

## 設置変更承認申請書 添付書類十 (11/10 補正申請)

## 10 変更後における原子炉の操作上の過失、機械又は装置の故障、地震、火災等があった場合に発生すると想定される原子炉の事故の種類、程度、影響等に関する説明書

## 10-1 安全評価に関する基本方針

## 10-1-1 序

本説明書は、原子炉施設の安全性を「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「第十三条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止」に基づき評価し、原子炉の安全性と安全確保のために設計した設備によって、原子炉施設が安全に運転できること及び万一の重大な事故の発生を想定しても放射性物質が敷地外へ多量に放出されるのを防止できることを説明するものである。

原子炉施設の設計の基本方針の妥当性を確認するための安全評価は、「水冷却型試験研究用原子炉施設の安全評価に関する審査指針（平成 3 年 7 月 18 日 原子力安全委員会決定）」（以下「研究炉安全評価指針」という。）を参考にして行い、原子炉施設の通常運転の状態を超えた事象、すなわち運転時の異常な過渡変化について評価を行い、次いでこの運転時の異常な過渡変化の範囲を超える事象、すなわち設計基準事故について評価を行うものとする。

運転時の異常な過渡変化としては、原子炉の運転中において、原子炉施設の寿命期間中に予想される機器の単一故障若しくは誤動作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生ずる異常な状態に至る事象を評価の対象とする。また、設計基準事故としては、運転時の異常な過渡変化を超える異常な状態であって、発生する頻度はまれであるが、発生した場合は原子炉施設からの放射性物質の放出の可能性がある、原子炉施設の安全性を評価する観点から想定する必要のある事象を評価の対象とする。

以下、原子炉施設の運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時の安全性に対して評価を行い、それぞれ、原因、防止対策、現象の経過の解析及び結果について説明し、原子炉施設の安全対策が十分施されていることを説明する。

運転時の異常な過渡変化時及び事故時の安全性を判断する基準は、次のとおりである。

## (1) 運転時の異常な過渡変化時の判断基準

想定された事象が生じた場合であっても、炉心は燃料の許容設計限界を超えることなく、かつ、原子炉施設は通常に復帰できる状態で事象が収束される設計であることを確認するための判断基準は、以下のとおりである。

- (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黒鉛及び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。

判断基準(i)は、燃料のブリスタが発生しないことを確認する<sup>1)</sup>、(ii)は、構造材が破損しないことを確認する、(iii)は、ポリエチレンが軟化する温度以下であることを確認する(黒鉛は、この温度で健全性を保つ)、(iv)は、軽水の温度が沸点未満であることを確認するためである。

## (2) 設計基準事故時の判断基準

想定された事象が発生した場合であっても、炉心の著しい損傷が発生するおそれがないものであり、当該設計基準事故以外の事故に至るおそれがある異常を生じないものであり、さらに周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないものであることを確認するための判断基準は、以下のとおりである。

- (i) 燃料の最高温度は、400°Cを超えないこと。
- (ii) 構造材のアルミニウムの最高温度は、400°Cを超えないこと。
- (iii) 固体減速架台の減速材である黒鉛及びポリエチレンの最高温度は、100°Cを超えないこと。
- (iv) 軽水減速架台の減速材である軽水の最高温度は、100°C未満であること。
- (v) 周辺公衆の実効線量の評価値は、発生事故当たり5mSvを超えないこと。

判断基準(i)は、燃料のブリスタが発生しないことを確認する、(ii)は、構造材が破損しないことを確認する、(iii)は、ポリエチレンが軟化する温度以下であることを確認する、(iv)は、軽水の温度が沸点未満であることを確認する、(v)は、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」を参考に周辺公衆の著しい放射線被ばくを及ぼさないことを確認するためのものである。

## 10-1-2 主要な解析条件

運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の解析に当たって、共通に用いる解析条件及び考慮すべき事項は、次のとおりである。初期温度の設定の妥当性については、解析の項目に応じて説明する。

なお、本章において、濃縮ウランのうち、濃縮度が■■■■のものが高濃縮ウラン、■■■■のものを低濃縮ウランと記載し、高濃縮ウランの燃料要素を用いた炉心を高濃縮ウラン炉心、低濃縮ウランの燃料要素を用いた炉心を低濃縮ウラン炉心と記載する。

### (1) 解析対象炉心

解析の対象とする炉心は、添付書類八の「8-2-1 炉心」に示したように、固体減速架台又は軽水減速架台の炉心の中から解析の項目に応じて選定する。

### (2) 初期運転条件

特に明記しない場合、初期温度は、室温として25°Cとする。また、原子炉熱出力等の初期値は、解析の項目に応じて設定する。

### (3) 安全保護回路及び原子炉停止系の特性

安全保護回路により監視している原子炉施設のプロセス量が設定値を超えた場合、原子炉のスクラム信号が発生し、自動的に制御棒の保持電磁石の励磁電流が遮断され、自重により炉心に挿入される。スクラム時間は、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である1秒とする。スクラム信号発生により、制御棒は全数（6本）が炉心下端まで落下するが、解析に当たっては、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ものとする。

### (4) 反応度温度係数

高濃縮ウラン炉心については、添付書類八の「8-2-1 炉心」で示した炉心のうち、軽水減速炉心である軽水2分割炉心の一部を除く全ての炉心において、反応度温度係数は負である。これら反応度温度係数が負となる炉心については、安全側に見積もるために、温度上昇に伴う負の反応度効果を見捨てる。反応度温度係数が正となる炉心のうち、C30の軽水2分割炉心は、大きな反応度温度係数を持ち、その最大値は約 $7.1 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ である。しかし、より厳しい条件で評価するために、反応度温度係数が正となる炉心の全てについて、燃料温度上昇により、制限値である $2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^\circ C$ で、正の反応度が加わると仮定した。

低濃縮ウラン炉心については、解析を行う各炉心の反応度温度係数を用いて、温度変化に伴う反応度フィードバックを考慮する。

### (5) 温度の評価

上昇温度は、各炉心の熱容量を元に、各解析項目の事象が発生してからの炉心出力の積算値より算出する。高濃縮ウラン炉心については、炉心出力がスクラム前の1/10に低下するまでの時間範囲について、低濃縮ウラン炉心については、炉心出力が0.1Wに低下するまでの時間範囲について積算出力を求める。

高濃縮ウラン炉心については、燃料要素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要素（固体減速炉心については角板のウラン・アルミニウム合金、軽水減速炉心については標準型燃料板のアルミ被覆でサンドイッチされたウラン・アルミニウム合金のミート部分）の温度上昇に費やされるものとする。燃料要素の温度の最大値は、炉心での発熱分布がcos分布であるとして評価する。

低濃縮ウラン炉心については、燃料要素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要素（固体減速炉心については角板のアルミニウム被覆でサンドイッチされたウランモリブデン・アルミニウム分散型燃料材とアルミニウム被覆材の部分、軽水減速炉心については標準型燃料板のアルミニウム被覆でサンドイッチされたウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料材とアルミニウム被覆材の部分）の温度上昇に費やされるものとする。燃料要素の温度の最大値は、各炉心の発熱分布と燃料要素内での発熱分布を考慮して評価する。

### (6) 臨界量、動特性パラメータ及び温度係数の誤差の影響評価（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心については、各炉心の臨界量の誤差を±6%、実効遅発中性子割合の誤差を±8%、中性子寿命の誤差を±8%、温度係数の誤差を±32%としたときの温度上昇への影響を評価する。

### 10-1-3 解析方法

動特性の解析は、下記の 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う。

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} N(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S \quad (10-1-1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{f_i \beta}{\ell} N(t) - \lambda_i C_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (10-1-2)$$

ここで、

- $\rho(t)$  : 時刻  $t$  における反応度
- $N(t)$  : 時刻  $t$  における中性子密度
- $\ell$  : 中性子寿命
- $\beta$  : 実効遅発中性子割合
- $S$  : 中性子源強度 (外部中性子源が存在する場合)
- $f_i$  : グループ  $i$  に属する遅発中性子の割合<sup>6)</sup>
- $\lambda_i$  : グループ  $i$  に属する遅発中性子先行核の崩壊定数<sup>6)</sup>
- $C_i(t)$  : グループ  $i$  に属する遅発中性子先行核密度

とする。

この連立微分方程式を汎用数式処理システム Mathematica<sup>®2)</sup>を用いて解く。Mathematica は、30 年以上にわたり世界各国で使用されている数式処理システムで、微分積分等の様々な数式を解析的又は数値的に解くことができる。使用したシステムは、高濃縮ウラン炉心については第 11 版、低濃縮ウラン炉心については解析時点での最新版の第 12 版である。

最初に、このシステムの計算精度を確認するために、高濃縮ウランを用いた軽水減速架台の C35G0 (5 列) 炉心において、臨界状態からステップ状に正の反応度が印加された場合について求めた安定ペリオドと通常の逆時間方程式に基づいて得られる安定ペリオドとの比較を行った。Mathematica の計算では、(10-1-1) 式及び (10-1-2) 式の連立微分方程式を数値的に解いて出力を求め、出力変化の形状を指数関数にフィッティングして、安定ペリオドを算出した。

結果を第 10-1-1 表に示す。両者の結果は、非常によく一致しており、(10-1-1) 式及び (10-1-2) 式に基づく動特性解析を本計算システムを用いて行うことの妥当性を確認した。

なお、計算に使用する実効遅発中性子割合、中性子寿命、反応度係数等の定数は、第 8-2-2 表～第 8-2-5 表を求めた SRAC コードシステム<sup>4)</sup>を用いた手法で作成した。解析のために必要な反応度の計算には、SRAC コードシステム又は連続エネルギーモンテカルロ計算コード MCNP (バージョン<sup>6)</sup><sup>5)</sup>を使用した。使用した核データは、全て JENDL-4.0<sup>6)</sup>に基づいたものである。

設計基準事故の「燃料の機械的破損」等の解析においては、燃焼に伴う核分裂生成物の発生量、燃料要素中の核分裂生成物の崩壊に伴う発熱等の評価が必要となる。燃料の燃焼計算は、米国の Oak

Ridge National Laboratory で開発された燃焼計算コード ORIGEN-2<sup>3)</sup> の解析時点で入手可能な最新版である ORIGEN-2.2 を使用した。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。

第 10-1-1 表 安定ペリオドの計算結果の比較 (C35G0 (5 列) 炉心)

印加反応度 (%Δk/k)	安定ペリオド (s)		(A) / (B)
	(A) 逆時間方程式	(B) Mathematica	
0.1	69.31	69.24	1.001
0.3	10.48	10.48	1.000
0.5	2.475	2.476	0.999

## 10-2 運転時の異常な過渡変化の解析

### 10-2-1 序

原子炉施設において発生する可能性のある運転時の異常な過渡変化に対して、その発生の防止対策を説明し、その経過と結果の解析を行い、原子炉の安全性が確保されることを説明する。

研究炉安全評価指針を参考にして、運転時の異常な過渡変化として次の事象を評価する。

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

なお、(1)の(iii)「実験物の異常等による反応度の付加」については、添付書類八の「8-9-5 炉心装荷物」の挿入管と照射物を対象とする。また、高濃縮ウラン炉心については、「8-9-5 炉心装荷物」に記載したとおり、照射物を使用せず、また挿入管は管の内部に水が流入した場合であっても炉心に反応度が加わらない場所に設置するため、(1)の(iii)「実験物の異常等による反応度の付加」の解析は行わない。さらに、低濃縮ウラン炉心については、重水反射体を使用しないため、(3)の(i)「重水反射体への軽水流入」の解析は行わない。

## 10-2-2 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き

### 10-2-2-1 発生状況及び防止対策

原子炉起動時に運転員の誤操作又は制御棒駆動装置の誤動作等により、制御棒が連続的に引き抜かれた場合、炉心に過度の反応度投入が起こり、原子炉出力が急上昇するため、燃料及び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。このような誤操作等を防止し、また、万一発生した場合でもその影響を限定するために、次のような対策を講じている。

- (1) 制御棒は、電磁石で保持され、その電磁石を電動機で上下に動かすことにより駆動される。その駆動速度は、上下とも一定に保たれている。
- (2) 制御棒による最大反応度添加率は、 $0.02\% \Delta k/k/s$  とする。
- (3) 炉周期が 30 秒以下になれば、インターロックにより制御棒の引抜きは制限されるとともに、警報が発報し運転員に異常を知らせる。さらに、15 秒以下になれば一せい挿入、10 秒以下になればスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。また、出力が線型出力計の各レンジの 110%以上のとき一せい挿入、120%以上のときスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。

### 10-2-2-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における原子炉起動時における制御棒の異常な引抜きについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 固体減速炉心、軽水減速炉心ともに過剰反応度は、制限値の最大値（固体減速炉心  $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心  $0.5\% \Delta k/k$ ）とし、制御棒の全反応度は、制限値の最小値（固体減速炉心  $1.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心  $1.5\% \Delta k/k$ ）、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（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 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  $1W$  となるレンジであったとする。
- (3) 制御棒の引抜きにより、最大反応度添加率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には、期待しないものとする。
- (4) 出力が線型出力系の指示値の 120%である  $1.2W$  を超えたとき、スクラム信号を発するとする。ただし、指示値の 110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。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とする。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は作動しないとする。

### 10-2-2-3 過渡変化の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における原子炉起動時における制御棒の異常な引抜きについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 固体減速炉心、軽水減速炉心ともに過剰反応度は、制限値の最大値（固体減速炉心  $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心  $0.5\% \Delta k/k$ ）とし、制御棒の全反応度は、制限値の最小値（固体減速炉心  $1.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心  $1.5\% \Delta k/k$ ）、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（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 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  $0.01W$  の臨界状態を保持しており、その際の線型出力計の指示値は、 $100\%$  で出力が  $100W$  となるレンジであったとする。
- (3) 【ケース A】  
制御棒の引抜きにより、最大反応度添加率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には、期待しないものとする。  
【ケース B】  
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が投入されたとする。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には、期待しないものとする。
- (4) 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とする。ただし、指示値の  $110\%$  以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。ただし、線型出力計の指示値が  $120\%$  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てスクラム信号を発生させるとする。
- (5) 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とする。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は作動しないとする。

### 10-2-2-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

解析結果を第 10-2-1 表、第 10-2-2 表及び第 10-2-1 図に示す。全ての炉心において、燃料の温度上昇量の最大値は、 $0.01^{\circ}C$  以下であり、構造材のアルミニウム及び減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、初期温度を  $25^{\circ}C$  としたとき、燃料、構造材のアルミニウム、減速材の温度は、全て  $25.01^{\circ}C$  以下となり、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。

固体減速炉心について、初期温度を  $25^{\circ}C$  から  $\pm 10^{\circ}C$  程度変化しても、各炉心での実効遅発中性子割合及び中性子寿命の値の変化量は非常に小さく、温度変化に対する燃料等の温度上昇量への影響は  $0.5\%$  以下であり、初期温度が変化しても、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。

軽水減速炉心について、初期温度が運転時の制限値である  $80^{\circ}C$  まで変化しても、実効遅発中性子割合及び中性子寿命の値の変化量は小さく、温度変化に対する燃料等の温度上昇量への影響は、

数%以下であり、初期温度が変化しても、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。なお、軽水減速炉心については、温度が上昇するに従い、反応度温度係数の値は小さくなるため、負の反応度温度係数の炉心については、反応度フィードバックを無視した結果及び正の反応度温度係数を持つ炉心について反応度温度係数の最大値を用いた結果は、安全側の評価となっている。

第 10-2-1 表 固体減速架台炉心（高濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における  
制御棒の異常な引抜き解析結果

炉心名称 <sup>a</sup>	1.2W 超までの 時間 <sup>b</sup> (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)
E3.7P	36.68	1.38	9.74	$5.48 \times 10^{-3}$
E3P	39.42	1.38	9.95	$5.21 \times 10^{-3}$
E2P	40.26	1.37	10.20	$4.52 \times 10^{-3}$
E1P	40.97	1.37	10.40	$2.90 \times 10^{-3}$
EE1P	40.70	1.37	10.32	$1.39 \times 10^{-3}$
EEE1P	39.97	1.37	10.11	$8.34 \times 10^{-4}$
EN3P	38.34	1.38	9.64	$2.96 \times 10^{-3}$
ENN3P	38.30	1.38	9.63	$2.63 \times 10^{-3}$
ENNN3P	38.31	1.38	9.63	$1.42 \times 10^{-3}$
EEN1P	39.30	1.38	9.92	$6.79 \times 10^{-4}$
EN1P	39.33	1.39	9.93	$1.02 \times 10^{-3}$
ENN1P	38.91	1.38	9.81	$4.82 \times 10^{-4}$
E1.5G	34.69	1.41	8.56	$1.34 \times 10^{-3}$
E1.5G	34.81	1.41	8.60	$1.46 \times 10^{-3}$
E0.5G	34.88	1.41	8.63	$8.01 \times 10^{-4}$
E3G	34.41	1.42	8.48	$1.57 \times 10^{-3}$

a 炉心名称について

- ・燃料を構成する最小単位のセルの構成を炉心名称とする
- ・E は高濃縮燃料板 (■■■■■)、N は天然ウラン板 (■■■■■)
- ・E 又は N が繰り返されると重ねることを表す (EE は高濃縮燃料板を 2 枚重ねる)
- ・末尾が P の時はポリエチレン、G は黒鉛を減速材として用いる
- ・数値は減速材の厚さで、ポリエチレン減速材のときは■■■■■ (例えば 3 のときは■■■■■)、黒鉛減速材のときは■■■■■

b 起動後、1.2W を超過してスクラム信号が発するまでの時間



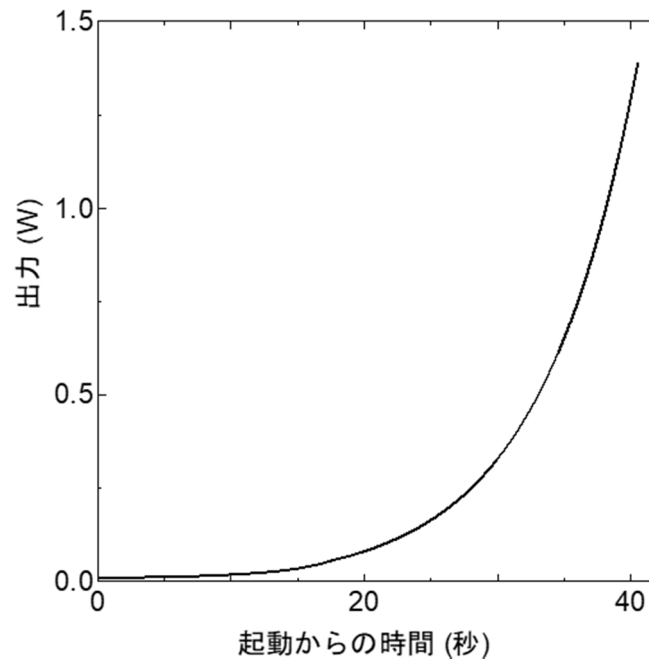
第 10-2-2 表 軽水減速架台炉心（高濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における  
制御棒の異常な引抜きの解析結果

炉心名称 <sup>a</sup>	列	1.2W 超までの 時間 <sup>b</sup> (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)
C35G0	3	26.53	1.80	4.74	$8.26 \times 10^{-4}$
C35G0	4	26.66	1.79	4.78	$1.16 \times 10^{-3}$
C35G0	5	26.67	1.79	4.78	$1.18 \times 10^{-3}$
C35G0	6	26.64	1.79	4.77	$1.12 \times 10^{-3}$
C35G(2H <sub>2</sub> O)	5	26.43	1.81	4.71	$1.21 \times 10^{-3}$
C35G(5H <sub>2</sub> O)*	5	25.95	1.86	4.58	$9.24 \times 10^{-4}$
C35G(10H <sub>2</sub> O)*	5	26.22	1.83	4.65	$6.57 \times 10^{-4}$
C35G(15H <sub>2</sub> O)	5	26.50	1.80	4.73	$6.06 \times 10^{-4}$
C35G(5D <sub>2</sub> O)	5	26.03	1.85	4.60	$1.11 \times 10^{-3}$
C35G(10D <sub>2</sub> O)	5	25.86	1.88	4.56	$1.01 \times 10^{-3}$
C35G(15D <sub>2</sub> O)	5	25.86	1.87	4.56	$9.11 \times 10^{-4}$
C35G(20D <sub>2</sub> O)	5	25.93	1.87	4.58	$8.32 \times 10^{-4}$
C35G(30D <sub>2</sub> O)	5	26.10	1.85	4.63	$7.31 \times 10^{-4}$
C30G0	3	26.55	1.80	4.74	$5.75 \times 10^{-4}$
C30G0	5	26.71	1.78	4.79	$9.29 \times 10^{-4}$
C30G(2H <sub>2</sub> O)	5	26.52	1.80	4.74	$9.86 \times 10^{-4}$
C30G(5H <sub>2</sub> O)*	5	26.01	1.86	4.60	$7.61 \times 10^{-4}$
C30G(10H <sub>2</sub> O)*	5	26.25	1.83	4.66	$5.23 \times 10^{-4}$
C30G(15H <sub>2</sub> O)	5	26.57	1.80	4.74	$4.78 \times 10^{-4}$
C45G0	3	26.55	1.83	4.67	$1.01 \times 10^{-3}$
C45G0	5	26.41	1.81	4.71	$1.50 \times 10^{-3}$
C45G(5H <sub>2</sub> O)	5	25.76	1.89	4.53	$1.10 \times 10^{-3}$
C45G(10H <sub>2</sub> O)	5	26.05	1.85	4.61	$8.24 \times 10^{-4}$
C45G(15H <sub>2</sub> O)	5	26.28	1.83	4.67	$7.70 \times 10^{-4}$
C20G0	5	26.44	1.81	4.71	$3.03 \times 10^{-4}$
C25G0	5	26.67	1.81	4.71	$6.60 \times 10^{-4}$
C60G0	5	25.98	1.86	4.59	$1.64 \times 10^{-3}$

a 炉心名称について

- ・ C の後の数値は燃料板ピッチ (■■■■■)、G の後の数値が 0 のときは単一炉心
- ・ G の後に括弧があるときは 2 分割炉心で、括弧内の数値は炉心間距離を cm 単位で示し、その後に炉心間の物質名を示す
- ・ 炉心名に \* が付いている炉心は正の反応度反応度温度係数を持つ炉心

b 起動後、1.2W を超過してスクラム信号が発するまでの時間



第 10-2-1 図 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜きの解析結果（高濃縮ウラン炉心 E3P 炉心）

#### 10-2-2-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

##### 【ケース A】

解析結果を第 10-2-3 表及び第 10-2-4 表に示す。固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、初期温度を 25°C としたとき、燃料温度上昇は約 0.44°C である。出力及び温度変化を第 10-2-2 図に示す。軽水減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは C45G(2H<sub>2</sub>O)4 列炉心で、燃料温度上昇は約 0.069°C である。出力及び温度変化を第 10-2-3 図に示す。両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも +20% 以下であり、判断基準を満足している。

##### 【ケース B】

解析結果を第 10-2-5 表及び第 10-2-6 表に示す。固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L4P-30 炉心で、初期温度を 25°C としたとき、燃料温度上昇は約 27.1°C である。この炉心では、出力が上昇するにつれて燃料温度が上昇するが、反応度添加量が小さいため、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減少し、最終的には、3600 秒を経過したところで、運転員が手動停止させるというケースである。出力及び温度変化を第 10-2-4 図に示す。軽水減速炉心では、最も燃料温度が高くなるのは C45G(2H<sub>2</sub>O)4 列炉心で、燃料温度上昇は約 1.85°C である。これは、出力が 120W を超えてスクラムしたケースである。出力及び温度変化を第 10-2-5 図に示す。両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも +10% 以下であり、判断基準を満足している。

第 10-2-3 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における  
制御棒の異常な引抜き解析結果（ケース A）

炉心名称	120W 超までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
L5.5P-50	69.5	138.7	309.1	$1.55 \times 10^3$	$1.72 \times 10^{-1}$	$3.94 \times 10^{-1}$
L5.5P-40	69.6	138.7	309.2	$1.55 \times 10^3$	$1.88 \times 10^{-1}$	$4.32 \times 10^{-1}$
L5.5P-30	69.5	138.7	309.2	$1.55 \times 10^3$	$1.93 \times 10^{-1}$	$4.41 \times 10^{-1}$
L4P-50	71.2	138.2	313.6	$1.59 \times 10^3$	$1.56 \times 10^{-1}$	$3.49 \times 10^{-1}$
L4P-40	72.1	137.9	315.8	$1.61 \times 10^3$	$1.90 \times 10^{-1}$	$4.15 \times 10^{-1}$
L4P-30	72.1	137.9	315.8	$1.61 \times 10^3$	$2.01 \times 10^{-1}$	$4.38 \times 10^{-1}$
L3P-50	73.0	137.6	318.2	$1.63 \times 10^3$	$1.49 \times 10^{-1}$	$3.17 \times 10^{-1}$
L3P-40	73.1	137.6	318.7	$1.64 \times 10^3$	$1.65 \times 10^{-1}$	$3.55 \times 10^{-1}$
L3P-30	73.4	137.5	319.2	$1.64 \times 10^3$	$1.82 \times 10^{-1}$	$3.79 \times 10^{-1}$
L2P-50	73.7	137.4	320.4	$1.65 \times 10^3$	$1.12 \times 10^{-1}$	$2.86 \times 10^{-1}$
L2P-40	74.3	137.2	322.0	$1.66 \times 10^3$	$1.32 \times 10^{-1}$	$2.92 \times 10^{-1}$
L2P-30	73.9	137.3	321.0	$1.65 \times 10^3$	$1.39 \times 10^{-1}$	$3.22 \times 10^{-1}$
L1P-50	73.2	137.6	319.6	$1.64 \times 10^3$	$6.41 \times 10^{-2}$	$2.07 \times 10^{-1}$
L1P-40	74.2	137.3	322.2	$1.66 \times 10^3$	$6.82 \times 10^{-2}$	$1.72 \times 10^{-1}$
L1P-30	74.0	137.3	321.7	$1.66 \times 10^3$	$7.16 \times 10^{-2}$	$2.19 \times 10^{-1}$
LL1P-50	72.7	137.7	318.5	$1.63 \times 10^3$	$2.69 \times 10^{-2}$	$1.02 \times 10^{-1}$
LL1P-40	73.3	137.5	319.9	$1.64 \times 10^3$	$2.43 \times 10^{-2}$	$8.85 \times 10^{-2}$
LL1P-30	73.0	137.6	319.4	$1.64 \times 10^3$	$2.81 \times 10^{-2}$	$1.11 \times 10^{-1}$

