

# 展望

中性子の鉄鋼研究への応用-7

## 中性子ラジオグラフィの基礎と応用 Basic of Neutron Radiography Technique and Its Applications

松林政仁

Masahito Matsubayashi

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門  
中性子産業利用技術研究ユニット  
中性子イメージング・分析研究グループ

### 1 はじめに

中性子ラジオグラフィはX線又はγ線ラジオグラフィ(以下、X線ラジオグラフィ等という。)と類似した非破壊放射線透過検査法である。その特長は、X線及びγ線が物質内の核外電子との相互作用により減衰されるのに対し、中性子は物質を構成する元素の核そのものと相互作用を起こして減衰される点にある。中性子及びX線の各元素に対する質量減弱係数を図1<sup>1)</sup>に示す。X線の減弱は主として物質内の自由電子密度に依存するため質量減弱係数は原子番号に対して単調増加の傾向を示している。これに対して熱中性子(0.025eV)の場合は原子番号に対して質量減弱係数が急激に変化している。また同じ中性子でも熱中性子と冷中性子(0.003eV)ではエネルギーの違いにより、同一元素に対する質量減弱係数に顕著な差が見られる。このように中性子ラジオグラフィに

よりX線ラジオグラフィ等と性質の異なる相補的な情報が得られる。具体的には、中性子を用いることによりX線又はγ線の減衰が小さい水素、炭素、硼素等を含む物質(例えば水、プラスチックあるいは有機物等)の減衰像が得られる一方で、中性子はX線が透過しにくい鉄、鉛、ウラン等の重金属を透過するため、これら重金属で構成されたものの内部を検査することができる。

### 2 中性子ラジオグラフィの基礎

典型的な中性子ラジオグラフィ装置は図2に示されるように中性子源、コリメータ及び撮像系の3つの要素から構成される。観察対象試料を中性子源より発生され、コリメータによって方向が揃えられた中性子ビーム内に置くと、試料内での中性子の散乱と吸収によって本来同様であった中性子ビー

