

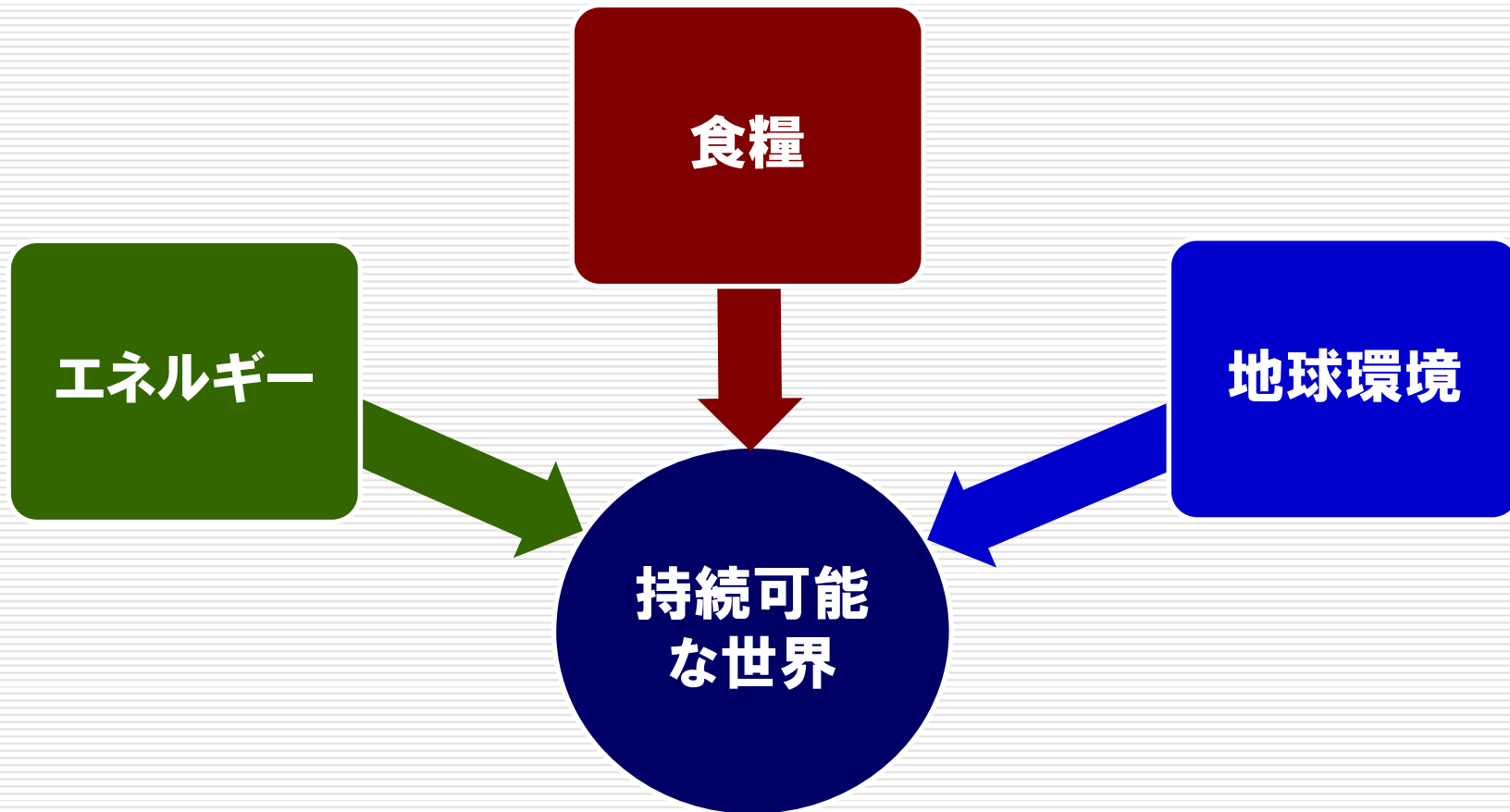
特別講義

高速炉と核燃料サイクル

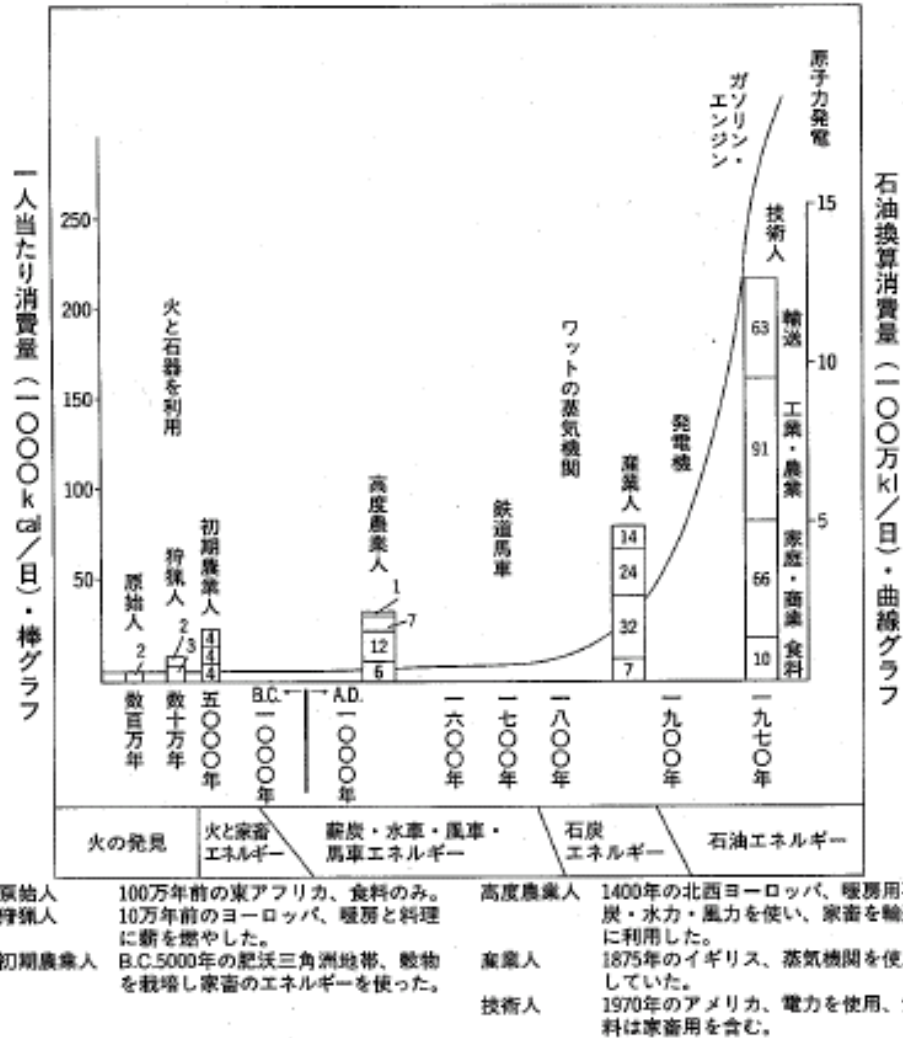
Dr. N. Nakae
原子力安全基盤機構 (JNES)

2013年12月26日
茨城大学大学院理工学研究科

持続可能な世界に必要なもの



エネルギー消費量の変遷



- 19世紀に入り蒸気機関が発明されてからエネルギー消費量は飛躍的増加の一途を辿っている。
- 20世紀に入り発電機が導入されてからその勢いはうなぎ昇りである。
- 科学技術の発展は人類に豊かさを提供したが、膨大なエネルギー消費を引き起こし、地球環境は破壊されつつある。
- 再び地球を救うのは人類の英知(科学)であり、それを実践するのは我々人間である。

