

2020年11月11日  
京大 KUCA ヒアリング資料

京都大学臨界実験装置 (KUCA)  
設置変更承認申請について

京都大学複合原子力科学研究所

【説明－1】

運転時の異常な過渡変化

「原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き」および「出力運転中の制御棒の異常な引抜き」の解析について

1. 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き

解析条件

(1) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値

固体減速炉心は  $0.35\% \Delta k/k$

軽水減速炉心は  $0.5\% \Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値

固体減速炉心は  $1.35\% \Delta k/k$

軽水減速炉心は  $1.5\% \Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の 1/3 以下）の最大値

固体減速炉心は  $1.35 \times 1/3 = 0.45\% \Delta k/k$

軽水減速炉心は  $1.5 \times 1/3 = 0.5\% \Delta k/k$

制御棒反応度添加率は核的制限値の最大値

$0.02\% \Delta k/k/s$

軽水ダンプまたは中心架台落下による反応度は核的制限値の最小値

$1\% \Delta k/k$

(2) 初期運転条件

初期温度は室温として  $25^{\circ}\text{C}$

線型出力系は指示値が 100% で 1W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 0.01W の臨界状態

(3) 反応度温度係数

ケース A の解析において、反応度温度係数が負の炉心については温度変化に伴う反応度フィードバックを無視する。反応度温度係数が正の炉心（軽水減速炉心の一部の 2 分割炉心）については温度変化に伴う反応度フィードバックを考慮するが、反応度温度係数は核的制限値の最大値の  $+2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^{\circ}\text{C}$  であるとす、燃料温度上昇により正の反応度が加わるとする。

ケース B の解析においては積算出力をもとに解析条件を設定しているため、反応度温度係数を考慮するしないにかかわらず温度上昇量は同じになるため、

温度変化に伴う反応度フィードバックを無視する。

(4) 安全保護回路系等の動作

- ・ 炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期 15 秒以下の一せい挿入信号、および炉周期 10 秒以下のスクラム信号は発生しない。
- ・ 線型出力計の指示値が 110%を超えたときに発生する一せい挿入の信号は発生しない。
- ・ スクラム信号の発生から制御棒が完全に挿入されるまでの時間が 1 秒以下であることが規定されているので、スクラム信号発生後の 1 秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ ただし、最大反応度効果を持つ制御棒 1 本が完全に引き抜かれた状態で挿入できない。
- ・ スクラム信号の発生でも中心架台は落下せず、ダンプ弁は開かない。

(5) スクラム信号発生

ケース A

- ・ 余剰反応度が核的制限の最大値である固体減速炉心  $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心  $0.5\% \Delta k/k$  の炉心において制御棒の引き抜きにより最大反応度添加率 ( $0.02\% \Delta k/k/s$ ) で反応度を連続的に加える。臨界状態から全制御棒引き抜きまでに固体減速炉心では  $0.35/0.02=17.5\text{sec}$ 、軽水減速炉心では  $0.5/0.02=25\text{sec}$  かかる。
- ・ 線型出力計の指示値が 120% (出力が 1.2W) を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・ 最大反応度効果を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので、固体減速炉心では  $1.35-0.45=0.9\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心では  $1.5-0.5=1.0\% \Delta k/k$  の負の反応度が加わり出力は低下する。
- ・ 出力が 0.1W になるまで解析する。

ケース B

- ・ 余剰反応度が非常に小さい (ほとんどゼロ) 炉心において制御棒をごく僅か引き抜くことにより正の反応度をステップ状に加える。
- ・ ここで加える反応度はスクラムまでの積算出力が 1 ヶ月の積算出力の最大値 ( $100\text{Wh}=3.6 \times 10^5\text{J}$ ) となるような値であるとする。
- ・ 線型出力計の指示値が 120% (出力が 1.2W) を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・ 余剰反応度をゼロとすると制御棒の全反応度は  $1.0\% \Delta k/k$ 、最大 1 本の反応度は  $1.0/3=0.333\% \Delta k/k$  となるので、スクラム時に加わる反応度は  $1-0.333=0.666\% \Delta k/k$  となり、炉心の反応度は  $-0.666\% \Delta k/k$  となる。

- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

(6) 評価

- ・スクラム信号が発生するまでの時間、最大出力、未臨界になるまでの積算出力を求める。
- ・ケース A については短時間の出力変化であるため発生した熱は全て燃料ミート部の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布が cos 分布であるとして燃料温度の最大値を求める。(積算熱出力を燃料の全熱容量 (J/K) で割り算し、その値に  $\pi^3/8$  を掛ける)
- ・ケース B については非常にゆっくりとした出力変化であるため発生した熱は燃料ミート部、燃料被覆材、軽水 (またはポリエチレン)、燃料フレーム (または燃料さや管) の温度上昇に用いられるとし、炉心での発熱分布が cos 分布であるとして燃料温度の最大値を求める。(積算熱出力を燃料の全熱容量 (J/K) で割り算し、その値に  $\pi^3/8$  を掛ける)

(追加) さらに燃料板内の温度分布を考慮して、固体減速炉心では 1.09 倍、軽水減速炉心では 1.01 倍の値とする。ただし LL1 炉心については 1.23 倍とする。

表 1 ケース B の解析結果 (C30G0(4 列)炉心)

反応度 (%dk/k)	ペリオド (sec)	SCRAM 時間 (sec)	ピーク出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (K)
0.17	31.0	133.7	1.24	40.1	0.0007
0.1	47.8	310.2	1.22	88.5	0.0016
0.005	1959	9381	1.20	2384	0.048
<b>0.0000327</b>	—	<b>1.45e6(402day)</b>	<b>1.20</b>	<b>360000</b>	<b>6.5</b>

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

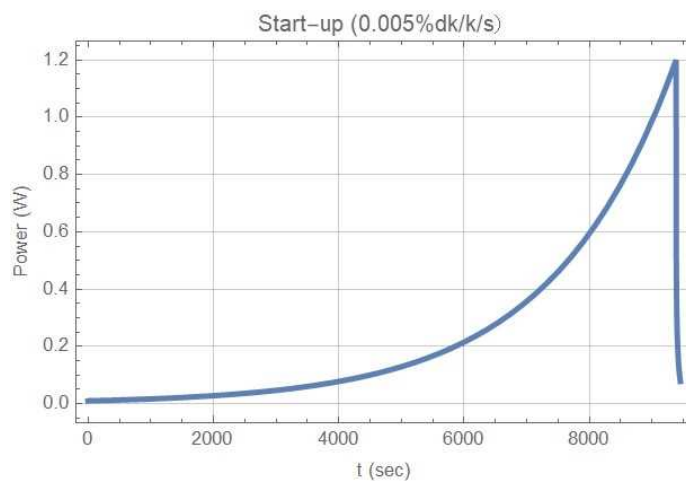


図1 ケース B の解析結果 (C30G0(4 列)炉心)  
(反応度 0.005%dk/k)

## 2 出力運転中の制御棒の異常な引抜き

(1)解析対象炉心、(2) 反応度等、(4)反応度温度係数、(5) 安全保護回路系等の動作、(7)評価  
については「1-2-1」と同じ。

### (3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

固体減速炉心では中心架台上限、軽水減速炉心では炉心タンク満水

線型出力系は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 0.01W の臨界状態

### (5) スクラム信号発生

「1. 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き」のスクラム信号発生のケース A とケース B でスクラム発生が出力 120W とする以外は全て同じ。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 2 ケース B の解析結果 (C30G0(4 列)炉心)

反応度 (%dk/k)	ペリオド (sec)	SCRAM 時間 (sec)	ピーク出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (K)
0.17	31.0	277.6	123.9	4658	0.08
0.1	47.8	629.8	121.7	9382	0.17
0.005	1959	18440	120.1	237298	4.3
<b>0.0033</b>	—	<b>28129</b>	<b>120.0</b>	<b>360000</b>	<b>6.5</b>

