

2017対話イン 京都女子大学

**「放射線・放射能・放射性物質と
原子力発電・核燃料サイクルの基礎知識」**



H29年6月24日

**シニアネットワーク連絡会
エネルギー問題に発言する会**

碓本 岩男



0. 講演の前に

- ・ エネルギー問題を理解するために必要となる基礎知識は多過ぎる。(講演者も分かっていない、知らないことが多い)
- ・ 科学、工学に係わる知識以上に社会的知識が必要。
- ・ 日本の国情、世界の情勢、地球、人類、生存、生活・・・。
- ・ 本日の講演で話せる基礎知識は、ほんの少し。
- ・ 少しでも、知らないよりは知ったほうが理解は深まる。
- ・ 分からないことがあっても、考えるヒントになる。
- ・ 従って、気楽に講演を聞いて下さい。

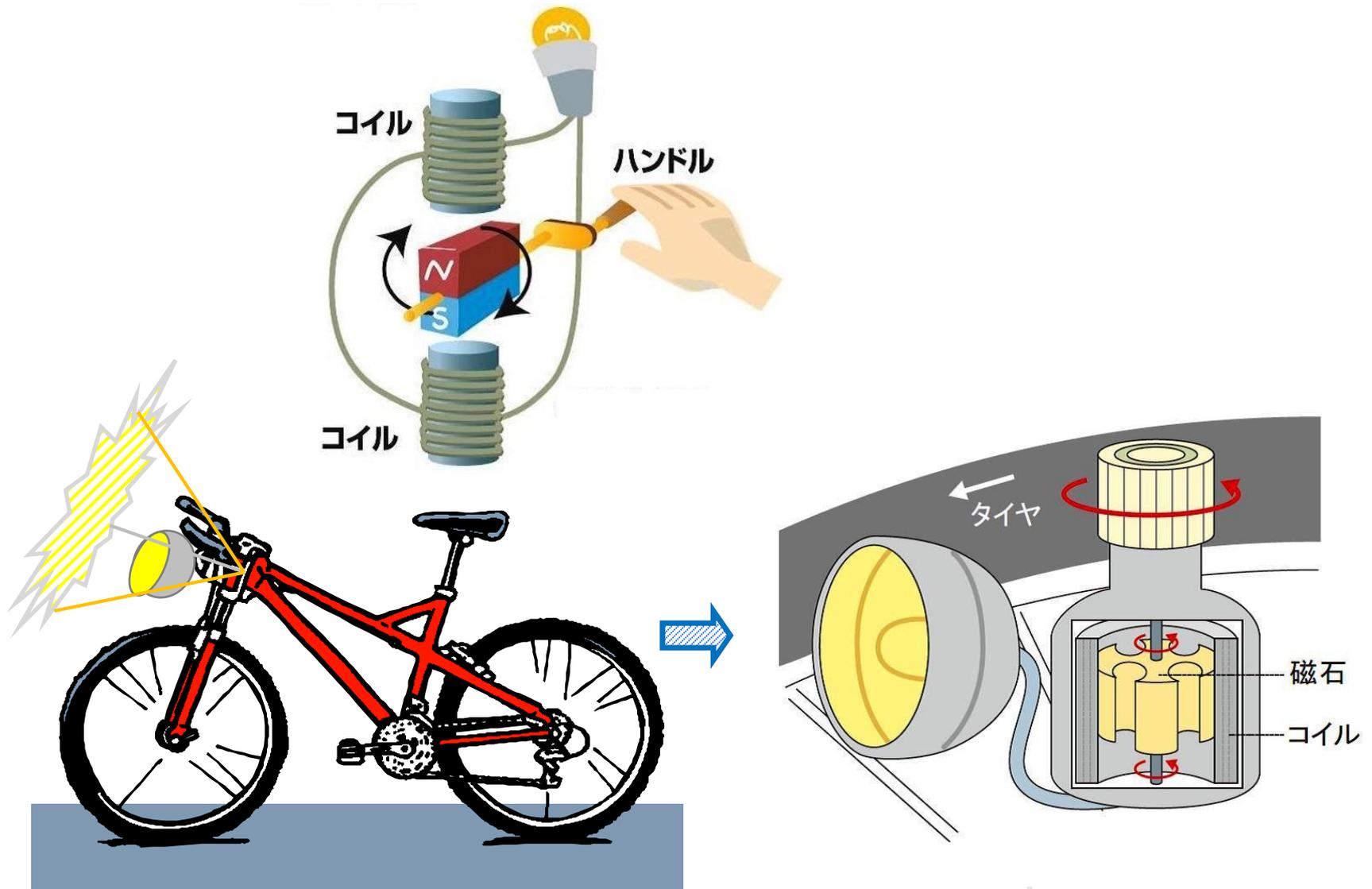
0. 本日の内容

- ① 原子力発電の仕組み
- ② 放射線と放射能と放射性物質
- ③ 安全の意味
- ④ 日本の基盤(世界の中での日本の立場)
- ⑤ 核燃料サイクルの基礎
- ⑥ まとめ



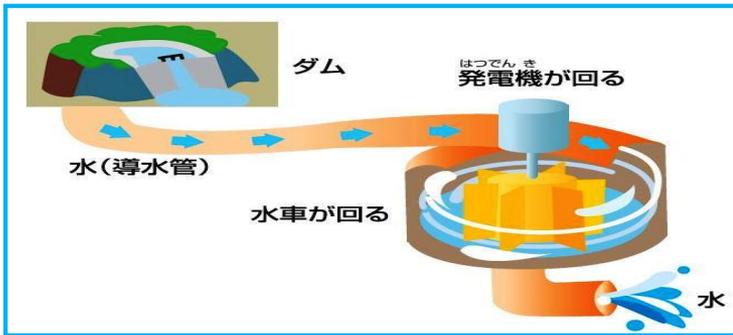
①原子力発電の仕組み

1. 原子力発電の仕組み(1) 電気はどうやって作る??

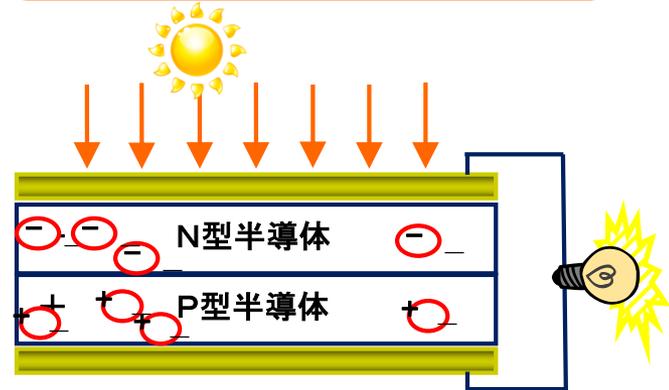


1. 原子力発電の仕組み(2) 電気はどうやって作る??

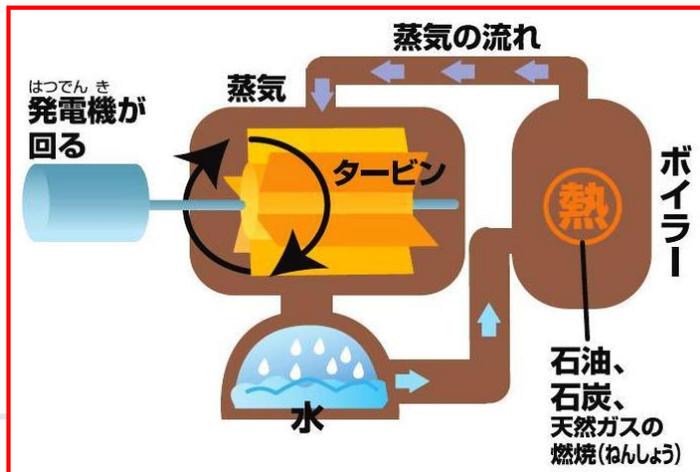
水力発電の仕組み



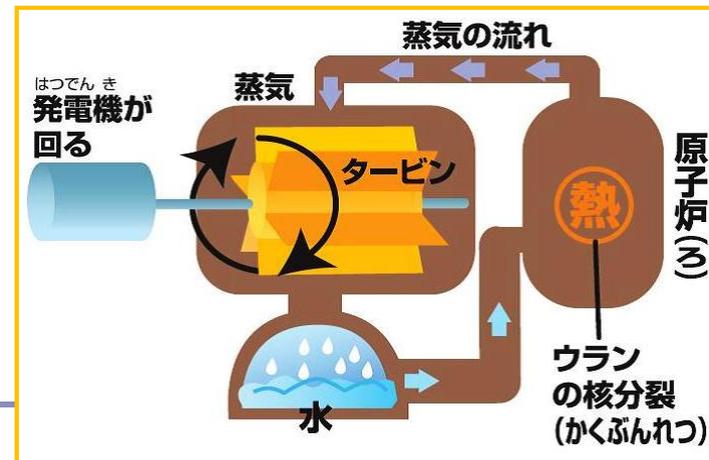
太陽光発電の仕組み



火力発電の仕組み

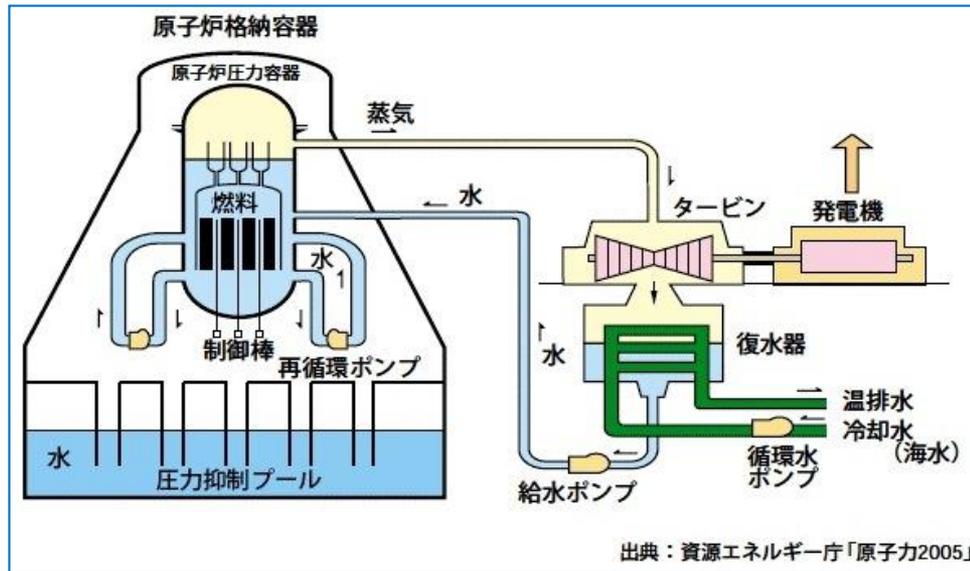


原子力発電の仕組み

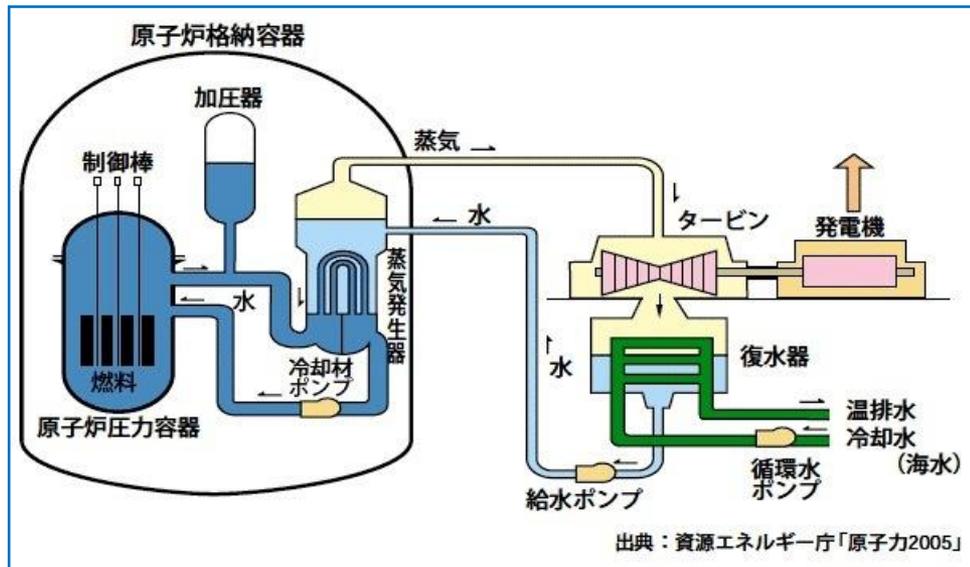


1. 原子力発電の仕組み(3)

電気はどうやって作る??



