

平成 29 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業
英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

原子力発電所等における
停止時未臨界監視手法の開発

成果報告書

平成 30 年 3 月

株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン

本報告書は、文部科学省の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業による委託業務として、株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパンが実施した平成27-29年度「原子力発電所等における停止時未臨界監視手法の開発」の成果を取りまとめたものです。

目次

概略	v
1. はじめに	1
2. 業務計画	2
2.1 全体計画	2
3. 業務の実施内容及び成果	3
3.1 反応度評価手法の開発 (H27)	3
3.2 核計装信号処理手法の検討 (H27)	23
3.2.1 ノイズ処理手法の検討	23
3.2.2 反応度計モデルの未臨界監視適用性検討 (再委託先：福井大学)	23
3.3 未臨界監視装置の試作 (H28)	36
3.3.1 試作機の作成	36
3.3.2 試作機の検証及び妥当性確認 (再委託先：福井大学)	38
3.4 核計装データ採取 (H28)	43
3.4.1 データ採取計画の立案及び実行	43
3.4.2 核計装データの分析 (再委託先：福井大学)	49
3.5 未臨界監視装置の検証 (H29)	54
3.5.1 実機適用上の課題整理及び解決策の検討	54
3.5.2 目標達成度の評価 (再委託先：福井大学)	61
3.5.3 BWR 以外への適用性検討	66
3.6 研究推進	69
4. 結言	70

表一覧

表 3-1	誤装荷時の SRNM 計数率への影響	20
表 3-2	未臨界監視装置の概略仕様	21
表 3-3	各検出器による反応度変化（初期値から最大値間での差）	32
表 3-4	未臨界監視装置試作機の要件定義（仕様）	37
表 3-5	未臨界監視装置試作機ハードウェア仕様	38
表 3-6	炉内燃料取り出し作業の概要	44
表 3-7	接続試験の概要	55
表 3-8	目標達成度評価結果	65
表 3-9	未臨界監視手法の適用性判定	68

図一覧

図 2-1	本業務の全体計画図	2
図 3-1	AETNA による実効増倍率と検出器応答評価結果	6
図 3-2	逆算した逆動特性法に基づく未臨界監視装置用実効中性子源強度の推移	6
図 3-3	初期炉心によって評価した中性子源強度をそのまま用いた場合の keff の推移	7
図 3-4	最終ステップの中性子源強度を用いて実効増倍率を評価した場合の keff の推移	7
図 3-5	中性子源強度の設定の違いによる keff の比較	8
図 3-6	3 回指定と 9 回指定時の keff 評価の比較	10
図 3-7	ユーザによるシャフリングステップ指定回数と keff 評価差	10
図 3-8	制御棒装荷ケースと燃料配置図（第 161 ステップ）	12
図 3-9	AETNA による実効増倍率と中性子源強度評価結果（ケース 1）	13
図 3-10	keff の予測値及び AETNA 解析値（ケース 1）	13
図 3-11	SRNM 解析値及び反応度 (\$)（ケース 1）	13
図 3-12	AETNA による実効増倍率と中性子源強度評価結果（ケース 2）	14
図 3-13	keff の予測値及び AETNA 解析値（ケース 2）	14
図 3-14	SRNM 解析値及び反応度 (\$)（ケース 2）	14
図 3-15	AETNA による実効増倍率と中性子源強度評価結果（ケース 3）	15
図 3-16	keff の予測値及び AETNA 解析値（ケース 3）	15
図 3-17	AETNA による実効増倍率と SRNM 応答評価結果（ケース 3）	15
図 3-18	引き抜き燃料と誤装荷位置（1034 ステップ）	17
図 3-19	正規装荷時の SRNM 計数率推移	18
図 3-20	誤装荷時の SRNM-D 計数率の影響	18
図 3-21	誤装荷時の SRNM-E 計数率の影響	19
図 3-22	誤装荷時の SRNM-C 計数率の影響	19
図 3-23	誤装荷時の SRNM-F 計数率の影響	20
図 3-24	警告発報レベルの概念図	22
図 3-25	静的解析結果（中性子源強度一定）	26
図 3-26	静的解析結果（中性子源強度補正あり；判定基準 0.5%dk）	26

図 3-27	動的解析結果；検出器 L（中性子源強度一定、ノイズなし）	28
図 3-28	静解析結果例（検出器 L）	28
図 3-29	動的解析結果；検出器 L	28
図 3-30	反応度飛躍判定基準 0.01	30
図 3-31	AETNA による反応度	30
図 3-32	検出器ごとの応答	31
図 3-33	AETNA 評価結果	33
図 3-34	反応度評価結果（ケース 1）	34
図 3-35	ノイズフィルタ応答（IPK vs. EKF_[連続式モデル]）	41
図 3-36	ノイズフィルタ応答（IPK vs. EKF_[離散化モデル]）	41
図 3-37	フィルターゲインの比較図	42
図 3-38	単位ステップ入力に対する応答	42
図 3-39	志賀 2 の炉心（全燃料装荷・全制御棒挿入状態）	45
図 3-40	燃料取り出し作業の概略	46
図 3-41	燃料取り出し作業時の予測計数率	46
図 3-42	燃料取り出し作業時の実測計数率（各ステップの 1 分間平均値）	47
図 3-43	計数率の比較（予測 vs. 実測）	47
図 3-44	燃料取り出し作業前の計数率時系列	48
図 3-45	燃料取り出し作業時の計数率時系列の一例（ステップ 1 ～ ステップ 3）	48
図 3-46	反応度評価結果（SRNM-J、ステップ 1 ～ ステップ 3）	51
図 3-47	反応度評価結果（SRNM-L、ステップ 1 ～ ステップ 3）	51
図 3-48	反応度の差分監視の概要	52
図 3-49	SRNM-J processed by source correction with 0.5% criterion	52
図 3-50	SRNM-J processed by source correction with 1% criterion	53
図 3-51	SRNM-J processed by source correction with 10% criterion	53
図 3-52	接続試験の様子	55
図 3-53	接続試験ケース 1 の様子	56
図 3-54	接続試験ケース 2 の様子	56
図 3-55	接続試験ケース 3 の様子	57
図 3-56	接続試験ケース 4 の様子	57
図 3-57	縮約方法の比較（中央位置制御棒の誤引き抜き）	60
図 3-58	縮約方法の比較（周辺位置制御棒の誤引き抜き）	60
図 3-59	一次遅れフィルタのボード線図の例	62
図 3-60	定常条件下の反応度変化の例	62
図 3-61	カルマンフィルターと SRE の反応度比較	63
図 3-62	未臨界監視の 3 要素	68
図 3-63	福島第一に未臨界監視手法を適用する場合の概要	69

略語一覧

ABWR	: Advanced Boiling Water Reactor	(改良沸騰水型軽水炉)
AETNA	: BWR core simulator	(3次元 BWR 炉心解析コード)
BOC	: Beginning Of Cycle	(サイクル初期)
BWR	: Boiling Water Reactor	(沸騰水型軽水炉)
EKF	: Extended Kalman Filter	(拡張カルマンフィルタ)
EOC	: End Of Cycle	(サイクル末期)
GNF-J	: Global Nuclear Fuel-Japan Co., Ltd.	(株式会社グローバル・ニュークリア・ フュエル・ジャパン)
GUI	: Graphical User Interface	(グラフィカルユーザインタフェ ース)
IPK	: Inverse Point Kinetic	(1点炉逆動特性)
keff	: Effective multiplication factor	(実効増倍率)
NATRASS	: Nuclear-plant Advanced Transient data Recorder and Analysis Support System	(日立社製過渡現象記録装置)
PWR	: Pressurized Water Reactor	(加圧水型軽水炉)
RMS	: Root Mean Square	(二乗平均平方根)
S/N	: Signal to Noise	(信号対雑音)
SRE	: Simple Reactivity Estimator	(簡易フィードバック)
SRNM	: Startup Range Neutron Monitor	(起動領域中性子モニタ)
β	: Delayed neutron fraction	(遅発中性子割合)
Λ	: Neutron lifetime	(中性子生成時間)
Q	: Neutron source intensity	(中性子源強度)

概略

福島第一原子力発電所の事故を受け、シビアアクシデントを考慮した新規制基準が施行された。その新規制基準の策定において、反応度誤投入による臨界防止対策が課題となり、その対策例として状態監視が挙げられた。未臨界度を測定する方法は複数開発されているが、均質炉心であることが前提であったり、パルス中性子源のような設備を必要としたりするため、商用原子炉において未臨界度を直接監視できる手段は実用化されてこなかった。

一方、臨界近傍での反応度を測定する手法として、1点炉逆動特性法による反応度計が存在している。近年のPWR/BWRの炉物理試験における制御棒価値測定などにデジタル反応度計が実用化されており、デジタル信号処理技術による高精度かつ高速性を利用して試験時間の短縮など、大きな成果を上げてきている。従来のデジタル反応度計は、反応度の測定が主な目的であり、商用炉の炉心未臨界監視に実用化されてはいない。

デジタル反応度計技術を未臨界監視に適用する上で欠かせないのが、中性子源からの中性子供給率（以下、“中性子源強度”という。）を適切に見積もることである。未臨界度（反応度）評価基礎式に、中性子源強度の項があり、臨界近傍など計数率が比較的高い状態ではこの項は無視できるが、未臨界状態ではこの項の寄与が相対的に大きく、無視することができなくなるからである。しかしながら、計装信号による情報（例えば中性子計数率）の処理からだけでは、中性子源強度を直接評価することはできない。そこで、3次元炉心シミュレータを用いた中性子源評価技術の適用を考える。燃料中の中性子源となり得る核種の量を評価できる機能を備えた炉心シミュレータを用いることによって、各検出器位置における、中性子源からの寄与（計数率）を精度良く見積もることが可能である。

また、未臨界状態における評価では、計数率が小さくノイズの影響が大きくなる。例えばIPK法による反応度評価式では、未臨界状態で計数率が小さい時、中性子源強度を含む項の寄与が大きい。この状態で、計数率がノイズによって大きく揺らげば、反応度の評価結果もそれに引きずられる形で大きく揺らいでしまい、未臨界監視が困難になることが予想される。未臨界監視装置は、燃料取替え中の計数率が低い状態から、臨界超過時の計数率が高い状態まで、広いレンジでの評価が求められる。レンジが異なればS/N比も異なると考えられる。さらに、炉心状態（例えば初装荷炉心と、2サイクル目炉心の違い）が異なれば、中性子源の分布・強度も異なることが予想され、S/N比に影響することが考えられる。すなわち、測定状態（レンジ・炉心状態など）に応じて、最適なノイズフィルタが適用される必要がある。最新の反応度計では、複数のフィルタリング手法が提案されており、当手法が未臨界監視にも適用できれば、評価精度を向上することが可能である。

本研究は、炉心シミュレータによる外部中性子源強度の予測手法と、ノイズフィルタリング手法を組み合わせることで未臨界監視手法を開発するとともに、炉心シミュレータによる模擬信号データや、実機で取得したノイズ込みデータ等を用いて、多角的な検証を行うことが目的である。

上記の目的を達成するために、初年度は、中性子源強度の評価が可能な炉心シミュレータと組み合わせて、1点炉逆動特性法(IPK)及び拡張カルマンフィルタ法(EKF)といった新旧の反応度評価手法と比較し、さらに新たな簡易フィードバック理論(SRE)に基づくデジタル反応度計の未臨界監視装置への適用に向けた手法の開発を行った。2年度は、初年度に開発した手法を基に、未臨界監視装置を試作するとともに、検証に必要なBWRの実機信号を採取した。最終年度は、試作した未臨界監視装置のBWRへの適用性を確認するとともに、炉心以外(プール等)への適用性も確認した。

当研究の未臨界監視手法は、反応度計モデルに基づいており、炉心シミュレータによる外部中性子源強度評価機能を組み合わせることで未臨界度を評価するものである。そのため、特別なプラント機器の改造は必要とせず、実現すれば商用炉の未臨界度を監視できる世界初の技術となる。未臨界監視手法によって燃料交換中などの誤操作(制御棒誤引き抜き、燃料誤装荷など)を検知し、臨界事故を未然に回避でき、安全性の向上に寄与できると期待される。

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故を受け、シビアアクシデントを考慮した新規規制基準が施行された。その新規規制基準の策定において、反応度誤投入による臨界防止対策が課題となり、その対策例として状態監視が挙げられた。未臨界度を測定する方法は複数開発^[1]されているが、均質炉心であることが前提であったり、パルス中性子源のような設備を必要としたりするため、商用原子炉において未臨界度を直接監視できる手段は実用化されてこなかった。

商用原子炉における未臨界度のオンライン監視を実現化することを目的とし、炉心シミュレータのマイクロ燃焼モデル^[2]による中性子源強度評価技術と、既知の反応度評価手法^{[3], [4]}や、最新の簡易フィードバック理論に基づくノイズフィルタを備えた反応度評価手法^[5]とを融合させ、停止中 BWR の未臨界状態を監視する装置を開発し、適用性について検証を行うことが本研究の目的である。

初年度は、GNF-J の新しい中性子源強度の評価ができる 3 次元炉心シミュレータ AETNA^[6]と組み合わせ、IPK 及び EKF といった新旧の反応度評価手法と比較し、新たな簡易フィードバック理論に基づくデジタル反応度計の未臨界監視装置への適用に向けた手法の開発を行う。2 年度は、初年度に開発した手法を基に、未臨界監視装置を試作するとともに、検証に必要な BWR の実機信号を採取する。最終年度は、試作した未臨界監視装置の BWR への適用性を確認するとともに、炉心以外（プール等）への適用性も確認する。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画を図 2-1 に示す。

研究項目	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
(1) 反応度評価手法の開発	■		
(2) 核計装信号処理手法の検討			
① ノイズ処理手法の検討	■		
② 反応度計モデルの未臨界監視適用性検討 (福井大学)	■		
(3) 未臨界監視装置の試作			
① 試作機の作成		■	
② 試作機の検証及び妥当性確認 (福井大学)		■	
(4) 核計装データ採取			
① データ採取計画の立案及び実行		■	
② 核計装データの分析 (福井大学)		■	
(5) 未臨界監視装置の検証			
① 実機適用上の課題整理及び解決策の検討			■
② 目標達成度の評価 (福井大学)			■
③ BWR 以外への適用性検討			■
(6) 研究推進	■		

図 2-1 本業務の全体計画図

3. 業務の実施内容及び成果

3.1 反応度評価手法の開発 (H27)

(1) 中性子源強度評価

1点炉逆動特性（以下、“IPK”という。）法^[3]に基づく未臨界監視装置に設定すべき中性子源強度について、マイクロ燃焼モデルによって中性子源強度とその空間分布が評価可能な3次元BWR炉心解析コードAETNA^[6]（以下、“AETNA”という。）によって評価・検討した。この検討は、仮想的なABWR条件で実施しており、まずは中性子源強度が燃料シャフリング中にどのように変化するかを把握した。

シャフリング（とあるEOC炉心からBOC炉心への変更）は、実機の炉内シャフリング手順を模擬した。検出器の感度は、検出器スペックを参考に同じ代表値を全ての検出器（10チャンネル）に設定した。実際は、運転中も検出器は炉内に装荷されたままなので、位置ごとの照射量に依存して検出効率は変わる。未臨界装置の燃料シャフリング中の運用では、燃料誤装荷及び制御棒誤引き抜きに対して機能させることを想定する。

現行のサイトにおけるデータサンプリング装置で監視している信号（中性子束、炉心流量など）を見ると、シャフリング中の炉内燃料の装荷状態を逐一把握することは不可能と考えられる。一方で、燃料装荷がある程度正しく手順通り実施されれば、少なくともEOC状態（シャフリング開始時）、燃料取り出しフェーズ終了時（最も装荷燃料が少ない状態）、BOC状態（シャフリング終了時）の中性子源強度は評価可能と考えられる。また、各フェーズ間には、数日オーダーの時間的余裕があるので、未臨界監視装置に設定された中性子源強度分布を適切に変更することも可能と考えられる。

燃料誤装荷は、正確には中性子源強度分布そのものの信頼性が損なわれることを意味するが、誤装荷体数が一定以下であればその影響は限られる。また、制御棒誤引き抜きは、中性子源強度そのものは変化せず、制御棒の影響によって、検出器に対する実効的な強度が変わるものであり、やはり影響は限られる。したがって、燃料誤装荷及び制御棒誤引き抜き時に、中性子源強度に一定の誤差が存在する状態であっても、検出器信号の異変によって一定の不確かさで実効増倍率の異常（予定外）が検出できるような中性子源強度を設定できるかどうか研究の主要な検討対象である。

なお、上述した炉心に対する燃料装荷や制御棒操作がない時間帯を利用して、何らかの方法で中性子源強度を“校正”できる手段があれば、監視装置には極めて有効と考えられる。検出器の実効的な中性子源強度は、反応度評価の基礎式である(1)式で定常状態を仮定した場合の検出器応答 n と反応度 ρ 、中性子源強度 Q に関する次の(2)式の単純な評価式によって評価した。

$$\rho(t) = \beta_{eff} - \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^6 \beta_i \left\{ n(0)e^{-\lambda_i t} + \lambda_i \int_0^t e^{-\lambda_i(t-\tau)} n(\tau) d\tau \right\} - \frac{Q \cdot \Lambda}{n(t)} \quad (1)$$

$$\rho = -\frac{Q \cdot \Lambda}{n} \quad (2)$$

AETNA による評価結果の実効増倍率と検出器応答を図 3-1 に示す。ここでは、取り出しフェーズの約半分の段階(0~235 ステップ)までの評価としている。なお、0~580 ステップ間で燃料引き抜きを、580~1792 ステップ間で燃料シャフリング及び燃料装荷を行っている。上記の実効増倍率と検出器応答から検出器ごとの中性子源強度を逆算した結果を図 3-2 に示す。仮に、図 3-2 に示すステップ依存中性子源強度を未臨界監視装置で設定できれば、ステップごとの実効増倍率は AETNA による keff に一致する。しかし、前述のように未臨界監視装置は、シャフリング中の炉心がステップ依存で現在どのような状態にあるかを入力信号から把握することは不可能である。ただし、初期状態と引き抜き終了状態では、尤もらしい中性子源強度を利用することはできる。ここでは、0 ステップと 235 ステップ(検討範囲の最終ステップ)の中性子源強度分布が使えると想定する。まず、初期(0 ステップ)中性子源強度をそのまま全ステップに適用した場合の、keff 評価値を AETNA と比較したものを図 3-3 に示す。図 3-3 より、この方法では中性子源強度を必ず過大評価するために、keff の評価値は、必ず過小評価となっている。なお、図中には全 10 チャンネル評価値の最大値も示している。最大値であっても 2%dk 程度の過小評価である。この最大値は、10 チャンネルの検出器の内、最も中性子源強度分布変更の影響を受けなかった検出器による信頼のおける評価値である。

次に、最終中性子源強度分布(235 ステップでの評価値)を用いて、最初のステップから実効増倍率を評価した場合の結果を図 3-4 に示す。図 3-3 とは逆に、中性子源強度を必ず過小評価するので、keff 評価値は必ず過大評価となっている。なお、図中には全 10 チャンネルの最小評価値も示してあり、その差は 1%dk 程度となっている。この最小値が、最もシャフリングによる中性子源強度分布変更の影響が小さかった検出器の評価値である。

続いて、初期中性子源強度(過大評価値)で評価した keff(過小評価値)の最大値と、最終中性子源強度(過小評価値)で評価した keff(過大評価値)の最小値と、その平均値を AETNA の keff と比較した図を図 3-5 に示す。図 3-5 における“Ave keff(estimated source)”は、炉内の燃料体数を基に単純な関数で中性子源強度を予測した場合の結果である。実際には、燃料装荷体数を検知できないので、このような推定は困難であるし、結果も思わしくない。過大評価 keff の最小値と過大評価 keff の最大値の平均であれば、ステップに渡り 2%dk 程度の差で検出できている。(0.98 は、シャフリング手順を立てる時の炉心 keff の制限値としてよく用いられる。)

以上より、初期及び最終中性子源強度分布を用いて増倍率の予想を行う場合は、それぞれ中性子源強度の大小から、どちらか中性子源強度分布を用いると keff を過大ま

たは過小評価するか判別して評価を行うべきである。また、想定する期間内で初期と最終の中性子源強度の範囲から逸脱する中性子源強度の検出器がある場合、その中性子源強度における増倍率の予測性は低下する。例えば、初期ステップの状態から、燃料シャフリング中に検出器の周りの燃料が全て引き抜かれ、最終ステップまでに検出器周りに再度燃料が配置された場合が挙げられる。

