TOSHIBA
Leading Innovation >>>

中性子イメージインテンシファイアとインジケータ撮影による画質

矢作　満[1)]、小長井　主税[1)]、◎日塔　光一[2)]
[1)]：東芝電力検査サービス㈱
[2)]：東芝原子力エンジニアリングサービス㈱

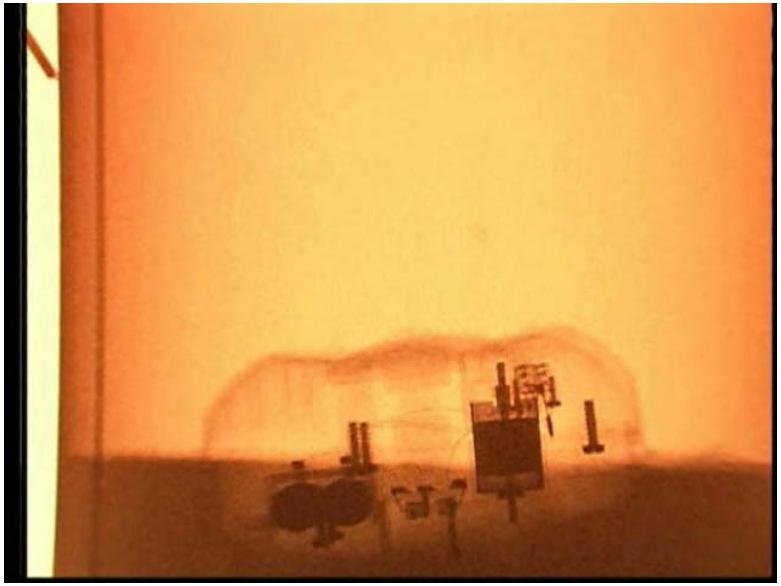
中性子ｲﾒｰｼﾞﾝｸﾞ専門研究会発表原稿

eco スタイル
東芝グループは、持続可能な
地球の未来に貢献します。

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

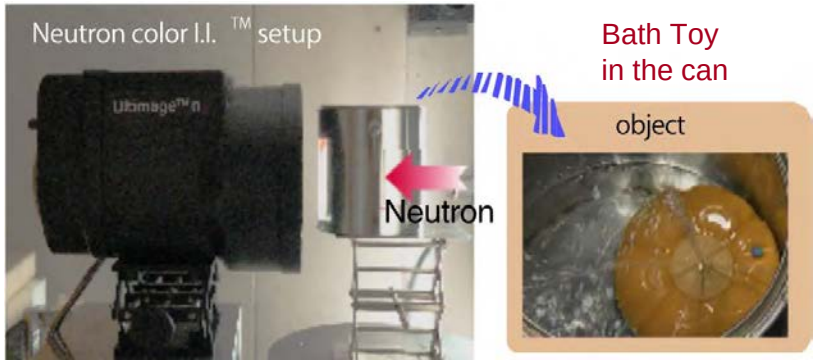
Difference between X-ray and Neutron Transmission Images

X-ray Color I.I.
X-ray (70kV)



Gd(n,γ)Type
Neutron

X-ray can visualize small metal parts inside the Bath Toy but no water droplets.
Neutron can clearly visualize water droplets are moving inside the can.



Neutron : JRR JRR-3M (Japan Research Reactor No.3 Modified)
Φ: 1.5×10^{8}n/ cm^2 / s

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

Construction of Neutron Color Image Intensifier (NCII)

Output screen Type

[o-1] High-intensity and high sensitivity Type
Phosphor = Y_2O_2S:Eu
Luminescence : Orange

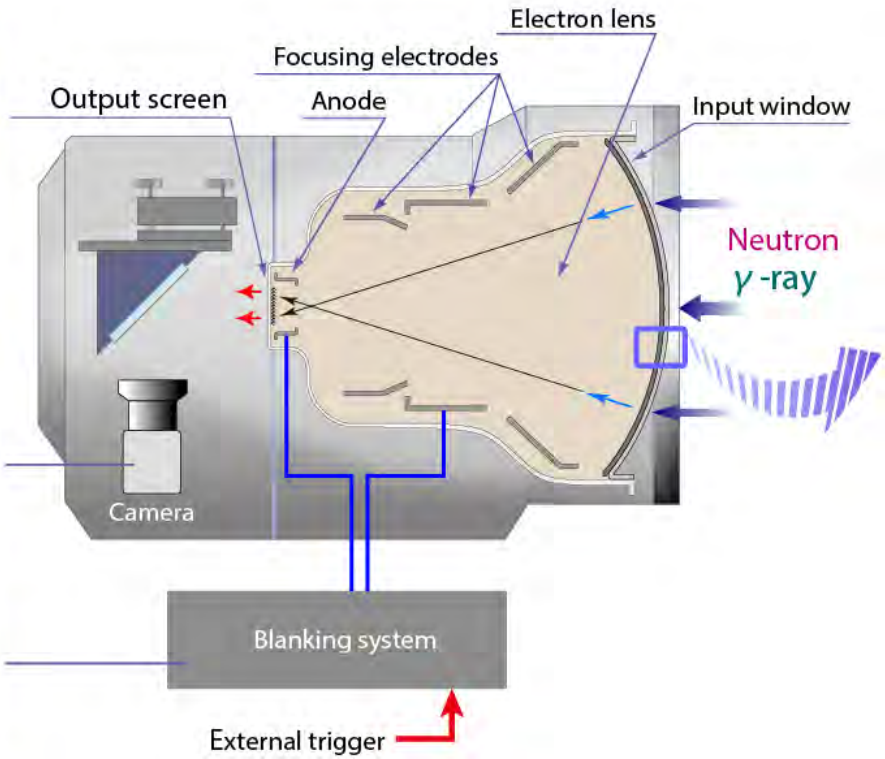
[o-2] Short-persistence Type
Phosphor = Y_2SiO_5:Ce
Luminescence : Blue

Camera & Sensing element

[c-1] High-resolution Camera
[c-2] High-speed Camera
[c-3] Motion video Camera
[c-4] Photomultiplier tube
etc.