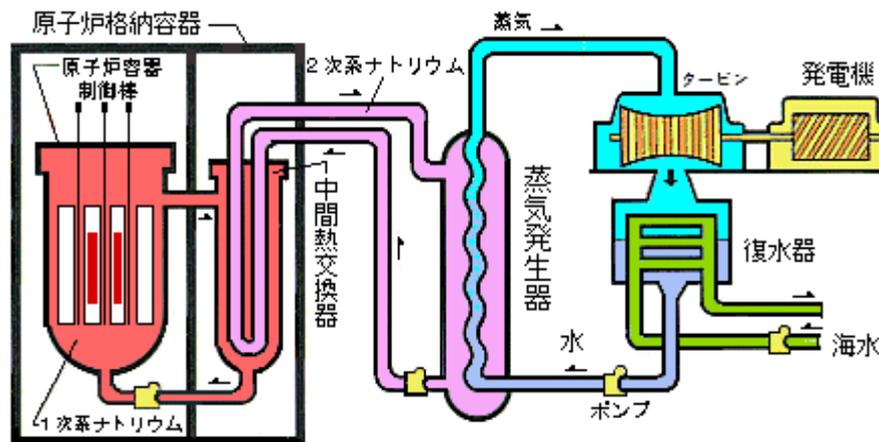
原子力発電
(沸騰水型プラント)
(BWR)



原子力発電
(加圧水型プラント)
(PWR)

1. 原子力発電の仕組み(4) 電気はどうやって作る??

■ 高速増殖炉 (FBR) のしくみ



高速増殖炉
(例:もんじゅ)
(FBR)

高速増殖炉では**高速**中性子を使って核燃料を**増殖**。

加圧水型プラント(PWR)システムに、中間熱交換器(IHX)と2次系ナトリウムシステムが加わったシステム。

IHXは1次系ナトリウムから2次系ナトリウムに熱交換する機器。



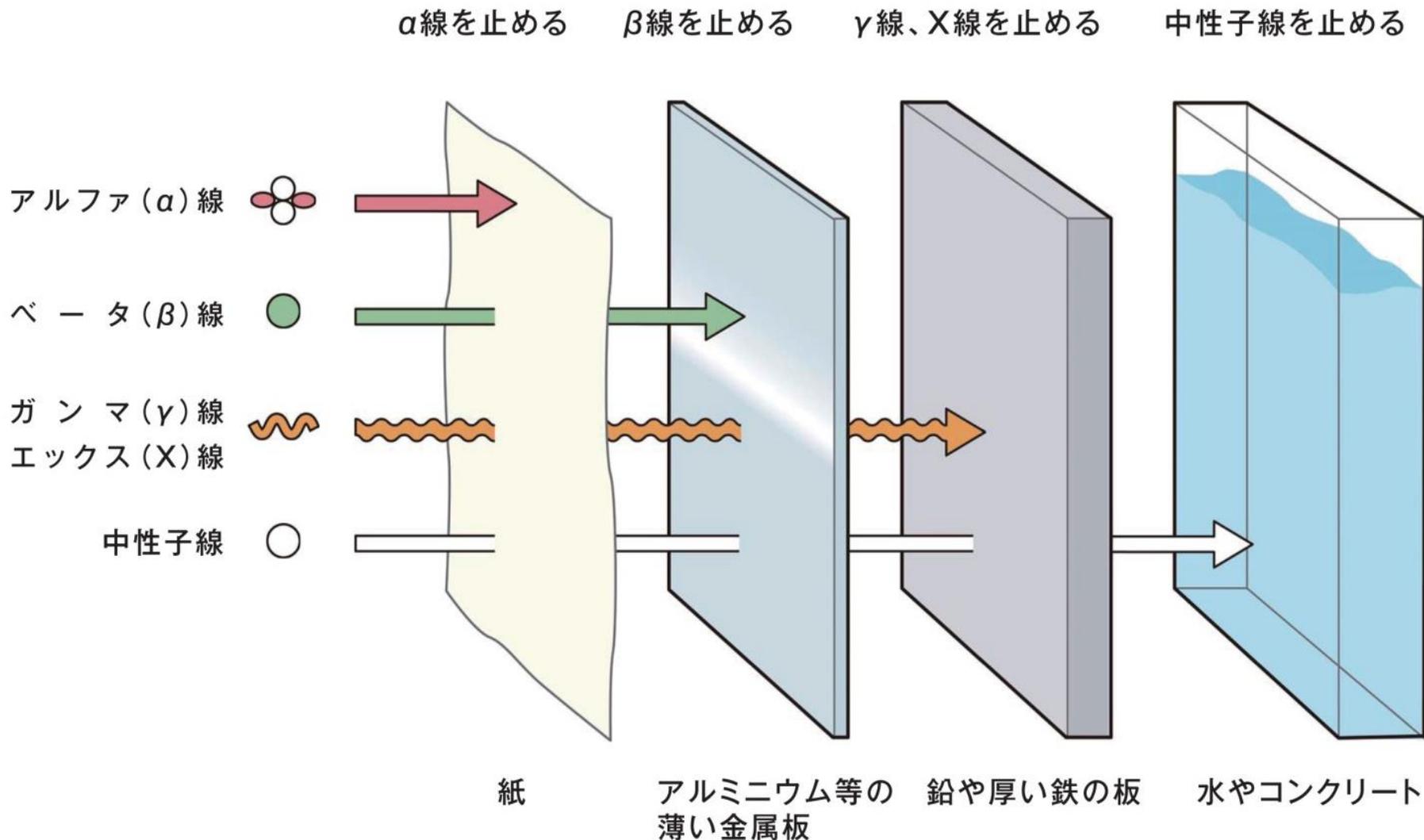
②放射線と放射能と放射性物質

2. 放射線、放射能、放射性物質(1) ー意味ー

- **放射線**: エネルギーを持った粒子または電磁波の流れ
 - 荷電粒子線: α 線、 β 線、陽子線、**電子線**等
 - 中性粒子線: 中性子線
 - 電磁波: γ (ガンマ)線、X線
- **放射能**: 放射線を放出する能力(=能力の数字が放射能)
 - (メディア、世間では放射性物質のことを放射能と言うことがある)
- **放射性物質**: 放射線を出す物質(=放射能を持つ物質)
 - (放射能物質とは言わない。放射性物質と呼ぶ。)

家庭で用いている電子レンジの電子も、 β 線と同じ電子であるが、原子核の自然崩壊で生じる高エネルギー電子が β 線。人為的に作られた高エネルギー電子が電子線。電子レンジのマイクロ波で揺り動かされる水(分子)の電子は、エネルギーが低いので放射線ではないが、同じ電子。

2. 放射線、放射能、放射性物質(2) -放射線の種類-



2. 放射線、放射能、放射性物質(3) —放射線の単位—

- **ベクレル(Bq)**:放射線を出す能力を表す単位。1秒間に1個の原子核が崩壊すること。次元は1/s。旧表示はキュリー(Ci)

$1\text{ Ci}=3.7 \times 10^{10}\text{ Bq}$ (おおよそラジウム1gの放射能)

Bqだと数字が大きいのので、ギガベクレル(GBq)、テラベクレル(TBq)を用いる。

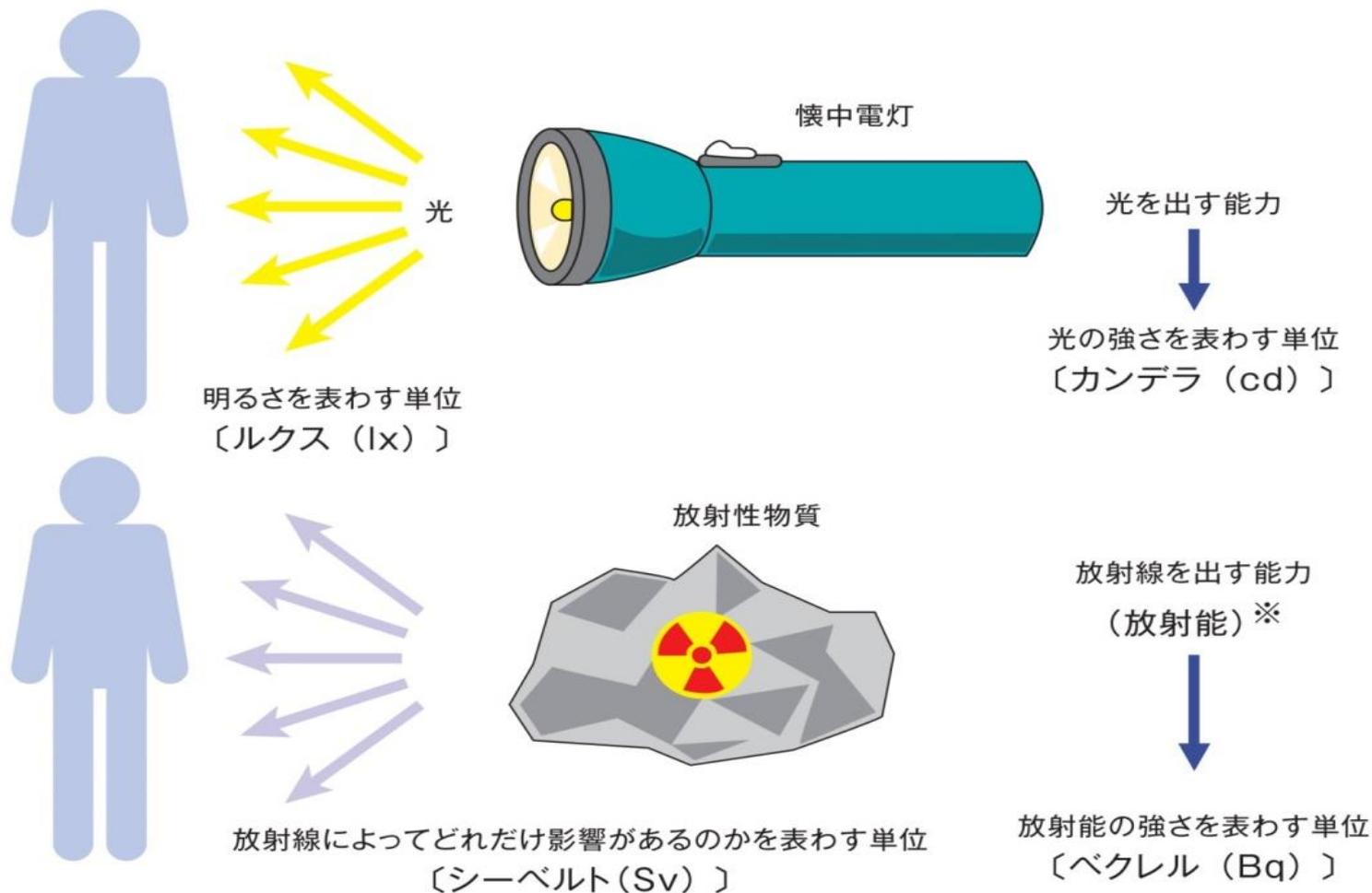
- **グレイ(Gy)**:吸収線量。放射線のエネルギーが物質にどのくらい吸収されたかを表す単位。物質1kgに1Jの吸収があった場合が1Gy。次元はJ/kg
- **シーベルト(Sv)**:線量等量。放射線が人体に及ぼす影響を表す単位。次元はGyと同じJ/kg。

$\text{Sv}=\text{放射線荷重係数}(W_R) \times \text{Gy}$ 、X線、 β 線、ガンマ線は $W_R=1$

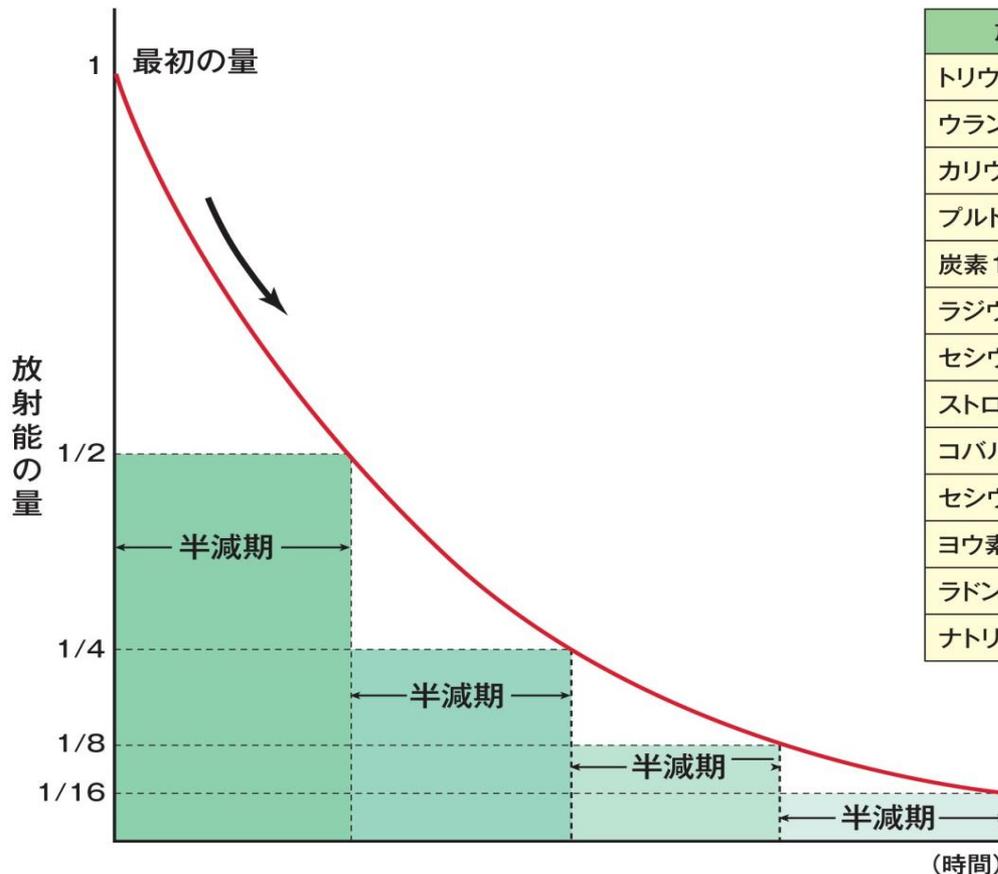
$1\text{ Sv}=1000\text{ mSv}$ 、 $1\text{ mSv}=1000\mu\text{ Sv}$

