

中学校教材 「原子核エネルギーと放射線」 (解説編)

1章 原子の構造と原子核

1. 原子の構造
2. 原子の種類と原子番号
3. 原子の質量数と同位体

2章 原子核と放射線

1. 放射線の発見
2. 放射線の正体
3. 放射線の特徴
4. 放射線の減り方と半減期

3章 放射線と放射線障害

1. 放射線による人体への影響
2. 放射線の単位
3. 放射線被曝と健康被害
4. 外部被曝と内部被曝

4章 原子核エネルギーと「原爆」・「原発」

1. 仕事とエネルギー
2. 原子核エネルギーと核分裂
3. 原子爆弾
4. 原子力発電
 - ① 原子力発電の仕組み
 - ② 原子力発電に固有の問題
 - ③ 原発に関連する事故

5章 福島原発事故とエネルギー問題

1. 国の電力政策と原子力発電
2. 福島原発事故と「安全神話」の崩壊
3. 日本の「自然エネルギー」
4. これからのエネルギーを考える

1章 原子の構造と原子核

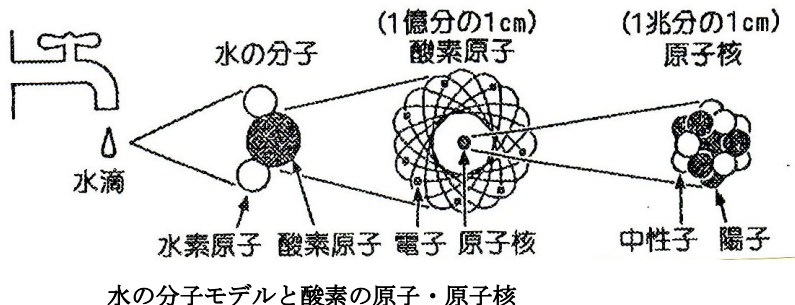
1. 原子と原子の構造

《原子については、2年理科「化学変化と原子・分子」のところで学習。原子の特徴を化学変化の範囲内に限定し、原子の構造については「発展」で簡単に触れる程度。》

A. 原子

私たちのまわりにある物質はすべて、水素(H)、酸素(O)、炭素(C)などおよそ100種類の原子からできています。原子は物質をつくる最小の粒子ですが、ただの球ではなく内部に構造を持っ

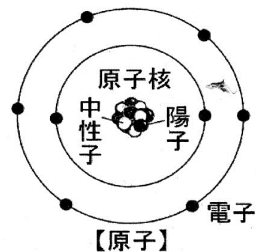
ています。水(H₂O)は分子ですが、水素原子2個と酸素原子1個が結びついてできています。



B. 原子の構造

酸素原子を拡大すると中心に原子核のかたまりがあり、そのまわりをマイナスの電気を持つ電子が動いています。原子核を更に拡大すると、プラスの電気を持つ陽子と陽子とほぼ同じ質量で電気を持たない中性子がつまっています。

このように、すべての原子は中心に原子核をもち、そのまわりを動く電子とで構成されています。原子はとても小さく1億分の1cmの大きさしかなく、原子核はさらに原子の数万分の1の大きさしかありません。



(課題1) 1円玉の直径は2cmなので、原子の大きさはその10万倍(10⁵)になります。

$$2\text{cm} \times 10^5 = 200000\text{cm} = 2\text{km} \quad (\text{野球場が数十個分})$$

核の大きさが原子の1万分の1とすると、200mになる。

※ 原子核の大きさを求める式

$$d = 1.2 \times 10^{-15} \times A^{1/3} \text{ (m)}$$

d : 原子核の半径

A : 原子の質量数 (陽子数と中性子数の和)

この式で酸素の原子核の大きさを求めると、原子の約3万分の1になる。

2. 原子の種類と原子番号

《教科書に周期表は載っているが、紹介する程度で原子番号や質量数についてはほとんど触れない。放射線を理解してもらうためには、原子番号や質量数についての知識が必要になる》

原子核の中の陽子1個が持つ電気の大きさは、まわりにある電子1個が持つ電気の大きさと同じで符号だけが反対です。すべての原子は必ず、陽子と電子を同じ数だけ持っていますので、原子は電氣的に中性の状態にあります。

陽子、中性子、電子でできている原子の違いはどこにあるのでしょうか。それは、陽子の数です。酸素原子を原子の表記法で表すと右の図のようになります。左下の8は**原子番号**を表す数字で、陽子の数を表しています。また、左上の16は**質量数**を表す数字です。質量数は、陽子の個数と中性子の個数を足した数字になります。



(課題2) 酸素の原子番号は8なので、陽子の個数は8個になります。質量数が16なので中性子の個数は、 $16-8=8$ で8個ということになります。また、電子の個数と陽子の個数は等しいので、電子も8個です。

メンデレーエフが発見した**周期表**は、現在では原子の構造に基づいてつくられています。

(下図)

Periodic Table of the Elements

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1 H 水素 1.00794 | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 He ヘリウム 4.0026 |
| 3 Li リチウム 6.941 | 4 Be ベリウム 9.012182 | | | | | | | | | | | 5 B ホウ素 10.811 | 6 C 炭素 12.0107 | 7 N 窒素 14.00674 | 8 O 酸素 15.9994 | 9 F フッ素 18.9984 | 10 Ne ネオン 20.1797 |
| 11 Na ナトリウム 22.98977 | 12 Mg マグネシウム 24.305 | | | | | | | | | | | 13 Al アルミニウム 26.982 | 14 Si ケイ素 28.0855 | 15 P リン 30.9738 | 16 S 硫黄 32.065 | 17 Cl 塩素 35.4527 | 18 Ar アルゴン 39.948 |
| 19 K カリウム 39.0983 | 20 Ca カルシウム 40.078 | 21 Sc スカンジウム 44.95591 | 22 Ti チタン 47.867 | 23 V バナジウム 50.9415 | 24 Cr クロム 51.9961 | 25 Mn マンガン 54.93805 | 26 Fe 鉄 55.845 | 27 Co コバルト 58.9332 | 28 Ni ニッケル 58.6934 | 29 Cu 銅 63.546 | 30 Zn 亜鉛 65.39 | 31 Ga ガリウム 69.723 | 32 Ge ゲルマニウム 72.61 | 33 As ヒ素 74.9216 | 34 Se セレン 78.96 | 35 Br 臭素 79.904 | 36 Kr クリプトン 83.8 |
| 37 Rb ルビウム 85.4678 | 38 Sr ストロンチウム 87.62 | 39 Y イットリウム 88.90582 | 40 Zr ジルコニウム 91.224 | 41 Nb ニオブ 92.9064 | 42 Mo モリブデン 95.94 | 43 Tc テクネチウム (99) | 44 Ru ルルチウム 101.07 | 45 Rh ロジウム 102.906 | 46 Pd パラジウム 106.42 | 47 Ag 銀 107.8682 | 48 Cd カドミウム 112.411 | 49 In インジウム 114.818 | 50 Sn スズ 118.71 | 51 Sb アンチモン 121.76 | 52 Te テルル 127.6 | 53 I ヨウ素 126.9045 | 54 Xe キセノン 131.29 |
| 55 Cs セシウム 132.90545 | 56 Ba バリウム 137.327 | 57-103 La-Lanthanoids ランタノイド | 72 Hf ハフニウム 178.49 | 73 Ta タンタル 180.9479 | 74 W タングステン 183.84 | 75 Re レニウム 186.207 | 76 Os オスmium 190.23 | 77 Ir イリジウム 192.217 | 78 Pt 白金 195.078 | 79 Au 金 196.967 | 80 Hg 水銀 200.59 | 81 Tl タリウム 204.3833 | 82 Pb 鉛 207 | 83 Bi ビスマス 208.98 | 84 Po ポロニウム (210) | 85 At アスタチン (210) | 86 Rn ラドン (222) |
| 87 Fr フランシウム (223) | 88 Ra ラジウム (226) | 89-103 Ac-Actinoids アクチノイド | 104 Rf ラファエリウム (228) | 105 Db ドブニウム (229) | 106 Sg シグネーティウム (263) | 107 Bh ボヘリウム (264) | 108 Hs ハツツウム (265) | 109 Mt マイテリウム (268) | 110 Ds ダームシュテットム (269) | 111 Rg レンドゲニウム (272) | 112 Uub ウンウンベリウム (277) | Unq ウンウンクニウム (289) | | | | | |
| ← s-ブロック元素 | | ← d-ブロック元素 | | | | | | | | | | ← p-ブロック元素 → | | | | | |
| ランタノイド | | 57 La ランタン 138.9055 | 58 Ce セリウム 140.116 | 59 Pr プラセオジウム 140.9077 | 60 Nd ネオジム 144.24 | 61 Pm プロメチウム (145) | 62 Sm サマリウム 150.36 | 63 Eu ユーロピウム 151.964 | 64 Gd ガドリニウム 157.25 | 65 Tb テルビウム 158.9253 | 66 Dy ジスプロシウム 162.5 | 67 Ho ホルミウム 164.93 | 68 Er エルビウム 167.26 | 69 Tm ツリウム 168.93421 | 70 Yb イットルビウム 173.04 | 71 Lu ルテチウム 174.967 | |
| アクチノイド | | 89 Ac アクチニウム (227) | 90 Th トリウム 232.0381 | 91 Pa パラセオニウム 231.03688 | 92 U ウラン 238.0289 | 93 Np ネプツニウム (237) | 94 Pu プルトニウム (239) | 95 Am アメリウム (243) | 96 Cm キュリウム (247) | 97 Bk バークリウム (247) | 98 Cf カリフォルニウム (251) | 99 Es アイズنهاイム (252) | 100 Fm フェルミウム (257) | 101 Md メンデルレービウム (258) | 102 No ノーベリウム (259) | 103 Lr ローレンシウム (262) | |

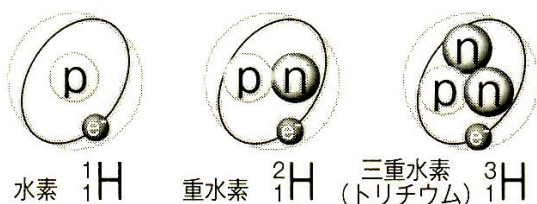
3. 原子の質量数と同位体

《3年理科の教科書に放射性同位体

原子を構成する陽子の質量は、電子のおよそ 1840 倍もあります。中性子は陽子とほぼ同じ質量を持つので、原子の質量は陽子と中性子の数で決まります。

(課題 3) 最も簡単な構造を持つ水素原子は、陽子 1 個と電子 1 個でできています。原子番号 1、質量数 1 の元素は水素ということになります。

(課題 4) 陽子は+の電気をもっているの
で、同じ電気どうしは反発して核を維持することができません。



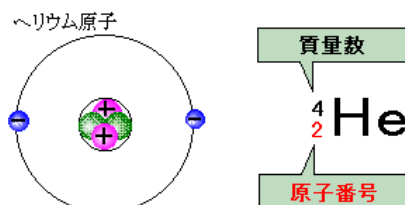
(課題 5) 原子番号 1、質量数 2 の元素は重水素と呼ばれます。

《中性子を 2 個もっている質量数 3 の

水素の同位体

水素原子は、三重水素(トリチウム)と呼ばれ β (ベータ)崩壊をします。》

原子番号 2 のヘリウムは質量数が 4 ですから、原子核は陽子 2 個と中性子 2 個でできていることになります。水素は陽子 1 個でできているのに、ヘリウムの原子核に中性子があるのは何故でしょうか。



ヘリウムの原子構造

陽子はプラスの電気を持っているので、陽子が 2 個だけだと同じ電気同士は反発するので原子核を維持できません。そこで、中性子がこれらの仲立ちをして原子核がばらばらになるのを防いでいます。

原子は、原子核という狭い空間に正電荷をもった陽子が複数存在するため、互いに大きな斥力(電磁気力)を受けています。この斥力に打ち勝って原子核を安定に存在させているのは、中性子の作用です。陽子、中性子の核子間には中間子を媒介した核力が引力として働き、これが電磁氣的反発力に打ち勝って原子核を安定化させているのです。

《核外での自由中性子の寿命は約 900 秒》

炭素は原子番号 6 で質量数は 12 なので、6 個の中性子を持っていることになります。一方、木材など有機物の年代を測定するのに**炭素 14 法**というのがあります。炭素 14 の 14 という数字は、質量数を表しています。原子番号が原子の種類を決める陽子の数ですから、炭素 14 は陽子を 6 個と中性子を 8 個持っていることになります。

このように同じ原子(陽子の数が同じ)でも、中性子の数が異なる原子も存在します。このような原子同士は**同位体**と呼ばれ、炭素 12 と炭素 14 は同位体になります。原子の同位体は、その原子の名前のあとに数字を書いて表すことになります。

2章 原子核と放射線

1. 放射線の発見

- 1895年ドイツの物理学者レントゲンが、クルックス管(真空放電管)の実験中に、分厚い本や人間の体も突き抜け写真フィルムを感光させるエックス線を発見しました。
- 1896年フランスの物理学者ベクレルが、ウラン化合物からエックス線とは異なるが、やはり写真フィルムを感光させる放射線を発見しました。
- ポーランド生まれの物理学者マリー・キュリーは、1898年にウラン化合物から出てくる放射線がウラン原子から出ていることを発見しました。彼女はさらに研究を重ねて放射線を出す2種類の原子、ポロニウムとラジウムを発見しました。また、放射線を出す物質が持つ、放射線を出す性質(能力)のことを「放射能」と名付けました。

2. 放射線の正体と性質

イギリスのラザフォードなど多くの科学者の研究により、放射線は原子核から出てくることが、性質の異なるアルファ線、ベータ線、ガンマ線の3種類であることが分かりました。また、原子の同位体の中には放射線を出さない安定な原子と放射線を出す不安定な原子が存在することも分かりました。この放射線を出す不安定な原子を**放射性同位体**と呼びます。炭素 12 は安定な原子ですが、炭素 14 は放射線を出すので放射性同位体ということになります。放射線を出す物質を放射性物質といいます。放射性物質から出てくる放射線には、アルファ線、ベータ線、ガンマ線の3種類と中性子線があります。

• アルファ線

高速のヘリウムの原子核(陽子2個と中性子2個)の流れで、プラスの電気を持つ粒子。【質量数の大きい(重い)原子が崩壊するとき】

• ベータ線

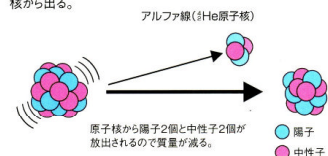
高速の電子の流れで、マイナスの電気を持つ粒子。
【中性子の個数が大きい原子が崩壊するとき】

