

1. 反応度 ( $\rho$ )

## (1) 定義

増倍率  $k$  ---- 核分裂の連鎖反応による中性子数の増倍過程を生物の世代にたとえり、ある世代の中性子数のその1世代前の中性子数に対する比

$$\left( = \frac{\text{ある世代の中性子数}}{\text{1世代前の中性子数}} \right)$$

$k > 1$  臨界超過

$k = 1$  臨界

$k < 1$  未臨界

反応度  $\rho$  ---- 増倍率  $k$  の、1からのずれの割合

$$\left( = \frac{k-1}{k} \right)$$

## (2) 六因子公式

$$k = \eta f p \varepsilon P_F P_T$$

$\eta$ : 燃料についての核物理的定数 ( $= \nu \sigma_f / (\sigma_f + \sigma_c)$ )

$f$ : 熱中性子利用率 (吸収される中性子のうち、燃料に吸収される確率)

$p$ : 減速過程で共鳴捕獲を逃れる確率

$\varepsilon$ :  $\frac{\text{熱中性子+高速中性子による全核分裂中性子数}}{\text{熱中性子による核分裂中性子数}}$

$P_F$ : 高速中性子が漏れぬ確率

$P_T$ : 熱中性子が漏れぬ確率

注) 熱中性子炉における数値例  $\eta = 1.65, f = 0.71, \varepsilon = 1.02, p = 0.87, P_F = 0.97, P_T = 0.99 \rightarrow k = 1$

## 2. 動特性

(1) 増倍率  $K$  の 実 際 的 な 定 義

$$K \equiv \frac{\text{炉内での中性子生成率}}{\text{炉内での中性子損失率 (吸収、捕獲、もれ)}} = \frac{P(t)}{L(t)} \quad \text{--- (3)}$$

(2) 中性子寿命 ( $l$ )

$$l \equiv \frac{N(t)}{L(t)} \quad \text{--- (4)}$$

 $N(t)$ : 時刻  $t$  における原子炉内の全中性子数

(3) 中性子のつり合い関係

$$\begin{aligned} \frac{dN(t)}{dt} &= \text{生成率} - \text{損失率} = P(t) - L(t) \\ &= \left\{ \frac{P(t)}{L(t)} - 1 \right\} L(t) \\ &= (K - 1) L(t) \\ &= \frac{K - 1}{l} N(t) \quad \text{--- (5)} \end{aligned}$$

 $K$  および  $l$  の時間依存性を無視して (5) 式を解くと、

$$N(t) = N_0 \exp \left\{ \frac{K - 1}{l} t \right\} \equiv N_0 \exp \frac{t}{T} \quad \text{--- (6)}$$

$$T \equiv \frac{l}{K - 1} \quad (\text{原子炉の"リオド"}) \quad \text{--- (7)}$$

注)  $l$  は、軽水型動力炉では、 $10^{-5} \sim 10^{-4}$  sec である。 $10^{-4}$  sec とすると、 $K = 1.001$  になったとすると、 $T = 0.1$  sec、1秒たつと原子炉出力は、 $e^{10} \approx 22000$  倍にもなる。しかし実際には、遅発中性子があるため  $T$  はより大きく、元答時間が遅くなる。

(4) 遅発中性子を考慮した動特性

遅発中性子先行核の崩壊による時間遅れを  $\lambda_i^{-1}$  ( $i$  は先行核をグループ分けした時の番号) とすると、中性子の実効的寿命  $\langle l \rangle$  は、

$$\langle l \rangle = (1 - \beta_{\text{eff}})l + \sum_{i=1}^6 \beta_{\text{eff},i} \cdot \frac{1}{\lambda_i} \quad \text{--- (8)}$$

$\beta_{\text{eff},i}$  :  $i$  グループ先行核からの遅発中性子の生成比率

$$\beta_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^6 \beta_{\text{eff},i}$$

$^{235}\text{U}$  に対して  $\langle l \rangle \approx 0.1 \text{ sec}$  とする。2% (下注) の例と比較すると、原子炉ペリオド  $T = 100 \text{ sec}$  と大きくなり、10秒経っても原子炉出力は  $e^{0.1} \approx 1.1$  倍にしかならない。

