

2021年6月3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

「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°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°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°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°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。

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）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

原子炉起動時に運転員の誤操作又は制御棒駆動装置の誤動作等により、制御棒が連続的に引き抜かれた場合、炉心に過度の反応度投入が起こり、原子炉出力が急上昇するため燃料、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。

(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

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 % $\Delta k/k/s$

(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 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) 解析条件

- ・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。(固体減速炉心は $0.35 - 0.9 = -0.55\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心では $0.5 - 1.0 = -0.5\% \Delta k/k$ の未臨界状態となる)
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

(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

(1) 反応度等

各炉心の過剰反応度は固体減速炉心、軽水減速炉心ともに $0.05\% \Delta k/k$

各炉心の制御棒の全反応度は固体減速炉心、軽水減速炉心ともに核的制限値の最小値である $1.05\% \Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は固体減速炉心、軽水減速炉心ともに核的制限値 (全体の 1/3 以下) の最大値である $1.05 \times 1/3 = 0.35\% \Delta k/k$

(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 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) 解析条件

- ・制御棒の引き抜きにより $0.05\% \Delta k/k$ のステップ状の反応度を加える
- ・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ので、各炉心共に $1.05 - 0.35 = 0.7\% \Delta k/k$ の負の反応度が加わり出力は

低下する。(0.05-0.7=-0.65 % $\Delta k/k$ の未臨界状態となる)

- ・出力が0.1Wになるまで解析する。

(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より詳しい解析を行い、今後の補正申請により設置変更申請書に記載する。

ケースAについて固体減速炉心の結果を表1-1に示す。最も燃料温度が高くなったのがL5.5P-30(炉心高30.8cm)炉心で燃料温度上昇は0.0034°Cであり判定基準値を満たしている(出力変化を図1-1に示す)。

この炉心について初期出力を変更したときの結果を表1-3に示す。初期出力を0.001Wと1/10としたとき温度の変化は約1%とほとんど変化はない。

この炉心の燃料重量の誤差(6%)と即発中性子減衰定数の誤差(8%)を検討したときの結果を表1-4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。

即発中性子減衰定数の β_{eff} と ℓ の誤差を個別に見積もることは難しいので、 β_{eff} と ℓ が各々8%の誤差を持った場合(もう一方は誤差無し)の結果を示す。 ℓ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大19%上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約1.26倍(1.06 \times 1.19)となるだけなので判定基準値を満たしている。(0.0034°C \times 1.26=0.0043°C)

ケースAについて軽水減速炉心の結果を表1-2に示す。最も燃料温度が高くなったのがC45G(2H₂O)4列炉心で燃料温度上昇は0.000501°Cであり判定基準値を満たしている(出力変化を図1-2に示す)。

この炉心について初期出力を変更したときの結果を表1-5に示す。初期出力を0.001Wと1/10としたとき温度は5%ほど低くなっている。

この炉心の燃料重量の誤差(6%)と即発中性子減衰定数の誤差(8%)を検討したときの結果を表1-6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。 β_{eff} と ℓ 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、 ℓ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大18%上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約1.25倍(1.06 \times 1.18)となるだけなので判定基準値を満たしている。(0.000501°C \times 1.25=0.000626°C)

ケースBについて固体減速炉心の結果を表2-1に示す。最も燃料温度が高くなったのが

L5.5P-30(炉心高 30.8cm)炉心で燃料温度上昇は 0.0576°C であり判定基準値を満たしている (出力変化を図 2-1 に示す)。

この炉心の燃料重量の誤差 (6%) と即発中性子減衰定数の誤差 (8%) を検討したときの結果を表 2-3 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。 β_{eff} と ρ 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、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 10% 上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.17 倍 (1.06×1.10) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.0576^{\circ}\text{C} \times 1.17 = 0.0674^{\circ}\text{C})$

ケース B について軽水減速炉心の結果を表 2-2 に示す。最も燃料温度が高くなったのが C45G(2H₂O) 4 列炉心で燃料温度上昇は 0.0164°C であり判定基準値を満たしている (出力変化を図 2-2 に示す)。

この炉心の燃料重量の誤差 (6%) と即発中性子減衰定数の誤差 (8%) を検討したときの結果を表 2-4 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。 β_{eff} と ρ 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、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 10% 上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.17 倍 (1.06×1.10) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.0164^{\circ}\text{C} \times 1.17 = 0.0192^{\circ}\text{C})$

表 1-1 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（固体減速炉心）（ケース A）

炉心名称	炉心高 (cm)		1.2W 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	50.9		37.4	1.39	52.2	12.0	1.33E-03	3.04E-03
L5.5P-40	41.8		37.4	1.39	52.2	12.0	1.44E-03	3.32E-03
L5.5P-30	30.8		37.4	1.39	52.2	12.0	1.48E-03	<u>3.40E-03</u>
L4P-50	49.7		38.2	1.38	53.4	12.3	1.20E-03	2.69E-03
L4P-40	39.5		38.6	1.38	54.0	12.4	1.46E-03	3.21E-03
L4P-30	30.7		38.6	1.38	54.0	12.4	1.55E-03	3.38E-03
L3P-50	51.3		39.0	1.38	54.7	12.6	1.15E-03	2.45E-03
L3P-40	39.8		39.1	1.38	54.9	12.7	1.28E-03	2.74E-03
L3P-30	30.5		39.2	1.38	55.0	12.7	1.41E-03	2.93E-03
L2P-50	48.1		39.5	1.38	55.4	12.8	8.66E-04	2.22E-03
L2P-40	39.0		39.8	1.37	55.9	12.9	1.03E-03	2.27E-03
L2P-30	30.7		39.6	1.38	55.6	12.8	1.08E-03	2.50E-03
L1P-50	47.7		39.4	1.38	55.3	12.8	4.98E-04	1.61E-03
L1P-40	38.2		39.9	1.37	56.0	12.9	5.31E-04	1.34E-03
L1P-30	29.2		39.8	1.37	55.8	12.9	5.57E-04	1.71E-03
LL1P-50	49.7		39.2	1.38	55.0	12.7	2.09E-04	7.90E-04
LL1P-40	38.4		39.5	1.38	55.4	12.8	1.89E-04	6.89E-04
LL1P-30	30.0		39.4	1.38	55.2	12.8	2.18E-04	8.68E-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（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける

表 1-2 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（軽水減速炉心）（ケース A）

炉心名称	列		1.2W 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)}
C30G0	4		26.5	1.81	37.0	6.41	9.35E-05	2.37E-04
	5		26.5	1.81	37.0	6.41	9.62E-05	2.29E-04
C35G0	4		26.6	1.80	37.2	6.45	1.31E-04	2.97E-04
	5		26.5	1.80	37.1	6.43	1.30E-04	2.99E-04
C45G0	4		26.5	1.81	37.0	6.40	1.86E-04	3.70E-04
	5		26.5	1.81	37.0	6.40	1.82E-04	3.83E-04
C60G0	4		26.3	1.83	36.6	6.31	1.74E-04	3.17E-04
	5		26.3	1.83	36.6	6.31	1.72E-04	3.24E-04
C45G(2H ₂ O)	4		26.3	1.83	36.7	6.33	1.91E-04	<u>5.01E-04</u>
C45G(5H ₂ O)			25.9	1.87	36.0	6.16	1.44E-04	4.78E-04
C45G(6H ₂ O)			25.9	1.87	36.0	6.16	1.30E-04	4.28E-04
C45G(7H ₂ O)			25.9	1.87	36.0	6.18	1.19E-04	3.78E-04
C45G(10H ₂ O)			26.1	1.84	36.4	6.26	1.03E-04	2.73E-04
C45G(15H ₂ O)			26.4	1.82	36.8	6.35	9.55E-05	2.03E-04
C45G(2H ₂ O)	5		26.3	1.83	36.6	6.31	1.90E-04	4.89E-04
C45G(5H ₂ O)			25.8	1.89	35.7	6.11	1.46E-04	4.87E-04
C45G(6H ₂ O)			25.7	1.89	35.7	6.10	1.32E-04	4.44E-04
C45G(7H ₂ O)			25.8	1.89	35.7	6.11	1.20E-04	3.98E-04
C45G(10H ₂ O)			26.0	1.86	36.2	6.21	1.02E-04	2.96E-04
C45G(15H ₂ O)			26.3	1.83	36.7	6.32	9.35E-05	2.23E-04
C60G(2H ₂ O)	4		26.0	1.85	36.2	6.22	1.68E-04	4.38E-04
C60G(5H ₂ O)			25.7	1.89	35.7	6.10	1.26E-04	3.87E-04
C60G(7H ₂ O)			25.8	1.88	35.8	6.13	1.07E-04	3.03E-04
C60G(10H ₂ O)			26.0	1.86	36.2	6.21	9.49E-05	2.20E-04
C60G(15H ₂ O)			26.2	1.84	36.5	6.28	8.92E-05	1.67E-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（1.01 倍）を掛ける

表 1-3 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き (L5.5P-30(炉心高 30.8cm))

(ケース A) 初期出力の影響

	1.2W 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)
初期出力 0.01W d)	37.4	1.39	52.2	12.0	1.48E-03	3.40E-03	—
初期出力 0.001W	53.0	1.39	67.8	12.0	1.49E-03	3.42E-03	1.01

a),b)は表 1-1 と同じ

c) 0.01W の結果に対する比

d) 表 1-1 の結果と同じ

表 1-4 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き (L5.5P-30(炉心高 30.8cm))

(ケース A) 誤差の影響

	1.2W 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)	37.4	1.39	52.2	12.0	1.48E-03	3.40E-03	—
U 重量を 6%減少	—	—	—	—	1.57E-03	3.60E-03	1.06
β eff を 8%減少	32.1	1.44	44.2	9.83	1.22E-03	2.80E-03	0.82
β eff を 8%増加	43.2	1.36	61.0	14.3	1.77E-03	3.72E-03	1.19
ρ を 8% 減少	37.4	1.39	52.2	11.95	1.48E-03	3.40E-03	1.00
ρ を 8% 増加	37.4	1.39	52.2	11.96	1.48E-03	3.40E-03	1.00

a),b)は表 1-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 1-1 の結果と同じ

表 1-5 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き (C45G(2H₂O) 4 列炉心)

(ケース A) 初期出力の影響

	1.2W 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)}
初期出力 0.01W ^{d)}	26.3	1.83	36.7	6.33	1.91E-04	5.01E-04	—
初期出力 0.001W	31.8	1.82	41.9	6.01	1.81E-03	4.76E-03	0.95

a),b) 表 1-2 と同じ

c) 0.01W の結果に対する比

d) 表 1-2 の結果と同じ

表 1-6 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き (C45G(2H₂O) 4 列炉心)

