

中性子カラー I.I.TM で領域が広がる新しい検査技術

X線では検査できない材料を中性子でイメージング

対象物を破壊せずに内部のようすをイメージングできるX線検査技術は、医療や手荷物検査から、古美術品の調査、工業的利用まで欠かせない技術になっています。水素社会の実現を目指して、燃料電池や水素貯蔵合金、効率的なエンジン開発などが進む現在、X線では検査が困難だった金属内部での水素や水のイメージングが求められています。

東芝は、このような新たなニーズに応えるため、中性子を用いてイメージングする装置として中性子カラー I.I.TMを開発しました。

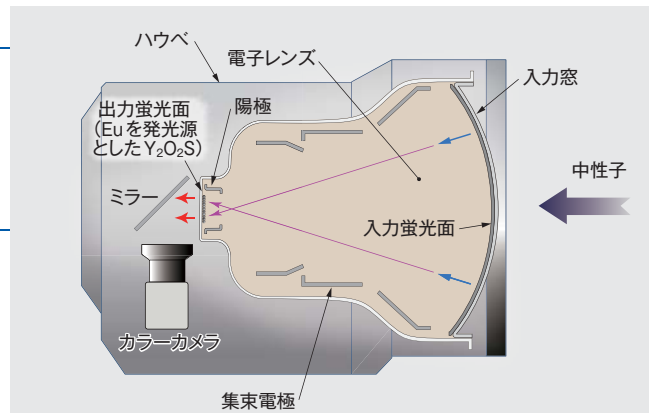


図1. カラー I.I.TM の断面構造 — 放射線と反応する入力蛍光面、電子レンズ、出力蛍光面、光学系（ミラー、レンズ）、カラーカメラ、及びハウベ（容器）で構成されています。

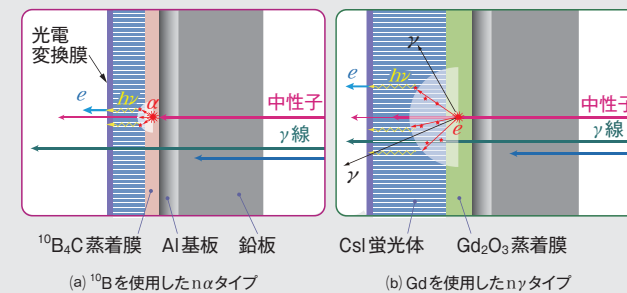


図2. 入力蛍光面の断面構造 — (a)ではα線の飛ぶ距離は短く、逆に(b)では内部転換電子（赤色のe）の飛ぶ距離は長くなります。α線又はeでCsI蛍光体を発光させます。

中性子カラー I.I.TM の開発

イメージンテンシファイア (I.I.) は、放射線の情報を入力蛍光面で効率的に光に変え、更に電子に変えて、電子レンズの作用で増幅して出力蛍光面に集束し、再び可視画像にします。この画像をミラーやレンズの光学系を介してカメラでイメージングします。

I.I.を使うと、物質中を透過した放射線の量を影絵のようなイメージ画像として効率的に表示できます。

カラー I.I.TM は従来のモノクロの I.I. と異なり、東芝が開発した、ユウロピウム (Eu) 原子を発光源とした酸化イットリウム (Y₂O₃S) カラーシンチレータを出力蛍光面に用いて、カラーカメラで撮影し表示します。このカラーシンチレータが開発のポイントで、モノ

クロの従来品と比べて約6倍の検出感度があり、撮影での検出感度領域を約2けた広げることができました。

X線用のカラー I.I.TM は、入力蛍光面では中性子と反応しません。そこで当社は、中性子と反応する物質を入力蛍光面に加えることで、中性子カラー I.I.TM を世界で初めて^(注1) 実現しました⁽⁹⁾ (図1)。

中性子と反応する膜の構造

中性子との反応が大きい物質に、濃縮ホウ素 (¹⁰B) や天然ガドリニウム (Gd) があります。これらの安定した化合物である炭化濃縮ホウ素 (¹⁰B₄C) や酸化ガドリニウム (Gd₂O₃) を、アルミニウム (Al) 基板とヨウ化セシウム (CsI) の間に蒸着して入力蛍光面を形

(注1) 2009年5月時点、当社調べ。

成します。

中性子は、¹⁰Bを用いる場合、(n, α) 反応と呼ばれる反応によりα線に変換され、このα線でCsI蛍光体を発光させてイメージングします。一方、Gdを用いる場合、(n, γ) 反応と呼ばれる反応でエネルギーの高いγ線と電子（厳密には内部転換電子）が生成され、この電子がCsI蛍光体を発光 (hν) させます。γ線はエネルギーが高く、ほとんどCsIとは反応せずに抜けてしまいます。電子の場合には、蛍光体中を約20 μm移動しますが、α線の場合は約4 μmしか移動しないため、α線を使用するほうが高精細になります (図2)。

