

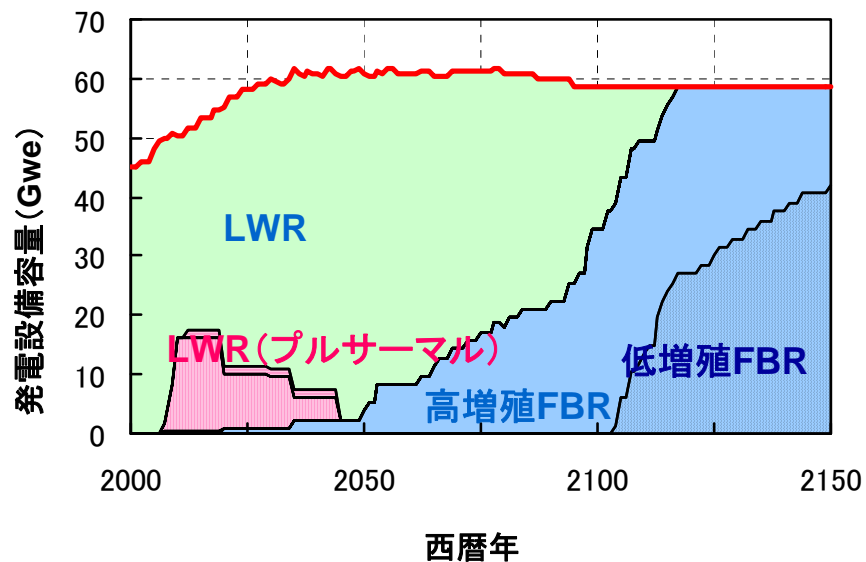
8. 非枯渇性エネルギーの開発を目指して(1)

- 核燃料サイクルの確立 -

FBRサイクルは1980年代に閉じられている。



LWRからFBRへの移行解析



大洗研究開発センターFBRサイクル解析Gr.において解析

ウランの可採年数は70年、核燃料サイクル技術を確立しウラン-プルトニウムのリサイクルを行えば、対応する可採年数は数1000年になる。 → 非枯渇性

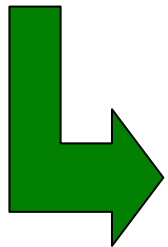
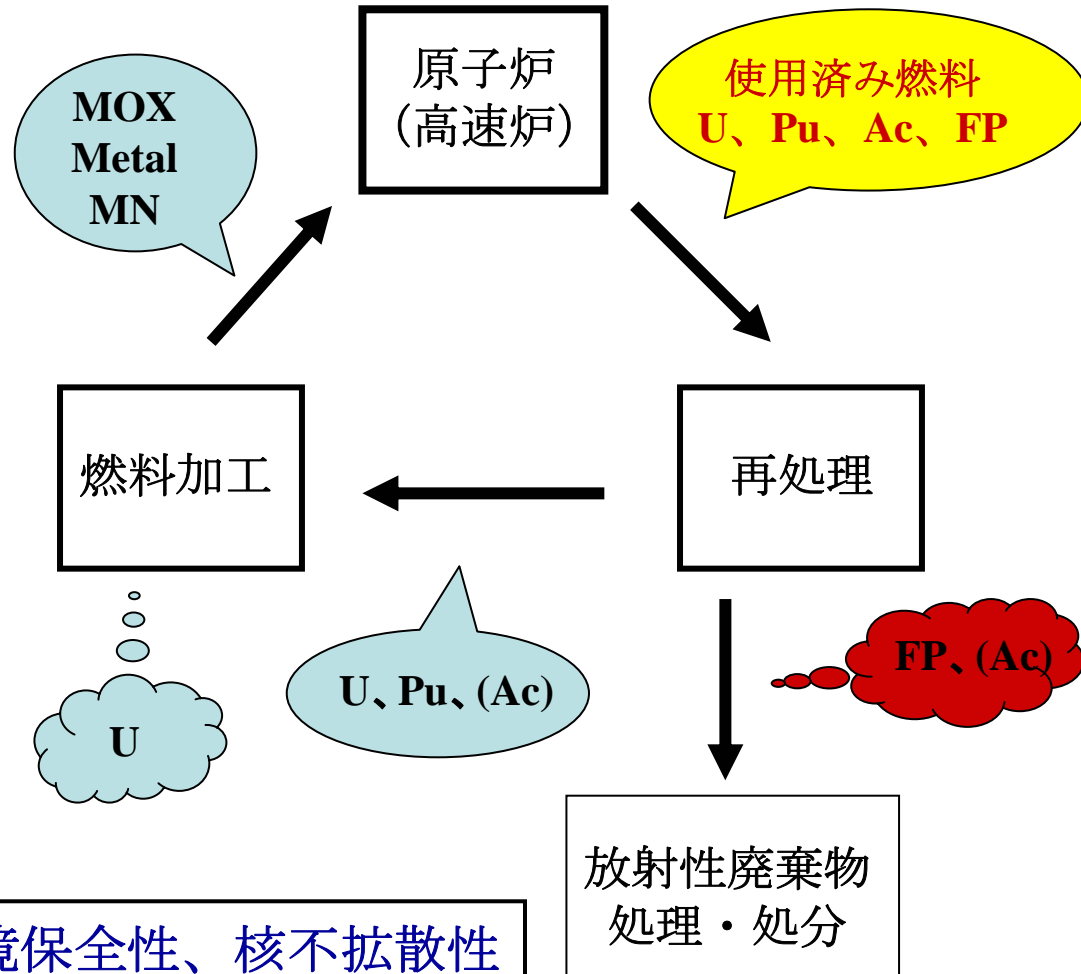
核燃料サイクルの意義

基盤技術は確立されており、安全性と経済性が確保できる。

原子力発電はCO₂を多量に排出しない発電システムである。

サイクルの中にはウランだけが入り、出るのはFP及び一部のアクチニドのみである。

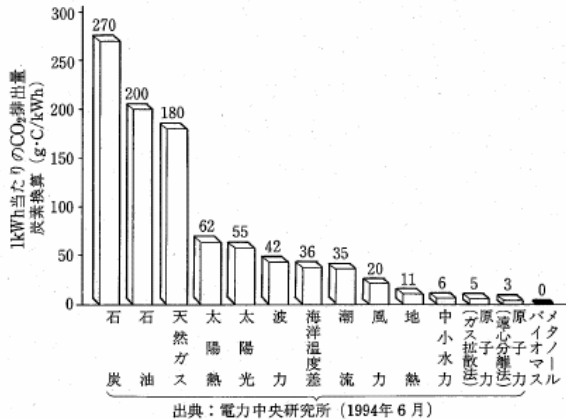
サイクルを廻る核燃料はアクチニドにスパイクされており、容易に接近できない。



安全性、経済性、環境保全性、核不拡散性
持続可能性

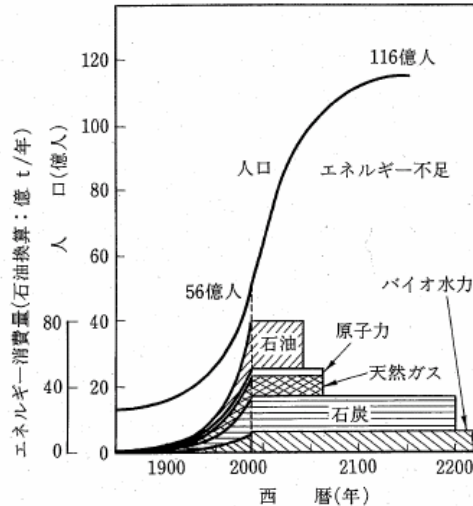
核燃料サイクルの必要性

脱CO₂問題

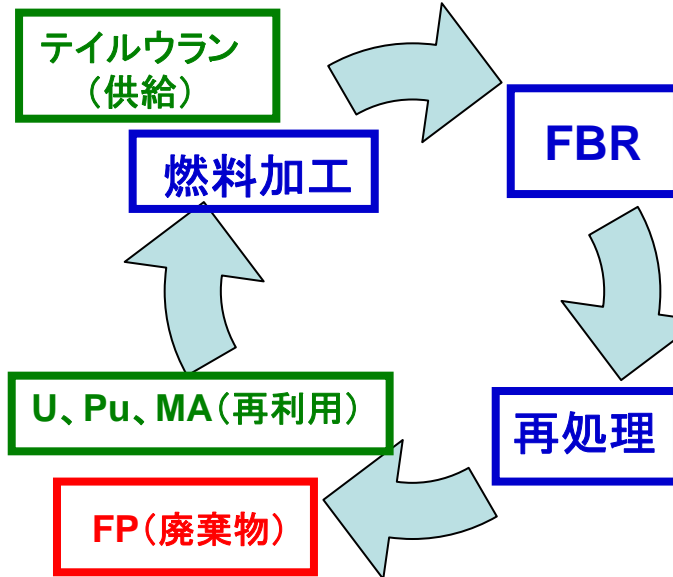


「バイオマスが拓く21世紀エネルギー」坂井正康著 森北出版株式会社より引用

非枯渇性



廃棄物問題



脱CO₂問題を解決できるものは再生可能エネルギーである。

原子力であっても、軽水炉ではウラン利用効率が低く、可採年数は70年程度であり、枯渇性である。

原子力以外の再生可能エネルギーは、供給能力の点で問題がある。

FBRシステムでは、ウランをほぼ完全燃焼させることが可能となり、ウラン利用効率は格段に高まる。また、システムに入り込む物質はテイルウランのみであり、出て行く物質はFPのみである。

核燃料サイクル技術の概要

原子炉(高速炉)

