

## 燃料要素設工認申請における最大温度上昇に関する評価計算書

低濃縮炉心における最大温度上昇を与える条件は、固体減速炉心において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する場合である。以下に、そのシナリオに従った解析を示す。

シナリオは以下のとおりである。

- (1) 固体減速炉心における過剰反応度は、制限値の最大値 ( $0.35\Delta k/k$ ) とし、制御棒の全反応度は、制限値の最小値 ( $1.35\Delta k/k$ )、及び中心架台落下による反応度は、制限値の最小値 ( $1\Delta k/k$ ) であるとする。反応度価値の最も大きな制御棒の反応度は制限値の最大値  $0.45\Delta k/k$  であるとする。
- (2)  $0.01W$  の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が  $100W$  となるレンジであったとする。
- (3) 【ケース A】

臨界状態において、パルス状中性子発生装置又は中性子発生設備の最大中性子発生量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  $5 \times 10^{10}n/s$ 、中性子発生設備については  $10^{11}n/s$  であるので、この解析では、値の大きい  $10^{11}n/s$  の中性子を発生させ、その半分である  $5 \times 10^{10}n/s$  が炉心に投入されるとする。

### 【ケース B】

炉心ごとに中性子発生量を変化させて、燃料温度が最大となる中性子発生量を求めて解析を行う。

- (4) 出力が線型出力計の指示値の 120%である  $120W$  を超えたとき、スクラム信号を発するとする。ただし、指示値の 110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。ただし、線型出力計の指示値が 120%に至らない場合には、出力上昇後 1 時間 (3600 秒) を経過した段階で、運転員が手動スクラムボタンを押してスクラム信号を発生させるとする。
- (5) スクラム信号が発生した 1 秒後に、制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わるとする。中心架台は作動しないとする。

## 解析結果

### 【ケース A】

解析結果を第 1 表に示す。線型出力計の指示値が 120%を超えてスクラム信号が発生することにより最大反応度値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「温度上昇による反応度－(全制御棒反応度－既に挿入されていた反応度－最大 1 本の反応度)」の未臨界状態となる。すなわち、 $-0.00-(1.35-0.35-0.45)=-0.55 \text{ \% } \Delta k/k$  の未臨界状態となる。

最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、初期温度を 25°Cとしたとき、燃料温度上昇は約 0.15°Cである。出力及び温度変化を第 1 図に示す。減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+25%以下であり、判断基準を満足している。

