

Material recognition using 950 keV X-band Linac and suppression of scattered X-ray

Kiwoo Lee[#], Takuya Natsui, Shunsuke Hirai, Mitsuru Uesaka
 Department of nuclear engineering and management, The University of Tokyo
 22-2 Shirane-shirakata, Tokai, Naka Ibaraki 319-1188

Abstract

High energy X-ray generated from a linear accelerator can penetrate a thick target or the target which has high atomic number. They are expected to be X-ray source for the inspection system of containers or baggage. 950 keV X-band Linac we have developed is compact size and has maximum energy 950 keV which is right for the baggage inspection system in the airport. We have developed the 2-fold scintillator array line detector to obtain two images, one is low energy X-ray image the other is high energy X-ray image, during one irradiation. With two images, the new information such as atomic number of target can be derived by numerical calculation.

We provided the concealment to hide the target material, iron and lead inside and took the X-ray image. Two metals were distinguished through the pixel value calculation. However there are several problems on the images such as noise image. The upgrade version of 2-fold scintillator detector is planned to manufacture suppressing the scattered X-ray which is considered as the main factor of noise image.

950 keV X-band Linac を用いた物質識別実験及び散乱 X 線対策

1. はじめに

従来の検査用 X 線は主に X 線管か放射性物質から得られることが多く、従って最大 500 keV までの X 線しか得られなかったのが事実である。しかし、加速器の開発によって、イオンの加速エネルギーが増加し、得られる制動複写 X 線も高くなってきた。コンテナ検査用の加速器の場合、10 MeV 以下まで加速する物が現在活用されている[1, 2]。しかも小型のシステムが次々と開発され、今や非破壊検査、治療検査用医療機器などにも既存の物の提案として積極的に導入されている。

我々も 950 keV X-band 加速器を開発してイメージングや X 線量計算に使っている。特に 2 色 X 線による物質識別分野に 950 keV 加速器を X 線源として導入し、空港などの手荷物検査装置として開発した。

ここではターゲットとして鉛と鉄を用い、それらを識別する実験を行った。撮影法は二つにして一つ目は投影画像撮影で、二つ目は CT 画像撮影である。二つの撮影結果から物質識別計算を行い、色付けをして画像再処理した。しかし、実験結果として得られた画像から問題点を発見したのでそれらの問題や解決策について述べた。

2. 実験装置

2.1 950 keV X-band 加速器

X 線源として使った 950 keV X 線は 1 MeV 以下のエネルギーということで空港などの公共場所でも放射線取扱者がいなくても使える。そして X-band なので加速管や magnetron のサイズが小さくなり、全体的なシステムが小型になるメリットも持っている[3]。

表 1: 950 keV X-ray の詳細

Resonant frequency	X-band 9.4 GHz
RF source	250 kW magnetron
Cavity type	On-axis coupling
Shunt impedance	~ 70 MW/m
Gun type	Thermionic, Diode, 20 keV
Tube length	~ 30 cm

2.2 2 段シンチレータアレイ

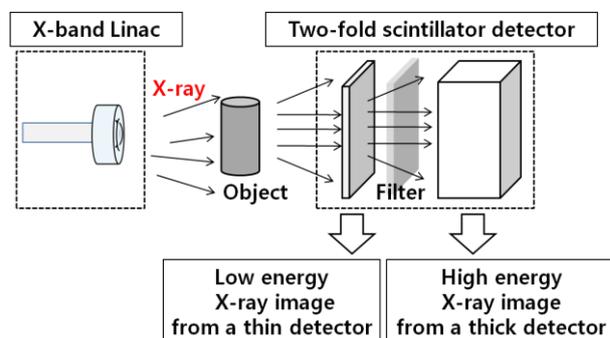


図 1: 2 段シンチレータアレイの構造

従来の 2 色 X 線検査装置では 2 回に X 線照射が行われる。二つの投影画像が必要なのでどうしても 2 回の X 線照射が必要である。しかし、我々はディテクター部を開発して、1 回の X 線照射でも二つの画像（低エネルギー画像と高エネルギー画像）が得

[#] kiwoo@nuclear.jp

られるようにした。そのポイントは受光部を 2 段にすること。つまり薄い CsI シンチレータを前に、厚い CdWO₄ シンチレータを後ろに設置して薄いシンチレータでは低エネルギー X 線を吸収し、厚いシンチレータでは CsI を抜いてきた高エネルギー X 線を吸収するようにする。これで 1 回の X 線照射でも二つの画像が得られるのである。

