

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11回）

中性子イメージングの課題と展望[†]

小林久夫

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 imaging, neutron radiography, problem of neutron radiography, limitation of neutron radiography, industrial application, education for neutron radiography, qualification to perform neutron radiography, standardization, international cooperation of neutron radiography

1. 始めに

中性子イメージングに内在する、技術上の諸問題、規格化、国際協力などの現状を整理する。次いで、将来に向けての展望などについてもふれる。ここで主に行う議論を確認することは、中性子イメージング技術を正当に評価、今後の展望をはかるための指針、更なる技術のブレークスルーがどのあたりにあるかを探る際の指標になると思う。

この技術は、非破壊検査の一技術として発展してきているので、工業利用に関連する諸問題もここで議論する。品質管理の観点から、技術者の教育と資格の認定、画像の規格も重要である。更に、この技術は大がかりな施設が必要となるため、一企業で占有することも困難であり、国営のあるいは一国に限らず様々な特性を持った各国の施設が相互に利用することが求められ、この点に関してもここで取りあげる。

2. 技術上の問題

本章で議論する問題点は、主に本連載基礎編第4回（7月号 403-416頁）に関連する。本章に関連する因子の大まかな値と例外もあるが、限界値等を表1にまとめた。なお、基礎となる理論的な中性子物理に関しては、本連載講座基礎編の第1, 2回（4月号 211-217頁, 5月号 271-281頁）を参照していただきたい。

2・1 中性子源とその強度

中性子線源の強度に関しては基礎編第5, 6回（8月号 479-486頁, 9月号 573-583頁）で詳しく論じられている。熱中性子化等の減速された中性子は、線質変換物質や、 γ 線除去フィルタ等による減衰や、コリメータの幾何学的因子による強度の影響を受け、画像化を行う撮像面における中性子フルエンス率が決定される。これは通常一定であるので、フルエンスは撮像時間を変えて決定され実施される。

2・2 中性子ビーム関連

中性子イメージングの特徴の一つは、既に本連載の随所で論じているように、超、極、冷、熱下、熱、熱外、高速、超高速中性子ビームに分類される広いエネルギーを利用できるところ

[†]Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Applications Part 11).
Problems and Prospects of Neutron Imaging.
Hisao KOBAYASHI: Professor Emeritus at Rikkyo University, 4-9-27, Morisaki, Yokosuka-shi, Kanagawa Pref. 238-0023, Japan (Residence).

表1 中性子イメージングにおける諸限界

項 目	下限	典型	上限	単位
中性源の強度	10^5	$10^{11}-10^{13}$	10^{15}	$\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
原子炉	10^{10}		10^{15}	$\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
加速器	10^7		10^{10}	$\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
放射線同位元素	10^5		10^9	$\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
フルエンス率	10^3	10^6-10^7	10^9	$\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
必要画像化フルエンス	10^8	10^9	10^{10}	$\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
ビームエネルギー				
超中性子		0.3	1	μeV
極中性子	0.3	1-10	30	μeV
冷中性子	0.03	1-5	10	meV
熱下中性子	1	5-10	25	meV
熱中性子	1	25	100	meV
熱外中性子	0.1	1-5	10000	eV
速中性子	10	0.1-14		MeV
超速中性子	10	100		MeV
撮像時間				
静止画像	1	100-1000	3600	s
動画像	15	30	1000	fps
散乱線				
通常ビーム	5	15	20	%
中性子導管	3	5	10	%
n- γ 比	10^4	10^5	10^6	$\text{n cm}^{-2} \text{mR}^{-1}$ *注
Cd 比	2	100	400	
固有解像度	(5)	20	200	μm
L/D	30	100-300	1000	
L	1	3	10	m
幾何学的解像度 ($\vartheta/(L/D)$)	$0(\vartheta=0\text{cm})$	$100(\vartheta=10\text{cm}, L/D=100)$	300	μm
ダイナミックレンジ	48	60	96	db
フィルム法			48	db
電子式撮像法	48	60	96	db
被写体寸法	10	10-50	50	$\text{cm}-\phi$
検査物質				
本体(主なもの)	Si, Al, Cu, Fe, Sn, W, Pb, Bi, U 等			
トレーサ物質	Li, B, Cd, In, Sm, Dy, Gd 等、時に H_2O			

