

# 原爆と原発

長島雅裕(文教大学教育学部)

masahiro@koshigaya.bunkyo.ac.jp

- Bq(放射能): 1秒あたりに崩壊する原子核の個数
- Gy(吸収線量): 1kgあたり吸収したエネルギー[J]
- Sv(実効線量): 被曝による体への影響を示す量
  - ▶ 通常はエネルギーに比例するから、Gyと同じ値とする
  - ▶  $\alpha$ 線などは同じエネルギーでも影響力が大きいのでGyを20倍する
  - ▶ 低線量被曝の場合、ICRP(国際放射線防護委員会; 国際標準)によると、自然放射線に1Svを追加で被曝すると、癌による生涯死亡リスクが5%上乗せされる
  - ▶ リスクは実効線量に比例する

# カリウム ( $_{19}\text{K}$ )

---

- 安定同位体： $^{39}\text{K}$  (93.3%)、 $^{41}\text{K}$  (6.7%)
- 不安定同位体(主なもの)： $^{40}\text{K}$  (0.012%)
  - ▶ 半減期12.5億年
  - ▶ 軌道電子捕獲によりArになるか、 $\beta$ 崩壊によりCaになる
- 人間にとって必須元素。常時体重の約0.2%
  - ▶ ホメオスタシス
- 体重60kgの人で、常に4000Bqほど抱えている
- バナナ等価線量：バナナはカリウムを豊富に含む。
  - ▶ バナナ一本当たり約15Bq、預託実効線量 $0.1\ \mu\text{Sv}$
- 減塩塩：塩化ナトリウム(NaCl)を減らし塩化カリウム(KCl)を入れている

[Bq] (ベクレル):1秒当たりに崩壊する原子核の個数

# 被ばく

- 「被爆」と「被曝」
  - ▶ 前者は爆撃によるもの、後者は放射線に「曝される」もの
- 外部被曝と内部被曝
  - ▶ 体外の放射線源による被曝か、体内からの被曝か
  - ▶ 外部被曝は主に  $\gamma$  線
    - $\alpha$ 、 $\beta$  線は遮蔽が容易
  - ▶ 内部被曝はすべて
    - $\alpha$ 、 $\beta$  は体外に出られず100%被曝
  - ▶ Svに直すと比較できる
    - というか、比較できるようにSvに直す

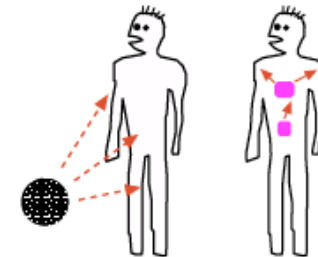
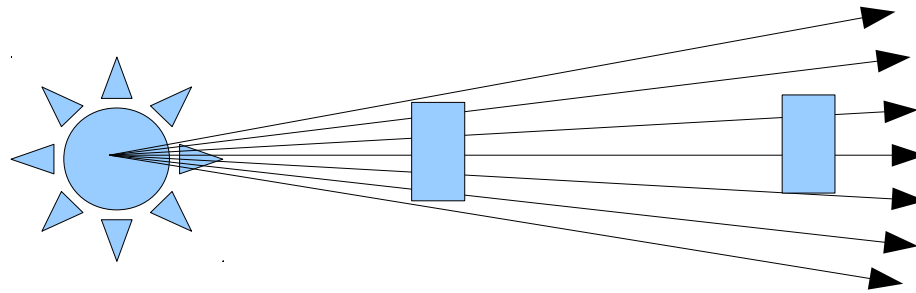


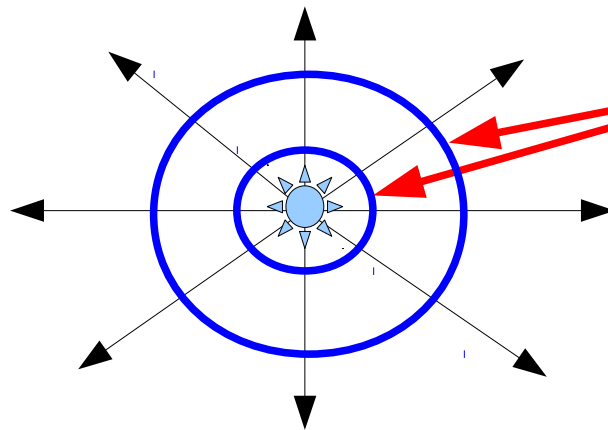
図 4.1 体の外の放射線源（たとえば、放射性物質）からの放射線を浴びるのが外部被曝（左）、体の中に空気や食物と一緒に入った放射性物質からの放射線を浴びるのが内部被曝（右）。

# 内部被曝は危険か？

- 程度による
- 線源に近付くと被曝量は増える
  - ▶  $1/r^2$  に比例



- ▶ ただし、Bqで出る放射線以上に被曝するものではない



くるんでしまえば、ど  
ちらも被曝量は同じ

- Svに直してしまえば内部も外部も同じ

# 自然放射線

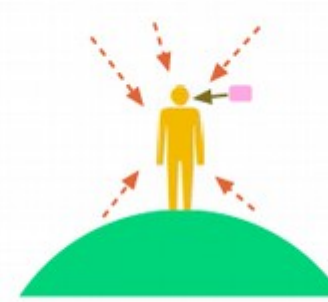


図 4.4 原子力とは関係なく、人間は、空からの放射線（宇宙線）、大地からの放射線によって外部被曝し、カリウム 40 の摂取やラドンの吸入によって内部被曝している。このような自然被曝の量は、被曝量の大小を考える上での一つの「目安」になる。

田崎 p.58

田崎 p.57

上空では大気による遮蔽が効かないので被曝量が増える→国際線乗務員や宇宙飛行士は要注意

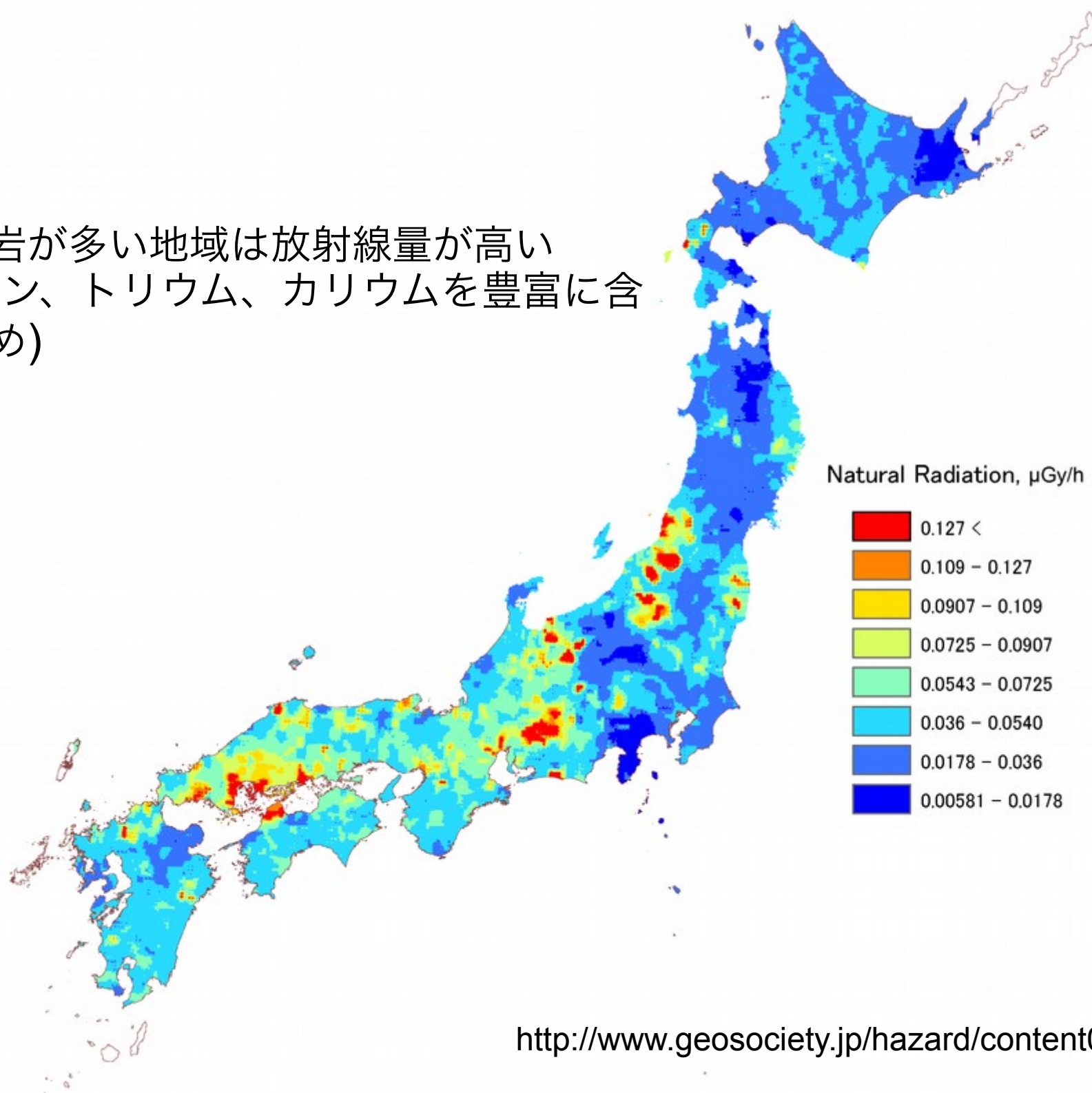
世界平均は2.4mSv/年

なお、日本の平均被曝は2011年に改訂。それまでは1.5mSv/年だった(Poの内部被曝の評価が改善された)

線源		実効線量 (mSv/年)
外部被ばく	宇宙線	0.3
	大地放射線	0.33
内部被ばく (吸入摂取)	ラドン (屋内、屋外)	0.37
	トリウム (屋内、屋外)	0.09
	喫煙 (鉛 210、ポロニウム 210 など)	0.01
	その他 (ウランなど)	0.006
内部被ばく (経口摂取)	主に鉛 210、ポロニウム 210	0.80
	トリチウム	0.0000082
	炭素 14	0.01
	カリウム 40	0.18
合計		2.1

表 4.3 「自然放射線による国民 1 人当たりの年間実効線量」、「新版・生活環境放射線 (国民線量の算定)」(原子力安全研究協会、2011 年 12 月) の表 1.4.1 を引用した (-部を 2012 年 12 月 27 日の「正誤表」に基づいて修正)。

花崗岩が多い地域は放射線量が高い  
(ウラン、トリウム、カリウムを豊富に含むため)



# 医療被曝

- 我々は、検査でも被曝をしている

田崎 p.59

線源	実効線量 (mSv/年)
X 線診断	1.47
X 線 CT 検査	2.3
集団検診 (胃)	0.038
集団検診 (胸部)	0.0097
歯科 X 線	0.023
核医学	0.034
合計	3.8747

表 4.4 「医療被ばくによる国民 1 人当たりの年間実効線量」、表 4.3 と同じ文献の表 4.2.1 を引用した。

# なぜ癌になるか

---

- 間違った設計図(DNA)を持った細胞が暴走的に増殖
- DNAが傷ついたまま細胞分裂すると起こりうる
- DNAが傷つくと、いつでも癌になるわけではない

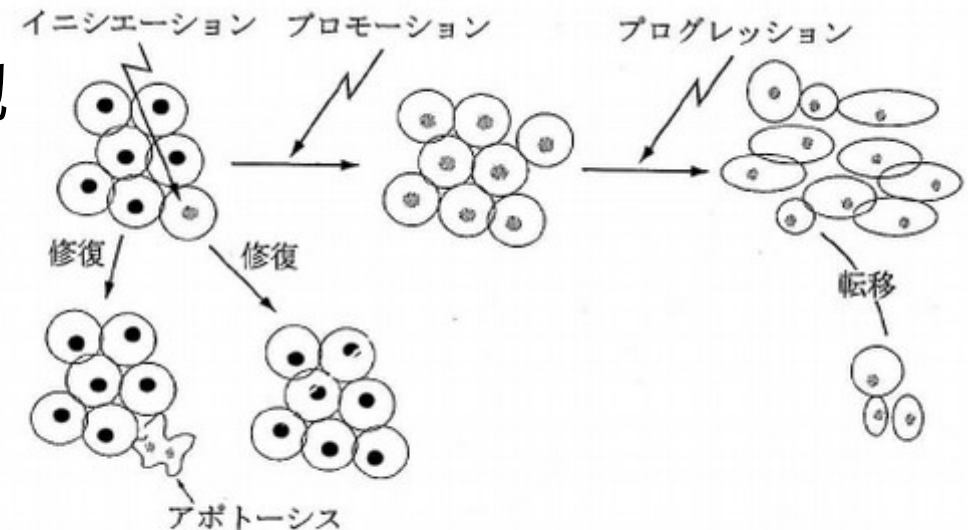


図 4.5 DNA はこのようなラセンがずっとつながった長い分子。ここでは、放射線によって DNA の二本の鎖がまとめて切断された状況をマンガ的に描いた。Wikipedia 掲載の図 (Richard Wheeler (Zephyris) により投稿) を加工した。



# DNAの損傷と修復

- 放射線が体内の分子と反応
  - ▶ DNAを構成する分子とぶつかり、電離し損傷を起こす
  - ▶ 細胞内の水分子とぶつかり、電離して活性酸素をつくり、活性酸素が反応してDNAを損傷する
- DNAの切断
  - ▶ 一本だけ切断：もう一本を見ながら修復…割と容易
  - ▶ 二本とも切断：修復、不可能ならば細胞死(アポトーシス)
  - ▶ 修復に失敗すると増殖(癌化)
- DNAの修復は、一日一細胞当たり最大50万回
  - ▶ 常に損傷している



# 放射線の健康への影響

- 確定的影響と確率的影響

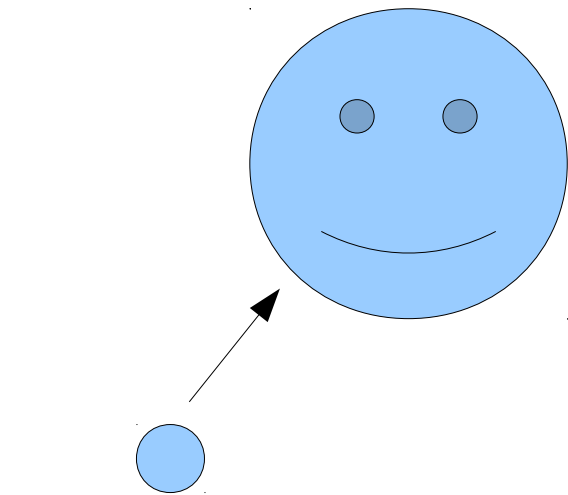
- ▶ 確定的影響…被曝線量が高い場合。ほぼ確実に起こる
- ▶ 確率的影響…被曝線量が低くても、確率的に起こりうる(癌と遺伝)

表6.5 確定的影響と確率的影響の特徴

影響の区分	線量との関係	例示
確定的影響	<ul style="list-style-type: none"><li>・しきい線量が存在する</li><li>・しきい線量を超えた場合には、線量が増加するに従って、発生率が増加し、重篤度も高くなる</li></ul>	放射線皮膚障害 急性放射線症 胎児の奇形 白内障など
確率的影響	<ul style="list-style-type: none"><li>・しきい線量は存在しないと仮定されている</li><li>・線量の増加に従って発生率が増加する</li><li>・重篤度は、線量に無関係である</li></ul>	放射線誘発ガン 放射線誘発遺伝的影響