核燃料を燃焼、ウランを プルトニウムに核変換

再処理

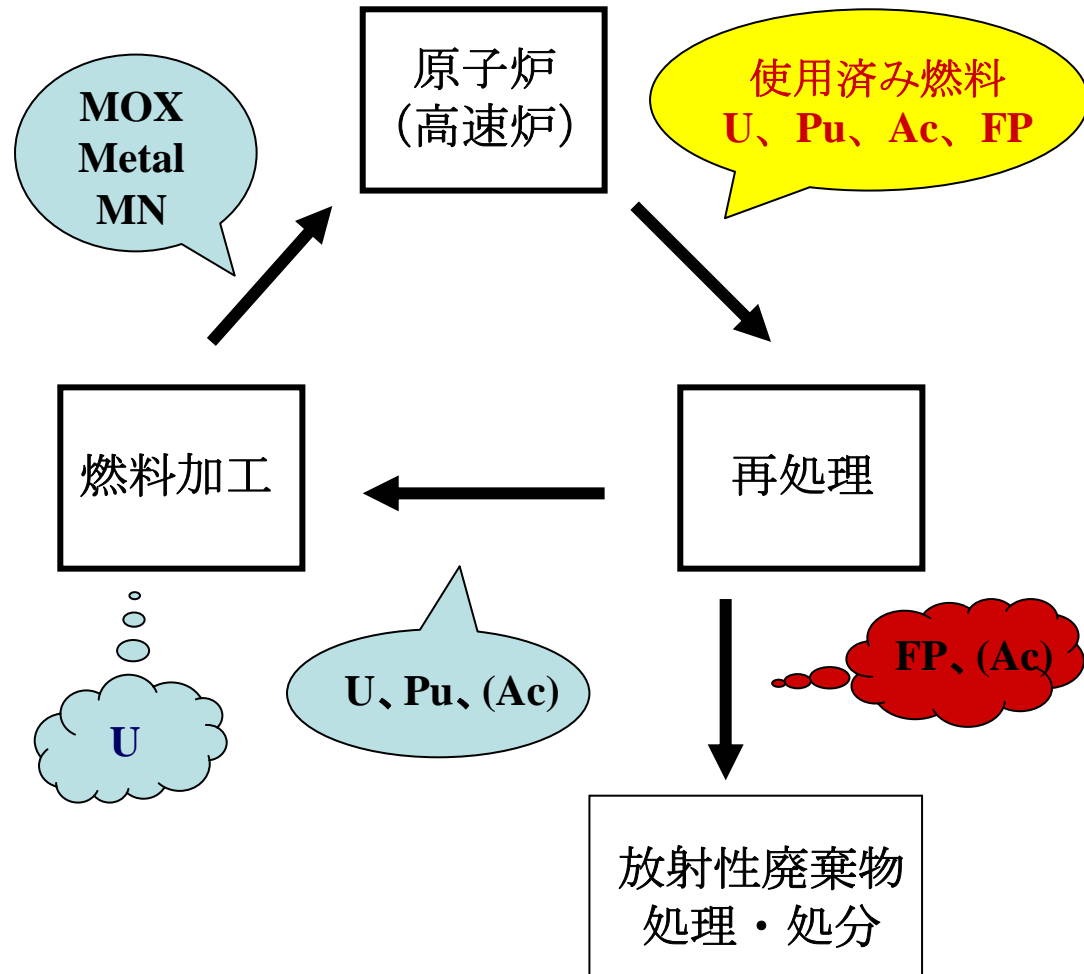
使用済燃料からウラン、プルトニウム、アクチニドを抽出、FP、アクチニドを分離

燃料加工

ウラン、プルトニウム、アクチニドを酸化物、金属、または窒化物に成型、燃料体に加工

高レベル放射性廃棄物処理・処分

高レベル放射性廃棄物(主にFP)をガラス固化体として処理、深地層に処分する。



高速増殖原型炉「もんじゅ」

高速実験炉「常陽」の経験を踏まえ
福井県敦賀市白木に建設された電気
出力280MWの炉型炉

1985年 建設開始

1994年4月 初臨界

1995年12月 ナトリウム漏えい事故

現在、運転再開に向け安全審査中

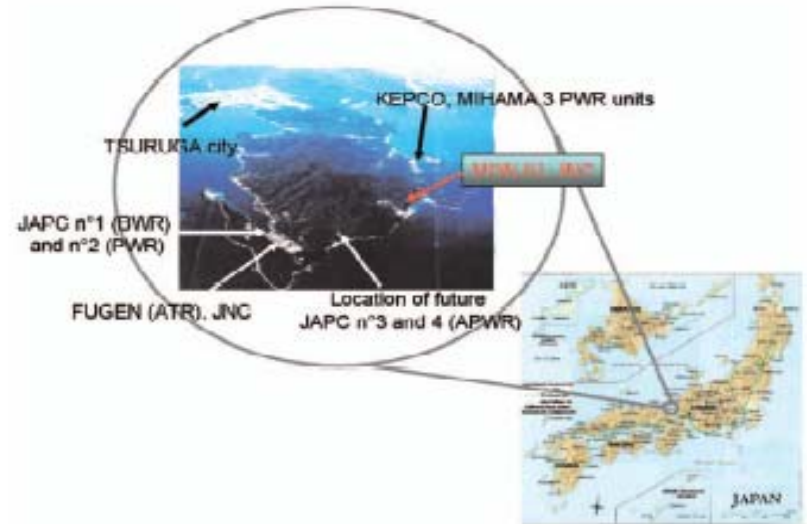
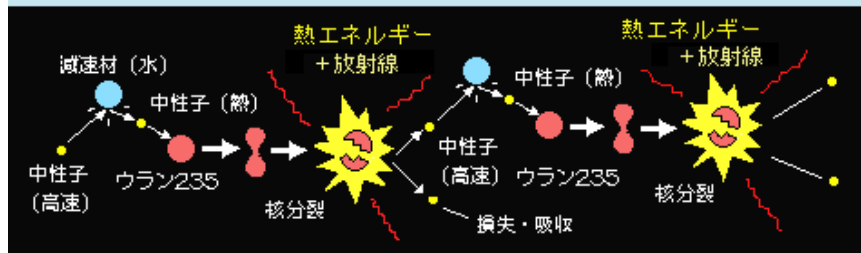


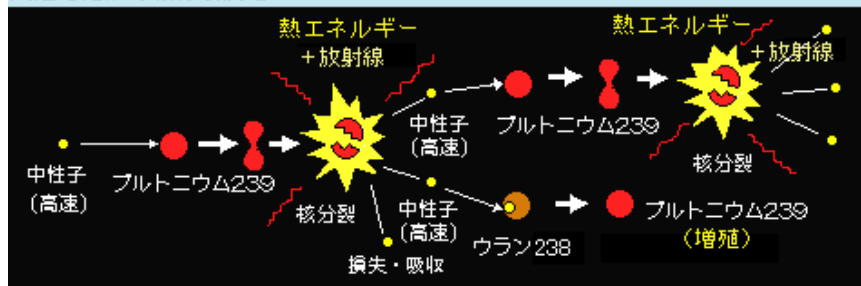
Fig. 1 : Aerial view of Tsuruga peninsula and location of different reactors

「サイクル機構技報 No.25 2004.12」より引用

軽水炉の核分裂反応



高速増殖炉の核分裂反応



<http://www.geocities.jp/tobosaku/kouza/image/fbr.gif>より引用

高速炉での核反応の特徴

プルトニウムの核分裂による発熱
ウランのプルトニウムへの核変換



エネルギーを生産しながら新しく核
燃料を作り出す (増殖性)

高速増殖原型炉「もんじゅ」の安全設計

【炉心】

核設計

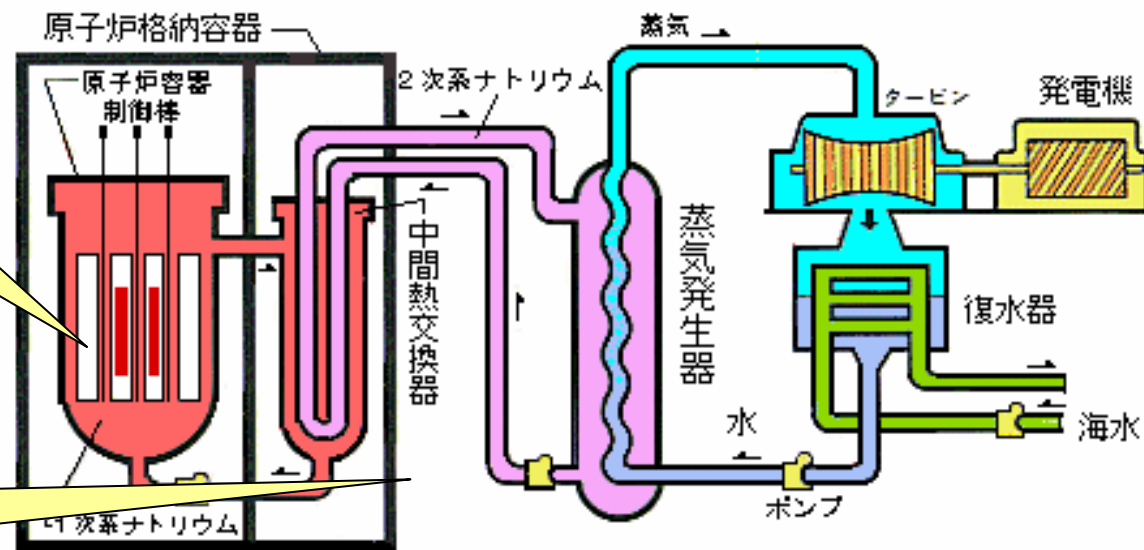
熱流力設計

燃料機械設計

【プラント】

構造設計

■ 高速増殖炉（FBR）のしくみ



<http://www.geocities.jp/tobosaku/kouza/image/fbr.gif>より引用

高速炉開発の現状と将来動向

高速炉開発の経緯

1990年近辺を境に、高速炉先進国である米国、英国、独国が高速炉開発から撤退した。理由は、エネルギー需要の伸びが予想より低く、ウランの枯渇がそれ程までに気にならなくなった。さらに、高速炉の経済性が軽水炉を凌駕するに至らなかった。