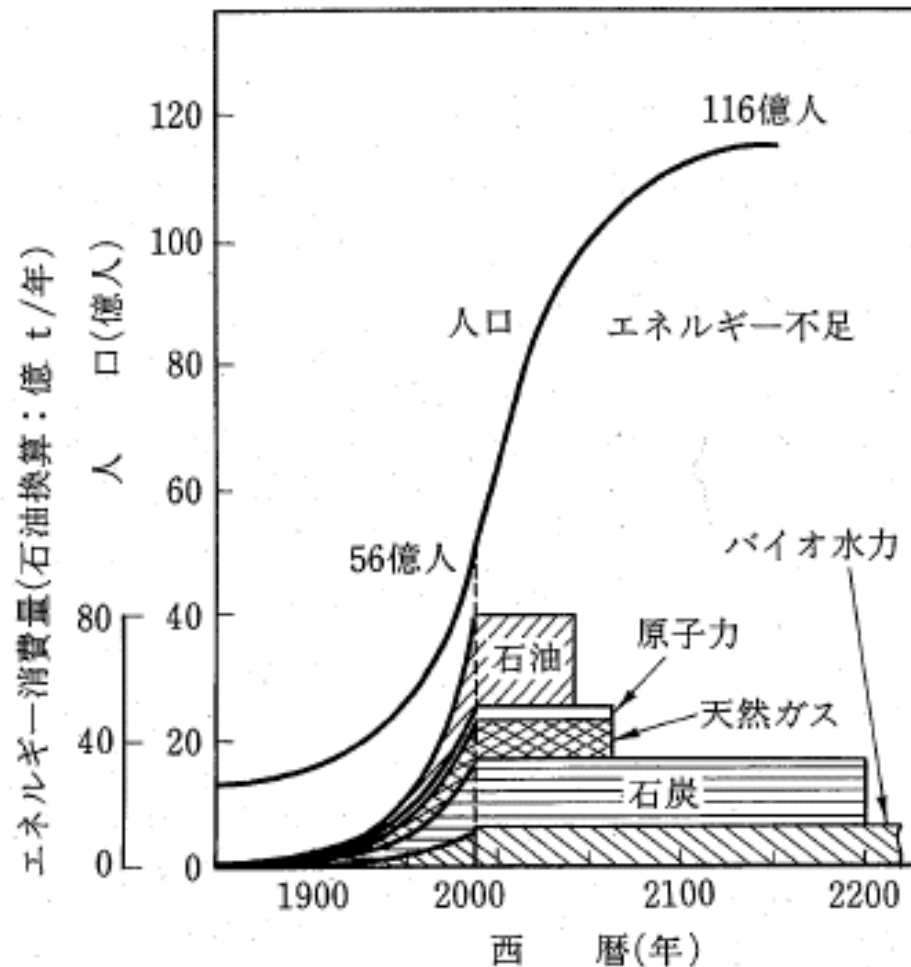


「この解を見出すのが我々の使命」

(参考資料) 総合研究開発機構「エネルギーを考える」

エネルギーの消費限界

可採年数：現状のペースで消費を続けることの可能な年数



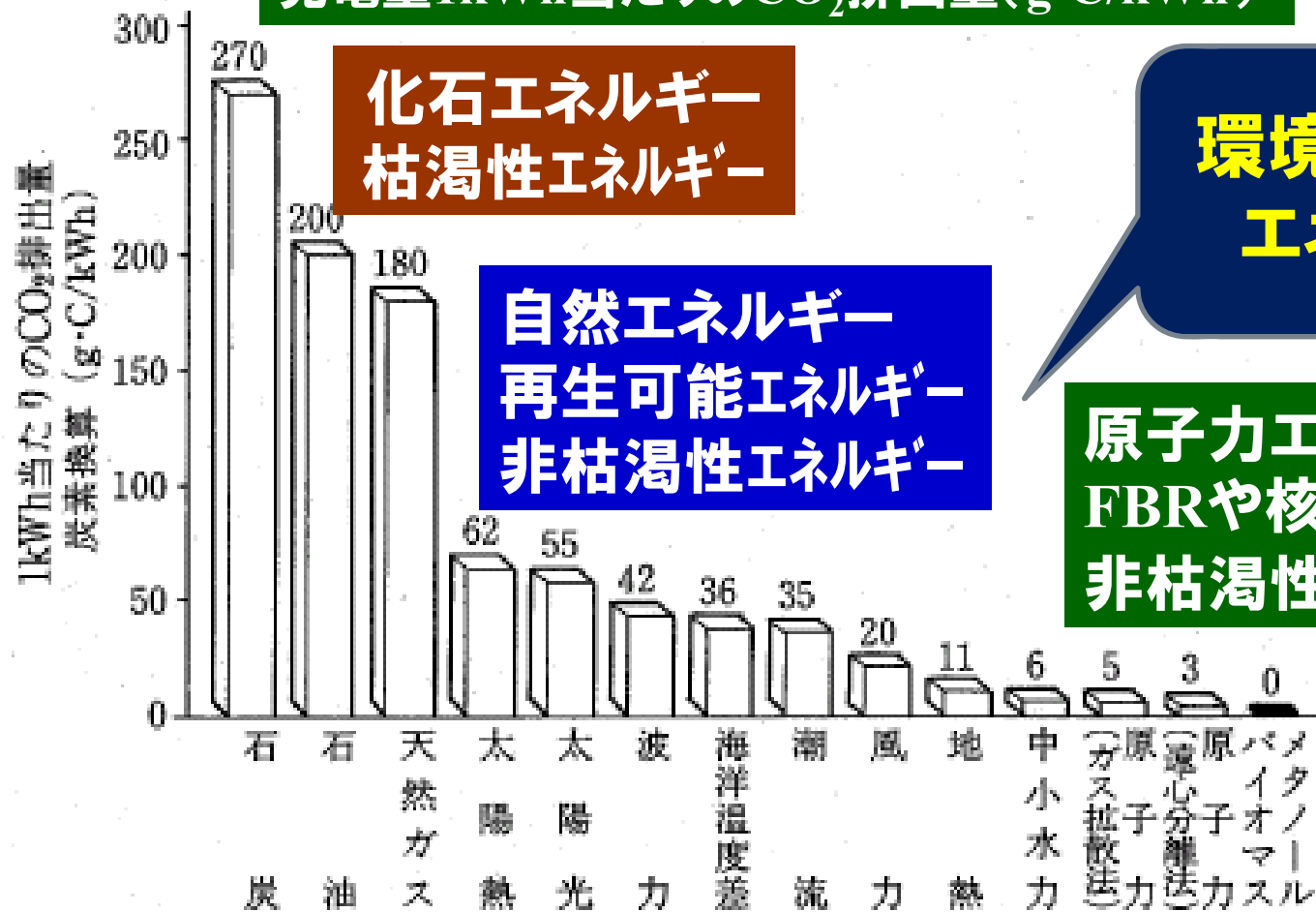
石油 : 50年
天然ガス : 70年
石炭 : 220年
ウラン(軽水炉) : 70年
注)確定値ではない

図は、人口の増加に対しエネルギー供給ができず多くの人がエネルギーの不足を余儀なくされる。

新しいエネルギー源を開発する必要あり。

各種エネルギーの消費とCO₂排出量

発電量1kWh当たりのCO₂排出量(g-C/kWh)



