

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4回）

中性子イメージングによる材料工学の研究[†]

玉置昌義

名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻
464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

Key Words : neutron, neutron imaging, neutron energy dependence, material engineering, neutron coherent scattering, post-irradiation-examination, resonance absorption reaction, neutron radiography

1. はじめに

非破壊検査における中性子イメージングの位置付けと概要については、応用編第1・2回において他の検査法と比較しながら述べられた。中性子透過画像による非破壊検査には、線質計、濃度計、画質計など幾種類かの検出計を使用して品質管理を行う。一方、理工学分野の研究開発の見地からいえば、一般の非破壊検査と比較して、より定量性が重視される。材料の中性子透過画像から、幾つかの補正などを経て目指す物理量を決める必要がある。

被写体の中性子透過画像の空間分解能、濃度分解能及び時間分解能がともに重要である。その中でも注意しなければならない画像情報の濃度定量性に関する事項として、散乱中性子、 γ 線、及び中性子スペクトルの影響とその処理・評価がある。材料理工学に関わる中性子イメージングの定量性を重視する立場から議論していく。

2. 散乱中性子の影響がある事例

中性子イメージングにおいては、被写体と何の相互作用もしないで透過してきた中性子（直達中性子）のみを検出して画像を形成させ、物質と中性子の相互作用の程度を定量的に測定するのが中心課題のひとつである。しかし、実際には、直達中性子に加わる形で、照射場中に散乱する中性子と、被写体によって散乱された中性子が検出器に入りバックグラウンドをあげてしまう。被写体の端で散乱された中性子は、外側へはじき出される成分が多くなり、画像の“にじみ効果”や“エッジ効果”が加わり、中性子2次元分布に図1のような歪みが生じ、定量性の劣化に繋がる¹⁾。これが散乱成分の影響で、その割合を評価するためにいろいろな実験的工夫やシミュレーションによる補正がなされる。

従来よりよく用いられる定量方法として、測定したい被写体の形状・組成に合わせて作成した比較校正用の物差し（グレイスケール）を同時に撮像して、散乱中性子込みの被写体画像とグレイスケールの濃度との比較から、散乱線を評価補正することなく必要な物理量を決める方法がある。材料化学研究の事例としては、鎌田らによるLiの固体内拡散の研究に採用され、当該分野における中性子イメージの定量を行った^{2), 3)}。

[†]Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Applications Part 4).

Applications of Neutron Imaging to Material Engineering.

Masayoshi TAMAKI: Nagoya University, Graduate School of Engineering, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi Pref. 464-8603, Japan.

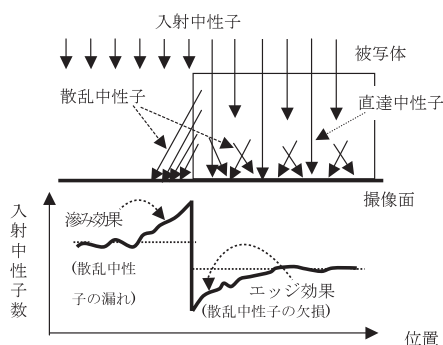


図1 散乱中性子による“にじみ効果”及び“エッジ効果”¹⁾

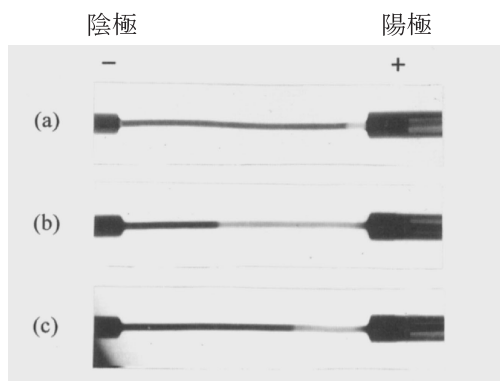


図2 エレクトロトランスポート(ET)現象におけるPdHのNR像：(a)水素化直後，(b)69日間ET，(c)100日間ET

Tamaki ら⁴⁾は、Pd 中の H のエレクトロトランスポート現象を研究する目的で、水素化 Pd の NR 像（図 2）から H を定量評価するために、同一材料製のグレイスケールを用い、定量評価を可能にした例もある。その結果、Pd 中の H の水素実効電荷、水素化 Pd の (H/Pd) 比及び相当平衡水素圧を求めた。

以下に、散乱線、 γ 線の除去、中性子エネルギーの相違等が材料理工学分野に応用された実例を示す。

2・1 分散法を応用した事例

分散法（基礎編第 3 回図 9(b)）は従来から用いられてきた方法であり、画像の解像度の劣化があまり問題にならない場合、特に散乱線の影

響を取り除く手立てがない場合に有効である。例えば、高速中性子によるイメージングにおいて、定量性を追求する手法として用いられる。吉井らのシミュレーション⁵⁾によれば、被写体と検出器の間を 10 cm ほど空ければ、バックグラウンドをほぼ均一なものとして差し引くことによって散乱線の影響が除けるとしている。ただし、この空隙によって多かれ少なかれ空間分解能の劣化は避けられない。

この方法は、流体二相流分野の体系的な研究⁶⁾において、流体の流れの定量化に利用された。

更にこの方法は、図 3 上段の試料に対し高速中性子による CT 撮像が実施され、断層再構成がなされた（図 3 下段）⁷⁾。

2・2 半影法を応用した事例

半影法は小林⁸⁾により提案され、多くの研究実績により体系化されている。図 4 に示すように、複数のステップウェッジに中性子吸収体を重ねて、半影法を組み合わせた線質計を作成し、中性子ビームの実効エネルギーを評価する方式に適用された⁹⁾。

半影法は照射済み燃料棒の中性子イメージングに用いられた。 γ 線不感式イメージングプレート (Dy-IP) で撮像した NR 画像の燃料棒中の Gd (中性子吸収体) の像部分 (図 5) の画像濃度を散乱中性子成分として、燃料を透過した直達中性子成分を評価する。これにより燃料ペレットの中性子全断面積を求め、いわゆる照射済み核燃料の²³⁵U 換算濃縮度を推定している¹⁰⁾。

この半影法による散乱中性子成分の評価手法は、断層再構成撮像研究にも応用された¹¹⁾。

2・3 スリット法を応用した事例

スリット法 (基礎編第 3 回図 9(c)) は、鎌田らの固体電池化学の分野で一種の分散法（基礎編第 3 回図 9(b)）といえるスケーリング法に併せて採用されている²⁾。

