

原子力についての勉強会

原発とは何か

原子力の原理から原発事故までを探る

2019年8月26日

西田 進

於：品川区立総合区民会館きゅりあん

原発の話をするときに、私が心がけていること

1. 科学技術として確立されていることを基に話す

- 原子物理学、原子炉工学、放射線科学、
福島原発事故調査委員会の報告(各種)などに基くこと
- これらは専門的で難解であるが、市民に理解してもらえる
ように工夫して説明する

2. 私見を述べる場合は、(私見)と明記する

事故の主要原因(私見)

原発の問題点(私見)

脱原発への道(私見)

3. 原発問題は、科学技術だけでなく、社会・経済・倫理・文化等 の多様な問題が含まれている

科学技術以外の問題の重要性を認識し、慎重に説明したい

目次

1. 原子力とは何か
2. 原発の歴史
3. 原子炉の技術
4. 福島原発事故
5. 放射能の話
6. 原発と地球温暖化
7. 核燃料サイクルと高速増殖炉
8. 原発の問題点
9. 脱原発への道

原子力とは何か

前半は、原子物理学入門です。

堅い話ですが我慢してお聴き下さい。

後半は、原発の話です。

前半の知識が役立ちます。

のっけからなんですが、
2015年は、アインシュタインの
一般相対性理論誕生100年でした。

1905年にアインシュタインが
特殊相対性理論(相対性原理ともいう)を
発表した。

1915年から1916年にかけて
一般相対性理論を発表した。

2015年11月25日に、
アインシュタインの一般相対性理論
誕生100年を迎えた。



大正11年(1922)
アインシュタイン訪日

アインシュタインの相対性原理

1905年にアインシュタインが発表した特殊相対性理論から導かれる式：

$$E = mc^2$$

ここで、 E = エネルギー [J]

m = 質量 [kg]

C = 光の速度 [m/s] = 3×10^8 m/s

30万km/s

この式から分ることは、**質量は巨大なエネルギーになり得る**ということ。

質量1g(グラム)をエネルギーに変換すると、2500万kWhのエネルギー得られる。

$$\therefore E = 0.001 \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{13} \text{J(ジュール)} = 2500 \text{万kWh}$$

1 J = 2.78×10^{-7} kWh

これを実現したのが原子力だ！

1戸の1か月の電力使用量を250kWhとすると
10万戸の1か月の電力使用量に相当する

この説明は結果としては正しいが、メカニズムの説明にはなっていない。
メカニズムの説明には、ノーベル賞の湯川秀樹の中間子理論が必要となる。

原子力とは何か(2)

原子核分裂

原子力(nuclear energy)とは、原子核の変換(核反応)に伴って放出される多量のエネルギーのこと

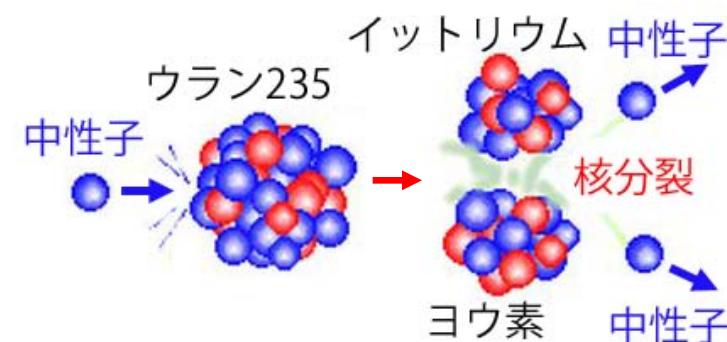
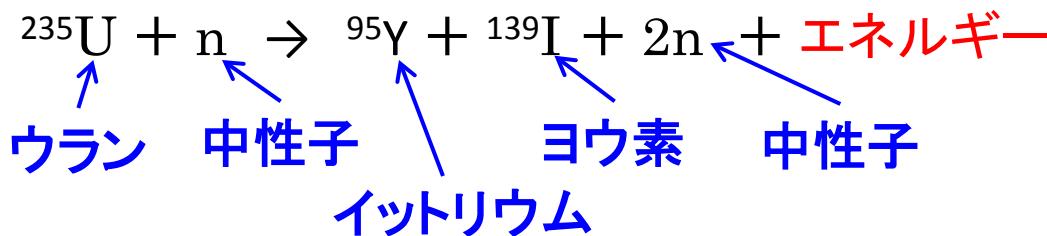
原子爆弾型

水素爆弾型

プルトニウム分裂型原子力については述べない

原子力には核分裂と核融合があるが、ここでは核分裂、中でもウラン分裂型原子力に限定して説明する。

ウラン原子の核分裂(数多い反応の中の一例)



ここで、235、95、139は質量数と呼ばれる。

中性子の質量数は1である。

1000億分の1

1 J (ジュール) = 2.78×10^{-7} kWh

この核反応でウラン原子1個当たり、 3.2×10^{-11} J のエネルギーが発生する。

原子力とは何か(3) $\because 1\text{モル} \times 6.02 \times 10^{23} = \text{アボガドロ定数}$

1kgのウランの中には 2.56×10^{24} 個の原子が含まれているので、

ウラン1kgの核分裂で、2300万kWhのエネルギーが得られる。 ①

$$\therefore 3.2 \times 10^{-11} \text{J} \times 2.56 \times 10^{24} = 8.2 \times 10^{13} \text{J} = 2300 \text{万kWh}$$

↑
ウラン原子1個が出すエネルギー ↑
1kgのウランに含まれるウラン原子の数

(2頁前の)相対性原理から出てきた

質量1g(グラム)をエネルギーに変換すると、2500万kWh ②

①と②を比較すると、

ウラン1kgの核分裂で、質量約1g(グラム)が消えてエネルギーに変わることが分る。

電気出力100万kWの原子力発電所では、熱効率を考えれば、熱出力は3倍
すなわち300万kWは必要である。1日(24時間)稼働するためには、
 $300\text{万kW} \times 24\text{h} = 7200\text{万kWh}$ の熱エネルギーが必要である。

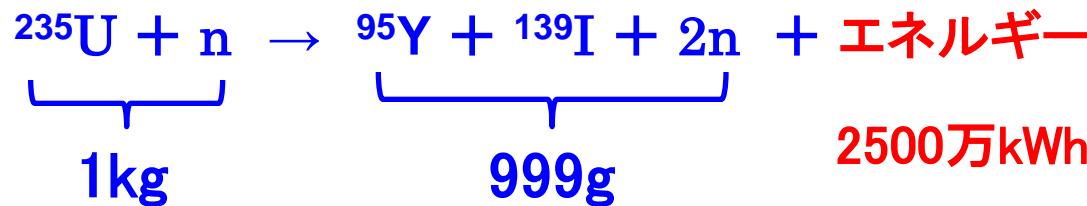
①より

したがって、1日に必要なウランの量は、 $7200\text{万kWh} \div 2300\text{万kWh/kg} = 3.13\text{kg}$
すなわち、1日にウラン約3kgが核分裂を起こす必要がある。

広島型原爆は1kgのウランが核分裂したといわれるから、原発では広島型原爆を
毎日3発の割で燃やすことに相当する。したがって大量の核廃棄物ができる！

1. アインシュタインの特殊相対性理論から導かれる式 : $E = mc^2$ から
質量 1g をエネルギーに変換すると、2500万kWh のエネルギー得られる。
これが、原子力は夢のエネルギーといわれる由縁！

2. では、どのようにして質量をエネルギーに変換するか。
ウラン原子の核分裂(一例)



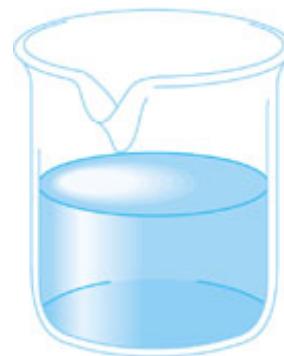
このとき、ウラン1kgの核分裂で、質量約 1g が消えてエネルギーに変わり、
約2500万kWh のエネルギーが得られる。

3. 電気出力 100万kW の原子力発電所では熱出力 300万kW が必要。
24時間には 7200万kWh の熱エネルギーが必要。
このためには、毎日ウラン約 3kg が核分裂を起こす必要がある。

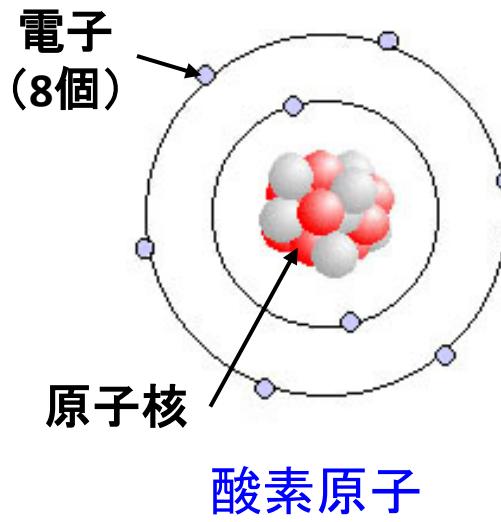
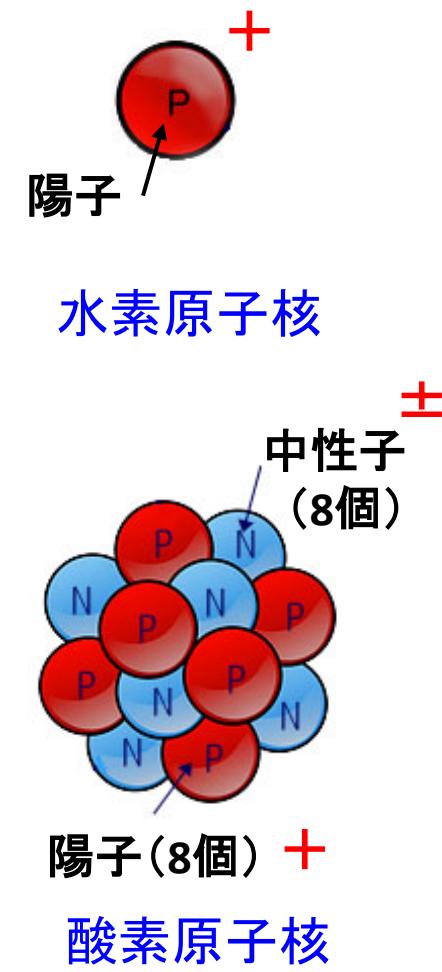
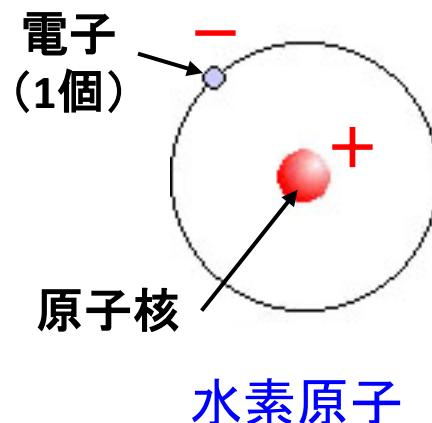
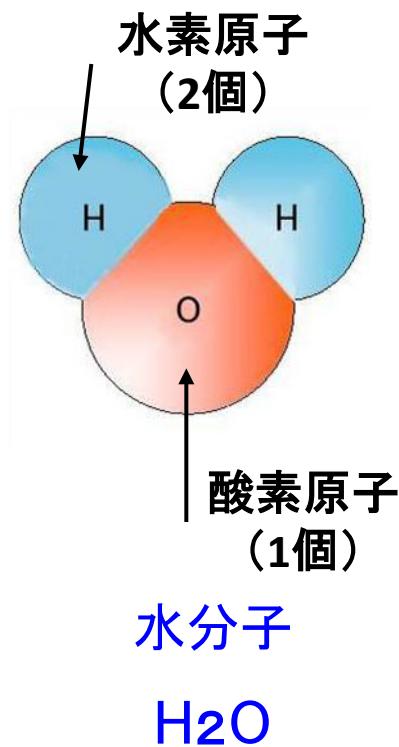
原発では広島型原爆を毎日3発の割で燃やすことに相当する。
したがって、毎日原爆3発分の核廃棄物ができる！

話変わって - - - 物質、分子、原子、原子核の話

物質を細かく調べると…



物質としての水

電子をやり取りするのが化学反応原子核が分裂・融合するのが核反応

原子力とは何か(5)

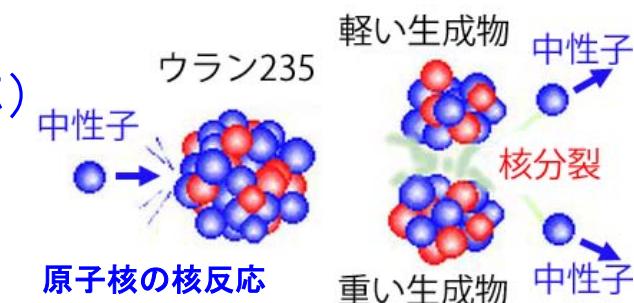
化学反応と核反応の比較

① ウラン1kgの核分裂(核反応)で発生するエネルギーは2300万kWh



ウラン1kg

2300万 kWh

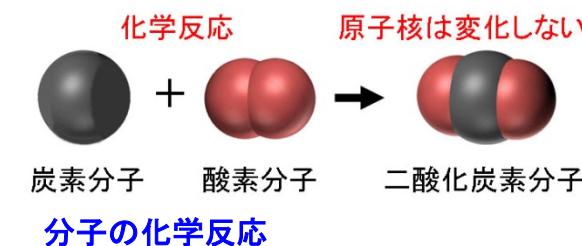


② 石炭(100%炭素) 1kgを燃焼(化学反応)させた時に発生するエネルギーは化学の教科書によると、



炭素1kg

8.08 kWh

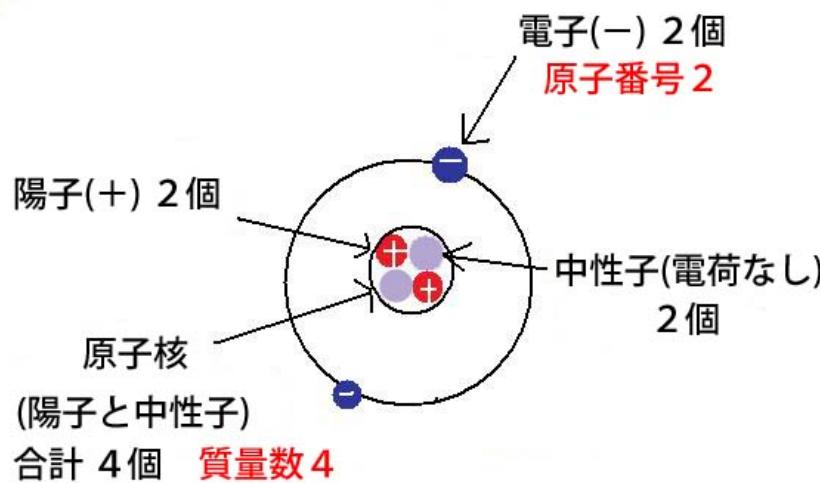


ウラン1kgの核分裂(核反応)によって発生するエネルギーは、炭素1kgの燃焼(化学反応)の $2300\text{万} \div 8.08 = \text{約300万倍}$ に相当する巨大なエネルギーである。(石炭約3000トンに相当する！)

核反応は化学反応に比べると、僅かな燃料で済むが、後に述べるように核分裂生成物(死の灰)という恐ろしいものを残すことが、大問題である。

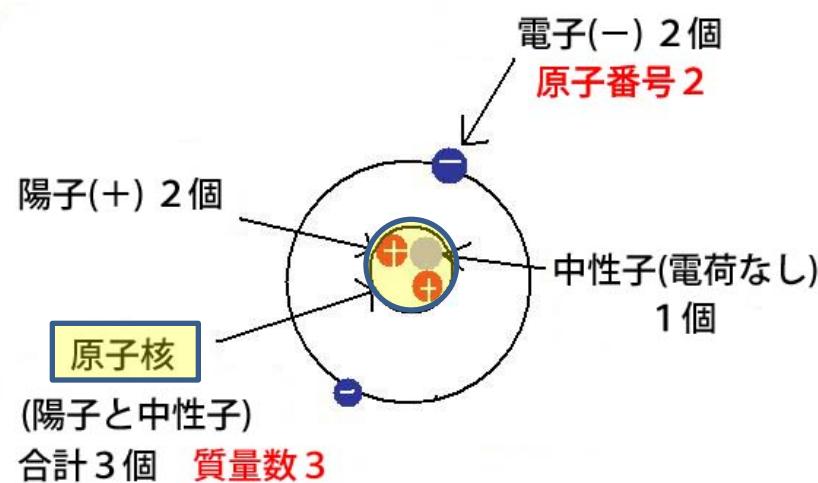
ヘリウム4

(地球上ではほとんど100%)



ヘリウム3

(100万分の1)



原子番号が同じで、**質量数**の異なる元素を、**同位元素(アイソトープ)**という

原子の構造(一般論)

1. 電子の個数は、**原子番号**に等しい
2. 陽子の個数は、電子の数に等しい
3. 中性子の個数は、0～陽子の個数の1.5倍程度
4. 陽子の個数と中性子の個数の合計を、**質量数**という
5. 原子番号が同じで、質量数の異なる元素を、**同位元素(アイソトープ)**という
ヘリウム4とヘリウム3は、同位元素である
6. 同位元素の存在比率を考慮して平均した質量数に補正係数を乗じたものを**原子量**という
原子番号と原子量は**元素の周期表**から分る

脱線ですが、炭素14による年代決定

自然界の炭素は99%が炭素12だ。
僅かに含まれる炭素14は放射性
同位元素で、 β 線(電子)を放出し、
半減期5730年で窒素14に変わる。
炭素14の割合から年代が決定できる。

原子力とは何か(7)

元素の周期表

1869年ロシアの化学者メンデレーエフが提案

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1 H	2	3	4 Be	5	6	7 ランタノイド	8	9	10 遷移元素	11 半金属	12 非金属元素	13	14	15	16 ハロゲン	17	2 He		
1 Li	2 Am (243)	3 アルカリ金属	4 アルカリ土類金属	5 アクチノイド	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
11 Na	12 Mg	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
55 Cs	56 Ba	57-71		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	89-103		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo	

不安定な同位体を持つ元素については、最も半減期

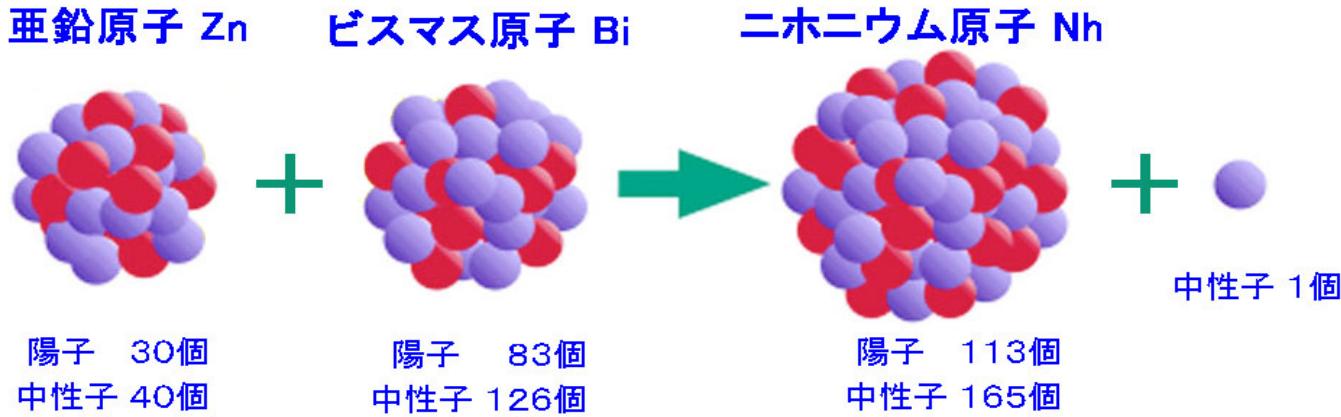
今日の話と関係ないが、
最近日本が命名権を得た新元素

周期表デザインとインターフェイス著作権 © 1997 Michael Dayah Ptable.com 最終の更新した日 2014/04/30

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

脱線です！ 日本が発見し、命名される元素

理化学研究所のチームが発見し、日本で初めて命名権を獲得した原子番号**113**番新元素の名前は、**ニホニウム**、元素記号案は**Nh**、に正式決定（国際純正・応用化学連合(IUPAC) 2016年11月30日）



