

第3章 アルゴンとヘリウム

アルゴンとヘリウムは、最初に発見された希ガスである。希ガスという呼び名にはふさわしくないほど豊富に存在し、産業ガスの会社を取り扱う重要な商材である。物質の世界には不活性な（化合物を作らない）元素というものは存在しないが、希ガスは、多くの条件下で不活性に近い性質を持つため様々な産業利用が行われている。

アルゴンは初めて発見された希ガスであり、空気中に0.93%という高い濃度で存在し、資源としても大量に存在するにも関わらず、長く発見されていなかった元素である。ヘリウムは太陽大気で発見され、地球上ではウラン鉱石から発見された宇宙では二番目に多い元素である。

希ガスの研究には、空気の液化が大きく関わっており、深冷空気分離の始まりと希ガスの研究は非常に密接な関係にある。空気中の希ガスの存在は、現在も空気分離技術にとって非常に重要な課題である。

また、地球上に存在する希ガスの大半は、創世記からある元素ではなく、地球誕生後に親物質の放射性崩壊によって造られてきた元素である。

アルゴン、ヘリウム、その他の希ガスについて、その発見の経緯、元素の起源、物性や利用法について、ガス屋として知っておきたいことを学ぶ。

3. アルゴンとヘリウム (Argon and Helium)

アルゴンとヘリウムは、工業的に大量に利用される重要な希ガスである。

ふたつのガスには、いくつかの共通点があり、①希ガスとしては例外的に資源量が豊富であり、大量に生産される産業ガスである②資源となっている空気中のアルゴンと地殻中のヘリウムは、地球創世記にはなかった元素である③アルゴンとヘリウムの親物質である放射性物質は、地球上に普遍的に存在し、崩壊によって新たな元素が作られ続けている。

酸素や窒素、炭素のような地球を作っている主要な元素は、太陽系以前の恒星における元素合成と超新星爆発によって合成されたものであり、太陽系で、新たに生成されることはない。しかし、地球のアルゴンとヘリウムの元素の大半の同位体は、こうした元素合成ではなく、原子核崩壊によって作られたものであり、今も生成され続けている。

類似点が多い一方、アルゴンとヘリウムの資源としての性質は、極端に異なっている。アルゴンは、空気中に1%近くも存在し、世界中どこにでもある。産業用のアルゴンは、深冷空気分離装置で酸素と窒素を製造する時に分離・併産されており、酸素や窒素と同じく、原料がどこにでもある地産地消のガスである。

一方、地殻中で発生するヘリウムは、一部の天然ガス田から回収・生産されている。ヘリウムの空気中の濃度は、天然ガス中のヘリウム濃度に対して何桁も低い。そのため、空気からヘリウムを工業的に生産することは不可能である。また、全ての天然ガスにヘリウムが含まれているのではなく、ヘリウムを高濃度に含む天然ガス田は限定されているため、ヘリウムの資源は、極端に偏在している。

ヘリウムは、天然ガスを生産する時に、分離・一時保存(粗ヘリウムガス)され、深冷分離によって精製されているが、生産地が限られ、消費地は世界各地にあるため、液化されて長距離輸送・供給されている。ヘリウムは、地産地消のアルゴンとは正反対のグローバル商品となっている。

3. 1 アルゴンの発見

アルゴンは、周期表第 18 族元素の「希ガス」(rare gas)である。第 18 族は、最外殻電子が閉殻となっているため、化学的に非常に不活性であり、地球上でも単原子分子として存在することができる。原子の数が非常に少ない(物質が非常に希薄な)ところ、たとえば宇宙空間では、窒素や酸素のような原子であっても単原子のまま存在が可能である。しかし地球上は原子の数が多いため、ほとんどの物質は化合物の状態で存在する。熱力学の基本に「単原子分子」という概念があるが、単原子分子を実現するのは難しく、アルゴンが発見されるまでは、水銀蒸気しか知られていなかった。

希ガスあるいは「稀ガス」という名称は、発見が難しく、分離や製造が難しい時代につけられた名残りであるが、代表的な希ガスであるアルゴンとヘリウムは、希少なガスではない。7 つしか存在しない希ガスのうち 2 つが希少ではないのである。IUPAC (国際純正・応用化学連合)では、rare gas ではなく noble gas という名称を使うように勧告しており、日本語では、これに同じ発音の「貴ガス」という文字をあてた。「noble gas、貴ガス」には、他の物質と反応しない、不活性という意味が込められている。

しかし、これも実際とは異なる。100 年前のアルゴンの発見当時、希ガスは、当時の化学の常識からは考えられない「化合物を作らない元素」とあると考えられていた。希ガスの発見者であるラムゼーが様々な実験を試み、様々な場所の探索を行ったが希ガスの化合物は見つからなかったのである。

しかし 20 世紀になって、希ガスの化合物が発見され、完全に不活性なガスというものは存在しないことが分かった。したがって、第 18 族元素の性質を表す言葉として、希少な「希ガス」も反応しない「貴ガス」も正しい表現とは言えなくなった。しかし、他によい言葉がないのか、現在もこの名称が使われている。多くが「希ガス」であり、IUPAC が推奨する「貴ガス」の方はそれほど普及していない。

これは、酸の素(酸性の要因)ではない酸素が、ずっと酸素と呼ばれているのに似ている。今さら、酸素を酸の素と勘違いすることはないが、文字の印象から「希ガスは希少なガス・元素」、あるいは、「貴ガスは化合物を作らないガス・元素」と勘違いすることがあるかも知れない。また、元素のグループの特性を表わす言葉は、「金属元素」「アルカリ金属」「半金属元素」「アルカリ土類金属」「ハロゲン」「遷移金属」など化学的性質が使われるのが普通であるため、状態を表す「ガス」があることが何か変であるが、18 族の元素は常温で、いずれも気体であり名称は

「希ガス」である。

なお、原光雄著「化学を築いた人々」に紹介されるラムジー（ラムゼー）には、「ラムジーの名前が化学史上に不朽のものとなったのは、アルゴンををはじめとする稀ガスの発見にもとづいている。この発見は周期表の上に新たに零族という特殊な元素をつけ加えたものであって、単なる個々の元素発見以上の業績であった」とある。

希ガス元素の発見は、周期表に全く新しい列（族）を加えたことでも高く評価されたとの記述であるが、この時（原先生の記事が連載されたのは1951～1953年）は、まだ零族と呼ばれていた。周期表の右端は、時代によって、8族であったり0族であったりするが、現在は18族である。

アルゴンが空気の中から発見された時の経緯については、奥野久輝（立教大学名誉教授）らがまとめた日本化学会編「化学の原典9・希ガスの発見と研究」（学会出版センター、1976年）に詳しい解説がある。

この本には、アルゴンや希ガスを発見したレイリーやラムゼーが著した論文や手紙などが集められ、翻訳、解説がされ、19世紀末の実験装置や実験の手法、発見に至る経緯、周囲の反応などが、非常に詳しく解説されている。是非、手にとって読んでみて欲しい。先人たちの科学に取り組む姿勢やその考え方がとても参考になるはずである。