逆に、 $K-1 \gg \beta_{\text{eff}}$  になると、遅発中性子の寄与はなくなり、ペリオドは短くなり、制御が難しくなる。

表1 各燃料核に対する  $\beta$  と、各種の炉型に対する  $l$

	$\beta$		$l$ (sec)
$^{235}\text{U}$	0.0064	PWR	$2.5 \times 10^{-5}$
$^{239}\text{Pu}$	0.0020	BWR	$5 \times 10^{-5}$
$^{233}\text{U}$	0.0027	高速増殖炉 (もんじゅ)	$4 \times 10^{-7}$
$^{241}\text{Pu}$	0.0049	重水炉 (BWR)	$4 \times 10^{-2}$
$^{238}\text{U}$	0.0148	HTGR (VHTR)	$2 \times 10^{-4}$ ( $6 \times 10^{-4}$ )

遅発中性子を考慮した一気炉近似動特性方程式

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{K(1-\beta_{eff})-1}{l} N(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (9)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i K}{l} N(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i=1, \dots, 6 \quad (10)$$

$C_i(t)$  :  $i$ グループの遅発中性子先行核数

⑨ ⑩ 式を、①式を使って時間依存の反応度 ( $\rho(t)$ ) の式に書きなおす。

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} N(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (9')$$

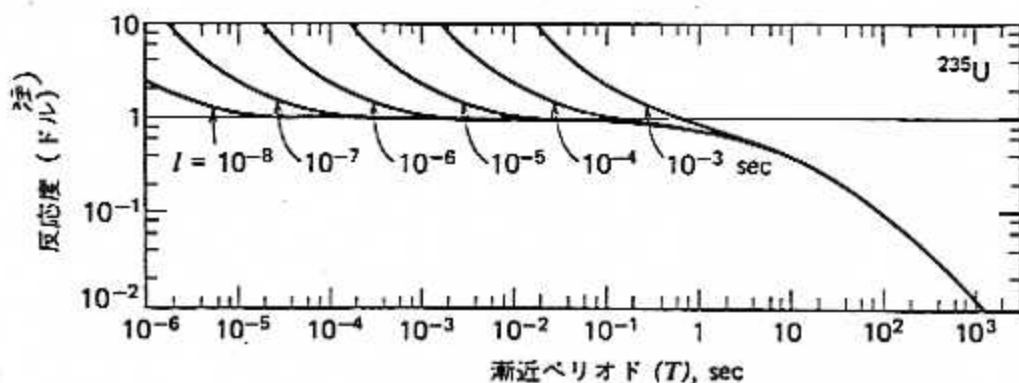
$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} N(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i=1, \dots, 6 \quad (10')$$

ただし、 $\Lambda \equiv l/K$  で、平均世代時間である。

⑨' ⑩' を、初期条件を用い、ラプラス変換等数学的手法を用いて解くとおこてくる。

得られた結果から、原子炉ペリオド(漸近)と反応度との関係を、 $l$  (遅発中性子寿命) をパラメータとして 図1 に示す。

図1.



注) ①式を  $\beta$  で割ったもの。即ち、 $\beta$  を尺度とした反応度をドルと言う。

図1よりわかるように、  
反応度  $\rho = \beta$  (すざわち1ドル)  
近くなると、炉ペリオドTは  
劇的に減少する(即発臨界)。

図2

正のステップ反応度添加によ  
る  $^{235}\text{U}$  原子炉の出力変化,  $\Lambda = 10^{-4}$   
s. (M. A. Schultz, *Control of  
Nuclear Reactors and Power  
Plants*, McGraw-Hill, New  
York, 1961.)

