

# 虚構の環境技術 4 : エネルギー源としての原子力

川 村 邦 男\*

(受付 2022 年 7 月 15 日)

## 1. は じ め に

「虚構の環境技術」シリーズ論文の目的の一つは、環境技術に関する世にあふれている誤解を解いて、問題点を市民に分かりやすい言葉で解説することである。また、そのための方法を模索・提案することである。環境技術の中でも関心の高い科学技術は温暖化対策技術と原子力であろう。温暖化問題については「虚構の環境技術 3」で解説・考察したので、今回は原子力に焦点をあてる。

私が本学に赴任する直前に東日本大震災とともに福島第一原子力発電所の過酷事故が起こった。日本は世界の主な地震の 1 割が集中する場所でありで、原発事故は起こるべくして起こった。それまで原子力の安全性には関心がなかった一般市民も、この事故をきっかけとして原子力の安全性に対して疑念を持つようになった。あれから10年以上が過ぎたが、この種の事故を今後は起こさないという方向に社会は向かったであろうか。私にはそうは思えない。むしろ、ますます、すべきでないことをしてしまう社会になったと思う。

原子力を進めるべきかどうかを市民に聞けば、賛成と反対の両方の答えが返ってくる。安全であれば動かしても良いと考える人は少なからずいる<sup>1,2)</sup>。事故に遭遇すると止めるべきだとし、エネルギー資源が足りないので安全が確保されたならば進めても良い、というように市民の意見は分かるとともに、状況によって変わる。この理由は、これらの判断をする根拠となる自然科学・技術の理解が十分でないことによる。実際、原子力について市民が学ぶ機会は少ない。原子力工学の科学技術に関連する教育内容は、高等学校までではごく限られている<sup>3,4)</sup>。そもそも工学は高等学校・普通科のカリキュラムには十分に含まれておらず、理科系教育が自然科学に偏っていることも理科系教育の課題である。また政府や電力会社による説明は、技術内容を正確かつ分かりやすく説明しようという類いのものではない。

そこでこの論文では以下に焦点をしぼって解説する。第 1 に、放射能と生物の関係を私の専門である宇宙における生命（アストロバイオロジー）の観点から概説する。第 2 は、放射能は人間は実質的には消すことはできないという自然科学的・技術的な事実である。第 3 は、

---

\* 広島修道大学

高速増殖炉は実現の見込みがない幻想技術であることである。第4として、原子力は再生可能エネルギーと同様に自立的なエネルギーではなく、化石燃料がないと機能しない点である。

## 2. 宇宙の歴史からみる生物と放射能との関係

### 2.1 そもそも放射線・放射能となにか

一般に、放射線とはエネルギーの強い電磁波や粒子のことであり、放射能とは放射線を出す能力のことである。このときのエネルギーの強い電磁波とは、だいたいガンマ線やX線のことである。電磁波の分類には、可視光線・紫外線・赤外線・マイクロ波・電波などが含まれ、これらは電磁波のエネルギー強度あるいは波長の違いによって名前がつけられている<sup>5)</sup>。例えばガンマ線は可視光線と比べておよそ100万倍以上のエネルギーを持ち、太陽系の外から来るような高エネルギー電磁波のように非常に強いものまである。このため、生物を構成する有機物に可視光があたっても有機物そのものを壊すことはほとんどないが、ガンマ線やX線はその強さに応じて物質を破壊するエネルギーをもっている。

### 2.2 宇宙の出現と生命の出現

生物を構成する水素以外の主な元素は、酸素、炭素、窒素である。その他にも様々な原子が必要である。生命がこの宇宙に出現するためには、これらの様々な種類の原子が宇宙に蓄積することが不可欠であった。宇宙はいまから約137億年前にビッグバンを経て出現したと考えられている。ビッグバンでは水素、ヘリウムを含む小さな原子は生成するが、重い原子は恒星の中心部で進む核融合によって徐々に蓄積されていく。このため初期の宇宙は主に水素で構成されており、他の種類の原子はほとんど存在しなかった。大きな恒星は最終的に超新星爆発を起こし、その残骸として様々な原子が宇宙にばらまかれる。その他にも中性子星の衝突によって重原子は生成することが明らかになってきた。これらの原子は再び集まって天体となる。このようなことを繰り返して、宇宙にはしだいに重い原子が蓄えられて、生物が出現するための準備が整っていった。我々の太陽系は今から46億年ほど前に形成したが、その時点では生命を構成する元素はそろっていたと言える。

恒星の中で起こる核融合現象は原子核反応であり、反応という言葉はついているが化学反応とはまったく異なる。化学反応では原子の種類は変化しないが、核反応では原子核そのものが変化する。このために、化学反応と比べて100万倍以上のエネルギーの出入りがある。つまり、放射能や放射線が生じる。宇宙船に乗って地球の大気圏を抜けてわずか500 kmの上空≈宇宙に行くと、強力な放射線にさらされる。一方で地球表面は、太陽の磁場と地球の磁場や大気などによって宇宙や太陽から進入する放射線や放射能から遮蔽されている。しかし