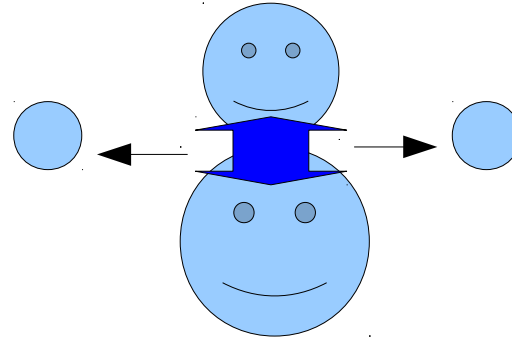
# 核分裂によるエネルギー生成

放出された中性子が、次の核分裂を引き起こす



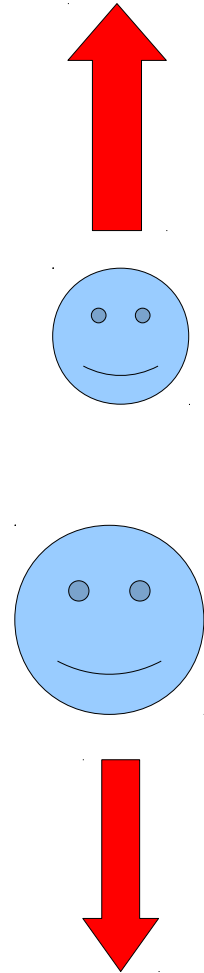
中性子を吸収  
→不安定になる  
←核力は到達距離が短いので隣同士でしか働かないが、クーロン力は全体で働く

中性子を放出



分裂  
→分裂片同士は離れてしまい、核力は働かない  
→強力な反発力 (クーロン力)

凄まじい勢いで分裂片が飛ぶ  
→他の原子に当たり、運動エネルギーが熱に変わる



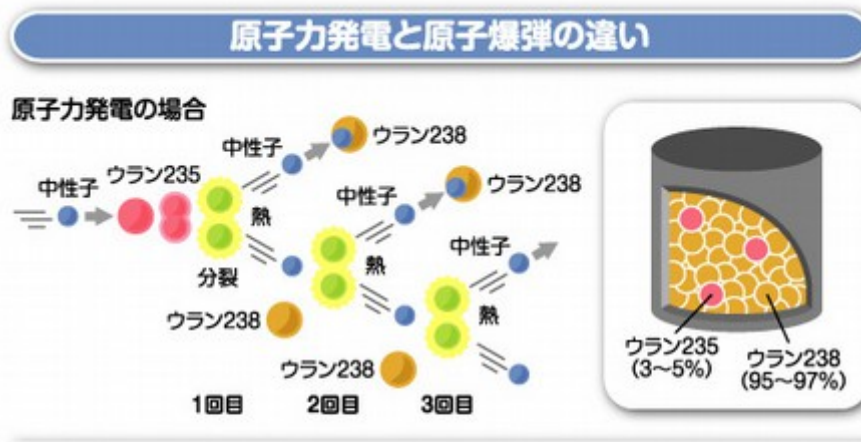
# 臨界

---

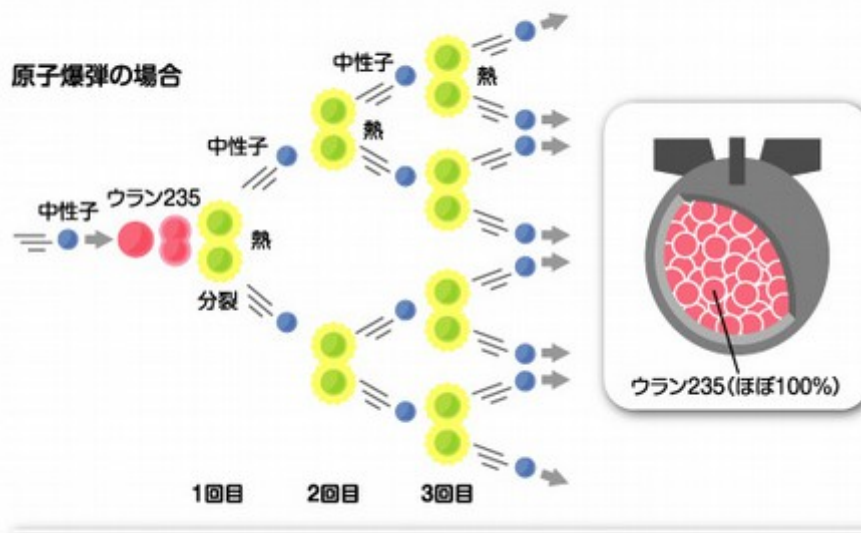
- $^{235}\text{U}$ も $^{239}\text{Pu}$ も、中性子を一個吸収すると核分裂
- 分裂で複数の中性子を放出
  - ▶ 別のUやPuにぶつかれば、次の核分裂を誘発
- 中性子は高速なので、一部は外に逃げる
- 平均して、一回の核分裂から出る中性子のうち、一個より多く別のUやPuにぶつかれば、反応はネズミ算式に増えていく⇒臨界
- 逆に一個未満であれば、核分裂はいずれ止まる
- 臨界に達するためには、燃料を十分多くし、中性子が逃げにくくする必要がある

# 原爆と原発の違い

原子力発電



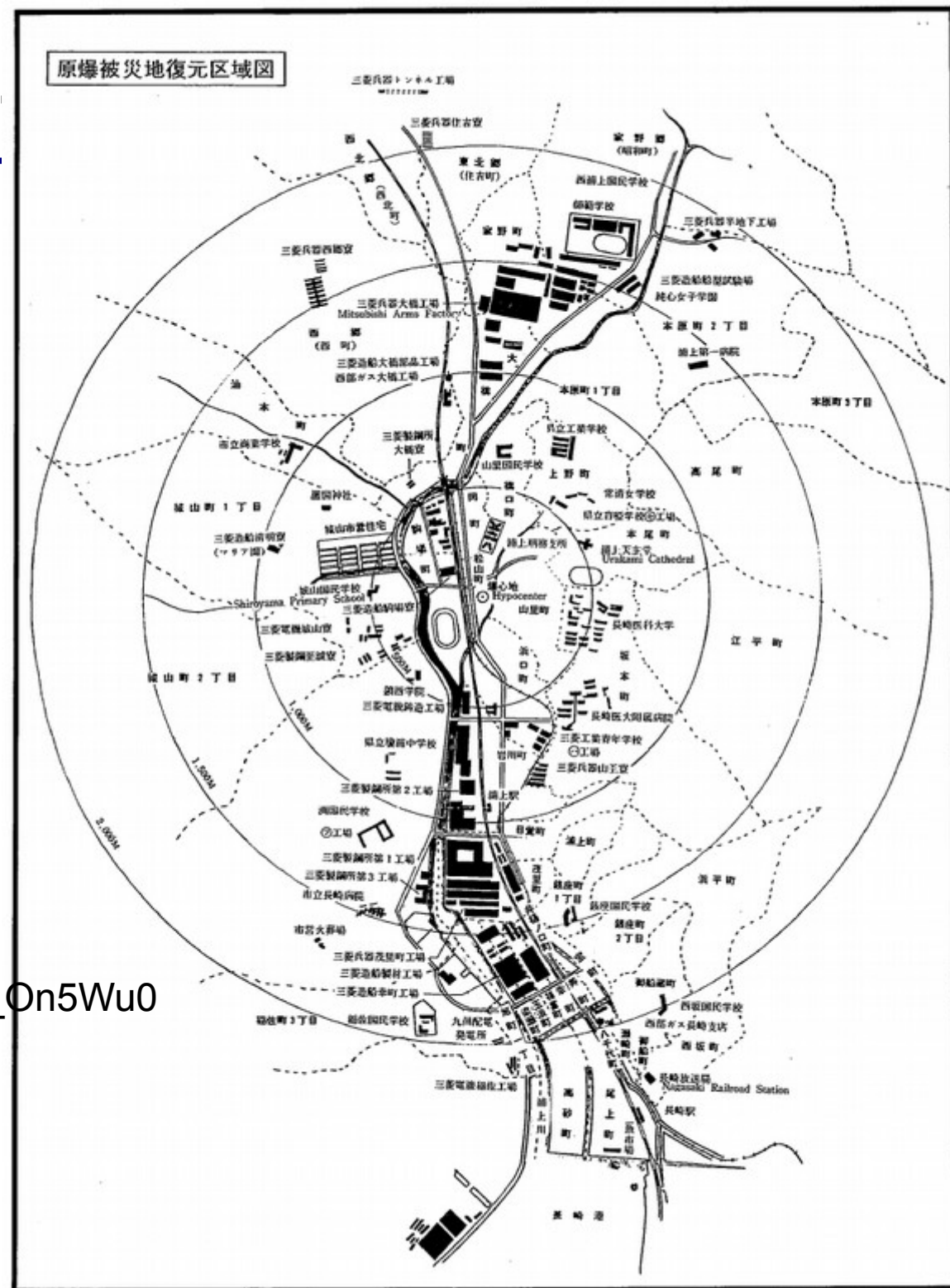
ウラン型原爆



# 原爆のエネルギー

- 長崎原爆では、
  - ▶ 熱線35%
  - ▶ 爆風50%
  - ▶ 放射線15%と推定されている
- 「長崎原爆後 街風景 ATOMIC BOMB」

[https://www.youtube.com/watch?v=J5wk\\_On5Wu0](https://www.youtube.com/watch?v=J5wk_On5Wu0)



# 被害

---

- 被害状況

<http://www.city.nagasaki.lg.jp/peace/japanese/record/iryoku.html>

- ▶ 死者 73,884人、重軽傷者 74,909人、合計148,793人
- ▶ この数字は長崎市原爆資料保存委員会の昭和25年7月発表の報告によったものだが、これが今日の通説となっている。
- ▶ ちなみに、昭和20年（1945）9月1日現在の長崎県知事の報告書（第11報）には、屍体検視済のもの19,743人とあり、この検視はほとんどが原爆直後の混乱期に、被災地現場で行われたもので、即死状態の氏名不詳、性別不詳といった、いわゆる身元が判明しない死体も約2,000体に及んでいる。累々たる死体の群れ、黒焦げや、ひどく損傷した遺体を目前にしては、身元確認の術もなかったことが、この数字からもうかがえよう。
- ▶ またこのほか行方不明として届出のあった者が、1,927名あり、何れも死亡したものと思われるともある。

**原爆死没者名簿記載人数は、現在では15万人超**

→人数は本質的な問題ではない

# 原爆ドーム(広島)

---



現在の姿



被爆前の姿を合成

<http://tanmatsui.exblog.jp/11224711>



# 原爆ドーム周辺(広島)

---

- 町並みがあった(現在は平和公園)



<https://twitter.com/ccttaa/status/610750864102309888>

# 核兵器の原理

---

- 核分裂(や核融合)を短時間のうちに連鎖的に引き起こし、一気にエネルギーを解放させる
- 連鎖反応をどうやって起こすか?
- 核分裂(原子爆弾)：ウラン型、プルトニウム型、…
  - ▶ ウラン235の核分裂で出るエネルギー:約 $2 \times 10^{12}$ [J/mol]
- 核融合(水素爆弾)：重水素、三重水素
  
- 軽い元素は核融合でエネルギーを取り出し(重い方が安定)、重い元素は分裂で取り出す(軽い方が安定)
  - ▶ その中間に、融合でも分裂でもエネルギーを取り出せず、吸熱反応となる最も安定な元素がある⇒鉄(Fe)

# 核分裂の連鎖反応を起こす

---

- ウラン型原爆

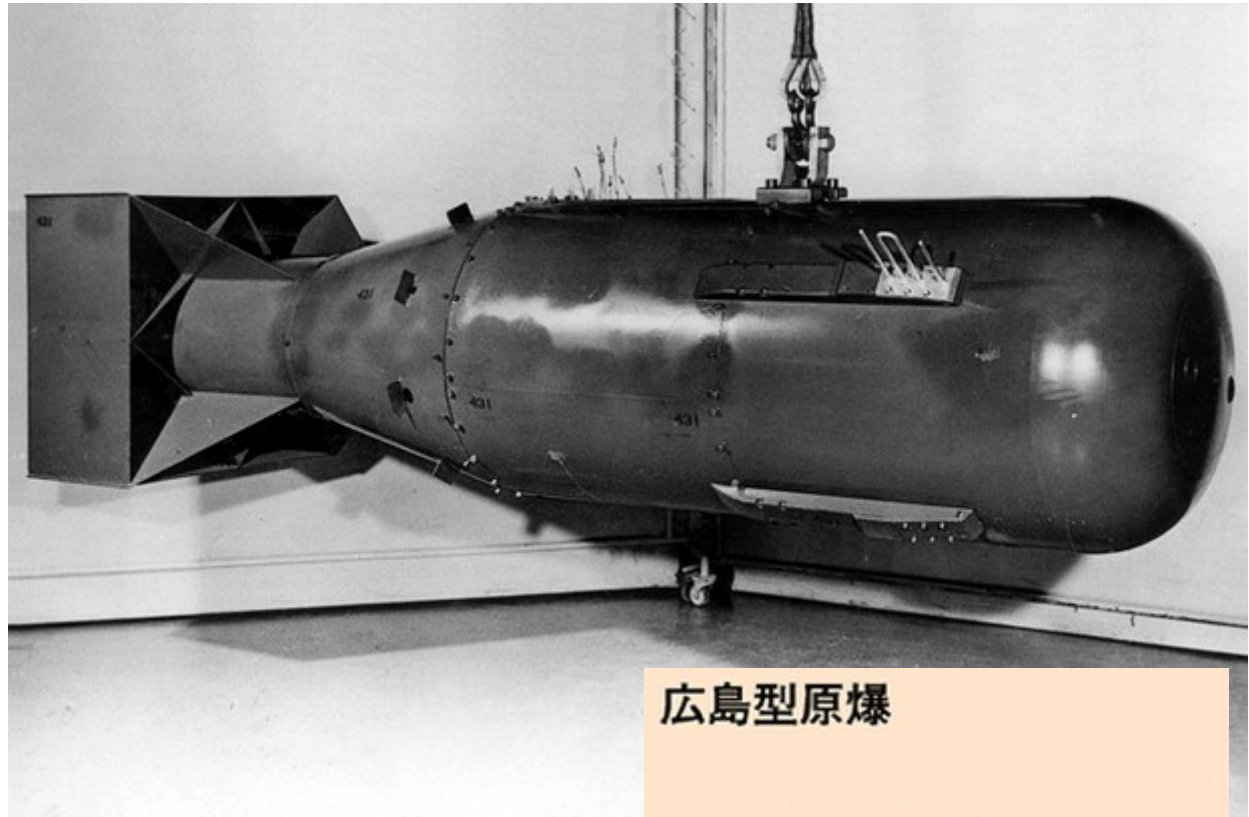
- ▶ 天然ウランの99%以上は半減期45億年のウラン238(核分裂を起こさない)
- ▶ ウラン235は中性子を加えると速やかに分裂するが、1%未満
- ▶ 連鎖反応を起こすには、ウラン235の純度を約90%以上にする必要がある

