

水吸収線量(D_w)と組織吸収線量(D_m)について

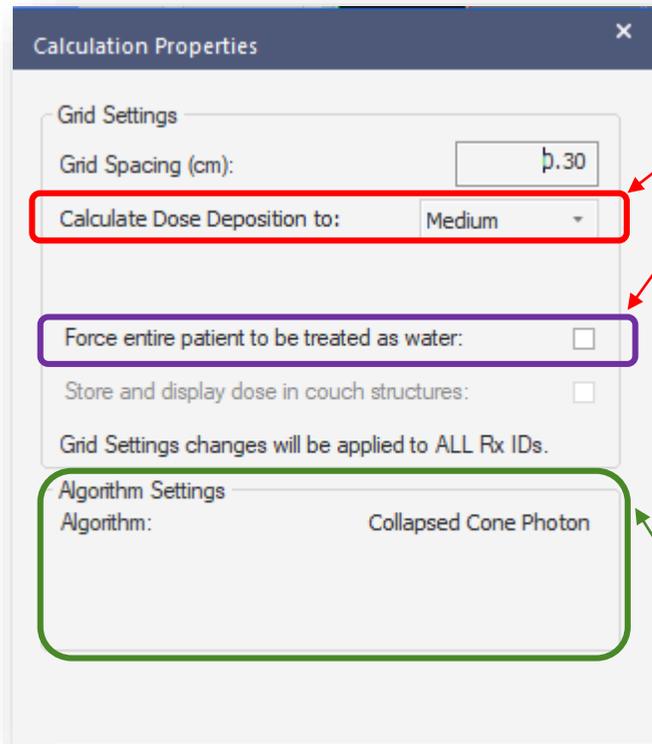
～Monacoへの実装を参考として

エレクタ株式会社

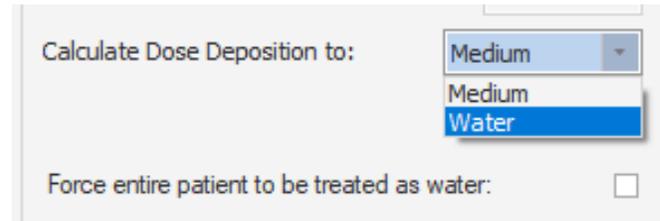
プロジェクト統括部アプリケーションフィジックス



Monacoには「水」と「組織」の選択を行う機能があります



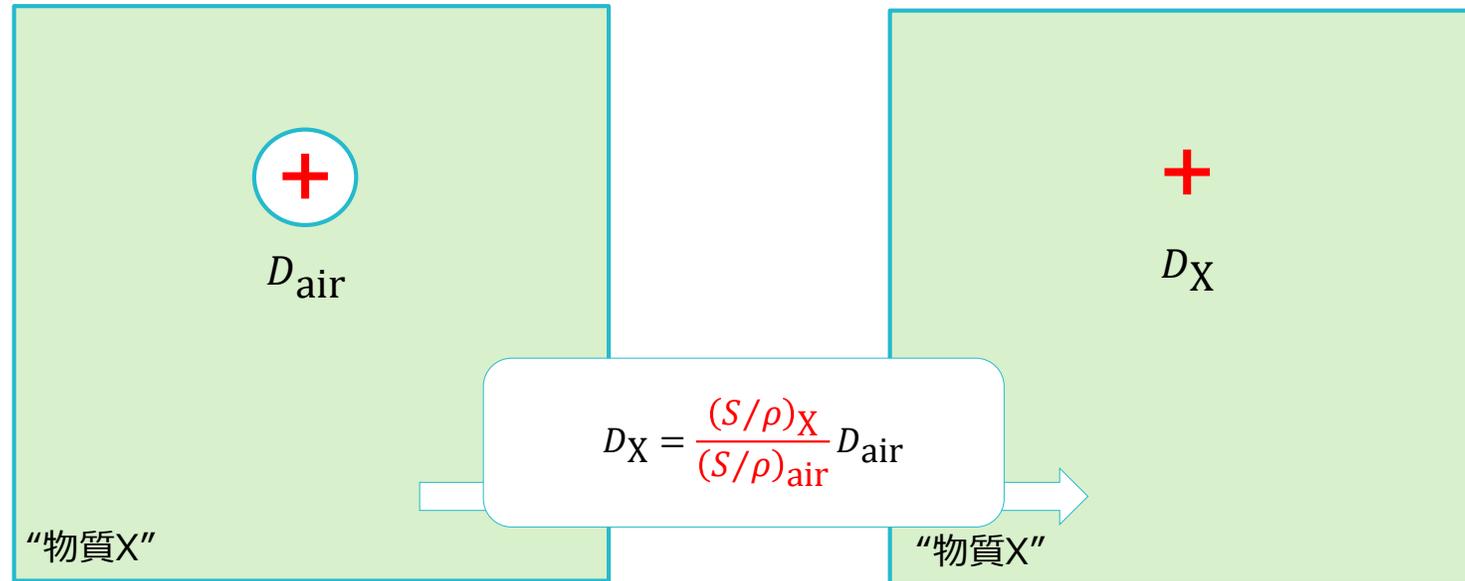
これはいったいなんでしょう？



	CCC	pMC	eMC
Calculate Dose to ... Medium	○	○	○
Calculate Dose to ... Water	×	○	○
Force entire patient to be treated as Water	○	△ (QAPlanのみ)	○