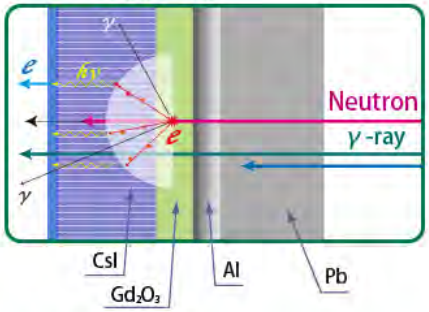
Blanking system

[b-1] With blanking system
[b-2] Without blanking system

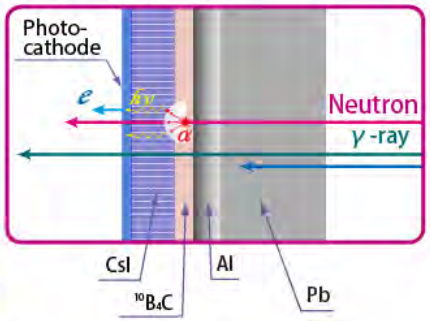


Input Neutron Converter Type

[i-1] Gd(n, γ) Type

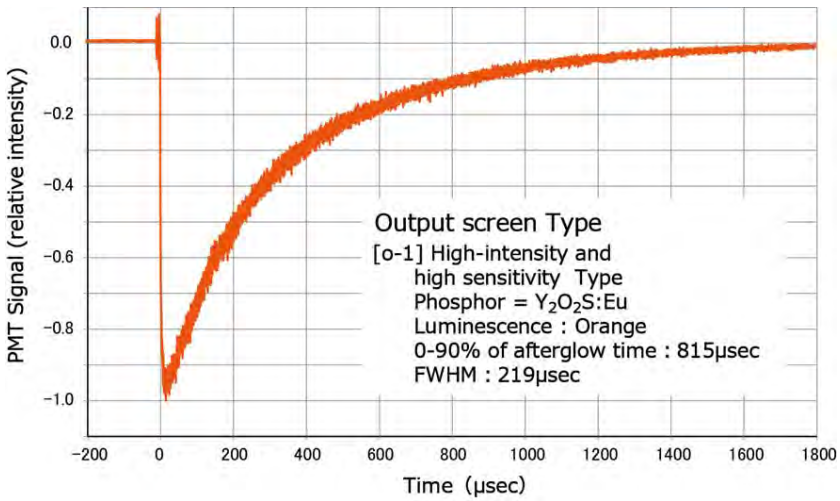


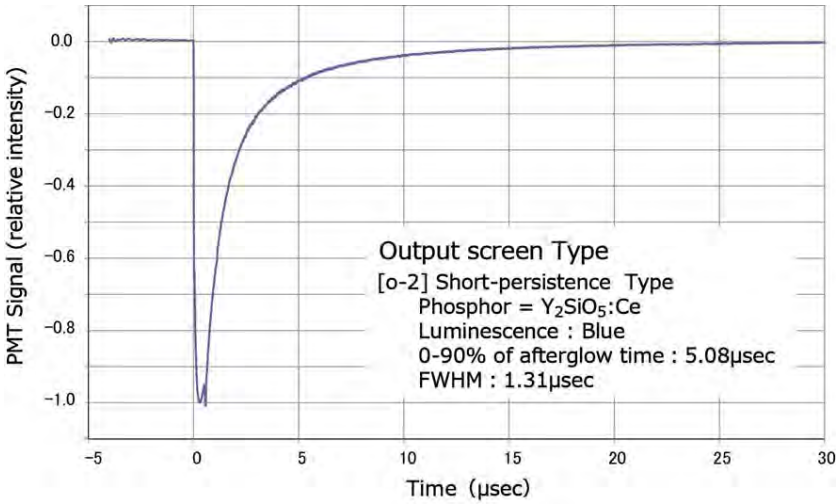
[i-2] $^{10}B(n, \alpha)$ Type



Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

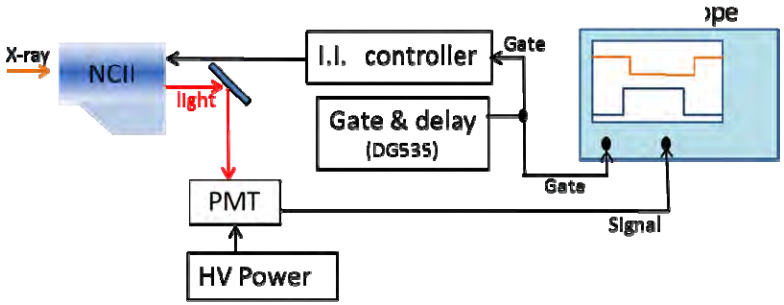
Measured at Hokkaido Univ. LINAC, X-Ray single pulse : ～10nsec



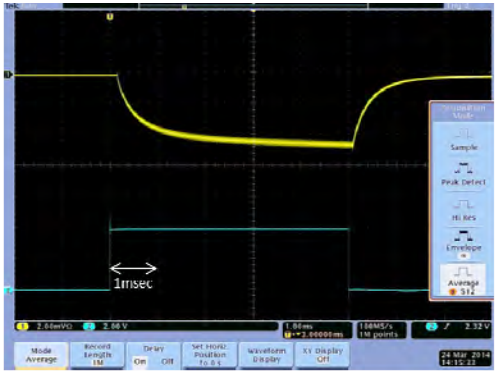


The response characteristic of the blanking system

Blanking measuring setup

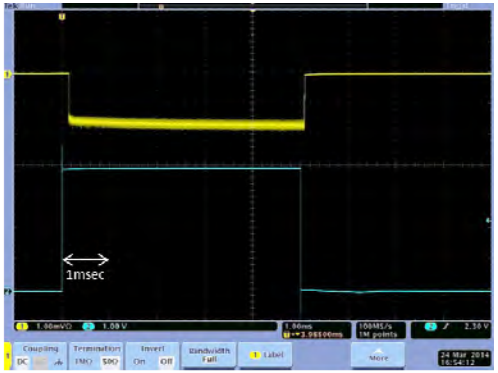


[i-1] Gd(n,γ) Type
[o-1] Phosphor = Y_2O_2S:Eu



X-ray: 60kVp, 0.3mA
PMT: HV=-750V
Blue: Input Gate Signal (5msec)
Yellow: Output PMT Signal

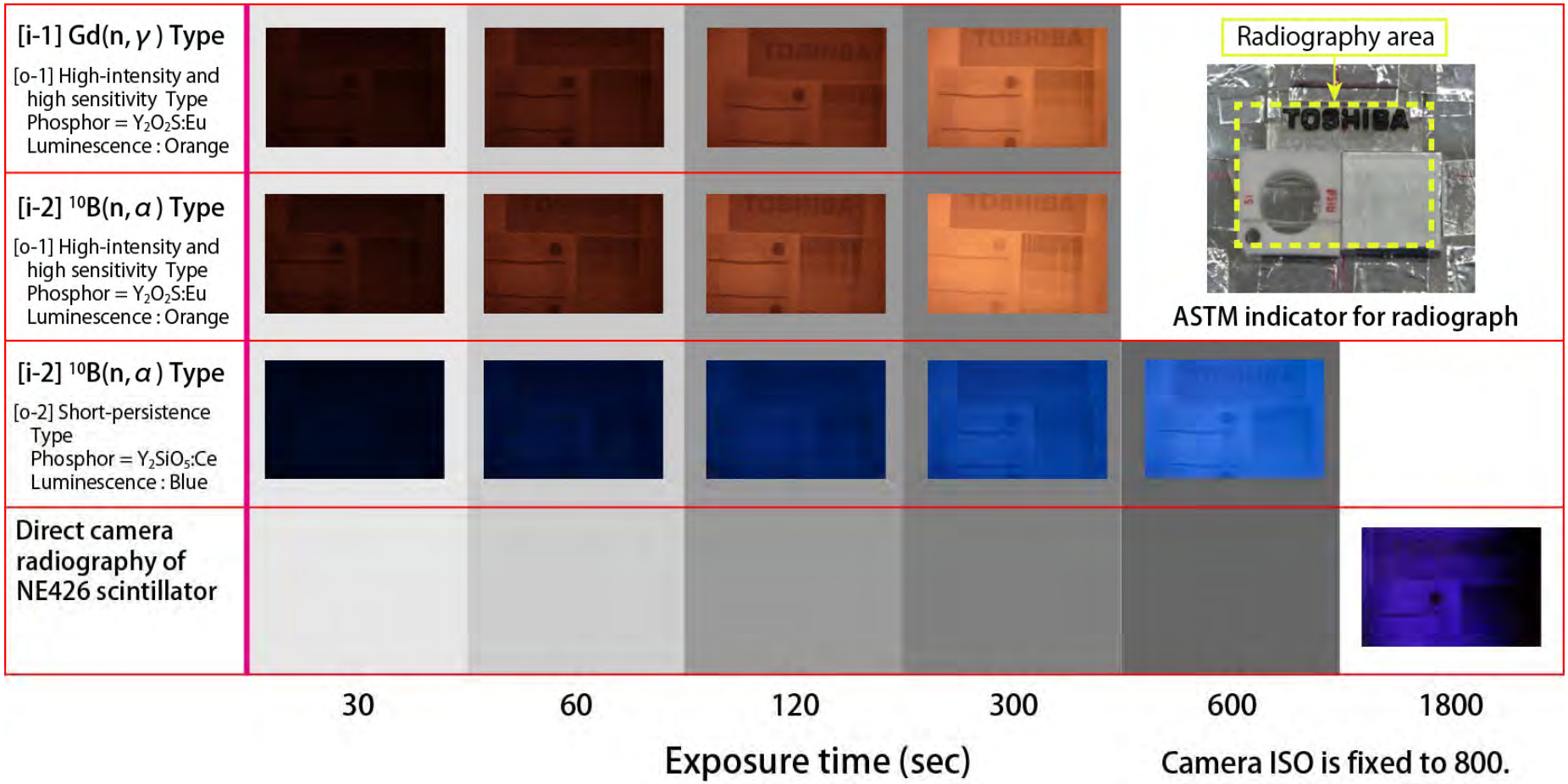
[i-2] $^{10}B(n,\alpha)$ Type
[o-2] Phosphor = Y_2SiO_5:Ce



X-ray: 81kVp, 0.1mA
PMT: HV=-800V
Blue: Input Gate Signal (5msec)
Yellow: Output PMT Signal

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

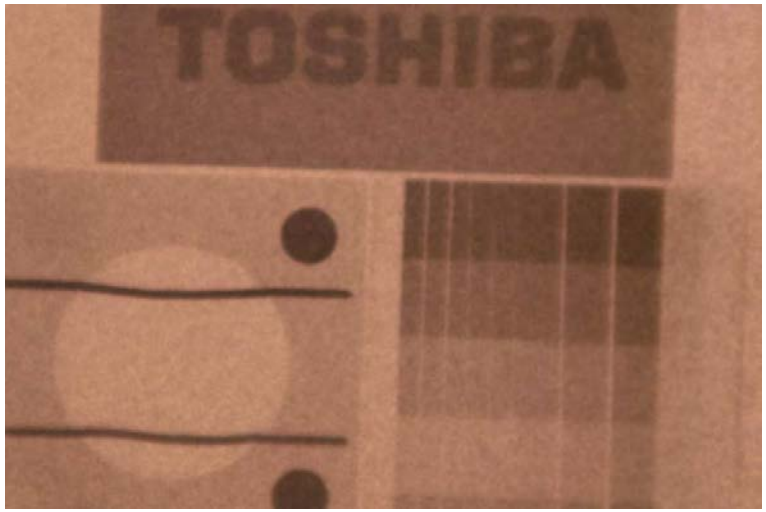
Relative sensitivity comparison of a NCIIs



