講 座

中性子による計測と利用

X. 中性子ラジオグラフィ

1. 中性子ラジオグラフィの概要

藤根成勲

京都大学原子炉実験所
590-04 大阪府泉南郡熊取町野田

Key Words: neutron radiography, neutron radioscopy, neutron radiology,
film method, electronic imaging, transfer method, track-etch
method, neutron source, collimator, converter

1. はじめに

中性子ラジオグラフィは、X線や γ 線ラジオグラフィと同様に各種材料の透過像を得る技術で、非破壊検査の一方法として1980年代に着実に発展し、中性子利用の一分野としての地位も確保されてきている。技術的にも写真法やテレビジョン法およびトラックエッチ法なども進歩し、種々の分野への応用にも利用されている。利用する中性子も熱中性子の他、高速中性子や冷中性子などそのエネルギーの違いによる物質の透過度の差にも注目し、それぞれの特徴を生かした利用分野で応用が拡大されている。

歴史的にみると、1932年の中性子発見の3年後、1935年にベルリンでKallmanとKuhnによって小型加速器で最初に実験され、その後Ra-Be線源が利用されたが、原子炉が利用できるようになって急速に進展した。かなり長い間、各国で個々に研究されていたが、1981年末

のサンディエゴ(米)での第1回中性子ラジオグラフィ国際会議¹⁾を契機として世界的な広がりを見せ、実用化へ発展した。国際会議は、第2回²⁾(1986)はパリ(仏)、第3回³⁾(1989)は大阪(日)、第4回⁴⁾(1992)はサンフランシスコ(米)、第5回(1996)はベルリン(独)で開催され、第6回は1999年に再度大阪で開催される予定である。さらに、1990年(カナダ)と1995年(日)にトピカルミーティング^{5),6)}が開催されており、第3回は1998年にスイスで開かれる予定である。また、1996年のベルリンの会議において中性子ラジオグラフィ国際学会(International Society for Neutron Radiology)が発足し、さらなる発展が期待されている。

2. 中性子ラジオグラフィの特徴

X線や γ 線が主に物質の核外電子と相互作用するのに対し、中性子は原子核と作用するために、たがいに相補的な情報が得られる。このため、中性子ラジオグラフィにはX線ラジオグラフィと比較して次のような特徴がある。

(1) 水、炭化水素、ホウ素、プラスチックのような軽い物質で減衰像が得られる。

[†] Neutron Beam Analyses and Its Application. X. Neutron Radiography. 1. Fundamentals of Neutron Radiography. Shigenori FUJINE: Research Reactor Institute, Kyoto University, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-04, Japan.

(2) 鉄鋼, 鉛, ウランなどの重金属を透過する。

(3) 同位元素間でも透過度が異なる。

(4) 高速, 熱, 冷中性子で透過度が異なる。

(5) 高放射性物質でも画像が得られる。

この様子をよく示しているのが図 1⁷⁾である。X 線の場合は原子番号に比例して質量減弱係数が単調に増加しているが, 中性子ではほとんどの金属を透過する。一方, 水素, 水, ホウ素, ガドリニウムやカドミウムなどで減衰が大きく, 鉄やアルミニウムなどで小さいために, 金属製容器内の水素化合物の検出ができることが注目される。特に, 減衰の大きい物質では熱中性子に比べて冷中性子の減衰が大きく, 透過度のよいものでは冷中性子の方がよりよいものがあるために, 冷中性子ラジオグラフィではコントラストの良い画像が得られることがうかがえる。

3. 中性子ラジオグラフィの方法^{8),9)}

中性子ラジオグラフィの方法としては, 装置を構成する中性子源, 中性子の種類, 検出器(コンバータ), 撮像方法, イメージレコーダや撮影の対象などにより, いくつかに分類できる。それぞれに特徴があるので, 装置の性能や応用によって使い分ける必要がある。たとえば, 後に述べられる気液二相流への応用では, 原子炉の熱中性子をダイバージェント型コリメータでコリメートし, 蛍光コンバータを用いたテレビジョン法で動画像を高速撮影し, その画像をビデオテープや光ディスクなどに記録される。また, 使用前後の原子炉燃料の検査では, 熱外または熱中性子を利用して, 水中の設備などによりトラックエッチ法で撮影される。

