

特別講義

2010年12月24日
茨城大学 工学部

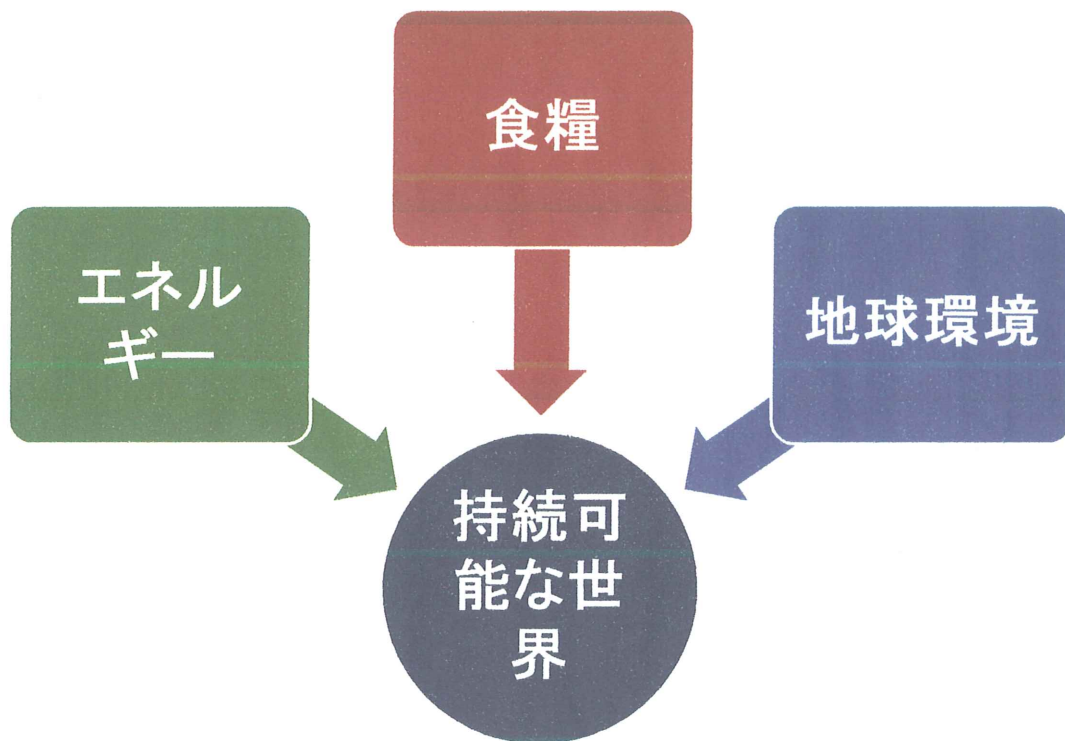
相対性理論と原子力
核不拡散への取り組み
原子力の平和利用
持続可能性と核燃料サイクル
高速炉燃料工学

