

†

第1章 70MeV陽子線によるイメージング実験

本実験は、千葉県稲毛にある放射線医療総合研究所(以下、放医研)にて行った。放医研にある加速器はサイクロトロンであり、加速器から放出された陽子線ビームは散乱体で拡大された後にワブラー電磁石によってビーム進行方向に垂直な面内に均一に広げられる。これはワブラー法と呼ばれ、2基の電磁石に位相が90度ずれた同一周波数の交流励磁電流を流すことで磁場を発生させ、互いの磁場の方向が直行することから荷電粒子ビームを円軌道に沿って高速で走査させる方法である。これにより、 $\pm 4\text{cm}$ の範囲で $\pm 5\%$ 以内の一様な分布のビームが得られる。放医研にあるワブラー電磁石の周期は $81.6 \pm 0.2\text{ms}$ である。

実験で使用したC8コースの外観を図1.2に示す。ターゲットポイントの上流約3mの所にワブラー電磁石が設置されている。

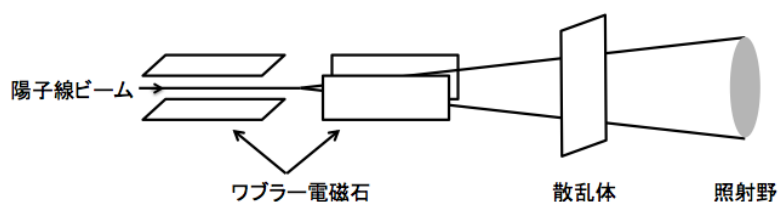


図 1.1 ワブラー法の原理



図 1.2 C8 コース [1]

1.1 実験装置

測定に使用した計測機器を、表 1.1 に示す。本実験では、被写体-シンチレータ間距離は 1.2 において——cm、1.3 において 2cm、シンチレータ-CCD カメラ間距離は——cm である。

名称	メーカー名	型番	その他 (大きさ等)
プラスチックシンチレータ	BICRON	BC408	100 × 100 × t5mm ³
CCD カメラ	BITRAN	BU-51LN	
ポリエチレン (減速材)	KDA	テストプレート	50 × 50 × t1mm ³ 50 × 50 × t3mm ³

表 1.1 使用した測定機器

1.2 反射材にゴアテックスを用いたときのイメージング

使用した陽子線は、70MeV、10nA である。陽子線の揺らぎ補正には、測定用シンチレータの被写体がない部分での発光量 (same) を用いた。

1.2.1 光量レンジ変換テーブル

雨具などに用いられるゴアテックスという白色の反射材を用いた場合の光量レンジ変換テーブルを図 1.3 に示す。白色反射材を選んだ理由として、白は光を全反射するため低レート照射でもシンチレータが十分な発光を示すと考えたためである。

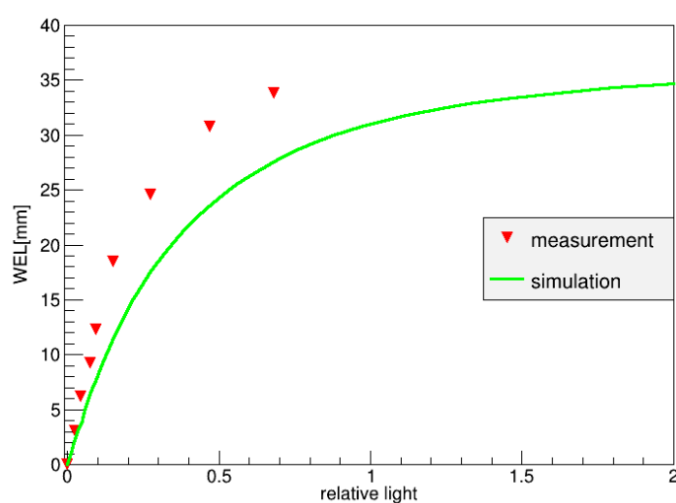


図 1.3 70MeV 陽子線による光量レンジ変換テーブル

赤で示したプロットは実測値であり、緑で示した曲線はシンチレータ内でのエネルギー損失をシミュレーションから求めた理論曲線である。実測値と理論曲線の差が大きくなった原因として、シンチレータ内での光の拡散が挙げられる。白色反射材を用いたためシンチレーション光が乱反射し各方向に広がってしまい、したがってファントム部分での発光が揺らぎ補正部にまで広がったため、結果として実際よりも補正の効果が強く効いたと考えられる。補正部の発光量は陽子線の揺らぎだけに依存するのであれば、減速材の厚みに関係なくほぼ一定の値をとるはずである。実際には減速材の厚みを増すごとに増えており、その差は最大で26%にも及んだ。これは、単に陽子線の揺らぎだけではない。実測から求めた近似式は次式となった。

