

高浜発電所 3、4 号機 (MOX 炉心) の取替炉心の安全性評価への CASMO4/SIMULATE3 コードの使用について

令和 3 年 3 月 12 日
原子力規制庁
実用炉監視部門

1. 経緯

関西電力においては、 UO_2 炉心の取替炉心の安全性評価に CASMO4/SIMULATE3 (以下「C4/S3」という。) コードを使用しており、MOX 炉心である高浜 3,4 号機においても、運転実績が蓄積されたことから、C4/S3 コードを使用したい旨の打診があった。

このため、C4/S3 コードの適用範囲を MOX 炉心に拡大することから、同コードを高浜 3,4 号機 (MOX 炉心) に使用することの妥当性について、原子力規制検査により確認した。

2. 確認結果

原子力規制検査の結果、C4/S3 コードは高浜発電所 3,4 号機 (MOX 炉心) の取替炉心の安全性評価においても十分な信頼性を有しており、同コードを用いることは妥当であると判断する。

3. 確認内容

(1) 臨界実験解析

MOX 燃料棒を使用した臨界実験解析を行った結果、図 1 に示すとおり、燃料棒単位の集合体内出力分布の平均自乗誤差 (測定値と解析値のばらつき) は、 UO_2 燃料集合体と同程度である。

(2) 実機解析

a. 実機測定値との比較

関西電力 PWR プラントを対象に、以下の核特性パラメータについて実機測定値と解析値を比較した結果、図 2-1～図 2-5 に示すとおり UO_2 炉心と同様、全て設計目標を満足しており、測定値と解析値の一致は良好である。

[高温全出力時]

- ・ 径方向出力分布 図 2-1
- ・ 臨界ボロン濃度 図 2-2

[高温零出力時]

- ・ 臨界ボロン濃度 図 2-2
- ・ 減速材温度係数 図 2-3
- ・ 制御棒価値 図 2-4

b. 測定値に対する誤差の許認可コードとの比較

測定値に対する誤差について許認可コードと比較した結果、表 1 に示すとおり有意な差は見られない。

(3) 取替炉心の安全性解析

取替炉心の安全性確認項目について許認可コードと比較した結果、表 2 に示すとおり全体としてほぼ一致している。

4. 確認資料

- (1) 炉内配置検査に用いる炉心解析コードの適用範囲拡大に伴う CASMO-4/SIMULATE-3 コードシステムによる MOX 炉心の取替炉心設計への適用について（平成 31 年 4 月 26 日 関西電力株式会社）
- (2) 取替炉心設計に係る CASMO-4/SIMULATE-3 の信頼性について（2019 年 4 月 株式会社原子力エンジニアリング）
- (3) PWR における CASMO/SIMULATE コードシステムによる核設計手法と信頼性（平成 30 年 8 月 株式会社原子力エンジニアリング）
- (4) 高浜 3 号機第 23、24 サイクル 取替炉心の安全性について
- (5) 高浜 4 号機第 21、22 サイクル 取替炉心の安全性について