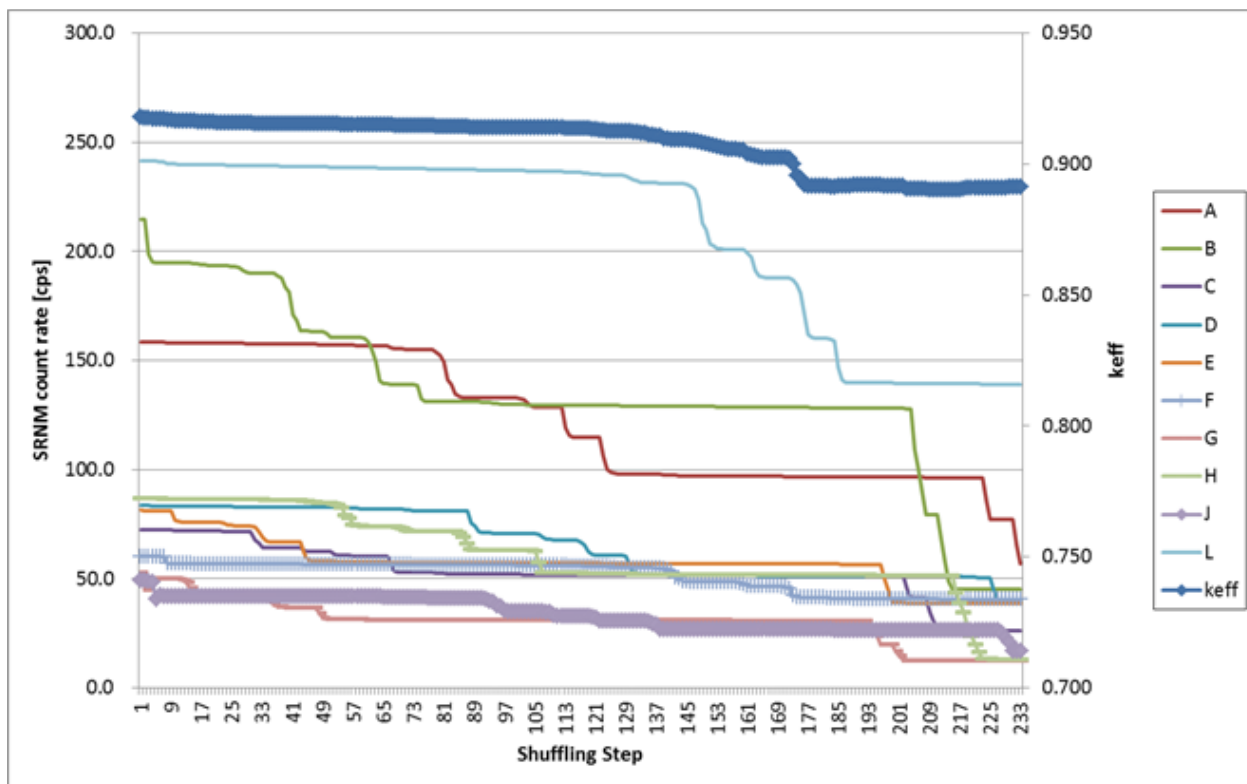


図 3-1 AETNA による実効増倍率と検出器応答評価結果

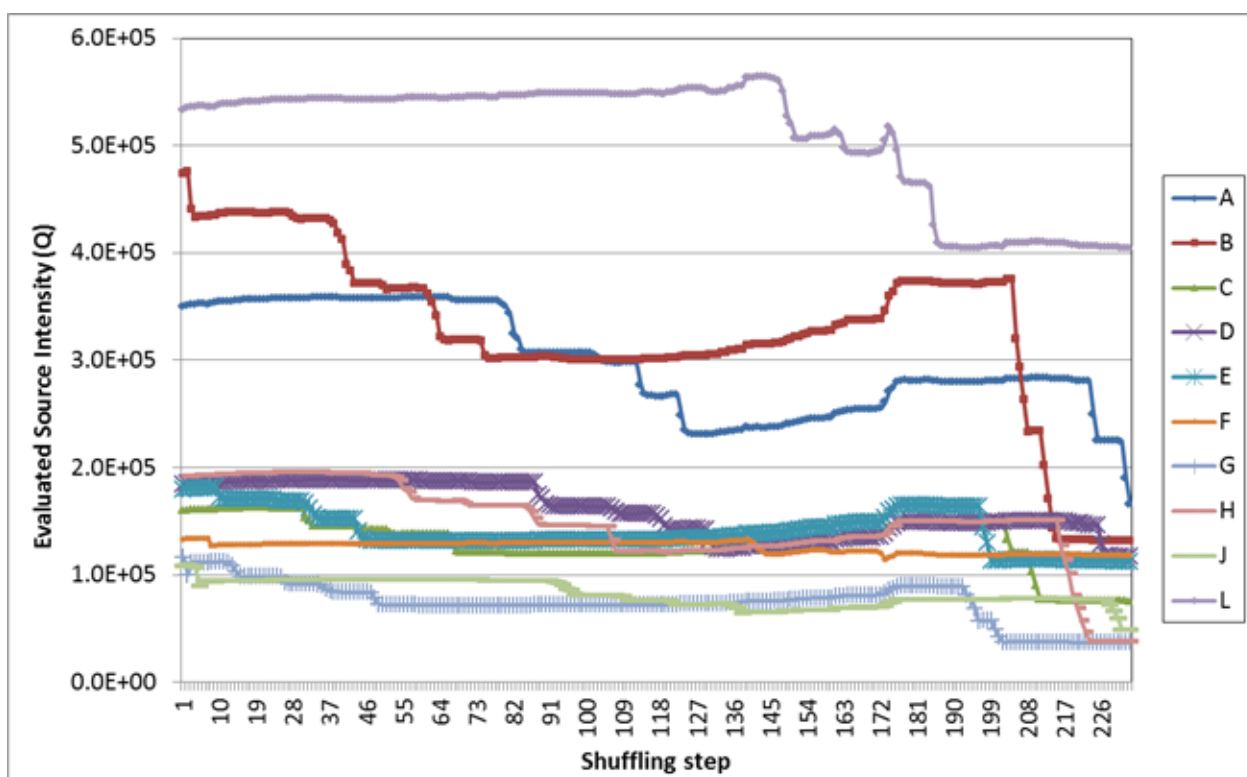


図 3-2 逆算した逆動特性法に基づく未臨界監視装置用実効中性子源強度の推移

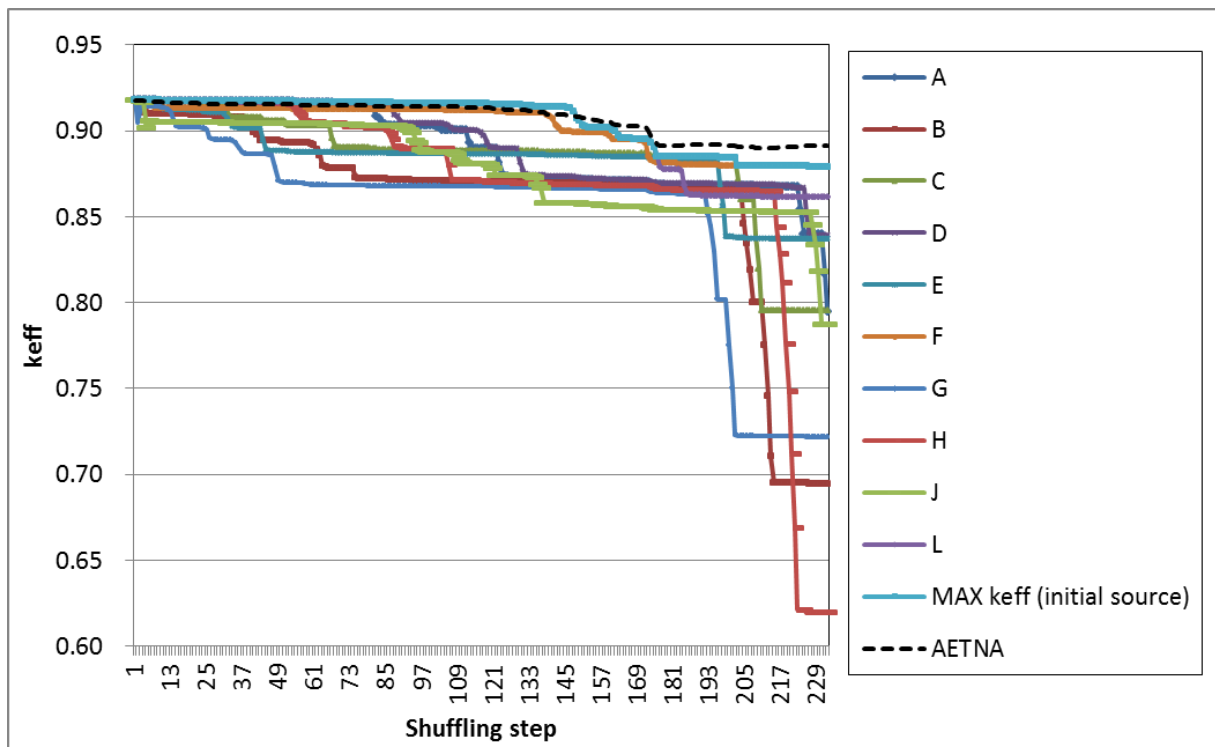


図 3-3 初期炉心によって評価した中性子源強度をそのまま用いた場合の k_{eff} の推移

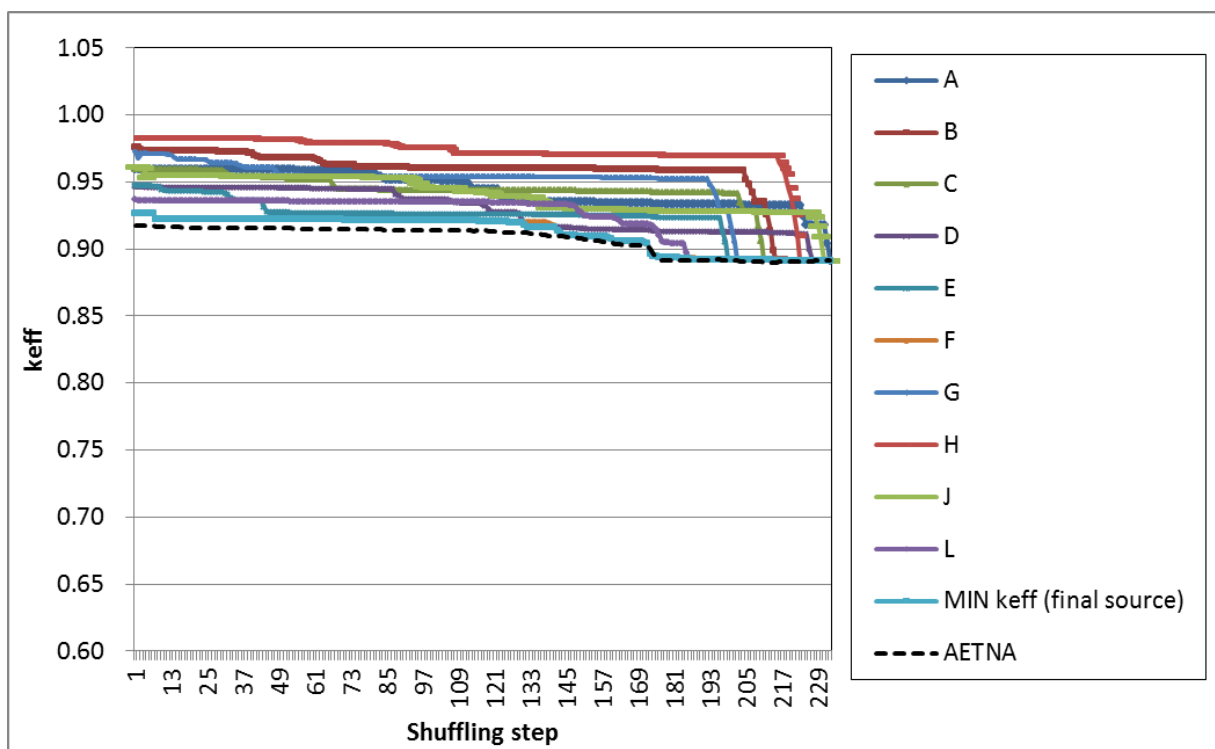


図 3-4 最終ステップの中性子源強度を用いて実効増倍率を評価した場合の k_{eff} の推移

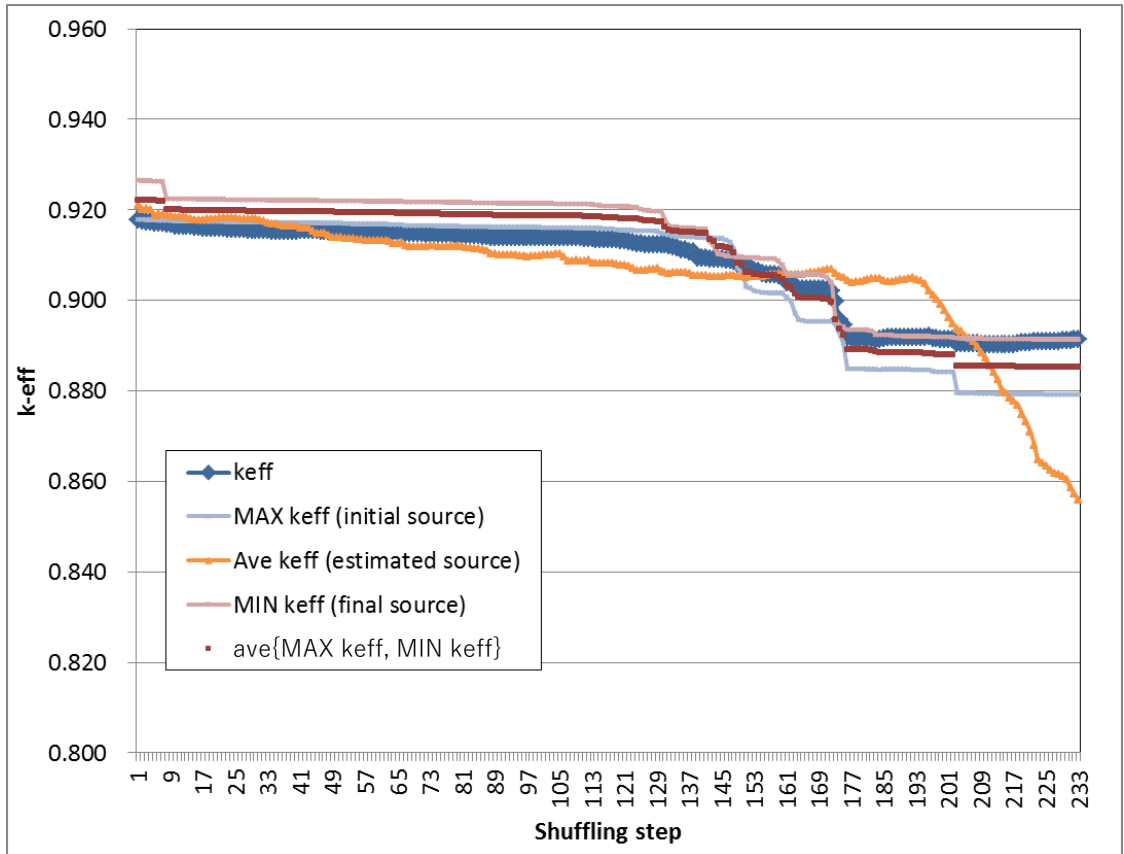


図 3-5 中性子源強度の設定の違いによる keff の比較

【検討結果のまとめ】

仮定や前提条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 仮想 BWR に対し燃料シャフリングのシミュレーション ・ 中性子源強度の設定方法の違いによる反応度への影響の確認
得られた結果	<ul style="list-style-type: none"> ・ シャフリング中に中性子源強度が大きく変化し、未臨界監視に大きな影響を与え得ることが分かった。 ・ シミュレーション結果に基づく中性子源強度の校正方法を試行し、実用的で良好な精度が見込める方法を考案できた。

(2) 中性子源強度補正方法の検討

3.1(1)の解析では、全シャフリングステップの最初の約4分の1ステップのみを対象としたが、ここでは全シャフリングステップを対象として数区間に分割し、それぞれで中性子源強度評価を行うと仮定した。このことは、シャフリング開始時（EOC 炉心）と終了時（BOC 炉心）の、燃料配置が特定されている2点以外に、複数回のユーザ入力によって現在のシャフリングステップが指定され、そのステップ情報に基づき評価するものである。各期間において、当該期間中の最大中性子源強度（keff 過小評価）及び最小中性子源強度（keff 過大評価）を使ってそれぞれの方法でkeffを全検出器で評価し、keff 過大評価の最小値と keff 過小評価の最大値で挟み込むことで、その中に最適値があると仮定する方法である。（以下、“平均化法”という。）

この評価では、個別評価結果の中から、シャフリング中の中性子源強度変化量の影響が最も小さかった検出器が選定されることとなり、さらに平均化処理による中性子源強度が減る、または増えることによる誤差を低減できることとなる。

この方法では、ユーザによるステップ指定回数が増えた場合を考える。上記のようにシャフリング中の中性子源強度は変動していくこととなるが、その変化量はシャフリングによって燃料配置が変化する量に依存することになるので、ステップ回数の増加によって、評価期間が分割され期間が短くなることで、当該期間中に仮定する最大・最小中性子源強度からのずれ量も少なくなる。つまり、指定回数が多いほど、平均化法の精度は向上すると考えられるので、指定回数を増やした場合の平均化法の精度を確認することとする。ステップのユーザ指定回数は、検出器ごとの中性子源強度変化量に着目しながら、次のように変化させた。

3 回指定、 4 期間

5 回指定、 6 期間

7 回指定、 8 期間

9 回指定、10 期間

続いて3回指定～9回指定までの各指定におけるAETNAの評価値とのRMS差（%dk）と、3回指定時と9回指定時の両者の評価値の比較図を、図3-7に示す。上記より、シャフリング中9回のユーザ指定があることで、keff評価差はRMSにして0.2%dk程度まで低減できており、この方法でも一定の精度を確保できることが分かる。

なお、シャフリング期間は、通常2～3週間であり、2週間で9回指定する場合、指定間の平均間隔は1.56日以上あるので、十分に現実的な指定タイミング数と考える。9回指定時の評価誤差は-0.74%～0.93%dkと、1%dkを下回っており、仮に1%dkの停止余裕基準から警報値をkeff_監視装置=0.99としても、臨界超過は避けることが可能となる精度を達成している。

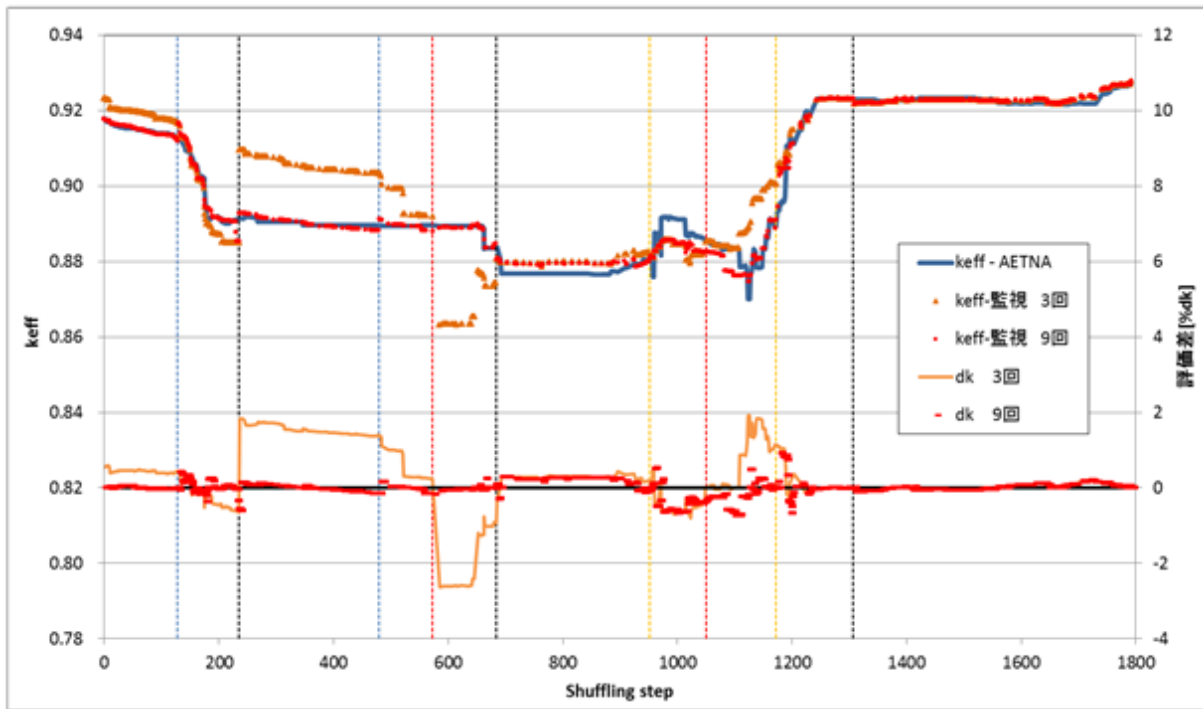


図 3-6 3回指定と9回指定時の keff 評価の比較

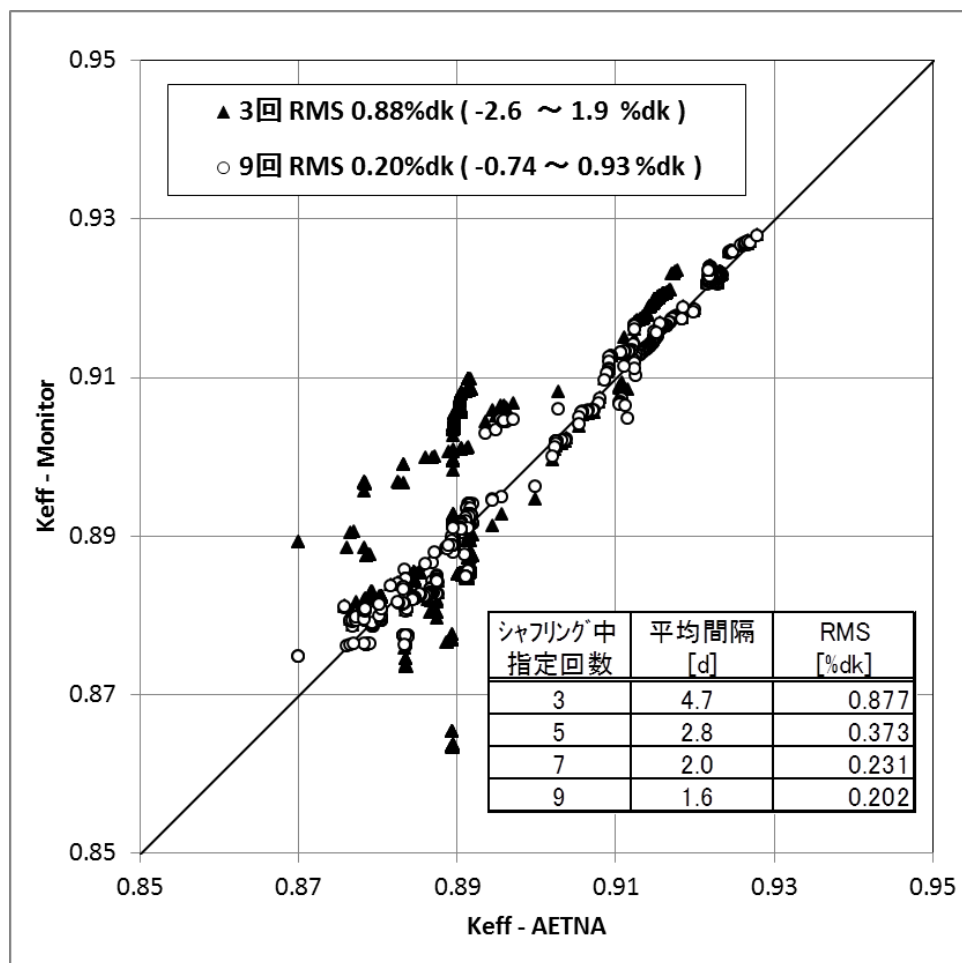


図 3-7 ユーザによるシャフリングステップ指定回数と keff 評価差

【検討結果のまとめ】

仮定や前提条件	・ 仮想 BWR に対し燃料シャフリングのシミュレーション ・ シャフリング中における中性子源強度の校正回数を変え、シミュレーション結果と反応度計モデルとの差異を比較
得られた結果	・ 校正回数が多いほど、シミュレーション結果との差異が小さかった。 ・ シャフリング中、1 日 1 回程度の校正で、実用的な精度が得られる見通しを得た。

(3) 制御棒誤引き抜き解析

シャフリング第 161 ステップにおいて、次のモニタリングに厳しいと思われる 3 ケースに対して、制御棒を引き抜いた際の応答を調査した。

- ケース 1 : SRNM から近く、価値の低い制御棒を引き抜いたケース
- ケース 2 : SRNM から遠く、価値の高い制御棒を引き抜いたケース
- ケース 3 : SRNM から遠く、価値の小さい制御棒を引き抜いたケース

図 3-8 に炉心内の燃料配置と検討した制御棒引き抜き位置について示している。なお、図中で 16 (青色) と記載されている燃料位置は空(水セル)である。なお、いずれのケースにおいても、0-2(秒) : 操作なし、2-12(秒) : 制御棒引き抜き(速度一律)、12-28(秒) : 全引き抜きからの経過としている。また、今回の実効増倍率の予測に使用する中性子源強度分布は、最大及び最小はともに第 161 ステップの中性子源強度分布を基準としている。

ケース 1 について、図 3-9 に増倍率の変化と SRNM 位置における中性子源強度を、図 3-10 に k_{eff} の予測値及び AETNA の解析値を示す。また、図 3-11 に SRNM の応答(AETNA 解析値)と反応度を示す。ケース 1 は、炉心全体への影響は小さいが、検出器が近い位置にあるために制御棒引き抜きに伴って中性子源強度が変化し、 k_{eff} の予測値に差が生じていることが分かる。続いてケース 2 について、図 3-12 に増倍率の変化と SRNM 位置における中性子源強度を、図 3-13 に k_{eff} の予測値及び AETNA の解析値を示す。また、図 3-14 に SRNM の応答(AETNA 解析値)と反応度を示す。ケース 2 においては、制御棒引き抜き位置が SRNM から遠いが、SRNM の応答が変化し、それに追従して k_{eff} の予測値に変化が生じている。最後に、ケース 3 について、図 3-15 に増倍率の変化と SRNM 位置における中性子源強度を、図 3-16 に k_{eff} の予測値及び AETNA の解析値を示す。また、図 3-17 に SRNM 応答(AETNA 解析値)と反応度を示す。ケース 3 においては、制御棒引き抜き位置が SRNM から遠く、また制御棒引き抜きが炉全体に印加する反応度も小さいため(制御棒価値が小さい)、それぞれの応答に k_{eff} の予測値に差が生じていない。

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3	2	2	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	3	4	7	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	11	3	1	4	4	7	1	4	4	1	3	10	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
5	0	0	0	0	0	0	1	2	4	4	4	3	4	4	3	3	4	3	4	7	4	2	4	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
6	0	0	0	0	0	1	2	4	4	2	4	1	4	4	4	4	1	3	3	1	4	4	4	1	4	4	3	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
7	0	0	0	0	1	2	3	4	3	4	7	4	7	4	7	2	1	4	2	7	4	7	4	7	4	3	4	9	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
8	0	0	0	1	2	4	4	2	4	1	4	1	3	1	4	1	4	4	1	16	1	3	16	4	1	4	16	4	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
9	0	0	0	1	2	16	16	4	16	3	16	7	16	3	16	3	16	3	16	7	16	3	16	4	16	3	16	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
10	0	0	0	1	4	4	4	16	3	16	1	16	3	16	4	1	3	16	1	16	3	16	4	1	3	16	1	4	4	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
11	0	0	1	2	2	4	16	4	16	1	16	4	7	4	1	3	4	1	3	1	4	7	4	7	16	4	4	7	4	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
12	0	1	2	10	4	16	4	16	7	16	4	16	4	16	16	7	4	16	16	4	1	16	16	4	4	16	16	4	1	4	11	2	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
13	0	1	2	3	7	4	7	3	16	3	16	4	3	3	7	4	16	3	16	7	16	3	16	7	3	3	3	7	4	7	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
14	0	1	2	1	4	4	4	1	3	16	4	1	3	3	3	1	3	16	1	3	3	16	1	4	3	3	1	4	16	4	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
15	1	2	3	4	3	4	1	1	16	4	1	4	7	3	3	4	4	4	4	1	3	7	4	1	4	7	4	7	4	3	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
16	1	16	16	4	4	1	2	1	3	16	16	7	4	1	1	7	7	1	1	16	16	3	1	3	3	2	1	16	16	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
17	16	2	16	4	16	3	16	4	16	3	16	4	16	3	16	4	1	16	3	16	4	16	3	16	1	16	3	16	1	16	3	16	7	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
18	1	16	7	16	3	16	1	16	3	16	4	4	3	16	1	4	1	4	4	3	16	4	1	3	16	4	4	3	16	4	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
19	1	3	16	4	4	16	2	1	3	1	3	7	4	1	4	7	4	4	1	4	7	3	1	3	1	2	1	4	4	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
20	1	16	3	16	16	4	16	4	7	16	16	4	7	16	16	4	4	1	3	16	16	1	4	16	16	7	4	3	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
21	0	16	16	1	4	4	4	1	16	3	16	1	16	3	16	1	16	3	16	3	16	3	16	3	16	4	3	3	1	4	4	4	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
22	0	1	2	16	7	4	7	3	3	16	7	4	3	16	7	4	3	16	4	7	3	16	4	7	3	3	7	4	7	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
23	0	1	2	11	4	1	7	1	7	4	4	8	4	1	4	7	4	7	4	1	4	8	4	4	7	4	4	1	4	10	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
24	0	0	1	2	2	4	4	4	16	16	4	7	16	16	3	1	16	16	1	4	16	16	7	1	4	7	4	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25	0	0	0	1	16	4	16	1	16	3	16	4	3	3	4	1	16	3	16	4	3	3	4	1	16	3	16	4	4	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
26	0	0	0	1	2	16	3	16	3	16	4	7	3	3	7	3	3	16	3	7	3	3	7	4	3	16	4	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
27	0	0	0	1	2	4	4	2	16	1	4	1	3	1	1	16	4	1	4	1	3	4	1	4	1	4	2	4	16	2	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
28	0	0	0	0	1	16	16	4	3	16	7	4	7	4	1	2	4	16	16	7	4	7	4	7	4	3	4	9	2	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
29	0	0	0	0	0	16	16	4	16	4	4	1	4	16	16	1	16	3	16	4	16	4	1	4	4	3	4	2	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30	0	0	0	0	0	0	1	16	2	16	2	4	7	4	3	4	3	16	4	3	4	7	4	2	4	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	10	3	1	4	4	4	4	4	4	1	3	11	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	3	4	4	7	4	3	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3	2	2	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34																	

図 3-8 制御棒装荷ケースと燃料配置図（第 161 ステップ）

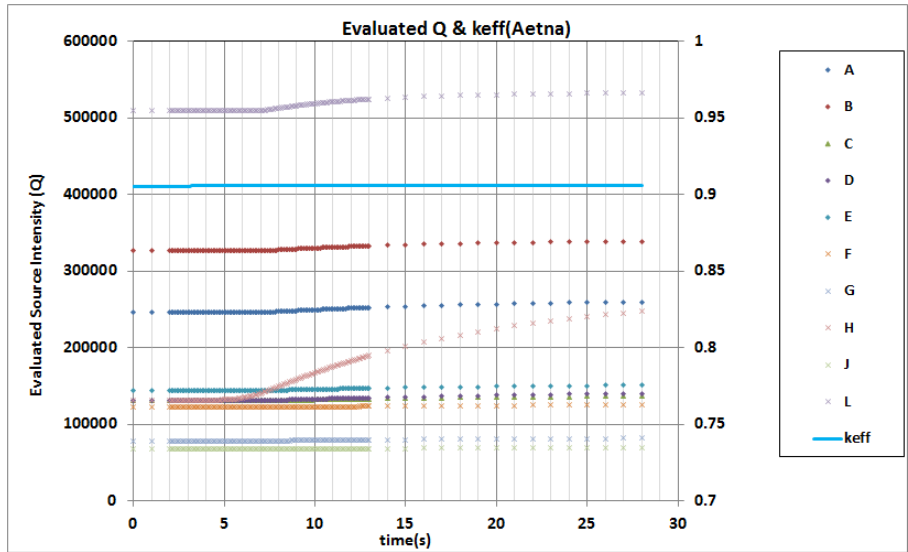


図 3-9 AETNA による実効増倍率と中性子源強度評価結果 (ケース 1)

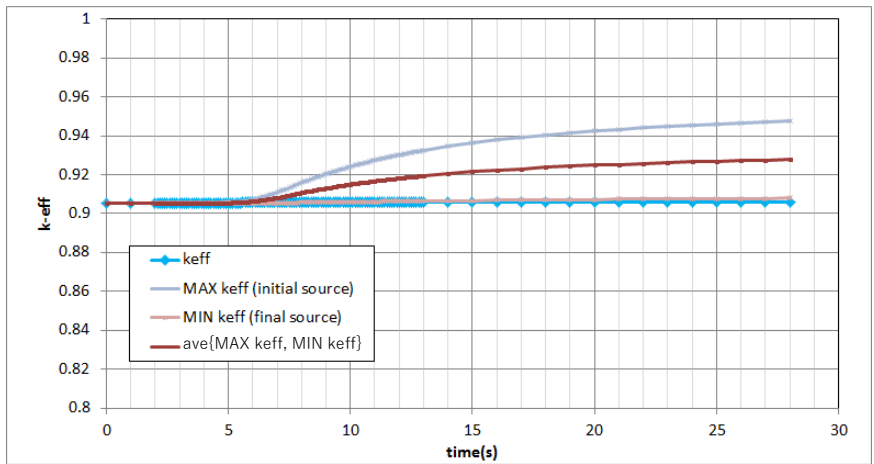


図 3-10 keff の予測値及び AETNA 解析値 (ケース 1)

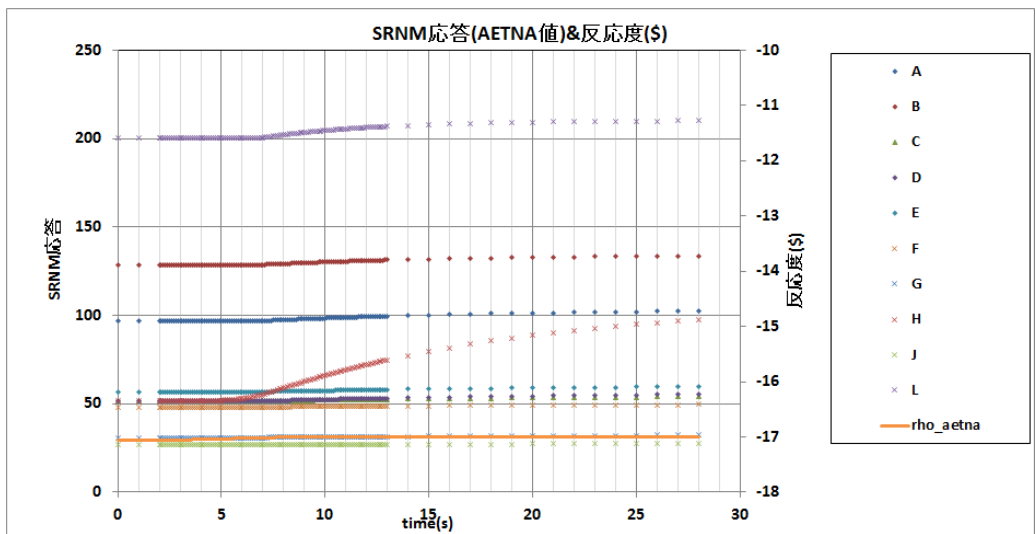


図 3-11 SRNM 解析値及び反応度 (\$) (ケース 1)

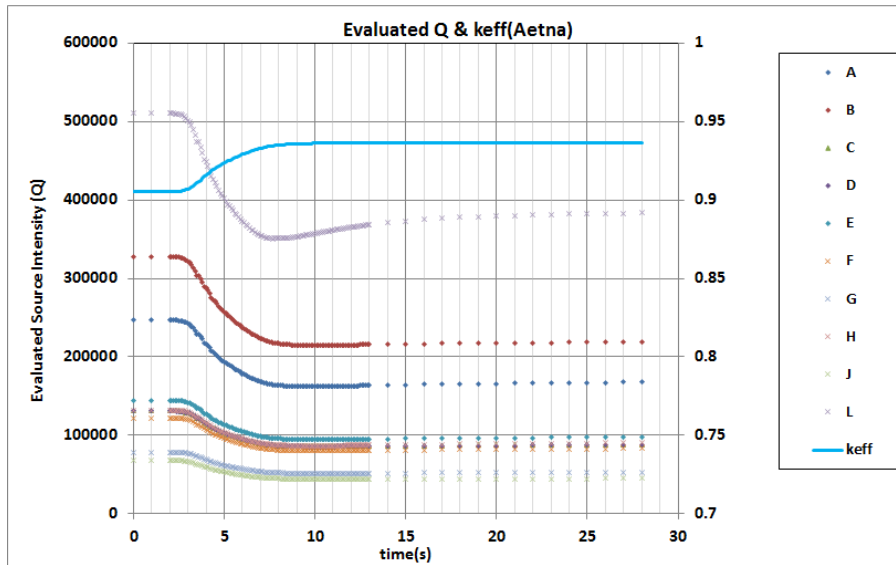


図 3-12 AETNA による実効増倍率と中性子源強度評価結果 (ケース 2)

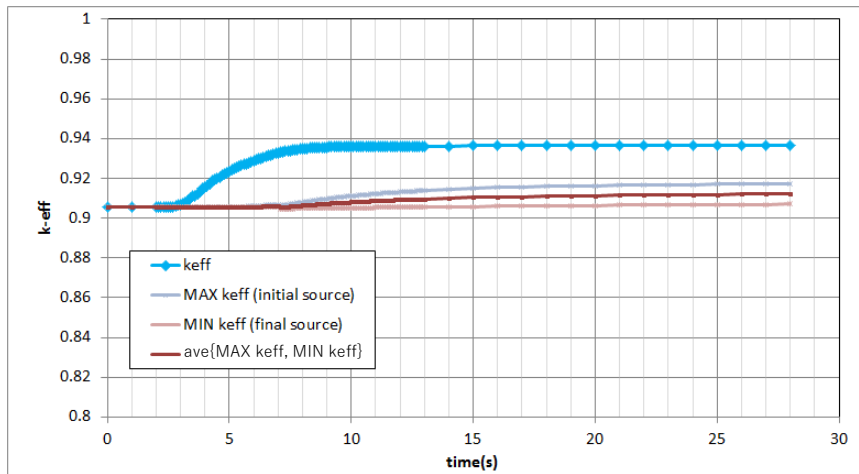


図 3-13 keff の予測値及び AETNA 解析値 (ケース 2)

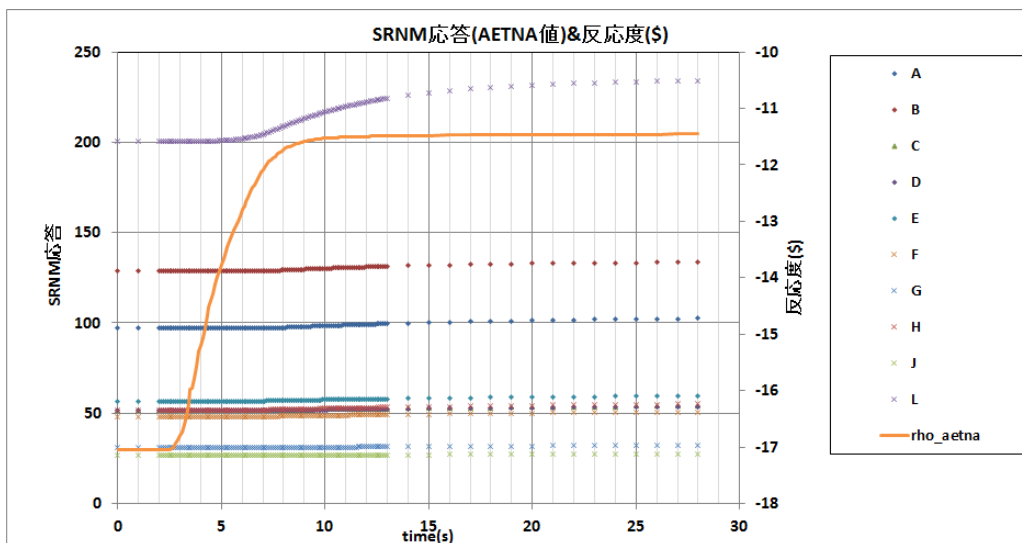


図 3-14 SRNM 解析値及び反応度 (\$) (ケース 2)