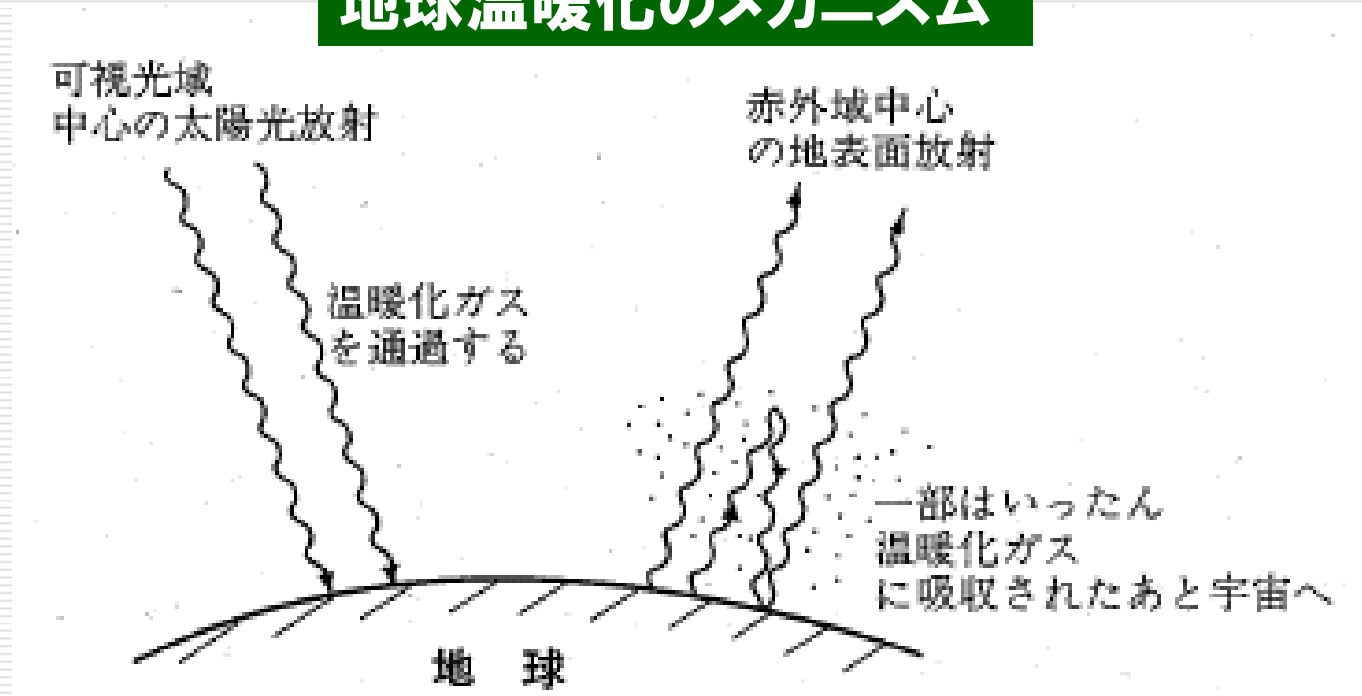
環境に優しい
エネルギー

原子力エネルギー
FBRや核融合なら
非枯渇性エネルギー

出典：電力中央研究所 (1994年6月)

化石エネルギー消費と地球環境問題

地球温暖化のメカニズム



- 太陽光の平均波長は可視光(0.3~1 μ m)
- 地球からの放射光の平均波長は赤外域(7~15 μ m)
- CO₂ メタン 亜酸化窒素(温暖化ガス)は、赤外域の電磁波を吸収し、宇宙への熱の放出を妨げる。

地球温暖化の影響

健康

蚊の分布域の拡大

水資源

降水雪量の減少による水不足

海面の上昇

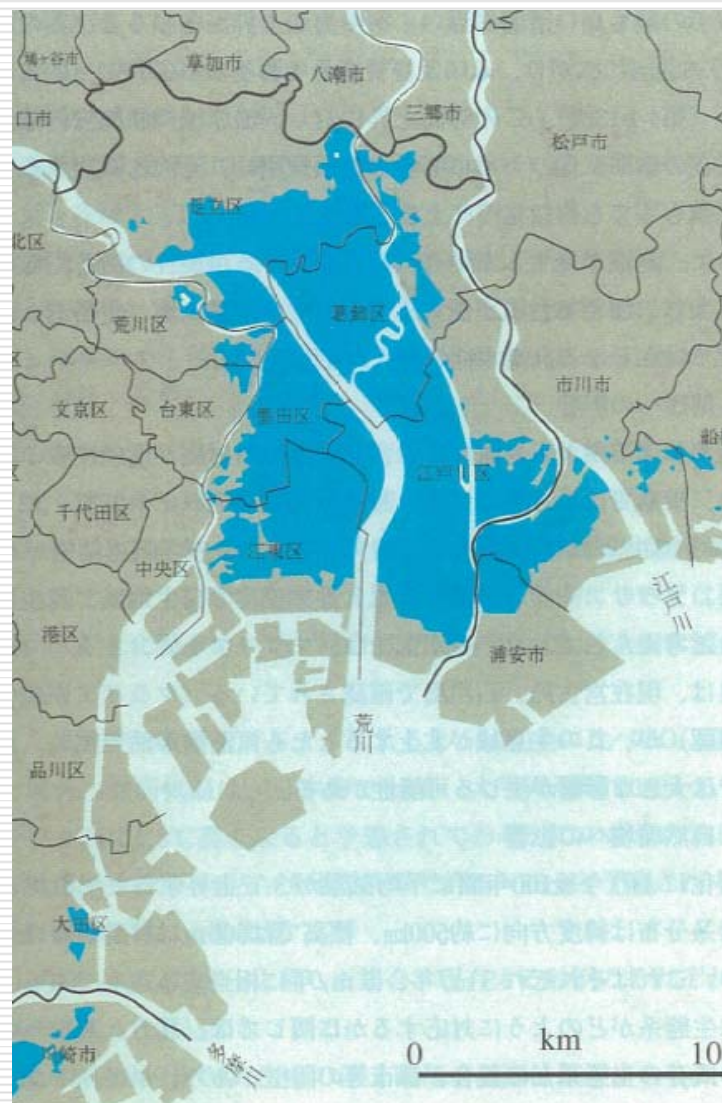
都心部でも水没（右図）

食生活

洪水、干ばつによる食物生産の減少

気候変動

ハリケーン、突風、竜巻、台風、集中豪雨の多発



エネルギー・食糧供給における地球の限界



一人当たりの年間エネルギー消費量と供給可能人口

アメリカ人並み	8TOE	10.5億人
日本人並み	4TOE	21億人
世界平均	1.4TOE	60億人



食糧供給可能人口

アメリカ人並み		30億人
日本人並み		50億人
世界平均		77億人

地球全体のエネルギー供給構造は、食糧供給構造と同様に非常に脆弱化している。
美しい地球を救っているのは誰か？ また、これから救うのは誰か？

地球環境に優しい持続可能なエネルギー

考え得る候補

候補1：再生可能エネルギー（太陽熱・光、風力など）

候補2：非枯渇型の原子力（核融合、FBR）

候補3：化石に代替する水素エネルギー

FBRと水素を本命と考える理由

理由1：太陽熱・光、風力などはエネルギー密度低

理由2：核融合は原理実証の段階、実用化は将来

FBRは実証炉段階、実用化を見通せる

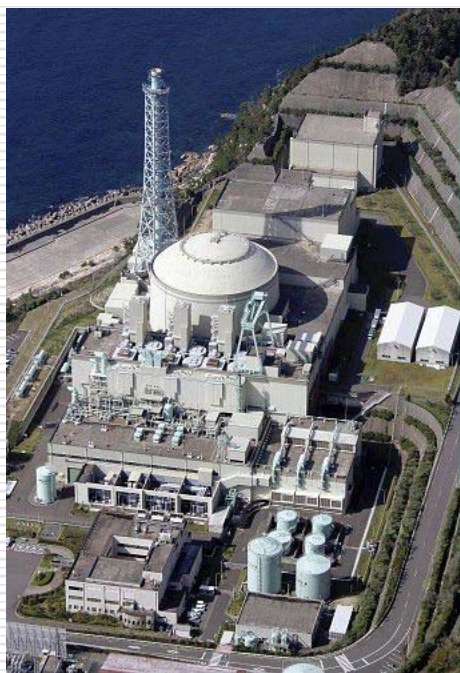
理由3：H/C値が大きいほど発熱大

Hは無限大

結論：「FBRによる発電と水素製造」

高速炉（Fast Reactor）とは

- 高速中性子（ $E > 0.1 \text{ MeV}$ ）による核分裂を利用し、冷却材にはナトリウム等の液体金属を使用する。
- 軽水炉は熱中性子（ $E > 0.025 \text{ eV}$ ）による核分裂を利用し、冷却材に水（軽水）を使用する。