新元素合成に使用された理研の加速器



プロジェクトを指揮した森田浩介教授 14

2016年1月時点での未発見元素

第9周期までのIUPAC(国際純正・応用化学連合)で認定されていない元素の一覧を示す。

現在の未発見元素は全て超ウラン元素であり、人工放射性元素と考えられている。「発見」とは人工的に合成できたことを証明することであり、具体的には放射性崩壊を観測して既知元素に至る崩壊系列を決定し、IUPACで認定される必要がある。

発見者として認定されると命名権が得られる。科学者(故人に限る)の名前や研究所の所在地などにちなんだ名称が発見者により提案され、IUPACで承認されると、正式に元素名となる。

未発見元素一覧

周期表の見方

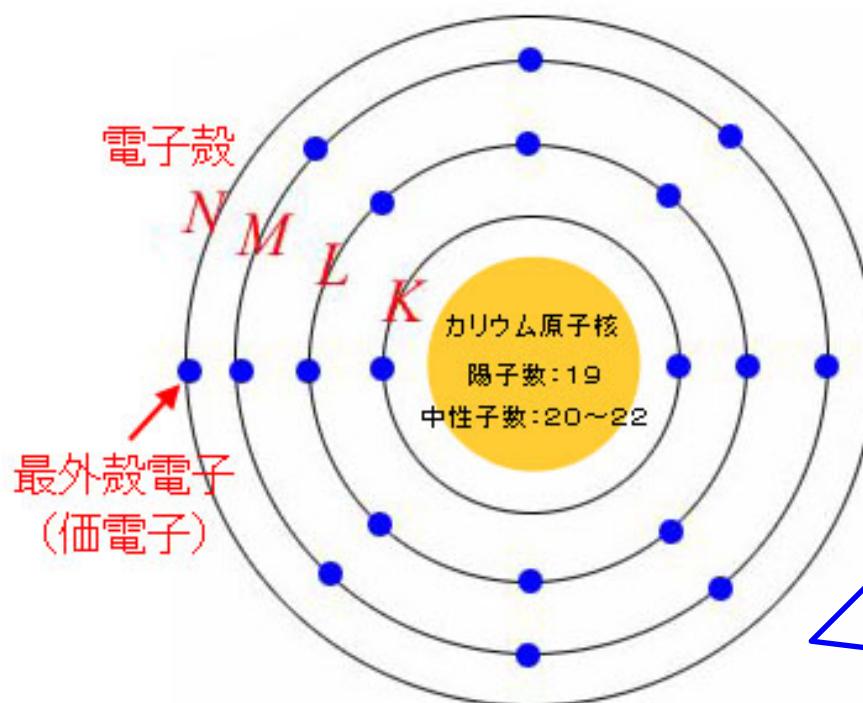
内側から順に

19
K
 カリウム
 39.0983

2 K殻
 8 L殻
 8 M殻
 1 N殻

元素名 カリウム
 元素記号 K
 原子番号 19
 原子量 39.0983
 電子配列 K殻2個、L殻8個、M殻8個、N殻1個

カリウムを例として説明する



周期表から電子配列が分る

カリウムK原子の電子個数は
 19(原子番号と同じ)

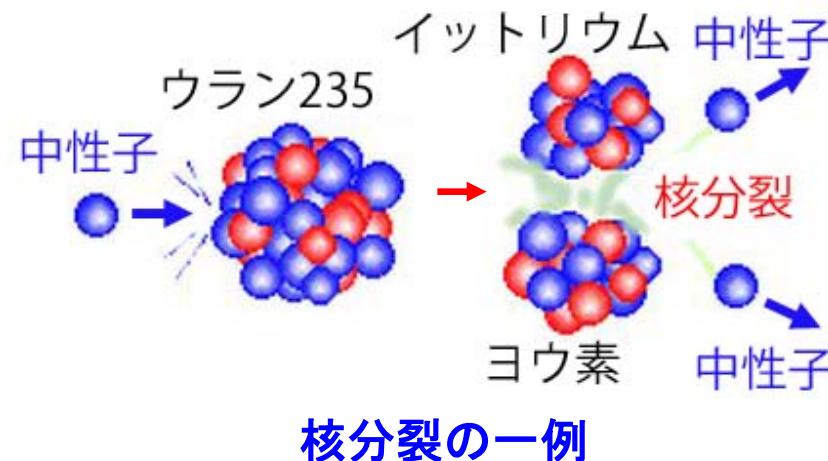
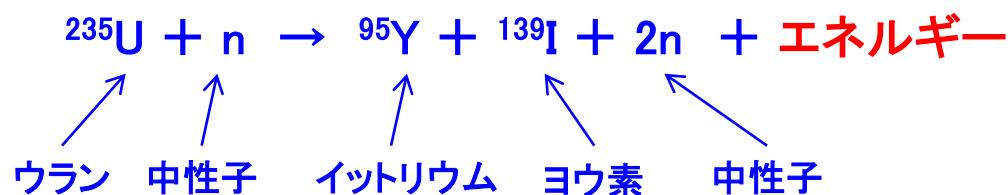
電子配列 左の図のように配列している
 K殻2個、L殻8個、M殻8個、N殻1個

原子力に関係ない話ですが…

カリウムの同位元素は、K39、K40、K41 の3種類ある。このうち、K40は放射性で半減期12億年でAr40に変わる。Arは気体であるので岩石が固まると逃げられない。Arの量を測定すると、岩石が固まった年代が分る。

今まで核分裂の話をしましたが、これからは原発の話

ウラン原子の核分裂（数多い反応の中の一例）



1個のウラン235に中性子1個を吸収させると、核分裂が起こり、2個の中性子が発生する。

上の反応で発生した中性子うち、1個を別のウラン235に吸収させ、1個をウラン以外の物質に吸収させると、**連鎖反応**が起こる。この状態を**臨界**という。

臨界を維持するためには中性子の量を制御する必要がある。

核分裂反応で発生した熱エネルギーを取り出して、蒸気を発生させ、タービンを回して発電するのが原子力発電所(原発)である。

原子力の歴史

原子物理学の曙、原爆の悲劇、原発の開発、原発事故

原子力の歴史(年表)

- 1896年 ベクレルがウランの放射線を発見、1898年にキュリー夫妻がラジウムを発見
- 1938年 ハーンとマイトナーが原子核分裂を発見
- 1939年 第二次世界大戦勃発
- 1942年 米国が原爆開発計画(マンハッタン計画)をスタート
- 1945年 5月7日ドイツ降伏
8月6日米国が広島にウラン型原爆★、8月9日長崎にプルトニウム型原爆★を投下
8月15日、日本降伏
- 1951年 米国が世界初の原子力発電を高速増殖炉EBR-1で実施(出力1kW)
- 1953年 米国アイゼンハワー大統領が国連で「平和のための原子力」を提案
- 1954年 米国がビキニ環礁で水爆実験、第五福竜丸が被爆★
日本初の原子力予算 2億3500万円国会提出(ウラン235に因む?)
ソ連のオブニンスク原子力発電所が発電開始(出力5000kW)
- 1955年 日本の原子力基本法が成立、民主・自主・公開の原子力三原則
- 1956年 英国で世界初の商用原発、コルダーホール発電所運転開始
黒鉛減速炭酸ガス冷却型原子炉(出力5万kW)
- 1965年 日本初の原子力発電所に、コルダーホール型原子炉を導入(出力16万kW)
- 1974年 原子力船むつ放射線漏れ
- 1979年 米国スリーマイル島原子力発電所事故発生
- 1986年 ソ連チェルノブイリ原子力発電所事故発生原発事故
- 1999年 東海村JCO臨界事故発生
- 2011年 福島第一原子力発電所事故発生★

原子物理学の曙

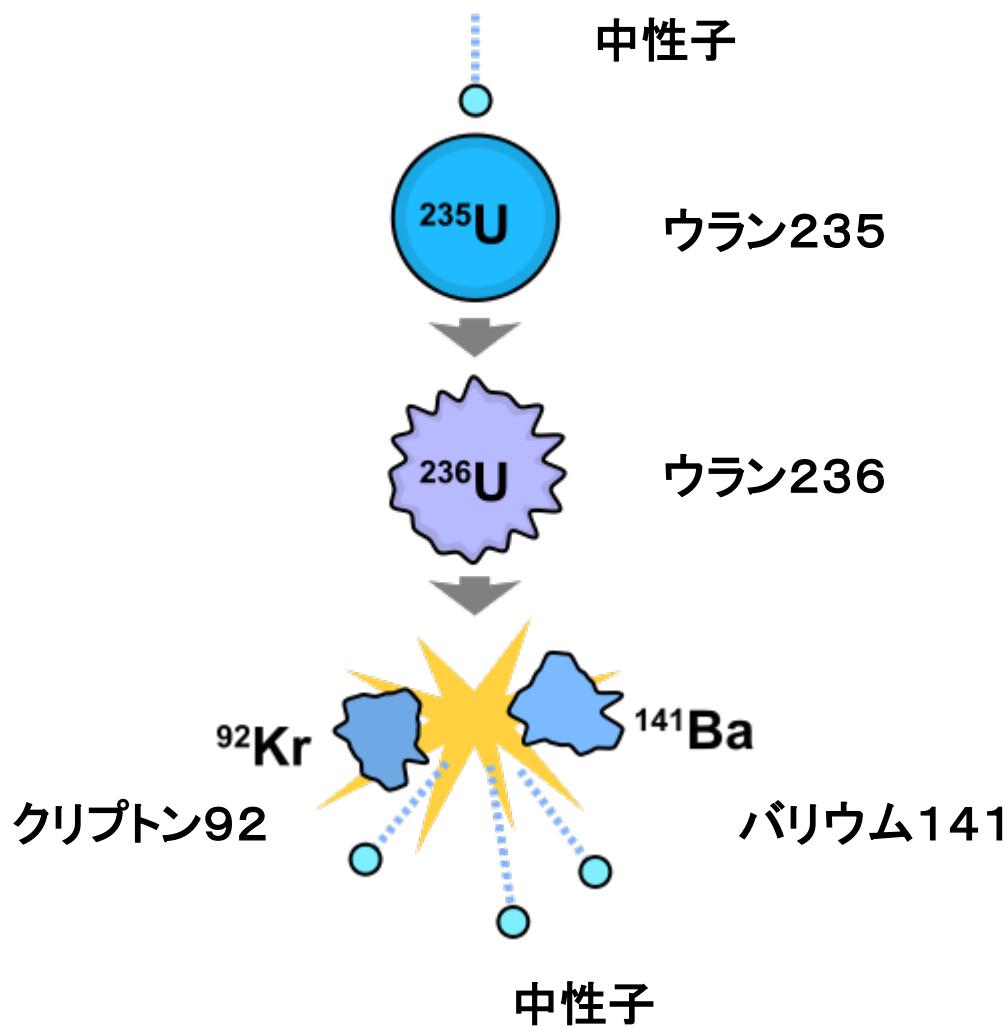
原爆の悲劇

原発の開発

原発事故

原子力の歴史

1938年に、ハーンとマイトナーが発見した原子核分裂



ドイツの化学・物理学者オットー・ハーン



オーストリアの物理学者リーゼ・マイトナー

1942年に、マンハッタン計画がスタート



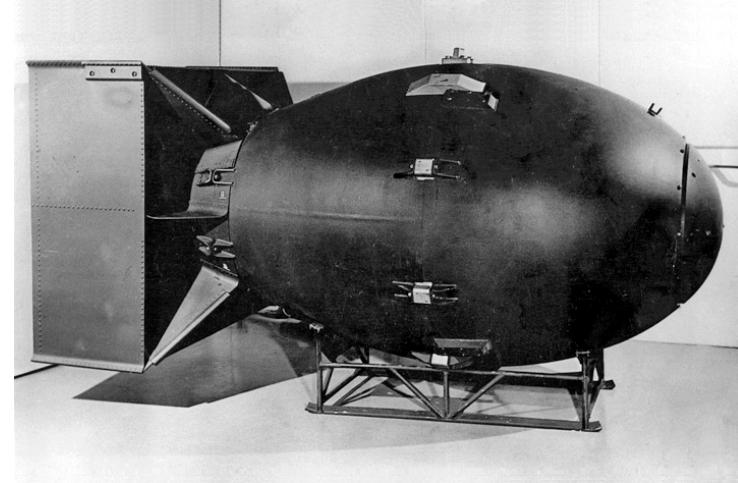
科学部門のリーダー ロバート・オッペンハイマー



1945年7月16日トリニティ実験はプルトニウム爆弾



8月6日広島に投下されたウラン爆弾のリトルボーイ



8月9日長崎に投下されたプルトニウム爆弾のファットマン 21

冷戦の中の原子力政策

1953年、米国アイゼンハワー大統領、
国連で「平和のための原子力」を提案



アイゼンハワー大統領

1954年3月、日本初の原子力予算
2億3500万円国会で成立
(ウラン235に因む?)

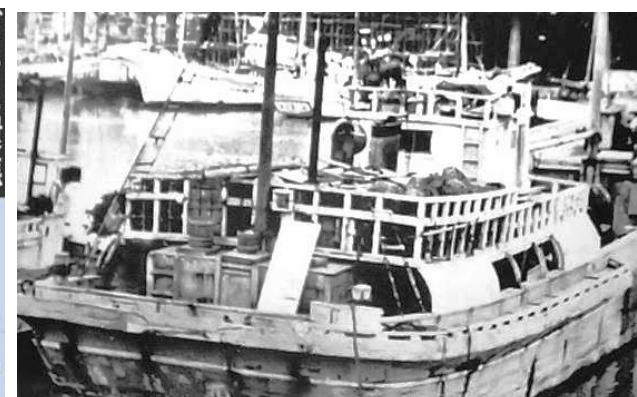


中曾根康弘参議院議員

1954年3月、米国がビキニ環礁で水爆実験、第五福竜丸が被爆



ビキニ環礁で行われた水爆実験



被爆した第五福竜丸と被害者





放射線漏れを起こした原子船むつ



スリーマイル島原発



チェルノブイリ原発の石棺



チェルノブイリ原発のシェルター

相次ぐ原発事故



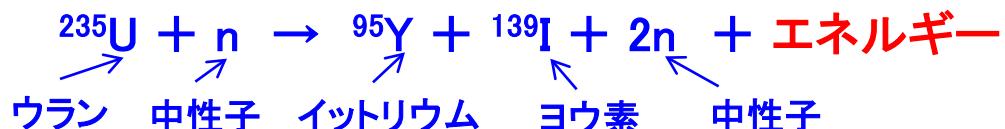
1、3、4号機が水素爆発した福島第一原発

原子炉の技術

原子炉の種類と構造から原子炉の技術を見る

原子炉を作る技術

ウラン原子の核分裂（数多い反応の中の一例）



1個のウラン235に中性子1個を吸収させると、核分裂が起こり、2個の中性子が発生する

自然界のウランは、ウラン238が99.3%、**ウラン235が0.7%**である。容易に上の反応をさせるには、予めウラン235の濃度を高めておく必要がある。（これを**ウラン濃縮**という）

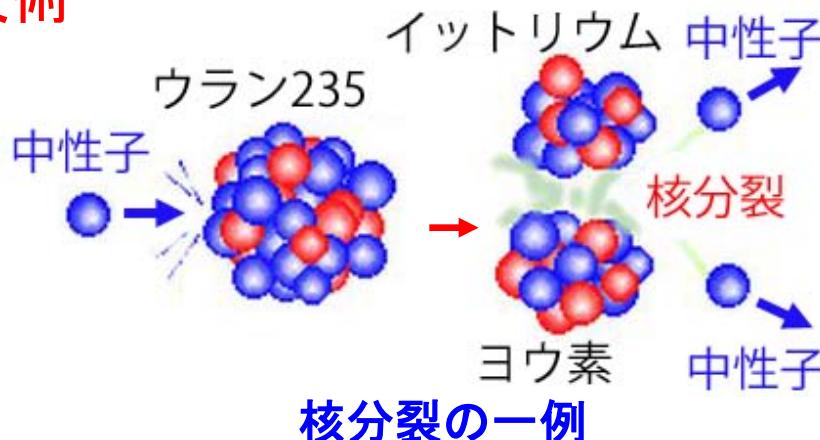
濃縮度20%以下のものは低濃縮ウランと呼ばれる。軽水炉では2～5%のものが燃料として使用される。ウラン型原爆で使用される高濃縮ウランは濃縮度70%以上。

上の反応で発生した中性子うち、1個を別のウラン235に吸収させ、1個をウラン以外の物質に吸収させると、**連鎖反応**が起こる。この状態を**臨界**という。

臨界を維持するためには中性子の量を制御する必要がある。この目的のための材料を**制御材（制御棒）**という。

核分裂で発生した中性子は速度が速い中性子（**高速中性子**）でウランに吸収され難い。そこで、高速中性子を、ウランに吸収されやすい低速中性子（**熱中性子**）に変換する必要がある。このために用いるのが**減速材**である。

原子力発電では核反応で発生した熱を取り出して、タービンを回さなければならぬ。熱を運ぶ媒体を**冷却材**という。



原子炉の種類

減速材による分類

世界の主流

- 軽水炉 通常の水は中性子減速能は大きいが、吸収能も大きいので、濃縮ウランを用いる必要あり。
- 重水炉 重水は中性子吸収能が小さいので、天然ウランが使える。しかし重水は高価である。
- 黒鉛炉 中性子吸収能が小さいので、天然ウランが使える。黒鉛は安価であるが、別に冷却材が必要。

冷却材による分類

世界の主流

Chernobyl はこのタイプ

- 軽水冷却炉 軽水が減速材と冷却材を兼ねる。
- 重水冷却炉 重水が減速材と冷却材を兼ねる。
- ガス冷却炉 二酸化炭素やヘリウムを冷却材に用いる。熱運搬能力が小さいため、最近は使われない。
- 溶融金属冷却炉 冷却材のナトリウムは水と激しく反応する。 → 高速増殖炉のナトリウム漏れ事故！

冷却材の状態による分類

GEの発明、福島はこのタイプ

- 沸騰水型原子炉(BWR) 炉内の冷却水が沸騰しており、そこから直接蒸気を取り出す。
- 加圧水型原子炉(PWR) 炉内の冷却水が加圧されており、熱交換機を介して蒸気を取り出す。

