



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	パルス中性子透過分光法による複数物質定量イメージング手法の開発 [全文の要約]
Author(s)	石川, 裕卓
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13647号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/76977
Type	doctoral thesis
File Information	Hirotaaku_Ishikawa_summary.pdf



博士論文内容の要約

パルス中性子透過分光法による
複数物質定量イメージング手法の開発

Development of quantification imaging method
for multiple substances
by pulsed neutron transmission spectroscopy

北海道大学大学院工学院
量子理工学専攻

石川 裕卓

中性子ラジオグラフィは、バルク試料内部に存在する物質の空間分布を非破壊、in-situ で測定可能であるという大きな特長を持っている。そのため、火工品の検査や原子力材料内の水素分布の定量評価、コンクリート・燃料電池内の水分布の定量評価など、バルク内軽元素の空間分布の定量評価に多く用いられてきている。しかし、中性子ラジオグラフィでは、中性子透過率と物質量の検量線が取得可能な被写体や、流体のように試料内部からの出し入れが可能な被写体の場合にのみ、物質量の定量が可能である。そのため、例えば、試料内部から被写体の出し入れが不可能な実稼働中のリチウムイオン電池におけるリチウムの空間分布の定量評価や、検量線の取得がそもそも困難な燃料デブリ内におけるホウ素の空間分布の定量評価等には適用できていなかった。本研究では、パルス中性子透過分光法に着目し、中性子ラジオグラフィでは定量が困難だった被写体に対して定量イメージングを行うことができる新たな手法の開発を行った。

本研究で開発した手法は、全断面積のエネルギー依存性が物質に固有であることを利用し、評価済み核データから得られる複数物質それぞれの全断面積を用いてスペクトル解析を行うことにより、各物質の定量を可能とするものである。また、本手法で用いるエネルギー領域として、パルス中性子透過分光法の中でも従来用いられていなかったブラッグエッジ領域と中性子共鳴領域の間のエネルギーを選択した。ブラッグエッジ領域より上のエネルギー領域では、測定される透過率スペクトルが原子核一個の全断面積をよく反映するようになる。そのため、評価済み核データを用いたスペクトル解析により物質の量を評価可能となる。また本手法は、中性子共鳴の有無に関わらず定量評価が行える。従って、本手法では共鳴の測定が難しい軽元素の評価も行えることが特長となる。この手法を確立するためには、評価済み核データを用いた複数物質の定量解析手法や、スペクトル解析に使用するエネルギー領域などの検討を行う必要がある。そのため、これらの課題についての検討を行い、パルス中性子透過分光法による軽元素を含む複数物質の定量イメージング手法の確立を目的として、研究を行った。

第1章では、中性子や他の量子ビームを用いたバルク内部の物質定量手法について述べ、中性子透過イメージング手法の利点を説明する。そして、従来の中性子イメージング手法の原理と課題について述べ、本研究で開発する手法の必要性、及び概要を説明する。

第2章では、開発した手法の原理、及び原理実証のために行った実験について述べた。まず開発した手法が、ブラッグエッジや共鳴のないエネルギー領域を使用する理由について、中性子と物質の相互作用の観点から検討した。また、評価済み核データを用いて、中性子透過率スペクトルから複数物質を定量評価する解析方法について検討した。そして、実験で測定された鉄試料と炭素試料及びそれらの積層試料の透過率スペクトルに対し手法を適用した結果より、開発した手法は、軽元素を含めた複数物質の定量評価を行えることを実証した。

第3章では、開発した手法に適した実験体系の構築方法について、北海道大学加速器中性子源（HUNS）の熱中性子源ポートを例として述べた。開発した手法により適切な定量評価を行うためには、透過率スペクトルと評価済み核データから計算した透過率スペクトルが一致している必要がある。そのため、中性子減速材の温度変化や環境中性子の混入等、測定される透過率スペクトルの系統誤差原因となり得る項目を列挙し、HUNS におけるそれら

の影響を調べた。そして、系統誤差の原因となる項目に対し、対策方法を検討し、開発した手法に適した実験体系について述べた。また、構築した実験体系を用いて HUNS において実験を行い、系統誤差の低減を確認した。

第4章では、開発した手法において、評価可能な複数物質の組み合わせに関する検討を行った。開発した手法では、物質により全断面積のエネルギー依存性が異なることを利用して複数物質の評価を行う。しかし、全断面積のエネルギー依存性が似ている物質もあるため、評価が行いにくい物質の組み合わせが存在する。そこで、種々の全断面積エネルギー依存性を持つ物質を用意し、それらを組み合わせて作成した2物質の試料に対して本手法を適用し、その定量精度を評価した。また、物質間の全断面積エネルギー依存性の異なり度合いを、「全断面積形状不一致度」という指標を導入して表現した。様々な2物質試料の定量精度と不一致度との関係を調べることで、開発した手法が評価可能な物質の組み合わせに関する知見を得た。また、ENTAXにより2種類以上の物質を評価可能であることを調べるため、3物質で構成される試料の中性子透過率スペクトルをシミュレーションにより計算し、ENTAXを適用した。そして、ENTAXにより、2種類以上の物質を評価可能であることを示した。

第5章では、開発した手法による定量イメージングの適用結果について述べた。従来の中性子イメージング手法による2元素の定量評価が難しい組み合わせとして、アルミニウムとリチウムの合金を選定し、厚さの異なる階段状試料や同じ厚さで組成の異なる複数の試料を作成した。これらの試料に対し、J-PARC MLF BL10 NOBORUにおいて、平行度の高い中性子ビームを用いることにより、アルミニウムとリチウムの定量イメージング実験を行った。2次元検出器の各ピクセルにおいて得られた透過率スペクトルに対し、本手法を適用することにより、アルミニウムとリチウムのそれぞれの定量イメージング画像を得た。また、解析により得られた値と実際の値を比較することにより、定量精度の評価を行った。その結果、リチウム、アルミニウム共に10%以内の定量精度で評価が行えることを確認し、本手法により、従来の中性子イメージング手法では困難であった軽元素を含む2種類の物質の定量イメージングが行えることを実証した。

第6章では、各章のまとめを行い、本研究の結論を述べた。

本研究では、従来の中性子イメージング手法では困難であった、軽元素を含む複数元素の定量イメージング手法を開発し、その実証を行った。さらに、高精度化のための実験体系や解析方法に関する様々な指針を得た。この研究により、中性子透過イメージングによるリチウムイオン電池内のリチウム空間分布や燃料デブリ内のホウ素空間分布の定量・可視化等へ資することが期待される。