

## 京都大学臨界実験装置 (KUCA) 設置変更承認申請について

### 【運転時の異常な過渡変化】

商用電源喪失

中性子発生設備等を臨界状態において利用  
炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

## 添付10の解析について

### 1. 運転時の異常な過渡変化

「通常運転時に予想される機械又は器具の単一の故障若しくはその誤作動又は運転員の単一の誤操作及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって発生する異常な状態であつて、当該状態が継続した場合には試験研究用等原子炉の炉心又は原子炉冷却材バウンダリの著しい損傷が生ずるおそれがあるものとして安全設計上想定すべきもの」

#### 1-1 解析項目

解析は以下のような項目について取り扱う。

- (1) 炉心内の反応度又は出力分布の異常な変化
  - (i) 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き
  - (ii) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き
  - (iii) 実験物の異常等による反応度の付加
- (2) 炉心内の熱発生又は熱除去の異常な変化
  - (i) 商用電源喪失
- (3) その他原子炉施設の設計により必要と認められる事象
  - (i) 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
  - (ii) 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

判定基準は以下の通りである。

- (i) 燃料の最高温度は  $400^{\circ}\text{C}$  を超えないこと。
- (ii) 構造材のアルミニウムの最高温度は  $400^{\circ}\text{C}$  を超えないこと。
- (iii) 固体減速架台の減速材であるポリエチレンの最高温度は  $100^{\circ}\text{C}$  を超えないこと。
- (iv) 軽水減速架台の減速材である軽水の最高温度は  $100^{\circ}\text{C}$  未満であること。

動特性の解析は 6 群の遅発中性子先行核を考慮した通常の一点炉近似の動特性方程式に基づいて行い、連立微分方程式を汎用数式処理システム Mathematica (最新バージョンの

12.2.0.0) を用いて解いた。

燃焼に伴って生じる核分裂生成物の崩壊に伴う発熱等の評価は米国の Oak Ridge National Laboratory で開発された燃焼計算コード ORIGEN-2 の解析時点で入手可能な最新版である ORIGEN-2.2 を使用し、断面積ライブラリとしては本原子炉施設の炉心の中性子エネルギースペクトルに比較的近い熱中性子炉の PWR 用に作成された定数 (PWRU.LIB) を用いた。

解析のために必要となる各炉心のパラメータ（臨界量、実効遅発中性子割合、中性子平均寿命、反応度温度係数）は「第 381 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」（2020 年 11 月 5 日）の説明資料 1-1 に記載した数値を用いる。

なお解析使用する U-7Mo（アルミ分散）の比熱は 0.2748J/g/K とする。

（出典：「Thermal Properties for the Thermal-Hydraulics Analyses of the BR2 Maximum Nominal Heat Flux」, ANL/RERTR/TM-11-20 Rev. 1 (2015).)

## 2 解析結果

- 2-1 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き
- 2-2 出力運転中の制御棒の異常な引抜き
- 2-3 実験物の異常等による反応度の付加
- 2-4 商用電源喪失

原子炉の出力運転中に電力系統の故障又は所内電気設備の故障等により商用電源が喪失すれば、安全保護回路系の電源断により原子炉はスクラムして停止するため、その後の運転状況の監視を行う必要はないとしているが、それを確認するために評価を行う

### (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  $1.5 \times 1/3 = 0.5\% \Delta k/k$

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  $25^{\circ}\text{C}$

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

出力 100W の臨界状態で 1 時間運転（1 ヶ月の最大積算出力 100Wh までの運転）

### (3) 解析条件

- ・ 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により制御棒が落下。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とする。
- ・ 商用電源喪失から 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。
- ・ 固体減速炉心では商用電源喪失に伴い中心架台を保持している油圧ポンプが停止して中心架台が落下し、12 秒後（申請書の記載値）にステップ状の負の

反応度が加わる。

- ・軽水減速炉心では商用電源喪失に伴いダンプ弁を保持している電磁石電源断により弁座が下降し水が排水され、30秒後（申請書の記載値）にステップ状の負の反応度が加わる。
- ・商用電源喪失後の1時間後までの積算熱量（主に核分裂生成物の崩壊熱）を求める。

#### (4) 解析条件

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに「第381回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合」（2020年11月5日）の説明資料1-1で選定したすべての代表炉心の中で

（固体減速炉心：L5.5P-30、軽水減速炉心：C45G(2H<sub>2</sub>O)4列炉心）。

結果を表4-1に示す。L5.5P-30炉心で燃料温度上昇は0.743℃、C45G(6H<sub>2</sub>O)炉心で燃料温度上昇は0.236℃判定基準値を満たしている（出力変化を図6-1～図6-3に示す）。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）、即発中性子減衰定数の誤差（8%）、反応度温度係数の誤差（32%）を検討したときの結果を表6-2と表6-3に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は6%高くなる。 $\beta_{\text{eff}}$ と $\rho$ が各々8%の誤差を持った場合（もう一方は誤差無し）の結果より、 $\rho$ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 $\beta_{\text{eff}}$ に誤差があった場合には燃料温度がL5.5P-30炉心で2%、C45G(6H<sub>2</sub>O)炉心で3%上昇する。反応度温度係数の誤差も燃料温度には影響を及ぼさない。

これらの誤差があったとしても燃料温度はL5.5P-30炉心で約1.08倍（ $1.06 \times 1.02$ ）の0.802℃（ $0.743 \times 1.08$ ）、C45G(6H<sub>2</sub>O)炉心で約1.09倍（ $1.06 \times 1.03$ ）の0.257℃（ $0.236 \times 1.09$ ）となるだけなので判定基準値を満たしている。

表 4-1 商用電源喪失

炉心名称	炉心 積算出力 (J)	FP 崩壊 積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-30	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01
C45G(2H <sub>2</sub> O) 4 列	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01

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」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数を掛ける

表 4-2 商用電源喪失 (L5.5P-30 炉心)

