

Unity Physics Training

Patient Model Review

第1版：2022/07/27



Objectives

- 患者ボクセルへの輪郭設定
- 線量計算グリッドの生成
- CT値の質量密度への変換
- 線量ファイルのエクスポート

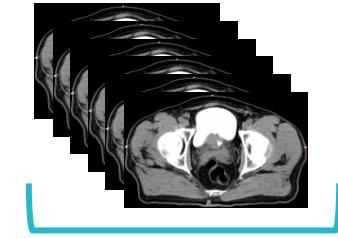


Patient modelとは

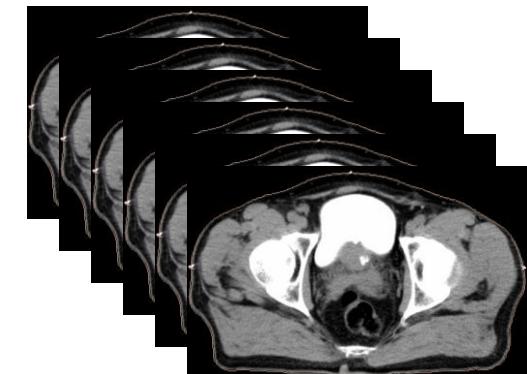
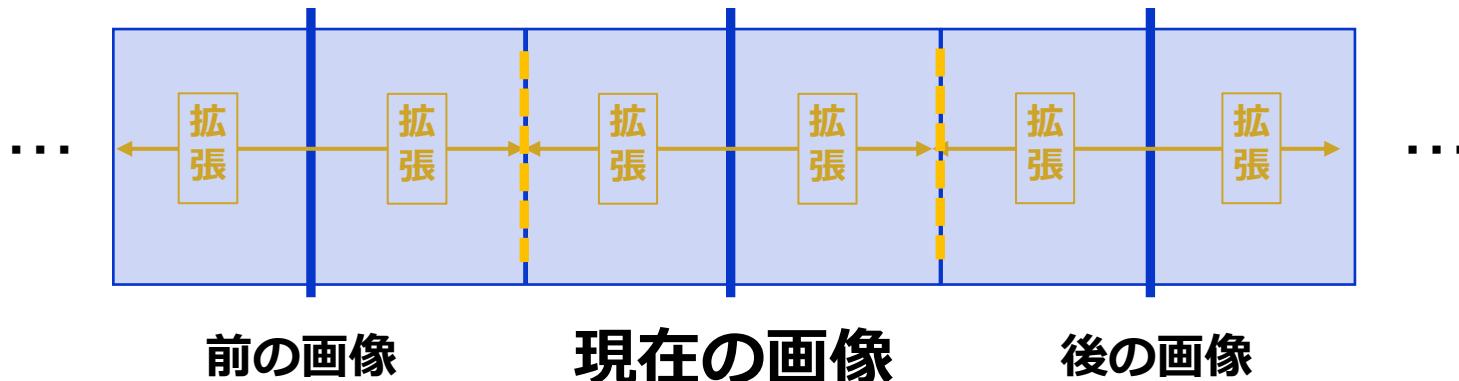
- MonacoはCT画像をそのまま線量計算に利用しているわけではありません。
- 線量計算の際にCT 画像を基に、患者をモデル化します。
つまり **Patient model**を作成します。
- Patient model作成のプロセスは以下の通りです。
 1. CT画像のボクセル化
 2. CT-相対電子密度変換

CT画像のボクセル化

- スライス間隔
 - CT画像セットは複数の2次元画像から構成されます。
 - Monacoでは、現在のCT画像と輪郭は現在の画像から前後の画像の途中まで拡張されるように設定されます。
 - CT画像セットは直方体を単位とした3次元画像に変換されます。

