

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】

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

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
炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

【設計基準事故】

燃料の機械的破損
実験設備、実験物等の著しい損傷

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、および設計基準事故の解析

「運転時の異常な過渡変化」、および「設計基準事故」の動特性の解析は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。

解析に必要な反応度の計算については SRAC コードシステム、またはモンテカルロ計算コード MCNP を用いた。SRAC コードシステム (SRAC2006) の解析方法は以下の通りである。

使用核データ： JENDL-4.0
エネルギー構造： 107 群（高速群 62 群、熱群 45 群）
20 群（高速群 12 群、熱群 8 群）
計算方法： セル計算 PIJ (107 群)、20 群に縮約
炉心計算 CITATION
(3次元拡散計算、20群)
(x方向、z方向は反射境界条件、y方向は真空境界条件)

MCNP についても使用した核定数は JENDL-4.0 に基づいたものである。

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。

温度解析に用いる各炉心の熱容量は補足資料-Aに示す。

2. 運転時の異常な過渡変化、および設計基準事故の解析

「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項において運転時の異常な過渡変化については以下のように規定されている。

「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って、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」

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 ①
 - (ii) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き ②
 - (iii) 実験物の異常等による反応度の付加 ③
- (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 ④
- (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 ⑤
 - (ii) 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇 ⑥

判定基準は以下の通りである。

- (i) 燃料の最高温度は 400℃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℃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℃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℃未満であること。

また「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項に設計基準事故については以下のように規定されている。

「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 ⑦
- (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 ⑧
 - (ii) 実験設備、実験物等の著しい損傷 ⑨

判定基準は運転時の異常な過渡変化の解析での判定基準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。

以上の①～⑨の項目について解析結果を示す。

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 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

(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 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。(1 秒後にステップ状の反応度が加わる)
- ・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 $1.35 - 0.45 = 0.9\% \Delta k/k$ 、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。

また解析に使用する遅発中性子割合、中性子平均寿命、温度係数についても上記の審査会資料に記載した値を用いる。

(5) 最高温度の評価方法

固体減速炉心、軽水減速炉心ともに解析で求めた燃料の平均温度に「第 404 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」(2021 年 5 月 17 日)の説明資料で示した各炉心の出力の最大値と平均値の比(資料の表 A-1)を掛け、さらに、「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)の資料 2-2 で示した燃料板内でのピークを求めるための比率(例えば、ほとんどの固体減速炉心では 1.09 倍)を掛けて燃料板内での最高温度を求める。(以下、添付 10 の全ての解析において最高温度はこの方法により評価する)

(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 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 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。(1 秒後にステップ状の反応度が加わる)
- ・線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) 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、

1 秒後に制御棒が落下する。(1 秒後にステップ状の反応度が加わる)

- ・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

ケース A の場合と同様である。

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約 0.44°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%)を考慮したときの結果を表 1-3 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。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 18% 上昇する。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 1.25 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。($0.44^{\circ}\text{C} \times 1.25 = 0.55^{\circ}\text{C}$)

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、燃料温度上昇は約 0.069°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。 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。 ℓ 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 1.26 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。($0.069^{\circ}\text{C} \times 1.26 = 0.087^{\circ}\text{C}$)

ケース B について固体減速炉心の結果を表 1-5 に示す。出力に変化には 2 つのパターンがある。1 つは図 1-3 に示した L4P-30 炉心のように出力が上昇するにつれて燃料温度が上昇するが、元々の反応度添加量が $+0.05 \% \Delta k/k$ と小さいため負の温度係数の影響により未臨界となり、出力は 120W のスクラム条件に至ることがなく徐々に減少し、最終的には 3600 秒を経過したところで運転員が停止させるというものである。これは燃料板の全熱

容量が小さな炉心で起こる。もう 1 つは温度上昇に伴って反応度は徐々に低下するものの出力は上昇して 120W を超えることによりスクラムする場合である。表 1-5 の下線で示した結果が 120W スクラムに至らない場合で、運転時間が長くなるため積算出力が増えるため温度上昇も大きくなる。今回の解析では L4P-30 炉心の温度上昇が最も高く、約 27.1°C であり判定基準値を満たしている。

この炉心の燃料重量、即発中性子減衰定数、反応度温度係数の誤差を検討した結果を表 1-7 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。 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさなく、 β_{eff} に誤差があった場合にも温度は低下する。温度係数の誤差については温度係数が小さくなると出力上昇が早くなり 120W でスクラムするため温度上昇は低くなる。一方温度係数が大きくなると出力上昇が緩慢となり、積算出力は小さくなるため、やはり温度上昇は低くなる。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.06 倍 (U 重量の誤差分のみ) となるだけなので判定基準値を満たしている。(27.1°C × 1.06 = 28.7°C)

ケース B について軽水減速炉心の結果を表 1-6 に示す。全ての炉心において出力は 120W まで上昇しスクラムに至っている。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 1.85°C であり判定基準値を満たしている (出力変化を図 1-4 に示す)。

この炉心の燃料重量、即発中性子減衰定数、反応度温度係数の誤差を検討したときの結果を表 1-8 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。 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。温度係数の誤差があった場合には燃料温度は約 2% 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 × 1.10 × 1.02) となるだけなので判定基準値を満たしている。(1.85°C × 1.19 = 2.20°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)		120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
L5.5P-50	50.9		69.5	138.7	309.1	1.55E+03	1.72E-01	3.94E-01
L5.5P-40	41.8		69.6	138.7	309.2	1.55E+03	1.88E-01	4.32E-01
L5.5P-30	30.8		69.5	138.7	309.2	1.55E+03	1.93E-01	4.41E-01 ^{c)}
L4P-50	49.7		71.2	138.2	313.6	1.59E+03	1.56E-01	3.49E-01
L4P-40	39.5		72.1	137.9	315.8	1.61E+03	1.90E-01	4.15E-01
L4P-30	30.7		72.1	137.9	315.8	1.61E+03	2.01E-01	4.38E-01
L3P-50	51.3		73.0	137.6	318.2	1.63E+03	1.49E-01	3.17E-01
L3P-40	39.8		73.1	137.6	318.7	1.64E+03	1.65E-01	3.55E-01
L3P-30	30.5		73.4	137.5	319.2	1.64E+03	1.82E-01	3.79E-01
L2P-50	48.1		73.7	137.4	320.4	1.65E+03	1.12E-01	2.86E-01
L2P-40	39.0		74.3	137.2	322.0	1.66E+03	1.32E-01	2.92E-01
L2P-30	30.7		73.9	137.3	321.0	1.65E+03	1.39E-01	3.22E-01
L1P-50	47.7		73.2	137.6	319.6	1.64E+03	6.41E-02	2.07E-01
L1P-40	38.2		74.2	137.3	322.2	1.66E+03	6.82E-02	1.72E-01
L1P-30	29.2		74.0	137.3	321.7	1.66E+03	7.16E-02	2.19E-01
LL1P-50	49.7		72.7	137.7	318.5	1.63E+03	2.69E-02	1.02E-01
LL1P-40	38.4		73.3	137.5	319.9	1.64E+03	2.43E-02	8.85E-02
LL1P-30	30.0		73.0	137.6	319.4	1.64E+03	2.81E-02	1.11E-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

c) 最大となる結果

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	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W ま で (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
C30G0	4	37.8	180.0	257.1	8.81E+02	1.29E-02	3.26E-02
	5	37.8	180.0	257.1	8.81E+02	1.32E-02	3.15E-02
C35G0	4	38.0	179.2	258.0	8.86E+02	1.80E-02	4.09E-02
	5	37.9	179.6	257.5	8.84E+02	1.78E-02	4.10E-02
C45G0	4	37.8	180.1	256.8	8.80E+02	2.55E-02	5.08E-02
	5	37.8	180.1	256.8	8.80E+02	2.50E-02	5.27E-02
C60G0	4	37.3	182.2	254.5	8.65E+02	2.39E-02	4.34E-02
	5	37.3	182.2	254.5	8.65E+02	2.35E-02	4.44E-02
C45G(2H ₂ O)	4	37.4	181.9	254.9	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02 ^{c)}
C45G(5H ₂ O)		36.4	186.3	250.5	8.40E+02	1.97E-02	6.51E-02
C45G(6H ₂ O)		36.4	186.3	250.5	8.40E+02	1.77E-02	5.84E-02
C45G(7H ₂ O)		36.4	185.9	250.9	8.43E+02	1.63E-02	5.16E-02
C45G(10H ₂ O)		37.0	183.5	253.2	8.57E+02	1.41E-02	3.74E-02
C45G(15H ₂ O)		37.5	181.3	255.6	8.72E+02	1.31E-02	2.79E-02
C45G(2H ₂ O)	5	37.3	182.3	254.5	8.65E+02	2.60E-02	6.71E-02
C45G(5H ₂ O)		36.0	188.0	248.9	8.31E+02	1.99E-02	6.63E-02
C45G(6H ₂ O)		35.9	188.4	248.5	8.28E+02	1.79E-02	6.03E-02
C45G(7H ₂ O)		36.0	188.0	248.9	8.31E+02	1.63E-02	5.42E-02
C45G(10H ₂ O)		36.6	185.1	251.7	8.47E+02	1.39E-02	4.04E-02
C45G(15H ₂ O)		37.3	182.0	254.8	8.67E+02	1.28E-02	3.05E-02
C60G(2H ₂ O)	4	36.7	184.5	252.1	8.51E+02	2.29E-02	5.98E-02
C60G(5H ₂ O)		35.9	188.3	248.6	8.29E+02	1.71E-02	5.27E-02
C60G(7H ₂ O)		36.1	187.5	249.4	8.34E+02	1.46E-02	4.12E-02
C60G(10H ₂ O)		36.6	185.0	251.7	8.48E+02	1.30E-02	3.01E-02
C60G(15H ₂ O)		37.1	183.0	253.7	8.60E+02	1.22E-02	2.28E-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

c) 最大となる結果

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)

(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 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	69.5	138.7	309.2	1.55E+03	1.93E-01	4.41E-01	—
U 重量 6%減少	—	—	—	—	2.05E-01	4.67E-01	1.06
β eff 8%減少	57.8	143.8	277.9	1.29E+03	1.60E-01	3.66E-01	0.82
β eff 8%増加	82.2	135.3	340.5	1.83E+03	2.28E-01	5.22E-01	1.18
ℓ 8%減少	69.5	138.7	309.1	1.55E+03	1.93E-01	4.41E-01	1.00
ℓ 8%増加	69.6	138.7	309.2	1.55E+03	1.93E-01	4.42E-01	1.00
温度係数 32% 減少	69.3	138.8	308.9	1.55E+03	1.92E-01	4.40E-01	1.00
温度係数 32% 増加	69.8	138.6	309.5	1.55E+03	1.93E-01	4.43E-01	1.00

a),b)は表 1-1 と同じ算出

c) 基準の結果に対する比

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 (C45G(2H₂O) 4 列炉心)
(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 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	37.4	181.9	254.9	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	—
U 重量 6%減少					2.78E-04	7.28E-04	1.06
β eff 8%減少	32.1	215.3	231.3	7.30E+02	2.20E-02	5.79E-02	0.84
β eff 8%増加	43.3	164.6	280.1	1.03E+03	3.12E-02	8.20E-02	1.19
ℓ 8%減少	37.3	182.0	254.8	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	1.00
ℓ 8%増加	37.4	181.8	254.9	8.68E+02	2.62E-02	6.88E-02	1.00
温度係数 32% 減少	37.3	181.9	254.9	8.67E+02	2.62E-02	6.87E-02	1.00
温度係数 32% 増加	37.4	181.9	254.9	8.68E+02	2.62E-02	6.88E-02	1.00

a),b)は表 1-2 と同じ算出

c) 基準の結果に対する比

d) 表 1-2 の結果と同じ

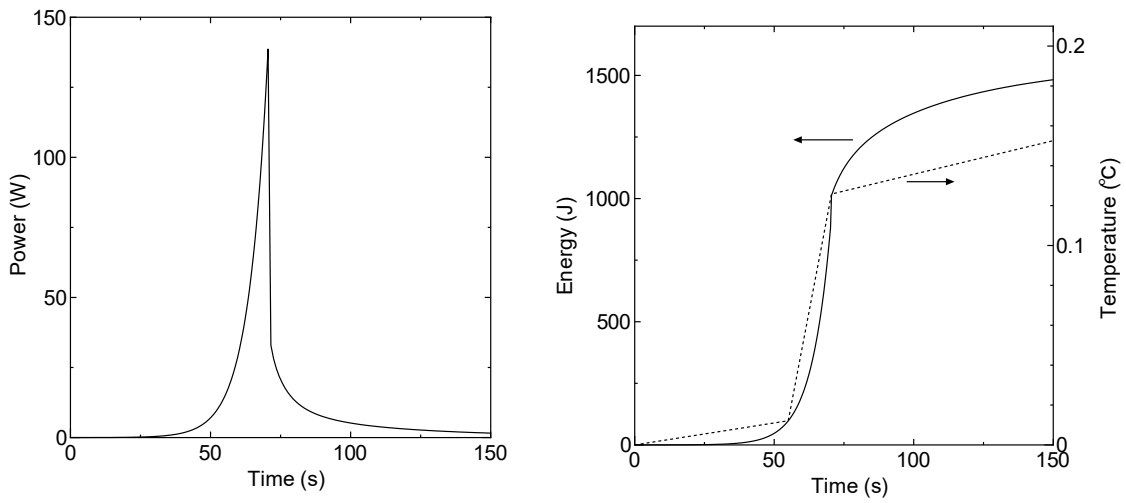


図1-1 L5.5P-30(炉心高 30.8cm)炉心
出力変化(左)、積算出力と温度変化(右実線:出力、右点線:温度)
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケースA)

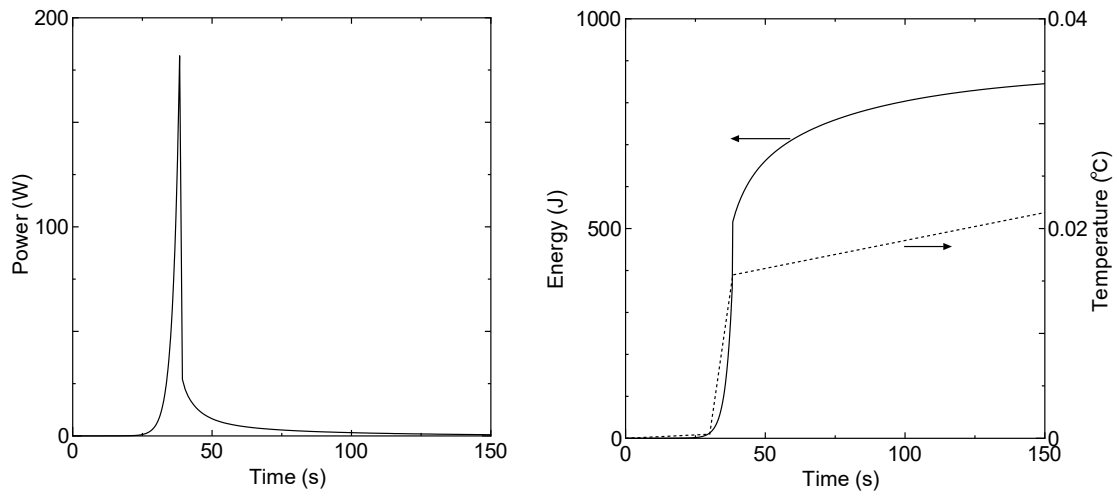


図1-2 C45G(2H₂O) 4列炉心
出力変化(左)、積算出力と温度変化(右実線:出力、右点線:温度)
原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケースA)

表 1-5 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	120W 超 または最大出力となる時刻 (s) ①	最大出力 (W) ②	0.1W までの時刻 (s) ③	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	<u>1815.7</u> c)	<u>103.0</u>	<u>3601.0</u>	<u>9.08E+04</u>	<u>1.01E+01</u>	<u>2.31E+01</u>
L5.5P-40	<u>1810.1</u>	<u>99.1</u>	<u>3601.0</u>	<u>8.74E+04</u>	<u>1.06E+01</u>	<u>2.43E+01</u>
L5.5P-30	<u>1814.3</u>	<u>102.0</u>	<u>3601.0</u>	<u>9.00E+04</u>	<u>1.12E+01</u>	<u>2.56E+01</u>
L4P-50	1769.5	120.1	2136.7	4.07E+04	4.00E+00	8.93E+00
L4P-40	<u>1857.0</u>	<u>113.5</u>	<u>3605.0</u>	<u>1.02E+05</u>	<u>1.20E+01</u>	<u>2.62E+01</u>
L4P-30	<u>1853.9</u>	<u>111.0</u>	<u>3604.7</u>	<u>9.95E+04</u>	<u>1.24E+01</u>	<u>2.71E+01</u>
L3P-50	1731.4	120.2	2098.9	3.55E+04	3.25E+00	6.91E+00
L3P-40	1720.7	120.2	2088.0	3.44E+04	3.48E+00	7.47E+00
L3P-30	1729.5	120.2	2097.2	3.50E+04	3.89E+00	8.09E+00
L2P-50	1627.0	120.5	1992.2	2.69E+04	1.82E+00	4.67E+00
L2P-40	1647.7	120.5	2006.8	2.73E+04	2.17E+00	4.80E+00
L2P-30	1634.7	120.5	1997.2	2.69E+04	2.25E+00	5.23E+00
L1P-50	1571.6	120.6	1934.2	2.35E+04	9.20E-01	2.98E+00
L1P-40	1582.4	120.6	1946.0	2.36E+04	9.70E-01	2.44E+00
L1P-30	1579.3	120.6	1942.7	2.36E+04	1.02E+00	3.12E+00
LL1P-50	1542.9	120.7	1904.3	2.23E+04	3.67E-01	1.39E+00
LL1P-40	1549.2	120.7	1911.3	2.23E+04	3.30E-01	1.20E+00
LL1P-30	1546.4	120.7	1908.2	2.23E+04	3.81E-01	1.52E+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
- c) 太字下線を付けた結果は出力が上昇してもスクラムの 120W まで至らず、その後未臨界のため出力が減少し、最終的に 3600 秒後に手動スクラムで停止したケース
- d) 温度上昇が最大となる結果
- ① 出力が 120W まで上昇してスクラムする場合のスクラムに至るまでの時間、出力が 120W まで上昇しない場合は出力が最大となるまでの時間
 - ② 出力が 120W まで上昇してスクラムする場合、出力が 120W まで上昇しない場合ともに最大出力
 - ③ 自動または手動スクラムをして出力が 0.1W まで低下する時間

表 1-6 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 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
C30G0	4	1546.3	120.7	1922.3	2.27E+04	3.31E-01	8.40E-01
	5	1546.5	120.7	1922.5	2.27E+04	3.41E-01	8.12E-01
C35G0	4	1557.2	120.7	1933.8	2.31E+04	4.68E-01	1.06E+00
	5	1554.6	120.7	1931.0	2.30E+04	4.65E-01	1.07E+00
C45G0	4	1566.7	120.6	1942.9	2.39E+04	6.93E-01	1.38E+00
	5	1564.7	120.6	1940.9	2.38E+04	6.74E-01	1.42E+00
C60G0	4	1543.0	120.7	1917.6	2.32E+04	6.39E-01	1.16E+00
	5	1542.2	120.7	1916.9	2.31E+04	6.29E-01	1.19E+00
C45G(2H ₂ O)	4	1547.4	120.6	1922.3	2.33E+04	7.03E-01	1.85E+00 ^{c)}
C45G(5H ₂ O)		1501.3	120.7	1873.1	2.19E+04	5.12E-01	1.70E+00
C45G(6H ₂ O)		1493.2	120.8	1864.8	2.15E+04	4.53E-01	1.49E+00
C45G(7H ₂ O)		1497.0	120.7	1868.9	2.16E+04	4.17E-01	1.32E+00
C45G(10H ₂ O)		1517.5	120.7	1884.5	2.21E+04	3.63E-01	9.64E-01
C45G(15H ₂ O)		1538.1	120.7	1913.2	1.99E+03	2.99E-02	6.38E-02
C45G(2H ₂ O)	5	1542.0	120.7	1916.6	2.31E+04	6.95E-01	1.79E+00
C45G(5H ₂ O)		1473.6	120.8	1844.0	2.08E+04	4.99E-01	1.66E+00
C45G(6H ₂ O)		1470.8	120.8	1841.0	2.08E+04	4.49E-01	1.51E+00
C45G(7H ₂ O)		1478.3	120.8	1848.9	2.11E+04	4.15E-01	1.37E+00
C45G(10H ₂ O)		1502.7	120.7	1875.1	2.17E+04	3.57E-01	1.03E+00
C45G(15H ₂ O)		1530.9	120.7	1905.4	2.24E+04	3.31E-01	7.90E-01
C60G(2H ₂ O)	4	1518.0	120.7	1891.0	2.24E+04	6.04E-01	1.57E+00
C60G(5H ₂ O)		1483.2	120.7	1853.7	2.14E+04	4.43E-01	1.36E+00
C60G(7H ₂ O)		1487.1	120.8	1858.0	2.14E+04	3.75E-01	1.06E+00
C60G(10H ₂ O)		1505.8	120.7	1878.3	2.19E+04	3.34E-01	7.76E-01
C60G(15H ₂ O)		1521.2	120.7	1895.0	2.22E+04	3.15E-01	5.89E-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

c) 最大となる結果

表 1-7 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き (L4P-30 炉心)
(ケース B) 誤差の影響

	120W 超 または最大 出力となる 時刻 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	<u>1853.9</u>	<u>111.0</u>	<u>3604.7</u>	<u>9.95E+04</u>	<u>1.24E+01</u>	<u>2.71E+01</u>	—
U 重量 6%減少	—	—	—	—	1.31E+01	2.87E+01	1.06
β eff 8%減少	<u>1726.9</u>	<u>116.5</u>	<u>3601.0</u>	<u>9.58E+04</u>	<u>1.20E+01</u>	<u>2.61E+01</u>	0.96
β eff 8%増加	<u>2033.4</u>	<u>102.2</u>	<u>3446.4</u>	<u>9.88E+04</u>	<u>1.23E+01</u>	<u>2.69E+01</u>	0.99
ρ 8%減少	<u>1853.8</u>	<u>111.0</u>	<u>3604.6</u>	<u>9.95E+04</u>	<u>1.24E+01</u>	<u>2.71E+01</u>	1.00
ρ 8%増加	<u>1853.9</u>	<u>111.0</u>	<u>3604.6</u>	<u>9.95E+04</u>	<u>1.24E+01</u>	<u>2.71E+01</u>	1.00
温度係数 32%減少	1645.9	120.4	2009.3	2.91E+04	3.63E+01	7.91E+01	0.29
温度係数 32%増加	<u>1900.0</u>	<u>83.7</u>	<u>3604.5</u>	<u>7.46E+04</u>	<u>9.31E+00</u>	<u>2.03E+01</u>	0.75

a),b)は表 1-5 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 1-5 の結果と同じ

e) 太字下線を付けた結果は出力が上昇してもスクラムの 120W まで至らず、その後未臨界のため出力が減少し、最終的に 3600 秒後に手動スクラムで停止したケース表 1-5 の結果と同じ

表 1-8 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 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	1547.4	120.6	1922.3	2.33E+04	7.03E-01	1.85E+00	
U 重量 6%減少	—	—	—	—	7.45E-01	1.96E+00	1.06
β eff 8%減少	1397.8	120.7	1757.8	2.10E+04	6.34E-01	1.66E+00	0.90
β eff 8%増加	1698.2	120.6	2087.3	2.56E+04	7.73E-01	2.03E+00	1.10
ρ 8%減少	1547.3	120.6	1922.2	2.33E+0 4	7.03E-01	1.85E+00	1.00
ρ 8%増加	1547.5	120.6	1922.4	2.33E+0 4	7.03E-01	1.85E+00	1.00
温度係数 32% 減少	1538.2	120.7	1912.9	2.28E+0 4	6.88E-01	1.81E+00	0.98
温度係数 32% 増加	1556.7	120.6	1931.9	2.38E+0 4	7.19E-01	1.89E+00	1.02

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

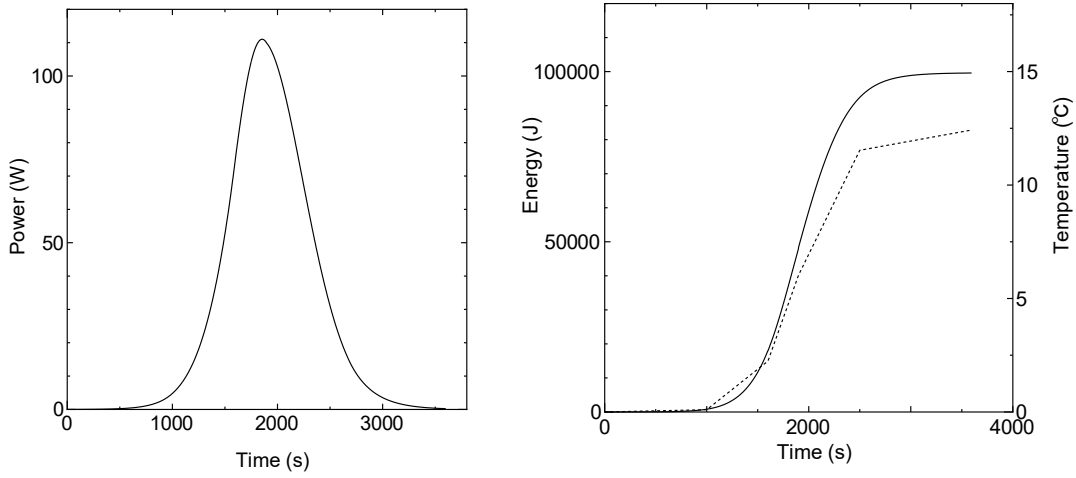


図1-3 L4P-30 炉心

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)
 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケースB)