*注 本来は SI 単位系で表現する必要があるが、中性子イメージングの分野ではこの単位を用いた方が、通りやすいのであえてこの表示を用いている。

にある。しかし、現実には熱中性子ビームの利用が大勢を占めており、次いで熱下、冷中性子ビームも用いられている。もちろん被写体と検査対象によっては必要に応じて熱外・高速中性子も用いられる。なお、極冷中性子、超高速中性子などは現在のところ研究段階にある。

ビームの形成に関する詳細は基礎編第6回(9月号573-583頁)を参照していただきたい。

散乱線：画像上の散乱線評価法に関していくつかの方法があることは基礎編第3回(6月号329-337頁)で、またその重要性は、基礎編第6回を始めとして各所で論じられている。典型的な施設での散乱線の成分は、20%にも及び(基礎編第4回)、ダイナミックレンジの下限拡大に主要な制限を与え、更に画質(S/N)を劣化させる主要な原因となっている。

従来より用いられている散乱線そのものの低減の方策としては、

1. 直達線透過後の大量のビームの処理と共に強力なビームキャッチャの設置。
2. 遮蔽室を可能な限り広い空間とする。
3. 遮蔽室の内部を、ライニングするなど可能な限り散乱線の発生を低減する。
4. コリメーター近傍の、遮蔽不良による開口部近傍からの中性子、直達 γ 線、捕獲 γ 線等のストリーミング放射線に対する遮蔽強化。

等がある。しかし、上のような諸努力の割にはその効果は少ないのが現状である。

中性子導管は、X線、 γ 線分の低減と共に散乱線の低減に役立っていることも、表1に示したとおりであるが、それでも桁違いに低減することはできていない。

2・3 画像取得関連

画像取得法に関しては、基礎編第7回（10月号687-697頁）図1、中でも電子式撮像に関しては、基礎編第9回（1月号77-86頁）を参照して頂きたい。なお、基礎編第7回表1には各種コンバータがまとめられているが、熱外中性子用には他にいくつかあるので、改めて表2にまとめておく。

また、撮像の具体例は応用編第4回（7月号417-429頁）などを参照して頂きたい。1980年代までは、フィルム法による画像取得が主であった。この場合問題となるのは、特性曲線の非直線性又はラチチュード（ダイナミックレンジ）^{*1}、及び画質の粒状性などである。ラチチュードはほぼ2桁、フィルム法における画像はラチチュードの範囲で、X線画像と同様目視非破

表2 熱外中性子イメージングに用いられるコンバータ

元素	主な共鳴吸収エネルギー	代表的な放射線	半減期
Eu	0.46eV	1.865MeV- β	9.3h
Sm	0.9eV	0.7MeV- β	46.7h
Rh	1.3eV	2.45MeV- β	42s
In	1.46eV	1.07MeV- β	54min
Dy	1.8eV	1.285MeV- β	2.3h
Ta	4.3eV	0.52MeV- β	115d
Au	4.9eV	0.961MeV- β	2.7d
Ag	5.2eV	1.65MeV- β	2.4m 等

壊検査に耐えうる程度には良好である。

もちろん新しいコンバータ、新しい撮像方式も興味のあることであるが、その具体例は基礎編第8回（11月号751-762頁）、基礎編11回（2008年3月号199-206頁）、基礎編12回（2008年4月号予定）を始めとして、応用編各回を参照していただきたい。ここでは、一般の撮像系での画像取得において、主に基礎的な部分で問題となる点を議論する。

ダイナミックレンジ（基礎編第7回、3・3節）：電子式のダイナミックレンジの拡大に関してはフィルム法と同様入力信号を増幅器の利得を変えてつなぐことも行われている。最近、電子式撮像装置においては、これを拡大する特殊な機能を持つ取得系も提案されている。

取得画像の S/N 比：基礎編第4回（7月号5・2節）で論じられなかった部分を含めて、少し詳しく述べてみたい。通常の光学的画像やX線画像の場合と異なり、中性子イメージングにおいては、中性子1個の作る信号量がX線と比較して大きい。このため、中性子画像では、単位面積あたりの光やX線の量子と比較して少ない中性子数でも、画像化が可能である。反面、中性子の量子統計による揺らぎが、そのまま画質に現れることになる。最近の高感度の撮像系、例えばイメージングプレート（IP）やイメージインテンシファイア（II）による撮像などでは、この問題が表面化してくる。中性子量が小さいときには、その量子統計 N_n が、撮像系の固有の雑音 N_{instr} を凌駕してしまう。このような領域では、 S/N は S/N_{instr} に代わって