誤差の影響

	炉心 積算出力 (J)	FP 崩壊 積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	—
U 重量を 6%減少	—	—	3.50E-02	8.02E-01	1.06
$\beta_{eff}$ を 8%減少	9.38E+02	1.61E+03	3.16E-01	9.75E-01	0.98
$\beta_{eff}$ を 8%増加	1.07E+03	1.61E+03	3.32E-01	7.61E-01	1.02
$l$ を 8%減少	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00
$l$ を 8%増加	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00
温度係数を 32% 減少	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00
温度係数を 32% 増加	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00

a) 表 4-1 と同じ

b) 表 4-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 4-1 の結果と同じ

表 4-3 商用電源喪失 (C45G(2H<sub>2</sub>O) 4 列炉心)

誤差の影響

	炉心 積算出力 (J)	FP 崩壊 積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	—
U 重量を 6%減少	—	—	9.69E-02	2.55E-01	1.06
$\beta_{eff}$ を 8%減少	1.27E+03	1.61E+03	8.71E-02	2.29E-01	0.97
$\beta_{eff}$ を 8%増加	1.45E+03	1.61E+03	9.23E-02	2.42E-01	1.03
$l$ を 8%減少	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00
$l$ を 8%増加	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00
温度係数を 32% 減少	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00
温度係数を 32% 増加	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00

a) 表 4-1 と同じ

b) 表 4-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 4-1 の結果と同じ

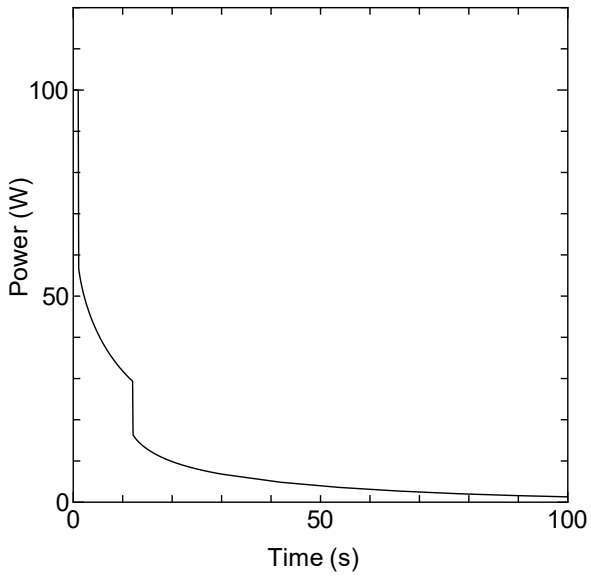


図 4-1 L55P-30 炉心 出力変化  
(商用電源喪失、100 秒まで)

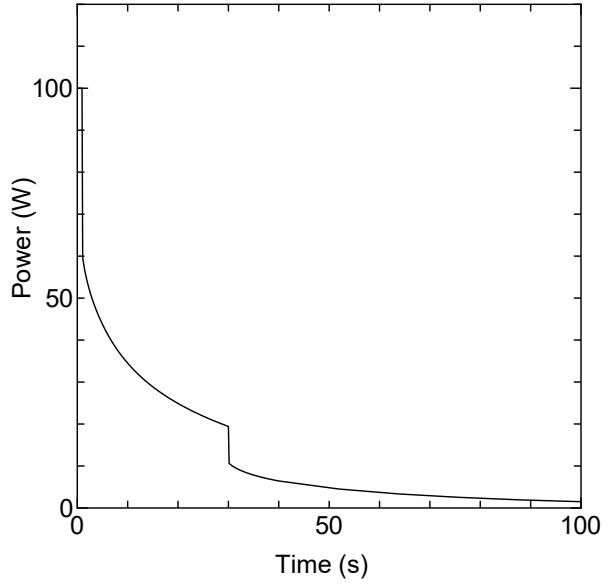


図 4-2 C45G(2H<sub>2</sub>O) 4 列炉心 出力変化  
(商用電源喪失、100 秒まで)

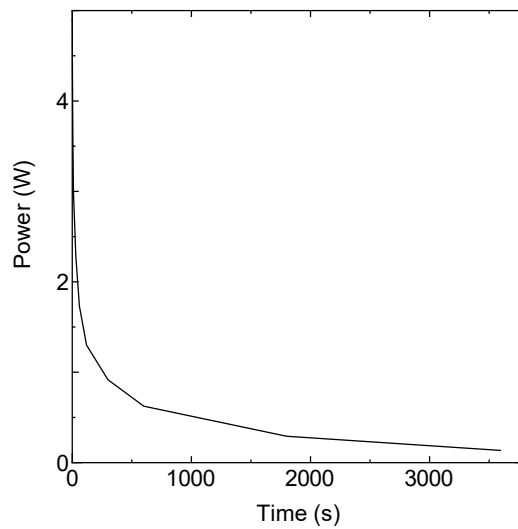


図 4-3 FP からの発熱 出力変化  
(商用電源喪失)



## 2-5 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

固体減速架台の A 架台において、中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置は未臨界状態でのみ使用することが定められているが、臨界状態で使用した場合には出力が上昇し続けるため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

### (a) ケース A

#### (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

$$1.35 \times 1/3 = 0.45 \text{ \%} \Delta k/k$$

#### (2) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

線型出力計は指示値が 100% で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 1W の臨界状態

#### (3) 解析条件

- ・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  $10^{11} \text{ n/s}$  であり、炉心内に到達して出力上昇に寄与する中性子としては別紙の補足資料の通り大きめに評価して  $4 \times 10^9 \text{ n/s}$  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 120W）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。
- ・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し、1 秒後に制御棒が落下する。
- ・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と

するので、固体減速炉心では  $1.35-0.45=0.9$  % $\Delta k/k$  の負の反応度が加わり出力は低下する。(  $0.35-0.9=-0.55$  % $\Delta k/k$  の未臨界状態となる)

- ・出力が 0.1W になるまで解析する。
- ・ただし、1 時間以内にスクラム信号が出ない場合には 1 時間後に運転員により手動スクラムボタンを押して 1 秒後に制御棒が落下する。

#### (4) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに「第 381 回 核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 11 月 5 日)の説明資料 1-1 で選定したすべての代表炉心を対象とし、燃料の最高温度が最大となる炉心について誤差を考慮するなどの詳しい解析を行い、今後の補正申請により設置変更申請書に記載する。

