

日本放射線技術学術大会中国・四国支部 第16回 夏季学術大会

画像情報研究会

「X線CTにおける被ばく線量の把握方法」

山口大学医学部附属病院 放射線部

山口 貴弘

はじめに

CT検査における被ばく線量の指標には **CTDI** (CT dose index) 及び **DLP** (dose length product) が用いられてきた。

CTDIの概要と $CTDI_{vol}$ が得られるまでを紹介する。
そして、CT検査における被ばく線量を把握する方法について考える。



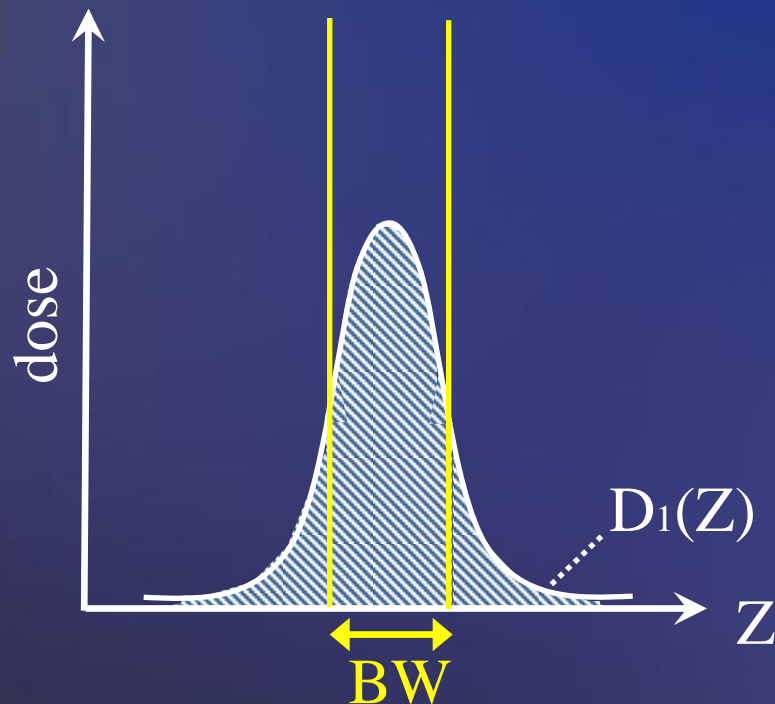
しかしながら、CTDIでは被検者の被ばく線量を正確に評価することはできないと言われている。

