

2021年6月17日  
京大 KUCA ヒアリング資料 1

## 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】

京都大学複合原子力科学研究所

## 添付10の解析について

### 1 運転時の異常な過渡変化

#### 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
- 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
- 2-6 炉心タンクヒータによる温度上昇

### 3 設計基準事故

「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の第2条第2項に「設計基準事故とは発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって、当該状態が発生した場合には試験研究用等原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべきもの」と記載されている。

解析は以下のような項目について取り扱う。

- (1) 反応度の異常な投入
  - (i) 燃料落下又は燃料誤装荷
- (2) 環境への放射性物質の異常な放出
  - (i) 燃料の機械的破損
  - (ii) 実験設備、実験物等の著しい損傷

判定基準は運転時の異常な過渡変化の解析での判定基に以下の項目を加える。

- ・周辺公衆の実効線量の評価値が発生事故当たり **5mSv** を超えないこと。

## 4 解析結果

### 4-1 燃料落下又は燃料誤装荷

炉心配置変更の際に燃料集合体を計画外の位置に誤って装荷した場合、炉心に反応度が投入され原子炉出力が上昇するため燃料、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。

申請書では以下のようなシナリオに従った解析を行っている。

#### (1) 解析対象炉心

固体減速炉心の「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 で選定した代表炉心の中で各燃料セルの炉心のうち燃料体 1 本当たりの反応度の大きな炉心長約 50cm の 6 種類の炉心（L5.5P-50、L4P-50、L3P-50、L2P-50、L1P-50、LL1P-50）について、燃料体 1 本を炉心に近接させて誤装荷したとき最も大きな反応度が加わる場合を調べ、6 種類の炉心のうち燃料の最高温度が最大となる炉心について申請書に記載する。（スクラム発生が早いケース）

さらに燃料体 1 本当たりの反応度の小さな炉心長約 30cm の 6 種類の炉心（L5.5P-30、L4P-30、L3P-30、L2P-30、L1P-30、LL1P-30）について、燃料体 1 本を炉心に近接させて誤装荷したとき最も小さな反応度が加わる場合を調べ、6 種類の炉心のうち燃料の最高温度が最大となる炉心について申請書に記載する。（スクラム発生が遅いケース）

#### (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、 $0.35\% \Delta k/k$

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

制御棒反応度添加率は核的制限値の最大値

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

#### (3) 初期運転条件

初期温度は室温として  $25^{\circ}\text{C}$

6 本ある制御棒のうち 3 本は全引抜き、残りの 3 本は全挿入とし、中心架台を下限とする。全引抜きの 3 本と全挿入の 3 本は同じ反応度であるとする。（3 本の反応度： $1.35/2 = 0.675\% \Delta k/k$ ）

線型出力系は指示値が 100% で  $0.1\text{W}$  となるレンジ

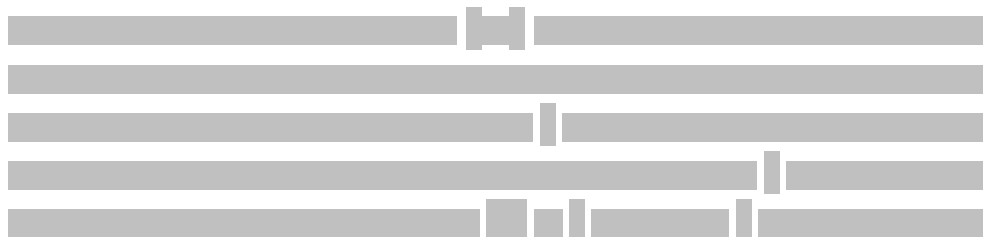
中性子源を挿入して、出力  $0.01\text{W}$  の未臨界定常状態

(4) 反応度温度係数

反応度温度係数を考慮する。

(5) 中心架台の動作についての説明

中心架台の概念図を図 7-1 に、制御室の中心架台操作盤を図 7-2 に示す。  
中心架台には A 架台炉心では 3×3、B 架台炉心では 5×5 体の燃料集合体、  
ポリエチレン反射体が装荷される。(最低でも 1 体の燃料集合体を装荷しな  
ければいけないことが申請書の本文に記載)



ストッパを通過するごとにシリン  
ダの上昇速度は遅くなるように設計されている。上昇速度とストロークはは申  
請書に以下のように記載されている。

表 7-1 設置変更申請書の本文に記載された中心架台の上昇速度

位置	ストローク (cm)	速度 (cm/s)
下限 ~ 第 2 段ストッパ	下限 ~ 約 70	3.3 以下
第 2 段ストッパ ~ 第 3 段ストッパ	約 70 ~ 約 140	1.1 以下
第 3 段ストッパ ~ 第 4 段ストッパ	約 140 ~ 約 170	0.6 以下
第 4 段ストッパ ~ 上限	約 170 ~ 約 190	0.2 以下



スクラム時にはこの油圧ポンプが停止し、さらに油圧開放弁が開くことにより  
シリンダは落下する。その際、ストッパはラチェット構造となっているためス  
トッパを外す操作を行わなくてもシリンダは下限まで下降することができる。

