

連載講座



中性子イメージング技術の基礎と応用 (応用編第12回)

国内外の中性子イメージング設備[†]

松林政仁

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Key Words : neutron, neutron imaging, neutron radiography, neutron imaging facility, neutron radiography facility, neutron source, neutron fluence rate, collimator ratio

1. はじめに

我が国で初めて中性子ラジオグラフィが一般に紹介されたのは、1962年頃¹⁾であるが、研究機関、企業の中には中性子ラジオグラフィに注目して実験を行っていたところがあった。東京都立アイソトープ総合研究所(現在、東京都立産業技術研究センター)ではRa-Be線源からの中性子をパラフィンで減速させ、インジウム転写箔を用いる間接法を行った論文が発表されている²⁾。また、東芝中央研究所(現在、東芝原子力技術研究所)では教育訓練用原子炉(TTR-1, スイミングプール型, 熱出力100 kW)のサーマルコラムを利用して、間接法により照射済酸化ウラン燃料ペレットを含む各種試料の撮影を実施しており、撮影位置での熱中性子束 $2.5 \times 10^5 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, カドミウム比3.5と報告されている³⁾。引き続きイメージンテンシファイアを用いる中性子テレビ法の実験が行われ、加速器中性子発生装置と組み合わせて可搬型中性子ラジオグラフィ装置の開発を目指

したが中止となった⁴⁾。日本原子力研究所 東海研究所(現在、日本原子力研究開発機構(原子力機構)原子力科学研究所)では、1967年JRR-3 (Japan Research Reactor No. 3) に照射済の高放射性物質を専用に試験する中性子ラジオグラフィ装置が設置されたが、解像度に問題があり実用化に至らなかった。

このような状況を経て、中性子ラジオグラフィの研究が国内各地の研究機関で盛んに行われるようになるのは、1970年代中頃からである。本解説では国内における、1970年代中頃以降の中性子ラジオグラフィ装置の状況について述べるとともに、国外の最新の設備並びに特徴のある設備を紹介する。国内の中性子ラジオグラフィ装置の仕様概要を表1に示す⁵⁾⁻⁷⁾。これらの中には常設でなく、それぞれの中性子源に用意された実験孔に設備を仮設して撮影を行うものも含まれている。このため、中性子源は稼動しているものの、中性子イメージング設備としては現状利用されていないものもある。

2. 原子炉中性子源を利用した中性子イメージング設備

2.1 JRR-2

1979年JRR-2 (Japan Research Reactor No. 2) の熱中性子柱に小規模な中性子ラジオグラフィ装置が設置された(図1⁵⁾参照)。こ

[†]Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Applications Part 12).

Neutron Imaging Facilities in Japan and Abroad.
Masahito MATSUBAYASHI: Japan Atomic Energy Agency, 2-4, Shirane, Shirakata, Tokai-mura, Nakagun, Ibaraki Pref. 319-1195, Japan.

表1 国内の中性子ラジオグラフィ装置仕様概要

設置機関	中性子源	熱中性子束 ($n\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}$)	カドミ ウム比	コリメー タ比	照射野 (mm)	n/γ比 ($n\cdot cm^{-2}\cdot mR^{-1}$)	備考
日本原子力研究開発機構	JRR-2	1.1×10^7	19	70	80×80	2.8×10^5	10MW
	JRR-4	2.7×10^7	14	—	—	5.9×10^5	3.5MW
	NSRR ・NRG-A	1.1×10^{10} ($n\cdot cm^{-2}$)	8.7	67	200×200	5.0×10^4	パルス炉
	JRR-3M ・TNRF-1 ・TNRF-2	2.0×10^8 1.2×10^8	300 320	— 185(H), 154(V)	115×432 255×305	— 2.16(Sv/h)	20MW
	JRR-3M CNS ・CNRf	(冷中性子) 10^7	—	—	約30×30	—	液体水素 中性子ベントナー
	Cf-252	$(1.9\sim 3.4)\times 10^3$	1.7(In)	12.5~50	200φ	$(1.9\sim 2.9)\times 10^4$	1mg=200GBq
京都大学	KUR-E2	1.1×10^6	400	100	160φ	1.0×10^6	5MW
	KUR-CNS ・CN-2 ・CN-3	(冷中性子) 1.1×10^7 1.4×10^7	—	—	10×75 20×75	—	液体重水素
	TRIGA-II	2.0×10^5	8	250	250φ	5.0×10^6	100kW
立教大学	TRIGA-II	3.2×10^6	2.2	79.9	200φ	5.0×10^5	100kW
近畿大学	UTR-KINKI	1.2×10^4 3.4×10^3	4.0 2.0	10 22	200φ 200φ	9.8×10^5 2.7×10^5	1W
	東京大学	弥生炉 ・GYD ・GYU ・TCO ・FCO	(>1.3MeV) 1.2×10^6 3.4×10^6 4.8×10^6 2.0×10^6	—	133 75 74 37	— 6.8R/h 27R/h 18R/h 15R/h	高速中性子源炉 (2kW)
名古屋大学	中性子発生器	1.0×10^4	5	25	200×200	10^4	3MeV
	バンデグラーフ	5.0×10^4	2.5	17	165×165	3×10^4	200μA
大阪府立放射線中央研究所	バンデグラーフ	$1.2\sim 9.0\times 10^3$	2.2	10~30	120×120	—	1MeV
	ライナック	$1.5\sim 7.0\times 10^3$	3.5	10~30	120×120	—	15MeV
	Sb-Be	1.0×10^2	20	70	5×50	10^3	100mCi
豊田中央研究所	バンデグラーフ $^9\text{Be}(p,n)^{10}\text{B}$	1.8×10^5	4.4	30	200×250	7.6×10^5	300μA 3MeV D.C.
東北大学	サイクロトロン (Model 680)	4.5×10^5 1.5×10^6	3.0 2.5	50 50	330×330 330×330	1.3×10^5 0.8×10^5	17MeV 30MeV
	住重試験検査株式会社	小型サイクロトロン $^9\text{Be}(p,n)^{10}\text{B}$	4.5×10^5 1.1×10^6	3.5 3.5	50 30	356×432 356×432	1.5×10^5 1.5×10^5
日本製鋼所 室蘭製作所	ベビーサイクロトロン	3.0×10^5	3.2	72	365×432	3.0×10^5 (熱)	16MeV50μA
	ン $^9\text{Be}(p,n)^{10}\text{B}$	4.4×10^5	3.5	50	356×432	2.5×10^5	16MeV50μA

の装置は非放射性物質を対象とし、中性子ラジオグラフィの基礎的な実験が手軽に行えるよう、一般利用を目的としたものであった。撮影可能な試料の最大寸法は80×80×20 t (mm) と制限はあるが、熱中性子束は $1.1\times 10^7 n\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}$ と大きく、n/γ比も $2.8\times 10^5 n\cdot cm^{-2}\cdot mR^{-1}$ と高いため、直接法(フィルム法、トラックエッチ法)、間接法ともに可能であった⁸⁾。本装置は1990年に解体されるまでの間、中性子ラジオ

グラフィの基礎的な実験や原子炉研修実験に供された。

2・2 JRR-4

JRR-4 (Japan Research Reactor No. 4) に常設の中性子ラジオグラフィ装置はないが、プール中にアルミニウムパイプを仮設して中性子ラジオグラフィ実験が1972年から可能となった⁹⁾。また、リドタンクにおいて仮設の中性子

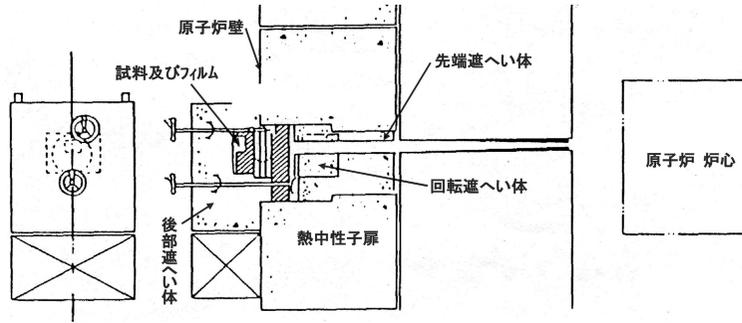


図1 JRR-2中性子ラジオグラフィ装置⁵⁾ (垂直断面図)

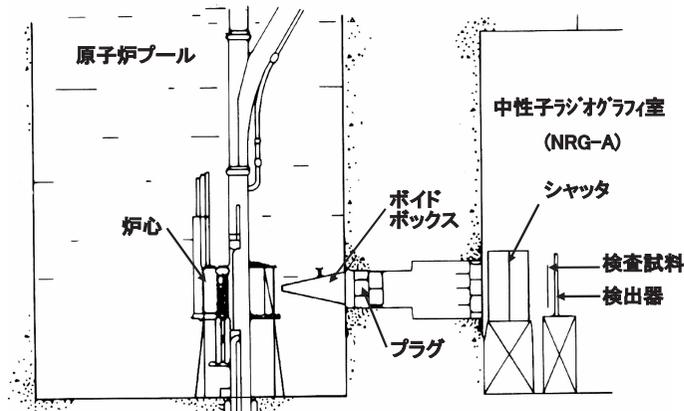


図2 NSRR中性子ラジオグラフィ装置(NRG-A)⁷⁾ (垂直断面図)

ラジオグラフィ装置による実験が行われたこともあったが、現在は使用されていない。

2・3 NSRR

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) には、中性子ラジオグラフィ装置が2基設置された。1976年NSRRで試験を行った燃料の検査用にプール壁に隣接してNRG-Aが設けられた(図2⁷⁾参照)。中性子はプール壁貫通孔を通して中性子ラジオグラフィ装置に導かれる。プール内のコリメータはボイドボックスとなっており、通常はプール水で満たされているが、中性子ラジオグラフィ装置使用時には圧搾空気によりプール水を排除してダイバージェント型コリメータとなる¹⁰⁾。1982年にはプール内にNSRRの使用済燃料の検査のためのNRG-Bが設置された。コリメータとなるボイドボックス