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

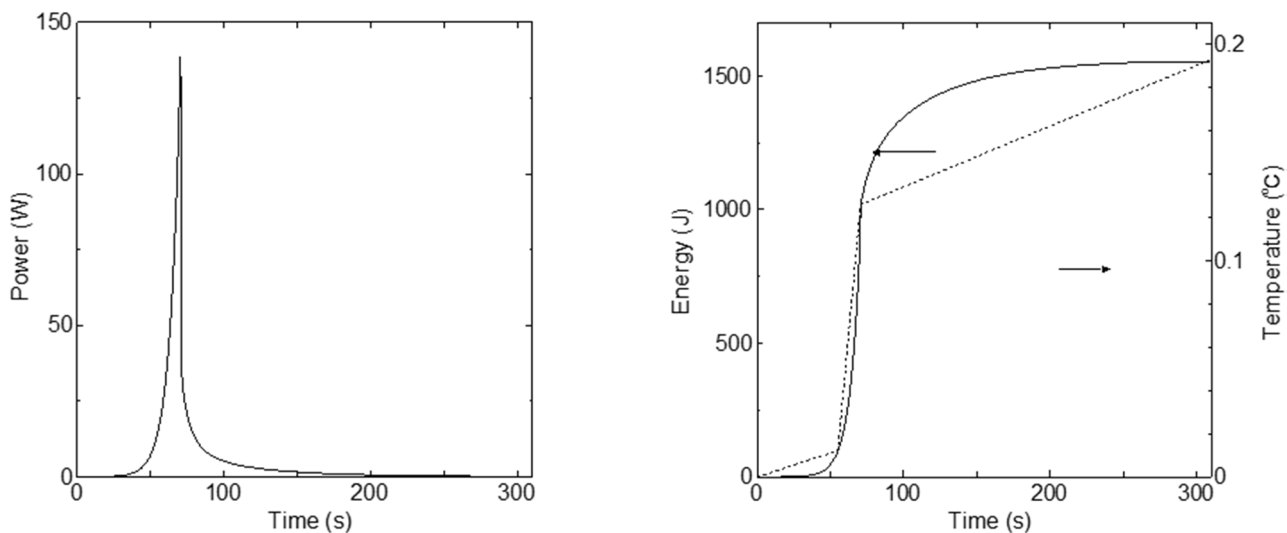
b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛けた値

第 10-2-4 表 軽水減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における  
制御棒の異常な引抜き解析結果（ケース A）

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

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

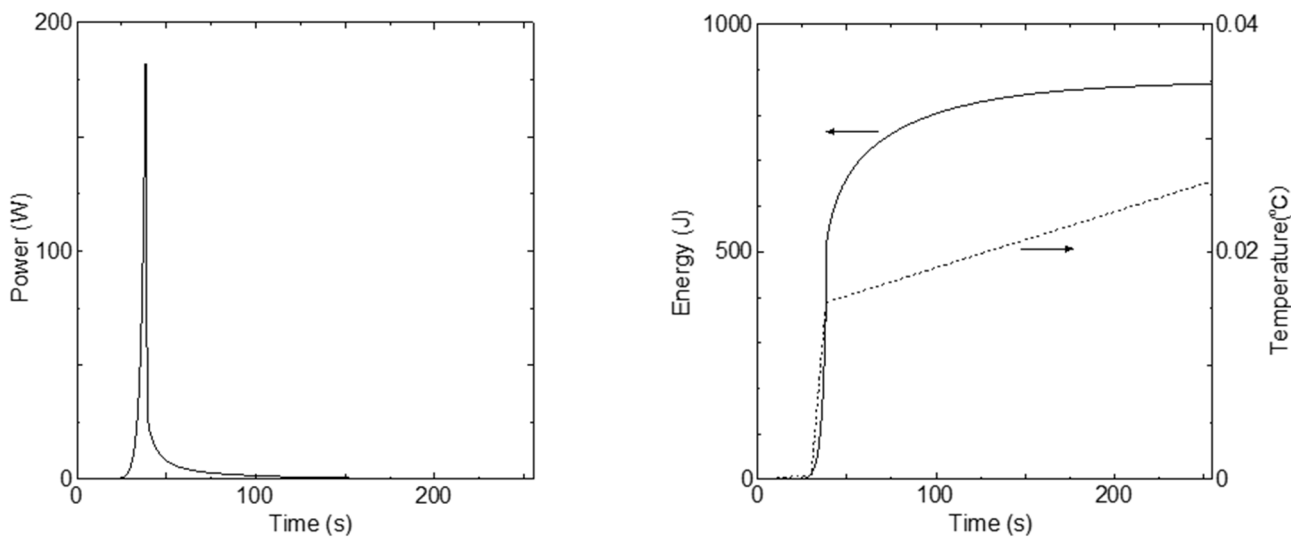
b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値



第 10-2-2 図 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（ケース A）

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（固体減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：L5.5P-30 炉心）



第 10-2-3 図 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（ケース A）

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（軽水減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：C45G(2H<sub>2</sub>O)4 列炉心）

第 10-2-5 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における  
制御棒の異常な引抜き解析結果（ケース B）

炉心名称	120W 超までの時間 <sup>d</sup> (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	手動スクラム時の出力 <sup>e</sup> (W)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
L5.5P-50°	1815.7	103.0	3601.0	0.154	$9.08 \times 10^4$	$1.01 \times 10^1$	$2.31 \times 10^1$
L5.5P-40°	1810.1	99.1	3601.0	0.147	$8.74 \times 10^4$	$1.06 \times 10^1$	$2.43 \times 10^1$
L5.5P-30°	1814.3	102.0	3601.0	0.152	$9.00 \times 10^4$	$1.12 \times 10^1$	$2.56 \times 10^1$
L4P-50	1769.5	120.1	2136.7	—	$4.07 \times 10^4$	$4.00 \times 10^0$	$8.93 \times 10^0$
L4P-40°	1857.0	113.5	3605.0	0.240	$1.02 \times 10^5$	$1.20 \times 10^1$	$2.62 \times 10^1$
L4P-30°	1853.9	111.0	3604.7	0.234	$9.95 \times 10^4$	$1.24 \times 10^1$	$2.71 \times 10^1$
L3P-50	1731.4	120.2	2098.9	—	$3.55 \times 10^4$	$3.25 \times 10^0$	$6.91 \times 10^0$
L3P-40	1720.7	120.2	2088.0	—	$3.44 \times 10^4$	$3.48 \times 10^0$	$7.47 \times 10^0$
L3P-30	1729.5	120.2	2097.2	—	$3.50 \times 10^4$	$3.89 \times 10^0$	$8.09 \times 10^0$
L2P-50	1627.0	120.5	1992.2	—	$2.69 \times 10^4$	$1.82 \times 10^0$	$4.67 \times 10^0$
L2P-40	1647.7	120.5	2006.8	—	$2.73 \times 10^4$	$2.17 \times 10^0$	$4.80 \times 10^0$
L2P-30	1634.7	120.5	1997.2	—	$2.69 \times 10^4$	$2.25 \times 10^0$	$5.23 \times 10^0$
L1P-50	1571.6	120.6	1934.2	—	$2.35 \times 10^4$	$9.20 \times 10^{-1}$	$2.98 \times 10^0$
L1P-40	1582.4	120.6	1946.0	—	$2.36 \times 10^4$	$9.70 \times 10^{-1}$	$2.44 \times 10^0$
L1P-30	1579.3	120.6	1942.7	—	$2.36 \times 10^4$	$1.02 \times 10^0$	$3.12 \times 10^0$
LL1P-50	1542.9	120.7	1904.3	—	$2.23 \times 10^4$	$3.67 \times 10^{-1}$	$1.39 \times 10^0$
LL1P-40	1549.2	120.7	1911.3	—	$2.23 \times 10^4$	$3.30 \times 10^{-1}$	$1.20 \times 10^0$
LL1P-30	1546.4	120.7	1908.2	—	$2.23 \times 10^4$	$3.81 \times 10^{-1}$	$1.52 \times 10^0$

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」及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）を掛けた値

c 120W まで到達することなく未臨界に移行し、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 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

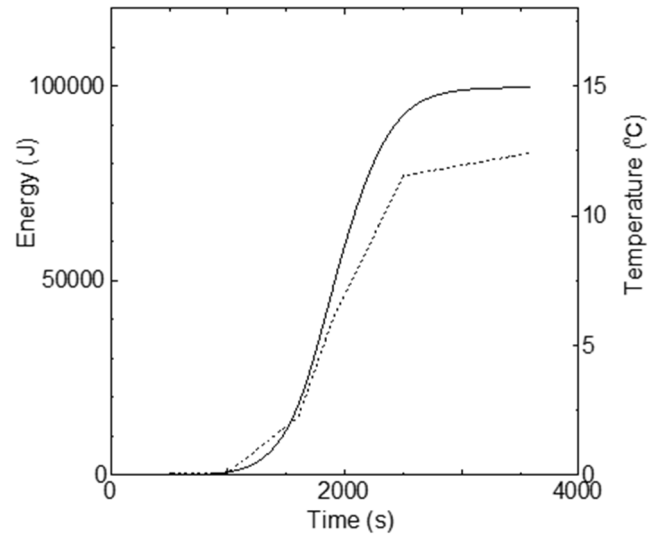
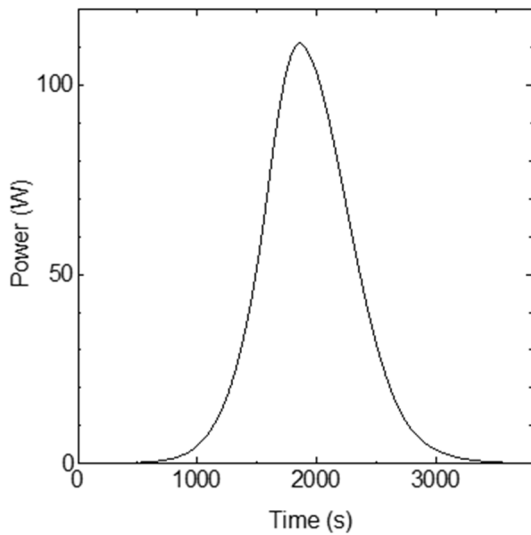
e 手動スクラムの 1 秒後の反応度が印加される直前での出力

第 10-2-6 表 軽水減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の原子炉起動時における  
制御棒の異常な引抜き解析結果（ケース B）

炉心名称	列	120W 超まで の時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
C30G0	4	1546.3	120.7	1922.3	$2.27 \times 10^4$	$3.31 \times 10^{-1}$	$8.40 \times 10^{-1}$
	5	1546.5	120.7	1922.5	$2.27 \times 10^4$	$3.41 \times 10^{-1}$	$8.12 \times 10^{-1}$
C35G0	4	1557.2	120.7	1933.8	$2.31 \times 10^4$	$4.68 \times 10^{-1}$	$1.06 \times 10^0$
	5	1554.6	120.7	1931.0	$2.30 \times 10^4$	$4.65 \times 10^{-1}$	$1.07 \times 10^0$
C45G0	4	1566.7	120.6	1942.9	$2.39 \times 10^4$	$6.93 \times 10^{-1}$	$1.38 \times 10^0$
	5	1564.7	120.6	1940.9	$2.38 \times 10^4$	$6.74 \times 10^{-1}$	$1.42 \times 10^0$
C60G0	4	1543.0	120.7	1917.6	$2.32 \times 10^4$	$6.39 \times 10^{-1}$	$1.16 \times 10^0$
	5	1542.2	120.7	1916.9	$2.31 \times 10^4$	$6.29 \times 10^{-1}$	$1.19 \times 10^0$
C45G (2H <sub>2</sub> O)	4	1547.4	120.6	1922.3	$2.33 \times 10^4$	$7.03 \times 10^{-1}$	$1.85 \times 10^0$
C45G (5H <sub>2</sub> O)		1501.3	120.7	1873.1	$2.19 \times 10^4$	$5.12 \times 10^{-1}$	$1.70 \times 10^0$
C45G (6H <sub>2</sub> O)		1493.2	120.8	1864.8	$2.15 \times 10^4$	$4.53 \times 10^{-1}$	$1.49 \times 10^0$
C45G (7H <sub>2</sub> O)		1497.0	120.7	1868.9	$2.16 \times 10^4$	$4.17 \times 10^{-1}$	$1.32 \times 10^0$
C45G (10H <sub>2</sub> O)		1517.5	120.7	1884.5	$2.21 \times 10^4$	$3.63 \times 10^{-1}$	$9.64 \times 10^{-1}$
C45G (15H <sub>2</sub> O)		1538.1	120.7	1913.2	$1.99 \times 10^3$	$2.99 \times 10^{-2}$	$6.38 \times 10^{-2}$
C45G (2H <sub>2</sub> O)	5	1542.0	120.7	1916.6	$2.31 \times 10^4$	$6.95 \times 10^{-1}$	$1.79 \times 10^0$
C45G (5H <sub>2</sub> O)		1473.6	120.8	1844.0	$2.08 \times 10^4$	$4.99 \times 10^{-1}$	$1.66 \times 10^0$
C45G (6H <sub>2</sub> O)		1470.8	120.8	1841.0	$2.08 \times 10^4$	$4.49 \times 10^{-1}$	$1.51 \times 10^0$
C45G (7H <sub>2</sub> O)		1478.3	120.8	1848.9	$2.11 \times 10^4$	$4.15 \times 10^{-1}$	$1.37 \times 10^0$
C45G (10H <sub>2</sub> O)		1502.7	120.7	1875.1	$2.17 \times 10^4$	$3.57 \times 10^{-1}$	$1.03 \times 10^0$
C45G (15H <sub>2</sub> O)		1530.9	120.7	1905.4	$2.24 \times 10^4$	$3.31 \times 10^{-1}$	$7.90 \times 10^{-1}$
C60G (2H <sub>2</sub> O)	4	1518.0	120.7	1891.0	$2.24 \times 10^4$	$6.04 \times 10^{-1}$	$1.57 \times 10^0$
C60G (5H <sub>2</sub> O)		1483.2	120.7	1853.7	$2.14 \times 10^4$	$4.43 \times 10^{-1}$	$1.36 \times 10^0$
C60G (7H <sub>2</sub> O)		1487.1	120.8	1858.0	$2.14 \times 10^4$	$3.75 \times 10^{-1}$	$1.06 \times 10^0$
C60G (10H <sub>2</sub> O)		1505.8	120.7	1878.3	$2.19 \times 10^4$	$3.34 \times 10^{-1}$	$7.76 \times 10^{-1}$
C60G (15H <sub>2</sub> O)		1521.2	120.7	1895.0	$2.22 \times 10^4$	$3.15 \times 10^{-1}$	$5.89 \times 10^{-1}$

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

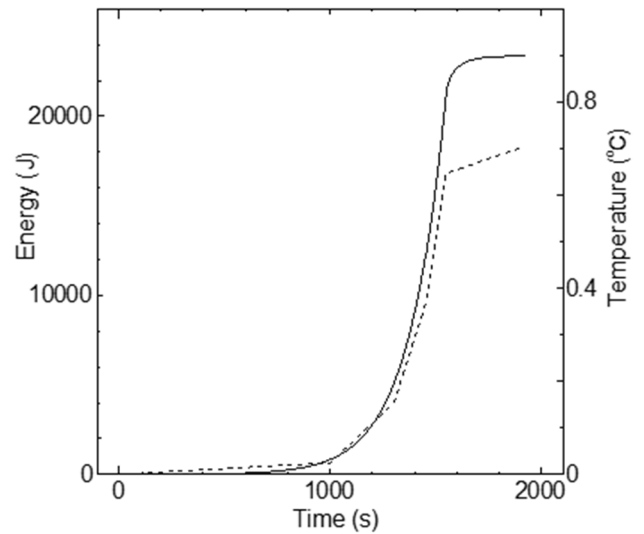
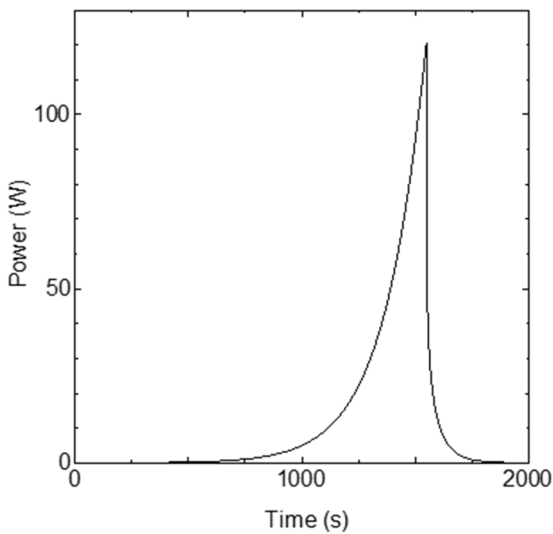
b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値



第 10-2-4 図 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（ケース B）

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（固体減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：L4P-30 炉心）



第 10-2-5 図 原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き（ケース B）

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（軽水減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：C45G(2H<sub>2</sub>O)4 列炉心）



### 10-2-3 出力運転中の制御棒の異常な引抜き

#### 10-2-3-1 発生状況及び防止対策

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り、原子炉出力が急上昇するため、燃料及び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。このような誤操作等を防止し、また、万一発生した場合でもその影響を限定するために、次のような対策を講じている。

- (1) 制御棒は、電磁石で保持され、その電磁石を電動機で上下に動かすことにより駆動される。その駆動速度は、上下とも一定に保たれている。
- (2) 制御棒による最大反応度添加率は、 $0.02\% \Delta k/k/s$  とする。
- (3) 炉周期が 30 秒以下になれば、インターロックにより制御棒の引抜きは制限されるとともに、警報が発報し運転員に異常を知らせる。さらに、15 秒以下になれば一せい挿入、10 秒以下になればスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。
- (4) 運転中は、出力変化を監視するために、線型出力計の表示が概ね 10%~80% 範囲となるような適切な出力レンジの値に設定する。出力が線型出力計の各レンジの 110% 以上のとき一せい挿入、120% 以上のときスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。

#### 10-2-3-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における出力運転中の制御棒の異常な引抜きについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 固体減速炉心、軽水減速炉心ともに過剰反応度は、制限値の最大値（固体減速炉心  $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心  $0.5\% \Delta k/k$ ）とし、制御棒の全反応度は、制限値の最小値（固体減速炉心  $1.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心  $1.5\% \Delta k/k$ ）、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（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 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 となるレンジであったとする。
- (3) その他の条件については、「10-2-2-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）」の解析条件と同じとする。

#### 10-2-3-3 過渡変化の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における出力運転中の制御棒の異常な引抜きについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 固体減速炉心、軽水減速炉心ともに過剰反応度は、制限値の最大値（固体減速炉心  $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心  $0.5\% \Delta k/k$ ）とし、制御棒の全反応度は、制限値の最小値（固体減速炉心  $1.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心  $1.5\% \Delta k/k$ ）、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（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。

- (2) 各炉心で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 となるレンジであったとする。
- (3) その他の条件については、「10-2-2-3 過渡変化の解析（低濃縮ウラン炉心）」の解析条件の(3)のケース A、(4)及び(5)と同じとする。

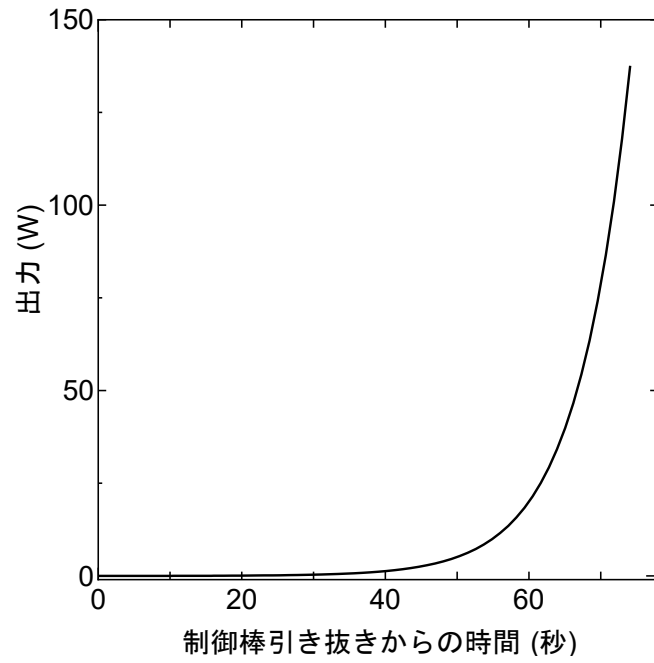
#### 10-2-3-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

解析結果を第 10-2-7 表、第 10-2-8 表及び第 10-2-6 図に示す。全ての炉心において、燃料の温度上昇量の最大値は、 $1^{\circ}\text{C}$ 以下であり、構造材のアルミニウム及び減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、初期温度を  $25^{\circ}\text{C}$ としたとき、燃料、構造材のアルミニウム、減速材の温度は、全て  $26^{\circ}\text{C}$ 以下となり、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。解析を行った温度の評価については「10-2-2-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）」と同じである。

第 10-2-7 表 固体減速架台炉心（高濃縮ウラン炉心）の出力運転中の  
制御棒の異常な引抜き解析結果

炉心名称	120W 超までの 時間 <sup>a</sup> (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)
E3. 7P	71. 50	138. 07	983. 7	$2. 50 \times 10^{-1}$
E3P	73. 10	137. 58	1006. 1	$2. 38 \times 10^{-1}$
E2P	74. 90	137. 06	1030. 9	$2. 05 \times 10^{-1}$
E1P	76. 41	136. 65	1051. 7	$1. 32 \times 10^{-1}$
EE1P	75. 83	136. 81	1043. 6	$6. 32 \times 10^{-2}$
EEE1P	74. 27	137. 24	1022. 3	$3. 80 \times 10^{-2}$
EN3P	70. 77	138. 30	974. 1	$1. 34 \times 10^{-1}$
ENN3P	70. 69	138. 33	973. 3	$1. 20 \times 10^{-1}$
ENNN3P	70. 71	138. 32	973. 3	$6. 50 \times 10^{-2}$
EEN1P	72. 83	137. 66	1002. 5	$3. 09 \times 10^{-2}$
EN1P	72. 91	137. 64	1003. 6	$4. 61 \times 10^{-2}$
ENN1P	72. 01	137. 91	991. 2	$2. 19 \times 10^{-2}$
E1. 5G	62. 82	141. 34	863. 6	$6. 38 \times 10^{-2}$
E1. 5G	63. 10	141. 21	867. 4	$6. 94 \times 10^{-2}$
E0. 5G	63. 26	141. 13	870. 0	$3. 78 \times 10^{-2}$
E3G	62. 21	141. 61	855. 0	$7. 52 \times 10^{-2}$

a 起動後 120W を超過してスクラム信号が発するまでの時間



第 10-2-6 図 出力運転中の制御棒の異常な引抜きの解析結果 (E3P 炉心)

第 10-2-8 表 軽水減速架台炉心（高濃縮ウラン炉心）の出力運転中の  
制御棒の異常な引抜きの解析結果

炉心名称	列	120W 超までの 時間 <sup>a</sup> (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)
C35G0	3	37.92	179.68	445.3	$7.76 \times 10^{-2}$
C35G0	4	38.24	178.51	449.7	$1.09 \times 10^{-1}$
C35G0	5	38.26	178.45	449.9	$1.11 \times 10^{-1}$
C35G0	6	38.19	178.68	449.0	$1.05 \times 10^{-1}$
C35G (2H <sub>2</sub> O)	5	37.66	180.68	441.7	$1.13 \times 10^{-1}$
C35G (5H <sub>2</sub> O)	5	36.48	185.71	425.5	$8.58 \times 10^{-2}$
C35G (10H <sub>2</sub> O)	5	37.15	182.76	434.7	$6.14 \times 10^{-2}$
C35G (15H <sub>2</sub> O)	5	37.85	179.95	444.3	$5.69 \times 10^{-2}$
C35G (5D <sub>2</sub> O)	5	36.68	184.80	428.2	$1.04 \times 10^{-1}$
C35G (10D <sub>2</sub> O)	5	36.25	186.79	422.4	$9.36 \times 10^{-2}$
C35G (15D <sub>2</sub> O)	5	36.26	186.71	422.6	$8.44 \times 10^{-2}$
C35G (20D <sub>2</sub> O)	5	36.44	185.85	425.1	$7.72 \times 10^{-2}$
C35G (30D <sub>2</sub> O)	5	36.87	183.92	431.0	$6.81 \times 10^{-2}$
C30G0	3	37.97	179.51	446.0	$5.40 \times 10^{-2}$
C30G0	5	38.37	178.05	451.5	$8.76 \times 10^{-2}$
C30G (2H <sub>2</sub> O)	5	37.89	179.80	444.9	$9.26 \times 10^{-2}$
C30G (5H <sub>2</sub> O)	5	36.63	185.03	427.6	$7.08 \times 10^{-2}$
C30G (10H <sub>2</sub> O)	5	37.23	182.41	435.8	$4.89 \times 10^{-2}$
C30G (15H <sub>2</sub> O)	5	37.96	179.56	445.8	$4.50 \times 10^{-2}$
C45G0	3	38.02	179.32	446.7	$9.43 \times 10^{-2}$
C45G0	5	37.62	180.86	441.1	$1.41 \times 10^{-1}$
C45G (5H <sub>2</sub> O)	5	36.00	188.03	419.0	$1.02 \times 10^{-1}$
C45G (10H <sub>2</sub> O)	5	36.71	184.64	428.7	$7.67 \times 10^{-2}$
C45G (15H <sub>2</sub> O)	5	37.29	182.17	436.6	$7.20 \times 10^{-2}$
C20G0	5	37.69	180.59	442.1	$2.84 \times 10^{-2}$
C25G0	5	37.77	180.29	443.1	$6.21 \times 10^{-2}$
C60G0	5	36.55	185.40	426.5	$1.53 \times 10^{-1}$

a 起動後 120W を超過してスクラム信号が発するまでの時間

### 10-2-3-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

解析結果を第 10-2-9 表、第 10-2-10 表に示す。固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、初期温度を 25℃としたとき、燃料温度上昇は約 0.68℃である。出力及び温度変化を第 10-2-7 図に示す。軽水減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは C45G(2H<sub>2</sub>O)4 列炉心で、燃料温度上昇は約 0.21℃である。出力及び温度変化を第 10-2-8 図に示す。両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+10%以下であり、判断基準を満足している。