この他、照射線量(X線または γ 線の強度を表わす物理量)の単位のクーロンがある。
(C/kgを使用する)

2. 放射線、放射能、放射性物質(4) —光との比較—



2. 放射線、放射能、放射性物質(5) - 放射能の半減期 -



放射性物質	放出される放射線*	半減期
トリウム232	$\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$	141億年
ウラン238	$\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$	45億年
カリウム40	$\beta \cdot \gamma$	13億年
プルトニウム239	$\alpha \cdot \gamma$	2.4万年
炭素14	β	5,730年
ラジウム226	$\alpha \cdot \gamma$	1,600年
セシウム137	$\beta \cdot \gamma$	30年
ストロンチウム90	β	28.7年
コバルト60	$\beta \cdot \gamma$	5.3年
セシウム134	$\beta \cdot \gamma$	2.1年
ヨウ素131	$\beta \cdot \gamma$	8日
ラドン222	$\alpha \cdot \gamma$	3.8日
ナトリウム24	$\beta \cdot \gamma$	15時間

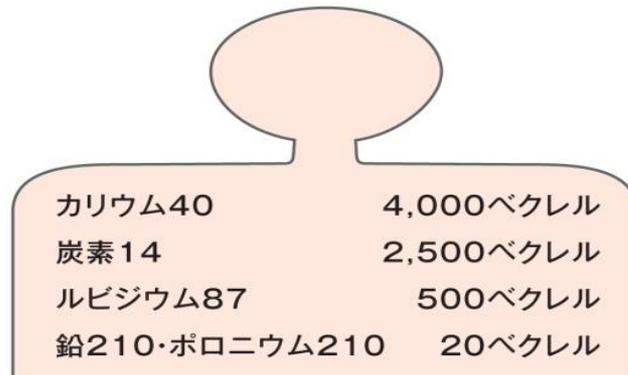
*壊変生成物(原子核が放射線を出して別の原子核になったもの)からの放射線も含む

この他半減期には生物学的半減期(放射性物質の体外への排出)がある。

2. 放射線、放射能、放射性物質(6) —体内、食物中の放射性物質—

● 体内の放射性物質の量

(体重60kgの日本人の場合)



● 食物中のカリウム40の放射性物質の量(日本)

(単位:ベクレル/kg)



2. 放射線、放射能、放射性物質(7) —食物基準値の国政比較—

(単位:ベクレル /kg)

核種	各国	日本	米国	EU
	食品群			
放射性セシウム	乳児用食品	50	1,200	400
	牛乳	50		1,000
	飲料水	10		1,000
	一般食品	100		1,250
食品基準値の考え方		被ばく線量が年間1ミリシーベルト以内になるように設定。 一般食品は50%、牛乳と乳児用食品は100%が汚染されていると仮定して算出。	被ばく線量が年間5ミリシーベルト以内になるように設定。 食品中の30%が汚染されていると仮定して算出。	被ばく線量が年間1ミリシーベルト以内になるように設定。 食品中の10%が汚染されていると仮定して算出。

日本は3.11以前でも500Bq/kgと欧米より厳しい基準にしていた。

2. 放射線、放射能、放射性物質(8) —自然放射線量—

(mSv/年)

国名	平均値	最高値
イラン(ラム サール地方)	10.2	260
ブラジル(ガラ パリ地方)	5.5	35
インド	3.8	35
中国	3.5	5.4
日本	2.1	2.9
世界	2.4	—

2. 放射線、放射能、放射性物質(9)－放射線被曝量－

線量	内容
5 μ Sv/h	原子力発電所の敷地境界でこの値が10分続くと通報義務 ¹⁾
500 μ Sv/h	原子力発電所の敷地境界でこの値が10分続くと緊急事態宣言 ²⁾
50 μ Sv/年	原子力発電所通常運転時の周辺公衆被曝制限目標値(実績は1 μ Sv/年以下)
1mSv/年	一般公衆の人工放射線の被曝限度(ICRP勧告)
50mSv/年	放射線業務従事者の被曝限度
100～250mSv/年	放射線業務従事者の緊急作業時の被曝限度
100～250mSv	発癌率が上昇する可能性のあるとされている被曝量(急性被曝)
250～500mSv	急性被曝で白血病、リンパ球の減少が生じる
～1000mSv	急性被曝で吐き気、嘔吐などの症状が発生
～2000mSv	急性被曝で出血、脱毛などの症状が発生。死亡する場合もある。
～5000mSv	急性被曝で50%程度の人が死亡するとされている。

ICRP :International Commission on Radiological Protection (国際放射線防護委員会)

1) 原子力災害対策特別措置法第10条

2) 原子力災害対策特別措置法第15条

2. 放射線、放射能、放射性物質(10) —放射線被曝量—

- 胸のX線検診 約 0.05mSv/回
- 東京-ニューヨーク 約 0.19mSv/往復
- 胃のX線検診 約 0.6mSv/回
- 自然界からの内部被曝 約 0.8mSv/年
- 国民の医療被曝の平均 約 2.4mSv/年
- 国民の放射線被曝の平均 約 3.8mSv/年
- 胸部CTスキャン 約 6.9mSv/回
- 宇宙飛行士 約 0.5~1mSv/日

<宇宙飛行士の累積規制値>

27~46歳以上(男性) 600~1000mSv

27~46歳以上(女性) 500~800mSv

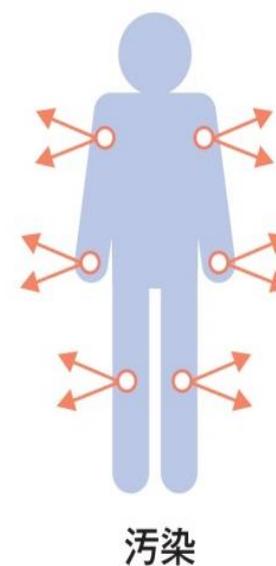
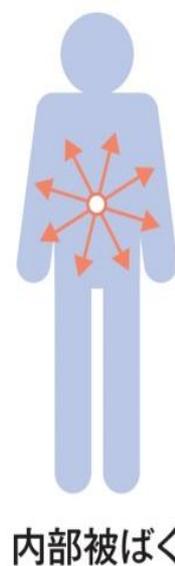
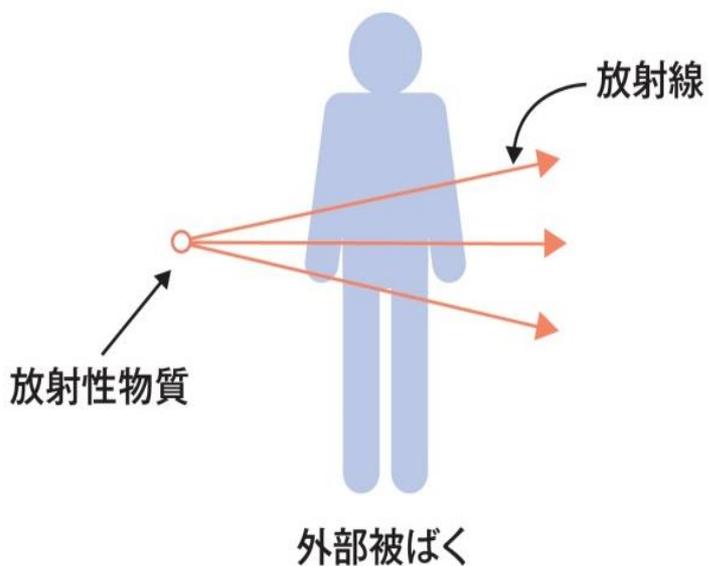
2. 放射線、放射能、放射性物質(11) —被曝と汚染の違い—

被ばく

放射線を受けること

汚染

放射性物質が皮膚や衣服に付着した状態

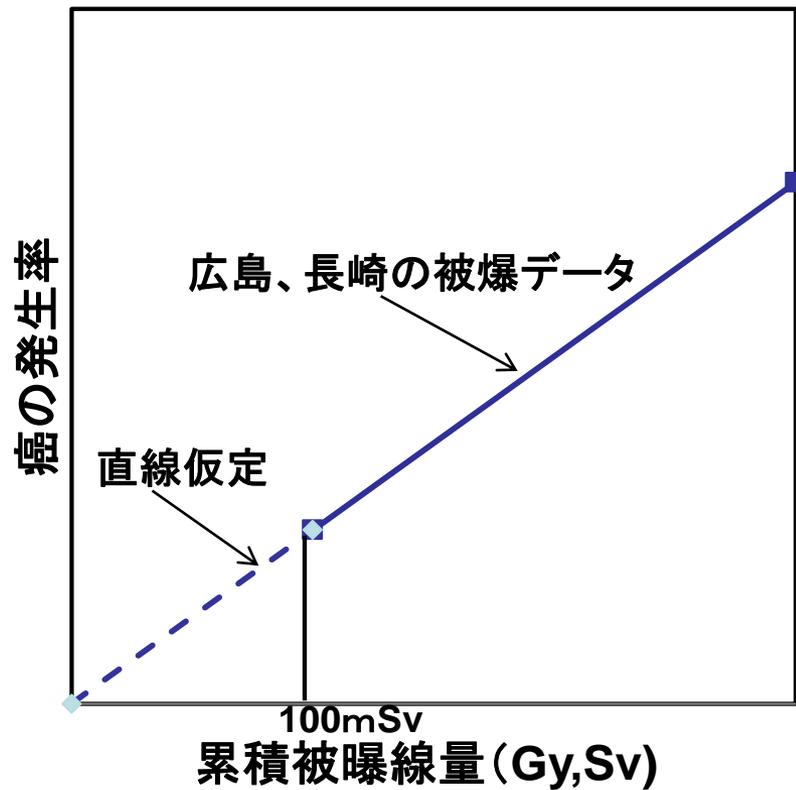


2. 放射線、放射能、放射性物質(12) —被曝の影響—

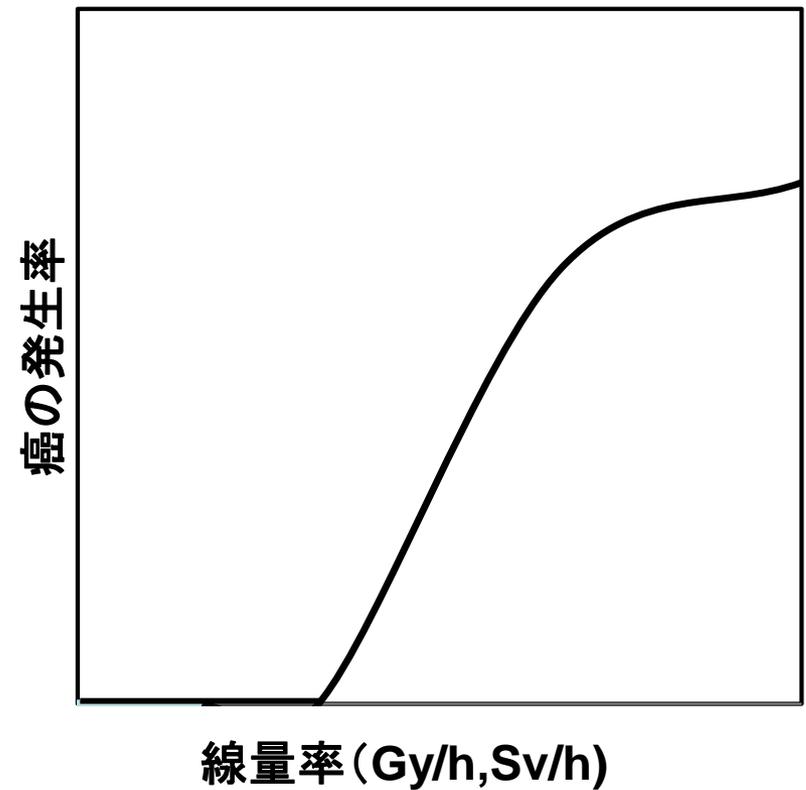
- ICRPの被曝制限値は、広島、長崎の急性被曝データ、マラーのショウジョウバエの実験結果に基づき、**しきい値なしの直線(LNT)仮説**で設定されている。
- 発癌率が大きくなることで、100mSvで1000人中5人(0.5%)の死亡との計算結果になる。ただし、これは単なる計算結果。
- ショウジョウバエには修復機能がなく、このため**放射線によって損傷したDNAは修復されずに累積すると考えられ、生涯の被曝量が制限された。**
- しかし、その後のマウスなどの実験で、マラーの実験が誤りであることが判明したが、放射線防護の指標としては変更されなかった。
- **LNT仮説はあくまでも放射線防護の目標を定めるための仮説であり、人体への影響の指標ではないことは2007年ICRPも正式に認めている。**
- 即ち、原子力発電所、医療設備を設計、運転するための**放射線被曝制限値と、実際の人体への影響は分けて考える必要がある。**
- 3年前から坂東昌子女史等が、線量率を考慮したWAMモデル*を提唱し、実験結果との良い一致を示している。