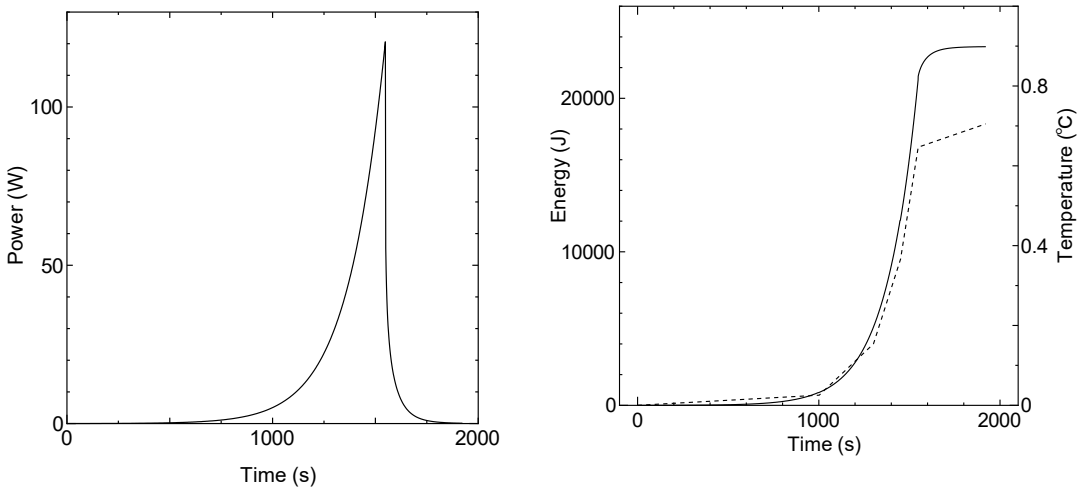


図1-4 C45G(2H₂O) 4列炉心 出力変化

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)
 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

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場合をケース B としていた。この場合、出力はペリオド約 160 秒（倍加時間は約 120 秒）で増加し最も積算出力が大きくなる場合は初期出力が低い場合であるが、既に「原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き」の解析において初期出力が 0.01W の結果を示しているため、「出力運転中の制御棒の異常な引抜き」ではケース B の解析は行わない。

ケース A 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 0.683°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）。

この炉心について初期出力を変更したときの結果を表 2-3 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。これは初期出力が高い方がスクラム後の出力の低下がゆっくりとなり、結果として積算出力が高くなるためである。

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%）、温度係数の誤差（32%）を考慮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 7%上昇する。温度係数の誤差も影響を及ぼさない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.13 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 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 0.208°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 2-5 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、即発中性子減衰定数、温度係数の誤差を検討したときの結果を表 2-6 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。温度係数の誤差も影響を及ぼさない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.13 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。 $(0.208^{\circ}\text{C} \times 1.13 = 0.235^{\circ}\text{C})$

表 2-1 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)	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	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 2-2 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	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	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 2-3 出力運転中の制御棒の異常な引抜き (L5.5P-30 炉心)
(ケース A) 初期出力の影響

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	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 2-1 と同じ

c) 100W の結果に対する比

d) 表 2-1 の結果と同じ

表 2-4 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

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	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-01	7.24E-01	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
温度係数 32%減少	4.20	127.6	374.4	2.40E+03	2.98E-01	6.83E-01	1.00
温度係数 32%増加	4.28	127.6	374.4	2.40E+03	2.98E-01	6.83E-01	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 2-5 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

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
初期出力 100W ^{d)}	4.30	127.5	391.5	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	—
初期出力 94W	5.32	128.4	388.0	2.62E+03	7.92E-02	2.08E-01	1.00
初期出力 90W	5.98	129.0	385.5	2.62E+03	7.90E-02	2.07E-01	1.00
初期出力 80W	7.56	130.6	378.8	2.58E+03	7.79E-02	2.04E-01	0.98

a),b)は表 2-2 と同じ

c) 100W の結果に対する比

d) 表 2-2 の結果と同じ

表 2-6 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

	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	4.30	127.5	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	128.0	378.3	2.43E+03	7.34E-02	1.93E-01	0.93
β _{eff} を 8% 増加	4.60	127.0	404.0	2.82E+03	8.51E-02	2.24E-01	1.07
ℓ を 8%減 少	4.32	127.5	391.3	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	1.00
ℓ を 8%増 加	4.32	127.5	391.3	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	1.00
温度係数 32%減少	4.27	127.5	391.5	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	1.00
温度係数 32%増加	4.37	127.5	391.5	2.63E+03	7.93E-02	2.08E-01	1.00

a),b)は表 2-2 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-2 の結果と同じ

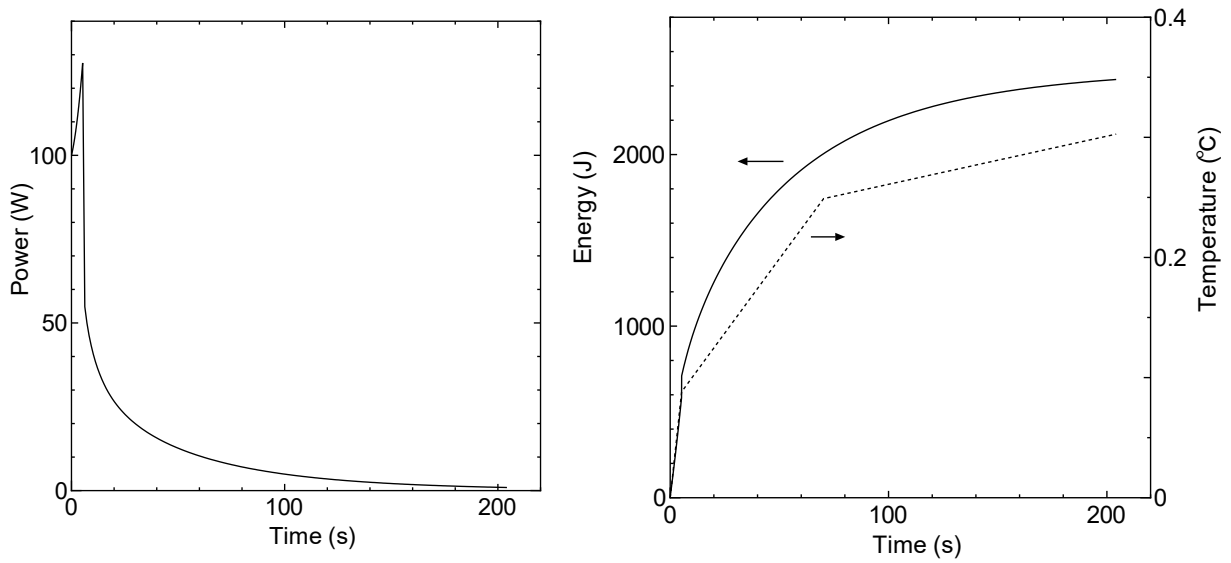


図 2-1 L5.5P-30(炉心高 30.8cm)炉心
出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)
(右図の横軸は制御棒挿入時からの経過時間)

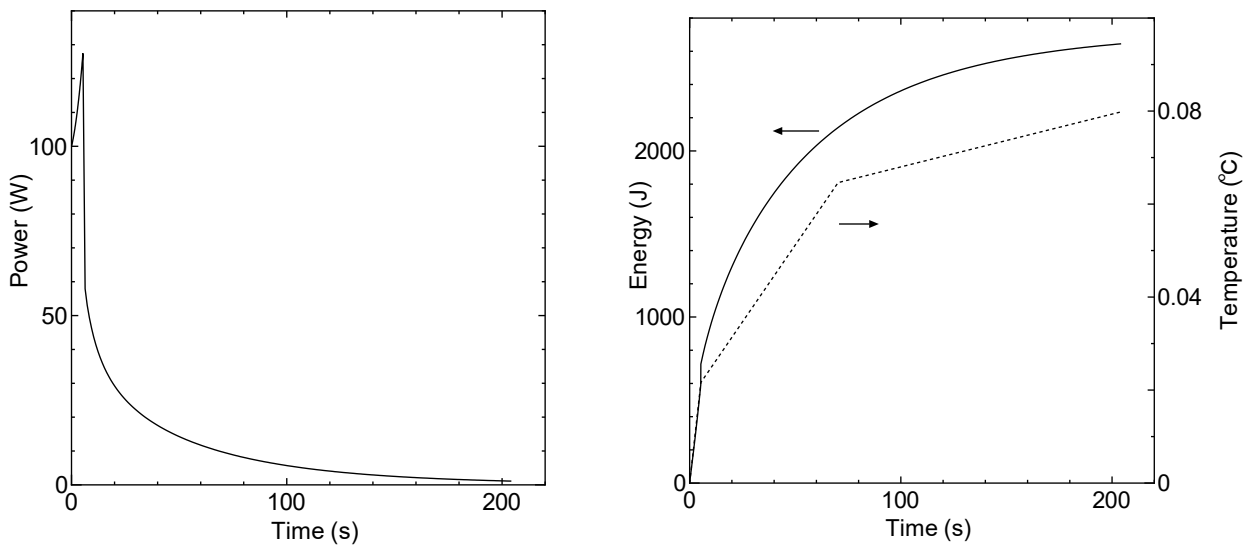


図 2-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心
出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)
(右図の横軸は制御棒挿入時からの経過時間)

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

実験物を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、軽水減速炉心ともに $0\% \Delta k/k$

(過剰反応度と試料の落下により加わる反応度を足し合わせたものを過剰反応度の核的制限値以下であるとするので、過剰反応度がゼロの炉心ほど試料の反応度を大きくすることができるので、このような条件を競ってした)

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

過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

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

(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 0.01W の臨界状態

(4) スクラム信号発生

【ケース A】

・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、 $-2/3 \text{ \%}\Delta k/k$ の未臨界度となる。
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

【ケース B】

- ・炉心に取り付けていた実験物が炉心からゆっくり落下するような場合、または軽水減速炉心で炉心近傍の挿入管にゆっくり水が入り込むような場合を想定する。固体減速炉心では最大 $+0.35\%\Delta k/k$ 、軽水減速炉心では最大 $+0.5\%\Delta k/k$ の反応度が 1 時間（3600 秒）かけて加わるとする。
- ・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。
- ・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、 $-2/3 \text{ \%}\Delta k/k$ の未臨界度となる。
- ・出力が 0.1W になるまで解析する。

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 炉心で燃料温度上昇は約 0.56°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）。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）、即発中性子減衰定数の誤差（8%）、温度係数の誤差（32%）を考慮したときの結果を表 3-3 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 18% 上昇する。温度係数の誤差も結果に影響しない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.25 倍（ 1.06×1.25 ）となるだけなので判定基準値を満たしている。（ $0.56^{\circ}\text{C} \times 1.25 = 0.70^{\circ}\text{C}$ ）

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約 0.14°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）。

この炉心の燃料重量の誤差、即発中性子減衰定数、温度係数の誤差を考慮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 18% 上昇する。温度係数の誤差も結果に影響しない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.25 倍 (1.06×1.18) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.14^{\circ}\text{C} \times 1.25 = 0.18^{\circ}\text{C})$

ケース B について固体減速炉心の結果を表 3-5 に示す。最も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約 2.6°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 3-3 に示す）。

この炉心の燃料重量の誤差、即発中性子減衰定数、温度係数の誤差を考慮したときの結果を表 3-7 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 6% 上昇する。温度係数の誤差により燃料温度が約 2% 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 ($1.06 \times 1.08 \times 1.02$) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(2.6^{\circ}\text{C} \times 1.17 = 3.04^{\circ}\text{C})$

ケース B について軽水減速炉心の結果を表 3-6 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約 0.59°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 3-4 に示す）。

この炉心の燃料重量の誤差、即発中性子減衰定数、温度係数の誤差を考慮したときの結果を表 3-7 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 66% 上昇する。温度係数の誤差も結果に影響しない。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.14 倍 (1.06×1.08) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.59^{\circ}\text{C} \times 1.14 = 0.67^{\circ}\text{C})$

表 3-1 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心）

【ケース A（ステップ状反応度印加）】

炉心名称 a)	1.2W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	58.0	138.8	388.3	1.98E+03	2.20E-01	5.04E-01
L5.5P-40	58.0	138.8	388.3	1.98E+03	2.40E-01	5.52E-01
L5.5P-30	58.0	138.8	388.3	1.98E+03	2.47E-01	5.64E-01 c)
L4P-50	59.7	138.3	394.1	2.04E+03	2.00E-01	4.46E-01
L4P-40	60.6	138.0	396.6	2.06E+03	2.42E-01	5.31E-01
L4P-30	60.6	138.0	396.6	2.06E+03	2.57E-01	5.60E-01
L3P-50	61.5	137.7	399.8	2.09E+03	1.91E-01	4.06E-01
L3P-40	61.7	137.7	400.4	2.09E+03	2.12E-01	4.54E-01
L3P-30	62.0	137.6	401.1	2.10E+03	2.33E-01	4.85E-01
L2P-50	62.4	137.5	403.2	2.12E+03	1.43E-01	3.67E-01
L2P-40	63.0	137.3	405.0	2.13E+03	1.69E-01	3.75E-01
L2P-30	62.6	137.4	403.8	2.12E+03	1.78E-01	4.13E-01
L1P-50	62.0	137.6	402.6	2.11E+03	8.24E-02	2.67E-01
L1P-40	63.0	137.3	405.8	2.14E+03	8.77E-02	2.21E-01
L1P-30	62.8	137.3	405.2	2.13E+03	9.21E-02	2.82E-01
LL1P-50	61.5	137.7	401.4	2.10E+03	3.46E-02	1.31E-01
LL1P-40	62.1	137.5	403.3	2.11E+03	3.13E-02	1.14E-01
LL1P-30	61.9	137.6	402.6	2.11E+03	3.61E-02	1.43E-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

c) 温度上昇が最大となる結果

表 3-2 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心）

【ケース A（ステップ状反応度印加）】

炉心名称	列	1.2W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
C30G0	4	19.9	180.0	481.7	1.76E+03	2.57E-02	6.52E-02
	5	19.9	180.0	481.6	1.76E+03	2.65E-02	6.31E-02
C35G0	4	20.1	179.3	483.0	1.77E+03	3.60E-02	8.18E-02
	5	20.0	179.6	482.3	1.77E+03	3.57E-02	8.21E-02
C45G0	4	19.8	180.2	480.5	1.76E+03	5.11E-02	1.02E-01
	5	19.8	180.2	480.6	1.76E+03	4.99E-02	1.05E-01
C60G0	4	19.3	182.3	476.5	1.73E+03	4.78E-02	8.68E-02
	5	19.3	182.3	476.6	1.73E+03	4.71E-02	8.89E-02
C45G(2H ₂ O)	4	19.4	182.0	477.2	1.73E+03	5.24E-02	<u>1.37E-01</u> ^{c)}
C45G(5H ₂ O)		18.3	186.3	469.9	1.68E+03	3.94E-02	1.30E-01
C45G(6H ₂ O)		18.3	186.3	469.9	1.68E+03	3.55E-02	1.17E-01
C45G(7H ₂ O)		18.4	185.9	470.6	1.72E+03	3.31E-02	1.05E-01
C45G(10H ₂ O)		18.9	183.5	474.7	1.72E+03	2.82E-02	7.49E-02
C45G(15H ₂ O)		19.5	181.3	478.9	1.75E+03	2.62E-02	5.59E-02
C45G(2H ₂ O)	5	19.3	182.3	476.5	1.73E+03	5.21E-02	1.34E-01
C45G(5H ₂ O)		17.9	188.0	467.3	1.67E+03	3.99E-02	1.33E-01
C45G(6H ₂ O)		17.8	188.4	466.6	1.66E+03	3.59E-02	1.21E-01
C45G(7H ₂ O)		17.9	188.0	467.2	1.67E+03	3.28E-02	1.09E-01
C45G(10H ₂ O)		18.6	185.1	472.0	1.70E+03	2.79E-02	8.09E-02
C45G(15H ₂ O)		19.3	182.0	477.5	1.74E+03	2.56E-02	6.11E-02
C60G(2H ₂ O)	4	18.7	184.6	472.5	1.70E+03	4.59E-02	1.20E-01
C60G(5H ₂ O)		17.8	188.3	466.0	1.66E+03	3.43E-02	1.05E-01
C60G(7H ₂ O)		18.0	187.5	467.8	1.67E+03	2.92E-02	8.26E-02
C60G(10H ₂ O)		18.6	185.0	472.0	1.70E+03	2.60E-02	6.03E-02
C60G(15H ₂ O)		19.1	183.0	475.5	1.72E+03	2.45E-02	4.57E-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

c) 温度上昇が最大となる結果

表 3-3 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心 L5.5P-30 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 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	58.0	138.8	388.3	1.98E+03	2.47E-01	5.64E-01 c)	—
U 重量 6%減少	—	—	—	—	3.16E-03	7.24E-03	1.06
βeff 8%減少	46.1	144.0	350.1	1.65E+03	2.05E-01	4.69E-01	0.83
βeff 8%増加	70.7	135.3	426.2	2.34E+03	2.91E-01	6.66E-01	1.18
ℓ 8%減少	58.0	138.8	388.3	1.98E+03	2.46E-01	5.64E-01	1.00
ℓ 8%増加	58.0	138.8	388.4	1.99E+03	2.47E-01	5.64E-01	1.00
温度係数 32%減少	57.8	138.9	388.5	1.98E+03	2.46E-01	5.64E-01	1.00
温度係数 32%増加	58.1	138.8	388.1	1.99E+03	2.47E-01	5.65E-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 3-4 出力運転中の制御棒の異常な引抜き（軽水減速炉心 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 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	19.4	182.0	477.2	1.73E+03	5.24E-02	1.37E-01 c)	—
U 重量 6%減少	—	—	—	—	5.56E-03	1.45E-03	1.06
βeff 8%減少	13.5	215.3	433.9	1.46E+03	4.41E-02	1.16E-01	0.83
βeff 8%増加	25.8	164.6	522.4	2.07E+03	6.24E-02	1.64E-01	1.18
ℓ 8%減少	19.3	182.0	477.0	1.73E+03	5.23E-02	1.37E-01	1.00
ℓ 8%増加	19.4	181.9	477.3	1.74E+03	5.24E-02	1.38E-01	1.00
温度係数 32% 減少	19.4	182.0	477.4	1.74E+03	5.24E-02	1.38E-01	1.00
温度係数 32% 増加	19.4	181.9	476.9	1.73E+03	5.23E-02	1.37E-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

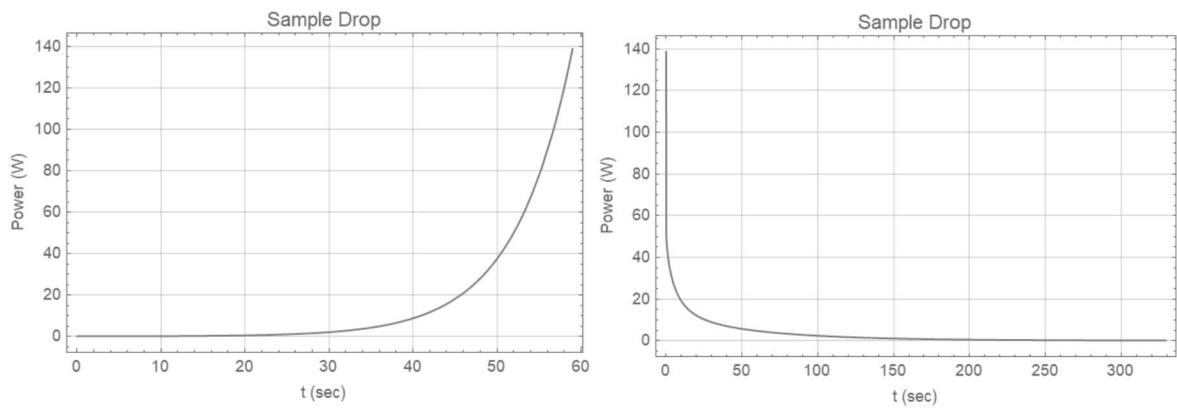


図 3-1 L5.5P-30 炉心 出力変化 (左 : スクラム前、右 : スクラム後)
 実験物の異常等による反応度の付加 (ケース A ステップ状反応度添加)

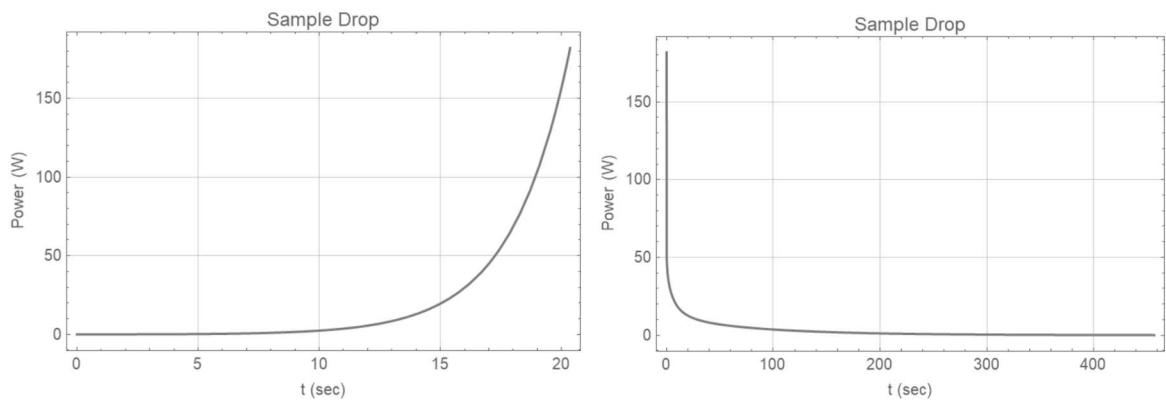


図 3-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化 (左 : スクラム前、右 : スクラム後)
 実験物の異常等による反応度の付加 (ケース A ステップ状反応度添加)