WHの発明、西日本に多いタイプ

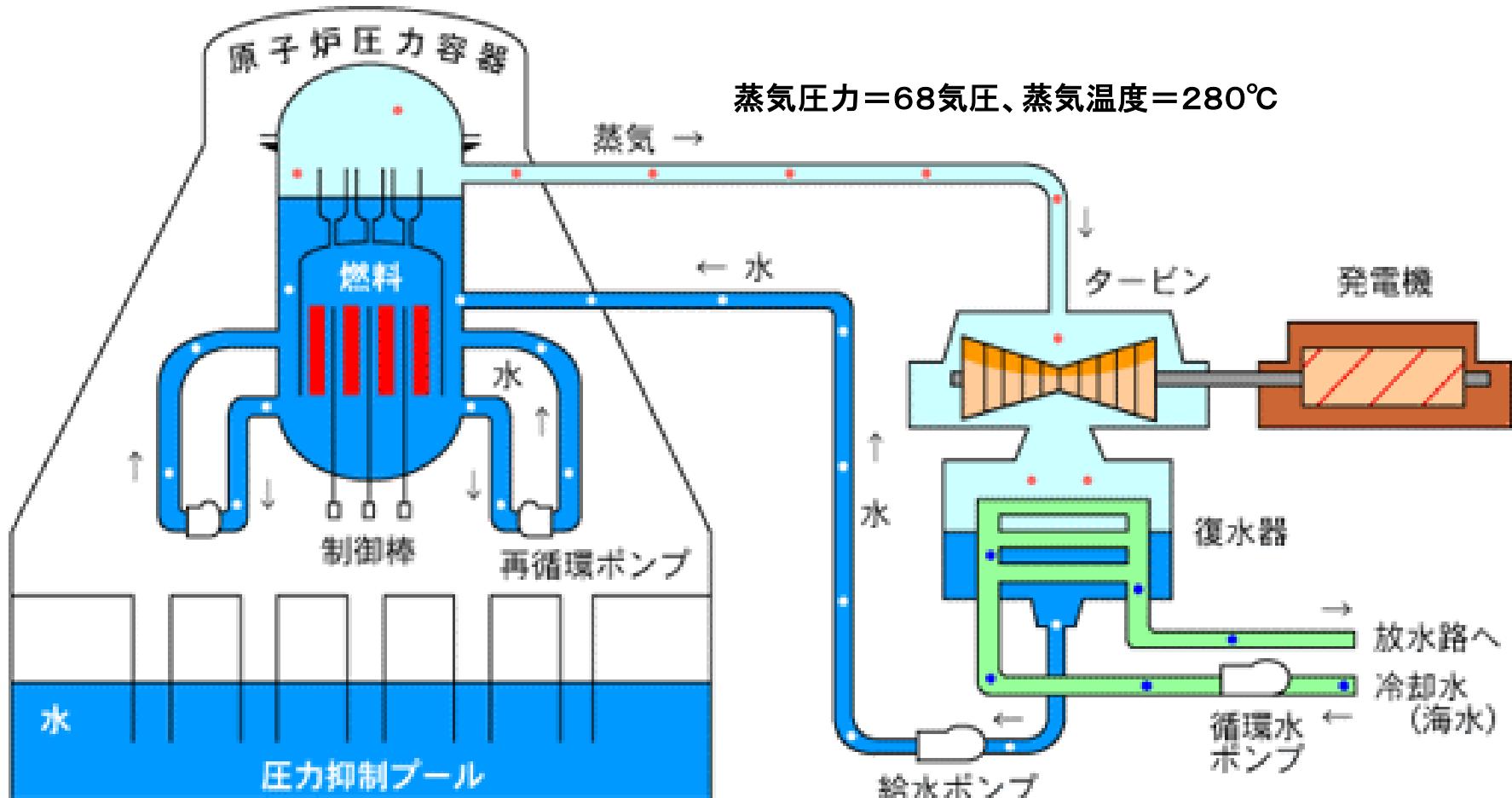
中性子の状態による分類

現存するすべての原子炉はこのタイプ

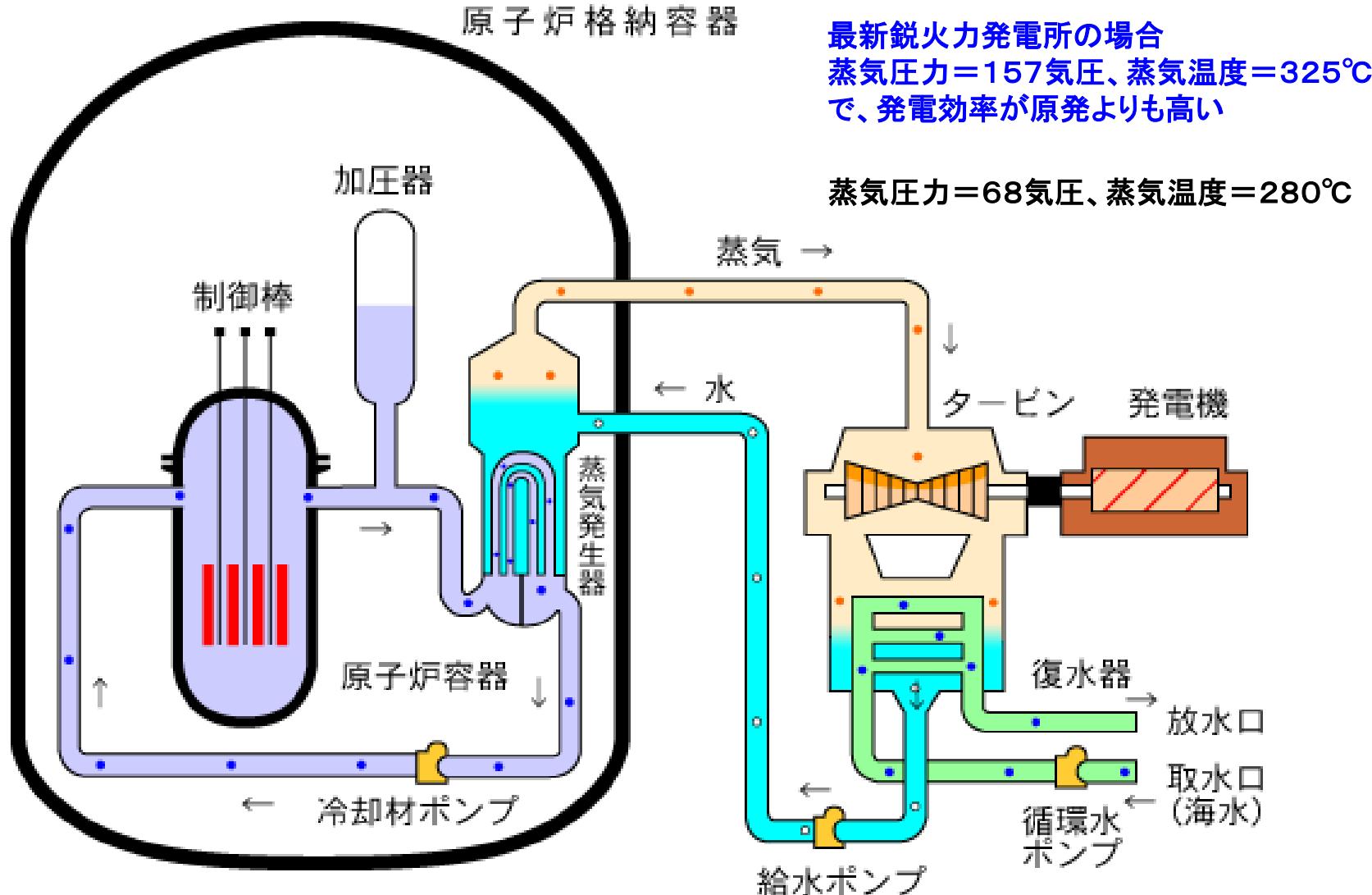
- 熱中性子炉 热中性子を利用する炉。ウラン235を効率よく核分裂させることができる。
- 高速中性子炉 高速中性子を利用する炉。中性子を吸収したウラン238はプルトニウムになるので燃料の増殖が可能である。(高速増殖炉) → 「もんじゅ」は、いつまでたっても完成しない

原子炉の構造 沸騰水型原子炉

原子炉格納容器



原子炉の構造 加圧水型原子炉

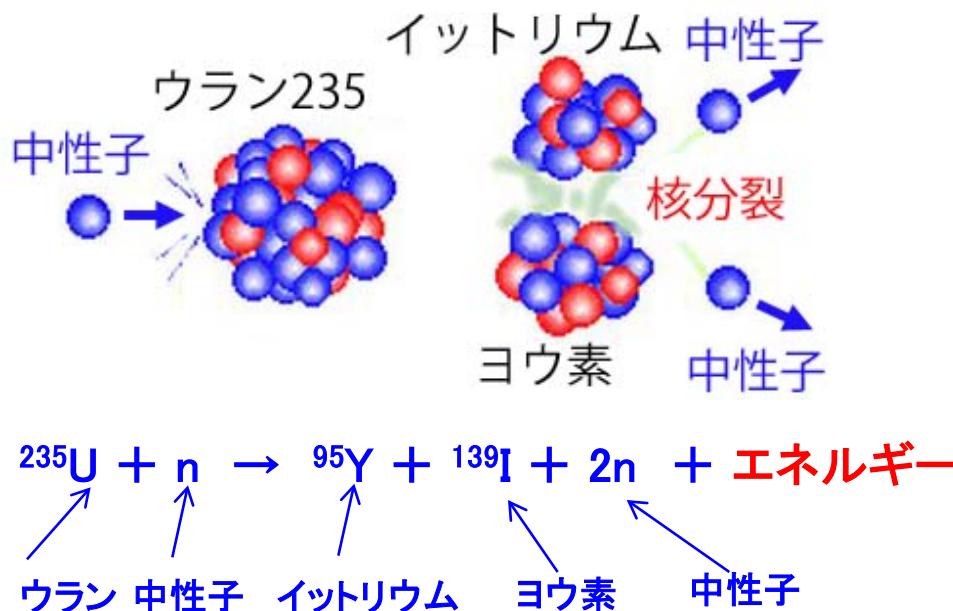


核分裂生成物(死の灰)

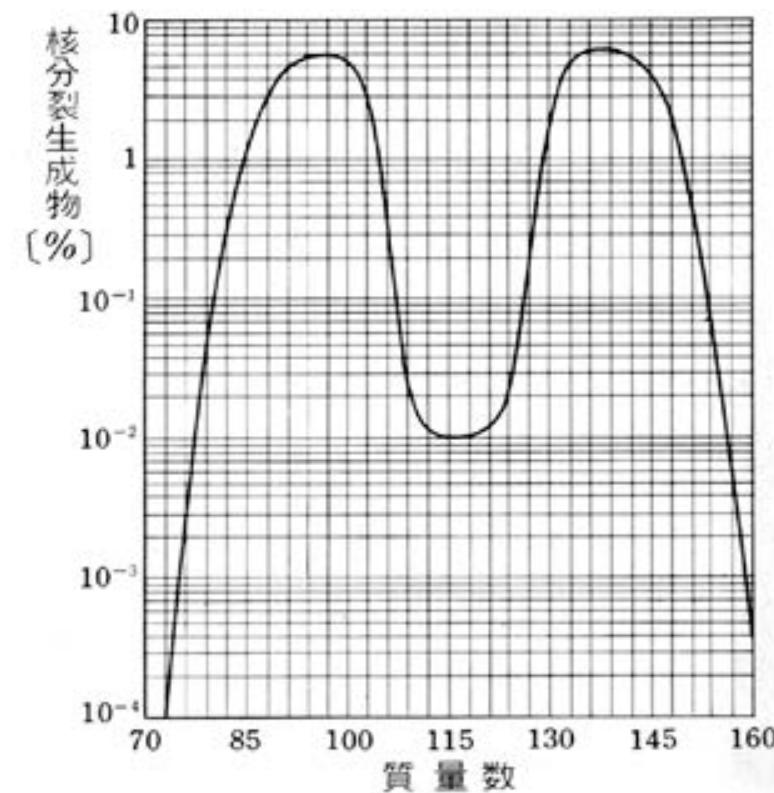
ウラン235が中性子を吸収したときに、もし核が均等に分裂すれば、
 $235 \div 2 = 117 \sim 118$ の質量数の原子ができるはずである。

実際は均等に分裂せず、少し軽い原子核と
 少し重い原子核ができる。

前のスライドで、数多い反応の中の一例と
 いったのは、そのためである。



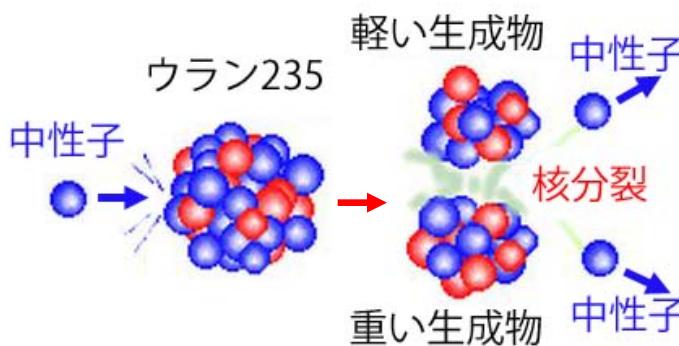
この結果、ウラン235が核分裂したときに生じる
 核分裂生成物(死の灰)には、いろいろな特徴
 的な原子核(核種)が含まれる。



核分裂生成物の割合

核分裂生成物(死の灰)

ウラン235が核分裂したときに生じる核分裂生成物(死の灰)の主なもの

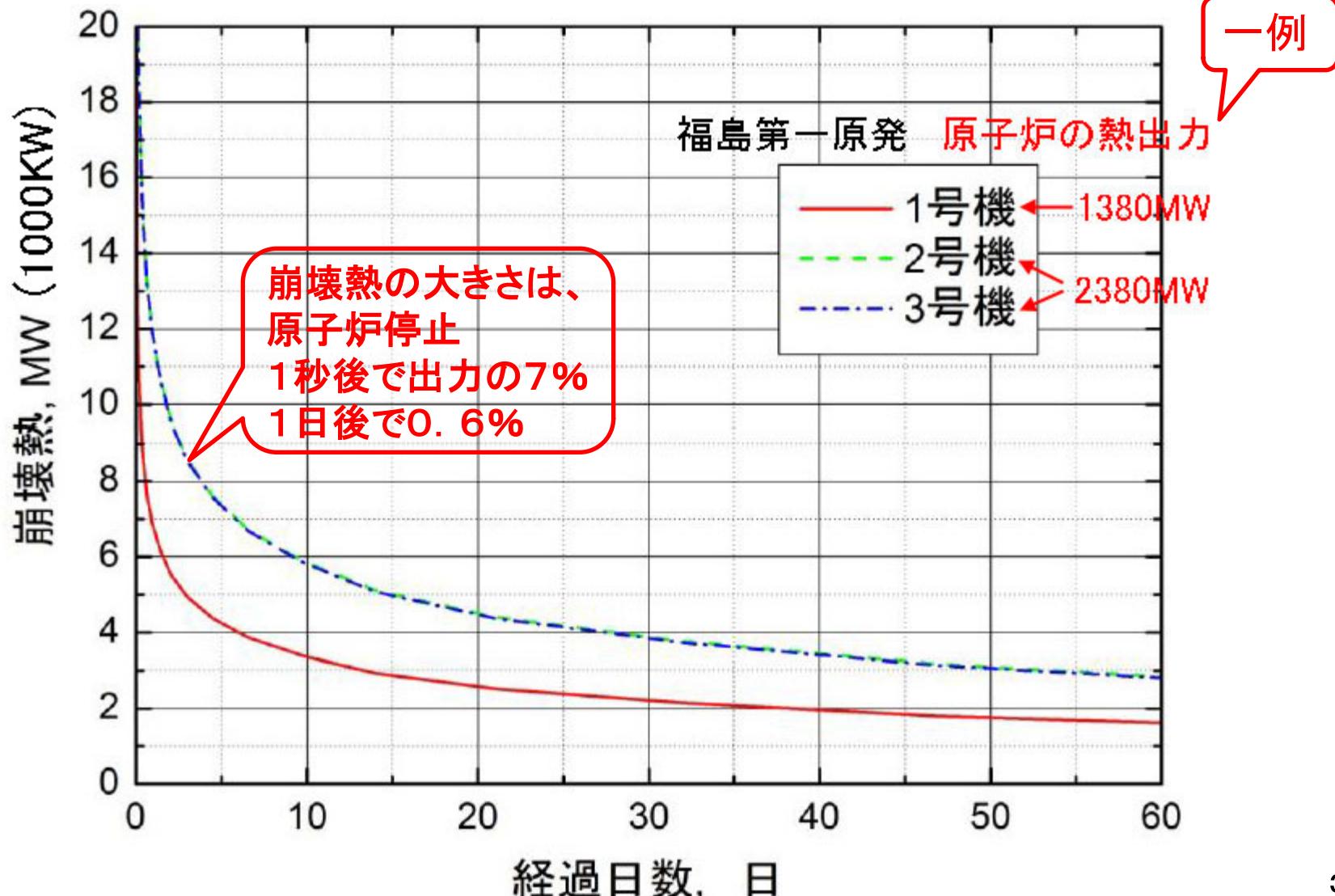


生成物(例)		収率	半減期
軽い生成物	ストロンチウム89	^{89}Sr	4.73%
	ストロンチウム90	^{90}Sr	5.75%
	ジルコニウム93	^{93}Zr	6.30%
	テクネチウム99	^{99}Tc	6.05%
重い生成物	ヨウ素129	^{129}I	0.54%
	ヨウ素131	^{131}I	2.83%
	キセノン133	^{133}Xe	6.70%
	セシウム133	^{133}Cs	6.70%
	ヨウ素135	^{135}I	6.28%
	セシウム137	^{137}Cs	6.19%
	プロメチウム147	^{147}Pm	2.27%
	サマリウム149	^{149}Sm	1.09%

原子炉を停止しても、炉心内にはそれまでに生成された核分裂生成物が蓄積している。核分裂生成物は崩壊し放射線を出す。その放射線エネルギーは原子炉内で熱に変換される。その熱を崩壊熱と呼ぶ。使用済み燃料を取り出した後も崩壊熱を出し続ける。

崩壊熱とは

原子炉を停止しても、炉心内にはそれまでに生成された核分裂生成物が蓄積している。核分裂生成物は崩壊し放射線を出す。その放射線エネルギーは原子炉内で熱に変換される。その熱を**崩壊熱**と呼ぶ。使用済み燃料は、取り出された後も崩壊熱を出し続ける。



河合弁護士監督の映画「日本と原発 4年後」

自主上映会場・日時は <http://www.nihontogenpatsu.com/> から分ります

[上映会のお申し込み](#) | [お問い合わせ](#)

お知らせ

上映会予定

予告動画

ストーリー

監督・製作チーム

『日本と原発』トーク

English

映画

「日本と原発」

なぜ弁護士がドキュメンタリー映画を作らねばならなかったのか？

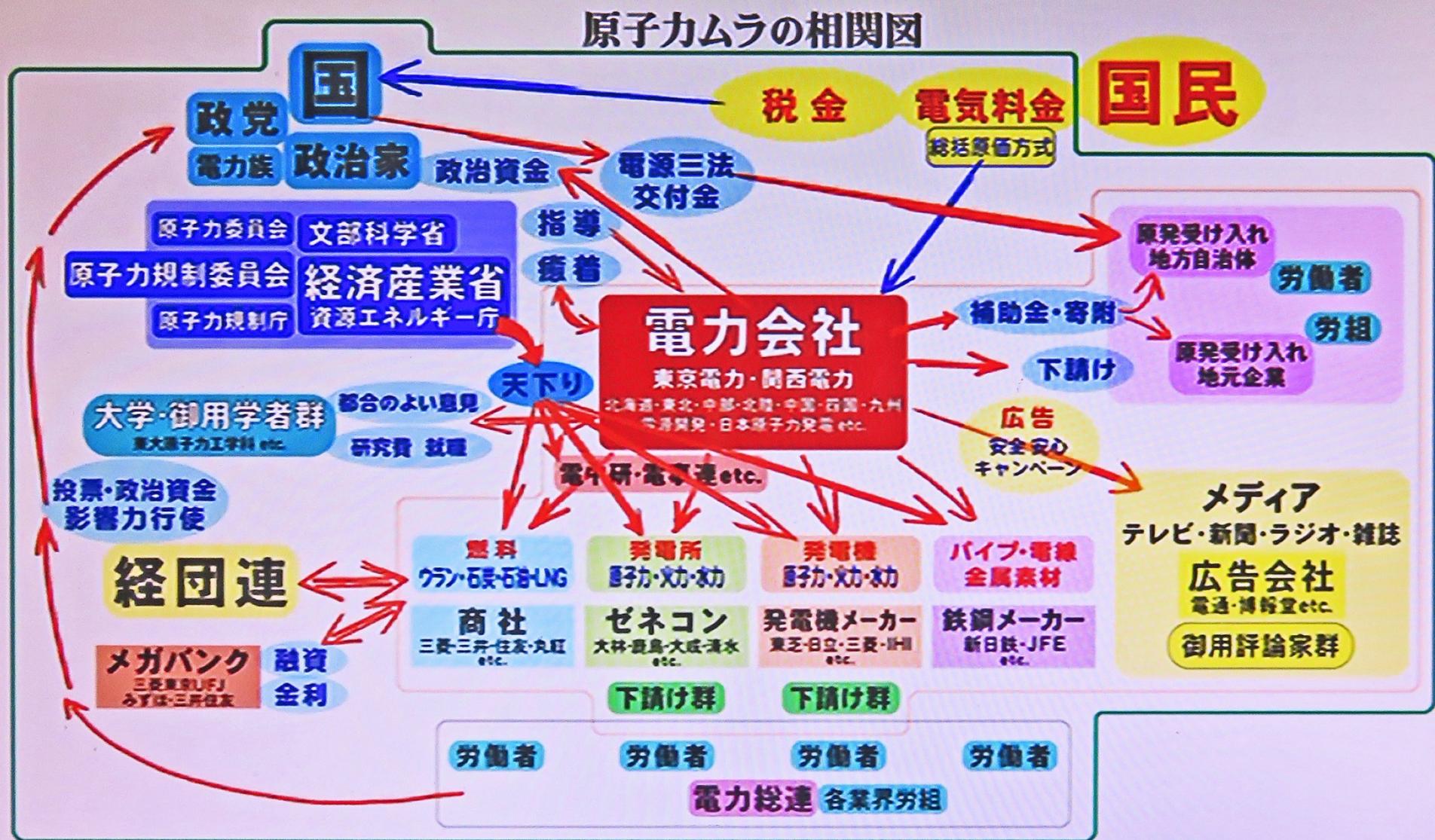
丸2年の歳月をかけて、弁護士二人がその眼で、耳で確かめた原発の真実とは。

日本と原発
4年後
劇場公開情報

▶ 詳しくは[こちら](#)