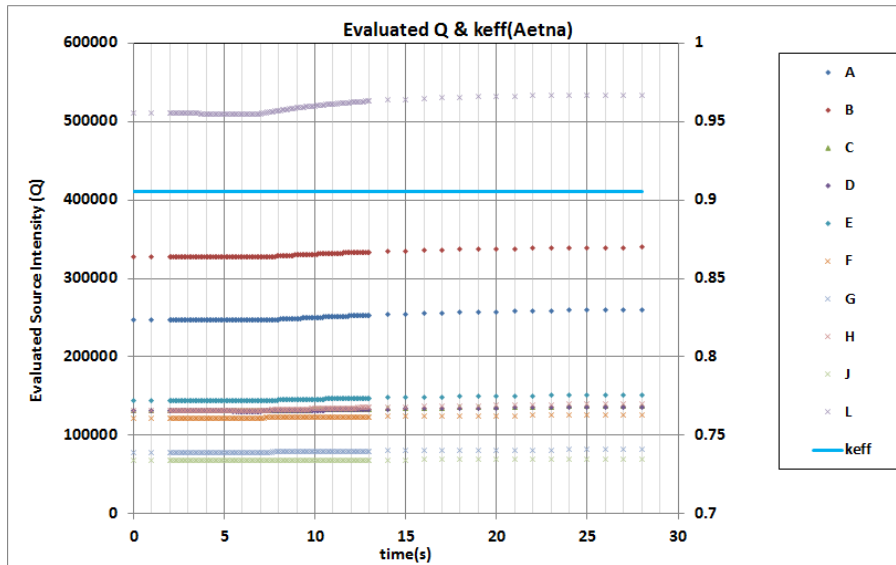


図 3-15 AETNA による実効増倍率と中性子源強度評価結果 (ケース 3)

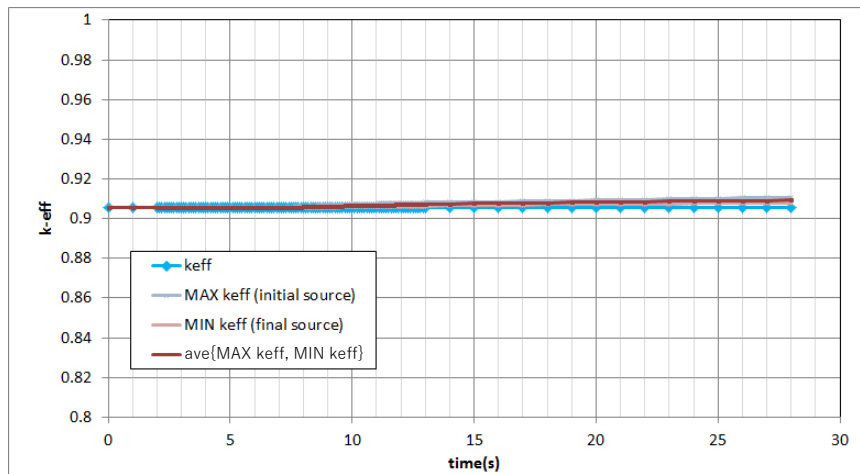


図 3-16 keff の予測値及び AETNA 解析値 (ケース 3)

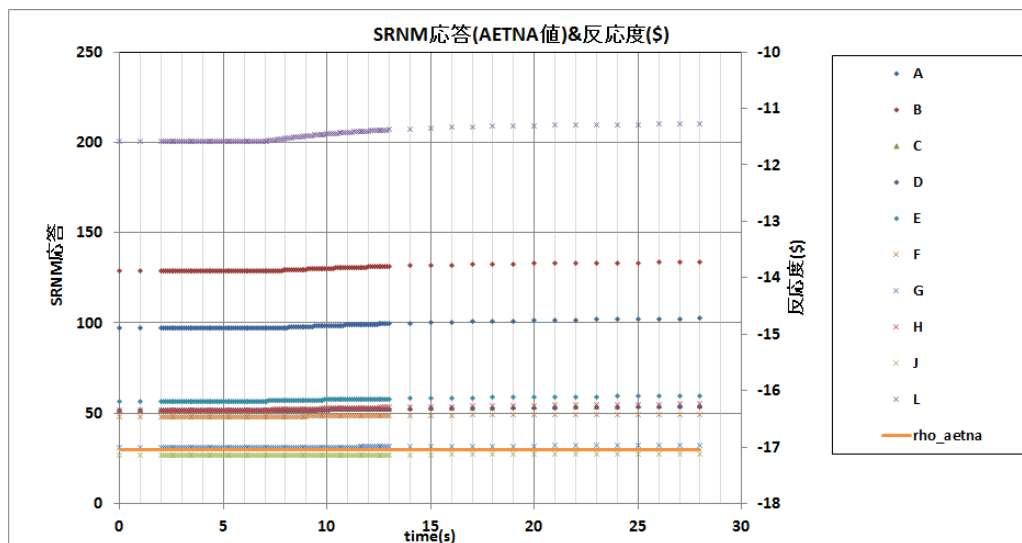


図 3-17 AETNA による実効増倍率と SRNM 応答評価結果 (ケース 3)

【検討結果のまとめ】

仮定や前提条件	・シャフリング途中での制御棒誤引き抜きシミュレーション
得られた結果	・制御棒誤引き抜きによって検出器応答に変化が出るが、誤引き抜き制御棒からの位置や炉心の状態に大きく影響を受けることが分かった。 ・1本程度の誤引き抜きでは、検出器応答の変化は大きくなかった。

(4) 燃料誤装荷

反応度の高い燃料を動かすステップにて装荷すべき座標を誤った場合を想定し、燃料誤装荷ケースの検討を行った。AETNA は、燃料の装荷中の動特性解析はできない（炉内で動かせるのは制御棒のみ）ので、装荷直後の状態の解析結果になる。したがってデータは、装荷前と装荷終了後の比較で判断する。図 3-18 に示す（ア）～（ウ）の誤装荷位置を想定した。

正規位置に正しく装荷された場合の SRNM 計数率の推移を図 3-19 に示す。次に、正規装荷時及び誤装荷時（ア）～（ウ）における SRNM-D（正規に装荷される場所に近い検出器）、E（誤装荷ケース（イ）の装荷箇所に近い検出器、C（誤装荷ケース（ア）の装荷箇所に近い検出器）、F（いずれの装荷位置からも遠い検出器）の計数率と実効増倍率の推移を図 3-20 から図 3-23 に示す。図 3-20～図 3-23 の結果を表 3-1 にまとめる。

今回の誤装荷は、意図的に反応度の高い燃料のシャフリングをインポートランスの高い位置に誤装荷した場合といえる。この時の影響として、表 3-1 より、以下のことが分かる。

- ・ 1 回の誤装荷による実効増倍率への影響は 0～0.3%dk 程度
- ・ 1 回の誤装荷による計数率への影響は 0～2 cps 程度

実際のノイズレベルとの兼ね合いにもよるが、監視装置によって燃料の誤装荷を、誤装荷直後に検出することは難しい要求といえる。つまり、実際のシャフリング手順を考えると、1 回の誤操作（誤装荷）では、もともと炉心に与える影響が小さいので、監視装置による検出は大変困難な目標かもしれない。誤装荷が複数重なる場合は、装荷対象位置に装荷済み燃料があるなど、より確率が低下するので想定がより非現実的となる。

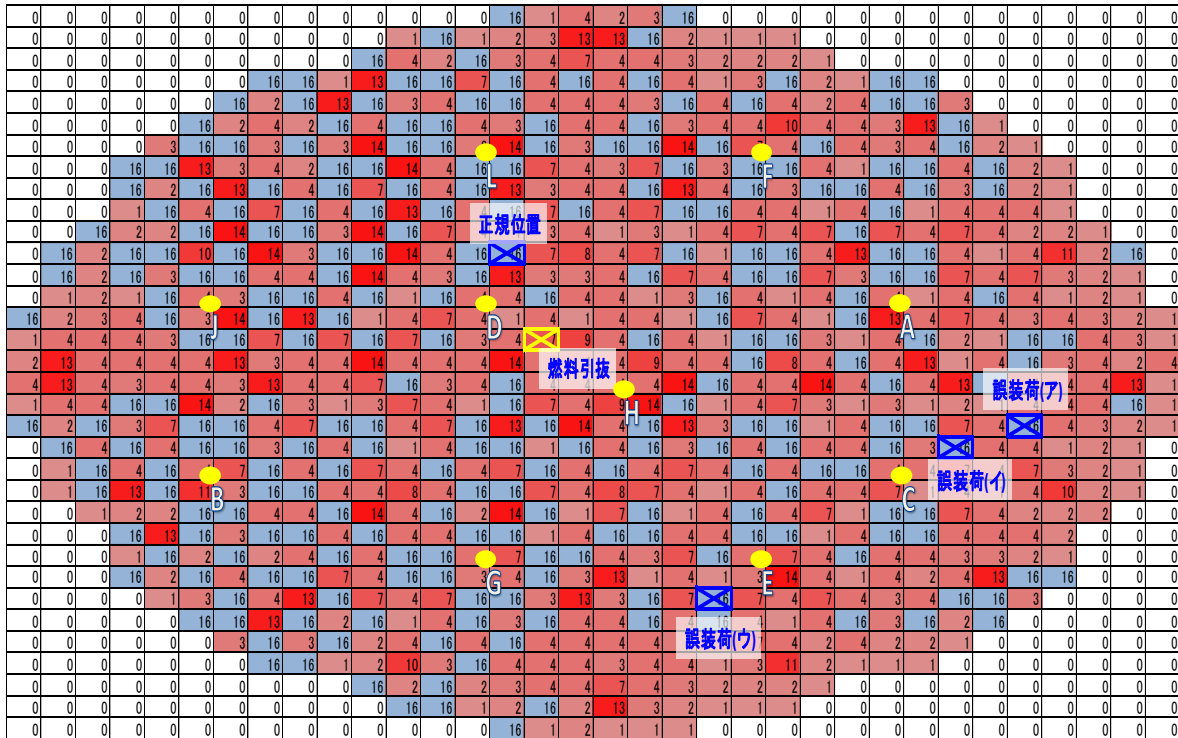


図 3-18 引き抜き燃料と誤装荷位置（1034 ステップ）

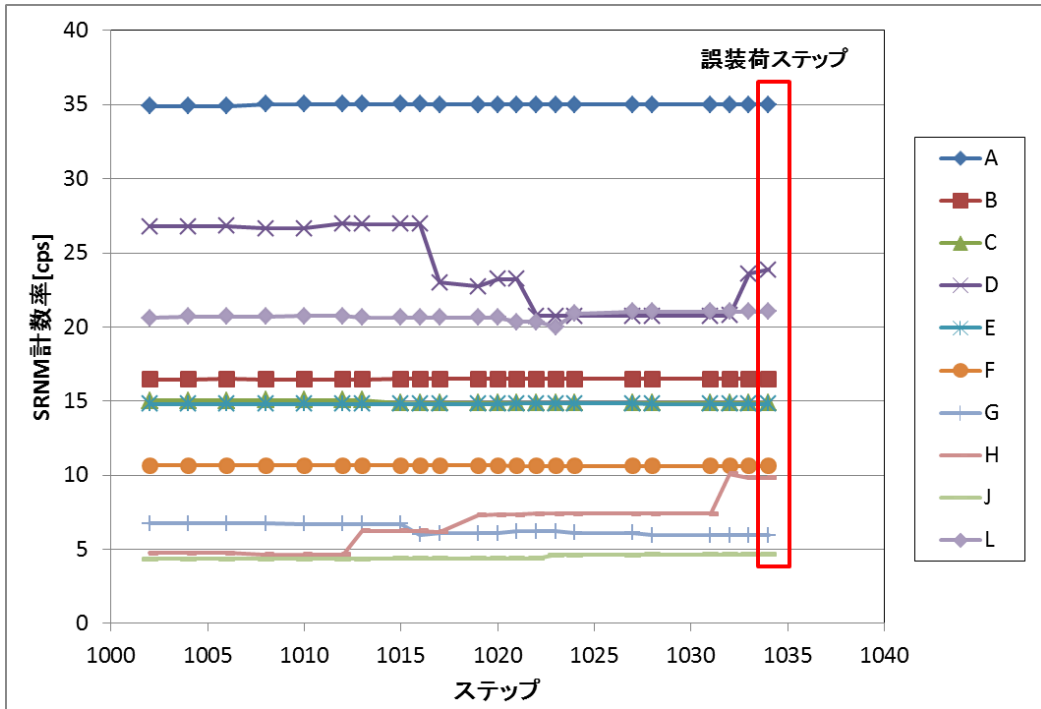


図 3-19 正規装荷時の SRNM 計数率推移

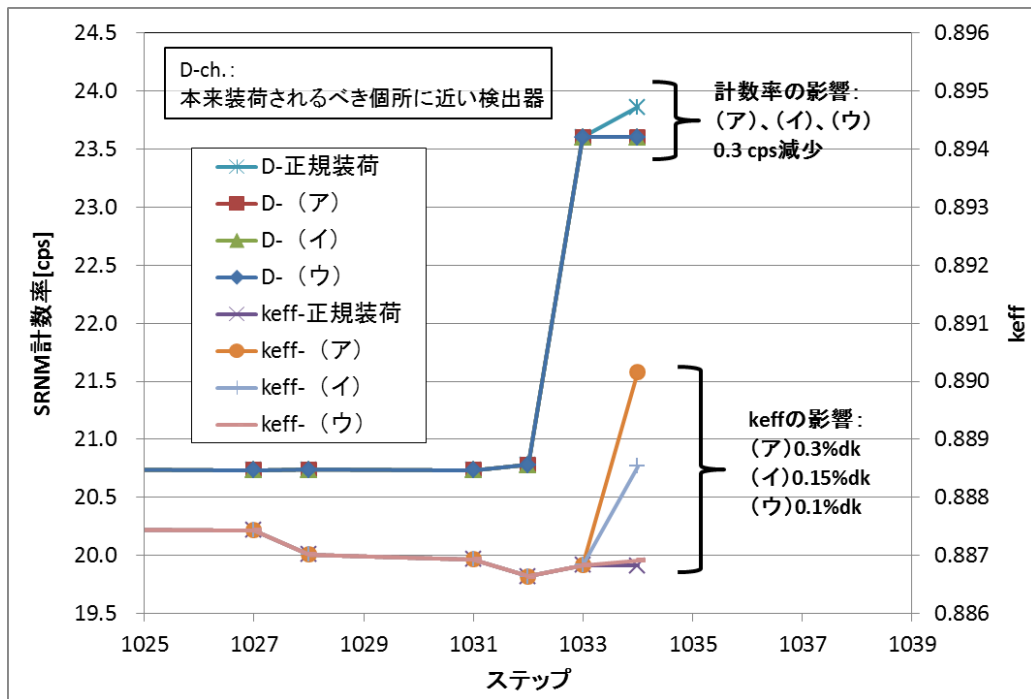


図 3-20 誤装荷時の SRNM-D 計数率の影響

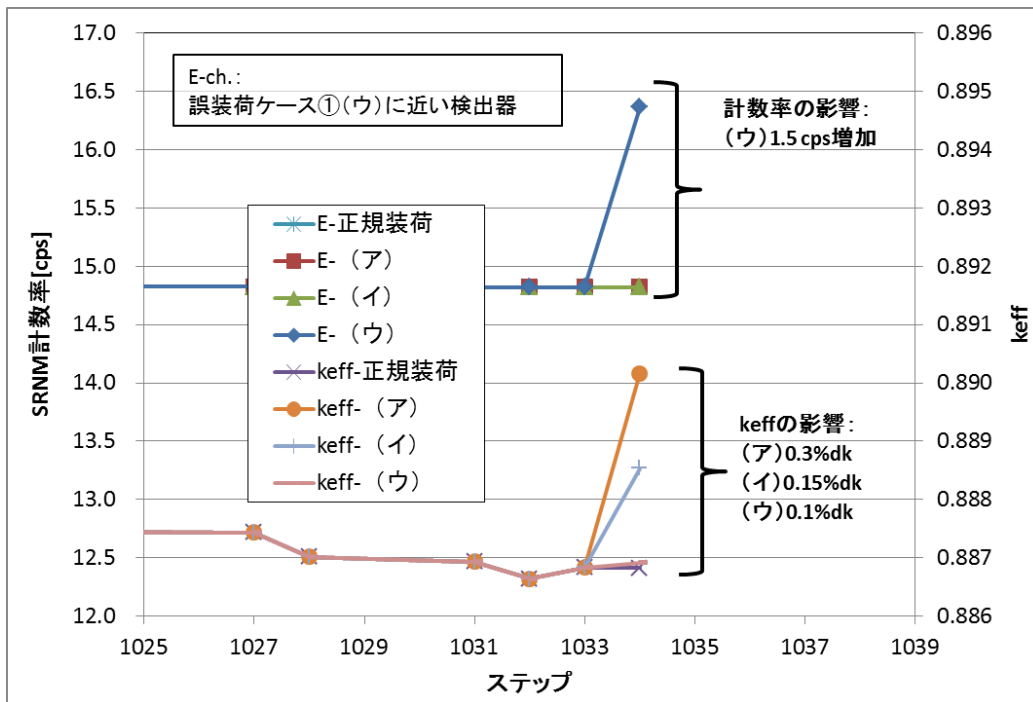


図 3-21 誤装荷時の SRNM-E 計数率の影響

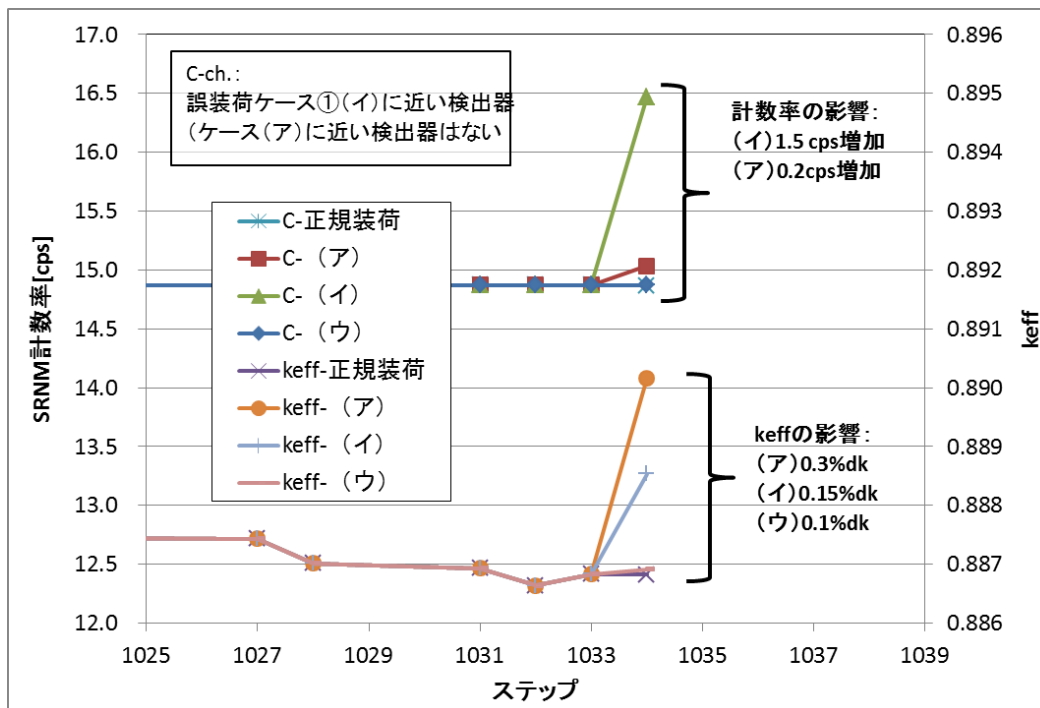


図 3-22 誤装荷時の SRNM-C 計数率の影響

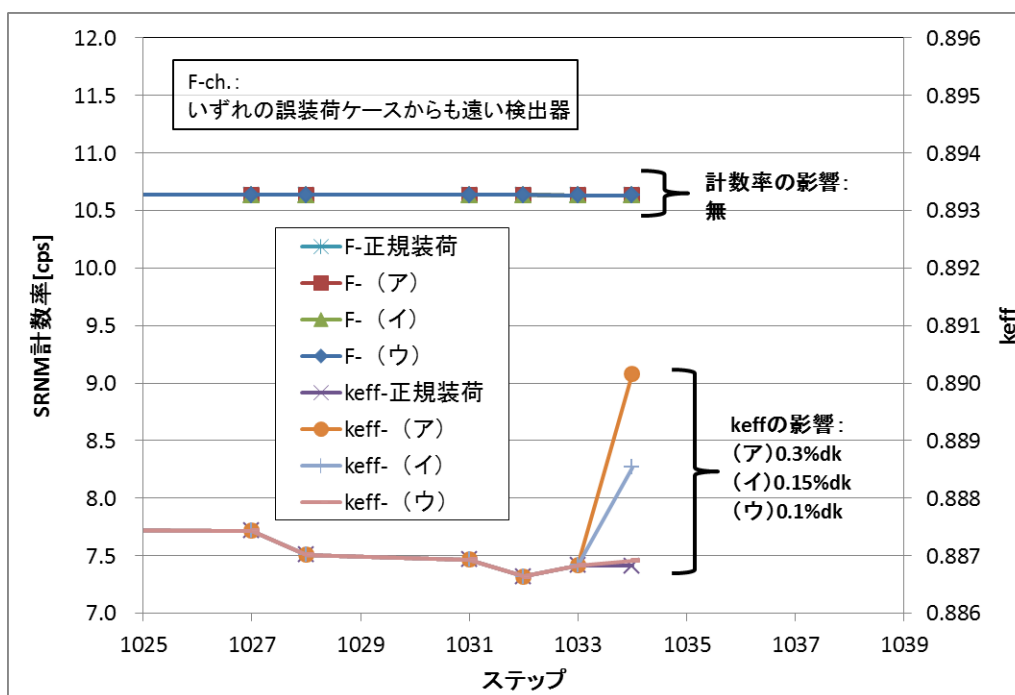


図 3-23 誤装荷時の SRNM-F 計数率の影響

表 3-1 誤装荷時の SRNM 計数率への影響

	keff			SRNM-D [cps]		SRNM-E [cps]		SRNM-C [cps]		SRNM-F [cps]	
正規装荷時	0.8868	-		23.863	-	14.820	-	14.869	-	10.633	-
誤装荷ケース(ア)	0.8902	0.33	%dk	23.603	-0.3	14.821	0.0	15.036	0.2	10.633	0.0
誤装荷ケース(イ)	0.8885	0.17	%dk	23.603	-0.3	14.821	0.0	16.470	1.6	10.633	0.0
誤装荷ケース(ウ)	0.8869	0.01	%dk	23.603	-0.3	16.367	1.5	14.870	0.0	10.633	0.0

【検討結果のまとめ】

仮定や前提条件	・シャフリング途中での燃料誤装荷シミュレーション
得られた結果	・1回の誤装荷程度では、計数率に与える影響は小さく検知は困難と考えられる。

(5) 未臨界監視装置の要求仕様の検討

(2)に示すように、シャフリング中にステップ指定を 9 回行った場合、RMS 差は 0.2%dk と小さいが、最大誤差範囲は-0.74~0.93%dk である。AETNA の冷温時実効増倍率の精度は、経験的に RMS にして 0.1%dk 未満を達成しており、この誤差や SRNM 応答率の誤差を考慮すると監視装置の達成できる最大誤差範囲は 1%dk 程度と考えられる。原子炉はシャフリング中においても炉停止余裕 1%dk を達成しているはずであり、1%未満となる場合は何らかの異常がある可能性が高い。したがって、“緊急性の高い警告”の発報時期として、監視装置の予測実効増倍率（絶対値）が 0.99 を超過したタイミングが考えられる。

また、シャフリング中や全炉心装荷時の実効増倍率については、事前に計算によって評価されており、そこから監視装置の評価誤差として 1%dk 以上乖離する場合は、何らかの事象（大きな予測誤差となる原因）が発生していることが考えられる。したがって、“緊急性の低い警告”の発報時期として、監視装置の予測実効増倍率が、事前の実効増倍率評価値（ステップ指定における期間最大値）を 1%以上超過した場合が考えられる。

上記で比較対象とした事前の実効増倍率の評価値を、ステップ指定における期間最大値とした理由は、中性子源強度評価の時と同様、未臨界監視装置は炉心状態を検知する手段がないため、たとえシャフリングステップごとの実効増倍率を事前評価していても、現実の炉心がどのような燃料装荷状態にあるか把握できないため、ステップ指定によって当該区間の最大値が参照値となる。このことは、これまでの検討で、中性子源強度評価値（過大・過少評価値）を把握するためにステップ指定が必要としていたが、実効増倍率監視のためにもステップ指定が必要であることを意味する。次の表 3-2 に、検討したスペックをまとめるとともに、監視システムによる警告ラインの発報時期を図 3-24 に示す。

表 3-2 未臨界監視装置の概略仕様

項目	想定値
装置不確かさ	1%dk (AETNA=監視装置間：最大誤差 0.93%dk) (AETNA=実機冷温時実効増倍率：RMS 差 0.2%dk)
警告レベル（低）	事前予測値の区間最大値+1%dk
警告レベル（高）	実効増倍率 0.99
ユーザ指定	シャフリング中に 10 回程度

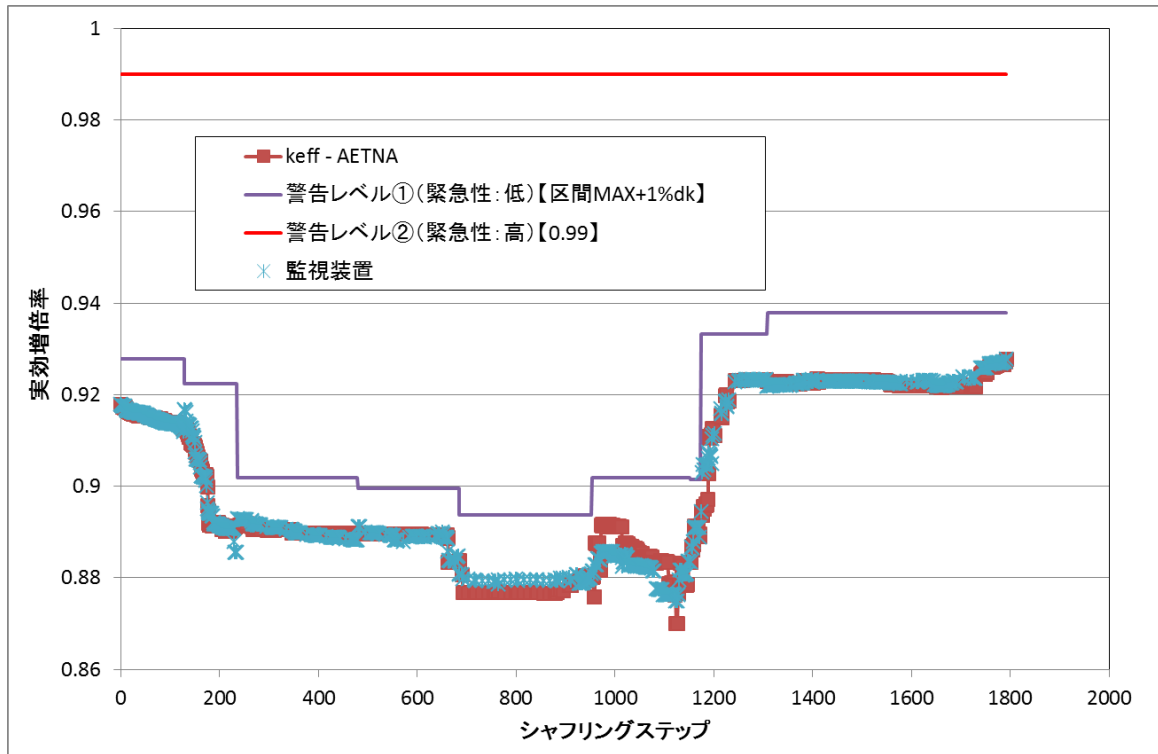


図 3-24 警告発報レベルの概念図

【検討結果のまとめ】

仮定や前提条件	・未臨界監視装置の要求仕様の検討
得られた結果	・シミュレーション結果や運用を考慮し、要求仕様を検討した。

3.2 核計装信号処理手法の検討 (H27)

3.2.1 ノイズ処理手法の検討

反応度計モデルの未臨界監視適用性を検討する目的で、実機炉心のノイズ込みデータ（以下、“ノイズデータ”という。）及びシミュレータ解析による当該炉心の動特性定数を準備し、福井大学に提供した。また、複数の核計装にて同時に測定されたデータから得られる結果の集約処理方法を設計した。

北陸電力株式会社の協力によって、志賀原子力発電所第2号機の起動試験における局所臨界測定試験で測定された実機炉心のノイズデータ（SRNM 信号値）の使用許可を得て、福井大学に提供した。ただし、当ノイズデータは臨界近傍（浅い未臨界～超臨界）に限られている。3.1 で評価した AETNA による燃料シャフリング中の模擬検出器応答を、動特性定数とともに福井大学に提供した。

提供したデータを基に福井大学が反応度評価を行った結果（3.2.2 参照方）、炉内 10 チャンネルの SRNM の反応度評価結果に、検出器の位置依存性が強く存在することを確認した。例えば、局所臨界試験データ分析においては、制御棒引き抜き箇所近傍では SRNM 信号値が上昇し、反応度評価値が上昇するものの、それ以外では SRNM 信号値に変化がほとんどないため、反応度評価値が変わらなかった。すなわち、停止中の BWR では制御棒が多数本挿入されているため、制御棒を引き抜かれたことによる影響が、挿入されている制御棒に阻まれ、周囲に伝わりにくくなっている。つまり、未臨界監視においては、炉心で同一の反応度評価値を用いることが困難であり、検出器ごとに局所的な反応度を評価し、監視することが重要であることが分かった。

【検討結果のまとめ】

仮定や前提条件	・実機ノイズデータを用いた反応度評価
得られた結果	・検出器の位置依存性が大きいことを確認した。

3.2.2 反応度計モデルの未臨界監視適用性検討（再委託先：福井大学）

BWR の中性子源領域核計装にて得られるノイズデータを、デジタル反応度計に適用する場合の複数のノイズ処理モデルについてモデル間の性能比較及び検討を行った。

燃料シャフリング中の模擬検出器応答データに、人工的なノイズを加えて、燃料シャフリング中の模擬ノイズデータを作成した。これを用いて、3 種の反応度計（拡張カルマンフィルタ方式、逆動特性方程式方式、単純フィードバック方式。以下、それぞれ EKF、IPK、SRE と呼ぶ。）で反応度を評価した。しかし、燃料シャフリング中においては、中性子源強度が大幅に変化するため、その影響を補正する必要があり、その補正法について検討した。その結果、一定の判定基準を設けて、有意な中性子源強度変化のみを取り入れることにした。これによって、反応度評価値は各検出器とも同等の指示範囲に収まること分かった。次にノイズのフィルタ性能について検討した。その結果、3 種の反応度計と