**第 10-2-9 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の出力運転中の制御棒の異常な引抜きの解析結果**

炉心名称	120W 超までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
L5.5P-50	4.24	127.6	374.4	2.40×10 <sup>3</sup>	2.67×10 <sup>-1</sup>	6.10×10 <sup>-1</sup>
L5.5P-40	4.24	127.6	374.4	2.40×10 <sup>3</sup>	2.90×10 <sup>-1</sup>	6.68×10 <sup>-1</sup>
L5.5P-30	4.24	127.6	374.4	2.40×10 <sup>3</sup>	2.98×10 <sup>-1</sup>	6.83×10 <sup>-1</sup>
L4P-50	4.28	127.5	376.2	2.43×10 <sup>3</sup>	2.38×10 <sup>-1</sup>	5.32×10 <sup>-1</sup>
L4P-40	4.29	127.5	377.0	2.44×10 <sup>3</sup>	2.87×10 <sup>-1</sup>	6.29×10 <sup>-1</sup>
L4P-30	4.29	127.5	377.0	2.44×10 <sup>3</sup>	3.04×10 <sup>-1</sup>	6.64×10 <sup>-1</sup>
L3P-50	4.32	127.4	378.0	2.45×10 <sup>3</sup>	2.25×10 <sup>-1</sup>	4.77×10 <sup>-1</sup>
L3P-40	4.32	127.4	378.2	2.46×10 <sup>3</sup>	2.48×10 <sup>-1</sup>	5.33×10 <sup>-1</sup>
L3P-30	4.33	127.4	378.4	2.46×10 <sup>3</sup>	2.73×10 <sup>-1</sup>	5.68×10 <sup>-1</sup>
L2P-50	4.34	127.4	379.0	2.47×10 <sup>3</sup>	1.67×10 <sup>-1</sup>	4.28×10 <sup>-1</sup>
L2P-40	4.35	127.4	379.6	2.48×10 <sup>3</sup>	1.97×10 <sup>-1</sup>	4.35×10 <sup>-1</sup>
L2P-30	4.34	127.4	379.2	2.47×10 <sup>3</sup>	2.07×10 <sup>-1</sup>	4.81×10 <sup>-1</sup>
L1P-50	4.33	127.4	378.8	2.47×10 <sup>3</sup>	9.63×10 <sup>-2</sup>	3.12×10 <sup>-1</sup>
L1P-40	4.35	127.3	379.8	2.48×10 <sup>3</sup>	1.02×10 <sup>-1</sup>	2.56×10 <sup>-1</sup>
L1P-30	4.35	127.4	379.6	2.48×10 <sup>3</sup>	1.07×10 <sup>-1</sup>	3.28×10 <sup>-1</sup>
LL1P-50	4.32	127.4	378.4	2.46×10 <sup>3</sup>	4.06×10 <sup>-2</sup>	1.53×10 <sup>-1</sup>
LL1P-40	4.34	127.4	379.0	2.47×10 <sup>3</sup>	3.65×10 <sup>-2</sup>	1.33×10 <sup>-1</sup>
LL1P-30	4.33	127.4	378.8	2.47×10 <sup>3</sup>	4.23×10 <sup>-2</sup>	1.68×10 <sup>-1</sup>

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

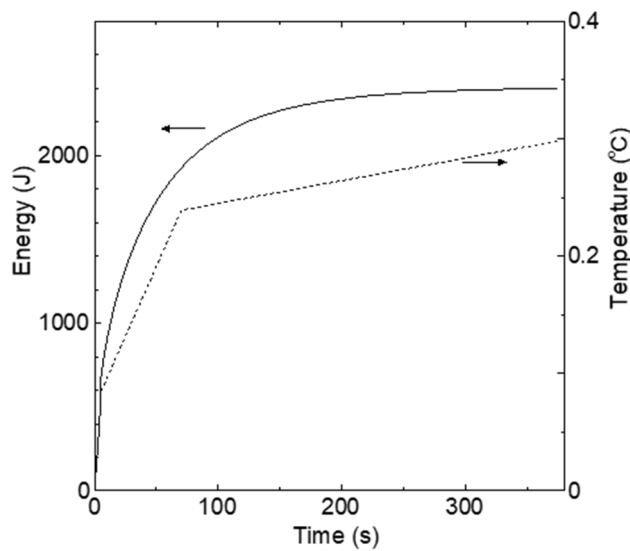
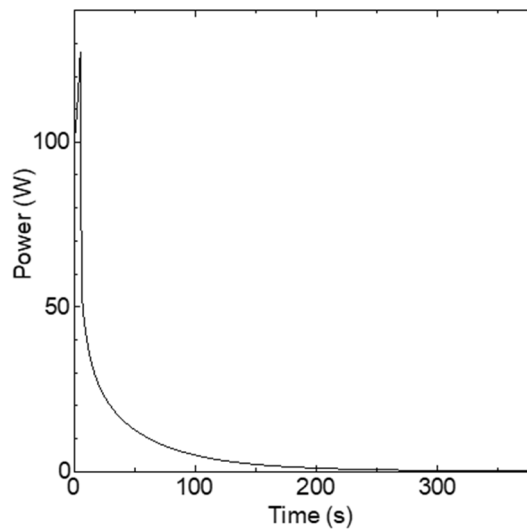
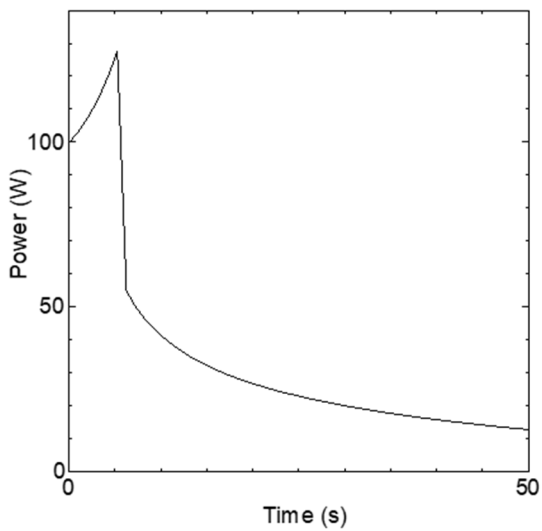
b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍、ただし LL1 炉心についてのみ 1.23 倍）を掛けた値

第 10-2-10 表 軽水減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の出力運転中の  
制御棒の異常な引抜き解析結果

炉心名称	列	120W 超まで の時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
C30G0	4	4.32	127.41	392.73	$2.64 \times 10^3$	$3.86 \times 10^{-2}$	$9.79 \times 10^{-2}$
	5	4.32	127.41	392.73	$2.64 \times 10^3$	$3.97 \times 10^{-2}$	$9.46 \times 10^{-2}$
C35G0	4	4.33	127.39	393.15	$2.65 \times 10^3$	$5.38 \times 10^{-2}$	$1.22 \times 10^{-1}$
	5	4.33	127.40	392.94	$2.65 \times 10^3$	$5.34 \times 10^{-2}$	$1.23 \times 10^{-1}$
C45G0	4	4.32	127.41	392.52	$2.64 \times 10^3$	$7.67 \times 10^{-2}$	$1.53 \times 10^{-1}$
	5	4.32	127.41	392.52	$2.64 \times 10^3$	$7.49 \times 10^{-2}$	$1.58 \times 10^{-1}$
C60G0	4	4.29	127.46	391.26	$2.62 \times 10^3$	$7.24 \times 10^{-2}$	$1.32 \times 10^{-1}$
	5	4.29	127.46	391.26	$2.62 \times 10^3$	$7.13 \times 10^{-2}$	$1.35 \times 10^{-1}$
C45G (2H <sub>2</sub> O)	4	4.30	127.45	391.47	$2.63 \times 10^3$	$7.93 \times 10^{-2}$	$2.08 \times 10^{-1}$
C45G (5H <sub>2</sub> O)		4.25	127.54	389.15	$2.59 \times 10^3$	$6.06 \times 10^{-2}$	$2.01 \times 10^{-1}$
C45G (6H <sub>2</sub> O)		4.25	127.54	389.15	$2.59 \times 10^3$	$5.47 \times 10^{-2}$	$1.80 \times 10^{-1}$
C45G (7H <sub>2</sub> O)		4.25	127.53	389.36	$2.59 \times 10^3$	$5.01 \times 10^{-2}$	$1.59 \times 10^{-1}$
C45G (10H <sub>2</sub> O)		4.28	127.48	390.63	$2.61 \times 10^3$	$4.29 \times 10^{-2}$	$1.14 \times 10^{-1}$
C45G (15H <sub>2</sub> O)		4.30	127.44	391.89	$2.63 \times 10^3$	$3.95 \times 10^{-2}$	$8.43 \times 10^{-2}$
C45G (2H <sub>2</sub> O)	5	4.29	127.46	391.26	$2.62 \times 10^3$	$7.90 \times 10^{-2}$	$2.03 \times 10^{-1}$
C45G (5H <sub>2</sub> O)		4.23	127.57	388.30	$2.58 \times 10^3$	$6.17 \times 10^{-2}$	$2.06 \times 10^{-1}$
C45G (6H <sub>2</sub> O)		4.23	127.58	388.09	$2.58 \times 10^3$	$5.56 \times 10^{-2}$	$1.88 \times 10^{-1}$
C45G (7H <sub>2</sub> O)		4.23	127.57	388.30	$2.58 \times 10^3$	$5.07 \times 10^{-2}$	$1.68 \times 10^{-1}$
C45G (10H <sub>2</sub> O)		4.26	127.51	389.78	$2.60 \times 10^3$	$4.28 \times 10^{-2}$	$1.24 \times 10^{-1}$
C45G (15H <sub>2</sub> O)		4.30	127.45	391.47	$2.63 \times 10^3$	$3.88 \times 10^{-2}$	$9.25 \times 10^{-2}$
C60G (2H <sub>2</sub> O)	4	4.27	127.51	390.00	$2.60 \times 10^3$	$7.02 \times 10^{-2}$	$1.83 \times 10^{-1}$
C60G (5H <sub>2</sub> O)		4.23	127.58	388.09	$2.58 \times 10^3$	$5.33 \times 10^{-2}$	$1.64 \times 10^{-1}$
C60G (7H <sub>2</sub> O)		4.23	127.56	388.52	$2.58 \times 10^3$	$4.51 \times 10^{-2}$	$1.28 \times 10^{-1}$
C60G (10H <sub>2</sub> O)		4.26	127.51	389.79	$2.60 \times 10^3$	$3.98 \times 10^{-2}$	$9.23 \times 10^{-2}$
C60G (15H <sub>2</sub> O)		4.28	127.47	390.84	$2.62 \times 10^3$	$3.72 \times 10^{-2}$	$6.94 \times 10^{-2}$

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」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値



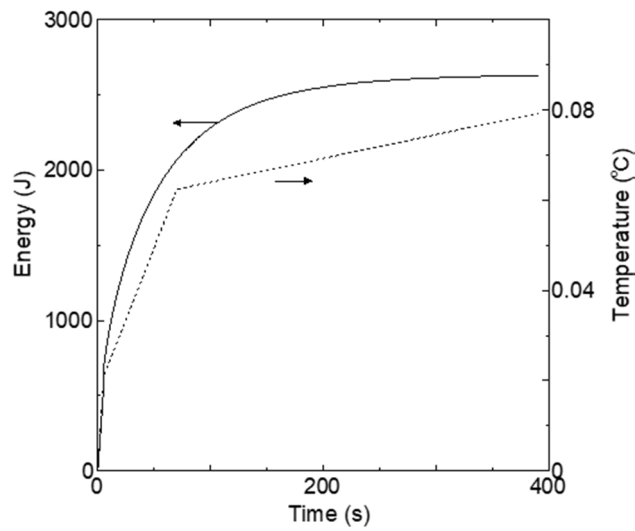
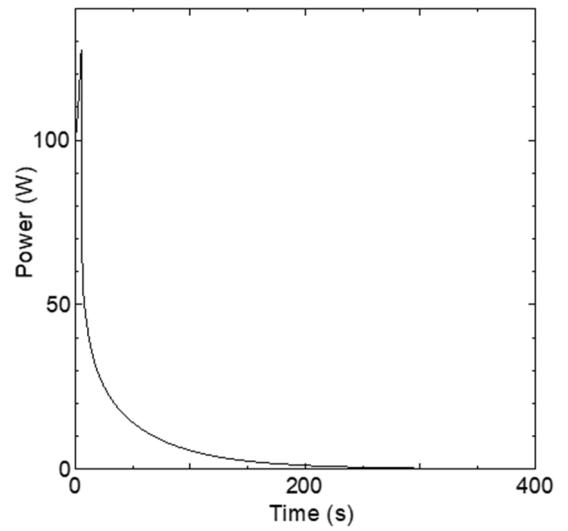
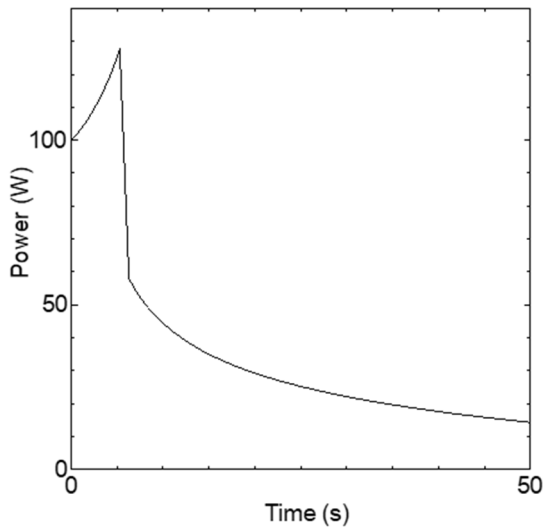
第 10-2-7 図 出力運転中の制御棒の異常な引抜き

上図：出力変化（スケールの違う 2 つの図）

下図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（固体減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：L5.5P-30 炉心）





第 10-2-8 図 出力運転中の制御棒の異常な引抜き

上図：出力変化（スケールの違う 2 つの図）

下図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（軽水減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：C45G(2H<sub>2</sub>O)4列炉心）

## 10-2-4 実験物の異常等による反応度の付加

### 10-2-4-1 発生状況及び防止対策

原子炉の出力運転中に、炉心に直接又は燃料体に取り付けて挿入する照射物の位置が変化した場合、あるいは軽水減速炉心の炉心周辺に設置した挿入管に軽水が流入する又は位置が移動する等の異常が発生した場合、炉心に反応度が印加され、原子炉出力が急上昇するため、燃料及び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。このような過度の反応度印加を防止し、また、万一発生した場合でもその影響を限定するために、次のような対策を講じている。

- (1) 炉心に直接又は燃料体にテープ等で取付けて挿入する照射物については、その位置が変化しないように、予め粘着テープ等で十分に固定する、又は隣接する燃料集合体を密着させて、その間の照射物を固定する等の措置を取る。
- (2) 軽水減速炉心の炉心周辺に設置した挿入管は、使用前に外観に異常がないことを確認する。またボルトで固定することにより、使用中に移動することがないように措置を取る。
- (3) 急激な反応度印加に伴い、炉周期が 30 秒以下になれば、インターロックにより制御棒の引抜きは制限されるとともに、警報が発報し運転員に異常を知らせる。さらに、15 秒以下になれば一せい挿入、10 秒以下になればスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。また、出力が線型出力計の各レンジの 110%以上のとき一せい挿入、120%以上のときスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は、作動しないとする。

以上の対策により、実験物の異常等による反応度印加の発生防止とその影響低減を行っているが、ここでは、低濃縮ウラン炉心において、照射物が炉心から落下する、又は挿入管が破損して内部に水が流入する等により反応度印加が発生した場合の影響を評価することとする。

なお、高濃縮ウラン炉心については、燃料体に取り付けて挿入する照射物は使用しないこと、及び挿入管は異常が生じて炉心に反応度の影響を及ぼさない位置に設置することが規定されているため、本解析は実施しない。

### 10-2-4-2 過渡変化の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における実験物の異常等による反応度の付加については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。なお、「8-9-5 炉心装荷物」に記載したとおり、照射物と挿入管に異常が生じたときに印加される反応度は、同時に異常が生じた場合での値として制限しているので、以下のシナリオでは、照射物に異常が生じたとして記載する。

- (1) 固体減速炉心、軽水減速炉心ともに照射物を取り付けた状態において過剰反応度は  $0\% \Delta k/k$  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、全て制限値の最小値 ( $1\% \Delta k/k$ ) であるとする。照射物の反応度は、固体減速炉心については絶対値で  $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心については絶対値で  $0.5\% \Delta k/k$  とする。
- (2) 照射物を装着した状態で  $0.01W$  の臨界状態を保持しており、その際の線型出力計の指示値は、

100%で出力が 100W となるレンジであったとする。

(3) 【ケース A】

炉心に取り付けていた照射物が炉心から落下し、照射物の最大反応度（固体減速炉心で  $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心で  $0.5\% \Delta k/k$ ）がステップ状に加わるものとする。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には、期待しないものとする。

【ケース B】

炉心に取り付けていた照射物が炉心からゆっくり落下し、照射物の最大反応度（固体減速炉心で  $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心で  $0.5\% \Delta k/k$ ）が 1 時間（3600 秒）をかけてランプ状に加わるものとする。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には、期待しないものとする。

- (4) 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とする。ただし、指示値の 110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。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ものとする。固体減速炉心の中心架台及び軽水減速炉心のダンプ弁は、作動しないとする。

#### 10-2-4-3 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

【ケース A】

解析結果を第 10-2-11 表及び第 10-2-12 表に示す。固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、初期温度を  $25^{\circ}\text{C}$  としたとき、燃料温度上昇は約  $0.56^{\circ}\text{C}$  である。出力及び温度変化を第 10-2-9 図に示す。軽水減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは C45G(2H<sub>2</sub>O)4 列炉心で、燃料温度上昇は約  $0.14^{\circ}\text{C}$  である。出力及び温度変化を第 10-2-10 図に示す。両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+20%以下であり、判断基準を満足している。

【ケース B】

解析結果を第 10-2-13 表及び第 10-2-14 表に示す。固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、初期温度を  $25^{\circ}\text{C}$  としたとき、燃料温度上昇は約  $2.6^{\circ}\text{C}$  である。出力及び温度変化を第 10-2-11 図に示す。軽水減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは C45G(2H<sub>2</sub>O)4 列炉心で、燃料温度上昇は約  $0.59^{\circ}\text{C}$  である。出力及び温度変化を第 10-2-12 図に示す。両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+10%以下であり、判断基準を満足している。

第 10-2-11 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の実験物の異常等による  
反応度の付加の解析結果（ケース A）

炉心名称	120W 超までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
L5.5P-50	58.0	138.8	388.3	$1.98 \times 10^3$	$2.20 \times 10^{-1}$	$5.04 \times 10^{-1}$
L5.5P-40	58.0	138.8	388.3	$1.98 \times 10^3$	$2.40 \times 10^{-1}$	$5.52 \times 10^{-1}$
L5.5P-30	58.0	138.8	388.3	$1.98 \times 10^3$	$2.47 \times 10^{-1}$	$5.64 \times 10^{-1}$
L4P-50	59.7	138.3	394.1	$2.04 \times 10^3$	$2.00 \times 10^{-1}$	$4.46 \times 10^{-1}$
L4P-40	60.6	138.0	396.6	$2.06 \times 10^3$	$2.42 \times 10^{-1}$	$5.31 \times 10^{-1}$
L4P-30	60.6	138.0	396.6	$2.06 \times 10^3$	$2.57 \times 10^{-1}$	$5.60 \times 10^{-1}$
L3P-50	61.5	137.7	399.8	$2.09 \times 10^3$	$1.91 \times 10^{-1}$	$4.06 \times 10^{-1}$
L3P-40	61.7	137.7	400.4	$2.09 \times 10^3$	$2.12 \times 10^{-1}$	$4.54 \times 10^{-1}$
L3P-30	62.0	137.6	401.1	$2.10 \times 10^3$	$2.33 \times 10^{-1}$	$4.85 \times 10^{-1}$
L2P-50	62.4	137.5	403.2	$2.12 \times 10^3$	$1.43 \times 10^{-1}$	$3.67 \times 10^{-1}$
L2P-40	63.0	137.3	405.0	$2.13 \times 10^3$	$1.69 \times 10^{-1}$	$3.75 \times 10^{-1}$
L2P-30	62.6	137.4	403.8	$2.12 \times 10^3$	$1.78 \times 10^{-1}$	$4.13 \times 10^{-1}$
L1P-50	62.0	137.6	402.6	$2.11 \times 10^3$	$8.24 \times 10^{-2}$	$2.67 \times 10^{-1}$
L1P-40	63.0	137.3	405.8	$2.14 \times 10^3$	$8.77 \times 10^{-2}$	$2.21 \times 10^{-1}$
L1P-30	62.8	137.3	405.2	$2.13 \times 10^3$	$9.21 \times 10^{-2}$	$2.82 \times 10^{-1}$
LL1P-50	61.5	137.7	401.4	$2.10 \times 10^3$	$3.46 \times 10^{-2}$	$1.31 \times 10^{-1}$
LL1P-40	62.1	137.5	403.3	$2.11 \times 10^3$	$3.13 \times 10^{-2}$	$1.14 \times 10^{-1}$
LL1P-30	61.9	137.6	402.6	$2.11 \times 10^3$	$3.61 \times 10^{-2}$	$1.43 \times 10^{-1}$

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」及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）を掛けた値

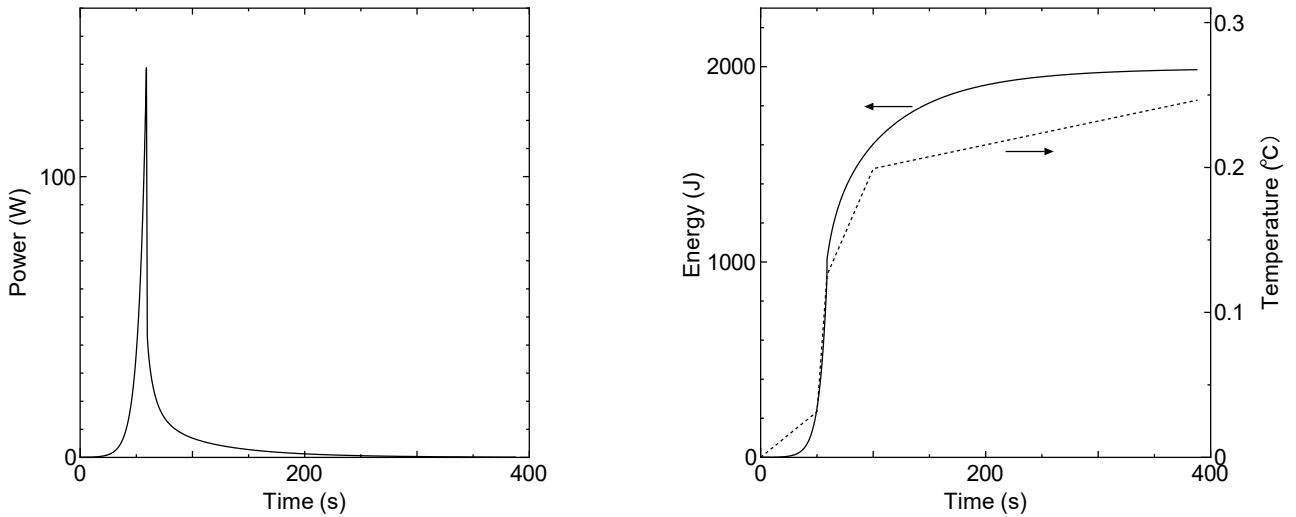
第 10-2-12 表 軽水減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の実験物の異常等による

反応度の付加の解析結果（ケース A）

炉心名称	列	120W 超まで の時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
C30G0	4	19.9	180.0	481.7	$1.76 \times 10^3$	$2.57 \times 10^{-2}$	$6.52 \times 10^{-2}$
	5	19.9	180.0	481.6	$1.76 \times 10^3$	$2.65 \times 10^{-2}$	$6.31 \times 10^{-2}$
C35G0	4	20.1	179.3	483.0	$1.77 \times 10^3$	$3.60 \times 10^{-2}$	$8.18 \times 10^{-2}$
	5	20.0	179.6	482.3	$1.77 \times 10^3$	$3.57 \times 10^{-2}$	$8.21 \times 10^{-2}$
C45G0	4	19.8	180.2	480.5	$1.76 \times 10^3$	$5.11 \times 10^{-2}$	$1.02 \times 10^{-1}$
	5	19.8	180.2	480.6	$1.76 \times 10^3$	$4.99 \times 10^{-2}$	$1.05 \times 10^{-1}$
C60G0	4	19.3	182.3	476.5	$1.73 \times 10^3$	$4.78 \times 10^{-2}$	$8.68 \times 10^{-2}$
	5	19.3	182.3	476.6	$1.73 \times 10^3$	$4.71 \times 10^{-2}$	$8.89 \times 10^{-2}$
C45G (2H <sub>2</sub> O)	4	19.4	182.0	477.2	$1.73 \times 10^3$	$5.24 \times 10^{-2}$	$1.37 \times 10^{-1}$
C45G (5H <sub>2</sub> O)		18.3	186.3	469.9	$1.68 \times 10^3$	$3.94 \times 10^{-2}$	$1.30 \times 10^{-1}$
C45G (6H <sub>2</sub> O)		18.3	186.3	469.9	$1.68 \times 10^3$	$3.55 \times 10^{-2}$	$1.17 \times 10^{-1}$
C45G (7H <sub>2</sub> O)		18.4	185.9	470.6	$1.72 \times 10^3$	$3.31 \times 10^{-2}$	$1.05 \times 10^{-1}$
C45G (10H <sub>2</sub> O)		18.9	183.5	474.7	$1.72 \times 10^3$	$2.82 \times 10^{-2}$	$7.49 \times 10^{-2}$
C45G (15H <sub>2</sub> O)		19.5	181.3	478.9	$1.75 \times 10^3$	$2.62 \times 10^{-2}$	$5.59 \times 10^{-2}$
C45G (2H <sub>2</sub> O)	5	19.3	182.3	476.5	$1.73 \times 10^3$	$5.21 \times 10^{-2}$	$1.34 \times 10^{-1}$
C45G (5H <sub>2</sub> O)		17.9	188.0	467.3	$1.67 \times 10^3$	$3.99 \times 10^{-2}$	$1.33 \times 10^{-1}$
C45G (6H <sub>2</sub> O)		17.8	188.4	466.6	$1.66 \times 10^3$	$3.59 \times 10^{-2}$	$1.21 \times 10^{-1}$
C45G (7H <sub>2</sub> O)		17.9	188.0	467.2	$1.67 \times 10^3$	$3.28 \times 10^{-2}$	$1.09 \times 10^{-1}$
C45G (10H <sub>2</sub> O)		18.6	185.1	472.0	$1.70 \times 10^3$	$2.79 \times 10^{-2}$	$8.09 \times 10^{-2}$
C45G (15H <sub>2</sub> O)		19.3	182.0	477.5	$1.74 \times 10^3$	$2.56 \times 10^{-2}$	$6.11 \times 10^{-2}$
C60G (2H <sub>2</sub> O)	4	18.7	184.6	472.5	$1.70 \times 10^3$	$4.59 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-1}$
C60G (5H <sub>2</sub> O)		17.8	188.3	466.0	$1.66 \times 10^3$	$3.43 \times 10^{-2}$	$1.05 \times 10^{-1}$
C60G (7H <sub>2</sub> O)		18.0	187.5	467.8	$1.67 \times 10^3$	$2.92 \times 10^{-2}$	$8.26 \times 10^{-2}$
C60G (10H <sub>2</sub> O)		18.6	185.0	472.0	$1.70 \times 10^3$	$2.60 \times 10^{-2}$	$6.03 \times 10^{-2}$
C60G (15H <sub>2</sub> O)		19.1	183.0	475.5	$1.72 \times 10^3$	$2.45 \times 10^{-2}$	$4.57 \times 10^{-2}$