21世紀社会の現状

地球温暖化や環境汚染、エネルギー問題、貧富の格差、民族抗争など多くの問題を抱え、人間社会が持続可能かどうか気になりだしている。

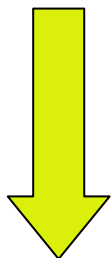
高速炉の将来動向

地球温暖化対策には原子力は有望な候補の1つである。放射線が及ぼす環境負荷を低減し、エネルギー問題を解決し、そして持続可能な人間社会の確立には、高速炉に依存せざるを得ない。

日本を含め先進諸国は2040～2050年頃に高速炉社会の実現を目指している。そのため、先進諸国は「もんじゅの動向」を凝視している。

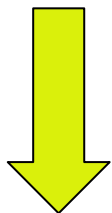
プルトニウム燃料の研究開発

炉心燃料(MOX燃料)製造



密度、プルスポット
制御(高度な技術)

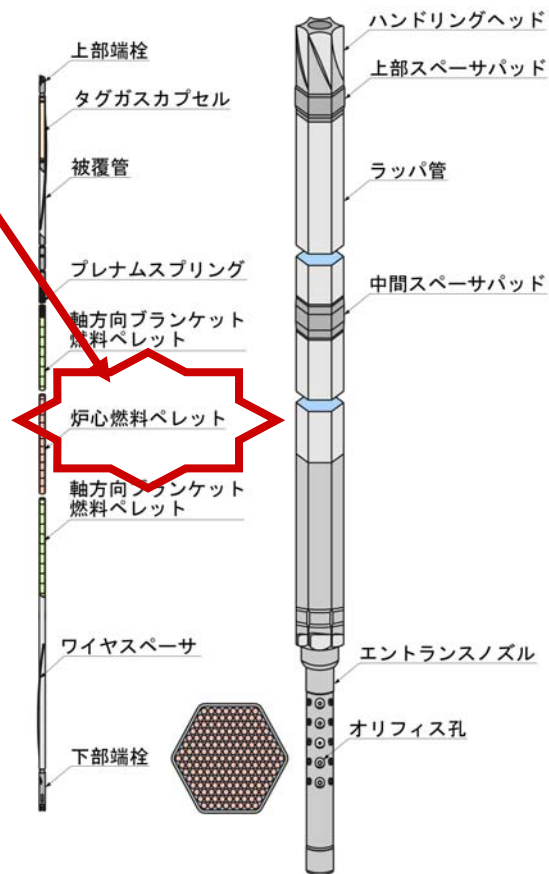
燃料要素加工組立



自動化技術

燃料集合体加工組立

自動化技術

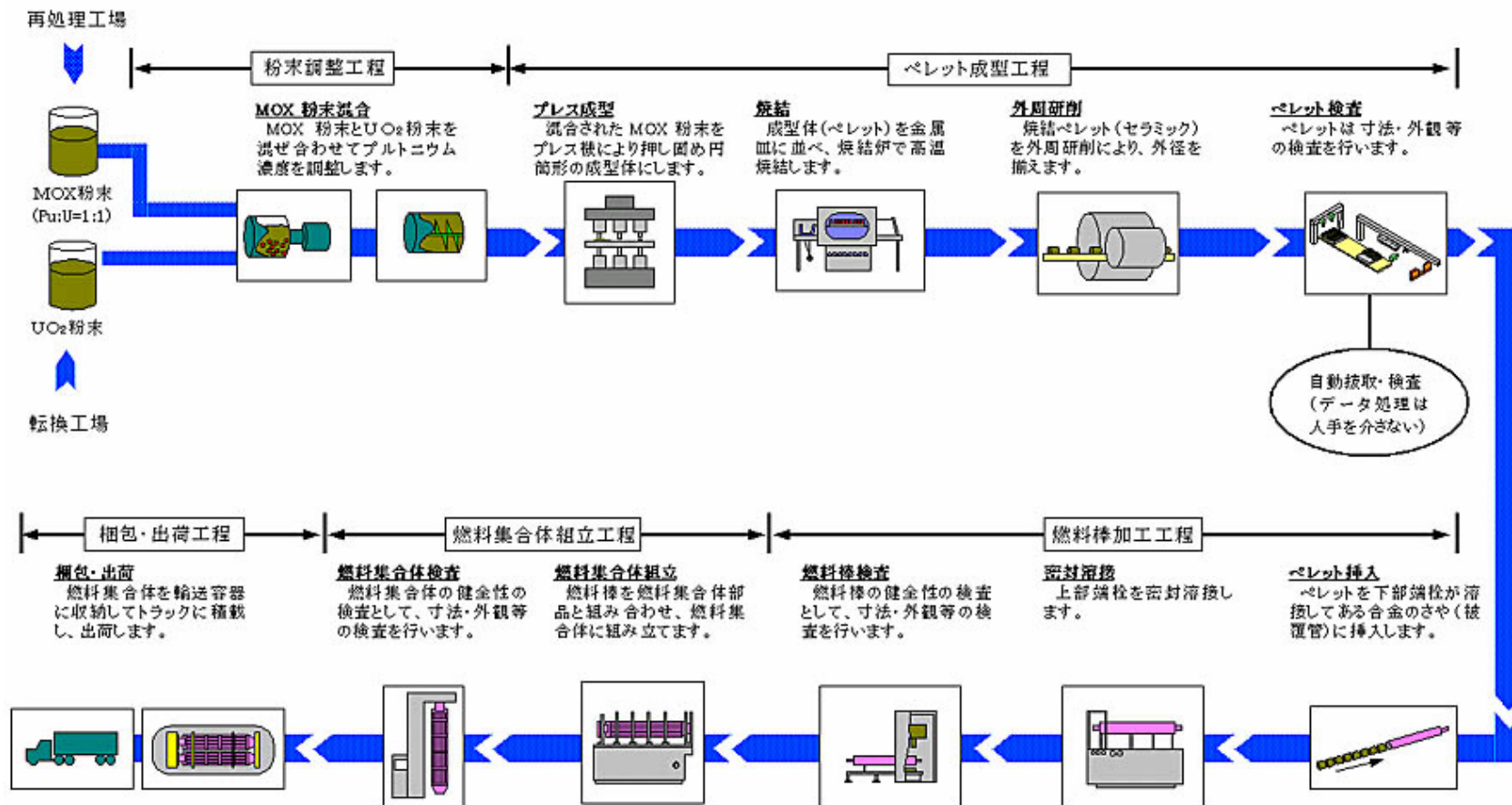


燃料要素

燃料集合体

プルトニウム燃料の研究開発

国内MOX燃料加工工程の概要



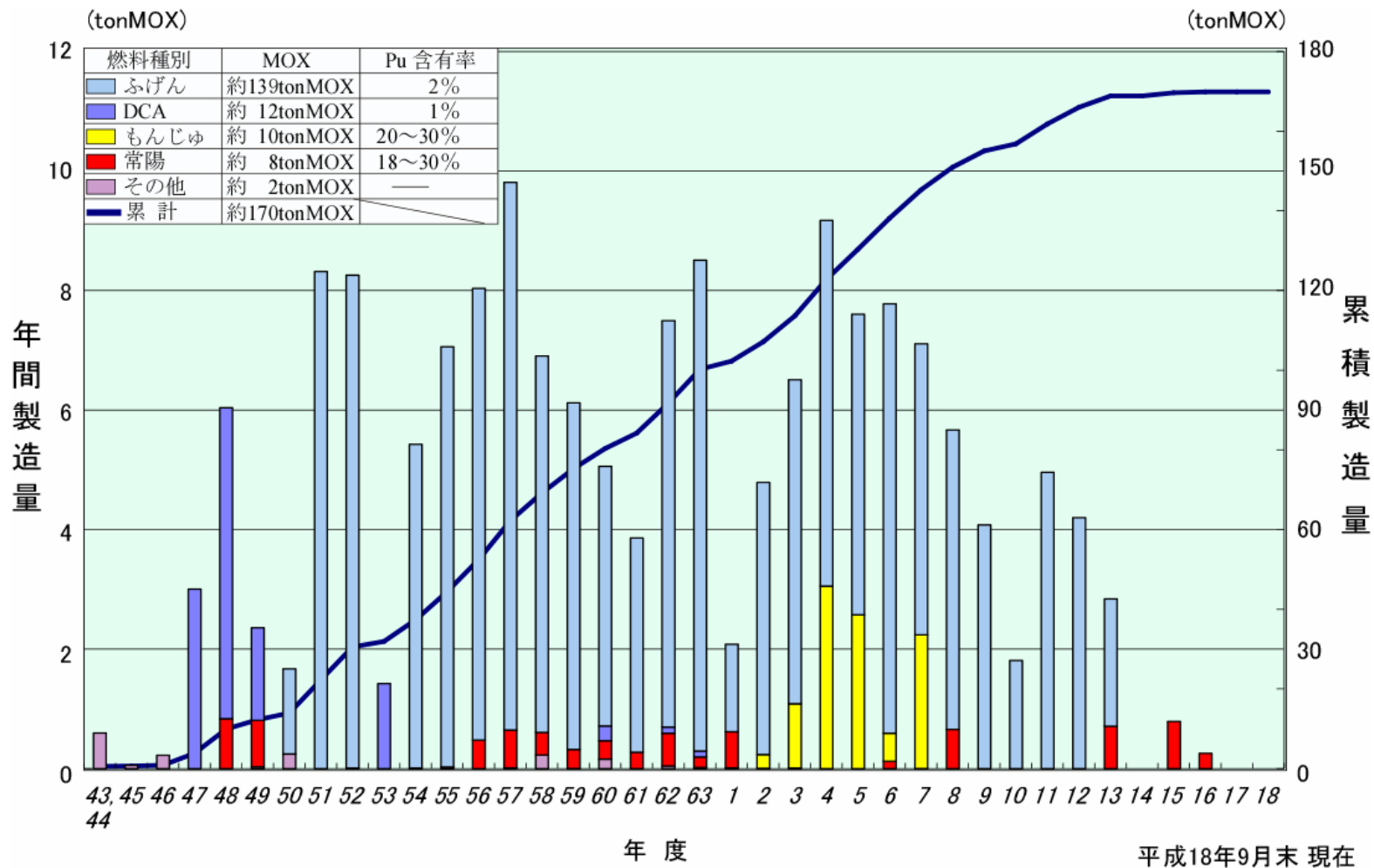
プルトニウム燃料の研究開発



プルトニウム燃料センター全景

JAEAプルトニウム燃料センターより入手

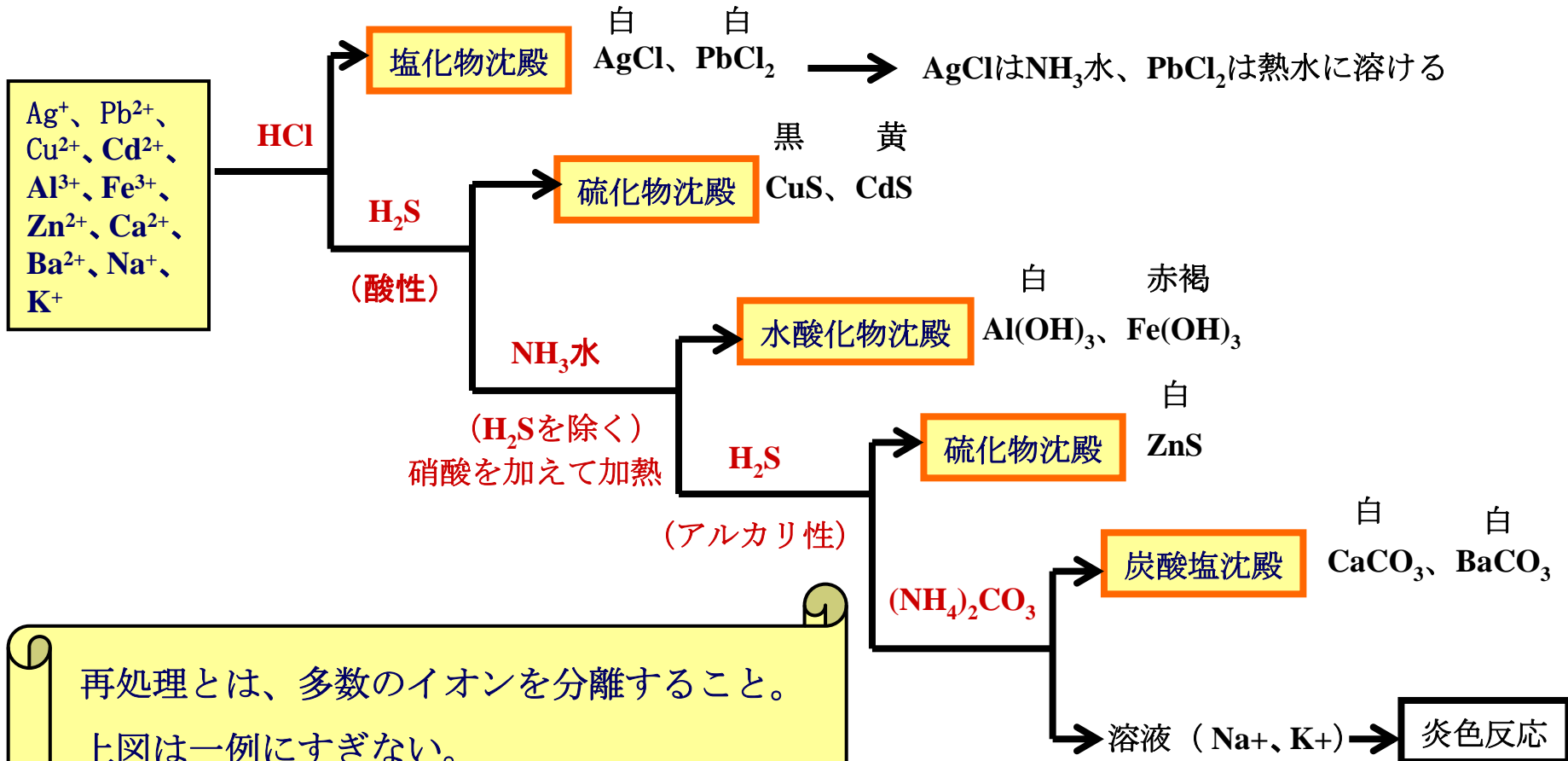
プルトニウム燃料の研究開発



MOX燃料の製造実績

JAEAプルトニウム燃料センターより入手

再処理の研究開発



再処理とは、多数のイオンを分離すること。
上図は一例にすぎない。
分離の方法は何でも構わない。

再処理の研究開発

プロセス	処理	再処理
出発物質	ウラン鉱石	使用済燃料
製品	ウラン	プルトニウム ウラン
原理	ウラン鉱石を酸に溶解抽出する (リーチング)	U、Pu、MA、FPをTBPに溶解抽出する 4種類のを分離する (ピューレックス)