(ケース A) 誤差の影響

	1.2W 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
基準	26.3	1.83	36.7	6.33	1.91E-04	5.01E-04	—
U 重量を 6%減少					2.02E-04	3.31E-04	1.06
β eff を 8%減少	24.4	2.28	33.9	5.90	1.78E-04	4.68E-04	0.93
β eff を 8%増加	28.8	1.65	41.1	7.45	2.25E-04	5.90E-04	1.18
ρ を 8%減 少	26.3	1.83	36.6	6.32	1.91E-04	5.01E-04	1.00
ρ を 8%増 加	26.3	1.82	36.7	6.33	1.91E-04	5.01E-04	1.00

a),b)は表 1-2 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 1-2 の結果と同じ

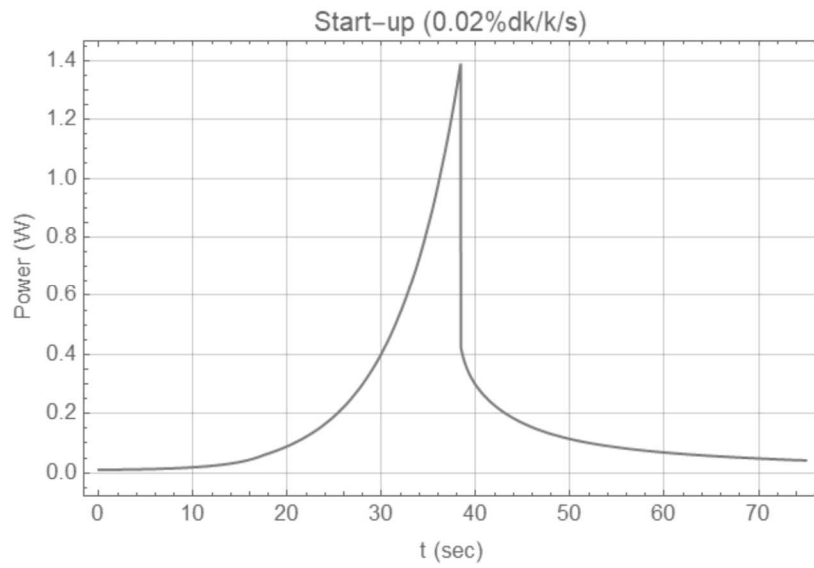


図 1-1 L5.5P-30(炉心高 30.8cm)炉心 出力変化
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケース A)

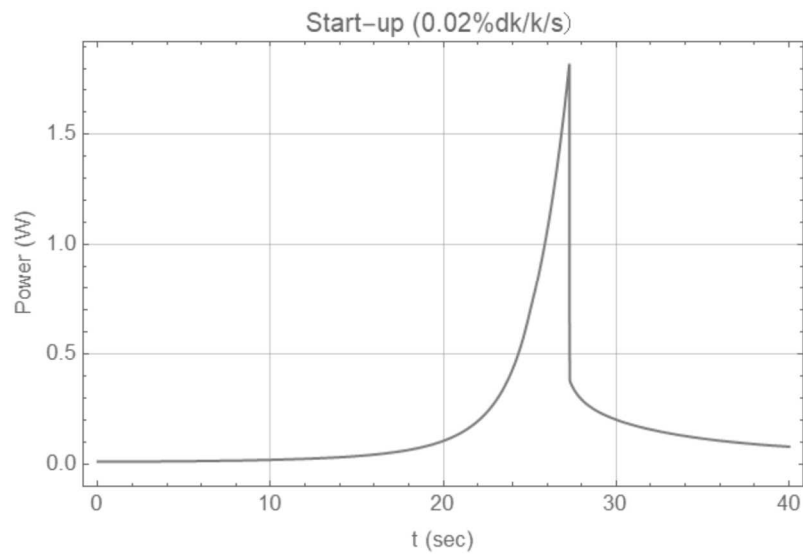


図 1-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケース A)

表 2-1 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（固体減速炉心）（ケース B）

炉心名称	炉心高 (cm)	1.2W 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	50.9	745.2	1.21	791.7	202.8	2.25E-02	5.15E-02
L5.5P-40	41.8	745.2	1.21	791.7	202.8	2.45E-02	5.64E-02
L5.5P-30	30.8	745.2	1.21	791.7	202.8	2.52E-02	5.76E-02
L4P-50	49.7	756.2	1.21	803.3	205.7	2.02E-02	4.51E-02
L4P-40	39.5	761.0	1.21	808.5	207.0	2.44E-02	5.34E-02
L4P-30	30.7	761.0	1.21	808.5	207.0	2.58E-02	5.63E-02
L3P-50	51.3	767.1	1.21	815.0	208.6	1.91E-02	4.06E-02
L3P-40	39.8	768.3	1.21	816.2	208.9	2.11E-02	4.53E-02
L3P-30	30.5	769.5	1.21	817.5	209.2	2.32E-02	4.83E-02
L2P-50	48.1	773.2	1.21	821.4	210.2	1.42E-02	3.64E-02
L2P-40	39.0	776.8	1.21	825.3	211.2	1.68E-02	3.71E-02
L2P-30	30.7	774.4	1.21	822.7	210.5	1.76E-02	4.10E-02
L1P-50	47.7	771.9	1.21	820.0	209.9	8.20E-03	2.65E-02
L1P-40	38.2	778.0	1.21	826.5	211.5	8.68E-03	2.18E-02
L1P-30	29.2	776.7	1.21	825.2	211.2	9.12E-03	2.79E-02
LL1P-50	49.7	769.4	1.21	817.4	209.2	3.45E-03	1.30E-02
LL1P-40	38.4	773.0	1.21	821.3	210.2	3.11E-03	1.13E-02
LL1P-30	30.0	771.8	1.21	820.0	209.9	3.60E-03	1.43E-02

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 2-2 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（軽水減速炉心）（ケース B）

炉心名称	列	1.2W 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)}
C30G0	4	768.3	1.21	816.2	208.9	3.05E-03	7.73E-03
	5	768.3	1.21	816.2	208.9	3.13E-03	7.47E-03
C35G0	4	770.8	1.21	818.9	209.6	4.25E-03	9.66E-03
	5	769.5	1.21	817.6	209.3	4.22E-03	9.72E-03
C45G0	4	767.2	1.21	815.0	208.6	6.06E-03	1.21E-02
	5	767.2	1.21	815.0	208.6	5.92E-03	1.25E-02
C60G0	4	759.9	1.21	807.3	206.7	5.70E-03	1.04E-02
	5	759.9	1.21	807.3	206.7	5.62E-03	1.06E-02
C45G(2H ₂ O)	4	761.1	1.21	808.6	207.0	6.25E-03	<u>1.64E-02</u>
C45G(5H ₂ O)		747.7	1.21	794.3	203.4	4.76E-03	1.58E-02
C45G(6H ₂ O)		747.7	1.21	794.3	203.4	4.29E-03	1.41E-02
C45G(7H ₂ O)		748.9	1.21	795.6	203.7	3.93E-03	1.25E-02
C45G(10H ₂ O)		756.2	1.21	803.4	205.7	3.38E-03	8.98E-03
C45G(15H ₂ O)		763.5	1.21	811.1	207.6	3.12E-03	6.65E-03
C45G(2H ₂ O)	5	759.9	1.21	807.3	206.7	6.22E-03	1.60E-02
C45G(5H ₂ O)		742.9	1.21	789.2	202.1	4.84E-03	1.61E-02
C45G(6H ₂ O)		741.6	1.21	787.9	201.8	4.36E-03	1.47E-02
C45G(7H ₂ O)		742.8	1.21	789.2	202.1	3.98E-03	1.32E-02
C45G(10H ₂ O)		751.3	1.21	798.2	204.4	3.36E-03	9.74E-03
C45G(15H ₂ O)		761.1	1.21	808.5	207.0	3.06E-03	7.29E-03
C60G(2H ₂ O)	4	752.6	1.21	799.5	204.7	5.52E-03	1.44E-02
C60G(5H ₂ O)		741.7	1.21	787.9	201.8	4.17E-03	1.28E-02
C60G(7H ₂ O)		744.1	1.21	790.5	202.4	3.54E-03	1.00E-02
C60G(10H ₂ O)		751.4	1.21	798.2	204.4	3.12E-03	7.26E-03
C60G(15H ₂ O)		757.5	1.21	804.7	206.0	2.93E-03	5.47E-03

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 2-3 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き (L5.5P-30(炉心高 30.8cm))
(ケース B) 誤差の影響

	1.2W 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)	745.2	1.21	791.7	202.8	2.52E-02	5.76E-02	—
U 重量を 6%減少	—	—	—	—	2.67E-03	6.11E-03	1.06
β eff を 8%減少	676.5	1.21	718.3	184.3	2.29E-02	5.91E-02	0.90
β eff を 8%増加	823.0	1.21	874.0	223.4	2.78E-02	7.17E-02	1.10
ρ を 8% 減少	749.6	1.21	796.0	203.8	2.53E-02	6.54E-02	1.00
ρ を 8% 増加	749.7	1.21	796.1	203.9	2.53E-02	6.54E-02	1.00

a),b)は表 2-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-1 の結果と同じ

表 2-4 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き (C45G(2H₂O) 4 列炉心)

(ケース B) 誤差の影響

	1.2W 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)	761.1	1.21	808.6	207.0	6.25E-03	1.64E-02	—
U 重量を 6%減少	—	—	—	—	6.63E-03	1.74E-02	1.06
β eff を 8%減少	687.8	1.21	730.5	187.4	5.66E-03	1.49E-02	0.91
β eff を 8%増加	836.3	1.21	888.4	227.1	6.85E-03	1.80E-02	1.10
ℓ を 8% 減少	761.9	1.21	809.3	207.2	6.25E-03	1.64E-02	1.00
ℓ を 8% 増加	761.9	1.21	809.4	207.2	6.25E-03	1.64E-02	1.00

a),b)は表 2-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-1 の結果と同じ

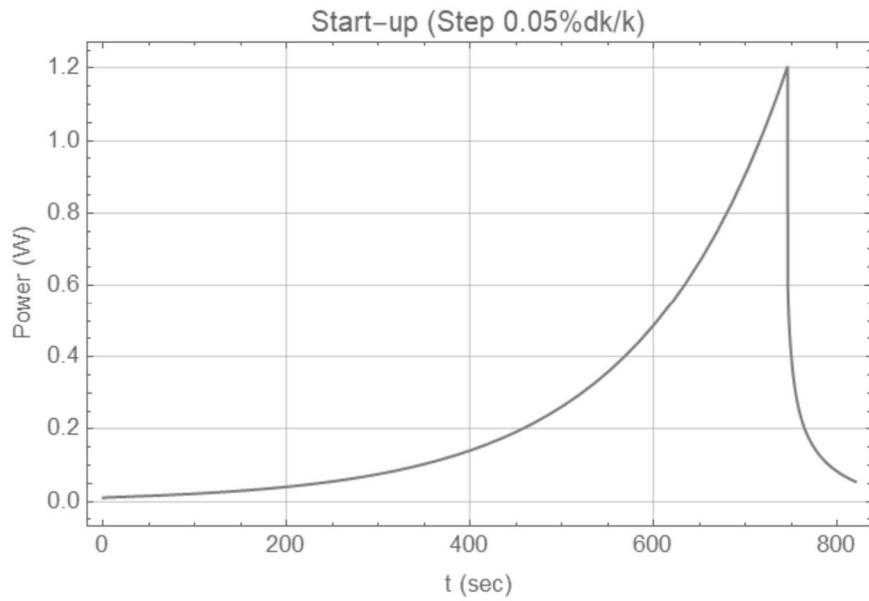


図 2-1 L5.5P-30(炉心高 30.8cm)炉心 出力変化
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケースB)

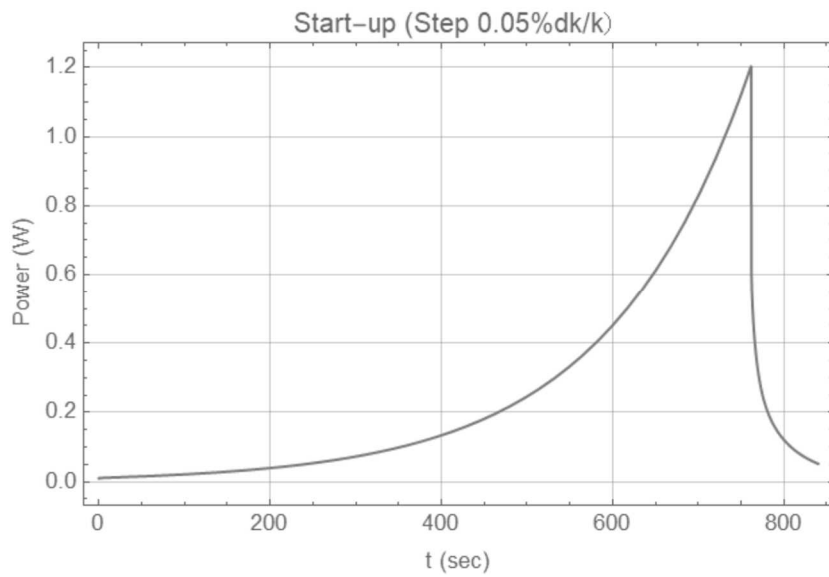


図 2-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケースB)