• ガンマ線

きわめて波長の短い電磁波(光のなかま)。【原子核に過剰なエネルギーが残っているとき、ガンマ線をだして崩壊】

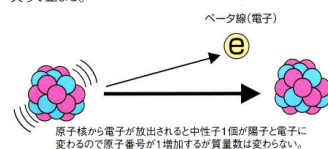
参考 (アルファ(α)・ベータ(β)壊変とガンマ(γ)線の放出) アルファ壊変(崩壊)

原子核の中から陽子2個、中性子2個が一団となって飛び出して来るものをアルファ粒子という。これは、ヘリウム(He)原子核と同じ構造をもつプラスの粒子である。放射線の中では重い粒子のため、短い距離で、空気中の物質の電子を電離・励起してエネルギーを失って止まる。アルファ線を出す壊変をアルファ壊変という。アルファ線は、ウラン、ラジウムなど大きい原子核から出る。



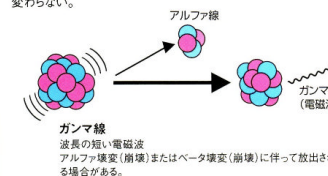
ベータ壊変(崩壊)

原子核の中の1個の中性子が陽子に変わる時に、原子核の中から出て来る高速の電子である。この電子をベータ線といい、ベータ線を出す壊変をベータ壊変という。ベータ壊変では、マイナスの電子が原子核から飛び出す。ベータ線もアルファ線と同様に、物質に当たり電離や励起をしながらエネルギーを失って止まる。



ガンマ線の放出

アルファ線やベータ線を出した原子核の多くは、不安定な状態(励起状態)になる。その励起状態の原子核は、安定な状態になる時にエネルギーを外へ放出する。その放出されたエネルギーがガンマ線である。ガンマ線を放出しても原子核の種類は変わらない。



・中性子線

ウラン 235 などの原子核が核分裂を起こしたときに発生する中性子の流れ。安定した原子がこの中性子を吸収すると不安定な原子に変わる。

・エックス線

ガンマ線よりも波長の長い電磁波で、原子核からは出てこない。図のようなエックス線発生装置で発生させる。

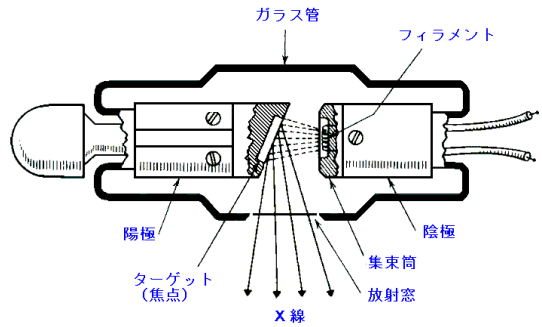


図1 エックス線管の構造

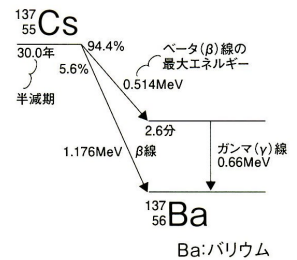
【出典】有水昇、高島力（編）：標準放射線医学第4版、医学書院（1992年4月）、p3

※ 放射性崩壊(壊変)

放射性同位体が粒子の流れであるアルファ線やベータ線を放出して異なる原子に変わることを放射性崩壊という。

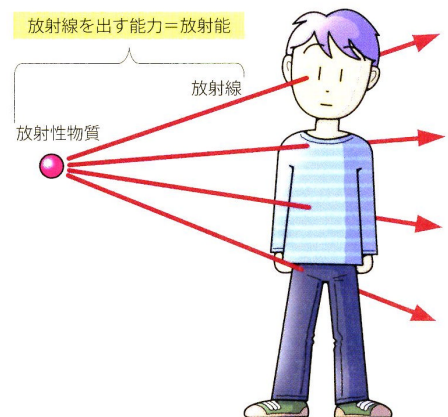
- ・アルファ線を放出した原子は、ヘリウム原子核（陽子 2 個、中性子 2 個）を放出するので、質量数は 4 減り、原子番号が 2 少ない原子に変わる。
- ・電子の流れであるベータ線を放出した原子は、中性子が陽子に変わるので、質量数は変わらないが原子番号が 1 大きい原子に変わる。
- ・ガンマ線は電磁波（光のなかま）なので、質量数も原子番号も変わらない。

◆セシウム (Cs) 137 の壊変 (崩壊)



※ 放射能と放射線, 放射性物質

右の図は、透過力の高いガンマ線を発する場合の放射性物質, 放射能, 放射線の説明図。放射性同位体を含む物質で、放射線を出す性質をもつものを放射性物質といいます。また、放射性物質がもつ放射線を出す能力を放射能といいます。



3. 放射線の特徴

放射線には次の特徴があります。

- ① 目に見えず、においもなく、感覚器官で感じるができない。
- ② 物質を突き抜ける透過力がある。
- ③ 原子の周りの電子をはじき飛ばし、原子をイオンにする作用(電離作用)がある。
- ④ 原子同士の結合を切断し、DNAなどの分子を破壊する。

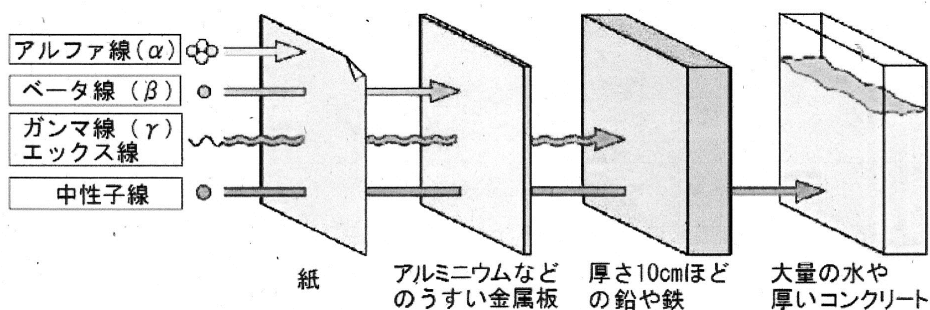
- ⑤ まわりの物質に作用しその温度をあげるはたらきがある。(崩壊熱)

・放射線による原子結合の切断

生命体のDNAを含め、すべての物質は原子によって構成されているが、原子が集まって分子となる場合の結合エネルギーは、eV (エレクトロンボルト ; エネルギーの単位) のオーダーでしかない。ところが、放射線のエネルギーは数十万 V ~ 数百万 eV に達する。生命体が放射線に被曝した場合には、DNA を含め多数の分子の結合が破壊される。破壊の程度が激しければ、その細胞や組織は生き延びることができないし、破壊の程度が低ければ、DNA に傷を負ったままの細胞が生き延び、やがて癌などを引き起こす。放射線は生命体が依拠している物質とはかけ離れたエネルギーを持っており、生命体に対して著しい危険を及ぼす。

4. 放射線による透過力の違いと遮蔽

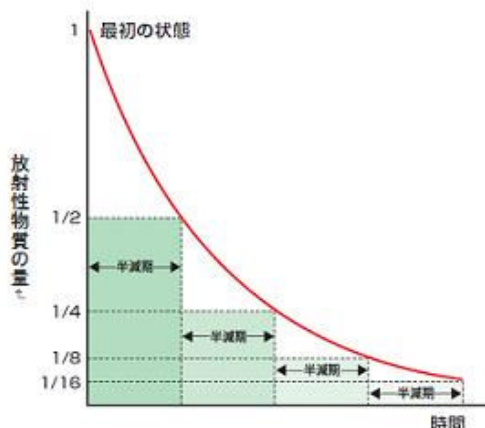
- ・アルファ線 … もっとも透過力が弱く、空気中を 2 ~ 3 cm 進む。皮ふに当たると細胞 1 個分を進み止まる。透過力が小さいのは、物質に当たってエネルギーを失うのが早いからで、当たった物質の受ける影響は大きい。紙 1 枚で止まる。
- ・ベータ線 … 空気中を数 10cm ~ 数 m 進む。皮ふに当たると数 mm の深さまで進んで止まる。薄い金属や木材で止まる。
- ・ガンマ線 … 空気中でも影響を受けずにエネルギーがなくなるまで直線的に進む 人体に深く入り込み、突き抜けるものもある。強いガンマ線をコンクリートで止めるなら 1 m 以上の厚さが必要。
- ・中性子線 … 電気を持たないので透過力は大きい。軽い原子核との衝突でエネルギーが失われる。軽い原子核でできている水を大量に用意するか、厚いコンクリートで止める。ホウ素は中性子をよく吸収するので、原子炉の制御棒に利用されている。



放射線による透過力の違いと遮蔽の方法

4. 放射能の減り方と半減期

放射性物質から放射線を出す性質(放射能)を人工的になくす方法はありません。放射性物質は放射線を出して別の安定した物質になっていくので、もとの放射性物質が持つ放射能は時間がたてば減っていきます。放射性物質が放射線を出して別の物質になるとき、もとの放射性物質の半分になる時間を**半減期**といい、その減り方には規則性があります。半減期は放射性物質の種類によって異なります。



放射性物質の半減期

(課題6) 半減期が30年なので、次の30年でさらに半分になります。つまり、元の2分の1のその2分の1なので、結果は4分の1になります。

※ 炭素 14 年代測定法

自然の生物圏内では炭素 14 (^{14}C) の存在比率がほぼ一定であり、動植物の内部における ^{14}C の存在比率は死ぬまで変わらないが、死後は新しい炭素が補給されなくなるため、存在比率が下がり始める。この性質と ^{14}C の半減期が 5730 年であることから年代測定が可能となる。植物が活着している間は、大気中の二酸化炭素を使うので、植物体の有機物もそれを食べる動物体の有機物も、その中の ^{14}C の量(割合)は大気中の ^{14}C の割合と同じである。ところが生物が死んで地中に埋まってしまうと、 ^{14}C だけが一方的に減っていくことになる。つまり生物の遺体中の ^{14}C が現在の 1/2 であればその生物は 5730 年前に、1/4 であれば 11460 年前に、1/8 であれば 17190 年前に、さらに 1/16 であれば 22920 年前に死んだことになる。

※ 主な放射性同位体と半減期、放射能の強さ

*天然放射性同位体は、自然界に存在する放射性同位体。

*人工放射性同位体は、原爆や原子炉内で生成する核分裂生成物。

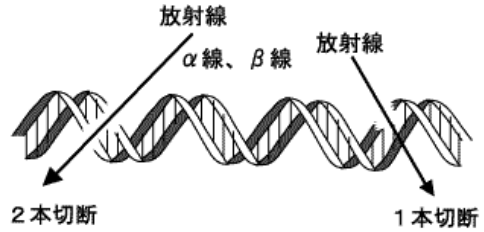
| | 元素名 | 元素記号 | 質量数 | 半減期 | 1グラムあたりの放射能の強さ(ベクレル、次頁参照) |
|----------|-------|------|-----|-----------|---------------------------|
| 天然放射性同位体 | ウラン | U | 238 | 44億6800万年 | 12,000 |
| | カリウム | K | 40 | 12億5000万年 | 260,000 |
| | ラジウム | Ra | 226 | 1600年 | 37,000,000,000 |
| | ポロニウム | Po | 210 | 138.4日 | 1,700,000,000,000,000 |
| 人工放射性同位体 | セシウム | Sc | 137 | 30年 | 3,000,020,000,000 |
| | ヨウ素 | I | 131 | 8日 | 4,600,000,000,000,000 |
| | キセノン | Xe | 133 | 5.2日 | 6,900,000,000,000,000 |
| | クリプトン | Kr | 88 | 2.8時間 | 2,900,000,000,000,000,000 |

3章 放射線と放射線障害

1. 放射線による人体への影響

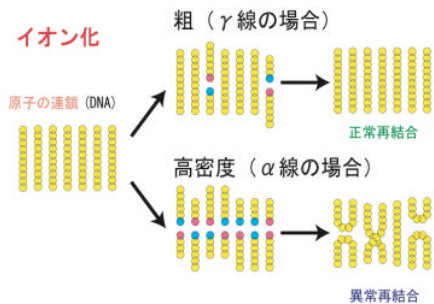
放射線が体に当たると放射線の電離作用によって原子同士の結びつきがこわされ、私たちの体をつくっている細胞や遺伝子に傷をつけます。放射線の影響を強く受ける細胞は、受精卵や胎児などの分化していない細胞、骨髄や小腸上皮など細胞分裂の活発な細胞です。

細胞が分裂するときにはDNAが複製されて2倍になり、染色体というひも状のかたまりになるので放射線が当たりやすくなります。細胞や遺伝子は傷つけられても修復する能力をもちますが、修復できないほどの強い放射線を浴びると細胞が死んでしまいます。また、二重らせん構造をもつDNAが複製する途中の1本鎖が傷つくと修復が困難になります。細胞分裂が活発な細胞のDNAが傷つけられると、異常の頻度も高くなります。放射線の影響は成長期にある乳幼児ほど受けやすくなります。



図A 電離放射線によるDNA二重らせん鎖の切断
放射線が二重鎖を切断する時、2本の切断は1本の切断に比べて修復がむずかしく、また修復に誤りが生じやすく、細胞にとってきわめて危険である。

放射線によるDNAの切断



DNAの再結合異常

2. 放射線の単位

放射線の強さや放射線の量を表す単位には、ベクレル(Bq)やシーベルト(Sv)、グレイ(Gy)などがあります。

① ベクレル … 放射性物質のもつ放射線の強さを表す。

1秒間に原子核が放射線を出して崩壊する個数を表す。ベクレルは個/秒である。放射性物質がどのくらい物質の中に含まれているかを表す表記は Bq/kg です。

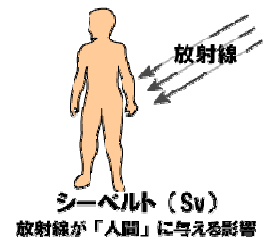
② シーベルト … 放射線による人体への影響の度合いを表す。

放射線の種類やエネルギーの違い、また人体の組織や臓器の種類によって現れる影響の程度の差を考慮して算定されます。

1 Sv(シーベルト)=1000 mSv(ミリシーベルト)

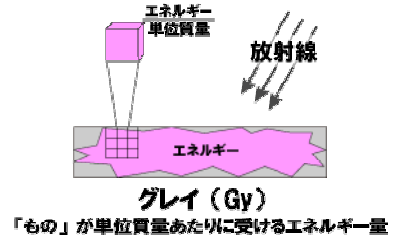
1 mSv =1000 μSv(マイクロシーベルト)