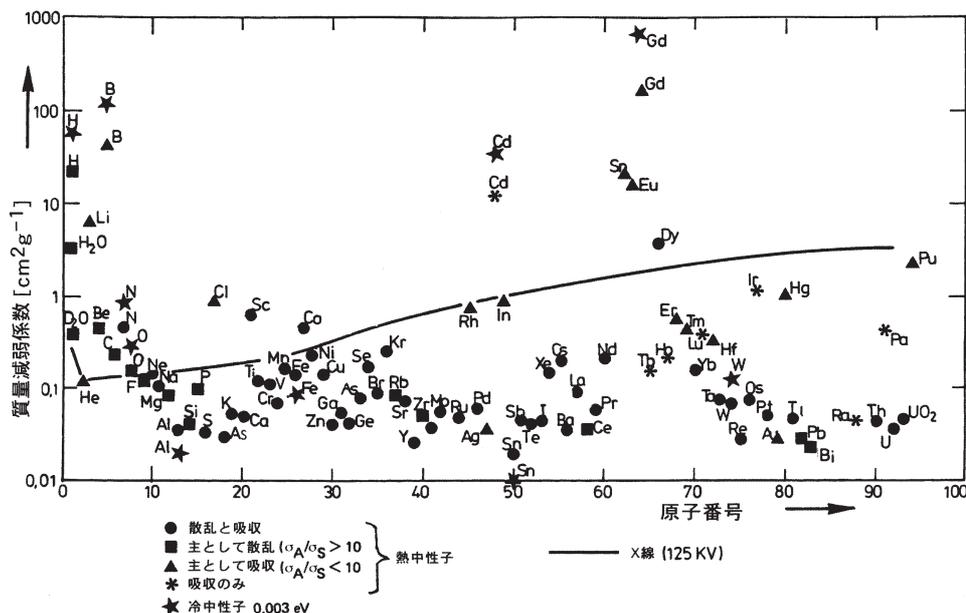


図1 異なるエネルギーを持つ中性子及びX線に対する質量減弱係数

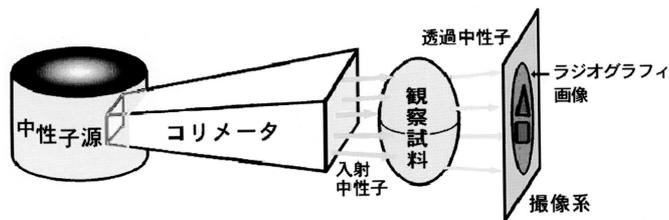


図2 典型的な中性子ラジオグラフィ装置

ム強度分布が変化し、試料の内部構造を示す強度分布になる。この中性子ビーム強度分布を適当な撮像系を用いて画像化するのが中性子ラジオグラフィである。以下にそれぞれの構成要素について述べる。

## 2.1 中性子源

中性子源としては、原子炉、加速器又は放射性同位元素が一般的である。このうち原子炉の中性子源強度が他の2者に比べて大であり、現在最も多くの中性子ラジオグラフィ装置で利用されている。昨今の技術革新による加速器の性能の向上、さらには大強度陽子加速器による核破砕を用いた中性子源の出現等により加速器を用いた中性子源の強度も極めて大きくなってきており原子炉と比肩、条件によっては凌駕するレベルに達している<sup>2)</sup>。特に核破砕反応を利用してパルス状に中性子を発生させる場合には、原子炉を利用する場合に比べて時間平均で同等程度、瞬間的には2桁高い強度の中性子ビームが利用可能となっている。現在、スイスポールシェラー研究所に核破砕中性子源を利用した中性子ラジオグラフィ装置 NEUTRA<sup>3)</sup>があるが、中性子の発生がパルス状でないため原子炉に設置された装置と同様の仕様となっている。一方、放射性同位元素では<sup>226</sup>Ra-Be、<sup>241</sup>Am-Be、<sup>252</sup>Cf等が用いられる。その特長は前2者に比べて、軽量かつコンパクトであるため可搬性を有する中性子ラジオグラフィ装置<sup>4)</sup>の中性子源として利用できる点である。これは、中性子ラジオグラフィでは一般に中性子散乱のように中性子ビームを単色化する必要がないため、強度の弱い中性子源でも利用可能だからである。

## 2.2 コリメータ

中性子源から放出された中性子は、まずコリメータに入る。コリメータの内壁は硼素、リチウム、カドミウム等の中性子吸収材によって内張りされており、コリメータ外から侵入する中性子や方向のずれた中性子は通過させない構造になっている。コリメータには直管型（入口部と出口部が同形状及び同寸法のもの）、Sollerslit型（中性子吸収材でできた小径管束又は等間隔の平板群を挿入して中性子ビームの平行度を向上させようとするもの）、ダイバージェント型（末広がり

型：入口部に対して出口部の面積が大きくなったもの）等の種類があり、現在ではダイバージェント型（図2に描かれているコリメータも角形のダイバージェントコリメータである。）のものが最も多く利用されている。その理由は中性子ビームの平行度を確保しつつ撮影位置でのビームサイズを大きく取れることにある。コリメータの性能を決定するのがL/D比と呼ばれる因子で、コリメータの全長Lと入口等価直径Dとの比として求められる。このL/D比が小さい場合、条件によっては撮影された画像に半影が生じ、良好な画像が得られない。これまでL/D比は100以上が望ましいとされていたが、高空間分解能撮影の必要性からL/D比500以上の装置が出現してきている。ただし、L/D比を大きく取ることは、Lを大きくするかDを小さくすることを意味し、いずれにしても撮影位置における中性子ビームの強度低下をもたらすため、高強度の中性子源が必須となる。

