

令和4年4月22日 @Online
近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

中性子を活用した材料(核種)の非破壊分析

近畿大学原子力研究所
佐野 忠史(さの ただふみ)
E-mail to t-sano@kindai.ac.jp

1

自己紹介

- ✓ 近畿大学理工学部原子炉工学科卒業
- ✓ 大阪大学大学院工学研究科修士 (Ph.D 原子力工学)
- ✓ 京都大学複合原子力科学研究所において京都大学研究用原子炉(KUR)や京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)の運転管理に従事、KUR・KUCA及びKURNS-LINAC(電子線型加速器)を使用した研究、教育等
- ✓ 平成31年4月から近畿大学原子力研究所
- ✓ 専門: 原子炉物理学
- ✓ 興味分野: 核データ測定、中性子イメージング(非破壊分析)、パルス中性子源
- ✓ 趣味: 釣り、山城探訪
- ✓ 野球: 阪神タイガース(今年はプロ野球は無いと聞いています、、、)

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

非破壊分析

Non-Destructive Assay (NDA)

対象: 生体、食品、文化財、工業製品等

主なNDA
超音波 探傷、厚さ測定、溶接部の検査、接着・剥離検査
赤外線 機器の異常温度検出、コンクリート剥離検査
保温材劣化検査

放射線	レントゲン検査	X線CT	材料欠陥
	結晶構造測定		荷物検査

検査対象物を透過するX線やガンマ線の透過量を測定
原子番号の大きな物質は苦手

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

放射線と放射能

- ・放射線とは、放射性物質や放射線発生装置から放出される粒子や電磁波のこと。放射線を出す核種(物質)を**放射性核種(物質)**という。
- ・放射能とは、1秒あたりに**放射線を出しながら放射性核種(物質)**が他の核種に変わる**個数**。または、その能力。

↑
放射線を測定することで含まれる放射性物質の種類と個数がわかる

放射性物質を懐中電灯でたとえると

放射性物質 → 放射線 → 放射線を出す能力

懐中電灯 → 光 → 光を出す能力

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

中性子とガンマ線

ガンマ線 (γ線)	高エネルギー光子 質量をもたない 原子核の周りの電子と相互作用する
中性子	<ul style="list-style-type: none"> ➡ 原子番号の大きな原子はガンマ線をよく遮蔽する ➡ 粒子 ➡ 質量をもつ。重さは陽子1個と同程度 ➡ 原子核と相互作用する ➡ 軽い原子核によって運動エネルギーを奪われる ➡ 同じ原子でも同位体(原子核内の中性子の個数が異なるもの)によって中性子吸収率が異なる ➡ 安定核種が中性子を吸収した場合、不安定核種(放射性核種)になる場合もある ➡ 運動エネルギーが極端に小さい場合、波の性質が表れる

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

中性子と物質の相互作用(1)

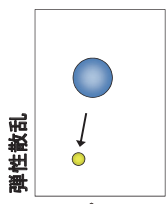
- 散乱 (Scattering)
 - 弾性散乱 (Elastic scattering)
 - 非弾性散乱 (Inelastic scattering)
- 吸収 (Absorption)
 - 捕獲 (Capture)
 - 核分裂 (Fission)
 - その他 (荷電粒子放出)

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

中性子と物質の相互作用(2)

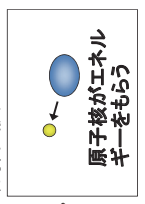
• 散乱

- 弾性散乱



軽い原子核に散乱されると運動エネルギーを失いやすい

- 非弾性散乱

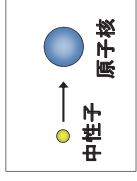


運動エネルギーが保存しない

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

中性子と物質の相互作用(3)


反応前



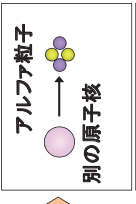
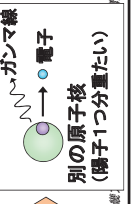
• 吸収

- 捕獲
- 核分裂
- その他 (粒子放出等)

捕獲



粒子放出

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

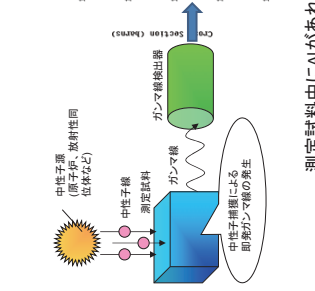
中性子を用いた非破壊分析

手法	主な相互作用	概要	低中性子源
即発ガンマ線分析 (PGA)	吸収	原子核に中性子が吸収された際に放出するガンマ線を測定する。同定・定量。	近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会
放射化分析	吸収	中性子を照射し対象物質を放射化させ、放射性崩壊で放出されるガンマ線やその他粒子を測定する。同定・定量。	
中性子イメージング	散乱・吸収	中性子を試料に照射し透過中性子を測定する。試料内部観察。	
中性子回折	散乱	回折による金属材料の歪み等の測定。材料表面。	
ブラッグエッジ測定	散乱	運動エネルギーの低い中性子を試料に照射し、ブラッグエッジ測定により結晶構造を観測(低エネルギー中性子の波の性質)。材料内部。	
中性子共鳴分析	散乱・吸収	試料を透過した中性子のエネルギー分布を測定する。	近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

