総 説

中性子ラジオグラフィの最近の動向[†]

和田延夫

日本原子力研究所東海研究所アイソトープ部利用開発室

311-13 茨城県東茨城郡大洗町

Key Words: neutron radiography, neutron exposure device, neutron imaging method, application, standardization

1. はじめに

中性子ラジオグラフィは中性子の特異な物質透過特性を巧みに利用して物質の内部を撮像する非破壊検査技術の一つである。X線や γ 線によるラジオグラフィとは異なり、金属材料中の水素化物の検査や高放射性物質の検査も可能であり、また同位体を区別して検査できるなどの特長があり、高価な中性子源を必要とするにもかかわらず、原子炉、航空機、ロケットなどの部品検査に実用化されている。最近では工業製品のほか古美術品の調査や生物・医学分野への応用展開も始まっている。

昭和61年6月にはフランスにおいて第2回世界中性子ラジオグラフィ会議が開催され、27か国、1機関(IAEA)より172名が参加し、104編の論文が提出され、中性子ラジオグラフィに関する最近の成果が発表された。国別論文提出状況は図1に示したとおりである。日本からは20編の論文が提出された。本稿においてはこの会議で発表された内容およびサクレ原子力研究センターなど欧米における主要中性子ラジオグラフィ施設の実地調査の内容を基に、最新の文献調査結果を加えて、中性子ラジオグラフィの最近の動向について述べる。

2. 中性子ラジオグラフィ技術の現状

2・1 熱中性子ラジオグラフィ照射装置

[†] Present Status and Future Trends of Neutron Radiography. Nobuo WADA: Application and Development Division, Department of Radioisotopes, Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-Pref. 311-13, Japan.

図1 1986年、フランスにおいて開催された第2回世界中性子ラジオグラフィ会議で発表された国別論文数

その他はカナダ、チェコスロバキヤ、インド、ソ連各2 (各1.92%)、およびオーストリア、オーストラリア、ブラジル、ハンガリー、イスラエル、メキシコ、スウェーデン、トルコ、ユーゴスラビア、マレーシア各1 (各0.96%)

2・1・1 RI中性子源による装置

RI中性子源は可搬性に富み、操作が簡単であり、また中性子放出率は安定している。ラジオグラフィ用中性子源として実用に供されているのは $^{124}\text{Sb-Be}$ および ^{252}Cf である。 $^{124}\text{Sb-Be}$ 中性子源の半減期は60.20日で短い、再放射化利用が可能であり、 10^{10} s^{-1} 程度の強い中性子源を製作することができる。放出される中性子のエネルギーは低く(24 keV)、減速効率の点ですぐれている。一方、 ^{252}Cf 中性子源の半減期は2.65年であり、自発核分裂により中性子を放出するの

(ラジオグラフィ用 ^{124}Sb -Be中性子源, 単位: mm)

(照射・撮像時の配置)

図2 西ドイツ Isar 1 原子力発電所において原子炉制御棒の検査に実用化されている ^{124}Sb -Be 中性子源 (上) と熱中性子ラジオグラフィ照射・撮像時の配置 (下)¹⁾

で中性子放出効率は高く、小寸法の強力中性子源が製作されている。放出される中性子の平均エネルギーは 2.3 MeV で後述する加速器中性子源に比べ低く、減速効率の点でやはりすぐれている。

^{124}Sb -Be 中性子源を用いたラジオグラフィ装置の実用化例として西ドイツの Isar 1 原子力発電所に設置されたものがある¹⁾。この装置は 37 TBq (1000 Ci) の ^{124}Sb -Be 中性子源を用いており、照射装置の構成と照射時の配置を図2に示す。全体は水密容器に収められ、照射・撮像は核燃料棒貯蔵ポンドの水面下で行われる。照射装置中央部における熱中性子束密度は $1.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、この値は 10 mg の ^{252}Cf 中性子源を用いた場合に相当する。撮像はニトロセルロースフィルム (Eastman Kodak 社, CN 85-Type B) を用いるトラックエッチ法によって行われ、沸騰水型原子炉 (BWR) の制御棒の検査に利用されている。

^{252}Cf 中性子源を用いたラジオグラフィ装置の実用化例としては西ドイツのプロシャ電力およびアメリカのモンサント(株)のものがある。前者の場合、500 μg の ^{252}Cf 中性子源 ($1.2 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$) を用いており、照射・撮像時の配置は図3に示すとおりである。全体は水密構造で、核燃料棒貯蔵プールの水面下に設置される。

