# 中性子イメージング技術の基礎と応用(基礎編第10回)

# 中性子断層撮影法の実際

# 持木幸一,小林久夫\*

武蔵工業大学 知識工学部 情報科学科 158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 \*立教大学名誉教授 238-0023 神奈川県横須賀市森崎 4-9-27(自宅)

Key Words : neutron, neutron radiography, neutron imaging, computed tomography, neutron computed tomography

### 1. はじめに

中性子を用いた断層撮影法(tomography あ るいは CT, computed tomography)の基礎の 部分は,この連載講座の基礎編第8回(2007 年11月号,751頁)<sup>1)</sup>で述べられているよう に,1980年代から報告されており,多くの基 礎研究や応用への開発がなされてきた。ここで は,応用に即した視点から,中性子のエネルギ ーを色々と変えた場合,また,単色にした場合 に得られる断層像の特徴や,最近注目を集めて いる位相を利用した断層撮像法など、また,撮 像装置に特徴を持たせた断層撮像法などについ て説明する。ここでは中性子 CT の全てを論ず るわけにいかないので,その中から主だったも のを取りあげる。

#### 2. 中性子 CT

通常の CT は, ほとんどが熱中性子ビームを 用いて行われてきたが, 最近は中性子イメージ ング用の冷中性子ビームラインが各所で稼働を 始めたため, 冷中性子 CT も行われるようにな っている。最近実施された例を,単色エネルギー CT も含めて概説する。

## 2·1 熱中性子 CT

熱中性子エネルギーは、最も多くの実用例が ある領域である。日本原子力研究開発機構の JRR-3M (Japan Research Reactor No.3 Modified) O TNRF2 (The 2nd Thermal Neutron Radiography Facility)は熱中性子束が1.5×10<sup>8</sup> n·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>であり、<sup>6</sup>LiF+ZnS:Agの中性子 コンバータと浜松ホトニクス社製の冷却型 CCDカメラC4880-50(1024×1024画素)が 設置されており、コンピュータ制御で任意の回 転ステップで必要な透過像データを自動収集で きる。コリメータ-コンバータ間距離Lとコリ メータ開口部の寸法 D の比である L/D は、ビ ームの平行性を評価する尺度であり、TNRF2 では水平方向が 176 で垂直方向が 153 である。 この施設を用いた様々な CT の例から四つの例 を取りあげる。

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Fundamentals Part 10).

Practical Applications of Neutron Computed Tomography.

Koh-ichi MOCHIKI and Hisao KOBAYASHI\*: Musashi Institute of Technology, 1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo158-8557, Japan, \*Professor Emeritus at Rikkyo University, 4-9-27, Morisaki, Yokosuka-shi, Kanagawa Pref. 238-0023, Japan (Residence).



図1 サイクル試験実施後のテスト用タンク中の水素貯蔵合金の水素濃度の可視化 (上部は透過像,下部は断層像)

(b) 100 サイクル



(a) バッフル板位置での水分率
 (b) バッフル板から下流へ 72 mm の位置での水分率
 図 2 原子炉模擬燃料集合体中の気液 2 相流の水分率の CT による計測

Matsubayashi ら<sup>2</sup>は,水素貯蔵合金を内蔵 した厚さ9.5 mmのテスト用タンクの透過像 (図1上3図)と断層像(図1下3図)を示し, 水素の吸収と放出の繰り返しサイクル数1回 (左図),100回(中図),140回(右図)による 水素濃度の挙動を示した。論文の動画像を見る と,サイクル数とともに水素吸蔵合金が集まり 粒度を増しながら下方に移動していることが良 く理解できる。これが,水素放出性能劣化の原 因となっていることが理解される(本連載講座 応用編第6回,9月号,585頁)<sup>3</sup>。

(a) 1 サイクル

静止した物質の分布ではなく,均質な水や気 体が混ざり合った物質の定常的な流れの現象を, 時間平均した分布として CT 画像として描出す る手法は、やはり JRR-3M の TNRF2 を用いて、 Takenaka  $6^4$ のグループにより初めて実施さ れた。図 2 は、複数のバンドルされたロッドの 間隙を流れる空気水の二相流の CT の試みであ る<sup>5)</sup>。