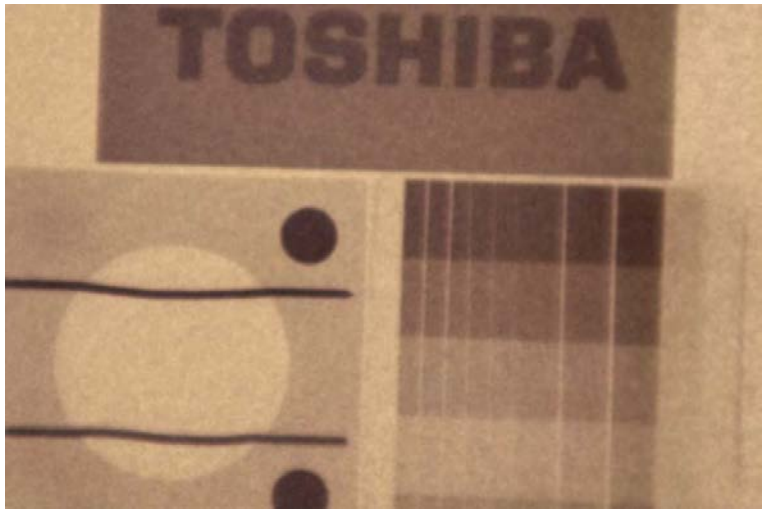
Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

Relative sensitivity comparison of a NCIIs

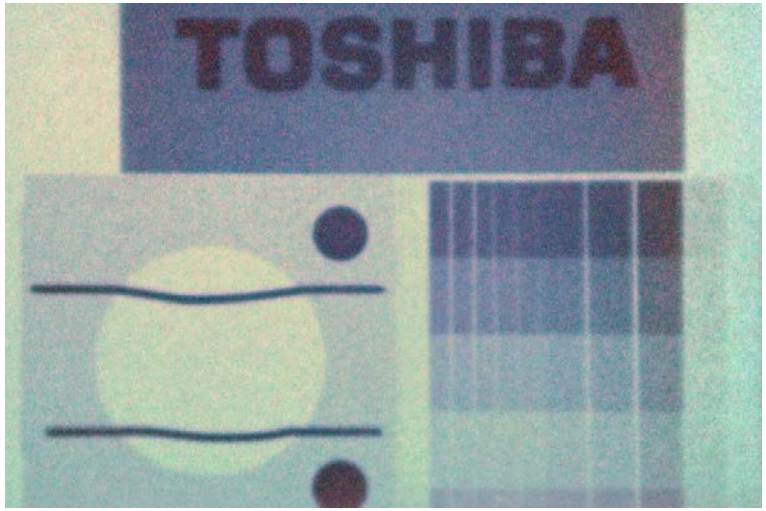
[i-1] Gd(n,γ), [o-1]Y_2O_2S:Eu, 120sec, ISO:800



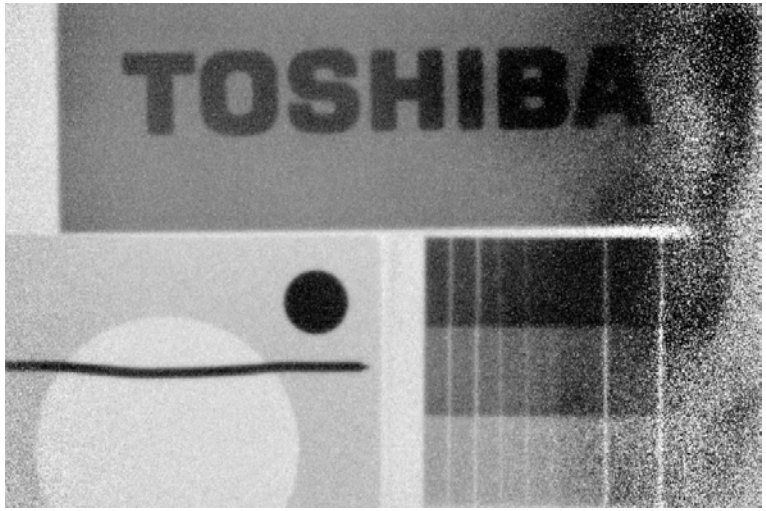
[i-2] ^{10}B(n,α), [o-1]Y_2O_2S:Eu, 120sec, ISO:800



[i-2] ^{10}B(n,α), [o-2]Y_2SiO_5:Ce, 600sec, ISO:1600



NE426 ZnS:^{6}LiF 1800sec ISO:800



Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

ASTM規格準拠インジケータによる撮影

- 1991年のASTM Designation: E545-91 (1991)“Standard Method for Determining Image Quality in Direct Neutron Radiographic Examination.” ★) では撮影された像質を評価するための標準的な方法が記載。この基準は、1975年のE545-75から改定。現在のE545-91は、1991年5月に承認され1991年7月に発行。
- 欧州では、1979年に、中性子ラジオグラフィのワーキンググループ(ユーラトム)が結成。グループの目的は核燃料の分野における中性子ラジオグラフィ法の標準化。1982年Riso-M-2356 Riso National Laboratory (1982) “ Standardization Activities of the Euratom Neutron Radiography Working Group “ を発表★★) 。
- RISO-M-2356の中で説明されている中性子ラジオグラフの像質判定に使われているビーム純度計(BPI)と感度計(SI)インジケータは、ASTM準拠と記載。
- **さまざまな中性子照射環境の中で測定した結果について共通の基準で評価する目的**。
- **評価の基準は、基本的に撮像媒体としてフィルムを使用**。照射された**フィルムの黒化濃度**を読み取り求めている。

- 中性子カラーI.I.を用い、中性子ラジオグラフィ法で撮影するに当たり、上記規格のASTMに準拠したビーム純度計(BPI)と感度計(SI)インジケータを用いて同様に評価する。
- 但し中性子カラーI.I.のデジタル画像の処理については記載されていないため、フィルム撮影した結果と比較し判断する。

★)ASTM Designation: E545-91 (1991)“Standard Method for Determining Image Quality in Direct Neutron Radiographic Examination.”
★★)RISO-M-2356 Riso National Laboratory (1982) “Standardization Activities of the Euratom Neutron Radiography Working Group”