地球表面に放射能がないわけではない。宇宙からも一部は地球に到達するし、地球の岩盤中にある放射性物質からも放射線がくる。

### 2.3 生物にとって放射線は有害である

生物を構成する原子が宇宙で起こった核反応で生じたものであることから始まり、放射能や放射線がある程度存在する中で進化したという点まで、生物と放射線との関係は切っても切れない。生物という視点から見ると、地球表面は放射線から何重ものバリアーによって遮蔽された環境である（図1）。放射線耐性菌などの放射線にたいして他の生物よりも強い耐性を持つ生物は存在するが、生物は地球表面で進化してきたので基本的には放射線に対する強い耐性はない。また、強すぎる放射線の中では、生物は出現も進化もしなかったであろう。生物は有機物（ $\approx$  生体分子）で構成されており、放射線は有機物を壊す。従って、放射線は地球上の生物にとっては有害である。

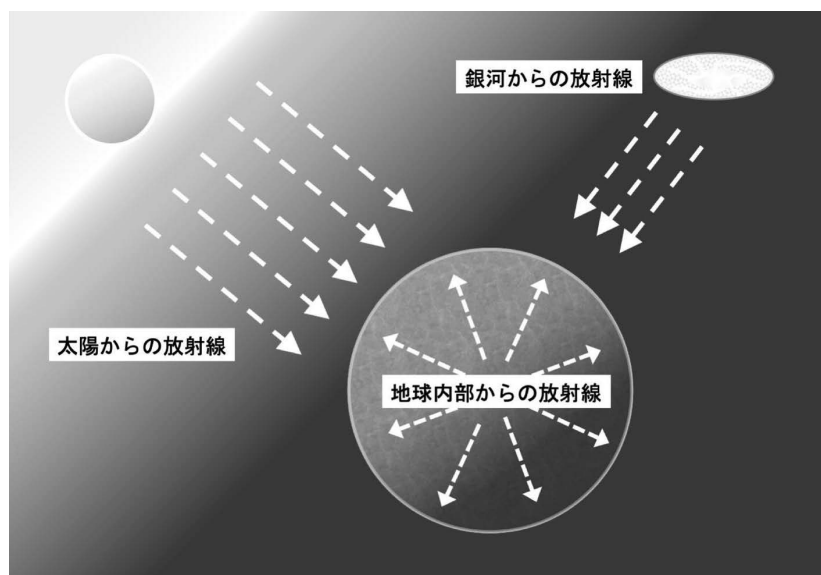


図1. 地球表面に到達する放射線の起源（模式図）  
地球表面には宇宙（太陽や銀河系などから）と地球内部の岩盤から放射線が到達する。ただしこれらの一部は地球の磁場、大気、および太陽の磁場などによって遮蔽される。

## 3. 原子力に関わる様々な誤解

### 3.1 市民が原子力を理解することの難しさ

原子力で作られる放射能を人間は実際的な技術で消すことはできない。これは原子力の最

大の問題の1つである。大学授業でもこの点を理解するのは難しいようである。そこで、まず私が行ってきた自然科学教育の経験から、市民はどのように自然科学的知識を理解しているかを考えてみたい。自然科学を理解するためには、自然科学的知識が必要である。同時に、自然科学の実際の方法を、演習や実践を通して習うことが必要である。実験科学では実験手法を習うだけでなく、自然科学的検証方法などの考え方を身につけることが必要である。

自然科学の思考法はだいたい以下のように説明できる<sup>6)</sup>。自然科学では再現可能な実験手法を提示し観測結果を示す。そしてそれらがどのような原因でそうなるのか、モデルを提案する。さらにその提案したモデルをまた次の実験観察によって検証することを繰り返し、提案したモデルを修正しつつ真理に近づいて行く。実際の自然科学の現場では正しい答えにはなかなか到達せず、モデルや仮説は正しいものにするために何度も修正されて、長い時間をかけて多くの科学者が認める知識として定着していく。自然科学者になるためには、大学院生はこの思考と検証のプロセスを指導者のもとで繰り返しトレーニングし、ポストドクなどの武者修行を経ることで徐々に身につける。このため一人前になるためには少なくとも10年ぐらひは必要である。そして現在では、自然科学者を養成する教育課程で学ばなければ、自然科学者になることはほとんど不可能である。また自然科学者は、自然科学の内容は常に変化しており、常に実践と競争を通じて自然科学者としての能力を維持しなければならない。私の経験では、大学で自然科学の教鞭を執る立場であっても、十分にトレーニングを積んでいない・継続していないと思われる人はいる。

一方で、市民は本を読むなどして自然科学的知識を得ることはできるが、その知識の信憑性や、自然科学的にみてその知識がどのような位置づけにあるのかを判断することは難しい。市民はどのように自然科学あるいは技術に関連する内容をとらえるのだろうか。私の経験によると、市民が自然科学や技術に関する判断を行う場合には、人が人を判断する際の思考法を使っているのではないかと、しばしば思う。例えば、誰かが自然科学・技術に関することを含めて何かを発言したとしよう。すると、それを発言する人を信頼できるかどうか判断しつつ、その自然科学的内容を考えるのである。例えば、発言する人が権威ある人物であったり、多くの人が信頼する人だと思えば、信用性は高いという具合である。我々自然科学者も、優れた科学者の発言を1つの考えとして注意深く聞く。しかし、それは検証して確立された科学的知識という意味ではなく、まだ検証はされていないが1つの考え方として重んじるということである。一方、市民は科学的検証のプロセスを習っていないので内容が妥当かどうかを判断することはむずかしい。このため、その人物を信頼できるかどうかが発言内容に対する主な判断材料となるようにみられる。これでは、発言の内容が間違っても信用するということが起こる。これと似たようなことは、私の教育現場の経験でも起こる。例えば授業の演習として、ある自然科学的内容の真偽をグループで相談させる。そうすると、その中