(6) 安全保護回路系等の動作

- ・ 3×3 の中心架台の位置は図 7-3、7-4 の各炉心の炉心配置図に示す。各炉心  
共に 1 体以上の燃料集合体が中心架台に装荷されている。
- ・ 誤ってこの炉心用の燃料集合体をもう 1 体作成してしまい、炉心のポリエチ  
レン反射体を取り出して、その位置に追加の燃料集合体を装荷したとする。燃  
料集合体の装荷位置は同じ燃料セルの炉心のうち 1 体当たりの反応度が最も  
大きい位置の場合、および最も反応度が小さい位置の場合とする。
- ・ 燃料集合体を誤装荷したときの反応度を添付書類 8 の代表炉心の解析に行っ

たものと同じ手法で求める。

計算コード：SRAC コードシステム（核データ：JENDL-4.0）

炉心計算：拡散計算コード CITATION（3次元、20群計算）

（Z方向のみ反射境界条件、XとY方向は真空境界条件）

計算結果を表7-1に示す。L5.5の燃料セルを持つ炉心の場合は、L5.5(50cm)炉心の⑧の位置が最大となり、L5.5(30cm)炉心の⑨の位置が最小となる）

・中心架台を上昇させる。

下限から第2段ストップまでの中心架台の移動では反応度には影響を及ぼさないの2段から中心架台を連続的に上昇させたとする（そこからストロークは約120cm）。上昇速度は申請書に記載した制限値の最大速度とする。

第2段～第3段まで： 長さ実測値 70.0cm、速度 1.1 cm/s

第3段～第4段まで： 長さ実測値 30.0cm、速度 0.6 cm/s

第4段～上限まで： 長さ実測値 18.8cm、速度 0.2 cm/s

中心架台の反応度についてはモンテカルロ計算コード MCNP を用い、中心架台の位置を変更したときの反応度変化を求める。L5.5(50cm)の結果を図7-8にL5.5(30cm)の結果を図7-8に示す。この計算結果を6次の多項式にフィッティングして動特性解析に用いる。

- ・中心架台を上昇させるに従って出力が上昇するが、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期系からの信号では安全保護回路系が作動しない。
- ・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。
- ・線型出力計の指示値が120%（出力が0.12W）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とする。（全引き抜きしていた2本の制御棒のみが挿入される）
- ・中心架台はスクラム信号発生後の1秒後に中心架台を上昇させるための油圧ポンプが停止して落下を開始し、スクラム信号発生後の12秒後までに時間ともに線型に負の反応度を加えるとする。（申請書に「最上位から燃料集合体の有効長さの70%に相当する105cm落下するまで12秒以下」と規定されている）。
- ・中心架台が下限となるまで解析を行う。
- ・これらの動作の間に中性子源は挿入したままとする。

## (7) 評価

積算発熱量を求め、発生した熱は全て燃料の温度上昇に用いられるとし、燃料温度の最大値を求める。

出力変化を図 7-6、図 7-9 に、またそのときの炉心の反応度を図 7-7、図 7-10 に示す。結果を表 7-2 に示す。L5.5 セルの炉心については誤装荷した燃料の反応度が最も大きい場合と最も小さい場合ともに燃料温度上昇は 10-3℃程度であり判定基準値を満たしている。

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 7-3、表 7-4 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  $\ell$  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、 $\beta_{\text{eff}}$  に誤差があった場合には燃料温度が最大 1%上昇する。 $\ell$  と反応度温度係数の誤差は結果にほとんど影響を及ぼさない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.07 倍 ( $1.06 \times 1.01 \times 1.00$ ) となるだけなので判定基準値を満たしている。

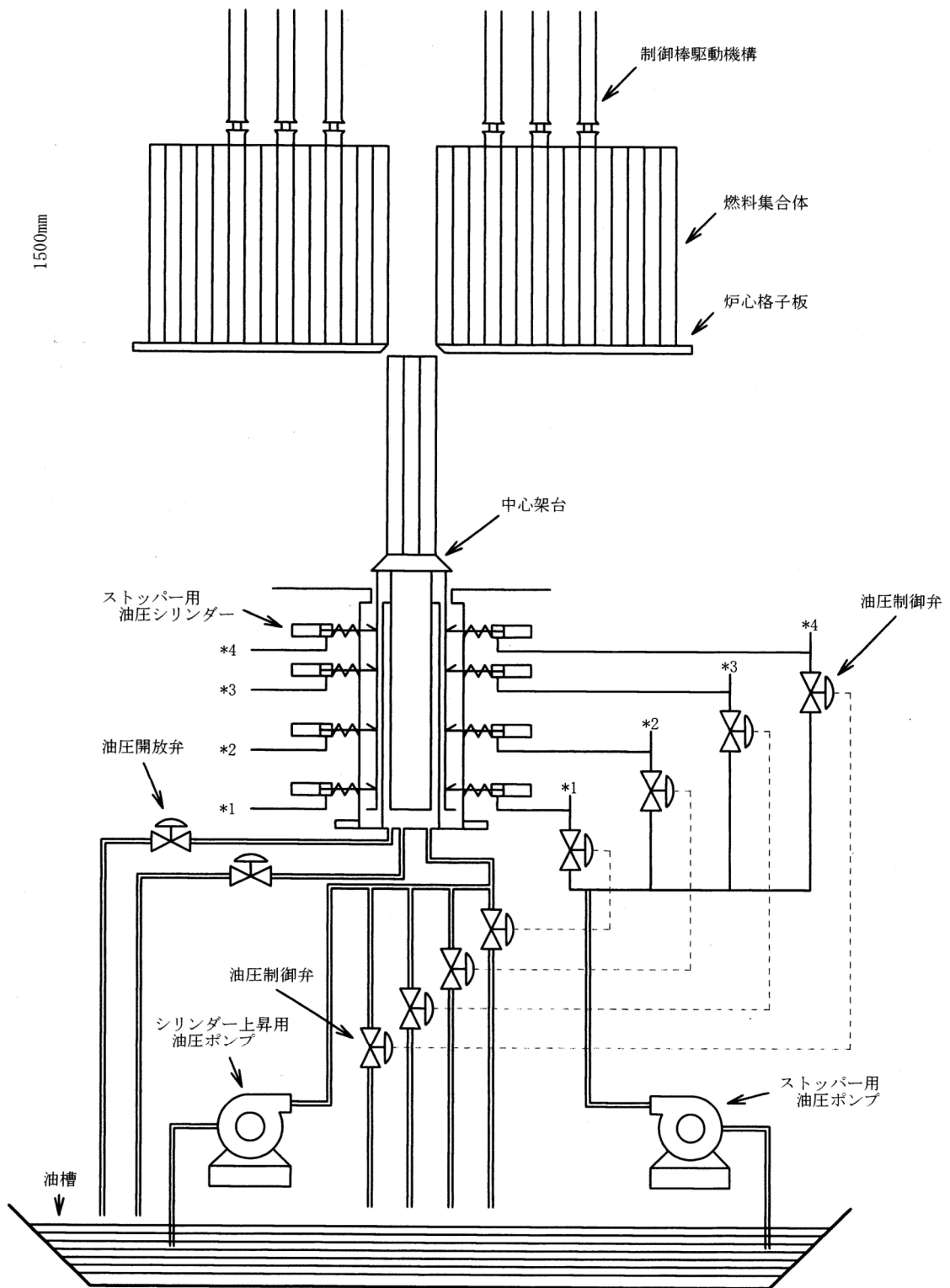
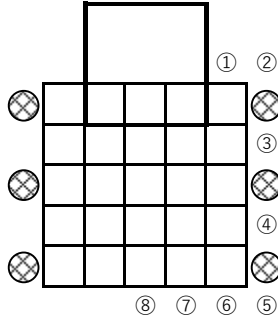