#### (b) ケース B

ケース A 比べて炉心内に到達して出力上昇に寄与する中性子量を 0.5 倍に減少させる。それ以外の条件はケース A と同じ。

#### (c) ケース C

ケース A 比べて炉心内に到達して出力上昇に寄与する中性子量を 0.1 倍に減少させる。それ以外の条件はケース A と同じ。

#### ケース A

結果を表 5-1 に示す。燃料温度が高くなったのが L5.5P-30 炉心で燃料温度上昇は 5.97°C であり判定基準値を満たしている (出力変化を図 5-1 に示す)。

この炉心の燃料重量の誤差 (6%)、即発中性子減衰定数の誤差 (8%)、反応度温度係数の誤差 (32%) を検討したときの結果を表 5-2 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6% 高くなる。 $\beta_{\text{eff}}$  と  $\rho$  が各々 8% の誤差を持った場合(もう一方は誤差無し)の結果より、 $\rho$  の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 $\beta_{\text{eff}}$  に誤差があった場合には燃料温度が最大 16% 上昇する。反応度温度係数の誤差を考慮したときには燃料温度は 24% 高くなる。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.52 倍 ( $1.06 \times 1.16 \times 1.24$ ) となるだけなので判定基準値を満たしている。(  $5.97^\circ\text{C} \times 1.52 = 9.07^\circ\text{C}$  )

#### ケース B

結果を表 5-3 に示す。L1P 炉心と LL1P 炉心については

温度係数の影響が小さいため出力は図 5-1 と同じように 120W 以上まで上昇してスクラムに至っている。しかしそれ以外の炉心については温度上昇の影響で臨界状態から負の反応度が加わるため出力は一旦上昇するものの途中から減少してしまい、1 時間後でも 0.1W まで至らないため運転員が手動スクラムボタンを操作して停止させており、その場合のほうが 120W 超えてスクラムする場合より積算出力は大きくなっている。

燃料温度が高くなったのが L2P-30 炉心で燃料温度上昇は 35.8°C であり判定基準値を満たしている。出力変化は図 5-2 と同じように最初は上昇して途中から減少する。

この炉心の燃料重量の誤差 (6%)、即発中性子減衰定数の誤差 (8%)、反応度温度係数の誤差 (32%) を検討したときの結果を表 5-4 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6% 高くなる。 $\beta_{\text{eff}}$  と  $\lambda$  が各々 8% の誤差を持った場合の結果より、 $\beta_{\text{eff}}$  と  $\lambda$  の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさない。反応度温度係数の誤差を考慮したときには燃料温度は 21% 高くなる。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.28 倍 ( $1.06 \times 1.21$ ) となり判定基準値を満たしている。 $(35.8^\circ\text{C} \times 1.28 = 45.8^\circ\text{C})$

#### ケース C

結果を表 5-5 に示す。すべての炉心については温度上昇の影響で臨界状態から負の反応度が加わるため出力は一旦上昇するものの途中から減少してしまい、1 時間後でも 0.1W まで至らないため運転員が手動スクラムボタンを操作して停止させている。

燃料温度が高くなったのが L1P-30 炉心で燃料温度上昇は 16.9°C であり判定基準値を満たしている。出力変化を図 5-2 に示す。

なお、ケース B で温度が最も高くなった L2P-30 炉心はケース C では 15.7°C と温度上昇量は少なくなっており、中性子発生量を少なくすると温度上昇は押さえられることが判った。

表 5-1 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 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (W)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	248.0	120.2	611.0	2.08E+04	2.31E+00	5.29E+00
L5.5P-40	254.4	120.2	617.8	2.15E+04	2.60E+00	5.967E+00
L5.5P-30	249.7	120.2	612.7	2.10E+04	2.61E+00	<b>5.970E+00</b>
L4P-50	233.2	120.3	596.7	1.92E+04	1.89E+00	4.21E+00
L4P-40	239.6	120.3	604.5	1.98E+04	2.33E+00	5.12E+00
L4P-30	242.3	120.3	607.3	2.01E+04	2.51E+00	5.47E+00
L3P-50	228.9	120.3	593.8	1.87E+04	1.71E+00	3.64E+00
L3P-40	226.3	120.3	591.3	1.85E+04	1.86E+00	4.00E+00
L3P-30	222.7	120.3	592.2	1.86E+04	2.06E+00	4.30E+00
L2P-50	208.2	120.4	572.6	1.67E+04	1.13E+00	2.89E+00
L2P-40	211.7	120.4	577.0	1.70E+04	1.35E+00	2.98E+00
L2P-30	210.9	120.4	575.7	1.69E+04	1.42E+00	3.29E+00
L1P-50	196.9	120.5	560.2	1.56E+04	6.10E-01	1.98E+00
L1P-40	198.3	120.5	562.7	1.57E+04	6.45E-01	1.62E+00
L1P-30	197.8	120.5	562.0	1.57E+04	6.77E-01	2.07E+00
LL1P-50	191.1	120.5	553.5	1.51E+04	2.49E-01	9.41E-01
LL1P-40	191.8	120.5	1855.3	1.51E+04	2.24E-01	8.15E-01
LL1P-30	191.2	120.5	554.1	1.51E+04	2.59E-01	1.03E+00

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」、およ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）を掛ける