は長さ約1mであり、コリメータ比は最大25である。被写体である使用済燃料と検出系は全てプール中で取り扱われる。NSRRはパルス炉であるため、定出力運転における中性子ラジオグラフィのほか、パルス運転時の撮影も可能である。1パルスあたりの炉出力積分値は117 MWsであり、中性子フルエンスは $1 \times 10^{10} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ に達する。通常の撮影法であれば10ms程度撮影ができるため、被写体によっては動態の検査もできる。フィルム法による気液二相流の高速度撮影が京都大学の三島らによって実施された^{11), 12)}。

2・4 JRR-3M

JRR-3M (Japan Research Reactor No.3 Modified) の熱中性子ラジオグラフィ装置(TNRF: Thermal Neutron Radiography Facil-

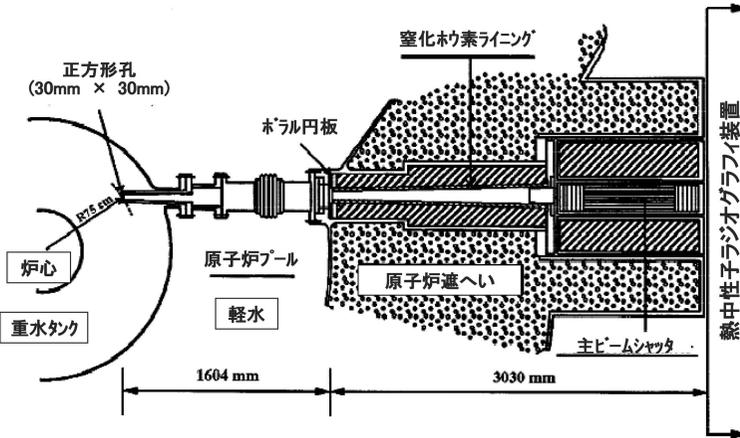


図3 JRR-3M 熱中性子ラジオグラフィ装置コリメータ部¹⁴⁾ (水平断面図)

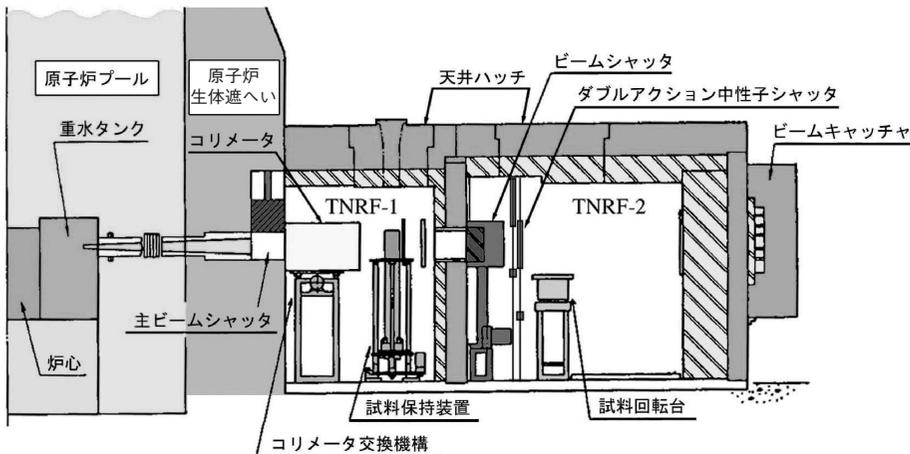
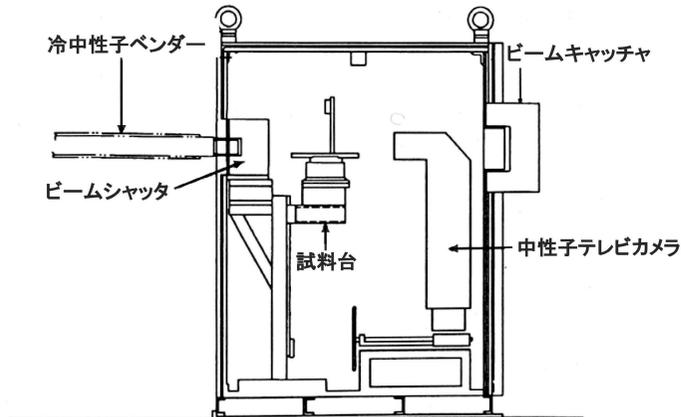
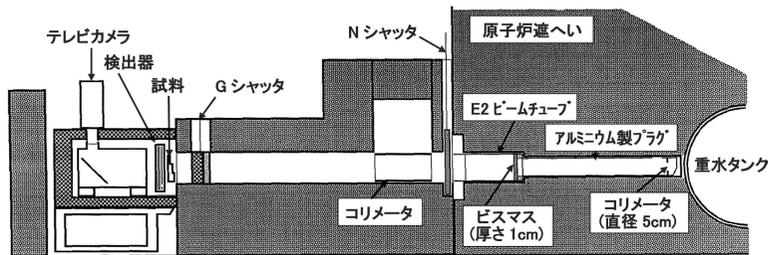


図4 JRR-3M 熱中性子ラジオグラフィ装置(垂直断面図)

ity) は、多目的の利用、高解像度、高放射性試料の非破壊検査、中性子テレビシステム等の特徴を持ち、当時最新の装置を備えて1991年度から利用が開始された¹³⁾。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(図3¹⁴⁾参照)。二つの部屋から構成されており、一つは高放射性的の試料用の撮影室(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(TNRF-2)である¹⁴⁾(図4¹⁴⁾参照)。代表的な撮像システムとしては冷却型CCD(Charge Coupled Device)カメラ

を用いる高解像度撮像系と高速度ビデオカメラとイメージintensifierを組み合わせた高速度撮像系が利用できる。冷中性子ラジオグラフィ装置(CNRF: Cold Neutron Radiography Facility)はマシンタイム共用のビームポートに設置されている¹³⁾(図5¹³⁾参照)。冷中性子は重水タンク中に設置された液体水素(20 K)の冷中性源から冷中性子導管により本装置に導かれる。当初設置されていたC2-3ビームポートが中性子ベンダーシステム導入により3分岐されたことから中性子束の低下が生じるとともに照射野が3 cm角程度に変更となった。中性子用イメージングプレート及び冷却型CCDカメラが利用できる。

図5 JRR-3M 冷中性子ラジオグラフィ装置¹³⁾(垂直断面図)図6 KUR 熱中性子ラジオグラフィ装置¹⁵⁾(断面図)

2・5 KUR

KUR (Kyoto University Reactor) は最大熱出力 5 MW のスイミングプール系タンク型研究炉で、液体重水素による冷中性子源を装備している。熱中性子ラジオグラフィで使用される E-2 実験孔は、熱中性子照射設備として設計されたもので、炉心を直視する B-4 実験孔と平行で先端が重水タンクを向いた炉心に対してオフセットの配置となっている (図 6¹⁵⁾ 参照)。このため、カドミウム比が高く γ 線の混入割合も低い。1978 年から、オンラインリアルタイム中性子ラジオグラフィの開発研究が始まった。1980 年に、我が国で初めてイメージンテンシファイアを使用しない中性子ラジオグラフィ画像を、超高感度 X 線用テレビカメラで直接撮影することに成功した¹¹⁾。その後 (1989 年) 高速度撮像法の研究も始まったが、医療照射設備の改修に伴い熱中性子強度が大幅に低下

し、利用の主体は冷中性子ラジオグラフィへと移行した。冷中性子ラジオグラフィ実験は CN-2 及び CN-3 のポートで行われてきた (図 7¹⁵⁾ 参照)。更に、極冷中性子 (VCN: Very Cold Neutron) 設備が設置され、世界唯一 VCN ラジオグラフィが可能な施設となっている¹⁶⁾ (図 8¹⁶⁾ 参照)。

KUR は現在進められている燃料の低濃縮度化工事に伴い、通常運転の熱出力が 5 MW から 1 MW に変更となる。このため、利用できる中性子強度も 1/5 となると予想されている。

2・6 武蔵工業大学炉

1978 年頃より TRIGA-II 型炉の水平実験孔を使って中性子ラジオグラフィに関する基礎的実験が行われ、単結晶ビスマス等をフィルタに用いた中性子エネルギー分布の調整が注目された¹⁷⁾。1984 年 B 実験孔に中性子ラジオグラフィ

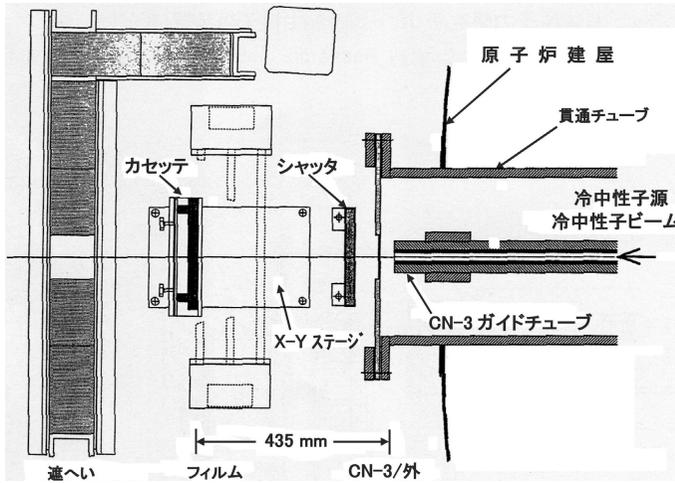


図7 KUR 冷中性子 (CN-3) ラジオグラフィ装置¹⁵⁾ (断面図)

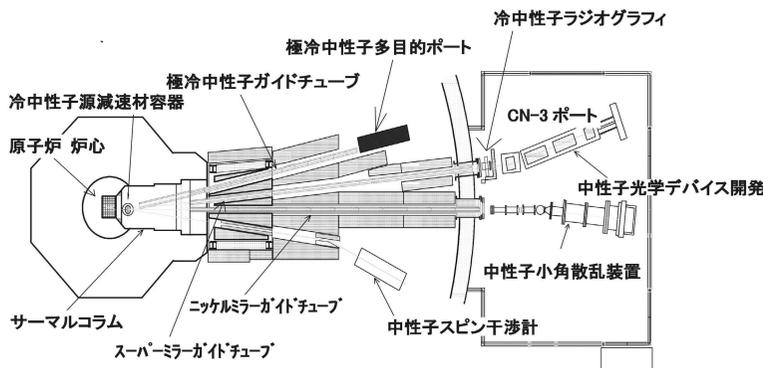


図8 KUR 極冷中性子ラジオグラフィ装置¹⁶⁾ (平面図)