以 上

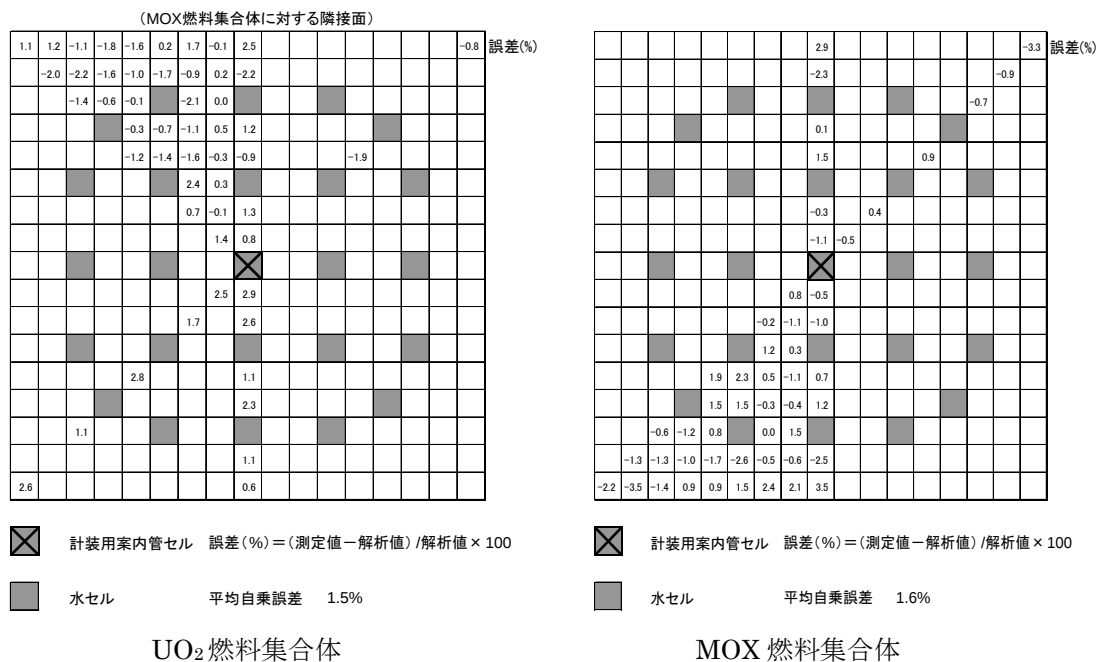
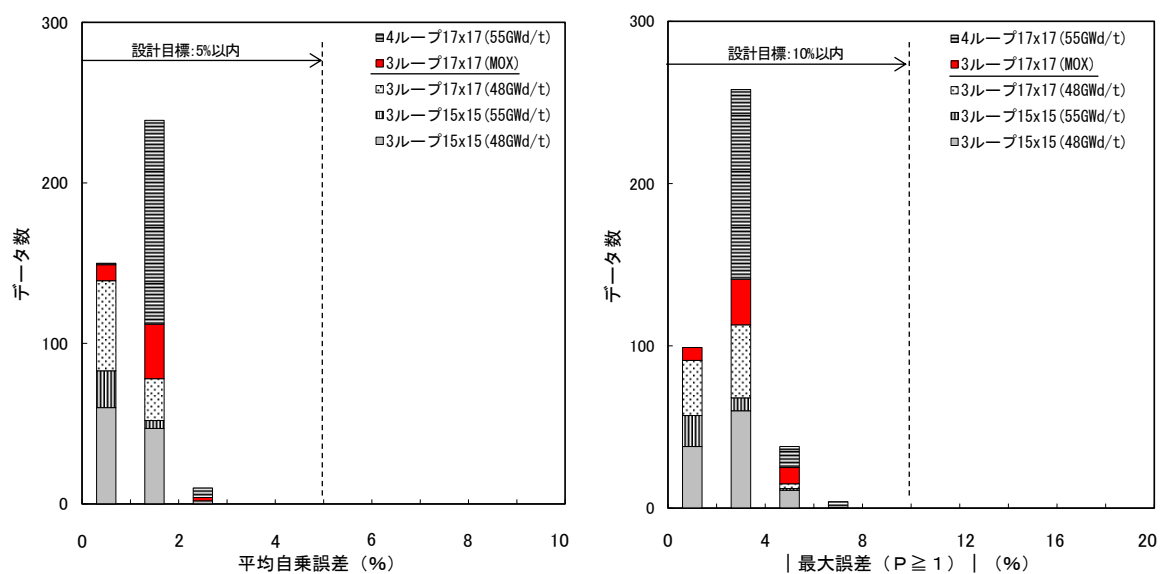


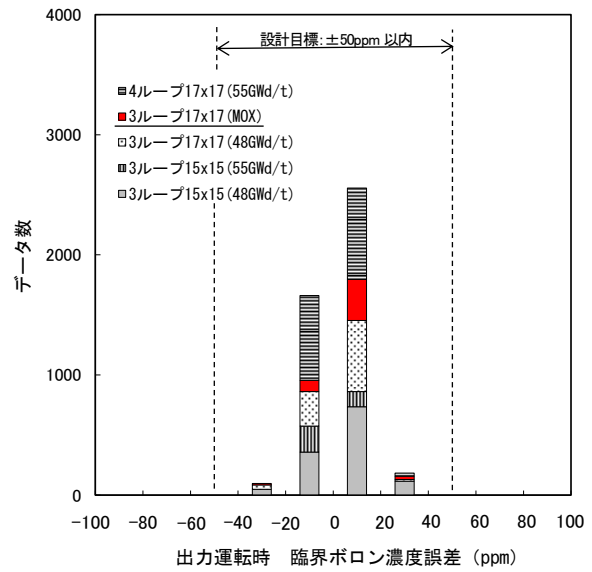
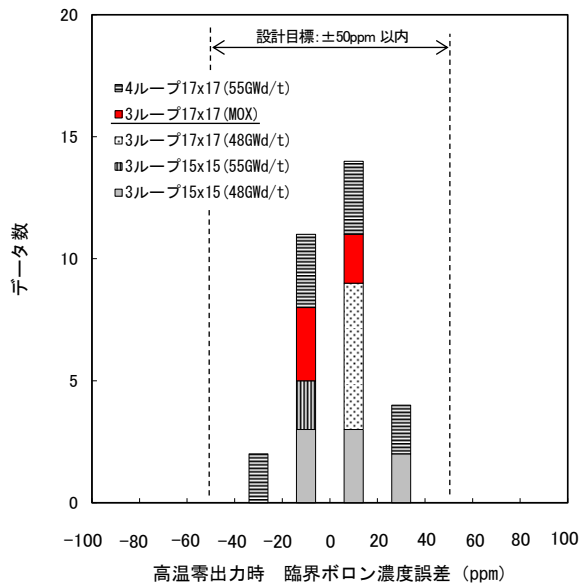
図 1 燃料集合体出力分布誤差(臨界実験解析)