Dr. N. Nakae
東京工業大学

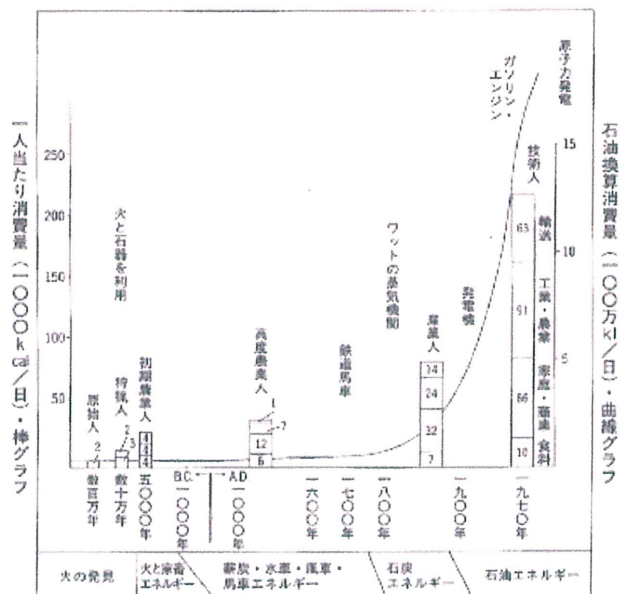
持続可能性と核燃料サイクル

人類の持続可能性に必要なものは・・・
エネルギー消費量の変遷
地球が賄える食糧とエネルギー
高速炉サイクルシステム

人類の持続可能性に必要なものは・・・



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。

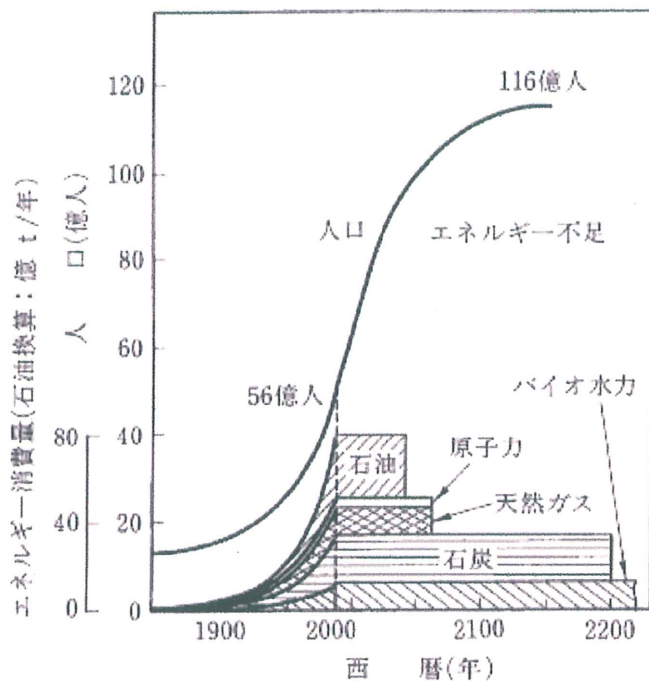
再び地球を救うのは人類の英知(科学)であり、それを実践するのは我々人間である。



「この解を見出すのが我々の使命」

エネルギーの消費限界は・・・

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 : 70年(軽水炉)
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

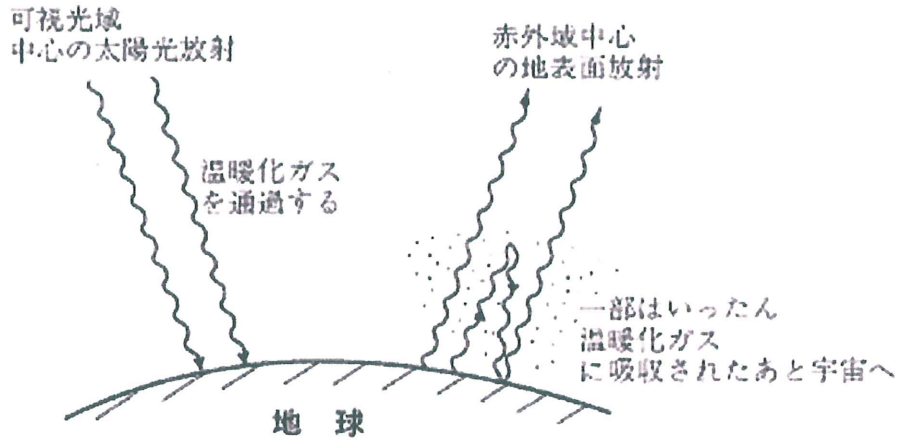
発電量1kWh当たりのCO₂排出量(g-C/kWh)



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線(7~15 μ m)
- CO₂、メタン、亜酸化窒素(温暖化ガス)は、赤外線の電磁波を吸収し、宇宙への熱の放出を妨げる。

地球温暖化が顕著になると...