図 7-1 中心架台の概念図

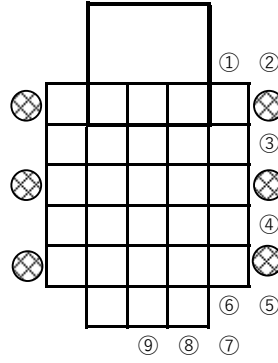




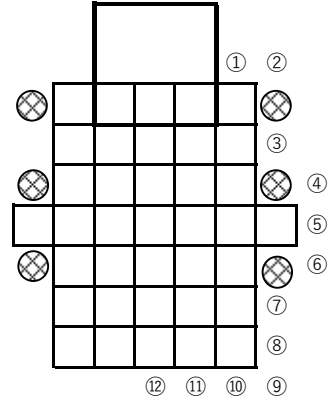
L5.5(50cm)



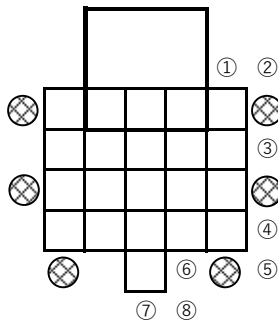
L5.5(40cm)



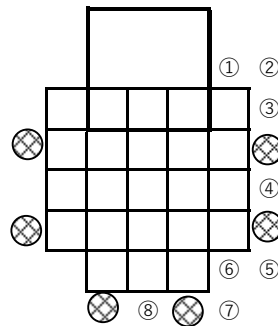
L5.5(30cm)



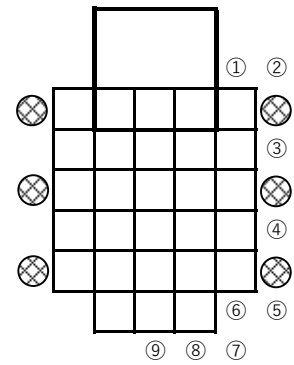
L4(50cm)



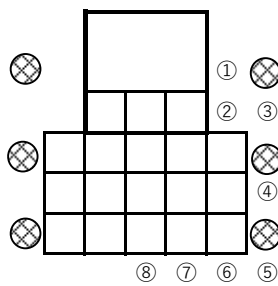
L4(40cm)



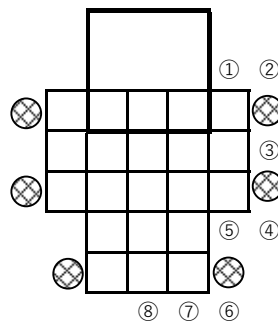
L4(30cm)



L3(50cm)



L3(40cm)



L3(30cm)

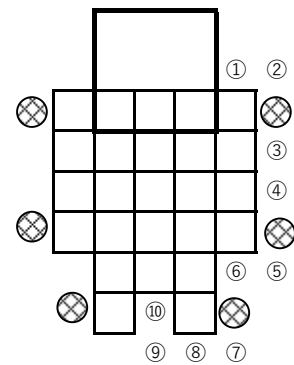
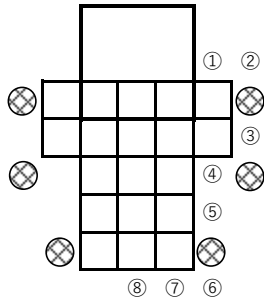