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

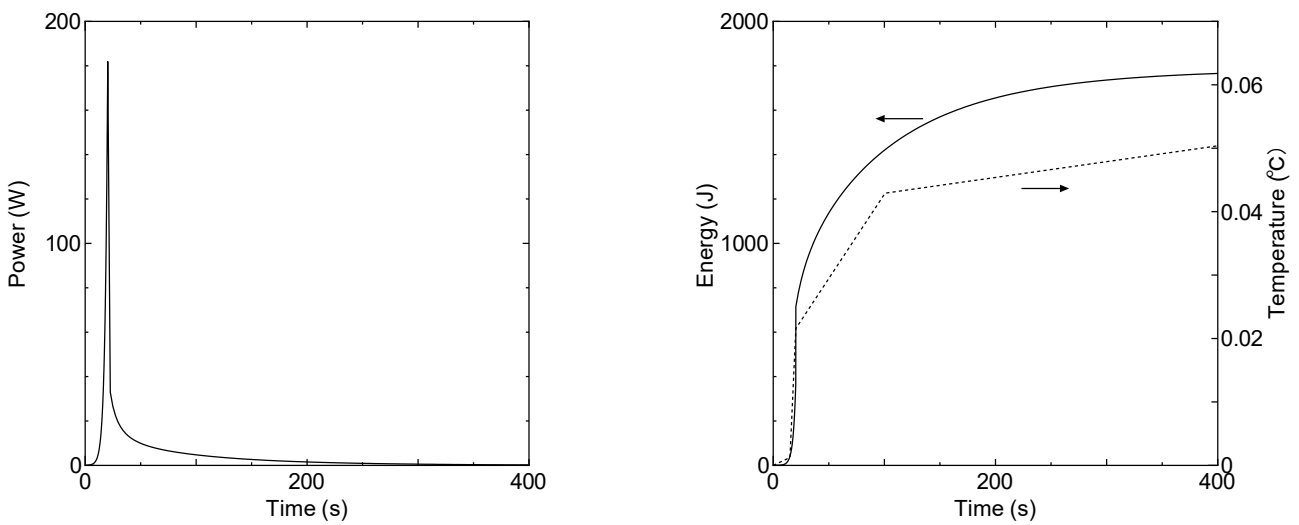
b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値



第 10-2-9 図 実験物の異常による反応度の付加 (ケース A)

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(固体減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : L5. 5P-30 炉心)



第 10-2-10 図 実験物の異常による反応度の付加 (ケース A)

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(軽水減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : C45G (2H<sub>2</sub>O) 4 列炉心)

第 10-2-13 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の実験物の異常等による  
反応度の付加の解析結果（ケース B）

炉心名称	120W 超までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
L5.5P-50	1173.7	121.9	1507.2	$9.23 \times 10^3$	$1.02 \times 10^0$	$2.34 \times 10^0$
L5.5P-40	1175.0	121.9	1508.4	$9.24 \times 10^3$	$1.12 \times 10^0$	$2.57 \times 10^0$
L5.5P-30	1174.6	121.9	1508.0	$9.22 \times 10^3$	$1.15 \times 10^0$	$2.62 \times 10^0$
L4P-50	1180.7	122.0	1516.2	$9.21 \times 10^3$	$9.04 \times 10^{-1}$	$2.02 \times 10^0$
L4P-40	1184.7	121.9	1521.2	$9.27 \times 10^3$	$1.09 \times 10^0$	$2.39 \times 10^0$
L4P-30	1184.9	121.9	1521.5	$9.28 \times 10^3$	$1.16 \times 10^0$	$2.52 \times 10^0$
L3P-50	1187.2	122.0	1524.9	$9.23 \times 10^3$	$8.45 \times 10^{-1}$	$1.80 \times 10^0$
L3P-40	1187.8	122.0	1525.6	$9.23 \times 10^3$	$9.32 \times 10^{-1}$	$2.00 \times 10^0$
L3P-30	1188.7	122.0	1526.9	$9.24 \times 10^3$	$1.03 \times 10^0$	$2.13 \times 10^0$
L2P-50	1187.4	122.1	1526.1	$9.10 \times 10^3$	$6.16 \times 10^{-1}$	$1.58 \times 10^0$
L2P-40	1190.6	122.0	1530.1	$9.15 \times 10^3$	$7.26 \times 10^{-1}$	$1.61 \times 10^0$
L2P-30	1188.8	122.0	1527.8	$9.13 \times 10^3$	$7.65 \times 10^{-1}$	$1.78 \times 10^0$
L1P-50	1183.6	122.1	1521.9	$8.97 \times 10^3$	$3.50 \times 10^{-1}$	$1.13 \times 10^0$
L1P-40	1187.9	122.1	1527.4	$9.01 \times 10^3$	$3.69 \times 10^{-1}$	$9.30 \times 10^{-1}$
L1P-30	1187.0	122.1	1526.2	$9.00 \times 10^3$	$3.88 \times 10^{-1}$	$1.19 \times 10^0$
LL1P-50	1180.2	122.2	1517.8	$8.89 \times 10^3$	$1.47 \times 10^{-1}$	$5.54 \times 10^{-1}$
LL1P-40	1182.7	122.1	1521.1	$8.91 \times 10^3$	$1.32 \times 10^{-1}$	$4.80 \times 10^{-1}$
LL1P-30	1181.8	122.1	1520.0	$8.90 \times 10^3$	$1.52 \times 10^{-1}$	$6.06 \times 10^{-1}$

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」及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）を掛けた値

第 10-2-14 表 軽水減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）の実験物の異常等による

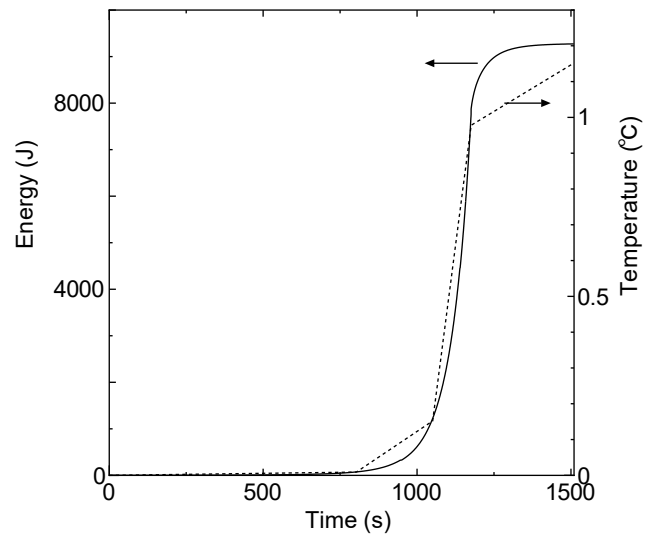
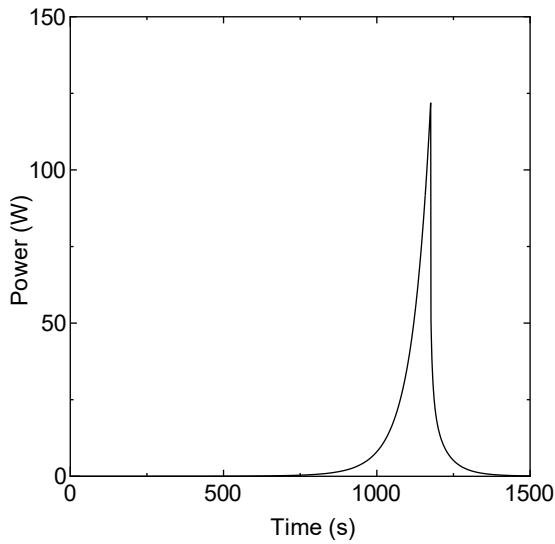
反応度の付加の解析結果（ケース B）

炉心名称	列	120W 超まで の時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
C30G0	4	960.1	122.7	1298.0	$7.39 \times 10^3$	$1.08 \times 10^{-1}$	$2.74 \times 10^{-1}$
	5	960.1	122.7	1298.0	$7.39 \times 10^3$	$1.11 \times 10^{-1}$	$2.64 \times 10^{-1}$
C35G0	4	961.8	122.7	1300.3	$7.42 \times 10^3$	$1.51 \times 10^{-1}$	$3.42 \times 10^{-1}$
	5	961.1	122.7	1299.3	$7.41 \times 10^3$	$1.49 \times 10^{-1}$	$3.44 \times 10^{-1}$
C45G0	4	960.3	122.7	1298.0	$7.43 \times 10^3$	$2.16 \times 10^{-1}$	$4.29 \times 10^{-1}$
	5	960.3	122.7	1298.0	$7.42 \times 10^3$	$2.72 \times 10^{-2}$	$5.75 \times 10^{-2}$
C60G0	4	955.6	122.7	1291.7	$7.37 \times 10^3$	$2.03 \times 10^{-1}$	$3.70 \times 10^{-1}$
	5	955.6	122.7	1291.6	$7.37 \times 10^3$	$2.00 \times 10^{-1}$	$3.78 \times 10^{-1}$
C45G (2H <sub>2</sub> O)	4	956.4	122.7	1292.8	$7.38 \times 10^3$	$2.23 \times 10^{-1}$	$5.85 \times 10^{-1}$
C45G (5H <sub>2</sub> O)		947.5	122.7	1280.8	$7.26 \times 10^3$	$1.70 \times 10^{-1}$	$5.63 \times 10^{-1}$
C45G (6H <sub>2</sub> O)		947.1	122.8	1280.3	$7.25 \times 10^3$	$1.53 \times 10^{-1}$	$5.04 \times 10^{-1}$
C45G (7H <sub>2</sub> O)		947.9	122.7	1281.4	$7.26 \times 10^3$	$1.40 \times 10^{-1}$	$4.44 \times 10^{-1}$
C45G (10H <sub>2</sub> O)		952.6	122.7	1287.8	$7.31 \times 10^3$	$1.20 \times 10^{-1}$	$3.19 \times 10^{-1}$
C45G (15H <sub>2</sub> O)		957.3	122.7	1294.1	$7.37 \times 10^3$	$1.11 \times 10^{-1}$	$2.36 \times 10^{-1}$
C45G (2H <sub>2</sub> O)	5	955.6	122.7	1291.6	$7.36 \times 10^3$	$2.22 \times 10^{-1}$	$5.71 \times 10^{-1}$
C45G (5H <sub>2</sub> O)		943.7	122.8	1275.7	$7.19 \times 10^3$	$1.72 \times 10^{-1}$	$5.74 \times 10^{-1}$
C45G (6H <sub>2</sub> O)		942.9	122.8	1274.7	$7.19 \times 10^3$	$1.55 \times 10^{-1}$	$5.23 \times 10^{-1}$
C45G (7H <sub>2</sub> O)		943.9	122.8	1276.0	$7.20 \times 10^3$	$1.42 \times 10^{-1}$	$4.70 \times 10^{-1}$
C45G (10H <sub>2</sub> O)		949.4	122.7	1283.5	$7.27 \times 10^3$	$1.20 \times 10^{-1}$	$3.47 \times 10^{-1}$
C45G (15H <sub>2</sub> O)		955.7	122.7	1292.0	$7.35 \times 10^3$	$1.09 \times 10^{-1}$	$2.59 \times 10^{-1}$
C60G (2H <sub>2</sub> O)	4	950.8	122.7	1285.2	$7.31 \times 10^3$	$1.97 \times 10^{-1}$	$5.14 \times 10^{-1}$
C60G (5H <sub>2</sub> O)		943.6	122.8	1275.4	$7.21 \times 10^3$	$1.49 \times 10^{-1}$	$4.58 \times 10^{-1}$
C60G (7H <sub>2</sub> O)		945.0	122.8	1277.4	$7.23 \times 10^3$	$1.26 \times 10^{-1}$	$3.57 \times 10^{-1}$
C60G (10H <sub>2</sub> O)		949.6	122.7	1283.7	$7.28 \times 10^3$	$1.11 \times 10^{-1}$	$2.58 \times 10^{-1}$
C60G (15H <sub>2</sub> O)		953.4	122.7	1288.9	$7.32 \times 10^3$	$1.04 \times 10^{-1}$	$1.94 \times 10^{-1}$

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」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値

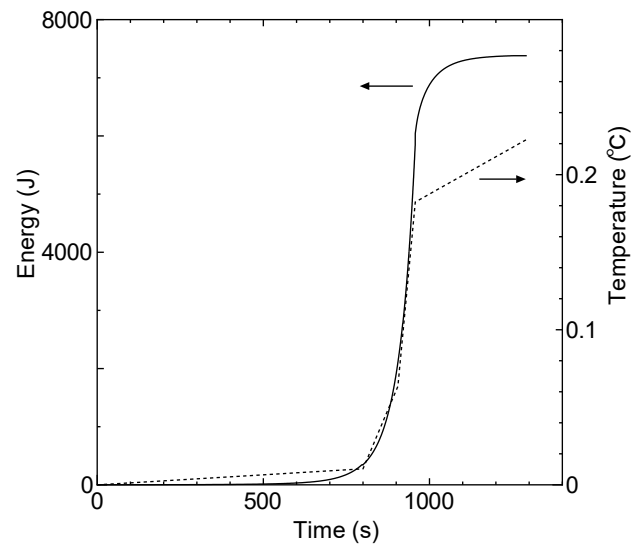
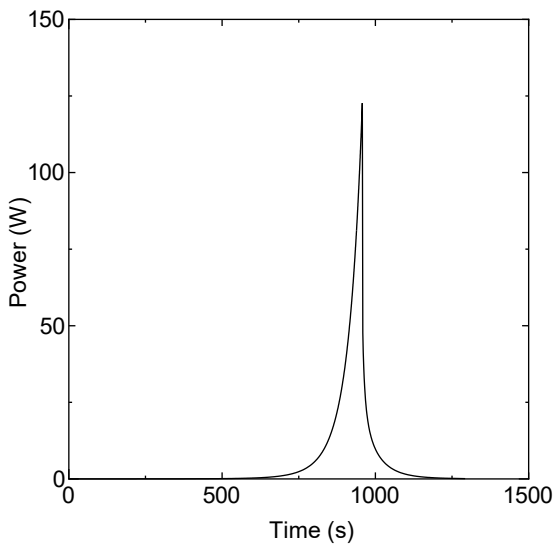




第 10-2-11 図 実験物の異常による反応度の付加 (ケース B)

左図 : 出力変化、右図 : 積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(固体減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : L5. 5P-30 炉心)



第 10-2-12 図 実験物の異常による反応度の付加 (ケース B)

左図 : 出力変化、右図 : 積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(軽水減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : C45G (2H<sub>2</sub>O) 4 列炉心)

## 10-2-5 商用電源喪失

### 10-2-5-1 発生状況及び防止対策

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

- (1) 複合原子力科学研究所に接続する電力系統の送電線は、独立した 2 回線からなっており、研究所外の変電所等のトラブルがあっても、商用電源が喪失し難いようになっている。
- (2) 商用電源喪失により、制御棒は電磁石電源が遮断され、自重で落下する。また、固体減速架台運転中は、中心架台の油圧ポンプ電源が遮断され、中心架台が自重で落下する。軽水減速架台運転中は、ダンプ弁の保持電磁石電源が遮断され、弁が自重で下降して、炉心タンク内の水は、ダンプタンクに排水される。
- (3) 商用電源喪失時に安全上必要な機器、監視装置の電源を確保するために、非常用電源設備を備えている。

### 10-2-5-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における商用電源喪失については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 軽水減速炉心の C35G0（5 列）炉心において、1 ヶ月の最大積算出力となる運転を行った直後に商用電源が喪失したとする。
- (2) 過剰反応度は制限値の最大値（ $0.5\% \Delta k/k$ ）、制御棒の全反応度は制限値の最小値（ $1.5\% \Delta k/k$ ）、及びダンプ弁の反応度は制限値の最小値（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (3) 商用電源喪失に伴う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、ダンプ弁保持の電磁石電源断により、ダンプ弁が開となる。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ものとする。また、ダンプ弁の開動作により、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ものとする。

### 10-2-5-3 過渡変化の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における商用電源喪失については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 添付書類八の「8-2-1 炉心」に示した炉心のうち、臨界量の最も少ない固体減速炉心である L5.5P-30 炉心、軽水減速炉心の C45G(2H<sub>2</sub>O)4 列炉心において、1 ヶ月の最大積算出力となる運転を行った直後に商用電源が喪失したとする。
- (2) 固体減速炉心、軽水減速炉心ともに、過剰反応度は、制限値の最大値（固体減速炉心  $0.35\% \Delta k/k$ 、軽水減速炉心  $0.5\% \Delta k/k$ ）とし、制御棒の全反応度は制限値の最小値（固体減速

速炉心 1.35% $\Delta k/k$ 、軽水減速炉心 1.5% $\Delta k/k$ ) であるとする。さらに、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 (1% $\Delta k/k$ ) であるとする。

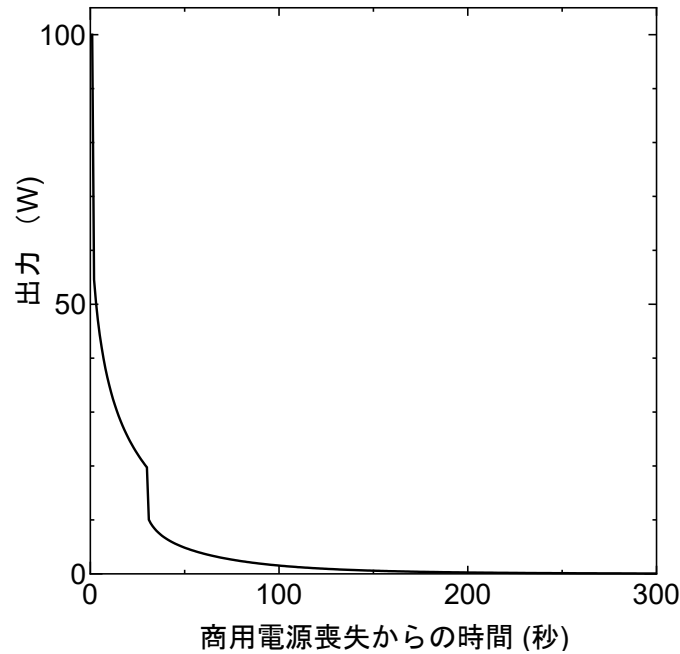
- (3) 商用電源喪失に伴い、制御棒の電磁石電源断により最大の反応度をもつ1本以外の5本が炉心に挿入され、制御棒落下により、1秒後にステップ状の負の反応度が加わるものとする。軽水減速架台では、ダンプ弁保持の電磁石電源断によりダンプ弁が開となり、30秒後に燃料領域の水が全て排出してステップ状の負の反応度が加わるものとする。固体減速架台では、中心架台保持の油圧ポンプ電源断により中心架台が落下し、12秒後に最上位から105cm落下してステップ状の負の反応度が加わるものとする。

#### 10-2-5-4 解析結果 (高濃縮ウラン炉心)

解析結果を第10-2-15表及び第10-2-4図に示す。停止後1時間後までの積算出力は、核分裂による発熱が約1389J、核分裂生成物による発熱が約1890Jとなり、この発生熱が全て燃料の温度上昇に用いられた場合であっても、燃料上昇温度は1°C以下となる。構造材のアルミニウム及び減速材の温度上昇量は、それより小さい値となり、初期温度を25°Cとしたとき、燃料、構造材のアルミニウム、減速材の温度は全て約26°C以下となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。解析を行った温度の評価については、「10-2-2-4 解析結果 (高濃縮ウラン炉心)」と同じである。

第10-2-15表 C35G0 (5列) 炉心 (高濃縮ウラン炉心) の  
商用電源喪失後に発生する熱量

停止時間 (min)	核分裂による発熱 (W)	核分裂生成物による発熱 (W)
1	10.6	2.1
5	0.29	1.1
10	0.0082	0.68
30	0.0001	0.33
60	0	0.15
合計	1389 (J)	1890 (J)



第 10-2-13 図 商用電源喪失後に核分裂により発生する熱量  
(C35G0 (5 列) (高濃縮ウラン) 炉心)

#### 10-2-5-5 解析結果 (低濃縮ウラン炉心)

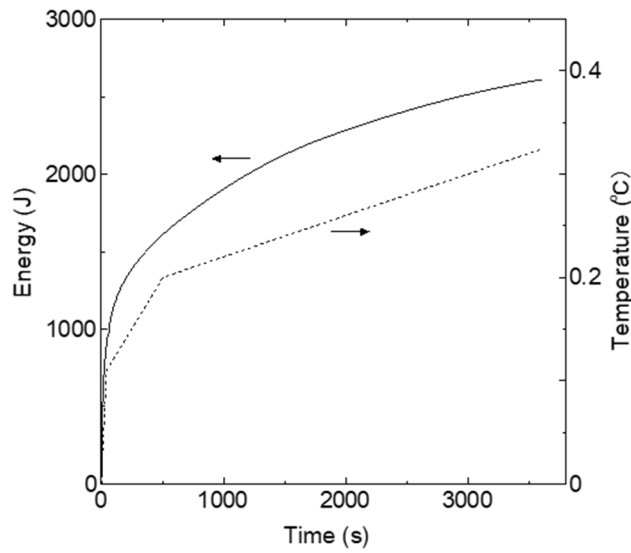
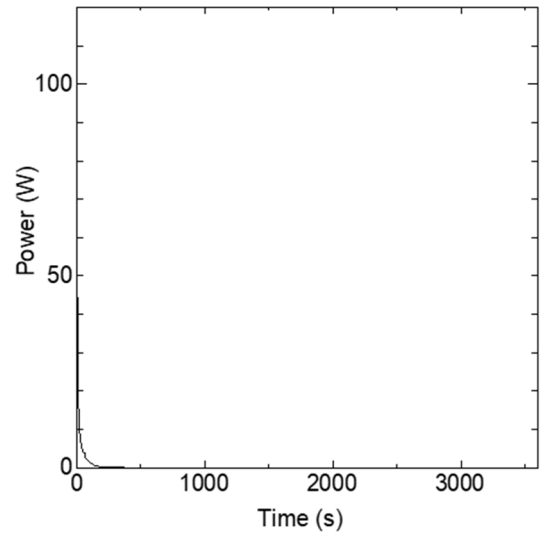
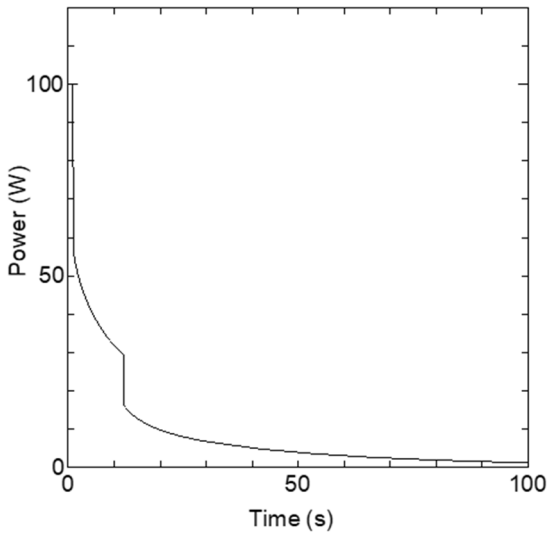
解析結果を第 10-2-16 表に示す。固体減速炉心である L5. 5-P30 炉心の燃料温度上昇は、約 0. 74℃である。出力及び温度変化を第 10-2-14 図に示す。軽水減速炉心である C45G (2H<sub>2</sub>O) 4 列炉心の燃料温度上昇は、初期温度を 25℃としたとき、約 0. 24℃である。出力及び温度変化を第 10-2-15 図に示す。両炉心ともに、減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+10%以下であり、判断基準を満足している。

第 10-2-16 表 商用電源喪失による解析結果

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 <sup>a</sup> (℃)	温度上昇 <sup>b</sup> (℃)
L5. 5P-30	253. 4	1. 00 × 10 <sup>3</sup>	1. 61 × 10 <sup>3</sup>	3. 24 × 10 <sup>-1</sup>	7. 43 × 10 <sup>-1</sup>
C45G (2H <sub>2</sub> O) 4 列	262. 2	1. 36 × 10 <sup>3</sup>	1. 61 × 10 <sup>3</sup>	8. 97 × 10 <sup>-1</sup>	2. 36 × 10 <sup>-1</sup>

a 温度上昇が炉心全体で均一であるとしたときの温度上昇

b この炉心の「最大値／平均値」(L5. 5P-30 炉心では 2. 6 倍、C45G (2H<sub>2</sub>O) 4 列炉心では 2. 0 倍) 及び燃料板内の出力分布を考慮する係数 (L5. 5P-30 炉心では 1. 09 倍、C45G (2H<sub>2</sub>O) 4 列炉心では 1. 01 倍) を掛けた値