人が1ミリシーベルトのガンマ線を浴びると、細胞1個当たりおよそ500か所の電離作用を受けます。



- ③ グレイ … 放射線により物質のや人体の組織にどれだけのエネルギーが吸収されたかを表す。

1 Gy(グレイ)は、1kg 当たり 1 J(ジュール)のエネルギーの吸収があったときの線量を表します。
1 Gy(グレイ) = 1 J/kg(ジュール/キログラム)です。



3. 放射線被曝と健康障害

① 急性障害

被曝後 2～3 か月以内に症状があらわれる障害です。100 mSv を超えると一定の線量で脱毛，下痢，嘔吐，皮下出血などの症状が現れる。

3000mSv を全身に被曝すると半数の人が死に至ります。

② 晩発性障害

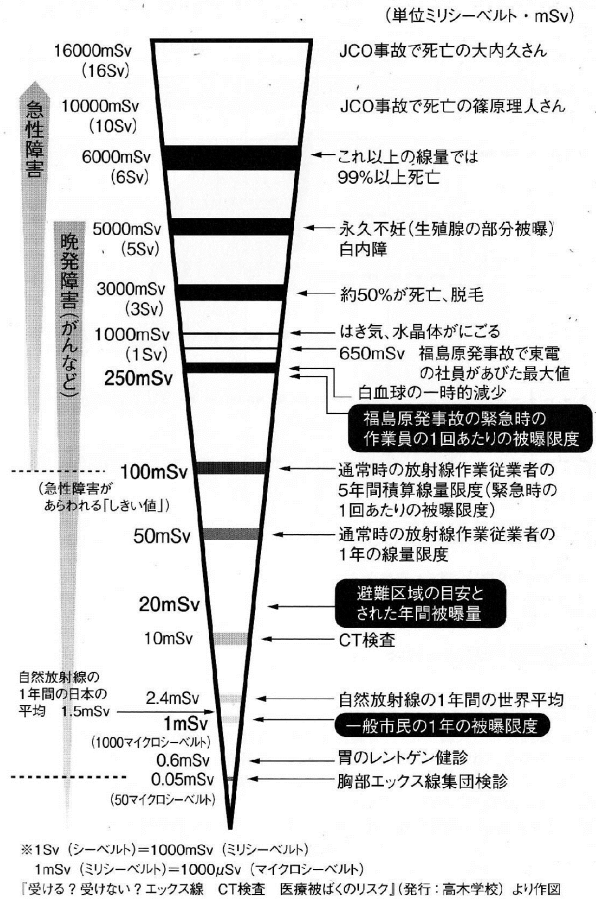
放射線を被曝してから長い期間ののちに症状が現れる障害で、がん，白血病，白内障などの症状が現れる。

③ 確定的影響と確率的影響

放射線を受けたときに症状が現れる最小の放射線量のことを「しきい値」といい、急性障害や白内障などその値を超えると確実に現れるような影響を確定的影響といいます。

白血病やがんなど、受けた放射線量が増えるに従って発症する確率が高くなるような影響を確率的影響といい、「しきい値」は無いと考えられています。

《文部科学省の新副読本に同じような図「身の回りの放射線被ばく」があります。しかしここには、100 mSv の線に太い赤い線が引いてあり、(これ以下では)『がん死亡が増えるという明確な証拠がない』と書かれています。》

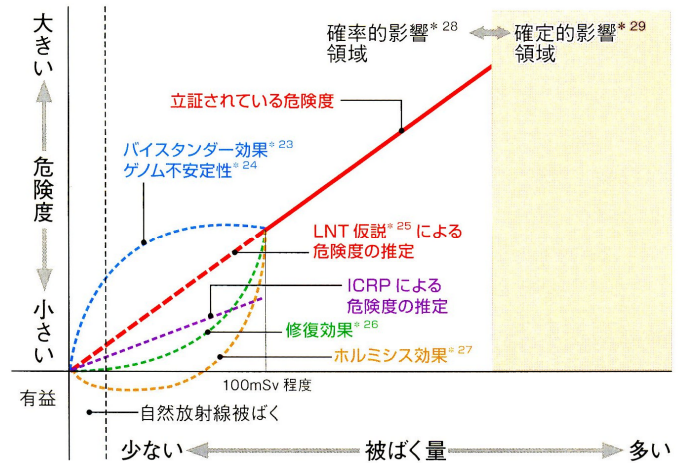


放射線の被ばく線量と健康被害

放射線量が増えるに従って発症する確率が高くなるような影響を確率的影響といい、「しきい値」は無いと考えられています。

※ 低線量被曝による人体への影響

低線量被曝による健康障害の「しきい値」はわかっていません。低線量被曝とがんの発生率の関係には諸説があります。しかし、国際放射線防護委員会（ICRP）は、『生体防護機構は、低線量に置いてさえ、完全には効果的でないようなので線量反応関係にしきい値を生じることはありそうにない』と述べています。

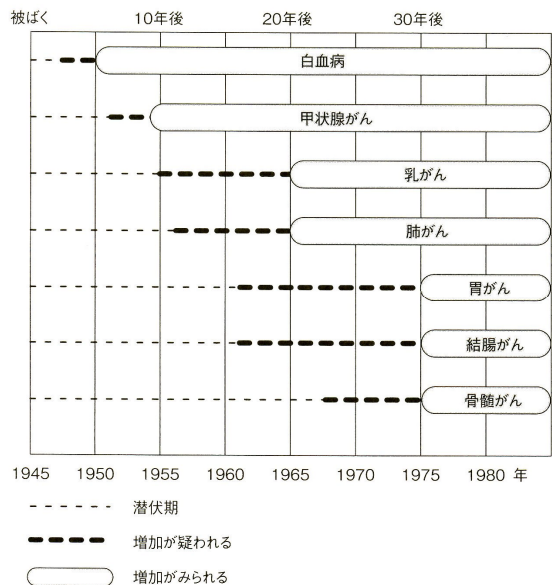


「人体に影響しない被曝」などというものは存在しないと考えるべきです。

4. 外部被曝と内部被曝

- ① 外部被曝 … からだの外から放射線を浴びることです。

広島・長崎に投下された原爆により、爆心地にいた人たちは発生したガンマ線や中性子線を大量に浴びて亡くなりました。また、爆発後に降下してきた放射性物質からの被曝により、多くの市民に急性障害が現れました。その後の調査によると、白血病は5年後から、甲状腺がんは20年後から、その他のがんは30年後から増加していることが確認されました。後述の内部被曝も大きく影響しているはずですが、政府は内部被曝の影響を認めようとしていません。チェルノブイリや福島原発事故では、飛び散った放射性物質が雨や雪などで地上に落ち、それらからたくさんの人や動物が外部被曝しました。



被曝してから癌を発症するまで(広島・長崎)

放射性物質による外部被曝は、おもに透過力の強いガンマ線を浴びることによります。外部被曝を避けるためには、放射線を遮る、放射性物質からできるだけ離れる、放射線を浴びる時間をできるだけ短くすることです。

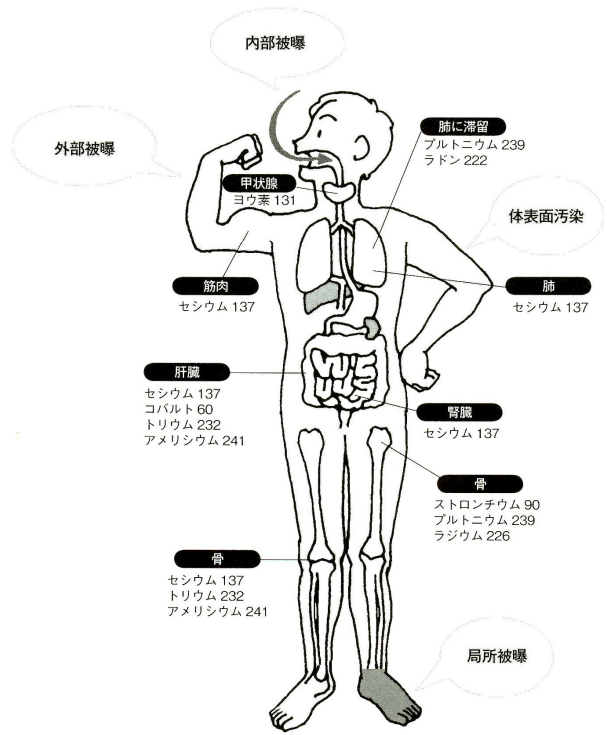
② 内部被曝 … 呼吸や飲食などで体内に取り込んだ放射性物質から放射線を浴びることです。

放射性物質がついた土ぼこりを吸い込んだり、放射性物質を含む飲料水や食べ物を体内に取り込むことで内部被曝が起こります。アルファ線やベータ線は透過力は小さいが、体内にあるときは近くの細胞に大きな影響を与えます。放射性物質が体内に取り込まれると、血液により体中に運ばれて特定の器官にとどまります。こうなると長期間、放射線を浴び続けることになるのでがんなどの原因になります。

チェルノブイリ原発事故では、多くの乳幼児が甲状腺がんにかか治療を受けました。甲状腺ではヨウ素（ワカメや昆布に多く含まれる）を材料として甲状腺ホルモンを作り出

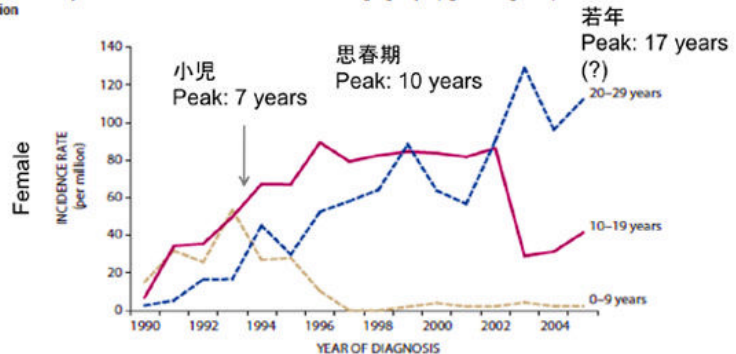
しています。この甲状腺ホルモンは体の発育や成長、新陳代謝などに欠かせない働きをしています。成長期にある子どもたちの甲状腺は、特にヨウ素を吸収しやすいと言われています。甲状腺がんが増えたのは原発事故でばらまかれたヨウ素 131 を子どもたちが摂取したのが原因でした。《甲状腺の被曝を防ぐ目的でヨウ素剤を服用（新生児・乳幼児・妊婦を優先）する》

図はチェルノブイリ原発事故後の人口 100 万人当たりの甲状腺がんの発生件数を示しています。一般に小児の甲状腺がんの発生は 100 万人当たり 1～3 人といわれていますが、原発事故の 2～3 年後から急な増加が見られます。



放射性物質がたまりやすい体の場所

Figure D-VIII. Thyroid cancer incidence rates for different age groups (age at diagnosis) of the total Belarusian female population



4章 原子核エネルギーと「原爆」・「原発」

1. 仕事とエネルギー

《3年生で、仕事とエネルギーを学習します。》

① 仕事

物体に力を加えて物体を動かしたときの「力の大きさ」と「力の向きに動いた距離」の積で表される。【単位；Nm= J(ジュール)】

② エネルギー

高いところにあるある物体は落下すると、杭を打つなどの仕事をすることができます。つまり、高いところにある物体は他の物体に対して仕事ができる状態にあります。このような状態にあるとき、物体はエネルギーを持つといいます。エネルギーは「仕事をする能力」【単位；J(ジュール)】のことでです。

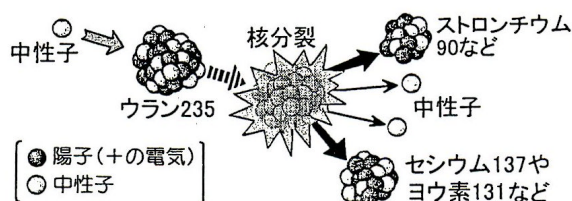
高いところにある物体は位置エネルギー、動いている物体は運動エネルギーを持っています。エネルギーはほかに、熱エネルギー、光エネルギー、電気エネルギー、化学エネルギーなどがあります。私たちは生活の中でエネルギーをいろいろな形に変換しながら利用しています。

2. 原子核エネルギーと核分裂

① 核分裂の発見

自然界でもっとも大きな原子核を持つのは、原子番号 92 のウランです。ウランにはウラン 238 とウラン 235 という同位体があります。どちらも不安定な原子核なので放射線を出し、最後には鉛になって安定します。

1939年ドイツの科学者ハーンとシュトラスマンが、ウラン 235 に中性子をぶつけると原子核が2つに割れる現象を発見しました。核分裂の発見です。割れてできる新しい原子核は、ヨウ素 131 やス



ウラン 235 の核分裂

トロンチウム 90 などすべて放射線を出す放射性同位体です。また、この核分裂では中性子も2, 3個飛び出します。1941年には、ウランより陽子数の多いプルトニウム 239も核分裂することが発見されました。

※ ナチス政権下のドイツ

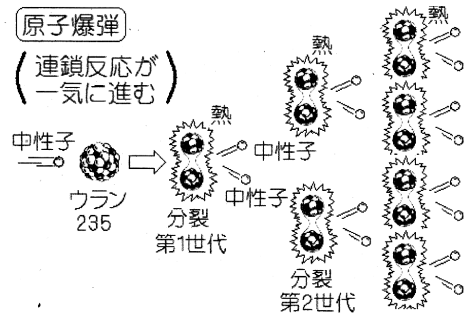
ナチスの中心理論の一つは人種論です。『強者であるドイツ民族はヨーロッパ各地を征服して、広大な生存圏を獲得しなければならない。弱者であるスラブ民族はドイツ民族に支配される運命にあり、ユダヤ人などの「劣等民族」は、隔離するか絶

滅するほかない。優秀な民族は、劣等な民族と結婚して自分の優秀な血液を濁してはならない。ドイツ民族は、民族共同体の一員として、一致団結して民族の発展に努めなければならない、上部の命令に従い、下部に対しては責任をもつという「指導者原理」による独裁政治がそのために必要となる』とナチスは説いた。

② 原子核エネルギーと連鎖反応

原子核が2つに核分裂するとき、元の原子核の質量より新しくできた2つの原子核の質量をあわせたものが小さくなります。この質量の小さくなった分がエネルギーとなり、熱や光のエネルギーに変わります。《アインシュタインの特殊相対性理論から導かれた公式； $E=mc^2$ （E：エネルギー，m：質量，c：光速）》

1gのウラン235の核分裂で石油2000L(リットル)分ものエネルギーを発生させるのです。石油などの化石燃料が酸素と化合(燃焼)する「化学反応」より約100万倍ものエネルギーを出すことができます。では、どのようにしてウラン235の原子核がすべて核分裂を起こすのでしょうか。実は、ウラン235が核分裂するとき2、3個の中性子が飛び出します。これが別のウラン235に当たって核分裂が起こり、また中性子が2、3個飛び出します。この反応が非常に短い時間に連続して起きるのです。この連続して起きる反応を連鎖反応といいます。ウラン235を一定量以上集めておくとそのまま核分裂の連鎖反応が進み巨大なエネルギーが生み出されるのです。



