

配布資料

理科概論－エネルギー科学基礎－（桐山、pp140－153）

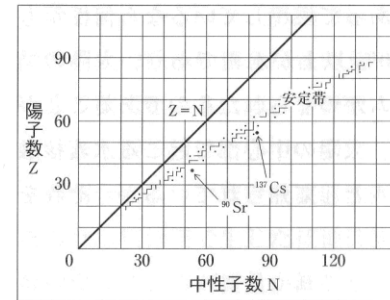


図 5-2-1 原子核の安定帯

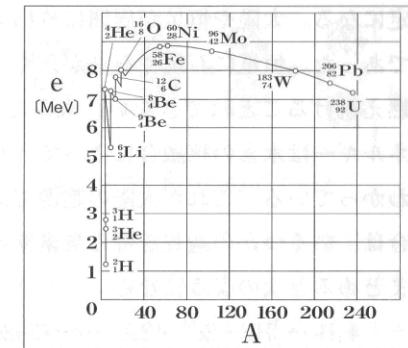


図 5-2-2 元素の結合エネルギー

1 ウランの核分裂とエネルギー生成

第2章で述べたように、原子番号20の $^{40}_{20}\text{Ca}$ までは安定同位体の中性子数Nと陽子数Zは同じであった。ところがCaをさかいに中性子数は漸次増加する。一例として原子番号82の $^{206}_{82}\text{Pb}$ では、82個の陽子に対して42個多い124個の中性子をもつ。比N/Zは1.5になる。

中性子数Nに対して陽子数Zを目盛ると図5-2-1が得られる。Zが20を超えるような質量数の大きな原子核は、中性子数Nが増えて陽子数Zより大きくなる安定帯とよばれる狭い範囲に入っている。質量数が大きな原子核では中性子数が陽子数より多くなる傾向は次のように説明される。核力はその到達距離が極めて短く、陽子同士は静電気反発力がはたらくため、核子数が大きな原子核ほど核力だけをおよぼす中性子の数が多くないと核をまとめる力が不足するからである。この安定帯に入らない同位体が

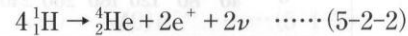
エネルギー的に不安定であり、放射性同位体となる。放射性同位体は結合エネルギーが負であり、自然に崩壊してエネルギーが低くなる方に向かう。図5-1-4、5-1-5に示したセシウムやストロンチウムも安定帯の外側にある。原爆や原子炉のような核分裂を原理とした装置では、放射性同位体がたくさん作られる。

第2章では原子核の結合エネルギーBが質量欠損 Δm と光速 c^2 の積になることを示した。原子核の結合エネルギーBは質量数Aが増え核子の数が多くなるほど大きくなる。それを原子核の質量数で割ると、核子1個あたりの結合エネルギーeを求めることができる。

$$e = \Delta mc^2 / A \quad \dots\dots (5-2-1)$$

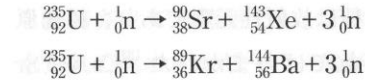
eを核子結合エネルギーとよぶ。質量数Aに対してeを目盛ると図5-2-2のようになる。このeは陽子や中性子が原子核内でどれくらいしっかりと結合しているかを示す指標となる。図のように、鉄のあたり(Aが50~60)の同位体のところでeが最大になり原子核の結合が最も安定になることがわかる。したがって、鉄原子核あたりが一番頑丈であり、原子核はそれより小さくても大きくても結合が弱まる。このことから水素やヘリウムなどの小さな原子核は核融合反応を起こして大きな原子核になった方が安

定になる。太陽や恒星が周囲に放出する巨大なエネルギーの源は長い間謎であった。恒星に石炭や石油がたくさんあって燃焼しているなら何億年も燃え続けることはできない。太陽では70%以上が水素であり、太陽のエネルギーは水素の核融合によってヘリウムがつけられたものであることがわかっている。これが太陽の起源である。太陽の中心部で起こる水素核融合は、いくつかの過程を経る炭素サイクルとして知られているが、それをまとめると次のようになる。



