

平成21年10月24日(土)

13:00-14:30

北海道大学学術交流会館

核燃料サイクルと バックエンドの基礎

地球環境、生活に欠かせない大切なエネルギー
を支える選択肢の一つ：原子力

北海道大学 大学院工学研究科
エネルギー環境システム専攻 佐藤 正知

<http://nms.qe.eng.hokudai.ac.jp>

内 容

46億年という永い地球史の中で資源が生まれ、現在の地球環境が出現しました。

この資源を利用して、豊かな生活を送っています。同時に、資源の枯渇と地球環境の破壊が懸念されています。

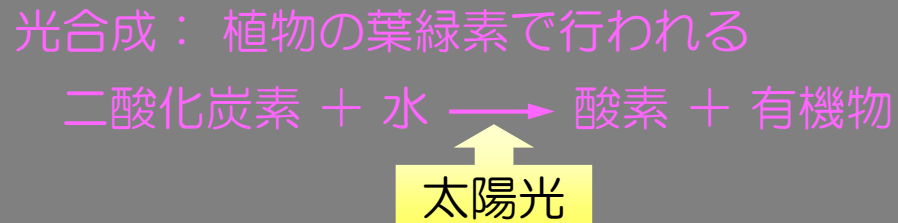
環境の保全と市民生活に重要なエネルギー、その柱の一つである原子力の利用について、核燃料サイクル、高レベル放射性廃棄物の地層処分に重点を置いて話を進めます。

- 1) はじめに、エネルギー資源の生い立ちと地球環境形成
- 2) 日本のエネルギー事情と原子力の役割
- 3) 原子力発電、核燃料サイクルと高レベル放射性廃棄物の発生
- 4) 放射性廃棄物の地層処分事業と安全確保
- 5) 処分から核燃料サイクルを考える。
- 6) まとめ

1) はじめに

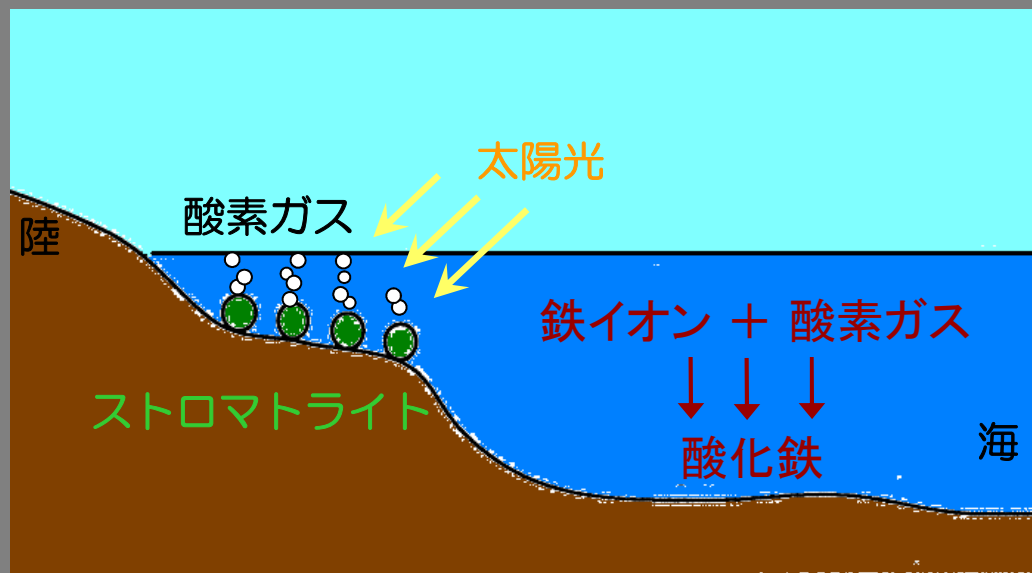
27億年前 光合成が始まる

葉緑素をもつシアノバクテリアが大発生し、海中に酸素が供給される



ストロマトライト
(シアノバクテリアが
積み重なってできたもの)

25億年前 鉄鉱床の形成

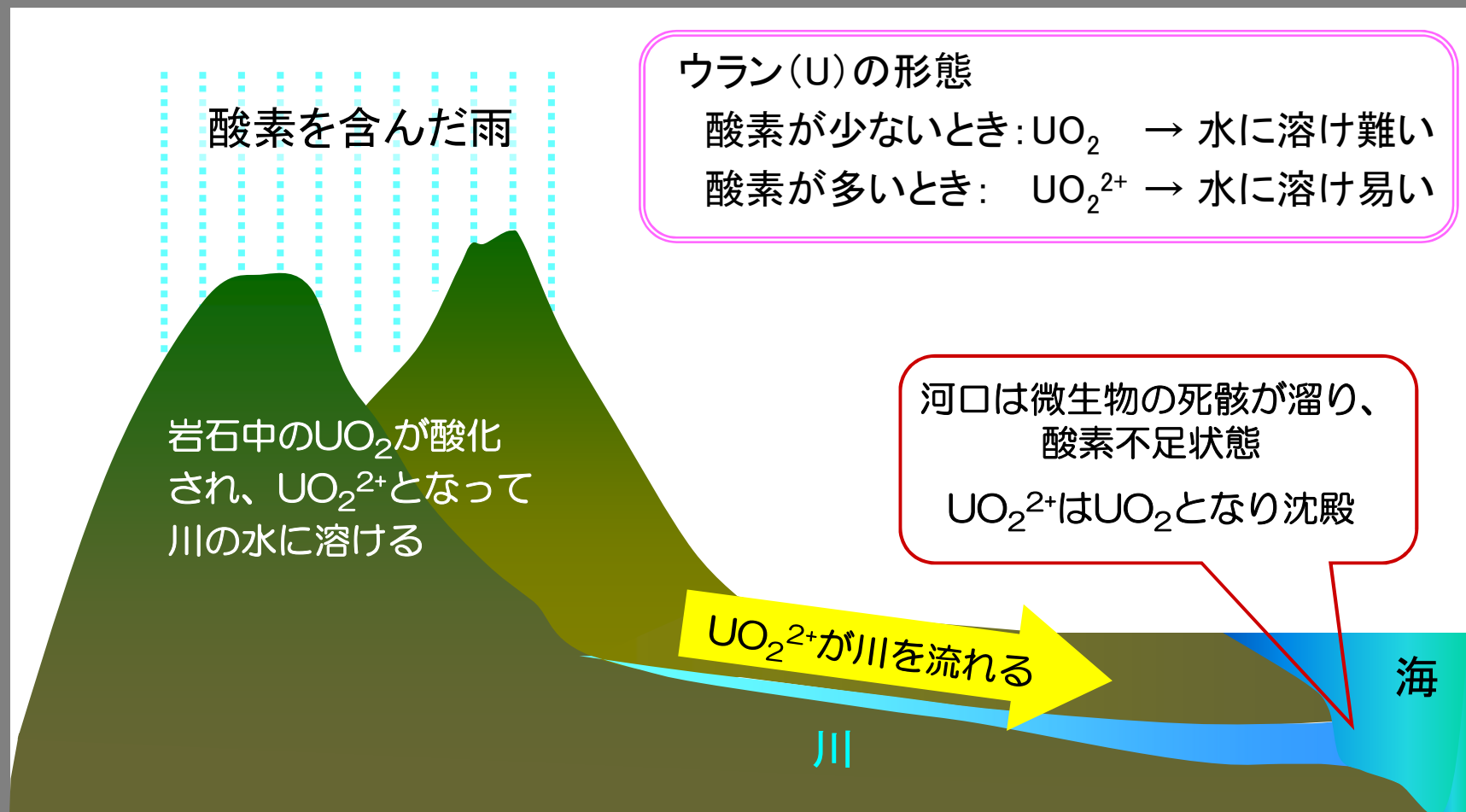


縞状鉄鉱床

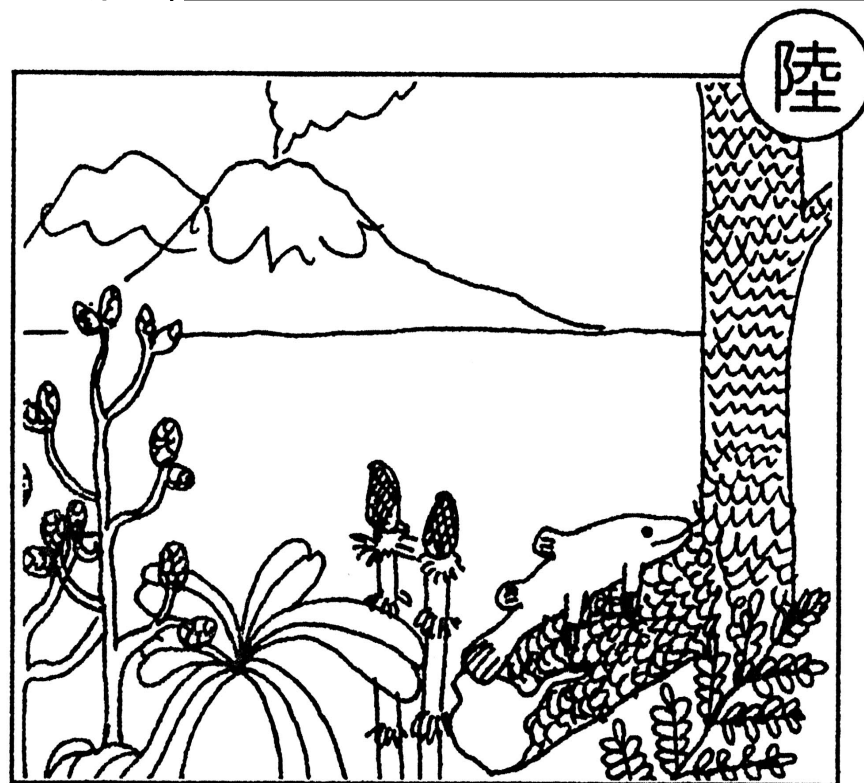
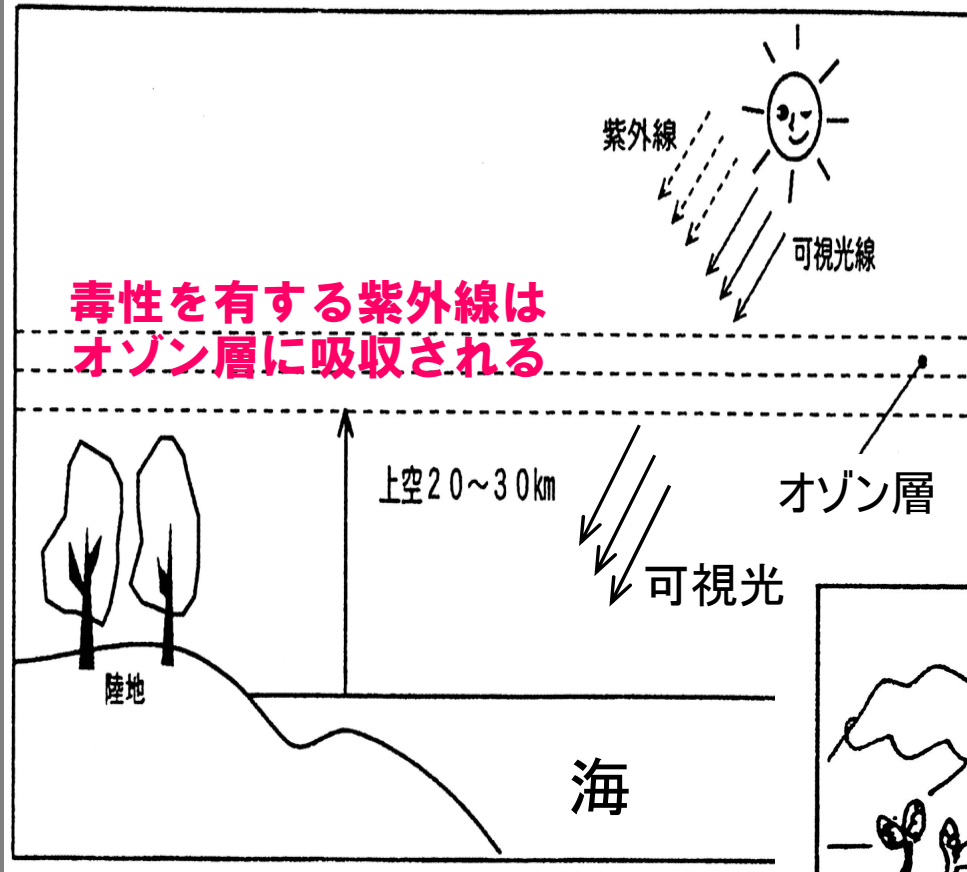
1) はじめに