(c) 140 サイクル

呉田と星<sup>6</sup>は、原子炉燃料集合体中のボイド 率の計測や原子炉での稠密度の高い燃料集合体 の冷却性能の研究も行っている。水塊のダイナ ミックな流動状況を把握するため、時系列デー タを高速処理して3次元の動画表示を行った。 図3は、燃料棒間ギャップが1mmの低減速軽 水炉を模擬した金属製試験体内を流れる沸騰流



(a) 中性子ラジオグラフィシステム



(b) 中性子 CT で得られた沸騰流データの3次元表示

図3 原子炉模擬燃料集合体中の沸騰流の可視化

を高速度撮影し,可視化したものである。図3 (a)の左図は撮像装置概観の側面,中図は金属 試験体の中性子透過図,右図下はその透過画像 の3次元表示,右図上及び図3(b)は中性子 CT 画像である。図3(b)では,水の偏在具合や水 蒸気の部分が識別でき,バンドル間の狭い領域 に水が溜まり易く,水は塊となって3本がバン ドルされている少し広い間隔部分の中心に近い 程高速に流れること等が明らかとなった。なお, 同様な研究や核燃料用ペレットの CT の研究は, 本連載講座応用編第7回(2007年10月号,699 頁)<sup>7</sup>に纏められている。

松島<sup>8)</sup>は、中性子を透過し難い植物中の水の 挙動を見るために、中性子を比較的透過しやす い重水をトレーサとした CT を JRR-3 で実施 した(図は、本誌、2007 年 9 月号、556 頁参照)<sup>8)</sup>。

国外の施設でも実例は多く,歴史的遺品,工 業製品,岩石やコンクリート中の水分密度や亀 裂,食料品など,多種多様なCTが実施されて いる。

ミュンヘン工科大学FRM-II (Forschungs-Reaktor Munchen II)のMühlbauerとGebhard<sup>®)</sup> は、ドイツ南部で発見された中世の剣の装飾を 調査するため 3 次元 CT(図 4)を実施した。 剣の柄付近(図 4 (a) 左図)の内部が CT 画像 (図 4 (b) 右図)で描写されている。

ミュンヘン工科大学と米国アエロテスト社の グループ<sup>10)</sup>は、小型の原子炉(TRIGAI)で もタービンブレード中の欠陥検査に利用できる ことを示した。図5は3次元CTの一つである。 南アフリカのRadebne ら<sup>11)</sup>のグループは、

図 6 に示したように、コンクリート中の鉄板が 蒸留水や 20% 食塩水によって腐食が進行する 具合を比較するために CT を行った。この図 6 (a) 矢印の部分では画像化されている鉄板が、 図 6 (b) の 20% 食塩水 2 か月間浸潤した場合は ほとんど腐食してしまっていることを示した。 なお、同じ条件で蒸留水浸潤の場合の腐食はほ とんど認められなかったという結果も示してい る。

米国 Cleveland Ⅳ ら<sup>12)</sup>のグループは,とうも ろこしの実の構造を 3 次元 CT により可視化し (図 7),またカビに感染した実の胚の部分は分 解されて水素濃度が減少するため、中性子吸収 率が減少することを示した。



図4 ドイツ南部で発見された中世の剣の装飾の調査



図 5 AERTEST 原子炉で得られたタービンブレードの CT データの色々な方向からの 3 次元表示 (*L*/*D* = 250)



(a) 進行前

(b) 進行後





図 7 とうもろこしの実の CT による解析

RADIOISOTOPES



図8 冷中性子による直径15cmのフィルタの断層像

2・2 冷中性子・単色中性子

熱中性子よりも水素に対する巨視的断面積が 約5割程度大きい冷中性子を使用すると,より コントラストのある断層像が得られる。最近は, 国外で冷中性子用の専用ビームポートがいくつ か設置されるようになり,この分野の応用研究 が進んでいる。

