

平成16年10月9日(土)10:30-12:00

第2回週末基礎講座

京都大学原子炉実験所

放射性廃棄物処理処分・・・概論(1)
核化学、燃料製造-原発・研究炉、放射線防護、リスク

北海道大学大学院工学研究科

量子エネルギー工学専攻 さとう せいち

原子力システム工学講座 佐藤 正知

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。

現世代は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進行しつつあります。将来世代に配慮することも私たちの責任です。

環境に関わり合いの深いエネルギー、原子力、放射性廃棄物の発生とその処理処分の基礎について概論的に話を進めます。

1) はじめに

日本のエネルギー / 原子力 / 放射性廃棄物処分

2) 核燃料サイクル - 1 (燃料製造-原発・研究炉 ・・・核化学、)

3) 核燃料サイクル - 2 (バックエンド・・・放射線防護、 リスク)

4) まとめ

以下の資料を配布します、是非参考にして下さい。

朽山 修, 「高レベル放射性廃棄物の地層処分」

ひろば, 320号, 東北原子力懇談会(2004, 9月)

エネルギー資源の生い立ち

46億年前 地球誕生
海の誕生 有害な紫外線がさえぎられる。

35億年前 海に生命が誕生

このころは二酸化炭素が主な大気の成分であった

27億年前 光合成 二酸化炭素を消費し酸素を放出

大気中に酸素がごくわずか存在するようになった

25億年前 鉄鉱床ができた 海底に大量の鉄が堆積して鉄鉱石がつくられた。
(オーストラリア、中国、ブラジル)

5億年前 油田、ガス田の形成 三葉虫やそう類などの海の動植物の死がいに由来、石油は海で生まれた。

4億年前 酸素濃度が高く
なるとともに、
オゾン層が形成
石炭の形成 上空で紫外線が吸収され、陸上で生物の生存が可能となる。シダ類の森林や湿地が誕生。大気中の二酸化炭素は、地中に固定され石灰岩や石炭となった。

太陽……すべてのエネルギー源

石油、天然ガス、石炭、バイオマス
(原子力を除く)

(原子核反応 → 化学エネルギー)

生物活動による変換

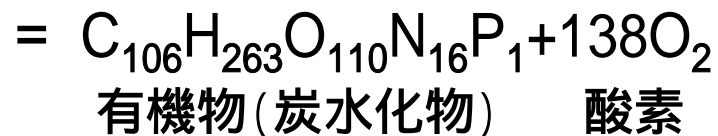
光合成……化学式で書くと



二酸化炭素

水

太陽光



暑~いイタリア 停電で大混乱

【ローマ＝郷富佐子】記録的な猛暑のため、ローマやミラノなどイタリアの主要都市で26、27の両日、停電が相次いだ。需要過剰によるシステムダウンを恐れた国内の電力各社が送電を一時停止したものだ。事前通告がなかったため各地で混乱が起こり、約600万人が影響を受けた。マルツァノ生産活動相は節電を呼びかける一方、「問題の行方は暑さが左右する」とも話しており、政府もお手上げの状態だ。

ローマでは連日、「6月としては212年ぶり」(レプブリカ紙)とされる猛暑が続いている。ミラノなどでも35度以上を記録。冷房設備のフル稼働で需要が急増したうえ、雨不足で水力による国内の発電量も低下。さらに電力輸入先のフランスが25日から供給を削減したため、一気に深刻化した。

国内の電力各社は26日朝から、事前通告なしに地域ごとの1時間程度の送電停止に踏み切った。エレベーター内

ローマなど600万人影響 エレベーター缶詰めも

に閉じこめられたり、信号機が消えたりして大騒ぎになった。ベルルスコーニ首相も「汗をかいたのでシャワーを浴びた」と上院に遅刻した。

イタリアは87年に原発の是非を問う国民投票を実施し、脱原発した。現在は国内で火力、水力による発電をしているほか、フランスやスイスなどからの供給に頼っている。今回の騒ぎに、中道右派の与党議員からは「輸入に頼らず、原発に戻るべきだ」との声も出ている。

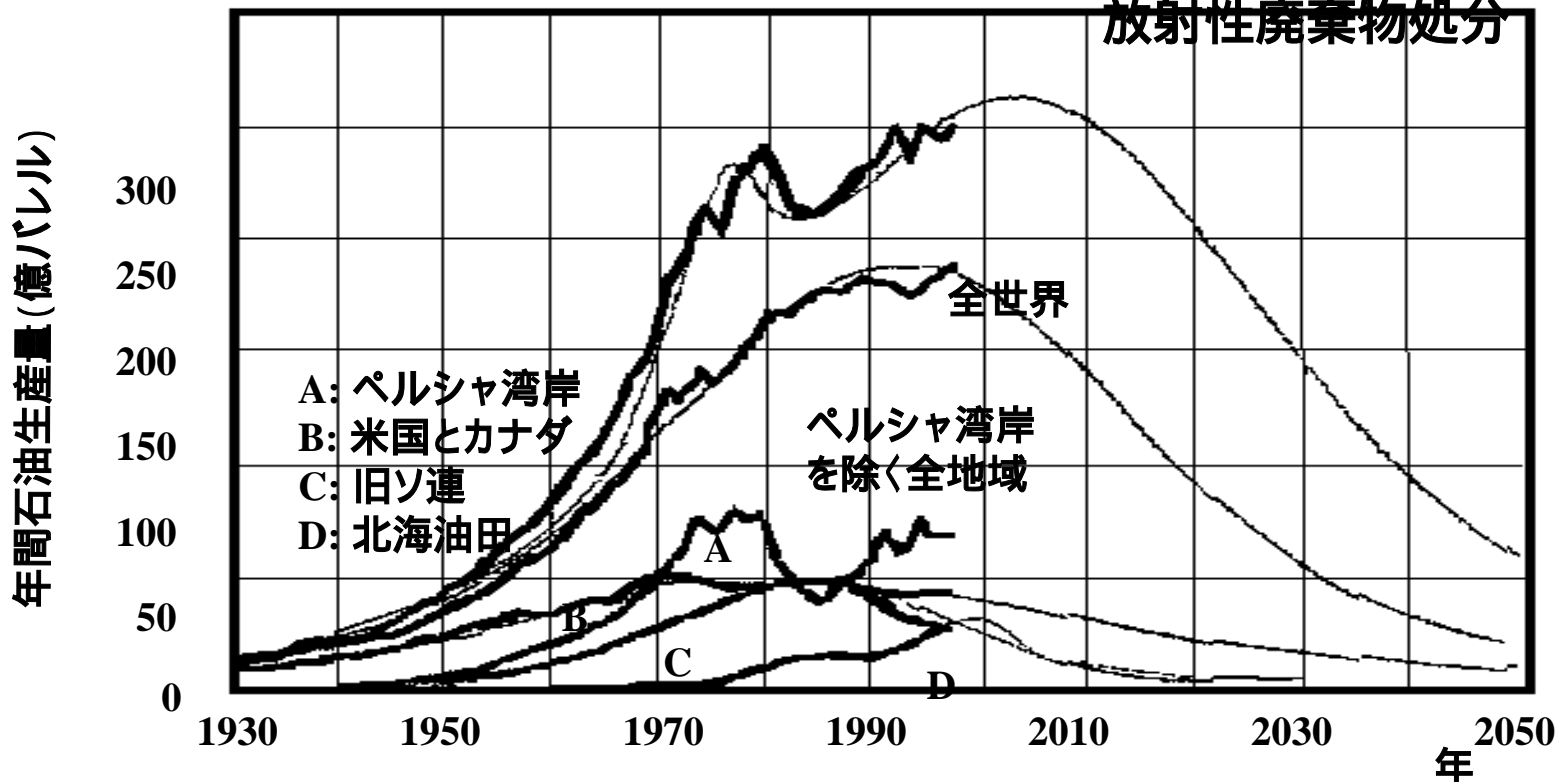
1)はじめに
日本のエネルギー / 原子力 /
放射性廃棄物処分



1)はじめに

日本のエネルギー / 原子力 / 放射性廃棄物処分

資源が徐々に枯渇……石油資源を例に



世界の年石油生産量 (太字) と予測値 (細線)
(キャンベル等、日経サイエンス1998年6月号)

1)はじめに
日本のエネルギー / 原子力 /
放射性廃棄物処分

昨年度の貿易

輸入相手 中国1位

財務省が23日発表した
02年度の貿易統計(速報)
によると、輸出から輸入

を差し引いた貿易黒字は9兆6795億円と、前年度より36・6%増えた。貿易黒字が拡大したのは4年ぶり。輸出入とも2年ぶりに増加し、ともに過去最高となった。輸出はアジア向けを中心

に大幅に拡大したほか、輸入は中国が米国を初めて上回り、最大の輸入相手国になった。また、アジアとの貿易額は輸出入とも過去最高だった。

輸出は8・5%増の52兆7302億円。アジア向けは、半導体や鉄鋼、自動車を中心に伸び、18・2%増の23兆2754億円となった。欧州連合(EU)向けは5・6%増。米国向けは科学光学機器や半導体が不振で、1・0%減の14兆4444億円だった。

輸入は43兆507億円、3・7%増えた。中国からの輸入は11・2%増の7兆9581億円で、比較可能な61年度以降では初めて米国を上回った。輸出も39・3%増え、中国向けの貿易赤字は22・2%減と、4年ぶりに縮小した。

1) はじめに 日本のエネルギー / 原子力 / 放射性廃棄物処分

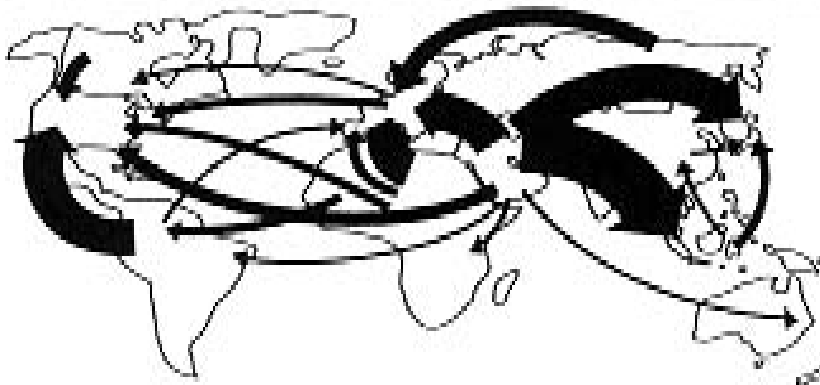
世界の石油貿易量 (1973年)



矢印の太さは貿易量を表す
矢印の長さ: 1mm=50万トン

出典: IEP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY (1973)

世界の石油貿易量 (1996年)



矢印の太さは貿易量を表す
矢印の長さ: 1mm=50万トン

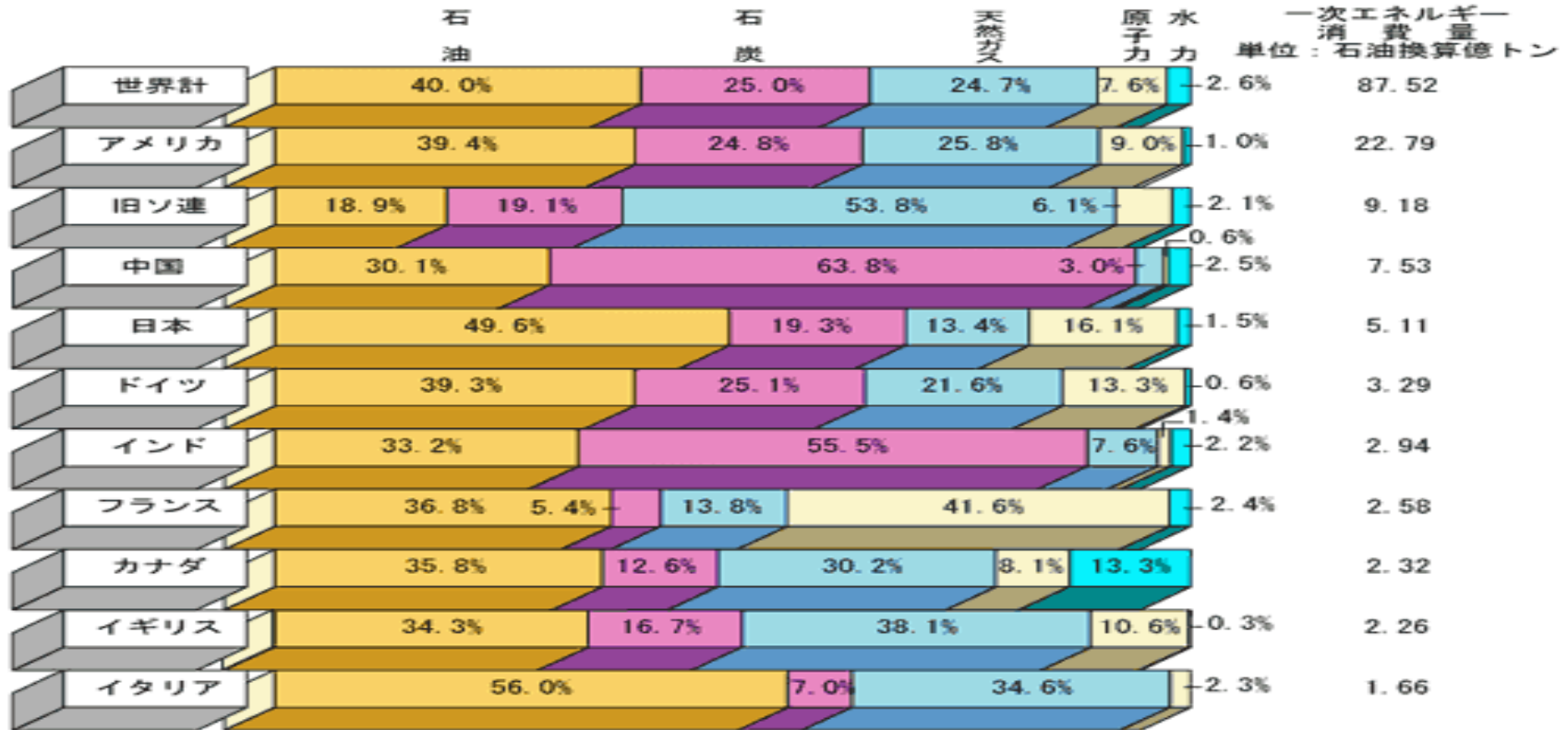
出典: IEP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY (1996)