* https://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf1507/data_04.pdf

2. 放射線、放射能、放射性物質(13) - LNT仮説、WAMモデル

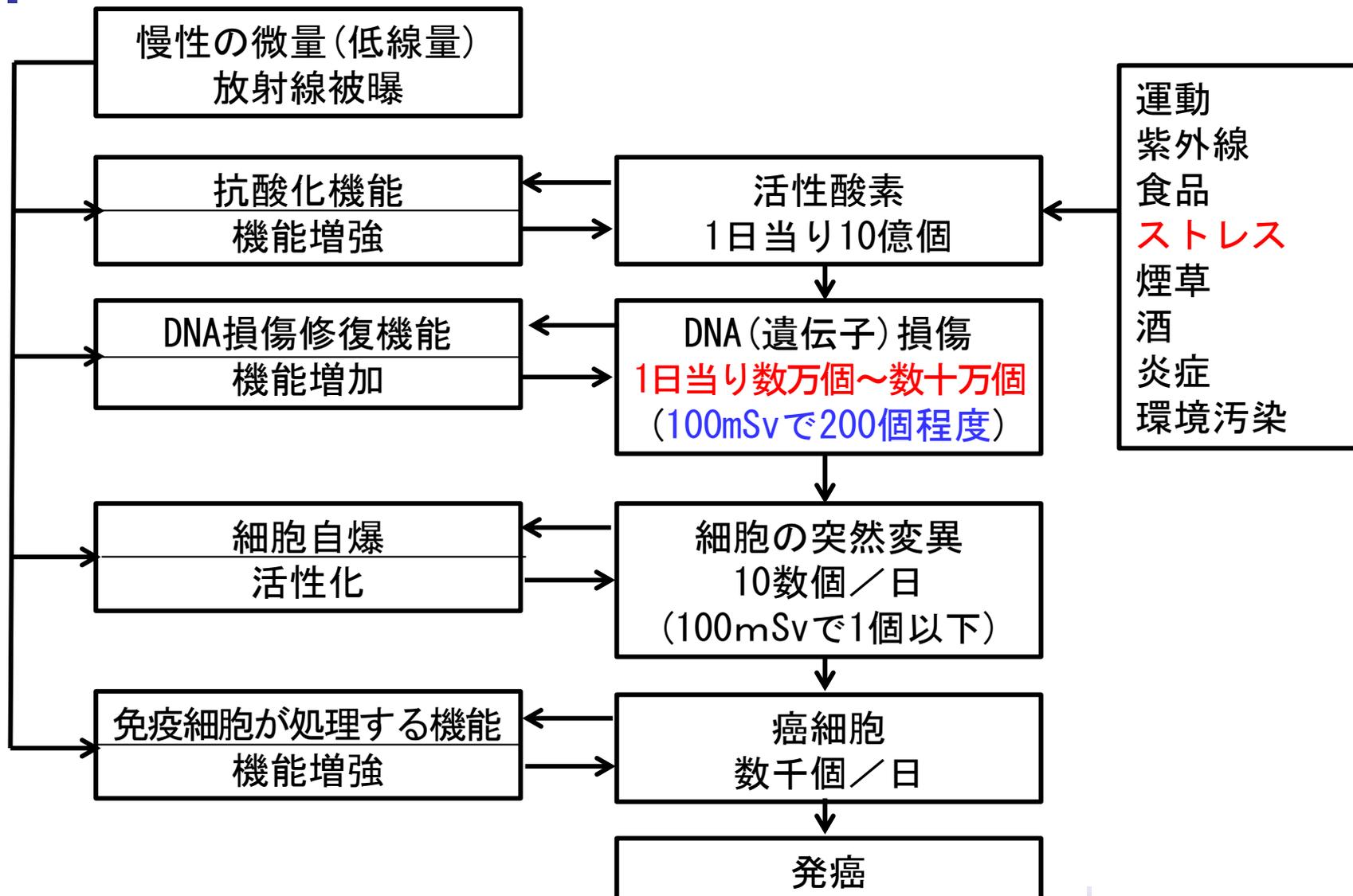


LNT仮説



WAMモデル

2. 放射線、放射能、放射性物質(14) —被曝の影響—



2. 放射線、放射能、放射性物質(15) -被曝の影響-

線量率(単位時間当たりの被曝量)により人体への影響が異なることは、以下のことから、容易に理解できる。

- 毎日1km (365km/年)のジョギングは体に良いが、1日に365kmも走ったら体に悪い。(実際には走れないが)
- お酒を飲める人が毎日1合(36升/年)のお酒を飲んでも害はない(健康に良い?)が1日に36升も飲んだら人は死ぬ。(実際には飲めないが)
- 体に適切な負荷を掛ける適度な運動は健康に良く、運動不足が体に悪い。
- 昔から、温泉、お風呂につかることが体に良いことは良く知られている。(ラドン温泉を使った治療は世界で行われている)

(慢性的低線量被曝はむしろ体に良いというホルミシス効果を示すデータ、これを主張する専門家も多いが科学的な証明は困難とされている)



③安全の意味

3. 安全の意味(1) —定義—

工学の世界(ISO:国際標準化機構、JIS:日本工業規格)では「安全」の意味は定義されている。

「安全」とは受入れ不可能なリスクが存在しないこと。
(ISO/ICEガイド51)

「安全」とは人への危害または損傷の危険性が許容可能な水準に抑えられている状態。(JIS Z 8115)

「リスク」とは危害の発生する確率と危害の大きさとの組合せ。
「危害(harm)」とは、人体の物理的な損傷もしくは健康障害または財産もしくは環境の受ける害。

危険(安全の反対)と危険源(hazard)とは異なる。

3. 安全の意味(2) — 定義 —

- 工学で意味する安全と、社会が受け入れる安全とは別。
- **社会が思っている(受け入れる)安全とは、自分が「安心」と感じられる状態を意味する。(個々の感情の問題)**
- 感情の問題は工学(技術)では解決できない。
- 工学で意味する安全と社会が受け入れる安全とを繋げる道は、「教育」と「報道」
- 情報公開、情報提供の目的は、正しい情報に基づく、公衆の不安解消。しかし原子力を含め、工学、医学分野等では専門的知識が必要。そこで、**情報提供を仲介するメディアの報道姿勢、内容が重要。**
- 人が暮らしていく中には現実的リスク(癌、病気、交通事故、労災、食中毒、熱中症等)が多くある。また、潜在的リスク(核兵器、戦争、テロ、異常気象、震災、飢餓)も多くある。**安全とはこれらリスクの相対比較の結果でもある。(このため国によって安全の考え方が異なる)**

3. 安全の意味(3) —原子力発電所の安全確保—

- 原子力発電所の安全確保の考え方：**公衆の被曝防止**
- 原子力発電所の安全確保の方策：「止める」「冷やす」
「閉じ込める」
- 原子力発電所の安全確保の方法：深層防護
- プラントの安全確保と、プラントの損傷程度、財産保護とは分けて考える必要がある。

<深層防護>

レベル1: 異常の発生の防止

レベル2: 異常の拡大、事故への発展の防止

レベル3: 事故の拡大防止、事故の影響緩和(放射性物質の放出の防止)

レベル4: 過酷事故(シビアアクシデント)の進展防止、影響緩和

レベル5: 放射性物質の大規模放出の防止、影響緩和

多重性、多様性で共通要因故障の排除が基本だが、福島第一は想定を超える津波(外部要因)によりこれに失敗

3. 安全の意味(4) —新規制基準の概要—

外部要因(外的事象)への対応を大幅に強化

＜従来の規制基準＞

＜新規制基準＞

シビアアクシデントを防止するための
基準(いわゆる設計基準)
(単一の機器の故障を想定しても炉心
損傷に至らないことを確認)

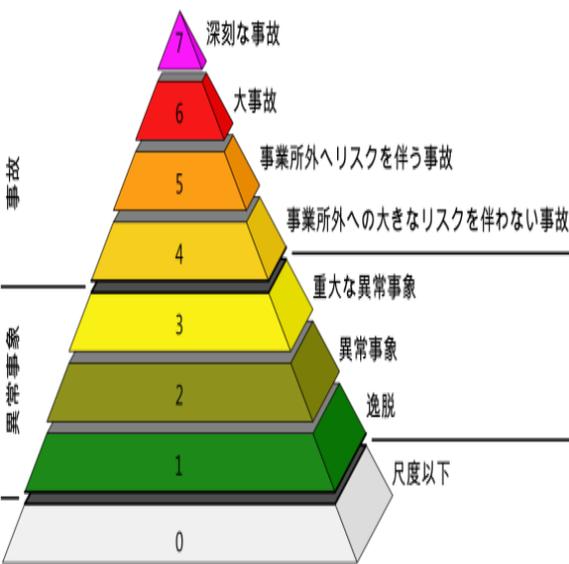
自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

意図的な航空機衝突への対応
放射性物質の拡散抑制対策
格納容器破損防止対策
炉心損傷防止対策 (複数の機器の故障を想定)
内部溢水に対する考慮(新設)
自然現象に対する考慮 (火山・竜巻・森林火災を新設)
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

新設 (テロ対策)
新設 (シビアアクシデント対策)
強化又は新設
強化

3. 安全の意味(5) — 事象分類(事故とは) —

国際原子力事象評価尺度



レベル	影響の範囲	参考事例
7 深刻な事故	放射性物質の重大な外部放出:ヨウ素131等価で数万テラベクレル以上の放射性物質の外部放出	チェルノブイリ原子力発電所事故(1986年) 福島第一原子力発電所事故(2011年)
6 大事故	放射性物質のかなりの外部放出:ヨウ素131等価で数千から数万テラベクレル相当の放射性物質の外部放出	ウラル核惨事(キシテム事故)(1957年)
5 事業所外へリスクを伴う事故	放射性物質の限定的な外部放出:ヨウ素131等価で数百から数千テラベクレル相当の放射性物質の外部放出	チョーク・リバー研究所原子炉爆発事故(1952年) ウインズケール原子炉火災事故(1957年) スリーマイル島原子力発電所事故(1979年) ゴイアニア被曝事故(1987年)
4 事業所外への大きなリスクを伴わない事故	放射性物質の少量の外部放出:法定限度を超える程度(数ミリシーベルト)の公衆被曝	フォールズSL-1炉爆発事故(1961年) 東海村JCO臨界事故(1999年) フルーリュス放射性物質研究所ガス漏れ事故(2008年)等
3 重大な異常事象	放射性物質の極めて少量の外部放出:法定限度の10分の1を超える程度(10分の数ミリシーベルト)の公衆被曝	動燃東海事業所火災爆発事故(1997年) 東北地方太平洋沖地震によって福島第二原子力発電所で起こったトラブル(2011年)
2 異常事象		関西電力美浜発電所2号機・蒸気発生器伝熱管損傷(1991年)等
1 逸脱		「もんじゅ」ナトリウム漏洩(1995年) 関西電力美浜発電所3号機・2次冷却水配管蒸気噴出(2004年)等
0+ 尺度以下	安全に影響を与え得る事象	関西電力美浜発電所3号機・2次冷却水配管破損(2004年)
0- 尺度以下	安全に影響を与えない事象	
評価対象外	安全性に関係しない事象	新潟県中越沖地震に伴う東京電力柏崎刈羽原子力発電所での一連の事故(2007年)等

3. 安全の意味(6) — 事象分類(事故とは) —

<日本の事象分類>

①安全設計審査指針

- **通常運転**: 計画的に行われる起動、停止、出力運転、高温待機、燃料取替等の運転時で、所定の制限内にある状態
- **異常な過渡変化**: 寿命期間中に予想される機器の単一故障もしくは誤動作又は運転員の単一の誤操作などで発生されると予想される外乱によって生じる異常な状態
- **事故**: 異常な過渡変化を超える異常な状態であって、発生頻度はまれであるが、安全設計の観点から想定される状態

②機械学会 原電用原子力設備規格 設計・建設規格

- **運転状態Ⅰ** (10^0 /炉年): 原子炉施設の通常運転時の運転状態。通常運転とは、運転計画等で定める起動、停止、出力運転、高温待機、燃料取替等。
- **運転状態Ⅱ** ($10^0 \sim 10^{-2}$ /炉年): 運転状態Ⅰから逸脱した状態であって、運転状態Ⅲ、Ⅳ及び耐圧試験状態以外の状態。
- **運転状態Ⅲ** ($10^{-2} \sim 10^{-4}$ /炉年): 原子炉施設の故障、異常な作動等により原子炉の運転停止が緊急に必要とされる運転状態。
- **運転状態Ⅳ** ($10^{-4} \sim 10^{-6}$ /炉年): 原子炉施設の安全性を評価する観点から異常な状態を想定した運転状態。
- **耐圧試験状態**: 耐圧試験圧力が負荷されている状態。

運転状態Ⅱ: 異常な過渡変化、 運転状態Ⅲ、Ⅳ: 事故

3. 安全の意味(7) –考慮している事象(想定外?)–

<3.11前の旧指針>

- 異常な過渡変化、事故：設計基準内事象(DBA)⇒設計想定内
- 重大事故、仮想事故：設計基準外事象(BDBA)⇒設計想定外、ただし被曝評価対象であり評価想定内の事故
- 過酷事故(シビアアクシデント)(DBAを大幅に超える事象であって、炉心の大規模損傷を伴う恐れのある事故)：PSA(PRA)評価、AMで対応 ⇒設計の想定外であってもPSA(PRA)、AMの想定内。
- 設計上は想定外であっても、公衆被曝の防止(安全確保)の観点からの評価は行っており、これに対応するための指針類、AMも整備されている。(AMの有効性を国が評価し、承認している)