ドイツの HMI (Hahn Meitner Institute)の 研究用原子炉 BER-II (Berlin Experimental Reactor II) にある多機能施設 CONRAD (Cold Neutron Radiography)では,波長域が約 0.2 nm から 0.65 nm の冷中性子が得られ,図 8 は, L/D が 250, ビーム幅 9×9 cm<sup>2</sup>,中性子束 1.6 ×10<sup>7</sup> n · cm<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>のフィールドで,直径 15 cm の被検体であるフィルタを上下左右に 40 秒間 スキャンさせて得た 300 枚の透過像をもとに再 構成した断層像である<sup>13)</sup>。この施設 (CON-RAD) には、ダブルクリスタルによる中性子 のモノクロメータがあり、0.2 nm から 0.65 nm の範囲で、分解能 ( $\Delta\lambda/\lambda$ )約10%の単色中 性子を得ることができる。中性子束は、波長 0.3 nm で 4×10<sup>5</sup> n·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>であり、ビーム サイズが 5×20 cm<sup>2</sup> のビームを発生できる。

Manke ら<sup>14)</sup>は,このビームを用いて積層燃 料電池内の水分の発生分布の挙動をダイナミッ ク表示した。一方向の透過像を露光時間 0.8 秒, 読み出し時間 3.7 秒で撮像し,プロジェクショ ン数 200 を 15 分かけて測定した。図 9 は 15 分 おきに出力電流を変えて 4 回連続 CT 測定し, 積層燃料電池の第二層内の水分を画像化した CT 像で,左から右に 0 分(出力電流(以下同) 0 mA,水の量(以下同) 0.24 cm<sup>3</sup>),15 分後 (400 mA, 0.42 cm<sup>3</sup>),30 分後(800 mA, 0.49 cm<sup>3</sup>),45 分(900 mA, 0.52 cm<sup>3</sup>)の画像であ る。出力電流の増加とともに,水分が発生する 領域が拡大している過程が明瞭に可視化されて いる。

図 10 は京都大学研究用原子炉(KUR)の最 大ピーク強度が波長 1.2 nmの極冷中性子施設 (Very Cold Neutron, VCN)で撮像された植物 中の水分分布を示す断層像である<sup>15)</sup>。右図中の 断層像 a, b, c は,各々透過像の a, b, c に



 (a)開始直後
 (b) 15 分後
 (c) 30 分後
 (d) 45 分後

 (電流値 0 mA,水の量 0.24 cm<sup>3</sup>)
 (400 mA, 0.42 cm<sup>3</sup>)
 (800 mA, 0.49 cm<sup>3</sup>)
 (900 mA, 0.52 cm<sup>3</sup>)

 図 9
 冷中性子による積層電池の出力電流値と発生した水分の 3 次元 CT による可視化



図10 京都大学研究用原子炉(KUR)の極冷中性子 実験孔で取得されたカーネーション切花の透 過像及び断層像

対応している。

## 2・3 熱外及び高速中性子

熱外中性子 CT の例として, Dy-IP (輝尽発 光体に Dy を混在させたイメージングプレー ト)を用いた例がスイス PSI (Paul Scherrer Institute)の Vontobel<sup>16)</sup>及び玉置<sup>17)</sup>によって報告 されている。これは, SINQ(Spallation Neutron Source)の使用済み核破砕ターゲットの3次 元 CT を実施したもので,本連載講座応用編第 4回(2007年7月号,423頁)<sup>18)</sup>に図と共に詳 述されているが,使用済み核燃料物質の CT 検 査法として注目される。 核分裂中性子を利用した東京大学「弥生炉」 では、金属部分が厚い工業製品などの大型の被 検体の検査に利用されている。Nakajima ら<sup>19)</sup> は、いくつかの試験片(図 11 (a))についての 高速中性子 CT を実施した。図 11 (b) は、弥生 炉のサーマルカラム(中性子強度 1.8×10<sup>7</sup> n・cm<sup>-2</sup>・s<sup>-1</sup>)において、高速中性子用のポリ プロピレンと ZnS: Ag からなるコンバータと SIT (Silicon Intensifier Target)管カメラによ り 360 度にわたり 100 の投影像を取得して重畳 積分法により得られた断層像である(本連載講 座応用編第4回, 2007 年7月号, 419 頁参照)<sup>18)</sup>。