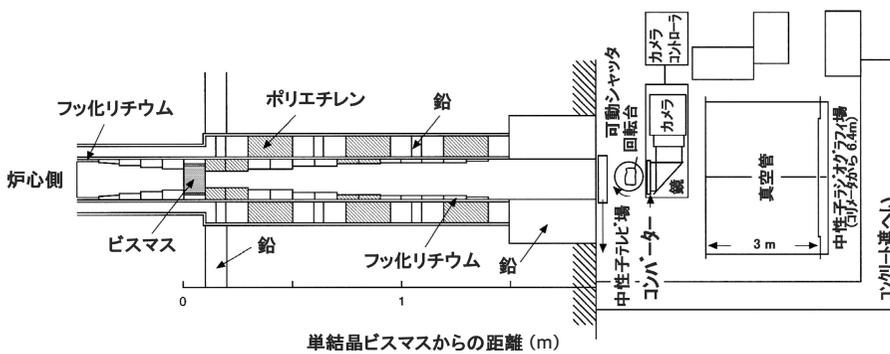


図9 武蔵工業大学炉中性子ラジオグラフィ装置¹⁵⁾ (断面図)

装置が設置された。L/D 比の異なる 2 箇所
の撮影位置が利用でき、最大試料サイズは直径
38 cm である。当該実験孔は炉心を直視して
いるためカドミウム比が低く高速中性子ラジオ

グラフィとしての利用も可能である (図9¹⁵⁾ 参
照)。武蔵工業大学の村田らによって中性子テ
レビスシステムの開発が行われていたが、1989
年に原子炉のトラブルにより運転が停止された。

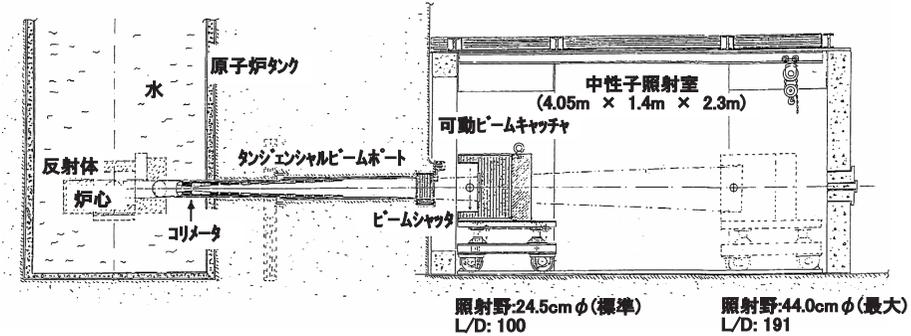


図10 立教大学炉中性子ラジオグラフィ装置¹⁵⁾ (垂直断面図)

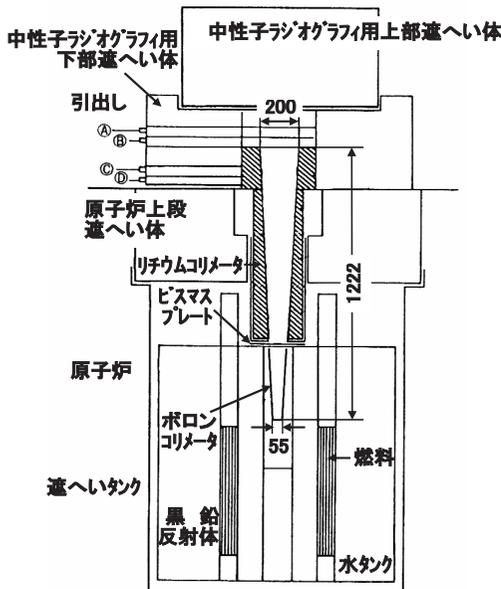


図11 近畿大学炉中性子ラジオグラフィ装置¹⁵⁾ (垂直断面図)

2.7 立教大学炉

1984年頃、TRIGA-II型炉に垂直ダイバージェント型コリメータを仮設して実験が開始された。一連の基礎的実験の後、1986年水平実験孔No.2に中性子ラジオグラフィ装置が設置された。No.2実験孔は炉心に対して接線方向に配置されており、 γ 線の混入の少ない中性子ビームが利用可能である(図10¹⁵⁾参照)。現在世界で中性子テレビシステムとして使用されている冷却型CCDカメラは、本装置を利用して世界で初めて中性子イメージング用に使用された。このビームは、ビームキャッチャの移動と

ダイアフラムの交換によりL/D値を30から500程度まで変更できる設計となっている。更に、このビームはダイアフラムから撮像装置付近までの任意の場所にフィルタが設置できる構造となっておりフィルタによる実効エネルギー変遷の研究などにも利用されている¹⁸⁾。実際、撮影は主にL/D=100で行われたが、 $\sim 10^7 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の高中性子束が要求される冷却型CCD撮像の場合などではL/D=30で実験が行われた。このビームにより中性子用イメージングプレートの特長試験が集中的に行われた¹⁹⁾。この炉も炉停止し廃炉中である。

2.8 近畿大学炉

1984年、原子炉の遮へい上蓋の一部にリチウム入りコリメータを置く中性子ラジオグラフィ装置が設置された^{20),21)}(図11¹⁵⁾参照)。中性子ビームは上向きで被写体、コンバータ、フィルムを収納した引き出しが撮影部となっており、原子炉運転中でも被写体の交換が可能である。大阪府立大学の谷口らは本装置場で冷却型CCDカメラを用いて高感度中性子イメージングを試みている²²⁾。

2.9 東京大学高速中性子源炉弥生

弥生炉の実験孔のうち中性子ラジオグラフィ用として使用できるのは、GYU(炉心上部)、GYD(炉心下部)、FCO及びTCOの4箇所がある(図12¹⁵⁾参照)。1.3 MeV以上の高速中性子が利用可能であり、CR-39等の固体飛跡

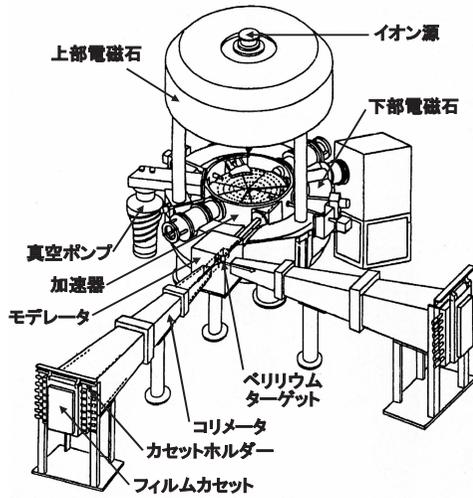


図 14 ベビーサイクロトロン加速器中性子ラジオグラフィ装置(日本製鋼所室蘭製作所)¹⁵⁾
(立体図)

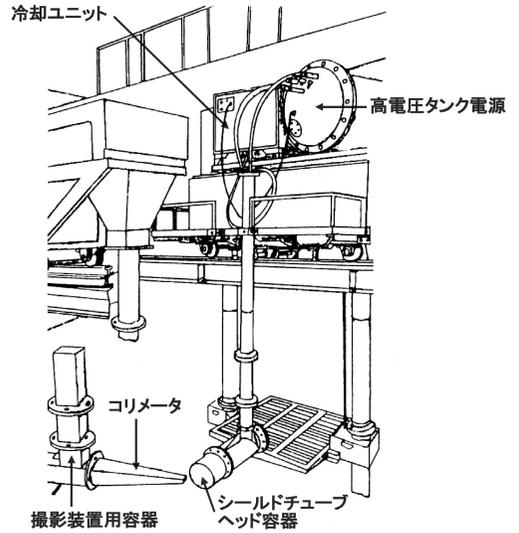


図 15 ホットラポールに設置された中性子ラジオグラフィ装置(名古屋大学)⁵⁾(立体図)

子として利用する場合がある。熱中性子ではガドリニウムコンバータと X 線フィルムを利用したフィルム法が、高速中性子では CR-39 が検出器として用いられる。1983 年からは宇宙ロケット用部品の火工品の検査が商業ベースで実施された。

3・3 その他の加速器中性子源を利用した中性子ラジオグラフィ装置

名古屋大学では、3 MeV バンドグラーフ加速器の Be(d, n) 反応による中性子源、ホットラポールでシールドチューブ中性子発生装置 ($^3\text{H}(d, n)$ 反応) を用いた中性子ラジオグラフィ装置が設置され実験が行われていた²⁸⁾ (図 15⁵⁾ 参照)。

大阪府立放射線中央研究所 (現在、大阪府立大学先端科学イノベーションセンター) では、1 MeV の小型バンドグラーフ加速器 (主として $^3\text{H}(d, n)$ 反応) が設置され中性子ラジオグラフィの研究が開始された²⁹⁾ (図 16⁵⁾ 参照)。その後、18 MeV のライナックの制動 X 線の Pb (γ, n), Be (γ, n) 反応による設備でも中性子ラジオグラフィ研究が実施された。

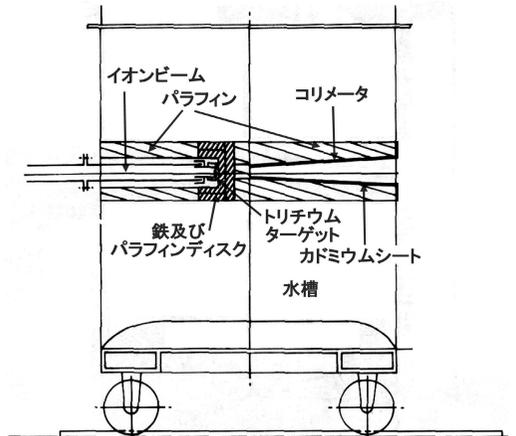


図 16 バンドグラーフ中性子ラジオグラフィ実験装置(大阪府立放射線中央研究所)⁵⁾
(垂直断面図)