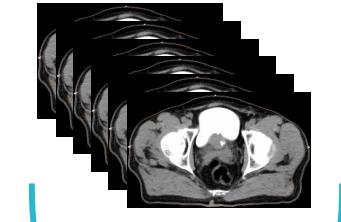


CT画像セット



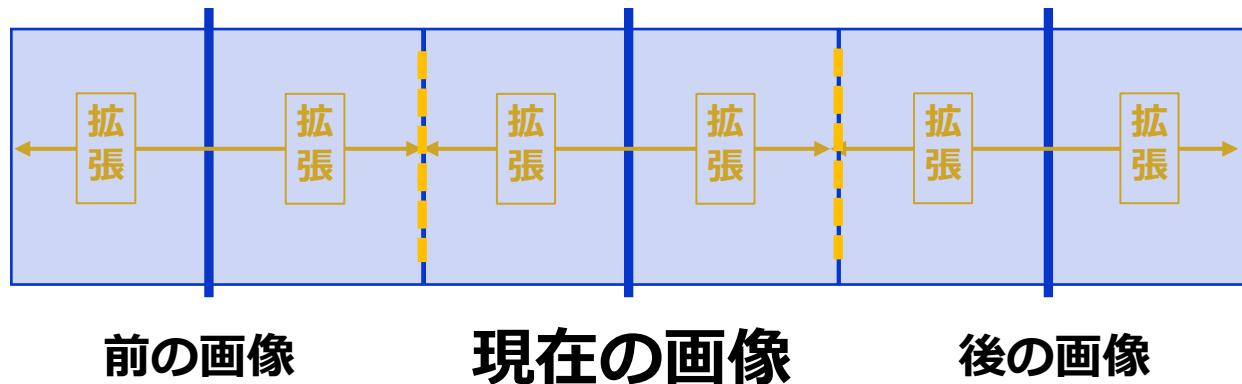
CT画像のボクセル化

- スライス間隔
 - CT画像セットは複数の2次元画像から構成されます。
 - Monacoでは、現在のCT画像と輪郭は現在の画像から前後の画像の途中まで拡張されるように設定されます。
 - CT画像セットは直方体を単位とした3次元画像に変換されます。

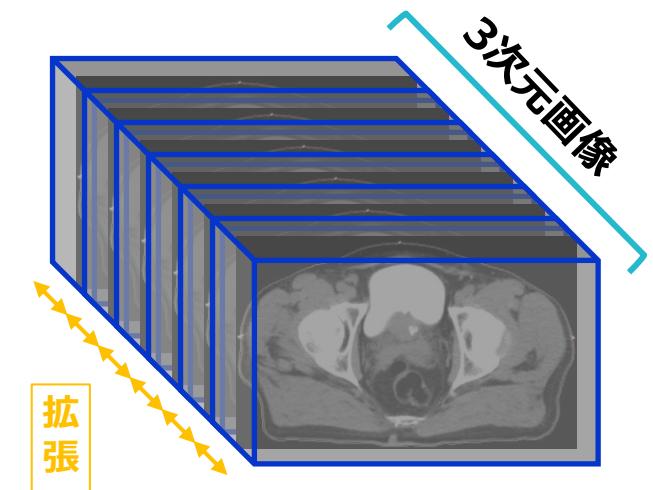


CT画像セット

...

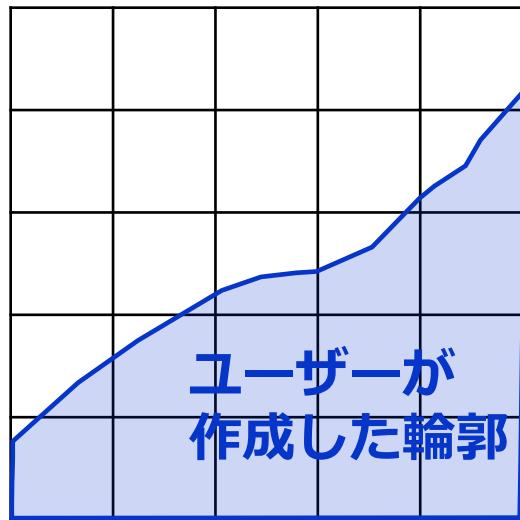


...