20億年前 ウラン鉱床ができた

海中に酸素が充分満たされ、
大気中の酸素量が増加し始める



1) はじめに

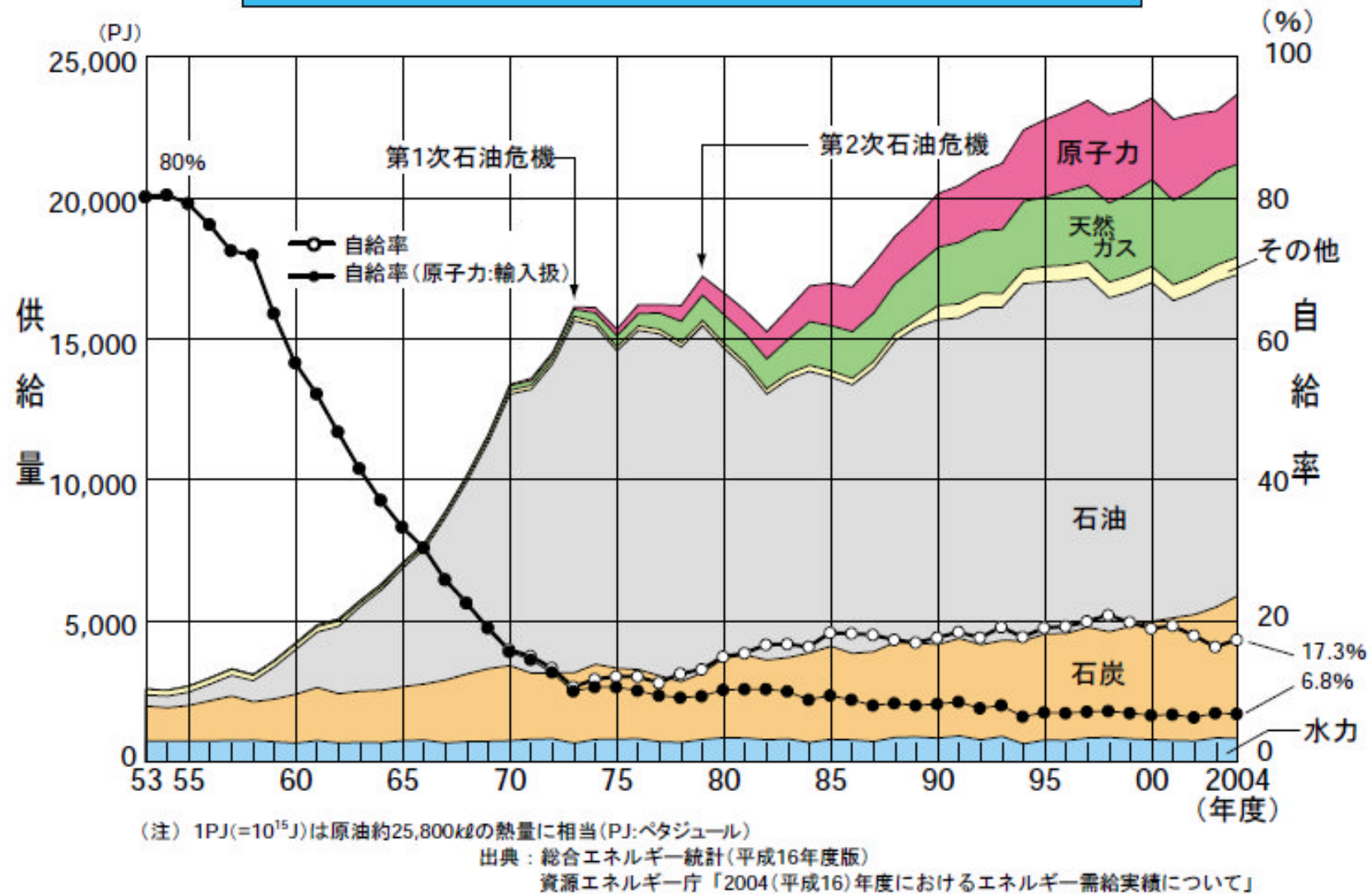


内 容

- 1) はじめに、エネルギー資源の生い立ちと地球環境形成
- 2) 日本のエネルギー事情と原子力の役割
- 3) 原子力発電、核燃料サイクルと高レベル放射性廃棄物の発生
- 4) 放射性廃棄物の地層処分事業と安全確保
- 5) 処分地の選定に向けた制度・取り組み
- 6) まとめ

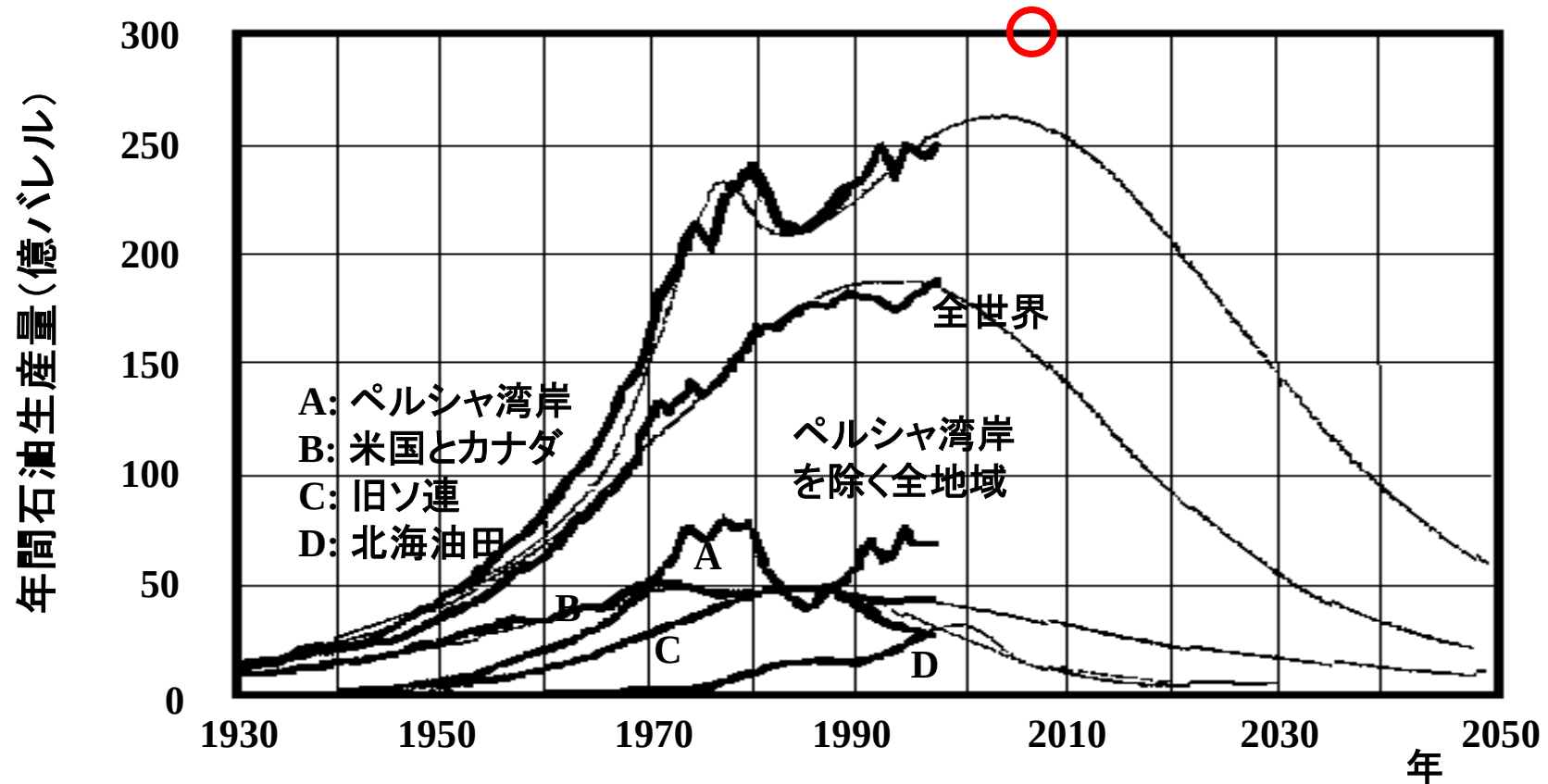
2)日本のエネルギー事情と原子力の役割

日本の一次エネルギー供給実績



出典:電気事業連合会

2)日本のエネルギー事情と原子力の役割



世界の年石油生産量(太字)と予測値(細線)

(出典：日経サイエンス1998年6月号、原典：C. Campbellら(1998))

注) 8153万バレル／日；約 300億バレル／年(2007年)

経済活動の拡大・・・エネルギーの大量消費
資源が徐々に無くなる

2)日本のエネルギー事情と原子力の役割

朝日新聞(平成21年8月4日)朝刊

朝日新聞 2005年4月8日(金)

第3種郵便物認可

「原油価格高水準 2030年でも続く」

IMF推計、生産増に限界

【ワシントン＝小陳勇

一】国際通貨基金(IMF)は7日、「世界経済見通し」のうち、原油価格についての分析結果などを発表し、30年時点でも現在のドル価値で評価して1バレル39～56ドルの高い水準が続いているという推計を示した。中国を

中心に途上国の需要が急増する一方、生産の増加には限界があるとみられるためだ。
IMFは、世界の1日当たりの原油消費量が04年の8200万バレルから30年には1億4千万バレルに急増すると予測。特に中国では、自動車が増え、200万台から30年には3億9千万台に激増するなどの結果、原油消費も04年の1日当たり650万バレルから1900万バレルに増えるとしている。

これに対して生産面は、石油輸出国機構(OPEC)に加盟していない国の既存の油田の埋蔵量に限りがある一方、OPEC諸国は利益を最大化するために需要増ほどには供給力を強化しないと予想している。

世界の大油田、生産ピーク過ぎた

【ヒューストン(米テキサス州)＝勝田敏彦】国際エネルギー機関(IEA、本部・パリ)の研究者が「世界の大油田の原油生産はすでにピークを過ぎ、世界全体でも10年後にはピークを迎える」と分析していることがわかった。3日付の英紙インディペンデント(電子版)にインタビューとして掲載された。IEAの

IEA研究者分析

関係者が石油のピーク時期について明確に言及するのは珍しい。
インタビューに答えたのはファティハ・ピロル博士。世界の埋蔵量の4分の3を占める800以上の油田について分析をしたところ、多くが生産のピークを過ぎ、5年以内に供給不足が起きて経済に大きな影響が出る可能性があるという。

2) 日本のエネルギー事情と原子力の役割

日本経済新聞

2009年(平成21年)2月26日(木曜日)

米国復活へ「3本柱」強調

オバマ大統領 議会演説

【ワシントン＝大隅隆】オバマ大統領は二十四日の議会演説で、金融安定化などの危機克服、新たな成長に向けた長期投資、財政再建を経済再建への三本柱に掲げた。大統領は「未来への責任」を強調、景気後退で沈滞する米国民に奮起を促すと同時に、政権発足から打ち出してきた政策の全体像を初めて示した。だが危機克服に時間がかかれば「米国復活」もおぼつかない。景気回復への期待を背負って船出したオバマ政権は、真価が問われる局面に入った。(関連記事6面、演説詳報9面に)