$$\text{WEL}[mm] = 35.14 - 35.57 \times e^{(-\frac{RL}{0.2166})} \quad (1.1)$$

1.2.2 画像再構成

被写体には、アクリル円柱型容器の中に水と空気を封入したものを用いた (図 1.4)。



図 1.4 水と空気を含む円柱型の被写体

露光時間はワブラー周期の5倍である0.408秒とし、180度方向から360枚撮影した。CT撮影中は、回転ステージは秒速1.22度で回し続け、一枚当たりの被写体の回転は0.5度となるように設定した。計算時間を短縮するために、このうち120枚の投影データを間引きFBP法を用いて再構成を行った。結果を図1.5に示す。

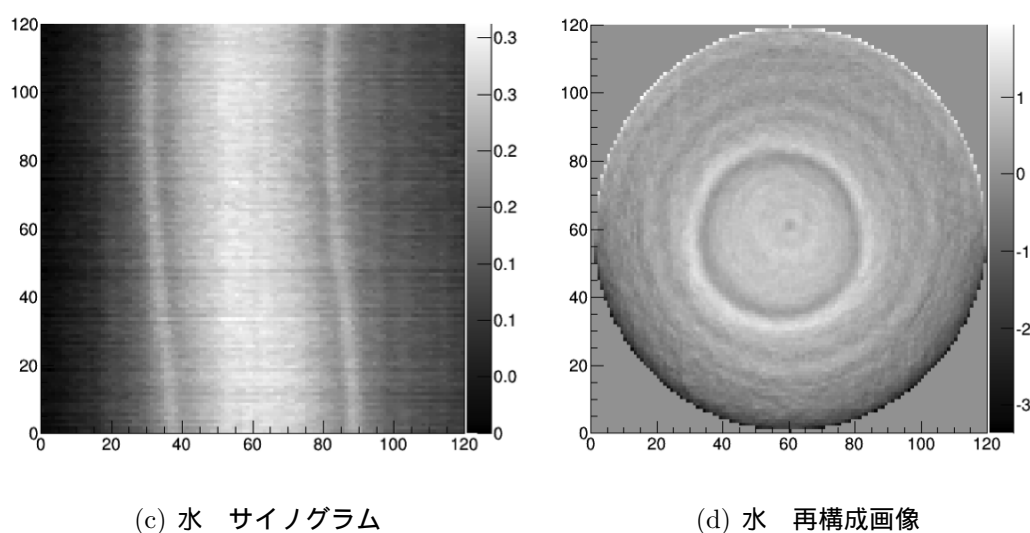
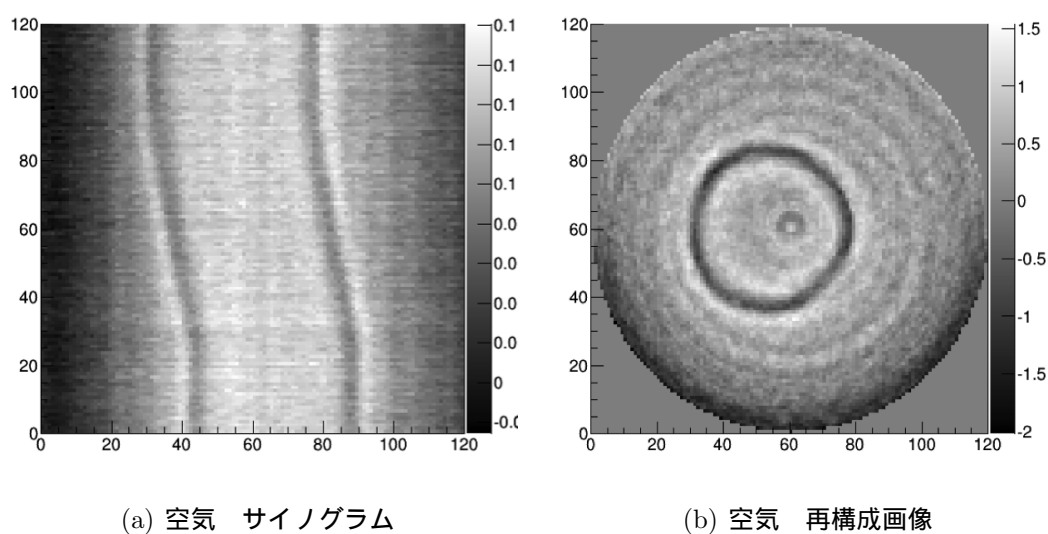