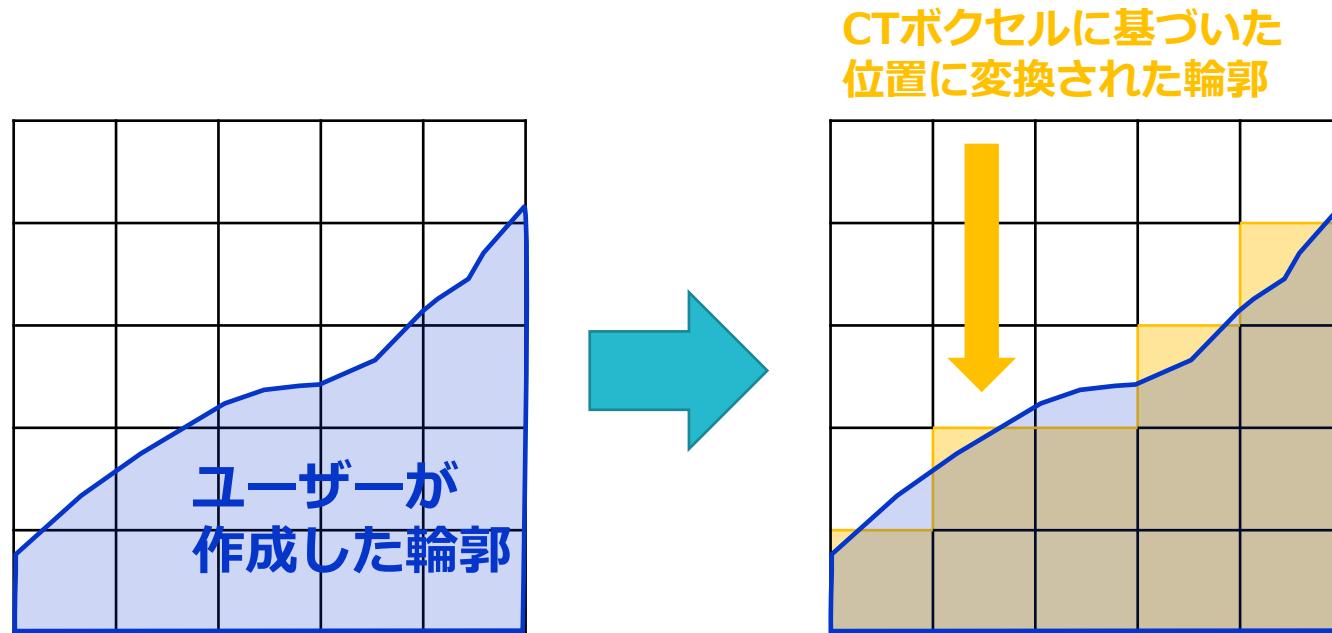
CT画像のボクセル化

- ・治療計画時には、3次元画像に対してユーザーが輪郭を作成します。



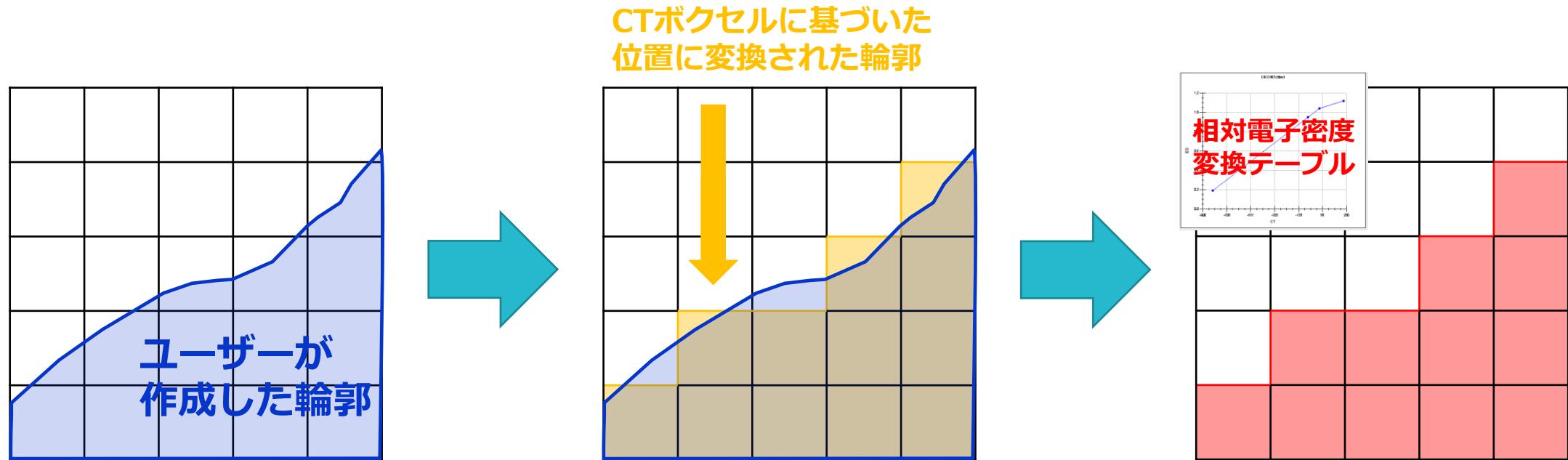
CT画像のボクセル化

- 線量計算の際にMonaco内部で、ユーザーが作成した輪郭に対してからCTボクセルに基づいた位置に変換した輪郭を作成します。



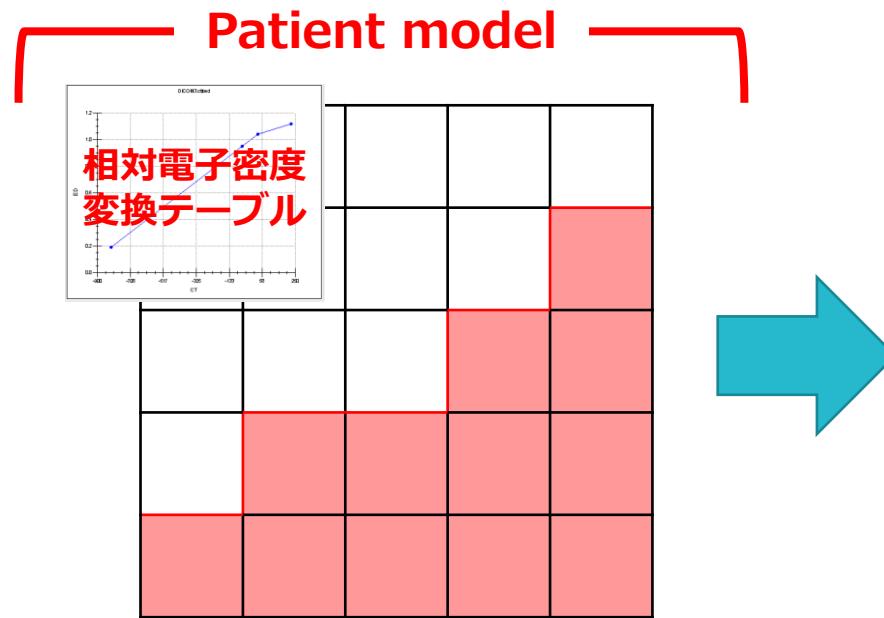
CT-相対電子密度変換

- CT-相対電子密度変換テーブルに基づいて、各CTボクセルに相対電子密度が割り当てられます。

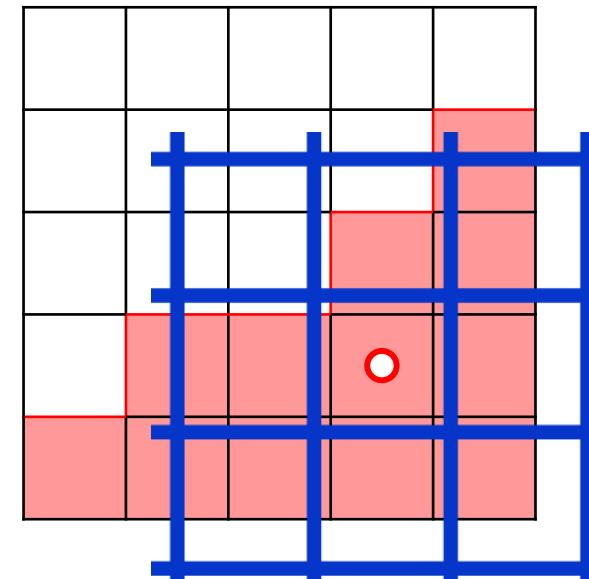


線量ボクセルの作成