ウランを中心として見た場合、処理は2度施される。
使用済燃料の処理は2回目であるため、再処理と呼ばれる。

軍用と民生用再処理

目的	軍用	民生用
処理物質	低燃焼ウラン 専用炉で燃焼	高燃焼使用済燃料 商用軽水炉で燃焼
製品	プルトニウム (Pu-239)	プルトニウム ウラン マイナーアクチニド
特記事項	Pu-239含有率の高いプルトニウムの抽出	プルトニウムを単独で取り扱わず、ウランやマイナーアクチニドでスパイクする

主な燃料再処理方式

再処理方式	プロセス例	原理
湿式法	ピューレックス Purex Process	溶媒抽出 (酸濃度、原子価による分配比の差)
	トリュレックス Thorex Process	
乾式法	フッ化物揮発法 Fluoride Volatility Process	フッ化物蒸気圧及び化学的性質の差
乾式法	高温冶金化学法 Pyrochemical Process	電解電位の差

燃料再処理の適用例

方式	湿式法	高温冶金化学法
適用例	軽水炉燃料 (UO_2) 高速炉燃料 (MOX)	高速炉燃料 (金属燃料) 高速炉燃料 (MOX)
開発者	日本 JAEA フランス COGEMA イギリス BNFL	日本 JAEA、CRIEPI 米国 ANL ロシア RIAR

JAEA: 日本原子力研究開発機構
COGEMA: フランス国営核燃料会社
BNFL: 英国原子燃料公社

CRIEPI: 電力中央研究所
ANL: アルゴンヌ国立研究所
RIAR: ロシア原子炉科学研究所

東海再処理施設



▲再処理施設



▼中央制御室

昭和46年6月	建設開始
昭和50年9月	ウラン試験開始
昭和52年7月	使用済燃料を初搬入
昭和52年9月	使用済燃料を用いた試験を開始
昭和52年11月	プルトニウムを初抽出
昭和56年1月	本格運転開始
昭和58年2月	プルトニウム転換技術開発施設完成
平成2年11月	累積処理量500t到達
平成14年6月	累積処理量1,000t到達
平成18年3月	電気事業者との役割再処理完了



▲燃料貯蔵プール

再処理の工程 (PUREX)

