

核燃料サイクルと バックエンドの概要と基礎

平成23年10月29日
バックエンド部会週末基礎講座
九州大学 出光 一哉

- ・原子力発電の原理/資源/温暖化ガス
- ・核燃料サイクル
- ・バックエンド(廃棄物処理/処分)
低レベル/TRU廃棄物/高レベル廃棄物
廃炉/クリアランス

1

原子力の基礎

2

質量とエネルギー

$$E = mc^2 \quad 1 \text{ a.m.u.} = 931.5 \text{ MeV}$$

陽子質量 $m_p = 1.007825 \text{ (a.m.u.: 原子質量単位)}$
電子の重量 (0.000549) 含む

中性子質量 $m_n = 1.008665 \text{ (a.m.u.)}$

$$(m_p + m_n) = 2.016490$$

重水素質量 $m_d = 2.014103 \text{ (a.m.u.)}$

$$\begin{aligned} \text{質量欠損 } \Delta m &= 0.002387 \text{ (a.m.u.)} \\ &= 2.223 \text{ MeV} \end{aligned}$$

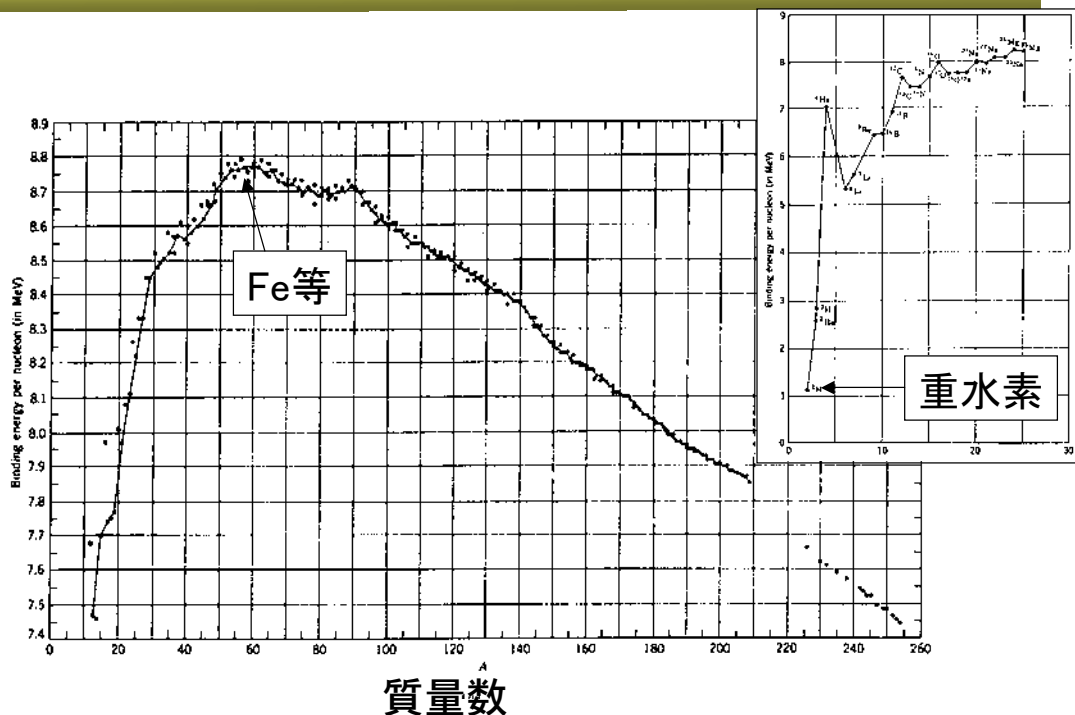
重水素核中の核子の結合エネルギー

$$= 2.223 / 2 = 1.11 \text{ MeV}$$

3

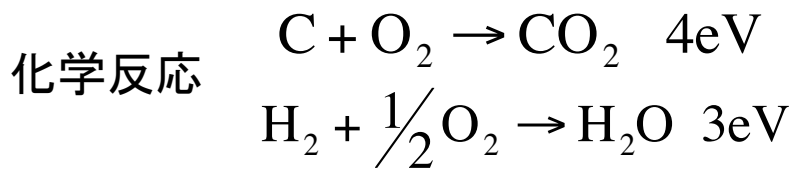
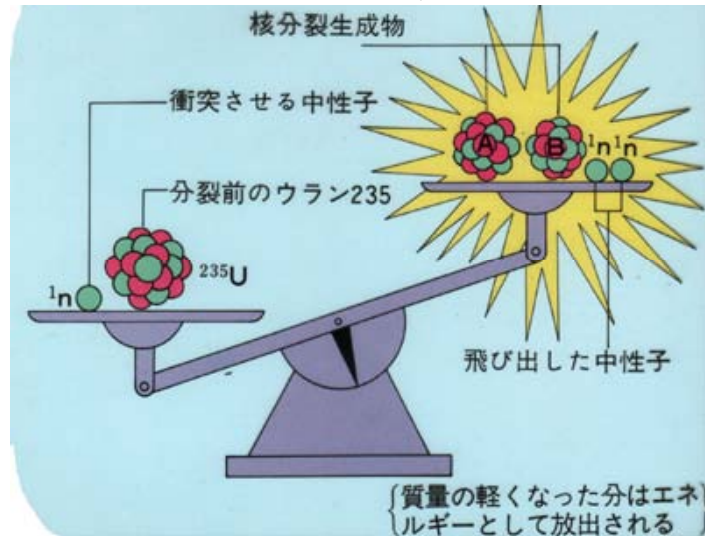
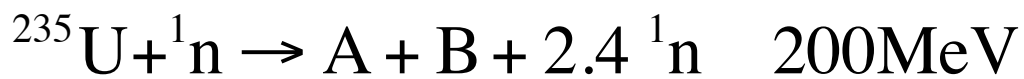
質量欠損と核子の結合エネルギー

結合エネルギー (MeV)



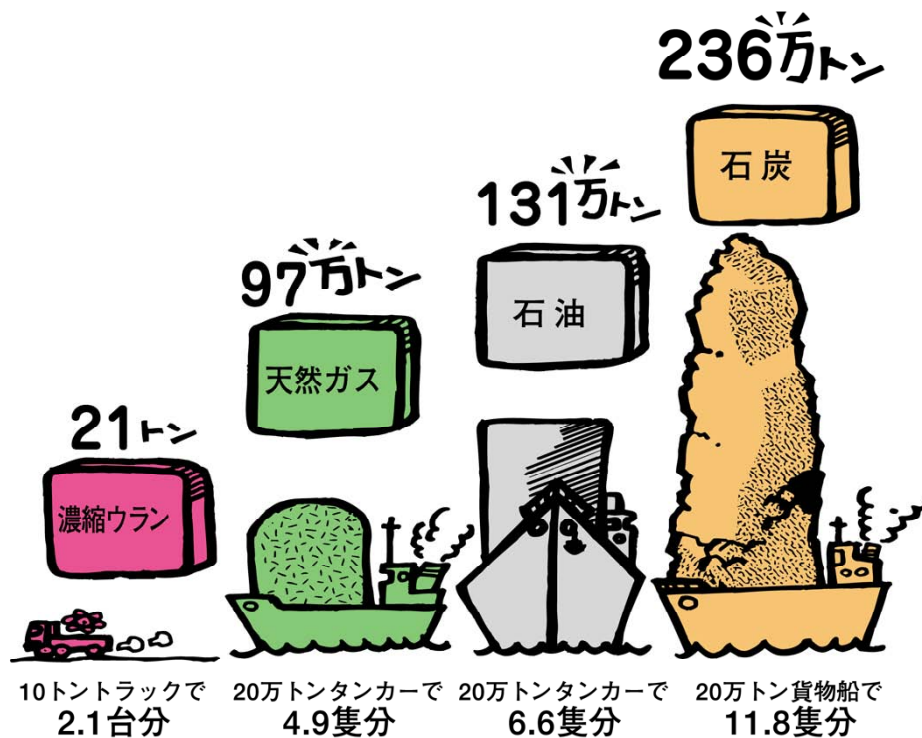
4

ウランの核分裂反応



5

100万kW発電のために必要な燃料(1年分)



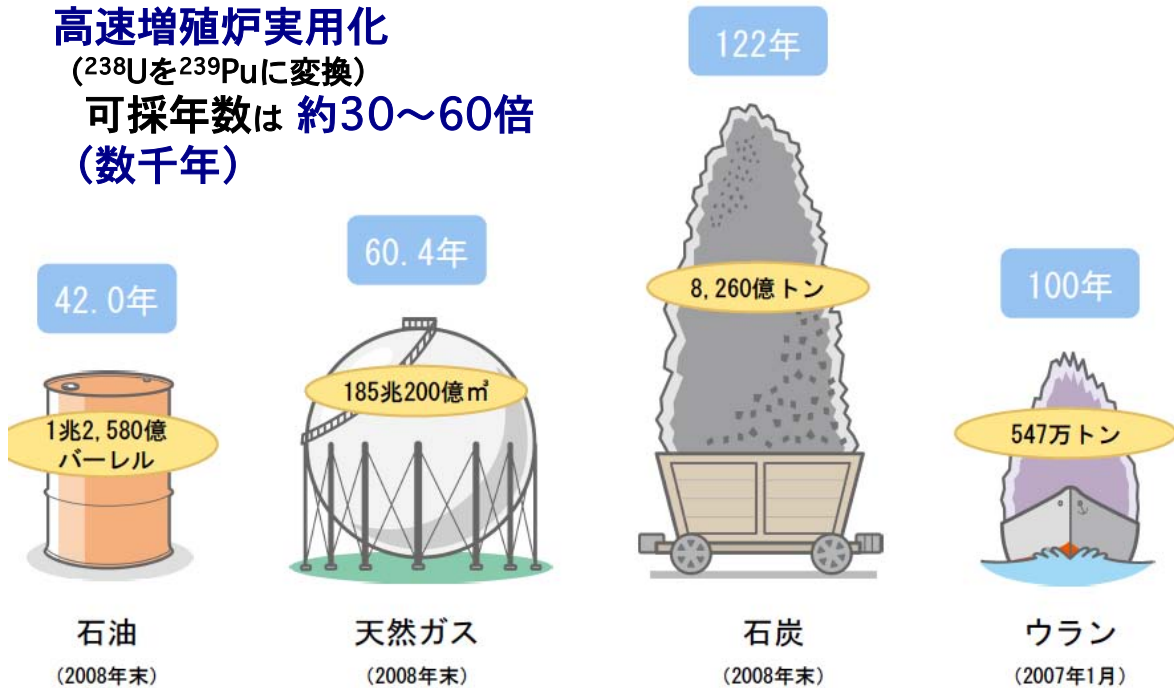
6

我々に残された資源

高速増殖炉実用化

(^{238}U を ^{239}Pu に変換)

可採年数は **約30～60倍**
(数千年)



7

世界のエネルギー資源 —ウラン—

ウランの可採年数**100**年分 (U-235 のみ利用)

可採年数 = 賦存量 / 年間使用量

高い**供給安定性**、**経済性**

運転時の**二酸化炭素の排出がない**

安全の確保を前提とした導入

U-235 : 天然に0.72%含 (核分裂し易いウラン)

残りのウラン U-238 (核分裂しにくい)

高速増殖炉実用化 (U-238 を Pu-239)

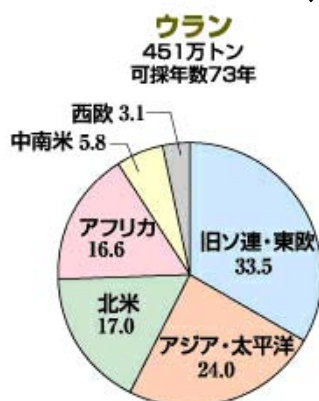
採可年数は **約60倍 (4000年)** となる。

海水からのウラン回収

(可採年数は、約2万年)

海水中のウラン、約3ppb (1トン当たり3mg)

現在、日本で必要な年間6000tの天然ウランを得るには、2000立方キロメートルの海水が必要。



(1995) 「OECD/NEA/IAEA」より

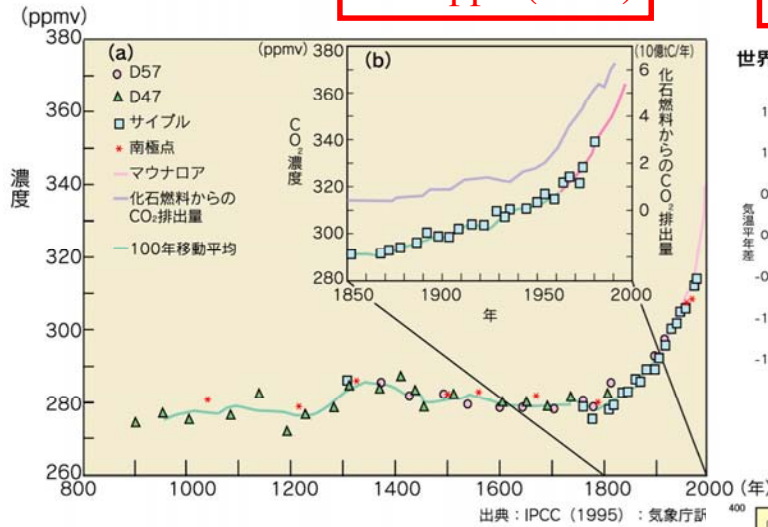
8

大気中のCO₂濃度上昇

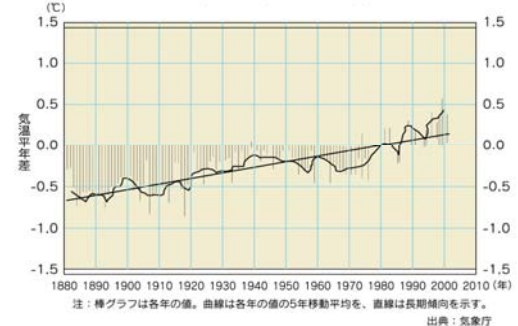
二酸化炭素の濃度の推移

385.2ppm(2009)

20世紀に平均気温0.6℃上昇

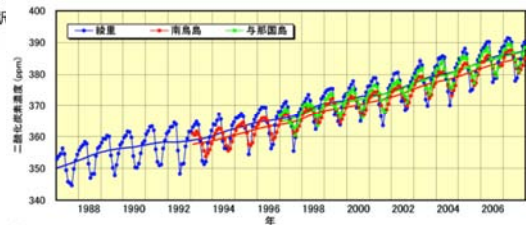


世界の年平均地上気温の年差の経年変化 (1880年～2001年)