でグループのメンバーは、その中で最も信頼するメンバーの発言を重視したり、多数決で判断すると言うことはしばしば見られる。この方法では、原子力に関する発言を正しくは理解できないだろう。

### 3.2 さらに放射性物質の壊れ方を理解することの難しさ

妥当な技術を用いて核燃料廃棄物の放射能を、人為的に減らすことはできない。この自然科学的あるいは技術的な事実は、なかなか理解されないので以下で説明する。

放射能をもつ物質は放射性同位体を含む原子から構成されている。原子は物質を作る要素であるが、原子は原子核と電子から構成され、原子核は陽子と中性子から構成される。これらは中等教育の初歩的の化学の範囲で勉強する。放射性同位体（あるいは放射性同位元素）とは、不安定な原子核からできている原子である。原子の名前、つまり水素、酸素、炭素、鉄などの名前は、原子の化学的性質を基準にしてつけられている。このため、原子核のレベルでは区別できる「同位体」=「陽子の数は同じだが中性子の数が異なる原子」にも、同じ元素の名前が当てられる。例えば、水素原子には原子核として陽子が1個あるが、さらに1個の中性子が含まれる原子核からなる原子も水素原子である（図2）。また後で説明する $^{235}\text{U}$ と $^{238}\text{U}$ は、質量数（=原子核中の陽子数と中性子数の和）がそれぞれ235と238のウランである。質量数のことなる同位体を区別するために、元素記号の左肩付きで質量数を表すことが多い。ウランは原子番号（=陽子数）92であるので、中性子の数はそれぞれ143と146である。同位体の種類は非常に多いが、多くは不安定=「放射性同位体」である。例えば、陽子が1個で中性子が2個の水素の同位体は放射性同位体である。しかし、我々の身の回り=「地球の表面」には放射能を持たない原子が圧倒的に多い。このため、原子が勝手に壊れるというイメージは、知識では分かっても理解しがたいだろう。

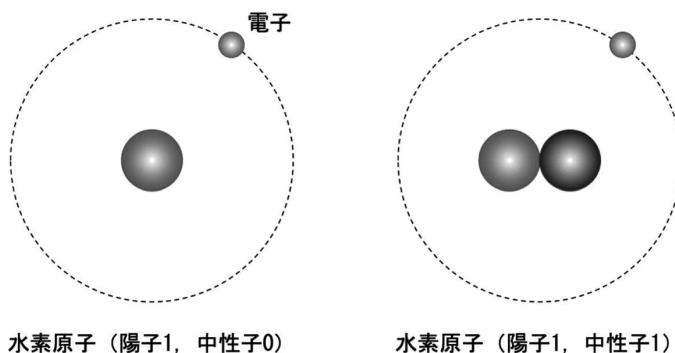


図2. 同位体の説明図

陽子が1個から構成される水素原子の同位体の例で、左は原子核内に中性子はなく、右は中性子を1個含む。大きな円：陽子および中性子、小さな円：電子。

多くの市民にとっては、放射性同位体が壊れる現象を、高等学校までの授業で学習する機会は少ない。そこで広島修道大学の授業では、放射性同位体の崩壊について定性的に私は教えている。放射性同位体の崩壊については化学反応で言うところの一次反応に従う。このため、例えば最初1000個ある粒子が一定時間すると500個に減る、また同じ時間すぎると今度は250に減る、という説明をする。つまり、半分になる時間が一定のままどんどん減っていくことを説明する（図3）。この種の自然現象は、なかなか理解しにくいようである。この理由は、第1に数値あるいは数式によって自然を記述することに慣れていないためであると思われる。第2に、このような自然現象は身の回りではあまり見られないことがあると考えられる。例えば、お米が10 kgあって毎日300 gずつ食べると何日でなくなるというような、身近なところで見られる変化とは異なる。

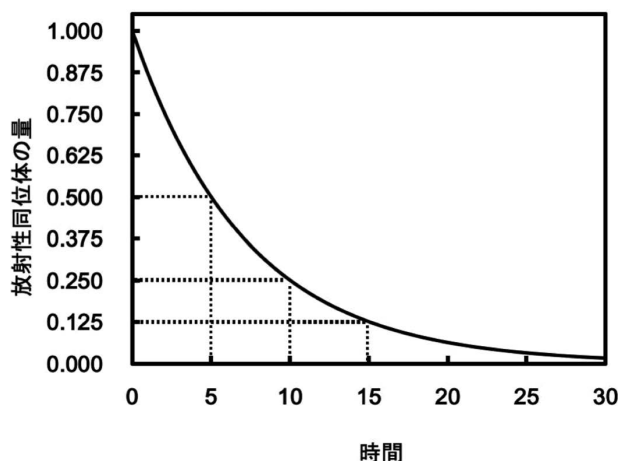


図3. 大学での文系学生に対する講義で半減期を説明するとき用いる模式図  
放射性同位体の現象速度はその同位体の量に比例する。これは化学反応の一次反応と同じ式で表される。このため、1から0.5になるまでの時間、0.5から0.25になるまでの時間、0.25から0.125になるまでの時間同じである。つまり半分になる時間はいつも一定である。