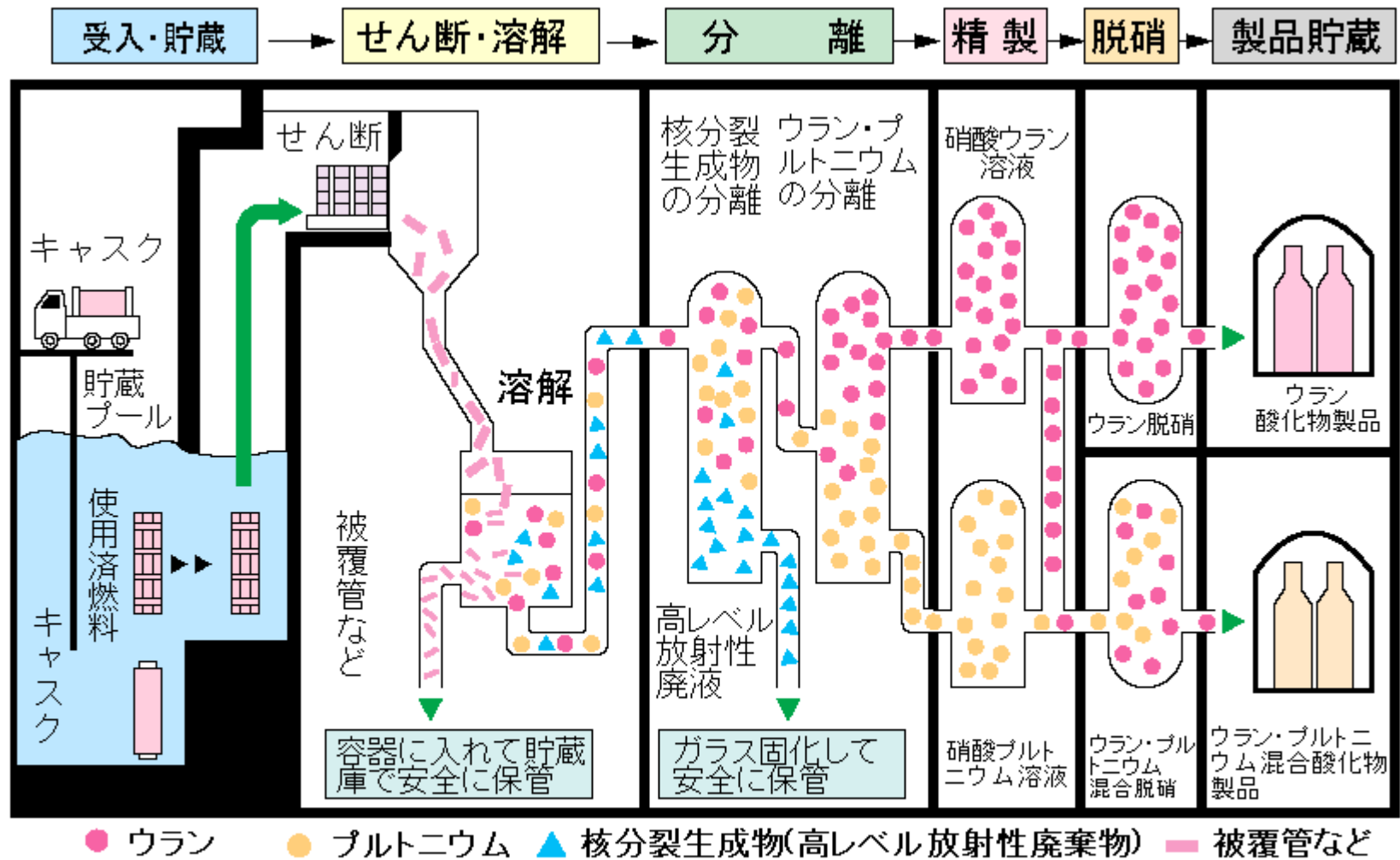
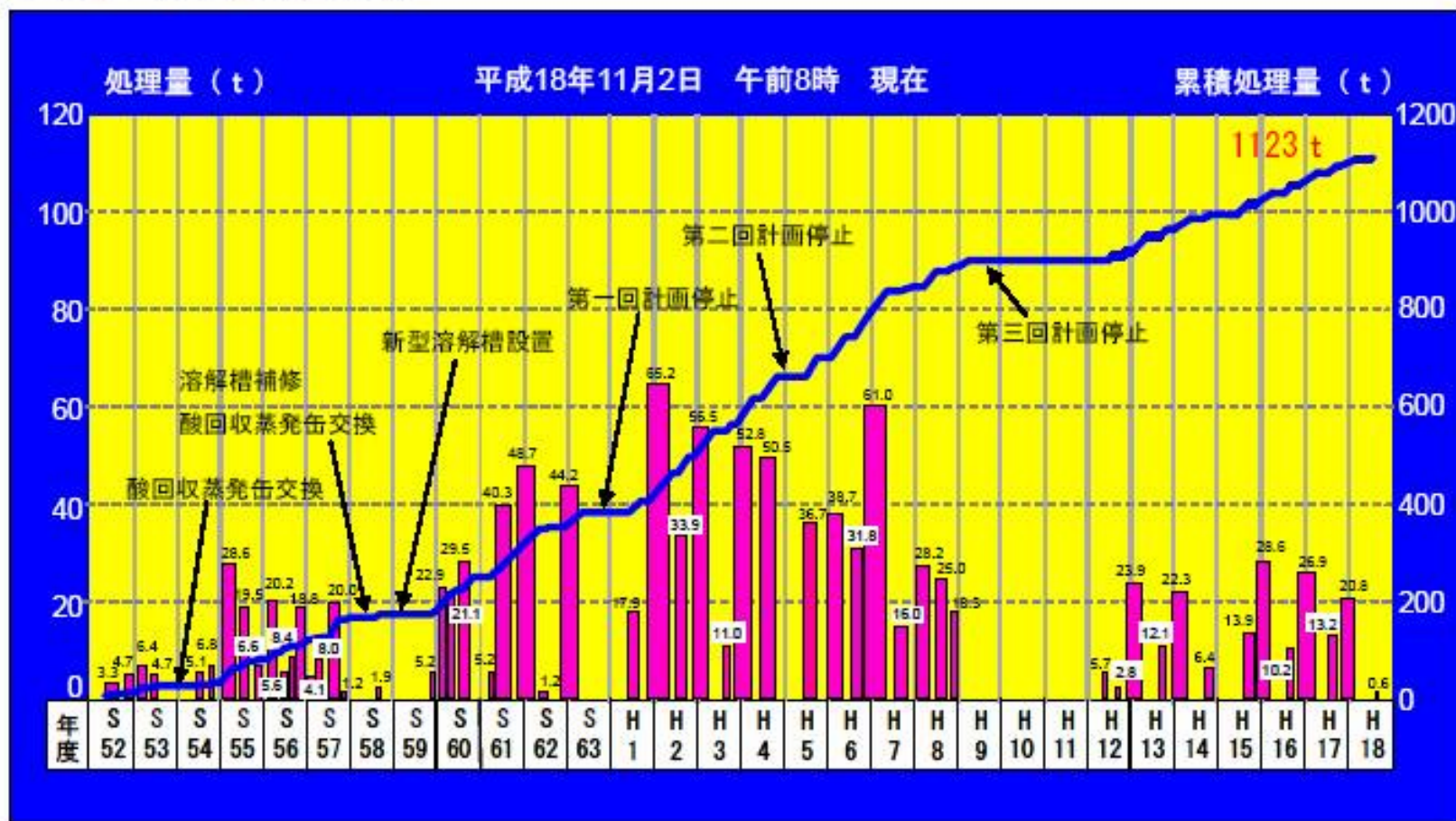


図3 再処理の工程

[出典]電気事業連合会(編):原子力図面集 2001-2002(2001年10月)、p.158

東海再処理施設における再処理実績

[これまでの処理実績]



- 1) 使用済燃料の受入れ及び再処理の運転は昭和52年に開始しました。
ガラス固化体の製造の運転は平成7年に開始しました。
- 2) 使用済燃料の再処理は、使用済燃料をせん断した量を示しています。

放射性廃棄物処理・処分の研究開発

基本的考え方

1. 原子力システムから出る放射性廃棄物の最少化

最も厄介な放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物である。これを最少化するには、低除染・MA含有再処理(FP、MAを完全にウラン、プルトニウムと分離しない再処理)を行う。

2. 人間の生活圏からの隔離

生活圏から隔離するためには、地球における生物圏、大気圏、水圏、岩石圏の4領域との相互作用を断ち切ることである。宇宙への放出や深地層への埋設などが、具体的な方法として検討されている。

3. 処分体の安定性確保

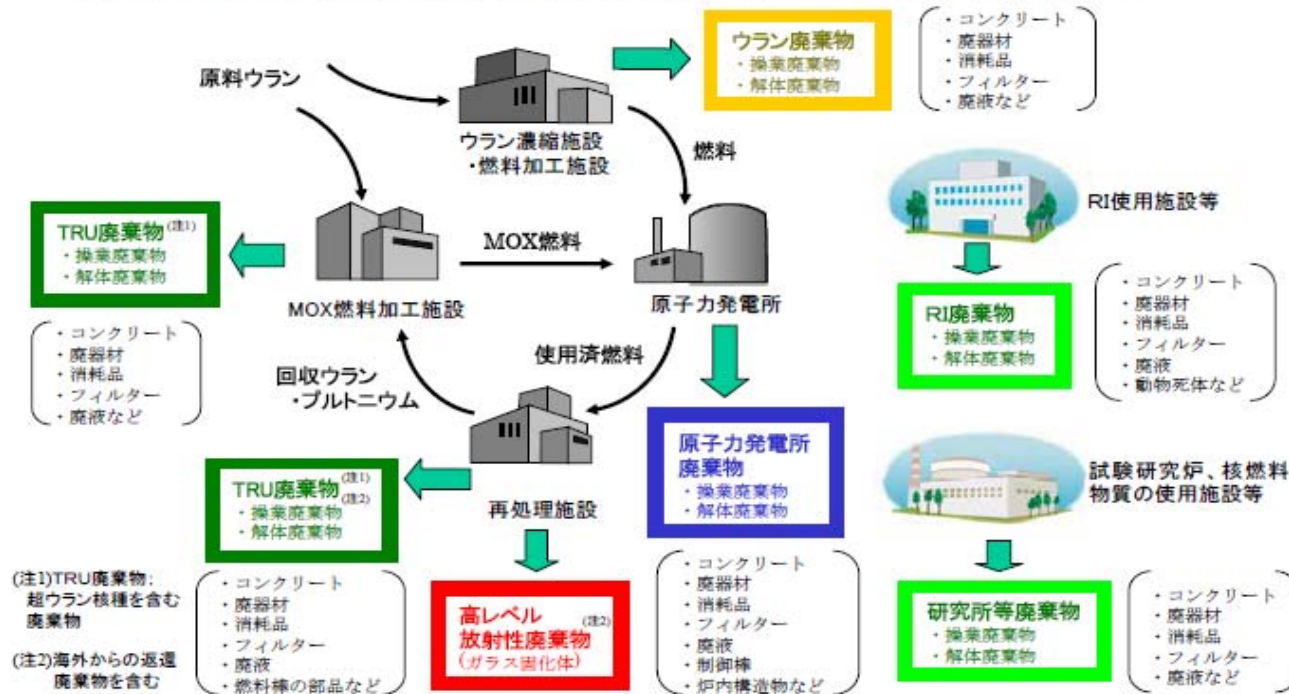
深地層に処分された高レベル放射性廃棄物から放射線が漏れ、地下水に移行しないことを相当な期間(例えば1000年の単位)担保することが必要である。