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

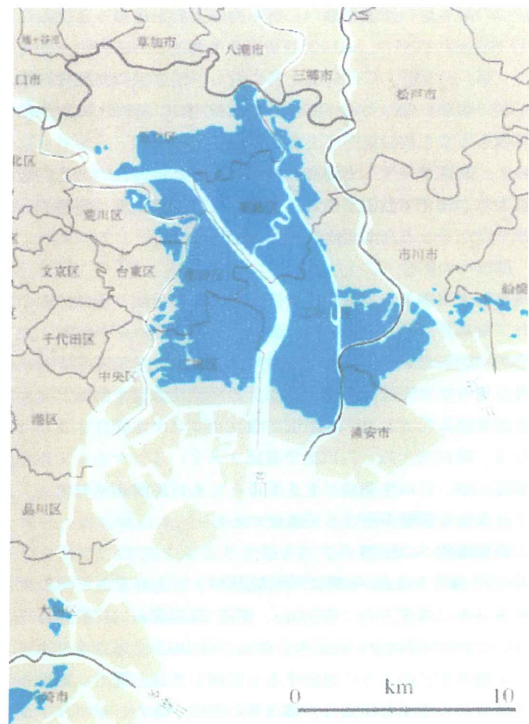
都心部でも水没

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

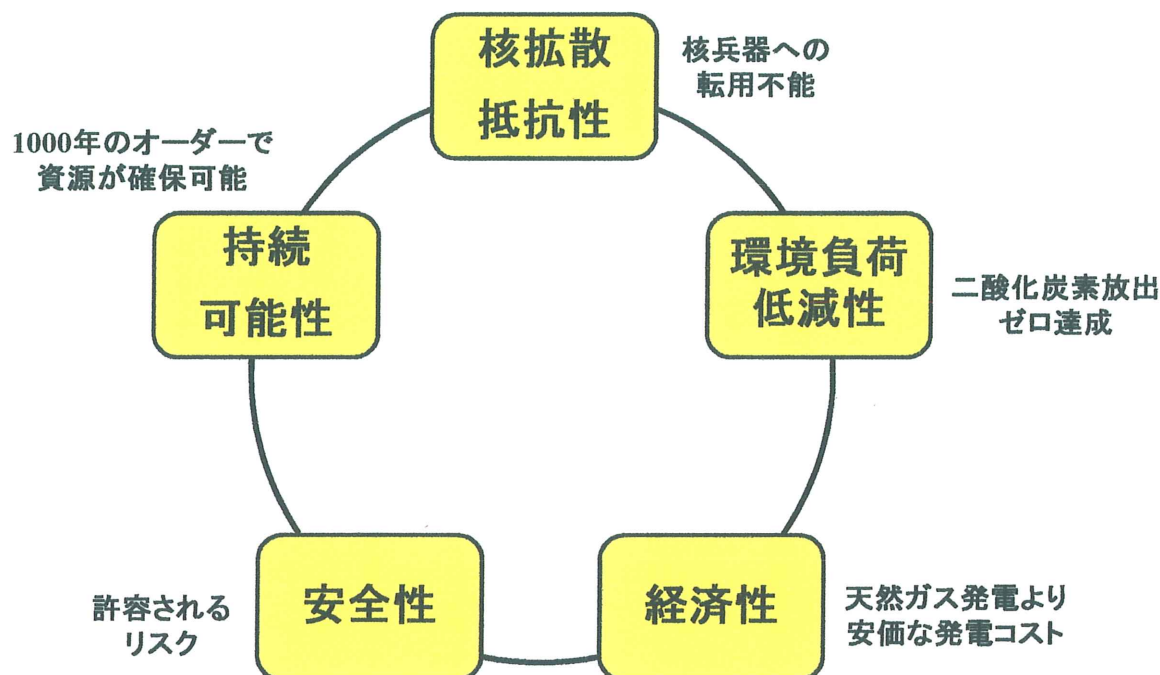
アメリカ人並み		30億人
日本人並み		50億人
世界平均		77億人

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？

人類は持続可能な社会を求めている

- 革新的なエネルギー源の創出が必要である。
- 核エネルギーは有力な候補である。
- 問題は核エネルギー利用システム、すなわち、革新的原子力システムの構築である。
- 革新的原子力システム（持続可能な原子力システム）の研究開発が21世紀のエネルギー・環境問題解決への鍵となる。
- 世界の原子力の研究者・技術者はこのような認識を共有している。(GEN-IV)

持続可能な原子力システムに求められる特性



核不拡散抵抗性を有する原子力システム

核拡散抵抗性とは・・・

システムに、濃縮、再処理プロセスが存在しないこと。
システムにおいて濃縮ウラン、プルトニウムを単独で
取り扱わないこと。

アクチニドリサイクルを採り入れた高速炉システム
(プルトニウムを単独抽出する再処理プロセスを
含まない核燃料サイクル)

超高燃焼可能で再処理フリーな原子力システム
(Breed & Burn: CANDU、TWR、PBR)