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

ビーム純度インジケータ（BPI）

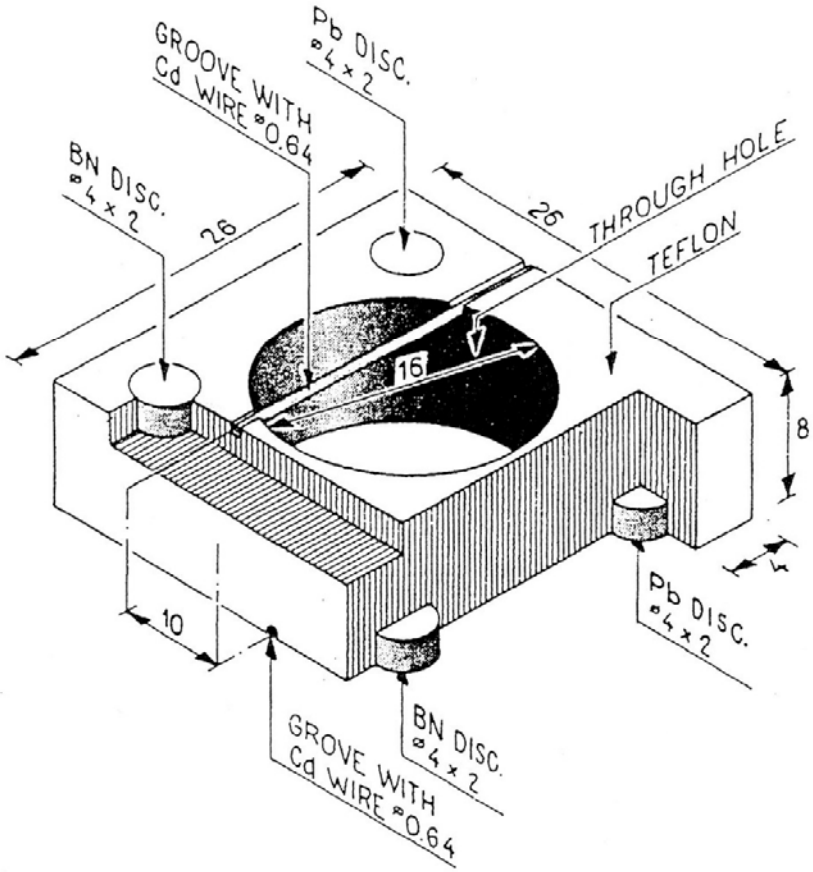


Fig. 1. ASTM (revised) Beam Purity Indicator - BPI

図1 ASTM（改定版）ビーム純度計－BPI

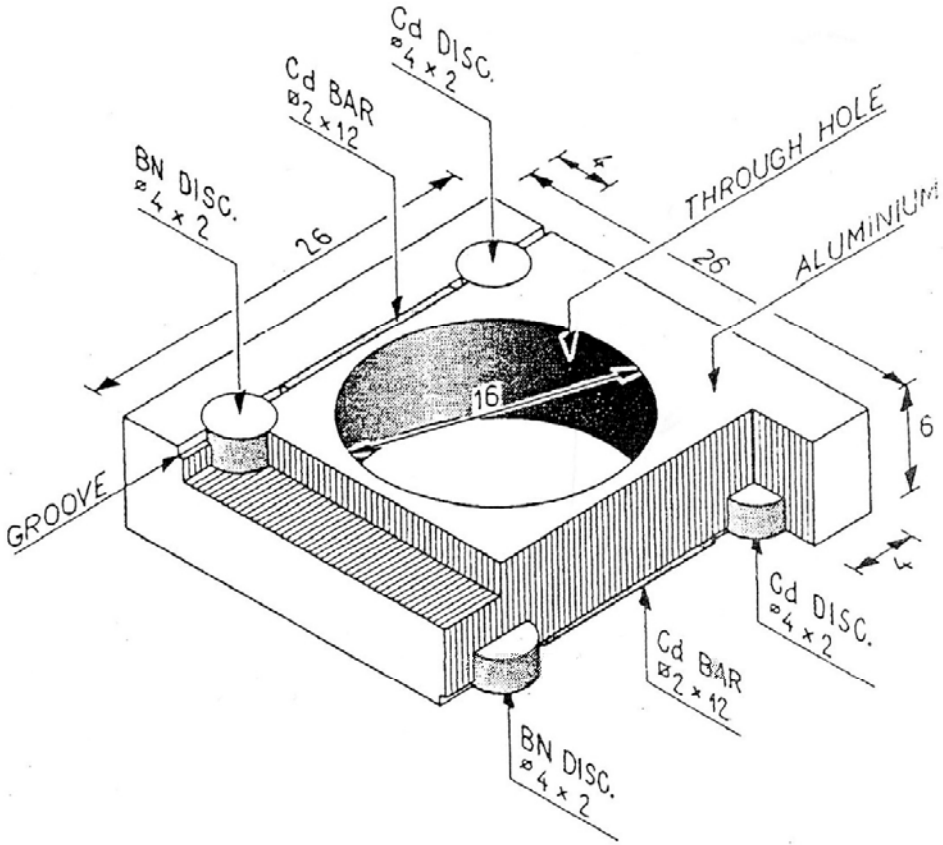


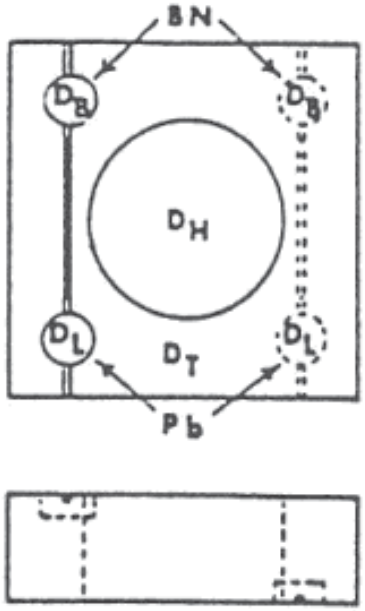
Fig. 2. Beam Purity Indicator Fuel - BPI-F

図2 ビーム純度計燃料－BPI-F

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

照射寄与および感度レベルの決定

(a)BPIインジケータ



Beam Purity Indicator

① 有効な熱中性子割合(NC) :
$NC=(D_H-(\text{highest } D_B+\Delta D_L))/D_H \times 100$

② 有効な散乱中性子割合(S) :
$S=(\Delta D_B/D_H) \times 100$

③ 有効ガンマ線割合(γ) :
$\gamma=(D_T-\text{lowest } D_L)/(D_H) \times 100$

④ 有効電子対生成割合(P) :
$P=(\Delta D_L/D_H) \times 100$

ここでD パラメーターの定義はTABLE 1 で与えられる。

TABLE 1 Definitions of *D* Parameters

D_B :窒化ホウ素円板の像によって測定したフィルム濃度。
D_L :鉛円板の像によって測定したフィルム濃度。
D_H :BPI の中で空孔の中心で測定したフィルム濃度。
D_T :ポリ四塩化エチレンの像によって測定したフィルム濃度。
ΔD_L :D_L 値の間の濃度差
ΔD_B :2つのD_B の値の間の濃度差。

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

感度インジケータ（SI）

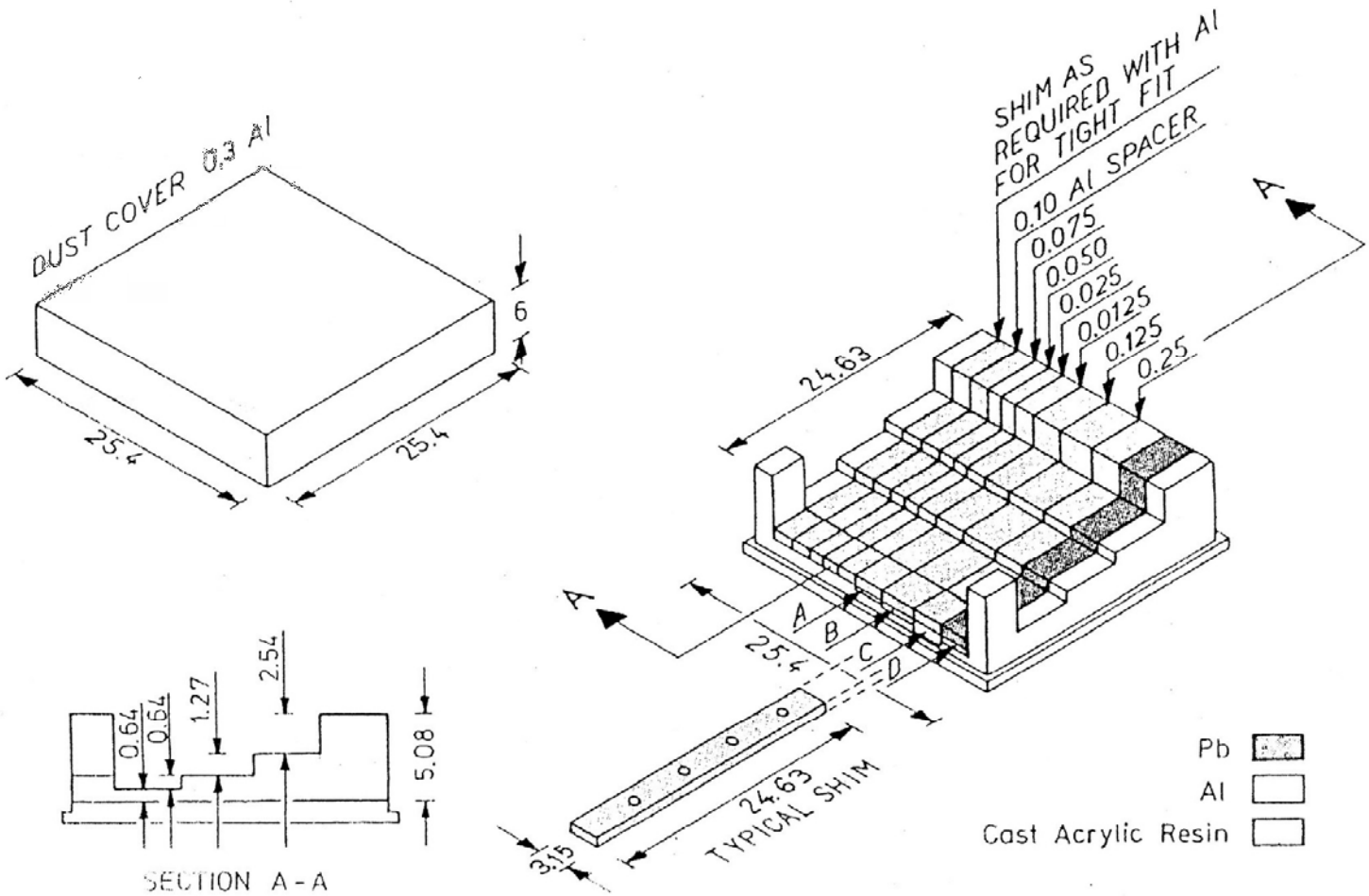


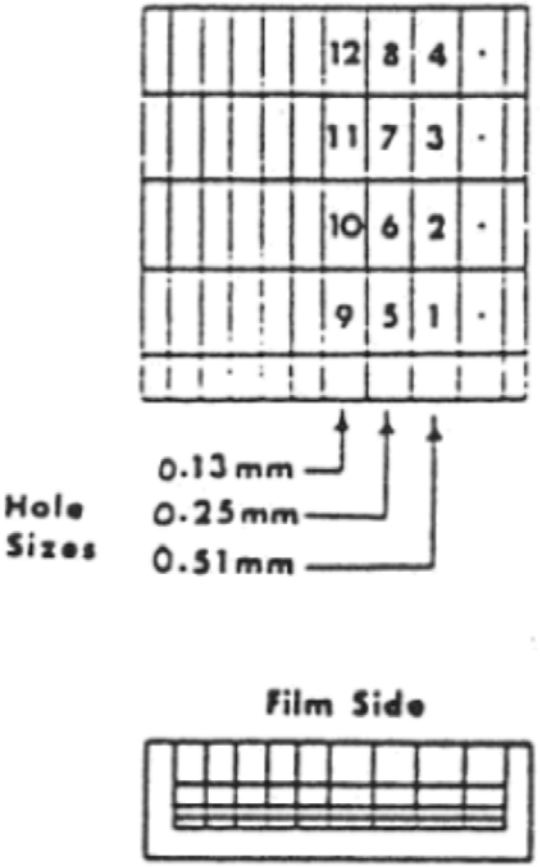
Fig. 3. ASTM (revised) Sensitivity Indicator - SI