- プルトニウム型原爆

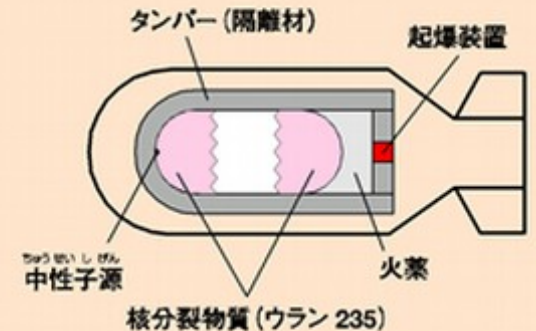
- ▶ プルトニウム239は中性子を加えると速やかに分裂
- ▶ 原子炉にて、ウラン238に中性子を照射して生成
  - $239\text{U} \rightarrow 239\text{Np}(\beta \text{崩壊}) \rightarrow 239\text{Pu}(\beta \text{崩壊})$
- ▶ プルトニウム240が7%未満にならないといけない
  - 核分裂を起こしやすく、勝手に連鎖反応が始まってしまう
  - $239\text{Pu}$ が中性子を吸収してできる

# 広島(ガン)型

- リトルボーイ
- 未臨界のウラン235の塊を2つに分けておき、起爆装置で火薬を爆発させ、塊をぶつける
- 臨界に達し、核分裂の連鎖反応が始まる
- 構造が単純なので、核実験せず実戦で使用



広島型原爆



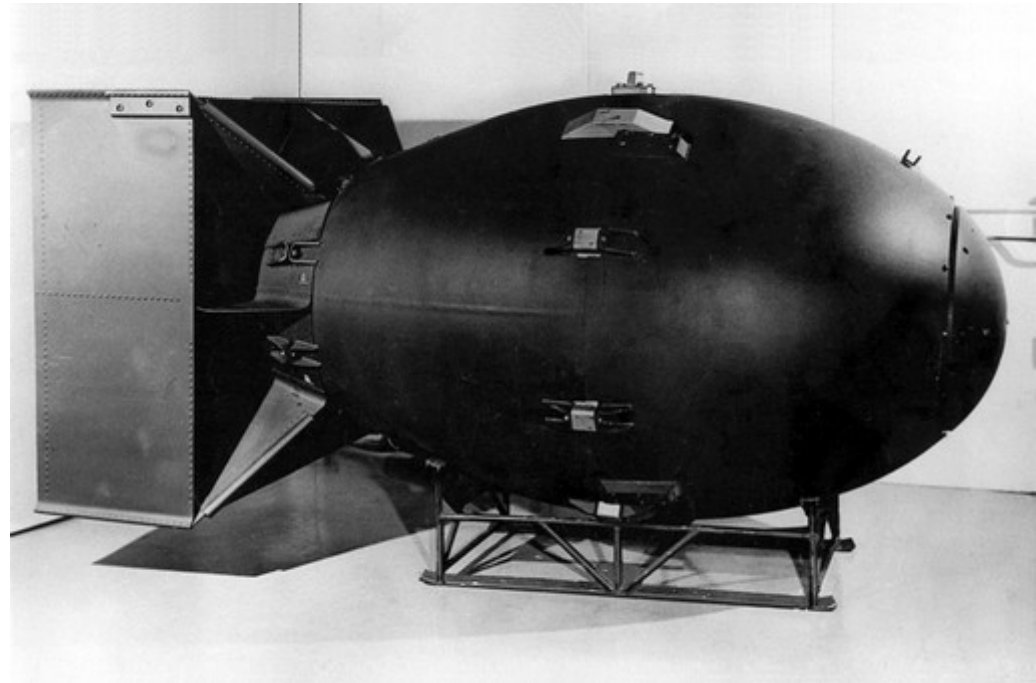
長さ3m 直径0.7m 重さ4トン  
火薬を使った爆弾1万5千トン相当  
「リトルボーイ(ちび)」と呼ばれた

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6a/Little\\_boy.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6a/Little_boy.jpg)

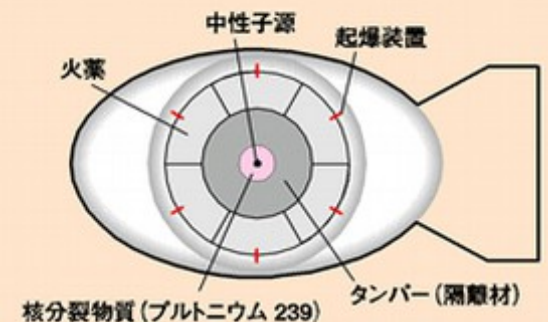
<http://www.city.nagasaki.lg.jp/peace/japanese/record/tokucho.html>

# 長崎(インプロージョン)型

- ファットマン
- プルトニウム239を純粹に精製するのは無理
  - ▶ 240Puが混じる
- 240Puは自発核分裂の確率が高く、ガン式では塊がぶつかる前に爆発してしまう
  - ▶ 早期爆発
- インプロージョン方式でPuを圧縮し、臨界へ
  - ▶ 圧縮する技術が難しい
- トリニティー実験
  - ▶ 1945年7月16日



長崎型原爆



長さ3.25m 直径1.52m 重さ4.5トン  
火薬を使った爆弾2万1千トン相当  
「ファットマン(ふとっちょ)」と呼ばれた

# 原爆(広島・長崎)の映像

---

- 「HD New released Hiroshima Nagasaki atomic bombs bombing 写実的 広島長崎原子爆弾爆撃 warning graphic content」
  - ▶ <https://www.youtube.com/watch?v=4y4CVRQpVS8>
- Atom bomb of Nagasaki
  - ▶ <https://www.youtube.com/watch?v=6l5jl4iO4-g>

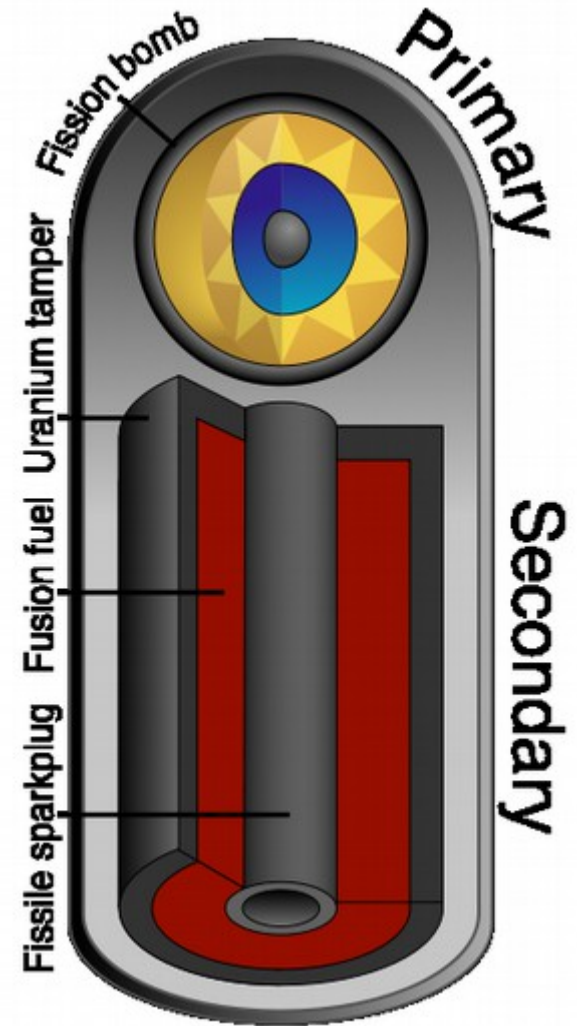
# 爆弾としての「効果」

---

- TNT爆薬換算で、広島原爆は15kt、長崎は20kt
  - ▶ TNT 1kt で約 $4 \times 10^{12}$ [J]のエネルギー
- 瞬間的な大量の核分裂によって  $\gamma$  線が放出
  - ▶ 大量の被爆
- 核分裂片の莫大な運動エネルギーが熱に変換され、巨大な「火の玉」が生成
  - ▶ 太陽がもう一つ出現したとたとえられる
  - ▶ 地表は1000度以上になったと考えられる
- 爆発時に発生した衝撃波が空気中を伝わり、爆風として破壊
- 核爆弾が炸裂した瞬間
  - ▶ <https://www.youtube.com/watch?NR=1&feature=endscreen&v=llXNviPq3ns>

# 水素爆弾

- 重水素の核融合を利用した爆弾
  - ▶ 水素の同位体。陽子(p)に中性子(n)が一つついている
  - ▶ 三重水素(nが2つ)を使う場合も
- 1952年、アメリカが最初の水爆実験に成功
- 重水素化リチウムを原爆を使って圧縮し、核融合を起こす
- ちなみに、太陽は水素の核融合でヘリウムを生成し光っている





# ブラボー実験と第五福竜丸

---

- 1954年3月1日、ビキニ環礁(太平洋のマーシャル諸島共和国)で行われたキャッスル作戦の一つ
- 15Mt の水爆実験
- 日本のマグロ漁船、第五福竜丸が放射性降下物(いわゆる「死の灰」)を浴びて被ばく、無線長の久保山愛吉氏が9月に亡くなる
  - ▶ 原水爆禁止運動はこれを機に盛り上がり、原水爆禁止日本協議会(原水協)が結成、翌年「第1回原水爆禁止世界大会」が開催
  - ▶ 広島・長崎は戦時中・占領中だったため情報が隠蔽され、多くの日本人が実態を知らなかった
- 「HD ビキニ 原爆 核実験 核実験の映画 慄然 戦争 1946」
  - ▶ [https://www.youtube.com/watch?v=An8j\\_RZV8Zw](https://www.youtube.com/watch?v=An8j_RZV8Zw)

# 放射性降下物

測定地	降下量 (Bq/m <sup>2</sup> )	
	セシウム 134	セシウム 137
山形県 (山形市)	11000	10000
福島県 (双葉郡)	3100000	3340000
茨城県 (ひたちなか市)	18000	17000
栃木県 (宇都宮市)	5800	5700
群馬県 (前橋市)	4700	4700
埼玉県 (さいたま市)	5400	5300
千葉県 (市原市)	4400	4900
東京都 (新宿区)	8500	8100
神奈川県 (茅ヶ崎市)	3500	3400

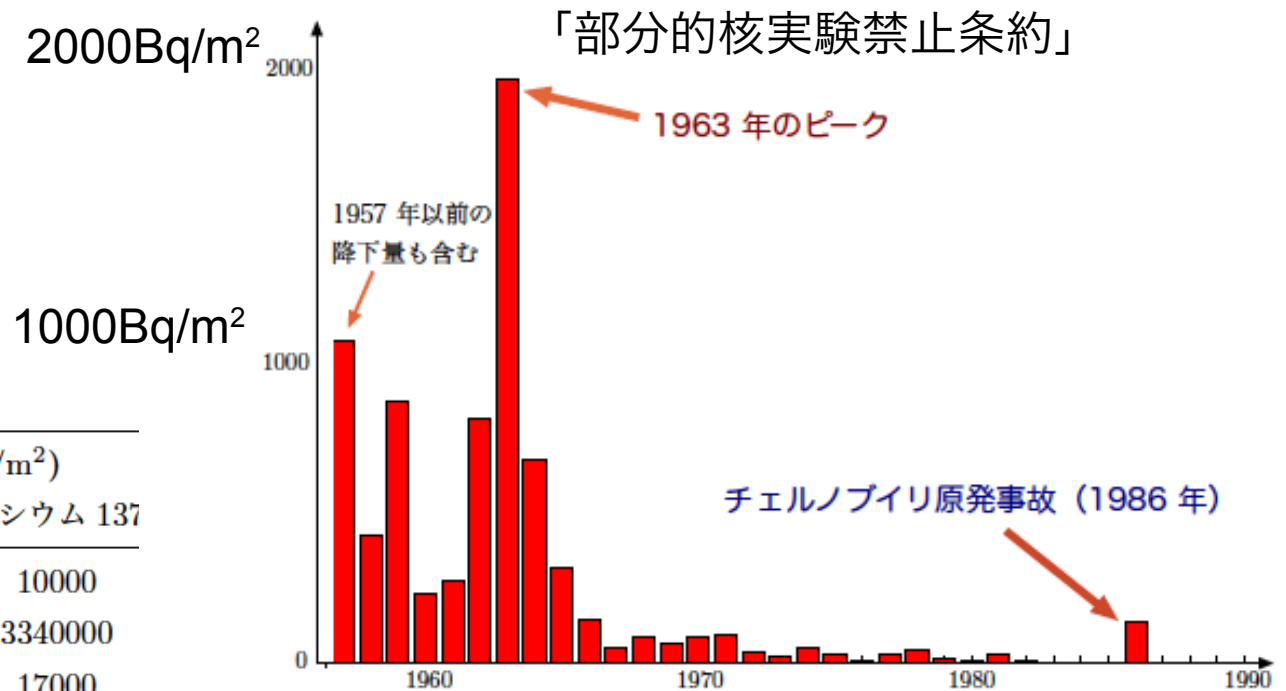


図 5.2 1957 年から 1990 年までの、東京での年間のセシウム 137 の降下量。縦軸の単位は Bq/m<sup>2</sup> である。このグラフの時期の降下量の総計は約 7600 Bq/m<sup>2</sup> になる。

田崎 p.93

表 5.1 2011 年 3 月のいくつかの都市でのセシウムの降下量。単位はベクレル毎平米 (Bq/m<sup>2</sup>)。文部科学省の「環境放射能水準調査結果 (月間降下物)」による。

<http://radioactivity.mext.go.jp/old/ja/>

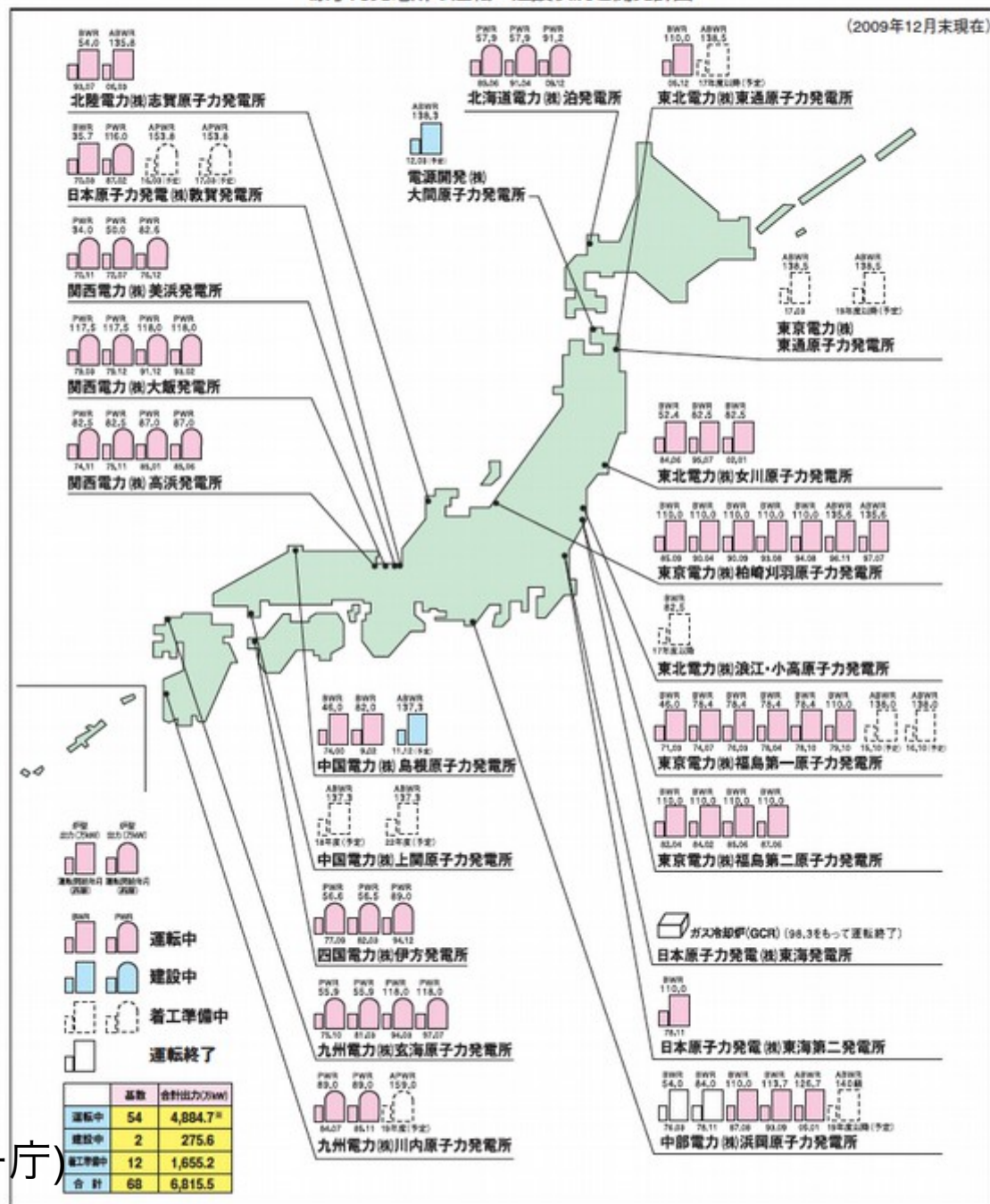
「環境一般等のモニタリング > 全国的なモニタリング > 定時降下物」をクリックし、その先のページで「過去の結果 > 定時降下物のモニタリング (平成 23 年 3 月)」をクリック。