### 【ケース B】

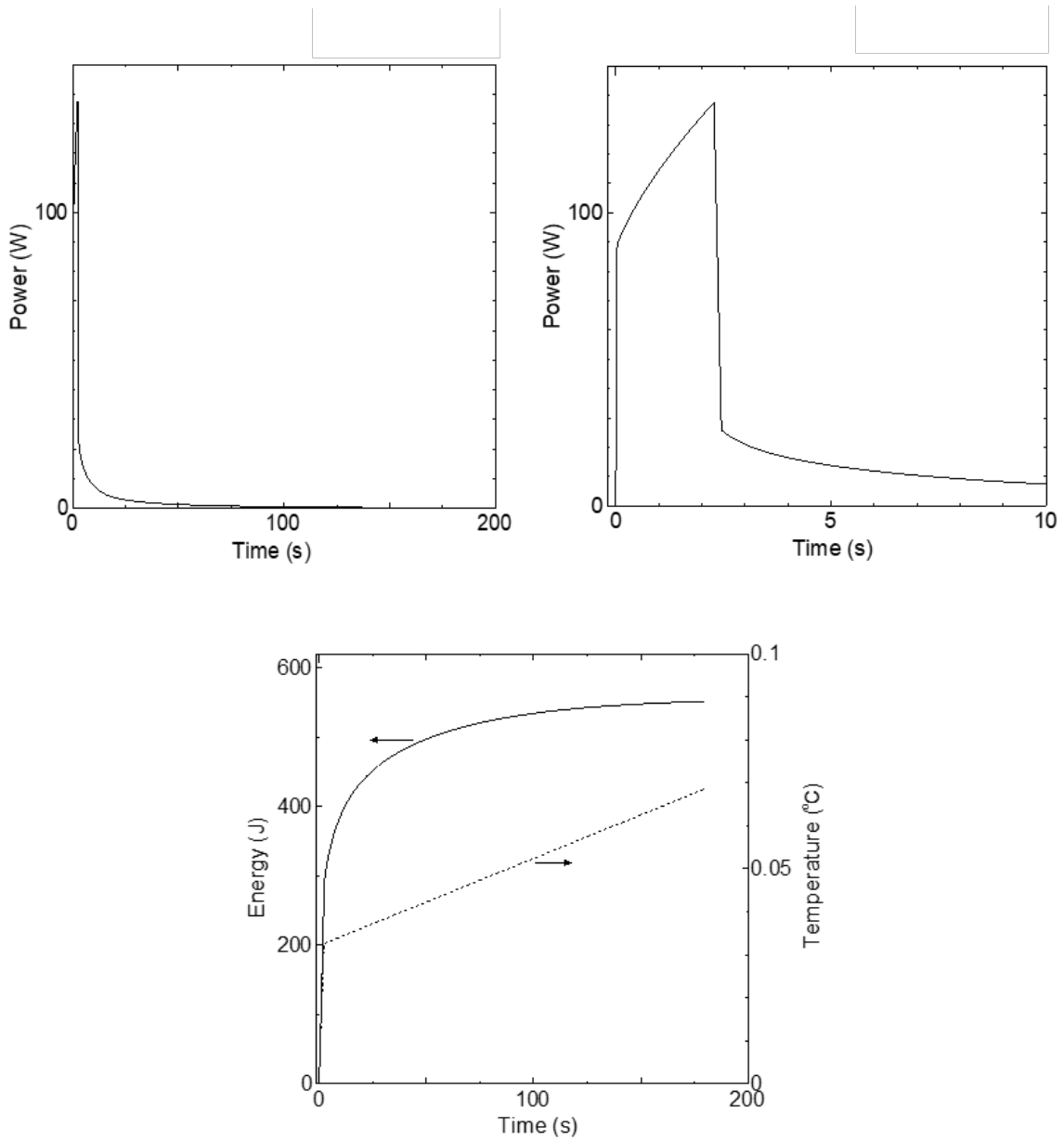
解析結果を第 2 表及び第 3 表に示す。最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、中性子発生量がケース A の 0.071 倍となったとき、初期温度を 25°Cとしたとき、燃料温度上昇は、約 49.3°Cである。この場合、出力が上昇するにつれて燃料温度が上昇し、最大出力が 120W より少しだけ低くなり、その後、燃料の温度上昇に伴う負の反応度印加により出力が低下し、最終的には、3600 秒を経過したところで運転員が手動停止させるというケースである。手動スクラムにより最大反応度値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「温度上昇による反応度－(全制御棒反応度－既に挿入されていた反応度－最大 1 本の反応度)」の未臨界状態となる。すなわち、 $-0.2-(1.35-0.35-0.45)=-0.75 \text{ \% } \Delta k/k$  の未臨界状態となる。これより中性子発生量が少し増加して、ケース A の 0.072 倍となると、最大出力は 120W を超えてスクラムするため、積算出力は低くなる。出力及び温度変化を第 2 図に示す。減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量は、上記の結果より小さくなる。

第1表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において  
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（ケース A）