この部分はAlgorithmで違います。

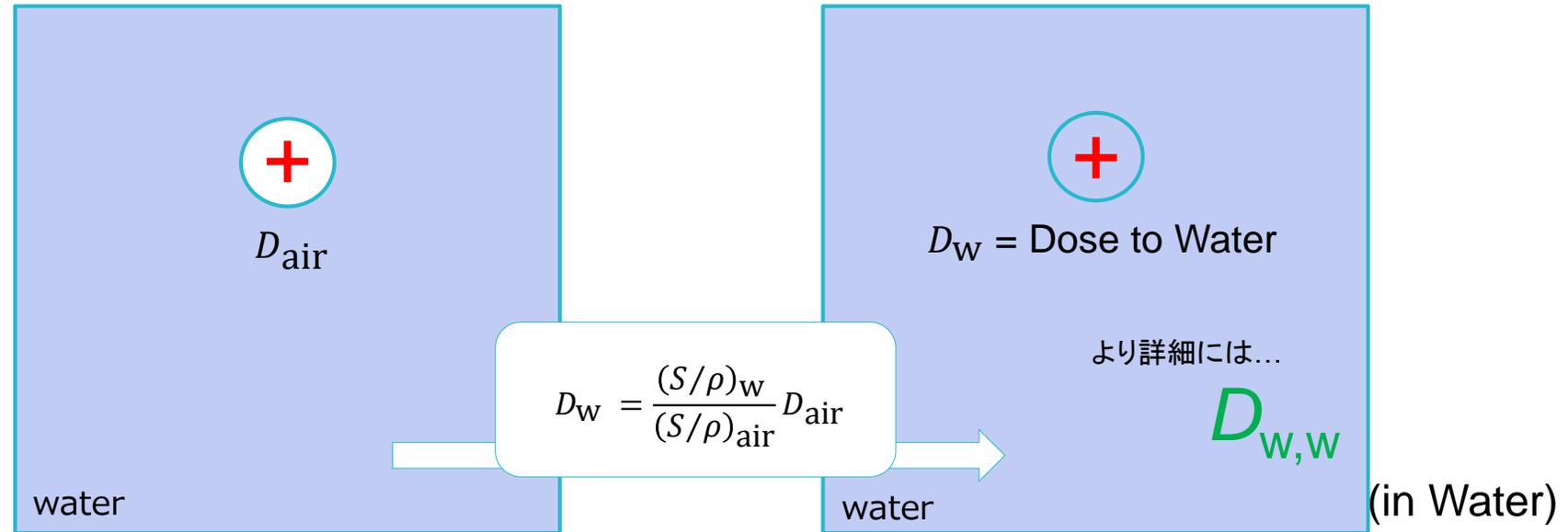
Bragg-Grayの空洞原理を思い出してみましょう



空洞原理が満たされていれば、物質Xへの吸収線量 D_X は、空洞の空気への吸収線量 D_{air} から **阻止能比** を使って換算することができます。

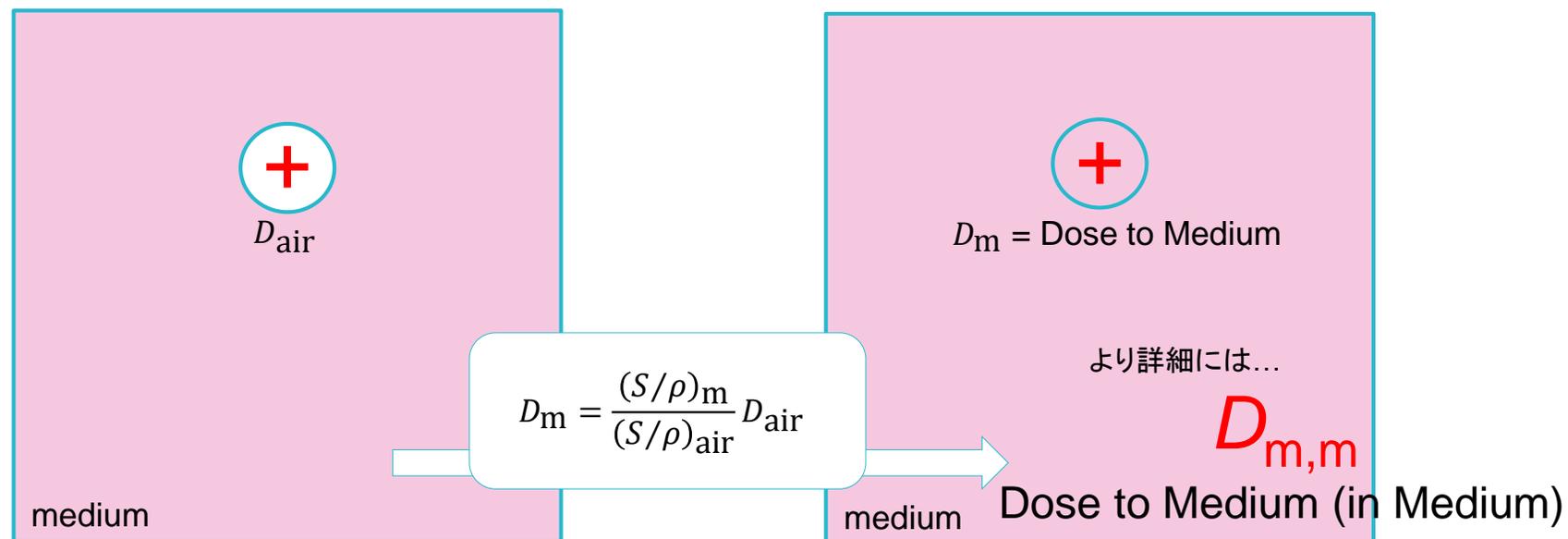
※正確にはその場所を通過する電子の非制限質量衝突阻止能比です。

もし「物質X」が水であったら？



「人体組織は水等価である」という仮定の下で、右図の状況は治療の状況を反映しています。従来これが線量測定&計算の大前提でした。

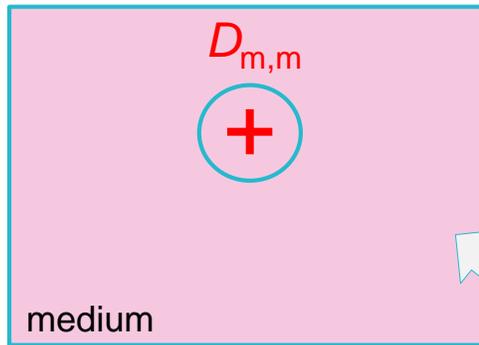
しかし、人間の体は水等価ではないのです。



本当は人間の体は水ではありませんから、治療の状況は右図の通りです。組織への吸収線量を直接測定することは簡単ではありませんが、しかし Monte Carloでは簡単に計算できます。

Dose To WaterとDose To Mediumの切り替え

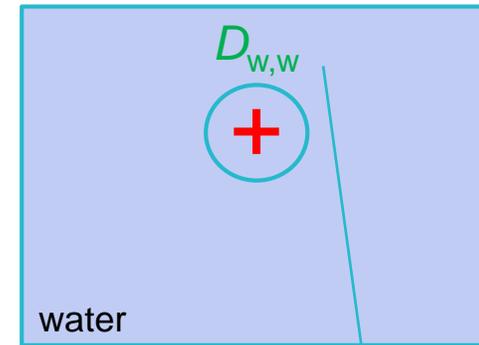
多くのMonte Carlo TPSの計算は
 $D_{m,m}$ に基づく



$D_{m,m}$ - $D_{w,w}$ 間の換算はできない



Superposition以前の多くのTPS*の
計算は $D_{w,w}$ に基づく



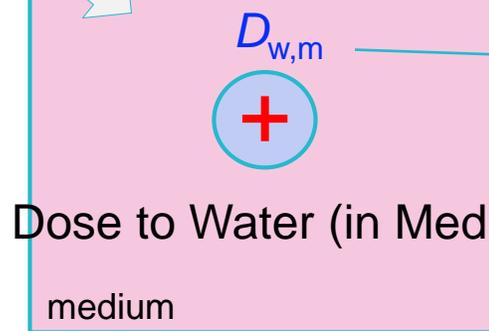
TPSが用意する $D_m \rightarrow D_w$ 変換は
 $D_{m,m}$ を $D_{w,m}$ に変換している

$$D_{w,m} = \frac{(S/\rho)_{\text{water}}}{(S/\rho)_{\text{medium}}} D_{m,m}$$

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_m^w$$

$$S^{w,m}$$

質量阻止能比は
いろいろな書かれ方を
するので、注意！



両方ともDose-To-Water(D_w)と呼ばれて
いるのが、混乱の元

※詳細は各製品のマニュアルで確認してください

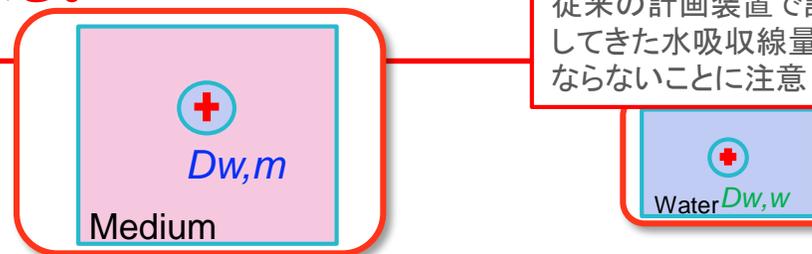
AAPM TG-105 Report (2007) の推奨は…

(p. 4837)