3・1 中性子源

中性子源としては, 大別して放射性同位元素(RI), 加速器, 原子炉が利用される。発生さ

図 1 中性子と X 線の質量減弱係数⁷⁾

● 散乱および吸収によるもの	▼ 吸収のみによるもの
■ 主に散乱によるもの	◆ 冷中性子 0.003 eV
▲ 主に吸収によるもの	— X 線 (125 kV)

れる中性子のエネルギーは、 $10^{-4} - 10^7$ eV の広い領域を持っている。このうち、0.025 eV の熱中性子が広く用いられている。

RI 中性子源としては、 $^{124}\text{Sb}-\text{Be}(\gamma, n)$, $^{210}\text{Po}-\text{Be}(\alpha, n)$, $^{241}\text{Am}-\text{Be}(\alpha, n)$, $^{226}\text{Ra}-\text{Be}(\alpha, n)$ などと、 ^{252}Cf の核分裂によるものなどがある。このうち、注目されているのは ^{252}Cf 線源である。これは線源強度の割に高価格であるが、1970 年以降可搬型中性子源として航空機関係（主に軍用機）の分野で多く利用されている。

加速器としては、コッククロフト・ワルトン型、バンデグラフ、ライナックが利用されているが、最近では、小型サイクロトロンが比較的強い中性子源として採用され、医療用や中性子ラジオグラフィ用などに利用されている。これらの商業的な利用については後に述べる。

原子炉では、熱中性子束として、 10^6 n/cm²・s 以上が得られ、画質の面で最も良い画像が得られる。反面、中性子源が移動できない、初期投資が高い、運転のライセンスの問題などがあるが、中性子ラジオグラフィ用中性子源として最も広く使用されているのが原子炉で、中性子ラジオグラフィ専用炉もある。また、熱中性子よりもエネルギーの高い熱外中性子やさらに高い高速中性子、エネルギーの低い冷中性子を利用するラジオグラフィ技術も発展してきている。これらについても後に解説する。

中性子源の最新のトピックスは、スイスの Paul Scherrer 研究所の核破砕中性子源 (SINQ) に中性子ラジオグラフィ装置の設置が予定されていることである¹⁰⁾。この装置については第 3 回トピカルミーティング (1998) で詳細が発表されると思われる。

3.2 コリメータ

中性子源より出る中性子の方向を限定してビームとして像質を良くするため、コリメータが利用される。これには、直管型、スリット型、ダイバージェント型がある。スリット型

は、直管型の中に小径管の束または等間隔の平板を挿入してビームを平行にしようとするものであるが、今日では主にダイバージェント型コリメータが使用されている。ダイバージェント型コリメータにおいて、像の影（ボケ）が入口開口部の直径 D と全長 L の比 D/L に関係しているため、この逆数の L/D をコリメータ比としてコリメータ設計の重要な因子としている。少なくとも 10 以上、できれば 100 以上が望ましいとされる。

一方、コンバータ入口の中性子束を ϕ_i 、出口の中性子束を ϕ_0 とすれば、

$$\phi_0/\phi_i = (D/4L)^2$$

が成立する。このため、 L/D は大きいほど良いが、 L を大きくすると ϕ_0 が小さくなってしまう。

3.3 検出器（コンバータ）

中性子は X 線と違って、写真用フィルムには直接に作用しないため、中性子をコンバータに当て、二次放射線としての α 線、 β 線または γ 線を検出する。

直接法においては、コンバータに Gd 金属箔を用いて、 $\text{Gd}(n, \gamma)$ 反応の γ 転移による電子線によって、X 線フィルムを感光させる。

また、トラックエッチ法では、 ^6Li や ^{10}B の化合物を用いて、 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$, $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応の α 線を利用して、硝酸セルロースフィルムを用い、一定のエッチング処理によりエッチピットを生成して像を得る。