高速増殖原型炉「もんじゅ」

高速増殖炉（FBR）とは

FBR（Fast Breeder Reactor：高速増殖炉）とは、

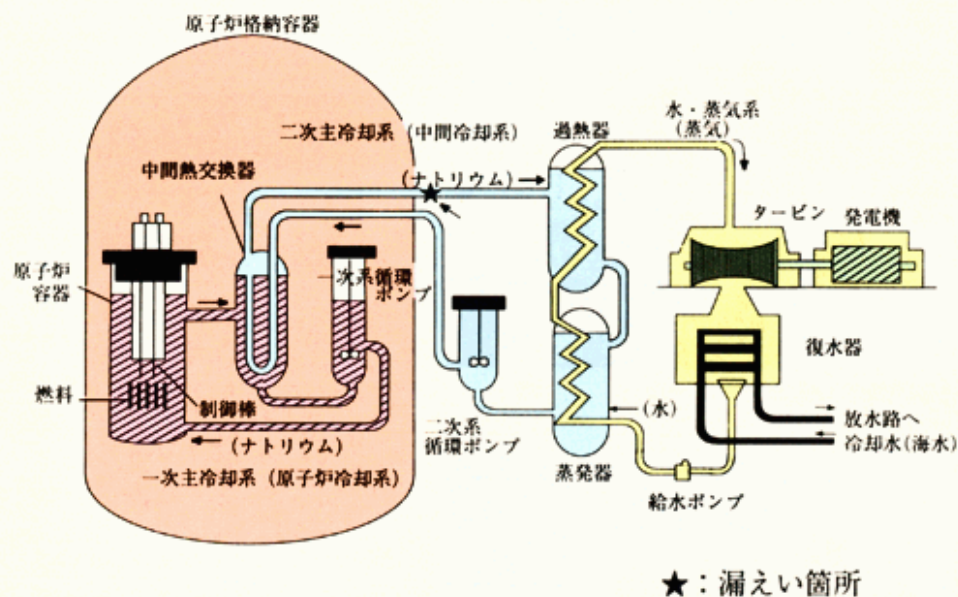
高速の中性子と核燃料の核反応を利用する原子炉であり、プルトニウムを積極的に核燃料として利用すれば、プルトニウムの核分裂による発生する中性子数は約3個と多いため、核分裂（1個必要）とウランからプルトニウムへの核変換（1個必要）の他に高レベル放射性廃棄物を消滅するためにも利用できる。

FBRの特徴はエネルギーを生産しながら新しく核燃料を生産可能である。（増殖性）

「環境に優しい」「非枯渇性」のエネルギーを生産することが可能である。

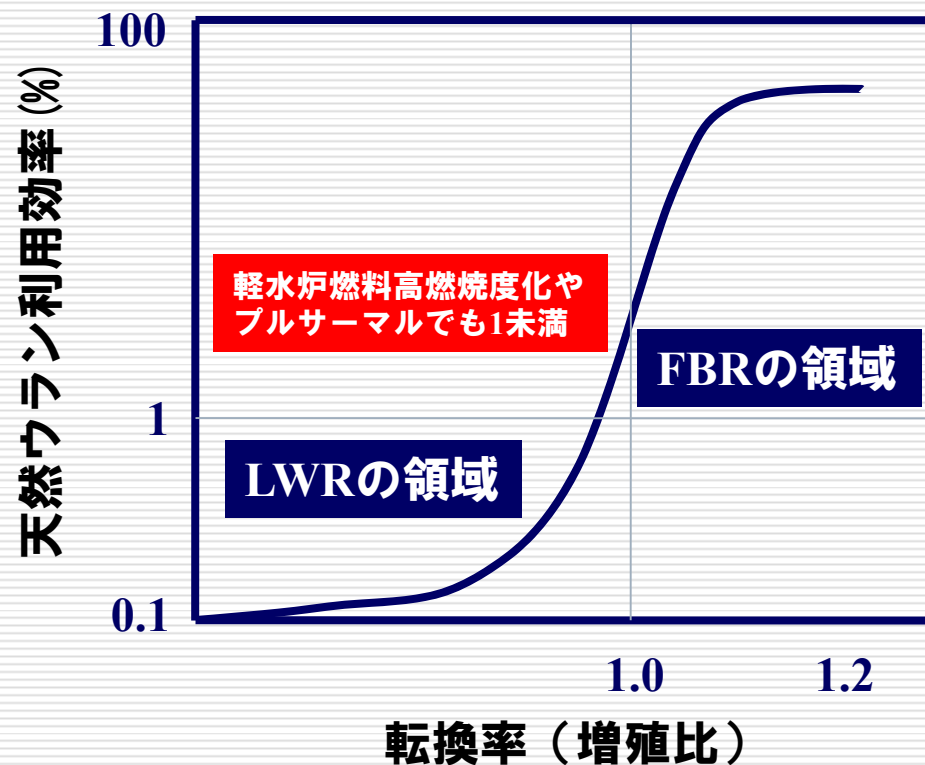
高速炉「もんじゅ」の仕組み

- 軽水炉（PWR）と似通っている。
- PWRは、1次冷却材の熱により水蒸気を発生させるが、高速炉は、1次冷却材の熱を中間熱交換器を通して2次冷却材に伝え、その熱で水蒸気を発生させタービンを回転させ発電する。