最適なシンチレータの厚さや構成物を決めるため、monte carlo シミュレーションや数値計算を行った[4]。

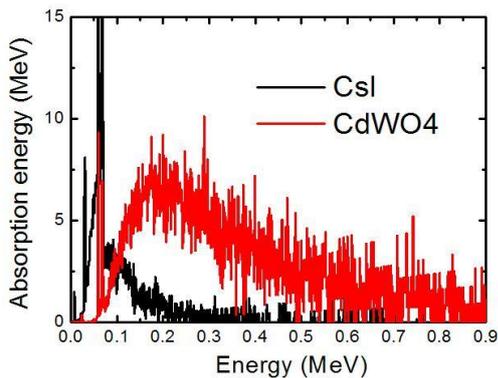


図 2：各シンチレータに吸収される X 線のエネルギー分布

表 2：Monte carlo シミュレーション結果

Simulation results	
Mean energy difference between CsI and CdWO ₄ (keV)	251-74=176 keV
Counts difference between CsI and CdWO ₄	7481-6695=786

計算結果、各シンチレータに吸収される平均エネルギーの差は 176 keV が出了。この差が大きいということはつまり低エネルギー画像と高エネルギー画像がちゃんと撮れてるということなので好ましい結果である。後、Count 数の差が小さいということは各シンチレータに入る X 線の数がほぼ同じということで片方に X 線が入り過ぎないことなのでよい結果だと思われる。シミュレーション結果に基づいて 2 種類の実験を行った。



(a)

隠蔽材の厚さ (mm)	鉄の原子番号 (26) と実験値との差	鉛の原子番号 (82) と実験値との差
5	3.41	2.35
10	4.76	2.58
15	4.06	3.22
20	7.02	3.31
25	9.99	4.34

3. 実験とその結果

3.1 投影画像撮影実験

1) 実験体系とタケット

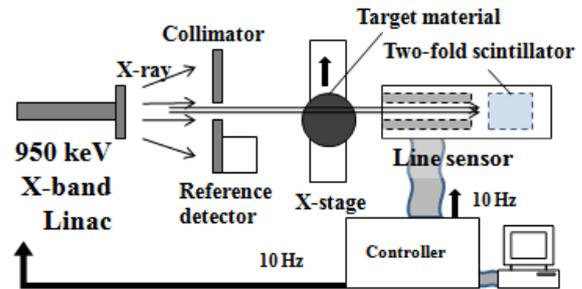


図 3：投影画像撮影実験体系

図 3 に実験体系を示す。このシステムは 10 Hz で動いていてラインセンサーコントローラから出る 10 Hz のパルスがラインセンサーや加速器の方に入ってちょうど X 線が照射されるタイミングで撮影を行うようにしている。タケットとしては鉄の鉛を用意し、それらを隠蔽材である Polyethylene や Polyvinyl chloride 容器に入れ、撮影を行った。X ステージはトリガが入ってないので単独で動いている。照射速度を決めるため、正方形のタケットを撮影して画像上の形も正方形になる時の速度で X ステージを動かすようにした。

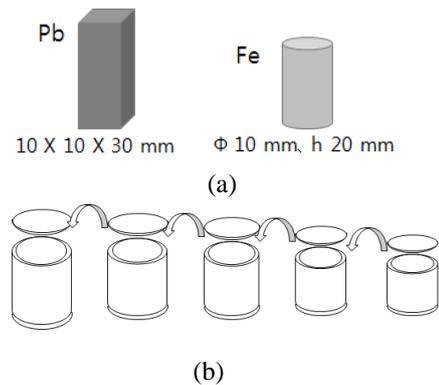


図 4. タケット物質(鉄と鉛)(a)と 隠蔽材 (b)