も、フィルタのパラメータを適切に選択することによって、ほぼ同等の性能を有することが分かった。

また、燃料シャフリング中の異常事態として、制御棒の誤引き抜きや、燃料の誤装荷が考えられるため、これらの影響について検討した。これらの事象のデータは、AETNA によって得られたものを用いた。その結果、制御棒誤引き抜きについては、複数の検出器に有意な反応度変化が確認できた。一方誤装荷においては、BWR 炉心は燃料集合体が多数装荷されており、1 体程度の誤装荷では有意な反応度変化にはならないことが確認できた。制御棒誤引き抜きと似た状況は、実機における局所臨界試験において見ることができる。このため、実機の当該試験時のデータ解析を行った。その結果、やはり、AETNA によって得られた模擬データの解析結果と同様な結果が得られた。

以上のような検討結果から、BWR の中性子源領域核計装にて得られるノイズデータを、デジタル反応度計に適用する場合、現在知られている 3 種のノイズ処理モデルは、いずれも使用できる見通しが得られた。しかし、最終的な判断は、実機データによるノイズ条件下で、さらには実機での使用環境における利便性も含め最も適切な方式を選択する必要がある。

(1) 反応度計による未臨界度評価能力の確認

燃料シャフリング中の SRNM の応答を AETNA によって評価したデータを用いて、1 点近似炉モデルによる反応度評価の可能性や問題点の有無について検討した。

① 実効中性子源強度の変化による反応度評価の補正法について

AETNA によって、炉内シャフリング中の SRNM の応答が評価された。このデータを用いて、反応度計モデルによる未臨界監視、つまり反応度監視性について検討した。これは今後の実機データによる検討の予備検討といえるものである。模擬データには、検出器応答のほかに、炉心平均中性子寿命、各検出器に対する実効中性子源強度が含まれている。

1) 静的解析

燃料シャフリング中の中性子束の変化は燃料の移動が完了すれば、次の燃料移動までは安定しているといえる。すなわち、反応度は一定である。燃料集合体移動の間隔は数分間程度と仮定しても問題はない。実際の中性子束は、燃料移動中に変化し、移動後新たな定常状態に落ち着く。落ち着くまでの時間は未臨界度に依存するが、未臨界度がある程度大きいと比較的短時間に落ち着く。反応度計によって連続監視をしていると、中性子束分布の変化が無視できる場合には、燃料移動に応じて反応度の変化を見ることができる。この炉心反応度が一定になる値は、静的解析で求めることができる。その関係は中性子源強度が一定とした場合、(2)式で算出できる。このため、まず中性子源強度は一定と仮定し、静的解析による反応度の時系列を評価した。その結果を図 3-25 に示

す。検出器の位置に依存する効果が非常に大きいことが分かる。これは、未臨界炉心における中性子束分布とそれぞれの中性子検出器の位置関係によるものと考えられる。

次に、実際の炉心では中性子強度は燃料移動とともに変化する。AETNAによる評価結果では、検出器ごとの応答を見ると、大きくステップ上に変化するところと、ほぼ一定に見えるところがある。一方、通常の燃料移動中の反応度変化は極めて小さいことから、連続監視中の反応度が一定の変化幅以上に変化した場合は実効的中性子源強度が変化したものと考えることができる。この観察から、AETNAによる模擬信号を用いて連続監視のシミュレーションを静的解析によって行い、それぞれの検出器応答に基づく反応度変化幅が0.5%dk以上の変化があった場合、その中性子検出器の実効中性子源強度が変化したものとする。しかし、反応度変化は小さく、1ステップ前の反応度と仮定し、(2)式に基づき、実効中性子源強度を再評価し、それ以降はこの新しい中性子源強度を用いて反応度を計算することにし、反応度の変化を再評価した。その結果を図3-26に示す。ここでは全ての検出器ではなく代表的なものとした。その結果、このような近似的な評価でも精度の向上が見られ、真の反応度からの誤差は4%dk程度の範囲に収まっている。しかし、このような修正を行っても、検出器の位置依存性の解消には至らず、反応度の時系列は真のものからかなり離れたものがあることから、全ての検出器応答を正しく評価できないことが分かる。

以上の検討結果から、一定のルールに基づき実効中性子源強度の補正を行えば、全ての検出器の反応度指示値を真値から一定の誤差範囲内に収めることができるといえる。

このため、検出器ごとに反応度評価を行うことは妥当であり、それらの挙動が矛盾ないことを確認することによって、真の反応度を一定の誤差範囲内で連続監視することが可能であるといえる。

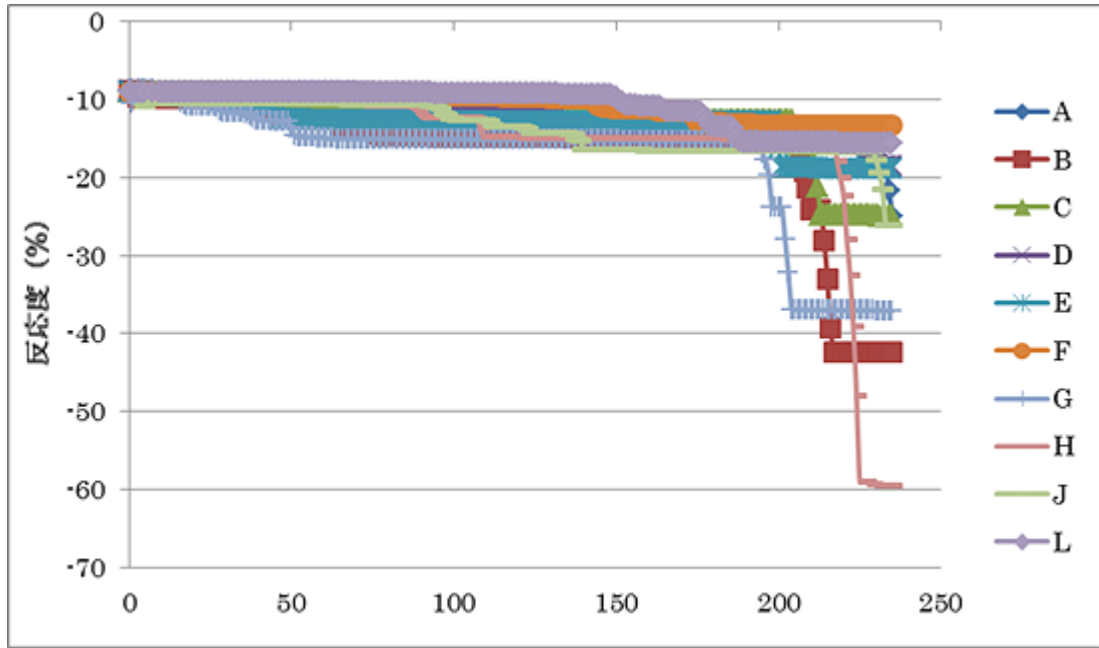


図 3-25 静的解析結果（中性子源強度一定）

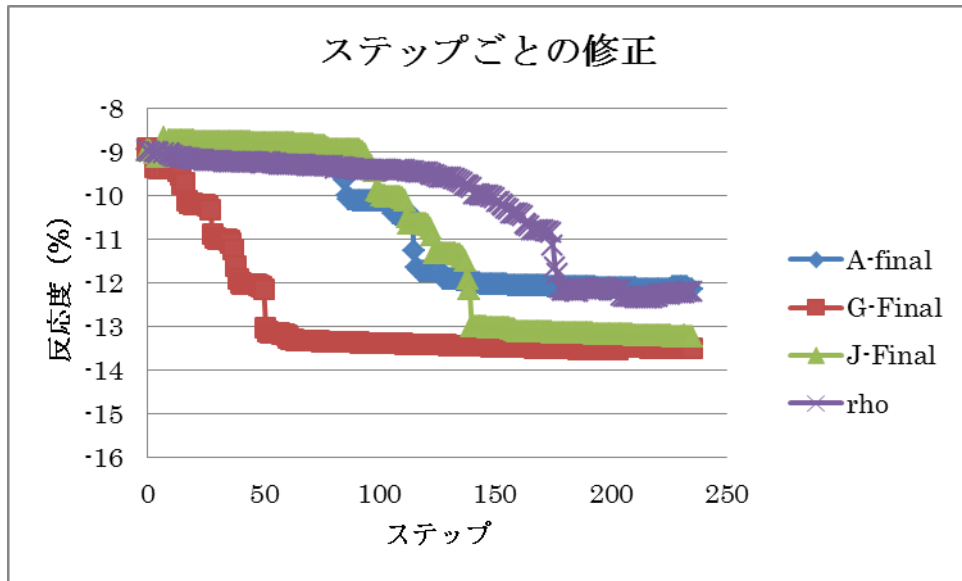


図 3-26 静的解析結果（中性子源強度補正あり；判定基準 0.5%dk）

2) 動的解析

実際に反応度計を用いて連続的に反応度評価を行った。対象とした検出器は真の反応度変化に近い指示を示すL検出器とした。連続信号は、各ステップの値が5分間継続するとして模擬時系列信号を作成し解析を行った。データサンプリング間隔は0.1秒である。その結果を図 3-27 に示す。静的解析をした結果（図 3-28）と矛盾がないことが分かる。連続時間解析は、1,165分間（約20時間）である。各反応度計の設定パラメータは以下の通りである。

a) EKF

初期未臨界度、中性子検出器応答に基づく中性子源は数万のオーダーの値となる。このような条件では、今までの中性子信号が規格化された場合や、未臨界度が極めて小さい場合に最適と思われた調整パラメータでは収束解が得られない。このため、収束できるパラメータの探索が必要であり、参考文献[5]を参考に以下の通り設定した。

$$Q(1, 1) = 1000000000$$

$$Q(8, 8) = (1/\text{初期値})^2 * 100$$

応答を早めるとフィードバックゲインが大きくなり、ゲイン評価上の収束に問題が出る。逆にノイズフィルタ性能を上げると反応度の振れ幅、すなわち、その標準偏差が小さくなるが、応答は緩慢になり、収束性は良くなる。

b) IPK

調整パラメータである1次遅れ時定数は通常の使用条件より長めの1秒とした。

c) SRE

燃料シャフリング中とのことから、ノイズを中性子束信号の数%と最初から大きめに与えたこと、また、検出器応答の変化幅は初期値の64%までくらいしかないことから、フィードバックゲインの値を従来値の5%と小さく設定した。(検出器応答の変化幅がもっと大きい場合、ノイズレベルが低い場合にはこのような調整は不要。)

図 3-29 に全てのシャフリング時間中の応答を示す。EKF と SRE の結果は重なっている。IPK 方式は少しノイズ幅が大きいですが、時定数の調整で縮小できる。これからも今回の条件ではいずれの反応度計も良い応答を示していることが分かる。もともと体系は未臨界であることから、未臨界度監視においては反応度の応答速度はそれほど重要ではないといえる。妥当な応答性を保ちながら、正しい反応度を提供できることが重要である。このため、ノイズフィルタ性能に重点を置き、反応度計の検討を進めるべきであろう。実機データの解析を通じて、この方針の妥当性を確認し、実機装置に反映する。

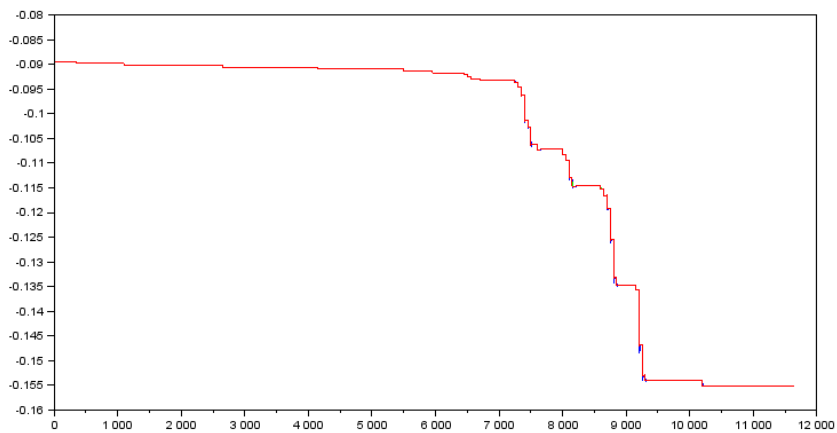


図 3-27 動的解析結果；検出器 L (中性子源強度一定、ノイズなし)

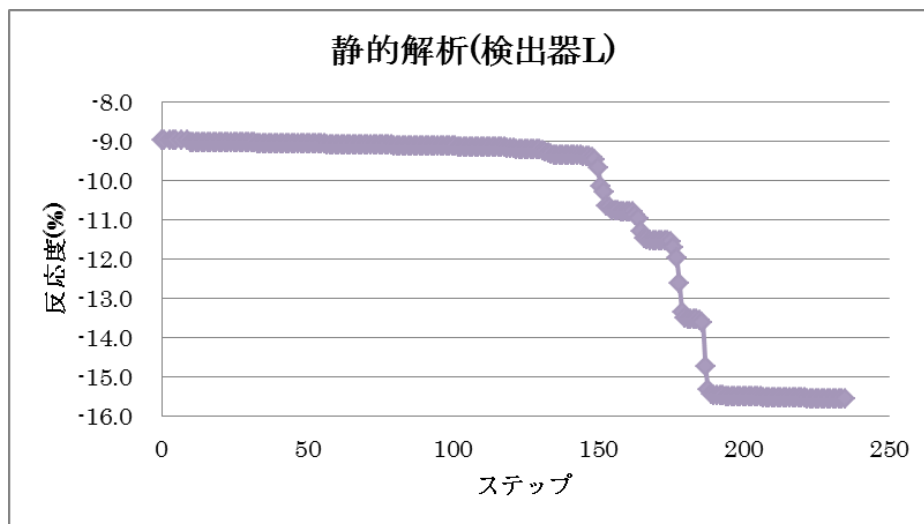


図 3-28 静解析結果例 (検出器 L)

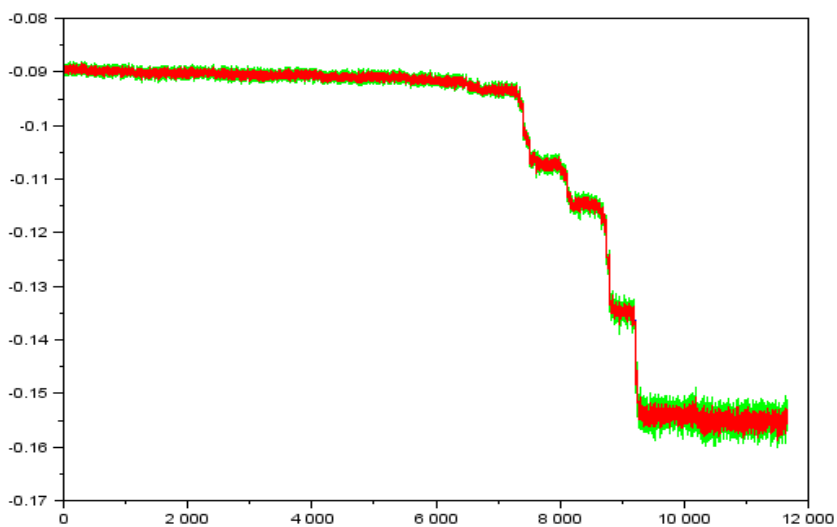


図 3-29 動的解析結果；検出器 L

② 反応度評価と中性子源強度補正結果

燃料シャフリング中においては、燃料の移動によって実効的な中性子源強度が変化する。これによって、反応度の評価結果に影響が出る。中性子源強度の変化は通常燃料移動の前後に起こる。このため、ある一定の反応度差が出た場合には、この実効中性子源強度の変化による反応度変化であると考えることができる。この考えに基づき、模擬シャフリング時の反応度評価のシミュレーションを行った。

ここでは、現在の反応度を含む過去 40 秒間の反応度平均値と、現時点から 80 秒遡った過去 40 秒間の反応度平均値を比較し、一定の飛躍があるとそれは実効中性子源強度の変化によるものであり真の反応度はその影響を取り除いたもの、すなわち、120 秒分前から 80 秒前までの反応度が維持されているとして、実効中性子源強度を逆に補正する。

(これは模擬解析時に 1 ステップ間の間を 50 秒としたため各ステップ間の変化を検出するためである。)

図 3-30 に上記の反応度変化が相対値で 0.01 の場合の結果を示す。AETNA による反応度変化計算結果では、 $-8.95\%dk$ から $-12.19\%dk$ である。一方、今回対象とした検出器データから中性子源強度補正なしで反応度評価を行うと $-8.95\%dk$ から $-15.5\%dk$ となるが、図 3-30 に示すように、補正を行うと、図 3-31 に示す AETNA の結果に近づくことが分かる。なお、中性子束のノイズは判定に影響を及ぼすか見るため、任意で与えたものである。

全ての検出器に対してこのような補正を行うことで、全ての検出器の反応度指示値が近いものとなる可能性があり、検討の価値がある。そこで、今後検討すべき項目としては、反応度の飛躍基準を全ての検出器に共通の値が事前に決められるかどうかである。今回は飛躍基準を 0.01 として全検出器応答を評価した。その結果を図 3-32 に示す。この結果、中性子源補正を行うことによって、検出器ごとの反応度の大きなばらつきはなくなる。ただし、変化のパターンはどうしても中性子源の影響を受ける。結論としては、中性子源強度の連続補正は有効な手段であるといえる。

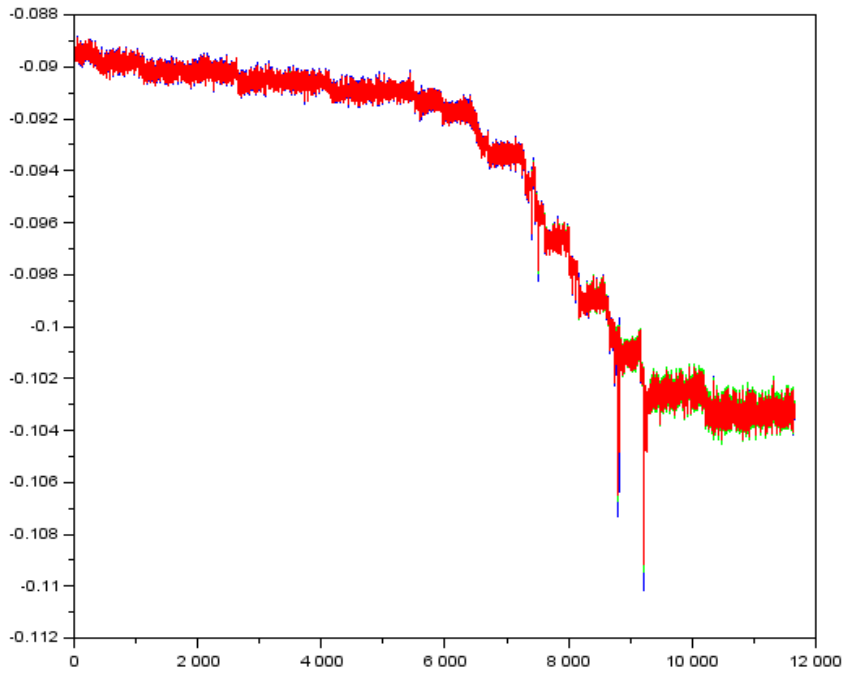


図 3-30 反応度飛躍判定基準 0.01

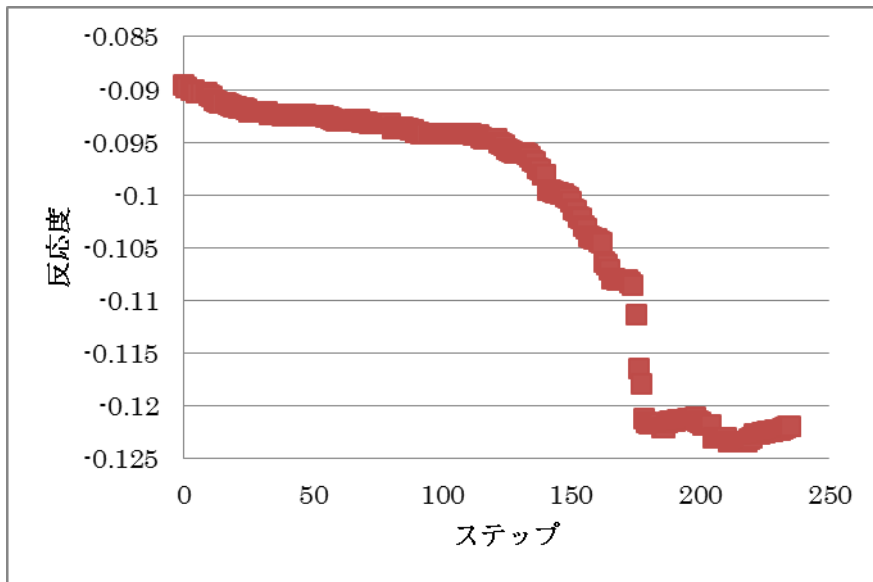
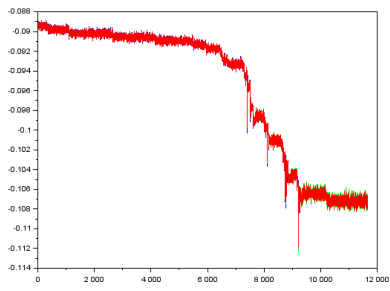
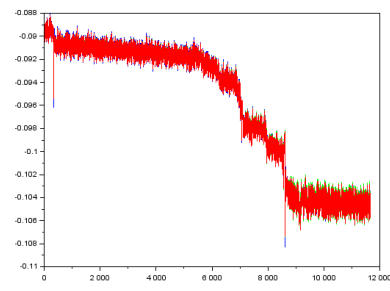


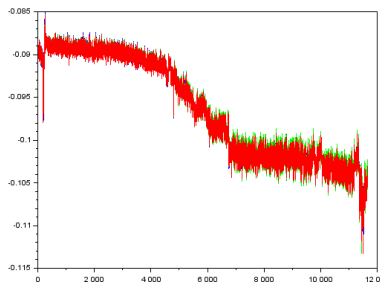
図 3-31 AETNA による反応度



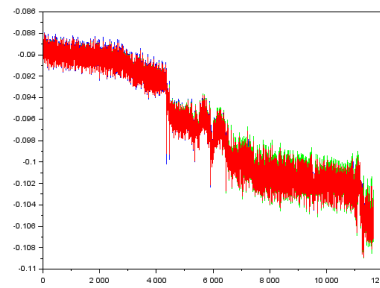
SRNM-L



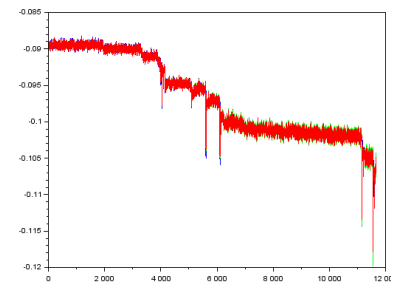
SRNM-F



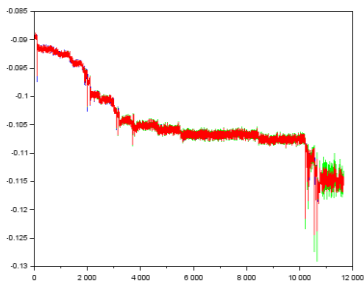
SRNM-J



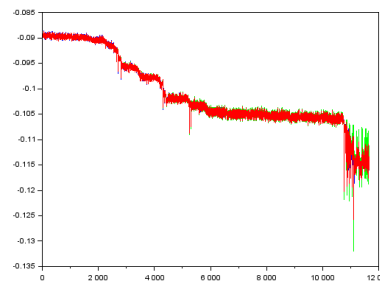
SRNM-D



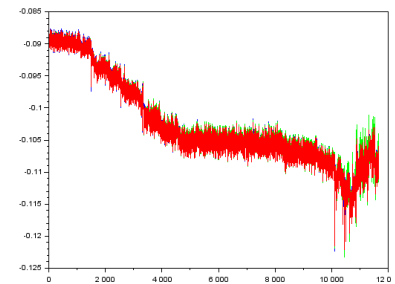
SRNM-A



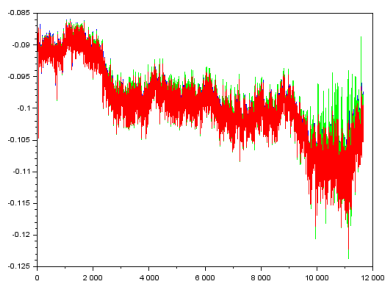
SRNM-B



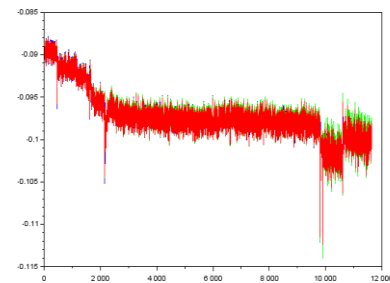
SRNM-H



SRNM-C



SRNM-G



SRNM-E

図 3-32 検出器ごとの応答

(2) AETNA の解析によるデータに基づく評価

AETNA による過渡変化時の応答に基づく反応度評価を行った。

① 制御棒誤引き抜きデータ解析

3.1(3)の AETNA による炉心過渡解析結果を用いて制御棒誤引き抜きデータ解析を行った。図 3-33 にケース 1～3 まで、各検出器の計数率データを比較する。これから見ると、ケース 1 とケース 3 では検出器の応答にほとんど差が出ていないことが分かる。ケース 2 では特に検出器 L で、他の検出器と差が出ていることが分かる。

AETNA の計算結果による添加反応度はケース 1～ケース 3 で以下の通りである。

ケース 1 ; 0.00032dk

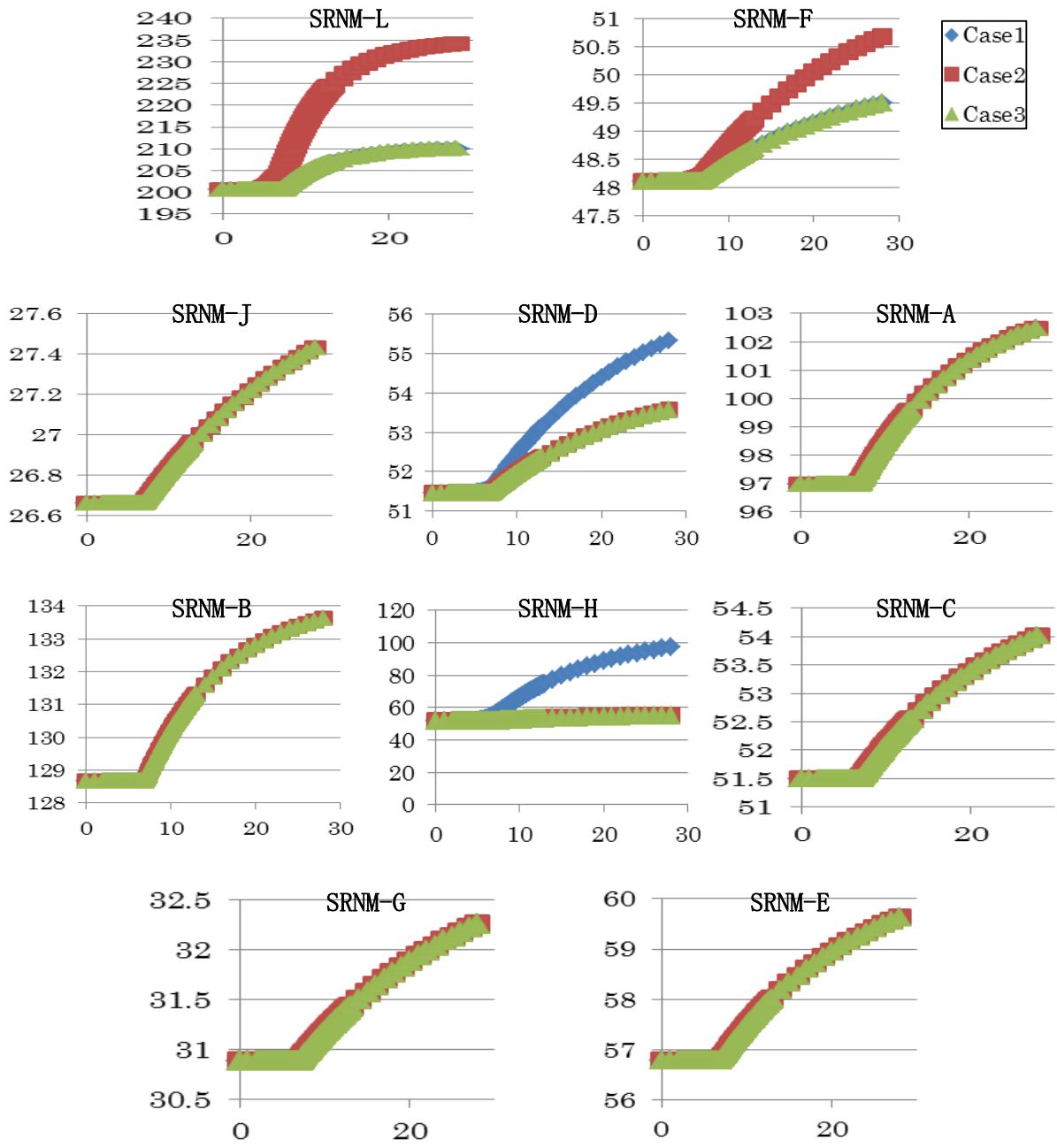
ケース 2 ; 0.03619dk

ケース 3 ; 0.00006dk

検出器応答は、この反応度を反映していないようである。また、それに基づいた反応度を図 3-34 に示す(ケース 1 のみ)。ケース 1 では、燃料と制御棒の間の制御棒が引き抜かれたことによって、見かけ上大きな反応度を検出した。ケース 2 については、真の反応度より小さい値しか得られていない。この結果から、未臨界時の制御棒値を正確に評価するためには別途検討が必要である。しかし、検出器信号はあまり変化がないように見えても、いずれの反応度も上昇を示していることは、制御棒誤引き抜き検出の指標になり得る。