DBA :Design Basis Accidents,

AM :Accident Management,

PSA (PRA):Probabilistic Safety (Risk)Assessment 確率論的安全(リスク)評価

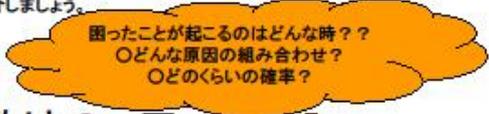
BDBA :Beyond DBA,

3. 安全の意味(8) – 確率論的安全(リスク)評価とは –

PRAとは設備故障等が重なった場合に、発生しうる事故を対象として、その発生頻度と影響を定量的に評価し安全性の度合いを検討する手法であり、航空分野や海洋分野など様々な分野で活用されています。原子力発電所においては、過酷事故(炉心損傷など)のリスクを算出しています。

過酷事故には事故のきっかけとなり得る出来事(起因事象)に対し、その出来事から事故に至るのを防ぐための様々な安全装置が存在します。PRAではその起因事象の発生頻度に、各種安全装置が故障などで機能しない確率を掛け合わせる事により、最終的な事故に至る頻度を評価しています。

それでは、身近なケースを例にPRA手法の概要をご紹介します。



■ 1年間に寝坊する回数は? ■



PRA手法を用いて寝坊する頻度を評価してみます。

まず、寝坊のきっかけになる出来事(起因事象といいます)はどのようなものがあるでしょうか?例えば、夜更かし、深酒、疲労などが挙げられます。



では、夜更かしをした場合、必ず寝坊するのでしょうか?
普通は目覚まし時計をセットしておきますね。



もし目覚まし時計が故障していて鳴らずに起きられなかったら?
母親が起こしてくれる事に期待できます。



もし母親が起こしてくれなかったら?
父親に起こしてもらう事にも期待できます。
父親が起こしてくれなくて初めて寝坊となります。

このように、夜更かしは寝坊の原因となりますが、すぐには寝坊とはならず様々な寝坊防止策に期待する事ができます。PRAではこれらの防止策の成否による寝坊に至るまでの進展を以下のようなイベントツリーで表現します。

寝坊にいたるイベントツリー

起因事象	寝坊防止策			No.	状態	発生頻度(／年)
	目覚まし時計	母親	父親			
夜更かし	→成功	0.103	0.2	1	起床	89.70
				2	起床	8.24
	↓失敗	0.5	3	起床	1.03	
			4	寝坊	1.03	
寝坊頻度						1.03

イベントツリーの左端の“夜更かし”が寝坊のきっかけ(起因事象)、右隣の“目覚まし時計”“母親”“父親”が寝坊防止策を視わします。

まず“夜更かし”からスタートし次に“目覚まし時計”に向かいます。目覚まし時計が鳴り、起床出来た場合上側のバスを通り、目覚まし時計が鳴らなかった場合下側のバスに進みます。

目覚まし時計が鳴らなかった場合、次の“母親”に起こしてもらいが必要があり、目覚まし時計の場合と同様に、成否によって進むバスが変化します。

各防止策の下にある数字は、防止策の失敗確率を示します(起因事象・・・ここでは夜更かし・・・の場合は発生頻度)。例えば目覚まし時計が鳴らず下のバスに進む確率は0.103、目覚まし時計が鳴って上のバスに進む確率は(1-0.103)となります。

上の例では4つのパターンが考えられます。

- No1. 目覚まし時計が鳴り起床する。
- No2. 目覚まし時計が鳴らないが、母親に起こしてもらい起床する。
- No3. 目覚まし時計が鳴らず、母親にも起こしてもらえないが、父親に起こしてもらい起床する。
- No4. 目覚まし時計が鳴らず、母親にも父親にも起こしてもらえず寝坊する。

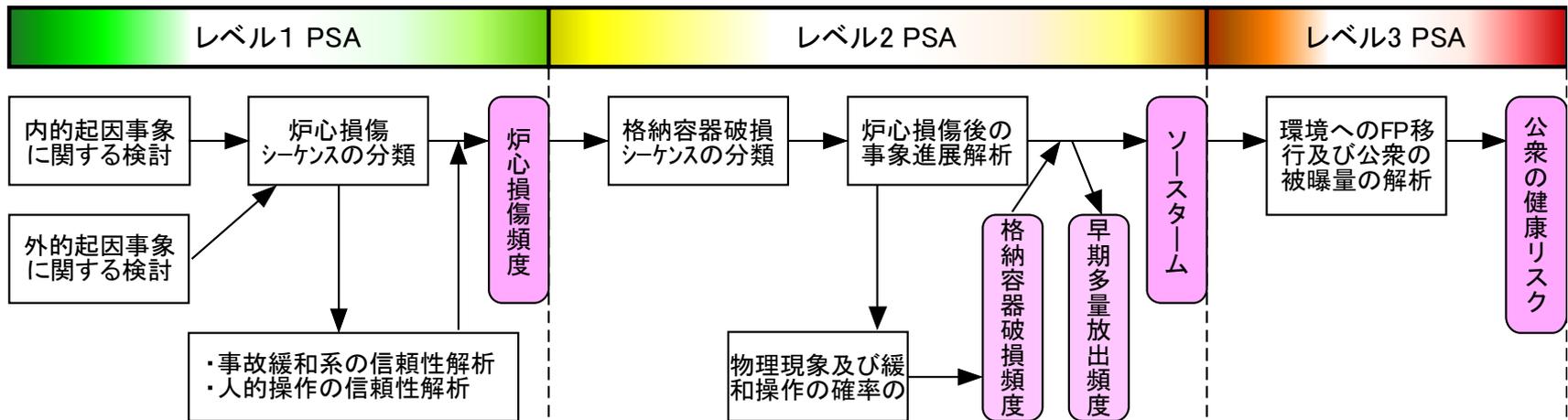
No4は寝坊防止策全てが失敗し寝坊となります。

寝坊の発生頻度の求め方ですが、起因事象の発生頻度に、各寝坊防止策が失敗する確率を掛けることで算出します。今回の例ですと、夜更かしの発生頻度(100 回/年) × 目覚まし時計が鳴らない確率(0.103) × 母親に起こしてもらえない(0.2) × 父親に起こしてもらえない(0.5)=1.03 回/年となります。

ではこの値はどのように決定するのでしょうか?

<http://www.tepsys.co.jp/common/images/pc/content/psa/PRA.pdf>

3. 安全の意味(9) –PSA(PRA)の内容–



- 炉心損傷発生確率を求めるレベル1PSA
- 格納容器破損確率、損傷に伴うFPの環境への放出量(ソースターム)を求めるのがレベル2PSA
- 環境中へのFP移行及び公衆被曝量を評価し、公衆の健康リスクを求めるのがレベル3PSA

FP :Fission Products (核分裂生成物)

内的起因事象とは機器の故障、操作ミス等に起因するもの、**外的起因事象**とは地震、津波、台風、崖崩れ、火災、航空機落下、テロ等に起因するもの

3. 安全の意味(10) –確率論的安全目標–

<性能目標>

- 炉心損傷頻度: 10^{-4} ／炉・年以下
- 格納容器破損頻度: 10^{-5} ／炉・年以下

<安全目標>

- 原子力施設の事故に起因する放射線被曝による施設の敷地境界付近の公衆の個人の平均急性死亡リスクは 10^{-6} ／炉・年以下
- 原子力施設の事故に起因する放射線被曝によって生じ得る癌に因る施設からある範囲の距離にある公衆の個人の平均死亡リスクは 10^{-6} ／炉・年以下
- 実際のPSA(PRA)評価では更に1～2桁ぐらい小さい。
- 福一事故を踏まえ、Cs137放出量100TBq以上の事故頻度を 10^{-6} ／炉・年以下に変更(避難は実質不要)

出典：原子力安全委員会安全目標専門部会 「発電用軽水型原子炉施設の性能目標について(案)」他

3. 安全の意味(11) -日本人の死亡原因-

- 年間の死者の総数 約129万人(2015年)
- 癌に因る死者 約 37万人(1位)
- 心臓疾患 約 20万人(2位)
- 肺炎 約 12万人(3位)
- 脳血管疾患 約 11万人(4位)
- 老衰 約 8万人(5位)
- 不慮の事故 約 4万人(6位)
- 自殺 約 2万人(8位)

3. 安全の意味(12) -不慮の事故の原因-

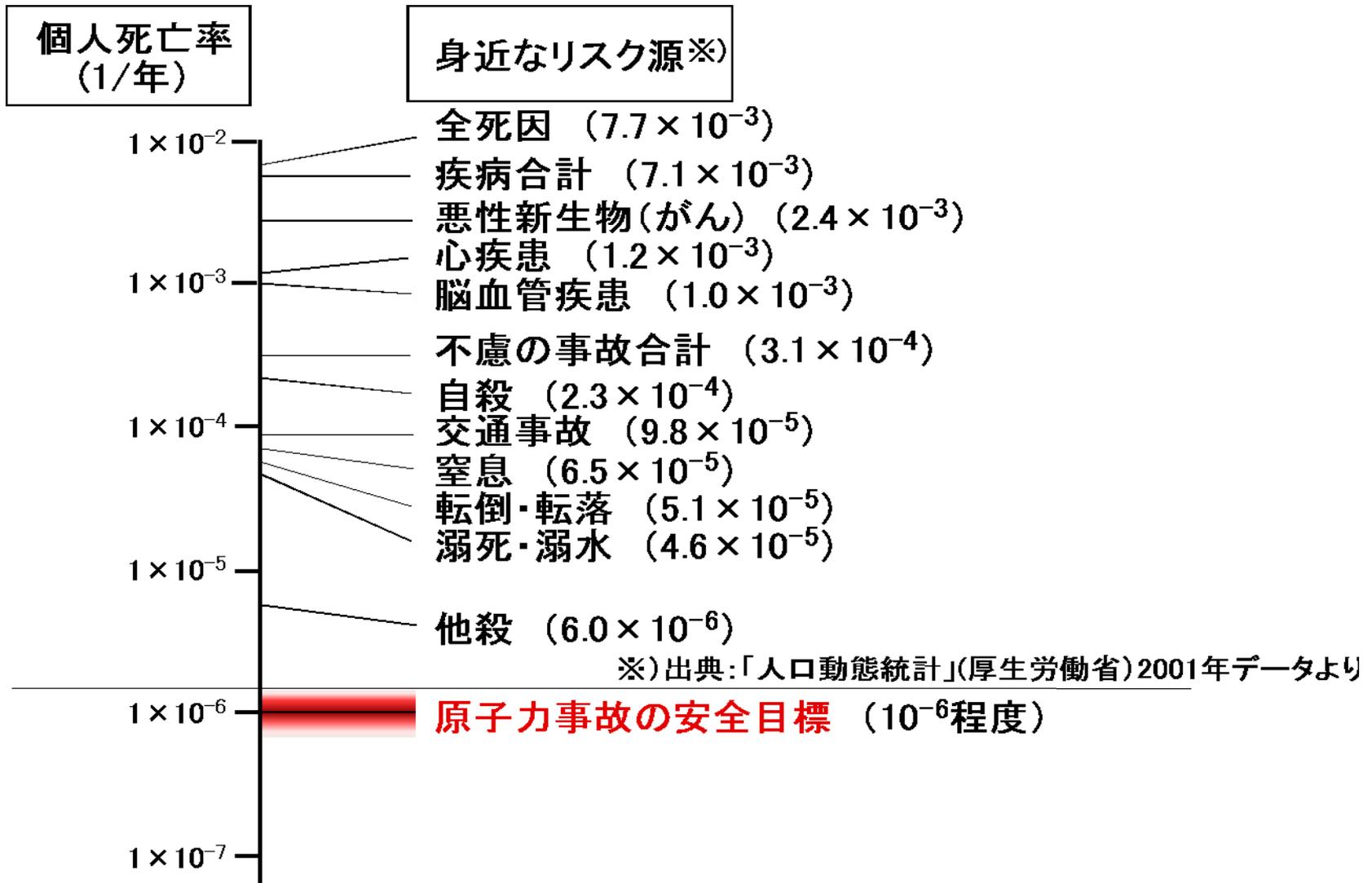
<2010年のデータ>

• 窒息	約9,400人	(1位)	負傷者は約90万人 重傷者は約 5万人
• 交通事故	約7,500人	(2位)	
• 転倒・転落	約7,200人	(3位)	
• 溺死	約6,500人	(4位)	
• 火災	約1,300人	(5位)	
• 他殺	約 780人		
• 労働災害	約1,100人		

休業4日以上を負傷者は約11万人

人間が生活しているすぐそばに、多数の車が走っており、運転手の不注意ですぐ死亡事故が発生する。

3. 安全の意味(13) -リスクの頻度比較-



3. 安全の意味(14) –リスクの比較例–

危険な生物	1年間で亡くなる人数
鮫、狼	10人
ライオン／象	100人
カバ／ワニ	500人／1000人
サナダムシ／回虫	2,000人／2,500人
カタツムリ、サシガメ(虫)、ハエ	10,000人
犬	25,000人
ヘビ	50,000人
人間	475,000人
蚊	725,000人