軽水炉での天然ウラン利用効率

軽水炉はワン・スルー、ウラン利用効率は1%未満



$$4x + 0.2y = 0.7(x + y)$$

x : 濃縮ウラン量

y : 劣化ウラン量

4 : 濃縮ウランの濃縮度

0.2 : 劣化ウランの濃縮度

0.7 : 天然ウランの濃縮度

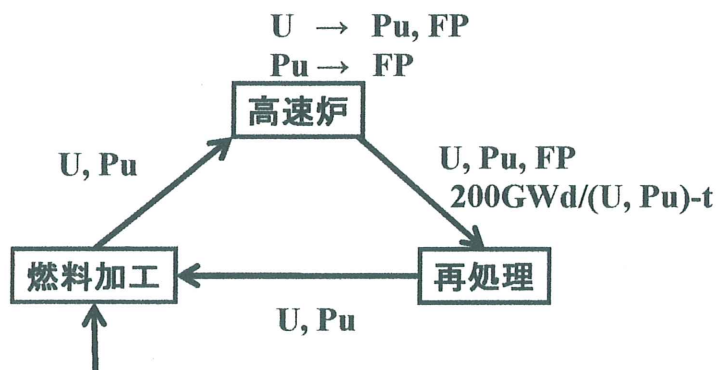
この場合、濃縮ウラン1に対し、天然ウラン7.6≒8が必要

$$\text{天然ウラン利用効率} = \frac{60\text{GWd}^E\text{U-t}}{1000\text{GWd}^N\text{U-t}} \times \frac{1}{8} = \frac{60}{1000 \times 8} = 0.75\%$$

- ・ 軽水炉では天然ウランは99%以上燃焼せず(不完全燃焼)
- ・ 軽水炉でのプルトニウムリサイクル(プルサーマル)では多重リサイクルは技術的に不可

高速炉での天然ウラン利用効率

高速炉はリサイクル、ウラン利用効率100%も可能

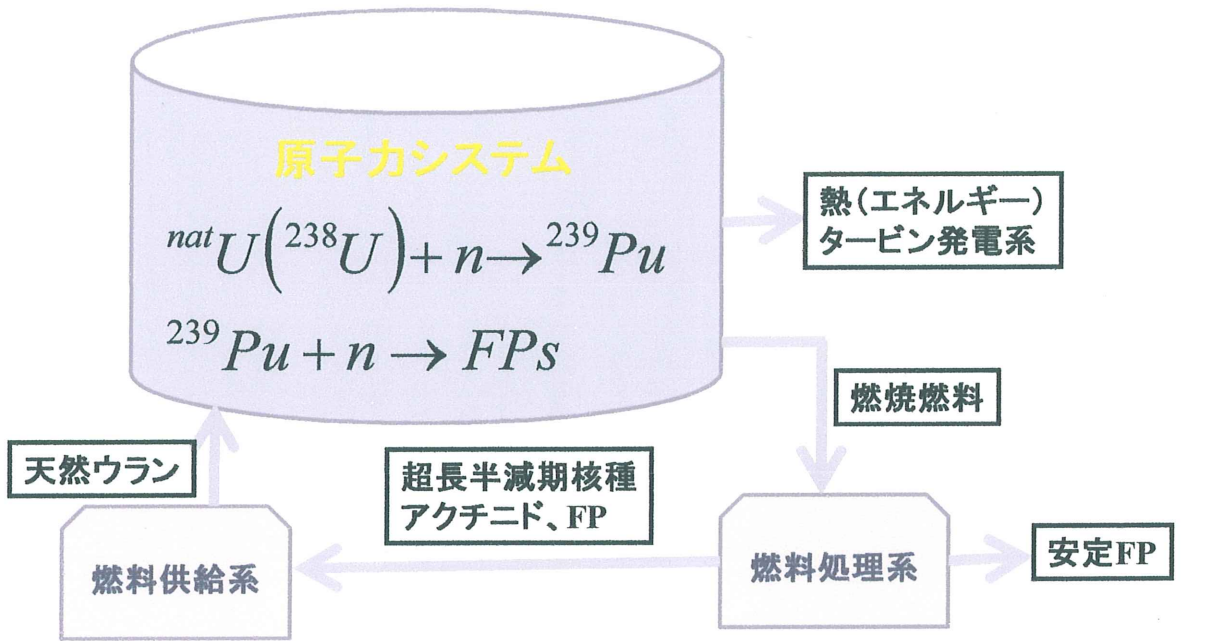


- ・ 高速炉とは、プルトニウムを触媒として天然ウラン(^{238}U)を燃焼させるもの
- ・ 部分的には不完全燃焼、しかし、リサイクルにより完全燃焼
- ・ 高速炉システムは非枯渇性を有する。