中性子のエネルギーと感度

中性子のエネルギーに対して、反応

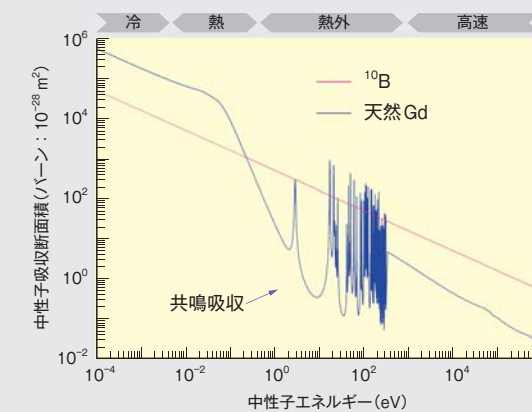


図3. 中性子エネルギーに対する¹⁰Bと天然Gdの反応 — 天然Gdは熱中性子より低い領域で反応しやすい特性を持ちますが、¹⁰Bのほうが共鳴吸収のピークがなく、広い領域で利用しやすい特性を持ちます。



図4. 中性子カラー I.I.TM — 中性子照射室内には、入力面のサイズが9インチの黒い中性子カラー I.I.TM 本体（商品名：Ultimage™）と、遮へい容器に入った白いカラーカメラシステムが設置され、照射室外のモニターで観察します。



図5. カラー I.I.TM による撮影例 — プリキ缶の中に入っている樹脂製の噴水のがん具を(a)に示します。これをX線で撮影した結果を(b)に、中性子で撮影した結果を(c)に示します。X線撮影では水の中と樹脂の中のモーターや電池が見えていますが、噴水の水が飛んでいる状態は見えません。中性子撮影では、水や樹脂の中は見ることができませんが、透明なガラスの中を見ているように噴水の水を見ることが出来ます。

体として¹⁰Bを用いる場合とGdを用いる場合で利用のしかたが異なります。中性子源として原子炉を用いる場合には、中性子のエネルギーは主に熱中性子領域となります。この場合、¹⁰BよりもGdのほうが約10倍反応効率が高くなります。一方、中性子源として加速器を用いる場合には、エネルギーの高い中性子が取り出せるため、¹⁰Bのほうが反応効率が良くなります。また、エネルギーに対して反応効率が大きく変わる共鳴吸収がない点でも使いやすくなります。

当社は、高精細でエネルギー領域の広い¹⁰Bを使用したnαタイプと、熱中性子より低いエネルギー領域で感度の高いGdを使用したnγタイプの2種類をラインアップしています (図3)。

X線撮影と異なる中性子撮影のイメージ

原子炉の中性子源を用いた撮影は、専用の照射室内に中性子カラー I.I.TM 本体と、カメラを保護するための遮へい容器に入ったカメラシステムを設置します。照射室の厚い遮へい扉の外には、撮影結果を表示するモニターや記録装置を設置して遠隔で撮影します (図4)。

金属内部での水の流れをイメージングする一例として、プリキ缶の中に噴水のがん具を入れて撮影した例を図5に示します。実際には動きのある画像で、X線撮影では、水の中と樹脂製がん具内のモーターや電池、ねじなど金属部分は見えますが、水の噴き出ているようすやその動きを見ることができません。中性子撮影では、水素を含む樹

脂や水の中は見ることができませんが、水が粒になって噴き出ているようすや、プリキ缶の内壁に当たって水の滴り落ちるようすを見ることが出来ます。

同様に、エンジン内部の油の流れや、燃料電池内部で水素と酸素の反応により生成された水の流れ、金属バルブ内部の樹脂製シール部分の変形、植物中の水の動きなどが検査できるようになります。中性子でこれだけ鮮明な動画を撮影したのは、世界で初めて^(注1)です。

今後の展望

高感度、高精細な中性子カラー I.I.TM は、中性子CT（コンピュータ断層撮影）や中性子回折用の2次元検出器など、中性子エネルギーの違いを利用した材料識別や新エネルギーの分野、あるいは生命科学や地球科学などの分野からも期待されています。

更に、最近稼働を始めた大型の加速器J-PARCや世界中の中性子源への適応など、施設や検査対象に合わせた改良を進め、検査精度の向上による製品品質の向上に貢献していきたいと考えています。

文献

- 日塔光一, ほか. カラーイメージンテンシファイア搭載X線検査装置. 東芝レビュー. 59, 10, 2004, p.51-54.
- Nittoh, K., et al. "New feature of the neutron color image intensifier". Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. 605, 1-2, 2009, p.107-110.
- 日塔光一, ほか. "濃縮ボロン反応膜を用いた中性子カラーイメージンテンシファイアの開発". 日本原子力学会2007年秋の大会 予稿集. 福岡, 2007-09, 日本原子力学会. p.97.

日塔 光一

電力・社会システム技術開発センター
機器・システム開発部主査