



展 望

TENBO

理工学部会 企画 *

共鳴中性子イメージングの現状



甲斐 哲也

Kai Tetsuya

((独)日本原子力研究開発機構 J-PARC センター)

1 はじめに

(独)日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構が共同で運営する大強度陽子加速器施設(J-PARC)の運転開始により、国内でも世界最大級のパルス中性子源が利用可能となった。現在 J-PARC では、年 2 回の課題公募により国内外の大学や研究機関、企業等の一般の研究者による利用が行われている。このような大強度のパルス中性子源の出現と合わせて、中性子の飛行時間と入射位置を同時に測定可能な 2 次元中性子検出器の開発が進んだことにより、新しい測定手法として、物質との相互作用における中性子エネルギー依存性を利用したパルス中性子イメージング法の開発が精力的に行われるようになってきた。パルス中性子イメージング法は、結晶構造等の空間分布を可視化する“ブラッグエッジイメージング”，磁場情報の空間分布を可視化する“偏極中性子イメージング”，元素密度や温度の空間分布を可視化する“共鳴中性子イメージング”等に大別される。本稿では、このうち“共鳴中性子イメージング”について紹介する。

2 共鳴中性子イメージングの原理

中性子が原子核に入射した際、ある特定のエネルギーでは、中性子の反応確率が極端に大きくなる“共鳴”と呼ばれる現象が生じる。共鳴を起こす中性子のエネルギーは、原子核の構造によって決まるため、共鳴反応が観測されたエネルギーを知ることにより、どのような原子核が試料中に含まれていたかを知ることができる。図 1 に、共鳴中性子イメージング実験の概念図を示す。パルス中性子源は、一定の繰り返し周期(J-PARC では 25 Hz)で、短いパルス状の中性子を発生させている。パルス中性子源

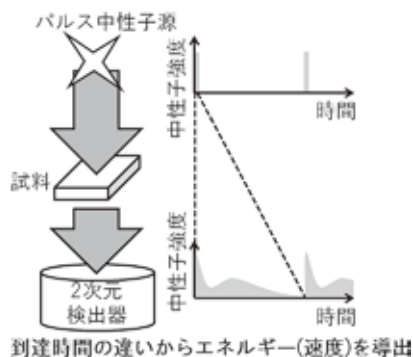


図 1 共鳴中性子イメージング実験の概念図

* 中性子応用専門委員会

から一定の距離を離して検出器を置くことにより、中性子のエネルギー（速度）によって到達時間に差が生じるため、パルス中性子の発生時刻から到達時刻までの時間（中性子飛行時間、TOF：Time-of-flight）を測定することにより、中性子のエネルギーを導出することが可能となる。このようなパルス中性子を使った実験で、ある程度ビームを広げ、中性子の2次元空間分布とTOFを同時に測定できる検出器を使うことにより、中性子エネルギーに応じた中性子ラジオグラフィ像を取得することが可能となる。

図2は、厚さ10 μm の金と1 cmの鉄に対する中性子透過率が中性子エネルギーに従ってどのように変化するかを比較したものである。このデータ作成では中性子反応断面積を収録した評価済核データライブラリ JENDL-4¹⁾ を参照した。従来から広く利用されている中性子ラジオグラフィで利用する中性子のエネルギー領域である0.1 eV付近以下では、鉄1 cmに対する透過率が0.3~0.1であるのに対して、金10 μm では0.97以上である。このためこのような厚さで両者が共存する場合、中性子ラジオグラフィ像の濃淡は鉄によって決まり、金の空間分布を中性子ラジオグラフィで確認することは、非常に困難である。しかしながら、金の共鳴エネルギーの1つである4.9 eVでは、10 μm の金に対する中性子透過率は0.2程度まで小さくなり、鉄1 cmよりも高い感度を示すことが分かる。したがって、中性子エネルギーを4.9 eV付近に限定してラジオグラフィ像を得ることにより、金を強調した中性子透過像を得ることが可能となる。さらに、共鳴エネルギーが4.9 eVであるという情報を基に、強調されたラジオグラフィ像は金に由来すると判断することができる。中性子共鳴反応を用いた元素密度の空間分布イメージングは、このような特長を有している。

前記の説明では、厚さ t [g/cm²] の試料に対する中性子透過率を、 $\exp(-\mu_g t)$ (μ_g は質量減弱係数 [cm²/g]) として計算した。図3²⁾ では、JENDL等の核データライブラリを参考に、各元