また、原光雄著「化学を築いた人々」の「ラムジー」の項にはラムゼーの人となり、アルゴンや希ガスの発見の経緯が詳細に述べられている。この本にもラムゼーとレイリーのアルゴン発見の話や、ラムゼーがその後発見した、数々の希ガスのことが非常に詳しく説明されている。

ここでは、これらの書籍やその他の資料から知ることのできるアルゴンの歴史を学ぶことにする。空気分離を技術基盤とし、アルゴンを商材とするガス屋としては是非知っておきたいと思う。

18世紀末、空気には、窒素（1772年、ダニエル・ラザフォードが発見）と酸素（1774年、ジョゼフ・プリーストリーが発見）が含まれていると考えられるようになり、アントワーヌ・ラヴォアジエ（フランス）が、空気はいくつかの物質からできていることを見出し、その中の物を燃やす力のある物質をオキシジェンと命名した（1779年）（第1章参照）。

当時のほとんどの化学者は、空気には、窒素と酸素しか含まれていないと考えていたが、ただひとり、ヘンリー・キャベンディッシュ（1731～1810、イングランド）だけが、空気中に不活性な（inactive）気体が微量存在することを実験的に証

明していた (1785 年)。化学者にとって、窒素は不活性ガスではなく、空気中の酸素と窒素を反応させて窒素酸化物を作る様々な化学実験が行われていたが、キャベンディッシュは、酸素と窒素を除去してもわずかに残る不活性なガスの存在に気付いていた。

キャベンディッシュは、水素を発見、水が化合物であることを発見したことで知られる英国を代表する化学者であるが、人間嫌いであったこともあり、生前にはあまり多くの論文を発表していないことでも知られる。後年、キャベンディッシュの研究が調査され、発表されていなかった研究成果の中には、ボイルの法則、シャルルの法則、クーロンの法則、オームの法則、などと同じ大発見が多く見つかっている。研究結果の多くを公表しなかったキャベンディッシュであるが、いくつかは発表されており、その中のひとつに、「空気には窒素の 120 分の 1 の微量の不活性ガスがある」という実験結果の報告があった。現在の空気の組成は、窒素 78.084%、アルゴン 9340ppm であるから、アルゴンは窒素の 119.6 分の 1 である。キャベンディッシュは驚くべき正確さで未知の元素を発見していたのである。しかし、その論文は 110 年間も全く無視され、誰もその正体を確かめようとはしなかった。その気体が、アルゴンという新元素として発見されたのは、19 世紀末のことである。(キャベンディッシュについては第4章も参照)

新元素「アルゴン」は、19 世紀末、レイリー卿 (1842~1919 年、イングランド) とウィリアム・ラムゼー (1852~1916 年、スコットランド) によって発見された (1894 年)。

カール・フォン・リンデ (ドイツ) による空気の液化が 1895 年、ジョルジュ・クロード (1870~1960 年、フランス) による空気の液化は 1902 年である (第4章参照)。最初に空気が液化され空気分離による酸素が製造されるようになった時、アルゴンは新発見の元素であった。

レイリーとラムゼーがアルゴンを発見するまで、空気は窒素と酸素の混合物 (と少量の不純物) からできていると思われていたため、空気分離による酸素製造法が発明された当時はアルゴンはまだ空気の中から発見されたばかりの元素である。

その性質も使い道も分かっていなかった。酸素の製造プロセス、窒素の製造プロセス、酸素と窒素の同時生産プロセスは考案されたが、アルゴンのことは考慮されず、製品酸素の中に含まれるただの不純物であった。

現在、アルゴンは、深冷空気分離装置を設計する時の重要なキー成分であり、酸素の生産量や装置の性能を確保する上でも、その挙動を正確に予測することが重要であり、アルゴンの存在を無視した深冷空気分離装置の設計はあり得ない。

しかし、発見当時は、空気の中から 1%近い高濃度で未知の元素が発見されると

いうことは誰も想像していなかったため、最初の空気分離装置ではアルゴンを効率的に分離する方法も、それを利用する方法も考えられてはいなかった。深冷空気分離装置では、その後の技術の進歩によって、アルゴンの工業生産が可能となり、希ガスの性質が明らかになり、用途が開拓されることによって、アルゴンは重要な産業ガスになっていった。第1章に示したように、吸着法などの他の分離方法では、空気からアルゴンを効率よく製造することはできない。もし、酸素の原料が空気ではなく、その分離法が蒸留でなかったならば、アルゴンをはじめとする希ガスの工業的な利用はなかったのかも知れない。(使用済みのアルゴンを回収して再利用するプロセスには蒸留法以外の方法も可能であるが、空気からアルゴンを効率的に回収する方法は蒸留法しかない)

アルゴンを発見したレイリーとは、ジョン・ウィリアム・ストラットのことである。ストラットは、何人もいるレイリー卿のひとりであり、他にも物理学者のレイリーはいるが、普通、物理学者のレイリー卿といえば、「第3代レイリー男爵」、ジョン・ウィリアム・ストラットのことを指す。

レイリーという呼び名は、日本でいえば、水戸中納言「水戸黄門(唐名)」のようなものである。水戸黄門は7人いたが、時代劇に登場する水戸黄門と言えば、普通は、水戸藩2代藩主「徳川光圀」を指す。水戸黄門=光圀と同じように物理学ではレイリー=ストラットである。

レイリーは、19世紀末から20世紀初頭の古典物理学の大家である。光のレイリー散乱(空が青い理由を説明)、レイリー波(地震の表面波)、黒体輻射(レイリー・ジーンズの法則、第二章参照)、光の分解能(レイリー限界)、レイリー電位計、入射光子数の単位レイリー、音響理論など、多くの業績によってその名前が知られる。物理学を勉強した人であれば誰でもが、その名前を知っているはずの大家である。

レイリーの成果は、物理学の教科書だけでなく、工学系の教科書でもよく目にするため、工学部出身者でも、たいしてはその名前をどこかで聞いているはずである。

流体力学・伝熱のレイリー数(熱伝導と熱伝達に関する無次元数)がよく知られるが、機械工学や化学工学で多用される「無次元数」は、「現象が複雑で記述する基礎式を得ることが困難な場合、無次元数を求めて記述する」という「レイリーの方法」に基づいている。工学系の複雑な現象を記述する時、無次元数に関するバッキングラムの π 定理を用いて、これを定式化することが広く行われている。レ



図 3-1-1 ジョン・ウィリアム・ストラット(第3代レイリー男爵)(1842~1919年)(Wikipedia)

イノルズ数やプラントル数など、よく知られる無次元数が実験データの解析や評価に用いられている。無次元数の0.8乗に比例するなどという整理方法は、科学的な説明になっていないという批判もあるが、複雑な現象を無次元数のグループで記述するという方法は、実用的であり工学にはなくてはならない手法となっている。このような、無次元数による現象の記述は、レイリーによって考え出された手法であり、レイリーは理論的な物理学というだけでなく、実学の分野にも大きな貢献をしている。

レイリーは、ケンブリッジ大学の教授を辞め、郷里に戻り、屋敷に実験室を作り、「プラウトの仮説」(Prout's hypothesis、1815年)を再検討するために主要気体の密度の測定を始めた(1882年)。レイリーがアルゴンを発見する話しはここから始まる。レイリー40歳の時である。

