

放射性元素・放射性同位元素について

1. 原子説 ドルトン (1766~1844)
2. 原子の構造

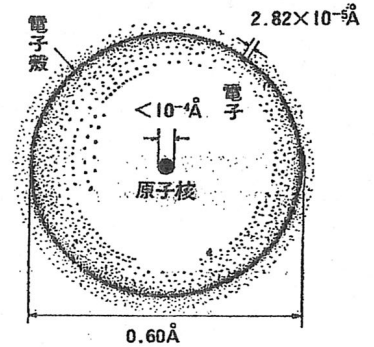
構成： 核外電子、原子核 (陽子、中性子、中間子、中性微子など)

大きさ： 原子核は原子の中心にあり

直径は原子全体の約10万分の1

つまり、電子核と原子核の間は
何も無く真空である。

| | | | |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | 水素原子 | 陽子 | 電子 |
| 半径 cm | 3.0×10^{-9} | $< 10^{-12}$ | 2.82×10^{-13} |
| 質量 g | 1.67×10^{-24} | 1.67×10^{-24} | 9.11×10^{-28} |



原子の種類: 約100種類

(別紙元素の周期表) 図 3-1 水素原子の構造 (球の断面図)

原子核を構成している素粒子: 陽子の質量を1、陽子の持つ電気量を+1「実際の質量 (g)、電気量 (クーロン) は超小さい」とする。 (P: 1.67×10^{-24} g、e: 9.70×10^{-28} g)

素粒子 (それ以上分割不能の最終粒子) P、e 電気量 1.60×10^{-19} クーロン

| 素粒子 | | 質量 | 電気量 |
|--------------|---|--------------------|-----|
| 陽子 (プロトン) | P | 1 | +1 |
| 中性子 (ニュートロン) | n | 1 | 0 |
| 電子 (エレクトロン) | e | $1/1840 \approx 0$ | -1 |

原子の質量は殆ど原子核にある。原子内の陽子の数と電子の数は同じ、つまり電氣的に+-0、中性である。

約100種類ある原子のそれぞれの性質はその原子核中にある陽子(プロトン)の数(原子番号)で決まっている。

例えば、陽子が8個なら酸素、92個ならウラン、53個ならヨウ素ということになる。中性子の数は原子の重さに関係はあるが化学的性質には関係ない。

質量数・・・原子核内の陽子と中性子の質量の和

3. 物質の構造

総ての物質 (無機物、有機物) は分子の集合によりより成り立っている。物質の性質を保つ最終粒子が分子である。例えばある量の水を半分又、半分と分け続けていくとついには水の分子1個に到達するこれは0℃で凍り、100℃で沸騰するという水の性質をもっている。

この分子は更に水素原子2個と酸素原子1個に分けることができる。もはやそれは水ではない。

原子の種類、個数・・・約100種

分子の種類、個数・・・無数（原子の組み合わせで出来るから）
素粒子の個数・・・数個

（無機化合物数十万、有機化合物無数）

結局、この世の総ての物（地球も含めて）はこの僅か数種の素粒子陽子、中性子、電子、中間子などで成り立っていることになる。

4. 同位元素（同位体、アイソトープ、isotope）

同じ元素の原子（陽子数同じ）で原子核内の中性子数の異なるものどうしを互いに同位元素という。つまり、化学的性質は全く同じだが重さだけが違う、一卵性双生児で体重が違うようなものである。

放射能を持たない（壊れない）安定な同位元素が表2にある。

例1 水素 (^1H) 重水素 (^2H デューテリウムDとも呼ぶ)
存在比 99.985% 0.015%

例2 塩素 ^{12}C 1 P17個 n18個 ^{13}C 1 P17個 n20個
存在比 75.53% 24.47%

水素の原子量 = $1 \times 99.985/100 + 2 \times 0.015/100 = 1.008$

塩素の原子量 = $35 \times 75.53/100 + 37 \times 24.47/100 = 35.5$

重水の話 : 1932. Harold Urey(米) が重水素発見。34年ノーベル化学賞

5. 放射性元素

天然に存在する放射能を持つ（放射線を出す）元素 表1

$^{238}_{92}\text{U}$ $^{235}_{92}\text{Ac}$ $^{232}_{90}\text{Th}$ $^{237}_{93}\text{Np}$ を祖先として何物にも（温度とか圧力とか）影響されることなく、放射線を出して壊れ続けていく旅路の果ては鉛である。