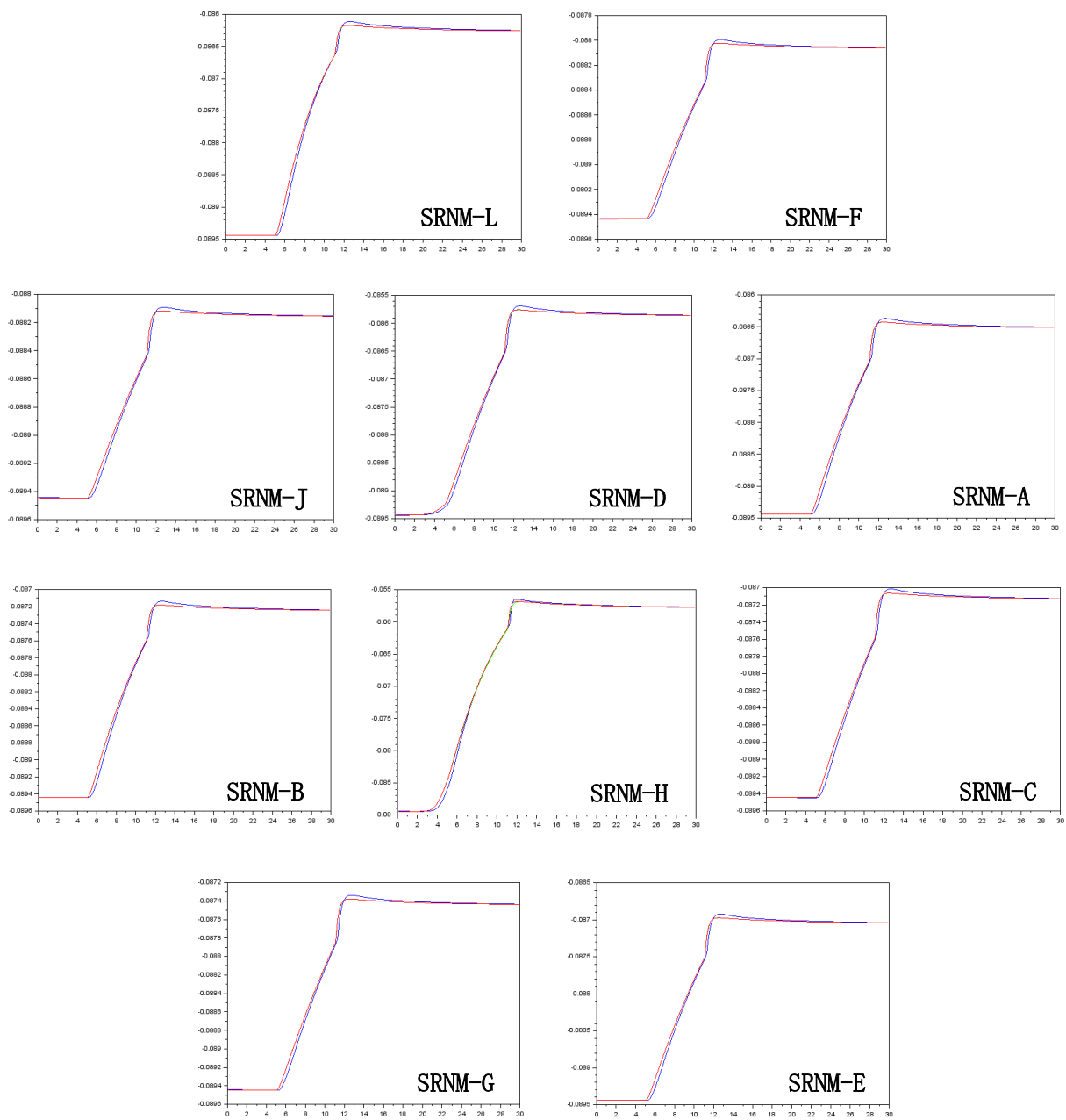
表 3-3 各検出器による反応度変化 (初期値から最大値間での差)

検出器	ケース 1	ケース 2	ケース 3
A	0.0031	0.0029	0.0029
B	0.0023	0.0024	0.0024
C	0.00235	0.0024	0.0024
D	0.0037	0.0021	0.0021
E	0.0025	0.0025	0.0025
F	0.0015	0.0027	0.0014
G	0.0021	0.0022	0.0022
H	0.0315	0.0031	0.0031
J	0.0013	0.0012	0.0022
L	0.0033	0.011	0.0034



縦軸：計数率[cps]
横軸：時間[秒]

図 3-33 AETNA 評価結果



縦軸：反応度[-]
 横軸：時間[秒]
 赤色線：IPK
 青色線：EKF

図 3-34 反応度評価結果（ケース 1）

② 誤装荷データ解析

誤装荷による反応度変化の評価が、AETNA によって行われたが、BWR は燃料体数が多く、そのうちの 1 体だけの誤装荷による反応度効果は極めて小さいことが確認された。このため、未臨界度監視の上からは、対象とする必要がないと思われる。なお、燃料装荷中の燃料移動は、事前の解析や手順書の確認で十分回避できると考えられている。

(3) まとめ

以上、種々検討を行ってきたが、今年度に得られた結論を以下にまとめる。

3 種の反応時計の未臨界度評価、ノイズフィルタ性能に関してはそれほど大きな有意差はない。むしろ、サイトにおける運用上の利便性や取り扱いの難易度に重点を置いて検討すべきであろうと思われる。この観点から、いずれの反応度計方式も適用可能であるといえる。ノイズフィルタ性能に関しては、実機の信号による性能比較が不可欠であり、最終的な結論はこの検討の後に行うべきである。BWR 炉心内にある全ての検出器信号について、反応度を評価し、総合的な観点から未臨界監視を行うべきである。

【検討結果のまとめ】

仮定や前提条件	・シミュレーションによるシャフリング中の模擬検出器応答を用いて、複数の反応度計モデル (IPK、EKF、SRE) によって未臨界度を評価
得られた結果	・検出器応答の変化を監視し、中性子源強度の自動補正法を考案した。 ・シャフリング中の未臨界監視では減衰特性が重要で即応性は重要ではなく、いずれもパラメータ調整により良好な減衰特性を得られることが分かった。

3.3 未臨界監視装置の試作 (H28)

3.3.1 試作機の作成

未臨界監視装置の試作機（オフライン）を作成した。具体的には、将来のプラントシステムとの連携や GUI の工夫等によって、利便性や評価精度などを考慮した上で試作機の要件定義を行い、試作機を作成した。

未臨界監視装置が実用化した場合、色々な状況を考えられるが、色々な状況にも耐えられるように、高性能かつ軽量のタブレットパソコンを試作機のハードウェアに選定した。未臨界監視プログラム（ソフトウェア）は、使用者の利便性を考慮し、GUI による操作で利用できるようにした。なお、未臨界監視は炉心内にある全 SRNM 信号（ABWR は 10 個）を、知られている三つの反応度計モデル全てでリアルタイムに評価できるようにした。

さらに、将来の未臨界監視装置のオンライン化に向けて、未臨界監視装置と実機の計装システムとを接続した場合のデータ送信に関わる仕様を検討した。

(1) 要件定義

未臨界監視装置試作機の要件定義を表 3-4 に示す。本研究においては、ABWR を対象として試作機の作成を行う。未臨界監視装置の上流側プラント設備として過渡現象記録装置（NATRASS）を想定する。未臨界度評価モデルは反応度計モデルとして、広く知られている IPK、EKF、SRE の三つの手法で評価する。

反応度計モデルで必要な、炉心特性パラメータ（ β 、 λ 、 Q 、 Λ ）は、炉心シミュレータ AETNA で評価した値を事前に与え、SRNM 時系列信号は、過渡現象記録装置（NATRASS）から入力されるものとする。ただし、試作機の段階においては、オフラインで様々な検証が行えるよう、SRNM 信号相当のデータファイルから読み込めることとする。出力は、試作機による反応度結果とシミュレータによる反応度予測値を同時に示し、両者に著しい乖離がある場合は、点滅等をして運転員に異常を知らしめることとする。

未臨界監視の適用範囲は、基本的には反応度操作に関わる全状態を想定している。しかし、通常の BWR 炉心では市松状の燃料装荷状態（以下、“市松模様状態”という。）では、臨界になりえないという知見が従前の炉心評価による経験からあるため、市松模様状態、及び、それよりさらに燃料が取り出された状態では、燃料健全性維持の観点で監視する必要性は薄いと考えた。よって、制御棒の誤引き抜きで臨界に到達し得る、市松模様状態までを適用範囲の限界（反応度評価の下限点）とする。一方で、反応度評価の上限点に関しては、反応度計モデルを用いているため、未臨界状態に限らず、臨界超過状態も評価は可能である。しかしながら、即発臨界状態では、評価モデルに含まれるノイズフィルタの影響もあり、反応度の絶対量を適切に評価するのは困難である。また、即発臨界時は、事象が急進するとともに直ちに安全システムが働き、未臨界監視装置自身が安全性の向上に直接貢献できるとは考えにくい。なお、即発臨界時の炉心の安全性は安全解析によって確認され

ている。よって、即発臨界未満までを監視の対象とする。

最後に、監視装置として常時監視できるようにするが、何らかの原因で計算が異常終了することが考えられる。そういった場合でも、自動的に復旧し、計測を即再開できるようにすることが重要である。

表 3-4 未臨界監視装置試作機の要件定義（仕様）

適用プラント	ABWR
上流側プラント設備	過渡現象記録装置（NATRASS）
未臨界度評価モデル	反応度計モデル（IPK、EKF、SRE）
入力変数、入力信号	シミュレーション結果（ β 、 λ 、 Q 、 Λ 、 ρ ） SRNM × 10 信号
出力	・反応度 ・異常検知（点滅）
未臨界監視の適用範囲	未臨界（市松装荷状態） ～ 臨界超過（即発臨界未満）
計算停止時の対応	自動復帰（計測の即再開）

(2) 未臨界監視試作機ハードウェア

未臨界監視装置が将来、システム製品として、実機での監視に供される場合、様々な運用方法が考えられる。理想的な運用方法の一つとして、燃料交換機に未臨界監視装置を設置し、燃料交換作業者が未臨界状態を直接監視しながら安全に作業を行うことが挙げられる。或いは、中央制御室等に未臨界監視装置を設置し、運転員が燃料交換作業者に未臨界状態を伝えるということも挙げられる。さらに、計算機室等に設置し、延々と未臨界状態の記録を行い、異常等を検知した場合に事後に状態を確認するというデータロガー的な運用も考えられる。

いずれにしても、未臨界監視装置の設置の容易さ、設置したことによる安全性向上の度合に違いがあるため、現時点で設置・運用方法を限定するのは得策ではない。

そこで、運用方法の違いに柔軟に対応できるように、高性能かつ軽量のタブレットパソコンを本研究の試作機のハードウェアに選定した。選定したハードウェアの仕様を表 3-5 に示す。

表 3-5 未臨界監視装置試作機ハードウェア仕様

	型番	数量
Microsoft Surface Pro 4 -CPU : Core-i7 -メモリ : 16GB -記憶容量 : 256GB	TH5-00013	1

(3) 未臨界監視装置伝送機能仕様

将来の未臨界監視装置のオンライン化に向けて、未臨界監視装置と実機の計装システムとを接続した場合のデータ送信に関わる仕様を検討した。

具体的には、過渡現象記録装置（NATRASS）との接続を想定し、未臨界監視装置－NATRASS 間のデータ送信に関わる仕様である。なお、サイバーテロへの対策として、データ送信は NATRASS から未臨界監視装置への一方向通信とし、NATRASS で扱っている全時系列信号（100Hz で収録）を 1 秒周期で伝送する仕様を設計した。

【検討結果のまとめ】

仮定や前提条件	未臨界監視装置試作機の要件を定義した。
得られた結果	未臨界監視装置を試作した。

3.3.2 試作機の検証及び妥当性確認（再委託先：福井大学）

3.3.1 の要件定義段階において、反応度計の開発経験等に基づき、要件の妥当性や実現性などの確認を行った。また、試作機と同等の環境を構築し、模擬信号等を用いて、未臨界監視装置の試作機の検証及び妥当性確認を行った。得られた不確かさを基に、システムの性能とサイトの業務内容・環境・要求性能を考慮した運用方法を検討した。

特に未臨界監視試作機に搭載されている三つの反応度計モデル（EKF、IPK、SRE）について、未臨界監視への適用性に関する検証を高度に行った。EKF に関しては連続式モデルで中間式を使用していたが、デジタル信号処理に適した離散式モデルに変えることで、フィルタ応答が発散する事象を改善した。IPK と SRE について、理論的な比較を両者間で行うことで、両者の共通特性を見出すことができ、今後の最適評価パラメータ決定において知見が活用できると考えられる。なお、IPK と SRE の比較については、学術論文誌に掲載された^[8]。

(1) 拡張カルマンフィルタの計算手法の改良

EKF は様々な分野で用いられるノイズフィルタの一種であるが、近年、反応度計モデル

にも適用された^[4]。理論的な最適解を導く方法として有力なツールといえる。ところがある反応度評価条件下においては、フィルタリング信号が振動する場合があります、使用する際は慎重に入力パラメータを選定（調整）する必要があります。そんな中、拡張カルマンフィルタを用いた反応度計の最新の研究^[7]において、デジタル反応度計に適った離散化モデルに従った計算手法が提案された。この手法によると、急激な負の反応度が印加された場合、従来の連続式モデルでは反応度（未臨界度）が無用な振動をしていた（図 3-35 参照）が、振動せず安定した反応度を導けるようになった（図 3-36 参照）。よって、本研究で開発している未臨界監視手法には、この新しく提案された離散化モデルに従った EKF を適用することにした。

【補足：EKF 改良の概要】

反応度評価のシステムを状態空間表現で表すと、(3)式となる。

$$\frac{dx}{dt} = f(x) = \underbrace{\begin{pmatrix} -\beta/\Lambda & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 & \lambda_6 & 0 & 0 \\ \beta_1/\Lambda & -\lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_2/\Lambda & 0 & -\lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_3/\Lambda & 0 & 0 & -\lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_4/\Lambda & 0 & 0 & 0 & -\lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_5/\Lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_5 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_6/\Lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} n \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ \rho \\ \omega \end{pmatrix}}_x + \underbrace{\begin{pmatrix} \rho n/\Lambda + Q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_B \quad (3)$$

システムを離散化すると次の差分方程式が得られる。

$$x_{k+1} = \Phi_n x_k + \Gamma_{n,k} + w_k \quad (4)$$

ここで、

Φ_n : ヤコビ行列

$\Gamma_{n,k}$: ベクトル $(= \int_0^{\Delta t} \exp(At) B dt)$

w_k : 白色ノイズ

ヤコビ行列に着目すると、改良前は $\Phi_n = \exp(A\Delta t)$ としていたがこれは連続式モデルで厳密であるが、離散化モデルに適用する場合は、(5)式に変更することが重要である^[4]。

$$\Phi_n = \exp(A\Delta t) + \left(\int_0^{\Delta t} \exp(At) dt \right) \frac{\partial B}{\partial x} \Big|_{x=x_k} \quad (5)$$

(2) 多重フィルタ

デジタル反応度計への入力信号ノイズを効率的にフィルタする手法として、1 次遅れフ

フィルタがある。特にノイズの多い場合には、1次遅れフィルタの時定数を大きくする必要はあるが、時定数を大きくすると反応度評価に時間遅れが目立つようになる。そこで、この問題を解決する新たなフィルタ手法について検討を行った。

本手法の原理は極めて単純である。現在1次遅れフィルタを入力信号に対して1回だけの処理になっているが、このフィルタの出力に、さらに同じ1次遅れフィルタを採用する。ノイズフィルタが不足する場合には、さらにこのフィルタを重ねて適用する。

このようなフィルタを用いると、効率良く高周波成分をフィルタできるが、時間遅れは極めて小さい値に維持できる。その具体例を図 3-37、図 3-38 に示す。応答に時間遅れは極めて小さいが、効率良く高周波成分をフィルタできることが分かる。

【検討結果のまとめ】

仮定や前提条件	開発経験等に基づき、要件の妥当性や実現性などの確認を行う。
得られた結果	<ul style="list-style-type: none">● 拡張カルマンフィルタの振動問題を改善することができた。● フィルタのノイズ除去性能と応答時間に対して考察した。

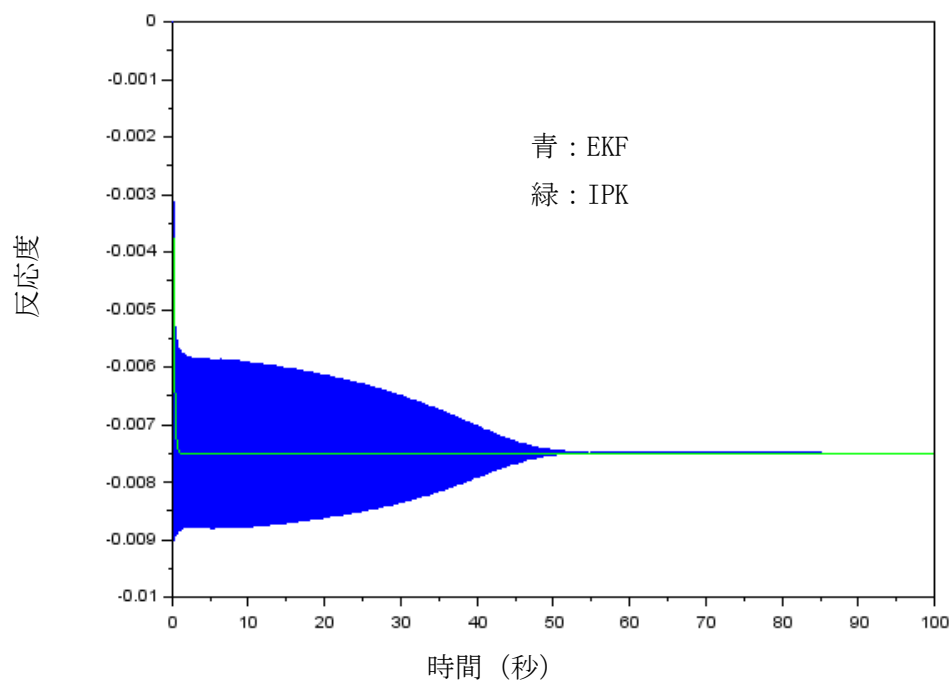


図 3-35 ノイズフィルタ応答 (IPK vs. EKF_[連続式モデル])

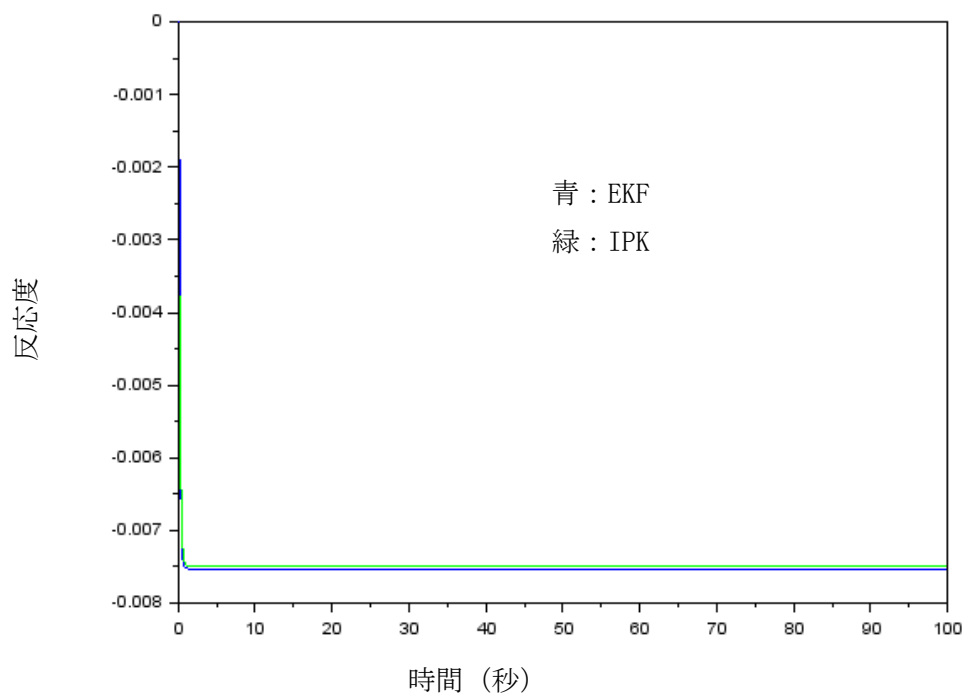


図 3-36 ノイズフィルタ応答 (IPK vs. EKF_[離散化モデル])

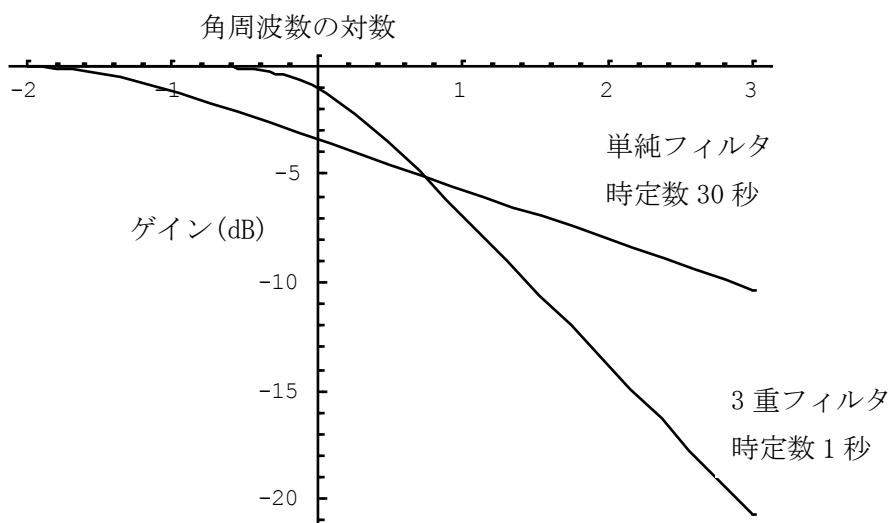


図 3-37 フィルターゲインの比較図

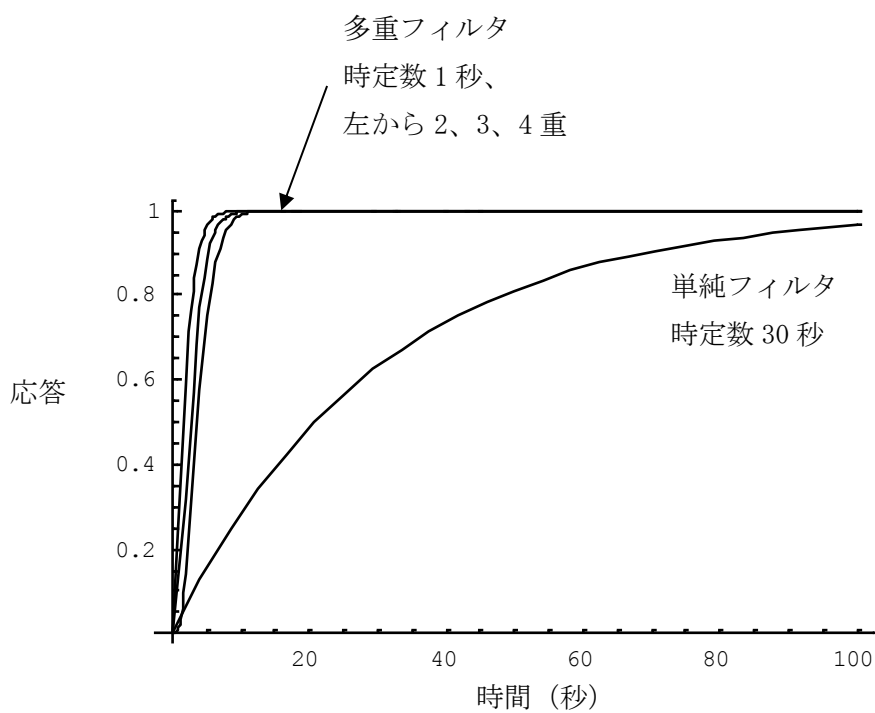


図 3-38 単位ステップ入力に対する応答

3.4 核計装データ採取 (H28)

3.4.1 データ採取計画の立案及び実行

北陸電力株式会社志賀原子力発電所 2 号機（以下、“志賀 2”という。）を対象として、燃料シャッフリング等の未臨界状態での反応度変化を伴う作業を想定し、SRNM 信号データの採取及び立ち会い計画を作成した。計画通り作業が行われることとなり、北陸電力と連携を密にして計画を実行した。

志賀 2 は、本研究開始時点で原子炉に燃料が装荷されている状態であった。この度、点検等を行うため、原子炉内の全 872 体の燃料集合体を燃料貯蔵プール（以下、“SFP”という。）に移動させることになった。そこで、北陸電力の協力を得て、燃料移動中の信号データを採取した。

(1) 炉内燃料取り出し作業

志賀 2 の炉心にある全 872 体の燃料集合体を全数燃料プールへ移動させる取り出し作業が行われた。図 3-39 に志賀 2 の炉心（取り出し作業前の全燃料装荷・全制御棒挿入状態）の模式図を示す。表 3-6 及び図 3-40 に取り出し作業の概要を示す。また、燃料取り出し計画に基づき、各燃料取り出しステップの SRNM 計数率を炉心シミュレータで評価した結果を図 3-41 に示す。

志賀 2 では、長期に亘り原子炉が停止状態であったため、燃料内の中性子源核種の崩壊（減少）が進行している。そのため、燃料取り出し作業中に、保安規定で定められた最小計数率(3 cps)を下回る懸念があった。そこで作業の初めに、各 SRNM 周りの 4 体の燃料集合体を燃料貯蔵プール中の燃焼が進んだ燃料（すなわち、中性子源核種の量が多い燃料）と置き換える作業（以下、“仮置き”という。）を行った。これによって、燃料取り出し作業中に、最小計数率を下回らない見通しが得られた（図 3-41 参照。1200 ステップ以降では 3 cps を下回っているが、これは SRNM に隣接する燃料集合体を取り出しているためである。最小計数率に関する規定は SRNM 周りの燃料集合体を取り出された状態では適用外のため、問題はない）。仮置き後は燃料集合体を市松模様状に取り出しを行い、市松到達後は、ダブルブレードガイドを用いながら、残りの燃料の取り出し及び制御棒の引き抜きを行う空セル化作業を行った。

実測データについては、時間平均計数率と、計数率の時系列信号の 2 種類を採取した。前者については、全 1372 ステップのデータを採取した。後者については、作業中の全時系列信号を採取することは、システム上困難であることから、採取点を限定することにした。その結果、断続的に過渡現象記録装置を稼働させることで、SRNM 信号データを全部で 31 ケース（信号数：SRNM 10 個、サンプリング周波数：10Hz、データ長：35 分間／各ケース）採取した。図 3-40 中の○で示した点で、時系列信号を採取した。

表 3-6 炉内燃料取り出し作業の概要

プラント	志賀 2 (ABWR)
燃料体数	872 体
作業	1～80; 仮置き 81～552; 市松取り出し 553～1372; 空セル化 (全 1372 ステップ)

(2) 実測データ (各ステップの 1 分間の平均計数率)

図 3-42 に燃料取り出し作業の各ステップで採取した 1 分間の SRNM 計数率の平均値を示す。図 3-41 と全体的な挙動が近いことが確認できる。また、燃料取り出し作業中に SRNM 周り 4 体が引き抜かれる作業終盤を除き、3 cps 以上の計数率を確保できていることが確認できる。

図 3-43 に計数率の予測値と実測値を比較したものを示す。これによると概ね一致しており、比較的高精度に予測が行えていることが分かる。一方で予測が大きく外れている点もいくつか観測できる。これは SRNM 周りの燃料集合体を取り出して当該領域が水状態になった場合であり、当該 SRNM は監視要件から外れた状態にあるため、未臨界監視装置の精度悪化は受け入れられる。

(3) 実測データ (時系列信号)

前述した通り、時系列信号データとして、全部で 31 ケースのデータを採取した。燃料取り出し作業前の非操作時に採取した計数率時系列信号を図 3-44 に示す。これによると、何も操作していない場合は、単に平均値周りに白色ノイズが載っているような挙動ではなく、数分程度の比較的長い周期のノイズ成分が含まれているようにも思える。停止中の反応度 (未臨界度) を評価する上では、このようなノイズ成分を適切に除外することが重要である。

燃料取り出し作業時の計数率時系列信号の一例として、燃料取り出し作業開始直後 (ステップ 1 ～ ステップ 3) の計数率時系列を図 3-45 に示す。燃料取り出し作業開始直後は、SRNM-J 周りの燃料の仮置きが行われた。図 3-45 では、仮置き時の燃料取り出しに伴う計数率の減少と、仮置き燃料の装荷に伴う計数率の上昇を確認することができる。一方で、SRNM-J 以外の応答は、図 3-44 と同程度に揺らいでいるのみで、仮置き作業の影響をほとんど受けていないように思われる。実際、仮置き作業では、炉心反応度 (未臨界度) に与える影響は微々たるものなので、未臨界監視をする上で、これらの特性に注意する必要がある。

【検討結果のまとめ】

仮定や前提条件	炉内燃料の取り出し作業が行われることが決まり、取り出し時のデータ採取方法を計画した。
得られた結果	燃料取り出し作業が無事行われ、当作業中の中性子信号データを採取した。停止中原子炉の中性子データについては、これまで積極的に採取や研究がなされてこなかった分野であり、本データは当該分野において貴重なデータといえる。

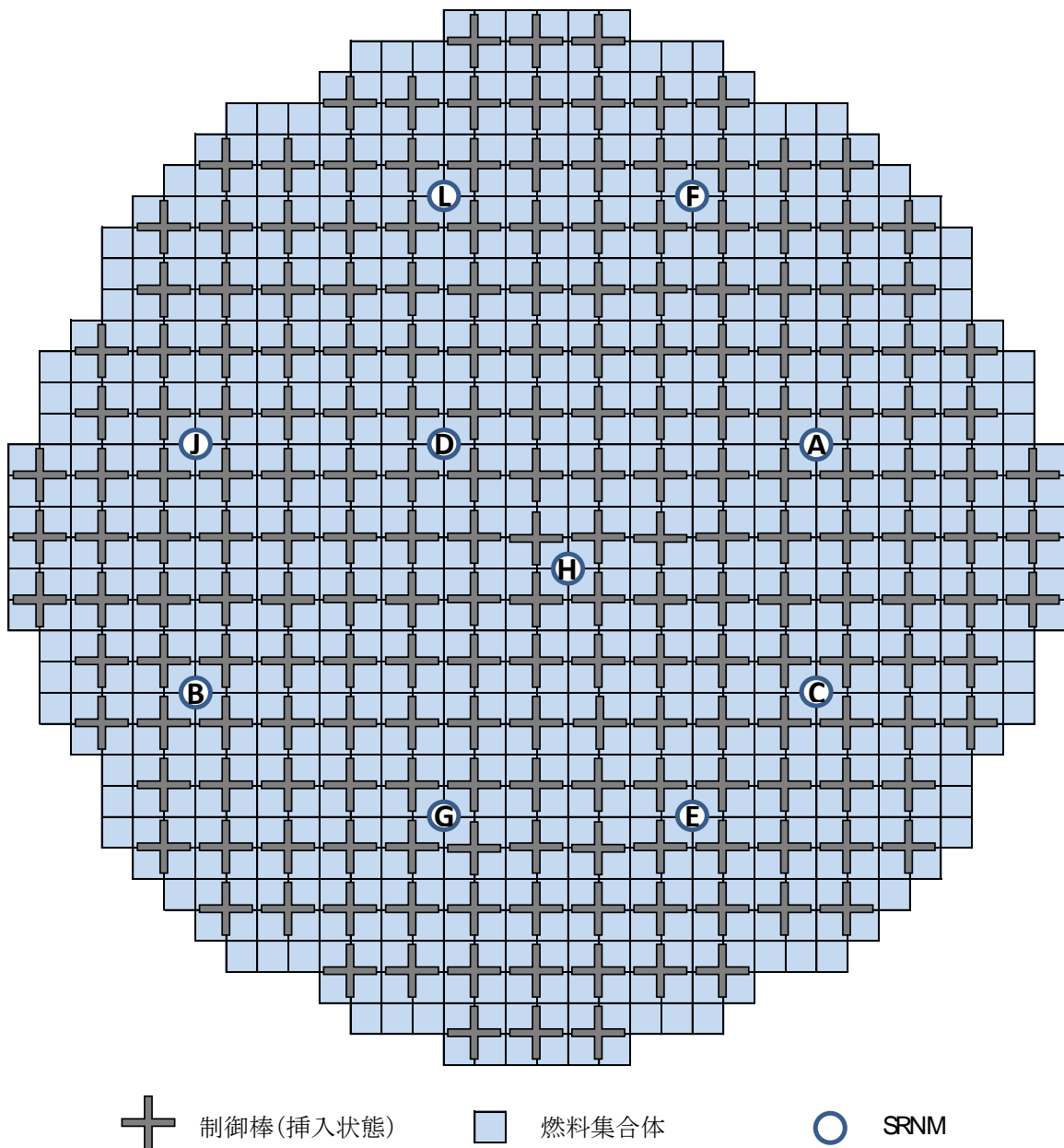


図 3-39 志賀 2 の炉心 (全燃料装荷・全制御棒挿入状態)