プラウトの仮説とは、ロンドンの開業医ウィリアム・プラウト(1785~1850年、イングランド)が提唱した原子の構造に関する仮説で、「水素の原子量を1とすると、その他の原子の原子量はその整数倍になる」というものである。しかし、塩素(原子量35.45)など、この仮説に従わない元素があったため、多くの学者がその理由を調べるために原子量の詳細測定を行っていた。気体の密度の測定は、それほど難しいものではないが、プラウトの仮説を検証するために必要となる精密測定となると慎重で難しい実験手順が必要であった。

レイリーは、3年後には、英国王立研究所の教授に就任したが、ほとんどの時間を屋敷内の実験室で過ごし、気体の密度の精密測定、プラウトの仮説の検証に費やした。レイリーは、水素や酸素の相対密度や絶対密度の精密測定を行い、続いて、窒素の密度を測定、その時に気付いたわずかな値の違いが重大な発見につながることになる。

当然、窒素ガスが販売されている訳ではないので、測定する窒素ガスは何らかの方法によって自ら製造しなければならないが、当時の実験室における窒素の製造は、空気から酸素や二酸化炭素を化学的に除去して行われるのが普通であった。

しかし、レイリーは、窒素の密度を測定するために、この方法に加えて、化学薬品を分解して窒素を作ることも同時に行った。当時の化学の常識であれば、いずれの窒素も変わりがないはずであるが、レイリーは、複数の製法で窒素を製造し、亜硝酸アンモニウムなどを分解して作った窒素(これを「化学窒素」と呼ぶ)の方が、酸素を除去した空気(「空中窒素」と呼ぶ)よりも1000分の1軽いことに気づいた。

レイリーは空気から化学的に窒素を得るのが当たり前であった時代に、わざわざ、一酸化窒素(NO)、一酸化二窒素(N_2O)、亜硝酸アンモニウム(NH_4NO_2)からも

窒素を製造、空気も含め、4種類の原料物質から化学的に窒素を作ることを行い、これらの密度を測定して比較した。レイリーの密度測定実験の開始は1882年、第一報は1888年、酸素、窒素、空気の密度の精密な測定結果は1892年に発表された。

レイリーは1894年、この「空気から得られた窒素は重い」という事実を公表、空気には、酸素と窒素以外の気体が含まれるのではないかということを示唆した。

"On an Anomaly encountered in Determinations of the Density of Nitrogen Gas", Lord Rayleigh (Secretary of the Royal Society), *Proceeding of Royal Society.*, **55**, 340-344,(1894). 「窒素ガスの密度の測定で遭遇した異常」という論文である。

アノマリーとは、法則・理論、科学的常識からみて異常、または説明できない事象という意味であり、それを窒素ガスの密度測定において発見したという報告である。

レイリーは、この論文の前にも主要な気体の密度に関して複数の論文を発表、創刊されてから20年ほどたった英国のネイチャー誌にも投書を行い、実験方法について詳細な報告を行っていた。王立協会のように権威ある学会での発表だけでなく、一般誌であるネイチャー誌という媒体でも、広く実験結果を公表していたのである。このような常識を覆す発表には、当然のことながら多くの異論・反論が現われることになる。化学窒素と空中窒素の製造方法、製造の過程における不純物、測定法の詳細など、数多くの問題について議論がなされた。

レイリーも含めて多くの研究者による酸素の密度の報告は、どれもほぼ等しかったので、測定方法についてはほぼ間違いはなさそうであった。しかし、窒素の密度は、他の研究者の報告が1.256g/Lほどであったのに対し、レイリーの報告は、1.257g/Lとわずかに大きかった。

当時、空気の組成は、窒素0.79059、酸素0.20941とされていたが、この組成を用いて、酸素の密度と窒素の密度から計算によって求められる空気の密度と、直接測定された空気の密度を比較すると、他の研究者の窒素の値では合わなかったが、レイリーが報告した空中窒素の密度を用いると、両者は、ぴたりと合っていた。これから、化学窒素よりも空中窒素の方がわずか1000分の1ではあるが、重いというレイリーの結果の方が正しいだろうと思われた。

空中窒素が化学窒素よりも重いことは事実として認められることになったが、レイリーもその理由までは分かっておらず、この結果を公表することによって、多くの科学者に問題提起を行うことにした。レイリーの講演会に参加したラムゼーは、その理由を探求するための研究を申し出て、そこから、物理学者レイリーと

化学者ラムゼーの共同研究が始まった。

当初、レイリーは、化学窒素に問題があるのではないかと考えていたが、窒素酸化物やアンモニアの合成など、化学の分野の窒素に詳しいラムゼーは、空中窒素の方に問題があると考えた。ラムゼーは、無酸素空気（空中窒素）から化学反応で窒素を除去し、そこにわずかに残った重い不活性な気体を分離することに成功した。他の研究者は、無酸素空気が化学窒素より重いのは、酸素が残留しているからだと指摘したが、ラムゼーは酸素を完全に除去し、空気には酸素と窒素以外の物質が存在すると主張した。

レイリーは、110年前のキャベンディッシュの論文を調査し、そこには、空気には酸素と窒素以外の気体が含まれているかも知れないことが記され、キャベンディッシュによって、ある程度の実験までが行われていたということを知った。王立協会の図書室に長く保管されていたキャベンディッシュの論文がレイリーによって発見された。

レイリーは、ラムゼーが分離した気体が、窒素とは異なるスペクトルを持つことを確認した。レイリーとラムゼーは、これは新元素であると確信し、ギリシャ語で「怠惰な」「不活発な」という意味を持つ「argon、アルゴン」と命名した（1895年1月）。レイリーとラムゼーが発見・命名した新元素は、ドイツ語やフランス語でも Argon、L'argon であり、日本語もカタカナのままアルゴンである。中国語では「氩」と書く。

"Argon, a New Constituent of the Atmosphere", Lord Reyleigh, W. Ramsay, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **186**, 187-241(1895).

「アルゴン、新しい空気の成分」

彼らは、アルゴンの存在を確認、新元素発見には物性の測定が不可欠であるが、溶解度や比熱比などの物性が測定され、一酸化二窒素を寒剤とした冷却（温度 -90°C ）が試みられたが、アルゴンの液化には成功しなかった。

当時、ラムゼーはユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドンの化学の教授であり、すぐ近くのロンドン王立研究所には、低温物理学で知られるジェイムズ・デュワー（1842～1923年、イングランド）がいた。しかし、ラムゼーはデュワーの支援を要請せず、アルゴンの試料は、デュワーには渡されることなく遠く離れたポーランドのクラクフ大学のカオル・オルショウスキー（1846～1915年、ポーランド）に送付された。



図 3-1-2 ウィリアム・ラムゼー（1852～1916年）
（Wikipedia）

オルショウスキーは、アルゴンを液化・固化し、その臨界温度、臨界圧力、融点、蒸気圧などを測定、新しい元素アルゴンの物性が調べられた。すぐ近くに低温や液化のエキスパートがいたのにも関わらず、このような手順となったのは、どうやらラムゼーとデュワーの不仲が理由らしい。