実用例① 即発ガンマ線分析 (PGA) (1)

原子核が中性子を吸収した際に放出する特性ガンマ線を測定する。

- ▶ 試料中の微量元素分析が可能(大型試料に適用化)
- ▶ ガンマ線ピーク位置(エネルギー)は核種固有であり、ピーク高さは対象核種量に比例する



測定試料中にAlがあれば、、、

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

実用例① 即発ガンマ線分析 (PGA) (2)

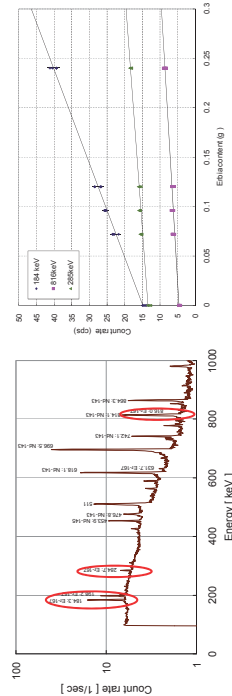


図 各ガンマ線番号強度とBi-ING-E203量の関係

図 KURで測定したBi-ING-E203(1wt%)試料からの即発ガンマ線信号

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

実用例② 放射化分析 (1)

中性子照射によって生成した放射性核種が崩壊する際に放出する特性ガンマ線を測定する。

- ▶ 材料中の微量元素分析が可能

ガンマ線ピーク位置(エネルギー)は核種固有であり、ピーク高さは対象核種量に比例する。化学分析(微細分析)では定量・同定が困難な微量も測定可能

かなりの量の中性子照射が必要であり一般的には研究用原子炉を用いる

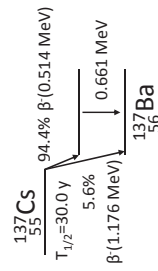


図 崩壊ガンマ線スペクトルの一例(校正用線源)

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

実用例② 放射化分析 (2)

- 京都大学研究用原子炉を用いたイタイタイ病の原因物質の特定患者の毛髪に含まれるカドミウムの同定・定量
 $Cd-110 + n \rightarrow Cd-111m$ ($T_{1/2} = 48.50 \text{ min}$) $Cd-110 : Ab. 12.49 \%$
 $\sigma_{n,thermal} = 11 \text{ b}$
- 小惑星イトカワの砂(約3マイクログラム)の放射化分析[1]
 イトカワの砂が宇宙由来であることを証明。Fe/Sc比が太陽系初期に形成された隕石と等しいことを観測
- 環境試料中の微小試料分析
 ↓
 試料中のCdやHgの定量

[1] M. Ebihara, et. al., "Neutron activation analysis of a particle returned from a meteorite Itokawa," Science, 333, 1119-1121, (2011)

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

実用例③ 中性子イメージング (1)

X線とは異なり中性子は軽い原子核や中性子吸収を起しやしい原子核で遮蔽される。X線撮影とは異なり、**金属材料中の軽元素をイメージング**できる
 主に研究用原子炉から取り出した中性子ビームを利用するが、近年は加速器中性子源による商用化 (例えば住重アテックス株式会社) も進んでいる

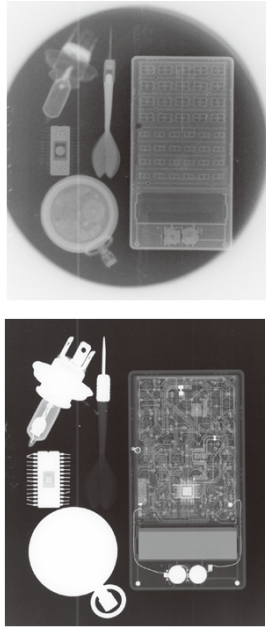
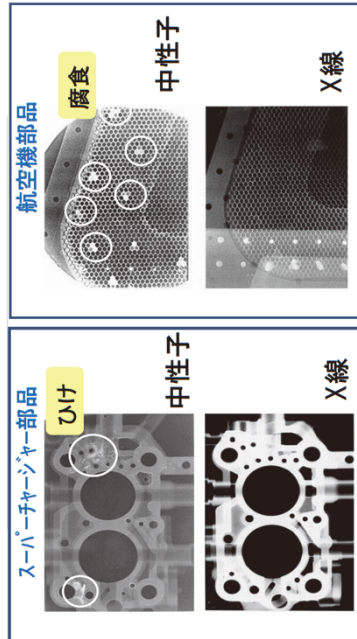


図 X線画像
 図 中性子画像
 近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

実用例③ 中性子イメージング (2)

自動車エンジンや航空機部品、橋梁柱の欠陥・腐食等のイメージング。エンジンオイルや人工衛星エンジン内のヒドラジン、燃料電池内の水素の動き等を動画撮影



近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

実用例③ 中性子イメージング (3)