- Monacoでは線量ボクセルは1つ目のビームの Isocenter を中心に配置されます。



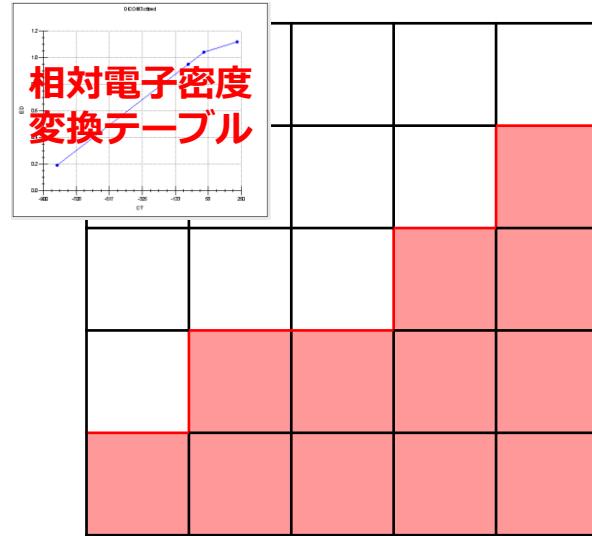
□ 線量ボクセル
○ アイソセンター



線量ボクセルの相対電子密度の割り当て

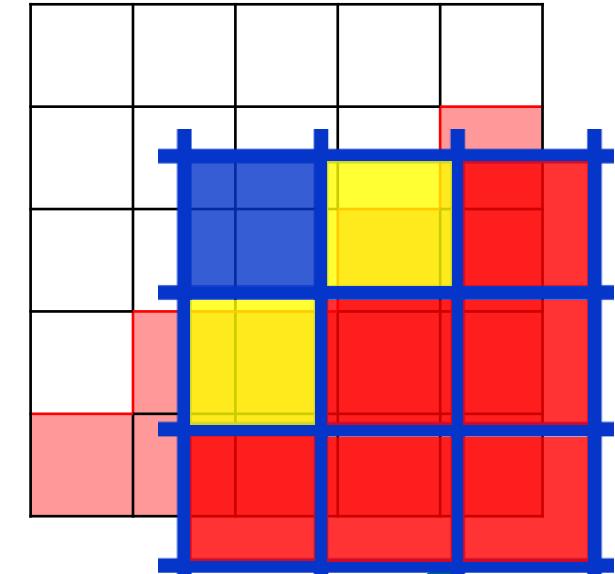
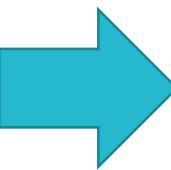
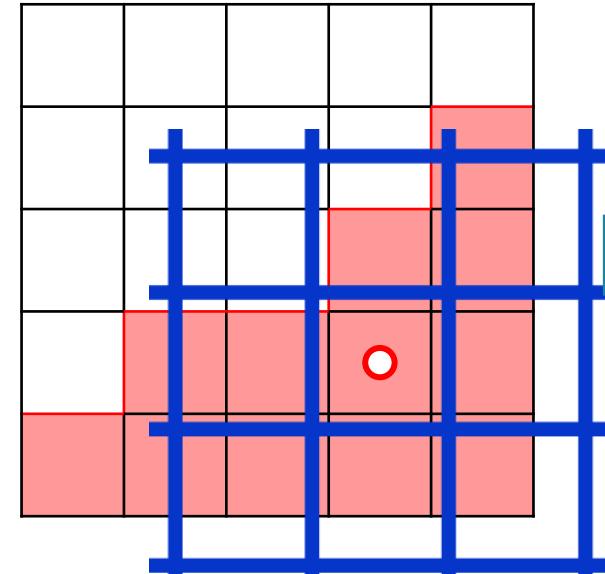
- 線量ボクセル内の相対電子密度の各CTボクセルの相対電子密度を参照して割り当てられます。

Patient model



□ 線量ボクセル
○ アイソセンター

相対電子密度: 低 相対電子密度: 高