表 3-5 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心）

【ケース B（ランプ状反応度印加）】

炉心名称 a)	1.2W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	1173.7	121.9	1507.2	9.23E+03	1.02E+00	2.34E+00
L5.5P-40	1175.0	121.9	1508.4	9.24E+03	1.12E+00	2.57E+00
L5.5P-30	1174.6	121.9	1508.0	9.22E+03	1.15E+00	2.62E+00 c)
L4P-50	1180.7	122.0	1516.2	9.21E+03	9.04E-01	2.02E+00
L4P-40	1184.7	121.9	1521.2	9.27E+03	1.09E+00	2.39E+00
L4P-30	1184.9	121.9	1521.5	9.28E+03	1.16E+00	2.52E+00
L3P-50	1187.2	122.0	1524.9	9.23E+03	8.45E-01	1.80E+00
L3P-40	1187.8	122.0	1525.6	9.23E+03	9.32E-01	2.00E+00
L3P-30	1188.7	122.0	1526.9	9.24E+03	1.03E+00	2.13E+00
L2P-50	1187.4	122.1	1526.1	9.10E+03	6.16E-01	1.58E+00
L2P-40	1190.6	122.0	1530.1	9.15E+03	7.26E-01	1.61E+00
L2P-30	1188.8	122.0	1527.8	9.13E+03	7.65E-01	1.78E+00
L1P-50	1183.6	122.1	1521.9	8.97E+03	3.50E-01	1.13E+00
L1P-40	1187.9	122.1	1527.4	9.01E+03	3.69E-01	9.30E-01
L1P-30	1187.0	122.1	1526.2	9.00E+03	3.88E-01	1.19E+00
LL1P-50	1180.2	122.2	1517.8	8.89E+03	1.47E-01	5.54E-01
LL1P-40	1182.7	122.1	1521.1	8.91E+03	1.32E-01	4.80E-01
LL1P-30	1181.8	122.1	1520.0	8.90E+03	1.52E-01	6.06E-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 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛ける

c) 温度上昇が最大となる結果

表 3-6 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心）

【ケース B（ランプ状反応度印加）】

炉心名称	列	1.2W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
C30G0	4	960.1	122.7	1298.0	7.39E+03	1.08E-01	2.74E-01
	5	960.1	122.7	1298.0	7.39E+03	1.11E-01	2.64E-01
C35G0	4	961.8	122.7	1300.3	7.42E+03	1.51E-01	3.42E-01
	5	961.1	122.7	1299.3	7.41E+03	1.49E-01	3.44E-01
C45G0	4	960.3	122.7	1298.0	7.43E+03	2.16E-01	4.29E-01
	5	960.3	122.7	1298.0	7.42E+03	2.72E-02	5.75E-02
C60G0	4	955.6	122.7	1291.7	7.37E+03	2.03E-01	3.70E-01
	5	955.6	122.7	1291.6	7.37E+03	2.00E-01	3.78E-01
C45G(2H ₂ O)	4	956.4	122.7	1292.8	7.38E+03	2.23E-01	5.85E-01 ^{c)}
C45G(5H ₂ O)		947.5	122.7	1280.8	7.26E+03	1.70E-01	5.63E-01
C45G(6H ₂ O)		947.1	122.8	1280.3	7.25E+03	1.53E-01	5.04E-01
C45G(7H ₂ O)		947.9	122.7	1281.4	7.26E+03	1.40E-01	4.44E-01
C45G(10H ₂ O)		952.6	122.7	1287.8	7.31E+03	1.20E-01	3.19E-01
C45G(15H ₂ O)		957.3	122.7	1294.1	7.37E+03	1.11E-01	2.36E-01
C45G(2H ₂ O)	5	955.6	122.7	1291.6	7.36E+03	2.22E-01	5.71E-01
C45G(5H ₂ O)		943.7	122.8	1275.7	7.19E+03	1.72E-01	5.74E-01
C45G(6H ₂ O)		942.9	122.8	1274.7	7.19E+03	1.55E-01	5.23E-01
C45G(7H ₂ O)		943.9	122.8	1276.0	7.20E+03	1.42E-01	4.70E-01
C45G(10H ₂ O)		949.4	122.7	1283.5	7.27E+03	1.20E-01	3.47E-01
C45G(15H ₂ O)		955.7	122.7	1292.0	7.35E+03	1.09E-01	2.59E-01
C60G(2H ₂ O)	4	950.8	122.7	1285.2	7.31E+03	1.97E-01	5.14E-01
C60G(5H ₂ O)		943.6	122.8	1275.4	7.21E+03	1.49E-01	4.58E-01
C60G(7H ₂ O)		945.0	122.8	1277.4	7.23E+03	1.26E-01	3.57E-01
C60G(10H ₂ O)		949.6	122.7	1283.7	7.28E+03	1.11E-01	2.58E-01
C60G(15H ₂ O)		953.4	122.7	1288.9	7.32E+03	1.04E-01	1.94E-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

c) 温度上昇が最大となる結果

表 3-7 実験物の異常等による反応度の付加（固体減速炉心 L5.5P-30 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 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)	比 c)
基準 d)	1174.6	121.9	1508.0	9.22E+03	1.15E+00	2.62E+00 c)	—
U 重量 6%減少	—	—	—	—	1.22E+00	2.78E+00	1.06
βeff 8%減少	1119.6	122.0	1437.6	8.70E+03	1.08E+00	2.47E+00	0.94
βeff 8%増加	1227.1	121.9	1575.4	9.74E+03	1.21E+00	2.77E+00	1.06
ℓ 8%減少	1174.6	121.9	1507.9	9.22E+03	1.15E+00	2.62E+00	1.00
ℓ 8%増加	1174.7	121.9	1508.0	9.22E+03	1.15E+00	2.62E+00	1.00
温度係数 32%減少	1170.6	122.0	1503.7	9.05E+03	1.12E+00	2.57E+00	0.98
温度係数 32%増加	1178.7	121.9	1512.4	9.41E+03	1.17E+00	2.67E+00	1.02

a),b)は表 3-5 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 3-5 の結果と同じ

表 3-8 実験物の異常等による反応度の付加（軽水減速炉心 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)	956.4	122.7	1292.8	7.38E+03	2.23E-01	5.85E-01 c)	—
U 重量 6%減少	—	—	—	—	2.36E-01	6.20E-01	1.06
βeff 8%減少	911.00	122.8	1230.4	6.93E+03	2.09E-01	5.49E-01	0.94
βeff 8%増加	1000.19	122.6	1353.1	7.82E+03	2.36E-01	6.20E-01	1.06
ℓ 8%減少	956.40	122.7	1292.7	7.38E+03	2.23E-01	5.85E-01	1.00
ℓ 8%増加	956.46	122.7	1292.8	7.38E+03	2.23E-01	5.85E-01	1.00
温度係数 32% 減少	956.04	122.7	1292.3	7.36E+03	2.22E-01	5.83E-01	1.00
温度係数 32% 増加	956.82	122.7	1293.2	7.39E+03	2.23E-01	5.86E-01	1.00

a),b)は表 3-6 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 3-6 の結果と同じ

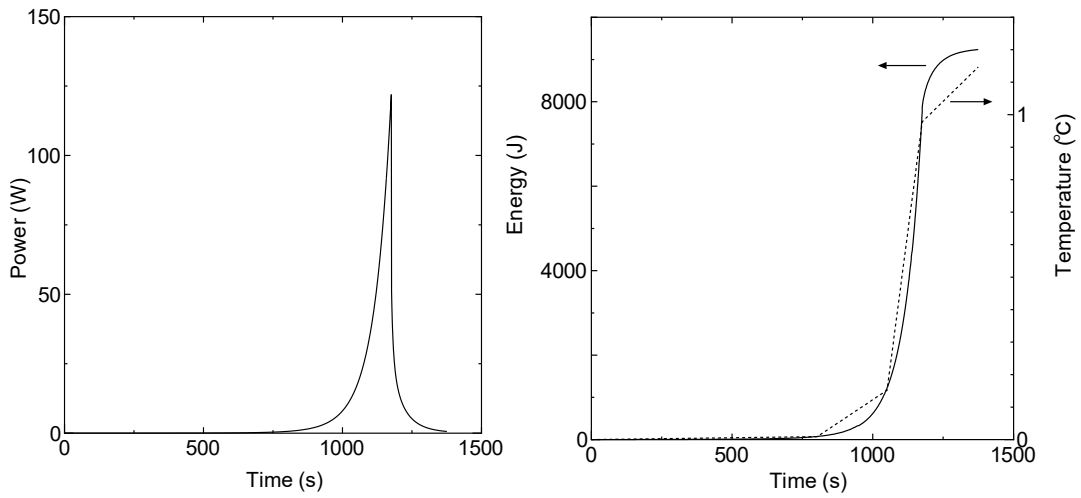


図 3-3 L5.5P-30 炉心 出力変化

出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）
 実験物の異常等による反応度の付加（ケース B ランプ状反応度添加）

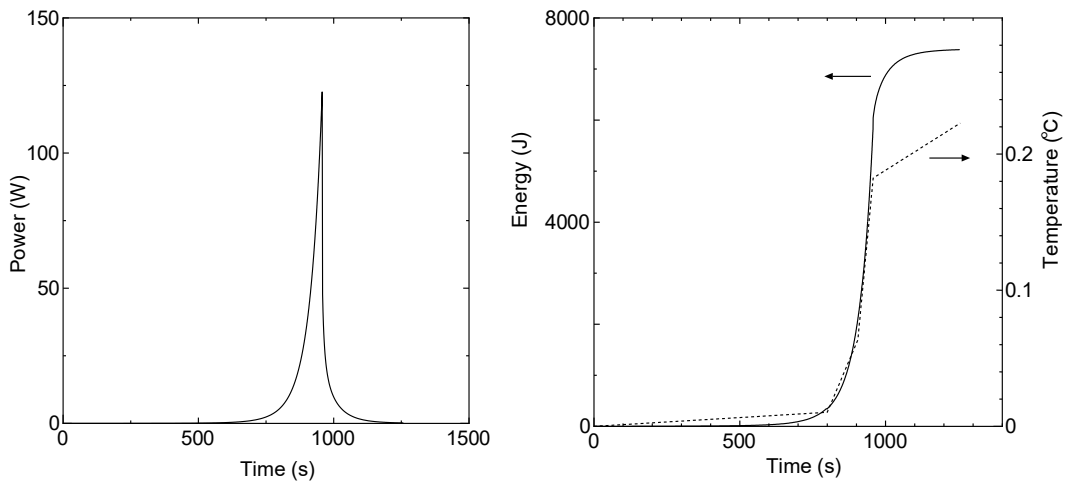


図 3-4 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化

出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）
 実験物の異常等による反応度の付加（ケース B ランプ状反応度添加）

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°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 $-0.55\% \Delta k/k$ の未臨界状態、軽水減速炉心では $-0.5\% \Delta k/k$ の未臨界状態）
- ・ 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。（ $-1\% \Delta k/k$ ）
- ・ 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。(-1% Δk/k)

- ・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

（固体減速炉心：L5.5P-30、軽水減速炉心：C45G(2H₂O)4列炉心）。

結果を表4-1に、出力変化を図6-1～図6-4に示す。L5.5P-30炉心で燃料温度上昇は0.743°C、C45G(6H₂O)炉心で燃料温度上昇は0.236°C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。β_{eff}とλ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、λ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L5.5P-30炉心で2%、C45G(6H₂O)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（1.06×1.02）の0.802°C（0.743×1.08）、C45G(6H₂O)炉心で約1.09倍（1.06×1.03）の0.257°C（0.236×1.09）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 ₂ O) 4 列	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01

d) 燃料板のみの温度上昇を考慮

e) 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
β_{eff} を 8%減少	9.38E+02	1.61E+03	3.16E-01	9.75E-01	0.98
β_{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(2H₂O) 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
β_{eff} を 8%減少	1.27E+03	1.61E+03	8.71E-02	2.29E-01	0.97
β_{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

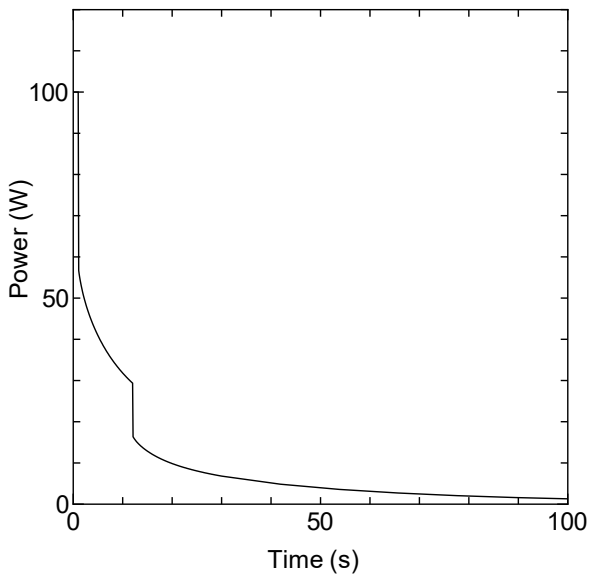


図 4-1 L55P-30 炉心 出力変化
(商用電源喪失、100 秒まで)

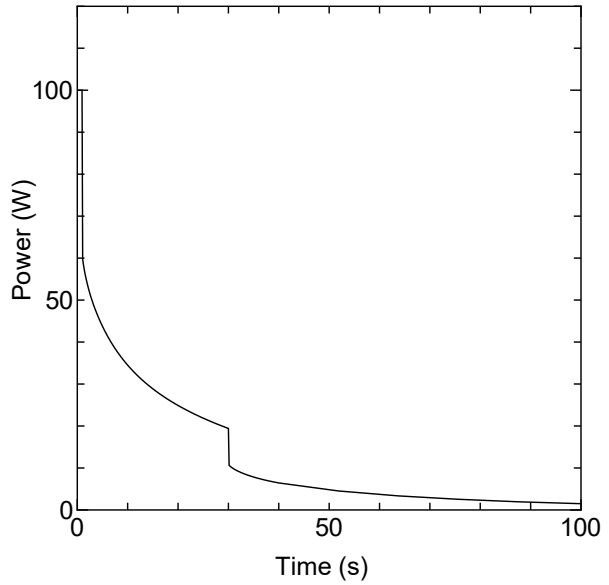


図 4-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化
(商用電源喪失、100 秒まで)

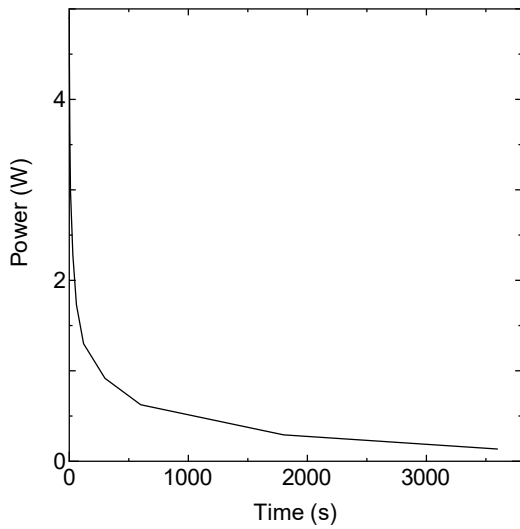


図 4-3 FP からの発熱 出力変化

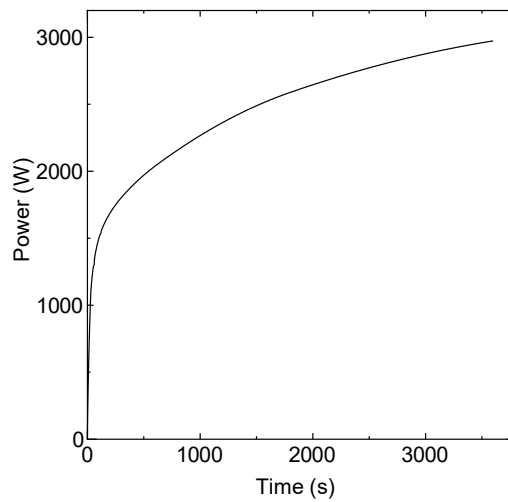


図 4-4 C45G(2H₂O) 4 列炉心の積算出力
(中性子とガンマ線の積算)

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。

(c) ケース A

(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：0.35 % $\Delta k/k$

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

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

(7) 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 0.01W の臨界状態

(8) 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} 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炉心と中性子発生部との位置関係を考慮して $4 \times 10^9 \text{ n/s}$ を基準ケースとする。（以下、この説明のなかで出力上昇に寄与する中性子数を「中性子発生量」とする。

【ケース A ×1.0】

- ・中性子発生量を 50%減少させたときの解析を行う。

【ケース B ×0.5】

- ・最も燃料温度が上昇する炉心についてはさらに中性子発生量を変化させたときの解析を行う。
- ・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。
- ・線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) 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、1 秒後に制御棒が落下する。(1 秒後にステップ状の反応度が加わる)
- ・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 $1.35-0.45=0.9$ % $\Delta k/k$ 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。

(9) 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。

ケース A

結果を表 5-1 に示す。燃料温度が最も高くなったのが L5.5P-30 炉心で燃料温度上昇は 5.67°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、即発中性子減衰定数、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。 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 13% 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 16% 高くなる。

これらの誤差があったとしても燃料温度は約 1.39 倍 ($1.06 \times 1.13 \times 1.16$) となるだけなので判定基準値を満たしている。($5.67^\circ\text{C} \times 1.39 = 7.88^\circ\text{C}$)

ケース B

結果を表 5-3 に示す。L1P 炉心と LL1P 炉心
 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を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。

燃料温度が最も高くなったのがL2P-30炉心で燃料温度上昇は37.0°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。

この炉心の燃料重量、即発中性子減衰定数、反応度温度係数の誤差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 ρ が各々8%の誤差を持った場合の結果より、 β_{eff} と ρ 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より低くなる。(なお、温度係数が小さくなると温度が上昇しても負の反応度印加が小さくなるため120Wまで出力が上昇してスクラムしている。)

これらの誤差があったとしても燃料温度は約1.06倍となり判定基準値を満たしている。
(37.0°C×1.06=39.2°C)

中性子発生量の影響について

ケースAとケースBで最も温度が上昇したL2P-30炉心とL5.5P-30炉心、および熱容量の大きなLL1P-30炉心について中性子発生量を変化させたときの影響について調べた結果を表5-5に示す。

L2P-30炉心では、中性子発生量が小さい場合にはゆっくりと出力が上昇し、温度上昇に伴って未臨界となるため途中から出力は減少するが、中性子発生量が大きくなるにつれて最大出力は大きくなり、燃料の温度上昇も大きくなる。しかし中性子発生量が0.6倍になると最大出力が120Wを超えてしまうため、スクラムして停止するため積算出力としては小さくなってしまう。さらに中性子発生量が増加すると120Wに至るまでの時間が短くなるため積算出力はさらに小さくなる。

すなわち、積算出力(温度上昇量)は中性子発生量が増えるにつれて大きくなるが、ある値(出力が120Wを越える直前で出力が低下する場合)を境に積算出力は逆に小さくなっていく。

表に示すとおり、中性子発生量の増加につれて積算出力がこのように変化する様子はL5.5P-30炉心およびLL1P-30炉心についても同様であることが判る。

以上より、ケースBで温度上昇量が最大となったL2P-30炉心の結果は中性子発生量を変化させたとしても最も厳しい結果に近い値であると考えられる。

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 ×1.0)

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	237.1	120.2	598.1	1.98E+04	2.20E+00	5.04E+00
L5.5P-40	241.1	120.2	602.4	2.03E+04	2.45E+00	5.63E+00
L5.5P-30	238.1	120.2	599.2	1.99E+04	2.48E+00	5.67E+00 ^{c)}
L4P-50	227.0	120.3	588.8	1.87E+04	1.83E+00	4.09E+00
L4P-40	232.6	120.3	595.7	1.92E+04	2.26E+00	4.95E+00
L4P-30	234.2	120.2	597.5	1.94E+04	2.42E+00	5.27E+00
L3P-50	224.6	120.3	588.0	1.83E+04	1.68E+00	3.56E+00
L3P-40	223.3	120.3	586.8	1.82E+04	1.84E+00	3.95E+00
L3P-30	224.4	120.3	588.2	1.83E+04	2.03E+00	4.23E+00
L2P-50	207.7	120.4	570.6	1.66E+04	1.12E+00	2.88E+00
L2P-40	211.1	120.4	574.9	1.69E+04	1.34E+00	2.97E+00
L2P-30	210.1	120.4	573.3	1.68E+04	1.41E+00	3.27E+00
L1P-50	197.2	120.5	558.8	1.56E+04	6.08E-01	1.97E+00
L1P-40	198.6	120.5	561.3	1.56E+04	6.42E-01	1.62E+00
L1P-30	198.2	120.5	560.6	1.56E+04	6.74E-01	2.06E+00
LL1P-50	192.0	120.5	552.5	1.51E+04	2.49E-01	9.39E-01
LL1P-40	192.6	120.5	553.9	1.51E+04	2.23E-01	8.13E-01
LL1P-30	192.3	120.5	553.2	1.51E+04	2.58E-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

c) 温度上昇が最大となる結果

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 ×1.0) 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)	238.1	120.2	599.2	1.99E+04	2.48E+00	5.67E+00	—
U 重量を 6%減少	—	—	—	—	2.63E+00	6.01E+00	1.06
β_{eff} を 8%減少	30.8	120.3	558.1	1.77E+04	2.20E+00	5.03E+00	0.89
β_{eff} を 8%増加	30.8	120.2	642.6	2.25E+04	2.79E+00	6.40E+00	1.13
ℓ を 8%減少	30.8	120.2	600.2	2.00E+04	2.49E+00	5.69E+00	1.01
ℓ を 8%増加	30.8	120.2	600.2	2.00E+04	2.49E+00	5.69E+00	1.01
温度係数を 32%減少	30.8	120.3	572.7	1.74E+04	2.16E+00	4.94E+00	0.87
温度係数を 32%増加	30.8	120.3	631.3	2.31E+04	2.87E+00	6.57E+00	1.16

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 5-3 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 ×0.5)

炉心名称	120W 超 (s) ①	最大出力 (W) ②	最大となる時間 (s) ③	最大出力 (W) ④	0.1W まで (s) ⑤	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}
L5.5P-50	—	—	436.6	82.5	3806.8	1.31E+05	1.45E+01	3.32E+01
L5.5P-40	—	—	431.1	81.4	3805.1	1.28E+05	1.55E+01	3.56E+01
L5.5P-30	—	—	435.2	82.2	3806.4	1.30E+05	1.61E+01	3.69E+01
L4P-50	—	—	466.1	87.5	3816.0	1.43E+05	1.40E+01	3.12E+01
L4P-40	—	—	460.6	85.5	3863.6	1.39E+05	1.64E+01	3.58E+01
L4P-30	—	—	457.2	84.9	3862.7	1.37E+05	1.71E+01	3.74E+01
L3P-50	—	—	489.3	90.3	3871.8	1.51E+05	1.38E+01	2.93E+01
L3P-40	—	—	495.5	91.3	3873.5	1.53E+05	1.55E+01	3.32E+01
L3P-30	—	—	493.3	90.8	3872.9	1.52E+05	1.69E+01	3.51E+01
L2P-50	—	—	603.9	110.3	3850.7	2.00E+05	1.35E+01	3.46E+01
L2P-40	—	—	581.5	106.0	3845.8	1.89E+05	1.50E+01	3.31E+01
L2P-30	—	—	584.0	106.7	3846.3	1.90E+05	1.59E+01	<u>3.70E+01</u> ^{c)}
<u>L1P-50</u> ^{d)}	482.7	120.2	—	—	847.9	3.43E+04	1.34E+00	4.34E+00
<u>L1P-40</u>	484.2	120.2	—	—	850.8	3.44E+04	1.41E+00	3.55E+00
<u>L1P-30</u>	480.9	120.2	—	—	848.0	3.42E+04	1.48E+00	4.52E+00
<u>LL1P-50</u>	426.6	120.2	—	—	801.3	2.99E+04	4.94E-01	1.87E+00
<u>LL1P-40</u>	426.7	120.2	—	—	802.2	2.99E+04	4.42E-01	1.61E+00
<u>LL1P-30</u>	427.8	120.2	—	—	800.7	2.98E+04	5.11E-01	2.03E+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

c) 温度上昇が最大となる結果

d) 炉心名称で下線をつけた炉心は出力が 120W まで上昇してスクラムする場合

① 出力が 120W まで上昇してスクラムする場合のスクラムに至るまでの時間

② 出力が 120W まで上昇してスクラムする場合の最高出力

③ 出力が 120W まで上昇しない場合の出力が最大となるまでの時間

④ 出力が 120W まで上昇しない場合の最大出力

⑤ 自動または手動スクラムをして出力が 0.1W まで低下する時間

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 × 0.5) 誤差の影響

	最大となる 時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) ^{a)}	温度上昇 (°C) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	584.0	106.7	3846.3	1.90E+05	1.59E+01	3.70E+01	—
U 重量 6%減少	—	—	—	—	1.59E+01	3.70E+01	1.06
β_{eff} を 8%減少	550.7	109.5	3836.6	1.90E+05	1.59E+01	3.70E+01	1.00
β_{eff} を 8%増加	617.3	104.2	3855.8	1.90E+05	1.59E+01	3.70E+01	1.00
ℓ を 8%減少	584.0	106.7	3846.3	1.90E+05	1.59E+01	3.70E+01	1.00
ℓ を 8%増加	584.0	106.7	3846.3	1.90E+05	1.59E+01	3.70E+01	1.00
温度係数を 32%減少	<u>583.9</u> ^{e)}	<u>120.0</u>	<u>963.1</u>	<u>4.62E+04</u>	<u>3.87E+00</u>	<u>9.00E+00</u>	<u>0.24</u>
温度係数を 32%増加	529.8	96.9	3833.4	1.66E+05	1.39E+01	3.22E+01	0.87

a), b) は表 5-3 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 5-3 の結果と同じ

e) 太字下線を付けた結果は出力が上昇して出力が 120W を超えてスクラムに至った場合。それ以外の結果はすべて出力は 120W まで至らずに出力が減少し、最終的に 3600 秒後に手動スクラムで停止した場合

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

【中性子発生量を変更した場合】

炉心 名称	中性子発生量 (倍率) ^{a)}	120W 超 (s) ^{b)}	最大出力 (W)	最大となる時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C)
L2P-30	0.2	—	—	806.8	58.6	3840.4	1.18E+05	9.91E+00	2.30E+01
	0.4	—	—	633.2	92.2	3840.4	1.70E+05	1.42E+01	3.31E+01
	0.5	—	—	584.0	106.7	3846.3	1.90E+05	1.59E+01	3.70E+01
	0.55	—	—	564.6	113.6	3848.9	2.00E+05	1.67E+01	3.88E+01
	0.59	—	—	564.6	118.9	3850.7	2.07E+05	1.73E+01	4.02E+01
	<u>0.6</u> ^{c)}	586.1	120.0	—	—	965.5	5.13E+04	4.30E+00	9.99E+00
	<u>1.0</u>	210.1	120.4	—	—	573.3	1.68E+04	1.41E+00	3.27E+00
	<u>2.0</u>	81.7	121.0	—	—	418.0	7.75E+03	6.50E-01	1.51E+00
L5.5P-30	<u>5.0</u>	17.7	123.4	—	—	291.8	2.51E+03	2.10E-01	4.88E-01
	0.5	—	—	435.2	82.2	3806.4	1.30E+05	1.61E+01	3.69E+01
	0.89	—	—	351.7	119.9	3818.7	1.74E+05	2.16E+01	4.93E+01
	<u>0.9</u>	312.1	120.1	—	—	678.5	2.69E+04	3.34E+00	7.66E+00
LL1P-30	<u>1.0</u>	238.1	120.2	—	—	599.2	1.99E+04	2.48E+00	5.67E+00
	0.1	—	—	2469.5	88.1	3947.4	2.34E+05	4.02E+00	1.60E+01
	0.15	—	—	2115.1	117.1	3957.5	3.16E+05	5.41E+00	2.15E+01
	<u>0.16</u>	2197.4	120.0	—	—	2582.7	1.76E+05	3.02E+00	1.20E+01
	<u>0.2</u>	1260.3	120.1	—	—	1643.7	8.61E+04	1.48E+00	5.86E+00
	<u>0.3</u>	758.5	120.1	—	—	1139.0	5.11E+04	8.75E-01	3.48E+00
	<u>0.5</u>	425.7	120.2	—	—	800.7	2.98E+04	5.11E-01	2.03E+00
	<u>1.0</u>	192.3	120.5	—	—	553.2	1.51E+04	2.58E-01	1.03E+00

a) ケース A の中性子発生量に対する倍率

b) 説明は表 5-3 と同じ

c) 中性子発生倍率に名称で下線をつけたものは出力が 120W まで上昇してスクラムする場合、それ以外は 120W まで上昇せずに手動スクラムで停止する場合

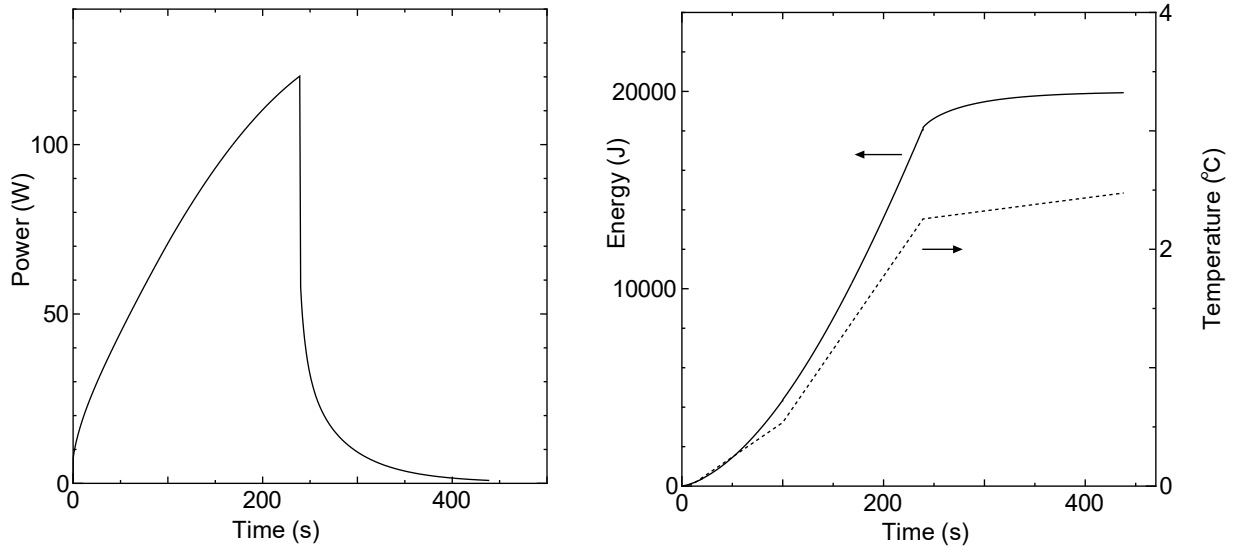


図 5-1 L5.5P-30 炉心

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

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 $\times 1.0$)