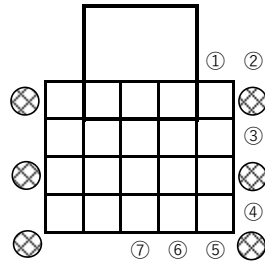
図 7-3 各炉心の燃料装荷位置 (L5.5、L4、L3 炉心)

炉心配置図の上のほうの 3×3 の黒い枠線が中心架台位置

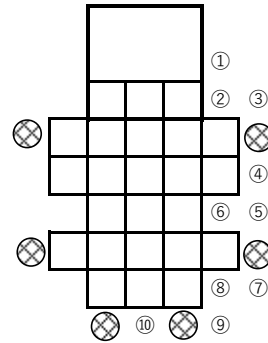
L2(50cm)



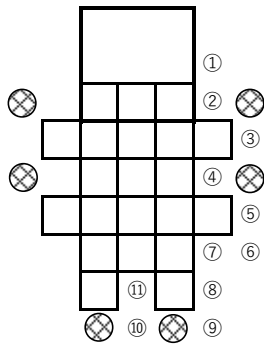
L2(40cm)



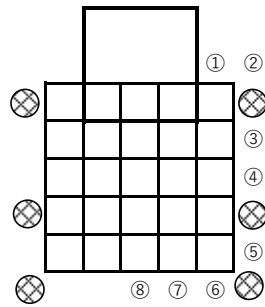
L2(30cm)



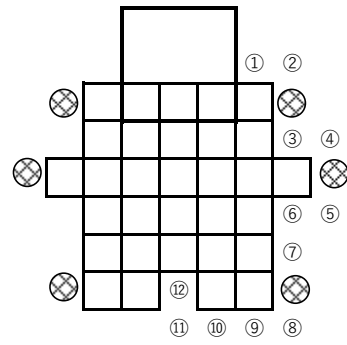
L1(50cm)



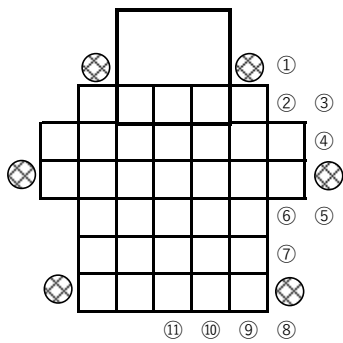
L1(40cm)



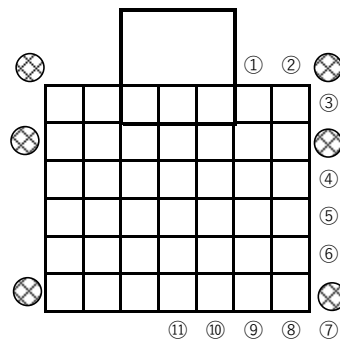
L1(30cm)



LL1(50cm)



LL1(40cm)



LL1(30cm)

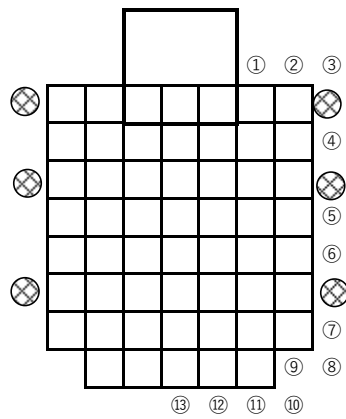


図 7-4 各炉心の燃料装荷位置 (L2、L1、LL1 炉心)  
炉心配置図の上のほうの 3×3 の黒い枠線が中心架台位置

表 7-1 燃料 1 体を追加したときの反応度 (% $\Delta k/k$ )

位置	炉心																	
	L5.5-50	L5.5-40	L5.5-30	L4-50	L4-40	L4-30	L3-50	L3-40	L3-30	L2-50	L2-40	L2-30	L1-50	L1-40	L1-30	LL1-50	LL1-40	LL1-30
①	0.422	0.326	0.181	0.632	0.522	0.320	0.715	0.634	0.448	0.774	0.791	0.482	0.785	0.644	0.452	0.566	0.526	0.298
②	0.197	0.150	0.086	0.297	0.237	<b>0.152</b>	1.200	0.305	0.215	0.383	0.418	0.717	0.714	0.395	0.300	0.400	0.347	0.197
③	0.663	0.548	0.376	0.805	0.496	0.522	0.655	0.749	0.681	0.884	0.890	0.456	0.997	0.909	0.442	0.610	0.287	0.143
④	0.663	0.708	0.218	0.649	0.777	0.627	0.884	0.775	0.798	<b>1.854</b>	0.650	0.787	0.901	1.029	0.442	0.450	0.543	0.254
⑤	0.197	0.505	0.231	0.388	0.426	0.289	0.399	1.288	0.498	1.683	0.749	0.998	<b>1.096</b>	0.559	0.559	<b>0.974</b>	0.661	0.459
⑥	0.422	0.262	0.214	<b>1.137</b>	0.796	0.571	0.826	0.403	0.801	0.481	1.322	1.257	1.053	0.620	0.685	0.739	0.446	0.456
⑦	0.760	0.243	0.433	0.526	0.401	0.266	1.446	0.612	<b>0.179</b>	0.717	1.599	0.376	1.014	0.974	0.711	0.954	0.216	0.262
⑧	<b>0.927</b>	0.401	0.226		0.641	0.420	<b>1.745</b>	0.747	0.266	0.868		0.557	0.924	1.063	<b>0.219</b>	0.380	0.339	0.306
⑨		0.488	<b>0.076</b>			0.513			0.415			<b>0.370</b>	0.438		0.326	0.531	0.531	<b>0.180</b>
⑩			0.194						0.757			0.518	0.847		0.555	0.718	0.737	0.296
⑪													0.562		0.994	0.834	0.813	0.283
⑫															0.664			0.377
⑬																		0.422

