

# 中性子施設ハンドブック



公益社団法人日本アイソトープ協会 理工学部会 中性子応用専門委員会

# 2018年3月

目次

表紙

目次 中性子イメージングカタログ

イメージングカタログについて

(1)中性子イメージングの基礎

(1-1)中性子とX線の違い

(1-2)エネルギー分解測定について

(1-3)水のイメージング(水分量の定量測定)

(2)どうやって測るか

(2-1)静止画、動画、CT測定法

(2-2)Bragg-edge測定法

(2-3)共鳴吸収の測定

(2-4)磁場測定法(偏極中性子イメージング法)

(2-5)タルボ・ロー干渉計による位相イメージング

(2-6)オートラジオグラフィー

(3)中性子検出器

(3-1)フィルム法

(3-2)IP(イメージングプレート)

(3-3)シンチレータ+カメラ

(3-4)中性子イメージインテンシファイア

(3-5)GEMを用いた中性子二次元検出器nGEM

(3-6)マイクロピクセルチェンバー(µPIC)中性子イメージング検出器(µNID)

(3-7)ピクセルタイプ検出器

(3-8)MCP検出器

イメージング画像集

植物(カーネーション)

植物(トウモロコシ)

木材(難燃処理木材)

コンクリート(1)

コンクリート(2)

コンクリート(3)

鉄筋コンクリート

小型固体高分子形燃料電池の膜厚方向水分布計測

固体高分子形燃料電池のダイナミックCT計測

リチウムイオン電池製品内部の黒鉛負極材の結晶格子面間隔変化の可視化

リチウムイオン二次電池

流動層セグレケセーション(二粒子混合)

流動層水平熱交換器まわりの流動層層材挙動

流動層熱交換器(鉛直配置)まわりの流動層層材挙動

鉛直バンドル配置された流動層熱交換器まわりの流動層層材三次元分布

流動層セグレケセーション(粗大粒子まわりの粒子挙動)

流動層内単一気泡まわりの粒子挙動

流動層ディストリビュータから吹き込まれた気泡の動的評価

流動層ディストリビュータから吹き込まれた空気の三次元分布特性 |沸騰二相流のボイド率計測(熱流束差による影響評価) 強制流動脈動化における沸騰二相流のボイド率計測 超臨界水熱合成装置内における超臨界水 · 常温水の混合状態の中性子線 CT像 ベアリング 小型4ストロークエンジン内の潤滑油挙動の可視化 人工衛星用スラスタ モデルモーター磁場イメージング 塗装鋼板の塗膜腐食膨れ内の水 鉄鋼材料:溶接材 圧延鋼材溶接部の優先部位・集合組織発達度・結晶子サイズの可視化 焼き入れ棒鋼の焼き入れ部(マルテンサイト相)の結晶格子面間隔ならびに結晶格子面 間隔分布の幅の可視化 Fe板材内の格子歪分布 金属(Al, Cu, Pb)円柱 中性子透過率測定型中性子共鳴吸収分光法による核種・温度のCTイメージング 中性子共鳴吸収を用いたマイナーアクチニド核種のイメージング 日本刀の結晶組織構造 オートラジオグラフィーの例(BNCTへの利用の展望) 中性子施設ハンドブック 中性子源ハンドブックについて J-PARC RADEN JRR-3 TNRF KUR B-4 KUR E-2 HUNS 青森県量子科学センター RANS **KUANS KURNS-LINAC** 住重アテックス SHI-ATEX 小型放電型核融合中性子源 世界のイメージング施設の例 執筆者一覧

(注1)無断転載を禁じます。 (注2)執筆者の所属、各施設の名称・所在地・所有設備等の記載情報は、2018年3月現在のものです。 (注3)各施設の利用等に関するお問合せは、ハンドブック記載の連絡先へ直接お願いいたします。







公益社団法人日本アイソトープ協会 理工学部会 中性子応用専門委員会 2018年3月

# <u>イメージングカタログについて</u>

中性子は金属に対しても透過力が強い、水素などの軽元素が見やすい、エネルギー依存の透過率を利用して結晶構造情報などが得られるなど、X線と違った情報が得られます。

そのため、中性子透過イメージによる工業製品のチェック、燃料電池、Liイオンバッテリーの調査、鉄鋼材料や金属文化財などの結晶組織構造の研究など幅広く利用されています。さらに、最近は偏極中性子を用いて、 モーターなどの磁場測定も行われるようになっています。

本カタログでは、あまり中性子イメージングに馴染みのない方に、どんなことができるかのイメージを持って いただけるようにということを考えて、日本アイソトープ協会の中性子応用専門委員会のもとで、中性子イメー ジング手法の基礎と測定例についてまとめたものです。

詳しい情報が必要なときは、参考文献等をあたっていただけるということを前提にしておりますので、分かり にくいところがあるかと思いますが、その点ご容赦いただければと思います。

1. 目的

中性子イメージング技術によって、必要な情報がとれないかと考えている方が、どんな画像がとれるかを イメージできるようなものとして、このカタログを作成しました。まずは、どんなことができるかを感覚的につか んでもらうことを目的としています。

2. 中性子イメージング法概要

最初にイメージング画像を取るために必要な知識について記述しています。この中には最近開発された 手法もあり、これまでの透過強度による濃淡画像取得とは異なった手法なども含まれています。項目は以下 のようになっています。

- (1)中性子イメージングの基礎
  - (1-1) 中性子とX 線の違い
  - (1-2) エネルギー分解測定について
  - (1-3) 水のイメージング(水分量の定量測定)
- (2)どうやって測るか
  - (2-1)静止画、動画、CT 測定法
  - (2-2) Bragg-edge 測定法
  - (2-3) 共鳴吸収の測定
  - (2-4) 磁場測定法(偏極中性子イメージング法)
  - (2-5) タルボ・ロー干渉計による位相イメージング
  - (2-6) オートラジオグラフィー
- (3)中性子検出器
  - (3-1) フィルム法
  - (3-2) IP(イメージングプレート)
  - (3-3) シンチレータ+カメラ
  - (3-4) 中性子イメージインテンシファイア
  - (3-5) GEM を用いた中性子二次元検出器 nGEM
  - (3-6) マイクロピクセルチェンバー(µ-PIC)中性子イメージング検出器 (µNID)
  - (3-7) ピクセルタイプ検出器
  - (3-8) MCP 検出器

3. イメージング画像集

画像の例として以下のものを掲載しました。

【植物】

- ・カーネーション
- ・トウモロコシ
- ·木材(難燃処理木材)

【産業応用】

- ·コンクリート(1)、(2)、(3)
- ・鉄筋コンクリート
- 小型固体高分子形燃料電池の膜厚方向水分布計測
- ・固体高分子形燃料電池のダイナミック CT 計測
- ・リチウムイオン電池製品内部の黒鉛負極材の結晶格子面間隔変化の可視化
- ・リチウムイオンニ次電池
- ・流動層セグレケセーション(二粒子混合)
- 流動層水平熱交換器まわりの流動層層材挙動
- ・流動層熱交換器(鉛直配置)まわりの流動層層材挙動
- ・鉛直バンドル配置された流動層熱交換器まわりの流動層層材3次元分布
- ・流動層セグレケセーション(粗大粒子まわりの粒子挙動)
- 流動層内単一気泡まわりの粒子挙動
- 流動層ディストリビュータから吹き込まれた気泡の動的評価
- 流動層ディストリビュータから吹き込まれた空気の三次元分布特性
- ・沸騰二相流のボイド率計測(熱流束差による影響評価)
- ・強制流動脈動化における沸騰二相流のボイド率計測
- ・超臨界水熱合成装置内における超臨界水ー常温水の混合状態の中性子線 CT 像
- ・ベアリング
- ・小型4ストロークエンジン内の潤滑油挙動の可視化
- ・人工衛星用スラスタ
- ・モデルモーター磁場イメージング
- ・塗装鋼板の塗膜腐食膨れ内の水
- ·鉄鋼材料:溶接材
- ・圧延鋼材溶接部の優先方位・集合組織発達度・結晶子サイズの可視化
- ・焼き入れ棒鋼の焼き入れ部(マルテンサイト相)の結晶格子面間隔ならびに結晶格子面間隔分布の 幅の可視化
- ・Fe 板材内の格子歪分布
- ・金属(Al、Cu、Pb)円柱
- ・中性子透過率測定型中性子共鳴吸収分光法による核種・温度の CT イメージング
- ・中性子共鳴吸収を用いたマイナーアクチニド核種のイメージング
- 【文化財】
  - ・日本刀の結晶組織構造
- 【医学応用】
  - ・オートラジオグラフィーへの例(BNCT への利用の展望)

### (1) 中性子イメージングの基礎

#### (1-1) 中性子とX線の違い

中性子は X 線と同じような知見が得られるが、中性子特有の性質があり、中性子でなければ得られない情報 もある。最近のイメージング手法に関連して、中性子とX 線の特性の違いを説明する。

最も基本的な特性は、原子による相互作用の強さ の違いである。X線は原子番号が大きくなるにつれて 相互作用が強くなるが、中性子は原子(原子核)毎に 相互作用の大きさが異なる。中性子とX線の原子毎 の相互作用の違いを図 1-1-1に示す。この特性の違 いは、X線が原子核周囲の電子およびそれによって 作られる場と相互作用するのに対し、中性子は原子 核と相互作用するからである。そのため、X線では電 子の数だけが問題となり、電子数が決まる原子番号 に依存することになる。即ち、重い原子ほどX線との 相互作用は強くなり、同位元素による違いもない。一



方、中性子は、原子核との相互作用であるので、核毎に相互作用は異なってくる。従って、同位元素によって相 互作用の強さが異なり、同じ水素でも軽水素の方が重水素より熱中性子(0.025eV)では、約 30 倍相互作用が 大きくなっている。従って、同位元素を使うことによって、特定の元素の影響を消す、あるいは変えることによって、 その元素の情報を得ることができる。

次の特徴は、中性子の透過力が強いことである。図 1-1-2 は鉄を例にとった中性子と X 線の相互作用断面 積のエネルギー依存を示している。また、図中に回折 実験に使われるエネルギー領域、透過実験に用いられ るエネルギー領域を大まかではあるが示してある。中 性子の方が低いエネルギーで回折実験が行われるが、 波長にすると X 線とほぼ同じ領域となる。回折が行わ れる領域で見てみると、中性子の相互作用断面積は X 線の 1/1000 程度であり、非常に透過力が強いことがわ かる。回折実験での試料厚さは、中性子が数 mm、X 線が数µm 程度が通常使われる。エネルギーの高い、 即ち波長の短い X 線を使用して、前方への回折を使え ば、一桁位厚い試料が使えるが、ビームサイズを細くし なければならないという制約が出てくる。透過について みれば、中性子は、軽水素を多く含む物質以外の、多く の材料について、ブラッグカットオフと呼ばれる急激な



断面積の減少が meV 領域で起きる。鉄の断面積にもそれが表われている。そのエネルギーより高い所では、 断面積がほぼ一定であり、どのエネルギーを使っても同様の透過力が得られる。それ以下のところでは、透過 力が高くなり、厚い試料が測定できる。中性子では、どのエネルギーでも cm オーダーの鉄を透過することがで きるが、X 線では 100keV 位の高い X 線が必要となる。ここで示した透過実験用の X 線のエネルギー範囲は 概ね市販の X 線管のエネルギーで最大 400keV を想定している。電子加速器を使えば、もっと高い X 線を発生 することができ、更に厚い鉄を透過することができる。しかし、このエネルギーでは構造情報が得られる回折現 象を起こさないので、構造情報を得ることはできない。その点、中性子では、ブラッグカットオフとそれより短波長 に表れるブラッグエッジに代表される結晶構造に起因する構造があり、その形状を解析することによって結晶組 織構造情報を得ることができる。これは、後に説明するブラッグエッジイメージングへつながる。

**⊠**1-1-3

#### (1-2) エネルギー分解測定について

原子炉中性子源では、<sup>235</sup>Uの核分裂によって中性子が発生する。核分裂によって発生した中性子は、中性 子イメージングに適した熱中性子エネルギー(~25 meV)領域より高いエネルギーを有しているため、減速材 を用いて熱平衡状態に達してから使用する。原子炉室には炉壁を貫通するビームチューブから引き出された 中性子が大型の単結晶で単色化され、その後実験装置へ供される。単結晶モノクロメーター・アナライザを用 いた単色熱中性子を用いて、磁気単結晶内部の磁区の観察や厚みのある試料内でも磁化プロセスの観察な どに応用されている。

加速器を用いて中性子を発生させる場合、加速した陽子ビームを線源ターゲットに衝突させる。その際、核破 砕反応によって、様々な波長(白色)を含んだ中性子が発生する。飛行時間(TOF: Time Of Flight)法を用 いることによって、高精度のエネルギー分析が可能となる。中性子の波長(エネルギー)は、次式

 $\lambda = \frac{h}{n} = \frac{h}{mv} = \frac{ht}{ml}$   $\lambda$ : 中性子の波長、*m*: 中性子の質量、*v*:速さ、*l*:飛行距離、*t*:飛行時間

により、線源から検出器に到達するまでの時間を計測することによって求めることができる。減速材(モデレー ター)の材質によって、冷中性子や熱中性子を使い分けることが可能である。パルス中性子イメージングでは、 主に冷中性子や熱中性子を用いて測定が行われている。図 1-2-1 には、Mo(厚さ 1cm)の縦軸透過率、横軸 中性子エネルギーの Bragg edge スペクトル、共鳴吸収スペクトルを示した。エネルギー領域が 1eV 以下の冷 中性子を用いると、Bragg 角 90°で面間隔 d に対応する波長、λ=2dに Bragg カットオフが現れる。Bragg カ ットオフの位置は、結晶構造や面指数(*hkl*)に由来する。エネルギー領域が 1eV 以上の熱中性子を用いると、 含有される核種固有の凹みがエネルギー分布スペクトル中に観測される。凹みの深さは含まれる核種の量に 依存することから、どんな核種がどれだけ存在するかを定量することが可能となる。様々なエネルギーの中性 子を利用することが可能なパルス中性子イメージングは、エネルギー分析に適している。



と共鳴吸収スペクトル

#### (1-3) 水のイメージング(水分量の定量測定)

水分子中の<sup>1</sup>H に対する、熱中性子の反応断面積が 30 barn と、他の原子核例えば <sup>56</sup>Fe では 15 barn と 比べて大きく、中性子に対する透過度が水素に対して低くなり、中性子の透過画像イメージングでは水素で高 コントラストが得られる。一方 X 線では透過度を左右する反応断面積は一般的に電子の数、つまり元素の陽子 数に比例するので、水を構成する水素と酸素のような軽元素に対しては反応率が小さくなり、透過度が大きくな り、水に対するコントラストは低くなる。このため中性線は X 線に比べ、水のイメージングに優れている。表に熱 中性子と X 線の 2mm 厚の水と 6mm 厚の鉄に対する透過度の計算を示す。 X 線においては水の透過度は おおきく、イメージングに必要なコントラストを得ることは難しい。しかしながら熱中性子では水の透過度は鉄に 比べて小さく、水でのコントラストが高くなる。

熱中性子とX線での透過度(反応断面積からの予測値)

		透過度		
	厚さ[mm]	熱中性子(25meV)	X 線(8keV)	
水	2	0.60	0.92	
鉄	6	0.24	0.0	

原理1)

試料を用意し、水を含んでいない(乾燥)状態と水を含んだ(含水)状態の中性子透過イメージを撮像する場合を想定する。中性子透過という観点からは、含水状態のサンプルは乾燥状態のサンプルに水を加えたものと考えられ、両状態の中性子透過イメーの差をとることによって、水の分布を得る。以下にその原理を説明する 式を示す。

乾燥サンプルの中性子に対する吸収長とその厚さを $L_a$ ,  $t_a$  として、入射中性子強度を $I_a^0$  とすると、透過中性子強度は

$$I_d = I_d^0 \cdot \exp(-t_d/L_d)$$
 (1-3-1)

となる。また水の吸収長と厚さを $L_w, t_w$ とすると、含水サンプルに対しては、入射中性子強度を $I^0_{d+w}$ とすると、 透過強度は

$$I_{d+w} = I_{d+w}^0 \cdot \exp(-t_d/L_d - t_w/L_w) \quad (1-3-2)$$

となる。式(1-3-2)を式(1-3-1)で除算して水の厚さtwについて解くと、

$$t_w = L_w \cdot [Log(I_d/I_{d+w}) + Log(I_{d+w}^0/I_d^0)] \quad (1-3-3)$$

が得られる。この時点で式(1-3-3)からは乾燥サンプルの吸収長と厚さの項はキャンセルされている。

実験的には式(1-3-3)の大括弧中の第1項は撮像した2つのイメージの輝度比から、第2項は入射中性子の 強度比から得られる。水の吸収長L<sub>w</sub>は実験からの検量線または放射線輸送計算シミュレーションで求めること ができる。

原子炉中性子源において入射中性子強度の時間変化が無視できる場合、式(1-3-3)の第 2 項は小さくなり、 水のイメージは乾燥状態の画像と含水状態の画像のそれぞれのピクセルでの輝度比をとったものの Log をと ることで得られる。

これらの操作は ImageJ 等の画像解析ツールを用いて処理することで、水の分布が得られる。

#### 塗装鋼板の塗膜下腐食中の水の観察例

普通鋼と耐食合金鋼の2種の塗装鋼材(鉄 6mm 厚、塗装 240µm 厚)の塗装に傷をつけ、塩水噴霧と乾燥 の過程を繰り返し、腐食を促進させたサンプルを用意して、水に浸して十分含水させた後にひきあげ、空気中 での乾燥過程の中性子透過イメージを J-PARC BL-10 で LiF/ZnS(Ag)シンチレーターと CCD センサーを組 み合わせた中性子イメージング検出器で十分乾燥するまで撮像を行った。これらの透過画像はサンプルの前 処理なしに撮像された。

乾燥イメージと乾燥過程のイメージを式(1-3-3)で比較することによって、水のイメージングを行った。図 1-3-1<sup>2)</sup>にサンプルの写真と水のイメージを示す。中性子イメージングを用いて塗膜下の水の動きを鮮明に捉え ている。この技術を用いると、物体中での水素を含む物質の分布を定量的に観察することができる。さらに連 続撮像することで、動画を得ることもできる。

#### 参考文献

- 1) Taketani, et.al: ISIJ Int., 57(2017)155
- 2) A.Taketani et.al: Mater. Trans. 59(2018) https://doi.org/10.2320/matertrans.M2018017



⊠ 1-3-1

# (2)どうやって測るか

#### (2-1) 静止画、動画、CT 測定法

ここでは、一般的な中性子透過像を得る手法について概説する。大雑把に言えば、可視光を使った「影絵」に 対して、X線を使った影絵を「レントゲン」、中性子を用いた影絵を「中性子ラジオグラフィ」または、「(透過型)中 性子イメージング」と呼ぶ。