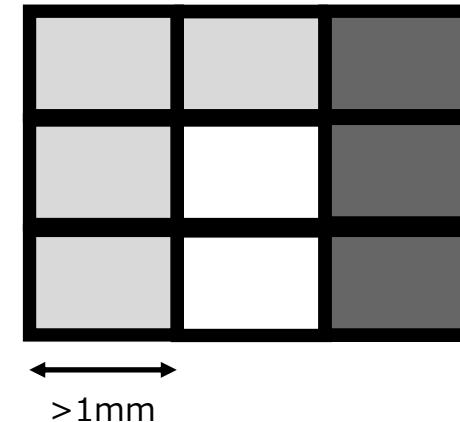


Patient Model

CT画像のボクセル化

- Monaco5.51ではCTボクセルをより小さなサブボクセルに分割します。
 - CTボクセルの境界とサイズを決定します。
 - CTボクセルをより小さなサブボクセルに分割します。
- サブボクセルの寸法は1mmを超えることができません。
- 各サブボクセルには、親となったCTボクセルのCT値が割り当てられます。

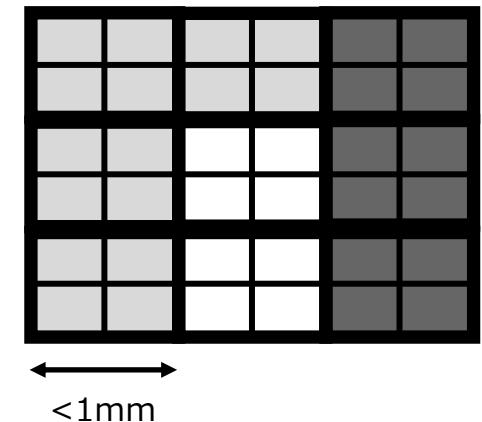
Voxels



Voxel dimensions:
(1.2 x 1.2 x 1.2 mm)

Voxel dimensions:
(2.7 x 2.7 x 2.7 mm)