1895年1月31日、ロンドン大学でアルゴンに関する特別討論会が開かれ、ラムゼーとレイリーは、アルゴンが新しい物質（元素）であることを発表、翌日には、オルショウスキーがアルゴンの液化を報告した。レイリー51歳、ラムゼー42歳、オルショウスキー49歳である。13年間も気体の密度の測定を続けたレイリーはついに新元素を「空気の中から」発見したのである。

ラムゼーらはアルゴンの存在を証明し、この討論会以降、アルゴンの存在が広く知られるようになった。しかし、様々な疑問が投げかけられ、この新発見は、すぐに、賞賛されることはなかった。

たとえば、「何か他の化合物ではないのか」、「重いのは窒素の同素体 N_3 ではないのか」、「単原子分子というものが存在するのか」、「アルゴンの化合物がみあたらない」、「報告された原子量が 39.9 というのは周期表にあてはめることが困難である」、といった意見が出された。特に、多くの化学者が「長い年月、調べられてきた空気に新種の気体が 1% 近くも含まれているはずがない」という不信の念をいだいた。

当時の技術ではアルゴンの化合物を作ることができなかったが、化学的に不活性ということが、特に重大な問題であった。化合物を作らない元素があるということが、化学の常識では考えられなかったため、新元素の発見は容易には受け入れられなかった。デュワーは、これは新元素ではなく窒素 N_3 であるという発表を行っている。

比熱比の測定から、アルゴンは二原子分子ではなく単原子分子であることが明らかとなったが、これも常識を覆す大発見であった。比熱の測定から単原子分子であると特定されたことは、物理学者の間では高い評価が得られたが、化学者の多くが馬鹿げていると感じた。(単原子分子の比熱比 $\gamma = C_p/C_v = 5/3 = 1.66$ 、二原子分子の比熱比は $\gamma = C_p/C_v = 7/5 = 1.40$ 、当時は水銀蒸気を除いて単原子分子の気体は発見されていなかったので金属以外ではアルゴンがはじめての単原子分子)

アルゴンが元素であるということが次第に明らかになってきたが、重さの問題が

表 3-1-1 アルゴンの主な物性
(密度は 0°C、101.3kPa
沸点は 101.3kPa の値)

原子量	39.948
密度[kg/m ³]	1.784
沸点[K]	87.30
融点[K]	83.80
三重点[K]	83.806
ファンデルワールス半径[nm]	0.188

※アルゴンの標準沸点と融点は比較的近い。液体アルゴンを取り扱うプロセスでは固化に注意が必要。

残った。既知の元素から、周期表の空欄を埋めるアルゴンには、およそ 38 の原子量が予想されていた。その後の原子や原子核の研究から、18 番元素であるアルゴンの平均的な原子量は 36 に近いはずであるが、当時の予想値 38 よりも、測定された原子量はさらに大きい 40 であった。アルゴンの予想外の重さが問題となった。

当時は、原子の構造や、その中の原子核のことなどは全く分かっていない時代であるから、周期表における原子番号の本当の意味もまだ分かっていない。元素の性質は、原子量が決めているとも思われていたため、異常に重いアルゴンを周期表にあてはめるには、その順番が問題とされた。

当時、周期表には、52 番元素テルル（原子量 127.5）と 53 番元素ヨウ素（原子量 126.9）の間に原子量の逆転が見出されていた。周期表は性質ごとに縦に並べられているため、テルルとヨウ素のように原子量が逆転しているのは、原子番号が間違っているのではなく原子量の測定値が間違っているとみなされていた。

18 番元素であるアルゴンの原子量 39.948 と 19 番元素のカリウムの原子量 39.083 も大きく逆転した。いずれの原子量の測定値も間違いがないと思われていたため、新元素アルゴンで周期表の空欄を埋めようとした時、ラムゼーらは非常に悩んだ。

そこで、空気中のアルゴンの多くは単原子分子であるが、一部は二原子分子が混じっていると考えると、つじつまが合うとも考えられたが、実際は、空気中のアルゴンは単原子分子だけである。当時は、まだ原子の構造が正しく理解されておらず、また空気に含まれるアルゴンの起源・成因も分かっていなかったため、アルゴンの原子量が異常に大きいということを説明することができなかった。

現在、深冷空気分離装置でアルゴンを分離するために、酸素－アルゴン系のサイドカラム（アルゴン蒸留塔）が用いられているが、「窒素－酸素系」、「窒素－アルゴン系」の気液平衡に比べて「酸素－アルゴン系」の気液平衡が近いいため、蒸留分離がしづらいため、この蒸留塔は、製品量に比較して塔径が大きく（還流比が大きい）、分離に必要な段数も多い。

アルゴン塔では、重いアルゴンが塔頂に、軽い酸素が塔底に濃縮されるが、もしアルゴンが、当時の周期表が予想する通り 36 の原子量を持っていたなら、もう少し異なった蒸留塔になっていたのかも知れない。

石油化学などの蒸留塔では、軽い成分が塔頂に、重い成分が塔底に濃縮するのが普通であるが、空気分離の場合、分子量が小さい方から、窒素（分子量）－酸素（分子量）－アルゴン（原子量）の順番になっているのに対して、これらの混合物である空気の気液平衡からは、塔頂部に窒素、塔底部に酸素が濃縮、中間にアルゴンのピークが存在する。周期表の中の並びが特殊なアルゴンであるが、蒸留塔としても変則的である。

新元素アルゴンは、身近な空気の中に含まれていたが、長い間、誰にも気付かれず、レイリーの地道な研究によって発見された。しかし、化合物を作らないことと、異常に重いという2つの疑問はしばらくの間、解決されなかった。

新元素アルゴンの発見から10年後の1904年、レイリーにノーベル物理学賞が、ラムゼーにノーベル化学賞が授与された。物理学賞の受賞理由は、「重要な諸気体の密度の測定と、これに関連してのアルゴンの発見」、化学賞の受賞理由は「大気の中の不活性気体元素の発見と周期律によけるそれらの位置の決定」と表現は異なっているが、実質的にはアルゴンの発見に与えられたといってもよさそうである。アルゴンの発見は、同じ業績に対して、ノーベル物理学賞とノーベル化学賞という2つの賞が同時に与えられるというノーベル賞の歴史の中でも極めて珍しいできごととなった。非常に身近で長年研究されつくされ、その物性がほとんど分かっていたはずの空気の中からアルゴンをはじめとしてその他の希ガスも発見されたということの科学的意義は非常に大きい。物理学者レイリーと化学者ラムゼーの科学者としての探究心・執念を感じる。

アルゴンには、化合物を作らないということと、異常に重いということの2つの課題が残った。

ラムゼーは、希ガスの化合物を作ることや発見することはできなかったが、その後「貴ガス化合物」(noble gas compound、希ガス化合物)が多く発見されている。

はじめの頃の希ガス化合物は、クラスレート、配位化合物、水和物などの形態であったが、その後、単純な構造の化合物も発見された。

貴ガス化合物は、酸化剤などに利用されているが、電子励起状態の原子分子が、他の原子分子と形成する分子・エキシマ(excited dimer, excimer)の利用がよく知られている。ArF、KrF、XeCl、などの希ガスエキシマ化合物があり、エキシマレーザーの発振に用いられ、半導体用のリソグラフィや視力矯正用のレーシック手術用レーザーなどに利用されている。

