

平成 25 年度

博士 学 位 論 文

内 容 の 要 旨

及 び

審 査 結 果 の 要 旨

(平成 26 年 3 月)

近畿大学大学院

総合理工学研究科

学位論文審査結果の報告書

氏 名 左 近 敦 士

生 年 月 日 昭 和 62 年 2 月 23 日

本 籍 (国 籍) 大 阪 府

学位の種類 博 士 (工 学)

学位記番号 工 第 205 号

学位授与の条件 学位規程第5条該当
(博士の学位)

論 文 題 目 パワースペクトル解析による
加速器駆動炉の未臨界度監視手法開発
に関する研究

審 査 委 員

(主 査)	大 澤 孝 明	
(副主査)	橋 本 憲 吾	
(副主査)	渥 美 寿 雄	
(副 査)	野 上 雅 伸	

論文内容の要旨

現在、加速器駆動未臨界炉 (Accelerator-Driven System) の研究開発が世界各国で活発に進められている。ADSにおいて炉心の未臨界度は、臨界安全性の裕度だけでなく加速器ビーム入力に対する炉出力の利得をも支配する。このため、ADSの運転においては炉心の未臨界度を常時監視する必要がある。しかし、現在まで用いられてきた未臨界度モニタリング手法は、ADSの駆動中性子源であるパルス中性子源を一切想定しておらず、ADSへの適用は困難である。本論文は、ADSに対して適用可能な未臨界度モニタリング手法を新たに開発し、その適用性を実験的に検証することを目的とする。本論文は全5章で構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第1章(序論)では、本論文の研究の背景、課題、目的、及び論文構成について述べている。

第2章(D-T中性子源駆動未臨界炉体系におけるパワースペクトル測定)では、臨界体系や定常中性子源下の未臨界体系で採用されてきた従来のパワースペクトル解析法を、パルス中性子源駆動下のADSに対して適用できるようにデータ解析式を理論的に導出し、この解析理論の妥当性を実験的に検証している。ADS体系内に配置した中性子検出器信号の時系列データをパワースペクトル解析の対象とし、1本の検出器信号の自己パワースペクトル密度と2本の検出器信号間の相互パワースペクトル密度を考える。パルス中性子源駆動未臨界炉体系であるADSへの適用を可能とするために、周期的かつパルス状に中性子を供給する中性子源を考慮してこれら自己及び相互パワースペクトル密度を定式化し、この定式に基づくデータ解析手法を提案した。この解析手法の適用性の実験的検証として、京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)の固体減速架台と付設加速器を用いて構築したADS体系においてパワースペクトル測定実験を実施し、本解析手法の妥当性を検討した。測定により得られた自己パワースペクトル密度、及び相互パワースペクトル密度には、原子炉雑音成分と呼ばれる連続した相関成分に加えて、パルス繰り返し周波数の整数倍の周波数点に δ 関数状の鋭い非相関ピーク成分が確認できた。全ての自己パワースペクトル密度には検出器雑音と呼ばれる検出過程に基づく白色雑音成分が確認され、特に高周波数領域では相関成分の周波数特性に白色化が観察された。また、深い未臨界体系の相互パワースペクトル密度にも、相関成分の白色化が高周波数領域で観察された。この白色化は、高速フーリエ変換器の解析精度限界に起因するものであり、高精度の変換器を使用してもADSのような深い未臨界状態の相関成分の解析には限界があることを示している。自己及び相互パワースペクトル密度の相関成分データのみを抽出し、本解析式をこれらデータに最小自乗フィットすることにより即発中性子減衰定数と未臨界度を得た。ただし、この相関成分の解析は、周波数全域が白色化する深い未臨界体系では実行不可能であった。一方、自己及び相互パワースペクトル密度の非相関ピーク点のみを抽出し、本解析式をこれらデータに最小自乗フィットすることによっても即発中性子減衰定数と未臨界度を得た。非相関ピークの波高は相関成分に比べて二桁以上高いため、白色化の影響は無視できる。このため、深い未臨界体系に対しても解析を実施することができた。パルス中性子源固有の非相関ピークの存在が、非常に深い未臨界体系に対してもスペクトル解析を可能にしている。以上の結果から、パルス中性子源を考慮したパワースペクトル解析法の妥当性と深い未臨界に対する優れた適用性を確認できた。本パワースペクトル解析法は、フィットする理論式が一次遅れ系の簡単な関数型であることから、極めて複雑な理論式を採用するFeynman- α 法に比べて優位である。一方、安定的で強靱な未臨界度監視の観点からは、非線形最小自乗フィッティングの回避が望ましい。この実用上の観点から、最小自乗フィットを用いない未臨界度監視手法の更なる開発が必要である。