また、豊田中央研究所では、1980 年 (昭和 55 年) に導入された 3 MeV バンドグラーフ加速器 (Be(d, n) 反応) をベースに 1983 年 (昭和 58 年) 頃に中性子ラジオグラフィ用の設備が試作・設置された³⁰⁾ (図 17⁵⁾ 参照)。中性子発生源の近くにソースボックスを備え中性子減速材に重水を入れ熱中性子の増加が図られている。コリメータはダイバージェント型であり γ 線低減用と推察されるビスマスフィルタがコリ

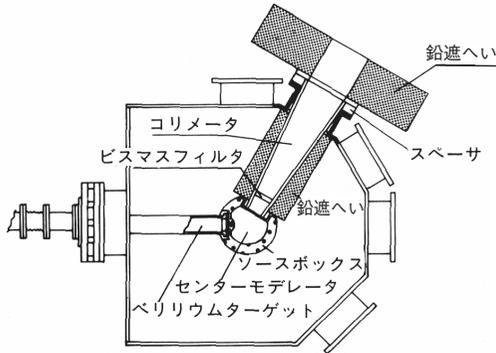


図 17 熱中性子ビーム発生装置(豊田中央研究所)⁵⁾
(水平断面図)

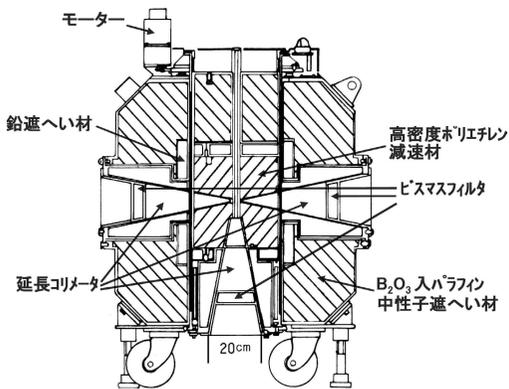


図 18 ^{252}Cf 熱中性子ラジオグラフィ装置(日本原子力研究開発機構)⁵⁾(垂直断面図)

メータ入口部分に装備されている。

4. 放射性同位体中性子源を利用した中性子イメージング設備

4.1 ^{252}Cf 熱中性子ラジオグラフィ装置

日本原子力研究所 大洗研究所(現在, 原子力機構 大洗研究開発センター)に RI の利用技術の一つとして 1977 年 ^{252}Cf を中性子源とする可搬型中性子ラジオグラフィ装置が設置された(図 18⁵⁾参照)。L/D 比の異なる 3 個のコリメータによる同時撮影が可能であり, 装置重量約 1t でクレーン付トラックで移動可能である。照射野における最大熱中性子束は $3.4 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とかなり低い, 我が国最初の可搬型中性子ラジオグラフィ装置としての意義は大

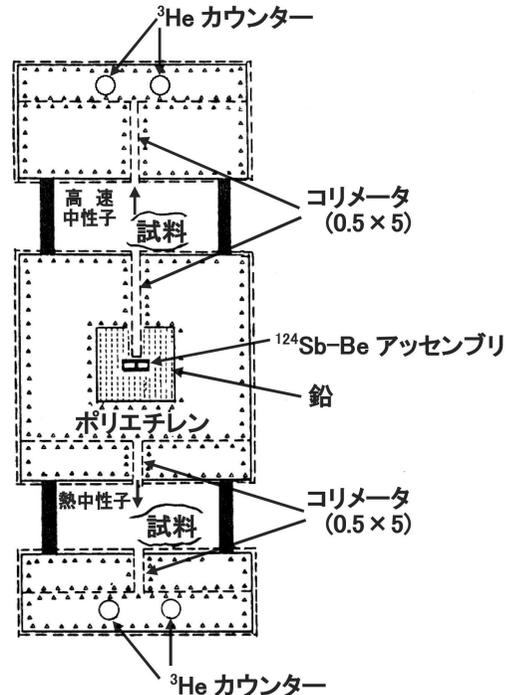


図 19 可搬型 ^{124}Sb 中性子ラジオグラフィ装置(大阪府立放射線中央研究所)⁵⁾(断面図)

きかった^{31), 32)}。同ラジオグラフィ装置のユニークな撮影法として熱中性子及び γ 線同時ラジオグラフィがある。中性子ビームに混入している γ 線を利用して, 被写体の γ 線透過像を熱中性子透過像と同時に得るもので, コンバータとフィルムの配置に工夫が施された³³⁾。 ^{252}Cf 線源の強度低下に伴い同装置の利用は減ったが, 低中性子束照射場として中性子イメージングプレートの開発や武蔵工業大学の持木らによるフォトンカウンティング法を用いた高感度撮影法の開発に利用された³⁴⁾。

4.2 $^{124}\text{Sb-Be}$ 中性子ラジオグラフィ装置

大阪府立放射線中央研究所に可搬型の中性子源として $^{124}\text{Sb-Be}$ を利用した装置があった(図 19⁵⁾参照)。ポリエチレン減速材により熱中性子を得て利用する熱中性子ポート(図の下部)と減速させずに利用する高速中性子ポート(図の上部)が用意されている。装置サイズが小さく可搬性はあるものの, 中性子強度が極めて小

表2 中性子ラジオグラフィとしてのJRR-3MとJ-PARC/JSNSの特徴比較

項 目		定常中性子源 (JRR-3M)	パルス中性子源 (J-PARC/JSNS)
線源として	中性子束 (強度)	積分値	○
		ピーク値	◎(JRR-3Mの100倍以上)
	周波数	—	25 Hz
	エネルギー弁別	JRR-3Mの装置では不可	中性子飛行時間法
	エネルギースペクトル (エネルギー領域)	熱中性子	冷～数10eV
装置として	ビーム形状(mm) L(入口-試料)/D(入口)[L/D]	試料位置：250×300mm 7,300/40 [183]	— 25,000/80 [313]
	バックグラウンド	低	高 (高エネルギー中性子, 高エネルギーγ線)
	遮へい	低	高
	スペース	狭 (JRR-3Mの装置)	広 (JSNSでの可能性として)

さく撮影野も小さい欠点を有する。

5. 核破碎反応中性子源を利用した中性子イメージング設備

現在原子力機構の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施設 (J-PARC: Japan Proton Accelerator Complex)³⁵⁾には、3 GeVの陽子を水銀ターゲットに当てて核破碎反応で中性子ビームを取り出し利用する物質生命科学実験施設³⁶⁾がある。23本の中性子ビームラインがあり、中性子散乱装置を中心に建設が進められているが、中性子イメージングの装置は2002年度(平成14年度)に提案された³⁷⁾ものの建設には至っていない。ここでは、中性子ラジオグラフィにおけるJRR-3M(定常中性子源)とJ-PARC/JSNS(Japan Spallation Neutron Source: パルス中性子源)の役割分担とそれぞれの特徴を比較する(表2参照)。

J-PARC/JSNSは、JRR-3Mに無い高いピーク強度、幅広い中性子エネルギー領域、飛行時間法の適用可能性等を有する。これらの特徴を中性子イメージングで有効に活かせば、定常中性子源で達成困難な撮影速度0.1 msを超えるス

トロボ撮影、飛行時間法による材料元素の特定可能性が出てくる。このためには、残光特性に優れたシンチレータ(ストロボ撮影)、十分な空間分解能を有する二次元検出器(飛行時間法)など、高性能な検出器が必要となる。一方、装置側からJ-PARC/JSNSを捉えた場合、次の課題がある。中性子ラジオグラフィは、他の実験装置と比較して試料位置におけるビームサイズが大きいため、Toチョッパー、ビームストッパー、ビームライン遮へい等に十分な検討が必要である。また、装置遮へいが重厚になることから、装置内側スペースを広くすると遮へいを含めた装置サイズが極めて大きくなる。更に、バックグラウンドノイズの低減及び検出器系エレクトロニクスの保護がより必要とされる。

6. 国外の中性子イメージング設備

中性子ラジオグラフィ装置は国外にも数多く存在^{38), 39)}するが、ここでは高性能な中性子ラジオグラフィ装置を中心に紹介する(表3参照)。中性子ラジオグラフィ装置の性能を示す重要なパラメータとして、空間分解能と時間分解能がある。これらに大きく影響するのが中性子束及

表3 国外の中性子ラジオグラフィ装置仕様概要

設置機関	中性子源	熱中性子束 ($n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)	カドミ ウム比	コリメー タ比	照射野 (mm)	n/γ比 ($n \cdot cm^{-2} \cdot mR^{-1}$)	備考
ILL	HFR [NEUTROGRAPH]	3.0×10^9	—	150	160×200	—	58.3MW
HMI	BER II CNS [CONRAD] (冷中性子)	2×10^8 ~ 6×10^6	—	70 ~ 500	30×50~ 100×100	—	10MW(液体水素)
CEA	ORPHEE CNS (冷中性子)	9.0×10^8	—	—	150×240	—	14MW(液体水素)
TUM	FRM-II CNS [ANTARES] (冷中性子)	9.4×10^7 2.5×10^7	15 15	402.4 795.2	320×320 360×360	1.4×10^8 ($n/cm^2/s/Sv/h$)	20MW(液体重水素)
	FRM-II [NECTAR] (核分裂中性子)	4.9×10^6	—	230	300×300	—	20MW
KFKI-AEKI	BBR [DNR]	10^8	—	170	150 φ	10^6 R/h	10MW
	[SNR]	2×10^6	56	100	75 φ	—	
NIST	NBSR [NIF]	3.0×10^8 ~ 2.5×10^5	—	100 ~6,000	80 φ ~260 φ	—	20MW
PSI	SINQ [NEUTRA]	2.82×10^7	100	200	150 φ	—	核破砕中性子源
		7.54×10^6	100	350	290 φ		
		3.96×10^6	100	550	400 φ		
	SINQ CNS [ICON] Position 2 Position 3 (冷中性子)	2.3×10^7 ~ 3.6×10^3 1.4×10^7 ~ 2.1×10^3	— —	178 ~ 14,200 151 ~ 24,200	30×70~ 80×180 80×70~ 120×310	— —	
SAPHIR	1.9×10^6 ~ 4.1×10^3	22	150 ~ 375	150 φ ~ 400 φ	—	10MW	
AERE Harwell	DIDO [6HGR9]	8.0×10^7	100	160	170 φ	650 (rem/h)	25MW
	[6H(subthermal)]	7×10^6	>1000	100	200 φ	—	
	[6H(subthermal)]	3.3×10^5	>1000	300	350 φ	—	
Petten JRC	HFR	4.2×10^9	547	540	220 φ	—	45MW
	[HB8]	1.6×10^9 (サブサーマル)	560	150	~ 250 φ	—	
AECL CRNL	NRU	4.5×10^7	1000	126	356×432 (フィルムサイズ)	5×10^6	
SNL	ACRR	1.9×10^8	—	107	—	—	2MW(定常)
		1.9×10^9	—	—	—	—	20MW(~10s)
		1.2×10^{12}	—	—	—	—	24,000MW
		(23ms)	—	—	—	—	(パルス:7.6ms)