- ベクレル Becquerel (1852~1908) にいて
- キュリー夫人 Marie Curie (1867~1934) について
- クルックス Crookes (1832~1919)、レントゲン (1845~1923) について

放射線の種類 放射能をもつ元素の出す放射線は α 、 β 、 γ の三種類である

α 、 β 、 γ ともに蛍光物質に当てると光る。写真のフィルムを感光する

| | 内容 | 電荷 | 質量 | 気体を電離する | 透過力 |
|-------------------|---------------------------------------|-----|----|---------|-----|
| α (アルファ) 線 | He原子核の流れ | + 2 | 4 | 大 | 小 |
| β (ベータ) 線 | 電子(+もある) | - 1 | 0 | 中 | 中 |
| γ (ガンマ) 線 | X線より波長の超短い電磁波 (0.07~1Å X線は10~0.1Å) | 0 | 0 | 小 | 大 |

α 線を出す α 崩壊が起こるとその原子核から He 核 (α 粒子) 飛び出していくのだから P 2個 n 2個が無くなることになる、つまり、原子番号が2つ減り質量数が4つ減ることになる。

β 線を出す β (-電子の場合) 崩壊が起こると原子核の中の中性子が陽子に変わる。崩壊後その原子の原子核内の陽子が1つ増えたから原子番号が1つ増え質量数は変わらない。

γ 線は α 、 β 崩壊が起こるのに伴って生じるものであり、崩壊の種類によってその量、強さは異なる。

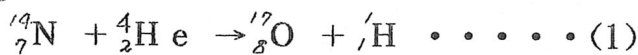
半減期：崩壊が進み初めの半分の量になる時間。ラジウム Ra は1622年で半分になる。更に1622年で1/4になる……

・ここで、表1と周期表を使って Uが終局の鉛になるまでの旅路を周期表を使って一緒に辿ってみよう。

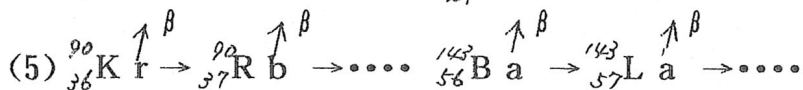
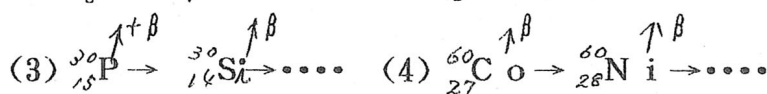
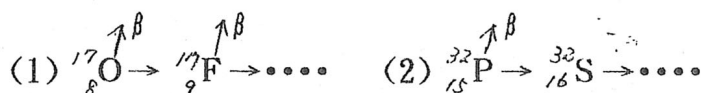
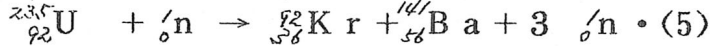
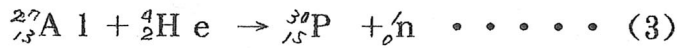
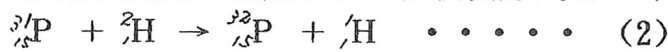
6. 人工放射性同位元素 (ラジオアイソトープ)

安定な原子の核に高エネルギーの粒子 (He 核、陽子、中性子) などをぶつけると放射能を持つ原子が生まれる。これが人工放射性元素である。原子番号93以上の元素は天然には存在しない総て人工放射性元素である。

1919年英国のラザフォードが窒素ガスの中に高速の α 線 (${}^4_2\text{He}$) 通した。



これが人類最初の原子を他の原子に変える核変換反応である。その後、ぶつける粒子に中性子を用いるようになって無数といえるほどの人工放射性元素が生産された。核反応式をいくつかあげると。