田崎 p.91

# 原子力発電

2009年12月末において日本で運転中の原子力発電所は、全部で**54基**、設備容量は**約4900万kW**です。この規模は、アメリカ、フランスに次いで世界第3位の原子力発電保有国となっています。また、2基が建設中、12基が着工準備中です。

原子力発電所の運転・建設状況と開発計画

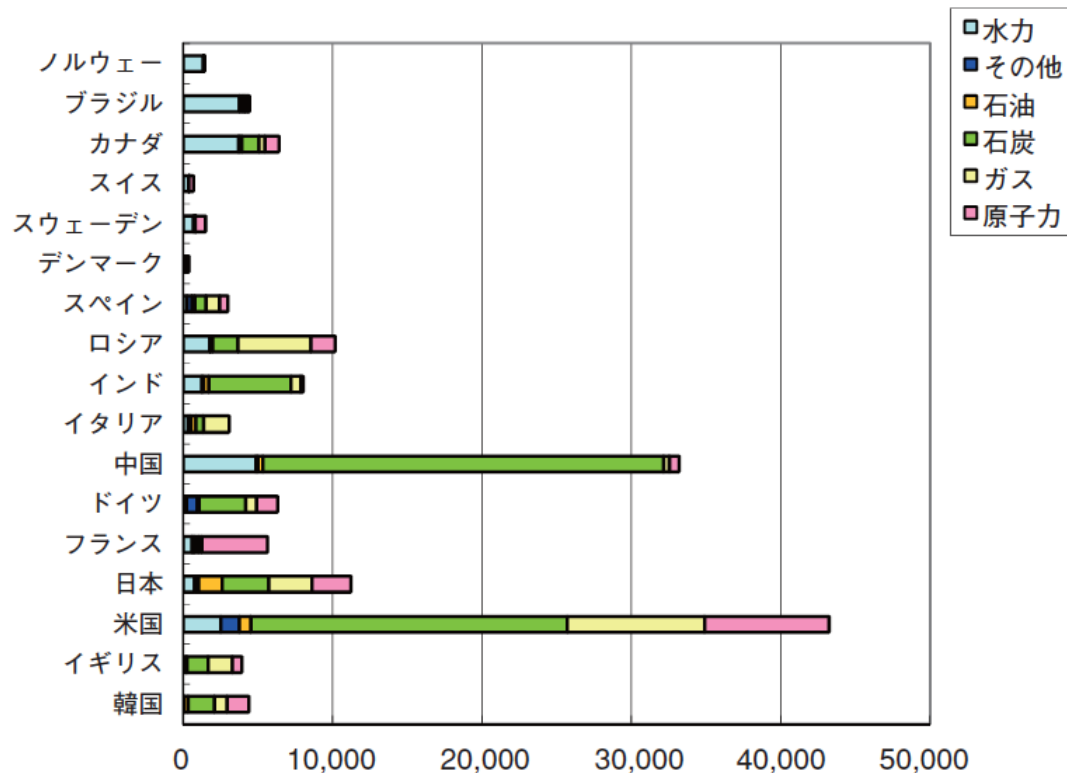
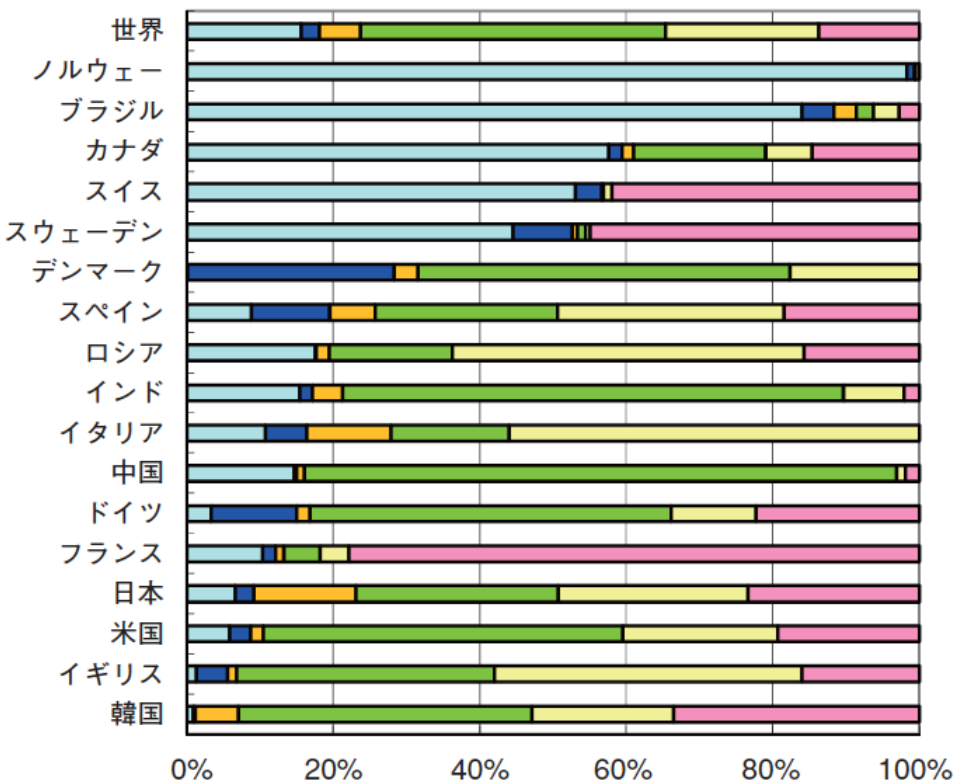


「日本の原子力発電」(2010,資源エネルギー庁)

水力+その他（風力、廃棄物など）による発電量の構成比が大きい順に並べてあります。

各国の資源別発電電力量の構成比

各国の資源別発電電力量（億kwh）

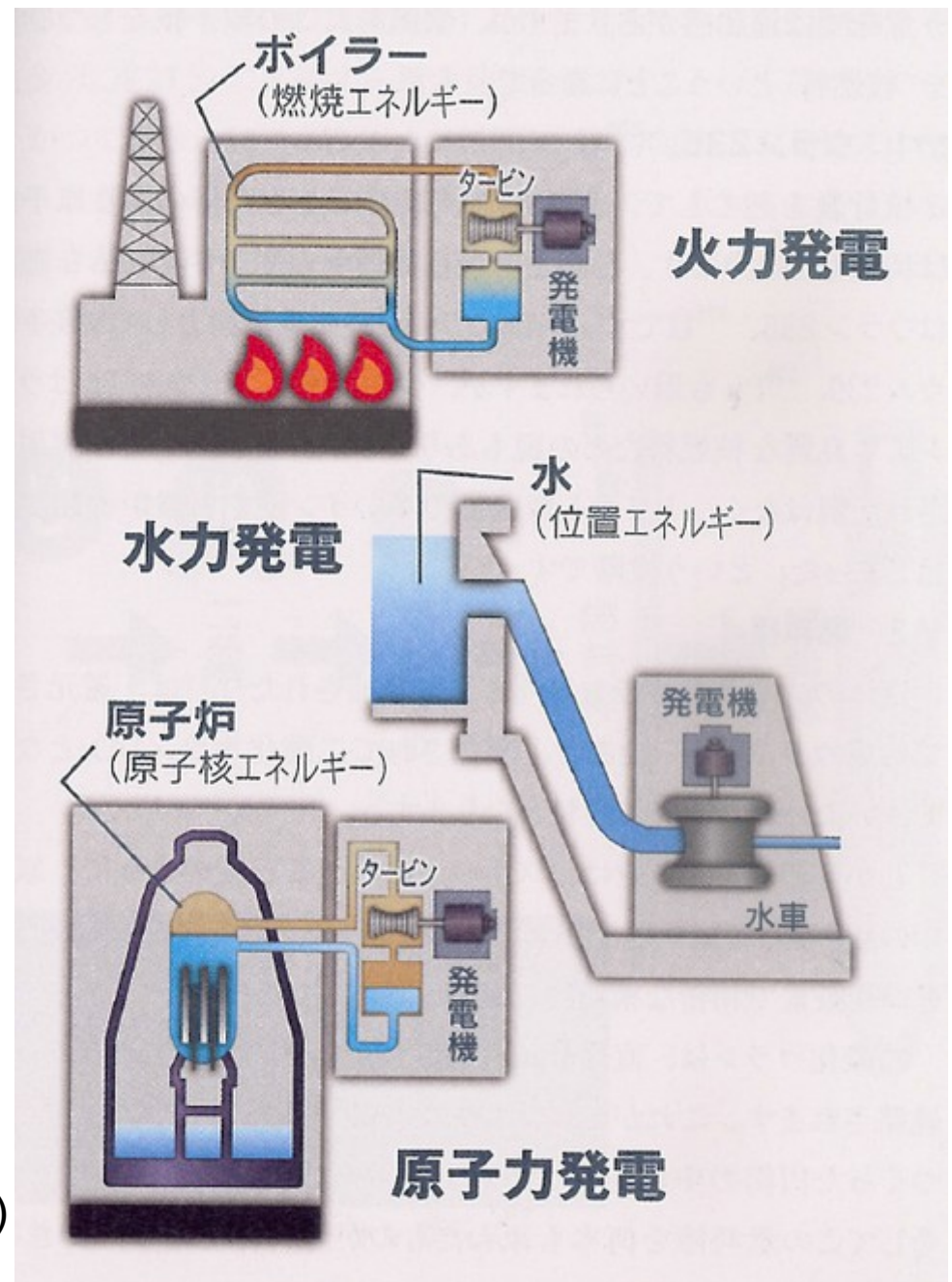


出典：OECD/IEA「ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES 2009」及び  
OECD/IEA「ENERGY BALANCES OF non-OECD COUNTRIES 2009」

「日本の原子力発電」(2010,資源エネルギー庁)

# 原発の仕組み

- 水蒸気を発生させ、タービンを回して発電、というところは基本的に変わらない。
  - ▶ 水力は水を落としてタービンを回す
- どうやって水蒸気を発生させるか？



# ウランの濃縮

---

- 天然ウランは、核分裂に必要な $^{235}\text{U}$ を1%も含まない
- 原子力発電のためには、数%まで増やす(濃縮)することが必要
  - ▶ 原爆の場合は、7~8割
- 様々な化学過程と遠心分離を経て濃縮される
  - ▶ 残りは $^{238}\text{U}$ の割合が増えた「劣化ウラン」
  - ▶ 弾頭として使用され、問題視されている
- 燃料は、それだけでは核分裂の連鎖反応を起こさない。中性子をぶつけ、核分裂を誘発する必要がある
  - ▶ 「減速材」を入れてやる

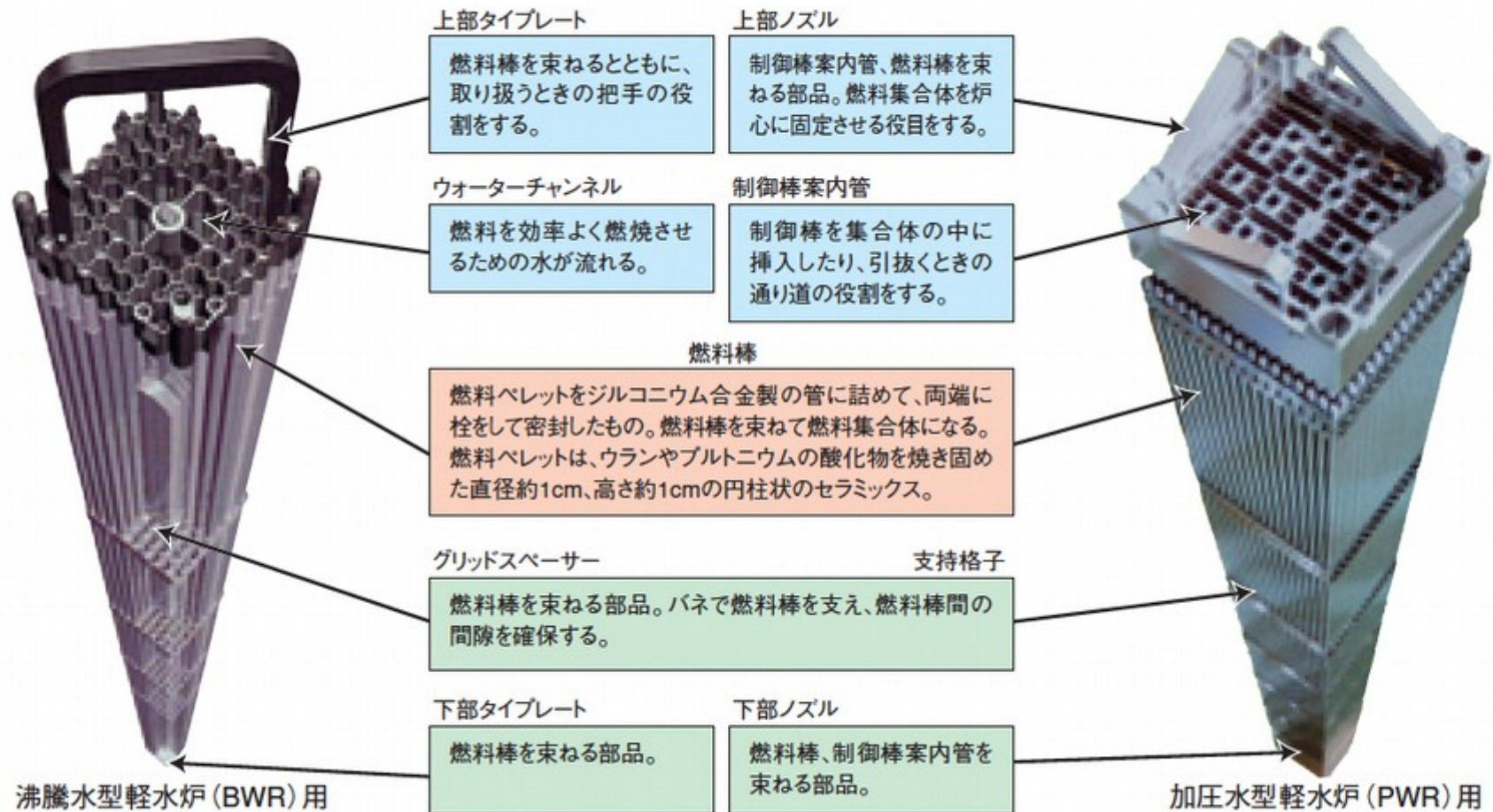
# 高速中性子の減速：熱中性子

---

- 核分裂で発生する中性子は高速
  - ▶ 原子炉から脱出してしまいうため、連鎖反応には使えない
- 中性子を減速し、燃料内の別の $^{235}\text{U}$ の核分裂を誘発する必要がある
- 減速するには?→なるべく中性子と同程度の質量の物質にぶつける
  - ▶ ビー玉やビリヤードと同じ。相手が重すぎると、跳ね返るだけで減速はされない
- 水素(陽子)や炭素がお手頃(豊富に手に入る)
  - ▶ 水素は $\text{H}_2\text{O}$ に豊富に含まれる
- 水なら冷却にも使える
  