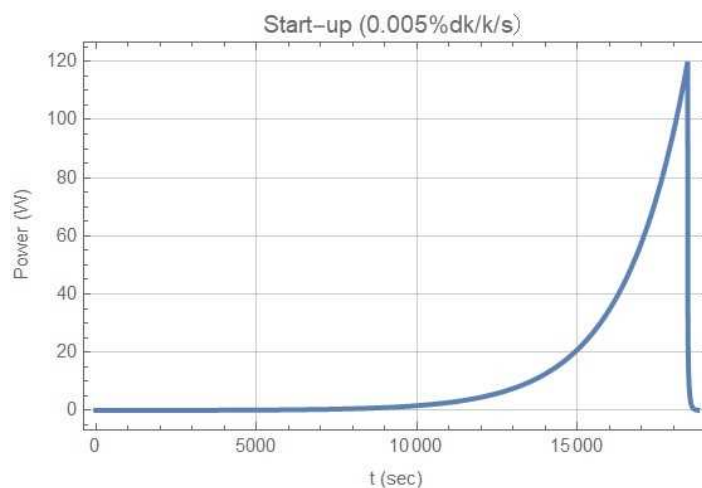


図 2 ケース B の解析結果 (C30G0(4 列)炉心)  
(反応度 0.005%dk/k)

### 3. 解析対象炉心の選択

反応度の投入事象の解析対象炉心について昨年提出した設置変更承認申請の解析結果を元に、最大出力と温度上昇量について中性子寿命と遅発中性子割合に対する値を図 3～6 に示す。

図 4 の最大出力については  $\beta_{\text{eff}}$  が小さいほどドル単位の反応度が大きくなるので最大出力も大きくなるという明らかな関係性が見られる。しかし他の結果については必ずしも線型の関係にはなっていないことが判る。

