

「リニアックの出力線量管理」

(⇒モニタ線量計を管理すること)

モニタ線量計の校正

モニタ線量計を
 $1 \text{ MU} = 1 \text{ cGy}$ にあわせるってこと

$1 \text{ MU} = 1 \text{ cGy}$

$1 \text{ MU} = 1 \text{ cGy}$ になっていることを確認する作業



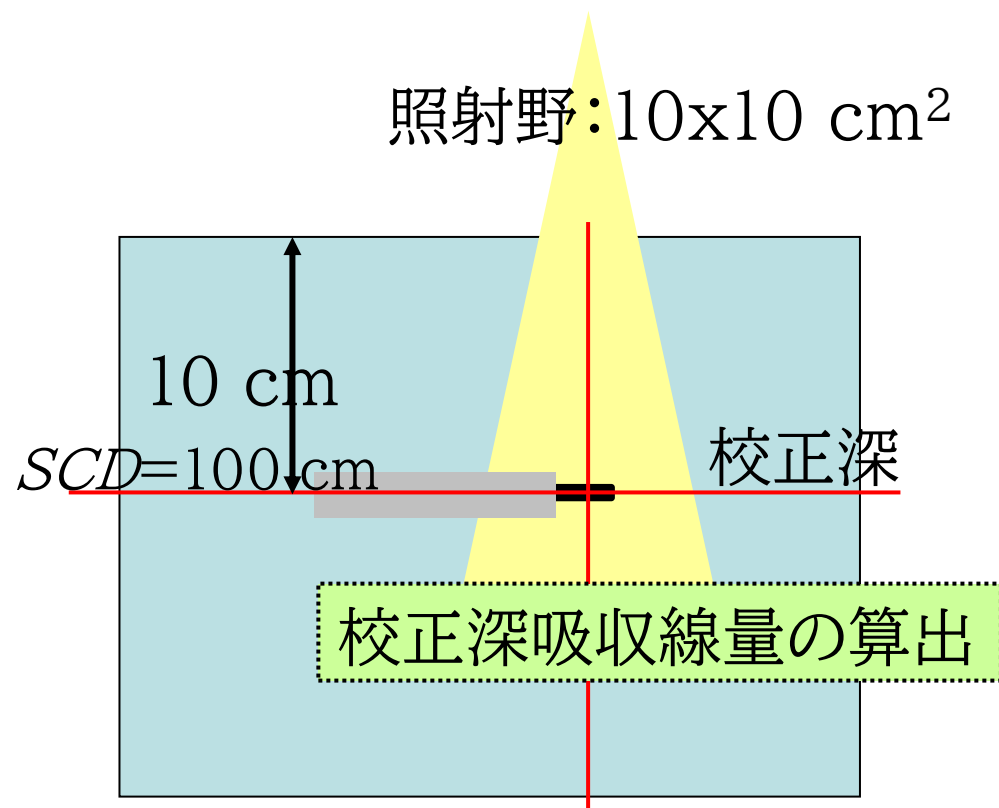
1 cGy は_____

e e e

外部線量計

重要

実際のX線モニタ校正（標準計測法12準拠）



電離箱: 0.6 cm³ 円筒形電離箱

ファントム: 水

SCD: 100 cm

(電離箱の幾何学的中心に合わせる)

基準照射野: 10x10 cm²

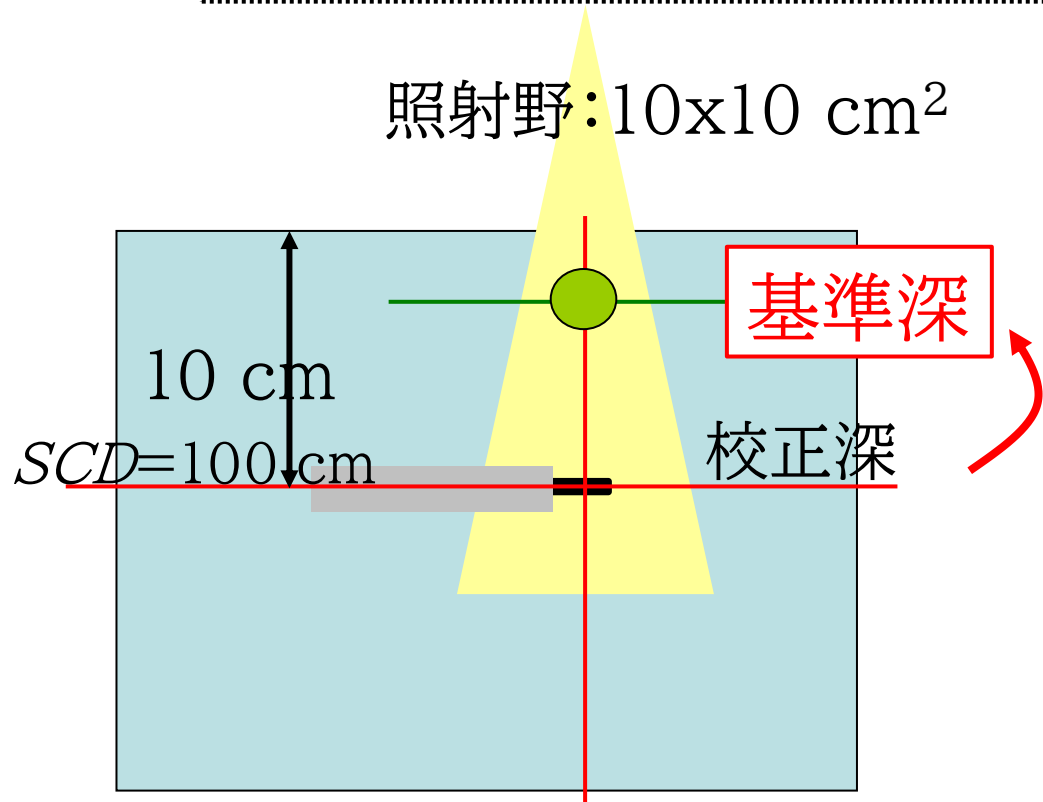


での“吸収線量(Gy)を求める”

重要

実際のX線モニタ校正（標準計測法12準拠）

基準深吸収線量の算出



電離箱: 0.6 cm³ 円筒形電離箱

ファントム: 水

SCD: 100 cm 校正深: 10 cm

(電離箱の幾何学的中心に合わせる)

基準照射野: 10x10 cm²



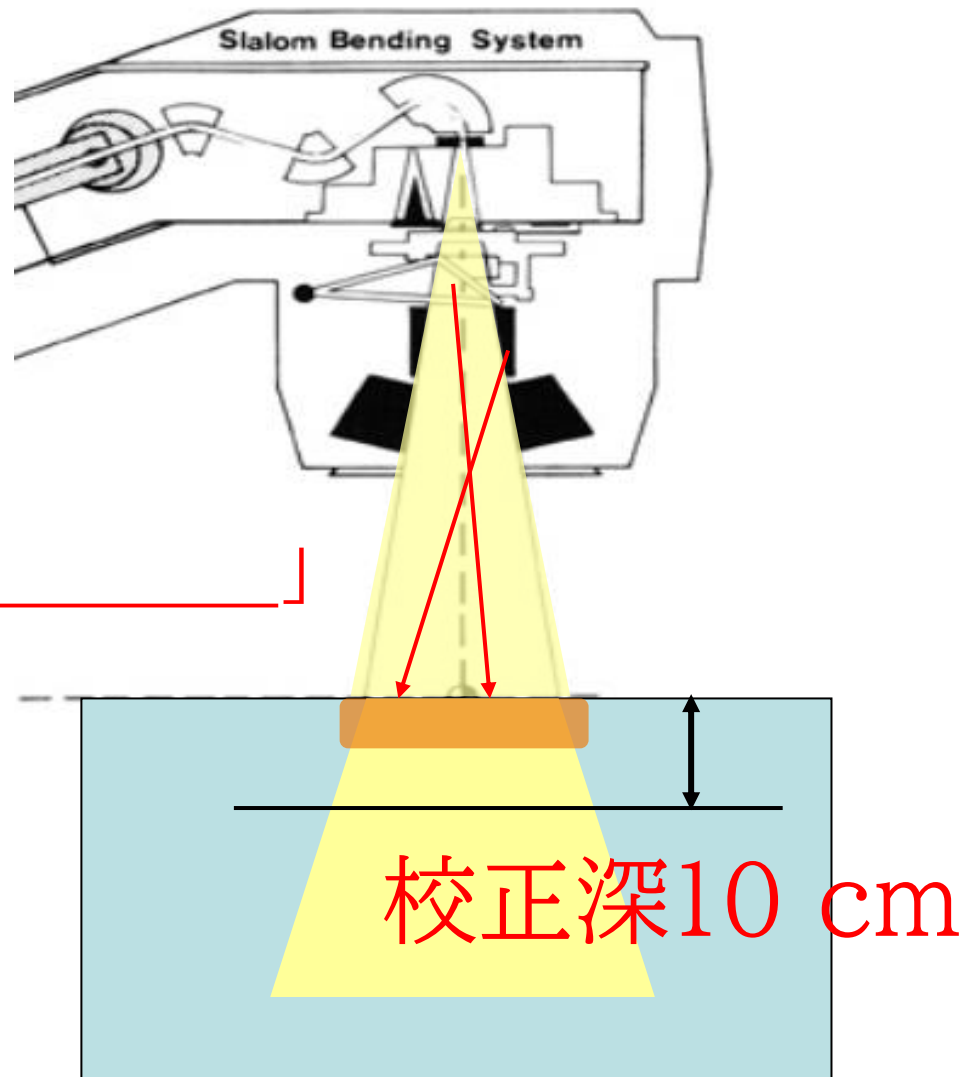
校正深での“吸収線量(Gy)を求める”



*TMR(dc)*を使って

の“吸収線量(Gy)に戻す”

なぜ「校正深10 cm」で測定するのか？



- ① 加速器ヘッド内部で発生する混入電子(コンタミネーション)の影響を抑えることができる
⇒ 純粋なX線線質で評価
(阻止能変化の影響が少ない)
- ② 高いX線エネルギーであっても、ビルドアップ領域の影響を受けない直線的な線量勾配が得られる
⇒ 完全な過渡電子平衡の成立

吸収線量評価に適した環境

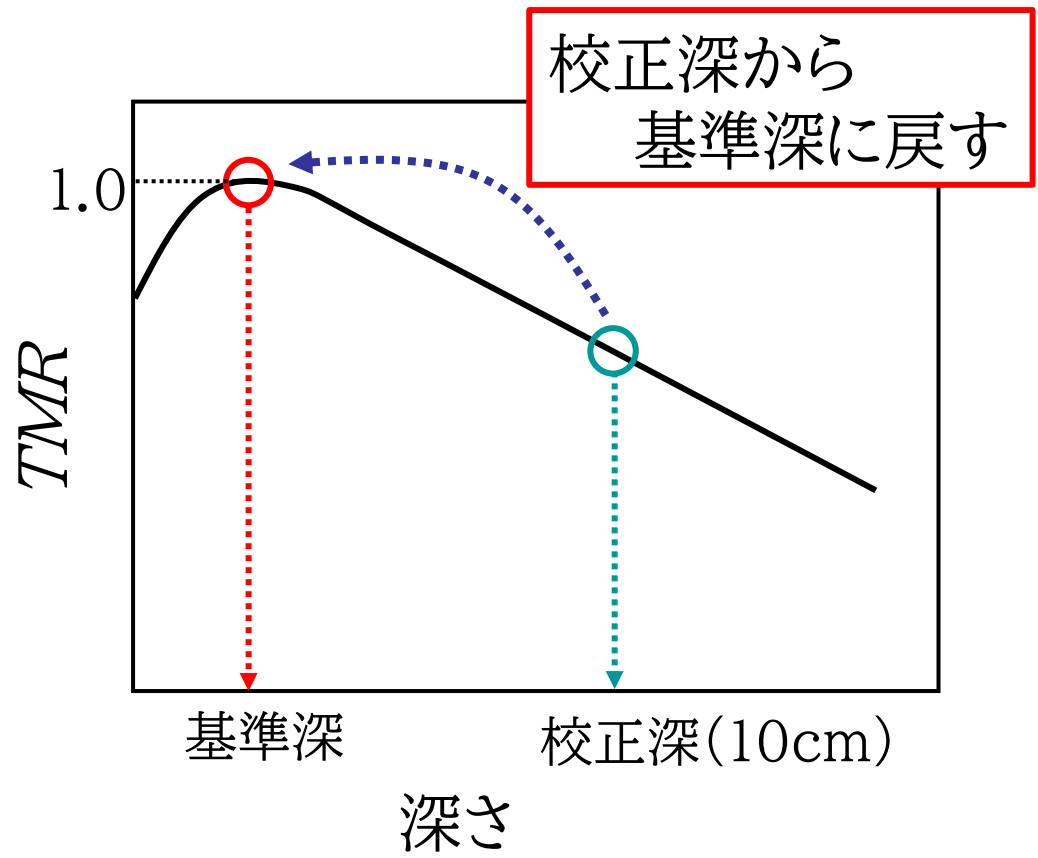
TMR (dc)