図3 西ドイツのプロシャ電力において原子炉制御棒の検査に利用されている 500 μg ^{252}Cf 熱中性子ラジオグラフィ装置²⁾

図4 アメリカ、モンサント(株)に設置された熱中性子ラジオグラフィのための ^{252}Cf 臨界未満実験装置^{3), 4)}

照射野は $14 \times 25 \text{ cm}$ であり、撮像はニトロセルロースフィルム (CN85-Type B) を用いるトラックエッチ法によって行われるが、必要な照射時間は約30分である。BWR の B_4C を含む制御棒の寿命検査に利用されている²⁾。一方、モンサント(株)の場合、40 mg の ^{252}Cf 中性子源と 93%濃縮ウラン板とを組み合わせた臨界未満増倍装置を設置しラジオグラフィに利用している^{3), 4)}。この装置の構成は図4に示したとおりであ

る。熱中性子束密度は線源近傍で $7 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、熱中性子ビームのコリメーション比 (L/D , L : コリメータの長さ, D : コリメータ入口部の直径) は照射台の位置を加減することにより 25-100 の範囲内で可変である。片面に乳剤を塗布した極超微粒子フィルム (Eastman Kodak 社 SR) を用いるときに必要な照射時間は L/D 値が 25 または 100 のときそれぞれ 30 分および 16 時間である。装置の操作は照射開始時および終了時に 10 分間のみで、終夜照射が日常的に行われている。照射野はかなり大きく寸法 $36 \times 43 \text{ cm}$ のフィルム 4 枚を同時に並列照射することができる。主な検査対象物は高密度材料中の水素化物すなわちプラスチックや火薬類である。

日本においては、1 mg の ^{252}Cf 中性子源を用いた移動型の熱中性子ラジオグラフィ照射装置が日本原子力研究所にあり、小線源による熱中性子ラジオグラフィの実用化開発研究が行われている³⁾。 L/D を 25 としたときの熱中性子束密度は $3.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。撮像は高感度の $\text{ZnS-}^6\text{LiF}$ シンチレーションコンバータやトラックエッチフィルムを用いて行っている。

2・1・2 加速器中性子源による装置

中性子ラジオグラフィに有用な加速器は高エネルギーの正のイオンをターゲットに衝撃するもので、各種の反応により中性子が発生する⁶⁾。興味ある反応は $\text{T(d,n)}^4\text{He}$ および $^9\text{Be(d,n)}^{10}\text{B}$ である。また最近、 $^9\text{Be(p,n)}^9\text{B}$ 反応によるものや、負の水素イオンをベリリウムターゲットに衝撃するものが着目されるようになった。また電子加速器は、高エネルギーの電子を高原子番号のターゲットに衝撃したとき生ずる制動放射線により同じターゲットで光核反応を起こさせ、中性子源として利用できる。中性子発生材料としては鉛あるいはウランなどが用いられる。この場合、電子加速器は中性子ラジオグラフィと X 線ラジオグラフィの両方に利用できると思われるが、中性子像を得るさいに強い X 線によるかぶりを避ける工夫が必要である。

$\text{T(d,n)}^4\text{He}$ 反応による中性子源は低い衝撃エネルギーで高い中性子収率が得られ、かつ発生装置全体が小型であるため移動可能なラジオグラフィ装置に用いられている。多くの場合、中性子発生管は密封型であり、その寿命は 200 時間程度である。アメリカの Army Materials & Mechanics Research Center では 1979 年以來、密封型中性子発生管を用いた移動型中性子ラジオグラフィ照射装置を航空機の検査に用いてきており、野外での豊富な使用経験を持っている⁷⁾。またア

メリカの Science Applications International Corporation では密封型中性子発生管 (Kaman 社, A711 型) を用いたロボット化した移動型中性子ラジオグラフィ装置を製作し、航空機機体の腐蝕検査に用いている⁸⁾。中性子発生管の中性子放出率は $1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ 、被検査物位置における熱中性子束密度は L/D が 24 のとき $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、撮像は TV カメラと接続した 9 インチ直径の中性子増強撮像管 (Thomson 社, CSF 型) によって行われ、TV カメラの出力信号は画像処理装置に接続されている。 L/D を 30 としたときの熱中性子束密度は $6 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に低下するが、画像を 8 秒間積算することにより、かなり良好な像 (ASTM 制定 A 型インジケータによる感度レベル: 11) が得られている。同様な移動型中性子ラジオグラフィ装置の開発はフランスの Société Anonyme d'Etudes et Réalisation Nucléaires においても計画されており、使用予定の TN 46 中性子発生管は加速電圧 300 kV、ターゲット電流 15 mA で $1 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ の中性子を放出する。被検査物位置における熱中性子束密度は L/D が 20 のとき $6 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、照射野は $36 \times 43 \text{ cm}$ である。照射・撮像状態にある本装置の概念図を図 5 に示す⁹⁾。