炉心名称	120W 超まで の時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
L5.5P-50	1.3	137.6	179.3	$5.31 \times 10^2$	$5.89 \times 10^{-2}$	$1.35 \times 10^{-1}$
L5.5P-40	1.3	137.6	179.2	$5.31 \times 10^2$	$6.42 \times 10^{-2}$	$1.48 \times 10^{-1}$
L5.5P-30	1.3	137.6	179.2	$5.31 \times 10^2$	$6.60 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-1}$
L4P-50	1.4	137.2	182.1	$5.47 \times 10^2$	$5.37 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-1}$
L4P-40	1.4	137.0	183.3	$5.54 \times 10^2$	$6.52 \times 10^{-2}$	$1.43 \times 10^{-1}$
L4P-30	1.4	137.0	183.3	$5.54 \times 10^2$	$6.91 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-1}$
L3P-50	1.4	136.8	184.8	$5.63 \times 10^2$	$5.15 \times 10^{-2}$	$1.09 \times 10^{-1}$
L3P-40	1.4	136.7	185.5	$5.67 \times 10^2$	$5.73 \times 10^{-2}$	$1.23 \times 10^{-1}$
L3P-30	1.4	136.8	184.8	$5.63 \times 10^2$	$6.25 \times 10^{-2}$	$1.30 \times 10^{-1}$
L2P-50	1.5	136.6	186.4	$5.72 \times 10^2$	$3.87 \times 10^{-2}$	$9.92 \times 10^{-2}$
L2P-40	1.5	136.4	187.3	$5.78 \times 10^2$	$4.59 \times 10^{-2}$	$1.01 \times 10^{-1}$
L2P-30	1.5	136.5	186.7	$5.74 \times 10^2$	$4.81 \times 10^{-2}$	$1.12 \times 10^{-1}$
L1P-50	1.5	136.6	186.1	$5.70 \times 10^2$	$2.23 \times 10^{-2}$	$7.21 \times 10^{-2}$
L1P-40	1.5	136.4	187.6	$5.79 \times 10^2$	$2.38 \times 10^{-2}$	$5.98 \times 10^{-2}$
L1P-30	1.5	136.5	187.3	$5.77 \times 10^2$	$2.49 \times 10^{-2}$	$7.63 \times 10^{-2}$
LL1P-50	1.4	136.7	185.4	$5.66 \times 10^2$	$9.34 \times 10^{-3}$	$3.53 \times 10^{-2}$
LL1P-40	1.5	136.6	186.3	$5.71 \times 10^2$	$8.45 \times 10^{-3}$	$3.08 \times 10^{-2}$
LL1P-30	1.5	136.6	186.0	$5.70 \times 10^2$	$9.76 \times 10^{-3}$	$3.88 \times 10^{-2}$

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛けた値



第1図 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  
(ケース A)

上図：出力変化 (スケールの違う 2 つの図)

下図：積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(固体減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : L5.5P-30 炉心)

第2表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において  
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（ケース B）（1  
/2）

炉心名称	中性子発生量（倍率） <sup>a</sup>	120W 超までの時間（s）	最大出力（W）	最大となる時間 <sup>d</sup> （s）	最大出力 <sup>e</sup> （W）	手動スクラム時出力 <sup>f</sup> （W）	0.1W までの時間（s）	積算出力（J）	温度上昇 <sup>b</sup> （℃）	温度上昇 <sup>c</sup> （℃）
L5.5P-50	0.070	—	—	355.0	119.0	23.2	3818.8	1.73×10 <sup>5</sup>	1.92×10 <sup>1</sup>	4.39×10 <sup>1</sup>
	0.071	295.5	120.1	—	—	—	660.9	2.52×10 <sup>4</sup>	2.80×10 <sup>0</sup>	6.41×10 <sup>0</sup>
L5.5P-40	0.072	—	—	347.1	119.7	23.1	3817.6	1.72×10 <sup>5</sup>	2.08×10 <sup>1</sup>	4.78×10 <sup>1</sup>
	0.073	312.4	120.1	—	—	—	678.8	2.72×10 <sup>4</sup>	3.28×10 <sup>0</sup>	7.55×10 <sup>0</sup>
L5.5P-30	0.071	—	—	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73×10 <sup>5</sup>	2.15×10 <sup>1</sup>	4.93×10 <sup>1</sup>
	0.072	312.1	120.1	—	—	—	678.5	2.69×10 <sup>4</sup>	3.34×10 <sup>0</sup>	7.66×10 <sup>0</sup>
L4P-50	0.065	—	—	392.3	119.9	24.2	3825.9	1.84×10 <sup>5</sup>	1.80×10 <sup>1</sup>	4.03×10 <sup>1</sup>
	0.066	344.6	120.1	—	—	—	714.3	2.92×10 <sup>4</sup>	2.86×10 <sup>0</sup>	6.40×10 <sup>0</sup>
L4P-40	0.067	—	—	380.8	119.7	23.9	3824.3	1.81×10 <sup>5</sup>	2.13×10 <sup>1</sup>	4.67×10 <sup>1</sup>
	0.068	339.0	120.1	—	—	—	709.2	2.89×10 <sup>4</sup>	3.40×10 <sup>0</sup>	7.46×10 <sup>0</sup>
L4P-30	0.067	—	—	377.8	118.9	23.6	3823.3	1.79×10 <sup>5</sup>	2.24×10 <sup>1</sup>	4.88×10 <sup>1</sup>
	0.068	357.2	120.0	—	—	—	728.2	3.10×10 <sup>4</sup>	3.87×10 <sup>0</sup>	8.44×10 <sup>0</sup>
L3P-50	0.061	—	—	420.2	118.8	24.7	3831.0	1.87×10 <sup>5</sup>	1.71×10 <sup>1</sup>	3.64×10 <sup>1</sup>
	0.062	393.7	120.0	—	—	—	767.1	3.37×10 <sup>4</sup>	3.08×10 <sup>0</sup>	6.54×10 <sup>0</sup>
L3P-40	0.060	—	—	428.5	118.9	25.0	3832.4	1.89×10 <sup>5</sup>	1.91×10 <sup>1</sup>	4.09×10 <sup>1</sup>
	0.061	397.7	120.0	—	—	—	771.4	3.38×10 <sup>4</sup>	3.42×10 <sup>0</sup>	7.34×10 <sup>0</sup>
L3P-30	0.061	—	—	423.9	119.5	25.0	3832.2	1.89×10 <sup>5</sup>	2.10×10 <sup>1</sup>	4.36×10 <sup>1</sup>
	0.062	379.6	120.1	—	—	—	752.8	3.20×10 <sup>4</sup>	3.55×10 <sup>0</sup>	7.39×10 <sup>0</sup>

