

添付書類

Ⅲ－９－３ 反応度制御についての評価書

- (1) 炉心の核的設計計算書作成の基本方針
- (2) 基本炉心（１）の核的設計計算書

添付書類

Ⅲ－９－３－(1) 炉心の核的設計計算書作成の基本方針

目 次

1.	概要.....	添Ⅲ-9-3-(1)-1
2.	基本方針.....	添Ⅲ-9-3-(1)-1
2.1	炉心構成の条件	添Ⅲ-9-3-(1)-1
2.2	構成してはならない炉心の識別.....	添Ⅲ-9-3-(1)-2
3.	評価条件及び判定基準.....	添Ⅲ-9-3-(1)-2
3.1	炉心の条件	添Ⅲ-9-3-(1)-2
3.2	過剰反応度	添Ⅲ-9-3-(1)-2
3.3	給排水系による最大反応度添加率.....	添Ⅲ-9-3-(1)-2
3.4	安全板による停止時の中性子実効増倍率.....	添Ⅲ-9-3-(1)-3
3.5	炉心特性	添Ⅲ-9-3-(1)-3
4.	計算方法.....	添Ⅲ-9-3-(1)-4
	参考文献.....	添Ⅲ-9-3-(1)-4

1. 概要

STACYの炉心は、炉心構成及び核的制限値並びに炉心特性の範囲内において、実験計画に基づき、炉心タンク内の格子板フレームに取り付けた格子板に棒状燃料及び実験用装荷物（配列式）を垂直になるように配列した後、減速材及び反射材として軽水を炉心タンクに給水することにより構成する。格子板及び格子板フレームは、実験の目的に応じて異なるものを製作し、交換して使用する。棒状燃料は、単一種類又は複数種類のを組み合わせて使用する。このとき、炉心の平均²³⁵U濃縮度（炉心に装荷した全棒状燃料の平均濃縮度）は10wt%以下とする。また、実験用装荷物は、実験の目的に応じて異なるものを製作し、単一種類又は複数種類のを組み合わせて使用する。減速材は、格子間隔の異なる格子板の使用又は格子板へ実験用装荷物（ボイド模擬体ほか）を配列することにより、減速材対燃料ペレット体積比（炉心平均）を0.9以上11以下の範囲で変化させる。軽水には、実験計画に応じて可溶性中性子吸収材を添加する。STACYで構成する炉心は、臨界水位が棒状燃料の有効長下端より40cm以上140cm以下の範囲とする。ただし、未臨界炉心（140cm超の給水によっても臨界とならない炉心）においては水位が140cm以下とする。

STACYの反応度制御は、給排水系及び安全板駆動装置を用いて行う。給排水系は、炉心タンクに制御材（軽水）を給水することにより正の反応度を添加する機能並びに炉心タンクから制御材（軽水）を排水することにより負の反応度を添加する機能を有する。安全板駆動装置は、安全板を炉心内に落下させることにより負の反応度を添加する機能を有する。

本書は、炉心タンクに制御材（軽水）を給水する場合の正の反応度添加率の評価並びに安全板を炉心内に落下させた場合の反応度抑制効果の評価に関する基本方針、これらの評価条件及び評価方法を示すものである。

2. 基本方針

2.1 炉心構成の条件

STACYで構成する炉心は以下の主要な核的制限値を満足するよう構成する。

- | | | | |
|-----|--------------------|-------|----------|
| (1) | 最大過剰反応度 | 0.8 | ドル |
| | 最大添加反応度 | 0.3 | ドル |
| (2) | 臨界近傍における最大反応度添加率 | 3 | セント/s 以下 |
| (3) | 安全板による停止時の中性子実効増倍率 | | |
| | 全数挿入時 | 0.985 | 以下 |
| | ワンロッドスタック(*)時 | 0.995 | 以下 |

(*)最大反応度値を有する安全板1枚が挿入不能なとき

また、炉心は、その特性が表1及び表2に示す範囲になるよう構成するものとする。

2.2 構成してはならない炉心の識別

炉心を構成するときには、実験計画に応じて炉心を構成する範囲を決定し、2.1に示した炉心構成の条件を満足していることを、原則として計算解析により評価し、確認する。評価条件及び判定基準の詳細は本書の3章以降に示す。このとき、計画した範囲内に炉心構成の条件を満足しない炉心が確認されたときは、当該炉心を「構成してはならない炉心」として特定し、炉心構成範囲外として識別する。

上記の手続きは、原子力科学研究所原子炉施設保安規定に定め、遵守する。

3. 評価条件及び判定基準

3.1 炉心の条件

本書に示す基本方針に従って評価する炉心の臨界水位の制限値は40cm以上140cm以下の範囲である。また、制御材は、軽水及びこれに可溶性中性子吸収材を付加したものとし、ウラン棒状燃料の ^{235}U 濃縮度は10 wt%以下とする。

3.2 過剰反応度

STACYでは、計測制御系統施設のプロセス計装設備である最大給水制限スイッチ及び給水停止スイッチにより、炉心に給水される軽水の水位を制限することによって、過剰反応度に関する制限を担保する。最大給水制限スイッチ及び給水停止スイッチによる水位制限について図1に示す。

最大給水制限スイッチの上限位置は、給水系の吐出弁の閉動作時間（1 s）及び低速給水系による水位上昇速度（最大1 mm/s）並びに最大給水制限スイッチの水面検出誤差（ ± 1.5 mm）を考慮して、最大過剰反応度（0.8 ドル）に相当する臨界超過水位よりも下方に制限する。

同様に、給水停止スイッチの上限位置は、給水系の吐出弁の閉動作時間（1 s）及び低速給水系による水位上昇速度（最大1 mm/s）並びに給水停止スイッチの水面検出誤差（ ± 1.5 mm）を考慮して、最大添加反応度（0.3 ドル）に相当する臨界超過水位よりも下方に制限する。

なお、STACYの炉心は、水位反応度係数が6 セント/mm（ $=6.0 \times 10^{-2}$ ドル/mm。表1参照）以下になる範囲で構成することから、図1に示すとおり、もともと水位反応度係数が大きい炉心においても運転を行うことができる。

3.3 給排水系による最大反応度添加率

臨界近傍における最大反応度添加率3セント/sに相当する給水流量を V_{lim} 、臨界近傍における制御材（軽水）の高さを H 、炉心タンク内の水面の面積を S とすると、水位反応度係数 $d\rho/dH$ と V_{lim} は以下の関係式で表される。

$$\frac{d\rho}{dH} \cdot \frac{V_{lim}}{S} = 3 \text{ セント} / \text{s}$$

$d\rho/dH$ は、 H のほぼ3乗に反比例するため、上式より臨界水位が最小の場合に V_{lim} が最小となる。給排水系の制御能力の評価では、実験計画時の計算解析により求めた $d\rho/dH$ を用いて算出した V_{lim} の最小値と低速給水系の給水制御能力を比較して、低速給水系の最小給水流量がこの V_{lim} を十分下回っているかどうかにより判定する。ただし、実測データにより見通しが明らかな場合は、計算解析を省略することができる。計算解析のみにより $d\rho/dH$ を求めた場合は、原子力科学研究所原子炉施設保安規定に定める手順に従って実測により計算解析の妥当性を確認する。

なお、前節に示したとおり、STACYの炉心は水位反応度係数 $d\rho/dH$ が6 セント/mm (= 6.0×10^{-2} ドル/mm) を下回るように構成する。この、もっとも給排水系による反応度添加率が大きいときの V_{lim} は 65 l/min である。

3.4 安全板による停止時の中性子実効増倍率

安全板による反応度抑制効果は、実験計画時の計算解析により、安全板の全挿入による停止時の中性子実効増倍率が 0.985 以下、ワンロッドスタック時（最大の反応度係数を持つ安全板1枚が挿入不能なとき）の中性子実効増倍率が 0.995 以下となることを確認することにより評価する。ただし、実測データにより見通しが明らかな場合は、計算解析を省略することができる。計算解析のみにより安全板の反応度抑制効果を評価した場合は、原子力科学研究所原子炉施設保安規定に定める手順に従って実測により計算解析の妥当性を確認する。さらに、STACY施設は想定される津波の遡上高さ (T.P. +約 6m) を敷地高さ (T.P. +約 8m) が上回るため津波による浸水のおそれはない。ただし、想定を超えた津波による浸水に対し炉心の未臨界を確保するため、安全板（又は安全板と同じ材料で製作する中性子吸収板（以下「未臨界板」という。））の性能とあいまって、海水による全水没を想定したときに中性子実効増倍率が 0.995 以下にできることを計算解析によって確認する。このとき、ワンロッドスタックは想定しない。また、評価に当たっては適切な臨界バイアスを考慮する。

3.5 炉心特性

炉心の特性は、原子力科学研究所原子炉施設保安規定に定める手続きに従い、実験計画段階において、水位、温度及びボイドに関する反応度係数並びに即発中性子寿命及び実効遅発中性子割合の変化範囲を計算解析により確認し、それらの特性値が表1及び表2に示す範囲内に収まる見通しがあることを確認する。

4. 計算方法

本評価書における評価には、以下に示すSN法輸送計算コード又はモンテカルロ法計算コード及び核データライブラリを使用する。ただし、最新の科学的知見の反映、計算技術の発達等により以下に示す計算コード及び核データライブラリ以外のものを用いることもある。その場合は、種々の実験の解析又は実測によりその妥当性を確認した上で使用する。

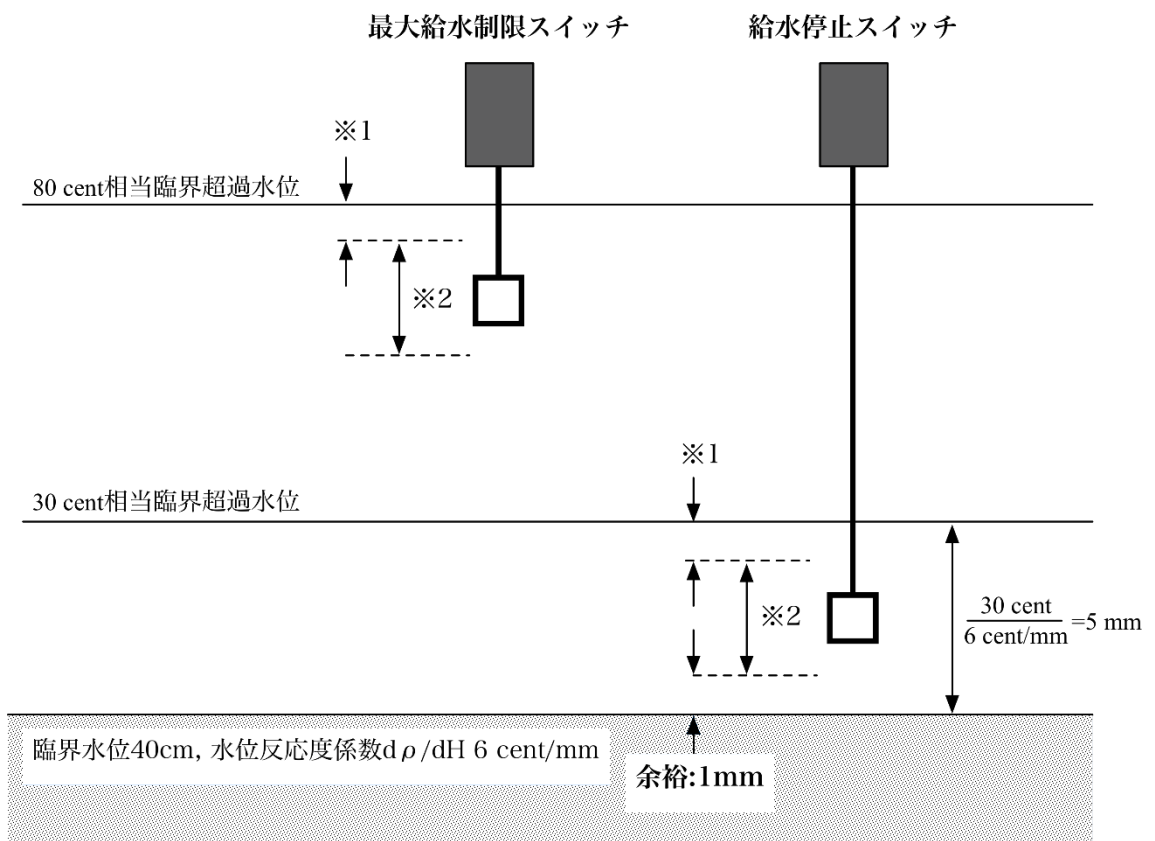
臨界量及び安全板の反応度値の計算には、連続エネルギー法に基づくモンテカルロ計算コードMVP^[1]を用い、核データとしては評価済核データライブラリJENDL-3.3^[2]を基にしたポイントワイズ断面積を用いる。