第3章(D-T中性子源駆動未臨界炉体系における位相遅れ測定)では、前章でも述べたとおり、未臨界度監視手法に強靱な安定性を持たせるために、非線形最小自乗フィットを排した未臨界度解析手法を提案する。前章では、相互パワースペクトル密度を2本の検出器信号間で定義した。一方、本章では、加速器ビーム電流計信号と中性子検出器信号との間の相互パワースペクトル密度を考える。この複素数である相互パワースペクトル密度の位相の遅れから未臨界度を算出する手法を提案し、実験的検証を実施している。まず、この相互パワースペクトル密度の定式化により、パルス中性子繰り返し周波数の整数倍の周波数点上の位相から即発中性子減衰定数を算術的に得ることが可能であることを示し、非線形最小自乗フィットを要しない新たな解析手法を考案した。この解析手法の妥当性の実験的検証として、KUCAの固体減速架台と付設加速器を用いて構築したADS体系において、本研究で定義した相互パワースペクトル密度の位相測定実験を実施し、パルス中性子繰り返し周波数の整数倍の周波数点上の位相の解析から本手法の妥当性を検討した。

一点炉動特性モデルに基づく本解析によって得られた即発中性子減衰定数は、非物理的な著しい周波数依存性が観察され、高周波数域では負の値となった。この周波数依存性は、パルス状の中性子集団が中性子源から炉心領域へ到達するのに要する時間遅れが原因であると考えた。そこで、この時間遅れを考慮して相互パワースペクトル密度の位相を定式化した。この理論式を採用してデータ解析をすることで、上記の非物理的な周波数依存性はほぼ消え、低周波数領域で得られた即発中性子減衰定数は前章の結果や他の実験値とも一致した。以上の位相データ解析において非線形最小自乗フィットは不要である。実際の加速器駆動未臨界炉における未臨界度の常時監視システムを構築する上で、最小自乗フィットの不要は、本位相解析手法の非常に有利な特徴である。

第4章(核破砕反応中性子源駆動体系におけるパワースペクトル測定)では、より実機に即した実験的検証として、核破砕中性子源を用いたパワースペクトル測定実験を実施している。第2章および第3章の実験は、D-T反応に基づく14MeV中性子源を使用したものであった。本章では、実機と同様、高エネルギー陽子ビームによる核破砕中性子をパルス中性子源として使用している。固定磁場強収束型(FFAG)加速器からの高エネルギー陽子ビームを原子炉に導き、タングステンや鉛ビスマスの核破砕ターゲットをこの陽子ビームで照射した。この実験とデータ解析により、第2章で開発したパワースペクトル解析法の核破砕中性子源駆動下における妥当性を検討している。KUCAの固体減速架台とFFAG加速器を用いて構築した核破砕中性子源駆動のADS体系において、自己及び相互パワースペクトル密度の測定を実施し、これらパワースペクトル密度からの即発中性子減衰定数の決定を試みている。測定により得られた自己パワースペクトル密度及び相互パワースペクトル密度には、D-T中性子源駆動体系による結果と同様、パルス繰り返し周波数の整数倍の周波数点に δ 関数状の鋭い非相関ピーク成分が確認できた。これらピーク点に対して本解析式を最小自乗フィットすることにより即発中性子減衰定数を得ることができた。一方、連続的な相関成分については、D-T中性子源駆動体系と比較すると、高周波数領域における白色化がより顕著になった。このため、相関成分の解析は不可能であった。

