

原発をどうする？ 第32回勉強会

原発とは何か(第1回)

原発の技術

2017年9月9日

西田 進

目次

(第1回) 原発の技術

- 1. 原子力とは何か
- 2. 原子力の歴史
- 3. 原子炉の技術

(第2回) 原発事故と放射能

- 4. 福島原発事故
- 5. 放射能の話

(第3回) 原発の問題点

- 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

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、
一昨年は、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

原子力とは何か(1)

アインシュタインの相対性原理から

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] = $3 \times 10^8 m/s$

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。

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

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
実際は発電の効率があるので、その約3分の1

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などが必要となる。

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

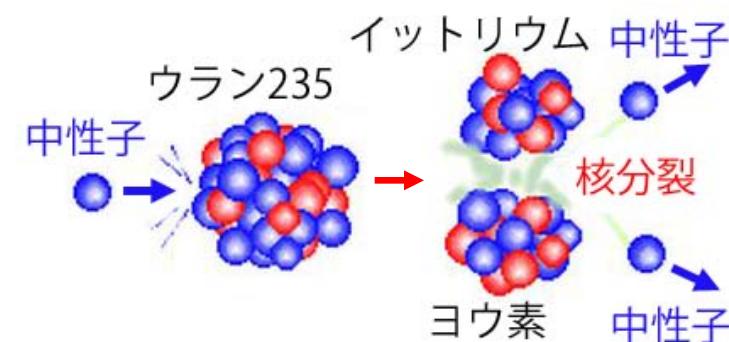
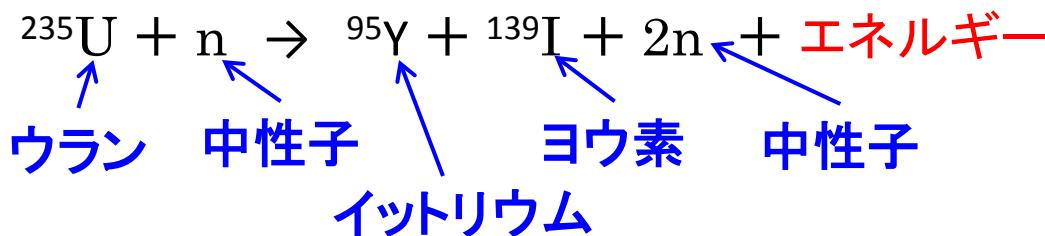
原子爆弾型

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

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

↑
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。

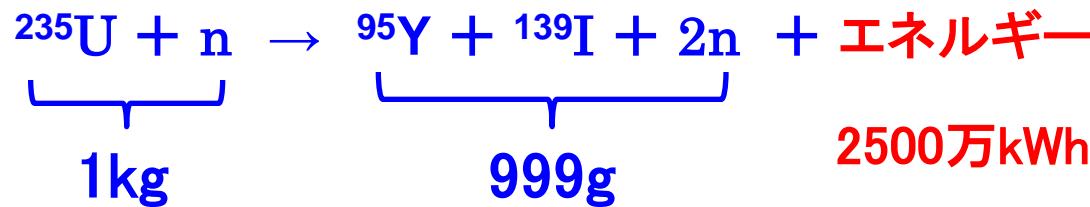
電気出力100万kWの原子力発電所では、熱効率を考えれば、熱出力は3倍
すなわち300万kWは必要である。1日(24時間)稼働するためには、
 $300\text{万kW} \times 24\text{h} = 7200\text{万kWh}$ の熱エネルギーが必要である。

したがって、1日に必要なウランの量は、 $7200\text{万kWh} \div 2300\text{万kWh/kg} = 3.1\text{kg}$
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)

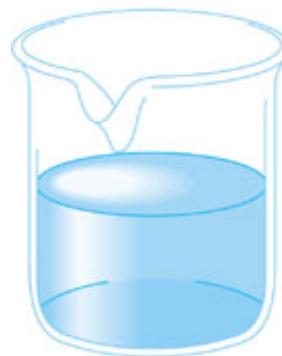


このとき、ウラン1kgの核分裂で、質量約 1g が消えてエネルギーに変わり、
約2500万kWh のエネルギーが得られる。

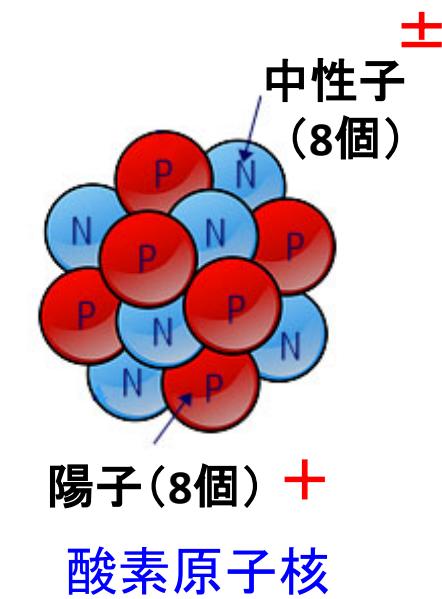
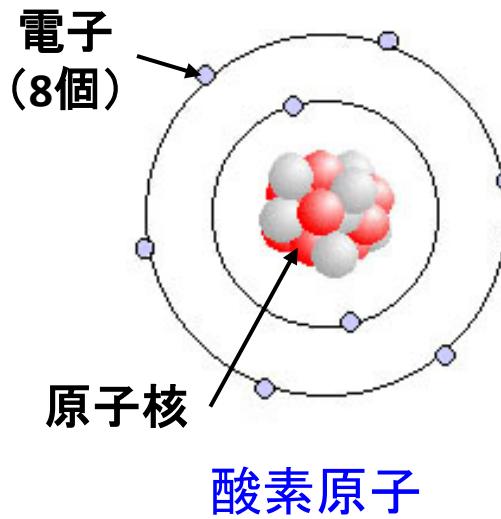
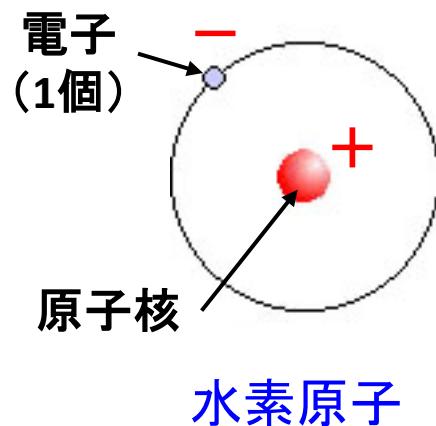
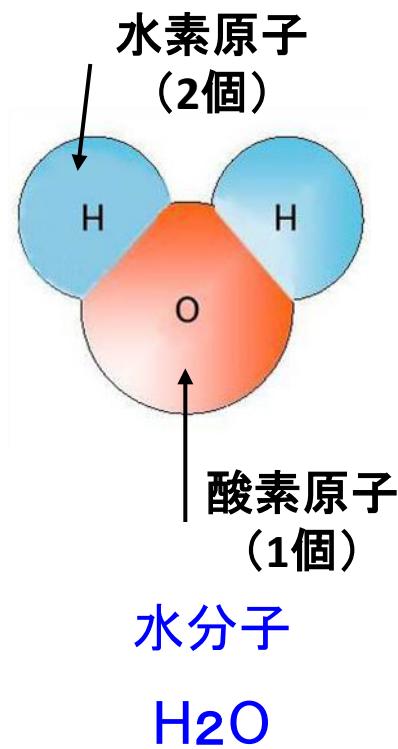
3. 電気出力 100万kW の原子力発電所では熱出力 300万kW が必要。
24時間には 7200万kWh の熱エネルギーが必要。
このためには、毎日ウラン約 3kg が核分裂を起こす必要がある。

