

要旨

1994年及び2010年に実施された「もんじゅ」制御棒価値測定試験について、測定値及び測定誤差の詳細評価を実施した。得られた測定値及び誤差に基づき、解析精度を評価した結果、炉心体系や制御棒の径方向位置、種類に依らず解析精度はほぼ一定（ばらつきが±2%の範囲内）となり、かつ解析値と測定値は両者の誤差合計値（約±3%：1σ）の範囲で一致することを確認した。

1. 研究目的

制御棒価値（以下、CR 価値）は主要核特性の1つであり、また、他の核特性測定でも反応度の基準として用いられるため、可能な限り正確に評価する必要がある。本研究では、1994年及び2010年に実施された「もんじゅ」性能試験のCR 価値測定試験結果（以下 Core1994、Core2010 と記す）を詳細に評価し、その結果を基に「もんじゅ」のCR 価値に対する解析精度を検証する。

2. CR 価値評価

炉心中心に位置する粗調整棒（CCR1）は正のペリオド法で、それ以外の位置にある制御棒はCCR1の微分価値を基にした置換法で測定されている。従来の「もんじゅ」性能試験での評価は種々の要因を一括して誤差としていた。本研究は、これを要因ごとの補正值とその誤差として扱い、最確測定値を評価した。

補正值及びCR 価値評価結果を表1、図1に示す。補正項目の例として「CR 駆動軸熱収縮補正」の概要を述べる。制御棒（CR）引抜に伴いCR 駆動軸の一部

は炉心部(200℃)から炉上部(約70℃)に移動し、熱収縮する。この影響を考慮するために、過去に実測された熱収縮の時間変化とCR 操作履歴から測定ステップ毎の熱収縮量を求め、補正值としている。

補正項目の中では、表1に示すように、Core1994における「外部中性子源効果補正」が最大であり、後述する誤差合計に比べても無視できない。その他の補正についても、制御棒間の差異を詳細に評価する場合は無視できないと考えられる。

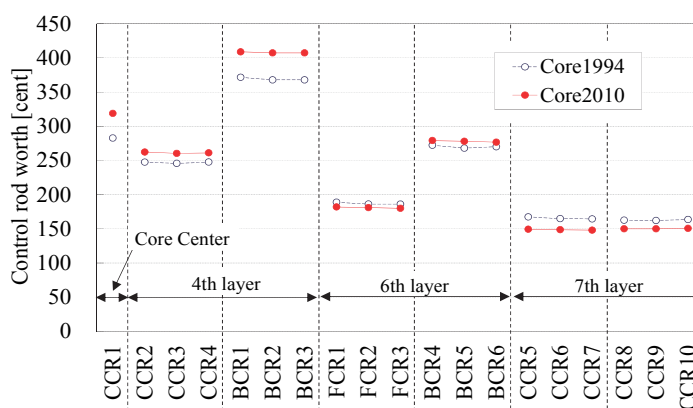


図1 CR 価値評価結果

表 1 CR 価値評価結果

		補正前CR価値		臨界判定補正	外部中性子源効果補正	トップラ効果補正	CR駆動軸熱収縮補正	補完解析値のE/C補正	補正後CR価値		
		測定範囲内	測定範囲外 ^(*)						測定範囲内	測定範囲外	フルストローク
Core1994	CCR1	276.55	-	-	+2.30	+0.77	+0.37	-	279.99	-	279.99
	CCR2	245.71	-	-	-	-	-0.14	-	245.57	-	245.57
	CCR5	168.28	-	-	-	-	0.00	-	168.28	-	168.28
	CCR6	163.55	-	-	-	-	+0.05	-	163.60	-	163.60
	FCR1	188.80	-	-	-	-	-0.02	-	188.78	-	188.78
	BCR1	333.84	-	-	-	-	+0.07	-	333.91	-	333.91
	BCR4	249.53	-	-	-	-	+0.03	-	249.56	-	249.56
Core2010	CCR1	170.96	141.03	+0.30	+0.51	+0.41	+0.52	+0.94	172.70	141.97	314.67
	CCR2	172.93	85.01	-	-	-	+0.10	+0.20	173.02	85.20	258.23
	CCR5	148.36	-	-	-	-	-0.21	-	148.16	-	148.16
	CCR6	149.01	-	-	-	-	-0.32	-	148.69	-	148.69
	FCR1	171.89	6.36	-	-	-	-0.43	+0.02	171.45	6.38	177.83
	BCR1	172.93	229.24	-	-	-	+0.38	+2.15	173.31	231.39	404.70
	BCR4	172.93	100.83	-	-	-	-0.09	+1.39	172.83	102.22	275.05