半世紀における石油貿易の大きさの変化

1) はじめに 日本のエネルギー / 原子力 / 放射性廃棄物処分

再生エネルギー

カナダ(経済大国、自然が豊かで人口密度小、
水力利用に最適)
それでも一次エネルギーの13.3%



(注) %の合計が100に合わないのは四捨五入の関係

出所: 「BP統計」

1)はじめに 日本のエネルギー / 原子力 / 放射性廃棄物処分

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18億人から現在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7%から9%の経済成長を続けている。このまま推移すると、11から13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。

**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

46億年という長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。

現世代は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進行しつつあります。将来世代に配慮することも私たちの責任です。

環境に関わり合いの深いエネルギー、原子力、特に放射性廃棄物の発生とその処理処分の基礎について概論的に話を進めます。

1) はじめに

日本のエネルギー / 原子力 / 放射性廃棄物処分

2) 核燃料サイクル - 1 (燃料製造-原発・研究炉 ・・・核化学、)

3) 核燃料サイクル - 2 (バックエンド・・・放射線防護、 リスク)

4) まとめ

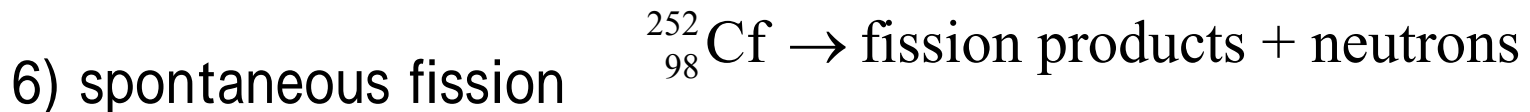
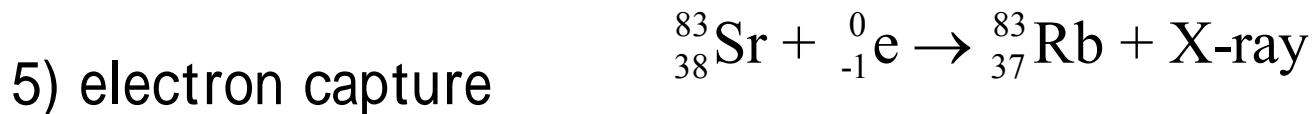
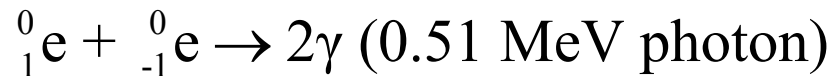
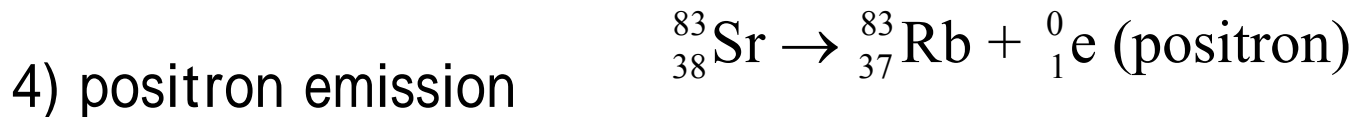
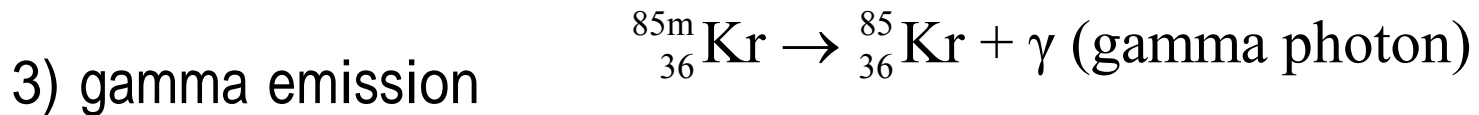
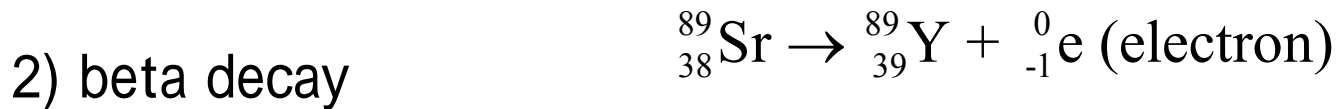
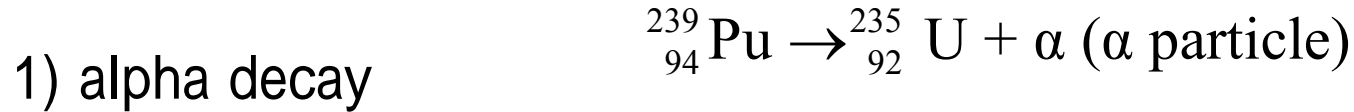
核燃料サイクル-1

(燃料製造-原発・研究炉
……核化学、)

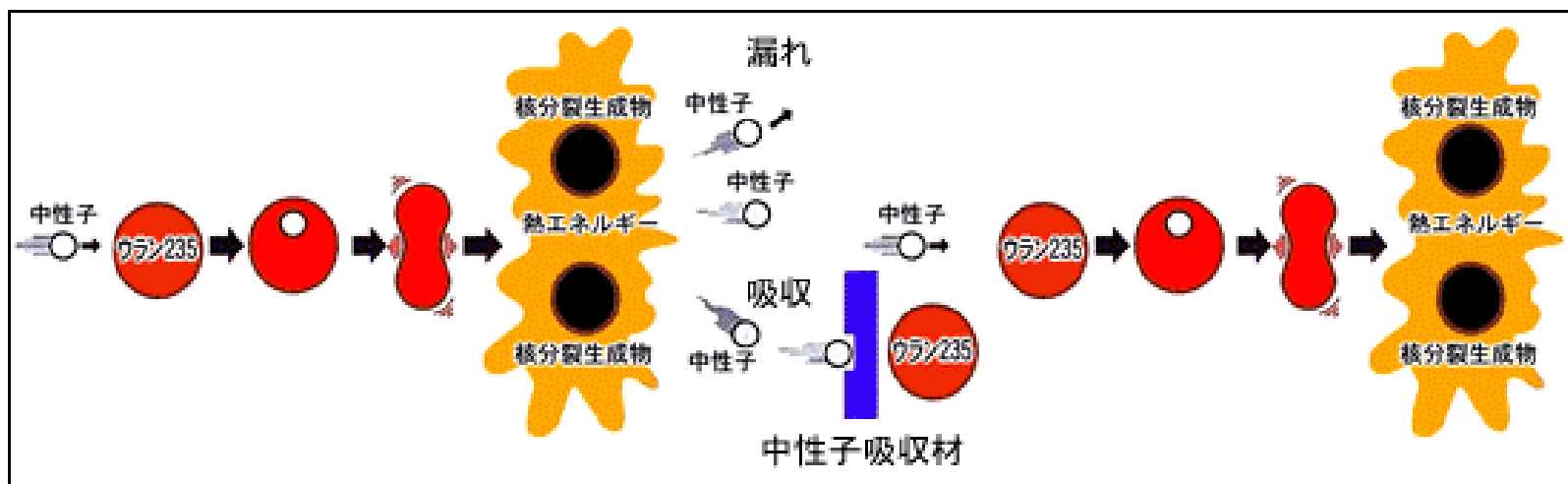
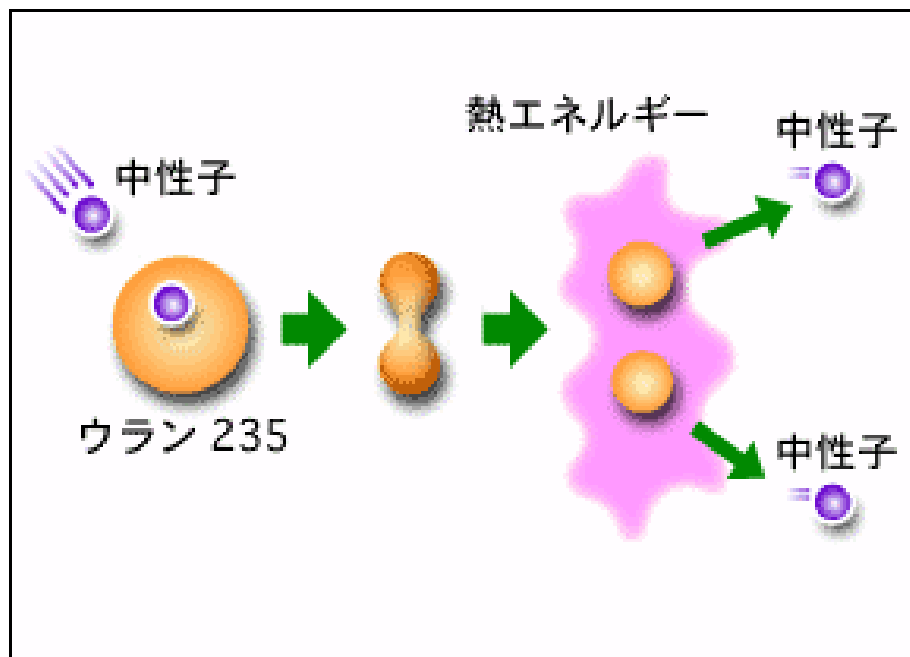


放射性壊変

放射性核種は次の6つの様式のいずれかで壊変または安定化する。



核分裂による熱の発生



(4) ウラン濃縮(省略)

(5) 再転換

濃縮した製品であるUF₆をUO₂粉末にする工程を再転換という。ここでは、湿式のADU法について説明。

- ・原料となるUF₆は濃縮工場からシリンダーに詰めて送られてくる。UF₆はシリンダー内で固体、大気圧下で加熱して気化させる。
- ・気体のUF₆を純水と反応させ、UO₂F₂を得る。
- ・アンモニア水と反応させて、だいたい色の重ウラン酸アンモン(ADU)、(NH₄)₂U₂O₇の沈殿を得る。
- ・ろ過し、乾燥させてADU粉末としたのち、焙焼、還元、粉碎の工程を経てUO₂粉末を得る。



PWR燃料集合体の製造

UO₂ペレットの製造、燃料棒の組み立て、燃料集合体の組み立て

電気出力1,180MWのPWRでは、

- ・UO₂で約100トン、燃料集合体数は193体
- ・燃料集合体1体当たり、17×17(289)の場合、264本の燃料棒。したがって炉心に燃料棒は193×264=50952と、5万本存在
- ・ペレットにすると、193×264×300=1600万個