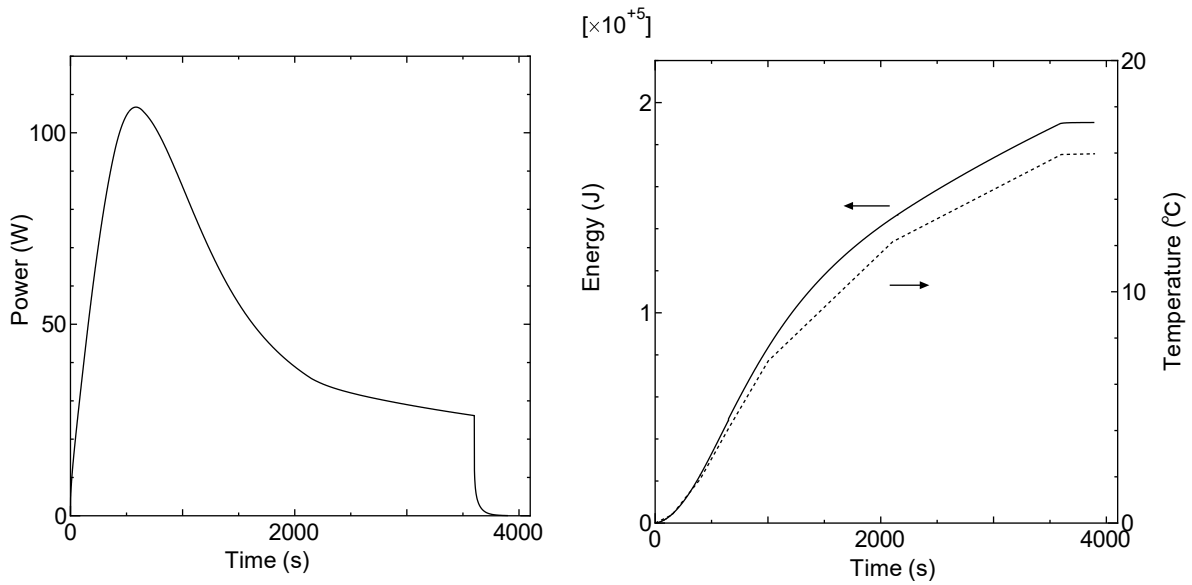


図 5-2 L2P-30 炉心

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

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 $\times 0.5$)

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/cm³ (25°C)

定圧比熱容量*)：4.18 J/K/g (25°C) *) 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(6H₂O)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 %Δk/k）以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるので -0.5 %Δk/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(6H₂O)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。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 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）

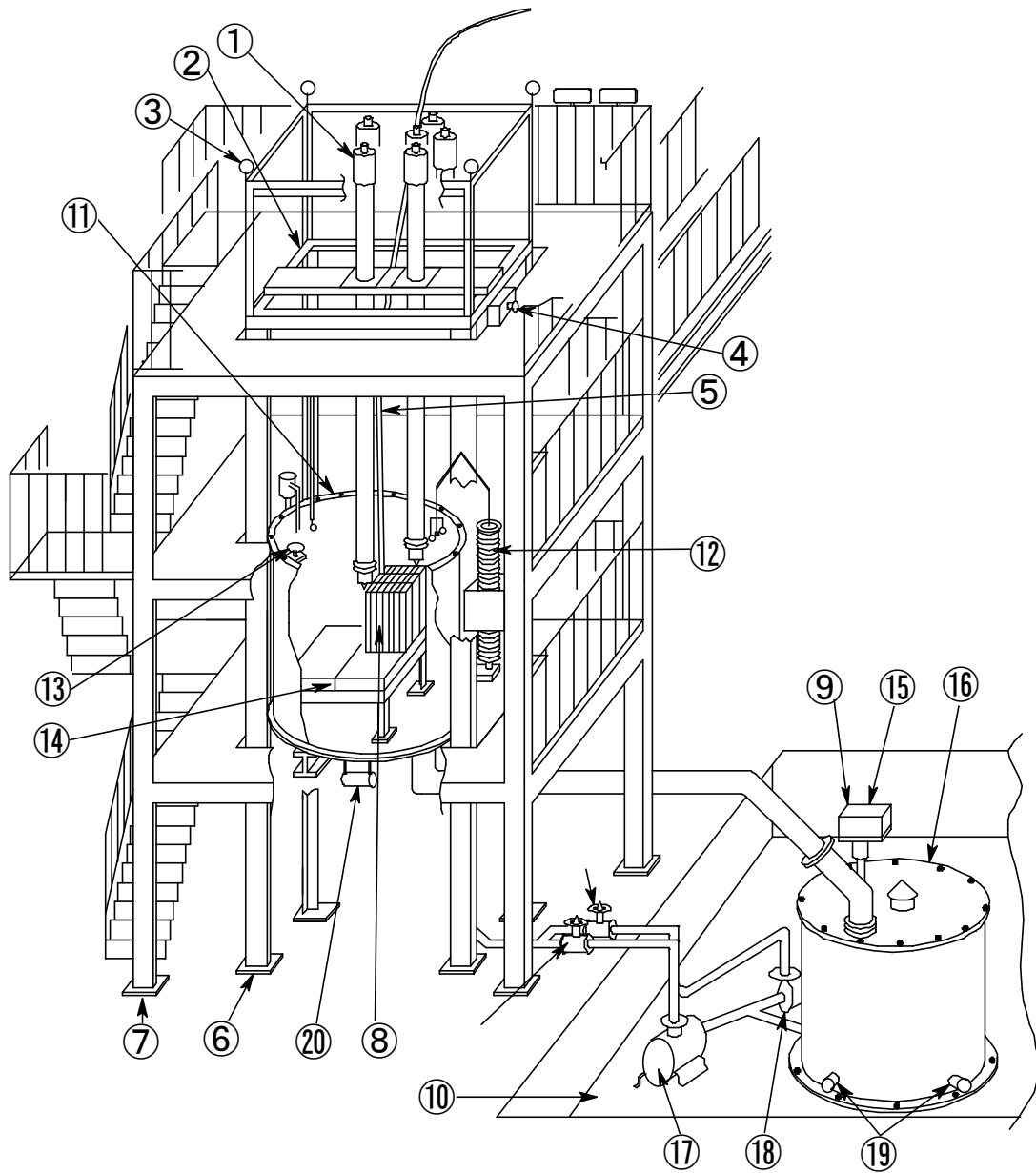


図 6-1 軽水減速架台 (C 架台) 概念図

(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 最大出力 (W)	0.1W ま で (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ($^\circ\text{C}$) ^{a)}	温度上昇 ($^\circ\text{C}$) ^{b)}	(参考) 炉心タンク 水の温度上 昇 ($^\circ\text{C}$)
C45G(5H ₂ O)	4	2.24×10^{-6}	1.08	3666	3.71E+03	7.83E-02	2.58E-01	1.75E-00
C45G(5H ₂ O)	5	4.06×10^{-5}	4.35	3747	6.61E+03	1.58E-01	5.27E-01	1.79E-01
C45G(6H ₂ O)		4.64×10^{-5}	5.41	3761	7.36E+03	1.59E-01	5.36E-01	1.80E-01
C45G(7H ₂ O)		2.69×10^{-5}	2.56	3715	5.18E+03	1.02E-01	3.38E-01	1.78E-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(6H₂O)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 ($^\circ\text{C}$) ^{a)}	温度上昇 ($^\circ\text{C}$) ^{b)}	比 ^{c)}
基準 ^{d)}	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
β_{eff} を 8%減少	6.37	3762	7.99E+03	1.73E-01	5.82E-01	1.09
β_{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

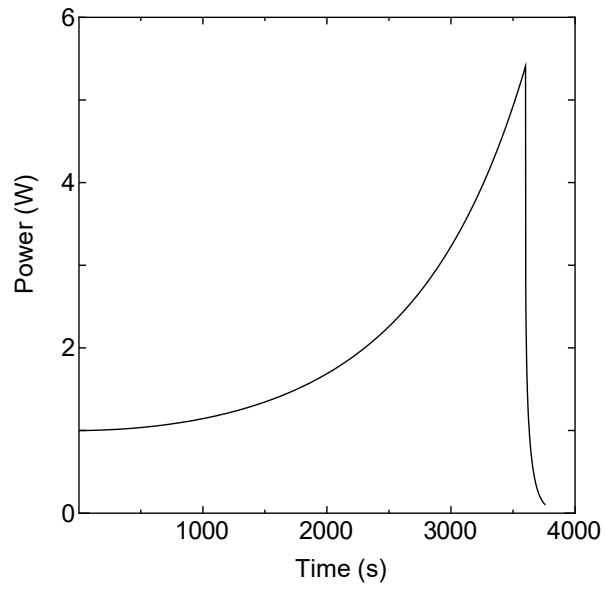


図 6-2 C45G(6H₂O)炉心 出力変化
(炉心タンクヒータによる温度上昇)

2-7 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°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 100W となるレンジ

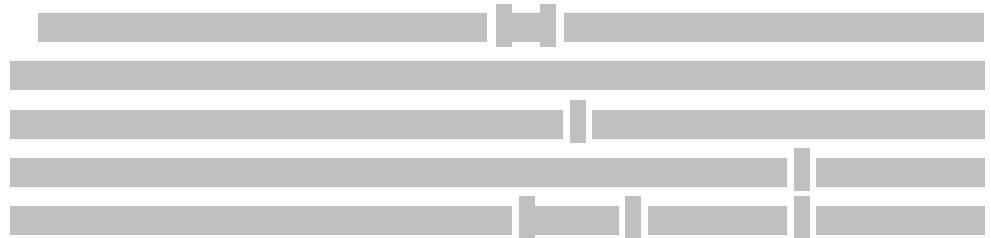
中性子源を挿入して、出力 0.01W の未臨界定常状態

(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)

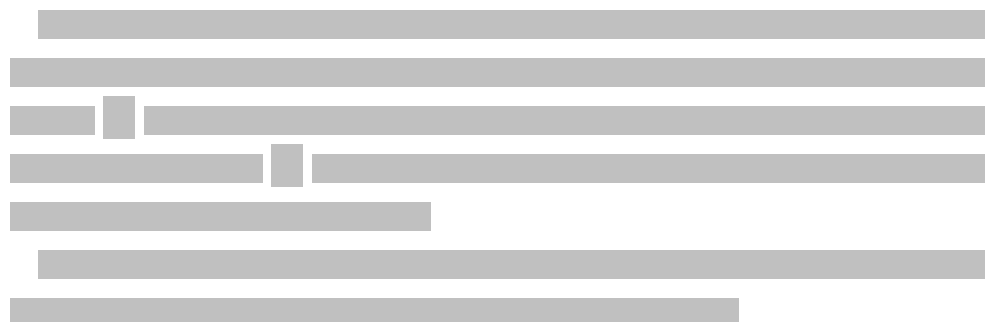


ストップを通過するごとにシリンダの上昇速度は遅くなるように設計されている。上昇速度とストロークは申請書に以下のように記載されている。

図 7-3 に主要なストップ間の距離を記載している。

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 段ストップ	下限 ~ 約 70	3.3 以下
第 2 段ストップ ~ 第 3 段ストップ	約 70 ~ 約 140	1.1 以下
第 3 段ストップ ~ 第 4 段ストップ	約 140 ~ 約 170	0.6 以下
第 4 段ストップ ~ 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、ストップはラチェット構造となっているためストップ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) 本事象の安全保護回路系等の動作を含むシナリオ

・3×3 の中心架台の位置は図 7-4、7-5 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、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

第 2 段から上限までは約 210 秒かかることになる。

中心架台の反応度の解析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 7-6 に L5.5(30cm)の結果を図 7-7 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。

誤装荷する燃料の反応度によりスクラムに至るまで 2 つの場合が想定される。

a) 中心架台の上昇途中で 120W を越えてスクラムする場合

- ・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。起動系（3 本の核分裂計数管）の対数計数率炉周期系統も作動しないこととする。
- ・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により中心架台を上昇させる油圧ポンプが停止し、1秒後に中心架台が落下を開始し12秒後までに時間とともに線型に負の反応度を加えるものとする。(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)。その際に、制御棒3本は上限状態となっているが作動しないものとする。
- ・これらの動作の間に中性子源は挿入したままとする。

b) 中心架台が上限まで上昇し、その後の制御棒引き抜き操作に伴って出力が上昇し120Wを越えてスクラムする場合

- ・中心架台を上昇させたのち、出力が安定するまでしばらく待つ。
- ・中心架台を上昇させてから10分後(中心架台上限となつてから約400秒後)に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する。
- ・スクラム信号の発生により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とする。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。その際に、中心架台は作動しないものとする。
- ・出力が0.1Wまで低下するまで解析を行う。
- ・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。

結果を表7-2に示す。温度上昇が最も大きいのはL2P-30炉心であり、燃料温度上昇は約1.1°Cであり判定基準値を満たしている。

この炉心の燃料重量、即発中性子減衰定数、反応度温度係数の誤差を検討したときの結果を表7-3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} に誤差があった場合には燃料温度が最大9%上昇する。 ℓ 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。

これらの誤差があつたとしても燃料温度は約1.15倍(1.06 \times 1.06)となるだけなので判定基準値を満たしている。

なお、燃料の温度上昇が最も大きくなった L2P-30 炉心の出力変化を図 7-9、図 7-10 に、反応度の変化(制御棒引抜き前まで)を図 7-11 に示す。

その他の結果として、反応度が小さい燃料を挿入した場合で L2P-30 炉心の結果の次に温度が最も大きくなった L5.5P-30 炉心の出力変化を図 7-12、図 7-13 に示す。これは中心架台を上限にしても未臨界であった場合である。また反応度が大きな燃料を挿入した場合で温度が最も大きくなった L5.5P-30 炉心の出力変化を図 7-12、図 7-13 に示す。これは中心架台を上昇中に出力が 120W を超えた場合である。

参考データとして、燃料を誤装荷しない場合に中心架台を上昇させたときの出力変化の例を図 7-8 に示す。

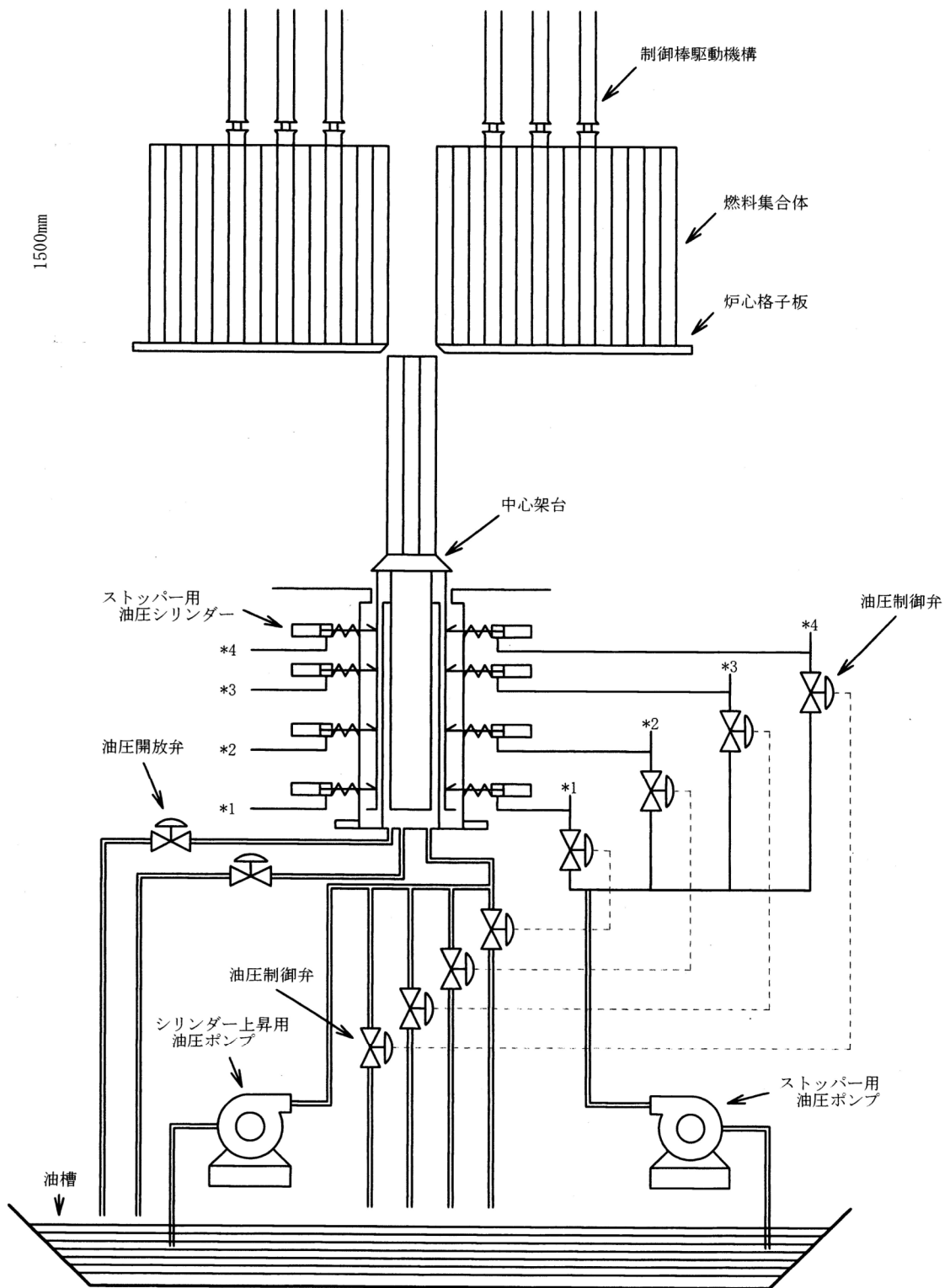


図 7-1 中心架台の概念図



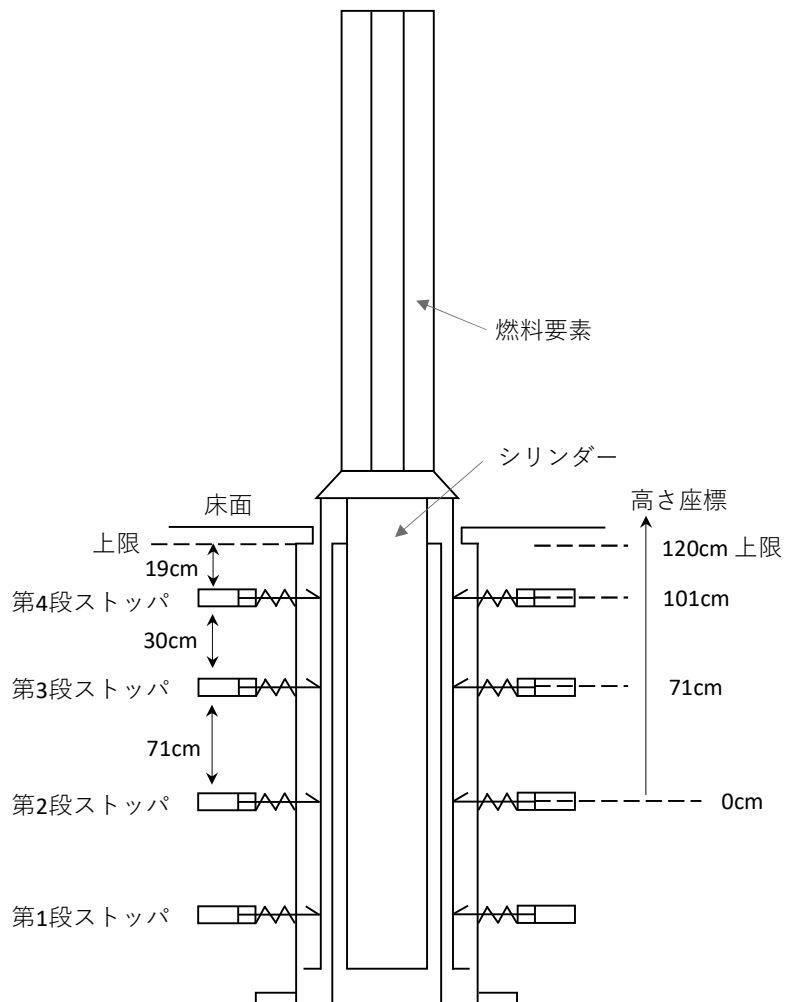
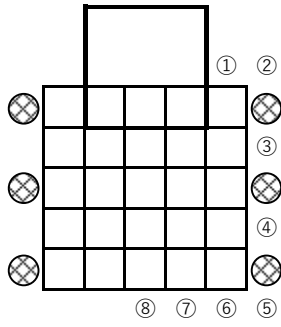
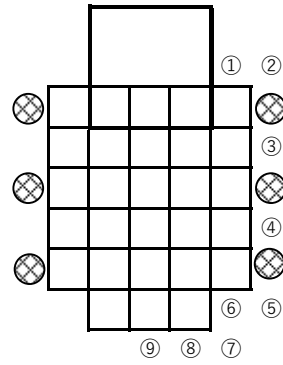


図 7-3 中心架台駆動装置のストッパ位置
 (反応度が添加され始める位置を高さ座標の 0cm としている)

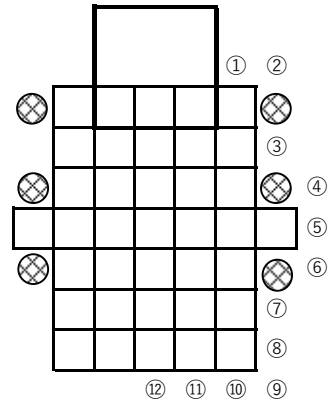
L5.5(50cm)



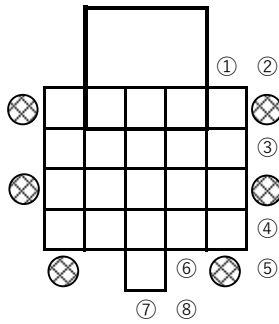
L5.5(40cm)



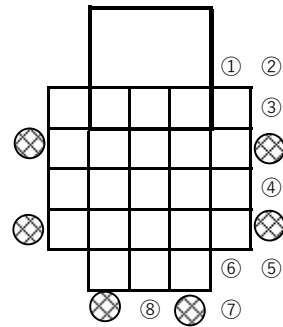
L5.5(30cm)



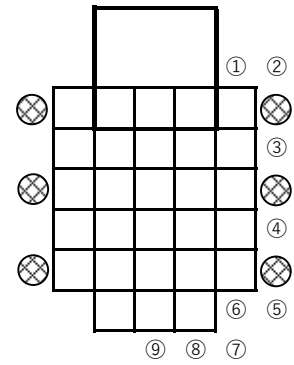
L4(50cm)



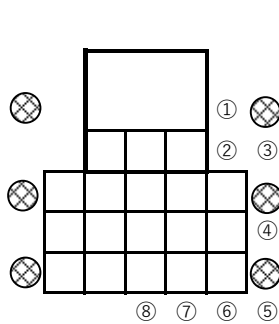
L4(40cm)



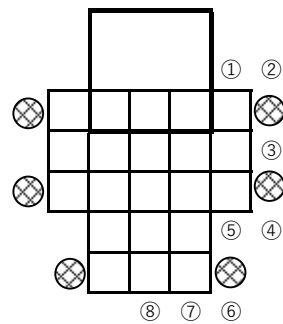
L4(30cm)