太字は同じ燃料セルの炉心での最大値

下線付き太字は同じ燃料セルの炉心での最小値

各炉心の燃料装荷位置は図 7-3、図 7-4 に示す

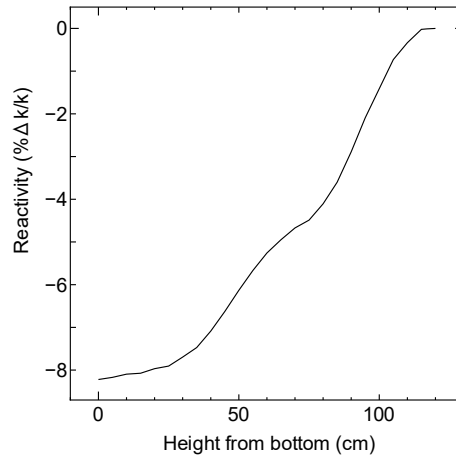


図 7-5 L5.5 (50cm) 炉心の中心架台反応度

(横軸は上限から 120cm 下の位置を起点とした中心架台の高さ、120cm で上限となる)  
 (縦軸は中心架台を上限としたときを基準としたときの各高さでの反応度)

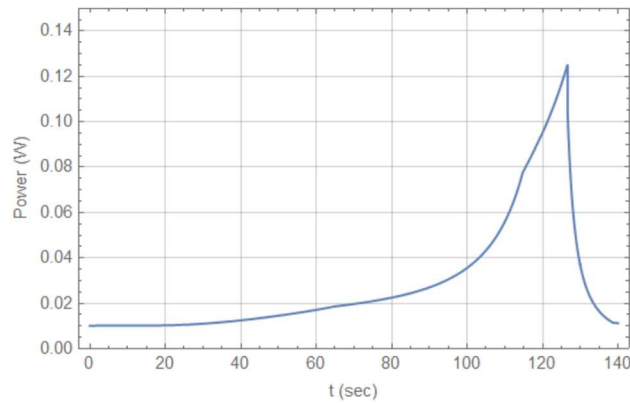


図 7-6 L5.5 (50cm) 炉心での中心架台上昇時の出力変化

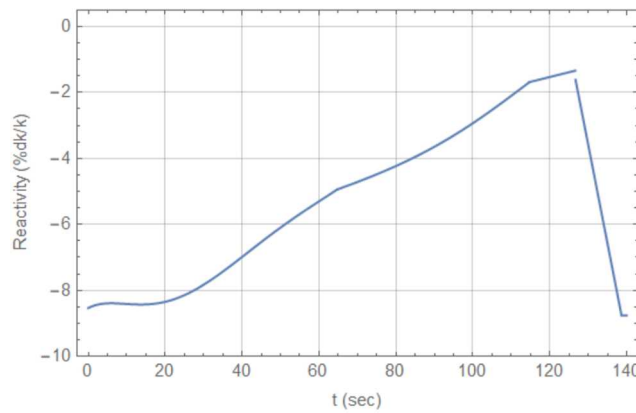


図 7-7 L5.5 (50cm) 炉心での中心架台上昇時の反応度変化

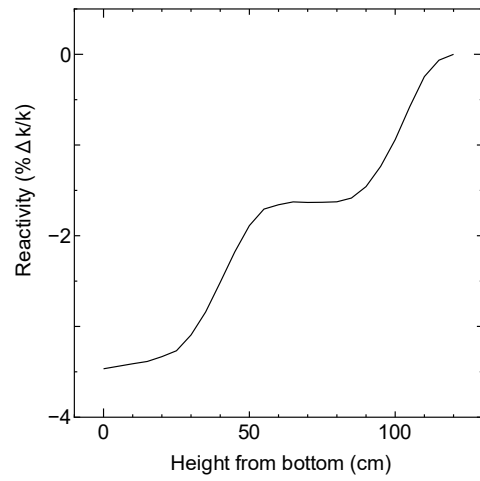


図 7-8 L5.5 (30cm) 炉心の中心架台反応度 (横軸、縦軸は図 7-5 と同じ)