CTDIの問題点について考え、被検者の被ばく線量をより正確に評価するための最近の動きについて紹介する。



CTDI (CT dose index) とは

シングルスキャンで得られる線量プロファイルの線積分線量を、X線ビーム幅で除した値をCTDIと定義する。



$$\text{CTDI} = \frac{1}{\text{BW}} \times \int_{-\infty}^{\infty} D_1(Z) dz$$

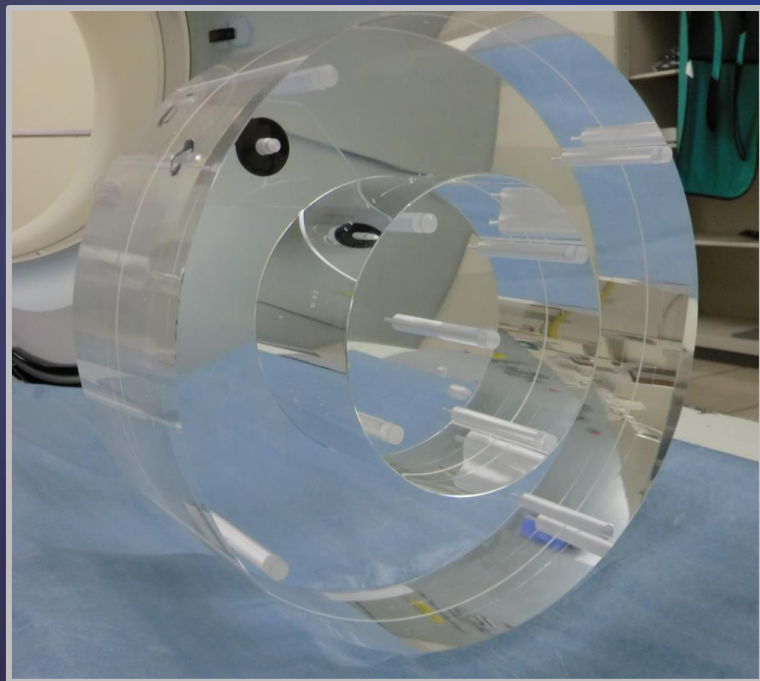
↓
線量計で計測
↓
検出器のサイズ × 数



CTDIの測定



ペンシル型電離箱線量計
有効電離長10cm
容量3mL



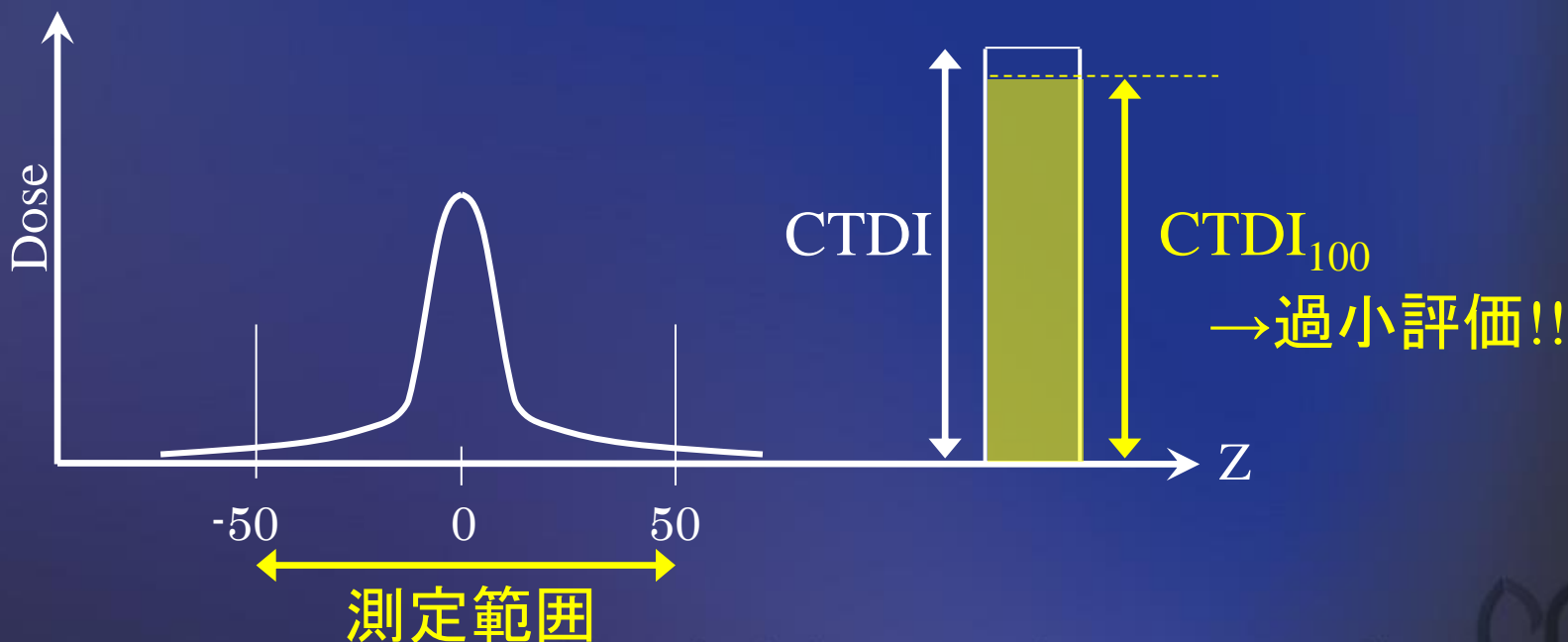
PMMA製円柱ファントム
密度： $1.19 \pm 0.01 \text{g/cm}^3$
直径32cmと16cm 長さ15cm
中央と、周辺の4か所に線量計
を挿入する孔が空いてある。



計測される様々なCTDI

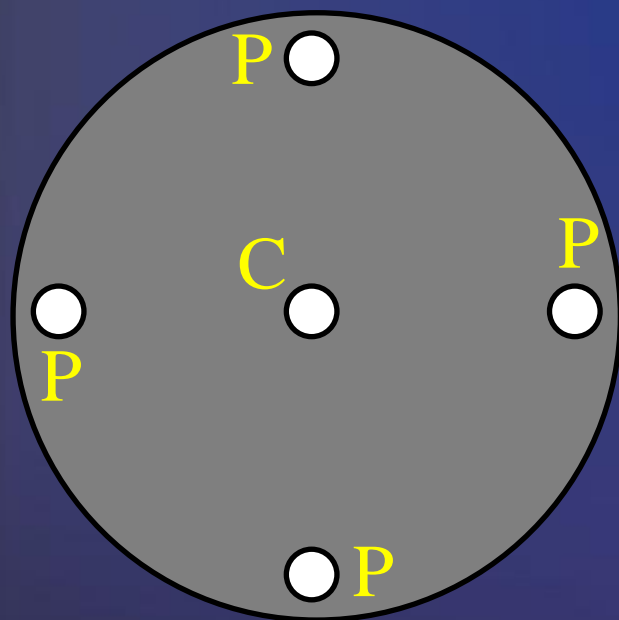
- $CTDI_{100}$: 線量計の長さが10cmのため、線積分線量の積分範囲 $\pm 50\text{mm}$ のデータしか実測できない。

$$CTDI_{100} = \frac{1}{BW} \int_{-50}^{50} D_1(Z) dz$$



- $CTDI_w$: ファントムの中心と周辺部では実測される線量の大きさに違いが生じる. その分を重み付し, 全体の平均線量とした値.

$$CTDI_w = \frac{1}{3} CTDI_c + \frac{2}{3} CTDI_p$$



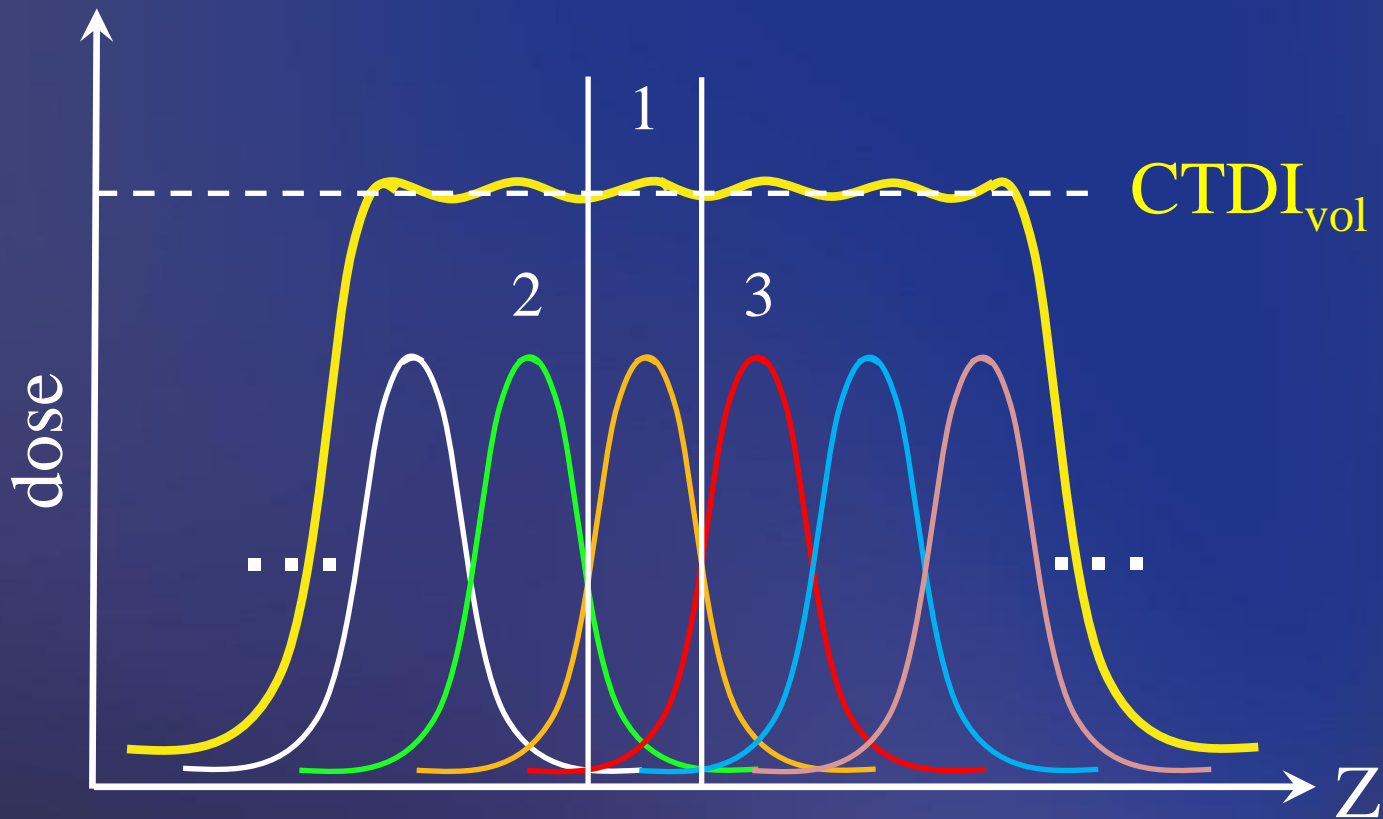
$CTDI_c$: 円柱ファントムの中心 (center)における $CTDI_{100}$