すでに解説されているように、中性子と物質との相互作用では、核反応を伴う吸収や散乱などが考えられる。 いずれにせよ、サンプルに中性子線を当てると、中性子ビームの進行方向に中性子は物質内で減衰される。こ の減衰の強弱を画像として計測し、中性子透過方向の情報を得ることができる。

#### 1. 中性子イメージングシステム

典型的な中性子イメージングシステムは、図 2-1-1 に示すように、①中性子源、②被写体、③シンチレータ、 ④暗箱およびカメラからなること一般的である。シンチレータを用いて中性子画像を可視光画像に変換し、 CCD などの高性能カメラを用いて、画像を取得する。蛍光コンバータは <sup>6</sup>LiF:ZnS(Ag)を組成とするものが最 も広く用いられており、中性子像を可視光画像に変換する。ただし、現在使用されている蛍光コンバータは発光 輝度が月明かり程度と微弱であるため、超高感度のカメラの使用が必要不可欠となる。従来は、撮像デバイス として超高感度を有する SIT(Silicon Intensifier Target) 管カメラが使用されてことも多かったが、現在では、 冷却型 CCD(Charge Coupled Device)カメラの性能が向上し、CCD カメラを用いることが多く、CT 撮像にも 利用される。また、通常のカメラでは、撮像速度は最大撮像速度は毎秒 60 コマであることが多いが、より高速 の現象を捉えるために可視光用のイメージインテンシファイアを装着した高速度ビデオカメラ(毎秒1000コマ以 上の撮影が可能)を利用することも可能である。



図 2-1-1 中性子イメージングシステム

・撮像に対して注意すべきこと

透過型イメージングによって得られた画像の画質は以下のような要素に依存する。

①中性子源のビーム平行度

②被写体の性質

③中性子束と露光時間

④撮像システム

上記の①について、通常の影絵を例にして簡単な説明を行う。一般に日光のもとでは、くっきりとシャープな 影絵が得られることが多い、しかしながら、図 2-1-2 に示すように、室内で影絵を作る場合には、スクリーンと被 写体の距離が離れると徐々に影絵がぼやけて、ある距離以上になると影がほとんど判別できなくなる。室内に は、光源と被写体までの距離が短く、光の平行度は高くない。また、他に光源がある場合や室内の壁などでの 反射光も存在するため、被写体とスクリーンとの距離が長くなるにつれて、像がぼけていくことになる。日光の 場合は、地球と太陽との距離が非常に長いため、平行度は極めて大きく、大気中での散乱が小さい場合には、 良好な影絵を得ることができる。



(a) 室内での影絵
 (b)スクリーンとの距離が近い場合
 (c)スクリーンとの距離が遠い場合
 図 2-1-2 可視光を用いた影絵の例

このボケのメカニズムを図示したのが、図 2-1-3 であり、光源とサンプルとの距離を L とし、光源の大きさを D とすると平行度は L/D(Collimator ratio と呼ばれる)と表現することができる。さらに、サンプルとスクリーンと の距離を Lとすると、ボケ  $U_g$  は L'(L/D)と概算できる。中性子イメージングの場合もスクリーン上の投影され るボケは同様にしておこるため、鮮明な画像を取得するためには、①平行度の高い中性子ビームを用いるか、 ②サンプルとスクリーンとの距離をできるだけ短くする必要がある。中性子イメージング設備では、L/D は、50 ~1000 程度である場合が多いが、鮮明な画像を得るためには、L/D>100 の設備を用いることが望ましい。な お、被写体とスクリーンとの距離を極めて小さくできる場合には、平行度が悪いビームを用いても良質な画像が 得られる。



図 2-1-3 ビームの非平行度による画像のボケのイメージ図

また、中性子イメージングの場合には、ビーム平行度のみならず、被写体内部の散乱によっても、画質は劣 化する。中性子は水素含有物に高い感度をもつため、水素含有物や水などの分布を計測する応用例が多い。 しかし、水素は散乱断面積が大きく、中性子が水素含有物を含む被写体に照射されると、図 2-1-4 のように、 その進行方向がバラバラになり、いくらビーム平行度が高くても、透過ビームの平行度は悪化し、結果として画 像がぼけてしまうことが多い。



水などの散乱体をサンプルとした場合には、散乱した中性 子は当方的に散乱されるため、物質がない場所の中性子強 度が増加することが考えられる。図 2-1-5 はこれを模式的に 表したもので、透過成分はステップ上になるものの、散乱成分 が存在するために、結果的にスクリーン上に投影される輝度 分布は一番下の分布のようになり、定量化に当たっては何等 かの補正が必要である。補正法には、①Cd のようなグリッド を用いて散乱成分を評価し、差し引く方法、②被写体とスクリ ーンとの距離を十分長くとることで、散乱成分を平滑化し、散 乱成分をオフセットとして差し引く方法、③散乱体の分布を仮 定し、試行計算により、散乱成分を補正する方法、などがあ る。いずれも長所と短所があり、目的に応じて、適した補正を 行う必要がある。

③の中性子束は、ノイズの少ない画像を得るために最も重要な要素である。研究炉の場合には、イメージング施設の中性子束は 10<sup>5</sup>~10<sup>8</sup>n/cm<sup>2</sup>s であることが多いが、中性子の計測精度は、中性子計数の統計誤差に依存するために、十分な露光(撮像)時間が必要となる。

小型中性子源を用いたイメージングでは、研究炉などの大型 設備と比較して、中性子束が小さい場合が多く、統計誤差を 減少させ、良好な画像を得るためには長い露光時間が必要と なる。従来は、撮像素子の効率や十分でなかったが、近年は



図 2-1-5 物質内散乱による、輝度分布の歪み

CCD カメラの検知精度が格段に上がり、小型中性子源を用いた場合でも、比較的短い露光時間でも良質な画像が得られるようになってきている。

2. CT 撮像について

単純な透過型中性子イメージングでは、得られるのは2次元情報であるため、サンプルの3次元構造を得る ことは原理的には不可能である。しかし、角度を変えて、様々な方角からの透過像から、内部の3次元構造を 得ることができる。これをコンピュータートモグラフィ(Computed Tomography: CT)と呼ぶ、再構成する。

この場合、各部位の中性子の減衰率を未知数とし、角度を変えた透過像から、連立方程式を立て、これを解 くことにより、各部位の減衰率を算出することが可能である。CT 法は中性子イメージングに先立って、主に X 線イメージングの分野で発達してきており、様々な CT 再構成アルゴリズムが提案されてきた。

CT 再構成アルゴリズムには、解析的再構成法、代数的再構成法、統計的再構成法に大別され、逆投影法 は解析的再構成法に分類され、逐次近似画像再構成法は代数的再構成法と統計的再構成法に分類される。 これまで CT 画像再構成法の主流はフィルタ補正逆投影法(filtered back projection:FBP 法)であったが、 近年では画像ノイズ低減効果やアーチファクト低減効果が期待される逐次近似画像再構成法(iterative reconstruction:IR 法)が増えつつある。いずれにせよ、CT 法については中性子イメージング分野によらず、 他分野においても積極的な開発が行われているため、最新の情報を得て、得られた中性子イメージングに応 用することが重要と考えられる。 (2-2) Bragg-edge 測定法

1. はじめに

近年、透過性の高い中性子を用いたイメージング研究が盛んに行われている。中性子を用いた研究施設は、 原子炉施設(定常中性子源)と加速器施設(パルス中性子源)に分けられる。原子炉施設の特徴は、原子炉内 で発生した波長が一定(単色)の中性子を用いて様々な実験が行われる。加速器施設の特徴は、核破砕反応 によって生じた様々な波長(白色)を含む中性子を用いる。Bragg-edge 法は、加速器(パルス中性子源)を用 いて発生した中性子を利用する。

パルス中性子源では、飛行時間(TOF: Time Of Flight)法と呼ばれる高精度エネルギー分析法が利用される。

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{ht}{ml} \quad (2-2-1)$$

 $\lambda$ :中性子の波長、m:中性子の質量、v:速さ、l:飛行距離、t:飛行時間

パルス中性子源で発生した中性子の波長は、(2-2-1)式より線源から検出器に到達するまでの時間を計測する ことによって求められる。

#### 2. Bragg-edge 法の原理

実験により測定した入射ビームスペクトル(L)、透過スペクトル(D)データを用いて透過率を求める。

Transmission =  $\frac{l}{l_0}$  (2-2-2)

透過スペクトルデータには、弾性干渉性散乱・非弾性干渉性散乱・非弾性非干渉性散乱・弾性非干渉性散乱・ 吸収が含まれる。全成分を積分した全段面積値(Total cross section, σ<sub>tot</sub>)を求めることが可能である(式(2-2-3)参照)。

 $Tr(\lambda) = \exp(-\Sigma\sigma_{tot,P}(\lambda)\rho_P t_P) \quad (2-2-3)$ 

ho:原子数密度、t:試料厚さ、P:結晶相、 $\sigma_{tot}$ :全段面積

 $\sigma_{tot}(\lambda) = \sigma_{coh}^{ela}(\lambda) + \sigma_{incoh}^{ela}(\lambda) + \sigma_{coh}^{inela}(\lambda) + \sigma_{incoh}^{inela}(\lambda) + \sigma_{abs}(\lambda) \quad (2-2-4)$ 



図 2-2-1 α-Fe(bcc 構造)の全段面積と弾性干渉性散乱・非弾性干渉性散乱・ 非弾性非干渉性散乱・弾性非干渉性散乱・吸収スペクトル

図 2-2-1 には、α-Fe の全段面積を示した。図 2-2-2 には、多結晶におけるブラッグエッジの形成過程を示した。 波長 4.1Å で、ブラッグの条件の満たす 110 回折が生じている。



図 2-2-2 α-Feの 110 回折のみから形成されるブラッグエッジ

ブラッグエッジには、マクロ歪、ミクロ歪、結晶構造・結晶相変化、集合組織に関する情報が含まれている。解 析コード RITS[1]を用いることによってこれらの情報を得ることが可能である。

#### 3. 実験について

実験体系や実験から得られるスペクトルの例を示す。



図 2-2-3 には実験体系を示した。測定試料は Fe( $\alpha$ )と SUS304 溶接板材である。Bragg-edge 法では、入射 ビーム  $I_0$ と透過ビーム Iの 2 つのデータを用いる。実験手順としては、

- (1) 入射ビームスペクトルの測定 (図 2-2-4 参照)
- (2) 透過ビームスペクトルの測定 (図 2-2-5 参照)
- (3) 規格化した入射ビームスペクトルと規格化透過ビームスペクトルから透過率を求める。図 2-2-6 の透過ス ペクトルが得られる。

中性子が透過するビームガイド管の窓材として Al 合金が用いられている。そのため、入射ビームスペクトル (図 2-2-4)内には、Al 合金由来のブラッグカットオフが明瞭に観察される。透過率を求める際は、規格化した 入射および透過ビームスペクトルを用いる。規格化は、線源に入射するプロトン数や中性子が発生した際に計 測されるキッカーパルス数を用いる。実験から得られた透過率を図 2-2-6、全段面積値を図 2-2-7 に示す。



#### 参考文献

[1] H. Sato, T. Kamiyama, Y. Kiyanagi, A Rietveld-Type Analysis Code for Pulsed Neutron Bragg-Edge Transmission Imaging and Quantitative Evaluation of Texture and Microstructure of a Welded  $\alpha$ -Iron Plate, 52, (2011), 1294-1302.

#### (2-3) 共鳴吸収の測定

中性子共鳴吸収の測定は、一般的な中性子散乱で 利用する冷~熱中性子領域より高いエネルギーの中 性子である熱外中性子(>0.5eV)を利用する。熱外中性 子領域の透過スペクトルを取得すると、複数の鋭い吸収 ディップが観測されることがあるが、これが共鳴吸収による 中性子の吸収である(図 2-3-1)。共鳴吸収は、中性子 が原子核に吸収されたときにできる複合核のエネルギ 一準位に対応しており、適当なエネルギーの中性子が 試料に入射すると共鳴的に吸収されるため生ずる。一 方、この複合核は短い時間のうちにy線として余剰の エネルギーを放出し、これは即発y線と呼ばれる。共鳴 吸収は複合核の形成に起因するため、それが起きるエネ ルギーから核種の区別が可能となる(表 2-3-1)。また 核種の局所運動によるドップラー効果が吸収ディップ



図2-3-1. ヨウ化銀の中性子共鳴吸収スペクトル

形状に反映するため、核種が持つ運動エネルギーに関する情報を得ることも可能である。

このような共鳴吸収の特徴か ら、その測定には図 2-3-2 のように 2 種類の方法がある。いずれの場 合にも、例えば中性子飛行時間法 で中性子スペクトルを測定する必 要があるということに注意が必要に なる。測定方法の一つは、中性子の 吸収量を透過スペクトルとして直接 測定する方法である。この透過型の 場合、エネルギーの決まった中性子 に対し試料透過でどのぐらい中性 子が減少したかを記録し、エネル ギーをスキャンしていく。このよう にして記録した中性子スペクトル



には、共鳴吸収エネルギー位置に複数のディップが現れるので、そのエネルギーから核種の種類が、吸収 量から核種の量が、ディップの幅から核種の運動エネルギーが解析できる。 一方、共鳴吸収時に放出される即発y線を中性子共鳴吸収の結果として記録する方法もある。この 即発y線型の場合、共鳴吸収の測定には中性子用の検出器ではなく、y線用の検出器を用いる。共鳴吸収 による即発y線は等方的に放出されるので、試料の周囲を囲むようにして検出器を設置する。入射中性子 のエネルギーをスキャンして、放出される即発y線を入射中性子エネルギーに対して記録していくと、共鳴 吸収が起きている位置では即発y線が吸収量に比例して放出されるため、共鳴吸収がピークとして記録さ れる。このピークを中性子透過量の測定と同様に解析することにより、核種の種類、量、運動エネルギーが 得られることになる。

イメージングについては、透過型の測定では2次元検出器を用いた測定で核種の存在を画像化することが可能となる。特に入射中性子エネルギーに対してゲートをかければ、共鳴吸収を起こす核種のみの分布が容易にイメージングできる。一方の即発y線型に関しては、透過測定ではないので位置情報を持ったスペクトル群を一度に測定することはできない。この場合には中性子スリット等で入射中性子に位置の情報を付加することで、空間スキャンによりイメージングすることになる。測定の時間はかかるが、透過型同様 CT スキャンも可能である。

核種	共鳴エネルギー	断面積	核種	共鳴エネルギー	断面積			
	[eV]	[barn]		[eV]	[barn]			
$_{47}\mathrm{Ag}$	5.19	12500	$^{233}$ U	1.79	200			
$_{49}$ In	1.457	30000		2.29	450			
$_{51}\mathrm{Sb}$	6.24	1700		3.66	60			
<sub>52</sub> Te	2.334	500		6.82	230			
$_{55}\mathrm{Cs}$	5.9	7000		10.39	100			
<sub>56</sub> Ba	24.37	150	$^{235}$ U	1.124	30			
$_{62}\mathrm{Sm}$	8.047	15000		2.028	60			
<sub>63</sub> Eu	0.46	10000		3.615	60			
<sub>73</sub> Ta	4.28	13000		4.845	180			
	10.36	4000		6.38	480			
	13.95	800		8.77	250			
$_{74}W$	4.155	2500		11.67	550			
<sub>79</sub> Au	4.906	2800		12.39	600			
$^{198}\mathrm{Hg}$	23	150	$^{238}$ U	6.671	7000			
$^{199}\mathrm{Hg}$	34	510		20.872	7000			

表2-3-1. 中性子共鳴吸収断面積(<35eV)の例

#### (2-4) 磁場測定法(偏極中性子イメージング法)

中性子はスピン磁気モーメントを有しており、空間中の磁場と相互作用しそのスピン状態が変化する。このス ピン状態の変化を空間分解能を以て検出することで、中性子が通過してきた磁場の情報を画像化することが できる。これが中性子線を用いた磁気イメージングである。

中性子線が任意の磁場Bの中を通過する際に起こるスピン状態の変化は下記の式により記述される。

 $\frac{d}{dt}\boldsymbol{\sigma}_n = \gamma \boldsymbol{\sigma}_n \times \boldsymbol{B} \quad (2-4-1)$ 

ここでσnは中性子スピンと平行な単位ベクトル、γは中性子の磁気回転比である。式(2-4-1)は中性子スピンが 磁場ベクトルを軸としたラーモア歳差回転をすることを意味し、この歳差回転を利用することで磁場情報の空間 的な分布を画像化するのが偏極中性子イメージングの基本的な考え方となる。式(2-4-1)の結果として生じる中 性子スピンの歳差回転角度φは

 $\phi = \frac{\gamma m \lambda}{h} \int_{path} \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{s} \ (2\text{-}4\text{-}2)$ 

となる。ここで、 $\lambda$ は中性子波長、mは中性子質量、hはプランク定数、 $\int B \cdot ds$ は磁場の強度を中性子の飛行経路について積分した量である。すなわち、歳差回転角の絶対値と中性子波長が決まれば、中性子飛行経路内の磁場強度の情報を取得することが可能となる。ここで注意しなければいけないことは、式(2-4-1)はスピンの極性に依存し、非偏極中性子(正極性と負極性の中性子が同数ある状態)では、歳差回転の情報を取得することができない。そのため、スピン極性が一方向にそろった偏極中性子を利用することが不可欠であること。そして、式(2-4-2)から磁場強度情報を取得するためには、中性子波長が一定(単色中性子)であることが要求されることである。

次に、中性子スピンの歳差回転を検出する方法について述べる。歳差回転を直接測定することは困難である が、中性子スピンをベクトルとして考えた時、中性子の偏極度は中性子スピンの量子化軸方向への射影となる ため、偏極度から間接的に回転角を求めることが可能である。ここで、偏極度Plt、

 $P = \frac{N_u - N_d}{N_u + N_d} \ (2-4-3)$ 

で定義され、アップスピン状態( $N_u$ )とダウンスピン状態の中性子数( $N_d$ )から計算される。偏極中性子イメージング法では、この偏極度を位置毎に測定するため、通常の中性子イメージングの体系に中性子偏極度を解析 する機器を導入する。最も単純な実験体系では、観察対象の上流に中性子偏極素子とスピン反転器を設置し、 観察対象と検出器の間に中性子検極素子を設置し、偏極素子と検極素子の磁場方向を量子化軸として中性 子スピンの方向を解析する(図2-4-1参照)。観察対象を透過した後のアップスピン状態とダウンスピン状態の 中性子強度は、スピン反転器を用いて入射中性子線のスピンの方向を反転させることで測定する。入射偏極 中性子強度を $N_0$ 、試料による吸収を $e^a$ 、スピンの回転に依存する成分を $N_{u,d}(\phi)$ とすると、各スピン状態での 中性子強度は、 $N_{u,d} = N_0 e^{-a} N_{u,d}(\phi)$ と表現され、偏極度Pには吸収に関わる項が除かれ、スピンの回転に依 存する項のみが残る。さらに、偏極素子・検極素子の偏極効率を補正するため、観察対象が無い場合の偏極 度 $P_0$ で規格化する<sup>※1</sup>。