Sub-voxels



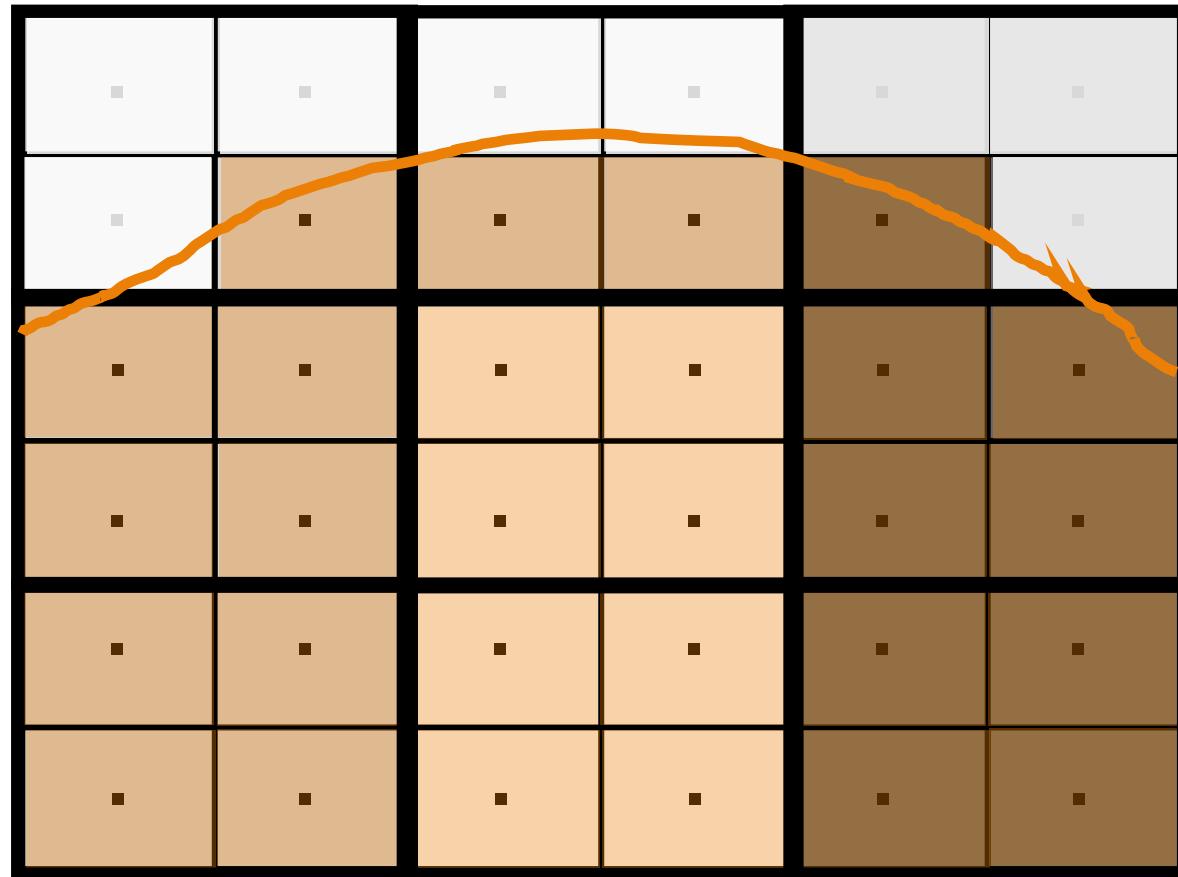
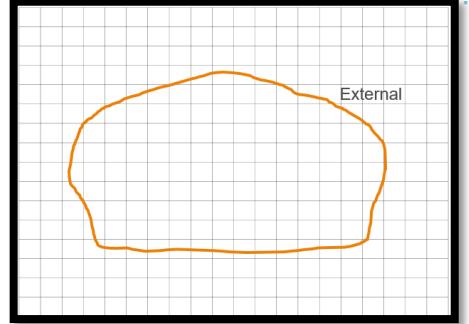
8 sub-voxels
(0.6 x 0.6 x 0.6)

27 sub-voxels
(0.6 x 0.6 x 0.6)