また、反応度係数及び動特性パラメータの計算には、多群法に基づくSN法輸送計算コードDANTSYS^[3]を用い、群定数としてはJENDL-3.3を基にした、統合核計算コードシステムSRAC^[4]ライブラリ107群定数(中性子エネルギーが0.68256eV以上の高速中性子70群及び熱中性子37群)を、SRAC内の衝突確率法に基づくPIJモジュールで求めた空間依存スペクトルを重みとして縮約したものを用いる。

これらの評価に用いる計算コード及び核データライブラリは、種々の実験によりその妥当性が確かめられている。

参考文献

- [1] Y. Nagaya et al., "MVP/GMVP II: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods," JAERI 1348 (2005)
- [2] K. Shibata et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3," J. Nucl. Sci. Technol. 39, 1125 (2002)
- [3] R. E. Alcouffe et al., "DANTSYS: A Diffusion Accelerated Neutral Particle Transport Code System," LA-12969-M (1995)
- [4] K. Okumura et al., "SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System," JAEA-Data/Code 2007-004 (2007)



※1：吐出弁閉時間(1s)×水位上昇速度(1mm/s)=1mm

※2：水位スイッチの精度 (±1.5 mm)

図1 最大給水制限スイッチ及び給水停止スイッチによる水位制限

表1 核的制限値に関連する炉心特性値

炉心特性値	最大値	最小値
水位反応度係数 $\frac{d\rho}{dH}$ (ドル/mm)	6.0×10^{-2}	2.0×10^{-3}
最大反応度添加率 相当給水流量 V_{lim}^* (ℓ/min)	1915	65

※炉心タンク内の水面の断面積を15%減として評価

表2 STACYで構成される炉心の動特性定数

動特性定数	最大値	最小値
減速材温度 反応度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	$+3.8 \times 10^{-4}$	-3.7×10^{-5}
減速材ボイド 反応度係数 ($\Delta k/k/vol\%$)	$+3.7 \times 10^{-3}$	-3.8×10^{-3}
棒状燃料温度 反応度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-8.5×10^{-6}	-4.1×10^{-5}
即発中性子寿命 (s)	8.4×10^{-5}	6.9×10^{-6}
実効遅発 中性子割合 (-)	8.1×10^{-3}	6.8×10^{-3}

添付書類

Ⅲ－９－３－(2) 基本炉心（１）の核的設計計算書

目 次

1. 概要	添Ⅲ-9-3-(2)-1
2. 基本炉心（1）の条件	添Ⅲ-9-3-(2)-1
3. 計算条件及び計算方法	添Ⅲ-9-3-(2)-2
3.1 基本方針	添Ⅲ-9-3-(2)-2
(1) 臨界炉心の評価	添Ⅲ-9-3-(2)-2
(2) 安全板（未臨界板）の評価	添Ⅲ-9-3-(2)-2
(3) 可溶性中性子吸収材（ボロン）の評価	添Ⅲ-9-3-(2)-4
(4) 炉心特性の評価	添Ⅲ-9-3-(2)-4
3.2 計算モデル	添Ⅲ-9-3-(2)-4
4. 計算結果	添Ⅲ-9-3-(2)-9
4.1 臨界炉心の評価結果	添Ⅲ-9-3-(2)-9
4.2 安全板（未臨界板）評価の結果	添Ⅲ-9-3-(2)-9
4.3 可溶性中性子吸収材評価の結果	添Ⅲ-9-3-(2)-9
4.4 炉心特性評価の結果	添Ⅲ-9-3-(2)-9
4.5 構成してはならない炉心の再評価	添Ⅲ-9-3-(2)-9
5. まとめ	添Ⅲ-9-3-(2)-10
参考文献	添Ⅲ-9-3-(2)-10
補足資料 設工認（第3回）「基本炉心（1）」の受検炉心について	添Ⅲ-9-3-(2)-33
(1) 基本炉心（1）の受検炉心（案）	添Ⅲ-9-3-(2)-33
(2) 基本炉心（1）の解析結果の整理	添Ⅲ-9-3-(2)-34

1. 概要

本書では、STACYの基本炉心（1）において主要な核的制限値が満足されていることを確認する手順を示す。実際の運転に当たっては、原子力科学研究所原子炉施設保安規定に定める手続きに従い、実験計画段階において同様の確認を行う。このとき、計算モデルには、炉心を構成する機器等の製作に当たり実測した値を適切に反映する（本書では設計値を用いる）。

2. 基本炉心（1）の条件

基本炉心の条件は、添付計算書「Ⅲ-9-3-(1) 炉心の核的設計計算書の基本方針」に示したものに加え、以下のとおりとする。

(1) 燃料

- a. 燃料として、平成4年5月1日付け4安（原規）第56号をもって設計及び工事の認可を取得して製作したウラン棒状燃料（ ^{235}U 濃縮度5 wt%）を用いる。
- b. 燃料の最大挿入量は、50本以上400本以下（実験用装荷物の燃料試料挿入管を含む）とする。ただし、棒状燃料の有効長下端より140cm超の給水によっても臨界にならない炉心については400本以下とする。

(2) 減速材及び反射材

- a. 軽水を用いる。
- b. 可溶性中性子吸収材として、実験計画に応じてボロン（ホウ酸）を用いる。
- c. 使用温度範囲は、常温（25℃）から最高70℃とする。

(3) 格子板

- a. 格子板として、本申請第1編Ⅳ. 格子板に示した以下のものを用いる。
 - 1) 格子間隔15 mmのもの
 - 2) 格子間隔12.7 mmのもの
- b. 減速材対燃料ペレット体積比は0.9以上11以下とする。

3. 計算条件及び計算方法

3.1 基本方針

炉心の形状は、水平断面が円筒形又は正方形であるとする。以下それぞれ「円筒炉心」「正方炉心」と呼ぶ。臨界計算及び安全板（未臨界板）の評価においては円筒炉心及び正方炉心を対象とする。炉心特性の評価においては、両者に差はほとんど無いため円筒炉心を対象とする。炉心温度については、常温（25℃）の炉心を対象とする。なお、昇温実験を行う際には、原子力科学研究所原子炉施設保安規定に定める手続きに従い、再度評価を行う。

評価は以下の順に行う。以下の計算のうち、(1), (2), (3)については、連続エネルギーモンテカルロコード MVP2^[1] を評価済核データライブラリ JENDL-3.3^[2] と組み合わせて使用する。また、(4)においては、SN 輸送計算コード DANTSYS^[3] のうちから TWODANT を用いて R-Z 体系の計算とする。このとき、群定数としては JENDL-3.3 を基にした、統合核計算コードシステム SRAC^[4] ライブラリ 107 群定数（中性子エネルギーが 0.68256eV 以上の高速中性子 70 群及び熱中性子 37 群）を、SRAC 内の衝突確率法に基づく P I J モジュールで求めた空間依存スペクトルを重みとして、16 群（高速中性子 10 群、熱中性子 6 群）に縮約したものをを用いる。

(1) 臨界炉心の評価

円筒炉心、正方炉心のそれぞれについて、臨界水位を 40 cm、70 cm、110 cm、140 cm とし、棒状燃料本数をパラメータとした臨界計算を行い、臨界となる本数を求める。臨界とみなす中性子実効増倍率は、原子力機構の既設の臨界実験装置 TCA における実験結果^{[5], [6]} から、0.997 とする。このとき、格子間隔は、減速材対燃料ペレット体積比（以下「VR」と略す。）に係る炉心構成範囲の制限を満足するものとして 1.27 cm、1.50 cm、2.54 cm とする（それぞれの VR は約 1.72, 2.93, 10.9 である）これらの臨界となる条件を以下「臨界炉心」と呼ぶ。なお、格子間隔 2.54 cm は、1.27 cm ピッチの格子板に棒状燃料を 1 本飛ばしで挿入することを想定したものである。

(2) 安全板（未臨界板）の評価

基本炉心（1）で使用する格子板の安全板スリット及び未臨界板スリットを図 3.1 に示す。本評価では、(1)で求めた臨界炉心について、図中①、②で示した安全板スリットに 2 枚の安全板を挿入したときの中性子実効増倍率を評価する。

評価の結果、核的制限値を満足しない場合は、当該臨界炉心を「構成してはならない炉心」として識別し、炉心構成範囲外とする。なお、実際の運転に当たっては、当該識別及び構成する炉心が炉心構成範囲内であることを確認する手順を原子力科学研究所原子炉施設保安規定に定め、遵守する。

上記の評価に当たっては、下式の計算を行い、最大過剰反応度である 0.8 ドル及びモンテカルロ計算に付随する不確かさの 3 倍を計算結果に加えて判定する。

$$\rho = \frac{1}{k_0} - \frac{1}{k_1}, \sigma_\rho = \sqrt{\frac{\sigma_{k_0}^2}{k_0^4} + \frac{\sigma_{k_1}^2}{k_1^4}}$$

$$\rho' = \rho + 0.8\beta_{\max}$$

$$k' = \frac{1}{1 - \rho'}, \sigma_{k'} = \frac{\sigma_\rho}{(1 - \rho')^2}$$

$$\text{test} [k' + 3\sigma_{k'} \leq \text{criterion}]$$

ただし、記号は、以下のとおりである。

k_0	安全板（未臨界板）を挿入しないときの中性子実効増倍率
σ_{k_0}	k_0 の不確かさ（1標準偏差）
k_1	安全板（未臨界板）を挿入したときの中性子実効増倍率
σ_{k_1}	k_1 の不確かさ（1標準偏差）
ρ	安全板（未臨界板）の反応度効果
σ_ρ	ρ の不確かさ（1標準偏差）
ρ'	最大過剰反応度 0.8 ドルを考慮した反応度効果
β_{\max}	実効遅発中性子割合の最大値 (8.1×10^{-3} 。添付書類Ⅲ-9-3-(1)表 2 参照。)
k'	安全板（未臨界板）挿入時の中性子実効増倍率
$\sigma_{k'}$	k' の不確かさ（1標準偏差）
test	判定関数。引数を評価した結果が真であるとき合格とする。
criterion	判定基準。全挿入時 0.985、ワンロードスタック時 0.995

また、想定を超えた津波に炉心が水没したときの評価として、炉心が海水に全水没したときでも中性子実効増倍率を 0.995 以下にできる最大本数の炉心进行评估する。なお、このとき ρ の評価には上式を用い、 k_0 を臨界バイアスである 0.997 とし、 σ_{k_0} は無視する。また、 ρ' の評価 ($0.8\beta_{\max}$ を加える) は行わない。以下このような炉心を「津波最大炉心」という。津波最大炉心は上記のスリットに安全板が 2 枚挿入された状態の評価を行うほか、図中③、④で示したスリットに未臨界板 2 枚が挿入された条件でも評価する。計算の結果、最大炉心の棒状燃料本数が臨界炉心の棒状燃料本数を下回る場合は、想定を超えた津波に水没した時に臨界になるおそれを否定できないものとして、当該臨界炉心を「構成してはならない炉心」として識別し、炉心構成範囲外とする。

(3) 可溶性中性子吸収材（ボロン）の評価

減速材に可溶性中性子吸収材を添加するため、(2)において評価した津波最大炉心に対して可溶性中性子吸収材を添加した臨界計算を行い、臨界となる濃度を求める。

最後に、上記で求めた最大濃度を添加した炉心に対して、(2)と同様の安全板の評価を行い、安全板に係る核的制限値を満足することを確認する。核的制限値が満足されない場合は、(2)と同様に「構成してはならない炉心」として識別し、炉心構成範囲外とする。

(4) 炉心特性の評価

(1)の臨界炉心及び(3)の可溶性中性子吸収材を添加した炉心について、減速材温度反応度係数、減速材ボイド反応度係数、棒状燃料温度反応度係数、即発中性子寿命、実効遅発中性子割合及び水位反応度係数の計算を行い、添付計算書「Ⅲ-9-3-(1) 炉心の核的設計計算書作成の基本方針」の表1及び表2に示した炉心特性値の範囲（以下「炉心特性範囲」という。）に入る見通しがあることを確認する。炉心特性範囲を逸脱する場合は、(2)と同様に、「構成してはならない炉心」として識別し、炉心構成範囲外とする。

