

1. 高速炉の概要

1-1. 目的 ; 燃料増殖 ; U^{238} を増殖的に Pu に変える。

ウラン資源・同量質の活用

軽水炉におけるウランの利用効率 ; 天然ウランの 0.4~0.7% ; 資源・同量質深刻

1-2. 特徴

燃料 ; Pu fertile U^{238}

冷却材 ; Na

1-3 丁度古い, 原理的には proven.

しかし、実用化の見通しは未定 ; 安全性とコストがネック.

2. Breeding の原理

2-1 n が U (or Pu) に吸収されると生成される中性子の数

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

ν : 中性子発生数 in fission

α : σ_c / σ_f

2-2 Breeding の条件

$\eta > 2$; 1個は fission, 1個以上が U^{238} に capture される必要

η は大きい方がいい

中性子の leak が少ない方がいい

2-3 Breeding の可能性

fast neutron + Pu

; 高速炉

slow neutron + U^{238}

; トリウムサイクル

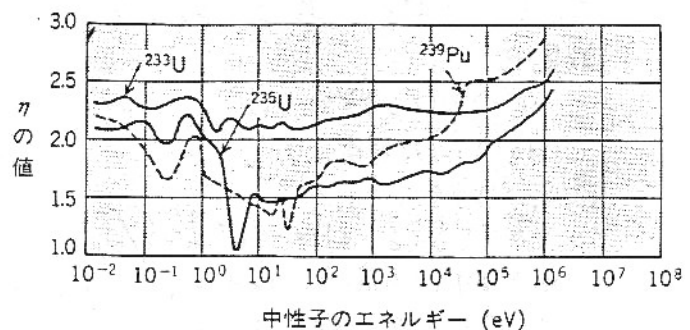


図 1.

中性子エネルギーによる η の値の変化

2-4 高速炉における example (Super phenix)

炉心構造 fuel, blanket, reflector

Pu production in 100 fission

80 fissile nuclei in the fuel part

+ 38 " in the blanket part

118 ; Breeding ratio 1.18% — phenix 実証炉

fuel part ; 反応度あまり変化しない

blanket part ; Pu を作る。

2-5 高速炉の特徴 1.

3つの中性子エネルギー領域における断面積

(i) 炉心は高中性子束に属する。

Super phenix ; $6 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$

(ii) スペクトルカーブが右にずれ、反応度が大きい。

(iii) Pu washing machine.

in the blanket ; pure Pu^{239} .in the fuel ; Pu^{240} の減少、利用。

δ_f , barns $\longrightarrow$	ν	α	η	
U ₂₃₅ fissile neutron spectrum				
U ₂₃₅	1.25	2.57	0.087	2.36
Pu ₂₃₉	1.85	3.09	0.043	2.95
Fast breeder neutron spectrum (Superphenix, central region, according to Bussac and Reuss, p. 566)				
U ₂₃₅	1.95	2.45	0.3	1.882
U ₂₃₈	0.04	2.90	6.8	0.37
Pu ₂₃₉	1.81	2.92	0.31	2.24
Thermal neutron reactor spectrum				
U ₂₃₅	582	2.43	0.171	2.07
U ₂₃₈	0	0	0	0
Pu ₂₃₉	748	2.87	0.377	2.05

Table 1.

(typical spectrum of the central region of a 1200 MW fast reactor)

	σ_f	ν	σ_c	η	W
U ₂₃₅	1.951	2.445	0.584	1.882	0.8
U ₂₃₈	0.040	2.900	0.271	0.373	0
Pu ₂₃₉	1.810	2.922	0.547	2.244	1
Pu ₂₄₀	0.371	2.976	0.523	1.235	0.14
Pu ₂₄₁	2.640	2.968	0.568	2.443	1.5
Pu ₂₄₂	0.252	3.087	0.622	0.890	0.04

Table 2.

3. ナトリウムの性質

融点 98°C , 沸点 881°C

放射化

Na-22 (2.6年)

Na-24 (15時間)

液体ナトリウム

空気中では燃える, $\Delta H = -99.4 \text{ kcal/mole}$.水と激しく反応; $\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \frac{1}{2}\text{H}_2$, $\Delta H = -53.67 \text{ kcal/mole}$.