2-2 出力運転中の制御棒の異常な引抜き

出力運転中に運転員の誤操作又は制御棒駆動装置の誤動作等により、制御棒が連続的に引き抜かれた場合、炉心に過度の反応度投入が起こり、原子炉出力の急上昇するため燃料、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。

(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

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

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

(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 100W の臨界状態

(3) 解析条件

- ・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。
- ・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。
- ・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、固体減速炉心は $0.35 - (1.35 - 0.45) = -0.55 \% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心では $0.5 - (1.5 - 0.5) = -0.5 \% \Delta k/k$ の未臨界状態となる。
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

(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

心についてより詳しい解析を行い、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

(1) 反応度等

各炉心の過剰反応度は固体減速炉心、軽水減速炉心ともに $0.05\% \Delta k/k$

各炉心の制御棒の全反応度は固体減速炉心、軽水減速炉心ともに核的制限値の最小値である $1.05\% \Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は固体減速炉心、軽水減速炉心ともに核的制限値（全体の $1/3$ 以下）の最大値である $1.05 \times 1/3 = 0.35\% \Delta k/k$

(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 100W の臨界状態

(3) 解析条件

- ・制御棒の引き抜きにより $0.05\% \Delta k/k$ のステップ状の反応度を加える
- ・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。
- ・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、各炉心共に $1.05 - 0.35 = 0.7\% \Delta k/k$ の負の反応度が加わり出力は低下する。（ $0.05 - 0.7 = -0.65\% \Delta k/k$ の未臨界状態となる）
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

(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より詳しい解析を行い、今後の補正申請により設置変更申請書に記載する。

ケースAについて固体減速炉心の結果を表3-1に示す。最も燃料温度が高くなったのがL5.5P-30(炉心高 30.8cm)炉心で燃料温度上昇は 0.683°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図3-1に示す）。

この炉心について初期出力を変更したときの結果を表3-3に示す。初期出力を 100W から 90% まで下げても温度はほとんど変化せず。 80W まで変化させると 1% ほど低くなっている。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）と即発中性子減衰定数の誤差（8%）を検討したときの結果を表 3-4 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。 β_{eff} と ρ 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、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 7% 上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.13 倍 (1.06×1.07) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.683^{\circ}\text{C} \times 1.13 = 0.772^{\circ}\text{C})$

ケース A について軽水減速炉心の結果を表 3-2 に示す。最も燃料温度が高くなったのが C45G(2H₂O) 4 列炉心で燃料温度上昇は 0.208°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 3-2 に示す）。

この炉心について初期出力を変更したときの結果を表 3-5 に示す。初期出力を 100W から 90% まで下げても温度はほとんど変化せず。80W まで変化させると 2% ほど低くなっている。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）と即発中性子減衰定数の誤差（8%）を検討したときの結果を表 3-6 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。 β_{eff} と ρ 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、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 7% 上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.13 倍 (1.06×1.07) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.208^{\circ}\text{C} \times 1.13 = 0.235^{\circ}\text{C})$

ケース B について固体減速炉心の結果を表 4-1 に示す。最も燃料温度が高くなったのが L5.5P-30(炉心高 30.8cm) 炉心で燃料温度上昇は 0.779°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 4-1 に示す）。

この炉心について初期出力を変更したときの結果を表 4-3 に示す。初期出力を 100W から下げるにつれてスクラムに至るまでの時間が延びて積算出力が増加するため温度は上昇し初期出力を 10W まで下げると温度は 12.4°C 上昇するが、それでも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%）と即発中性子減衰定数の誤差（8%）を検討したときの結果を表 4-4 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。 β_{eff} と ρ 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、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 12% 上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.19 倍 (1.06×1.12) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(12.4^{\circ}\text{C} \times 1.19 = 14.8^{\circ}\text{C})$

ケース B について軽水減速炉心の結果を表 4-2 に示す。最も燃料温度が高くなったのが C45G(2H₂O) 4 列炉心で燃料温度上昇は 0.223°C であり判定基準値を満たしている（出力変

化を図 4-2 に示す)。

この炉心について初期出力を変更したときの結果を表 4-5 に示す。初期出力を 100W から下げるにつれてスクラムに至るまでの時間が延びて積算出力が増加するため温度は上昇し初期出力を 10W まで下げると温度は 1.68°C 上昇するが、それでも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%) と即発中性子減衰定数の誤差 (8%) を検討したときの結果を表 3-6 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。 β_{eff} と ℓ 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、 ℓ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 12% 上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.19 倍 (1.06×1.12) となるだけなので判定基準値を満たしている。(1.68°C \times 1.19 = 2.0°C)

表 3-1 出力運転中の制御棒の異常な引抜き（固体減速炉心）（ケース A）

炉心名称 a、	炉心高 (cm)	1.2W 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	50.9	4.24	127.6	374.4	2.40E+03	2.67E-01	6.10E-01
L5.5P-40	41.8	4.24	127.6	374.4	2.40E+03	2.90E-01	6.68E-01
L5.5P-30	30.8	4.24	127.6	374.4	2.40E+03	2.98E-01	6.83E-01
L4P-50	49.7	4.28	127.5	376.2	2.43E+03	2.38E-01	5.32E-01
L4P-40	39.5	4.29	127.5	377.0	2.44E+03	2.87E-01	6.29E-01
L4P-30	30.7	4.29	127.5	377.0	2.44E+03	3.04E-01	6.64E-01
L3P-50	51.3	4.32	127.4	378.0	2.45E+03	2.25E-01	4.77E-01
L3P-40	39.8	4.32	127.4	378.2	2.46E+03	2.48E-01	5.33E-01
L3P-30	30.5	4.33	127.4	378.4	2.46E+03	2.73E-01	5.68E-01
L2P-50	48.1	4.34	127.4	379.0	2.47E+03	1.67E-01	4.28E-01
L2P-40	39.0	4.35	127.4	379.6	2.48E+03	1.97E-01	4.35E-01
L2P-30	30.7	4.34	127.4	379.2	2.47E+03	2.07E-01	4.81E-01
L1P-50	47.7	4.33	127.4	378.8	2.47E+03	9.63E-02	3.12E-01
L1P-40	38.2	4.35	127.3	379.8	2.48E+03	1.02E-01	2.56E-01
L1P-30	29.2	4.35	127.4	379.6	2.48E+03	1.07E-01	3.28E-01
LL1P-50	49.7	4.32	127.4	378.4	2.46E+03	4.06E-02	1.53E-01
LL1P-40	38.4	4.34	127.4	379.0	2.47E+03	3.65E-02	1.33E-01
LL1P-30	30.0	4.33	127.4	378.8	2.47E+03	4.23E-02	1.68E-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 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける

表 3-2 出力運転中の制御棒の異常な引抜き（軽水減速炉心）（ケース A）

炉心名称	列	1.2W 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)}
C30G0	4	4.32	127.41	392.73	2.64E+03	3.86E-02	9.79E-02
	5	4.32	127.41	392.73	2.64E+03	3.97E-02	9.46E-02
C35G0	4	4.33	127.39	393.15	2.65E+03	5.38E-02	1.22E-01
	5	4.33	127.40	392.94	2.65E+03	5.34E-02	1.23E-01
C45G0	4	4.32	127.41	392.52	2.64E+03	7.67E-02	1.53E-01
	5	4.32	127.41	392.52	2.64E+03	7.49E-02	1.58E-01
C60G0	4	4.29	127.46	391.26	2.62E+03	7.24E-02	1.32E-01
	5	4.29	127.46	391.26	2.62E+03	7.13E-02	1.35E-01
C45G(2H ₂ O)	4	4.30	127.45	391.47	2.63E+03	7.93E-02	<u>2.08E-01</u>
C45G(5H ₂ O)		4.25	127.54	389.15	2.59E+03	6.06E-02	2.01E-01
C45G(6H ₂ O)		4.25	127.54	389.15	2.59E+03	5.47E-02	1.80E-01
C45G(7H ₂ O)		4.25	127.53	389.36	2.59E+03	5.01E-02	1.59E-01
C45G(10H ₂ O)		4.28	127.48	390.63	2.61E+03	4.29E-02	1.14E-01
C45G(15H ₂ O)		4.30	127.44	391.89	2.63E+03	3.95E-02	8.43E-02
C45G(2H ₂ O)	5	4.29	127.46	391.26	2.62E+03	7.90E-02	2.03E-01
C45G(5H ₂ O)		4.23	127.57	388.30	2.58E+03	6.17E-02	2.06E-01
C45G(6H ₂ O)		4.23	127.58	388.09	2.58E+03	5.56E-02	1.88E-01
C45G(7H ₂ O)		4.23	127.57	388.30	2.58E+03	5.07E-02	1.68E-01
C45G(10H ₂ O)		4.26	127.51	389.78	2.60E+03	4.28E-02	1.24E-01
C45G(15H ₂ O)		4.30	127.45	391.47	2.63E+03	3.88E-02	9.25E-02
C60G(2H ₂ O)	4	4.27	127.51	390.00	2.60E+03	7.02E-02	1.83E-01
C60G(5H ₂ O)		4.23	127.58	388.09	2.58E+03	5.33E-02	1.64E-01
C60G(7H ₂ O)		4.23	127.56	388.52	2.58E+03	4.51E-02	1.28E-01
C60G(10H ₂ O)		4.26	127.51	389.79	2.60E+03	3.98E-02	9.23E-02
C60G(15H ₂ O)		4.28	127.47	390.84	2.62E+03	3.72E-02	6.94E-02

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 3-3 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (L5.5P-30(炉心高 30.8cm))

(ケースA) 初期出力の影響

	1.2W 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)
初期出力 100W d)	4.24	127.6	374.4	2.40E+03	2.98E-01	6.83E-01	—
初期出力 94W	5.39	128.5	370.3	2.41E+03	3.00E-01	6.86E-01	1.00
初期出力 90W	6.04	129.1	367.9	2.41E+03	3.00E-01	6.86E-01	1.00
初期出力 80W	7.60	130.7	361.2	2.39E+03	2.97E-01	6.79E-01	0.99

a),b)は表 3-1 と同じ

c) 100W の結果に対する比

d) 表 3-1 の結果と同じ

表 3-4 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (L5.5P-30(炉心高 30.8cm))

(ケースA) 誤差の影響

	1.2W 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)	4.24	127.6	374.4	2.40E+03	2.98E-01	6.83E-01	—
U 重量を 6%減少	—	—	—	—	3.16E-03	7.24E-03	1.06
β_{eff} を 8%減少	4.11	128.1	361.6	2.23E+03	2.77E-01	6.34E-01	0.93
β_{eff} を 8%増加	4.65	127.1	385.6	2.58E+03	3.21E-01	7.34E-01	1.07
l を 8% 減少	4.38	127.6	373.8	2.41E+03	2.99E-01	6.84E-01	1.00
l を 8% 増加	4.38	127.6	373.8	2.41E+03	2.99E-01	6.84E-01	1.00

a),b)は表 3-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 3-1 の結果と同じ

表 3-5 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (C45G(2H₂O) 4 列炉心)