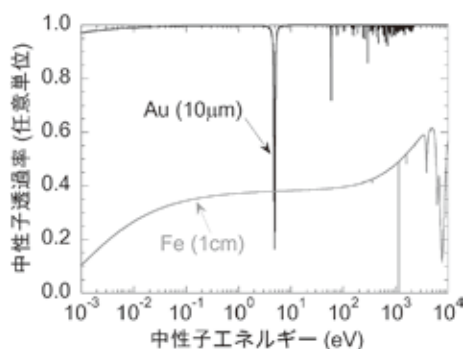


図2 厚さ10 μm の金と1 cmの鉄に対する中性子透過率のエネルギー依存性

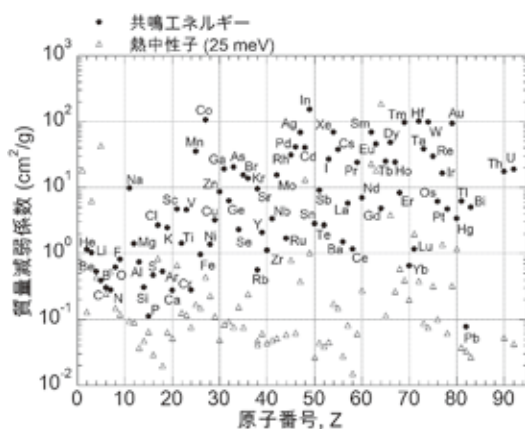


図3 熱中性子と共鳴エネルギーにおける線減弱係数

素に対する熱中性子と共鳴エネルギーにおける質量減弱係数を比較している。大半の元素は多数の共鳴を持っているため、元素密度のイメージングに最も適した共鳴を選択している。熱中性子断面積の大きなりチウム、ホウ素、ガドリニウムや、核データライブラリの範囲で共鳴を持たない水素を除いて、共鳴中性子イメージングにより、特定の元素に対する感度を大幅に向上したイメージングが可能となることが分かる。

中性子のエネルギー E は、中性子の飛行速度 v を使って $E=1/2 mv^2$ (m は中性子の質量) と表すことができる。共鳴反応の起きるエネルギーは、厳密には中性子そのものの速度ではなく、中性子と原子核の相対速度によって決定される。原子核は熱振動により運動しているた

め、原子核が中性子に向かって動いているときは相対速度が大きくなり、その逆に動いている場合は小さくなる。このため、中性子の速度が一定であっても、原子核の熱振動により相対速度にある程度の広がりが生じるため、測定対象の原子核が高温になるほど、共鳴エネルギー付近での中性子透過率の変化が緩やかになるという現象が生じる。このような現象は、音や光での類似の現象と同様に“ドップラー効果”と呼ばれている。図2の中性子透過率は室温における値を示したが、図4ではイリジウム（厚さ

0.5 mm）を測定対象とし、温度を 300～1,000 K まで変化させた時の中性子透過率の計算値を示している。計算は評価済核データライブラリ ENDF/B-VII.1³⁾ と共鳴解析プログラム REFIT-2009⁴⁾ を用いて行った。温度が高くなるにつれて共鳴の幅が広くなり、谷が浅くなっていることが分かる。したがって、このような変化を解析することにより、測定対象となっている原子核の温度を測定することが可能となる。

3 共鳴中性子イメージングの実例

近年、共鳴中性子イメージング法の開発は、J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) の BL10 に設置された実験装置 NOBORU^{5,6)} で行われている。図5⁷⁾ は、NOBORU で中性子源に同期させた高速度カメラを使って、コバルト、カドミニウム、インジウム、タンタル、金の共鳴イメージングを行った例である。1ch は 8 μ s に相当し、ch 番号に 8 μ s を乗じたものが TOF となる。図5 は 1ch 当たり 2,720 枚の画像を積算して得られた画像である。なお、この時の陽子ビーム強度は 20 kW（現在は約 300 kW、