3 ASTM（改定版）感度計－SI

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

感度(SI)インジケータの評価

(b)SIインジケータ



Hの決定

Value of *H*[A]	Hole Size, mm	Absorber Thickness, mm
1	0.51	0.64
2	0.51	1.27
3	0.51	2.54
4	0.51	5.08
5	0.25	0.64
6	0.25	1.27
7	0.25	2.54
8	0.25	5.08
9	0.13	0.64
10	0.13	1.27
11	0.13	2.54
12	0.13	5.08

[A] The value of *H* reported is the largest consecutive value that is visible in the image.

Gの決定

Value of G [A]	Gap Size, mm
1	0.25
2	0.13
3	0.10
4	0.076
5	0.051
6	0.025
7	0.013

[A] The value of G reported is the smallest gap that can be seen at all absorber thicknesses.

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

中性子ラジオグラフィ・カテゴリー

Category	NC	H	G	S	γ	P
I[A]	65	6	6	5	3	3
II[A]	60	6	6	6	4	4
III[A]	55	5	5	7	5	5
IV	50	4	5	8	6	6
V	45	3	5	9	7	7

[A] For Categories I, II, and III, the 0.25-mm hole must be visible at all lead thicknesses.

NC：有効な熱中性子割合（BPIインジケータより求める）
H：目視可能な空孔からレベルを求める（SIインジケータより求める）
G：目視可能なギャップ幅から解像度を求める（SIインジケータより求める）
S：有効な散乱中性子割合（BPIインジケータより求める）
γ：有効ガンマ線割合（BPIインジケータより求める）
P：有効電子対生成割合（BPIインジケータより求める）

◆**評価の基準は、基本的に撮像媒体としてフィルムを使用**。照射された**フィルムの黒化濃度**を読み取り求めている。

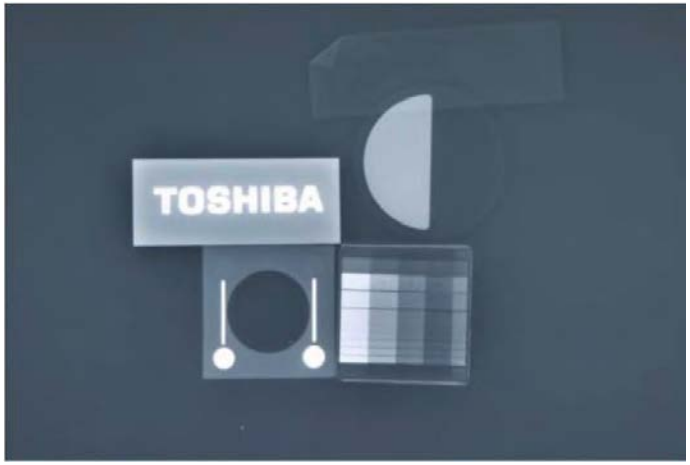
Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

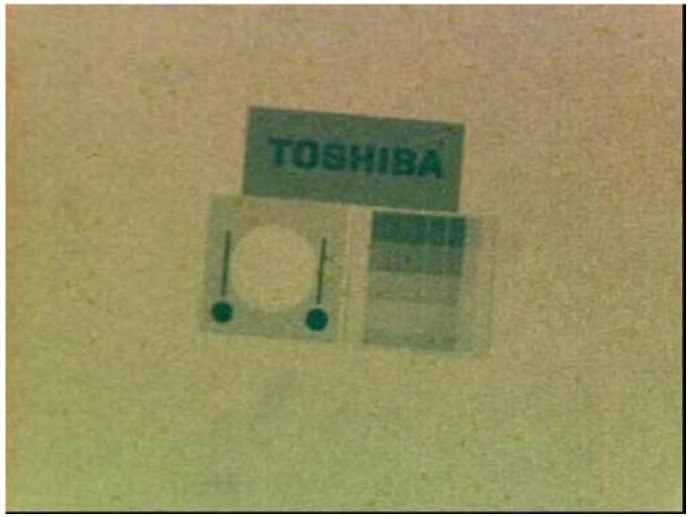
インジケータ使用の注意点（内容の抜粋）

- 別段の定めがない限り、放射線のビームの方向は、フィルム面にできるだけ垂直にする。
- 熱中性子エネルギーに応答するコンバージョン・スクリーンを用い、指定された像質レベル仕様を満たすラジオグラフィ画像にする。
- 撮影するラジオグラフィは、ビーム純度インジケータ(BPI) および感度インジケータ(SI) を含むように配慮する。2つのインジケータは、フィルム照射領域の任意の縁から少なくとも25.4mm(1インチ) 以上に位置する。
- インジケータはフィルムに対して平行の方向に並べ、出来るだけフィルムに接近して配置する。
- ラジオグラフィ設備の各フィルム、日付、ラジオグラフィ番号および部品の識別を確認する。この識別はフィルム像中に記録する。
- フィルム濃度を透過濃度計を使用して測定する。濃度計は濃度単位で± 0.04 の精度で、± 0.02の再現性があるものを利用する。
- ビーム純度インジケータ中のカドミウム棒の像を視覚的に比較する。 像鮮鋭度の明白な差は、中性子のコリメーションを決めるL/D 比が低いと考えられる。ここで示すコリメータとは中性子源から撮影サンプルまでの間に設置するもので、一般にはほぼ平行な中性子成分のみを切り出して照射する目的で散乱してくる中性子成分を削減するものである。その性能は、コリメータの長さをL とし、中性子源側の開口径をD としてL/D 比で表され、この値が大きいほど中性子束が揃った成分が多くなり、画像の解像度が良くなるとされている。

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

フィルム法撮影結果との比較





フィルム撮影データのデジタル輝度値
(住重試験検査(株)サイクロトロン加速器中性子源)

File name	①D_B	②D_B	③D_H	④D_L	⑤D_T	⑥D_L
6374	0.00	0.00	178.76	132.21	145.75	142.06
6375	0.00	0.00	181.33	135.13	150.34	145.64
6376	0.00	0.00	184.11	139.31	153.80	149.22

File name	ΔD_L	ΔD_B	NC	S	γ	P
6374	9.85	0.00	94.5	0.00	4.8	5.5
6375	10.51	0.00	94.2	0.00	5.5	5.8
6376	9.91	0.00	94.6	0.00	5.2	5.4

中性子カラーI.I.™6 インチモード撮影**エンハンス処理**結果のデジタル輝度値

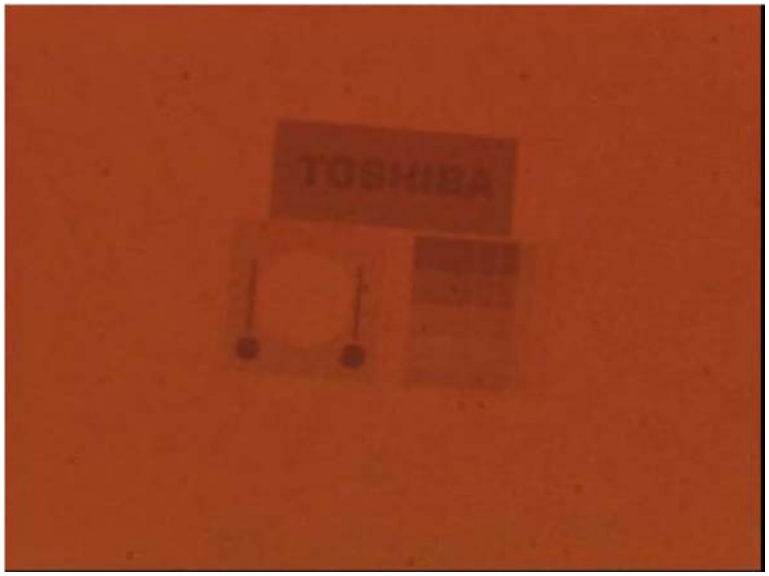
File name	①D_B	②D_B	③D_H	④D_L	⑤D_T	⑥D_L
134937	40.79	41.60	100.95	85.26	88.36	87.85
R	14.97	15.74	108.38	87.96	92.46	91.66
G	54.16	54.74	102.72	88.29	90.84	90.51
B	39.71	40.74	71.10	61.53	63.72	62.91