## 2.3 撮像系

撮像系は、試料を透過してきた中性子ビームの強度分布を可視化する部分である。従来から用いられてきた方法としてフィルム法があるが、現在では中性子用イメージングプレート(N-IP)<sup>5)</sup>で殆ど置き換えられつつある。また、蛍光コンバータ（コンバータとして蛍光を発するもの）と高感度のテレビカメラを組み合わせることにより動的試料の撮影も可能となる。この中性子テレビシステムは蛍光コンバータ、鏡、撮像デバイス及び暗箱より構成される。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、中性子強度を可視光の強度に変換する。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、超高感度のテレビカメラの使用が必要となる。従来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いたが、より高速の現象を捉えるためにイメージインテンシファイア(II)を装着した高速度ビデオカメラや高解像度を目指した冷却型CCD(Charge Coupled Device)カメラが現在利用されている。中性子テレビ法の特徴は、蛍光コンバータにより光の強度に変換された後では市販の光学機器が利用できる点である。

# 3 JRR-3M中性子ラジオグラフィ装置の概要と利用可能な撮像システム<sup>6)</sup>

## 3.1 JRR-3M中性子ラジオグラフィ装置

JRR-3M中性子ラジオグラフィ装置(JRR-3M NRF)は、国産第一号の研究用原子炉JRR-3の改造に伴い、最新の装置を備えた中性子ラジオグラフィ装置として平成3年度から

利用が開始された。JRR-3M NRFは大きく分けて、熱中性子ラジオグラフィ装置 (TNRF、図3 参照) と冷中性子ラジオグラフィ装置 (CNRF) から構成される。TNRFは炉心を取り巻くように設置されている重水タンク中に30 mm角の先端断面を持つビームチューブからダイバージェント型のコリメータを用いて中性子ビームを取り出している。TNRFは図3に示されるように2つの部屋から構成されており、一つは高放射線の試料用の撮影室 (第1撮影室：TNRF-1) であり、他方は、一般的な非破壊検査や中性子ラジオグラフィ実験に使用する撮影室 (第2撮影室：TNRF-2) である。TNRF-2には、ビームシャッター、ダブルアクション中性子シャッター、コンピュータ制御可能な試料回転台、ビームキャッチャ等が装備されており、多様な実験に対応できる。TNRFの特性を表1に示す。

### 3.2 高解像度撮像システム

静止あるいは定常状態の試料を撮影するために、冷却型 CCD カメラ (1024×1024pixel, 14bit) が導入され高信頼度の画像取得を達成している。高解像度撮像システムは図4に示されるとおり、蛍光コンバータ、2枚の石英鏡、レンズ及び冷却型 CCD カメラから構成される。このシステムでは放射線感受性が高い冷却型 CCD カメラを試料等によって散乱された中性子ビーム及び二次的に発生した  $\gamma$  線から保護す

るために、鏡を2枚用いて中性子ビームラインからオフセットして配置するとともに、10 cm厚さのポリエチレン及び鉛によってバックグラウンド放射線を低減している。蛍光コンバータ上に投影された画像は、マイクロニッコール f105 mmのレンズを用いた場合で80  $\mu$ m、f55 mmのレンズを用いた場合で160  $\mu$ mが CCD チップの1画素に相当する<sup>7)</sup>。市販の蛍光コンバータ (蛍光体の塗布重量：45 mg/cm<sup>2</sup>) を用いた場合の解像度は150  $\mu$ m程度が得られており、蛍光体の塗布重量を15 mg/cm<sup>2</sup>に減らすことによって解像度を72  $\mu$ mまで改善している<sup>6)</sup>。さらに、SIT管カメラを用いる場合も簡単な変更のみで使用できる構造としている。このシステムの特徴は画像の無歪性及び信号強度の直線性並びに高階調分解能にあり、専ら CT (Computed Tomography) の投影画像取得に利用されている。CTの再構成には通常、投影画像を回転角度1度毎に1枚、半回転分180枚必要とする。再構成計算はShepp-Logan フィルタを用いてフィルタ逆投影法により行われる。高解像度撮像システムで撮影したユリのつぼみの画像を図5に示す。図5中右の画像がCT画像である。左の投影画像だけでは分からないつぼみの内部の構造