表 5-2 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  
(L5.5P-30(炉心高 30.8cm) (ケースA) 誤差の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (W)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	249.7	120.2	612.7	2.10E+04	2.61E+00	5.97E+00	—
U 重量を 6% 減少	—	—	—	—	2.82E+00	6.45E+00	1.06
$\beta$ eff を 8% 減少	217.2	120.3	565.8	1.82E+04	2.26E+00	5.17E+00	0.87
$\beta$ eff を 8% 増加	287.9	120.2	664.5	2.44E+04	3.03E+00	6.93E+00	1.16
$\rho$ を 8%減少	249.7	120.2	612.7	2.10E+04	2.61E+00	5.97E+00	1.00
$\rho$ を 8%増加	249.7	120.2	612.7	2.10E+04	2.61E+00	5.97E+00	1.00
温度係数を 32%減少	218.0	120.3	578.1	1.78E+04	2.21E+00	5.05E+00	0.85
温度係数を 32%増加	295.6	120.1	661.4	2.59E+04	3.22E+00	7.37E+00	1.24

a),b)は表 5-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 5-1 の結果と同じ

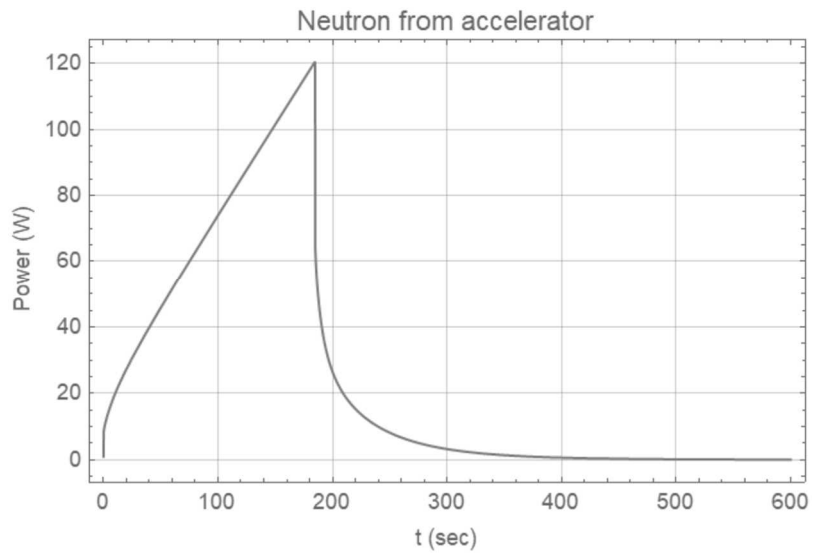


図 5-1 L5.5P-30 炉心 出力変化

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(ケース A)

表5-3 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)

炉心名称	120W 超 (s)	0.1W ま で (s)	最大とな る時間 (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	—	—	438.1	82.5	1.25E+05	1.39E+01	3.18E+01
L5.5P-40	—	—	429.9	81.7	1.23E+05	1.49E+01	3.42E+01
L5.5P-30	—	—	437.5	82.1	1.24E+05	1.55E+01	3.54E+01
L4P-50	—	—	468.0	87.3	1.36E+05	1.34E+01	2.99E+01
L4P-40	—	—	461.4	85.4	1.32E+05	1.56E+01	3.41E+01
L4P-30	—	—	458.4	84.7	1.31E+05	1.63E+01	3.56E+01
L3P-50	—	—	489.0	90.1	1.43E+05	1.31E+01	2.79E+01
L3P-40	—	—	495.7	91.1	1.46E+05	1.47E+01	3.16E+01
L3P-30	—	—	495.0	90.5	1.44E+05	1.60E+01	3.34E+01
L2P-50	—	—	610.6	109.8	1.93E+05	1.30E+01	3.34E+01
L2P-40	—	—	592.5	105.2	1.82E+05	1.45E+01	3.20E+01
L2P-30	—	—	593.4	106.1	1.84E+05	1.54E+01	<b><u>3.58E+01</u></b>
L1P-50	482.7	859.8	—	—	3.54E+04	1.38E+00	4.47E+00
L1P-40	484.2	862.3	—	—	3.54E+04	1.45E+00	3.66E+00
L1P-30	480.9	858.7	—	—	3.51E+04	1.58E+00	4.65E+00
LL1P-50	426.6	801.9	—	—	3.01E+04	4.97E-01	1.88E+01
LL1P-40	426.7	802.6	—	—	3.01E+04	4.45E-01	1.62E+01
LL1P-30	427.8	803.6	—	—	3.02E+04	5.18E-01	2.06E+01

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」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09倍、ただし LL1 炉心についでのみ 1.23倍）を掛ける

表 5-4 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  
(L2P-30 炉心) (ケース B) 誤差の影響

	最大となる時間 (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) <sup>a)</sup>	温度上昇 (°C) <sup>b)</sup>	比 <sup>c)</sup>
基準 <sup>d)</sup>	593.4	106.1	1.84E+05	1.54E+01	3.58E+01	—
U 重量を 6% 減少	—	—	—	1.66E+01	3.87E+01	1.06
$\beta$ eff を 8% 減少	563.44	108.7	1.84E+05	1.54E+01	3.58E+01	1.00
$\beta$ eff を 8% 増加	623.32	103.7	1.84E+05	1.54E+01	3.57E+01	1.00
$\rho$ を 8%減少	593.36	106.1	1.84E+05	1.54E+01	3.58E+01	1.00
$\rho$ を 8%増加	593.38	106.1	1.84E+05	1.54E+01	3.58E+01	1.00
温度係数を 32%減少	674.80	121.2	2.22E+05	1.86E+01	4.32E+01	1.21
温度係数を 32%増加	542.89	96.3	1.60E+05	1.34E+01	3.12E+01	0.87

a),b)は表 5-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 5-1 の結果と同じ



表 5-5 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 C)

