

基調講演「放射能と地球環境」

百島則幸*§

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故は人々に放射能への関心や不安を抱かせる出来事となったが、もともと放射能が自然界に存在していることや放射線を利用する医療行為で私たちは被ばくをしていることなどを改めて知るきっかけとなった。その意味では放射能や放射線を理解する手助けとなった事故ではあったが、社会的損失や風評被害は大きく、影響は今もって続いている。

現代社会において放射能は原子力利用に関連した側面から捉えられることが多いが、放射能は普遍的に宇宙に存在し、太陽系の誕生に端を発する地球史にも最初から登場する。地球表層は自然放射能に満ちた環境であり、表層に生成した海のなかに生命は誕生し、やがて陸に上がり人類に続く進化の道をたどってきた。

2. 地球の誕生と放射能の濃縮

46億年前に地球は誕生したと考えられている。星間ガスが重力で凝集し、その中心に原始太陽が誕生した。恒星である太陽のエネルギー源は水素からヘリウムが生まれる核融合反応であり、核融合により膨大なエネルギーを宇宙空間へ放出し続けている。太陽の放射エネルギーがなければ地球は誕生しなかったし、生命の発生もなかった。地球や木星などの惑星は原始太陽の赤道面に生まれて散らばっていた微惑星が合体・集合することで誕生したが、岩石や金属などの高融点の材料を取込んだ地球型惑星は太陽に近い所に、水素やヘリウムなどのガス成分を主体とする惑星は遠い所に生まれた。太陽の核融合反応では鉄より重い元素は生成しないことが原子核の結合エネルギーの解析からわかっている。しかし地球には鉄より重い元素が存在しているし、ウラン等の放射性元素も存在している。これらの重い元素は恒星が最後に起こす超新星爆発で生成して、宇宙空間に微粒子としてばらまかれたものと考えられている(田近, 2009)。最近では中性子星同士の衝突で重い元素

が生成した可能性が議論されているが、いずれにしても地球になぜ放射能があるのかに対する答えは、地球の材料となった星間ガスに放射能をもった固体微粒子が最初から含まれていたからとなる。

微惑星が合体・集合して誕生した直後の地球は岩石や金属が均一に分布する星であったが、微惑星の衝突エネルギーで地球は加熱されるとともに脱ガスが進行し、地球表面を覆ったガスの温室効果により地球はさらに熱くなっていった。やがて岩石は熔融しマグマオーシャンが誕生し、地球全体が熔融した状態になったと考えられている。マグマオーシャンが輻射熱を宇宙に放出して地球が冷却されていくと表層に融点が高い鉄が析出してきたと考えられる。鉄は重いのでマグマオーシャンを沈降し地球の中心に集まり核を形成したと考えられている。さらに冷却が進むとマントルが生成してくるが、このような分化の進行は加熱と冷却が関係していることから、微惑星が衝突した場所はその周辺で熔融が進行、大きな惑星が衝突すると全体が熔融するなどを繰り返したと思われる。微惑星の衝突が減り冷却が進むと最後に地殻が形成された。分化の過程でマントルに取込まれ難く最後まで残っていた元素のうち、ウランやトリウムやカリウムなどの放射能の多い元素は大陸地殻の花こう岩に多く取込まれた。従って私たちが生活している大地は地球で最も放射能が濃縮された場所となった。

3. 放射性同位体と放射壊変

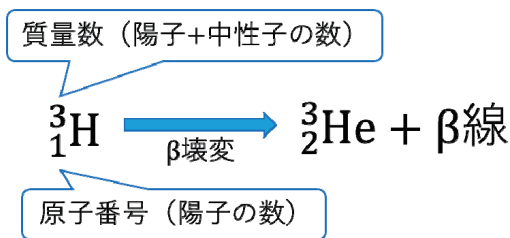
まばゆい輝きをもつ金の価値は昔も今も変わらない。中世ヨーロッパの錬金術師は金を作ろうと大変な努力をしたが、夢物語であり決して鉄が金に変わることはなかった。そのため長らく元素は不変であると考えられてきた。しかし1895年のレントゲン博士によるX線の発見以降、放射能や放射線の研究が進み、放射性元素は放射壊変すると別の元素になることが明らかになった。ラザフォードは天然のα線を用いた原子の散乱実験から、質量の大部分を占める重い原子核が原子の中心に位置し、原子核の周りを電子がまわる原子模型を提案した。原子核は陽子と中性子からできて