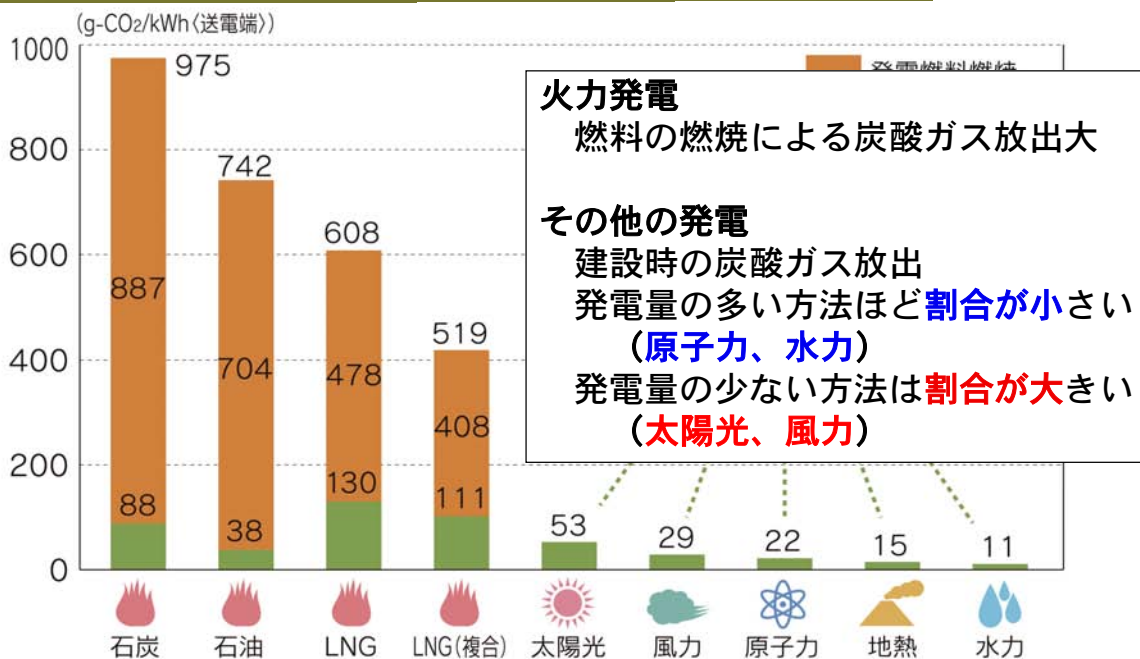


この20年で35ppm増加

大船渡市綾里389.7ppm(2009)

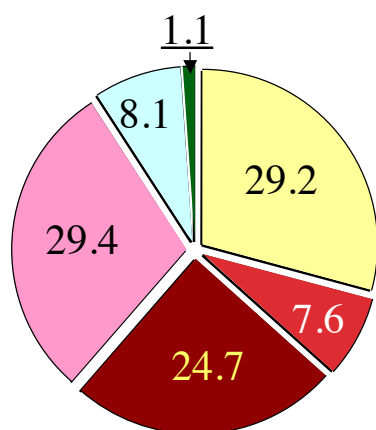


各電源の炭酸ガス放出



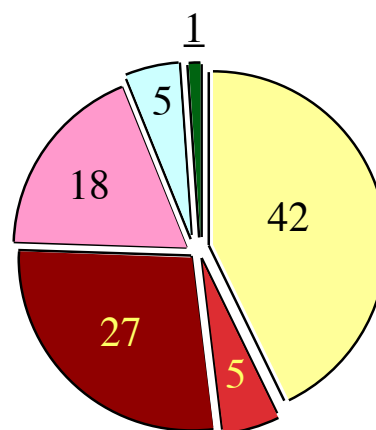
日本のエネルギー電力使用量

2009年度全国
964.2TWh



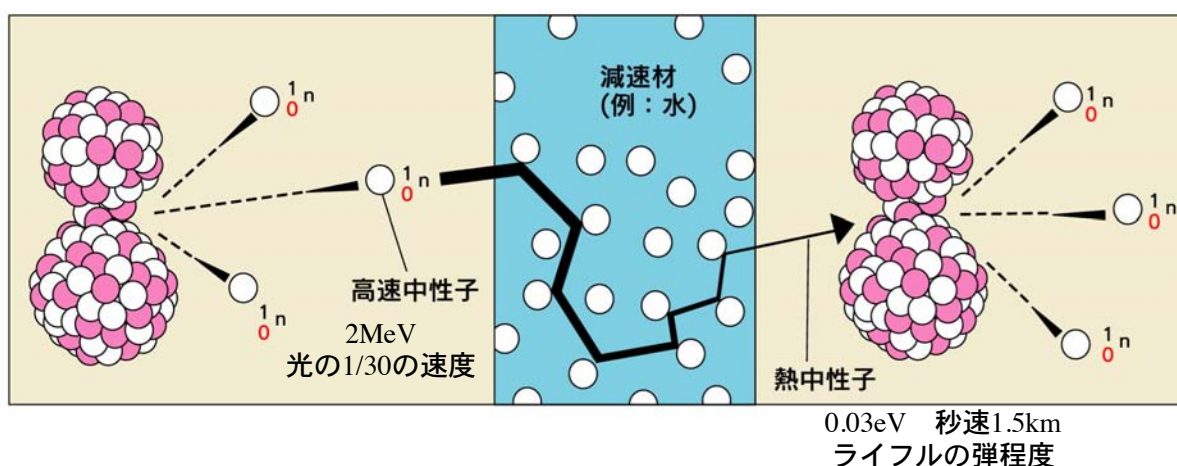
化石燃料62%

2009年度九州
83.4TWh



化石燃料50%
11

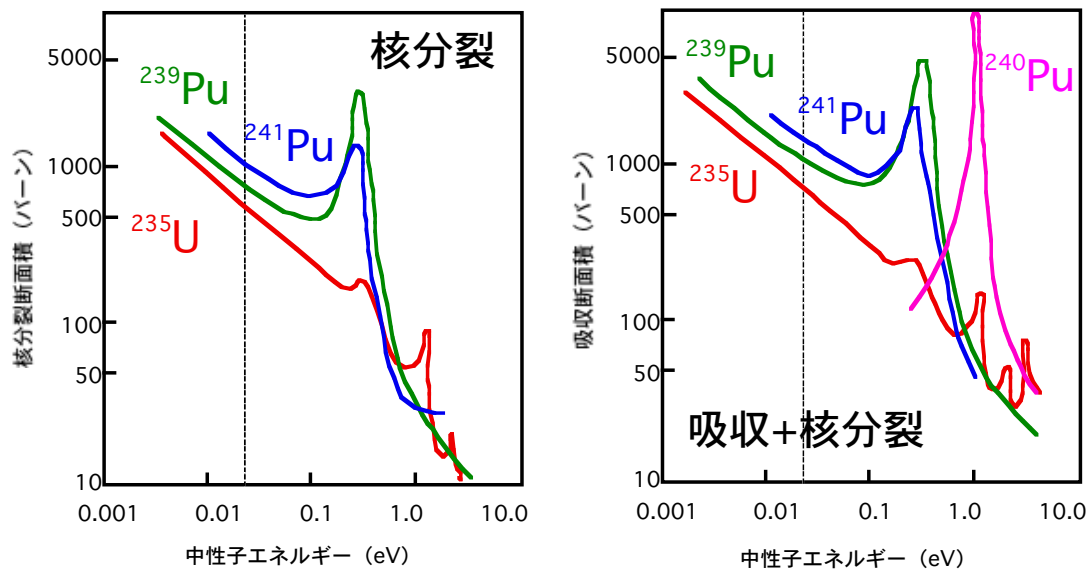
核分裂と連鎖反応



軽水炉（PWR, BWR）では減速材を用いる。

核分裂で出てくる中性子は速度が速いが、中性子の速度が遅い程核分裂し易いので、水（軽水）を使って速度を遅くする。

核分裂と連鎖反応 エネルギー依存性

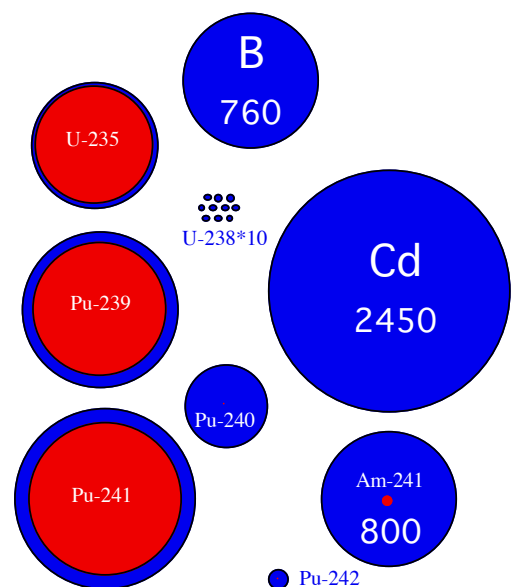


中性子のエネルギーが低い（遅い）ほど
核分裂（吸収）しやすい

13

ウランとプルトニウムの同位体

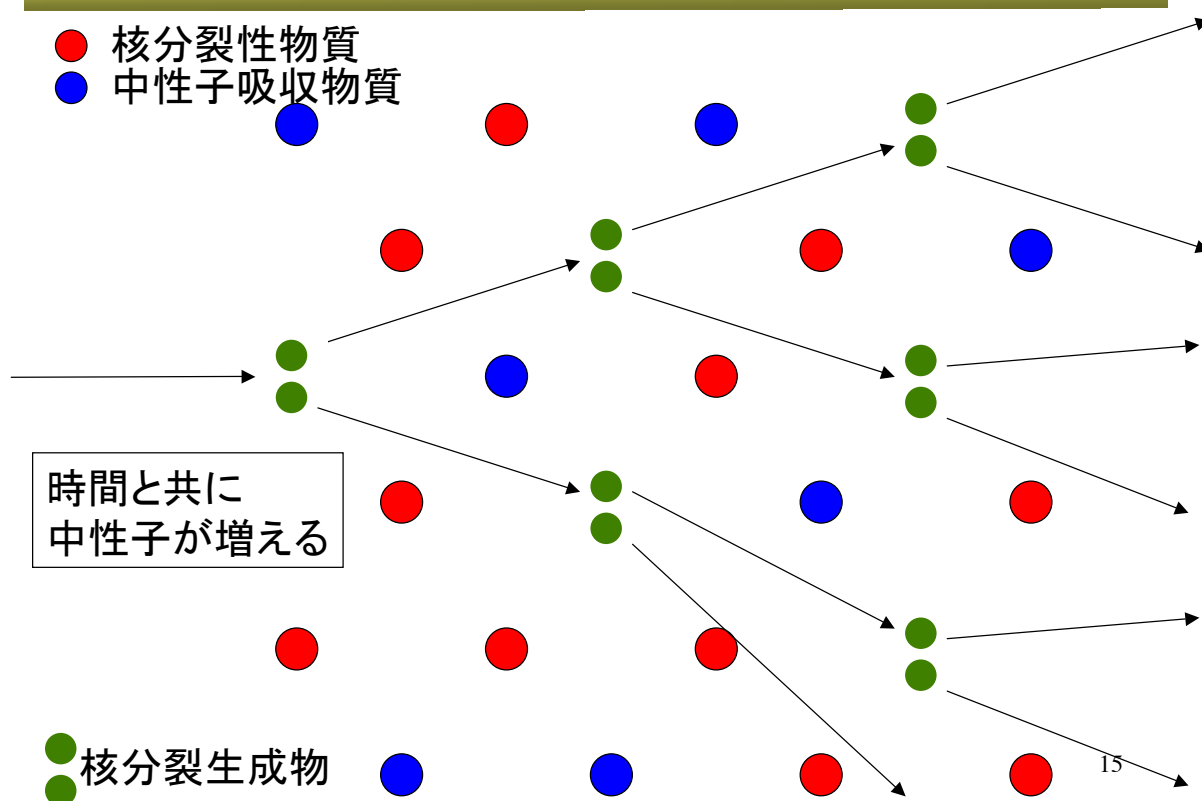
核種	熱中性子吸収断面積 (核分裂断面積) バーン
U-235	680 (577)
U-238	3 (0.0005)
Pu-239	1017 (741)
Pu-240	289 (0.08)
Pu-241	1378 (950)
Pu-242	19 (0.2)