UO₂ペレットの製造

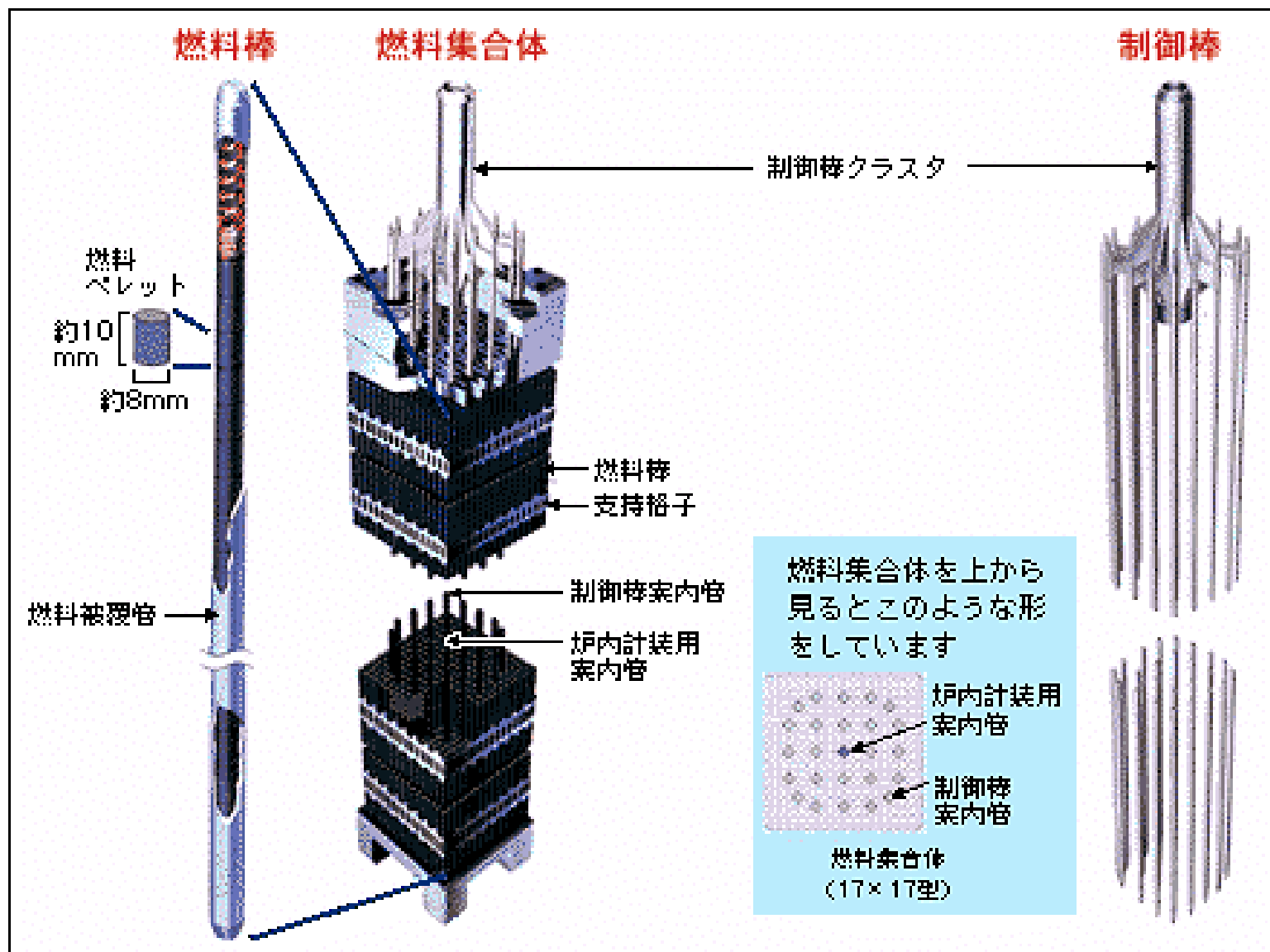
粉末前処理 → 成型 → 焼結 → 研削 → 検査

最近では経済性向上と使用済燃料発生量の減少のため、燃料の高燃焼度化の進行とともに、FPガスを保持できる大粒径ペレットを使用。

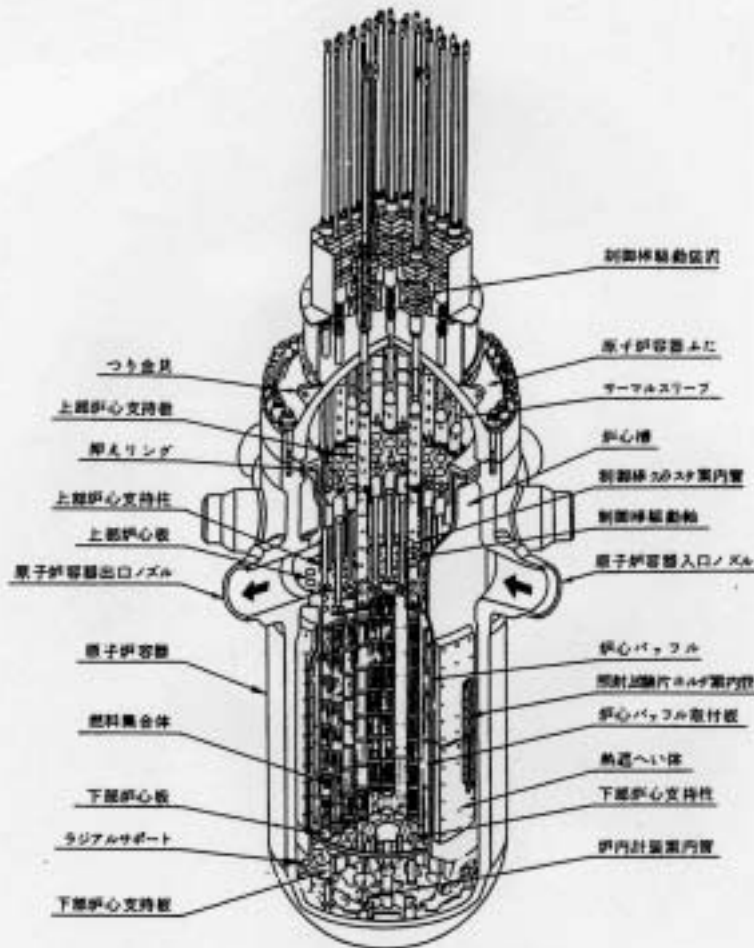
燃料棒組み立て

ペレット挿入 → 端栓溶接 → ヘリウムガス加圧溶接
(真空引き後、Heガス置換30気圧)

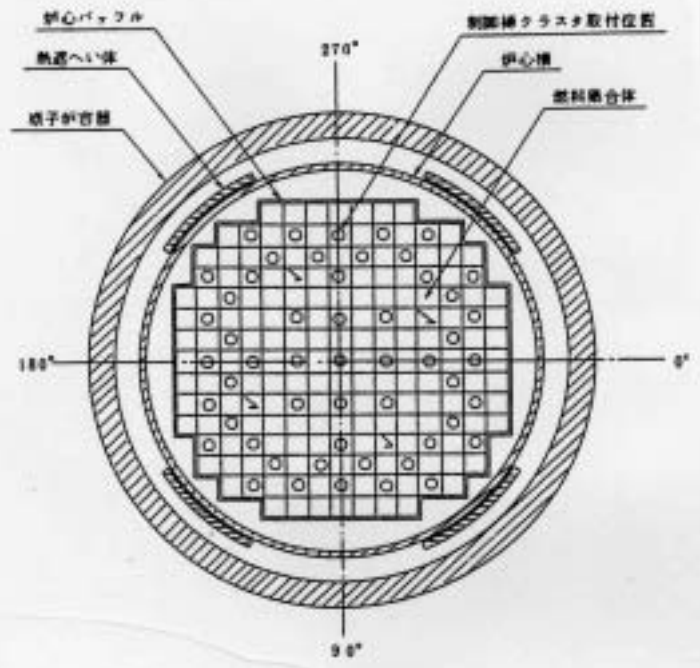
核燃料の構成



炉心の構成



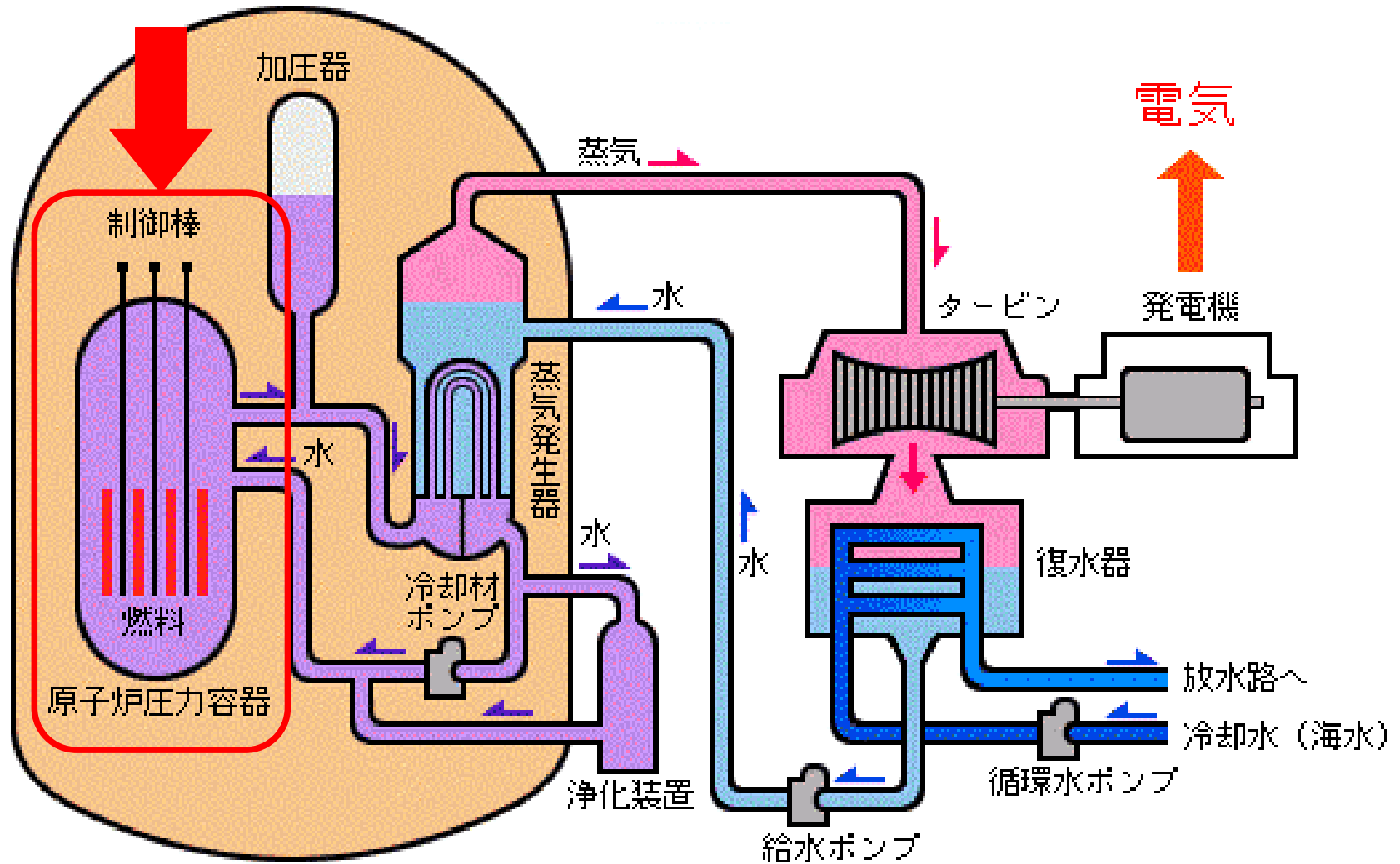
原子炉容器内構造図



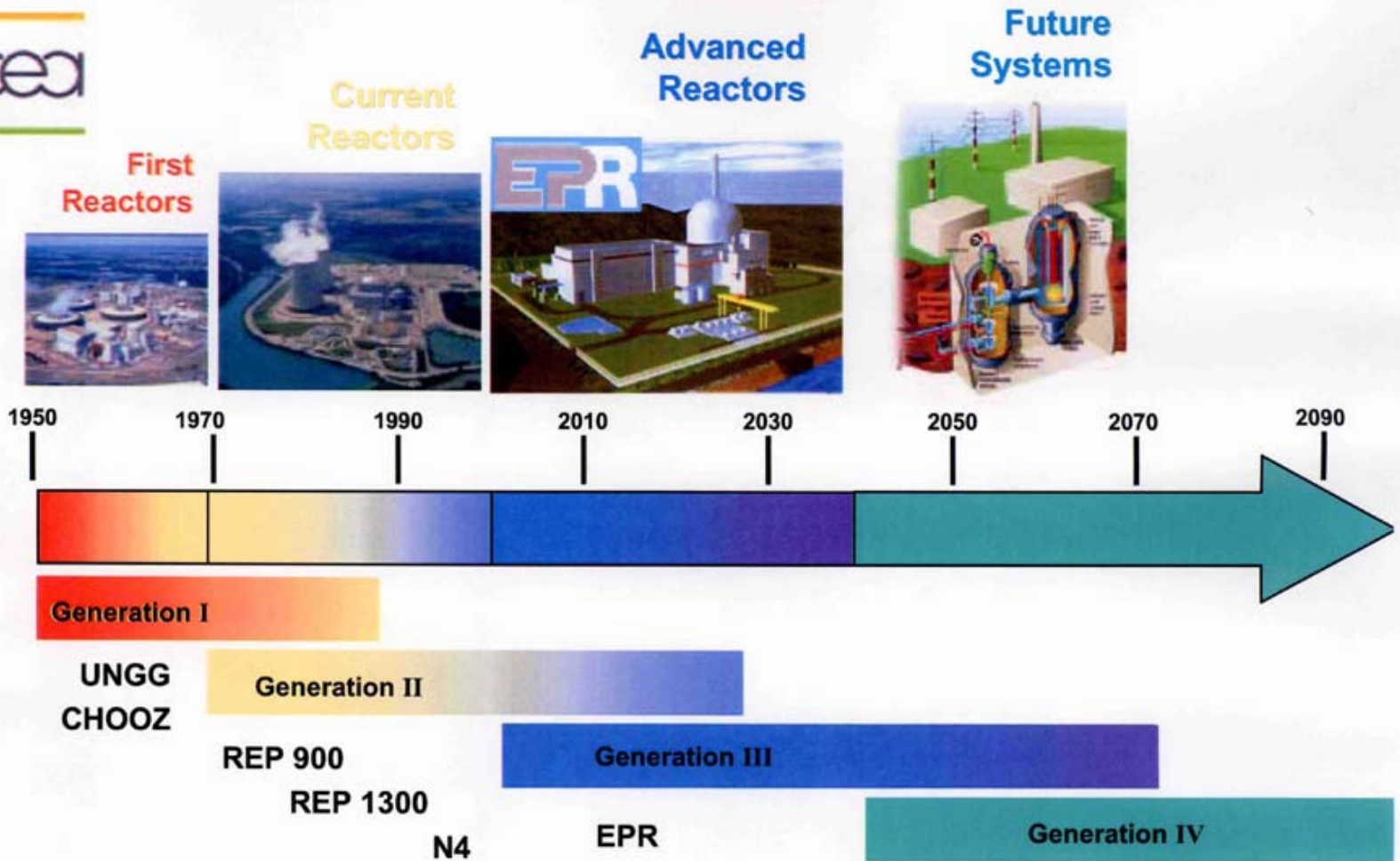
炉心断面図

原子力発電の仕組み

原子炉格納容器

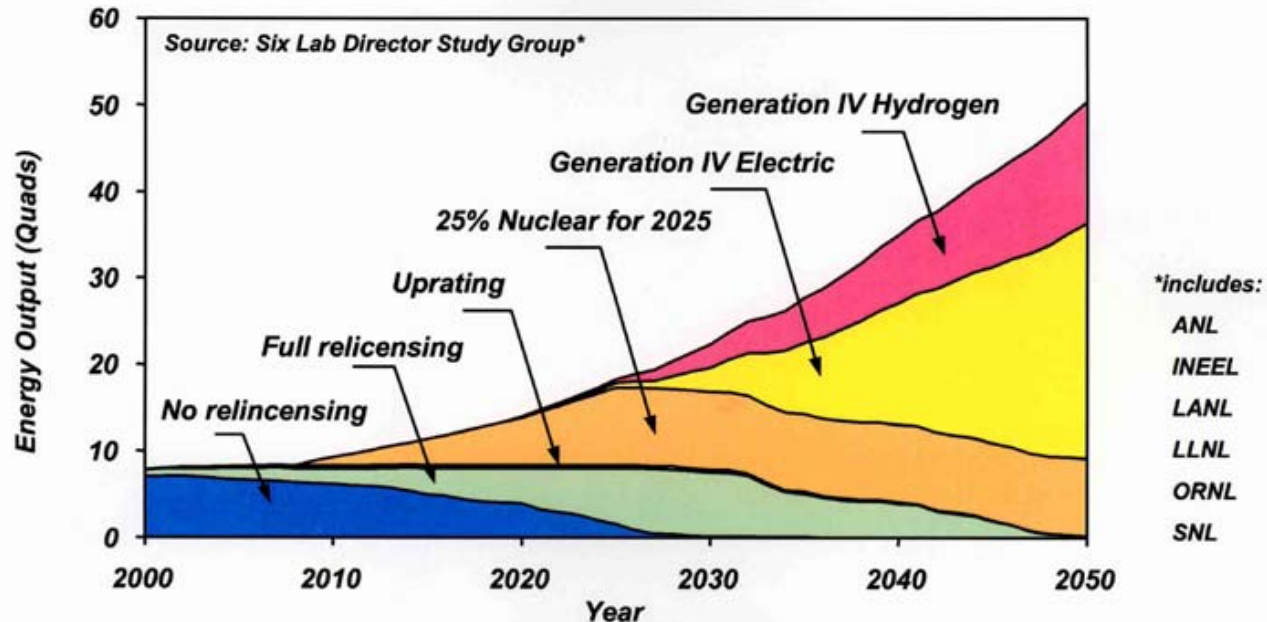


The Evolution of Nuclear Power



Expansion of the Nuclear Energy Supply

Nuclear Generation Scenarios

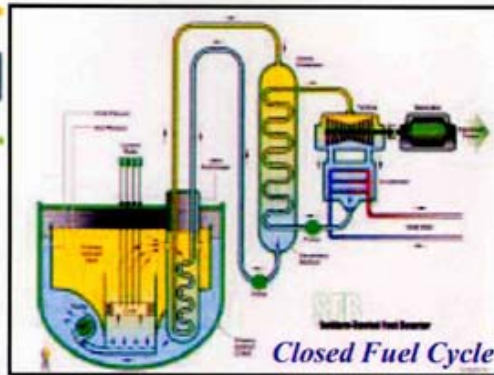


By 2050, with robust technology development:

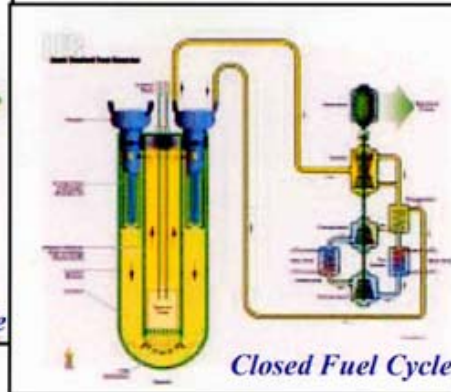
- **50% of U.S. electricity production could be nuclear**
- **25% of U.S. transportation could use hydrogen from nuclear energy**

Six Innovative concepts with technological breakthroughs

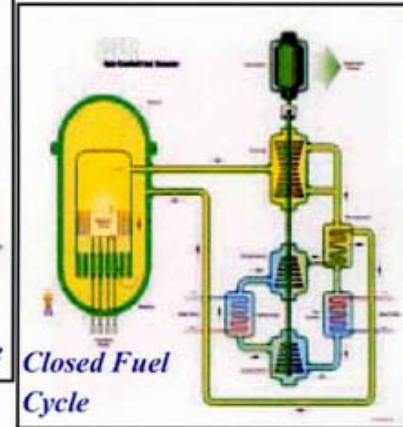
cea



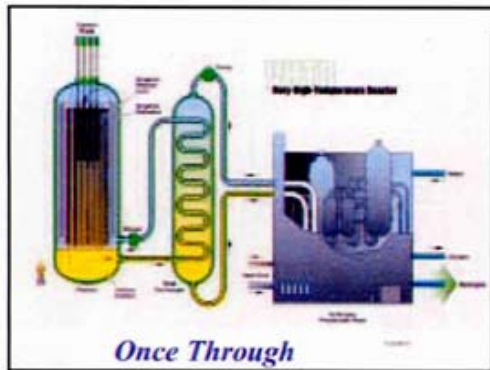
Sodium Fast reactor



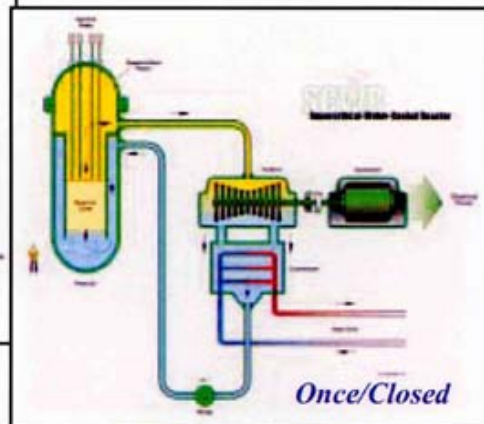
Lead Fast Reactor



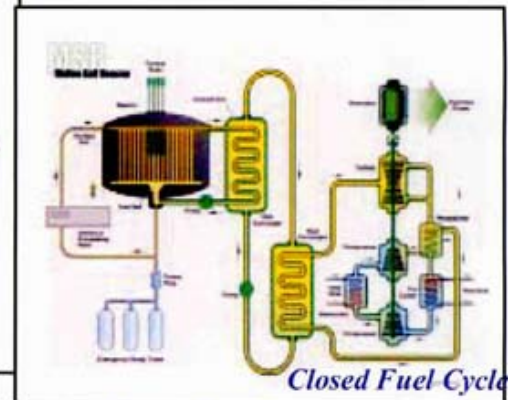
Gas Fast Reactor



Very High Temperature Reactor



Supercritical Water Reactor



Molten Salt Reactor

原子力発電事業と高レベル廃棄物の発生量(2001年)

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($10^6 \text{ kWh} \times 24 \times 365 \times 0.8$)

30円/kWhで、2,100億円/年、5.7億円/日

10円/kWhで、700億円/年、1.9億円/日

…使用済み燃料30トン

…ガラス固化体30本

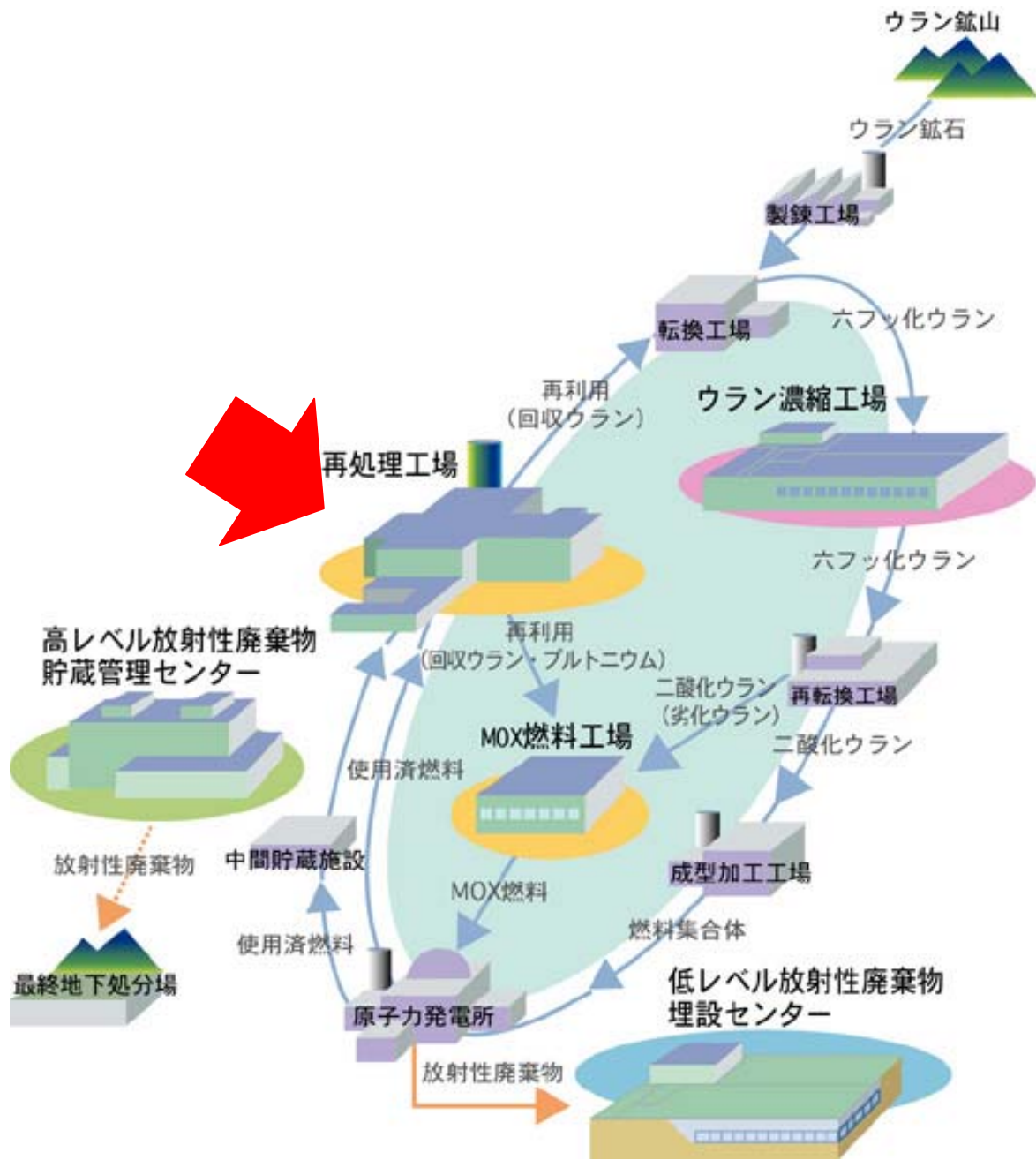
発電コストは5.1～5.9円/kWh(石炭:5.7～6.2,石油:10.7～)

現在、原子力発電所の定格電気出力は52基で4,574万kW
発電電力量は、3,175億kWh、35%

年間、1200本のガラス固化体が発生

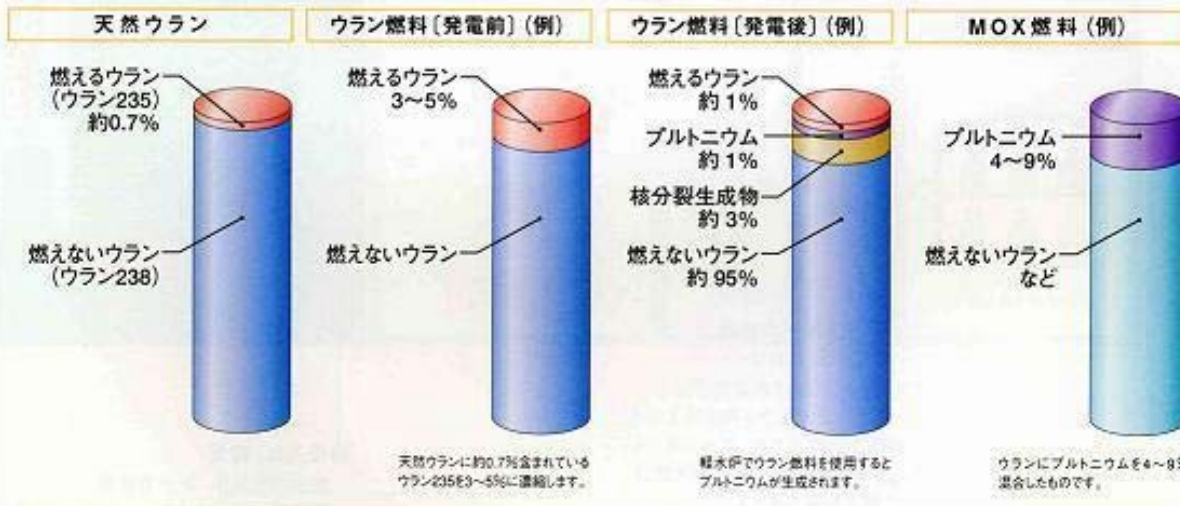
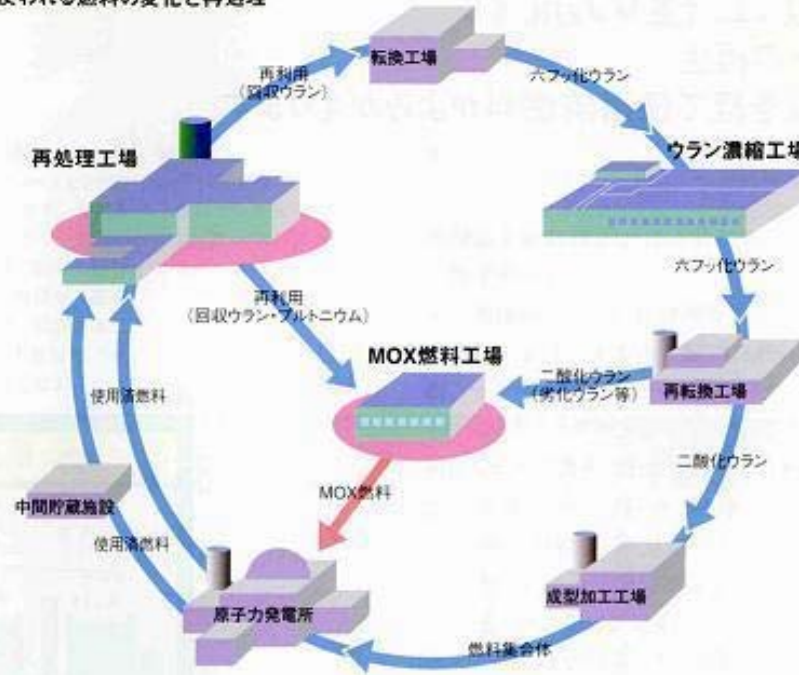
2030 - 2040年代半ばまでの累積発生数は
数万本……………地層処分場の面積は数 km^2