スリット法を断層像再構成の撮像に応用した

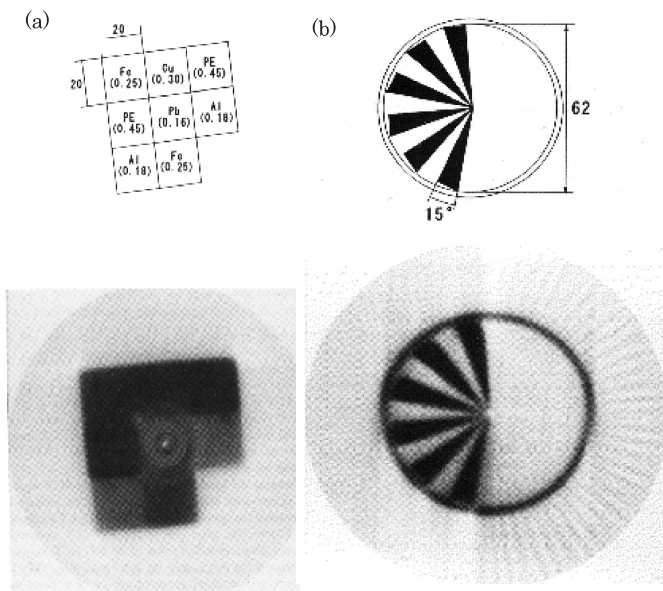


図3 高速中性子ラジオグラフィにおける散乱中性子の影響を取り除いた金属製ブロック (a) 及び鉄製ジューメンスター, (b) の高速中性子CT再構成断面⁷⁾

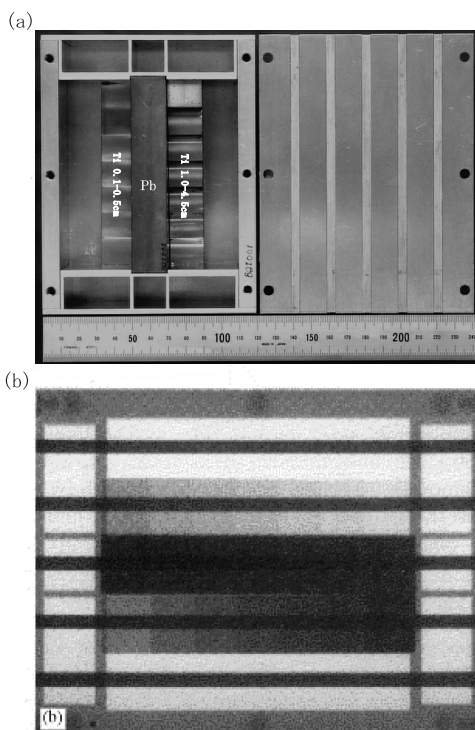


図4 中性子ビーム実効断面積測定用線質計⁹⁾
(a) 内部構造 (左) と半影法用Cd細板を組み込んだ上蓋 (右), (b) NR画像 (JRR3M TRNFビーム)

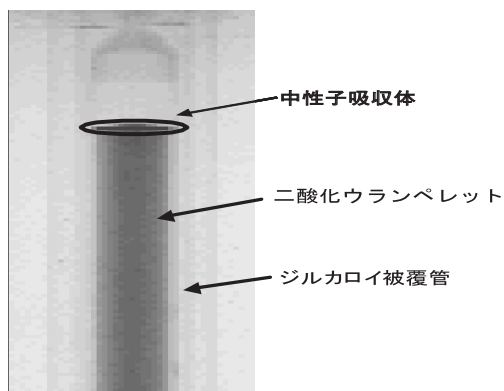
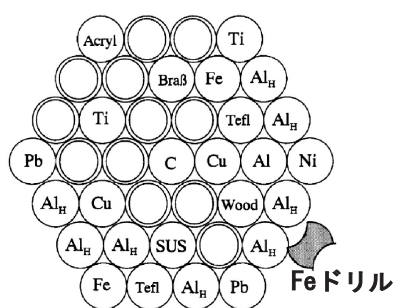


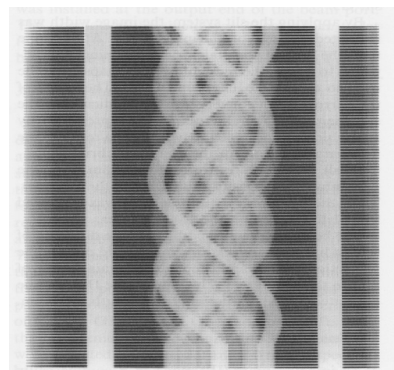
図5 燃料棒に含まれるGd中性子吸収体像

好例もある¹²⁾。被写体は、図6(a)に書き込まれているように、1 cm ϕ の金属、合金、アクリル、木材、Alパイプ (壁厚0.5 mm) を束ねたものである。図6(b)は、3.6度刻みで360度 (1周分) とったIP上の投影データのシノグラム^{*1}である。図6(c)は、そのCT再構成

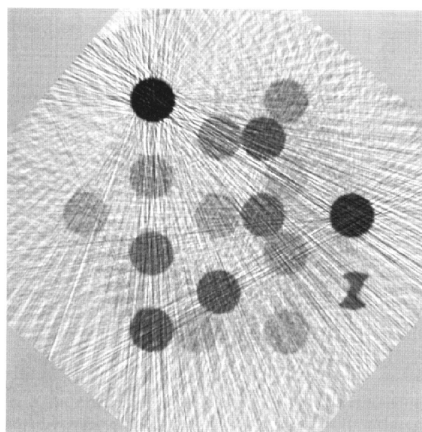
^{*1}sinogram: CTにおいて投影画像を角度について並べると、ある特定の点が角度に対してsin曲線を描くことからこの言葉が使われる。