そのため解析対象とする炉心については慎重に決める必要がある。

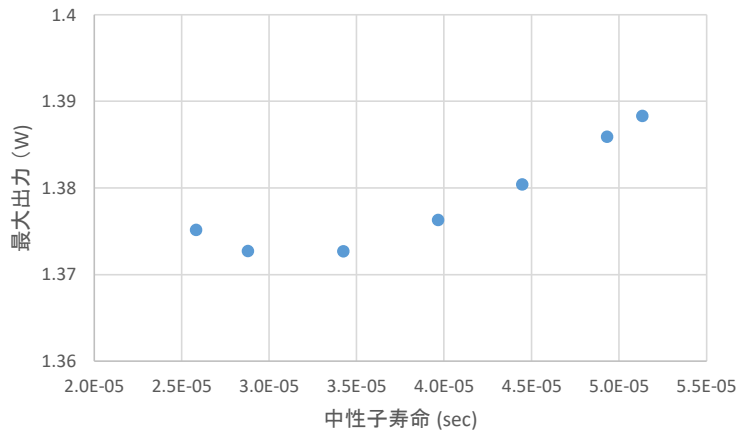


図 3 中性平均寿命と最大出力

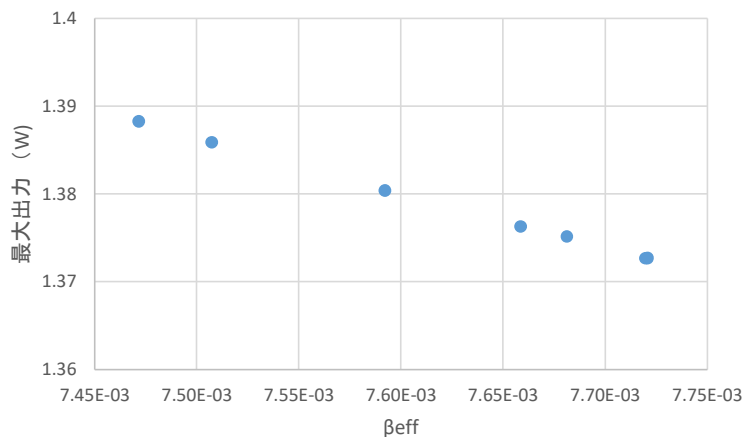


図 4 実効遅発中性子割合と最大出力

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

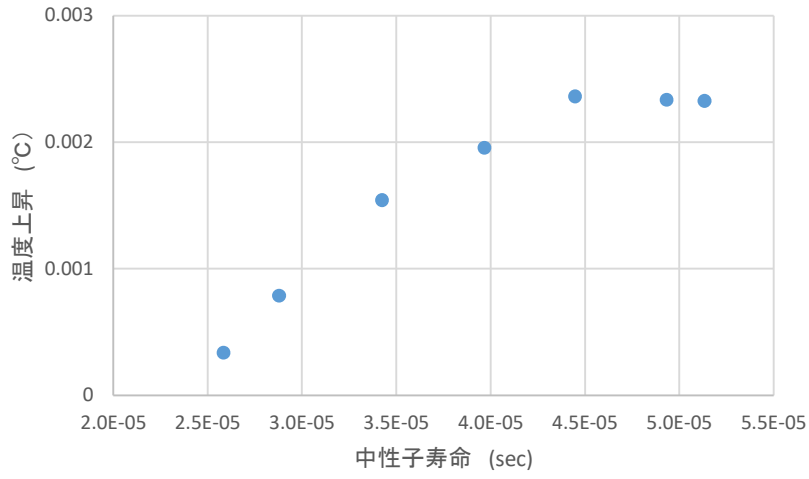


図 5 中性平均寿命と温度上昇

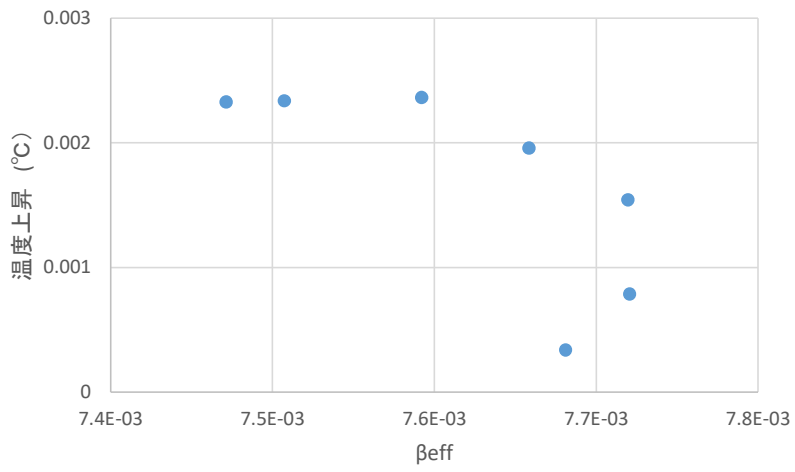


図 5 実効遅発中性子割合と温度上昇



【説明-2】

運転時の異常な過渡変化

「中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用」  
の解析について

1. 解析条件

(1) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値、 $0.35 \% \Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値、 $1.35 \% \Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の  $1/3$  以下）の最大値

固体減速炉心は  $1.35 \times 1/3 = 0.45 \% \Delta k/k$

(2) 初期運転条件

初期温度は室温として  $25^{\circ}\text{C}$

固体減速炉心では中心架台上限

線型出力系は指示値が  $100\%$  で  $100\text{W}$  となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力  $1\text{W}$  の臨界状態

(3) 反応度温度係数

反応度温度係数はすべて負であるので、温度変化に伴う反応度フィードバックを無視する。

(4) 中性子発生設備の状態と安全保護回路系等の動作

- ・ 臨界状態でパルス状中性子発生装置又は中性子発生設備の中性子の打ち込みを連続的に行ったとする。
- ・ 線型出力計の指示値が  $110\%$  を超えたときに発生する一せい挿入の信号は発生しない。
- ・ 線型出力計の指示値が  $120\%$ （出力が  $120\text{W}$ ）を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・ スクラム信号の発生から制御棒が完全に挿入されるまでの時間が  $1$  秒以下であることが規定されているので、スクラム信号発生後の  $1$  秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・ ただし、最大反応度効果を持つ制御棒  $1$  本が完全に引き抜かれた状態で挿入できない。
- ・ スクラム信号の発生でも中心架台は落下しない。