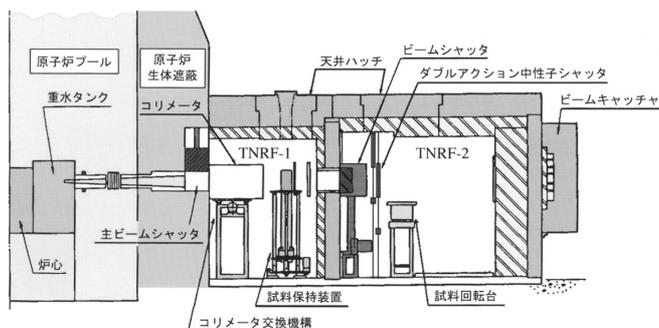


図3 JRR-3M熱中性子ラジオグラフィ装置

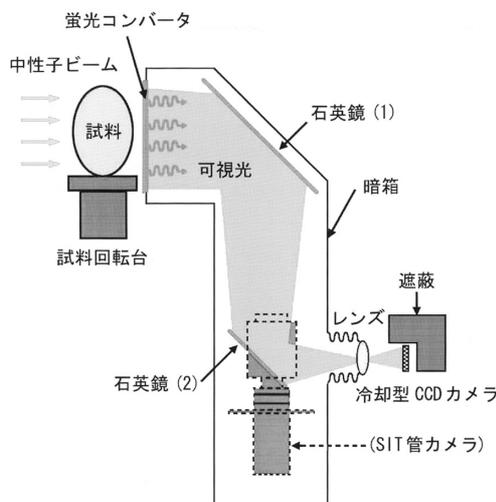


図4 高解像度撮像システムの概要

表1 JRR-3M TNRFの特性

撮影室	中性子束 (n/cm <sup>2</sup> s)	カドミ比	$\gamma$ 線量率 (Sv/h)	コリメータ比			照射野 (mm)
				L (mm)	L/D	D	
TNRF-1	2.6 × 10 <sup>8</sup>	81	—	水平*: 5426 *	138	39 *	水平: 115
	(2.0 × 10 <sup>8</sup> )**	(300)**		垂直*: 5497 *	115	48 *	垂直: 432
TNRF-2	1.5 × 10 <sup>8</sup>	130	2.16	水平: 7286 ± 9	185 ± 9	39 ± 2	水平: 255
	(1.2 × 10 <sup>8</sup> )**	(320)**		垂直: 7357 ± 5	154 ± 1	48 ± 1	垂直: 305

\* TNRF-2 の測定結果に幾何学的補正を行なった求めた値

\*\* JRR-3M の燃料がシリサイド燃料に移行した初期炉心時に測定した結果

がCT画像でははっきりと確認できる。

### 3.3 高速度撮像システム

観察対象の事象がより高速で推移する場合、従来の実時間撮影 (30 フレーム/秒) では1/30秒の動きに対応するボケた画像となり画像からの物理情報抽出の誤差要因となる。この問題を解決するためには、1フレーム当たりの撮影時間を短くする必要があるが、これは中性子照射量の低下をもたらすものであり、S/Nの低下をもたらす。JRR-3M NRFにおいては、単位フレーム当たりの中性子照射量低下に伴う輝度低下を補うために、マイクロチャンネルプレートを2段装備したIIが高速度カメラと組み合わせられた。蛍光コンバータ上の投影画像はレンズを通してIIの光電面に結像され、最高10万倍まで増幅された後リレーレンズを介して高速度カメラで撮影される。高速度ビデオカメラは4,500フレーム/秒 (フルフレームモード) の撮影が可能であり、JRR-3M NRFの限界状態での撮影が可能となる。高速度撮像システムの性能諸元を表2に示す<sup>6)</sup>。この中では観察対象に応じた撮影速度の選択性も考慮されている。