偏極素子と検極素子の量子化軸を同一に取った時、偏極度Pは

 $P = \{1 - (1 - \cos \phi) \cdot (1 - n^2)\}P_0 \quad (2 - 4 - 4)$ 

と書き表される。ここでnは観察対象となる磁場の量子化軸方向への方向余弦である。式(2-4-4)より明らかな

ように、*P*はφとφ+2nπについて同一の値を与え、中性子スピンの回転に対して2πの周期性を有し、歳差回転 角の絶対値を一意に決定することができない。しかしながら、式(2-4-2)に示すように歳差回転角は中性子波長 に依存するため、複数の波長を用いて偏極度を測定することがこの問題を回避する上で有効である[1]<sup>※2</sup>。

さて、磁場はベクトルであるため、「磁場強度」だけでなく「方向」も重要な量である。式(2-4-4)には量子化軸 への磁場の方向余弦が含まれるため、1方向のみの偏極度解析では量子化軸からの磁場方向の傾きしか知 ることができない。磁場ベクトルをより厳密に求めるためには、偏極度を3次元的に解析することが必要である。 そこで、偏極度をベクトル量に拡張する。観察対象を透過後の偏極度Pは、回転行列Dを用いて $P = D(n)P_0$ と 表される。回転行列の各要素 $D_{ij}$ は、磁場が中性子線の経路に対して一様な場合について以下の用に表現す ることができ、

 $D_{ii} = 1 - (1 - \cos \phi) \cdot (1 - n_i^2)$ 

 $D_{ij} = (1 - \cos \phi)n_i n_j - n_k \sin \phi$ 

 $D_{ji} = (1 - \cos \phi)n_i n_j + n_k \sin \phi$  (tetel, *i*, *j*, *k* = *x*, *y*, *z*) (2-4-5)

非対角項には磁場方向を示す単位ベクトル(n<sub>x</sub>, n<sub>y</sub>, n<sub>z</sub>)の一次の項が顕に含まれる[2]。そのため、中性子ス ピンの方向を3次元的に制御して、この回転行列要素を測定することにより、磁場の強度と方向に関する情報 (磁場ベクトル)を原理的に取得することができる。

偏極中性子イメージングの実験体系の概念図を図2-4-1 に示す。上述のように、この実験体系は、通常の中 性子イメージングに使用される2次元画像検出器の上流に、偏極素子・スピン反転器・検極素子を配置すること で構成される。偏極素子と検極素子には、中性子磁気ミラーや<sup>3</sup>Heスピンフィルターが使用される。3次元スピ ン解析を行なう場合には、観察対象の前後にスピン回転子と呼ばれる1対の板状のコイルをそれぞれ配置し、 各コイルの磁場により中性子スピンを90度回転させることで中性子スピンの方向をx, y, zの各軸に向ける。さ らに、3次元スピン解析では、環境磁場の影響を排除するためにスピン回転子と観察対象を零磁場空間に配 置するため、全体を磁気シールドで囲む場合がある[3]。



図2-4-1 3次元スピン解析の実験体系の概念図。

観察対象を挟んで、偏極素子と検極素子、スピン回転子と呼ばれるコイルが配置される。

偏極中性子イメージングにおける視野範囲は偏極素子の大きさに依る場合が多く、数10mm角程度が一般 的である。使用可能な中性子波長範囲も偏極素子の偏極性能に依存し、熱~冷中性子の範囲が主に使用さ れる。また、偏極中性子を利用することはビーム強度は最も効率が良いとしても非偏極中性子の半分であり、 偏極素子と検極素子の透過率や偏極性能によって、さらに強度が減少することに注意されたい<sup>※3</sup>。この手法の 応用先としては、空間中の磁場のみならず、磁性体中の磁化分布や磁区構造、超伝導体中にトラップされた磁 東などがあり、歴史的にも偏極度解析法は磁性体中の磁気秩序状態の同定に使用されてきたことから、磁気 相転移温度分布の観察等への応用もなされている。さらに、トモグラフィと3次元スピン解析を組合せた磁場ベ クトルの3次元空間分布の再構成技術の開発も進められており[4]、将来的には現在の技術では実現されてい ない磁性体内部の磁区構造の3次元可視化が可能になると考えられる。しかしながら、中性子偏極技術が不 可欠であるため、測定を実施可能な施設はJ-PARCのRADEN、HZBのCONRAD、PSIのBOA、FRM-IIの PONT、ANTARESなどの大型中性子実験施設に設置された装置に現在のところ限られている。今後は本技 術が実施可能な施設が増えることが期待される。

※1厳密にはスピン反転器のスピン反転効率を考慮する必要がある。

<sup>※2</sup>複数の中性子波長での測定を行なう際に、パルス中性子は飛行時間分析法を活用して高効率かつ高精度 な偏極度の中性子波長依存性を取得することができるため、偏極中性子イメージングによる磁場の定量化に おいて大きな利点がある。

※3利用可能なビーム強度は偏極素子の性能に強く依存するが、非偏極中性子を使用する場合の1桁程度である。

T. Shinohara, K. Sakai, M. Ohi, T. Kai, M. Harada, K. Oikawa, F. Maekawa, J. Suzuki, T. O ku, S. Takata, K. Aizawa, M. Arai and Y. Kiyanagi, Nucl. Instr. and Meth. A 651, 121(2011).
 M. Th. Rekveldt, Z. Pys. 259, 391 (1973).

[3] T. Shinohara, K. Hiroi, Y. H. Su, T. Kai, T. Nakatani, K. Oikawa, M. Segawa, H. Hayashida, J. D. Parker, Y. Matsumoto, S. H. Zhang, Y. Kiyanagi, J. Phys.: Conf. Ser. 862, 012025(2017).
[4] M. Sales, M. Strobl, T. Shinohara, A. Tremsin, L. T. Kuhn, W. R. B. Lionheart, N. M. Desai, A. B. Dahl, S. Schmidt, Sci. Rep. 8, 2214 (2018).

#### (2-5) タルボ・ロー干渉計による位相イメージング

1. 位相イメージング

低エネルギー中性子と試料の相互作用は、複素屈折率nを用いて表すことができる.

 $n(x, y, z) = 1 - \delta(x, y, z) + i\beta(x, y, z), \ \delta = \frac{N\lambda^2}{2\pi}b_c, \ \beta = \frac{N\lambda}{4\pi}(\sigma_a + \sigma_{inc} + \sigma_{coh})$ 

ここで、 $\lambda$ は中性子波長、Nは原子核数密度、 $b_c$ は干渉性散乱長である. また、 $\sigma_a$ 、 $\sigma_{inc}$ 、 $\sigma_{coh}$ はそれぞれ吸収、 非干渉性散乱、干渉性散乱の断面積である. 通常のラジオグラフィ(吸収コントラストイメージング)では、試料 による中性子波の強度変化を測定し、屈折率の虚部 $\beta$ を試料の厚さ方向に射影した量の2次元分布を取得す る. これに対して、位相イメージングでは干渉法を用い、吸収イメージングでは失われてしまう位相情報を強度 情報に変換して、屈折率の実部 $\delta$ に関する情報を抽出する. たとえば波長 5 Å の場合では、多くの物質におい て $\delta/\beta \sim 10^3 - 10^4$ であるから、吸収イメージングではコントラストが付きにくかった試料も位相イメージングで は明瞭に可視化し得る. 本稿では格子干渉計の一種であり、近年活発な開発が進められている Talbot-Lau (タルボ・ロー)干渉計による位相イメージングについて概説する.

2. Talbot-Lau 干涉計

#### 実験体系と原理

図 2-5-1 に示すように、Talbot-Lau 干渉計は3枚の格子から構成される光学系である。

中央の格子(G1)は回折格子であり、干渉計のビームスプリッタとして機能する. G1 の背後には Fresnel 回 折により Talbot カーペットとよばれる周期的な強度分布のパターンが現れる. 特に、G1 から $z_{12} = pd^2/\lambda(d:$ G1 の周期, p:Talbot 次数、吸収回折格子のときは整数、位相回折格子のときは半整数)だけ離れた位置に は、自己像とよばれる G1 と同一の周期をもつ強度分布が生じる(Talbot 効果).

G1の周期は通常数µm程度であるため,自己像を中性子イメージング検出器で直接撮影することは難しい. そこで,自己像位置に同じ周期をもつ吸収格子(G2)をアナライザとして配置し,モアレ縞を生成して観察する. このモアレ縞が Talbot-Lau 干渉計の干渉シグナルである.

このように、原理的には G1 と G2 の 2 枚の格子のみで干渉計を構成することが可能である. しかし、Talbot 干渉計でモアレ縞を生じさせるためには、空間可干渉性の要請から 1 次光源のサイズを絞らなければならず、 中性子強度が低くなってしまう. この問題を解決するのが最上流の吸収格子(G0)である. G0 はマルチスリット として、可干渉な 2 次線光源列を作り出す. それぞれの光源からの自己像が強めあって重なる(Lau 効果)よう に、G0 は G1 の前方 $z_{01} = z_{12}d_0/d$ の位置に配置される( $d_0$ :G0 の周期).



図 2-5-1 Talbot-Lau 干渉計の模式図.

実際のセットアップでは、G2は自己像の位置に置かれるが、見やすくするため分離して描いている.

通常のセットアップではモアレ縞は次のような簡単な形に書かれる.

$$I(x, y) \simeq B + A\cos\Psi = B + A\cos\left[\frac{2\pi}{d}(y\theta + \chi + z_{12}\varphi_{s})\right]$$

ここで, Bはモアレ縞の平均強度, Aは振幅である. 位相Ψは G1 と G2 間のz軸周りの相対角 $\theta$ , G1 の G2 に 対するx方向のずれ $\chi$ , 試料での入射波の屈折角 $\varphi_s$ に依存する. 試料を置いた状態と置かない状態とで G2 位 置の移動によって縞走査を行い, 平均強度B, 位相Ψ, ビジビリティ(鮮明度) $V \equiv A/B$ の変化からそれぞれ, 吸 収コントラスト像, 微分位相コントラスト像, ビジビリティコントラスト像が同時に得られる.

#### <u>微分位相コントラスト像</u>

微分位相コントラストイメージングで測定されるモアレ縞の位相変化ΔΨは試料での屈折角φ<sub>s</sub>に比例する. 光線の屈折角は, 波動光学的には波面の歪み, つまり波動関数の微分位相∂Φ/∂xと等価であり, 測定される物 理量を書き下すと以下のようになる.

$$\Delta \Psi \propto \varphi_{\rm s} \equiv \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \propto \lambda^2 \frac{\partial}{\partial x} \int b_{\rm c} N dz$$

<u>ビジビリティコントラスト像</u>

モアレ縞のビジビリティの減衰は、検出器で解像できない試料中の微小構造に由来する. 試料のb<sub>c</sub>またはN が検出器のピクセル内で空間的に揺らいでいるとすると、平均的な屈折光からわずかにずれた(小角)散乱光 が生じる. これによってモアレ縞は不鮮明に"ぼやける"ことになる. ビジビリティの減衰率は次式によって、微小 構造の自己相関関数γ(x; Δx)と結びつけられる.

$$V/V_0 = \exp[-\sigma_f^2 \{1 - \gamma(x; -pd)\}]$$
$$\gamma(x; \Delta x) \equiv \frac{\overline{\Phi_f(x)\Phi_f(x + \Delta x)}}{\sigma_f^2}$$

ここで、 $\Phi_{f}$ は微小構造による平均的な位相シフトからのずれ、 $\sigma_{f}$ は $\Phi_{f}$ の標準偏差である.

3. Talbot-Lau 干渉計による位相イメージングの具体例

J-PARC MLF BL22「螺鈿」で行った位相イメージングの具体例を紹介する. 使用した Talbot-Lau 干渉計は 位相回折格子タイプのもので、中心波長 $\lambda = 5$  Å, p = 1/2 で設計されている. G0, G1, G2 の周期はそれぞれ  $d_0 = 180 \ \mu m, d_1 = 8.6 \ \mu m, d_2 = 9.0 \ \mu m$  である. また格子間距離は $z_{01} = 1535 \ mm, z_{12} = 77 \ mm$  である.

図 2-5-2 に ZnS(Li)シンチレータを用いた EM-CCD カメラによるアルミニウムロッド(直径 5 mm)の吸収コン トラスト像, 微分位相コントラスト像, ビジビリティコントラスト像を示す. モアレ縞は 2π/5 rad 刻みで 5 ステップ 測定され, 各ステップ 300 秒露光された. 波長分解能は 5 Å を中心に 18%に設定された. また, 撮影時の陽 子ビームパワーは 500 kW であった. 吸収コントラストではアルミニウムの像はほとんど確認できないが, 微分 位相コントラスト・ビジビリティーコントラスト像ではロッドのエッジがエンハンスされて, 明瞭に可視化できている ことがわかる.



図 2-5-2:アルミニウムロッドの吸収, 微分位相, ビジビリティコントラスト像.

図 2-5-3 には, µNID による電磁鋼板の観察例を示す. モアレ縞の走査方法, および波長の設定は上記と同様で, 各ステップの測定時間は 1 時間であった. 撮影時の陽子ビームパワーは 150 kW であった. 中性子は磁気モーメントを持つため, 電磁鋼板中の磁場と相互作用する. 微小磁区から構成される局所的な補助磁区領域や磁壁では散乱の効果が大きく, ビジビリティの減衰として可視化される. 一方, 磁区の向きがそろっている領域ではビジビリティが保持されていることがわかる.



図 2-5-3: 電磁鋼板のビジビリティコントラスト像.

#### 参考文献

- [1] F. Pfeiffer et al., Phys. Rev. Lett., 96, 215505 (2006).
- [2] W. Yashiro *et al.*, J. Opt. Soc. Am. A **25**, 2025 (2008).
- [3] W. Yashiro *et al.*, Opt. Express **18**, 16890 (2010).
- [4] Y. Seki et al., J. Phys. Soc. Jpn. 86, 044001 (2017).

#### (2-6) オートラジオグラフィー

#### Neutron Capture Auto-Radiography (NCAR)

#### 1. はじめに

オートラジオグラフィーの手法を中性子捕捉療法の薬剤分布の測定に応用したので、まず、中性子捕捉療法(BNCT)について説明する。この方法は、腫瘍部に <sup>10</sup>B 元素を集積させ、熱中性子照射で生じる原子核反応(<sup>10</sup>B+<sup>1</sup>n→<sup>4</sup>He+<sup>7</sup>Li+2.31MeV)で放出される  $\alpha$  粒子および<sup>7</sup>Li 粒子で、効率よく悪性腫瘍を破壊する細胞内の部照射によるがん治療法である。BNCT が腫瘍部以外の正常組織を障害することなく有効であるためには、生体内に投与された <sup>10</sup>B 原子が確実に患部に送達され、かつ限定されるような <sup>10</sup>B デリバリー薬剤の開発が必要であり、患部ならびに他の正常臓器内の <sup>10</sup>B の分布状況とその濃度を決定しておくことが不可欠である。その基礎研究として、CR-39 プラスチック飛跡検出器(CR-39 は商標名で、物質名としては PADC(Polly <u>Allyl</u> <u>Diglicol</u> Carbonate))を用いた中性子ラジオグラフィー(Neutron Capture Auto-Radiography : NCAR)がマウス標本に適応され、NCAR 像を形成する飛跡(エッチピット)の解析から、生体中の <sup>10</sup>B の分布状況とその 濃度の定量や腫瘍部内の線量計測が行われている。

#### 2. NCAR 画像の取得

マウス背部皮下に癌細胞を移植し皮下腫瘍モデルを作成し、<sup>10</sup>B 化合物キャリアーを静脈から投与した後に、 CMC(carboxymethyl cellulose)とドライアイスアセトンを用いて経時的にマウスを冷凍固定結させ、ミクロトー ムにより作成したマウス薄片(40µm 厚)を CR-39 板に密着させ(このとき CR-39 の包装パックに入れて、真空 にして密着度を増すと良い)、原子炉において 熱中性子を照射する。CR-39 は重荷電粒子に高感度であり、 照射後の化学エッチングにより円錐状の飛跡と呼ばれるエッチピットが CR-39 中に生成されることを利用して、 マウス標本中の <sup>10</sup>B の濃度分布を反映する NCAR 像を取得することができる。

#### 3. NCAR 像取得のためのエッチング

熱中性子照射後の CR-39 プラスチック飛跡検出器を、7mol/L 70℃の NaOH 溶液中で2 時間エッチングし て NCAR 像を取得する。白く濃い部分は、α 粒子や 7Li 粒子の飛跡が多数存在する場所であり、そこには <sup>10</sup>B が蓄積されていることを意味する。また、熱中性子は標本内の窒素核と反応して陽子を放出する。さらに、熱中 性子束の中に混入している速中性子は、標本内の水素原子核と衝突して反跳陽子をたたき出す。これらの陽 子が CR-39 に残す飛跡により、マウス薄片の全体像も同時に認識できる(図 2-6-1、写真 2-6-1)。







図2-6-1 : NaOH エッチングによる NCAR 像

- (a) 担癌マウスにおける <sup>10</sup>B Liposome 静脈投与 6 時間後の <sup>10</sup>B分布のNCAR像
   (熱中性子フルーエンス: 1.8 x 10<sup>12</sup> n・cm<sup>-2</sup>)
- (b) NaOH エッチングを用いた<sup>10</sup>B含有標準濾紙のNCAR 像におけるトラックサイズ分布。 15800ppm の<sup>10</sup>BSH 含有標準濾紙をCR-39 α 飛跡検出器に貼り付け、 熱中性子フルーエンス: 4.5 x 10<sup>8</sup> n·cm<sup>-2</sup> で照射した。 サイズの小さい位置の盛り上がりは陽子の飛跡によるもの。

Yanagie H, Ogura K, Kobayashi H et al : Nucl. Instr. & Method A 424(1): 122-128, 1999.



写真2-6-1 立教大学原子力研究所TRIGAII 原子炉において熱中性子を照射して取得した NCAR 像(Thermal neutron fluence : 1.8 x 10<sup>12</sup> n・cm<sup>-2</sup>)

- 3hr : 担癌マウス像:<sup>10</sup>BSH Liposome 静脈投与後 3 時間後
- 12hr : 担癌マウス像:<sup>10</sup>BSH Liposome 静脈投与後 12 時間後
- Standard : <sup>10</sup>BSH 溶液濃度の異なるコントロール用濾紙の NCAR 像

時間の経過とともに<sup>10</sup>B原子の濃度変化を確認できる。<sup>10</sup>BSH Liposome 静脈投与後 12 時間経過してもマウ ス背部皮下腫瘍部と肝臓には、十分な濃度の<sup>10</sup>B原子の蓄積を確認できる。

Yanagie H, Ogura K, Kobayashi H et al : Nucl. Instr. & Method A 424(1): 122-128, 1999.