金融機関の健全化に言及 貸借対照表

① 危機克服

「景気対策を完遂に実行しても、信用危機(credit crisis)を解決しない限り本当の回復は実現しない」

米大統領議会演説のポイント

【総論】
▽短期的な利益が長期的な繁栄より重視されてきたが、過ちをただすときだ
▽国を再建し、復活する。米国はかつてより強くなる

① 危機克服

- ・景気対策は経済を回復させる第一歩。今後2年間で350万人の雇用を創出
- ・金融安定化策では、銀行に重大な問題があれば修正を求め、バランスシート健全化を支援
- ・自動車を発明した国は自動車産業を見捨てない

② 長期投資

- ・代替エネルギー開発へ年150億ドルを投資
- ・温暖化ガスの排出量取引市場創設法案の策定を議会に要請
- ・医療保険改革を推進。来週、官民を集め検討開始
- ・教育分野にも投資。国民は1年以上の高度な教育・職業訓練を

③ 財政再建

- ・13年までに財政赤字を半減
- ・国民の2%にあたる最富裕層の減税打ち切り
- ・歳出の無駄を減らし、10年間で2兆ドル削減

代替エネルギー開発 年間150億ドル

② 長期投資

「不要な事業予算をカットする一方で、我々の経済の未来にとって絶対不可欠な三分野(the three areas that are absolutely critical to our economic future)に投資する」

危機対策と並行して、オバマ大統領は長期投資の重点分野としてエネルギー、医療、教育の三分野を明示した。
太陽光発電は米国が考案したのに生産で日本に抜かれた。こう指摘する同大統領は「代替エネルギー開発などに年百五十億ドル投資する」と表明。温暖化ガスの排出量取引市場創設法案の策定も議会に求めた。
十六年前に誕生したクリントン政権では医療保険改革に着手する考えを表明したが保険会社な

歳出のムダ削減

10年で2兆ドル

③ 財政再建

「私は連邦予算を未来への青写真(a blueprint for our future)と見なす」

オバマ大統領は週内に予算の全体像を示す。同を半減する目標を掲げて時に長期の財政見直しも明らかにする。大統領は四年の任期が終わる二た。無駄減らしで二兆ドル

の歳出削減も打ち出した。アクセルロッド大統領上級顧問は二十四日、米MSNBCテレビのインタビューで「我々は財政均衡も重要と思っているし、(中間層への減税など)重要な政策もある」と指摘。富裕層への一定

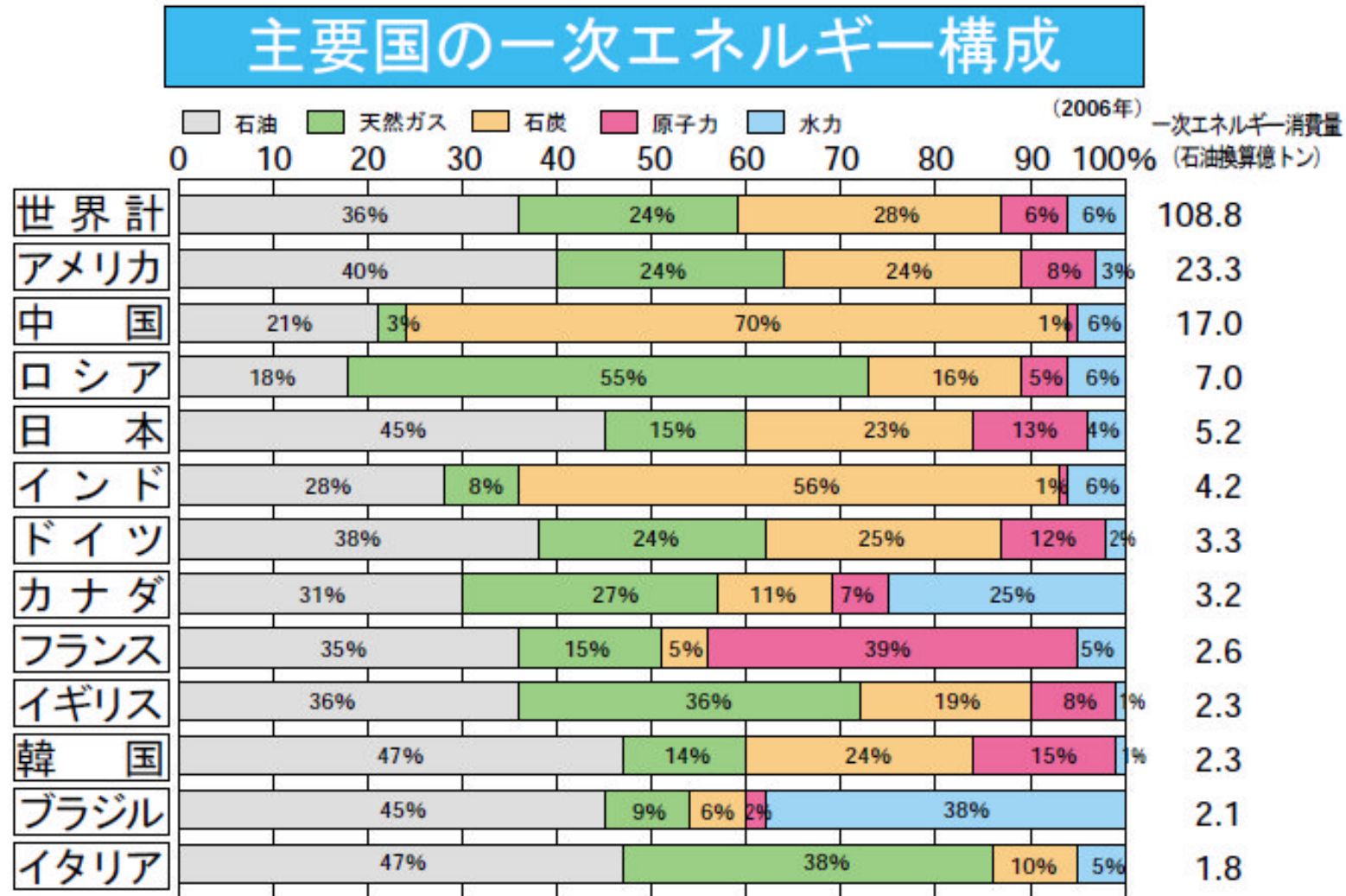
の骨子

保安庁が担うべき役割を明確にする。防衛や緊急事態に警察官が対応できるようにする。承認後、遅くとも艦船2隻が開始予定だ。

長期投資の重点3分野
エネルギー・医療・教育

2) 日本のエネルギー事情と原子力の役割

水力、風力、太陽光など(再生エネルギー)は、限られた国で十分な利用が可能となる。



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。

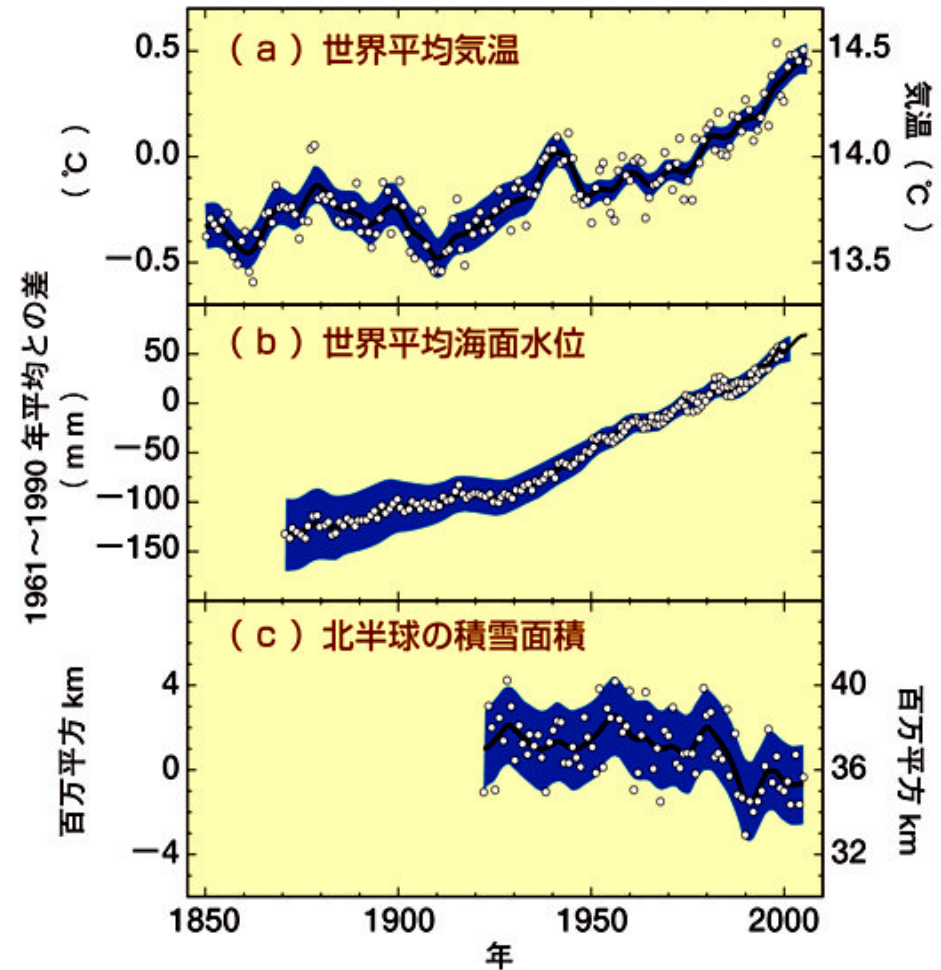
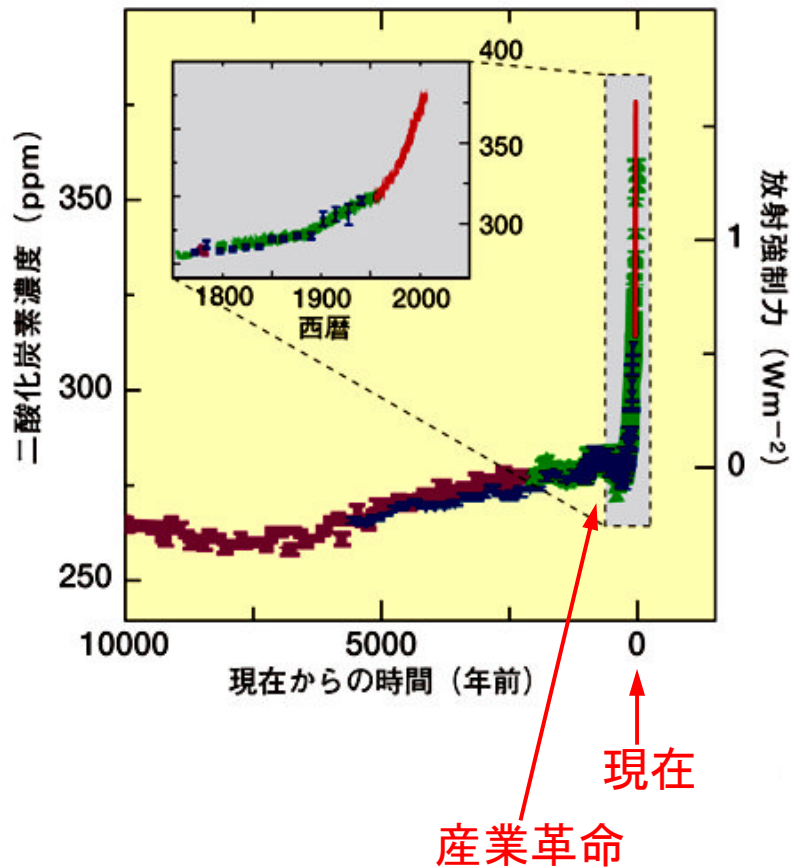
出典: 電気事業連合会 (原典: BP統計2007)