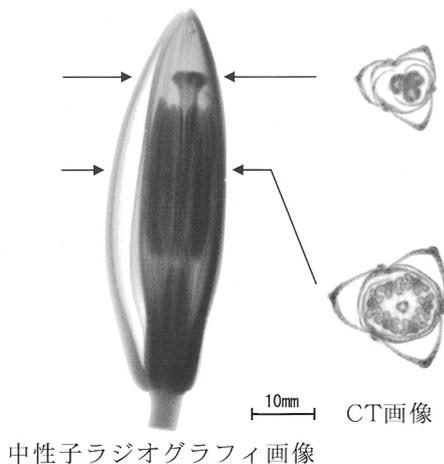


図5 ユリのつぼみのCT画像

## 4 応用分野の紹介

世界中で中性子ラジオグラフィが実用的に利用されている分野を列挙すると：1) 原子炉燃料の健全性検査、2) 宇宙開発用各種ロケットやその起爆管、導火線等の火工品、エンジンノズル、各種電気部品の試験検査、3) 航空機エンジンをはじめとする各種タービンプレードの検査、機体のハニカム構造材腐食検査、4) 内燃機関内の燃料の輸送状況、潤滑油の状態、油圧装置類中の油の挙動観察等である。これら工業分野以外にも、美術品への応用、埋蔵文化財への応用、農業への応用等が挙げられる。特にヨーロッパ及びアメリカでは中性子ラジオグラフィが日常的に工業分野で利用されているのに対し、国内での工業分野への応用は、日本製鋼所室蘭製作所<sup>8)</sup>がラジオグラフィ検査業務を停止したことから、住重試験検査株式会社<sup>9)</sup>でサイクロトロンを用いたビジネス利用が行われているのみである。なお、平成18年度から日本原子力研究開発機構において施設共用制度が開始され、中性子ラジオグラフィ装置の成果非公開での有償利用さらに役務の提供も可能となり、企業にとって利用し易い環境が整った。

### 4.1 熱流動現象等の可視化

熱流動現象の可視化・計測には、高空間分解能、高時間分解能を備えた非接触計測法が必要とされる。さらに熱流動研究では、高温、高圧、高熱流束条件が求められることが多く金属容器の使用は不可欠である。これらの問題に対し、中性子ラジオグラフィ、特に中性子テレビ法は有力な可視化・計測法として期待できる。可視化画像を画像処理することにより流動様式、気泡上昇速度、液膜厚さ、速度分布、ポイド率分布等の代表的な流動特性値が計測可能である。日本原子力研究開発機構では、低減速軽水炉の設計研究を進めている。低減速軽水炉の燃料棒は、中性子のエネルギーを高く保つため三角格子状に配置され、さらに燃料棒間隙が1mm程度と稠密であり、炉心平均ポイド率も約0.6と高いため、熱的に厳しい状況が予想される。このため、核設計と並行して熱流

表2 高速度撮像システムの仕様

FASTCAM-ultima-UVS (フォトロン製).		
イメージセンサ		MOS タイプ 画素サイズ: 40 μm x 40 μm (有効エリア 80%)
記録速度 (フレーム/秒)	フルフレームモード セグメントフレームモード*	30, 60, 125, 250, 500, 750, 1125, 2250, 4500 9000, 13500, 18000, 27000, 40500
画像サイズ (画素)	フルフレームモード セグメントフレームモード*	256 x 256 256 x 128, 128 x 128, 256 x 64, 128 x 64, 64 x 64
グレイレベル		256

\*記録速度と画像サイズは同順で対応している

動特性の評価が重要である。稠密なバンドル流路内の瞬時ボイド率の計測や0.6以上の高ボイド率の計測は、従来法では計測が困難であった。このため、高速度撮像法<sup>10, 11)</sup>計測技術を適用して、低減速軽水炉の炉心形状を模擬した稠密バンドル流路内二相流のボイド率の時間変動量と時間平均ボイド率が計測された。瞬間ボイド率を計測した例での撮像系の時間分解能は2 ms、空間分解能は870  $\mu\text{m}$ 、計測誤差の推定値は13%であった。