持続可能な社会形成と原子力

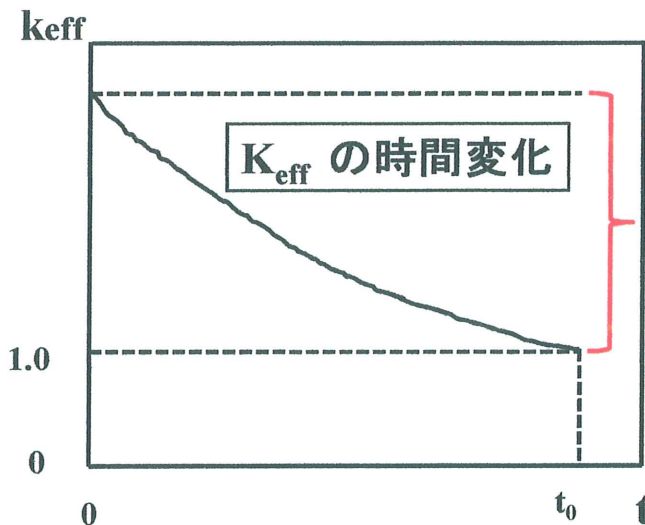
天然ウランの完全燃焼が可能な原子力システムが理想である。

システムへの入力は天然ウラン、出力は熱(エネルギー)と安定なFPのみである。



原子炉は中性子によって支配されている

実効増倍率(K_{eff})は炉心内の中性子の数に依存する。

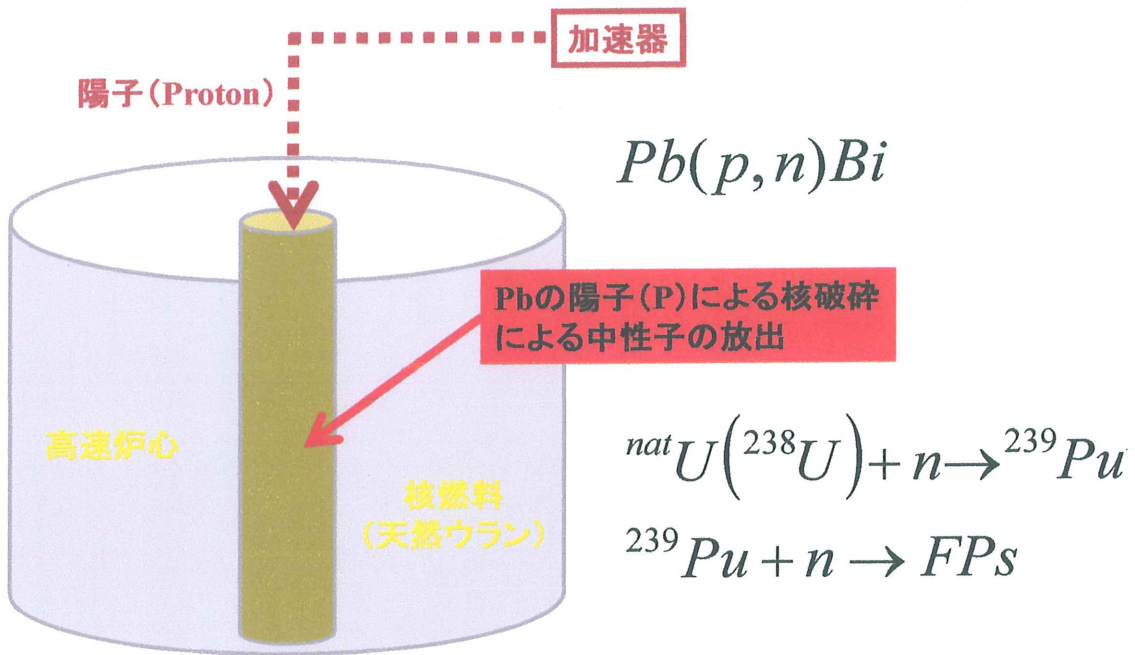


- ① 燃焼期間(t_0)を確保するため、 $t=0$ で、炉心は余剰反応度を持つ必要がある。
→ **濃縮ウランやプルトニウムの使用**
- ② 初期の余剰反応度は、制御棒で抑制される。(中性子を吸収)
- ③ K_{eff} が減少する原因
 - ・ 核物質が減少 → 中性子放出が減少
 - ・ FPが増加 → 中性子吸収が増加いずれにせよ中性子数が減少
- ④ 燃料交換が必要

原子炉は中性子によって支配されている。

σ_f , ν 及び η が大きい核物質であるウラン-235やプルトニウムが原子燃料となる。**高速炉ではプルトニウムが燃料となる。**

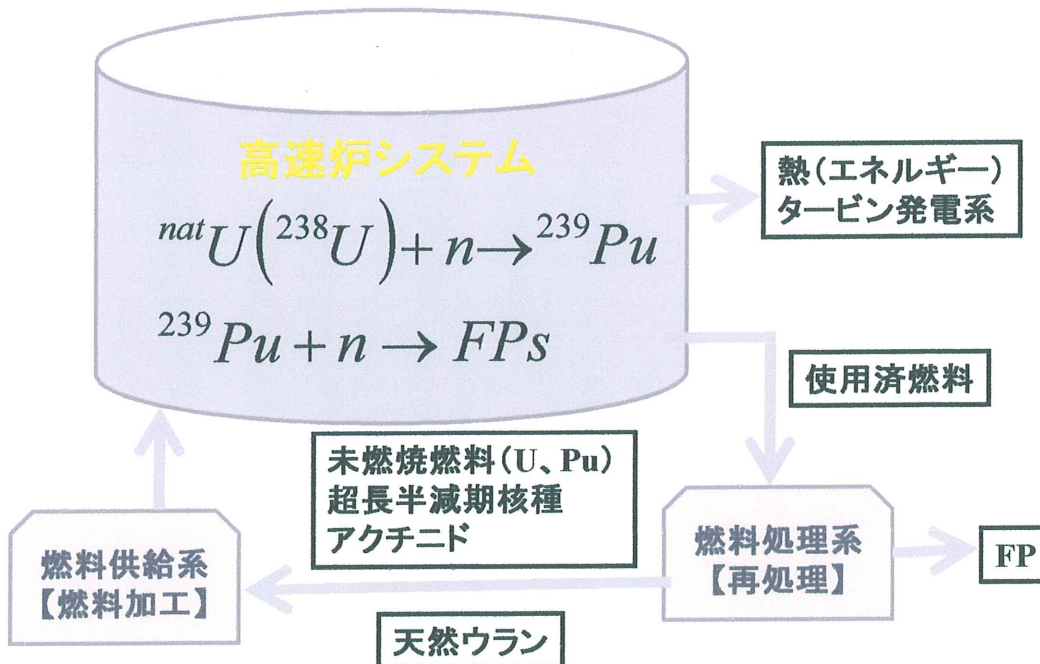
核燃料の完全燃焼には中性子が必要



ポイントは加速器の負担軽減！！！！

現時点で実現可能な原子力システム

高速炉サイクルシステムが現時点で考えられる最も実現可能性の高いものである。



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」

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
プルトニウムの積極利用とは・・・

高速中性子と相性の良いプルトニウム(核特性)

プルトニウムは核分裂による発生中性子数多い
核分裂以外にウランのプルトニウムへの核変換

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」
のエネルギーとなる。



FBRの核特性

	LWR $E \cong 0.025eV$				FBR $E \geq 0.1MeV$			
	σ_f	σ_c	$1/\alpha$	η	σ_f	σ_c	$1/\alpha$	η
U-235	46.7	10.5	4.4	2.0	1.9	0.5	3.8	2.0
U-238	0.1	0.9	0.1	≈ 0.0	0.1	0.3	0.3	0.4
Pu-239	106.2	58.6	1.8	1.9	1.8	0.5	3.6	2.4
Pu-240	0.6	104.0	≈ 0.0	≈ 0.0	0.4	0.5	0.8	1.5
Pu-241	118.1	38.7	3.1	2.2	2.4	0.4	6.0	2.6
Pu-242	0.4	31.7	≈ 0.0	≈ 0.0	0.3	0.4	0.8	1.4

