

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

1. 運転時の異常な過渡変化、および設計基準事故の解析方法について

「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®¹⁾ (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-2²⁾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 (SRAC2006)³⁾、またはモンテカルロ計算コード MCNP 6 (バージョン 1.0)⁴⁾を用いた。SRAC コードシステム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-4.0⁵⁾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 2-1 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。

Mathematica を用いた動特性方程式の数値解析(以下、過渡解析)においては温度変化を考慮した解析が必要となる。温度上昇量は積算出力と熱容量から求められるので、過渡解析においては幾つかの時間に区切って、その間の温度は時間と共に線形に上昇するとして、その温度変化量に各炉心の温度反応度係数の値を掛けた値を動特性方程式の反応度の項に加えて解析を行った。

原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き反応度印加量の大きなケース (図 2-1-1) や実験物の異常等による反応度がステップ状に印加されるケース (図 2-3-1) のような温度上昇量が小さい場合には以下のように解析を行った。

- ① 適当な温度上昇量を仮定して、最初のステップ(図 2-1-1 ではスクラムするまでの約 70 秒) の過渡解析を行い、その間の積算出力を求める。
- ② ①の最終的な炉出力、遅発中性子先行核密度を求め、それらの値を動特性方程式の初期値として次のステップの過渡解析を行い、その間の積算出力を求める。これを最後まで繰り返す。
- ③ ②までの解析で得られた積算出力を用いて各ステップでの温度上昇量を変更して再度各ステップの過渡解析を順番に行う。
- ④ ③の手順を温度上昇量が収束するまで行う。

温度上昇量が小さい場合には温度上昇の反応度に及ぼす影響が小さいため、この繰り返し計算は 2 回程度で収束する。

原子炉起動時において制御棒を少しだけ引き抜くケース(図 2-1-3)、中性子発生設備を臨界状態において使用するケース (図 2-5-2) のように温度上昇量が多い場合には上記のようなマニュアルでの計算手法では温度を収束させることが難しいため、以下のように解析を行った。

- ① 適当な温度上昇量を仮定して、最初のステップ(図 2-1-3 では温度が約 0.1°C 上昇する 1000 秒まで)の過渡解析を行い、その間の積算出力と温度上昇量を求めて、再度過渡解析計算を行う。この解析を温度上昇量が収束するまで行う (温度変化割合が 1%以下となるまで)。
- ② ①の最終的な炉出力、遅発中性子先行核密度を求め、それらの値を動特性方程式の初期値として次のステップの過渡解析を行う。この過渡解析を温度上昇量が収束するまで行う。
- ③ ②の解析を最後のステップまで行う。

各ステップでの繰り返し計算の回数は温度変化量等によって異なるが、多いときでも 10 回以内程度であった。

上記の 2 つの手法は自動か手動で計算するかの違いのみで結果に影響を及ぼすことはない。

参考文献

- 1) Wolfram Mathematica, <https://www.wolfram.com/mathematica/> .
- 2) A. G. Croff, "A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code," ORNL/TM-7175 (1980).
- 3) K. Okumura, et al., "SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System," JAEA-Data/Code 2007-004, Japan Atomic Energy Agency (2007).
- 4) D. B. Pelowitz et al., "MCNP6 user's manual," LA-CP-13-00634, Los Alamos National Laboratory (2013).
- 5) K. Shibata et al., "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), 1-30 (2011).

2. 運転時の異常な過渡変化の解析

「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つて、当該状態が継続した場合には試験研究用等原子炉の炉心又は原子炉冷却材バウンダリの著しい損傷が生ずるおそれがあるものとして安全設計上想定すべきもの」

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。

以上の①～⑥の項目について解析結果を示す。以下の節の「2-**」の**が①～⑥の番号に対応する。

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。

2-1-1 解析シナリオ

(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 $0.35 / 0.02 = 17.5\text{ s}$ 、軽水減速炉心では $0.5 / 0.02 = 25\text{ s}$ 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 %Δk/k、軽水減速炉心では 0.5-1.0 = -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。

(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 2-1 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合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 1-1 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 %Δk/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 %Δk/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 $1.05 \times 1/3 = 0.35$ %Δk/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%Δk/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。

2-1-2 解析結果

ケース A

ケース A について固体減速炉心の結果を表 2-1-1 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 2-1-1 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 2-1-2 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。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 2-1-3 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 2-1-2 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 2-1-4 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

ケース B について固体減速炉心の結果を表 2-1-5 に示す。出力の変化には2つのパターンがある。1つは図 2-1-3 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最大となった後に徐々に出力が減少し、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可能性が高い。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 2-1-5 の下線で示した結果が 120W スクラムに至らない場合では運転時間が長くなるため積算出力が増え、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 2-1-6 に示す。燃料重量の誤差を考慮しても燃料温度はほとんど変わらない。 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。

これらの誤差を考慮しても燃料温度は基準とした値より低くなる。

ケース B について軽水減速炉心の結果を表 2-1-7 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 2-1-4 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 2-1-8 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 8% 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 1.21 倍 ($1.08 \times 1.10 \times 1.02$) となるだけなので判定基準値を満たしている。(1.85°C \times 1.21 = 2.24°C)

表 2-1-1 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) 温度上昇が最大となる結果

表 2-1-2 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	69.6	138.7	309.2	1.55E+03	2.05E-01	4.70E-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 2-1-1 と同じ算出

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-1-1 の結果と同じ

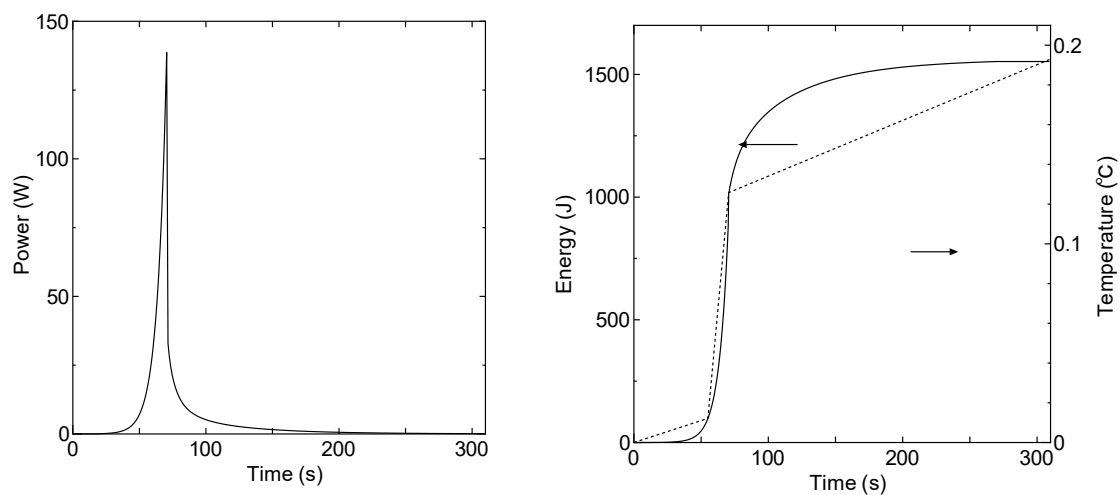


図 2-1-1 L5.5P-30 炉心

原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケースA)

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

表 2-1-3 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) 温度上昇が最大となる結果

表 2-1-4 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	37.4	181.9	254.8	8.67E+02	2.79E-04	7.31E-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 2-1-2 と同じ算出

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-1-2 の結果と同じ

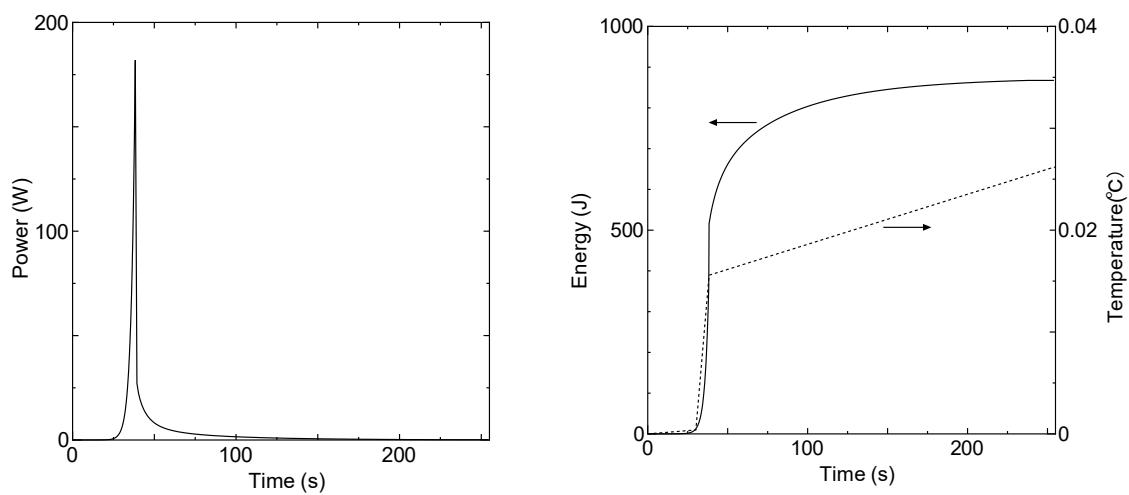


図 2-1-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心

原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケース A)

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

表 2-1-5 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 d)	最大出力 (W) ②	0.1W までの時刻 (s) ③	手動スクラム時の出力 (W) ④	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>0.154</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>0.147</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>0.152</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>0.240</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>0.234</u>	<u>9.95E+04</u>	<u>1.24E+01</u>	<u>2.71E+01</u> e)
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（1 秒後に反応度印加）で停止したケース
d) 表の説明
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
④ 手動スクラム時の反応度が印加される直前での出力（③が 3601 秒となっている上段 3 つのケースは、制御棒落下ですぐに出力が 0.1W 以下となる）
e) 温度上昇が最大となる結果

表 2-1-6 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	<u>1812.9</u>	<u>104.2</u>	<u>3603.3</u>	<u>9.33E+04</u>	<u>1.23E+01</u>	<u>2.69E+01</u>	<u>0.99</u>
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 2-1-5 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-1-5 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 2-1-5 の結果と同じ

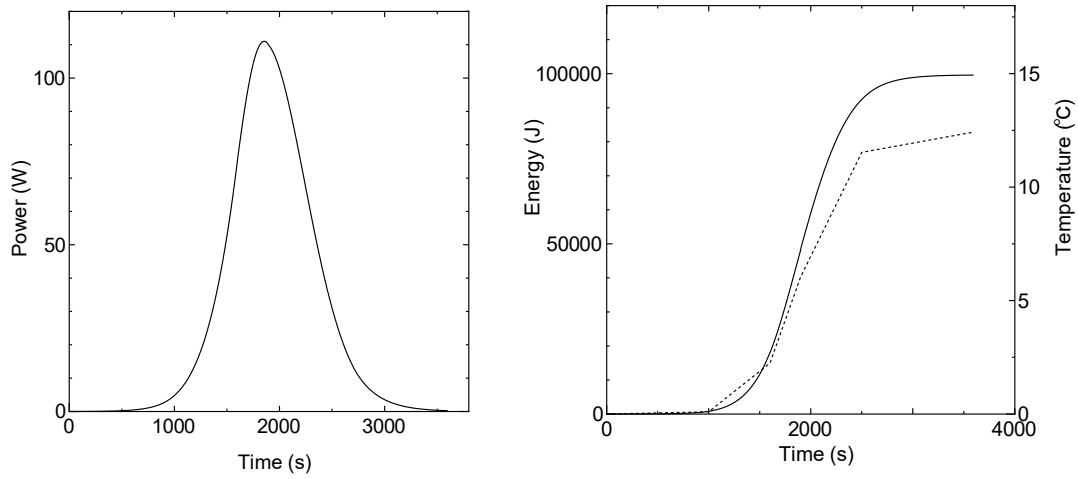


図 2-1-3 L4P-30 炉心

原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケースB)

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

表 2-1-7 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) 温度上昇が最大となる結果

表 2-1-8 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	1559.3	120.61	1934.5	2.38E+04	7.62E-01	2.00E+00	1.08
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+04	7.03E-01	1.85E+00	1.00
ρ 8%増加	1547.5	120.6	1922.4	2.33E+04	7.03E-01	1.85E+00	1.00
温度係数 32% 減少	1538.2	120.7	1912.9	2.28E+04	6.88E-01	1.81E+00	0.98
温度係数 32% 増加	1556.7	120.6	1931.9	2.38E+04	7.19E-01	1.89E+00	1.02

a),b)は表 2-1-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-1-7 の結果と同じ

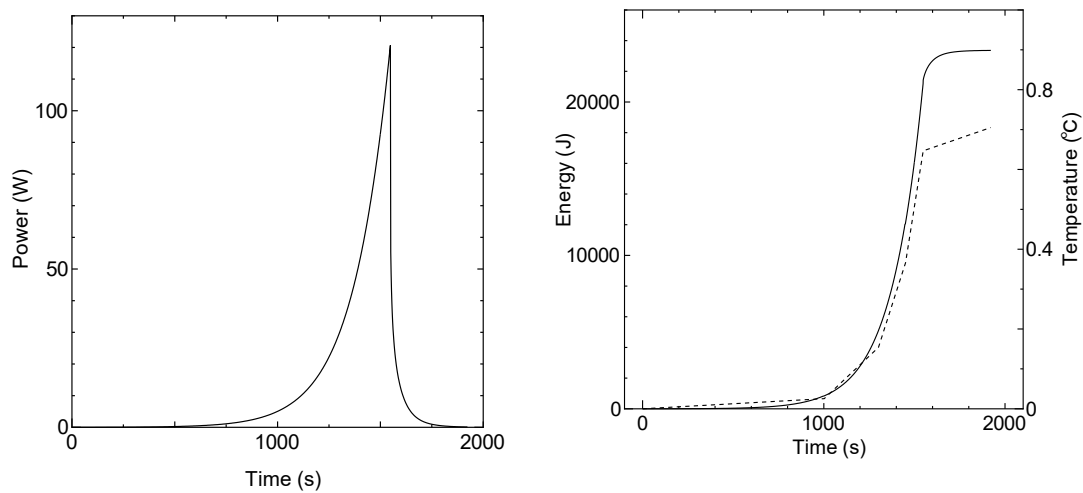


図 2-1-4 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化

原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き(ケース B)

出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

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。

2-2-1 解析シナリオ

(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 2-1 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。

2-2-2 解析結果

ケース A について固体減速炉心の結果を表 2-2-1 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 0.68°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-2-1 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 2-2-3 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。さらに初期出力を下げると積算出力が小さくなる。

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 2-2-2 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 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。（ $0.68^{\circ}\text{C} \times 1.13 = 0.77^{\circ}\text{C}$ ）

ケース A について軽水減速炉心の結果を表 2-2-4 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 0.21°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-2-2 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 2-2-6 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。さらに初期出力を下げると積算出力が小さくなる。

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 2-2-5 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。(0.21°C \times 1.13 = 0.24°C)

表 2-2-1 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 c)
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

c) 最大となる結果

表 2-2-2 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	4.24	127.6	373.5	2.40E+03	3.17E-01	7.26E-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 2-2-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-2-1 の結果と同じ

表 2-2-3 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
初期出力 50W	12.10	137.1	322.5	2.15E+03	2.67E-01	6.11E-01	0.89
初期出力 10W	21.98	139.5	256.0	1.55E+03	1.92E-01	4.04E-01	0.64
初期出力 1W	37.63	138.9	239.7	1.54E+03	1.91E-01	4.02E-01	0.64
初期出力 0.1W	53.4	138.8	291.9	1.55E+03	1.92E-01	4.02E-01	0.64

a),b)は表 2-2-1 と同じ

c) 100W の結果に対する比

d) 表 2-2-1 の結果と同じ

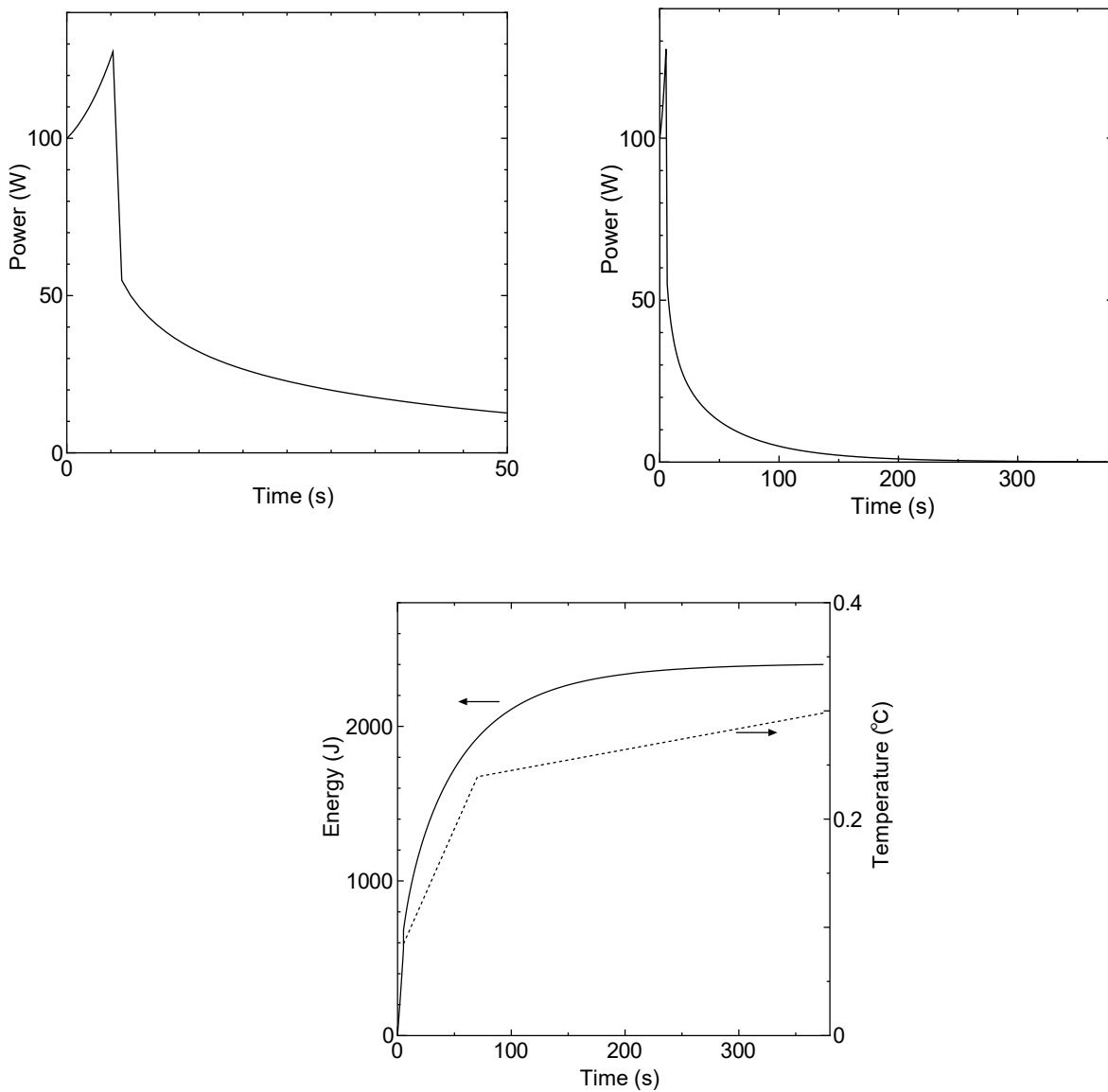


図 2-2-1 L5.5P-30 炉心
 出力運転中の制御棒の異常な引抜き(ケースA)
 出力変化 (上、スケールの違う 2 つの図)、
 積算出力と温度変化 (下、右実線 : 出力、右点線 : 温度)
 (右図の横軸は制御棒挿入時からの経過時間)

表 2-2-4 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	2.08E-01 ^{c)}
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

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-2-5 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) 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	4.31	127.5	391.47	2.63E+03	8.40E-03	2.21E-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 2-2-2 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-2-4 の結果と同じ

表 2-2-6 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) 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
初期出力 50W	12.20	136.9	352.9	2.30E+03	6.95E-02	1.82E-01	0.88
初期出力 10W	20.47	163.4	286.4	1.41E+03	4.27E-02	1.12E-01	0.54
初期出力 1W	26.30	182.5	248.8	9.12E+02	2.75E-02	7.23E-02	0.35
初期出力 0.1W	31.82	182.0	248.7	8.71E+02	2.63E-02	6.91E-02	0.33

a),b)は表 2-2-2 と同じ

c) 100W の結果に対する比

d) 表 2-2-4 の結果と同じ

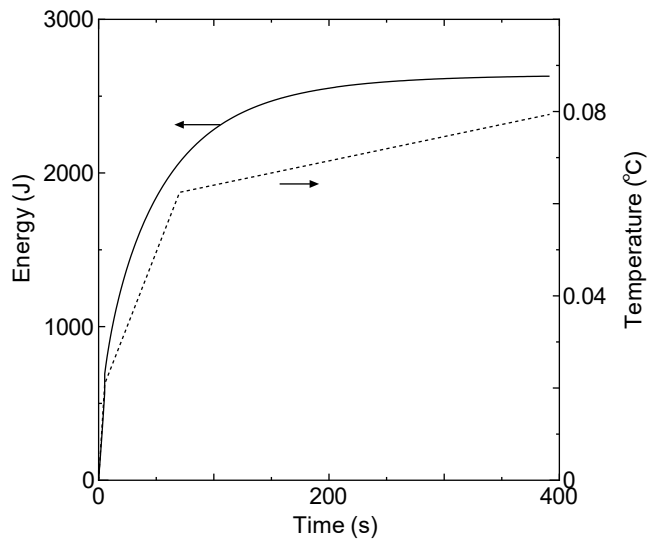
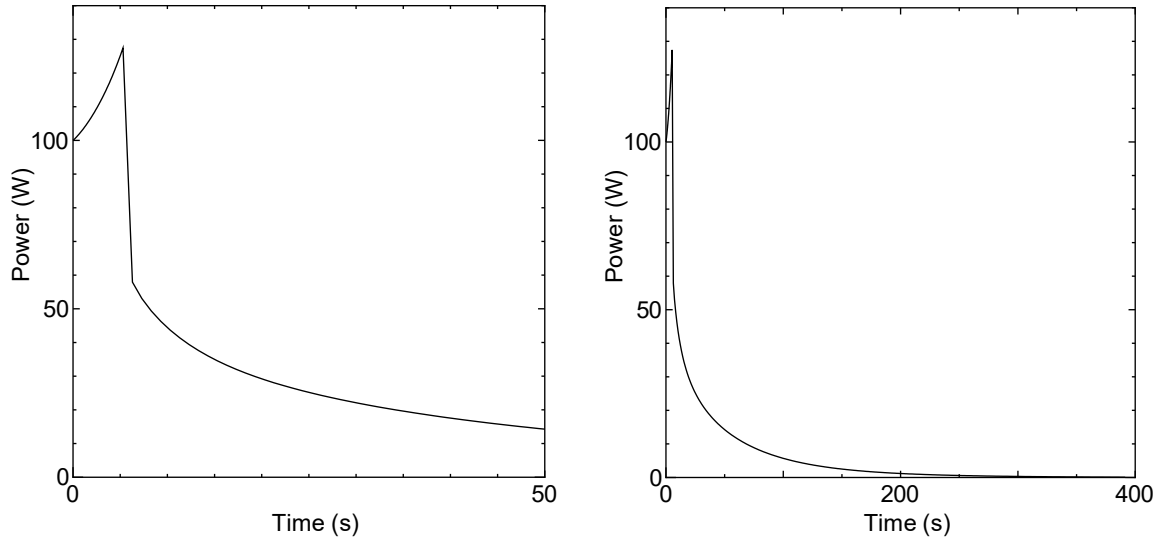


図 2-2-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心
 出力運転中の制御棒の異常な引抜き(ケースA)
 出力変化 (上、スケールの違う 2 つの図)、
 積算出力と温度変化 (下、右実線 : 出力、右点線 : 温度)
 (右図の横軸は制御棒挿入時からの経過時間)

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。

2-3-1 解析シナリオ

(1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心、軽水減速炉心ともに「第 381 回 核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 11 月 5 日)の説明資料 2-1 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、印加される反応度をできるだけ大きくするためにこのような条件を設定した)

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

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

2-3-2 解析結果

ケース A

ケースAについて固体減速炉心の結果を表 2-3-1 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 2-3-1 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 2-3-2 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 ℓ が各々8%の誤差を持った場合の結果より、 ℓ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が最大18%上昇する。温度係数の誤差も結果に影響しない。

これらの誤差があつ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 2-3-3 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 2-3-2 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 2-3-4 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

ケース B について固体減速炉心の結果を表 2-3-5 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 2-3-3 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 2-3-6 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 5% 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 1.16 倍 ($1.05 \times 1.08 \times 1.02$) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(2.6^{\circ}\text{C} \times 1.16 = 3.0^{\circ}\text{C})$

ケース B について軽水減速炉心の結果を表 2-3-7 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 2-3-4 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 2-3-8 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。 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 1.12 倍 (1.06×1.06) となるだけなので判定基準値を満たしている。 $(0.59^{\circ}\text{C} \times 1.12 = 0.66^{\circ}\text{C})$

表 2-3-1 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 2-3-2 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	58.0	138.8	388.3	1.99E+03	2.61E-03	5.98E-03	1.06
β_{eff} 8%減少	46.1	144.0	350.1	1.65E+03	2.05E-01	4.69E-01	0.83
β_{eff} 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 2-3-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-3-1 の結果と同じ

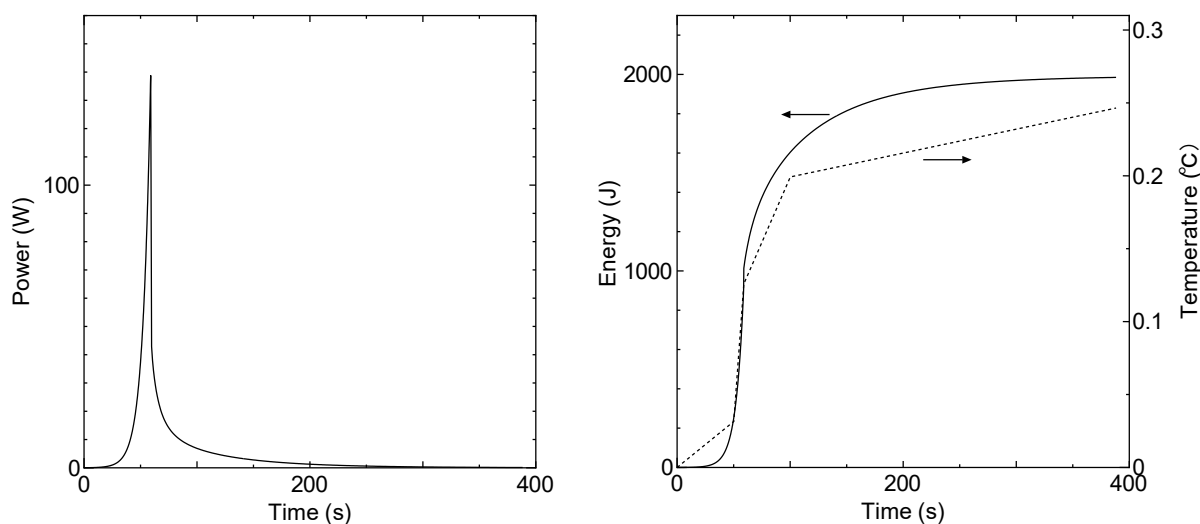


図 2-3-1 L5.5P-30 炉心

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）

出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

表 2-3-3 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 2-3-4 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	19.4	181.9	477.1	1.73E+03	5.55E-03	1.44E-03	1.06
β _{eff} 8%減少	13.5	215.3	433.9	1.46E+03	4.41E-02	1.16E-01	0.83
β _{eff} 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 2-3-3 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-3-3 の結果と同じ