中性子を用いた動画撮影の例



図 エンジンオイルの挙動
 図 燃料電池内の水の挙動
 Water in a polymer electrolyte fuel cell. N. Takemba et al. (Kobe U.)
 近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

研究開発例② 中性子共鳴透過分析(1)

ハルス中性子源が必要

中性子断面積
原子核と中性子の相互作用する確率(中性子断面積)は核種固有である。
更に原子核への中性子の入射エネルギーによって中性子断面積が変化する

図 Cu-63とCu-65の中性子吸収断面積
共鳴エネルギーの中性子が選択的に吸収される。

図 Cd-110とCd-113の中性子吸収断面積
試料を透過した中性子のエネルギー分布を測定すれば共鳴位置に歪みが生じる

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

研究開発例① ブラッグエッジ測定

ハルス中性子源
加速器等を用いてハルス状態に中性子を生じさせ、中性子の発生から試料への到達時間を測定することで中性子のエネルギー分布を測定できる。

試料に低エネルギー中性子を照射し、試料を透過した中性子をベクトル中に存在するBragg-edgeと呼ばれる構造を観測する。

Bragg-edgeは試料の結晶構造に起因し、その位置はBraggの式 $2d \sin \theta = n\lambda$ から面間隔dに由来する。

岩瀬謙二、「ハルス中性子イメージングによる金属材料研究」、Isotope News, No.725, (2014).

図 4 α -Fe (bcc構造) の Bragg-edge spectrum
Transmission spectrum(A) vs Neutron wavelength(\AA)

図 4 Braggエッジ出現波長(エネルギー)の変化から結晶格子面間隔 d_{hkl} の変化が観測可能。

結晶格子ひずみの観測

- 中性子イメージングと組み合わせること、金属材料中のひずみ分布の可視化
- 日本刀の産地の特定。玉鋼の組成の違いによる結晶構造を測定

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

研究開発例③ 核燃料物質を対象とした非破壊分析/核種濃度定量

透過中性子束を用いた核種濃度定量
Neutron Resonance Transmission Analysis (NRTA)

● Self-indication法を用いた核種濃度定量*

高精度な測定対象核種の箔(indicator)を試料の下流に設置し、indicatorからの信号(ガンマ線、核分裂片)を測定することで、間接的に透過中性子束を測定する。

*J. Hori, T. Sano, et al. "Non-destructive assay of nuclear materials using a self-indication method," EPJ Web of Conference, 146, 03028, (2017)

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

研究開発例② 中性子共鳴透過分析(2)

図 天然ウラン試料を透過した中性子のエネルギー分布

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

研究開発例④ 核種弁別型イメージング

中性子共鳴透過分析法と中性子イメージングの合わせ技
透過中性子測定の際に目的核種の共鳴エネルギーの中性子を測定し2次元検出器で測定することで、目的核種の空間分布をイメージングできる。

従来の中性子イメージング
(全エネルギーを使用)

透過中性子束のスペクトル

Sample	Geometry
DU (0.046 at. % ²³⁵ U)	12.7 mm x 12.7 mm
High Enriched Uranium (HEU) (1.59 ²³⁵ U, 98.41 ²³⁸ U)	12.7 mm x 12.7 mm
Am-241 (5.93 Mkt)	8.5 mm
Am-241 (5.93 Mkt)	9.20 mm

*T.Sano, D.Ito, et al., "Imaging of Actinide Nuclides using Neutron Resonance Absorption," IEEE/NSI/MIC/NSTD, N-09-03, Sydney, Australia, (2018).
近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

DU, Np237, Zr93を積層した試料を対象にself-indication法の適用実験

図 透過中性子束のTOFスペクトル
非破壊で同時に核種同定と濃度の定量が可能。

*J.Hon, T.Sano, et al., "Improvement of a Non-destructive Nuclide Assay using a Self-indication Method," IEEE/NSI/MIC/NSTD, N-09-03, Sydney, Australia, (2018).
近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

参考資料 中性子スペクトル測定

TOF法(time of flight)

- パルス中性子が発生してから測定試料に入射するまでの飛行時間を測定し、核反応を起こす中性子の運動エネルギー(E)を求める方法

既知の中性子飛行距離：L
中性子飛行時間：t

中性子源

測定試料

$$E[\text{eV}] = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \left(\frac{L}{t}\right)^2 = \frac{(mL)^2}{2t^2} \quad (1)$$

L: 飛行距離[m]
t: 定数72.3(eV)^{1/2} μsec/m
m: 中性子質量[1.67 × 10⁻²⁷kg]

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会

まとめ

- 中性子の特性: 原子核と相互作用する。軽い原子核で遮蔽されやすい。
- 中性子を使用することで、X線では困難な金属内部の情報を得ることができる
- イメージング技術への応用
- 放射化を利用することで、微量試料の同定・定量が可能
- 共鳴吸収の利用
 - X線では困難な核物質の探査
 - パルス中性子源を使用することで応用範囲が広がる
 - 金属試料内部のひずみ分布の可視化
- 中性子発生装置(原子炉、加速器、RI)が必要

近畿アルミニウム表面処理研究会 春季講演会