間接法では、Dy, In や Au 箔等を用いて、 $^{164}\text{Dy}(n, \gamma)^{165}\text{Dy}$, $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116}\text{In}$, $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 反応を利用して、これら金属箔に潜像を作り、 β 線によってフィルムに転写する。

一方、 ^{10}B や ^6Li を混ぜた物質に $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 等の蛍光材を入れ、 ^{10}B , ^6Li の (n, α) 反応で発生した α 線で、または Gd の (n, γ) 反応の内部転換で放出される電子で、蛍光材を発光させる蛍光コンバータがある。市販されているものには、 $\text{LiF} + \text{ZnS}(\text{Ag})$ (Nuclear Enterprise ;

NE-426, Kasei Optonix) と X 線用増感紙 $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}(\text{Tb})$ (Konishiroku Photo. Industries ; KH, KO-750, KO-500 など, Fuji Film ; G-4, G-8 など) がある。他に $\text{BN} + \text{ZnS}(\text{Ag})$ や $\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{ZnS}(\text{Ag})$ などが研究され、新しい窒化ボロン型の開発研究も発表されている。これらの蛍光コンバータは、感度が良いためにテレビジョン法の検出器として利用されている。

最近、高速中性子用に反跳陽子を利用するポリプロピレンと $\text{ZnS}(\text{Ag})$ を組み合わせた蛍光コンバータ (ASK) が開発され、テレビジョン法やフィルム法に利用されている。

3・4 撮像方法

撮像方法としては、フィルム法（直接法と間接法）とテレビジョン法の二つに大別できる。

直接法では、カセット内でコンバータの像を直接フィルムに感光させる。

間接法では、中性子場内でコンバータに生成された RI 像を暗室でフィルムに転写する方法で、 γ 線に不感であるという特徴がある。

いずれの場合でもフィルムの現像処理の条件を常に一定にすることも重要である。

トラックエッチ法は一種の固体飛跡検出法で、 γ 線に不感で暗室作業が不要であるという利点がある。熱中性子では、 ^6Li や ^{10}B のコンバータを酢酸セルロース、硝酸セルロース、ポリカーボネート、雲母などのフィルムと組み合わせて、中性子場で照射したのち、 NaOH 等でエッチングすることにより像を表出する。高速中性子場では、反跳陽子を利用して CR-39 等を直接照射して、同様なエッチング処理により像を得る。この方法ではエッチングの温度や時間が重要な要素となる。

フィルム法とは別に、ダイナミック法として高感度テレビジョンカメラと蛍光コンバータを利用する方法があり、実時間画像を得る方法として、デジタル画像処理技術と組み合わせた研究が盛んに進められている。この方法は、中性子テレビジョン法（英語では neutron radio-

scopy, electronic imaging と訳されている）ともいわれ、ビデオ画像として取り扱うために解像度の点に問題が残されている。しかし、最近では冷却型 CCD カメラや高精度のアナログ・デジタル変換器の採用と、走査線を増した高解像度テレビジョンの利用でかなり改善されてきた。このため、動態画像だけでなく静止画像にも利用されるようになった。また、画像の定量的な解析に対しては、入力レベルの設定、暗電流補正、シェーディング補正、画像歪み補正など注意すべき問題点が多くある。

TV カメラとしては、最初はイメージオルシコンが使用されたが、製造中止や調整の困難さなどのため、その後 SIT (silicon intensifier target) 管に移行している。イメージインテンシファイアの技術の進歩に伴い CCD カメラやカルニコン管などが使用され始め、高中性子束炉の利用が可能になって高速度撮影も実用化された。

この他、中性子用イメージングプレート (NRIP) を用いて、デジタル画像処理システムと組み合わせたコンピューテッドラジオグラフィ (CR) 法 (イメージングプレート法) がある。これについてはすでに本誌 Vol. 45, No. 12, pp. 813-819 で詳しく解説されている。イメージングプレートとしては、1980年代末から Gd_2O_3 化合物入りのものを使用して、ASTM 標準試料などで解像度や感度特性などが測定されていた。最近 LiF や Li_2CO_3 入りのものが開発され、 ^{10}B のものも検討されている。中性子場で得た NRIP の潜像を、CR システムでレーザー光により揮発性蛍光を発生させ、光電子増倍管で測定し、計算機による画像処理を行いフィルムに焼き付けることもできる。CR システムは高価でフィルム法に比較して解像度が劣るため、中性子ラジオグラフィではまだ本格的には使用されていない。しかし、X 線を利用する医学や生物学の分野などでは実用段階にある。もともと CR システムといわれるだけにデジタル画像処理に適し、ダイナミックレン