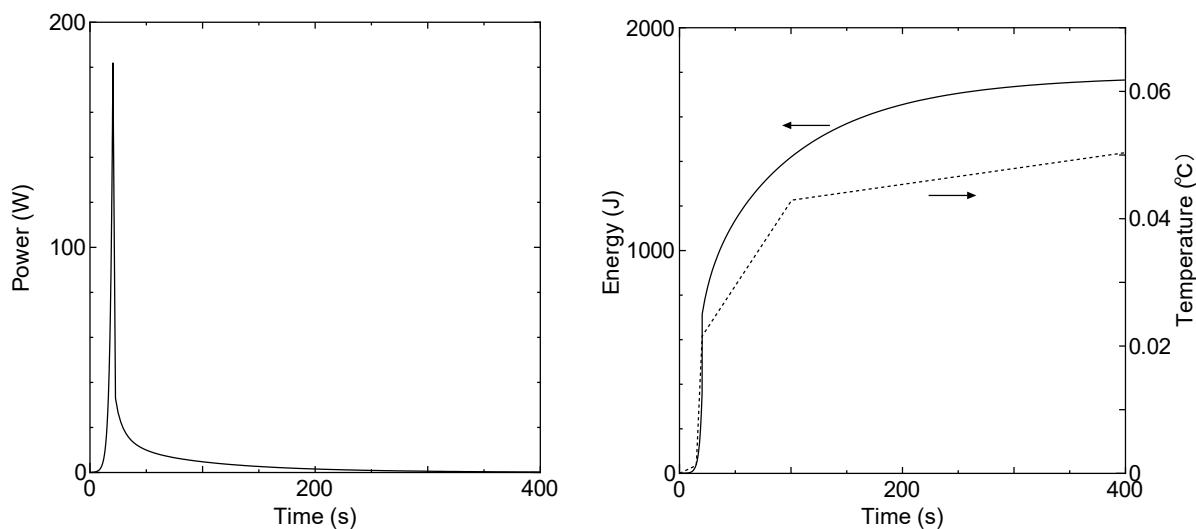


図 2-3-2 C45G(2H₂O) 4 列炉心

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）
 出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

表 2-3-5 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 2-3-6 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	1172.6	121.9	1505.1	9.17E+03	1.21E+00	2.76E+00	1.05
β _{eff} 8%減少	1119.6	122.0	1437.6	8.70E+03	1.08E+00	2.47E+00	0.94
β _{eff} 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 2-3-5 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-3-5 の結果と同じ

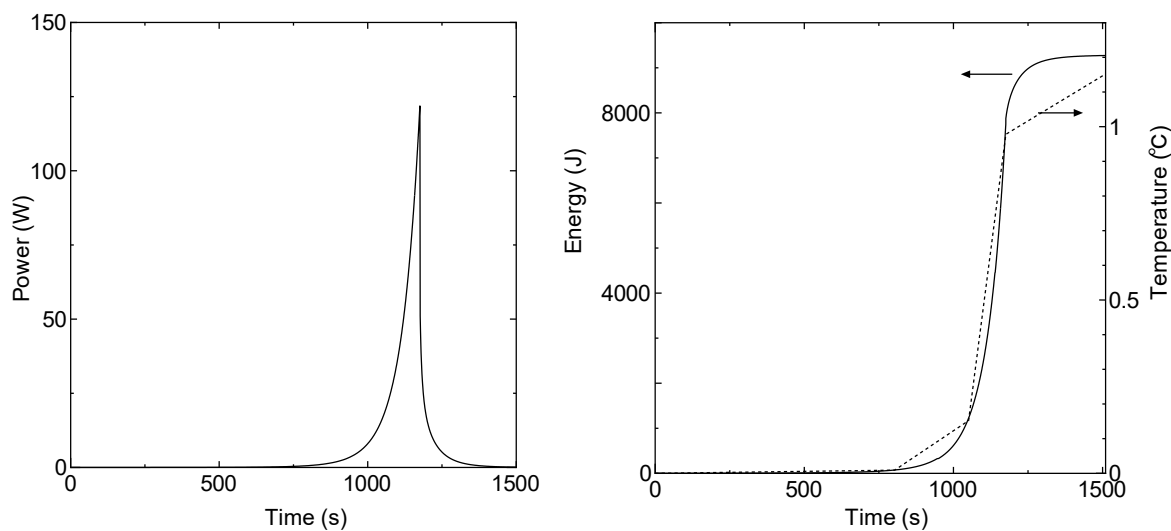


図 2-3-3 L5.5P-30 炉心 出力変化

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）

出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

表 2-3-7 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	<u>5.85E-01</u> ^{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 2-3-8 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 (J)	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	956.5	122.7	1292.7	7.38E+03	2.36E-01	6.20E-01	1.06
β _{eff} 8%減少	911.00	122.8	1230.4	6.93E+03	2.09E-01	5.49E-01	0.94
β _{eff} 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 2-3-7 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-3-7 の結果と同じ

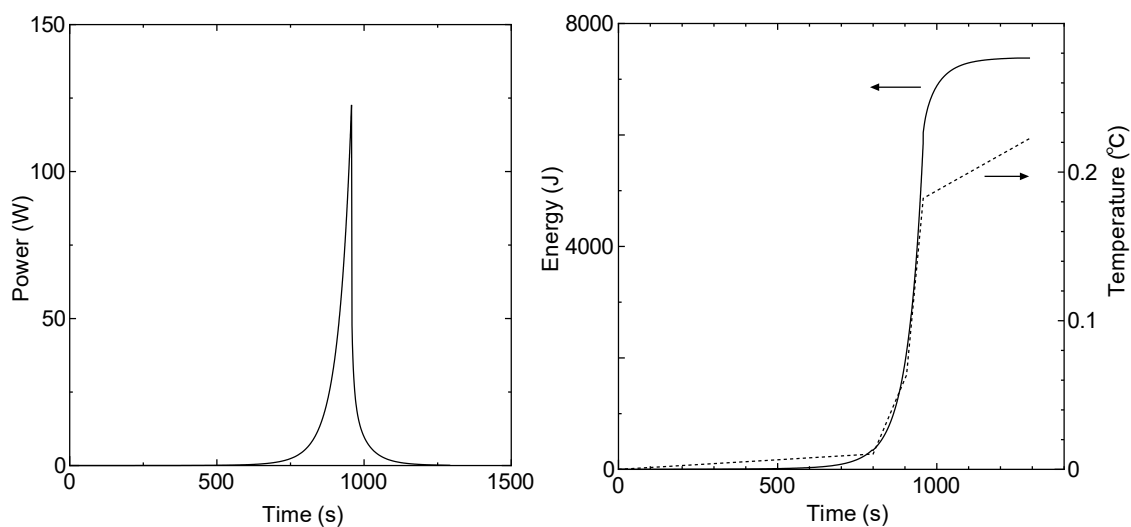


図 2-3-4 C45G(2H₂O) 4 列炉心 出力変化

実験物の異常等による反応度の付加（ケース B ランプ状反応度添加）

出力変化（左）、積算出力と温度変化（右実線：出力、右点線：温度）

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

2-4-1 解析シナリオ

(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。（ $-1\% \Delta k/k$ ）
- ・商用電源喪失後の1時間後までの積算熱量（炉心の出力と核分裂生成物の崩壊熱の合計）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2-1

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

2-4-2 解析結果

結果を表2-4-1に、出力変化、積算出力、温度変化を図2-4-1～図2-4-5に示す。L5.5P-30炉心で燃料温度上昇は約0.74℃、C45G(6H₂O)炉心で燃料温度上昇は約0.24℃であり判定基準値を満たしている。

この炉心の燃料重量の誤差（6%）、即発中性子減衰定数の誤差（8%）、反応度温度係数の誤差（32%）を検討したときの結果を表2-4-2と表2-4-3に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は6%高くなる。 β_{eff} と ρ が各々8%の誤差を持った場合（もう一方は誤差無し）の結果より、 ρ の誤差が結果にほとんど影響を及ぼさないが、 β_{eff} に誤差があった場合には燃料温度が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0.80℃（ 0.74×1.08 ）、C45G(6H₂O)炉心で約1.09倍（ 1.06×1.03 ）の0.26℃（ 0.24×1.09 ）となるだけなので判定基準値を満たしている。

表 2-4-1 商用電源喪失

炉心名称	0.1W までの時間 (s)	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	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01
C45G(2H ₂ O) 4 列	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

b) 各炉心の「最大値／平均値」、および燃料板内の出力分布を考慮する係数を掛ける

表 2-4-2 商用電源喪失 (L5.5P-30 炉心)

誤差の影響

	0.1W までの時間 (s)	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)}	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	—
U 重量を 6%減少	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.50E-01	8.02E-01	1.06
β_{eff} を 8%減少	245.7	9.38E+02	1.61E+03	3.16E-01	9.75E-01	0.98
β_{eff} を 8%増加	260.7	1.07E+03	1.61E+03	3.32E-01	7.61E-01	1.02
l を 8%減少	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00
l を 8%増加	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00
温度係数を 32%減少	253.5	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00
温度係数を 32%増加	253.4	1.00E+03	1.61E+03	3.24E-01	7.43E-01	1.00

a) 表 2-4-1 と同じ

b) 表 2-4-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-4-1 の結果と同じ

表 2-4-3 商用電源喪失 (C45G(2H₂O) 4 列炉心)

誤差の影響

	0.1W までの時間 (s)	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)	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	—
U 重量を 6%減少	262.2	1.36E+03	1.61E+03	9.69E-02	2.55E-01	1.06
β_{eff} を 8%減少	254.2	1.27E+03	1.61E+03	8.71E-02	2.29E-01	0.97
β_{eff} を 8%増加	269.9	1.45E+03	1.61E+03	9.23E-02	2.42E-01	1.03
l を 8%減少	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00
l を 8%増加	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00
温度係数を 32% 減少	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00
温度係数を 32% 増加	262.2	1.36E+03	1.61E+03	8.97E-02	2.36E-01	1.00

a) 表 2-4-1 と同じ

b) 表 2-4-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-4-1 の結果と同じ

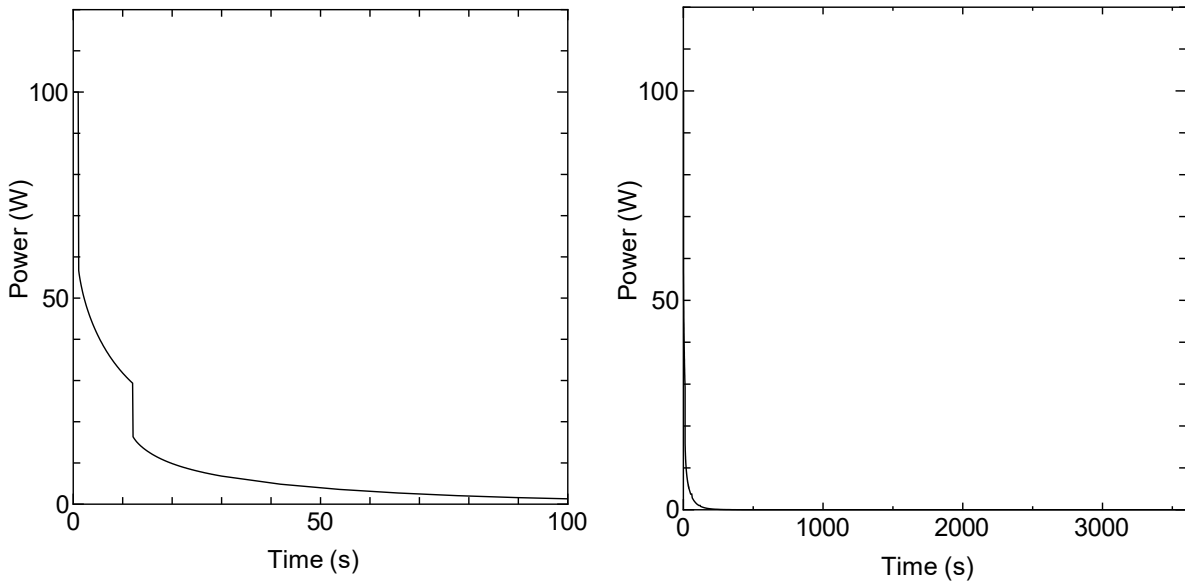


図 2-4-1 L5.5P-30 炉心 商用電源喪失時の出力変化
(左 : 100 秒まで、右 : 3600 秒まで)

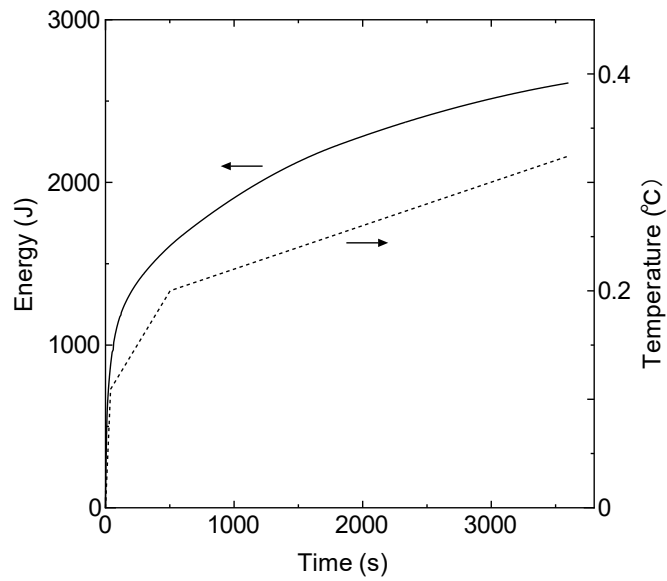


図 2-4-2 L5.5P-30 炉心
商用電源喪失時の積算出力(炉心+FP)

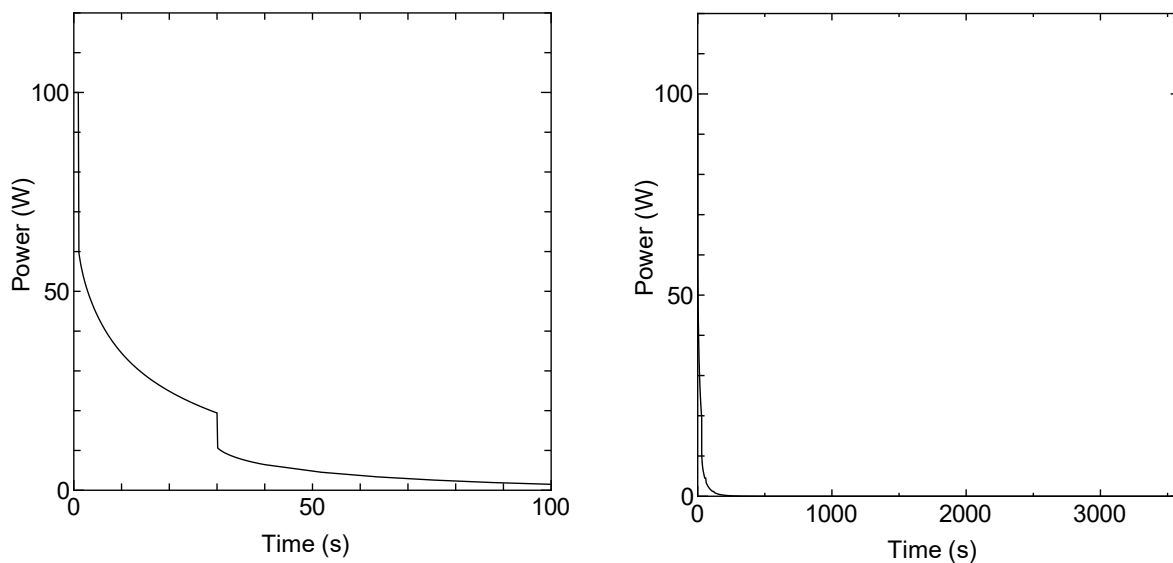


図 2-4-3 C45G(2H₂O) 4 列炉心 商用電源喪失時の出力変化
(左 : 100 秒まで、右 : 3600 秒まで)

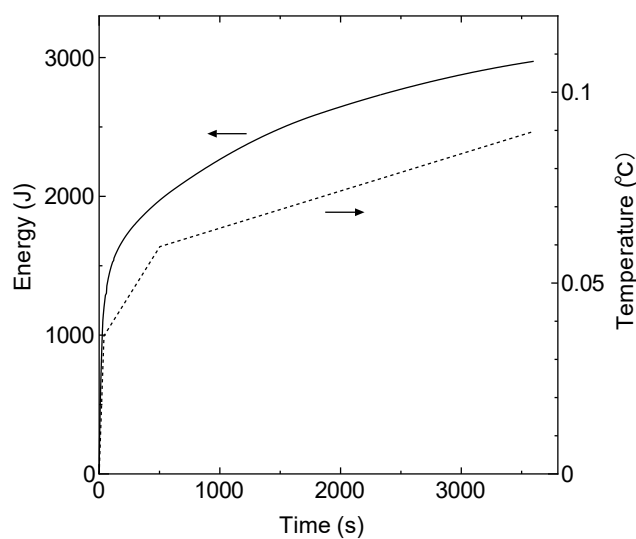


図 2-4-4 C45G(2H₂O) 4 列炉心
商用電源喪失時の積算出力(炉心+FP)

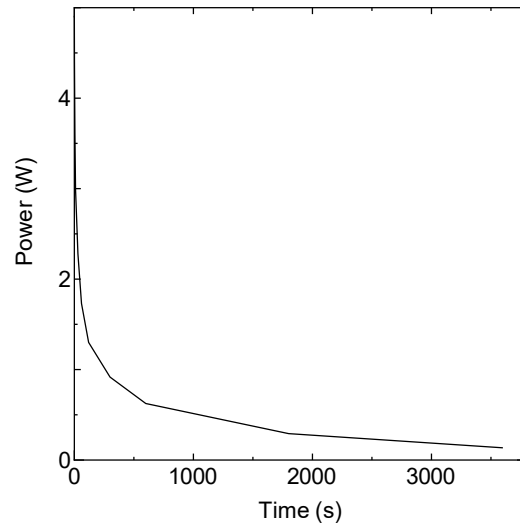


図 2-4-5 FP からの発熱 出力変化

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。

2-5-1 解析シナリオ

(1) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値：0.35 % $\Delta k/k$

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値：1.35 % $\Delta k/k$

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の 1/3 以下）の最大値

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

(2) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

線型出力計は指示値が 100% で 100W となるレンジ

制御棒の一部を挿入して、出力 0.01W の臨界状態

(3) 中性子発生量

【ケース A】

- ・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で炉心に中性子の打ち込みを開始したとする。設置申請書に記載された最大中性子発生量はパルス状中性子発生装置が 5×10^{10} n/s、中性子発生設備が 10^{11} n/s であり、中性子発生は等方であるとする。炉心外側に設置された中性子発生ターゲットから炉心方向に 1/2 の中性子が到達する可能性がある。ここでは中性子発生量の多い中性子発生設備の場合の $10^{11} \times 1/2 = 5 \times 10^{10}$ n/s が出力上昇に寄与する中性子数（以下、中性子発生量）と考える。

【ケース B】

- ・炉心ごとに中性子発生量をケース A の最大値から減少させ、燃料温度が最大となるような中性子発生量を求めて解析を行う。

(4) 解析条件

- ・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秒後に制御棒落下に伴うステップ状の負の反応度が印加される。
- ・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。

(5) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、固体減速炉心について「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2-1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。

2-5-2 解析結果

ケース A

結果を表2-5-1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約0.15℃であり判定基準値を満たしている（出力変化を図2-5-1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2-5-2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21%上昇する。反応度温度係数の誤差は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1.28倍（ 1.06×1.21 ）の0.19℃（ $0.15\text{℃} \times 1.28$ ）となるだけなので判定基準値を満たしている。

ケース B

ケース B の解析を行う前に、中性子発生量を変化させたときの出力変化の違いについて、熱容量が小さい L5.5P-30 炉心と、それより熱容量が大きい LL1P-30 炉心について調べた結果を表 2-5-3 に示す。(L5.5P-30 炉心については中性子発生量を変化させた時の出力、積算出力、温度の時間変化を図 2-5-2～図 2-5-5 に示す)

L5.5P-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出力は最大となった後に減少して 1 時間後に手動スクラムして停止することになる。中性子発生量が大きくなると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 0.072 倍になると最大出力が 120W を超えて、その時点で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ふ。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って温度上昇量も小さくなる。

LL1P-30 炉心でも同じような傾向を示し、中性子発生量が増えると温度上昇が大きくなるが、中性子発生量が 0.0128 倍になると最大出力が 120W を超えて、その時点で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ふ。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って温度上昇量も小さくなる。L5.5P-30 炉心と比べると LL1P-30 炉心のほうが熱容量が大きいいため負の温度係数の影響を受けにくく、LL1P-30 炉心では中性子発生量が少なくても最大出力が 120W を超えるまで出力が上昇することになる。

以上の結果より、中性子発生量を調整して出力の最大値が 120W より少しだけ低くなる場合 (120W のスクラムに至らない場合) と、それより中性子発生量が少しだけ大きくなった場合 (120W のスクラムに至る場合) について調べると、出力の最大値が 120W より少しだけ低くなる場合に温度上昇量が最も大きくなり、中性子発生量がそれより大きくても小さくても温度上昇は小さくなることが判った。

全ての炉心について最大値が 120W より少しだけ低くなる場合 (120W のスクラムに至らない場合) と、中性子発生量が少しだけ大きくなって 120W のスクラムに至る場合について調べた結果を表 2-5-4 に示す。燃料温度が最も高くなったのが L5.5P-30 炉心で中性子発生量がケース A の 0.071 倍になった場合で、そのときの燃料温度上昇は 49.3℃であり判定基準値を満たしている。

なお、最も温度上昇が高くなった中性子発生量 0.071 倍のケースから中性子発生量が少なくなると温度上昇量は単調に減少することを確認することができた。(表 2-5-4(B))

L5.5-30 炉心について初期出力を 0.01W として過渡解析を行っていたが、設定した初期出力が温度上昇に及ぼす影響について調べた。なお、初期出力を大きくすると同じ中性子発生量では 120W のスクラムに至る場合があるため中性子発生量は初期出力ごとに若干調整して 120W スクラムとならないようにしている。

表 2-5-6 に過渡解析の結果を示す。この結果より初期出力を変化させても温度上昇量はほとんど変化しないことが判る。初期出力が 0.01W と 1W の場合の出力変化を図 2-5-8 に、積算出力と温度変化を図 2-5-9 に示す（図 2-5-9 では 0.01W と 1W の結果はほとんど重なっている）。両者は過渡解析の初期段階では若干の違いがあるものの、大局的に見るとほとんど相違は見られないため温度上昇量（出力の積分値）もほとんど変化しないものと考えられる。

L5.5P-30 炉心で中性子発生量がケース A の 0.071 倍になった場合について、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 2-5-5 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は低くなる。 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 の誤差があると燃料温度はほとんど変化しないか、または低くなる（ β_{eff} が小さくなると出力は 120W まで出力が上昇してスクラムしている。）。反応度温度係数の誤差を考慮して温度係数を大きくしても小さくしても燃料温度上昇量は低くなる。これは温度係数が小さくなると負の反応度が小さくなるため出力の低下が起こりにくく、出力は 120W を超えてスクラムするため運転時間が短くなり積算出力は小さくなり、一方、温度係数が大きくなると出力低下が起こりやすくなって最大出力は 120W よりさらに低くなって積算出力も小さくなるためである。燃料温度係数の誤差を考慮した場合の出力、積算出力、温度の時間変化を図 2-5-6、図 2-5-7 に示す

従って、これらの誤差があったとしても燃料温度温度上昇量は低くなる。

表 2-5-1 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
(ケース A)