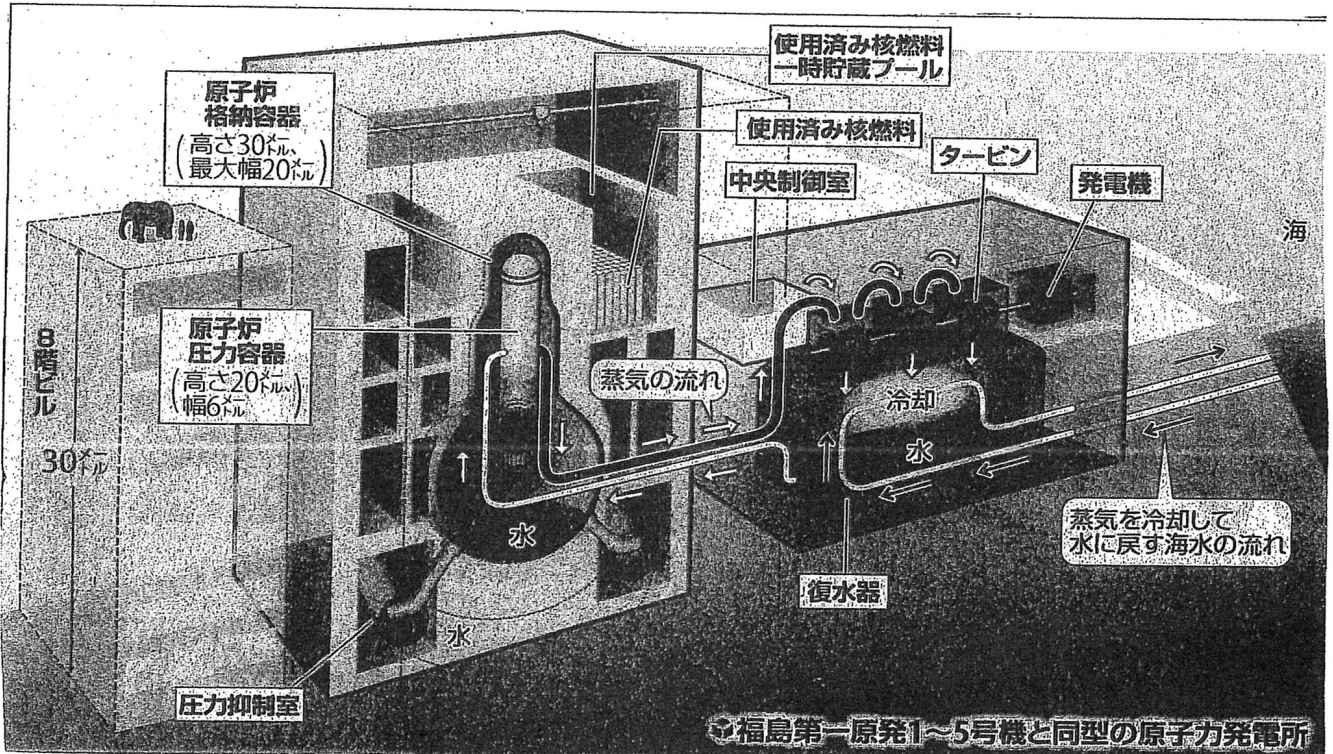
・人工放射性元素のほとんどは - β 壊変であるが + β もある。

・原子炉圧力容器内の主たる反応は(5)式である。

・2元素 ヨウ素131、セシウム137についてその放射系列を書いて見る。

| ヨウ素131 | | 半減期 | セシウム137 | | 半減期 |
|-------------------------|--------|--------|-------------------------|-----------|--------|
| $^{131}_{53}\text{I}$ | (ヨウ素) | 8.1day | $^{137}_{55}\text{C s}$ | (セシウム) | 33year |
| $^{131}_{54}\text{X e}$ | (キセノン) | 12day | $^{137}_{56}\text{B a}$ | (バリウム) | 2.6min |
| $^{131}_{55}\text{C s}$ | (セシウム) | 10day | $^{137}_{57}\text{L a}$ | (ランタン) | ? |
| $^{131}_{56}\text{B a}$ | (バリウム) | 12day | $^{137}_{58}\text{C e}$ | (セリウム) | 36h |
| $^{131}_{57}\text{L a}$ | (ランタン) | 58min | $^{137}_{59}\text{P r}$ | (プラセオジウム) | 1h |
| $^{131}_{56}\text{B a}$ | (バリウム) | 12day | $^{137}_{58}\text{C e}$ | (セリウム) | 36h |