びコリメータ比である。ドイツのハイデルベルク大学の Andreas Van Overberghe が中性子イメージング設備をこれらの性能でまとめたものが図 20 である⁴⁰⁾。PSI (Paul Scherrer Institut) を除いて、いずれも中性子源は研究用原子炉(研究炉)である。また、ILL (Institut Laue Langevin) を除けば、原子炉の最大熱出力は 10 MW ~ 20 MW となっている。従来の装置では中性子束が重要視されていたが、近年では

コリメータ比が重要視されている。一番上の曲線に近いのが ILL であり、これは中性子源としての研究炉 HFR (High Flux Reactor) の高中性子束によるものである。二番目の曲線には HMI (Hahn-Meitner Institut), CEA (French Atomic Commission), JRR-3M, TUM (Technische Universität München) が並んでいる。これらの中で一番新しい装置を有する TUM はコリメータ比を優先している。また、ILL 及び

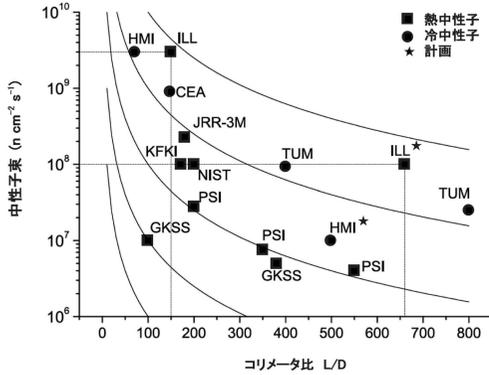


図 20 世界の高性能中性子イメージング設備⁴⁰⁾

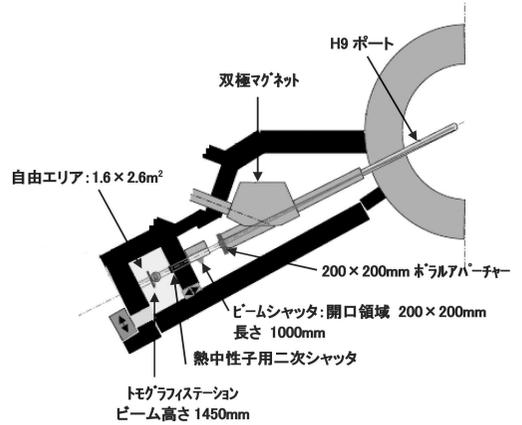


図 21 ILL 中性子ラジオグラフィ装置 (NEUTROGRAPH)⁴¹⁾ (平面図)

HMIでも新しいプロジェクトとして、よりコリメータ比の高い装置を計画しているようである。

6.1 ILL-HFR

ILLはフランスのグルノーブルにあるが、HFRに設置された中性子ラジオグラフィ装置^{41), 42)} (NEUTROGRAPH, 図 21⁴¹⁾参照)は、ドイツのハイデルベルク大学のグループが管理している。10⁹ n・cm⁻²・s⁻¹を超える高中性子束を有し、かつコリメータ比も100を超えていることから、高速度撮像にも十分対応できる。また、コリメータ比を600以上にする計画もあり、この場合でも中性子束10⁸ n・cm⁻²・s⁻¹を超えることが予想されることから、高空間分解能のCT (Computed Tomography) 画像を短時間で取得できる。

6.2 HMI-BER II

ドイツ HMI の研究炉 BER II に設置された CONRAD (図 22⁴⁴⁾参照) の名前の由来は、Cold Neutron Radiography and Tomography であり、通常の透過撮影に加えて断層撮影も対象としている⁴³⁾。CONRAD は、BER II の冷中性子導管 NL1b の末端に設置されている。撮影位置は2箇所あり、中性子強度が期待できる導管の出口近傍の第1撮影位置と、ピンホールコリメータと5mのフライトチューブを利用して高コリメータ比を確保した第2撮影位置である。第1撮影位置では、実時間撮影と露光時間10ms～500msの高速度CT撮影ができる。ビームサイズは3cm×5cmで、空間分解能は300μmから500μm程度である。第2撮影位置では、高空間分解能撮影が可能で、ピンホールの大き

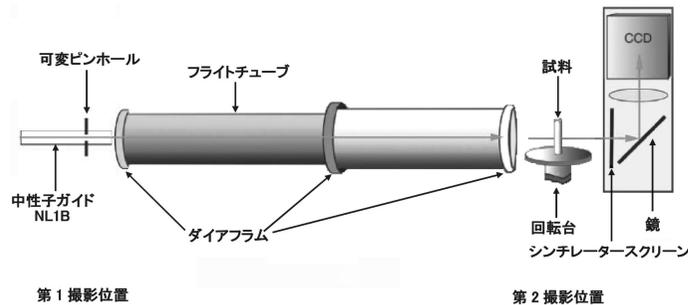


図 22 HMI 中性子ラジオグラフィ装置 (CONRAD)⁴⁴⁾ (立体図)

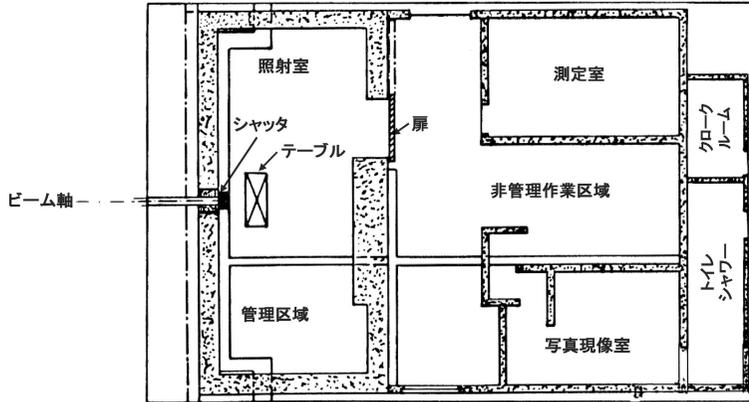


図 23 ORPHEE 中性子ラジオグラフィ装置⁴⁵⁾ (平面図)

さを 1 cm とした場合でコリメータ比は 500 となりビームサイズ 10 cm×10 cm を確保できる。露光時間は 1～25 s である。撮像デバイスとして 1 280×1 024 ピクセルの CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) カメラ及び 2 048×2 048 ピクセルの CCD カメラが用意されている⁴⁴⁾。

6.3 CEA-ORPHEE

フランス CEA の研究炉 ORPHEE (14 MW) の冷中性子導管の末端 (炉心中心から約 70 m) に中性子ラジオグラフィ装置が設置されている (図 23⁴⁵⁾ 参照)。冷中性子導管は大きな照射室の壁の位置まで届いている。導管を使用しているため動的に可視化できる領域は小さいが、照射室自体が広いので大きな試料も容易に設置でき、スキャンング法を用いると試料の広い領域が可視化できる。撮影システムとしては、通常のフィルム法に加えて蛍光コンバータとテレビカメラによる実時間動画撮影、更には高速度ビデオカメラシステムも利用できる⁴⁶⁾。

なお、CEA には研究炉 OSIRIS (70 MW:ギリシャの王の名 Us-yri による) のモックアップとしての ISIS (700 kW: Inherent Safe Immersed System) があり、使用済核燃料要素の撮影をディスプレイシウム箔による間接法や硝酸セルロースによるトラックエッチ法を用いて実施していたことでも知られている⁴⁷⁾。

6.4 TUM-FRM-II

ドイツ TUM の研究炉 FRM-II に設置された中性子ラジオグラフィ装置 ANTARES (Advanced Neutron Tomography And Radiography Experimental System) は、冷中性子源 (液体重水素 25 K) から導管を用いずにフライトチューブにより冷中性子ビームを装置まで導いている (図 24, 25⁴⁹⁾ 参照)。ピンホールコリメータと中性子エネルギーセクターを装備しており、高コリメータ比を確保できる。撮影システムは ZnS: Ag/LiF の蛍光コンバータと冷却型 CCD カメラの組み合わせとなっている^{48), 49)}。FRM-II には ANTARES の他に、核分裂中性子をそのまま利用する NECTAR (Neutron Computerized Tomography And Radiography Facility) がある。NECTAR ではプラスチックシンチレータを用いて CCD カメラでの撮影が行われる⁵⁰⁾。

6.5 KFKI AEKI-BRR

ハンガリー KFKI AEKI (Atomic Energy Research Institute) の研究炉 BRR (Budapest Research Reactor) の炉室に、動画用ラジオグラフィ (DNR: Dynamic Neutron Radiography) 装置と静止画用ラジオグラフィ (SNR: Static Neutron Radiography) 装置が用意されている⁵¹⁾。最近、この装置は、照射室を貫いて 20 m ほどのヘリコプターのローター全体をスキャン