L3(50cm)



L3(40cm)



L3(30cm)

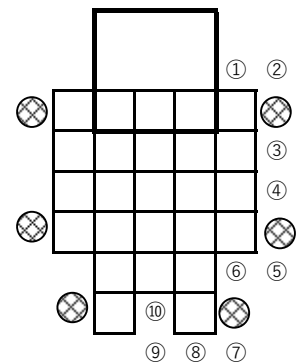
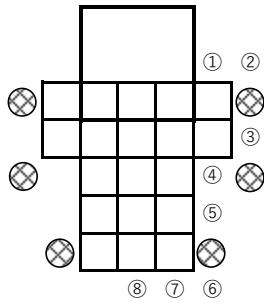
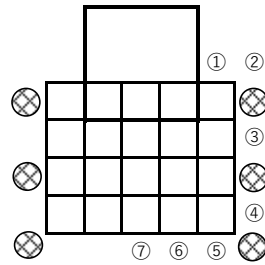


図7-4 各炉心の燃料装荷位置 (L5.5、L4、L3 炉心)
炉心配置図の上のほうの3×3の黒い枠線が中心架台位置

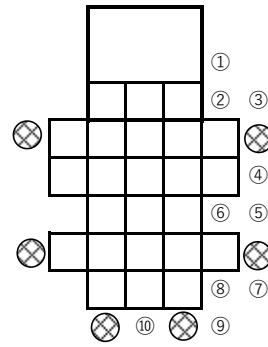
L2(50cm)



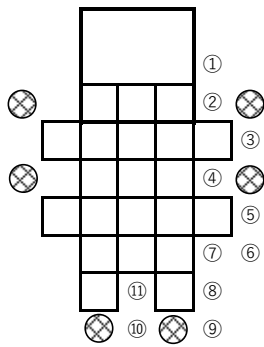
L2(40cm)



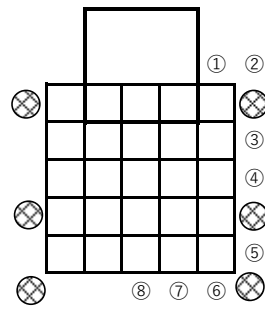
L2(30cm)



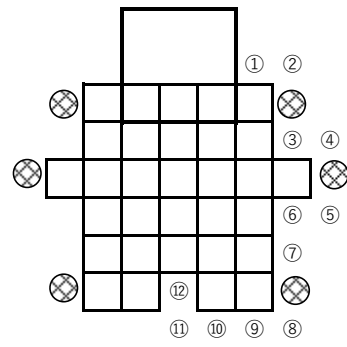
L1(50cm)



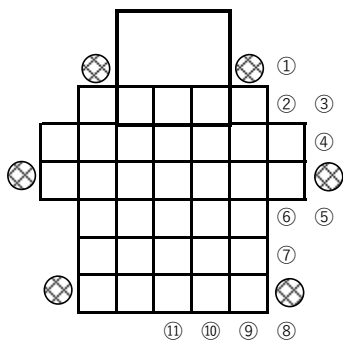
L1(40cm)



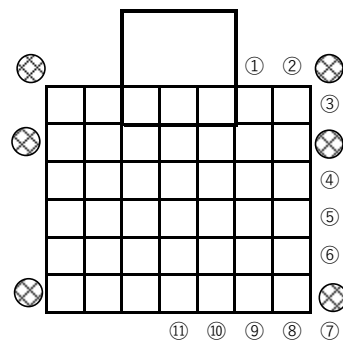
L1(30cm)



LL1(50cm)



LL1(40cm)



LL1(30cm)

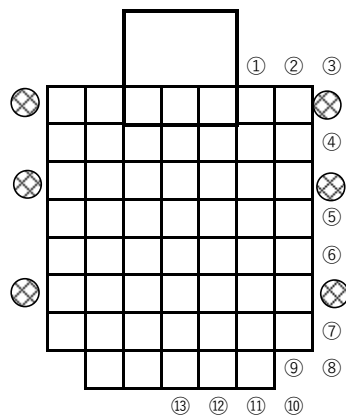


図 7-5 各炉心の燃料装荷位置 (L2、L1、LL1 炉心)

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	0.152	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	1.854	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	1.096	0.559	0.559	0.974	0.661	0.459
⑥	0.422	0.262	0.214	1.137	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	0.179	0.717	1.599	0.376	1.014	0.974	0.711	0.954	0.216	0.262
⑧	0.927	0.401	0.226		0.641	0.420	1.745	0.747	0.266	0.868		0.557	0.924	1.063	0.219	0.380	0.339	0.306
⑨		0.488	0.076			0.513			0.415			0.370	0.438		0.326	0.531	0.531	0.180
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

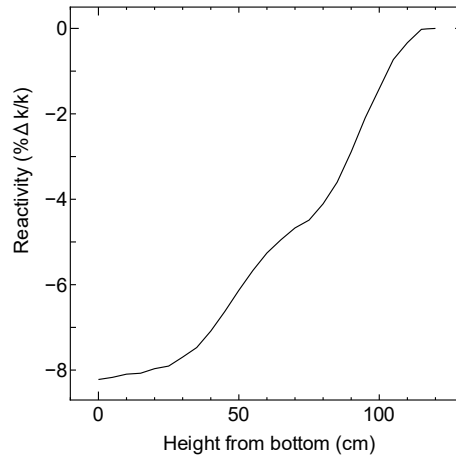


図 7-6 L5.5 (50cm) 炉心の中心架台反応度

(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)

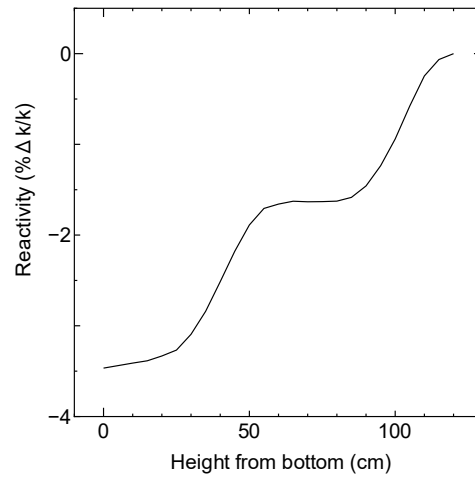


図 7-7 L5.5 (30cm) 炉心の中心架台反応度

(横軸、縦軸は図 7-6 と同じ)

- a) 太字下線の結果は中心架台上昇時に出力が 120W を超過してスクラムした場合、それ以外は中心架台上限とした後、制御棒を引き抜いて出力が上昇してスクラムした場合

炉心名称	燃料装荷反 応度 (%Δk/k)	中心架台反 応度 (%Δk/k)	120W 超過 (s) ①	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C)
L5.5P-50 (最大)	0.927	8.22	<u>183.9</u> a)	8.26E+02	9.17E-02	2.10E-01
L5.5P-30 (最小)	0.076	3.47	45.6	1.26E+03	1.56E-01	3.57E-01
L4P-50 (最大)	1.137	11.5	<u>157.9</u>	5.34E+02	5.24E-02	1.17E-01
L4P-30 (最小)	0.152	5.93	36.0	1.23E+03	1.54E-01	3.36E-01
L3P-50 (最大)	1.745	12.7	<u>134.6</u>	5.20E+02	4.75E-02	1.01E-01
L3P-30 (最小)	0.179	8.64	33.5	1.41E+03	1.56E-01	3.25E-01
L2P-50 (最大)	1.854	17.5	<u>134.9</u>	4.84E+02	3.28E-02	8.40E-02
L2P-30 (最小)	0.370	9.00	16.8	5.80E+03	4.86E-01	<u>1.13E+00</u> b)
L1P-50 (最大)	1.096	10.7	<u>147.8</u>	5.80E+02	2.27E-02	7.34E-02
L1P-30 (最小)	0.219	8.70	31.3	1.60E+03	6.90E-02	2.11E-01
LL1P-50 (最大)	0.974	5.83	<u>140.8</u>	8.10E+02	1.34E-02	5.05E-02
LL1P-30 (最小)	0.180	3.23	35.4	1.11E+03	1.91E-02	7.58E-02

- b) 温度上昇の最大値は L2P-30 (下線付き数値)

- ① 中心架台上昇時にスクラムした場合は中心架台上昇開始 (図 7-3 の第 2 ストップ位置) からスクラム発生するまでの時間、中心架台上限となった場合は制御棒を上昇し始めてからスクラム発生するまでの時間

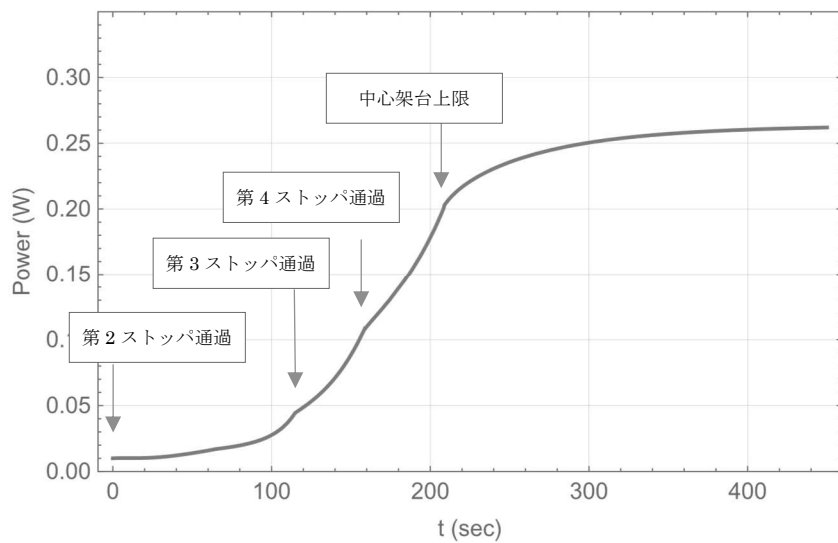


図 7-8 (A) L5.5 (30cm) 炉心での通常運転時(燃料誤装荷無し)の中心架台上昇時の出力変化
(横軸、縦軸は図 7-6 と同じ)

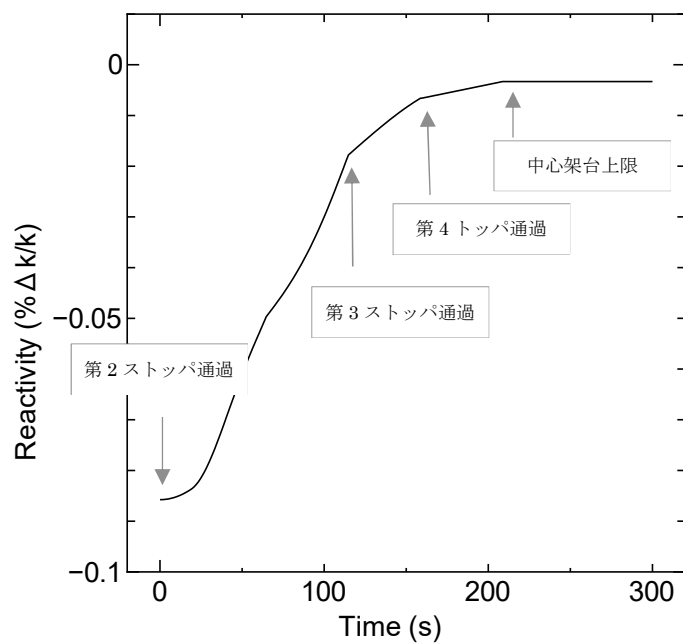


図 7-8 (B) L5.5 (30cm) 炉心での通常運転時(燃料誤装荷無し)の中心架台上昇時の反応度の変化

表 7-4 L2P-30 炉心 (反応度最小) の解析結果 (誤差の影響)

	120W 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)	16.8	5.80E+03	4.86E-01	1.13E+00	—
U 重量を 6%減少	—	—	9.38E-04	2.15E-03	1.06
βeff を 8%減少	14.7	6.33E+03	5.31E-01	1.23E-01	1.09
βeff を 8%増加	18.8	5.46E+03	4.58E-01	1.07E+00	0.94
ℓ を 8%減少	16.8	5.81E+03	4.86E-01	1.13E+00	1.00
ℓ を 8%増加	16.8	5.81E+03	4.86E-01	1.13E+00	1.00
温度係数を 32%減少	16.8	5.80E+03	4.86E-01	1.13E+00	1.00
温度係数を 32%増加	16.8	5.80E+03	4.86E-01	1.13E+00	1.00
中心架台反応度誤差+a)	16.5	6.09E+03	5.10E-01	1.18E+00	1.05
中心架台反応度誤差-	17.1	5.51E+03	4.62E-01	1.07E+00	0.95

a) 反応度の誤差評価方法

$$\rho = 1 - \frac{1}{k} \text{ なので、} \Delta\rho = \frac{1}{k^2} \Delta k = \frac{1}{\left(\frac{1}{1-\rho}\right)^2} \Delta k = (1-\rho)^2 \Delta k$$

Δk=±0.6%として±Δρを評価する。

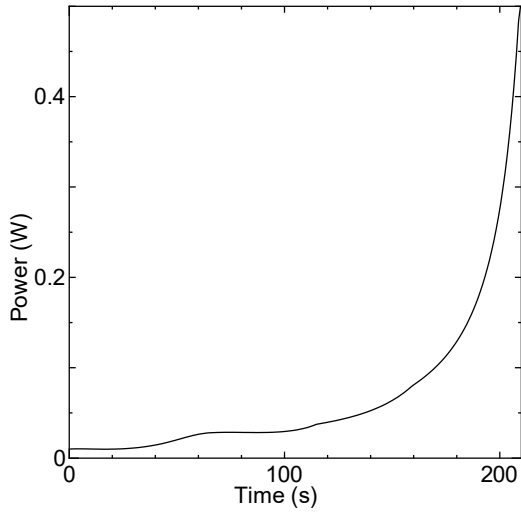


図 7-9 L2-P30(最小)出力変化
(中心架台上昇まで)

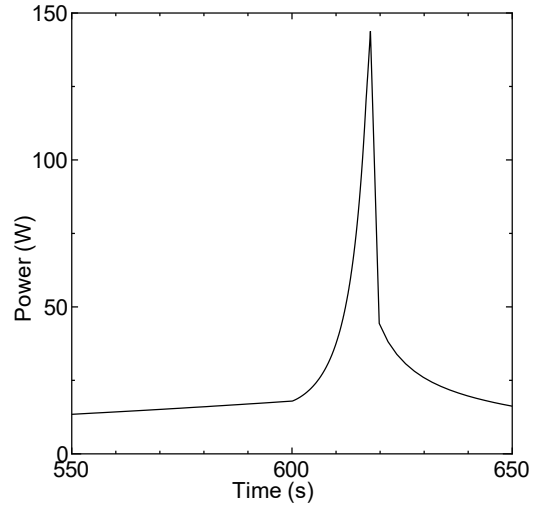


図 7-10 L2-P30(最小)出力変化
(600 秒から制御棒引抜き)

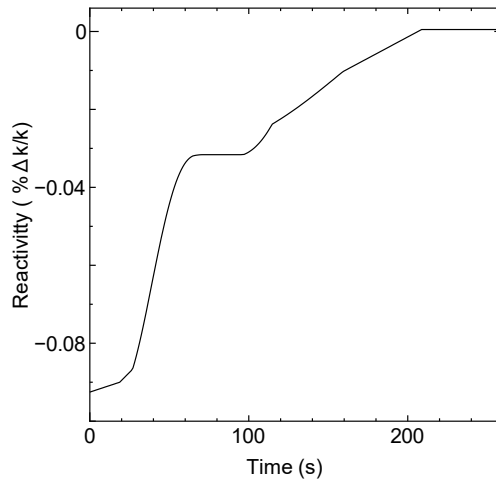


図 7-11 L2-P30(最小) 反応度変化
(中心架台上昇は 208 秒まで)

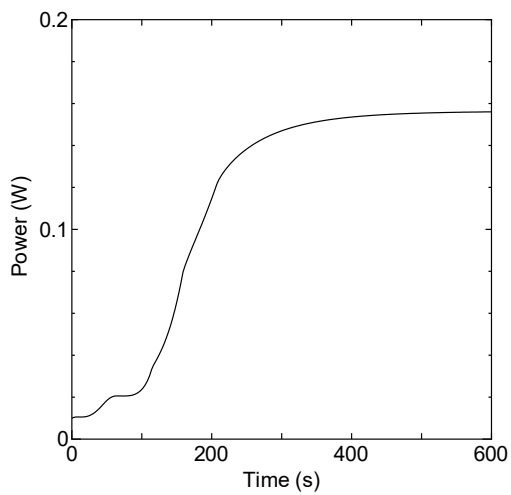


図 7-1 2 L5.5-P30(最小)出力変化
(中心架台上昇は 208 秒まで)

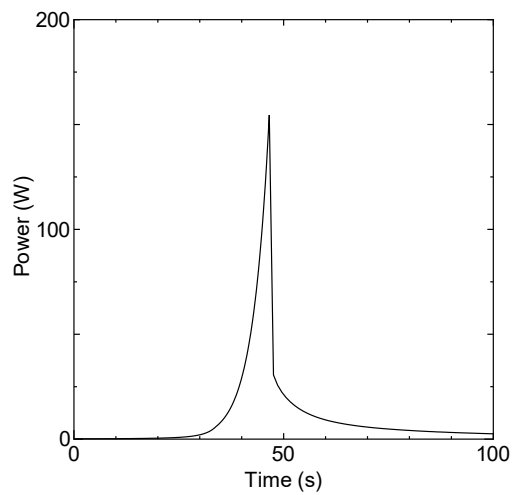


図 7-1 3 L5.5-P30(最小)出力変化
(制御棒上昇後、上昇開始を 0s)

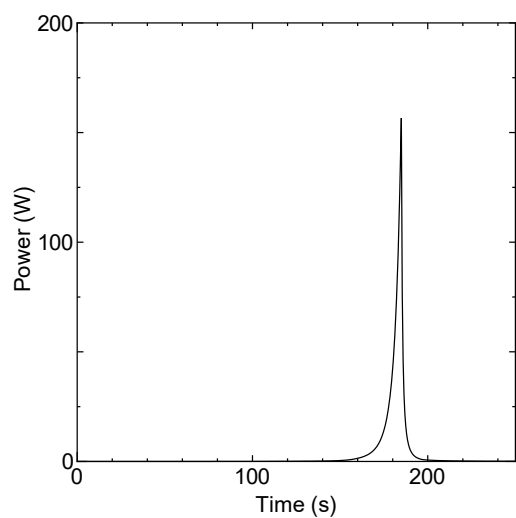


図 7-1 4 L5.5-P30(最大)出力変化

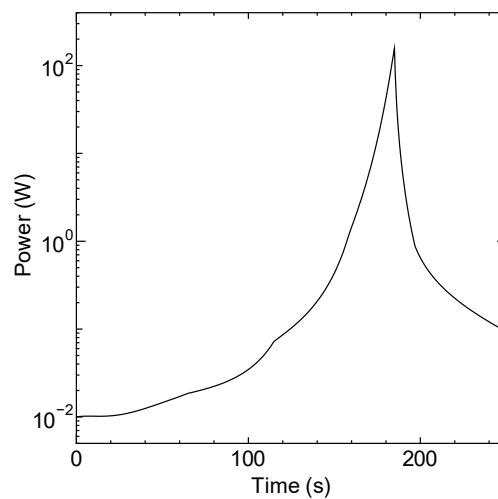


図 7-1 5 L5.5-P30(最大)出力変化
(図 7-14 の縦軸 Log)

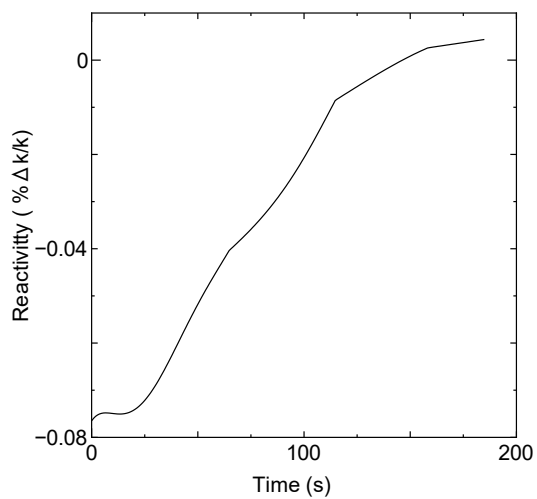


図 7-1 4 L5.5-P30(最大) 反応度変化

2-8 燃料の機械的破損

2-8-1 解析シナリオ

燃料集合体の作成、運搬、炉心装荷作業などの取扱中に誤って燃料集合体を落下させるなどした場合、燃料集合体が機械的に破損して燃料要素（固体減速炉心の燃料角板、軽水減速炉心の燃料長板）より核分裂生成物（FP）が放出され周辺公衆に対して著しい放射線被ばくを与える可能性がある。

以下のようなシナリオに従った解析を行う。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、「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 で選定した代表炉心の中で、下記の (3) の燃料破損条件の時に最も FP 放出量が多くなる炉心を対象とする。

(2) 初期条件

- ・同じ炉心で月末に 100W での運転を 1 時間行うという運転パターンを 9 回繰り返すとする。各運転間隔は 30 日間とし、その後、最後の運転（9 回目）の 24 時間後（次の月の初日）に 100W での運転を 1 時間行う。（申請書に記載された積算出力に関する規制値は、100Wh/月、1kW/年）
- ・この運転履歴を元に FP の生成量を燃焼計算コード ORIGEN-2.2 を用いて求める。

(3) 燃料破損条件

最後の運転を停止してから、1 日後に炉心配置変更作業を行い、その際に 1 体の燃料集合体を取り扱う際に誤って燃料板を破損させたとする。
軽水減速架台では 1 枚の燃料を破損させ、燃料芯材において切断面からある深さ内に蓄積した FP のうち希ガス（Xe、Kr）及びよう素が全量放出されたとする。固体減速架台では 1 体の燃料体のうち 10%の燃料要素（角板）が破損し、同じく燃料芯材の切断面からある深さ内に蓄積した FP のうち希ガス（Xe、Kr）及びよう素が全量放出されたとする。

(4) 評価

研究所敷地境界位置での実効線量を評価する。

2-8-2 燃料要素内での FP の飛程

燃料要素内での希ガス (Kr、Xe) とヨウ素 (I) の飛程を SRIM コード¹⁾を用いて求めた。SRIM (the Stopping and Range of Ions in Matter)は高速イオンが材料中を通過する場合のイオンの飛程やダメージ等を算出するためのシミュレーションコードである (現在の最新バージョンは SRIM2013)。

ウラン 235 の 1 核分裂あたりの発生エネルギーは約 200MeV で、このうち 170MeV が核分裂片 (FP) のエネルギーとなるとする。このエネルギーが 2 つの核分裂片 (FP) に全て分配されたとすると、質量数が小さい方が受け取るエネルギーは大きくなるので、Kr、Xe、I のうち線量の解析で考慮する各核種のなかでは Kr-81、Xe-129、I-131 のエネルギーが最も大きくなり、

Kr-81 : 112MeV、Xe-129 : 77MeV、I-131 : 76MeV

となる。

固体減速炉心で用いる U-Mo 燃料、および軽水減速炉心で用いる U-Si 燃料のそれぞれについての最大飛程の結果を表 8-1 に示す。高濃縮ウラン (HEU) の添付書類 10 での設計基準事故の解析では FP の最大飛程を 15 μ m としていたが、低濃縮ウランを用いた両燃料要素共に燃料の密度が HEU の場合 (U-Al 合金) より大きいため FP の飛程は短くなる。

燃料要素である U-Si 燃料は研究用原子炉の燃料として広く用いられてきた実績があり、また U-Mo 燃料についても様々な照射実験によりその内部に FP を保持する能力が高いことが判っている。これらの燃料板は外部から力が加わった場合であっても変形するだけで割れたりする可能性は少なく FP は燃料要素内に留まるはずである。しかし、ここでは何らかの原因で切断面から FP の安全側の最大飛程 (15 μ m とする) までの領域の FP がすべて切断面に溜まっていたと仮定して、破損した燃料板の切断面から 15 μ m の深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びヨウ素が全量放出されたとする。なお、KUR の設計基準事故解析でも FP の最大飛程を 15 μ m としている。

燃料板 1 枚当たり FP を放出する体積の割合は以下のようになる。

固体減速炉心用 燃料角板

軽水減速炉心用 燃料角板



1) "SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter", <http://www.srim.org/>.