アルゴンの異常な重さの理由を知るには、アルゴンの起源、原子核崩壊、同位体の存在など、いくつかの科学の進展を待たなければならなかった。

3. 2 アルゴンの起源

地球の大気の変遷を示す図 2-2-5-3 からは、空気中にアルゴンが増え続けていることが読み取れる。

地球を構成する元素には、太陽系が誕生した時から存在する原始地球由来の元素と、他の元素の崩壊によって後から生成された元素の2通りのものがある。酸素や窒素、鉄や珪素などは、創世記からある原始の元素であるが、希ガスは、創世記からの原子はごくわずかであり、大半は、親物質の崩壊によって作られた放射性同位体起源の原子、あるいは宇宙線と空気の反応によって生成された原子核反応の原子からなる元素である。

希ガスは、極めて化合物を作りにくい元素であるため、酸素や窒素、炭素などのように化合物として地殻や海洋中に資源としてとどまることがなく、地球創世記にあった「非放射性同位体起源の希ガス」は、宇宙へ拡散してしまい、わずかしか残っていない。地球ができた後から生成した「放射性同位体起源の希ガス」も、宇宙空間に散逸したが、地球に二酸化炭素と窒素を主成分とする大気が形成されてからは、大気（主に空気）の微量成分として地球に留まった。あるいはヘリウムのように地下の岩盤の中に他のガスとの混合ガスとして留まった。いずれにしても地球にある希ガスのほとんどが放射性同位体起源のものである。

レアメタルやレアアース（希土類元素、rare earth elements、REE）には、本当に希少なものもあるが、実際は大量に存在するのに、手に入りにくいもの、製錬が難しいもの、あるいは生産地が極端に偏っているなどの理由で「レア」と呼ばれるものがある。これに対して、希ガスは、地層中や海洋中に化合物資源としては存在せず、空気中にも単原子分子としてわずかに存在するため、文字通り「希」な元素である。

現在の空気中の希ガスの濃度は安定しており、ヘリウム5.24ppm、ネオン18.1ppm、クリプトン1.14ppm、キセノン87ppbとなっている。どこで測ってもほとんど違いない。アルゴンを除くとネオンが最も多いが、それでもわずか18ppmしかない。ラドン（86番元素）も空気成分であるが、濃度が安定しておらず、安定同位体が存在しないため空気の成分表には表記されない。アルゴンは、唯一の例外として、空気中に高い濃度で存在している。

レイリーは、空気中の窒素の密度の異常に気付き、アルゴンを発見したが、当時の実験技術、測定技術では79%も存在する窒素（当時の組成、現在は78%）の中に埋もれた0.93%のアルゴンを重さの違いから見出すのは容易ではなかった。しかし、空気中のアルゴンの濃度は、9300ppmもあり、現在の技術では、容易に分析

が可能である。

補足 3-1：レアメタル（希少金属、minor metals）、レアアース、レアガス

レアアース（希土類元素）は正式な学術用語であるが、レアメタルは和製英語であり学術用語でもない。

流通量の少ない金属のうち、貴金属を除く産業用金属を英語では、マイナーメタルと呼び、コモンメタル(common metal)あるいはベースメタル(base metal、鉄、銅、亜鉛、アルミニウム)の対義語がマイナーメタルであり、日本語ではこれをレアメタルと呼んでいる。精錬が難しい、入手が難しいなどの理由からコモンメタルではない金属のことをマイナーメタルと呼ぶが、必ずしも希少な金属ということではない。また、レアアースも全てが希少資源ではなく、またレアガス（希ガス）も基本的には希少資源であるがアルゴンとヘリウムは希少資源ではない。

空気中のアルゴンの濃度が非常に大きい理由は、アルゴンの起源にある。アルゴンの親物質の量が、他の希ガスの親物質に比べて莫大であるため、空気中に濃度の高いアルゴンが生まれたが、これを詳しく解説する教科書は少ない。地球の歴史を非常に詳しく解説している R ハイゼンの本でも、なぜかアルゴンの記述が乏しい。(→「2.2.5.3 地球 46 億年の歴史と空気の起源」)

しかし、地球のアルゴンの起源は、複数の学説があるとか、未解決の問題があるといったものではなく、生成の機構や歴史は、はっきりとしている。地球年代学(geochronology)の分野では、アルゴンの生成機構は最もポピュラーな年代測定方法のひとつであり、テキストには詳細が記されている。しかし、一般には、あまり興味を引かないのか、その他の分野、たとえば、地質や空気に関する書籍であっても、あまり詳しく取り上げられることがない。空気分離のテキストにも、アルゴンの起源については、あまりはっきり書かれていないようである。ここでは、アルゴンがどのようにして生成されているのか、ガス屋の知識として整理しておきたい。

同じ原子番号を持つ物質（元素）のうち、異なる質量数を持つものを「同位体(isotope)」と呼び、自然界におけるその割合を「同位体の天然存在比」(natural abundance ratio)と呼ぶ。ここで、天然とは「地球上」という意味であり、一般的には地球の表層部の自然界のこと指している。同位体の存在比は、場所によって異なるため、天然存在比の値は、地球の地表面近くの平均値が採用される。したがって、元素の同位体存在比は、他の場所、たとえば地球の極地や深部では、天

然存在比とは異なることがある。また、元素の起源が異なる他の天体では、同位体存在比が地球のものとは全く異なるのが普通であり、もし以てしているとしたら、原材料の組成が近いということが考えられる。したがって、同位体の存在比や天然存在比は、地球化学や天体の研究にとって極めて重要な情報となっている。アルゴンの起源を考える時にも、アルゴンの天然存在比が重要な情報となる。

ここで、原子番号が 20 のカルシウムよりも原子番号が小さい元素の原子には、原子番号の 2 倍の質量数を持つ同位体、すなわち原子核中の陽子と中性子の数が等しい同位体の存在比が大きいという、一般的な性質がある。

たとえば、原子番号 7 の窒素は、質量数 14 の同位体 ^{14}N 、原子番号 8 の酸素は、質量数 16 の同位体 ^{16}O の存在比が大きい。この関係が、原子番号 20 のカルシウム、 ^{40}Ca まで続き、原子番号 21 のスカンジウムよりも原子番号が大きい元素では、原子核中の中性子数が陽子数よりも多い中性子過剰核を持つ同位体の存在比が大きくなる。元素の原子量は、同位体の質量数とその天然存在比から決まるので、軽い元素の原子量は原子番号の約 2 倍、重い元素の原子量は原子番号の 2 倍より大きくなる傾向がある。

軽元素の原子番号と原子量の関係をグラフに示す（図 3-2-1）。多くの元素が原子番号の 2 倍の原子量を持っていることが分かる（図中の直線が原子番号の 2 倍の質量数の線）。

この中で、水素、リチウム、ベリリウム、アルゴンの 4 つの元素の原子量がこの傾向から大きく外れている。

原子番号 1 番の水素は、原子核に中性子を持たない特別な原子である軽水素 ^1H が安定的に大量に存在するため、原子量は 1.00794 となり、2 よりもかなり小さい。原子核に中性子を持たない特別な核種は、水素 ^1H とリチウム ^3Li の二つしか存在