The Deadliest Animal in the world by the blog of Bill Gates

3. 安全の意味(15) – 原発事故の被害 –

- 福島第一原子力発電所では想定外の津波により炉心溶融に至り、水素爆発で格納容器も損傷し、放射性物質を大気中に放出してしまった。
- 一方、福島第二、女川、大間、東海第二、福島第一の5、6号機には安全上の問題(公衆被曝)はなかった。
- 想定外の津波で、堤防、住居、ビル、道路、鉄道などが壊れ、1万8千人の命と40万人の財産が奪われてしまった。
- 福島第一原発事故の被曝による人的被害は0。拙速な避難により福島県の関連死は2千人以上。(全体では約3千5百人)
- マスコミの報道、一部の似非専門家、識者の発言で風評被害を招き、避難民の心労(ストレス)を助長させた。
- 科学的事実を認識し、冷静に判断することが重要。



④日本の基盤
(世界中での日本の立場)

4. 日本の基盤(1) —日本のデータ—

- 自然の恵みだけで生活していた江戸時代までの日本の人口は最大で約3千万人。(豊臣時代は約1.2千万人)
- 現在の人口は、約1億3千万人。
- 日本のGDPは、約548兆円で米国、中国に次いで世界第3位(2016年)。(ただし1人当たりでは22位。1位はルクセンブルク、2位はスイス、3位はノルウエー)
- エネルギー自給率は6%(原子力を除く)で原子力を含めると20%程度(3.11前の運転実績)になる。
- 食料自給率はカロリーベースで40%(金額ベースでは70%)

GDP : Gross Domestic Product (国内総生産)

4. 日本の基盤(2) –日本のデータ–

- エネルギーの94%を海外に依存
- 食料の60%を海外に依存
- 日本の輸出額は、約71兆円(2006～2010年の平均)
- 日本の輸入額は、約65兆円(2006～2010年の平均)
- 日本の輸出額は、約70兆円(2011～2016年の平均)
- 日本の輸入額は、約75兆円(2011～2016年の平均)
- 日本の輸出額の約90%が工業製品(日本は工業立国、技術立国、貿易立国)(自動車は輸出額の約25%を占める)

4. 日本の基盤(3) –フード・マイレージ–

- 英国のティム・ラングが提唱した指標
- 輸入する食糧の重さと輸送距離を乗算したもの
- 日本のフード・マイレージは約9,000億トン・キロメートル(Tk)で世界1
- 米国 約3,000億(Tk)、 英国 約1,900億(Tk)
独国 約1,700億(Tk)、 仏国 約1,000億(Tk)

日本人は、多くの食料を遠い国(米国、中国、オーストラリア、タイ、カナダ、ブラジルなど)から調達して生きている。

4. 日本の基盤(4) —エコロジカル・フットプリント—

- 人間の生活していくのに必要となる土地の広さを表わす指標
- 必要となる土地とは、「生活する」、「働く」、「食料を生産する」、「エネルギーを得る」、「空気を得るための自然を維持する」土地のことである。
- 日本人1人が必要な土地は約4.3ヘクタール(43,000m²)
- 日本の国が1人に供給できる土地は約0.8ヘクタール(8,000m²)
- **日本人は、国土の約5.3倍の土地を必要としている。**

4. 日本の基盤(5) —エコロジカル・フットプリント—

＜国の有効広さに対する必要な広さの倍率＞

- 日本は約5.3倍(逆に言うと、今の生活レベルでは約1/5の人口しか住めない)
- 米国は約1.9倍
- 英国は約3.6倍
- 中国は約1.9倍
- ニュージーランドは約0.6倍
- ブラジルは約0.2倍
- 世界平均では約1.6倍(地球の広さでは足りない)

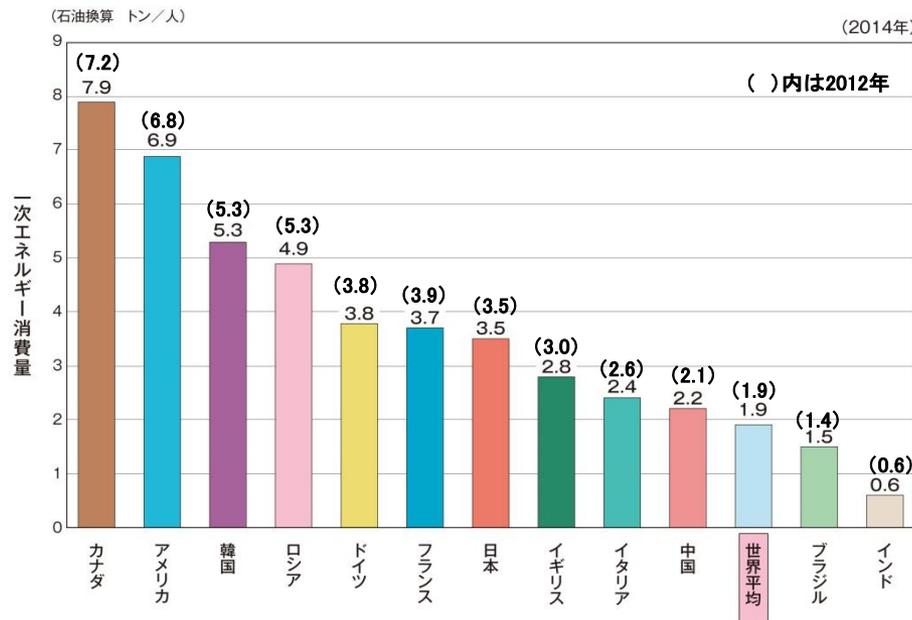
4. 日本の基盤(6) —世界の人口とエネルギー—

- 人口は、中国、インドで世界の36%を占める。
- 中国、インドの生活レベルは向上しない？
- エネルギー(食料)は足りている？

(2016年)

ランク	国名	人口(億人)
	世界	72.8
1	中国	13.7
2	インド	12.6
3	アメリカ	3.2
4	インドネシア	2.5
5	ブラジル	2.0
6	パキスタン	1.9
7	ナイジェリア	1.7
8	バングラディシュ	1.6
9	ロシア	1.4
10	日本	1.3
11	メキシコ	1.1
12	フィリピン	0.9

一人あたりの一次エネルギー消費量



4. 日本の基盤(7) —飽和人口、飽和食料—

- 世界の人口は約73億人(2016年)
- **日本の生活レベルで73億人が暮らすためには、地球が2.4個必要**との評価がある。
- 現実には、世界は豊かな生活をしている国と貧しい暮らしをしている国がある。
- **地球の飽和人口、飽和食料、飽和エネルギーの量と、その時の生活レベルは？**
- **国の生活レベルの違いで許される範囲は？**
- **世界の資源を大量消費して豊かに暮らしている工業立国の日本が、化石エネルギー枯渇、地球温暖化、砂漠化という地球的問題のある中で、ウラン資源を有効活用しないという脱原発という選択肢が正しい道？**
- **1次エネルギーは化石、核、再生の3種類しかない。世界的には福一事故後も原発推進の流れは変わっていない(後述)中、日本は脱原発で本当に暮らせていける？**

4. 日本の基盤(8) —日本の事情—

- 資源のない日本は、現実的には、工業(技術)立国、貿易立国でしか生きる道が無い。
- 日本人の暮らしは、以下が前提である。
 - ①世界が平和であること(貿易が安定して行えること)
 - ②適切な金を出せば日本に必要な量のエネルギー、食料が安定的に輸入できること
 - ③日本の製品(技術)が売れること(他国より優れた技術を持ち続けること)
- この前提は、化石燃料の枯渇(資源争奪)、新興国の技術力向上、地球温暖化による気候変動(食料不足)などでいつ崩れてもおかしくなく、日本の基盤は磐石ではなく脆弱であるという危機意識が必要。
- 日本の脆弱性を緩和する方策として、エネルギー自給率の向上と、世界に売れる技術として原子力発電、核燃料サイクル技術が重要(ロシア、韓国、中国、フランスがライバル)

4.日本の基盤(9) – 原発保有国の動向 –

- 原発を保有、運転している国は世界で31ヶ国
- 福一後に原子力推進を表明している国は26ヶ国
アメリカ、カナダ、フランス、イギリス、ロシア、ウクライナ、アルメニア、オランダ、フィンランド、スウェーデン、チェコ、ハンガリー、ルーマニア、スロバキア、中国、韓国、日本、インド、パキスタン、イラン、メキシコ、ブラジル、アルゼンチン、南アフリカ、UAE、ベラルーシ
- 凍結を表明している国は5ヶ国(ただし、原発は運転中)
ドイツ、スイス、スペイン、台湾、ベルギー
(ドイツ、スイスはチェルノブイリ事故があった30年前にも凍結を表明)
- 方針を決めていない国は2ヶ国(ただし、原発は運転中)
ブルガリア、クロアチア



⑤核燃料サイクルの基礎

5. 核燃料サイクルの基礎(1) –意味–

核燃料(原子燃料)サイクルとは、広義の意味では、
「**原子力発電を維持するための核燃料の流れ**」

狭義の意味では

「**原子力発電所の使用済燃料を再処理し、原子力発電所の燃料として再利用すること**」

フロントエンド:ウランの採掘(採鉱)、精錬、転換、濃縮、
燃料加工

バックエンド:使用済燃料の再処理、MOX燃料加工、放射性
廃棄物の処理、処分

MOX: Mixed Oxide 混合酸化物

5. 核燃料サイクルの基礎(2) -目的-

① 資源の有効利用

(日本のエネルギー自給率の向上、エネルギー安全保障の向上)

② 高レベル放射性廃棄物の減容、有害度低減

③ 余剰プルトニウムの低減

(プルトニウムの平和利用)

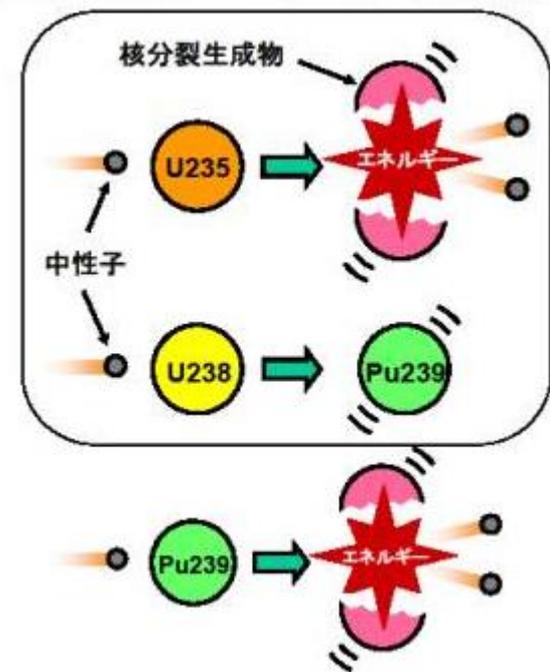
5. 核燃料サイクルの基礎(3) – 有効利用とは? –

- 天然ウラン成分: U^{235} 0.7%、 U^{238} 99.3%
- 核分裂性物質 : U^{235} 、 Pu^{239}
(U^{233} 、 Np^{237} 、 Pu^{241} 、 Am^{241} 、 Cm^{244})
- 軽水炉の燃料 : 濃縮(U^{235} 3~5%)ウラン
- 高速炉の燃料 : プルトニウム燃料
(プルトニウム富化度20~30%)
- 劣化ウラン : $U^{235} < 0.7\%$ (ブランケット燃料0.2%)
- 天然ウランの0.7%しか利用していない。
- 天然ウランの資源確保埋蔵量は約99年

5. 核燃料サイクルの基礎(4) –有効利用とは?–

- 核分裂しない(しにくい) U^{238} に高速中性子を当てると Pu^{239} になる。
- Pu^{239} は原発の燃料として使える。(MOX燃料、プルサーマル)**

中性子の種類	エネルギー(E)
冷中性子	$E < 0.026\text{eV}$
熱中性子	$0.026\text{eV} < E < 1\text{eV}$
熱外中性子	$1\text{eV} < E < 0.1\text{MeV}$
高速中性子	$0.1\text{MeV} < E$