「原子力ムラの相関図」

映画「日本と原発」より

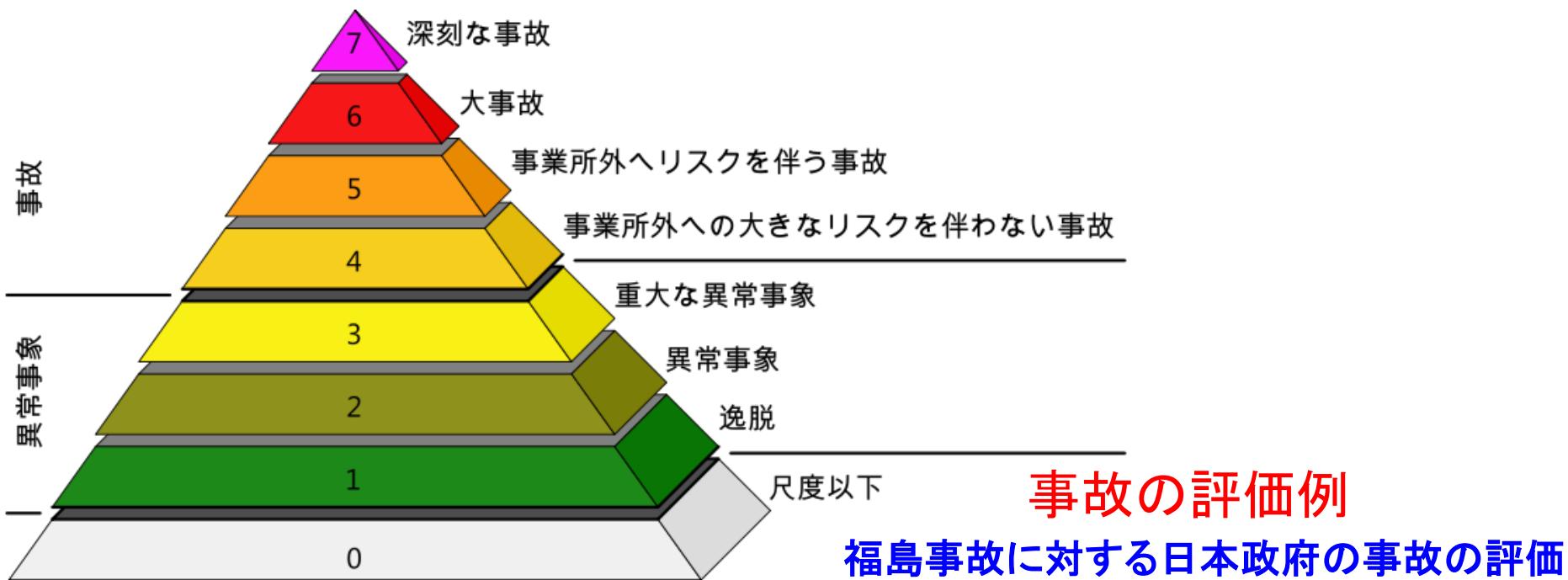


福島原発事故

4つの事故調査委員会で事故は解明されたのか

福島原発事故(1)

国際原子力機関 (IAEA)が定めた国際原子力事象評価尺度



福島事故に対する日本政府の事故の評価

3月11日16時	レベル3
3月12日	レベル4
3月18日	レベル5
4月12日	レベル7

過去の事故の評価

1979年スリーマイル島	レベル5
1986年チェルノブイリ	レベル7
1999年JCO臨界事故	レベル4

各事故調の概要

760頁

640頁

410頁

373頁

	政府	国会	民間	東電
名称	東京電力 福島原子力発電所における 事故調査・検証委員会	東京電力 福島原子力発電所 事故調査委員会	福島原発事故 独立検証委員会	福島原子力事故 調査委員会
構成	委員長・畠村洋太郎 (東京大学名誉教授) 委員9名	委員長・黒川清 (元日本学術會議会長) 委員9名	委員長・北澤宏一 (前科学技術振興機構理事長) 委員5名	委員長・山崎雅男 (代表取締役副社長(当時)) 委員7名
調査	[ヒアリング] 政治家、東電関係者ら772人 [その他] 発電所の視察、首長からの意見聴取など	[ヒアリング] 菅直人元首相ら政治家、東電 関係者延べ1167人 [その他] 発電所視察、被災住民や 発電所作業員へのアンケートなど	[ヒアリング] 政治家ら約300人 東電関係者には実施せず	[ヒアリング] 役員・社員延べ約600人
委員会特徴	政府設置だが、従来の原子力行政から独立した立場の委員会	日本の憲政史上初となる国会に設置された調査機関	政府や企業から独立した市民の立場で調査・分析を実施	社外有識者で構成する「原子力安全・品質保証会議事故調査検証委員会」の意見も聞き調査・検証を実施
分析・提言など	事故原因、政府や東電の初動対応、過去の法規制を中心検証 再発防止と被害軽減のための25項目を提言	事故検証、政府や東電の初動対応、法規制を中心に検証 国会による規制機関の監視など7項目を提言	事故の歴史的、構造的要因や官邸の現場介入を分析 技術的検証は少ない 個々の検証ごとに、その解決策を提示	事前の備え、初動対応のほか、詳細なプラントデータをもとに事故原因を解析 津波対策を中心に具体的な対策を提案
公表日	中間:2011年12月26日 最終:2012年 7月23日	2012年7月5日	2012年2月27日	中間:2011年12月2日 最終:2012年6月20日

(以下より作成)

国立国会図書館 調査と情報 第756号「福島第一原発事故と4つの事故調査委員会」

日本電気協会発行「東京電力・福島第一原子力発電所 ここがポイント 事故調査報告書」

各事故調報告書

福島原発事故(3)

福島第一原発の事故状況

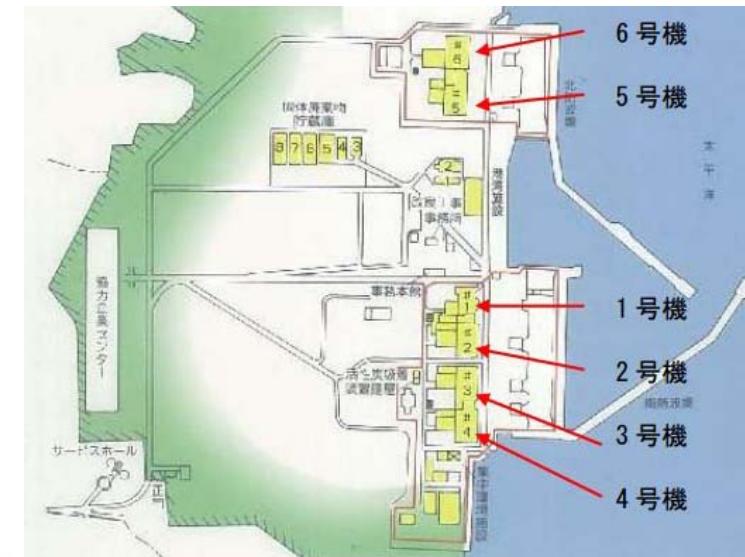
場所 福島第一原発

時刻 2011年3月11日14時46分より

契機 東北地方太平洋沖地震による地震動
と津波

進展 地震動による原子炉の一部破壊
地震動による送電線等外部電源喪失
津波によるディーゼル発電機の冠水
水素ガス爆発、炉心のメルトダウン

福島第一原発の設備と事故状態の一覧



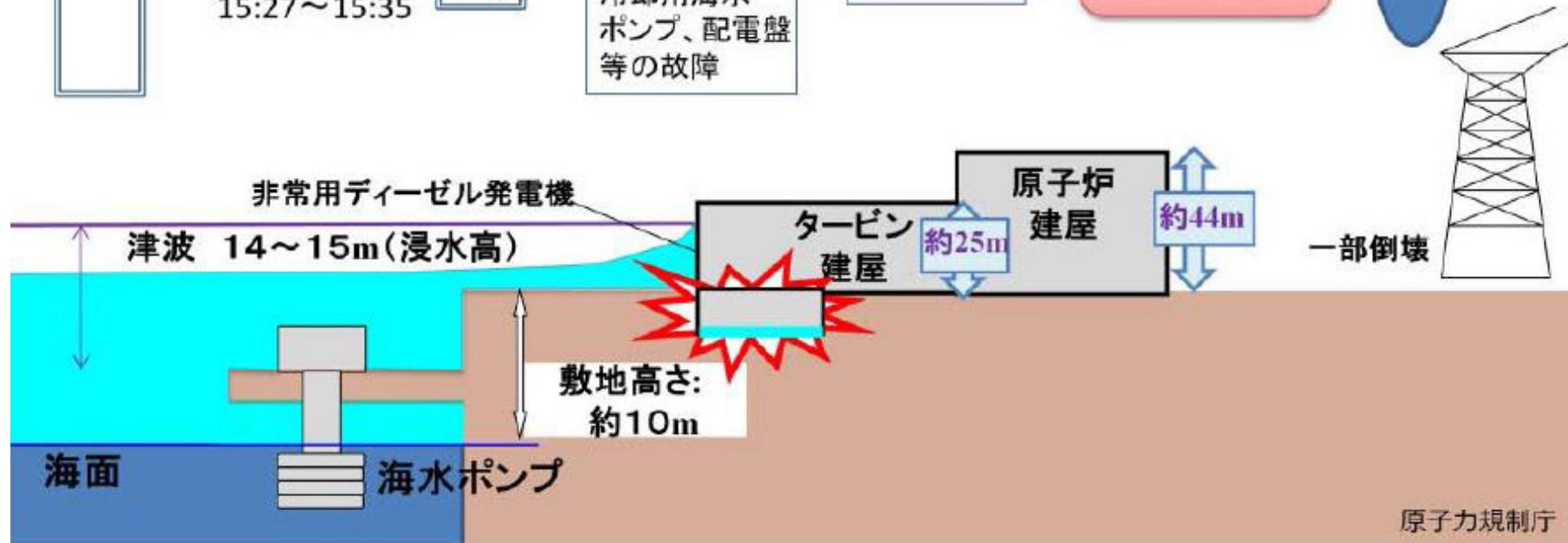
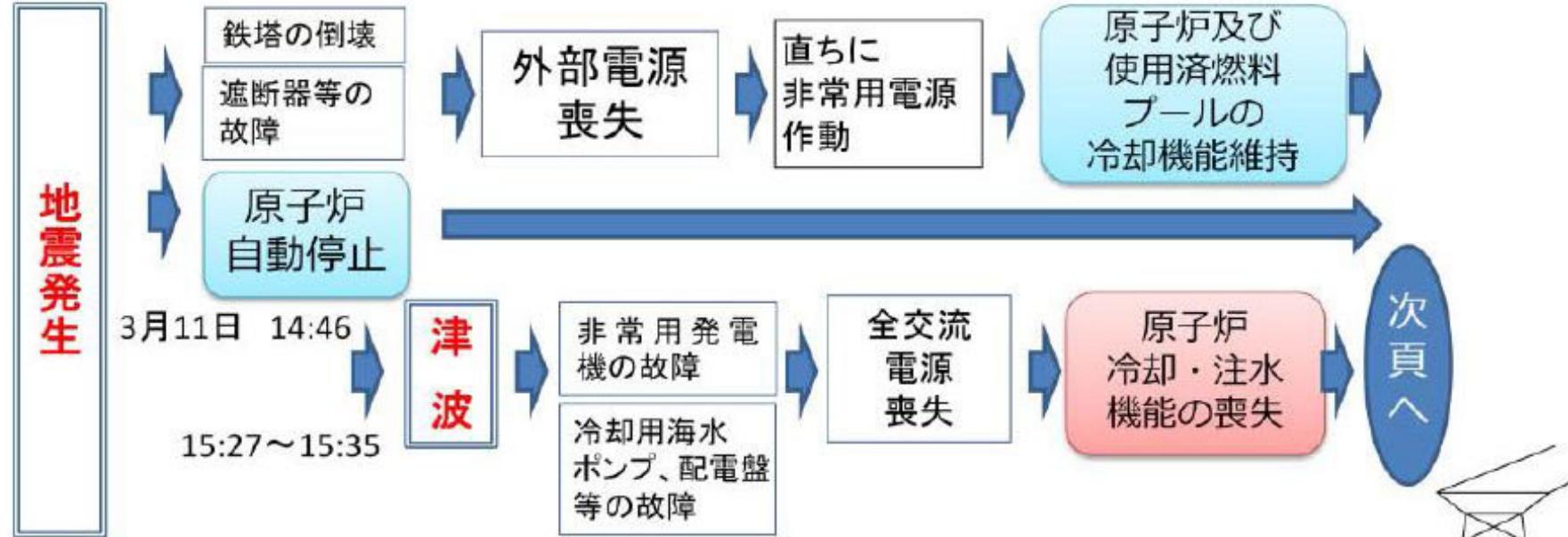
	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機
電気出力 (万 kW)	46.0	78.4	78.4	78.4	78.4	110.0
建設着工	1967/9	1969/5	1970/10	1972/9	1971/12	1973/5
営業運転開始	1971/3	1974/7	1976/3	1978/10	1978/4	1979/10
原子炉形式	BWR-3	BWR-4			BWR-5	
格納容器形式	マーク I					マーク II
燃料集合体数 (体)	400	548	548	548	548	764
制御棒本数 (本)	97	137	137	137	137	185
事故直前の状況	運転中 ⇒自動停止	運転中 ⇒自動停止	運転中 ⇒自動停止	定期点検中 プールに使用済燃料	定期点検中	定期点検中
建屋健全性	水素爆発	損傷 *1	水素爆発	水素爆発 *2	健全	健全
炉心状態 (推定)	メルトダウン	メルトダウン	メルトダウン	MDなし	健全	健全

*1 1号機の水素爆発で2号機建屋のパネルが脱落したため

*2 3号機のベントで4号機建屋に水素が流入したため

東電福島第一原発
事故の状況

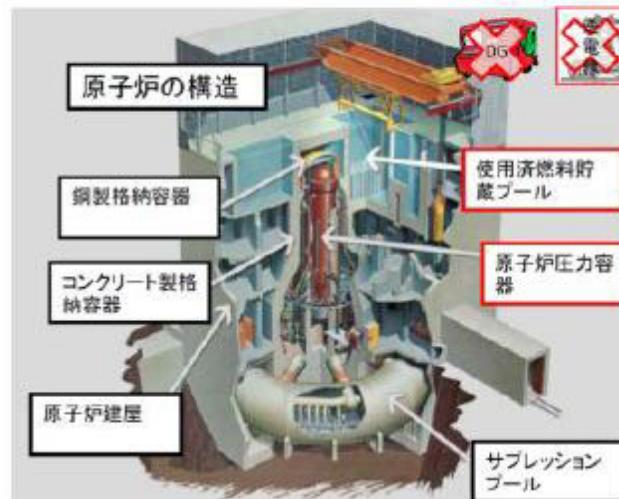
事故の要因(推定):地震と津波の影響



事故の要因(推定):原子炉内の状況

前頁より

原子炉冷却・注水機能の喪失

水蒸気による
原子炉内圧力
上昇弁の開放による
原子炉内減圧タイミング良く実施
することができず燃料空焚きに
による
温度上昇消防ポンプ等
による
代替注水

発生した事象

- ▶ 水-ジルコニウム反応による水素発生
→ 水素爆発
- ▶ 炉心燃料の過熱
→ 炉心溶融
- ▶ 圧力容器貫通部の劣化
→ 溶融燃料の一部が圧力容器から格納容器へ流下
- ▶ 格納容器の劣化
→ 高レベル汚染水の流出発生
→ 放射性物質の大気中への放出

ほぼ回避

- ◆ 水蒸気爆発
- ◆ 再臨界
- ◆ 使用済燃料プール冷却水の蒸発による燃料損傷

原子爆弾・水素爆弾・水素爆発

原子爆弾は「核分裂」、水素爆弾は「核融合」、水素爆発は「化学反応」

原子爆弾:ウランが核分裂する 原子力発電所の原理と同じ



ウラン イットリウム ヨウ素

水素爆弾:水素が核融合する 核融合炉の原理と同じ



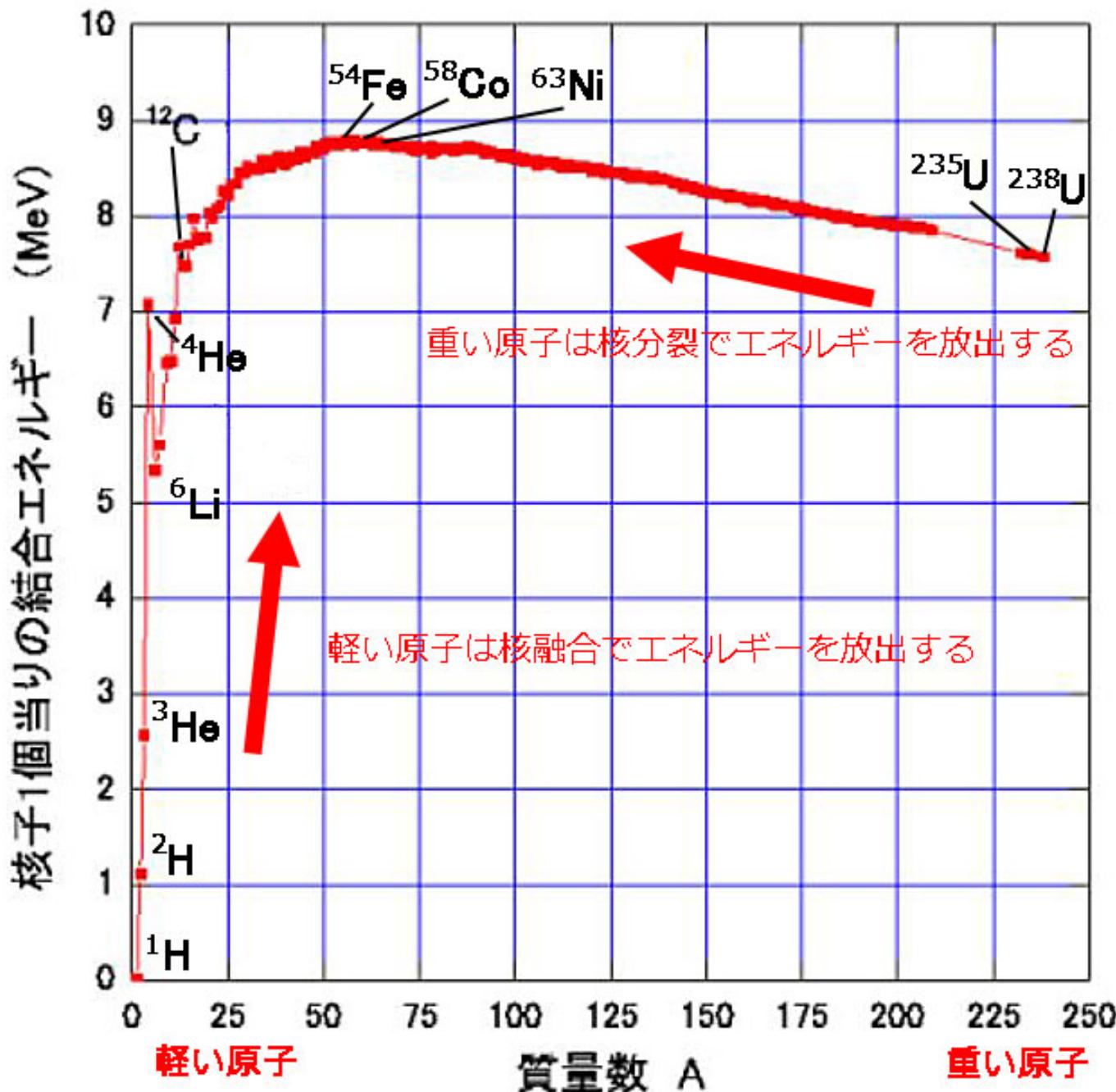
二重水素 三重水素 ヘリウム

太陽のような高温高圧が必要。これを地上に実現するのが国際熱核融合実験炉。
EU、日、ロ、米、中、韓、インドの7ヶ国が参加。総資金は100億ユーロ(1.6兆円)

水素爆発:水素ガスが大気中の酸素と化合して爆発する(燃焼)



ちょっと脇道にそれますが、核分裂と核融合の話



福島原発事故の主要原因(私見)

1. 送電鉄塔倒壊など外部電源が喪失したこと

重要施設では外部電源は、独立した2系統から取るのが常識であるが、東京電力は送電系の信頼性を過信しており、地震による送電鉄塔倒壊は全く想定していなかった。

2. 非常用ディーゼル発電機を低いところに置いていたこと

タービン建屋の地下という発電所内の一一番低い場所に置いていて、津波に対する配慮が全く欠けていた。

(文科省地震調査研究推進本部が発表した三陸沖での最高15.7mの津波予想を東京電力は承知していたが、「仮想的な数値」だとして採用しなかった)

