

これから日本を担う若者へ  
(原子力技術への誘い)

平成 28 年 6 月 30 日

提言検討小委員会委員長 石井慶造

## 目次

はじめに

### 1 人類にとって科学技術は何なのか

- 1.1 科学技術への誘い
- 1.2 科学技術開発の理念

### 2 原子力技術の魅力

- 2.1 エネルギー利用
  - 2.1.1 原子力発電のしくみ
  - 2.1.2 核燃料サイクルのしくみ
- 2.2 放射線利用
  - 2.2.1 医療応用
  - 2.2.2 材料開発への応用
  - 2.2.3 その他への応用

### 3 エネルギー源としての原子力の位置づけ

- 3.1 持続可能な発展を目指して
- 3.2 地球温暖化について

### 4 原子力の安全性

おわりに

はじめに

是非見てほしいSF映画がある。それは、33年後の宇宙開発の未来を予測した映画「2001年宇宙の旅（1968年公開）である。この映画の冒頭では、「人が棒（骨？）を使って野獣を攻撃する」シーンがある。このシーンは「人は道具を使うことによって、人となった。」ことを意味する。この映画では、33年後に、太陽系内での惑星間航行が自由に行われていること、コンピューターによる人工頭脳が実現されていることを予想していた。しかし、50年近く経った今でも、これらの技術は達成されていない。

一方、ミクロな世界を構成する基本粒子である原子の技術についてはどうだろう。原子を操る技術の応用は非常に広い、エネルギー、医療、バイオテクノロジー、農業、通信、宇宙開発、地球環境、材料改質、半導体、超集積回路・・・・・・と際限なく挙げられ、この技術応用はまだまだ我々に好奇心と想像力を掻き立たせる。例えば、エネルギーを生み出す原子力技術は、環境に二酸化炭素を出さないエネルギー源を我々に提供するとともに日本経済の発展に貢献してきた。地球規模の環境破壊である地球温暖化を緩和し、豊かで高度な社会を今後も維持するためには、二酸化炭素を出さないエネルギーの利用を積極的に進めるべきである。

しかしながら、その一端を担っていた原子力は、今回の東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、東電福島第一事故と略す）により、その利用が止められた。事故の主要原因は、地震による外部電源の喪失、次に訪れた津波による非常用電源の喪失であった。このため炉心が冷却不能に陥り、メルトダウンし、放射性物質を環境に放出した。この事故によって、原子力技術の開発および原子力事業を推進してきた多くの人々は失意し、同時に事故を起こしたことを猛省した。また、この事故により、多くの一般の方々は、原子力技術について強い不信感を持った。日本原子力学会は、事故後、学会内に事故調査委員会を設置し、事故原因について徹底した調査を行い、その結果を公表し、学会の在り方の見直しを含め、原子力に対する世間の厳しい目を意識し、原子力技術の向上に研鑽している。

しかし、今回のような状況に晒されても、安全を維持できる革新的原子炉の開発は、若くてやわらかい脳を持った君たちなら実現できるものと確信する。ここでは、原子力技術の応用の多様性（工学分野にとどまらず、理学、医学、環境学、農学、水産学等の分野への応用）とその奥の深さを伝えたい。そして、この冊子が、高度で豊かなそして安全・安心な未来地球の構築に貢献する主要な科学技術の一つである原子力技術に興味を持ち、学ぶことへの一助になれば幸甚である。

## 1 人類にとって科学技術は何なのか

### 1.1 科学技術への誘い

ルーブル博物館で一際多くの入館者を集めている絵画がある。それは、「モナリザ」である。あの神秘的な微笑に多くの人が魅了されてしまう。それは、スフマート技法と言って輪郭の無い画法を使用した結果現れた効果と考えることができる。この絵の作者、レオナルド・ダ・ヴィンチは、画家であるのみならず、ヘリコプター、装甲車、計算機のスケッチを残している。物を作ることの楽しさを、レオナルド・ダ・ヴィンチは良く知っていた。物づくりは、日用品から、宇宙機器まで非常に広い。ふっと思いついたアイデアが大発明を生むことが多々ある。君たちも、大発明家