TMR...Tissue Maximum Ratio (組織最大線量比)

■ TMR(dc)・・・ _____ の値

モニタ校正の測定は校正深で行い，線量評価は基準深で行う

重要



基準深線量 = _____

1 MU = 1 cGy 基準深において



これが，リニアックの
すべての線量の基準となる！

リニアックにおける“線量の基準”

, **のみ**が絶対線量測定

⇒ MU値と線量の関係 $[cGy/MU]$ ()

他の条件は, 相対的な関係より計算で求められる

$$MU = \frac{D(d,s) \cdot w_i}{DMU \cdot S_c(c) \cdot A_0(r) \cdot S_p(s) \cdot G \cdot TMR(d,s) \cdot WF(d,s) \cdot TF(d,s) \cdot (\text{others})}$$

深さ d 、照射野 s での線量

次の条件の X 線の基準深吸収線量(cGy)を求めなさい。測定は校正深で実施した。

$$TPR_{20,10} : 0.70$$

$$k_{Q,Q_0} : 0.985$$

$$N_{D,W,Q_0} : 5.400 \times 10^{-2} \text{ (Gy/nC)}$$

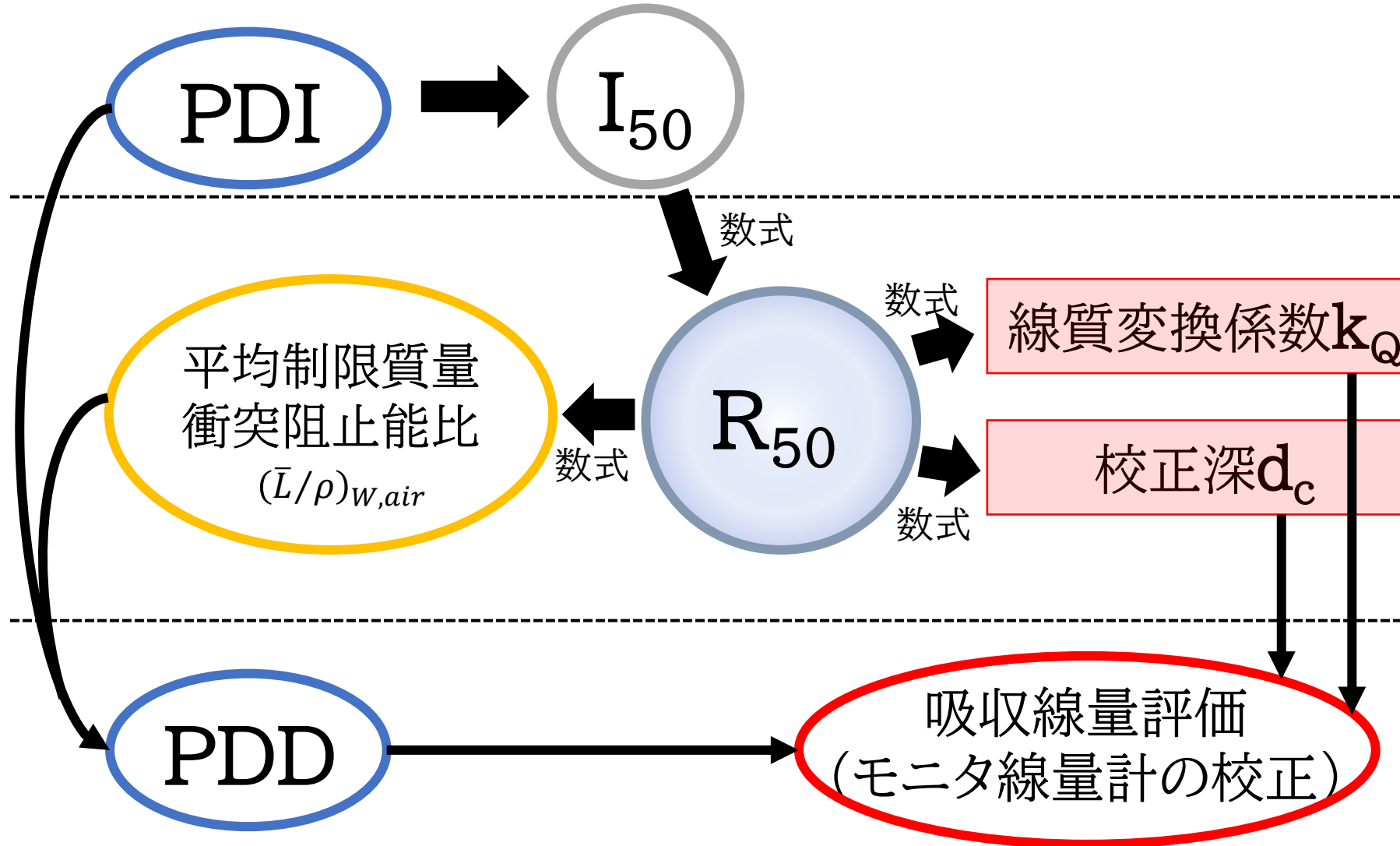
$$\text{補正後の表示値} : 29.5 \text{ nC}$$

$$TMR(dc) : 0.78$$

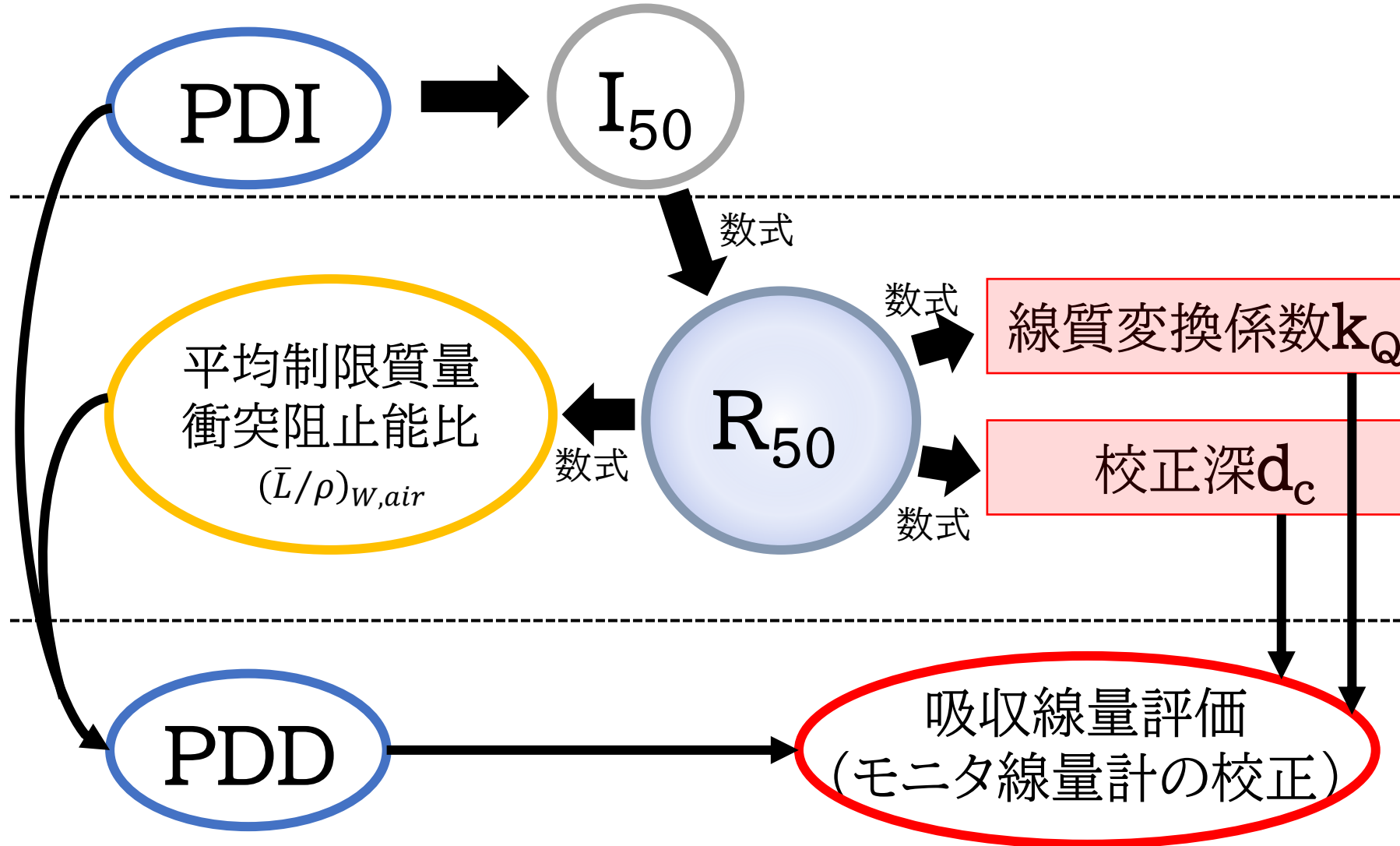
この時の照射MUは、200 MUであった。DMUの値はいくらか？