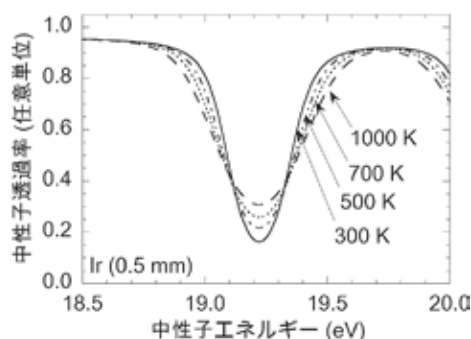


図4 イリジウム（厚さ 0.5 mm）の 19.2 eV 共鳴の温度変化

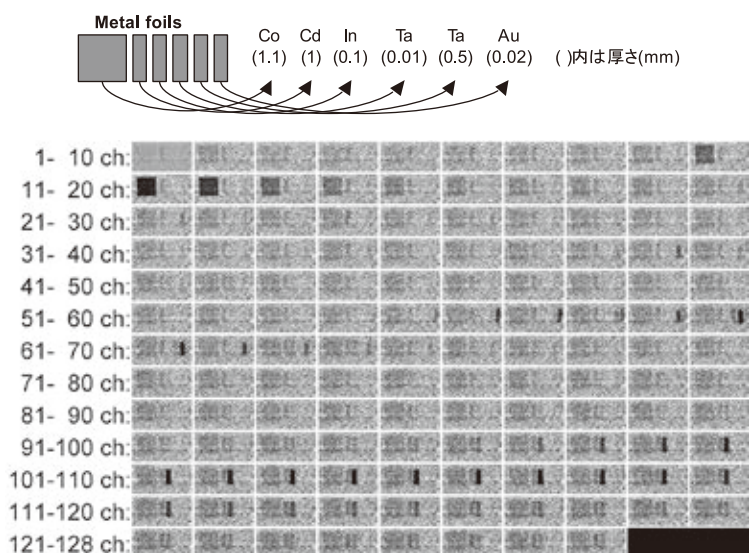


図5 高速度カメラを用いた金属箔の共鳴中性子イメージング例

将来は1 MWの予定)で、試料を照射した時間は2分弱であった。共鳴エネルギーに合致したchでそれぞれの元素を強調した中性子透過像が得られる一方で、カドミニウムに対する感度は低いままであることが分かる。図6²⁾は1ユーロ及び2ユーロコインを中性子共鳴イメージングで測定した例である。これらのコインは内側と外側で異なる合金が使用されており、黄色の部分が銅-亜鉛-ニッケル合金、白色が銅-ニッケル合金である。検出器には、⁶Liガラスシンチレータを16×16で配置したピクセル型検出器を使用した。空間分解能は3 mm程度である。亜鉛が共鳴を持つ517 eVでは、黄色部分に相当する1ユーロコインの外側及び2ユーロコインの内側で影が濃くなっており、亜鉛を強調した中性子透過像が得られていることが分かる。一方、コインの内側と外側の両方に同程度の割合で含まれている銅が共鳴を持つ2 keVでは、コイン全体で中性子透過像の影が濃くなっており、亜鉛の分布との違いが明確に表れている。

共鳴中性子イメージングによる温度分布測定の最近の例には、佐藤博隆ら⁸⁾が北海道大学の電子線形加速器による中性子源において、Inの1.5 eV共鳴を利用して実施した実験がある。佐藤らは、二重円筒の内側にIn₂O₃、Ag₂O、及びAl₂O₃を、外側にIn₂O₃とAl₂O₃を封入した試料を中心部のヒーターで加熱した。この円筒の側部から中性子を照射して得られた結果から得た半径方向の温度分布を、熱電対の測定値と熱伝導から求められる温度分布との比較を行った。その結果、検出器の空間分解能の制約から再現が困難である温度変化が急激な中心部を除いて、共鳴中性子による手法は、内部の温度分布を的確に測定することが可能であることが示されている。

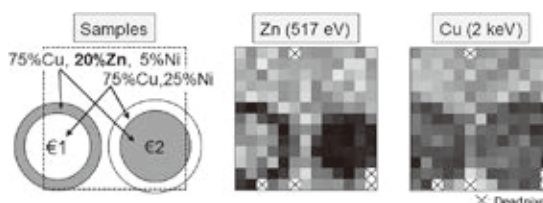


図6 ⁶Liガラスピクセル型検出器を使ったユーロコインの共鳴中性子イメージング例

4 今後の展望

共鳴中性子イメージング法は、技法の有効性を示すデモンストレーションとしての実験から、実際の利用研究への応用に必要な精度検証や信頼性の評価を行う段階に移行しつつある。また、これまでに行われてきたパルス中性子イメージングの成果を踏まえ、MLFのBL22にパルス中性子イメージングに特化した実験装置“螺鈿 (RADEN)”が建設されており、平成27年4月より一般ユーザーによる利用を開始する予定となっている。装置の特長については別稿となるが、従来型の中性子ラジオグラフィ装置としての利用に加え、世界初のパルス中性子イメージング用装置として、技術開発の中心になることが期待されている。

参考文献

- 1) Shibata, K., *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, 1–30 (2011)
- 2) Kai, T., *et al.*, *Physics Procedia*, **43**, 111–120 (2013)
- 3) Chadwick, M.B., *et al.*, *Nucl. Data Sheet*, **112**, 2887–2996 (2011)
- 4) Moxon, M.C., Ware, T.C., and Dean, C.J., Tech. rep., UKNSF (2010)
- 5) Oikawa, K., *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A589**, 310–317 (2008)
- 6) Maekawa, F., *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A600**, 335–337 (2009)
- 7) Kai, T., *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A651**, 126–130 (2011)
- 8) Sato, H., Kamiyama, T., and Kiyanagi, Y., *Nucl. Instr. Meth.*, **A605**, 36–39 (2009)