3. 作業者に事故訓練が不十分であったこと

全電源喪失に備えた電源車の準備、ベントの操作方法の検討などを、事故が発生してから急遽行ったが、初めてのことで現場は混乱に陥った。

以上はいずれも原発施設の安全性審査で当然指摘されるべきであるが、原子力ムラ内では発言が憚られたのは当然であろう。これが根本的な原因である。

放射能の話

放射能とは何か、どんな種類があるのか、
どのようにして測るのか、どこまで安全か

はじめに 放射線・放射能・放射性物質とは

- ランタン

(光を出す能力を持つ)



カンデラ (cd)

(光の強さの単位)



ルクス (lx)

(明るさの単位)

- 放射性物質 = 放射線を出す能力 (放射能) を持つ



ベクレル (Bq)

▶ 放射能の強さの単位

換算係数



シーベルト (Sv)

▶ 人が受ける放射
線被ばく線量の
単位

※ シーベルトは放射線影響に関する統一的な基礎資料

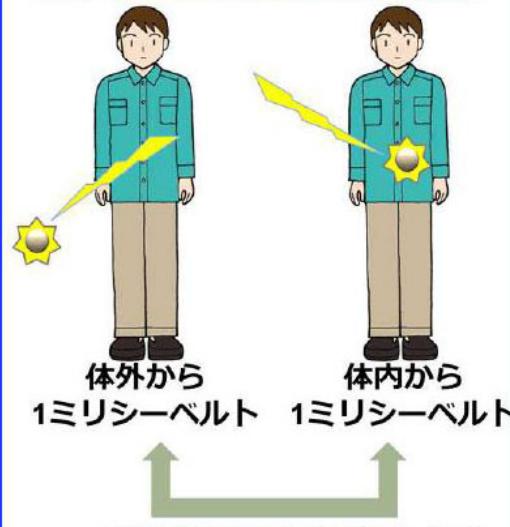
ベクレル (Bq)

放射能の量を表す単位

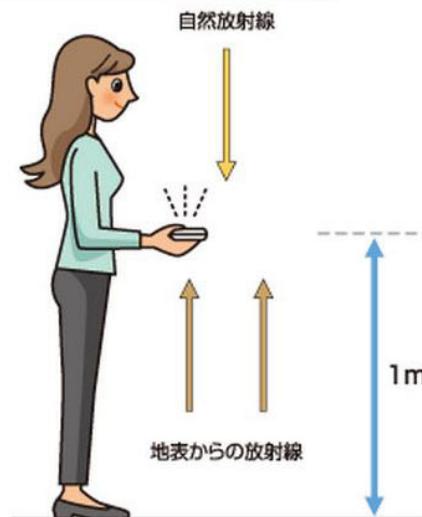
1秒間に1個原子核が壊れる
= 1ベクレル (Bq)



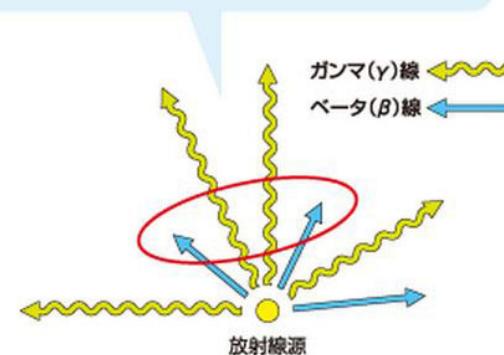
食品検査用ベクレル計

**シーベルト (Sv)**人が受ける被ばく線量の単位。
放射線影響に関係付けられる

環境省による

**空間線量率
シーベルト／時間 (Sv/h)**

地表近くで測る場合、 β 線も測ってしまうと、
正しく外部被ばく量に変換できない



放射能の話(3)

ベクレル(Bq) 放射能の量を表す単位

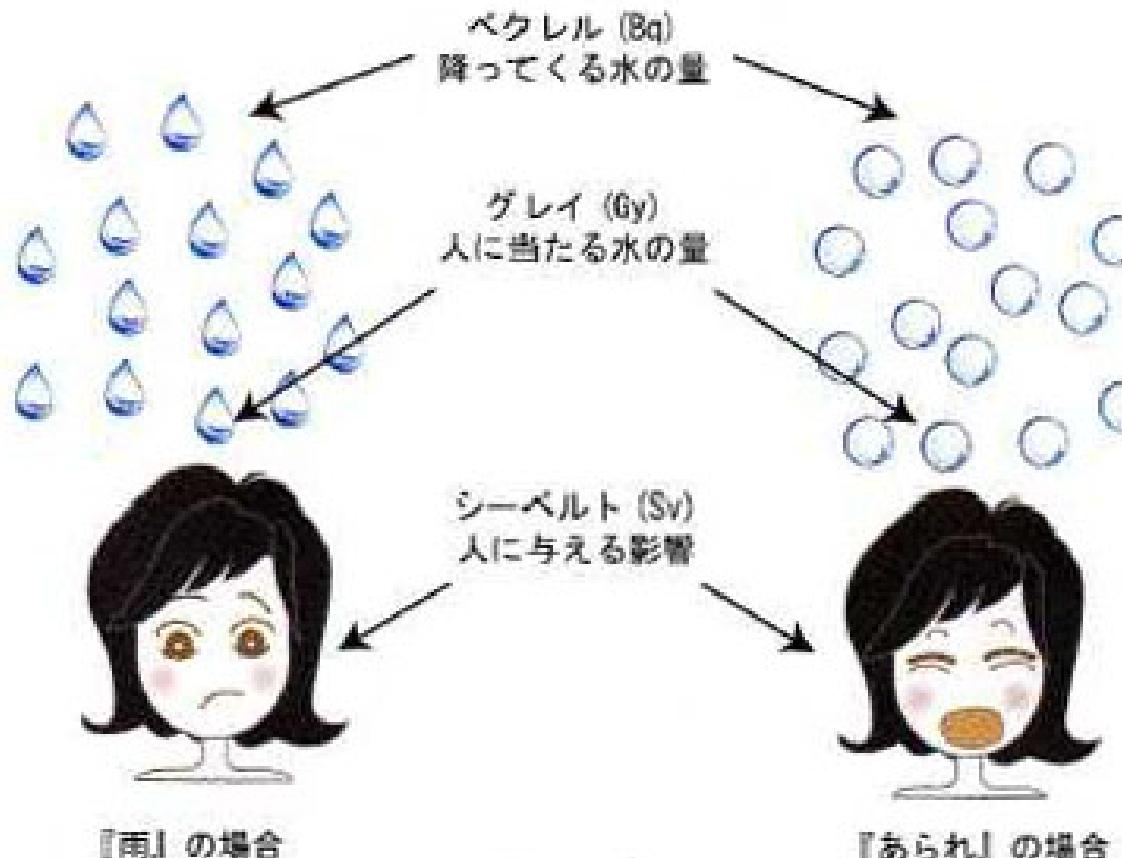
1Bqは、1秒間に1個の放射性壊変をする放射性物質の量を表します

グレイ(Gy)

吸収線量を表す単位 物質がどれだけ放射線のエネルギーを吸収したかを表す量
1Gyは物質1kg当り、1ジュールのエネルギー吸収を与える吸収線量

シーベルト(Sv) 実効線量を表す単位 放射線が生物に及ぼす効果を表す量

実効線量=吸収線量×放射線荷重計数×組織荷重計数



AsepticRoom HPより

放射線

放射線の種類

電離放射線

電磁波

X線（原子核の外で発生）

 γ 線（原子核から出る）

放射線には電離放射線と非電離放射線があるが、通常、放射線といった場合は、電離放射線を指すことが多い。

粒子線

荷電粒子線
(直接電離放射線) β 線（原子核から飛び出る電子） α 線（原子核から飛び出るヘリウムの原子核）

陽子線，重陽子線，三重陽子線，重イオン線

荷電中間子線

核分裂片など

非荷電粒子線
(間接電離放射線)

非荷電中間子線

中性微子（ニュートリノ）

中性子線など（原子炉，加速器，アイソトープ
ニュートロン などから作られる）

非電離放射線

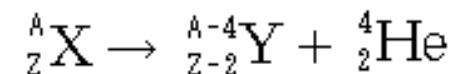
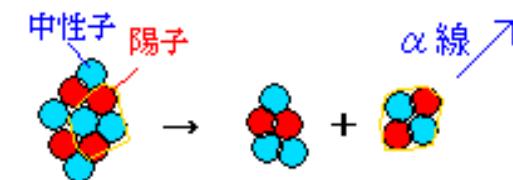
電波，マイクロ波，赤外線，可視光線，紫外線など

α線、β線、γ線とは何か

α線

α線は、α崩壊により放出される放射線。

α線の本体は、高速のヘリウムの原子核である。原子番号2、質量数4のヘリウム原子核は、陽子2個、中性子2個を持つので、α崩壊がおこると元の原子核(親核)の原子番号が2減少し、質量数は4減少した原子核(娘核)ができる。

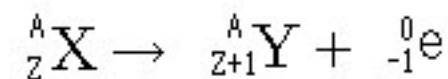
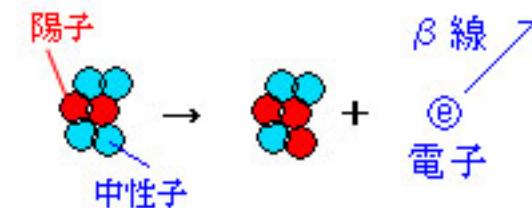


β線

β線は、β崩壊により放出される放射線。

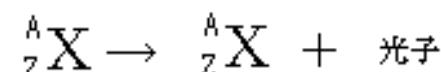
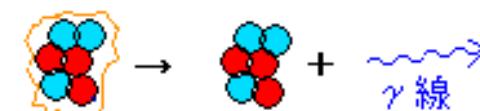
β線の本体は高速の電子である。

β崩壊が起こると中性子が陽子になるので原子番号が1増加するが、質量数(陽子と中性子の数の和)は変化しない。

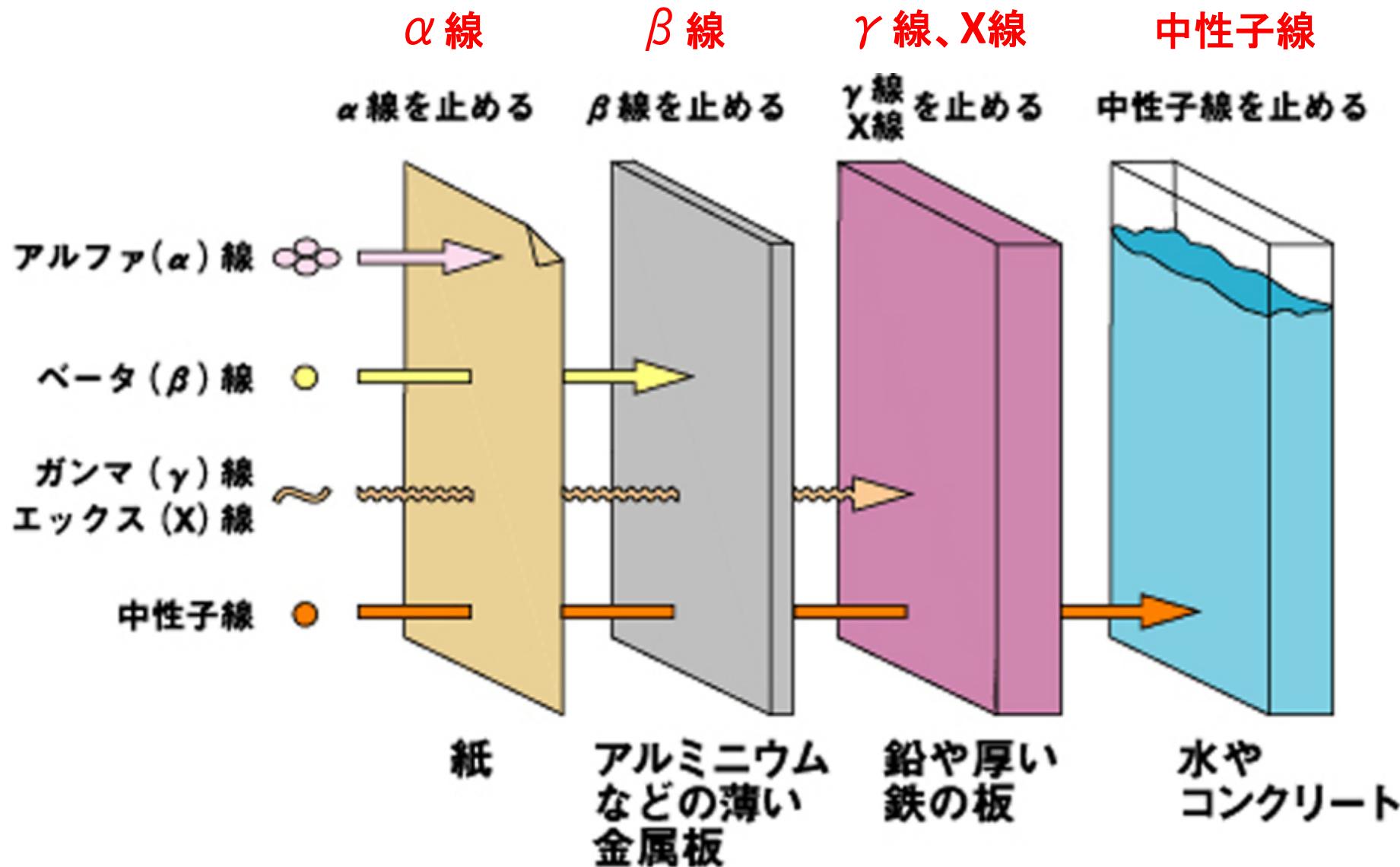


γ線

α崩壊やβ崩壊をした直後の原子核はまだ不安定で、続けてγ線を放出することが多い。γ線の本体は光子で、X線や光の仲間である。γ線を放出しても、原子番号や質量数は変化しない。



放射線の透過力



原発事故由來の放射性物質

I-127は安定ヨウ素

	I-131 ヨウ素	Cs-134 セシウム	Cs-137 セシウム	Sr-90 ストロンチウム	Pu-239 プルトニウム
出す放射線 の種類	β , γ	β , γ	β , γ	β	α , γ
物理学的 半減期	8日	2.1年	30年	29年	24,000年
実効半減期	8日	64日	70日	15年	197年
蓄積する 器官・組織	甲状腺	全身	全身	骨	骨、肝

実効半減期：体内に取り込まれた放射性物質の量が、生物学的排泄作用(生物学的半減期)および放射性物質の物理的壊変(物理学的半減期)の両者によって減少し半分になるまでの時間。緊急被ばく医療テキスト(医療科学社)の値を引用した。

食品からの被ばく線量(計算例)

(例) 成人がセシウム137を100 Bq/kg含む食品を0.5 kg摂取

$$100 \text{ Bq/kg} \times 0.5 \text{ kg} \times 0.013 = 0.65 \mu\text{Sv}$$

$$= 0.00065 \text{ mSv}$$

実効線量係数($\mu\text{Sv}/\text{Bq}$)



	ヨウ素131	セシウム137
3ヶ月児	0.18	0.021
1歳児	0.18	0.012
5歳児	0.10	0.0096
成人	0.022	0.013

Bq : ベクレル

μSv : マイクロシーベルト

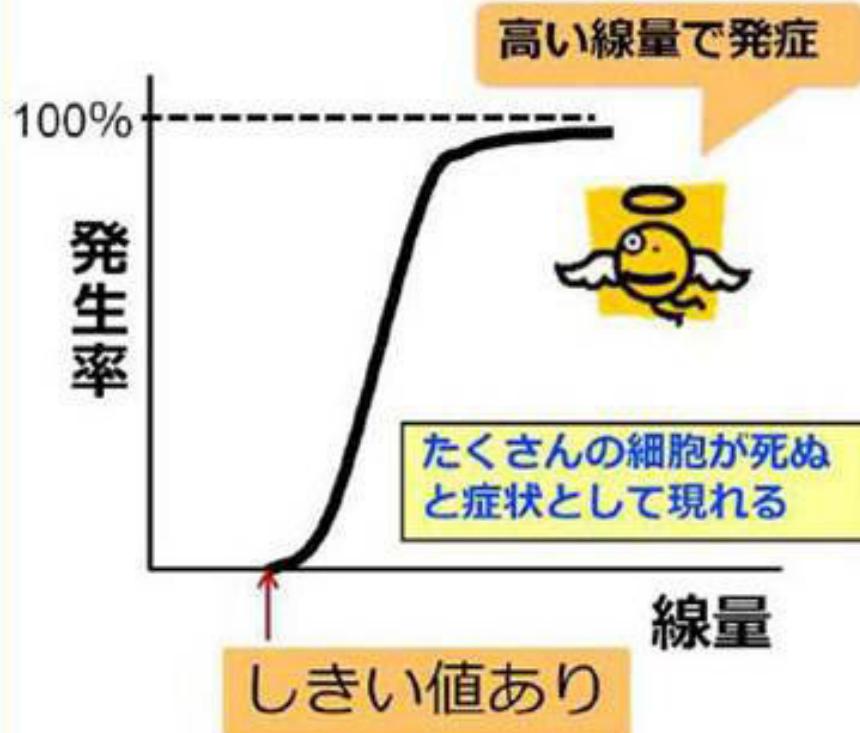
mSv : ミリシーベルト

ICRP Database of Dose Coefficients CD-ROM, 1998

線量反応関係

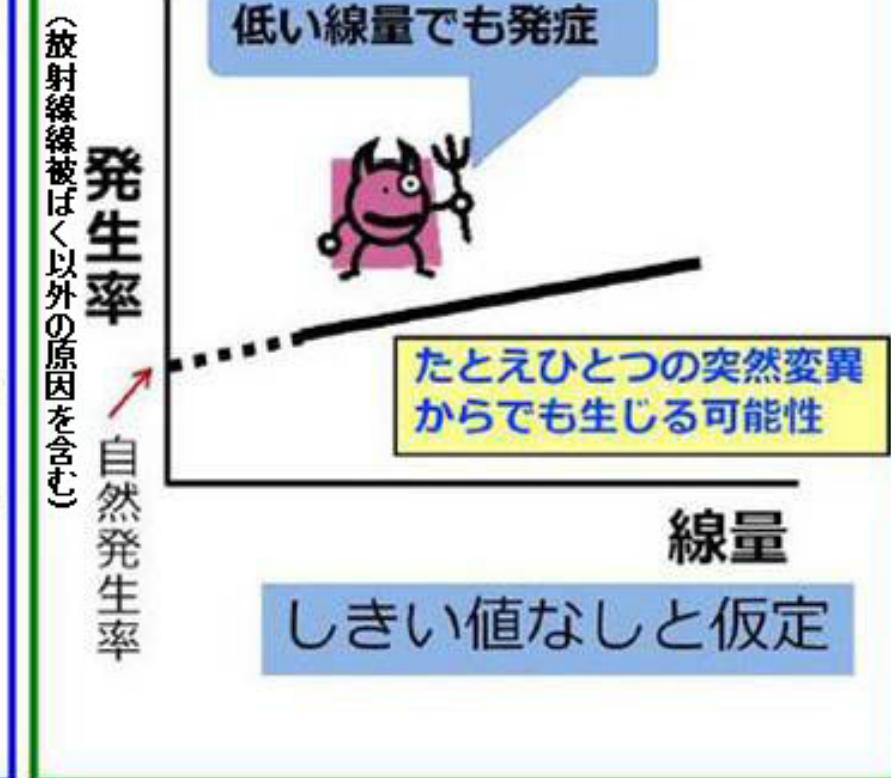
確定的影響

(細胞死が引き金)