図 1.5 70MeV 陽子線による再構成画像

外側に見える黒い淵は被写体における陽子線多重クーロン散乱の影響であり、それは特に物質の境界面において顕著となる。画像が不鮮明であることの原因として、反射材において光が吸収されず乱反射したことが考えられる。

1.3 反射材に暗幕を用いたときのイメージング

前節では白色の反射材を用いたことにより得られた画像は不鮮明となった。この問題に対処するため、本節では反射材に暗幕を用いた。使用した陽子線は、70MeV、30nA である。

1.3.1 光量レンジ変換テーブル

—と同様の手法を用いて光量レンジ変換テーブルを作成した結果を図 1.6 に示す。

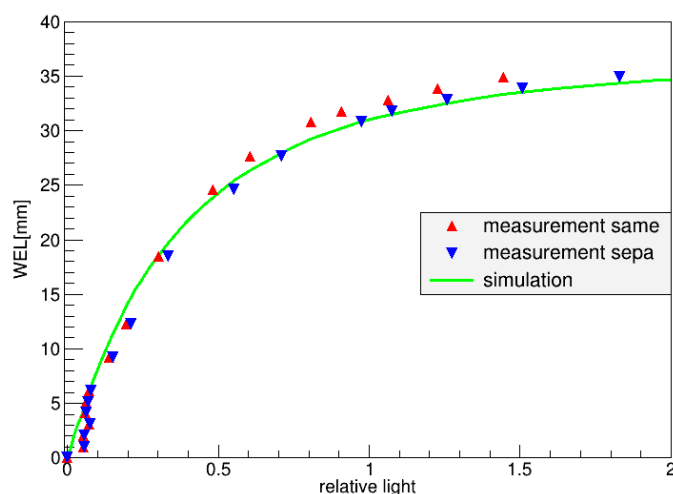


図 1.6 70MeV 陽子線による光量レンジ変換テーブル

これより求めた近似式は、

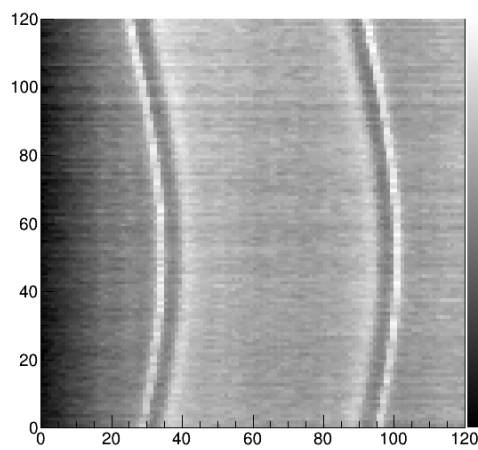
$$\text{WEL}[\text{mm}] = 36.32 - 37.07 \times e^{\left(-\frac{RL}{0.4335}\right)}; \text{same} \quad (1.2)$$

$$\text{WEL}[\text{mm}] = 35.51 - 36.11 \times e^{\left(-\frac{RL}{0.4722}\right)}; \text{sepa} \quad (1.3)$$