a ケース A の中性子発生量に対する倍率

b 温度上昇が炉心全体で均一であるとしたときの温度上昇

c 各炉心の「最大値／平均値」（2.6倍）及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09倍）を掛けた値

d 出力が120Wに達しない場合に出力が最大となるまでの時間

e 出力が120Wまで上昇しない場合の最大出力

f 出力が120Wに達しない場合に手動スクラムで反応度が印加される直前での出力

第3表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において  
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（ケース B）（2  
/2）

炉心名 称	中性子 発生量 (倍 率) <sup>a</sup>	120W 超 までの 時間 (s)	最大出 力 (W)	最大 となる 時間 <sup>d</sup> (s)	最大 出力 <sup>e</sup> (W)	手動スク ラム時出力 <sup>f</sup> (W)	0.1W までの 時間 (s)	積算出力 (J)	温度 上昇 <sup>b</sup> (°C)	温度 上昇 <sup>c</sup> (°C)
L2P-50	0.045	—	—	579.5	119.3	29.0	3853.6	2.12×10 <sup>5</sup>	1.44×10 <sup>1</sup>	3.68×10 <sup>1</sup>
	0.046	520.3	120.0	—	—	—	898.2	4.24×10 <sup>4</sup>	2.87×10 <sup>0</sup>	7.35×10 <sup>0</sup>
L2P-40	0.048	—	—	544.3	119.5	28.3	3850.4	2.07×10 <sup>5</sup>	1.65×10 <sup>1</sup>	3.64×10 <sup>1</sup>
	0.049	488.7	120.0	—	—	—	866.5	4.00×10 <sup>4</sup>	3.18×10 <sup>0</sup>	7.04×10 <sup>0</sup>
L2P-30	0.047	—	—	550.9	118.6	28.2	3850.3	2.07×10 <sup>5</sup>	1.73×10 <sup>1</sup>	4.03×10 <sup>1</sup>
	0.048	511.5	120.0	—	—	—	889.4	4.23×10 <sup>4</sup>	3.55×10 <sup>0</sup>	8.23×10 <sup>0</sup>
L1P-50	0.029	—	—	914.6	118.9	37.3	3882.5	2.52×10 <sup>5</sup>	9.85×10 <sup>0</sup>	3.19×10 <sup>1</sup>
	0.030	793.8	120.0	—	—	—	1175.0	6.12×10 <sup>4</sup>	2.39×10 <sup>0</sup>	7.74×10 <sup>0</sup>
L1P-40	0.029	—	—	926.3	119.7	37.8	3884.6	2.55×10 <sup>5</sup>	1.05×10 <sup>1</sup>	2.63×10 <sup>1</sup>
	0.030	784.0	120.0	—	—	—	1166.0	5.99×10 <sup>4</sup>	2.46×10 <sup>0</sup>	6.19×10 <sup>0</sup>
L1P-30	0.028	—	—	949.5	117.8	37.7	3885.5	2.53×10 <sup>5</sup>	1.09×10 <sup>1</sup>	3.35×10 <sup>1</sup>
	0.029	869.2	120.0	—	—	—	1252.7	6.83×10 <sup>4</sup>	2.95×10 <sup>0</sup>	9.03×10 <sup>0</sup>
LL1P-5 0	0.014	—	—	1884.3	118.4	73.1	3945.0	3.15×10 <sup>5</sup>	5.20×10 <sup>0</sup>	1.96×10 <sup>1</sup>
	0.015	1511.7	120.0	—	—	—	1895.5	1.09×10 <sup>5</sup>	1.80×10 <sup>0</sup>	6.80×10 <sup>0</sup>
LL1P-4 0	0.013	—	—	2039.1	118.3	80.4	3953.8	3.17×10 <sup>5</sup>	4.69×10 <sup>0</sup>	1.71×10 <sup>1</sup>
	0.014	1622.7	120.0	—	—	—	2007.4	1.17×10 <sup>5</sup>	1.73×10 <sup>0</sup>	6.29×10 <sup>0</sup>
LL1P-3 0	0.012	—	—	2139.5	114.6	83.4	3956.8	3.09×10 <sup>5</sup>	5.30×10 <sup>0</sup>	2.10×10 <sup>1</sup>
	0.013	1873.5	120.0	—	—	—	2258.4	1.40×10 <sup>5</sup>	2.39×10 <sup>0</sup>	9.50×10 <sup>0</sup>