File name	ΔD_L	ΔD_B	NC	S	γ	P
134937	2.59	0.81	56.2	0.8	1.8	2.6
R	3.70	0.77	82.1	0.7	2.4	3.4
G	2.22	0.58	44.5	0.6	1.4	2.2
B	1.38	1.03	40.8	1.4	2.1	1.9

中性子カラーI.I.™はフィルム法と同等に評価できることを確認。

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

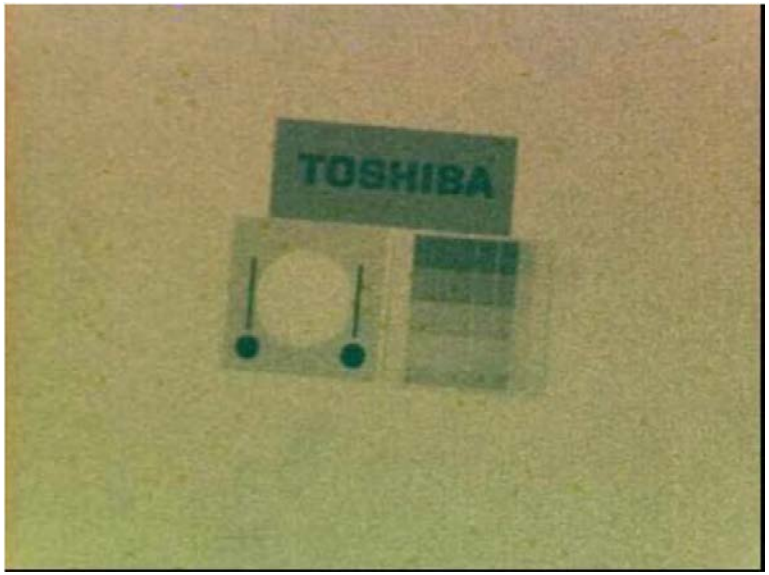
デジタル処理によるパラメータの変化



中性子カラーI.I.TM6 インチモード撮影結果のデジタル輝度値
(住重試験検査(株)サイクロトロン加速器中性子源)

File name	①D_B	②D_B	③D_H	④D_L	⑤D_T	⑥D_L
134923	60.30	60.01	87.84	80.91	82.02	83.42
R	108.24	108.57	156.32	146.10	148.03	148.27
G	42.59	42.87	63.88	57.68	58.86	58.95
B	24.07	24.36	29.43	27.82	28.18	28.32

File name	ΔD_L	ΔD_B	NC	S	γ	P
134923	2.51	0.29	28.8	0.3	−0.2	2.9
R	2.17	0.33	29.2	0.2	0.5	1.4
G	1.27	0.28	30.9	0.4	0.9	2.0
B	0.50	0.29	15.5	1.0	0.4	1.7



中性子カラーI.I.TM6 インチモード撮影**エンハンス処理**結果のデジタル輝度値

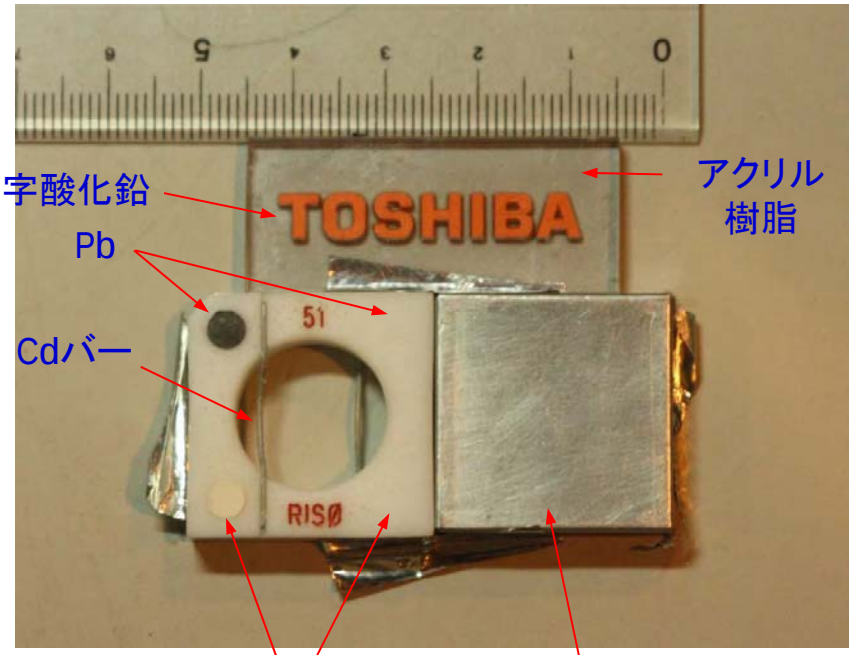
File name	①D_B	②D_B	③D_H	④D_L	⑤D_T	⑥D_L
134937	40.79	41.60	100.95	85.26	88.36	87.85
R	14.97	15.74	108.38	87.96	92.46	91.66
G	54.16	54.74	102.72	88.29	90.84	90.51
B	39.71	40.74	71.10	61.53	63.72	62.91

File name	ΔD_L	ΔD_B	NC	S	γ	P
134937	2.59	0.81	56.2	0.8	1.8	2.6
R	3.70	0.77	82.1	0.7	2.4	3.4
G	2.22	0.58	44.5	0.6	1.4	2.2
B	1.38	1.03	40.8	1.4	2.1	1.9

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

中性子インジケータの撮影（4インチモード）

インジケータ外観



文字酸化鉛
Pb
Cdバー
アクリル
樹脂
窒化ホウ素
（BN)
アルミ容器内のSIインジケータ
アクリルと鉛のステップウェッジ

撮影結果

カメラ積算60フレームを500
枚積算（約17秒撮影）

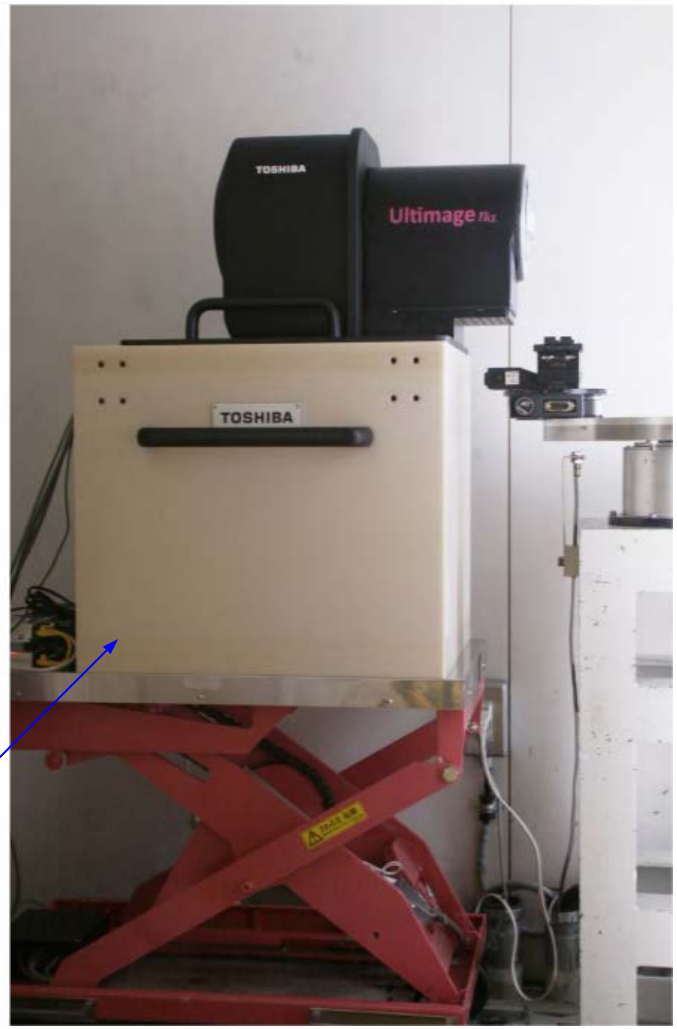
MUSASIポート中性子フラックス10^5~10^6オーダーで
撮影を確認（25μmの線のギャップが見えている）