3.2 計算モデル

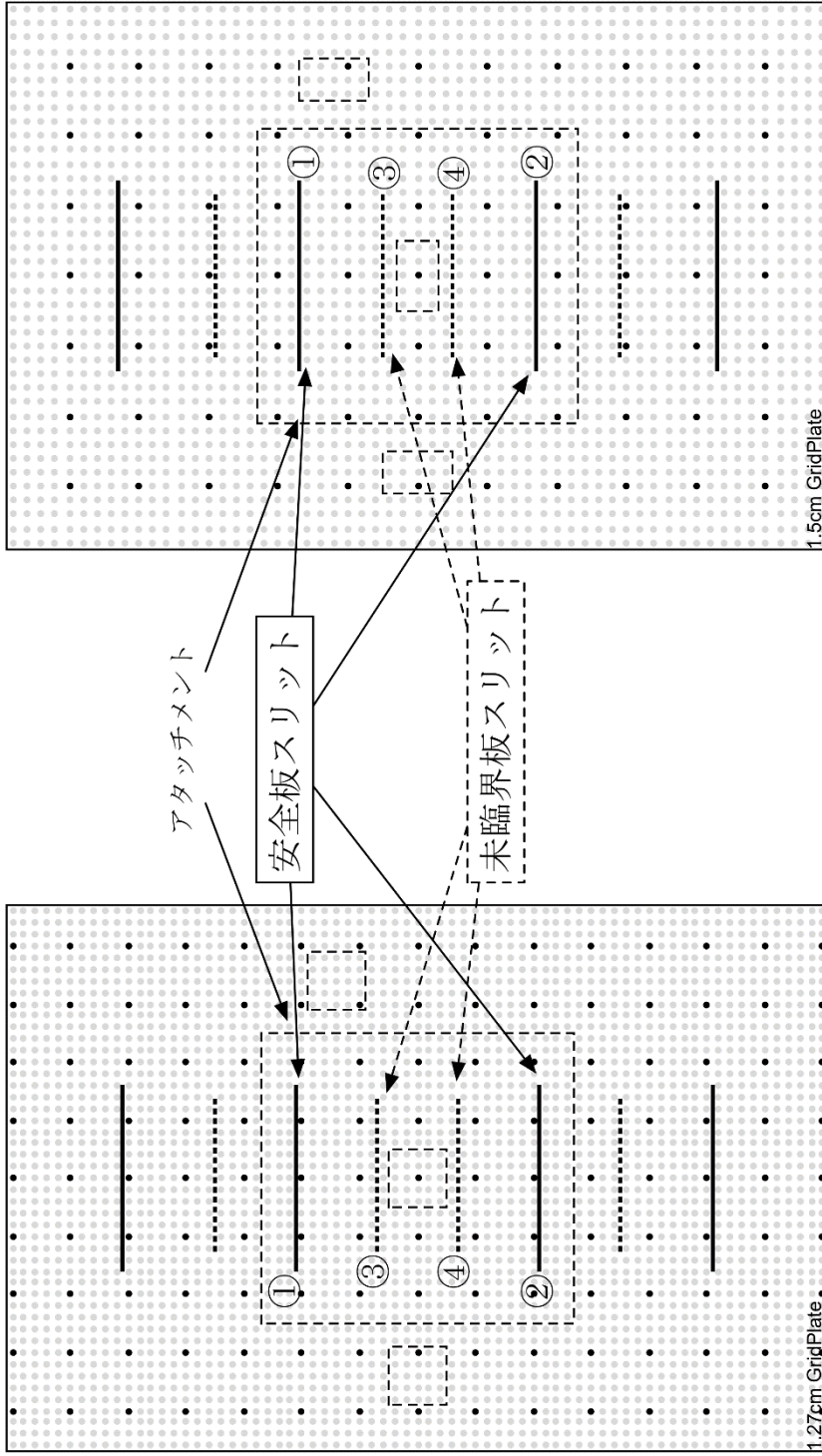
前述のとおり、計算コード及び核データライブラリは、添付計算書「Ⅲ-9-3-(1) 炉心の核的設計計算書作成の基本方針」に示したものをを用いる。モンテカルロ計算の計算条件を表3.1に示す。使用した原子個数密度を表3.2に示す。

また、計算においては、安全板（未臨界板）評価時の中性子実効増倍率を大きくするため、以下の条件をおく。

- (1) 安全板の幅は、実機（本申請第2編Ⅳ. 制御設備にて申請）よりも狭い20 cmとする。
未臨界板の幅は設計仕様よりも狭く17 cmとする。
- (2) 安全板の全体の厚み及びカドミウムの厚みは、実機よりも薄い1.25 mm、0.3 mmとする。なお、未臨界板の厚みは安全板と同じとする。
- (3) 安全板装置のガイドピンは、棒状燃料に置き換える。
- (4) 未臨界板評価時の海水は、茨城県沖の海水の塩分が約32 g/kg^[7]であることから実際の海水より低く31 g/kgとする。また、海水に含まれる中性子吸収物質（塩素、ボロン等）の密度を実際より低くするため、茨城県沖の夏季の海表面温度^[7]を参考に、海水温度は30℃とする。

- (5) 安全板が挿入されたときの水位の上昇は、計算モデルに反映する。このとき、上昇量を実際より大きく推定するため、炉心タンク内の水面の面積を、棒状燃料の装荷本数等によらず一律 15%減¹として計算する。

¹ 炉心タンク内の面積の 15%は、棒状燃料にして約 5300 本、直径 11cm の内挿管にして約 40 本に相当する。これは、棒状燃料の最大装荷量 400 本に対して十分に大きい。



格子間隔 12.7 mm 格子板

格子間隔 15 mm 格子板

- 安全板スリット
- - - 未臨界板スリット
- ⋯ 棒状燃料挿入孔(実験用装荷物の燃料試料挿入管を含む)
- 棒状燃料挿入孔(数えやすくするために色を変えてあるが、同じ孔)

図 3.1 格子板概略図 (詳細図は本申請第 1 編Ⅳ. 格子板を参照)

表 3.1 モンテカルロ計算の計算条件

入力項目	入力データ
統計	<ul style="list-style-type: none"> • バッチあたりの粒子数 10000 • バッチ数 500 • 統計を取るまでにスキップするバッチ数 200
粒子源発生分布	<ul style="list-style-type: none"> • 全棒状燃料のペレット部にXY方向は均一分布とし、Z方向は、水没部に余弦分布、水面より上は均一分布とする。

表 3.2 計算に使用した原子個数密度

(1) 棒状燃料ペレット

二酸化ウラン ²³⁵ U濃縮度 5 wt%	
核種	密度 (10 ²⁴ /cm ³)
U-235	1.1757 × 10 ⁻³
U-238	2.2057 × 10 ⁻²
O-16	4.6465 × 10 ⁻²

(2) 棒状燃料被覆管

ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4 ^[8])			
核種	密度 (10 ²⁴ /cm ³)	核種	密度 (10 ²⁴ /cm ³)
C-12	4.5124 × 10 ⁻⁵	Zr-91	4.7649 × 10 ⁻³
O-16	3.1617 × 10 ⁻⁴	Zr-92	7.2833 × 10 ⁻³
Si-nat	1.2865 × 10 ⁻⁵	Zr-94	7.3809 × 10 ⁻³
Cr-nat	8.4548 × 10 ⁻⁵	Zr-96	1.1891 × 10 ⁻³
Fe-nat	1.4989 × 10 ⁻⁴	Sn-126	4.3475 × 10 ⁻⁴
Zr-90	2.1850 × 10 ⁻²		

※-natは天然核種を示す。

表 3.2 計算に使用した原子個数密度 (続き)

(3) 中性子吸収材 (カドミウム)、軽水、ステンレス鋼

中性子吸収材 (カドミウム)		安全板被覆 (ステンレス鋼)	
核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)	核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)
Cd-nat	4.6338×10^{-2}	C-12	3.1728×10^{-4}
		Si-nat	1.6961×10^{-3}
軽水		P-nat	6.9206×10^{-5}
H-1	6.6658×10^{-2}	S-nat	4.4566×10^{-5}
O-16	3.3329×10^{-2}	Cr-nat	1.7407×10^{-2}
		Mn-54	1.7341×10^{-3}
		Fe-nat	5.7871×10^{-2}
		Ni-nat	8.1167×10^{-3}

※-natは天然核種を示す。

(4) 海水^[9]

海水 (塩分濃度 31 g/kg、温度 30 °C)			
核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)	核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)
H-1	6.6075×10^{-2}	Na-nat	2.5169×10^{-4}
O-16	3.3102×10^{-2}	Mg-nat	2.9610×10^{-5}
Cl-nat	2.9611×10^{-4}	Si-nat	5.9221×10^{-8}
B-10	4.8662×10^{-8}	S-nat	1.5397×10^{-5}
B-11	1.9710×10^{-7}	K-nat	5.3299×10^{-6}
C-12	1.2733×10^{-6}	Ca-nat	5.6260×10^{-6}
Br-nat	4.4416×10^{-7}		

※-natは天然核種を示す。

4. 計算結果

4.1 臨界炉心の評価結果

臨界炉心の評価結果を表 4.1 及び図 4.1 に示す。また、代表的な炉心の配列の例を図 4.2 に示す。なお、格子間隔 2.54 cm の条件においては、低水位（40 cm）における棒状燃料本数が 400 本をやや上回る（正方炉心において 406 本、円筒炉心において 402 本）ことから、棒状燃料本数が 400 本となるよう、臨界水位を調整して以下の解析を行った。

4.2 安全板（未臨界板）評価の結果

原子炉停止余裕の計算結果について、表 4.2-1 に示す。また、ワンロードスタックマージンの計算結果について表 4.2-2 に示す。さらに、津波最大炉心の計算結果を、安全板によるものを表 4.2-3 に、未臨界板によるものを表 4.2-4 に示す。

上記より、すべての臨界炉心について原子炉停止余裕及びワンロードスタックマージンが満足できることが確認できた。また、津波最大炉心の評価においてもすべての炉心で安全板（未臨界板）で未臨界を確保できることが確認され、「構成してはならない炉心」として識別される炉心は無かった。

4.3 可溶性中性子吸収材評価の結果

減速材及び反射材に可溶性中性子吸収材（ボロン）を添加する実験のため、4.2 で評価した津波最大炉心に対して、臨界水位を 40 cm、70 cm、110 cm、140 cm としたときの臨界ボロン濃度を計算した。なお、4.1, 4.2 で「構成してはならない炉心」として識別された炉心又は未臨界となった炉心があった場合には、それらは評価対象から外すものとする。

可溶性中性子吸収材評価の結果を表 4.3-1 及び図 4.3-1 に示す。

4.4 炉心特性評価の結果

4.1～4.3 で評価した炉心について、炉心特性値の評価を行った。評価の結果を表 4.4-1～6 に示す。また水位反応度係数の変化を図 4.4-1 に示す。評価の結果、すべての炉心について、炉心特性範囲を逸脱しないことが確認され、「構成してはならない炉心」として識別される炉心は無かった。

4.5 構成してはならない炉心の再評価

4.1～4.4 の評価を通じて「構成してはならない炉心」が識別された場合、これらの炉心は、棒状燃料の本数が「津波最大炉心」を上回るか、核的制限値を満足しないか又は炉心特性範囲を逸脱するため、構成することができない。このときは、追加の解析によりパラメータサーベイを行い、構成できる炉心の範囲を明確化するものとする。上記手順を通じて、構成できるすべての炉心特性が制限の範囲に入ることを確認する。

5. まとめ

STACYの基本炉心(1)について、炉心構成条件の範囲で臨界となる棒状燃料本数と可溶性中性子吸収材(ボロン)濃度を計算し、それらすべての炉心で核的制限値を満足できることを確認した。また、想定を超える津波により炉心が水没した際に、臨界となる可能性が否定できない条件がある場合、核的制限値を満足しない場合、あるいは炉心特性範囲を逸脱する場合には、当該炉心を「構成してはならない炉心」として識別する手順を示した(以下これらを「識別した炉心」という)。識別した炉心は、原子力科学研究所原子炉施設保安規定に定める手続きにおいて炉心構成範囲外として取り扱われる。本評価においては、識別した炉心は特定されず、全臨界炉心に対して炉心特性値を計算した結果、評価したすべての炉心について、炉心特性範囲を逸脱しないことを確認した。さらに、識別した炉心について、構成できる炉心構成条件の範囲を明らかにし、炉心構成範囲を明確化するとともに、炉心の特性が炉心特性範囲を逸脱しないことを確認する手順を示した。

STACYは、実験計画に応じて炉心構成を変更する臨界実験装置であるため構成可能な炉心は多岐にわたるが、炉心構成の手順を原子力科学研究所原子炉施設保安規定に定め、計画に際して本書に示した評価を確実にを行い、構成してはならない炉心を識別することにより、核的制限値及び炉心特性の範囲で運転を行うことができる。