#### 4.2 水素吸蔵合金開発への応用

水素吸蔵合金 $\text{Mg}_3\text{Ni}$ に水素化処理を15分行った後、CT法が適用された。水素は中性子に対する減衰係数(図1参照)が大きいことから良く可視化できる。 $\text{Mg}_3\text{Ni}$ の試料表面に近い位置での断層像では一様に水素が分布しており、中間位置に相当する断層像では中心が白く縁が黒い(水素が多い)のがはっきり分かり、水素濃度の差が明瞭に分かった。これにより、水素は各断面から一様に分布しながら拡散進入していく様子が確認できた<sup>12)</sup>。これに対してTiCrV系合金及びTiCrMo系合金では、500~600ppm程度の低濃度で水素を吸蔵(固溶体領域)させた場合でも、表面から内部にかけて均一に水素が分布しており、拡散は比較的速いことが確認された。さらにこれらの合金を利用した超小型水素吸蔵合金タンク中の合金の分布について、水素吸放出口付近やタンク底面部に大きな水素濃度分布が生じ、水素の注入・放出に伴ってあるいは合金の膨張・収縮により合金粉末の移動が起こっていることが分かった<sup>13)</sup>。

#### 4.3 農学関係への応用

農学においては植物に関連して土壌中の根の生育状況と土壌中の水分の挙動を解明するための研究に中性子ラジオグラフィが応用されている。図5に示されるように植物は中性子ラジオグラフィによって内部構造をはっきりと確認できる。これは植物の大部分が水で構成されているからであり、植物の生育に伴う根の成長の様子を時系列的に非破壊で可視化したり、土壌改良剤としての吸水性ポリマーの機能を根の成長との関係で確認したり、根の生育と根近傍の土壌中の水分量との関係を明らかにするために使用されている<sup>14)</sup>。

#### 4.4 古文化財への応用

埋蔵文化財への非破壊検査としては利用しやすいX線ラジオグラフィが一般的であるが、中性子ラジオグラフィを用いることにより相補的な情報が得られる。具体例としては鏡におけるひび割れ、腐食の発生状況、鉄剣の錆の発生状況、青銅製の経筒内の内容物の確認等が挙げられる<sup>15)</sup>。特に金属容器内に存在する紙、布等の有機物は中性子ラジオグラフィ

によりはっきりと確認できる。図6は青銅鏡の中性子ラジオグラフィ画像である。元々は青銅のみであるから、X線で撮影しても中性子で撮影しても青銅の厚さあるいは密度に関する情報が同様に得られるのみであるが、不均一な濃淡(特に縁の部分)が画像上で確認できる。これは錆に起因するものと推察され、中性子では錆の部分に水素が多く含まれている場合には強いコントラスト(画像上の濃淡)がつき、そうでない場合にはコントラストがつかない。一方、X線では水素の存在如何に関わらずコントラストはつかない。これはひび割れの部分にも当てはまり、画像上でひび割れと思われる部分が黒い線として確認できるのはひび割れの部分に腐食生成物等が存在しているものと思われる。従って、X線ラジオグラフィの画像と比較することによってより詳しい情報が得られる。