*1 フィルムにおいて特性曲線（中性子量（光量）と濃度の関係）として定義され、直線性の保たれる領域をいう。通常の撮像系では、取得可能な最大信号と最小識別信号の比で表す。最大信号は撮像系の飽和条件、最小信号は主として増幅器初段の雑音で決まる。

S/N_n で記述される。

中性子フルエンス率は変えられないのが普通であるから、中性子フルエンスの大小は照射時間を変えることで決定される。 S/N 比は、照射時間との関連で論ずる必要がある。中性子フルエンス（照射時間）が増大すると、中性子の量子信号に対する揺らぎ (S/N_n の逆数) は $1/\sqrt{S}$ に比例して減少する。一方、 N_{instr} のうちコンバータの非均質性からくる信号の揺らぎは、照射時間に比例して大となる。その結果、最初 $N_n > N_{instr}$ であっても、照射時間が増すとこの関係が逆転することになる。このとき N_{instr} はフルエンスに比例するので、この成分が主となると S/N は S によらず一定となる。このような特性は、IP や II などの高性能撮像系において観測されている。

1980 年代ではこのような論議がなされていなかったため、撮像系の感度を上げさえすれば、弱い線源でも良質の撮像が可能であると考えられていた。しかし中性子においては、Gd からの内部転換電子を ^6Li や ^{10}B 等からの α 線に変えることで感度を上げて低中性子フルエンスにおける画質は、 S/N_n に支配されるため期待ほどには向上しないのである。このとき、照射量を増大して画質の改善を図るのであれば、感度を上げるという最初の目的にはかなわなくなる。

なお、X 線フィルムにおける N の性質は分散 (variance) の形で表現して文献 1) に示されており、また実測例は基礎編第 4 回 (7 月号 403-416 頁) 図 2 に示されている。

解像度：固有解像度 U_i と幾何学的解像度 U_g に関しては基礎編第 4 回で論じた。詳細はそちらに譲るが、画像の固有解像度を向上させる問題は、中性子イメージングにおける、主要なテーマでありラジオグラフィ研究者の夢の一つでもある。しかし、コンバータから発生する 2 次放射線を利用している限り、その飛程が結果的に固有解像度の限界を決めてしまう。

Gd コンバータの分解能は計算上 $\sim 17 \mu\text{m}^{2)}$

である。一方、 ^6Li や ^{10}B の発する重イオン線^{*2}の飛程は、数 μm であるから、これが中性子イメージングにおける分解能の限界といえる。上述したように、 ^6Li や ^{10}B を用いたイメージングには撮像系の感度を落として強照射する必要があるが、実際どうなるかは興味有る問題である。

これ以上の分解能は、特殊な検出法を用いるか、中性子ビームをレンズ等で加工して、いわゆる中性子顕微鏡³⁾の技術を使用するなど全く異なった技術を採用することが必要となる。透過画像とは異なるが、フェーズコントラスト法は画像が拡大取得できるので、ごく薄い試料の端部や全巨視的断面積の変化のある部分の解像度を上げることが期待される。

被写体寸法：一般的な、中性子照射施設の撮像面でのビーム開口部の寸法は 10 cm $\sim$ 50 cm の程度である。被写体寸法がそれ以上の場合は、被写体を上下左右に移動して画像をつなげることになる。現に、多くの撮像施設ではそのような試料走査施設を備えている。極端な例として、ハンガリーの KFKI-AEKI (Central Research Institute for Physics-Atomic Energy Research Institute) の原子炉では、ヘリコプターのローターを前後左右に走査し多数の画像を取得することによって全体の撮像を実施している^{*3}。

中性子導管のビーム寸法は最大 3 cm $\times$ 15 cm である^{*4}。ビーム強度分布は導管の構造からして一様ではなく、加えてビーム断面内の位置と共にエネルギースペクトルが異なるのが普通である。このような強度と線質のビーム内の場所による変動を走査により均質化して撮像するこ

*2 ^6Li (n, α : 2.05 MeV) ^3T : 2.74 MeV, ^{10}B (n, α : 1.47 MeV) ^7Li : 0.84 MeV。

*3 ほぼ 10 m 長のローターの全体像を、縦横 3 枚 $\times$ 212 枚の画像で取得している (応用編第 3 回図 7 参照)。

*4 フランス・サクレイの研究炉 ORFEE の G4 孔は 3 meV 冷中性子ビームであり、その寸法は 25 mm $\times$ 150 mm, 1 m $\times$ 50 cm 程度の試料の XY スキャンが可能である。