炉心名称	最大となる時間 (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) <sup>a)</sup>	温度上昇 (°C) <sup>b)</sup>
L5.5P-50	766.9	28.7	5.60E+04	6.22E+00	1.42E+01
L5.5P-40	757.7	28.3	5.51E+04	6.65E+00	1.53E+01
L5.5P-30	764.4	28.6	5.58E+04	6.93E+00	1.59E+01
L4P-50	818.2	30.3	6.09E+04	5.98E+00	1.34E+01
L4P-40	805.2	29.7	5.92E+04	6.97E+00	1.53E+01
L4P-30	799.9	29.5	5.86E+04	7.32E+00	1.59E+01
L3P-50	852.5	31.4	6.40E+04	5.86E+00	1.24E+01
L3P-40	865.5	31.7	6.50E+04	6.57E+00	1.41E+01
L3P-30	862.1	31.5	6.45E+04	7.16E+00	1.49E+01
L2P-50	1054.7	38.1	8.46E+04	5.73E+00	1.47E+01
L2P-40	1017.7	36.6	8.02E+04	6.37E+00	1.41E+01
L2P-30	1021.5	36.9	8.09E+04	6.78E+00	1.57E+01
L1P-50	1412.6	50.8	1.25E+05	4.90E+00	1.58E+01
L1P-40	1430.7	51.1	1.27E+05	5.19E+00	1.31E+01
L1P-30	1444.1	51.6	1.28E+05	5.53E+00	<b><u>1.69E+01</u></b>
LL1P-50	2283.6	81.5	2.19E+05	3.61E+00	1.36E+01
LL1P-40	2304.5	81.5	2.28E+05	3.38E+00	1.23E+01
LL1P-30	2304.5	85.5	2.28E+05	3.91E+00	1.55E+01

c) 燃料板のみの温度上昇を考慮

d) 各炉心の「最大値／平均値」、およ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）を掛ける

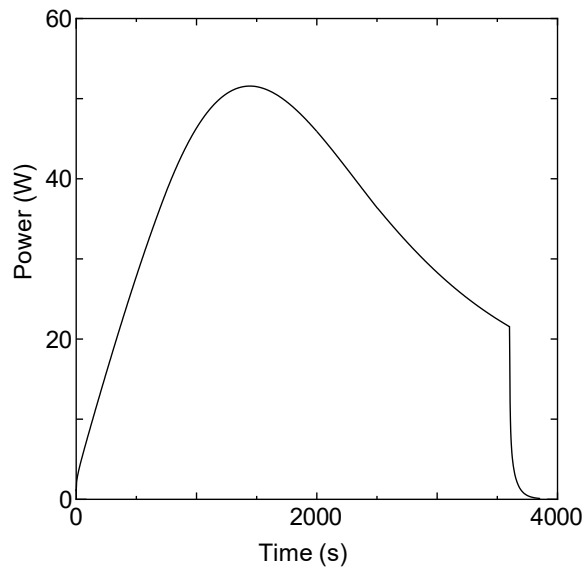


図 5-2 L1P-30 炉心 出力変化

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(ケース C)

## 2-5 炉心タンクヒータによる温度上昇

軽水減速架台の運転中に炉心タンクヒータを作動させるとき、反応度温度係数が正の炉心の場合には炉心温度の上昇に伴って正の反応度が印加され出力が上昇し続けるため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

炉心タンクヒータは図 6-1 の⑳で、設置変更申請書の本文には

### ハ. 原子炉本体の構造及び設備

#### (1) 炉心

##### (i) 構造

炉心タンクには、水の加熱と保温のための電気ヒータを含むループを設ける。

と記載されているものである。出力 10kW の電気ヒータが設置されており、炉心タンクに給水した後に炉心タンク内の水をこの電気ヒータ系統にポンプで循環させて温度を上昇（保温）させることができる。

この電気ヒータを用いて炉心タンクの水温を上昇させるとする。

炉心タンクの容積：1m（半径）×1m× $\pi$ ×1.6m（水位）

水密度\*）：0.99704 g/cm<sup>3</sup>（25℃）

定圧比熱容量\*）：4.18 J/K/g（25℃） \*）出典：理科年表（2015）

$$\text{温度上昇} : 10 \times 10^3 / (1.6 \pi \times 10^6 \times 0.99704 \times 4.18) = 4.78 \times 10^{-4} \text{ K/s}$$

#### (1) 解析対象炉心

軽水減速炉心の添付書類 8 の代表炉心の中の反応度温度係数が正となる炉心のうち燃料の最高温度が最大となる炉心とする。反応度温度係数が正となる炉心は C45G(6H<sub>2</sub>O)炉心など 4 つの炉心があり、その全ての炉心の解析を行い、その中で最も燃料温度が高くなる炉心について今後の補正申請により設置変更申請書に記載する。

#### (2) 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、0.5 %Δk/k

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値、1.5 %Δk/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

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

解析のために必要となる各炉心のパラメータ（臨界量、実効遅発中性子割合、中性子平均寿命、温度係数）は「第 381 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」（2020 年 11 月 5 日）の説明資料 1-1 に記載した数値を用い

る。

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

炉心タンク満水

線型出力計は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒を挿入して出力 1W の臨界状態

(4) スクラム信号発生

- ・ 炉心タンクヒータ（出力 10kW）を用いて炉心タンク水の温度を上昇させる。  
ヒータの熱は全て軽水の温度上昇に用いられるものとする。
- ・ 線型出力計の指示値が 120%（出力が 120W）を超えたときにスクラム信号が発生し 1 秒後に制御棒が落下する。
- ・ ただし、1 時間以内にスクラム信号が出ない場合には 1 時間後に運転員により手動スクラムボタンを押して 1 秒後に制御棒が落下する。
- ・ 最大反応度効果を持つ制御棒 1 本（0.5 % $\Delta k/k$ ）以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので -0.5 % $\Delta k/k$  の未臨界状態となる。
- ・ 出力が 0.1W になるまで解析する。

結果を表 6-1 に示す。全ての炉心で最大出力は 120W 以下であるため、1 時間後に運転員が手動スクラムボタンを押して停止させた。（この間の水温の上昇は約 1.7°C）

燃料温度が高くなったのが C45G(6H<sub>2</sub>O)炉心で燃料温度上昇は 0.536°Cであり判定基準値を満たしている（出力変化を図 6-2 に示す）。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）、即発中性子減衰定数の誤差（8%）、反応度温度係数の誤差（32%）を検討したときの結果を表 6-2 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6%高くなる。 $\beta_{\text{eff}}$  と  $\rho$  が各々 8%の誤差を持った場合（もう一方は誤差無し）の結果より、 $\rho$  の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 $\beta_{\text{eff}}$  に誤差があった場合には燃料温度が最大 9%上昇する。反応度温度係数の誤差を考慮したときには燃料温度は 40%高くなる。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.62 倍（ $1.06 \times 1.09 \times 1.40$ ）となるだけなので判定基準値を満たしている。（ $0.536^\circ\text{C} \times 1.62 = 0.868^\circ\text{C}$ ）