(ケース A) 初期出力の影響

	1.2W 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)
初期出力 100W d)	4.30	127.45	391.47	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	—
初期出力 94W	5.32	128.37	387.97	2.62E+03	7.92E-02	2.08E-01	1.00
初期出力 90W	5.98	128.99	385.50	2.62E+03	7.90E-02	2.07E-01	1.00
初期出力 80W	7.56	130.60	378.81	2.58E+03	7.79E-02	2.04E-01	0.98

a),b)は表 3-2 と同じ

c) 100W の結果に対する比

d) 表 3-2 の結果と同じ

表 3-6 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (C45G(2H₂O) 4 列炉心)

(ケース A) 誤差の影響

	1.2W 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)	4.30	127.45	391.47	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	—
U 重量を 6%減少	—	—	—	—	8.41E-03	2.20E-03	1.06
β _{eff} を 8%減少	4.05	127.97	378.32	2.43E+03	7.34E-02	1.93E-01	0.93
β _{eff} を 8%増加	4.60	127.01	403.96	2.82E+03	8.51E-02	2.24E-01	1.07
ℓ を 8% 減少	4.32	127.45	391.32	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	1.00
ℓ を 8% 増加	4.32	127.45	391.33	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	1.00

a),b)は表 3-2 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 3-2 の結果と同じ

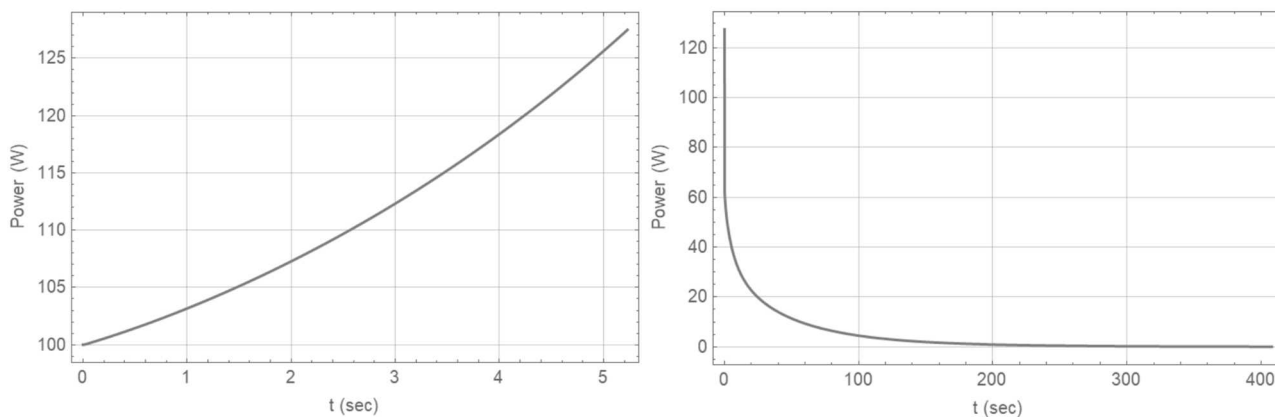


図 3-1 L5.5P-30(炉心高 30.8cm)炉心 出力変化
出力運転中の制御棒の異常な引抜き(ケース A)
(右図の横軸は制御棒挿入時からの経過時間)

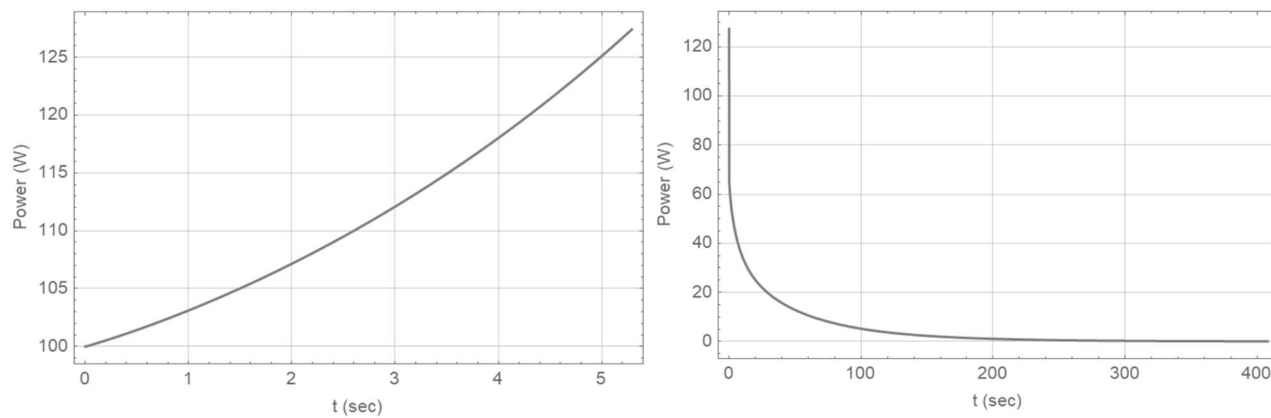


図 3-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化
出力運転中の制御棒の異常な引抜き(ケース A)
(右図の横軸は制御棒挿入時からの経過時間)

表 4-1 出力運転中の制御棒の異常な引抜き（固体減速炉心）（ケース B）

炉心名称 a、	炉心高 (cm)	1.2W 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	50.9	9.11	121.1	357.2	2.74E+03	3.04E-01	6.96E-01
L5.5P-40	41.8	9.11	121.1	357.2	2.74E+03	3.31E-01	7.62E-01
L5.5P-30	30.8	9.11	121.1	357.2	2.74E+03	3.40E-01	7.79E-01
L4P-50	49.7	9.37	121.1	359.1	2.79E+03	2.74E-01	6.11E-01
L4P-40	39.5	9.48	121.1	359.9	2.81E+03	3.31E-01	7.25E-01
L4P-30	30.7	9.48	121.1	359.9	2.81E+03	3.51E-01	7.65E-01
L3P-50	51.3	9.62	121.0	361.0	2.84E+03	2.60E-01	5.52E-01
L3P-40	39.8	9.65	121.0	361.2	2.84E+03	2.87E-01	6.17E-01
L3P-30	30.5	9.68	121.0	361.4	2.85E+03	3.16E-01	6.58E-01
L2P-50	48.1	9.77	121.0	362.0	2.87E+03	1.94E-01	4.97E-01
L2P-40	39.0	9.85	121.0	362.6	2.88E+03	2.29E-01	5.06E-01
L2P-30	30.7	9.80	121.0	362.2	2.87E+03	2.41E-01	5.59E-01
L1P-50	47.7	9.74	121.0	361.8	2.86E+03	1.12E-01	3.62E-01
L1P-40	38.2	9.88	121.0	362.8	2.89E+03	1.18E-01	2.98E-01
L1P-30	29.2	9.85	121.0	362.6	2.88E+03	1.24E-01	3.81E-01
LL1P-50	49.7	9.67	121.0	361.4	2.85E+03	4.70E-02	1.78E-01
LL1P-40	38.4	9.76	121.0	362.0	2.87E+03	4.24E-02	1.54E-01
LL1P-30	30.0	9.73	121.0	361.8	2.86E+03	4.90E-02	1.95E-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 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける

表 4-2 出力運転中の制御棒の異常な引抜き（軽水減速炉心）（ケース B）

炉心名称	列	1.2W 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)}
C30G0	4	9.65	121.0	361.2	2.84E+03	4.15E-02	1.05E-01
	5	9.65	121.0	361.2	2.84E+03	4.27E-02	1.02E-01
C35G0	4	9.71	121.0	361.6	2.86E+03	5.79E-02	1.32E-01
	5	9.68	121.0	361.4	2.85E+03	5.75E-02	1.32E-01
C45G0	4	9.63	121.0	361.0	2.84E+03	8.25E-02	1.64E-01
	5	9.63	121.0	361.0	2.84E+03	8.05E-02	1.70E-01
C60G0	4	9.46	121.1	359.7	2.81E+03	7.75E-02	1.41E-01
	5	9.46	121.1	359.7	2.81E+03	7.63E-02	1.44E-01
C45G(2H ₂ O)	4	9.49	121.1	359.9	2.81E+03	8.49E-02	<u>2.23E-01</u>
C45G(5H ₂ O)		9.17	121.1	357.6	2.75E+03	6.44E-02	2.13E-01
C45G(6H ₂ O)		9.17	121.1	357.6	2.75E+03	5.81E-02	1.91E-01
C45G(7H ₂ O)		9.20	121.1	357.8	2.76E+03	5.33E-02	1.69E-01
C45G(10H ₂ O)		9.37	121.1	359.1	2.79E+03	4.59E-02	1.22E-01
C45G(15H ₂ O)		9.54	121.1	360.3	2.82E+03	4.24E-02	9.04E-02
C45G(2H ₂ O)	5	9.46	121.1	359.7	2.81E+03	8.45E-02	2.18E-01
C45G(5H ₂ O)		9.06	121.1	356.8	2.73E+03	6.54E-02	2.18E-01
C45G(6H ₂ O)		9.03	121.1	356.6	2.72E+03	5.88E-02	1.98E-01
C45G(7H ₂ O)		9.06	121.1	356.8	2.73E+03	5.37E-02	1.78E-01
C45G(10H ₂ O)		9.26	121.1	358.2	2.77E+03	4.55E-02	1.32E-01
C45G(15H ₂ O)		9.48	121.1	359.9	2.81E+03	4.16E-02	9.91E-02
C60G(2H ₂ O)	4	9.29	121.1	358.5	2.77E+03	7.48E-02	1.95E-01
C60G(5H ₂ O)		9.03	121.1	356.6	2.73E+03	5.64E-02	1.73E-01
C60G(7H ₂ O)		9.09	121.1	357.0	2.74E+03	4.78E-02	1.35E-01
C60G(10H ₂ O)		9.26	121.1	358.2	2.77E+03	4.23E-02	9.83E-02
C60G(15H ₂ O)		9.40	121.1	359.3	2.80E+03	3.97E-02	7.42E-02

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 4-3 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (L5.5P-30(炉心高 30.8cm))

(ケースB) 初期出力の影響

	1.2W 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)
初期出力 100W d)	9.11	121.1	357.2	2.74E+03	3.40E-01	7.79E-01	—
初期出力 90W	25.3	120.8	342.1	4.42E+03	5.49E-01	1.26E+00	1.6
初期出力 50W	164.7	120.5	502.6	1.55E+04	1.93E-00	4.41E+00	5.5
初期出力 10W	590.0	120.2	935.5	3.49E+04	4.34E-00	1.24E+01	12.4

a),b)は表 4-1 と同じ

c) 100W の結果に対する比

d) 表 4-1 の結果と同じ

表 4-4 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (L5.5P-30(炉心高 30.8cm))

(ケースB) 誤差の影響

	1.2W 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)	9.11	121.1	357.2	2.74E+03	3.40E-01	7.79E-01	—
U 重量を 6%減少	—	—	—	—	3.60E-01	8.26E-01	1.06
β_{eff} を 8%減少	8.01	121.2	344.4	2.48E+03	3.08E-01	8.83E-01	0.88
β_{eff} を 8%増加	11.57	120.9	369.8	3.15E+03	3.91E-01	1.12E+00	1.12
l を 8% 減少	9.73	121.0	357.2	2.81E+03	3.48E-01	1.00E+00	1.00
l を 8% 増加	9.74	121.0	357.2	2.81E+03	3.49E-01	1.00E+00	1.00

a),b)は表 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 4-5 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (C45G(2H₂O) 4 列炉心)