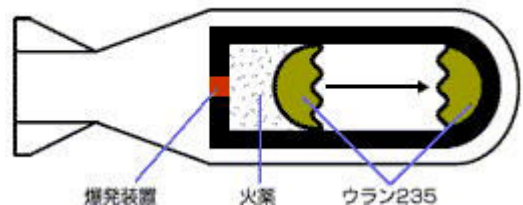
核分裂の連鎖反応

3. 原子爆弾

第二次世界大戦末期の1945年8月6日広島と8月9日長崎に、アメリカは原子爆弾(原爆)を投下し未曾有(みぞう)の犠牲者をだしました。爆発に伴う熱線と放射線や爆風による被害と、爆発後に降った放射性物質(「黒い雨」など)からの被曝による被害がさらに加わりました。

① 広島型原爆

ウラン235を60kg使い、その中の1.4%およそ850gしか核分裂しなかったのですが、12月までに14万人の人が亡くなり、5年間で合計20万人もがなくなったのです。



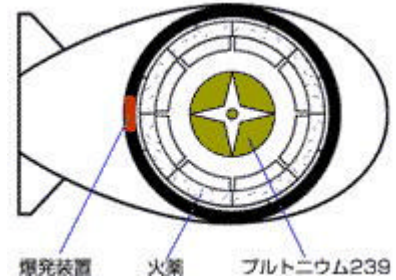
広島型原爆の模式図

天然ウランには、核分裂しないウラン 238 を 99.3%、核分裂するウラン 235 を 0.7% 含んでいますが、このままでは連鎖反応は起こりません。広島型原爆は、ウラン 235 の割合を 100% 近くまで濃縮したものが使われました。

② 長崎型原爆

長崎に投下された原爆は、天然には存在しないプルトニウム 239 が使われました。12 月までに 7 万人以上が、5 年間では合計 14 万人の人が亡くなりました。

《アメリカが最初に製造した原爆 3 個のうち 2 個が爆縮型プルトニウム原子爆弾でした。1945 年 7 月 16 日、ニューメキシコ州アラモゴード爆縮型プルトニウム原子爆弾の

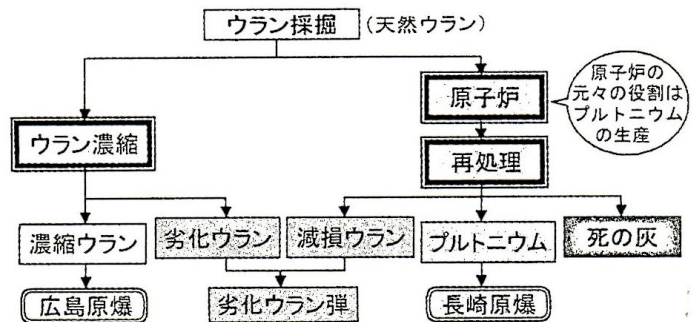


長崎型原爆の模式図

爆発実験で、同型の爆弾が後に日本の長崎県に投下された。この実験による核爆発は約 20kt(キロトン)の TNT の爆発と同規模のものでした。アメリカは原爆の破滅的な破壊力を知っていたにもかかわらず、日本に投下したのです。》天然に存在しないプルトニウム 239 はどのようにしてつくられたのでしょうか。ウラン



238 が中性子を吸収すると、中性子が 1 個増えるのでウラン 239 になります。このウラン 239 が 2 回ベータ崩壊してプルトニウム 239 に変わり、ウラン 235 より核分裂しやすい物質になります。このプルトニウムをつくりだすための装置が「原子炉」です。原子炉の中でウラン燃料の核分裂が進むとプルトニウムがたまってきます。原子炉の中にたまったプルトニウムを選び出して取り出す作業を「再処理」といいます。

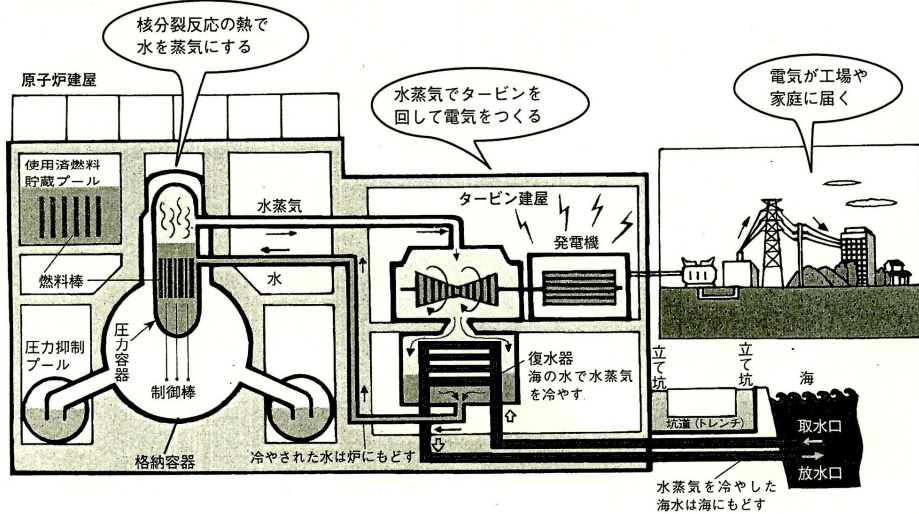


原子炉も再処理ももとは原爆製造のため

「原子炉」も使用済み核燃料を処理する「再処理工場」も元々は原子爆弾製造のための装置だったのです。

4. 原子力発電

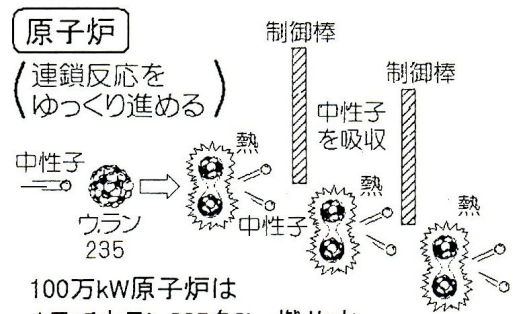
① 原子力発電の仕組み



原子力発電（沸騰水型）のメカニズム

上の図は、福島第一原子力発電所の原子炉と同じ沸騰水型軽水炉の仕組みです。タービン(羽根車)を回して発電する仕組みは水力発電、火力発電、原子力発電ともに同じです。火力発電は石油、石炭、天然ガスを燃やして水を沸騰させ水蒸気のでタービンを回して発電します。原子力発電はウラン 235 の核分裂反応で発生する大量の熱で水を沸騰させています。ここで使うウラン燃料は天然ウランではなく、ウラン 235 の割合を 3~5%にした「濃縮ウラン」です。このウランを円柱形に固めたペレットと呼ばれるものをジルコニウム合金の管（被覆管）に密封したものが燃料棒です。この燃料棒を束ねたものを燃料集合体といいます。1基の原子炉で使う燃料棒は 2 万本から 6 万本もの数になるので、核分裂の連鎖反応が暴走しないよう、中性子を吸収する働きを持つ制御棒を出し入れしてコントロールします。

タービンを回したあとの水蒸気は復水器で冷やされて水に戻ります。復水器では水蒸気を冷やすために大量の海水が必要なので、原発は海の近くに建てられています。軽水炉の軽水とは普通の水のことです。この水は冷却用であると同時に、核分裂を効率よくするための減速材としても使われます。日本に建設されている原発はすべて軽水炉ですが、沸騰水型と加圧水型の 2 種類があります。

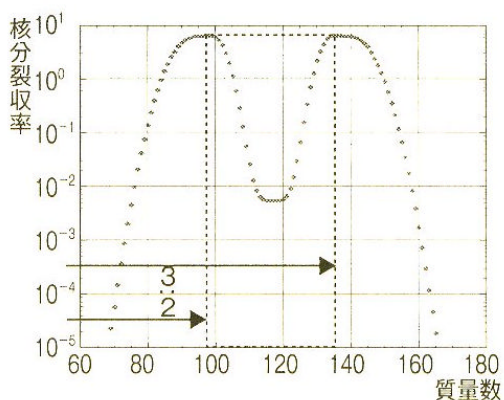


原子炉内での連鎖反応

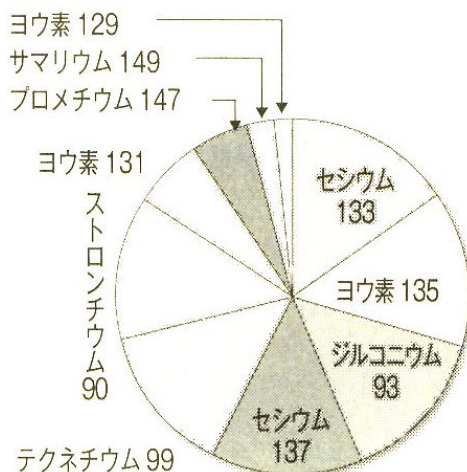
② 原子力発電に固有の問題

i. 放射性廃棄物が大量にできる

核分裂によって新しくできる物質を核分裂生成物といい、すべてが放射性物質である。原発を運転したあとに残る燃料棒が使用済み核燃料で、大量の放射性物質を含むので放射性廃棄物といわれる。最初のウラン燃料の持つ放射能に比べて、この使用済み核燃料のもつ放射能は数億倍の強さになる。



分裂生成物の収率 (ウラン235が熱中性子で核分裂を起こした場合の例) (出典:T.Nakagawa et al.編、
「Curves and Tables of Neutron Cross Sections
in JENDL-3.3, JAERI-Data/Code 2002-020(2002)」)



(課題 8) 100 万 kw の原発 1 基は、1 日に 3kg の ^{235}U を利用します。つまり、1 日に 3kg の放射性廃棄物が生じます。1 年間では 1095kg ($3 \times 365 = 1095$) になります。広島型原爆で 850g が核分裂したとすると、広島型原爆の 1000 発分 ($1095 \div 0.85 = \text{約 } 1288$) に相当します。

ii. 放射性廃棄物を最終処分する方法が確立していない

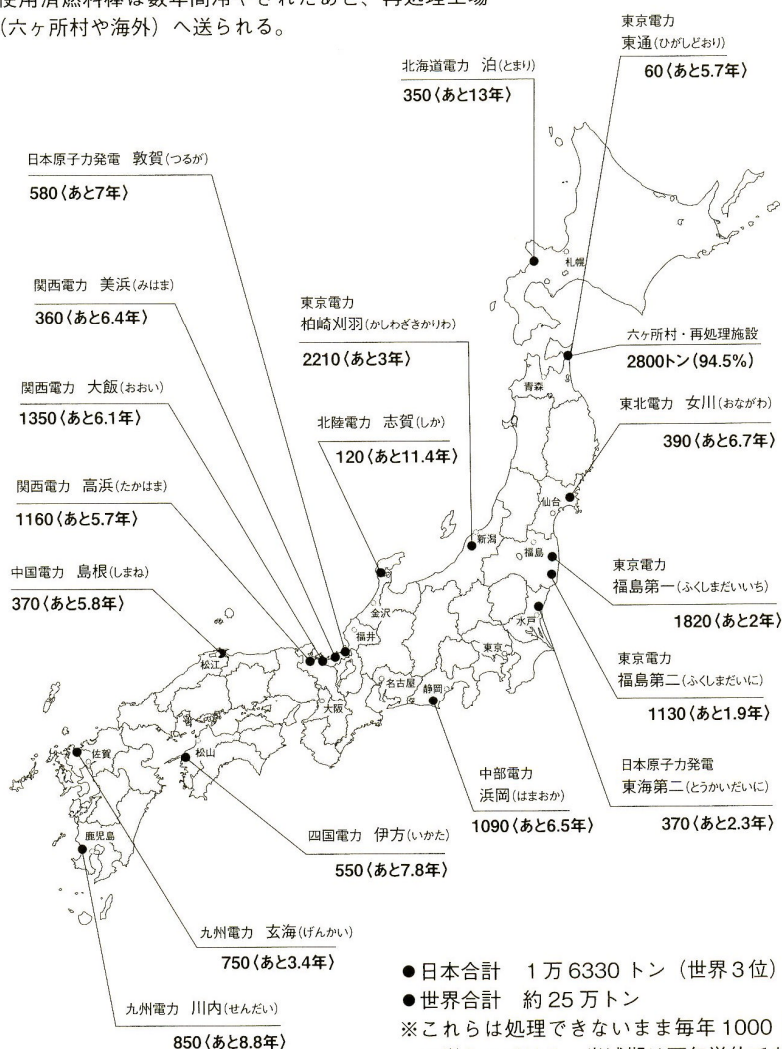
経済産業省は 2000 年に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」を制定しましたが、「核のごみ」の最終処分場は未だに決まっていません。日本の現行のエネルギー政策では、原発で燃やしたウランなど使用済み核燃料は、全量を再処理してプルトニウムを取り出し、MOX 燃料 (ウランとプルトニウムを混ぜた混合酸化物燃料) に加工して、既存の原発でプルサーマル発電として再利用することになっています。使用済み核燃料を再処理した後に残るのが、核のごみである高レベル放射性廃棄物で、日本ではガラスと混ぜて固化体として金属製の容器に詰め、地下 300 メートルより深い地盤の安定した地層に最終処分することになっています。高レベル放射性廃棄物の放射能はケタ違いに強く、「放射能が十分に減衰するまでに数万年かかるため、人間の生活環境から厳重に隔離する必要がある」(経産省資源エネ

ルギー庁) からです。海外ではスウェーデンとフィンランドが使用済み核燃料を地下に埋める最終処分場を決定しましたが、先進国では例がありません。

日本の電力会社が原発で利用した使用済み核燃料は、これまで英国とフランスに依頼して再処理してきたが、今後は電力会社が出資する日本原燃が青森県六ヶ所村で営業運転を目指す再処理工場で MOX 燃料を加工、高レベル放射性廃棄物をガラス固化する方針です。既に海外で再処理された日本の高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)は国内外に約 2500 本あり、「これまでに原発から出た使用済み核燃料を再処理すると、約 2 万 5000 本のガラス固化体が生まれる」(資源エネルギー庁)といわれています。この計画は日本原燃の再処理工場のトラブル続発で遅れに遅れています。

営業運転はこれまでに何度も延期となり、実質的な運転開始の目処はたっていない。その貯蔵管理施設に 6075 本まで一時貯蔵できるが、青森県は高レベル放射性廃棄物の実質的な最終処分場となることを拒否しており、将来的には別の場所に最終処分場を作っている。