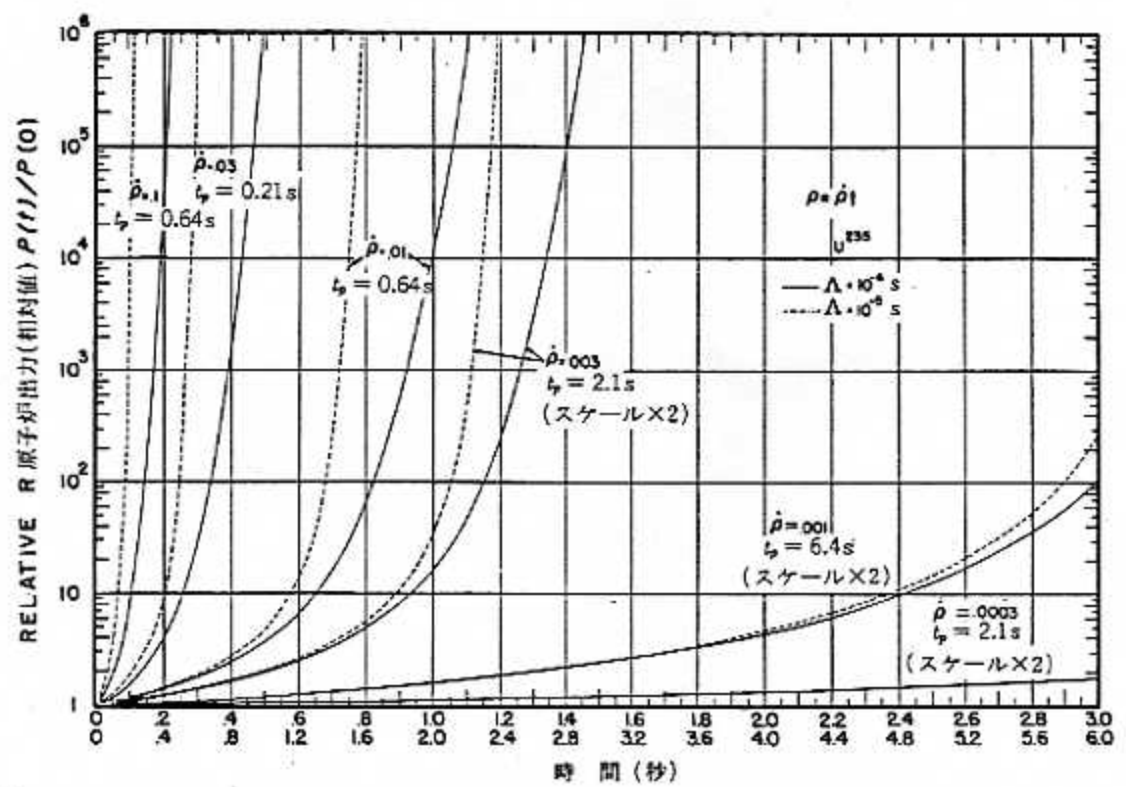
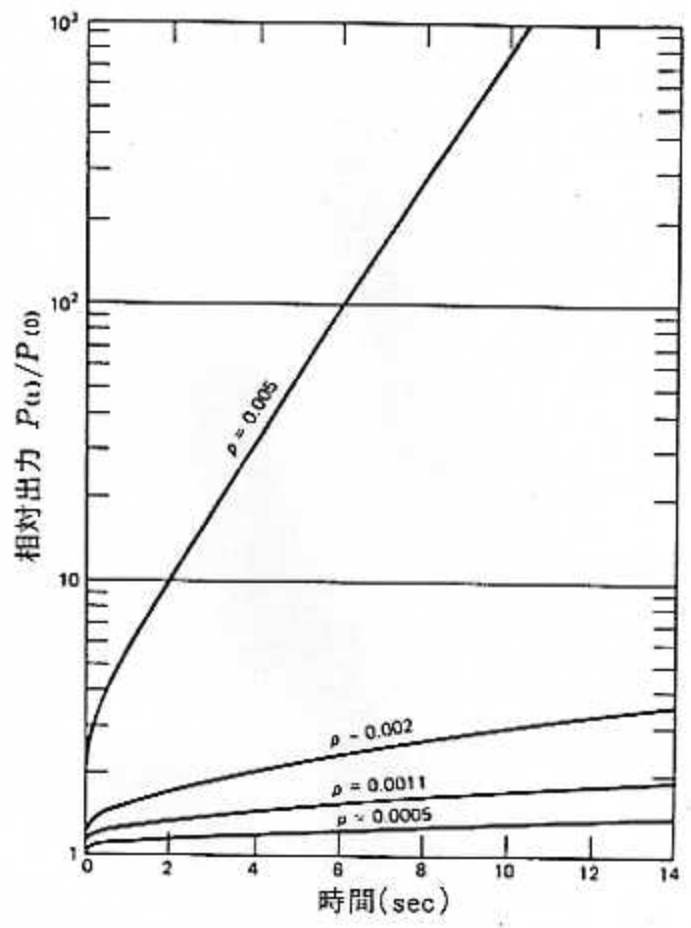


図3

$^{235}\text{U}$  体系のランプ状反応度変化の出力応答. 即発中性子世代時間  $10^{-4} \sim 10^{-5}$ s,  
(G.R. Keepin, *Physics of Nuclear Kinetics*)