7. 原子力発電の原理



福島第一原発1～5号機と同型の原子力発電所

圧力容器(高さ20m幅6m厚さ13cm~30cm重さ500ton耐圧70気圧)この中で上の(5)式の反応 $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{92}_{36}\text{K r} + ^{141}_{56}\text{B a} + 3^1_0\text{n}$ がおきてこのとき、質量の一部がエネルギー(熱)に変わる $E = mc^2$ 。反応のときできた中性子がまた他の $^{235}_{92}\text{U}$ に突き刺さって (5)の反応を連鎖的におこしていく、ただしそれがあまり激しいと爆発の危険があるわけでウラン燃料(ジルコニウムの合金の筒に入れてある)の間に反応制御(コントロール)用の炭素棒(中性子を減速する)が出し入れで調整できるように数多く挿入されている。ここでできた高温の水蒸気をタービンに送り発電機を回す。ウラン1gが核分裂すると石炭3ton、石油2000リットル相当する膨大なエネルギーが出る。

8. 原発事故に伴ういろいろな問題点

- 原子炉圧力容器内のウラン燃料のメルトダウン(Uの融点は1150℃) 表3

- 水素爆発はどうして
- 放射線量の問題

ベクレル……放射性物質が放射線を出す能力その強さの単位
 シーベルト……同じベクレルの放射線でも放射性物質の種類、
 被爆の形態などで身体への影響は違ってくるそれを考慮した一定の計算式で作った。つまり人が放射線を浴びたときの影響度の数値である。これは広島、長崎の被爆者を長年にわたって追跡調査した日本の研究者達が考え出した方式である。

- 安全値について

(日本人の平均値) 自然からの放射線量(年間)

食物……約0.4 (ミリ・シーベルト)

宇宙……約0.3

大地……約0.4

呼吸……約0.4

約1.5

合計

9.2ミリ・シーベルト

医療関係など

胃のX線(1回)……0.6

胸部CTスキャン(1回)……6.9

航空機(東京-ニューヨーク往復)……0.2

7.7

10以下なら?

- ただし、例えば乳ガンの放射線治療では、1回に2000ミリ・シーベルト相当の放射線を20~30回ほど当てる、放射線が当たった部分の皮膚が日焼けのように赤くなることがあるが大事ない。胃のX線、胸部のCT検査も体の一部しか放射線を受けてないから影響は全身被曝とは異なる。

1954年米国の大気圏核実験(水爆)でマグロ漁船福竜丸が致死量の放射能をもった灰を大量に浴び乗組員が半年後死亡した。当時は冷戦の真ただ中、米国、ソ連などが核実験を繰り返し、62年には178回以上行われ、63年5月大阪市で688ベクレルのセシウム137を検出した(今回で一番多かった茨城で479ベクレル/㎡)。今以上切実な事態であったのである。最悪の放射線汚染は 86年ウクライナ・チェルノブイリ原発事故である。広島型原爆の約400倍の約7トンの放射性物質が北半球全域に飛散 特にヨーロッパ、ドイツなど7万ベクレル、ベルギー、モルサバ、オーストリア、フィンランドなど国土全体の平均降下量が1万ベクレルを超えた。

- 100ミリ・シーベルト以上を被曝すると明らかに危険である。

国際放射線防護委員会では一般住民が1年間に浴びて良い人工放射線量を1ミリ・シーベルトとしている。その根拠は「80歳放射線を浴び続けても80ミリ・シーベルトだから」

日本の原子力安全委員会は、この10倍年10ミリ・シーベルトまではよしとしている。要は放射線量がたとえ多くても体の局所に受けたとき、浴びた期間が短いものはあまり心配がないということになる。低い放射量を永年にわたって浴びたときの被害についてはまだはっきりとした結論は出ていないようである。ただ、乳児、幼児、児童については必要以上の安全値を設定するべきと思う。

福島県浪江町赤宇木（原発から30Km）3月23日～5月12日（57日間）の積算放射線量が30.68ミリ・シーベルトであった。このままの状態が続くとすると $365 \times 30.68 / 57 = 196.5$ （ミリ・シーベルト）となり計画的退避区域指定されることはやむをえないことと思われる。^{（平瀬）}