高エネルギー電子線の水吸収線量の標準計測

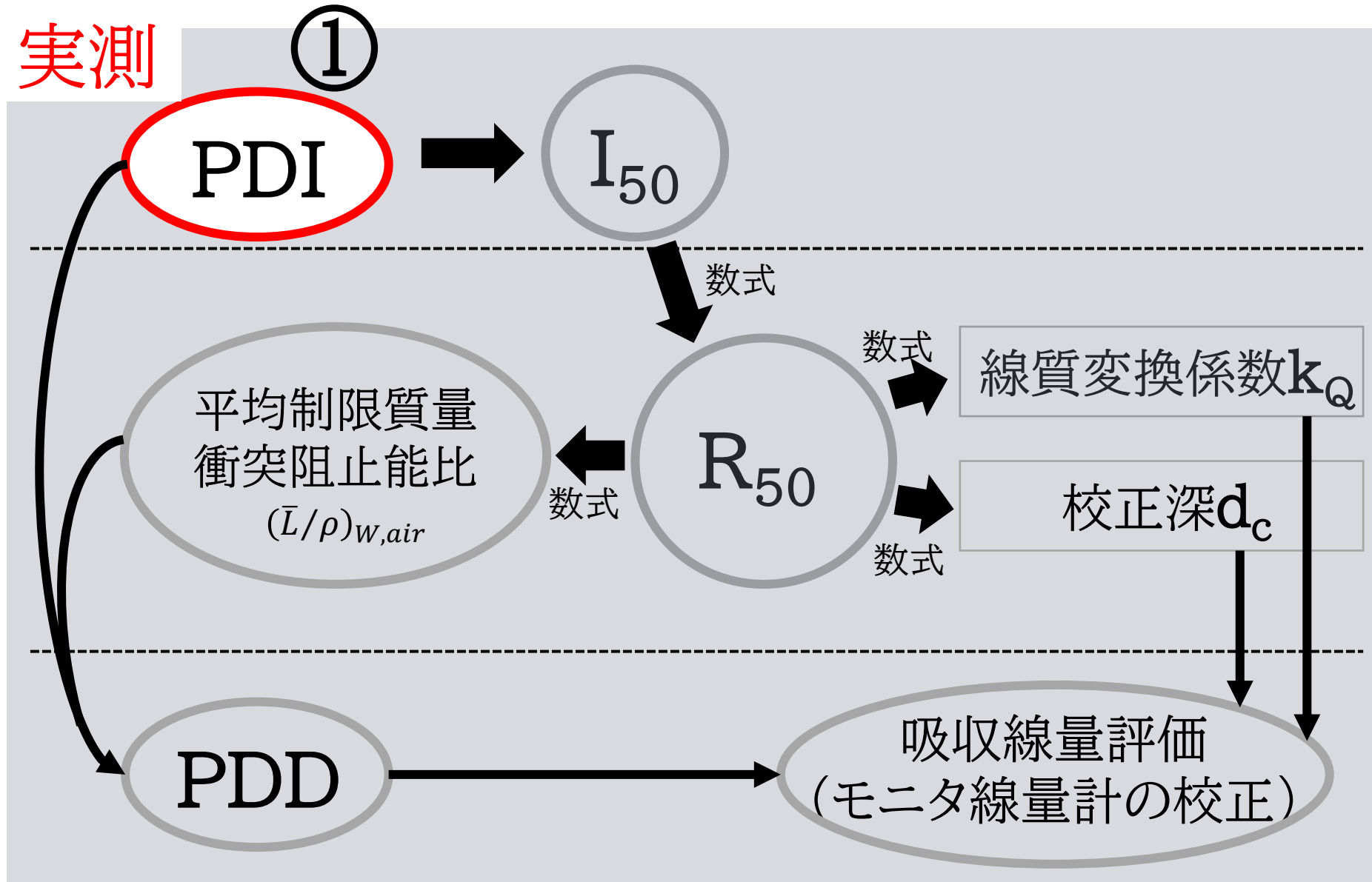
電子線吸収線量計測のながれ



電子線吸収線量計測のながれ

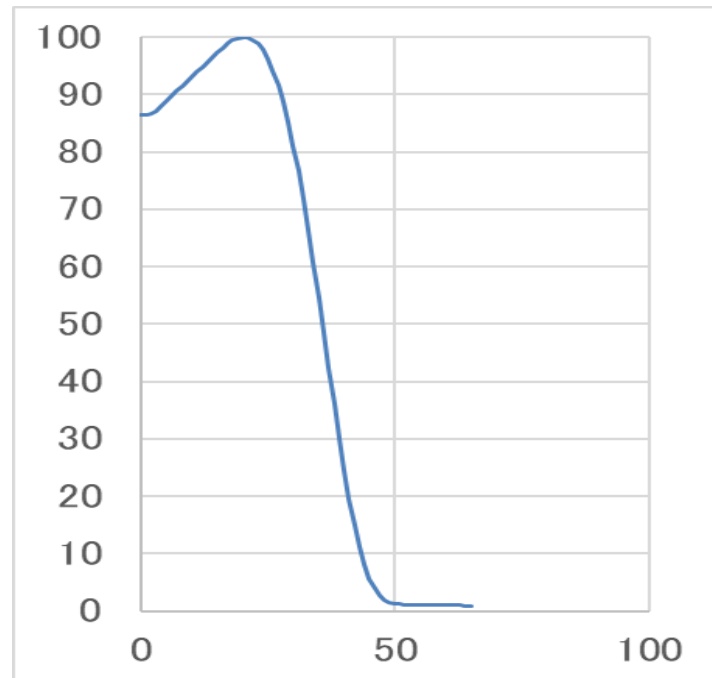


電子線吸収線量計測のながれ



① PDI(percent depth ionization: 深部電離量百分率)の測定

- 線量計を使用 (深さ方向の分解能が高い)
- 一定 (SSD:source surface distance)
- 線量計を深さ方向に移動させながら測定



① PDI(percent depth ionization: 深部電離量百分率)の測定

電離量の式(前回のと一緒)

$$M_Q = M_{raw} \cdot k_{TP} \cdot k_{pol} \cdot k_s \cdot k_{elec}$$

線量計表示値

極性効果補正係数
(では影響大)

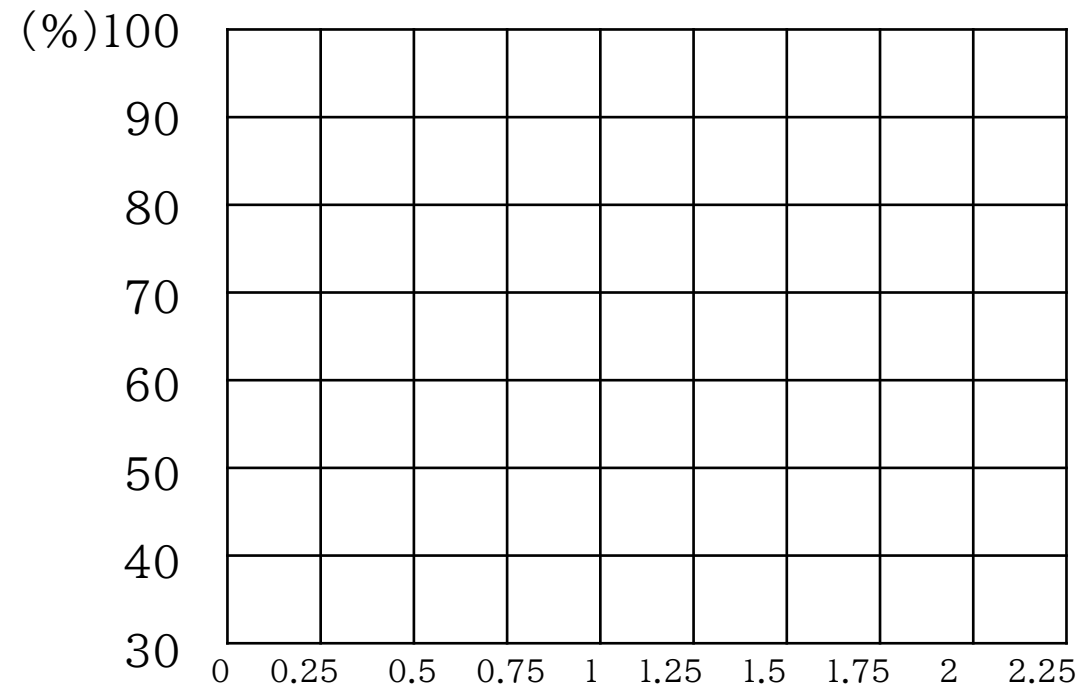
平行平板形電離箱線量計で補正が必要
(円筒形電離箱線量計では不要)

例題 PDIの計算

あるエネルギーの電子線のPDIを測定したところ次の表の様な結果となった。

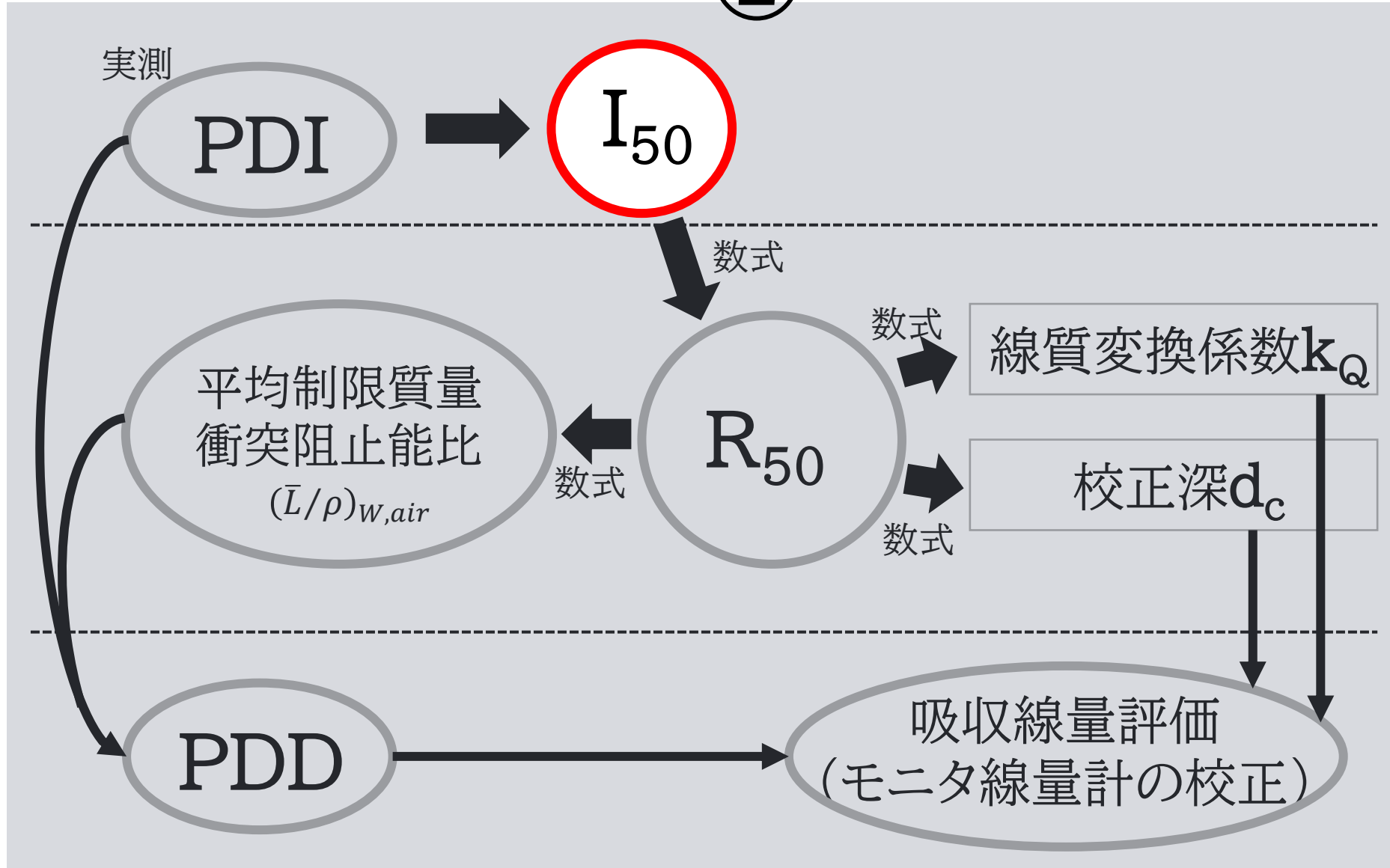
- 1) PDI(%)に換算せよ。
- 2) PDIのグラフを書いてください。

深さ (cm)	電離量 (nC)	PDI (%)
0	16	
0.25	18	
0.5	19	
0.75	19.5	
1.0	20	
1.25	19	
1.5	18	
1.75	14	
2.0	10	
2.25	6	