$^9\text{Be(d,n)}^{10}\text{B}$ 反応を利用するファン・デ・グラフ加速器は中性子収率および減速効率ともによく、また γ 線バックグラウンドが低いという長所を持ち、3 MeV, 300 μA の場合、被検査物位置でおよそ $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の熱中性子束密度が得られる。この加速器を中性子源とするラジオグラフィ装置はおもにアメリカにおいて各種の検査に用いられており、アメリカ G. A. Technologies, Inc. 製作による同種のラジオグラフィ装置が最近、韓国の Daejeon Machine Depot にも設

図 5 フランスにおいて開発中の加速器利用移動型熱中性子ラジオグラフィ装置⁹⁾

図6 小型サイクロトロンを利用した熱中性子ラジオグラフィ装置の外観¹³⁾

置された¹⁰⁾。

一方、(株)日本製鋼所および住友重機械工業(株)によって小型サイクロトロンが開発され、 ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ 反応を利用した中性子源がラジオグラフィに用いられている^{11), 12)}。これはサイクロトロンの場合、重陽子よりも陽子を加速する方が同じ装置で得られる最大エネルギーが高く、中性子収率の点で有利であるからである。これらのサイクロトロンの性能はほぼ同じであり、16 MeV, 50 μA の場合、被検査物位置における熱中性子束密度は L/D が52のとき $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。照射野は $36 \times 43 \text{ cm}$ であり、複数の熱中性子ビームポートが設けられている。小型サイクロトロンを用いた中性子ラジオグラフィ装置の一例を図6に示す¹³⁾。撮像はガドリニウム金属はくコンバータによるフィルム法またはシンチレーションコンバータとTVカメラとを組み合わせたエレクトロニックイメージング法によって行われる。ロケット用火工品の検査に実用されているほか、撮像法や応用分野の探索研究に活発に利用されている。

一方、超電導磁石を用いた可搬型の超小型サイクロトロンがイギリスの Oxford Instruments Ltd. によって設計され、1号機の登場が期待されている¹⁴⁾。このサイクロトロンの重量は1250 kg であり、日本で開発された上記サイクロトロンの約1/20の重さである。そ

図7 超電導磁石利用超小型サイクロトロンによる移動型熱中性子ラジオグラフィ装置の概念図¹⁴⁾

の大きさは直径1.15 m, 高さ1.76 m である。中性子源は ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ 反応により発生するが、17 MeV, 200 μA の場合の中性子放出率は $1.8 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ である。被検査物位置における熱中性子束密度は約 $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と予想される。サイクロトロン自身が軽量であるという特色を生かして野外での使用を目的として考えられている移動型中性子ラジオグラフィ装置の外観を図7に示す。

2・1・3 原子炉中性子源による装置

最大熱出力100 kW - 50 MW の大小いろいろの出力規模の原子炉がラジオグラフィ用中性子源として用いられている。大切なことは被検査物位置において利用できる熱中性子束密度であり、その値は $10^6 - 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であることが望ましく、仮に L/D を100とするとコリメータ入口部における熱中性子束密度として $10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を要する。

アメリカにおける代表的な中性子ラジオグラフィ施設として Aerotest Operations, Inc. の例がある¹⁵⁾。この施設は原子炉として Aerotest Research and Radiography Reactor (ARRR) を用いており、その最大熱出力は250 kW である。原子炉は水張りタンク(直径3 m×深さ7 m)の底に置かれており、熱中性子ビームはアルミニウム製のヘリウム充填ダクトを通じて水面上の照射・撮像位置に到達する。照射野は大きく $55 \times 76 \text{ cm}$ である。コリメータ入口部の絞りは交換可能で、 L/D 値は100 - 500の範囲内で設定できる。撮像は25 μm のガドリニウム金属はくと微粒子フィルムを組み合わせた直接露出法によって行う。同社は放射能を持たない被検査物を対象とする専門の検査会社として活動している。一方、放射性の被検査物をもあわせて検査するサービス機関としてアメリカの General Electric Company がある¹⁶⁾。同社が設計、製作した最大熱出力100 kW の Nuclear Test Reactor を用い

ており、原子炉の南北両側に2つの熱中性子ビームコリメータがあり、その一方では放射性被検査物の検査が可能である。主な被検査物は火工品、タービン羽根、電子リレー、核燃料ピンである。

前2者と同規模の小型研究用原子炉である TRIGA がラジオグラフィ用中性子源として各国において利用されている。日本においては武蔵工業大学原子力研究所および立教大学原子力研究所のラジオグラフィ装置がこれに該当する^{17),18)}。いずれの場合も最大熱出力 100 kW の TRIGA-II を利用しており、被検査物位置での熱中性子束密度は約 $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。撮像はやはりガドリニウム金属はくと微粒子X線フィルムを組み合わせた直接露出法によって行われる。武蔵工業大学の場合、シンチレーションコンバータと SIT 管を用いてエレクトロニックイメージングも行っている。