a ケース A の中性子発生量に対する倍率

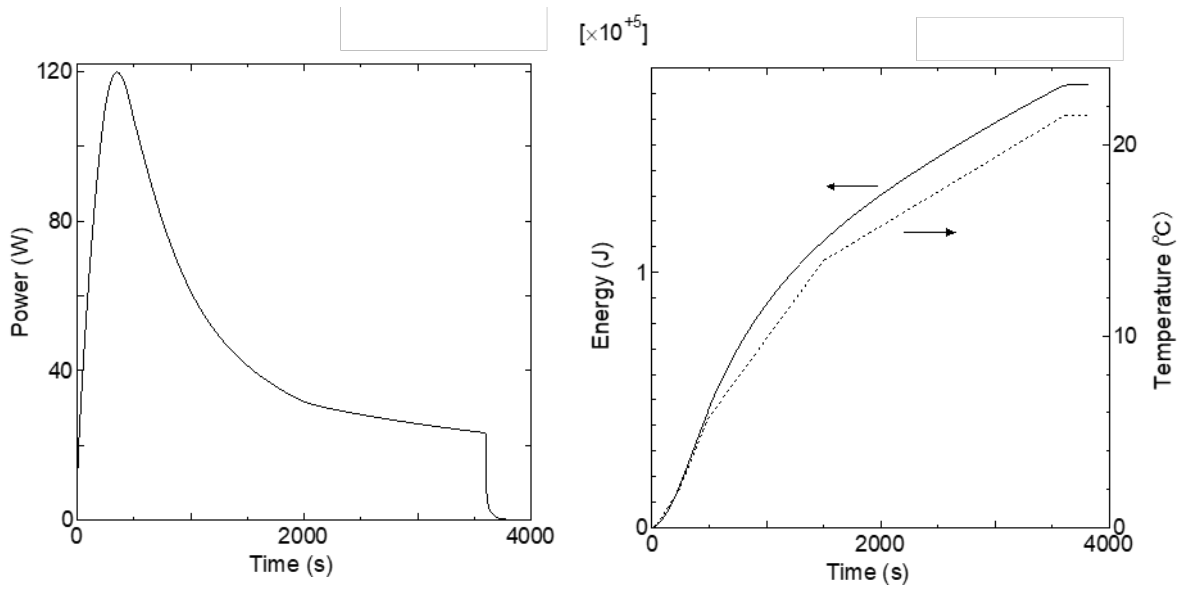
b 温度上昇が炉心全体で均一であるとしたときの温度上昇

c 各炉心の「最大値/平均値」（2.6倍）及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09倍）を掛けた値

d 出力が 120W に達しない場合に出力が最大となるまでの時間

e 出力が 120W まで上昇しない場合の最大出力

f 出力が 120W に達しない場合に手動スクラムで反応度が印加される直前での出力



第2図 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  
(ケース B)

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）  
(固体減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：L5.5P-30 炉心、中性子発生量はケース A の 0.071 倍)