- 原爆の場合は、減速せず高速で一気に連鎖反応。周囲を $^{238}\text{U}$ のタンパーで覆い、閉じこめた

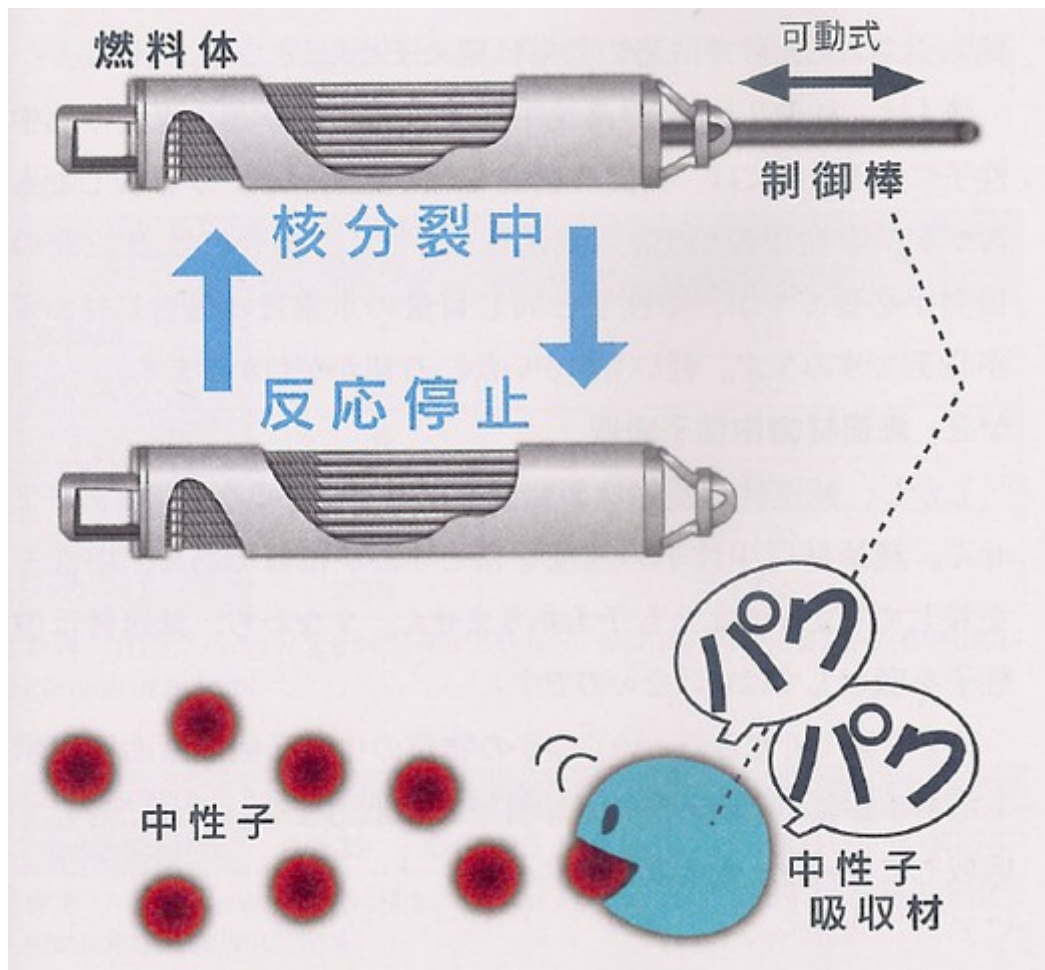
# 燃料棒

## 燃料集合体の概略構造



出典：日本原子力学会誌を利用、vol.46,No.5,P41～47「核燃料工学の基礎第一回核燃料の概要」(森一麻)より

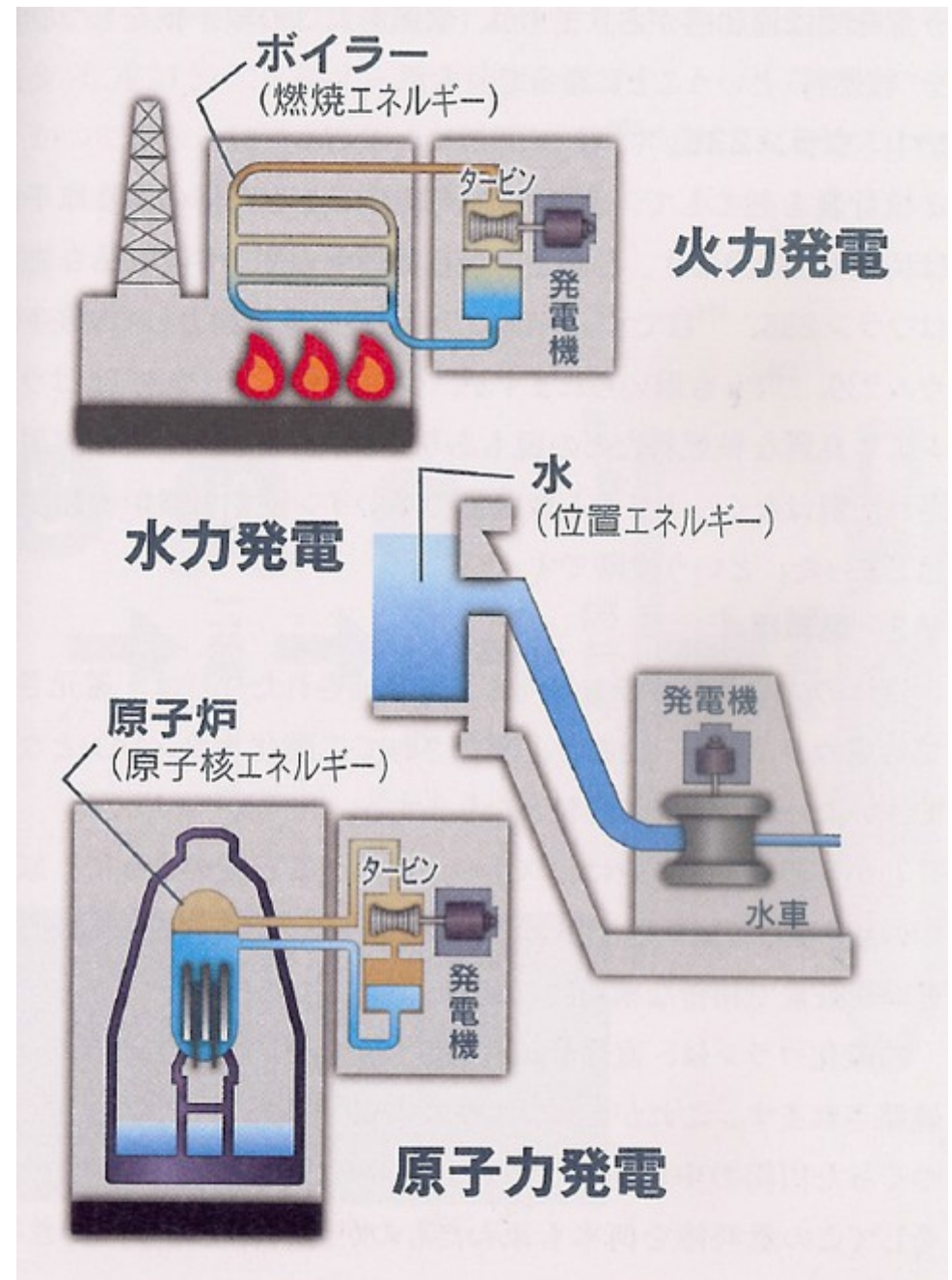




「知っておきたい放射能の基礎知識」(齋藤勝裕)

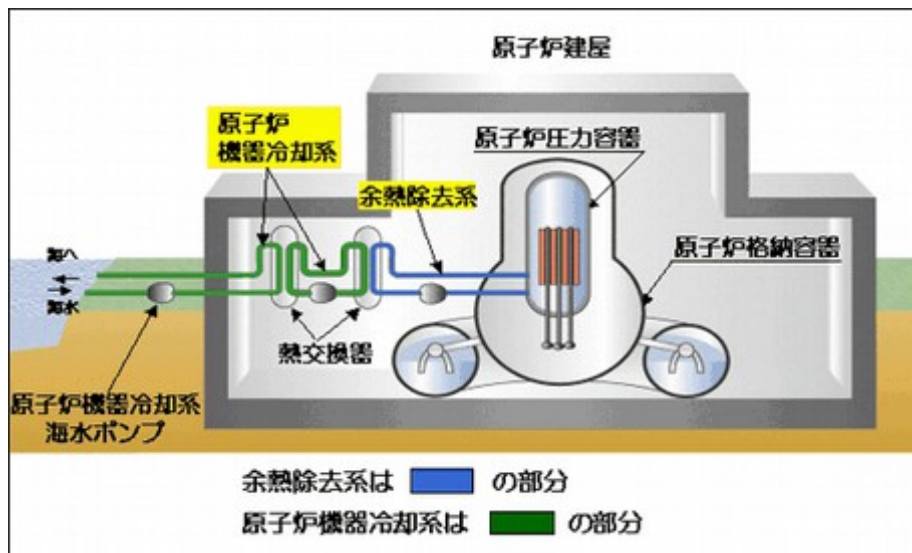
# 冷却材

- タービンを回すには、水蒸気が必要(水を熱する)
- 燃料は常に冷やさない  
と、放射性物質の崩壊熱で熱くなりすぎ、溶けて  
しまう(炉心溶融；メル  
トダウン)
- 比熱が大きく、流動性の  
あるものが有利
- 結局、水(H<sub>2</sub>O)が良い
- 燃料を冷却し、自分は熱  
くなってタービンを回し  
に行く
- 水の場合は、同時に減速  
材にもなる



# 冷却

- タービンを回した水蒸気は、再び冷やされ、原子炉内を循環する(詳細は後述)
- その際、余分な熱が残る。これを捨てないといけない
  - ▶ 冷却塔を作って熱を放出
  - ▶ 海水を取り込み、海水で冷やす→暖められた海水は海に放出されるため、周囲の海水温は上昇する



スリーマイル島の原発

[http://www.chuden.co.jp/corporate/publicity/words/3004597\\_6468.html](http://www.chuden.co.jp/corporate/publicity/words/3004597_6468.html)

<http://www.exeloncorp.com/powerplants/threemileisland/Pages/profile.aspx>

# オクロ(Oklo)の天然原子炉

- オクロ(ガボン共和国)のウラン鉱床で、天然の状態で $^{235}\text{U}$ の核分裂の連鎖反応が起きていた痕跡
- 約20億年前は $^{235}\text{U}$ の比率が高かった
  - ▶ 半減期約7億年、いまの約8倍

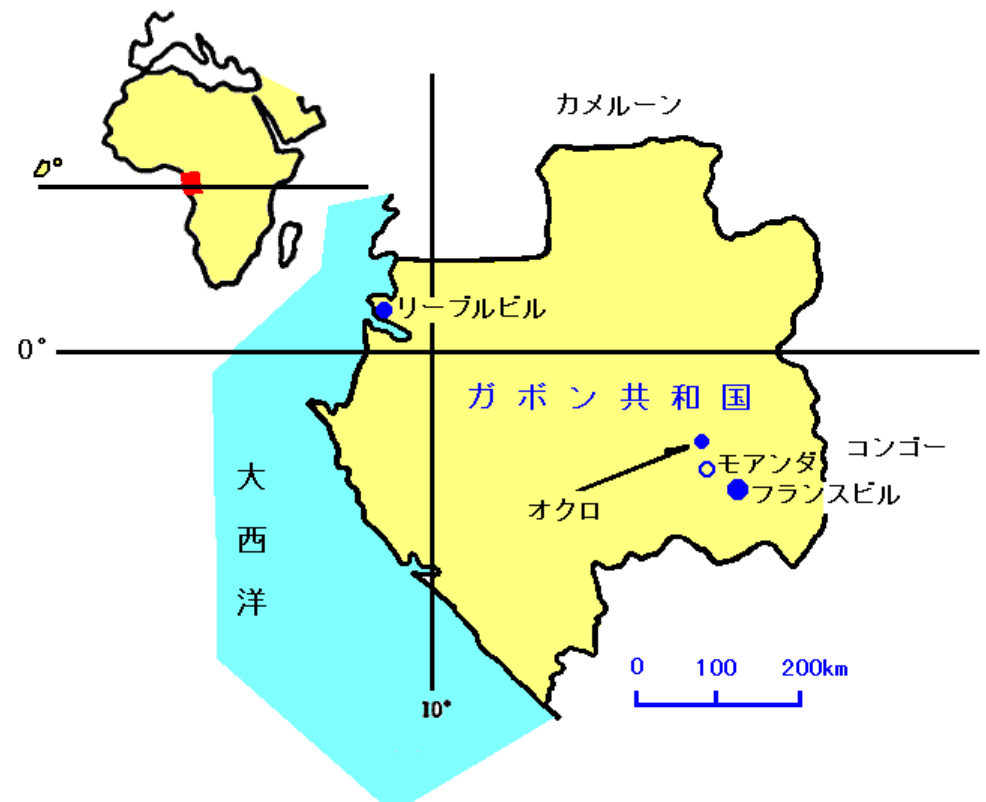
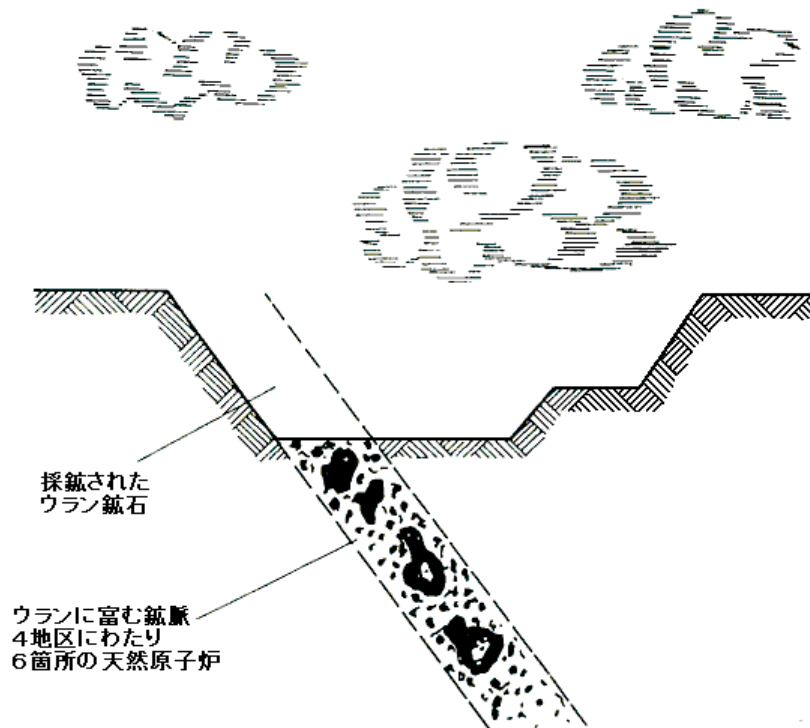