単位: [ε]

*1) 炉心反応度が小さいため測定範囲外となる範囲については解析値にて補完

誤差評価結果を表 2 に示す。「臨界性再現性」や「遅発中性子データ誤差」(遅発中性子ファミリーデータの誤差)は、本評価において新たに考慮した項目である。各 CR に対する誤差評価結果は約 1.6~1.7% (相対値、1σ) であり、いずれの CR においても「遅発中性子データ誤差」が支配的である。CR 価値測定のさらなる精度向上のためには当該誤差項目の低減が有効である。

なお、本報では省略するが、得られた補正および誤差評価の妥当性は対称位置における CR 価値が誤差の範囲内で概ね一致することにより確認している。

表 2 CR 価値誤差評価結果

	測定誤差									遅発中性子データ誤差		組成誤差		合計	
	計数率データ処理	臨界判定	制御棒位置表示	デラッチ・ラッチ操作	トップラ効果補正	制御棒駆動軸の熱収縮補正	外部中性子源効果補正	臨界性再現性	基準制御棒	先行核ファミリー相対割合	先行核ファミリー崩壊定数	燃料	制御棒(¹⁰ B)		
Core 1994	CCR1	0.30	0.10	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	-	-	1.26	0.81	0.15	0.23	1.56
	CCR2	-	0.03	0.05	0.03	-	0.02	-	-	1.54	-	-	0.16	0.23	1.57
	CCR5	-	0.04	0.10	0.00	-	0.02	-	0.48	1.56	-	-	0.17	0.24	1.66
	CCR6	-	0.04	0.11	0.00	-	0.01	-	0.49	1.56	-	-	0.17	0.24	1.67
	FCR1	-	0.04	0.08	0.01	-	0.00	-	-	1.55	-	-	0.16	0.26	1.58
	BCR1	-	0.02	0.09	0.02	-	0.00	-	0.24	1.65	-	-	0.14	0.11	1.68
	BCR4	-	0.03	0.12	0.02	-	0.01	-	0.32	1.63	-	-	0.14	0.11	1.68
Core 2010	CCR1	0.07	0.13	0.10	0.09	0.04	0.02	0.02	-	-	1.32	0.87	0.16	0.26	1.62
	CCR2	-	0.04	0.13	0.07	-	0.04	-	-	1.59	-	-	0.16	0.26	1.63
	CCR5	-	0.05	0.13	0.01	-	0.01	-	-	1.59	-	-	0.16	0.24	1.62
	CCR6	-	0.05	0.13	0.00	-	0.01	-	-	1.59	-	-	0.16	0.24	1.63
	FCR1	-	0.04	0.11	0.02	-	0.03	-	-	1.59	-	-	0.16	0.24	1.62
	BCR1	-	0.04	0.16	0.11	-	0.03	-	-	1.59	-	-	0.14	0.18	1.62
	BCR4	-	0.04	0.13	0.07	-	0.04	-	-	1.59	-	-	0.14	0.17	1.61

(単位: %)

3. 測定誤差の相関評価

誤差の相関は、複数データを解析値と比較する際に必須となる項目であり、これにより複数の CR 値の差の有意性を的確に判断することが可能となる。ここでは、表 2 を基にして、同一炉心および炉心間 (Core1994⇔Core2010) の複数 CR 間における誤差の相関 (共通の誤差ソースによる誤差項目が全誤差に占める割合) を定量的に評価した。評価結果を表 3 に示す。

異なる炉心間であっても誤差は互いに強い相関 (相関係数≒1) を示す。これは誤差評価(表 2)において「遅発中性子データ誤差」が支配的かつ共通の誤差要因であることに起因する。尚、枠で囲んだ箇所は比較的弱い相関を示している。これは Core1994 のみに計上した「臨界性再現性誤差」や BCR 値測定手法の炉心間差異 (Core1994 のみ CCR1 に加えて FCR1-3 も基準として使用) が寄与している。