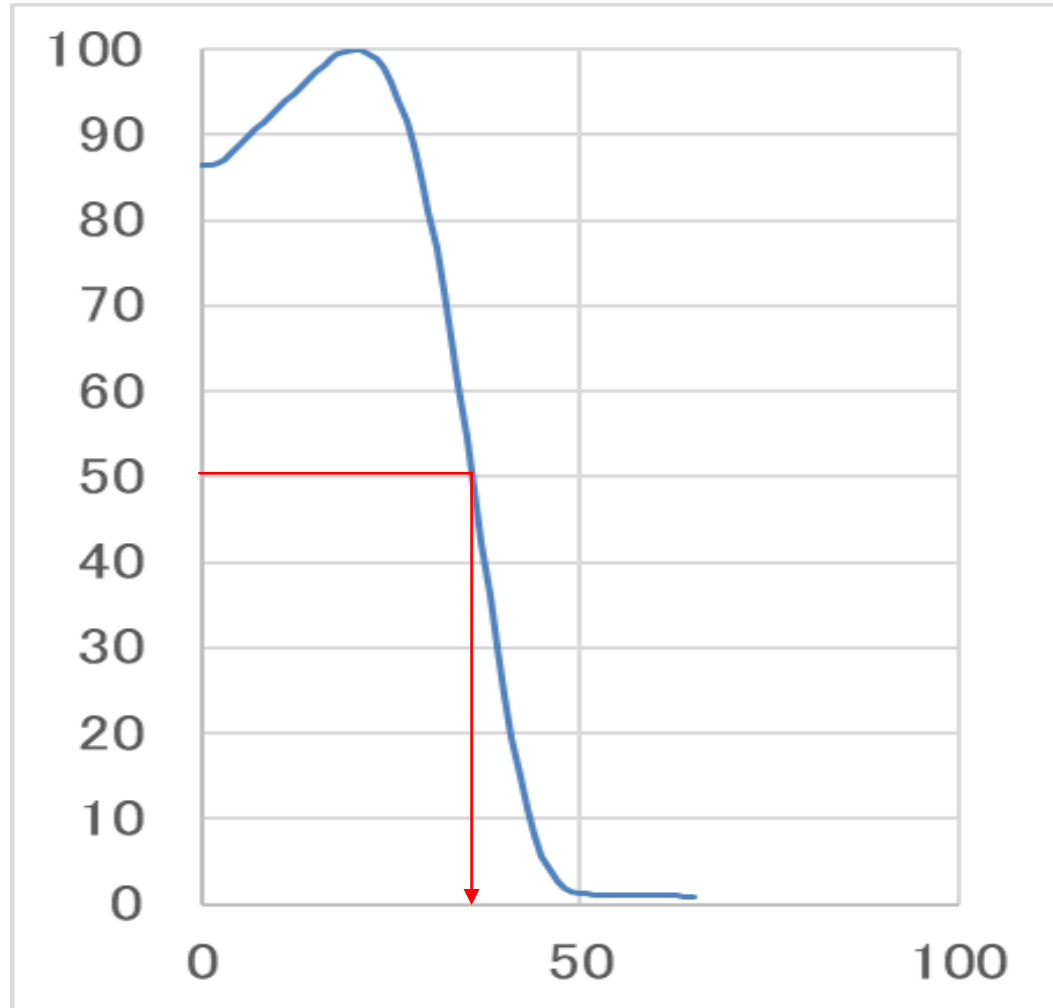


電子線吸収線量計測のながれ

②



② I_{50} (深部電離量半価深) を算出



PDIが50%になる深さ

最大深 d_{\max} \Rightarrow

I_{50} \Rightarrow

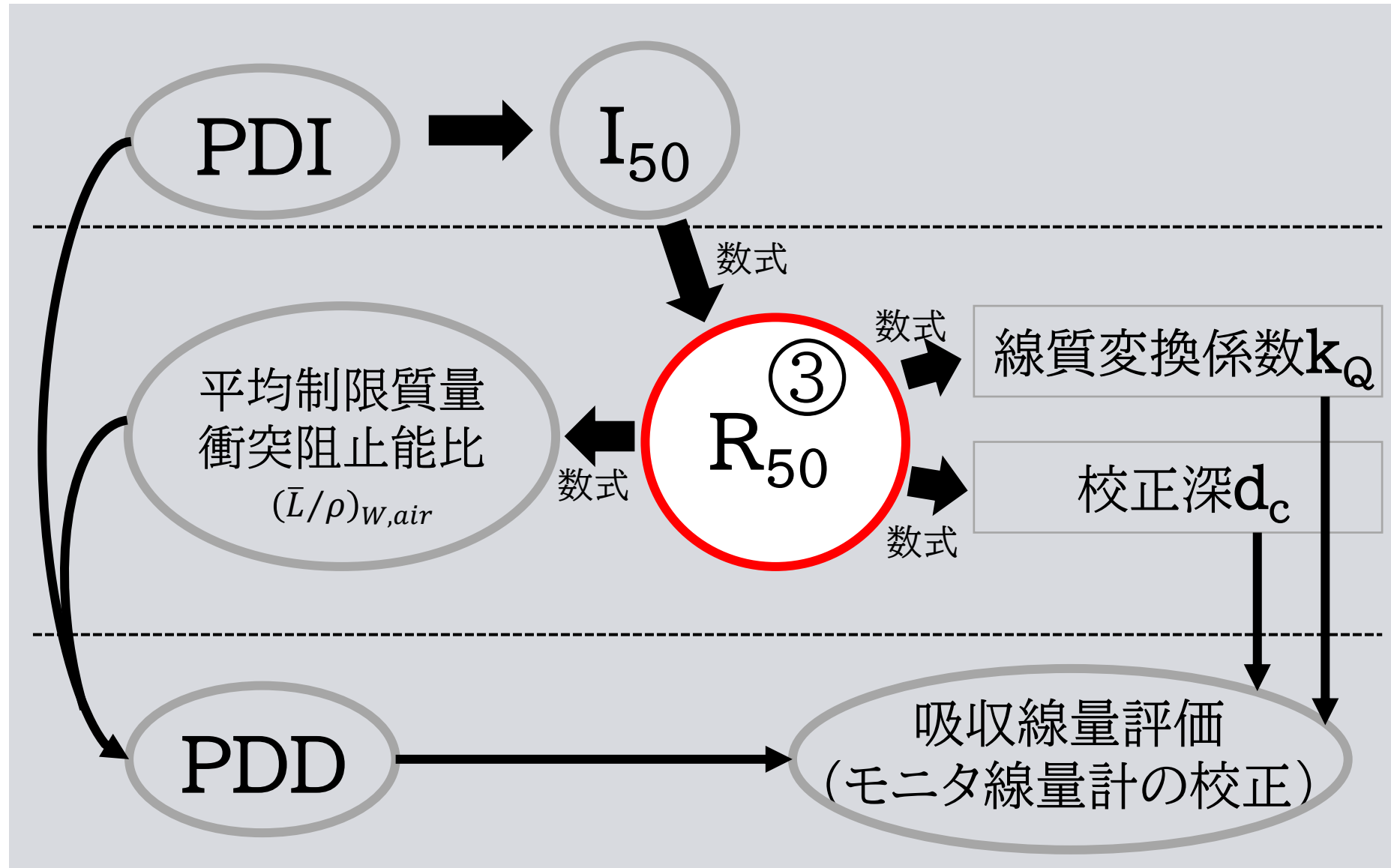
Depth	%
0.0	74.3
1.0	75.6
2.0	77.4
3.0	79.8
4.1	82.1
5.0	84.5
6.1	86.9
6.9	89.6
8.1	91.9
9.0	94.2
10.1	96.4
11.0	98.1
12.1	99.3
12.9	100.0
14.2	99.8
15.1	98.8
16.1	96.9
17.0	94.3
18.2	89.9
19.0	85.5
20.2	78.9
21.1	72.9
22.1	65.2
23.1	57.4
24.2	48.3
25.1	40.8

② I_{50} (深部電離量半価深) を算出

Depth	%
0.0	74.3
1.0	75.6
2.0	77.4
3.0	79.8
4.1	82.1
5.0	84.5
6.1	86.9
6.9	89.6
8.1	91.9
9.0	94.2
10.1	96.4
11.0	98.1
12.1	99.3
12.9	100.0
14.2	99.8
15.1	98.8
16.1	96.9
17.0	94.3
18.2	89.9
19.0	85.5
20.2	78.9
21.1	72.9
22.1	65.2
23.1	57.4
24.2	48.3
25.1	40.8

$I_{50} \Rightarrow$

電子線吸収線量計測のながれ



③ R_{50} (深部量半価深)を算出

I_{50} :

R_{50} :

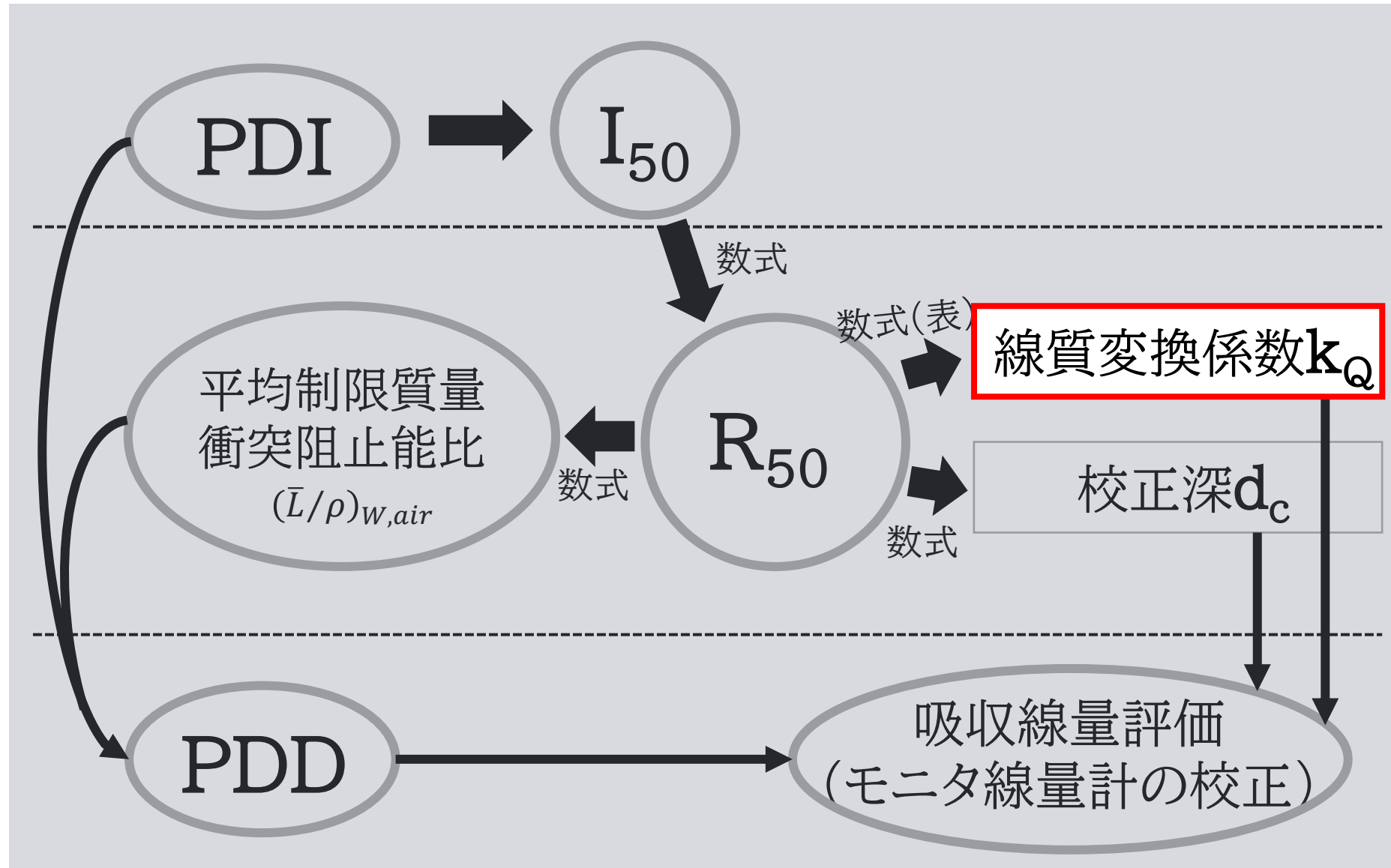
R_{50} は電子線の線質指標 (X線の線質指標は)

$$I_{50} \leq 10 \text{ gcm}^{-2} \text{ のとき } R_{50} = 1.029I_{50} - 0.06$$

$$I_{50} > 10 \text{ gcm}^{-2} \text{ のとき } R_{50} = 1.059I_{50} - 0.37$$

gcm^{-2} : 単位面積質量 (密度: gcm^{-3})