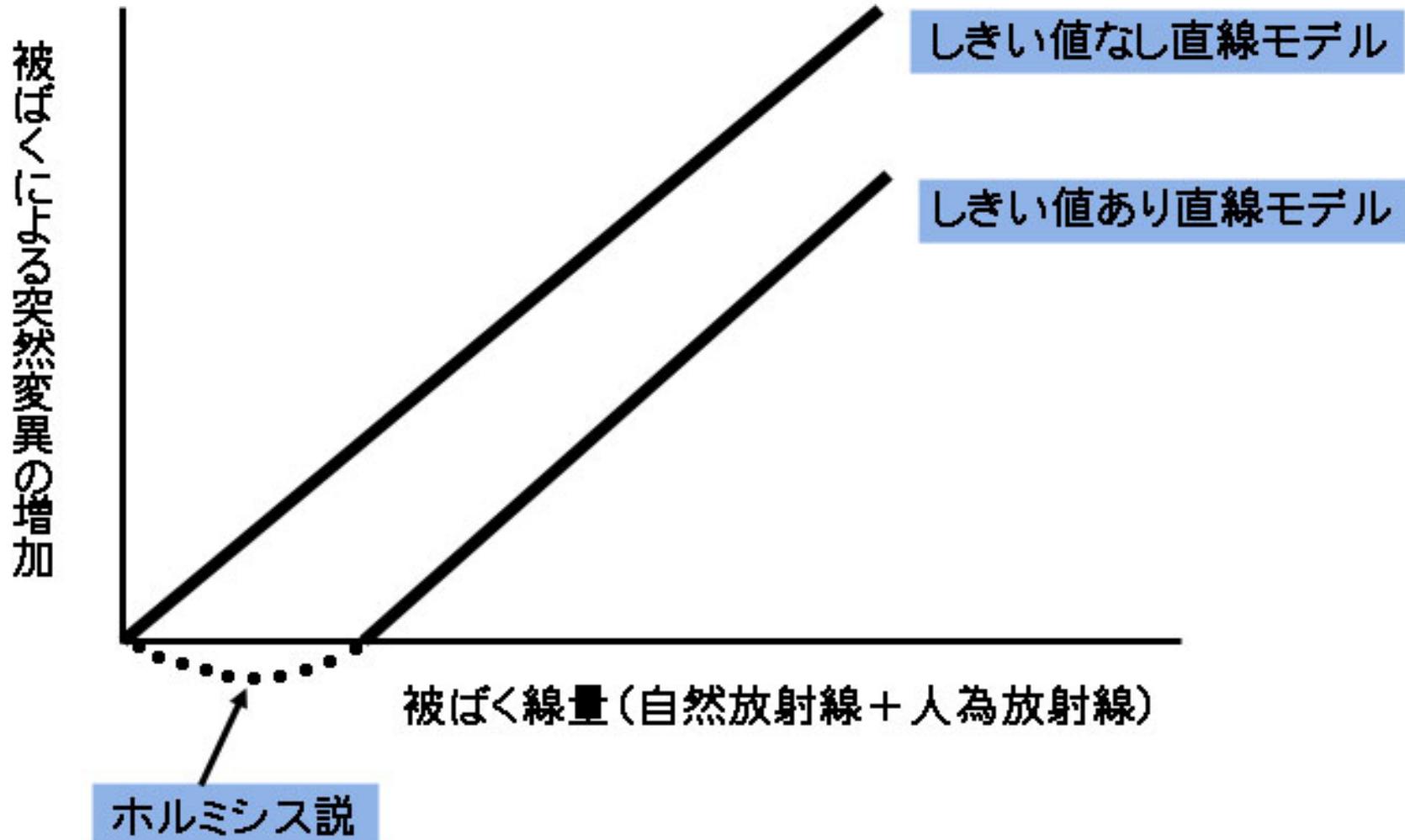
確率的影响

(突然変異が引き金)



確率的影響

(突然変異が引き金)



国際放射線防護委員会 (ICRP)

放射線防護の基本的な枠組みと防護基準を勧告することを目的とする。主委員会と5つの専門委員会(放射線影響、線量概念、医療被ばくに対する防護、勧告の適用、環境の放射線防護)で構成されている。

				東電福島原発事故での対応
	1977年 勧告	1990年 勧告	2007年 勧告	
線量限度 (職業人)	50mSv/年	100mSv/5年 かつ 50mSv/年	100mSv/5年 かつ 50mSv/年	厚生労働省電離放射線障害防止規則の特例 従来の100 mSvから250 mSvに引き上げ *平成23年11月1日以降、原則 100 mSvに戻すことが決められた。
線量限度 (公衆)	5mSv/年	1mSv/年	1mSv/年	例 計画避難地域での避難の規準: 20 mSv/年

mSv : ミリシーベルト

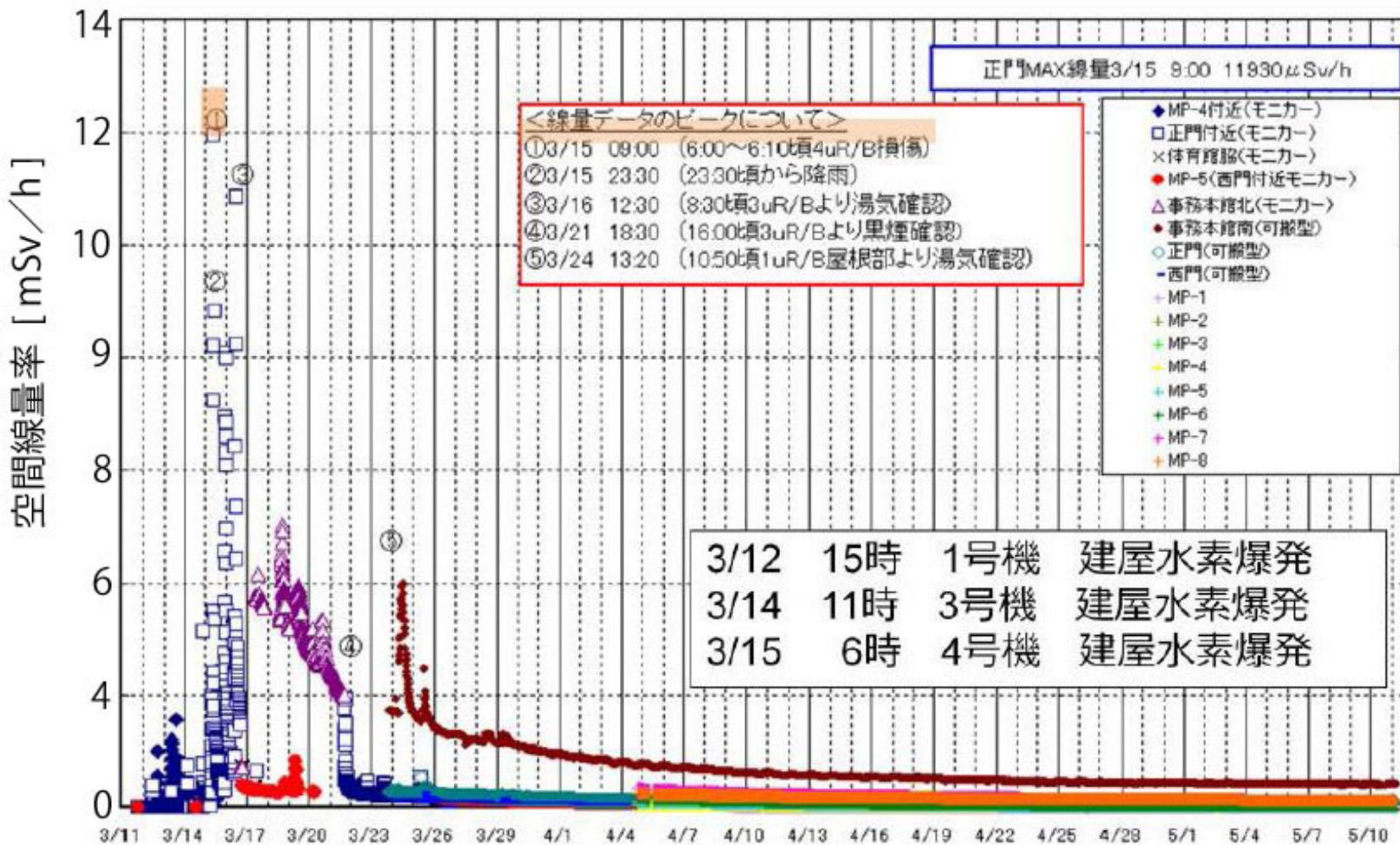
本スライドは、環境省「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料(平成25年度版)」の「ICRP勧告の部分」と「東電福島原発事故での対応」の部分を組み合わせた。一部加筆した。

放射能の話(12)

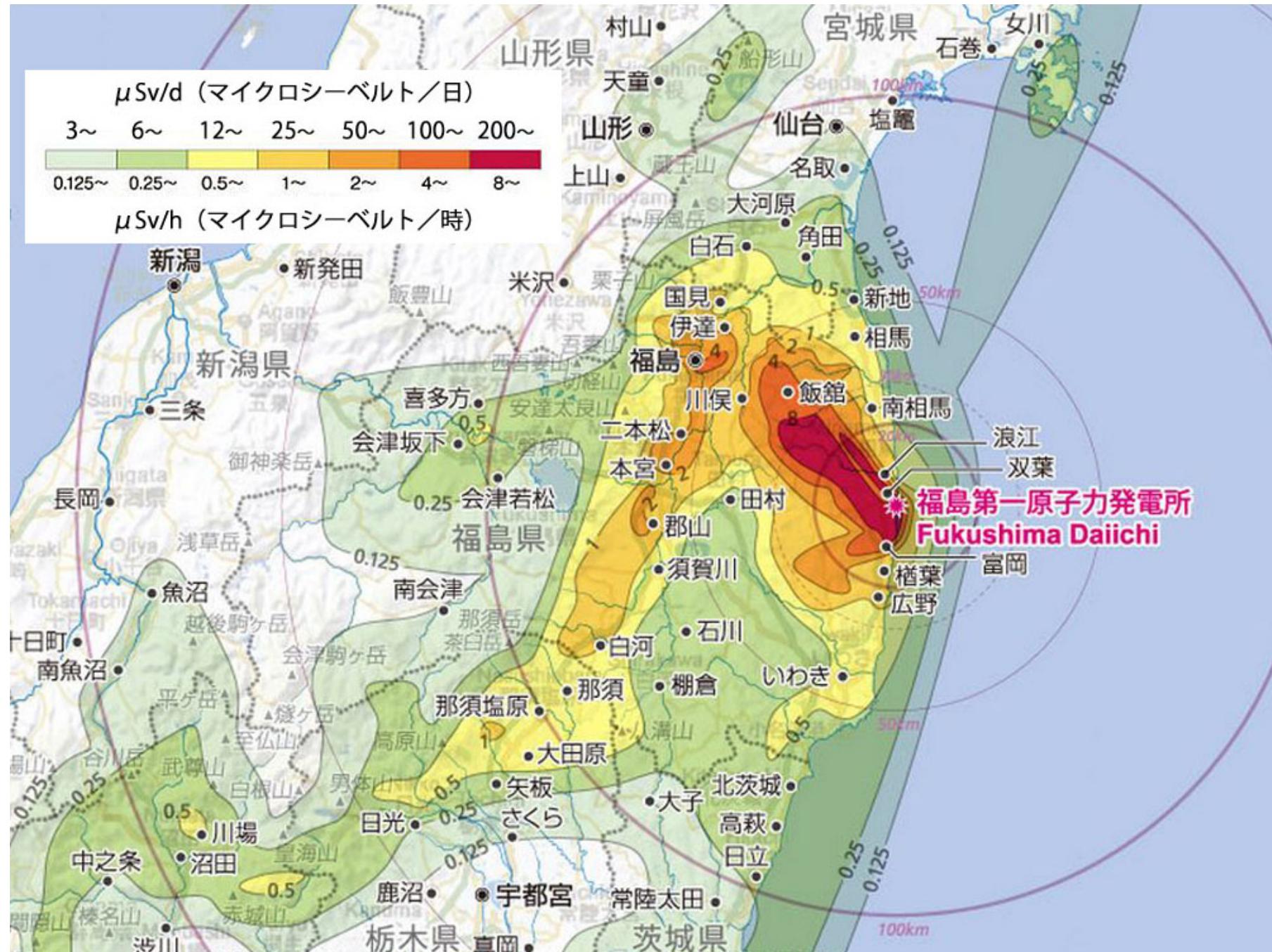
東電福島第一原発 事故の概要

事故直後から2ヶ月間の空間線量率 (福島第一原発敷地内及び敷地境界)

1-4号機建屋等で水素爆発が発生、3月15日午前中に放射線量のピークが観測されている。

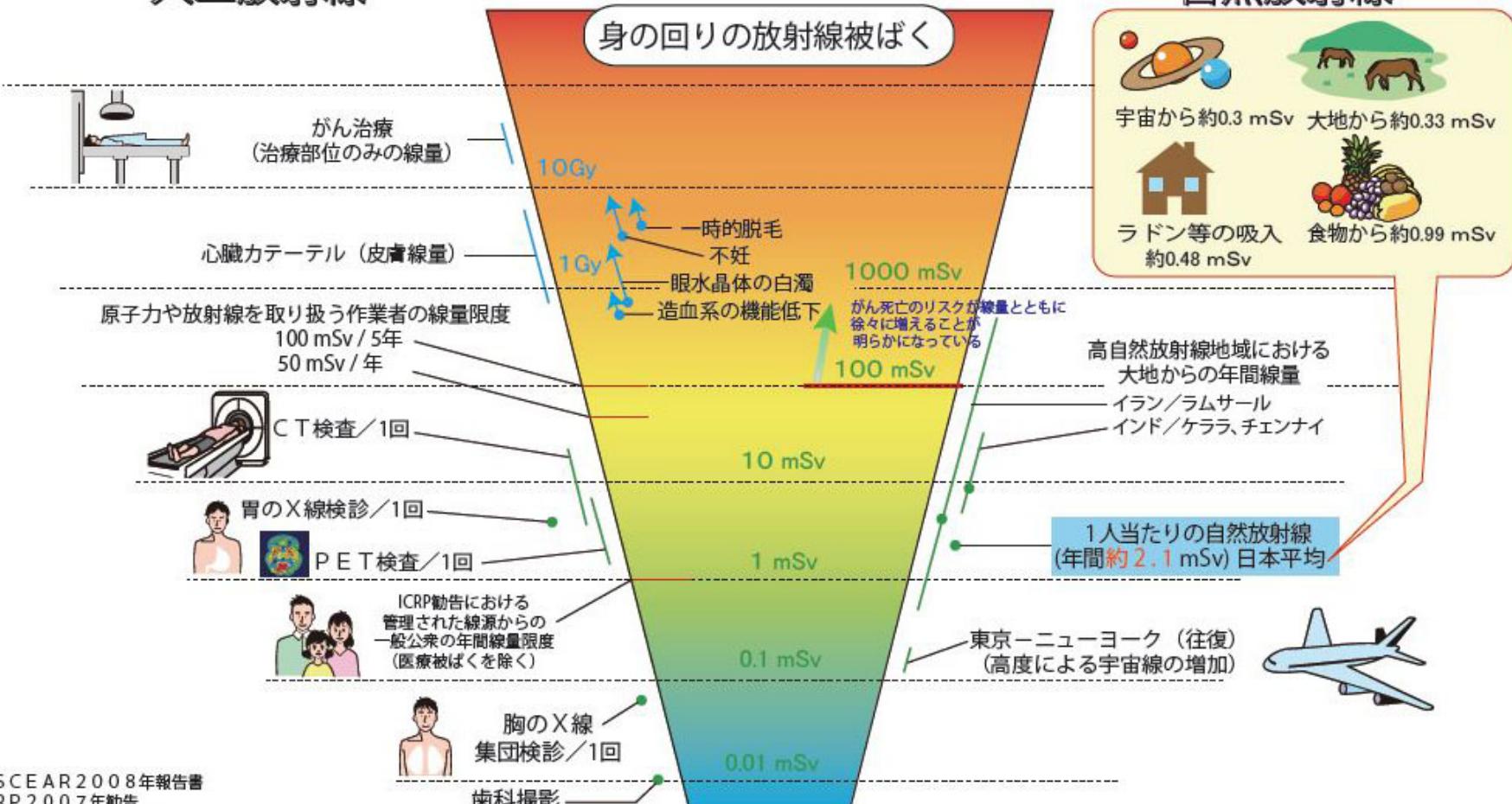


出典：原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書 平成23年6月
原子力災害対策本部 添付V-9



放射線被ばく早見図

人工放射線



- UNSCEAR 2008年報告書
- ICRP 2007年勧告
- 日本放射線技師会医療被ばくガイドライン
- 新版 生活環境放射線 (国民線量の算定)
- などにより、放医研が作成(2013年5月)

【ご注意】

- 1) 数値は有効数字などを考慮した概数です。
- 2) 目盛(点線)は対数表示になっています。
目盛がひとつ上がる度に10倍となります。
- 3) この図は、引用している情報が更新された場合
変更される場合があります。

【線量の単位】

各臓器・組織における吸収線量: Gy (グレイ)

放射線から臓器・組織の各部位において単位重量あたりにどれくらいのエネルギーを受けたのかを表す物理的な量。

実効線量: mSv (ミリシーベルト)

臓器・組織の各部位で受けた線量を、がんや遺伝性影響の感受性について重み付けをして全身で足し合わせた量で、放射線防護に用いる線量。

各部位に均等に、ガンマ線 1 Gy の吸収線量を全身に受けた場合、
実効線量で 1000 mSv に相当する。

原発と地球温暖化

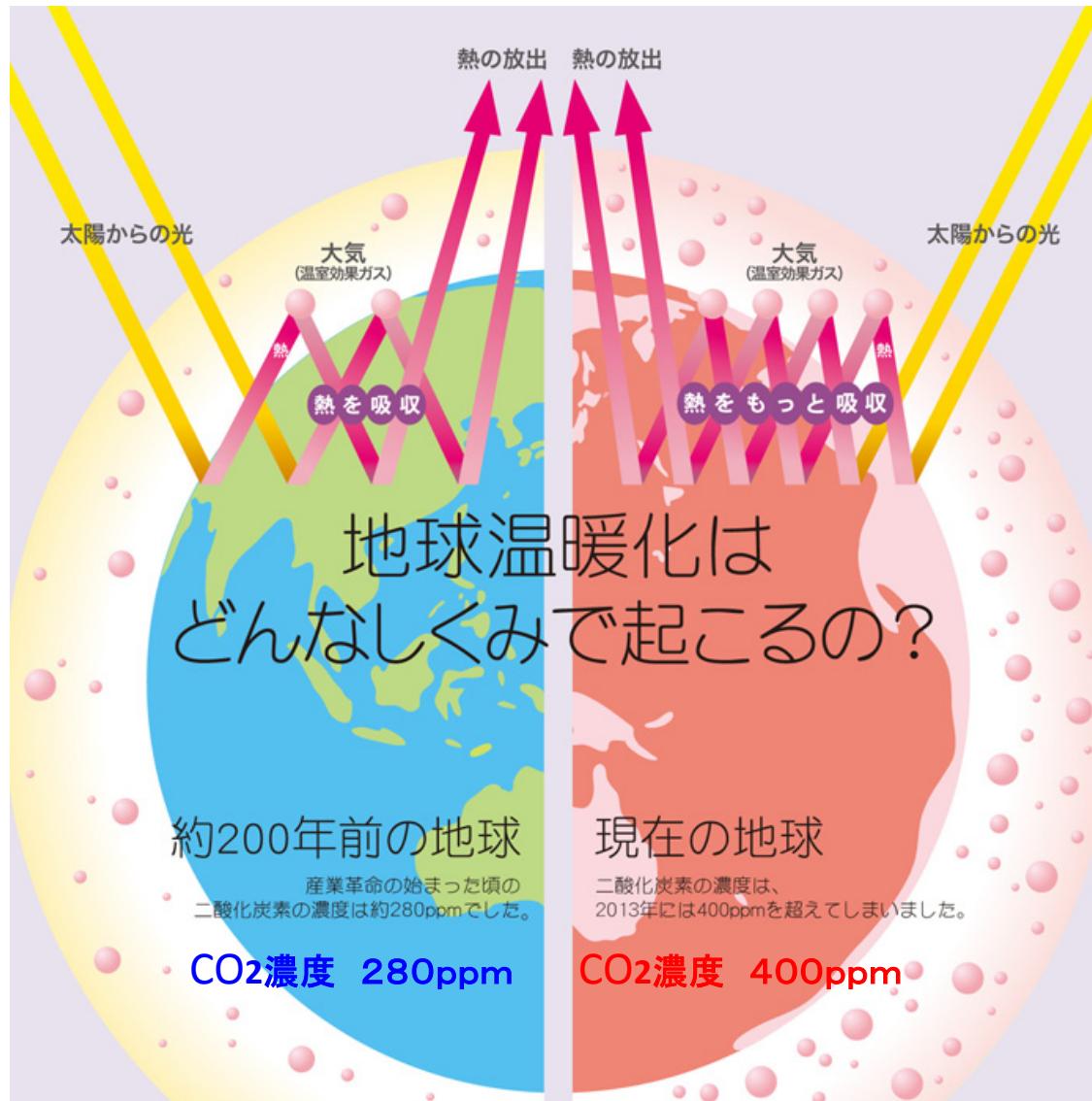
1. 地球温暖化の原因
 2. 原発は建設から解体までにどれだけCO₂を出すか
 3. 原発は地球温暖化問題解決の決め手になりうるか
- (別項) 原発の温排水が地球温暖化に及ぼす影響