ここで e^+ は陽電子、 ν はニュートリノである。この核反応では質量数(核子数)は保存されるが質量が減少し結合エネルギーの差に等しい運動エネルギーを生み出す。ヘリウム核や陽電子の運動エネルギーは太陽内部から表面に伝わり、それが光のエネルギーとして周囲に放射される。世界中で地上の太陽をつくるべく熱核融合の研究が長い間行われてきたが、莫大なコストをかけた割にはエネルギー実用化のめどはおろか装置を安定させることもできていない。しかし、軍事的には早い段階で成功していて、1954年3月1日にビキニ環礁でアメリカが行った水爆実験の破壊エネルギーは水素原子の核融合反応であった。この破壊エネルギーは第2次世界大戦5回分に匹敵したといわれる。

逆にウランは重く核子結合エネルギーが小さいので、少しエネルギーを与えられると分裂してエネルギー的に安定になる。しかしウランの結合エネルギーは正であるから放射性崩壊のように自然に分裂することはない。ウランに中性子が1個吸収されるとその結合エネルギーが解放され、それが核全体の振動を引き起こし核分裂が生じる。このような核分裂は分裂に必要なエネルギーを中性子が供給できるときに起こる。ウランでは $^{235}_{92}\text{U}$ で起こるが自然界における大半を占める $^{238}_{92}\text{U}$ では起こらない。ウランの核分裂では質量数140前後と95前後の2つの原子核に分裂し、2~3個以上の高速中性子を放出する(図5-2-3)。ウランの核分裂の一例を示す。



核分裂は中性子の割合が多い重い原子核で起こるため、分裂後にできた原子核はたいてい中性子の割合が多い不安定な放射性同位体であり、平均3回くらい崩壊する。

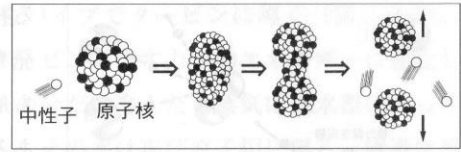


図5-2-3 核分裂のイメージ

このため核分裂で生じた核種は放射能が強い。核分裂反応においても核子数は保存されるが質量が減少し分裂後にできた核や中性子は結合エネルギーの差に等しい運動エネルギーをもっている。さらに分裂後の放射性同位体が発する γ 線などのエネルギーも含まれる。このような核分裂によって生じるエネルギーも最終的には熱エネルギーになる。それを閉じこめて電力にするのが原子炉、一気に放出させるのが原子爆弾である。原子炉の事故では放射性物質が外部に出ることになる。核分裂は他の核反応に比べて1つの原子核から放出される核エネルギーがかなり大きい。

問8 核分裂で保存される核子数を求めよ。(236)

分裂前： $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n}$ 核子数 = 235 + 1 = 236

分裂後： $^{90}_{38}\text{Sr} + {}^{143}_{54}\text{Xe} + 3{}^1_0\text{n}$ 核子数 = 90 + 143 + 3 × 1 = 236

第2章で述べたように1gの質量減少は石油約2000t(トン)分のエネルギーに相当する。長崎に投下されたプルトニウム原爆の破壊エネルギーは1gの質量減少に相当している。

2 連鎖反応の制御と暴走

核分裂の際に放出される中性子のうち、少なくとも1個が次の核分裂を引き起こすならば核分裂反応は次々と起こることになる。このように引き続いて起こる反応を連鎖反応とよぶ。連鎖反応を引き起こす中性子は、およそ $2.0 \times 10^3 \text{ m/s}$ 程度の熱運動の速さくらいであり熱中性子とよばれる。図5-2-4に連鎖反応のイメージ図を示す。前述したように核分裂で生成す

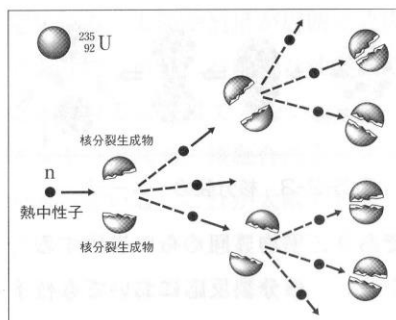


図 5-2-4 連鎖反応のイメージ

る核種は放射性元素であり、福島原発事故でばらまかれた ^{137}Cs や ^{90}Sr も原子炉内で生じた核分裂生成物である。連鎖反応を起こすとき、連続的に巨大なエネルギーが発生する。そのエネルギーを用いたものが原子爆弾や原子力発電の原子炉である。人類最初の自己継続的連鎖反応は、