我々の将来を考えると、いろいろなエネルギーを使えるようにしておくことが重要

温暖化を示唆するデータ

2) 日本のエネルギー事情と原子力の役割

大気中の二酸化炭素濃度の変化



出典：「IPCC第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約」翻訳 気象庁，2007年3月

2)日本のエネルギー事情と原子力の役割

世界の経済規模の急激な拡大

この100年間で、世界の人口は20世紀はじめの18億人から60億人を超え、3倍以上に増加した。1人あたりのエネルギー消費量も3倍以上に増加して世界のエネルギー消費量は10倍以上に急増した。

現在、人口13億人の中国と10億人のインドは年～9%の経済成長を続けている。このまま推移すると、10年後にはもう一つの中国とインドが新たに出現することになる。地球環境問題はさらに顕在化する可能性が高い。

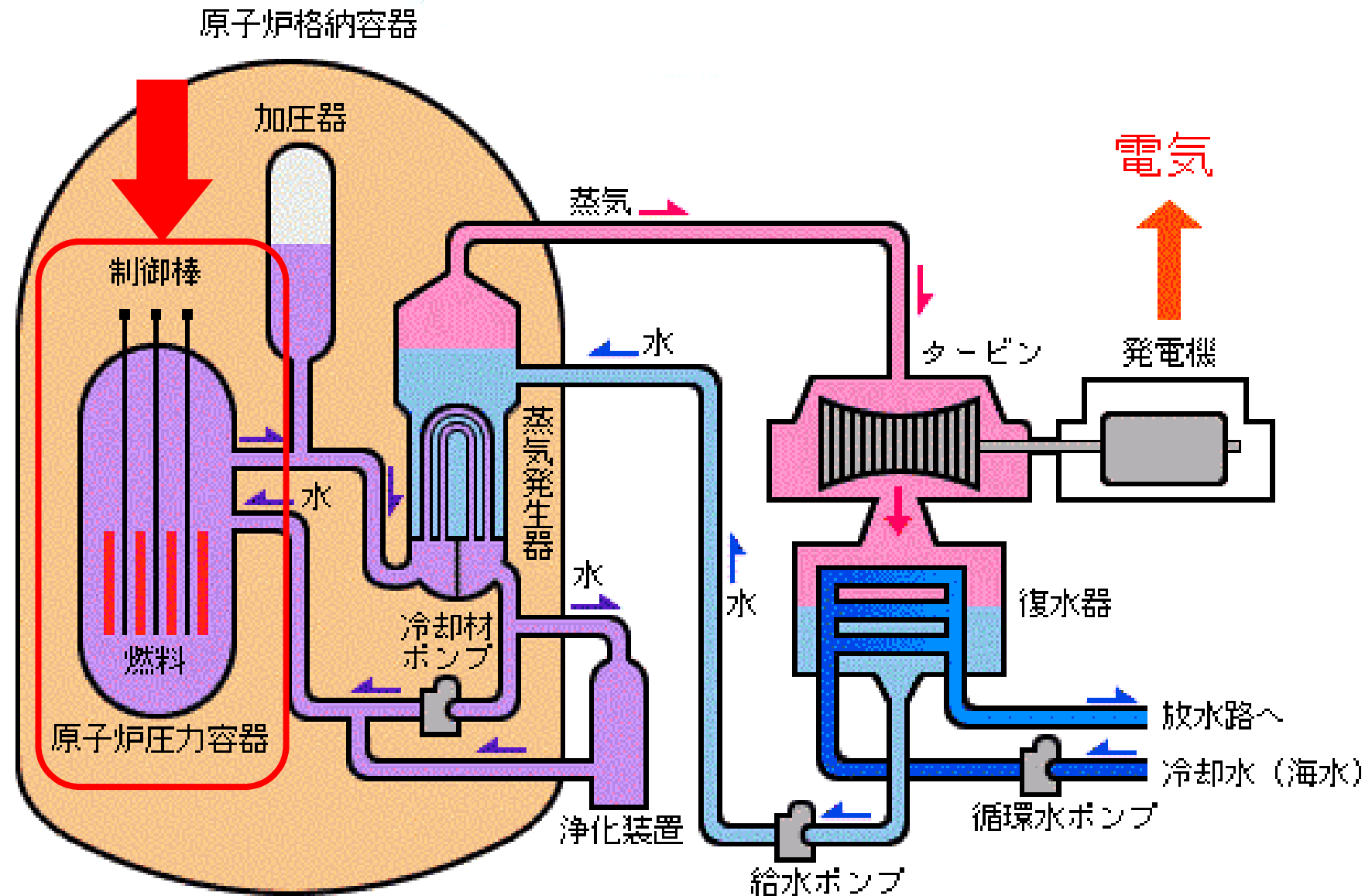
われわれは将来に向けてどう対処すべきか。エネルギー資源小国・経済大国日本にとって、**現実的選択肢の一つは原子力。**

内 容

- 1) はじめに、エネルギー資源の生い立ちと地球環境形成
- 2) 日本のエネルギー事情と原子力の役割
- 3) 原子力発電、核燃料サイクルと高レベル放射性廃棄物の発生
- 4) 放射性廃棄物の地層処分事業と安全確保
- 5) 処分から核燃料サイクルを考える。
- 6) まとめ

3)核燃料サイクルと廃棄物の発生

原子力発電



3)核燃料サイクルと廃棄物の発生 (フランスの実績)

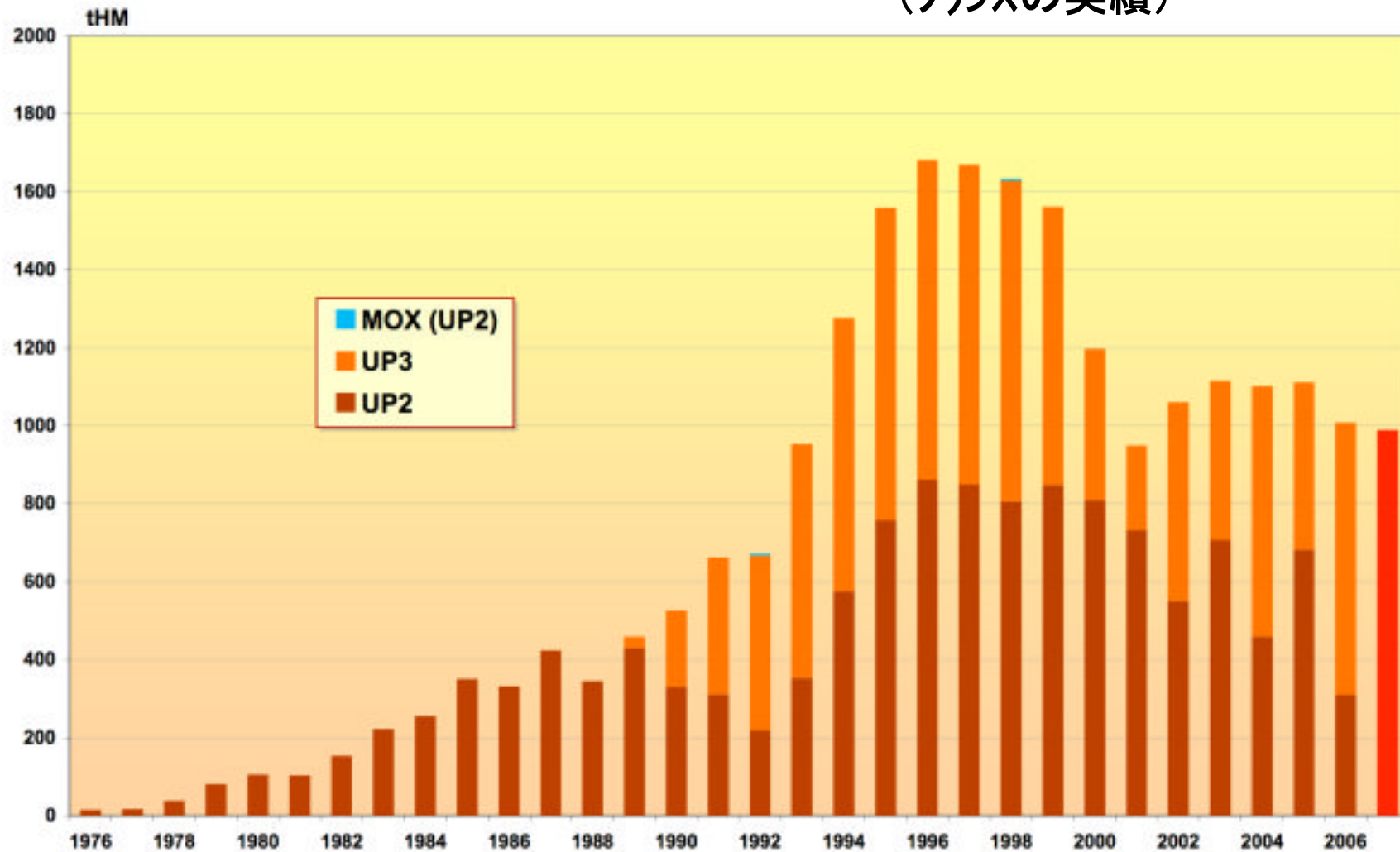


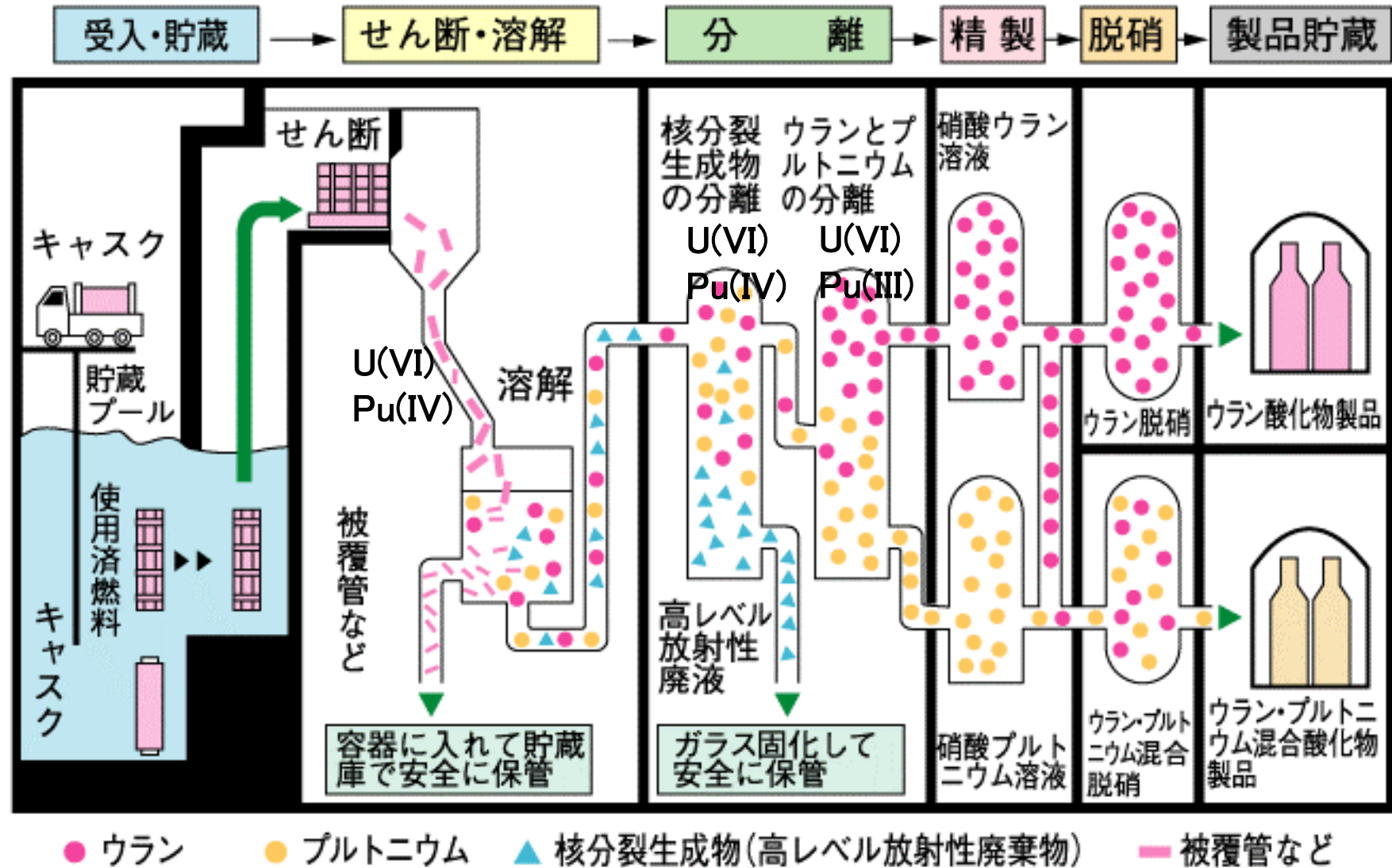
Figure 6: Combined Annual LWR Fuel Reprocessing at La Hague, UP2 and UP3 (as of 31 Dec. 2006, cumulated annuals, tons of heavy metal).