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！

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

化学反応と核反応の比較

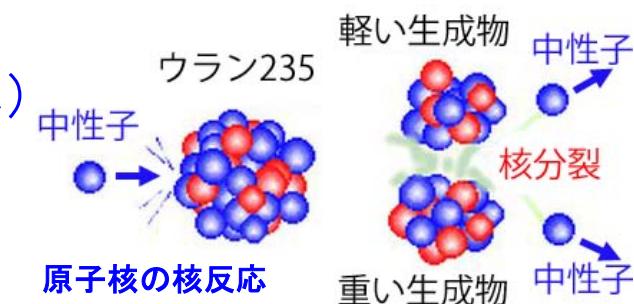
① ウラン1kgの核分裂(核反応)で発生するエネルギーは2300万kWh



ウラン1kg

2300万 kWh

10万戸の1月の電力使用量



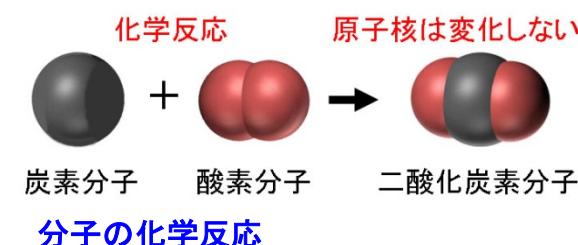
② 石炭(100%炭素) 1kgを燃焼(化学反応)させた時に発生するエネルギーは化学の教科書によると、



炭素1kg

8.08 kWh

1戸の1日の電力使用量

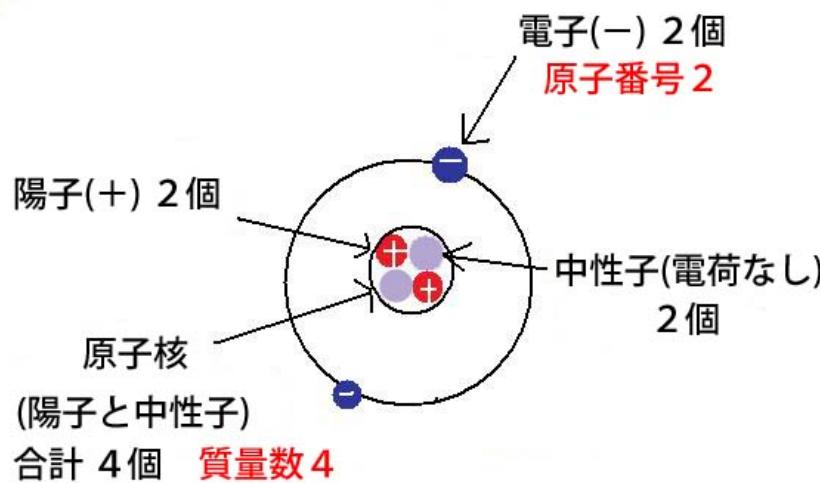


ウラン1kgの核分裂(核反応)によって発生するエネルギーは、炭素1kgの燃焼(化学反応)の $2300\text{万} \div 8.08 = \text{約}300\text{万倍}$ に相当する巨大なエネルギーである。(石炭約3000トンに相当する！)

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。

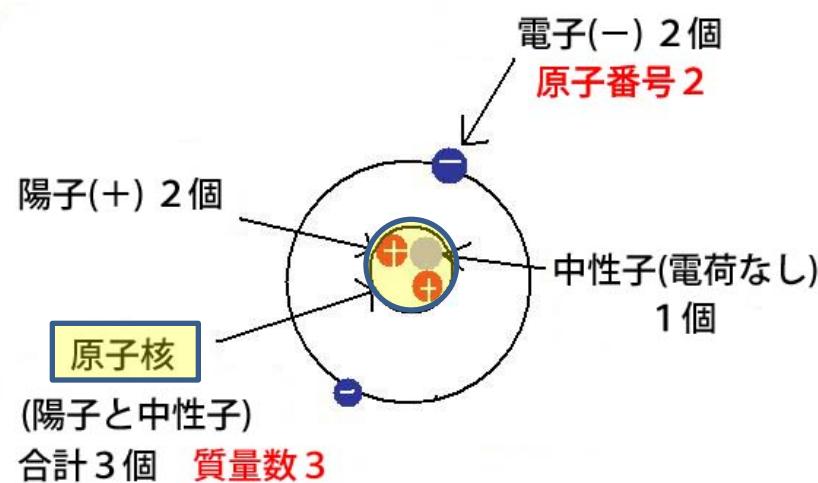
ヘリウム4

(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	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 B	14 C	15 N	16 O	17 F	10 Ne		
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	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
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