- ・「水」「食品」規制値 原子力安全委員会の指標（国際規準と整合）

| 基準値 1Kあたりのベクレル値 | |
|---------------------------------|----------------------|
| 放射 性 ヨ ウ 素 | 飲料水※乳幼児は100 |
| | 牛乳・乳製品※乳児用粉ミルクなどは100 |
| 放 射 性 セ シ ウ ム | 野菜類 (根菜、イモ類を除く) |
| | 飲料水・牛乳・乳製品 |
| 放 射 性 セ シ ウ ム | 野菜類 |
| | 穀類 |
| | 肉 |
| | 卵 |
| | 魚 |
| ム | その他 |

ウランは飲料水・牛乳・乳製品・乳幼児用食品 20ベクレル
 プルトニウムは 1ベクレル
 ウランは野菜類・穀類・肉・魚その他 100ベクレル
 プルトニウムは 10ベクレル

9 放射線量の測定方法

1. 電離箱を用いる方法
2. 箔検電器を用いる方法
3. 計数管を用いる方法
4. 写真フィルムを用いる方法

10 人工放射性元素の活用

1. トレーサー(tracer)

・ある原子が物質の内部をどのように移動するかを知るためにその原子の放射性同位元素を使って混ぜてやる。放射性の原子は放射線を出しつつ移動する。それを計数管で追跡する。

- 例えば $^{24}_{11}\text{Na}$ ($^{23}_{11}\text{Na}$ ナトリウムの放射性同位元素) で食塩 (NaCl) をつくり、これを動物に食べさせて出てくる放射線を計ることによって体のどの部分にどのくらいの速さで達するかが測定できる。

血液に注入すれば、血液の循環の速さ、血管の故障、心臓の動きなど知ることができる。

- 動物の骨や歯に含まれるリン (P) は耐えず新旧の入れ替えがおきている。したがって常に補給をしなければならない。このことが判ったのはリンの放射性同位元素 $^{32}_{15}\text{P}$ を使って追跡した結果である。
- 放射性同位元素の $^{32}_{15}\text{P}$ 、 $^{40}_{19}\text{K}$ でリン酸肥料やカリ肥料を作り、植物に肥料がどう吸収され、どう分布されるか、土に残る肥料がどれだけか、どんな肥料をどの時期に与えれば吸収がいいかなどが判る。
- $^{14}_6\text{C}$ の CO_2 を作り植物の光合成の仕組みを研究する。
- $^{14}_6\text{C}$ $^{13}_7\text{N}$ $^{34}_{16}\text{S}$ でアミノ酸、タンパク質の研究。

2. その他の活用

- いろいろの機械に使われるピストンの材料鉄 (Fe) に放射性同位元素 $^{55}_{26}\text{Fe}$ を含ませ動かし、潤滑油や鉄粉の放射能からピストンのすり減りやできのよしあしをしらべる。
- コバルトの放射性同位元素 $^{60}_{27}\text{Co}$ は崩壊の際、強力な γ 線を放出するこれをガン細胞に照射することでガン細胞を消滅させるこれが放射線治療である。
- $^{60}_{27}\text{Co}$ は強力な γ 線とその半減期が5.3年と比較的長いことを利用して、さまざまな方面で活用されている。
- 年代の測定

炭素の放射線同位元素 $^{14}_6\text{C}$ は普通の炭素に混じって微量だが大気中に存在する。植物、動物の体内の炭素の源は大気中の炭酸ガスである。だから、生物の体内には一定の割合で $^{14}_6\text{C}$ は存在している。

その植物、動物が死ぬとその瞬間から炭素の補給はなくなるので $^{14}_6\text{C}$ は放射線を出して減少する一方である。そこで残っている $^{14}_6\text{C}$ の放射能の強さからいくら $^{14}_6\text{C}$ が無くなったかが判り、 $^{14}_6\text{C}$ の半減期が5568年であることからその年代を推測することができる。考古学、人類学などで何千年、何万年前という年代の測定に利用されている。