Sources: COGEMA 2002, ASN Annual Reports, Ouest France, 16 February 2008.

出典: Schneider and Marignac (2008)

3)核燃料サイクルと廃棄物の発生

使用済み核燃料の再処理工程

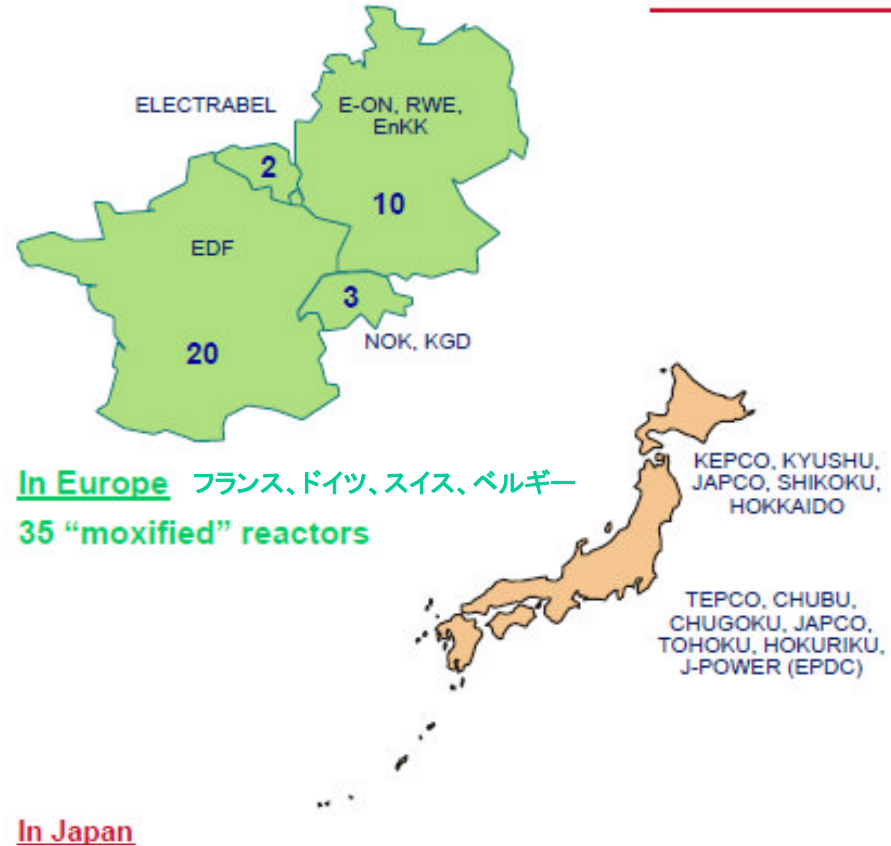


3)核燃料サイクルと廃棄物の発生 (欧州各国の実績)

Panorama of MOX loadings worldwide



In United States



仏AREVA NCからMOX燃料が供給されている国(電力会社)

原子力発電事業

電気出力100万kWの原子力発電所を1年間運転(設備利用率80%)
・・・70 億kWhの電力($10^6 \text{ kWh} \times 24 \times 365 \times 0.8$)

20円/kWhで、1,400億円/年、3.8億円/日の売り上げ
発電コストは5.1～5.9円/kWh(石炭:5.7～6.2,石油:10.7～)
・・・使用済み燃料30トン ・・・ガラス固化体30本
ガラス固化体の処分費用は約4,000万円/本(約12億円/ 30本)

原子力発電所の定格電気出力は55基で4,931万kW(2008年11月現在)
発電電力量は、3,034億kWh(売り上げ約6兆円)、30.5%(2006年度)

年間、1200本のガラス固化体相当の使用済み燃料が発生
平成33年頃までの累積発生数は4万本
……………地層処分場の面積は、地上1km²、地下3×2km²
(結晶質岩の場合)

一人が80年の生涯にわたり電力の半分を原子力で賄う
としたとき、ゴルフボール3個相当のガラス固化体が発生

内 容

- 1) はじめに、エネルギー資源の生い立ちと地球環境形成
- 2) 日本のエネルギー事情と原子力の役割
- 3) 原子力発電、核燃料サイクルと高レベル放射性廃棄物の発生
- 4) 高レベル放射性廃棄物の地層処分事業と安全確保
- 5) 処分から核燃料サイクルを考える。
- 6) まとめ

4)地層処分と安全確保

日本で発生する廃棄物の量

	発生廃棄物量 (t/日)		備考
一般 廃棄物	主に家庭から排出される生ゴミ、粗大ゴミ及びオフィスから排出される紙くずなど	144,500	平成17年度実績
産業 廃棄物	事業活動に伴って生じた廃棄物のうち、廃油、廃プラスチック、廃酸、廃アルカリなどの19種類	1,142,000	平成16年度実績
放射性 廃棄物	原子力施設の運転、保守などに伴って発生する放射性の廃棄物	高レベル 1.4	平成12～17年度実績より推定
		低レベル 61	平成18年度実績

出典：電気事業連合会

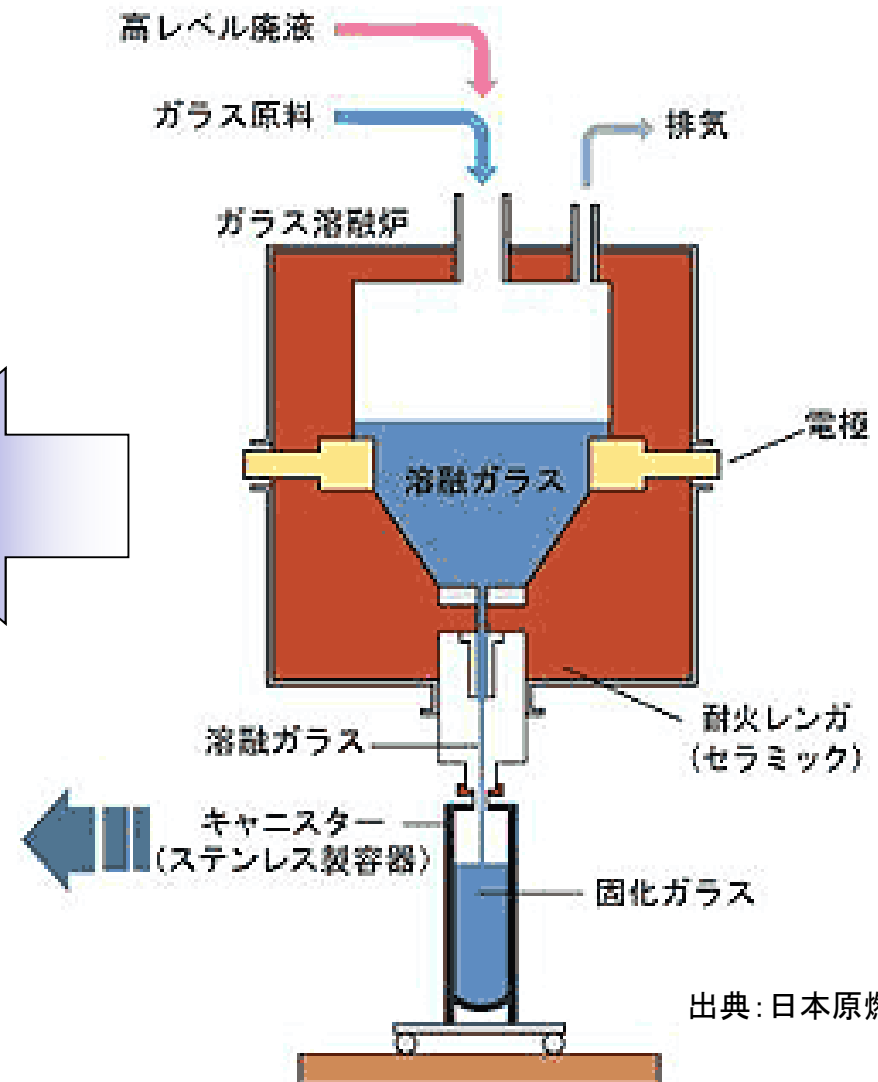
高レベル廃液のガラス固化

ガラス固化体

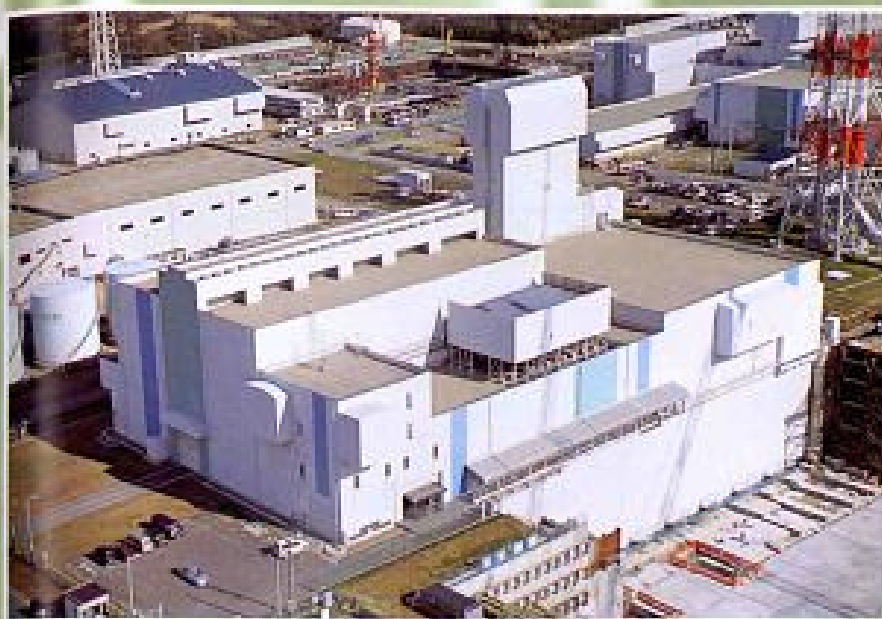
高さ: 1.3 m
直径: 0.4 m
容積: 150 l
重さ: 500 kg



高レベル廃棄物処理装置(ガラス溶融炉)