参考文献

- [1] Y. Nagaya et al., "MVP/GMVP II: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods," JAERI 1348 (2005)
- [2] K. Shibata et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3," J. Nucl. Sci. Technol. 39, 1125 (2002)
- [3] R. E. Alcouffe et al., "DANTSYS: A Diffusion Accelerated Neutral Particle Transport Code System," LA-12969-M (1995)
- [4] K. Okumura et al., "SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System," JAEA-Data/Code 2007-004 (2007)
- [5] Y. Miyoshi et al., "CRITICAL ARRAYS OF LOW-ENRICHED UO_2 FUEL RODS WITH WATER-TO-FUEL VOLUME RATIOS RANGING FROM 1.5 TO 3.0," NEA/NSC/DOC/(95)03/IV Volume IV., LEU-COMP-THERM-006, Rev. 1 (1998).
- [6] H. Tsuruta et al., "Critical Sizes of Light-Water Moderated UO_2 and PuO_2 - UO_2 Lattices," JAERI-1254 (1978).
- [7] 理科年表、国立天文台編、2019年
- [8] 曾野他、「棒状燃料格子間隔 1.5cm の STACY 非均質炉心の核特性解析」、JAERI-Tech 2003-065、日本原子力研究所 (2003)
- [9] 化学大事典、化学大辞典編集委員会、1963年

表 4.1 (1) 正方炉心の臨界評価結果

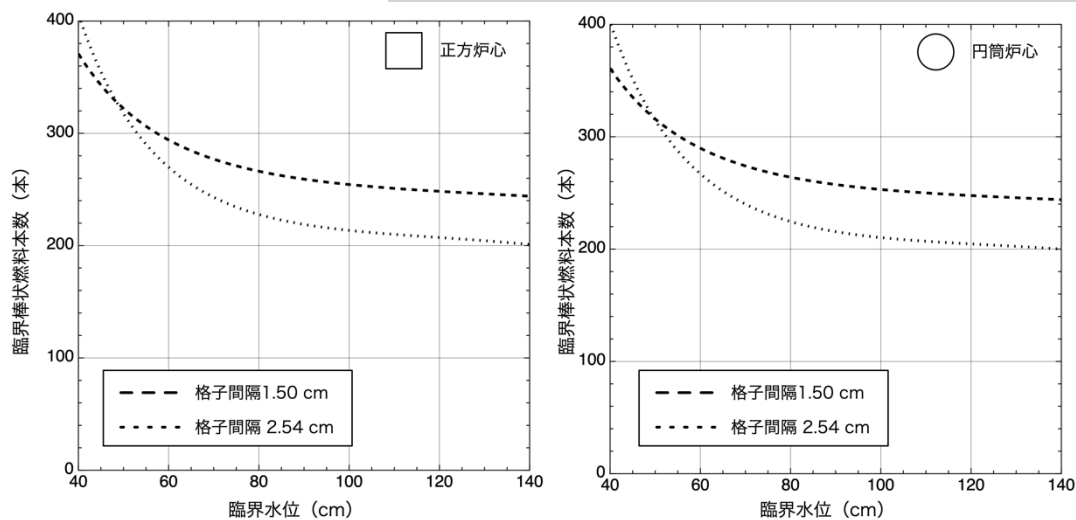
格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)
1.27	140	未臨界 [※]	2.54	140	201
1.27	110	未臨界 [※]	2.54	110	210
1.27	70	未臨界 [※]	2.54	70	243
1.27	40	未臨界 [※]	2.54	40.4	400
1.50	140	244	/		
1.50	110	251			
1.50	70	277			
1.50	40	371			

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.1 (2) 円筒炉心の臨界評価結果

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)
1.27	140	未臨界 [※]	2.54	140	200
1.27	110	未臨界 [※]	2.54	110	207
1.27	70	未臨界 [※]	2.54	70	240
1.27	40	未臨界 [※]	2.54	40.1	400
1.50	140	244	/		
1.50	110	250			
1.50	70	274			
1.50	40	361			

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。



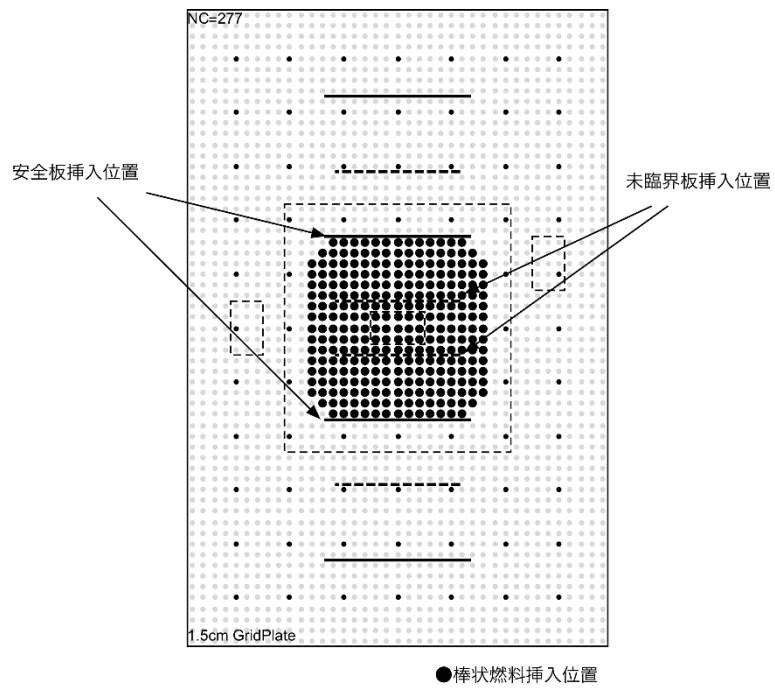


図 4.2 代表的な臨界炉心の例
 (格子間隔 1.5cm、臨界水位 70cm、棒状燃料 277 本の正方炉心)

表 4.2-1 (1) 原子炉停止余裕評価結果 (正方炉心)

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	中性子実効 増倍率 ^{※1}	判定 ≤0.985
1.27	140	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	110	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	70	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	40	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.50	140	244	-	0.9597	良
1.50	110	251	-	0.9585	良
1.50	70	277	-	0.9517	良
1.50	40	371	-	0.9639	良
2.54	140	201	-	0.9458	良
2.54	110	210	-	0.9455	良
2.54	70	243	-	0.9461	良
2.54	40.4	400	-	0.9529	良

※1 $k_{\text{eff}}+3\sigma$

※2 「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.2-1 (2) 原子炉停止余裕評価結果 (円筒炉心)

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	中性子実効 増倍率 ^{※1}	判定 ≤0.985
1.27	140	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	110	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	70	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	40	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.50	140	244	-	0.9663	良
1.50	110	250	-	0.9644	良
1.50	70	274	-	0.9659	良
1.50	40	361	-	0.9626	良
2.54	140	200	-	0.9533	良
2.54	110	207	-	0.9512	良
2.54	70	240	-	0.9502	良
2.54	40.1	400	-	0.9533	良

※1 $k_{\text{eff}}+3\sigma$

※2 「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.2-2 (1) ワンロッドスタックマージン評価結果 (正方炉心)

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	中性子実効 増倍率 ^{※1}	判定 ≤0.995
1.27	140	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	110	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	70	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	40	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.50	140	244	-	0.9870	良
1.50	110	251	-	0.9858	良
1.50	70	277	-	0.9819	良
1.50	40	371	-	0.9885	良
2.54	140	201	-	0.9826	良
2.54	110	210	-	0.9820	良
2.54	70	243	-	0.9804	良
2.54	40.4	400	-	0.9850	良

※1 $k_{\text{eff}}+3\sigma$

※2 「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.2-2 (2) ワンロッドスタックマージン評価結果 (円筒炉心)

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	中性子実効 増倍率 ^{※1}	判定 ≤0.995
1.27	140	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	110	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	70	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.27	40	未臨界 ^{※2}	-	■	■
1.50	140	244	-	0.9931	良
1.50	110	250	-	0.9942	良
1.50	70	274	-	0.9914	良
1.50	40	361	-	0.9871	良
2.54	140	200	-	0.9901	良
2.54	110	207	-	0.9879	良
2.54	70	240	-	0.9860	良
2.54	40.1	400	-	0.9855	良

※1 $k_{\text{eff}}+3\sigma$

※2 「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.2-3 (1) 安全板による津波最大炉心評価結果 (正方炉心)

格子間隔 (cm)	最大本数 (本)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	判定 最大 \geq 臨界
1.27	400	140	未臨界 [※]	─
1.27		110	未臨界 [※]	─
1.27		70	未臨界 [※]	─
1.27		40	未臨界 [※]	─
1.50	371	140	244	良
1.50		110	251	良
1.50		70	277	良
1.50		40	371	良
2.54	400	140	201	良
2.54		110	210	良
2.54		70	243	良
2.54		40.4	400	良

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.2-3 (2) 安全板による津波最大炉心評価結果 (円筒炉心)

格子間隔 (cm)	最大本数 (本)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	判定 最大 \geq 臨界
1.27	400	140	未臨界 [※]	─
1.27		110	未臨界 [※]	─
1.27		70	未臨界 [※]	─
1.27		40	未臨界 [※]	─
1.50	365	140	244	良
1.50		110	250	良
1.50		70	274	良
1.50		40	361	良
2.54	400	140	200	良
2.54		110	207	良
2.54		70	240	良
2.54		40.1	400	良

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.2-4 (1) 未臨界板による津波最大炉心評価結果 (正方炉心)

格子間隔 (cm)	最大本数 (本)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	判定 最大 \geq 臨界
1.27	400	140	未臨界 [※]	─
1.27		110	未臨界 [※]	─
1.27		70	未臨界 [※]	─
1.27		40	未臨界 [※]	─
1.50	400	140	244	良
1.50		110	251	良
1.50		70	277	良
1.50		40	371	良
2.54	400	140	201	良
2.54		110	210	良
2.54		70	243	良
2.54		40.4	400	良

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.2-4 (2) 未臨界板による津波最大炉心評価結果 (円筒炉心)

格子間隔 (cm)	最大本数 (本)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	判定 最大 \geq 臨界
1.27	400	140	未臨界 [※]	─
1.27		110	未臨界 [※]	─
1.27		70	未臨界 [※]	─
1.27		40	未臨界 [※]	─
1.50	400	140	244	良
1.50		110	250	良
1.50		70	274	良
1.50		40	361	良
2.54	400	140	200	良
2.54		110	207	良
2.54		70	240	良
2.54		40.1	400	良

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.3-1 (1) 可溶性中性子吸収材評価結果 (安全板による津波最大炉心 (正方))

格子間隔 (cm)	燃料本数 (本)	臨界水位 (cm)	ボロン濃度 (ppm)	停止余裕 ^{※1} ≤0.985	ワンロッド ^{※2} ≤0.995	判定
1.27	400	140	■	■	■	■
1.27		110	■	■	■	■
1.27		70	■	■	■	■
1.27		40	■	■	■	■
1.50	371	140	427.3	0.9652	0.9882	良
1.50		110	393.2	0.9650	0.9878	良
1.50		70	278.9	0.9642	0.9873	良
1.50		40	0.0	0.9639	0.9885	良
2.54	400	140	171.2	0.9520	0.9852	良
2.54		110	157.3	0.9522	0.9860	良
2.54		70	113.3	0.9524	0.9849	良
2.54		40.4	0.0	0.9529	0.9850	良

※1 原子炉停止余裕、※2 ワンロッドスタックマージン。いずれも keff+3σの結果

表 4.3-1 (2) 可溶性中性子吸収材評価結果 (安全板による津波最大炉心 (円筒))

格子間隔 (cm)	燃料本数 (本)	臨界水位 (cm)	ボロン濃度 (ppm)	停止余裕 ^{※1} ≤0.985	ワンロッド ^{※2} ≤0.995	判定
1.27	400	140	■	■	■	■
1.27		110	■	■	■	■
1.27		70	■	■	■	■
1.27		40	■	■	■	■
1.50	365	140	428.1	0.9660	0.9898	良
1.50		110	400.0	0.9658	0.9885	良
1.50		70	280.9	0.9653	0.9880	良
1.50		40	3.8	0.9643	0.9884	良
2.54	400	140	174.7	0.9528	0.9857	良
2.54		110	162.5	0.9531	0.9851	良
2.54		70	116.8	0.9536	0.9859	良
2.54		40.1	0.0	0.9533	0.9855	良

※1 原子炉停止余裕、※2 ワンロッドスタックマージン。いずれも keff+3σの結果

表 4.3-1 (3) 可溶性中性子吸収材評価結果 (未臨界板による津波最大炉心 (正方))