#### 4. NCAR 像の画質

熱中性子照射で得られた像には、陽子の飛跡が混在するため、全体像を見ることができ標本中で <sup>10</sup>B の存 在する組織を特定しやすいという利点がある反面、当然のことながら <sup>10</sup>B の定量をする際には陽子の飛跡が バックグラウンドとして計測精度に影響を与える。一方、冷中性子照射で取得した NCAR 像は、陽子によるバ ックグラウンドが少なく鮮明で <sup>10</sup>B の分布状況がよりよく判別できる利点がある。冷中性子照射が困難で熱中 性子を照射した場合でも、エッチングを工夫することで画質を改善することができる。それはエッチング溶液を NaOH 溶液から PEW 溶液(15wt% KOH + 65 wt% C2H5OH + 20wt% H2O)に代えて CR-39 をエッチン グすることで実現する。PEW 溶液はエッチングによる飛跡現出に特徴があり、電離損失量の低いイオンほど 飛跡を縮退させる効果がある。この手法の適用により陽子飛跡を選択的に縮退させ、α 粒子や 7Li 粒子の飛 跡のみによる NCAR 像を形成させると、冷中性子による像と同じくらい鮮明なものが得られる。これらの方法 を用いると、NCAR像を一目見ただけでマウス組織内の <sup>10</sup>B の分布状況とおおよその濃度が判定できるので、 多数の <sup>10</sup>B デリバリー薬剤の候補の中から有効なものを容易に抽出することが可能になる(図 2-6-2、写真 2-6-2)。

#### 5. 飛跡解析による <sup>10</sup>B 濃度の定量と <sup>10</sup>B 分布図の取得

腫瘍部に蓄積された<sup>10</sup>B 濃度の定量は、飛跡の大きさと数を解析して行う。ただし、中性子束強度を NCAR の画像取得時より2 桁程度下げて照射し、飛跡が互いに重ならないようにしておく。

イオンが CR-39 板を通過した後には、その道筋に沿って高分子鎖が切断され、小分子片の密集した潜在トラックが残される。この放射線損傷(潜在トラック)の大きさは、入射イオンが電離作用により物質中で失う局所的 な限定エネルギー損失量(Restricted Energy Loss: REL 値\*: E.V. Benton and W.D. Nix, Nucl.Instr.& Meth., 67 (1969) 343.)に依存する。REL 値は、入射粒子の速度が遅いほど、またイオンの原子番号が大き いほど高くなり、検出器を化学エッチングした時に形成される飛跡の形状が大きくなる。NCAR 像中の飛跡の REL 値は、7Li> $\alpha$ >p の関係にあるから、飛跡のサイズを分析することにより、7Li、 $\alpha$  飛跡のグループと陽子 による飛跡を<u>弁別</u>できる(図 2-6-1(b))。陽子の飛跡は前述したように、<sup>10</sup>B の定量の際にバックグラウンドとな るが、測定された飛跡のサイズ分布を考慮することで陽子の飛跡を除いた定量が可能となる。つぎに、<sup>10</sup>B 濃度の異なるコントロール用濾紙の NCAR 像を用いて、<sup>10</sup>B 濃度と  $\alpha$  および 7Li 飛跡密度との関係を求め検量 線を作成すれば、腫瘍部での  $\alpha$  と 7Li の飛跡密度から <sup>10</sup>B 濃度が推定できる(図 2-6-3)。



図2-6-2 : PEW エッチングによる NCAR 像

- (a) 担癌マウスにおける <sup>10</sup>B -Liposome 腫瘍内局所投与後の <sup>10</sup>B 分布の NCAR像
   (熱中性子フルーエンス: 2.7 x 10<sup>10</sup> n・cm<sup>-2</sup>)
- (b) PEW エッチングを用いた <sup>10</sup>B 含有標準濾紙の NCAR 像におけるトラックサイズ分布。
   15800ppm の<sup>10</sup>BSH 含有標準濾紙を CR-39 a 検出器に貼り付け、
   熱中性子フルーエンス: 4.5 x 10<sup>8</sup> n·cm<sup>-2</sup> で照射した。
   図2-6-1で見られたトラックサイズの小さい陽子飛跡部が消えている。

Yanagie H, Ogura K, Kobayashi H et al : Nucl. Instr. & Method A 424(1): 122-128, 1999.



Ogura K. et al: Radi. Meas. 34, 555-558, 2001

写真 2-6-2 <sup>10</sup>BSH封入トランスフェリン修飾 Poly-ethylene glycol 結合 Liposome 静脈投与 60 時間後の NCAR 像

- (a) 熱中性子照射(立教大原子炉 TRIGA II, 2 x 10<sup>12</sup> n·cm<sup>-2</sup>)
- (b) 冷中性子照射(Paul Scherer Institute, SINQ, 2 x 10<sup>11</sup> n·cm<sup>-2</sup>)
- (c) 冷中性子照射(Saclay, ORFEE, 1 x 10<sup>11</sup> n·cm<sup>-2</sup>)

(a), (b), (c)は共に 70°C NaOH 溶液にて 2 時間エッチング

(d) 熱中性子照射(立教大原子炉 TRIGA II, 2 x 10<sup>12</sup> n·cm<sup>-2</sup>)50℃ PEW65溶液にて 8 分間エッチング

熱中性子照射で取得した NCAR 像には、陽子の飛跡が混在するため、バックグラウンドを形成し画質が悪く なっている。冷中性子照射で取得した NCAR 像は、陽子によるバックグラウンドが少なく鮮明で、<sup>10</sup>Bの分布 状況がよく判別できる利点がある。また、熱中性子を照射した場合でも、NaOH 溶液ではなく、PEW 溶液で CR-39 をエッチングすることにより陽子飛跡を縮退させ、a 粒子や7Li 粒子の飛跡のみによる NCAR 像を 形成させると、冷中性子による像と同じくらい鮮明なものが得られる。



図 2-6-3 α 粒子飛跡密度の計算と<sup>10</sup>B の推定

- (a) 標準サンプルの NCAR 像。熱中性子フルーエンス: 1.8 x 10<sup>12</sup> n·cm<sup>-2</sup> で照射を行い、エッチングは PEW 溶液を用いて、50℃、8 分で実施した。<sup>10</sup>BSH 溶液の原液濃度は 15800ppm である。
- (b) 飛跡密度は<sup>10</sup>B濃度と熱中性子フルーエンスに比例する。

Yanagie H, Ogura K, Kobayashi H et al : Nucl. Instr. & Method A 424(1): 122-128, 1999.

注釈:REL値とは、固体飛跡検出器特有のクライテリオンで、定義は、「荷電粒子によって叩き出されたδ線の うち、エネルギーの高いものは経路外に飛び去ってしまい飛跡生成には寄与せず、エネルギーの低いものの みがその経路近傍のエネルギー付与に寄与すると考えれば、あるエネルギー以上のδ線の寄与を除外した限 定的な電離損失を考えるというものである。つまり REL は Bethe-Bloch の式で表される荷電粒子のエネルギ ー損失のうち、ある一定エネルギー(ω)以上のδ線が飛跡近傍から持ち去るエネルギー損失を差し引いた量、 即ちある閾値よりもエネルギーの高いδ線による寄与を考慮しないエネルギー損失として定義される。」である。

# (3) 中性子検出器

#### (3-1) フィルム法

フィルムは X 線撮影用の物(主に、工業用 X 線フィルム)が使用される。感度が高い両面乳剤タイプ(フィル ム基板の両面に乳剤が塗布されたもの)と感度より解像度を優先した片面乳剤タイプがある。乳剤面が感光面 となる。X 線フィルムは感光しやすいので、暗室又はブラックライト下で作業を行う必要がある。X 線フィルムは 撮影後、暗室内でカセッテから取り出し、現像、停止、定着、水洗、乾燥等の作業が必要となる。なお、現像後 の X 線フィルム上の像はネガティブ像であり、中性子がよく透過した部分が黒くなる。印画紙に転写することに より、ポジティブ像が得られる。X 線フィルムを用いた撮影では解像度の高い画像が得られる反面、階調分解 能が低いため、中性子透過率の定量的解析には不向きである。

直接法:

ー般的には、中性子と反応して荷電粒子等放射線を放出する金属箔としてガドリニウムが用いられる。ガド リニウムはそのままでは酸化されやすいことから、アルミニウム板にガドリニウムを真空蒸着し保護のためサフ ァイヤコーティングした物(Gd コンバータ)が用いられる。ガドリニウムは中性子捕獲によりベータ線とガンマ線 を放出するが、飛程の短いベータ線により X 線フィルムを感光させるため、Gd コンバータと X 線フィルムは中 性子透過率の高いアルミニウム製真空カセッテに収納して使用される。この際、X 線フィルムの乳剤面(感光面) とガドリニウム蒸着面が密着するように配置する。フィルムと Gd コンバータの配置は、試料を透過した中性子 が X 線フィルムを透過し、Gd コンバータに入射するようにされる。中性子ビームの強度が低い場合には、蛍光 コンバータと両面乳剤の X 線フィルムを組み合わせた撮影法も使用される。こちらは、Gd コンバータ使用の場 合と比べて解像度が悪い。

#### 間接法(または転写法):

直接法がコンバータと X 線フィルムを同時に中性子ビームで照射するのに対し、間接法では、金属箔(イン ジウム箔、ディスプロシウム箔)のみを試料を透過した中性子ビームの位置に置き撮影する。この時、金属箔 は透過中性子の強度に応じて放射化される。中性子ビーム照射後に、金属箔を X 線フィルムと真空カセッテ等 を用いて暗状態で密着放置することにより、金属箔の放射化分布が X 線フィルムに転写される。間接法では、 放射化した金属箔を扱わなければならないことから、被ばくを伴う作業を避けられないが、X 線フィルムが直接、 中性子ビーム及び試料と近接していないことから、ガンマ線の混入が多い中性子ビームでの撮影や、ガンマ線 等放射線を放出する放射性試料の場合、それら放射線の影響を受けずに中性子透過像を得ることができる。

参考文献(一例)

小林久夫, RADIOISOTOPES, 56, 687-697 (2007)

#### (3-2) IP (イメージングプレート)

イメージングプレート(IP)は輝尽発光と言われる、放射線照射により励起した蛍光体が長波長の電磁波な どで別の刺激を受けた際に再び閃光を発する現象を利用した検出器である。このような輝尽性蛍光体を中性 子コンバーターである Gd を含む Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微粒子と混合させてシート基板上に塗布したものが中性子 IP である。 中性子に一定時間照射後に専用のスキャナー装置内部で赤色レーザーによって再発光した光を光電子増倍 管で読み取っている。画像読み取り後は紫外線の照射により情報を消去でき、繰り返し使える。中性子 IP の 位置分解能はスキャナーの性能によっても異なるがおおよそ 100µm 程度が実現できている。積分型の 2 次元 検出器であり計数率を気にせずに利用できるが、ダイナミックレンジはおよそ 5 桁であり、J-PARC などの加速 器中性子源での TOF 測定には対応できないため、近年では利用頻度が下がっている。検出器本体は薄いフィ ルム状シートであり、ガンマ線遮蔽用のカートリッジを用いても充分に薄いので取扱いが容易であり、本計測を 開始する前の試験計測などで利用されることがある。参考文献[1]が開発者の研究報告書で、詳しく説明され ている。





図 3-2-1:M12 ボルト締結部の画像。 左)測定したボルトとナット。右)中性子透過画像 撮影:JRR-3 MUASI-L.(波長 2.46Å、ビーム強度およそ 10<sup>6</sup>n/s/cm<sup>2</sup>) 照射時間 10 分 計測者:山形、広田(理研)

参考文献

[1] 中性子イメージングプレート BAS-ND の開発、富士フィルム研究報告書 43(1998)41

- [2] 玉木昌義、Radioisotope 56(2007)329
- [3] 野口正安、富永洋、放射線応用計測 基礎から応用まで、日刊工業新聞社

(3-3) シンチレータ+カメラ

1. 概要

本節ではカメラ型検出器を用いた中性子イメージング技術について説明する。カメラ型検出器は、観測対象 を透過した中性子の 2 次元分布を中性子透過像として取得するイメージング検出器の一つである。カメラ型検 出器はシンチレータ、ミラー、対物レンズ、カメラから構成されており、測定条件に応じ数 cm~数十 cm 角に視 野を調整できる。またカメラの選択により、高解像での撮像や過渡的現象の観察、中性子の波長に依存した撮 像(エネルギー分析型イメージング)が可能である。上述の実験機器はアルミ製の暗箱内に設置され、外部か らの光漏れを遮断している。シンチレータは <sup>6</sup>Li、<sup>10</sup>B、Gd 化合物と蛍光体(ZnS)を混ぜ、薄いアルミニウム板 に塗布している。シンチレータ内では、観測対象を透過した中性子が、式 1)-3)の中性子吸収反応から生成さ れる荷電粒子あるいはガンマ線が、シンチレータ内の蛍光体により可視光へと変換される。

$^{6}\text{Li}(n, \alpha)^{3}\text{H}$	1)
$^{10}\mathrm{B}(n,\alpha)^{7}\mathrm{Li}$	2)
$^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd},  ^{155}\text{Gd}(n, \gamma)^{156}\text{Gd}$	3)

この可視光を対物レンズでカメラに集光し検出を行う。実験では試料有・無しの条件で撮像し、両者を除算して 中性子透過率を求める。中性子線、シンチレータ、対物レンズ、カメラが直線状に並ぶ配置が最もシンプルな 検出体系である。しかし、この検出体系では、中性子がカメラに直接照射された場合、得られる中性子透過画 像の画質が低下するだけでなく、カメラ本体の深刻な故障を招く恐れがある。そのため、カメラ型検出器ではミ ラーを用いてカメラの位置を中性子ビームの照射軸からずらしている。一般的に、シンチレータの厚みが増すと、 可視光の発光量が増え短時間での撮像が可能になる一方で、シンチレータ内で発生した可視光は四方に広が るため、得られる空間分解能は低下する傾向にある。カメラについても解像度やダイナミックレンジに優れた冷 却型 CCD カメラや、高フレームレートでの撮像が可能な CMOS カメラ等の種々のタイプがある。実験を最適 な視野及び空間分解能で行うためには、シンチレータの種類や厚み、対物レンズやカメラの種類を適切に選択 する必要がある。

2. RADEN におけるカメラ型検出器

J-PARC の物質・生命科学実験施設(MLF)BL22 に建設された世界初のパルス中性子イメージング専用 の装置(RADEN)[1]には、厚みの異なる Gd 及び<sup>6</sup>Li/ZnS シンチレータとカメラ型検出器が用意されている。 本稿では、代表的な冷却型 CCD カメラ(Andor Technology Ltd, 2048×2048 ピクセル)を使用したカメラ型検 出器について説明する。この CCD カメラ(Andor Technology Ltd, 2048×2048 ピクセル)を使用したカメラ型検 出器について説明する。この CCD カメラは 16 ビットの高いダイナミックレンジを持ち、センサーは暗電流ノイズ を抑制するために-100℃まで冷却できる。視野は 50 mm f / 1.4、105 mm f / 2.8、150 mm f / 2.8 などの対 物レンズを使用することで、50×50~300×300 mm<sup>2</sup> の範囲で自由に調整可能である。これらの機器は、図 3-3-1 に示すように暗箱内に配置されており、周囲を鉛およびホウ素ゴムシートで覆うことで中性子やガンマ線の 遮蔽を行っている [2]。図 3-3-2 は、<sup>6</sup>Li/ZnS シンチレータ厚 0.1 mm、中性子ビームの平行度 L / D = 400 の 条件で視野を 3 種類(60×60 mm<sup>2</sup>、160×160 mm<sup>2</sup>、300×300 mm<sup>2</sup>)選択し測定した PSI テストパターンの中 性子透過像である。PSI テストパターンはシンチレータに直接取り付けた。PSI テストパターンは異なる幅と間 隔の Gd 線対が放射状に配置されており、得られた中性子透過像中で確認できる最も細い線対から空間分解 能を求めた。視野 160×160 mm<sup>2</sup> および 300×300 mm<sup>2</sup> での空間分解能は、それぞれ約 200 µm および 350 µm であった。1 画素あたりのサイズ(以後ピクセルサイズと呼ぶ)が 78 µm および 146 µm であるため、空間 分解能はこれらの約 2.5 倍である。一方、視野 60×60 mm<sup>2</sup>の空間分解能は約 100 µm であり、ピクセルサイ
ズ 30  $\mu$ m の約 3.3 倍であった。小さな視野では幾何学的なボケが顕著になるため、60×60mm<sup>2</sup>の視野での空間分解能は、ピクセルサイズから想定される空間分解能(75  $\mu$ m 以下)よりも悪い結果となった。また、図 3-3-3(左)に同カメラ型検出器と<sup>6</sup>Li/ZnS シンチレータ厚 50  $\mu$ m を用いて中性子のビーム平行度 L / D = 180、視野 30×30 mm<sup>2</sup>で撮像した中性子透過画像を示す。試料は J-PARC で製作した高空間分解能評価に対応した Gd 製ターゲットである[3]。図 3-3-3(右)に示した、図 3-3-3(左)点線部のラインプロファイルから、この条件での空間分解能が 50  $\mu$ m であることが分かった。

また、本装置を利用したデモンストレーションとして、生花及び樹脂製の百合を試料とした得た中性子透過画 像を示す[4](図 3-3-4(左)試料の写真、(右)中性子透過画像)。試料中の 2 本の百合のうち、左側が生花で 右側が造花である。図 3-3-4(右)に示す中性子透過像の生花部分は、右の造花と比較した場合、茎の部分だ けでなく花弁や葉など、水分を含んでいる部分が明瞭に可視化されていることが分かる。造花においては、相 対的に太い芯の部分は明瞭な透過像が得られているが、厚さの薄い花弁や葉はかすかにしか見えておらず生 花との対比がはっきりとしている。このように非破壊で中性子に感度の高い水分の存在を反映した透過像が得 られるという特性を利用して、工学・農学など様々な分野で本カメラ型検出器利用されている。

#### 参考文献

[1]T. Shinohara et al., J. Phys.: Conf. Series 746, 012007 (2016)

[2]Y. Matsumoto et al., Physics Procedia Volume 88, Pages 162-166 (2017)

[3]M. Segawa et al., NOP 2017, Proceeding, submitted. (2017)