14

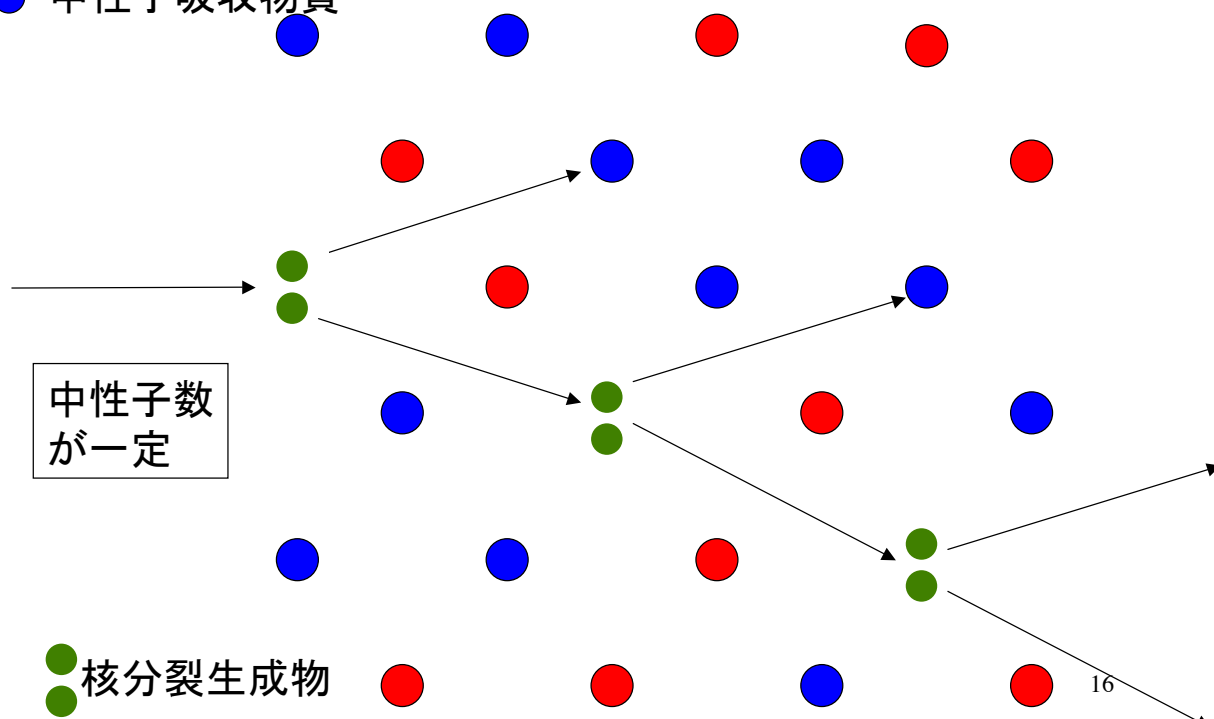
核分裂と連鎖反応（超臨界）

- 核分裂性物質
- 中性子吸収物質



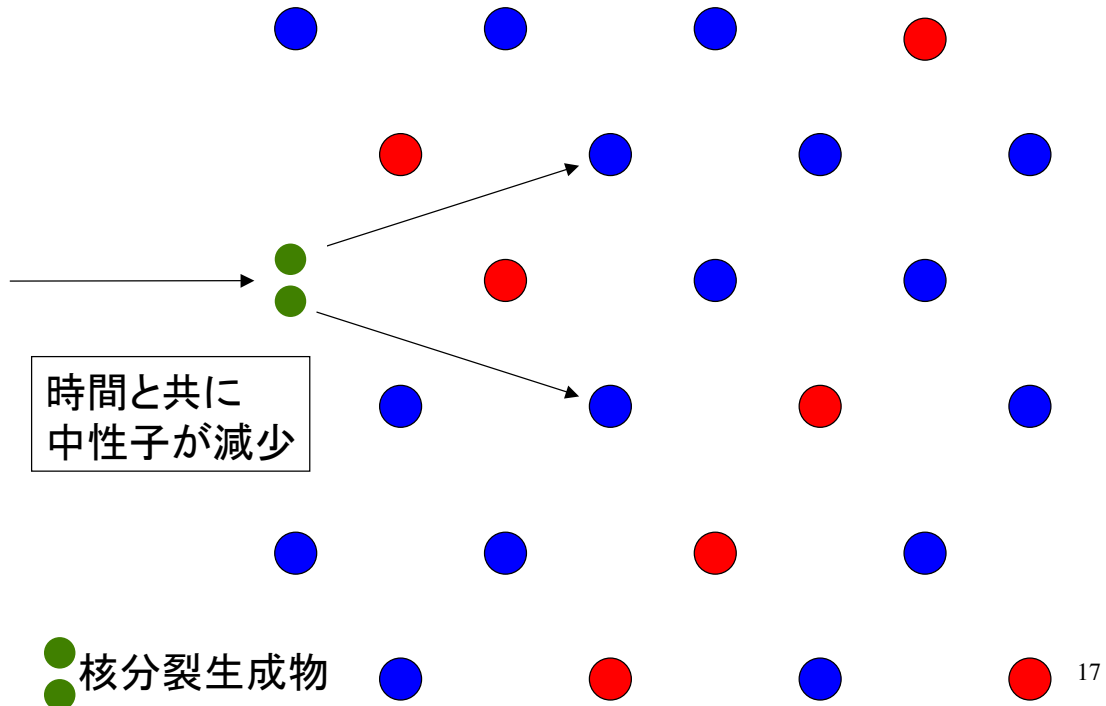
核分裂と連鎖反応（臨界）

- 核分裂性物質
- 中性子吸収物質

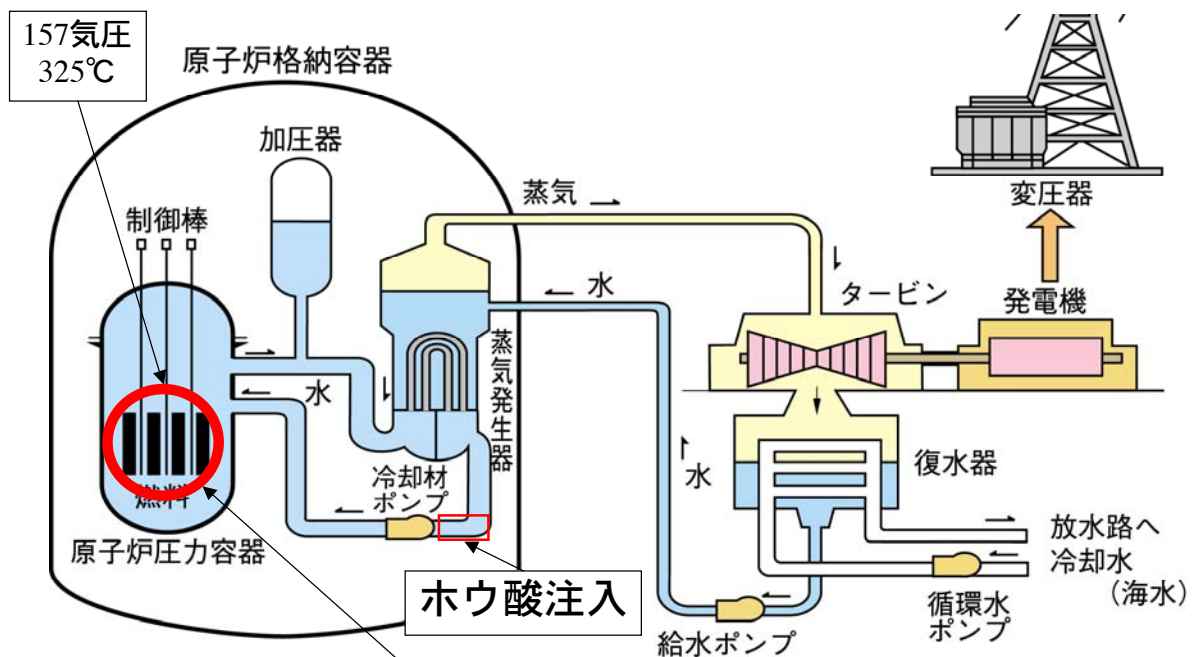


核分裂と連鎖反応（未臨界）

- 核分裂性物質
- 中性子吸収物質



原子炉の構造



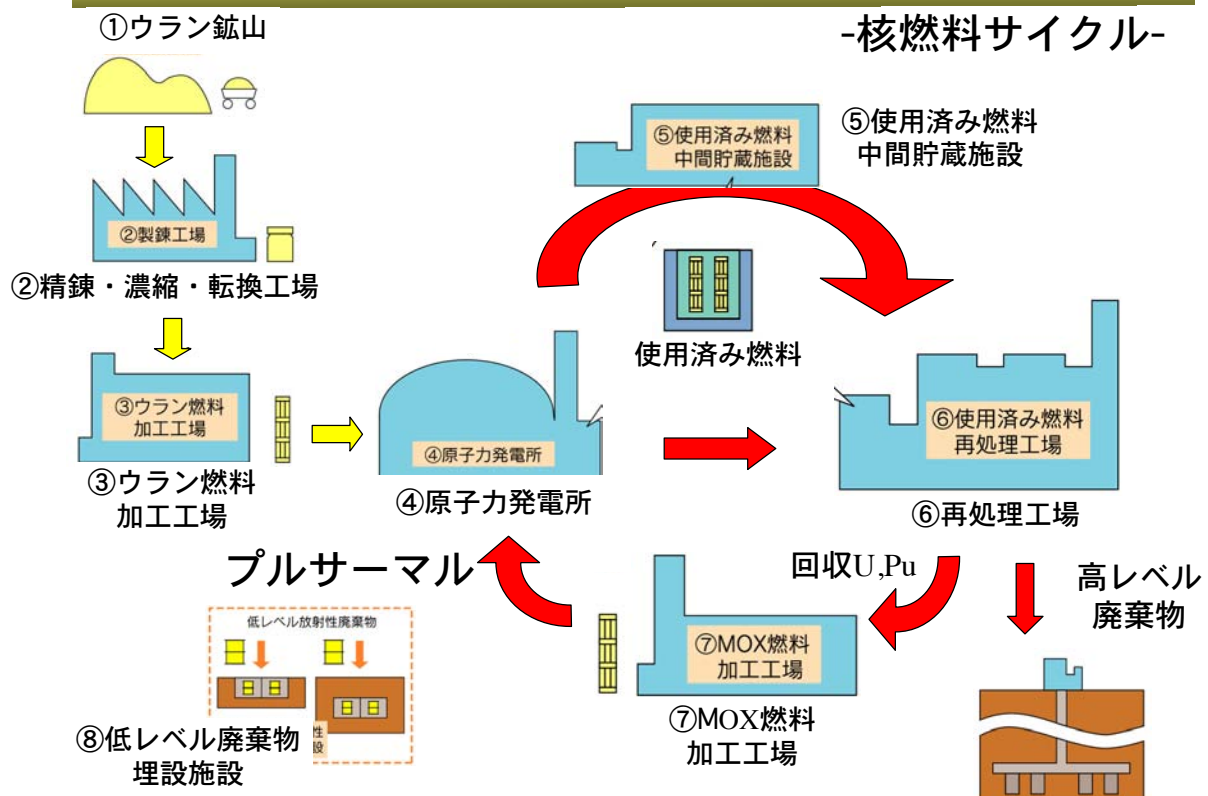
MOX燃料集合体を適切に配置
玄海3号 193体中MOX48体（現時点36体）

核分裂と連鎖反応（まとめ）

- 重さが奇数の核種が核分裂し易い。
- 中性子スピードが遅い程核分裂しやすい（減速材）
- 連鎖反応
 - 超臨界（中性子の数が増えていく）
自動車で言うと、アクセルを踏んだ状態
 - 臨界（中性子の数が変化しない）
自動車で言うと、定速度運転（速度によらない）
 - 未臨界（中性子の数が減っていく）
自動車で言うと、ブレーキを踏んだ状態

19

核燃料サイクル



プルトニウムの生成

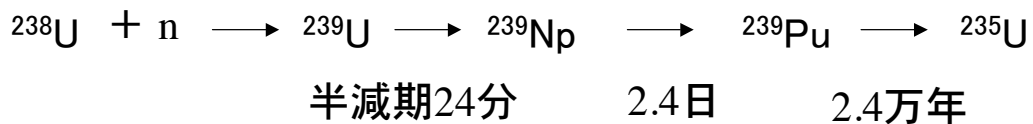
^{235}U : 核分裂しやすい 0.72% (天然存在比)

^{238}U : 核分裂しにくい 99.3%

原子炉で使用の際は ^{235}U を3~5%に同位体濃縮

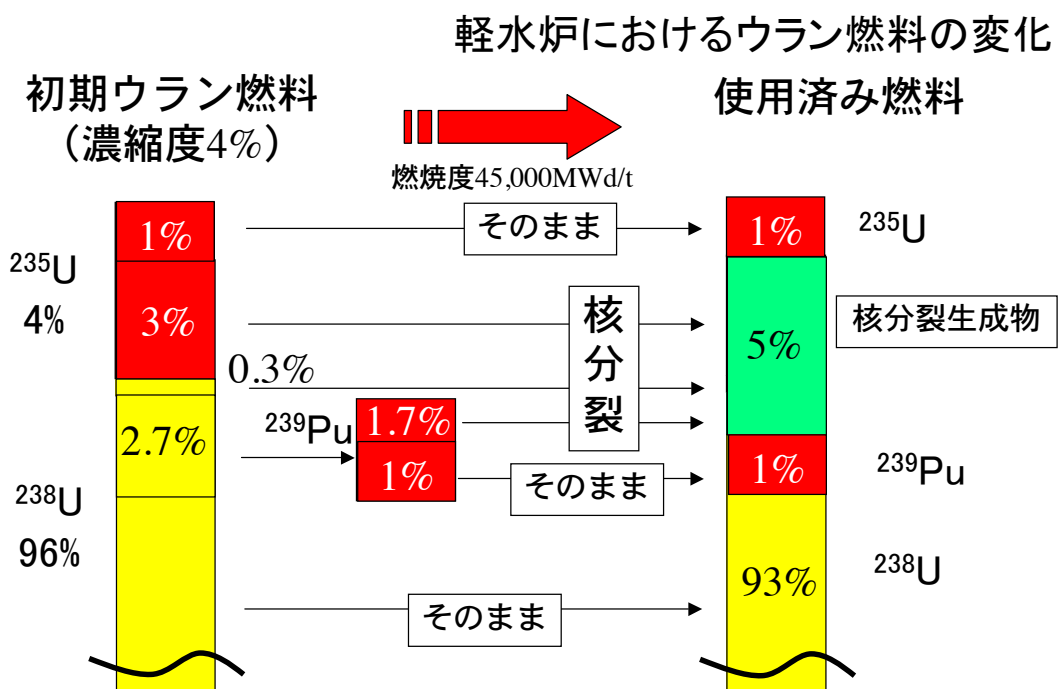
大多数の ^{238}U は無駄?