放射性廃棄物処理・処分の研究開発

放射性廃棄物の全体概要

1

放射性廃棄物は、原子力発電所や再処理施設、ウラン濃縮・燃料加工施設などの核燃料サイクル施設、医療機関や研究機関等の操業や廃止措置に伴い発生。



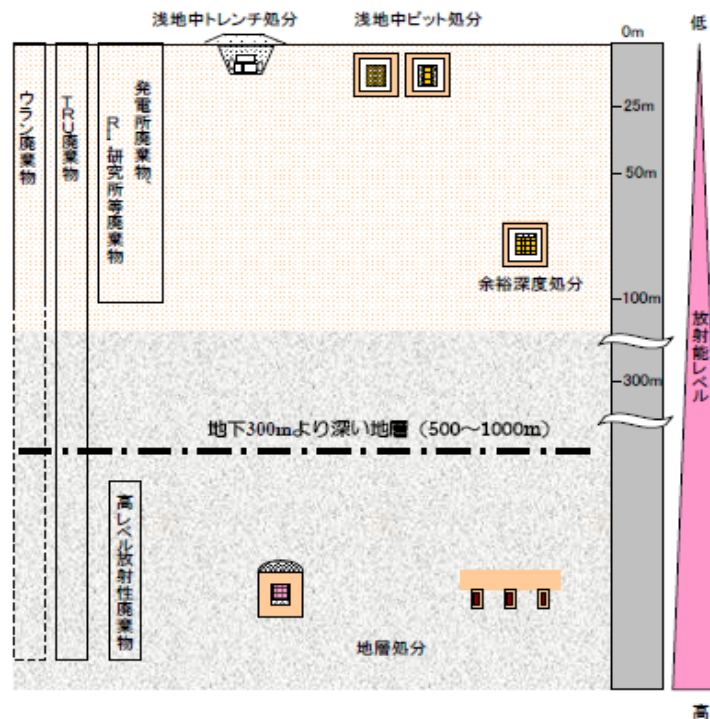
放射性廃棄物処理・処分の研究開発

放射性廃棄物処分方法

2

放射性廃棄物の処分方法は、深さや放射性物質の漏出を抑制するためのバリアの違いにより、4つに分類される。

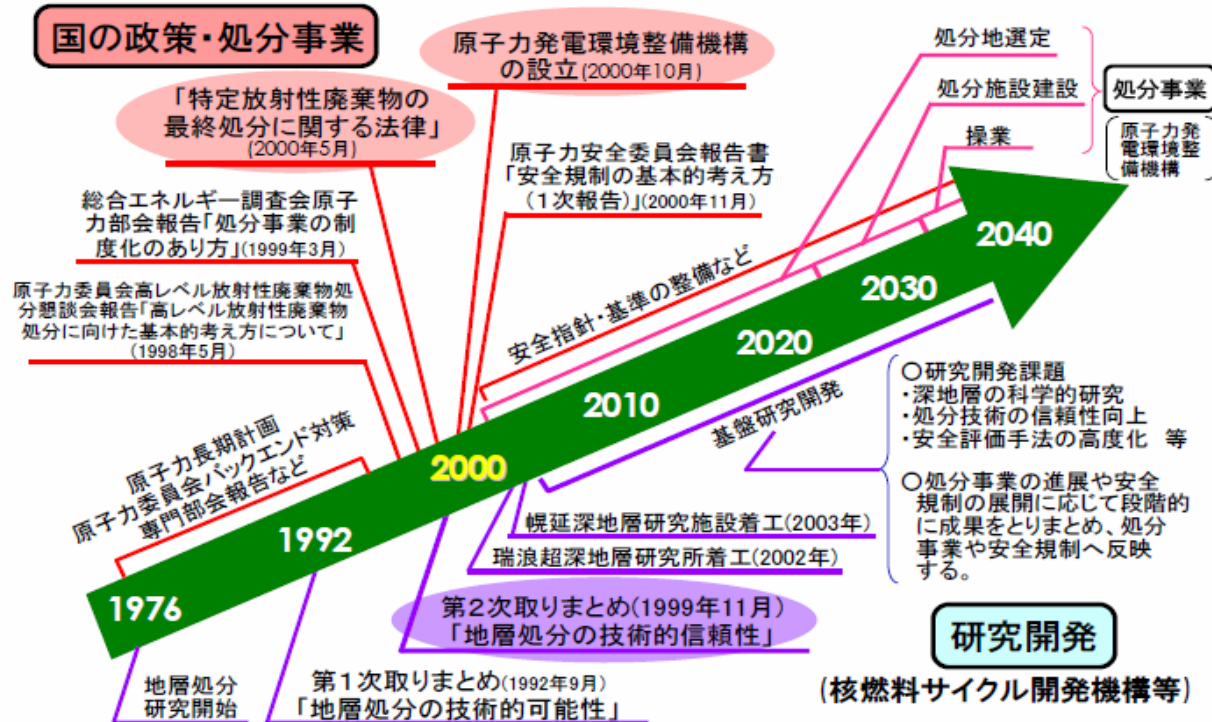
- ・浅地中トレンチ処分
人工構築物を設けない浅地中埋設処分
- ・浅地中ピット処分
コンクリートピットを設けた浅地中への処分
- ・余裕深度処分
一般的な地下利用に対して十分余裕を持った深度（地下50～100m）への処分
- ・地層処分
地下300mより深い地層中に処分



放射性廃棄物処理・処分の研究開発

高レベル放射性廃棄物処分政策・事業・研究開発の経緯と今後の展開

10



放射性廃棄物処理・処分の研究開発

深地層研究施設の役割と展開

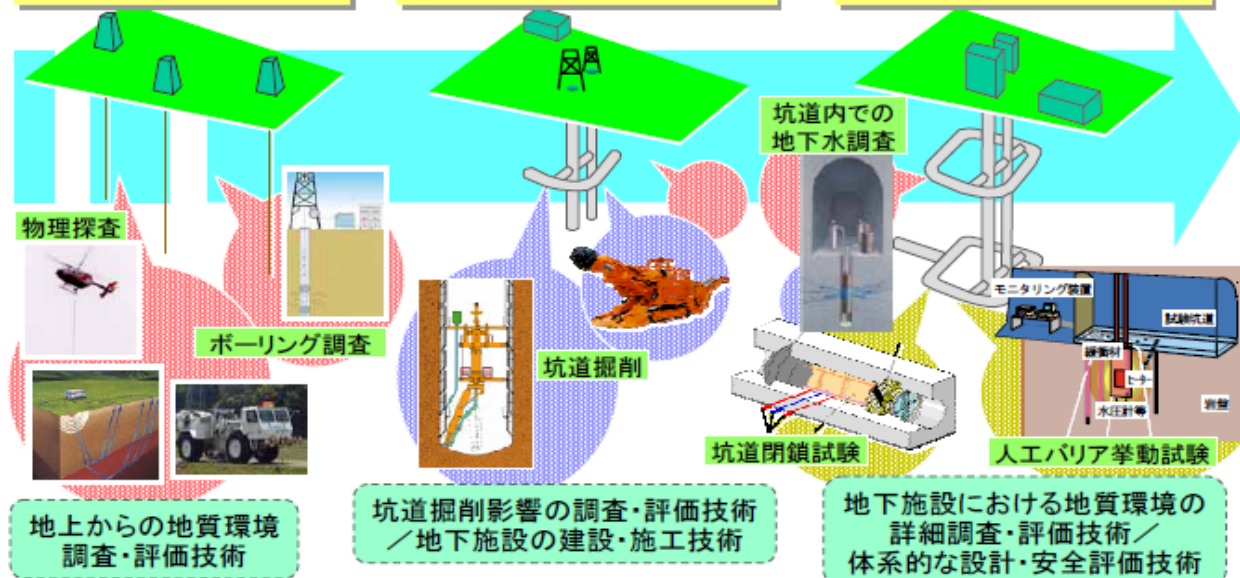
11

- ・瑞浪(結晶質岩, 淡水系, 硬岩), 幌延(堆積岩, 塩水系, 軟岩)の2つの計画
- ・地層処分技術の適用性確認, わが国固有の地質環境の理解, 深地層の体験・理解の場

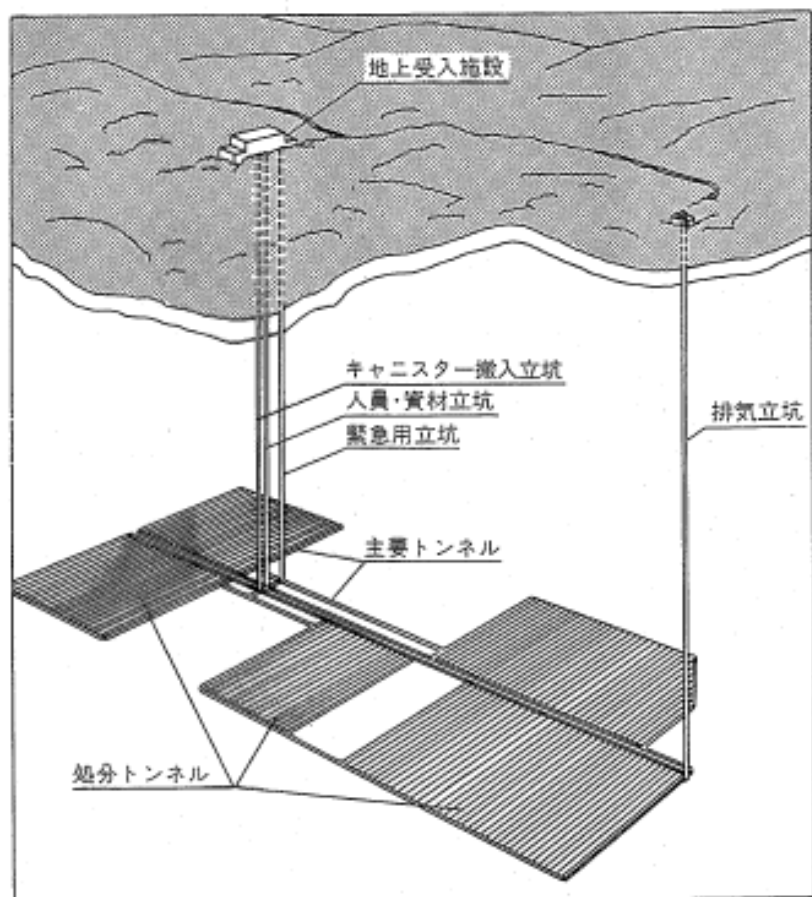
第1段階
地上からの調査研究

第2段階
坑道掘削時の調査研究

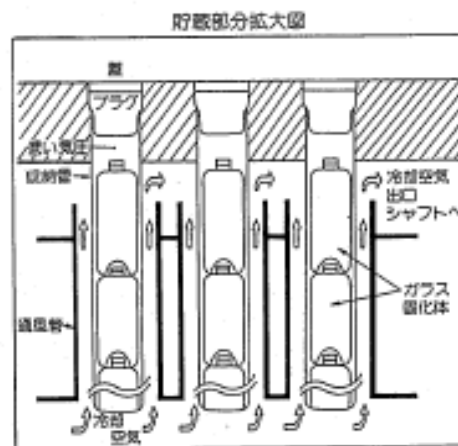
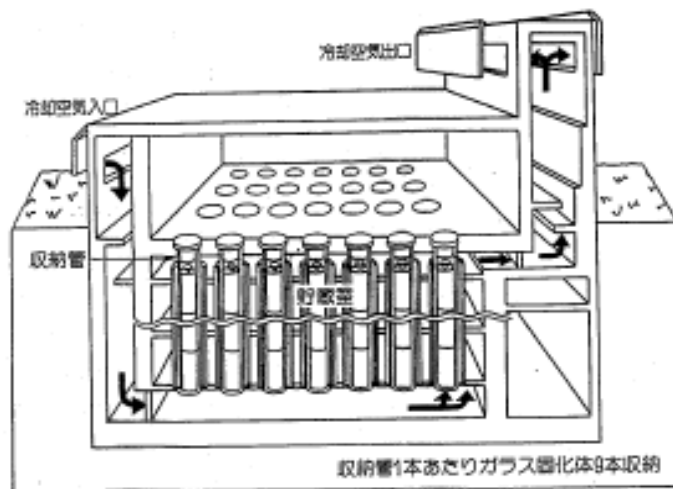
第3段階
地下施設での調査研究