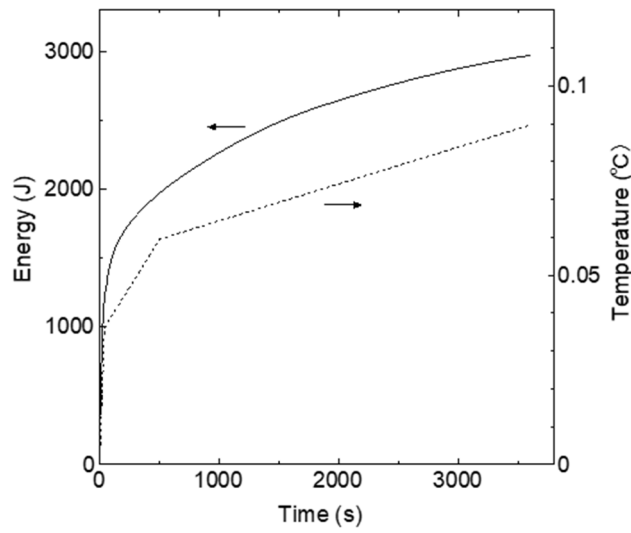
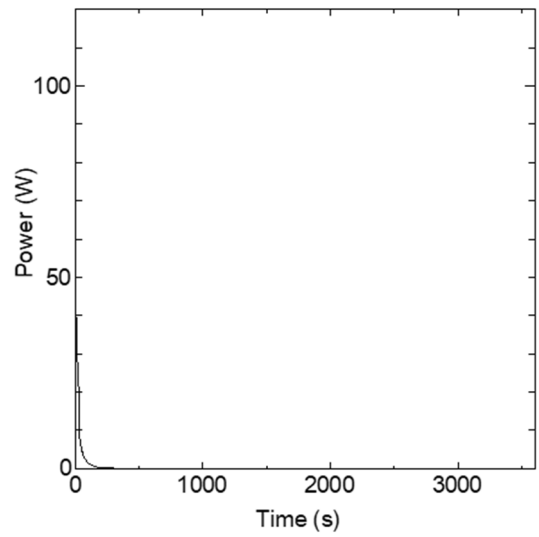
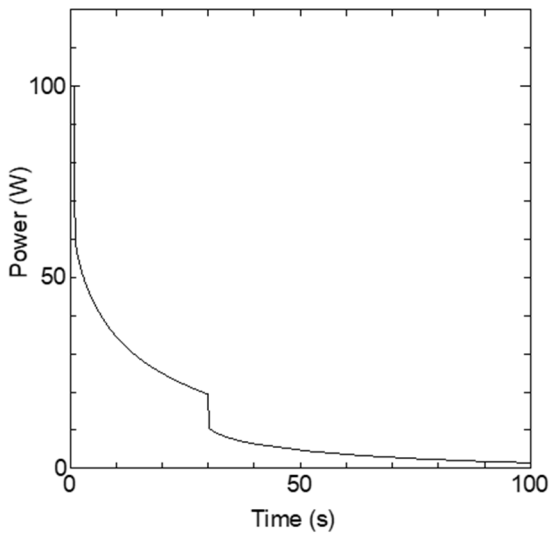


第 10-2-14 図 商用電源喪失

上図：出力変化（スケールの違う 2 つの図）

下図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（固体減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：L5.5P-30 炉心）



第 10-2-15 図 商用電源喪失

上図：出力変化（スケールの違う 2 つの図）

下図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（軽水減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：C45G(2H<sub>2</sub>O)4列炉心）

## 10-2-6 重水反射体への軽水流入

### 10-2-6-1 発生状況及び防止対策

出力運転中の軽水減速架台において、使用している重水タンクが破損した場合、重水反射体へ軽水が流入する、又は重水反射体から重水が流出することにより、炉心に反応度が印加され、原子炉出力が急上昇する可能性がある。このような過度の反応度印加を防止し、また、万一発生した場合でもその影響を限定するために、次のような対策を講じている。

- (1) 重水タンクは、水密構造としたアルミニウム製で、その健全性は使用前に確認しているため、重水タンクが破損する可能性は低い
- (2) 重水タンク内の重水量は、水位計により監視しており、既定値より低くなると、警報が発報することにより制御室の運転員に知らせることができるようになっているが、通常の重水タンク中の重水の水位レベルは、軽水反射体の水位レベルに比べて高いため、小さな破損であれば、重水タンク内に軽水が流入する可能性は低い。
- (3) 急激な反応度印加に伴い、炉周期が 15 秒以下になれば一せい挿入、10 秒以下になればスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。また、出力が線型出力計の各レンジの 110%以上のとき一せい挿入、120%以上のときスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。

研究炉安全評価指針での運転時の異常な過渡変化としては、「重水反射体への軽水流入」が取り上げられているが、重水タンクが破損した場合には、重水タンクからの重水の流出も考えられるので、本解析においては、それについても解析を行う。

なお、低濃縮ウラン炉心については、重水反射体を使用しないため、本解析は実施しない。

### 10-2-6-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における重水反射体への軽水流入については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 軽水減速炉心で反射体の持つ反応度効果が大きい G30 燃料体（高濃縮ウラン）を用いた単一炉心の外側に重水タンクを設置した炉心又は G30 燃料体（高濃縮ウラン）を用いた 2 分割炉心を選定する。過剰反応度は、制限値の最大値（ $0.5\% \Delta k/k$ ）、制御棒の全反応度は制限値の最小値（ $1.5\% \Delta k/k$ ）、及びダンプ弁の反応度は制限値の最小値（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 出力は、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 となるレンジであったとする。
- (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とする。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、炉心タンクの軽水と混入したとする。
- (4) 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には、期待しないものとする。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

ときにスクラムするものとする。ただし、指示値の 110%以上で作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。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反応度が加わるものとする。ダンピング弁は、作動しないとする。

### 10-2-6-3 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

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場合及び重水タンクが大きく破損して重水タンク中の重水の一部が炉心タンクの軽水に混入した場合、炉心は未臨界状態となり、直ちに原子炉は停止する。これは、大きく破損した場合には反射体が重水から軽水となることの影響が大きく、また小さく破損した場合には減速材中に重水が混入して減速効果が低下することによる影響が大きく、どちらの場合であっても、負の反応度が加えられるためである。未臨界となるため、燃料、構造材のアルミニウム及び減速材の温度上昇量は、無視できるほど小さく、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。

なお、炉心の最大積算出力を月間 100Wh 及び年間 1kWh に制限しているため、重水中に生成されるトリチウム量は、無視できるほど少ないため、重水タンクの破損によるトリチウムの漏洩の影響に関する評価は行わない。

## 10-2-7 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

### 10-2-7-1 発生状況及び防止対策

中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置は、固体減速架台の A 架台において、未臨界状態のみで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。このような利用を防止するため、次のような対策を講じている。

- (1) 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を利用すると、パルス中性子が周期的に入射するタイミングで出力が急上昇し、それに伴って炉周期短により、スクラムしてしまうため、それを避けるために、対数出力炉周期系をバイパスする必要がある。ただし、対数出力炉周期系をバイパスした場合には、制御棒の引抜きができなくなるインターロック機能を設けている。中性子発生設備については、中性子を利用するためにビーム隔離弁を開けると、同様に制御棒の引抜きができなくなるインターロック機能を設けている。このため、中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置の作動中に、臨界調整を行うことはできない。
- (2) 急激な出力上昇により、出力が線型出力計の各レンジの 110%以上のときに一せい挿入、120%以上のときにスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。



### 10-2-7-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における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することについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。なお、本事象と同様の過渡変化は、臨界状態の炉心に起動用中性子源を挿入した場合にも発生する可能性があるが、起動用中性子源の中性子発生量は、本解析での中性子発生量に比べて十分に小さいため、その過渡変化は本解析結果に包含される。

- (1) 固体減速炉心における過剰反応度は、制限値の最大値（ $0.35\% \Delta k/k$ ）、制御棒の全反応度は制限値の最小値（ $1.35\% \Delta k/k$ ）、及び中心架台の反応度は制限値の最小値（ $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 1Wの臨界状態を保持しており、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が100Wとなるレンジであったとする。
- (3) 臨界状態において、パルス状中性子発生装置又は中性子発生設備の最大中性子発生量で炉心に中性子の打ち込みを開始したとする。最大中性子発生量は、パルス状中性子発生装置については $5 \times 10^{10} \text{n/s}$ 、中性子発生設備については $10^{11} \text{n/s}$ であるので、この解析では、値の大きい $10^{11} \text{n/s}$ で中性子を打ち込むものとする。
- (4) 線型出力計の単一故障を仮定し、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ものとする。ただし、指示値の110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ1本が挿入できないとする。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反応度が加わるものとする。中心架台は、作動しないとする。

### 10-2-7-3 過渡変化の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における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することについては、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。なお、本事象と同様の過渡変化は、臨界状態の炉心に起動用中性子源を挿入した場合にも発生する可能性があるが、起動用中性子源の中性子発生量は、本解析での中性子発生量に比べて十分に小さいため、その過渡変化は本解析結果に包含される。

- (1) 固体減速炉心における過剰反応度は、制限値の最大値（ $0.35\% \Delta k/k$ ）、制御棒と中心架台の反応度は、制限値の最小値（ $1.35\% \Delta k/k$  及び  $1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 0.01Wの臨界状態を保持しており、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が100Wとなるレンジであったとする。
- (3) 【ケース A】

臨界状態において、パルス状中性子発生装置又は中性子発生設備の最大中性子発生量で炉心に中性子の打ち込みを開始したとする。最大中性子発生量は、パルス状中性子発生装置については $5 \times 10^{10} \text{n/s}$ 、中性子発生設備については $10^{11} \text{n/s}$ であるので、この解析では、値の大きい $10^{11} \text{n/s}$ の中性子を発生させ、その半分である $5 \times 10^{10} \text{n/s}$ が炉心に投入

されるところ。

#### 【ケース B】

炉心ごとに中性子発生量を変化させて、燃料温度が最大となる中性子発生量を求めて解析を行う。

- (4) 線型出力計の単一故障を仮定し、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ものとする。ただし、指示値の 110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。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反応度が加わるものとする。スクラム信号が発生しても中性子発生は停止しないものとする。中心架台は、作動しないとする。
- (5) ケース A、ケース B で燃料温度が最も高くなる炉心についての結果を示す。

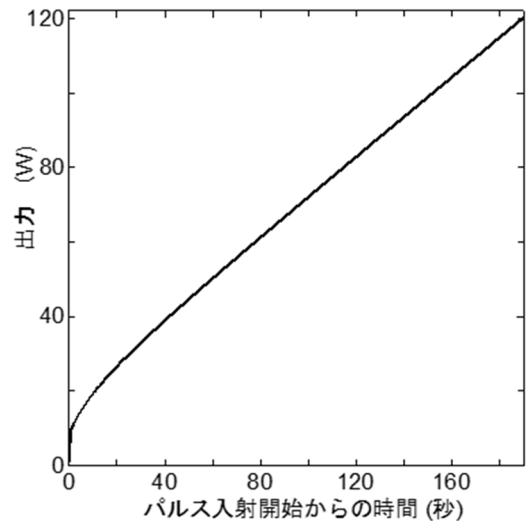
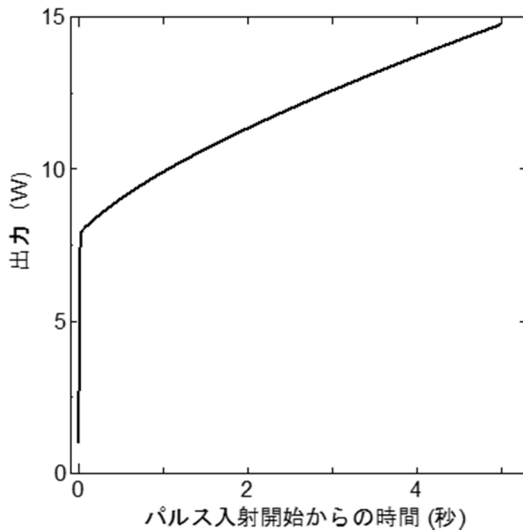
#### 10-2-7-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

解析結果を第 10-2-17 表及び第 10-2-16 図に示す。臨界状態で運転中に上記の中性子が入射したとき出力は、一旦急上昇した後、緩やかに上昇し、安全出力計の指示値の 120%を超えたときにスクラムし、制御棒が落下するとともに、中性子発生設備についてはビーム隔離弁が閉じて、炉心への中性子の供給が停止する。

全ての炉心において、燃料の温度上昇量は、 $2^{\circ}\text{C}$ 以下であり、構造材のアルミニウム及び減速材のポリエチレンの温度上昇量は、それ以下の値となるため、初期温度を  $25^{\circ}\text{C}$ としたとき、燃料、構造材のアルミニウム、減速材の黒鉛又はポリエチレンの温度は、全て  $27^{\circ}\text{C}$ 以下となり、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。解析を行った温度の評価については、「10-2-2-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）」と同じである。

第 10-2-17 表 中性子発生設備（高濃縮ウラン炉心）を臨界状態において利用したときの解析結果

炉心名称	120W 超までの 時間 (s)	最大出力 (W)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)
E3. 7P	187. 29	120. 59	$1. 28 \times 10^4$	7. 22
E3P	189. 60	120. 59	$1. 31 \times 10^4$	6. 87
E2P	192. 17	120. 58	$1. 33 \times 10^4$	5. 88
E1P	194. 32	120. 57	$1. 34 \times 10^4$	3. 74
EE1P	193. 53	120. 58	$1. 34 \times 10^4$	1. 80
EEE1P	191. 36	120. 58	$1. 32 \times 10^4$	1. 09
EN3P	186. 32	120. 59	$1. 29 \times 10^4$	3. 96
ENN3P	186. 24	120. 59	$1. 29 \times 10^4$	3. 53
ENNN3P	186. 28	120. 59	$1. 29 \times 10^4$	1. 91
EEN1P	189. 35	120. 58	$1. 31 \times 10^4$	0. 90
EN1P	189. 46	120. 58	$1. 31 \times 10^4$	1. 34
ENN1P	188. 22	120. 59	$1. 30 \times 10^4$	0. 64
E1. 5G	172. 45	120. 64	$1. 20 \times 10^4$	1. 89
E1. 5G	172. 88	120. 63	$1. 21 \times 10^4$	2. 05
E0. 5G	173. 79	120. 63	$1. 21 \times 10^4$	1. 13
E3G	171. 17	120. 64	$1. 19 \times 10^4$	2. 21



第 10-2-16 図 中性子発生設備を臨界状態において利用したときの出力変化 (E3P 炉心)  
(左右のグラフは横軸のスケールのみが異なる)

#### 10-2-7-5 解析結果 (低濃縮ウラン炉心)

##### 【ケース A】

解析結果を第 10-2-18 表に示す。固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L5. 5P-30 炉心で、初期温度を 25°C としたとき、燃料温度上昇は約 0.15°C である。出力及び温度変化を第 10-2-17 図に示す。減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも +25% 以下であり、判断基準を満足している。

##### 【ケース B】

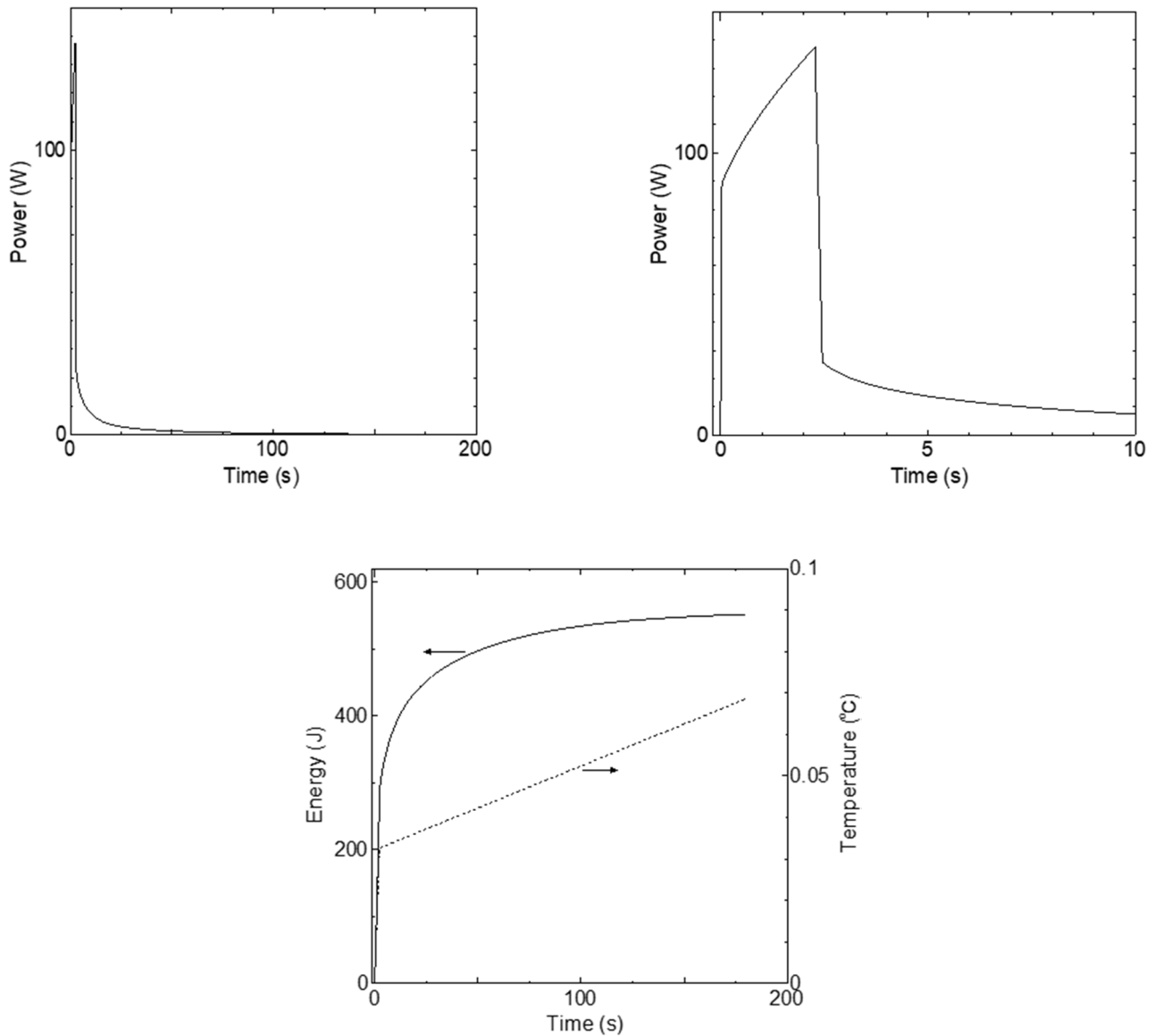
解析結果を第 10-2-19-1 表及び第 10-2-19-2 表に示す。固体減速炉心で最も燃料温度が高くなるのは L5. 5P-30 炉心で、中性子発生量がケース A の 0.071 倍となったとき、初期温度を 25°C としたとき、燃料温度上昇は、約 49.3°C である。この場合、出力が上昇するにつれて燃料温度が上昇し、最大出力が 120W より少しだけ低くなり、その後、燃料の温度上昇に伴う負の反応度印加により出力が低下し、最終的には、3600 秒を経過したところで運転員が停止させるというケースである。これより中性子発生量が少し増加して、ケース A の 0.072 倍となると、最大出力は 120W を超えてスクラムするため、積算出力は低くなる。出力及び温度変化を第 10-2-18 図に示す。減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量は、上記の結果より小さくなる。

第 10-2-18 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において  
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 超までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
L5.5P-50	1.3	137.6	179.3	$5.31 \times 10^2$	$5.89 \times 10^{-2}$	$1.35 \times 10^{-1}$
L5.5P-40	1.3	137.6	179.2	$5.31 \times 10^2$	$6.42 \times 10^{-2}$	$1.48 \times 10^{-1}$
L5.5P-30	1.3	137.6	179.2	$5.31 \times 10^2$	$6.60 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-1}$
L4P-50	1.4	137.2	182.1	$5.47 \times 10^2$	$5.37 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-1}$
L4P-40	1.4	137.0	183.3	$5.54 \times 10^2$	$6.52 \times 10^{-2}$	$1.43 \times 10^{-1}$
L4P-30	1.4	137.0	183.3	$5.54 \times 10^2$	$6.91 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-1}$
L3P-50	1.4	136.8	184.8	$5.63 \times 10^2$	$5.15 \times 10^{-2}$	$1.09 \times 10^{-1}$
L3P-40	1.4	136.7	185.5	$5.67 \times 10^2$	$5.73 \times 10^{-2}$	$1.23 \times 10^{-1}$
L3P-30	1.4	136.8	184.8	$5.63 \times 10^2$	$6.25 \times 10^{-2}$	$1.30 \times 10^{-1}$
L2P-50	1.5	136.6	186.4	$5.72 \times 10^2$	$3.87 \times 10^{-2}$	$9.92 \times 10^{-2}$
L2P-40	1.5	136.4	187.3	$5.78 \times 10^2$	$4.59 \times 10^{-2}$	$1.01 \times 10^{-1}$
L2P-30	1.5	136.5	186.7	$5.74 \times 10^2$	$4.81 \times 10^{-2}$	$1.12 \times 10^{-1}$
L1P-50	1.5	136.6	186.1	$5.70 \times 10^2$	$2.23 \times 10^{-2}$	$7.21 \times 10^{-2}$
L1P-40	1.5	136.4	187.6	$5.79 \times 10^2$	$2.38 \times 10^{-2}$	$5.98 \times 10^{-2}$
L1P-30	1.5	136.5	187.3	$5.77 \times 10^2$	$2.49 \times 10^{-2}$	$7.63 \times 10^{-2}$
LL1P-50	1.4	136.7	185.4	$5.66 \times 10^2$	$9.34 \times 10^{-3}$	$3.53 \times 10^{-2}$
LL1P-40	1.5	136.6	186.3	$5.71 \times 10^2$	$8.45 \times 10^{-3}$	$3.08 \times 10^{-2}$
LL1P-30	1.5	136.6	186.0	$5.70 \times 10^2$	$9.76 \times 10^{-3}$	$3.88 \times 10^{-2}$

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」及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）を掛けた値



第 10-2-17 図 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)

上図：出力変化 (スケールの違う 2 つの図)

下図：積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(固体減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : L5.5P-30 炉心)

第 10-2-19-1 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において

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）（1/2）

炉心名称	中性子発生量 (倍率) <sup>a</sup>	120W 超 までの 時間 (s)	最大出力 (W)	最大 となる 時間 <sup>d</sup> (s)	最大 出力 <sup>e</sup> (W)	手動スクラム 時出力 <sup>f</sup> (W)	0.1W までの 時間 (s)	積算出力 (J)	温度 上昇 <sup>b</sup> (°C)	温度 上昇 <sup>c</sup> (°C)
L5.5P-50	0.070	—	—	355.0	119.0	23.2	3818.8	1.73×10 <sup>5</sup>	1.92×10 <sup>1</sup>	4.39×10 <sup>1</sup>
	0.071	295.5	120.1	—	—	—	660.9	2.52×10 <sup>4</sup>	2.80×10 <sup>0</sup>	6.41×10 <sup>0</sup>
L5.5P-40	0.072	—	—	347.1	119.7	23.1	3817.6	1.72×10 <sup>5</sup>	2.08×10 <sup>1</sup>	4.78×10 <sup>1</sup>
	0.073	312.4	120.1	—	—	—	678.8	2.72×10 <sup>4</sup>	3.28×10 <sup>0</sup>	7.55×10 <sup>0</sup>
L5.5P-30	0.071	—	—	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73×10 <sup>5</sup>	2.15×10 <sup>1</sup>	4.93×10 <sup>1</sup>
	0.072	312.1	120.1	—	—	—	678.5	2.69×10 <sup>4</sup>	3.34×10 <sup>0</sup>	7.66×10 <sup>0</sup>
L4P-50	0.065	—	—	392.3	119.9	24.2	3818.6	1.84×10 <sup>5</sup>	1.80×10 <sup>1</sup>	4.03×10 <sup>1</sup>
	0.066	344.6	120.1	—	—	—	714.3	2.92×10 <sup>4</sup>	2.86×10 <sup>0</sup>	6.40×10 <sup>0</sup>
L4P-40	0.067	—	—	380.8	119.7	23.9	3824.3	1.81×10 <sup>5</sup>	2.13×10 <sup>1</sup>	4.67×10 <sup>1</sup>
	0.068	339.0	120.1	—	—	—	709.2	2.89×10 <sup>4</sup>	3.40×10 <sup>0</sup>	7.46×10 <sup>0</sup>
L4P-30	0.067	—	—	377.8	118.9	23.6	3823.3	1.79×10 <sup>5</sup>	2.24×10 <sup>1</sup>	4.88×10 <sup>1</sup>
	0.068	357.2	120.0	—	—	—	728.2	3.10×10 <sup>4</sup>	3.87×10 <sup>0</sup>	8.44×10 <sup>0</sup>
L3P-50	0.061	—	—	420.2	118.8	24.7	3831.0	1.87×10 <sup>5</sup>	1.71×10 <sup>1</sup>	3.64×10 <sup>1</sup>
	0.062	393.7	120.0	—	—	—	767.1	3.37×10 <sup>4</sup>	3.08×10 <sup>0</sup>	6.54×10 <sup>0</sup>
L3P-40	0.060	—	—	428.5	118.9	25.0	3832.4	1.89×10 <sup>5</sup>	1.91×10 <sup>1</sup>	4.09×10 <sup>1</sup>
	0.061	397.7	120.0	—	—	—	771.4	3.38×10 <sup>4</sup>	3.42×10 <sup>0</sup>	7.34×10 <sup>0</sup>
L3P-30	0.061	—	—	423.9	119.5	25.0	3832.2	1.89×10 <sup>5</sup>	2.10×10 <sup>1</sup>	4.36×10 <sup>1</sup>
	0.062	379.6	120.1	—	—	—	752.8	3.20×10 <sup>4</sup>	3.55×10 <sup>0</sup>	7.39×10 <sup>0</sup>

a ケース A の中性子発生量に対する倍率

b 温度上昇が炉心全体で均一であるとしたときの温度上昇

c 各炉心の「最大値／平均値」（2.6 倍）及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍）を掛けた値