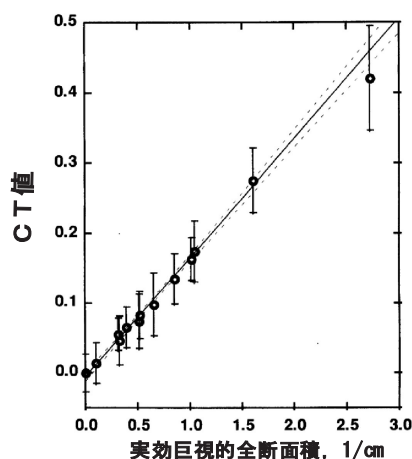
a) CT用被写体



b) CT用シノグラム像



c) CT再構成像



d) CT値と断面積の関係

図6 円柱形状金属等バンドルのCT再構成過程

断面図で、そのCT値を実効巨視的全断面積との相関で整理したのが図6(d)である。直線関係は、CT値が物理量として意味を持っていることを示している。

2・4 ハニカムコリメータによる散乱線除去法

図7(a)に示した中性子吸収体でできたハニカムコリメータを被写体と検出器の間に設置して、被写体で散乱されてビーム軸からずれた中性子を吸収して除去し、検出器に到達しないようにする撮像法である¹³⁾。ただし、この方法は、厳密にはダイヤモンドの有効寸法D内の限られた寸法内でのみ有効である。したがって、そ

の寸法以上の照射野でこの方法を有効なものにするには、ハニカム自身の L_h/D_h *2を小さくして、より多くの散乱線の混入を許容せざるを得なくなる。同時に、ハニカムの端部に行くに従って暗くなること(図7(b))などの考慮を要する。また、この方法は、ハニカム構造が被写体に重なって写ってしまう欠点があるため、被写体なしのハニカム像を用いて強度補正を行う必要がある。Santoso¹⁴⁾は、この方法を用いて被写体の減弱係数を評価した。

*2 ここで言う L_h/D_h はハニカムの厚さ L_h とハニカム孔の有効径 D_h のことで、通常使われている中性子ビームの L/D とは異なる量である。

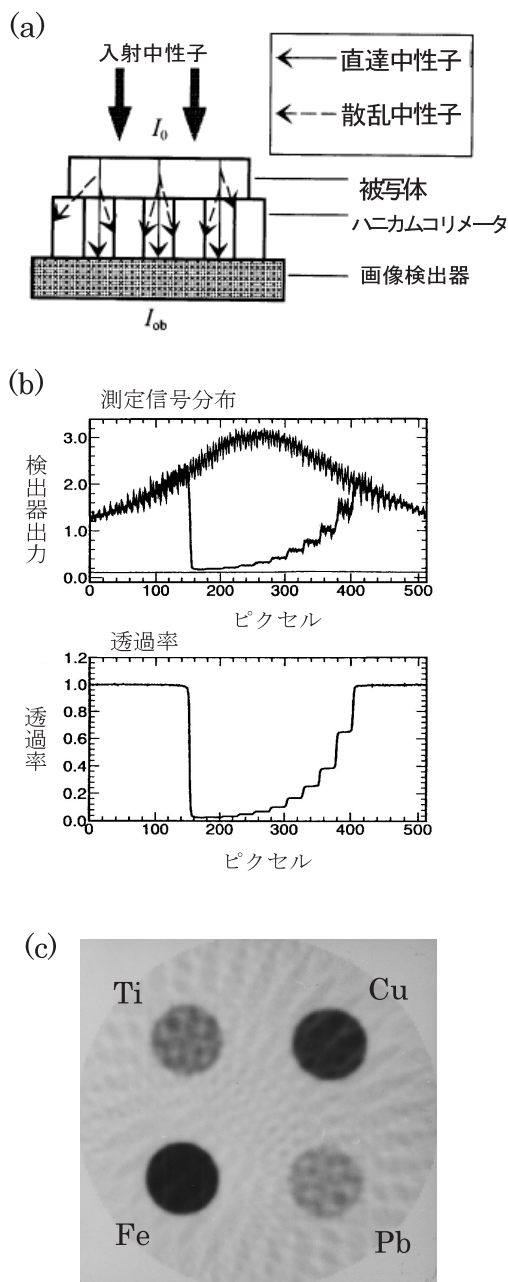


図7 ハニカムコリメータによる散乱中性子の除去法とそれを利用した定量的CT
(a) 散乱線除去法, (b) 測定信号分布 (上図),
(c) この方法を利用した定量的CT画像

この方法を拡張して断層像再構成に応用することで、散乱中性子の影響によって起こるカップリング現象^{*3}を低減することができる。この

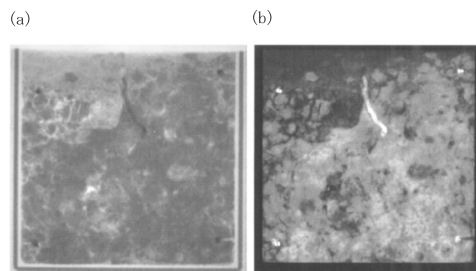


図8 点散乱関数を用いる散乱中性子の補正と土壌中の水分評価の実施例¹⁸⁾

(a) 水分を含む土の中性子ラジオグラフィ像,
(b) 点散乱関数を用いて散乱中性子ラジオグラフィ成分から評価された水分の分布

方法で、被写体の減弱係数に相当するCT値をかなりの精度で再現できる (図7(c))。

その他、散乱中性子の評価方法として、Mora¹⁵⁾は点散乱関数を提案し、単純形状の被写体に対して有効性を示した。その中で実際散乱線補正を実現して定量的画像を得る例がある¹⁶⁾。そこでは、土壌中の水分分布を画像化するのに、点散乱関数を使って水ステップウェッジの画像データに補正を加え、水の透過厚さを定量的に表現した (図8(a))。その手法を拡張して、土壌中の成分分布を求めて、図8(b)のような水分量分布を表す2次元画像を得るまでに至っている。

3. γ 線の影響がある事例

中性子イメージングを行う照射場には、入射中性子ビーム中に含まれる γ 線、被写体内での中性子吸収核反応に伴う γ 線が存在し、 γ 線のカブリという形で中性子画像の定量的性に影

^{*3} 連続スペクトルによるCTで、線減衰係数の大きいエネルギー成分ほど減衰が大きい。透過長が大きくなるほど減衰係数の小さい成分が選択的に残る。したがって、試料の厚い部分のCT値は見かけ上小さく見える。試料は回転させるため、結局中心部分のCT値が見かけ上小さくなる。全体を見るとカップの底のように見えるためにこの言葉が使われた。