表 8-1 燃料要素中の FP の飛程 (単位: μm)

イオンエネルギー (MeV)	U-Mo 燃料			U-Si 燃料		
	Kr	I	Xe	Kr	I	Xe
70	—	7.2	8.0	—	9.3	8.4
80	—	7.8	8.6	—	10.0	9.0
110	10.9	—	—	12.7	—	—
120	11.5	—	—	13.4	—	—

2-8-3 解析炉心の選定

固体減速炉心については取り出した燃料体1体の一部を破損させることにしているので、まず全ての代表炉心について燃料体1体当たりの積分出力（核分裂率に比例）を求め、その中で最も値が大きくなる燃料体を求める。次にその燃料集合体を取扱中に破損させてしまうことを考えて、その燃料体の積分出力に対する出力のピーク値との比率を求める。（燃料体の高さ方向に出力のピークがあったとしたら、その箇所の燃料板のみを破損させるようなことを想定）。この両者を掛け合わせた値が最も大きな炉心が最もFPを放出する可能性があるため、その炉心を選定する。

なお各炉心について、燃料体ごとの出力積分値の最大となる燃料体の位置を図8-2、8-3に示す。

表8-2に結果を示す。燃料体1体当たりの出力が最大となる炉心はL3P-50炉心であり、燃料体中の出力ピークを考慮してもこの炉心が最もFP放出量が大きくなるので、L3P-50炉心を選定する。なおこの炉心について燃料体ごとの出力を表8-5に示す。

軽水減速炉心については

2-8-4 解析

放出はすべて地上放出とし、実効放出継続時間はFPが瞬時に大気に放出されるものと考え、気象観測時間の最小単位の1時間とする。希ガスからは直接 γ 線による外部被ばくを受け、よう素からは吸引による甲状腺への取込みによる内部被ばくを受けるものとする。被ばく線量を評価するための着目核種として、希ガスについては、「被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について」（平成元年3月27日原子力安全委員会了承、平成13年3月29日原子力安全委員会一部改訂）に記載されているXe及びKr核種を対象とする。

相対濃度 $(\chi/Q)_{97\%}$ 及び相対線量 $(D/Q)_{97\%}$ は実効放出継続時間に基づき計算する。

放射性雲による線量として、放射性雲中の希ガスからのガンマ線による実効線量は次式で計算する。

$$D_{\gamma} = Q_{\gamma} \cdot (D/Q)_{97\%} \quad (1)$$

ここで、

D_{γ} : ガンマ線による実効線量 (Sv)、

Q_{γ} : 希ガス核種の0.5MeV（ガンマ線）換算放出量(Bq)、

$(D/Q)_{97\%}$: 希ガスに対する相対線量（実効放出時間1時間）(Sv/Bq)、

である。

よう素の呼吸摂取による実効線量は、評価地点におけるよう素の地表空気中の相対濃度

及びよう素の ^{131}I 等価放出量に基づいて次式により計算する。

$$D = K_{He} \cdot M \cdot Q_e \cdot (\chi/Q)_{97\%} \quad (2)$$

ここで、

- D : よう素の呼吸摂取による実効線量 (Sv)、
- K_{He} : ^{131}I の吸入摂取による小児の実効線量係数 (Sv/Bq)、
- M : 小児の呼吸率 (m^3/h)、
- Q_e : よう素の放出量 (^{131}I 等価量) (Bq)、
- $(\chi/Q)_{97\%}$: よう素に対する相対濃度 (実効放出時間 1 時間) (h/m^3)、

である。

(2) 式中で用いるよう素の ^{131}I 等価放出量 Q_e は次式により計算する。

$$Q_e = \sum_i \frac{K_{Hi}}{K_{He}} \cdot Q_i \quad (3)$$

ここで、

- K_{Hi} : よう素核種 i の吸入摂取による小児の実効線量係数 (Sv/Bq)、
- Q_i : よう素核種 i の放出量 (Bq)、

である。

地上放出であるため、放出位置に近いほど評価が大きくなる。周辺監視区域の境界外で放出位置を中心としてとった 16 方位の範囲内で放出位置から最短距離である地点を着目地点として評価し、このうち最大の評価を与える地点を評価地点とする。計算に用いるパラメータは表 8-2 に示す小児の値とし、実効放出継続時間が 1 時間であることを考慮して活動時における値を用いる。希ガスの環境への放出量は 0.5MeV (γ 線) について [REDACTED] を用いる。また、よう素については [REDACTED] を用いる。

なお、西南西方向は敷地境界までの距離が KUR に比べて KUCA のほうが遠いため、この評価は安全側の結果となる。

放出量は以下のように求める。

固体減速炉心 (L3P-50 炉心)

- (1) ORIGEN-2.2 で燃料破損時の FP の蓄積量を求める。
- (2) (1) の値に取り出した燃料体中の FP 蓄積量の比率である 7.13×10^{-2} (表 8-2 の(A)) を掛ける。
- (3) (2) の値にピークを考慮した比率 2.74 (表 8-2 の(B)) を掛ける

- (4) (3)の値に L3P-50 炉心の燃料角板中でのピーキング係数 1.09^{a)}を掛ける。
- (5) (4)の値に燃料角板中の FP 放出箇所の体積の比率である 9.47×10^{-4} を掛ける。
- (6) (5)の値に燃料破損割合の 10%を掛ける

軽水減速炉心 (C45G2(4 列)炉心)

- (1) ORIGEN-2.2 で燃料破損時の FP の蓄積量を求める(固体減速炉心と同じ値)。
- (2) (1)の値に C45G2(4 列)炉心の出力のピークを考慮した比率 2.60^{b)}を掛ける
- (3) (2)の値に C45G2(4 列)の燃料角板中でのピーキング係数 1.01^{a)}を掛ける。
- (4) (3)の値に燃料角板中の FP 放出箇所の体積の比率である 5.38×10^{-4} を掛ける。
- (5) (4)の値に破損燃料の比率である (1÷燃料板枚数(265 枚)) を掛ける。

a) 「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 で示した燃料板内のピーキング係数

b) 「第 404 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 5 月 17 日)
の説明資料 1-2 で示した炉心内のピーキング係数

結果を表 8-3、表 8-4 に示す。被ばく線量は最大でも小児の場合の約 $0.004 \mu\text{Sv}$ となり、周辺公衆の実効線量の評価値が発生事故当たり 5mSv を超えないという判断基準を満足している。

表 8-2 よう素による実効線量の評価に使用するパラメータ等

パラメータ等		数値
核種 <i>i</i> の吸入摂取による 小児の実効線量係数 (Sv/Bq)	131I	1.6×10^{-7}
	132I	2.3×10^{-9}
	133I	4.1×10^{-8}
	134I	6.9×10^{-10}
	135I	8.5×10^{-9}
小児の呼吸率(m ³ /h) (活動時)		0.31

「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」(平成 2 年 8 月 30 日
原子力安全委員会決定、平成 13 年 3 月 29 日原子力安全委員会一部改訂)

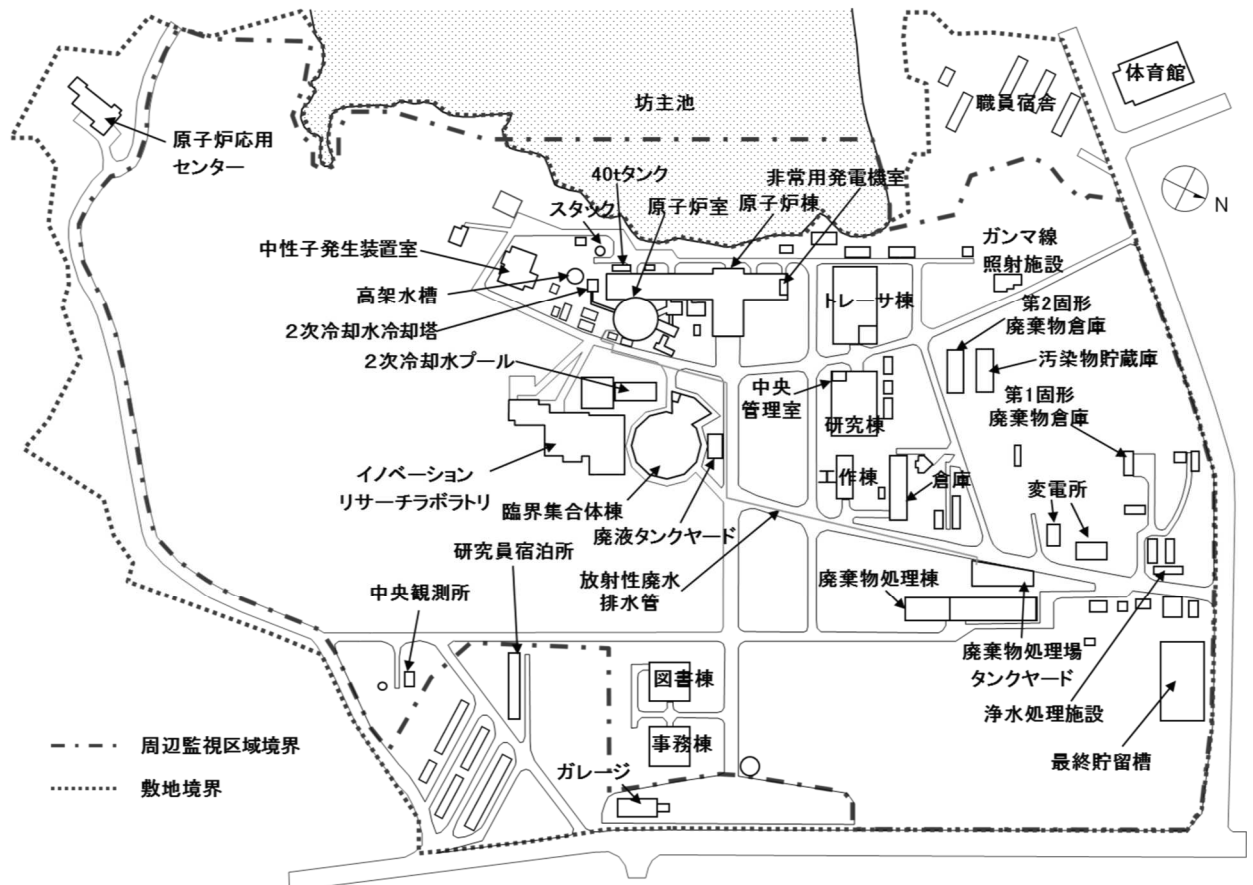


図 8-1 複合原子力科学研究所 施設配置図

表 8-2 各炉心の燃料 1 体当たりの積算出力の最大値、その燃料体中での出力ピーク比

炉心名称	燃料体 1 体当たり積算出力の最大値 (W) *) (A)	左記の燃料体中の出力平均値に対する出力最大値の比率**) (B)	(A)×(B)
L5.5P-50	5.90E-02	2.56	0.15
L5.5P-40	5.34E-02	2.83	0.15
L5.5P-30	4.29E-02	2.91	0.12
L4P-50	6.56E-02	2.68	0.18
L4P-40	6.19E-02	2.82	0.17
L4P-30	5.25E-02	2.72	0.14
L3P-50	7.13E-02	2.74	0.20***)
L3P-40	6.58E-02	2.85	0.19
L3P-30	5.69E-02	3.13	0.18
L2P-50	6.61E-02	2.71	0.18
L2P-40	6.27E-02	2.96	0.19
L2P-30	5.47E-02	3.26	0.18
L1P-50	5.51E-02	3.45	0.19
L1P-40	4.90E-02	3.46	0.17
L1P-30	4.07E-02	4.09	0.17
LL1P-50	3.42E-02	5.26	0.18
LL1P-40	2.88E-02	4.90	0.14
LL1P-30	2.41E-02	5.43	0.13

*) 炉心の積算出力を 1W としたときの燃料体 1 体当たりの出力の最大値

**) 1 体当たりの積算出力が最大となる燃料体中での (出力ピーク値) ÷ (出力平均値)

**) (A) × (B) が最大となる炉心

表 8 - 3 燃料損傷に伴う被ばく線量 (固体減速炉心 L3-50 炉心)

核種	生成量 (Bq)	放出量 (Bq)	換算または 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m}Kr	1.64E+07	3.31E+02	1.65E+00	6.74E+04	5.79E-07 ^{*)}
^{85}Kr	6.45E+05	1.30E+01	5.72E-02		
^{85m}Kr	1.51E+08	3.04E+03	9.68E+02		
^{87}Kr	7.13E+04	1.44E+00	2.28E+00		
^{88}Kr	6.99E+07	1.41E+03	5.49E+03		
^{131m}Xe	1.44E+06	2.90E+01	1.16E+00		
^{133}Xe	1.41E+09	2.85E+04	2.57E+03		
^{133m}Xe	8.42E+07	1.70E+03	1.43E+02		
^{135}Xe	5.31E+09	1.07E+05	5.35E+04		
^{135m}Xe	2.70E+08	5.44E+03	4.70E+03		
^{131}I	5.64E+08	1.14E+04	1.14E+04	3.75E+04	4.10E-03 ^{**)}
^{132}I	1.85E+09	3.73E+04	5.37E+02		
^{133}I	4.61E+09	9.30E+04	2.38E+04		
^{134}I	3.25E+03	6.56E-02	2.83E-04		
^{135}I	1.68E+09	3.39E+04	1.80E+03		

*) $6.74\text{e}4 \times 8.60\text{e-}18$ (Sv/Bq)

***) $3.75\text{e}4 \times 1.60\text{e-}7$ (Sv/Bq) $\times 2.20\text{e-}6$ (h/m³) $\times 0.31$ (m³/h)

表 8 - 4 燃料損傷に伴う被ばく線量 (軽水減速炉心 C45G2(4 列)炉心)

核種	放出量 (Bq)	換算または 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m}Kr	8.74E+01	4.37E-01	1.78E+04	1.53E-07 ^{*)}
^{85}Kr	3.44E+00	1.51E-02		
^{85m}Kr	8.05E+02	2.56E+02		
^{87}Kr	3.80E-01	6.03E-01		
^{88}Kr	3.73E+02	1.45E+03		
^{131m}Xe	7.66E+00	3.06E-01		
^{133}Xe	7.54E+03	6.79E+02		
^{133m}Xe	4.49E+02	3.77E+01		
^{135}Xe	2.83E+04	1.41E+04		
^{135m}Xe	1.44E+03	1.24E+03		
^{131}I	3.01E+03	3.01E+03	9.93E+03	1.08E-03 ^{**)}
^{132}I	9.87E+03	1.42E+02		
^{133}I	2.46E+04	6.31E+03		
^{134}I	1.73E-02	7.48E-05		
^{135}I	8.97E+03	4.77E+02		

*) $1.78\text{e}4 \times 8.60\text{e-}18$ (Sv/Bq)

***) $9.93\text{e}3 \times 1.60\text{e-}7$ (Sv/Bq) $\times 2.20\text{e-}6$ (h/m³) $\times 0.31$ (m³/h)

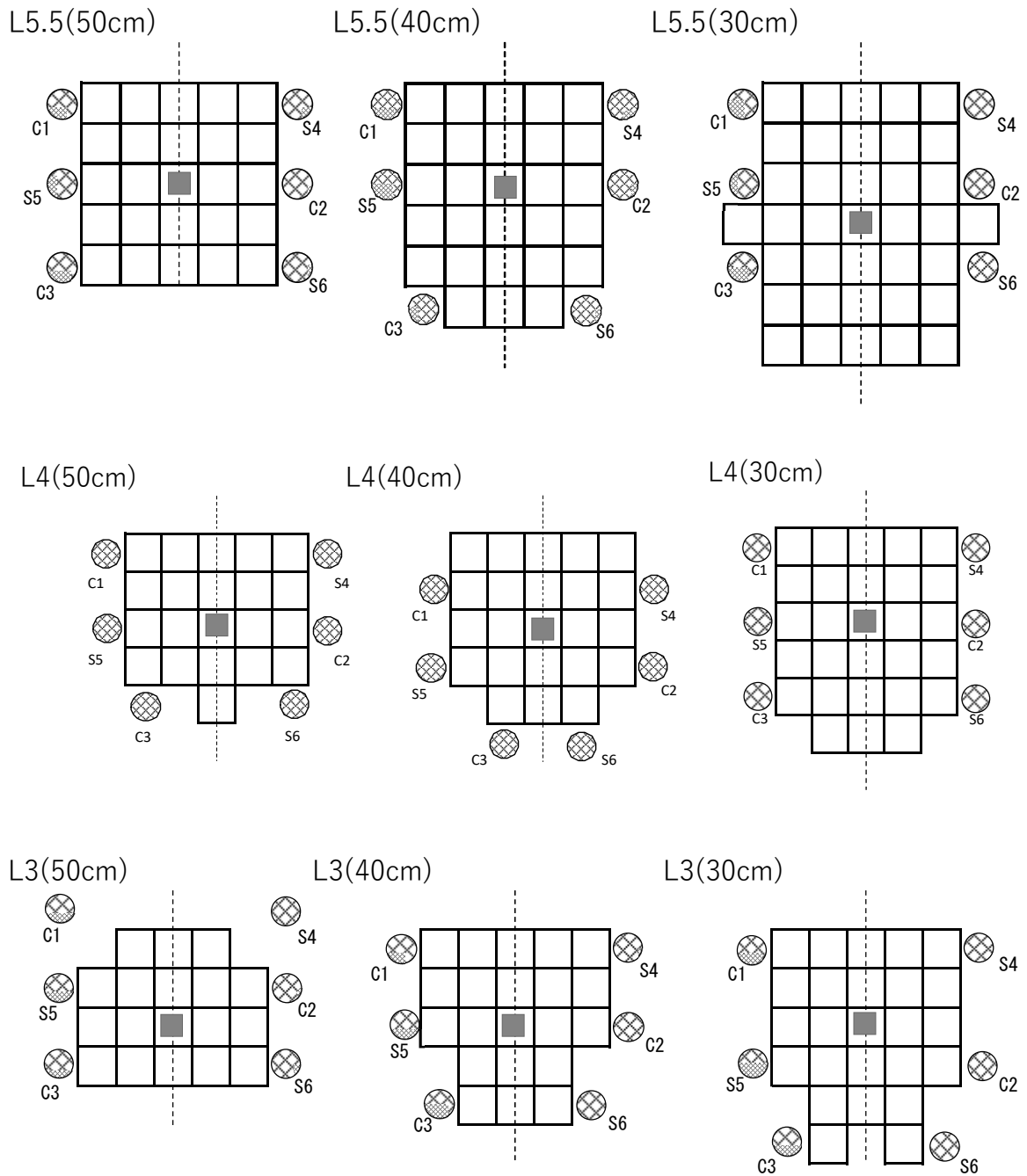


図 8 - 2 炉心配置図 (L5.5P、L4P、L3P)
 (■の記号をつけた燃料体が核分裂の積分値が最大となる燃料体)

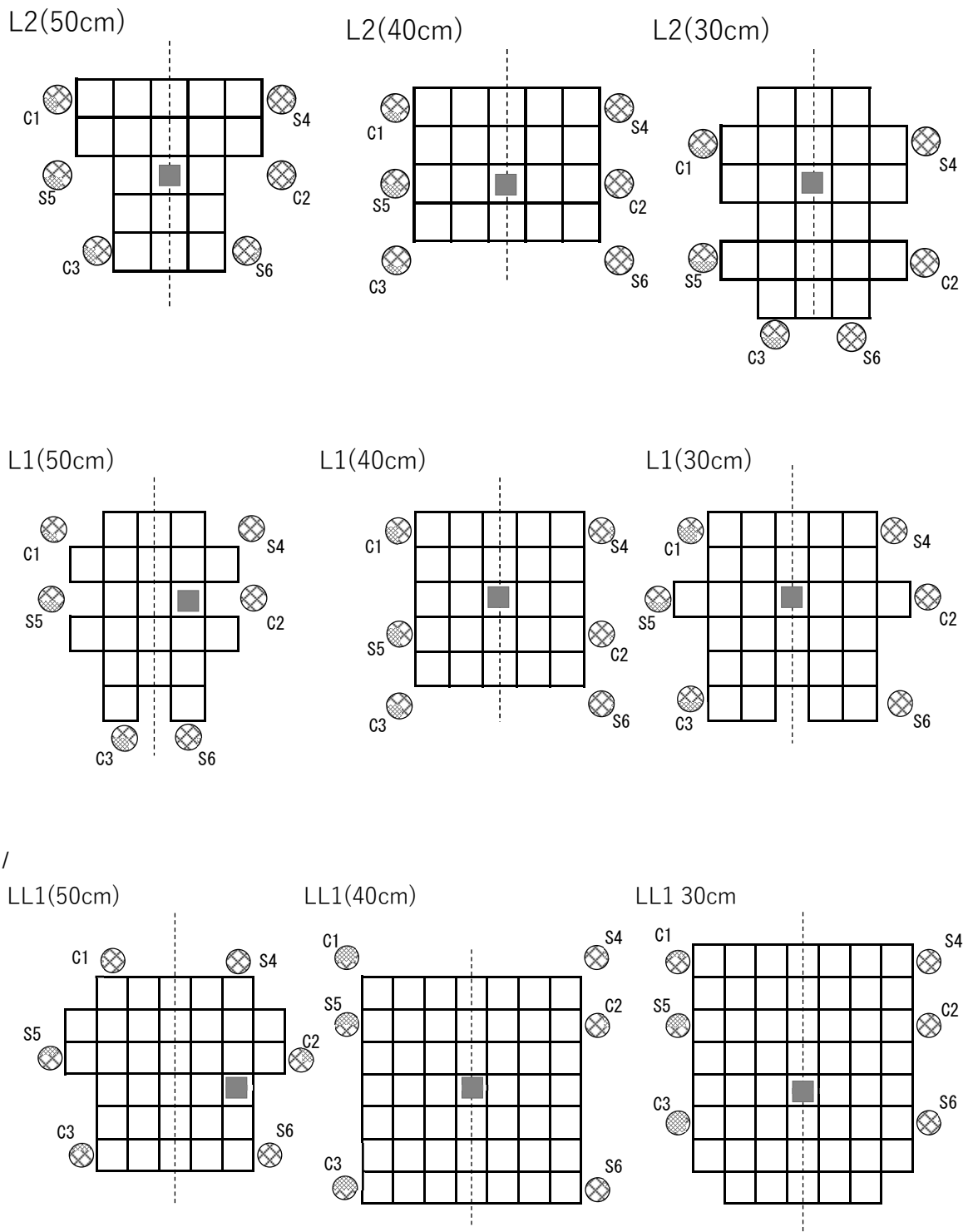


図 8 - 3 炉心配置図 (L2P、L1P、LL1P)
 (■の記号をつけた燃料体が核分裂の積分値が最大となる燃料体)

L3(50cm)

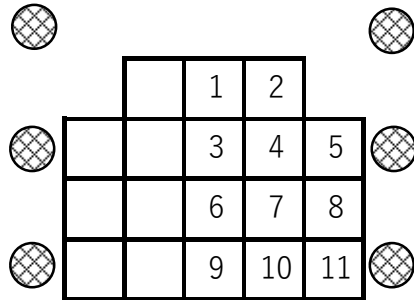


図 8 - 4 L3P-50 炉心配置図

表 8 - 5 L3P-50 炉心の燃料体ごとの出力
(炉心出力を 100W とする)

図 8-4 燃料体番号	出力 (W)
1	5.72E+00
2	5.46E+00
3	6.94E+00
4	6.23E+00
5	4.68E+00
6	7.14E+00^{a)}
7	6.37E+00
8	4.61E+00
9	6.26E+00
10	5.61E+00
11	4.02E+00

a) 出力の最大値

2-9 実験設備、実験物等の著しい損傷

2-9-1 解析シナリオ

パイルオシレータで核燃料の試料を用いているときに、核燃料が何らかの原因により損傷した場合、試料より核分裂生成物が放出される可能性がある。

以下のようなシナリオに従った解析を行う。

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、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最も核燃料の試料（天然ウラン（NU）、または濃縮ウラン（EU））の核分裂率が大きくなる炉心とする。

(2) 初期条件

- ・最大出力 100W においてパイルオシレータにより NU、または EU（濃縮度 4.5%）の酸化物（ UO_2 ）試料の反応度測定を行うとする。
- ・各試料の量はパイルオシレータ実験での反応度絶対値の最大値 $0.1\% \Delta k/k$ であるとする。
- ・試料は各炉心で熱群の中性子束が最大値となる場所に固定していたとする。

(3) 実験物破損条件

1 時間の運転を行い、1 回の運転での最大積算出力の制限値（100Wh）となつて運転を終了した直後に試料が破損し、内部の核分裂生成物（希ガス（Xe、Kr）及びよう素）の 10% が放出されたとする。

(4) 評価

研究所敷地境界位置での実効線量を評価する。

3-9-2 炉心の選定

パイルオシレータの実験で使用する試料の重量の最大値は、試料を反応度が最大となる位置においたときの反応度が制限値（ $0.1\% \Delta k/k$ ）となるという条件により決まるため、試料の重量は以下のように求める。

- ① SRAC コードシステムの拡散計算コード CITATION（3 次元体系、20 群）を用い、NU、EU 試料を反応度が最も高くなる炉心中心付近の熱中性子束が最大となるメッシュに置いたとして（メッシュ幅は各炉心共に約 $0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ ）、そのときの反応度を 1 次摂動計算により求める。
- ② 試料の反応度の絶対値の最大値は $0.1\% \Delta k/k$ と規定されているので、NU と

EU の試料の体積を以下の式により求める。

$$0.1\% \Delta k/k / [②の反応度 \% \Delta k/k \text{の絶対値}] \times [②のメッシュ体積]$$

③ ③の体積に UO_2 の密度(10.97g/cm^3)を掛ける

実験では試料の位置を変化させるが、ここでは各炉心において NU、EU 試料の核分裂率の最大値となる位置に固定していると仮定する。

各炉心における NU、EU 試料の核分裂率の燃料内、反射体内を含めた最大値、および反応度の絶対値が $0.1\% \Delta k/k$ となる試料の重量を表 9-1 に示す。

試料中に生成する FP の量は核分裂率と試料の重量に比例するので、両者を掛け合わせた値が最も大きい場合が FP の量が最大となる。表 9-1 より NU 試料については L5.5P-30 炉心、EU 試料については L2P-50 炉心での照射が各試料中の FP 量が最大となる。