を夢見てみないか。

## 1.2 科学技術開発の理念

現在の宇宙飛行を可能にしているロケットは、ウェルナー・フォン・ブラウンが開発した技術によるところが大きい。しかし、彼の作ったロケットが最初に用いられたのは、兵器としてであった。最初の原子炉、シカゴ・パイル1号も原子爆弾に使うプルトニウムを製造するためのハンフォードB原子炉の基礎となり、これによって生産されたプルトニウムは、長崎に投下された原子爆弾に使用された。これらの技術は、開発者の意図に反して兵器として使われた。

科学技術を平和利用のために使用することは、当然のことであるが、それをいかに実行するかは、政治家、科学者だけでなくすべての人の責務である。

## 2 原子力技術の魅力

### 2.1 エネルギー利用

#### 2.1.1 原子力発電のしくみ

原子力発電は、核物質（例えば、ウランやプルトニウム）を含んだ燃料棒、中性子を吸収する物質を含んだ制御棒、これらを納めている圧力容器と冷却水系、発電機系等からなる。燃料棒中の核物質は中性子を吸収すると2つの原子核（核分裂片）に分裂し、同時に2~3個の中性子を放出する。核分裂片および中性子は、核分裂前後の質量差 $\Delta m$ に対応したエネルギー $E = \Delta mc^2$ （ $c$ は光の速さ）で燃料棒を熱する。例えば、1gのウラン235から得られるエネルギーは、ドラム缶約10本の石油を燃やしたときに出るエネルギーに相当する。発生した中性子は、核燃料中のウラン235に吸収され再び核分裂を起こし、次々と核分裂反応が続いていく。これを核分裂連鎖反応といい、連鎖反応が制御されて一定の核分裂反応が継続しているとき、臨界状態にあるという。

核分裂反応の速さは瞬時であり、その連鎖反応を制御できなければ、最悪の場合、暴走事故に至る。では、どうやって連鎖反応を制御しているのだろうか？それは、核分裂でできた原子核から十数秒程度遅れて放出される中性子（遅発中性子という）が存在することによって可能となる。核分裂で放出される遅発中性子の生成割合は、全放出中性子のうち1%にも満たない。しかし、この微々たる量の遅発中性子は臨界状態を維持するのに不可欠で、その結果、連鎖反応が実効的に遅くなり、制御棒の出し入れによって臨界性を管理することができる。この原理に基づいて、原子炉内の中性子の数を一定にし、エネルギーを安定に生成することで、発電に利用できるようになる。原子力の平和利用は、この遅発中性子が存在していなかったら、実現できなかった。そのため、遅発中性子は神から人類への贈り物と言われている。また、遅発中性子以外に原子炉の安全性を高めるものとして、自然現象を利用した負のフィードバック効果がある。例えば、原子炉内で中性子の数が増加すると、核分裂の数が増え、熱の発生量が大きくなる。しかし、この熱により燃料の温度が上昇すると、核分裂を起こしにくいウラン238の中性子吸収量が増加するため、核分裂反応に寄与する中性子の数が減少し、結果的に核分裂の数が減少することになる。このように、中性子数が増加し核分裂数が多くなった場合に、その増加傾向が継続し連鎖反応が暴走するのではなく、反対に核分裂数の減少という負のフィードバック特性をもった現象（ドップラー効果という）が作用することで、事態の悪化を抑えることもできるように原子炉は設計されてい

る。

### 2.1.2 核燃料サイクルのしくみ

現在世界で運転され発電している原子炉の大部分は濃縮ウランを燃料とする加圧水型（PWR）または沸騰水型（BWR）と呼ばれる軽水炉である。天然ウランのうち原子炉の炉心で核分裂を起こしてエネルギーを出すウラン 235 の割合はたった 0.7%に過ぎない。残りの 99.3%はそのままでは核分裂を起こさないウラン 238 が占めている。軽水炉で燃料として使われる濃縮ウランは、天然ウランの中のウラン 235 の割合を大規模なプラントで膨大なエネルギーを使って 4~5%に増やしたものである。これをウラン濃縮というが、この際には廃棄物としてウラン 235 の割合が 0.2~0.3%になった劣化ウランが大量に発生する。そのため、濃縮ウランだけを燃料にすると貴重な天然ウラン資源が短期間でなくなってしまうことが懸念されている。