原爆開発を目的に1942年12月2日にシカゴ大学の体育館の地下で秘密裏に行われ、それはマンハッタン計画とよばれた。シカゴ大学の装置は世界第一号の原子炉である。

核分裂の際ウランの量が少ない場合には連鎖反応は起こらないかあるいは短時間で終息する。しかしウランの量がある一定の量を超えると中性子の吸収数と放出数が釣り合って連鎖反応が持続する。この状態を臨界という。

一般に、連鎖反応が起こるためにはある量以上のウランが1カ所に集まっていなければならない。この連鎖反応を持続するウランの最小量を臨界量という。一般にウランの臨界では入射する中性子のエネルギーが高い場合は原子核が中性子を捕獲しないため臨界量は大きくなる。原子炉で中性子を減速させるのには水が用いられる。高速中性子が減速して熱中性子になると、原子核に捕獲されて核分裂が始まるため、一般に水溶液の場合は臨界量が少なくなる。20%の濃縮ウランで臨界量は約20kgといわれる。

表5-1-2に示すように、核分裂を起こす ^{235}U は全てのウラン原子中のわずか0.7%であり、存在比の約99.3%を占める ^{238}U は核分裂を行えない。したがって、天然ウランを濃縮して ^{235}U の濃度を3~5%まで高め原子炉の燃料としている。原子炉の冷却と高速中性子の減速に水(軽水)を使う原子炉を軽水炉とよぶ。旧型の沸騰水型軽水炉は原子炉の中の冷却水

を沸騰させて水蒸気とし、それをパイプでタービンに導く(図5-2-5)。水蒸気の熱エネルギーの一部がタービンを回す力学的エネルギーに変化し発電する。変化した熱エネルギーの分だけ冷えた水蒸気は復水器に入ってさらに冷却され凝結して水に戻る。その水は再び原子炉に戻る。構造は単純であるが、炉水(汚染水)がタービンに接するためタービンが汚染されている。したがって事故が起こればタービンに近づけないなど深刻な状況となる。福島第一原発は全て沸騰水型軽水炉である。復水器には海水を循環させて放熱している(二次冷却系)。加圧水型軽水炉は原子炉内を高压にして水の沸点を 300°C 程度に高め、水を高温の液体にしたまま蒸気発生器に導く(図5-2-6)。

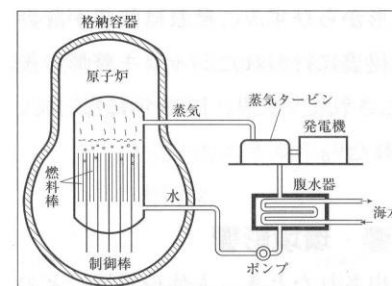


図 5-2-5 沸騰水型軽水炉

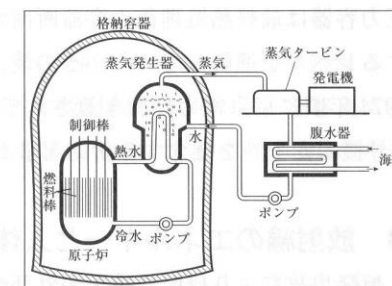


図 5-2-6 加圧水型軽水炉

蒸気発生器を循環する二次冷却水は沸騰して水蒸気を作りタービンを回す。水蒸気は冷えて水に戻り蒸気発生器へ再び入る。蒸気発生器が原子炉内にあるため構造は複雑になるが汚染水がタービンに接することはない。絶えず循環する水は中性子を減速し、蒸気発生器との熱交換により熱を除去する役目をはたしている。制御棒は中性子吸収性能のよいカドミウムまたはホウ素鋼製で連鎖反応を制御する。濃縮ウランの詰まった燃料棒から制御棒が引き抜かれると原子炉(圧力容器)内で生ずる連鎖反応の度合いは増大する。制御棒が完全に挿入されると中性子を吸収し連鎖反応を止める。出力を止めるための制御棒の挿入は加圧水型軽水炉では燃料棒の上か