^{238}U を核分裂する ^{239}Pu に変換



21

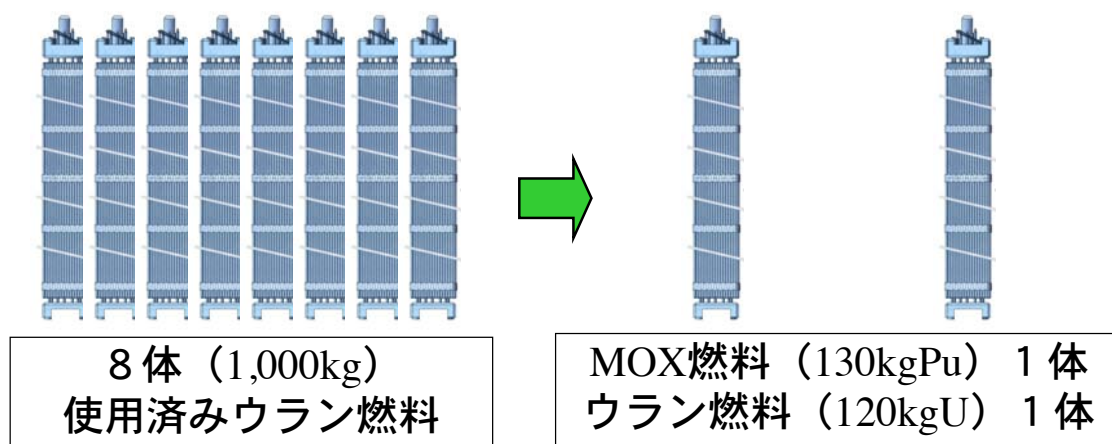
軽水炉におけるウラン燃料の変化



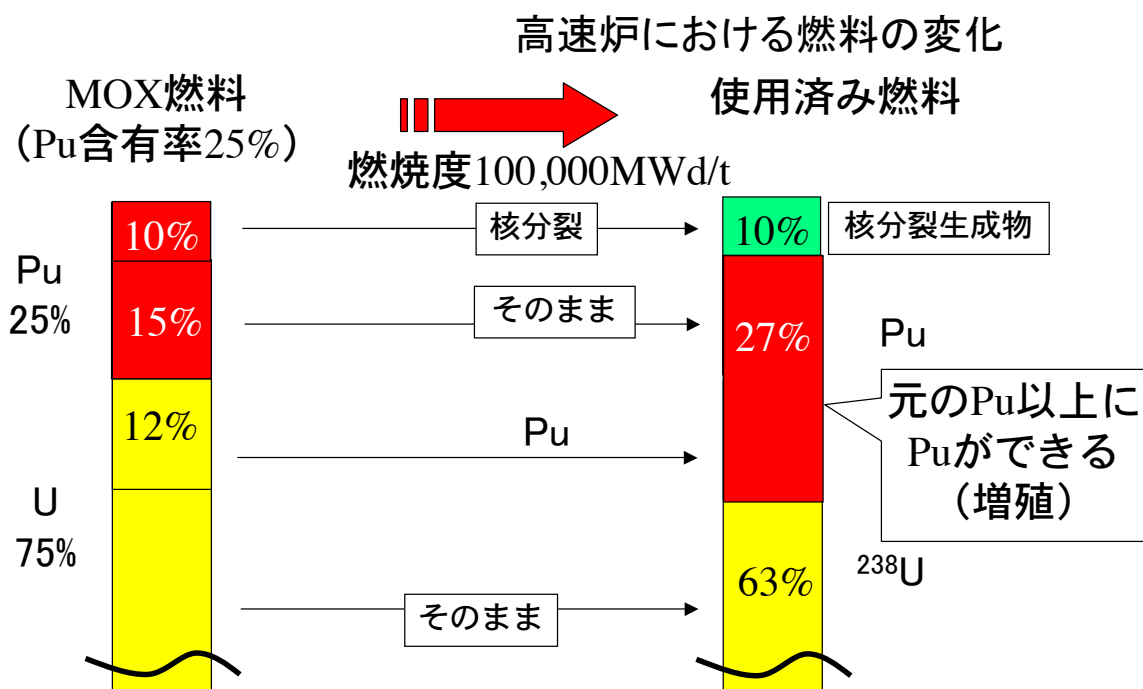
22

プルサーマルによる使用済み燃料の資源化

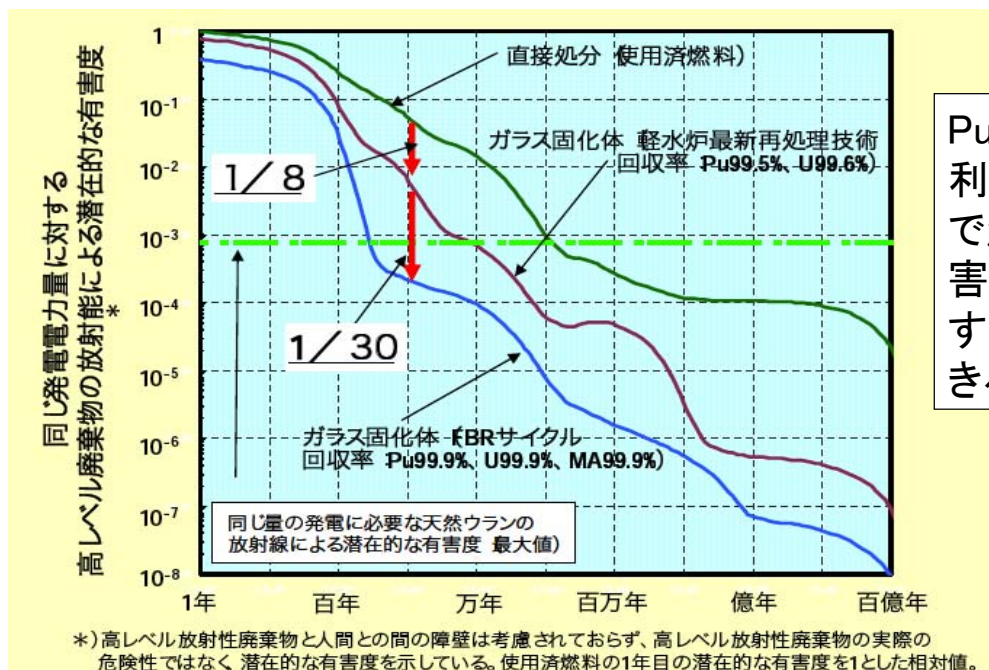
- ・ プルトニウムを使用するにあたって、ウラン燃料と大きく異なることはありません。
- ・ 積極的に使用することによって、エネルギー資源を有効に利用することができます。



高速炉における燃料の変化



高速炉を使用した場合の廃棄物の低減

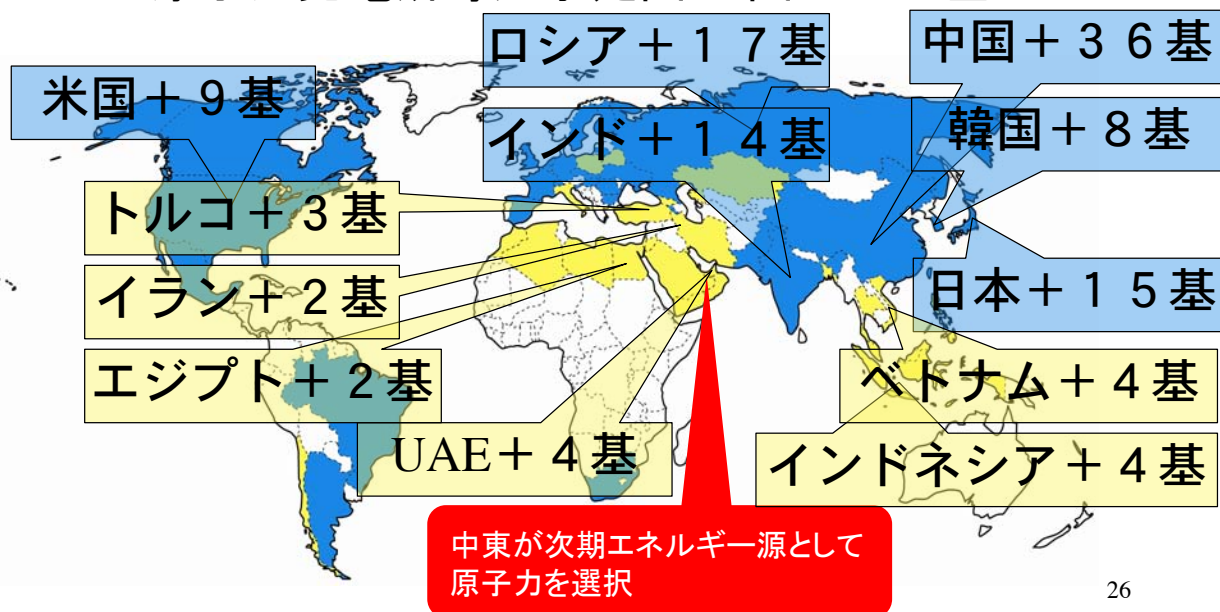


25

世界の原子力発電所新設計画

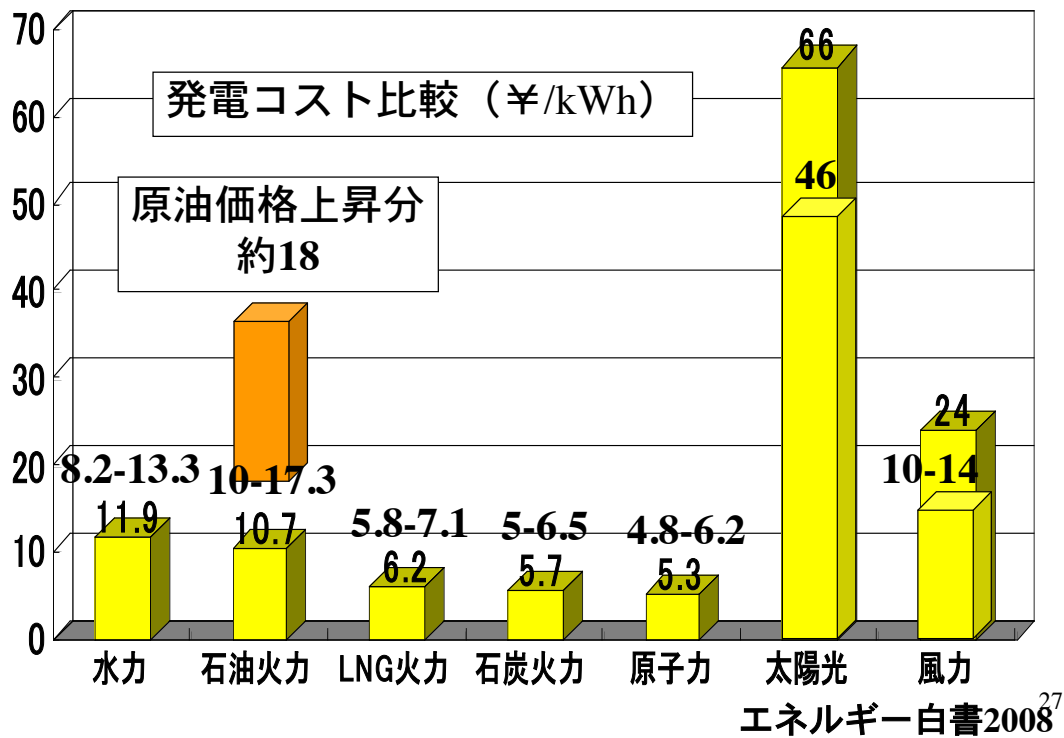
■ 原子力発電所既導入国: 30国 **432基 + 54基**

■ 原子力発電所導入予定国: 8国 **+ 20基**



26

発電コスト比較



原子力の利点・欠点

【利点】

- ・エネルギー密度が高い(貯蔵、輸送負担少)
- ・発電時にCO₂を出さない
- ・発電コストが低い
- ・高速炉が実用化されれば
1000年単位のエネルギー源となる

【欠点】

放射能を有する

- ・運転時の安全性(災害対策:特に電源)
- ・廃棄物処理/処分(これからの課題)

核兵器への転用の怖れがある

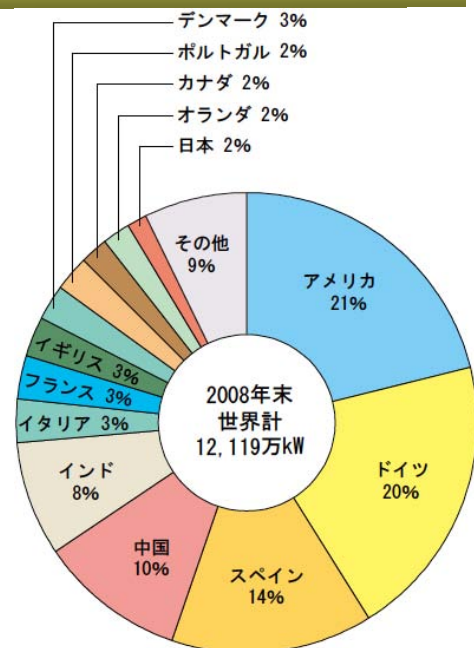
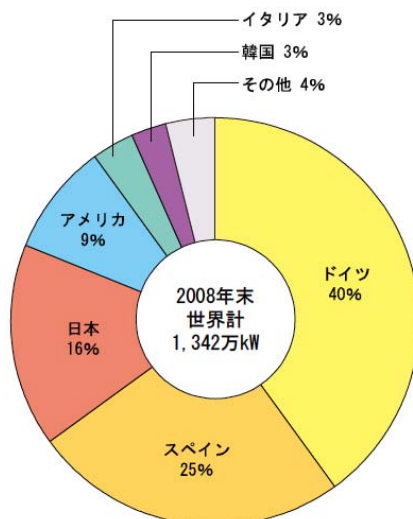
自然エネルギー

29

新エネルギーの実力

太陽光発電

ドイツ540万kW、スペイン340万kW
日本214万kW(世界 3 位)
日本の全エネルギー消費の**0.3%以下**

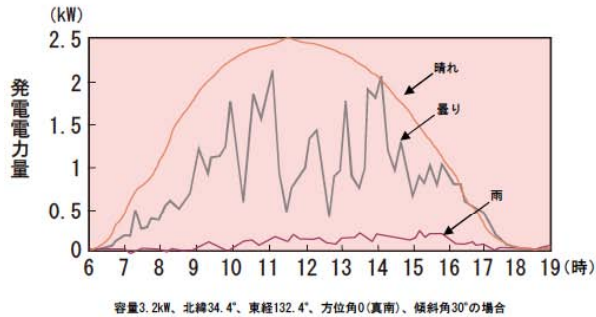


風力発電

日本188万kW(世界 1 3 位)
日本の全エネルギー消費の**0.3%程度**

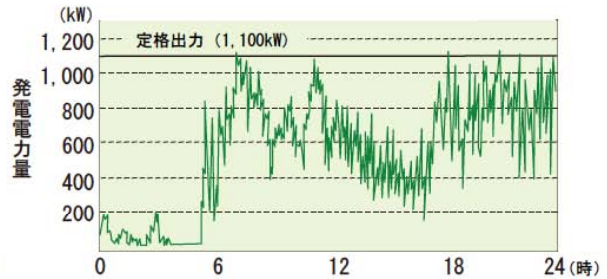
新エネルギーの実力

太陽光発電の出力変動（春季）



太陽光発電は
時間と天気で
発電量が変わる

風力発電の出力変動（冬季）



風力発電は
風の強さで
発電量が変わる

31

新エネルギーの実力

100万kWの発電所 太陽光 58 km² エネ庁→14 km²
風力だと3.5倍の面積が必要 214 km² エネ庁→約100 km²

日本の年間電力使用量 約1兆kWh
これを、自然エネルギーで賄うためには

【太陽光発電の場合】

$1,000,000,000,000 \text{ kWh} \div (1,000,000 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ d} \times 0.12) \times 14 \text{ km}^2$
= 13,300 km² (国土の約3.5%) (四国：約14,000 km²)

【風力発電の場合】

$1,000,000,000,000 \text{ kWh} \div (1,000,000 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ d} \times 0.3) \times 100 \text{ km}^2$
= 38,000 km² (国土の約10%) (九州：約42,000 km²)

32

新エネルギーの実力

【バイオ燃料】

効率のよいバイオ生産法でもガソリン相当 1kL/ha の生産量
国内年間ガソリン需要 4500万kL ÷ 1kL/ha = 4500万ha
= 450,000 km² (国土の約1.2倍)