高速増殖原型炉「もんじゅ」の仕組み

FBRにおける天然ウラン利用効率



FBRにおける天然ウランの利用効率は約70%である。

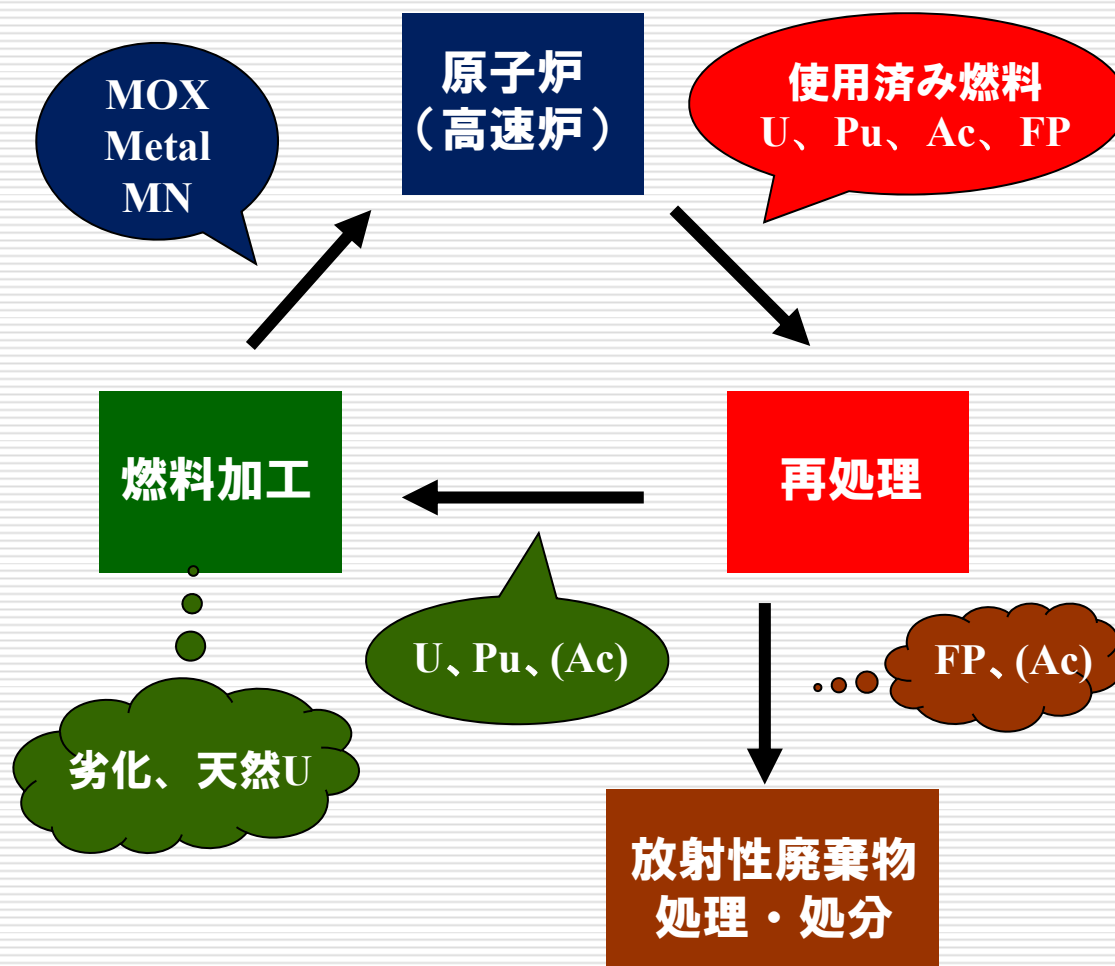
これは、使用済燃料のリサイクルによって可能となる。

なお、効率が100%でないのは核燃料サイクルの過程での燃料ロスの発生によるものである。



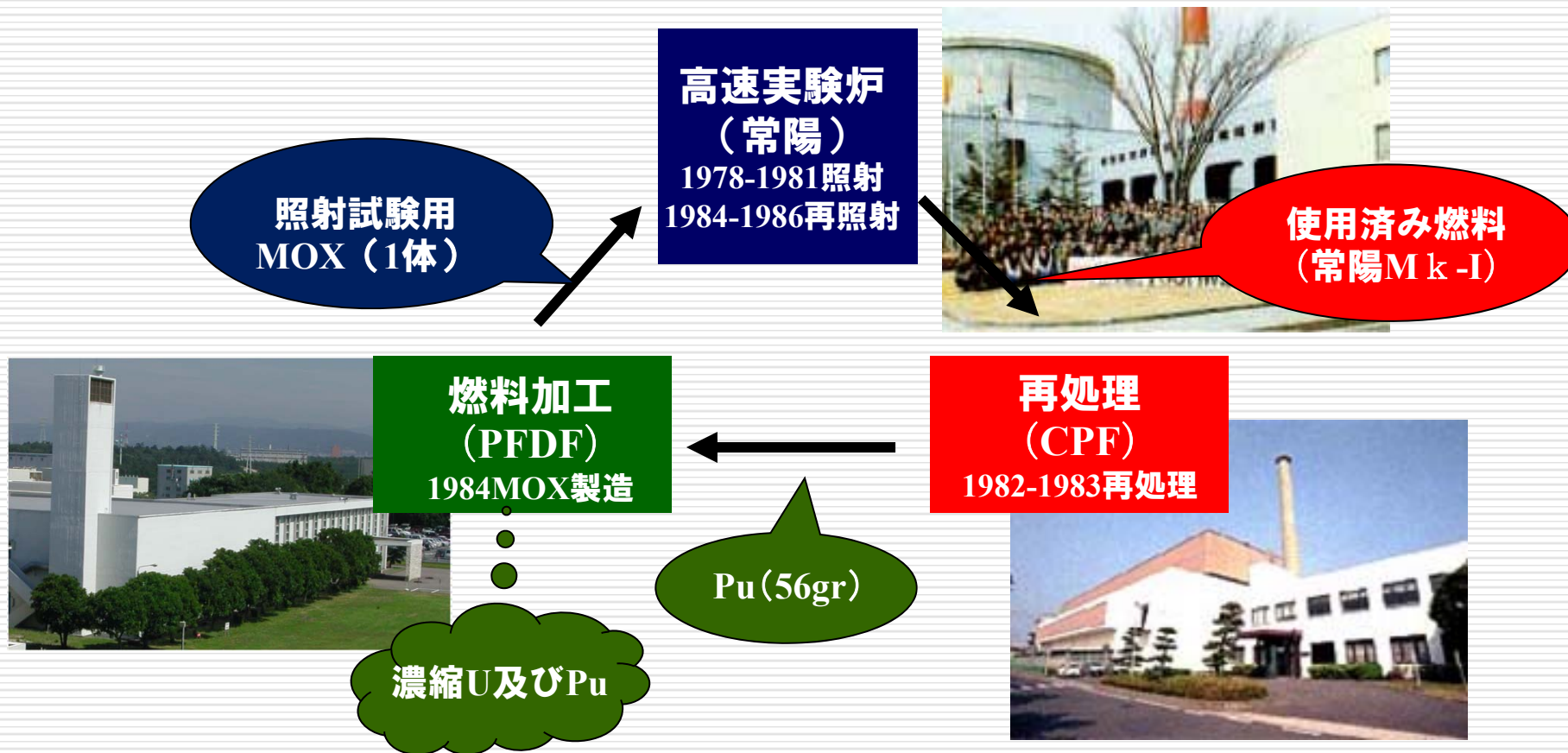
FBRと核燃料サイクル開発が必要である。

核燃料サイクルとは



サイクルに供給する物質は劣化・天然ウラン、サイクルから排出される物質は核分裂生成物（FP）及び長半減期を持つアクチノイド元素である。

核燃料サイクルは閉じている



核燃料サイクルは、1982年から1986年の4年間かけて
高速実験炉「常陽」、リサイクル試験施設「CPF」、
及びプルトニウム燃料第1開発室「PFDF」で完結した。

