワット（442 億 kW）と見積もられている。現在、この放熱とほぼ釣り合う地球内部の熱供給が研究されている。

マグマオーシャンの中から重い物質、鉄とマグネシウム中心とした金属が地球中心に向かって沈み込んだ時、その位置エネルギーは熱エネルギーとなって、地球内部には莫大な「原始の熱」がためこまれた。地球の放熱の半分がこの原始の熱によるものと推定されている。

一方、微惑星の中に含まれていた放射性物質は、崩壊を続け残りの熱を供給している。ニュートンやケルピンは、この原始の熱と原子の崩壊熱を考慮することができなかったため、地球の年齢を非常に短く見積もってしまったことになる。

地球の表面に分布する、ウランとトリウム崩壊熱は 7 兆ワット（70 億 kW）、地球全体でのカリウムの崩壊熱は 4 兆ワット（40 億 kW）と推定されている。全体の放熱から原始の熱を除き、地殻の崩壊熱 11 兆ワットを除く残りが、どこからくるのかという研究が東北大学ニュートリノ科学研究センターのカムランドを用いて行われた（井上邦雄）。地球内部の反ニュートリノを観測した結果、地殻を除いたマントル中で発生するウラン・トリウムの崩壊熱は 10 兆ワットと推定された。

これによって、地球の熱源の半分が原始の熱であるという説が裏付けられ、地殻中には 11 兆ワットの崩壊熱、マントル中には 10 兆ワットの崩壊熱があるということが明らかとなった、という。地殻は地球表面の非常に薄い皮であり、マントルは非常に深いところまで広がる大きな構造であるが、ウランは表面に多く分布しているため、地殻の発熱とマントルの発熱がほぼ同じような値になってい

る。このような地球内部の熱源の研究は、火山活動、プレート運動、地震活動、マントル対流、地磁気の研究・理解に必要とされている。

なお、ここで示している地球の熱収支は、地球内部の発熱とその放熱の関係を示しており、太陽からの放射熱やそれが再び宇宙空間に放射される量は議論されていない。太陽からの入射は 17 京 4 千兆ワットと桁外れに大きく、これに地球内部の熱が加わって、地球の外への放熱との間に収支がとられている。