図1 ガボン共和国とオクロ

[資料提供] フランスビル・ウラン鉱山会社 (COMUF)

# オクロ(Oklo)の天然原子炉

- 約60万年間作動していた(おそらく間欠的?)
- ウラン鉱床に地下水が入りこみ、**減速材として機能?**
- 核分裂により熱が発生し水が沸騰してなくなると停止



オクロ原子炉跡、ここには6ヵ所の天然原子炉炉心が4つの反応帯に分かれて存在する。

図3 オクロ原子炉跡

【出典】 Ivan. G. Draganic (ほか(松浦辰男ほか訳):放射線と放射能、  
学会研究センター(1996. 1), p149

# 放射性物質を閉じこめる

放射性物質に対する5重の防壁（沸騰水型原子力発電所（BWR）の例）

「5重の防壁」…として宣伝された

⑤原子炉建屋

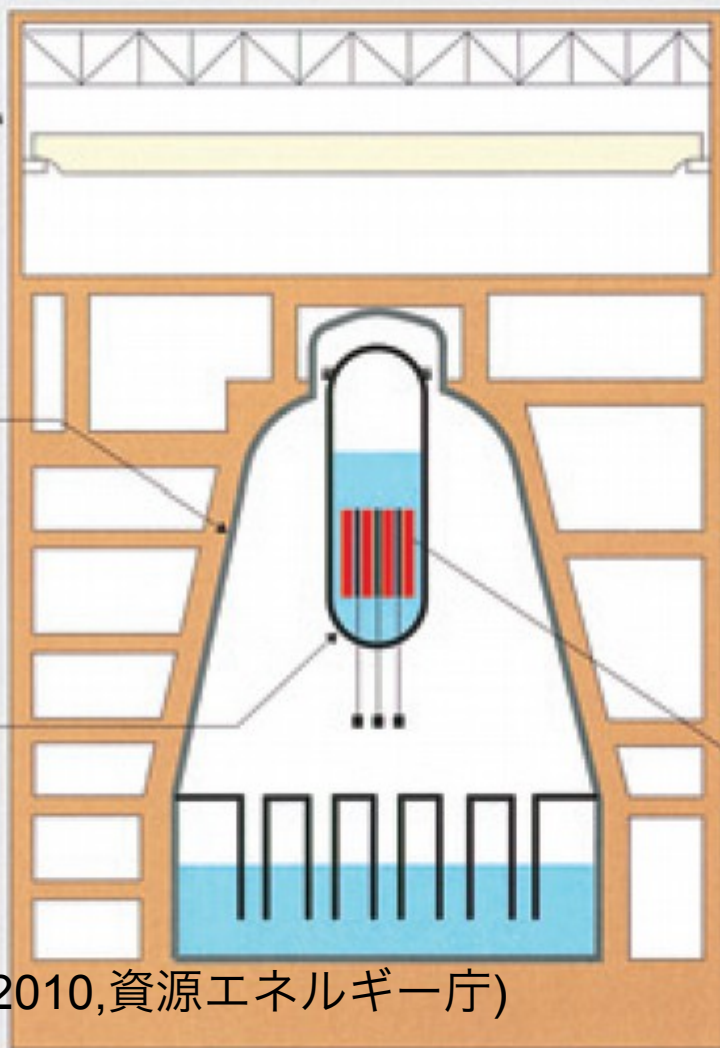
厚さ約1メートルの鉄筋コンクリートの壁で放射性物質の放出を防ぐ

④原子炉格納容器

圧力容器を納める厚さ約3センチの鋼鉄製の容器

③原子炉圧力容器

厚さ約15センチの鋼鉄製の容器



①ペレット

ウラン燃料は直径1センチ、高さが1センチくらいの大きさに焼き固める



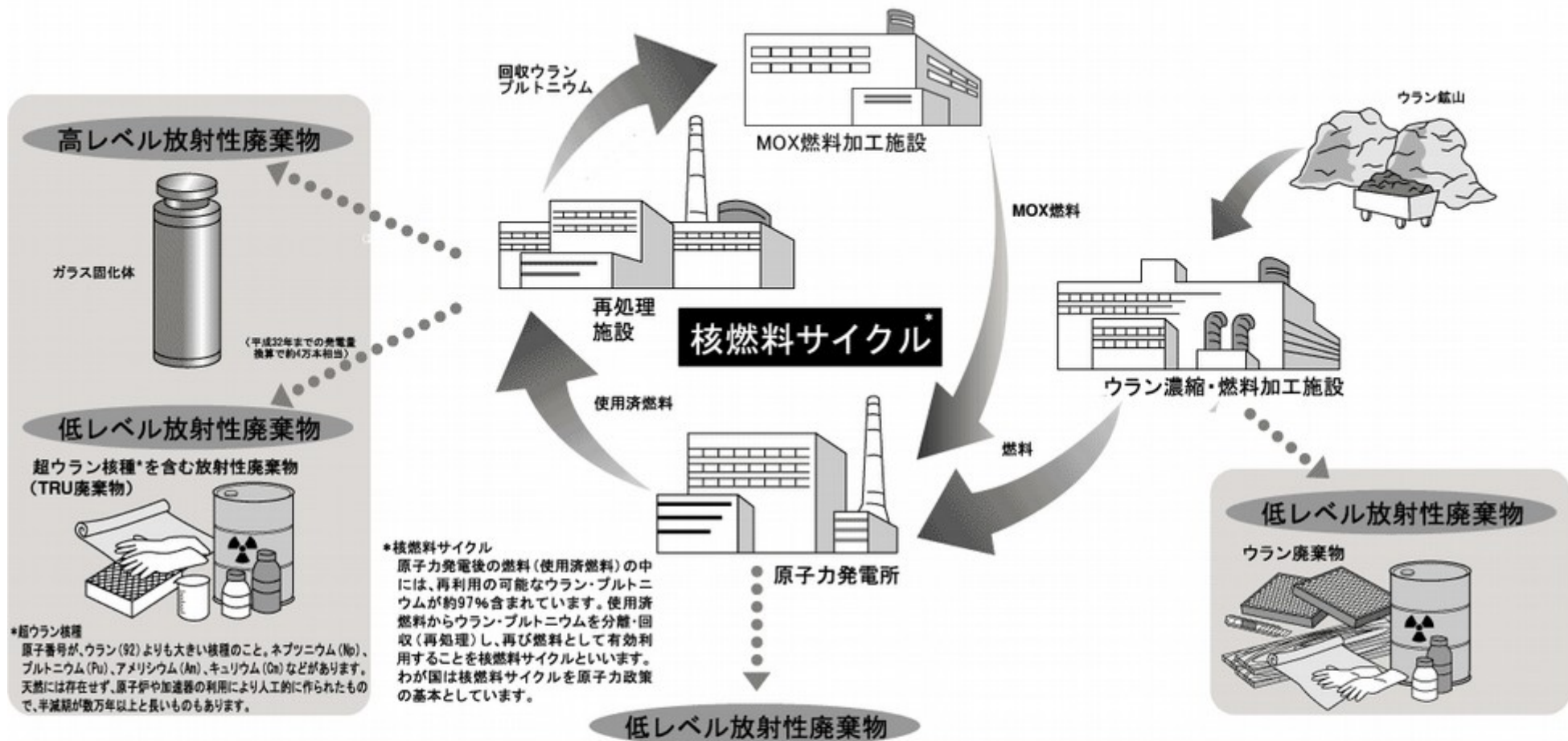
約4メートル

②被覆管

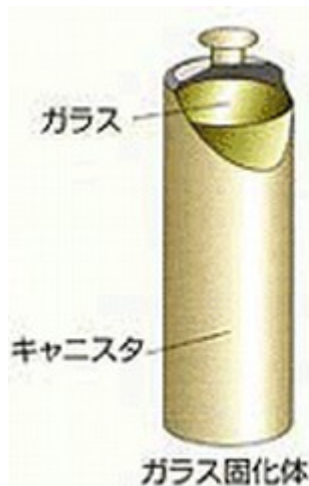
ペレットをジルコニウム合金の被覆管に入れて密封する

「日本の原子力発電」(2010,資源エネルギー庁)

# 放射性廃棄物

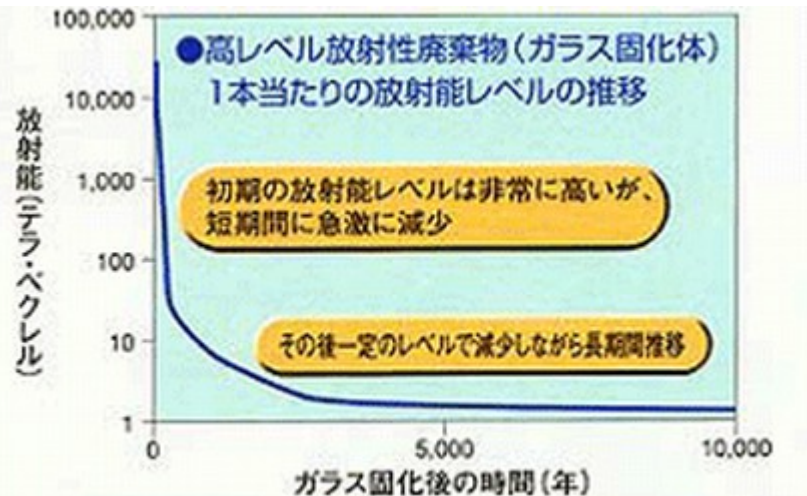


# 放射性廃棄物



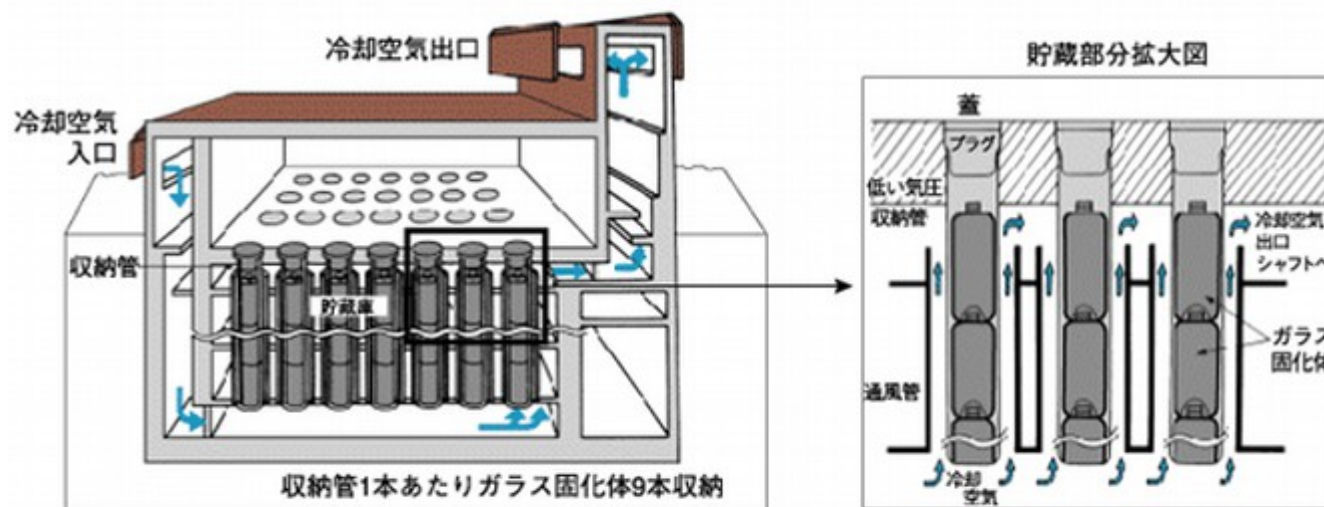
液体状の高レベル放射性廃棄物をホウケイ酸ガラスと混合し、熔融したものを、ステンレス容器(キャニスタ)に注入して固化したもの。

総重量：約500kg  
寸法：外径／約40cm  
高さ／約1.3m



ベクレルとは放射能の強さを表す単位のことであり、1テラ・ベクレルは1兆ベクレルです。

## 高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)貯蔵施設





# 放射性廃棄物

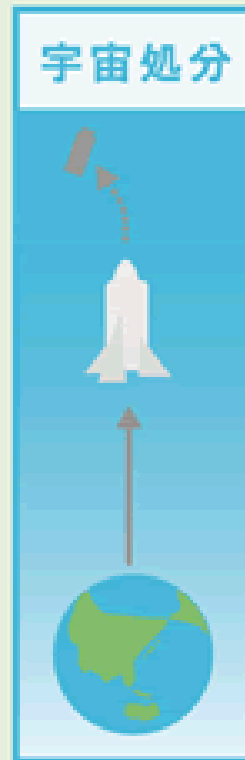
人間による管理を必要としない

## 地層処分



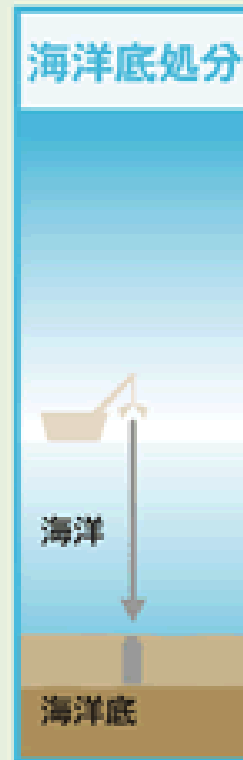
- 地層が本来もっている、物質を閉じ込める能力を巧みに利用。もっとも問題点が少なく実現可能性がある。