Patient Model

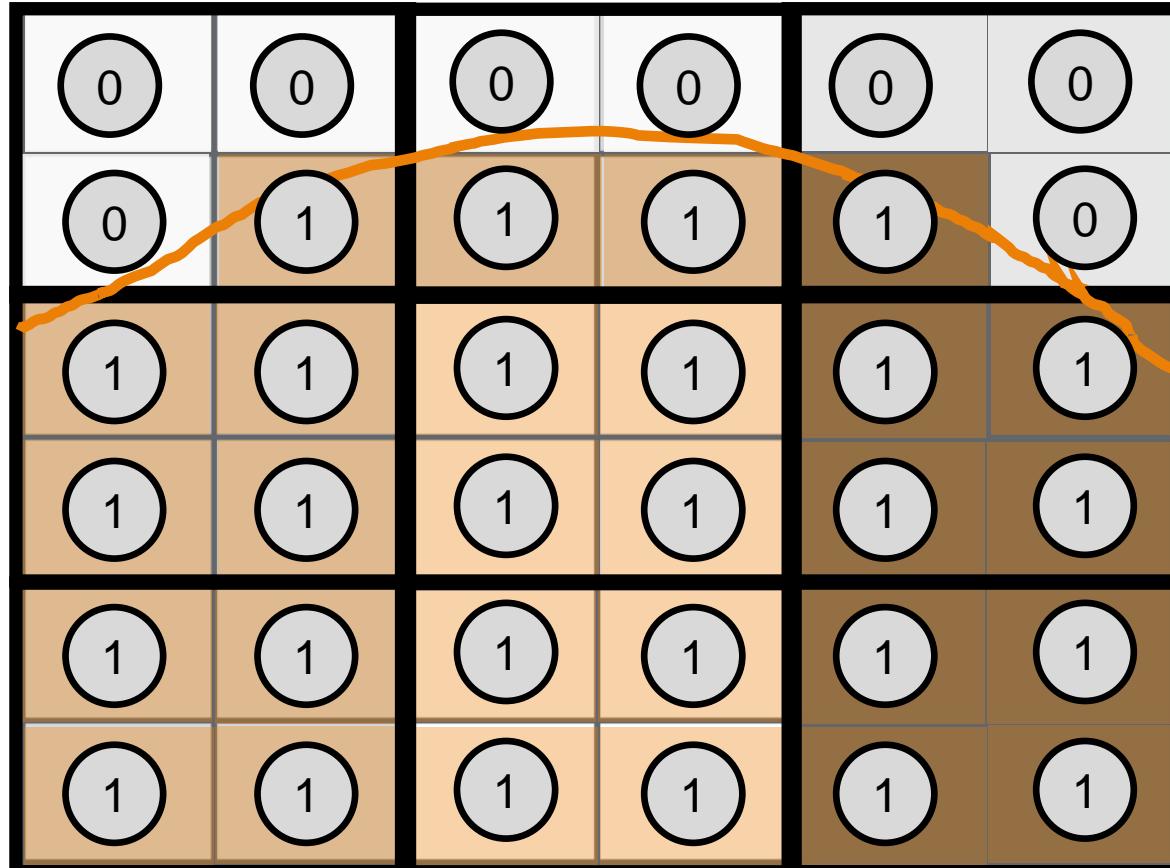
CT画像のボクセル化



- Monacoは、CT画像の各行に沿い、サブボクセルの中心が輪郭の内側にあるか外側にあるかを判断します。
- サブボクセルの中心が輪郭の内側にある場合、そのサブボクセルは輪郭として認識されます。