# 2・4 飛行時間法による単色 CT

加速器でパルス状に中性子を発生させ、中性 子の飛行時間法で中性子エネルギーを選択して CT 画像を得る方法が、宮本ら<sup>20)</sup>によって試み られている。飛来する中性子ビームはスリット により細東ビームとし、試料を移動させてスキ ャンした。n-γ反応による即発 γ線を、ゲー ト時間付きの複数の γ線スペクトロメータで 取得し、ビーム上の複数の核種の分布情報を定 量化している。このようにして取得した CT 画 像が図 12 である。図 12(a) が Ta、図 12(b)は 同じ試料の Ag の CT 図であり、着目する元素 の共鳴吸収エネルギーを選定してデータを取得



(a) 被検体の構成



(b) 断層像

図 11 高速中性子 CT

RADIOISOTOPES



(a) サンプル内のタンタル(Ta)の断層像
 (b) サンプル内の銀(Ag)の断層像
 図 12 ライナックを利用した中性子共鳴吸収 CT による核種分布の非破壊分析

し,着目元素ごとに分布を画像化できるのが特 色である。なお,この図は試料が軸対称である ことを利用して,単一角度の投影データから再 構成したものである。

また, TOF を利用した熱中性子ビームを用 いたもう一つの例として, 吸収スペクトル測定 を CT 化したものが報告されている。この例も, 本連載講座応用編第4回(2007年7月号,427 頁)<sup>18)</sup>に図と共に詳述されているが, Kamiyama<sup>21)</sup>は,<sup>181</sup>Ta の共鳴吸収ピーク幅が温度に 依存することを用いて,その温度分布の CT を 行った。

# 3. ダイナミック CT

近年は、燃料電池内の水の挙動を秒単位で CT 撮像し、ダイナミックな動きを可視化する 等、高速で連続撮像が可能な装置の開発が盛ん である。高速度 CT は、Van Overberghe ら<sup>22)</sup> が 9 秒間隔での画像化を実現している。彼らは、 ILL (Institut Laue-Langevin)の熱中性子束  $6.0 \times 10^9 \, n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ の NEUTROGRAPH に お いて、細管中の水が落下したり上昇したりする 様子を、中性子コンバータと画素数 640×480 の CCD カメラを用いて露光時間 5 ms で 181 フレームの投影セットを 9 秒間隔で撮像し、水 の動きだけを 3 次元でアニメーション表示した (図 13)。

また、持木等のグループは<sup>23)</sup>, JAEAの JRR-



図 13 ダイナミック CT による細管中の水の 動きのアニメーション表示のひとコマ

3Mで,熱中性子束が $1.5 \times 10^8$  n·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>の TNRF-2の照射場で,中性子イメージ・インテ ンシファイアと毎秒 30 フレームの CMOS カメ ラを用い,9秒間で 270 フレームの投影画像を 取得した(図 14(b))。これに対し,同一の照 射場で,従来の中性子コンバータと冷却型 CCD カメラによって,2時間ほどかかって取得した CT像(図 14(a))を取得している。図 14 の断 層像では,共に直径 60 mm のアルミニウム中 の直径 1 mm の鉄線がほぼ同様,明瞭に観測で きている。



(a) 中性子コンバータと冷却型 CCD カメラによる断層像
 (測定時間約2時間)



 (b) 中性子イメージ・インテンシファイアと CMOS カメラ による断層像(測定時間 9 秒)

図 14 中性子イメージ・インテンシファイアを用いた高速 CT の試み

#### 4. 吸収コントラスト以外の CT

通常の CT 以外にもフェーズコントラスト, 屈折コントラスト,小角散乱コントラストの CT についての報告もあり,2,3の例を取りあ げる。なお,2・4節の飛行時間法で取りあげた 二つの例は,この章における特殊な CT 例でも ある。