$t_p$  は 即発臨界に達するまでの所要時間

### 3. 反応度係数、フィードバック効果

(1) 反応度の出力係数 ---- 出力変化に対する反応度変化率  
( $\alpha_p$ )

$$\alpha_p = \frac{d\rho}{dP} = \sum_i \left( \frac{\partial \rho}{\partial T_i} \right) \left( \frac{\partial T_i}{\partial P} \right) \quad \text{--- (1)}$$

$T_i$  : 個々の炉心要素の温度

" $\alpha_p < 0$  なら、出力上昇に対し負のフィードバック効果が働き、固有の安定性" を持つことになる (設計の原則)。

(2) 反応度係数の時間的応答

即発的なもの ---- ドップラー効果, 燃料要素の変形

遅発的なもの ---- 減速材, 冷却材, 構造材の熱膨張 (密度減少)  
中性子エネルギー・スペクトルの変化

(3) 各反応度係数と特徴

イ) ドップラー効果 ----  $^{238}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{232}\text{Th}$  の共鳴捕獲の増加<sup>5%</sup> 多くの炉型 (燃料反応度係数) で負。値は他の効果に比べ小さいが即効性

ロ) 減速材反応度係数 ---- 黒鉛炉では、多くの効果が複合し、その量および符号は複雑。  
液体減速炉では、スペクトル硬化、密度減少 (ボイド発生を含む) および減速材圧力係数に分けて考えられる。

ハ) 炉心の膨張効果 ---- 高速炉で重要 (負)、ただし、燃料棒曲り、被覆管-燃料膨張差による効果は正 (小さい) (構造材)

(4) 各炉型の反応度係数比較

表2. 各炉型の反応度係数比較

	PWR (玄海2号)	BWR	LMFBR (もんじゅ)	重水冷却 沸騰軽水冷却 (3.17℃)	黒鉛減速 He冷却部 (HTGR)	黒鉛減速 炭酸ガ冷却 (原電東海1号)	黒鉛減速 沸騰軽水冷却 (RBMK-1000)
出力係数 ( $\Delta K/K/MW$ )		$-1.2 \times 10^{-5}$	$-9.4 \sim 11$ $\times 10^{-6}$	$-1.1 \sim -1.4$ $\times 10^{-4}$			$-0.5 \times 10^{-6}$ (定格出力)
燃料温度係数 ( $\times 10^{-5} \Delta K/K/^\circ C$ )	$-1.8 \sim -3.5$	$-0.5 \sim -3$	$-0.33 \sim -0.39$	$-1.7 \sim -1.6$	-7	-2.4	$-1.3 \sim -1.6$
減速材温度係数 ( $\times 10^{-5} \Delta K/K/^\circ C$ )	$+5 \sim -85$	$-8 \sim -50$	/	+11 (初期炉) -4.2 (取替炉心)	+1	+15	+6
ボイド係数 ( $\times 10^{-5} \Delta K/K/\% 水持$ )	$+50 \sim -280$	$-50 \sim -150$	/	0 ± 5 (初期炉) -5 ± 5 (取替炉心)	/	/	+20 (定格出力) +30 (事故時)
圧力係数 ( $\times 10^{-5} \Delta K/K/Kg/cm^2$ )	$+7.3 \sim -0.5$	/	$+0.010 \sim +0.014$	-1.0 (初期炉) -1.1 ~ -6.0 (取替炉心)	/	/	
冷却材温度係数 ( $\times 10^{-5} \Delta K/K/^\circ C$ )	/	/	$+0.06 \sim +0.1$				
構造材温度係数 ( $\times 10^{-5} \Delta K/K/^\circ C$ )							

### 4. Xeによる毒作用と出力振動

<sup>135</sup>Xeの生成は、図4に示す過程で行われる。このうち <sup>135</sup>Te → <sup>135</sup>I はここで巻いてより時間スケールでは瞬間的であって、核分裂による<sup>135</sup>Iの直接生成に含ませてもよい。また<sup>135m</sup>Xeも短寿命ゆえ、すべての<sup>135</sup>Iは<sup>135</sup>Xeに壊変すると巻く。

$$\frac{\partial I(t)}{\partial t} = \delta \sum_f \phi(t) - \lambda_I I(t) - \sigma_a^I \phi(t) I(t) \quad (12)$$