…このタスクグループの共通認識としては、モンテカルロ法を使った線量計算では、(a) その計算が水に対して行われたのか、組織であればどんな組織に対して行われたのか、を明示すべきであり、また(b) **上に示した方法、もしくは将来考案される別の方法にて、 D_m と D_w との相互変換を可能とするべきである**

D_m から D_w への変換やその逆の変換は、Bragg-Grayの空洞原理を使って行う。つまり $D_w = D_m (\bar{S}/\rho)_m^w$ であり、ここで $(\bar{S}/\rho)_m^w$ は水-組織の非制限質量衝突阻止能比を、その場所での一次電子線のスペクトルによって平均したものである。

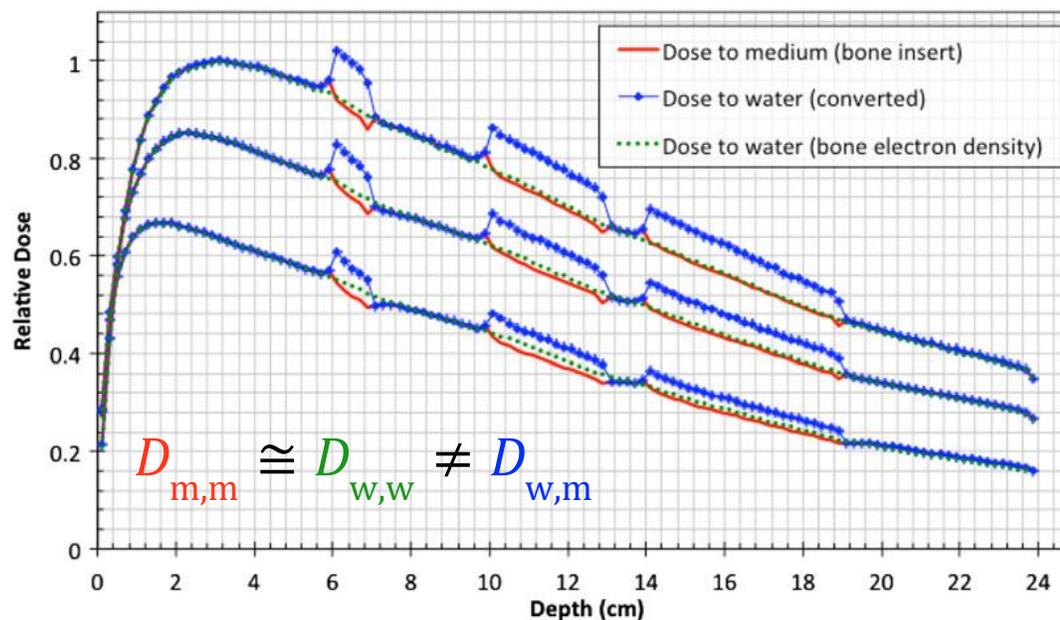
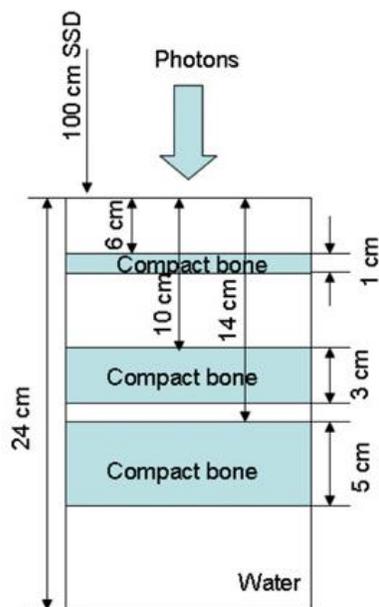
このやりかたで D_m から変換された D_w は、実際の組織中に埋め込まれた微小体積の水の線量を示していることになる。



従来の計画装置で計算してきた水吸収線量にはならないことに注意！

$D_{m,m}$ は実のところ $D_{w,w}$ とあまり変わらない...

C-M Ma and Jinsheng Li, Phys. Med. Biol. 56 (2011) 3073-3089



$$D_{m,m} \cong D_{w,w} \neq D_{w,m}$$

「 $D_{m,m}$ で計算を行うTPSが換算した $D_{w,m}$ での結果」と
「もともと $D_{w,w}$ で計算を行うTPSの結果」とは、かなり違う。

組織の密度と質量阻止能比 (S/ρ) の関係 (X線の場合)

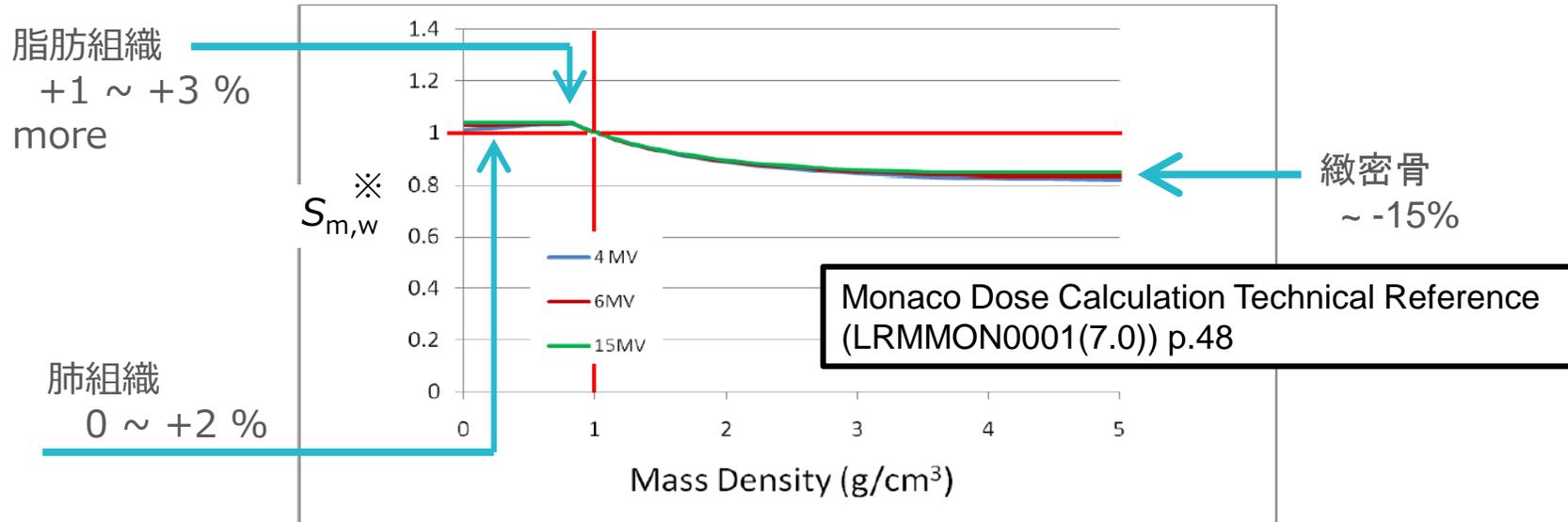
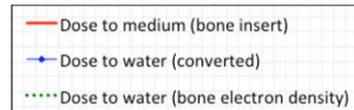
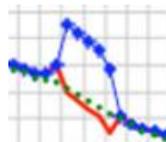