【4】甲斐哲也他,機関紙「非破壊検査」2018年の5月号掲載予定



図 3-3-1 カメラ型検出器を用いた実験セットアップ 参考文献【2】より抜粋



図 3-3-2 カメラ型検出器を用いた PSI テストパターンの中性子透過像 (左:視野(FOV)60mm<sup>2</sup>,中央:視野 160 mm<sup>2</sup>,右:視野 300 mm<sup>2</sup>) 参考文献【2】より抜粋



図 3-3-3 左:カメラ型検出器を用いた Gd テストパターンの中性子透過像(視野 30mm<sup>2</sup>) 右:点線部のラインプロファイル 参考文献【3】より抜粋



図 3-3-4 左:カメラ型検出器を用いた百合の写真(生花・造花)、右:中性子透過像 参考文献【4】図 4より抜粋

#### (3-4)中性子イメージインテンシファイア

撮像管, テレビジョンの発展とともにイメージインテンシファイア(Image Intensifier 以下 I.I.と略記する)を組 み込んだX線テレビシステムが開発された。I.I.はX線と反応して発光する蛍光体の光を光電変換膜で電子に 変換し,加速電界と電子レンズの作用で増幅して出力蛍光面に集束し,再び可視画像に変換する真空管であ る。初期の I.I.の容器は入力側の窓含めてガラスで製作され,主に蛍光体は Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb が用いられていた。 撮影視野拡大に伴い入力窓はガラスからメタルに代わり,X線の透過率が高く散乱の少ないアルミニウムが使 われるようになった。更に反応蛍光面の膜厚を厚くして変換効率を向上させても解像度の劣化を起こさないよう に CsI 柱状結晶が開発された[1,2]。当初使われていた Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb 蛍光体が中性子でも反応し発光すること から中性子用の I.I.(中性子 I.I.と略記する)として製品化された経緯がある[3,4]。但し,中性子だけでなくX線 や  $\gamma$ 線とも反応するため,  $\gamma$ 線の遮蔽を十分に施さないと中性子とX線  $\cdot\gamma$ 線を区別して測定することが難しか った。X線との反応が CsI 蛍光体となってからは中性子 I.I.の製品は姿を消すこととなった。

1998年、従来黄緑色発光のI.I.出力蛍光体 P-20をカメラで撮影するモノクロタイプから、RGB マルチ発光す る出力蛍光体をカラーカメラで撮影するカラータイプが開発され、2003 年よりX 線カラーI.I.の製品販売が開始 された[5]。その後、入力面に Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb 蛍光体を塗布した中性子 I.I.の試作を経て、中性子用反応膜に蛍光 体ではない酸化ガドリニウム(Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)と CsI 柱状結晶蛍光体を共に蒸着して製作することに成功し、2008 年 から中性子 I.I. の製品販売が開始された[6,7]。特に CsI 柱状結晶の厚さをX 線用の約 1/10 に薄くしてX 線・ γ 線による CsI への線エネルギー付与を極力抑え Gd の内部転換電子での発光に最適化している。更に高精 細化と熱中性子より高いエネルギーでも反応し、X 線・Y 線による影響を少なくするために反応膜に炭化ボロン (<sup>10</sup>B<sub>4</sub>C)を蒸着で形成し、CsI 柱状結晶の厚さを X 線用の約 1/20 に薄くしたタイプも製品化された。図 3-4-1 に構造を示す。



図 3-4-1 中性子 I.I.の構造(論文[9]Fig.2 引用)



図 3-4-2 中性子 I.I.の解像度 JRR3-7R にて撮影(論文[11]Fig.7 と Fig.10 引用転載) 左:SI インジケータ模式図, 中:2 インチ視野モード, 右:出力蛍光面を光学拡大撮影

中性子 I.I.の解像度は使用する搭載するカメラや中性子源のコリメータ性能(L/D 等), サンプルの設置位置 で異なる。視野4インチの[i-2]<sup>10</sup>B(n,a)タイプの中性子 I.I.を電子レンズ(Electron Lens)の軌道設定で視野2 インチに拡大して, 非破壊検査規格の米国材料試験協会(ASTM)インジケータ[8,9]を撮影した結果を図 3-4-2 中に, 更に光学レンズで拡大し,約2110 万画素(5616×3744)の一眼レフにて撮影(約3.5µm/pixel)し た結果を図 3-4-2 右に示す。感度計 SI インジケータで最小のギャップ 12.5µm が視認できる。

パルス中性子源の特徴である飛行時間法(TOF:Time of Flight)とパルス中性子源で発生と同時に放出される大量の高エネルギーのX(y)線バースト(ガンマバースト)に対応させるため、主に循環器医療用で使用されている I.I.ブランキング法のスイッチング特性を高速化したタイプや I.I.出力蛍光体の残光時間の短い短残 光タイプの中性子 I.I.が開発された[10,11]。図 3-4-3 には北海道大学の瞬間強力パルス状放射線発生装置で ブランキング機能付き視野 4 インチの[i-2] <sup>10</sup>B(n, $\alpha$ )タイプを用いて ASTM 規格準拠の像質計(BPI)[9]と金 属被服のボールペンの芯を I.I.の動作タイミングを変えて撮影した結果を示す。



図 3-4-3 中性子 I.I.のブランキングまたはシャッタータイミング機能による撮影 (論文[10]Fig.13 引用転載)

図 3-4-3(a)は開始時間 C=0msec, 動作時間 D=1msec, (b)は C=0.2msec, D=17msec, (c)は C=1msec, D=17msec である。動作開始時間のタイミング設定で X(y)線による画像と中性子の画像を分けて撮影できる。

これらバーストガンマや TOF で同時に多くの情報を一度に測定するための高速カメラシステムも開発された [12]。

中性子 I.I.は比較的強いフラックスを有する(JRR3-7R 等)場所ではリアルタイム動画撮影(30~60fps)が 特徴である。金属内部での水の流れをイメージングする一例として,ブリキ缶の中に噴水のがん具を入れて撮 影した結果を図 3-4-4 に示す。



図 3-4-4 I.I.の動画撮影例(論文[10] Fig.7引用転載)

中性子で撮影した結果図 3-4-4(c)はX線で撮影した結果(b)と比較して噴水が粒になって噴き出ている様子や, ブリキ缶の内壁に当たって水の滴り落ちる様子が鮮明に見える。これら中性子 I.I.の入力反応面のサイズや材 質の種類,内部電子レンズ軌道の拡大,ブランキング機能の有無,出力蛍光面の材質,組み合わせカメラの 種類等の組み合わせラインナップ(図 3-4-5 参照)が 2014 年に発表報告されている[11]。中性子 I.I.の高感 度・高精細に着目して,少ない中性子フラックスでのイメージングの適用も検討されている。低フラックス環境で の中性子撮影では,露光時間を長くするか撮影枚数を多くして積算することが必要となる。長時間での撮影や 高感度設定での撮影の場合,放射線により発生するノイズの他に長時間ノイズや高感度ノイズが課題になる。 カメラを独自のペルチェ冷却で温度管理でき,現場への移動がし易い小型で長時間ノイズの少ないタイプも開 発されている(図 3-4-5(右)参照)。



図 3-4-5 中性子 I.I.ラインナップ(左:論文[11]Fig.11 引用転載)

#### 参考文献

#### [1] 全国循環器撮影研究会 HP 講座 No.1 装置 1「X線イメージインテンシファイア装置」

http://plaza.umin.ac.jp/zen-jun/%E5%85%A8%E5%BE%AA%E9%81%8E%E5%8E%BB/public\_html /secret\_file/HPkoza\_No.1\_I..I..pdf

[2] Peter A.E. Stewart, US Patent 4,152,598 (1979)

[3] P.A.E. Stewart : AIAA, SAE, ASME, Joint Propulsion Conference, 23rd, San Diego, CA, June 29-July 2, (1987), p.17

[4] H. Washida et al., Advances in Electronics and Electron Physics, 52, (1979), p.201

[5] K.Nittoh, C.Konagai, T.Noji : Nucl. Instr. and Meth. A 535, (2004), pp.686-691

[6] K.Nittoh, C.Konagai, T.Noji, K.Miyabe: Nucl. Instr. and Meth. A 605, (2009), pp.107-110

[7] 東芝レビュー Vol.64 No.7 (2009) p.70

[8] ASTM Designation: E545-91 (1991)"Standard Method for Determining Image Quality in Direct Neutron Radiographic Examination."

[9] RISO-M-2356 Riso National Laboratory (1982)"Standardization Activities of the Euratom Neutron Radiography Working Group"

[10] 日塔光一, 波紋 22(4), (2012)11, pp.322-328

[11] K. Nittoh, C. Konagai, M. Yahagi, Y. Kiyanagi, T. Kamiyama Physics Procedia 69 (2015) pp.177 – 184

[12] K. Mochiki, K. Ishizuka, K. Morikawa, T. Kamiyama, Y. Kiyanagi Physics Procedia 69 (2015) pp.143 – 151

#### (3-5) GEM を用いた中性子二次元検出器 nGEM

nGEM は高頻度入射粒子特性に優れた GEM(Gas Electron Multiplier)[1]を用いた中性子 二次元検出器である。茨城県東海村にある J-PARC 物質・生命科学実験施設(MLF)[2]は世界 最高強度を誇るパルス中性子源の 1 つであり、大強度中性子ビームを利用した"その場測定(insitu measurement)"で威力を発揮する。中性子ビームを照射した"その場測定"は、試料温度 や試料雰囲気などの外場条件を刻々と変化させた際の試料構造を観察する手法の 1 つであり、 MLF の稼動によって初めて身近なものとなりつつある。その一方で、MLF において精度の高い "その場測定"を実現するためには、サブ秒レベルの短時間測定でも十分な統計量を稼ぐ高計数 タイプの中性子ビームモニターが必要である。nGEM はこのような要求を満たすために開発され ており、中性子ビームモニターとして、ビームプロファイルなどの二次元画像の取得も含めて、精 度の高い入射中性子の情報を提供することができる。

KEK 物質構造科学研究所の中性子科学研究系では、2008 年頃から KEK 素粒子原子核研 究所と共同で GEM を用いた中性子二次元検出器 GEM モニター[3]の開発をおこなっている。



図 3-5-1 GEM の形状

図 3-5-1 に示すように、GEM は両面フレキシブル基板上に多数の細孔を開けた形状をしてい る。検出可能な信号を得るため、400 V 程度の電圧が GEM の両面に印加される。これによって、 荷電粒子のガス増幅作用を起こすのに十分な高電場領域が GEM の細孔内に形成される。また、 複数の GEM を積層することで、より高いガス増幅度を得ることができ、nGEM には 2 枚の GEM が信号増幅用として組み込まれている。GEM の高頻度入射粒子特性は 10 MHz/cm<sup>2</sup>を超えて おり[4]、GEM 本体に限定すれば、MLF の中性子ビームラインでガス増幅率の低下の問題を気 にすることなく使用することができる。nGEM は GEM モニターの特長を踏襲しつつ、筐体デザイ ン、データ転送能力、イベント処理アルゴリズムを改良したものである。nGEM は放射線ガス検出 器の 1 つであり、チェンバーガスとして Ar/CO<sub>2</sub>(ガス混合比 7:3)をフローして使用する。中性子の 検出は、アルミカソード上に蒸着された <sup>10</sup>B 層における n(<sup>10</sup>B,α)<sup>7</sup>Li 反応で生成したα粒子もしくは <sup>7</sup>Li 粒子を検出することでおこなう。このように中性子を検出可能な荷電粒子に変換する素材は中 性子コンバーターと呼ばれる。nGEM の中性子感度は <sup>10</sup>B の蒸着厚に依存し、1 枚の <sup>10</sup>B 層当 たり 0.1%~5%の熱中性子感度を達成している。一般に <sup>10</sup>B の蒸着厚が厚くなると、有感領域で あるチェンバーガス中に放出される荷電粒子のエネルギーが低くなるため、信号の SN 比が悪化 する。また、<sup>10</sup>B を蒸着した GEM(B-GEM)を何枚か追加することで、20%に近い熱中性子感度 を達成することができる。この場合、B-GEM は中性子コンバーターとして機能し、信号増幅に寄 与しないように印加電圧が調整される。



図 3-5-2 nGEM の概観図

図 3-5-2 に示すように、nGEM の概観は中性子を検出するためのチェンバー部分と信号を処 理するための電子回路部分が一体となった形状(524 mm×254 mm×51 mm)をしている。ノイズ 対策として、全ての信号配線はプリント基板内に収められている。チェンバー部分には検出器の 有感領域に相当する 100 mm×100 mm の GEM を積層することができ、用途に応じて積層枚数 を調整することが可能である。二次元読み出しを実現するために 128 チャンネル×128 チャンネ ル、0.8 mm ピッチのストリップ読み出し基板を使用している。フロントエンド回路として、GEM、μ-PIC[5]などの Micro Pattern Gas Detector 用に開発された CMOS プロセス ASIC (Application Specific Integrated Circuit)である ASIC-FE2007[6]を採用している。ASIC-FE2007は1チップで8チャンネル分の信号増幅、パルス整形、波高弁別とデジタル出力の処理 をおこなうことができる他、サンプリング用のアナログ信号を取り出すことが可能である。フロント エンド回路で出力されたデジタル信号は FPGA(Field Programmable Gate Array)に導かれ、 計算機に転送されるイベントデータが生成される。FPGA には後述するイベント処理のためのア ルゴリズムが実装されている。また、FPGA は 200 MHz のクロックで動作するため、中性子の飛 行時間(Time-Of-Flight:TOF)法で記録される最小の時間間隔は 5 ns となっている。計算機に 転送されるイベントデータは1イベント当たり16 バイトの大きさを持ち、中性子ヒット位置、TOF デ ータ、パルス幅データなどが記録されている。1 イベント毎のデータが計算機に保存されるため、 解析条件を変更した処理を繰り返すことができる他、時分割処理をおこなう際に使用するタイミン グデータも計算機に転送され、このデータは TOF データがリセットされた瞬間を現在時刻として記 録する。また、MLF で広く利用されている DAQ(Data Acquisition)ソフトウェアである DAQ-Middleware[7]に対応しているため、nGEMを中性子分光器や中性子回折装置の複雑なデータ

収集系に容易に組み込むことが可能である。計算機へのデータ転送は SiTCP[8]を使用した TCP プロトコルによっておこなわれ、1 Gbps に相当する最大 7.8 MHz のイベント転送が可能で ある。なお、計算機と nGEM は他のモジュールを介することなく直接、ネットワークケーブルで接 続できる。 nGEM のイベント処理アルゴリズムは GEM モニターを使って検証されており[9]、それ はチェンバー内における荷電粒子の振る舞いに基づいている。



図 3-5-3 nGEM のイベント処理アルゴリズム

図 3-5-3 に nGEM のイベント処理アルゴリズムの概要を示す。説明を簡単にするため、中性 子コンバーターはアルミカソード上の 10B 層だけとし、信号増幅用の GEM は 1 層として描かれて いる。まず、中性子源から飛行してきた中性子が反応点で n(10B,a)7Li 反応を起こし、a粒子をチ ェンバーガス中に放出する。放出されたα粒子はチェンバーガス中で電離作用を起こし、飛跡に沿 って複数の電子・イオン対("Electron cluster")を生成する。これらの電子・イオン対の内、信号 生成に寄与するのは主に電子である。この後、電子はチェンバー内に形成された電場に沿ってア ノードである読み出し基板に向かってドリフトし、GEM でガス増幅されて、さらにアノードに接近す ることで検出可能な信号を生成する。図 3-5-3 から明らかなように、GEM の近傍で生成した電子 が最も早く検出され、中性子反応点に近いところで生成した電子は最も遅く検出される。また、収 集される電子の数が多い読み出しチャンネルほどアナログ信号が大きくなり、それに比例してパ ルス幅も大きくなる。図 3-5-3 には 4 つの読み出しチャンネルが描かれており、3 番目のチャンネ ルで最も多くの電子を収集している。なお、パルス幅がパルス波高と同様にアナログ信号の大き さを反映することは、GEM モニターを用いた先行実験で確認されている[9]。1 イベント当たりのパ ルス幅は全ヒットチャンネルのパルス幅の合計として与えられる。nGEM のイベントデータには、 最も早く検出されたチャンネル、最も遅く検出されたチャンネル、TOF データ(最も早く検出された チャンネルの TOF 値)、パルス幅と到達時間の差のデータが含まれるが、ヒットチャンネルのマル チプリシティ(1 イベント当たりのヒットチャンネル数)については、その後のオフライン解析で導出 する必要がある。nGEM のイベントデータとして含まれる多くの情報を適切に活用することで、位 置分解能や n- γ 弁別特性の改善が期待できる。例えば、中性子コンバーターとしてアルミカソー

ド上の <sup>10</sup>B 層だけが存在する場合、最も遅く検出されたチャンネルを選択することで 0.85 mm (FWHM)の位置分解能が得られている。他にも、パルス幅とヒットチャンネルマルチプリシティの カットを適切に施すことで、γ線バックグラウンドを低減することができる。図 3-5-4 に計数損失(数 え落とし)に対するパルス幅の依存性(計算値)を示す。計数損失の割合は測定可能な計数率と (平均的な)パルス幅の積で与えられる。平均的なパルス幅として実際に MLF で稼動している nGEM の測定値である 170 ns を用いると、図 3-5-4 に示すように、0.1%の計数損失の状態で測 定をおこなうためには、システム全体の計数率を 60 kHz 程度に抑える必要がある。許容できる 計数損失の割合を緩くすることで、システム全体の計数率を高めることが可能であり、5%の計数 損失の状態では、システム全体で受容できる計数率は 3 MHz まで上昇する。これらの計数率の 値は前述の SiTCP の最大データ転送量よりも小さいので、nGEM のデータ収集レートは読み出 し基板を含む電子回路部分で制限されていることがわかる。計数率と計数損失の間にはトレード オフの関係があり、実際には、要求される計数率と許容できる計数損失のバランスを検討して実 験をおこなう必要がある。





- [1] F. Sauli, Nucl. Instr. and Meth. A **386** (1997) 531.
- [2] F. Maekawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 620 (2010) 159.
- [3] H. Ohshita, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 623 (2010) 126.
- [4] A. Bressan, et al., Nucl. Instr. and Meth. A **425** (1999) 262.
- [5] J. D. Parker, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 697 (2013) 23.
- [6] Y. Fujita, et al., presented at the IEEE NSS 2007.
- [7] K. Nakayoshi, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 600 (2009) 173.
- [8] T. Uchida, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-55 (2008) 2698.
- [9] M. Shoji, et al., JINST 7 (2012) C05003.