とは必須である。なお、中性子導管はビームの平行性は必ずしも良くなく、かつ上下左右で異なることは認識しておく必要がある。

被写体の材質：X線と同様な手法で取得される中性子画像が、それでも用いられる理由は、全巨視的断面積が対応するX線の線吸収係数と著しく異なることにある。中性子線に対する全巨視的断面積は個々の元素、更には同じ元素でも個々の同位元素により異なることが特徴である。当然その特性を意識しながら画像化が行われる。

一般的に被写体本体は、全巨視的断面積の小さな固体あるいは液体は数cmから数十cmの程度まで透過試験が可能である。一方、全巨視的断面積の大きな物質は自身の透過試験には向かない。しかしそれゆえに、透過性の物質中にあるこの種の微細な物質は容易に識別可能となる。あるいは、造影剤として利用可能である。中性子イメージングはこの特長を念頭に置きながら、X線ラジオグラフィと協調的に使用することによって、より検査性能の向上が図られている。

3. 工業利用

中性子イメージングの技術は、基礎学問への貢献においても重要であるが、工業利用を念頭に置いた技術であるから、この側面からの議論は欠かせない。ここでは、重要な幾つかの問題点を抽出する。

3.1 中性子源と可搬性

工業利用の観点からは、中性子線源は最初に遭遇する難問である。画像化のために一定のフルエンスが必要であることと同時に、多くの場合可搬性が求められる。しかし、可搬性のある中性子源では、撮像面で得られる中性子フルエンス率は $(10^3 \sim 10^5) \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の程度である。この条件で、実用に足る良質の中性子イメージングを得るには、画質 (S/N) の劣化を容認するか、撮像時間を大きくして対処することにな

る。大強度の可搬中性子線源には、超伝導磁石を用いた小型加速器などの提案がなされているが、一般には、 ^{252}Cf 線源及びシールドチューブ加速器を用いたものなど、限られたものとなっている。可搬性はないが工業利用されている装置として、サイクロトロン、線形加速器、バンデグラフ加速器なども稼働している。

3.2 放射化

中性子イメージングのもう一つの悩みは、多かれ少なかれ、放射化⁴⁾の問題である。幸い、通常の画像化に必要な $(10^9 \sim 10^{10}) \text{ n cm}^{-2}$ の程度のフルエンス^{*5}では、放射化が問題となることは多くない。半減期 $T_{1/2}$ の短い物質 (Al 等) は、照射時間の数倍程度の冷却期間を取ることで、放射線管理上ほぼ問題にならない程度まで冷却してしまう。逆に、 $T_{1/2}$ の長い物質の場合、放射化は撮像時間 t に対し、ほぼ $t/T_{1/2}$ に比例して増加する。しかし、 $t/T_{1/2}$ が小さければ、通常の $(10^9 \sim 10^{10}) \text{ n cm}^{-2}$ の照射ではやはり放射線管理上の問題になる物質は多くない。ただし、例えば、特にCT撮像など長時間照射する必要のある特殊な撮像の場合や、電子式撮像で長時間照射使用する治具、コンバータなど、繰り返し使用する物品は、やはり注意が必要である。特にイメージングプレートには、Ba や Br 等の中に長半減期^{*6}のRIを作る同位元素が含まれており、繰り返しの使用によって、放射化が進む。イメージングプレートとしては、過去の照射履歴を負った残像が残ることになり、また放射線管理上からしても放射化が進み使用できなくなることがある。いずれにしても、試

*5 誘導放射能を測定する中性子放射化分析では、状況にもよるが $(10^{10} \sim 10^{13}) \text{ n cm}^{-2}$ の程度の照射が必要である。なお、文献4)には全ての天然存在比の元素について、飽和状態と照射後1日冷却後の比誘導放射能と 1 m γ 線線量率が計算されている (PDF ファイルで提供できる。詳細は HKobaRUR@aol.com へ問い合わせいただきたい)。

*6 ^{138}Ba : 71.9% (n, γ) ^{139}Ba (82.7 m), ^{81}Br : 49.31% (n, γ) ^{82}Br (35.3 h) 等。

料、撮像系の放射化という問題はついて回る。また、フィルム法の場合、放射化したエマルジョンの混入した現像廃液についても考慮する必要がある。

3・3 事業上の使い勝手

中性子イメージング検査の手法は、X線検査と比較してそれほどの障害になることはない。しかし、可搬性のなさ、放射化の問題、照射物の放射線管理の必要性が、場合によってはX線検査などに比較して障害となる。