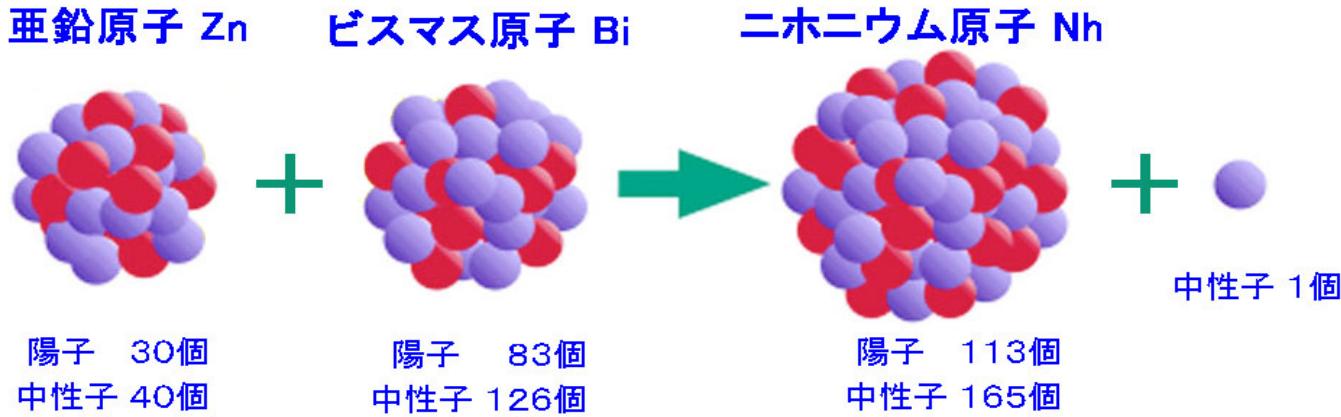
今日の話と関係ないが、
最近日本が命名権を得た新元素

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、命名された元素

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

周期表の見方

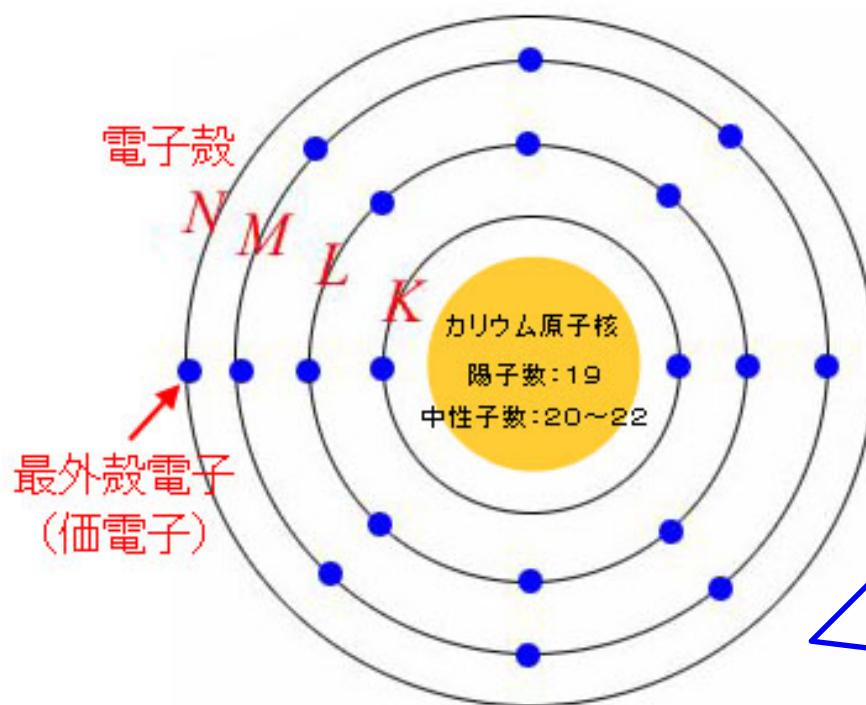
内側から順に

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)

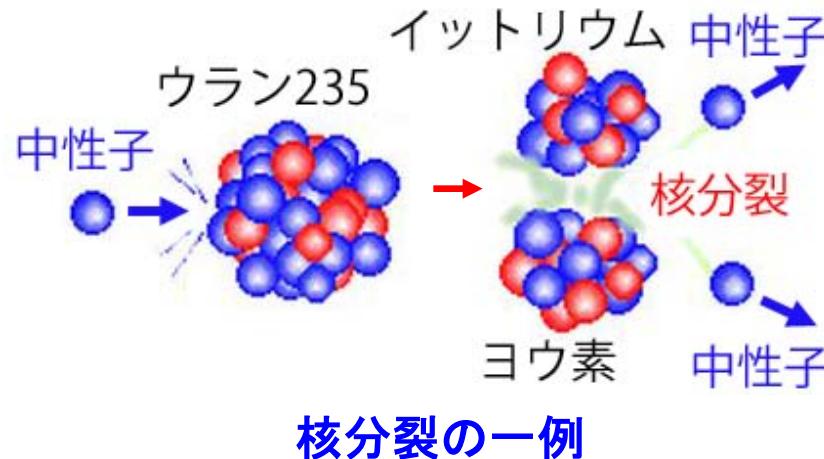
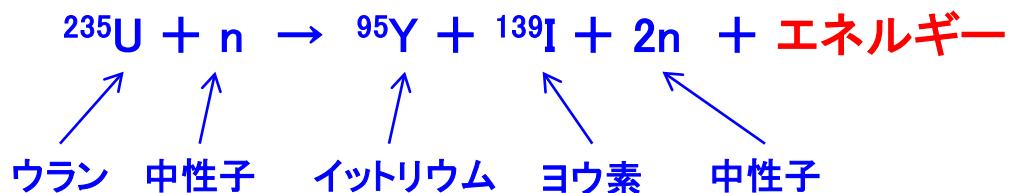
電子配列 左の図のように配列している
K殻2個、L殻8個、M殻8個、N殻1個

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 ハーンとマイタ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