炉心名称	120W 超 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C) a)	温度上昇 (°C) b)
L5.5P-50	1.3	137.6	179.3	5.31E+02	5.89E-02	1.35E-01
L5.5P-40	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	6.42E-02	1.48E-01
L5.5P-30	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01 c)
L4P-50	1.4	137.2	182.1	5.47E+02	5.37E-02	1.20E-01
L4P-40	1.4	137.0	183.3	5.54E+02	6.52E-02	1.43E-01
L4P-30	1.4	137.0	183.3	5.54E+02	6.91E-02	1.51E-01
L3P-50	1.4	136.8	184.8	5.63E+02	5.15E-02	1.09E-01
L3P-40	1.4	136.7	185.5	5.67E+02	5.73E-02	1.23E-01
L3P-30	1.4	136.8	184.8	5.63E+02	6.25E-02	1.30E-01
L2P-50	1.5	136.6	186.4	5.72E+02	3.87E-02	9.92E-02
L2P-40	1.5	136.4	187.3	5.78E+02	4.59E-02	1.01E-01
L2P-30	1.5	136.5	186.7	5.74E+02	4.81E-02	1.12E-01
L1P-50	1.5	136.6	186.1	5.70E+02	2.23E-02	7.21E-02
L1P-40	1.5	136.4	187.6	5.79E+02	2.38E-02	5.98E-02
L1P-30	1.5	136.5	187.3	5.77E+02	2.49E-02	7.63E-02
LL1P-50	1.4	136.7	185.4	5.66E+02	9.34E-03	3.53E-02
LL1P-40	1.5	136.6	186.3	5.71E+02	8.45E-03	3.08E-02
LL1P-30	1.5	136.6	186.0	5.70E+02	9.76E-03	3.88E-02

a) 燃料板のみの温度上昇を考慮

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

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-5-2 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) (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)	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01	—
U 重量を 6%減少	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	7.02E-02	1.61E-01	1.06
β_{eff} を 8%減少	0.8	141.0	160.3	4.30E+02	5.34E-02	1.22E-01	0.81
β_{eff} を 8%増加	1.8	135.1	197.9	6.43E+02	7.99E-02	1.83E-01	1.21
ℓ を 8%減少	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01	1.00
ℓ を 8%増加	1.3	137.6	179.3	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01	1.00
温度係数を 32%減少	1.3	137.6	179.3	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01	1.00
温度係数を 32%増加	1.3	137.6	179.2	5.31E+02	6.60E-02	1.51E-01	1.00

a),b)は表 2-5-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-5-1 の結果と同じ

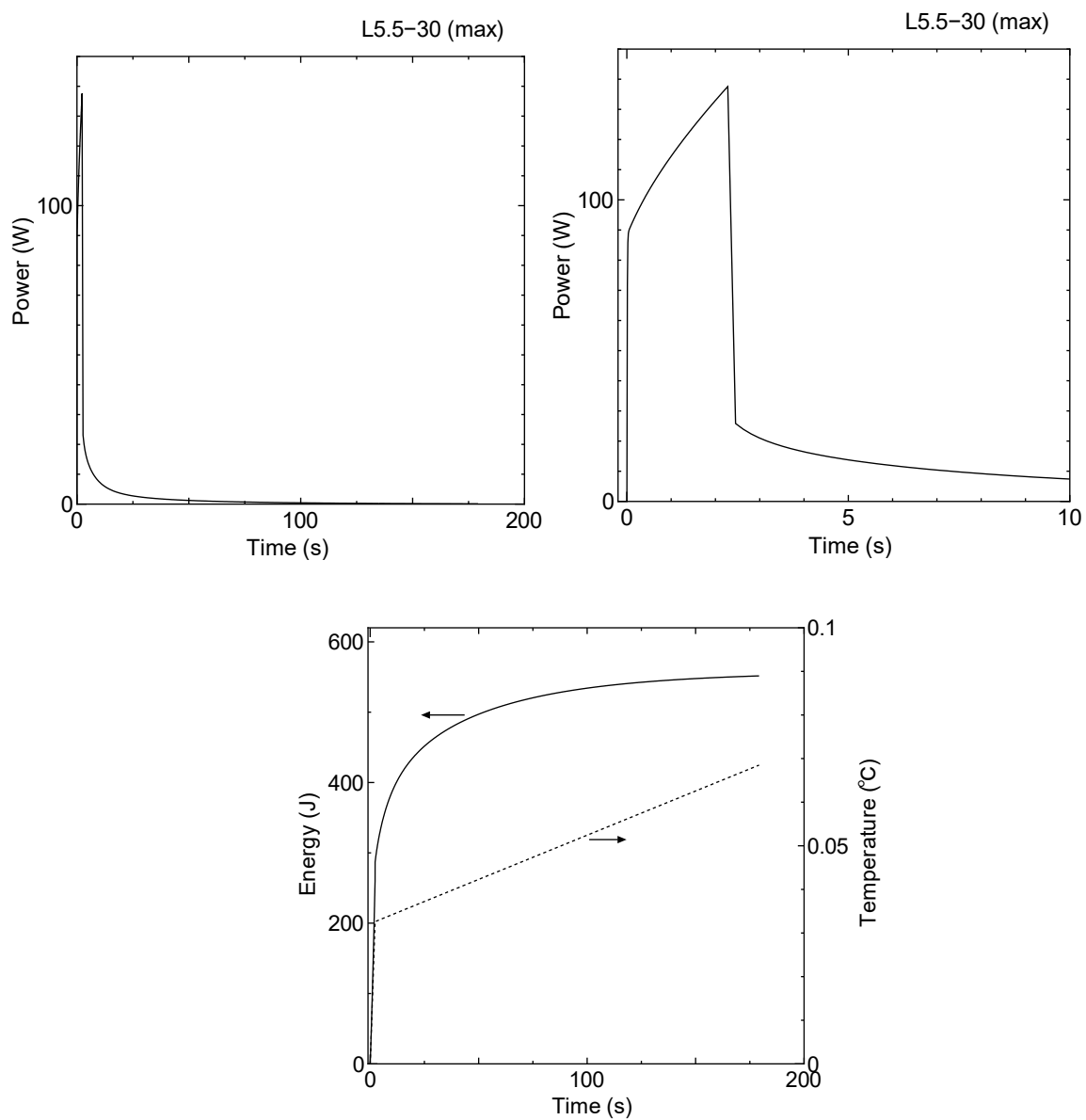


図 2-5-1 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用

L5.5P-30 炉心 (ケース A)

出力変化 (上、左右で横軸のスケールのみが異なる)、
 積算出力と温度変化 (右実線 : 出力、右点線 : 温度)

表 2-5-3 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
中性子発生量を変化させたとき

炉心名称	中性子発生量 (ケース A に対する比率) ^{a)}	120W 超 (s) ^{① b)}	最大出力 (W) ^②	最大となる時間 (s) ^③	最大出力 (W) ^④	手動スクラム時の出力 (W) ^⑤	0.1W まで (s) ^⑥	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C) ^{b)}
L5.5P-30	0.040	—	—	435.2	82.2	17.6	3806.4	1.30E+05	1.61E+01	3.69E+01
	0.071 ₂	—	—	351.7	119.9	23.3	3818.7	1.74E+05	2.16E+01	4.93E+01
	0.072	312.1	120.1	—	—	—	678.5	2.69E+04	3.34E+00	7.66E+00
	0.080	238.1	120.2	—	—	—	599.2	1.99E+04	2.48E+00	5.67E+00
LL1P-30	0.008	—	—	2469.5	88.1	74.0	3947.4	2.34E+05	4.02E+00	1.60E+01
	0.012 ₄	—	—	2115.1	117.1	84.1	3957.5	3.16E+05	5.41E+00	2.15E+01
	0.012₈	2197.4	120.0	—	—	—	2582.7	1.76E+05	3.02E+00	1.20E+01
	0.016	1260.3	120.1	—	—	—	1643.7	8.61E+04	1.48E+00	5.86E+00
	0.024	758.5	120.1	—	—	—	1139.0	5.11E+04	8.75E-01	3.48E+00
	0.040	425.7	120.2	—	—	—	800.7	2.98E+04	5.11E-01	2.03E+00
	0.080	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 ($5 \times 10^{10} \text{n/s}$) に対する比率 (例: 0.040 とは、 $5 \times 10^{10} \times 0.04 \text{n/s}$)

b) 説明

- 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 手動スクラムして制御棒落下する直前の出力 (時間は 3601 秒)
- ⑥ 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

c) 中性子発生量に欄で太字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 1 時間後に手動スクラムで停止する場合

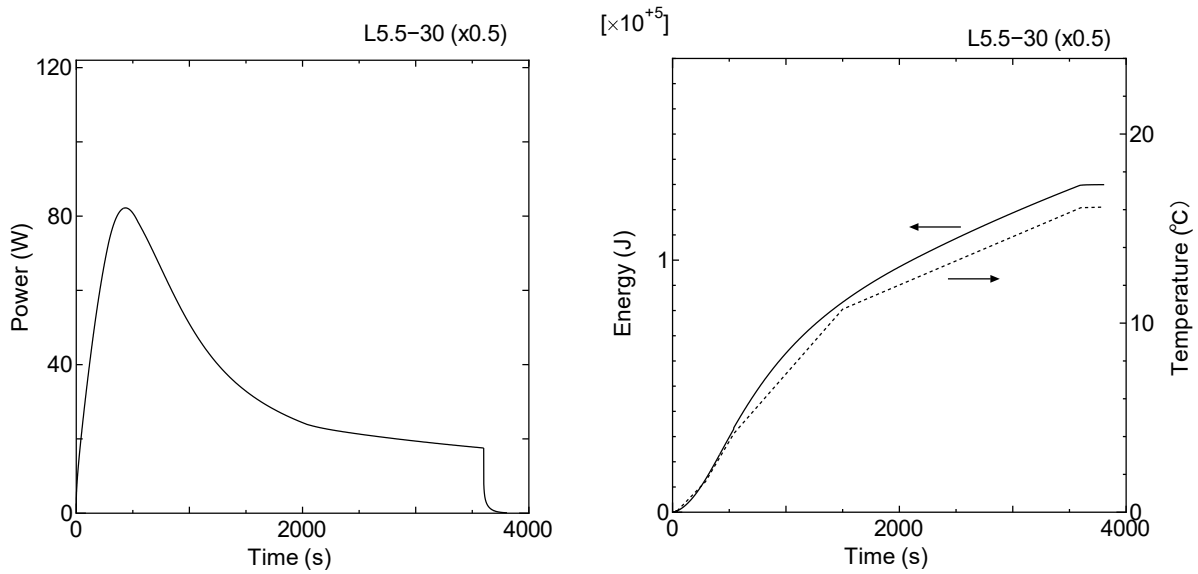


図 2-5-2 L5.5P-30 炉心 (中性子発生量 ケース A の×0.04 倍)
 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

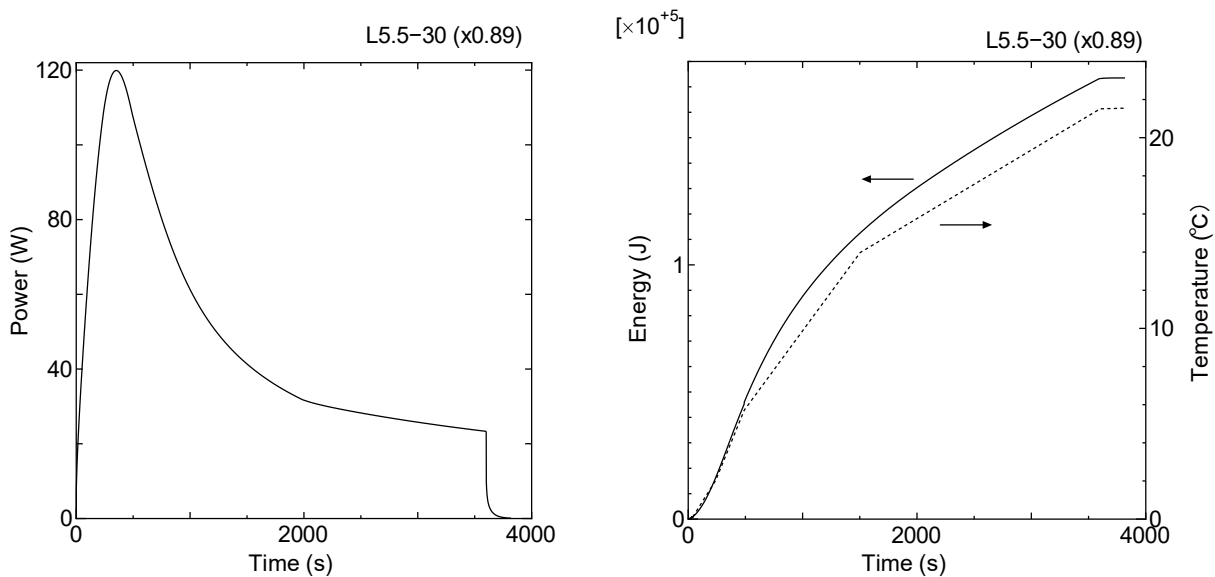


図 2-5-3 L5.5P-30 炉心 (中性子発生量 ケース A の×0.071 倍)
 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線：出力、右点線：温度)

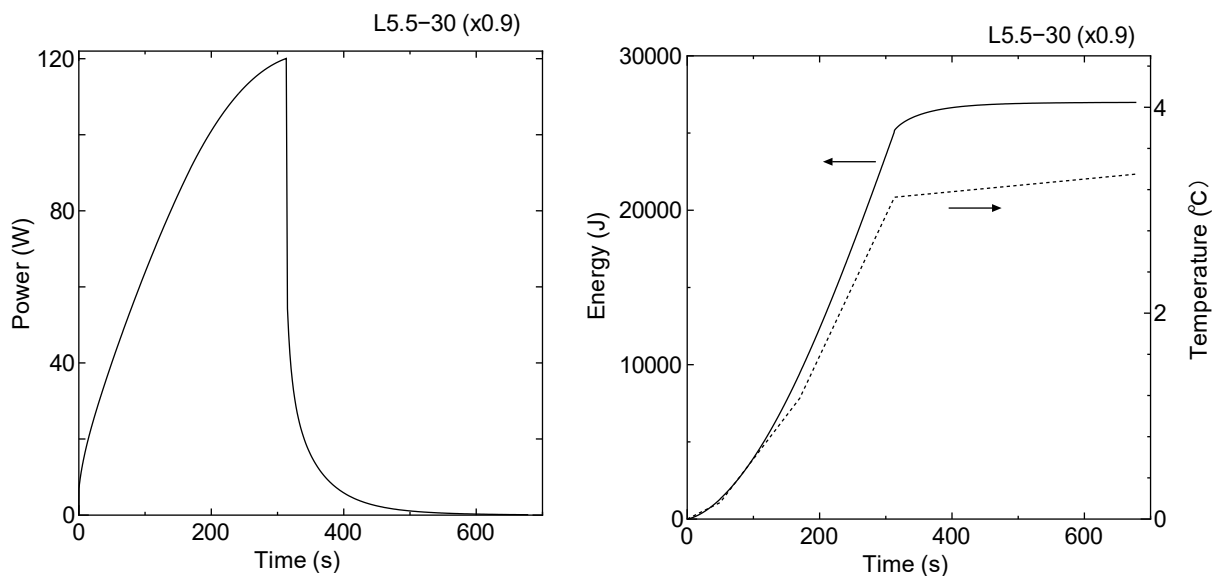


図 2-5-4 L5.5P-30 炉心 (中性子発生量 ケース A の $\times 0.072$ 倍)
 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線: 出力、右点線: 温度)

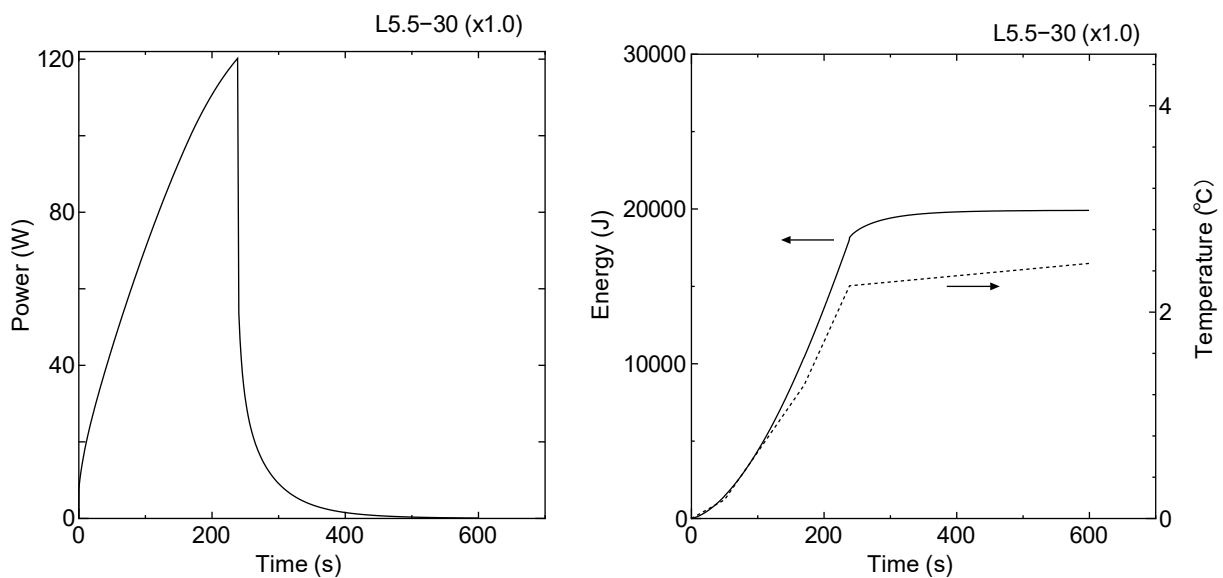


図 2-5-5 L5.5P-30 炉心 (中性子発生量 ケース A の $\times 0.08$ 倍)
 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線: 出力、右点線: 温度)

表 2-5-4 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

【ケース B 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) ^{① b)}	最大出力 (W) ^②	最大となる時間 (s) ^③	最大出力 (W) ^④	手動スクラム時の出力 (W) ^⑤	0.1W まで (s) ^⑥	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C)
L5.5P-50	0.070	—	—	355.0	119.0	23.2	3818.8	1.73E+05	1.92E+01	4.39E+01
	<u>0.071</u>	295.5	120.1	—	—	—	660.9	2.52E+04	2.80E+00	6.41E+00
L5.5P-40	0.072	—	—	347.1	119.7	23.1	3817.6	1.72E+05	2.08E+01	4.78E+01
	<u>0.073</u>	312.4	120.1	—	—	—	678.8	2.72E+04	3.28E+00	7.55E+00
L5.5P-30	0.071	—	—	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	<u>4.93E+01</u> ^{d)}
	<u>0.072</u>	312.1	120.1	—	—	—	678.5	2.69E+04	3.34E+00	7.66E+00
L4P-50	0.065	—	—	392.3	119.9	24.2	3818.6	1.84E+05	1.80E+01	4.03E+01
	<u>0.066</u>	344.6	120.1	—	—	—	714.3	2.92E+04	2.86E+00	6.40E+00
L4P-40	0.067	—	—	380.8	119.7	23.9	3824.3	1.81E+05	2.13E+01	4.67E+01
	<u>0.068</u>	339.0	120.1	—	—	—	709.2	2.89E+04	3.40E+00	7.46E+00
L4P-30	0.067	—	—	377.8	118.9	23.6	3823.3	1.79E+05	2.24E+01	4.88E+01
	<u>0.068</u>	357.2	120.0	—	—	—	728.2	3.10E+04	3.87E+00	8.44E+00
L3P-50	0.061	—	—	420.2	118.8	24.7	3831.0	1.87E+05	1.71E+01	3.64E+01
	<u>0.062</u>	393.7	120.0	—	—	—	767.1	3.37E+04	3.08E+00	6.54E+00
L3P-40	0.060	—	—	428.5	118.9	25.0	3832.4	1.89E+05	1.91E+01	4.09E+01
	<u>0.061</u>	397.7	120.0	—	—	—	771.4	3.38E+04	3.42E+00	7.34E+00
L3P-30	0.061	—	—	423.9	119.5	25.0	3832.2	1.89E+05	2.10E+01	4.36E+01
	<u>0.062</u>	379.6	120.1	—	—	—	752.8	3.20E+04	3.55E+00	7.39E+00
L2P-50	0.045	—	—	579.5	119.3	29.0	3853.6	2.12E+05	1.44E+01	3.68E+01
	<u>0.046</u>	520.3	120.0	—	—	—	898.2	4.24E+04	2.87E+00	7.35E+00
L2P-40	0.048	—	—	544.3	119.5	28.3	3850.4	2.07E+05	1.65E+01	3.64E+01
	<u>0.049</u>	488.7	120.0	—	—	—	866.5	4.00E+04	3.18E+00	7.04E+00
L2P-30	0.048	—	—	550.9	118.6	28.2	3850.3	2.07E+05	1.73E+01	4.03E+01
	<u>0.049</u>	511.5	120.0	—	—	—	889.4	4.23E+04	3.55E+00	8.23E+00
L1P-50	0.029	—	—	914.6	118.9	37.3	3882.5	2.52E+05	9.85E+00	3.19E+01
	<u>0.030</u>	793.8	120.0	—	—	—	1175.0	6.12E+04	2.39E+00	7.74E+00
L1P-40	0.029	—	—	926.3	119.7	37.8	3884.6	2.55E+05	1.05E+01	2.63E+01
	<u>0.030</u>	784.0	120.0	—	—	—	1166.0	5.99E+04	2.46E+00	6.19E+00
L1P-	0.028	—	—	949.5	117.8	37.7	3885.5	2.53E+05	1.09E+01	3.35E+01

30	<u>0.029</u>	869.2	120.0	—	—	—	1252.7	6.83E+04	2.95E+00	9.03E+00
LL1P-	0.014	—	—	1884.3	118.4	73.1	3945.0	3.15E+05	5.20E+00	1.96E+01
50	<u>0.015</u>	1511.7	120.0	—	—	—	1895.5	1.09E+05	1.80E+00	6.80E+00
LL1P-	0.013	—	—	2039.1	118.3	80.4	3953.8	3.17E+05	4.69E+00	1.71E+01
40	<u>0.014</u>	1622.7	120.0	—	—	—	2007.4	1.17E+05	1.73E+00	6.29E+00
LL1P-	0.012	—	—	2139.5	114.6	83.4	3956.8	3.09E+05	5.30E+00	2.10E+01
30	<u>0.013</u>	1873.5	120.0	—	—	—	2258.4	1.40E+05	2.39E+00	9.50E+00

- a) ケース A の中性子発生量に対する倍率
- b) 各項目の説明は表 2-5-3 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
- d) 温度上昇が最大となる結果

表 2-5-4(B) 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
中性子発生量を変化させたとき

炉心名称	中性子発生量 (ケース A に対する比率) ^{a)}	最大となる時間 (s) ^{① b)}	最大出力 (W) ^②	手動スクラム時の出力 (W) ^③	0.1W まで (s) ^④	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C) ^{c)}
L5.5P -30	0.040	435.2	82.2	17.6	3806.4	1.30E+05	1.61E+01	3.69E+01
	0.055	385.2	101.2	20.5	3813.1	1.53E+05	1.90E+01	4.34E+01
	0.060	373.4	107.2	21.4	3815.0	1.59E+05	1.98E+01	4.53E+01
	0.065	363.1	113.0	22.3	3816.7	1.66E+05	2.06E+01	4.72E+01
	0.068	357.4	116.3	22.8	3817.7	1.70E+05	2.11E+01	4.82E+01
	0.069	355.6	117.5	23.0	3818.0	1.71E+05	2.12E+01	4.86E+01
	0.070	353.8	118.6	23.1	3818.3	1.72E+05	2.14E+01	4.89E+01
	0.071	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01

d) ケース A の中性子発生量 ($5 \times 10^{10} \text{n/s}$) に対する比率 (例: 0.040 とは、 $5 \times 10^{10} \times 0.04 \text{ n/s}$)

e) 説明

① 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

② 出力が 120W まで上昇しない場合の最大出力

③ 手動スクラムして制御棒落下する直前の出力 (時間は 3601 秒)

④ 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

f) 出力分布、燃料セル内での分布を考慮した温度

表 2-5-5 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
(L5.5P-30 炉心) (ケース A ×0.071 倍) 誤差の影響

	最大となる 時間 (s)	最大出力 (W)	手動スク ラム時の 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)}	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01	
U 重量 6%減少	344.3	117.4	22.6	3815.6	1.68E+05	2.09E+01	4.78E+01	0.97
β_{eff} を 8%減少	<u>270.9</u> ^{e)}	<u>120.1</u>	—	<u>623.4</u>	<u>2.30E+04</u>	<u>2.86E+00</u>	<u>6.55E+00</u>	<u>0.13</u>
β_{eff} を 8%増加	371.2	117.1	23.3	3826.9	1.74E+05	2.16E+01	4.93E+01	1.00
ℓ を 8%減少	351.7	119.9	23.3	3818.7	1.74E+05	2.16E+01	4.93E+01	1.00
ℓ を 8%増加	351.7	119.9	23.3	3818.7	1.74E+05	2.16E+01	4.93E+01	1.00
温度係数を 32%減少	<u>255.0</u> ^{e)}	<u>120.2</u>	—	<u>617.7</u>	<u>2.06E+04</u>	<u>2.55E+00</u>	<u>5.84E+00</u>	<u>0.12</u>
温度係数を 32%増加	320.3	108.8	20.3	3805.2	1.51E+05	1.87E+01	4.29E+01	0.87

a),b)は表 2-5-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-5-4 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

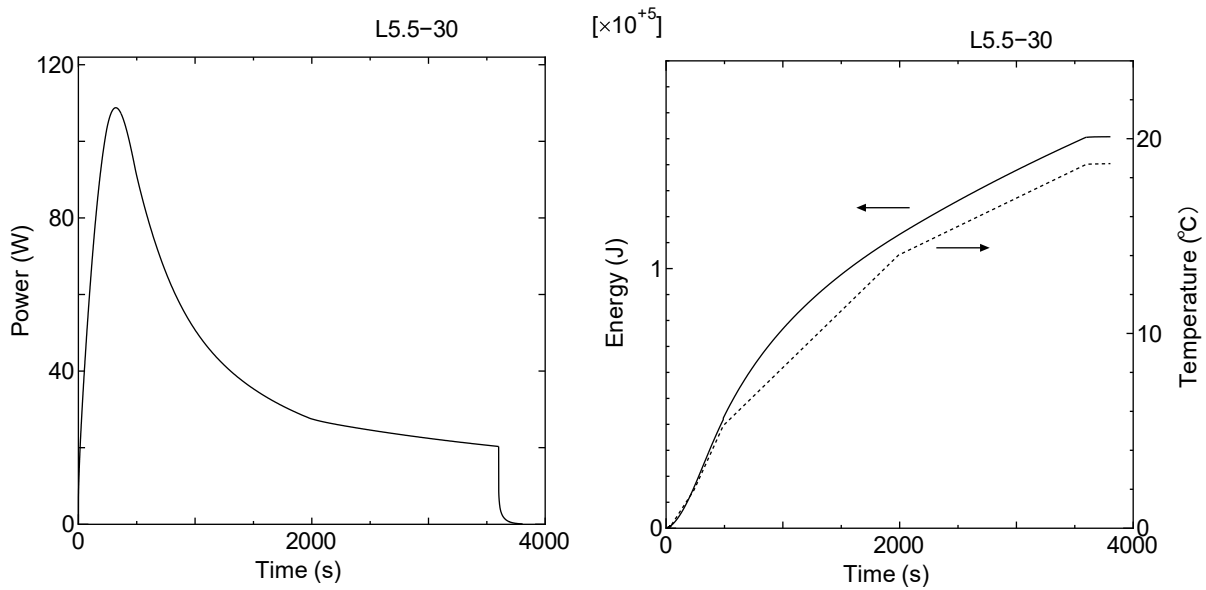


図 2-5-6 L5.5P-30 炉心 (ケース A $\times 0.071$ 倍)
 誤差考慮 (温度係数を 32% 増加)
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線: 出力、右点線: 温度)

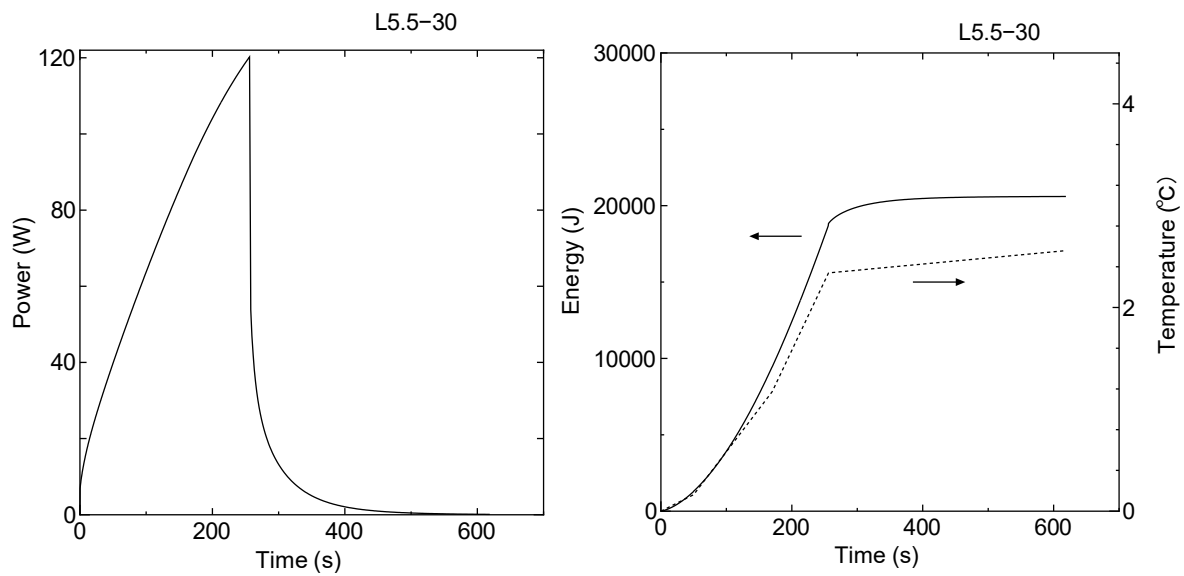


図 2-5-7 L5.5P-30 炉心 (ケース A $\times 0.071$ 倍)
 誤差考慮 (温度係数を 32% 減少)
 出力変化 (左)、積算出力と温度変化 (右実線: 出力、右点線: 温度)