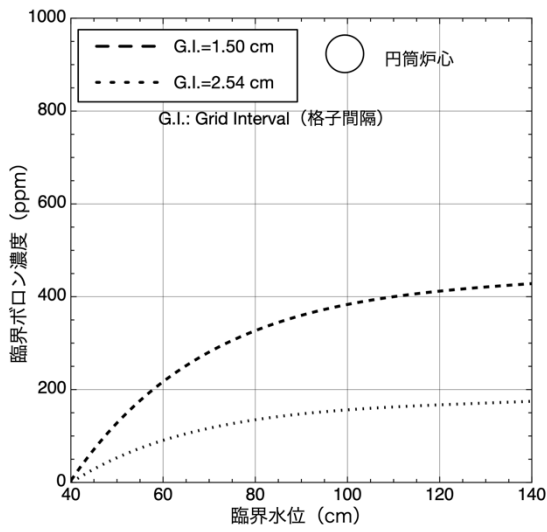
格子間隔 (cm)	燃料本数 (本)	臨界水位 (cm)	ボロン濃度 (ppm)	停止余裕 ^{※1} ≤0.985	ワンロット ^{※2} ≤0.995	判定
1.27	400	140	■	■	■	■
1.27		110	■	■	■	■
1.27		70	■	■	■	■
1.27		40	■	■	■	■
1.50	400	140	526.8	0.9678	0.9905	良
1.50		110	488.2	0.9682	0.9902	良
1.50		70	368.9	0.9661	0.9893	良
1.50		40	70.8	0.9675	0.9905	良
2.54	400	140	171.2	0.9520	0.9852	良
2.54		110	157.3	0.9522	0.9860	良
2.54		70	113.3	0.9524	0.9849	良
2.54		40.4	0.0	0.9529	0.9850	良

※1 原子炉停止余裕、※2 ワンロットスタックマージン。いずれも keff+3σ の結果

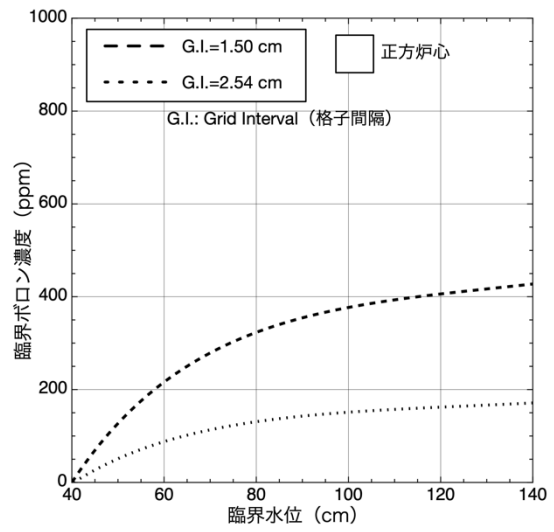
表 4.3-1 (4) 可溶性中性子吸収材評価結果 (未臨界板による津波最大炉心 (円筒))

格子間隔 (cm)	燃料本数 (本)	臨界水位 (cm)	ボロン濃度 (ppm)	停止余裕 ^{※1} ≤0.985	ワンロット ^{※2} ≤0.995	判定
1.27	400	140	■	■	■	■
1.27		110	■	■	■	■
1.27		70	■	■	■	■
1.27		40	■	■	■	■
1.50	400	140	544.6	0.9681	0.9886	良
1.50		110	505.9	0.9673	0.9899	良
1.50		70	380.4	0.9675	0.9906	良
1.50		40	81.1	0.9666	0.9898	良
2.54	400	140	174.7	0.9528	0.9857	良
2.54		110	162.5	0.9531	0.9851	良
2.54		70	116.8	0.9536	0.9859	良
2.54		40.1	0.0	0.9533	0.9855	良

※1 原子炉停止余裕、※2 ワンロットスタックマージン。いずれも keff+3σ の結果

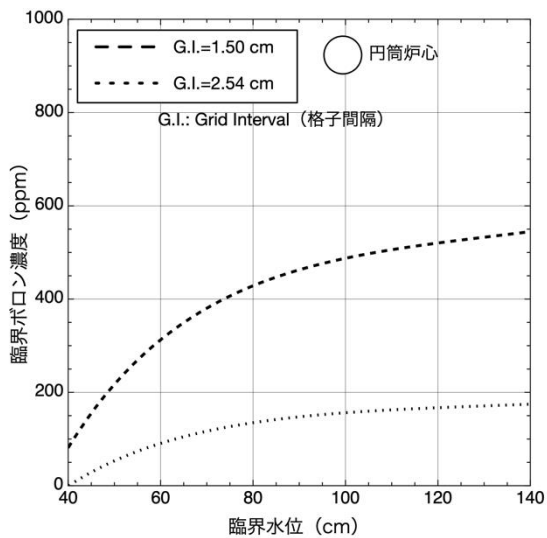


(a) 安全板による津波最大炉心 (円筒炉心)

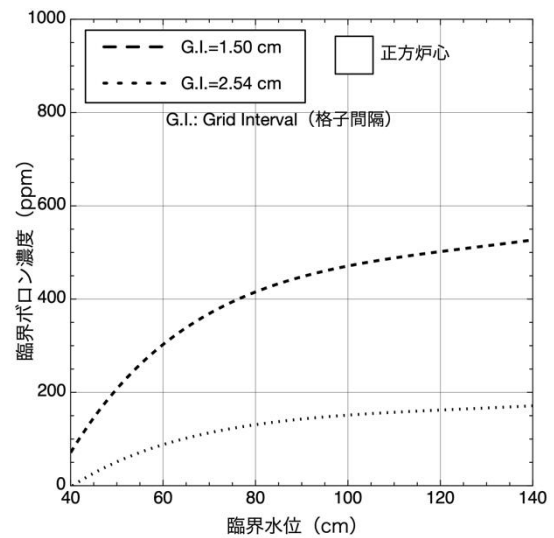


(b) 安全板による津波最大炉心 (正方炉心)

図 4.3-1 (1) 可溶性中性子吸収材評価結果 (安全板による津波最大炉心)
(格子間隔 1.27 cm は未臨界となるため省略)



(a) 未臨界板による津波最大炉心 (円筒炉心)



(b) 未臨界板による津波最大炉心 (正方炉心)

図 4.3-1 (2) 可溶性中性子吸収材評価結果 (未臨界板による津波最大炉心)
(格子間隔 1.27 cm は未臨界となるため省略)

表 4.4-1 減速材温度反応度係数の評価結果

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	減速材温度 反応度係数 ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	判定 $\geq -3.7 \times 10^{-5}$ $\leq +3.8 \times 10^{-4}$
1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	244	—	1.55×10^{-5}	良
1.50	110	250	—	1.57×10^{-5}	良
1.50	70	274	—	6.77×10^{-6}	良
1.50	40	361	—	1.22×10^{-5}	良
2.54	140	200	—	1.41×10^{-4}	良
2.54	110	207	—	1.36×10^{-4}	良
2.54	70	240	—	1.43×10^{-4}	良
2.54	40.1	400	—	1.52×10^{-4}	良

(以下可溶性中性子吸収材あり (安全板による津波最大炉心))

1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	365	428.1	-4.57×10^{-6}	良
1.50	110	365	400.0	-9.87×10^{-7}	良
1.50	70	365	280.9	1.46×10^{-6}	良
1.50	40	365	3.8	9.36×10^{-6}	良
2.54	140	400	174.7	2.03×10^{-4}	良
<u>2.54</u>	<u>110</u>	<u>400</u>	<u>162.5</u>	<u>2.05×10^{-4}</u>	<u>良</u>
2.54	70	400	116.8	1.87×10^{-4}	良
2.54	40.1	400	0.0	1.52×10^{-4}	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.4-1 減速材温度反応度係数の評価結果 (続き)
 (可溶性中性子吸収材あり (未臨界板による津波最大炉心))

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	減速材温度 反応度係数 ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	判定 $\geq -3.7 \times 10^{-5}$ $\leq +3.8 \times 10^{-4}$
1.27	140	未臨界 [※]	—	—	—
1.27	110	未臨界 [※]	—	—	—
1.27	70	未臨界 [※]	—	—	—
1.27	40	未臨界 [※]	—	—	—
1.50	140	400	544.6	1.19×10^{-6}	良
1.50	110	400	505.9	1.00×10^{-6}	良
1.50	70	400	380.4	-1.73×10^{-6}	良
1.50	40	400	81.1	8.18×10^{-6}	良
2.54	140	400	174.7	2.03×10^{-4}	良
2.54	110	400	162.5	2.05×10^{-4}	良
2.54	70	400	116.8	1.87×10^{-4}	良
2.54	40.1	400	0.0	1.52×10^{-4}	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.4-2 減速材ボイド反応度係数の評価結果

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	減速材ボイド 反応度係数 ($\Delta k/k/vol\%$)	判定 $\geq -3.8 \times 10^{-3}$ $\leq +3.7 \times 10^{-3}$
1.27	140	未臨界※	-	-	-
1.27	110	未臨界※	-	-	-
1.27	70	未臨界※	-	-	-
1.27	40	未臨界※	-	-	-
1.50	140	244	-	-3.29×10^{-3}	良
1.50	110	250	-	-3.22×10^{-3}	良
1.50	70	274	-	-2.96×10^{-3}	良
1.50	40	361	-	-2.29×10^{-3}	良
2.54	140	200	-	3.60×10^{-4}	良
2.54	110	207	-	4.39×10^{-4}	良
2.54	70	240	-	7.52×10^{-4}	良
2.54	40.1	400	-	1.63×10^{-3}	良

(以下可溶性中性子吸収材あり (安全板による津波最大炉心))

1.27	140	未臨界※	-	-	-
1.27	110	未臨界※	-	-	-
1.27	70	未臨界※	-	-	-
1.27	40	未臨界※	-	-	-
1.50	140	365	428.1	-2.47×10^{-3}	良
1.50	110	365	400.0	-2.46×10^{-3}	良
1.50	70	365	280.9	-2.43×10^{-3}	良
1.50	40	365	3.8	-2.27×10^{-3}	良
<u>2.54</u>	<u>140</u>	<u>400</u>	<u>174.7</u>	<u>1.95×10^{-3}</u>	<u>良</u>
2.54	110	400	162.5	1.92×10^{-3}	良
2.54	70	400	116.8	1.84×10^{-3}	良
2.54	40.1	400	0.0	1.63×10^{-3}	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.4-2 減速材ボイド反応度係数の評価結果 (続き)
 (以下可溶性中性子吸収材あり (未臨界板による津波最大炉心))

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	減速材ボイド 反応度係数 ($\Delta k/k/vol\%$)	判定 $\geq -3.8 \times 10^{-3}$ $\leq +3.7 \times 10^{-3}$
1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	400	544.6	-2.22×10^{-3}	良
1.50	110	400	505.9	-2.22×10^{-3}	良
1.50	70	400	380.4	-2.21×10^{-3}	良
1.50	40	400	81.1	-2.11×10^{-3}	良
<u>2.54</u>	<u>140</u>	<u>400</u>	<u>174.7</u>	<u>1.95×10^{-3}</u>	良
2.54	110	400	162.5	1.92×10^{-3}	良
2.54	70	400	116.8	1.84×10^{-3}	良
2.54	40.1	400	0.0	1.63×10^{-3}	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.4-3 棒状燃料温度反応度係数の評価結果

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	棒状燃料温度 反応度係数 ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	判定 $\geq -4.1 \times 10^{-5}$ $\leq -8.5 \times 10^{-6}$
1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	244	—	-1.99×10^{-5}	良
1.50	110	250	—	-2.00×10^{-5}	良
1.50	70	274	—	-2.03×10^{-5}	良
1.50	40	361	—	-2.03×10^{-5}	良
2.54	140	200	—	-1.09×10^{-5}	良
2.54	110	207	—	-1.13×10^{-5}	良
2.54	70	240	—	-1.08×10^{-5}	良
2.54	40.1	400	—	-1.05×10^{-5}	良

(以下可溶性中性子吸収材あり (安全板による津波最大炉心))

1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	365	428.1	-2.16×10^{-5}	良
1.50	110	365	400.0	-2.12×10^{-5}	良
1.50	70	365	280.9	-2.13×10^{-5}	良
1.50	40	365	3.8	-2.04×10^{-5}	良
2.54	140	400	174.7	-1.26×10^{-5}	良
2.54	110	400	162.5	-1.25×10^{-5}	良
2.54	70	400	116.8	-1.20×10^{-5}	良
2.54	40.1	400	0.0	-1.05×10^{-5}	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.4-3 棒状燃料温度反応度係数の評価結果（続き）
 (以下可溶性中性子吸収材あり（未臨界板による津波最大炉心）)