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

JRR3　TNRF7Rによる撮影

(a) 9 インチ

(b) 4 インチ

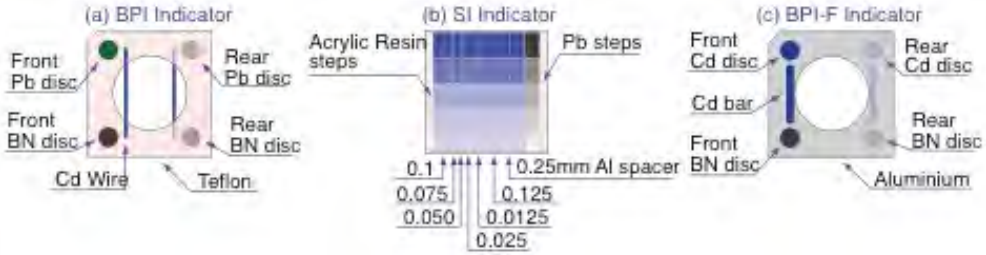


ボロン入りポリエチレンによる中性子遮蔽材

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

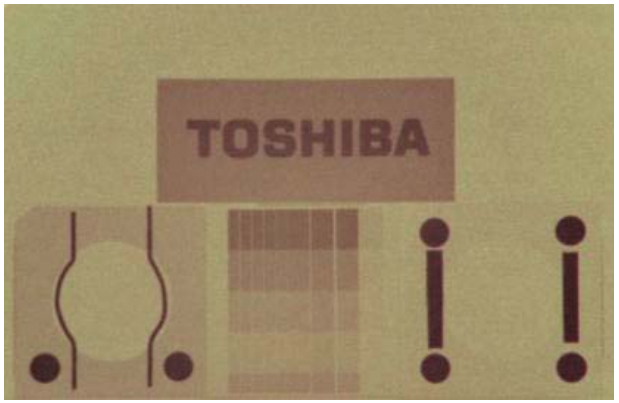
JRR3-TNRF7RによるASTM規格インジケータ撮影

ASTM規格
インジケータ

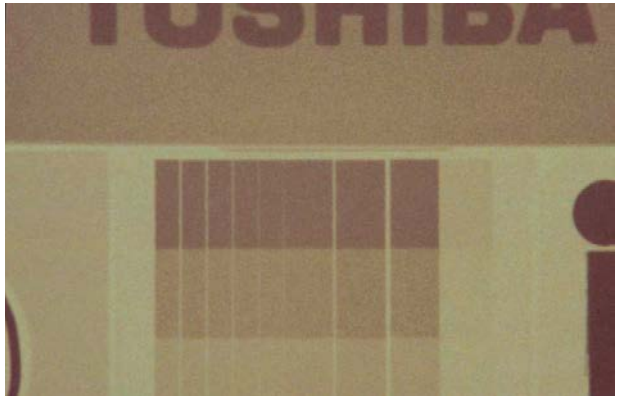


(a) ASTM 規格 RISO インジケータ 外観

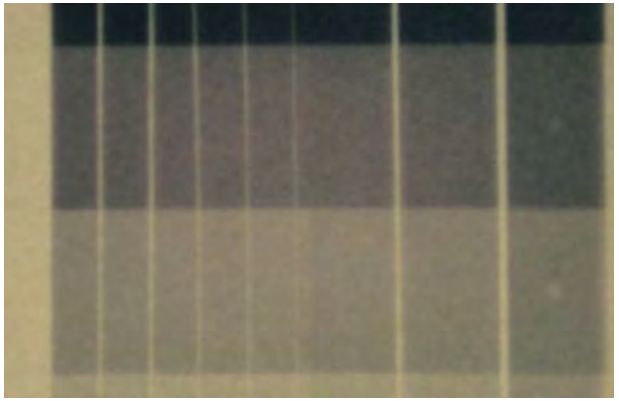
(b) 4 インチ視野撮影結果



(c) 電子レンズにて 2 インチ視野拡大結果

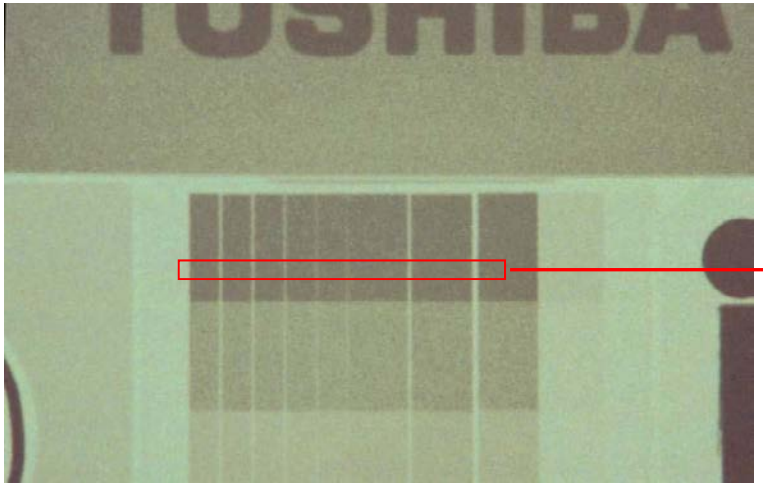


(c) 光学レンズにて視野拡大結果



Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

ASTM規格SIインジケータの撮影結果



中性子ラジオグラフィでI.I.を用いて0.0125mmの確認は世界初（高分解能確認）

左から0.1,0.75,0.05,0.025,**0.0125**,　0.125,0.25 **mm**

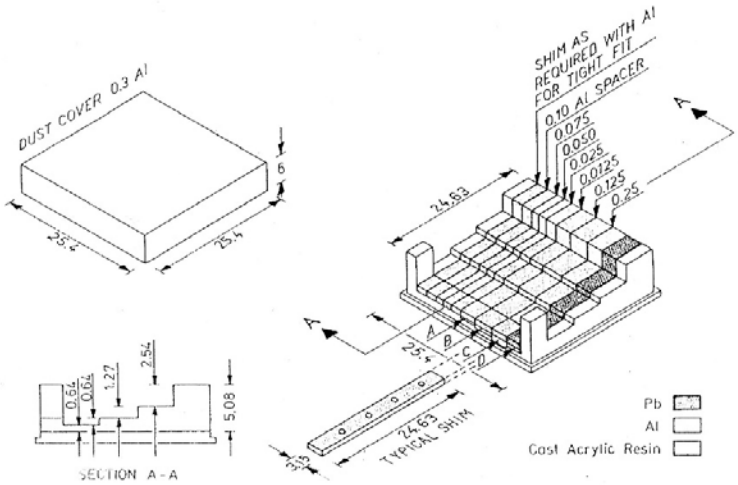
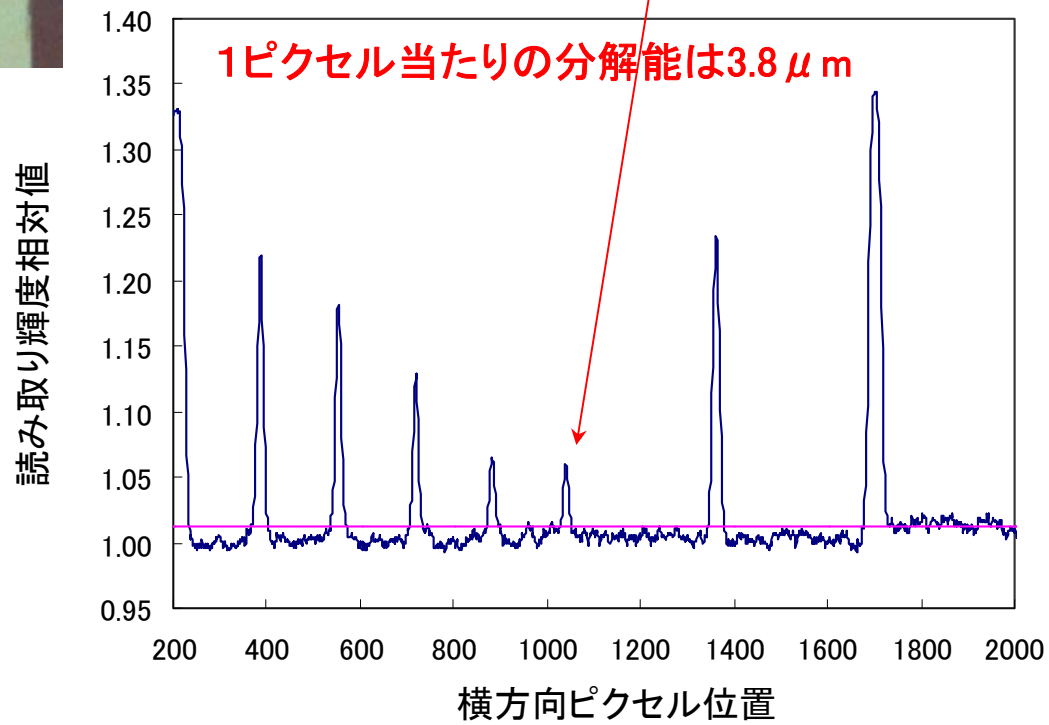