#### 4.5 金属製品の非破壊検査

##### (1) アルミニウム合金製エンジンヘッドのCT

主たる構成部材がアルミニウム合金で、内筒として鉄材料が利用されたエンジンヘッド部品にCT法を適用した。部品の概観写真を図7に示す。図8上段が投影画像であり、白い

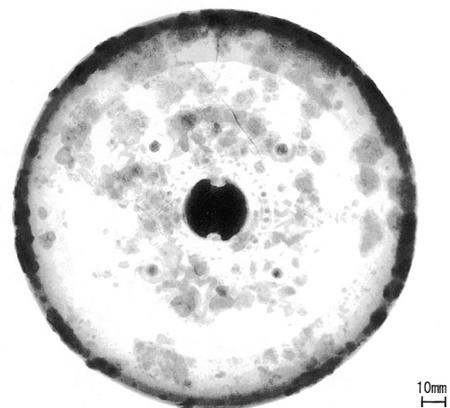


図6 青銅鏡の中性子ラジオグラフィ画像



図7 エンジンヘッドの概観写真

直線の位置が下段に示されるCT画像の切断位置である。投影画像では確認できない異物の混入がCT画像の円で囲んだ位置に確認できる。さらに、CT画像のデータを用いて別の角度からの断層像を構築したのが図9である。上段画像上に引かれた直線でカットされる断面が下段に示されており、形状、寸法等の把握を容易にしている。中性子のアルミニウムに対する透過率は高く(図1参照)、自動車製品で多用されるアルミニウム合金製部品の検査には最適である。ただし、内筒に用いられている鉄材料の部分は画像を見て分かる通り、中性子の透過率があまり高くないとを認識しておく必要がある。

(2) ステンレス鋼製管溶接部のCT

直径4 cm程度のステンレス鋼製管の溶接状況を確認するためCT法を適用した。試料の概観写真を図10に示す。図11は左側に投影画像(直交方向の2枚)を右側の断層像の切断位置とともに示している。左側下段の投影画像から溶接部位の長さは左側が長いことが分かる。図11の断層像は切断位置が一方の溶接部位にのみかかっていることから、右側の

断層像でもはっきりと確認できる。一方図12では切断位置が両方の溶接部位にかかっており、その様子が断層像でも確認でき、さらに二つの溶接部位の間には空隙が残されていることがはっきりと分かる。撮影位置を変えた透過画像からも溶接の状況が観察できるが、CT画像により詳しくその状況を知ることができる。

5 まとめ

中性子ラジオグラフィ装置の性能・特徴は中性子源の影響を大きく受ける。現在は、原子炉を中心とした定常中性子源が一般的であるが、日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所で建設が進められている大強度陽子加速器による核破砕中性子源は、パルス中性子源である。そのピーク強度はJRR-3Mの100倍以上と予想され、平均中性子束においても同程度と見込まれている。このパルス中性子源を利用することにより、瞬間的な高強度中性子ビームを用いたストロボ高速ラジオグラフィや中性子飛行時間法を用いたエネルギー分析型ラジオグラフィが適用可能となり、中性子ラジオグラ