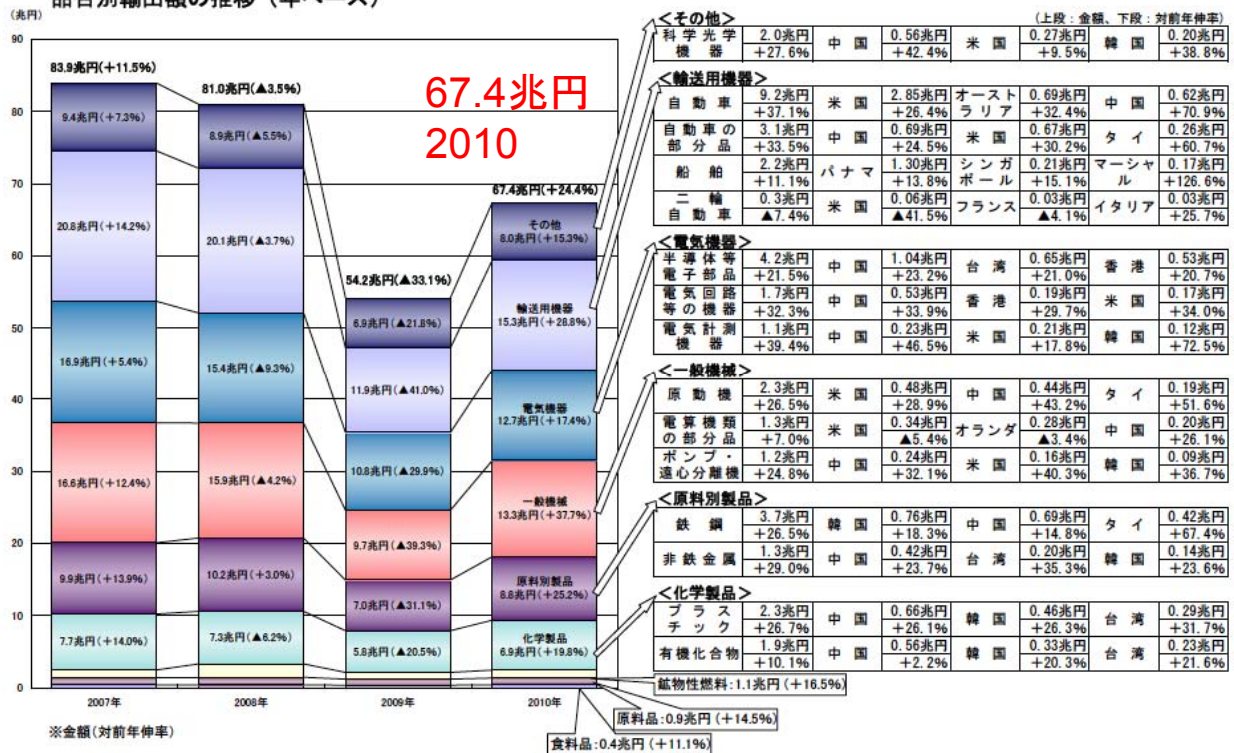
新エネルギーの役割

- ・ 化石エネルギーの消費を抑える
- ・ 地産地消のエネルギー

33

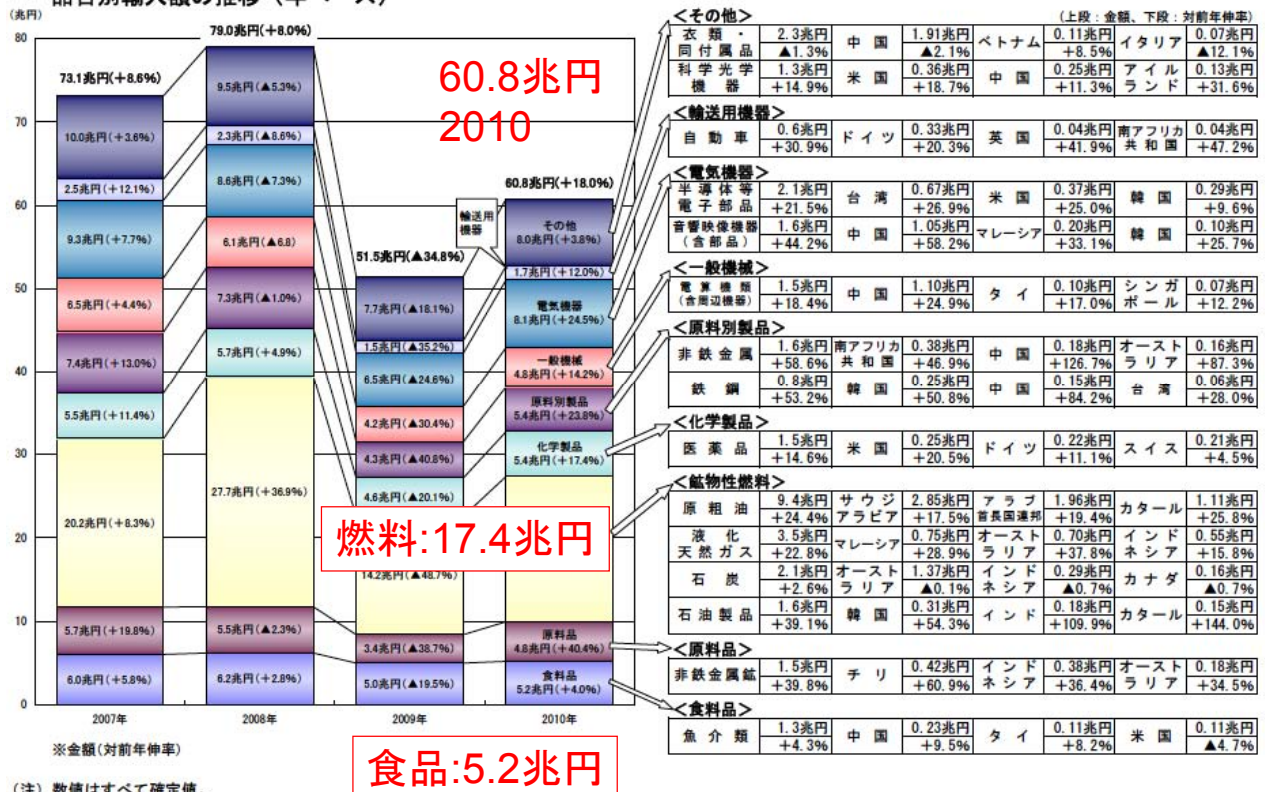
日本経済について（輸出）

品目別輸出額の推移（年ベース）



日本経済について（輸入）

品目別輸入額の推移（年ベース）



バックエンド
-主に廃棄物処分-

一般廃棄物と放射性廃棄物の比較

	一般廃棄物	放射性廃棄物
年間発生量 H18統計	4905万 t 一人当たり400kg 焼却77.7%, 資源化19.6% 最終処分 681万 t 産廃 4.185億 t 最終処分 2180万 t	使用済み燃料 1,200 t 高レベル廃棄物 1,200本相当 (放射能全体の99%) ガラス固化体 低レベル廃棄物 32,000ドラム セメント固化体等
特徴	無くならない 化学的毒性	放射線を出す 時間と共に減少する
処分法	管理型 (浸出液の分析) 安定型 (埋め立て) 遮蔽型 (隔離する)	高レベル (深部地下) 低レベル (地表付近) 廃棄物は固化される 適切な障壁を多重に設ける

37

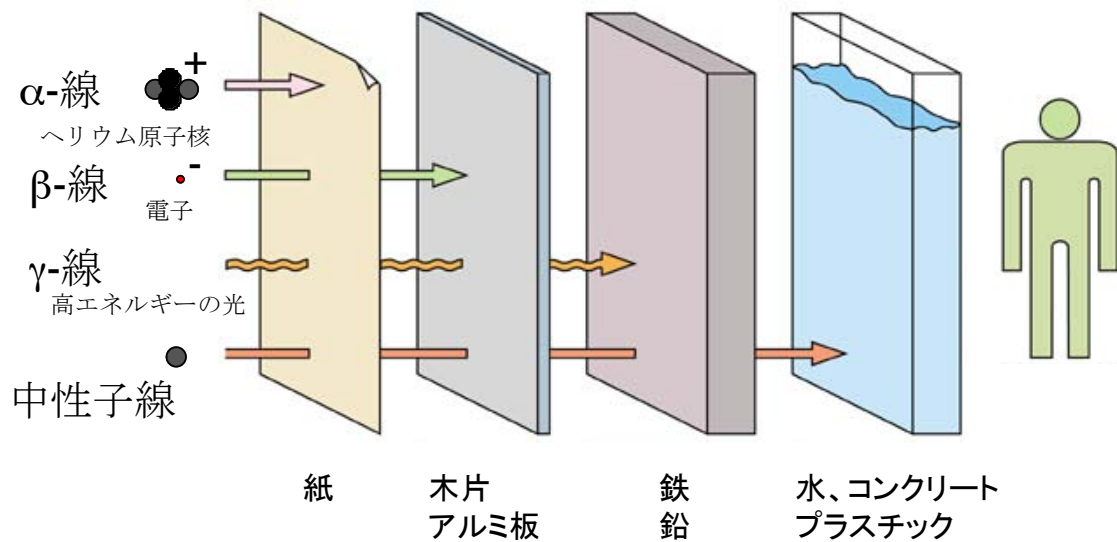
被ばくについて

38

放射能とは何か？

放射能とは放射線を出す能力

- ・ 放射性物質から出る放射線には3種類ある。
- ・ 中性子線は核分裂や核融合のような核反応によって発生する。



39

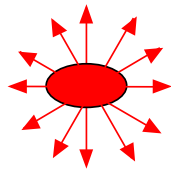
霧箱 α 線が見える



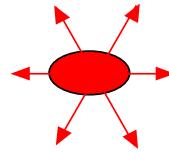
40

放射能と被ばく

放射能（単位：Bq, dps） dps : disintegration per second



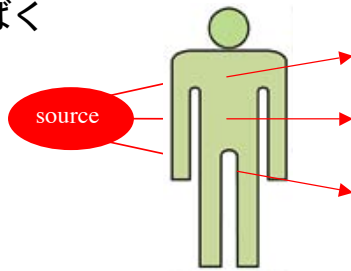
高放射能



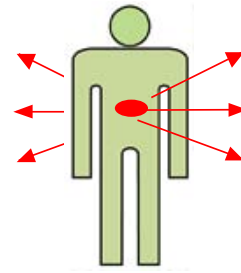
低放射能

被曝線量（単位：mSv, μ Sv）年間被ばく線量 = 1~2mSv = 1000~2000 μ Sv

外部被ばく



内部被ばく



→ α 遮へい 容易
→ β, γ 遮へい 困難

エネルギー付与 大
エネルギー付与 小

41

被ばくと放射線障害

身体的影響

・早期の影響

脱毛、不妊、
発しん、びらん

・晩発的影響

白内障、がん、
白血病

遺伝的影響 未確認
遺伝的障害(死産、奇形)

規制

職業人(100mSv/5年)

一般人(1mSv/年)