表 1 放射性元素の系列

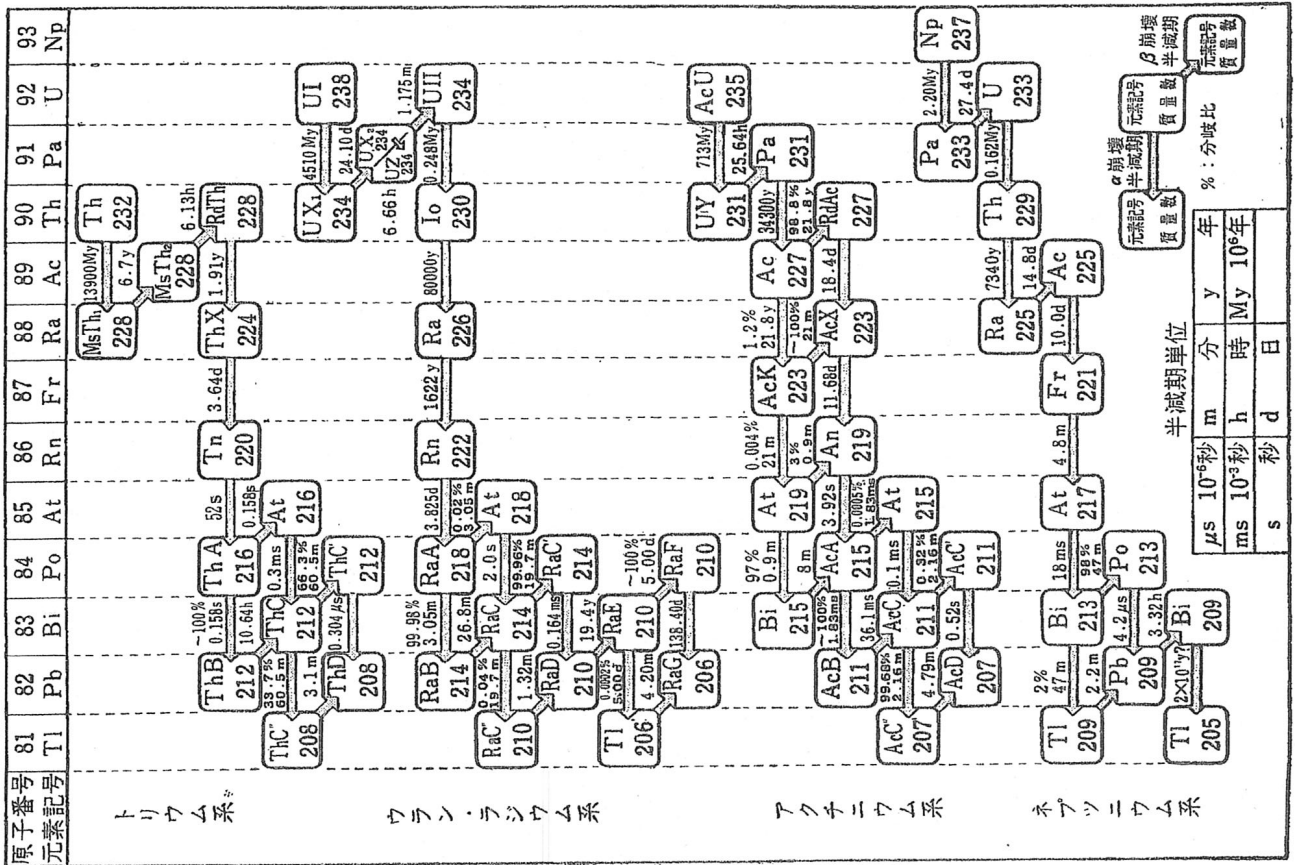


表 2 安定な同位元素

この表はおもな元素の安定な原子核を示す。nは中性子、Dは重水素である。
Z: 原子番号=陽子数, N: 中性子数, A: 質量数とすれば、A=Z+N

| 元素 | Z・記号 | A | 元素 | Z・記号 | A | 元素 | Z・記号 | A |
|--------|------|-----|-------|------|-----|----|------|------|
| (中性子) | 0n | 1** | | | | | | |
| 水素 | 1H | 1 | カルシウム | 20Ca | 40 | テ | 52Te | 120 |
| | 1D | 2 | | 20Ca | 42 | | 52Te | 122 |
| ヘリウム | 2He | 3 | | 20Ca | 43 | ル | 52Te | 123 |
| | 2He | 4 | | 20Ca | 44 | | 52Te | 124 |
| リチウム | 3Li | 6 | | 20Ca | 46 | ル | 52Te | 125 |
| | 3Li | 7 | | 20Ca | 48 | | 52Te | 126 |
| ベリリウム | 4Be | 9 | ク | 24Cr | 50 | よ | 52Te | 128 |
| | 5B | 10 | | 24Cr | 52 | 素 | 52Te | 130 |
| ほう素 | 5B | 11 | マンガン | 25Mn | 55 | | 53I | 127 |
| | 6C | 12 | | 26Fe | 54 | | 56Ba | 130 |
| 炭素 | 6C | 13 | 鉄 | 26Fe | 56 | バ | 56Ba | 132 |
| | 7N | 14 | | 26Fe | 57 | リ | 56Ba | 134 |
| 窒素 | 7N | 15 | コ | 26Fe | 58 | ウ | 56Ba | 135 |
| | 8O | 16 | | 27Co | 59 | ム | 56Ba | 136 |
| 酸素 | 8O | 17 | ニ | 28Ni | 58 | | 56Ba | 137 |
| | 9F | 18 | ツケル | 28Ni | 60 | 白 | 56Ba | 138 |
| フッ素 | 9F | 19 | | 28Ni | 61 | 金 | 78Pt | 190 |
| | 10Ne | 20 | | 28Ni | 62 | | 78Pt | 192 |
| ネオン | 10Ne | 21 | 銅 | 28Ni | 64 | | 78Pt | 194 |
| | 11Na | 22 | | 28Ni | 64 | | 78Pt | 195 |
| ナトリウム | 11Na | 23 | 面 | 29Cu | 63 | 金 | 78Pt | 196 |
| | 12Mg | 24 | | 29Cu | 65 | | 78Pt | 197 |
| マグネシウム | 12Mg | 25 | 臭 | 30Zn | 64 | | 80Hg | 196 |