地層処分場の概念図



高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)貯蔵庫



放射性廃棄物処理・処分の研究開発

(参考)クリアランスレベルの算出

★ クリアランスレベルは、対象物に含まれる放射性核種ごとの放射能濃度として定められている。

★ クリアランスレベルは、対象物がどのように再生利用、処分されたとしても、人が受ける放射線の量が年間0.01ミリシーベルト(自然放射線の量の1/100以下)を超えないよう、様々なシナリオを想定した上で、算出されている。

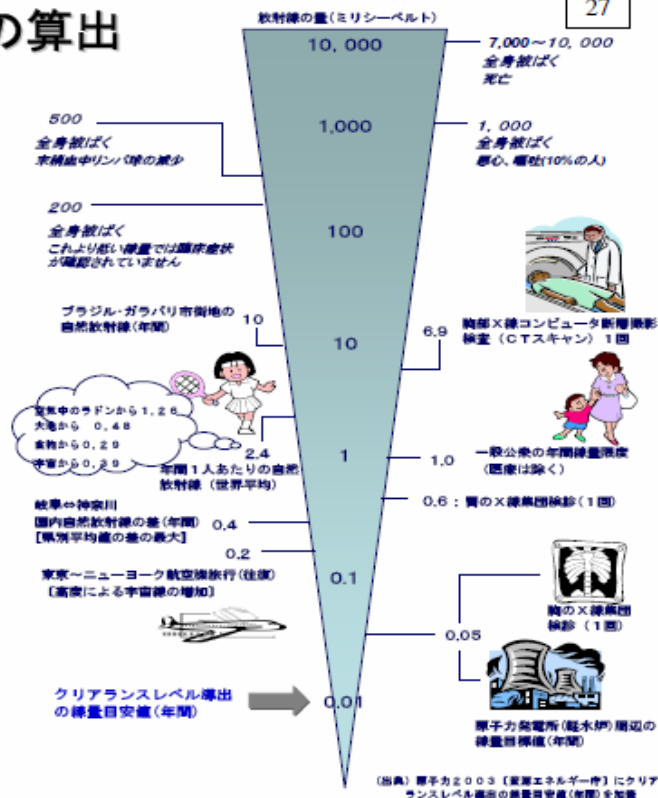
ベクレル
クリアランスレベル (単位: Bq/g)

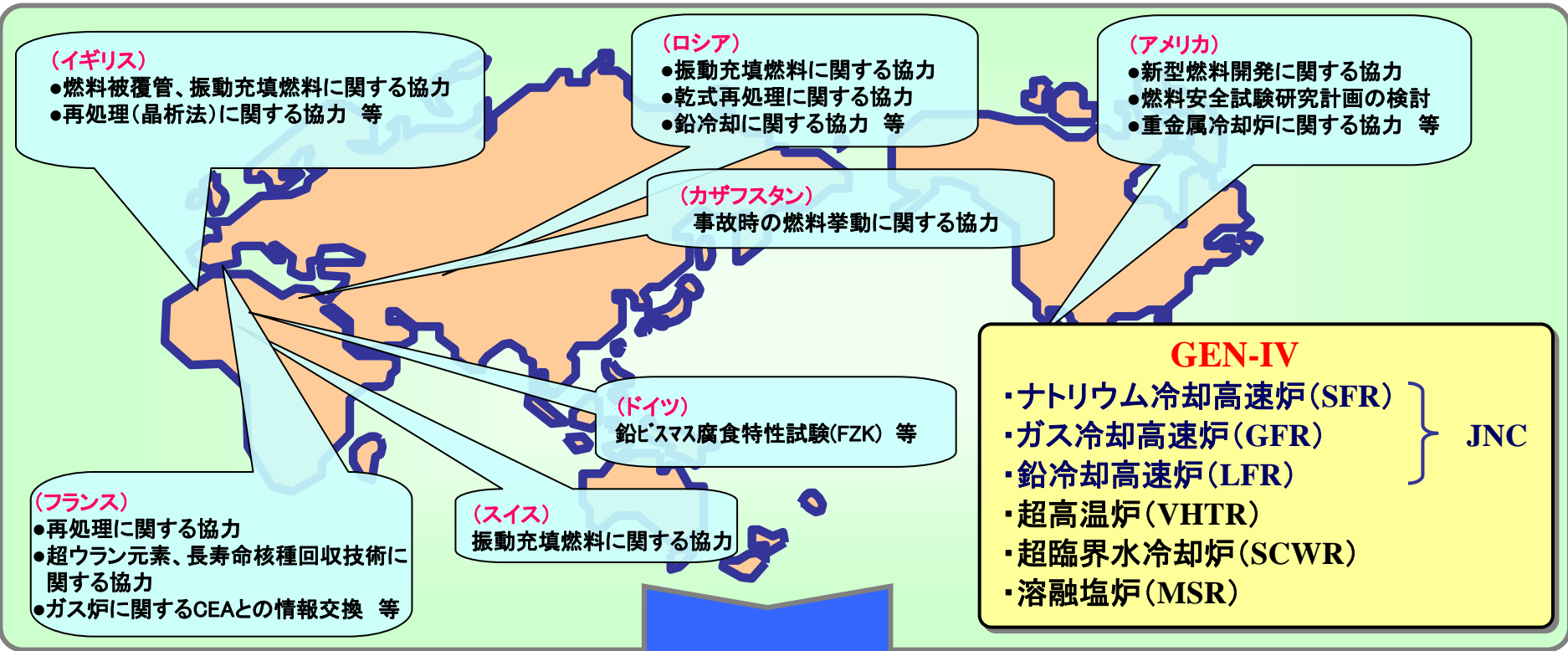
[IAEA安全指針の値]

H-3 : 100 (トリチウム)	Cs-134 : 0.1 (セシウム)
Mn-54 : 0.1 (マンガン)	Cs-137 : 0.1 (セシウム)
Co-60 : 0.1 (コバルト)	Eu-152 : 0.1 (ユーロピウム)
Sr-90 : 1 (ストロンチウム)	Eu-154 : 0.1 (ユーロピウム)
全α核種 : 0.1	

日常生活と放射線

27





今後の展開

二国間協力の枠組み

- ・「もんじゅ」、「常陽」の国際的な照射場としての活用
- ・基礎・基盤技術に関する研究協力
- ・情報共有のための連絡会

GEN-IV等への取り組み

- ・グローバルスタンダードとなる次世代原子力の構築を目指した、今後の国際協力の中核
- ・共通枢要技術を中心とした国際的協力体制による研究開発の推進（「もんじゅ」、「常陽」の活用を含む）
- ・将来的な国際共同プロジェクトによるシステム設計の実施

国際協力の状況と今後の展開

21世紀のエネルギー戦略

(核燃料サイクルの是非について)

21世紀社会の現状

地球温暖化や環境汚染、エネルギー問題、貧富の格差、民族抗争など多くの問題を抱え、人間社会が持続可能かどうか気になりだしている。



問題解決のための方策

地球温暖化 → 原子力利用の推進
環境汚染 → 環境負荷低減可能な原子力システムの導入
エネルギー問題 → 非枯渇性の原子力システムの採用
貧富の格差、民族抗争 → エネルギー安定供給による経済発展により解消



21世紀のエネルギー戦略

核燃料サイクル(高速炉、再処理、MOX加工)を確立する。

9. 非枯渇性エネルギーの開発を目指して(2)

- 再生可能エネルギーの開発 -

再生可能エネルギー	特徴
太陽	<ul style="list-style-type: none">・太陽熱発電(直接熱エネルギーとして利用)・太陽光発電(太陽電池を用いて可視領域の光子を利用)・経済性の向上が急務
風力	<ul style="list-style-type: none">・風の運動エネルギーを風車の運動エネルギーに変換し、これを電気エネルギーに変換・風力資源が豊富なことからある程度の土地面積が確保される地域では積極的に導入される
海洋	<ul style="list-style-type: none">・波力発電(波の上下運動の位置エネルギーを利用)・海洋温度差発電(水深によって生じる海水の温度差を利用)
バイオマス	<ul style="list-style-type: none">・光合成を利用・バイオマスの利用ではトータルとしてのCO2排出量はゼロとなる
水力	<ul style="list-style-type: none">・太陽エネルギーを水の位置エネルギーに変換して利用・黒四ダムでの総発電量は約80万KW(小型の軽水炉1基分に相当)
地熱	<ul style="list-style-type: none">・超高温のマグマの熱エネルギーを地下水の熱エネルギーに変換して利用・自然公園や温泉地との競合による制約が多く、開発リスクが大きい
潮汐	<ul style="list-style-type: none">・潮の干満によって起きる海水の移動を利用・日本では干満の差が大きくても8m程度なので実用化は難しい