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	棒状燃料温度 反応度係数 ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	判定 $\geq -4.1 \times 10^{-5}$ $\leq -8.5 \times 10^{-6}$
1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	400	544.6	-2.23×10^{-5}	良
1.50	110	400	505.9	-2.20×10^{-5}	良
1.50	70	400	380.4	-2.15×10^{-5}	良
1.50	40	400	81.1	-2.07×10^{-5}	良
2.54	140	400	174.7	-1.26×10^{-5}	良
2.54	110	400	162.5	-1.25×10^{-5}	良
2.54	70	400	116.8	-1.20×10^{-5}	良
<u>2.54</u>	<u>40.1</u>	400	<u>0.0</u>	<u>-1.05×10^{-5}</u>	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.4-4 即発中性子寿命の評価結果

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	即発中性子 寿命 (s)	判定 $\geq 6.9 \times 10^{-6}$ $\leq 8.4 \times 10^{-5}$
1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	244	—	3.68×10^{-5}	良
1.50	110	250	—	3.66×10^{-5}	良
1.50	70	274	—	3.57×10^{-5}	良
1.50	40	361	—	3.39×10^{-5}	良
2.54	140	200	—	6.88×10^{-5}	良
2.54	110	207	—	6.87×10^{-5}	良
2.54	70	240	—	6.82×10^{-5}	良
2.54	40.1	400	—	6.74×10^{-5}	良

(以下可溶性中性子吸収材あり (安全板による津波最大炉心))

1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	365	428.1	2.63×10^{-5}	良
1.50	110	365	400.0	2.66×10^{-5}	良
1.50	70	365	280.9	2.80×10^{-5}	良
1.50	40	365	3.8	3.37×10^{-5}	良
2.54	140	400	174.7	6.02×10^{-5}	良
2.54	110	400	162.5	6.07×10^{-5}	良
2.54	70	400	116.8	6.23×10^{-5}	良
2.54	40.1	400	0.0	6.74×10^{-5}	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.4-4 即発中性子寿命の評価結果 (続き)
 (可溶性中性子吸収材あり (未臨界板による津波最大炉心))

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	即発中性子 寿命 (s)	判定 $\geq 6.9 \times 10^{-6}$ $\leq 8.4 \times 10^{-5}$
1.27	140	未臨界 [※]	—	—	—
1.27	110	未臨界 [※]	—	—	—
1.27	70	未臨界 [※]	—	—	—
1.27	40	未臨界 [※]	—	—	—
1.50	140	400	544.6	2.49×10^{-5}	良
1.50	110	400	505.9	2.53×10^{-5}	良
1.50	70	400	380.4	2.65×10^{-5}	良
1.50	40	400	81.1	3.12×10^{-5}	良
2.54	140	400	174.7	6.02×10^{-5}	良
2.54	110	400	162.5	6.07×10^{-5}	良
2.54	70	400	116.8	6.23×10^{-5}	良
2.54	40.1	400	0.0	6.74×10^{-5}	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.4-5 実効遅発中性子割合の評価結果

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	実効遅発 中性子割合 (-)	判定 $\geq 6.8 \times 10^{-3}$ $\leq 8.1 \times 10^{-3}$
1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	244	—	7.87×10^{-3}	良
1.50	110	250	—	7.88×10^{-3}	良
1.50	70	274	—	7.90×10^{-3}	良
<u>1.50</u>	<u>40</u>	<u>361</u>	—	<u>7.92×10^{-3}</u>	<u>良</u>
2.54	140	200	—	7.31×10^{-3}	良
2.54	110	207	—	7.31×10^{-3}	良
2.54	70	240	—	7.32×10^{-3}	良
2.54	40.1	400	—	7.32×10^{-3}	良

(以下可溶性中性子吸収材あり (安全板による津波最大炉心))

1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	365	428.1	7.72×10^{-3}	良
1.50	110	365	400.0	7.74×10^{-3}	良
1.50	70	365	280.9	7.79×10^{-3}	良
<u>1.50</u>	<u>40</u>	<u>365</u>	<u>3.8</u>	<u>7.92×10^{-3}</u>	<u>良</u>
<u>2.54</u>	<u>140</u>	<u>400</u>	<u>174.7</u>	<u>7.07×10^{-3}</u>	<u>良</u>
2.54	110	400	162.5	7.09×10^{-3}	良
2.54	70	400	116.8	7.16×10^{-3}	良
2.54	40.1	400	0.0	7.32×10^{-3}	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.4-5 実効遅発中性子割合の評価結果（続き）
 （可溶性中性子吸収材あり（未臨界板による津波最大炉心））

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	実効遅発 中性子割合 (-)	判定 $\geq 6.8 \times 10^{-3}$ $\leq 8.1 \times 10^{-3}$
1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	400	544.6	7.68×10^{-3}	良
1.50	110	400	505.9	7.70×10^{-3}	良
1.50	70	400	380.4	7.76×10^{-3}	良
1.50	40	400	81.1	7.89×10^{-3}	良
2.54	140	400	174.7	7.07×10^{-3}	良
2.54	110	400	162.5	7.09×10^{-3}	良
2.54	70	400	116.8	7.16×10^{-3}	良
2.54	40.1	400	0.0	7.32×10^{-3}	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.4-6 水位反応度係数の評価結果

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	水位反応度係数 (ドル/mm)	判定 $\geq 2.0 \times 10^{-3}$ $\leq 6.0 \times 10^{-2}$
1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	244	—	2.18×10^{-3}	良
1.50	110	250	—	4.24×10^{-3}	良
1.50	70	274	—	1.37×10^{-2}	良
1.50	40	361	—	5.33×10^{-2}	良
2.54	140	200	—	2.40×10^{-3}	良
2.54	110	207	—	4.59×10^{-3}	良
2.54	70	240	—	1.42×10^{-2}	良
2.54	40.1	400	—	5.67×10^{-2}	良

(以下可溶性中性子吸収材あり (安全板による津波最大炉心))

1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	365	428.1	2.27×10^{-3}	良
1.50	110	365	400.0	4.28×10^{-3}	良
1.50	70	365	280.9	1.40×10^{-2}	良
1.50	40	365	3.8	5.25×10^{-2}	良
2.54	140	400	174.7	2.54×10^{-3}	良
2.54	110	400	162.5	4.81×10^{-3}	良
2.54	70	400	116.8	1.59×10^{-2}	良
2.54	40.1	400	0.0	5.67×10^{-2}	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

表 4.4-6 水位反応度係数の評価結果 (続き)

(以下可溶性中性子吸収材あり (未臨界板による津波最大炉心))

格子間隔 (cm)	臨界水位 (cm)	臨界本数 (本)	ボロン濃度 (ppm)	水位反応度係数 (ドル/mm)	判定 $\geq 2.0 \times 10^{-3}$ $\leq 6.0 \times 10^{-2}$
1.27	140	未臨界※	—	—	—
1.27	110	未臨界※	—	—	—
1.27	70	未臨界※	—	—	—
1.27	40	未臨界※	—	—	—
1.50	140	400	544.6	2.35×10^{-3}	良
1.50	110	400	505.9	4.40×10^{-3}	良
1.50	70	400	380.4	1.40×10^{-2}	良
1.50	40	400	81.1	5.33×10^{-2}	良
2.54	140	400	174.7	2.54×10^{-3}	良
2.54	110	400	162.5	4.81×10^{-3}	良
2.54	70	400	116.8	1.59×10^{-2}	良
<u>2.54</u>	<u>40.1</u>	400	0.0	<u>5.67×10^{-2}</u>	良

太字は、最大値又は最小値を与える炉心。波下線が最大値。

※「未臨界」は、棒状燃料 400 本では臨界にならないことを示す。

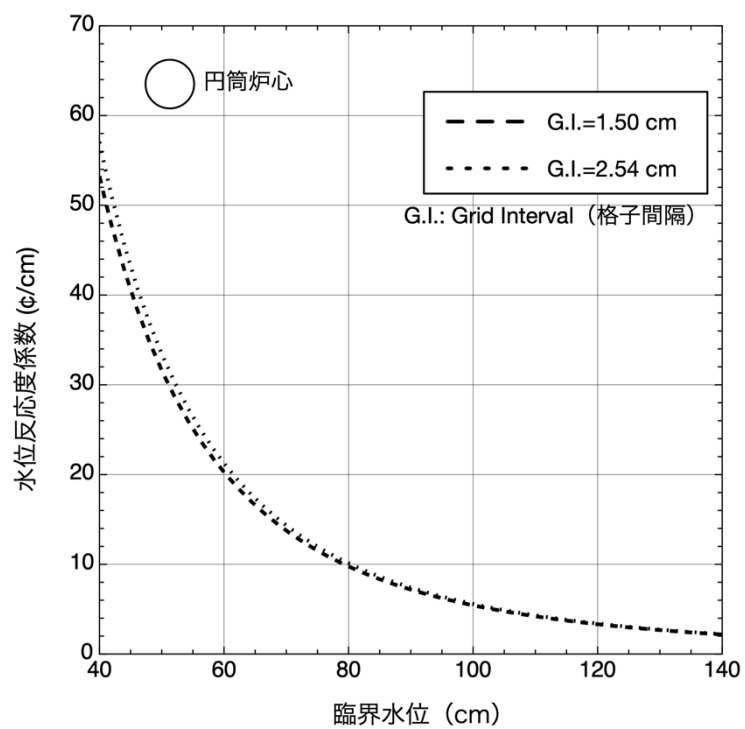


図 4. 4-1 水位反応度係数の計算結果
 (格子間隔 1.27 cm は未臨界となるため省略)

補足資料 設工認（第3回）「基本炉心（1）」の受検炉心について

(1) 基本炉心（1）の受検炉心（案）

基本炉心（1）における炉心核特性の典型的な変化傾向を示すため、基本炉心（1）の解析結果について、安全板挿入時の中性子実効増倍率（ワンロードスタックマージン及び原子炉停止余裕）を整理した。対象とする炉心の格子間隔は1.50 cmのほか、1.27 cm 格子板を1本飛ばしで使用した2.54 cm（許可上最大）とした。なお、1.27 cm 間隔で配列する炉心は、臨界となる棒状燃料本数が現有の400本を超えるため除外した。臨界水位は、許可上の最小である40 cmから最大である140 cmのほか、中間の値として70 cm及び110 cmとした。炉心の形状（炉心の水平断面）は、円筒形及び正方形とした。整理した結果を(2)に示す。基本炉心（1）の中性子実効増倍率は、格子間隔については2.54 cmよりも1.50 cmのほうが、また、炉心形状については円筒形のほうが大きくなる傾向が見られた。ここで、中性子実効増倍率が大きくなる結果が得られた格子間隔1.50 cmの臨界水位については、低水位40 cmにおいてその他の水位に比べて中性子実効増倍率が低くなる傾向が得られた。他方、水位70 cm以上の炉心においては有意な違いは見られないものの、ワンロードスタックマージンの評価において臨界水位110 cmの炉心が最大となった。また、1.27 cm 格子板を使用した格子間隔2.54 cmでは、ワンロードスタックマージン及び原子炉停止余裕で高水位側140 cmの炉心で中性子実効増倍率が大きくなった。

以上の結果から、基本炉心（1）において、格子間隔1.50 cmの格子板を使用する場合は水位70 cm付近から実験を開始して高水位側の炉心を受検炉心とし、格子間隔1.27 cmの格子板を使用する場合は同様に水位70 cm付近から実験を開始し、高水位側で使用前事業者検査を受検することとしたい。基本炉心（1）の受検炉心の案を表1に示す。なお、炉心構成に当たっては、原子力科学研究所原子炉施設保安規定に定める手続きに従って詳細解析を行い、その結果を臨界水位及び棒状燃料本数に反映する。

表1 基本炉心（1）の受検炉心（案）[§]

No.	格子間隔 (cm)	臨界水位* (cm)	棒状燃料* (本)	配列 パターン	備考
①	1.50	約70	約274	円筒炉心	事前確認
	1.50	90～140	255～240*	円筒炉心	受検炉心
②	2.54†	約70	約240	円筒炉心	事前確認
	2.54†	90～140	215～200*	円筒炉心	受検炉心

† 格子間隔1.27 cmの格子板に棒状燃料を1本飛ばしで挿入する。

※ 臨界水位及び棒状燃料の装荷本数は可変条件であり、詳細解析、実測データ又は臨界近接の結果により決定する。

* 本数の大小が逆であるのは、臨界水位の大小と合わせたため（臨界水位が増大すると本数は減少する。）。

§ これらの炉心の炉心特性について別紙に示す。

(2) 基本炉心（1）の解析結果の整理

基本炉心（1）の解析結果を整理する範囲を下表に示す。

パラメータ	変化範囲	備考
棒状燃料本数	50～400 本	
臨界水位	40, 70, 110, 140 cm	
炉心形状 (水平断面)	円筒形、正方形	
格子間隔	1.50, 2.54 cm	1.27 cm は 400 本以上の棒状燃料を要するため除外。