↑核分裂による生成     
 ↑崩壊による消滅     
 ↑中性子吸収による消滅

$$\frac{\partial X(t)}{\partial t} = \delta_X \sum_f \phi(t) + \lambda_I I(t) - \lambda_X X(t) - \sigma_a^X \phi(t) X(t) \quad (13)$$

↑<sup>135</sup>I崩壊による生成

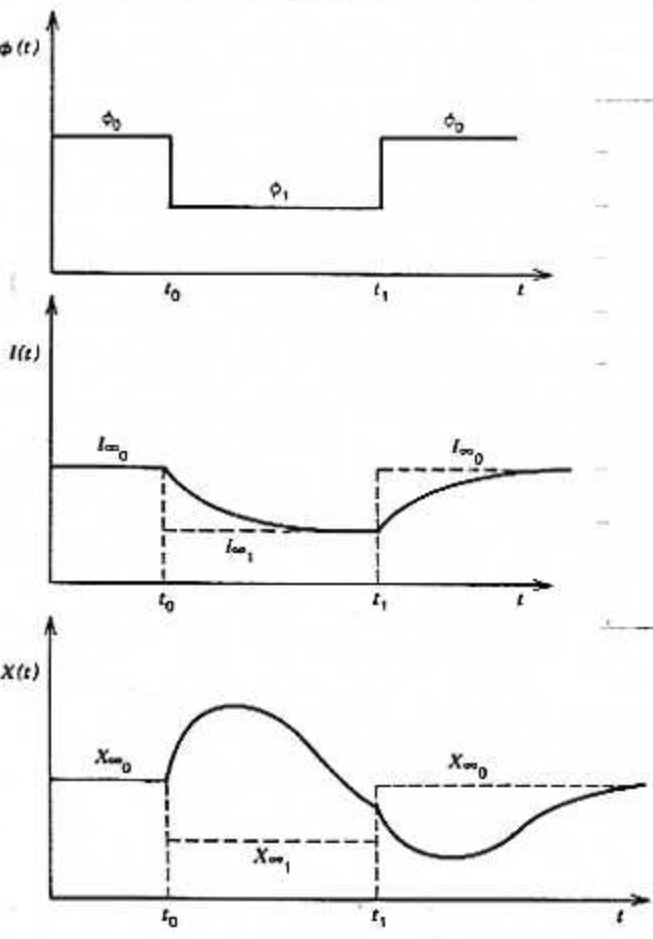


図5 出力レベル変更による<sup>135</sup>Xeの変化

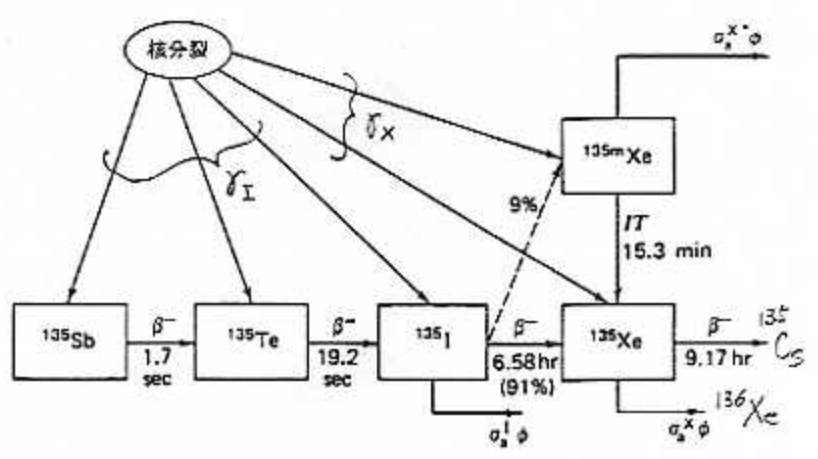


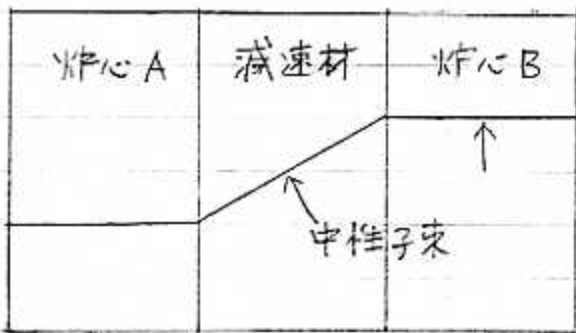
図4 A=135の崩壊図

原子炉を停止すると、<sup>135</sup>Xeは増え11.6hr後にピークに達したのち減少する。<sup>135</sup>Xeの熱中性子吸収断面積は  $2.7 \times 10^6$  b もあり、この立上りが原子炉再起動を妨害する。