ジの良い特性と相まって今後ますます使用され
ると予想される。

3・5 イメージレコーダ

中性子ラジオグラフィ画像を記録または表示
するものとして、フィルム、トラックエッチ
フィルムやテレビジョン法などがある。

フィルムは種類も多く、それぞれのコンバー
タとの最適な組合せがあり、解像度や撮影時間

も変わるため、研究者がその場に合ったそれぞ
れ最適な組合せを使用している。わが国では、
Gd 箔コンバータとコダック SR フィルムの組
合せが主に使用されている。中性子束の低い設
備では、蛍光コンバータとフィルムの組合せが
使用されている。

トラックエッチ法で得られる画像は、エッチ
ング処理で拡大されたエッチピットの集合によ
るものである。そのまま顕微鏡などにより

表 1 わが国の中性子ラジオグラフィ設備

設 備 名	中性子束 (n/cm ² ・s)	Cd 比	照射野 (mm)	L/D	n/γ 比 (n/cm ² ・mR)	備 考
日本原子力研究所・東海						
JRR-3M(20 MW)	2.6×10 ⁸	81	115×432	178	—	R3・TNRF R-1
	1.5×10 ⁸	130	255×305	238	2.5×10 ⁶	R3・TNRF R-2
	2.3×10 ⁸	—	20×50	—	—	R3・CNRF(冷中性子)
NSRR	1.0×10 ¹⁰ /パルス	8.7	200×200	67	5.0×10 ⁴	
大洗 ²⁵² Cf	(1.9-3.4)×10 ³	1.7	直径 200	~50	~2.9×10 ⁴	<1 mg=20 GBq
京都大学原子炉実験所						
KUR(5 MW)	1.2×10 ⁶	400	直径 160	100	1.0×10 ⁶	1996年まで
	1.4×10 ⁷	—	20×70	—	—	CN-3(冷中性子)
武蔵工大・原研						
TRIGA-II(100 kW)	1.9×10 ⁶	80	150×150	52	2.4×10 ⁶	1989.12 より
	4.2×10 ⁵	60	380×380	120	1.6×10 ⁶	運転停止中
立教大学・原研						
TRIGA-II(100 kW)	3.2×10 ⁶	2.2	直径 200	79.9	5.0×10 ⁵	
近畿大学・原研						
UTR-KINKI(1 W)	1.2×10 ⁴	4.0	直径 200	10	9.8×10 ⁵	
	3.4×10 ³	2.0	直径 200	22	2.7×10 ⁵	
東京大学・東海						
弥生炉(2 kW, 高速中性子)	1.2×10 ⁶	—	直径 100	133	—	GYD(>1.3 MeV)
	1.8×10 ⁷	—	直径 200	39	—	TC NTV(>1.3 MeV)
名古屋大学						
密封管	1.0×10 ⁴	5	200×200	25	10 ⁴	3 MeV, 200 μA
バンデグラフ	5.0×10 ⁵	2.5	165×165	17	3×10 ⁴	
大阪府立大学・先端科研						
バンデグラフ	1.2-9.0×10 ³	2.2	120×120	10-30	—	
ライナック	1.5-7.0×10 ⁵	3.5	120×120	10-30	—	15 MeV
Sb-Be	1.0×10 ²	20	5×50	70	10 ³	3.7 GBq
豊田中央研究所						
バンデグラフ	1.8×10 ⁵	4.4	200×250	30	7.6×10 ³	3 MeV, 300 μA
住重試験検査・東予	4.5×10 ⁵	3.5	356×432	50	1.5×10 ⁵	18 MeV, 50 μA
サイクロトロン-CYPRIS370	1.1×10 ⁶	3.5	356×432	30	1.5×10 ⁵	18 MeV, 50 μA
日本製鋼所・室蘭	3.0×10 ⁵	3.5	356×432	70	3.0×10 ⁵	16 MeV, 50 μA
サイクロトロン-BC168	4.4×10 ⁵	3.5	356×432	50	2.5×10 ⁵	16 MeV, 50 μA