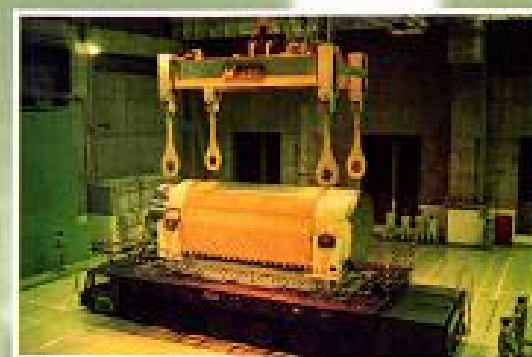
4)地層処分と安全確保



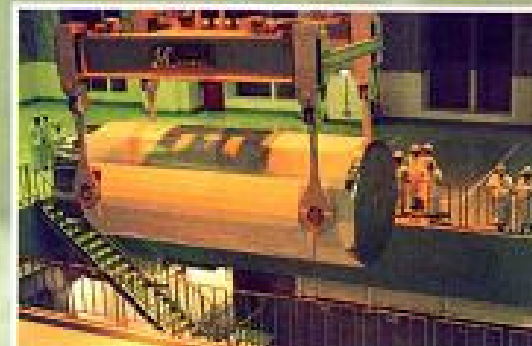
高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター



貯蔵ビット



輸送車からクレーンで引き上げられるキャスク



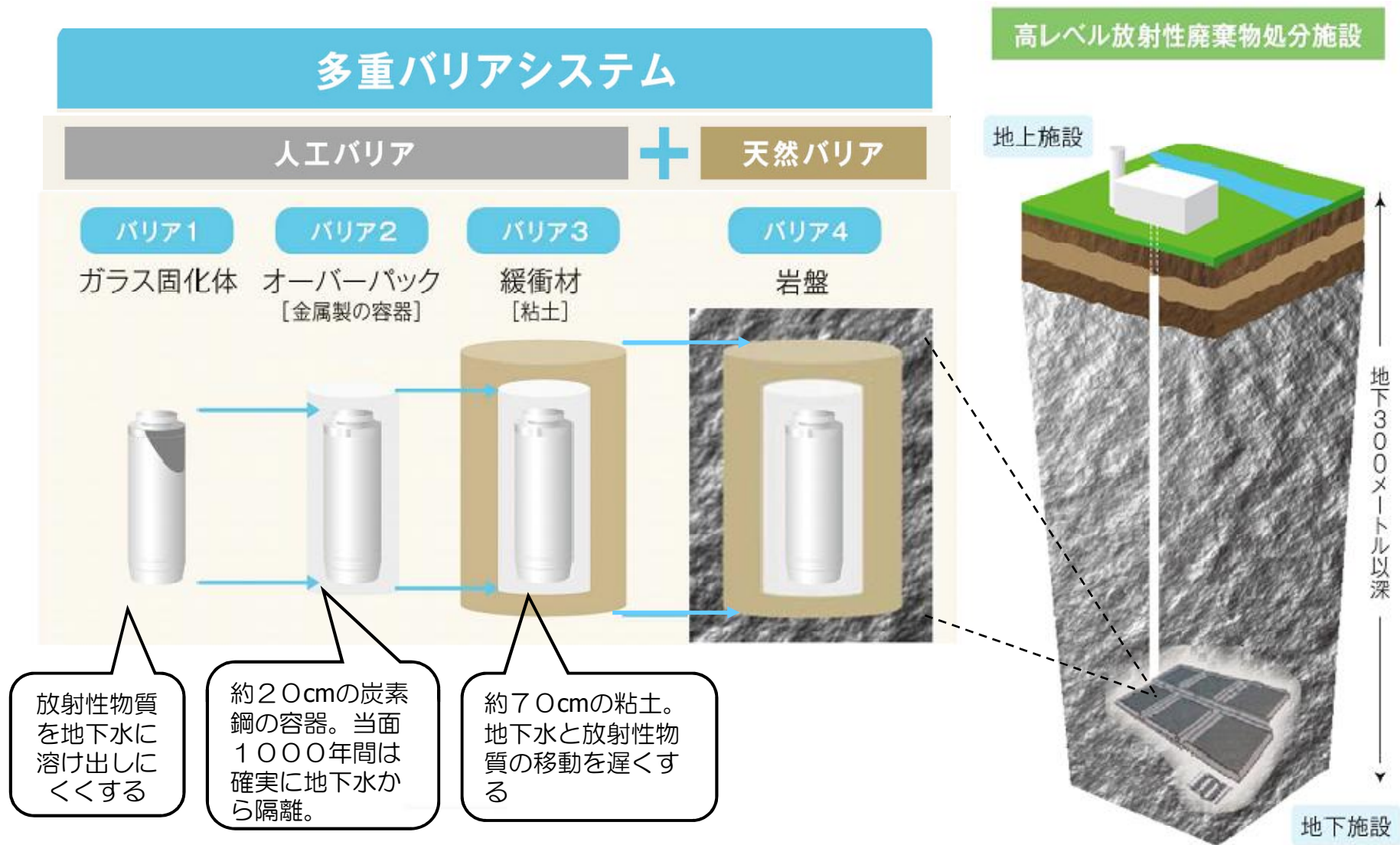
輸送容器一時保管区域へ運ばれるキャスク



遠隔操作によるガラス固化体検査

高レベル廃棄物の処分概念

4)地層処分と安全確保



出典:資源エネルギー庁

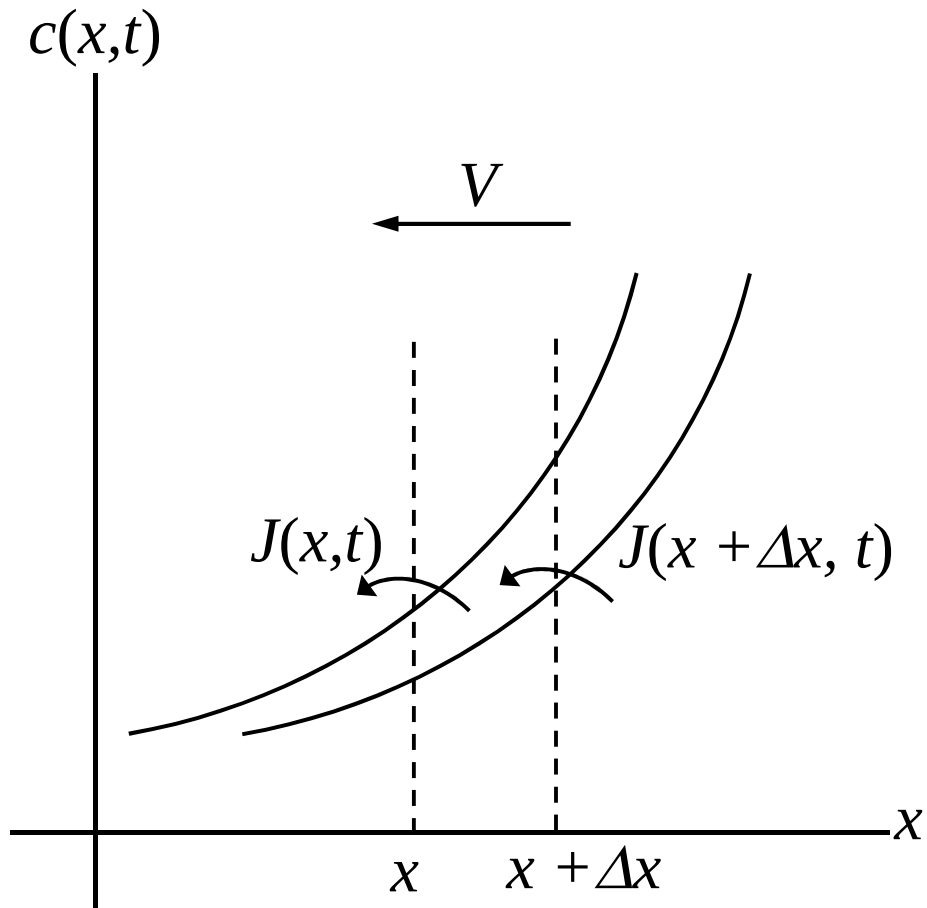
4)地層処分と安全確保

処分後の安全確保の基本的考え方：多重障壁概念

ガラス固化体／圧密ベントナイト／天然の深地層＝最後の障壁
(水に溶けにくい)(水を極めて通しにくい粘土) (岩盤)

- (1) 放射性核種はイオンとして地下水を介して移動する。
- (2) 岩石を構成する鉱物はイオン交換樹脂と同じ無機イオン交換体、
$$-\text{SiO}\cdot\text{H} + {}^{137}\text{Cs}^+ = -\text{SiO}\cdot{}^{137}\text{Cs} + \text{H}^+$$
$$-\text{AlO}\cdot\text{H} + {}^{137}\text{Cs}^+ = -\text{AlO}\cdot{}^{137}\text{Cs} + \text{H}^+$$
のように、放射性核種は鉱物の表面に捕らえられる。
- (3) 地層は膨大な量の無機イオン交換体である。
- (4) 処分場から放出された場合でも、核種は岩石／鉱物に捕らえられ、移動速度は地下水に比べて著しく遅くなる。

4)地層処分と安全確保



$$J(x) = -D \frac{\partial c(x)}{\partial x} + V \cdot c(x)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} &= \frac{-(J(x + \Delta x) - J(x))}{\Delta x} \\ &= \frac{-\left[\left\{ J(x) + \left(\frac{\partial J(x)}{\partial x} \right) \Delta x \right\} - J(x) \right]}{\Delta x} \\ &= -\frac{\partial J(x)}{\partial x} \\ &= D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - V \frac{\partial c}{\partial x} \end{aligned}$$

高レベル放射性廃棄物処分の安全評価における母岩中の核種移行モデル(1/2)

4)地層処分と安全確保

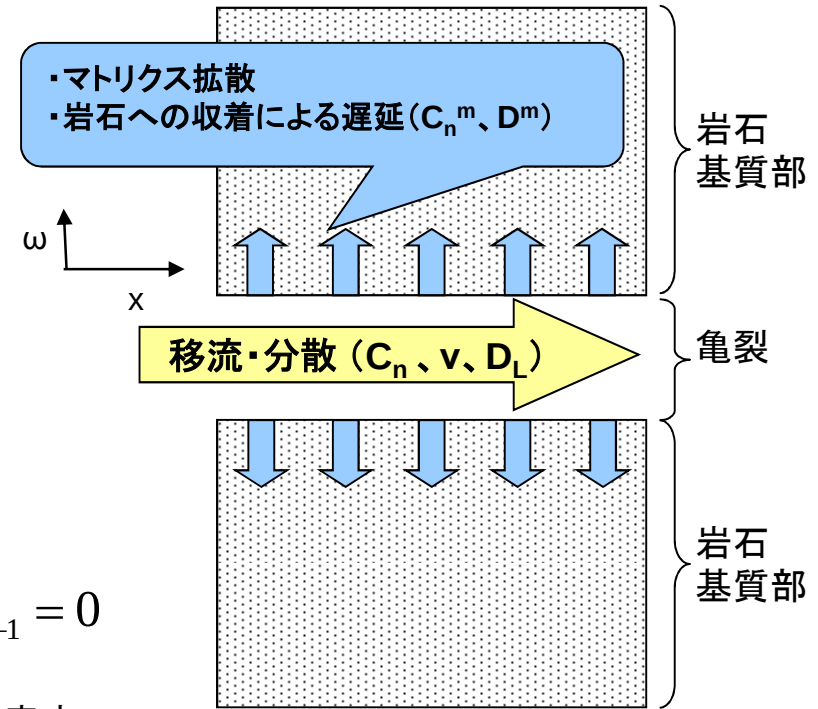
<亀裂内部の核種濃度>

$$R_n \frac{\partial C_n}{\partial t} + v \frac{\partial C_n}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} D_L \frac{\partial C_n}{\partial x} + R_n \lambda_n C_n - R_{n-1} \lambda_{n-1} C_{n-1} + \frac{F}{b} D_e^m \frac{\partial C_n}{\partial \omega} \Big|_{\omega=0} = 0$$

<岩石基質中の核種濃度>

$$R_n^m \frac{\partial C_n^m}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial \omega} D^m \frac{\partial C_n^m}{\partial \omega} + R_n^m \lambda_n C_n - R_n^m \lambda_{n-1} C_{n-1} = 0$$