表 3 誤差相関評価結果

		Core 1994						Core 2010							
		CCR1	CCR2	CCR5	CCR6	FCR1	BCR1	BCR4	CCR1	CCR2	CCR5	CCR6	FCR1	BCR1	BCR4
Core 1994	CCR1	-	1.00	0.95	0.94	0.99	0.95	0.92	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
	CCR2		-	0.95	0.95	1.00	0.96	0.93	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
	CCR5			-	0.91	0.95	0.92	0.89	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	CCR6				-	0.95	0.92	0.89	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	FCR1					-	0.97	0.94	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	BCR1						-	0.98	0.89	0.89	0.88	0.88	0.89	0.89	0.89
	BCR4							-	0.89	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
Core 2010	CCR1							-	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	
	CCR2								-	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	
	CCR5									-	0.98	0.99	0.98	0.99	
	CCR6										-	0.99	0.98	0.99	
	FCR1											-	0.99	0.99	
	BCR1												-	0.98	
	BCR4													-	

4. 解析精度の評価

CR 値は他の CR との相互干渉により変化するため、解析と測定間の CR 位置の差を補正する必要がある。本研究では、測定時の CR 位置情報から解析によって補正值を求め、様々な CR 位置での臨界データに対する解析精度を分析することにより、その誤差も評価した。

CR 値の解析値は、これまでの「もんじゅ」性能試験解析で培った手法³に基づいて評価した。

解析値と測定値の比(C/E 値)を図 2 に示す。干渉効果補正の適用 (図中の●) により、炉心体系や CR の径方向位置、種類に依らず解析精度はほぼ一定 (C/E 値 (ノミナル値) のばらつきが±2%の範囲内) となり、かつ、解析値は測定値と誤差 (解析誤差を含む) の範囲 (約±3% : 1σ) で一致する。

³ JENDL-3.3、3次元拡散計算結果に対し、輸送、空間メッシュ、エネルギー群補正を考慮。

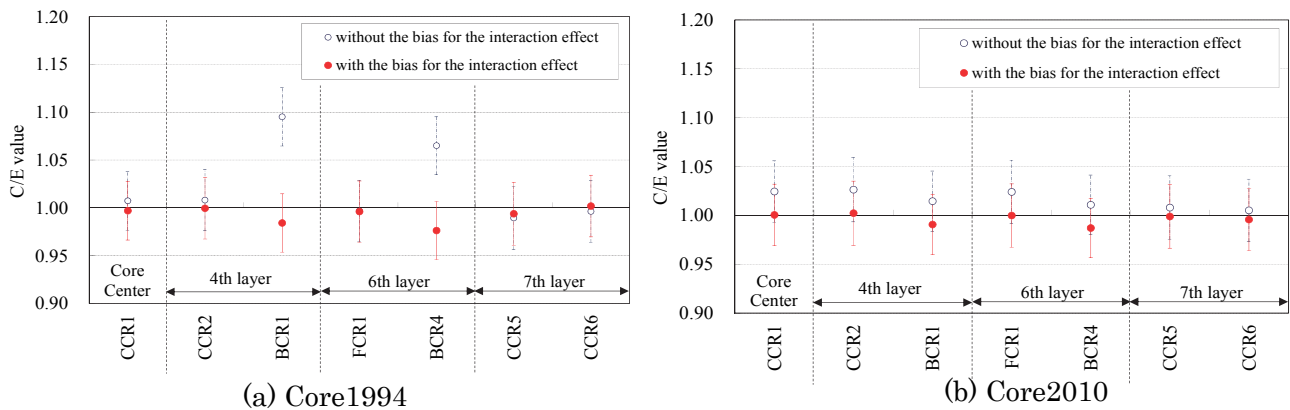


図 2 CR 価値に対する C/E 値評価結果

5. まとめ

1994 年と 2010 年の「もんじゅ」CR 価値測定試験について、測定値及び誤差を詳細評価し、解析値と比較した。解析精度は、炉心体系や制御棒の径方向位置、種類に依らずほぼ一定（ばらつきが±2%の範囲内）となり、かつ解析値と測定値は両者の誤差合計値（約±3% : 1 σ ）の範囲で一致することを確認した。「もんじゅ」設置変更許可での設計精度の設定根拠として使用された臨界実験での C/E 値(0.91-1.03)[1]に比して良好であり、設計裕度の合理化に活用できるものと考えている。

本稿に関する投稿論文

- [0] Takano, et al., “Control Rod Worth Evaluation for the Monju Restart Core”, Nucl. Technol., 179, p. 266 (2012).

参考文献

- [1] 原子力安全・保安院，“独立行政法人 日本原子力研究開発機構 高速増殖炉研究開発センター 原子炉設置許可変更許可申請 核設計について”，高速増殖炉原型炉もんじゅ原子炉施設の変更に係る審査会合<第 111 部会>A グループ 第 2 回会議，資料第 111A-2-1 号(2007).