d 出力が 120W に達しない場合に出力が最大となるまでの時間

e 出力が 120W まで上昇しない場合の最大出力

f 出力が 120W に達しない場合に手動スクラムで反応度が印加される直前での出力

第 10-2-19-2 表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において

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）（2/2）

炉心名称	中性子発生量 (倍率) <sup>a</sup>	120W 超 までの 時間 (s)	最大出力 (W)	最大 となる 時間 <sup>d</sup> (s)	最大 出力 <sup>e</sup> (W)	手動スクラム 時出力 <sup>f</sup> (W)	0.1W までの 時間 (s)	積算出力 (J)	温度 上昇 <sup>b</sup> (°C)	温度 上昇 <sup>c</sup> (°C)
L2P-50	0.045	—	—	579.5	119.3	29.0	3853.6	2.12×10 <sup>5</sup>	1.44×10 <sup>1</sup>	3.68×10 <sup>1</sup>
	0.046	520.3	120.0	—	—	—	898.2	4.24×10 <sup>4</sup>	2.87×10 <sup>0</sup>	7.35×10 <sup>0</sup>
L2P-40	0.048	—	—	544.3	119.5	28.3	3850.4	2.07×10 <sup>5</sup>	1.65×10 <sup>1</sup>	3.64×10 <sup>1</sup>
	0.049	488.7	120.0	—	—	—	866.5	4.00×10 <sup>4</sup>	3.18×10 <sup>0</sup>	7.04×10 <sup>0</sup>
L2P-30	0.048	—	—	550.9	118.6	28.2	3850.3	2.07×10 <sup>5</sup>	1.73×10 <sup>1</sup>	4.03×10 <sup>1</sup>
	0.049	511.5	120.0	—	—	—	889.4	4.23×10 <sup>4</sup>	3.55×10 <sup>0</sup>	8.23×10 <sup>0</sup>
L1P-50	0.029	—	—	914.6	118.9	37.3	3882.5	2.52×10 <sup>5</sup>	9.85×10 <sup>0</sup>	3.19×10 <sup>1</sup>
	0.030	793.8	120.0	—	—	—	1175.0	6.12×10 <sup>4</sup>	2.39×10 <sup>0</sup>	7.74×10 <sup>0</sup>
L1P-40	0.029	—	—	926.3	119.7	37.8	3884.6	2.55×10 <sup>5</sup>	1.05×10 <sup>1</sup>	2.63×10 <sup>1</sup>
	0.030	784.0	120.0	—	—	—	1166.0	5.99×10 <sup>4</sup>	2.46×10 <sup>0</sup>	6.19×10 <sup>0</sup>
L1P-30	0.028	—	—	949.5	117.8	37.7	3885.5	2.53×10 <sup>5</sup>	1.09×10 <sup>1</sup>	3.35×10 <sup>1</sup>
	0.029	869.2	120.0	—	—	—	1252.7	6.83×10 <sup>4</sup>	2.95×10 <sup>0</sup>	9.03×10 <sup>0</sup>
LL1P-50	0.014	—	—	1884.3	118.4	73.1	3945.0	3.15×10 <sup>5</sup>	5.20×10 <sup>0</sup>	1.96×10 <sup>1</sup>
	0.015	1511.7	120.0	—	—	—	1895.5	1.09×10 <sup>5</sup>	1.80×10 <sup>0</sup>	6.80×10 <sup>0</sup>
LL1P-40	0.013	—	—	2039.1	118.3	80.4	3953.8	3.17×10 <sup>5</sup>	4.69×10 <sup>0</sup>	1.71×10 <sup>1</sup>
	0.014	1622.7	120.0	—	—	—	2007.4	1.17×10 <sup>5</sup>	1.73×10 <sup>0</sup>	6.29×10 <sup>0</sup>
LL1P-30	0.012	—	—	2139.5	114.6	83.4	3956.8	3.09×10 <sup>5</sup>	5.30×10 <sup>0</sup>	2.10×10 <sup>1</sup>
	0.013	1873.5	120.0	—	—	—	2258.4	1.40×10 <sup>5</sup>	2.39×10 <sup>0</sup>	9.50×10 <sup>0</sup>

a ケース A の中性子発生量に対する倍率

b 温度上昇が炉心全体で均一であるとしたときの温度上昇

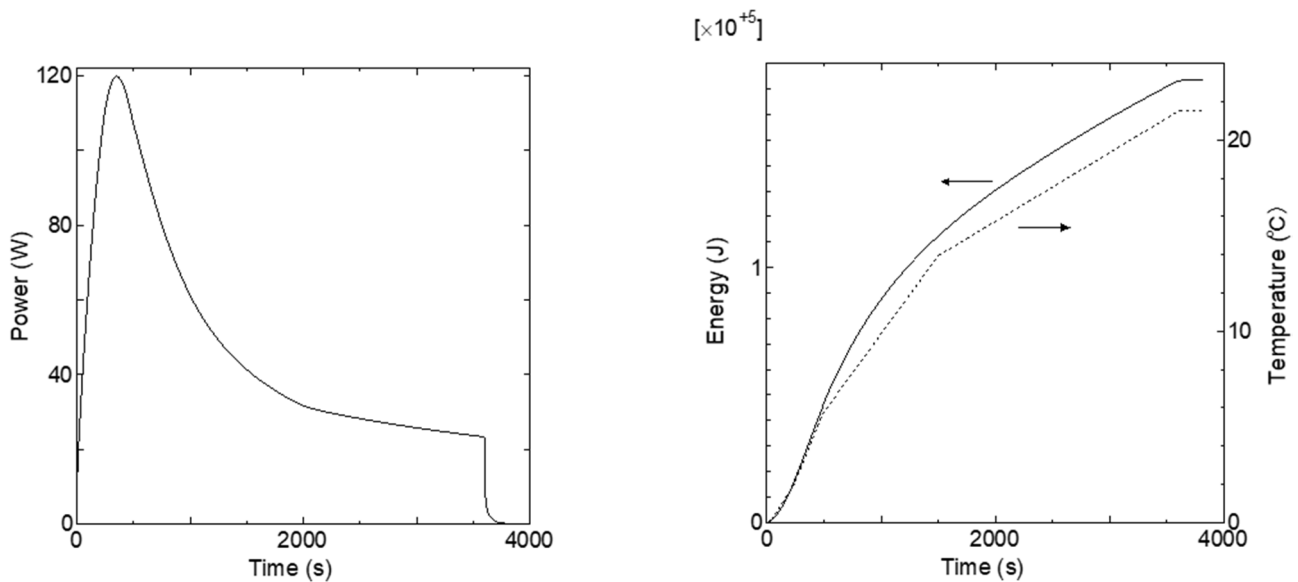
c 各炉心の「最大値／平均値」（2.6 倍）及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09 倍）を掛けた値

d 出力が 120W に達しない場合に出力が最大となるまでの時間

e 出力が 120W まで上昇しない場合の最大出力

f 出力が 120W に達しない場合に手動スクラムで反応度が印加される直前での出力





第 10-2-18 図 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）

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）

（固体減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：L5.5P-30 炉心、中性子発生量はケース A の 0.071 倍）

## 10-2-8 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇

### 10-2-8-1 発生状況及び防止対策

軽水減速架台の運転中に炉心タンクヒータを作動させたとき、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。このような利用を防止するため、次のような対策を講じている。

- (1) 炉心タンクヒータを作動させるためには、軽水減速架台室において、電気盤を操作し、さらに、制御室でもヒータの操作釦を押す必要があるため、誤って炉心タンクヒータを使用することは、考えられない。
- (2) 炉心温度が 80°C を超えた場合には、警報が発報し運転員に異常を知らせることができる。
- (3) 出力上昇に伴い、出力が線型出力計の各レンジの 110% 以上のとき一せい挿入、120% 以上のときスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。

### 10-2-8-2 過渡変化の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における炉心タンクヒータによる炉心温度上昇については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 軽水減速架台で正の反応度温度係数が最も大きい高濃縮ウラン炉心について、過剰反応度は制限値の最大値（0.5%  $\Delta k/k$ ）、制御棒の全反応度は制限値の最小値（1.5%  $\Delta k/k$ ）、及びダンプ弁の反応度は制限値の最小値とする（1%  $\Delta k/k$ ）。

- (2) 軽水減速架台の全ての単一炉心は、負の反応度温度係数を持つが、炉心内部に軽水領域を持つ2分割炉心については、正の反応度温度係数となる場合がある。中性子エネルギースペクトルの最も硬いC30(5列)炉心で分割幅が7cmの炉心において、正の反応度温度係数が最も大きくなり、そのときの反応度温度係数は、約 $7.1 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ である。ただし、安全側の評価として、反応度温度係数の値は、制限値である $2 \times 10^{-4} \Delta k/k/^\circ C$ とする。
- (3) 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となるレンジであったとする。
- (4) 軽水の初期温度を $25^\circ C$ とし、炉心タンクヒータ(出力約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。
- (5) 線型出力計の単一故障を仮定し、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ものとする。ただし、指示値の110%以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ1本が挿入できないとする。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ものとする。ダンプ弁は、作動しないとする。

#### 10-2-8-3 過渡変化の解析(低濃縮ウラン炉心)

低濃縮ウラン炉心における炉心タンクヒータによる炉心温度上昇については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

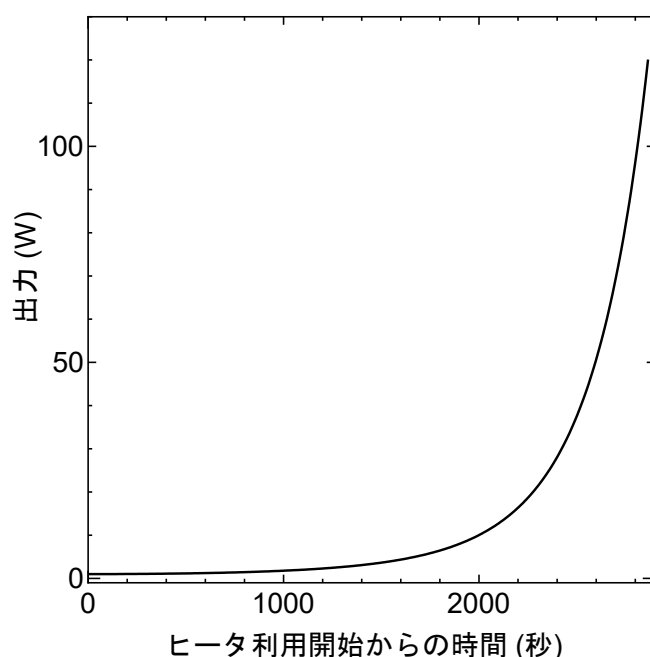
- (1) 軽水減速架台の添付書類八の「8-2-1 炉心」に示した炉心のうち、正の反応度温度係数をもつ炉心(4つ)について、過剰反応度は制限値の最大値( $0.5\% \Delta k/k$ )、制御棒とダンプ弁の反応度は、制限値の最小値とする( $1.5\% \Delta k/k$ 及び $1\% \Delta k/k$ )。
- (2) 各炉心の反応度温度係数の値は、各炉心固有の解析値とする。
- (3) 出力が1Wの臨界状態とし、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が100Wとなるレンジであったとする。
- (4) 軽水の初期温度を $25^\circ C$ とし、炉心タンクヒータ(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。
- (5) 線型出力計の単一故障を仮定し、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ものとする。指示値の110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとする。ただし、線型出力計の指示値が120%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て、スクラム信号を発生させるとする。制御棒の最大の反応度を持つ1本が挿入できないとする。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ものとする。ダンプ弁は、作動しないとする。

#### 10-2-8-4 解析結果(高濃縮ウラン炉心)

結果を第10-2-19図に示す。温度上昇を開始して、約2865秒後に出力が120Wを超え、スクラム信号を発生し、1秒後に出力が120.4Wになった時点で、制御棒落下により負の反応度が加わり停

止する。この間の水温上昇は、約 1.5℃であり、構造材のアルミニウムの温度上昇量もほぼ同じ値となるため、初期温度を 25℃としたとき、燃料、構造材のアルミニウム及び減速材の温度は、全て約 26.5℃となり、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。この結果は、軽水の温度上昇率と反応度温度係数により決まるため、高濃縮ウラン炉心、低濃縮ウラン炉心に係わらず同様の結果となる。

初期温度が使用最高温度の 80℃近傍であった場合には、温度上昇により、すぐに温度が 80℃を超えて警報が発報するため、運転員は、すぐに異常に気づき、炉心タンクヒータの電源を遮断する等の措置を取ることができる。



第 10-2-19 図 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇に伴う出力上昇（高濃縮ウラン炉心）

#### 10-2-8-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

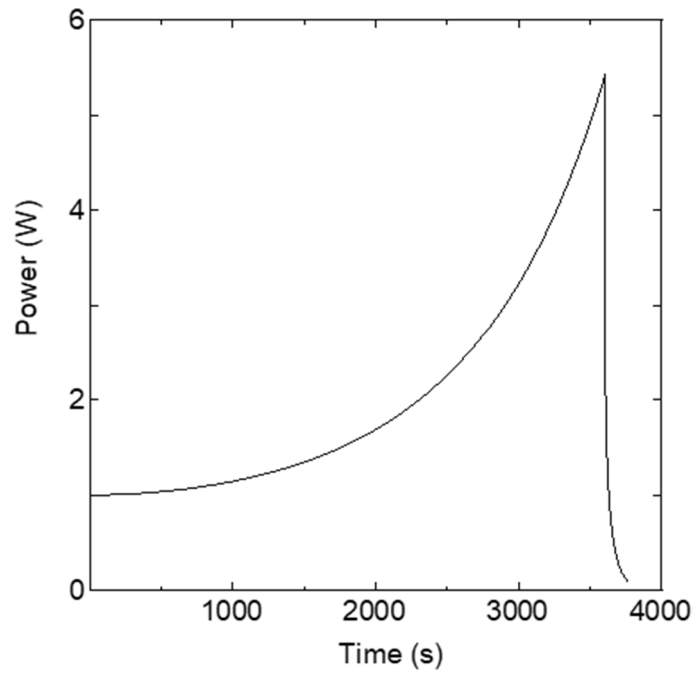
解析結果を第 10-2-20 表に示す。最も燃料温度が高くなるのは C45G (6H<sub>2</sub>O) 5 列炉心で、燃料温度上昇は、初期温度を 25℃としたとき、約 0.54℃である。出力及び温度変化を第 10-2-20 図に示す。減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも +40%以下であり判断基準を満足している。

第 10-2-20 表 炉心タンクヒータによる温度上昇（低濃縮ウラン炉心）

炉心名称	列	温度係数 ( $\Delta k/k/^\circ\text{C}$ )	1 時間後の 最大出力 (W)	0.1W まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 <sup>a</sup> ( $^\circ\text{C}$ )	温度上昇 <sup>b</sup> ( $^\circ\text{C}$ )	(参考) 炉心タンク水温度 上昇 ( $^\circ\text{C}$ )
C45G (5H <sub>2</sub> O)	4	$2.24 \times 10^{-6}$	1.08	3666	$3.71 \times 10^3$	$7.83 \times 10^{-2}$	$2.58 \times 10^{-1}$	$1.75 \times 10^0$
C45G (5H <sub>2</sub> O)	5	$4.06 \times 10^{-5}$	4.35	3747	$6.61 \times 10^3$	$1.58 \times 10^{-1}$	$5.27 \times 10^{-1}$	$1.79 \times 10^{-1}$
C45G (6H <sub>2</sub> O)		$4.64 \times 10^{-5}$	5.41	3761	$7.36 \times 10^3$	$1.59 \times 10^{-1}$	$5.36 \times 10^{-1}$	$1.80 \times 10^{-1}$
C45G (7H <sub>2</sub> O)		$2.69 \times 10^{-5}$	2.56	3715	$5.18 \times 10^3$	$1.02 \times 10^{-1}$	$3.38 \times 10^{-1}$	$1.78 \times 10^{-1}$

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」、及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値



第 10-2-20 図 炉心タンクヒータによる炉心温度上昇に伴う出力上昇  
(低濃縮ウラン炉心、C45G (6H<sub>2</sub>O) 炉心)

## 10-3 設計基準事故の解析

### 10-3-1 序

原子炉施設の設計基準事故に対して、その発生状況と防止対策を説明し、その経過と結果の解析を行い、原子炉の安全性が確保されることを説明する。

研究炉安全評価指針を参考にして、設計基準事故として次の事象を評価する。

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

### 10-3-2 燃料落下又は燃料誤装荷

#### 10-3-2-1 発生状況及び防止対策

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。誤装荷を防止し、あるいは、万一発生した場合でもその影響を限定するとともに、その波及を制限するために、次のような対策を講じている。

- (1) 燃料集合体の作成は、運転指令書に基づいて実施しており、余分の燃料集合体を製作するためには、運転指令書に記載された以上の枚数の燃料要素をバードケージより取り出す必要があるため、誤って燃料集合体を製作する可能性は低い。
- (2) 炉心への燃料集合体の装荷時においては、現場の作業員及び制御室の運転員が連絡を取りあい、運転指令書と燃料集合体の装荷位置を互いに確認しながら、誤操作を起こすことがないように注意して作業を実施している。
- (3) 急激な反応度印加に伴い、炉周期が 15 秒以下になれば一せい挿入、10 秒以下になればスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。また、出力が線型出力計の各レンジの 110%以上のとき一せい挿入、120%以上のときスクラムが作動し、原子炉は自動停止する。

#### 10-3-2-2 設計基準事故の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における燃料落下又は燃料誤装荷については、以下のシナリオに従った評価を行なう。

- (1) 固体減速炉心において、過剰反応度が制限値の最大値（ $0.35\% \Delta k/k$ ）となるだけの燃料集合体が装荷されているとする。
- (2) 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、中心架台を下限とした状態で炉心配置変更作業を行う。なお、引き抜いた制御棒と挿入された制御棒は、燃料

領域に対して対称な位置に配置されているとする。

- (3) 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、1 体当たりの反応度が最も大きい位置であるとする。
- (4) その後、線型出力計の指示値が 100%で 0.1W となるレンジで中性子源を挿入し、出力 0.01W の定常状態となったとする。その後、中心架台を上昇させる。中心架台の上昇速度は、添付書類八に記載する制限値の最大速度 (3.3cm/s) とする。
- (5) 対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、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ものとする。ただし、指示値の 110%以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。
- (6) スクラム信号の発生に伴い、中心架台を上昇させるための油圧ポンプが停止することにより、中心架台の上昇動作は直ちに停止する。制御棒は、3 本が上限になっているが、その中に最大の反応度を持つ 1 本があるとし、その制御棒が挿入できないとする。スクラム信号が発生した 1 秒後に、制御棒の挿入によりステップ状に負の反応度が加わるとする。
- (7) 中心架台は、スクラム信号発生後の 1 秒後に落下を開始し、スクラム信号発生後の 12 秒後までに、時間ともに線型に負の反応度を加えるとする。

### 10-3-2-3 設計基準事故の解析 (低濃縮ウラン炉心)

低濃縮ウラン炉心における燃料落下又は燃料誤装荷については、以下のシナリオに従った評価を行なう。

- (1) 固体減速炉心において、過剰反応度が制限値の最大値 ( $0.35\% \Delta k/k$ ) となるだけの燃料集合体が装荷されているとする。
- (2) 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、中心架台を下限とした状態で炉心配置変更作業を行う。なお、引き抜いた制御棒と挿入された制御棒は、燃料領域に対して対称な位置に配置されているとする。
- (3) 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及び最も反応度が小さい位置の場合とする。
- (4) その後、線型出力計の指示値が 100%で 120W となるレンジで中性子源を挿入し、出力 0.01W の定常状態となったとする。その後、中心架台を上昇させる。中心架台の上昇速度は、添付書類八に記載する制限値の最大速度 (3.3cm/s) とする。
- (5-1) 中心架台上昇中に 120W を超えてスクラムする場合

対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、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ものとする。ただし、指示値の 110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しない。スクラム信号の発生に伴い、中心架台を上昇させるための油

圧ポンプが停止することにより、中心架台の上昇動作は直ちに停止する。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。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。この動作の間、中性子源は挿入したままとする。

- (5-2) 中心架台が上限まで上昇し、その後の制御棒引抜き操作に伴って出力が上昇し、120Wを超えてスクラムする場合

中心架台を上昇させてから10分後（中心架台上限となってから約400秒後）に、制御棒の引き抜きにより最大反応度添加率（ $0.02\% \Delta k/k/s$ ）で反応度を連続的に加える。対数出力炉周期系の単一故障を仮定し、原子炉は、線型出力計の指示値の120%を超えたときに、スクラムするものとする。ただし、指示値の110%以上のときに作動する一せい挿入には、期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ1本が挿入できないとする。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。中心架台は作動しないものとする。中性子源は挿入したままとする。

#### 10-3-2-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

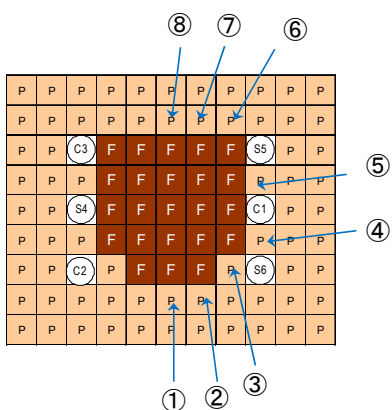
燃料集合体の装荷により印加される反応度の解析結果について、E3P炉心（高濃縮ウラン炉心）の場合を例にとって、第10-3-1表及び第10-3-1図に示す。ここでは、⑧の位置に燃料集合体を装荷したときに、最も大きな反応度が加わることになる。

また、中心架台の上昇に伴う反応度印加量の解析結果の例を、第10-3-2図及び第10-3-3図に示す。第10-3-2図は、E3P炉心での解析結果であるが、制御棒校正曲線の形状がどの単一炉心についてもS字曲線になるのと同様に、他の炉心の場合についても、第10-3-2図とほぼ相似な形状となる。その例として、第10-3-3図にE3P炉心より中性子エネルギースペクトルがかなり硬いE1P炉心での中心架台の反応度校正曲線の解析結果を示しており、絶対値は異なるものの、両者の形状にはほとんど違いは見られない。そこで、第10-3-2図の曲線を多項式（6次式）でフィッティングし、その式を各体系の中心架台の全反応度量の絶対値で規格化して、中心架台の反応度校正曲線とした。

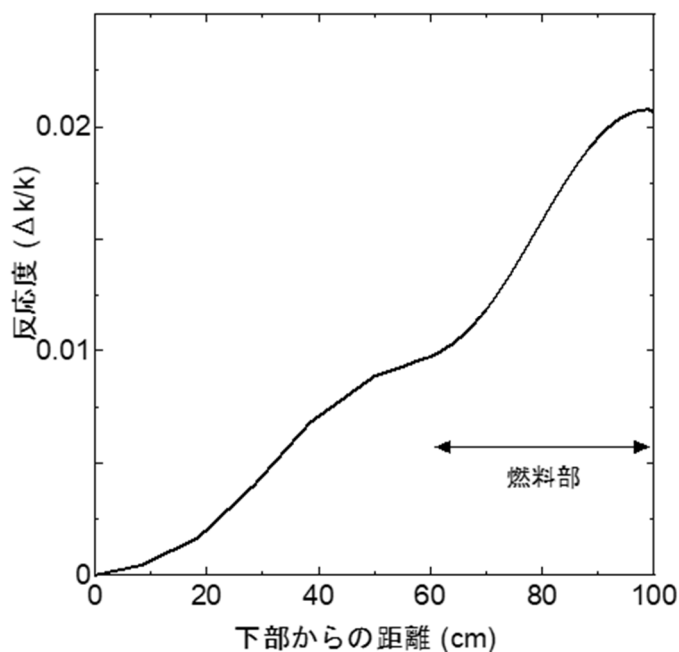
E3P炉心について、加えられた反応度の時間変化を第10-3-4図に、出力の時間変化を第10-3-5図に示す。中心架台の全ストロークは約190cmであるが、起動して中心架台の位置が最上部から100cmの位置を通過後、反応度が徐々に印加され、両図の約57秒の時点で、スクラム信号により反応度印加が停止し、その1秒後に負の反応度が加えられて、原子炉は停止する。最大出力は約0.128W、積算出力は約2.9Jであり、燃料の温度上昇は、 $4 \times 10^{-4} \text{°C}$ と十分に小さな値である。構造材のアルミニウム及び減速材のポリエチレンの温度上昇量は、それ以下の値となるため、初期温度を25°Cとしたとき、燃料、構造材のアルミニウム及び減速材のポリエチレンの温度は全て約25°Cであるため、設計基準事故時の温度に関する判断基準を満足している。解析を行った温度の評価については「10-2-2-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）」と同じである。また、この事象により核分裂生成物は、燃料要素から放出されないため、周辺公衆に著しい放射線被ばくを及ぼすことはなく、設計基準事故時の判断基準を満足している。

第 10-3-1 表 燃料集合体装荷による反応度

位置	反応度 (% $\Delta k/k$ )
①	0.82
②	0.68
③	0.81
④	0.65
⑤	0.70
⑥	0.52
⑦	0.91
⑧	1.10

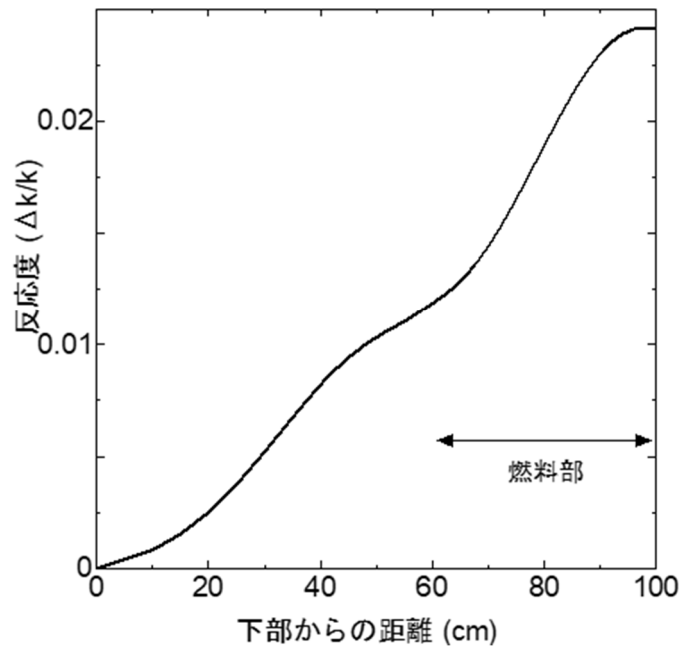


第 10-3-1 図 炉心の配置図 (燃料集合体装荷位置)  
(高濃縮ウラン炉心)

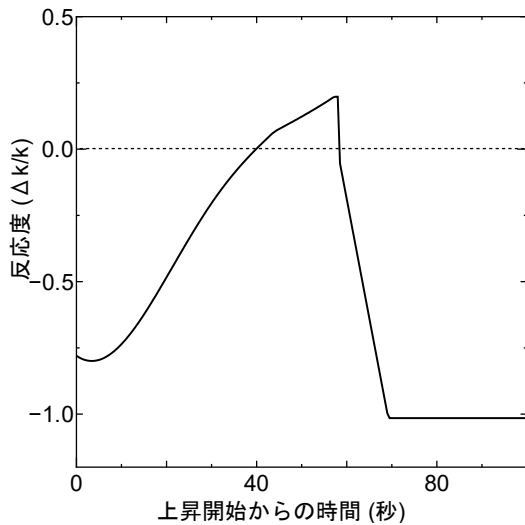


第 10-3-2 図 中心架台の反応度校正曲線 (E3P 炉心)