ガラス固化体の処分費用は3,590万円/本

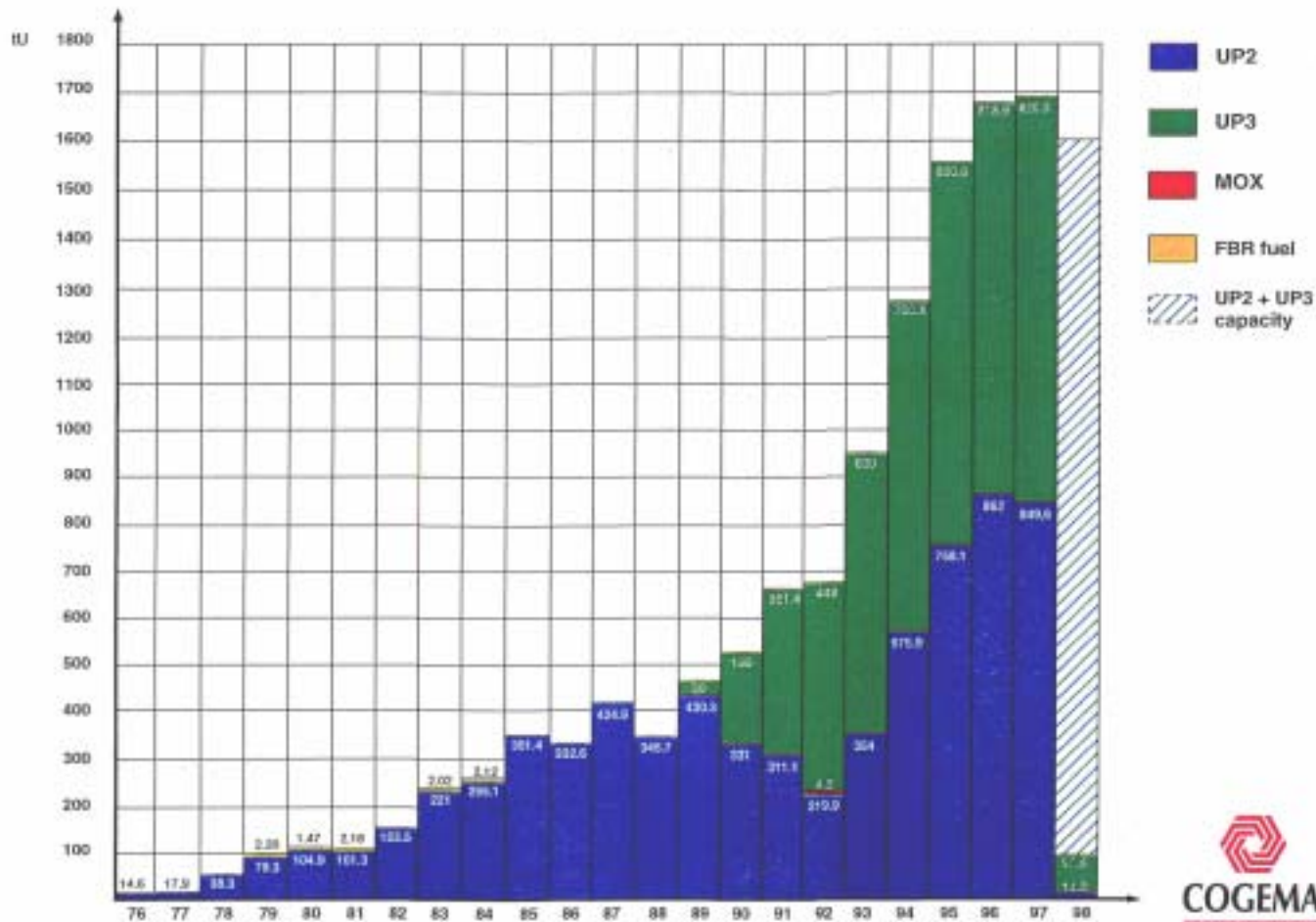


核燃料サイクルと廃棄物の発生

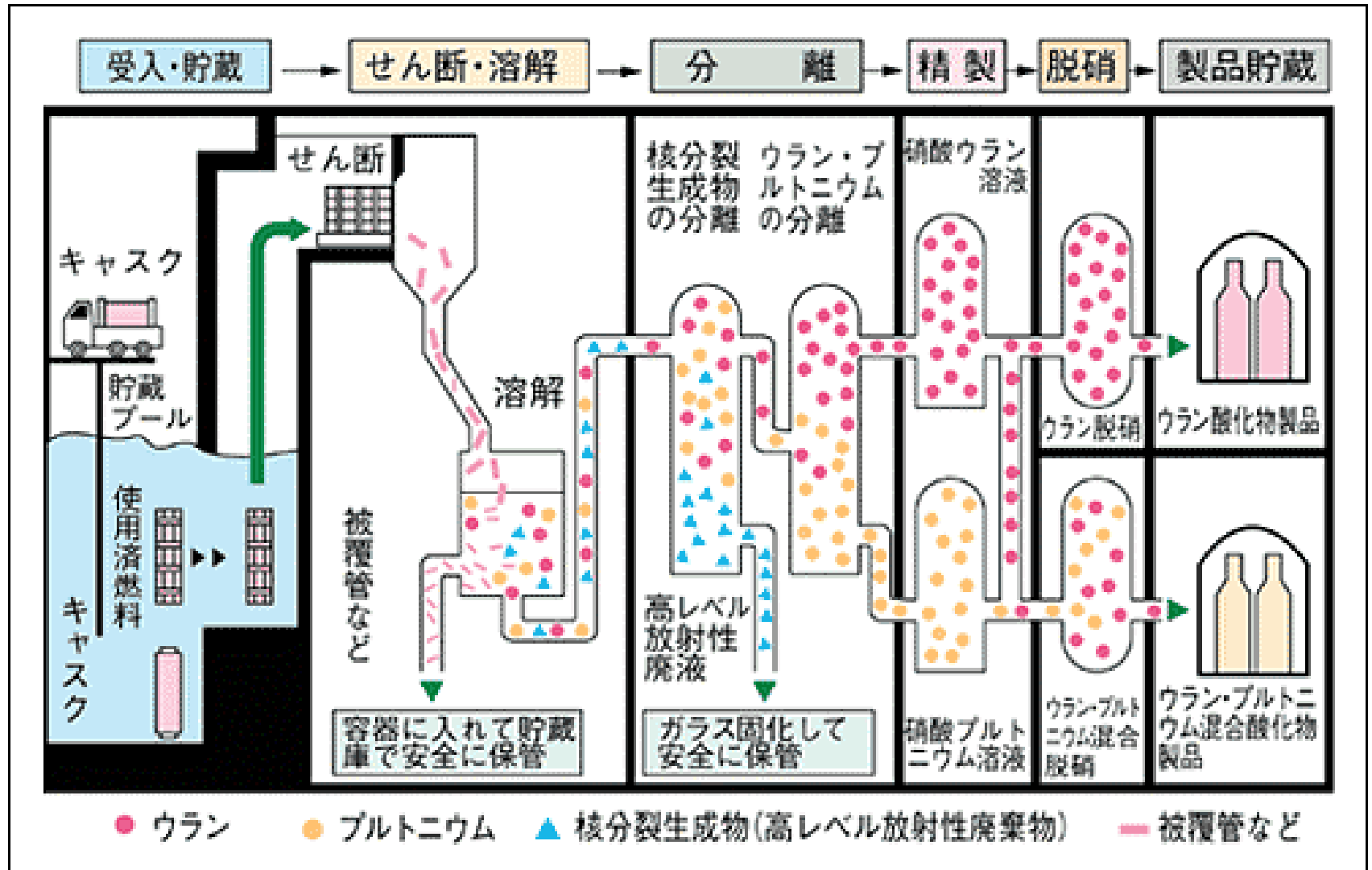
原子力発電所で使われる燃料の変化と再処理



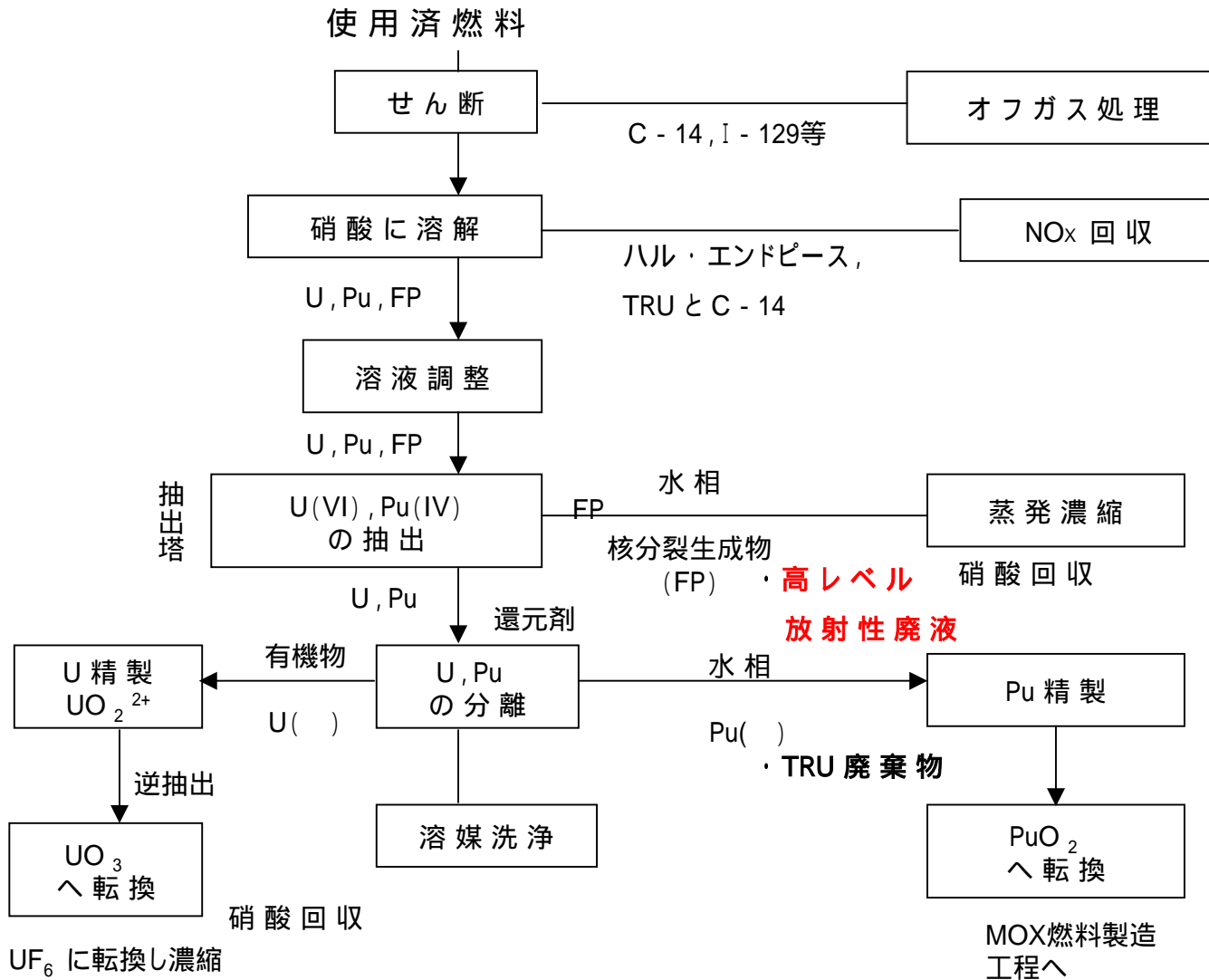
ANNUALLY REPROCESSED UP2/UP3 (フランスの実績) TOTAL QUANTITY AS OF FEBRUARY 1ST, 1998



使用済み核燃料の再処理工程



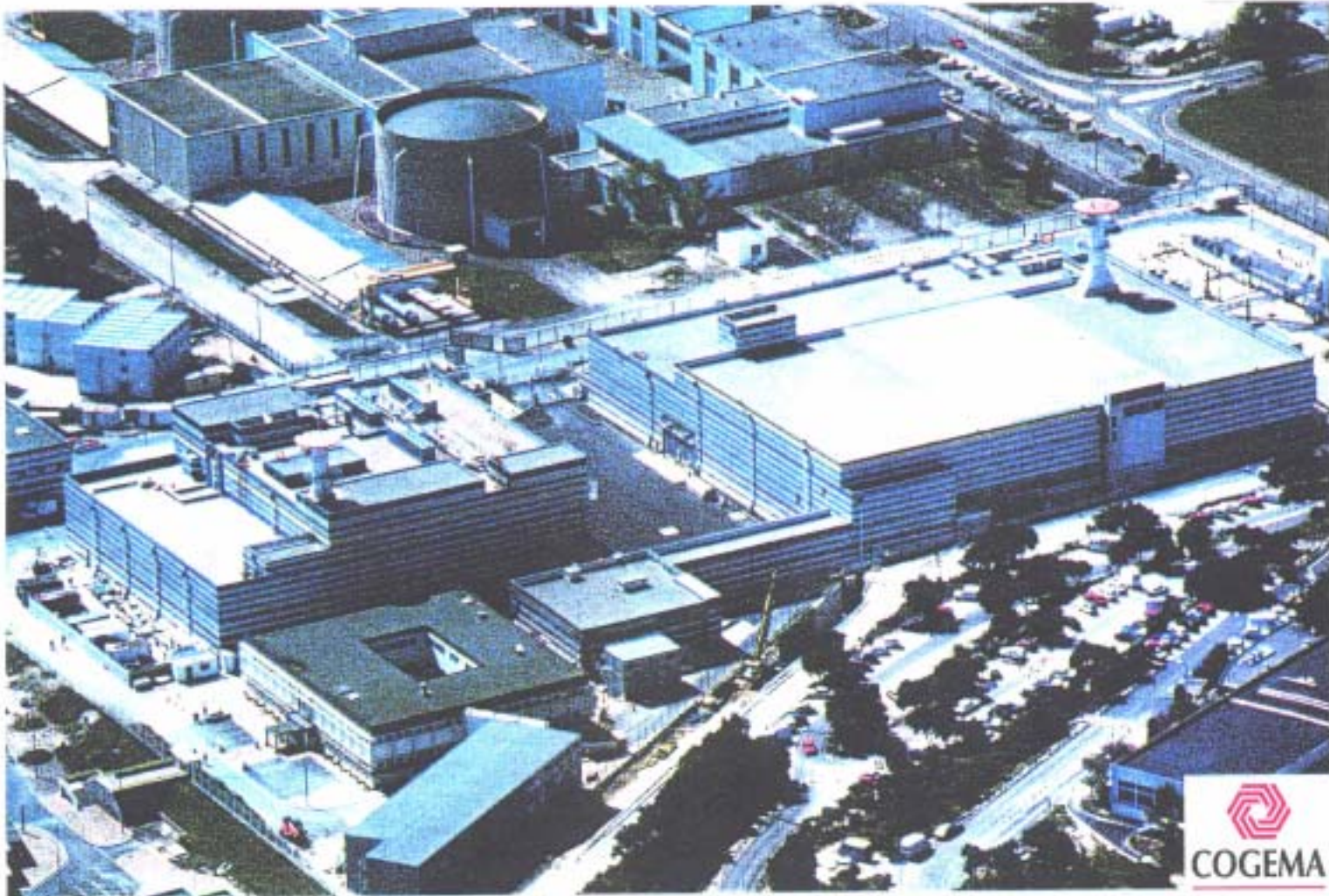
核燃料サイクルと廃棄物の発生



再処理と放射性廃棄物の発生

MOX FUEL FABRICATION PLANT, MELOX (フランスの実績)