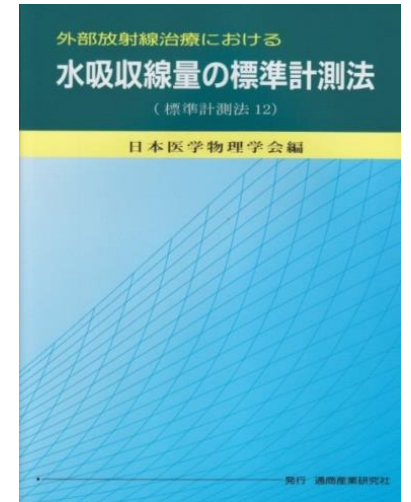
電子線吸収線量計測のながれ



④ k_Q (線質変換係数) を表から読み取る

電離箱の種類ごとに、

線質指標 R_{50} と k_Q の関係が一覧表になっている



線質変換係数 k_Q

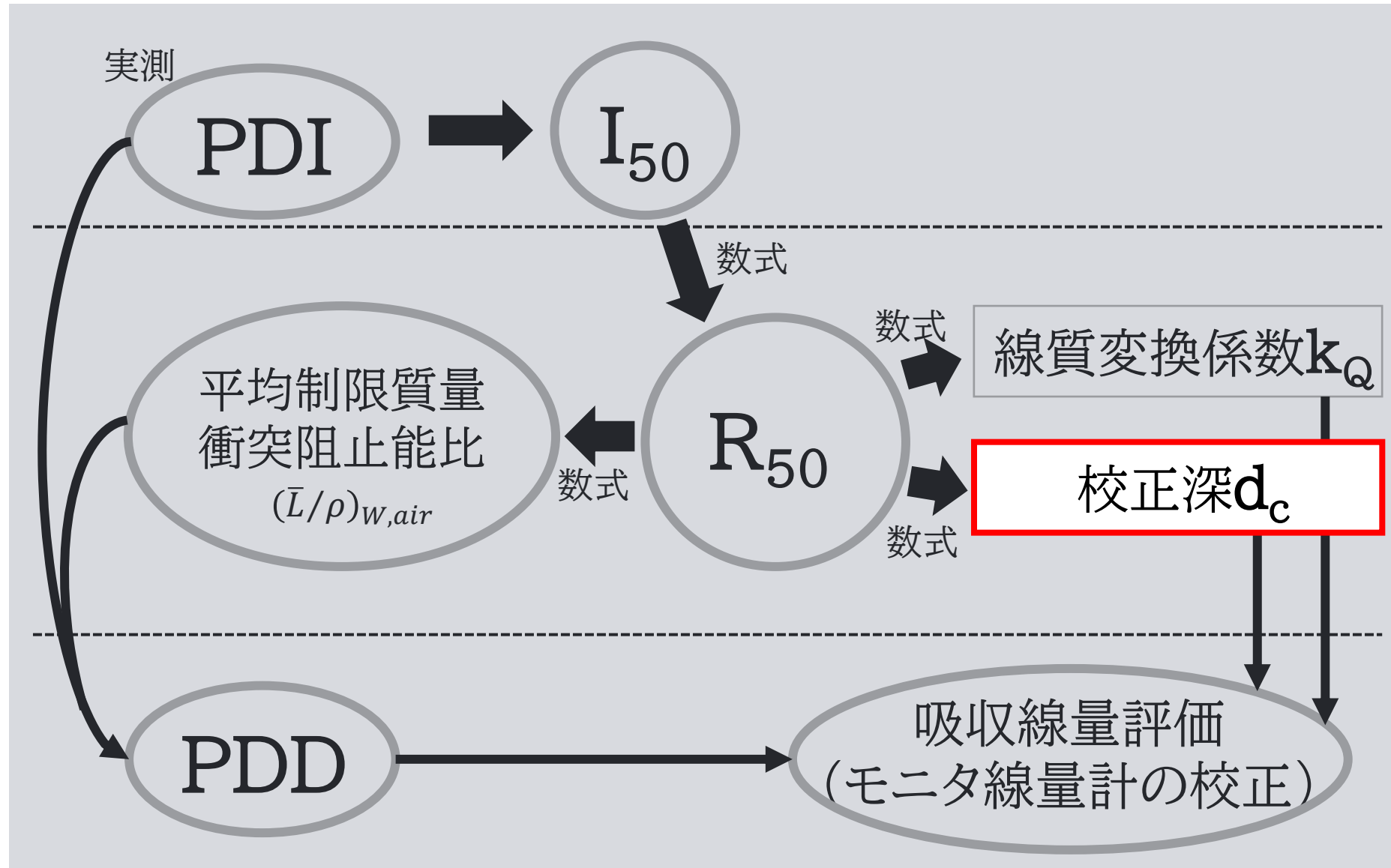
電離箱線量計の校正は ^{60}Co γ 線を基準線質として行われるため、
線質による電離箱線量計の感度の違いを補正するための係数

④ k_Q (線質変換係数) を表から読み取る

表 4.3 校正深における電子線に対する線質変換係数 k_Q

電離箱	線 質 : R_{50}														
	1.0	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	10.0	10.5
- 平行平板形 -															
NACP-02	0.978	0.964	0.949	0.940	0.933	0.927	0.921	0.916	0.912	0.908	0.905	0.898	0.893	0.884	0.882
Roos	0.989	0.974	0.959	0.950	0.942	0.936	0.930	0.925	0.921	0.917	0.913	0.906	0.901	0.891	0.889
Classic. Markus	0.979	0.966	0.952	0.943	0.936	0.930	0.925	0.921	0.916	0.913	0.909	0.904	0.898	0.890	0.888
- 円筒形 -															
応用技研															
C110 (JARP)							0.918	0.916	0.914	0.911	0.909	0.905	0.901	0.894	0.893
Capintec															
PR-06C							0.921	0.919	0.917	0.914	0.912	0.909	0.905	0.898	0.896
Exradin															
A2							0.922	0.921	0.920	0.919	0.918	0.915	0.912	0.907	0.906
T2							0.891	0.890	0.889	0.887	0.886	0.884	0.881	0.876	0.875
A12							0.926	0.924	0.922	0.920	0.918	0.914	0.910	0.903	0.901
A12S							0.926	0.924	0.922	0.920	0.918	0.914	0.910	0.903	0.901
A19							0.927	0.924	0.922	0.920	0.918	0.914	0.910	0.903	0.901
IBA															
CC25/ IC25							0.925	0.922	0.920	0.918	0.916	0.912	0.908	0.901	0.899
FC65-P/ IC69							0.921	0.919	0.917	0.915	0.913	0.909	0.905	0.898	0.896
FC65-G/ IC70							0.927	0.925	0.922	0.920	0.918	0.914	0.910	0.903	0.902
Nuclear Associates															
30-716							0.925	0.922	0.920	0.918	0.916	0.912	0.908	0.901	0.899
30-751							0.921	0.919	0.917	0.915	0.913	0.909	0.905	0.898	0.896
30-752							0.927	0.924	0.922	0.920	0.918	0.914	0.910	0.903	0.902
Nuclear Enterprise															
2505/A							0.908	0.906	0.903	0.901	0.899	0.895	0.891	0.884	0.883
2505/3, 3A							0.926	0.923	0.921	0.919	0.917	0.913	0.909	0.903	0.901
2505/3, 3B							0.909	0.907	0.905	0.903	0.901	0.897	0.894	0.887	0.885
2571							0.926	0.923	0.921	0.919	0.917	0.913	0.909	0.903	0.901
2581 (CE:A150)							0.904	0.902	0.900	0.898	0.896	0.892	0.889	0.882	0.880
2581 (CE:A1)							0.911	0.909	0.907	0.905	0.903	0.899	0.895	0.889	0.887

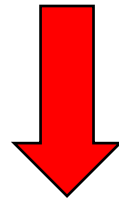
電子線吸収線量計測のながれ



⑤

⑤ 校正深 d_c を求める

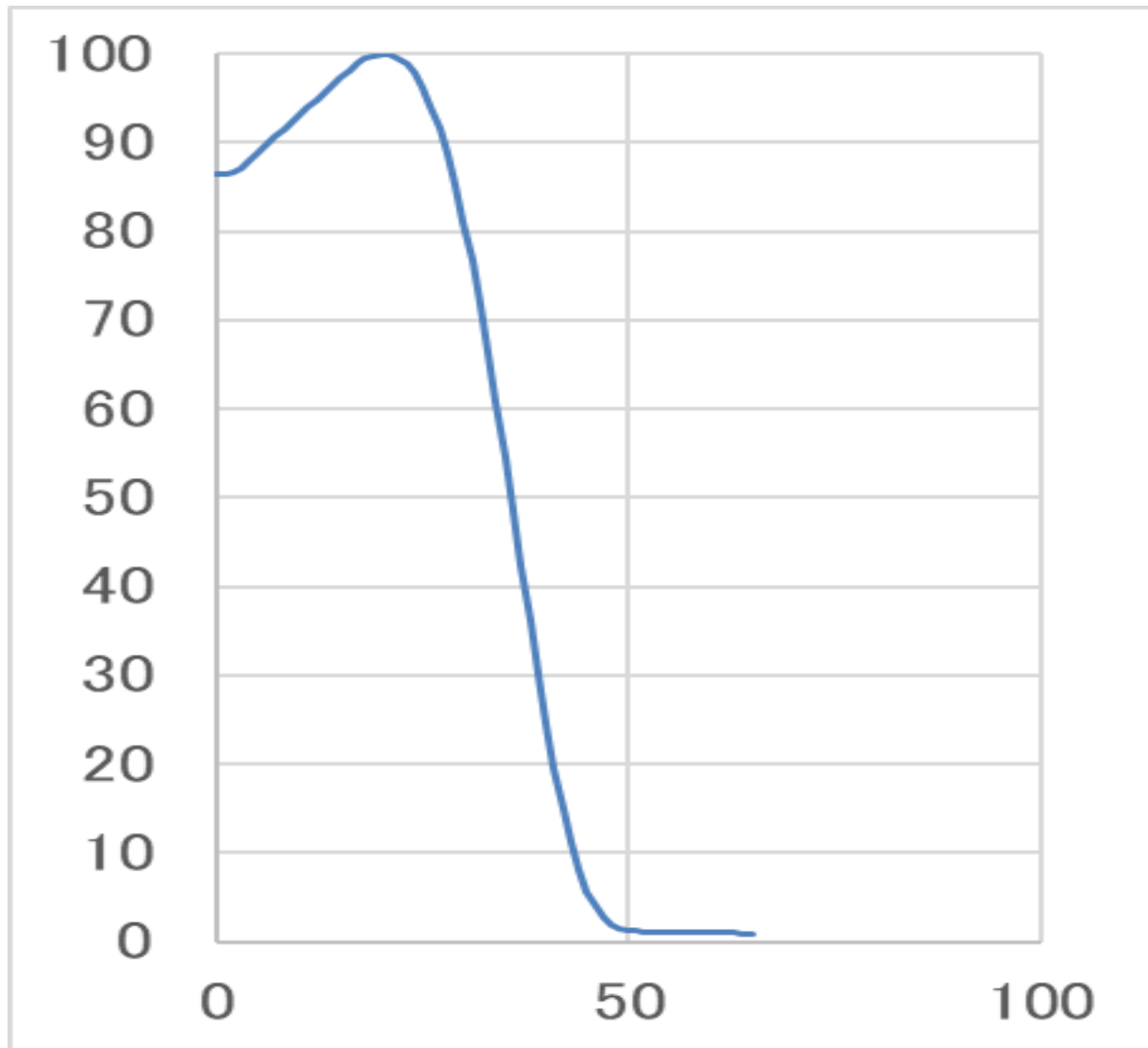
モニタ線量計の校正を行う深さ = 電子線の測定に適切な位置
混入電子の影響が少なく、装置間の差が少ない深さが理想