基本炉心（1）の解析を整理した結果を図 1 に示す。図の横軸は臨界水位、縦軸は安全板挿入時の中性子実効増倍率（ワンロッドスタックマージン及び原子炉停止余裕）である。エラーバーは、モンテカルロ計算に付随する不確かさを 1σ （約 0.0007）として $\pm 3\sigma$ である。

図より、基本炉心（1）の中性子実効増倍率は、格子間隔については 1.50 cm のほうが、炉心形状については円筒形のほうが大きくなる傾向が見られる。臨界水位については、格子間隔 1.50 cm の円筒形炉心の場合、デジタル値では臨界水位 110 cm でワンロッドスタックマージンの、臨界水位 140 cm で原子炉停止余裕の結果が最大となったものの、臨界水位 70 cm 以上ではほぼ違いが見られなかった（表 2 に示すとおり、差は $\pm 3\sigma$ 以内）。また、格子間隔 1.27 cm の格子板を使用した場合（格子間隔 2.54 cm）では、ワンロッドスタックマージン及び原子炉停止余裕の双方で高水位側 140 cm の炉心で中性子実効増倍率が大きくなる傾向が見られた（表 3 参照）。このため、受検炉心としては高水位を提案する。

（解析結果の整理の補足）

図 1 の横軸を炉心の幅（正方形の炉心では 1 辺の長さ、円筒形の炉心では直径）で整理した結果を図 2 に示す。図には、各格子板の安全板スリットの間隔を縦線で示した。図より、安全板の間隔と円筒形炉心の直径が一致するとき、中性子実効増倍率が大きくなっていることがわかる。中性子実効増倍率が最大となった炉心の大きさと安全板の位置関係について図 3 に示す。この中性子実効増倍率の傾向は、一般に中性子束が減少する炉心端に安全板が位置し、安全板による熱中性子吸収効果が弱まるためである。また、正方炉心よりも円筒炉心のほうが中性子実効増倍率が大きい（すなわち、熱中性子吸収効果が弱い）理由も、図 3 の炉心に装荷した棒状燃料の配置と安全板の位置関係から説明できる。

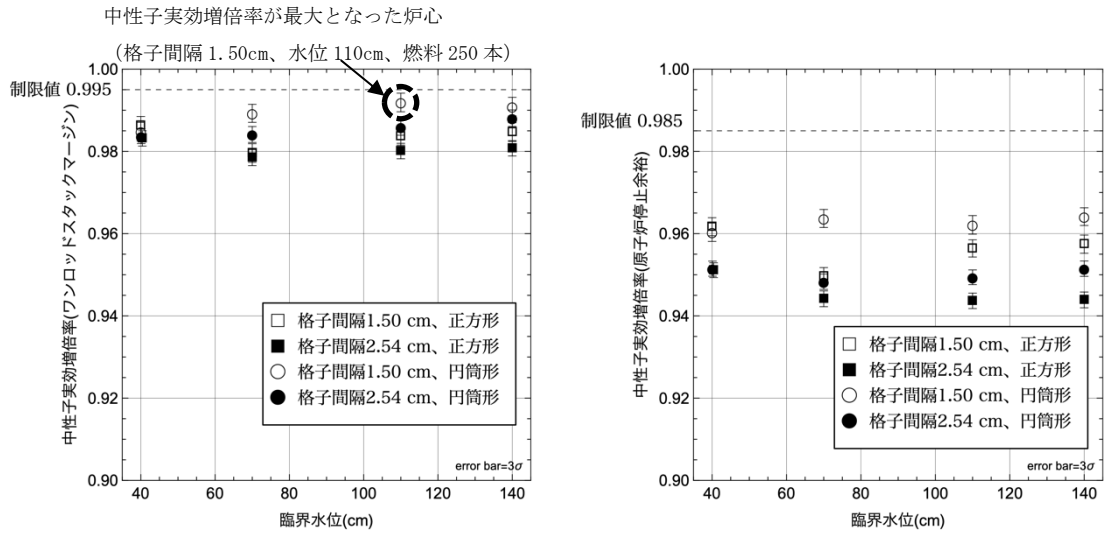


図1 基本炉心（1）の解析結果の整理

(左：ワンロッドスタックマージン、右：原子炉停止余裕)

表2 格子間隔 1.50 cm、円筒炉心の中性子実効増倍率の比較

臨界 水位 (cm)	棒状 燃料 本数	ワンロッド スタックマージン		水位 70cm 炉心との差 (σ) [※]	原子炉停止余裕		水位 70cm 炉心との差 (σ) [※]
		k_{eff}	$\pm 1\sigma$		k_{eff}	$\pm 1\sigma$	
40	361	0.9848	0.0008	-4.2	0.9603	0.0007	-3.2
70	274	0.9892	0.0007	-	0.9637	0.0007	-
110	250	0.9919	0.0008	2.5	0.9621	0.0008	-1.5
140	244	0.9909	0.0007	1.6	0.9641	0.0007	0.4

※臨界水位 70 cm の炉心の計算結果を k_0 、 σ_0 とした場合、 $(k_{\text{eff}} - k_0) / \sqrt{(\sigma^2 + \sigma_0^2)}$ で計算。

表3 格子間隔 2.54cm、円筒炉心の中性子実効増倍率の比較

臨界 水位 (cm)	棒状 燃料 本数	ワンロッド スタックマージン		水位 70cm 炉心との差 (σ) [※]	原子炉停止余裕		水位 70cm 炉心との差 (σ) [※]
		k_{eff}	$\pm 1\sigma$		k_{eff}	$\pm 1\sigma$	
40.1 [†]	400	0.9837	0.0006	-0.5	0.9515	0.0006	3.6
70	240	0.9841	0.0006	-	0.9483	0.0006	-
110	207	0.9859	0.0007	2.0	0.9494	0.0006	1.3
140	200	0.9881	0.0007	4.3	0.9515	0.0006	3.6

※臨界水位 70 cm の炉心の計算結果を k_0 、 σ_0 とした場合、 $(k_{\text{eff}} - k_0) / \sqrt{(\sigma^2 + \sigma_0^2)}$ で計算。

† 水位 40 cm では棒状燃料本数が 400 本をわずかに上回るため、400 本で臨界となるよう水位を調整した。

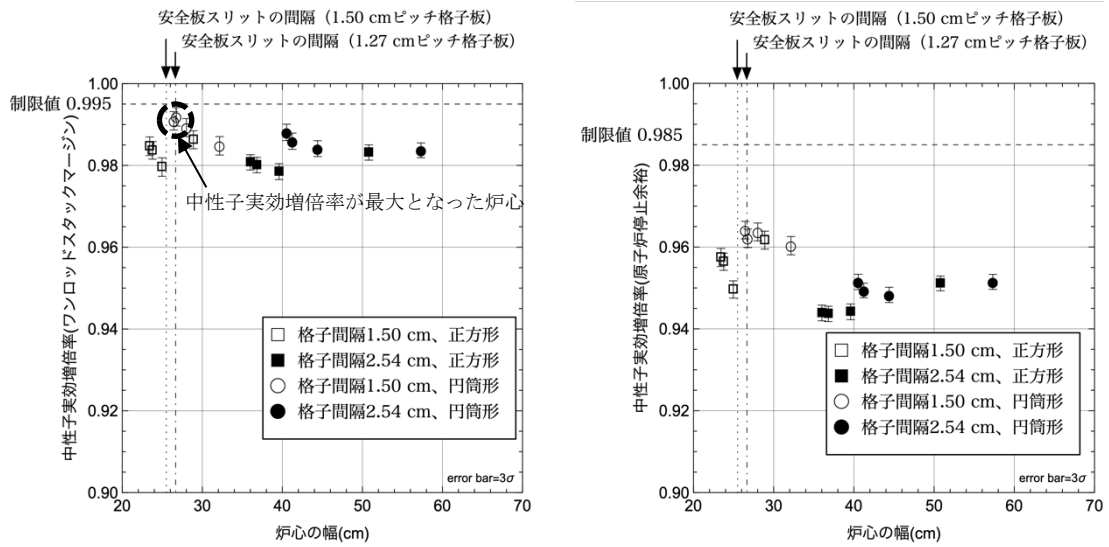


図2 基本炉心（1）の解析結果の整理（炉心の幅で整理）

（左：ワンロッドスタックマージン、右：原子炉停止余裕）

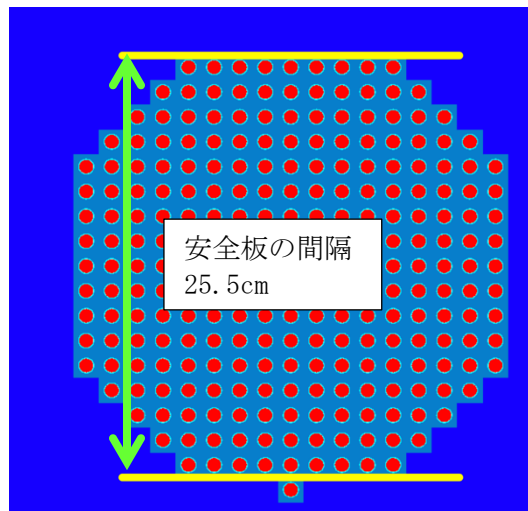


図3 中性子実効増倍率が最大となった炉心（格子間隔 1.50 cm、棒状燃料 250 本）

と安全板の位置関係

基本炉心（１）の受検炉心（案）の炉心特性

表１ 基本炉心（１）の受検炉心（案）に示した炉心の核特性（減速材温度反応度係数、減速材ボイド反応度係数、棒状燃料温度反応度係数、即発中性子寿命、実効遅発中性子割合及び水位反応度係数）は、添付書類「Ⅲ－９－３－（２）基本炉心（１）の核的設計計算書」に解析結果が示されている。それぞれの炉心特性値について、受検炉心（案）の臨界水位の変化範囲、安全確認のために事前に水位 70 cm 付近から実験を開始するための炉心（以下「事前確認炉心」という。）及び炉心特性値の変化範囲（添付書類「Ⅲ－９－３－（１）炉心の核的設計計算書作成の基本方針」参照）との関係を図 1～6 に示す。図に示すとおり、受検炉心（案）はすべて、炉心特性値の変化範囲に収まる見通しが確認できる。また、「Ⅲ－９－３－（２）基本炉心（１）の核的設計計算書」表 4.2-3 及び表 4.2-4 に示すとおり、棒状燃料 400 本以下の条件では、基本炉心の臨界本数はすべて津波最大炉心の最大本数以下（津波水没時の臨界判定が「良」＝未臨界）であるため、津波に水没した場合でも臨界となることはない。