核燃料サイクル施設の役割

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FP、Acを分離、U、Pu、Acを抽出

燃料加工

U、Pu、Acを酸化物等に成型、燃料体に加工

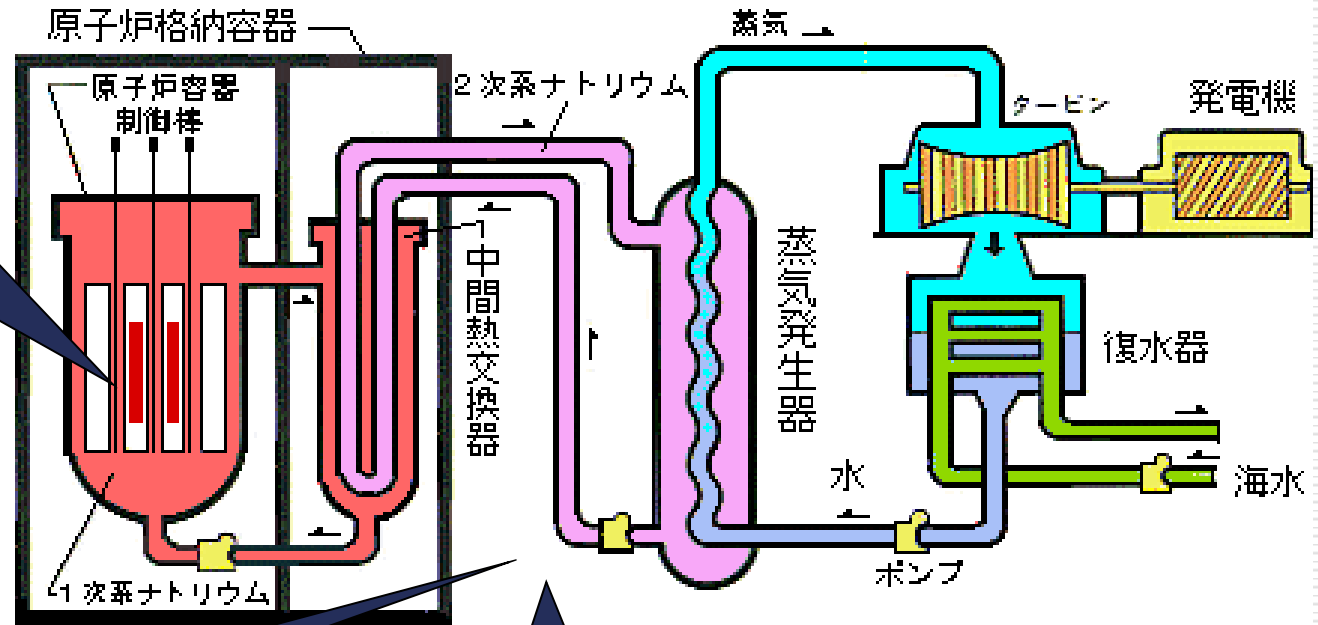
高レベル放射性廃棄物処理・処分

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

FBR技術開発

■ 高速増殖炉（FBR）のしくみ

【炉心】
核設計
熱流力設計
燃料機械設計



【プラント】
構造設計

安全設計
安全評価

核設計・熱流力設計とは

- 核設計とは、炉心内での中性子のバランスを取ることである。

$$(1) N_{\text{GEN}} = N_{\text{ABS}} + N_{\text{LEAK}}$$

$$(2) k_{\text{eff}} = 1.0$$

$$k = \nu \cdot P_{NL} \cdot P_{aF} \cdot P_f$$

- 熱流力設計とは、炉心内での熱のバランスを取ることである。

$$(1) Q_{\text{GEN}} = Q_{\text{REM}}$$

$$(2) T = \text{Constant}$$

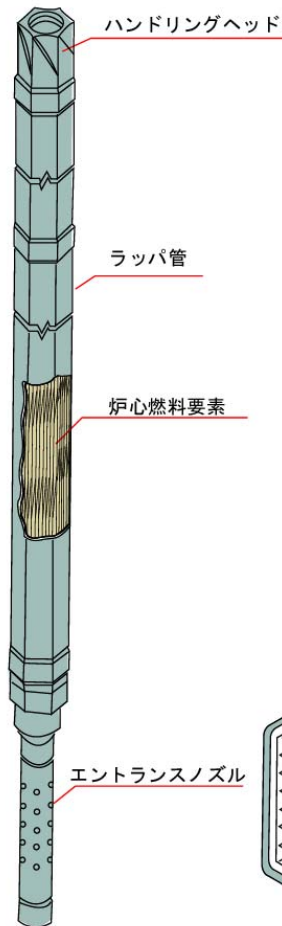
燃料（機械）設計とは

- **燃料（機械）設計とは、燃料が過大な変形や損傷・破損しないことを保証することである。**
- **燃料設計条件には、線出力、燃焼度、高速中性子束、高速中性子照射量、冷却材温度の軸方向分布や履歴がある。**
- **予め決めた燃料仕様（寸法、密度、組成等）に対して設計評価を行い設計基準（健全性の判断基準）を満足することを確認する。**
- **代表的な判断基準として、燃料中心温度、被覆管外径増加、被覆管に働く応力や歪がある。**

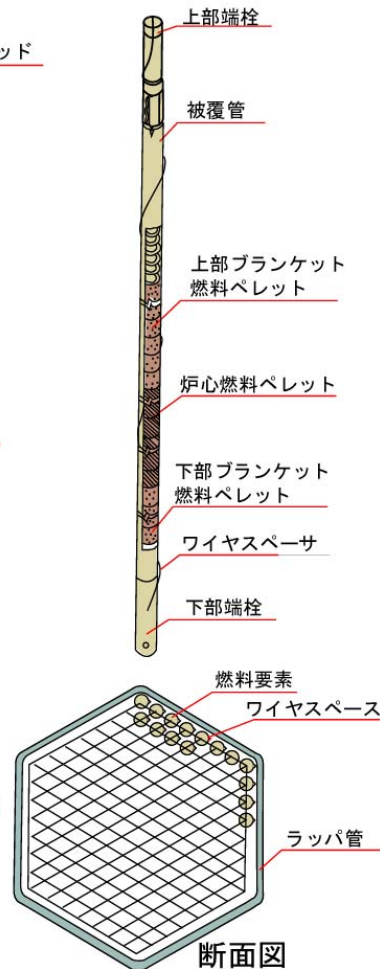
燃料体の構造

燃料集合体の構造

炉心燃料集合体

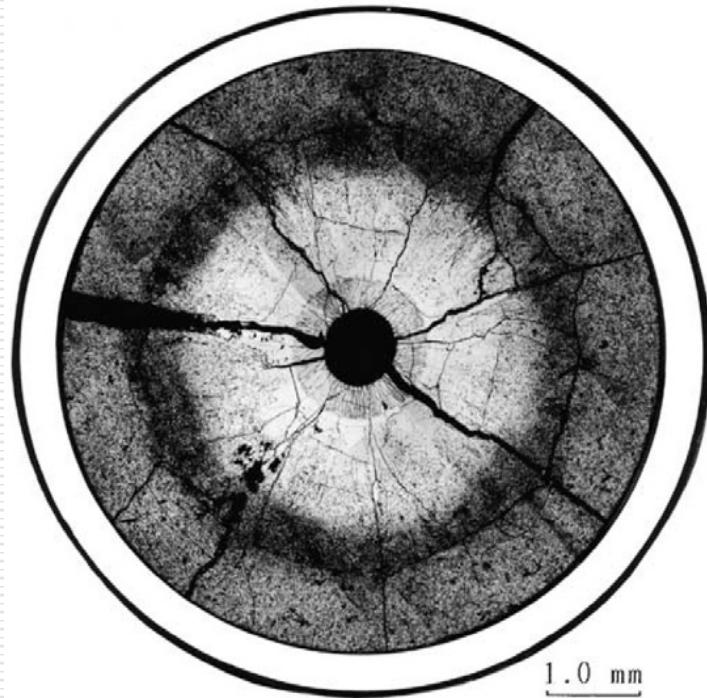


炉心燃料要素



- 燃料集合体は、169本の燃料要素(燃料ピン)が細密充填されている。
- 燃料要素束はラッパ管の中に収納されており、ラッパ管はその上部で燃料取扱い用のハンドリングヘッド、下部で冷却材が流入するエントランスノズルと溶接されている。
- エントランスノズルから流入した冷却材（ナトリウム）は燃料要素の外側を通り下部から上部に流れる。燃料要素同士が接触せずナトリウムの流路を確保するためにワイヤスペーサが燃料要素に巻き付けられている。
- 燃料要素の中央部に炉心燃料ペレット、その上下にブランケットペレット、上部にプレナムが配置され上下部で端栓溶接されている。

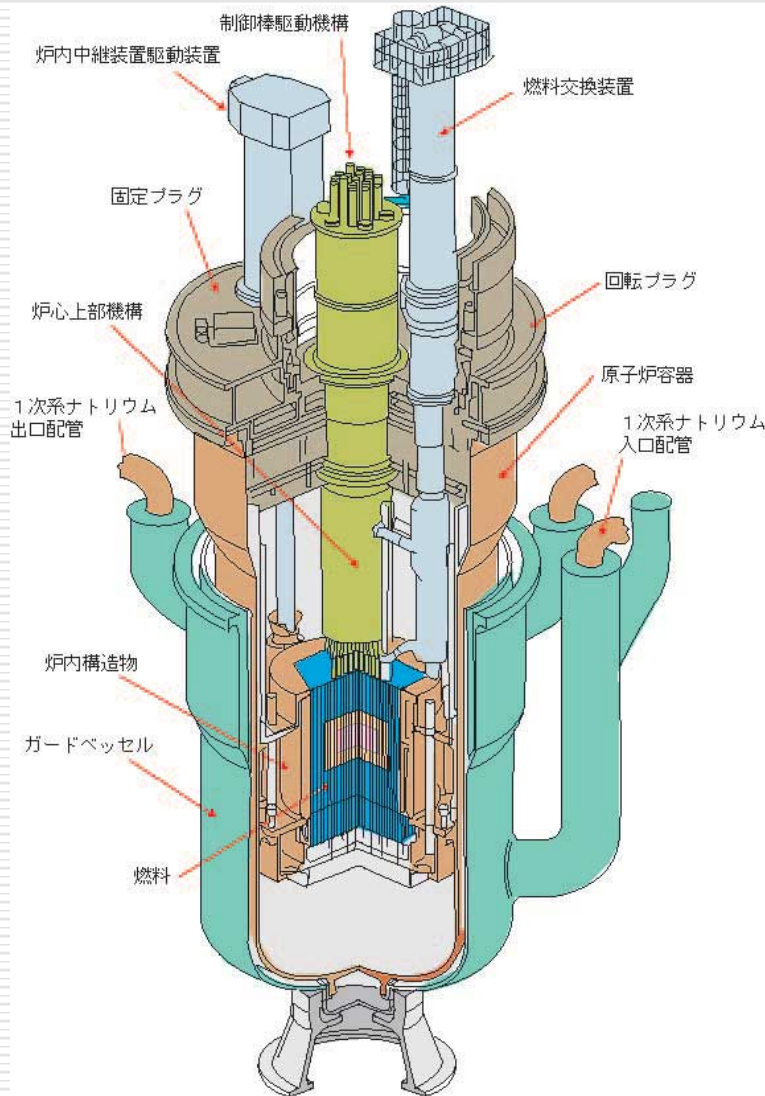
燃料の照射挙動の例



燃料溶融試験結果の写真

- 燃料中心が溶融する出力（左図のケースでは691W/cm）で照射した結果、燃料中心部は溶融した。
- 中央の黒い円はペレット内での径方向温度勾配によって製造時の気孔が中央部に集まってできた中心空孔である。
- その外側に燃料が溶けて固まった跡が観察される。（デンドライト）
- その外側の白く見える部分は製造時の気孔が消失している領域である。
- その外側の黒く見えるリング状の組織は照射により生成された核分裂生成ガスが集まった部分である。
- その外側は製造時の状態が保持されている。
- 多くのクラックが見られる。