表 2-5-6 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
初期出力を変化させたとき

炉心名称	初期出力 (W)	中性子発生量 (ケース A に対する比率) ^{a)}	最大となる時間 (s) ^{① b)}	最大出力 (W) ^②	手動スクラム時の出力 (W) ^③	0.1W まで (s) ^④	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 (°C) ^{c)}
L5.5P -30	0.01	0.071	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	0.1	0.071	351.9	119.7	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	1	0.071	350.1	119.8	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	2	0.071	348.1	119.9	23.3	3818.6	1.73E+05	2.15E+01	4.93E+01
	5	0.0707	342.5	119.8	23.2	3818.4	1.73E+05	2.15E+01	4.92E+01
	10	0.0701	333.2	119.9	23.1	3818.2	1.73E+05	2.14E+01	4.91E+01
	20	0.069	315.6	119.9	22.9	3817.7	1.71E+05	2.13E+01	4.87E+01

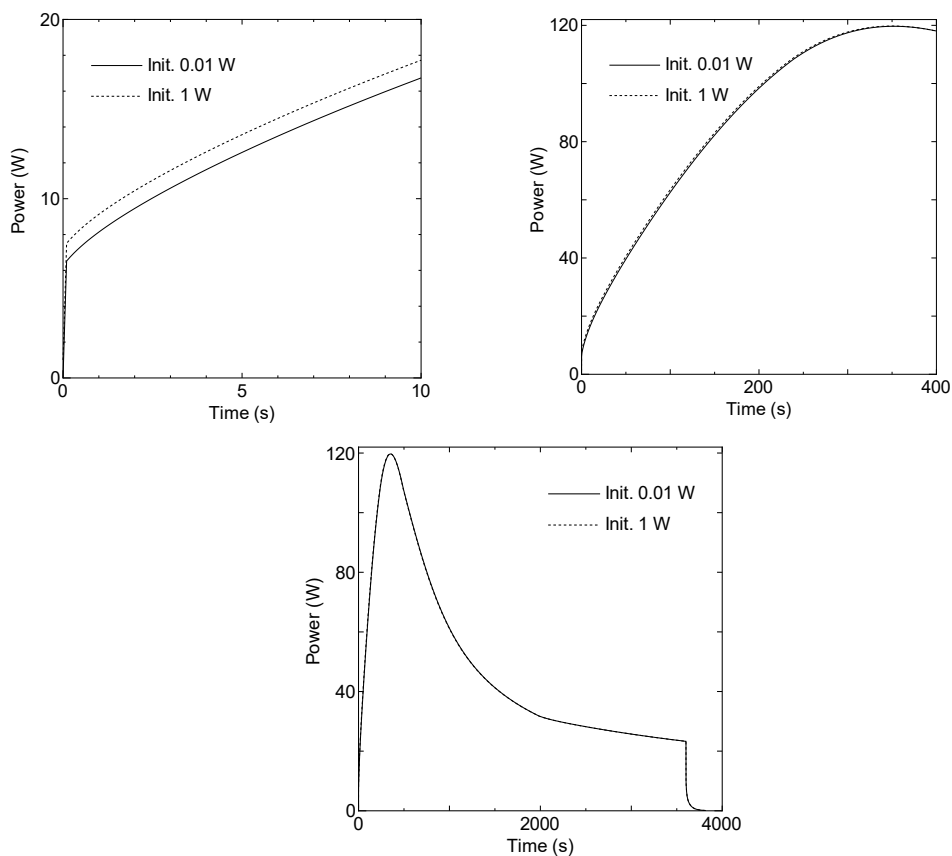


図 2-5-8 L5.5P-30 炉心 初期出力を変化させた時の出力変化
 (実線 : 0.01W、点線 1W) (3つの図は横軸のスケールをみの違い)

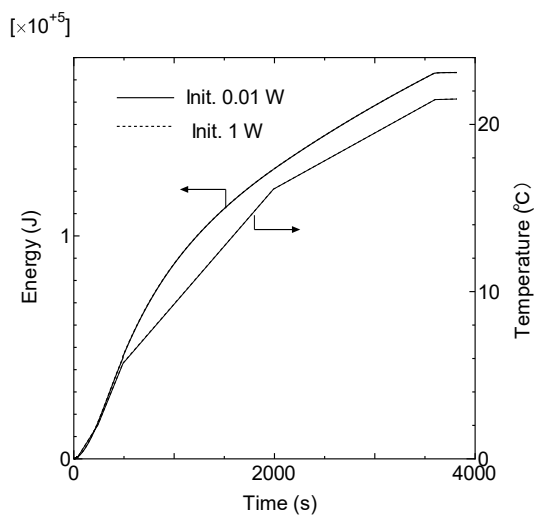


図 2-5-9 L5.5P-30 炉心 初期出力を変化させた時の積算出力と温度変化

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 2-6-1 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℃）

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

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

2-6-1 解析シナリオ

(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 2-1 で選定した軽水減速炉心の中の反応度温度係数が正となる炉心とする。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。

(2) 反応度等

各炉心の過剰反応度は申請書記載の核的制限値の最大値、0.5 %Δk/k

制御棒の全反応度は核的制限値の最小値、1.5 %Δk/k

反応度が最大の制御棒は核的制限値（全体の 1/3 以下）の最大値

軽水減速炉心は $1.5 \times 1/3 = 0.5 \text{ \%}\Delta k/k$

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 2-1 に記載した数値を用いる。

(3) 初期運転条件

初期温度は室温として 25°C

炉心タンク満水

線型出力計は指示値が 100% で 100W となるレンジ

制御棒を挿入して出力 1W の臨界状態

(4) スクラム信号発生

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

2-6-2 解析結果

結果を表 2-6-1 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約 0.54°C であり判定基準値を満たしている（出力変化を図 2-6-2 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 2-6-2 に示す。燃料重量の誤差を考慮したときには燃料温度は 7% 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 1.63 倍（ $1.07 \times 1.09 \times 1.40$ ）と 0.88°C （ $0.54^{\circ}\text{C} \times 1.63$ ）なるだけなので判定基準値を満たしている。

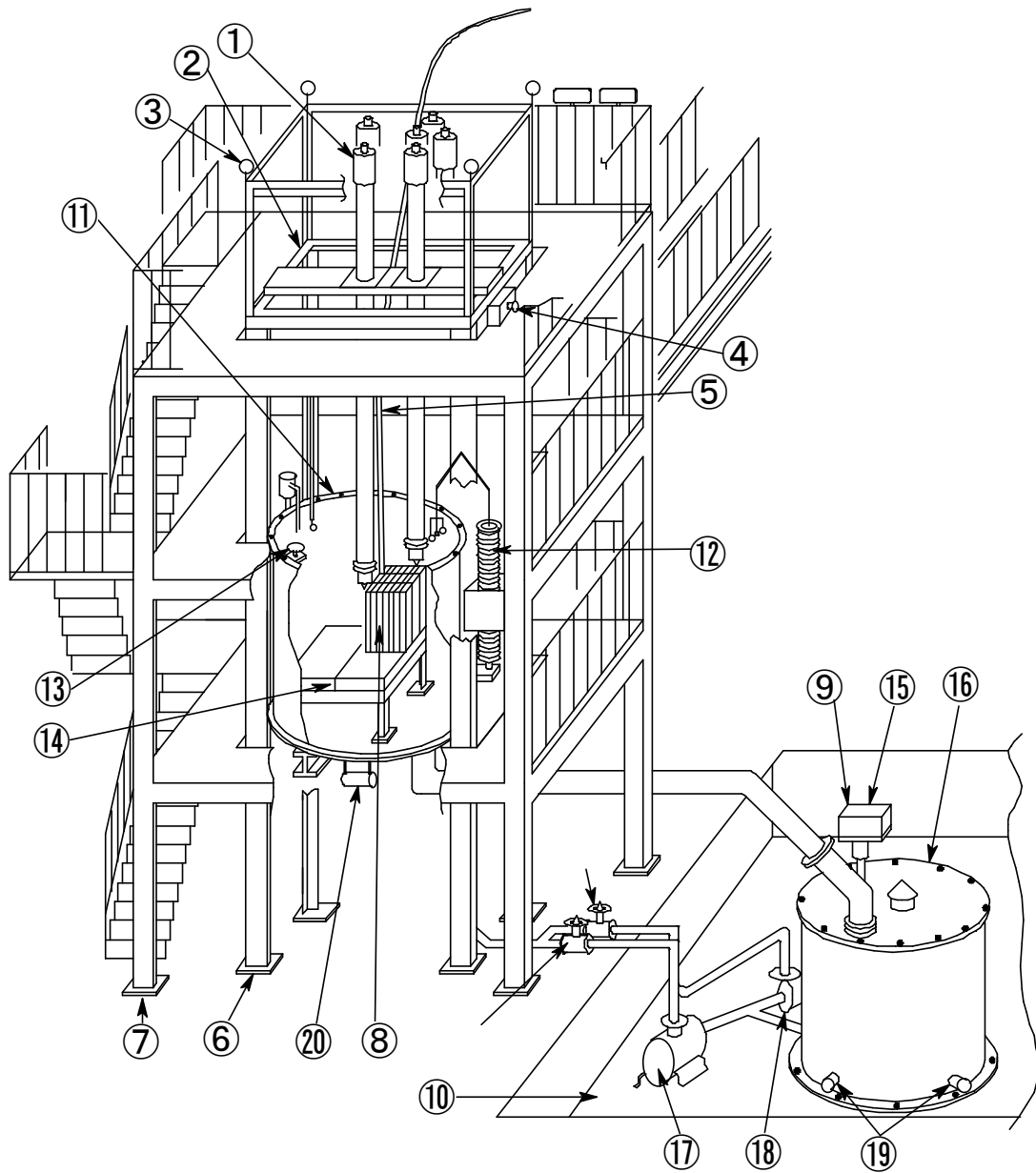


図 2-6-1 軽水減速架台 (C 架台) 概念図

(設置変更申請書の参考図 7)

⑳ : 炉心タンクヒータ

表 2-6-1 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^{c)}	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

c) 温度上昇が最大となる結果

表 2-6-2 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	5.47	3761	7.40E+03	1.70E-02	5.73E-01	1.07
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

a) 表 2-6-1 と同じ

b) 表 2-6-1 と同じ

c) 基準の結果に対する比

d) 表 2-6-1 の結果と同じ

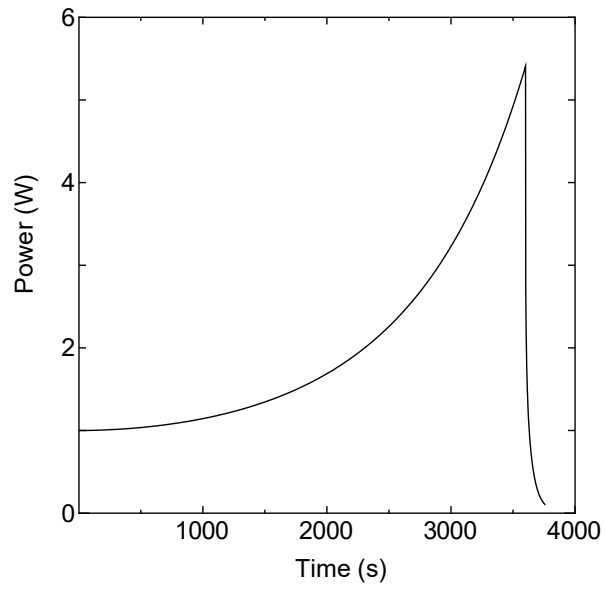


図 2-6-2 C45G(6H₂O)炉心 出力変化
炉心タンクヒータによる温度上昇

3. 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 ①
- (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 ②
 - (ii) 実験設備、実験物等の著しい損傷 ③

判定基準は「2 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①～③の項目について解析結果を示す。以下の節の「3-***」の***が①～③の番号に対応する。

3-1 燃料落下又は燃料誤装荷

炉心配置変更の際に燃料集合体を計画外の位置に誤って装荷した場合、炉心に反応度が投入され原子炉出力が上昇するため燃料、減速材の温度が上昇して許容設計限界を超える可能性がある。

3-1-1 解析のシナリオ

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制基準適合性に係る審査会合」(2020 年 11 月 5 日)の説明資料 2-1 で選定した代表炉心について、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、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

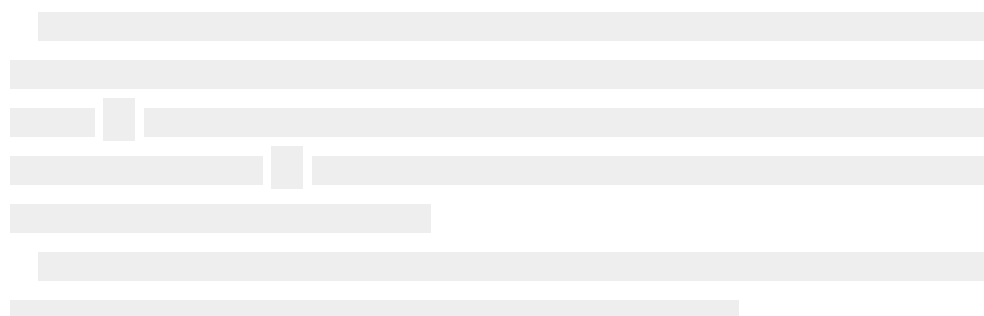
中心架台の概念図を図 3-1-1 に、制御室の中心架台操作盤を図 3-1-2 に示す。中心架台には A 架台炉心では 3×3、B 架台炉心では 5×5 体の燃料集合体、ポリエチレン反射体が装荷される。(最低でも 1 体の燃料集合体を装荷しなければいけないことが申請書の本文に記載)



ストップパを通過するごとにシリンダの上昇速度は遅くなるように設計されている。中心架台の上昇速度とストロークについては申請書に表 3-1-1 のように記載されている。図 3-1-3 に主要なストップパ間の距離を記載している。

表 3-1-1 中心架台のストロークと上昇速度

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



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

(6) 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 3-1-4、図 3-1-5 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 3-1-1 に示す。L5.5 の燃料セルを持つ炉心の場合は、L5.5 (50cm) 炉心の⑧の位置が最大となり、L5.5 (30cm) 炉心の⑨の位置が最小となる）

- ・中心架台を上昇させる。

下限から第 2 段ストップまでの中心架台の移動では反応度には影響を及ぼさないの 2 段から中心架台を連続的に上昇させたとする（そこからストロークは約 120cm）。上昇速度は申請書に記載した制限値（表 3-1-1）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 3-1-6 に L5.5(30cm)の結果を図 3-1-7 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（表 3-1-5 に多項式の例を示す）。

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形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、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%Δk/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、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。

2-7-2 解析結果

結果を表3-1-2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℃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3-1-3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。 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(1.06×1.06)の約1.3℃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 3-1-9、図 3-1-10 に、反応度の変化(制御棒引抜き前まで)を図 3-1-11 に、また中心架台の反応度を表す式と係数の値を表 3-1-4 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 3-1-14、図 3-1-15 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 3-1-12、図 3-1-13 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 3-1-8 に示す。

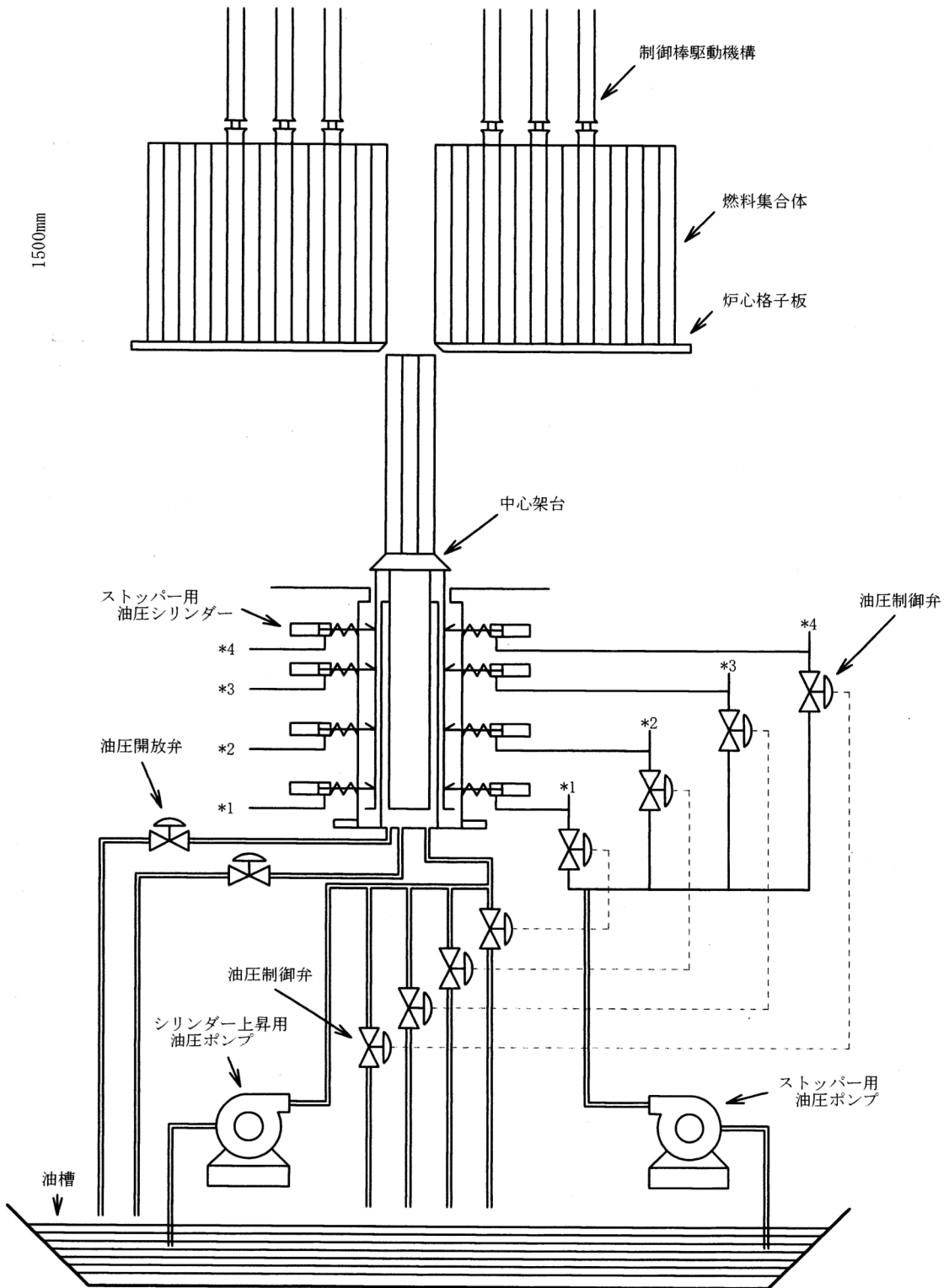


図 3-1-1 中心架台の概念図

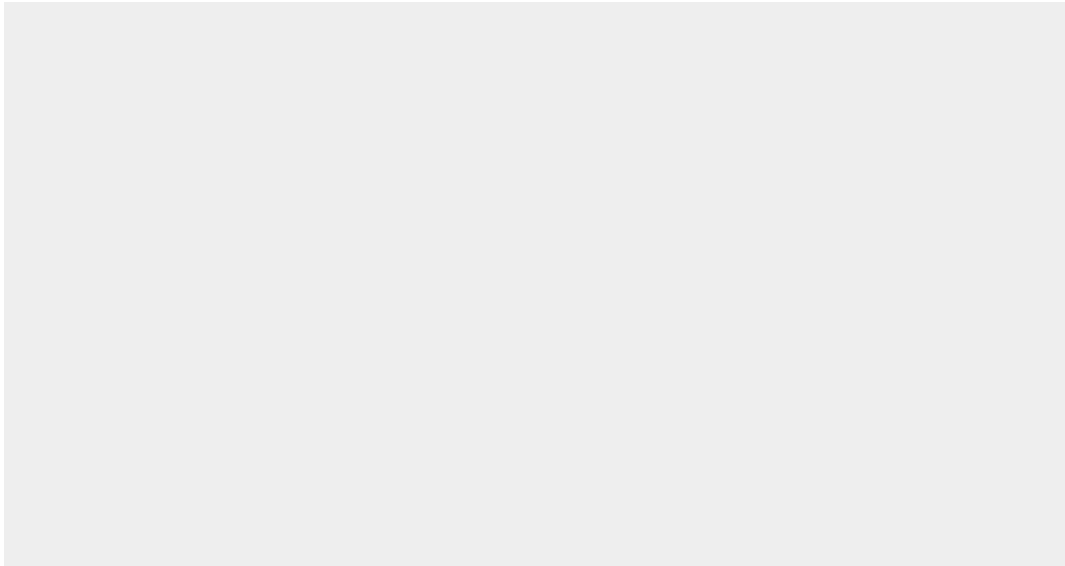


図 3-1-2 制御室制御卓の中心架台操作盤

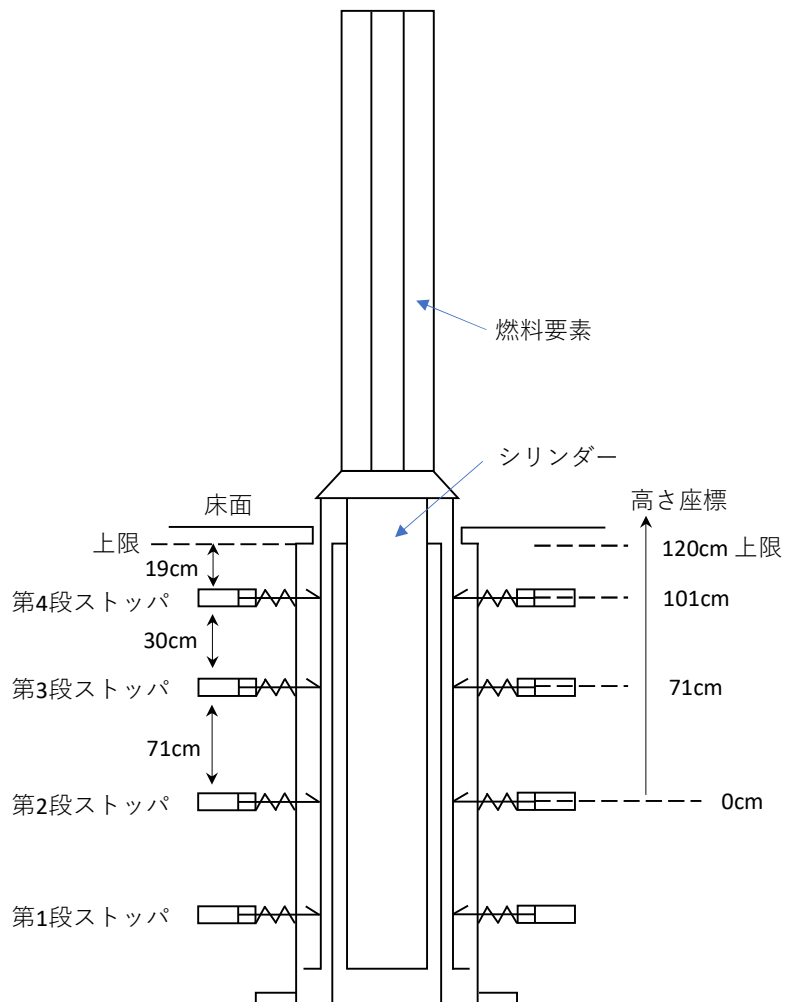
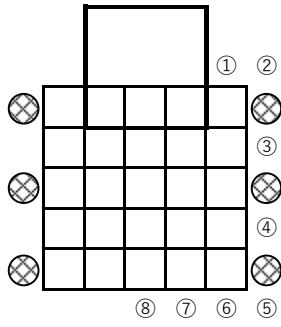
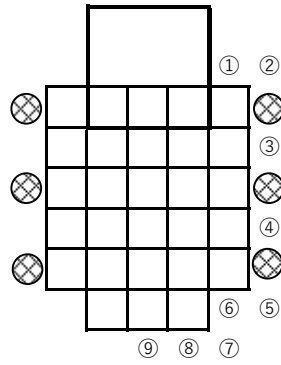


図 3-1-3 中心架台駆動装置のストップ位置
 (反応度が添加され始める位置を高さ座標の 0cm としている)

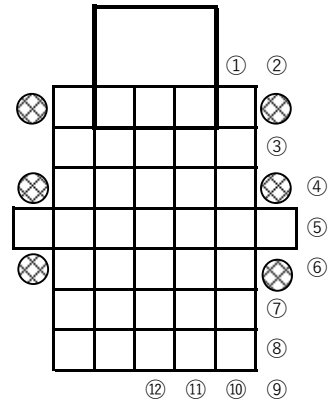
L5.5(50cm)



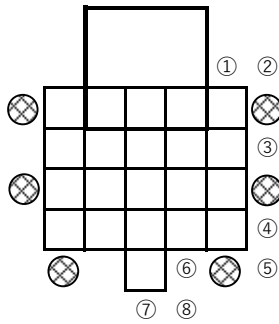
L5.5(40cm)



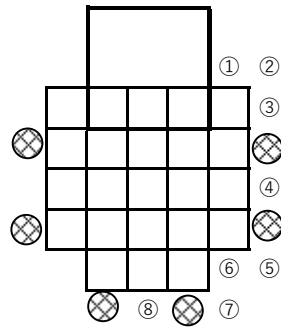
L5.5(30cm)



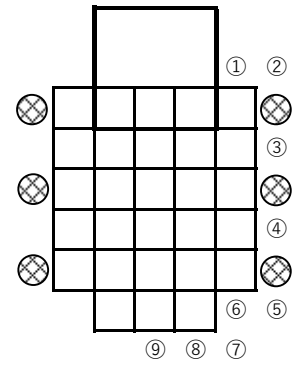
L4(50cm)



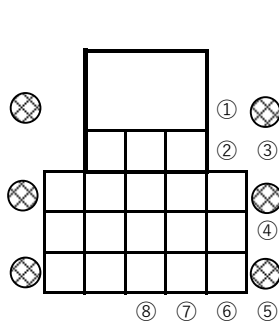
L4(40cm)



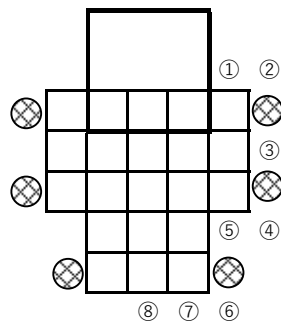
L4(30cm)



L3(50cm)



L3(40cm)



L3(30cm)

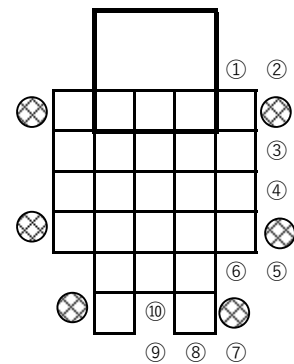
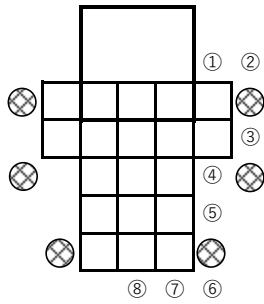
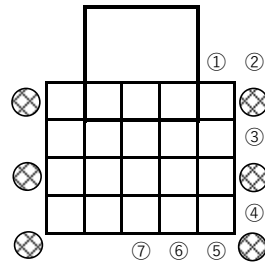