2-9-3 解析結果

線量の解析方法は「4-2 燃料の機械的破損」と同じである。

結果を表 9-2、表 9-3 に示す。被ばく量は最大でも小児に対する値、約 $0.19\mu\text{Sv}$ となり、周辺公衆の実効線量の評価値に関する設計基準事故時の判断基準を満足しており、周辺公衆に対して著しい放射線被ばくをおよぼさない。

表 9-1 各炉心の核分裂率の最大値、および反応度の重量

炉心名称	核分裂率 (1/cm ³ /s)		反応度の絶対値が 0.1%Δk/k となる試料の重量 (g)		(A)× (C)	(B)× (D)
	NU (A)	EU (B)	NU (C)	EU (D)		
L5.5P-50	7.13E+08	4.16E+09	145.8	16.5	1.04E+09	6.85E+08
L5.5P-40	7.84E+08	4.57E+09	130.3	14.8	1.02E+09	6.76E+08
L5.5P-30	8.01E+08	4.67E+09	131.0	14.6	1.05E+09^{*)}	6.80E+08
L4P-50	7.34E+08	4.48E+09	85.5	25.6	6.28E+08	1.15E+09
L4P-40	7.57E+08	4.62E+09	80.2	23.5	6.07E+08	1.09E+09
L4P-30	7.82E+08	4.47E+09	76.4	22.2	5.98E+08	9.91E+08
L3P-50	7.89E+08	4.81E+09	74.3	49.7	5.86E+08	2.39E+09
L3P-40	8.31E+08	5.07E+09	67.7	45.1	5.63E+08	2.28E+09
L3P-30	7.76E+08	4.73E+09	65.7	42.0	5.10E+08	1.99E+09
L2P-50	8.48E+08	5.15E+09	70.6	240.7	5.99E+08	1.24E+10^{**)}
L2P-40	8.49E+08	5.19E+09	62.3	218.5	5.29E+08	1.13E+10
L2P-30	9.73E+08	5.89E+09	61.0	194.7	5.94E+08	1.15E+10
L1P-50	6.60E+08	3.96E+09	84.1	163.9	5.55E+08	6.50E+09
L1P-40	6.73E+08	4.10E+09	78.5	153.1	5.28E+08	6.29E+09
L1P-30	7.80E+08	4.72E+09	73.4	142.6	5.72E+08	6.74E+09
LL1P-50	5.00E+08	3.05E+09	117.8	157.0	5.89E+08	4.79E+09
LL1P-40	4.91E+08	3.00E+09	111.6	148.7	5.48E+08	4.47E+09
LL1P-30	5.00E+08	3.05E+09	113.2	151.3	5.66E+08	4.62E+09

*) (A)× (C) が最大となる炉心

***) (B)× (D) が最大となる炉心

表 9-2 NU 試料破損時の被ばく線量 (L5.5P-30 炉心)

核種	生成量 (Bq)	放出量 (Bq) *)	換算または 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)
^{83m}Kr	4.15E+04	4.15E+03	2.07E+01	1.04E+06	8.94E-06
^{85}Kr	3.69E-01	3.69E-02	1.62E-04		
^{85m}Kr	3.79E+05	3.79E+04	1.20E+04		
^{87}Kr	2.22E+06	2.22E+05	3.52E+05		
^{88}Kr	1.62E+06	1.62E+05	6.31E+05		
^{131m}Xe	4.68E-02	4.68E-03	1.87E-04		
^{133}Xe	6.02E+02	6.02E+01	5.41E+00		
^{133m}Xe	1.56E+02	1.56E+01	1.31E+00		
^{135}Xe	8.08E+04	8.08E+03	4.04E+03		
^{135m}Xe	4.67E+05	4.67E+04	4.04E+04		
^{131}I	5.21E+03	5.21E+02	5.21E+02	1.68E+04	1.83E-02
^{132}I	3.24E+04	3.24E+03	4.66E+01		
^{133}I	2.73E+05	2.73E+04	6.98E+03		
^{134}I	4.33E+06	4.33E+05	1.87E+03		
^{135}I	1.38E+06	1.38E+05	7.35E+03		

*) 放出量 = 生成量 \times 0.1

表 9-3 EU 試料破損時の被ばく線量 (L2P-50 炉心)

核種	生成量 (Bq)	放出量 (Bq) *)	換算または 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 (μ Sv)		
^{83m}Kr	4.30E+05	4.30E+04	2.15E+02	1.15E+07	9.90E-05		
^{85}Kr	3.72E-00	3.72E-01	1.64E-03				
^{85m}Kr	4.11E+06	4.11E+05	1.31E+05				
^{87}Kr	2.46E+07	2.46E+06	3.90E+06				
^{88}Kr	1.79E+07	1.79E+06	7.00E+06				
^{131m}Xe	4.74E-01	4.74E-02	1.89E-03				
^{133}Xe	6.04E+03	6.04E+02	5.44E+01				
^{133m}Xe	1.30E+03	1.30E+02	1.09E+01				
^{135}Xe	8.58E+04	8.58E+04	4.29E+04				
^{135m}Xe	5.09E+05	5.09E+05	4.40E+05				
^{131}I	5.13E+04	5.13E+03	5.13E+03			1.73E+05	1.88E-01
^{132}I	2.61E+05	2.61E+04	3.75E+02				
^{133}I	2.77E+06	2.77E+05	7.09E+04				
^{134}I	4.57E+07	4.57E+06	1.97E+04				
^{135}I	1.44E+07	1.44E+06	7.66E+04				

*) 放出量 = 生成量 \times 0.1

各炉心の熱容量について



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).)



U_3Si_2 (アルミ分散) の比熱は $0.32J/g/K$ とする。

出典：「NSRR を用いたシリサイド板状燃料実験の技術開発」 JAERI-M-91-114

【質問番号 47】 起動用中性子源について以下の点を説明すること。

①構造

②中性子強度（設置当時と現在の Am-Be の放射能強度）

③炉心構成における設置可能範囲

（設置範囲については、代表炉心の中から水平方向の断面積が最小と最大の炉心について、炉心と中性子源の相対位置、垂直方向の設置高さが分かる図面を添付）

KUCA では起動用中性子源として Am-Be を使用している。

形状は図 A-1 の通りで、ステンレス製の 22.4 mm ϕ \times 31 mm のカプセル内部に Am-Be が封入されている。約 47 年前の購入時の強度は 2Ci (74GBq) であり、Am の半減期は 432 年であるため 7% ほど減衰している。

Am-Be 中性子源は図 A-4 に示すワイヤー付きカプセル内に入れられており、使用時には制御室から遠隔操作でワイヤーを駆動させて中性子源格納容器から炉心内に設置した中性子源挿入管（図 A-5）内まで移動させることができるが、出力や計数率の調整のため途中の位置で止めることもできる。軽水減速架台での中性子源が最も炉心に挿入されたときの位置を図 A-3 に示す（固体減速炉心の高さ方向の最も挿入された位置は炉心中心より少し上に設定されている）。図 A-5 の中性子源挿入管は炉心内のどの場所にでも設置することができ、実験目的に応じて設置場所を変更することができる。（燃料体に近接して設置することも可能。）

中性子発生量は約 4×10^6 n/s であり（約 2.2×10^6 n/s/Ci）、発生する中性子の平均エネルギーは約 4.4MeV である。^{1) 2)}

参考文献：

- 1) 辻村、他、「RI 中性子源における中性子放出角度分布の非等方性の評価」、JAEA-Research 2008-034.
- 2) Radiation sources industrial laboratory, The Radiochemical Centre, Amersham, 1977/8.

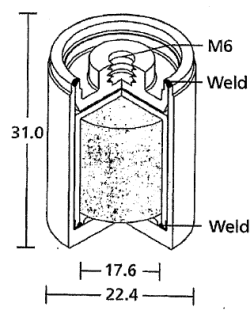


図 A-1 Am-Be 中性子源の構造

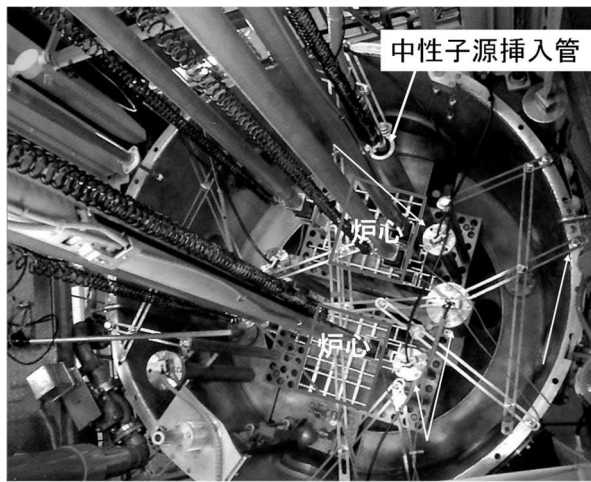
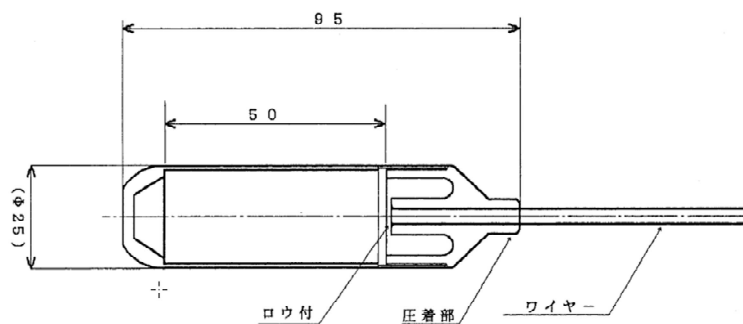


図 A-2 炉心内の中性子源挿入管

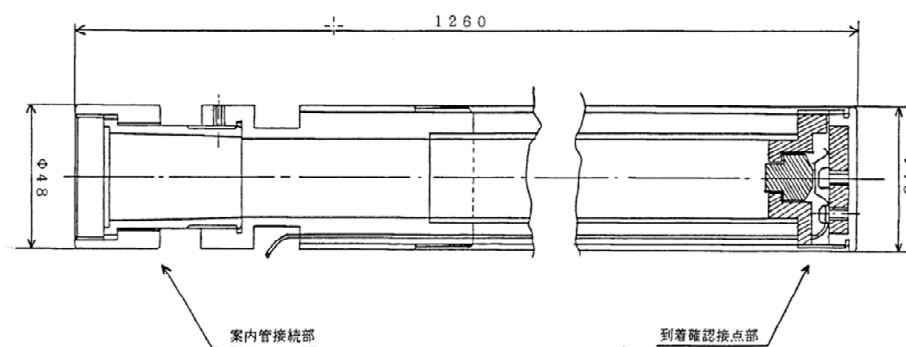


図 A-3 C 架台の中性子源位置 (垂直方向)



図A-4 中性子源取り付けカプセル

(カプセル内に Am-Be 中性子源を入れて、ワイヤーを通じて出し入れする)



図A-5 中性子源案内管

(図の右側を下側として炉心に挿入し、上部より中性子源駆動パイプを通じて中性子源を挿入する)

【燃料温度の算出方法について】

2021年6月3日付けヒアリング資料1の修正

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。発熱量（核分裂率）の解析方法は以下の通りである。

使用計算コード： SRAC コードシステム (SRAC2006)

使用核データ： JENDL-4.0

エネルギー構造： 107 群（高速群 62 群、熱群 45 群）

20 群（高速群 12 群、熱群 8 群）

計算方法： セル計算 PIJ (107 群)、20 群に縮約

炉心計算 CITATION

(3次元拡散計算、20群)

(x方向、z方向は反射境界条件、y方向は真空境界条件)

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

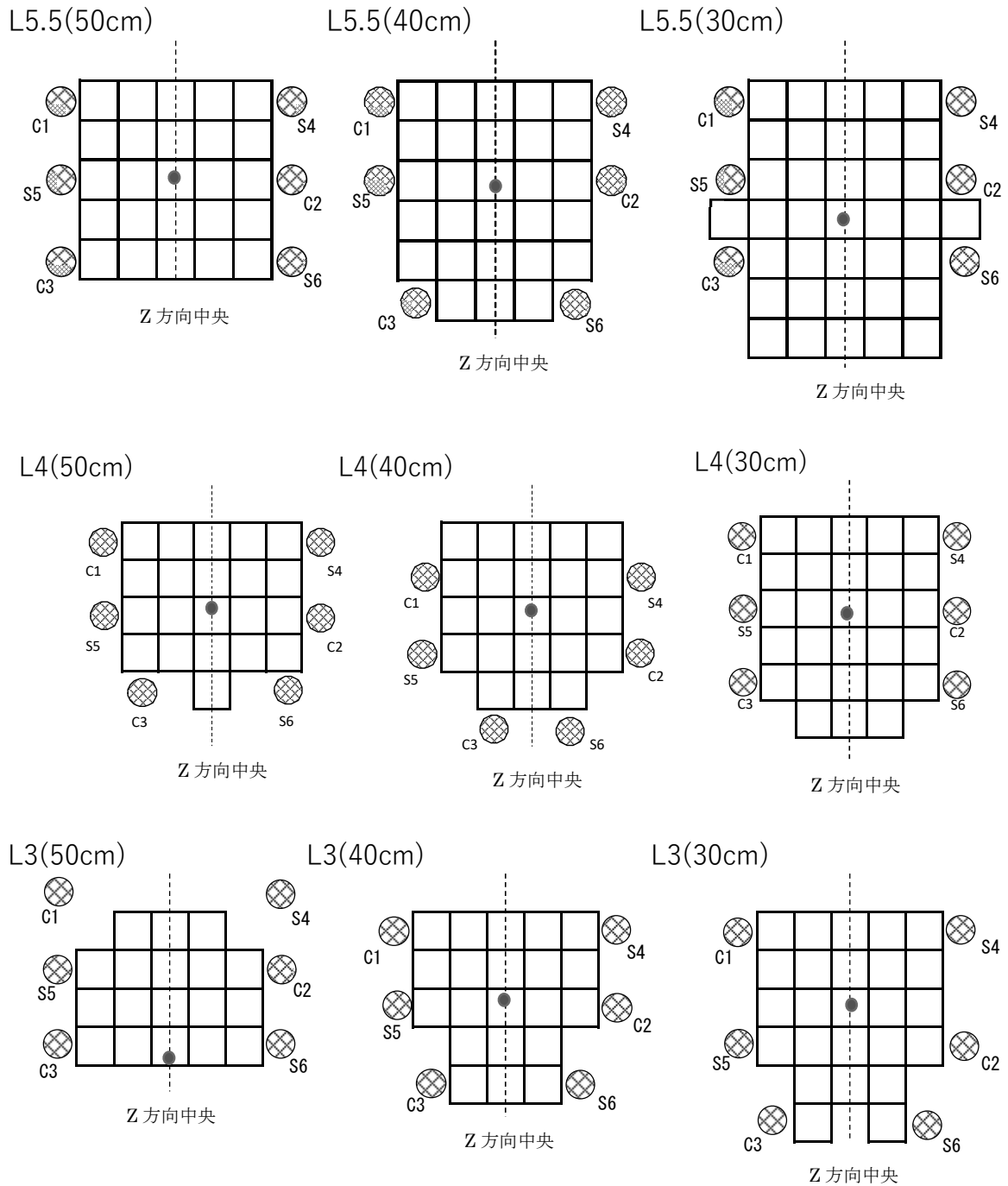


図 A-1 炉心配置図 (L5.5P、L4P、L3P)
 (炉心内丸印が出力分布が最大となる点
 z 方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)

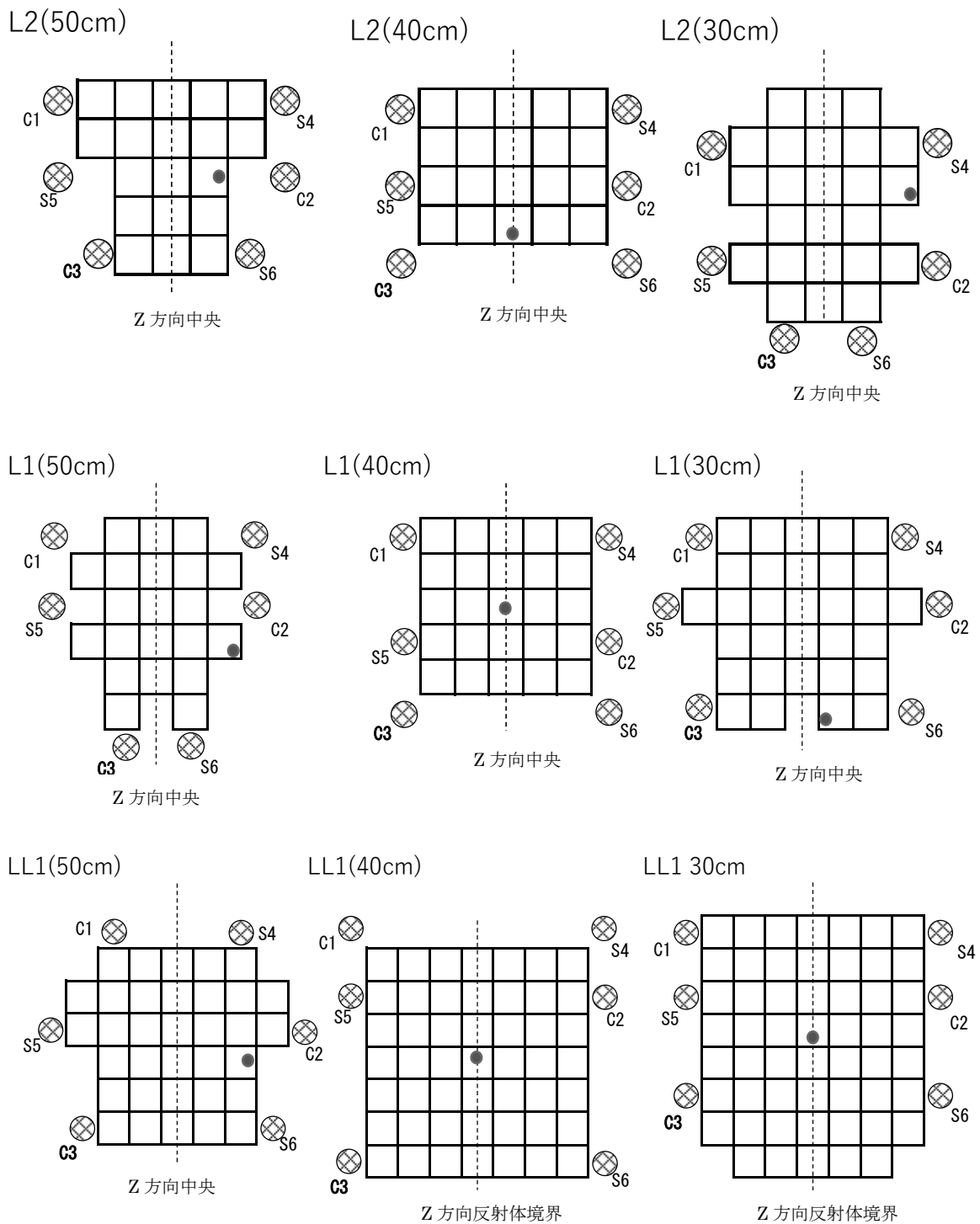


図 A-2 炉心配置図 (L2P、L1P、LL1P)

(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)

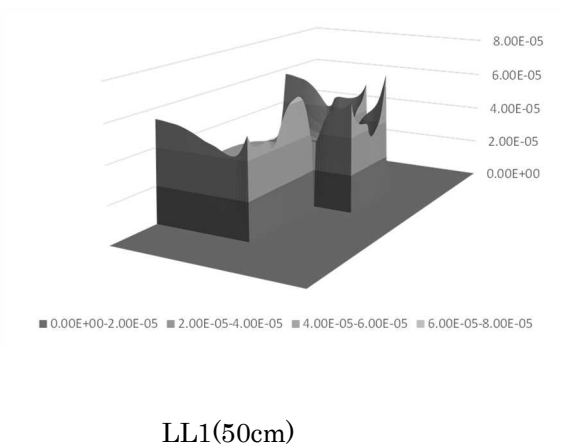
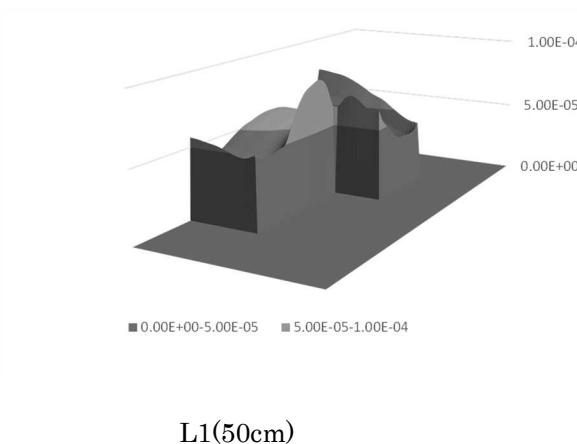
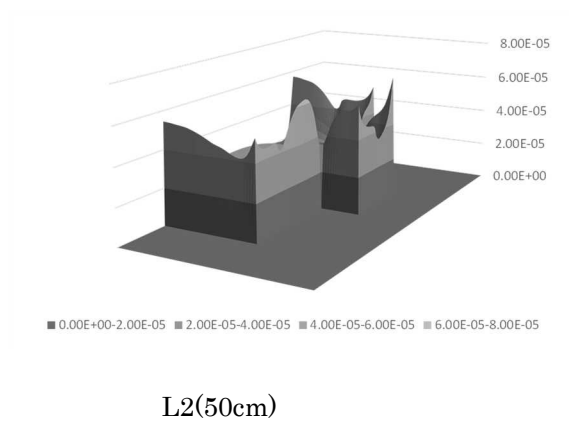
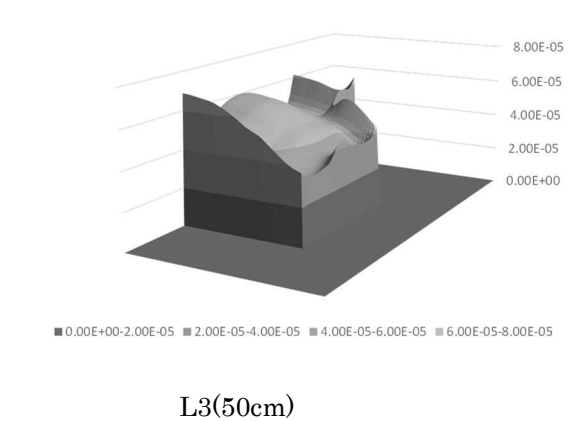
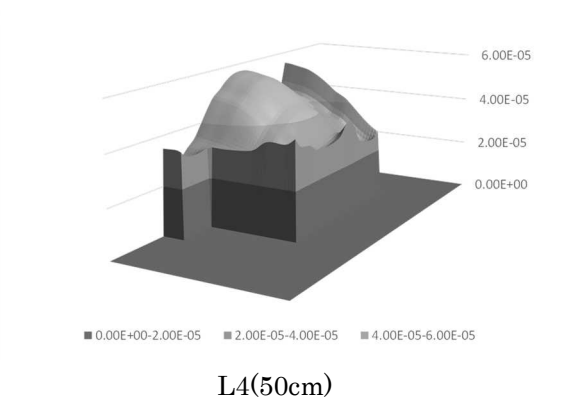
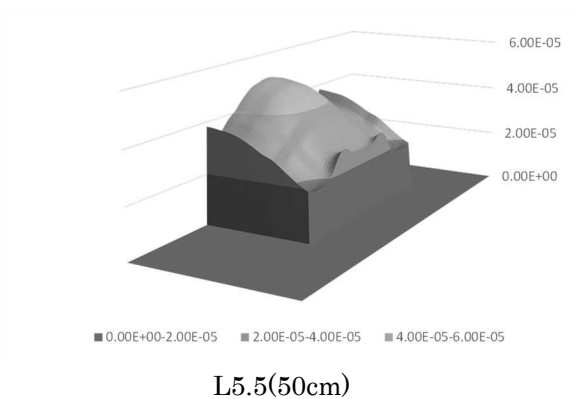
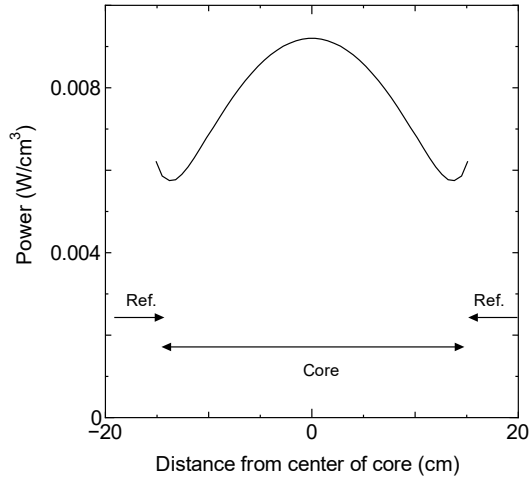
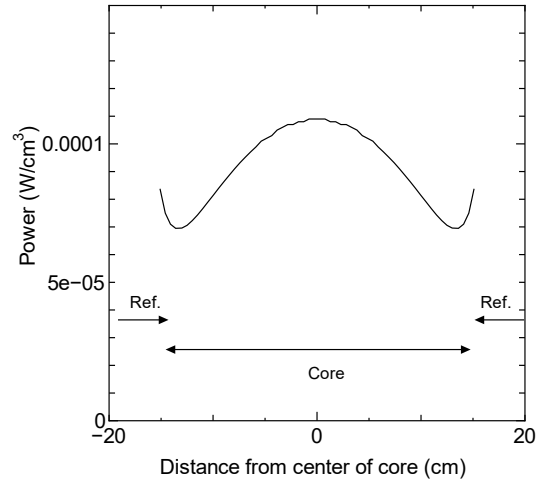