第5章(結論)において、本論文のまとめを述べている。

以上の結果より、加速器駆動未臨界炉体系へ適用しうる新たなパワースペクトル解析手法の開発、非線形最小自乗フィットを不要とする新しい位相パワースペクトル解析の提案、中性子源から炉心領域への中性子輸送に起因する時間遅れ効果の定式化など、加速器駆動未臨界炉に対する未臨界度モニタリング手法の高度化を行った。更に、本研究で開発したパワースペクトル解析手法を核破砕中性子源駆動未臨界炉体系の実験へ適用し、より実機に近い条件において有効性の実証を行った。

論文審査結果の要旨

各国で研究が進められている加速器駆動未臨界炉 (Accelerator-Driven System, ADS) は、未臨界のターゲット系に加速器からの陽子ビームを打ち込み、核破砕 (スポレーション) 反応で発生する中性子を利用し大強度中性子源実験装置を開発し、あるいは核種変換により長寿命放射性物質を短寿命化することを目指すものである。ADSの未臨界度は、システムの特性を支配するため、ADSの運転においては炉心の未臨界度の常時監視が必要である。しかし、従来の未臨界度モニタリング手法は、パルス中性子源を想定しておらず、ADSへの適用は困難である。本論文では、ADSに対して適用可能な未臨界度モニタリング手法を新規に開発し、その適用性を実験的に検証したものである。

著者は、まず第1に、臨界体系や定常中性子源下の未臨界体系で採用されてきた従来のパワースペクトル解析法を、パルス中性子源駆動下のADSに対して適用できるようにデータ解析式を理論的に導出し、この解析理論の妥当性を実験的に検証している。D-T中性子源駆動未臨界炉体系内に配置した中性子検出器信号の時系列データを対象として、1本の検出器信号の自己パワースペクトル密度、および2本の検出器信号間の相互パワースペクトル密度を測定している。周期的かつパルス状に中性子を供給する中性子源を考慮してこれら自己および相互パワースペクトル密度を定式化し、この定式に基づくデータ解析手法を提案した。この解析手法の適用性を実験的に検証するため、京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) の固体減速架台と付設コッククロフト型加速器を用いて構築したADS模擬体系においてパワースペクトルを測定し、本解析手法の妥当性を検討した。自己および相互パワースペクトル密度の測定データには、原子炉雑音に基づく相関成分と、パルス繰り返し周波数の整数倍の周波数点に δ 関数状の鋭い非相関ピーク成分が確認できた。全ての自己パワースペクトル密度には検出器雑音 (白色) 成分が観測され、特に高周波数領域では相関成分の周波数特性に白色化が観察された。また、深い未臨界体系の相互パワースペクトル密度にも、相関成分の白色化が高周波数領域で観察された。この白色化は、高速フーリエ変換器の解析精度限界に起因するものであり、高精度の変換器を使用してもADSのような深い未臨界状態の相関成分の解析には限界があることを示している。著者は、自己および相互パワースペクトル密度の相関成分データのみを抽出し、本解析式をこのデータに最小自乗フィットすることにより即発中性子減衰定数と未臨界度を得た。ただし、この相関成分の解析は、周波数全域が白色化する深い未臨界体系では実行不可能であった。一方、自己および相互パワースペクトル密度の非相関ピーク点のみを抽出し、本解析式をこれらデータに最小自乗フィットすることによっても即発中性子減衰定数と未臨界度を得た。非相関ピークの波高は相関成分に比べて二桁以上高く、白色化の影響は無視できるので、深い未臨界体系に対しても解析が可能である。パルス中性子源固有の非相関ピークの存在が、非常に深い未臨界体系に対してもスペクトル解析を可能にしているのである。以上の結果から、パルス中性子源に対するパワースペクトル解析法の妥当性と、深い未臨界に対する適用性を確認した。本解析法は、フィットする理論式が一次遅れ系の簡単な関数型であることから、極めて複雑な理論式を採用するFeynman- α 法に比べて優位に立つと言える。