## 2-6 炉心タンクヒータによる温度上昇

軽水減速架台の運転中に炉心タンクヒータを作動させるとき、反応度温度係数が正の炉心の場合には炉心温度の上昇に伴って正の反応度が印加され出力が上昇し続けるため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

炉心タンクヒータは図 6-1 の⑳で、設置変更申請書の本文には

### ハ. 原子炉本体の構造及び設備

#### (1) 炉心

##### (i) 構造

炉心タンクには、水の加熱と保温のための電気ヒータを含むループを設ける。

と記載されているものである。出力 10kW の電気ヒータが設置されており、炉心タンクに給水した後に炉心タンク内の水をこの電気ヒータ系統にポンプで循環させて温度を上昇（保温）させることができる。

この電気ヒータを用いて炉心タンクの水温を上昇させるとする。

炉心タンクの容積：1m（半径）×1m×π×1.6m（水位）

水密度\*）：0.99704 g/cm<sup>3</sup>（25℃）

定圧比熱容量\*）：4.18 J/K/g（25℃） \*）出典：理科年表（2015）

$$\text{温度上昇} : 10 \times 10^3 / (1.6 \pi \times 10^6 \times 0.99704 \times 4.18) = 4.78 \times 10^{-4} \text{ K/s}$$

#### (5) 解析対象炉心

軽水減速炉心の添付書類 8 の代表炉心の中の反応度温度係数が正となる炉心のうち燃料の最高温度が最大となる炉心とする。反応度温度係数が正となる炉心は C45G(6H<sub>2</sub>O)炉心など 4 つの炉心があり、その全ての炉心の解析を行い、その中で最も燃料温度が高くなる炉心について今後の補正申請により設置変更申請書に記載する。

#### (6) 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、0.5 %Δk/k

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値、1.5 %Δk/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

軽水減速炉心は 1.5×1/3=0.5 %Δk/k

解析のために必要となる各炉心のパラメータ（臨界量、実効遅発中性子割合、中性子平均寿命、温度係数）は「第 381 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性

に係る審査会合」(2020年11月5日)の説明資料1-1に記載した数値を用いる。

(7) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

炉心タンク満水

線型出力計は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒を挿入して出力 1W の臨界状態

(8) スクラム信号発生

- ・炉心タンクヒータ(出力 10kW)を用いて炉心タンク水の温度を上昇させる。ヒータの熱は全て軽水の温度上昇に用いられるものとする。
- ・線型出力計の指示値が 120%(出力が 120W)を超えたときにスクラム信号が発生し1秒後に制御棒が落下する。
- ・ただし、1時間以内にスクラム信号が出ない場合には1時間後に運転員により手動スクラムボタンを押して1秒後に制御棒が落下する。
- ・最大反応度効果を持つ制御棒1本(0.5 % $\Delta k/k$ )以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので-0.5 % $\Delta k/k$ の未臨界状態となる。
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

結果を表 6-1 に示す。全ての炉心で最大出力は 120W 以下であるため、1時間後に運転員が手動スクラムボタンを押して停止させた。(この間の水温の上昇は約 1.7°C)

燃料温度が高くなったのが C45G(6H<sub>2</sub>O)炉心で燃料温度上昇は 0.536°Cであり判定基準値を満たしている(出力変化を図 6-2 に示す)。

この炉心の燃料重量の誤差(6%)、即発中性子減衰定数の誤差(8%)、反応度温度係数の誤差(32%)を検討したときの結果を表 6-2 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 6%高くなる。 $\beta_{\text{eff}}$  と  $\rho$  が各々 8%の誤差を持った場合(もう一方は誤差無し)の結果より、 $\rho$  の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 $\beta_{\text{eff}}$  に誤差があった場合には燃料温度が最大 9%上昇する。反応度温度係数の誤差を考慮したときには燃料温度は 40%高くなる。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.62 倍(1.06×1.09×1.40)となるだけなので判定基準値を満たしている。(0.536°C×1.62=0.868°C)