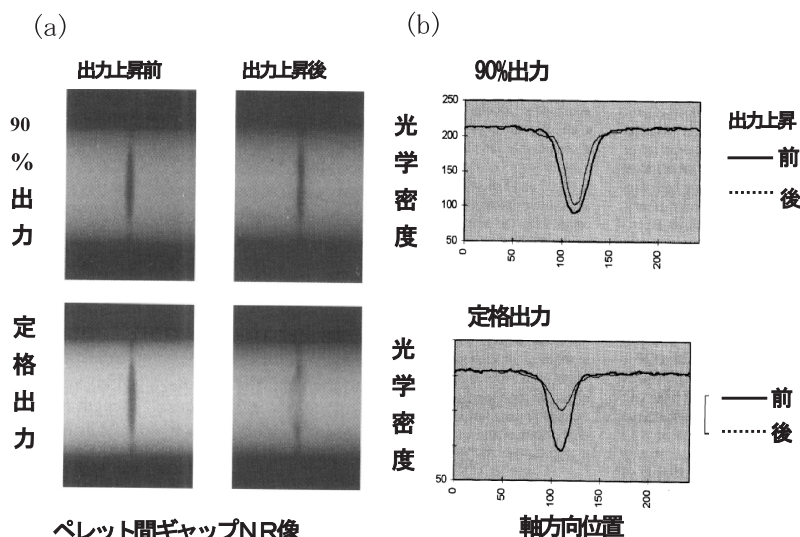


図9 照射による加圧水型原子炉(PWR)燃料ペレットの高密度化とそのNR像及び評価¹⁷⁾

(a) NR像, (b)ギャップ付近濃度プロファイルの出力上昇前後比較

響することがある。

従来から行われている間接法により撮像すれば、 γ 線は検出系に届かず、中性子のみによるイメージが得られる。この方法については本講座基礎編第3回で簡単に示した。例えば、照射後燃料の試験に使われた例¹⁷⁾がある。照射により高密度化した加圧水型原子炉(PWR)燃料のNR像(図9(a)上図)と、その評価の結果を図9(b)下図に示した。線出力密度が90%出力(117 W/cm: 図9(a)上図)から定格出力(225 W/cm: 図9(a)下図)まで大きくなるとともに、高密度化が進むことがわかる。その様子は、ペレット間ギャップを形成するディッシュ構造がつぶれていくことと対応することが図9(a)のNR像から見て取れる。ギャップが燃料本体で次第に埋まっていることを図9(b)が示している。

直接法を用いる場合には、 γ 線によるカブリの分を何らかの方法で評価し引き去る必要がある。本講座基礎編第3回で述べた、フィルムあるいはX線用IPを2重に設置した直接法で、1枚は中性子と γ 線の2重画像を、もう1枚は γ 線のみによる画像を撮り、その2画像間の差分

照射後燃料棒画像

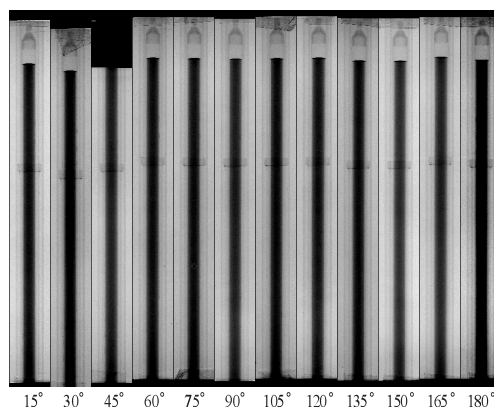


図10 照射済みUO₂燃料棒のDy-IPによるNR像¹⁸⁾

から中性子のみによる画像を得る方法である。

前述した散乱線の影響を除去するための半影法は、陰の部分に回りこんだ散乱中性子成分とともに、陰の部分で検出された γ 線成分も引き去ってくれる。また、広く用いられている電子画像取得法においても、概ねこれらの2画像間で差分をとる方法や、半影法の応用で中性子成分像を得る工夫が行われている。しかし、2画像を合致させて差分をとる際に誤差を生むことが多く、 γ 線が強すぎれば、カブリ分だけで検出器がオーバーフローしてしまい、画像情報

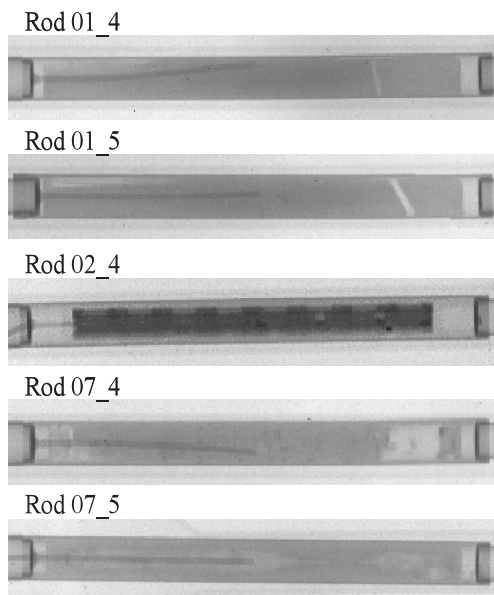


図 11 Dy-IP による照射済み核破砕ターゲットの撮像例¹⁹⁾

を失ってしまうので気をつける必要がある。

間接法あるいはそれを発展させた方法を工夫して、 γ 線の影響を受けない画像を直接得るのが有益である。コンバータとして、Dy あるいは In と画像検出器（フィルムや IP）を組み合わせる方法、 γ 線不感的中性子画像検出器（Dy-IP）を用いる方法が採用されている。この方式は主として放射化する ^{165}Dy （存在比 28.2%）の半減期が 2.33 h であるので、同一の Dy-IP を引き続いて用いる場合は、半減期の数倍の時間冷却して用いる必要がある。

これを応用した照射済み核燃料棒の NR イメージとその解析例¹⁸⁾を示そう。図 10 は、CT 用に 15 度ごとに 12 方向で撮影した投影データである。この図から、ジルコニウム被覆管内壁に生じた ZrH_4 が、燃料棒径方向に異方性を持って局所的に点在しているのが見て取れる。また、軸方向にバレット間ギャップが読み取れ、かなり低燃焼度の燃料であることまでが推定できる。また、燃料部における中性子透過率から、 ^{235}U 換算濃縮度も評価している。