4·1 フェーズコントラストCT

Lorenz ら<sup>24)</sup>は, FRM-II (Forschungs-Reaktor Munchen II) に設置された ANTARES (Advanced Neutron Tomography And Radiography Experimental System) という冷中性子装 置でフェーズコントラスト CT 実験を行い, 図 15 に示した断層像を得ている。2 mm のピンホ ールから 13.6 m 離れた照射場で実施された。 被検体は Al 合金の直方体(紙面に垂直方向で はステップ状の形状をした試料)を, コの字型 をした異なった屈折率を持つ Al 合金で三方向 を囲ったものである。通常の CT では微少な透 過率の違いでほとんど識別できない二種の Al 合金(図 15(a))が,フェーズコントラスト CT ではその境界が鮮明に描画できている(図 15 (b))。ただし,この方法は透過度情報とフェ ーズコントラスト情報が混在した信号を基にし て画像再構成しているため,中性子の全巨視的 断面積の分布を描出する方式としての本来厳密 な意味での CT 画像ではないことには注意する 必要がある。しかしながら、端部あるいは異種



(a) 通常の吸収 CT
 (b) フェーズコントラスト CT
 図 15 フェーズコントラスト CT による異種金属境界面の識別



図 16 屈折コントラストによるアルミニウム棒の 3 次元 CT

物質の境界を強調する試みとして実用的な価値 はある。 法を用いている。

4・2 屈折率コントラスト CT

Strobl ら<sup>25</sup>)は屈折率コントラスト CT の可能 性を示し、Al 試験片の 3 次元像を示した(図 16)。Al 材は中性子の透過コントラスト差が小 さいため画像化し難い。彼らは二重屈曲クリス タルを用いて屈折率測定を行い、屈折率の変化 で 3 次元 CT の描出を行った。CT は細束ビー ムを用いたいわゆる TR (translate-rotation) 4・3 極小角散乱コントラスト CT

Treimer ら<sup>26)</sup>は、図 17 に示すように、左図 の真ちゅう製試験片(左端図)の、吸収コント ラスト CT (中左),屈折コントラスト CT (中 右),超小角中性子散乱コントラスト(USANS: ultra small angle neutron scattering) CT (右 端)の比較実験を行い、同一試料の吸収、屈折, 散乱に基づく CT 像を与えた。



図17 真ちゅう製試料の吸収コントラスト,屈折コントラスト,及び超小角散乱コントラスト法による 断層像の比較

4·4 偏極中性子 CT

最近, 偏極中性子が現実のものとなっている。 Treimer ら<sup>27)</sup>は, Ge 単色化装置からのビーム がスーパーミラーで全反射され偏極した中性子 を使って, 永久磁石の浮遊磁場(stray magnetic field)の CT 画像化を試みた。永久磁石はビー ムに垂直に走査され, 透過した中性子のスピン は第二のスーパーミラーで解析される。中性子 のスピンは試料の磁場によりラモーア歳差運動 をはじめ, 結果解析装置には反射強度の減少と なって現れる。これが CT データとなる。図 18 はこのようにして取得した最初の永久磁石 の CT 画像である<sup>27)</sup>。この例も,図12の例と 同様, 試料が軸対称であることを利用した,1 投影データを使っての CT 図である。

## 5. CT 技術関連

CT の方式や性能向上に関する研究は,古く からなされており,更に多数の論文が報告され ている。基本的な部分は本連載講座基礎編第8 回(2007年11月号,751頁)<sup>11</sup>で論じた。ここ では,中性子 CT に関連して,最近報告された ものを 2,3 列挙するに留める。

#### 5・1 CT 値の直線性

イメージングプレートを用いた CT は, Kobayashi ら<sup>28)</sup>によって初めて実施された。彼ら は立教大学原子力研究所 TRIGA-II (廃炉中) を用い,種々の物質をバンドルした試料を用い て CT 値の直線性の成立する範囲を示した(本 連載講座応用編第4回,2007年7月号,417 頁)<sup>18)</sup>。

5·2 最尤法

XCT で既に多くの報告があり,中性子の分 野でも少なからず報告されているが,例えば最 尤法 (maximum likelihood method) を通常の FBP 法 (filtered back projection method) と 比較したものに, Coakley ら<sup>20)</sup>が燃料電池の水 分の解析に用いた例がある。