コンクリート中と結晶水と反応。

ナトリウムは金属の腐食; 酸素濃度に強く依存, 浄化システム必要

4 Superphenix について

4-1 概要

高速炉として世界最初の大規模原型炉。タンク型

3,000 MW th. 1,242 MWe

共同プロジェクト：フランス 51%，イタリヤ 33%，ドイツ 16%

リヨンの近く、リーヌを、86年12月全出力運転。

4-2 フロントの主要特性

熱出力	3,000MW	バックアップ炉停止系集合体の数	3
ネット電気出力	1,174MWe	集合体を構成するエレメント数	3
グロス電気出力	1,242MWe	被覆材料	S.S
年間利用時間	6,600 hours	主原子炉タンク形状	平坦な球形の底を持つ円筒
燃料		内径	21,000 mm
組成	UO ₂ -PuO ₂	高さ	19,500 mm
PuO ₂ /(U, Pu)O ₂	内部炉心 14.6% 外部炉心 18.5%	材料	S.S
²³⁹ Puの量	4,800 kg	1次系冷却材	ナトリウム
増殖率	1.24	1次系中のナトリウムの全量	3,250t
最大燃焼度 (目標)	70,000 to 100,000MWD/T (oxide)	流量	4×4.2t/s
燃料集合体		中間熱交換器出口温度	392°C (1次 Na)
燃料集合体数	364	炉心入口温度	395°C
燃料集合体当りの燃料要素数	271	炉心出口温度	545°C
燃料要素長さ	2,700 mm	中間熱交換器入口温度	542°C (1次 Na)
燃料集合体長さ	5,400 mm	2次系冷却材	ナトリウム
被覆材料	S.S	2次系内のナトリウムの全量	1,500 t
最高被覆温度	620°C	流量	4×3.27t/s
ブランケット集合体		蒸気発生器出口温度	345°C
ブランケット集合体数	233	中間熱交換器入口温度	525°C
集合体当たりのブランケット要素数	91	中間熱交換器出口温度	525°C
要素長さ	1,944 mm	蒸気発生器入口温度	237°C
集合体長さ	5,400 mm	水蒸気系	タービンストップバルブでの蒸気温度
被覆材料	S.S	蒸気発生器入口での水の温度	487°C
制御棒集合体		蒸気発生器入口での水の圧力	218bar
主炉停止系		タービンストップバルブでの蒸気圧力	177bar
制御棒集合体数	21	流量	4×340 kg/s
集合体当たりの要素数	31		
要素の長さ	1,300 mm		
被覆材料	S.S		

Active part of core (blanket 除く)

height 1 m

diameter 3.6 m

fuel pin, assembly

outer dia 8.5 mm

狭くて、細い

(5.4, 6.5, 7.4, 7.9)

出力密度 280 kW/l

Table 3

4-3 構造

全体の構成
 原子炉 (図2)
 炉心、燃料 (図3)
 2次系
 格納システム
 燃料交換

4-4 燃料 doubling time

燃料 doubling time (RDT)

$$RDT = \frac{4800}{\left(\frac{3000}{950}\right) \times 360 \times 0.76 \times 0.24} = 23 \text{ 年}$$

全必要燃料 doubling time (IDT)

貯蔵, 再処理, 加工等

1サイクルを仮定

$$IDT = 1.5 RDT = 35 \text{ 年}$$

燃料交換: 149Aに1日 1回 燃料交換

4-5 特性は原子炉軽水炉との比較 (Table 4)

4-6 安全性にかかわる特徴の比較

(Table 5)

4-7. ともに起こり得る想定事故

(Table 6)