#### (3-6) マイクロピクセルチェンバー(μ-PIC)中性子イメージング検出器 (μNID)

マイクロピクセルチェンバー(uPIC)を用いた中性子イメージング検出器(uNID)は京都大学で開発[1,2]が 進められてきたマイクロパターンガス検出器の一種である。この検出器は、微細電極構造がもたらす高速応答 による MHz クラスの計数率と高い空間分解能[3]の両者を実現可能であり、J-PARC のような大強度中性子 源のイメージング検出器として魅力的である。図 3-6-1(a)のように μNID は、有効体積が 100×100×25 mm<sup>3</sup> の time-projection-chamber (TPC)、モジュール化された µPIC を含む読み出し基板[4]、FPGA を用いた データ収集系[5]から構成されている。μPIC は、図 3-6-1(b)に示すような独特の構造で 0.4 mm 間隔の 2 次 元読み出しストリップが配置されており、電荷増幅とアナログ信号のストリップ読み出しを同時に行っている。中 性子検出を促進するため、2 気圧の CF4-iC4H10-3He 混合ガス (混合比 45:5:50)を使用しており、検出効 率は熱中性子(25.3 eV)に対して 26%である。中性子と <sup>3</sup>He の反応で生成した陽子・トリチウム対がガス中を 飛行する 3 次元の軌跡とその際のエネルギー付与は、Time-Over-Threshold (TOT)\*1 法により評価され、 FPGA を使用したエンコーダーモジュールに記録され、ギガビットイーサネットを通じてパソコンに送られる。秘 跡情報を詳細に解析することにより、0.1 mm という高空間分解能と、10<sup>-12</sup>以下の低い y 線感度を実現するこ とができる。これらに加えて、μNID は 0.25 μs の時間分解能、8 Mcps の最大ピーク計数率、1 Mcps の実効 ピーク計数率という性能を有している [6]。なお、最大ピーク計数率はデータ収集系の最大処理能力を示し、実 効ピーク計数率は線形性が良好な範囲(ピーク時に数え落としが 2%以下と定義した)での最大計数率とした。 μNID の主な性能[7,8]を表 3-6-1 にまとめた。また図 3-6-2 には、μNID の高空間分解能の実例として、ガド リニウム製のテストパターンの中性子透過像を示した。µNID は、現在、J-PARC の物質・生命科学実験施設 (主に RADEN[9])で、エネルギー分析型中性子イメージングの検出器として利用されている。



図3-6-1 (a) アルミニウム製圧力容器、ビーム入射窓及びFPGAを用いたデータエンコーダーモジ ュールを含むµNIDシステムの写真、(b) ドリフト面とµPIC読み出し機構から構成されるTimeprojection chamberの概念図(ドリフト面とµPICの間隔は実物比ではない)。

<b>表</b> 3-6-1	マイクロ	ピクセルヲ	Fェンバー( <sub>1</sub>	uPIC)を用	いた中性子	イメージング	ブ検出器(μ	NID)の性能。
空間	<b>引</b> 分解能。	、最大ピー	ク計数率及	び実効ピー	-ク計数率は	RADEN	こおいて確認	認した[7,8]。

	μNID
分類	マイクロパターンガス検出器
中性子コンバータ	<sup>3</sup> He
有感面積	$100 \times 100 \text{ mm}^2$
時間分解能	0.25 μs
空間分解能	0.1 mm
検出効率(熱中性子に対して)	26%
最大ピーク計数率	$8 \mathrm{Mcps}$
実効ピーク計数率	1 Mcps

さらに、RADEN において、新たに MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems: 微少電 気機械システム)技術で製作した 215 µm ピッチの 読み出し素子を用いた空間分解能の向上試験や、 計数率の向上を目指したホウ素を中性子コンバー タとして採用する試み等、µNID の開発が続いて いる[6]。 MEMS で製作した µPIC は概ね 1/2 の 読み出しストリップのピッチを実現しており、シミュ レーションの結果では、相応の空間分解能の向上 が期待されている。一方で、ホウ素を使用したコン バータでは、中性子と10Bとの反応によって放出さ れた α 粒子のガス中での飛行距離が、反応で生 成する陽子とトリチウムが軽い<sup>3</sup>Heをコンバータに 使用した場合と比較して、非常に短くなる。このた め、イベント当たりに信号を検出するストリップの数 が少なくなり、結果として、同じバンド幅でより多く のイベント数を転送できるようになることから、最大 計数率が3倍の20 Mcps 以上にまで向上するこ



図3-6-2 J-PARCのRADEN装置でµNIDを使用し て取得したガドリニウム製テストパターンの中性 子透過像。陽子ビーム出力150 kW、照射時間 は1.5時間、L/Dは5000であった。画像の大きさ は100×100 mm<sup>2</sup>で、ピクセルサイズは40×40 µm<sup>2</sup>とした。

とが期待されている。イベント当たりのデータが小さくなることで、α粒子の飛跡の終端を正確に測定することが 困難になり、空間分解能を劣化させる懸念があるが、劣化の程度は、ストリップのピッチ程度に留まると考えら れる。なお、<sup>3</sup>He ガスから<sup>10</sup>B を使ったコンバータに変更することにより、長期にわたる検出器の維持費用を抑 えられるという利点もある。このような新しい μNID の試験が、RADEN で進められている。

\*1 パルス波高が閾値を超えた時間を計測することにより、波高値を時間幅に変換して評価することができる 計測方法。一般的なアナログ-デジタル変換による波高測定と比較して、回路が単純になるという利点がある。

#### 参考文献

- [1] J.D. Parker et al., Nucl. Instr. and Meth. A 697, 23 (2013).
- [2] J.D. Parker et al., Nucl. Instr. and Meth. A 726, 155 (2013).
- [3] A. Oed, Nucl. Instr. and Meth. A 263, 351 (1988).
- [4] A. Ochi, T. Nagayoshi, S. Koishi, T. Tanimori, T. Nagae, and M. Nakamura, Nucl. Instr. and Meth. A 471, 264 (2001).
- [5] T. Mizumoto et al., Nucl. Instr. and Meth. A 800, 40 (2015).
- [6] J.D. Parker et al., submitted to Proc. Int. Conf. Neutron Optics (NOP2017), Nara, 2017.
- [7] J.D. Parker et al., 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 1 (2016).
- [8] J.D. Parker et al., 2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop, 1 (2017).
- [9] T. Shinohara et al., J. Phys.: Conf. Series **746**, 012007 (2016).

#### (3-7) ピクセルタイプ検出器

16×16 ピクセルフラットパネル PMT を用いた中性子検出器で、高計数率タイプと高位置分解能タイプの 2 種類がある。

- <検出器仕様>
  - ・検出器面積:50×50 mm<sup>2</sup>
  - ・使用シンチレーター:Li ガラス(GS20)1mm 厚
  - ・TOF(飛行時間)測定可能
- 1)高計数率タイプ
  - ・位置分解能:3mm
  - ・最大計数率:約70Mcps(検出器全体)
  - ・検出効率約:40%(熱中性子に対して)
- 2)高位置分解能タイプ
  - ·位置分解能:約 0.5 mm
  - ・最大計数率:約5Mcps(検出器全体)
  - ・検出効率約:75%(熱中性子に対して)



検出器素子部



検出器及び回路





測定例:左)Gd板による形状、右)重心計算による画像

# (3-8) MCP検出器

Neutron sensitive Microchannel plate detector ※University of California at BerkeleyのDr. Anton S. Tremsinにより開発



### イメージング画像集

(記載項目)
画像種別(静止画、CTの一部、動画の一部)
測定施設
L/D
測定方法(検出(フィルム(感度)、IP, CCD+コンバータ,その他)、フィルター、コリメータ)
測定時間
画角
検出器のピクセルサイズ
想定中性子束
撮影年月日
撮影者・グループ
エネルギー分析等は、その他の必要情報を付加する。

#### 植物(カーネーション)

測定施設 PSI NEUTRA CT画像 測定方法:CCDカメラ 測定時間:15秒 ピクセルサイズ:0.1 mm 画角:30cm角 想定中性子束:>5 x 10<sup>6</sup> neutrons cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> mA<sup>-1</sup> (p-current) 撮影年月日:2004年6月5日 撮影者・グループ:松嶋卯月, E. H. Lehmann



カーネーション試料(左),カーネーション花冠CT(右上)の外観画像, カーネーション花冠CTの輪切り画像(右下). 植物(トウモロコシ)

測定施設 HZB, CONRAD 静止画 測定方法:CCDカメラ 測定時間:10秒 ピクセルサイズ:0.1 mm 画角:15cm角 想定中性子束:~10<sup>7</sup>n/sec/cm<sup>2</sup> 撮影年月日:2005年10月25日 撮影者・グループ:松嶋卯月, N. Kardjilov, A. Hilger, W. B. Herppich



Corn seedling

Bright color indicates concentration of D<sub>2</sub>O.

トウモロコシ苗の根が重水を吸収する様子をとらえた画像. ガラス管に水と ガラスビーズを充填した上にトウモロコシを播種し, 草丈が10 cm程度にな るまで生育させた(左). 水を重水に置換した時点から連続画像を撮影し, 差 分画像を得た(右). 重水は水より中性子の透過度が高いため, 重水を吸収 した部分の根は明るく示される. 同様に, 植物の茎や葉でも, 重水が吸収さ れ水に置き換わった部分が可視化されるので, 植物内部における水移動 の研究に応用できる.

測定施設 JRR-3	TNRF
画像種類	:静止画
L/D	:水平 176 垂直 153
測定方法	: C-CCD カメラ、6LiF:ZnS(Ag)
測定時間	:8秒(データ転送時間含む)
ピクセルサイズ	: 100 $\mu$ m/pixel
画角	:約 100×100mm <sup>2</sup>
想定中性子束	$: 1.2 \times 10^8 n/sec/cm^2$
撮影年月日	:2006 年 6 月 23 日
撮影者・グループ	: 東京理科大学・日本原子力研究開発機構グループ
概要	:環境対策から、近年建築材料として木材・木質材料の積極利用が図られてい
	る。その積極的利用には木材を難燃化する技術が必要となるが、天然素材に
	対する薬剤の含浸状況を非破壊で正確に把握する手法が求められている。本
	研究でけ 冬菇大村にたける難燃加理剤の今月出況た非破壊に上川測完する

る。その積極的利用には木材を難燃化する技術が必要となるが、大然素材に 対する薬剤の含浸状況を非破壊で正確に把握する手法が求められている。本 研究では、各種木材における難燃処理剤の含侵状況を非破壊により測定する ことを試みたものである。年輪やひび割れ等に加え、含侵剤(白色部位)の空 間的分布を見ることが出来る。



樹種の違いによる難燃処理剤の含浸状況

(上段:各樹種の実画像、下段:中性子 ln(I/I<sub>0</sub>) 画像、淡色部は難燃処理剤(ホウ素系)が含侵している箇所)

Ref) 日本建築学会、建築分野への中性子利用技術の応用[若手奨励] 特別研究委員会報告書、2010

## コンクリート(1)

測定施設 JRR-3	TNRF
画僧種類	:静止画(連続撮影)
L/D	:水平 176 垂直 153
測定方法	: C-CCD カメラ(1024×1024)、6LiF:ZnS(Ag)
測定時間	:8 秒(データ転送時間含む)
ピクセルサイズ	: 100 $\mu$ m/pixel
画角	: 約 100 × 100mm²
想定中性子束	$: 1.2 \times 10^8 n/sec/cm^2$
撮影年月日	:2006 年 6 月 23 日
撮影者・グループ	: 東京理科大学・日本原子力研究開発機構グループ
概要	:土木構造物や建築物に用いられる鉄筋コンクリートは、ひび割れを介して劣化因子
	が浸透し内部の鉄筋が腐食することで、構造体としての性能が損なわれることが
	知られている。本研究では、模擬したひび割れを介してコンクリート中に水分が浸

透する様子を差分解析により定量的に評価した。





コンクリート試験体 (100×100×20mm、w/c 50%)

コンクリートの中性子透過画像 (ホワイトスポットノイズ除去処理済(3 画像に 対するミニマムフィルタ)、淡色箇所が骨 材、濃色箇所がセメント硬化体)



コンクリートのひび割れから組織に含浸してゆく水分の様子を捉えた画像(差分) (上試験体左側にプールを設け側面より水を供給して 120 分までの経時変化を捉えた)

Ref) 未来を拓く原子力、p.53、2007

コンクリート(2)

測定施設	京都大学研究	5用原子炉(KUR) ビーム照射孔 (B-4)
画像種類	:	静止画(連続撮影)
L/D	:	約 20
測定方法	:	C-CCD カメラ(1024×1024)、LiF:ZnS (Ag)
測定時間	:	5.5秒(データ転送時間含む)
ピクセルサ	イズ:	約100µm/pixel
画角	:	約 100×100mm² (撮像範囲は 20×100mm²程度)
想定中性子	束 :	1×10 <sup>7</sup> n/sec/cm <sup>2</sup> (1MeV 運転時)
撮影年月日	:	2011 年 11 月 10 日
撮影者・グ	ループ :	東京理科大学・京都大学グループ
概要	:	鉄筋コンクリートは高い耐火性を有するが、高強度コンクリートが火災時に
		急激な加熱を受けると、表層からコンクリートが爆発的に剥離する爆裂と呼
		ばれる現象が起きることが知られている。本研究では、加熱環境下における

コンクリート内部の様子を可視化し、高温加熱に伴って生じる水分挙動を定



高温加熱下におけるコンクリートの中性子イメージング 左:工学画像、左から2番目: ln(I/I<sub>0</sub>)画像、以右: ln(I/I<sub>0</sub>)時間差分画像 (画像下側よりブンゼンバーナーにより加熱し、下面より乾燥が進む様子を捉えた)

Ref) M. KANEMATSU, N. TUCHIYA, M. TAMURA, T. NOGUCHI, D. ITO, and Y. SAITO : Experimental Research on the Moisture Behavior of High Strength Concrete under High Temperature by using TNRF, 10th World Conference on Neutron Radiography 5-10 October 2014 Grindelwald, Switzerland

コンクリート(3)

測定施設 理化学码	开究所 RANS
画像種類	:静止画
L/D	: 15.2 (ただし、L:線源までの距離 D:ビーム径)
測定方法	: C-CCD カメラ、東芝製 9 インチ Gd タイプ中性子イメージインテンシ
	ファイア
測定時間	: 15 秒 (データ転送時間含む)
ピクセルサイズ	:約45μm/pixel
画角	:約 4008×2672 mm²
想定中性子束	: 1×10 <sup>5</sup> n/sec/cm <sup>2</sup> (パルス中性子)
撮影年月日	:2017 年 1 月 20 日
撮影者・グループ	: 東京理科大学・理化学研究所グループ
概要	:鉄筋コンクリート造構造物の維持管理、特に現地における調査・診断技術の
	開発・精度向上が急務とされている中で、小型中性子線源による非破壊検査
	技術が注目されている。本研究は、理化学研究所 RANS によるコンクリート
	の中性子イメージングを試みた事例であり、内部のセメント硬化体・骨材が
	十分な精度で確認できる。



コンクリート試験体 (40×40×10mm、w/c 40%)



コンクリートの中性子イメージング (In(I/I<sub>0</sub>)画像、ホワイトスポットノイズ除去処理済 (3 画像に対するミニマムフィルタ)、淡色箇所が骨 材、濃色箇所がセメント硬化体)

鉄筋コンクリート

測定施設 J-PARC	RADEN
画像種類	:静止画
L/D	: 1000
測定方法	:CCD カメラ(2048 x 2048 pixel, Lens = Nikon 85mm / f=1.4)
	PSI 製シンチレータ(6LiF+ZnS、t=0.1mm)
	CT 撮影(180 step (1deg/step))
測定時間	:100 秒
ピクセルサイズ	: 50µm/pixel
画角	$: 140 \times 140 \text{ mm}^2$
想定中性子束	: 4.6×10 <sup>5</sup> n/sec/cm <sup>2</sup> (パルス中性子)
撮影年月日	:2017 年 6 月 13 日
撮影者・グループ	:東京理科大学・日本原子力研究開発機構・J-PARC グループ
概要	: 鉄筋コンクリートでは、鉄筋とコンクリートが一体的に応力伝達を行うこと
	が肝要であるが、経年劣化により鉄筋が腐食するとその応力伝達が損なわれ
	ることになる。本研究では、コンクリート内部に生じるひび割れと腐食の状
	態を非破壊で確認することを目的として、中性子 CT イメージングを実施し

た。結果、鉄筋周りに生じるひび割れや腐食生成物の状況を確認することが 出来た。今後、樹脂注入などの補修材の導入状況などの可視化に適用できる

ひび割れ

鉄筋コンクリート試験 体 ( $\phi$ 51×460mm<sup>2</sup>(写真) 験体の中性子透過 は一部)、鉄筋**φ10mm**)

鉄筋コンクリート試 イメージング

と期待される。

鉄筋コンクリートの中性子 CT イメージング 中央に鉄筋が見える。断面 B, C では鉄筋回りにひ び割れが観察された。

### 小型固体高分子形燃料電池の膜厚方向水分布計測

測定施設:KUR B4(5MW運転)

L/D:384(ピンホールコリメータ使用) 測定方法:冷却型CCDカメラ(PIXIS 1024, Princeton Instruments) 高輝度コンバータ 測定時間:60秒 ピクセルサイズ:8.7µm 画角:9×9mm 想定中性子束:5×10<sup>7</sup> n/sec/cm<sup>2</sup> 撮影年月日:2012年9月 撮影者・グループ:神戸大学・京都大学グループ



Hideki Murakawa, Katsumi Sugimoto, Nobuki Kitamura, Masataka Sawada, Hitoshi Asano, Nobuyuki Takenaka, Yasushi Saito, Visualization of water accumulation process in polymer electrolyte fuel cell using neutron radiography, *Physics Procedia*, Vol. 69, pp. 607-611 (2015).

Hideki Murakawa, Katsumi Sugimoto, Masataka Sawada, Masataka Nishizaki, Hitoshi Asano, Nobuyuki Takenaka, Yasushi Saito, Study of water transport phenomena in polymer electrolyte fuel cells in the through-plane direction, Multiphase Science and Technology, Vol.27, No.2-4, pp.117-132, (2015)

### 固体高分子形燃料電池のダイナミックCT計測

測定施設: JRR-3 TNRF
 L/D: 175
 測定方法: 高速度C-MOSカメラ(Basler, A504kc),
 6インチ中性子カラーイメージインテンシファイヤ((株)東芝)
 測定時間: 2.6秒毎に1時間以上の連続計測が可能
 ピクセルサイズ: 107µm
 画角: 6インチ丸
 想定中性子束: 1.5×10<sup>8</sup>n/sec/cm<sup>2</sup>
 撮影年月日: 2010年11月
 撮影者・グループ: 神戸大学・東京都市大学グループ







Nobuyuki Takenaka, Hitoshi Asano, Katsumi Sugimoto, Hideki Murakawa, Michitsugu Hashimoto, Noritaka Shindo, Koh-ichi Mochiki, Ryo Yasuda, Visualization of dynamic 3-D water behavior in polymer electrolyte fuel cell by using neutron image intensifier, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol.651, No.1-21, pp.277-281(2011)

村川英樹、橋本迪矩、杉本勝美、浅野等、竹中信幸、持木幸一、安田良、中性子ラジオ グラフィによるダイナミックCTシステムの開発と燃料電池スタック内水分布の連続三次 元可視化、日本機械学会論文集 B編、77巻、784号、pp. 2255-2262 (2011)

### リチウムイオン電池製品内部の 黒鉛負極材の結晶格子面間隔変化の可視化

測定施設 北海道大学電子加速器中性子源(HUNS)
 静止画
 測定方法 GEM型中性子TOF画像検出器
 ピクセルサイズ 800 µm×800 µm
 測定領域 9 cm×9 cm
 線源出力 1 kW
 撮影者 北大、名大グループ
 撮影種類 ブラッグエッジ



充電により、リチウムイオンが、正極から負極へ移動。 → 負極の黒鉛の原子層間に侵入し、層間隔を拡げる。 層間隔の拡がり方が鈍い箇所が存在することが可視化された。このムラを無くすことで、電 池性能が向上する可能性。

Structural Change of Carbon Anode in a Lithium-ion Battery Product Associated with Charging Process Observed by Neutron Transmission Bragg-edge Imaging, T. Kamiyama, Y. Narita, H. Sato, M. Ohnuma, Y. Kiyanagi, Physics Procedia, 88 (2017) 27-33.