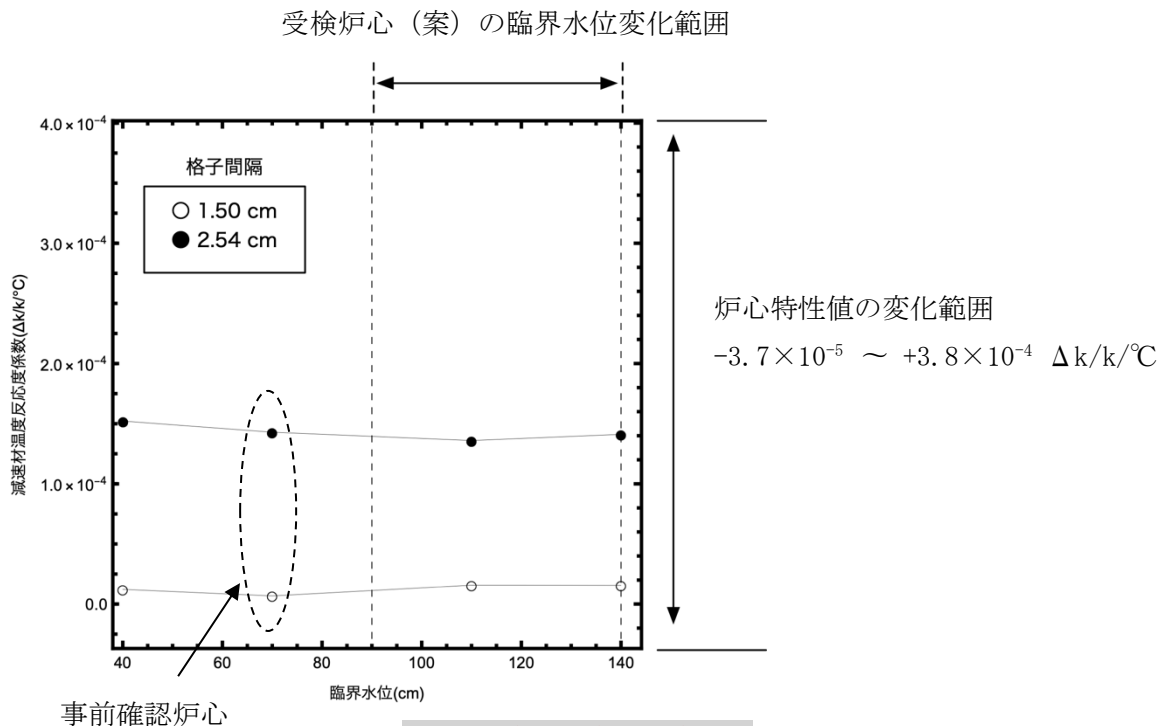


図 1 減速材温度反応度係数

受検炉心（案）の臨界水位変化範囲

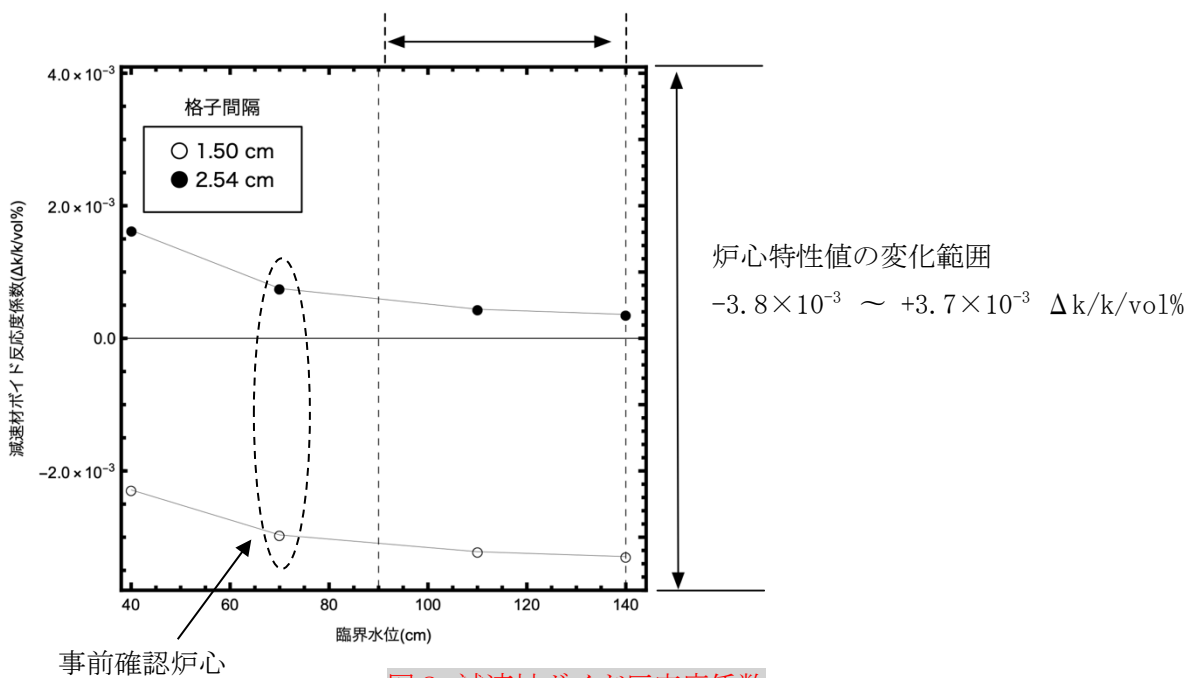


図2 減速材ボイド反応度係数

受検炉心（案）の臨界水位変化範囲

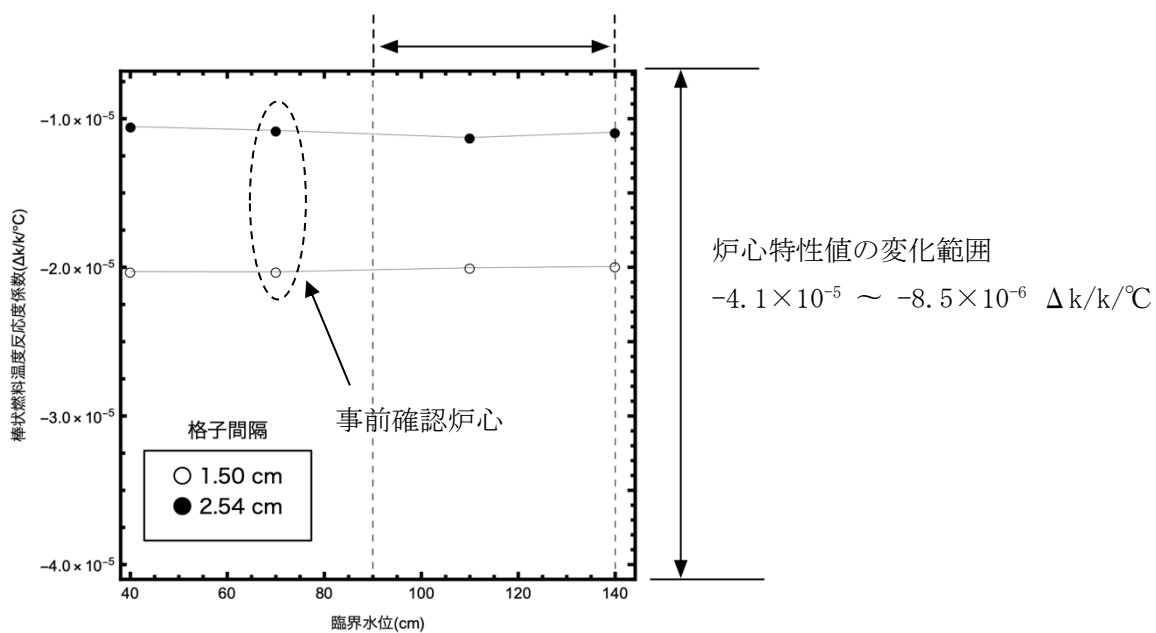


図3 棒状燃料温度反応度係数

受検炉心（案）の臨界水位変化範囲

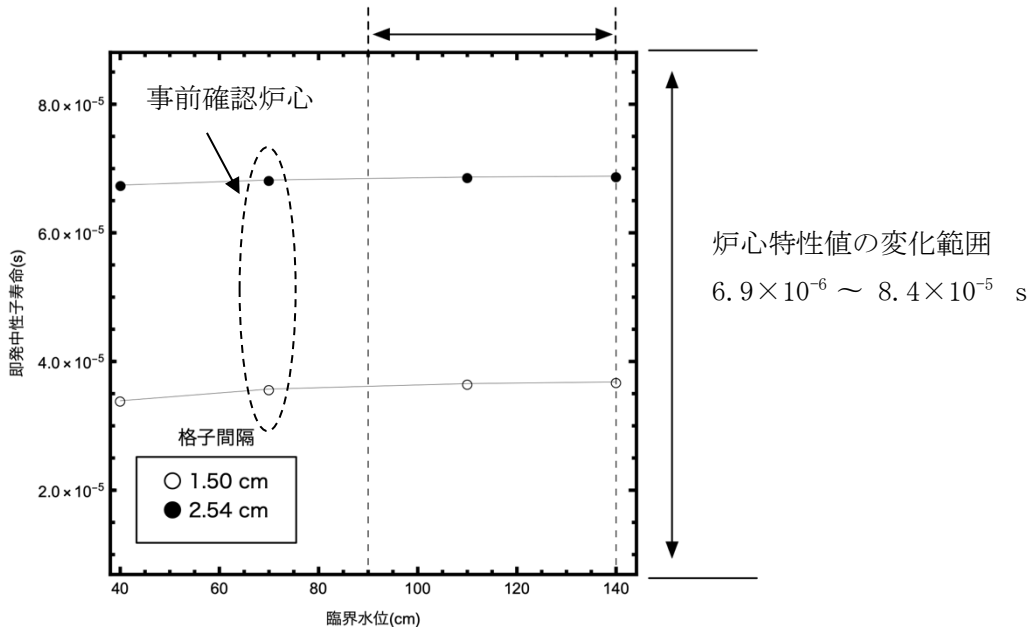


図4 即発中性子寿命

受検炉心（案）の臨界水位変化範囲

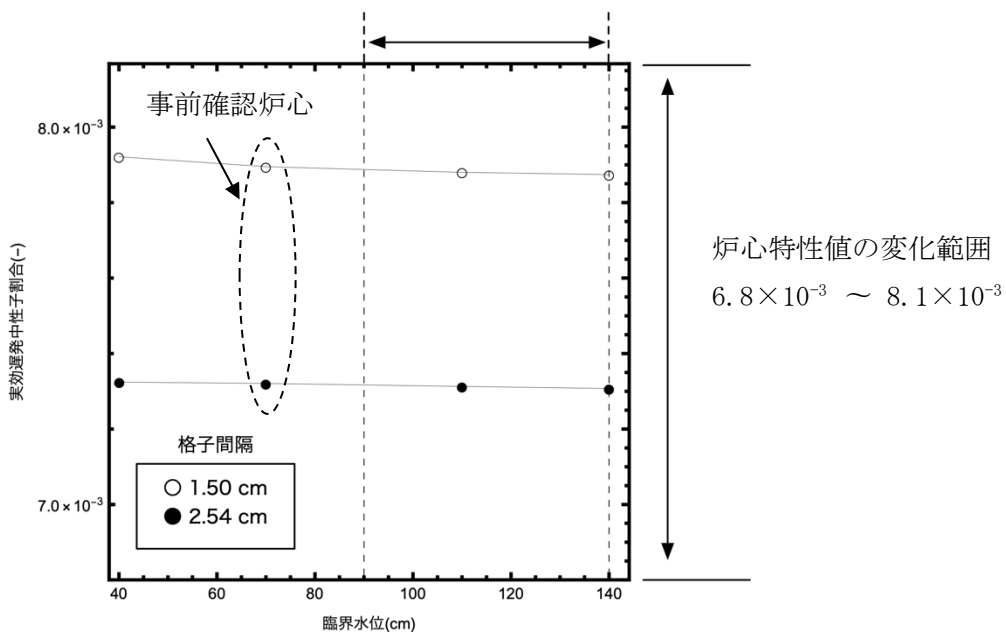


図5 実効遅発中性子割合

受検炉心（案）の臨界水位変化範囲

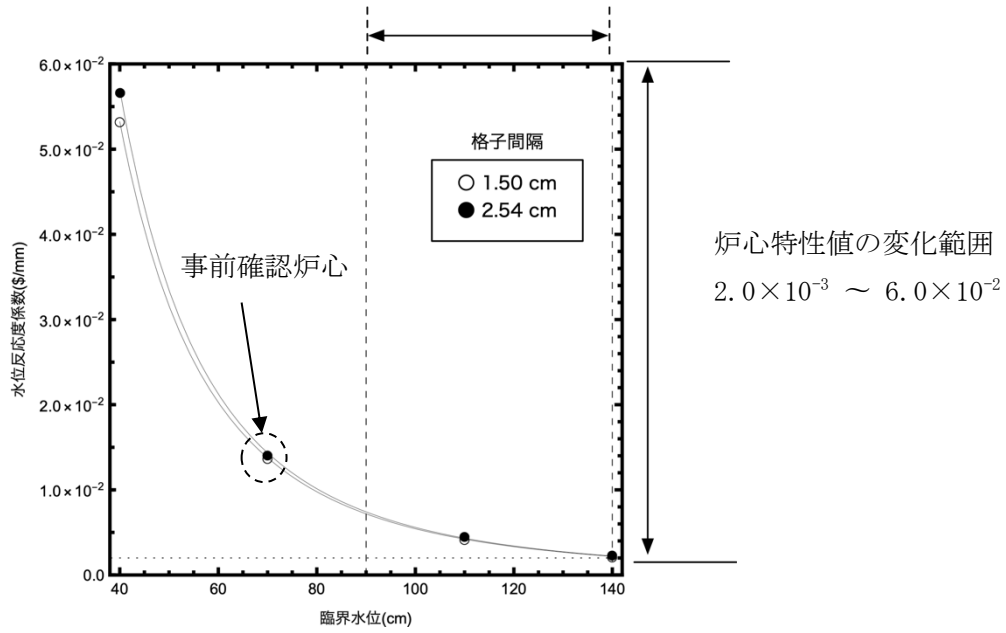


図6 水位反応度係数