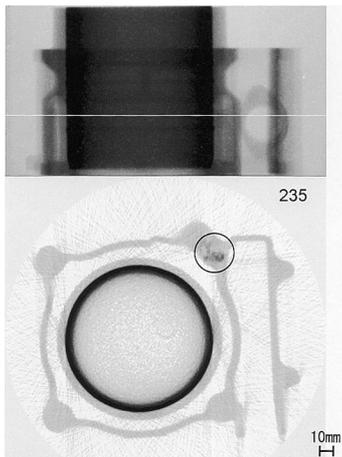


図8 エンジンヘッドの投影画像とCT画像

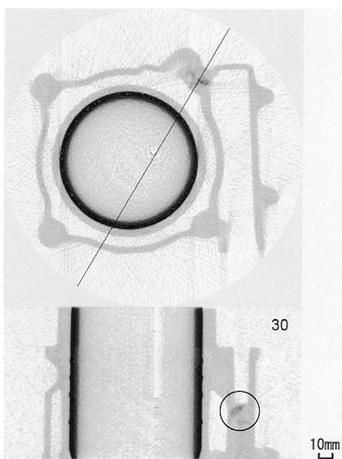


図9 エンジンヘッドのCT画像と再構成された断層像

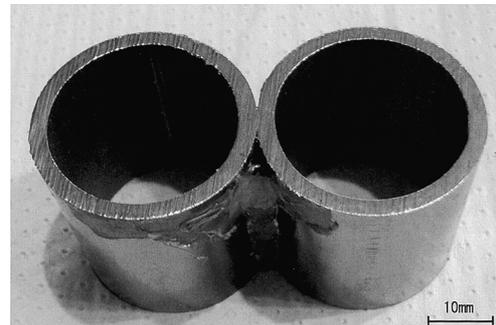


図10 ステンレス製管溶接試料の概観写真

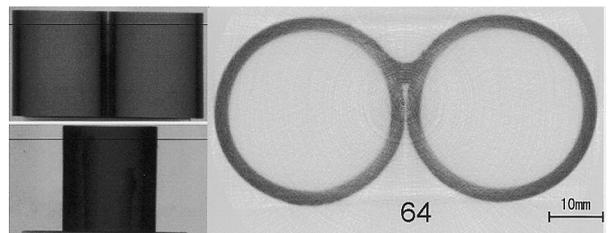


図11 ステンレス製管溶接試料の投影画像とCT画像1

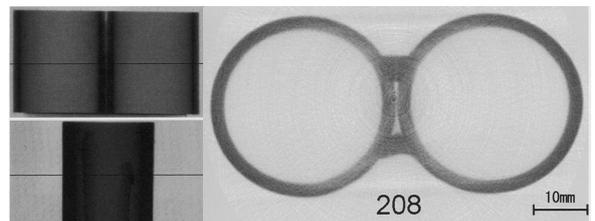


図12 ステンレス製管溶接試料の投影画像とCT画像2

フィに新たな局面が開けていくものと期待される。

#### 参考文献

- 1) Neutron Radiography Handbook, ed. by P. von Der Hardt and H. Rotger, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, (1981), 20.
- 2) Y. Oyama, S. Ikeda and JAERI-KEK Joint Project Team : JAERI-Conf 2001-002, (2001), 19.
- 3) E. Lehmann, H. Pleinert and L. Wiesel : Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., A, 377 (1996), 11.
- 4) 和田延夫 : 日本原子力学会誌, 30 (1988), 28.
- 5) N. Niimura, Y. Karasawa, I. Tanaka, J. Miyahara, K. Takahashi, H. Saito, S. Koizumi and M. Hidaka : Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., A, 349 (1994), 521.
- 6) M. Matsubayashi, H. Kobayashi, T. Hibiki and K. Mishima : Nuclear Technology, 132 (2000), 309.
- 7) M. Matsubayashi, A. Tsuruno, T. Kodaira and H. Kobayashi : Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., A, 377 (1996), 107.
- 8) 戸田陽二郎 : 原子力工業, 41 (1995) 2, 57.
- 9) 西原善明, 垂水裕司, 尾崎正和, 柿平将次, 田沢修一, 中新威彦 : 原子力工業, 41 (1995) 2, 60.
- 10) 呉田昌俊, 日引俊, 三島嘉一郎, 秋本肇 : 日本機械学会論文集, B編, 67 (2001) 653, 179.
- 11) 呉田昌俊, 日引俊, 三島嘉一郎, 秋本肇 : 日本機械学会論文集, B編, 67 (2001) 661, 2295.
- 12) H. Sakaguchi, A. Kohzai, K. Hatakeyama, S. Fujine, K. Yoneda, K. Kanda and T. Esaka : Int. J. Hydrogen Energy, 25 (2000), 1205.
- 13) M. Matsubayashi, T. Ebisawa, K. Kubo, H. Arashima and H. Itoh : JAERI-Review 2005-045 (2005), 165.
- 14) T. M. Nakanishi and M. Matsubayashi : J. Plant Phys., 151 (1997), 442.
- 15) 増澤文武, 村田忠繁, 尾崎誠, 米田憲司, 岡本賢一, 辻本忠, 横島勝則, 安田章 : 第1回放射線シンポジウム講演論文集, (1995), 146.

(2007年1月30日受付)