MARCOULE



放射性廃棄物の発生

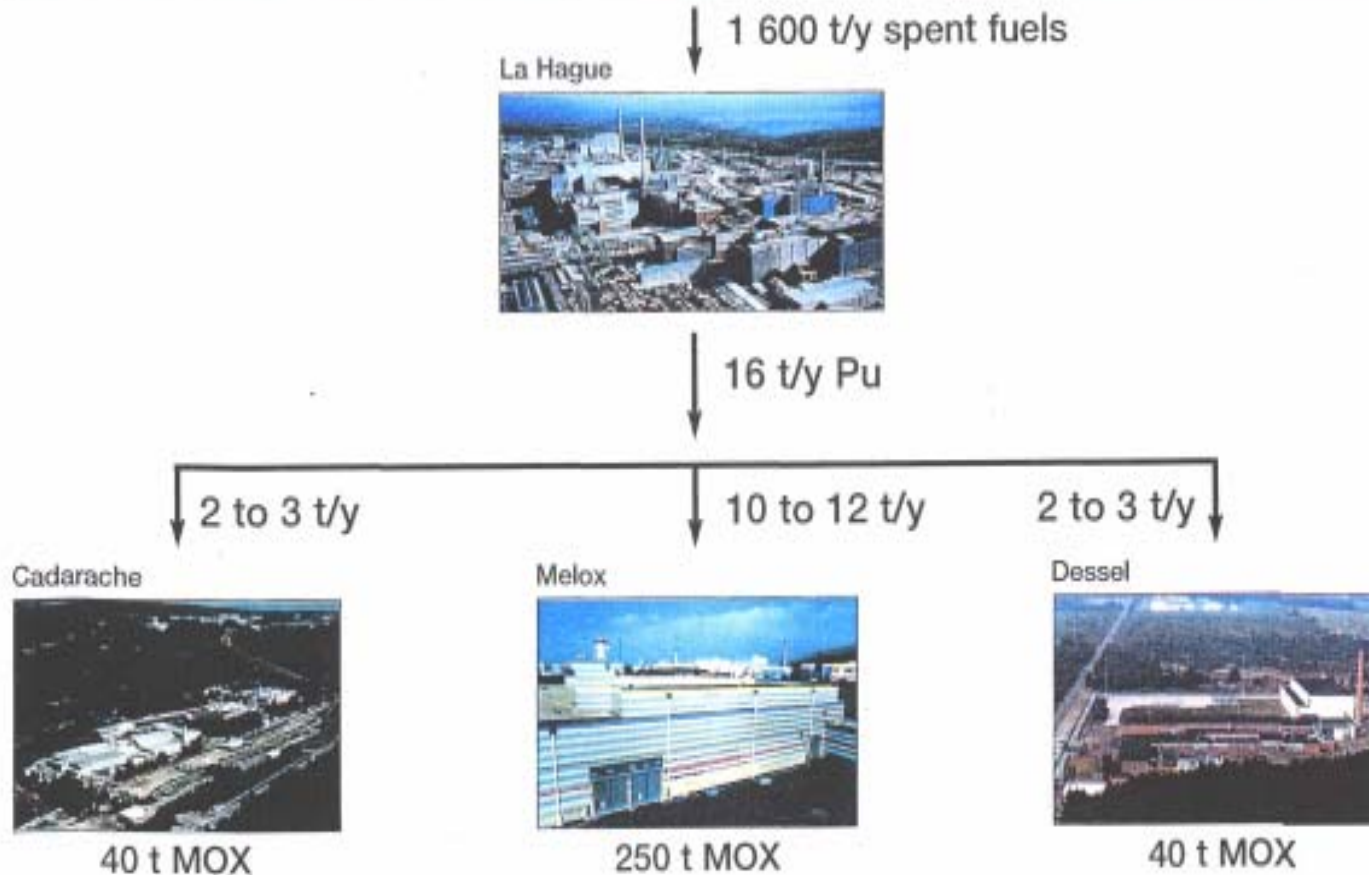
- (1) 低レベル放射性廃棄物
原発、再処理工場、RIを使用する研究機関から発生、
放射能のレベルは比較的低い。ドラム缶にセメント等
で固化、六ヶ所村で処分実施中。

- (2) 高レベル放射性廃棄物
原発の使用済燃料を起源として発生
放射能のレベルは極めて高い
(1)使用済核燃料, (2)ガラス固化体の
処分場の立地は今後の課題

- (3) TRU廃棄物
再処理工場, MOX燃料加工工場で発生
(2)に比べて放射能レベルは低い、 線を放出する
ため毒性の高いTRU元素(主にプルトニウム)を含む
セメント固化・・・検討中
処分場の立地は今後の課題

核燃料サイクルと廃棄物の発生 (フランスの実績)

ILLUSTRATION: COGEMA MOX FABRICATION CAPABILITIES BY THE YEARS 2000s

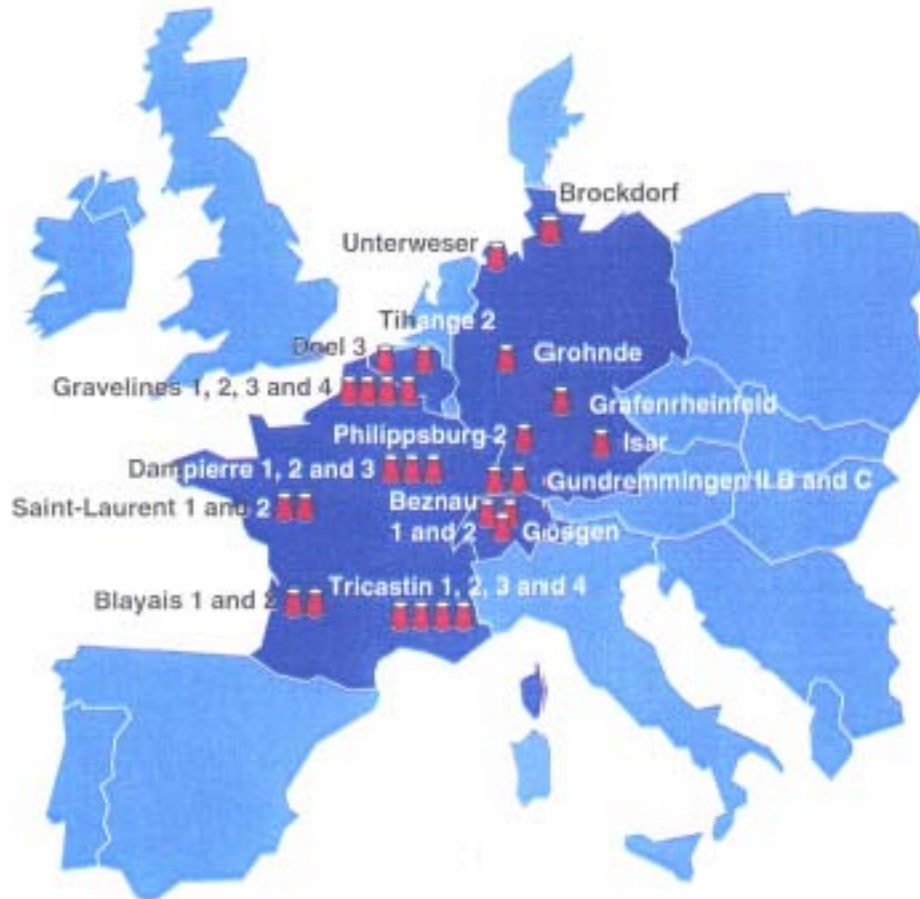


MOX FUEL - AN INDUSTRIAL REALITY

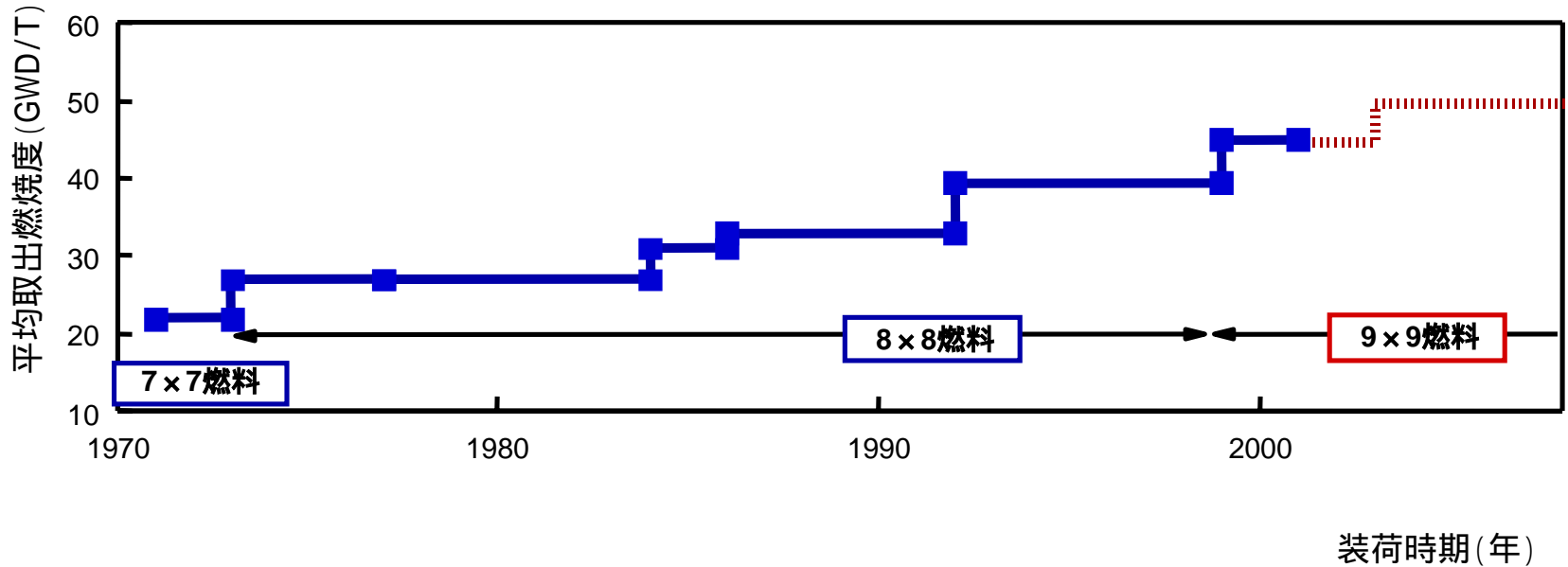
	Reactors in operation	MOX authorized reactors	"Moxified" reactors	First commercial MOX loading date
France	57	16	15	1987
Germany	21	11	8	1982
Belgium	7	2	2	1995
Switzerland	5	4	3	1988

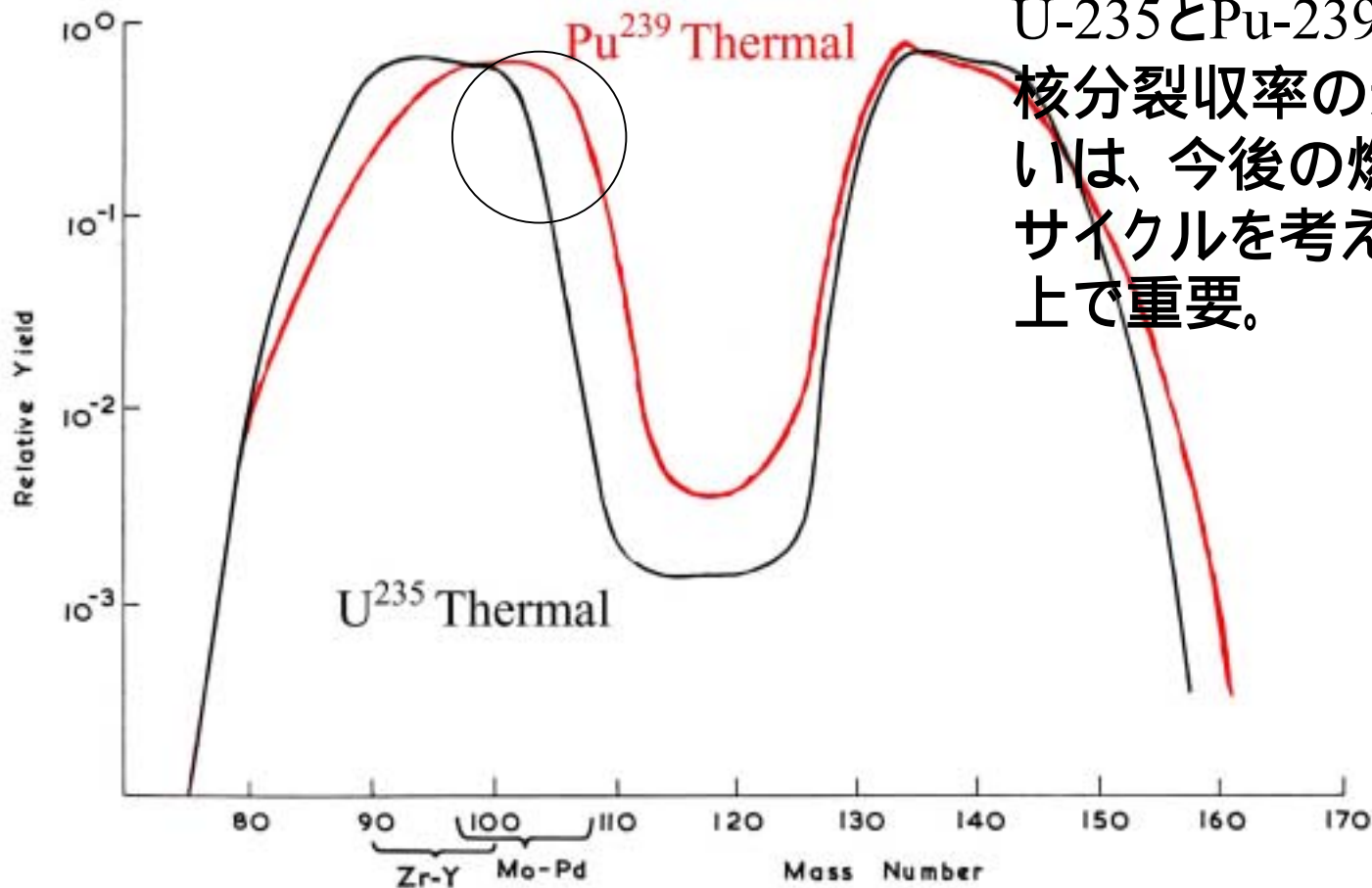
核燃料サイクルと廃棄物の発生 (欧州各国の実績)