ら行う。沸騰水型軽水炉では下から行うため事故時には危険性が高い。地震などにより電気系統が故障すると冷却水を循環させることができなくなる。そうすると制御棒が挿入されたとしても核分裂は止まるが核分裂生成物の崩壊による放射線で加熱が続く。これを崩壊熱という。崩壊熱で燃料がさらに加熱して压力容器の底に落下した場合、そこで再臨界に至ることもありうる。また圧力の高まった水蒸気などが漏れて爆発し、格納容器を破損させて放射性物質を一気に外へ放出させるという大事故になりかねない。福島の事故ではこれが現実に起きている。

沸騰水型軽水炉の110万kW級では压力容器は直径7メートル、高さ20メートル、重量700トン程になるといわれる。福島第一原発4号機用压力容器は最終熱処理後の容器断面が円形からひずみ、それは法規が許容するレベルを逸脱していた。その後、極秘裏に行われたジャッキ整形の後、1974年頃に東京電力に引き渡されて運転されていた³⁾。1988年になって、4号機の安全性を懸念する新聞記事が流れた⁴⁾。

3 放射線のエネルギーと人体影響・環境影響

原発事故により放射性物質が外部へ放出されたとき、人体や環境にどのような影響が出るのだろうか。放射線の人体影響は確定的影響と確率的影響に分類される。それを考えるために、まず10 Gyの放射線によって人体が被曝した場合そのエネルギーがどうなるかについて考えてみよう。 γ 線のような放射線は電磁波であり赤外線も同じ電磁波である。赤外線を10 Gy受けた場合どうなるか（普通こんな言い方はしないが）。人体は水分が70%以上であるから水で換算すると、水1 kgを1度上昇させるための熱量（=比熱）は4.2 kJ（=4200 J）である。したがって10 Gyを受けて10 Jのエネルギーが1 kgの人体組織に吸収された場合は、 $10/4200 \approx 0.0024$ 度ほど体温が上昇することになる。これは何の問題もない。しかしこれまでに学んだように人体組織の結合エネルギーが数eV（電子ボル

ト）であるのに対して、 γ 線のエネルギーは1 MeVの桁である。だから γ 線があたると人体組織は電離され分子がちぎれて損傷してしまう。赤外線のように人体組織1 kgをマクロに加熱するのではなく、同じ10 Gyであっても γ 線の場合はエネルギーが照射された部分に集中的に作用し、ミクロな分子構造を破壊する。放射線の怖さはエネルギーの量ではなく人体への作用の仕方にある。放射線の人体影響のターゲットはDNAである。図5-2-7の①に示すように、DNAは生物の種に固有な染色体の中にあって遺伝情報を構成する。放射線によってDNAにできた損傷が主に人体影響の重要な要因になると考えられている。損傷の過程は純粋に物理・化学的な過程であり、直接効果と間接効果に分類される。図5-2-7の②③に直接効果と間接効果のイメージを示す。

直接効果：DNAに直接放射線があたって損傷ができる。

間接効果：DNAの周りの水や生体物質に放射線がエネルギーを与えて、化学的エネルギーの高いラジカル類ができ、これがDNAを攻撃する。

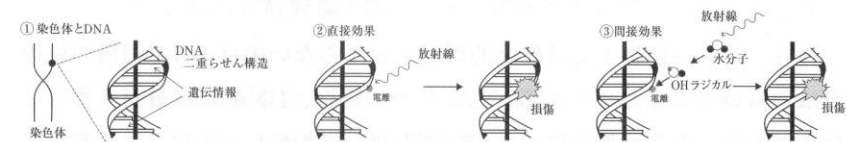


図5-2-7 DNA損傷の直接効果と間接効果

人体はDNAが損傷してもその部分を除去して修復する機能を有している。しかし損傷が激しければ修復が不可能になる。このようなDNAの修復が不可能となるような放射線障害を確定的影響とよぶ。一般に確定的影響はある限界線量（しきい値）以上で比較的早期に（数ヵ月以内）症状が現れる。代表的な症状としきい値は表5-2-1のようである⁵⁾。慢性被曝の線量は1年間の継続的な被曝量で表されている。卵巣は慢性被曝のしきい値が低い。確定的影響にはこの他にも造血組織障害や晩発性の白血病なども含