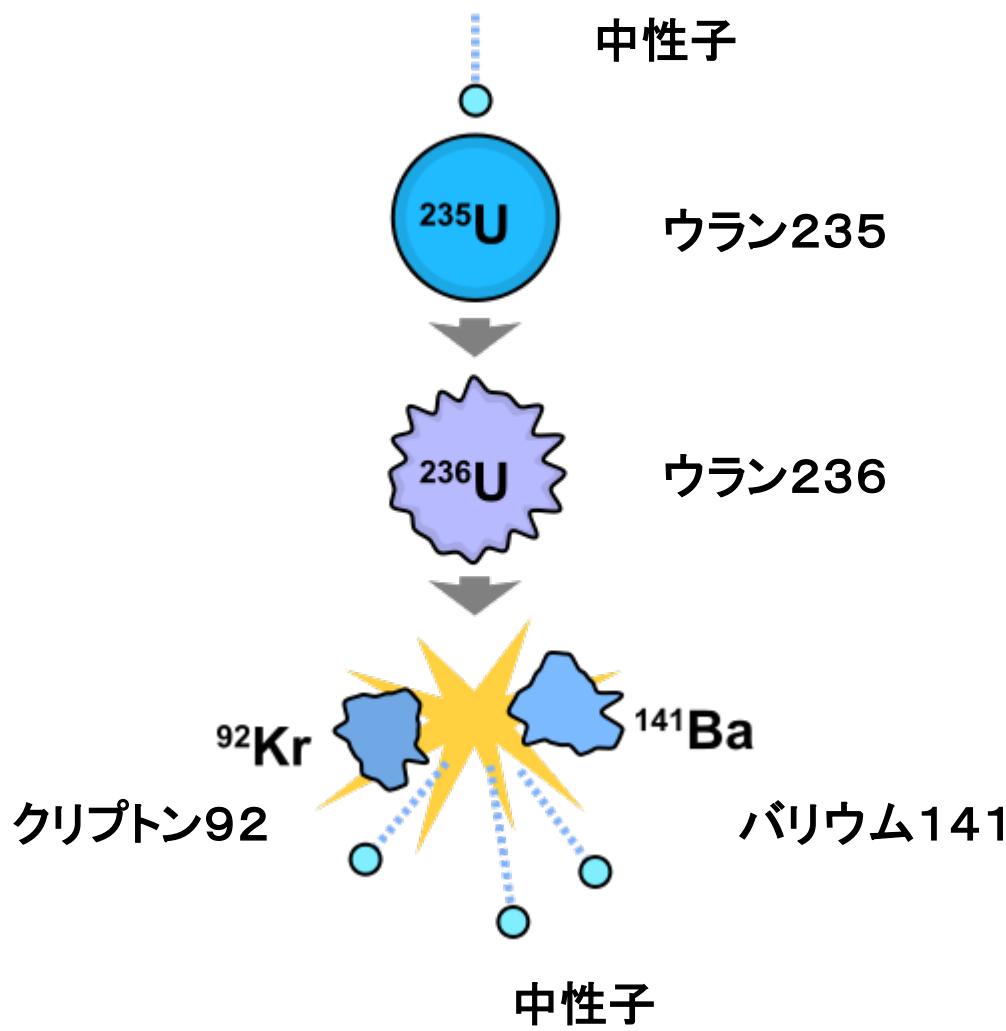
原発の開発

原発事故

★日本の四大被曝といわれることもある

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



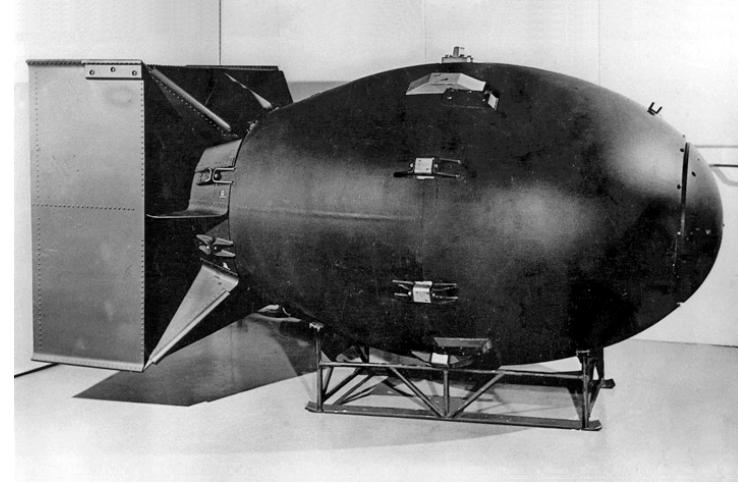
科学部門のリーダー ロバート・オッペンハイマー



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 20

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



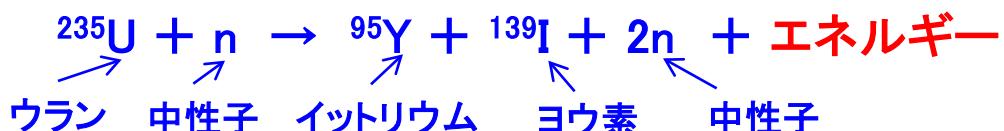
1、3、4号機が水素爆発した福島第一原発

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）

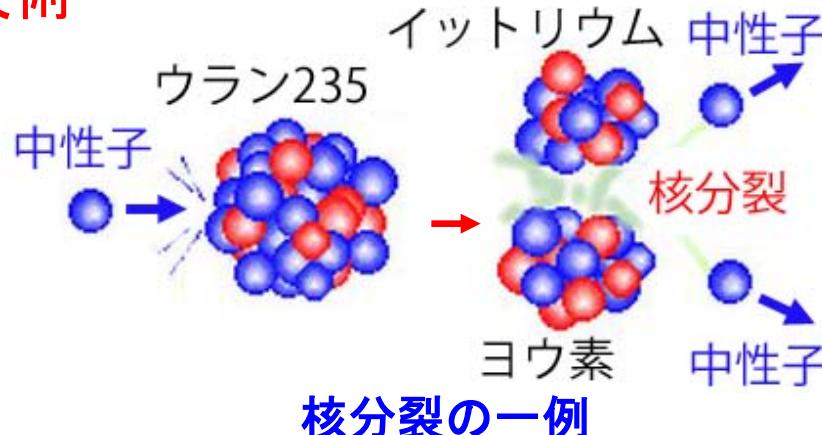
濃縮度20%以下のものは低濃縮ウランと呼ばれる。軽水炉では2～5%のものが燃料として使用される。ウラン型原爆で使用される高濃縮ウランは濃縮度70%以上。