### リチウムイオンニ次電池

測定施設 J-PARC SPICA

静止画

測定方法:中性子粉末回折装置の散乱槽内にて、リチウムイオンニ次電池

(LIB)サンプルを µ PIC型二次元中性子検出器の上流10cmに設置。

XYコリメータにて中性子強度を調整。

測定時間:各充電率(SOC)で約10時間

空間分解能:約100 μ m(1 σ)。ただし、下の図1では1ピクセル0.2mm×0.2mm に、図2では1ピクセル2mm×20mmにて画像化。

画角:10cm角

撮影年月日:2014年3月31日

撮影者・グループ:北海道大学、KEK



### 流動層セグレケセーション(二粒子混合)

測定施設 JAEA JRR-3 動画 L/D 238 測定方法:SITカメラ 測定時間:30frame/sec ピクセルサイズ: 0.5mm 画角:300mm×240mm 想定中性子束:1.5×10<sup>8</sup> 撮影年月日:2003 撮影者・グループ:関大グループ



粒子系の異なる2種類のけい砂を混合.細かい粒子を硝酸ガドリ ニウム2%水溶液に浸漬・乾燥させることで着色.流動化を十分に 高く保って均一混合したのち,低下させるとセグレゲーションが発 生する.別途X線ラジオグラフィにより撮影したボイド率分布よる結 果を併用することで粒子偏析を定量評価できる

S.Furui, H.Umekawa, M.Tsuzuki, M.Ozawa and N.Takenaka, Flow Visualization of Segregation Process in a Fluidized Bed by Neutron Radiography, IEEE Transactions on Nuclear Science Vol.52 No.1(2005), 295-298. 測定施設 JAEA JRR-3 動画 L/D 238 測定方法:SITカメラ 測定時間:30frame/sec ピクセルサイズ: 0.5mm 画角:300mm×240mm 想定中性子束:1.5×10<sup>8</sup> 撮影年月日:2003 撮影者・グループ:関大グループ



水平配置した伝熱管周りの流動層層材挙動(硝酸ガドリニウム水溶液 にて着色したけい砂)を動的に定量計測. 中央に配置した加熱管の熱 伝達率特性との関係を評価

R.Honda, H.Umekawa and M.Ozawa,Heat Transfer and Flow Characteristics around a Finned-Tube Bank Heat Exchanger in Fluidizedbed, Vol.605(2009),189-191. 測定施設 JAEA JRR-3 動画 L/D 238 測定方法:SITカメラ 測定時間:30frame/sec ピクセルサイズ: 0.5mm 画角:300mm×240mm 想定中性子束:1.5×10<sup>8</sup> 撮影年月日:2003 撮影者・グループ:関大グループ



鉛直配置した伝熱管周りの流動層層材挙動(硝酸ガドリニウム水 溶液にて着色したけい砂)を動的に定量計測.加熱管の熱伝達率 特性との関係を評価

古井秀治,梅川尚嗣,林幸一,小澤守,竹中信幸,流動層熱交換器内 に垂直に配置された伝熱管周りの気泡挙動,日本機械学会論文集 B,Vol.68.No.676(2002),3432-3438.

#### 鉛直バンドル配置された流動層熱交換器まわりの 流動層層材三次元分布

測定施設 JAEA JRR-3
静止画(CT)
L/D 238
測定方法:SITカメラ
測定時間:10sec × 200
ピクセルサイズ: 0.5mm
画角:300mm × 240mm
想定中性子束:1.5 × 10<sup>8</sup>
撮影年月日:2003
撮影者・グループ:関大グループ



バンドル状に配置した鉛直管周りの流動層層材挙動をCT計測. 最下部ではロの字型に空気を吹きこむことで,上昇するにつれて ボイド率分布が変化する様相を可視化

H.Umekawa, M.Ozawa and S.Furui, Bubble Behavior in Vertical Tube Banks Installed in a Fluidized Bed, Nondestructive testing and Evaluation, Vol.16(2001), 391-402.

#### 流動層セグレケセーション(粗大粒子まわりの粒子挙動)

測定施設 JAEA JRR-3 動画 L/D 238 測定方法:SITカメラ 測定時間:30frame/sec ピクセルサイズ: 0.5mm 画角:300mm×240mm 想定中性子束:1.5×10<sup>8</sup> 撮影年月日:2003 撮影者・グループ:関大グループ



流動層内に球粗大粒子を混合.層材には炭化ホウ素を粘土で 固めたトレーサー粒子を混合.粗大粒子をPTV処理,層材粒子 をPIV処理することで,粗大粒子挙動に対する層材粒子挙動の 影響を評価

梅川尚嗣,小野寺俊和,小澤守,竹中信幸,二成分系流動層内の 気泡と粗大粒子挙動の可視化,混相流,Vol.14 No.4 (2000), 451-455.

#### 流動層内単一気泡まわりの粒子挙動

測定施設 JAEA JRR-3 動画 L/D 238 測定方法:SITカメラ 測定時間:30frame/sec ピクセルサイズ: 0.5mm 画角:300mm×240mm 想定中性子束:1.5×10<sup>8</sup> 撮影年月日:2003 撮影者・グループ:関大グループ



流動層層材に炭化ホウ素を粘土で固めたトレーサー粒子を 混合した状態で単一気泡を打ち込み,気泡周りの粒子挙動 を評価

梅川尚嗣,小野寺俊和,小澤守,竹中信幸,二成分系流動層 内の気泡と粗大粒子挙動の可視化,混相流,Vol.14 No.4 (2000), 451-455.

### 流動層ディストリビュータから吹き込まれた気泡の動的評価

測定施設 JAEA JRR-3 動画 L/D 238 測定方法:SITカメラ 測定時間:30frame/sec ピクセルサイズ: 0.5mm 画角:300mm×240mm 想定中性子束:1.5×10<sup>8</sup> 撮影年月日:2003 撮影者・グループ:関大グループ



# 流動層内底部にディストリビューターを配置. ディストリビューター より排出されたガスの動的挙動を定量評価

H.Umekawa,Y.Hoshikawa,Y.Tsuji,S.Furui,M.Ozawa and N.Takenaka, Void Distribution around a Distributor Nozzle of Fluidized Bed, Neutron Radiography 8, 313-321, 2008. 流動層ディストリビュータから吹き込まれた空気の三次元分布特性

測定施設 JAEA JRR-3 静止画(CT) L/D 238 測定方法:SITカメラ 測定時間:10sec×200 ピクセルサイズ: 0.5mm 画角:300mm×240mm 想定中性子束:1.5×10<sup>8</sup> 撮影年月日:2003 撮影者・グループ:関大グループ



流動層底部にディストリビューターを配置. ディストリビューター より吹き込まれた空気の分布特性をCTIにより三次元的に評価

Application of CT-processing to Neutron Radiography Imaging of Fluidized-bed, Particle - Particle Systems Characterization, Vol.24, No.3(2006), 262-278.

### 沸騰二相流のボイド率計測(熱流束差による影響評価)

測定施設 KUR B4 静止画 L/D 測定方法:C-CCDカメラ 測定時間: ピクセルサイズ: 画角:30×75mm(テストセクションを昇降させて最長1000mmまで測定) 想定中性子束:1×10<sup>7</sup> 撮影年月日:2003 撮影者・グループ:関大グループ



強制流動沸騰系の加熱長さを変化させ同一熱平衡クオリティ 条件下で熱流束の異なる条件での沸騰状態を実現.昇降装 置を使うことで全長にわたってボイド率を計測

H.Umekawa, S.Nakamura, S, Fuijiyoshi,T.Ami and M.Ozawa, The Influence of the Heating Condition on the Void Fraction of Boiling Channel,Physics Procedia, Vol,69(2015),599-606 測定施設 KUR B4
疑似動画
L/D
測定方法:C-CCDカメラ
測定時間:2s(アンサンブル平均使用)
ピクセルサイズ:
画角:30×75mm
想定中性子束:1×10<sup>7</sup>
撮影年月日:2003
撮影者・グループ:関大グループ



入口流量を機械的に脈動させた状態で加熱実験を行い内部の 沸騰状態を可視化.撮影では脈動との同期をとることでアンサン ブル平均を実施.加熱管の熱容量による影響を評価

H.Umekawa, Convective Boiling under Unstable Flow Conditions(Y.Kozizumi, M.Shoji, M.Monde, Y.Takata, N.Nagai eds.), Boiling-Research and Advances, Elsevier, 297-315, 2017.
超臨界水熱合成装置内における超臨界水ー常温水の

混合状態の中性子線CT像

測定施設 ↓ ∕ D	京都大学原子炉実験所 500
測定方法	CCD+コンバータ( <sup>6</sup> LiF/ZnS)
測定時間	1 min×200枚
画角	65 × 65 mm²
ピクセルサイズ	64 $\mu$ m/pixel (1024 × 1024 pixel)
想定中性子束	5×10 <sup>7</sup> n/cm <sup>2</sup> s (5 MW運転時)
撮影年月日	2012年10月23-25日
撮影者	東北大学,神戸大学,京都大学グループ



S. Takami, K. Sugioka, K. Ozawa, T. Tsukada, T. Adschiri, K. Sugimoto, N. Takenaka, Y. Saito, *Phys. Procedia* **69**, 564–569 (2015).

ベアリング

測定施設 KUR E2
静止画、CT測定
L/D:50
測定方法:CCDカメラ(1100万画素)、
ZnS/LiFシンチ200µm、フィルター無
測定時間:静止画:1分間照射、CT:30秒/
枚で300枚撮像
ピクセルサイズ:約80µm
画角:約10cm×15cm
想定中性子束:8×104n/cm2/sec(静止
画、1MW)、4×105n/cm2/sec(CT、5MW)
撮影年月日:2014年4月15~17日
撮影者・グループ:名古屋大広田



測定対象物



静止画像 (右側はグリスあり、 左側はグリスなし)



CT測定例

## 小型4ストロークエンジン内の潤滑油挙動の可視化

測定施設:JRR-3 TNRF 動画:30fps~ L/D:175 測定方法:高速度C-MOSカメラ(Basler, A504kc), 9インチ中性子カラーイメージインテンシファイヤ((株)東芝) 測定時間:10秒以上 ピクセルサイズ:160µm 画角:9インチ丸 想定中性子束:1.5×10<sup>8</sup>n/sec/cm<sup>2</sup> 撮影年月日:2010年11月 撮影者・グループ:東京都市大学・神戸大学グループ



動画 https://www.jrias.or.jp/report/cat1/202.html

Masahiro Nakamura, Katsumi Sugimoto, Hitoshi Asano, Hideki Murakawa, Nobuyuki Takenaka, Koh-ichi Mochiki, Visualization of oil behavior in a small 4-cycle engine with electrical motoring by neutron radiography, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol.605, No.1-2, pp.204-207 (2009)

## 人工衛星用スラスタ

測定施設 KUR B-4 動画 測定方法:HSCカメラ、ZnS/<sup>6</sup>Liシンチレータ 140µm 測定時間:40秒(200Hz) 想定中性子束:5x10<sup>7</sup>n/sec/cm<sup>2</sup> 撮影年月日:2014年5月15日 撮影者・グループ:JAXAグループ+KURグループ

人工衛星用スラスタの触媒内におけるヒドラジン分解反応の中性子イメージングを行った。 高速度カメラで撮影した画像に画像処理を施すことで、ヒドラジンの噴射直後の様子を可視化 できた。





## モデルモーター磁場イメージング

測定施設 J-PARC NOBORU
 動画
 L/D 210
 測定方法:µNID、フィルター無し、コリメータ小
 測定時間:20時間(スピン極性を切り替えて10時間ずつ測定)
 ピクセルサイズ:200µm
 画角:3cm×2.5cm角
 想定中性子束:~10<sup>5</sup>n/sec/cm<sup>2</sup>
 撮影年月日:2016年3月20日
 撮影者・グループ:J-PARCグループ
 偏極パルス中性子を使用して撮像。偏極中性子のスピン方向は垂直方向。
 モーターの回転周期21.5Hz。





## 塗装鋼板の塗膜腐食膨れ内の水

測定施設 J-PARC BL-10 Noboru 静止画 L/D 140 測定方法:LiF/ZnS(Ag)シンチレーター+CCDカメラ、フィルター無し 測定時間:12秒 想定中性子束:~107n/sec/cm<sup>2</sup> 撮影年月日:2016年3月30日 撮影者・グループ:理研・中性子ビーム技術開発チーム+神戸製鋼所

普通鋼





撮像開始直後(

500秒後

8000秒後





## 鉄鋼材料:溶接材

測定施設 J-PARC 20番 静止画 測定方法 2次元位置敏感型Liグラス検出器(64ch) 測定時間 2時間 ピクセルサイズ 1.7mm×1.7mm 測定領域 20mm×20mm 線源出力 4kW 撮影者 茨城大、北大グループ 撮影種類 ブラッグエッジ



Fe-SUS溶接材と 測定領域内のピクセル番号

Fe板(bcc構造)とSUS304(fcc構造)の溶接材をBragg-edge法で測定した。溶接部付近のFe 板部、SUS304部、HAZ(熱影響部)部位をBragg-edgeスペクトルから特定した。スペクトル の形状変化から、それぞれの部位を特定した。

## 圧延鋼材溶接部の 優先方位・集合組織発達度・結晶子サイズの可視化

測定施設 北海道大学電子加速器中性子源(HUNS) 静止画 測定方法 GEM型中性子TOF画像検出器 測定時間 8.3時間 ピクセルサイズ 800 μm×800 μm  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 測定領域 線源出力 1 kW 北大グループ 撮影者 ブラッグエッジ 撮影種類

H. Sato, T. Kamiyama and Y. Kiyanagi, Mater. Trans. 52 (2011) 1294-1302.



圧延方向に<110>組織、その法線に<111>組織が配向・伸長。溶接部では圧延集 合組織が弱くなり、結晶子サイズが小さい。

焼き入れ棒鋼の焼き入れ部(マルテンサイト相)の 結晶格子面間隔ならびに結晶格子面間隔分布の幅の可視化

測定施設 J-PARC MLF BL10 「NOBORU」
 静止画
 測定方法 MCP型中性子TOF画像検出器
 測定時間 12時間
 ピクセルサイズ 55 μm×55 μm
 測定領域 1.4 cm×1.4 cm
 線源出力 120 kW
 撮影者 北大グループ
 撮影種類 ブラッグエッジ

H. Sato, T. Sato, Y. Shiota, T. Kamiyama, A. S. Tremsin, M. Ohnuma and Y. Kiyanagi, Mater. Trans. **56** (2015) 1147-1152.



焼入れ領域の同定可能

結晶格子面間隔分布の幅とビッカース硬さの間に比例関係が存在することもわかった →非破壊硬さ可視化法の確立

## Fe板材内の格子歪分布

測定施設 J-PARC BL 19 静止画 2次元位置敏感型Liグラス検出器(256ch) 測定方法 引張試験と透過実験を同時測定 測定時間 4時間 ピクセルサイズ 1.7mm×1.7mm 測定領域 40 mm  $\times$  40 mm 線源出力 150kW 茨城大、北大グループ 撮影者 ブラッグエッジ 撮影種類



図1 引張試験片(Fe板)



Tensile tester 図2 測定時の様子



試料の中央付近に切欠きを入れたFe板材の測定を実施した。引張試験と中性子透 過法(Bragg-edge法)を同時に測定した。引張荷重の増加と共に切欠き付近の格子 歪が増加。切欠き付近から試料の中央付近に歪分布変化を可視化した。 K. Iwase, et al., In situ lattice strain mapping during tensile loading using the neutron transmission and diffraction method, J. Appl. Cryst. 45, (2012) 113–118.