まれる。経験によると、8 Gy の線量では被曝した人は治療を受けても助からないことが知られている。4 Gy の線量では治療を受けなければ被曝者の50%が死亡する。2 Gy ではめまいや疲労感が現れ、1 Gy では被曝者の半数にこれらの症状が現れる。250 mGy の被曝は血液検査による染色体観察によって探知できる。1999年のJCO事故では、10 Gy 程度の被曝をした2人の作業員の方が急性放射性障害で亡くなられた。体細胞の染色体が全てぐちゃぐちゃになり、DNA が破壊されたため細胞の再生能力を失ったことによるものである。

表5-2-1 代表的な症状としきい値（文献5）より作成

臓器・組織	影響	急性被曝	慢性被曝
胎児	奇形発生	100 mGy	—
胎児	重度精神発達遅延	120~200 mGy	—
精巣	一時的不妊	150 mGy	400 mGy/年
精巣	永久的不妊	3.5~6 Gy	2.0 Gy/年
卵巣	永久的不妊	2.5~6 Gy	200 mGy/年

一方、しきい値以下では確定的影響が起こらないのはDNA損傷の修復がはたらいてくるためである。しかしその場合、DNAの修復がうまくはたらかなかったり修復時にミスが起きた場合はDNAの変化（突然変異）が起きたり、細胞死という細胞レベルの影響が現れる。一度に100 mSv以上を受けると修復能力が追いつかなくなるともいわれる。一般に癌の発症はDNAの異常な細胞が一つできてこれが増殖することによって引き起こされる。異常な細胞ができるにはDNA突然変異などの重要な傷が蓄積するまでに長い時間がかかると考えられる。したがって放射線被曝から癌になるまでの期間は長いと考えられている。現在の知見では、各種の放射線による発癌と子孫に影響が現れる遺伝的影響は確定的影響で見られるようなしきい値はないと考えられている。ここまでなら安全という基準値な

ど科学的に決めることは不可能である。このように、DNAの修復が不完全となることによって固形癌などを発症させる放射線障害を確率的影響とよぶ。確率的影響の特徴は2つある。

特徴1：線量が高いほど発症する確率が高くなる。LNT（Linear Non-Threshold）仮説では、発症確率は線量に比例して増加する。

特徴2：発症してしまうと症状の重さは線量に関係がない。

白血病は被曝後数年で発症がはじまるが、甲状腺癌や乳癌などの固形癌の場合は被曝してから数~10年くらいして発症してくる。ところが、もし自分の身体に異変が見いだされたとしても、生活環境において数多くの化学薬品が使用されていることなどから、身体の変異を放射線のみ原因に帰することは極めて難しい。しかし、その難しさにこそ放射線の本当の恐怖がある。チェルノブイリ事故後1~3年後は小児の甲状腺癌が微増し、4年目に激増した。一般に小児甲状腺癌は100万人に1~2人という発症率である。福島原発事故後、2013年4月までに約17万人の小児検査が実施され、2次検査の後、乳頭癌（小児甲状腺癌の主な症例）12名が手術されている⁶⁾。これらが放射線の影響である可能性を否定することはできない。

国際放射線防護委員会（ICRP）のLNTモデルによる放射線被曝のリスク推定によると、1万人の人がそれぞれ1 mSv被曝するとその中の1人が被曝による白血病ないし固形癌になる可能性があるとしている⁷⁾。東京都の人口が1千万人なら新たに1000人に癌が発生することになる。このモデルは10 Gy（=10 Sv=10000 mSv）の被曝が致死量であるとする、1 mSvの被曝はその1/10000の影響をもつと考えることによる。致死率が1/10000ということは10000人に1人が死亡することに等しいと考えるのである。ICRPは放射線を扱う職業人の被曝限度を5年間で100 mSv以内に、1年間では50 mSvを超えないように勧告し、一般の公衆については1年間の被曝限度は1 mSvであると定めている。これは自然放射線に