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

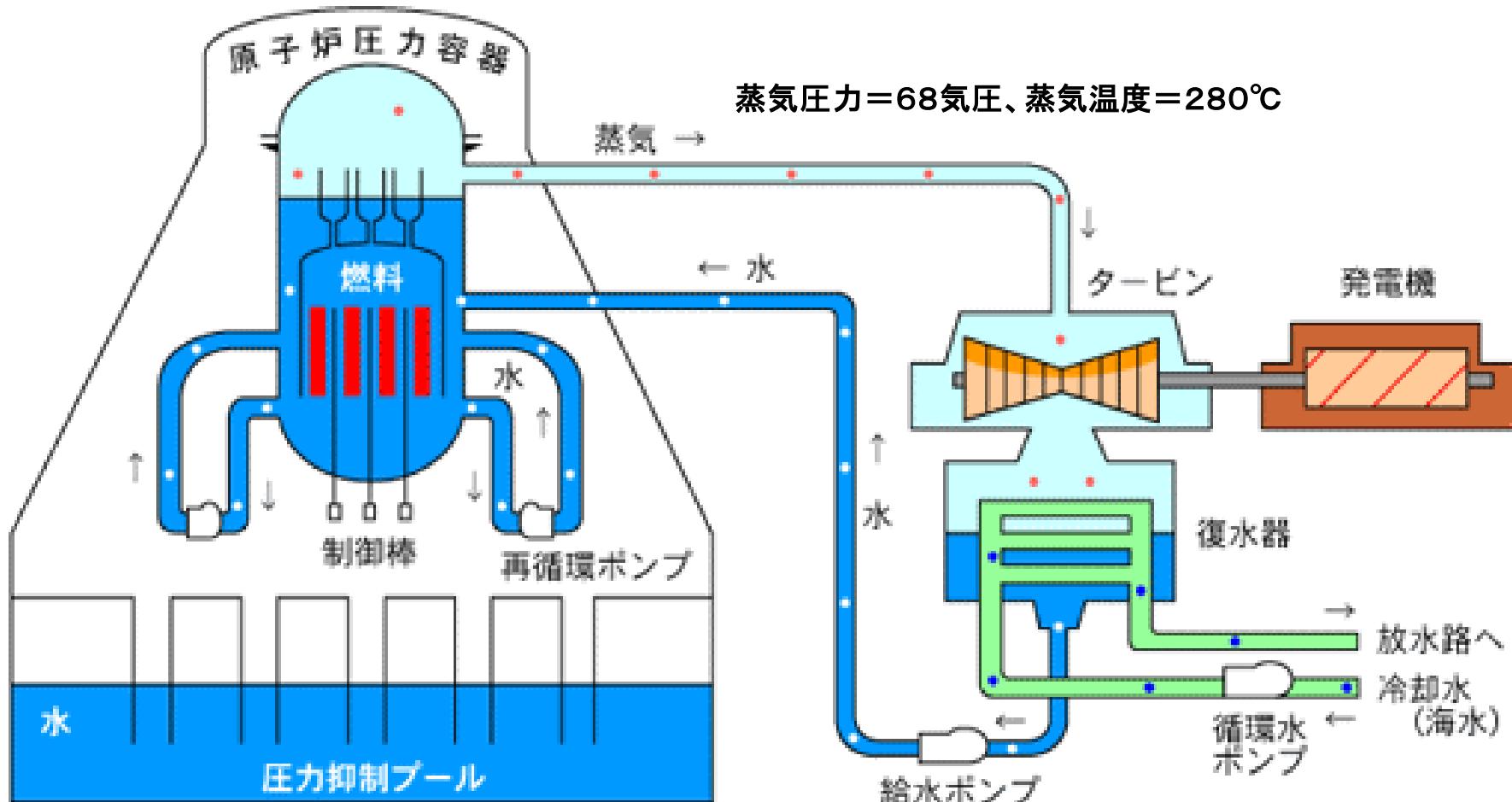
中性子の状態による分類

現存するすべての原子炉はこのタイプ

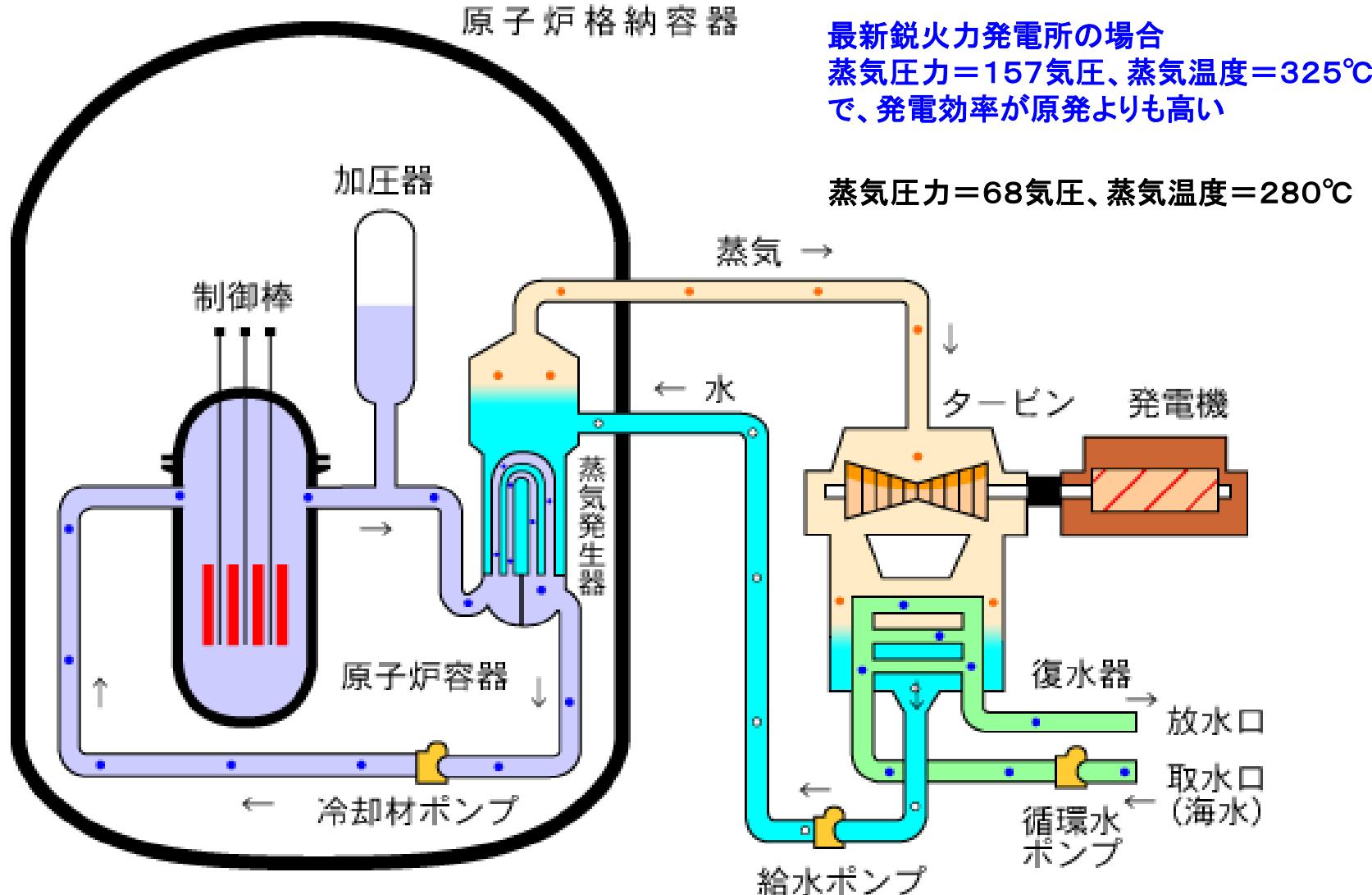
- 熱中性子炉 热中性子を利用する炉。ウラン235を効率よく核分裂させることができる。
- 高速中性子炉 高速中性子を利用する炉。中性子を吸収したウラン238はプルトニウムになるので燃料の増殖が可能である。(高速増殖炉) 「もんじゅ」は、いつまでたっても完成しない