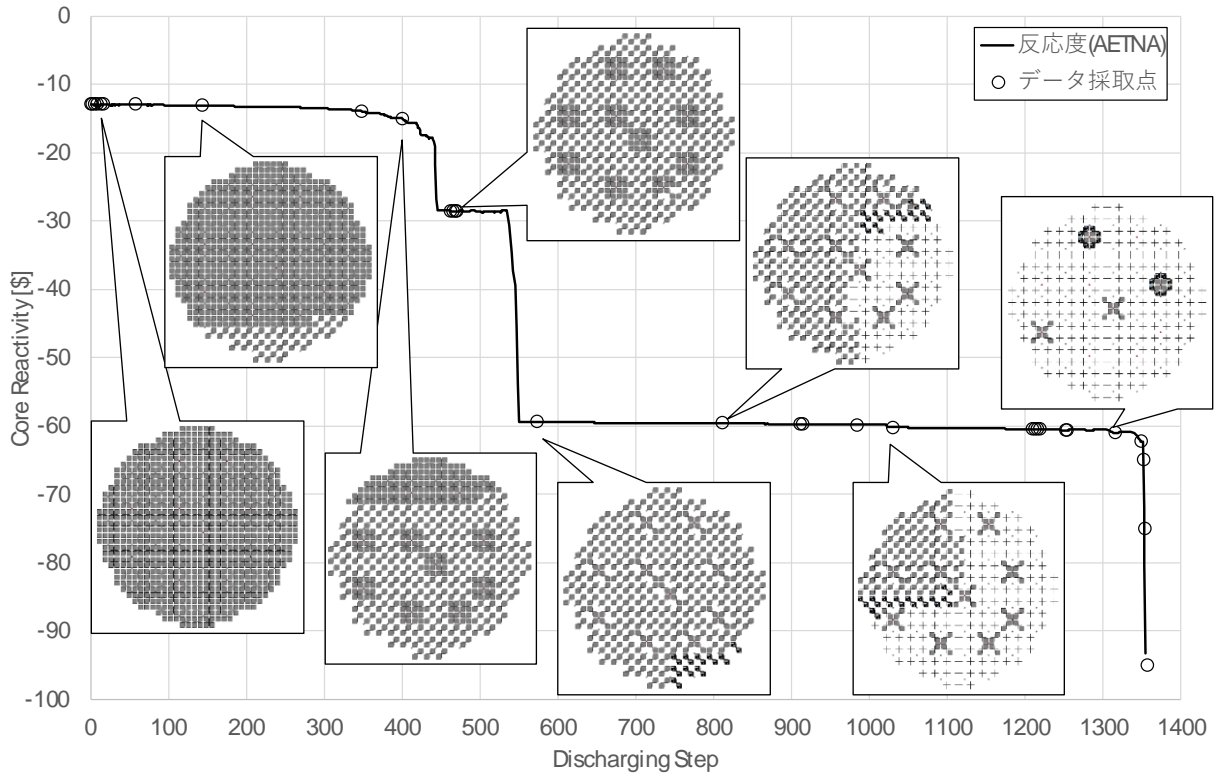


図 3-40 燃料取り出し作業の概略

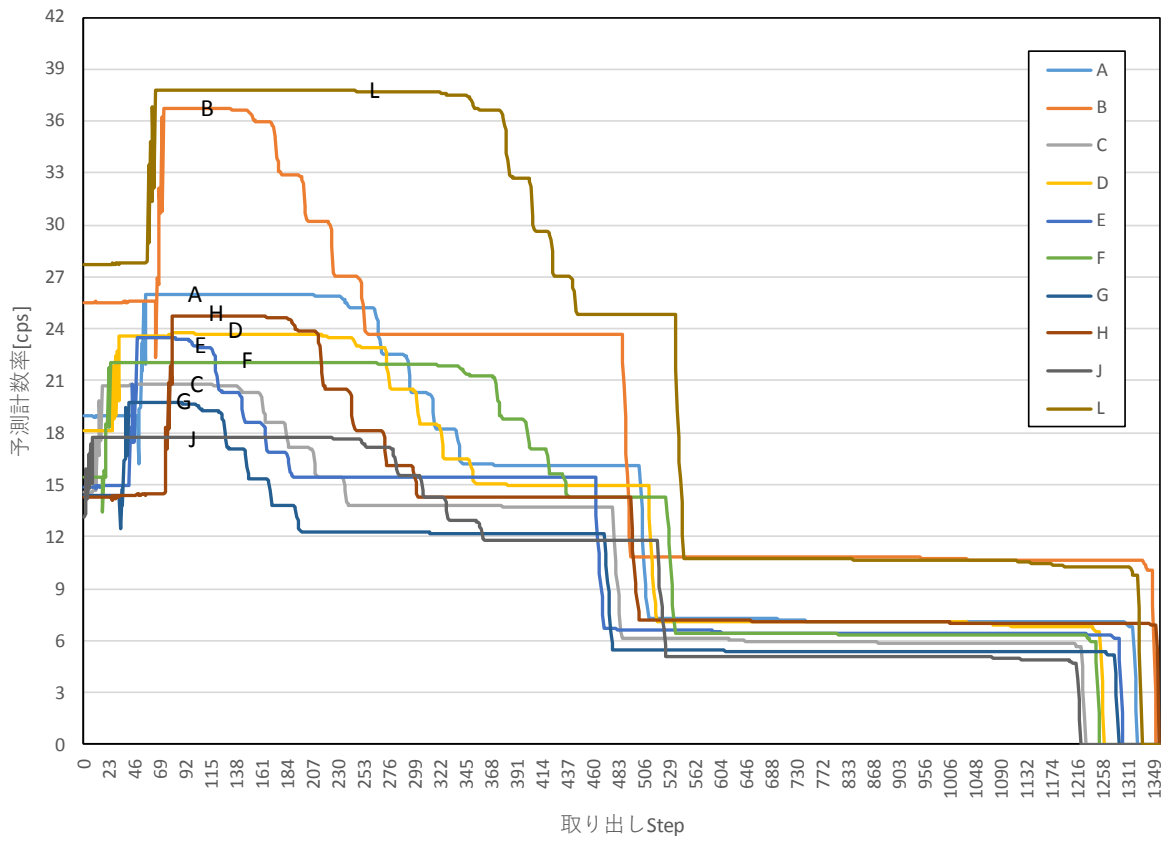


図 3-41 燃料取り出し作業時の予測計数率

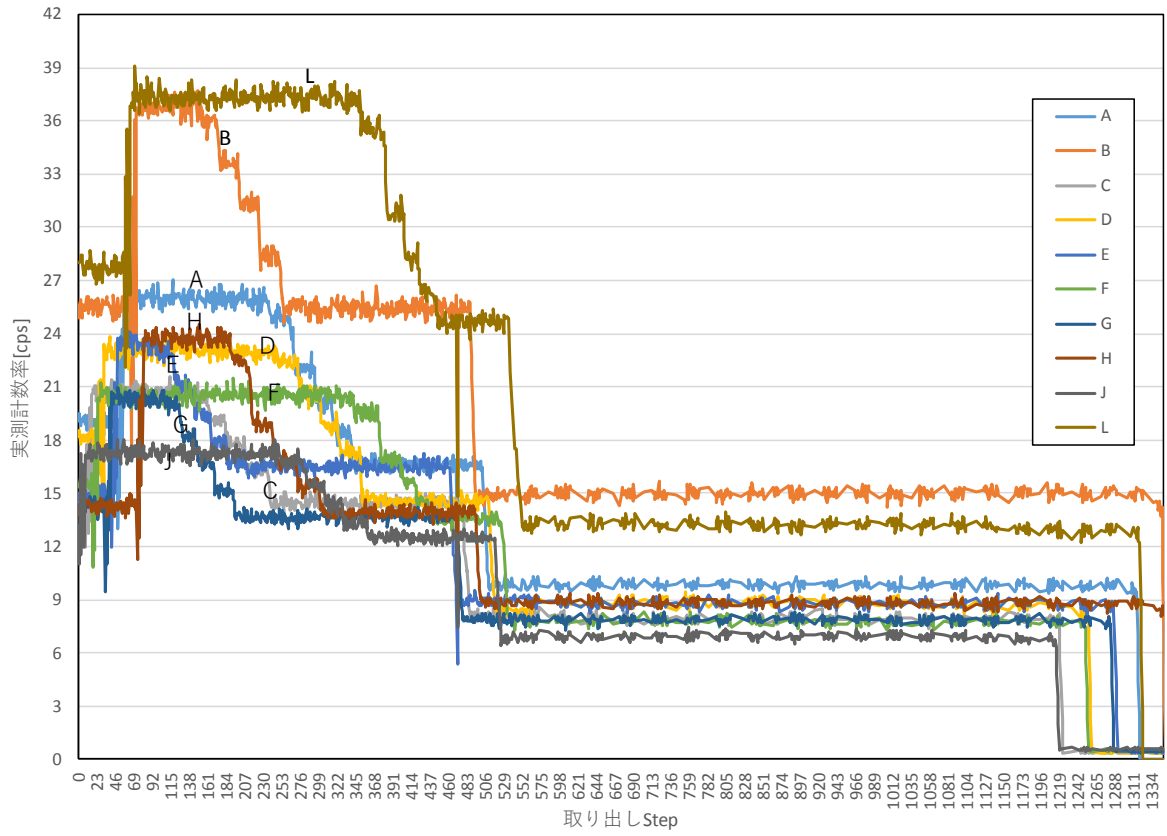


図 3-42 燃料取り出し作業時の実測計数率（各ステップの1分間平均値）

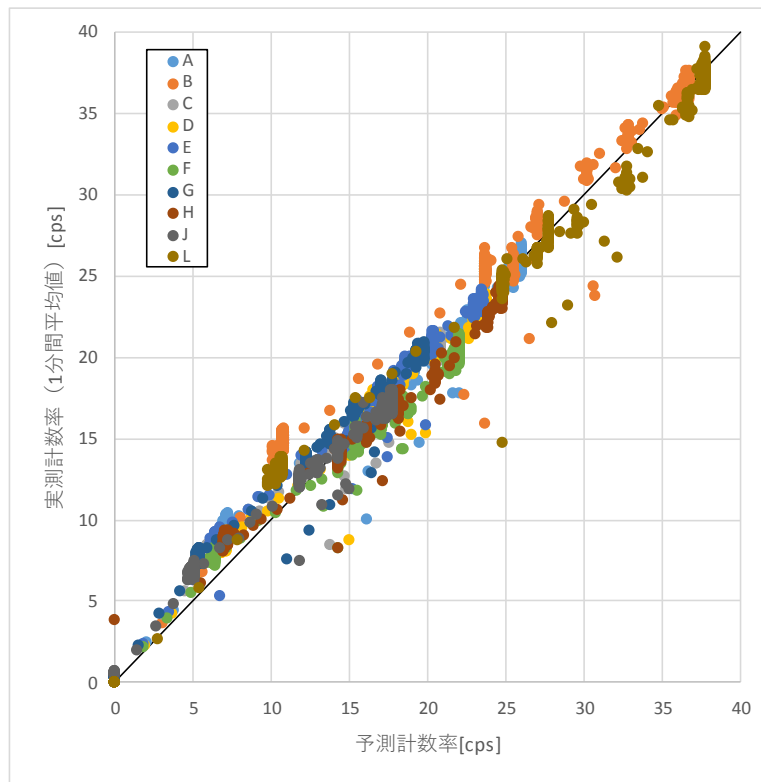


図 3-43 計数率の比較（予測 vs. 実測）

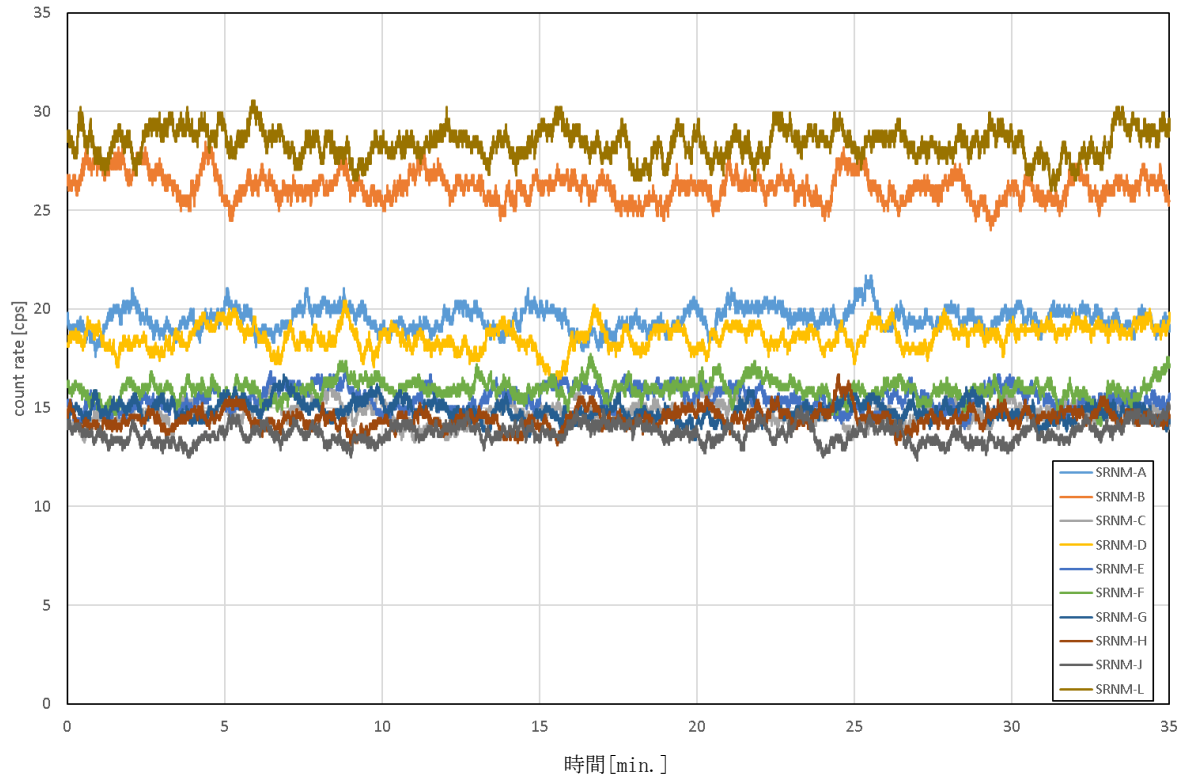


図 3-44 燃料取り出し作業前の計数率時系列

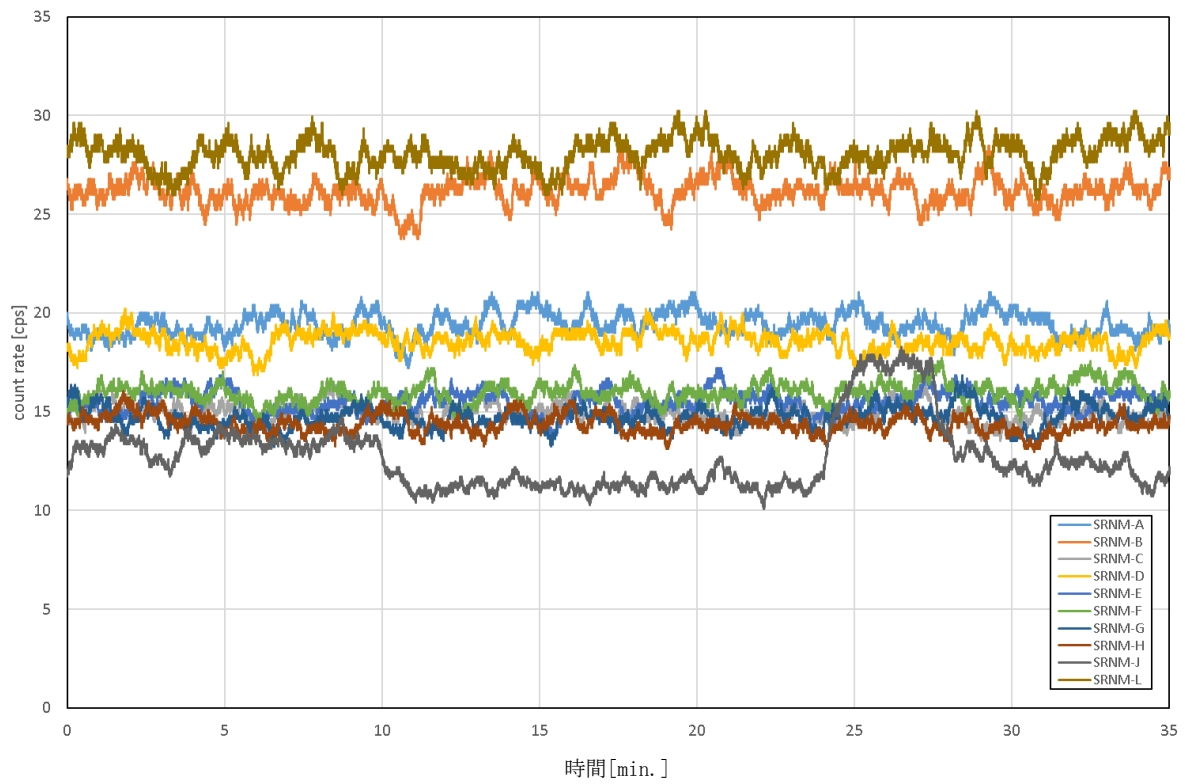


図 3-45 燃料取り出し作業時の計数率時系列の一例 (ステップ 1 ~ ステップ 3)

3.4.2 核計装データの分析（再委託先：福井大学）

3.4.1 のデータ採取計画の作成段階において、反応度計の運用経験等に基づき、計画の妥当性などの確認を行った。また、核計装データ採取する場合には、データ分析に関わる業務担当の代理者が、採取現場に行き実務を行った。

採取した核計装データを用いて、ノイズ処理モデル（簡易フィードバック理論等）を用いた核計装データの分析を行った。

実機信号を用いた評価でも知られている三つの反応度計モデルそれぞれで未臨界度を同程度に評価できることを確認した。これは前年度に実施した模擬信号による評価結果と同じである。

今回採取した原子炉停止中の SRNM 信号データを観察することによって、燃料や制御棒の操作中・操作外に関わらず、信号間の相関が極めて小さいことが分かった。これは空間的な核的結合効果が弱く、すなわち、炉心で一つの未臨界度を示すことが難しいことを表している。今後の研究では、未臨界度の提示の方法（SRNM 周りの小領域をそれぞれ監視するか、炉心で一つの解に集約するか等）について検討することとした。

また、それぞれの信号値は平均値周りで常に揺らいでいるわけではなく、比較的長い周期で絶対値の大きいノイズ成分があることも分かった。当ノイズが未臨界度評価に影響することが考えられるため、今後の研究では、ノイズ源を特定するなどして、ノイズの影響の低減を検討することとした。

(1) 反応度評価結果

燃料取り出し作業時の計数率時系列信号（ステップ 1 ～ ステップ 3）より、反応度（未臨界度）を評価した結果を図 3-46（仮置き燃料に隣接する SRNM）、及び図 3-47（仮置き燃料から離れた SRNM）に示す。

仮置き燃料に隣接する SRNM の反応度は、燃料の取り出しや挿入に伴う局所的な反応度変化の影響を受け、反応度が大きく変化している。一方、仮置き燃料から離れた SRNM の反応度は、局所的な反応度の変化の影響を受けず、ほぼ一定値（ただしノイズの影響は受ける）を示している。仮置き操作による炉心への反応度の投入量は微々たるものである。すなわち、図 3-46 のような反応度の大きな変化は、仮置き操作によって、実効的な外部中性子源強度が変化しているにもかかわらず、外部中性子源強度を一定としていることに起因しており、適切に校正する必要があることを示唆している。

なお、評価に当たっては、初期の反応度が AETNA で評価した反応度と一致するように外部中性子源強度を調整している。また、評価は IPK、EKF、SRE それぞれで行っているが、評価結果はいずれも同等であり、重なって 1 本の線に見える。すなわち、IPK、EKF、SRE のいずれでも同等の評価が行えることが分かる。ただし、評価パラメータ（時定数等）

を調整することで、評価結果は変わり得るため、ノイズ減衰特性や時間応答などを考慮し、今後の研究において適切な評価パラメータを設定する必要がある。

(2) 中性子源強度の自動補正方法の検討

図 3-45 で示したような、特定の検出器の応答が特異的に変化をし、それ以外の検出器による応答に目立った変化がない場合は、炉心反応度はほとんど一定で、特異的な応答を示した検出器への実効的な中性子源強度が変化したと考えることができる。

すると、次の関係式によって、変化後の実効的な中性子源強度を求めることができる。

$$\frac{n_{\text{after}}}{n_{\text{before}}} = \frac{Q_{\text{after}}}{Q_{\text{before}}} \quad (6)$$

ここで、

Q_{before} : 特異的応答変化前の実効的な中性子源強度

n_{before} : 特異的応答変化前の計数率

Q_{after} : 特異的応答変化後の実効的な中性子源強度

n_{after} : 特異的応答変化後の計数率

図 3-48 に補正の実施判断に供する反応度の差分監視方法の概略図を示す。差分監視では、過去の 120 秒分の反応度評価結果に対し、初期 44.5 秒分の平均値と後期 44.5 秒分の平均値の差の監視を行う。その差が別途定めるクライテリアを超過していた場合は、(6) 式を用いて補正を行う。なお、中間の 31 秒分は、燃料集合体の取り出しや装荷時に燃料有効長部が炉心内を通過（移動）しているおおよその時間である。

図 3-49 から図 3-51 に、図 3-46 の反応度評価結果に対して、クライテリアを $0.5\% \Delta k$ 、 $1\% \Delta k$ 、 $10\% \Delta k$ とそれぞれ変えて、中性子源強度を自動で補正した反応度評価結果を示す。クライテリアが大きすぎると補正がほとんど行われず、小さすぎると単なるノイズ変化で補正が行われてしまうため、ほどよいクライテリアを設定することが重要である。

【検討結果のまとめ】

仮定や前提条件	実機で採取した信号を基に未臨界監視手法の適用性の検討、課題の抽出を行う。
得られた結果	<ul style="list-style-type: none"> ・実機信号を基にした評価で反応度を評価できることを確認した。 ・中性子源強度について、自動補正方法を検討した。

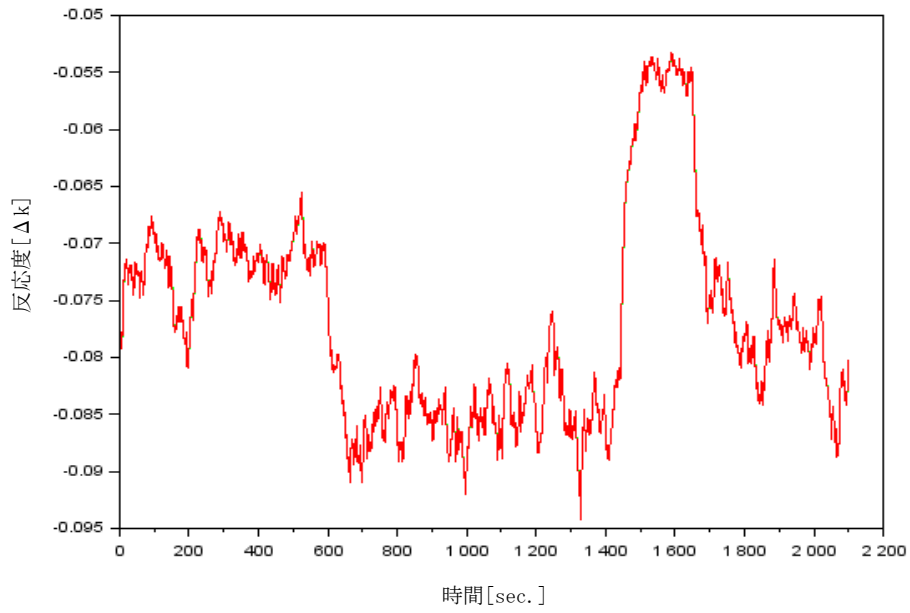


図 3-46 反応度評価結果 (SRNM-J、ステップ 1 ～ ステップ 3)

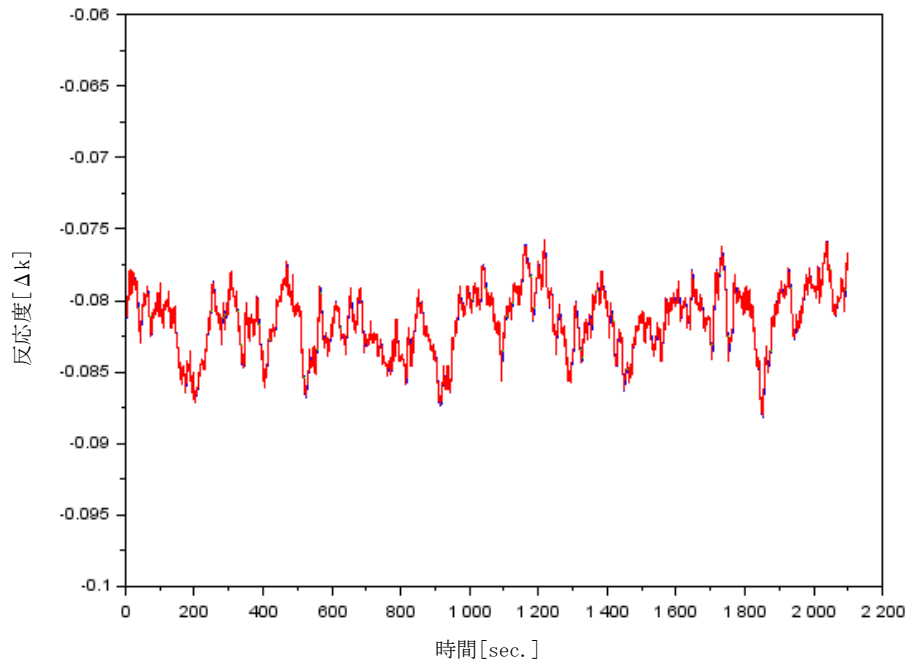


図 3-47 反応度評価結果 (SRNM-L、ステップ 1 ～ ステップ 3)