Dy-IP は、断層撮像に応用され、Pb 及び Hg

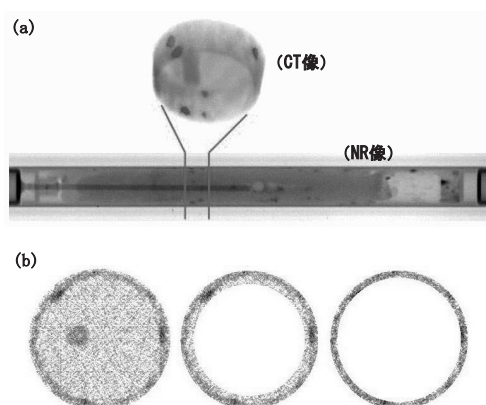


図 12 照射済み核破砕ターゲットの NR 像の解析結果^{19), 20)}

(a) 鉛核破砕ターゲットジルカロイ被覆中の ZrH_2 プリスター：(上)CT 像，(下)NR 像
(b) ZrH_2 スポットに沿った CT スライス：(左)マスクなしスライス，(中)鉛マスク，(右)鉄マスク

の核破砕ターゲット開発の照射後試験に貢献している。図 11 は、ポールシェラー研究所 (Paul Scherrer Institute: PSI) の核破砕装置 (spallation neutron source: SINQ) の次期核破砕ターゲットとして開発のため、1 年間照射・半年冷却した後、照射後試験として、Dy-IP を用いて撮像したものの内の 5 本のターゲット像¹⁹⁾である。

Vontobel¹⁹⁾や玉置ら²⁰⁾は、照射済み核破砕ターゲットの NR 像とその解析を行った。彼らは、ターゲットの被覆管部の軸方向に沿って、ステンレス鋼製被覆管の中性子透過量変化や核破砕ターゲットに照射された陽子ビームの形状を測定している。両者から、被覆管の中性子透過量分布と陽子ビームの形状が良く対応していることがわかる。陽子ビームの照射によって蓄積された H や核破砕生成物によるものと考えられる。また彼らは、照射後の Pb ターゲットの軸方向断面の中性子断面積を断面中心と表面付近の中性子断面積のプロファイルを取り、中性子断面積が端に近づくにつれて次第に小さくなる傾向があることを示した。

核破砕反応生成物のシミュレーションによる

表1 代表的な物質の Bragg カットオフエネルギー

物質	Al	Be	C	Mg	Si	Fe	Ni	Pb	Bi	Zr
Bragg カットオフ エネルギー(meV)	4	6	2	2.6 ～2.9	2	5	5	3	2	2.5 ～3

と、このターゲット中心部における熱中性子吸収増分の約 90% が ^{196}Hg と ^{199}Hg によるもので、残りはターゲット内に留まった H によるものと考えられる。図 12(a) の NR 像は、ターゲットの高性能化をめざして被覆管にジルカロイを採用した場合の健全性を調べるための Pb ターゲットの NR 像である。また、図 12(a) の上部には、3 次元 CT 像を示した。黒く見える点状の析出物が、 ZrH_4 と考えられる。それは、図 12(b) の 3 個の CT 像から、析出はジルカロイ部で起こっており、鉛部分や保護用のステンレス鋼被覆部には存在しないことから確かめられる。

このように、Dy-IP は照射後試験に適した IP であり、今後の応用の広がり期待したい。

4. 中性子スペクトルに係わる事例

中性子イメージングの被写体になる多くの物質は、中性子のエネルギーによって相互作用の大きさ(断面積)が変化する。通常の中性子イメージングに用いられる熱中性子領域では、相互作用を表す中性子全断面積は比較的緩やかな変化にとどまり、中性子エネルギーの影響を考えなくてもよい場合が多い。熱から熱外領域にわたるエネルギー範囲では、通常全断面積はかなり小さくなるが、その熱外領域では、いわゆる中性子を共鳴吸収するものも多く、全断面積がエネルギー依存性の極めて強いものとなる。その特性を利用したイメージングは、中性子エネルギーをプローブとして利用する物質科学の新天地にもなろう。一方、熱から冷中性子領域にわたっては、物質の持つ結晶性が関与し、波動性を持った中性子の干渉性散乱が加わり、全

断面積の中性子エネルギー(波長)依存性が大きくなる。ここでは低エネルギーから高エネルギーに至る中性子に特性を利用した事例を順次見ていく。

4.1 Bragg カットオフに関連する事例

本講座基礎編第 3 回で示したように、断面積は Bragg カットオフ位置で大きく変化する。Bragg カットオフの形状は、その物質の結晶構造に由来する固有なものである。表 1 に、いくつかの物質の Bragg カットオフをエネルギーで表した²¹⁾。

通常、冷中性子ビームは、減速材温度でほぼ平衡に至ったエネルギー分布をしている。画像によって知らされる情報は、中性子及び被写体断面積のエネルギー依存性が重みつき平均された結果である。

中性子全断面積がエネルギーに対して正の傾きか負の傾きかを持つことによって、中性子スペクトルはその物質を透過するに従って、低エネルギー側か高エネルギー側にスペクトルの形状が変形しシフトしてゆく。これをそれぞれスペクトルのソフトニング及びハードニングと称する。Bragg カットオフのある場合は、当然ソフトニングに対応するスペクトルシフトが生じる。

この効果を積極的に取り入れて断層像の定量性の向上をもたらした例がある²²⁾。スペクトルを調整した冷中性子ビームを用いて、被写体中でのソフトニングやハードニングが起こりにくい条件を整えて、冷中性子断層撮影を行い、カップリング現象を取り除いている。

表2 実効エネルギー測定用線質計によるBiフィルタ透過中性子の実効エネルギー

Bi (cm)	0	5	10	15
Gd-SR (a)	27.3	20.5	11.1	8.1
Gd-SR (b)	26.8	24.1	13.9	10.8
NIP (Gd)	27.5	24.6	15.6	11.5
NIP (^6Li)	26.2	—	—	—
C-CCD	30.6	26.1	16.1	11.3
SIT	29.6	—	—	—
平均値	28.0	23.8	14.2	10.4
標準偏差	2.2	2.8	2.5	1.7

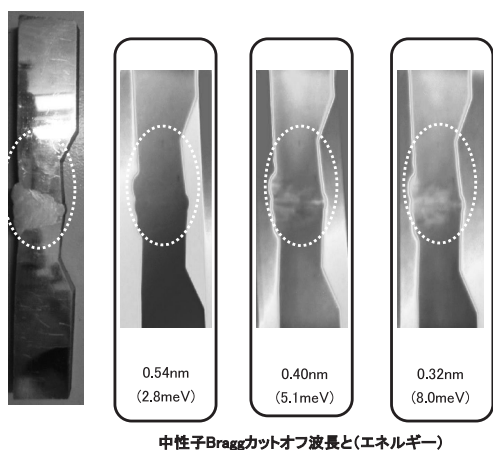


図13 鉄溶接部(左端)の波長0.54 nm, 0.40 nm 及び0.32 nm(左から右へ)の中性子透視像

4・2 フィルタによる実効エネルギー調整の事例

熱中性子ビームのフィルタによるソフトニングを利用して、冷中性子側にシフトしたビームを取り出し、図4に示した実効エネルギー測定用線質計を用いて体系的に整理した例がある(表2)²³⁾。これは図4に示した線質計 (beam quality indicator: BQI) を用いて測定したものである。この表は、中性子検出器の種類をパラメータにとって示してあるが、表の下段に示した程度の誤差で一致した結果を得ている。Biの厚さが大きくなるとともに、通過した中性子