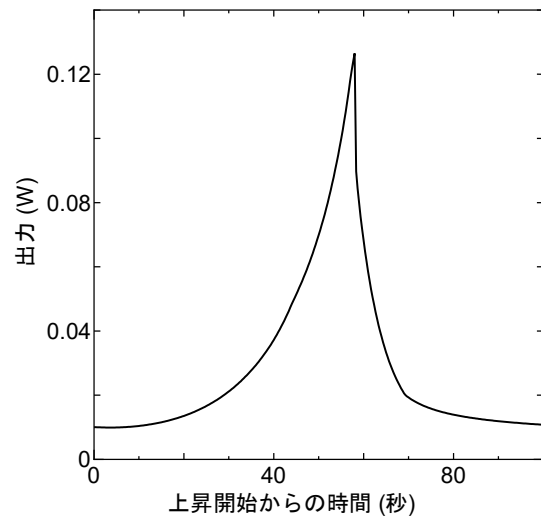




第 10-3-3 図 中心架台の反応度校正曲線 (E1P 炉心)



第 10-3-4 図 反応度の時間変化 (E3P 炉心)



第 10-3-5 図 出力の時間変化 (E3P 炉心)

同様の解析を高濃縮ウランの燃料要素及びポリエチレン減速材で構成される最もスペクトルの柔らかい E3.7 炉心、スペクトルが最も硬い EEE1 炉心及びその間のスペクトルの E3 炉心、E2 炉心、E1 炉心、EE1 炉心について行った。これらの炉心は、高濃縮ウランの燃料要素を用いる固体減速炉心で構成することができる中性子エネルギースペクトルの範囲を広く含んでいる。各炉心において E3P 炉心の解析と同様に、燃料集合体と隣接した 1 体のポリエチレン反射体を取り除いたときの反応度変化の絶対値が最小となる値を中心架台の反応度とし、各炉心において燃料集合体を誤装荷した際の最大の反応度となる値を求めた。さらに、中心架台の反応度が大きく中心架台の

上昇に伴う反応度添加率がより大きくなる場合を考え、中心架台の反応度が各炉心について、規制値の最大値（5%Δk/k）となる場合の解析も行った。

解析に用いた反応度を第 10-3-2 表及び第 10-3-3 表に、起動後のスクラム発生時刻等の解析結果を第 10-3-4 表に示す。ここで、スクラム発生時刻は、中心架台の反応度が印加され始める中心架台上限から 100cm 下の位置（中心架台の下限から約 90cm 上昇させた位置）を基準としている（下限位置から中心架台を上昇させ始めて約 40 秒後）。

第 10-3-4 表に示すとおり、各炉心における燃料要素の温度上昇は、0.01℃以下であり、構造材のアルミニウム及び減速材の温度上昇量はそれ以下の値となるため、初期温度を 25℃としたとき、燃料、構造材のアルミニウム及び減速材の温度は、全て約 25.01℃以下であるため、設計基準事故時の判断基準を満足している。また、この事象により核分裂生成物は燃料要素から放出されないため、周辺公衆に著しい放射線被ばくを及ぼすことはなく、設計基準事故時の判断基準を満足している。

固体減速架台については、天然ウランの燃料要素を組み合わせた炉心についても、添付書類八において解析を行っているが、天然ウランを加えることにより装荷する燃料体数が増加し、炉心が大きくなることにより、燃料誤装荷時の反応度印加量が小さくなるため、上記の結果より安全側となる。

軽水減速架台については、炉心配置変更作業が行われる際にダンプ弁が開いており、炉心タンク内に減速材が存在しないため、燃料集合体を装荷した際の反応度は、減速材を燃料集合体内に有している固体減速架台に比べて非常に小さい値であるため、燃料集合体の誤装荷を行ったとしても、未臨界状態を維持している。

以上より、燃料集合体の誤装荷を行ったとしても臨界となるおそれはなく、そのため、燃料要素の温度上昇は起こらず、核分裂生成物は燃料要素から放出されないため、設計基準事故時の判断基準を満足している。また燃料集合体の誤装荷後に誤って原子炉を起動した場合であっても、設計基準事故時の判断基準を満足している。

第 10-3-2 表 各炉心の反応度（高濃縮ウラン炉心）（中心架台反応度の最低値）

炉心	燃料集合体取出し による絶対値最小の 反応度（%Δk/k）	燃料集合体装荷 による絶対値最大の 反応度（%Δk/k）	炉心配置変更時 の反応度（%Δk/k）	燃料誤装荷後 の反応度（%Δk/k）
E3.7P	-1.49	1.10	-1.82	-0.72
E3P	-2.00	1.54	-2.33	-0.79
E2P	-2.23	2.07	-2.56	-0.49
E1P	-2.32	2.15	-2.65	-0.50
EE1P	-1.49	1.51	-1.82	-0.30
EEE1P	-1.70	1.07	-2.03	-0.95

第 10-3-3 表 各炉心の反応度（高濃縮ウラン炉心）（中心架台反応度=5%Δk/k）

炉心	中心架台の反応度 (%Δk/k)	燃料集合体装荷 による絶対値最大の 反応度 (%Δk/k)	炉心配置変更時 の反応度 (%Δk/k)	燃料誤装荷後 の反応度 (%Δk/k)
E3.7P	-5.00	1.10	-5.33	-4.23
E3P	-5.00	1.54	-5.33	-3.79
E2P	-5.00	2.07	-5.33	-3.26
E1P	-5.00	2.15	-5.33	-3.18
EE1P	-5.00	1.51	-5.33	-3.81
EEE1P	-5.00	1.07	-5.33	-4.25

第 10-3-4 表 燃料誤操作後の起動時の解析結果（高濃縮ウラン炉心）

（各炉心の上段が中心架台反応度の最低値の結果、下段が中心架台反応度=5%Δk/kの結果）

炉心	スクラム 発生時刻 (s)	スクラム時の中心 架台位置（上限を 基準）(cm)	最大出力 (W)	起動後積算出力 (J)	燃料要素 の温度上昇 (°C)
E3.7P	74.5	-28.4	0.128	3.30	$1.86 \times 10^{-3}$
	97.0	-17.2	0.124	3.61	$2.03 \times 10^{-3}$
E3P	57.2	-39.9	0.128	2.88	$1.51 \times 10^{-3}$
	86.6	-20.3	0.127	3.00	$1.57 \times 10^{-3}$
E2P	37.6	-56.2	0.138	2.25	$9.97 \times 10^{-4}$
	78.6	-25.7	0.128	3.25	$1.44 \times 10^{-3}$
E1P	38.2	-55.5	0.138	2.28	$6.35 \times 10^{-4}$
	77.3	-26.5	0.128	3.26	$9.08 \times 10^{-4}$
EE1P	43.2	-49.6	0.135	2.41	$3.24 \times 10^{-4}$
	87.0	-20.1	0.127	3.20	$4.30 \times 10^{-4}$
EEE1P	80.0	-24.7	0.129	3.47	$2.86 \times 10^{-4}$
	98.1	-16.9	0.124	3.66	$3.02 \times 10^{-4}$

### 10-3-2-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

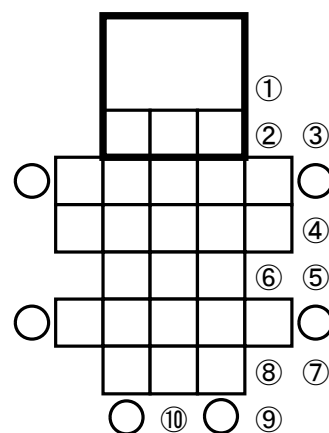
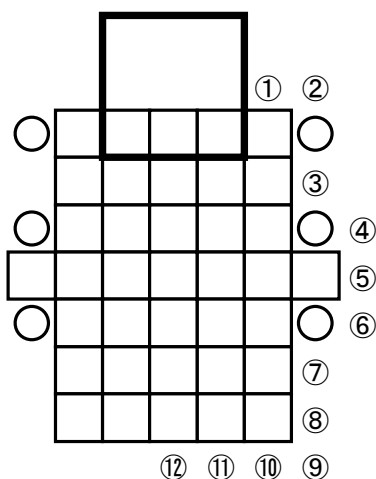
燃料集合体の装荷により印加される反応度の解析結果について、L5. 5P-30 炉心及び L2P-30 炉心（ともに低濃縮ウラン炉心）の場合を例にとって、第 10-3-5 表、第 10-3-6 図及び第 10-3-7 図に示す。各燃料セルの炉心で燃料集合体の誤装荷による温度上昇の解析結果を第 10-3-6 表に示す。ここで示した炉心は、各燃料セルの炉心の中で燃料集合体の誤装荷による反応度が最大となる場合と最小となる場合である。例えば、温度上昇が大きくなった L5. 5P-30 炉心（第 10-3-6 図）と L2P-30 炉心（第 10-3-7 図）の場合についての燃料集合体誤装荷による反応度を第 10-3-5 表に示すが、ここでは、両炉心とも⑨の位置に燃料集合体を装荷したときに、最も温度上昇が大きくなる。

温度上昇が最も大きいのは L2P-30 炉心であるが、燃料要素の温度上昇は高々約 1.1℃である。従って、核分裂生成物は燃料要素から放出されないため、設計基準事故時の判断基準を満足している。この炉心について、中心架台の反応度校正曲線を第 10-3-8 図に、反応度の変化（制御棒引抜前まで）を第 10-3-9 図に示す。また、炉心出力の変化を第 10-3-10 図及び第 10-3-11 図に示す。

その他の結果として、反応度が小さい燃料集合体を装荷した場合で、L2P-30 炉心の次に温度上昇が最も大きくなった L5. 5P-30 炉心の中心架台の反応度校正曲線を第 10-3-12 図に、反応度の変化（制御棒引抜前まで）を第 10-3-13 図に示す。また、炉心出力の変化を第 10-3-14 図及び第 10-3-15 図に示す。このケースでは、中心架台を上限にしても未臨界である。さらに、L5. 5P-30 炉心において、反応度が大きな燃料集合体を装荷した場合の出力変化を第 10-3-16 図に示す。このケースでは、中心架台の上昇中に出力が 120W を超える。

第 10-3-5 表 燃料集合体装荷により印加される反応度の解析結果の例（低濃縮ウラン炉心）

位置	印加反応度 (% $\Delta k/k$ )	
	L5. 5P-30 炉心	L2P-30 炉心
①	0.181	0.482
②	0.086	0.717
③	0.376	0.456
④	0.218	0.787
⑤	0.231	0.998
⑥	0.214	1.257
⑦	0.433	0.376
⑧	0.226	0.557
⑨	0.076	0.370
⑩	0.194	0.518



第 10-3-6 図 L5.5P-30 炉心（低濃縮ウラン炉心）

第 10-3-7 図 L2P-30 炉心（低濃縮ウラン炉心）

（○の数字は燃料集合体の誤装荷位置）

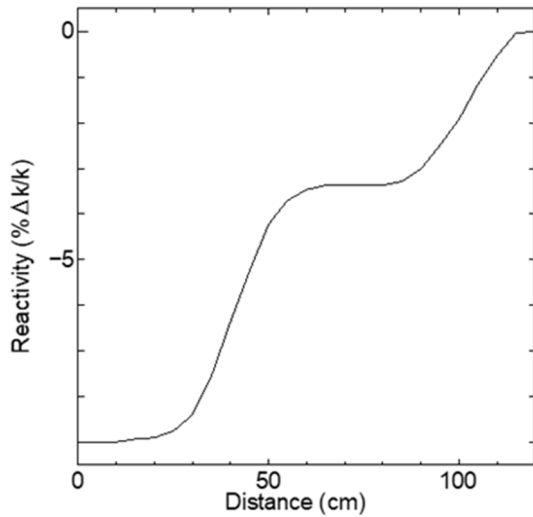
（○の数字は燃料集合体の誤装荷位置）

第 10-3-6 表 燃料集合体の誤装荷による温度上昇の解析結果（低濃縮ウラン炉心）

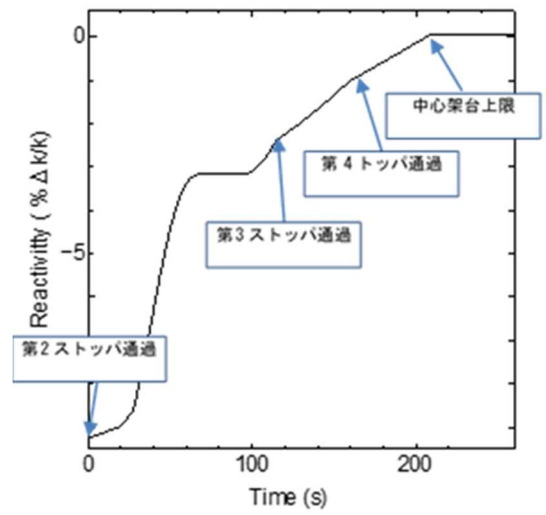
炉心名称	燃料集合体 装荷反応度 (%Δk/k)	中心架台 反応度 (%Δk/k)	120W 超まで の時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 (°C)	温度上昇 <sup>b</sup> (°C)
L5.5P-50 (最大)	0.927	8.22	183.9 <sup>a</sup>	$8.26 \times 10^2$	$9.17 \times 10^{-2}$	$2.10 \times 10^{-1}$
L5.5P-30 (最小)	0.076	3.47	45.6	$1.26 \times 10^3$	$1.56 \times 10^{-1}$	$3.57 \times 10^{-1}$
L4P-50 (最大)	1.137	11.5	157.9 <sup>a</sup>	$5.34 \times 10^2$	$5.24 \times 10^{-2}$	$1.17 \times 10^{-1}$
L4P-30 (最小)	0.152	5.93	36.0	$1.23 \times 10^3$	$1.54 \times 10^{-1}$	$3.36 \times 10^{-1}$
L3P-50 (最大)	1.745	12.7	134.6 <sup>a</sup>	$5.20 \times 10^2$	$4.75 \times 10^{-2}$	$1.01 \times 10^{-1}$
L3P-30 (最小)	0.179	8.64	33.5	$1.41 \times 10^3$	$1.56 \times 10^{-1}$	$3.25 \times 10^{-1}$
L2P-50 (最大)	1.854	17.5	134.9 <sup>a</sup>	$4.84 \times 10^2$	$3.28 \times 10^{-2}$	$8.40 \times 10^{-2}$
L2P-30 (最小)	0.370	9.00	16.8	$5.80 \times 10^3$	$4.86 \times 10^{-1}$	$1.13 \times 10^0$
L1P-50 (最大)	1.096	10.7	147.8 <sup>a</sup>	$5.80 \times 10^2$	$2.27 \times 10^{-2}$	$7.34 \times 10^{-2}$
L1P-30 (最小)	0.219	8.70	31.3	$1.60 \times 10^3$	$6.90 \times 10^{-2}$	$2.11 \times 10^{-1}$
LL1P-50 (最大)	0.974	5.83	140.8 <sup>a</sup>	$8.10 \times 10^2$	$1.34 \times 10^{-2}$	$5.05 \times 10^{-2}$
LL1P-30 (最小)	0.180	3.23	35.4	$1.11 \times 10^3$	$1.91 \times 10^{-2}$	$7.58 \times 10^{-2}$

a 中心架上昇のみでスクラムしたケース、他は追加で制御棒を引抜いてスクラムしたケース

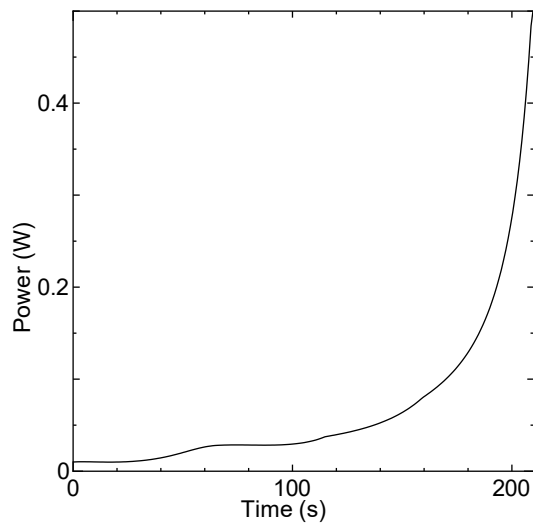
b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.01 倍）を掛けた値



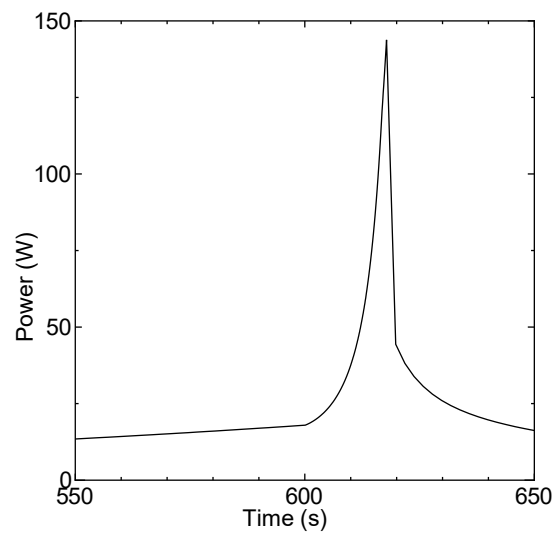
第 10-3-8 図 L2P-30 (最小ケース) の  
中心架台の反応度校正曲線  
(上限から 120cm 下がった位置を基準)



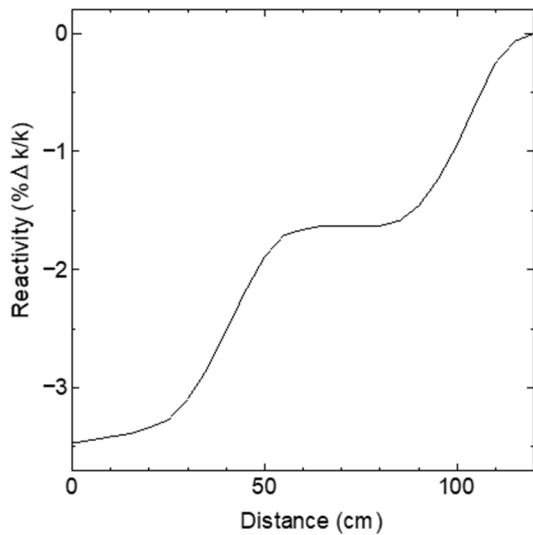
第 10-3-9 図 L2P-30 (最小ケース) の  
反応度変化



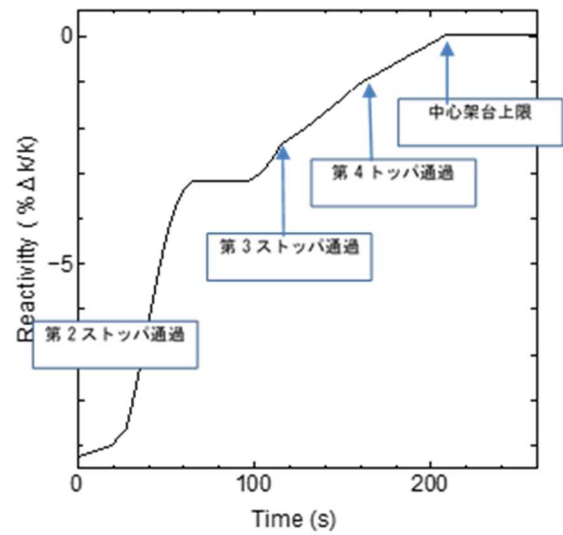
第 10-3-10 図 L2P-30 (最小ケース) の出力変化  
(中心架台上昇まで)



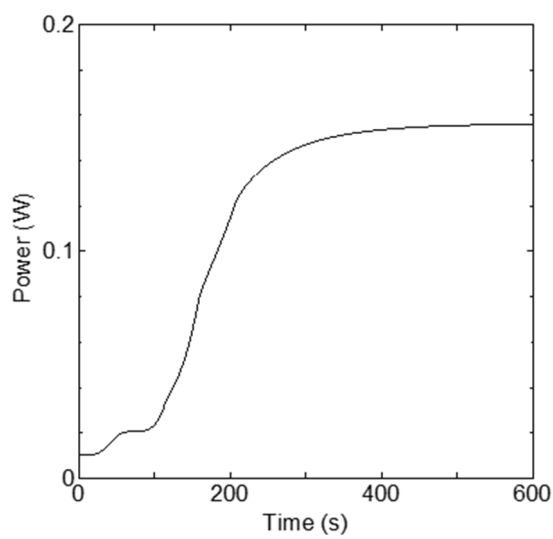
第 10-3-11 図 L2P-30 (最小ケース) の出力変化  
(600s から制御棒引抜き開始)



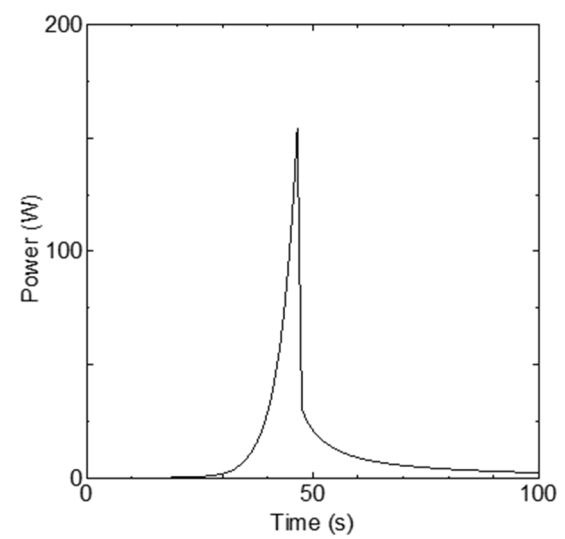
第 10-3-12 図 L5.5P-30 (最小ケース) の  
中心架台反応度校正曲線  
(上限から 120cm 下がった位置を基準)



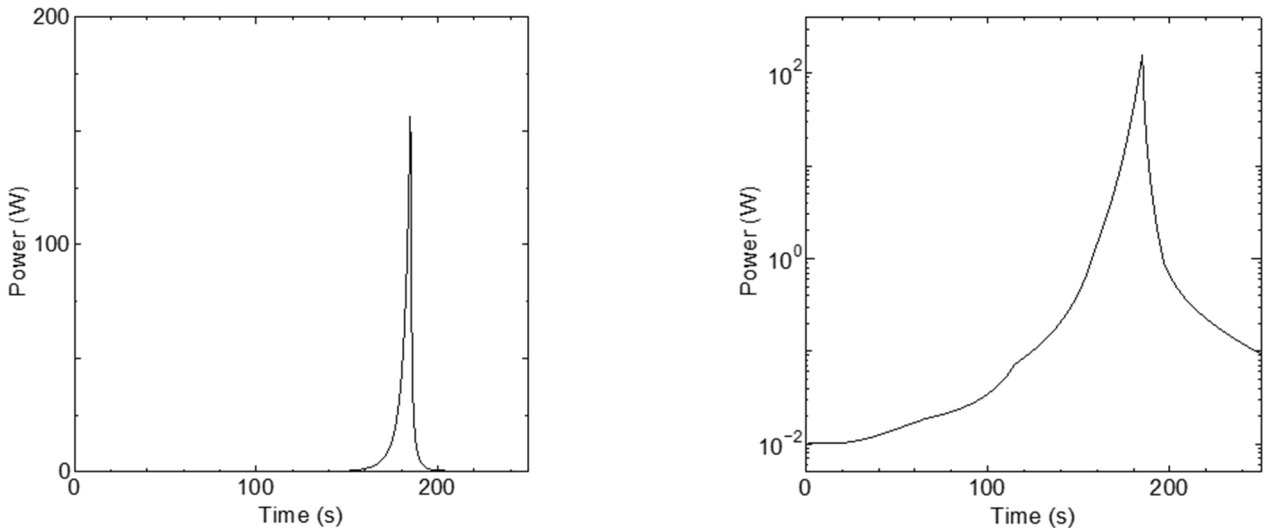
第 10-3-13 図 L5.5P-30 (最小ケース) の  
反応度変化



第 10-3-14 図 L5.5P-30 (最小ケース) の  
出力変化 (中心架台上昇は 208s まで)



第 10-3-15 図 L5.5P-30 (最小ケース) の  
出力変化 (制御棒の上昇開始を 0s とする)



第 10-3-16 図 L5.5P-30（最大ケース）の出力変化  
 左図：縦軸線型スケール、右図：縦軸対数スケール

### 10-3-3 燃料の機械的破損

#### 10-3-3-1 発生状況及び防止対策

燃料集合体の組立て、運搬、炉心装荷作業等の取扱中に誤って燃料集合体を落下させる等した場合、燃料集合体が機械的に破損して、燃料要素より核分裂生成物が放出され、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。燃料体の機械的破損を防止するために、次のような対策を講じている。

- (1) 燃料体の取扱いは、経験豊富な臨界装置部員が慎重に行う。また、臨界装置部員以外のものが燃料体を取扱う際には、作業前に燃料体の取扱方法について説明し、作業中は必ず臨界装置部員が立会って、燃料体を破損させることがないように、作業を実施している。
- (2) 燃料体の取扱い作業は、複数の作業員で行うようにすることで、監視しながら燃料体の取扱いを実施し、落下等の失敗をしないようにしている。
- (3) 燃料体の運搬作業には、専用の運搬台車を用いることで、運搬中のトラブルがないようにしている。

#### 10-3-3-2 設計基準事故の解析（高濃縮ウラン炉心及び低濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心及び低濃縮ウラン炉心における燃料の機械的破損については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 軽水減速架台又は固体減速架台において、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 9 回繰り返すとする。各運転間隔は、30 日間とし、その後、最後の運転の 24 時間後（次の月の初日）に 100W での運転を 1 時間行う。なお、この運転パターンは、設置申請書に記載する運転の制限値を満足している。



- (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う。そのとき、1 体の燃料集合体を取扱う際に、誤って燃料要素を損傷させたとする。燃料板破損時に燃料要素内に残っている核分裂生成物の量は、ORIGEN-2 コードにより求める。
- (3) 軽水減速架台では、1 枚の燃料要素を破損させ、燃料要素芯材において表面より核分裂生成物の飛程に相当する 15 μm 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とする。固体減速架台では、1 体の燃料集合体のうち 10%の燃料要素が折曲がり、燃料要素の切断面から FP の飛程に相当する約 15 μm 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とする。

評価に用いる数値については、添付書類六の第 6-1-14 表に記載した値を使用する。

### 10-3-3-3 解析方法 (高濃縮ウラン炉心及び低濃縮ウラン炉心)

核分裂生成物の放出は全て地上放出とし、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。希ガスからは直接ガンマ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 $(X/Q)_{97\%}$ 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。

$$D_{\gamma} = Q_{\gamma} + \left(\frac{D}{Q}\right)_{97\%} \quad (1)$$

ここで、

$D_{\gamma}$  : ガンマ線による実効線量 (Sv)