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

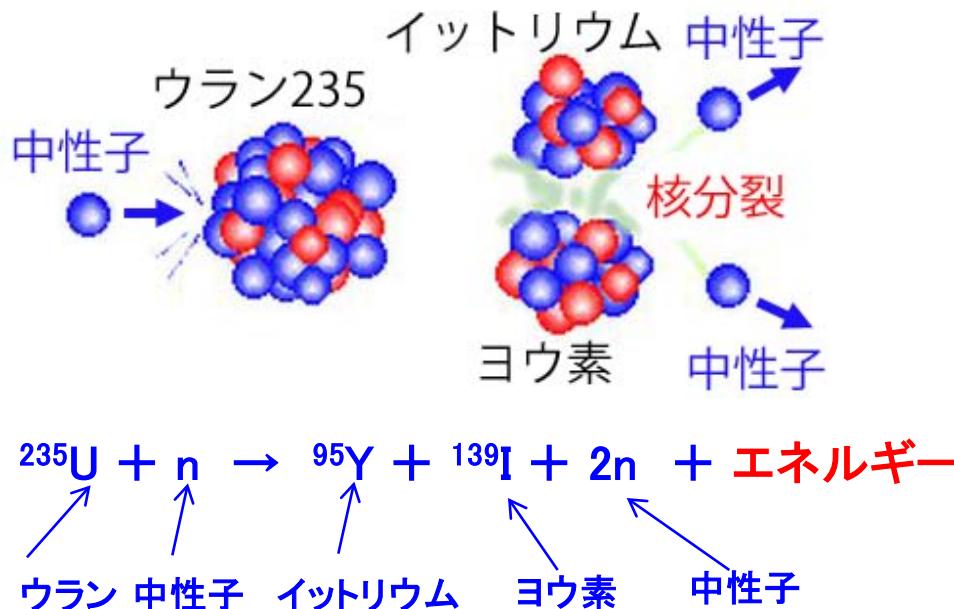


核分裂生成物(死の灰)

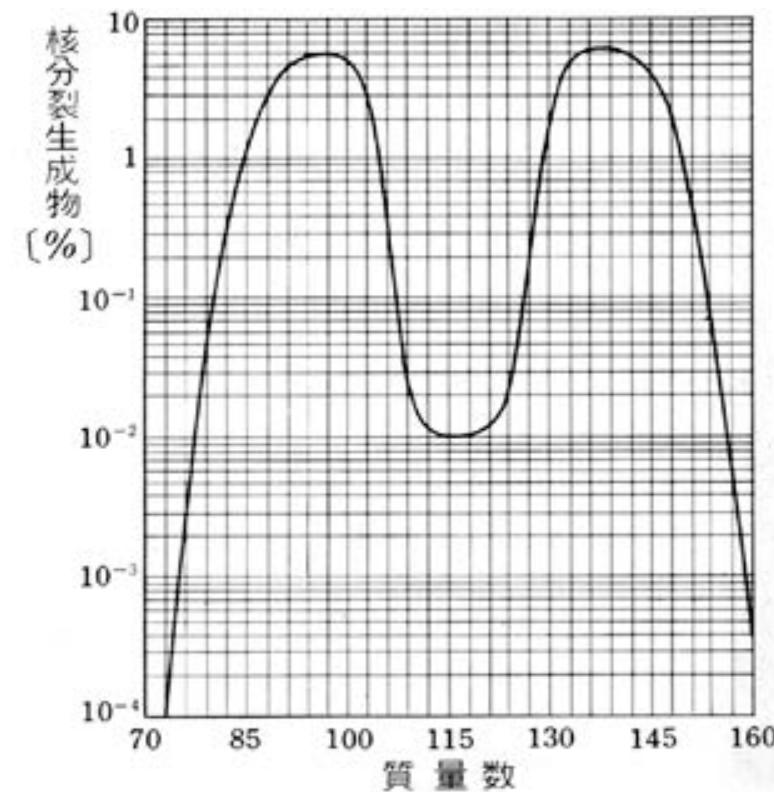
ウラン235が中性子を吸収したときに、もし核が均等に分裂すれば、
 $235 \div 2 = 117 \sim 118$ の質量数の原子ができるはずである。

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。



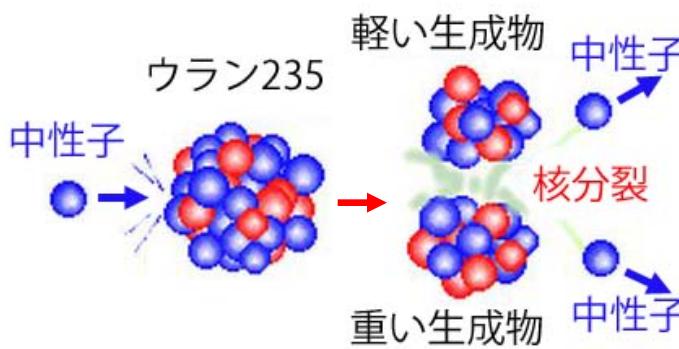
この結果、ウラン235が核分裂したときに生じる核分裂生成物(死の灰)には、いろいろな特徴的な原子核(核種)が含まれる。