※添え字n,mはそれぞれ、核種および岩石基質部を表す



一次元平行平板モデルの概念

R_n : 亀裂の遅延係数

R_n^m : 岩石基質部の遅延係数

C_n : 亀裂の核種濃度 [mol m^{-3}]

C_n^m : 岩石基質部中の核種濃度 [mol m^{-3}]

D^m : 岩石基質部間隙中の拡散係数 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

D_e^m : 実効拡散係数 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

D_L : 亀裂内分散係数 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

v : 亀裂内流速 [m s^{-1}]

λ_n : 崩壊定数 [s^{-1}]

b : 亀裂開口幅の1/2 [m]

F : 亀裂単位面積あたりのマトリクス拡散に寄与する亀裂面積の割合

＜亀裂の遅延係数＞

$$R_n = 1 + \frac{K_{a_n}}{b}$$

＜岩石基質部の遅延係数＞

$$R_n^m = 1 + \frac{\rho^m K_{d_n^m}}{\theta^m}$$

K_{a_n} : 亀裂表面への分配係数 [m]

$K_{d_n^m}$: 岩石基質部の岩石鉱物への分配係数 [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$]

ρ^m : 岩石基質部の乾燥密度 [kg m^{-3}]

θ^m : 岩石基質部の有効間隙率

4)地層処分と安全確保

実験室での研究とともに深地層を対象とした研究が重要である。
深地層地下研究施設を使った研究が欠かせない。

米国、ドイツ、スウェーデン、スイス、ベルギー、カナダ、は既に研究施設を保有。各国で、地下研究施設で集めたデータや、実験室でのデータをもとに地層処分の安全性の確保に関する評価報告書を提出。原子力大国フランスでも地下研究施設を建設し研究を続け、その結果をもとに議会でその後の方針を決定。**フィンランドとスウェーデンは処分地を決定。米国は一応の決定を見ているがまだ不透明。**

わが国でも、2000年に、核燃料サイクル開発機構(現・日本原子力研究開発機構:JAEA)が第2次取りまとめを公表。
東濃地区(岐阜県)と幌延地区(北海道)で縦坑を掘削中で地下研究施設での研究開発が行われる。

4)地層処分と安全確保

地層処分の安全評価での仮定と現実的な事象の比較

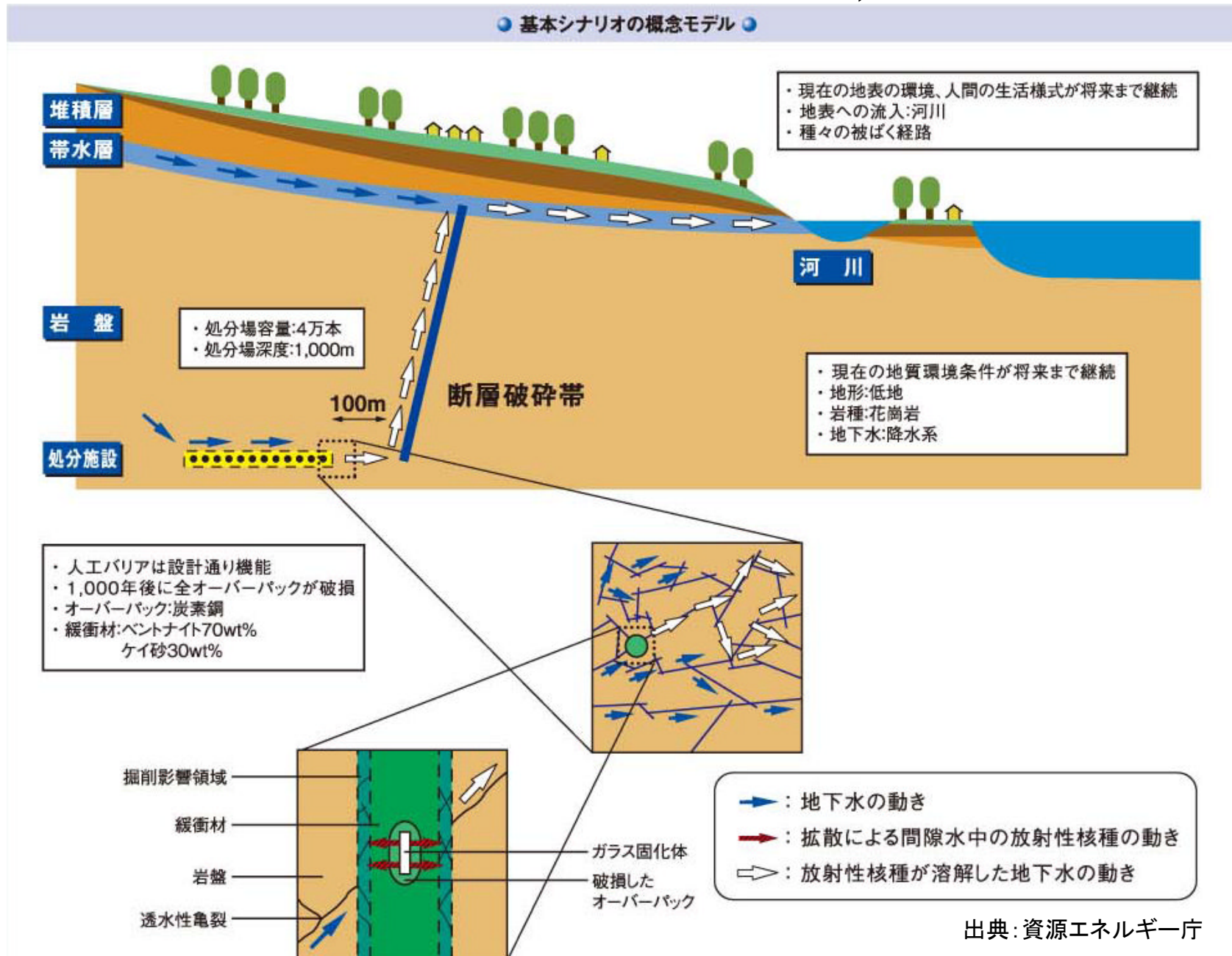
【評価の基本方針】

モデルやデータは、現実よりもはるかに厳しい仮定をおいて評価し、安全性を確保

予想される現実的な事象	評価での仮定
オーバーパックは千年以上の健全性が期待される	オーバーパックは処分後千年で全て同時に破損
破損後のオーバーパックも、部分的にバリア機能を有する	破損したオーバーパックは全てのバリア機能を喪失
処分場は断層から十分離して設置	処分場の近くに断層があると仮定
緩衝材の外側に到達した核種は、周辺の岩盤により遅延され、地表に到達する核種は限られる	緩衝材の外側に到達した核種は、全て特定の亀裂と断層を移行し、地表に到達する

出典：核燃料サイクル機構※(2001)第2次取りまとめ
※現・日本原子力研究開発機構(JAEA)

4)地層処分と安全確保



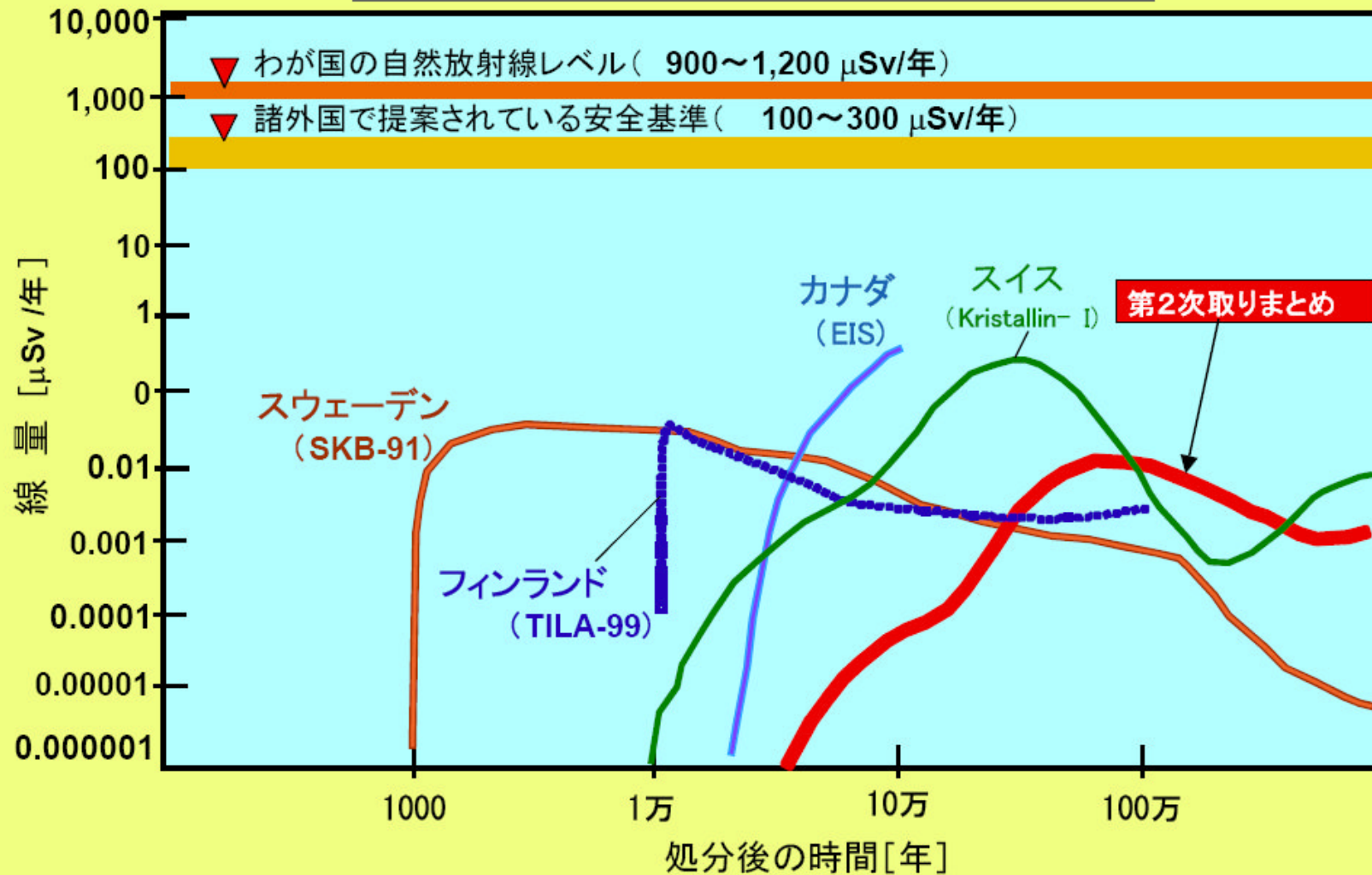
4)地層処分と安全確保

15



地層処分システムの安全評価

－ 各国の安全評価結果との比較 －



出典:核燃料サイクル機構※(2001)『高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)に関する地層処分研究開発第2次取りまとめの概要』

※現・日本原子力研究開発機構(JAEA)