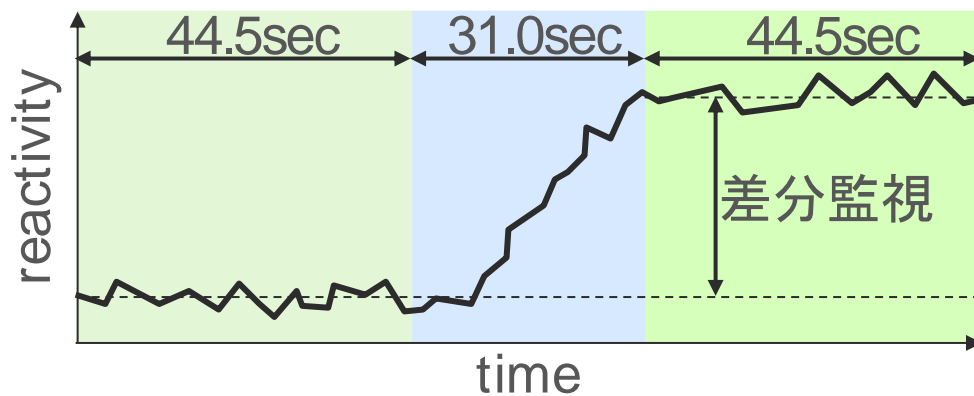


図 3-48 反応度の差分監視の概要

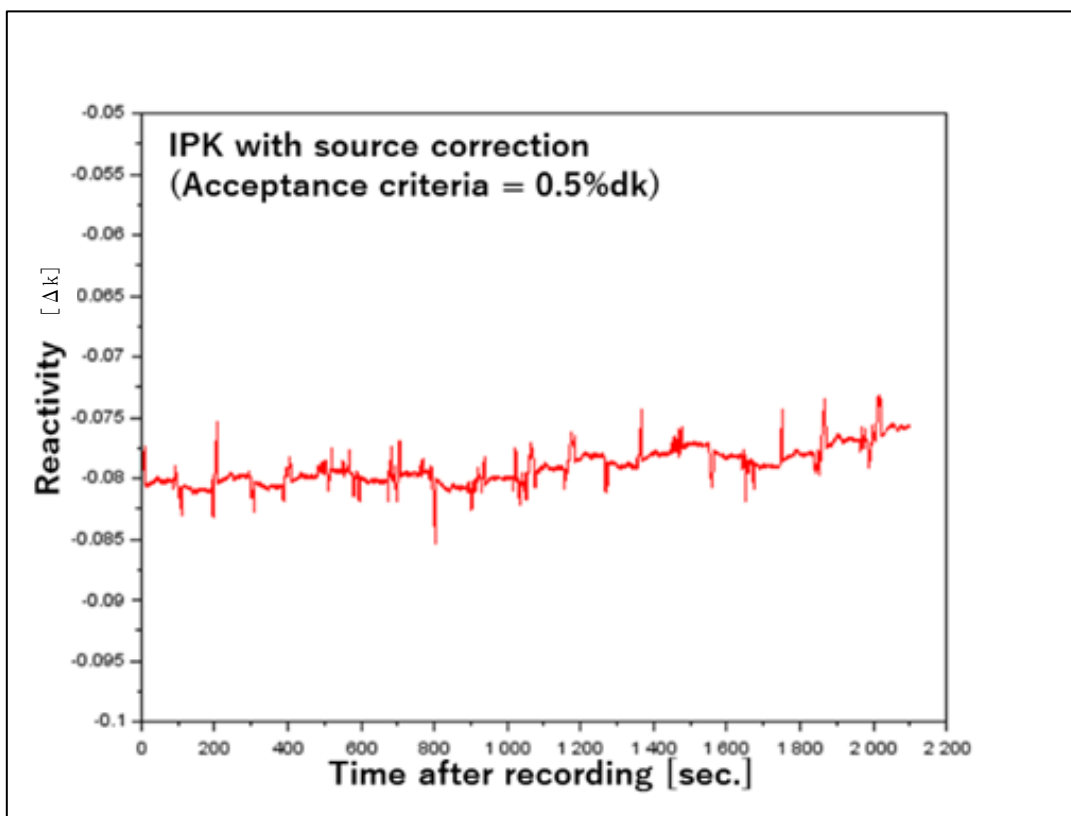
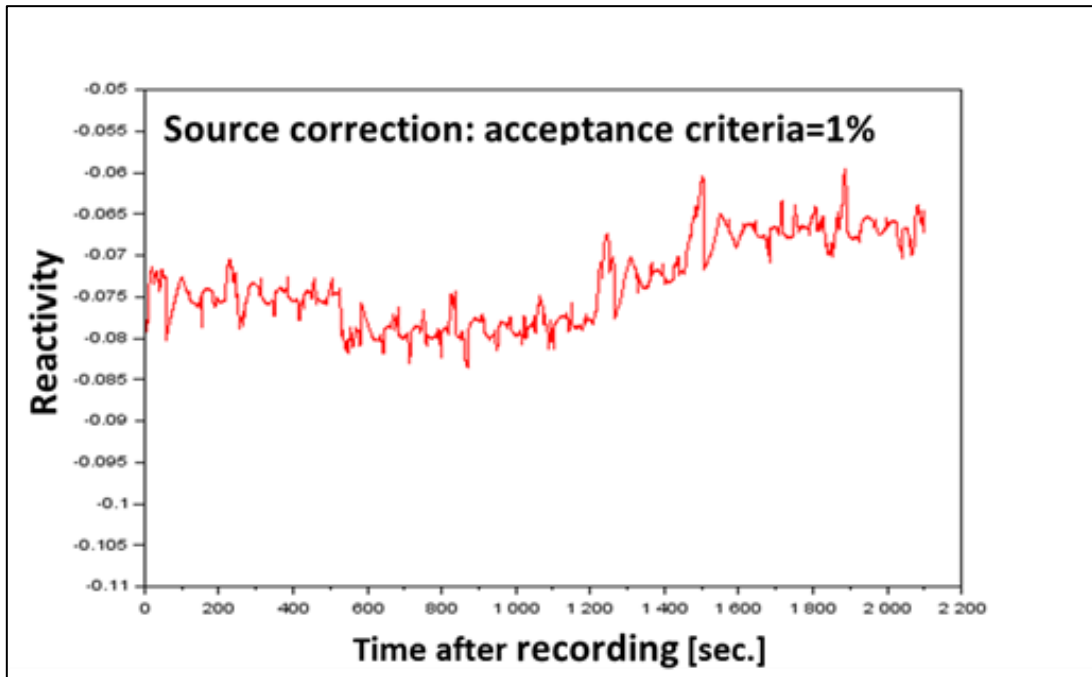
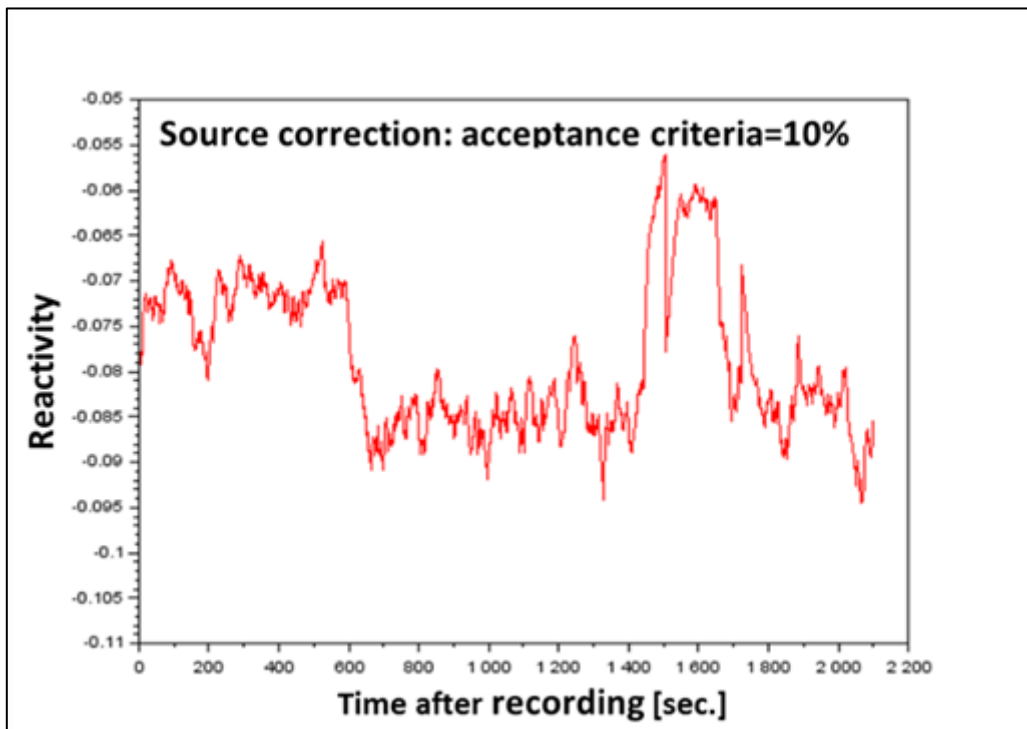


図 3-49 SRNM-J processed by source correction with 0.5% criterion



☒ 3-50 SRNM-J processed by source correction with 1% criterion



☒ 3-51 SRNM-J processed by source correction with 10% criterion

3.5 未臨界監視装置の検証 (H29)

3.5.1 実機適用上の課題整理及び解決策の検討

平成 28 年度に採取した停止中 BWR 核計装データを、同じく平成 28 年度に試作した未臨界監視装置試作機で評価することで、未臨界監視装置を実機に適用する上での課題を整理するとともに、その解決策を検討した。なお、評価に当たっては、実機試験を模擬した仮想システムと試作機間の接続試験を行い、実機適用性を確認した。

(1) 仮想システムと試作機間の接続試験

接続試験は、実機の過渡現象記録装置 NATRASS を模擬した仮想システムと、未臨界監視装置試作機を有線 LAN によって接続し実施した。図 3-52 に接続試験の様子を示す。なお、サイバーテロ対策として、仮想システムから未臨界監視装置試作機への片方向通信方式を採用している。接続試験は表 3-7 に示す四つのケースで行った。

ケース 1 は、図 3-45 に示した志賀原子力発電所 2 号機の燃料取り出し中に NATRASS で採取した実機信号（約 600 信号、100Hz、35 分）を 1 秒ごとに 1 秒分のデータを仮想システムから試作機に伝送し、試作機はその信号を受け取り、反応度計モデルによって未臨界度を準リアルタイムに評価し、その結果を画面に出力できるかどうかを確認する試験である。図 3-53 にケース 1 の確認の様子を示す。試験の結果、所期の信号データが伝送され、未臨界監視装置試作機が適切に信号処理できていることを確認した。

ケース 2 は、AETNA による制御棒誤引き抜きをシミュレーションした、模擬信号（SRNM10 信号、100Hz、73 秒）をケース 1 と同様に伝送及び信号処理し、未臨界状態から臨界近接の過程で、臨界近接警告が適切に表示されるかどうかを確認する試験である。図 3-54 にケース 2 の確認の様子を示す。試験の結果、臨界近接警告が適切に表示されることを確認した。

ケース 3 は、ケース 1 と同じ実機信号を伝送及び信号処理している最中に、未臨界監視装置試作機の電源を強制的に落とす、CPU をクラッシュさせる（CPU 使用率を強制的に 100%にする）、メモリをクラッシュさせる、LAN ケーブルを抜く等を行い、仮想 NATRASS の挙動(CPU 使用率等)に影響するかどうかを確認する試験である。図 3-55 にケース 3 の確認の様子（CPU をクラッシュ）を示す。試験の結果、試作機の異常状態が仮想 NATRASS に影響しないことを確認した。

ケース 4 は、ケース 1 と同じ実機信号を繰り返し長時間伝送及び信号処理することで、長時間の運用に耐え得るかどうかを確認する試験である。図 3-56 にケース 4 の確認の様子を示す。約 2 時間、連続して動作させたが、試験開始時と終了直前でコンピュータの処理負荷が有意に増大していないことを確認した。

これらの結果から、本研究の開発手法に実機適用性があることを確認した。

表 3-7 接続試験の概要

ケース	確認内容	判定
1	NATRASS で採取した実機信号を受信し、適切に処理が行えるかを確認する。	合格
2	未臨界から超臨界に急激に炉心状態が変わる中で、反応度（未臨界度）の評価及び臨界近接警告の処理が適切に行われることを確認する。	合格
3	未臨界監視装置に異常が生じても、NATRASS 側に問題を起こさないことを確認する。	合格
4	長時間 NATRASS で採取した全実機信号を受信し、適切に処理が行えるかを確認する。	合格



図 3-52 接続試験の様子

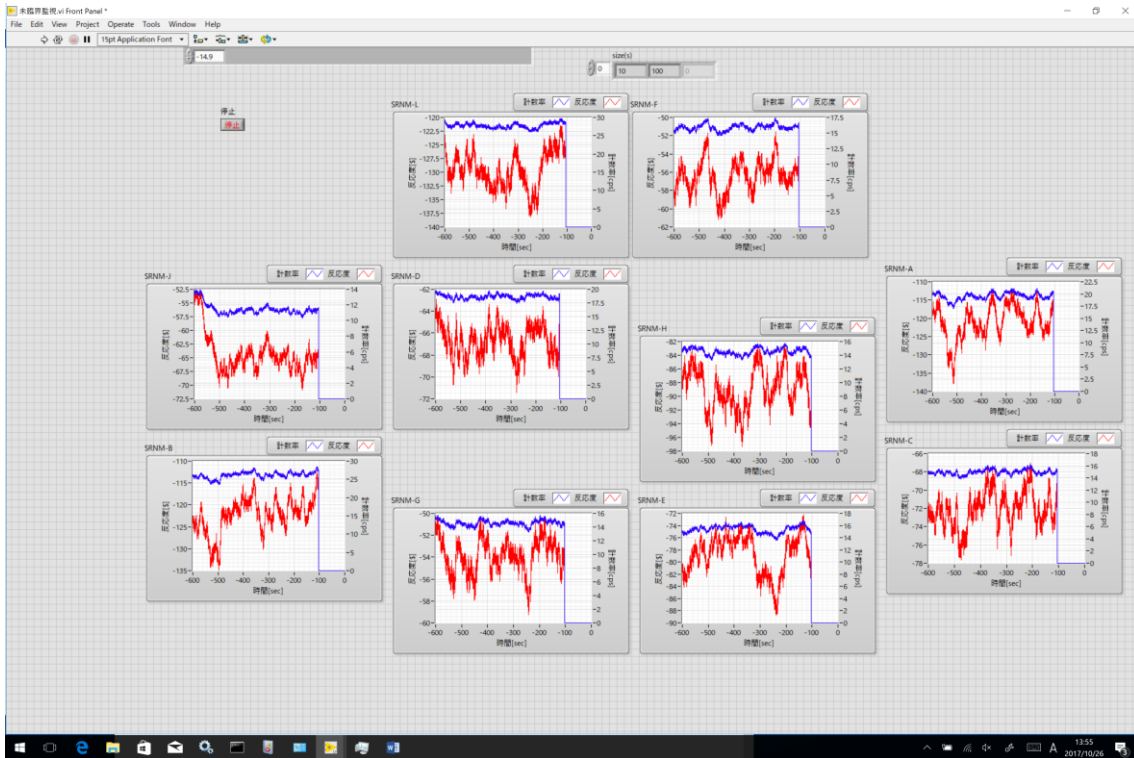


図 3-53 接続試験ケース 1 の様子

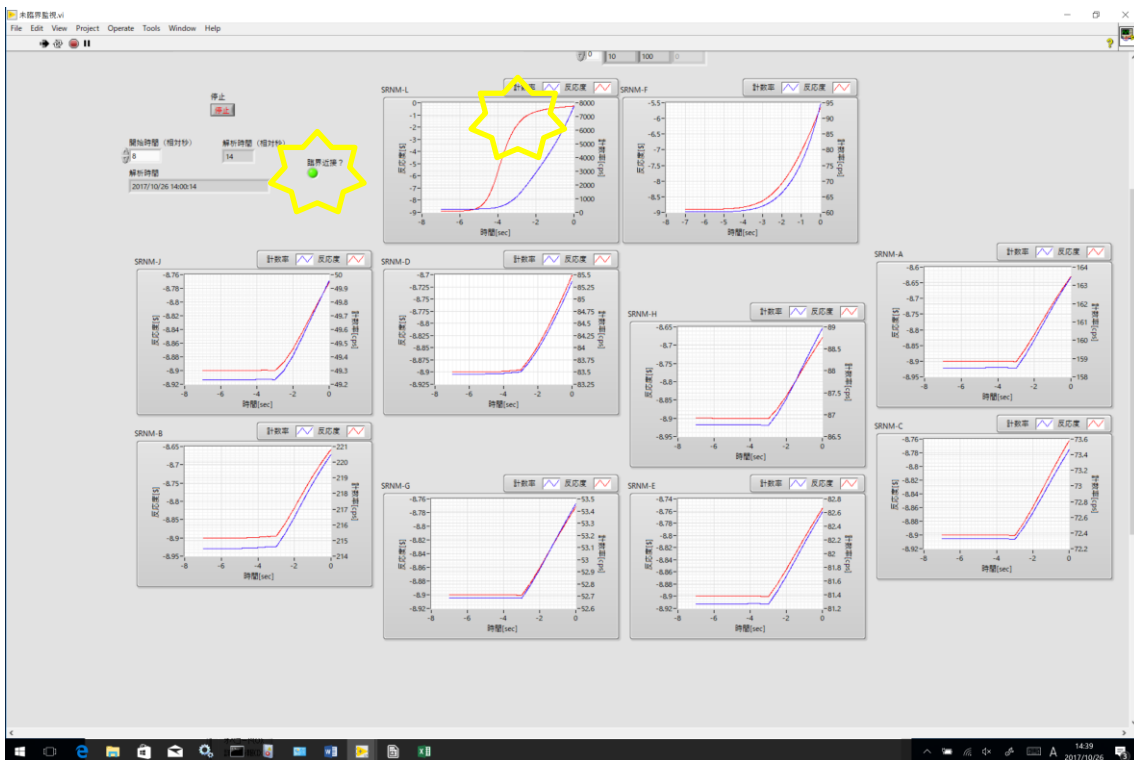


図 3-54 接続試験ケース 2 の様子

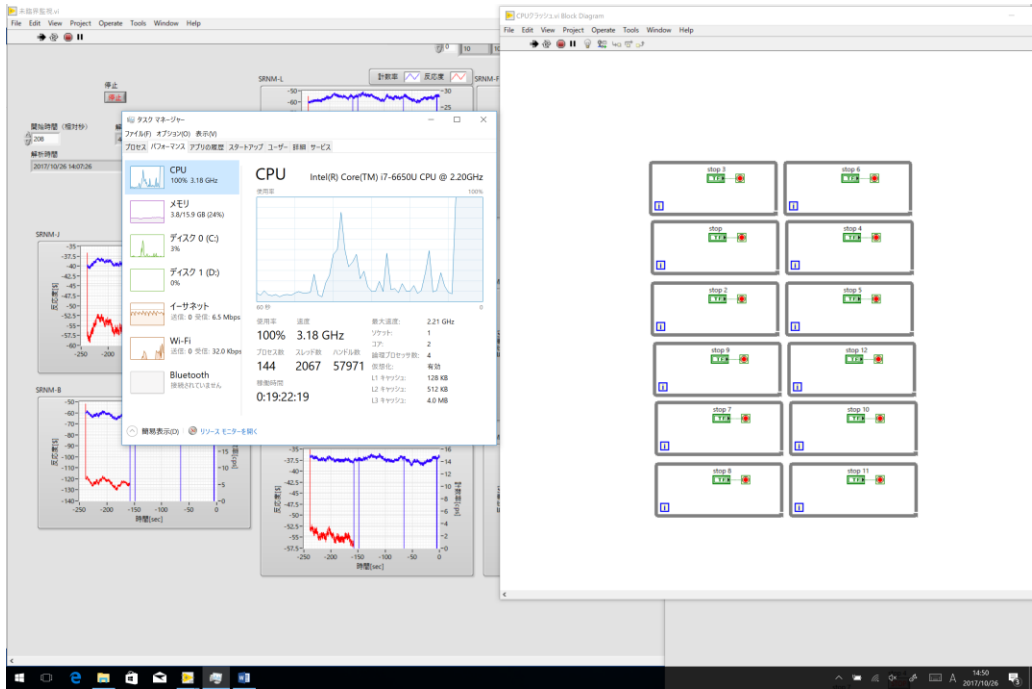


図 3-55 接続試験ケース 3 の様子

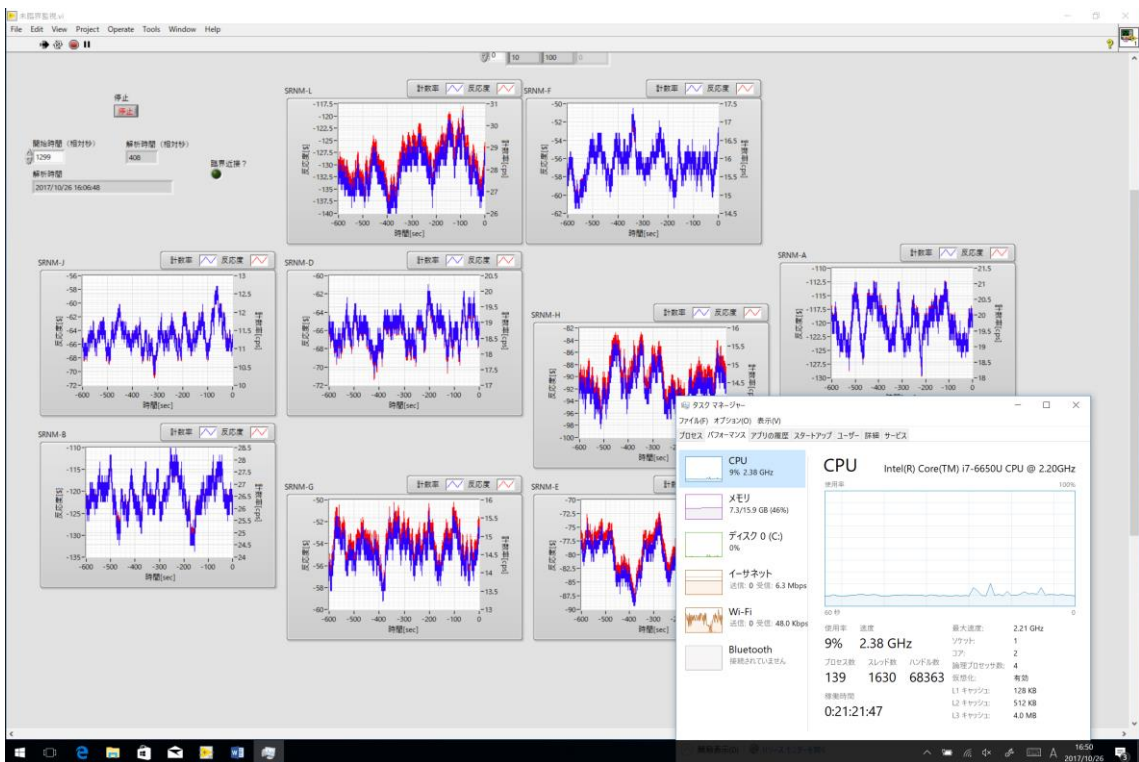


図 3-56 接続試験ケース 4 の様子

(2) 実機への適用上の課題及び解決策

停止中の原子炉は、核的な空間結合力が弱く、局所的な反応度変化の影響が炉心の全体的な特性に与える影響が小さい。すなわち停止中の未臨界度評価では、検出器ごとに未臨界度評価結果が大きく異なることがある。検出器それぞれの評価結果は、各検出器周りの局所的な未臨界度特性を表していると考えられることから、臨界安全の観点で有益であり、監視に活用する。一方、運転員が炉心状態を把握するために、尤もらしい唯一の未臨界度を評価することも重要である。そこで、複数の検出器応答より尤もらしい一つの反応度に集約する方法の検討を行った。

まず、エネルギー-1群時間依存の中性子拡散方程式より、

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla D(\vec{r}, t) \nabla \phi(\vec{r}, t) - \Sigma_a(\vec{r}, t) \phi + (1 - \beta) v \Sigma_f(\vec{r}, t) \phi(\vec{r}, t) + \sum_m \lambda_m C_m(\vec{r}, t) + Q(\vec{r}, t) \quad (7)$$

$$\frac{dC_m}{dt} = -\lambda_m C_m(x, t) + \beta_m v \Sigma_f(\vec{r}, t) \phi(\vec{r}, t) \quad (8)$$

(7)、(8)式両辺を検出器 j 領域で積分し、領域 j の体積 V_j で割ることで、(9)式を得る。

$$\frac{1}{v} \frac{d\phi_j}{dt} = - \left(\frac{\int_{S_j} \vec{J}(\vec{r}, t) d\vec{S}}{V_j} + \Sigma_{a,j}(t) \phi_j(t) \right) + (1 - \beta) v \Sigma_{f,j}(t) \phi_j(t) + \sum_m \lambda_m C_{m,j}(t) + Q_j(t) \quad (9)$$

$$\frac{dC_{m,j}}{dt} = -\lambda_m C_{m,j}(t) + \beta_m v \Sigma_{f,j}(t) \phi_j(t) \quad (10)$$

ここで、領域 j における中性子増倍率 $k_j(t)$ を以下のように定義する。

$$k_j(t) = \frac{v \Sigma_{f,j}(t) \phi_j(t) V_j}{\Sigma_{a,j}(t) \phi_j(t) V_j + \int_{S_j} \vec{J}(\vec{r}, t) d\vec{S}} \quad (11)$$

(11)式で定義した $k_j(t)$ を(9)式に代入し、 $\phi_j(t) = n_j(t)v$ の関係を利用して整理することで、各領域 j について以下のような動特性方程式を得ることができる。

$$\frac{dn_j}{dt} = \frac{\rho_j(t) - \beta}{\Lambda_j(t)} n_j(t) + \sum_m \lambda_m C_{m,j}(t) + Q_j(t) \quad (12)$$

$$\rho_j(t) \equiv 1 - \frac{1}{k_j(t)} \quad (13)$$

$$\Lambda_j(t) \equiv \frac{1}{v \Sigma_{f,j}(t)} \quad (14)$$

次に、体系全体の中性子増倍率 \bar{k} を以下で定義する。

$$\bar{k}(t) = \left(\sum_j v \Sigma_{f,j}(t) \phi_j(t) V_j \right) / \left\{ \sum_j \left(\Sigma_{a,j}(t) \phi_j(t) V_j + \int_{S_j} \vec{J}(\vec{r}, t) d\vec{S} \right) \right\} \quad (15)$$

ここで、(11)式で定義した $k_j(t)$ を用いることで、 $\bar{k}(t)$ は次のように表現し直すことができる。

$$\bar{k}(t) = \left(\sum_j v \Sigma_{f,j}(t) \phi_j(t) V_j \right) / \left\{ \sum_j \left(\frac{v \Sigma_{f,j}(t) \phi_j(t) V_j}{k_j(t)} \right) \right\} \quad (16)$$

さらに、(16)式両辺について逆数を取り、両辺から 1 を引いて整理することで以下の式を導出することができる。

$$\bar{\rho}(t) = \left(\sum_j \rho_j(t) v \Sigma_{f,j}(t) \phi_j(t) V_j \right) / \left(\sum_j v \Sigma_{f,j}(t) \phi_j(t) V_j \right) = \left(\sum_j \rho_j(t) \frac{n_j V_j}{\Lambda_j(t)} \right) / \left(\sum_j \frac{n_j V_j}{\Lambda_j(t)} \right) \quad (17)$$

$$\bar{\rho}(t) \equiv 1 - \frac{1}{\bar{k}(t)} \quad (18)$$

一方、(12)式において両辺を全領域について積分し式変形することで以下の式を得る。

$$\frac{dn_{all}}{dt} = \frac{\bar{\rho}(t) - \beta}{\Lambda(t)} n_{all}(t) + \sum_m \lambda_m C_{m,all}(t) + Q_{all}(t) \quad (19)$$

$$\bar{\Lambda}(t) = \left(\sum_j n_j V_j \right) / \left(\sum_j \frac{n_j V_j}{\Lambda_j(t)} \right) = \left(\sum_j \frac{\phi_j(t)}{v} V_j \right) / \left(\sum_j v \Sigma_{f,j}(t) \phi_j(t) V_j \right) \quad (20)$$

以上をまとめると、各検出器それぞれで求められた反応度 $\rho_j(t)$ について、核分裂中性子生成率 $P_j(t) = v \Sigma_{f,j}(t) \phi_j(t)$ を重みとして平均化する。中性子増倍率 $k_j(t)$ の場合には、重み付け調和平均($k_j(t)$ の逆数について重み付け平均)することとなる。このように求められた平均反応度 $\bar{\rho}(t)$ は、複数ある検出器信号を足し合わせた合計値 $n_{all}(t)$ に対して逆推定した反応度と等価となる。

これを基に、3.1(3)制御棒誤引き抜き解析のシミュレーション解析結果（各検出器の計数率及び反応度）を用いて、それぞれの計数率を足し合わせた合計値から反応度を評価する方法（計数率縮約）とそれぞれの反応度を重み付け平均処理する方法（反応度縮約）で尤もらしい反応度を評価し、AETNA による反応度と比較した。図 3-57 に中央位置制御棒を誤引き抜きさせた場合の結果を、図 3-58 に周辺位置制御棒を誤引き抜きさせた場合の結果をそれぞれ示す。

中央位置制御棒の誤引き抜きは、添加した正の反応度量が大きいことも関係するが、誤引き抜き制御棒から全ての検出器が比較的近いことがあり、全部の検出器が同様の反応度を示していることが分かる。この場合は、縮約はそれほど重要ではない。一方、周辺位置制御棒の誤引き抜きでは、誤引き抜き制御棒に近い検出器から順番に反応度が増加していることが分かる。この場合、検出器ごとに反応度が異なるため、縮約が重要となる。なお縮約方法の違いについては、丸め誤差程度の僅かな差異はあるものの同等であり、上述の理論通りであることを確認した。また AETNA の反応度との比較においては、反応度の立ち上がりなどに違いは確認できるものの、実用上は問題ない違いといえる。よって、上述した二つ縮約方法はいずれも尤もらしい一つの反応度を評価できるといえる。

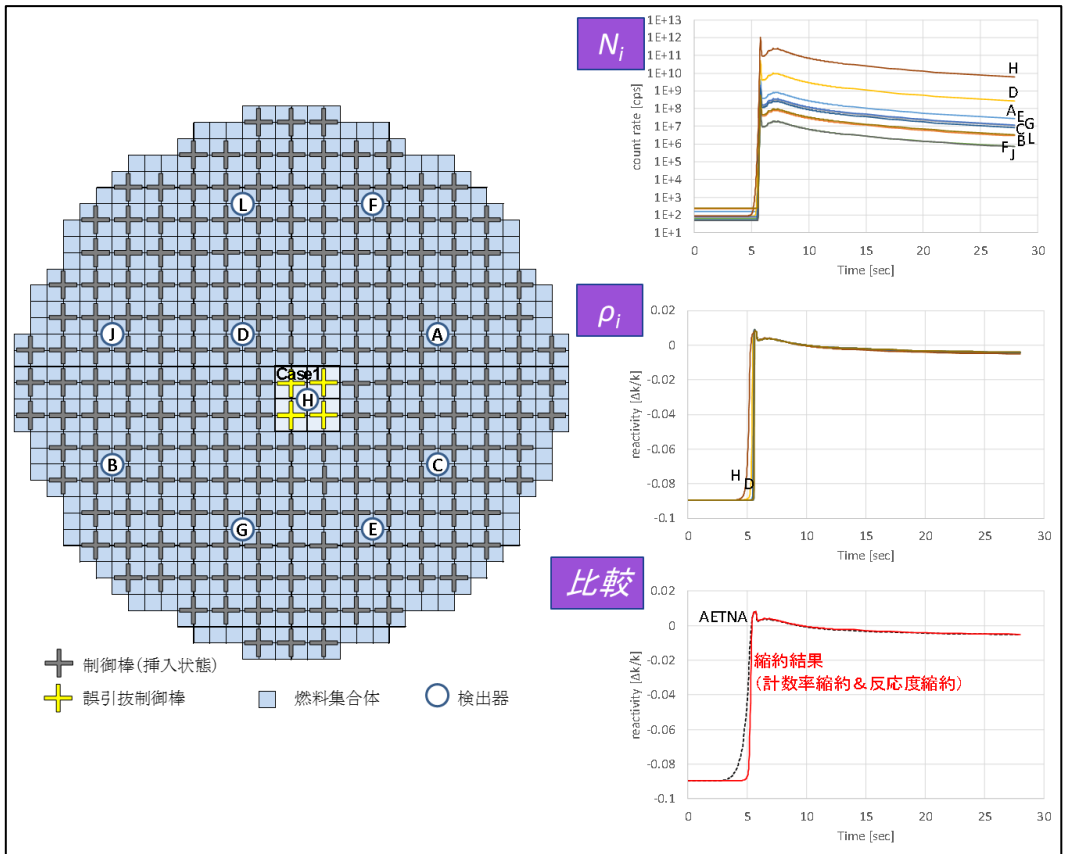


図 3-57 縮約方法の比較 (中央位置制御棒の誤引き抜き)