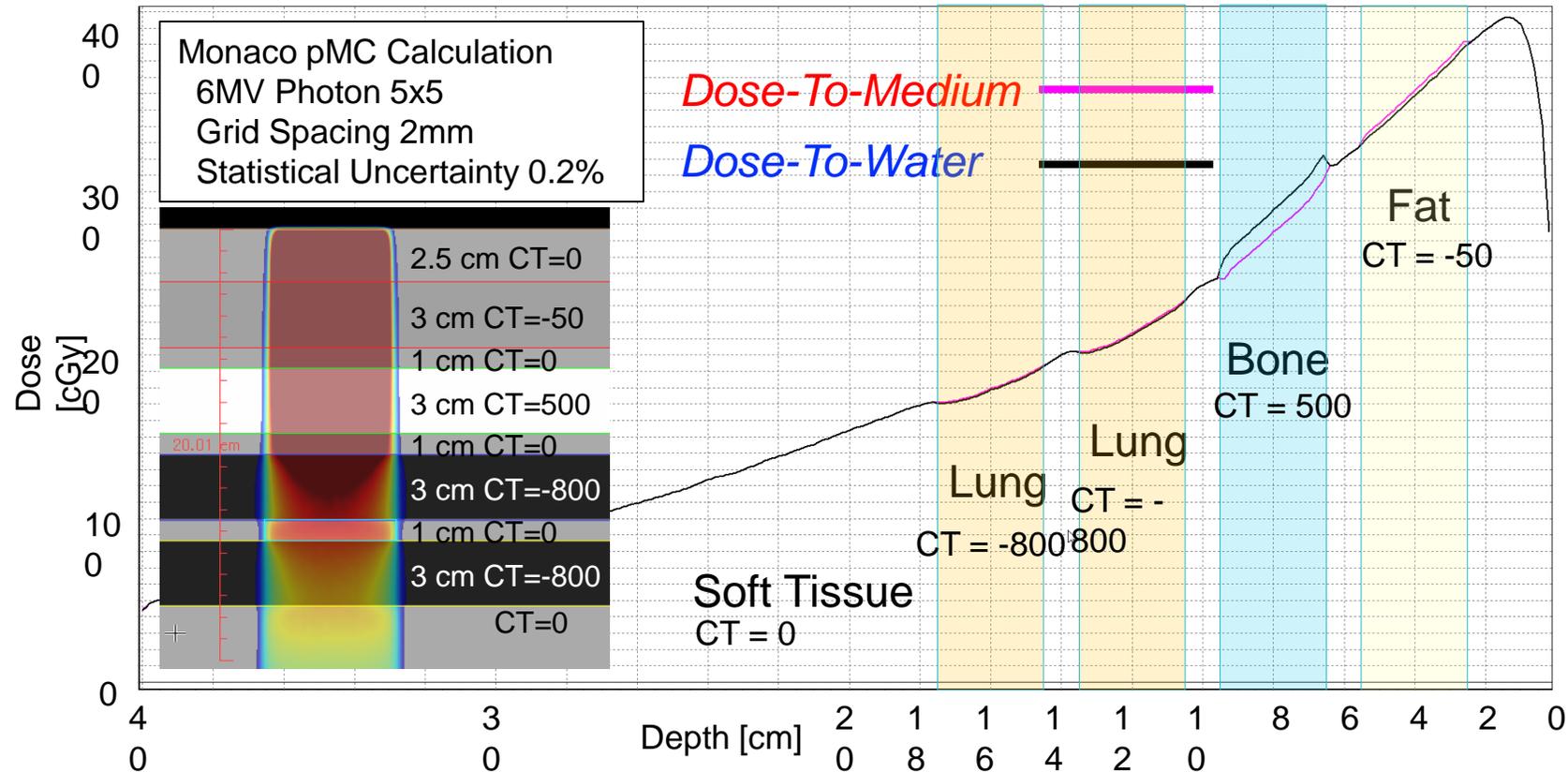
Figure 33: Water to Medium Mass Stopping Power Ratio vs. Mass Density, for mean energies of 4, 6, and 15 MV.



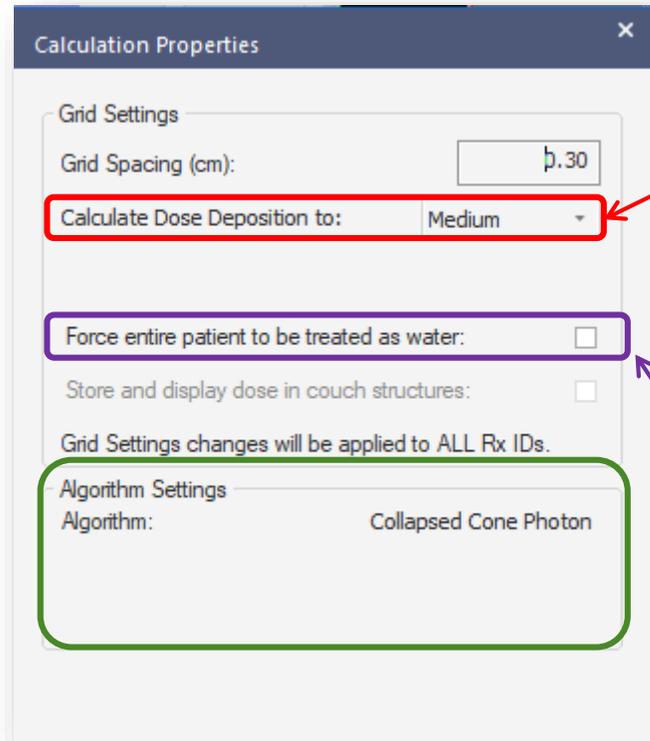
$$D_{w,m} = D_{m,m} \left(\frac{S}{\rho} \right)_m^w = D_{m,m} / S_{m,w}$$