(7) スクラム信号発生

ケース A

- ・余剰反応度が核的制限の最大値である  $0.35\% \Delta k/k$  の炉心において臨界状態で炉心に中性子の打ち込みを開始したとする。最大中性子発生量はパルス状中性子発生装置については  $5 \times 10^{10} \text{n/s}$ 、中性子発生設備については  $10^{11} \text{n/s}$  であるので、この解析では値の大きい  $10^{11} \text{n/s}$  で炉心外部から中性子を打ち込むものとする。
- ・線型出力計の指示値が 120% (出力が 1.2W) を超えたときにスクラム信号が発生する。
- ・最大反応度効果を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので  $1.0 - 0.45 = 0.55\% \Delta k/k$  の負の反応度が加わり出力は低下する。
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

#### ケース B

- ・余剰反応度が核的制限の最大値である  $0.35\% \Delta k/k$  の炉心において臨界状態で炉心に中性子の打ち込みを開始したとする。中性子発生量はスクラムまでの積算出力が 1 ヶ月の積算出力の最大値 ( $100 \text{Wh} = 3.6 \times 10^5 \text{J}$ ) となるような値であるとする。
- ・以下、ケース A と同じ。

#### (5) 評価

- ・スクラム信号が発生するまでの時間、最大出力、未臨界になるまでの積算出力を求める。
- ・ケース A については短時間の出力変化であるため発生した熱は全て燃料ミート部の温度上昇に用いられるとする。
- ・ケース B については非常にゆっくりとした出力変化であるため発生した熱は燃料ミート部、燃料被覆材、ポリエチレン、燃料さや管の温度上昇に用いられるとする。
- ・ケース A、B ともに積算熱出力を燃料の全熱容量 (J/K) で割り算し、炉心の発熱分布が  $\cos$  分布であるとして燃料温度の最大値を求めるためにその値に  $\pi^3/8$  を掛ける、さらに燃料板内の温度分布を考慮して、1.09 倍 (LL1 炉心についてのみ 1.23 倍) をさらに掛ける。

## 2. 解析方法

中性子発生設備から中性子が  $10^{11}$  個/sec 発生し、すべて前方方向 ( $2\pi$ ) に均等に放出されると仮定する。図 3 に 200MeV の陽子が鉄のターゲットに入射したときに発生する中性子の各方向ごとのエネルギースペクトルの実験値を示す。この結果よりターゲットの後方にも多くの中性子が発生しているので、「すべて前方方向」に発生するという仮定は中性子発生量を多めに見積もる設定である。

実験を行う体系は、燃料板と減速材とを組み合わせた燃料集合体を燃料領域とし、その周囲を反射体で囲んだものである。ターゲットは反射体の外側に設置されるため、炉心中央に高速中性子を導くためには、反射体の一部にボイド領域（高速中性子のコリメータ）を作成する必要がある。下図はその実験体系を示したもので、反射体にボイド缶を入れて燃料領域に直接高速中性子を入射できるようにしている。

ここで、ターゲットから炉心に中性子を導くコリメータの大きさを  $15 \times 15\text{cm}$  であるとし、ターゲットと燃料領域の距離を  $30\text{cm}$  であると仮定する（反射体を設置する関係から、これ以上近づけることは難しい）。