表 2 アメリカおよび EC 諸国の主な中性子ラジオグラフィ設備

設 備 名	中性子束 (n/cm ² ・s)	Cd 比	照射野 (mm)	L/D	備 考
アメリカ合衆国					n/γ 比
Aerotest Operation	1×10 ⁷	5	558×762	65-500	1.4×10 ⁶ L=100
General Elect. Co.	4×10 ⁶ (N)	—	432×432	125-300	2.1×10 ⁶
	2×10 ⁶ (S)	—	432×432	75-300	1.4×10 ⁶
Atomics International	—	—	14"×17"	64(ver)	—
	—	—	—	80(hor)	—
General Atomics	—	—	—	—	—
	2.8×10 ⁸	—	140×480	30, 60	—
ANL TREAT	4.3×10 ⁶	1.9	254×432	50-300	7.7×10 ⁴
ERS	2.6×10 ⁶	1.9	356×432	185-700	1.4×10 ⁵
NRS	3.2×10 ⁶ (H)	47	直径 305	55.2	1.0×10 ⁷
Univ. of Michigan	2.3×10 ⁶ (V)	200	直径 71	326	7.5×10 ⁶
Phoenix Memorial Lab.	2.6×10 ⁶ (1 MW)	56	直径 229	50-100	3.5×10 ⁵
Penn State Univ.(PSBR)	200 MW (20 ms)	—	—	—	—
	1.9×10 ⁸	—	—	110	—
Sandia ACRR	1.9×10 ⁹ (10 s)	—	—	—	—
US Army Mat. Tech.	3.4×10 ⁴ 14 MeV	—	203×254	12-90	2.7×10 ⁴
²⁵² Cf	2×10 ⁴ 12 mg	17	356×432	10-90	2.25×10 ⁴
McClellan Air Force Cf	10 ⁵ 50 mg	—	—	30	—
1 MW	—	—	—	110	—
Univ. of Virginia	1×10 ⁷	—	—	30	—
ベルギー					
Mol BR1	1.1×10 ⁶	>50	300×300	75	## 乾式
BR2	3×10 ⁷	40	100×600	240	## 水中
ドイツ					
Geesthacht FRG2	1×10 ⁷	5	100×400	100	* 水中
FRG1	5×10 ⁶	100	300×300	375	#
1 kCi Sb-Be	1.5×10 ⁴	2	200×400	10-20	* 乾式
Berlin BAM(linac)	2×10 ⁴	—	直径 150	40	#
BEM2 10 MW	—	—	—	—	—
Ottobrun IABG(D-T)	8×10 ⁴	—	250×200	>12	#
デンマーク					
Riso DR1	1.8×10 ⁶	4.2 left	100×100	110(ver)	## 乾式
	1.4×10 ⁶	3.8 right	100×100	27.5(hor)	## 乾式
フランス					
Cadarache LDAC	10 ⁵	9	500×100	13.5	* 乾式
SCARABEE	1.5×10 ⁷	0.25	180×240	470	* 乾式
Grenoble SILOE	8.5×10 ⁷	2.4	120×400	380	* 水中
Saclay ISIS	8×10 ⁶	2.4	100×150	94	* 乾式
ISIS(tan)	2×10 ⁶	—	240×180	100	#
OSIRIS	6×10 ⁷	3.8	100×650	148	* 水中
ORPHEE	9×10 ⁸ 1)	>50	25×150	—	#
Valduc MIRENE	2.6×10 ⁸ /パルス	9	180×240	100	* 乾式
イギリス					
Harwell DIDO(6HGR9)	8×10 ⁷	—	直径 180	160	* 乾式
(6H)	1×10 ⁷ 2)	—	直径 150	100	#
Ext. Fac.	3×10 ⁵	—	直径 500	300	#
イタリア					
Casaccla TRIGA-RC1	5×10 ⁷	1.65	直径 120	50	* 乾式(停止中)
オランダ					
Petten HFR	2×10 ⁷	7.2	86×584	233	* 水中
HFR(HB8)	1.4×10 ⁷	6.5	100×160	400	* 乾式
HFR 9 m 管	4.2×10 ⁵ 3)	547	直径 220	540	#
HFR 11 m 管	2.5×10 ⁵ 3)	677	直径 250	750	#
LFR	1×10 ⁶	40	直径 250	127	#