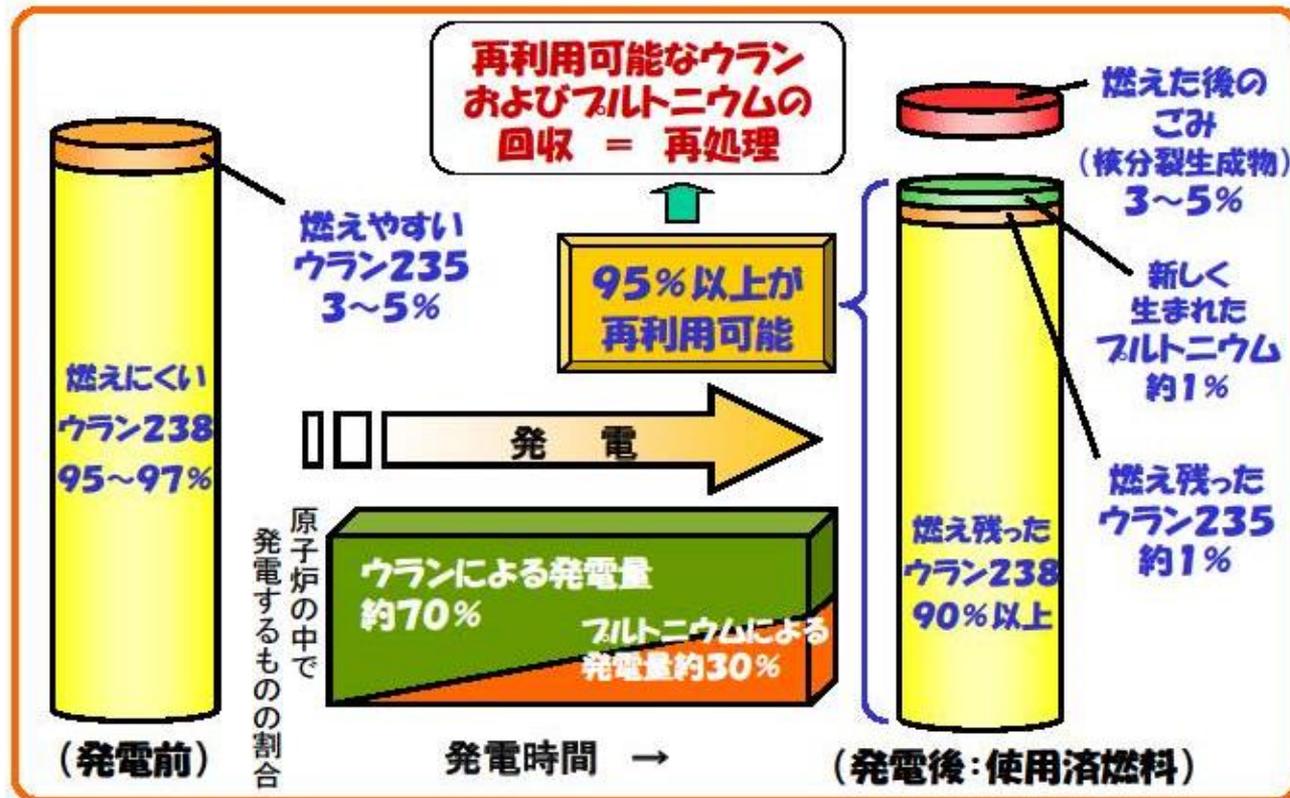


MOX : Mixed Oxide 混合酸化物

プルサーマル : プルトニウムで製造した燃料を熱中性子炉 (軽水炉) で使うこと

5. 核燃料サイクルの基礎(5) –有効利用とは?–

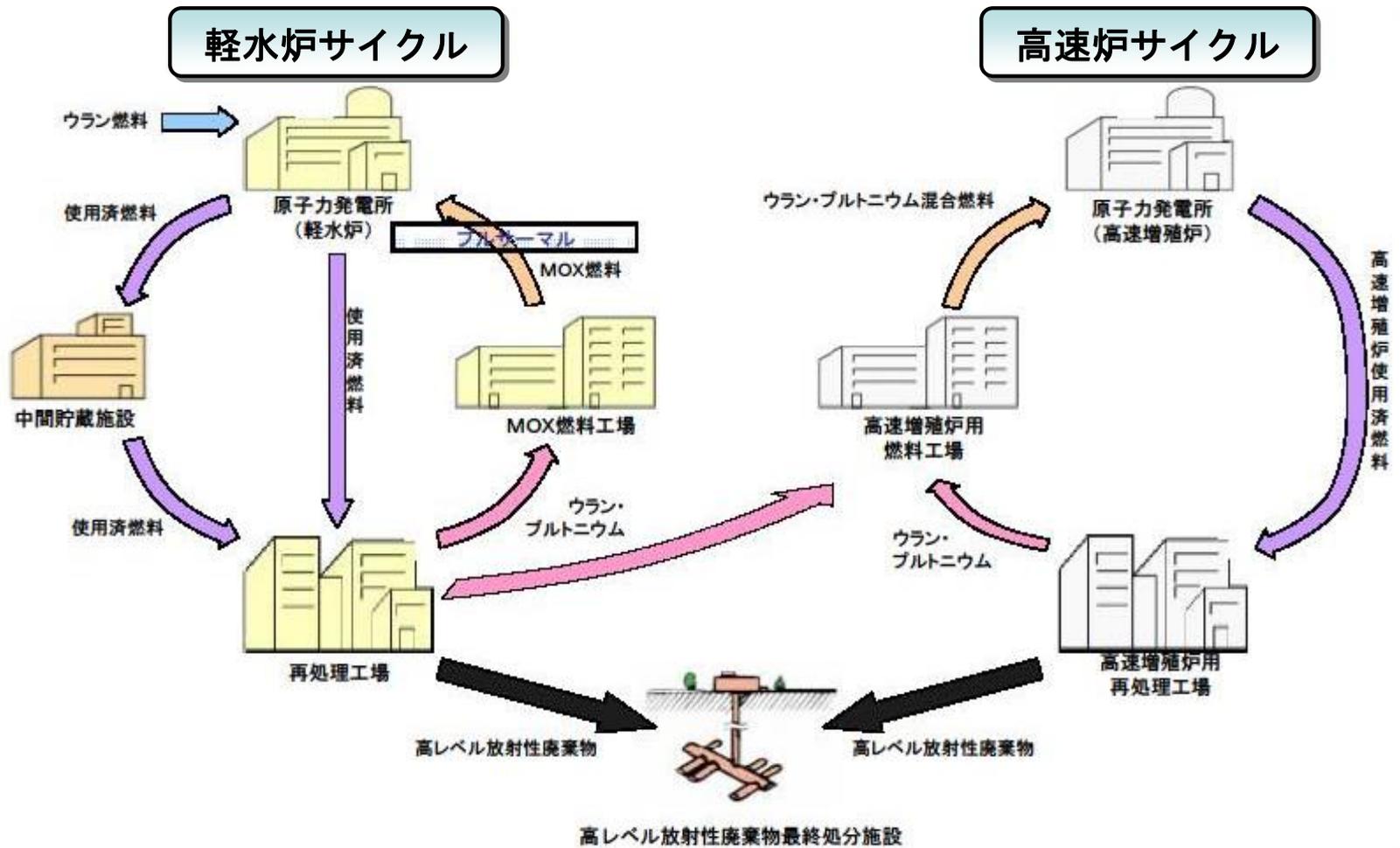
- 使用済燃料を再処理することで、リサイクルが可能
- **95%以上の資源が再利用できる**(放射性廃棄物の減容になる)



5. 核燃料サイクルの基礎(6) —高速増殖炉(FBR)の役割—

- 高速中性子によって、ブランケット燃料(U^{238})を Pu^{239} に変換する。
- 発電のために使用した燃料以上の燃料(1.1倍～1.2倍)を作る。(ウラン資源の99年が3000年以上になる)
- 使用済燃料、高レベル放射性物質に含まれる長寿命(半減期の長い)核種(MAといわれるNp、Amなど)を短寿命核種に変換する。
- 天然ウランと同等の放射性物質となるまでの期間
 - 使用済み燃料(直接処分): 約10万年
 - 軽水炉サイクル: 約8千年～1万年(体積も1/4に減容)
 - 高速炉サイクル(核変換後): 約3百年～千年(体積も1/7に減容)

5. 核燃料サイクルの基礎(7) -核燃料サイクル-



原発の燃料取出しから再処理工場受入れまでは約1年(使用済燃料の輸送条件)受入れから再処理(せん断)開始までに約3年。その間は水プールで保管。

5. 核燃料サイクルの基礎(8) –再処理工場の概要–

- 再処理施設は、事故時の一般公衆への被ばく線量は発電炉110万kW級と比べて約1桁小さい。
(発電炉も六ヶ所村に立地したと仮定して評価)

項目	再処理施設	(参考)原子力発電所
設備の概要	<p>The diagram illustrates the reprocessing process in several stages: 1. 使用済燃料受入れ・貯蔵 (Spent fuel reception and storage) in a pool. 2. 前処理 (Pretreatment) where fuel is dissolved. 3. 分離 (Separation) of plutonium and uranium. 4. 精製 (Refining) of plutonium and uranium. 5. ウラン精製 (Uranium refining) to produce uranium fuel. 6. 製品貯蔵 (Product storage) for fuel and uranium. Supporting processes include analysis, waste treatment, and glass immobilization.</p>	<p>The diagram shows a PWR system with a primary loop containing the reactor core and a steam generator. The secondary loop includes a turbine generator, condenser, and feedwater pump. The system is sealed to prevent radioactive leakage.</p>
放射性物質の形態	<ul style="list-style-type: none"> 非密封(高レベル廃液、プルトニウム溶液等) 密封(使用済燃料、ガラス固化体等) 	<ul style="list-style-type: none"> 密封(燃料ペレット及び燃料被覆管)
放射性物質の種類	<ul style="list-style-type: none"> 主に長半減期核種 	<ul style="list-style-type: none"> 短半減期核種あり
放射性物質の分布	<ul style="list-style-type: none"> 多数の機器に分散(多数の工程で処理) 	<ul style="list-style-type: none"> 炉心に集中

5. 核燃料サイクルの基礎(9) —再処理工場の特徴—

項目	再処理施設	(参考)原子力発電所
運転条件	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 常温、常圧、未臨界 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 高温、高圧、臨界
施設に存在するエネルギーの量	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 臨界にならないように管理。核分裂反応させることでエネルギーを取り出す設備ではない(通常状態では大きなエネルギーは発生しない)。 ▶ 放射能として、大きいのはガラス固化体、使用済燃料といった固体の放射性物質(密封されている)。 ▶ 再処理の特徴として、使用済燃料を硝酸に溶かして処理を行うことから非密封状態の溶液を取り扱うこと。溶液の放射性物質の中で最も放射能が大きいのは高レベル濃縮廃液。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 核分裂反応で大きなエネルギーを発生させて、そのエネルギーを取り出す設備(運転状態で大きなエネルギーが発生)。 ▶ 使用済燃料の放射能は、再処理の固体の放射性物質と同程度。 ▶ 原子力発電所の特徴として、原子炉圧力容器内(炉心)に大量のエネルギーを内包し、原子炉を停止しても停止直後の崩壊熱は大きい。



(再処理施設の特徴を踏まえた対応)

- ▶ 原子力発電所と比較し、時間的余裕がある
- ▶ 原子力発電所に必要となる高温停止、低温停止のような対応が必要とならない
- ⇒ 設計基準についてはこれらの特徴を考慮し対応する。
- ⇒ 重大事故等対処設備は対応へのフレキシビリティを考慮し、可搬型設備を主とする。

5. 核燃料サイクルの基礎(10) —再処理工場の安全確保—

- 原子力発電所と同様、深層防護の思想で公衆の被曝防止
- 安全確保の方策は、「冷やす」、「閉じ込める」
- 新規制基準による外部要因(外的事象)を考慮
- 想定する過酷事故(シビアアクシデント)は、臨界、水素爆発、火災、使用済燃料の損傷など

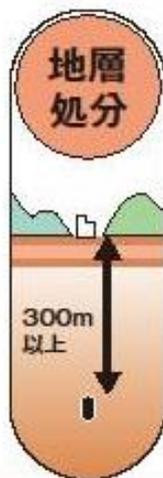


NRA : 原子力規制委員会, JNFL: 日本原燃(株)

5. 核燃料サイクルの基礎(11) —高レベル放射性廃棄物の処理方法—

人間による恒久的な管理の継続は困難であり、将来世代にも管理の負担を負わせることになるので、最終的には人間による管理がなくなったとしても安全に処分できる方法が検討されてきた。

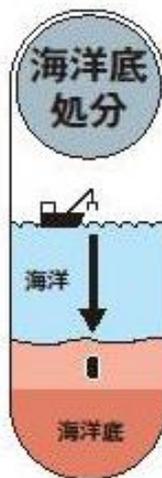
- ・地層中への処分は、地下資源などが長期間保存されてきた多数の実例があり、実現可能性が高い
- ・宇宙空間への処分は、発射技術等の信頼性に問題がある
- ・海洋底の下への処分は、海洋投棄を規制しているロンドン条約により禁止されている
- ・極地の氷床への処分は、南極条約により禁止されている。また、氷床の特性解明が不十分である