| | 12Mg | 26 | 銀 | 30Zn | 66 | | 80Hg | 198 |
| アルミニウム | 13Al | 27 | | 30Zn | 67 | 水 | 80Hg | 199 |
| | 14Si | 28 | 臭 | 30Zn | 68 | | 80Hg | 200 |
| けい素 | 14Si | 29 | 素 | 30Zn | 70 | | 80Hg | 201 |
| | 15P | 30 | | 35Br | 79 | | 80Hg | 202 |
| りん | 15P | 31 | 銀 | 35Br | 81 | | 80Hg | 204 |
| | 16S | 32 | | 47Ag | 107 | 鉛 | 82Pb | 204 |
| | 16S | 33 | | 47Ag | 109 | | 82Pb | 206 |
| | 16S | 34 | | 50Sn | 112 | | 82Pb | 207 |
| | 16S | 36 | | 50Sn | 114 | | 82Pb | 208 |
| 塩 | 17Cl | 35 | す | 50Sn | 116 | ビ | 83Bi | 209 |
| | 17Cl | 37 | | 50Sn | 117 | ス | 83Bi | 209* |
| アルゴン | 18Ar | 36 | | 50Sn | 118 | マ | 90Th | 232* |
| | 18Ar | 38 | | 50Sn | 119 | ス | 90Th | 232* |
| | 18Ar | 40 | | 50Sn | 120 | マ | 92U | 234* |
| カルリウム | 19K | 39 | | 50Sn | 122 | ス | 92U | 234* |
| | 19K | 40* | | 50Sn | 124 | ス | 92U | 235* |
| | 19K | 41 | | | | | 92U | 238* |

**放射性, 半減期 1×10⁵年以上のもの

1号機の経過

([] は東電の解析結果)

| | | |
|-------|-------|---|
| 3月11日 | 午後2時 | 制御棒がすべて挿入、出力低下 |
| | 47分 | 非常用ディーゼル発電機起動 |
| | | 主蒸気隔離弁が閉じ、圧力容器の圧力上昇 |
| | 49分 | 大津波警報発令 |
| | 52分 | 非常用復水器が自動起動 |
| | 3時3分 | 非常用復水器が停止(以降、全交流電源喪失まで起動、停止を繰り返したとみられる) |
| | 37分 | 全交流電源喪失 |
| | 6時ごろ | 「炉心の露出が始まる」 |
| | 7時ごろ | 「炉心の損傷が始まる。炉心温度が急激に上昇、約2800度に達する」 |
| 12日 | 午前5時 | 消防ポンプで淡水注入開始 |
| | 46分 | |
| | 6時ごろ | 「圧力がほぼ大気圧に。圧力容器が破損。燃料が全て溶け、全量が下に落ちる」 |
| | 午後2時 | 格納容器ベント操作(約30分) |
| | 53分 | 淡水の注入終了 |
| | 3時36分 | 水素爆発 |
| | 8時20分 | 海水の注入開始 |