$CTDI_p$: 円柱ファントムの周辺 (peripheral)における $CTDI_{100}$ の平均値

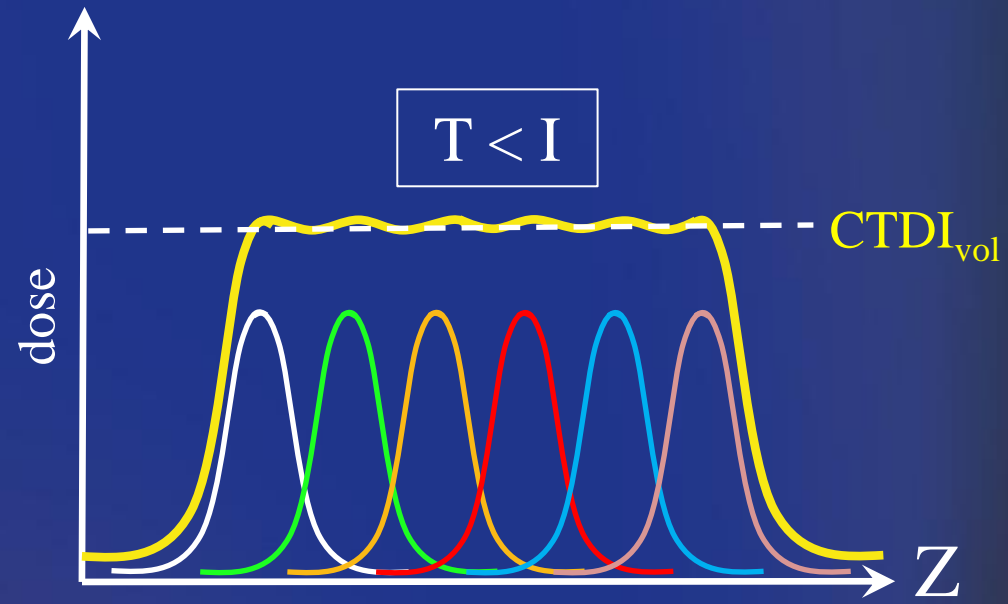
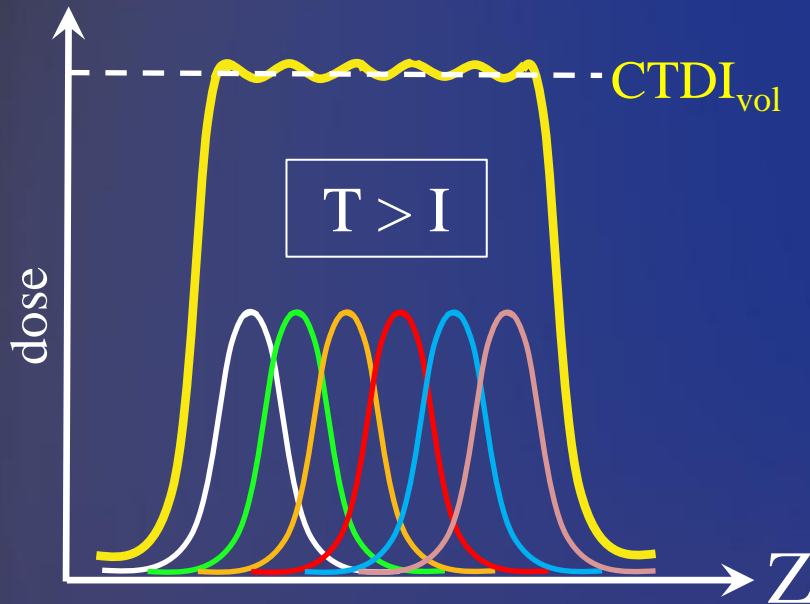


□ $CTDI_{vol}$:

多重スキャンやヘリカルスキャンを用いて
体軸方向に任意の範囲で撮像を行うと、
他スライス面からの線量が重複するため、
 $CTDI$ は合算された値となる。



重複する割合は、X線ビーム幅と寝台移動間隔の割合によって異なる。



$$CTDI_{vol} = \frac{T}{I} CTDI_w$$

$$= \frac{1}{PF} CTDI_w$$

I : 寝台移動間隔

T : スライス厚

PF (Pitch factor) : X線ビーム幅に対する一回転当りの寝台移動距離

Dose Length Product (DLP)