図 18 分極中性子断層法による小さな永久磁石の 浮遊磁場の断層像

# 5・3 広角円錐ビーム

この問題も CT 一般に論じられるべきもので ある。やはり一例をあげる。円錐型ビームを用 いたCTにおいてFeldkampm-Davis-Kress(FDK) 法を用いた例が Krimmel ら<sup>30)</sup>によって提案さ れている。

## 5·4 大型試料

ビームより大きな試料の CT の試みは, XCT の領域で古くから論じられている課題であるが, Schillinger ら<sup>31)</sup>はこの問題を取りあげ, 画像領 域外に発生する不完全画像と環状アーティファ クト(疑似画像)について論じた。その上で彼 らはビーム両域外の像を消去した。

#### 5·5 散乱線補正

CT における散乱線補正は Ikeda ら<sup>32)</sup>が試み ている。テスト試料に対し,近傍に置かれた吸 収体により散乱線を評価,補正することにより, CT 画像を取得し,CT 値の非直線性を補正し た。

5・6 繰り返し先鋭化法

この方法もしばしば論じられているが、中性

子 CT ではビームハードニング以外にも各種の 画像劣化の要因がある。

Masschaele ら<sup>33)</sup>は,繰り返し先鋭化の手法 を行った CT を試み,発光体自身,幾何学的因 子 (*L/D*),及び散乱線による画像劣化を考慮 し,Richardson-Lucy (RL)型のデコンボリュ ーション・アルゴリズムを用いて CT 画像の先 鋭化をはかった。

5・7 アーティファクト

この問題は, CT 全般のものであり, 各種の 原因でこの現象が発生する。一般的な問題とし ては本連載講座基礎編第8回(2007年11月 号, 751頁)<sup>1)</sup>に詳しい説明がある。

中性子 CT における繰り返しアーティファクト軽減法には、Kasperl と Vontbel<sup>34)</sup>によって 試みられた例がある。

また、3章でも取りあげた(図13)が、逆に アーティファクトを利用する手法を、Van Overbergheら<sup>22)</sup>が提案している。図19に見る ように、彼らは新しい試みとして、渦巻き状に 画像化された運動体によるアーティファクトの 解析を試みた。本来、アーティファクトはCT の条件にそぐわない各種擾乱等からくるものと して消去してしまうのが普通であるが、原因が 明確な場合にはこの例のように逆に解析に用い られるということを示したものとして注目され る。

5·8 雑音解析

CT における雑音解析は Kobayashi<sup>35)</sup>が行っ た。彼は、減衰値の測定には最良点があり、減 衰値が小さいほど、また大きいほど相対的な雑 音が増大し、結果 CT 値のダイナミックレンジ は基本的にはこれに制限されることを示した。 詳細は本連載講座基礎編第8回(2007年11月 号、751頁)<sup>1)</sup>を参照していただきたい。



図 19 ダイナミック CT で動いた水に起因する アーティファクトを利用した水の定量化

#### 6. おわりに

以上,近年行われた CT 画像について概説し た。前述したように,CT に用いられたエネル ギーも多様になり,さらには対象とする物理量 も吸収ばかりでなく,フェーズコントラスト, 屈折コントラストなど多様な CT が試みられる ようになった。特性や画質の改善に関連して発 表された研究については,報告された代表的な ものを取りあげた。もちろん,X線 CT 等で中 性子 CT に役立つ多くの研究がなされているが, ここでは取りあげなかった。

なお,我が国では J-PARC,国外も含めて多 くの中性子源が使用できるようになり,様々な エネルギーの中性子が使用できる環境が整いつ つある。また,中性子強度の向上や高検出効率 で高感度な撮像素子の開発,またダイナミック CT の開発が進み,応用分野が広がっている。

# 文 献

- 1) 小林久夫, *RADIOISOTOPES*, **56**(11), 751-762 (2007)
- Matsubayashi, M., Iikura, H., Yasuda, R., Ito, H., Kubo, K., Arashima, H. and Ebisawa, T., 8th World Conference on Neutron Radiography, T141 (2006)
- 竹中信幸,浅野 等,梅川尚嗣,松林政仁, RA-DIOISOTOPES,56(9),585-591 (2007)
- 4) Takenaka, N. et al., Nucl. Instum. Methods Phys.