* 一般財団法人九州環境管理協会 (〒813-0004 福岡県福岡市東区松香台1丁目10番1号)

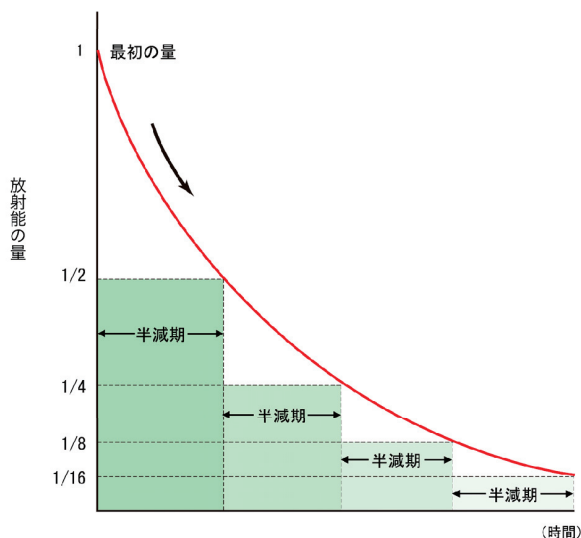
§ E-mail: momoshima@keea.or.jp

いるが、これらの核子は非常に近い距離で作用する強い力で結び付けられることで原子核は安定化している。周期表は元素を順番に並べたもので、その順番は原子核に含まれている陽子の数である。放射壊変が起こると原子核を構成する陽子と中性子の数の関係が変わる。すなわち元素が変わることになる。周期表の83番目に位置するビスマス (Bi) 以降はすべて放射性の元素である。元素は化学結合して多様な化合物を作ることができるが、化学結合を担うのは原子核の周りをまわる電子であり、化学結合しても元素は変わらない。

水素は原子核に含まれている陽子の数が一つであることから周期表の最初に位置する。水素には中性子の数が異なる同位体が3つ存在し、そのうちの一つであるトリチウム (H-3) は放射性で、β壊変 (ベータ線を放出) して安定なヘリウム (He-3) になる (第1図)。放射壊変にともない放射線が放出されるが、我々は放射線を放出でき



第1図 水素の放射性同位体であるトリチウムはβ壊変を行い質量数3のヘリウムになる。放出されるβ線の最大エネルギーは18.6keVである。質量数は元素記号の左肩上に書く。原子番号は省略されることが多い。



第2図 放射能と半減期の関係。

る能力のことを放射能と呼んでいる。放射壊変する確率はそれぞれの放射性同位体に固有であり、直感的に理解しやすい指標である半減期で表現することが多い。ちなみにトリチウムの半減期は12.3年である。トリチウムの放射能が高いあるいは強いという場合は、物質に含まれるトリチウムの数が相対的に多いことを意味する。放射能の強弱は物質に含まれる放射性同位体の数の多少であり、その単位としてベクレル (Bq) を用いる。ベクレルは1秒間に放射壊変する放射性同位体の数である。放射能の特徴として半減期の時間が経過すると放射能は半分になることが挙げられる。すなわち放射性同位体の数は半減期で半分になる (第2図)。半減期の10倍の時間が経過すると放射能は1024分の1になるので、120年前の地下水にはほとんどトリチウムは含まれていないことになる。

4. 放射線被ばくの実態

放射線はエネルギーをもった粒子あるいは電磁波である。α壊変で放出されるα線はヘリウムの原子核そのものであるが、高いエネルギーをもっていることが特徴である。一方、空気中に存在しているヘリウムガスは低エネルギーでありα線とは呼ばない。放射線は物質に入射すると持っているエネルギーを物質に与える。物質は放射線エネルギーを吸収すると物質を構成している原子や分子に電離や励起が起こる。電離はイオン化であり、物質中の放射線の飛跡に沿って正負のイオン対が生成する。これらのイオン対は物質と様々な相互作用を引き起こす。励起は原子や分子のエネルギー状態が高くなることであり、通常は熱や輻射により脱励起して元のエネルギー状態に戻るが、分子の化学結合が切れる場合もある。物質が受取ったエネルギーを吸収線量というが、人が放射線エネルギーを受取ることが被ばくという。放射線被ばくの特徴は放射線エネルギーが体を構成する細胞のいくつかに集中的に与えられることであり、放射線の飛跡に沿って起こった電離や励起が分子レベルでの生命活動を担っている代謝機能に影響を与えることである。被ばく線量は、吸収線量、放射線の種類とそのエネルギーに対して定められた係数、そして人の組織や臓器毎に求められた影響の大きさを表す係数から求められる。被ばく線量の単位はシーベルト (Sv) である。ここで忘れてはいけないことは、放射線に限らず体に取込まれた