(ケース B) 初期出力の影響

	1.2W 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)
初期出力 100W d)	9.49	121.1	359.9	2.81E+03	8.49E-02	2.23E-01	—
初期出力 90W	23.6	120.8	369.6	4.27E+03	1.29E-01	3.39E-01	1.51
初期出力 50W	118.5	120.7	456.7	1.17E+04	3.54E-01	9.30E-01	4.16
初期出力 10W	421.3	120.7	759.2	2.12E+04	6.41E-02	1.68E+00	7.52

a),b)は表 4-1 と同じ

c) 100W の結果に対する比

d) 表 4-1 の結果と同じ

表 4-6 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (C45G(2H₂O) 4 列炉心)

(ケース B) 誤差の影響

	1.2W 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)	9.49	121.1	359.9	2.81E+03	8.49E-02	2.23E-01	—
U 重量を 6%減少	—	—	—	—	9.00E-01	2.36E-01	1.06
β _{eff} を 8%減少	7.89	121.2	347.0	2.49E+03	7.53E-02	1.98E-01	0.88
β _{eff} を 8%増加	11.42	120.9	372.6	3.17E+03	9.56E-02	2.51E-01	1.12
ℓ を 8% 減少	9.60	121.0	359.9	2.82E+03	8.54E-02	2.24E-01	1.00
ℓ を 8% 増加	9.60	121.0	359.9	2.82E+03	8.54E-02	2.24E-01	1.00

a),b)は表 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

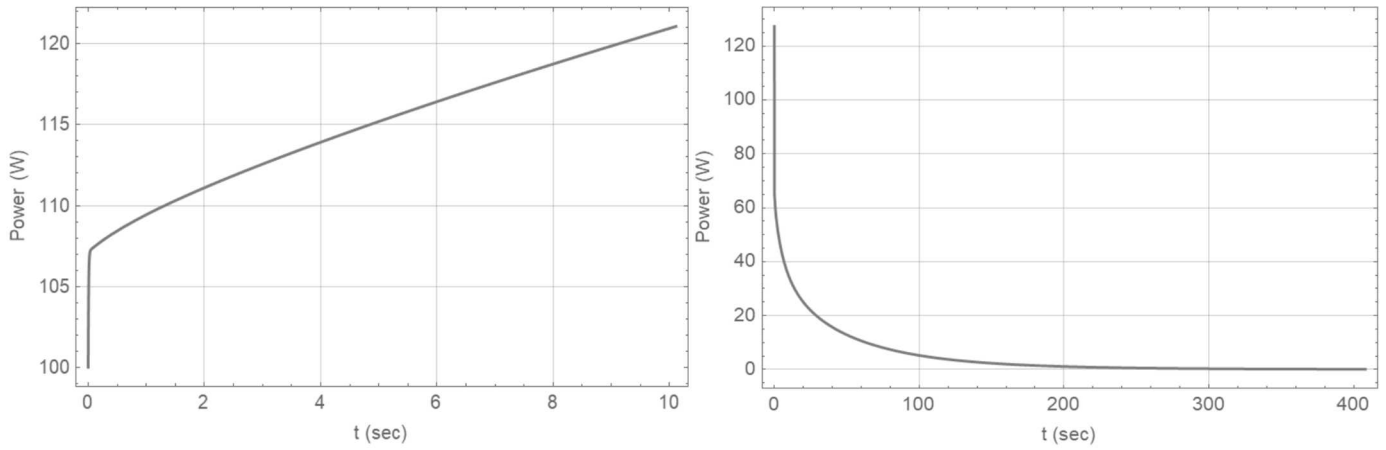


図 4-1 L5.5P-30(炉心高 30.8cm)炉心 出力変化
出力運転中の制御棒の異常な引抜き(ケース B)
(右図の横軸は制御棒挿入時からの経過時間)

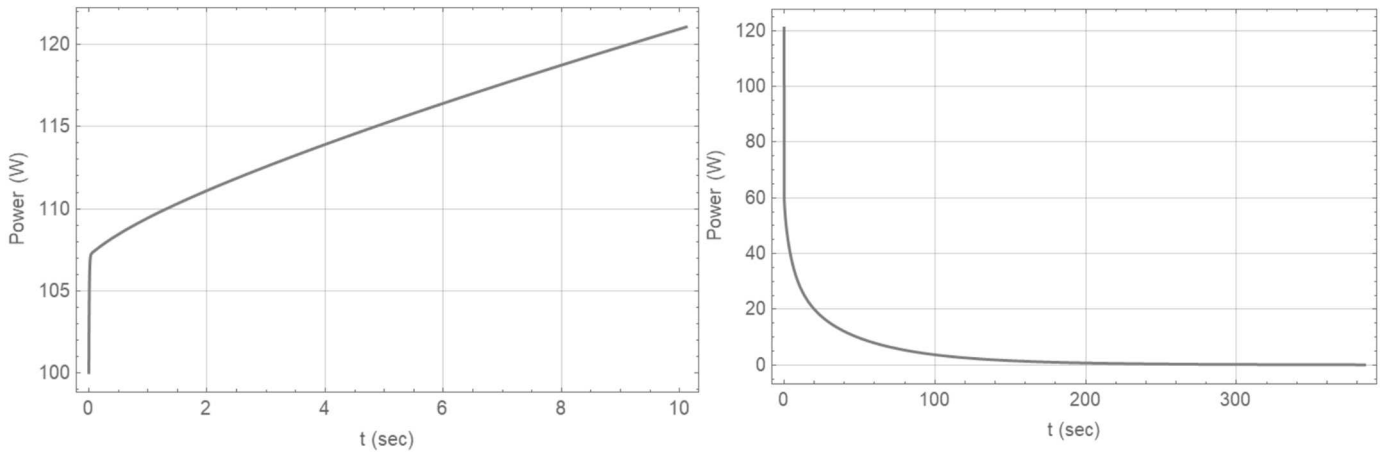


図 4-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化
出力運転中の制御棒の異常な引抜き(ケース B)
(右図の横軸は制御棒挿入時からの経過時間)

2-3 実験物の異常等による反応度の付加

原子炉の出力運転中に、炉心に直接挿入又は燃料集合体に取り付けて炉心内挿入する実験物の位置が変化した場合、炉心に反応度が印加され原子炉出力が急上昇するため燃料、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。

(1) 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、炉心に負の反応度を有する実験物を装荷しているとしたとき、実験物の落下により燃料の最高温度が最大となる炉心についてより詳しい解析を行い、今後の補正申請により設置変更申請書に記載する。

(2) 反応度等

実験物が取り付けられていない状態での各炉心の過剰反応度

固体減速炉心は $0.35\% \Delta k/k$

軽水減速炉心は $0.5\% \Delta k/k$

実験物の反応度(取り付けることにより負の反応度が加わる試料)

固体減速炉心は絶対値で $0.35\% \Delta k/k$

軽水減速炉心は絶対値で $0.5\% \Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値

余剰反応度がゼロの炉心であるので $1.0\% \Delta k/k$

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

$1.0 \times 1/3\% \Delta k/k$

(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

線型出力計は指示値が 100%で 100W となるレンジ

制御棒はすべて引き抜いて出力 1W の臨界状態

(4) スクラム信号発生

- ・炉心に取り付けていた実験物が炉心から落下し、固体減速炉心では $+0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心では $+0.5\% \Delta k/k$ の反応度がステップ状に加わる。
- ・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。
- ・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、 $-2/3\% \Delta k/k$ の未臨界度となる。

- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

固体減速炉心の結果を表 5-1 に示す。最も燃料温度が高くなったのが L5.5P-30(炉心高 30.8cm)炉心で燃料温度上昇は 0.558℃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%）と即発中性子減衰定数の誤差（8%）を検討したときの結果を表 5-3 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。 β_{eff} と ℓ 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、 ℓ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 18%上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.15 倍（ 1.06×1.18 ）となるだけなので判定基準値を満たしている。（ $0.558^\circ\text{C} \times 1.15 = 0.642^\circ\text{C}$ ）

軽水減速炉心の結果を表 5-2 に示す。最も燃料温度が高くなったのが C45G(2H₂O) 4 列炉心で燃料温度上昇は 0.139℃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）。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）と即発中性子減衰定数の誤差（8%）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。 β_{eff} と ℓ 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、 ℓ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大 19%上昇する。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.26 倍（ 1.06×1.19 ）となるだけなので判定基準値を満たしている。（ $0.139^\circ\text{C} \times 1.25 = 0.175^\circ\text{C}$ ）

表 5-1 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心）

炉心名称 a、	炉心高 (cm)	1.2W 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	50.9	26.2	139.0	358.9	1.96E+03	2.18E-01	4.99E-01
L5.5P-40	41.8	26.2	139.0	358.9	1.96E+03	2.37E-01	5.46E-01
L5.5P-30	30.8	26.2	139.0	358.9	1.96E+03	2.44E-01	5.58E-01
L4P-50	49.7	27.0	138.4	363.6	2.02E+03	1.98E-01	4.42E-01
L4P-40	39.5	27.4	138.2	365.7	2.04E+03	2.40E-01	5.26E-01
L4P-30	30.7	27.4	138.2	365.6	2.04E+03	2.54E-01	5.54E-01
L3P-50	51.3	27.9	137.9	368.2	2.07E+03	1.89E-01	4.02E-01
L3P-40	39.8	28.0	137.8	368.8	2.07E+03	2.09E-01	4.50E-01
L3P-30	30.5	28.1	137.7	369.3	2.08E+03	2.31E-01	4.80E-01
L2P-50	48.1	28.4	137.5	370.8	2.10E+03	1.42E-01	3.63E-01
L2P-40	39.0	28.7	137.4	372.4	2.11E+03	1.68E-01	3.71E-01
L2P-30	30.7	28.5	137.5	371.3	1.46E+03	1.22E-01	2.83E-01
L1P-50	47.7	28.3	137.6	370.2	2.09E+03	8.16E-02	2.64E-01
L1P-40	38.2	28.8	137.3	372.8	2.12E+03	8.69E-02	2.19E-01
L1P-30	29.2	28.7	137.4	372.3	2.11E+03	9.12E-02	2.79E-01
LL1P-50	49.7	28.1	137.8	369.1	2.08E+03	3.43E-02	1.29E-01
LL1P-40	38.4	28.4	137.6	370.7	2.09E+03	3.10E-02	1.13E-01
LL1P-30	30.0	28.3	137.6	370.2	2.09E+03	3.58E-02	1.42E-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 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける

表 5-2 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心）

炉心名称	列	1.2W 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)}
C30G0	4	8.54	180.2	474.0	1.78E+03	2.59E-02	6.57E-02
	5	8.54	180.2	473.9	1.78E+03	2.66E-02	6.35E-02
C35G0	4	8.64	179.4	475.4	1.79E+03	3.62E-02	8.24E-02
	5	8.59	179.8	474.7	1.78E+03	3.59E-02	8.27E-02
C45G0	4	8.52	180.4	473.4	1.77E+03	5.15E-02	1.02E-01
	5	8.52	180.4	473.5	1.77E+03	5.03E-02	1.06E-01
C60G0	4	8.26	182.5	469.6	1.74E+03	4.81E-02	8.75E-02
	5	8.26	182.5	469.6	1.74E+03	4.74E-02	8.96E-02
C45G(2H ₂ O)	4	8.29	182.2	470.2	1.75E+03	5.28E-02	<u>1.39E-01</u>
C45G(5H ₂ O)		7.81	186.5	462.9	1.70E+03	3.97E-02	1.31E-01
C45G(6H ₂ O)		7.80	186.5	462.9	1.70E+03	3.58E-02	1.18E-01
C45G(7H ₂ O)		7.85	186.1	463.6	1.70E+03	3.28E-02	1.04E-01
C45G(10H ₂ O)		8.11	183.7	467.5	1.73E+03	2.84E-02	7.55E-02
C45G(15H ₂ O)		8.38	181.5	471.5	1.76E+03	2.64E-02	5.63E-02
C45G(2H ₂ O)	5	8.25	182.5	469.5	1.74E+03	5.25E-02	1.35E-01
C45G(5H ₂ O)		7.63	188.1	460.3	1.68E+03	4.02E-02	1.34E-01
C45G(6H ₂ O)		7.59	188.6	459.7	1.67E+03	3.61E-02	1.22E-01
C45G(7H ₂ O)		7.63	188.2	460.3	1.68E+03	3.30E-02	1.09E-01
C45G(10H ₂ O)		7.93	185.3	464.9	1.71E+03	2.81E-02	8.15E-02
C45G(15H ₂ O)		8.29	182.2	470.1	1.75E+03	2.58E-02	6.16E-02
C60G(2H ₂ O)	4	7.99	184.8	465.6	1.72E+03	4.63E-02	1.21E-01
C60G(5H ₂ O)		7.60	188.5	459.8	1.67E+03	3.46E-02	1.06E-01
C60G(7H ₂ O)		7.68	187.6	461.0	1.68E+03	2.94E-02	8.32E-02
C60G(10H ₂ O)		7.95	185.2	465.0	1.71E+03	2.61E-02	6.07E-02
C60G(15H ₂ O)		8.17	183.2	468.3	1.73E+03	2.46E-02	4.60E-02

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 5-3 実験物の異常等による反応度の付加 (L5.5P-30(炉心高 30.8cm))
誤差の影響

	1.2W 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)	26.2	139.0	358.9	1.96E+03	2.44E-01	5.58E-01	—
U 重量を 6%減少	—	—	—	—	2.59E-01	5.91E-01	1.06
β_{eff} を 8%減少	20.8	143.9	326.3	1.64E+03	2.03E-01	4.65E-01	0.83.
β_{eff} を 8%増加	32.4	135.4	389.1	2.32E+03	2.88E-01	6.60E-01	1.18
ℓ を 8% 減少	26.4	138.9	357.9	1.97E+03	2.44E-01	5.59E-01	1.00
ℓ を 8% 増加	26.4	138.8	358.0	1.97E+03	2.44E-01	5.59E-01	1.00

a),b)は表 5-2 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 5-2 の結果と同じ

表 5-4 実験物の異常等による反応度の付加 (C45G(2H₂O) 4 列炉心)
誤差の影響

	1.2W 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)	8.29	182.2	470.2	1.75E+03	5.28E-02	1.39E-01	—
U 重量を 6%減少	—	—	—	—	5.60E-01	1.47E-01	1.06
β _{eff} を 8%減少	5.66	215.3	430.2	1.48E+03	4.46E-02	1.17E-01	0.84
β _{eff} を 8%増加	11.31	164.6	510.8	2.08E+03	6.27E-02	1.65E-01	1.19
ℓ を 8% 減少	8.31	182.0	469.5	1.75E+03	5.27E-02	1.38E-01	1.00
ℓ を 8% 増加	8.33	181.9	469.7	1.75E+03	5.28E-02	1.39E-01	1.00

a),b)は表 5-2 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 5-2 の結果と同じ

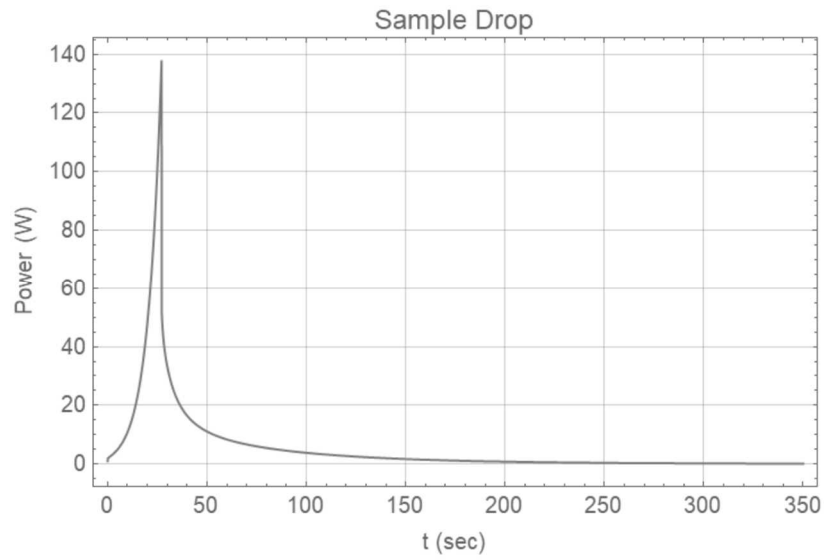


図 5-1 L5.5P-30(炉心高 30.8cm)炉心 出力変化
 実験物の異常等による反応度の付加)

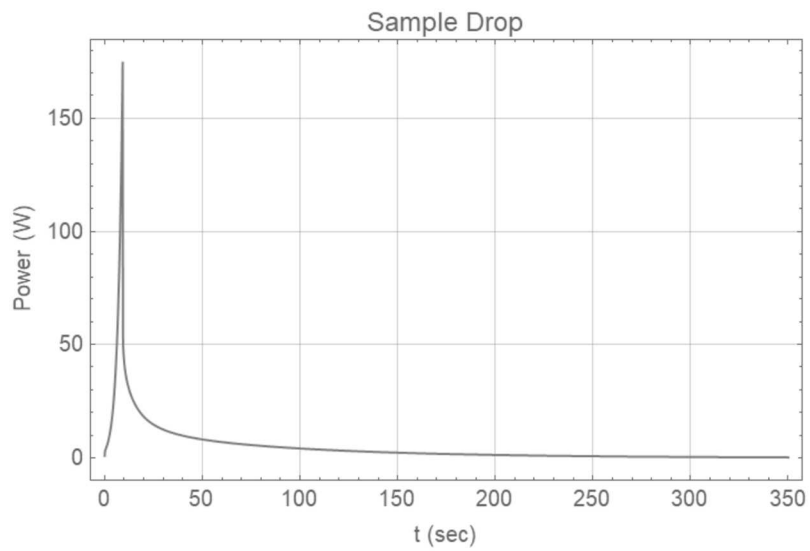


図 5-2 C45G(2H₂O) 4列炉心 出力変化
 実験物の異常等による反応度の付加)

【燃料温度の算出方法について】

添付書類 8 で取り上げたすべての代表炉心について臨界解析に用いた SRAC の CITATION により炉心内での発熱分布を求めた。燃料領域での平均値と最大値の比を算出した結果を表 A-1 に示す。

以下のように過渡解析の温度の評価を行うこととする。

- ① 各炉心について、出力分布の平均値から得られた温度に表 A-1 の各炉心の「最大値／平均値」を掛ける。
- ② 「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）の資料 2-2（50 ページ）で示したとおり、燃料板内の出力分布を考慮するために①の結果に固体減速炉心では 1.09 倍（ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）、軽水減速炉心では 1.01 倍の値を掛ける。
- ③ ②より得られた温度を判断基準と比較する。

表 A-1 各炉心の出力の最大値と平均値の比

	炉心	最大値／平均値 (CITATION 結果)
固体減速炉心	LL1 (30cm)	3.23
	LL1 (40cm)	2.96
	LL1 (50cm)	3.07
	L1 (30cm)	2.81
	L1 (40cm)	2.31
	L1 (50cm)	2.97
	L2 (30cm)	2.13
	L2 (40cm)	2.03
	L2 (50cm)	2.35
	L3 (30cm)	1.91
	L3 (40cm)	1.97
	L3 (50cm)	1.95
	L4 (30cm)	2.00
	L4 (40cm)	2.01
	L4 (50cm)	2.05
	L5.5 (30cm)	2.10
	L5.5 (40cm)	2.11
	L5.5 (50cm)	2.10
軽水減速炉心	C30G0 (4 列)	2.51
	C30G0 (5 列)	2.36
	C35G0 (4 列)	2.25
	C35G0 (5 列)	2.28
	C45G0 (4 列)	1.97
	C45G0 (5 列)	2.09
	C60G0 (4 列)	1.80
	C60G0 (5 列)	1.87
	C45G2 (4 列)	2.60
	C45G5 (4 列)	3.28
	C45G6 (4 列)	3.26
	C45G7 (4 列)	3.14

	C45G10 (4 列)	2.63
	C45G15 (4 列)	2.11
	C45G2 (5 列)	2.55
	C45G5 (5 列)	3.30
	C45G6 (5 列)	3.34
	C45G7 (5 列)	3.28
	C45G10 (5 列)	2.87
	C45G15 (5 列)	2.36
	C60G2 (4 列)	2.58
	C60G5 (4 列)	3.04
	C60G7 (4 列)	2.80
	C60G10 (4 列)	2.30
	C60G15 (4 列)	1.85

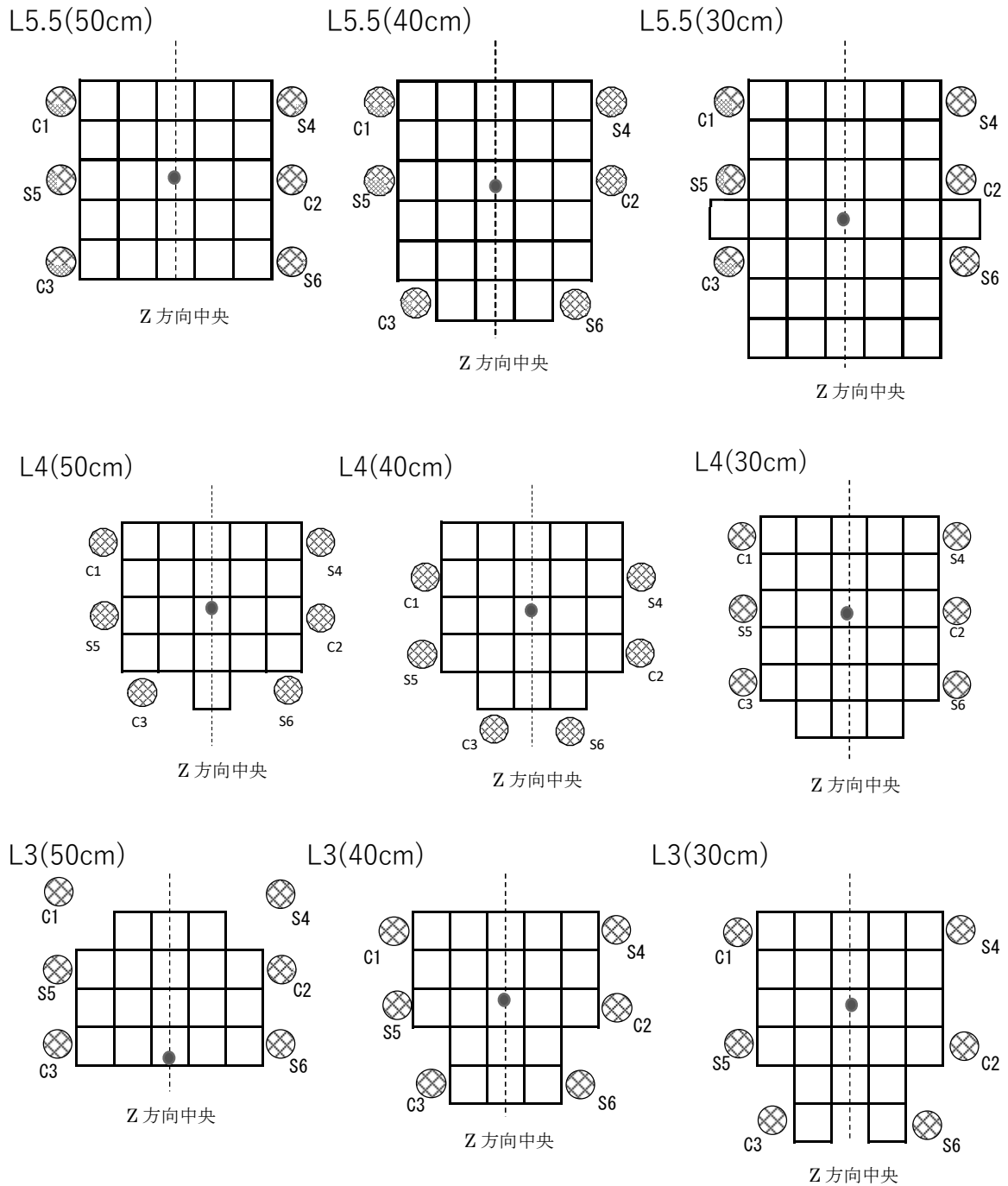


図 A-1 炉心配置図 (L5.5P、L4P、L3P)
 (炉心内丸印が出力分布が最大となる点
 z 方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)