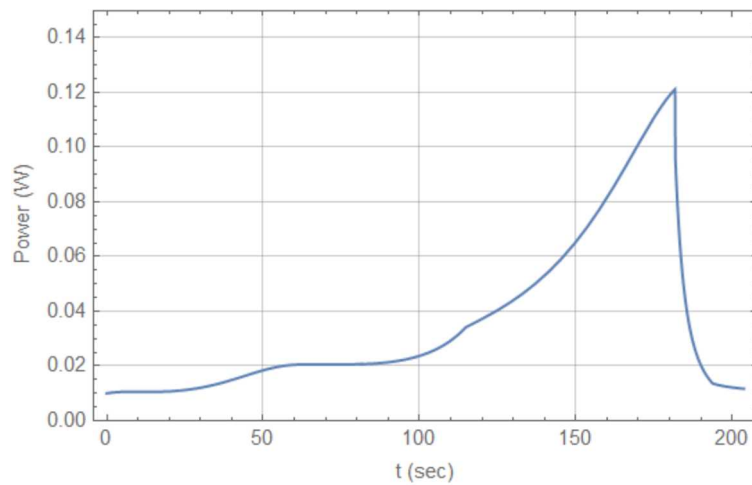


図 7-9 L5.5 (30cm) 炉心での中心架台上昇時の出力変化

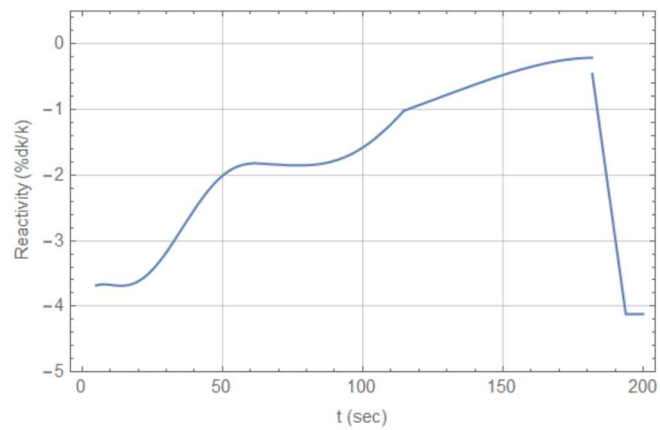


図 7-10 L5.5 (30cm) 炉心での中心架台上昇時の反応度変化

表 7-2 炉心解析結果

炉心名称	燃料装荷 反応度 (% Δ k/k)	中心架台 反応度 (% Δ k/k)	0.12W 超過 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) <sup>a)</sup>	温度上昇 (°C) <sup>b)</sup>
L5.5P-50 (最小)	0.927	8.22	125.7	3.99	4.42E-04	1.01E-03
L5.5P-30 (最小)	0.076	3.47	180.8	7.12	8.85E-04	2.03E-03
L4P-50 (最大)	1.137	11.5	118.1	3.56	3.43E-04	7.03E-04
L4P-30 (最小)	0.152	5.93	179.7	5.95	7.43E-04	1.62E-03
L3P-50 (最大)	1.745	12.7	108.3	3.36	3.07E-04	6.53E-04
L3P-30 (最小)	0.179	8.64	168.0	5.89	6.54E-04	1.36E-03
L2P-50 (最大)	1.854	17.5	109.7	4.02	2.72E-04	6.98E-04
L2P-30 (最小)	0.370	9.00	171.9	6.54	5.48E-04	1.27E-03
L1P-50 (最大)	1.096	10.7	106.3	4.03	1.57E-04	5.10E-04
L1P-30 (最小)	0.219	8.70	148.2	6.64	2.87E-04	8.79E-04
LL1P-50 (最大)	0.974	5.83	98.7	3.49	5.77E-05	2.18E-04
LL1P-30 (最小)	0.180	3.23	164.8	6.76	1.16E-04	4.60E-04

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

c) 温度上昇の最大値は L5.5P-30 (下線付き数値)

表 7-3 L5.5-50 炉心 (反応度最大) の解析結果 (誤差の影響)

	0.12W 超過 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	125.7	3.99	4.42E-04	1.01E-03	—
U 重量を 6%減少	—	—	4.69E-04	1.07E-03	1.06
$\beta_{eff}$ を 8%減少	125.2	3.95	4.39E-04	1.00E-03	0.99
$\beta_{eff}$ を 8%増加	126.2	4.01	4.45E-04	1.02E-03	1.01
$l$ を 8%減少	125.7	3.98	4.42E-04	1.01E-03	1.00
$l$ を 8%増加	125.7	3.98	4.42E-04	1.01E-03	1.00
温度係数を 32%減少	125.7	3.99	4.42E-04	1.01E-03	1.00
温度係数を 32%増加	125.7	3.99	4.42E-04	1.01E-03	1.00

a) 表 7-2 と同じ

b) 表 7-2 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 7-2 の結果と同じ

表 7-4 L5.5-30 炉心 (反応度最小) の解析結果 (誤差の影響)

	0.12W 超過 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	180.8	7.12	8.85E-04	2.03E-03	—
U 重量を 6%減少	—	—	9.38E-04	2.15E-03	1.06
$\beta_{eff}$ を 8%減少	178.7	6.95	8.63E-04	1.97E-03	0.98
$\beta_{eff}$ を 8%増加	183.3	7.36	9.14E-04	2.09E-03	1.03
$l$ を 8%減少	180.8	7.12	8.85E-04	2.03E-03	1.00
$l$ を 8%増加	180.8	7.12	8.85E-04	2.03E-03	1.00
温度係数を 32%減少	180.8	7.12	8.85E-04	2.03E-03	1.00
温度係数を 32%増加	180.8	7.12	8.85E-04	2.03E-03	1.00

a) 表 7-2 と同じ

b) 表 7-2 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 7-2 の結果と同じ

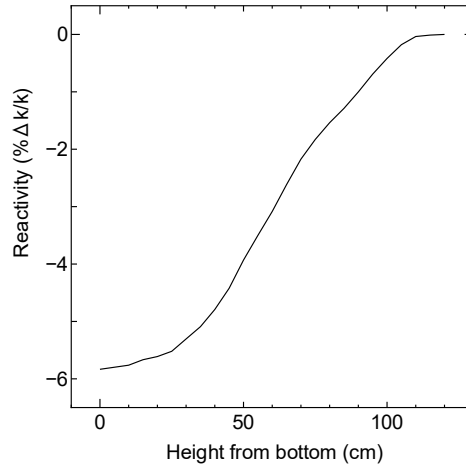


図 7-11 LL1 (50cm) 炉心の中心架台反応度 (横軸、縦軸は図 7-5 と同じ)