備考：*：放射性試料 #：非放射性試料および工業用部品

1) 冷および熱中性子ビーム 2) Be フィルタ中性子ビーム

3) 純熱, Si & Bi フィルタまたは冷中性子および Bi & Bi フィルタ中性子ビーム

表 3 その他の国の主な中性子ラジオグラフィ設備

設 備 名	中性子束 (n/cm ² ・s)	Cd 比	照射野 (mm)	L/D	備 考
オーストラリア					
Lucas Heights UTR	1.4×10 ⁶		直径 100	100	100 kW Argonaut
オーストリア					
Vienna TRIGA	1.5×10 ⁵ Bi poly 3×10 ⁵ Bi single	20 3	直径 90 直径 400	125 45	250 kW TRIGA —
ASTRA (Seisbersdori)	5×10 ⁷	2.3	直径 150	150	9 MW
バングラデシュ					
AERE 3 MW	1.13×10 ⁶	10.51	直径 300	60	3 MW TRIGA-2
ブラジル					
IPEN 5 MW B & W	1.4×10 ⁷			100	5 MW B & W プール
カナダ					
Chalk River NRX 40 MW	4.5×10 ⁷	1 020	406×483	152	n/γ: 5×10 ⁶
McMaster Univ. MNR	1×10 ⁶	14	250×250	125	5 MW プール
中 国					
SINPC PIR	2.5×10 ⁵	150		50 - 110	3 MW プール
チェコ					
IRN Rez VVRS	1.2×10 ⁷	16		360	2 MW
ハンガリー					
NVRSZ-M (Budapest)	7.8×10 ⁷	2.5	直径 150	170	10 MW
インド					
Kalpakkam KAMINI	3×10 ⁶		60×200	100	30 kW U233 プール
ASPARA 400 kW	1×10 ⁶	6.3	直径 150	90	400 kW
インドネシア					
RCNT, Bandung	2×10 ⁶	5.24	直径 150	76	1 MW TRIGA-2, #3
RSG-GAS, Serpong	1.54×10 ⁷	6.4	直径 300	83	30 MW, 乾式
Yogyakarta 250 kW	3.14×10 ⁷ (4×10 ⁶)	4 5	370×130×220 直径 180		水中, 間接法 250 kW, TRIGA-2
イラン					
TNRC, Tehran	6.1×10 ⁴	50	直径 186	114	5 MW
韓 国					
HANARO 30 MW	2.01×10 ⁷ 1.01×10 ⁷		294×418 442×607	191 271	30 MW TRIGA-2 #1, #3 (Mur 2)
マレーシア					
PUSPATIRIP 750 kW	5×10 ⁵	37	180×240	37	1 MW TRIGA-3
メキシコ					
NCM, Mexico	3.8×10 ⁶	3.65	直径 203	135	
パキスタン					
PARR-I 10 MW	3.3×10 ⁵	18	直径 300	60	
ロシア					
VVR Res. R. NR31R	5×10 ⁷		200×200	100	
K. IAE NR11R	2×10 ⁷	29	110×220		MR プール
スロベニア					
J.S. Inst. TRIGA	4×10 ⁵	15	直径 120	125	250 kW, TRIGA-2
スウェーデン					
Studsvik AB R2-0	3×10 ⁷		300×300	75	1 MW プール
R2	3×10 ⁷		400×80	300	50 MW MTR プール
台 湾					
ZPRL, Lung-tan	6.9×10 ⁵	8.2	直径 420	111	8.3×10 ⁵ (n/γ) 30 kW
タ イ					
TTR-1/M1 1 MW	1.6×10 ⁶	100	250×200	~60	TRIGA-3
ベトナム					
Dalat, 500 kW	6.7×10 ⁶ 2.5×10 ⁶	69 120	直径 120 120×120	~40	TRIGA-2
トルコ					
CNRIC TR-2	7.4×10 ⁷		400×150	225	