医療被ばくを除く

局部被ばく

皮膚:急性潰瘍

皮膚:赤い発疹

水晶体:白内障

生殖腺:永久不妊

皮膚:脱毛

水晶体:混濁



全身:100%死亡

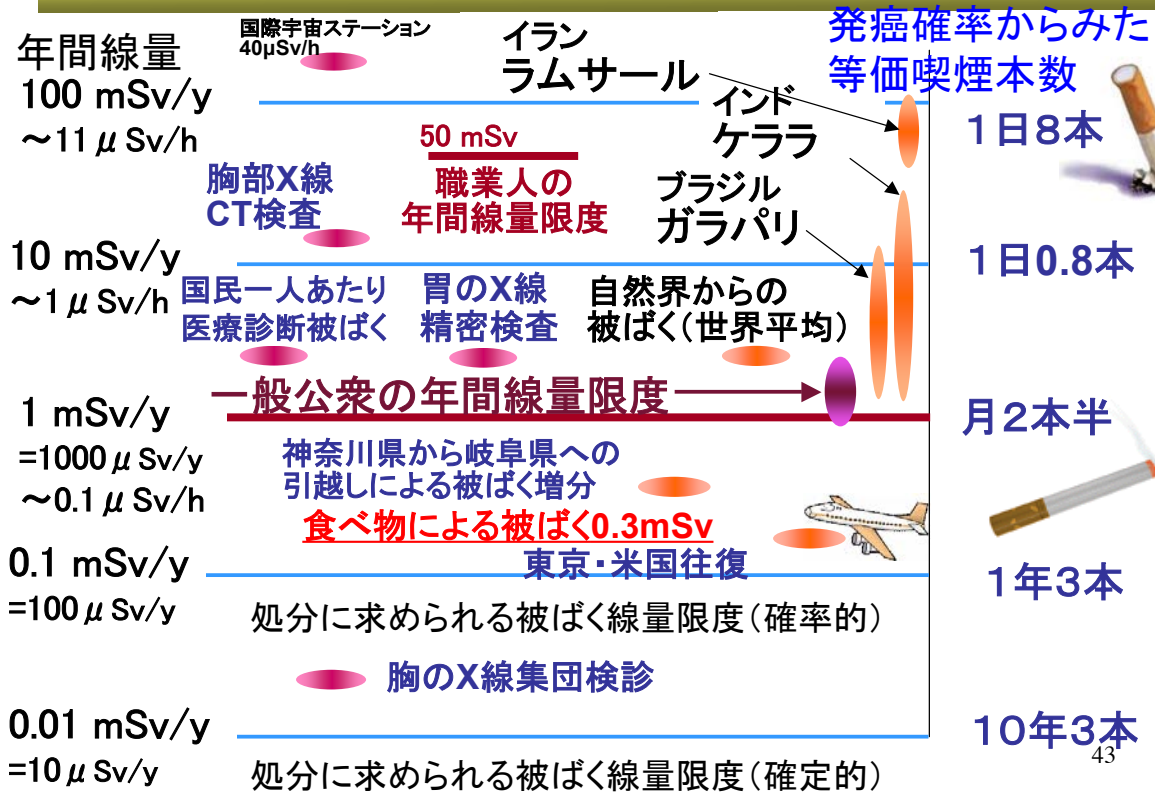
全身:50%死亡

全身:はきけ、倦怠感

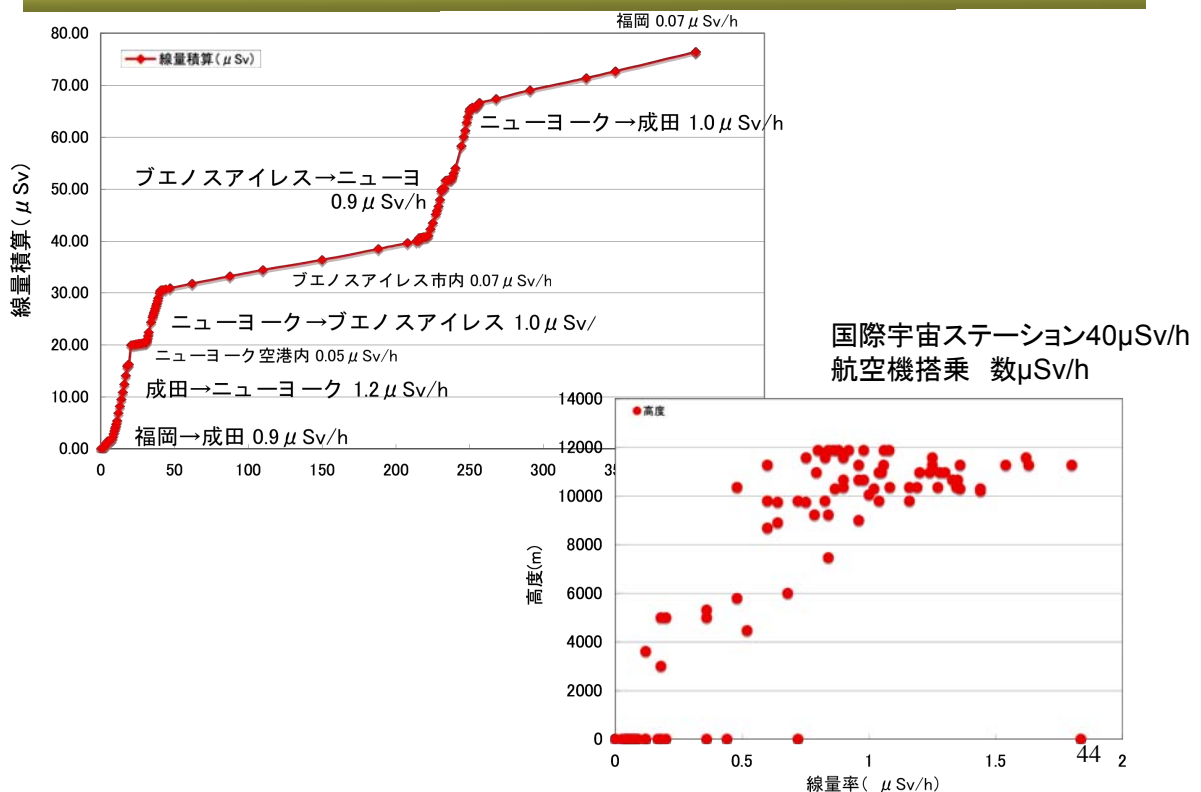
全身:白血球減少

全身:症状確認されず

いろいろな放射線被ばく



航空機搭乗による被ばく



原乳、水、食品の暫定基準とその摂取による被ばく

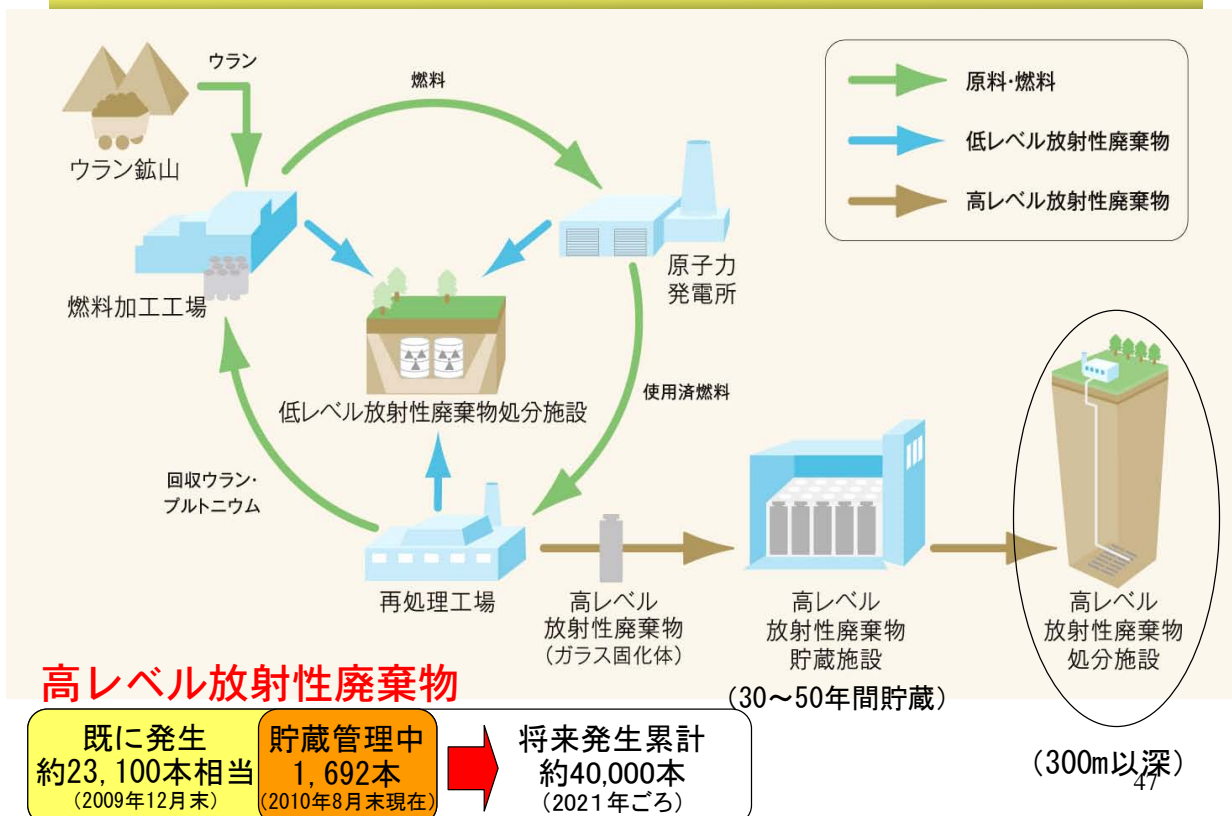
	^{131}I	^{137}Cs	^{40}K (天然) 参考
原乳／水	300 (100) Bq/kg 乳幼児・妊婦 6.6 $\mu\text{Sv/kg}$	200Bq/kg 2.6 $\mu\text{Sv/kg}$	50Bq/kg 0.31 $\mu\text{Sv/kg}$
食品	2,000Bq/kg 44 $\mu\text{Sv/kg}$	500Bq/kg 6.5 $\mu\text{Sv/kg}$	200Bq/kg 1.2 $\mu\text{Sv/kg}$

45

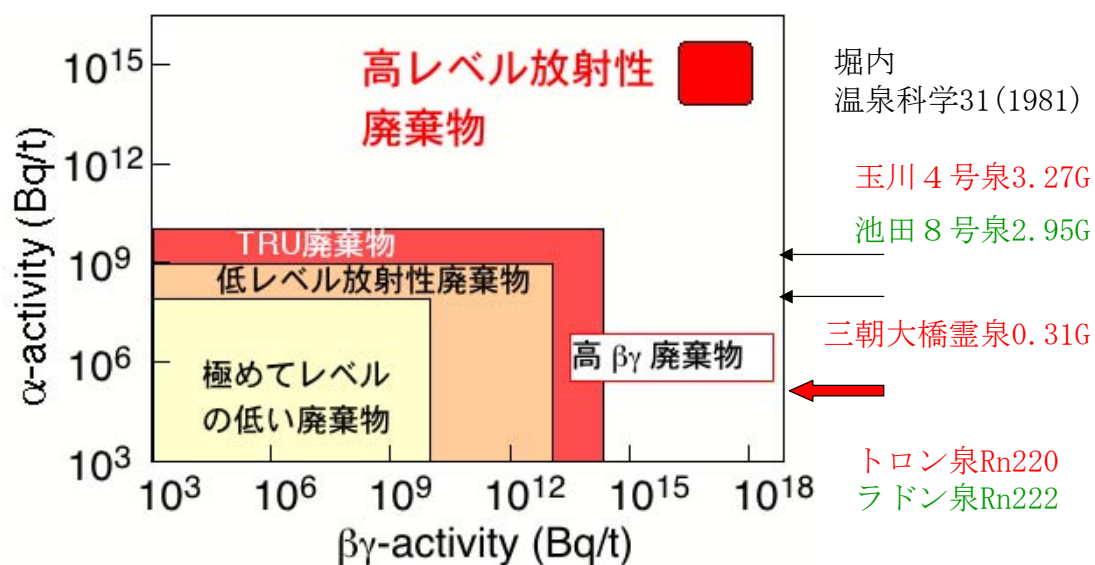
放射性廃棄物の処分

46

放射性廃棄物はどこで発生し処分される？



放射能濃度による分類



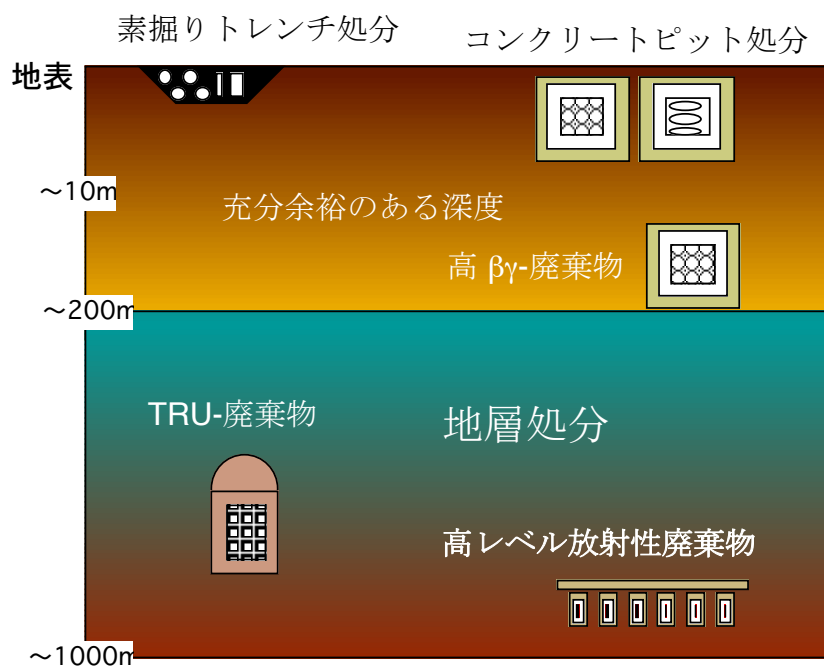
ウラン: クラーク数 4ppm 4g/t $\sim 50\text{kBq/t}$
トリウム: 同 12ppm 12g/t $\sim 50\text{kBq/t}$

放射性廃棄物はどのように処分されるか

種類	処理	処分
高レベル廃棄物	ガラス固化	地層処分
TRU廃棄物	減容・固化	地層処分
高 $\beta\gamma$ 廃棄物	減容・固化	充分余裕のある深度への処分
低レベル廃棄物	減容・固化	コンクリートピット処分（青森）
極めて濃度の低い廃棄物	減容・固化	素堀トレンチ処分
規制除外 クリアランス	再利用・減容	産廃と同様

49

放射性廃棄物処分の考え方



50

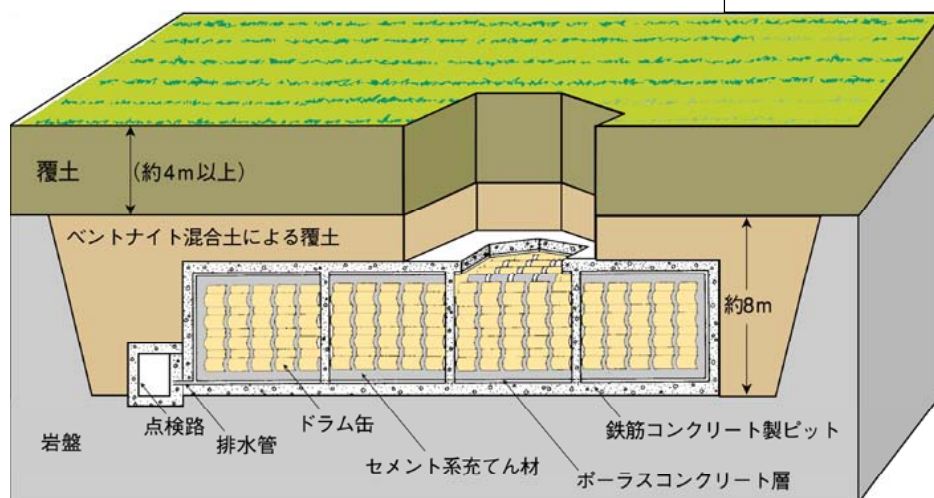
低レベル放射性廃棄物

51

処分概念(低レベル)

低レベル放射性廃棄物埋設
センター(青森県六ヶ所村)

Pit No.1 145,587drums
Pit No.2 92,016drums
2011年9月末現在



出典：原子力安全白書 平成11年版

15-30 年間点検

300年間管理

52

TRU廃棄物

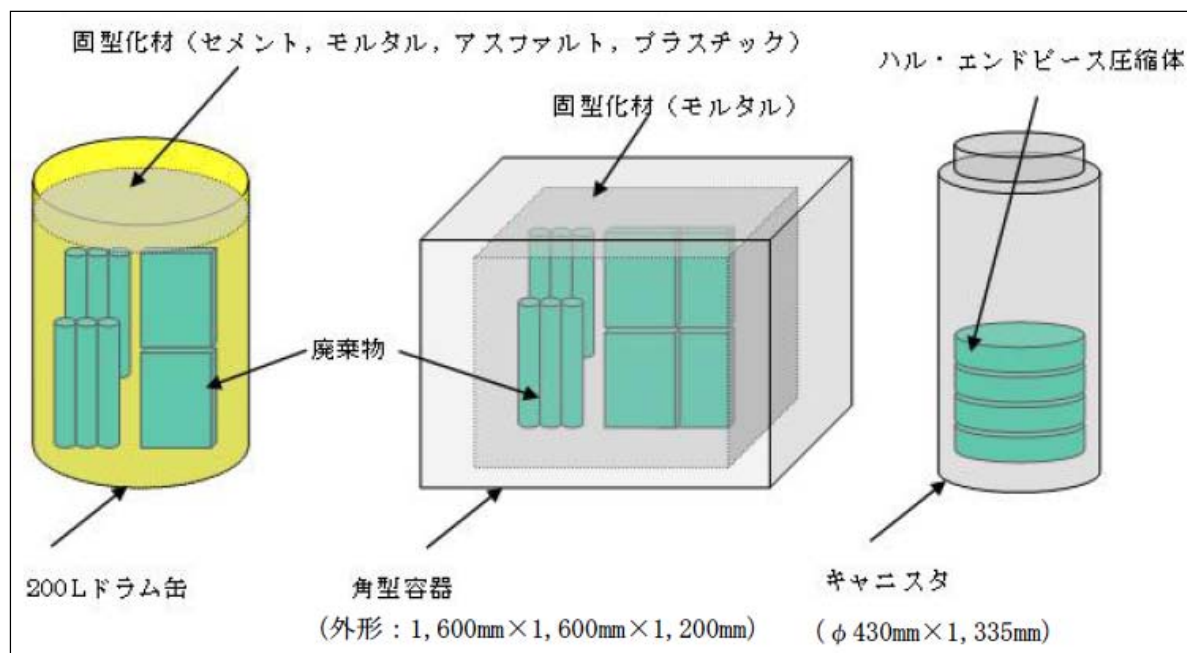
53

TRU廃棄物とは 一廃棄物の例一

- CB（チャンネルボックス）（発熱）
- BP（バーナブルポイズン：制御棒等）（発熱）
- 低レベル濃縮廃液（ヨウ素、C-14、硝酸塩）
- 廃溶媒
- 廃樹脂（イオン交換樹脂）
- 廃銀吸着剤（AgI）（ヨウ素）
- ハル・エンドピース（発熱：C-14）
- 廃活性炭
- スラッジ・・・