中型の原子炉もラジオグラフィ用中性子源としてよく利用されており、その例として京都大学原子炉実験所の研究炉 KUR に設置されたラジオグラフィ装置がある¹⁹⁾。この装置は実験用 E-2 孔に設置されており、重水タンクを通して得られる熱中性子ビームは γ 線バックグラウンドが低い良質のもので、この装置の諸特性を表1に示す。撮像はガドリニウム金属はくによる直接露出法またはシンチレーションコンバータを用いるエレクトロニックイメージングによって行われる。中性子ラジオグラフィの基礎および応用研究に有効に利用されている。

表1 京大炉熱中性子ラジオグラフィ装置の諸特性¹⁹⁾

原子炉	KUR (5 000 kW)
炉心における熱中性子束密度	$6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
コリメータの長さ	500 cm
L/D (標準)	100
被検査物位置における熱中性子束密度	$1.2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
被検査物位置における γ 線量率	4.2 R h^{-1}
カドミウム比	400
γ 線量率に対する熱中性子束密度	$1.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$
照射野	直径 16 cm

中小型原子炉を照射後核燃料棒の検査に利用している例として、フランスのサクレ原子力研究センターの装置がある²⁰⁾。最大熱出力 700 kW の ISIS 原子炉から水平方向に取り出される熱中性子ビームの有効照射野は $10 \times 15 \text{ cm}$ であり、被検査物位置での熱中性子

束密度は $2.5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。核燃料棒を並べて立てかける格子枠があり、コリメータ出口に対して核燃料棒を上下移動させるための昇降機構により、全長 4 m までの核燃料棒を検査することができる。撮像はニトロセルロースフィルムを用いるトラックエッチ法により行われるが、ニトロセルロースフィルムに記録された像から核燃料棒の寸法測定も行っている。

大型原子炉もラジオグラフィ用中性子源としてよく利用されている。オランダのペテン研究所では高中性子束材料試験炉 (HFR) に装備したラジオグラフィ装置により核燃料棒の検査を積極的に行っている²¹⁾。この原子炉の最大熱出力は 45 MW であり、被検査物位置における熱中性子束密度は $2.3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。照射野は $60 \times 8 \text{ cm}$ であるが、最大 $15 \times 20 \times 156 \text{ cm}$ までの被検査物の検査が可能である。核燃料棒の検査に関してヨーロッパにおける中心的役割を果たしている。

やはり、大型原子炉を利用し、核燃料棒以外の一般的な部品などの検査を行っている例として、フランスのサクレ原子力研究センターがある。最大熱出力 14 MW の原子炉 ORPHEE に装備したラジオグラフィ装置を用いている。炉心から約 70 m の位置に別室から遠隔操作可能な照射台がある。照射野は $15 \times 2.5 \text{ cm}$ 、検査可能な被検査物の大きさは最大 $15 \times 101 \text{ cm}$ である。ロケット ARIANE に用いられる火工品の検査を定期的に行っている。

日本においては現在、日本原子力研究所の原子炉 JRR-3 の改造工事が進められており、完成後には高性能汎用研究炉 (最大熱出力 20 MW) として利用される。この改造炉には新しいラジオグラフィ装置が装備され、昭和 65 年度から利用できるよう計画されている²²⁾。この装置は水平実験孔 7 R に設置され、第 1 撮影部および第 2 撮影部より構成される。第 1 撮影部は放射性被検査物専用であり、 L/D は 187、熱中性子束密度は $1.0 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。照射野は $12 \times 43 \text{ cm}$ 、最大 $10 \phi \times 100 \text{ cm}$ までの被検査物の検査が可能である。撮像はジスプロシウム金属はくによる間接露出法およびトラックエッチ法によって行われる。第 2 撮影部は非放射性の一般検査物を対象に考えられており、 L/D は 221、熱中性子束密度は $1.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。照射野は $23 \times 30 \text{ cm}$ であり、撮像はガドリニウム金属はくによる直接露出法、ジスプロシウム金属はくによる間接露出法のほかトラックエッチ法、エレクトロニックイメージング法によって行われる。

2・2 熱外中性子, 冷中性子, 高速中性子ラジオグラフィ照射装置

2・2・1 熱外中性子ラジオグラフィ装置

プルトニウムを含む高速炉用混合酸化物燃料棒は熱中性子に対しては吸収断面積が大き過ぎ、透過熱中性子束が不足するため良質の熱中性子ラジオグラフィを得ることは困難である。これに対して熱外中性子はこのような燃料棒に対して適度の透過特性を示すので熱外中性子によるラジオグラフィが有効である。熱外中性子源としては原子炉を中性子源とする熱中性子ラジオグラフィ装置のコリメータ内にカドミウムフィルタを置いたものが用いられている。オランダのベテン研究所では LMFBR の混合酸化物燃料棒の熔融状態を調べる目的で熱外中性子ラジオグラフィを実施し成果を挙げている²³⁾。アメリカ、アルゴンヌ国立研究所においても同様な検査が行われている。熱外中性子ラジオグラフィにおける撮像は金またはインジウム金属はくコンバータを用いる間接露出法によって行われる。