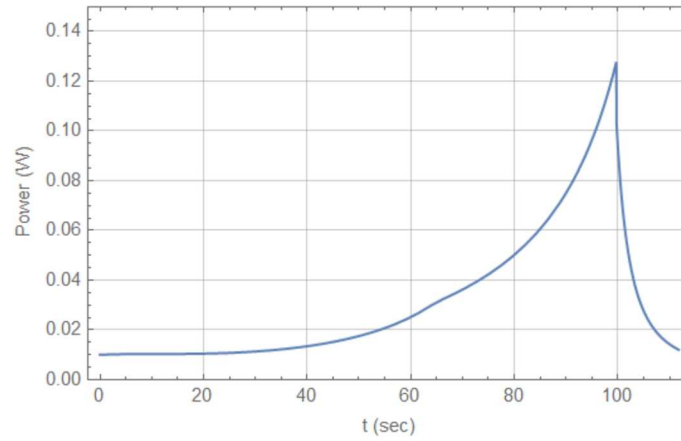


図 7-12 LL1 (50cm) 炉心での中心架台上昇時の出力変化

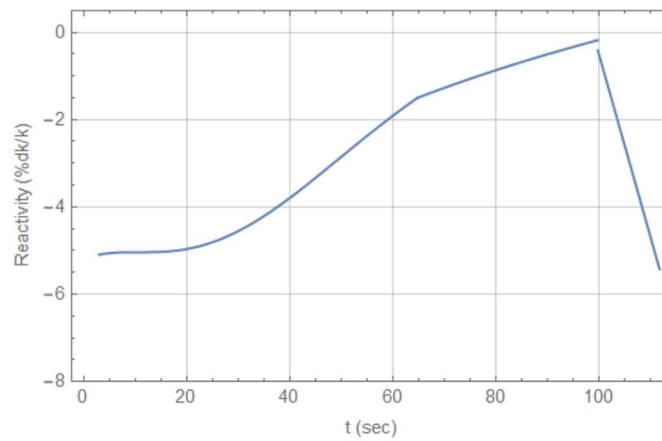


図 7-13 LL1 (50cm) 炉心での中心架台上昇時の反応度変化



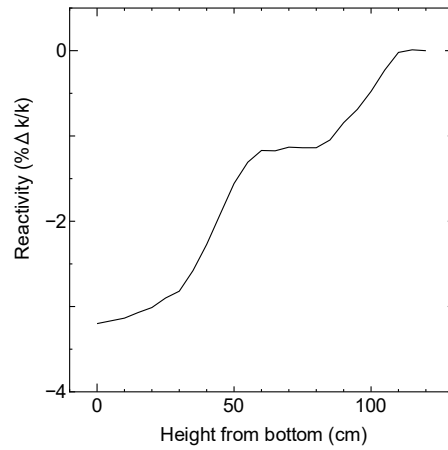


図 7-14 LL1 (30cm) 炉心の中心架台反応度 (横軸、縦軸は図 7-5 と同じ)

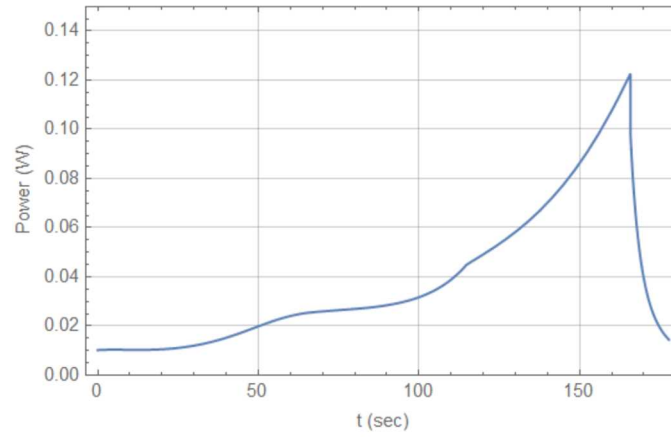


図 7-15 L5.5 (30cm) 炉心での中心架台上昇時の出力変化

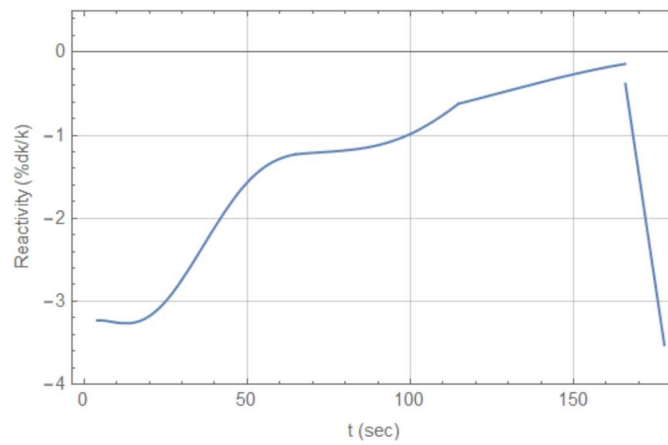


図 7-16 L5.5 (30cm) 炉心での中心架台上昇時の反応度変化

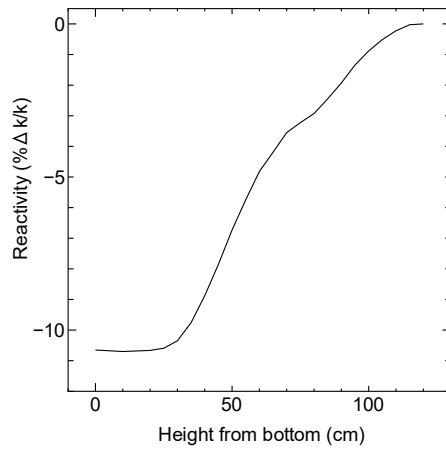


図 7-17 L1 (50cm) 炉心の中心架台反応度 (横軸、縦軸は図 7-5 と同じ)