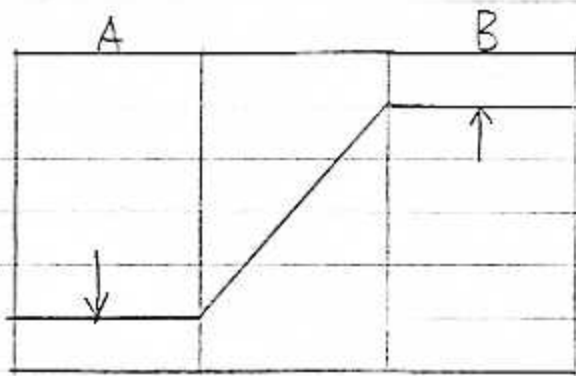
# Xe による空間出力振動

炉が大型になると、動特性の一室炉近似は妥当でなくなり、中性子束の局所的変化が出力の空間的な振動を起し、それを防ぐため複雑な制御棒操作が必要となる。

簡単のため、炉を減速材を挟んだ2部分に近似する。制御系により3つの領域の全出力が一定に保たれているとき、



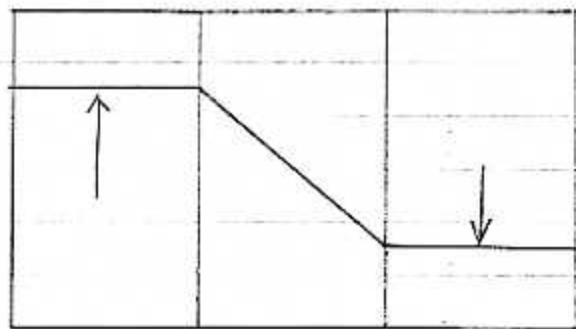
すると、炉心 B で中性子束が少し増えるとする。



すると、  
 $^{135}\text{Xe} + n \rightarrow ^{136}\text{Xe}$  が 増える  
 (  $^{135}\text{Xe}$  が 減る )

$^{135}\text{Xe}$  に対する反応度が減少し、B の中性子束はさらに増える。

全出力一定に制御してなければ、炉心 A の中性子束は下がる。



中性子束の高い炉心 B で  $^{135}\text{I}$  がより多く作られ、その崩壊で  $^{135}\text{Xe}$  が増える (A では逆)。

その結果、B では中性子束下がり、A では上昇する。

### 5. 黒鉛炉の一般的性質

- イ) 黒鉛は熱中性子吸収が小さい。(表3 第1欄)
- ロ) 黒鉛は、減速材の中では減速しにくい(表3 第2欄)
- ハ) 黒鉛は減速比 ( $\xi \Sigma_s / \Sigma_a$ ) が大きい。(表3 第3欄)
- ニ) 黒鉛内では、中性子は拡散しやすい。(表3 第4欄)
- ホ) 黒鉛炉の即発中性子寿命は一般に長い(表1)。

ロ, ニ) より、黒鉛炉は大型である。(十分な減速)  
 イ) ハ) より、天然ウランでも臨界になる(原電東海1号)  
 ホ) より、出力上昇時定数が大きく、制御に有利である。

表3. 減速材の比較

	$\sigma_a (^{2200}_{m/s})$ (b-c)	減速能 ( $\xi \Sigma_s, cm^{-1}$ )	減速比 ( $\xi \Sigma_s / \Sigma_a$ )	拡散距離 (L, cm)	減速距離 ( $\sqrt{L}, cm$ )
軽水	0.66	1.53	72	2.7	5
重水	~0.001	0.17	~12000	~110	10
黒鉛	0.004	0.064	170	53	18

$\sigma_a (^{2200}_{m/s})$  : 2200 m/s の熱中性子に対する微視的吸収断面積  
 $\xi$  : 1回の衝突により失うエネルギーの平均対数  
 $\Sigma_s, \Sigma_a$  : 巨視的散乱および巨視的吸収断面積  
 (  $\Sigma_s = N \sigma_s, \Sigma_a = N \sigma_a, N$  は原子数密度 )

核分裂で生じた高速中性子が、減速材原子核と熱平衡に達するまでの平均衝突回数、軽水で19回、重水で32回に対し、黒鉛では114回である。