*Res.*, A377, 115-118 (1996)

- Takenaka, N. et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 387-391 (2005)
- 6) 呉田昌俊,星 芳幸,日経サイエンスビジュア ル・サイエンス・フェスタ,入賞(2003), http://www.nikkei-bookdirect.com/science/vsf/ winning/w\_2003\_v\_04.html
- 7) 竹中信幸, 安田 良, 齊藤泰司, 呉田昌俊, RA-DIOISOTOPES, 56 (10), 699-707 (2007)
- 8) 松島卯月, RADIOISOTOPES, 56(9), 553-565(2007)
- Mühlbauer, M. J. and Gebhard, R., 8th World Conference on Neutron Radiography, T245 (2006)
- Mühlbauer, M. J., Schillinger, B. and Tsukimura, R. R., 8th World Conference on Neutron Radiography, T312 (2006)
- Radebe, M. J., de Beer, F. C. and Lindsay, R., 8th World Conference on Neutron Radiography, P009 (2006)
- 12) Cleveland, T. and Arif, M., 8th World Conference on Neutron Radiography, T444 (2006)
- Kardjilov, N. et al., 8th World Conference on Neutron Radiography, T125 (2006)
- Manke, I. et al., 8th World Conference on Neutron Radiography, T143 (2006)
- Nakano, T., Kawabata, Y., Hino, M. and Matsushima, U., *Key Eng. Mater.*, **270-273**, 1297-1303 (2004)
- 16) Vontobel, P., J. Nucl. Mater., 356, 162-167 (2006)
- 17) 玉置昌義,原子力学会中部支部第38回研究発表 会予稿集 R27(名古屋,2006.12.13)
- 18) 玉置昌義, RADIOISOTOPES, 56(7), 417-429 (2007)
- Nakajima, N., Asano, H., Fujii, T., Mizubata, M. and Yoshii, K., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A377, 90-92 (1996)
- 20) 宮本直樹,小崎 完,富岡 智,加美山隆,非 破壞検査協会秋季講演会要旨集,335-337(2007)
- 21) Kamiyama, T., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.,

A542, 258-263 (2005)

- 22) Van Oberberghe, A., Abele, H., Ballhausen, H., Dawson, M., Gauhler, R. and Trapp, M., 8th World Conference on Neutron Radiography, T313 (2006)
- 23) 岡崎道彦,和田泰明,持木幸一,非破壊検査協 会秋季講演会要旨集,327-330(2007)
- 24) Lorenz, K., Calzada, E., Mühlbauer, M., Schillinger, B. and Schulz, M., 8th World Conference on Neutron Radiography, T211 (2006)
- 25) Strobl, M., Treimer, W. and Hilger, A., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B222, 653-658 (2004)
- 26) Treimer, W., Strobl, M., Hilger, A., Seifert, C. and Feye-Treimer, U., *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 398-400 (2003)
- 27) Treimer, W., Hilger, A., Kardjilov, K. and Strobl, M., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 367-375 (2004)
- 28) Kobayashi, H., Satoh, M. and Matsubayashi, M., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A424, 221-228 (1999), 図は RADIOISOTOPES, 56, 420 (2007)参照
- 29) Coakley, K. J., Vecchia, D. F. and Hussey, D. S., 8th World Conference on Neutron Radiography, T145 (2006)
- Krimmel, S., Stephan, J. and Baumann, J., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 399-407 (2005)
- 31) Schillinger, B., Kardjilov, N. and Kuba, A., Appl. Radiat. Isot., 61, 561-565 (2004)
- 32) Ikeda, Y. et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A377, 85-89 (1996)
- 33) Masschaele, B. et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 361-366 (2005)
- 34) Kasperl, S. and Vontbel, P., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 392-398 (2005)
- 35) Kobayashi, H., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A377, 80-84 (1996)