現在我が国における原子炉による中性子イメージングは、必要ときに試験的な検査を実施するだけで、実際に事業化され日常的に検査が実施できるような施設とはなっていない。したがって、適用される検査が中性子でなければならない場合に利用されている。

高出力の原子炉は通常昼夜連続運転を行っている。夜間でも利用できる仕組みは有効利用のために必要であろう。

かつて筆者は、米国のNIST (National Institute of Standards and Technology) に立ち寄った際、「この施設(原子炉)は税金でまかなわれているので、納税者という立場から企業の利用が優先(90%)される」と聞かされ、感心した覚えがある。我が国でも、一般の事業への利用に解放するという建前にはなっている。しかし、原子炉設備には他の多くの研究設備が同時に利用しており、その研究プロジェクトが事実上優先されてしまう。NISTでは、この点をどのように調整しているのであろうか。

3・4 業務内容と画像の秘匿性

特に問題となるのが、実施する検査内容と画像の秘匿性に関してである。場合によっては、検査において排他的に施設を使用したいという要求がある。その場合、どの程度、検査の秘匿性が保たれるかは、特に重要な関心事となろう。この点に関して、日本原子力研究開発機構では産学連携推進部知的財産管理課が所掌しており、

秘密情報保持契約が結ばれ、以下に述べる基本的な条項

1. 情報交換(秘密情報開示)の目的
2. 秘密情報の定義
3. 契約者の義務
4. 知的財産権の取扱
5. 契約期間及び有効期間
6. 情報公開法による制限

が定められ運用されている⁵⁾。いずれにせよ、同様な契約を結ぶことは必要となろう。

3・5 経費と維持費

中性子イメージングを事業とする場合、この問題を避けて通るわけにはいかない。

米国では、1974年よりアエロテスト・オペレーションズ社(Aerotest Operations Co.)が専用中性子ラジオグラフィ施設としてTRIGA炉を運用事業化している。この施設は中性子ラジオグラフィだけを事業として運営しているただ一つのものである。

カナダでは、チョーク・リバー研究所(Chalk River Nuclear Laboratories)のAECL-NRC (Atomic Energy of Canada Limited National Research Council of Canada)が、大変効率の良いフィルム法をベースとしたラジオグラフィ設備を設置、一時大々的に大量のタービンプレード等の検査を流れ作業的に実施^{*7}、事業化していたが、研究所側との利用料金の話がこじれ、せっかくの施設が休眠状態に陥った。

このように、ラジオグラフィを事業化し、あるいはしていた施設を2例ピックアップして紹介したが、諸外国でも、事業化するとなると維持費等の面で問題が多いようである。我が国でも、現在は住重試験検査(株)がサイクロトロンを用いた検査を実施しているが、事業という側面からはかなり苦戦を強いられているようである。

特に、性能の良い中性子ラジオグラフィ施設

^{*7} 例えば7×7個のタービンプレードの画像を1日に100枚は処理できるという。

は、原子炉施設以外は無いのが現状で、その場合アエロテスト社の場合は別として、国立の研究施設でなければ維持できない。

3・6 資格と教育

技術者の資格と承認に関しては、JIS (Japan Industrial Standards) の「非破壊試験-技術者の資格および承認」(JIS Z2305) で規格化されている。中性子ラジオグラフィに関しては、その中の「放射線透過試験: RT」(JIS Z2305) を適用する。この規格は国際標準化機構 ISO (International Organization for Standardization) 9712 に準拠しているが、その基となるのは、米国非破壊検査協会 (American Society for Nondestructive Testing: ASNT) の諸規定で、その例に沿って、米国で行われている実情を少し詳しく紹介する。

米国内では、中性子ラジオグラフィの資格検定に関する教育プログラムを実施している大学、訓練校は存在しない。しかし、例えばアエロテスト・オペレーションズ社では、3 か月ごとに中性子ラジオグラフィを解説する「三日間クラス」, 「個別指導クラス」がある。更にレベルⅢ (LⅢ)^{*8} を所有していない職員への指導相談も行っている。同社は ASNT で LⅢ を公認されている唯一の試験炉施設である。

上記 ASNT では、様々な訓練において個人の資格と免許に対する必要条件に関して、二つの文書がある。すなわち「推奨される技量, No. SNT-TC-1A (2006)」⁶⁾ 及び「個人の非破壊検査に係わる技量と認証の ASNT 基準 (2006) CP-189 (2006)」⁷⁾ である。