## 金属(Al、Cu、Pb)円柱

測定施設 J-PARC RADEN
 静止画
 L/D 298
 測定方法: EMCCD、ZnS/LiF 100µm、フィルター無し、コリメータ??
 測定時間: 300秒×5ステップ
 ピクセルサイズ: 35µm
 画角: 3.5cm角
 想定中性子束:~10<sup>5</sup>n/sec/cm<sup>2</sup>
 撮影年月日: 2015年10月27日
 撮影者・グループ: J-PARC、東北大グループ
 陽子ビームパワー500kW。Talbot-Lau干渉計を使用して撮像。準単色中性子
 (中心波長5Å、波長分解能10%)。吸収コントラスト、微分位相コントラスト、
 ヴィジビリティコントラストをそれぞれ取得。



## 中性子透過率測定型中性子共鳴吸収分光法による 核種・温度のCTイメージング

測定施設 北海道大学 電子加速器パルス中性子源「HUNS」
 静止画
 測定方法 64ピクセルタイプ<sup>6</sup>Liガラスシンチレーション検出器
 測定時間 21時間
 ピクセルサイズ 2 mm×2 mm
 測定領域 1.8 cm×1.8 cm
 線源出力 1 kW
 撮影者 北大グループ
 撮影種類 共鳴吸収

H. Sato, T. Kamiyama and Y. Kiyanagi, Nucl. Instrum. Methods A 605 (2009) 36-39.



物体内部の核種・温度の非破壊・非接触CTイメージング 中性子透過率測定体系(2次元検出器)の使用による迅速測定



## 中性子共鳴吸収を用いたマイナーアクチニド核種のイメージング

測定施設 京都大学複合原子力科学研究所 電子線型加速器 静止画 GEM型中性子検出器(128ch×128ch) 測定方法 測定時間 21時間 ピクセルサイズ 0.8 mm×0.8 mm 測定領域  $100 \text{mm} \times 100 \text{mm}$ 電流値 0.7 kW (平均電流24 µ A、パルス幅1 µ s. 50Hz) 撮影者 京大グループ 撮影種類 共鳴吸収

D. Ito, Y. Takahashi, T. Sano, J. Hori and K. Nakajima, JPS Conference Proceeding, (to be published)



共鳴吸収を用いた核種選別型イメージング マイナーアクチニド、LLFPなど放射性物質に適用可能

## 日本刀の結晶組織構造



Y. Shiota, H. Hasemi, Y. Kiyanagi, Physics Procedia 88 (2017) 128 – 133

I **-**83

## オートラジオグラフィーの例(BNCTへの利用の展望)

CR-39 プラスチック飛跡検出器を用いて良質な NCAR 画像が得られるようになり、輸送性 と固着性に優れた <sup>10</sup>B デリバリー薬剤の検索が容易になった(図参照)。また、NCAR 像の 飛跡サイズ計測により粒子の LET スペクトルを導くことができるので、組織内における陽子 による吸収線量とα、7Li 粒子による吸収線量を弁別して推定することも可能である。これは この手法のみが有する特長であり、細胞レベルでのマイクロドジメトリーへの道を拓き、今後 の臨床に向けてのファントム実験などへの適応が期待される。



α 飛跡密度による腫瘍内<sup>10</sup>B 原子分布

図は、<sup>10</sup>BSH 封入トランスフェリン修飾 Poly-ethylene glycol 結合 Liposome 静脈投 与 60 時間後のマウスの腫瘍部において観測された α とLi の飛跡の位置を×、y座標 上にマッピングしたもので、腫瘍部内<sup>10</sup>Bの分布を表している。濃淡(飛跡密度)が<sup>10</sup>B 濃度を示している。<sup>10</sup>Bは腫瘍部内で偏在しているが、静脈投与 60 時間後も十分量の <sup>10</sup>Bが蓄積していることがわかる。オートフォーカス機構の付いた広領域画像高速取得 顕微鏡を用いることで大量の飛跡を迅速に解析できるので、NCAR 像を図のように 飛跡位置のマッピングによりコンピュータ上に再構築できる。

Yanagie H et al : Biomed.Phamacother, 60: 43-50, 2006.

# 中性子施設ハンドブック



写真提供: J-PARCセンター

公益社団法人日本アイソトープ協会 理工学部会 中性子応用専門委員会

2018年3月

## <u>中性子源ハンドブックについて</u>

中性子を用いたイメージングには中性子源が必要ですが、これまでは、 原子炉や大型加速器などの施設しかありませんでしたが、最近は比較的小 型の加速器を用いた中性子源ができているので、中性子イメージングを やってみようかと考えている方にも、以前より容易に施設とコンタクトで きるようになっています。ここでは、日本アイソトープ協会中性子応用専 門委員会のもと、施設の概要について簡単にまとめています。実際の利用 にあたっては、各施設へ直接連絡してください。

- 1.目的:中性子に馴染みのない方に対して、
   中性子施設の概要が一目で分かるようにする。
- 2. 記載項目:以下の内容を網羅するようにする。
  - 施設名
  - 住所
  - 連絡先

施設の図面

施設の概要

中性子特性(中性子束、Cd比、L/D、照射野、n/ $\gamma$ ) 検出器

付帯設備

撮影種類(静止画、CT、動画、ブラッグエッジなど)

3. 掲載施設名

(大型施設)

J-PARC RADEN (大強度陽子加速器施設)

JRR-3 TNRF (原子力機構研究炉)

(中型施設)

KUR B-4、E-2 (京都大学複合原子力研究所原子炉) (小型加速器施設)

HUNS (北海道大学中性子源)

青森県量子科学センター

RANS (理研中性子源)

KUANS (京大中性子源)

KURNS-LINAC (京都大学複合原子力研究所中性子源)

SHI-ATEX (住重アテックス)

(可搬型)

小型放電型核融合中性子源 (京大エネルギー理工学研究所) (その他)

世界のイメージング施設の例

## 螺鈿(RADEN) J-PARC物質・生命科学実験施設BL22 Energy-resolved neutron imaging system

## 住所:茨城県那珂郡東海村白方2-4

http://www.j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/instrumentation/ns\_spec.html#bl22

#### (施設概要)

核破砕中性子源

	陽子加速器
エネルギー	3 GeV
最大電流	333 µA
繰り返し	$25~\mathrm{Hz}$
パルス幅	$\sim 1 \mu s$

#### (中性子特性)

中性子強度(飛行距離18m)	
0.5 eV以下	$3  imes 10^7$ n/s/cm <sup>2</sup> /MW
5 meV以下	$2  imes 10^7$ n/s/cm²/MW

#### 撮影種類

ラジオグラフィ、トモグラフィ、 ブラッグエッジ、共鳴、磁場

#### 検出器

CCD+ZnS/<sup>6</sup>Li+CCDカメラ、カラーI.I.、 GEM検出器、μNID検出器、 <sup>6</sup>Liガラスピクセル検出器、

## 最大視野

300x300 mm

最高空間分解能

50µm







## 螺鈿(RADEN) J-PARC物質・生命科学実験施設BL22 Energy-resolved neutron imaging system





## **ZnS/<sup>6</sup>LF**シンチレータ(厚さ50µm) 視野: 30 x 30 mm<sup>2</sup>, (15µm/pixel) 照射: 300秒 x 3回の平均





## 日本原子力研究開発機構 熱中性子ラジオグラフィ装置(TNRF)

住所:〒319-1195

茨城県那珂郡東海村大字白方2-4 日本原子力研究開発機構

http://jrr3uo.jaea.go.jp/index.htm

連絡先:JRR-3ユーザーズオフィス

Tel: 029-282-6098, Fax: 029-282-6763 e-mail: jrr3-uoffice@jaea.go.jp 中性子源:研究用原子炉JRR-3M(熱出力20MW)

#### 装置仕様

中性子束(n/cm²/s)	$1.2$ $ imes$ $10^8$
照射野(W × H mm)	255~ imes~305
コリメータ比 (L/D)	176 *

\* ピンホールコリメーターを設置することで変更可能(ただし、照射野は狭くなる)

共用撮像システム

- 1) 冷却 CCD カメラ(浜松ホトニクス製 C4742-98)
- ・有効画素数 1024×1024
- ・濃度階調 16bit
- ·静止画撮影用
- 2) EM-CCD カメラ(浜松ホトニクス製 C9100-02)
- ・有効画素数 1000×1000
- ・濃度階調 14bit
- ・動画撮影用
- 3) 高速度カメラ(フォトロン製 FASTCAM SA5)
- ・有効画素数 1024×1024(<7000fps)、512×272(50000fps)
- ・濃度階調 12bit
- · 高速度撮影用

## 撮影室概要



- ・大型構造物も撮影可能
- ・CT 撮影可能
- ・撮影室の広さ(W×H×D) 1456×1930×980 mm
- ・搬入扉幅
   934 mm

撮影例

ガドリニウム製テストパターン



CT 用インジケータ



## B-4 京都大学研究用原子炉B-4ス-パーミラー中性子導管実験室 B-4 supermirror neutron guide tube facility

住所:大阪府泉南郡熊取町朝代西2-1010 http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/kur



## E-2 京都大学研究用原子炉E-2水平照射孔 B-4 supermirror neutron guide tube facility

住所:大阪府泉南郡熊取町朝代西2-1010 http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/kur

(施設概要)

研究用原子炉 KUR 定格出力:5MW (中性子特性)

中性子束(ビーム出口)	3.2 × 10 <sup>5</sup> n/sec/cm <sup>2</sup> @ 5MW
N/γ比	1.0 × 10 <sup>5</sup> n/mRcm <sup>2</sup>
L/D	100
カドミウム比	400



撮影種類

ラジオグラフィ、CT撮影

#### 検出器

CCD+ZnS/<sup>6</sup>Li+CCDカメラ

#### 最大視野

φ15mm

**最高空間分解能** 100μm



## HUNS 北海道大学加速器中性子源

Hokkaido University accelerator driven Neutron Source

## 住所: 札幌市北区北13条西8丁目

 $1.6 \times 10^{12}$  n/s (34MeV, 1kW)

 $3.1 \times 10^3$  n/s/cm<sup>2</sup>/kW

(飛行距離7m)

http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/hulinac/

#### (施設概要)

発生中性子強度

冷中性子強度

新電子線型加速器(2018年秋以降、3.5kW)

RF	s-band	
最高エネルギー	35  MeV	
最大平均電流	100 µA	
繰り返し	10~100 Hz	
パルス幅 10 ns ~ 4 µs		
(中性子特性(ただし、旧加速器による値))		

撮影種類

静止画、ブラッグエッジ、共鳴

検出器(ピクセルサイズ)

- 1. GEM検出器(0.8 mm)
- 2. カラーII (~100 μm)
- 3. Liピクセル検出器

#### 付帯設備

速/熱/冷中性子源+X線源 恒温装置 -150~200℃ ステップ撮像用回転ステージ 各種ビームラインデバイス







## 青森県量子科学センター

## 中性子ラジオグラフィ撮影装置

Aomori prefecture Quantum Science Center (https://www.aomori-gsc.jp/)

住所:青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮字表舘2-190 TEL:0175-72-1270

〇サイクロトロン 20MeV,50 µ A(中性子ラジオグラフィにおける照射条件)
 〇水平ポートと垂直ポートの2ポートから構成
 〇測定位置における中性子束 6.1×10<sup>5</sup>n/sec/cm<sup>2</sup>(熱中性子)
 〇コリメーション比 L/D=44
 〇測定位置までの距離 2,100mm
 〇照射野 430×350mm
 〇イメージング検出器 工業用X線フィルム+Gdコンバータ

中性子用イメージングプレート



## RANS 理研加速器中性子源

**RIKEN** accelerator driven Neutron Source

住所:埼玉県和光市広沢2-1

http://rans.riken.jp

(施設概要)

陽子線形加速器

RF	$425~\mathrm{MHz}$
エネルギー	$7 { m MeV}$
最大電流	70 µA
繰り返し	12~150 Hz
パルス幅	20~160 µs
最大RF Duty factor	1.3 %

## イメージング検出器(ピクセルサイズ)

L/D 21-781 (最大値)

 $LiF/ZnS + CCD (40\mu m)$ 

Gd, B<sub>4</sub>Cタイプイメージインテシファイア + CCD (40μm) LiF/ZnS, Liガラス + 位置感応型光電子倍増管(~1mm) <sup>3</sup>He 位置感応型検出器(~10mm)

(中性子特性)

発生中性子強度 熱中性子強度 ~10<sup>12</sup> n/s ~10<sup>4</sup> n/s/cm<sup>2</sup> (飛行距離5m)



ステーション

20m

## KUANS 京大陽子加速器中性子源

Kyoto University Accelerator driven Neutron Source (KUANS)

## 住所:京都市左京区北白川追分町

http://phi.phys.nagoya-u.ac.jp/JCANS/kuans-j.html

#### (施設概要)

加速器中性子源

	陽子加速器
エネルギー	3.5 MeV
平均電流	30 <i>µ</i> A
繰り返し	100 Hz
パルス幅	~ 50 μ s

#### (中性子特性)

中性子強度(飛行距離1m)	
発生中性子強度	<b>~</b> 10 <sup>11</sup> n∕s
熱中性子強度	∼10 <sup>3</sup> n/s/cm <sup>2</sup>
	@2m, L/D>20

撮影種類

ラジオグラフィ

検出器 PSPMT+ZnS/<sup>6</sup>Li

最大視野

60 mmф

**最高空間分解能** 0.5mm



写真(左):陽子加速器(手前)と中性子発生源の遮蔽体(中央奥) (右):中性子飛行空間

## KUANS 京都大学陽子加速器中性子源 (Kyoto University Accelerator driven Neutron Source)

インジケータによる線質・像質評価



## KURNS-LINAC 京都大学複合原子力科学研究所 電子線型加速器

**Electron Linear Accelerator** 

住所:大阪府泉南郡熊取町朝代西2-1010 http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/kur

施設概要 電子線型加速器

最大出力	6kW	KURRI LINA (pulsed electr
エネルギー(電子)	最大46MeV	<b>T</b>
最大平均電流値	200μΑ	Ta-target Pb
繰り返し	1Hz~300Hz	
パルス幅	$2$ nsec $\sim$ 4 $\mu$ sec	Water
光中性子源	Та	Tank
		135°

## 中性子特性(12m飛行導管使用時)

中性子束** ( n/sec/cm2/μA)		
Thermal	2.36E+02	
(0.002 eV < E < 0.2 eV)		
Epi Thermal	2 13F+02	
( E > 0.2 eV)	2.102.02	



\*減速材を変更することで、任意に中性子スペクトルを変更可能。 本表の値は、下記写真の反射材(黒鉛)と減速材として厚さ50mmのポリエチレン板を使用した例





## 住重アテックス加速器中性子源

## SHI-ATEX accelerator driven Neutron Source

#### 住所 愛媛県西条市今在家1501

連絡先 電話 e-mail 鵜野浩行 0898-64-6949 hiroyuki.uno@shi-g.com

(施設概要)

サイクロトロン(Cyclotron)

加速粒子	陽子
加速エネルギー	$18 { m MeV}$
最大電流	20 µA

撮影種類 静止画(フィルム、IP)

## 撮影機器

 ①工業用X線フィルム +Gdコンバータ
 ②中性子用IP

## (中性子特性)

中性子強度 (垂直ポート)	$2.0  imes 10^5  ext{ n/s/cm}^2$ (18MeV, 20 $\mu$ A)			
L/D	44			
照射野	$350 \mathrm{mm}  imes 430 \mathrm{mm}$			





## 小型放電型核融合中性子源

#### Portable discharge-type fusion neutron source

住所 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学エネルギー理工学研究所 連絡先 増田 開 電話: 0774-38-3443 e-mail: masuda@iae.kyoto-u.ac.jp

#### (施設概要)

#### 慣性静電閉じ込め型核融合中性子源

球形陽極直径	20 cm
最大放電電圧	120 kV
最大放電電流	300 mA
運転モード	CW
最大連続運転時間	40 hr / week

#### (中性子特性)

発生中性子強度	1.0×10 <sup>8</sup> n/s (2.45MeV単色)
熱中性子束	$8.1\! imes\!10^2$ n/s/cm $^2$
(0.2eV以下)	(距離36cm)

#### 撮影種類

#### 静止画

**検出器** イメージングプレート

#### 付帯設備

(PGA用検出器)
 BGO 3<sup>"</sup> dia. x 3<sup>"</sup> L
 LaBr<sub>3</sub> 3<sup>"</sup> dia. x 3<sup>"</sup> L
 (生体試料照射用)
 低温インキュベータ
 温度精度 ±0.5K







中性子透過像

X線透過像

中性子/X線同時撮像

中性子源がX線も同時 に発生

中性子IP / X線IP

Cd (1mm厚)上の穴の 直径は, 左から3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 mm

## 世界のイメージング施設の例

国名	都市名	施設名	中性子源	装置名・ビームライン名	パワー	
	Gaithersburg	NIST	NBSR原子炉	BT-2(熱中性子)	20MW	
アメリカ	Sacrament	UC Davis	TRIGA原子炉	(熱中性子)	1 MW	
	Oak Ridge	ORNL	HFIR	CG-ID (熱中性子)	85MW	
	Bloomington	LENS	p線形加速器	(冷中性子)	$^{\sim}4\mathrm{kW}$	
オーストラリア	Sydney	ANSTO	OPAR原子炉	DINGO(熱中性子)	25MW	
韓国	Daejon	KAERI	HANARO原子炉	(熱中性子)	30MW	
スイス		PSI	SINQ陽子加速器	NEUTRA(熱中性子)	- 1 MW	
	villigen			ICON (冷中性子)	1 MW	
ドイツ	Munich	TU Mensish	FDM 9百乙后	ANTARES(冷中性子)	9EMW	
	Munich	TU Munich	FRM-2原子炉	NECTOR(高速中性子)	25MW	
	Berlin	HZB	BER-2原子炉	CONRAD(冷中性子)	1 OMW	
ハンガリー	Budapest	KFKI	WWS-M原子炉	(熱中性子)	10MW	
南アフリカ	Pelindaba	NECSA	SAFARI原子炉	SANRAD(熱中性子)	20MW	
	Bejing	CIAE	CARR原子炉	NRA(熱中性子)	60MW	
中国	Beijing	PKUNFTY	d線形加速器	(熱・熱外中性子)	0.8kW	
	Beijing	CPHS	p線形加速器	(熱中性子)		
タイ	Bangkok	TRR-1/M1	TRIGA原子炉	NR(熱中性子)	1 MW	
ロシア	Dubuna	IBR-II	パルス炉	(熱中性子)	2MW	
インドネシア	Serpong-Tangeran Selatan	gGA Siwabessy MTR	原子炉	RN1(熱中性子)	30MW	
ハンガリー	Budapest	BNR	BRR(原子炉)	RAD(熱中性子)	1 OMW	

#### 執筆者一覧

## (中性子イメージングカタログ/中性子施設ハンドブック) \*五十音順、敬称略

#### 第 26 期理工学部会 中性子応用専門委員会

委員長	鬼柳	善明	名古屋大学	
委員	飯倉	寛	日本原子力研究開発機構	
	岩瀬	謙二	茨城大学	
	氏平	祐輔	東京大学名誉教授	
	甲斐	哲也	日本原子力研究開発機構	J-PARC センター
	兼松	学	東京理科大学	
	加美山	隆	北海道大学	
	齊藤	泰司	京都大学	
	篠原	武尚	日本原子力研究開発機構	J-PARC センター
	竹谷	篤	理化学研究所	
	竹中	信幸	神戸大学	
	広田	克也	名古屋大学	
	松嶋	卯月	岩手大学	
	松林	政仁	日本原子力研究開発機構	
	持木	幸一	東京都市大学	

#### 外部執筆者

浅野	等	神戸大学	高橋	浩之	東京大学
伊藤	大介	京都大学	高見	誠一	名古屋大学
鵜野	浩行	住重アテックス(株)	田崎	誠司	京都大学
梅川	尚嗣	関西大学	塚田	隆夫	東北大学
上野	桂	青森県	日塔	光一	東芝原子力エンジニアリング
大下	英敏	高エネルギー加速器研究機構			サービス(株)
小倉	紘一	日本大学	廣井	孝介	日本原子力研究開発機構
木野	幸一	産業技術総合研究所			J-PARC センター
小林	久夫	立教大学名誉教授	丸山	一雄	帝京大学
酒井	卓郎	日本原子力研究開発機構	柳衛	宏宣	東京大学
佐藤	博隆	北海道大学	渡辺	賢一	名古屋大学
瀬川	麻里子	日本原子力研究開発機構	J. D. F	Parker	総合科学研究機構
関	義親	日本原子力研究開発機構			
		J-PARC センター			

その他、本誌作成にあたりご協力くださいました皆様方に、心より御礼申し上げます。