ウラン換算トン、〈 〉内はあと何年で満杯になるか。
使用済燃料棒は数年間冷やされたあと、再処理工場(六ヶ所村や海外)へ送られる。



- 日本合計 1万6330トン(世界3位)
- 世界合計 約25万トン
- ※これらは処理できないまま毎年1000トンずつ増えつづける。半減期は万年単位である。

たまり続ける使用済核燃料棒

iii. 使用済み核燃料の再処理には困難が多く危険性も極めて大きい

青森県の六ヶ所村に再処理工場ができたが、トラブル続きでいまだに完成していない。使用済み核燃料の再処理は技術的に高度で危険性を伴い、事故を起こせば大変なことになる。世界的に再処理工場の爆発事故は、報告されているだけで 28 回も起きている。

表1 世界における再処理施設の火災・爆発事故例

| 本文の章 | 再処理施設等 | 発成年 | 事故の種類 | 原因 | 被害 | 防止対策 |
|------|--------------------------|------|--------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| 1 | 英国ウインズケール(セラフィールド) | 1973 | 抽出工程溶媒供給器の発火 | 有機溶媒の不溶性残渣による発火 | 運転員の被ばく等 | 不溶性残渣の除去工程の設置 |
| 2 | 米国サバナリバー | 1953 | 抽出工程蒸発缶の爆発 | TBP-硝酸ウラン錯体の急激な熱分解反応 | 機器の損傷、建屋の一部破壊、運転員2名負傷等 | 多量有機溶媒の混入防止 蒸発缶の加熱温度制限 |
| | | 1975 | 転換工程脱硝器の爆発 | 上記と同じ | 上記と同じ | 多量有機溶媒の混入防止等 |
| 3 | ロシアトムスク | 1993 | 抽出工程調整貯槽の爆発 | TBP-硝酸ウラン錯体の急激な熱分解反応 | 機器の損傷、建屋の破壊、放射性物質の環境への放出等 | 多量有機溶媒の混入防止 硝酸に対して反応性の低い希釈剤の使用等 |
| 4 | 旧ソ連キシテム | 1957 | 高レベル廃液貯槽の爆発 | 冷却系の故障による有機混合物(酢酸塩等)の爆発 | 多量の放射性物質の環境への放出等 | 独立した換気系と信頼性の高い計器の設置 |
| 5 | 米国ハンフォード・プルトニウム回収施設 | 1997 | プルトニウム回収施設の試薬貯槽の爆発 | 硝酸ヒドロキシルアミン(HAN)の急激な熱分解反応 | 機器、建屋の一部破壊等 | 運転管理の改善等 |
| 6 | 仏国ラアーグ | 1980 | 電源系の火災 | 電源系の短絡 | 応急措置により汚染等なし | 電源系の多重化等 |
| 7 | ベルギーユーロケミック・アスファルト固化処理施設 | 1981 | アスファルト固化体の火災 | アスファルトと硝酸塩の急激な化学反応 | 機器損傷、作業員の外部被ばく等 | 廃液の熱分析による事前確認等 |
| 8 | 日本動燃アスファルト固化処理施設 | 1997 | アスファルト固化体の火災 | アスファルトと硝酸塩の急激な化学反応 | 設備損傷、作業員の内部被ばく等 | 運転管理の改善等 |

[出典] 本文中の#SEEREFER(1)~(9)を基に作成

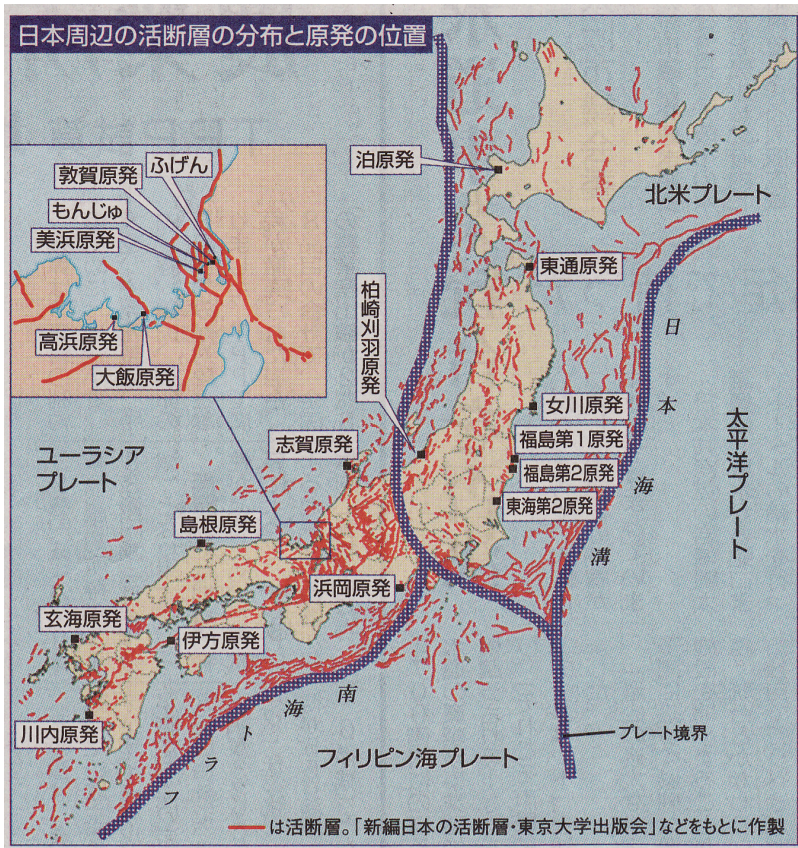
iv. 冷却材喪失で重大事故

原発の熱効率は 30%しかありませんから、1 基の発電量が 100 万 kw の原子炉の総熱出力は約 300 万 kw にもなります。電力に変えることのできない約 200 万 kw の熱は、冷却材を使って最終的に海へ捨てることとなります。冷却に使用される海水の温度は 7℃も高くなり、温排水として毎秒 70 トンもの量が海に出ていくこととなりますので、海洋の生態系に重大な影響を与えています。

(課題 9) 燃料棒にたまっている放射性物質からの膨大な熱(崩壊熱)で水がなくなり、空だき状態になります。水素爆発の危険性や燃料棒の溶ける炉心溶融(メルトダウン)が起これ、压力容器や格納容器が破壊されます。

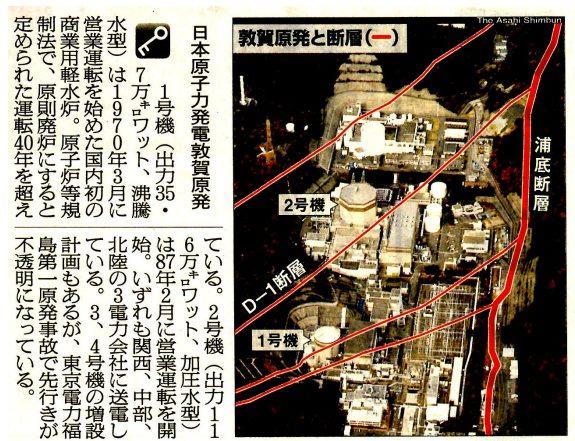
v. 「地震大国」

日本日本列島にはいたるところに活断層があり、いつ地震が起きてもおかしくありません。また、4 つのプレートの境界にあり、巨大地震や津波が多く発生してきました。日本の面積は地球の表面積のわずか 0.3%、そこに世界の地震の 10%が集中しています。原子炉などの重要施設を活断層の真上に作ることは当然認められていません。



日本周辺の4つのプレートと活断層の分布・原発の位置

2012年7月、全国の原発敷地内の再検証が行われた結果、動く可能性が否定できない断層が次々と浮上し、再調査が必要な原発は6か所にもなりました。2013年5月15日、原子力規制委員会は有識者らの評価会合を開き、本原電敦賀原発2号機直下の断層は耐震設計上考慮する活断層である」と断定する報告書をまとめました。



敦賀原発直下の断層

vi. 原子力発電の異質の危険性

チェルノブイリや福島第一原発事故を見れば明らかです。他の事故にはない放射能の影響で、広範囲の地域に数10年間も人が住めなくなるのです。

③ 原発に関連する事故

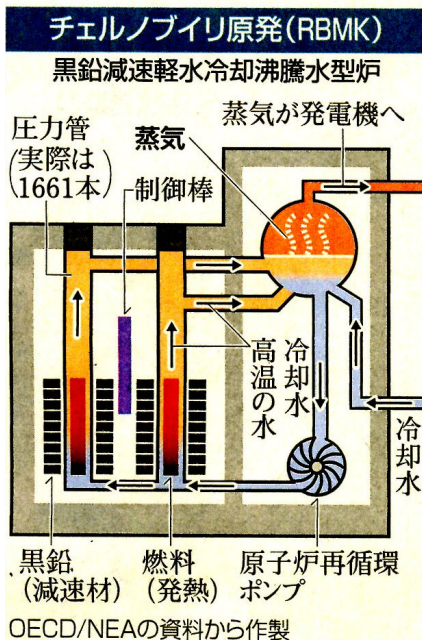
i. スリーマイル島原発事故

1979年、アメリカのスリーマイル島の原発が冷却水の給水ポンプが停止し、操作ミスが続いて原子炉内の水がなくなり、空だき状態となり水素爆発しました。後の調査で、原子炉の核燃料の半分ほどが溶けていることがわかりました。この原子炉1基から核燃料を取り出すのにおよそ10年かかり、原子炉など放射能で汚染された廃棄物をなくすことは今でもできていません。この事故の調査委員会は「原発は安全だと思いこんでいる安全神話を改める」と報告書に書いています。

ii. チェルノブイリ原発事故

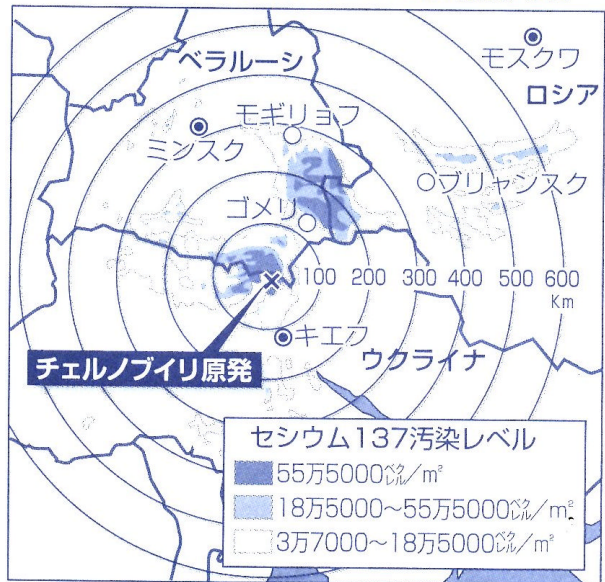
1986年4月26日、旧ソ連(現在のウクライナ)でチェルノブイリ原発事故が起きました。この原子炉は「黒鉛減速軽水冷却沸騰水型炉」で福島の「沸騰水型軽水炉」と構造は違いますが、操作ミスが重なり4基のうちの1基が暴走し、水蒸気爆発を起こして放射性物質を全地球にばらまきました。原子炉に近づくことも核燃料を取り出すこともできないので、5000トンもの大量の砂やコンクリートと鉄板で囲われ「石棺」と呼ばれる状態で管理されています。

汚染地域は、14万5千km²で、日本面積の40%に相当します。強制移住地域は1万km²もあり、東京都の4.57倍の面積と同じになります。



チェルノブイリ原発の模式図

チェルノブイリ原発事故による放射能汚染



チェルノブイリの放射性物質の汚染地図

iii. JCO の臨界事故

1999年9月30日、東海村にあるJCOの核燃料加工施設内で核燃料を加工中に、ウラン溶液が臨界状態に達し核分裂連鎖反応が発生し、約20時間持続しました。これにより、至近距離で中性子線を作業者3名中2名が死亡、1名が重症となった他667名の被爆者を出しました。この事故で亡くなった2名の被曝量は、推定でO氏(当時35歳)が16~20Sv以上、S氏が6~10Svでした。このときに核分裂したウラン燃料はわずか1mgとされています。図にあるように、O氏の染色体は放射線によってばらばらに断ち切られていました。O氏の皮膚はひどくただれてしまい、皮膚の移植手術も行はれたが、治癒しませんでした。



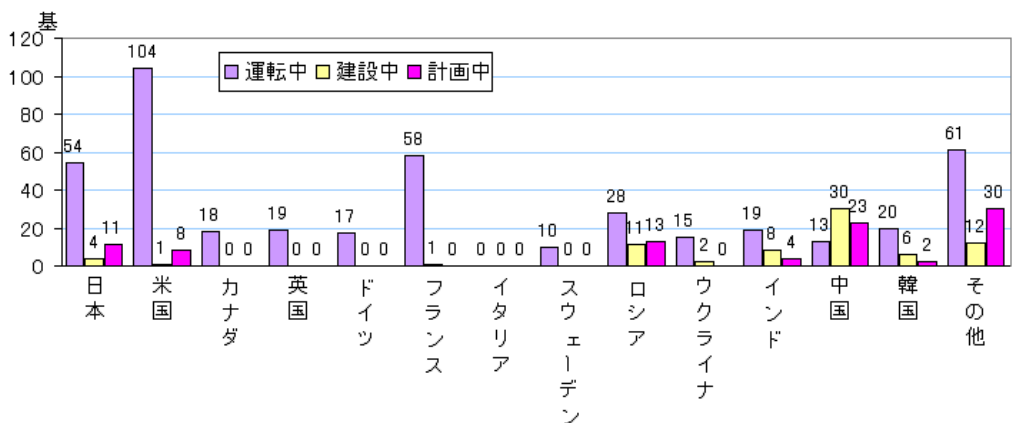
左は正常な染色体の顕微鏡写真(順番に並べたもの)。右は高線量被曝によりばらばらに破壊されたO氏の染色体の顕微鏡写真(被曝4日目)

5章 福島原発事故とエネルギー問題

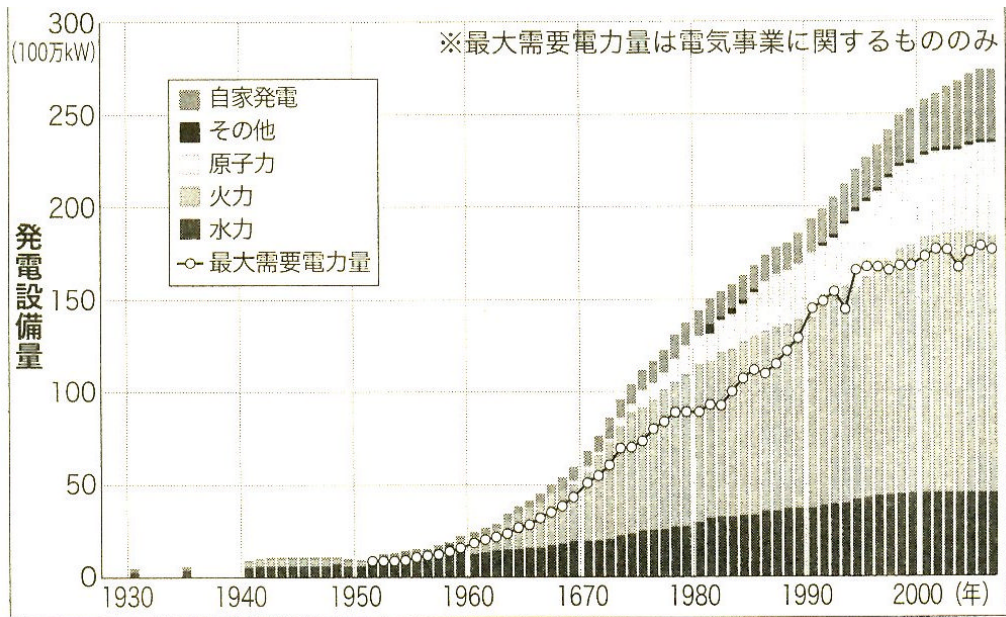
1. 国の電力政策と原子力発電

① 日本の原子力発電の現状

(課題10) 日本の原発数は2011年時点で54基でした。2013年5月現在、福島原発の4基が廃炉になり、稼働中の原発は大飯原発3・4号機の2基のみになっています。