図 3-1-4 各炉心の燃料装荷位置 (L5.5、L4、L3 炉心)
炉心配置図の上のほうの 3×3 の黒い枠線が中心架台位置

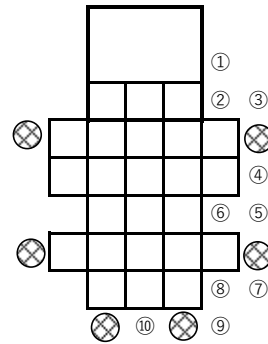
L2(50cm)



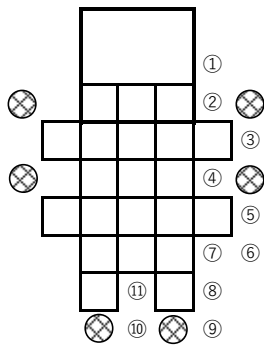
L2(40cm)



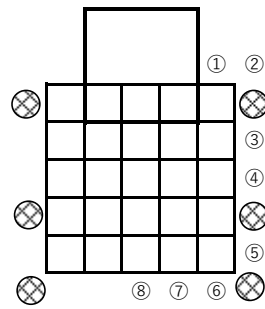
L2(30cm)



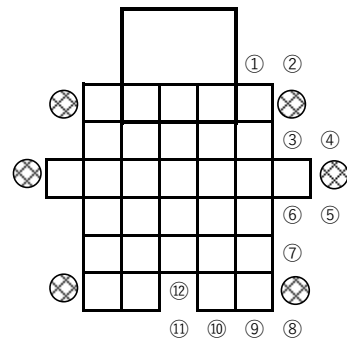
L1(50cm)



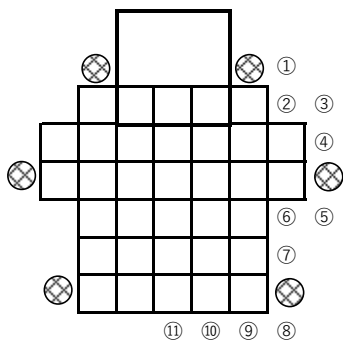
L1(40cm)



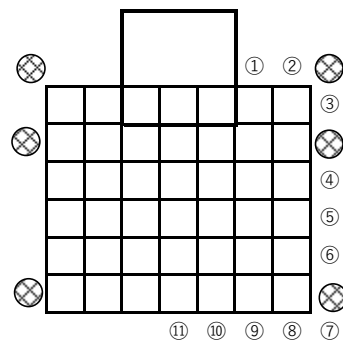
L1(30cm)



LL1(50cm)



LL1(40cm)



LL1(30cm)

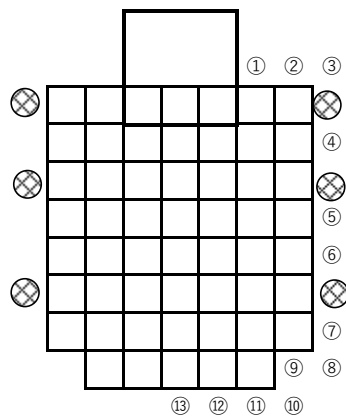


図 3-1-5 各炉心の燃料装荷位置 (L2、L1、LL1 炉心)
炉心配置図の上のほうの 3×3 の黒い枠線が中心架台位置

表 3-1-1 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 3-1-4、図 3-1-5 に示す

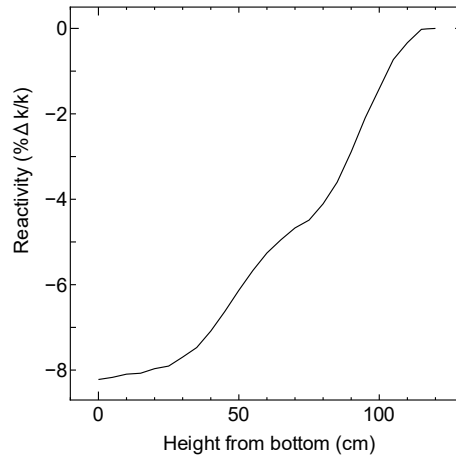


図 3-1-6 L5.5P-50 炉心の中心架台反応度

(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)

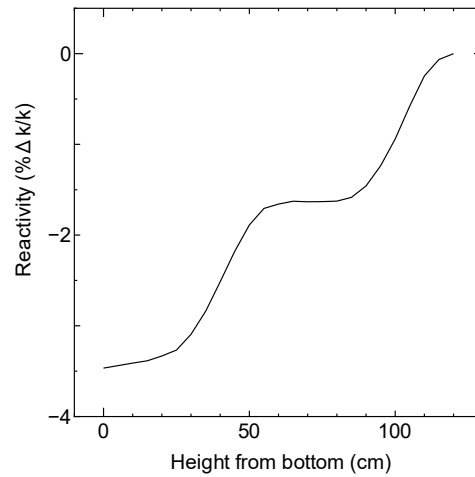


図 3-1-7 L5.5P-30 炉心の中心架台反応度

(横軸、縦軸は図 3-1-6 と同じ)

表 3-1-2 燃料誤装荷時の解析結果

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

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

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 3-1-3 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

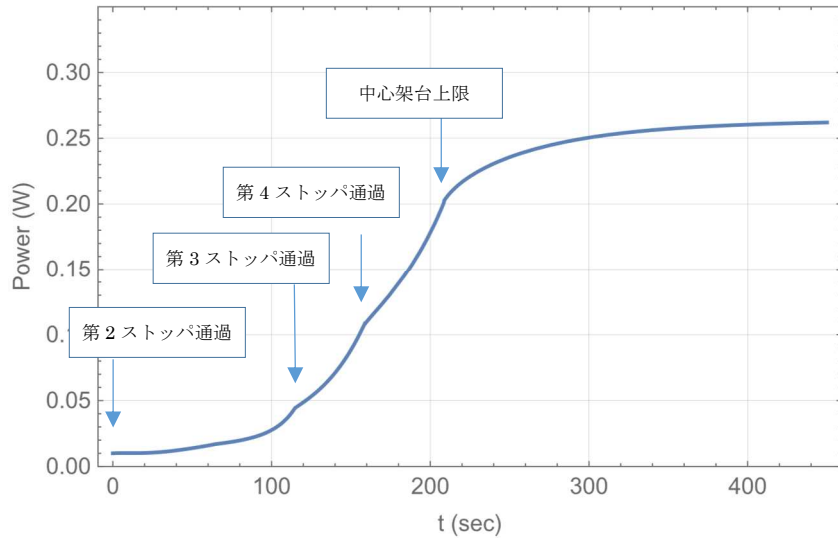


図 3-1-8 (A) L5.5P-30 炉心での通常運転時(燃料誤装荷無し)の中心架台上昇時の出力変化
(横軸、縦軸は図 3-1-6 と同じ)

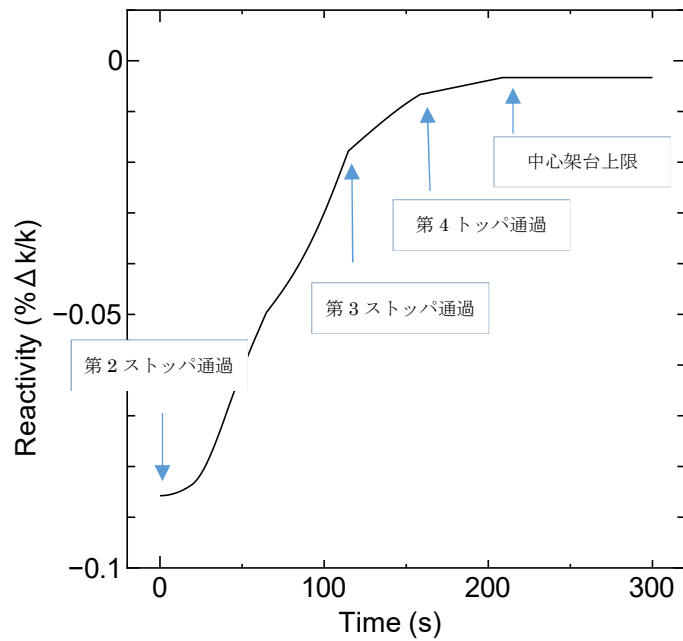


図 3-1-8 (B) L5.5P-30 炉心での通常運転時(燃料誤装荷無し)の中心架台上昇時の反応度の変化

表 3-1-3 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	16.8	5.80E+03	5.17E-01	1.20E+00	1.06
βeff を 8%減少	14.7	6.33E+03	5.31E-01	1.23E+00	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。

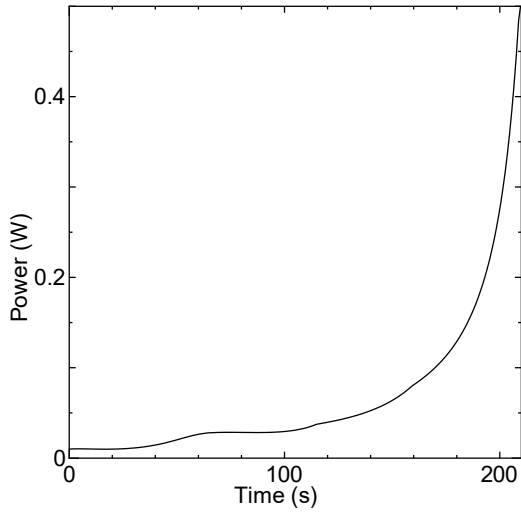


図 3-1-9 L2P-30(最小)出力変化
(中心架台上昇まで)

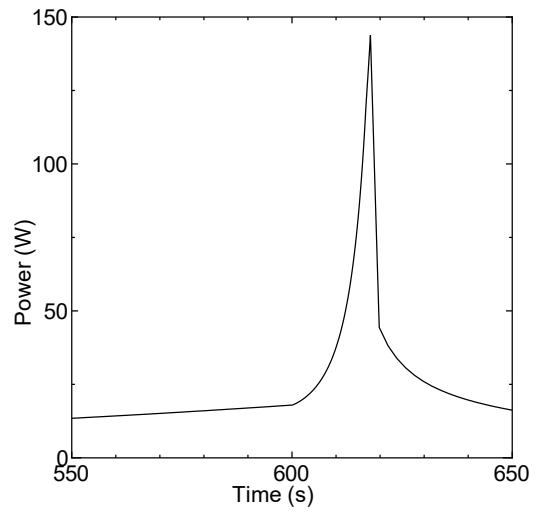


図 3-1-10 L2P-30(最小)出力変化
(600 秒から制御棒引抜き)

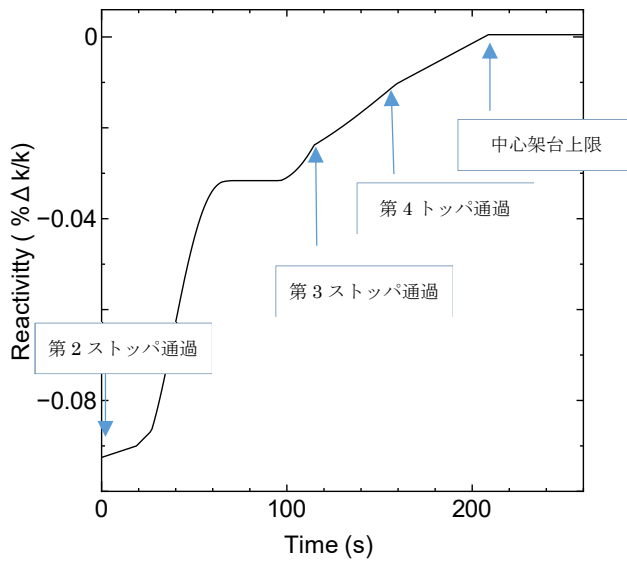


図 3-1-11 L2P-30(最小) 反応度変化
(中心架台上昇は 208 秒まで)

表 3-1-4 L2P-30 炉心の中心架台反応度

$$\rho(z) = a_0 + a_1z + a_2z^2 + a_3z^3 + a_4z^4 + a_5z^5 + a_6z^6$$

係数	値
a ₀	-3.110E-10
a ₁	+1.136E-07
a ₂	-1.512E-05
a ₃	+8.693E-04
a ₄	-1.891E-02
a ₅	+1.298E-01
a ₆	-9.298E-00

中心架台が上限から 120cm 下がった位置を z=0 とする

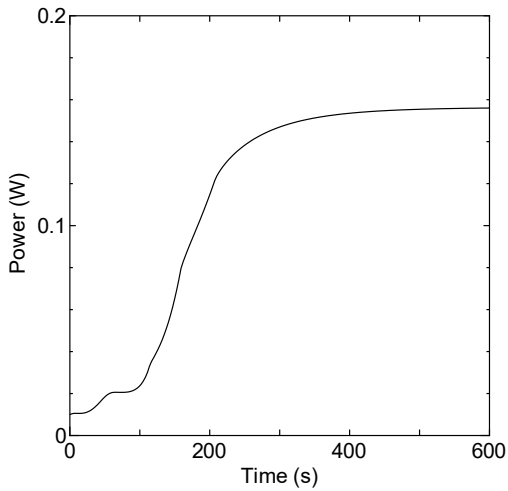


図 3-1-12 L5.5P-30(最小)出力変化
(中心架台上昇は 208 s まで)

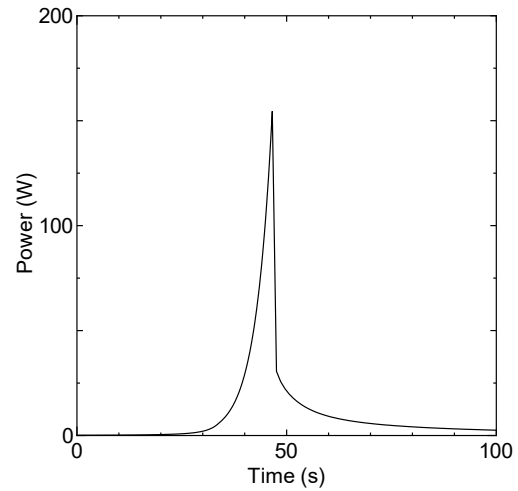


図 3-1-13 L5.5P-30(最小)出力変化
(制御棒上昇後、上昇開始を 0s)

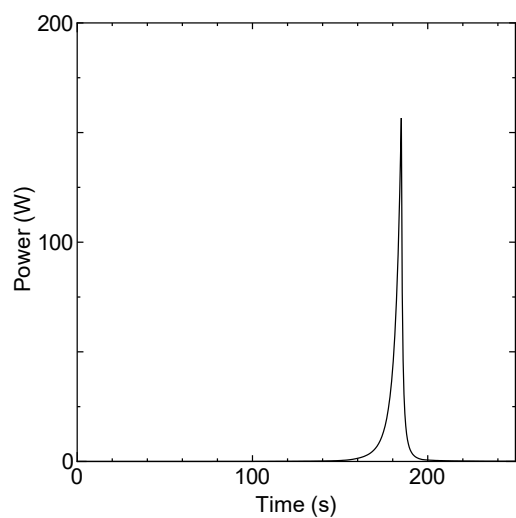


図 3-1-14 L5.5P-30(最大)出力変化

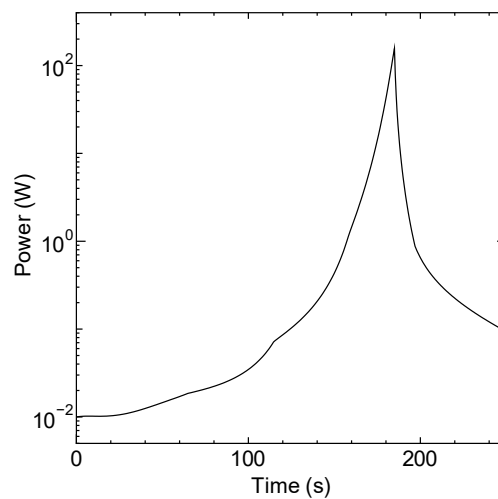


図 3-1-15 L5.5P-30(最大)出力変化
(図 3-1-14 の縦軸 Log)

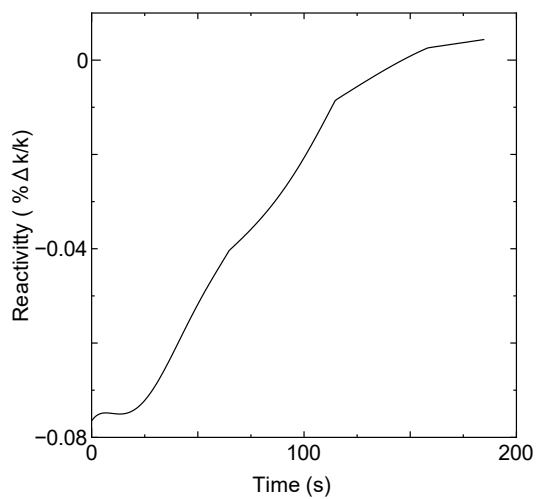


図 3-1-16 L5.5P-30(最大) 反応度変化

3-2 燃料の機械的破損

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。

3-2-1 解析シナリオ

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 2-1 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）及びヨウ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）及びヨウ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。

3-2-2 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 3-2-1 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。

燃料要素は対角方向にまっすぐに切断されたとする。角板の場合は 5.08cm 角の正方形の板なので、全体の切断面の長さは $5.08 \times \sqrt{2}$ であり、そのうち燃料ミート部の大きさは 4.48cm 角なので、燃料ミート部の切断面の長さは $4.48 \times \sqrt{2}$ となる。軽水減速架台の燃料長板のミート部は 58 \times 5.6cm であるので、切断面の長さは $\sqrt{(58^2+5.6^2)}$ となる。

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なになる。

固体減速炉心用 燃料角板

$$\frac{\text{切断面長さ} \times \text{厚さ} \times \text{最大飛程} \times \text{切断面両面分}}{\text{全体積}}$$

軽水減速炉心用 燃料角板

切断面長さ×厚さ×最大飛程×切断両面分 ÷ 全体積

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

表 3-2-1 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	—	—

3-2-3 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3-2-2、図3-2-3に示す。

表3-2-3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3-2-6に示す(表3-2-6中の燃料体番号は図3-2-4に示す)。

軽水減速炉心については
 なお、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、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3-2-1(B)の通りC45G2(4列)が最も大きくなることを確認した(C45G5(5列)もほとんど同じ値)。

表 3-2-1(B) 各炉心の出力の最大値と平均値の比

炉心	燃料枚数	最大値／平均値 (CITATION 結果) ①	1 / 燃料枚数×①
C30G0 (4 列)	548	2.51	0.0046
C30G0 (5 列)	533	2.36	0.0044
C35G0 (4 列)	394	2.25	0.0057
C35G0 (5 列)	397	2.28	0.0057
C45G0 (4 列)	276	1.97	0.0071
C45G0 (5 列)	282	2.09	0.0074
C60G0 (4 列)	290	1.80	0.0062
C60G0 (5 列)	294	1.87	0.0064

C45G2 (4 列)	265	2.60	<u>0.0098</u>
C45G5 (4 列)	342	3.28	0.0096
C45G6 (4 列)	379	3.26	0.0086
C45G7 (4 列)	414	3.14	0.0076
C45G10 (4 列)	487	2.63	0.0054
C45G15 (4 列)	533	2.11	0.0040
C45G2 (5 列)	266	2.55	0.0096
C45G5 (5 列)	334	3.30	0.0098
C45G6 (5 列)	371	3.34	0.0090
C45G7 (5 列)	407	3.28	0.0081
C45G10 (5 列)	487	2.87	0.0059
C45G15 (5 列)	542	2.36	0.0044
C60G2 (4 列)	297	2.58	0.0087
C60G5 (4 列)	387	3.04	0.0079
C60G7 (4 列)	458	2.80	0.0061
C60G10 (4 列)	524	2.30	0.0044
C60G15 (4 列)	564	1.85	0.0033

3-2-4 解析方法

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。よう素による実効線量の評価に使用するパラメータは表 3-2-2 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、
を用いる。また、よう素については

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 3-2-3 の(A)) を掛ける。
- (3) (2)の値にピークを考慮した比率 2.74 (表 3-2-3 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 (C45G(2H₂O) 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 C45G(2H₂O) 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 C45G(2H₂O) 4 列炉心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 2-2 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」(2021 年 5 月 17 日) の説明資料 1-1 で示した炉心内のピーキング係数

3-2-5 解析結果

結果を表 3-2-4、表 3-2-5 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 3-2-2 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)

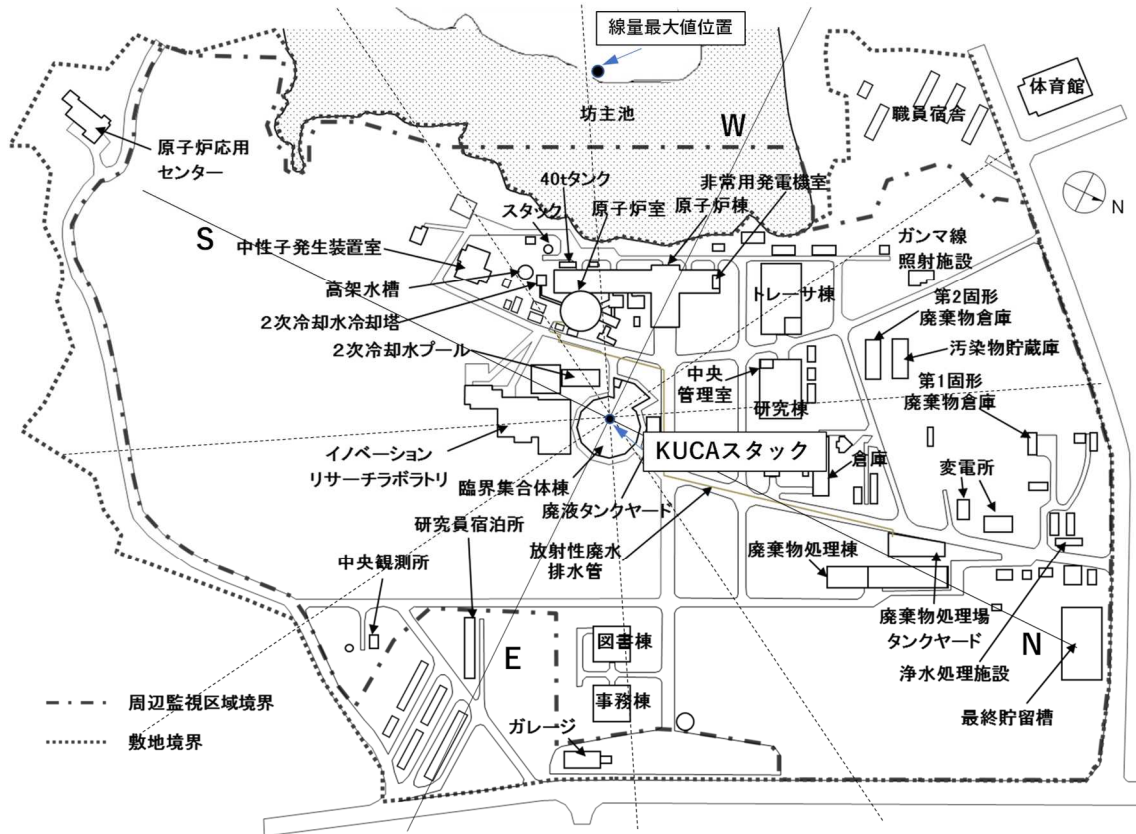


図 3-1-1 複合原子力科学研究所 施設配置図

表 3-2-3 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 3-2-4 (A) 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) ①	実効エネルギー*) (MeV/dis) ②	0.5MeV 換算 放出量 (Bq) ③	合計放出量 (Bq) ④	実効線量 (μ Sv)
^{83m}Kr	1.64E+07	3.31E+02	0.0025	1.65E+00	6.74E+04	5.79E-07 ⁾
^{85}Kr	6.45E+05	1.30E+01	0.0022	5.72E-02		
^{85m}Kr	1.51E+08	3.04E+03	0.159	9.68E+02		
^{87}Kr	7.13E+04	1.44E+00	0.793	2.28E+00		
^{88}Kr	6.99E+07	1.41E+03	1.950	5.49E+03		
^{131m}Xe	1.44E+06	2.90E+01	0.020	1.16E+00		
^{133}Xe	1.41E+09	2.85E+04	0.045	2.57E+03		
^{133m}Xe	8.42E+07	1.70E+03	0.042	1.43E+02		
^{135}Xe	5.31E+09	1.07E+05	0.250	5.35E+04		
^{135m}Xe	2.70E+08	5.44E+03	0.432	4.70E+03		

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

**) 「被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について」原子力安全委員会了承 (平成元年 3 月 27 日、平成 13 年 3 月 29 日一部改訂)

② : ① \times ② \div 0.5、 ④ : ③の放出量の合計

表 3-2-4 (B) 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) ①	表 3-2-2 と同じ 核種iの吸入摂取に よる小児の実効線 量係数 (Sv/Bq) ②	^{131}I 等価放出量 (Bq) ③	合計放出量 (Bq) ④	実効線量 (μ Sv)
^{131}I	5.64E+08	1.14E+04	1.6E-7	1.14E+04	3.75E+04	4.10E-03 ⁾
^{132}I	1.85E+09	3.73E+04	2.3E-9	5.37E+02		
^{133}I	4.61E+09	9.30E+04	4.1E-8	2.38E+04		
^{134}I	3.25E+03	6.56E-02	6.9E-10	2.83E-04		
^{135}I	1.68E+09	3.39E+04	8.5E-9	1.80E+03		

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

**) 「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)

③ : ① \times ② \div 1.6E-7 (^{131}I の値)、 ④ : ③の放出量の合計

表 3-2-5 燃料損傷に伴う被ばく線量（軽水減速炉心 C45G(2H₂O) 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		

*) $1.78e4 \times 8.60e-18$ (Sv/Bq)