エッチピットの数や大きさなどを測定してデータ処理することもあるが、画像として表示する場合にいろいろと問題がある。そのままで印画紙に引き伸ばしても、また写真でフィルムに撮影しても鮮明な画像は得にくい。このため、フィルムに二つの斜方向からの光を当てて、散乱光による画像をカメラで撮影する方法やシュリーレン法による印画法が利用されている。

テレビジョン法での表示装置はCRT ディスプレイであるが、記録装置としてはビデオテープ、ビデオディスクなどが用いられ、デジタル画像としては種々のディスクに格納され、ハードコピーなどで表示できる。また、ディスプレイ上の画像の写真なども多く利用される。

4. 中性子ラジオグラフィ設備

これまでに開催された国際会議の論文などから、わが国および外国の中性子ラジオグラフィ設備をまとめると、表1-3のようになる。この他にもいくつかの設備があるが、論文が発表されないものや特性の記述がないものである。表中にも、現在使用されていない設備や特性の変更があるかもしれないが、できる限りのものをまとめた。現状では、一般的な中性子源のあるところでは大部分とっていいほど整備されている。しかし、東南アジアからの発表などでは、設備はあるものの実際に研究が進んでいるようにはみえない。

最近の傾向としては、 $10^7 - 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ の利用できる高中性子束炉 (JRR-3M, Petten-HFR, OSIRIS, Mol-BR2, Sandia-ACRR など) が多くなり、実時間画像での定量的な測定が盛んである。その他、パルス炉 (NSRR, PSBR, ACRR) や可搬型 (^{252}Cf -McClellan, Mobil Accelerator-LTV) の中性子源も利用されている。さらに、熱中性子だけではなく、高速中性子

(YAYOI) や冷中性子 (JRR-3M, KUR-CNS, Petten-HFR, ORPHEE) の設備も利用されている。

5. おわりに

中性子ラジオグラフィの概要についてまとめた。応用については、これからいくつか解説されるので省略した。中性子ラジオグラフィの流れとしては、技術そのものの基礎的な研究、他の近接科学と組み合わせた定量的な解析と応用、非破壊検査としての可視化や定性的な利用があげられる。また、ASTM の標準試料 (像質計, 感度指示計, L/D 評価治具) はあるものの問題点が多く決定的な評価法となっておらず、新しい標準試料の開発が期待されている。

文 献

- 1) Barton, J. P. et al. (eds.): "Neutron Radiography", D. Reidel Pub. Co. (1983)
- 2) Barton, J. P. et al. (eds.): "Neutron Radiography (2)", D. Reidel Pub. Co. (1987)
- 3) Fujine, S. et al. (eds.): "Neutron Radiography (3)", Kluwer Academic Pub. (1990)
- 4) Barton, J. P. (ed.): "Neutron Radiography (4)", Gordon and Breach Sci. Pub. (1994)
- 5) MacGillivray, G. M. et al. (eds.): "Neutron Radiography System Design and Characterization", Canadian Nucl. Society (1994)
- 6) (1) Mochiki, K. et al. (eds.): Conf. Proceedings, Rikkyo Univ. (1995)
(2) Kobayashi, H. et al. (eds.): Neutron radiography system design and characterization, *Nucl. Instr. Meth. A*, **377**, No. 1 (1996)
- 7) Von Der Hardt, P. et al. (eds.): "Neutron Radiography Handbook", D. Reidel Pub. Co. (1981)
- 8) 藤根成勲: KURRI-TR-359, 1-46 (1992)
- 9) 藤根成勲: 原子力工業, **41**, (2), 10-20 (1995)
- 10) Lehmann, E. et al.: Ref. 6(2), 11-15 (1996)