※…元資料では $S_{w,m}$ とありますが、誤植です

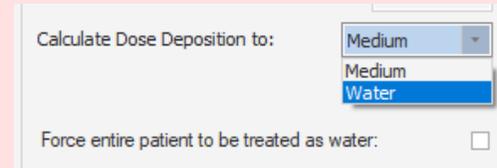
Monacoでもやってみました : 肺、脂肪、骨



最初の疑問に対する答えは……



計算した結果をそのまま表示するか($D_{m,m}$)、換算を行う($D_{w,m}$)か、の切り替えスイッチです

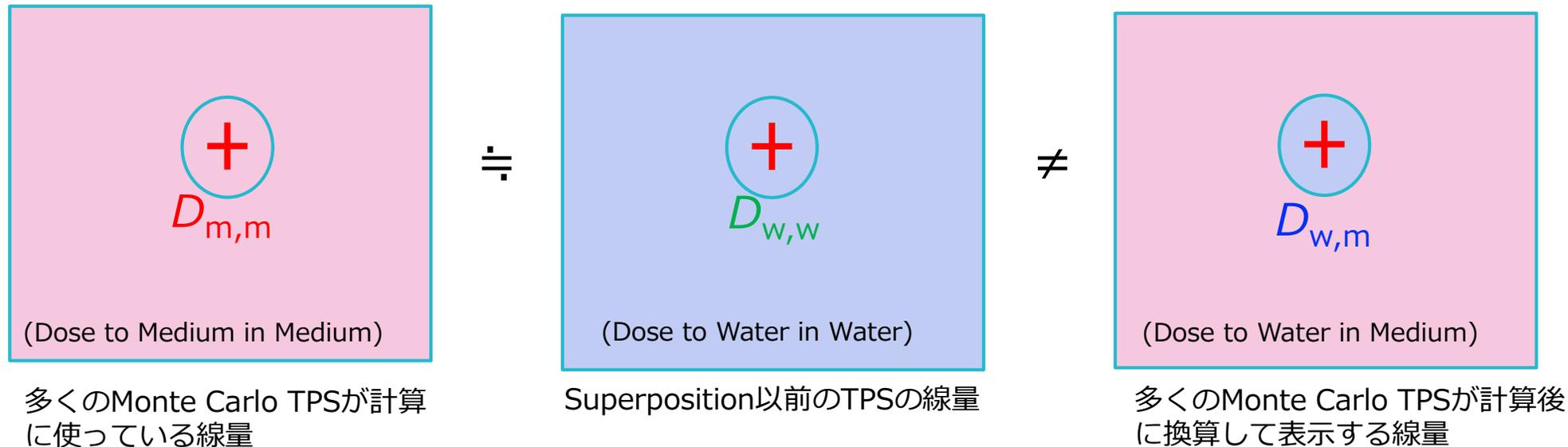


Monaco Collapsed Coneは $D_{m,m}$ で計算を行いますが、 $D_{w,m}$ への換算機能を持っていません。
(スイッチはあるが、「使えません」と警告が出る)

これは不均質補正OFF（輪郭の中はすべて密度1.0の水とする）のスイッチです。※ pMC (QA Plan以外)は別の方法で指定します。

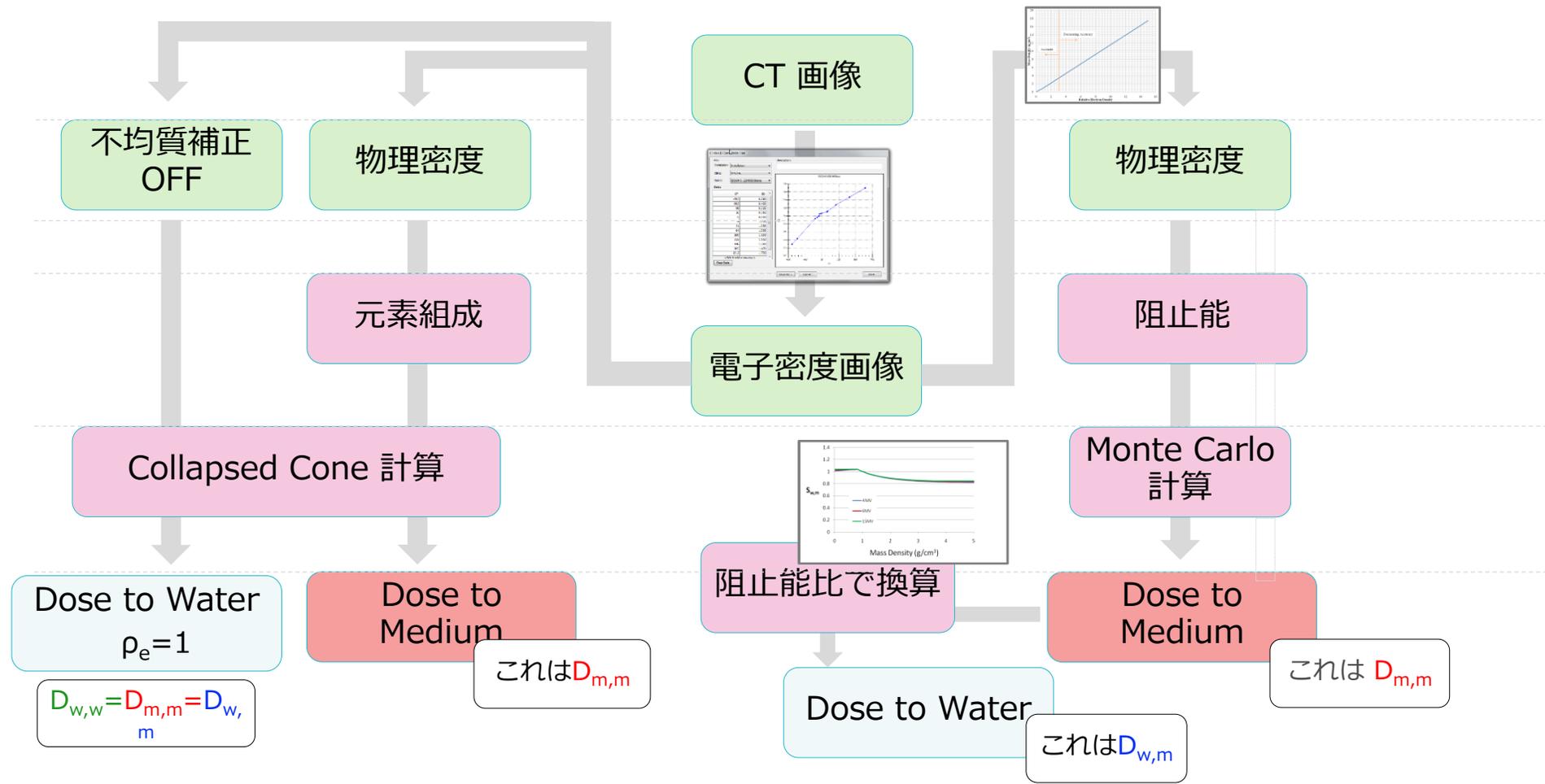
結論

$D_{m,m}$ で計算を行うTPS(多くのMonte Carlo TPS)の換算機能で得られた $D_{w,m}$ は、
 $D_{w,w}$ で計算を行うTPS(多くのSuperposition以前のTPS)で直接計算した $D_{w,w}$ とは異なる