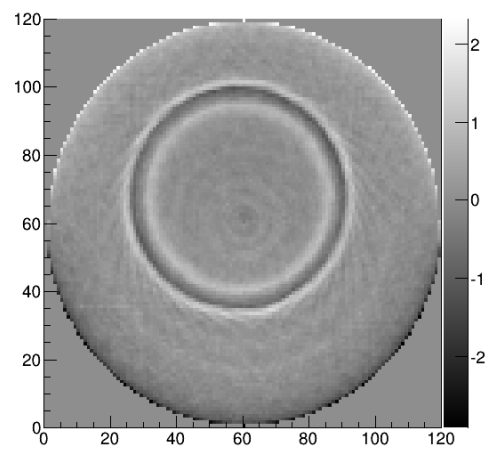
となった。

1.3.2 再構成

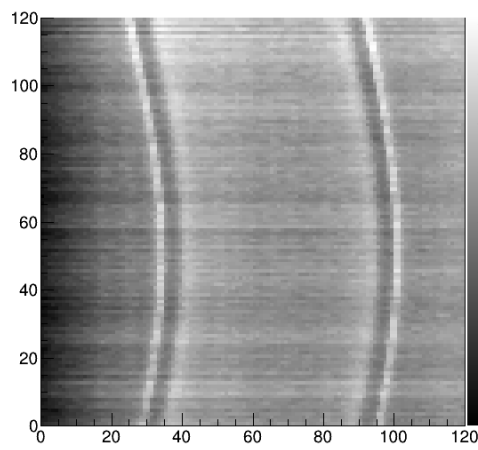
前節同様、被写体には、アクリル円柱型容器の中に水と空気を封入したものを用いた (図 1.4)。陽子線の揺らぎ補正方法を変えた 2 種類のサイノグラムと FBP 法による画像再構成結果を図 1.8、図 1.7 に示す。反射材にゴアテックスを用いた場合に比べ光量は半分以下に落ちたが、かなり鮮明な画像を得ることが出来た。サイノグラムに見られる横縞は、陽子線の揺らぎによるものである。“same”の方が“sepa”に比べて横縞が少なくなる理由として、“same”は補正部分に測定用シンチレータの一部を用いるため、補正部分と被写体部分で陽子線に対する感度が等しくなるが、“sepa”は測定用シンチレータとは別の種類のプラスチックシンチレータを独立させて用いているため、発光感度が異なることが考えられる。