注) 誤差の定義: 燃料集合体毎の相対出力誤差(%) = (測定値 - 解析値) / 解析値 × 100

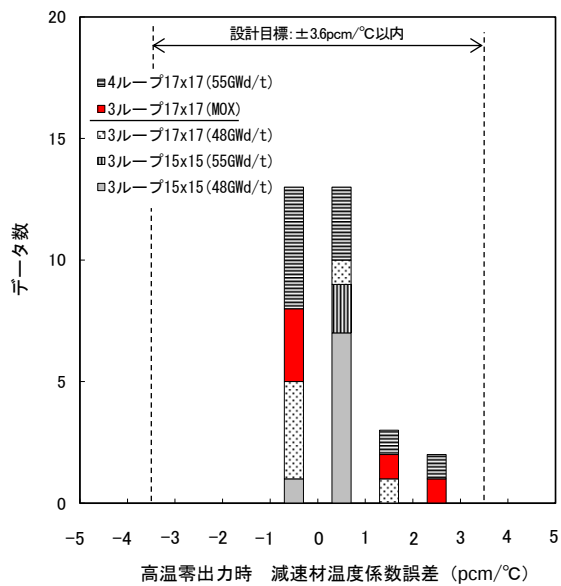
平均自乗誤差(%) = $\sqrt{\sum (\text{燃料集合体毎の相対出力誤差})^2 / \text{燃料集合体数}}$