高速炉の構造設計



漏えい防止

温度差による
熱膨張差吸収

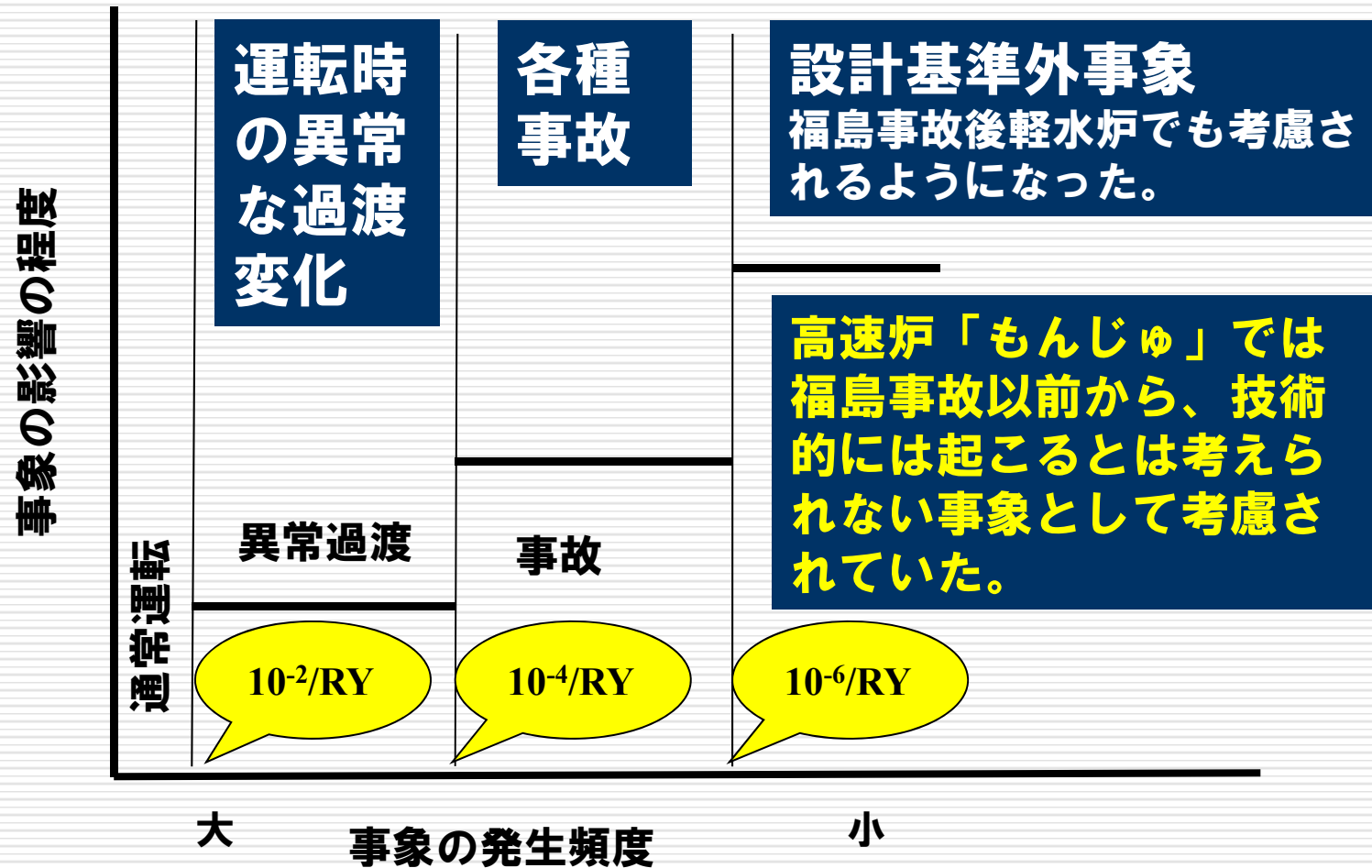
ガードベッセル
配管の高所引回し

エルボウ

構造設計を支える基礎技術

高性能材料の開発
高クロムフェライト鋼
(熱膨張係数小)

高速炉の安全設計・安全評価



5項事象

5項事象は、高速炉指針の5項で規定されたことから「技術的には起こるとは考えられない事象」と呼ばれる。

- 局所燃料破損事象(Local Fuel Fault)
 - 1次冷却系配管大口徑破損事象(LOPI)
 - 反応度抑制機能喪失事象(ATWS)
UTOP: 燃料分散→未臨界状態
ULOF: 炉心溶融→エネルギー放出
-

再処理技術開発



東海再処理工場 全景



使用済燃料貯蔵プール

再処理技術開発

プロセス	処理（精錬・転換）	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。

再処理技術開発

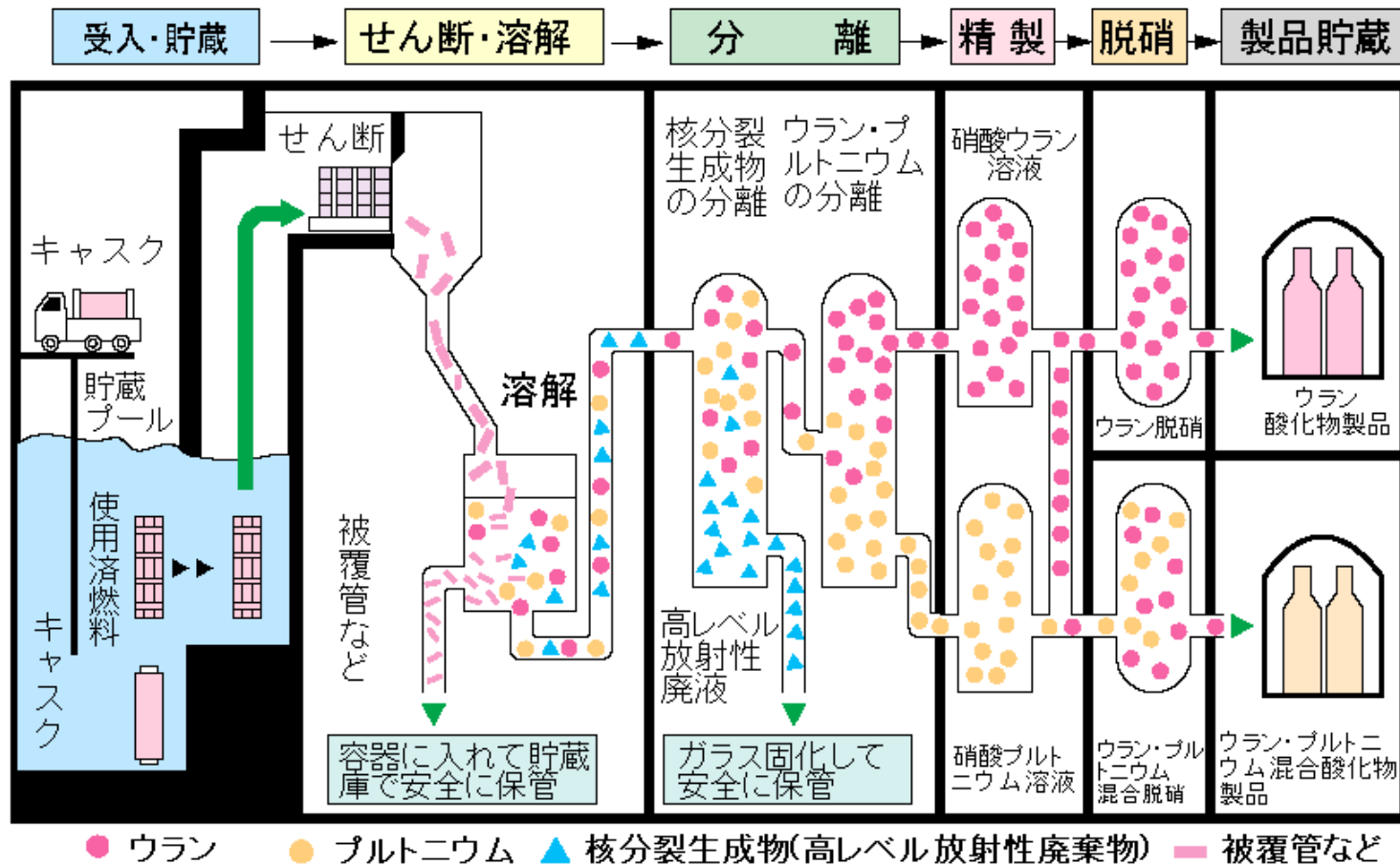


図3 再処理の工程

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

プルトニウム燃料施設

・もんじゅ及び常陽用のドライバー燃料製造



プルトニウム燃料第3開発室
Plutonium Fuel Production Facility
PFPF (1988 -)