R_{50} と校正深 d_c の関係式

$$d_c = 0.6R_{50} - 0.1 \text{ gcm}^{-2}$$

PDIから校正深 d_c を求めてみよう



$$I_{50} = 24.0 \text{ mm}$$

Depth(mm)	%
0.0	74.3
1.0	75.6
2.0	77.4
3.0	79.8
4.1	82.1
5.0	84.5
6.1	86.9
6.9	89.6
8.1	91.9
9.0	94.2
10.1	96.4
11.0	98.1
12.1	99.3
12.9	100.0
14.2	99.8
15.1	98.8
16.1	96.9
17.0	94.3
18.2	89.9
19.0	85.5
20.2	78.9
21.1	72.9
22.1	65.2
23.1	57.4
24.2	48.3
25.1	40.8

PDIから校正深 d_c を求める

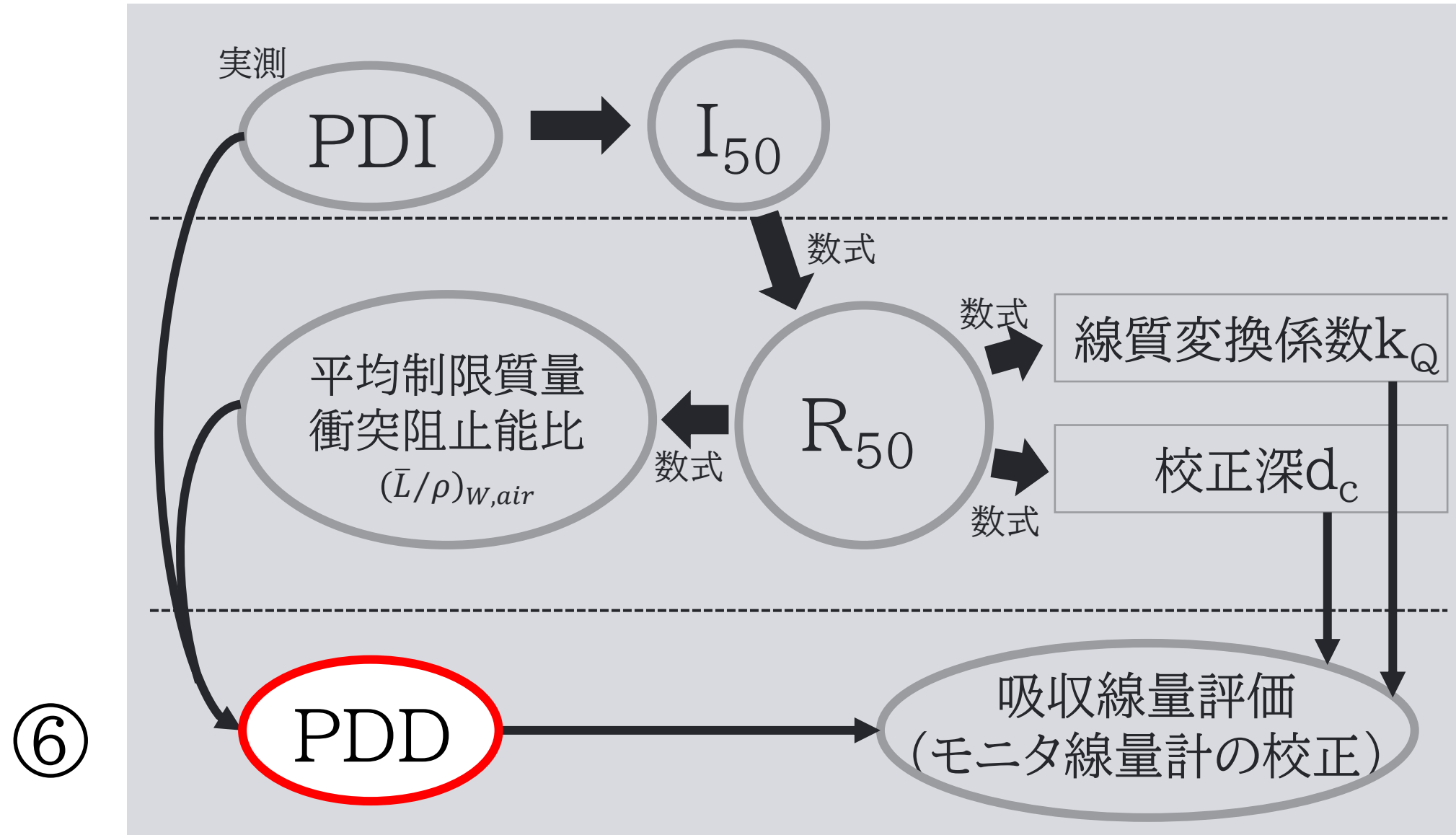
$$R_{50} = 1.029I_{50} - 0.06 \quad (I_{50} \leq 10 \text{ gcm}^{-2})$$
$$R_{50} = 1.059I_{50} - 0.37 \quad (I_{50} > 10 \text{ gcm}^{-2})$$

$$d_c = 0.6R_{50} - 0.1 \text{ gcm}^{-2}$$

$$I_{50} = 24.0 \text{ mm}$$

Depth(mm)	%
0.0	74.3
1.0	75.6
2.0	77.4
3.0	79.8
4.1	82.1
5.0	84.5
6.1	86.9
6.9	89.6
8.1	91.9
9.0	94.2
10.1	96.4
11.0	98.1
12.1	99.3
12.9	100.0
14.2	99.8
15.1	98.8
16.1	96.9
17.0	94.3
18.2	89.9
19.0	85.5
20.2	78.9
21.1	72.9
22.1	65.2
23.1	57.4
24.2	48.3
25.1	40.8

電子線吸収線量計測のながれ



⑥ PDD(percent depth dose: 深部量百分率)を求める

定義:

$$PDD(d, A_0) = 100 \cdot \frac{M_d \cdot N_{D,W,Q_0} \cdot k_{Q,d}}{M_{max} \cdot N_{D,W,Q_0} \cdot k_{Q,max}}$$

⑥ PDD(percent depth dose: 深部量百分率)を求める

定義: 最大深吸収線量に対する任意の深さの水吸収線量の百分率

$$PDD(d, A_0) = 100 \cdot \frac{M_d \cdot \cancel{N_{D,W,Q_0}} \cdot k_{Q,d}}{M_{max} \cdot \cancel{N_{D,W,Q_0}} \cdot k_{Q,max}}$$

PDI

電子線は深さが変わるとエネルギーが変化するから、

$k_{Q,max}$ と $k_{Q,d}$ の値が違う！！

線質変換係数： k_{Q, Q_0} コバルトから自施設のエネルギーに変換

$$X = N_{D, W, Q} = N_{D, W, Q_0} \times k_{Q, Q_0}$$

↓ 計算式は

$$k_{Q, Q_0} = \frac{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}}^{\text{water}} P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{dis}} P_{\text{cel}} \right] Q}{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}}^{\text{water}} P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{dis}} P_{\text{cel}} \right] {}^{60}\text{Co}}$$

阻止能 ↓

エネルギーの違いにより電離箱の反応が異なるため、
線質の違いの補正が必要(つまりエネルギー依存)

⑥ PDD(percent depth dose: 深部量百分率)を求める

定義: 最大深吸収線量に対する任意の深さの水吸収線量の百分率

$$PDD(d, A_0) = 100 \cdot \frac{M_d \cdot \cancel{N_{D,W,Q_0}} \cdot k_{Q,d}}{M_{max} \cdot \cancel{N_{D,W,Q_0}} \cdot k_{Q,max}}$$

$k_{Q,max}$ と $k_{Q,d}$ の値が違う!!

⇒ つまり 最大深 d_{max} と測定深 d における

「阻止能の比」の比

⑥ PDD(percent depth dose: 深部量百分率)を求める

$\left(\frac{L}{\rho}\right)_{w,air}$: 水/空気の平均制限質量衝突阻止能比

電子線は深さにより、阻止能比も変化する

ある深さの阻止能比は R_{50} から求めることができる

$$\left(\frac{L}{\rho}\right)_{w,air}(R_{50}, d) = \frac{a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3y}{1 + a_4x + a_5x^2 + a_6x^3 + a_7y}$$

$$a_0=1.0752 \quad a_1=-0.50867 \quad a_2=0.088670 \quad a_3=-0.08402 \\ a_4=-0.42806 \quad a_5=0.064627 \quad a_6=0.003085 \quad a_7=-0.12460$$

$$x = \log_e R_{50} \quad y = d/R_{50}$$

平均制限質量衝突阻止能 $\left(\frac{L}{\rho}\right)$

阻止能: 二次電子が単位長さあたりに失うエネルギー
(物質が二次電子をストップ(阻止)する能力のこと)

平均: エネルギーの広がりや損失を考慮した平均の阻止能

制限: カットオフエネルギー Δ 以下の阻止能

質量: 密度 (ρ) で除した阻止能

衝突: 阻止能 = 衝突阻止能 + 放射阻止能
(制動放射成分を除いた阻止能)

平均制限質量衝突阻止能

円筒形電離箱の断面

Spencer-Attixの制限付き阻止能

Bragg Grayの空洞理論の条件が成立しない

⇒空洞のサイズを考慮する必要がある

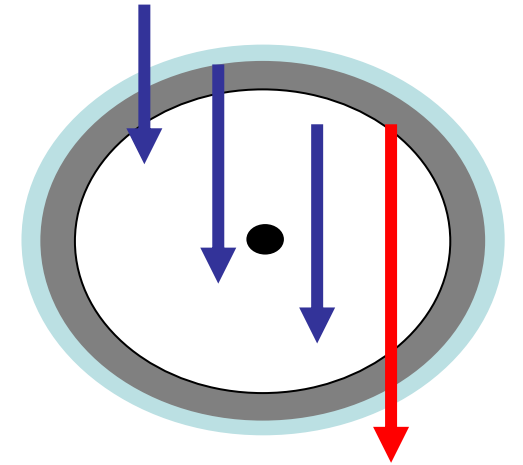
空洞内の電離に関する二次電子のエネルギーのみで阻止能を考える

二次電子が空洞内を丁度横切ることが出来る

エネルギーをカットオフエネルギー(Δ)と定義して

Δ より低いエネルギーという制限を設けて阻止能を求める。

($\Delta = 10\text{keV}$)



⑥ PDD(percent depth dose: 深部量百分率)を求める

定義: 最大深吸収線量に対する任意の深さの水吸収線量の百分率

$$PDD(d, A_0) = 100 \cdot \frac{M_d \cdot \cancel{N_{D,W,Q_0}}}{M_{max} \cdot \cancel{N_{D,W,Q_0}}} \frac{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{W,air} \right]_{Q,d}}{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{W,air} \right]_{Q,d,max}}$$