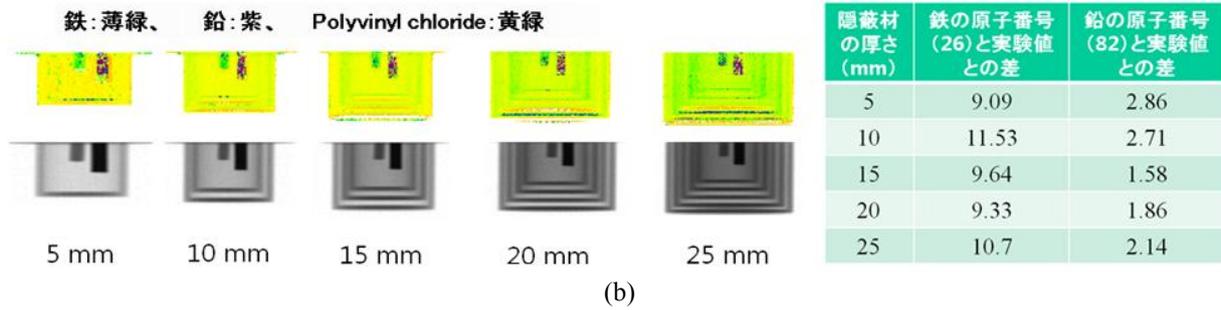


図 5. 鉄と鉛をそれぞれ Polyethylene (a)と Polyvinyl chloride (b) 隠蔽材に入れた時の画像再構成結果

2) 実験結果

図 5 鉛と鉄試料を隠蔽材の中に入れて撮った画像とその画像処理結果である。各試料の原子番号もしくは実効原子番号にあたり色を付けて表せた。

polyethylene 隠蔽材の場合、鉄は原子番号の実験値と理論値が 3 ~ 10 の差を見せたのに比べ、鉛は 2 ~ 5 の差を見せた。Polyvinyl chloride 隠蔽材の場合、鉄と鉛それぞれ 9 ~ 12 と 1 ~ 3 の原子番号の理論値と実験値差を見せた。この差は隠蔽材の厚さが厚くなるほどそして材質の密度が高くなるほど大きくなっている[5]。

3.2 CT 画像撮影実験

1) 実験体系とタケット

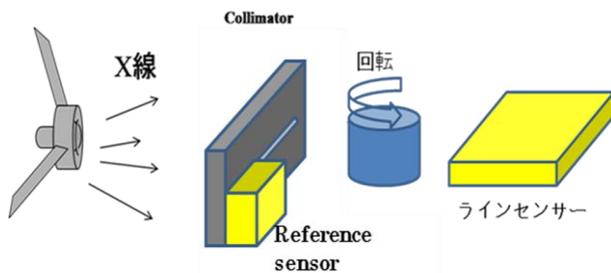


図 6 : CT 画像撮影実験体系

CT 実験を行うため、既存のラインセンサーを横に倒してタケットの断面を撮るようにした。それに合わせてパララックスセンサーも横に倒して上下方向のコリメータの役割をした。このシステムも 10 Hz で動かしていて X 線が照射される間、タケットを 180 度まで回転して 1 度ずつ 180 枚の断面画像を採取した。特に今回はラインセンサー中にあるコリメータを取り出してアライメントの間違いによる画像の異変をなくした。これでもし画像上問題が発生した場合、アライメントによる影響は考えなくてもよい。タケットとしてはまず 1 回目は鉄、鉛、アルミ、そ

して乾電池を用意した。乾電池は中身の構造を見るのができることを期待して撮って見た。2 回目は 1 回目より多少原子番号が低い水とアセトン、メラーミンを用意した。これは少ない原子番号の差も CT 画像上識別できるか試すためである。

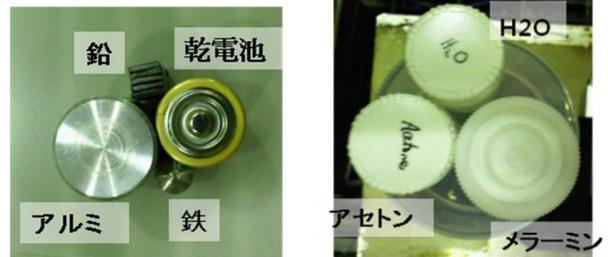
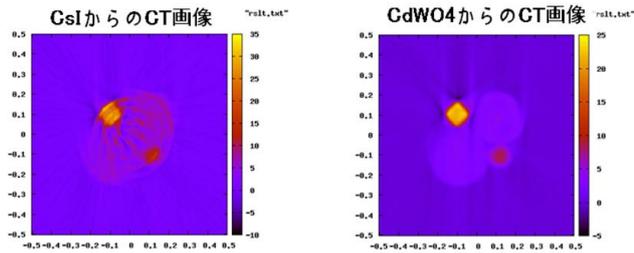