一方、原子炉の中では核分裂の際に発生する中性子がウラン 238 に吸収されると、燃料となるプルトニウム 239 が新たにできる。核燃料サイクルの基本的な考え方は、原子炉で使われた燃料棒からこのプルトニウムを取り出して新たに燃料として使おうということである。軽水炉では今までにたまったプルトニウムで作った燃料を部分的に炉心に入れて燃やす「プルサーマル」運転がすでに我が国でも実用化されている。

高速の中性子によるプルトニウム 239 の核分裂反応で放出される中性子の数はウラン 235 の核分裂より多く、出てくる中性子のうち、1 個を連鎖反応の維持（別のプルトニウム 239 の核分裂）に使っても、残りをウラン濃縮の際の廃棄物である劣化ウランを使って効率的にウラン 238 に吸収させてやれば 1 個以上のプルトニウム 239 を作るができる。すなわち、燃やした以上の燃料が新たにできるというまさにマジックのようなことが実際に起こる。この原理をうまく使いプルトニウムを燃料として、燃やした燃料以上の燃料を新たに作る原子炉を「増殖炉」という。我が国の高速増殖炉「もんじゅ」はこのタイプの原子炉である。「もんじゅ」は事故やトラブルのため順調には開発が進んでいないが、将来、安全で効率の良い増殖炉が開発されれば、ウラン資源の少ない我が国においては有望な原子炉になるだろう。

## 2.2 放射線利用

放射線利用の身近な例として、空港の手荷物 X 線検査、レントゲン写真、X 線 CT、放射線がん治療、煙検知器などを思い浮かべる人は多いだろう。このような検査、医療の分野はもちろんのこと、材料開発をはじめとした工業分野、害虫駆除や品種改良などの農業分野、排煙排水処理の環境分野など、放射線は幅広く利用されている。

### 2.2.1 医療応用

放射線の透過性を利用して、人体の内部を非侵襲的に診断できる。健康診断で行われているレントゲン写真は、体に X 線を照射して透過した X 線像により、体内の状態を見ることができる。さらに、X 線を様々な方向から照射して撮影し、コンピューターで画像処理することによって、体の断面を見ることができる。これは、X 線 CT と言われ、人体の臓器の形態を 3 次元画像として捉え、解剖せずに内部を診断できる。

さらに、放射線を出す薬剤を患者に投与し、薬剤から出る放射線を検出して画像化することで、脳を含めた臓器の機能の診断やがんの発見が可能である。現在、このような機能画像診断装置としての陽電子放射断層撮影装置（PET）及び単一光子放射断層撮影装置（SPECT）が多くの病院で利用できるようになってきた。

一方、放射線が細胞に吸収されると細胞死を起こすことがある。癌細胞が正常細胞に比べて放射線に対して感受性が高いことを利用すると、がんの治療に役に立つ。今日では放射線によるがん治療は外科手術、抗がん剤による薬物療法と並んで主要ながん治療の手段となっている。特に、X線照射による治療が広く行われている。陽子又は炭素の原子核を光速近くまで加速して生体に照射し、がんの位置で停止するよう制御すると、陽子又は炭素は停止した所にエネルギーを最も与えるため、正常細胞への影響が抑えられ、がんを集中的に攻撃して治療することができる。最近、このような粒子線治療が普及し始めている。

放射線の利用価値は高いが、放射線は人体に影響を与え、大きな被曝線量を受けると死に至る。また、癌の発生及び遺伝子に影響を与える。従って、放射線の利用に対しては、このリスクとベネフィットを十分に考慮しなければならない。

### 2.2.2 材料開発への応用

物質にガンマ線・電子線を照射すると性質を変えることができる。例えば、これらの放射線照射により高分子材料の化学結合に変化（重合、架橋など）を与えることにより、耐熱性や強度を向上させることができる。この性質は、パソコンなどの電気製品内部に使われている耐熱電線や絶縁膜に使われている熱収縮チューブ、ラジアルタイヤ、発砲ポリエチレン、ボタン電池用隔膜、消臭剤、ウィルス防止マスク、水浄化フィルターなどに利用されている。