2・2・2 冷中性子ラジオグラフィ装置

一般に中性子に対する吸収断面積は中性子のエネルギーが低下するほど大きくなる。ところで、Al, Fe, Zr, Pb のような結晶質の物質では Bragg edge 以下の中性子エネルギーにおける中性子吸収断面積は熱中性子に対する値よりも小さくなる。そのため、冷中性子

は熱中性子よりもこれらの物質を透過しやすい。一方、水素は中性子エネルギーの低下に伴って、その中性子吸収断面積は次第に大きくなる。これらのことから、たとえば鉄鋼材料に包まれたゴムやプラスチックのような非結晶質の物質の検査には冷中性子によるラジオグラフィが有効であることがわかる。冷中性子ラジオグラフィ装置の代表例としてイギリス、ハーウェル原子力研究所の原子炉 DIDO に装備されたものがある²⁴⁾。図 8 に示すように炉心からの中性子は径路に置かれたフィルタを通り、ビームスイッチ、真空ビーム管 (20 cm ϕ) およびヘリウム充填ビーム管 (120 cm ϕ) を経て原子炉から 25 m 離れた原子炉建屋外の照射室 (1.7 $\times$ 3.4 $\times$ 1.6 m³) に到達する。フィルタは厚さ 30 cm の多結晶ベリリウムと厚さ 23 cm の単結晶ビスマスより構成され、真空の銅製ジャケット内に据えられており、液体窒素温度まで冷却される。この装置の特長はビームが十分にコリメートされており、照射野が大きく (30 cm)、かつ妨害となる他の放射線が少ないことである。照射野中心部での冷中性子束密度は $3.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、 γ 線量率は 0.2 R/h である。撮像はガドリニウム金属はくと X 線フィルムを組み合わせた直接露出法またはシンチレーションコンバータとイメージンテンシファイアおよび TV カメラを結合したエレクトロニックイメージング法によ

図 8 イギリス、ハーウェル原子力研究所 DIDO 原子炉に設置されている冷中性子ラジオグラフィ装置²⁴⁾

て行われる。タービン羽根の日常検査に利用されているほか、航空機や自動車エンジン内部の燃料や潤滑油の動きなど動的現象の実時間観測に有効に利用されている。

日本原子力研究所においても先の改造 JRR-3 の冷中性子導管に冷中性子ラジオグラフィ装置が装備される²⁵⁾。その照射野は 20×60 mm、冷中性子束密度は 2.0×10^5 cm⁻² s⁻¹ が見込まれている。

2・2・3 高速中性子ラジオグラフィ装置

被検査物が厚いプラスチックや鉄などで構成されている場合、熱中性子や熱外中性子では透過中性子が不足するため良質の中性子像を得ることは困難である。このような対象については高速中性子の透過を利用する高速中性子ラジオグラフィが有効であることは以前から知られていた。しかしながら、適当な高速中性子が手元になかったり、また高速中性子像の検出が難しかったりしてその技術開発は遅れていた。最近になって固体高分子フィルム CR-39 が高速中性子像の検出に有効であることがわかり²⁶⁾、東京大学原子炉「弥生」から得られる高速中性子ビームとこのフィルムによる高速中性子ラジオグラフィの実験が行われ、厚さ10 cm 程度のプラスチックや鉄材料の検査に有効であることが認められた²⁷⁾。現在、恒常的な高速中性子ラジオグラフィ装置が存在するわけではないが、諸外国における関連研究とも相まって、この分野における今後の発展が望まれる。

2・3 撮像方法

2・3・1 直接露出法

直接露出法において用いられている熱中性子コンバータはシンチレーションコンバータ、ガドリニウム金属はくおよびホウ素コンバータである。

シンチレーションコンバータとしてはイギリスの Nuclear Enterprises 社製の NE-426 が最も多く用いられている。これは ⁶LiF と ZnS および有機ガラス (Perspex) の混合物をアルミニウム板上に薄く塗布したもので、核反応 ⁶Li(n, α)³H のさい放出される α 粒子により励起されて発光する。NE-426 と適当な X 線フィルムを組み合わせると熱中性子像が形成される。高感度であるばかりでなく、比較的 γ 線の影響を受け難い特長を持っている。

ガドリニウム金属はくコンバータは核反応 ¹⁵⁷Gd(n, γ)¹⁵⁶Gd のさい70 keV の内部転換電子を放出する。この電子によりフィルムは黒化し熱中性子像が形成される。¹⁵⁷Gd の熱中性子吸収断面積がきわめて大