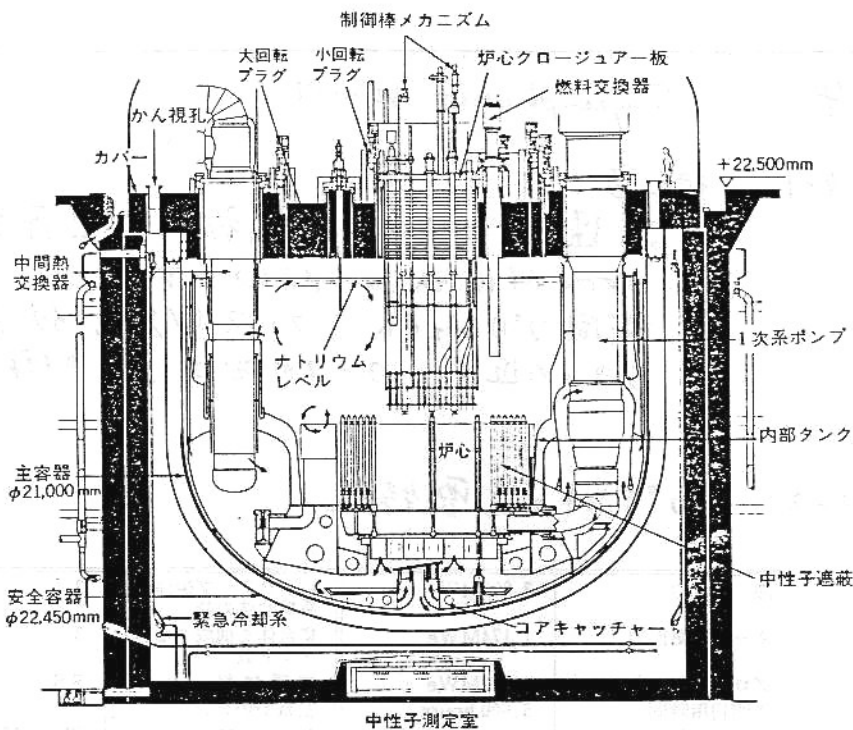
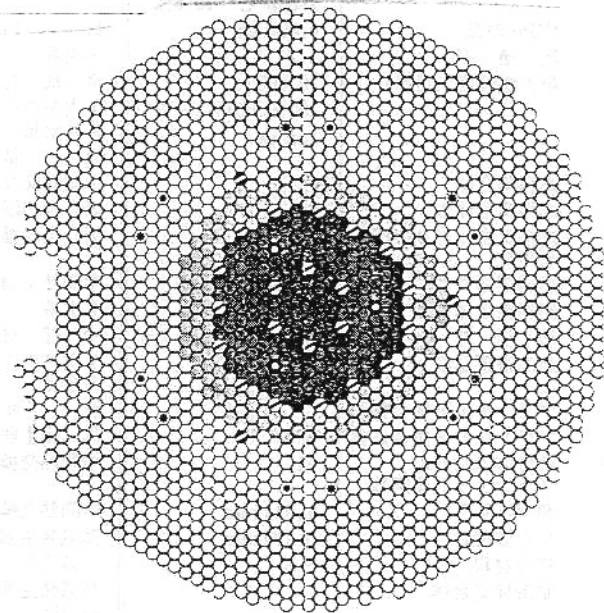


図2. superphenixの原子炉



- | | |
|-----------------|-------------------|
| ○ 193 燃料集合体領域 1 | ● 3 中性子ガイドチューブ |
| ○ 171 燃料集合体領域 2 | ○ 197 スチール集合体 |
| ○ 21 主制御棒 | ○ 1,076 中性子遮蔽集合体 |
| ○ 3 バックアップ制御棒 | ● 6 スペアー燃料集合体領域 1 |
| ○ 233 ブランケット集合体 | ● 6 スペアー燃料集合体領域 2 |

図3. 炉心部の燃料配置

Table 5

軽水炉

高速炉

燃料

燃料
燃料棒

UO₂

PuO₂, UO₂

炉心

出力密度
燃焼度
高速中性子束

100 kW/l
30,000 MWD/t
~ 10¹³

280 kW/l
~ 100,000 MWD/t
6 × 10¹⁵ n/cm².sec

冷却材

材料
温度
圧力

水
315°C ~ 280°C
150 気圧

ナトリウム
542°C ~ 392°C
8 気圧

反応度

中性子寿命
遅発中性子割合
ドップラー係数
冷却材温度係数
冷却材膨張係数

~ 10⁻⁵ sec.
0.55 ~ 0.7 %
-(1.8 ~ 2.9) × 10⁻⁵ ΔK/K/°C
~ -6.5 × 10⁻⁴ ΔK/K/°C
(-2.5 ~ +0.5) × 10⁻³ ΔK/K/°C