一方、粒子を物質に注入すると、その物質に機能を持たせることができる。特に、半導体製造の場合、粒子の注入条件を色々変えることにより、様々な性質を持った半導体を製作できる。

宇宙開発においては、高放射線環境下での材料及び半導体の劣化が問題となる。劣化メカニズムの解明や耐放射線材料の開発にも放射線利用技術が貢献している。

このように、身近な製品から宇宙開発まで、放射線は広く利用されている。

### 2.2.3 その他への応用

海外にも愛好家が増えている日本酒、その原料となるコメの多くが放射線による品種改良で作られたものである。雑味の無い、美味しい日本酒が気軽に味わえるのも放射線のおかげである。このように、用途に合わせ優れた特性を持つ品種を生み出せることが放射線による品種改良の魅力である。病気に強く育てやすい品種を作り出すことによって、収穫量の増加や、農薬使用量の低減に役立っている。

「放射線を照射した食品」というと抵抗があるかもしれないが、食品への照射によって発芽防止、殺菌、害虫の繁殖防止などのメリットがある。海外では香辛料の殺菌などに利用され、国内ではジャガイモの発芽防止に利用されている。当然のことながら、これらの食品を口にした人への影響はない。

害虫駆除として放射線で不妊化した虫を放し、野生中と交尾させることで害虫の孵化率を下げ

る方法がある。南西諸島におけるウリミバエの根絶駆除が有名である。この方法は他の生物種への影響を最小限にできる利点がある。

この他、非破壊検査や遺跡の年代測定、犯罪捜査における極微量分析にも放射線が利用されている。

### 3 エネルギー源としての原子力の位置づけ

#### 3.1 持続可能な発展を目指して

エネルギー源（電源）として必要なことは、まず第一に安全で安心して使えることが重要であり、その他にもエネルギー資源量が豊富、二酸化炭素の排出量が少ない、エネルギー収支比が大きい、備蓄性に優れる等が挙げられる。これらの特長を全て満たす万能のエネルギー源はなく、いろいろなエネルギーを組み合わせて使う「ベストミックス」という考え方が一般的である。ベストミックスの考え方は国ごとに、またその時代、技術レベル、経済状態、社会情勢によって異なってくるが、現在日本では2030年における電源の20～22%を原子力が、残りを、水力を含む再生可能エネルギーと石油・天然ガス・石炭等の化石燃料が担う、という国の方針が示されている。すなわち、安全であり安心して受け入れられるエネルギー源としての原子力は、人類の持続可能な発展を目指すためにも重要なものとして位置づけられる。

#### 3.2 地球温暖化について

近年、中国やインド等の発展途上国の経済成長はめざましく、世界的に石油・石炭の使用量が急増している。このことが一つの深刻な問題をひき起こしている。それが地球温暖化である。

世界で最も信頼されている地球温暖化に関する報告であるIPCC2013年報告書では「温暖化が起きているのは疑う余地がない」こと、「20世紀半ば以降に観測された温暖化は人間活動による可能性が極めて高い(95～100%の可能性)」こと、また、「温暖化の将来予測として、温暖化対策の規模によって4つのシナリオを考えて1995年前後に比べて約100年後の平均気温が0.3～1.7℃(対策最大)、2.6～4.8℃(対策最少)」と予測している。

「100年間に数℃の気温上昇なら大きな問題ではないのでは？」と思う諸君には地球の気温の時間変化を知ってほしい。地球は1万年前までは氷河期で現在より8℃程度低く、その後温暖化し、6000年前が最も高く今より2℃高かった、その後徐々に下がって現在に至っている。ところが現在はこの数十年間で1℃も急上昇している。これほどまでの急激な気温変化が地球環境にもたらす影響は甚大であることは想像に難くない。

二酸化炭素は地球温暖化ガスの主要成分の一つである。このため発電の際に二酸化炭素を排出しない原子力はライフサイクル評価によっても排出量が最も少ない電源の一つであり、地球温暖化対策に貢献するものと注目されている。