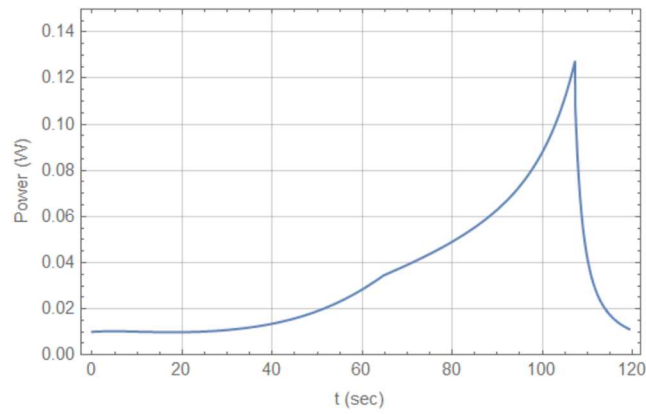


図 7-18 L1 (50cm) 炉心での中心架台上昇時の出力変化

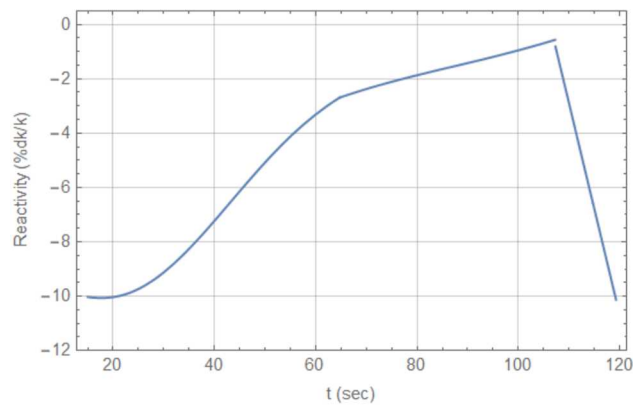


図 7-19 L1 (50cm) 炉心での中心架台上昇時の反応度変化

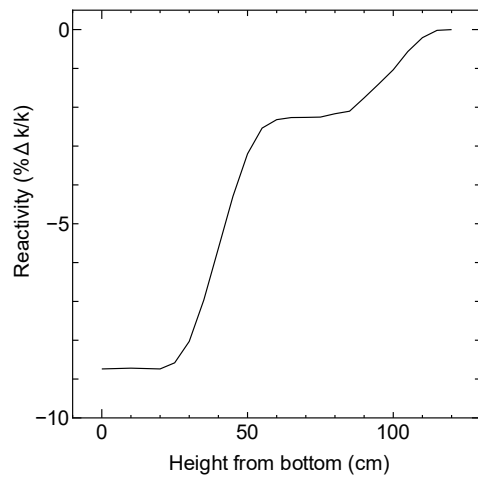


図 7-20 L1 (30cm) 炉心の中心架台反応度 (横軸、縦軸は図 7-5 と同じ)

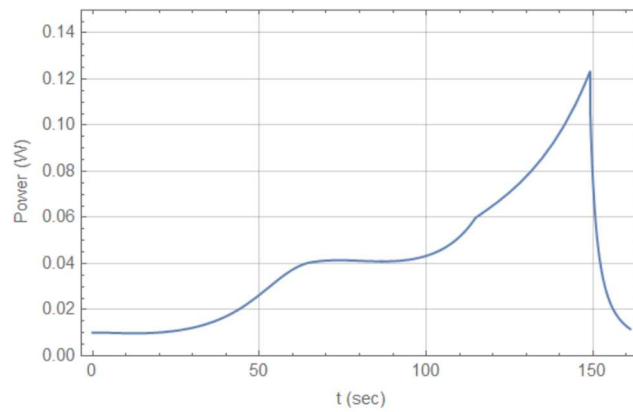


図 7-21 L1 (30cm) 炉心での中心架台上昇時の出力変化

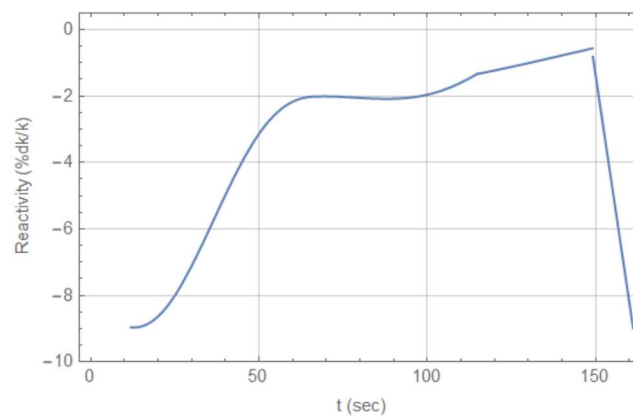


図 7-22 L1 (30cm) 炉心での中心架台上昇時の反応度変化