よる被曝（世界平均は2.4 mSv、日本では1.5 mSv程度）に追加されると考えねばならないから、1 mSvという過剰な被曝を国民に強いていると解釈することもできる。

内部被曝は外部被曝と違って組織を集中的に被曝させるため、このようになりリスク推定を超えた影響があると考えられている⁸⁾。国・行政によって肉類、魚類、穀類（米を含む）については2011年度には500 Bq/kg、2012年度からは100 Bq/kgの規制値（基準値）が敷かれた。米の汚染は土壌から放射性物質（主として¹³⁴Cs、¹³⁷Cs）を吸い上げることによって発生する。これらの値は諸外国の規制値に比して極めて甘い設定である。そして、建前上は流通している米はこれ以内であるとしている。しかし、規制値を一桁超える汚染米が市場に出まわったことは記憶に新しい。また、外食産業などに流通している国産米は様々な産地の米をブレンドしている。そういう意味で、国産米を継続して摂取することによって、長期的な内部被曝の危険性の有無を懸念する考えも理解できる。100 Bq/kg程度の汚染米を何年も食べ続けた場合どんな影響が出るのかについては、放射性物質が体内にある一定時間にわたり滞在して一様に被曝させるとして計算する方法（預託線量計算）があるがここでは割愛する。このような方法は、本来は組織への集中的影響を有する内部被曝を一様な外部被曝のようにならして計算させようとする考え方である。

問9 30万人の都市で年間積算線量が10 mSvであるとき、LNTモデルではどのような予測が得られるか。（300人に発癌）
LNTモデルでは、 $300000 \times 10 \times (1/10000) = 300$ のようになり、300人に放射線被曝による過剰な癌が発生するという計算結果になる。福島県内では2013年になっても空間線量率が $1 \mu\text{Sv/h}$ 程度の地域が少なくない。これは年間で9 mSvの外部被曝に相当する。原発事故から10～20年経過したらこの予測の真否が確認されるだろう。原子力の“平和利用”である原子力発電は、こんなことを考えねばならない代物である。

4 核廃棄物と原発の廃炉

原子炉で核分裂をしない²³⁸Uは中性子を捕獲すると²³⁹U（ウラン239）となり、 β 崩壊を繰り返して²³⁹Pu（プルトニウム239）ができる。原子炉内では他のプルトニウム同位体も多数できる。²³⁹Puは²³⁵Uと同様に核分裂性を有し、原爆の材料や原子炉の燃料に使うことができる。

原子炉で使用された使用済み燃料は水を満たしたプールの中で数ヶ月蓄えられ、放射能が減少してから溶解される。そして使用済み燃料は未分裂のウランと新たに生成したプルトニウム（Pu）を分離し、残りの核分裂生成物を廃棄物として処分する再処理という工程に入る。日本はこれまで再処理をフランスなどに委託していた。2003年時点で原発運転により地上で処理できない40トンの余剰²³⁹Puが蓄積されている。プルトニウムはわずか4 kgほどあれば原爆が造れる軍事物質である。軍事的緊張を避けるために余剰プルトニウムを持たないという国際公約を守るには、プルトニウムを消費する必要がある。その一つが回収されたプルトニウムをウランと混ぜて原発（軽水炉）で利用するプルサーマル計画である。この混合物をMOX燃料（モックス燃料、混合酸化物燃料）というが、福島第一原発の第3号炉はプルサーマルであった。プルサーマルの危険性は、プルトニウムは吸い込むと1 gで約50万人を肺ガンにできるといわれる猛毒性をもつこと、再処理後の高レベル廃棄物の処理のめどが立っていないことが挙げられる。また原発（軽水炉）一炉に入れられるプルトニウム量は約200 kg程度だから、再処理により増えるばかりの余剰プルトニウムがプルサーマルで吐けるはずはなく、再処理を見直すしかないといわれる。しかしプルトニウムを増やさないためにはプルトニウムを作らないことが基本であることは言うまでもない。福島第一原発は廃炉になることが決まっている。原子炉の中の燃料の取り出しは最長で2051年度に入ると試算されているが、燃料が炉の中にあるのかなのか、どんな状態でどこへ行ったのかさえもわからない現状である（2013年5月現在）。また、原発事