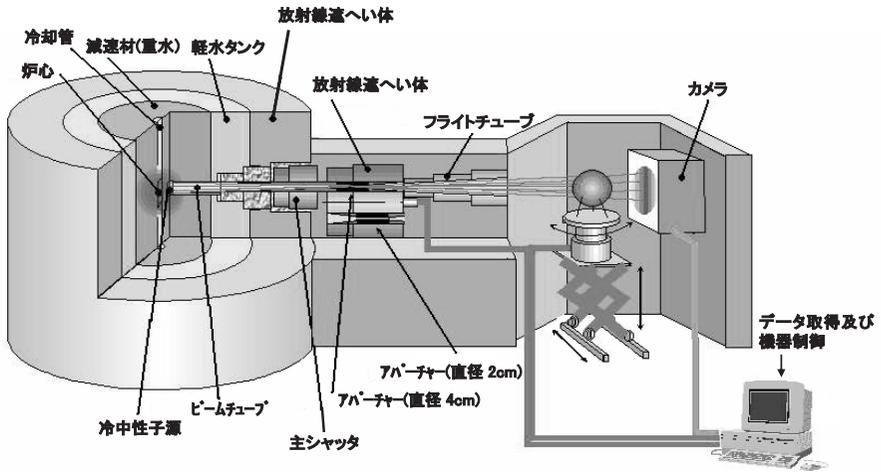


図 24 TUM 中性子ラジオグラフィ装置 (ANTARES)⁴⁹⁾ (概略鳥瞰図)

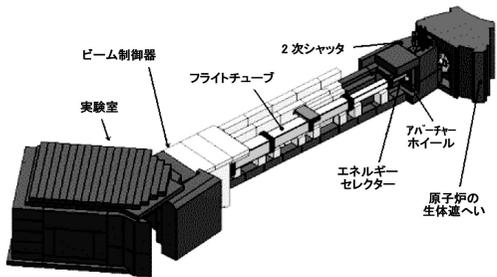


図 25 TUM 中性子ラジオグラフィ装置 (ANTARES) ビームライン⁴⁹⁾ (立体図)

できる施設に改造されている。DNR は BRR の No.2 ポートに設置されており、ピンホールコリメータを通して炉心からの中性子と γ 線を導いており、同時に両透過画像が得られる。一方、SNR は BRR の No.3 ポートに設置されており、口径を可変できるピンホールコリメータと、鉄、鉛、ビスマスのフィルタを装備している⁵²⁾。

6・6 NIST-NBSR

米国 NIST (National Institute of Standards and Technology) にある研究炉 NBSR (National Bureau of Standards Reactor) には中性子ラジオグラフィ装置は設置されていなかったが、燃料電池開発用の可視化ツールとして DOE (Department of Energy) のファンドで開発・設置

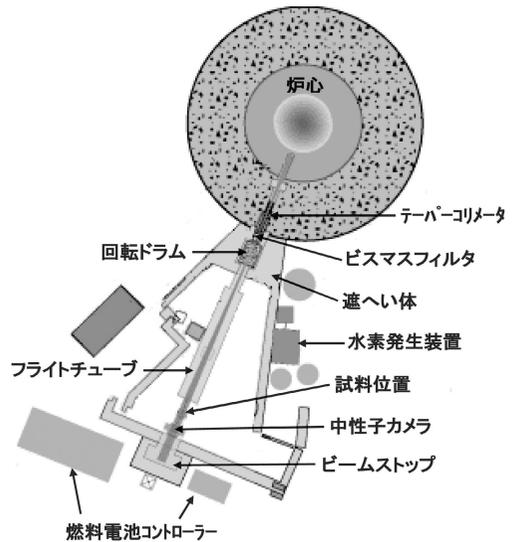


図 26 NIST 中性子ラジオグラフィ装置 (NIF)⁵⁴⁾ (平面図)

された⁵³⁾ (図 26, 27⁵⁴⁾ 参照)。燃料電池の運転・制御に必要な設備は装置に完備されている。ビームチューブが炉心を直視しているため高エネルギーの中性子と γ 線が混在しているが、単結晶のビスマスフィルタ (10 cm) を液体窒素 (77 K) で冷却して対応している。このフィルタの下流にピンホールコリメータが設置されており、ピンホールサイズを 2 cm ~ 0.1 cm で可変してコリメータ比を 100 から 6 000 まで向上させることができる。ピンホールコリメータ

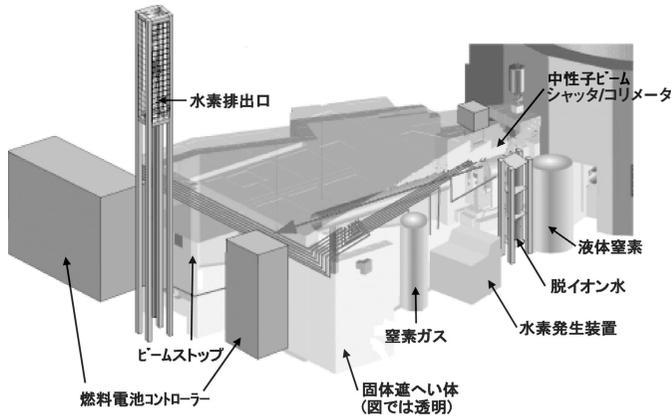


図 27 NIST 中性子ラジオグラフィ装置 (NIF)⁵⁴⁾ (立体図)

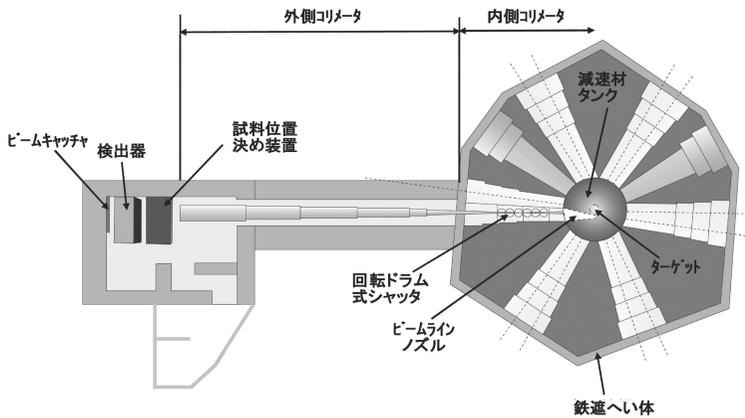


図 28 PSI 中性子ラジオグラフィ装置 (NEUTRA)⁵⁷⁾ (平面図)

の下流には、フライトチューブが試料位置まで設置されている。撮像システムは蛍光コンバータと冷却型 CCD カメラの組み合わせの他、フラットパネル検出器 (30 fps) も利用できる⁵⁴⁾。

6・7 PSI-SINQ

スイス PSI の核破砕中性子源 SINQ (Swiss Spallation Neutron Source) に中性子ラジオグラフィ装置 NEUTRA (Neutron Transmission Radiography) が設置されている^{55)–57)} (図 28⁵⁷⁾ 参照)。SINQ は、J-PARC/JSNS と異なり定常中性子源である。撮影位置が 3 箇所あり、コリメータ比を 200, 350 及び 500 から選択できる。中性子束が中程度であることから、動画撮影より高解像度静止画撮影に適した装置である。

撮像システムとしては、蛍光コンバータと冷却型 CCD カメラの組み合わせ、フラットパネル検出器 (アモルファスシリコン) が利用できる。SINQ には、冷中性子源からフライトチューブで冷中性子を導いて使用する冷中性子ラジオグラフィ装置 ICON (Imaging with Cold Neutrons) も設置されている⁵⁸⁾ (図 29⁵⁷⁾ 参照)。中性子速度弁別器, チョッパー, ベリリウムフィルタ, ビームリミッター等が装備されており, マイクロトモグラフィ, フェーズコントラストイメージング⁵⁹⁾, プラッグエッチイメージング等で利用されている。

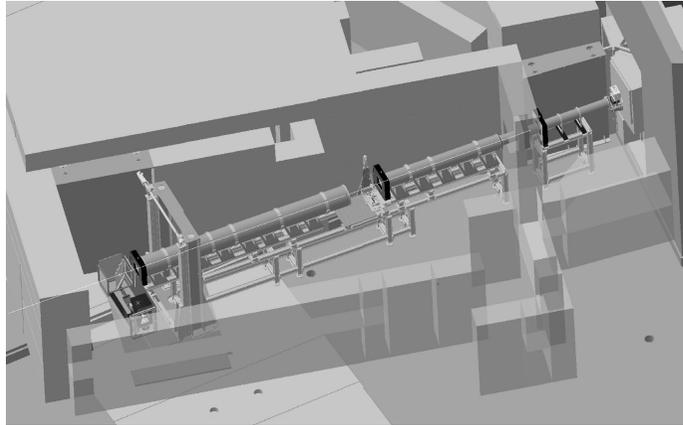


図 29 PSI 冷中性子ラジオグラフィ装置 (ICON)⁵⁷⁾ (立体図)

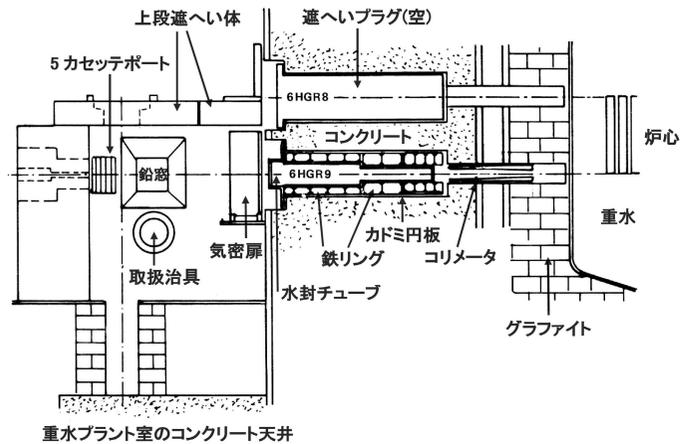


図 30 Harwell DIDO 中性子ラジオグラフィ装置 (6HGR9)⁶⁰⁾

6・8 その他の特徴ある中性子イメージング設備

イギリス AERE (Atomic Energy Research Establishment) の Harwell 研究所の研究炉 DIDO の中性子ラジオグラフィ装置 (図 30, 31⁶⁰⁾ 参照) は、第 1 回中性子ラジオグラフィ国際会議で自動車エンジンの動画撮影を紹介した装置である^{61), 62)}。DIDO には冷中性子源はないものの、フィルタを用いて熱中性子より低エネルギー (サブサーマル) の中性子を增強させ、ヘリウムガスを封入したフライトチューブにより原子炉建屋外に導いて撮影を行った。イメージング用インテンシファイアとテレビカメラを組み合わせたものに加えて、Thomson の中性子イメージ