化学物質や細胞活動で発生した活性酸素など生命活動に影響を与えるものはたくさん存在していることと、それらの影響を低減し、代謝機能に生じた障害を修復するメカニズムを私たちは持っていることである。私たちは体の中で営まれている代謝活動を常に監視し、障害を修復しながら生きているといえる。

5. 自然放射線による被ばく

自然放射線による被ばく線量は世界平均で2.4mSv/年（放射線医学総合研究所, 2011）であり、日本平均で2.09mSv/年（原子力安全研究協会, 2011）である（第1表）。私たちは、環境中の四つの放射線源から被ばくを受けているが、宇宙線と大地は外部被ばく、食べ物と呼吸は内部被ばくである。大地からの線量は大地に含まれる放射性物質の量の大小に依存し、中国やインドにはウランやトリウムが多く含まれているために線量が高い場所があることが知られている。食べ物からの線量に関して世界より日本が高いのは放射能を多く含んだ海産物をたくさん食べているためとされている。呼吸からの線量は、空気中に含まれる希ガスであるラドンとその子孫核種の量と住宅の構造などの要因によると考えられている。ラドン源は石やコンクリートなどの建材や地面にあるので、密閉性の高い地下室や居室は被ばく線量が高くなる傾向がある。わが国が低いのは木造建築が主体であることと海に囲まれているためにラドン濃度の低い空気の影響を受けやすいことが関係していると思われる。

高い線量を受けるとがんによる死亡リスクが高くなることが知られている。広島・長崎の原爆被ばく者に関する膨大な追跡調査から線量に比例的にリスクが増加していることが明らかになっている。一方で、私たちは普通の生活をしていてもがんを発症している。生活習慣により生涯がんで死亡する確率は2017年度の統計では男性25%、女性15%である。実に男性の4人に一人はがんで亡くなっている。付加的な放射線被ばくは生活習慣によるがんの死亡リスクに上乘せされることになる。広島・長崎の調査では高い線量域で線量とがんリスクの比例性が確認されているので、低線量域でもこの直線性が成り立つと仮定すると、低線量の被ばくを受けた場合の付加的ながんリスクを計算できる。それによると100mSvを受けた場合のがんの死亡リスクは0.5%と計算されるので（神

第1表 自然放射線による被ばく

線源	被ばく線量 (mSv/年)	
	世界平均	日本平均
宇宙線	0.39	0.3
大地	0.48	0.33
食べ物	0.29	0.98
呼吸	1.26	0.48
合計	2.4	2.09

田, 2012), 男性のがんリスクは25%から25.5%となる。このリスク増加を許容するかどうかは私たちの個人の問題となる。ちなみに世界には平均よりも高い被ばく線量を受けながら生活している集団があるが、このような集団についてがんリスクに関する疫学調査がなされている。調査されたいずれの集団についてもがんリスクの増加は見つかっていない (Tao *et al.*, 1997)。

6. 時計として利用される放射能

長い半減期をもつウラン-238は α 壊変や β 壊変でつながるウラン系列と呼ばれる壊変系列を作っている。 α 壊変では質量数が4つ減り、原子番号が2つ減る。 β 壊変では質量数の変化はなく、原子番号が1つ増えるので、ウラン系列に属する放射性同位体の質量数の変化は $4n+2$ で表される。同様にウラン-235で始まるアクチニウム系列($4n+3$)とトリウム-232から始まるトリウム系列($4n$)がある。これらの系列の最後は安定な鉛同位体になって終わる。第2表に示すように鉛には4つの安定な同位体があるが、壊変系列に由来する鉛同位