また、ASNT 以外には「NAS (National Aerospace Standard) 非破壊試験における個人の資格と免許」⁸⁾ もある。

SNT-TC-1A の基準は、7 年間の経験を有す

^{*8} レベルⅠ, Ⅱ, Ⅲの区分は、訓練時間、経験年数、学歴、資格試験等を基準に行われる (JIS Z2305)。アエロスペース社では最上位の「レベルⅢ」を「LⅢ」として使用している。

ることで訓練生から LⅢ への昇格を認めている。しかしこの昇格は、個々の組織で行われ、2 年あるいは 4 年の大学・専門学校出身者についての年限は短縮され得るとしている。

CP-189 の目的は、ASNT によって管理された中心となる検定プログラムであった。しかしそのプログラムはごく限定されたものであり、ほとんどの組織は SNT-TC-1A 又は NAS 410 に頼っている。

以上が、米国における技術者の教育と資格に関する概略であり、我が国での詳細は上記 JIS Z2305 を参照していただきたい。

4. ビーム及び画像の規格化

工業利用にとって、上に述べた技術者の資質向上と資格認定と同時に、いくつかの規格化は画像の品質管理上欠かせない。中性子ビームは、個々の施設で異なるので、別の施設で撮像した画像は厳密に言えば直接には比較できないのである。中性子ビームの特性に関連しての規格化は、米国の基準 ASTM, 国際規格 ISO, 日本非破壊検査協会基準 NDIS (Standards of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection) が行っている。ここではまず制定されている規格を紹介し、更に新しい規格化の現状についても紹介する。なお、撮像系に関する規格化も必要と考えるが、現時点では X 線イメージングに関連するものを参考にする事になり、ここでは取りあげない。

4・1 規格化の現状

米国では、ASTM が規格を設定している。また、ISO が、国内では NDIS が各々規格を制定している。中性子イメージングに関連して制定された諸規格を表 3 にまとめて示した。

中性子イメージングで特に重要な規格は、線質計 BPI (beam purity indicator: ASTM E545 (E2003)), 像質系 SI (sensitivity indicator: ASTM E545 (E2023)) が、また L/D 決定治具として ASTM E803 (ISO12721) があり、これと

表3 中性子ラジオグラフィ関連の規格

項 目	表 題	備 考
ASTM E94-91	ラジオグラフィ検査法の手引き	ラジオグラフィ全般、E1000 参照
ASTM E545-05	直接法中性子ラジオグラフィにおける像質決定法の規格	IQI (BPI、SI) 基準、SI 単位系を考慮
ASTM E747-04	ラジオグラフィ用ワイヤ型像質決定治具の設計、製作、物質分類法の実施基準	X 線、 γ 線用基準、インチポンド系
ASTM E748-02	物質の熱中性子ラジオグラフィ実施基準	中性子ラジオグラフィ、フィルム法以外も適用可能、E94 参照
ASTM E803-91(2002)	中性子ラジオグラフィビームの L/D 検査決定方法基準	L/D、ISO12721 と同一
ASTM E1000-98(2003)	ラジオグラフィの手引き	X- γ 用であるが中性子にも適用可能、E1316 参照
ASTM E1255-96(2002)	ラジオグラフィ実施基準	全般、ダイナミックラジオグラフィを含む
ASTM E1316-07a	非破壊検査における用語集	より広くラジオグラフィ全般
ASTM E1441-92a	断層撮影法(CT)検査の指針	ラジオグラフィ全般
ASTM E2003-98(2004)	中性子ラジオグラフィビーム用線質計(BPI)制作の実施基準	BPI 基準、SI 単位系を考慮
ASTM E2023-99(2004)	中性子ラジオグラフィ用像質計(SI)制作の実施基準	相対的な画質決定、インチポンド系基準
ASTM E2033-99(2004)	電子式ラジオグラフィ実施基準 (光輝尽光法)	ラジオグラフィ全般、E94, E2007, E1316, E747, E1025 参照
ISO 12721:2000	非破壊検査-熱中性子ラジオグラフィ検査-L/D 比決定法	L/D、ASTM E803 と同一
NDIS 1402	中性子ラジオグラフィの L/D 比決定方法	簡易型 L/D, L 決定治具、改訂予定

は異なった方式の L/D 決定治具 NDIS 1402 がある。BPI と SI はその二つで像質を決定するので、併せて IQI (image quality indicator: E545) ^{*9}

^{*9} IQI の概要と評価法は本連載応用編第 2 回 (5 月号, 283-290 頁) の図 7 (BPI) 及び図 8 (SI) 参照。この二つのインジケーターにより像質を「カテゴリー I」から「同 5」に分類する。