CTDI_{vol}はスキャン範囲における平均的な場の線量。
一方、スキャン範囲全体の線量をDLPと定義する。

$$DLP = \int_{-\infty}^{\infty} D_{N,I}(Z) dz$$

シングルスキャンをN回行ったとき

$$DLP = CTDI_{vol} \times N$$

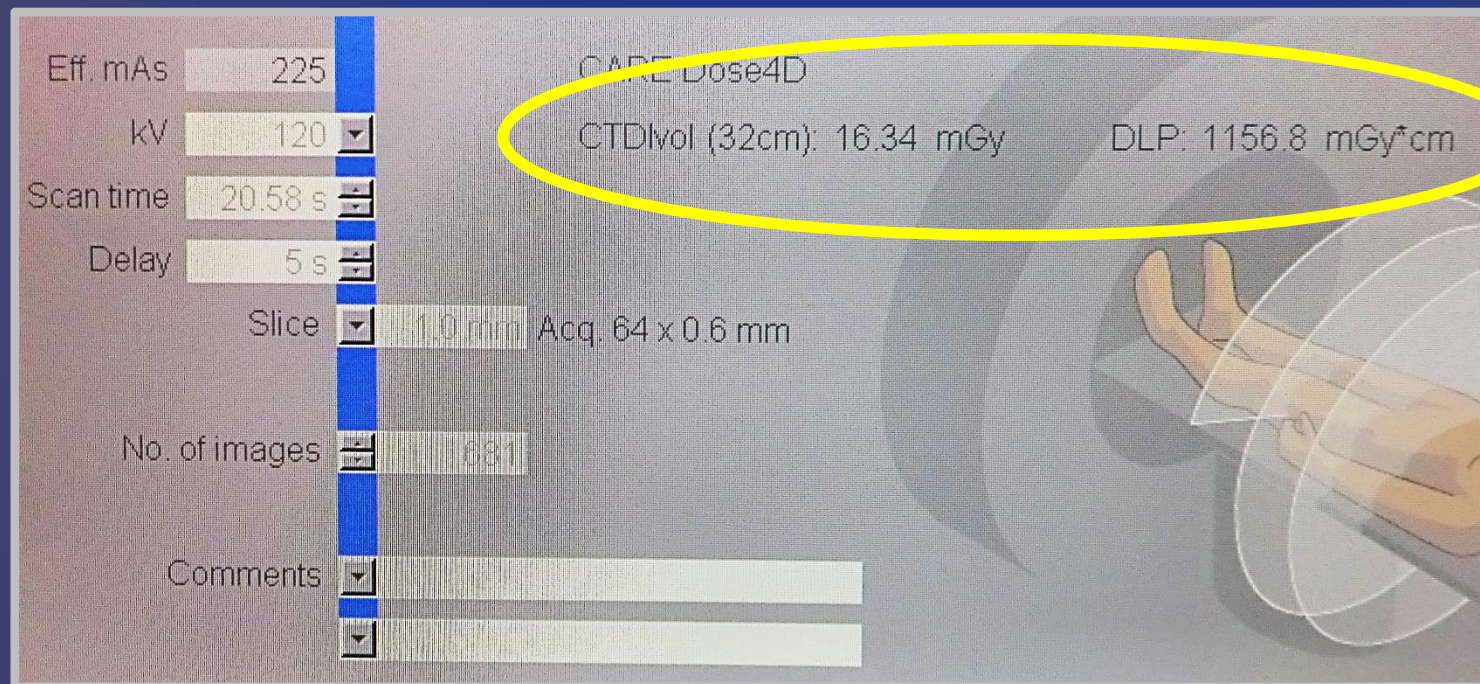
ヘリカルスキャンを撮像範囲(L)で行ったとき、

$$DLP = CTDI_{vol} \times L$$



CTDI_{vol}の把握方法

スキャン直前



IEC60601-2-44において、CTDI_{vol} [mGy] とDLP [mGy・cm] を装置上に表示することが勧告されている。



CTDI_{vol}の把握方法

検査後

Ward:
Physician:
Operator:

Total mAs 8593 Total DLP 1166 mGycm

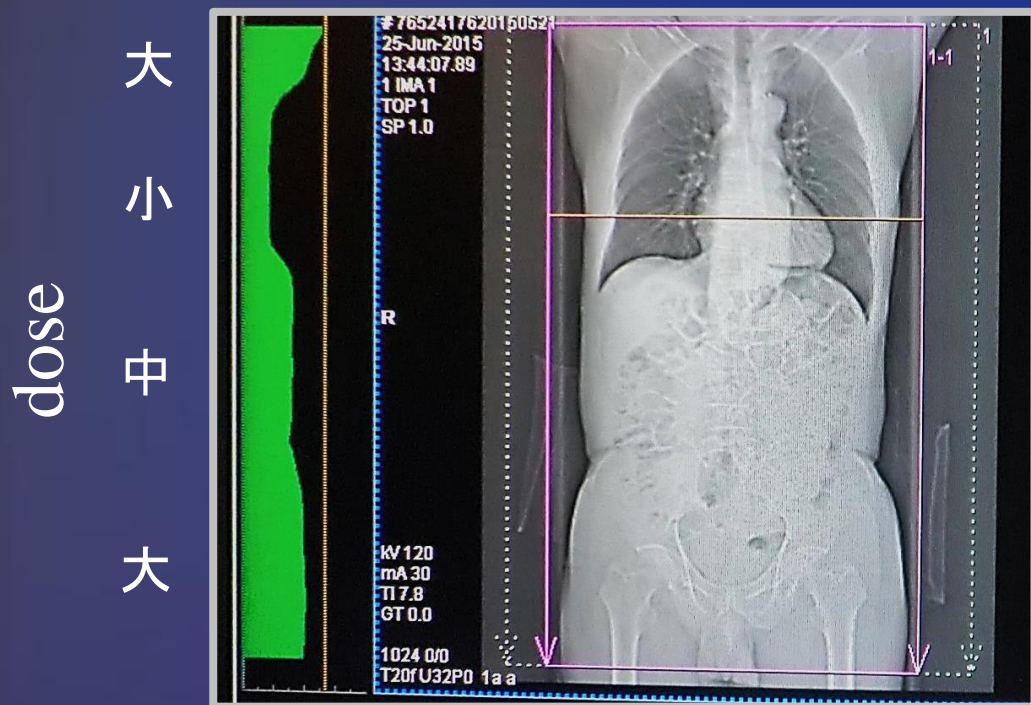
	Scan	kV	mAs / ref.	CTDI _{vol} * mGy	DLP mGycm	TI s	cSL mm
Patient Position F-SP							
Topogram	1	120	30 mA	0.11 L	9	7.8	0.6
ChestAbd	2	120	225 / 250	<u>16.34 L</u>	<u>1157</u>	0.5	0.6