インテンシファイアを利用して、100 fps のエンジン動画撮影が行われた。

オランダ JRC (Joint Research Center) の Petten 研究所の研究炉 HFR でも、照射済燃料検査用に 1981 年から稼動していた HFR-HB8-T NR-カメラに多結晶ベリリウム (80 K, 5 meV 以下の低エネルギー通過用)、単結晶シリコン (純粋な熱中性子用) 及び単結晶ビスマス (80 K, γ 線低減用) を組み合わせたフィルタステーションを装備して、原子力以外の分野への中性子ラジオグラフィの応用を図っている^{63), 64)} (図 32⁶⁴⁾ 参照)。なお、フィルタ使用による実効中性子エネルギーの低下については、小林の研究があるので参照いただきたい⁶⁵⁾。

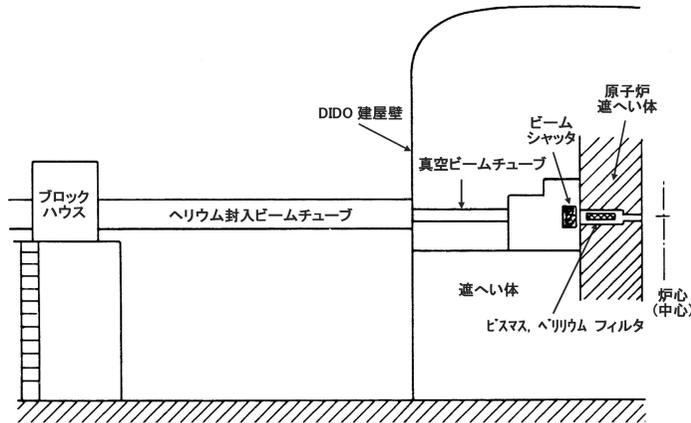


図 31 Harwell DIDO 中性子ラジオグラフィ装置(6H[サブサーマル])⁶⁰⁾(垂直断面図)

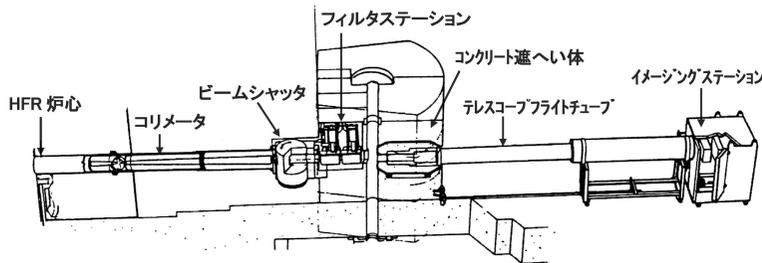


図 32 Petten HRF 中性子ラジオグラフィ装置⁶⁴⁾(垂直断面図)

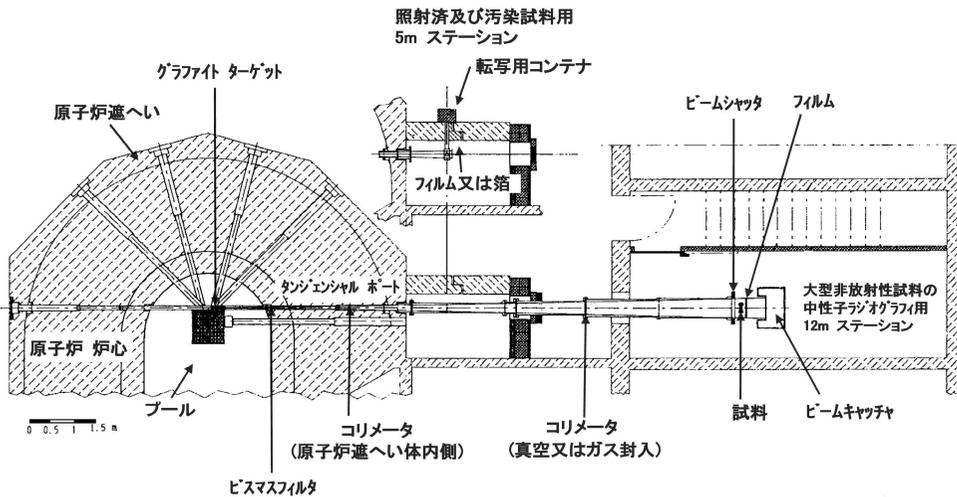


図 33 PSI SAPHIR 中性子ラジオグラフィ装置⁶⁵⁾(水平断面図)

スイス PSI には、研究炉 SAPHIR があり中性子ラジオグラフィ装置が設置されていた⁶⁶⁾(図 33⁶⁶⁾参照)。照射済試料や放射性試料の検

査用に 5 m 位置に撮影室が用意され、12 m 位置には大型の試料の撮影が行える撮影室が用意されていた。同様の考えは SINQ に設置された

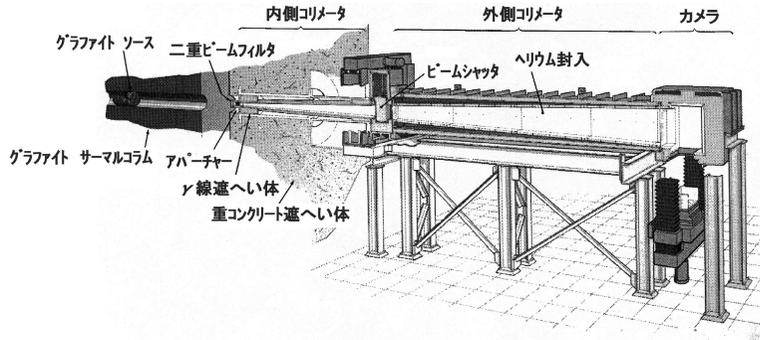


図 34 CRNL NRU 中性子ラジオグラフィ装置⁶⁸⁾(鳥瞰図)

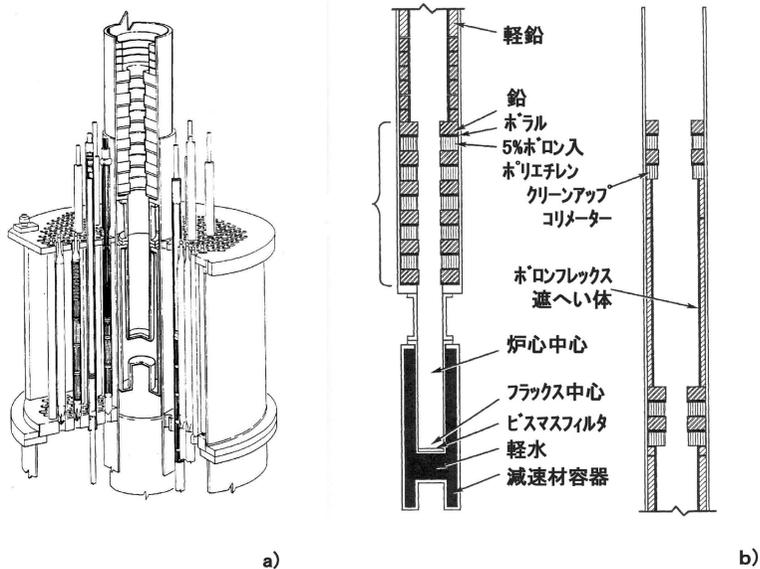


図 35 SNL ACRR の a)中性子ラジオグラフィ装置(HFNRF)(鳥瞰図)及び b)減速材容器とコリメータ⁶⁹⁾(垂直断面図)

中性子ラジオグラフィ装置 NEUTRA 及び ICON にも踏襲されている。この炉は現在停止しており、廃炉の予定である。

イギリス、スイスともに中性子源として研究炉から陽子加速器を用いた核破砕中性子源へと移行しているが、イギリス RAL (Rutherford Appleton Laboratory) の核破砕中性子源 ISIS⁶⁷⁾ には中性子イメージング用の装置は設置されていない。

カナダ AECL (Atomic Energy of Canada Limited Research Company) の CRNL (Chalk River Nuclear Laboratories) には、商業利用

を目的とした中性子ラジオグラフィ装置(図 34⁶⁸⁾参照)が研究炉 NRU (National Research Universal) に設置された⁶⁸⁾。中性子束は中程度の強度であるが、高いカドミウム比 (1 000) と大きなフィルムサイズ (35.6 cm × 43.2 cm) の利用を可能とし、タービンブレードの検査等に威力を発揮した。

特にユニークな中性子ラジオグラフィ装置としてはアメリカ SNL (Sandia National Laboratory) の研究炉 ACRR (Annular Core Research Reactor) の HFNRF (High Flux Neutron Radiography Facility) (図 35⁶⁹⁾参照)が挙げられる⁷⁰⁾。

ACRR の環状炉心の中央部に垂直のダイバージェント型コリメータが用意されている。ACRR の 3 種類の運転モードに応じて高中性子束ビームが利用できる (表 3 参照)。同様の運転モードは原子力機構の NSRR でも可能であるが、垂直照射孔として用いられることの多い炉心中央の高中性子束実験孔を利用している点に特徴がある。

最後にアジア地域の 29 の装置については、小林が文献 38 に、線源、中性子ビーム特性、撮像デバイス等を詳細にまとめているので参照いただきたい³⁸⁾。

7. まとめ

国内外の高性能な中性子イメージング設備を紹介した。国内の中性子イメージング設備は JRR-3M, KUR (停止中), 住重試験検査等の既存中性子源利用が中心であるが、核破砕パルス中性子源 J-PARC/JSNS への期待は大きい。国外では、これまでの中性子束重視から空間分解能 (高コリメータ比) 重視へと中性子イメージング設備の性能の重心が移っている。これまで中性子散乱実験設備が中心であった ILL HFR や NIST NBSR で、中性子散乱実験装置用の実験孔にイメージング設備が設置されており、燃料電池開発等、これまでの非破壊検査用途のみならず研究開発用のツールとして産業界に広く開放されているようである。