### 4 原子力の安全性

原子力エネルギーの利用は社会に多大な恩恵をもたらす一方、極めて大きな危険性を内包している。それは残念ながら、東電福島第一事故のもたらした災害を見れば明らかである。従って、その危険性が顕在化（実際の事故となってしまうこと）し一般社会に害悪を及ぼすことがないよ

う、顕在化のプロセスをつぶさに検討し防止すること、また万が一、顕在化したとしてもその被害をできる限り最小に抑えるよう種々の対策がなされていることが肝要である。

広島、長崎への原爆投下によって人類は、原子力の生み出す莫大なエネルギーや放射線が人間や社会に及ぼす被害の甚大さを目の当たりにした。そして、その後の原子力平和利用においては、当初からその危険性を認識した様々な安全策が講じられてきた。具体的には、①原子炉内での核分裂連鎖反応によるエネルギーが爆発的に発生してしまわないよう適切に制御し安全に原子炉を停止させる機能を有すること、②原子炉を停止した後も、核燃料内に蓄積された核分裂生成物から発生する崩壊熱で炉心が損傷することがないように冷却能力を維持すること、③万が一、炉心が損傷しても内包される放射性物質が環境中に放出されることがないように堅牢な閉じ込める機能を有すること、である。そして、それらの機能がひとつの機器の故障や一回の誤操作等で簡単に失われることがないように多重性、多様性を持たせた対策を施してきた。しかし、それらは当初から完成度の高いものであったわけではない。そのため、米国スリーマイル島事故や旧ソ連チェルノブイリ事故、そして、我が国の東電福島第一事故のような大事故を引き起こしてしまうこととなった。その都度、我々はそこからの教訓をくみ取り改善を行って、現在に至っている。

東電福島第一事故では、津波という発電所外からの脅威（外的事象）によって、様々な安全機能が一度に無力化する（共通原因故障）という問題の大きさが改めて明らかになった。そこで、既存の発電所に対しては、そもそも地震や津波などの外的事象の設計想定を格段に厳しくするとともに、万が一、それを超える事象が発生したとしても、一度に安全機能を失ってしまうことのないよう、たとえば可搬型非常用電源の確保、炉心冷却のための水源や手段の多様化などの対策を実施した。さらに、不幸にして事故に発展してしまった場合を想定し、所内緊急時対策所の機能や耐震性の強化、電力会社が共同で後方支援を行うための緊急事態支援組織の設置、オフサイトセンターの機能強化、実効的な避難計画の策定等が実施されている。

それでも 100%の安全というのはいずれもあり得ない。原子力の安全確保とは、その利用を著しく阻害しない形で実現されなければ意味がない。そこに人類の英知が求められているのである。繰り返すが、原子力とは莫大なエネルギーを生み出す裏腹に危険も内包するものであり、利用するためには相当の覚悟と毅然たる対処が必要である。その恩恵を享受するため利用するには、継続的な安全性向上に向け、終わりのない努力を惜しんではならないのである。これが原子力技術者のいつまでも変わることはない責務である。

おわりに

日本においては既存の原子力発電所は、世界一厳しいとされる新しい規制基準に適合するよう安全性を高める改良がなされつつある。また、今後、国内外で建設される発電所は、災害などで全電源が失われた場合も安全に停止できるよう、重力などの自然現象で作動する安全装置などの設計が導入されている。

次世代の原子力発電のシステムは、より高い安全性、核拡散への抵抗性、廃棄物と天然資源利用の最小化、原子炉の建設運用費用の低減などを目標に掲げ、国際協力で開発が行われている。現在、超高温原子炉・超臨界圧軽水冷却・溶融塩炉・ガス冷却高速炉・ナトリウム冷却高速炉・鉛冷却高速炉が候補として選定されている。

エネルギー資源が乏しい日本にとって、持続的に豊かで快適な生活を営める国を目指すには、英知を結集してこれら新しい技術を開発していく必要がある。

また、原子力技術は、発電だけでなく、医学、農業から情報産業、宇宙産業まで非常に幅広く、その発展は留まることはない。

君たち若い人たちの英知を結集して欲しい。