画像データの他に, dose report も自動で記録される。
サーバーに保存しておけば, 後の線量把握に役立つ。



CTDI_{vol}を把握する上での注意点

CT-AEC (CT自動露出機構) を使用した場合



mAs / ref.	CTDI _{vol} * mGy	DLP mGycm
30 mA	0.11 L	9
225 / 250	16.34 L	1157

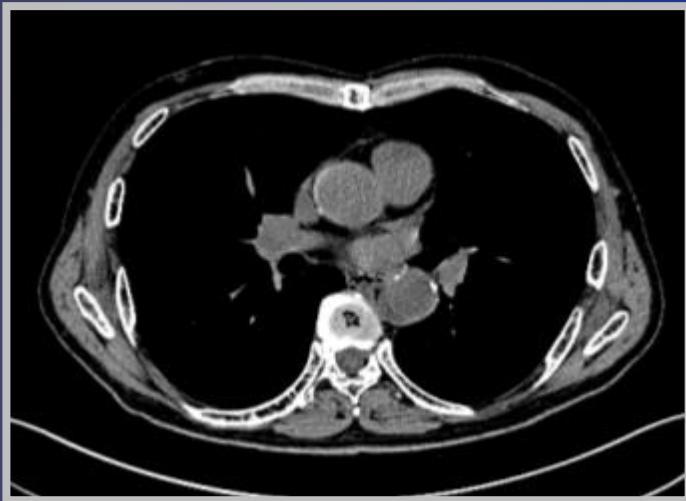
スキャン中の**平均mAs値**におけるCTDI_{vol}を表示する

or

スキャン中の**最大mAs値**におけるCTDI_{vol}を表示する



CTDI_{vol}をより詳細に把握する



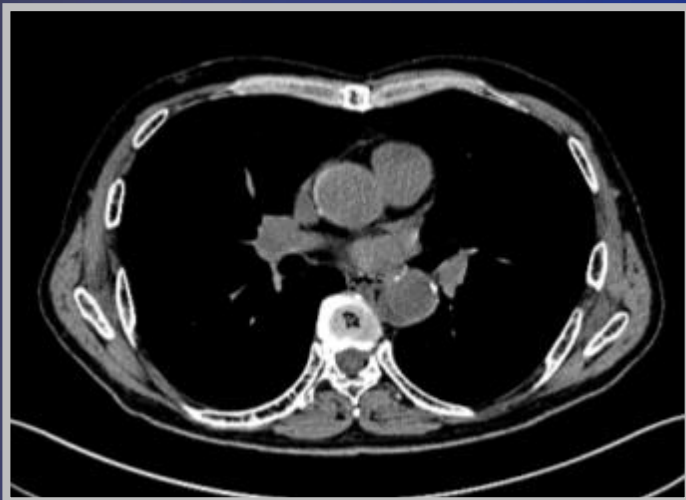
CT-AEC機構を使用することで、部位によって線量が調整される。コンソールに表示されるCTDI_{vol}では、部位別での評価ができない。



normalized CTDI_{vol} (nCTDI_{vol})
= CTDI_{vol} / mAs値 [mGy/mA·s]
を求めておき、mAs値を乗算して
部位別でのCTDI_{vol}を算出できる



CTDI_{vol}をより詳細に把握する



$$nCTDI_{vol} = 16.34 / 225 = 0.073$$

Exposure:109

$$\begin{aligned}CTDI_{vol} &= nCTDI_{vol} \times \text{Exposure} \\ &= 0.073 \times 109 \\ &= 7.96 \text{ mGy}\end{aligned}$$



Exposure:271

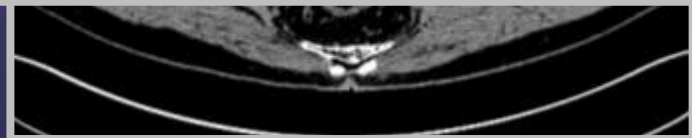
$$\begin{aligned}CTDI_{vol} &= nCTDI_{vol} \times \text{Exposure} \\ &= 0.073 \times 271 \\ &= 19.78 \text{ mGy}\end{aligned}$$



CTDI をより詳細に把握する

```
0018,1210 Convolution Kernel: B40f
0018,5100 Patient Position: FFS
0018,9306 ---: 0.6
0018,9307 ---: 19.2
0018,9309 ---: 34.4
0018,9310 ---: 17.2
0018,9311 ---: 0.9
0018,9323 ---: XYZ_EC
0018,9324 ---: 32.4324
0018,9345 ---: 7.927888409302327
0008,0100 Code Value: 113691
0008,0102 Coding Scheme Designator: DCM
0008,0104 Code Meaning: IEC Body Dosimetry Phantom
0019,0010 ---: SIEMENS CT VAO COAD
0019,1090 ---: 0
0019,1092 ---: 0.9179
0019,1093 ---: -0.21
0019,1096 ---: 0
```

実はDICOMタグにある



$$CTDI_{vol} = 16.34 / 225 = 0.073$$

re:109

$$D_{vol} = nCTDI_{vol} \times \text{Exposure}$$
$$= 0.073 \times 109$$
$$= 7.96 \text{ mGy}$$

re:271

$$D_{vol} = nCTDI_{vol} \times \text{Exposure}$$
$$= 0.073 \times 271$$
$$= 19.78 \text{ mGy}$$



CTDI_{vol} = 被ばく線量 で良いの？



CTDI_{vol}の欠点

- ・ファントムは長さ15cmの32cmΦと16cmΦ
→様々な被検者の体格を反映しておらず、
本来発生するはずの散乱線を再現できない。
- ・ペンシル型線量計の長さが10cm
→線量プロファイルの裾野を十分に測定できない。