内 容

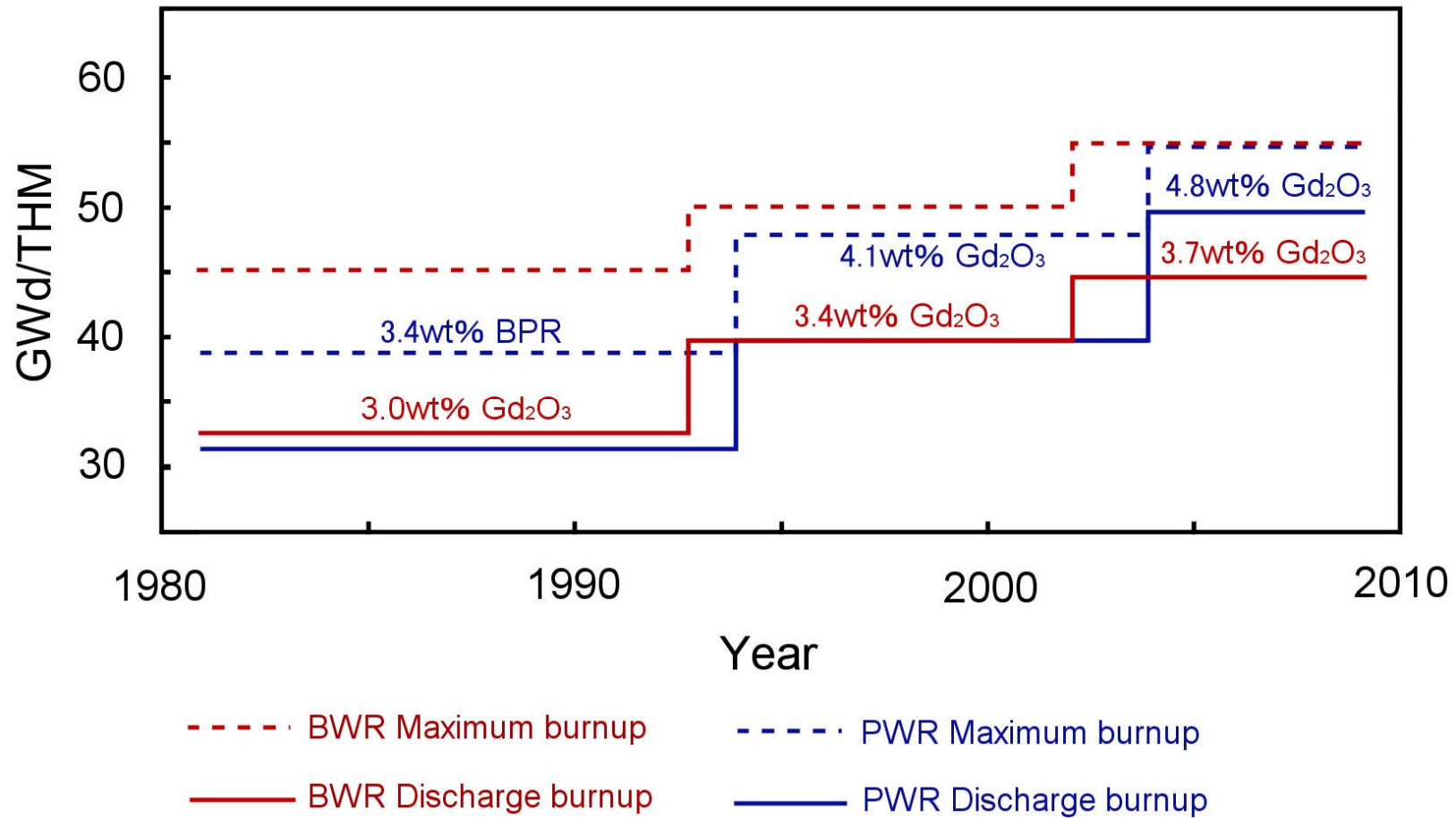
46億年という永い地球史の中で資源が生まれ、現在の地球環境が出現しました。

この資源を利用して、豊かな生活を送っています。同時に、資源の枯渇と地球環境の破壊が懸念されています。

環境の保全と市民生活に重要なエネルギー、その柱の一つである原子力の利用について、核燃料サイクル、高レベル放射性廃棄物の地層処分に重点を置いて話を進めます。

- 1) はじめに、エネルギー資源の生い立ちと地球環境形成
- 2) 日本のエネルギー事情と原子力の役割
- 3) 原子力発電、核燃料サイクルと高レベル放射性廃棄物の発生
- 4) 放射性廃棄物の地層処分事業と安全確保
- 5) 処分から核燃料サイクルを考える。
- 6) まとめ

5) 処分から核燃料サイクルを考える



背景

高燃焼度化の進行

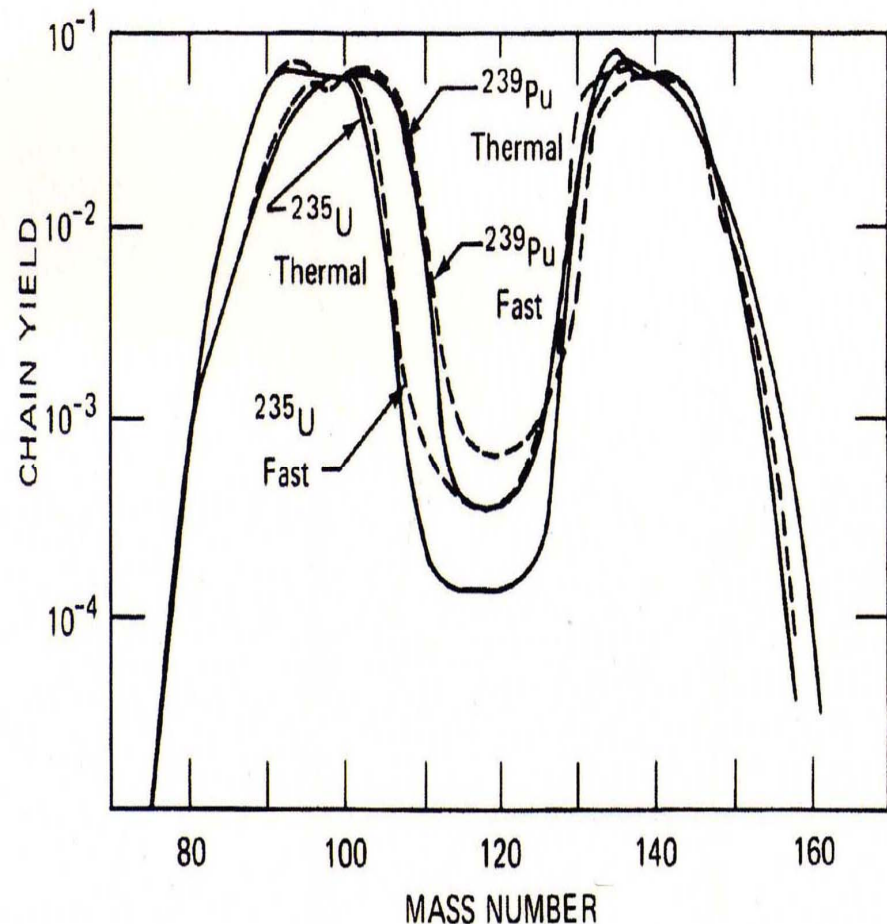
1980年代半ばまで、27,500 MWD/MTUであった燃焼度は、経済性を高めるとともに使用済燃料の発生量を抑えるため、90年代になって、33,000、それ以後39,500、48,000となり現在55,000 MWD/MTUに達している。

Puの燃焼と廃棄物特性の変化

高燃焼度化や、MOX燃料の装荷により、Pu燃焼の役割がこれまで以上に高まる。右の図のようにPu-239が核分裂して、Ru、Rh、Pdを主とした貴金属FPとともにMoの生成割合が高まる。さらに生成するPu-241やPu-242の β 崩壊でAm、CmそしてPu-238が生じる。

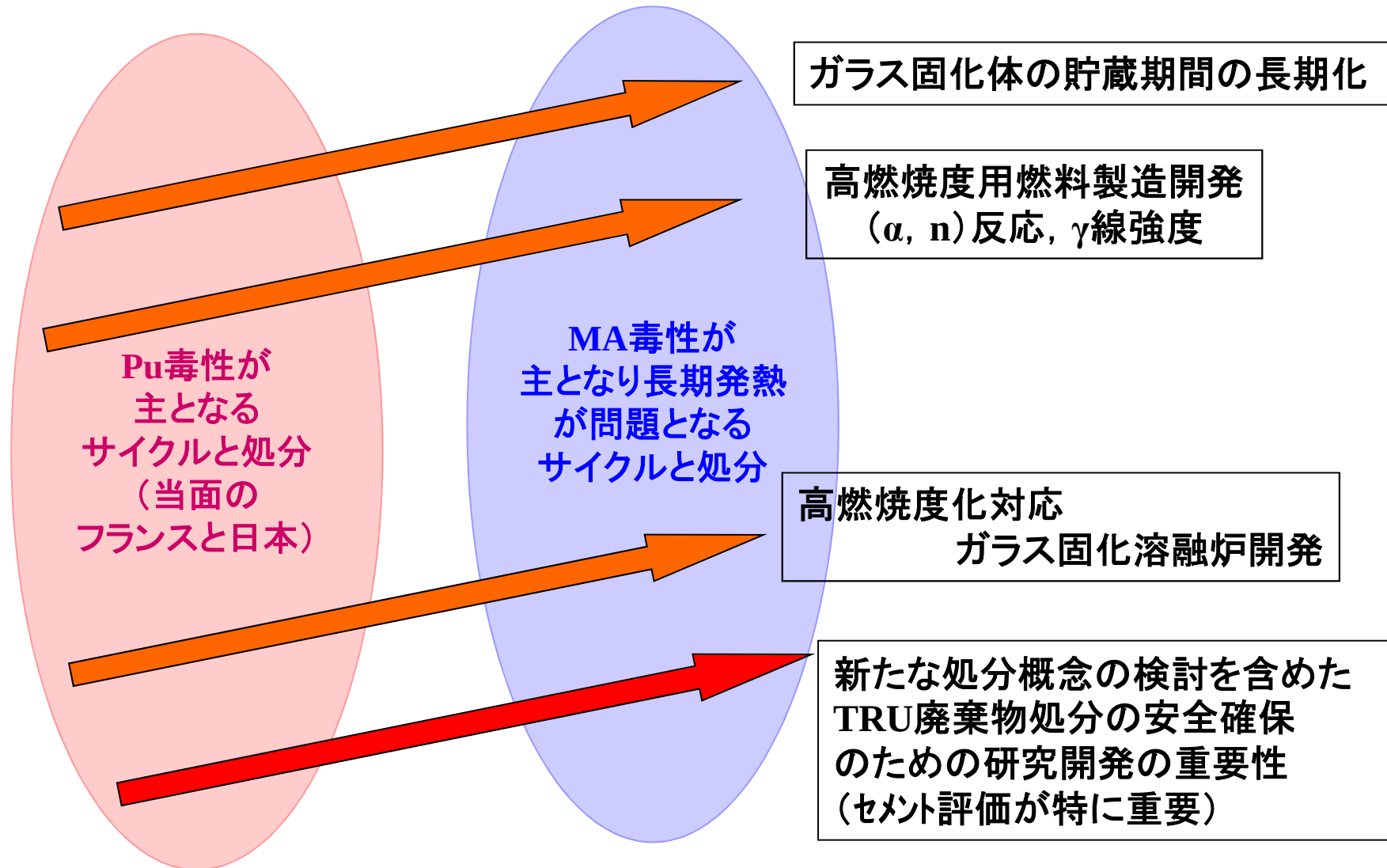
貴金属FPの増加はガラス溶融炉の短寿命化につながる。また、Moの増加はガラス固化体の製造を難しくし、Amは廃棄物発生量を増大させるとともに、熱による貯蔵期間の長期化、処分場の必要面積増大を引き起こす。このため今後のバックエンドのあり方に大きな課題を投げかける。

5) 処分から核燃料サイクルを考える



高燃焼度化の進行と課題

5) 処分から核燃料サイクルを考える



まとめ

大量生産・大量消費・大量廃棄の経済体制のもと、地質学的年代にわたり蓄えられた太陽エネルギー(化石燃料)を急激に消費し、快適な生活を送っている。

○エネルギーは極めて重要で、1日も欠かすことができない。時代の変化に柔軟に対応するために、いくつかのエネルギーの選択肢を持つことが重要である。

資源小国・経済大国日本の有力で現実的な選択肢は原子力である。そして、高レベル放射性廃棄物の処分を進める必要がある。

○処分地の選定を段階的に進めることによって、多重バリアシステムを構築することにより、処分後の長期安全確保を期待できる。