故による核廃棄物を処分する中間処分場を決めることもできないでいる（最終処分場は議論にも出ない）。

福島第一原発の廃炉は事故から40年かかる算段になるが、10兆円以上のコストが必要であるといわれる。そのコストは電気料金に上乗せされ、さらには我々の税金から賄われるだろう。そして実際の廃炉プロセスでは、必要となるエネルギー生産に計り知れない化石燃料を必要とするだろう。廃炉は基本的には使用済み燃料を取り出し、放射化されている原子炉の解体で出る廃棄物や周辺設備など危険なものを人間や生態系から隔離することを意味する。詳細は省くが廃炉の方法がいくつか提案されている。しかしながら、廃炉プロセスは除染とは違い、どの方法も極めて危険な物質への接近やその移動を含むため、事故が起きていない原発は設備をそのまま安定な状態に保って放置する以上によい方法があるとは思われない。原発はできれば設備をそのままの状態でも地下も含めて厚いコンクリートで覆い、原子炉から取り出した使用済み燃料を数百年間にわたってエネルギーを投入して冷却し続けるのが最善であるように思える。要するに放射能を漏れないようにする以外は何もしない方がよい。世界中の全ての原発の廃炉を進める途上で、もしそのエネルギー源である化石燃料がなくなれば、その時点で廃炉をあきらめるしかない。人類は放射能に対する新たな生物的進化をとげるほか生き残る道はなからう。

事故が起きてしまった原発においては、通常の原発における廃炉という概念そのものすら当てはまらない。まずは循環的な冷却システムを構築して冷却し続けることが最優先である。チェルノブイリにならえば、福島原発1~4号機は分厚いコンクリートで覆って放射能が漏れないようにしなければならない。その上で、原発近辺（例えば5~10 km 圏内）には自然放射線レベルに回復するまでは（恐らく数百年間は）近づかないなど、高い線量下の極めて危険な作業を人間にはさせないのが本当の人道的選択である。この方法は科学的に妥当な選択でもある。ただし福島の場合、決して

事故は収束していないのであって（2013年5月現在）、新たな危機が起これる場合はそのための対策をとらねばならないのは言うまでもない。その一つは、序章でもふれたように、毎日400トン近い汚染水が原発周辺に設置された全容量30万トンという巨大な数のタンク群に溜まり続けている問題である⁹⁾。汚染水のタンクによる貯蔵には限りがあり、さらには汚染水タンク群が周辺の放射線量を上昇させている。2013年4月に入って27万トンまで溜まった。

原発には次の受け入れがたい4つの困難が含まれている。

- ①原子炉で原爆の材料にして最強の毒物プルトニウムがつくられる。
- ②核廃棄物を無害にする処理技術がなく最終処分場もない。
- ③原発事故による放射能は広範囲の生態系を長期間汚染し人体を被曝させる。

④廃炉には40年以上の年月とともに莫大なコストとエネルギーが要る。以上のような計り知れない困難（デメリット・リスク）があるにもかかわらず、国策として原発が推進されたのは利権に群がる人々が後を絶たないからである。脱原発を掲げていたはずの民主党政権は、2012年の夏の電力不足を建前に関西電力大飯原発を同年8月に再稼働させた。しかし再稼働しなくても電力不足はなかったとの調査や研究がいくつもある¹⁰⁾。再稼働は電力会社の倒産危険性を回避させる国策であった可能性が濃厚である。電気が必要だから原発を再稼働させるという論理は、原子力発電が上述の4つの困難を解決して他の発電技術と対等に比較できるようにならない限り、電力会社や国の詭弁であると判断するほかあるまい。

【引用・参考文献】

- 1) 地学団体研究会編：新地学教育講座5 地球内部の物理・化学、東海大学出版会（1980）
- 2) 桐山信一：学校理科で探究する生活科学—生活科学的アプローチによ

以下省略