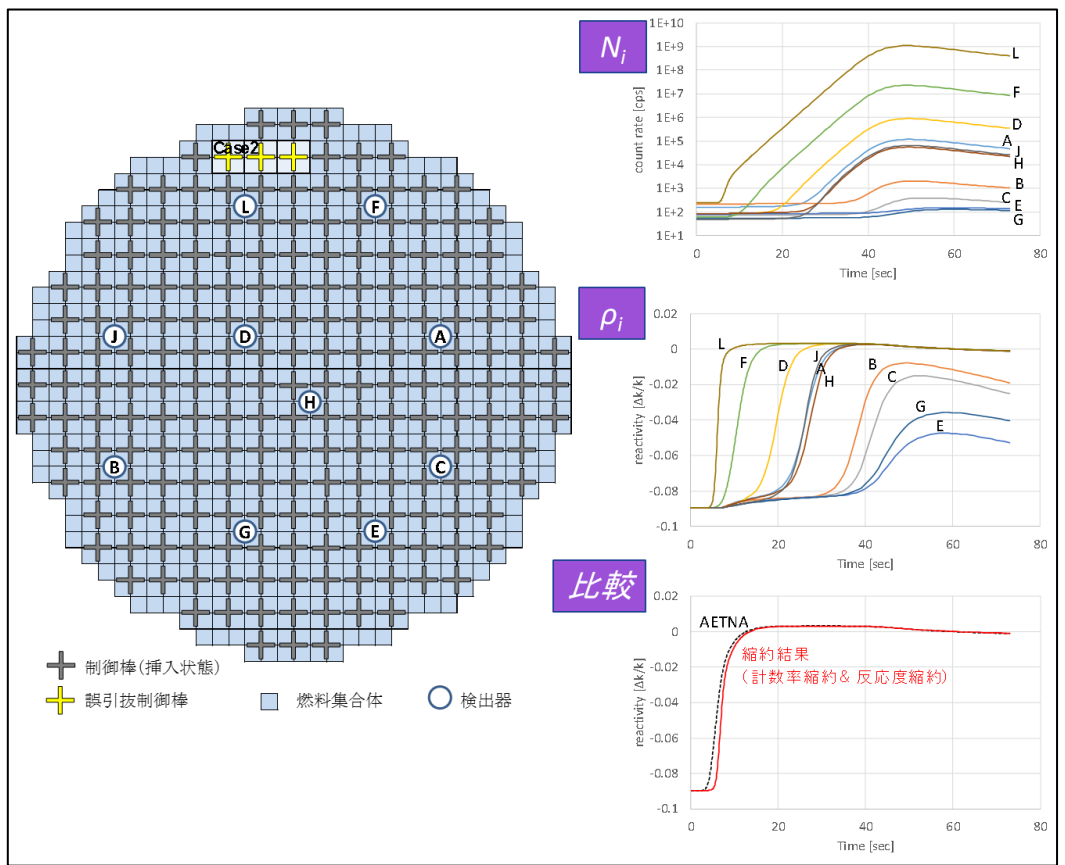


図 3-58 縮約方法の比較 (周辺位置制御棒の誤引き抜き)

3.5.2 目標達成度の評価（再委託先：福井大学）

目標指標値に対する達成度を評価した。また、開発した手法の既設燃料プールやサイクル関連施設、研究炉、将来炉への適用性について GNF-J へ助言した。達成度が低い指標については、反応度計の開発経験等に基づき、課題を整理して最適な改善案をまとめた。

(1) 実機適用上の課題整理及び解決策の検討

① 多重フィルタの適用性について

従来から逆動特性方式の反応度計で十分な実績にある 1 次遅れフィルタを多重化することにより、反応度評価の時間遅れを大きくすることなく、高周波成分のノイズを効果的に除去できることを示してきた。この検討を進め、1 次遅れフィルタを 5 重程度重ねることで良好なフィルタ性能を得ることができる見通しが得られた。この原理を次に示す。

1 次遅れフィルタは次式で与える

$$n_k = n_{k-1} + \frac{T_s}{T_s + \tau} (\hat{n}_k - n_{k-1}) \quad (21)$$

ここで、 n_k 及び n_{k-1} はフィルタ済みの計数率で τ は時間遅れを示す。多重フィルタは次式で与える。

$$\begin{aligned} n_{k,1} &= n_{k-1,1} + \frac{T_s}{T_s + \tau} (\hat{n}_k - n_{k-1,1}) \\ n_{k,2} &= n_{k-1,2} + \frac{T_s}{T_s + \tau} (n_{k,1} - n_{k-1,2}) \\ n_{k,3} &= n_{k-1,3} + \frac{T_s}{T_s + \tau} (n_{k,2} - n_{k-1,3}), \text{ and so on.} \end{aligned} \quad (22)$$

最終値 $n_{k,n}$ は反応度計算値が使われる。

時定数を 5 秒とした時のフィルタのボード線図の例を、図 3-59 に示す。なお、ここで時定数の選択は説明のためだけであることを注意が必要である。フィルタを多重化することによって、ノイズフィルタリング性能が向上していることが分かる。

反応度変動の例を図 3-60 に示す。この図から、3 重フィルタ以上の多重フィルタによって、反応度がより滑らかな評価を与える事が分かる。多重化するほど、応答が遅くなるが、5 重フィルタでも時間遅れは 1 秒以内であり、未臨界監視上、問題にはならないと考えられる。これによって、多重フィルタのノイズフィルタリング性能の向上を実証した。

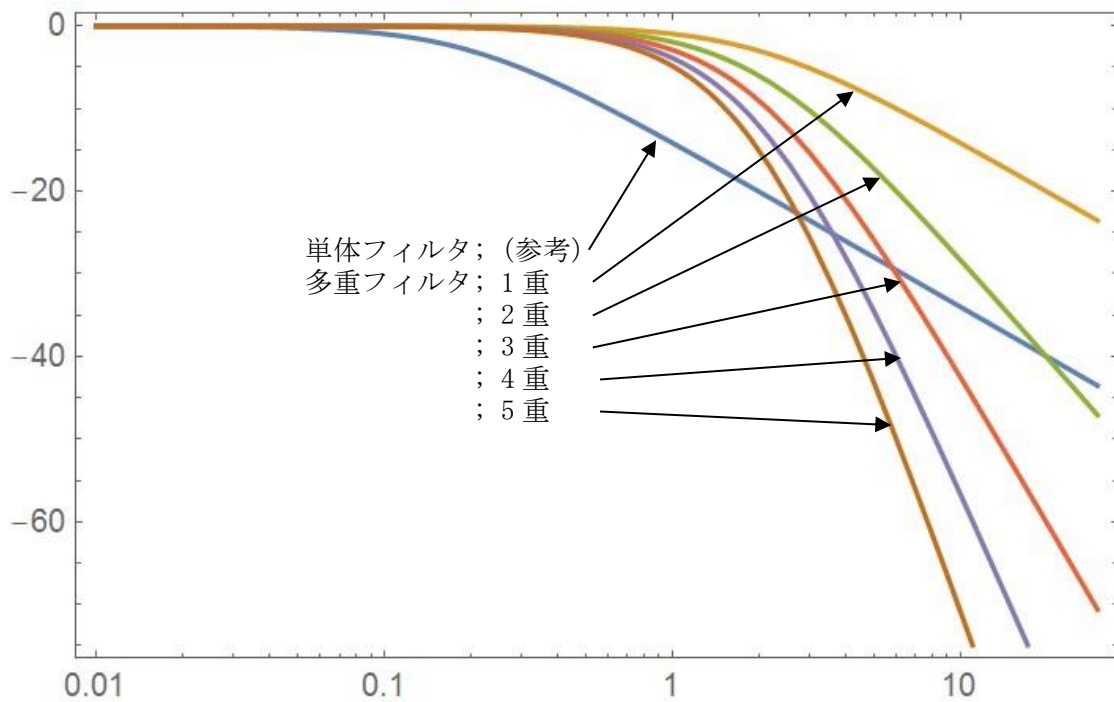


図 3-59 一次遅れフィルタのボード線図の例

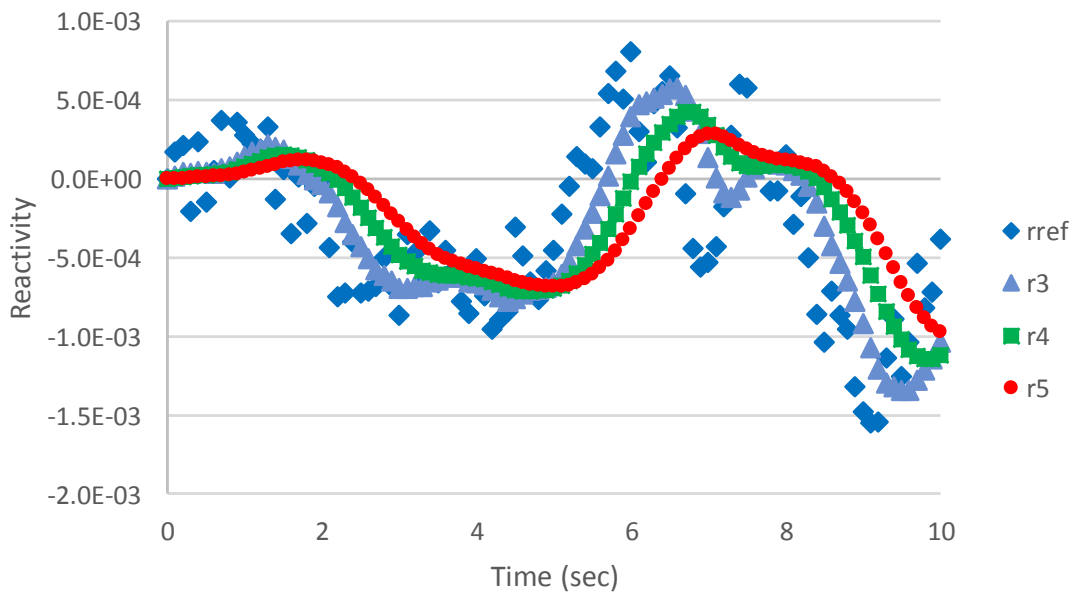


図 3-60 定常条件下の反応度変化の例

(rref:単体フィルタ、r3:3重フィルタ、4r:4重フィルタ、5r:5重フィルタ)

② 拡張カルマンフィルタ方式と単純フィードバック方式の理論的な比較

拡張カルマンフィルタ方式では、事前にシステムノイズや測定ノイズの分散データが必要になるが、実機適用に当たっては十分な評価ができない可能性がある。このため、EKFの動作特性を詳細に調べるとともに、SREとの比較、すなわち、EKFの最適フィード

バックゲインの算出機構とその値を SRE のフィードバックゲインと比較し EKF の特性把握を行った。

カルマンフィルター方式も結局は SRE と同様に反応度補正を行いながら計算を行っている。その係数を理論的に、誤差の共分散が最小になるように定めているのであるが、反応度評価においてはゲインの変動は小さく、一定値でも可能である。一方、SRE ではゲインは中性子束の値に逆比例したゲインとなっており、このため、ゲイン調整係数を採用したことにより、カルマンフィルターと同等の性能を発揮していることが分かる。

図 3-61 に、強制的にゲインの値を一定値にしてカルマンフィルター方式による反応度評価と、SRE 方式による反応度評価を比較したものを示す。双方の反応度は重なっており、カルマンフィルター方式の結果がほとんど見えない。多少カルマンフィルターによる反応度振れ幅は小さいが、これはゲインを少し調整すれば同等の結果が得られる。

具体的な計算手順は SRE 方式の方が単純で、カルマンフィルター方式のような事前の共分散パラメータの設定が不要であること、フィルター性能の調整が簡単にできることから、発電所等では使用しやすいと思われる。この観点では従来の逆動特性方式も同じである。

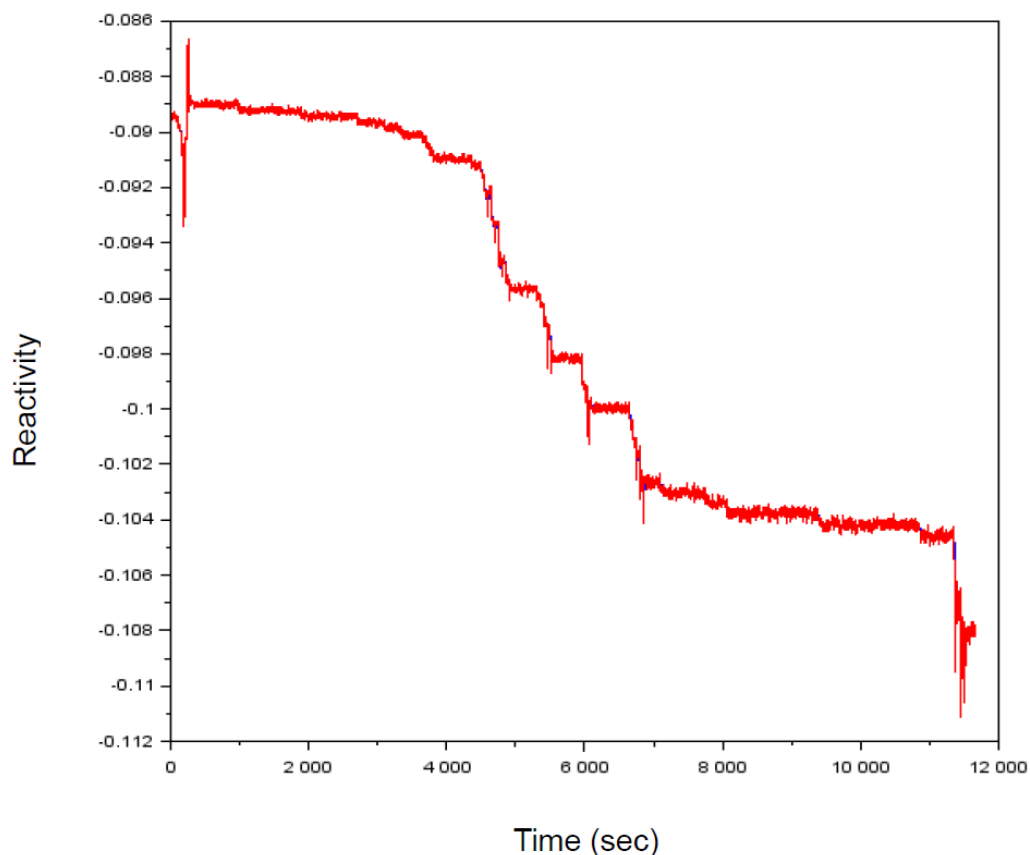


図 3-61 カルマンフィルターと SRE の反応度比較

(2) 目標指標値に対する達成度の評価

達成目標として重要な項目は次のようなものが挙げられる。

- 全検出器ごとに連続的に反応度を監視できること
 - ✓ 反応度評価精度解析値との誤差 $1\%dk/k$ 以下
 - ✓ 十分な即応性があること
 - ✓ 静的な反応度と動的な反応度評価が可能であり、双方に矛盾がないこと
- 異常な反応度添加がある場合にはそれを検知できること
- 異常な反応度添加に対し、警報を発すること
- 発電所現場における実時間監視が可能であること
- 計算機異常時の応答

上記の目標は、3.5.1(1)仮想システムと試作機間の接続試験結果を踏まえ、得られた成果、今後の検討事項として表 3-8 に整理した。これに示される通り、未臨界監視装置開発という観点からの達成度は十分満足できるものであると判断できる。今後を検討すべき点は、現状の基本的な性能を実機に適用するに当たり、さらなる性能、使用上の利便性等の向上を図るものである。これらの事項について、及び、開発した手法の既設燃料プールやサイクル関連施設、研究炉、将来炉への適用性について、GNF-J へ助言した。

表 3-8 目標達成度評価結果

炉物理	信号処理	運用	ターゲット	目標指標	注記
○	○			未臨界監視中の Q の変化に対応できること	自動補正、手動補正
○	○			複数検出器から尤もらしい未臨界度を評価できること	縮約
○	○			反応度の評価誤差が既知の基準値と比べて $1\% \Delta k/k$ 以下であること	反応度評価手法の妥当性確認
○	○			既知の反応度計モデルを使用できること	IPK、EKF、SRE
○	○	○		停止中 BWR において異なる炉心条件に対しても連続して未臨界度を評価できること	市松模様
○	○	○		他の方法での測定が可能な時に、校正ができること。	*今後の検討
○	○	○		炉物理試験ではペリオド法などでも反応度測定が行えること	*同上
○	○	○		各反応度計モデルの計算パラメータを設定できること	*任意入力、自動設定アルゴリズム
	○	○		実機信号によって開発手法の適用性を確認すること	志賀 2 (ABWR) - SRNM
	○	○		実用上、十分なノイズフィルタ性能を有していること	EKF、多重フィルタ
	○	○		10 個の SRNM 信号をリアルタイムに処理できること	確認済
	○	○		一時的にデータ欠損が生じても監視を継続できること	データ補完
	○	○		データ伝送及び未臨界監視処理が長時間の運用に耐えられること	*実際の運用を見越して 1 ヶ月程度。
		○		プラントから未臨界監視装置への伝送は、未臨界監視装置によりプラント側が影響を受けないこと	片方向通信
		○		何らかの不具合で監視に支障が生じた場合、これを検知し自動復旧すること	*今後対応
		○	○	予測値との差異が $2\% \Delta k$ 一定値以上となった場合、所定の作業から逸脱している可能性があることを運転員に知らせめること	*誤操作警報
		○	○	未臨界度が $1\% \Delta k$ を下回った時に、臨界近接状態であることを運転員に知らせめること	臨界近接警報
		○	○	正の反応度が継続する場合警報を出すこと	*臨界近接警報の前に出すイメージ
			○	基本的な操作は GUI 等により直感的に行えること	LabVIEW
			○	現実的なコストで実現できること	計算量/LabVIEW

注) *印は実用機において対応する。

3.5.3 BWR 以外への適用性検討

開発した手法の既設燃料プールやサイクル関連施設、研究炉、将来炉への適用性について、福井大学から受けた助言を踏まえて検討した。

本研究の未臨界監視手法は(1)式で示した原子炉動特性に基づく反応度計モデルによっており、評価原理は極めて単純である。この手法に基づいて未臨界監視する場合に必要な3要素を図 3-62 に示す。

一つ目の要素は、未臨界の監視対象となる中性子増倍体系である。原子炉の炉心または燃料貯蔵プールが代表的なものである。中性子増倍体系は、後述する炉物理定数評価システムによる評価で誤差を小さくするために、体系の性状（燃料集合体及び制御棒などの形状、燃焼に伴う組成変化、冷却材の温度など）をできるだけ詳細かつ正確に把握していることが重要である。性状がよく分かっていない場合、炉物理定数評価システムによる評価での誤差要因となり、それがそのまま未臨界監視時の誤差となり得る。

二つ目の要素は、当該中性子増倍体系の動特性定数や外部中性子源強度など炉物理定数を評価するシステムである。BWR 炉心では3次元炉心シミュレータ AETNA など、既存の解析コードを使用することができるが、マイクロ燃焼モデルなどにより、外部中性子源強度を評価できる機能を備えている必要がある。燃料プール及びサイクル関連施設など、臨界安全管理を適切に行うことで、未臨界が保たれていることを確認している設備に関しては、炉心シミュレータのように詳細に炉物理特性を解析するコードは通常存在しないため、炉物理定数評価システムを開発する必要がある。

三つ目の要素は、中性子増倍体系に設置する中性子検出器である。BWR に限らず、研究炉や商用炉では備えられている中性子検出器を使用することができるが、出力レベルに応じた検出器を用いる必要がある。燃料プール及びサイクル関連施設は上述した通り、適切な臨界安全管理によって未臨界が保たれていると考えられているため、中性子検出器を設置し未臨界状態を監視するようなことは行われていない（ただし、ガンマ線を計測して万一の臨界超過を知らしめる施設もある）。そのため、燃料プール等で中性子検出器がない施設で未臨界監視を行うには、工事を行い適切な位置に中性子検出器を設置する必要がある。

これらを踏まえて、未臨界監視手法の BWR 以外への適用性を検討した結果を表 3-9 にまとめる。

研究炉、将来炉及び PWR は、炉内の性状を詳細に把握でき、さらに高度な炉物理定数評価システム及び中性子検出器を備えていると考えられ、容易に未臨界監視手法を適用可能と考えられる。ただし、PWR への適用性は、基本的には BWR と同様にあると考えられるが、

中性子検出器は BWR が炉心内に多数（ABWR は 10 個）あるのに対し、PWR は炉心外に少数（2 個）あるのみという違いがある。未臨界監視では、検出器の位置が監視精度に影響を与えるため、精度を向上させるためには、検出器の数を増やすことが重要と考えられる。

燃料貯蔵プール及びサイクル関連施設は、その構成要素である燃料部材の形状や組成（燃焼度）を詳細に把握することができる。しかし、炉物理定数評価システム及び中性子検出器がないため、監視を行うにはそれぞれの開発及び設置が必要となる。これらの開発及び設置は技術的には難しくないが、導入費用に対する安全性向上の効果を検討し、導入の是非を判断すべきだと考えられる。

最後に、福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出し時にこの未臨界監視手法を適用する場合について検討した。図 3-63 に概要を示す。

中性子増倍体系については、燃料デブリが対象となる。各機関の調査報告や報道等によって、燃料デブリの性状が事故直後に比べると少しずつ明らかになりつつあるが、なお不明な点が多い。未臨界監視手法を適用するには、安全上、不明な点を保守側に仮定することが考えられる。燃料デブリについては引き続き性状の調査が行われるので、燃料デブリ取り出し時には最新の知見を収集及び整理して、より正確に評価することが重要である。炉物理評価システムに関しては、事故によって炉心が著しく損傷したことから、事故前に使用していた炉心シミュレータを使用できないことは明らかである。そのため、燃料デブリに適用できる評価システムを開発する必要がある。また、未臨界監視をする上で重要な外部中性子源強度の評価においては、中性子増倍体系が不明確なため、評価誤差が大きくなることが考えられるため、炉雑音処理（例えば Feynman- α 法）の結果で較正するなどして、より正確な炉物理定数が得られることが期待される。中性子検出器に関しては、事故によって事故前に使用していた検出器が使用できないことは明らかなので、新規に設置する必要がある。未臨界で中性子束レベルが低い状態では、それぞれの中性子検出器がカバーできる領域が小さいのに加えて、位置依存性が大きいため、評価精度を上げるには多くの検出器を可能な限り燃料デブリ近くに設置することが重要である。しかしながら、事故に伴う炉内構造物や高い放射線などの影響で、設置場所が限定されることに加えて、設置工事に難航が予想されるので注意が必要である。

上記をまとめると、現状では福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出し時にこの未臨界監視手法を適用するのは難しい。しかしながら、各機関で行われている燃料デブリの性状や中性子検出器の研究開発が進めば、この未臨界監視手法を適用することが可能となり得る。また、この研究以外でも、デブリ取り出し時の未臨界監視手法が検討されているため、デブリ取り出し時には、複数の手法によって監視することで、それぞれの手法のメリットを活かして、確実に臨界超過を防ぐことが重要だと考える。

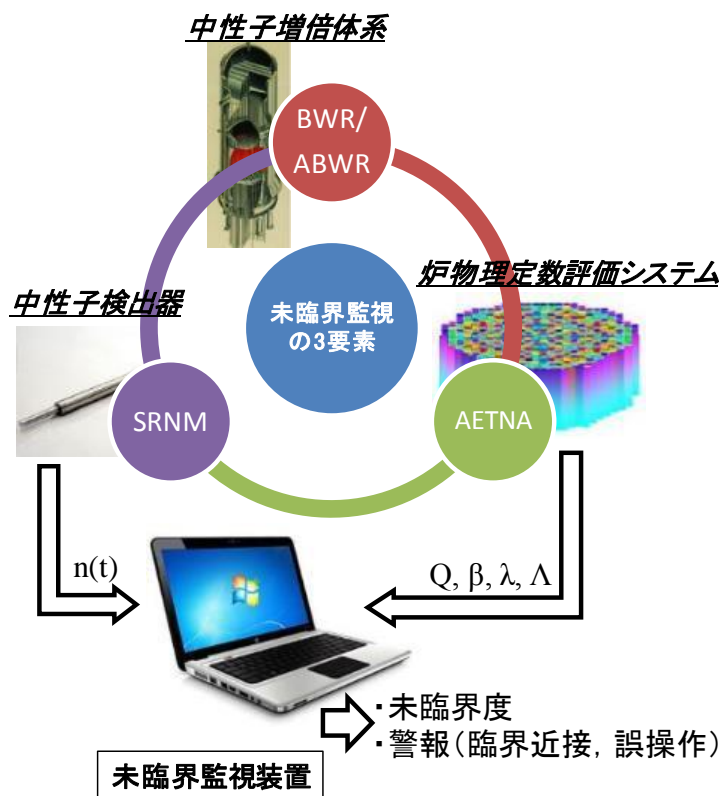


図 3-62 未臨界監視の 3 要素

表 3-9 未臨界監視手法の適用性判定

	中性子増倍体系	炉物理定数 評価システム	中性子検出器
BWR	◎ 性状を把握	◎ 開発済み	◎ 設置済み
研究炉及び将来炉	◎ 性状を把握	◎ 開発済み	◎ 設置済み
PWR	◎ 性状を把握	◎ 開発済み	○ 設置済み (要追加)
燃料プール及びサイ クル関連施設	◎ 性状を把握	○ 要開発	○ 要設置 (設置容易)
福島デブリ取り出し	△ 性状が不明確	△ 要開発	△ 要設置 (設置困難)

(注) IRIDのHPからCG動画を引用した上で、図を加工処理しています。

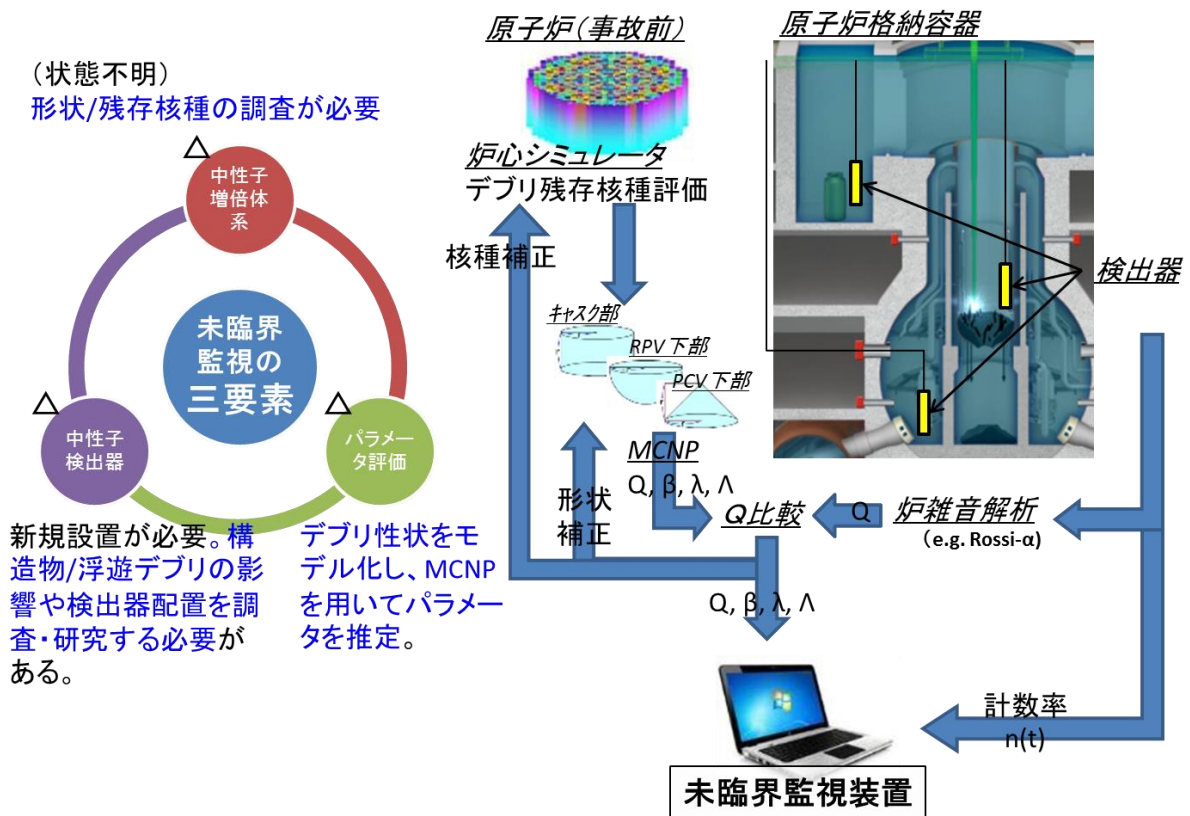


図 3-63 福島第一に未臨界監視手法を適用する場合の概要

3.6 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めた。

研究実施機関間で直接会っての打合せを 15 回開催した (2015/10/16、10/22、11/2、12/18、2016/1/25、2/12、4/7、5/13、6/17、7/8、8/5、2017/1/25、5/26、6/23、7/28)。期間中に再委託先 (福井大学) の業務主任者が 2 回海外長期出張となったが、出張期間中も 3 週間に 1 回程度の PC 画面を共有した音声会議を行うなどして交流を維持した。

実機データの採取に関しては、北陸電力 (協力会社) に協力してもらい、これまで公表されていない原子炉停止中の SRNM 信号データを大量に入手することができた。

接続試験に関しては、日立製作所 (協力会社) と伝送仕様の作成段階から接続試験完了まで、綿密に打ち合わせなどを実施し、未臨界監視手法の実機適用性を確認することができた。

実機に適用する上で、課題であった複数検出器の集約方法については、名古屋大学遠藤知弘助教に助言をもらったことで、適切な集約方法を得ることができた。

4. 結言

この研究では、初年度は、GNF-J の新しい中性子源強度の評価ができる 3 次元炉心シミュレータと組み合わせ、IPK 及び EKF といった新旧の反応度評価手法と比較し、新たな簡易フィードバック理論に基づくデジタル反応度計の未臨界監視装置への適用に向けた手法の開発を行った。2 年度は、初年度に開発した手法を基に、未臨界監視装置を試作するとともに、検証に必要な BWR の実機信号を採取した。最終年度は、試作した未臨界監視装置の BWR への適用性を確認するとともに、炉心以外（プール等）への適用性も確認した。以上、3 カ年計画の全業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

今後は、この研究の開発手法を搭載した未臨界監視装置を実機プラントに適用することで、原子力発電所の安全性向上及び研究成果の社会還元に貢献できると考えている。実機プラントに適用すべく、未臨界監視装置の信頼性向上に関する取り組みを継続するとともに、原子力発電事業を持つ電力会社に採用に向けた提案を行っていききたい。

参考文献

- [1] 中野誠, 島津洋一郎, 橋本憲吾, 他, 原子力施設に対する未臨界度測定装置に関する技術開発, 革新的実用原子力技術開発費補助事業 平成 16 年度成果報告書概要版, (2005)
- [2] M. Watanabe, et al., “Measuring the Photoneutrons Originating from $D(\gamma, n)H$ Reaction after the Shutdown of an Operational BWR,” J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 46(12), pp. 1099 – 1112, (2009)
- [3] Y. Shimazu, et al., “Subcriticality monitoring with a digital reactivity meter.” J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 40(11), pp. 970 – 974, (2003)
- [4] T. U. Bhatt et al., Estimation of sub-criticality using extended Kalman filtering technique, Annals of Nuclear Energy 60 (2013) 98-105
- [5] Y. Shimazu, “A simple procedure to estimate reactivity with good noise filtering characteristics,” Annals of Nuclear Energy, Vol. 73, pp. 392 – 397, (2014)
- [6] 株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン「炉心核熱水力解析システム 燃料集合体核特性計算コード AETNA について」, GLR-005 AETNA 編
- [7] Xingjie Peng et al., Comparison of reactivity estimation performance between two extended Kalman filtering schemes, Annals of Nuclear Energy 96 (2016) 76-82
- [8] Yoichiro Shimazu et al., Theoretical comparison of performance using transfer functions for reactivity meters based on inverse kinetic method and simple feedback method, Journal of Nuclear Science and Technology Volume 54 (2017) 481-489