きい(242 000 b) ので、厚さ 25 μm の薄いはくが用いられており高い分解能が得られる。ただし、感度は NE-426 に比べてはるかに低く、たとえば Kodak AA フィルムとの組み合わせでは、フィルム濃度 1.5 を得るのに $2-3 \times 10^8$ cm⁻² の熱中性子露出を要する。また熱中性子ビームに混在する γ 線はフィルムに直接かぶりを与えるので、n/γ 比としては 10^8 cm⁻² mR⁻¹ 以上の良質の熱中性子ビームを前提とする。

ホウ素コンバータとしては Kodak 社製の BN-1 および BE-10 がある²⁸⁾。いずれも核反応 ¹⁰B(n, α)⁷Li のさい放出される α 粒子によるニトロセルロースフィルムの放射線損傷を利用し、同フィルム上に熱中性子像を形成させる。BN-1 は天然のホウ素を用いているが、BE-10 は90%以上に濃縮した ¹⁰B を用いており、その感度は BN-1 の約4倍である。このようなホウ素コンバータとニトロセルロースフィルムとの組み合わせによる撮像法をトラックETCH法とよぶが、この方法は γ 線には感じない高分解能撮像法として着目され、核燃料棒など高放射性物体の検査に実用化されている。

2・3・2 間接露出法(像転写法)

間接露出法は照射終了後に放射化した金属はくと X 線フィルムを密着させて露出し、像を得る方法で、転写させるので像転写法とよばれることがある。γ 線には感じないので高放射性物体の検査に有効であり、また γ 線バックグラウンドの高い熱中性子ビーム下での撮像も可能である。ただし、金属はくの放射化を利用するので、低熱中性子束下では得られる飽和放射能に限界があり、たとえ長時間の露出を行っても、低熱中性子束下での撮像は困難である。金属はくとしては古くからジスプロシウムが用いられており、最近では熱中性子では透過しにくい高速炉核燃料棒の検査に熱外中性子の透過が利用されるようになり、これに適した金属はくとして金やインジウムのはくが用いられている。

2・3・3 エレクトロニックイメージング法

動的現象や移動する被検査物を実時間で撮像するにはエレクトロニックイメージング法が適用される。デジタル画像処理機能を持つエレクトロニックイメージングシステムの一例を図9に示す²⁹⁾。一般にこのようなシステムにおいては、被検査物を透過した熱中性子照射によりシンチレーションコンバータから放出される光は直接またはイメージインテンシファイアを通して TV カメラによって検出され、そのままあるいはデジタル画像処理を経て TV モニタ上に中性子像が形成

図9 デジタル画像処理機能を持つエレクトロニックイメージングシステムの一例²⁹⁾

される。熱中性子束密度が $\sim 5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上の場合はイメージンテンシファイアなしでも動的現象の実時間撮像が可能である。シンチレーションコンバータとしてはNE-426が主として用いられている。フランスのThomson-CSF社ではTVカメラの光入射面に $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ 膜を塗布し、コンバータとTVカメラとを一体化した中性子撮像管を発売している。一般にエレクトロニックイメージング法では熱中性子束密度が $10^5 - 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のとき、0.25-0.5 mmの分解能が得られる。しかし、 $10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度の低い熱中性子束密度の場合、1フレーム(1画像走査時間1/30 s)当たりの熱中性子数は 10^3 cm^{-2} 以下になるため像のコントラストは低下し、分解能も悪くなる。この場合には、フレーム数の積算処理などの画像処理を施すことによって像の統計的ゆらぎなどを少なくして像質を改善することができる。

一方、X線やNMRによるコンピュータ断層撮影(CT)の技術的進歩は著しく、すでに医学分野で実用化されているが、中性子CTの技術開発も進められている。図10は核燃料棒集合体などの断層撮影への実用化を目指して開発中の中性子CTの原理図である³⁰⁾。断層像を再構成するためのデータはこの場合、被検査物を順次回転することによってフィルム上に得られる。最近ではフィルム法に代ってTVカメラを用いる例が多くなっている^{31), 32)}。得られたデータより断面像を再構成する方法としてはフーリエ変換法や重畳積分法が实际的であり、逐次近似法は原理的には簡単であるが処理に時間がかかる。

2.4 中性子ラジオグラフィの応用

2.4.1 宇宙航空ほか一般分野における応用

一般分野における中性子ラジオグラフィの実用例としては火工品およびタービン羽根の検査がある。さまざまな火工品について、金属ケース内の火薬の充填度、均一性、異物混入の有無などの検査が日本におい