***) $9.93e3 \times 1.60e-7$ (Sv/Bq) $\times 2.20e-6$ (h/m³) $\times 0.31$ (m³/h)

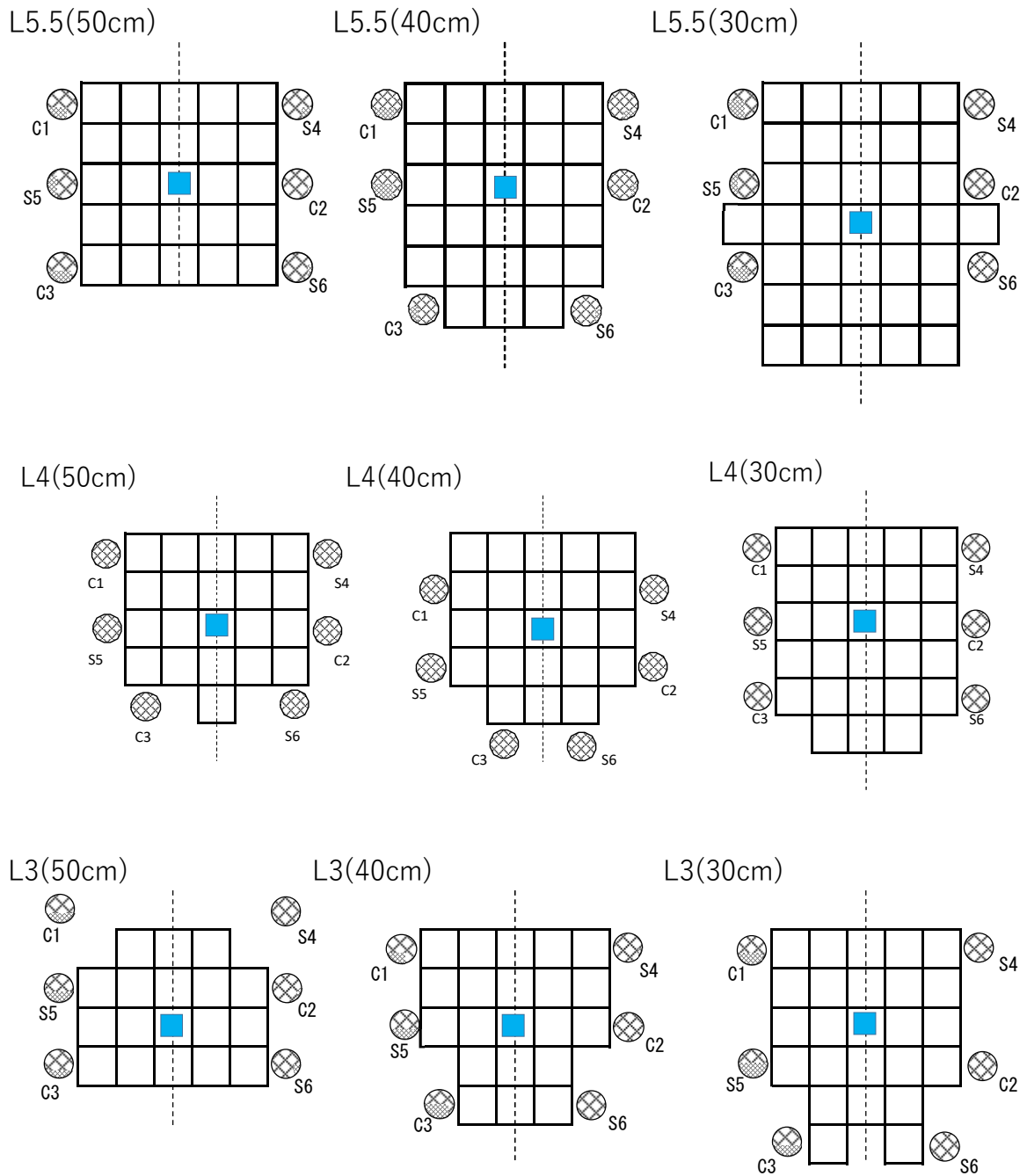


図 3-2-2 炉心配置図 (L5.5P、L4P、L3P)
 (■の記号をつけた燃料体が核分裂の積分値が最大となる燃料体)

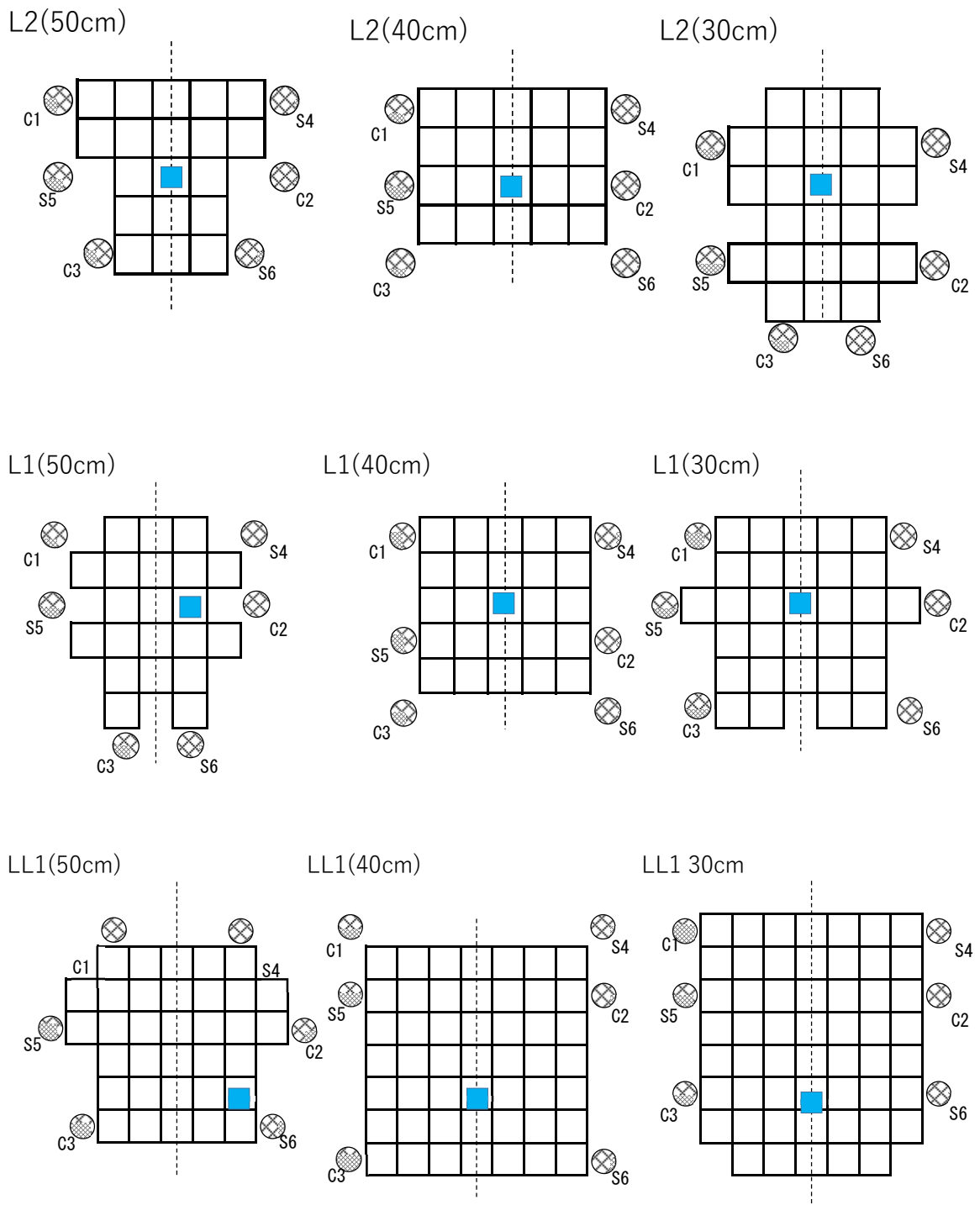


図 3-2-3 炉心配置図 (L2P、L1P、LL1P)
 (■の記号をつけた燃料体が核分裂の積分値が最大となる燃料体)

L3(50cm)

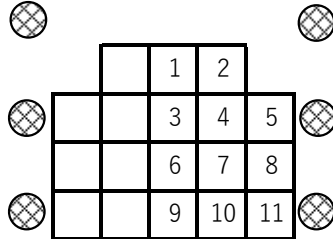


図 3-2-4 L3P-50 炉心配置図

表 3-2-6 L3P-50 炉心の燃料体ごとの出力
(炉心出力を 100W とする)

図 3-2-4 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

3-3 実験設備、実験物等の著しい損傷

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、試料から核分裂生成物が放出される可能性がある。

3-3-1 解析シナリオ

(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 2-1 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）となっ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。

この解析の対象としているパイルオシレータについてはまだ KUCA には設置されておらず詳細な設計は行われていないため、試料を移動させるための挿入管の設置位置やサイズなどは全く決まっていない。また後述する試料の反応度と体積の関係は 1 次摂動計算を元に決定しているため、試料内での中性子束の歪み等の詳細な実験情報を取り込むことは難しいなど解析を行う上での不確定な要素が非常に多い。

現時点ではこれらの不確定要素については解析の条件に取り入れるしかないため、実験物破損条件を前節の「燃料の機械的破損」での燃料板の破損割合に比べて大きな値（10%）としている。

3-3-2 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。
$$0.1\% \Delta k/k / [\text{②の反応度 } \% \Delta k/k \text{ の絶対値}] \times [\text{②のメッシュ体積}]$$
- 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 3-3-1 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 3-3-1 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。

3-3-3 解析結果

線量の解析方法は「3-2 燃料の機械的破損」と同じである。

結果を表 3-3-2、表 3-3-3 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 3-3-1 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 3-3-2 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

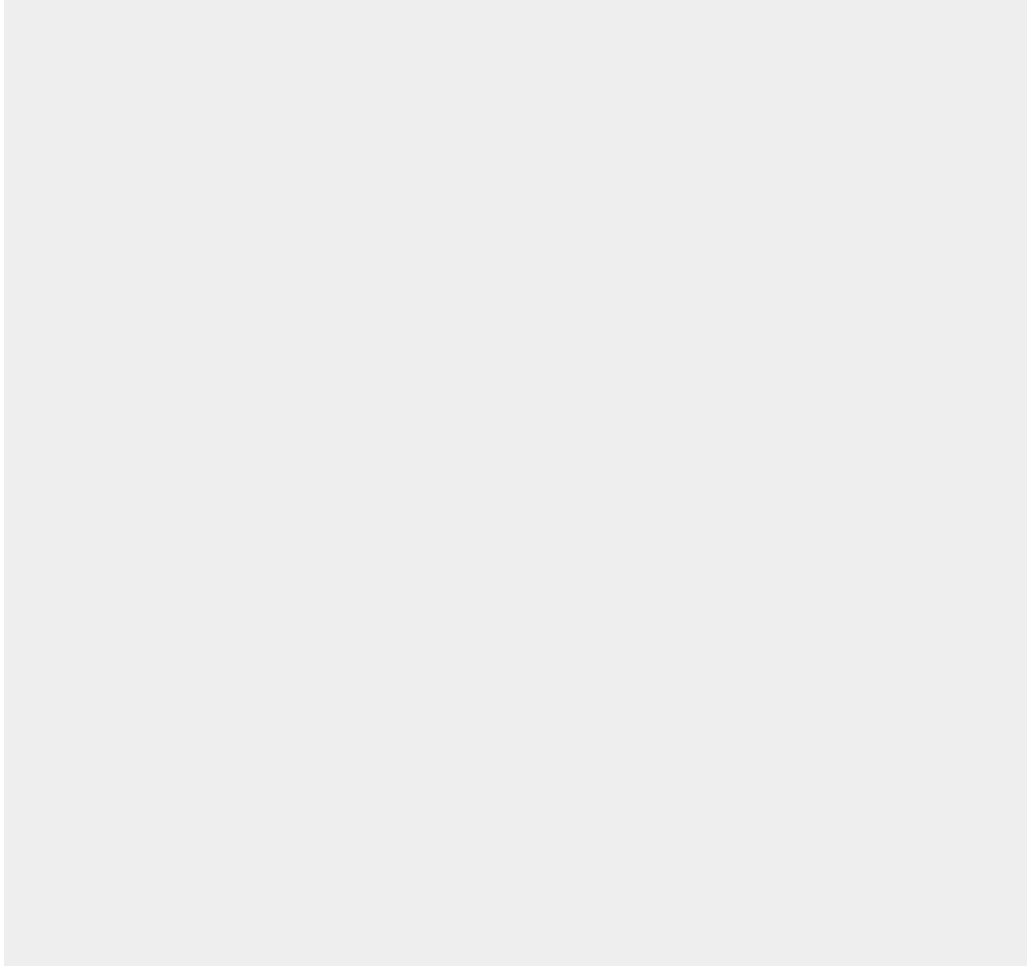
表 3-3-3 EU 試料破損時の被ばく線量 (L2P-50 炉心)

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

【補足A 各炉心の熱容量について】

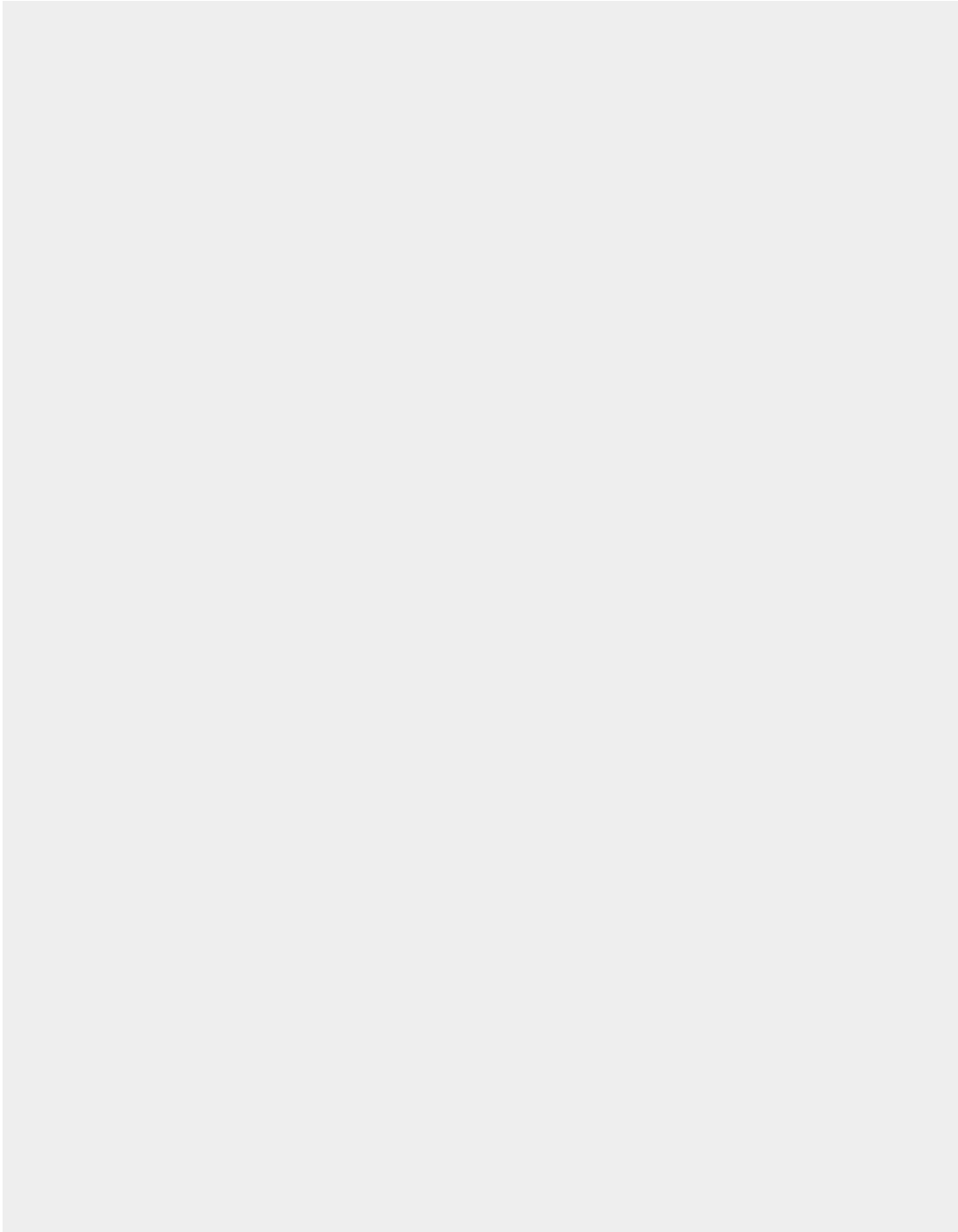
表 A-1 固体減速炉心の熱容量



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).)

表 A-2 軽水減速炉心の熱容量



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

【補足B 燃料温度の算出方法】

1. 炉心内出力の最大値の算出

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

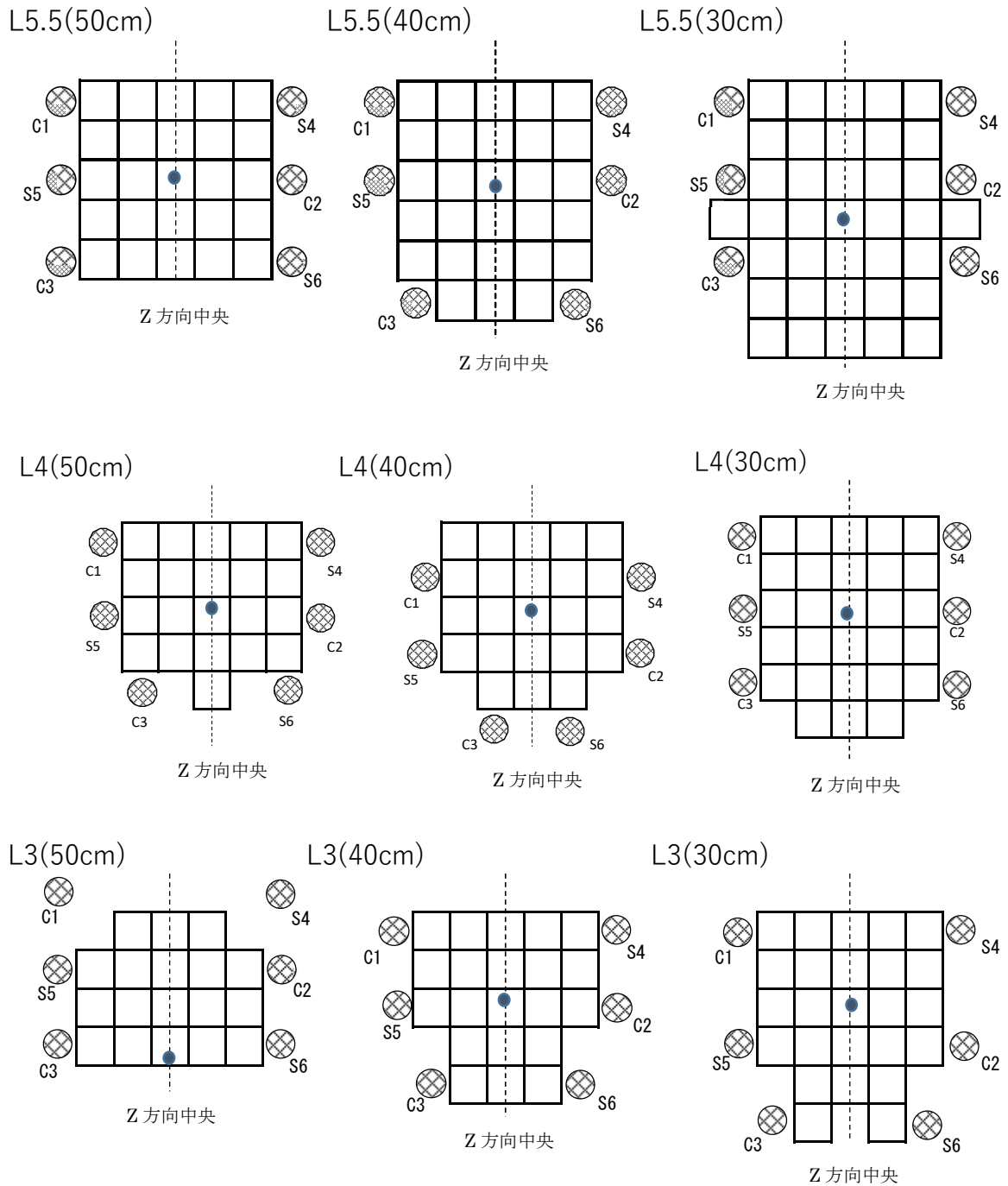
(3次元拡散計算、20群)

(x 方向、z 方向は反射境界条件、y 方向は真空境界条件)

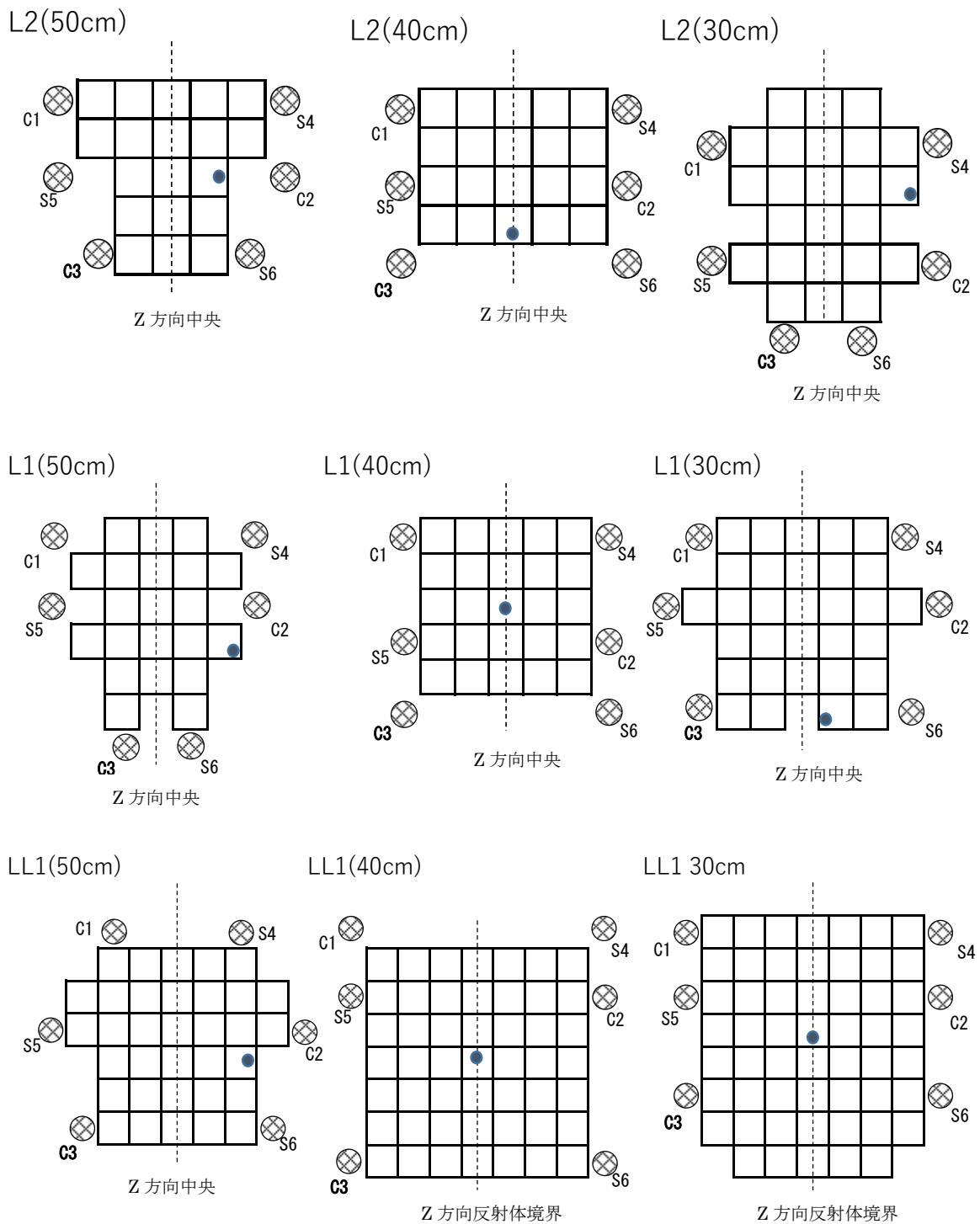
表B-1 各炉心の出力の最大値と平均値の比

	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



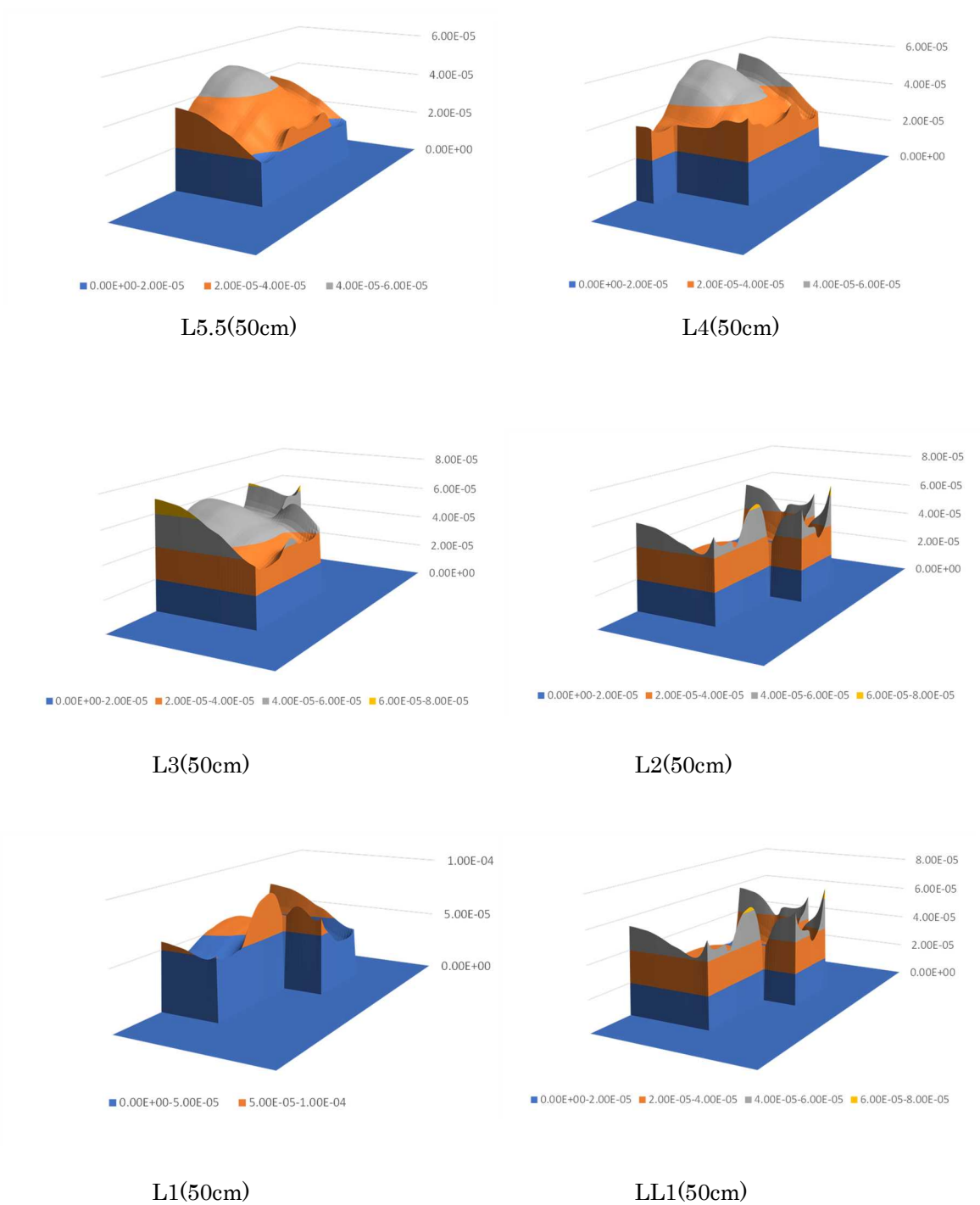
図B-1 炉心配置図 (L5.5P、L4P、L3P)
 (炉心内丸印が出力分布が最大となる点
 z方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)