地球温暖化の原因

温室効果ガスは
地球からの熱の
放出を遮る働きを
する

200年前の地球

温室効果ガスが
少なかつたので、
地球は平均気温
15°Cで、太陽か
らの光に等しい熱
の放出ができた。



現在の地球

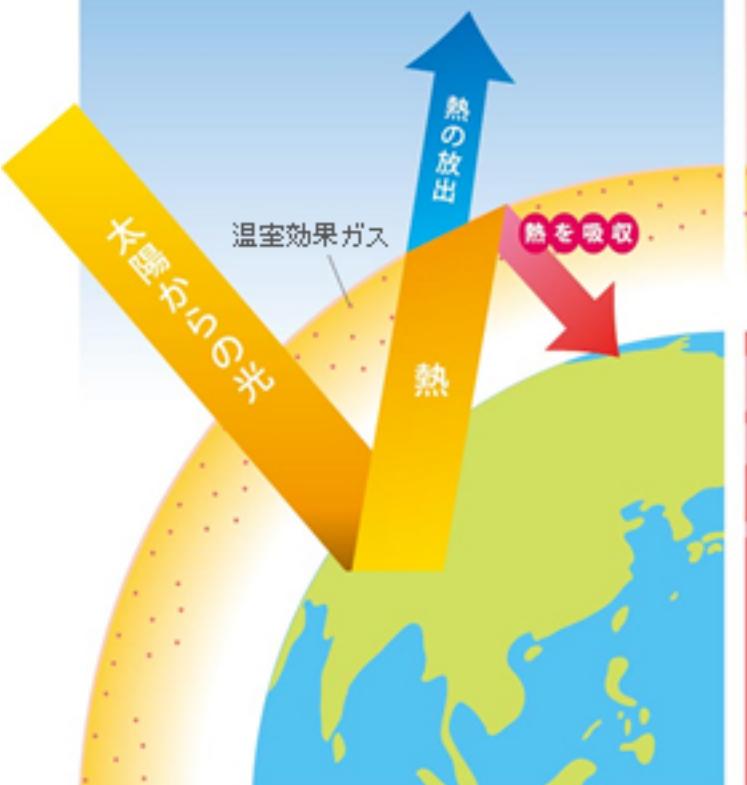
温室効果ガスが
多いので、平均
気温17°Cになら
ないと、太陽か
らの光に等しい熱
の放出ができな
い。

地球温暖化防止
活動推進センター
のホームページより

チョット余談ですが 地球温暖化の誤った説明

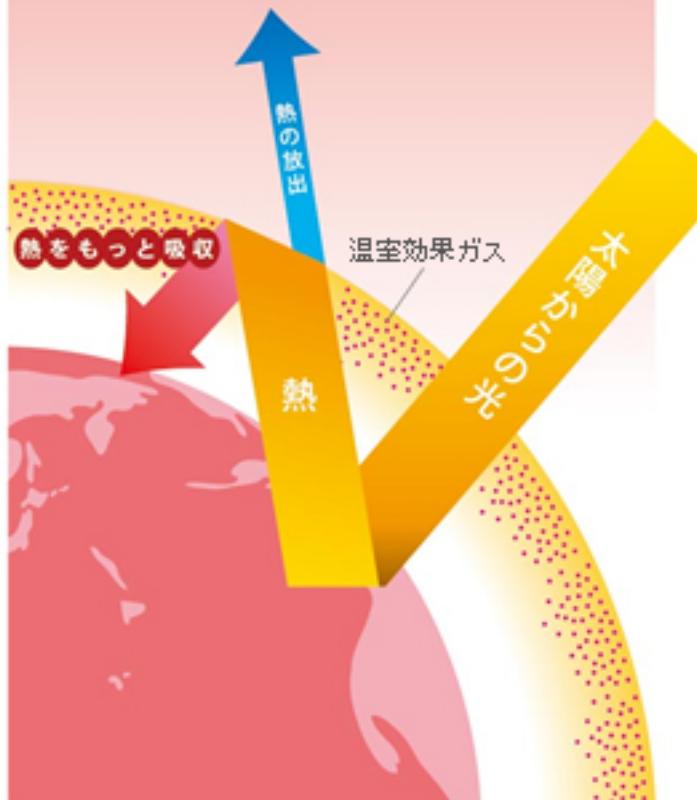
約200年前の地球

産業革命の始まった頃の
二酸化炭素の濃度は約280ppmでした。



現在の地球

二酸化炭素の濃度は、
現在では370ppmを超えていました。



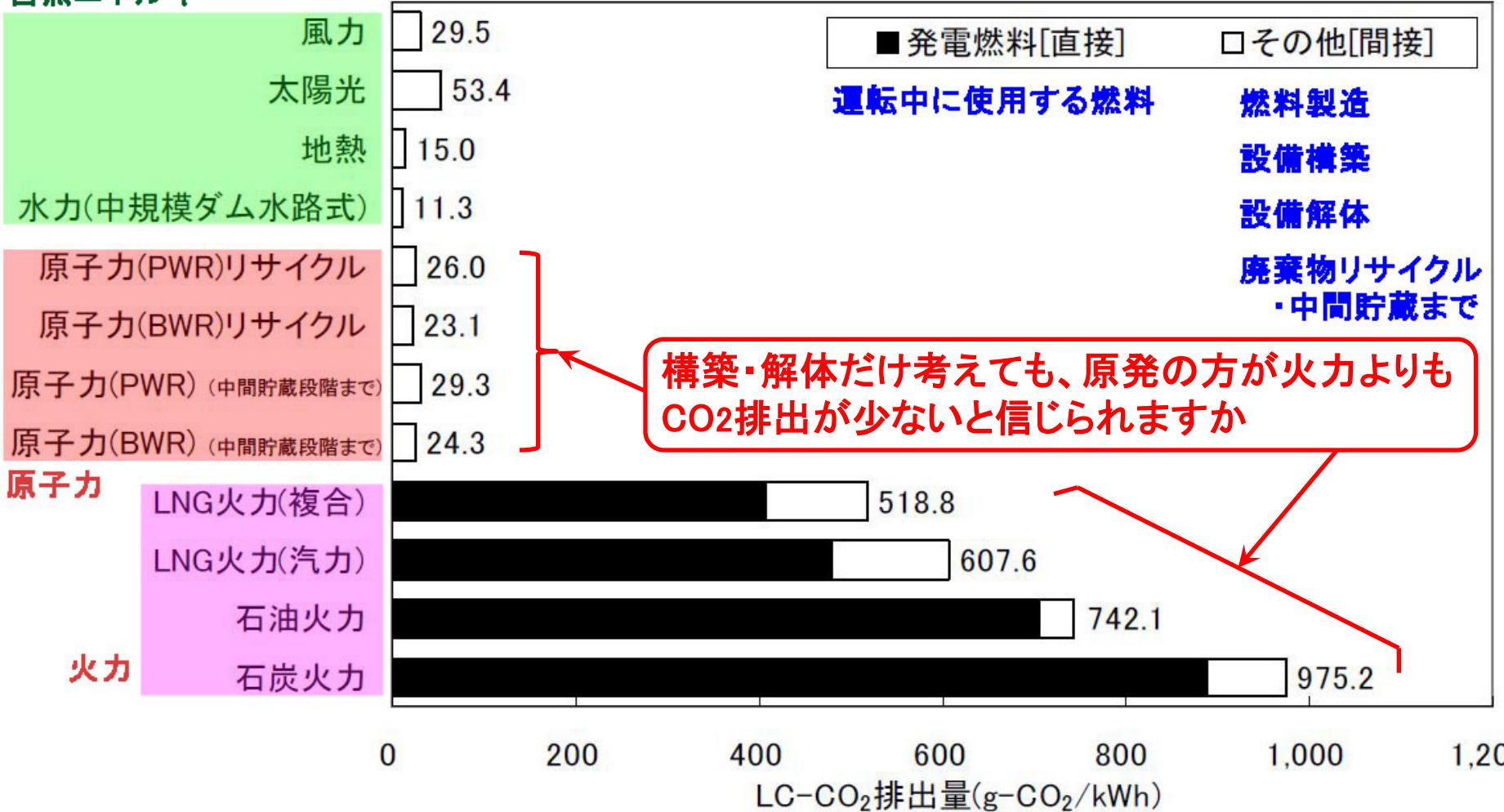
誤った説明

現在の地球では、「太陽からの光」より「熱の放出」の方が少ないから、温暖化する。

地球温暖化時報
ホームページより

原発は建設から解体までにどれだけCO₂を出すか

自然エネルギー

図 2.3 2000 年評価^{[2][3]}における電源別ライフサイクル CO₂ 排出量

原発は構築から解体までにどれだけCO₂を出すか(続)

原発の構築、燃料製造、運用、解体、廃棄物処理など、すべての工程で発生する CO₂ の量を、原発の LC-CO₂ というこのような評価をすることを、一般に LCA (Life Cycle Assessment) という

前頁に示されたLC-CO₂ の結果に問題点はないだろうか

1. 原発の燃料の採掘・製錬・濃縮等は外国で行われており、LCAに必要なデータが十分に把握されているだろうか。
2. 我国では大型の商用炉の解体(廃炉)の経験がないので、解体で生じる CO₂ の量が適正に評価されているだろうか。
3. 廃棄物処理については、LLW(低レベル放射性廃棄物)の中間貯蔵までしか考慮されていない。HLW(高レベル放射性廃棄物)の長期貯蔵(10万年?)はどうなっているのだろうか。
4. 地球温暖化とは一応別の問題だが、原発には、放射能の健康被害、災害避難などがある。CO₂ の量に換算できない問題も大きい。

原発は地球温暖化問題解決の決め手になりうるか

1. 温暖化対策は気候変動のリスクを防ぐためのものである。したがって、単なる技術問題としてだけではなく、リスク管理を含めた経済問題としても考慮しなければならない。
2. 原発は運転中のCO₂の排出は少ないけれども、コストが高過ぎ、日本のように国策でなければ経済的に成り立たない。先進国では原発よりも再生可能エネルギーに投資することにより、再生エネルギーのコストが下がっている。同じく CO₂の排出がないならコストの安い再生エネルギーの方が温暖化対策に効果的である。
3. 原発は、事故、核廃棄物、廃炉などのリスクが大き過ぎる。温暖化のリスクを避けるために新たなリスクを負うことになる。
4. エネルギー単位で表わしたウラン原料の埋蔵量は、石油の1／7* しかない。つなぎのエネルギーである原発で生じた核廃棄物を10万年間も管理しなければならない。
* プルトニウムを増殖できる「高速増殖炉」の開発には、日本だけが固執している。

喻は適切ではないが、原発は大艦巨砲主義であろう。航空主兵論者だった源田実は、「海軍が大艦巨砲主義から航空へ切り替えられなかったのは組織改革での犠牲を嫌う職業意識の強さが原因だった。人情に脆くて波風が立つのを嫌う日本人の性格では、なかなか難しいことです」と語っている。

原発と地球温暖化(7)

(別項)原発の温排水が地球温暖化に及ぼす影響(誤解を解くために)

「原発は多量の温排水を出し、地球温暖化の原因になる」という。これは本当か？

1. 原発の発電効率と温排水

カルノーサイクルの熱機関の最大効率 η は、

$$\eta = (T_H - T_L) / (T_H + 273) \text{ である。}$$

ここで、 T_H は高温源の温度($^{\circ}\text{C}$)、

T_L は低温源の温度($^{\circ}\text{C}$)

原発では、 $T_H = 280 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 、 $T_L = 40 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ とすると、

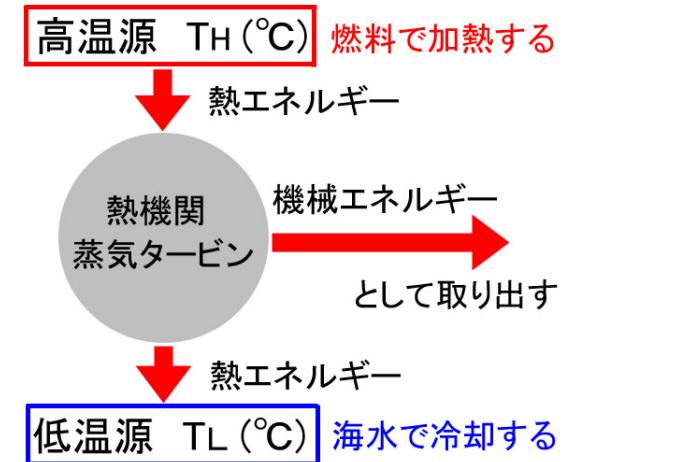
$\eta = 43\%$ となるが、実際は約33 %である。つまり、出力100万kWの原発では、ウラン燃料の発熱 300万kWのうち 200万kWは廃熱として、海に捨てられる。

2. 温排水による地球温暖化

日本には、100万kW級の原発が58基ある(廃炉予定を含む)。稼働率を70%とすると日本の原発による廃熱の合計は、 $200\text{万kW} \times 58 \times 0.70 = 8120\text{万kW}$ となる。これが海を温めている。

8120万kWは、日本列島に降り注ぐ太陽エネルギーの約 0.1%にしかならない。

この廃熱が日本列島全体に均等にばらまかれたら多分問題にならないだろうが、原発周辺に集中すれば「温室効果ガスによる温暖化」とは別の環境問題となると思われる。(一種のヒートアイランド現象)



核燃料サイクルと高速増殖炉

1. 現在のウラン原子炉では、ウランを無駄使いしている？
2. 核燃料サイクルと高速増殖炉
3. 高速増殖炉の原理と構造
4. 高速増殖炉の現状

核燃料サイクルと高速増殖炉

以下のようなことが言われている:

1. 現在のウラン原子炉では、天然ウランの中に0.7%しか含まれていないウラン235を燃料として使用している。
2. 高速増殖炉を建設すれば、使用した燃料よりも多くの燃料が得られるので、燃料サイクルを回せば、無尽蔵にエネルギーが得られる。
3. 資源のない日本としては、高速増殖炉はぜひ開発しなければならない技術である。

これらは、本当だろうか？

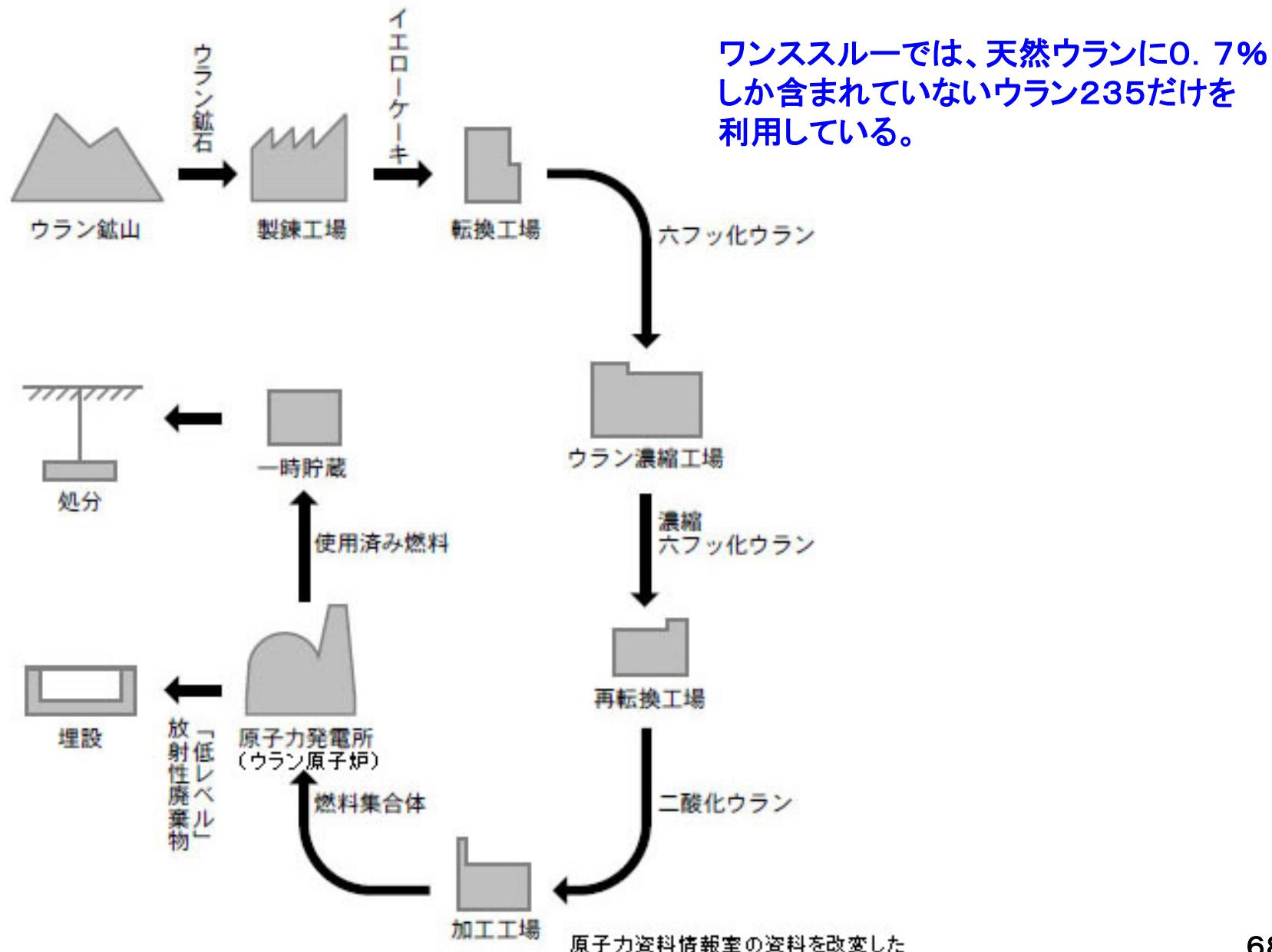
実は、1. は正しい。

2. は正しい部分もあるが、結論は誤りである。誤解を招きやすい表現である。
3. は誤りであろう。(現実的でない)

以下、順次説明する。

核燃料サイクルと高速増殖炉(3)

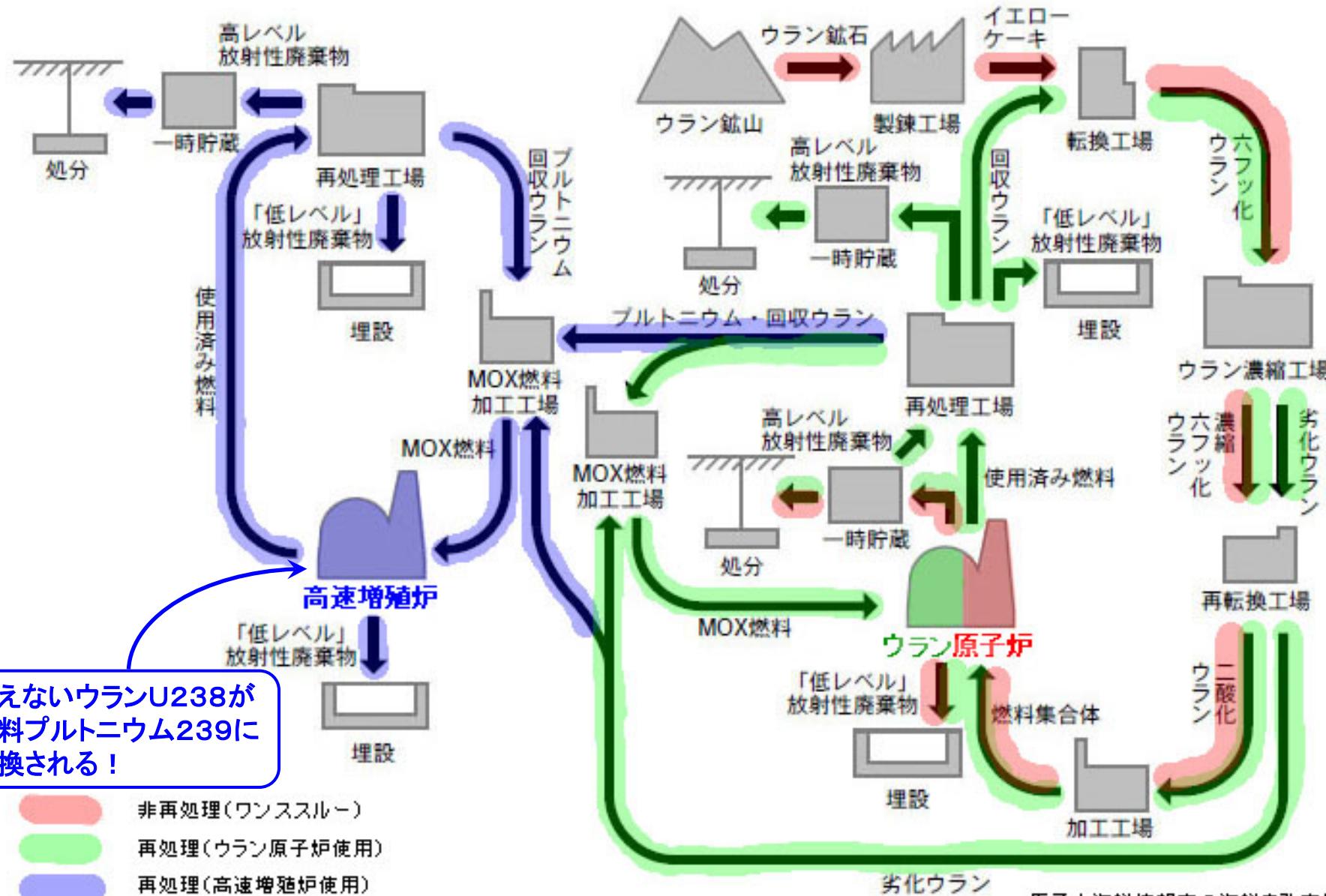
核燃料サイクル — 非再処理ケース(ワンススルー)