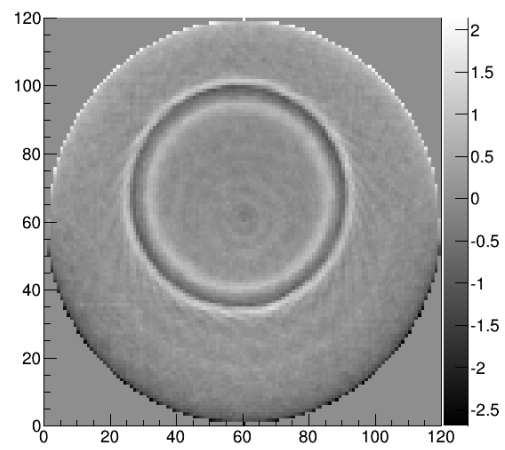
(a) サイノグラム same



(b) 再構成画像 same



(c) サイノグラム sepa



(d) 再構成画像 sepa

図 1.7 70MeV 陽子線による空気ファントムの再構成画像

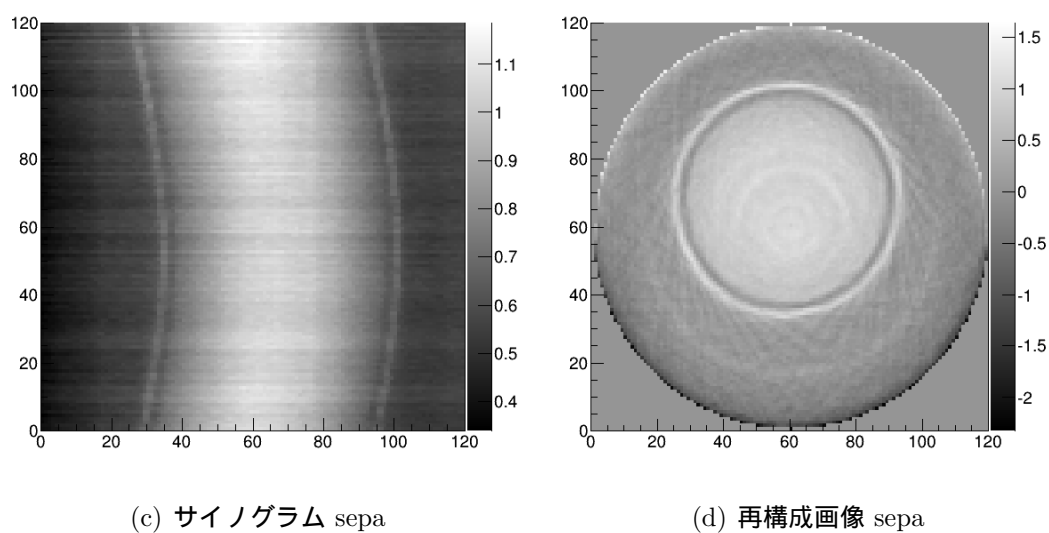
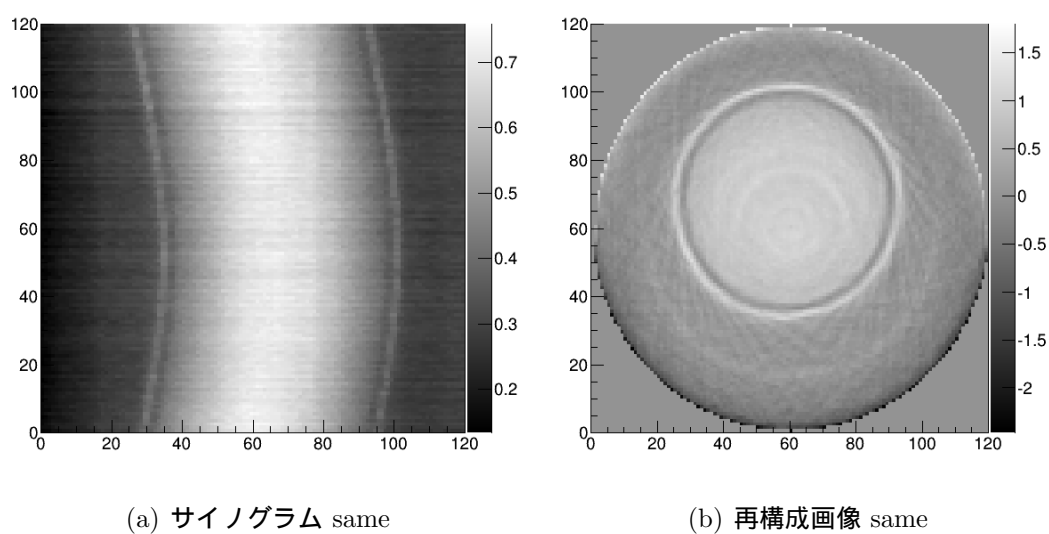


図 1.8 70MeV 陽子線による水ファントムの再構成画像

1.3.3 複雑なファントムの再構成

次に空間分解能を調べるために、図 1.9 に示した複雑なファントムを使用した。このファントムの組成は C_2H_3Cl 、密度は $1.25g/cm^3$ である。再構成結果を図 1.11 に示す。ここで、前節の結果から陽子線揺らぎ補正には“same”を用いた。

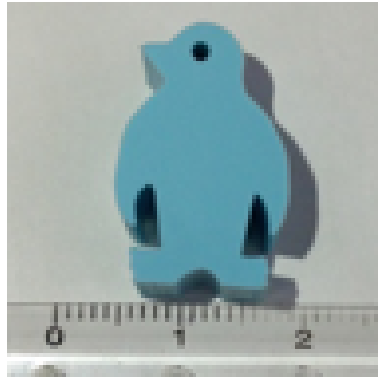


図 1.9 70MeV 陽子線 CT 撮影の被写体

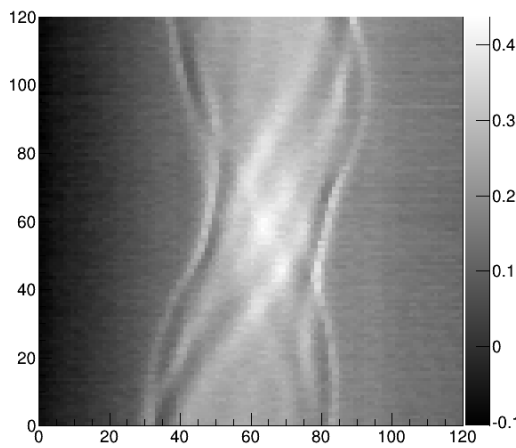


図 1.10 サイノグラム (same)