この放射性同位体の崩壊は微分方程式 (1-1) で表現できる。これを積分すると式 (1-2) となる。この変化は化学反応における一次反応と同じである。放射性原子数の単位時間あたりの減少量（減少速度）はその放射性原子数に比例する。だんだんと少なくなっていくが、半分になる時間は一定であるという現象である。そこでこの半分になる時間に対して、半減期という用語が使われる。大学授業では、この半減期を数式を用いずに説明するのはなかなか難しく、教わる方も分かりにくいということになる。

$$-\frac{dA}{dt} = CA \quad (1)$$

$$A = A_0 \exp(-Ct) \quad (2)$$

$t$  : 時間,  $A$  : 時間  $t$  における放射性同位体の量,  $A_0$  : 時間 0 における放射性同位体の量,  $C$  : 定数で核種によって決まる。

次に、放射能や放射線に関する現象は物質の化学的性質とは無関係であることも、理解しにくいようである。大学授業でも、核現象と化学反応を混同しているケースもよく見られる。核反応という言葉を使うことも原因の一つであろうが、上述した通り原子核の自然現象を扱うのは中等教育まででは少ないためであろう。原子核崩壊の半減期は放射性同位体の種類（原子核の種類）ごとに異なり、その原子核の特性として決まっている。また、崩壊の仕方は主に  $\alpha$  崩壊、 $\beta$  崩壊、 $\gamma$  崩壊の 3 種類に分類できる。それらの性質は原子の化学的性質とは全く無関係であり、原子ではなく原子核で起こる現象である。従って、どんな化学的処理をほどこしても放射能を減らすことはできないので、放射能は消えるまで待つしかない。しかもその時間スケールは原子核の種類ごとに異なっている。半減期の一例を表 1 に示す<sup>7)</sup>。半減期とは、式(2)では  $A$  が  $A_0$  の半分になるときの  $t$  である。福島第一原発事故のあとによく報道された、セシウム、ヨウ素、プルトニウム、ウランなど千差万別であり、何10億年もかかるものもあれば、1秒の1億分の1以下という時間のものもあり、速いものと遅いものとは最大40桁ぐらゐの差がある。

表 1. 放射性核種の半減期の例

核種 (質量数)	元素記号	半減期
ナトリウム (24)	$^{24}\text{Na}$	15時間
ヨウ素 (131)	$^{131}\text{I}$	8.0日
コバルト (60)	$^{60}\text{Co}$	5.3年
ストロンチウム (90)	$^{90}\text{Sr}$	28.8年
セシウム (137)	$^{137}\text{Cs}$	30.1年
セシウム (134)	$^{134}\text{Cs}$	2.1年
ウラン (238)	$^{238}\text{U}$	45億年
ウラン (235)	$^{235}\text{U}$	7.0億年
プルトニウム (239)	$^{239}\text{Pu}$	2.4万年

日本アイソトープ協会「アイソトープ手帳 (2011年)」<sup>7)</sup>

核燃料廃棄物の処理という言葉は、放射能が消えてなくなるというイメージを定着させたと思う。ここでの処理の実質的内容は、核燃料廃棄物中の化学物質を、分離したり保管しやすい化学物質に変えるということである。これは化学処理であるので、放射能が自発的に減衰する以上には、放射能は減ることはない。

### 3.3 原子核を変換する機械に関する誤解

日本の使用済み核燃料の量はウランに換算すると18000トン（2019年）である<sup>8)</sup>。一方で、二酸化炭素の排出量は10.4億トンである<sup>9)</sup>。この核燃料廃棄物の量は、化石燃料よりも小さいので、メリットがあると言うケースがある。ゴミの性質が異なるのに、単にその重量で比べるという説明がまかり通っている。このようなことに騙されるようでは、勉強不足という点で市民にも一定の責任はあるだろう。核燃料廃棄物の問題は、放射能をなくすことはできないことにある。つまり、核燃料廃棄物の放射能を、実用的技術によってなくすことはできない。核燃料廃棄物の放射能は人類の歴史スケールと比べるとほぼ永遠に残り続ける。

一方で、一定の安定性を持つ原子核を壊したり別の物に変換することは物理的には不可能ではない。しかしその際には、化学反応と比べて強力なエネルギーが必要であり、人為的に行う場合には加速器を使わなければならない。私が共同研究のためにフランス・グルノーブルの研究所を訪れた時に写した加速器を図4に示す。これは日本のSpring-8と同様に放射光

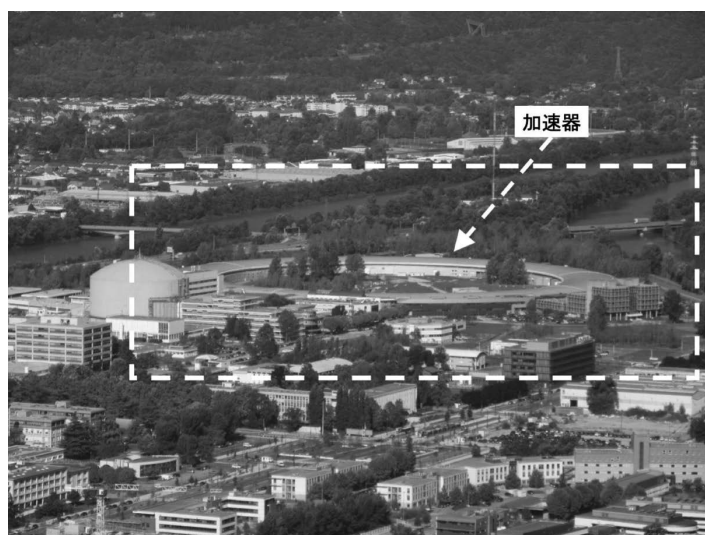


図4. フランス・グルノーブルにある加速器

著者が共同研究のためにフランス・グルノーブルを訪問した際に撮影した物で、日本にあるSpring-8と同様のシンクロトロン放射光を発生させる装置である。白枠内の楕円が加速器。加速器の原理は同様であるが、現在では非常に大きな装置が用いられる。