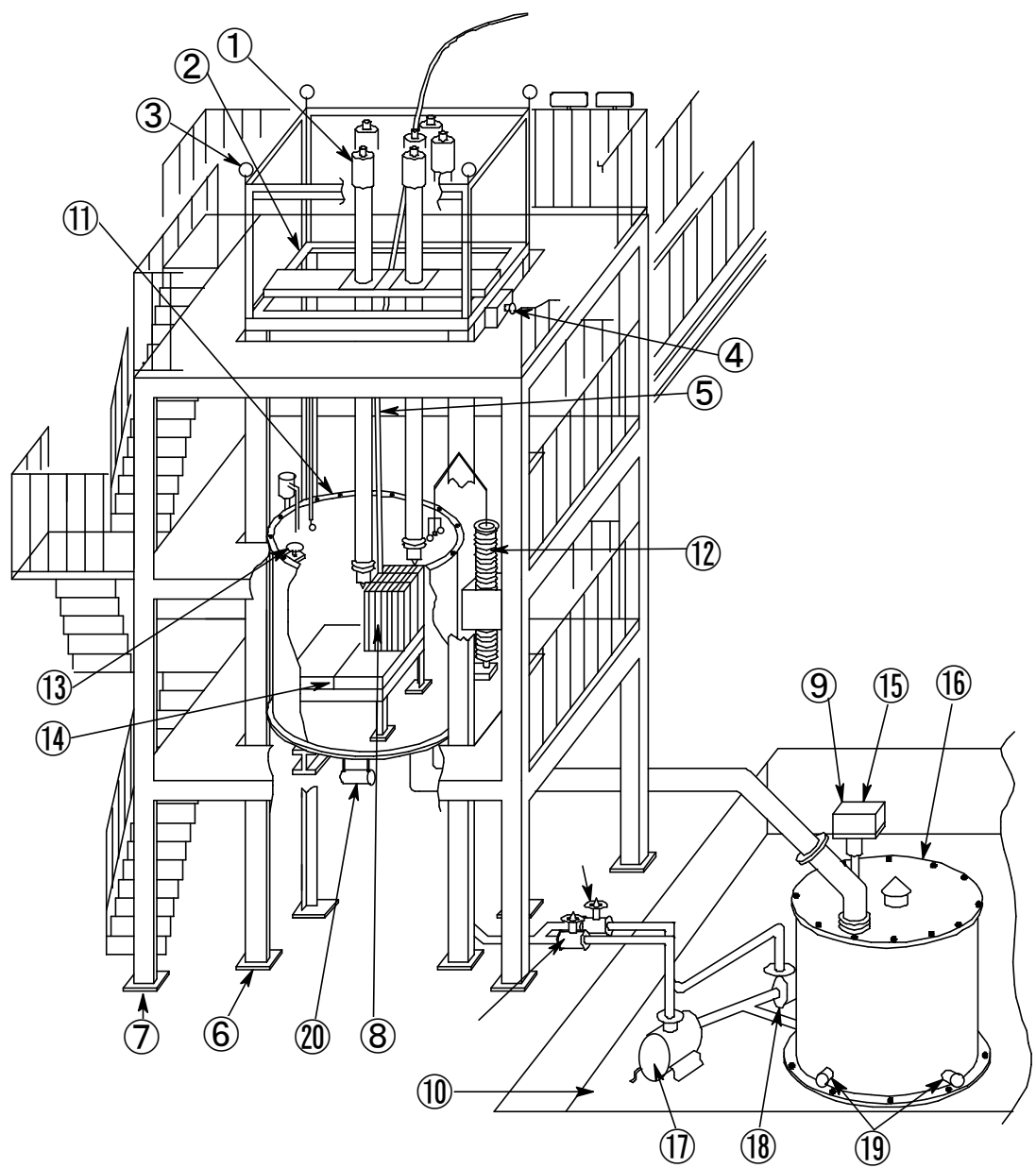


図 6-1 軽水減速架台 (C 架台) 概念図

(設置変更申請書の参考図 7)

⑳ : 炉心タンクヒータ

表 6-1 炉心タンクヒータによる温度上昇

炉心名称	列	温度係数 ( $\Delta k/k/^\circ\text{C}$ )	1 時間後の 最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ( $^\circ\text{C}$ ) <sup>a)</sup>	温度上昇 ( $^\circ\text{C}$ ) <sup>b)</sup>
C45G(5H <sub>2</sub> O)	4	$2.24 \times 10^{-6}$	1.08	3666	3.71E+03	7.83E-02	2.58E-01
C45G(5H <sub>2</sub> O)	5	$4.06 \times 10^{-5}$	4.35	3747	6.61E+03	1.58E-01	5.27E-01
C45G(6H <sub>2</sub> O)		$4.64 \times 10^{-5}$	5.41	3761	7.36E+03	1.59E-01	<b>5.36E-01</b>
C45G(7H <sub>2</sub> O)		$2.69 \times 10^{-5}$	2.56	3715	5.18E+03	1.02E-01	3.38E-01

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」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数 (1.01 倍) を掛ける

表 6-2 炉心タンクヒータによる温度上昇 (C45G(6H<sub>2</sub>O)炉心)  
誤差の影響

	1 時間後の 最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ( $^\circ\text{C}$ ) <sup>a)</sup>	温度上昇 ( $^\circ\text{C}$ ) <sup>b)</sup>	比 <sup>c)</sup>
基準 <sup>d)</sup>	5.41	3761	7.36E+03	1.59E-02	5.36E-01	—
U 重量を 6%減少	—	—	—	1.72E-02	5.79E-01	1.06
$\beta_{\text{eff}}$ を 8%減少	6.37	3762	7.99E+03	1.73E-01	5.82E-01	1.09
$\beta_{\text{eff}}$ を 8%増加	4.72	3760	6.88E+03	1.49E-01	5.01E-01	0.94
$l$ を 8%減少	5.41	3761	7.36E+03	1.59E-02	5.36E-01	1.00
$l$ を 8%増加	5.41	3761	7.36E+03	1.59E-02	5.36E-01	1.00
温度係数を 32% 減少	3.06	3725	5.61E+03	1.21E-02	4.08E-01	0.76
温度係数を 32% 増加	10.17	3803	1.03E+04	2.23E-01	1.40E-00	1.40

e) 表 6-1 と同じ

f) 表 6-1 と同じ

g) 基準の結果に対する比

h) 表 6-1 の結果と同じ



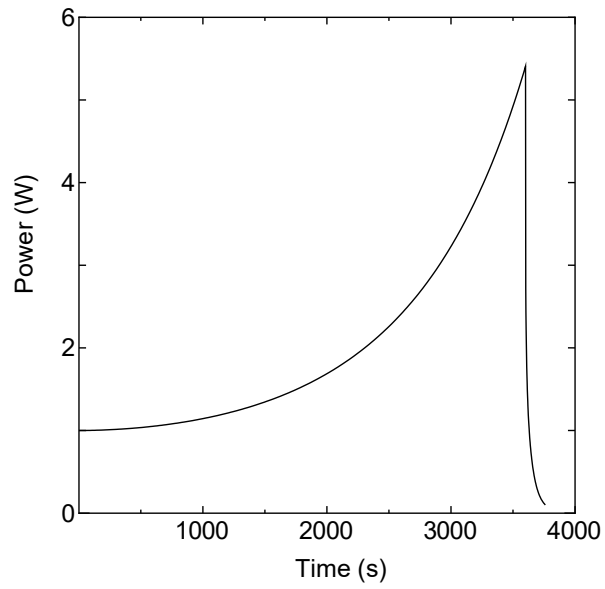


図 6-2 C45G(6H<sub>2</sub>O)炉心 出力変化  
(炉心タンクヒータによる温度上昇)

## 補足資料

### 中性子発生設備からの炉心に入射される中性子量

#### 1) パルス状中性子発生装置について

図1に炉心配置例を示す。この炉心ではターゲット（固定位置）から炉心中央まで高速中性子を導くためには、反射体の一部にボイド領域（反射体にボイド缶を入れたコリメータ）を設置したものである。