54

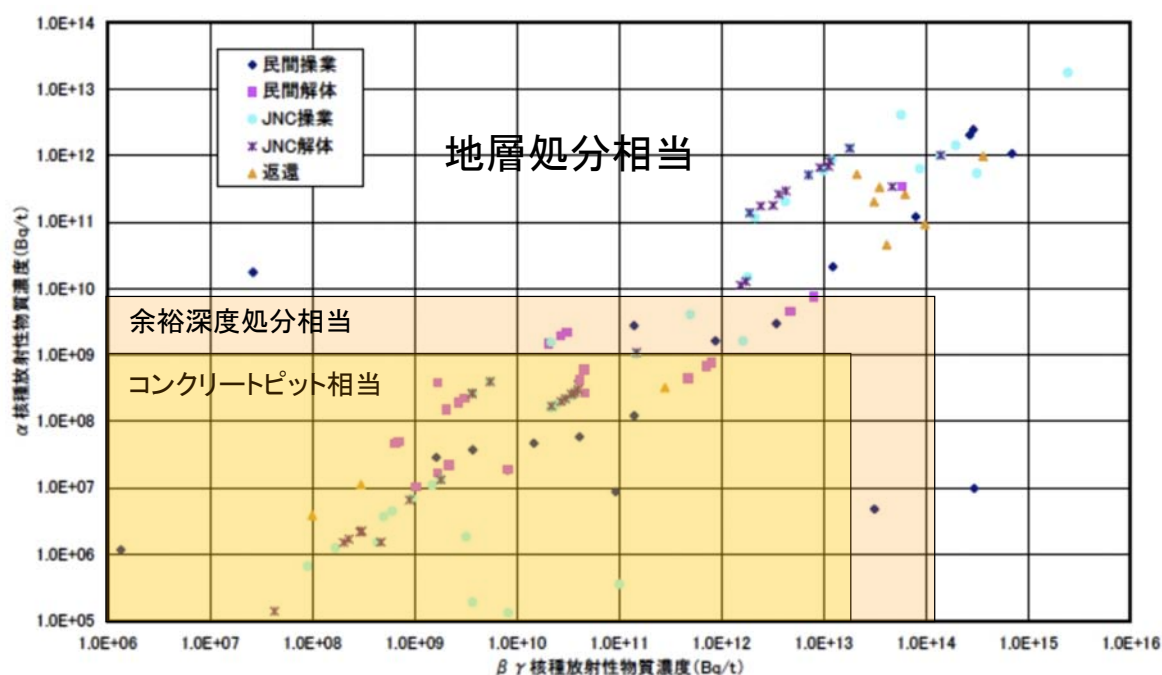
TRU廃棄物 ー形状ー



+500Lドラム缶

55

TRU廃棄物 ー含有放射能ー



TRU廃棄物 ー放射性核種ー

- 核分裂生成物

Cs-134(2), Cs-137(30), Sr-90(28.8),

Tc-99(210k), **I-129(16M)**

- TRU (中性子吸収)

Np-237(2.1M), Np-239(8d)

Pu-239(24k), Pu-240(6.6k), Pu-242(373k)

Pu-241(14.4), Am-241(432), Am-243(7.37k)

Cm-242(163d), Cm-244(18.1)

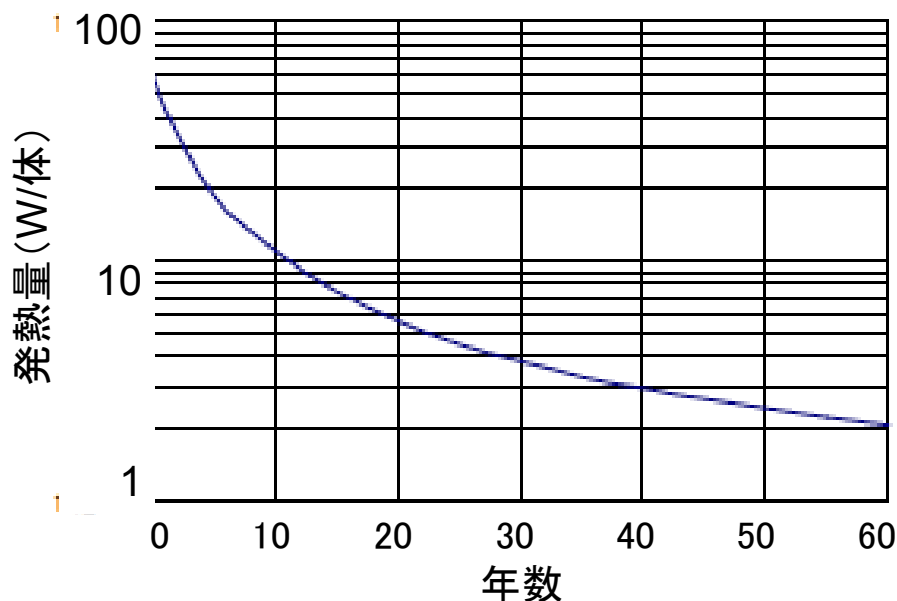
- 放射化物

C-14(5.7k), Co-60(5.2), Ni-63(100)

* ()内半減期 単位:年 k:1000、M:1000000 d:日

57

ハル・エンドピースの発熱



58

TRU廃棄物処分の留意点

- セメント変質
- アルカリと緩衝材および岩石との反応
- 硝酸塩の影響
- ガス発生

表面線量評価

	HLW	TRU廃棄物
γ 線	～30	～40,000
中性子線	～0.4	～0.5

Gy/y
 HLW:50年貯蔵、オーバーパック19cm
 オーバーパック表面
 TRU: 25年貯蔵、オーバーパック無し
 緩衝材内側境界

61

高レベル放射性廃棄物

62

高レベル放射性廃棄物とは？

● 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）●

高レベル固化

ガラス

液体状の高レベル放射性廃棄物をガラス原料とともに溶かし合わせて固めたもの

この写真は、実物と同じ寸法で作った模型を断面がわかるようにカットしたものです。



容器（キャニスタ）

- 放射性物質を閉じ込める
- 物理的・化学的に安定
- 地下水に溶け出しにくい

- ・直径:43cm
- ・高さ:134cm
- ・重さ:約500kg

（なお核燃料サイクル開発機構で製造されたものは
・直径:43cm
・高さ:104cm
・重さ:約400kg

（日本原燃パンフレット「海外から返還されるガラス固化体の管理について」）

63

高レベル廃棄物処分の考え方

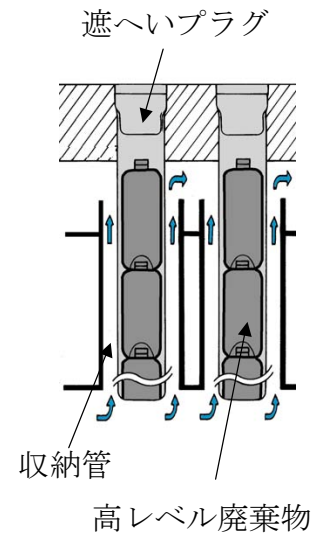
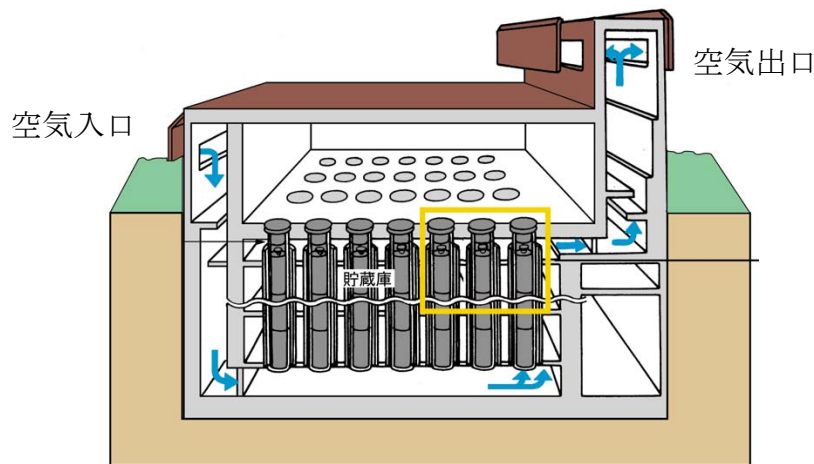
- ・初期発熱は固化体1本あたり約2kW
30～50年で350Wに低下 … 30～50年冷却が必要
地上施設で保管
- ・放射エネルギーは1000年後に約1/1000になる … 処分後1000年間は
完全密封
- ・1000年以後放射能は少しずつ減少 … 固化体が水と接触しても
（半減期の長い核種が多く存在する）放射性物質が漏れにくくする
（緩衝材、岩盤）
地下深部に処分する
- ・多重バリアシステム
廃棄物固化体が壊れないようにする （緩衝材、オーバーパック）
壊れた場合でも放射性物質が漏れにくくする（ガラス固化体、緩衝材）
漏れた放射性物質が動きにくくする （緩衝材、岩盤）

64

高レベル廃棄物処分の貯蔵

受け入れ 1,414本
 収納 1,338本
 2011年9月末現在

高レベル廃棄物固化体貯蔵施設
 (青森県六ヶ所村)



収納管当たり9本の高レベル廃棄物収納
 65

使用済み燃料の貯蔵

キャスクの大きさ :
 直径2.5m、高さ約6m

一体中の使用済み燃料 :
 最大69体貯蔵

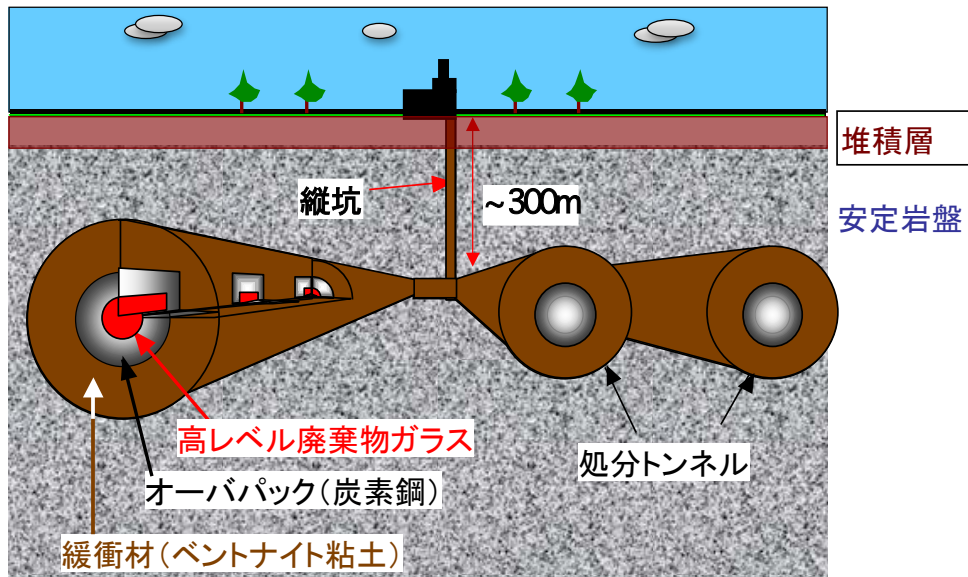
発熱量 : 約20kW

重量 : 125t

建屋内の線量率 : 約
 $5 \mu\text{Sv/h}$ (自然の100倍)



処分概念(高レベル)



多重バリアシステム

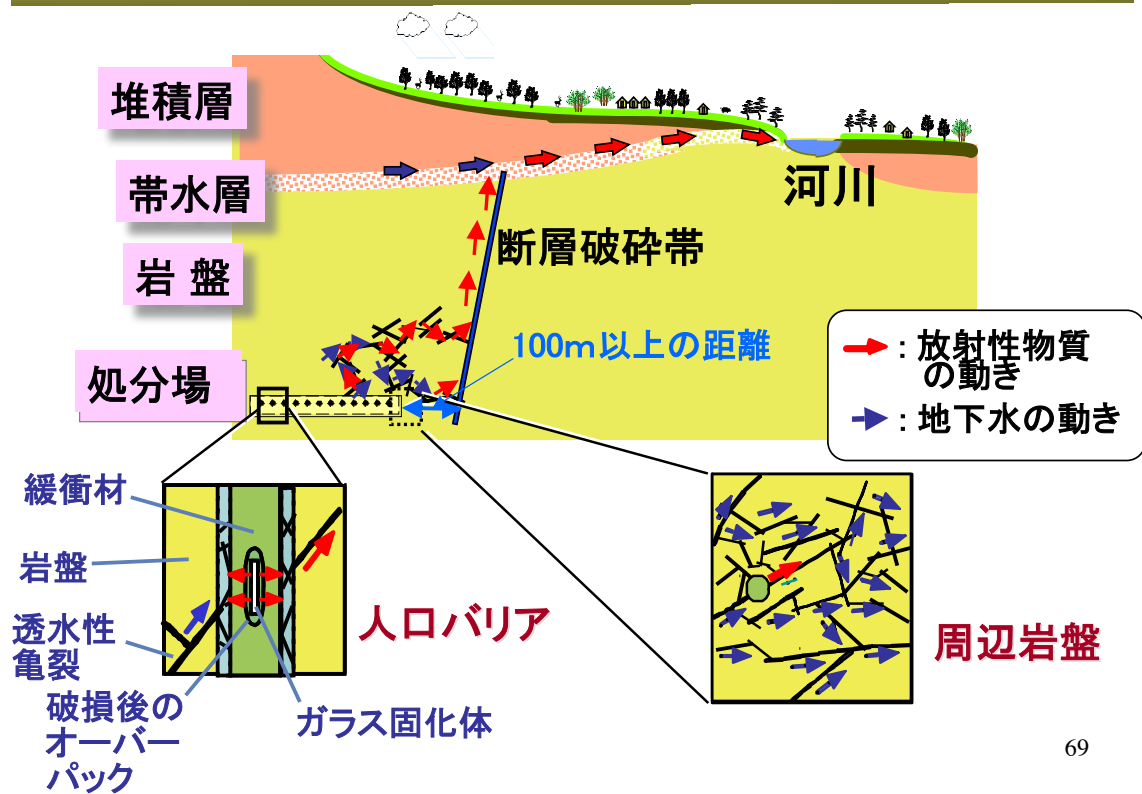
67

なぜ地層処分するのか？

検討された方法 自国で発生した廃棄物は自国内で処分すべき (IAEA)

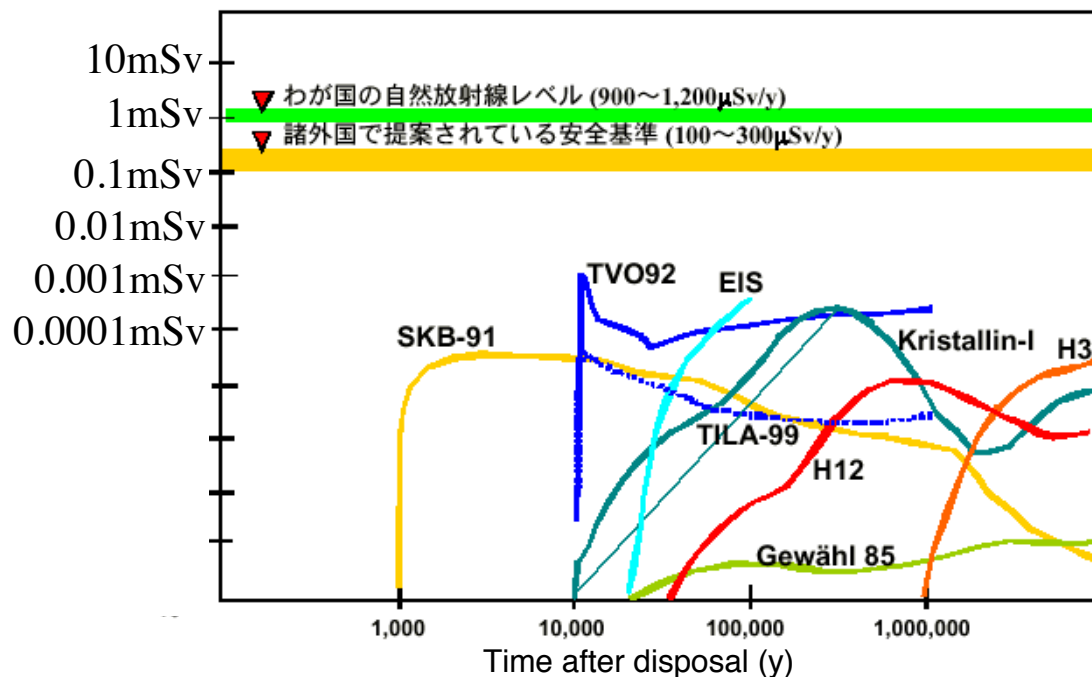
地層処分	宇宙処分	海洋底処分	氷床処分	長期管理
深地層	高コスト	海洋 海洋底	氷床 岩盤	高コスト 将来世代への負担
●地層が本来もっている、物質を閉じ込める能力を巧みに利用。最も問題点が少なく実現可能性がある。	●発射技術の信頼性などに問題がある。	●廃棄物などの海洋投棄を規制しているロンドン条約により禁止。	●南極条約により放射性廃棄物の南極への処分禁止。 ●氷床の特性などが不明確。	●将来世代にまで監視の負担を負わせる。