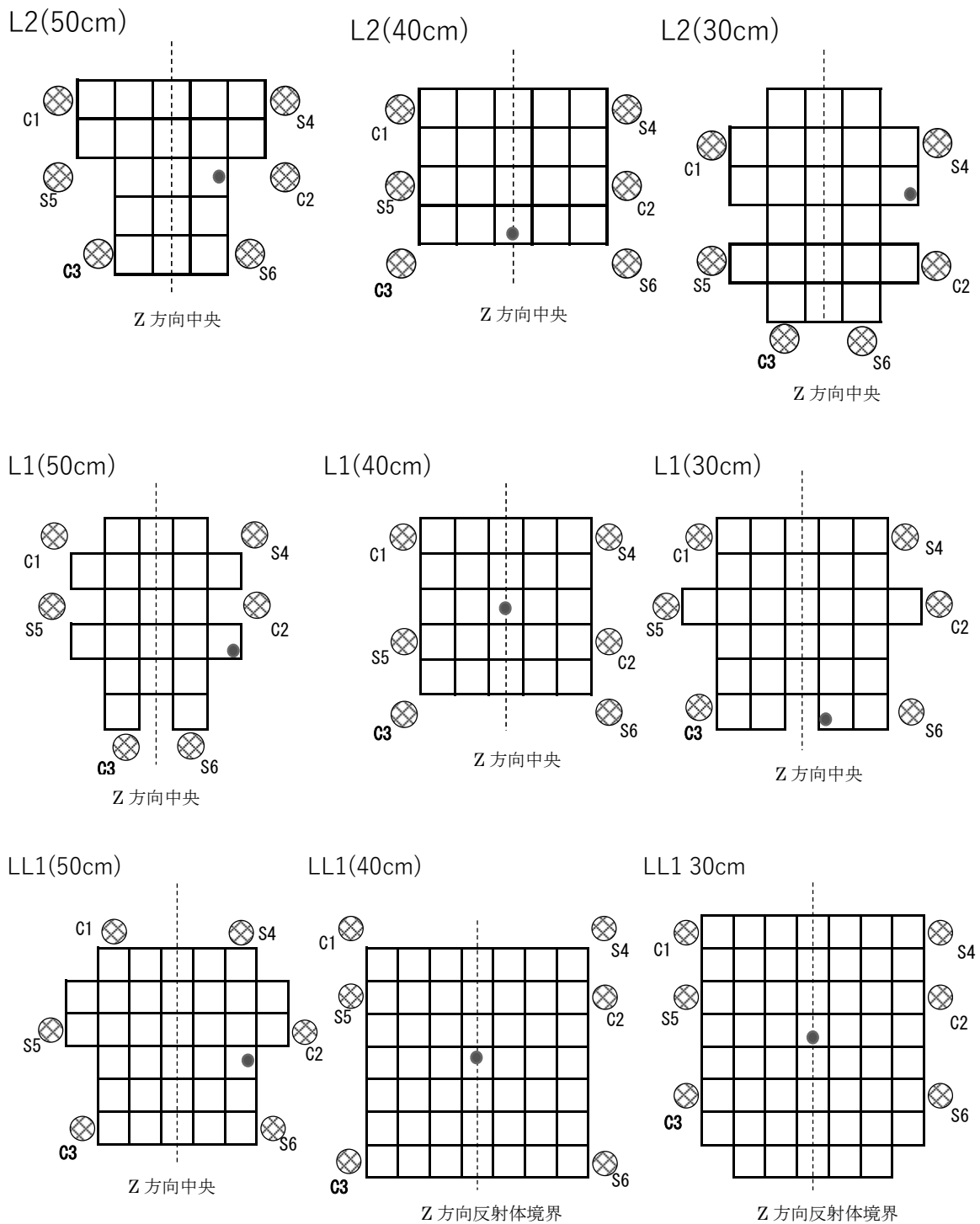


図 A-2 炉心配置図 (L2P、L1P、LL1P)

(炉心内丸印が出力分布が最大となる点)

z 方向(垂直方向)は LL1(40cm)、LL1(30cm) 以外の炉心はすべて中央で出力分布は最大となる。LL1(40cm)、LL1(30cm) 炉心は丸印の燃料体の z 方向(垂直方向)の反射体境界で出力分布は最大となる)

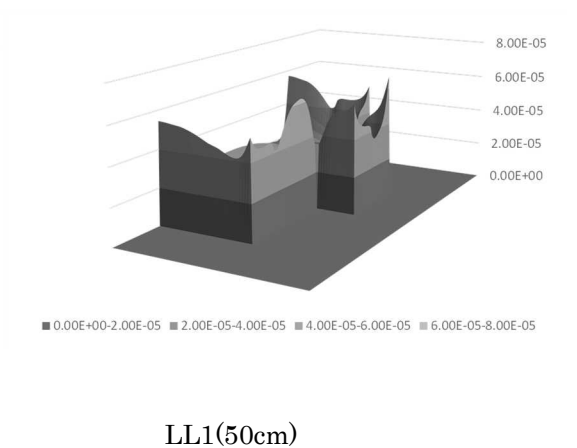
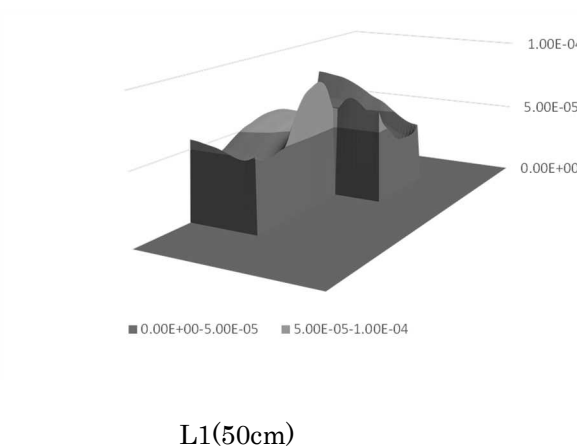
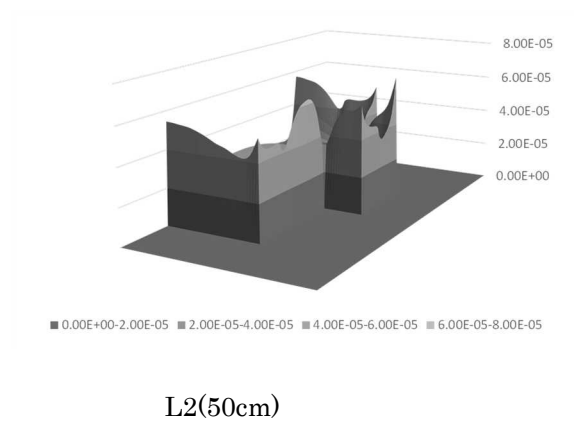
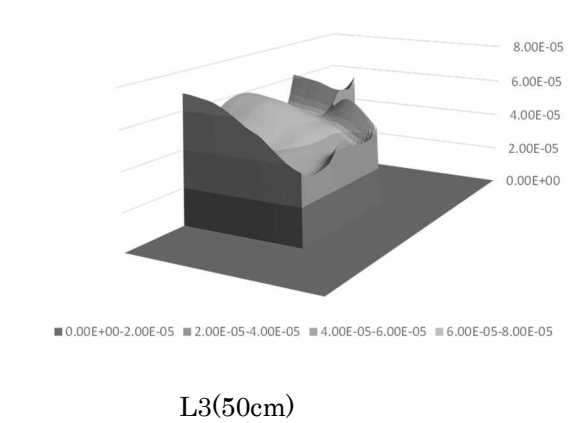
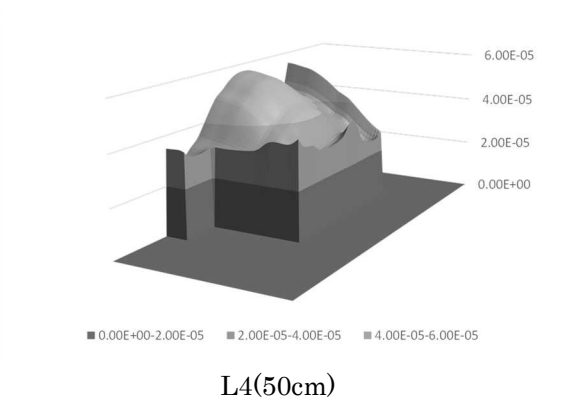
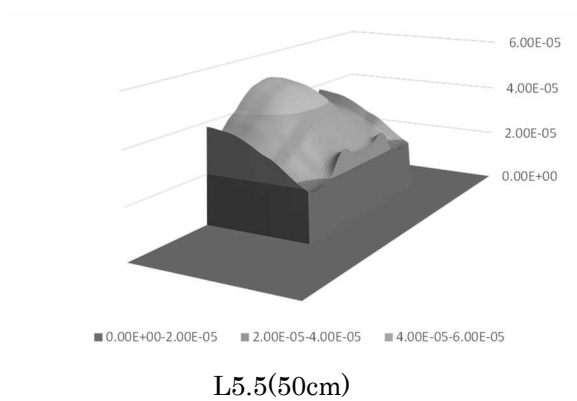


図 A-3 出力分布 (高さ約 50cm の固体減速炉心)
(炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm³)