を発生させるための装置ではあるが加速器の一種であり、他の加速器もこのような大規模装置である。加速器では荷電粒子を高速で衝突させ、核変換を起こすこともできる。私の担当した授業では、「原子核を変えることができるからそれを使って放射能をなくすことができる」という説明を、授業で学生が発表するケースがあった。しかし、加速器は超高真空状態で素粒子などの性質を調べるために作られた機械であり、実用的なレベルで同位体を変化させることとは無関係の機械である。また、加速器の消費電力は莫大であり、使えば余分にエネルギーを消費する。また加速器では装置などが放射化されるなど<sup>10)</sup>、余計に放射能がつくられる。運転するためには莫大なエネルギーを必要とし、放射能を余分につくってしまうのが加速器である。この周辺分野の調査を行っていたときに、「放射性廃棄物の処理方法」が平成30年度の「21世紀発明賞」を受賞していたことを知った<sup>11)</sup>。この方法は、レーザーを用いて奇数核種を偶数核種から分離し、さらに加速器で放射性核種を安定核種に変換するというものである。これはまさに本論文で問題を指摘しているところの、エネルギー生産やそこで発生する廃棄物処理のために大量にエネルギー消費することを検証しないタイプの、技術である。

### 3.4 技術の進歩や安全性に関する誤解

安全性を確保すれば、ある技術を展開できるということは、原子力ではたびたび言われる。しかし、人間が知恵を絞ったところで、太陽の中心部に行く宇宙船やタイムマシンは作れない。太陽中心部は、あらゆる物質の原子がばらばらなるような高温高压のプラズマ状態である。時間の進む方向が存在するので、タイムマシンはあり得ない。つまりこれらは、いま分かっている自然科学的真理には基づかない空想である。そして原子力についても、人間の知恵では対応できない難点が含まれている。

原子力の安全性についても、例えごくわずかでも高まったとすることはできる。しかしこれは、技術的に重要な論点をさける詭弁にすぎない。そもそも原子力は何が危険だろうか。第1は上で述べた通り、強力な放射能を含むゴミが大量にでき、それらを我々は減らすことができないことである。このゴミを人類の歴史とは比べものにならないほど長い時間（おそらく100万年以上）<sup>12)</sup>、安全などどこかに保管・隔離しなければならない。第2に、制御棒による制御機能、あるいは、冷却機能が失われた場合には、短時間の内に福島第一原発やチェルノブイリ原発のような事故へと発展する。これらは、人為的ミス、自然災害、あるいは、攻撃などによって起こり得る。冷却機能の喪失は、冷却装置の故障や、格納容器が割れて水が抜けることなどで起こり得る。実際にこれらは、チェルノブイリ原発や福島第一原発で起こった。例えば日本では、強い地震による被害を確実になくすことはできないので、原子力の事故を自然災害から確実に防ぐ方法はない。そして第3に、低線量の放射線についても考えな

なければならない。原子力発電所からは基準値以下ではあっても放射能と放射線は漏れている。遮蔽は放射能を減らすことはできても、なくすことはできない。そして、低線量の放射線の安全性については研究途上である。このため、例えば、ある人が原子力発電所の周辺に住んでいて、放射線が誘発するような病気にかかったとしても、その原因が原子力発電所からの放射線によるものであると特定することはできない、または、ほぼできない。

以上は、技術は自然法則どおりにしかならないことや、まだ自然に関する未知があるために、技術をいかにつきつめても安全にはできないことの例である。

## 4. 妄想の高速増殖炉

### 4.1 原子力発電の原理

放射能を持つ原子核（放射性同位体）が放射線を放出することは、原子核が変化する現象の1つである。その際には、ガンマ線として非常に大きなエネルギーを放出する。原子核が変化する際には大きなエネルギーの出入りがある。このような原子核の現象の1つとして、原子核の核分裂がある。 $^{235}\text{U}$ は核分裂する代表的な原子核である。核分裂は、例えば $^{235}\text{U}$ の核分裂現象を簡略化した図5を用いて説明できる。 $^{235}\text{U}$ 原子核に1つの中性子があたると、原子核は2つに壊れる。このように原子核が壊れる現象を、核分裂という。その際には電磁波などとして大きなエネルギーを放出する。同時に2～3個の中性子を放出するため、これが別の $^{235}\text{U}$ に当たると、核分裂は繰り返される。この繰り返しを人間が制御し、持続的に核分裂を起こさせるようにしたのが、原子炉である。このエネルギーの一部を高温の熱に変換