Fig. 3. ASTM (revised) Sensitivity Indicator - SI

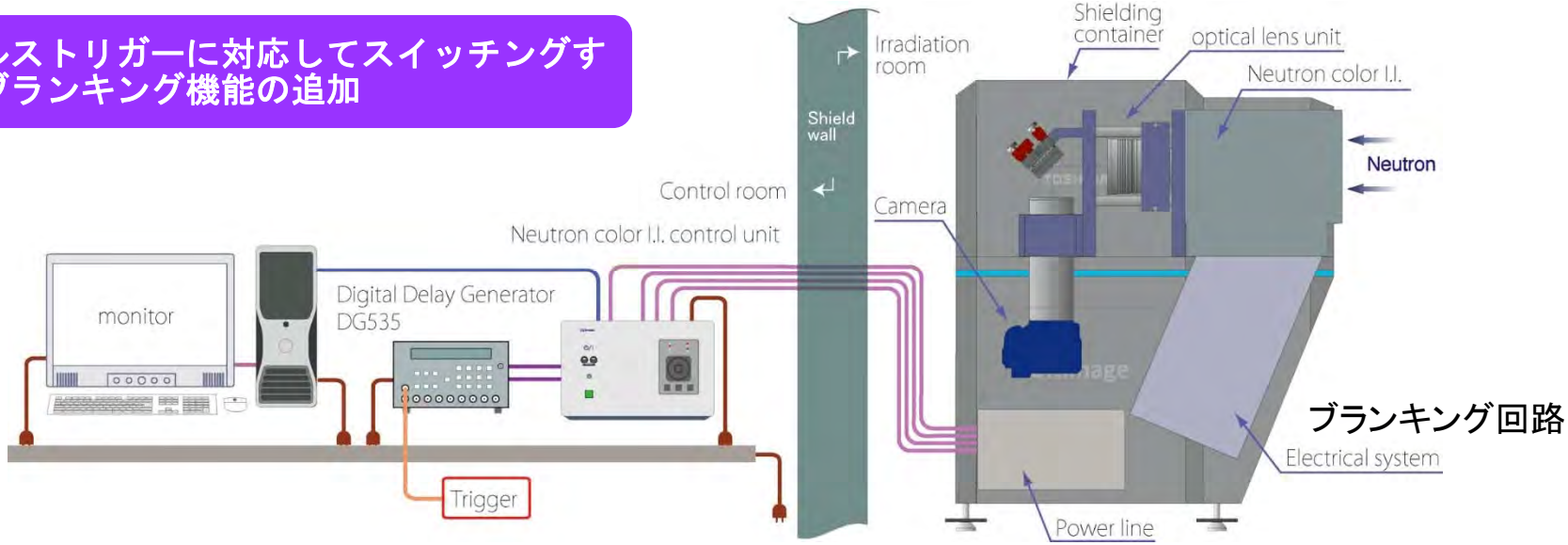
図3　ASTM（改定版）感度計－SI

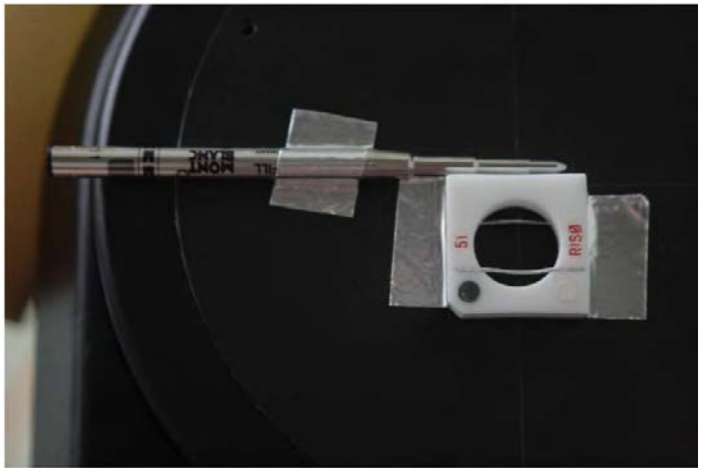


Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

北大パルス中性子源を用いた撮影

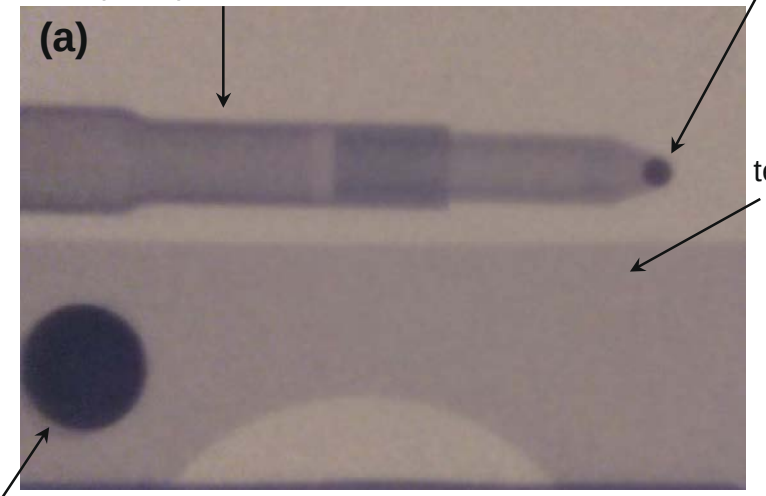
パルストリガーに対応してスイッチングするブランキング機能の追加

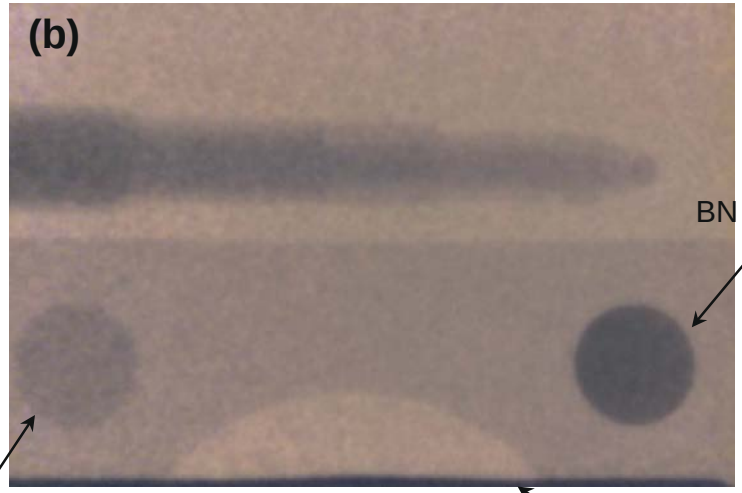


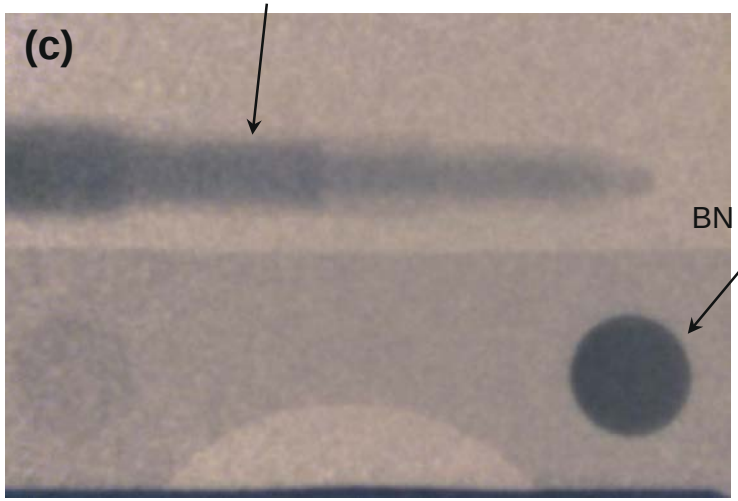


Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

北大パルス中性子源を用いたBPIインジケータ撮影







(a)
Ut00468～00469
C=0msec
D=1msec
ISO=1250
SS=10min

(b)
Ut00481～00483
C=0.2msec
D=17msec
ISO=1250
SS=10min

C= I.I. blanking period time of trigger point
D= I.I. operation time
ISO= camera sensitivity
SS= camera open time

(c)
Ut00472～00475
C=1msec
D=17msec
ISO=1250
SS=10min

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

まとめ

- 中性子カラーI.I.TMのデジタル画像とフィルム撮影との結果、有効な熱中性子割合(NC)の値は他の有効な散乱中性子割合(S)や有効なガンマ線割合(γ)と比べても高い値となっており、γ線による影響が少なく熱中性子で撮影できていること、ASTM規格インジケータで評価できることを確認した。
- デジタル画像のコントラストを調整して輝度データを読み取るとNCの値は異なる。この状況でもγの値はフィルムの結果と比較して低いことから中性子カラーI.I.TMはγ線による影響を少なく撮影できるが、デジタルでの画像処理の指標が今後必要と思われる。
- 中性子カラーI.I.TMに2600万画素以上で3.8μm/pixcelの高精細カメラで撮影した結果、フィルムと同様にSIインジケータ12.5μmの線が目視で確認できている。5000万画素を超えるカメラで更に視野を拡大して高精細に撮影できることが期待される。但し、フィルム同様コリメータのL/Dに依存する。
- パルス中性子源では中性子カラーI.I.TMのブランキング機能でBPIインジケータを用いて高エネルギーX線と中性子の画像を照射時間タイミングを変化させて異なる画像を撮影できることを確認した。フィルムではできない新たな評価が可能である。
- 加速器中性子源など熱中性子より高いエネルギーでの指標となるインジケータが必要と考える。

Copyright 2014, Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.

TOSHIBA

Leading Innovation >>>