の実効エネルギーは小さくなり、15 cmのBiを通過した後では、本来28 meVの熱中性子ビームの実効エネルギーが10 meV程度にまで下がり、かなり冷中性子ビーム化がはかられた。通常の熱中性子ビームと多結晶Biフィルタがあれば、若干の強度低下と、わずかではあるが残留熱中性子成分や高エネルギー中性子成分と γ 線成分の混入をある程度許容できるのであれば、高価な冷却ボトルと中性子導管を使用しなればならない冷中性子ビーム施設を利用するよりは、安価で実用的な実験が可能なことを教えている。

4・3 単色冷中性子を用いる事例

冷中性子領域スペクトルの単色化法は、一般的には速度選別器によって行われる。中性子源から取り出した熱平衡中性子ビームのスペクトルバンド幅を狭めるための第1段階の手法としても使われている。ここでは、試行的にこの狭められたスペクトルを単色ビームとして直接中性子イメージングに用いた例を示す²⁴⁾。

Feの溶接部を含む部分をBraggカットオフ前後の波長のビームで撮影し、溶接部を可視化し、溶接の影響判別が試みられた例がある(図13)。実験はPSI SINQに新設された冷中性子照射施設 (image with cold neutron: ICON) の中性子源からの連続白色スペクトルビームを、速度選別器を通して得られたスペクトル幅の狭い冷中性子を用い、CCDカメラにより画像が得られた。図13左端はFeの溶接部の外観写真である。その溶接部を3種類の中性子波長で撮影した結果が、図13右側の3枚のNR画像である。Braggカットオフより長い波長(0.54 nm)の中性子で撮影した溶接部分は、かろうじて周りのFeとの境目が見える程度で、それ以外の情報を得ることはできない。Braggカットオフより短い波長(0.32 nm)の中性子ビームを用いると、溶接部分全体がはっきり判別でき、周りの部分との違いを可視化できる。Braggカットオフ付近の0.40 nmの中性子ビ

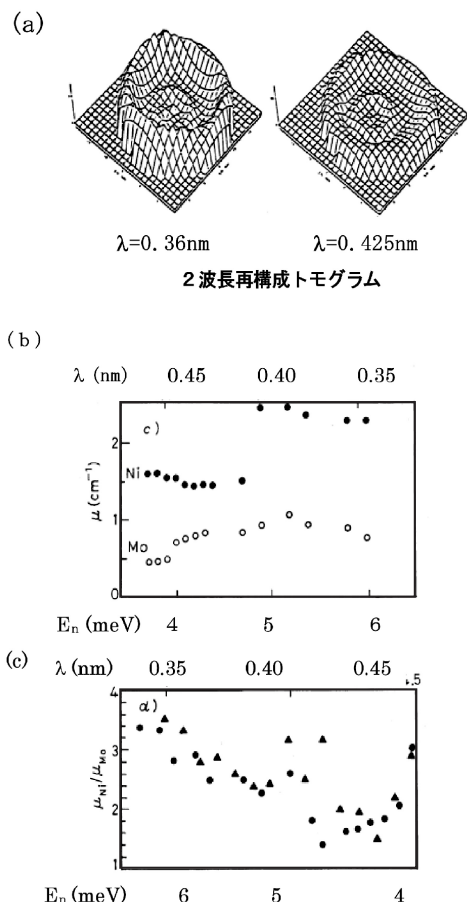
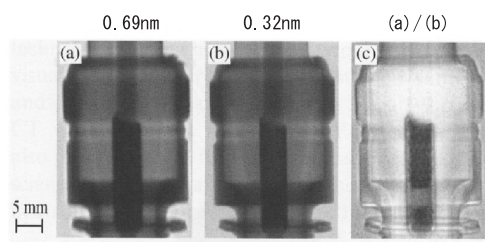


図 14 単色中性子による走査型中性子トモグラフィ
(a) 0.36 nm 及び 0.425 nm における CT 画像
(b) 減弱係数と, (c) 減弱係数比の波長依存



2 波長によるスパークプラグのNR像と画像間比

図 15 2 波長中性子イメージング²⁶⁾

(a) 0.69 nm, (b) 0.32 nm, (c) 両者の画像間比

ームで撮影した画像は、溶接部内の微小な変化をも可視化している。このように Bragg カットオフ付近のエネルギービームを使うと、溶接

部内の微小な結晶構造の変化、溶接歪み、析出物などまで観察できる。

また、単結晶モノクロメータにより取り出した単色中性子ビームを用いて、中性子エネルギー走査型の断層撮像を行った例がある²⁵⁾。図 14(a) は、2 波長でとった Ni-Mo 同心円柱の CT 値等高線図である。図 14(b) は、減弱係数の波長依存性をとったもので、Ni の Bragg カットオフが 0.4 nm 付近に明確に出ている。

この 2 波長単色中性子イメージング及びトモグラフィ法が更に展開されている²⁶⁾。図 15 は、(a), (b) 2 波長で撮られたスパークプラグの NR 像と, (c) その比を取った像が示されている。特定の部品のコントラスト比が強調されているのは、その部品 0.69 nm と 0.32 nm とにおける中性子全断面積が他の部品のそれとで傾向が大きく異なるため、Bragg カットオフがこの間にあることを予想させる。

CT 値の違いを用いて油と炭素を区別して二つの画像を作成した例がある。図 16(a) の 3 次元 CT は、鉄製曲管内に付着した炭素と油の析出物を表したもので、単結晶モノクロメータで取り出した高い (L/D) 比の単色中性子ビームを用いて、CT 用投影データを取っている。

中性子のスピンの向きをそろえた偏極中性子を用いて、永久磁石の NR 像を撮り、CT 像に再構成した例がある (図 16(b))。磁力線と中性子のスピンの相互作用の様子を画像化したもので極めて興味深い。