図 2-1 径方向出力分布誤差のヒストグラム



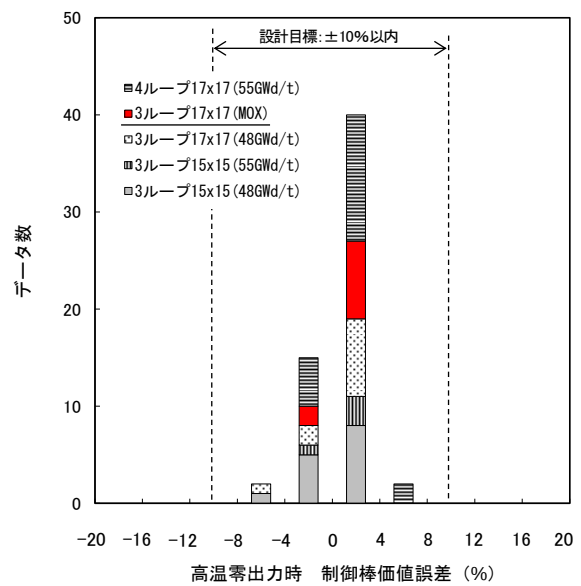
注) 誤差の定義: 臨界ボロン濃度誤差 (ppm) = 測定値 - 解析値

図 2-2 臨界ボロン濃度誤差のヒストグラム



注) 誤差の定義: 減速材温度係数誤差 (pcm/°C) = 測定値 - 解析値

図 2-3 減速材温度係数誤差のヒストグラム



制御棒価値誤差 (%) = (測定値 - 解析値) / 解析値 × 100

図 2-4 制御棒価値誤差のヒストグラム

表 1 測定値に対する誤差の許認可コードと CASMO4/SIMULATE3 コードの比較

項 目				高浜3号機				高浜4号機				設計目標	備 考 (誤差)
				第 23 サイクル		第 24 サイクル		第 21 サイクル※1		第 22 サイクル			
				許認可 コード	C4/S3	許認可 コード	C4/S3	許認可 コード	C4/S3	許認可 コード	C4/S3		
HFP	径 方 向 出力分布	平均自乗誤差 〔%〕	BOC	1.7	2.1	2.5	2.7	1.3	1.7	1.8	1.9	5%以内	(測定値－解析値) ／解析値×100
			MOC	1.1	0.7	2.4	1.9	1.0	1.4	1.4	1.1		
			EOC	1.2	0.9	2.0	1.3	0.8	1.3	0.9	0.9		
		最大誤差〔%〕 (測定出力≧1.0)	BOC	-3.5	-4.8	-4.1	+4.9	+2.2	-4.4	+4.9	+4.3	±10%以内	
			MOC	+2.3	-1.6	+3.0	+3.1	+2.3	+2.7	+3.8	+2.5		
			EOC	+3.0	-2.3	+2.5	-2.5	+1.4	-2.2	+1.9	-2.4		
	臨界ボロン濃度最大誤差 〔ppm〕			-25	+11	+9,-9	+27	-17	-34	+12	+19	±50ppm 以内	測定値－解析値
HZIP	臨界ボロン 濃度誤差 〔ppm〕	ARO	-6	-6	+2	+7	+11 -7	-1 -7	+5	-3	±50ppm 以内	測定値－解析値	
	減速材温度 係数誤差 〔pcm/℃〕	ARO	-1.3	-0.6	+0.4	+0.6	-0.9 -0.6	-0.6 -0.2	+1.0	+1.3	±3.6 pcm/℃ 以内	測定値－解析値	
	制御棒価値 誤差〔%〕	全制御棒	+0.7	+1.9	+0.3	+0.2	+1.2 +1.7	+2.4 +2.9	+0.2	+0.2	±10%以内	(測定値－解析値) ／解析値×100	

※1 高浜 4 号機第 21 サイクルは起動時の炉物理検査を 2 回実施しており、HZIP についてはそれぞれの結果を記載（上段：1 回目、下段：2 回目）

表 2 「取替炉心の安全性」解析結果の許認可コードと CASMO4/SIMULATE3 コードの比較

項 目				高浜3号機				高浜4号機				制 限 値
				第 23 サイクル		第 24 サイクル		第 21 サイクル		第 22 サイクル		
				許認可コード	C4/S3	許認可コード	C4/S3	許認可コード	C4/S3	許認可コード	C4/S3	
反応度停止余裕（％Δk/k）				2.89	2.47	2.57	2.22	3.38	3.06	2.82	2.43	1.8 以上
最大線出力密度(kW/m)				36.4 以下	35.2 以下	35.9 以下	35.8 以下	36.4 以下	35.6 以下	36.2 以下	35.4 以下	39.6 以下
集合体最高燃焼度 (MWd/t)		ウラン		47,600	47,600	47,200	47,200	47,600	47,600	47,400	47,100	48,000 以下
		MOX		28,900	29,400	43,400	43,500	10,900	11,100	28,100	28,300	45,000 以下
F _{xy} ^N				1.44 以下	1.44 以下	1.45 以下	1.44 以下	1.43 以下	1.43 以下	1.44 以下	1.43 以下	1.48 以下
減速材温度係数 (×10 ⁻⁵ Δk/k／℃)				-58～-4.3	-60～-5.1	-59～-7.1	-60～-7.4	-56～-1.9	-58～-2.4	-58～-2.9	-60～-3.4	-78 ～ 0
最大反応度添加率 (×10 ⁻⁵ (Δk/k)/秒)				55	58	52	54	59	62	54	55	86 以下
制御棒落下		ワース (%Δk/k)		0.18	0.17	0.19	0.19	0.18	0.18	0.17	0.18	0.25 以下
		F _{ΔH} ^N		1.69	1.68	1.72	1.70	1.69	1.68	1.68	1.65	1.84 以下
制御棒飛出し	ワース (%Δk/k)	BOC	HFP	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.19 以下
			HZP	0.52	0.50	0.48	0.47	0.24	0.25	0.40	0.40	0.90 以下
		EOC	HFP	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.19 以下
			HZP	0.91	0.83	0.62	0.61	0.63	0.57	0.91	0.92	1.0 以下
	F _Q	BOC	HFP	2.18	2.08	2.19	2.10	2.13	2.08	2.14	2.07	7.0 以下
			HZP	7.55	7.38	7.45	6.98	4.91	4.43	5.84	5.98	14 以下
		EOC	HFP	2.74	2.67	2.22	2.28	2.33	2.29	2.68	2.78	5.6 以下
			HZP	20.9	20.3	15.9	15.4	17.3	16.2	21.1	21.0	26 以下