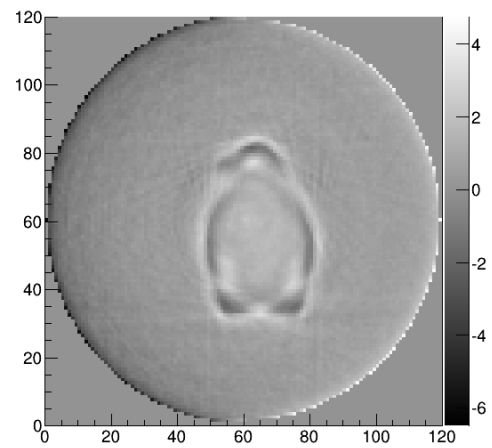


図 1.11 再構成画像 (same)

また図 1.12 において、黄色線で示した直線の一次元プロファイルを示した。上部の穴は直径 1mm であるが、再構成画像では半値幅 1.67mm となった。放射線治療において、患部周囲に設ける余分な照射領域であるマージンは数 mm 以上であるので、これは十分な精度であると言える。内部の WEL は求められないが、直径 1mm の穴であっても撮影する事が出来た。

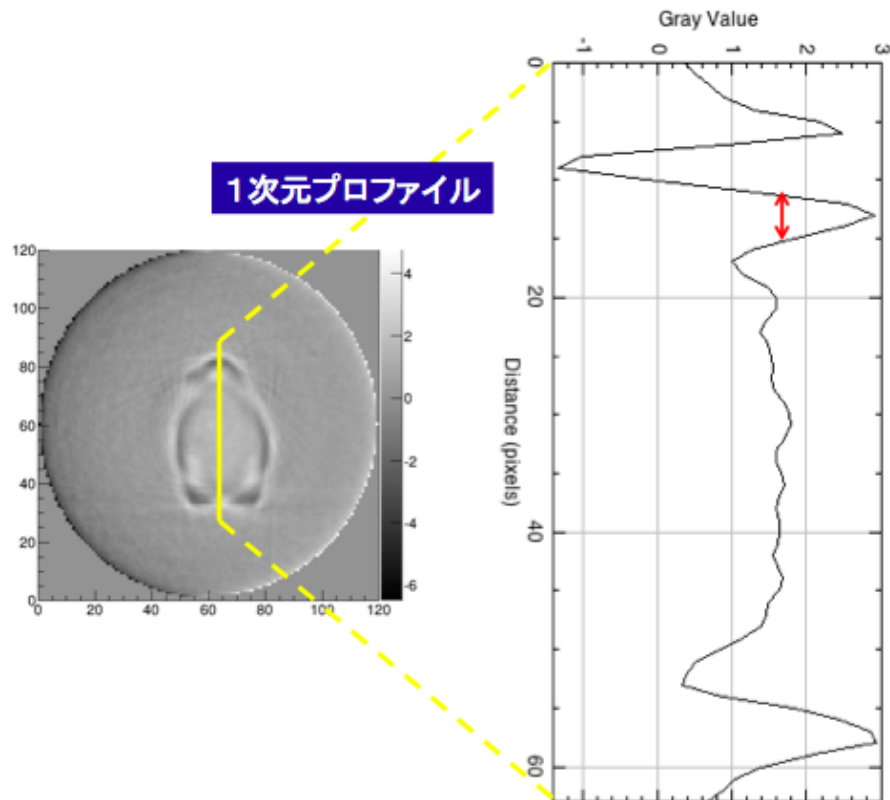


図 1.12 再構成画像の 1 次元プロファイル

1.4 WEL 測定

protonCT の目的は、被写体の正確な WEL を求めることである。ここでは、再構成結果から得られる WEL の精度について述べる。被写体には直径 26.3mm の水ファントム、直径 20mm のアクリルファントム、直径 26.3mm のイソプロパノールファントムを用いた。3 種の物質の再構成画像の比較を図 1.13 に示す。水の WEL を基準 1 としたときの、アクリル、イソプロパノールの WEL を比較した結果を表 1.2 に示す。