REACTOR CORES LOADED WITH MOX FUEL STATUS AS OF APRIL 1ST, 1998



高燃焼度化：BWR燃料設計の推移 (Puの燃焼)





Puの燃焼および、
 U-235とPu-239
 核分裂収率の違いは、今後の燃料
 サイクルを考える
 上で重要。

[J. H. Davis and F. T. Ewart, *J. Nucl. Mater.*, 41: 143 (1971)]

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。

現世代は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進行しつつあります。将来世代に配慮することも私たちの責任です。

環境に関わり合いの深いエネルギー、原子力、特に放射性廃棄物の発生とその処理処分の基礎について話を進めます。

1) はじめに

日本のエネルギー / 原子力 / 放射性廃棄物処分

2) 核燃料サイクル - 1 (燃料製造-原発・研究炉 ・・・核化学、)

3) 核燃料サイクル - 2 (バックエンド・・・放射線防護、 リスク)

4) まとめ

放射性廃棄物の区分と現状

廃棄物の種類		廃棄物の例	発生源	廃棄物量	
高レベル放射性廃棄物		ガラス固化体	再処理施設	ガラス固化体 換算15,500本 ⁽¹⁾	
低 レ ベル 放 射 性 廃 棄 物	超ウラン核種を含む 放射性廃棄物	ハル、エンドピース、ヨウ 素吸着フィルター、廃液	再処理施設、 MOX燃料加工施設	ドラム缶 87,000本 ⁽²⁾	
	ウラン廃棄物	消耗品、スラッジ、廃器材	ウラン濃縮、燃料加 工施設	ドラム缶 114,000本 ⁽²⁾	
	発電所廃棄物	高	制御棒、炉内構造物	原子力発電所	8,000トン ⁽²⁾
		低	廃液、フィルター、廃器材 等を固形化		ドラム缶 500,000本 ⁽³⁾
極低		コンクリート、金属			
RI研究所等廃棄物		実験、医療用廃棄物	RI利用施設、研究所	ドラム缶 391,000本 ⁽²⁾	
クリアランスレベル以下の 廃棄物		解体廃棄物の大部分	上記全て		

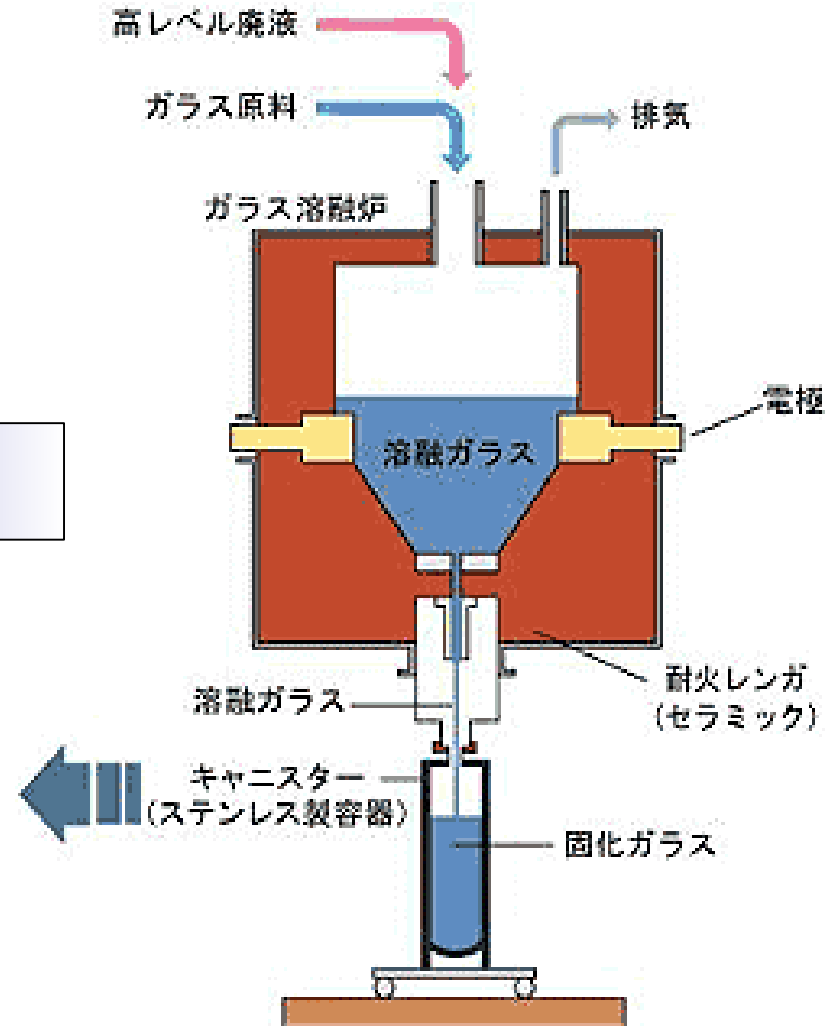
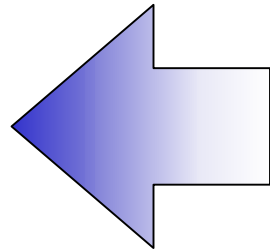
(1)平成14年1月末現在、(2)平成10年3月末現在、(3)平成12年1月末現在

たまっている放射性廃棄物は、高レベルが1.5万本、低レベルが100万本

高レベル廃棄物の処理

高レベル廃棄物処理装置(ガラス溶融炉)

ガラス固化体



廃棄物の処分概念と安全確保



高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター



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

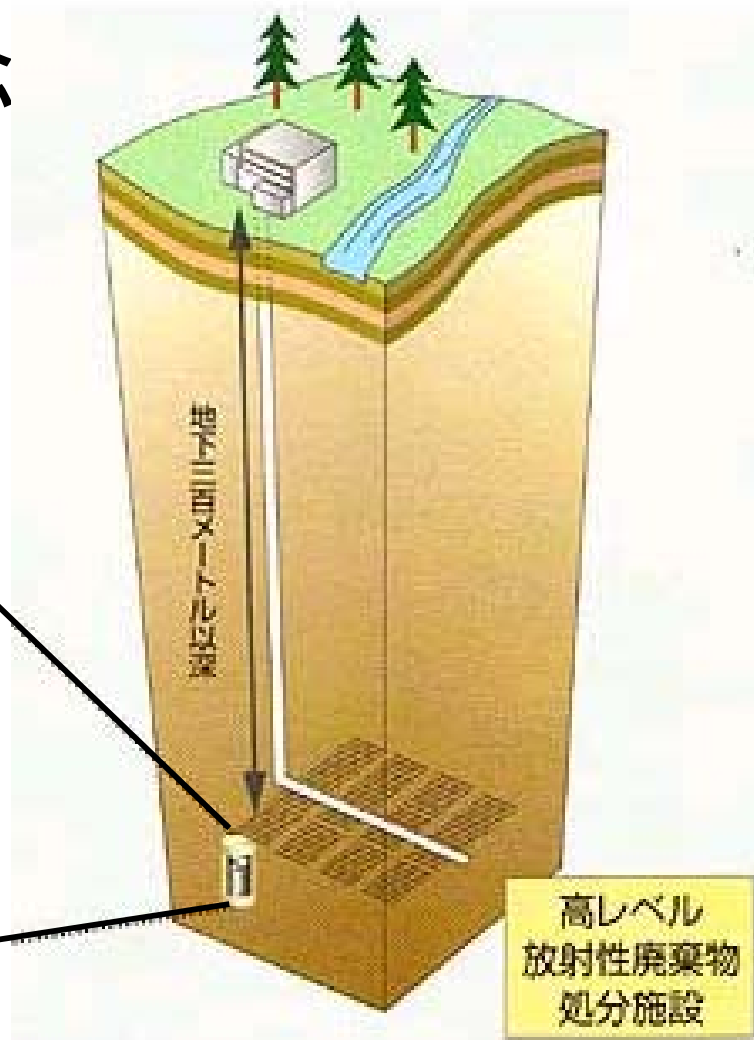
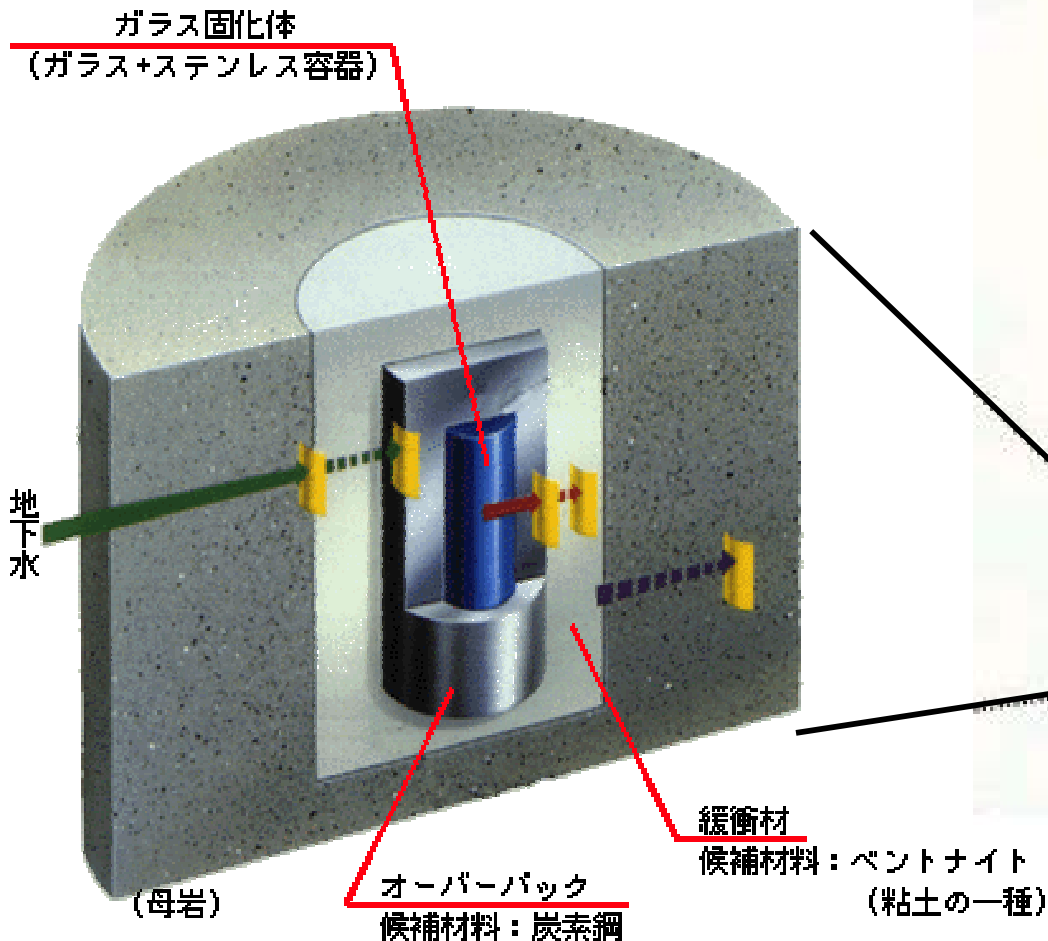


貯蔵ピット



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



高レベル放射性廃棄物：なぜ地層処分か(その1)

1)「分散か封じ込め」かの選択

高レベル放射性廃棄物のように多量の放射性物質を含むものでは分散は不可能

高レベル放射性廃棄物は「封じ込め」

2)「きわめて長期的に人間が関与をするか、しないか」の選択

きわめて長期的な人間の関与を必要とする無期限の長期貯蔵は倫理的に問題

理由：現世代が利益を得た結果として発生した負の遺産である廃棄物を、後々の世代に残してはならない。

人の手を放れた長期の安全確保が可能な処分でなければならない。

なぜ地層処分か（その２）

高レベル放射性廃棄物は「封じ込め」

人の手を放れた長期の安全確保が可能な処分でなければならない。

それでは具体的な処分とは？

- 1) 宇宙処分・・・スペースシャトル・チャレンジャ - の事故
- 2) 氷床処分・・・南極大陸：南極条約で放射性廃棄物の処分禁止
- 3) 海洋底下処分・・・公海下
- 4) 地層処分：

人間の継続的な関与なしに長期的な安全が確保できる。

封じ込めによる長期的な安全性を科学的に評価できる見通しがある。

廃棄物を発生する国の領土内で処分が実施できる可能性がある。

再取り出しが不可能ではない。

以上の点で地層処分が最も有望

核種封じ込めに関する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

(ガラス) (水を極めて通しにくい粘土) (岩盤)

- 1) ガラス固化体から地下水中への核種の浸出率は年 10^{-5} 以下と低い。……実験で確認できる
- 2) 緩衝材および処分場周囲の地層による核種の封じ込めが効果的である。