と言う。L/D 治具 (E 803) ^{*10} は、直径 0.64 mm の

^{*10} 基本的には直径 0.64 mm の Cd とナイロンのロッド各々 32 本を各々フィルムから異なった距離に置いた治具であり、この治具一個で $L/D < 150$, 2 個を積み重ねで $L/D < 300$, マイクロデンシトメーターを用いて精密測定すると L/D が 20 から 1000 までが決定できるとしている。

Cd ロッドの本影が消滅する時の撮像面からロッドの距離から L/D を決定する方法である。

これらの治具は、現在、主に工業利用でフィルム法により検査を行う際に使用されているが、通常の中性子ビームではほとんどがカテゴリー I に分類されてしまう。業務上はそれで良いのかもしれないが、最近の中性子ビーム自身の評価には馴染まない。また、最近の電子式画像取得装置に対しては定義されていないなど、利用価値に疑問が残る規格となっている。また、筆者の評価によると、 L/D 治具 (E803) は、特別の注意を払わなければ、常に低い L/D 値の方に系統的な誤差を生む傾向があることがわかっており、上のことを承知した上で、使用する必要がある。単純に考えても、 L/D の評価には Cd ロッドの直径が L/D を決定する因子であるため、このロッド径がどの程度正確に作り得るかを考えても、精度には必ずから限界があると理解できる。

以上の諸規格のうち、IQI 関連の治具は、厳密には全て熱中性子ビームをフィルム法で撮像した場合に規定された規格である。しかし、他の撮像系で取得した画像に関しては、Domanus が編纂したハンドブック⁹⁾に取りあげられている類似のインジケータも含めて、何ら保証なしに使用しているのが現状である。今後従来の IQI の早急な見直しを行い、フィルム法以外にも適応の拡大をはかる必要がある。 L/D の評価治具に関しては、撮像系の種類に制限はないが、熱あるいは冷中性子ビームが対象である。いずれにしても、熱外以上の高エネルギー中性子ビームに対しては規格は存在しない。

4・2 他の規格

X 線で多用されているワイヤ式像質計と類似のもの、IQI、 L/D と同様な治具は、他にいくつか提案されていて、その詳細は Domanus 編集のハンドブック⁹⁾にまとめられている。この中で、Kobayashi 法と名付けられた L/D 測定治具 (同書 123-126 頁) は、E803 の欠点を改

善し、同時に画像の拡大率を決める重要な因子 L 値 (D 値) も同時に計測でき、更に信頼性の評価も行っている。 L/D を 1000 までの正確度が公称 $\pm 1\%$ で決定できる。既に国内及び EU ではこの治具が制作され、各所で L/D の測定が行われている。この治具は上述 NDIS 1402 の簡易型 L/D 測定治具の原理を基に、高精度化したものである。現在、日本非破壊検査協会では、NDIS 1402 を高精度化したものに改訂することになっている。

ハンドブック⁹⁾にまとめられていないものに、筆者の提案している BQI (beam quality indicator) がある。ここでは、本講座応用編第 4 回 (7 月号, 417-429 頁) 図 4 に掲げた BQI の内部写真と撮像例以外他の部分でも取りあげていないので、ここで簡単な説明を行う。

BQI は Pb^{*11} 及び Ti^{*12} の全巨視的断面積のエネルギー依存がほぼ反対であることに着目し、同一中性子透過濃度を与える両者の厚さの比が、全巨視的断面積の逆比となることを利用して、厚さの比から連続スペクトルの実効エネルギーを評価しようとするものである^{*13}。その原理は文献 10) に、その性能の検証は文献 11) に詳述されている。BQI には校正曲線と、その実験式が与えられていて、結果の導出を容易にしている。この BQI による、実効エネルギーは、世界の各所の中性子ラジオグラフィビームで測定されている。紙数の関係で、ここには掲載しないが、その一部は文献 10) に、

a) 11 種のフィルタを用いていないビーム、

*11 鑄造した天然 Pb の全巨視的断面積は 2 meV から 0.1 eV の間、ほぼ単調に増大する。

*12 Ti の全巨視的断面積は 1 eV 以下で、エネルギーの増大と共にほぼ単調に $1/v$ で減少する。

*13 具体的な実効エネルギー測定評価法は CD-ROM, "Principal Parameters and those Evaluation for Neutron Radiography" (2005) に収録されている。なお本文文献 10) と 11) はこの CD に収録されている (送料を同封していただければ提供できる。詳細は HKobaRUR@aol.com へ問い合わせいただきたい)。