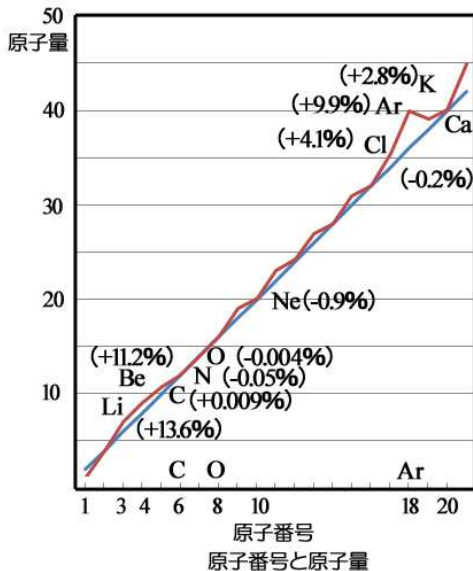


図 3-2-1 軽元素の原子番号と原子量の関係
○ 内は原子番号の 2 倍と原子量の違い

せず、安定的に存在するのは、水素だけであり、水素は原子番号と原子量の関係が例外的である。

原子番号3番のリチウムは、安定同位体のほとんどが ${}^7\text{Li}$ であるため、原子量が6.941と6から大きく外れている。これはリチウムの原子核の核子の結合エネルギーが例外的に小さく、軽元素であるにも関わらず、核分裂を起こしやすいためである（放射性という意味ではなく、安定核種の中でも分裂しやすいという意味）。

原子番号4番のベリリウムは、13種類ある同位体のうち、安定同位体は ${}^9\text{Be}$ のみであり、他の核種の寿命は非常に短いため、天然には同位体がひとつしか存在しない。ベリリウムの原子量9.012は、中性子過剰核である ${}^9\text{Be}$ の質量に等しく、原子番号の2倍から大きく外れている。

原子量が原子番号の2倍から大きく外れるこれら3つの例外（水素、リチウム、ベリリウム）は、その理由が、同位体の原子核そのものにある。

しかし、アルゴンの場合は、原子核にはこのような理由がなく、理論的には、陽子数と中性子数が等しい質量数36のアルゴン36 (${}^{36}\text{Ar}$) が最も存在比が大きくなるはずであり、アルゴン36は安定同位体であって減る理由がないため、測定される原子量も36に近くなるはずである。実際、太陽大気に含まれるアルゴンは、アルゴン36 (${}^{36}\text{Ar}$) の同位体比が84%である。太陽と太陽系の他の天体は、ほぼ同じ原材料（分子雲）から作られたため、この値は地球でも、ほぼ同じような値になる、はずであった。

ところが、地球の空気中のアルゴンは、質量数40のアルゴン40 (${}^{40}\text{Ar}$) が99.6%もあり、太陽系の平均値から大きく外れている。地球のアルゴン (${}^{40}\text{Ar}$) は、陽子の数と中性子の数がほぼ等しい軽元素であるにも関わらず、中性子が4個も過剰であり、太陽系の普通のアルゴン (${}^{36}\text{Ar}$) に比べて異常に重い。

レイリーとラムゼーが周期表に加えるのに悩んだアルゴンの異常な重さの理由は、地球の空気中に存在するアルゴンの大半が、宇宙の元素合成の機構に基づいて作られたオリジナルのアルゴンではなく、地球ができた後から作られたアルゴンだからである。

地球の空気中のアルゴンの起源は、放射性のカリウムである。

カリウムには、 ${}^{32}\text{K}$ から ${}^{55}\text{K}$ まで、2種類の安定同位体 (${}^{39}\text{K}$ 、 ${}^{41}\text{K}$)、22種類の放射性同位体、4種類の核異性体 (${}^{32m}\text{K}$ 、 ${}^{38m1}\text{K}$ 、 ${}^{38m2}\text{K}$ 、 ${}^{40m}\text{K}$)、合計28種類の同位体が存在する。天然には、 ${}^{39}\text{K}$ (93.3%)、 ${}^{40}\text{K}$ (117ppm)、 ${}^{41}\text{K}$ (6.7%) の3種類の同位体が存在し、 ${}^{39}\text{K}$ と ${}^{41}\text{K}$ は安定同位体、 ${}^{40}\text{K}$ (カリウム40) は放射性同位体であ

り、⁴⁰K がアルゴンの親物質となっている。

放射性同位体は、他の核種に壊変して失われ、その存在量が変化するため、一般的には、天然存在比が示されない、あるいは未確定とされることが多いが、⁴⁰K (カリウム 40) の場合は、天然に大量に存在し、半減期も比較的長いいため、天然存在比の値 117ppm が確定、報告されている。

⁴⁰K は 12.8 億年の半減期で崩壊するので、地球創世記 (46 億年前) には、現在の約 12 倍の量の ⁴⁰K が存在していたことになる。

⁴⁰K は、半減期 12.8 億年でおおよそ次のように崩壊する。

表 3-2-1 ⁴⁰K の崩壊 (半減期 12.8 億年)

崩壊過程	確率	反応式	放出エネルギー
β^- 崩壊	89.1%	${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + e^- + \bar{\nu}_e$	1.31MeV
EC 崩壊	10.9%	${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} + \gamma + \nu_e$	1.51MeV
β^+ 崩壊	0.001%	${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} + e^+ + \nu_e$	陽電子対消滅 1.02MeV

主な反応性生物は、⁴⁰Ca (カルシウム 40) であるが、全体の約 1 割程度が ⁴⁰Ar (アルゴン 40) になる。

カリウムのうち 117ppm の ⁴⁰K が 12.8 億年という比較的長い半減期でゆっくりと崩壊し、そのうちの 11% だけが ⁴⁰Ar になるので、カリウム全体から見るとカリウムがアルゴンに変換される速度は遅く、その数も少ない。しかし、カリウムはクラーク数では 7 番目に多い元素であり、地殻中や海水中に普遍的に存在し、その量は莫大であり、生成されるアルゴン (⁴⁰Ar) の量も莫大である。

アルゴンは、希ガスであるにもかかわらず、現在、空気中に、9300ppm という高い濃度で存在し、⁴⁰K を親物質として生成され続けているのである。

地球の大気の変遷をおおまかにみると、①初めからその量がほとんど変化していない窒素、②莫大な量があったが海の生成、生命の発生、大気の循環などによって激減し、主成分ではなくなってしまった二酸化炭素、③はじめは全くなかったが生物が作り出した酸素 (分子)、④創世記からずっとカリウムが崩壊続けて生成され続けているアルゴン、これらの 4 つの物質によって空気や大気が形成されてきた。

^{40}K が、空気中に存在するアルゴンの起源であるということは、あまり意識されることがないが、 ^{40}K の崩壊を利用する「カリウム-アルゴン法」は、最もよく知られている放射年代測定法である。たとえば、マグマが固化した岩石を採取し、その中に閉じ込められている ^{40}Ar とカリウムの関係を調査すればマグマが固化した年代が推定できる、というものである。