緩衝材と地層の核種封じ込め効果とは？

- (1) 放射性核種はイオンとして地下水を介して移行する。
- (2) 深地層の岩石は鉱物から構成されている。
- (3) 鉱物はイオン交換樹脂に類似した無機イオン交換体で、
$$-\text{SiO} \cdot \text{H} + {}^{137}\text{Cs}^+ = -\text{SiO} \cdot {}^{137}\text{Cs} + \text{H}^+$$
$$-\text{AlO} \cdot \text{H} + {}^{137}\text{Cs}^+ = -\text{AlO} \cdot {}^{137}\text{Cs} + \text{H}^+$$
のように、イオン交換樹脂の特性と同じイオン交換過程により放射性核種は吸着される。
- (4) 地層そのものが膨大な量の無機イオン交換体である。
- (5) 処分場から放出された場合でも、核種は岩石 / 鉱物に吸着し、その移行速度は地下水に比べ著しく遅くなる。

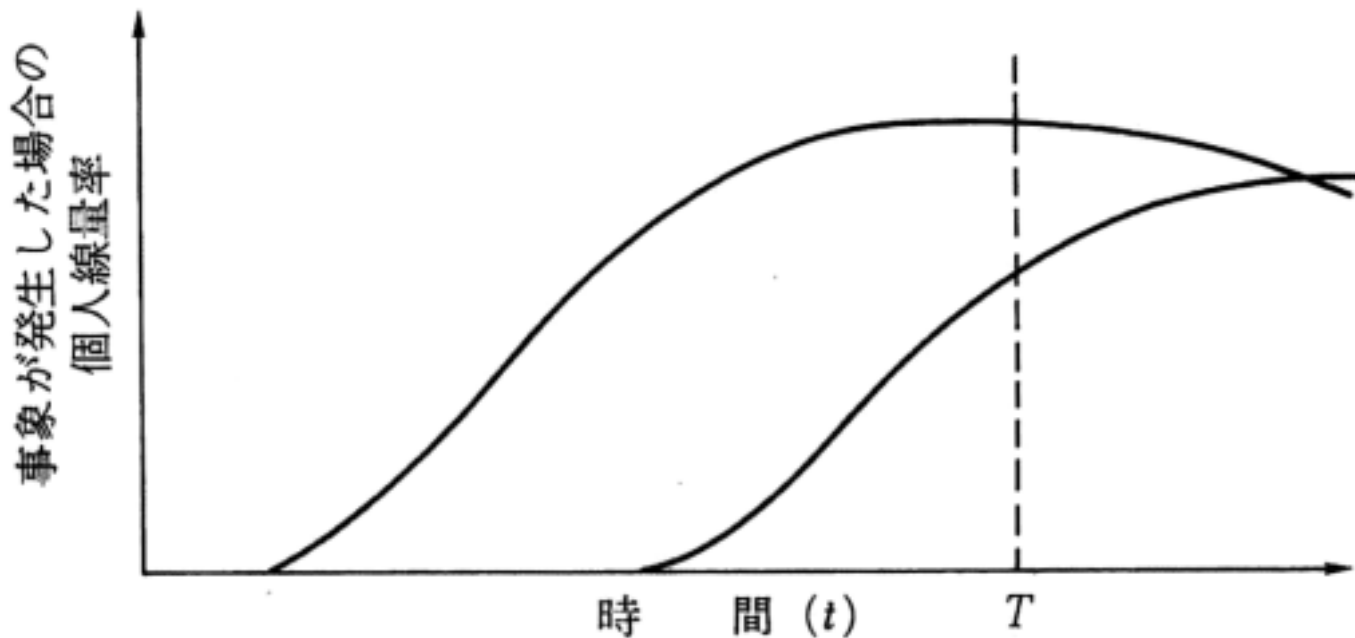
廃棄物の処分概念と安全確保

緩衝材および処分場周囲の地層による核種の封じ込めが効果的である。従って、適切に処分場を選定できれば、数千年から数万年にわたり地層処分の安全確保は有望である。

一方、実験室での研究とともに深地層を対象とした本格的な研究が重要である。すなわち、深地層地下研究施設が欠かせない。

フランスは地下研究施設建設候補地を決定し2006年まで研究を続け、その結果をもとに議会でその後の計画を決定する予定。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。米国とフィンランドは処分地を決定。

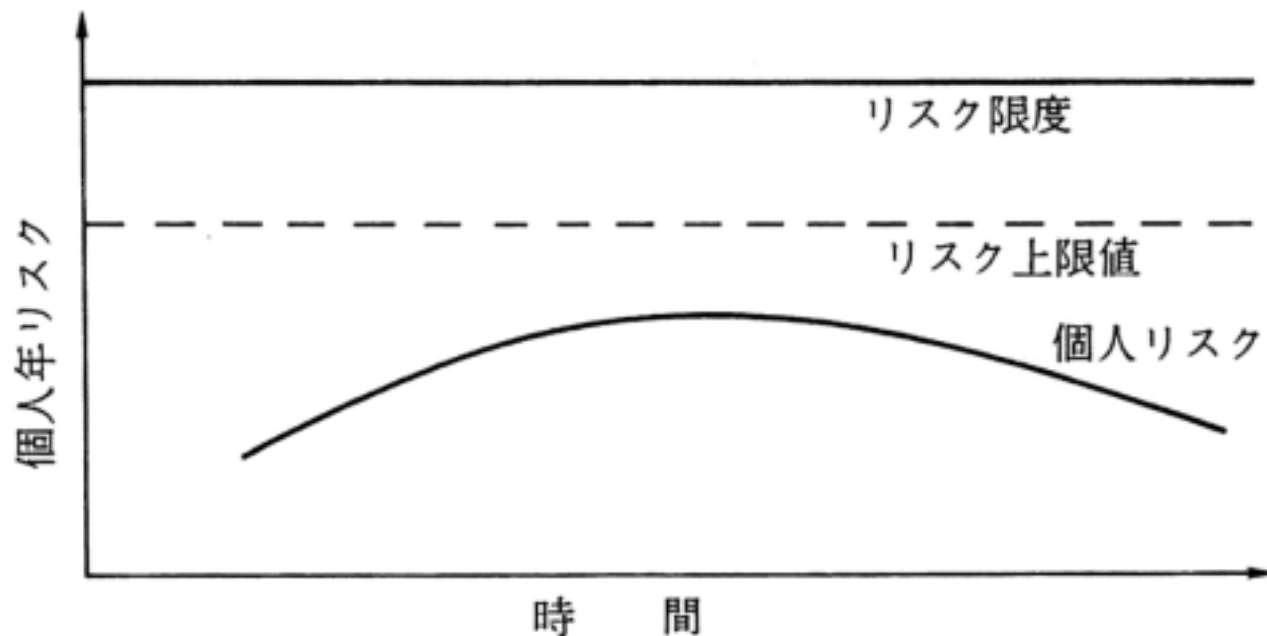
わが国でも、2000年に、核燃料サイクル開発機構が第2次とりまとめを公表。東濃地区(岐阜県)と幌延地区(北海道)で地下研究施設での研究開発がはじまろうとしている。



放射性廃棄物処分後二つの異なる時刻に起こる破壊的事象による仮想的個人線量率の図示例

$$P(T) = rL \cdot \int_0^T f(t) \cdot g(t, T-t) dt$$

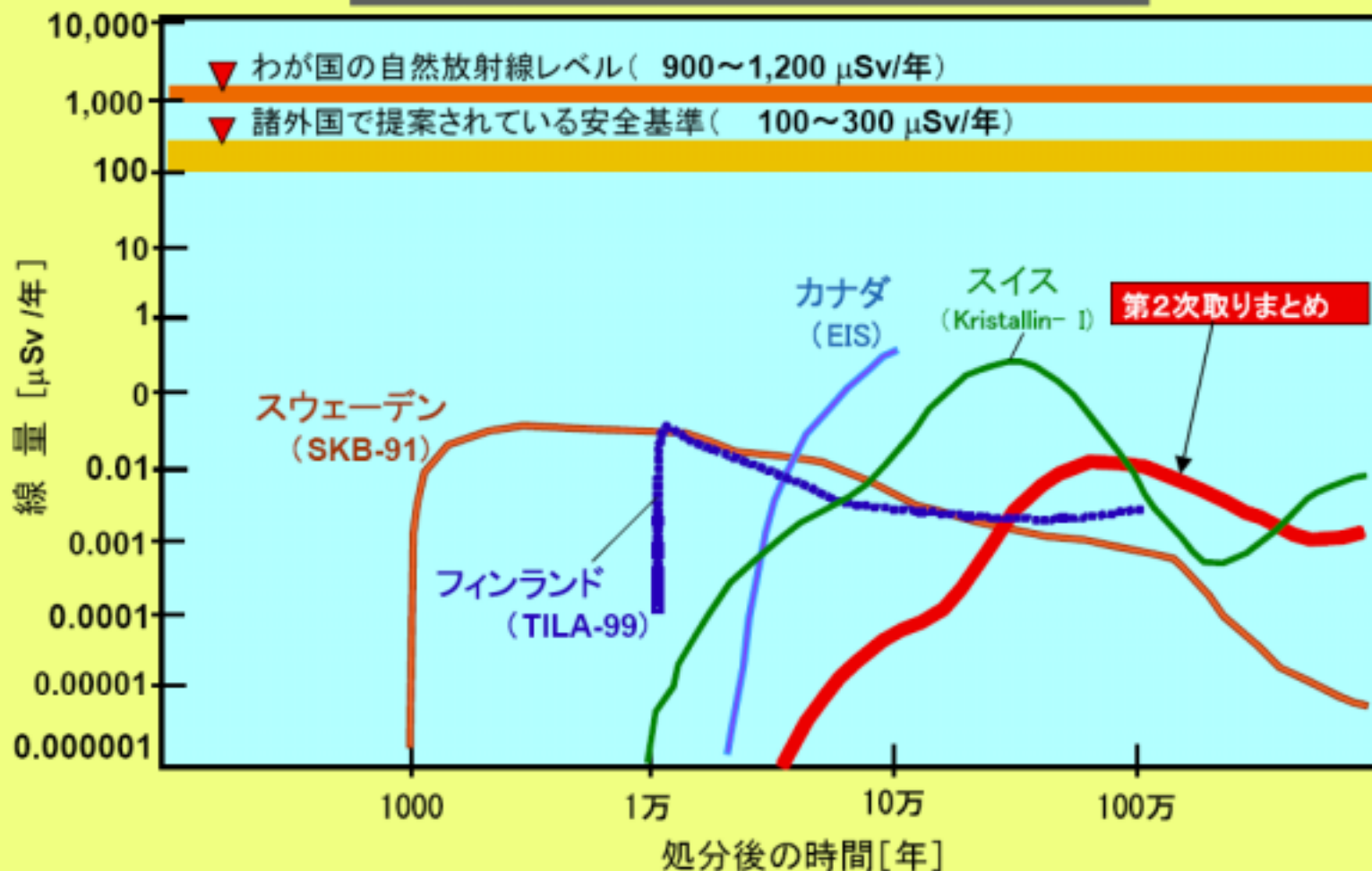
$$\sum P^1(T)$$



被曝の確率分布と条件付影響を積分して得られる種々の時点における個人のリスクの予測値と、リスク限度あるいはリスク上限値との比較の例示，すべての種類の事象についての合計

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 -



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。その結果、地球温暖化の可能性が高く、オゾン層破壊の可能性も否定できない。現世代のみならず将来世代の人々の生き方に制約を課す可能性があり、現代人の倫理観が問われている。

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。したがって、常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。われわれは選択肢を持っているか？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、放射性廃棄物処分に関する研究を着実に進める必要がある。

拡散支配・イオン交換等により優れた性能を有する工学バリア(障壁)と、不確実性はあるものの膨大な吸着容量を有する天然バリアにより、処分場を適切に選ぶことができれば、地層処分は有望である。

今後は、将来世代のためにも、文明を豊かにしてきた科学技術をものでづくりのみならず、サービス分野や環境保全の分野にも積極的に活用し、新しい産業分野として発展させていかなければならない。放射性廃棄物に関する研究開発はこの分野の先駆けを担うものとして期待される。

有望視される地層処分

福井大副学長、東海小池あり
日本のエネルギー事情と
環境問題は、共に解決す
る必要がある。今後ばら
ばらにエネルギーを安らげ



佐藤 正知・北大助教授(原子力工学)

福井 福井市生まれ。1975年、北大大学院工学研究科博士課程修了、理学博士。米シカゴ大ジョージム・フランク研究所、九州大工学部を経て帰国。最近の共著「放射線学 エネルギー」(ナツメ社)。

長期の環境影響が焦点

長期にわたる環境影響が、原子力発電所の地層処分の焦点となっている。福島第一原子力発電所が、2011年に稼働を開始する。その際に、放射性廃棄物の処理が課題となる。地層処分は、放射性廃棄物を地下深くに埋め込む方法で、長期にわたる環境影響が焦点となっている。佐藤正知氏は、地層処分の安全性を評価する必要があると指摘している。

研究への理解広げる場に

地層処分の安全性を評価する必要があると指摘している。佐藤正知氏は、地層処分の安全性を評価する必要があると指摘している。地層処分の安全性を評価する必要があると指摘している。地層処分の安全性を評価する必要があると指摘している。

安全性確保の方法探る

最終処分場建設を決断

巨大建設費がかさむ。02年に完成する、政府がライオン社や、手上げ、岩盤を掘る必要 地盤掘削との対応をめぐり、最終処分場建設の決断を迫る。ライオン社は、最終処分場建設の決断を迫る。ライオン社は、最終処分場建設の決断を迫る。

50年来の難題 打開へ一歩

ライオン社は、最終処分場建設の決断を迫る。ライオン社は、最終処分場建設の決断を迫る。ライオン社は、最終処分場建設の決断を迫る。



使用済み核燃料の封印カプセルの壁に立つライオン社の社員

ライオン社は、最終処分場建設の決断を迫る。ライオン社は、最終処分場建設の決断を迫る。ライオン社は、最終処分場建設の決断を迫る。

エネルギー世界 原発新潮流

全米十五、億のインベス 全米十五、億のインベス 全米十五、億のインベス

ライオン社は、最終処分場建設の決断を迫る。ライオン社は、最終処分場建設の決断を迫る。ライオン社は、最終処分場建設の決断を迫る。