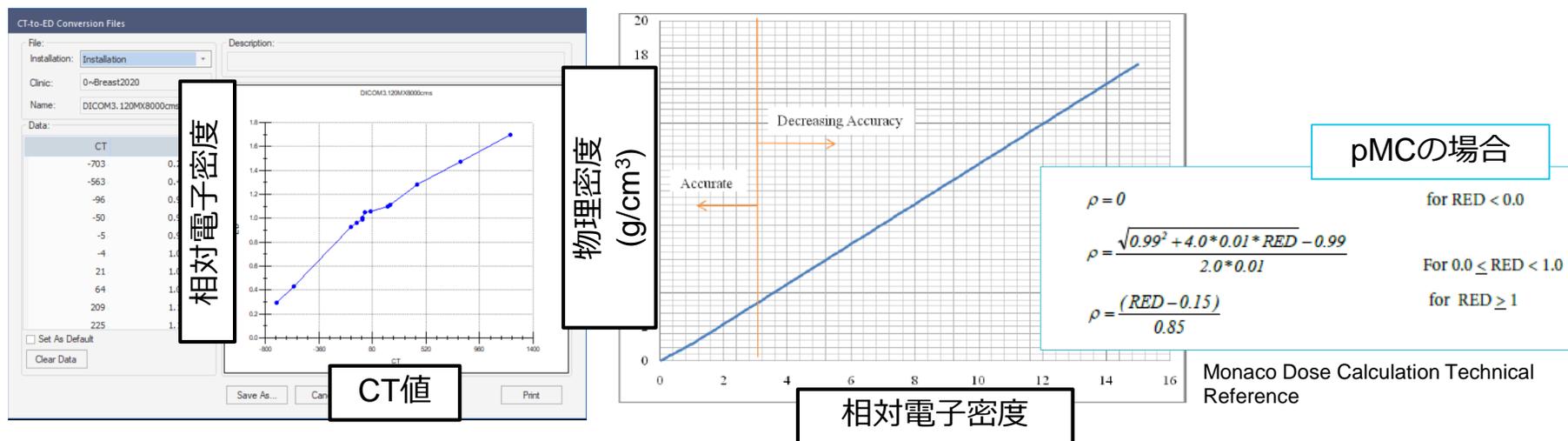
以下、Monacoの実装について……

Monaco : 患者モデルの利用 : photon Monte CarloとCollapsed Cone

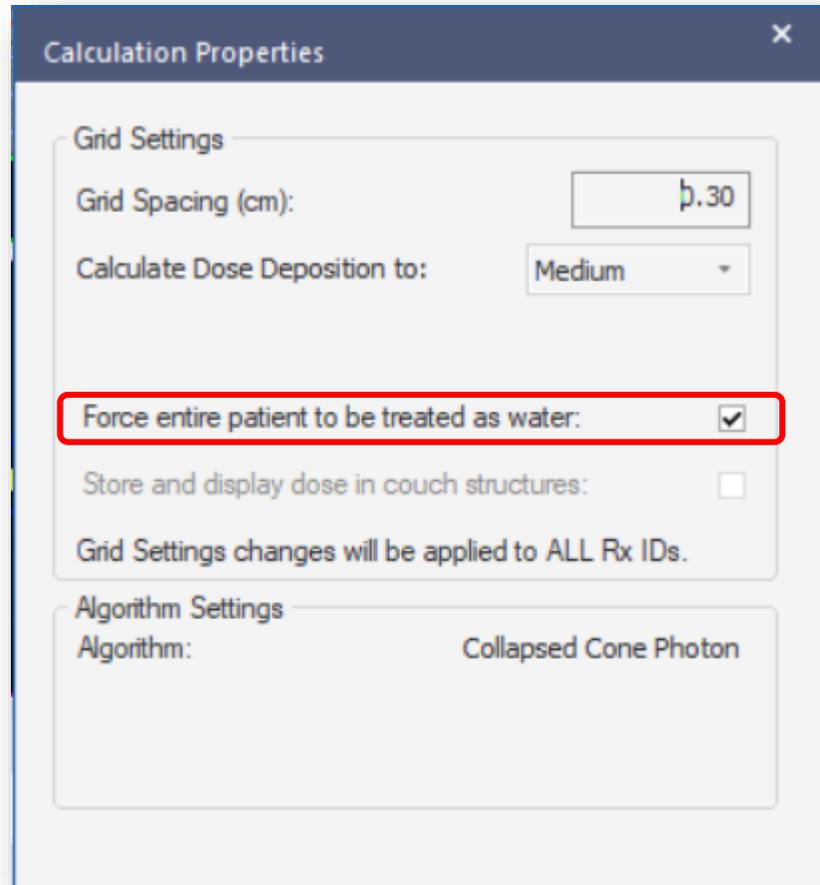


Monaco : CT値→物理密度変換

- Monacoは、CT-電子密度変換テーブル(XiO互換)を使用して、計画用CTの校正をします。このテーブルはユーザーが設定します。
- その後Monacoは内部で、電子密度を物理密度に変換します。物理密度は内部処理でのみ使われ、ユーザーが知ることはできません。
- 電子密度→物理密度の変換はCollapsed Cone, Electron Monte Carlo, Photon Monte Carloで異なります。



Monaco : Collapsed Cone上のスイッチ



- 計算できるのは $D_{m,m}$ だけです。
 - Collapsed ConeはSuperposition相当のアルゴリズムですが、 $D_{m,m}$ を計算します。
- **Force entire patient to be treated as water**にチェックすると、不均質補正自体をOFFとし、すべての輪郭の中を $\rho=1$ の液体の水とみなしますので、

