

柏崎刈羽原子力発電所第6号機	設計及び工事計画審査資料
資料番号	KK6 補足-028-10-25 改0
提出年月日	2024年1月22日

ジルカロイ設計疲労曲線の高燃焼度燃料への適用性について

2024年1月

東京電力ホールディングス株式会社

25. ジルカロイ設計疲労曲線の高燃焼度燃料への適用性について

## 目次

1. はじめに .....	1
2. ジルカロイ設計疲労曲線 .....	1
3. 検討結果 .....	2
4. 引用文献 .....	2

## 1. はじめに

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能維持の評価項目として、下部端栓溶接部応力解析より得られた応力振幅と Langer-0' Donnell のジルカロイ設計疲労曲線<sup>[1]</sup>に基づく疲労評価を実施している。このジルカロイ設計疲労曲線は、ジルカロイ-2 の未照射材及び照射材についての疲労試験結果に基づくものであるが、試験に供された照射材の照射量は  $1.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \sim 5.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  ( $>0.625 \text{ eV}^*$ ) であり、疲労特性の照射量依存性は小さいと報告されている。

その後に実施された研究<sup>[2]</sup>において、高速中性子照射量  $1.3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  までのジルカロイ-2 被覆管の疲労試験データが採取されている。

本資料は、Langer-0' Donnell のジルカロイ設計疲労曲線の 9×9 燃料の被覆管疲労評価への適用性について、過去の研究で実施されたジルカロイ-2 被覆管の疲労試験のデータに基づいて検討した結果を示すものである。

## 2. ジルカロイ設計疲労曲線の適用性

Langer-0' Donnell のジルカロイ設計疲労曲線<sup>[1]</sup>は、ジルカロイ-2 の未照射材及び照射材の疲労試験結果をベースに、未照射材及び照射材のベストフィット曲線について最大平均応力の補正を施した上で、応力を 1/2 倍した曲線及びサイクル数を 1/20 倍した曲線の 4 つの曲線の包絡線を設計疲労曲線としたものである。(図 1)

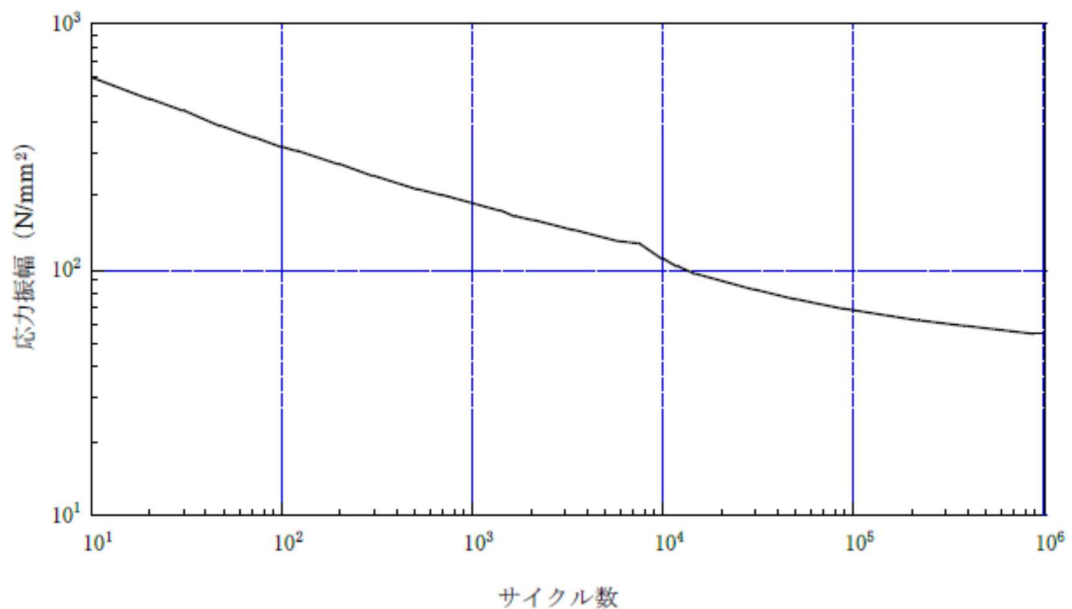


図 1 ジルカロイ設計疲労曲線

未照射材の疲労試験では室温及び316°C (600 ° F) における、ジルカロイ-2 平滑材 (圧延-焼鈍材及び溶接材) を用いた軸方向引張・圧縮及び曲げの完全交番試験 (平均ひずみが 0) による定ひずみ振幅データ (ひずみの負荷方向は圧延方向, 圧延直角方向, 溶接方向及び溶接直角方向) が得られている。ここで, 疲労試験結果の縦軸は, 仮想的な弾性挙動を仮定した下記の式を用いて, 疲労試験におけるひずみ振幅から応力振幅に換算されたものである。

$$S_a = E \cdot \epsilon_a = E \cdot \epsilon_t / 2$$

ここで,  $S_a$  : 応力振幅 (psi)

$E$  : ヤング率 (室温 ;  $14.0 \times 10^6$  psi, 316°C ;  $11.5 \times 10^6$  psi)

$\epsilon_a$  : 全ひずみ振幅

$\epsilon_t$  : ひずみ範囲 (ピーク-ピーク間の変化幅)

照射材の疲労試験は, 照射量  $1.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \sim 5.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  ( $>0.625 \text{ eV}^*$ ) の供試材を用いて, 316°Cにおける軸方向引張・圧縮及び曲げの完全交番試験が行われており, 約  $1.0 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  以上では照射による疲労特性への影響は小さいと報告されている。

また, 過去の研究<sup>[2]</sup> において, 実機の設計条件を超える高速中性子照射量約  $1.3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  までのジルカロイ-2 燃料被覆管の疲労試験データが採取され, Langer-0' Donnell の照射材疲労試験データに包絡されることが確認されている。なお, 9×9 燃料の燃料被覆管応力解析に係わる設計パラメータの高速中性子照射量は  $1.2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  <sup>[3]</sup> であり, 上記疲労試験<sup>[1,2]</sup> の範囲内にある。

### 3. 検討結果

9×9 燃料の燃料被覆管応力解析に係わる設計パラメータの高速中性子照射量  $1.2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  <sup>[3]</sup> を超える  $1.3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  まで照射されたジルカロイ-2 被覆管を用いた疲労試験データを Langer-0' Donnell のジルカロイ設計疲労曲線<sup>[1]</sup> と比較し, ジルカロイ設計疲労曲線は, 高照射量の被覆管の疲労試験データに対して十分な余裕を有しており, 9×9 燃料に適用可能と判断された。

### 4. 引用文献

- [1] W. J. O' Donnell and B. F. Langer, "Fatigue Design Basis for Zircaloy Components", Nuclear Science and Engineering, 20, 1-12 (1964)
- [2] S. Ishimoto, et al., "Improved Zr Alloys for High Burnup BWR Fuel", Top\_Fuel 2006 (2006 International Meeting on LWR Fuel Performance, 22-26 October 2006, Salamanca, Spain)
- [3] 「沸騰水型原子力発電所 9×9 燃料について」(株式会社 グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン, GLR-001, 平成 15 年 4 月)

---

\* 熱中性子を除く高エネルギー領域 ( $>0.625\text{eV}$  の中性子束は, 高速中性子束 ( $\geq 1\text{MeV}$ ) の約 4 倍)