世界の原子力発電開発の動向(2011年1月1日現在)



日本の発電設備容量と最大需要電力量の推移

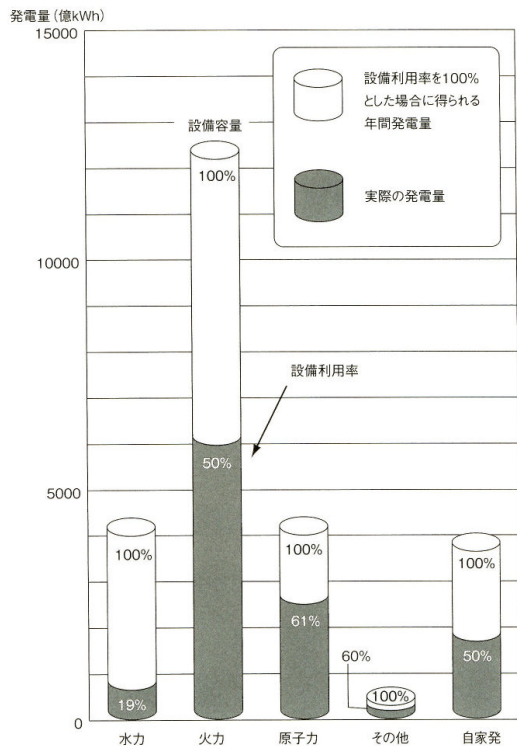
(課題 11) 2000 年代の発電設備容量は、火力が最も大きく次いで原子力と水力がほぼ等しくなっています。原発は 1960 年代後半から運転を開始し、徐々にその数を増やしてきました。

原発は出力の調整が難しいので、その稼働率を高めるために水力や火力の稼働率が低く抑えられてきました。右の図では原子力の設備利用率が 61% になっていますが、1990 年代後半には 80% 前後もありました。

上の図で最大需要電力量の推移をみると、1990 年代の一時期を除いて、原子力なしでも火力と水力でまかなえています。

原子力の設備利用率から発電量は約 250 億 kwh になります。これを火力の設備容量で見ると約 20% ですから、火力の設備利用率を 70% にすればよいのです。

●火力は 50%、水力は 19% しか使われていない



2008 年 電気事業連合会の資料より作成

日本の発電設備容量と設備利用率

② 「第五福竜丸事件」と原水爆禁止運動

- i. 1954年3月1日の朝、アメリカは太平洋沖のビキニ環礁で水爆実験を行いました。この水爆の威力は、広島に落とされた原爆の千倍以上もの爆発力を持っており、死の灰（放射線降下物）は指定された「危険区域」をはるかに超えて広がりました。その頃、遠洋マグロ漁船だった第五福竜丸は、ビキニ環礁の東160kmの海域へ漁にでかけていました。船の乗務員は巨大な火の玉を目撃し、大きな音を聞きました。そして、その3～4時間後に放射能に汚染された白い雪のような珊瑚礁の破片が降ってきました。それを浴びた乗務員全員がその直後から急性放射線障害の症状となり、同年9月23日には、無線長だった久保山愛吉さん(当時40歳)が亡くなりました。また、港へ帰りつく他の漁船のマグロからも放射能が検出され、原爆マグロと呼ばれて457トンもの魚が廃棄処分になりました。国内には放射能の雨がふり、実験の被害は広がっていき、平和なくらしがおびやかされました。

■Wikipedia ビキニ環礁より

1954年3月1日、ビキニ環礁で行われた水爆実験（キャッスル作戦）では、広島型原子爆弾約1000個分の爆発力(15Mt)の水素爆弾（コード名ブラボー）が炸裂し、海底に直径約2キロメートル、深さ73メートルのクレーター（通称、ブラボー・クレーター）が形成された。このとき、日本のマグロ漁船・第五福竜丸をはじめ約1000隻以上の漁船が死の灰を浴びて被曝した。また、ビキニ環礁から約240km離れたロンゲラップ環礁にも死の灰が降り積もり、島民64人が被曝して避難することになった。

- ii. 1954年5月、東京都杉並区の母親達が「核兵器をなくし核実験をやめさせよう」と署名運動を始めました。この署名は、翌年の8月には3000万人を突破しました。これらの運動を背景に、原爆が投下されてから10周年を迎えた1955年8月に、広島で「第1回原水爆禁止世界大会」が開催されました。アメリカ、オーストラリア、中国など11カ国50人の代表を含め5000人が参加、原水爆禁止を求める署名が、日本で3238万、世界で6億7000万集まったと報告されました。また、有名な「ラッセル＝アインシュタイン宣言」が1955年7月9日に決議されました。

③ 原発建設の流れ

- ・1955年12月、「原子力基本法」成立

『第二条 原子力利用は、平和の目的に限り、安全の確保を旨として、民主な運営の下に、自主的にこれを行うものとし、その成果を公開し、進んで国際協力に資するものとする。』【原子力三原則】

- ・1955年11月から12月にかけて、読売新聞とアメリカ政府(広報庁)の共催で、原

子力平和利用博覧会が日比谷公園で開催され、入場者が 36 万人を超えました。このあと、日本各地で朝日新聞や地元の新聞もアメリカ広報庁と共催して開き、260 万人もの入場者がありました。

- 1955 年 11 月 14 日ワシントンで、日米原子力協定が調印されました。アメリカから日本への濃縮ウラン貸与協定で、研究原子炉用に濃縮ウラン 235 を、6 キロを限度にアメリカから日本に貸与すること、使用済み燃料のアメリカへの返還、貸与燃料を目的どおり使用することを義務化し、その記録を毎年報告することが協定されました。

- 1957 年、日本原子力発電株式会社が、民間 8 割・政府 2 割の出資でつくられました。

- 1959 年「大型原子炉の事故の理論的可能性及び公衆損害額に関する試算」

福島で起きた原発事故の規模で試算すると、放出パターンと気象条件によっては、数百名の致死者、数千人の障害、100 万人程度の要観察者が出る。物的損害は、最悪の場合 1 兆円以上に達するとされました。この内容は、長く非公開だったが、1998 年に正式に全文が公開されました。

- 1961 年、「原子力損害賠償法」がアメリカにならって制定されました。これは、事故の賠償責任を一定額に制限し、それ以上の被害が出たら国が国会の議決を経て援助を行うこと、つまり国民の税金でまかなうことを決めたものといえます。

《プライス・アンダーソン法（1957 年制定）

原子力損害の賠償に関するアメリカの法律。原子力損害が起きたときの事業者の責任は、賠償措置額に上限（約 126 億ドル）を設ける、いわゆる「有限責任主義」をとっています。》

- 1965（昭和 40 年）5 月 4 日、茨城県東海村にイギリス製の原子炉を使った発電所が、初めて臨界に到達し、日本初の商業用原子炉となりました。その後 27 年間の営業運転を経て、1998（平成 10）年 3 月 31 日に営業運転を停止しました。この最初の原子炉以外、日本にある原子炉は全てアメリカの企業とターンキー契約を結んで建設したものです。

《ターンキー契約

工場や発電所などのプラントの建設の請負契約において、全体を一括して請け負って試運転を行い、スイッチを入れればすぐ運転を開始できる状態にして引き渡すことを約束した契約のこと。》

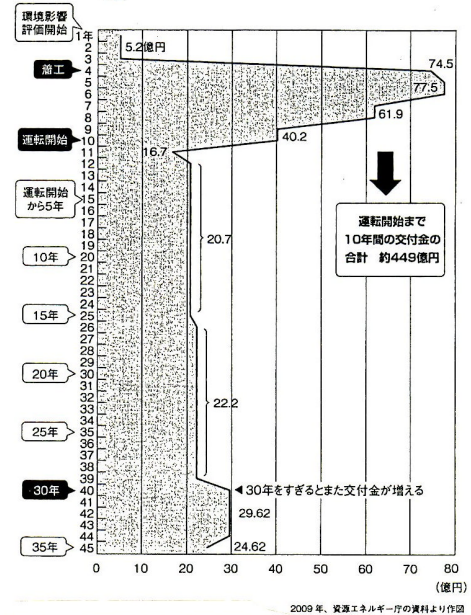
- 1974 年、田中角栄内閣のもとで、電力に関する 3 つの法律電源三法が成立しました。これに基づいて、原発のある県や市町村は多額の交付金を毎年もらえることになりました。最新型の原発を誘致した町は 45 年間で 2455 億円ものお金をもらうことができます。この交付金は、いったいどこから出てきたお金でしょうか。実は、

電気料金の中に含まれている「電源開発促進税」という税金が元手になっていて、交付金として姿を変え、原発のある町に支給されています。「電源開発促進」という名目にもかかわらず、この税収の7割が原発関連に使われているのです。こうして、1970年代から1990年代にかけて、過疎に悩む町に原発が増えていった。しかし、交付金があっても、原発施設を拒否する市町村も数多くあった。たとえば、新潟県巻町では、1996年8月東北電力による原発建設計画に61%の住民が反対して、計画はなくなりました。

電気料金は総括原価方式という、必要経費に事業報酬（利潤）を足したものから算出されています。事業報酬は、電力会社が持っている「資産」に一定の報酬率（約3%）を掛けたものです。つまり、巨費を投げれば投じるほどその分余計にもうかる仕組みになっているのです。

●自治体への交付金は運転開始までが高い

●交付金は運転開始前が多額で、その後は急速に減る。
財政難になった自治体が、新しく原発をつくるように誘致するケースもある。



自治体への原発交付金

④ 原子力にまつわる四つの「神話」

i. 安全神話

原発は安全と思わせるために、危険性を軽視または無視した非科学的な主張。

◎確率的安全評価論 … 原子力事故の確率はきわめて低く、事実上起こらないという考え方。

- ・ 原発で起こる重大事故の確率は、10億年に1回。（アメリカ原子力規制委員会）
→1979年のスリーマイル島原発事故を受け、アメリカは「安全神話」と決別。
- ・ 原発で大事故が起きる確率は50億分の1で、これは人が隕石にあたる確率と同じくらいだ。（1977年福島第1原発の関係者）

◎多重防護論 … 炉心溶融（メルトダウン）が起こっても、四重・五重の防護壁に守られているため、放射能が外に漏れ出すことは絶対にないという考え方。

- ・ 文部科学省は小中学生向けの旧副読本で、『原子力発電所では、これらの放射性物質を閉じこめるため「五重の壁」を設けています。万一、事故発生とい

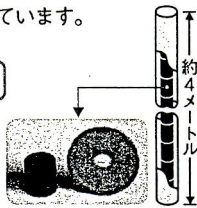
う事態になっても周辺環境への放射性物質の放出を防止できるよう、何重にもわたる安全設計を行っています。』と書いているのです。

五重のかべ

ウランの核分裂によって発生する物質を「核分裂生成物」といいます。この中には非常に強い放射能を持つものもふくまれているので、放射性物質を管理する上で最も重視されます。原子力発電所では、これらの放射性物質を閉じ込めるため五重のかべを設けています。万一、事故発生という事態になっても周辺環境への放射性物質の放出を防止できるよう、何重にもわたる安全設計を行っています。

第1のかべ

ペレット
ウランを焼き固めたもの。



第2のかべ

燃料棒(被覆管)
ペレットを入れた合金製の細い丈夫な管。

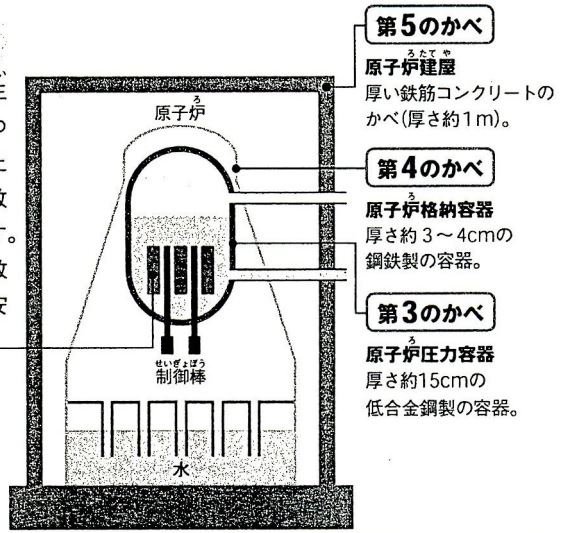


図 16. 原子力発電所の五重の壁

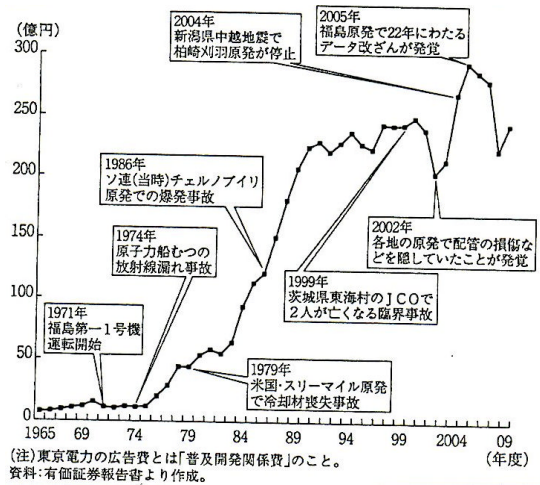
《文部科学省が発行した旧副読本》

| 旧副読本 | |
|--------|---|
| 発行主体 | 文部科学省、経済産業省資源エネルギー庁 |
| 発行年月 | 2010年2月 |
| 副読本の種類 | 「わくわく原子カランド」(小学生用) 「チャレンジ!原子カワールド」(中学生用) |
| 主な特徴 | <ul style="list-style-type: none"> ●原子力の推進側に偏っている。 ●実際、福島第一原発の事故後に、文部科学大臣自らが「事実と反した記載がある」などと発言して、副読本が回収された。 |
| 入手方法の例 | 国立国会図書館のデジタル・アーカイブ事業で保存されたページで入手可能。 |