10.まとめとして将来のエネルギー予測と原子力

表5-1 21世紀のグローバルエネルギー予測での解析ケースおよび境界条件

解析ケース名	Case A1 低経済成長 環境保全	Case A2 低経済成長 経済原則	Case B1 高経済成長 環境保全	Case B2 高経済成長 経済原則
全エネルギー $Q(t)$	$Q_{(2000)} = 1.4 \text{ toe}$ $P_{(2000)} = 70 \text{ 億人}$	$Q_{(2100)} = 2.0 \text{ toe}$ $P_{(2100)} = 120 \text{ 億人}$	$Q_{(2000)} = 1.4 \text{ toe}$ $P_{(2000)} = 70 \text{ 億人}$	$Q_{(2100)} = 4.0 \text{ toe}$ $P_{(2100)} = 120 \text{ 億人}$
省エネルギー $Q1(t)$	$Q1_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$		$Q1_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$	
再生可能エネルギー $Q3(t)$	$Q3_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$ $Q3_{(2100)} = 120 \text{ 億toe}$	$Q3_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$ $Q3_{(2100)} = 60 \text{ 億toe}$	$Q3_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$ $Q3_{(2100)} = 120 \text{ 億toe}$	$Q3_{(2000)} = 5 \text{ 億toe}$ $Q3_{(2100)} = 60 \text{ 億toe}$
化石エネルギー $Q4(t)$	$Q4_{(2000)} = 73 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2100)} = 0 \text{ 億toe}$	$Q4_{(2000)} = 73 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2200)} = 120 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2100)} = 30 \text{ 億toe}$	$Q4_{(2000)} = 73 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2100)} = 0 \text{ 億toe}$	$Q4_{(2000)} = 73 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2000)} = 120 \text{ 億toe}$ $Q4_{(2100)} = 30 \text{ 億toe}$

ロジスティック関数を用いた非常に簡単な数式により解析した。
但し、境界条件を正確に入力する必要がある。

解析結果：できる限り原子力の導入を控えた条件でも原子力は必要

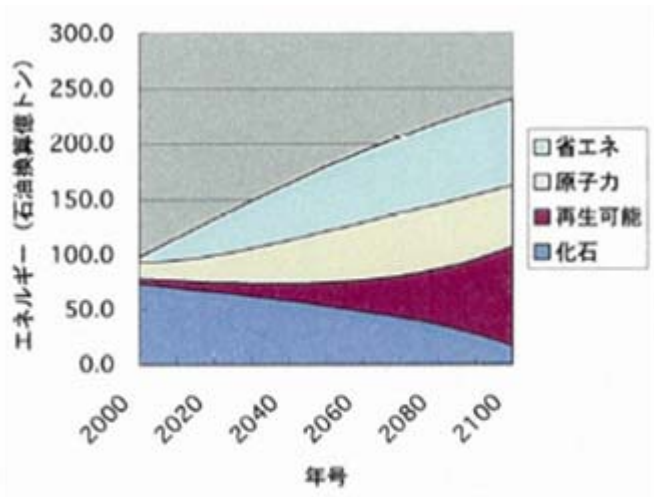


図 5-1(1) 21 世紀のグローバルエネルギー予測解析結果
(低経済成長で環境保全型とした解析ケース)

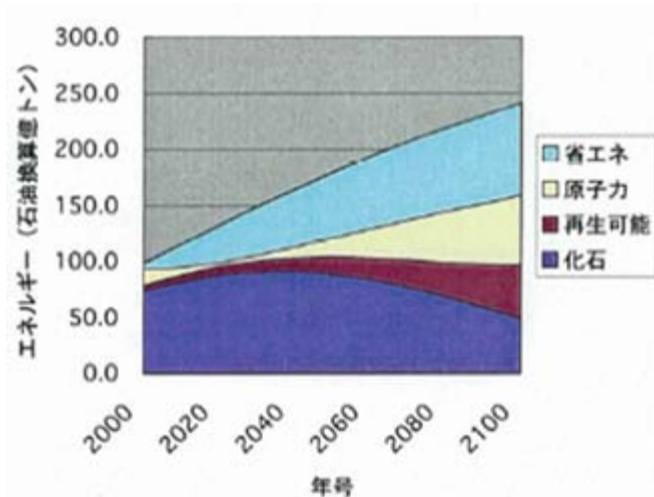


図 5-1(2) 21 世紀のグローバルエネルギー予測解析結果
(低経済成長で経済原則型とした解析ケース)

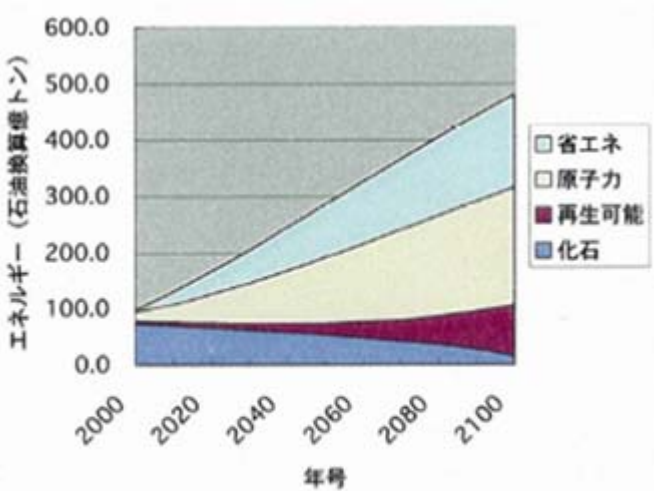


図 5-1(3) 21 世紀のグローバルエネルギー予測解析結果
(高経済成長で環境保全型とした解析ケース)

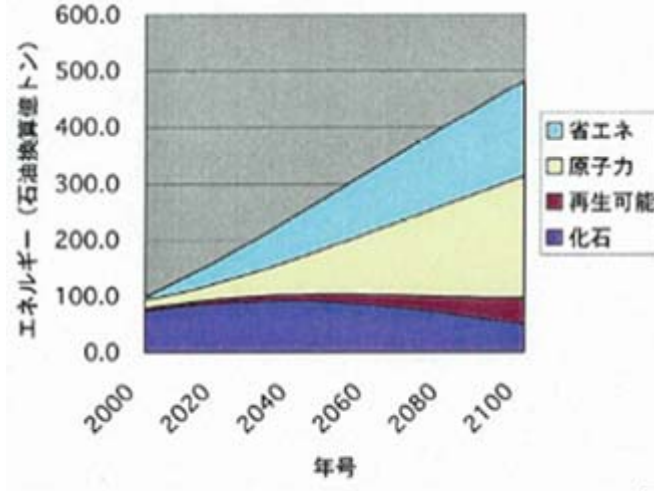


図 5-1(4) 21 世紀のグローバルエネルギー予測解析結果
(高経済成長で経済原則型とした解析ケース)

省エネルギーの構成比率

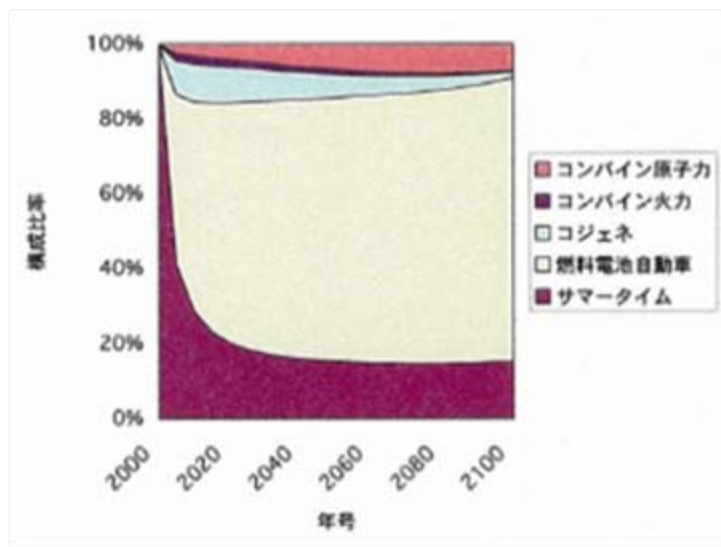
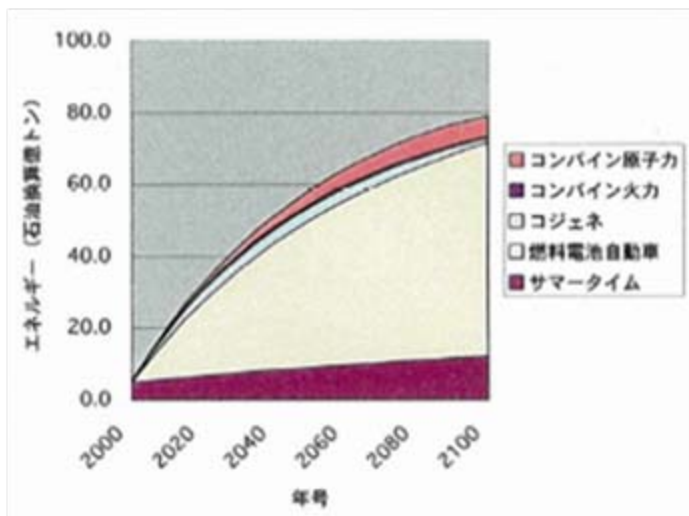


図5-2 省エネルギーの構成比率

(低経済成長で環境保全型とした解析ケース)

省エネルギーの占める割合がかなり大きい。そこで、省エネルギーとして、サマータイム、燃料電池自動車、コージェネ、コンバインド火力、コンバインド原子力の5要素で分担するとしてそれらの分担割合を予測した。

結果は左図に示すように燃料電池自動車の寄与が圧倒的に大きい。

つまり、運輸部門のエネルギー供給はほとんど全て燃料電池によって賄われる必要があると言える。

すなわち、水素エネルギー利用が必要となることを示唆している。

21世紀のエネルギー問題解決の鍵は、原子力と水素であろう。