第2に著者は、強靱かつ安定な未臨界度監視手法を開発するため、非線形最小自乗フィットに依存しない未臨界度解析手法を提案している。前章とは異なり、2本の中性子検出器ではなく、加速器ビーム電流計信号と中性子検出器信号との間の相互パワースペクトル密度を測定し、この複素数相互パワースペクトル密度の位相の遅れから未臨界度を算出する手法を提案し、実験的検証を実施した。まず、この相互パワースペクトル密度の定式化により、パルス中性子繰り返し周波数の整数倍の周波数点上の位相から即発中性子減衰定数を算術的に得ることが可能であることを示し、新たな解析手法を考案した。この解析手法の妥当性の実験的検証として、KUCAの固体減速架台と付設加速器を用いて構築したADS模擬体系において、本研究で定義した相互パワースペクトル密度の位相測定実験を実施し、パルス中性子繰り返し周波数の整数倍の周波数点上の位相の解析から本手法の妥当性を検討している。一点炉動特性モデルに基づく本解析によって得られた即発中性子減衰定数には、非物理的な著しい周波数依存性が観察され、高周波数域では負の値となった。この周波数依存性は、パルス状の中性子集団が中性子源から炉心領域へ到達するのに要する時間遅れが原因であると考え、この時間遅れを考慮して相互パワースペクトル密度の位相を定式化した。この理論式を用いてデータ解析をすると、上記の非物理的な周波数依存性はほぼ消滅し、低周波数領域で得られた即発中性子減衰定数は前章の結果や他の実験値とも一致した。

以上の位相データ解析において、非線形最小自乗フィットが不要であることは、実際の未臨界度の常時監視システムを構築する上で有利な特徴であると言える。

第3に、著者は、より実機に即した実験的検証として、核破砕中性子源を用いたパワースペクトル測定実験を実施している。京都大学原子炉実験所の固定磁場強収束型(FFAG)加速器からの高エネルギー陽子ビームを臨界集合体(KUCA)固体減速架台に導き、タングステンや鉛ビスマス製ターゲットで核破砕中性子を発生させた。この実験データ解析に、上記の解析法を適用し、即発中性子減衰定数を決定し、その妥当性を検討した。測定により得られた自己パワースペクトル密度及び相互パワースペクトル密度には、D-T中性子源駆動体系による結果と同様、パルス繰り返し周波数の整数倍の周波数点に δ 関数状の鋭い非相関ピーク成分が観測された。これらピーク点に対して本解析式を最小自乗フィットすることにより即発中性子減衰定数を得ている。一方、連続的な相関成分については、D-T中性子源駆動体系と比較すると、高周波数領域における白色化がより顕著になった。このため、相関成分の解析は不可能であった。

以上のように、本論文では、①加速器駆動未臨界炉体系へ適用しうる新たなパワースペクトル解析理論式の導出、②非線形最小自乗フィットに依存しない新規の位相ペクトル解析の提案、③中性子源から炉心領域への中性子輸送に起因する時間遅れ効果の定式化により、加速器駆動未臨界炉に対する未臨界度モニタリング手法の高度化の提案を行っている。さらに、④このパワースペクトル解析手法を核破砕中性子源駆動未臨界炉体系の実験へ適用し、より実機に近い条件で有効性の実証を行った。本研究のこれら成果は、今後の世界的な加速器駆動未臨界炉の研究開発に進歩をもたらすものであり、博士(工学)論文に値するものであると認めた。