中心架台は「かよた-14,15,16」の3行3列の領域であるため、炉心はその位置の近傍に設置する必要がある。この炉心の場合ターゲットから最も近い燃料体までは6体分（ $5.53\text{cm} \times 6 = 33.2\text{cm}$ ）だけ離れている。図1の上図では燃料領域近傍に1さや分のコリメータが入っているが、図2では $3 \times 3$ （約 $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ ）のコリメータが入っている。解析では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 $30\text{cm}$ であると考え、中性子が等方に発生するとするとターゲットから燃料領域に供給される中性子量は以下のようにになる。（パルス中性子の最大発生量を申請書記載の $10^{10}(\text{n}/\text{sec})$ とする）

$$\frac{10^{10}}{4\pi \times 30^2} \times 15^2 \approx 2.0 \times 10^8 \quad (\text{個}/\text{sec})$$

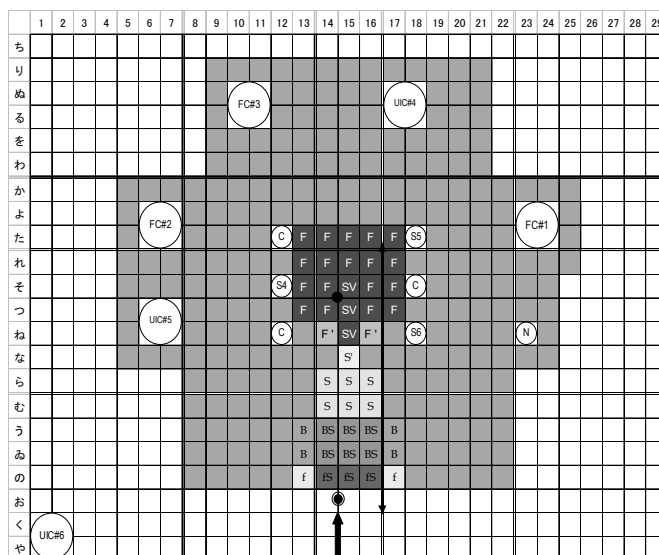


図1 パルス状中性子発生装置を用いた実験の炉心配置図

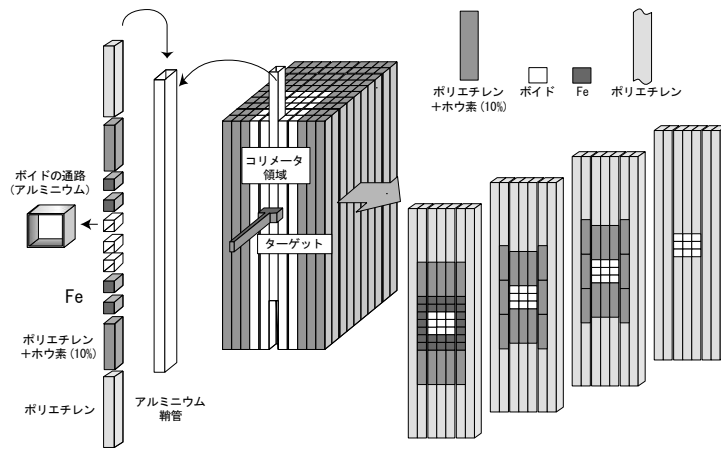


図2 加速器からの中性子を導入するための反射体コリメータ

2) 中性子発生設備について

図 3 に炉心配置例を示す。ターゲットは「い-15」の外側に設置されており（固定位置）、この炉心の場合ターゲットから最も近い燃料体までは 9 体分（ $5.53\text{cm} \times 9 = 49.8\text{cm}$ ）だけ離れている。パルス状中性子発生装置利用の場合と同様に中心架台近傍に炉心を配置しなければいけないため、このようなほぼ断面が正方形の炉心ではこれ以上炉心をターゲットに近づけて構成することはできない。

より細長い炉心を構成して炉心をターゲットに近づけるようにしたとして、ターゲットと燃料領域の距離を約 30cm（さや管で 6 体分）が最も近い状況であると考え、コリメータの大きさを  $15 \times 15\text{cm}$  であるとし、中性子がすべて前方に発生するとするとターゲットから燃料領域に供給される中性子量は以下ようになる。（パルス中性子の最大発生量を申請書記載の  $10^{11}(\text{n/sec})$  とする）

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

添付 10 の解析の ケース A では 1) のケースより大きいこの値を用い行う。

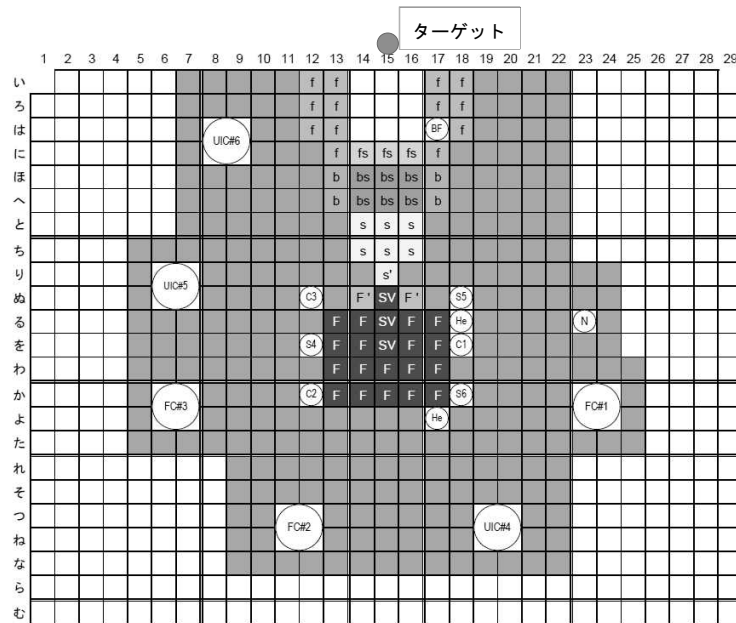


図 3 中性子発生設備を用いた実験の炉心配置図