なお、本解説で、全ての設備を取りあげることとはできていないが、注目すべき主要な中性子設備はほぼ網羅されている。今後、これらの設備を利用する際の助けになれば幸いであり、また新しい設備を考える際の参考になれば幸いである。

文 献

- 1) 小林昌敏, 原子力工業, 8(6), 25-34(1962)
- 2) Kobayashi, M., Nakajima, K. and Maeda, S., *Annu. Rep. Tokyo Metro. Isot. Cent.*, 2, 29(1963)
- 3) 小川一行, 若林信義, 応用物理, 33(5), 334-341(1964)
- 4) Kawasaki, S., *Nucl. Instrum. Methods*, 62, 311-315(1968)
- 5) 相沢乙彦, 白井英次, 平岡英一, 放射線と産業 42, (財)放射線照射振興協会, 23-31(1988)
- 6) 藤根成勲, 原子力工業, 41(2), 10-20(1995)
- 7) 藤根成勲, KURRI-TR-359, 1-46(1992)
- 8) 清水堅一, 鶴野 晃, 日本原子力学会誌, 22(1), 40(1980)
- 9) Tsuruno, A., *Neutron Radiography*, pp.365-368, D. Reidel Publishing Co. (1983)
- 10) 大友正一, 塩沢周策, 柳原 敏, JAERI-M-7304(1977)
- 11) Fujine, S., Mishima, K., Yoneda, K., Yonebayashi, K., Yamamoto, K., Sobajima, M., Ohtomo, S., Kanda, K. and Nishihara, H., *Neutron Radiography* (3), pp.513-521, Kluwer Academic Publishers(1990)
- 12) 日本非破壊検査協会編, 中性子ラジオグラフィ写真集, 104-105(1995)
- 13) Matsubayashi, M. and Tsuruno, A., *Neutron Radiography* (4), pp.415-422, Gordon and Breach Science Publishers(1994)
- 14) Matsubayashi, M., Kobayashi, H., Hibiki, T. and Mishima, K., *Nucl. Technol.*, 132, 309-324(2000)
- 15) 日本非破壊検査協会編, 中性子ラジオグラフィ写真集, 5-9(1995)
- 16) Kawabata, Y. and Horie, T., *Appl. Radiat. Isot.*, 61, 541-546(2004)
- 17) Matsumoto, T., Aizawa, O. and Watanabe, S., *Neutron Radiography* (2), pp.137-144, D.Reidel Publishing Co.(1987)
- 18) Kobayashi, H., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* 377, 52-57(1996)
- 19) Kobayashi, H., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* 424, 1-8(1999)
- 20) 丹羽健夫, 古賀妙子, 森嶋彌重, 鶴田隆雄, 河合 廣, 日本原子力学会誌, 29(10), 904-912(1987)
- 21) Kawai, H., Niwa, T., Morishima, H., Koga, T. and Tsuruta, T., *Neutron Radiography* (3), pp.101-108, Kluwer Academic Publishers(1990)
- 22) Taniguchi, R., Fujine, S., Tsujii, Y., Okamoto, K., Yoneda, K., Okuda, S., Ogawa, Y., Niwa, T. and Tsujimoto, T., *Appl. Radiat. Isot.*, 61, 465-470(1994)

- (2004)
- 23) Yoshii, K. and Miya, K., *Progress in Nuclear Energy*, **32**, 123-139 (1998)
 - 24) Yoshii, K. and Miya, K., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A335**, 513-522 (1993)
 - 25) 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**(2), 60-62 (1995)
 - 26) 住重試験検査ホームページ, http://www.shieico.jp/japanese/hou_nrt.shtml
 - 27) 戸田陽二郎, 原子力工業, **41**(2), 57-59 (1995)
 - 28) Matsumoto, G., Doi, S., Ohkubo, K. and Ikeda, Y., *Nucl. Technol.*, **68**(1), 94-101 (1985)
 - 29) 平岡英一, 藤代正敏, 辻井幸雄, 非破壊検査, **27**(7), 381-388 (1978)
 - 30) Kakeno, M., Kido, Y. and Kawamoto, J., *Neutron Radiography* (3), pp.245-252, Kluwer Academic Publishers (1990)
 - 31) Wada, N., *Neutron Radiography* (2), pp.223-230, D. Reidel Publishing Co. (1987)
 - 32) 和田延夫, 日本原子力学会誌, **30**(7), 610-616 (1988)
 - 33) Wada, N., Tominaga, H., Tachikawa, N. and Enomoto, S., *Neutron Radiography*, pp.681-688, D. Reidel Publishing Co. (1983)
 - 34) Mochiki, K., Akaike, H., Murata, Y., Moki, T. and Ishikawa, I., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A 377**, 137-139 (1996)
 - 35) J-PARC ホームページ, <http://j-parc.jp/ja/aboutJPARC-j.html>
 - 36) J-PARC 物質生命科学実験施設ホームページ, <http://j-parc.jp/MatLife/ja/index.html>
 - 37) 平成 14 年度中性子実験装置提案リスト <http://j-parc.jp/MatLife/ja/news/koubo/02Exp.INSTRULIST.html>
 - 38) Kobayashi, H., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A 377**, 1-10 (1996)
 - 39) 世界の中性子ラジオグラフィサイト, http://info.casaccia.enea.it/triga/NR_Sites/
 - 40) Andreas Van Overberghe, Doctor thesis, High Flux Neutron Imaging for highly dynamic and time resolved non-destructive testing
 - 41) ハイデルベルク大学 Neutrograph ホームページ, <http://www.rzuser.uni-heidelberg.de/~mfaist/index.htm>
 - 42) Hillenbach, A., Engelhardt, M., Abele, H. and Gähler, R., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A542**, 116-122 (2005)
 - 43) Hilger, A., Kardjilov, N., Strobl, M., Treimer, W. and Banhart, J., *Physica B : Condensed Matter*, **385-386** (Part 2), 1213-1215 (2006)
 - 44) HMI-CONRAD ホームページ, http://www.hmi.de/bensc/instrumentation/pdf_files/BENSC_V7.pdf
 - 45) von der Hardt, P. and Röttger, H., eds., *Neutron Radiography Handbook*, p.169, D. Reidel Publishing Co. (1981)
 - 46) CEA-ORPHEE 中性子ラジオグラフィ ホームページ, <http://www-llb.cea.fr/neutro/nr1.html>
 - 47) Bayon, G. and Person, J. L., *Neutron Radiography* (2), pp.103-107, D. Reidel Publishing Co. (1987)
 - 48) Calzada, E., Schillinger, B. and Grünauer, F., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A542**, 38-44 (2005)
 - 49) TUM-ANTARES ホームページ, <http://www.physik.tu-muenchen.de/antares/>
 - 50) TUM-NECTAR ホームページ, <http://www.frm2.tum.de/en/science/radiography/nectar/index.html>
 - 51) Balasko, M., Palfalvi, J. and Svab, E., *Neutron Radiography* (6), pp.177-184, Gordon and Breach Science Publishers (2001)
 - 52) KFKI-AEKI 中性子ラジオグラフィ ホームページ, <http://www.kfki.hu/~aekihp/aszlhome/index.html>
 - 53) Hussey, D. S., Jacobson, D. L., Arif, M., Huffman, P. R., Williams, R. E. and Cook, J. C., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A542**, 9-15 (2005)
 - 54) NIST-NIF ホームページ, <http://physics.nist.gov/MajResFac/Nif/facility.html>
 - 55) Lehmann, E. H., Pleinert, J. and Wiezel, L., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A377**, 11-15 (1996)
 - 56) Lehmann, E. H., Vontobel, P. and Wiezel, L., *Neutron Radiography* (6), pp.151-158, Gordon and Breach Science Publishers (2001)
 - 57) PSI-NEUTRA ホームページ, <http://neutra.web.psi.ch/facility/index.html>
 - 58) Lehmann, E. H., Frei, G., Kühne, G. and Boillat, P., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A576**, 389-396 (2007)
 - 59) Lehmann, E. H., Lorenz, K., Steichele, E. and Von-

- tobel, P., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A542**, 95-99 (2005)
- 60) von der Hardt, P. and Röttger, H., eds., *Neutron Radiography Handbook*, pp.157-159, D.Reidel Publishing Co. (1983)
- 61) Taylor, D. J., *Neutron Radiography*, pp.145-151, D. Reidel Publishing Co. (1983)
- 62) Stewart, P. A. and Heritage, J., *Neutron Radiography*, pp. 635-642, D.Reidel Publishing Co. (1983)
- 63) Leeftang, H. P., van Otterdijk, K. H., Bleeker, E. J. and Markgraf, J. F. W., *Neutron Radiography* (3), pp.109-120, Kluwer Academic Publishers (1990)
- 64) Markgraf, J. F. W., *Neutron Radiography* (3), pp.121-130, Kluwer Academic Publishers (1990)
- 65) Kobayashi, H., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A 424**, 151-157 (1999)
- 66) Hammer, J., Lehmann, E. H. and Pleinert, H., *Fifth World Conference on Neutron Radiography*, pp. 638-643, DGZfP (1997)
- 67) ISIS ホームページ, <http://www.isis.rl.ac.uk/>
- 68) MacGillivray, G. M., *Neutron Radiography* (3), pp.73-79, Kluwer Academic Publishers (1990)
- 69) McCrory, F. M., Kelly, J. G., Tichenor, D. A. and Cooper, P. J., "Annular Core Research Reactor High Flux Neutron Radiography Facility." *Proc. The First Topical Meeting on Neutron Radiography System Design and Characterization*, Pembroke, Canada 1990 August 28-30
- 70) McCrory, F. M., Kelly, J. G., Tichenor, D. A. and Berkmoes, A. A. V., *Neutron Radiography* (4), pp.423-431, Gordon and Breach Science Publishers (1994)
-