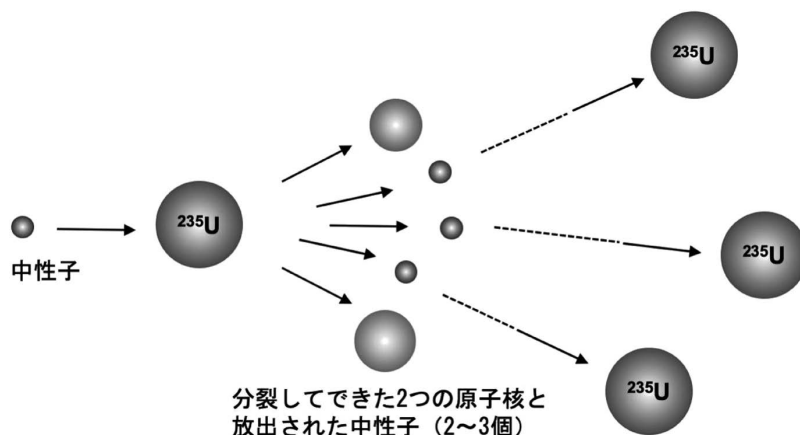


図5. 大学での文系学生に対する講義でウランの核分裂を説明するとき用いる模式図  
ウランの同位体である $^{235}\text{U}$ は核分裂する代表的な原子核である。 $^{235}\text{U}$ に中性子があたると同じぐらいの大きさの2つの原子核（大きな円）に分裂する。この際に中性子（小さな円）を2～3個放出する。これらの中性子が他の $^{235}\text{U}$ にあたると核分裂は繰り返される。

して、これをつかって水蒸気をつくり、発電所のタービンを回すことで電気を作る。タービンを回すという点では、火力発電と違いはない。一方で、放射性物質はゴミとして残る。原子力発電でできるこのゴミは、人間が減らすことはできない点で、火力発電とは大きく異なる。

#### 4.2 無尽蔵というレッテルをはった高速増殖炉の妄想

さしあたって原子力発電で利用できる原子核は $^{235}\text{U}$ （ウランの同位体の1つ）だけである。しかし鉱物資源としての $^{235}\text{U}$ は非常に少ない。そもそもウランは宇宙の中で少ししか作られないので、ウランを含む鉱物が地球に少ないのは当たり前である。さらに、ウランの同位体の中に、 $^{235}\text{U}$ が占める割合は0.7%である。残りの大半は $^{238}\text{U}$ である。 $^{238}\text{U}$ は核分裂しないので現在の原子力発電所では燃料にはならない。つまり、ウランの資源量は化石燃料と比べると圧倒的に少なく、この点でもエネルギー資源としてふさわしくない。

この弱点を補うために現れた口実が、高速増殖炉という妄想技術である。その内容は以下の通りである。高速増殖炉内では $^{238}\text{U}$ を $^{239}\text{Pu}$ に変換しつつ燃料として使うことができる。 $^{239}\text{Pu}$ は $^{235}\text{U}$ と同じように核分裂する物質である。またウラン資源の大半である $^{238}\text{U}$ は、燃料にならないゴミである。つまり高速増殖炉を使えば、ゴミ( $^{238}\text{U}$ )を燃料( $^{239}\text{Pu}$ )にどんどん変換しながら発電でき、原子力エネルギー資源量は2桁も大きくなると、説明されているのである。この説明を聞くと、エネルギーは無尽蔵にあるような印象をうけるが、利点ばかりを説明しているだけである。そして現実には、以下の技術的難点によって地球上でこれを行うことは幻想である。以下でその重大欠陥を説明しよう<sup>13)</sup>。

第1は、冷却剤として液体状の金属ナトリウムを使わなければならない点である。 $^{238}\text{U}$ を $^{239}\text{Pu}$ に核反応によって変換するためには、核分裂によって生成する中性子を減速させずに $^{238}\text{U}$ にあてなければならない。ここで一般に、化学プラントなどでは冷却剤として水を用いるが、水は水素と酸素という軽い原子で構成されている。このため、核分裂によって生成した高速中性子はすみやかに減速して熱中性子となる。熱中性子が $^{238}\text{U}$ にあたっても $^{239}\text{Pu}$ は効率よく生成しない。このために高速中性子をなるべく減速しないようにするために、液体状の金属ナトリウム（以下、液体ナトリウム）を冷却剤として使おうというのである。水と酸素で満たされている地球表面上で、冷却剤として液体ナトリウムを使う巨大プラントを作ろうとすることは、正気の沙汰ではない。かつて飛行船には水素ガスが封入され、最終的に大事故によって使われなくなった。高温にした液体ナトリウムを使うのはもっと危険である。ナトリウムの危険性は化学の初歩で学ぶ。ナトリウムは水や空気と接触することで、爆発的に燃焼する。実際、もんじゅの事故の多くは、ナトリウム漏れによるものであった<sup>14)</sup>。

第2は制御の問題である。1回の $^{235}\text{U}$ の核分裂で2～3個の中性子が発生するので、これらが他の $^{235}\text{U}$ に全て当たれば指数関数的に核分裂の頻度は大きくなり爆発する。これは原

子爆弾の原理である。電気を発生させるために定常的に熱を発生させるためには、核分裂で生成した中性子が平均として他の<sup>235</sup>Uに1個あたるとして他の<sup>235</sup>Uに1個あたるとして制御することが必要である。一般の原子炉では中性子を吸収しやすい素材で作られた制御棒を出し入れすることで、原子炉内にある中性子の数を制御する。原子炉や付随する装置が壊れるなどの事態がない限りは、冷却剤と制御棒を用いて原子炉を一定条件に制御できる。一方で、高速増殖炉では炉内の中性子数を制御することは極めて困難であり、制御の点で極めて危険であることが分かっている<sup>13)</sup>。

日本は、はじめから解決の見通しもつかない技術的欠陥がある中で、高速増殖炉の開発に何10年も執着してきたのである。アメリカもフランスも早い段階で撤退している。これだけ重い技術的欠陥があるので、普通のエンジニアや研究者であれば最初から高速増殖炉には夢をみないであろう。長い時間の執着は、高速増殖炉が妄想であることを象徴している。