更に中性子エネルギーの低い極冷中性子 (very cold neutron: VCN) を使った中性子イメージングによる材料研究もある²⁷⁾。

4.4 タイムオブフライト (time-of-flight: TOF) による単色中性子イメージングの事例

中性子イメージングの分野で、冷中性子 TOF の開発に精力的に取り組んでいる例がある²⁸⁾。リチウムガラスと光電子増倍管を組み合わせた 2 次元中性子検出器を用いた TOF 法により、

2 波長によるスパークプラグのNR像と画像間比

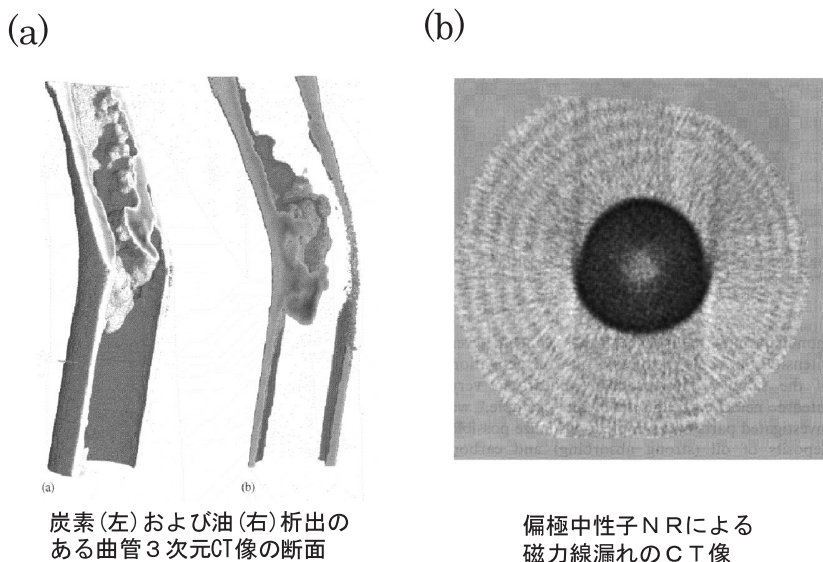


図 16 (a) 同じ曲管内の異なったCT値の3次元CT

(b) 永久磁石の偏極中性子による磁力線漏れを表す中性子CT²⁶⁾

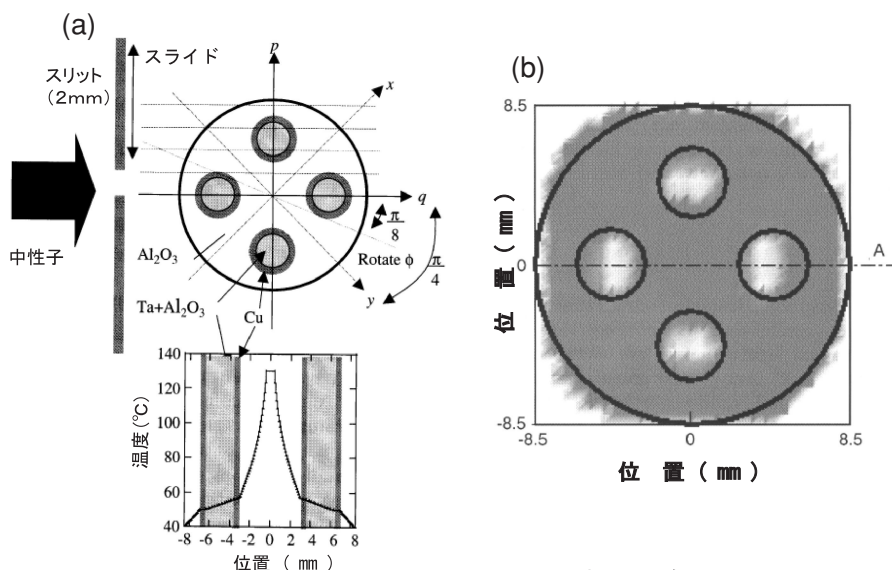
エネルギー弁別中性子計測を行い、Fe の Bragg カットオフ近傍エネルギー域に着目して、溶接部における Fe の結晶学的変化を見ている。また、素子数 8×8 の検出器を使って、溶接部の 2 次元形状を画像として可視化も試みている。

近年、TOF 式の検出法開発が成果を結び、熱外から高速中性子領域の共鳴エネルギーに的をあてた中性子イメージングが展開し始めた。

熱外中性子領域の例から紹介しよう。TOF を利用して試料の熱外共鳴領域の吸収スペクトルを測定し、それを CT 化した中性子共鳴吸収 CT 温度計測とでもいう新しい研究が報告されている²⁹⁾。熱外共鳴吸収のピーク幅は、その見ている核種の温度によって個々の原子の熱振動に変化をきたしドップラー効果の影響を受ける。すなわち、温度の上下によってピーク幅が広くなったり狭くなったりする。これを利用すれば、共鳴ピークの幅を測定することで対象核種の温度、ひいては物質内部の温度分布を非接触で計測できることになる (図 17)。¹⁸¹Ta の持つ共鳴吸収ピークを標的にして、共鳴領域の TOF