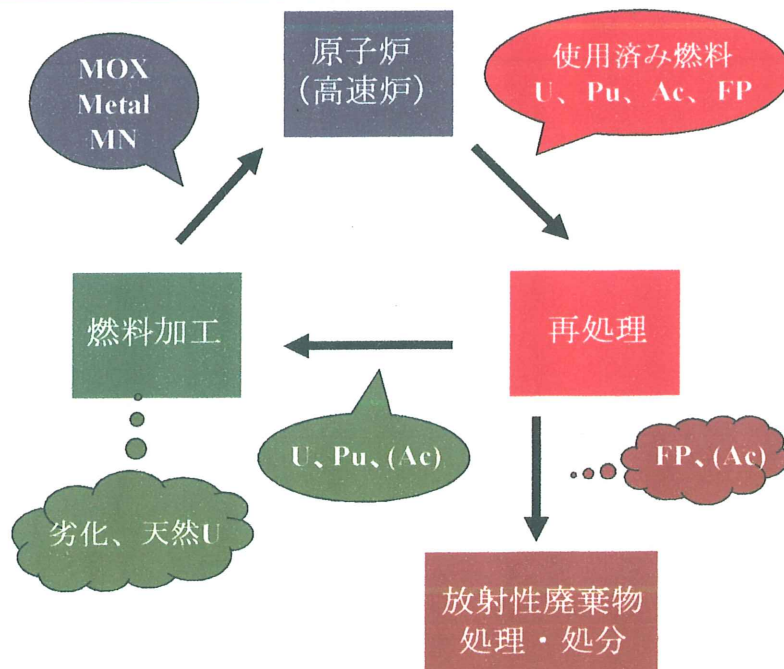
$$\alpha = \frac{\sigma_\gamma}{\sigma_f} \quad \frac{1}{\alpha} = \frac{\sigma_f}{\sigma_\gamma} = \frac{(n, f)}{(n, \gamma)}$$

1回の核分裂あたり放出される中性子数の平均値

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_a} = \frac{\nu}{1 + \alpha}$$