高速増殖炉に関するもう一つの疑念にふれておこう。通常の原子炉でも<sup>238</sup>Uに中性子があたることで<sup>239</sup>Puは少し生成するので、原子力発電が始まっていらい<sup>239</sup>Puは貯まってきた。このため、日本のプルトニウム総保有量は約46 t (2020年)である<sup>15,16)</sup>。プルトニウムは、核兵器の材料となる非常に危険な物質である。これだけ多くのプルトニウムを、日本が保有することは大きな問題である。このため、高速増殖炉はこのプルトニウムを減らす方法としても必要だ、という説明もされてきた。しかし、もし高速増殖炉ができたらプルトニウムを今よりももっとたくさん作ることになるので、減らすという説明とはどのようにつながるのであるか。

## 5. 非自律的なエネルギー

### 5.1 原子力は本当にエネルギーを生産しているのか？

原子力は再生可能エネルギーと同様に、非自律的なエネルギーであると言ってよい。第1に、原子力のEPRは低く<sup>17)</sup>、またコストは高い<sup>18)</sup>。試算によってEPRやコストはまちまちであるが、化石燃料と比べてかなり低いことは確かである。原子力発電のコストやEPRを計算する多くの場合には、建設やランニングコストなどを含むだけであり、ほぼ永遠に続く使用済み核燃料の保管と管理、廃炉処理、事故への対応などを含めれば、コストは高くなりEPRはさらに低くなる。第2に、原子力はほぼ電気しか作れない。電気しか作れなければ電気では動かない多くの産業基盤は動かない。第3に、資源量は圧倒的に少ない。これらの性質をみると、とうてい主なエネルギーとして位置づけることはできない。全世界のエネルギー消費量の内、原子力が占める割合は5%程度である<sup>19)</sup>。この程度は、簡単な節約で十分にまかなえるだろう。しかしこの事実は市民には伝わっていない。

ここで、EPRの低さに関連して、「原子力は本当にエネルギーを生産しているのか？」と

いう疑問を私は持っている。つまり、原子力のEPRは1を下回っているのではないかという疑問である。実際、バイオマスエネルギーのEPRはしばしば1以下であるにも関わらず、一部では使われてきた<sup>17,20)</sup>。しかし、原子力のEPRに関するこの疑問に答える十分な情報は見あたらない。このような疑問を抱く理由は、原子力発電に関する基礎的データを示さないことや、燃料の濃縮の問題などの様々な効率の低さにある。例えば、そもそも原子力を一次エネルギーとして位置づけているが、一次エネルギーの内訳として原子力の寄与分は、発電した電気に換算してデータとして示される。化石燃料の場合であれば、化石燃料がもつ燃焼エネルギーを基本としているが、これでは基準は異なっている。石油や石炭はあまり加工せずに燃焼することができるので、一次エネルギーという指標を用いる意味はある。一方で原子力では、最終的に得られる電力で換算表示しており、これでは一次エネルギーではないと言っているようなものである。燃料の採掘や加工などに必要なエネルギー、ましてや、核燃料廃棄物の処理や保管に必要なエネルギーは含まれていない。これらを考慮したエネルギー資源量を表す妥当な方法を用いて、データを表示するべきである。

特に問題であるのは、同位体の濃縮工程である。ウランは希少資源であり、それを採掘、精錬して特定の化合物に加工し、最終的に燃料棒として使える形にするまでのプロセスでは多くのエネルギーを必要とする。さらに濃縮工程では非常に大量のエネルギーを必要とする。天然には0.7%しか含まれない<sup>235</sup>Uを<sup>238</sup>Uから分離して、例えば軽水炉という原子炉で使うために3～5%に濃縮するためには、その質量の違いを利用して遠心分離などで分けなければならない。この過程は、精錬したウランを六フッ化ウランとし、ガス化して行う。化学式はUF<sub>6</sub>でありモル質量は<sup>238</sup>Uでは $238 + 19 \times 6 = 352$ で、<sup>235</sup>Uでは $235 + 19 \times 6 = 349$ である。この質量の違いはわずかに0.85%である。わずかな差しかないので、濃縮工程では大きなエネルギーを必要とする。広島型原爆では、爆弾が放出したエネルギーの3倍ほどのエネルギーが、この濃縮工程（当時はガス拡散法）に必要であったと推定されている<sup>21,22)</sup>。従ってエネルギー収支の視点で見ると原子爆弾はエネルギーを生産しなかったことになる。言い換えると、化石燃料のエネルギーを、一度に大きな爆発力をもつ原子爆弾という形に、エネルギー変換しただけであったと言うことになる。

現在では、当時の方法と比べると効率的な遠心分離法などで濃縮は行われている。しかし一方で、原子力発電では<sup>235</sup>Uが放出するエネルギーの約30%しか電気に変換できない。さらに、原子力発電における<sup>235</sup>U濃縮以外の工程も化石燃料と比べて非常に複雑である。石油では精製すればガソリンなどを作れるし、石炭は種類によってはそのまま燃焼できる。これらと比べると、比較にならないほどロスが大きい。エネルギー生産量を計算するためにはこれらの電力消費量について十分に説明し、原子力エネルギーのEPRは1を下回っているのではないかという疑問に対しては、正確に答えなければならない。

## 5.2 原子力は技術的にも社会的にも欠陥の塊である

原子力と再生可能エネルギーのEPRは小さく一桁程度である。また、ほぼ電気しか作れないという共通の難点がある。近い将来に化石燃料のEPRが大きく下がったら、再生可能エネルギーを導入すればよい。一方で安全性を含めて原子力技術は欠陥の塊であり、我々の社会を蝕むだけの技術である。