核燃料サイクルと高速増殖炉(4)

核燃料サイクル

ワンススルー、再処理(ウラン原子炉使用)、再処理(高速増殖炉使用)、3つのケースを示す

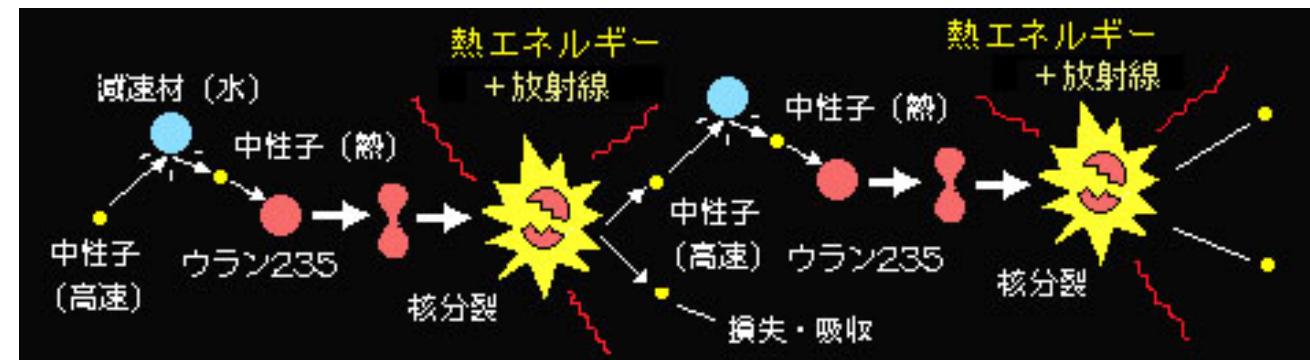


高速増殖炉とは、高速の中性子を利用してプルトニウムを増殖するもので、高速で増殖するのではない。

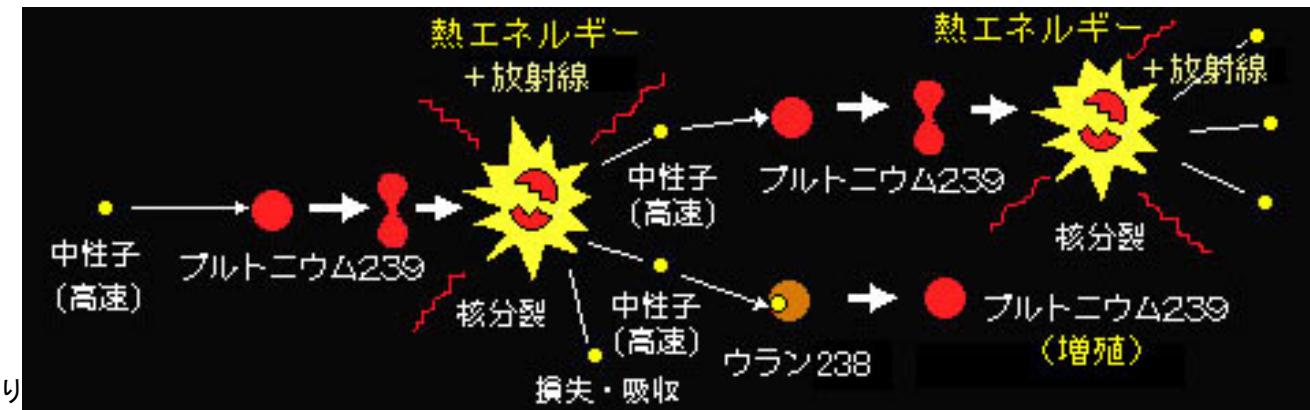
ウランやプルトニウムが核分裂すると2~3個の中性子が飛び出す。軽水炉では飛び出した中性子の内1つだけが水にぶつかってスピードを落としてから次のウランにぶつかる仕組みになっている。

高速増殖炉では、プルトニウム燃料を包み込むように、燃えないウラン(ウラン238)を並べておく。そこで、核分裂で飛び出した中性子の内、1つを連鎖反応に使い、もう一つをウラン238に吸収せらるようすれば、効率よくプルトニウムを増やす。このとき高速中性子の方がプルトニウムができやすい。水は中性子のスピードを落とす(減速)性質があるので、冷却材に水は使えない。そこで、中性子を減速させず、熱を伝えやすい性質のナトリウムを冷却材に使う。(ナトリウムは金属を腐食させ、水と反応して爆発する)

軽水炉での核分裂反応



高速増殖炉での核分裂反応



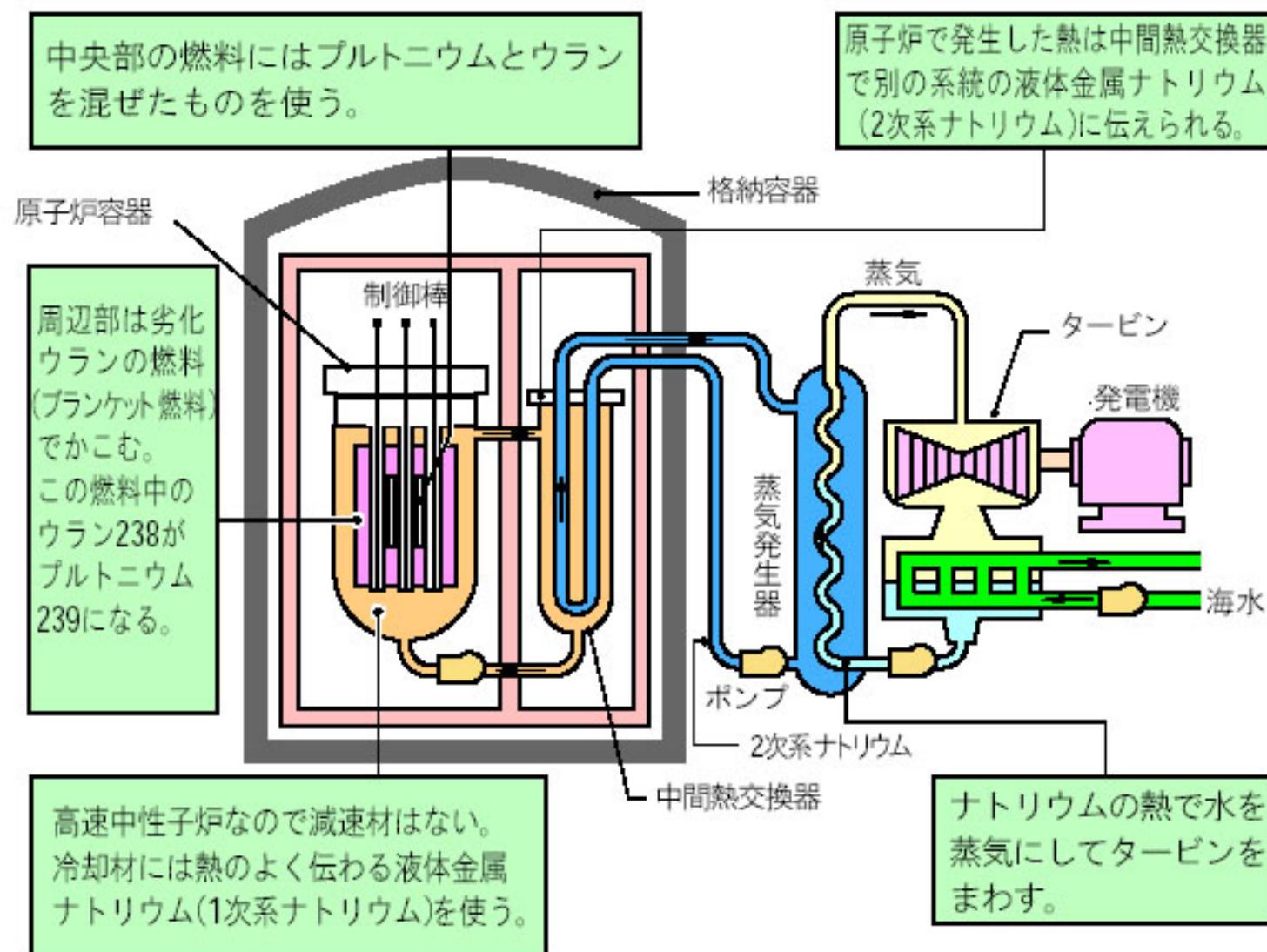


図1 高速増殖炉(FBR)のしくみ

[出典]日本原子力文化振興財団:「原子力」図面集(2005)

高速増殖炉の問題点と現状

1. 高速増殖炉が難しい理由

① 冷却材にナトリウムを使う

高温の金属ナトリウムは、空気に触れると燃焼し、水に触れると爆発する

原子炉の中ではナトリウムは強い放射能を帯び、不透明のため、点検が困難

② 核暴走(核爆発)事故を起こしやすい

③ ウランよりも放射線の強いプルトニウムを燃料にする

④ 構造に無理があり、地震に弱い

2. 日本の高速増殖炉の現状(福井県敦賀市にある原型炉もんじゅ)

① 1995年 4月 臨界達成

② 1995年12月 ナトリウム漏洩事故発生

③ 2010年 8月 原子炉容器内で炉内中継装置(3.3トン)が落下

④ 2012年11月 原子力規制庁が点検漏れ9679個あることを公表

⑤ 2015年11月 原子力規制委員会が、原子力機構に代る運営主体の明示を文科大臣に勧告

⑥ 2016年12月 廃炉が決定、現在廃炉作業中

3. 世界の高速増殖炉の現状

① アメリカ CRBR原型炉1983年計画中止、PRISM原型炉1994年計画中止

② フランス フェニックス原型炉2010年運転中止、スーパーフェニックス実験炉1998年閉鎖

③ イギリス PFR原型炉1994年閉鎖、CDFR商用実証炉計画中止

④ ドイツ SNR-300原型炉1991年計画中止、SNR-2実証炉計画中止

⑤ ロシア BN-800実証炉2014年臨界、2015年12月商用発電開始出力86万kW(世界唯一)

チヨット脱線ですが、えせ科学のお話

一見科学のように見えて、実は科学的としては疑問符が付くものをえせ科学という。にせ科学、疑似科学、Pseudo-science、Bending Science などとも呼ばれる。

科学と疑似科学の境界線はあいまいであり、学者の見解が必ずしも一致しないため、法律による取締りに馴染まない。

一部の疑似科学はいわゆる悪徳商法と親和性が高い

1. えせ科学であることが明白だといわれている例

UFO、ルイセンコ遺伝学、パワーストーン、偽食事療法、超能力、など

2. 科学的であるが、根拠を調べないと危険な場合がある例

- 疫学(統計調査の結果から因果関係を導くのが難しい場合は、悪用されやすい)
- ライフサイクル・アセスメント(基礎データが入手困難な場合は、悪用されやすい)
- 核燃料サイクル(科学的には正しいが、技術的・経済的に合理性が乏しい)

3. えせ科学の被害に遭わないために

- 学校教育で、騙されないためのリテラシーを教えること
- 市民がリベラル・アーツとしての科学を勉強すること
- 科学者が市民のための科学教育にもっと貢献すること

原発の問題点

原発はなぜいけないのか

原発の問題点(私見)

1. 原発事故がなくても、放射性廃棄物の長期保管に目途が立たない
高レベル放射性廃棄物を地上管理施設で冷却・保管し(30年～50年)、その後地層処分して数万年以上に渡り隔離・保管しなければならない。
それだけない。ウラン採掘から燃料棒の加工、廃炉まで放射線被害を蒙る。
2. 原発事故は万一起これば、国際的な甚大な被害を及ぼす
福島事故は8年経った。廃炉には40年以上かかるというが、果たして可能か。
3. 原発の発電コストは、廃炉や事故補償を含めると火力よりも高くつく
日本の原発は税金を投入し国策としてやっているが、経済的には成り立たない。
4. 原発は核兵器拡散の元凶である
今、原発に注力している国(フランス、中国、インド)は核兵器と無関係ではない。
5. ウランの確認可採埋蔵量は化石燃料に比べて僅かである
高品位石炭 500、石油150、天然ガス120、ウラン20（単位は 10^{16} kcal）

元京都大学原子炉実験所 小出先生の講演より

以上5つの理由から、原発は未来世代へ負担を残すものといえる

脱原発への道

日本の原発の現状

この統計では対象原発60基

2019年8月5日時点

再稼働
9基

設置変更許可
6基

新規制基準
審査中
12基

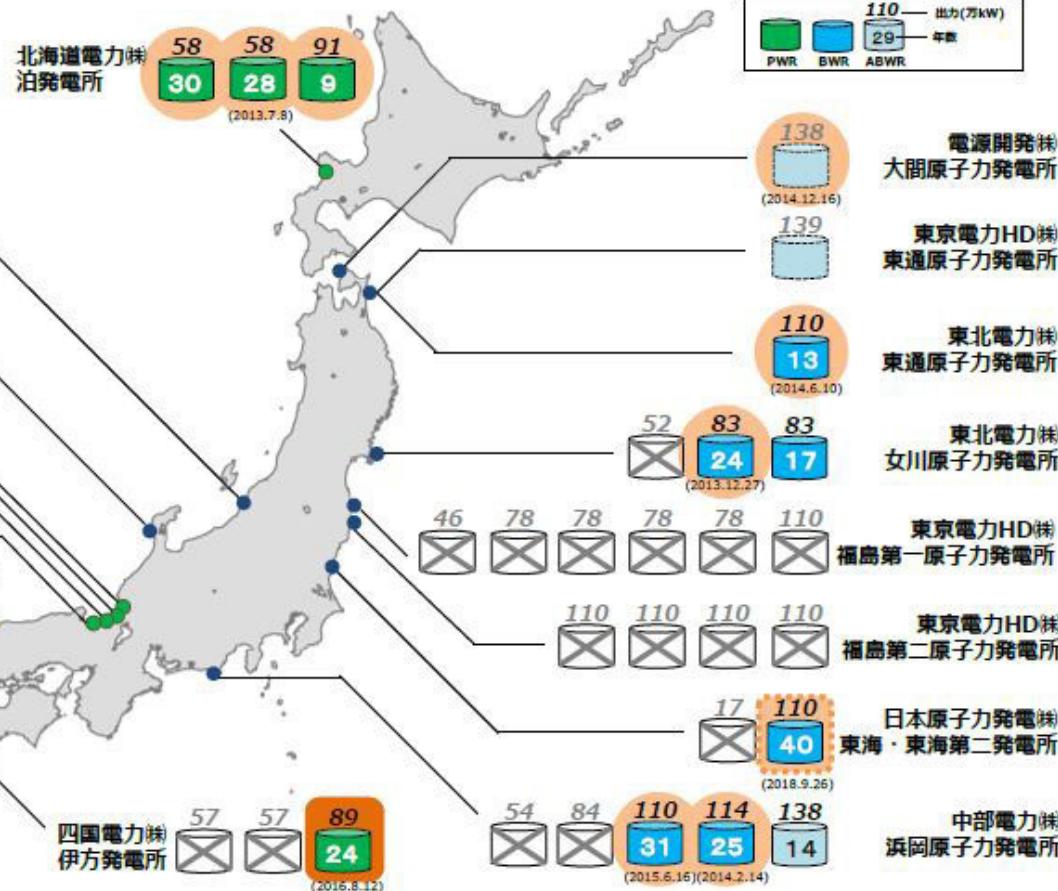
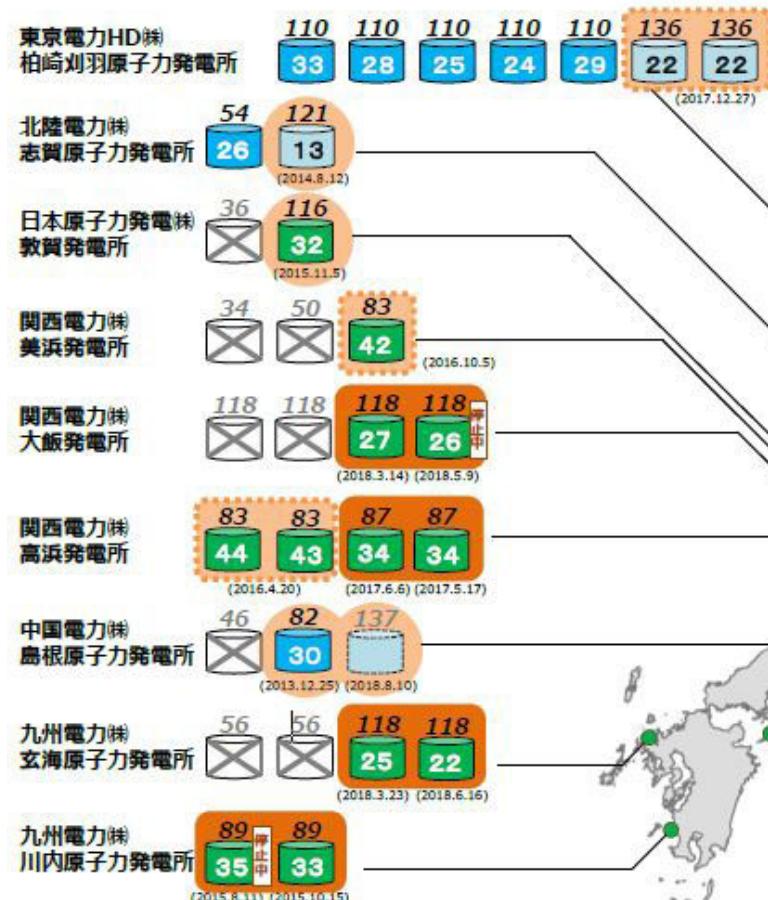
未申請
9基

廃炉
24基

稼働中 7基、停止中 2基 (起動日)

(許可日)

(申請日)



脱原発への道(私見)

たかが電気を得るために、危険な原発を使うのはやめよう

1. 日本のエネルギー消費のうち、電力の占める割合は僅か約25%である。電力は、原発がなくても火力や再生可能エネルギーで作れる。
2. 地球温暖化を考えると、今後化石燃料の使用は減らさなければならない。それは次の方法で実現できると考えられる。完全実現には年月を要する。
省エネルギー
自然エネルギー(再生可能エネルギー)
3. 廃炉作業には長期間を要する。正常に運用終了した東海発電所の場合は23年間の予定で進めている。福島原発の廃炉作業には40年かかるといわれている。チェルノブイリは廃炉をあきらめて石棺にした。

未来世代に負の遺産を残さず、持続可能な社会を残そう！

みんなで原発なしで暮らす方法を考えませんか

科学者・技術者の役割(私見)

「科学者の役割は、科学的真理の解明により、人類に知的満足を与えること、技術者の役割は、技術的成果の創造により、人類に実利的満足を与えること」だと思う。

しかば、

「原発が人類にとって、重大な問題があることが判明すれば、これを市民に周知させることは、科学者・技術者の務めである」と思う。

私は科学・技術者であるので、今日はその立場から発言させて頂いたが、政治・経済・法律・哲学・倫理・芸術等、各分野の方々は、それぞれの立場から、原発を理解し、発言して下さることを期待する。



ご清聴、有難うございました

本資料作成に当たり、環境省ほか多数の資料を参考にしました

この資料は下記からダウンロードできます
<http://nishida-s.com/yg/atomic>