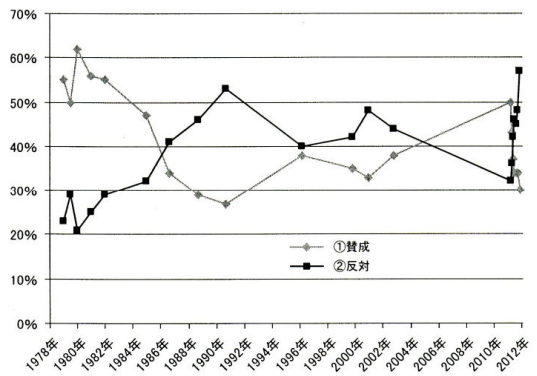
日本の原子力に関する国の旧副読本と特徴

◎ 宣伝効果

- ・ 図 17 のグラフは、東京電力の広告費の推移を表したものです。このグラフから、東京電力の宣伝費は 1960 年代に比べ大幅に増加しています。
- ・ 大手新聞社の紙面に、「安全」を訴える全面広告を出しました。
- ・ 原発招待旅行を実施し、原発内部の見学会を催し「安全」を PR しました。
- ・ 右の図は、朝日新聞全国世論調査における「原発利用の賛否」を表したものです。1986 年までは、原発利用に賛成する割合が高かったのですが、この年に起きたチェルノブイリ原発事故の影響で賛否が逆転しました。しかし、福島原発事故の直前では再び賛成する割合が高くなっています。巨額の宣伝費が効果をあらわしたといえます。



東京電力の広告費の推移



原発利用の賛否

ii. 化石燃料には限りがある

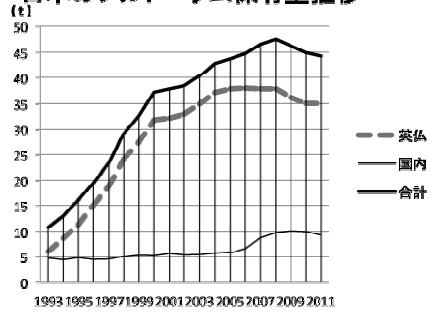
A. 化石燃料が枯渇するので、原発は必要だという主張があります。しかし、ウランも鉱物なので当然限りがあります。そこで考え出されたのが、使用済み核燃料を再処理して燃料にしようという計画です。プルトニウムとウランを混ぜた燃料を高速増殖炉という特殊な原子炉で燃やすと、発電しながら使った以上のプルトニウムを作ることができると期待されました。「もんじゅ」、**「常陽」**と名付けた高速増殖炉がつくられましたが、2つとも事故やトラブルが続き、実用化のめどは全くたっていません。欧米各国では、技術的に困難が多い高速増殖炉については、事故を起こしやすく多額の費用がかかるため開発をやめてしまいました。

「もんじゅ」は 1995 年、試験運転中にナトリウム漏れで火災が発生し止まったままでした。2010 年に 15 年ぶりに動かしたものの、事故でまたも停止しました。

この間に使われた税金は 1 兆円以上です。また、「もんじゅ」は発電していなくても安定した状態で管理するのに、1 日 5500 万円もの費用がかかるのです。

B. プルトニウムは核兵器の材料になるので、日本は余分なプルトニウムは持たないことを国際的に約束しています。ところが、高速増殖炉が実現する前提で使用済み核燃料の再処理をイギリスやフランスに頼み、45トンのプルトニウムを抽出、一部は日本に保管されています。このプルトニウムを消費するため、ウランとプルトニウムの混合燃料（MOX 燃料）をいまの原子炉で使うプルサーマル計画が進み、一部実用化されました。プルトニウムはウランより 20 万倍も放射能毒性が強く、核分裂しやすい物質で扱いが難しいのです。ウランを燃料とする設計の原子炉で、MOX 燃料を燃やすのは、「石油ストーブの灯油にガソリンを混ぜるようなもの」との不安が専門家からも出ています。しかも、大間に建設予定の原発は、フル MOX 燃料で運転することになっています。記事は「もんじゅ」に関する朝日新聞掲載の記事です。

日本のプルトニウム保有量推移



もんじゅ処分

もう再開はありえない

原子力規制委員会が高速増殖原型炉「もんじゅ」の使用停止を命じる方針を固めた。

中性子検出器など最も安全が求められる機器を含め、1万近い機器の点検を怠っていた。規制委による処分は当然だ。

点検放置の背景には、原発の使用済み燃料からプルトニウムを再利用する核燃料サイクル事業の行き詰まりがある。

国は一日も早くサイクル政策を捨て、もんじゅの廃炉を決めるべきだ。

高速増殖炉は燃やした以上のプルトニウムができるとして、かつては「夢の原子炉」ともいわれた。だが、経済性が低く、各国は次々に撤退した。

94年に運転を始めたもんじゅは、95年のナトリウム漏れ事故などでほぼ止まったまま。それでも、ナトリウムを熱して循環させることなどに年間約200

億円を費やしている。

事業主の日本原子力研究開発機構は、運転再開の旗を降ろさず、09年にそのための点検計画をつくった。しかし翌年から放置が始まっていた。

原発事故でサイクル政策自体が宙に浮いているうえ、直下に活断層がある疑いも出ている。近い将来に運転再開が望める状況にはない。

もんじゅの所長は、朝日新聞の取材に「現場はいつ運転再開するか分からず、いつまでに点検すればよいか、組織全体で認識を共有していなかった」と語った。目標を見失った組織のゆるみは明らかだ。

鈴木篤之・原子力機構理事長の責任は大きい。

もんじゅでは、旧動力炉・核燃料開発事業団（動燃）の時代から事故隠しなどが何度も問題になった。旧日本原子力研究所

（原研）との統合後、安全研究畑の理事長が就くことが増え、鈴木氏も東大教授、原子力安全委員長を経て、10年から理事長を務める。

だが、今回の点検放置について鈴木氏は、原子力規制庁長官から報告命令を受けた際、「形式的なミスはやむを得ない」と口走った。トップがこの程度の認識では、安全文化を定着させることはできない。

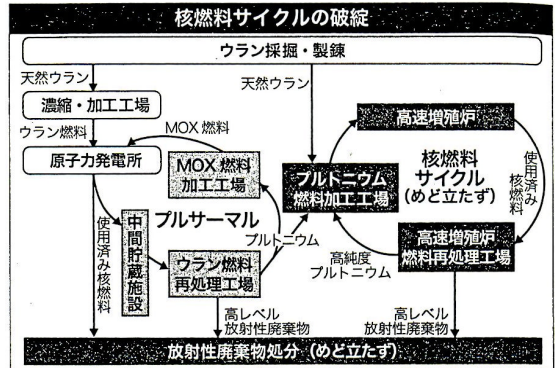
原子力機構は、原子力安全の研究でも国内有数の組織だ。

私たちは社説で脱原発を主張しているが、もんじゅを含め原発やその関連施設は「止めれば終わり」ではない。

原子力の研究者や技術者は、安全な後始末のために使命を担ってほしい。

国はそうした観点から、原子力機構の組織と意識を抜本的に改める必要がある。

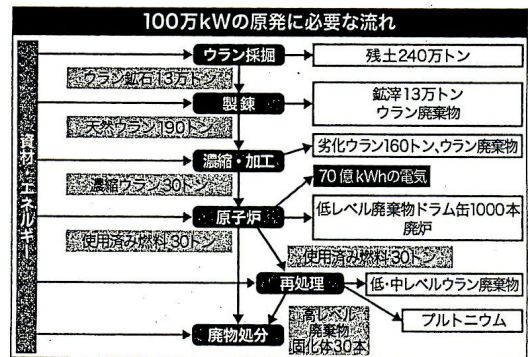
C. 使用済み核燃料を処理・保管するために、青森県六ヶ所村に再処理工場が建てられました。全国から使用済み核燃料を集めて処理しようとしたのですが、ここでもトラブル続きで完成が大幅に遅れています。この再処理工場の建設費は7600億円とされていましたが、現在すでに2兆2000億円もの費用がつきこまれています。以上のことから、国や電力会社が推し進めている核燃料サイクルの計画は破綻しているといえます。



核燃料サイクルの破綻

iii. 原発はCO₂を出さない

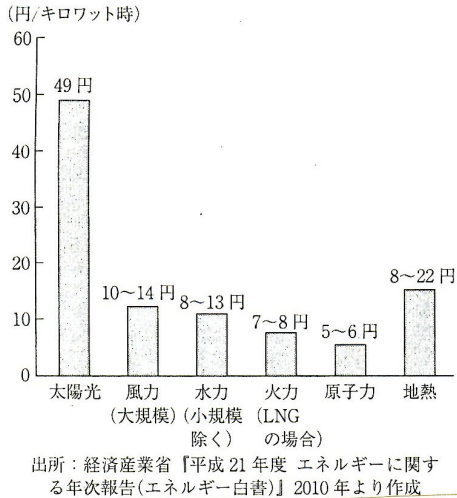
「原子力は二酸化炭素を出さないから、環境に優しいエネルギー」といわれます。正しくは、「原子力は発電時に二酸化炭素を出さない」です。ウラン山から採掘される天然ウランにはウラン 235 が 0.7%しか含まれていません。これを数%に濃縮して燃料ペレットにし、さらに燃料棒の形にして使います。こうしたそれぞれの工程（図）で使われるエネルギーは、ほとんどが石油などの化石燃料です。また発電所建設にもたくさんのエネルギーが使われていることから、原発が動くまでに、多くの化石燃料を消費し大量の二酸化炭素を放出しているのです。さらに、処理方法が確立していない「使用済み核燃料」の問題や「温排水」の問題などを考えると、環境に優しいとはとても言えません。



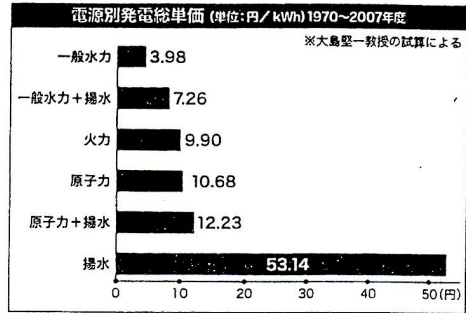
100万kwの原発に必要なウラン燃料の流れ

iv. 原発のコストは安い

次の図は政府による電源別の発電コストを示しています。この図によると、発電コストが一番低いのは原子力です。ところがこの計算には、実態を反映していない部分があったり、必要な費用が含まれていなかったりしています。そこで発電に直接必要な費用のほか、再処理の費用、開発や立地に投入される国の財政支出などを組み込んで計算すると、図のようになります。この図で最もコストが低いのは一般水力ということになり、原子力は水力や火力と比べると発電コストは高くなっています。揚水発電の分も考慮すると、コストはさらに高くなっていきます。



電源別発電コスト



*揚水発電とは…夜間に下流のダムから上流のダムに水をくみ上げておき、昼間の電力ピーク時に放水してタービンをまわすという発電方法。大きい揚水発電所なら原発1基分の発電ができ、東電だけでも1050万kWの揚水発電能力を持っている。

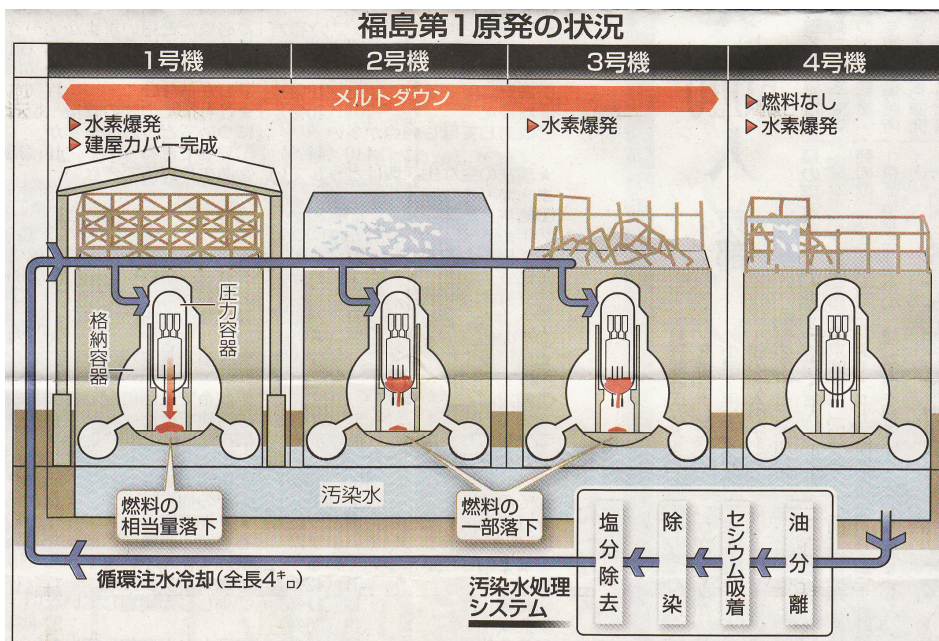
電源別発電総単価

2. 福島原発事故と「安全神話」の崩壊

① 福島第一原発はどんな事故を起こしたか

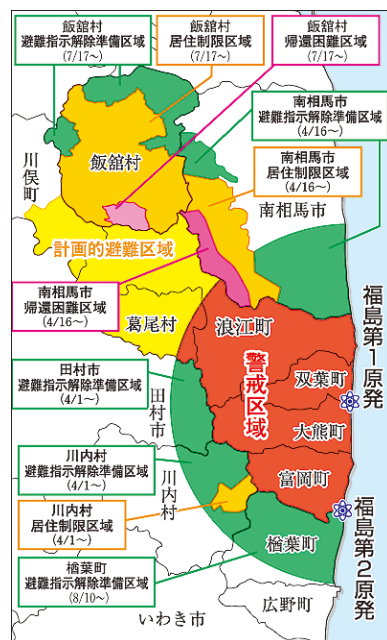
- i. 東北地方太平洋沖地震 …… 2011年3月11日14時46分、マグニチュード9.0の巨大地震が発生した。地震センサーがはたらき、制御棒を燃料棒の間に押し込む装置が作動し、核分裂反応が止まり原子炉は停止しました。(緊急停止)
政府が半径3km圏内に避難指示、10km圏内に屋内退避を指示しました。
- ii. 外部電源喪失 …… 発電所に送電する受電鉄塔が地震のために倒壊し、外部電源が断たれ、非常用ディーゼル発電機が起動しました。
- iii. 全電源喪失 …… 巨大津波の影響で、非常用も含め全電力の供給が途絶え、ECCS(緊急炉心冷却装置)も作動しなくなり、安全確保に必要な炉心の冷却機能が完全に失われました。同時に、原子炉建屋内にあった使用済み核燃料プールの冷却機能も失われました。
- iv. ベント …… 燃料棒被覆管の表面で300℃であった燃料温度は、毎秒5~10℃の割合で上昇し、1000~2000℃になりました。圧力容器の圧力が上昇し、容器の保護のため炉内の水蒸気を外部に排出(ベント)する操作によって、放射性物質が拡散されました。
- v. メルトダウン …… 水が蒸発して水位はさらに下がり、燃料棒は水面上に露出した。燃料棒が露出すると、温度が急上昇し、1800℃を超えたところで燃料棒被覆管(ジルコニウム合金)が融解、さらに2400℃を超えると燃料本体も融解し、炉心溶融(メルトダウン)が起きました。溶けた高温の燃料は、圧力容器の底を貫通し、一部は格納容器も貫通してコンクリートまで達しました。