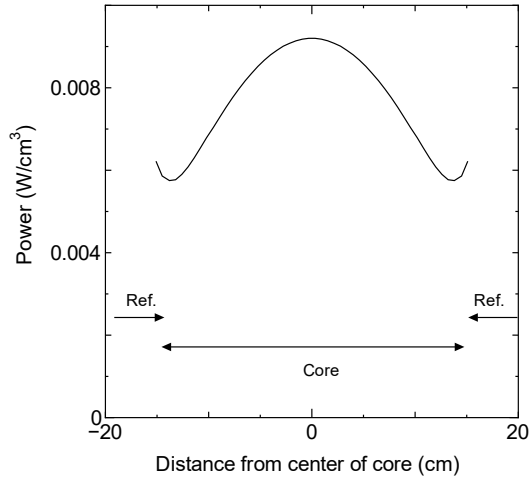
図B-2 炉心配置図 (L2P、L1P、LL1P)

(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)

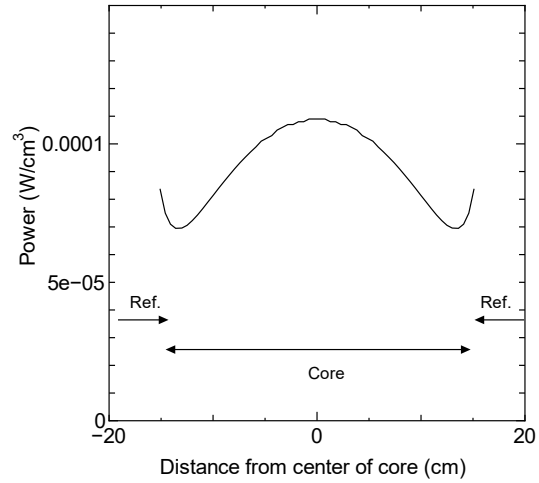


図B-3 出力分布（高さ約50cmの固体減速炉心）
 （炉心出力を1Wで規格化、縦軸の単位はすべてW/cm³）



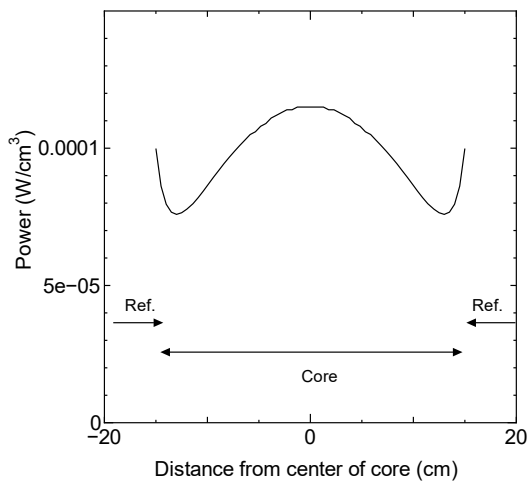
L5.5(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.21)



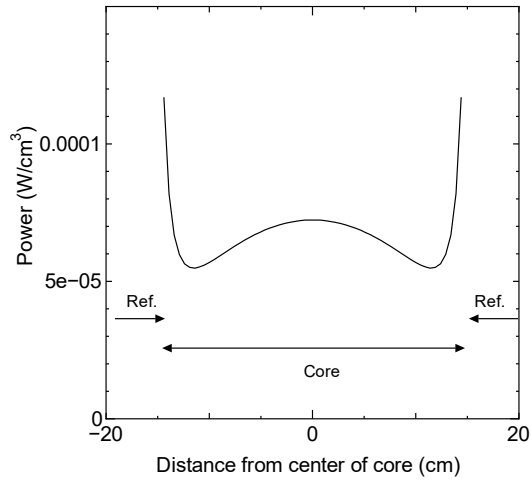
L4(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.20)



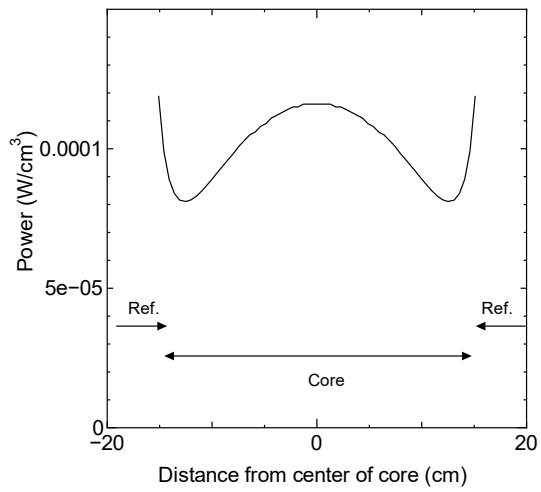
L3(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.18)



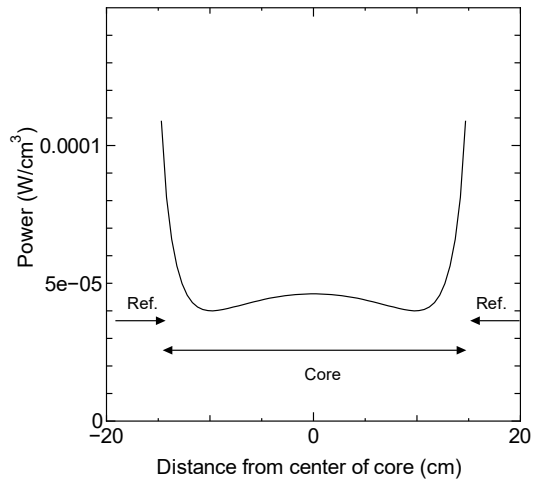
L2(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.15)



L1(30cm)炉心

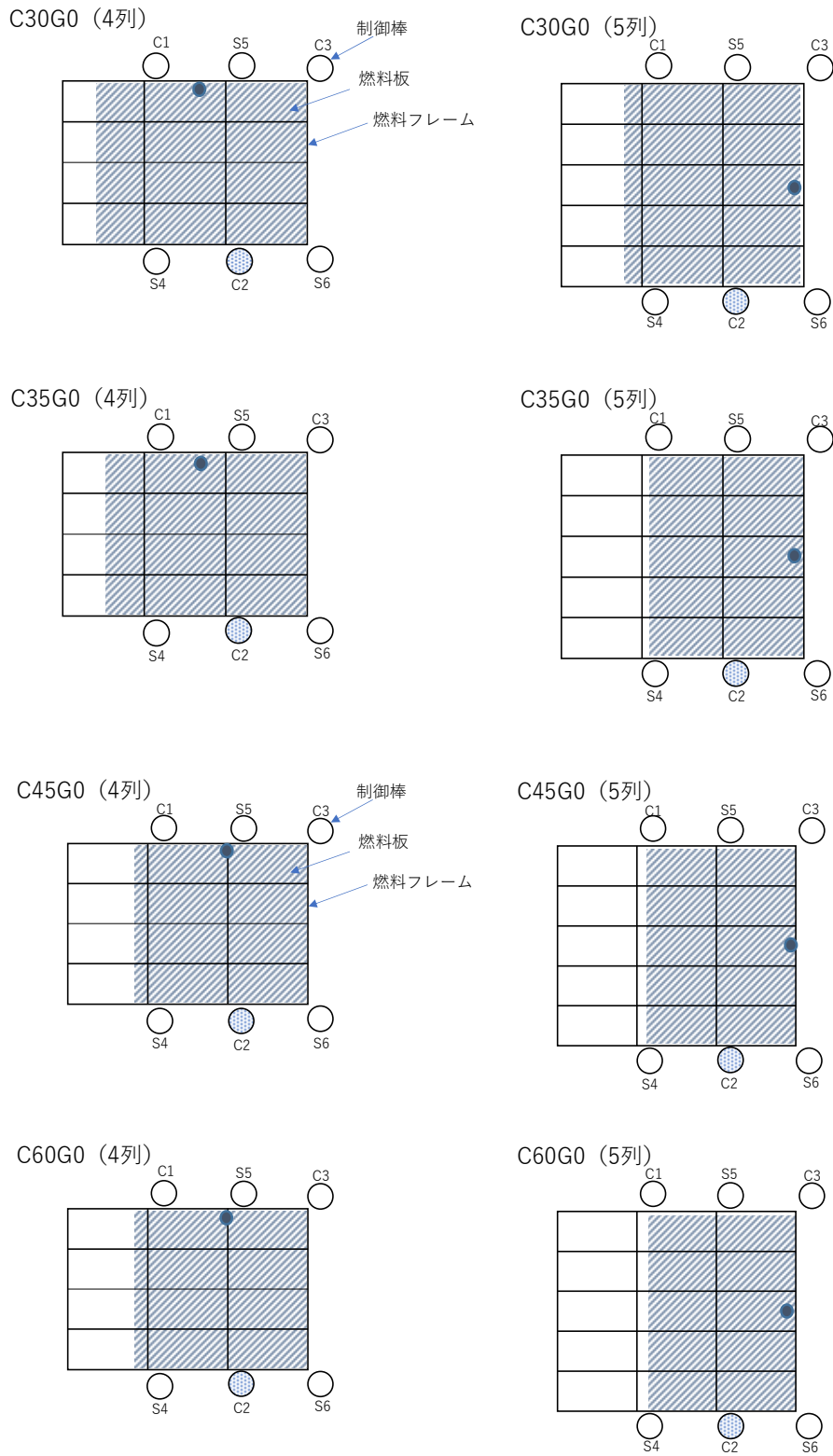
(z 方向平均値に対する中央比率 1.08)



LL1(30cm)炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 0.96)

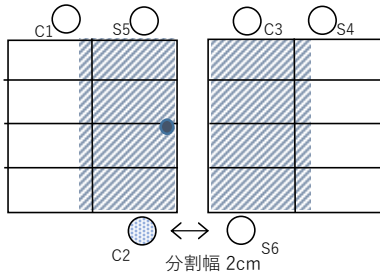
図 B-4 出力分布 (高さ約 30cm の固体減速炉心の炉心中心付近の z 方向)
(炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm^3)



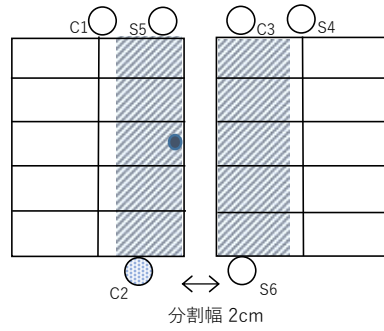
図B-5 軽水減速炉心の炉心配置図 (1)
(炉心内丸印が出力分布が最大となる点)

z 方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)

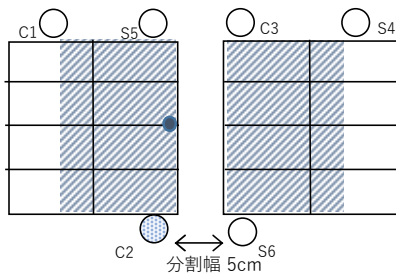
C45G (2H₂O) (4列)



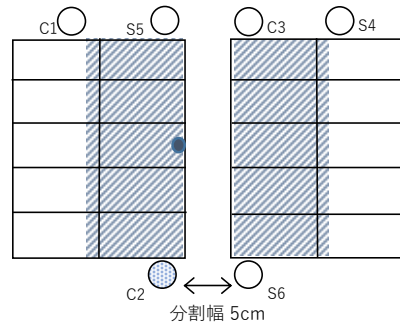
C45G (2H₂O) (5列)



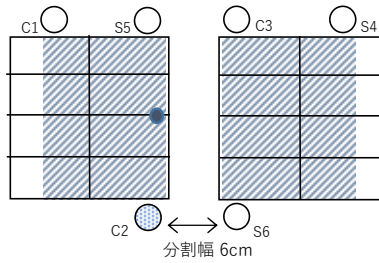
C45G (5H₂O) (4列)



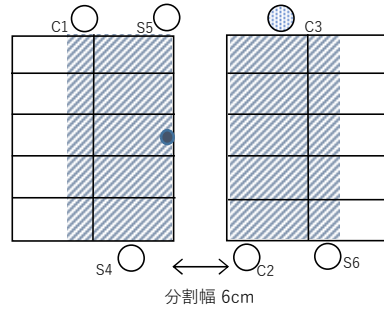
C45G (5H₂O) (5列)



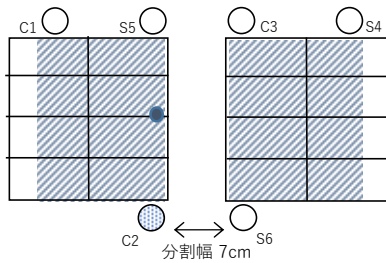
C45G (6H₂O) (4列)



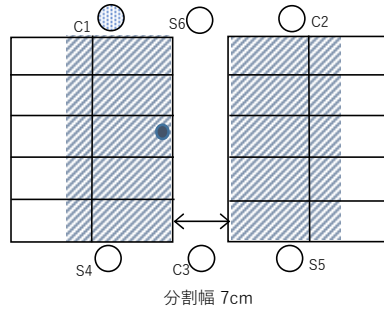
C45G (6H₂O) (5列)



C45G (7H₂O) (4列)

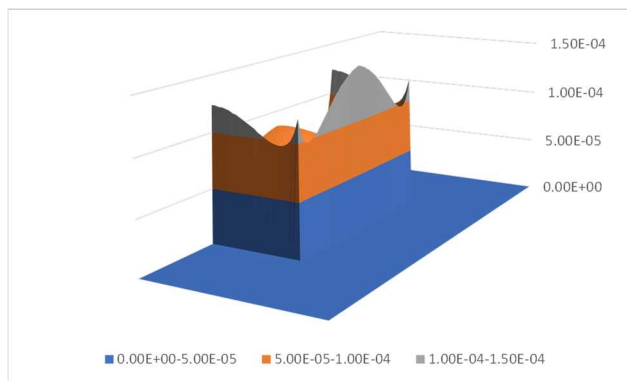


C45G (7H₂O) (5列)

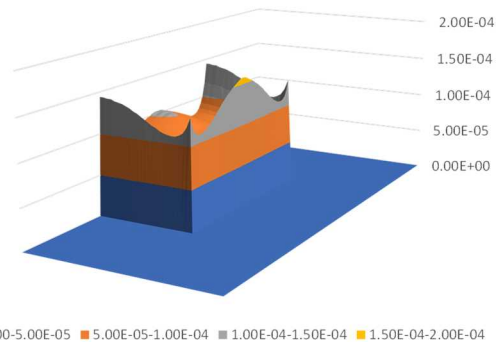


図B-6 軽水減速炉心の炉心配置図(2)
(炉心内丸印が出力分布が最大となる点)

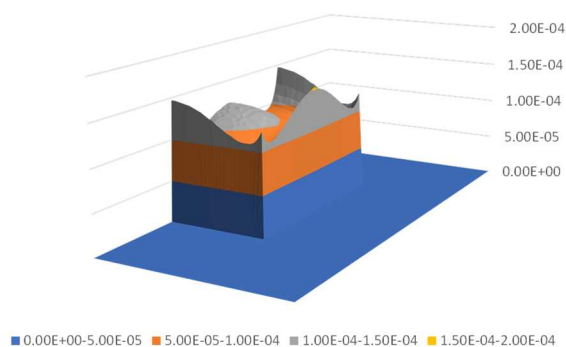
z 方向(垂直方向)はすべて中央で出力分布は最大となる)



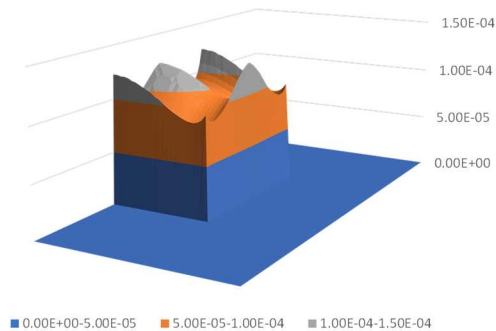
C30G0-4 列 炉心



C35G0-4 列 炉心

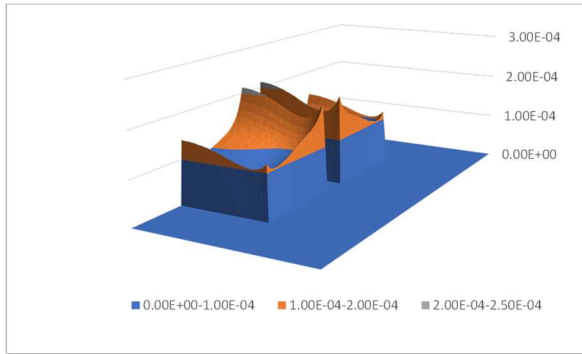


C45G0-4 列 炉心

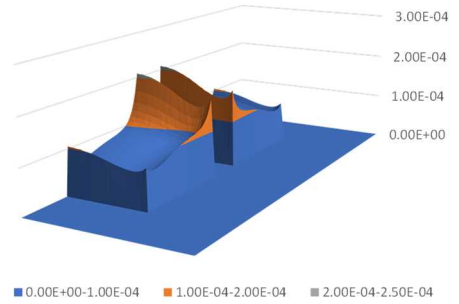


C60G0-4 列 炉心

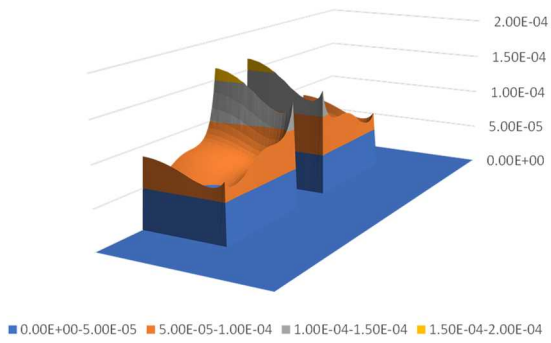
図B-7 出力分布 (4列の軽水減速炉心の高さ方向中央)
(炉心出力を 1W で規格化、縦軸の単位はすべて W/cm³)



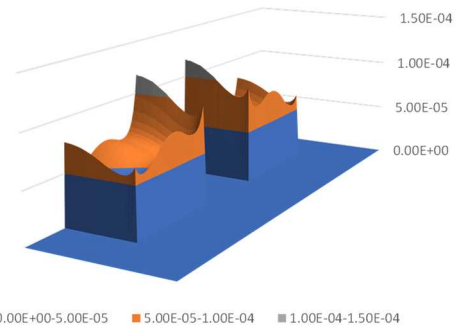
C45G2-4 列 炉心



C45G5-4 列 炉心

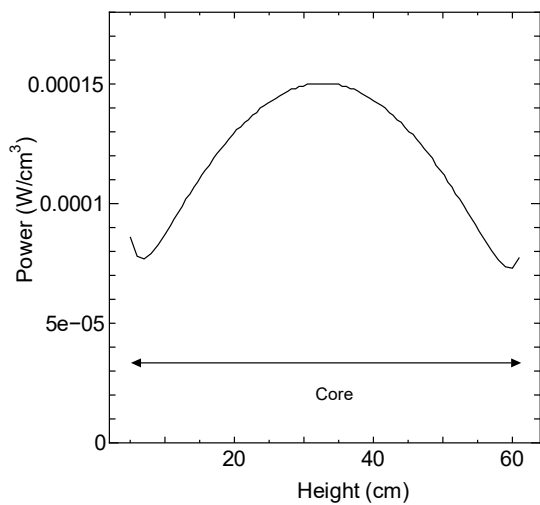


C45G7-4 列 炉心



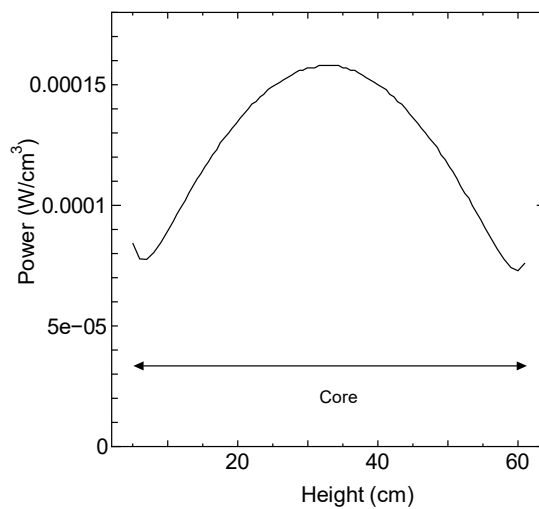
C45G10-4 列 炉心

図B-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)



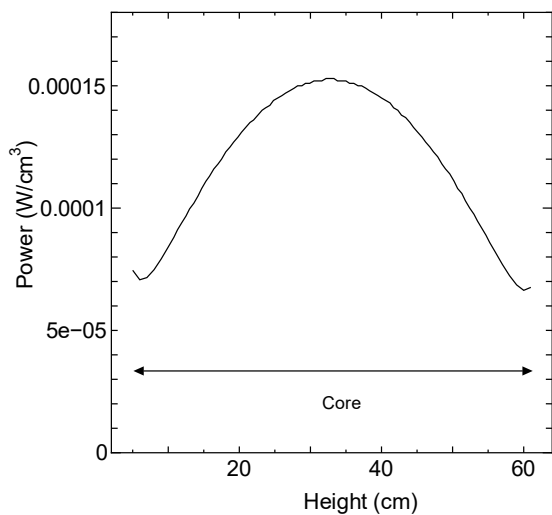
C30G0 (4 列) 炉心

(z 方向平均値に対する中央比率 1.23)



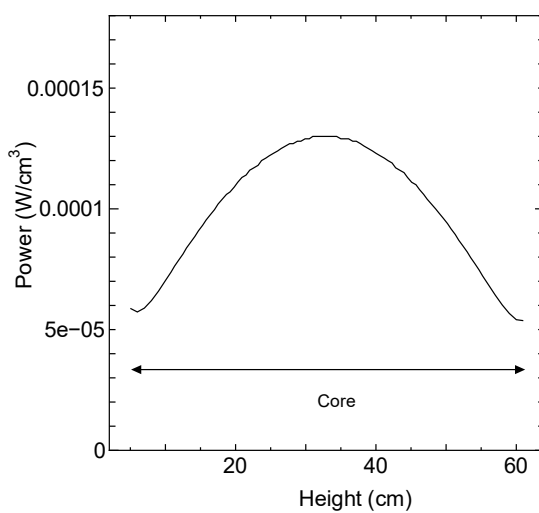
C35G0 (4 列) 炉心

(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 B-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)

2. 燃料板内の出力分布の考慮

燃料のセル計算による熱中性子束分布を固体減速炉心について図 B-10～図 B-13 に、軽水減速炉心について図 B-13～図 B-14 に示す。中性子スペクトルが硬い炉心と柔らかい炉心を対象とした。全てのセルで燃料ミート部（図の U と記載した箇所）の中心で中性子束が低下し、燃料板被覆のアルミニウムとの境界で中性子束が最大となっていることが判る。

各セルの燃料ミート部の中性子束分布の平均値と最大値の比を表 B-2 に示す。固体減速炉心の燃料板を 1 枚使用したセルで Flux 比は 1.09、軽水減速炉心で 1.01 となっている（燃料板を 2 枚使用した LL1 では 1.23 と例外的に大きな値）。固体減速炉心の U-Mo 燃料が軽水減速炉心に比べて厚く、しかも密度が高いため Flux 比が大きくなると考えられる。

燃料の最高温度を評価する際には、1) で述べた温度の評価値に対して、固体減速炉心では 1.09 倍、軽水減速炉心では 1.01 倍の値とする。ただし LL1 炉心については 1.23 倍とする。

燃料板の温度上昇量は以下のような手順で算出する。

- ① 過渡解析等により積算出力 (J) を求める
- ② 炉心に装荷された燃料板枚数と燃料ミート部の比熱から全熱容量を求める
- ③ 積算出力を全熱容量で割り算して平均的な温度上昇量を求める
- ④ ③の値に炉心内の最高出力と平均出力の比（表 B-1）を掛ける
- ⑤ ④の値に表 B-1 の燃料板内の出力比を掛ける