## 6. ま と め

本論文では、エネルギー資源として原子力はあってはならないものであることを解説することを試みた。これまでのシリーズ論文でも、自然科学や技術が専門家だけのものであることが、様々な社会問題の背景にあることを述べたが、まさに原子力はこれが当てはまる分野である。このため市民には、原子力をどうすれば良いのかを判断する拠り所はない。原子力では、放射能や過酷事故という具体的で大きな危険がある。福島第一原発事故が起こってから10年以上すぎたが、これに対する科学者の発信や市民の学びはまだまだ不十分である。実際、核兵器の被害者であった日本の一般市民に原子力を受け入れさせるためには、それを進めたい人達による長い活動があった。従って、原子力の欠陥を説明しそれを理解するためには、科学者と市民はそれ以上に頑張らなければならない。

また本論文では、市民が原子力を理解するためには、様々な教育上の課題があることを示した。この種の問題は原子力だけでなく、多くの自然科学や技術が関わる社会問題に共通する課題である。また以前の論文で、教育などの情報生産の機構は文明の方向を決める大きな要素として働くことを示した<sup>23)</sup>。この点からも、停滞した日本の理科系教育を見直す必要がある。特に、理科系教育においては自然科学だけでなく、工学や農学などの社会・産業に関わる教育を充実させることが、社会を健全な方向に進めるための糸口であると思う。

## 7. 謝 辞

本研究の一部は、広島修道大学の支援によって行われましたので謝意を表します。

## 引 用 文 献

- 1) 上園昌武, 江口貴康, 関 耕平 (2012) 島根原発稼働への松江市民の意識構造, 山陰研究, 5, 1-18.
- 2) 片岡佳美, 吹野 卓 (2015) 島根原子力発電所立地地域住民の原発に対する意識の分析, 山陰研究, 8, 37-46.
- 3) 村井健志 (2013) 放射線教育の現状と放射線に関する意識調査, INSS Journal, 20(SR-3), 28-37.

#### 虚構の環境技術 4 : エネルギー源としての原子力

- 4) 佐々木敏紘, 渡邊直美, 木幡大河, 長島康雄 (2014) 中学校理科における放射線を扱う学習機会の可能性に関する検討, 仙台市科学館 研究報告, 23, 31-37.
- 5) 文部科学省, 知っておきたい放射線のこと 高校生のための放射線副読本 解説編【教師用】. [https://www.mext.go.jp/component/b\\_menu/other/\\_icsFiles/afiedfile/2011/11/04/1313005\\_11\\_1.pdf](https://www.mext.go.jp/component/b_menu/other/_icsFiles/afiedfile/2011/11/04/1313005_11_1.pdf)
- 6) 川村邦男 (2023) 虚構の環境技術 3 : 消えゆく地球温暖化問題と登場した気候変動問題, 人間環境学研究, 21, 1-18.
- 7) 日本アイソトープ協会 (2011) アイソトープ手帳.
- 8) 経済産業省 資源エネルギー庁 (2019) 「使用済燃料」のいま～核燃料サイクルの推進に向けて, 2019年1月22日, スペシャルコンテンツ. <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoo/shiyozuminenryo.html>
- 9) 国立環境研究所 (2022) 日本の温室効果ガス排出量データ (1990~2020年度) 確報値, 2022年4月19日. <https://www.nies.go.jp/gio/aboutghg/index.html>
- 10) 柴田徳思 (1999) 使用を廃止した加速器の放射化の問題, RADIOISOTOPES, 48, 208-215.
- 11) 内閣府政策統括官 (科学技術・イノベーション担当) (2018) 「放射性廃棄物の処理方法」が「21世紀発明賞」を受賞—公益社団法人発明協会平成30年度全国発明表彰—. <https://www.jaea.go.jp/02/press2018/p18051701/>
- 12) 今中哲二 (2016) 「ガラス固化体の隔離期間は8000年」のキャラクター, 原子力資料情報室通信, No. 510, 12.1.
- 13) 高木仁三郎 (1981) プルトニウムの恐怖, 岩波新書.
- 14) 動力炉・核燃料開発事業団 (1995) 「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の概要, 資料 第1-7号.
- 15) 内閣府 原子力政策担当室 (2021) 令和2年における我が国のプルトニウム管理状況, 第1回原子力委員会, 資料第1号.
- 16) 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 (2021) プルトニウム管理状況, データベース. <https://www.jaea.go.jp/database/pu/>
- 17) 田村八洲夫 (2014) 石油文明はなぜ終わるか, 東洋出版.
- 18) 大島堅一 (2011) 原発のコスト—エネルギー転換への視点, 岩波新書.
- 19) 経済産業省 資源エネルギー庁 (2020) エネルギー白書2020 (令和元年度エネルギーに関する年次報告). <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/2-2-1.html>
- 20) 久保田宏, 松田 智 (2009) 幻想のバイオ燃料—科学技術的見地から地球環境保全対策を斬る, B&T ブックス, 日刊工業新聞社.
- 21) 小出裕章 (2005) 差し迫る原発災害の危機!!—今といった日本の原発はどうなっているのか—, 京都大学複合原子力科学研究所.
- 22) 小出裕章 (2016) ウラン濃縮, 時事用語事典. <https://imidajp>
- 23) 川村邦男 (2014) 文明の生命システム論からみる地球環境保全—教育と研究活動の役割—, 人間環境学研究, 13, 53-69.