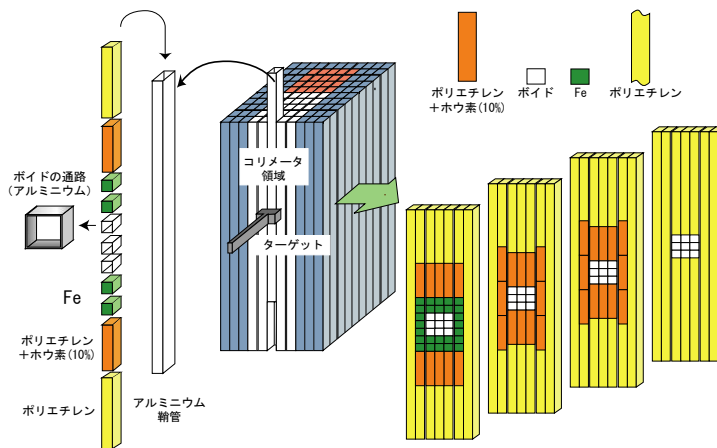


図 1 炉心の構成方法

中性子発生設備から単位時間あたりに下記の量の中性子が炉心に供給されることになる。

$$\frac{10^{11}}{2\pi \times 30^2} \times 15^2 = 4.0 \times 10^9 \quad (\text{個/sec})$$

この高速中性子が減速されて核分裂の連鎖反応に寄与することになる。

なお、実際の実験体系ではターゲットから燃料領域までの距離は 40～50cm 程度としており、ここでの 30cm という設定は安全側の仮定である。またこのようなコリメータを用いずに反射体に直接入射させるような配置の炉心も多く、その場合は炉心中心まで到達する中性子はさらに少なくなる。

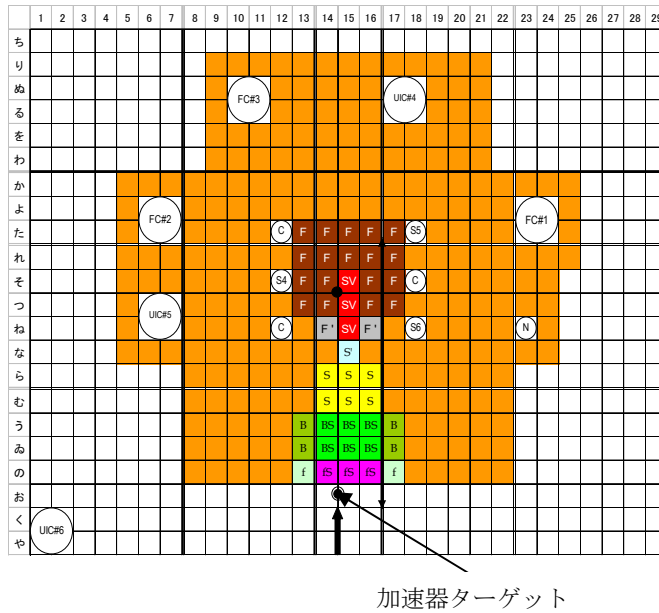


図 2 炉心の構成例

(補足) これまでの加速器と A 架台を組み合わせた実験炉心の一例の水平断面図 (1つの四角のマスは 5.53×5.53cm である)

F, F', と書かれたところが燃料体、SV と書かれたところがコリメータを入れた燃料体で、その他の S, BS, fS と書かれたところはコリメータを入れた反射体を示す。ターゲットから発生した 14MeV の中性子はコリメータを通じて炉心に打ち込まれる。

解析は遅発中性子 6 群の 1 点炉動特性方程式を解くことにより行う。

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} \cdot N(t) + \sum_i \lambda_i C_i(t) + S$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{f_i \beta}{\ell} N(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (i=1 \sim 6)$$

ここで、

- $\rho(t)$  : 時刻 t における反応度
- $N(t)$  : 時刻 t における原子炉出力レベル
- $\ell$  : 中性子寿命
- $\beta$  : 実効遅発中性子割合
- $S$  : 中性子源強度
- $f_i$  : グループ i に属する遅発中性子の割合
- $\lambda_i$  : グループ i に属する連発遅発中性子先行核の崩壊定数
- $C_i(t)$  : グループ i に属する遅発中性子先行核密度