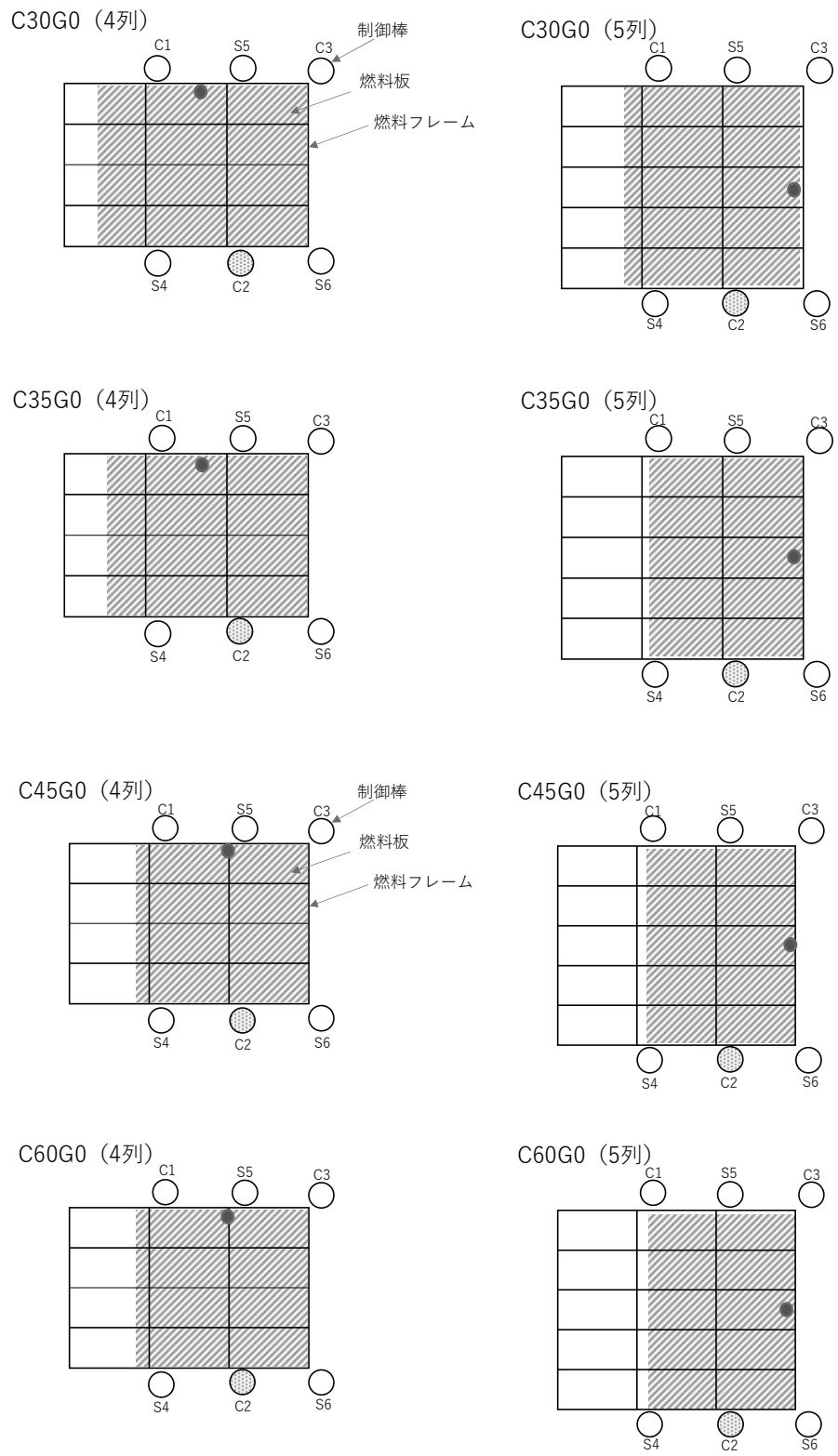
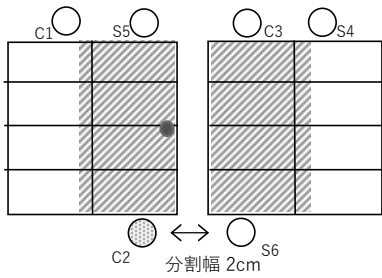
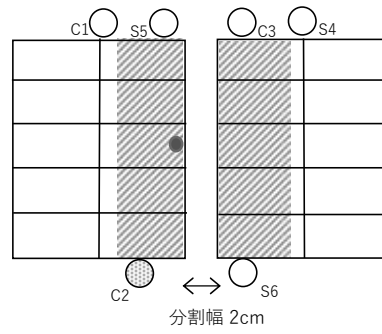


図 A-4 軽水減速炉心の炉心配置図 (1)
 (炉心内丸印が出力分布が最大となる点
 z 方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)

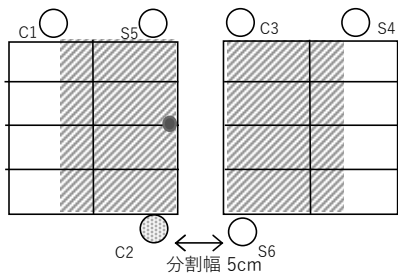
C45G (2H₂O) (4列)



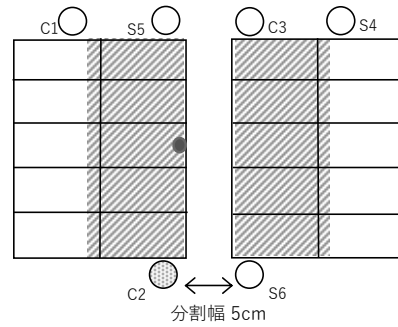
C45G (2H₂O) (5列)



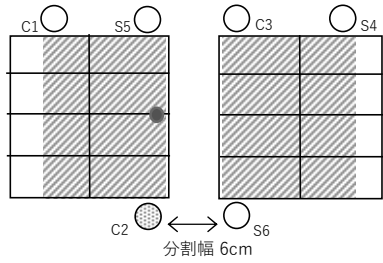
C45G (5H₂O) (4列)



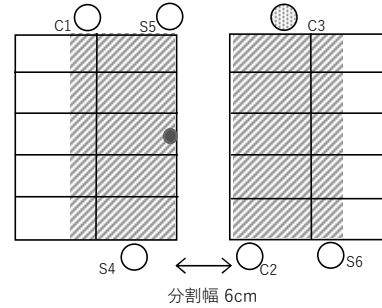
C45G (5H₂O) (5列)



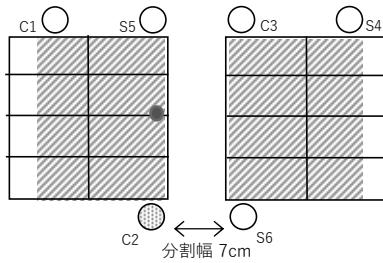
C45G (6H₂O) (4列)



C45G (6H₂O) (5列)



C45G (7H₂O) (4列)



C45G (7H₂O) (5列)

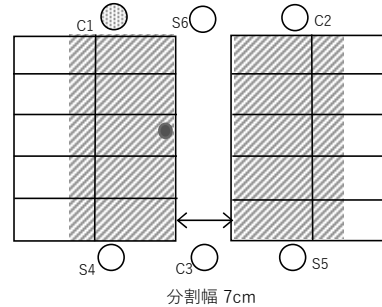
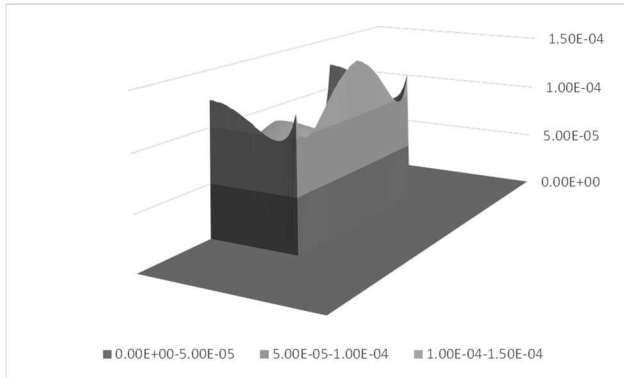


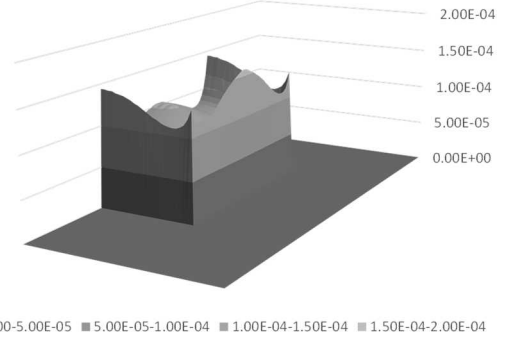
図 A-5 軽水減速炉心の炉心配置図 (2)

(炉心内丸印が出力分布が最大となる点

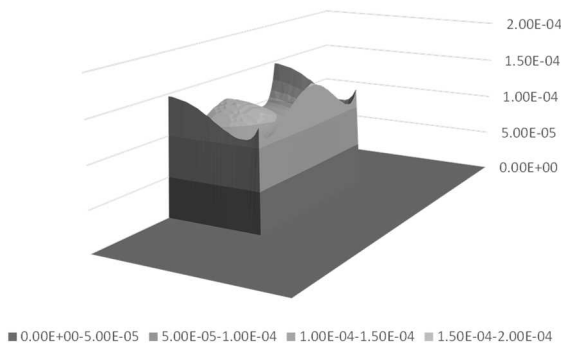
z 方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)



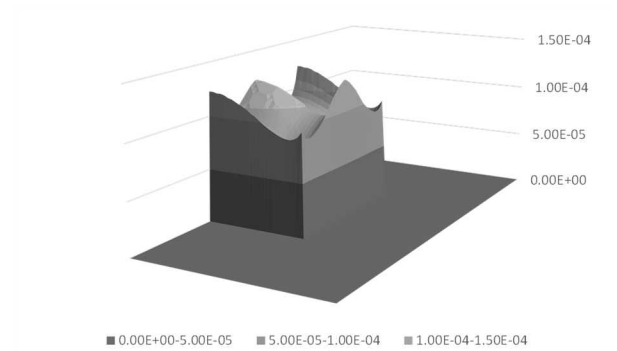
C30G0-4 列 炉心



C35G0-4 列 炉心

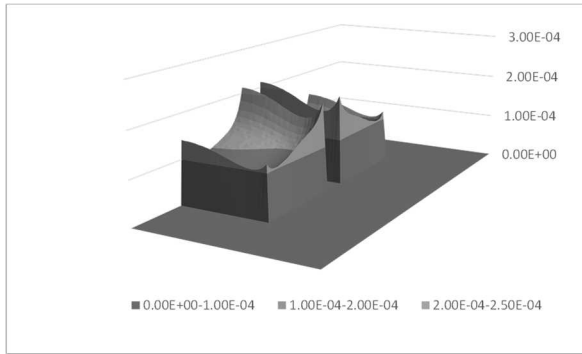


C45G0-4 列 炉心

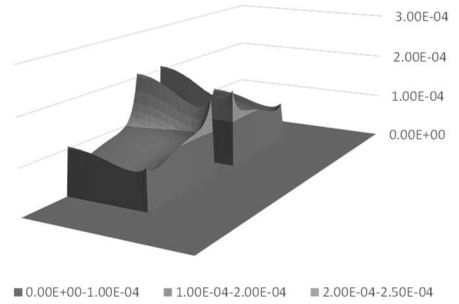


C60G0-4 列 炉心

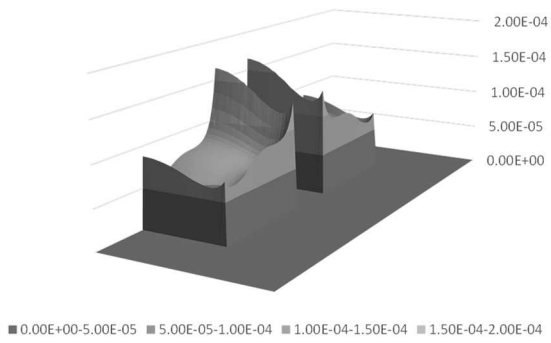
図 A-6 出力分布 (4 列の軽水減速炉心の高さ方向中央)
(炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm³)



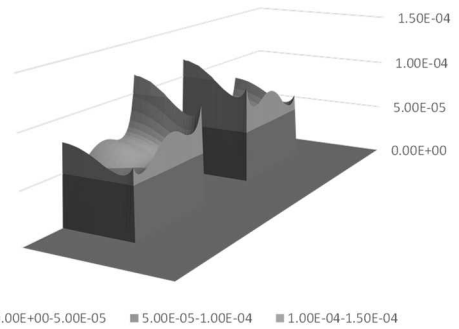
C45G2-4 列 炉心



C45G5-4 列 炉心



C45G7-4 列 炉心



C45G10-4 列 炉心

図 A-7 出力分布 (4 列の軽水減速炉心の 2 分割炉心、高さ方向中央)
(炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm³)