PDI

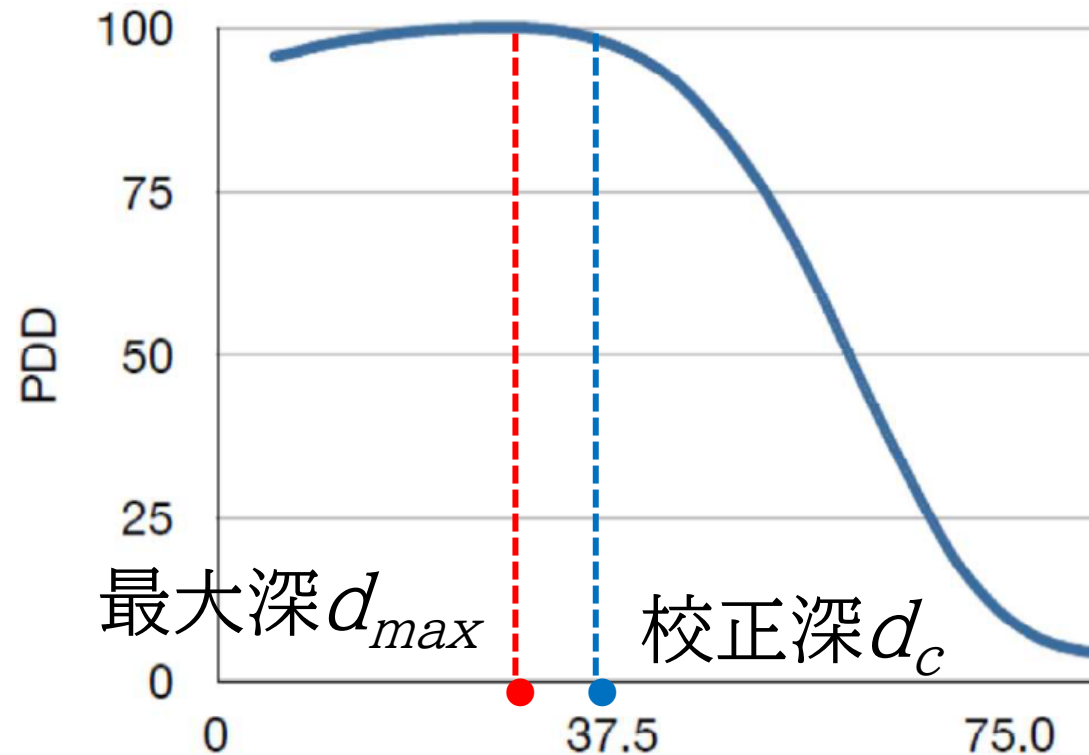
「阻止能の比」の比

に と における の比を
かけることによって を求める

ゴール！ 線量最大深吸収線量を求める

モニタ線量計の感度校正

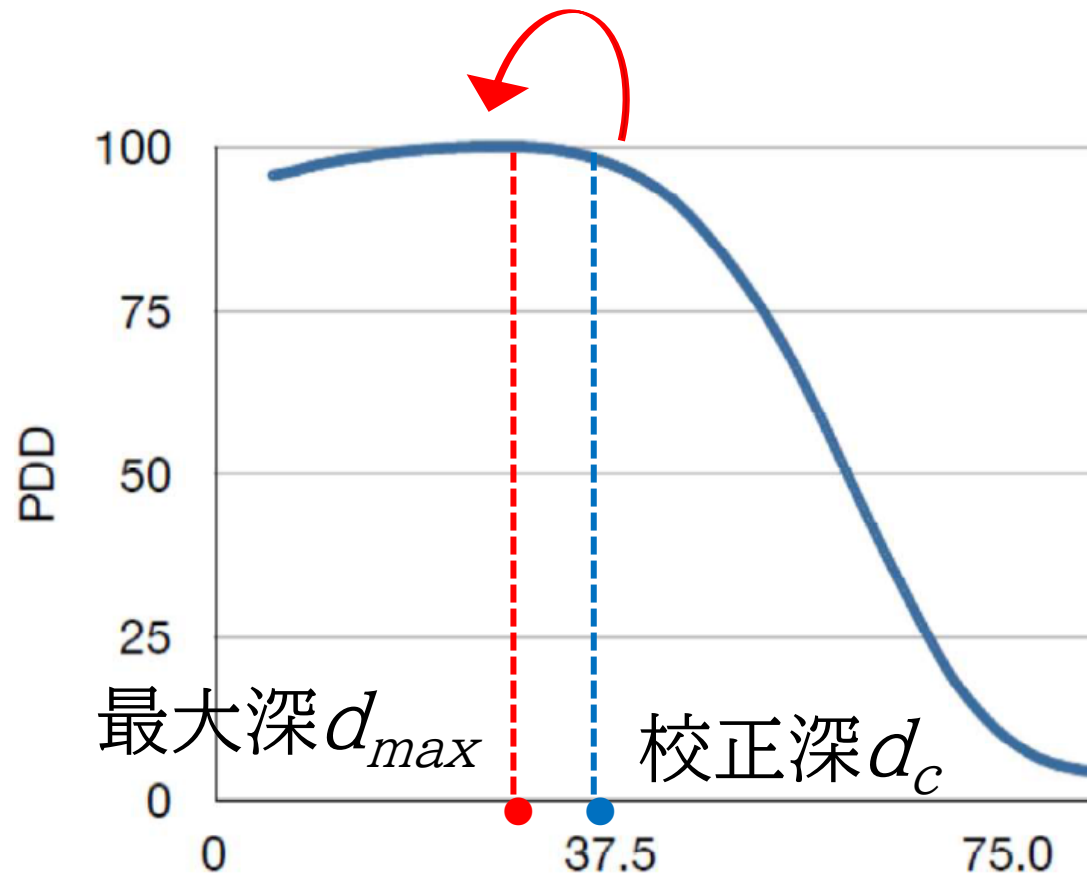
100MU照射して100 cGyになるように校正 ←どこで??



ゴール！ 線量最大深吸収線量を求める

モニタ線量計の感度校正

100MU照射して100 cGyになるように校正 ←どこで??

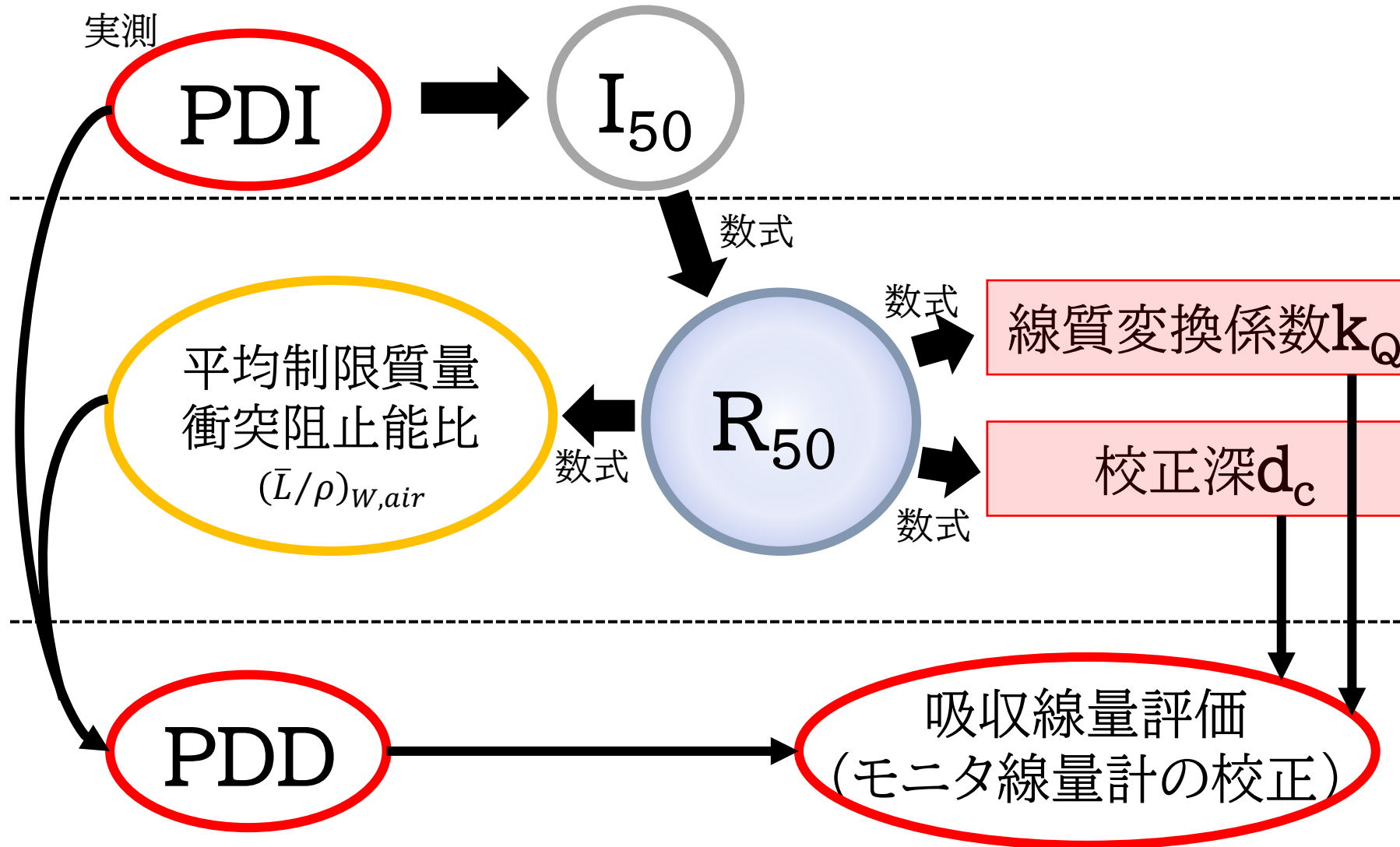


= で!



PDDを用いて
校正深吸収線量から
最大深吸収線量を求める

なぜ R_{50} が線質指標なのか



なぜ R_{50} が線質指標なのか

① R_{50} を使って校正深 d_c における平均制限質量衝突阻止能比がわかる

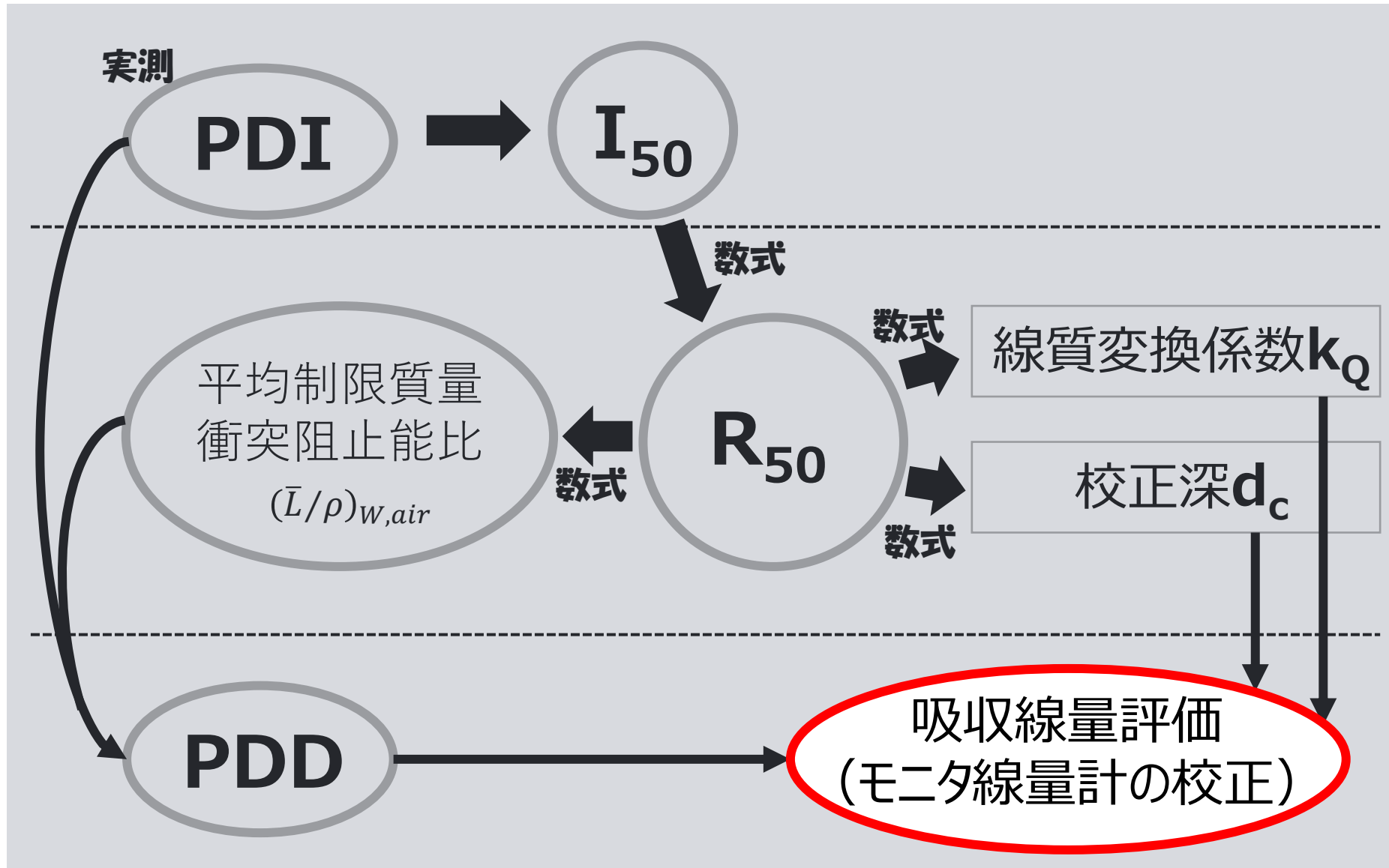
② 精確な吸収線量の測定に必要な校正深 d_c は R_{50} から求める

$$d_c = 0.6R_{50} - 0.1 \text{ (cm)}$$

③ R_{50} は線質変換係数 k_Q を求めるために必要

電子線吸収線量の評価に必要な係数、値はすべて線質指標 R_{50} から求めることができる

電子線吸収線量計測の概要



高エネルギー電子線モニタ線量計校正の流れ

$$D_r = M_{raw} \times k_{TP} \times k_s \times k_{pol} \times k_{elec} \times N_{D,W} \times k_Q / PDD_c$$