●地層が本来もっている物質を閉じ込める性質を利用



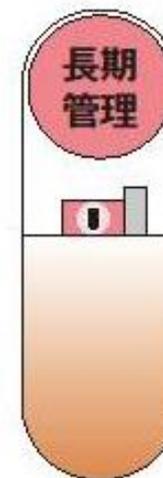
●発射技術等の信頼性に問題がある



●海洋投棄を規制しているロンドン条約により禁止



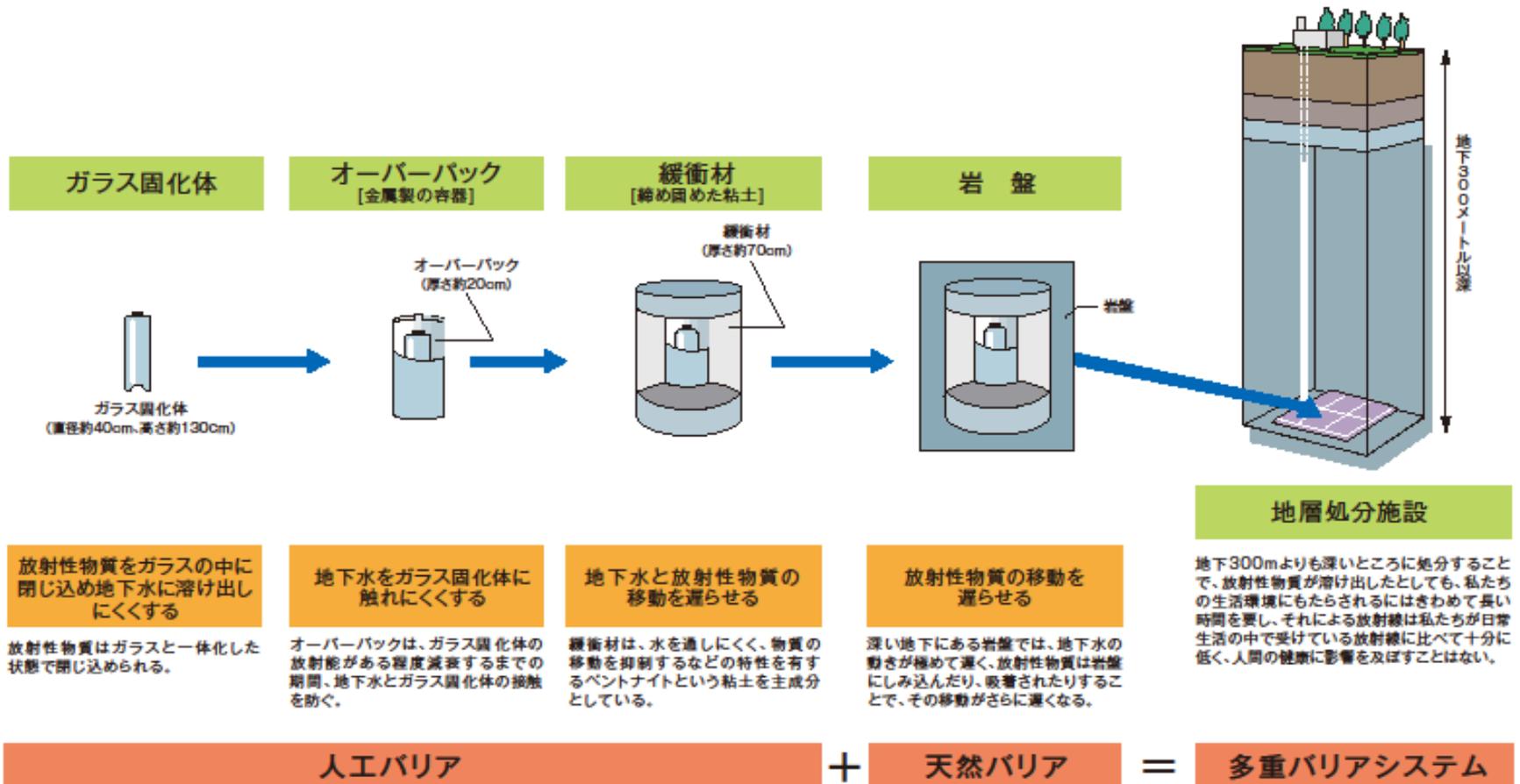
●南極条約により禁止
●氷床の特性等の解明が不十分



●人間による恒久的な管理は困難
●将来の世代にまで監視の負担を負わせる

5. 核燃料サイクルの基礎(12) - 多重バリア -

高レベル放射性廃棄物の処分は5重のバリアで安全を確保している。



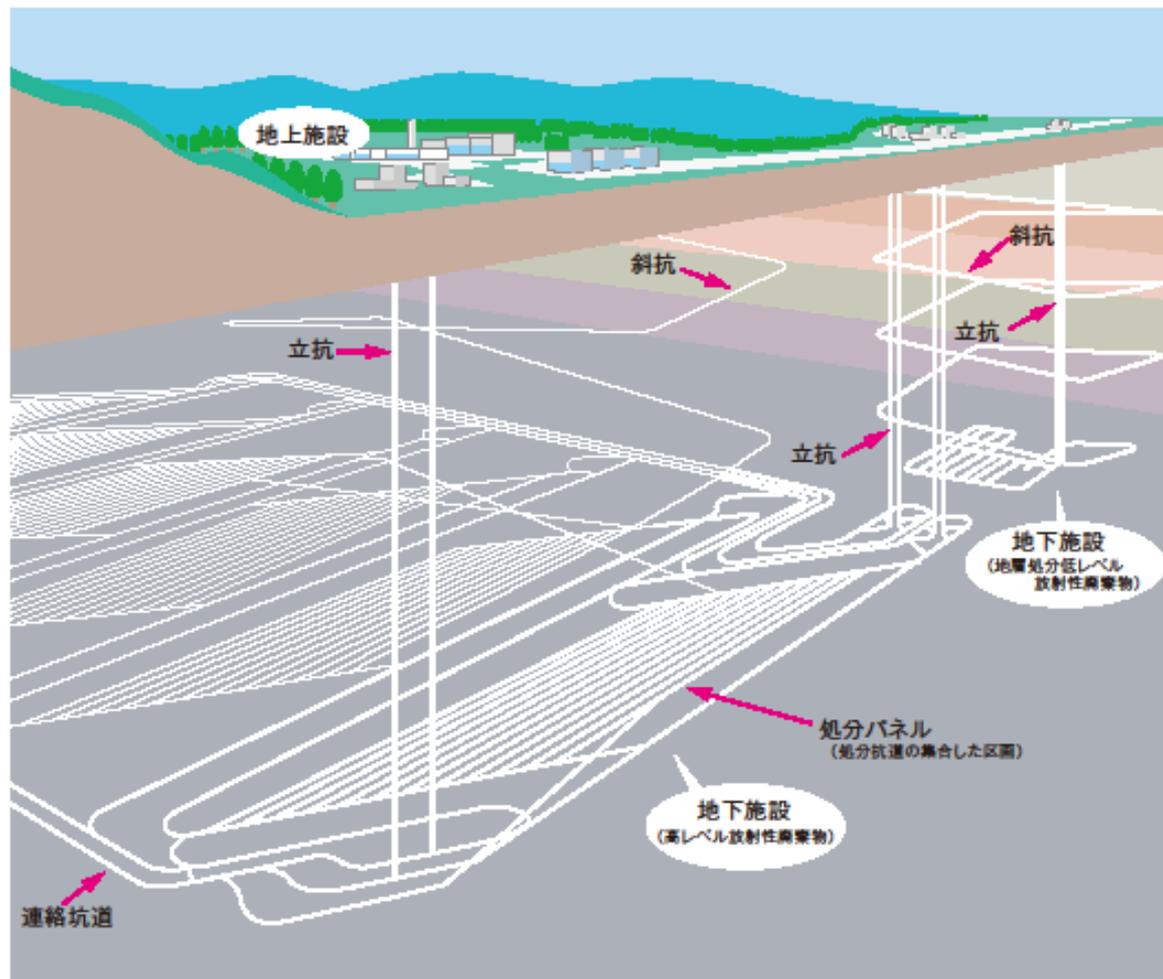
5. 核燃料サイクルの基礎(13) —地層処分の概念—

地層処分施設のレイアウト例

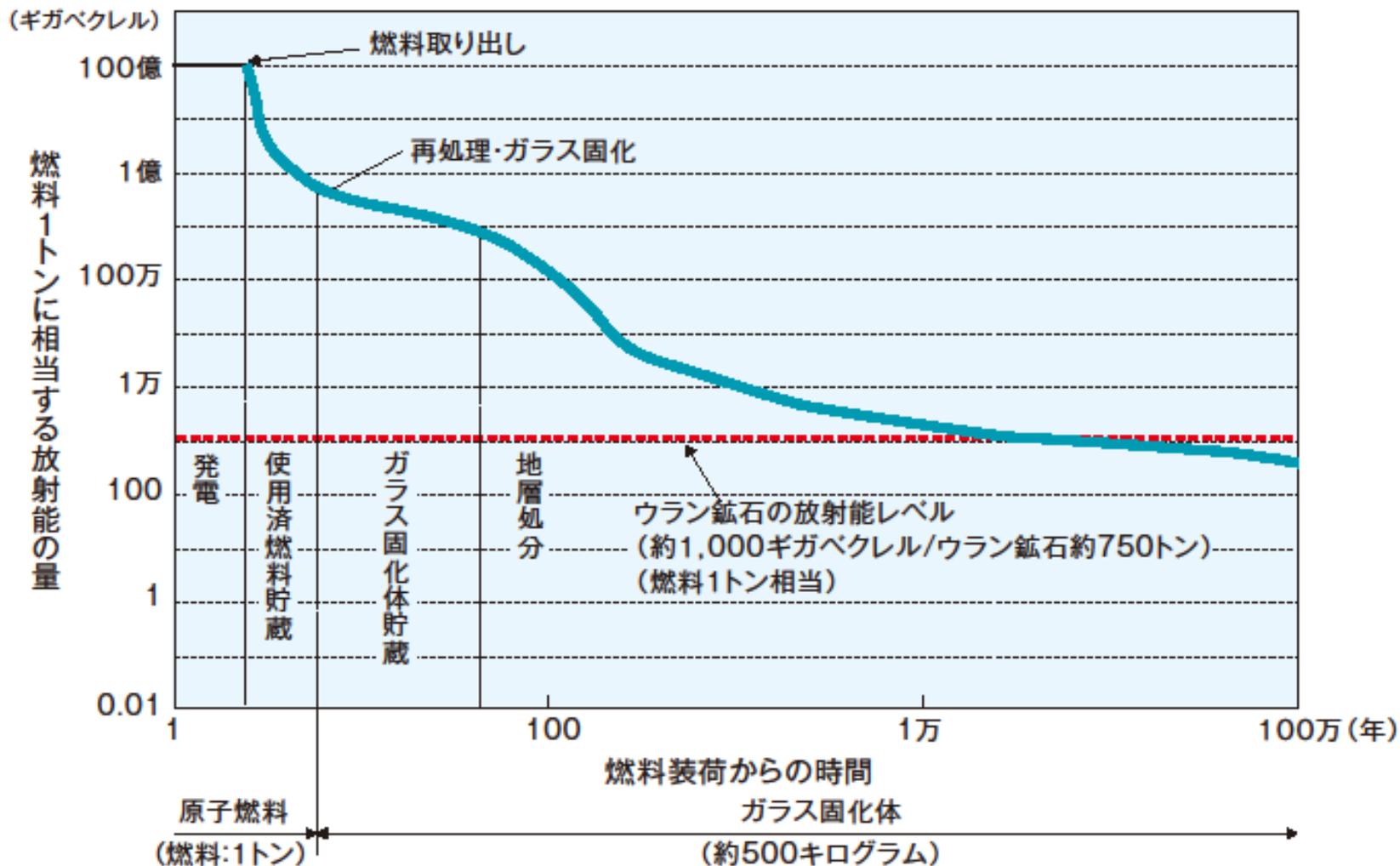
高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分施設を併置した例

仕様の一例(結晶質岩、深度1,000mの場合)

地上施設	敷地面積1~2km ²
高レベル放射性廃棄物の地下施設	大きさ(平面) 約3km×約2km
地層処分低レベル放射性廃棄物の地下施設	大きさ(平面) 約0.5km×約0.3km



5. 核燃料サイクルの基礎(14) —高レベル放射性廃棄物の放射能の減衰—





⑥まとめ

6. まとめ(1) —エネルギー—

1次エネルギーは化石、核、再生エネルギーの3種類しかなく、それぞれのエネルギーには特徴がある。

資源のない(エネルギー自給率6%)日本にとって**全てのエネルギーが重要**。

核エネルギー(原子力発電)の利点として**3つのE**が挙げられている。

Energy Security

エネルギーの安全保障

Economy

経済性

Environmental Conservation

環境保全(地球に優しい)

6. まとめ(2)

—核エネルギーの必要性—

- 高速増殖炉技術、核燃料サイクル技術を確立できれば、ウラン資源を100倍以上有効利用でき、3千年以上の期間のエネルギーを他国に頼らず手に入れられる可能性がある。
- 資源が無く、工業(技術)立国として生きていくしかない日本にとって、エネルギー確保は最重要課題であり、3Eに優れた原子力エネルギーも重要。
- 事故は謙虚に反省し、2度と起こさない対策を行うことは当然のことであるが、福島第一原子力発電所の事故があっても、日本という国の暮らしの基盤は少しも変わらない。

6. まとめ(3) —最後に—

- 地球上に、豊かな国と貧しい国があり、地球の資源も有限である以上、エネルギー、食料の分配(争奪)は今後益々厳しくなることが容易に推定できる。
- 限られた地球の資源を有効かつ効率的に使用するのには資源のない日本の使命である。
- 自然エネルギーも国産エネルギーであり、重要ではあるが、自然エネルギーだけで産業が求める安定、安価、高品質の電力は賄えない。
- 資源を持たない日本は、エネルギー自給率向上のための原子力発電の推進と早期の核燃料サイクル確立を行い、エネルギー安全保障に対する脆弱性を解決する必要があることは、東日本大震災後の今も変わっていない。

御清聴ありがとうございました。



データの出典

- 原子力・エネルギー図面集2015、2016
- 日本原子力研究開発機構のホームページ
- 電気事業連合会のホームページ
- 原子力規制委員会のホームページ
- 資源エネルギー庁のホームページ
- 電力会社のホームページ など