$$D_{w,m} = D_{m,m} = D_{w,w}$$

となります。

Monaco CCC/eMC : 寄り道 : Force ED = 1.000

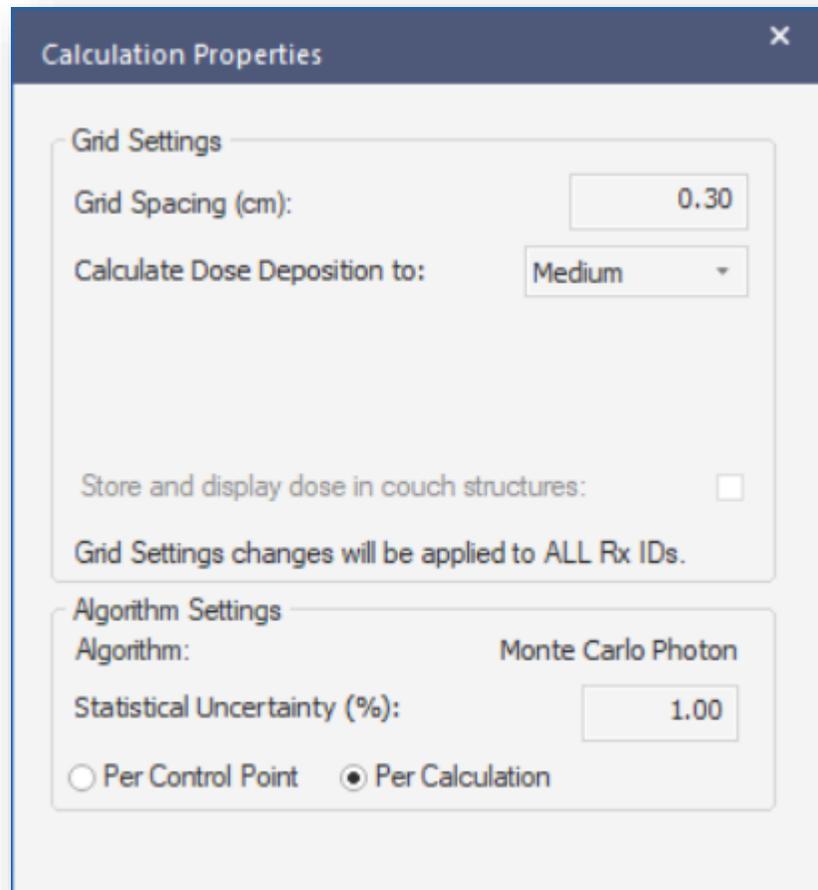
Monaco CCC/eMCの物質テーブル

組成	相対質量密度	相対電子密度
空気(患者外)	0.00121	0.00109
肺(ICRU 44)	0.50	0.50
脂肪(ICRU 44)	0.95	0.95
筋肉(ICRU 44)	1.05	1.04
軟骨(ICRP 23)	1.10	1.08
2/3軟骨, 1/3骨	1.35	1.29
1/3軟骨,2/3骨	1.60	1.52
骨(ICRP 23)	1.85	1.72
骨(ICRP 23)	2.10	1.95
1/2骨、1/2アルミ	2.40	2.15
アルミ	2.70	2.34
アルミ	2.83	2.46
鉄	7.87	6.60
水	1.00	1.00

- Monaco CCC/eMCでは、相対電子密度1.00は水ではなく、脂肪と筋肉の混合物で質量密度1.02 g/cm³に該当します。
- 従って、水中の線量計算をするのであれば Force ED=1.000を指定するのは誤りです。明示的に**Force entire patient to be treated as water**（体輪郭内はすべて水とする）を指定しなければなりません。

Monaco External Beam Dose Calculation Algorithm (LRMMON0005) p.32

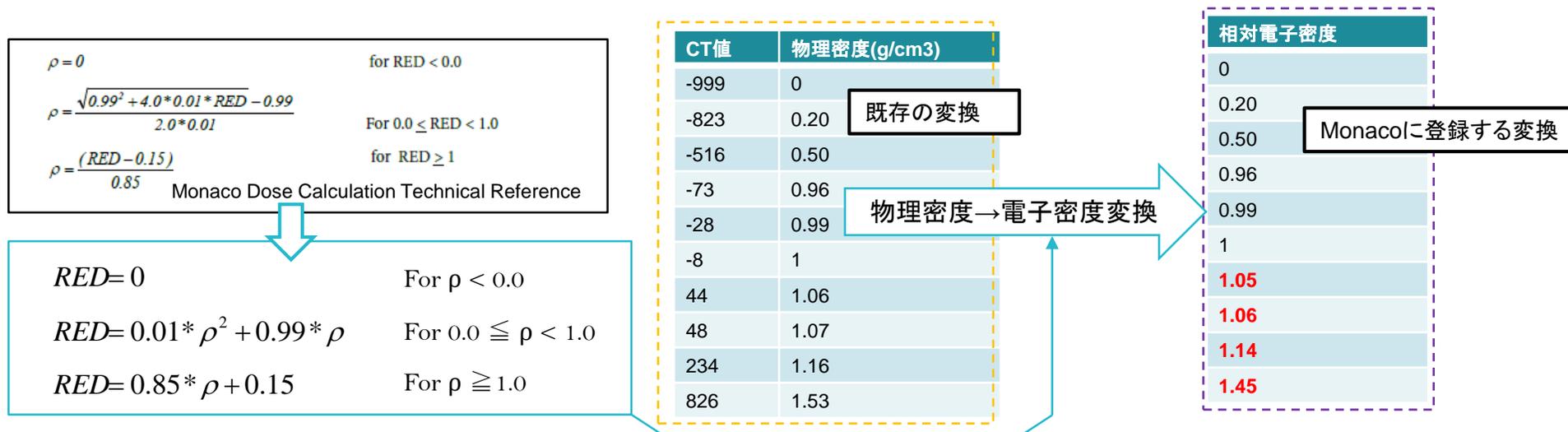
Monaco : Photon Monte Carloにおけるスイッチ



- Monacoの基本モードは**Calculate dose to : Medium**です。つまり $D_{m,m}$ を計算します。
- もしここで**Calculate dose to : Water**を選んだら、 $(S/\rho)_m^w$ による変換が行われて $D_{w,m}$ が計算されます。
- もし“Force ED”にてすべての輪郭の中身を1.00にすれば、計算されるのは $D_{m,m} = D_{w,m} = D_{w,w}$ です。

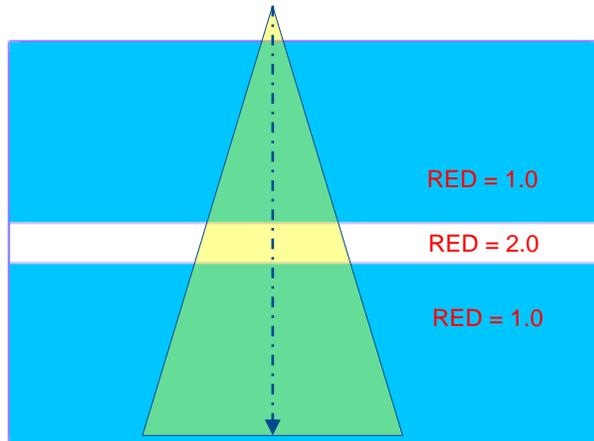
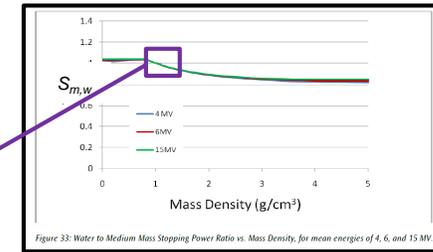
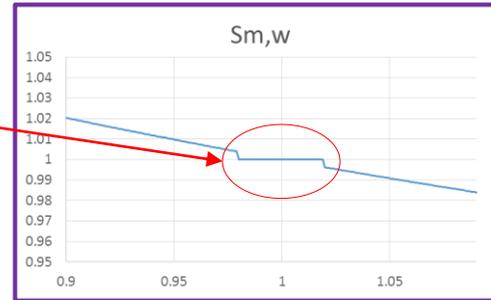
Monaco pMC : 寄り道 : DICOM RecalculateとCT-密度変換

- Monacoは5.1から、他のTPSで作成されたプランをPhoton Monte Carloで再計算することができます。
- その場合、プラン作成元とMonaco5.1とで、同じ患者データを計算するように、双方のCT-密度変換のつじつまを合わせなければなりません。
- **CT-物理密度変換を登録するTPSがプラン作成元である場合**、その**変換テーブル**と**下記の逆関数**とを合成して、**CT-電子密度変換**を作成し、これをMonacoに登録します。



Monaco pMC : 寄り道 : D_m から D_w への変換は局所です。

$\rho = 1.00$ では $S_{m,w} = 1.000$ 、つまり
 $D_{m,m} = D_{w,m}$
 となる(ように $S_{m,w}$ を調整してある)ので...