10⁻⁷ sec
2.34 ~ 0.17 %
-0.8 × 10⁻⁵ ΔK/K/°C
+(10⁻⁷ ~ 10⁻⁶) ΔK/K/°C
+ ~ 10⁻⁴ ΔK/K/1体
+ ~ 10⁻² ΔK/K/全炉心

炉心変形
反応度抑制方法

- (+)
制御棒, 化学素水,

+, (-)
制御棒

メンテナンス

水

液体ナトリウム環境下で困難
化学的活性, 強い放射能, 不透明.

コスト
安全性

コストが高い,
安全性が不利

再処理

再処理が必要, 環境汚染

Table 5 高速炉内現象のまとめ

大量のフルトニウムが流通 (~7トン/炉)
 原水爆に最通, 核拡散問題
 強い毒性
 管理社会の強化

巨大な危険性

大量のFP

大量のPu

大量の液体ナトリウム(4500トン)

原子炉が破壊されると、手をつけられず、破局の事態

大事故の確率が大きい

異常に対する応答が早い 核的にも 熱的にも

即座に異常に切りやすい。

燃料棒が破損しやすいため、炉心の条件が厳しい。

冷却材の暴走の引き金になる。異常に対して正のフィードバックがより大きい。

冷却材能力の異常が、流量減少、冷却材喪失

スクラム失敗は致命的;

厳しい工学的条件;

Table 6 高速炉で選定された事故の種類

(1) 炉心内の反応度の増大に至る事故

(a) 制御棒急速引抜事故

(b) 燃料スランピング事故 *

(c) 気泡通過事故 *

(2) 炉心冷却能力の低下に至る事故

(d) 冷却材流路閉塞事故 *

(e) 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故 *

(f) 2次主冷却系循環ポンプ軸固着事故 *

(g) 主給水ポンプ軸固着事故 *

(h) 1次冷却材漏えい事故 *

(i) 2次冷却材漏えい事故 *

(j) 主蒸気管破断事故

(k) 主給水管破断事故

(3) 燃料取扱いに伴う事故

(1) 燃料取替取扱事故

(4) 廃棄物処理設備に関する事故

(a) 気体廃棄物処理設備破損事故

(5) ナトリウムの化学反応

(n) 1次ナトリウム補助設備漏えい事故 *

(o) 蒸気発生器伝熱管破損事故

(6) 原子炉カバーガス系に関する事故

(p) 1次アルゴンガス漏えい事故 *

* 「発電用軽水型原子炉施設安全評価指針」
(S.53.9.29) にないもの

反応度事故に対する高速炉設計の変遷

とチェルノブイリ事故との関係

(工学的問題を除く)

金属燃料
小型炉心

(EBR-II
FERMI)

$\beta: 10^{-7}$ 以下 $\rightarrow$ 暴走急激

ドップラー 極めて小 $\rightarrow$ ドップラー効果小さい

中性子の漏れ大 $\rightarrow$ ホイド係数負

燃料膨張 $\rightarrow$ 即時の負効果 β が慣性遅れがある

即時効果に甘くない



暴走の抑制に間に合わない



ドップラー(負)を大きくしたい



スペクトル軟化

酸化物燃料
大型炉心

(フェニックス
スーパーフェニックス
モハンディヤ)

ドップラー(負)増加 $\rightarrow$ 即時効果

漏れ減少 $\rightarrow$ ホイド係数正 $\rightarrow$ 即時効果

$\beta: 10^{-7}$ のオーダー $\rightarrow$ 依然として暴走急激

Pu 燃料 $\rightarrow \beta$ が小さい $\rightarrow$ 暴走急激

ドップラー(負)は更に大 $\rightarrow$ 即時効果大

漏れ少ない $\rightarrow$ ホイド係数正

$\beta: 10^{-3}$ 弱 $\rightarrow$ 極めて大

暴走周期 緩い

チェルノブイリ型
原発