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

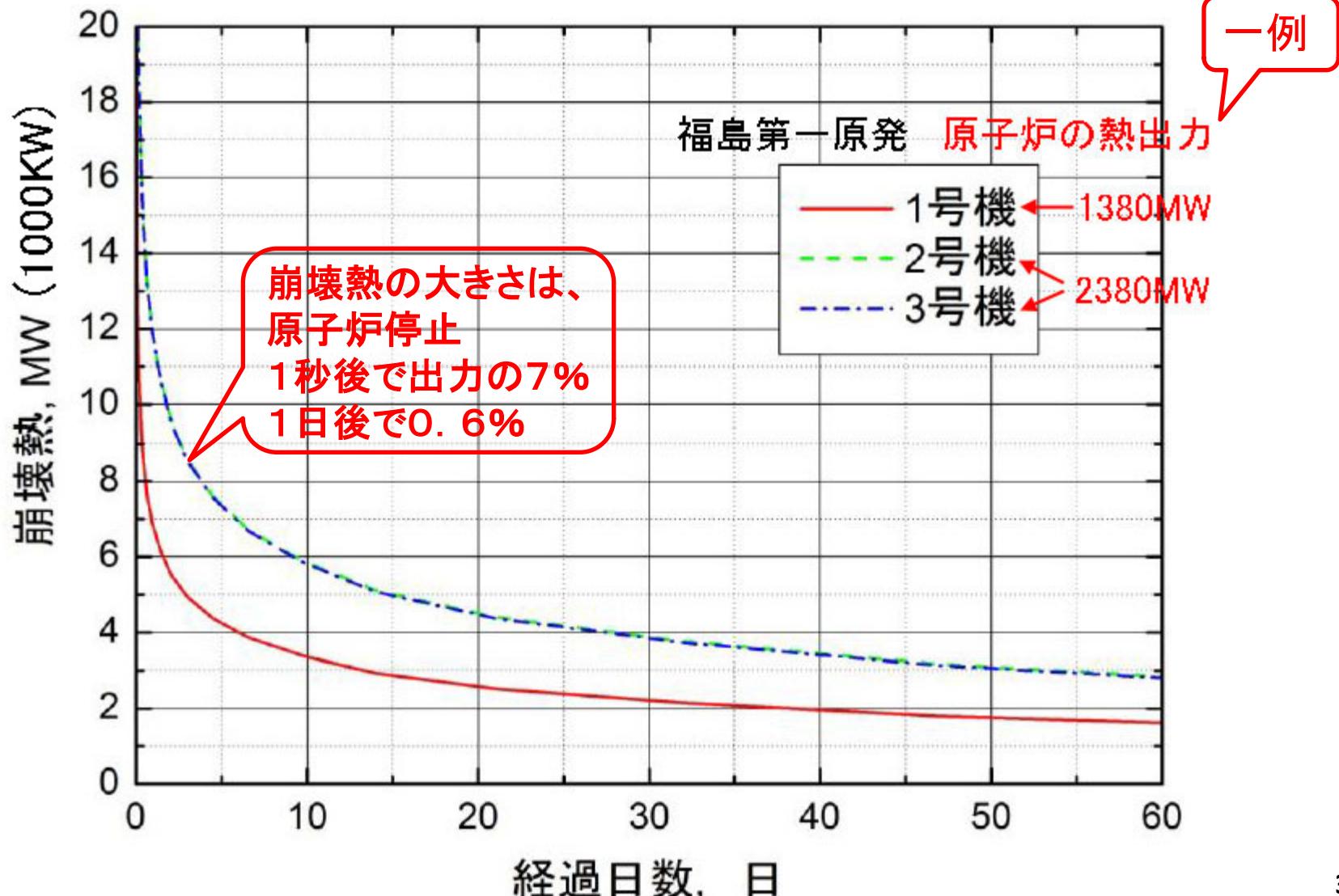


生成物(例)		収率	半減期
軽い生成物	ストロンチウム89	^{89}Sr	4.73%
	ストロンチウム90	^{90}Sr	5.75%
	ジルコニウム93	^{93}Zr	6.30%
	テクネチウム99	^{99}Tc	6.05%
重い生成物	ヨウ素129	^{129}I	0.54%
	ヨウ素131	^{131}I	2.83%
	キセノン133	^{133}Xe	6.70%
	セシウム133	^{133}Cs	6.70%
	ヨウ素135	^{135}I	6.28%
	セシウム137	^{137}Cs	6.19%
	プロメチウム147	^{147}Pm	2.27%
	サマリウム149	^{149}Sm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