第2表 壊変系列を形成する放射性同位体と最終的に生成する鉛同位体

放射性同位体	半減期 (億年)	放射性同位体の存在割合 (%)	生成する鉛同位体	鉛同位体の存在割合 (%)
U-238 ($4n+2$)	44.68	99.275	Pb-206	24.1
U-235 ($4n+3$)	7.038	0.720	Pb-207	22.1
Th-232 ($4n$)	140.5	100	Pb-208	52.4
—	—	—	Pb-204	1.4

体の数は地球誕生からの時間経過とともに増加していることになる。一方、鉛-204は壊変系列に由来しないので数は変わっていない。鉛同位体の数は地球の年齢のような長い時間を知るための時計として使える。マグマから岩石や鉱物が生成するときすべての鉛同位体は同じように挙動する。すなわち溶融マグマ中の鉛同位体の組成は生成した岩石や鉱物にそのまま移行する。一方、ウランやトリウムと鉛の化学的挙動は異なるため、岩石や鉱物が生成するときは分別によりそれぞれの含有量は異なってくる。現在の岩石や鉱物中の鉛同位体の数は元々の鉛同位体と時間経過で生まれた鉛同位体の数の合計である。異なる壊変系列の鉛同位体のデータを組み合わせて解析することでマグマから岩石が生成した時間を知ることができる (Manhes *et al.*, 1980)。地球の年齢を求めるには地球が誕生したときの最初の鉛同位体の組成に関する情報が必要である。この情報はウラン含有量が極めて低い鉄隕石の鉛同位体の分析から得られている (Patterson, 1956)。隕石は太陽系が生まれたときに地球と同時に生成したものと考えられている。地球の年齢はカリウム-アルゴン法と呼ばれる方法でも求められているが鉛同位体法とほぼ同じ年齢が得られている。

7. おわりに

地球環境の自然放射能は元から地球にあったものなので、地球が誕生した46億年前は今よりも高い放射能レベルであった。地球上に生命が発生した時期は確定されていないが30数億年前ともいわれており、最古の真核生物の化石は19億年前の地層から見つかっている。現在と比べると19億年前のカリウム-40の放射能は3倍、ウラン-238は1.3倍、ウラン-235は6.5倍、トリウム-232は1.1倍であった。ウラン-238、ウラン-235、トリウム-232は壊変系列をなしているため、各系列に属するすべての放射性同位体も同じように高かった。私たちは地球環境の放射能が高かったところに発生し進

化してきた生命の遺伝子を受継いでいると思われる。国際宇宙ステーション滞在中の宇宙飛行士は、強烈な宇宙線に曝されるため被ばく線量が高くなり、半年の滞在期間中に受ける線量は、地上で一生涯に受ける線量に相当するとされている。想像ではあるが、宇宙ステーション滞在中は発生する放射線障害を修復するための遺伝子の発現が活性化されていたのではないだろうか。

引用文献

- 田近英一(2009). 地球環境46億年の大変動史. 化学同人, 京都, 1-226.
- 放射線医学総合研究所(2011). 放射線の線源と影響. 国連科学委員会2008年報告書 I, 4.
- 原子力安全研究協会(2011). 新版 生活環境放射線(国民線量の算定). 原子力安全研究協会, 東京, 73.
- 神田玲子(2012). 疫学研究から見た低線量放射線の影響—専門家によって説明が異なるのはなぜか—. *Isotope News*, **No.693**, 19-23.
- Tao, Z.F., Kato, H., Zha, Y.R., Akiba, S., Sun, Q. F., He, W.H., Lin, Z.X., Zou, J.M., Zhang, S.Z., Liu, Y.S., Sugahara, T. and Wei, L.X. (1997). Study on cancer mortality among the residents in high background radiation area of Yangjiang, China. In "High levels of natural radiation 1996: radiation dose and health effects" (eds. Wei, L.X., Sugahara, T. and Tao, Z.F.), Elsevier, Amsterdam, 249-254.
- Manhes, G., Allegre, C. J., Dupre, B., and Hamelin, B. (1980). Lead isotope study of basic-ultrabasic layered complexes - speculations about the age of the earth and primitive mantle characteristics. *Earth Planet. Sc. Lett.*, **47**, 370-382.
- Patterson, C. (1956). Age of meteorites and the earth. *Geochim. Cosmochim. Ac.*, **10**, 230-237.