式中性子吸収スペクトルを Ta を含有する試験片 (図 17(a)) を画像化し、CT 化することで、物体内部の 2 次元温度測定に繋げた (図 17(b))。

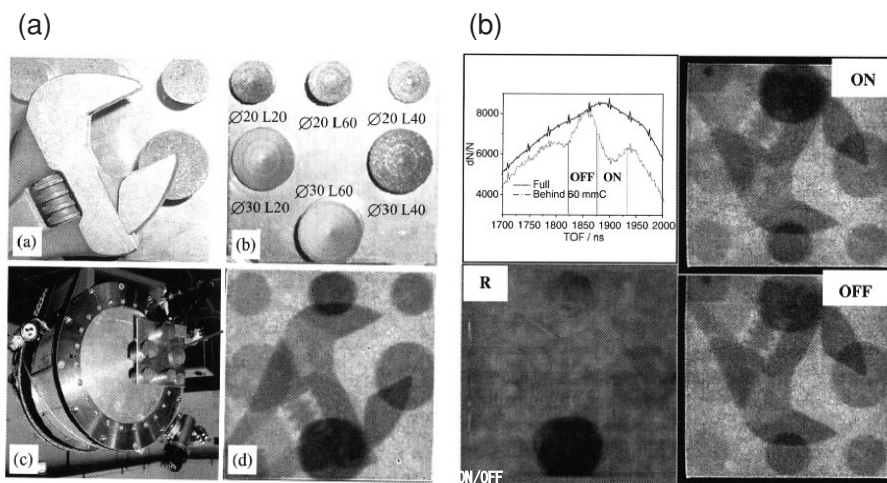
高速中性子領域に TOF を応用して単色高速中性子イメージングを行い、炭素の 8 MeV 近傍の幅広く大きな共鳴吸収面積を持つピークと 7 MeV 近傍の吸収断面積が小さい窓部分との断面積比を利用して、鉄製部品の背景にある黒鉛片を可視化する手法も実験的に示されている^{30), 31)}。FANGAS (FASt Neutron GAS detector) と名づけられた高速中性子気体検出器により、TOF 法で黒鉛試料通過有無の高速中性子のエネルギースペクトルをカウンティング法で測定し、7 MeV の窓と 8 MeV の吸収ピークに対応する変化を確認した。その二つのエネルギー領域で黒鉛片を含む被写体のイメージング用データを求め、画像間の比を取ると、このエネルギー領域ではエネルギー依存がごく弱い物質や空間の情報はなくなり、黒鉛のみが浮き上がるように映し出される。図 18(a)には、いくつかのサイズの黒鉛片に鉄製のレンチを重ね、



中性子共鳴吸収CT試料配置

中性子共鳴吸収CTによる
試料温度分布再構成断面

図 17 熱外中性子共鳴吸収法を利用した CT による物体内部の温度測定



黒鉛とレンチの写真およびFNR

黒鉛の高速中性子共鳴イメージング

図 18 高速中性子共鳴吸収に TOF を組み合わせて特定核種のみを画像化する方法

中性子ビームライン上に設置した様子及び全スペクトルで得られた高速中性子画像がまとめられている。黒鉛片に重なった鉄製レンチも写っている。TOF を利用して 7 MeV と 8 MeV の高速中性子で撮った 2 画像と、それらの比を取った画像も図 18(b) に示した。比画像には、鉄製レンチの像はなく、黒鉛のみの画像になって

いる。これは、Fe が 7 ～ 8 MeV 領域においてあまり中性子吸収断面積変化がないことからきている。2 波長中性子イメージングの大きな発展性がよく表われている。

5. まとめ

いろいろな材料の理工学的研究のために、中

性子イメージングが取り上げられるようになった。また逆に、新しい材料・技術が取り入れられて、最新の中性子イメージング手法の飛躍的な進展がある。中性子イメージングの画像情報に定量性を確保することが中性子科学及びその理工学への応用を広げることになる。それが産業諸分野における実用的な利用に繋がる。基礎研究と応用研究の両分野での更なる発展を期待したい。

文 献

- 1) 小田将広, 冷中性子ラジオグラフィ技術の定量性向上に関する基礎研究, 博士論文(名古屋大学, 1997)
- 2) Kamata, M. et al., *Nucl. Instrum. Methods A*, **377**, 161-165 (1996)
- 3) Takai, S., *Solid State Ionics*, **171**, 107-112 (2004)
- 4) Tamaki, M., *Nucl. Instrum. Methods A*, **377**, 166-169 (1996)
- 5) Yoshii, K. and Kobayashi, H., *Nucl. Instrum. Methods A*, **377**, 76-79 (1996)
- 6) Mishima, K. and Hibiki, T., *Nucl. Sci. Eng.*, **124**, 327 (1996)
- 7) Nakajima, T. et al., *Nucl. Instrum. Methods A*, **377**, 90-92 (1996)
- 8) Kobayashi, H., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **29**, 1045-1053 (1992)
- 9) Kobayashi, H., *Nucl. Instrum. Methods A*, **424**, 151-157 (1999)
- 10) Tamaki, M. et al., *Nucl. Instrum. Methods A*, **542**, 320-323 (2005)
- 11) Ikeda, Y. et al., *Nucl. Instrum. Methods A*, **377**, 85-89 (1996)
- 12) Kobayashi, H., *Nucl. Instrum. Methods A*, **424**, 221-228 (1999)
- 13) Oda, M., *Nucl. Instrum. Methods A*, **379**, 323-329 (1996)
- 14) Santoso, B., *Nucl. Instrum. Methods A*, **377**, 133-136 (1996)
- 15) Mora, C. A., A Scattering Effect Correction Technique for Neutron Tomography Image Enhancement Using the Maximum-Entropy Formalism, PhD Thesis (University of Virginia, 1992)
- 16) Hassaneins, R., *Nucl. Instrum. Methods A*, **542**, 353-360 (2005)
- 17) Bayron, G., *Nucl. Instrum. Methods A*, **424**, 92-97 (1999)
- 18) Tamaki, M., *Nucl. Instrum. Methods A*, **542**, 320-323 (2005)
- 19) Vontobel, P., *J. Nucl. Mater.*, **356**, 162-167 (2006)
- 20) 玉置昌義, 原子力学会中部支部第38回研究発表会予稿集 R27 (名古屋, 2006. 12. 13)
- 21) Mc Donald, Jr., T. E., *Nucl. Instrum. Methods A*, **424**, 235-241 (1999)
- 22) 小田将広, 日本原子力学会誌, **39**, 647-656 (1997)
- 23) Matsubayashi, M., *Nucl. Instrum. Methods A*, **424**, 165-171 (1999)
- 24) 玉置昌義, 日本原子力学会 2006 年秋の大会 予稿集 F51 (北海道大学, 2006. 9. 29)
- 25) イタリア物理学会, 第 114 回 エンリコ フェルミ 国際物理学校, 中性子の産業および工学への応用, 論文集, 中性子ラジオグラフィにおけるコントラスト向上方法
- 26) Treimer, W., *Nucl. Instrum. Methods A*, **542**, 367-375 (2005)
- 27) Kawabata, Y., *Nucl. Instrum. Methods A*, **542**, 61-67 (2005)
- 28) Kiyanagi, Y., *Nucl. Instrum. Methods A*, **542**, 316-319 (2005)
- 29) Kamiyama, T., *Nucl. Instrum. Methods A*, **542**, 258-263 (2005)
- 30) Dangendorf, V., *Nucl. Instrum. Methods A*, **542**, 197-205 (2005)
- 31) Vartsky, D., *Nucl. Instrum. Methods A*, **542**, 206-212 (2005)