2号機の経過

([] は東電の解析結果)

| | | |
|-------|-------|----------------------------------|
| 3月11日 | 午後2時 | 原子炉緊急停止 |
| | 47分 | 非常用ディーゼル発電機が起動 |
| | 50分 | 原子炉隔離時冷却系の手動起動(水位が高くなり1分後に自動停止) |
| | 3時2分 | 原子炉隔離時冷却系の手動起動(水位が高くなり26分後に自動停止) |
| | 39分 | 原子炉隔離時冷却系の手動起動 |
| | 41分 | 全交流電源喪失 |
| 14日 | 午後1時 | 原子炉隔離時冷却系の停止(推定) |
| | 25分 | |
| | 4時34分 | 消防ポンプによる海水注入作業開始 |
| | 6時ごろ | 「炉心の露出が始まる」 |
| | 8時ごろ | 「炉心の損傷が始まる」 |
| 15日 | 午前6時 | 爆発音。圧力抑制室が損傷 |
| | 14分 | |
| | 午後8時 | 大部分の燃料が圧力容器底部に落下 |
| 16日 | 午前4時 | 「原子炉圧力容器が破損」 |

3号機の経過 ([] は東電の解析結果)

| | | |
|-------|-------|---------------------------------|
| 3月11日 | 午後2時 | 原子炉緊急停止 |
| | 47分 | |
| | 3時6分 | 原子炉隔離時冷却系手動起動 |
| | 25分 | 同冷却系停止 |
| | 38分 | 全交流電源喪失 |
| | 4時3分 | 同冷却系手動起動 |
| 12日 | 午前11時 | 同冷却系停止 |
| | 36分 | |
| | 午後0時 | 高圧注水系起動 |
| | 35分 | |
| 13日 | 午前2時 | 高圧注水系停止(冷却機能喪失)、原子炉圧力上昇 |
| | 42分 | 「原子炉水位低下開始」 |
| | 7時ごろ | 「炉心の露出が始まる」 |
| | 9時8分 | 原子炉減圧操作 |
| | | 「炉心が完全露出、損傷が始まる」 |
| | 20分 | 格納容器内蒸気の外部放出(ベント)開始(以後、放出を繰り返す) |
| | 25分 | 淡水注入開始 |
| | 午後1時 | 海水注入に切り替え |
| | 12分 | |
| 14日 | 午前1時 | 水補給のため注水停止 |
| | 10分 | |
| | 3時ごろ | 「大部分の燃料が落下」 |
| | 3時20分 | 注水開始 |
| | 9時ごろ | 「圧力容器破損」 |
| | 11時ごろ | 水素爆発 |

1~3号機の炉心状況の推移と現状

(時刻は推定。東電の資料をもとに作成。2号機、3号機の推移は「最悪の場合」を想定)

現状

1号機

- ▶ 毎時6トンを注水
- ▶ 水位は4m以下(水位計を5月12日に修正)
- ▶ 下部温度97度(5月23日)

2号機

- ▶ 毎時7トンを注水
- ▶ 水位不明(水位計が未修正)
- ▶ 下部温度108度(5月23日)

3号機

- ▶ 毎時15トンを注水
- ▶ 水位不明(水位計が未修正)
- ▶ 下部温度97度(5月23日)

推移

3月11日午後6時
燃料露出開始

同7時
燃料損傷開始

3月12日午前6時
メルトダウン
(大部分の燃料が)溶融し、落下

圧力容器が破損

3月14日午後6時
燃料露出開始

同8時
燃料損傷開始

3月15日午後8時
メルトダウン

同16日午前4時
圧力容器が破損

底まで落ちずに固まった燃料

3月13日午前7時
燃料露出開始

同9時
燃料損傷開始

3月14日午前3時
メルトダウン

同9時
圧力容器が破損