天然の放射性物質（放射性同位体）の崩壊を利用した年代測定法には、ウラン-鉛法、アルゴン-アルゴン法、炭素 14 法など 20 種類ほどが知られている。この放射年代測定という方法、分野は、比較的よく知られており、理科の教科書にも出ており、その中でもカリウム-アルゴン法は、最もポピュラーな年代測定法のひとつである。しかし、空気中のアルゴンの親物質であるということの記述はあまり多くない（どこかに書かれているとは思いが一般の認知度は低い）。

カリウムは、岩石中に大量に含まれるだけでなく、動植物にとって必須元素であるため、食品や生物の体内には、必ず、 ^{40}K が含まれている。 ^{40}K は β -崩壊と EC 崩壊を起こす放射性同位体であるが、地球上の生物は、カリウムを摂取し代謝するため、ほぼ一定量のカリウムを体内に保有、放射性の ^{40}K も保有していることになる。カリウムは、放射性物質であり、最も身近な被曝線源である。しかし、カリウムは生物にとって必須ミネラルであり、法令では放射性物質として取り扱わない。

人間は、体内にカリウムがなければ生きていけない。また、 ^{40}K の半減期 12.8 億年は、人類の歴史の長さから考えると長い。 ^{40}K の天然存在比は、今後もその値はほとんど変わることがなく、 ^{40}K による放射線の内部被曝は今までも、これからも避けることはできない。

^{40}K は、ヒトの体重 1kg あたり、放射能として 60~100 ベクレルほどが含まれるため、成人一人あたりでは、およそ 4000 ベクレル程を保有しているこ

ことになる。これは、人体が自然界から受ける放射線内部被曝の中では最も大きく、およそ半分くらいを占めており、年間約 0.17 ミリシーベルトとされている。

地上の生物は、空気や大気、地磁気などによって宇宙から（主に太陽から）の危険な放射線（宇宙線、荷電粒子、紫外線など）から守られているが、この地磁気

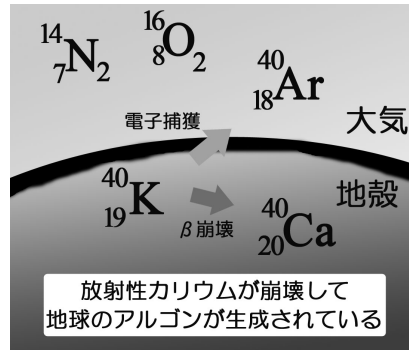


図 3-2-2-アルゴンの起源

を作っているのは、地球内部の外核の高温の液体金属である。そして、この地球が冷えて固まらないための熱源に占める⁴⁰Kの崩壊熱の寄与は非常に大きく、要するに、⁴⁰Kという放射性物質の存在によって地球は生きており、その結果、地上の生物は危険な太陽から守られているということにもなるが、同時に⁴⁰Kによる放射線に曝されているということになる。

SF作家のアイザック・アシモフは、自然界の放射線が生物の進化に与える影響を考えて次のように述べている「大昔⁴⁰Kによる放射線が強かった時は、傷つきやすい長いゲノムが作られず、遠い未来に⁴⁰Kが減って放射線が減った時には、突然変異の出現率が大幅に低下するため、大昔も遠い将来のも、いずれの時代も生物は進化しないだろう」。要するに、カリウムによる内部被曝が大きい時代は遺伝子が傷つき高等生物は進化せず、内部被曝がなくなれば逆に遺伝子の変化がなくなり生物の進化が止まる。現在の量が、ちょうど人類の進化に適しているのではないかという想像である。しかし、地球の生物は⁴⁰Kという放射性物質が存在しない時代を知らないため、アシモフの説を確認する方法がない。40億年先には⁴⁰Kの量も現在の8分の1くらいに減っているだろうが、その頃には太陽や地球の寿命は尽きている。

ここで、参考のために、希ガスの同位体存在比の概要をまとめておく。

図3-2-3は、周期表第1周期のヘリウムと第2周期のネオンの同位体の存在比である。ヘリウムは、宇宙では水素について多い元素であり、恒星のエネルギーの源である。ヘリウムには、同位体が2つ存在するが、現在、地球にあるほとんどのヘリウムは⁴Heである。

創世記の原始大気中にあっただと思われるヘリウムは、既に地球の外に拡散してしまい、現在、天然ガスの中から採取されているヘリウムはウランが起源である（→「3.5 原子核の崩壊とアルゴンの生成・ヘリウムの生成」）。

³Heは、太陽のエネルギー源であり、月面の岩石中には、長い間の太陽風によって³Heが多く蓄積されているといわれており、しばしばSFの題材になっているが、これは³Heが何らかのエネルギー源になっているということではなく、³Heを燃料として利用する核融合の可能性を論じ

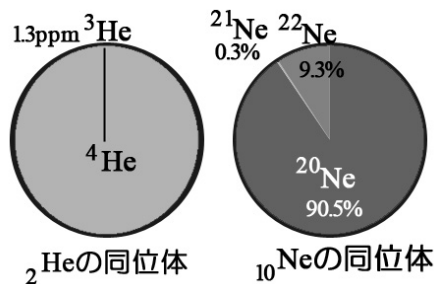


図3-2-3 ヘリウムとネオンの同位体

ているということである。 ^3He は、地球上の天然存在比が極めて低く 1.3ppm しかないため、人工的に生産されており、産業ガス事業の取扱商品とはなっているが、極めて入手が難しいガスである。

ネオンは、希ガスの中では比較的多く空気中に存在する。ラムゼーは、アルゴンとヘリウムを発見した後、空気を液化する方法を入手し、窒素、酸素、アルゴンを除去した残りの気体から、ネオン、クリプトン、キセノンを発見した(1898年)。

ネオンを最初に実用化したのは、エアリキード社を創設したクロードであり、ネオンガスを封入した管に放電することで、新たな照明器具を発明した(1910年)。「ネオンサイン」の会社などが作られた。

20世紀初頭に放射性同位体が発見され、同じ元素の中に異なる質量を持つ原子の存在が知られるようになったが、JJ トムソン(1856~1940年、イングランド)によって、ネオンには、放射性ではない質量の異なる同位体が存在することが発見された(1913年)。その後、地球上には、多くの安定同位体が存在することが分かった。レイリーが調べていたブラウト仮説におけるいくつかの元素の原子量が整数倍から大きくずれていることは、安定同位体の存在の発見によって、ようやく、説明できるようになった。

ネオンは深冷空気分離装置の窒素側にわずかに濃縮され、酸素側にはほとんど含まれないため、窒素を蒸留分離して製造される。現在、ネオンを冷媒とした高温超電導用冷凍機が開発されている。超低温冷凍機の冷媒はヘリウムが多いが、高温の超電導では、60K~70Kほどの温度が領域を利用するためヘリウムよりも質量の大きいネオンの方が冷凍サイクルに適していることから注目を集めている。

図 3-2-4 は、第3周期のアルゴンである。図の左、太陽大気のアルゴンに対して地球大気のアルゴンは同位体比が全く異なる。太陽は、ほとんどが水素とヘリウムからできているが、大気中には、その他の元素も微量含まれている。

太陽系の種になったのは宇宙空間の分子雲であるが、分子雲には、ヘリウムよりも重い元素が含まれ、「ガス」が集まって木星や土星のようなガス惑星が、「チリ」が集まって、金星や地球のような岩石惑星が生成した。太陽系の中心部に集まった水素が重力で圧縮され、安定した核融合が始まり、