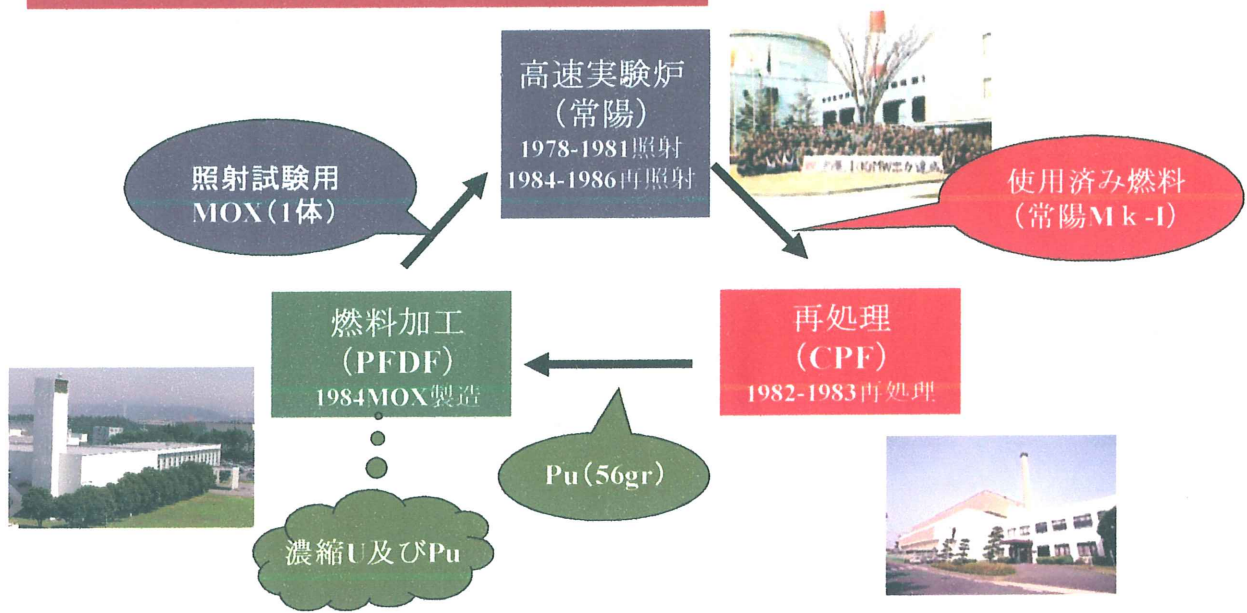
吸収した1個の中性子あたりに核分裂によって放出する中性子数の平均値

核燃料サイクルとは・・・



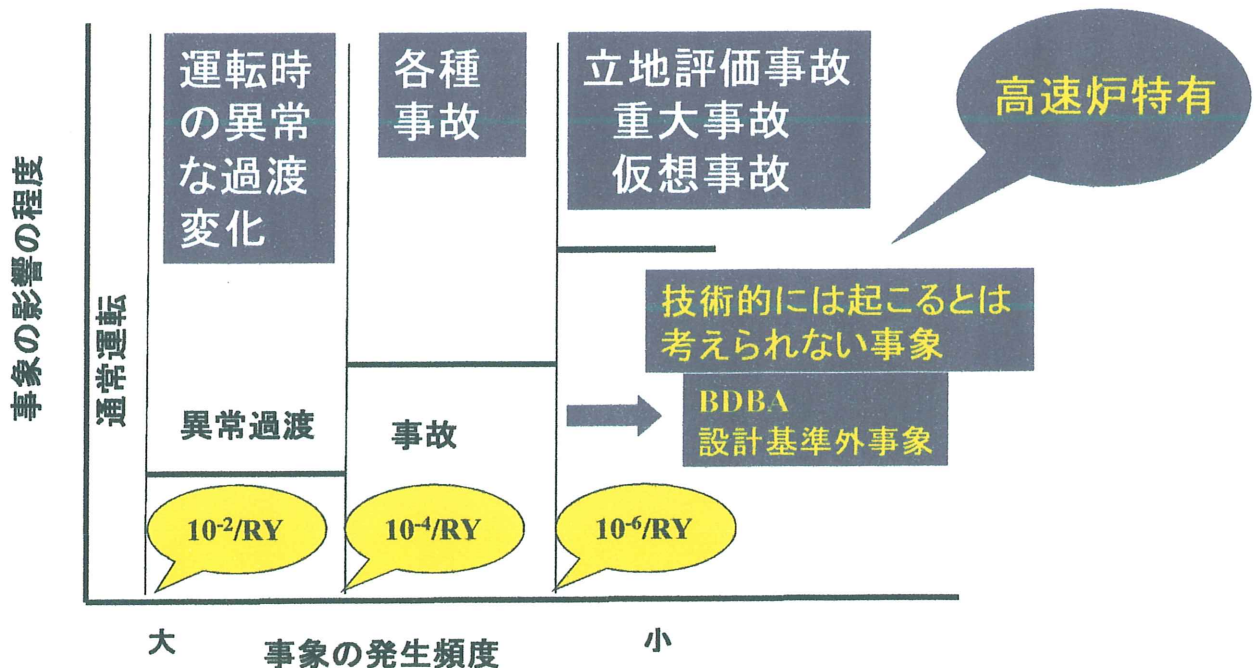
サイクルに供給する物質は劣化・天然ウラン、サイクルから排出される物質は核分裂生成物 (FP) 及び長半減期を持つアクチノイド元素である。

核燃料サイクルの輪は閉じているか...



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。

FBRの安全設計・安全評価



FBRの安全設計・安全評価

運転時の異常な過渡変化

反応度挿入型(TOP: Transient Over Power)

制御棒引き抜き

冷却材喪失型(LOF: Loss of Flow)

1次系、2次系ポンプトリップ、軸固着、外部電源喪失

蒸気発生器伝熱管破損、タービントリップ

各種事故

重大事故

放射性物質の放出を伴う各種事故の中から選定しより多くの放出を想定し立地の妥当性を評価する。

仮想事故

技術的に起こるとは考えられない事象

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

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