・ふげん、常陽用のドライバー燃料製造



プルトニウム燃料第2開発室
Plutonium Fuel Fabrication Facility
PFFF (1972 - 2001)



プルトニウム燃料第1開発室
Plutonium Fuel Development Facility
PFDF (1965 -)

・プルトニウム燃料に関する基礎的研究
(物性測定)
・照射試験用燃料の製造

プルトニウム燃料製造技術開発

MOX燃料ペレット製造



密度、プルスポット
制御(高度な技術)

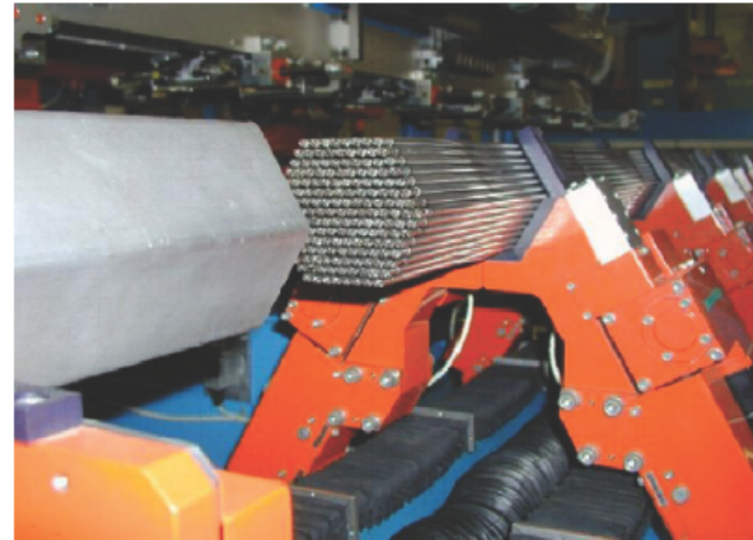
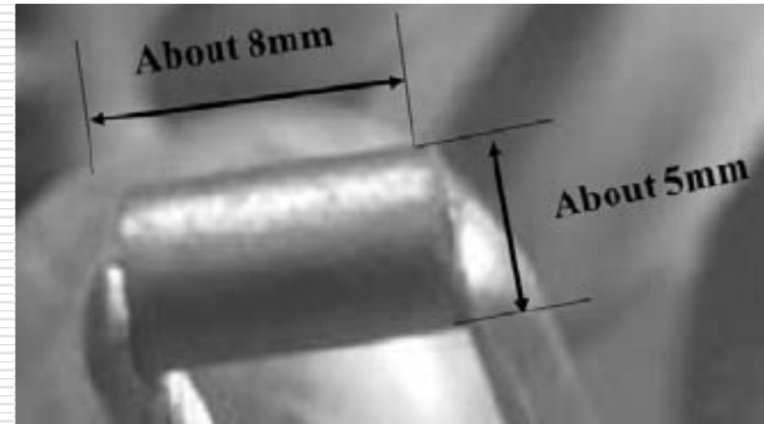
燃料要素加工組立



自動化技
術

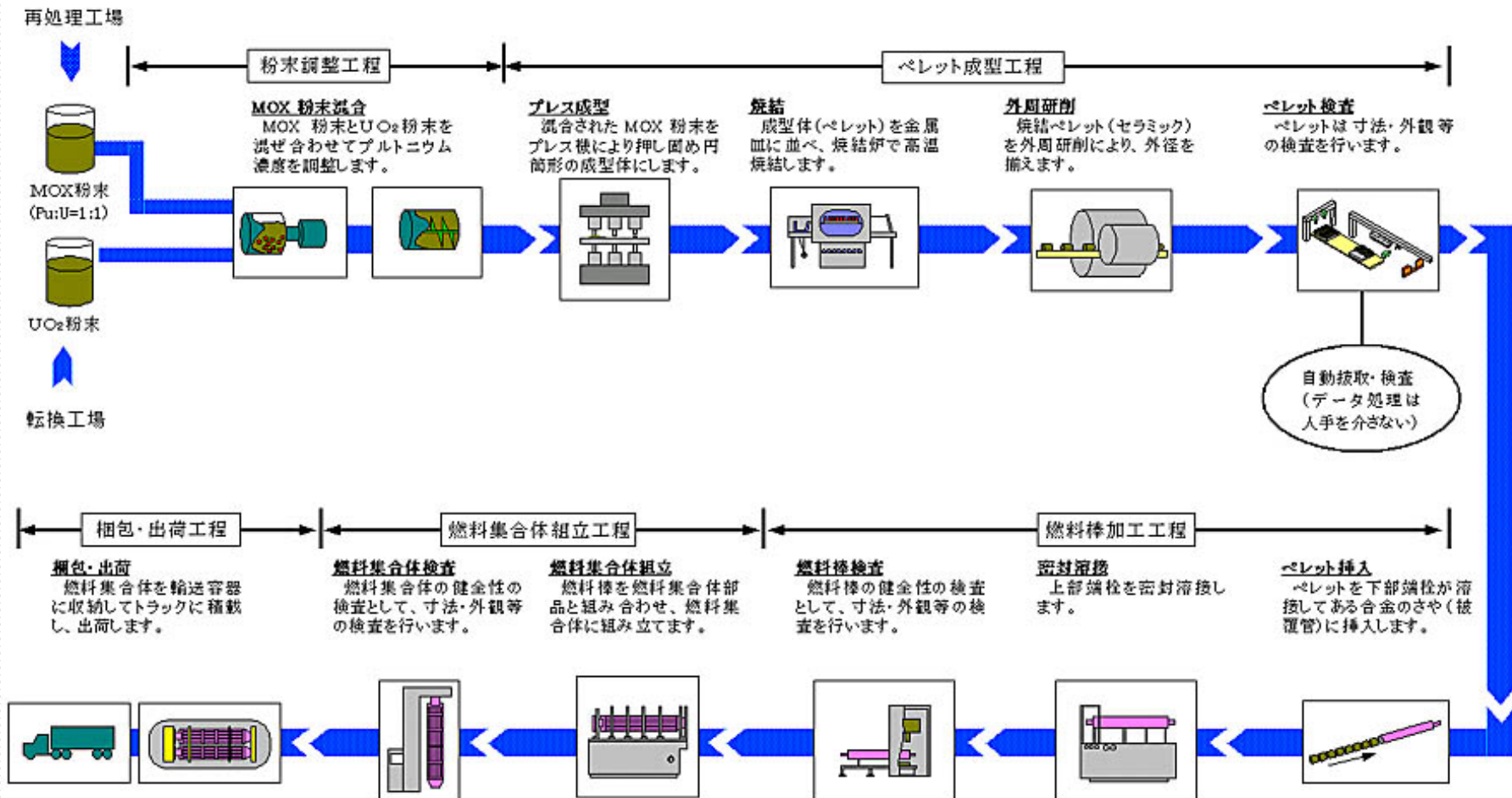
燃料集合体加工組立

自動化技術



プルトニウム燃料製造技術開発

国内MOX燃料加工工程の概要



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出している。



問題解決のための方策

地球温暖化	→	原子力を含む非化石燃料の利用の推進
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）の確立