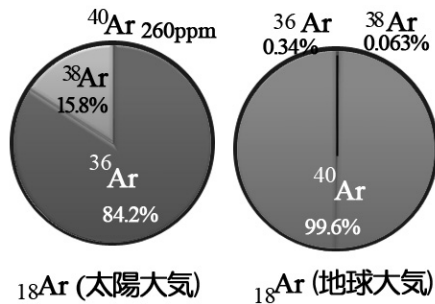


図 3-2-4. アルゴンの同位体

太陽は主系列恒星と呼ばれる自分の反応で光る星になった。地球も太陽とほぼ同じ時代に同じ分子雲から作られているため、その時のアルゴンが残っているのであれば、太陽大気のアルゴンの同位体存在比と地球のアルゴンの同位体の天然存在比は、ほぼ等しいはずであるが、全く異なっており、地球のアルゴンが創世記のアルゴンではないということが、この同位体比の大きな違いから、はっきりと確認することができる。

図 3-2-5 に第 4 周期のクリプトン（原子番号 36）と第 5 周期のキセノン（原子番号 54）の同位体比を示す。同位体の種類が多いため、この図では、存在比の数値は省略、質量数の小さいほうから順に示した。いずれの同位体も、原子番号の 2 倍よりもかなり質量数が大きい。

電球の封止ガスなどに少量使用されており、クリプトン球（白熱電球）やキセノンランプが知られる。

キセノンは、宇宙船のイオン推進エンジンやキセノン麻酔などの利用も考えられているが、なんといっても空気中に 0.087ppm しか含まれていないため、極めて少量しか生産されず、非常に高価なガスとなっている。

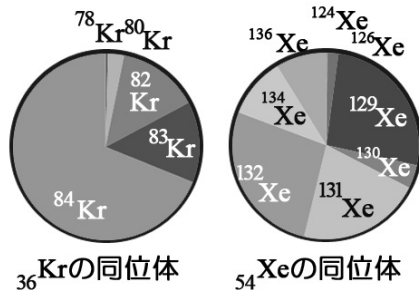


図 3-2-5-クリプトンとキセノンの同位体

3.3 空気中のアルゴンの量

とてもカラフルでインターラクティブな新時代の電子書籍を代表するセオドア・グレイの「元素図鑑」には、「アルゴンは空気中に驚くほどたくさん（重量比で1%近く）含まれている」という説明がなされている。

アルゴンを希ガスのひとつと考え、空気の成分と考えると「驚くほど多い」ということになる。資源として考えても存在比が1%もあるということは莫大な量があるということである。

一方、インターネット上の情報を検索すると、空気の組成の説明には、「アルゴンは、0.934%「しか」含まれない（重量比 1.282%）」という記述を見かける時がある。

しかし、いくつかの分野の書籍では、アルゴンの存在が無視されることもあり、「空気を100とすると、その組成は窒素79、酸素21である」と書かれることさえある。酸素や窒素と比べると「少ない」となるのかも知れない。

空気中のアルゴンの量に関しては、それぞれの主観によって異なるようであり、科学的・学術的には「アルゴンは非常に多い」と書かれるが、特定の分野では「非常に少ない」と書かれ、時にはその存在が無視されることもある。

ガス屋の常識では、原料空気の中に1%近く含まれるアルゴンは「非常に多い」ということになり、深冷空気分離装置を設計する立場からみても、空気に含まれる成分の中では無視できないほど多い。

資源あるいは分離技術という観点からみても、原料中に1%近くも含まれている物質というのは、非常に多く存在すると考えるのが普通である。近年の環境問題のなかで、製品1kgを得るために、自然資源を何kg動かすかという「エコロシカル・リュックサック」という環境負荷指標が取り上げられている。環境省が示すデータでは、鋼鉄のエコリュックサックは21kg、アルミニウムは85kg、再生アルミニウムは3.5kg、銅は500kg、金は540トン、ダイヤモンドは5万3千トンとなっている。この指標は、原料中の濃度が低ければ環境負荷が大きくなるということを示している。

鉄とアルミニウムは、エコリュックサックが非常に小さく、極めて優れた資源であるということが分かるが、アルゴンも優れた資源であり、1kg作るのに必要な空気はわずか78kgである（空気中の重量比1.288%）。エコリュックサックが小さい空気中のアルゴンは、けっして希薄ではなく、少なくともない資源である。しかも、鉱物資源の場合は、製品以外の大量の鉱石、土砂、廃棄物を処理しなければなら

ないが、空気から取り出されるアルゴンには、このような廃棄物がなく、酸素と窒素を作るときに同時に生産されるので無駄がない。

空気の組成を示すとき、通常は水蒸気を含まない乾燥空気を 100%とすることが多いが、ここで、アルゴンの量を比較するために、湿潤空気の組成を計算してみる。20℃の飽和水蒸気圧は 2.34kPa である。気圧 1atm で湿度 100% (飽和) の時、空気に対する水蒸気の濃度は 2.3% (23,000ppm) に相当するから、その量は、アルゴンの約 2.5 倍である。

20℃で湿度が40%であれば、空気中の水蒸気量とアルゴンの量はほぼ等しい。空気中には、莫大な量の水蒸気が存在することが実感できるが、それと同じ量のアルゴンが空気中に存在するということになる。温暖化の要因としてその増加が懸念される空気中の CO₂ の濃度は、現在約 390ppm。空気の成分としては 4 番目に多いが、アルゴンの濃度と比べると 24 分の 1 である。図 3-2-6 に湿潤空気の組成を示す。この条件 (20℃、相対湿度 40%) の時、水蒸気量とアルゴンの量はあまり変わらない。水蒸気と比べてもアルゴンは、無視したり見落としたりできないほど大量に存在する。

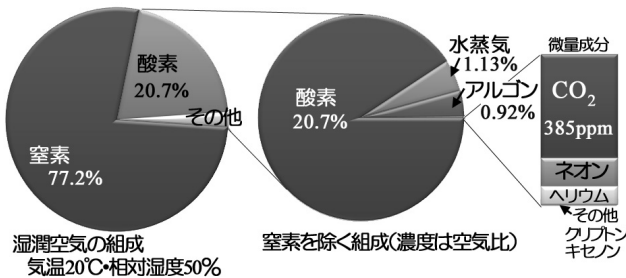


図 3-2-6 湿潤空気の組成

図の一番右には、その他のガスを拡大表示しているが、アルゴン以外の希ガス(ネオン、ヘリウム)は、空気になかなか含まれない本当に希なガスである。

アルゴン以外の希ガスの存在量は極めて少ないが、キセノンに至っては、0.087ppm しかないため、存在量は、わずか 3.8 億 Nm³ しかない極めて希少なガスである (全空気量を 433 京 Nm³ として。同じ計算で、ヘリウムは、空気中に 22 兆 Nm³、アルゴンは 4 京 Nm³ 存在する)。

ガス屋であるならば、顧客に対して、「希ガスであるアルゴンは名前の通り希少なガスである」という誤った情報を間違っても伝えないようにしたい。