図10 核燃料棒集合体など断層撮影への実用化が期待される中性子コンピュータ断層撮影法(中性子CT)³⁰⁾

て日常的に行われている³³⁾。アメリカ、フランスおよびイギリスにおいても同様な検査が行われている。タービン羽根の主な材料はニッケル合金であるが、これはX線を通しにくく、熱中性子をよく透過させるので、冷却用空気経路に残存するセラミックス等の異物の検査に熱中性子ラジオグラフィが適している。その他、電気リレー内部の絶縁物（紙、布）の状態、金属材料で隠された O-リングの状態、ハニカムサンドイッチ構造材の接着状態などの検査が行われている。最近ではコンクリート内の水の浸透性の研究³⁴⁾、古美術品の調査^{35), 36)}、鋼中ホウ素分布の観察³⁷⁾、鋼製容器内の窒素ガス圧の測定³⁸⁾など中性子ラジオグラフィの応用分野はさまざまな分野に広がっている。生物・医学分野への利用³⁹⁾、航空機機体の腐蝕検査⁴⁰⁾への応用展開も始まっている。

2.4.2 原子力分野への応用

中性子ラジオグラフィの実際利用の先駆けをなしたのは1960年代後半、アメリカ Argonne National Laboratory における核燃料棒の検査であった。以来、原子力分野における中性子ラジオグラフィの利用はますます盛んになり、フランス、オランダ、西ドイツ、日本などにおける利用も進んでいる。検査対象はさまざまであるが、まず核燃料棒の検査が挙げられる。核燃料棒の中性子照射後の状態を調べるのに有効であり、燃焼度測定、寸法測定、被覆材の水素化損傷の検査などが行われている。核燃料棒の検査において顕著な活動を続けているのはユーラトム中性子ラジオグラフィ・ワーキンググループであり、Risø National Laboratory で日常的に実施し集めた中性子ラジオグラフを基に典型的な欠陥を発生箇所と素姓によって分類し、これらの欠陥を示すラジオグラフの実例を集めたアトラスを出版した^{41), 42)}。寸法測定に関してはマイクロデシメートルのコンピュータ化により、たとえば核燃料ペレットの直径測定の精度は $\pm 10 \mu\text{m}$ である⁴³⁾。新しい核燃料棒についても組立て時における異物混入の有無を調べるために中性子ラジオグラフィが利用されている。原子炉制御棒に関しても、可燃性毒物の分布状態や燃焼度の検査が中性子ラジオグラフィによって有効に行われている。

3. 中性子ラジオグラフィの標準化

中性子ラジオグラフィの実用段階において必要な標準化については American Society for Testing and Materials (ASTM) の E 07.05 小委員会の検討に基づいた下記の3つの標準的方法が定められている。

(1) E545-86 Standard Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiographic Testing

(2) E748-85 Standard Practices for Thermal Neutron Radiography of Materials

(3) E803-86 Standard Method for Determining the L/D Ratio of Neutron Radiography Beams

わが国においても関係者が集まり、これら標準的方法の検証試験を進めている⁴³⁾。

4. おわりに

中性子ラジオグラフィの今後について考えてみると、原子力分野については原子炉を中性子源とする熱、熱外および冷中性子ラジオグラフィがさらに普及し、核燃料棒、原子炉制御棒や原子炉材料の検査に有効に利用され、原子炉の安全性保障に大きく寄与するものと考えられる。トラックエッチ撮像法や中性子 CT 技術の開発はこの分野における中性子ラジオグラフィの利用を大きく促進するであろう。

原子力以外の分野においても熱中性子ラジオグラフィの実用化は着実に進展するものと思われる。中性子源としては原子炉のほか加速器や RI 中性子源が並行して用いられよう。とくに小型の加速器や RI 中性子源は移動型熱中性子ラジオグラフィ照射装置の中性子源として適しており、エレクトロニックイメージング技術の発展とも呼応して、航空機の腐蝕検査や鋼管内部の気液二相流の動的現象の実時間観測などを目的とした現場用の高機能の熱中性子ラジオグラフィ装置に組み込まれていくものと思われる。

冷中性子ラジオグラフィの利用も進むであろう。また高速中性子ラジオグラフィは新しい応用分野を切り開くものと考えられる。

文 献

- 1) Greim, L., Borchers, M., Greim, G.W. et al.: 2nd World Conf. on Neutron Radiography, WG. 5-V/O (1986)
- 2) Schulz, W.: *ibid.*, WG. 2-V/O (1986)
- 3) Crosbie, K. L., Preskitt, C. A., John, J. and Hastings, J. D.: *Mater. Eval.*, **40**, 579-582 (1982)
- 4) Hastings, J. D., Crosbie, K. L., Preskitt, C. A. and John, J.: *ibid.*, **40**, 584-589 (1982)
- 5) Wada, N.: 2nd World Conf. on Neutron Radiography, JP. 8-III/B/O (1986)