## 宇宙処分



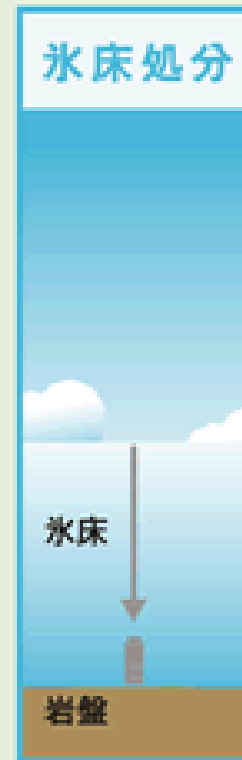
- 発射技術の信頼性などに問題がある

## 海洋底処分



- 廃棄物などの海洋投棄を規制しているロンドン条約により禁止

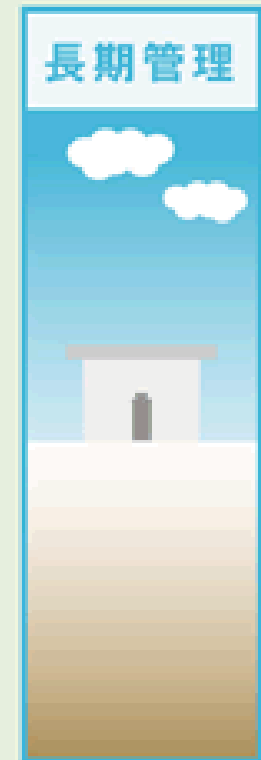
## 氷床処分



- 南極条約により放射性廃棄物の南極への処分禁止
- 氷床の特性などが不明確

人間による管理

## 長期管理



- 人間による恒久的な管理は困難
- 将来世代にまで監視の負担を負わせる

# 放射性廃棄物

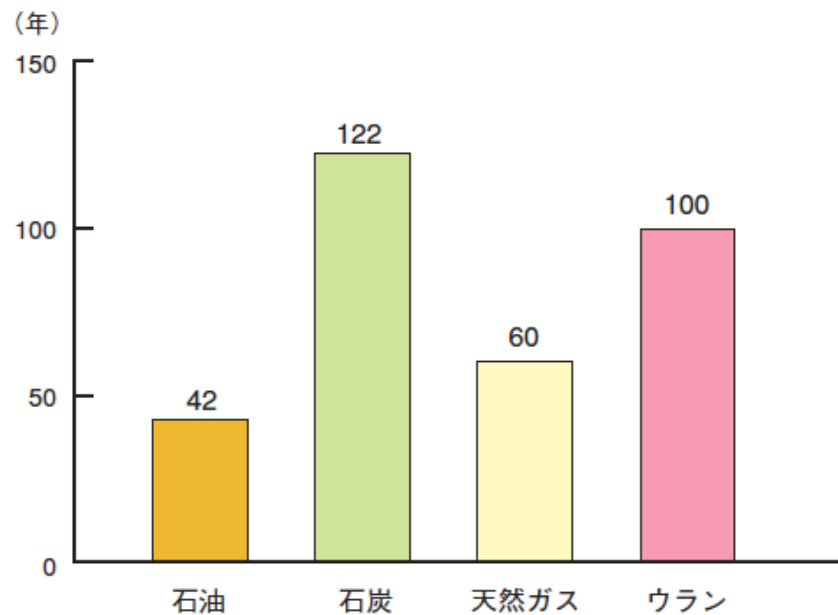
---

- 宇宙に捨てることが非現実的(ロケット打ち上げに失敗した場合のリスクが大きい)である以上、地球上で保管しなければならない
- (たとえば)プルトニウムの半減期は2万4千年。これだけたって、ようやく放射能レベルが半分
- 数万年にわたって、致命的な放射線を放出しつづける。これに生物が近寄らないようにしないといけない
- 生物が近寄れないような場所に埋めることが可能か?
  - ▶ 地殻変動なども考慮する必要がある
- いまから数万年前の人類はどうだったか?これから数万年後の人類はどうなっているか?
  - ▶ どうやって「危険」を伝えるのか?
- 処理場は決まっていない(世界中どこでも問題)。
  - ▶ 「トイレなきマンション」

# 燃料の枯渇と資源

- 石油はいずれ枯渇すると言われて久しい
  - ▶ 中東依存も問題視
- しかしウランもそう長く採掘できるわけではない

エネルギー資源の確認可採年数



出典：BP統計2009、OECD/NEA「Uranium2007」

「日本の原子力発電」(2010、資源エネルギー庁)

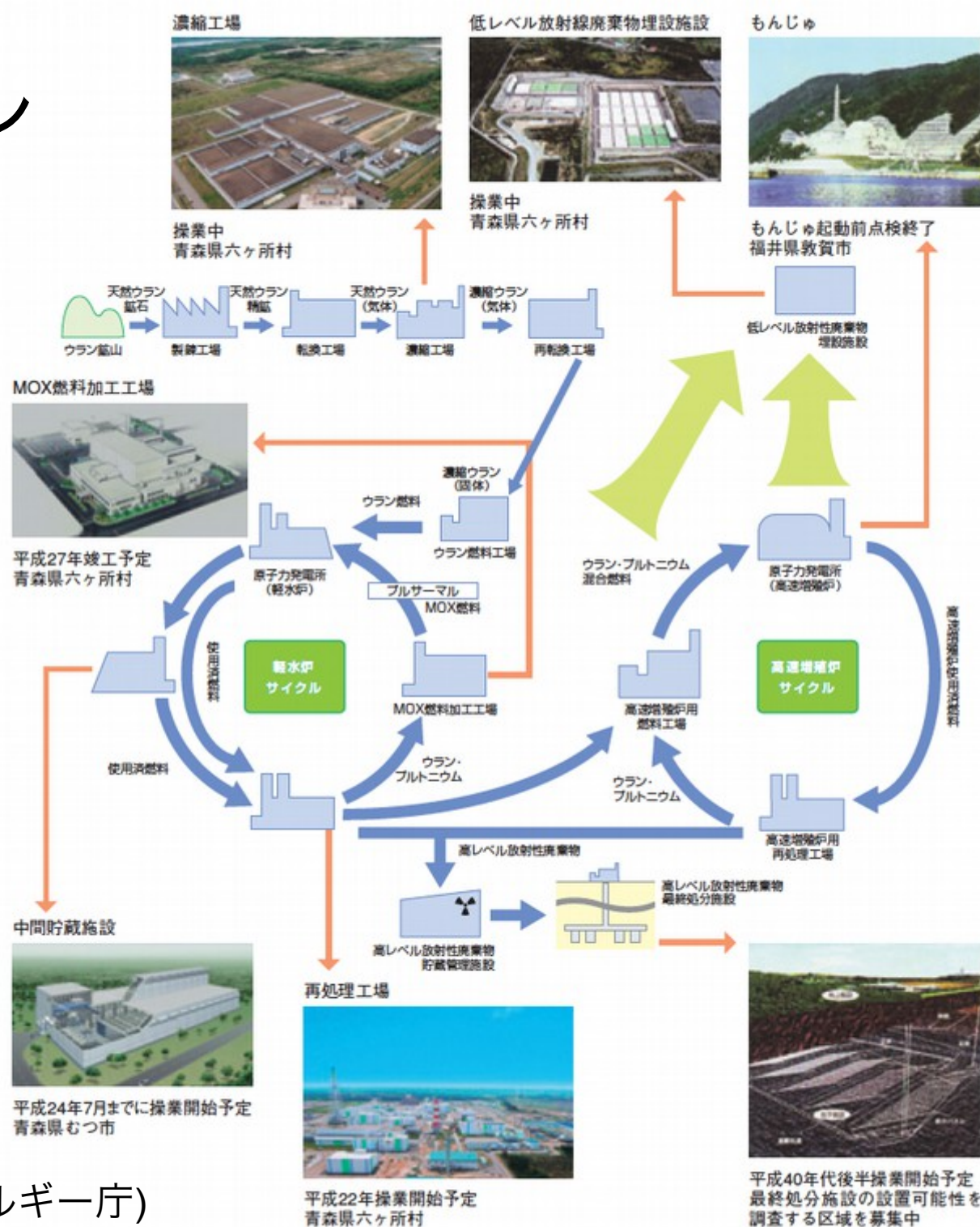
# プルサーマル

---

- プルトニウム+サーマル・ニュートロン・リアクター (熱中性子炉)
- プルトニウムを含む燃料(Mixed Oxide; MOX燃料)を用いる
- 廃棄物であるプルトニウムを再利用することで、燃料を節約できる
- もともと、運転中のウラン燃料は、プルトニウムを生成し続けている( $^{238}\text{U}$ に中性子が吸収)
- そのプルトニウムの核分裂による熱も発電に寄与している
- 使用済み燃料から回収したプルトニウムを再利用し、はじめから燃料に入れておく
- プルトニウムの回収→他国から核爆弾開発の懸念、事故時に大量のPuが飛散する可能性、など指摘

# 核燃料サイクル

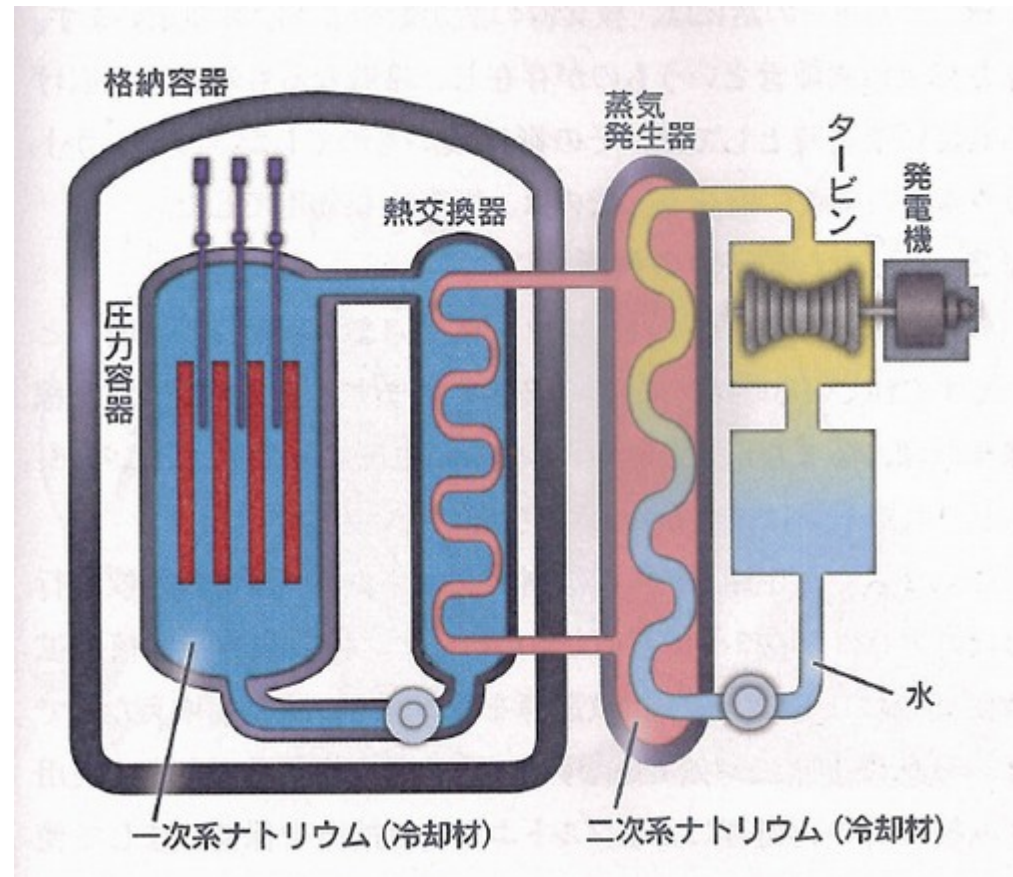
- 使用済み燃料から、プルトニウムやまだ分裂していない残りの $^{235}\text{U}$ を回収、再利用
- しかし、現実には、長年実験されてきたにもかかわらず、うまく回っていない



「日本の原子力発電」(2010,資源エネルギー庁)

# 高速増殖炉

- 高速中性子を $^{238}\text{U}$ にぶつけると、吸収されて $^{239}\text{Pu}$ になる
- Pu燃料の周囲を $^{238}\text{U}$ で囲み、中性子を減速せずにぶつかるようにする
- Puが分裂によって「燃える」以上に新たにPuが生成
- 燃料が増殖する



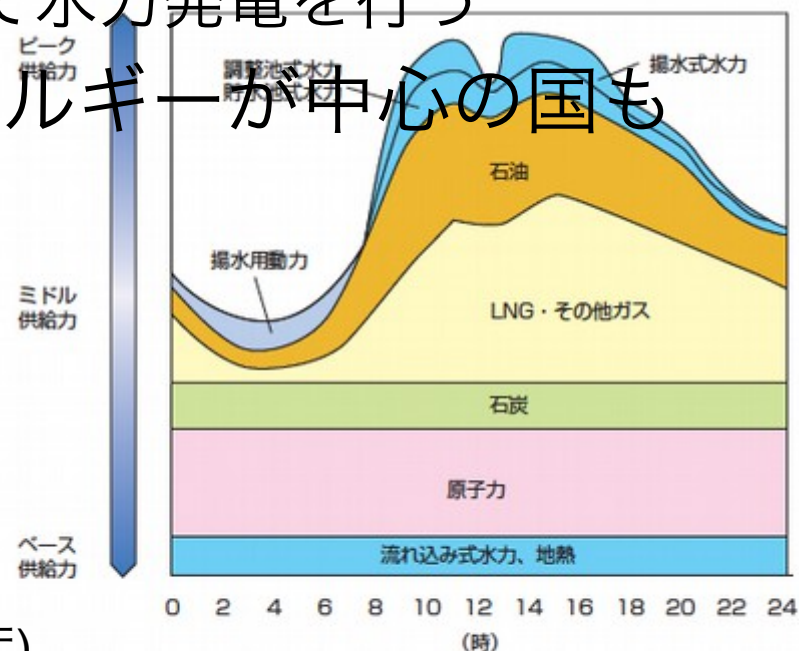
# 高速増殖炉の冷却材

---

- 高速中性子を減速してはいけない
  - ▶ 水は使えない
- 重すぎてはいけない
  - ▶ 水銀などでは配管の強度に問題
- 現状では、金属ナトリウム(比重0.97, 融点97°C)が使われている
- しかし、金属ナトリウムは水と爆発的に反応
- ナトリウム漏れが起きると大変に危険
  - ▶ 「もんじゅ」の事故(1995年)。幸い、水と反応するところまではいかなかった
- 「【爆発】約450gのナトリウムの塊を池に投げてみた」
  - ▶ <http://www.youtube.com/watch?v=MKNqsjamMNs>

# 発電方式ごとの特徴

- 火力は出力調整が容易
- 原子力は難しい(一定の出力で運転する方がしやすい)
- 需要は変動する(日中は多い、夏冬は多い、など)
- 大震災までは、原発をベースに、火力で出力調整をし、夜間の余分な電力を揚水発電にまわしていた
  - ▶ 夜のうちに大量の水を上部のダムに汲み上げ、日中電力が不足してきたらその水を使って水力発電を行う
- 一方、欧州では自然エネルギーが中心の国も
- これからどうする？



「日本の原子力発電」(2010,資源エネルギー庁)



# 主な原発事故

---

- スリーマイル島原発事故
  - ▶ 1979年、アメリカ、加圧水型(PWR)
  - ▶ パイプに異物が詰まり、一次冷却系の放熱ができなくなり、炉心の温度が上昇し原子炉の圧力が上昇、安全弁が開き原子炉内の水蒸気が大量に放出
  - ▶ さらにその後、様々な判断ミスが重なり、冷却水が止まってしまい、燃料の空焚き状態となり、炉心溶融(メルトダウン)
- チェルノブイリ原発事故
  - ▶ 1986年、ソ連(ウクライナ)、黒鉛・沸騰水型
  - ▶ どうも実験を行っていたらしい
  - ▶ 炉心溶融、水蒸気爆発、黒鉛の火災でヨーロッパが広範囲に汚染(日本にも降下)
  - ▶ 不完全な設計(特に格納容器がなかった)、低出力で不安定、運転員の教育不足などが指摘されている