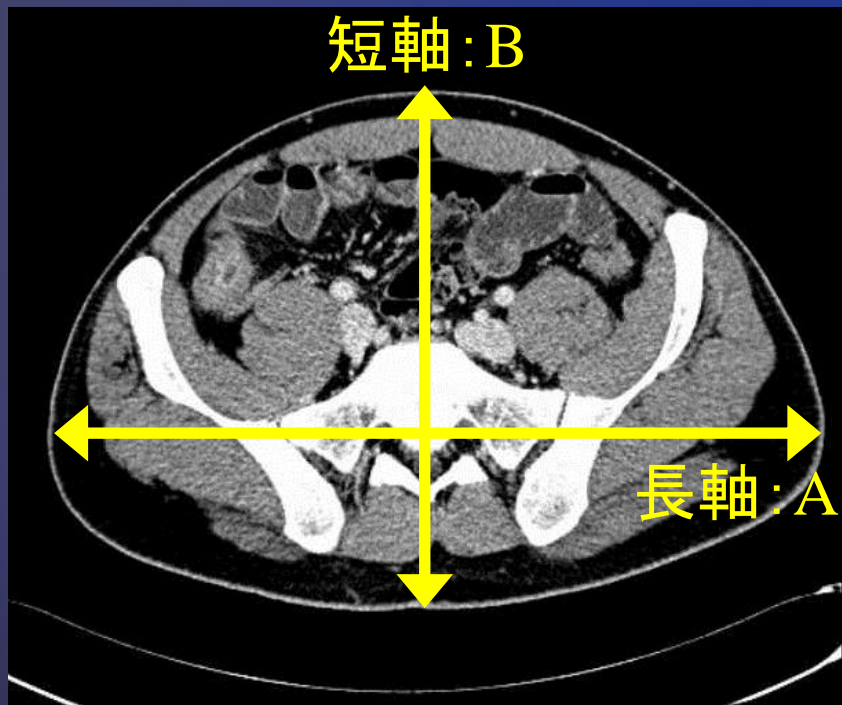


装置の性能評価には
適しているけど...



Size-Specific Dose Estimates (SSDE)

ファントムと被検者体格の大きさの違いから生じる
CTDI_{vol}の不正確さを補正する



長軸(A)と短軸(B)より、
実行径 $D_{\text{eff}} = \sqrt{A \cdot B}$

A, B, A+B, D_{eff} , の値から
テーブルを引いてSSDE
への変換係数を求める。

Table 1A

Lat+AP Dim (cm)	Effective Dia (cm)	Conversion Factor
16	7.7	2.79
18	8.7	2.69
20	9.7	2.59
22	10.7	2.50
24	11.7	2.41
26	12.7	2.32
28	13.7	2.24
30	14.7	2.16
32	15.7	2.08
34	16.7	2.01
36	17.6	1.94
38	18.6	1.87
40	19.6	1.80
42	20.6	1.74
44	21.6	1.67
46	22.6	1.62
48	23.6	1.56
50	24.6	1.50
52	25.6	1.45
54	26.6	1.40
56	27.6	1.35
58	28.6	1.30
60	29.6	1.25
62	30.5	1.21
64	31.5	1.16
66	32.5	1.12
68	33.5	1.08

Table 1B

Lateral Dim (cm)	Effective Dia (cm)	Conversion Factor
8	9.2	2.65
9	9.7	2.60
10	10.2	2.55
11	10.7	2.50
12	11.3	2.45
13	11.8	2.40
14	12.4	2.35
15	13.1	2.29
16	13.7	2.24
17	14.3	2.19
18	15.0	2.13
19	15.7	2.08
20	16.4	2.03
21	17.2	1.97
22	17.9	1.92
23	18.7	1.86
24	19.5	1.81
25	20.3	1.76
26	21.1	1.70
27	22.0	1.65
28	22.9	1.60
29	23.8	1.55
30	24.7	1.50
31	25.6	1.45
32	26.6	1.40
33	27.6	1.35
34	28.6	1.30

Table 1C

AP Dim (cm)	Effective Dia (cm)	Conversion Factor
8	8.8	2.68
9	10.2	2.55
10	11.6	2.42
11	13.0	2.30
12	14.4	2.18
13	15.7	2.08
14	17.0	1.98
15	18.3	1.89
16	19.6	1.81
17	20.8	1.73
18	22.0	1.65
19	23.2	1.58
20	24.3	1.52
21	25.5	1.45
22	26.6	1.40
23	27.6	1.34
24	28.7	1.29
25	29.7	1.25
26	30.7	1.20
27	31.6	1.16
28	32.6	1.12
29	33.5	1.08
30	34.4	1.05
31	35.2	1.02
32	36.0	0.99
33	36.8	0.96
34	37.6	0.93