- vi. 水素爆発 …… 高温になった燃料棒被覆管のジルコニウム合金が水蒸気と反応して水素が発生した。発生した水素が蓄積し、火花などで爆発が起こった。1号機の建屋が損壊し、格納容器が損傷した。2号機の格納容器の下部にある圧力抑制室が損傷。このときドライベントを実施した結果、大量の放射能を大気中に放出した。3号機（MOX 燃料使用）の建屋損壊。4号機の建屋損壊。



- vii. 放射能汚染 …… 事故後 1 ヶ月の時点で、大気中に放出した放射性物質(死の灰)の総量は、ヨウ素 131 換算で 85 万テラベクレルと発表されました (海への放出分は含まれない)。これは、チェルノブイリ原発事故 520 万テラベクレルの 16% に達する量です。この結果、原発を中心に広い範囲にわたって土壌が汚染されました。

- viii. 避難区域 …… 2011 年 3 月 12 日、原子力災害特別法に基づき、避難指示区域および屋内待避区域が設定された。さらに、汚染の広がりが確認され、住民の健康のために、4 月 22 日に警戒区域・計画的避難区域・緊急時避難準備区域が定められました。2012 年 8 月 14 日現在の避難者数は、約 16 万 2000 人です。



第1原発「警戒区域」

② 「安全神話」の崩壊

原発を推進してきた勢力（国，電力会社，企業，研究者，メディア）がまき散らした「安全神話」は、福島原発事故により完全に崩壊した。

◆崩れた「五重の壁」

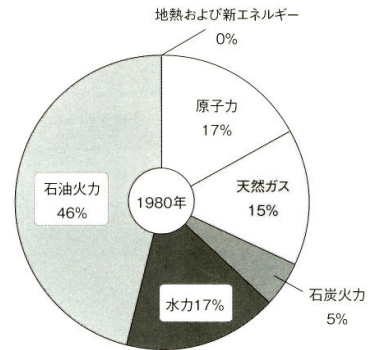
（課題 13）

- ・第1の壁（ペレット）…… 温度が2400℃を超え、燃料そのものが溶融しました。
- ・第2の壁（燃料棒被覆管）…… 温度が1800℃を超え、ジルコニウム合金でできた被覆管は溶融しました。
- ・第3の壁（原子炉压力容器）…… 炉心溶融（メルトダウン）により压力容器の底が貫通しました。
- ・第4の壁（原子炉格納容器）…… 溶けた燃料で貫通した，水素爆発の影響で格納容器が損傷しました。
- ・第5の壁（原子炉建屋）…… 水素爆発で建屋が損壊しました。

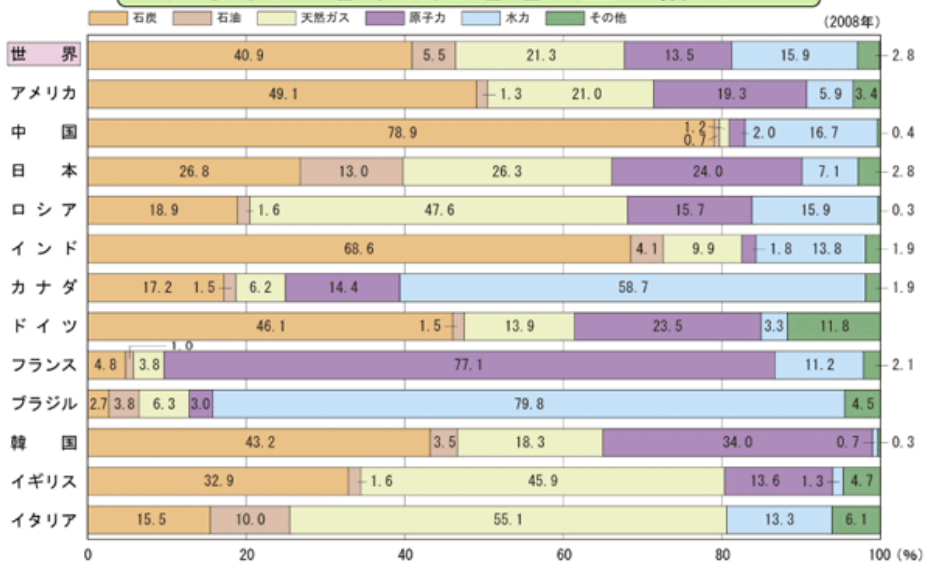
3. 日本の自然エネルギー

①日本のエネルギーシフト

（課題 14）1980年は、火力の中では石油火力の発電量が最も多くて46%、次に天然ガス15%、石炭火力は5%にすぎません。原子力は、石油火力に次いで2番目、17%を占めています。



主要国の電源別発電電力量の構成比



（注）四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある

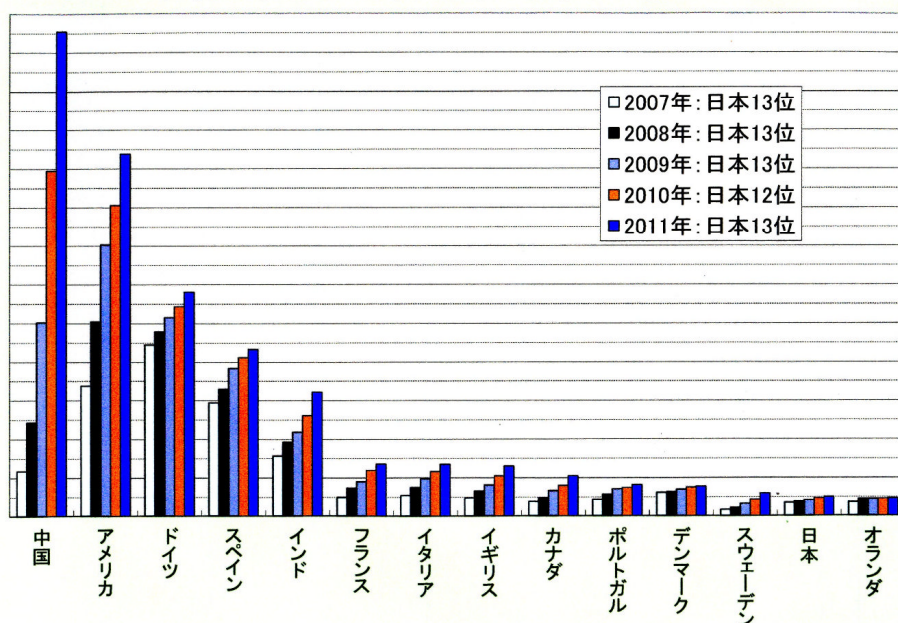
(課題 15) 前ページの図は「原子力・エネルギー」図面集 2011 より引用しています。

- ・アメリカの特徴は、石炭火力が半数近くを占め、原子力が 5 分の 1 を占めていることです。
- ・ドイツの傾向はアメリカに似ていますが、その他が 1 割を超えています。これは、ドイツが自然エネルギーの普及に力を入れていることを示しています。原子力がまだ 4 分の 1 ありますが、ドイツのメルケル政権が、昨年 3 月 11 日の東日本大震災による原発事故を受け、シュレーダー政権時の「2022 年全停止」(脱原発) へと政策スタンスを元に戻しました。二転三転したのち、「脱原発」へと民意の合意形成がようやく整ったわけで、福島第一原発の放射能漏れ事故が、ドイツ国民にも強い衝撃を与えたのでした。
- ・イタリアでは旧ソ連で起こったチェルノブイリ原発事故を受け、1987 年の国民投票で原発廃止となっていました。ところが、これに対して原発推進派のベルルスコーニ政権が台頭したことで、再び原発を新設するかどうかが問われていました。原子力発電所を再開するかどうかの国民投票が実施された結果、再開への反対票が 94% となり、脱原発へと民意が傾いていることが確認されました。

(課題 16) 1980 年と 2011 年の日本の電源別発電量を比較すると、石油火力が大幅に減って石炭火力と天然ガスが増えています。また、原子力 4 分の 1 近くを占めるまでになっています。これらに対し、その他(自然エネルギーなど)はほとんど増えていません。

② 風力発電

世界の国別風力発電導入量[万kW]



(課題 17) 風力発電の設備容量は、2009 年までアメリカがトップでした。しかし中国が急激に設備容量を伸ばし、現在では世界 1 位です。

日本の風力発電設備の技術力は世界トップクラスだが、海外に比べて普及は進んでいません。その要因は、原子力発電への依存度が高く、ドイツのような自然エネルギーへの手厚い普及政策がとられていないことにあります。2011 年の環境省の試算では、国内で 2400 万～1 億 4000 万 kw の潜在能力があるととしています。

③ 太陽光発電

(課題 18) 太陽光発電の設備容量はドイツが断然トップです。日本はスペインに次いで 3 位になっています。

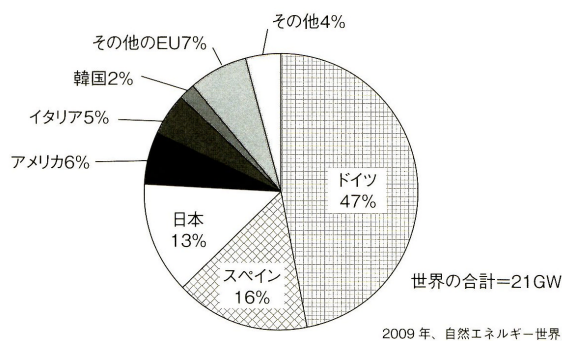
日本の技術力は世界一といわれますが、2005 年の補助金打ち

切りで伸び悩み、太陽光発電の設備容量は世界 1 位から 3 位へ転落しました。太陽電池生産量もかつては世界 1 位で、世界市場シェアの 50% を占めていましたが、現在では、中国、アメリカについて 3 位です。2009 年のシェアは 14% にまで落ち込んでいます。

④ 地熱発電

(課題 19) 日本の地熱資源量は世界 3 位ですが、設備容量では 6 位にとどまっています。世界では、2005～2010 年の 5 年間に発電量が約 20% 増加しました。日本では 2000 年以降、地熱発電所の新設はなく、発電量は総発電量のわずか 0.2%、およそ 53 万 kw にすぎません。一方、日本の地熱発電に関する技術は高く、2010 年時点で日本企業が世界の地熱発電設備の 70% を供給しています。今後が期待できる発電方法です。

●太陽光発電の設備容量・上位 6 カ国



Data9-9-E 国別の地熱資源量と発電量

| 国名 | 活火山数 (個) | 地熱資源量 [MW] | 地熱発電導入量 (2008) [MW] |
|----------|----------|------------|---------------------|
| インドネシア | 150 | 27,791 | 992 |
| 米国 | 133 | 23,000 | 3,040 |
| 日本 | 100 | 20,540 | 535 |
| フィリピン | 53 | 6,000 | 1,970 |
| メキシコ | 35 | 6,000 | 958 |
| アイスランド | 33 | 5,800 | 575 |
| ニュージーランド | 19 | 3,650 | 632 |
| イタリア | 14 | 3,267 | 811 |

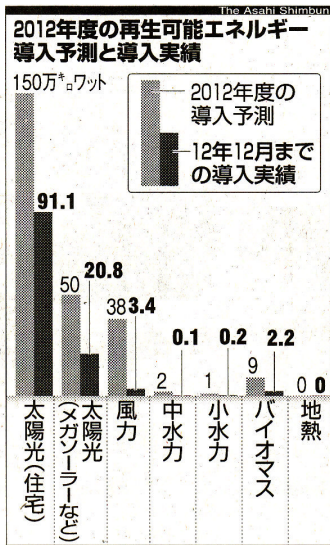
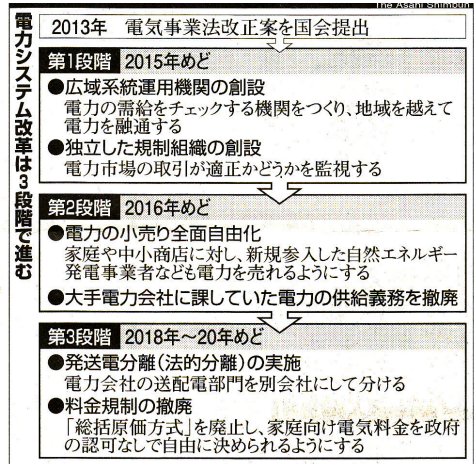
産業技術総合研究所の資料より作図

(課題 20) 再生可能エネルギーについての調べ学習なので、インターネットの活用など生徒の自主的な取り組みを援助する。

《教師の課題》

日本で再生可能エネルギーがなかなか普及しない背景には、「国のエネルギー政策」と「電力会社の独占体制」があります。

- ① 2013年2月8日 経済産業省・電力システム改革専門委員会の報告書
- ② 固定価格全量買い取り法 (FIT 法) と制度上の課題



■制度上の課題 (資源エネルギー庁の資料から)

| 発電の種類 | 関連法 | 所管省庁 | 課題 |
|--------|-------|-------|----------------------------|
| 地熱 | 温泉法 | 環境省 | 温泉地域での地熱発電の設置許可の早期化、柔軟化 |
| 小水力 | 河川法 | 国土交通省 | 農業用水などでの発電では、許可手続きを簡素化 |
| 風力・太陽光 | 農地法 | 農林水産省 | 優良農地確保に支障を生じない場合は農地の転用を柔軟化 |
| 太陽光 | 電気事業法 | 経済産業省 | 保安規制の緩和 |
| すべて | 電気事業法 | 経済産業省 | 再生可能エネルギーの電気を送電線に接続しやすくする |

固定価格全量買い取り法 (FIT法)

太陽光、風力などによってできる電気を固定価格で一定期間、電力会社が買い取る制度を決めた特別措置法。太陽光発電の価格が高いなど、電源の発電コストに応じ買い取り価格に差をつける。収入が保証されるため投資がしやすく、欧州は主にこの方法で再生可能エネルギーを増やした。

- ③ 電力自由化と発送電分離