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」

[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。

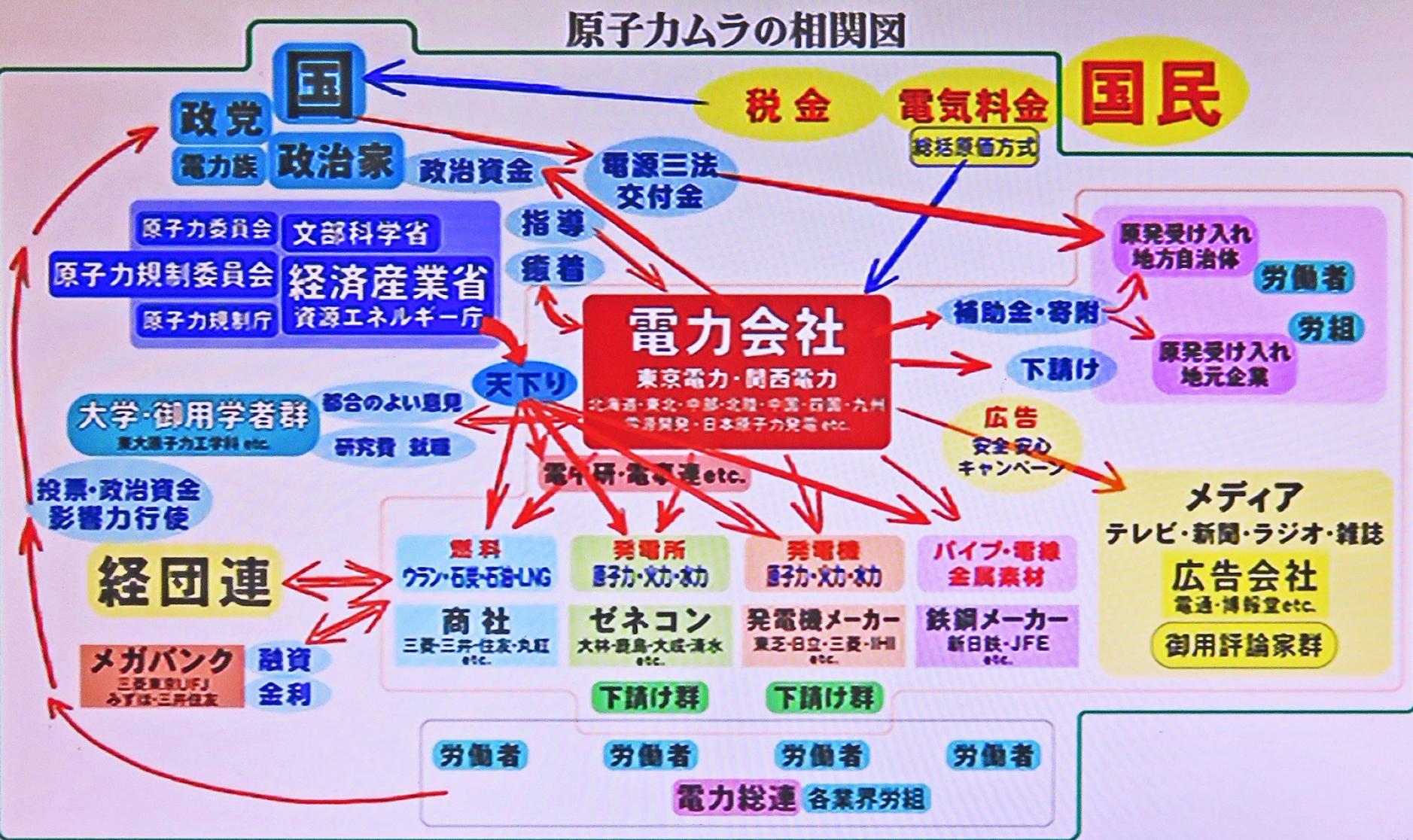
日本と原発
4年後

劇場公開情報

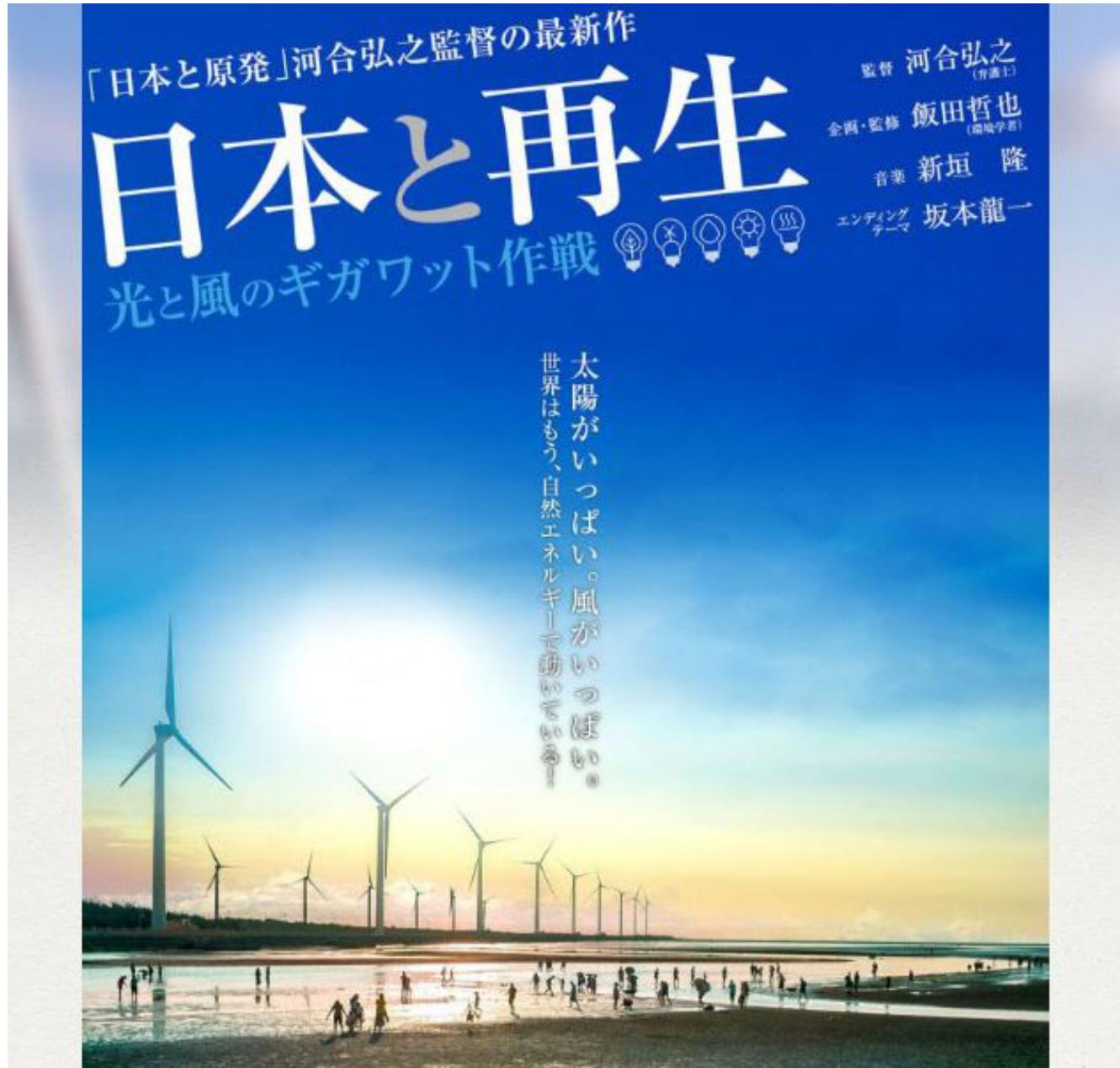
▶ 詳しくは[こちら](#)

「原子力ムラの相関図」

映画「日本と原発」より



河合弁護士監督の映画「日本と再生」





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