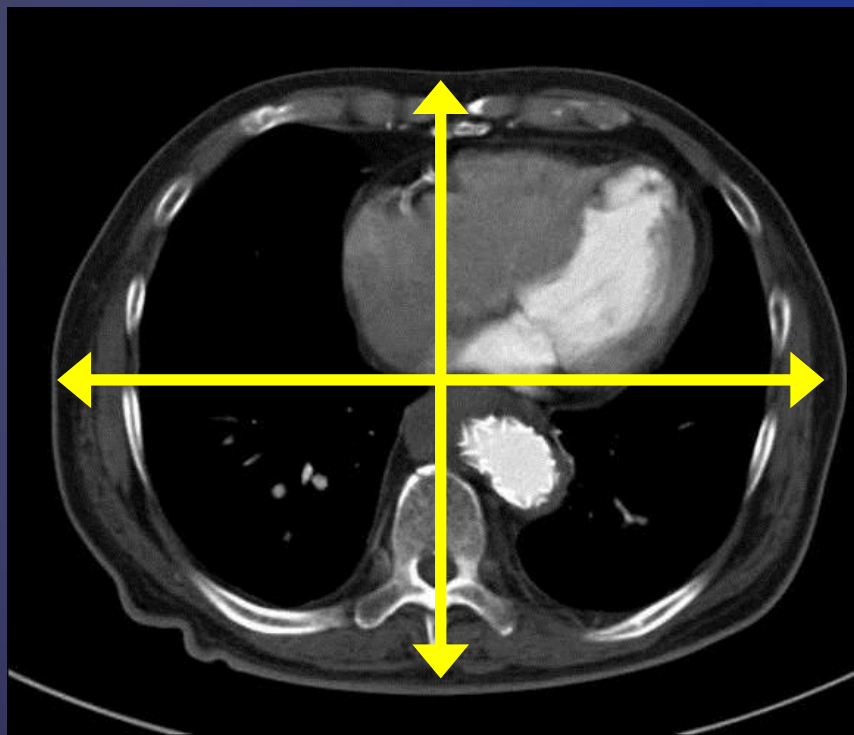
Table 1D

Effective Dia (cm)	Conversion Factor
8	2.76
9	2.66
10	2.57
11	2.47
12	2.38
13	2.30
14	2.22
15	2.14
16	2.06
17	1.98
18	1.91
19	1.84
20	1.78
21	1.71
22	1.65
23	1.59
24	1.53
25	1.48
26	1.43
27	1.37
28	1.32
29	1.28
30	1.23
31	1.19
32	1.14
33	1.10
34	1.06

Water-Equivalent Diameter (D_w)

水透過経路

$$D_w = 2 \sqrt{\left[\frac{1}{1000} \overline{CT(x, y)}_{ROI} + 1 \right] \frac{A_{ROI}}{\pi}}$$



で補正する.

肺野等が含まれる時に、
より正しく補正できる.

$\overline{CT(x, y)}_{ROI}$: ROI内の平均CT値

A_{ROI} : ROIの面積

AAPM Report No.220: Use of Water Equivalent Diameter for Calculating Patient Size and Size-Specific Dose Estimates (SSDE) in CT



Table 1A

Lat + AP Dim (cm)	Dw (cm)	Conversion Factor
16	7.7	2.79
18	8.7	2.69
20	9.7	2.59
22	10.7	2.50
24	11.7	2.41
26	12.7	2.32
28	13.7	2.24
30	14.7	2.16
32	15.7	2.08
34	16.7	2.01
36	17.6	1.94
38	18.6	1.87
40	19.6	1.80
42	20.6	1.74
44	21.6	1.67
46	22.6	1.62
48	23.6	1.56
50	24.6	1.50
52	25.6	1.45
54	26.6	1.40
56	27.6	1.35
58	28.6	1.30
60	29.6	1.25
62	30.5	1.21
64	31.5	1.16
66	32.5	1.12
68	33.5	1.08
70	34.5	1.04

Table 1B

Lateral Dim (cm)	Dw (cm)	Conversion Factor
8	9.2	2.65
9	9.7	2.60
10	10.2	2.55
11	10.7	2.50
12	11.3	2.45
13	11.8	2.40
14	12.4	2.35
15	13.1	2.29
16	13.7	2.24
17	14.3	2.19
18	15.0	2.13
19	15.7	2.08
20	16.4	2.03
21	17.2	1.97
22	17.9	1.92
23	18.7	1.86
24	19.5	1.81
25	20.3	1.76
26	21.1	1.70
27	22.0	1.65
28	22.9	1.60
29	23.8	1.55
30	24.7	1.50
31	25.6	1.45
32	26.6	1.40
33	27.6	1.35
34	28.6	1.30
35	29.6	1.25

Table 1C

AP Dim (cm)	Dw (cm)	Conversion Factor
8	8.8	2.68
9	10.2	2.55
10	11.6	2.42
11	13.0	2.30
12	14.4	2.18
13	15.7	2.08
14	17.0	1.98
15	18.3	1.89
16	19.6	1.81
17	20.8	1.73
18	22.0	1.65
19	23.2	1.58
20	24.3	1.52
21	25.5	1.45
22	26.6	1.40
23	27.6	1.34
24	28.7	1.29
25	29.7	1.25
26	30.7	1.20
27	31.6	1.16
28	32.6	1.12
29	33.5	1.08
30	34.4	1.05
31	35.2	1.02
32	36.0	0.99
33	36.8	0.96
34	37.6	0.93
35	38.4	0.91

Table 1D

Dw (cm)	Conversion Factor
8	2.76
9	2.66
10	2.57
11	2.47
12	2.38
13	2.30
14	2.22
15	2.14
16	2.06
17	1.98
18	1.91
19	1.84
20	1.78
21	1.71
22	1.65
23	1.59
24	1.53
25	1.48
26	1.43
27	1.37
28	1.32
29	1.28
30	1.23
31	1.19
32	1.14
33	1.10
34	1.06
35	1.02

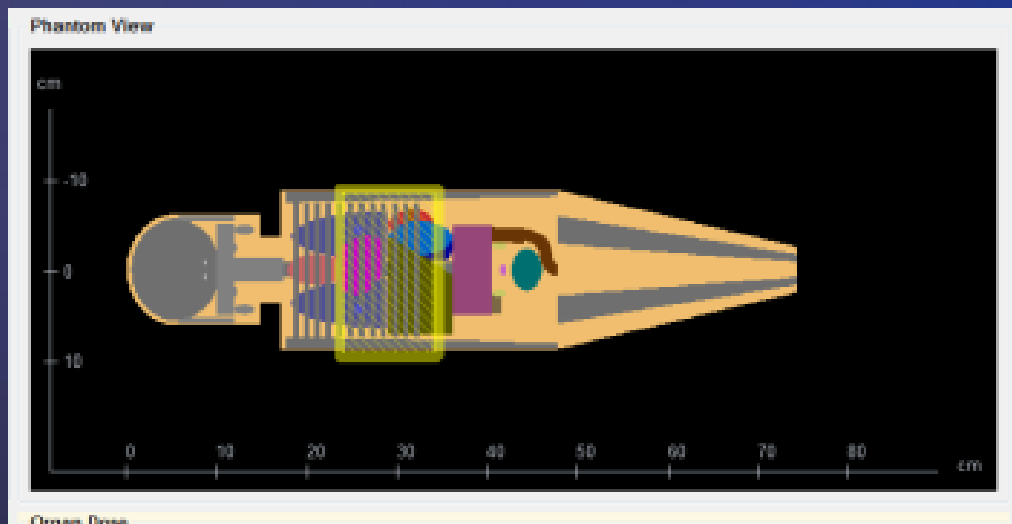
シミュレーションによる被ばく線量の推定

様々なデータより仮想空間に任意のCT装置と被検者を作り, Monte Carlo等によるシミュレーションによって線量分布や各臓器の実効線量等を計算する.