$Q_{\gamma}$  : 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  $^{131}\text{I}$  等価放出量に基づいて、次式により計算する。

$$D = K_{\text{He}} \cdot M \cdot Q_e \cdot \left(\frac{X}{Q}\right)_{97\%} \quad (2)$$

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、

$K_{Hi}$  : よう素の呼吸摂取による実効線量 (Sv)

$Q_i$  :  $^{131}I$  の吸入摂取による小児の実効線量係数 (Sv/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 (ガンマ線) について、相対線量として  $8.6 \times 10^{-18} Sv/Bq$  (KUR の添付書類六に記載した実効放出継続時間が 1 時間の値、西南西方向、第 10-3-17 図に研究所の敷地図を示す) を用いる。また、よう素については、相対濃度として  $2.2 \times 10^{-6} h/m^3$  (KUR の添付書類六に記載した実効放出継続時間が 1 時間の値、西南西方向) を用いる。

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



第 10-3-17 図 複合原子力科学研究所の施設配置図（16 方位記入）

#### 10-3-3-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

結果を第 10-3-7 表及び第 10-3-8 表に示す。被ばく量は、最大でも軽水減速架台の燃料要素の機械的破損による小児に対する値である約  $0.18 \mu\text{Sv}$  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及ぼさない。

第 10-3-7 表 燃料要素損傷に伴う被ばく線量（固体減速架台）（高濃縮ウラン炉心）

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 ( $\mu$ Sv)
$^{83m}\text{Kr}$	$5.70 \times 10^1$	$2.85 \times 10^{-1}$	$1.16 \times 10^4$	$5.45 \times 10^{-7}$
$^{85}\text{Kr}$	$2.25 \times 10^0$	$9.88 \times 10^{-3}$		
$^{85m}\text{Kr}$	$5.26 \times 10^2$	$1.67 \times 10^2$		
$^{87}\text{Kr}$	$2.48 \times 10^{-1}$	$3.94 \times 10^{-1}$		
$^{88}\text{Kr}$	$2.43 \times 10^2$	$9.49 \times 10^2$		
$^{131m}\text{Xe}$	$4.98 \times 10^0$	$1.99 \times 10^{-1}$		
$^{133}\text{Xe}$	$4.91 \times 10^3$	$4.42 \times 10^2$		
$^{133m}\text{Xe}$	$2.92 \times 10^2$	$2.46 \times 10^1$		
$^{135}\text{Xe}$	$1.84 \times 10^4$	$9.22 \times 10^3$		
$^{135m}\text{Xe}$	$9.37 \times 10^2$	$8.10 \times 10^2$		
$^{131}\text{I}$	$1.95 \times 10^3$	$1.95 \times 10^3$	$6.46 \times 10^3$	$3.36 \times 10^{-3}$
$^{132}\text{I}$	$6.42 \times 10^3$	$9.23 \times 10^1$		
$^{133}\text{I}$	$1.60 \times 10^4$	$4.11 \times 10^3$		
$^{134}\text{I}$	$1.13 \times 10^{-2}$	$4.87 \times 10^{-5}$		
$^{135}\text{I}$	$5.85 \times 10^3$	$3.11 \times 10^2$		

第 10-3-8 表 燃料要素損傷に伴う被ばく線量（軽水減速架台）（高濃縮ウラン炉心）

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 ( $\mu$ Sv)
$^{83m}\text{Kr}$	$2.97 \times 10^3$	$1.49 \times 10^1$	$6.06 \times 10^5$	$2.84 \times 10^{-5}$
$^{85}\text{Kr}$	$1.17 \times 10^2$	$5.16 \times 10^{-1}$		
$^{85m}\text{Kr}$	$2.74 \times 10^4$	$8.73 \times 10^3$		
$^{87}\text{Kr}$	$1.30 \times 10^1$	$2.06 \times 10^1$		
$^{88}\text{Kr}$	$1.27 \times 10^4$	$4.95 \times 10^4$		
$^{131m}\text{Xe}$	$2.60 \times 10^2$	$1.04 \times 10^1$		
$^{133}\text{Xe}$	$2.56 \times 10^5$	$2.31 \times 10^4$		
$^{133m}\text{Xe}$	$1.53 \times 10^4$	$1.28 \times 10^3$		
$^{135}\text{Xe}$	$9.62 \times 10^5$	$4.81 \times 10^5$		
$^{135m}\text{Xe}$	$4.89 \times 10^4$	$4.22 \times 10^4$		
$^{131}\text{I}$	$1.02 \times 10^5$	$1.02 \times 10^5$	$3.37 \times 10^5$	$1.75 \times 10^{-1}$
$^{132}\text{I}$	$3.35 \times 10^5$	$4.82 \times 10^3$		
$^{133}\text{I}$	$8.36 \times 10^5$	$2.14 \times 10^5$		
$^{134}\text{I}$	$5.90 \times 10^{-1}$	$2.54 \times 10^{-3}$		
$^{135}\text{I}$	$3.05 \times 10^5$	$1.62 \times 10^4$		

10-3-3-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

結果を第 10-3-9 表～第 10-3-11 表に示す。被ばく量は、最大でも軽水減速架台の燃料要素の機械的破損による小児に対する値である約  $0.004 \mu\text{Sv}$  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及ぼさない。

第 10-3-9 表 燃料要素損傷に伴う被ばく線量（固体減速炉心：L3-50 炉心）（低濃縮ウラン炉心）

核種	生成量 (Bq)	放出量 (Bq) ①	実効 エネルギー <sup>a</sup> (MeV/dis) ②	0.5MeV 換算 放出量 (Bq) ③	合計放出量 (Bq) ④	実効線量 <sup>b</sup> ( $\mu$ Sv)
<sup>83m</sup> Kr	1.64E+07	3.31E+02	0.0025	$1.65E \times 10^0$	$6.74 \times 10^4$	$5.79 \times 10^{-7}$
<sup>85</sup> Kr	6.45E+05	1.30E+01	0.0022	$5.72 \times 10^{-2}$		
<sup>85m</sup> Kr	1.51E+08	3.04E+03	0.159	$9.68 \times 10^2$		
<sup>87</sup> Kr	7.13E+04	1.44E+00	0.793	$2.28 \times 10^0$		
<sup>88</sup> Kr	6.99E+07	1.41E+03	1.950	$5.49 \times 10^3$		
<sup>131m</sup> Xe	1.44E+06	2.90E+01	0.020	$1.16 \times 10^0$		
<sup>133</sup> Xe	1.41E+09	2.85E+04	0.045	$2.57 \times 10^3$		
<sup>133m</sup> Xe	8.42E+07	1.70E+03	0.042	$1.43 \times 10^2$		
<sup>135</sup> Xe	5.31E+09	1.07E+05	0.250	$5.35 \times 10^4$		
<sup>135m</sup> Xe	2.70E+08	5.44E+03	0.432	$4.70 \times 10^3$		

a 「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)

b  $(6.7 \times 10^4) \times (8.6 \times 10^{-18})$  Sv/Bq

③=①×②÷0.5

④=③の放出量の合計

第 10-3-10 表 燃料要素損傷に伴う被ばく線量（固体減速炉心：L3-50 炉心）（低濃縮ウラン炉心）

核種	生成量 (Bq)	放出量 (Bq) ①	核種 i の吸入摂取に よる小児の実効線 量係数 (Sv/Bq) ②	<sup>131</sup> I 等価放出量 (Bq) ③	合計放出量 (Bq) ④	実効線量 <sup>a</sup> ( $\mu$ Sv)
<sup>131</sup> I	$5.64 \times 10^8$	$1.14 \times 10^4$	$1.6 \times 10^{-7}$	$1.14 \times 10^4$	$3.75 \times 10^4$	$4.10 \times 10^{-3}$
<sup>132</sup> I	$1.85 \times 10^9$	$3.73 \times 10^4$	$2.3 \times 10^{-9}$	$5.37 \times 10^2$		
<sup>133</sup> I	$4.61 \times 10^9$	$9.30 \times 10^4$	$4.1 \times 10^{-8}$	$2.38 \times 10^4$		
<sup>134</sup> I	$3.25 \times 10^3$	$6.56 \times 10^{-2}$	$6.9 \times 10^{-10}$	$2.83 \times 10^{-4}$		
<sup>135</sup> I	$1.68 \times 10^9$	$3.39 \times 10^4$	$8.5 \times 10^{-9}$	$1.80 \times 10^3$		

a  $(3.75 \times 10^4) \times (1.6 \times 10^{-7})$  Sv/Bq ×  $(2.2 \times 10^{-6})$  h/m<sup>3</sup> ×  $0.31$  m<sup>3</sup>/h

③=①×②÷ $(1.6 \times 10^{-7})$  (<sup>131</sup>I の値)

④=③の放出量の合計

第 10-3-11 表 燃料要素損傷に伴う被ばく線量（軽水減速炉心：C45G(2H<sub>2</sub>O)4 列炉心）

（低濃縮ウラン炉心）

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 ( $\mu$ Sv)
<sup>83m</sup> Kr	$8.74 \times 10^1$	$4.37 \times 10^{-1}$	$1.78 \times 10^4$	$1.53 \times 10^{-7}$ <sup>a</sup>
<sup>85</sup> Kr	$3.44 \times 10^0$	$1.51 \times 10^{-2}$		
<sup>85m</sup> Kr	$8.05 \times 10^2$	$2.56 \times 10^2$		
<sup>87</sup> Kr	$3.80 \times 10^{-1}$	$6.03 \times 10^{-1}$		
<sup>88</sup> Kr	$3.73 \times 10^2$	$1.45 \times 10^3$		
<sup>131m</sup> Xe	$7.66 \times 10^0$	$3.06 \times 10^{-1}$		
<sup>133</sup> Xe	$7.54 \times 10^3$	$6.79 \times 10^2$		
<sup>133m</sup> Xe	$4.49 \times 10^2$	$3.77 \times 10^1$		
<sup>135</sup> Xe	$2.83 \times 10^4$	$1.41 \times 10^4$		
<sup>135m</sup> Xe	$1.44 \times 10^3$	$1.24 \times 10^3$		
<sup>131</sup> I	$3.01 \times 10^3$	$3.01 \times 10^3$	$9.93 \times 10^3$	$1.08 \times 10^{-3}$ <sup>b</sup>
<sup>132</sup> I	$9.87 \times 10^3$	$1.42 \times 10^2$		
<sup>133</sup> I	$2.46 \times 10^4$	$6.31 \times 10^3$		
<sup>134</sup> I	$1.73 \times 10^{-2}$	$7.48 \times 10^{-5}$		
<sup>135</sup> I	$8.97 \times 10^3$	$4.77 \times 10^2$		

a  $(1.78 \times 10^4) \times (8.6 \times 10^{-18})$  Sv/Bq

b  $(9.93 \times 10^3) \times (1.6 \times 10^{-7})$  Sv/Bq  $\times (2.2 \times 10^{-6})$  h/m<sup>3</sup>  $\times 0.31$  m<sup>3</sup>/h

#### 10-3-4 実験設備、実験物等の著しい破損

##### 10-3-4-1 発生状況及び防止対策

パイルオシレータで核燃料の実験物を用いているときに、実験物が何らかの原因により損傷した場合、実験物より核分裂生成物が放出される可能性がある。実験物の機械的破損を防止し、あるいは万一発生した場合でも、その影響を限定するとともに、その波及を制限するために、次のような対策を講じている。

- (1) パイルオシレータの実験物に核燃料を用いている場合、その取扱いは、経験豊富な臨界装置部員が慎重に行い、実験物を破損させることがないように、作業を実施する。
- (2) 使用中の実験物は、パイルオシレータの内部に封入されているため、実験物が損傷する可能性は低く、また、万一破損した場合でも、放射性物質の放出を少なく抑えるようにする。

#### 10-3-4-2 設計基準事故の解析（高濃縮ウラン炉心）

高濃縮ウラン炉心における実験設備、実験物等の著しい破損については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 固体減速架台で最大出力 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）の実験物の反応度測定を行う。各実験物の量は、パイルオシレータ実験での反応度の絶対値の最大値（ $0.1\% \Delta k/k$ ）であるとする。
- (2) 最大積算出力となる運転の終了直後に、濃縮ウランの実験物が破損し、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。
- (3) 放出の経路については、「10-3-3 燃料の機械的破損」と同じとする。

#### 10-3-4-3 設計基準事故の解析（低濃縮ウラン炉心）

低濃縮ウラン炉心における実験設備、実験物等の著しい破損については、以下のシナリオに従った解析を行うものとする。

- (1) 解析の対象とする炉心は、固体減速炉心の代表炉心の中で、核燃料の実験物（天然ウラン（NU）又は濃縮ウラン（EU、濃縮度 4.5%））の核分裂率が最も大きくなる炉心とする。
- (2) 固体減速架台で最大出力 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）の実験物の反応度測定を行う。各実験物の量は、反応度が最大となる位置において、反応度が絶対値の最大値（ $0.1\% \Delta k/k$ ）となる量とする。実験物は、各炉心で熱群の中性子束が最大となる位置に固定していたとする。
- (3) 最大積算出力（100Wh）となる運転の終了直後に、濃縮ウラン実験物が破損し、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。
- (3) 放出の経路については「10-3-3 燃料の機械的破損」と同じとする。

#### 10-3-4-4 解析結果（高濃縮ウラン炉心）

結果を第10-3-12表～第10-3-15表に示す。被ばく量は、最大でも小児に対する値である約 $0.092 \mu Sv$ 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及ぼさない。



第 10-3-12 表 NU 実験物破損時の被ばく線量 (高濃縮ウラン炉心 : E3P 炉心)

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 ( $\mu$ Sv)
$^{83m}\text{Kr}$	$1.46 \times 10^4$	$7.30 \times 10^0$	$3.65 \times 10^6$	$1.71 \times 10^{-4}$
$^{85}\text{Kr}$	$1.27 \times 10^{-1}$	$5.57 \times 10^{-4}$		
$^{85m}\text{Kr}$	$1.31 \times 10^5$	$4.18 \times 10^4$		
$^{87}\text{Kr}$	$7.80 \times 10^5$	$1.24 \times 10^6$		
$^{88}\text{Kr}$	$5.69 \times 10^5$	$2.22 \times 10^6$		
$^{131m}\text{Xe}$	$1.65 \times 10^{-2}$	$6.60 \times 10^{-4}$		
$^{133}\text{Xe}$	$2.12 \times 10^2$	$1.91 \times 10^1$		
$^{133m}\text{Xe}$	$5.51 \times 10^1$	$4.63 \times 10^0$		
$^{135}\text{Xe}$	$2.84 \times 10^4$	$1.42 \times 10^4$		
$^{135m}\text{Xe}$	$1.64 \times 10^5$	$1.42 \times 10^5$		
$^{131}\text{I}$	$1.84 \times 10^3$	$1.84 \times 10^3$	$5.90 \times 10^4$	$3.07 \times 10^{-2}$
$^{132}\text{I}$	$1.15 \times 10^4$	$1.65 \times 10^2$		
$^{133}\text{I}$	$9.60 \times 10^4$	$2.46 \times 10^4$		
$^{134}\text{I}$	$1.52 \times 10^6$	$6.57 \times 10^3$		
$^{135}\text{I}$	$4.87 \times 10^5$	$2.59 \times 10^4$		

第 10-3-13 表 NU 実験物破損時の被ばく線量 (高濃縮ウラン炉心 : EE1P 炉心)

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 ( $\mu$ Sv)
$^{83m}\text{Kr}$	$4.40 \times 10^4$	$2.20 \times 10^1$	$1.18 \times 10^7$	$5.51 \times 10^{-4}$
$^{85}\text{Kr}$	$3.81 \times 10^{-1}$	$1.68 \times 10^{-3}$		
$^{85m}\text{Kr}$	$4.21 \times 10^5$	$1.34 \times 10^5$		
$^{87}\text{Kr}$	$2.52 \times 10^6$	$4.00 \times 10^6$		
$^{88}\text{Kr}$	$1.84 \times 10^6$	$7.16 \times 10^6$		
$^{131m}\text{Xe}$	$4.85 \times 10^{-2}$	$1.94 \times 10^{-3}$		
$^{133}\text{Xe}$	$6.18 \times 10^2$	$5.56 \times 10^1$		
$^{133m}\text{Xe}$	$1.33 \times 10^2$	$1.12 \times 10^1$		
$^{135}\text{Xe}$	$8.78 \times 10^4$	$4.39 \times 10^4$		
$^{135m}\text{Xe}$	$5.21 \times 10^5$	$4.50 \times 10^5$		
$^{131}\text{I}$	$5.25 \times 10^3$	$5.25 \times 10^3$	$1.77 \times 10^5$	$9.20 \times 10^{-2}$
$^{132}\text{I}$	$2.67 \times 10^4$	$3.83 \times 10^2$		
$^{133}\text{I}$	$2.83 \times 10^5$	$7.25 \times 10^4$		
$^{134}\text{I}$	$4.67 \times 10^6$	$2.02 \times 10^4$		
$^{135}\text{I}$	$1.48 \times 10^6$	$7.87 \times 10^4$		

第 10-3-14 表 EU 実験物破損時の被ばく線量 (高濃縮ウラン炉心 : E3P 炉心)

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 ( $\mu$ Sv)
$^{83m}\text{Kr}$	$4.04 \times 10^3$	$2.02 \times 10^0$	$1.01 \times 10^6$	$4.73 \times 10^{-5}$
$^{85}\text{Kr}$	$3.50 \times 10^{-2}$	$1.54 \times 10^{-4}$		
$^{85m}\text{Kr}$	$3.63 \times 10^4$	$1.15 \times 10^4$		
$^{87}\text{Kr}$	$2.16 \times 10^5$	$3.42 \times 10^5$		
$^{88}\text{Kr}$	$1.57 \times 10^5$	$6.13 \times 10^5$		
$^{131m}\text{Xe}$	$4.56 \times 10^{-3}$	$1.82 \times 10^{-4}$		
$^{133}\text{Xe}$	$5.86 \times 10^1$	$5.27 \times 10^0$		
$^{133m}\text{Xe}$	$1.52 \times 10^1$	$1.28 \times 10^0$		
$^{135}\text{Xe}$	$7.86 \times 10^3$	$3.93 \times 10^3$		
$^{135m}\text{Xe}$	$4.54 \times 10^4$	$3.93 \times 10^4$		
$^{131}\text{I}$	$5.07 \times 10^2$	$5.07 \times 10^2$	$1.63 \times 10^4$	$8.49 \times 10^{-3}$
$^{132}\text{I}$	$3.16 \times 10^3$	$4.55 \times 10^1$		
$^{133}\text{I}$	$2.65 \times 10^4$	$6.80 \times 10^3$		
$^{134}\text{I}$	$4.21 \times 10^5$	$1.81 \times 10^3$		
$^{135}\text{I}$	$1.35 \times 10^5$	$7.15 \times 10^3$		

第 10-3-15 表 EU 実験物破損時の被ばく線量（高濃縮ウラン炉心：EE1P 炉心）

核種	放出量 (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 ( $\mu\text{Sv}$ )
$^{83\text{m}}\text{Kr}$	$1.09 \times 10^4$	$5.44 \times 10^0$	$2.91 \times 10^6$	$1.36 \times 10^{-4}$
$^{85}\text{Kr}$	$9.41 \times 10^{-2}$	$4.14 \times 10^{-4}$		
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$1.04 \times 10^5$	$3.31 \times 10^4$		
$^{87}\text{Kr}$	$6.22 \times 10^5$	$9.87 \times 10^5$		
$^{88}\text{Kr}$	$4.54 \times 10^5$	$1.77 \times 10^6$		
$^{131\text{m}}\text{Xe}$	$1.20 \times 10^{-2}$	$4.79 \times 10^{-4}$		
$^{133}\text{Xe}$	$1.53 \times 10^2$	$1.37 \times 10^1$		
$^{133\text{m}}\text{Xe}$	$3.28 \times 10^1$	$2.76 \times 10^0$		
$^{135}\text{Xe}$	$2.17 \times 10^4$	$1.09 \times 10^4$		
$^{135\text{m}}\text{Xe}$	$1.29 \times 10^5$	$1.11 \times 10^5$		
$^{131}\text{I}$	$1.30 \times 10^3$	$1.30 \times 10^3$	$4.37 \times 10^4$	$2.27 \times 10^{-2}$
$^{132}\text{I}$	$6.59 \times 10^3$	$9.47 \times 10^1$		
$^{133}\text{I}$	$6.99 \times 10^4$	$1.79 \times 10^4$		
$^{134}\text{I}$	$1.15 \times 10^6$	$4.98 \times 10^3$		
$^{135}\text{I}$	$3.65 \times 10^5$	$1.94 \times 10^4$		

10-3-4-5 解析結果（低濃縮ウラン炉心）

結果を第 10-3-16 表及び第 10-3-17 表に示す。被ばく量は、最大でも小児に対する値である約  $0.19 \mu\text{Sv}$  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。

第 10-3-16 表 NU 実験物破損時の被ばく線量 (低濃縮ウラン炉心 : L5. 5P-30 炉心)

核種	生成量 (Bq)	放出量 <sup>a</sup> (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 ( $\mu$ Sv)
<sup>83m</sup> Kr	$4.15 \times 10^4$	$4.15 \times 10^3$	$2.07 \times 10^1$	$1.04 \times 10^6$	$8.94 \times 10^{-6}$
<sup>85</sup> Kr	$3.69 \times 10^{-1}$	$3.69 \times 10^{-2}$	$1.62 \times 10^{-4}$		
<sup>85m</sup> Kr	$3.79 \times 10^5$	$3.79 \times 10^4$	$1.20 \times 10^4$		
<sup>87</sup> Kr	$2.22 \times 10^6$	$2.22 \times 10^5$	$3.52 \times 10^5$		
<sup>88</sup> Kr	$1.62 \times 10^6$	$1.62 \times 10^5$	$6.31 \times 10^5$		
<sup>131m</sup> Xe	$4.68 \times 10^{-2}$	$4.68 \times 10^{-3}$	$1.87 \times 10^{-4}$		
<sup>133</sup> Xe	$6.02 \times 10^2$	$6.02 \times 10^1$	$5.41 \times 10^0$		
<sup>133m</sup> Xe	$1.56 \times 10^2$	$1.56 \times 10^1$	$1.31 \times 10^0$		
<sup>135</sup> Xe	$8.08 \times 10^4$	$8.08 \times 10^3$	$4.04 \times 10^3$		
<sup>135m</sup> Xe	$4.67 \times 10^5$	$4.67 \times 10^4$	$4.04 \times 10^4$		
<sup>131</sup> I	$5.21 \times 10^3$	$5.21 \times 10^2$	$5.21 \times 10^2$	$1.68 \times 10^4$	$1.83 \times 10^{-2}$
<sup>132</sup> I	$3.24 \times 10^4$	$3.24 \times 10^3$	$4.66 \times 10^1$		
<sup>133</sup> I	$2.73 \times 10^5$	$2.73 \times 10^4$	$6.98 \times 10^3$		
<sup>134</sup> I	$4.33 \times 10^6$	$4.33 \times 10^5$	$1.87 \times 10^3$		
<sup>135</sup> I	$1.38 \times 10^6$	$1.38 \times 10^5$	$7.35 \times 10^3$		

a 放出量=生成量×0.1

第 10-3-17 表 EU 実験物破損時の被ばく線量（低濃縮ウラン炉心：L2P-50 炉心）

核種	生成量 (Bq)	放出量 <sup>a</sup> (Bq)	換算又は 等価放出量 (Bq)	合計放出量 (Bq)	実効線量 ( $\mu$ Sv)
<sup>83m</sup> Kr	$4.30 \times 10^5$	$4.30 \times 10^4$	$2.15 \times 10^2$	$1.15 \times 10^7$	$9.90 \times 10^{-5}$
<sup>85</sup> Kr	$3.72 \times 10^0$	$3.72 \times 10^{-1}$	$1.64 \times 10^{-3}$		
<sup>85m</sup> Kr	$4.11 \times 10^6$	$4.11 \times 10^5$	$1.31 \times 10^5$		
<sup>87</sup> Kr	$2.46 \times 10^7$	$2.46 \times 10^6$	$3.90 \times 10^6$		
<sup>88</sup> Kr	$1.79 \times 10^7$	$1.79 \times 10^6$	$7.00 \times 10^6$		
<sup>131m</sup> Xe	$4.74 \times 10^{-1}$	$4.74 \times 10^{-2}$	$1.89 \times 10^{-3}$		
<sup>133</sup> Xe	$6.04 \times 10^3$	$6.04 \times 10^2$	$5.44 \times 10^1$		
<sup>133m</sup> Xe	$1.30 \times 10^3$	$1.30 \times 10^2$	$1.09 \times 10^1$		
<sup>135</sup> Xe	$8.58 \times 10^4$	$8.58 \times 10^4$	$4.29 \times 10^4$		
<sup>135m</sup> Xe	$5.09 \times 10^5$	$5.09 \times 10^5$	$4.40 \times 10^5$		
<sup>131</sup> I	$5.13 \times 10^4$	$5.13 \times 10^3$	$5.13 \times 10^3$	$1.73 \times 10^5$	$1.88 \times 10^{-1}$
<sup>132</sup> I	$2.61 \times 10^5$	$2.61 \times 10^4$	$3.75 \times 10^2$		
<sup>133</sup> I	$2.77 \times 10^7$	$2.77 \times 10^5$	$7.09 \times 10^4$		
<sup>134</sup> I	$4.57 \times 10^7$	$4.57 \times 10^6$	$1.97 \times 10^4$		
<sup>135</sup> I	$1.44 \times 10^7$	$1.44 \times 10^6$	$7.66 \times 10^4$		

a 放出量=生成量×0.1

### 参考文献

- 1) U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Safety Evaluation Report related to the Evaluation of Low-Enriched Uranium Silicide-Aluminum Dispersion Fuel for Use in Non-Power Reactors, NUREG-1313 (1988).
- 2) Wolfram Mathematica, <https://www.wolfram.com/mathematica/> .
- 3) A. G. Croff, A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code, "ORNL/TM-7175".
- 4) K. Okumura et al., "SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System", JAEA-Data/Code 2007-004, Japan Atomic Energy Agency (2007).
- 5) D. B. Pelowitz et al., "MCNP6 user's manual", LA-CP-13-00634, Los Alamos National Laboratory (2013).
- 6) K. Shibata et al., "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering", J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), 1-30 (2011).
- 7) T. Misawa et al., "Nuclear Reactor Physics Experiments", Kyoto University Press (2010).