- 6) Stokes, J. A., Parks, L. A., Preskitt, A. and John, J.: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-30**, 1623-1626 (1983)
- 7) Antal, J. J., Dance, W. E., Carollo, S. F. and Moravec, J. E.: 2nd World Conf. on Neutron Radiography, US. 4-V/O (1986)
- 8) Orphan, V., Johansen, F. and Kedem, D.: *ibid.*, US. 14-V/O (1986)
- 9) Dubouchet, M. and Cluzeau, S.: *ibid.*, FR. 6-III_A/O (1986)
- 10) Kwon, J.S. and Whittemore, W.L.: *ibid.*, US. 18-III_A/O (1986)
- 11) Fukushima, Y., Nakamura, T., Hiraoka, E. et al.: *ibid.*, JP. 20-III_A/P (1986)
- 12) Tazawa, S., Yano, M., Nakanii, T. et al.: *ibid.*, JP. 15-III_A/P (1986)
- 13) 飯島 昭: *Isotope News*, No. 360, 6-7(1984)
- 14) Wilson, M.N.: 2nd World Conf. on Neutron Radiography, GB. 9-III_A/P (1986)
- 15) Underhill, P.E.: *ibid.*, U.S. 17-I/O (1986)
- 16) Barton, J.P. and von der Hardt, P. (Eds.): "Neutron Radiography", pp.153-162, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland (1982)
- 17) Matsumoto, T., Aizawa, O. and Watanabe, S.: 2nd World Conf. on Neutron Radiography, JP. 6-II/P (1986)
- 18) Kobayashi, H., Harasawa, S., Tomura, K. et al.: *ibid.*, JP. 6-II/P (1986)
- 19) Kanda, K., Fujine, S. and Yoneda, K.: *ibid.*, JP. 3-VIII/P (1986)
- 20) Ducros, G., Bayon, G., Person, J.L.: *ibid.*, FR. 11-II/P (1986)
- 21) Domanus, J.C. and von der Hardt, P. (Eds.): "Neutron Radiography at the HFR Pettern", EUR7915EN (1981)
- 22) 鶴野 晃: JAERI-M 85-149, 200-203 (1985)
- 23) Moss, R.L. and Beers, M.: 2nd World Conf. on Neutron Radiography, NL. 5-V/O (1986)
- 24) Bryant, L.E. (Ed.): "Nondestructive Testing Handbook 2nd Eds. Vol. 3", p. 586, Amer. Soc. Nondestructive Testing, U.S.A. (1985)
- 25) 鶴野 晃: JAERI-M 85-149, 222 (1985)
- 26) 池田 泰, 村松善与, 松本元一: *Radioisotopes*, **35**, 367-374 (1986)
- 27) 吉井康司, 他: 私信 (1987)
- 28) Kodak-Pathe 社カタログ: "Kodak Enriched Converter Screen BE-10"
- 29) Fujine, S., Yoneda, K. and Kanda, K.: 2nd World Conf. on Neutron Radiography, JP. 2-VIII/O (1986)
- 30) Bryant, L.E. (Ed.): "Nondestructive Testing Handbook 2nd Eds. Vol. 3", p. 588, Amer. Soc. Nondestructive Testing, U.S.A. (1985)
- 31) Yoneda, K., Fujine, S. and Kanda, K.: 2nd World Conf. on Neutron Radiography, JP. 7-XI/P (1986)
- 32) Matsumoto, G., Sendo, T., Honda, S. et al.: *ibid.*, JP. 9-XI/P (1986)
- 33) Yamawaki, K., Fukushima, Y., Nakamura, T. and Sekita, J.: *ibid.*, JP. 21-IV/O (1986)
- 34) Vei, M.D., Zhong, Z.C., Ping, G.Z. et al.: *ibid.*, CP. 1-IV/O (1986)
- 35) Masuzawa, F., Sakata, M., Inokuchi, Y. et al.: *ibid.*, JP. 19-VII/O (1986)
- 36) Fischer, C.O., Leuther, W., Laurenze, C. and Slusallek, K.: *ibid.*, WG. 7-VII/O (1986)
- 37) Larsson, B., Sornsuntisook, O., Johansson, E. et al.: *ibid.*, SD. 1-VII/O (1986)
- 38) Nir-el, Y., Yellin, E., Gayer, A. and Breitman, B.: *ibid.*, IS. 1-IV/O (1986)
- 39) 小林久夫: *Isotope News*, No. 394, 10-11 (1987)
- 40) Berger, H., Polichar, R. and Rowe, W.J.: 2nd World Conf. on Neutron Radiography, US. 3-VIII/O (1986)
- 41) Domanus, J.C.: "Neutron Radiographic Finding in Light Water Reactor Fuel", Risø National Laboratory (1979)
- 42) Domanus, J.C. (Ed.): "Reference Neutron Radiographs of Nuclear Reactor Fuel", D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland (1984)
- 43) Katsurayama, K., Kanda, K., Yoneda, K. et al.: 2nd World Conf. on Neutron Radiography, JP. 13-XIII/O (1986)