# 主な原発事故

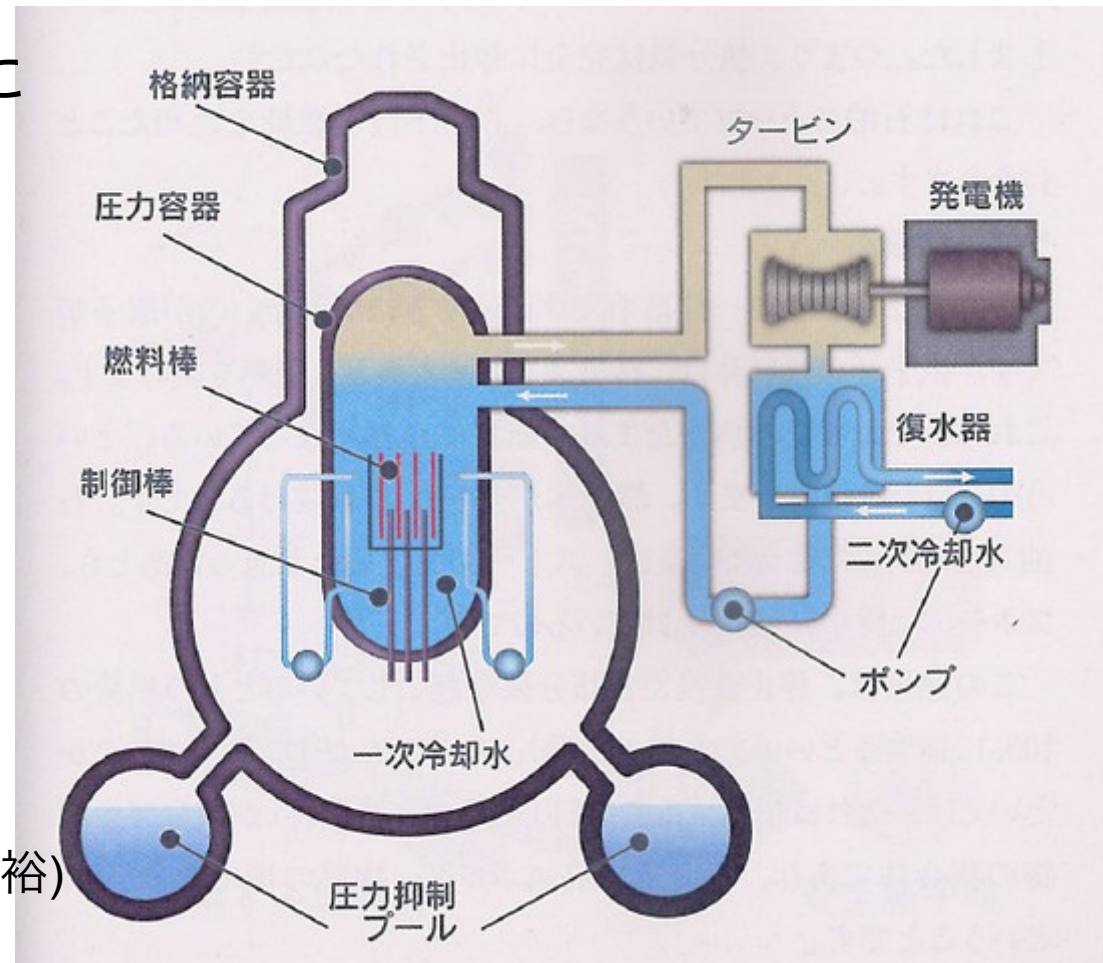
---

- 東海村臨界事故

- ▶ 1999年、茨城県(JCO核燃料加工施設)
- ▶ 高速増殖炉(実験炉)用の燃料加工
- ▶ 規程を無視し、バケツで入れるなどするうち(裏マニュアルがあり、常態化していたらしい)、ウランが臨界に達して大量の中性子が放出
- ▶ 作業員3名が大量の被曝、2名死亡1名重体。
- ▶ その他、数百名の被曝者を出した

# 福島第一原発事故

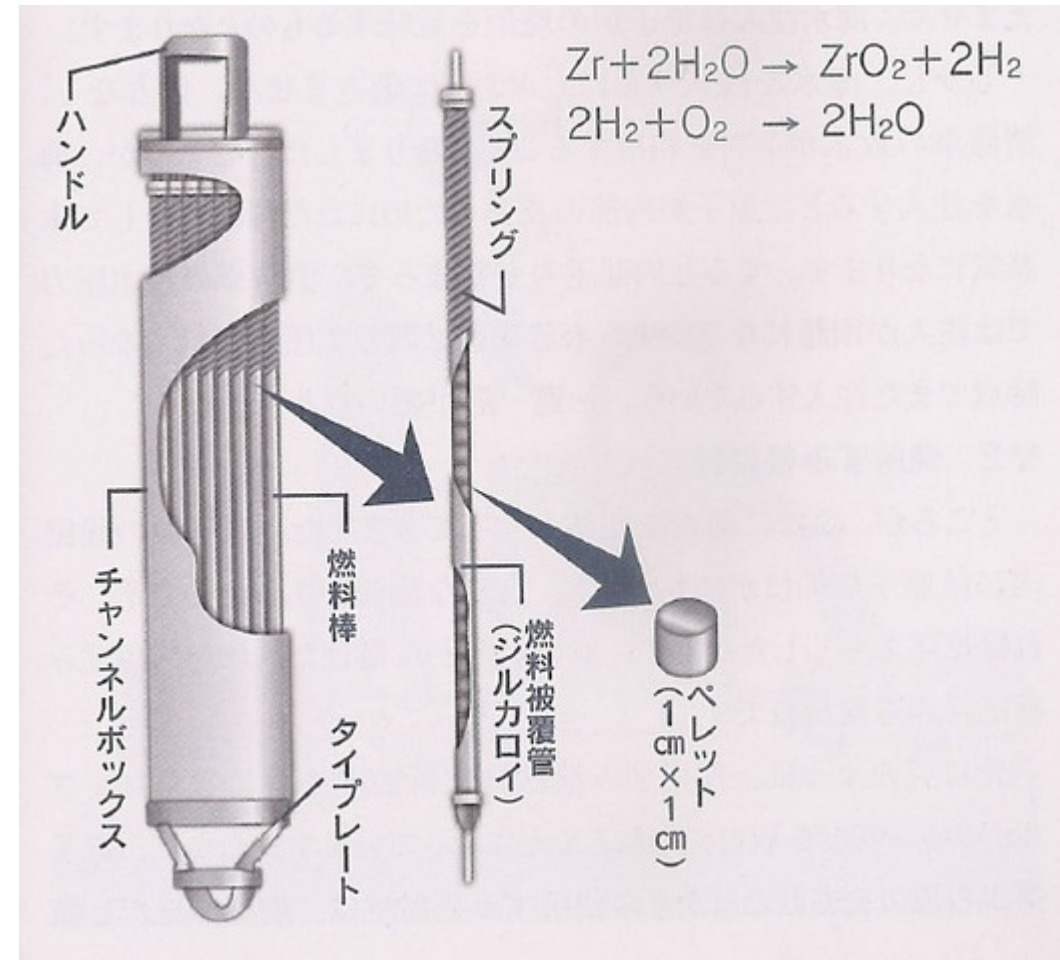
- 地震の発生直後、一旦は制御棒が自動挿入され、自動停止した
- しかし全電源が喪失し、ポンプが動かないなど、冷却系が使えなくなった



「知っておきたい放射能の基礎知識」(齋藤勝裕)

# 福島第一原発事故

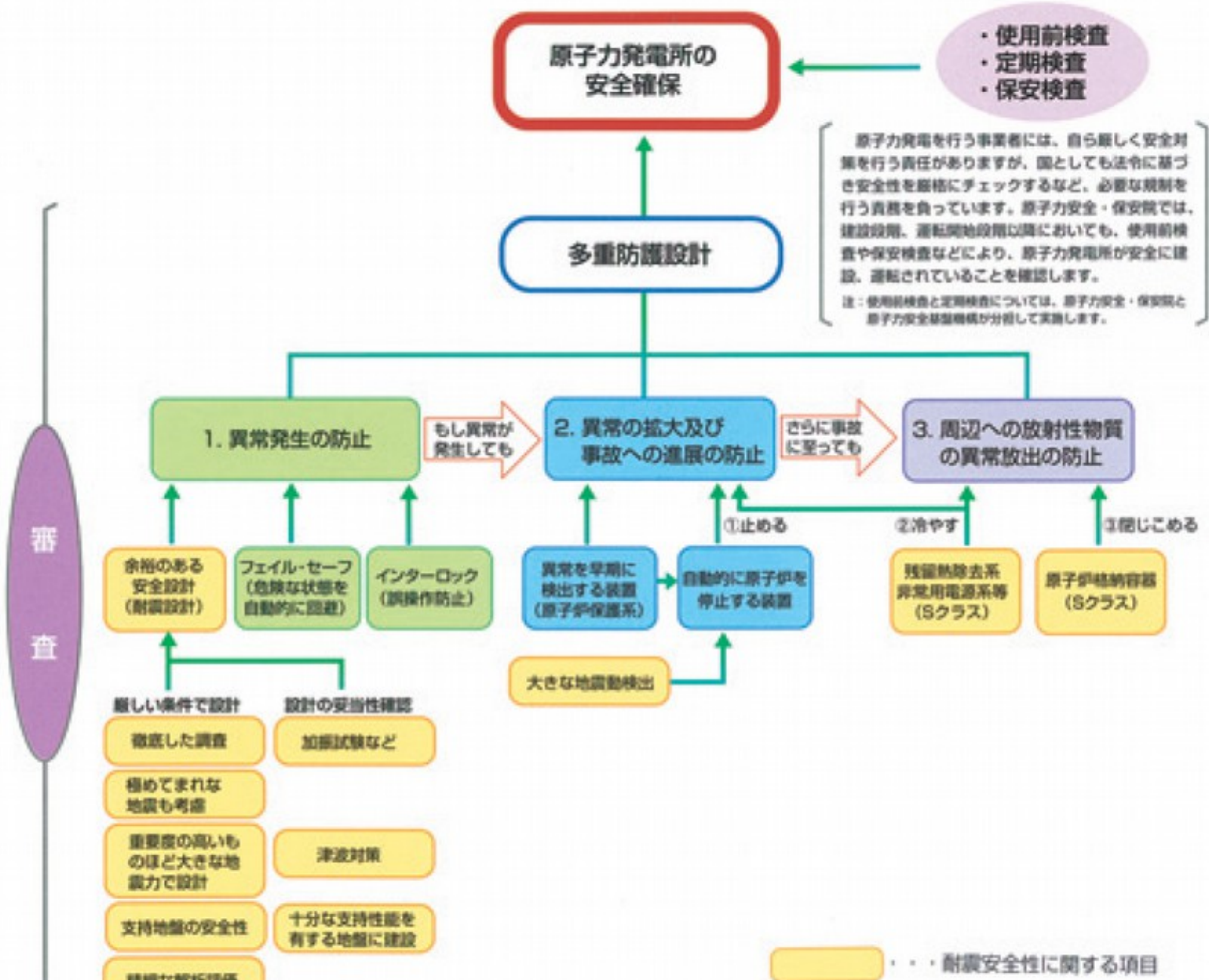
- 炉心が溶融を始め、水蒸気と被覆材のジルコニウムが反応し、水素を発生
- 水素と酸素が反応し、爆発(水素爆発)
- 建屋が吹き飛んだ



# 福島第一原発事故

---

- 1～6号機のうち、運転中は1～3号機のみ
- しかし、運転停止中のものも、使用済み核燃料の冷却プールには燃料が入っていた
- 冷却プールも冷却する必要

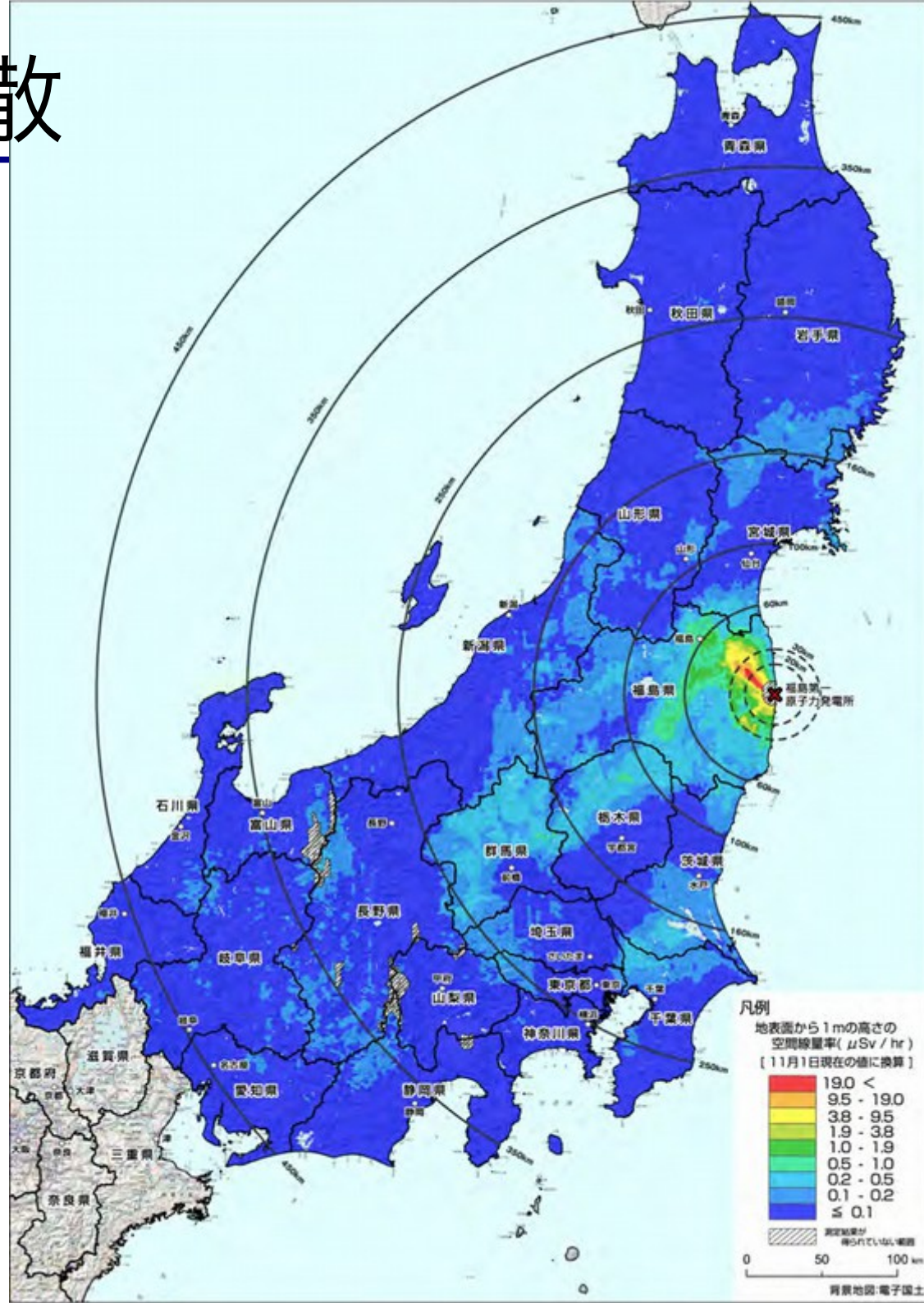


「日本の原子力発電」(2010,資源エネルギー庁)

# 放射性物質の飛散

放射線広域航空機モニタリング  
(2011.11.1時点)

※新潟県、富山県、長野県、静岡県など一部で見られる高い線量率を示す地域では、放射性セシウムがほとんど検出されていないので花崗岩などによる天然放射線によるものと考えられています。



# 発電のコスト

---

- これまで、原子力発電は火力や風力・太陽光などと比べてコストが安いと宣伝されてきた
- しかし、廃炉の費用や、各種税金・広告費等を考慮すると、むしろ高いのではないか、という指摘もされている



# 課題

---

- 原爆、または原発に関してテーマを1つ設定し、調べてください。
  - ▶ たとえば「原爆の被害」「ウランの採掘」「原発事故」「原発と経済」などなど
- 今日の感想など書いてくれると嬉しいです
  - ▶ 採点対象外
- A4 何ページでも可
- 〆切：**7/3(金)**
- 遅れたら、減点の上受け取ります