本解析においては、すべて臨界に非常に近い体系を対象としているので、中性子生成時間と中性子寿命は等しいとしている。

第 1 式は中性子数についてのバランスの方程式になっているので、出力に関する式にするためには、両辺に  $\gamma V \Sigma_f$  を掛ける。

$$\frac{dN(t) \gamma V \Sigma_f}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} \cdot N(t) \gamma V \Sigma_f + \sum_i \lambda_i C_i(t) \gamma V \Sigma_f + S \gamma V \Sigma_f$$

ここで  $\gamma$  は 1 回の核分裂当たりの回収できるエネルギー(約 200MeV)、 $V$  は中性子速度、 $\Sigma_f$  は核分裂断面積である。炉心出力について  $N(t) \gamma V \Sigma_f = P(t)$  とおくと、

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} \cdot P(t) + \sum_i \lambda_i C_i(t) \gamma V \Sigma_f + S \gamma V \Sigma_f$$

となる。

右辺第 3 項の中性子源に関する項は

$$S \gamma V \Sigma_f = S \gamma V \Sigma_a \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a} \frac{1}{\nu} = S \gamma \frac{k}{\ell} \frac{1}{\nu} \approx S \frac{\gamma}{\ell \nu}$$

(分母の  $\nu$  は 1 核分裂当たりの中性子発生数、 $\nu =$  約 2.4)

のように変形することができるので、出力の変化を解析するための式は以下のようになる。

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} \cdot P(t) + \sum_i \lambda_i C_i(t) \gamma V \Sigma_f + S \frac{\gamma}{\ell v}$$

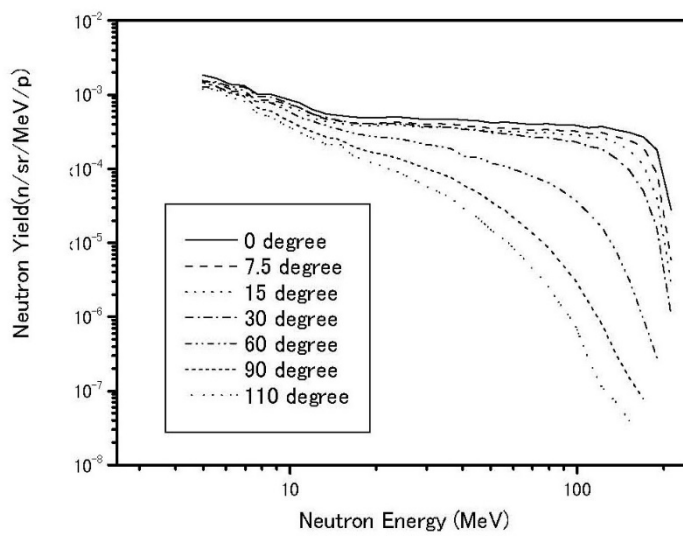


図 3 210MeV の陽子が鉄に衝突した場合の発生中性子スペクトル (実験値)

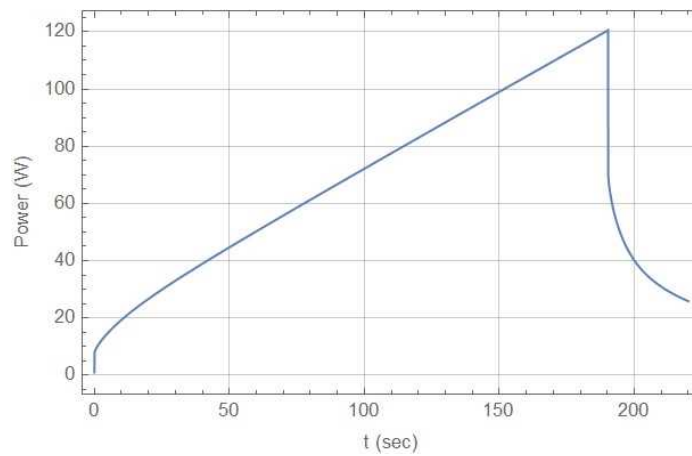


図 2 ケース A の解析結果

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」