- b) 31 種の様々な物質と厚さのフィルタを挿入したビーム、
 - c) 16 種のもっと複雑なフィルタ構成のビームと冷却フィルタを使用した熱下中性子ビーム、
 - d) 8 種の中性子導管を用いた冷中性子ビーム、
- 合計 60 種の測定結果を掲載している。

この結果を見ると、いままで単純に熱中性子ビーム（実効エネルギー 25 meV）と思われていたビームのエネルギーは、同一のものは一つもないといってよいほどで、冷中性子ビームといってもよいようなものまであり、かなり幅がある。

残念ながら、BQI は 1 meV 以上 0.1 eV 以下の、熱・冷中性子ビームのみに対応したもので、熱外から高速中性子ビームは飛行時間（TOF-time of flight）法に頼らなければならないのが現状である。

以上、中性子イメージングにおける、規格化の現状を見てきた。線質が微妙に異なる個々のビームで取得した画像の品質管理の観点から、規格化の現状は未だ道遠しの感がある。

5. 国際協力

中性子イメージング施設の特長のために必須となる共同研究について触れる。

現在、国内での大学・研究所の研究者には、文部科学省のもとで共同利用により、研究費、旅費等が支給される。また、日本原子力研究開発機構でも同様な共同利用が可能である。他の一般利用者は、個々に施設の利用規程によって利用される。

この研究には世界各国での共同研究が欠かせない。特に、EU において各国間で互いの施設を利用した緊密な連携が取られていて、互いの共同研究が盛んになされている。更に、EU 以外の国にも多くの施設は開放されている。また、研究会、ワーキンググループなどの活動も活発に行われている。

アジア地域の場合、いくつかの原子炉が存在

し、中性子ラジオグラフィ施設は存在するのであるが、財政的な理由や人材の不足などで開店休業の形となっているものが多い。その中で我が国と韓国は、近いこともあって現在盛んに共同研究、研究会、ワークショップが行われている。

6. おわりに

中性子イメージングにまつわる諸課題を主に論じてきた。全ての項目を網羅できたかは疑問であるが、課題とすべき主な項目は本講座で考慮されている。また、この技術のいくつかの限界を論じているが、これらを見極めた上で、新しい技術の展望を見据えていく参考になればと強く考える次第である。なお、今回の講座では、実用面の課題などについては、各回の応用編に譲らざるを得なくなった。また、もっとも興味のある新しい技術が次々と提案されている。これは基礎編第 11 回と第 12 回に詳述されているのでそちらを是非参照していただきたい。

文 献

- 1) 小林久夫, 中性子ラジオグラフィ最近の研究動向, 日本原子力学会誌, 38(6), 434-441 (1996)
- 2) Kobayashi, H., Response functions of screen-film systems, Neutron Radiography (3), Fijine, S. et al. Eds., pp.893-902, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht (1990)
- 3) Steyerl, A., Drexel, W., Ebisawa, T., Gutmiedl, Steinhouser, K.-A., Gahler, R., Mampe, W. and Ageron, P., Neutron microscopy, *Rev. Phys. Appl.*, 23, 171 (1988)
- 4) 小林久夫, 中性子ラジオグラフィ試料の誘導放射能 IAERU-8601, 立教大学原子力研究所所内報 (1986)
- 5) URL: <http://www3.tokai-sc.jaea.go.jp/sangaku/3-facility/05-support/index-30.html>
- 6) ASNT Recommended Practice No. SNT-TC-1A (2006)
- 7) ASNT Standard for Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personnel (2006 Edition), ANSI/ASNT CP-189-2006

- 8) NAS Certification & Qualification of Nondestructive Test Personnel, NAS-410 (U. S. Department of the Air Force の Mil-Std-410 から転載され, 現在 Aerospace Industries Association of America, Inc. (AIA) が著作権を所有)
 - 9) Domanus, J. C., ed., Practical Neutron Radiography, Kulwer Academic Publ., Dordrecht (1992)
 - 10) Kobayashi, H. and Kiyanagi, Y., Basic concept and characteristics of beam quality indicator for continuum neutron spectrum, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A377**, 52-57 (1996)
 - 11) Matsubayashi, M., Lindsay, J. T. and Kobayashi, H., Preparation of a beam quality indicator for effective energy determinations of continuum beams: establishment of traceability, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A424**, 165-171 (1999)
-