毎回測定

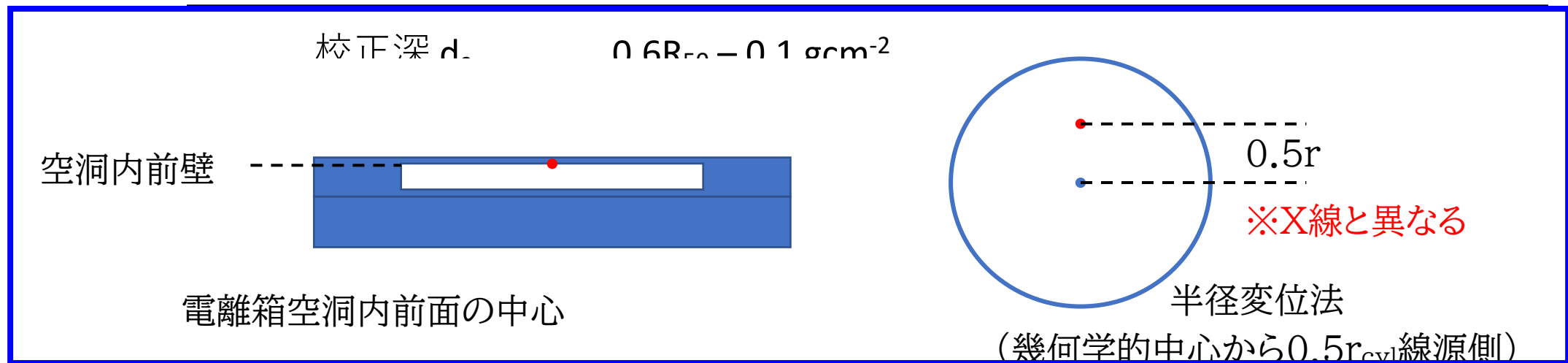
事前に測定

- リファレンス線量計を校正に出す / 1年
⇒ 水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ 、電位計校正係数 k_{elec}
- PDI測定 ⇒ PDD
- 線質指標 R_{50} ⇒ 線質変換係数 k_Q 、校正深 d_c
- 極性効果補正係数 k_{pol} 、イオン再結合補正係数 k_s

- モニタ線量計の校正 / 2週
⇒ 温度気圧補正係数 k_{TP} 、計測(M_{raw})

電子線の水吸収線量計測の基準条件

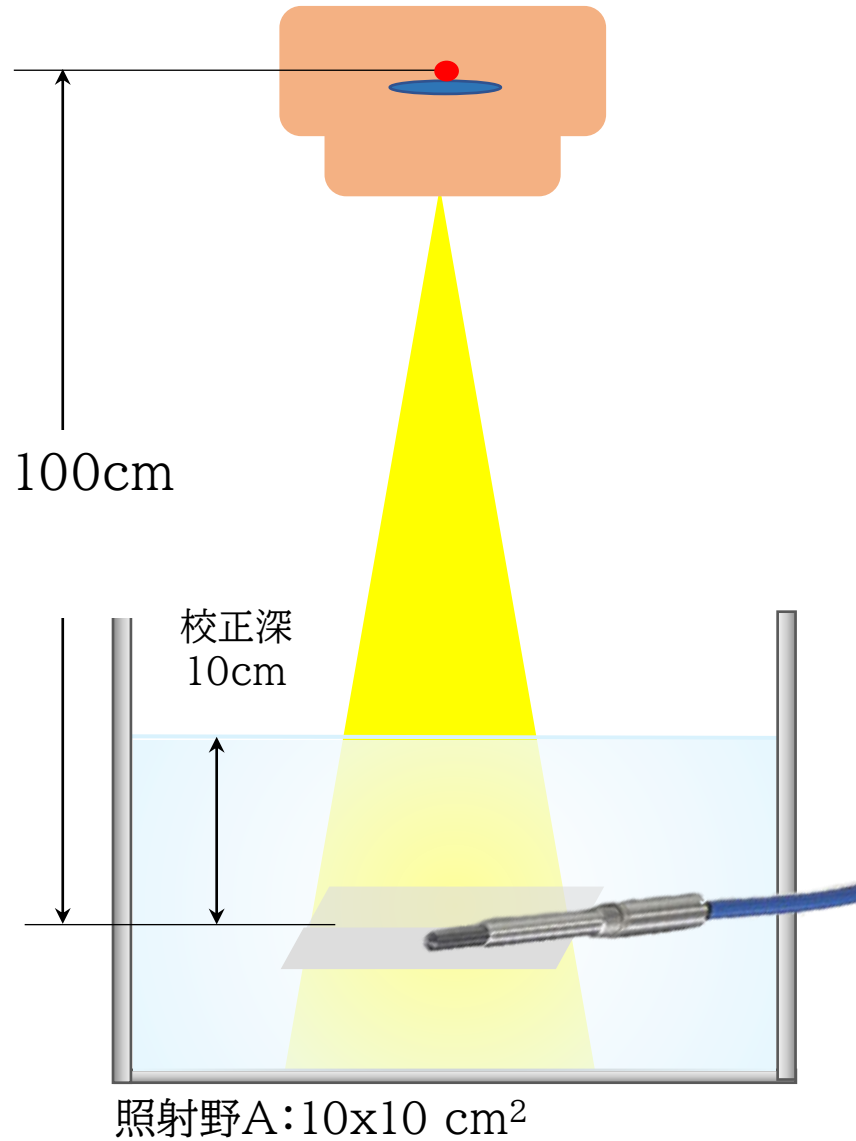
項目	基準値あるいは基準条件
ファントム材質	水 ($R_{50} > 4 \text{ gcm}^{-2}$) 水 or 水等価固体ファントム ($R_{50} < 4 \text{ gcm}^{-2}$) $E_0 < 10 \text{ MeV}$
電離箱	平行平板形 or ファーマ形 ($R_{50} > 4 \text{ gcm}^{-2}$) 平行平板形 ($R_{50} < 4 \text{ gcm}^{-2}$)
電離箱の基準点	平行平板形： ファーマ形：幾何学的中心から $0.5r_{\text{cyl}}$ 線源側



X線との水吸収線量計測の違い

- PDI→PDD (平均制限質量衝突阻止能比)
【X線:変化しない】
- 線質指標
【X線:TPR_{20,10}】
- 電離箱
【X線:ファーマ形】
- 校正深
【X線:10cm】
- 距離
【X線:STD=100cm】

X線モニタ校正



測定条件

ファントム：水

電離箱：ファーマ形電離箱

校正深 d_c ：10 cm

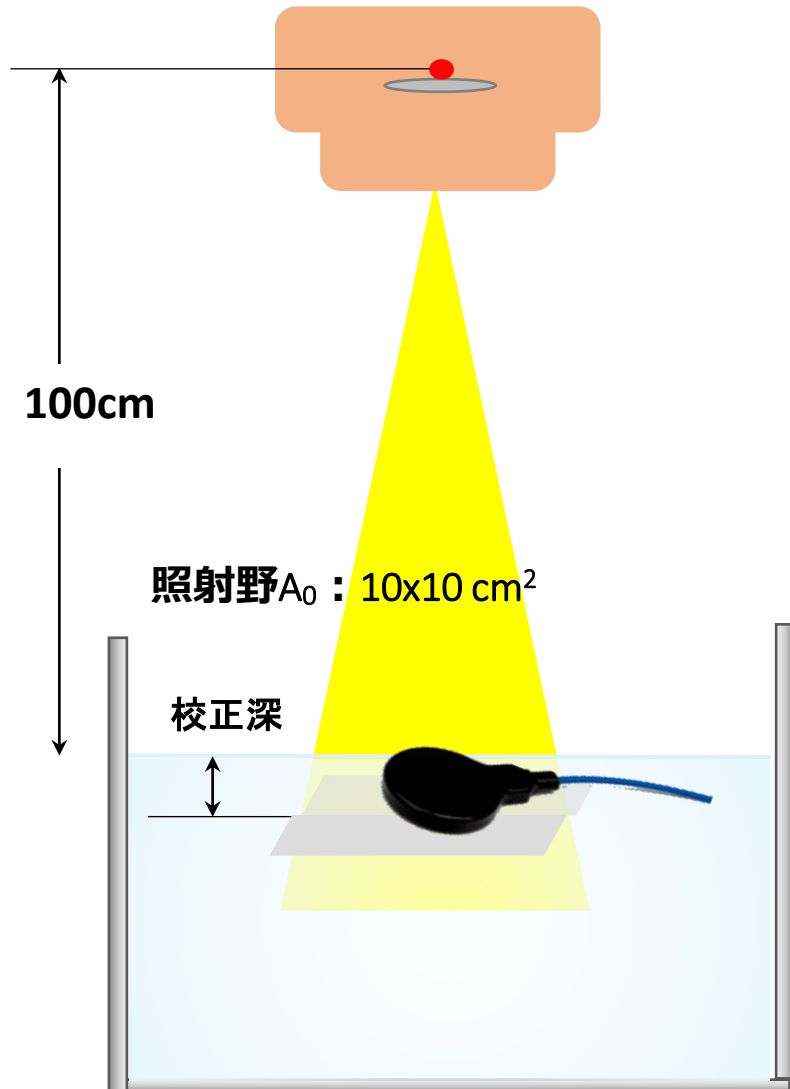
電離箱の基準点：幾何学的中心

SCD：100 cm

照射野：10×10 cm²

$$D_{\max} = \frac{D_c}{\quad}$$

電子線モニタ校正



測定条件

ファントム： 水

電離箱：

電離箱

校正深 d_c ：

cm

電離箱の基準点：

中心

S D： 100 cm

照射野： $10 \times 10 \text{ cm}^2$

$$D_{\max} = \frac{D_c}{\quad}$$

記号・略語のまとめ

	記号・略称		記号・略称
水吸収線量校正定数		線源回転軸間距離	SAD
線質変換係数		線源電離箱間距離	
イオン再結合補正係数		線源標的間距離	
極性効果補正係数		線源表面間距離	
温度気圧補正係数		深部電離用百分率	
電位計校正定数		深部量線量百分率	
校正深		電離量半価深	
線量最大深(ピーク深)		線量半価深	
組織最大線量比		組織ファントム線量比	