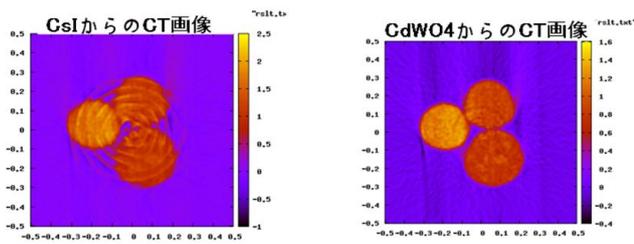
図 7 : CT 実験に用いられたタケット

2) 実験結果

図 8 は各タケットを CsI や CdWO₄ シンチレータディテクターで撮った画像である。CdWO₄ で撮った CT 画像はタケットの断面の形がそのまま現れていて、しかも CT 値も原子番号によって違うことが分かる。ただ乾電池の中身の場合、その形が分かり難くて詳細な構造が分からない。これはピクセルのサイズが 2 mm で大きいため画像再処理の際、少ない断面画像のずれでも CT 画像上大きく影響するからだと思われる。CsI の場合、画像の中心からちょうど 4 チャンネルごと円形の線のような物が現れる。これらの原因は元々の断面画像にあり、またそんな断面画像が撮られた理由は CsI シンチレータ部にある。CsI の厚さは 0.5 mm で、とても取り扱いが難しい。それで少し大きめの 4 チャンネルずつセットにして使っていてその間にスリットとかはない。なので光ったシンチレータの光が隣のチャンネルに行ってしまうと 4 チャンネルのパターンを作ったと思われる。この問題の原因と対策については次の節で詳しく説明する。



(a)



(b)

図 8 : 1 回目(鉛、鉄、アルミ、乾電池)の各シンチレータの CT 画像(a)と 2 回目(水、アセトン、メラミン)の CT 画像(b)

4. 2 段シンチレータの改良

4.1 画素サイズの大きさ

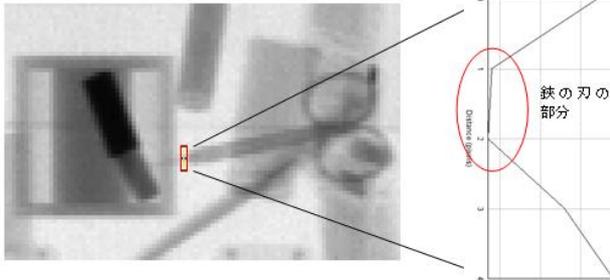


図 9 : 赤い部分の画像数値分析

まず優先する問題は画素サイズである。図 9 のように二つの画素にあたる実際の長さは 4 mm であり、1 画素あたり 2 mm を表現することになる。これは手荷物検査装置としては非常に大きいサイズであり、1 mm 以下まで押さえる必要がある。

4.2 CsI シンチレータの構成

次の問題は画素が 4 チャンネルずつ区切られて表れることである。結果、図 10 のように分解能が劣る画像になってしまう。この問題の原因は実際 4 チャンネルに分けられてる CsI シンチレータだと思われるので 1 チャンネルあたり 1 シンチレータの構造で新しい試作機の製作に入る予定である。

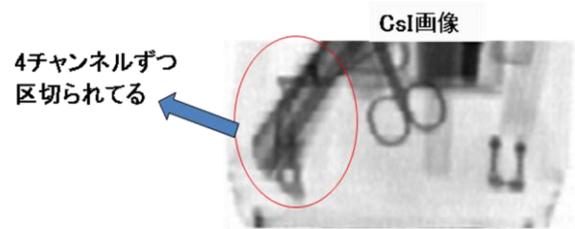


図 10 : CsI 部の構造の問題

4.3 CsI シンチレータの構成

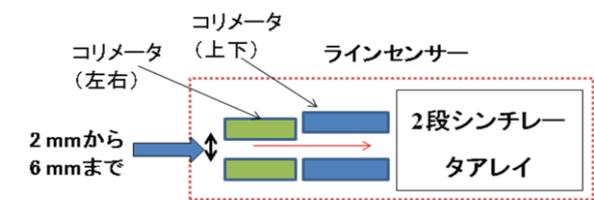


図 11 : コリメータの構造

コリメータの幅を従来 4 mm の最小値を 2 mm まで絞ることができる。こうすることによって散乱 X 線の除去ができると期待されてる。そして CT 撮影の場合は断面の幅は小さい方がもっと詳しく調べることができるので 4 mm より 2 mm にできるだけ小さくした。

参考文献

- [1] Ogorodnikov S, Petrunin V., "Processing of interlaced images in 4-10 MeV dual energy customs system for material recognition [J]" Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2002, 5(10): pp1-11.
- [2] Ch. Tang, et al., *Proc. of LINAC 2006*, Knoxville, Tennessee USA, TUP007
- [3] T. Yamamoto, et al., *Proc. of European Particle Accelerator Conference '06*, June 26 - 30, 2006, Edinburgh, Scotland, WEPCH182
- [4] K. Lee, et al., Design and experiment of dual-energy X-ray material recognition using a 950 keV X-band Linac, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, in press.
- [5] K. Lee, et al., 950 keV X-band Linac for material recognition using two-fold scintillator detector as a concept of dual-energy X-ray system, the 21st International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, Aug., 2010, Dallas, Texas, USA.