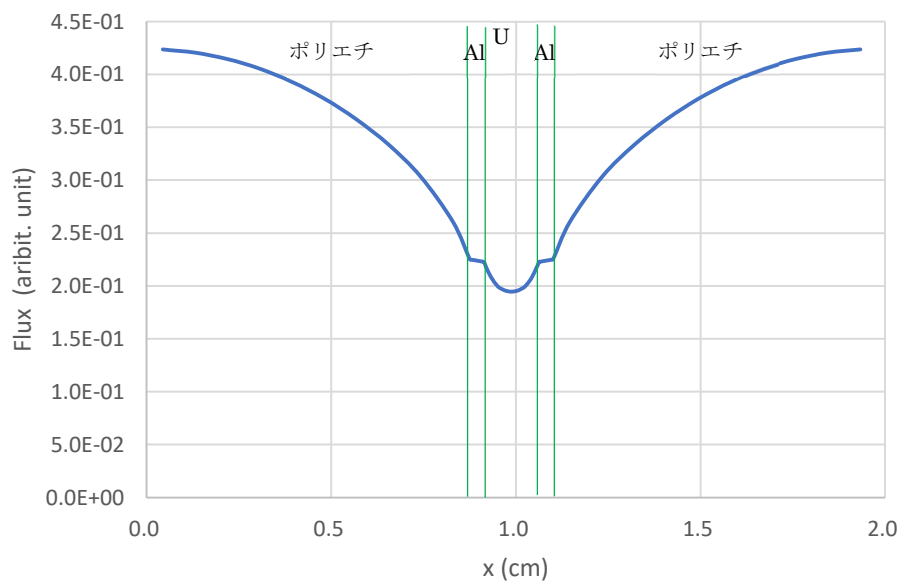


図 B-10 L5.5セル（燃料1枚+1/8”×5.5枚ポリエチレン）熱中性子束分布

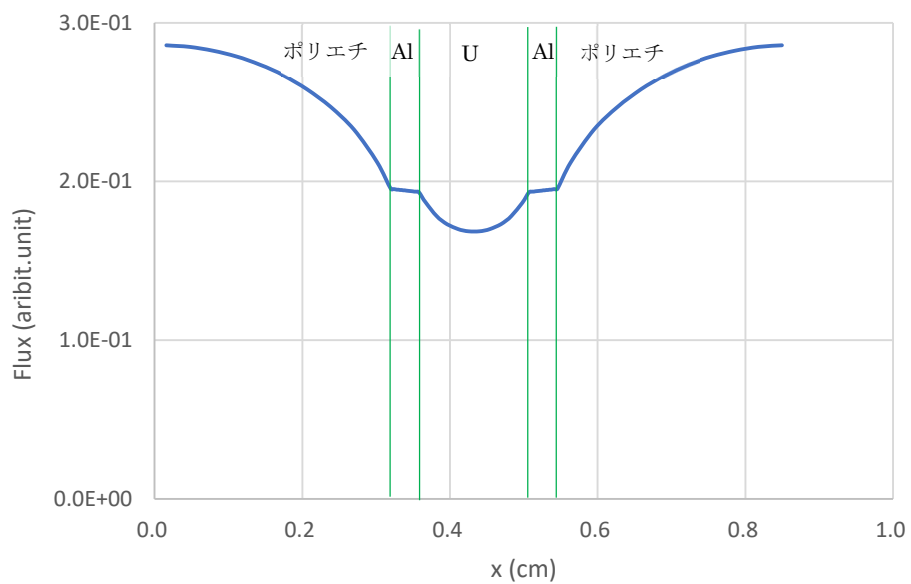


図 B-11 L2セル（燃料1枚+1/8”×2枚ポリエチレン）熱中性子束分布

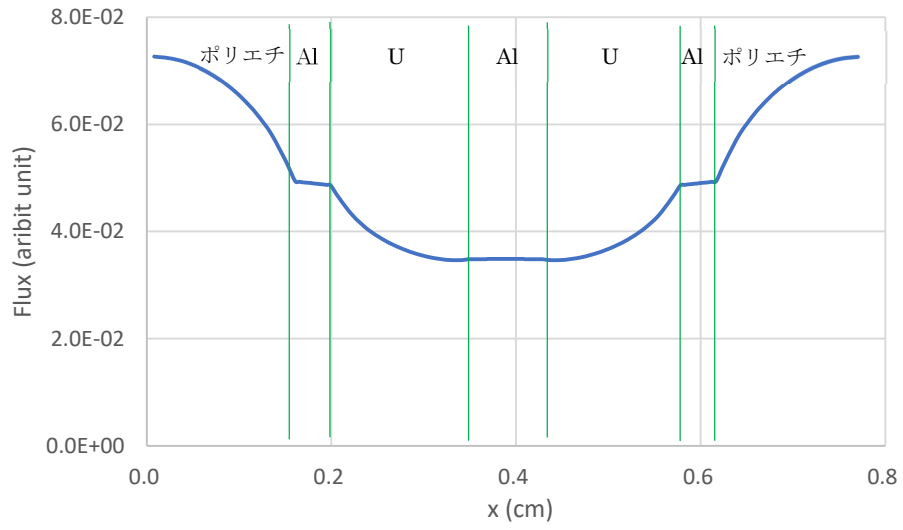


図 B-12 LL1 セル (燃料 2 枚+1/8"×1 枚ポリエチレン) 熱中性子束分布

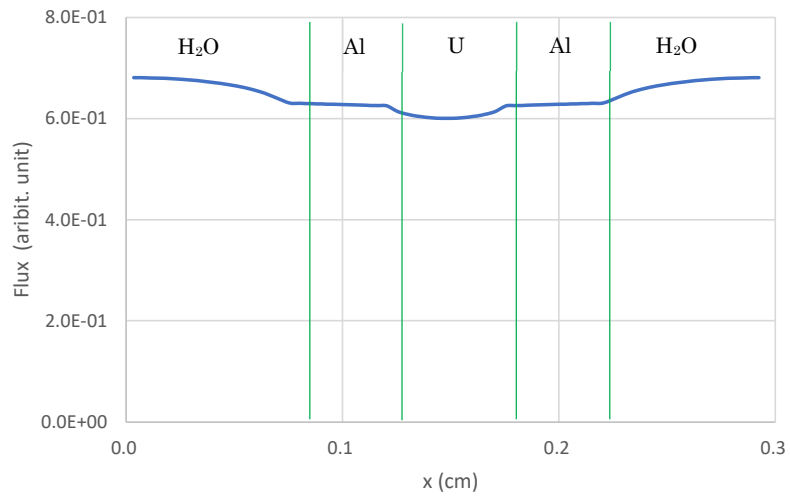


図 B-13 軽水減速炉心 C30 セル 熱中性子束分布

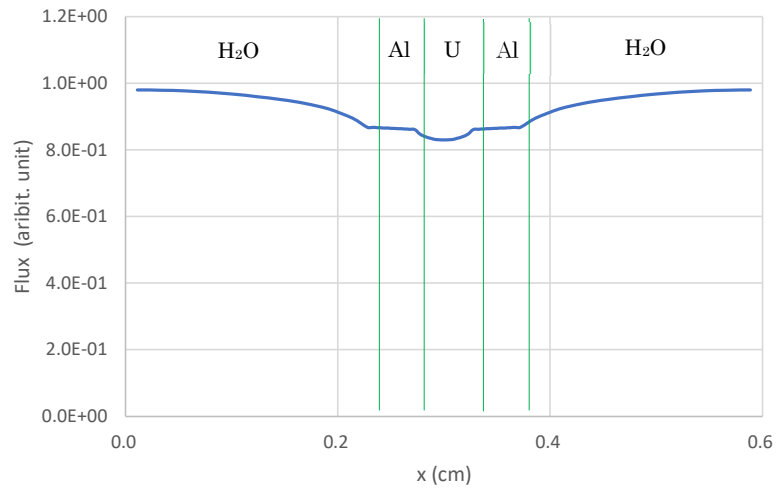


図 B-14 軽水減速炉心 C60 セル 熱中性子束分布

表 B-2 燃料板ミート部の Flux 比

	炉心名称	Flux 比
固体減速炉心	L5.5 炉心	1.09
	L2 炉心	1.09
	LL1 炉心	1.23
軽水減速炉心	C30 炉心	1.01
	C60 炉心	1.01

Flux 比 : (中性子束最大値) ÷ (中性子束平均値)

【補足C 高出力運転後の炉心交換作業について】

原子炉施設保安規定には高出力運転後の作業開始の規定については記載が無く、被ばく管理の基本方針として、「放射線管理部長は、管理区域に立ち入る者の線量を、通常時において、放射線業務従事者については1 mSv/週以下にするように被ばく管理上の措置を講じなければならない。」と記載されており、それに従って作業を行うことが原則となる。

現状では1W以上の高出力運転を行った直後は点検も含めて炉心に近づく作業は禁止して翌日に炉心作業を行うことにしており、その際であっても燃料体を取り出して操作する作業は鉛エプロンを装着して短時間で行うなどなどの対応をすることで、できる限り被ばく量を少なくするように努めている。

設計基準事故では100Wで1時間運転を行った後に燃料操作を行ったときに燃料破損をしてしまうことを想定している。

運転後の経過時間を変化させた時の燃料1体から発生する放射線による1m離れた位置での線量率の解析結果を表A-1に示す。この表での1時間というのは、臨界状態から停止までにかかる時間と炉室作業を始めるまでの準備にかかる時間を考慮して、運転後に燃料操作を開始する最短時間の目安と考える。

燃料作業を行う際の燃料との作業員との距離は1mよりもっと短いため、作業場所での線量率はこの表の値の数倍以上となると考えられる。1回の作業当たりの放射線被ばく量を1mSv以下に抑えることを考えると、運転停止後24時間以上経過してから燃料作業を行うという考え方にならざるを得ないと考える。(これまでの経験から考えると、被ばく線量を下げするためにさらに数日以上時間を開けることになると思う)

表C-1 100W 運転後の燃料1体当たりの線量率

経過時間	線量率 (mSv/h/m)
運転直後	98
1時間後	17
24時間後	0.47

軽水減速炉心を想定

解析コード:ORIGEN 2.2

KUCA設置変更申請書 添付書類10の安全評価結果 高濃縮燃料（既承認）と低濃縮燃料(今回申請)の比較

	高濃縮燃料（既承認）	低濃縮燃料(今回申請)	備考
	<p>共通事項</p> <p>(1) 燃料から周囲の減速材等への熱の伝達は無視し、発生した熱が全て燃料板の燃料ミート部の温度上昇に費やされるものとする。</p> <p>(2) 温度分布が x, y, z 方向共に cos 分布であるとして、温度上昇の平均値に対する出力ピークの係数を掛ける。</p> <p>(3) 反応度温度係数が負の炉心については温度変化に伴う反応度効果は無視する。軽水減速炉心の2分割炉心で正の反応度温度係数を持つ炉心についてはすべて温度係数が制限値の最大値 ($+2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^\circ C$) であるとし、燃料温度上昇により正の反応度が加わるとして解析を行う。</p> <p>(4) 制御棒挿入後に出力が 1/10 以下に低下するまでの積算出力を算出する。</p> <p>(5) スクラム発生時には最大の反応度を有する1本の制御棒が落下しない。</p> <p>(6) 判定基準は高濃縮燃料、低濃縮燃料で変更無し。</p>	<p>共通事項</p> <p>(1) 燃料から周囲の減速材等への熱の伝達は無視し、発生した熱が全て燃料板の燃料ミート部と燃料被覆材の温度上昇に費やされるものとする。</p> <p>(2) 各炉心の出力分布の最大値と平均値の比を掛け、さらに燃料板内でのピークを求めるための比率を掛ける。</p> <p>(3) 全ての炉心で各炉心の反応度温度係数（正負とも）を考慮して解析を行う。</p> <p>(4) 制御棒挿入後に出力が 0.1W まで低下するまでの積算出力を算出する。</p> <p>(5) スクラム発生時には最大の反応度を有する1本の制御棒が落下しない。</p> <p>(6) 判定基準は高濃縮燃料、低濃縮燃料で変更無し。</p>	<p>LEUでは各炉心の出力分布と燃料板内出力分布考慮して最大値を求める</p> <p>LEUは全炉心で温度係数考慮</p> <p>積算範囲が異なる</p>
	原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き	原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き	
シ ナ リ オ	<p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンブ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付8で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 0.01W の臨界状</p>	<p><u>ケースA</u></p> <p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンブ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値</p> <p>(2) 添付8で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 0.01W の臨</p>	<p>LEUは線型出力</p>

	<p>態、その際の線型出力計の指示値は 100%で出力が 1W となるレンジ。</p> <p>(4) 制御棒の引抜きにより最大反応度添加率 $0.02\% \Delta k/k/s$ で反応度が連続的に投入されたとする。対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120%である 1.2W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	<p>界状態、その際の線型出力計の指示値は 100%で出力が 100W となるレンジ。</p> <p>(4) 制御棒の引抜きにより最大反応度添加率 $0.02\% \Delta k/k/s$ で反応度が連続的に投入されたとする。対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120%である 120W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p> <p><u>ケース B</u> (ケース A と異なる箇所のみ記載)</p> <p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は $0.05\% \Delta k/k$ とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値</p> <p>(4) 制御棒の引抜きにより $0.05\% \Delta k/k$ のステップ状の反応度を加える。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 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す。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。</p>	<p>系 100W レンジ</p> <p>LEU は線型出力系 120W でスクラム</p> <p>LEU はケース B の小反応度印加を追加</p> <p>LEU は 3600 秒後に手動スクラムもある</p>
結果	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>E3. 7P 炉心 : 積算出力 9.74J、温度上昇 $5.48 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>C60G0 (5 列) 炉心 : 積算出力 4.59J、温度上昇 $1.64 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$</p>	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケース A L5. 5P-30 炉心 : 積算出力 $1.55 \times 10^3 \text{ J}$、温度上昇 $4.41 \times 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>ケース B L4P-30 炉心 : 積算出力 $9.95 \times 10^4 \text{ J}$、温度上昇 $2.71 \times 10^1 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケース A C45G (2H₂O) 4 列炉心 : 積算出力 $8.67 \times 10^2 \text{ J}$、温度上昇 $6.87 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>ケース B C45G (2H₂O) 4 列炉心 : 積算出力 $2.33 \times 10^4 \text{ J}$、温度上昇 $1.85 \times 10^0 \text{ } ^\circ\text{C}$</p>	
	出力運転中の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	

シ ナ リ オ	<p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 0.01W の臨界状態、その際の線型出力計の指示値は 100%で出力が 100W となるレンジ。</p> <p>(4) 制御棒の引抜きにより最大反応度添加率 0.02% $\Delta k/k/s$ で反応度が連続的に投入されたとする。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120%である 120W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	<p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 各炉心で起動時として反応度が投入される前の原子炉の状態は出力 0.01W の臨界状態、その際の線型出力計の指示値は 100%で出力が 100W となるレンジ。</p> <p>(4) 制御棒の引抜きにより最大反応度添加率 0.02% $\Delta k/k/s$ で反応度が連続的に投入されたとする。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 出力が線型出力計系の指示値の 120%である 120W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	
結 果	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値 E3. 7P 炉心：積算出力 $9.84 \times 10^2 J$、温度上昇 $2.15 \times 10^0 \text{ }^\circ C$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値 C60G0 (5 列) 炉心：積算出力 $4.27 \times 10^2 J$、温度上昇 $5.90 \times 10^{-1} \text{ }^\circ C$</p>	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値 L5. 5P-30 炉心：積算出力 $2.40 \times 10^3 J$、温度上昇 $6.83 \times 10^{-1} \text{ }^\circ C$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値 C45G (2H₂O) 4 列炉心：積算出力 $2.63 \times 10^3 J$、温度上昇 $2.08 \times 10^{-1} \text{ }^\circ C$</p>	
	実験物の異常等による反応度の付加	実験物の異常等による反応度の付加	
シ ナ リ オ	<p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% $\Delta k/k$、軽水減速炉心 0.5% $\Delta k/k$）とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 実験物（照射試料）を装着した状態で 1W の臨界状態を保っており、その際の線型出</p>	<p><u>ケース A</u></p> <p>(1) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は 0% $\Delta k/k$ とし、制御棒の全反応度、及びダンプ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 実験物（照射試料）を装着した状態で 0.01W の臨界状態を保っており、その際</p>	LEU は印加反応度を最大とするために過剰反応度は 0% $\Delta k/k$

	<p>力計の指示値は 100%で出力が 100W となるレンジ。</p> <p>(4) 炉心に取り付けていた実験用試料が炉心から落下し+0.5%Δk/k がステップ状に加わる。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 原子炉は出力が線型出力系の指示値の 120%である 120W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p>	<p>の線型出力計の指示値は 100%で出力が 100W となるレンジ。</p> <p>(4) 炉心に取り付けていた実験用試料が炉心から落下し反応度の最大値（固体減速架台+0.35%Δk/k、軽水減速炉心+0.5%Δk/k）がステップ状に加わる。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 原子炉は出力が線型出力系の指示値の 120%である 120W を超えたときスクラム信号を発する。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わる。中心架台、ダンプ弁は作動しない。</p> <p><u>ケース B</u>（ケース A と異なる箇所のみ記載）</p> <p>(4) 炉心に取り付けていた実験用試料がゆっくり落下し試料の反応度の最大値（固体減速架台+0.35%Δk/k、軽水減速炉心+0.5%Δk/k）が時間と共に線形に 3600 秒掛けてランプ状に加わる。その際、対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短によるスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110%での一せい挿入も作動しない。</p>	<p>LEU は初期出力 0.01W</p> <p>固体減速炉心の反応度印加量変更</p> <p>LEU はケース B のランプ状反応度印加を追加</p>
結果	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>E3.7P 炉心：積算出力 4.44×10^2J、温度上昇 2.50×10^{-1} °C</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>C60G0（5 列）炉心：積算出力 4.33×10^2J、温度上昇 1.55×10^{-1} °C</p>	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケース A L5.5P-30 炉心：積算出力 1.98×10^3J、温度上昇 5.64×10^{-1} °C</p> <p>ケース B L5.5P-30 炉心：積算出力 9.22×10^3J、温度上昇 2.62×10^0 °C</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>ケース A C45G(2H20) 4 列炉心：積算出力 1.73×10^3J、温度上昇 1.37×10^{-1} °C</p> <p>ケース B C45G(2H20) 4 列炉心：積算出力 7.38×10^3J、温度上昇 5.85×10^{-1} °C</p>	
	商用電源喪失	商用電源喪失	
シナ	(1) 軽水炉心の C35G0（5 列）炉心において、1 ヶ月の最大積算出力（100Wh）となる運転を行った直後に商用電源が喪失。	(1) 固体減速炉心は L5.5P-30 炉心、軽水減速炉心は C45G(2H ₂ O) 4 列炉心において、1 ヶ月の最大積算出力（100Wh）となる運転を行った直後に商用電源が喪失。	LEU は固体減速と軽水減速の 2

リ オ	<p>(2) 過剰反応度は制限値の最大値（軽水減速炉心 0.5% Δk/k）とし、制御棒の全反応度、及びダンブ弁開放による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(3) 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により最大の反応度をもつ 1 本以外の 5 本が炉心に挿入され、ダンブ弁保持の電磁石電源断によりダンブ弁が開となる。ただし、制御棒落下により 1 秒後にステップ状の負の反応度が加わる。またダンブ弁の開動作により 30 秒後に燃料領域の水が全て排出してステップ状の負の反応度が加わる。</p>	<p>(2) 固体減速炉心、軽水減速炉心共に過剰反応度は制限値の最大値（固体減速架台 0.35% Δk/k、軽水減速炉心 0.5% Δk/k）とし、制御棒の全反応度、及びダンブ弁開放又は中心架台落下による反応度は制限値の最小値。</p> <p>(3) 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により最大の反応度をもつ 1 本以外の 5 本が炉心に挿入され、ダンブ弁保持の電磁石電源断によりダンブ弁が開となる。ただし、制御棒落下により 1 秒後にステップ状の負の反応度が加わる。固体減速炉心では 12 秒後に中心架台が落下してステップ状の負の反応度が加わる。軽水減速炉心ではダンブ弁の開動作により 30 秒後にステップ状の負の反応度が加わる。</p>	炉心を選択
結 果	C35G0（5 列）炉心：積算出力 $3.28 \times 10^3 \text{J}$ 、温度上昇 $8.08 \times 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$	<p>固体減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>L5.5P-30 炉心：積算出力 $2.61 \times 10^3 \text{J}$、温度上昇 $7.43 \times 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>軽水減速炉心の温度上昇の最大値</p> <p>C45G(2H₂O) 4 列炉心：積算出力 $2.97 \times 10^3 \text{J}$、温度上昇 $2.36 \times 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$</p>	
	重水反射体への軽水流入	重水反射体への軽水流入	
シ ナ リ オ	<p>(1) 軽水減速炉心で C30 の単一炉心、または 2 分割炉心の燃料体の外側に重水タンクを設置する。過剰反応度は制限値の最大値、制御棒とダンブ弁の反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 出力が 100W の臨界状態とし、その際に線型出力計は指示値が 100% で 100W となるレンジ。</p> <p>(3) 重水タンクが大きく破損して全ての重水が軽水と混合した、又は、重水タンクが小さく破損して重水の一部が重水タンクから漏れ出して炉心タンクの軽水と混入。</p> <p>(4) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(5) 原子炉は出力が線型出力計の指示値の 120% である 120W を超えたときにスクラム。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下により 1 秒後にステップ状の反応度が加わ</p>	低濃縮燃料では重水は使用しないため解析は行わない	

	る。ダンプ弁は作動しない。		
結果	出力上昇せず未臨界	—	
	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	
シナリオ	<p>(1) 固体減速架台で過剰反応度は制限値の最大値 0.35% Δk/k、制御棒と中心架台の反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 1W の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W とするレンジ。</p> <p>(4) 臨界状態で 10^{11}n/s で中性子を打ち込み、炉心には 4×10^9n/s の中性子が入射し出力上昇。</p> <p>(5) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入は作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(6) 原子炉は出力が線型出力計の指示値の 120% である 120W を超えたときにスクラム。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下によりステップ状の反応度が加わる。中心架台は作動しない。</p>	<p><u>ケース A</u></p> <p>(1) 固体減速架台で過剰反応度は制限値の最大値 0.35% Δk/k、制御棒と中心架台の反応度は制限値の最小値。</p> <p>(2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心を対象。</p> <p>(3) 0.01W の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W とするレンジ。</p> <p>(4) 臨界状態で 10^{11}n/s で中性子を打ち込み、炉心には半分の 5×10^{10}n/s の中性子が入射し出力上昇。</p> <p>(5) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、炉周期短にスクラム及び一せい挿入には作動しない。線型出力系の 110% での一せい挿入も作動しない。</p> <p>(6) 原子炉は出力が線型出力計の指示値の 120% である 120W を超えたときにスクラム。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下により 1 秒後にステップ状の反応度が加わる。中心架台は作動しない。</p> <p><u>ケース B</u> (ケース A と異なる箇所のみ記載)</p> <p>(4) 臨界状態で炉心にはケース A より少ない中性子が入射。中性子発生量は炉心により異なり、燃料温度が最も上昇する中性子発生量をサーベイして決定する。</p> <p>(6) 線型出力計の指示値が 120% (出力が 120W) を超える場合にはケース A と同様にスクラムするが、120% に至らずに出力が低下する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 秒後に制御棒落下によりステップ状の反応度が加わる。中心架台は作動しない。</p>	<p>LEU は初期出力 0.01W 中性子発生量の変更</p> <p>LEU はケース B の追加</p>

結果	温度上昇の最大値 E3. 7P 炉心：積算出力 $1.28 \times 10^4 \text{J}$ 、温度上昇 $7.22 \times 10^0 \text{ }^\circ\text{C}$	温度上昇の最大値 ケース A L5. 5P-30 炉心：積算出力 $5.31 \times 10^2 \text{J}$ 、温度上昇 $1.51 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$ ケース B L5. 5P-30 炉心：積算出力 $1.73 \times 10^5 \text{J}$ 、温度上昇 $4.93 \times 10^1 \text{ }^\circ\text{C}$	
	炉心タンクヒータによる温度上昇	炉心タンクヒータによる温度上昇	
シナリオ	(1) 軽水減速架台で正の反応度温度係数が最も大きい C30G (7H ₂ O) (5 列) 炉心で、反応度温度係数が制限値の最大値 ($+2 \times 10^{-4} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$) であるする、 (2) 出力が 100W の臨界状態とし、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W となるレンジ。 (3) 軽水の初期温度を 25 $^\circ\text{C}$ とし、炉心タンクヒータ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。 (4) 線型出力系の 110% での一せい挿入は作動しない。 (5) 原子炉は安全出力計の指示値の 120% を超えたときにスクラムする。スクラム信号が発生した 1 秒後に制御棒落下によりステップ状の負の反応度が加わる。ダンプ弁は作動しない。	(1) 代表炉心の中で軽水減速架台の反応度温度係数が正となる C45G (6H ₂ O) 炉心など 4 つの炉心を対象とし、反応度温度係数は各炉心の値を用いる。 (2) 出力が 1W の臨界状態とし、その際の線型出力計の指示値は 100% で出力が 100W となるレンジ。 (3) 軽水の初期温度を 25 $^\circ\text{C}$ とし、炉心タンクヒータ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。 (4) 線型出力系の 110% での一せい挿入は作動しない。 (5) 原子炉は線型出力計の指示値の 120% を超えたときにスクラムする。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 秒後に制御棒落下によりステップ状の負の反応度が加わる。ダンプ弁は作動しない。	LEU は対象炉心 変更 LEU は初期出力 1W LEU は 3600 秒 後に手動スク ラム
結果	温度上昇 $1.5 \times 10^0 \text{ }^\circ\text{C}$	温度上昇の最大値 C45G (6H ₂ O) 5 列炉心：積算出力 $7.36 \times 10^3 \text{J}$ 、温度上昇 $5.36 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$	
	燃料落下又は燃料誤装荷	燃料落下又は燃料誤装荷	
シナリオ	(1) 固体減速架台で、過剰反応度が制限値の最大値 ($0.35\% \Delta \text{k/k}$) となるだけの燃料集合体が装荷されている。制御棒と中心架台の反応度は制限値の最小値。 (2) E3. 7, E3, E2, E1, EE1, EEE1 炉心を対象。	<u>ケース A</u> (1) 固体減速架台で、過剰反応度が制限値の最大値 ($0.35\% \Delta \text{k/k}$) となるだけの燃料集合体が装荷されている。制御棒と中心架台の反応度は制限値の最小値。 (2) 添付 8 で取り上げた全ての代表炉心の各燃料セルの炉心のうち、(4) の燃料誤装荷に伴う反応度印加量が最も大きくなる炉心。	LEU は対象炉心 を変更。 誤装荷の反応

	E3. 7P 炉心 : 積算出力 $3.61 \times 10^0 \text{J}$ 、温度上昇は最大で $2.0 \times 10^{-3} \text{°C}$	ケース A L5. 5P-50 炉心 : 積算出力 $8.26 \times 10^2 \text{J}$ 、温度上昇 $2.10 \times 10^{-1} \text{°C}$ ケース B L2P-30 炉心 : 積算出力 $5.80 \times 10^3 \text{J}$ 、温度上昇 $1.13 \times 10^0 \text{°C}$	
	燃料の機械的破損	燃料の機械的破損	
シ ナ リ オ	<p>(1) 軽水減速架台、又は固体減速架台 (E3. 7P 炉心、C60G0 炉心) において、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運転間隔は 30 日間として 9 回繰り返す。その後、最後の運転の 24 時間後 (次の月の初日) に 100W での運転を 1 時間行う。</p> <p>(2) 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 1 体の燃料集合体を取り扱う際に誤って燃料板を損傷させた。</p> <p>(3) 軽水減速架台では燃料を破損させ、燃料芯材において表面より $15 \mu\text{m}$ 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びよう素が全量放出された。燃料板の破損は KUR の使用済燃料の破損の解析と同じように表面の被覆材がすべて外れたとする。固体減速架台では 1 体の燃料体のうち 10% の燃料板が燃料の端面と平行な方向に折れ曲がり (長さ約 5cm) 燃料芯材が露出し、燃料板の切断面から $15 \mu\text{m}$ 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びよう素が全量放出された。</p>	<p>(1) 固体減速炉心では全ての炉心のうち燃料体ごとの出力積分値が最大となる燃料体を有する炉心 (L3P-50 炉心)、軽水減速架台では臨界質量が小さい炉心 (C45G2 (4 列) 炉心) を対象。月末に 100W での運転を 1 時間行うという運転パターンを運転間隔は 30 日間として 9 回繰り返す。その後、最後の運転の 24 時間後 (次の月の初日) に 100W での運転を 1 時間行う。</p> <p>(2) 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 1 体の燃料集合体を取り扱う際に誤って燃料板を損傷させた。</p> <p>(3) 軽水減速架台では 1 枚の燃料が燃料板の対角線方向に折れ曲がり燃料芯材が露出し、燃料芯材において表面より $15 \mu\text{m}$ 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びよう素が全量放出された。固体減速架台では 1 体の燃料体のうち 10% の燃料板が対角線方向 (長さ約 7cm) に折れ曲がり燃料芯材が露出し、燃料板の切断面から $15 \mu\text{m}$ 深さ内で生成された希ガス (Xe、Kr) 及びよう素が全量放出された。</p>	LEU では出力積分値が最大となる燃料体を選定 燃料の破損方向を軽水と固体共に燃料板の対角線方向に統一
結 果	被ばく量は最大でも小児に対して約 $0.18 \mu\text{Sv}$	被ばく量は最大でも小児に対して約 $0.004 \mu\text{Sv}$	
	実験設備、実験物等の著しい破損	実験設備、実験物等の著しい破損	
シ ナ リ オ	<p>(1) 固体減速架台 (E3 炉心、EE3 炉心) で最大出力 100W においてパイルオシレータにより天然ウラン、又は濃縮ウラン (4.5%濃縮) の試料 (反応度絶対値の最大値 $0.1\% \Delta k/k$) を使用。照射位置は炉心中心。</p> <p>(2) 100Wh の運転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。</p>	<p>(1) 固体減速架台の全ての代表炉心を対象として、最大出力 100W においてパイルオシレータにより天然ウラン、又は濃縮ウラン (4.5%濃縮) の試料 (反応度絶対値の最大値 $0.1\% \Delta k/k$) を使用。照射位置は試料の核分裂率の最大値となる位置。</p> <p>(2) 100Wh の運転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。</p>	LEU では全ての炉心を検討。照射位置は核分裂率最大値となる位置

	(3) 放出の経路については「燃料の機械的破損」と同じとする。	(3) 放出の経路については「燃料の機械的破損」と同じとする。	
結果	被ばく量は最大でも小児に対して約 $0.092 \mu\text{Sv}$	被ばく量は最大でも小児に対して約 $0.19 \mu\text{Sv}$	