図 A-3 出力分布 (高さ約 50cm の固体減速炉心)
 (炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm³)



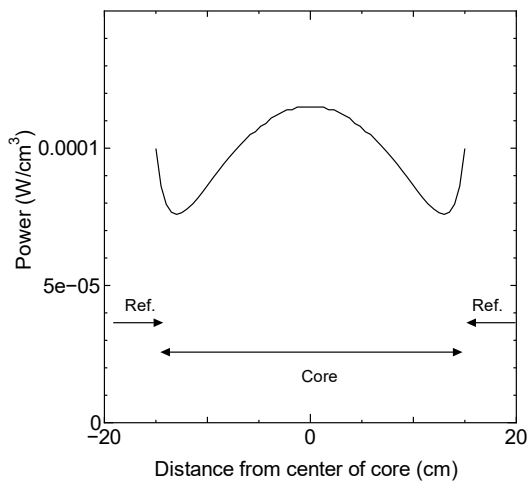
L5.5(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.21)



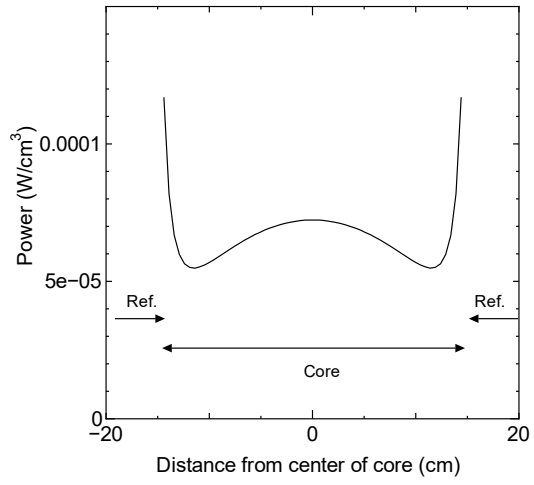
L4(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.20)



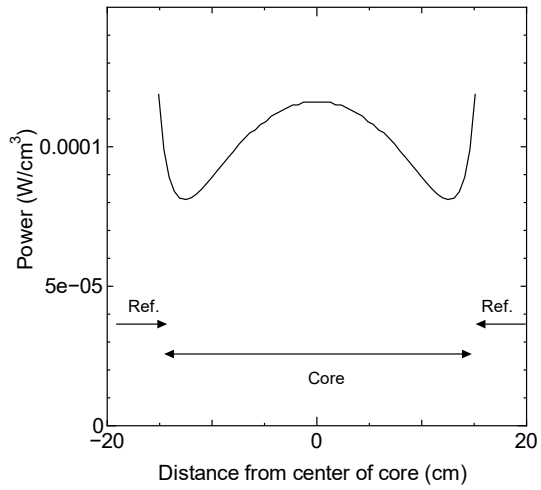
L3(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.18)



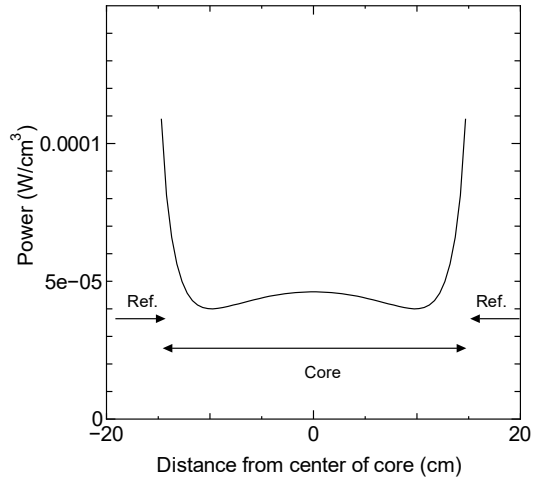
L2(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.15)



L1(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.08)



LL1(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 0.96)

図 A-4 出力分布 (高さ約 30cm の固体減速炉心の炉心中心付近の z 方向)
(炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm^3)

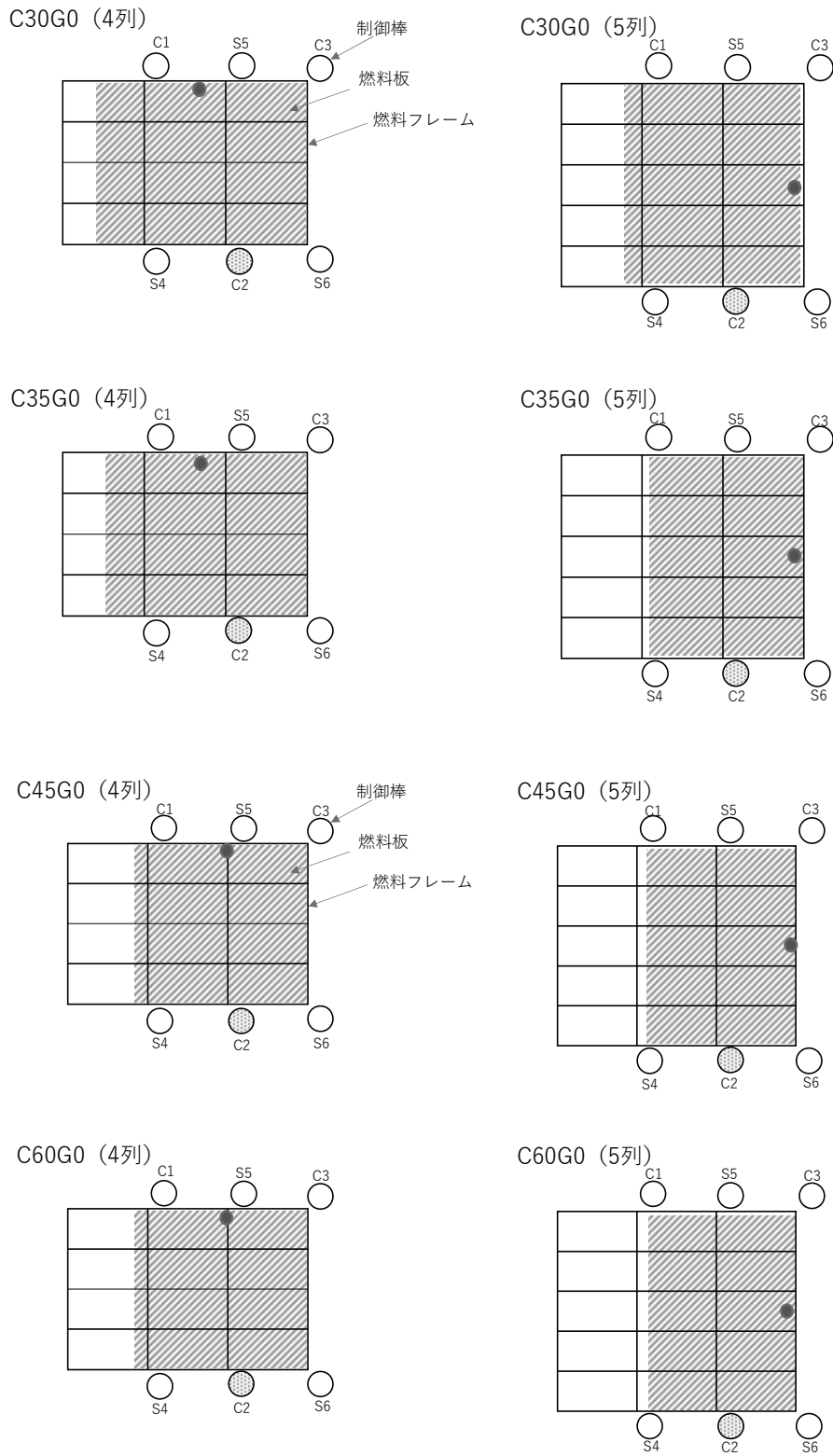
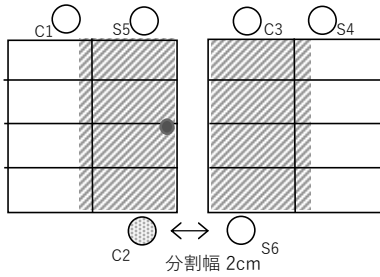


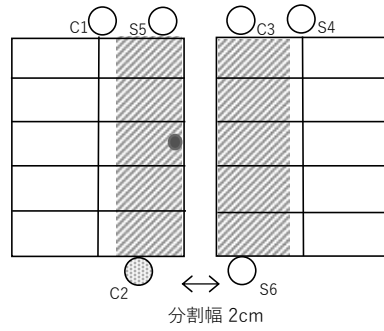
図 A-5 軽水減速炉心の炉心配置図 (1)
 (炉心内丸印が出力分布が最大となる点)

z 方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)

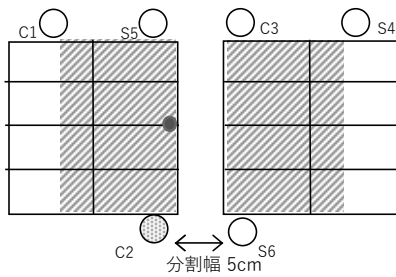
C45G (2H₂O) (4列)



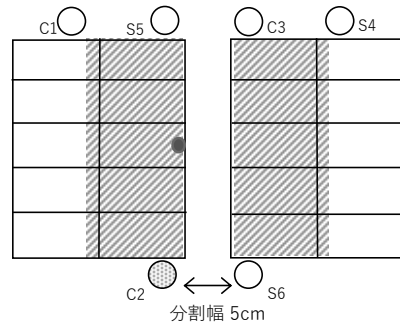
C45G (2H₂O) (5列)



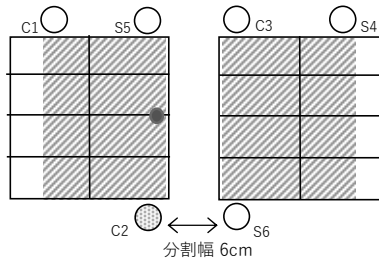
C45G (5H₂O) (4列)



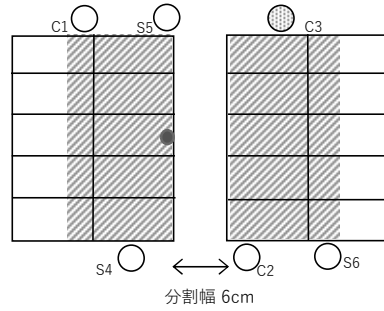
C45G (5H₂O) (5列)



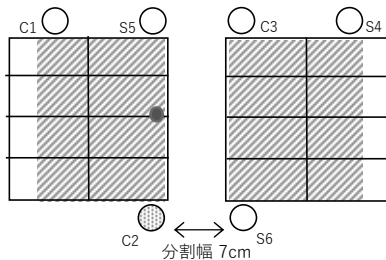
C45G (6H₂O) (4列)



C45G (6H₂O) (5列)



C45G (7H₂O) (4列)



C45G (7H₂O) (5列)

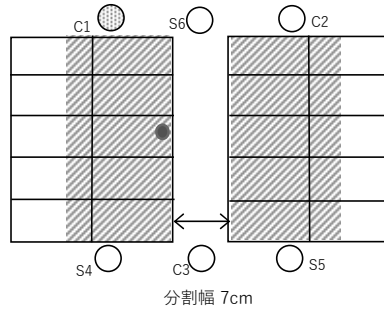
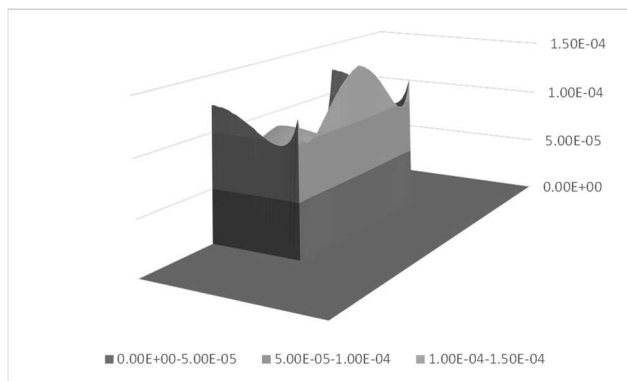
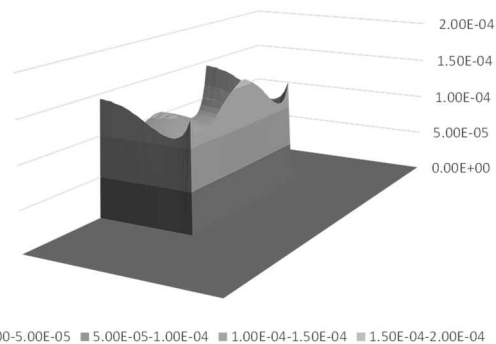


図 A-6 軽水減速炉心の炉心配置図 (2)
(炉心内丸印が出力分布が最大となる点)

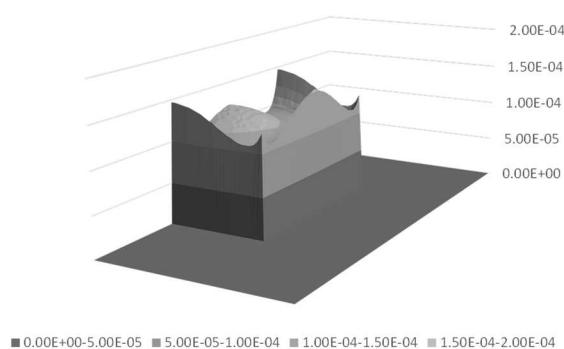
z 方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)



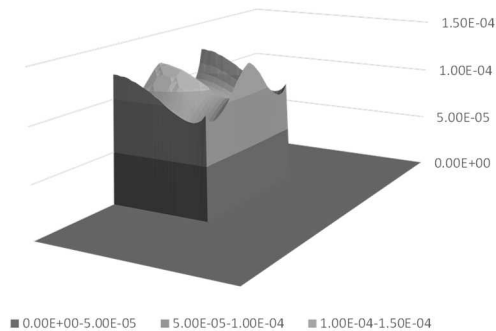
C30G0-4 列 炉心



C35G0-4 列 炉心

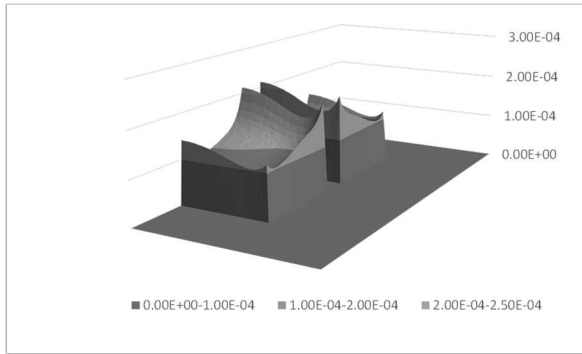


C45G0-4 列 炉心

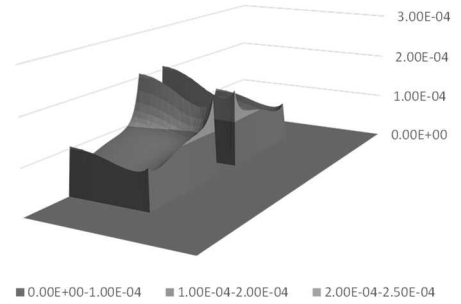


C60G0-4 列 炉心

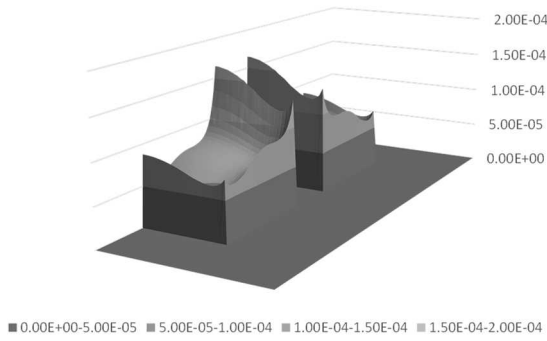
図 A-7 出力分布 (4 列の軽水減速炉心の高さ方向中央)
(炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm³)



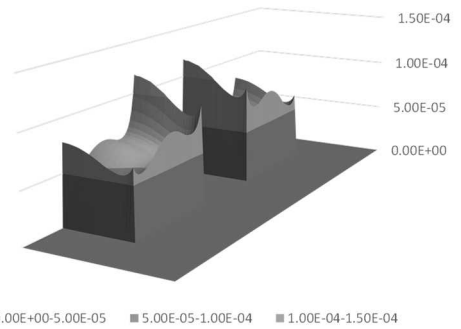
C45G2-4 列 炉心



C45G5-4 列 炉心

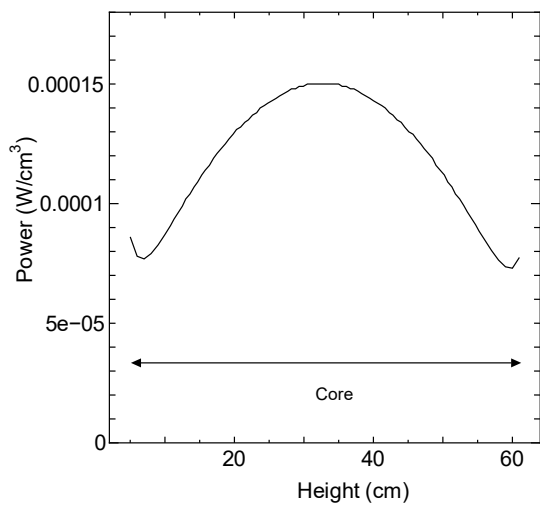


C45G7-4 列 炉心



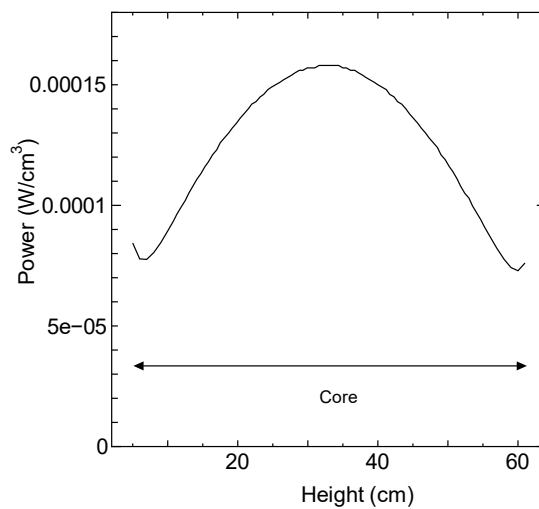
C45G10-4 列 炉心

図 A-8 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)



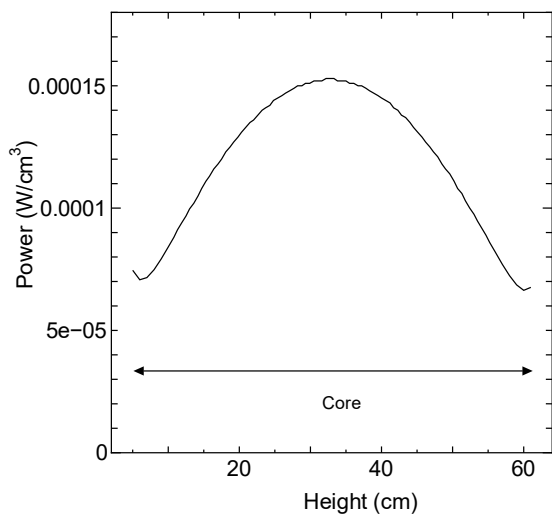
C30G0 (4列) 炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.23)



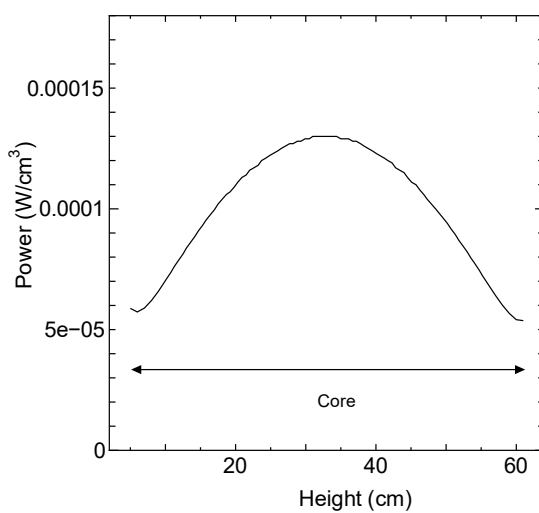
C35G0 (4列) 炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.24)



C45G0 (4列) 炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.25)



C60G0 (4列) 炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.26)

図 A-9 出力分布 (4列の軽水減速炉心の炉心中心付近の z 方向高さ方向中央)
(炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm³)

【質問番号 51】 起動時の制御棒の誤引抜き(1-1)において、初期出力を0.01Wとしているが、中心架台を全挿入し、全挿入されてる3本の制御棒を順次引き抜く段階での出力がこのオーダーになっていることを説明すること。

2017年6月の施設定期検査でのA架台での原子力規制庁立会による高出力検査時の線型出力計の指示値を下図に示します。線型出力計のフルレンジは10nA、30nA、100nA・・・、と約1/3ずつ変化するため、出力が10倍となるとレンジを2つ上げることになります。

ここでは、最大出力は10Wでの運転を行っており、制御棒引抜き開始時(中心架台上限)の時の出力は約0.001Wとなっております。高出力運転時の中性子源の位置は炉心から少し離れていまるため0.001Wとなりましたが、もう少し炉心に近づけることで起動時(未臨界状態)での出力を高くすることもあります。

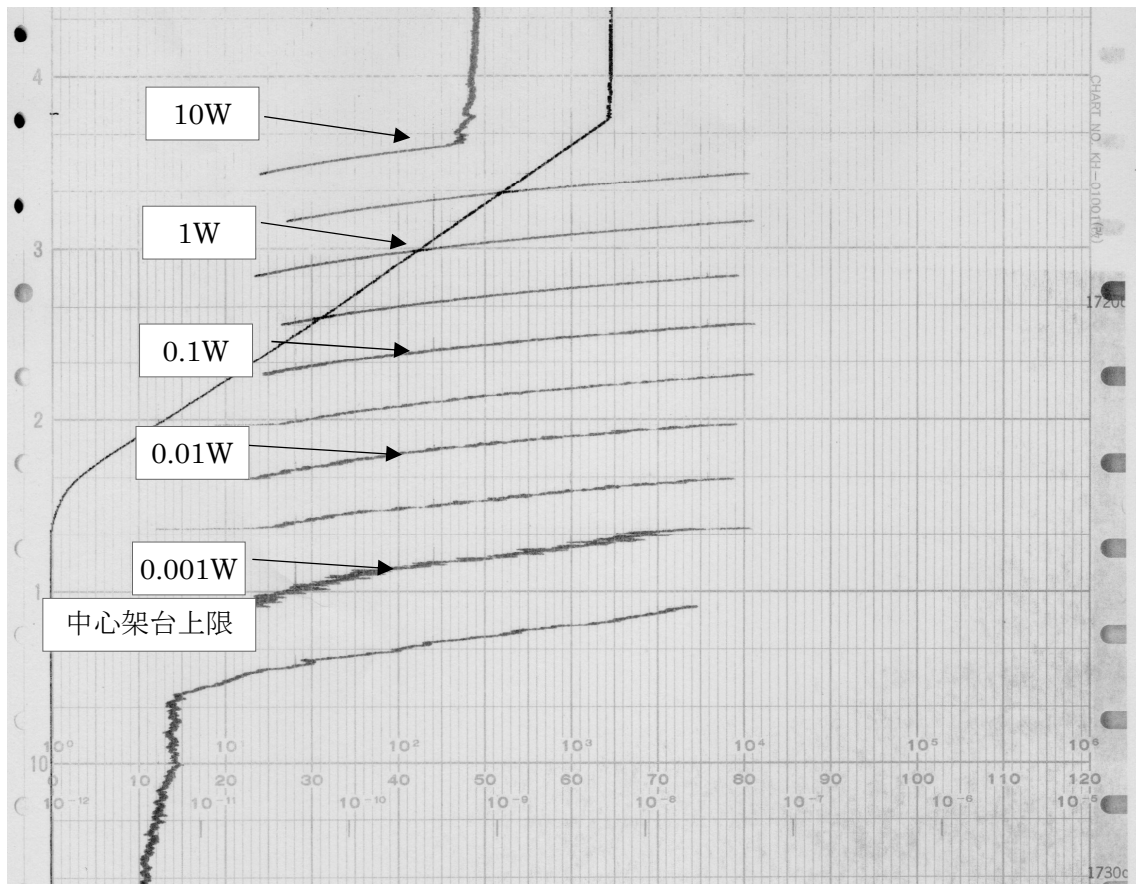


図 線型出力計 指示値 (チャート紙)
 (図の下方から上方へ時間が経過する。
 一番上で出力が一定となっているところが出力約 10W のところ)

【質問番号 64】設計基準事故の一つである燃料の機械的破損について、軽水減速炉心では最小臨界量の炉心を代表炉心とするとしているが、固体減速炉心と同様、最小炉心が厳しいことを説明すること。

燃料板 1 枚当たりの平均 FP 生成量は燃料枚数に反比例します。その値に出力分布のピークと平均値の比率を掛けたものが最も FP 生成量が多い燃料板（炉心）となるので、それを調べた結果、下記の表の通り C45G2（4 列）が最も大きくなることを確認しました（C45G5（5 列）もほとんど同じ値）。

表 A-1 各炉心の出力の最大値と平均値の比