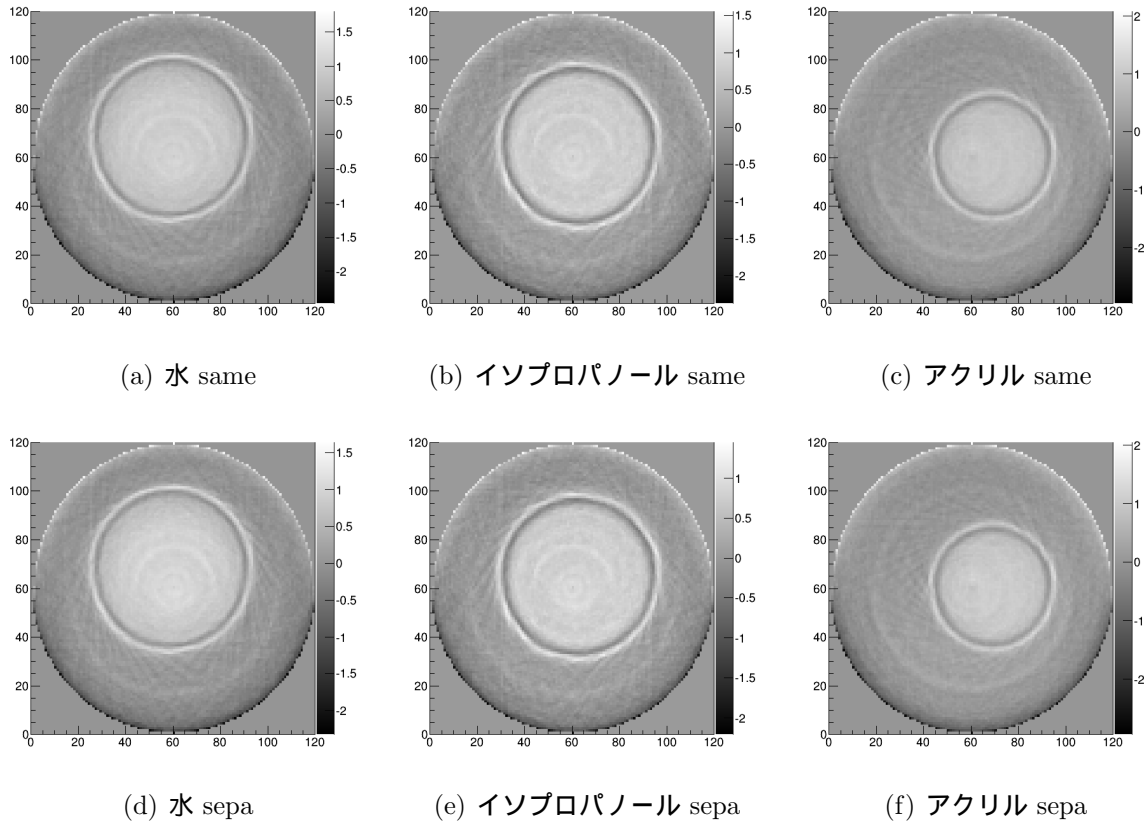


図 1.13 70MeV 陽子線による水ファントムの再構成画像

(reference)	アクリル	イソプロパノール
理論	1.16	0.82
70same	1.22 ± 0.00	0.83 ± 0.00
70sepa	1.32 ± 0.00	0.82 ± 0.00

表 1.2 WEL 比較

イソプロパノールは 1 %以下の精度で測定ができた。一方で、アクリルは理論値に比べ、same、sepa とともに大きい値が得られた。その原因として、シンチレータの劣化による光量レンジ変換テーブルの不定性が挙げられる。高レートでの照射のためトラップ準位ができ、同量の線量照射でより多くの発光量が得られる状態となった。これは測定を重ねるごとに影響が大きくなるため、光量レンジ変換テーブル作成における後半、つまり、相対光量が多い部分で顕著になると考えられる。テーブルを作成した時とその後被写体撮影をした時では、同じ発光量であっても対応する WEL が異なり、特に WEL が大きい、つまり相対発光量が多いアクリルでその影響が支配的になったと考えられる。”sepa”の方が WEL 測定の誤差が大きくなった原因として、揺らぎ補正用シンチレータが測定用シンチレータに用いた BC408 プラスチックシンチレータでないということが挙げられる。密度や組成が若干異なるために、劣化の度合いが異なり、誤差が大きくなったと考える。

この結果より、次に示す 200MeV でのイメージング実験においては、揺らぎ補正用シンチレータは測定用シンチレータの一部 (same) を用いた。