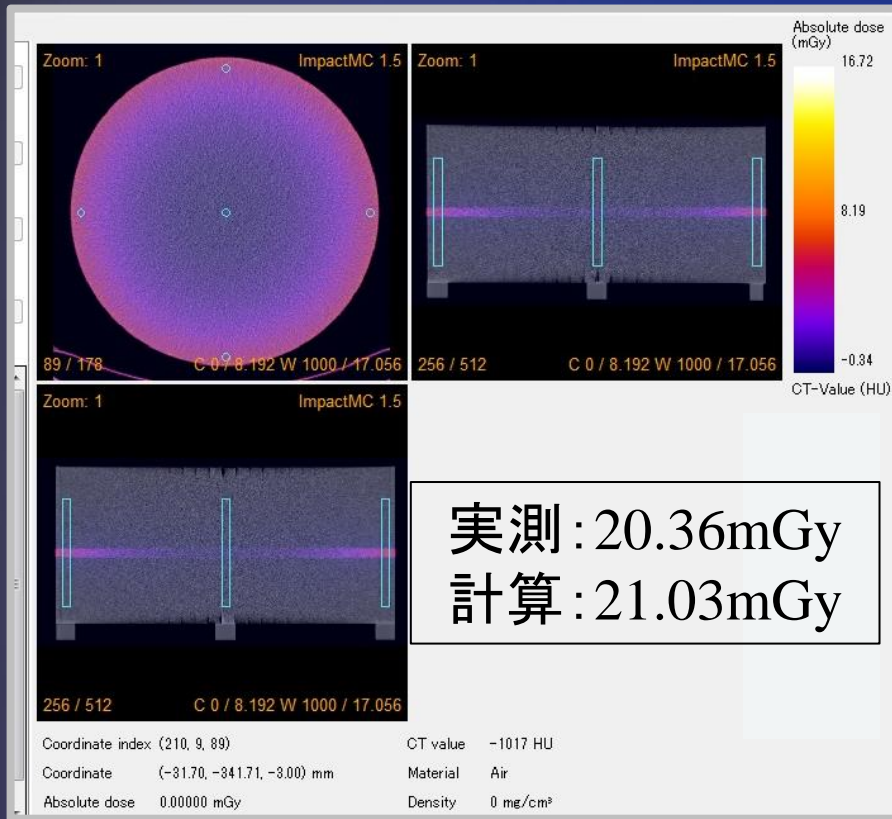
CTDOSE[®] (NPRB), ImpactDose[®] (CT Imaging)

WAZA-ARI v2(放射線医学総合研究所医療被ばく研究プロジェクト)

等々...



当院ではImpactMC[®] が最近導入された。



画像からシミュレーションにより線量分布を計算する。
実測データの外、仮想のフィルタ等も設定可能。



まとめ

$CTDI_{vol}$ はX線CT検査における被ばく線量の標準的な指標である。dose reportに記録され、後の線量把握も容易である。

$CTDI_{vol}$ はファントムを用いた測定値を基にしているため、実際の被検者の被ばく線量と誤差が生じる。その誤差を補正する指標が報告されつつある。

また、シミュレーションを用いた臓器別での実効線量の推定も行われている。



Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study

Klervi Leuraud, David B Richardson, Elisabeth Cardis, Robert D Daniels, Michael Gillies, Jacqueline A O'Hagan, Ghassan B Hamra, Richard Haylock, Dominique Laurier, Monika Moissonnier, Mary K Schubauer-Berigan, Isabelle Thierry-Chef, Ausrele Kesminiene

Summary

Background There is much uncertainty about the risks of leukaemia and lymphoma after repeated or protracted low-dose radiation exposure typical of occupational, environmental, and diagnostic medical settings. We quantified associations between protracted low-dose radiation exposures and leukaemia, lymphoma, and multiple myeloma mortality among radiation-monitored adults employed in France, the UK, and the USA.

Methods We assembled a cohort of 308 297 radiation-monitored workers employed for at least 1 year by the Atomic Energy Commission, AREVA Nuclear Cycle, or the National Electricity Company in France, the Departments of Energy and Defence in the USA, and nuclear industry employers included in the National Registry for Radiation Workers in the UK. The cohort was followed up for a total of 8·22 million person-years. We ascertained deaths caused by leukaemia, lymphoma, and multiple myeloma. We used Poisson regression to quantify associations between estimated red bone marrow absorbed dose and leukaemia and lymphoma mortality.

Findings Doses were accrued at very low rates (mean 1·1 mGy per year, SD 2·6). The excess relative risk of leukaemia mortality (excluding chronic lymphocytic leukaemia) was 2·96 per Gy (90% CI 1·17–5·21; lagged 2 years), most notably because of an association between radiation dose and mortality from chronic myeloid leukaemia (excess relative risk per Gy 10·45, 90% CI 4·48–19·65).

Interpretation This study provides strong evidence of positive associations between protracted low-dose radiation exposure and leukaemia.

【参考文献】

市川勝弘 村松禎久:標準X線CT画像計測 オーム社

日本X線CT専門技師認定機構:X線CT認定技師講習会テキスト

Robert L. Dixon, “A new look at CT dose measurement: Beyond CTDI” Citation: Medical Physics 30, 1272 (2003)

AAPM Report No.204: Size-Specific Dose Estimates (SSDE) in Pediatric and Adult body CT Examinations

AAPM Report No.220: Use of Water Equivalent Diameter for Calculating Patient Size-Specific Dose Estimates (SSDE) in CT

Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS):an international cohort study: *Klervi Leuraud: Lancet Haematol* 2015;2: e276–81