安全評価の基本シナリオ



69

安全評価の結果



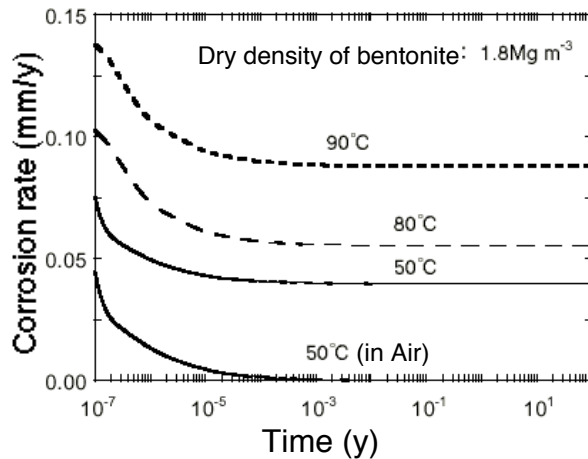
これらの評価にはどれほどの信頼性があるか？
モデルの正しさ、データの正しさ、ナチュラルアナログ

70

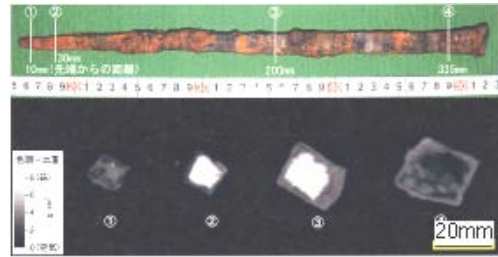
鉄材料の腐食

オーバパック腐食

設計 厚さ 190mm
腐食厚 40mm/1000y



考古学的アナログ

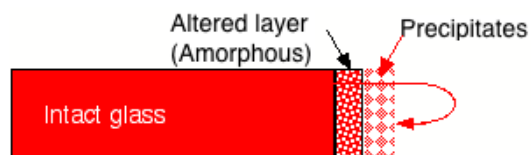
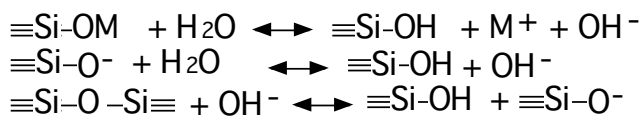


土壤中に750年間埋まっていた釘
(出雲大社)

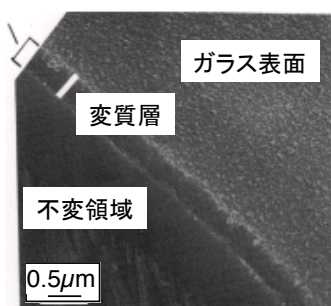


粘土中に750年間埋まっていた斧
(出雲大社)

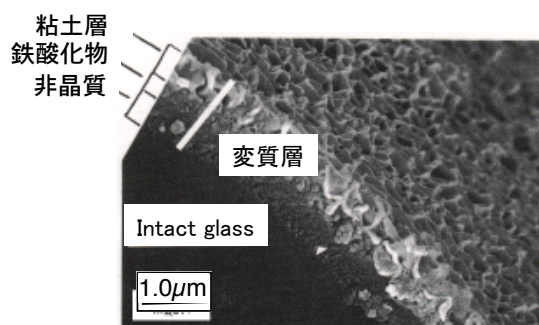
ガラスの溶解



ナチュラルアナログ

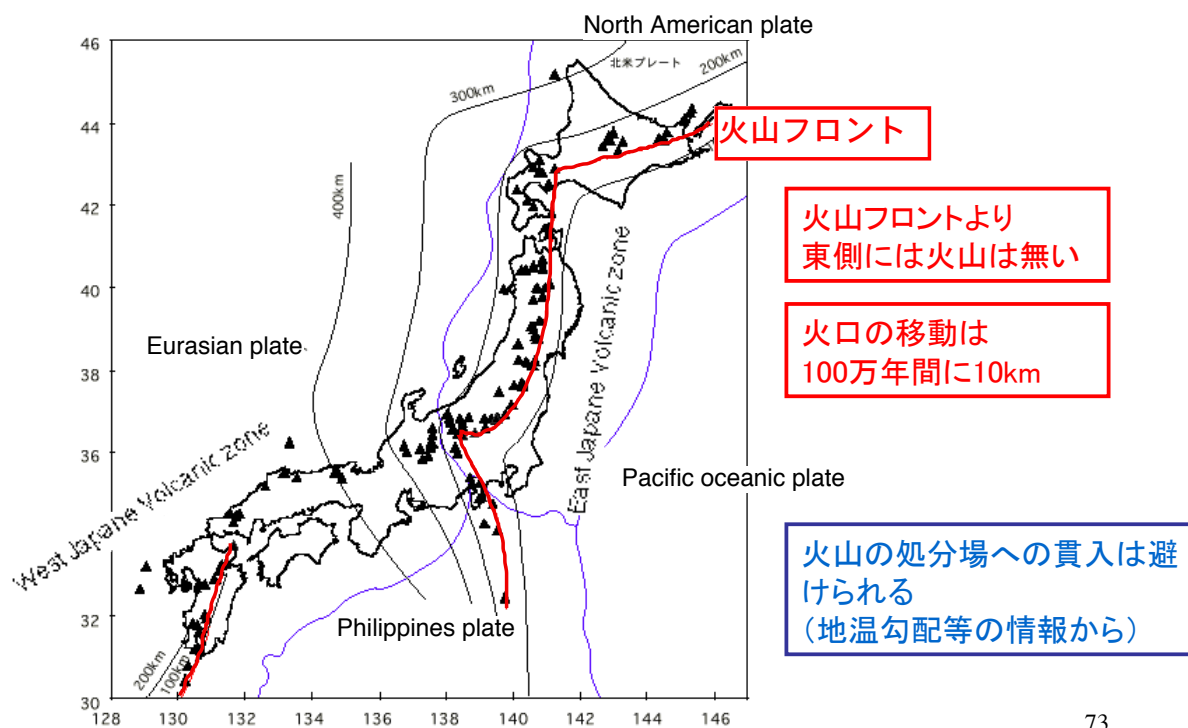


富士山の火山ガラス
(280年間湿った地中に存在)



伊豆大島火山ガラス
(1240年間湿った地中に存在)

日本に高レベル廃棄物処分場に適した場所があるか？

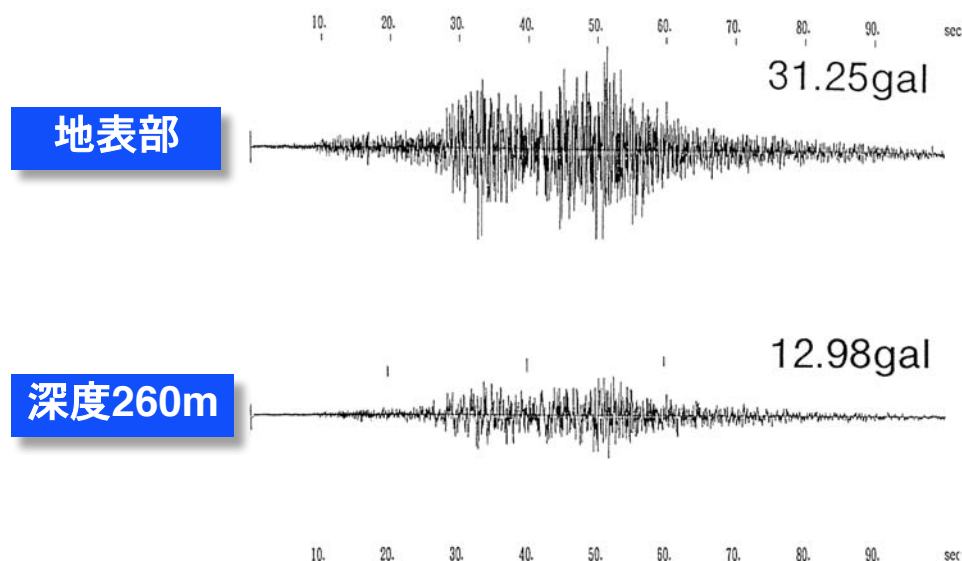


73

地震の影響

釜石鉦山での地震観測例

●地下深部の揺れは地表に比べると小さい

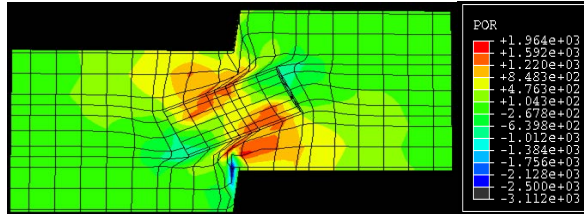


(三陸はるか沖地震: 1994年12月28日21時マグニチュード7.5, 震央距離 212.6 km)

74

活断層が直撃したら？

断層ズレによる人工バリアのせん断挙動



縮小模型実験と
数値解析

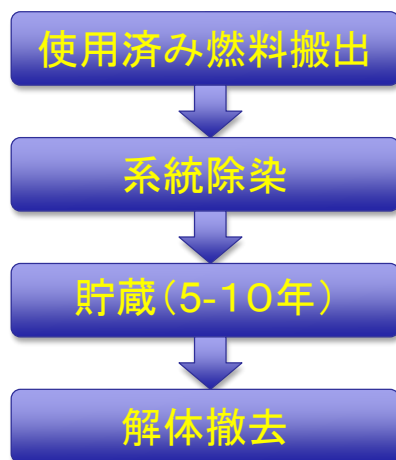
75

廃炉とクリアランス

76

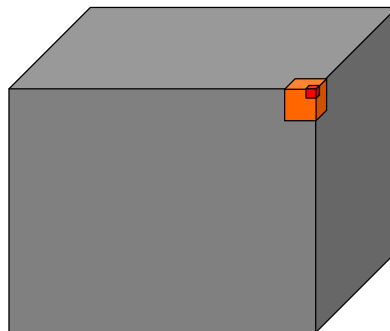
原子炉の解体（廃炉）

解体の手順



発生する廃棄物

110万kW級軽水炉の場合
約50万t 多くはコンクリート
内 放射性廃棄物 約1万t
多くは金属
放射能レベルの比較的高いもの 約200t



解体費用

約600億円<建設費用約3000億円

「原子力発電投資環境整備小委員会報告書」(2007年5月)総合エネルギー調査会 77

原子炉の解体費用

解体費用

約600億円<建設費用約3000億円

「原子力発電投資環境整備小委員会報告書」(2007年5月)総合エネルギー調査会

原子力発電施設解体引当金制度 平成元年より
約20年間の積み立て

積立限度額 債務総額の90% → 100% H22.2月

日本原子力発電 1 号炉の解体

1998 2000 2010 2014 2020

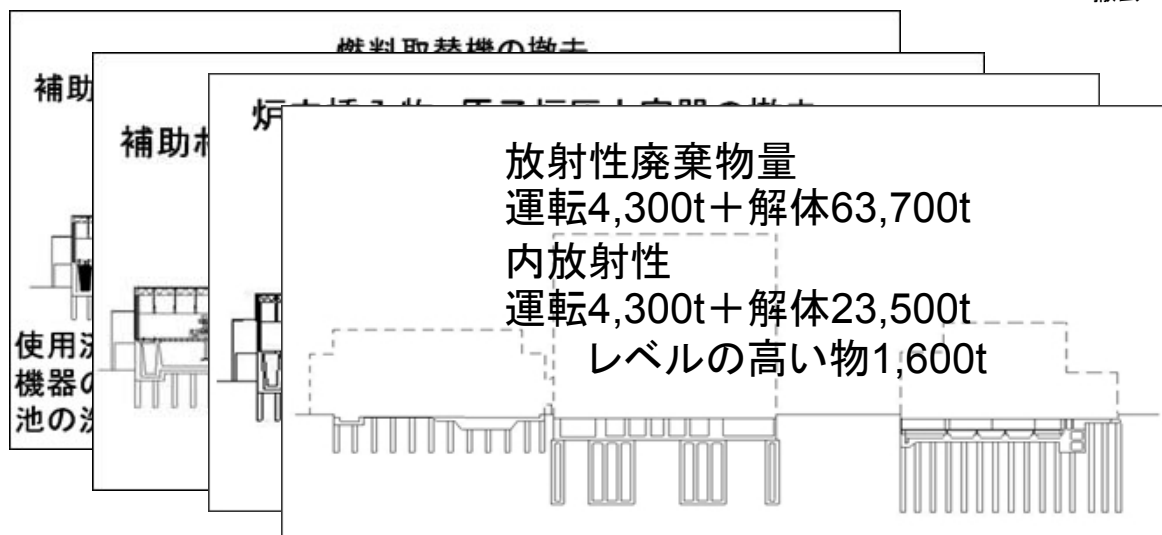
燃料搬出

原子炉領域安全貯蔵

原子炉領域解体

原子炉領域以外の解体撤去

建屋
解体
撤去



クリアランス

放射性物質として扱う必要のないもの 0.01mSv/y以下

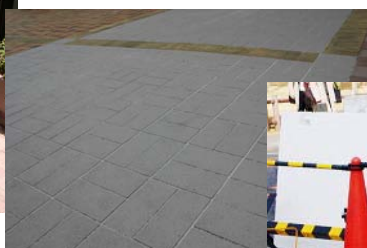
東海1号炉
発生廃棄物量 解体63,700t
内放射性 解体23,500t
クリアランス 40,200t
内金属 4,900t



遮へい体



ベンチ



ブロック



放射性廃棄物　—まとめ—

- ・ 放射性廃棄物の発生量は一般廃棄物に比べ非常に少ない
高レベル：約200g／人一生
- ・ 処分方法の基本は多重バリアシステム
- ・ 高レベル放射性廃棄物の処分方法
ガラス固化、オーバーパック、緩衝材
- ・ 現世代でできる限りのことをしておく