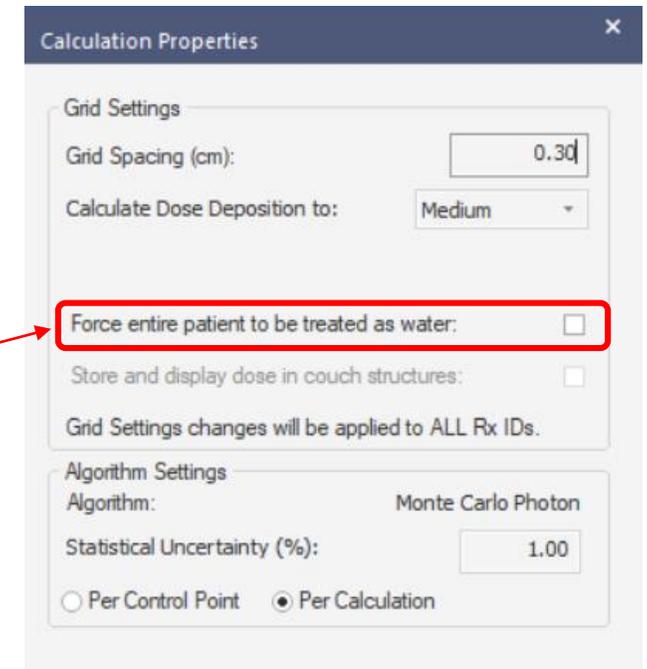
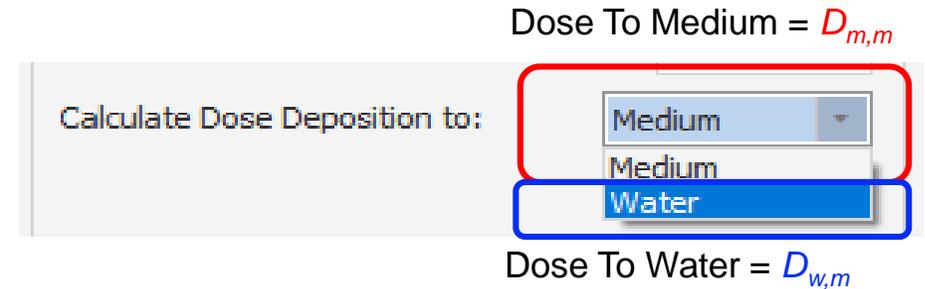
変換はRED=2.0のところにも影響を与え.....



RED=1.0の部分には
 前方・後方とも影響
 を与えない.....

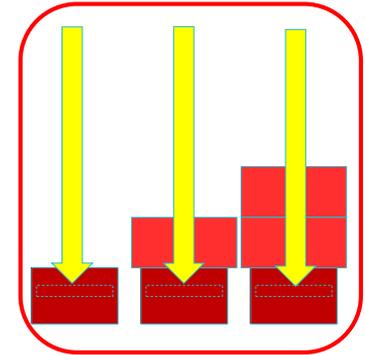
Monaco : いつ、どちらの計算モードを使うべき？

- 第一原則 : ユーザーが決める。
- 臨床プラン(実際の患者)
 - 従来使ってきた線量に近いのは $D_{m,m}$ です。
- 水槽と電離箱線量計
 - CCC, eMC : Force entire patient to be treated as water に ✓
 - pMC : “Force ED”にてpatientを1.00にする
QAPlanではForce entire ~に ✓でも計算可能
- 固体ファントムと配列検出器
 - 次のスライドで……



Monaco : 固体ファントムと配列検出器

- Rule 1 : 極端に組織等価でない場合（基盤や電極）は再現不可能
 - 周囲の組織等価材と同じとみなしましょう。
- Rule 2 : 組織等価性が低い場合（ABSやアクリルなど）は、“Force ED”を使って、実効電子密度を求めてください。
 - CT値を信用するのはNG。カタログに載っている電子密度を使うのもNG。
 - 必ず自分で減衰の度合いを測定し、Monaco上で再現計算を行って、電子密度を決めましょう。



Rule 2:組織等価性が低い場合（ABSやアクリルなど）は、“Force ED”を使って、実効電子密度を求めてください

<決定方法>

- (1) 上半分のガントリ角度（=カウチの掛からない範囲）で、5x5などの単純な照射野形状のビームをファントムに入射し、実測する。
 - ① MUは100や200に固定。
 - ② ガントリ角度は10度毎など細かくしてもよいし、30度おき、45度おき、など適当に間引いてもよい。

※このあとのカウチモデリングの際は、カウチ端に掛かる範囲やカウチ厚みが変わる範囲があるため、細かくしたほうがよいが、ファントムの密度を決める際は上半分のビームで確認する（ビームを遮る物が無い）ので、少し間隔が粗くても問題ないはず。

(2) (1) と同じ条件の計算を行う。

① 計算グリッドやSUはなるべく小さく。少なくとも、臨床のプランやQAで使う条件より大きくしないこと。

② 計算値を出すときにはチェンバーの体積のMean Doseを採用する。
※微小体積のチェンバーを使う場合は、計算グリッドサイズにも注意すること。

(3) 実測値と計算値を比較する。

(4) (2) の計算においてファントムに割り当てるREDを調整し、再計算
→実測値の比較、を繰り返す。

参考文献:

- J. V. Sievers, et al., Phys. Med. Biol. 45 (2000) 983-995
 - (There is a comment, M. Fippel and F. Nusslin, Phys. Med. Biol. 45 (2000) L17-9)
- H. Helen Liu and Paul Keall, Med. Phys. 29 (5) 2002, 922- 924
- N. Reynaert, et al., NCS Report 16: Monte Carlo Treatment Planning, An Introduction (2006)
- B.H. Curran, et al., Integrating New Technologies into the Clinic: Monte Carlo and Image-Guided Radiation Therapy AAPM Monograph No.32 (2006)
- I. J. Chetty et al., Report of the AAPM Task Group No. 105: Issues associated with clinical implementation of Monte Carlo-based photon and electron external beam treatment planning (2007)
- C-M Ma and Jinsheng Li, Phys. Med. Biol. 56 (2011) 3073-3089
- Pedro Andrero, Phys. Med. Biol. 60 (2015) 309-337

- Monaco 5.10 Training Guide LTGMON0510
- Monaco Dose Calculation Technical Reference LRMMON0001
- Monaco External Beam Dose Calculation Algorithms Technical Reference LRMMON0005

この2つはすこし古いので、あまりお勧めしません。

Thank you