Patient Model

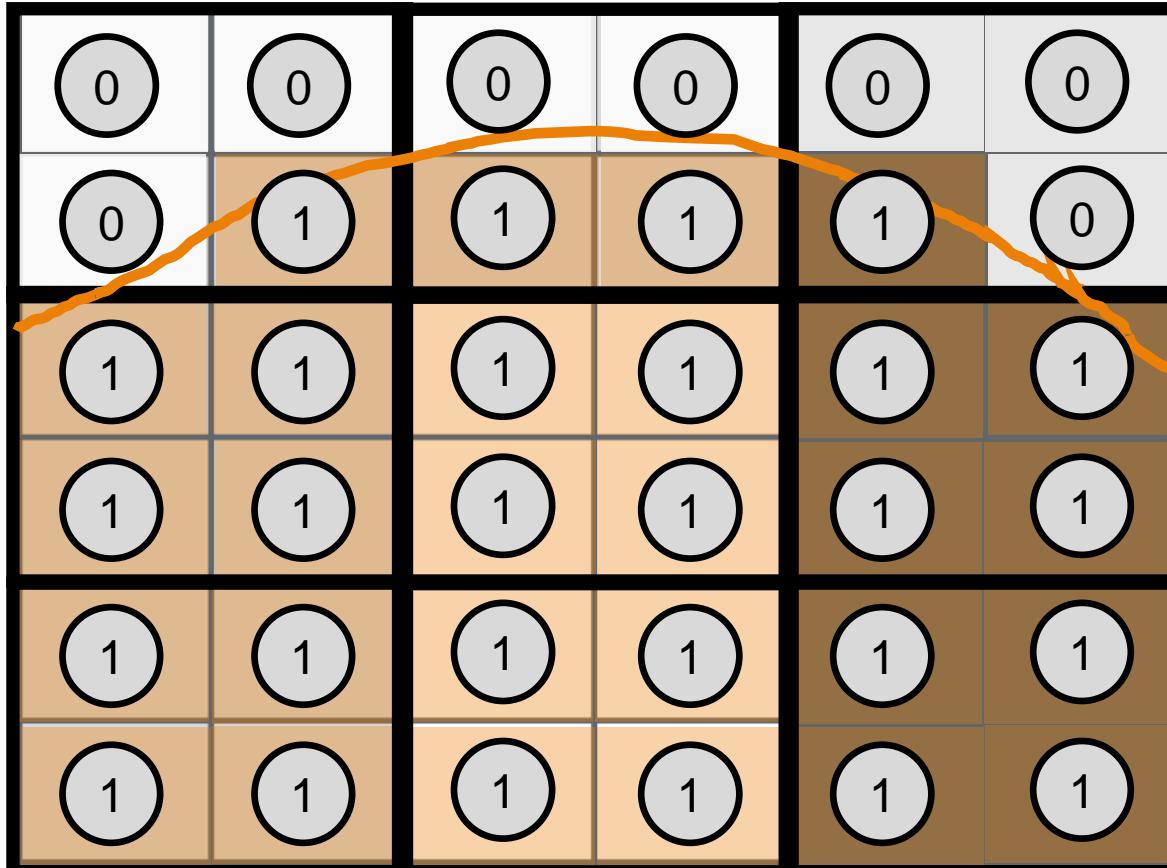
線量ボクセル内の相対電子密度



- サブボクセルごとにバイナリマスクが作成されます。
 - ストラクチャ外の場合は「0」
 - ストラクチャ内の場合は「1」
- このボクセルの割り当ては、線量計算ボクセルの密度を決定するために使用されます。

Patient Model

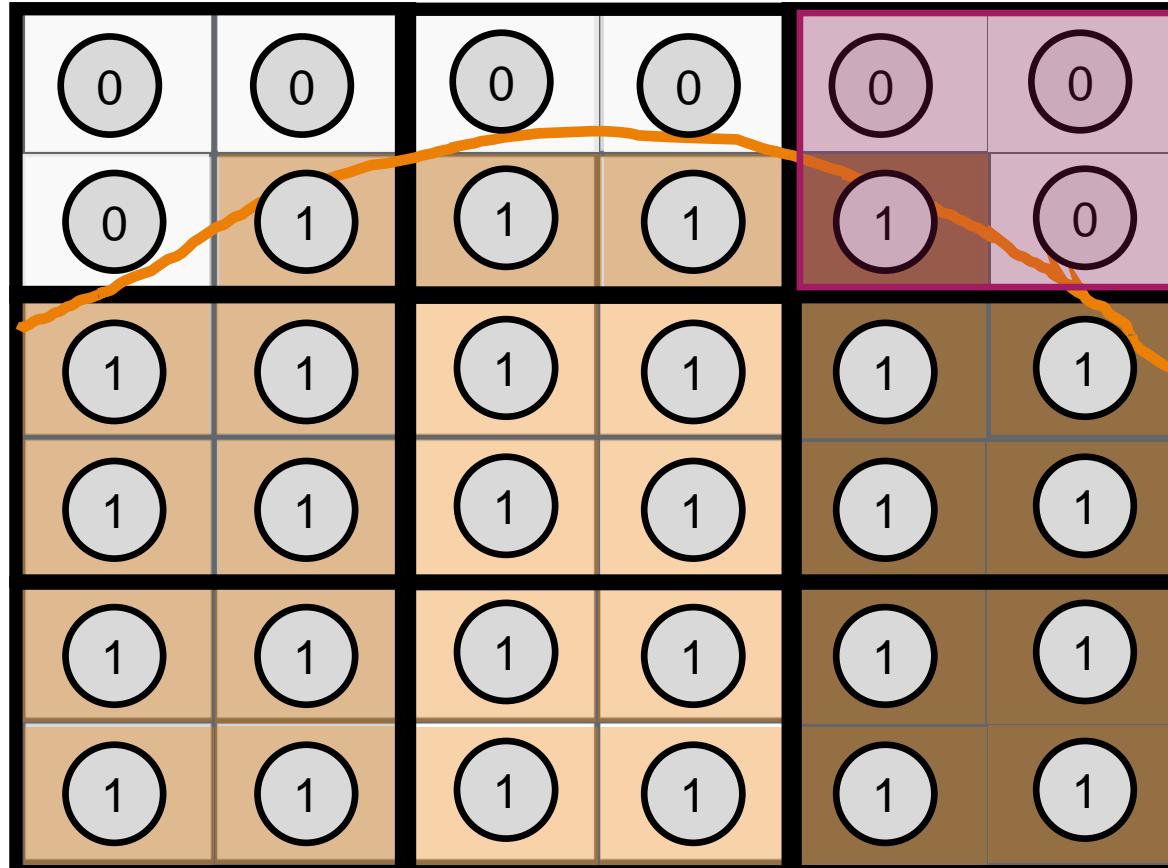
線量ボクセル内の相対電子密度



- 次に、CTサブボクセルに相対電子密度が割り当てられます。
- 相対電子密度は、CT値を電子密度に変換するか、“Force ED”によって決定されます。
- 部分的に体輪郭の外側にあるボクセルは、重み付けされた相対電子密度が割り当てられます。

Patient Model

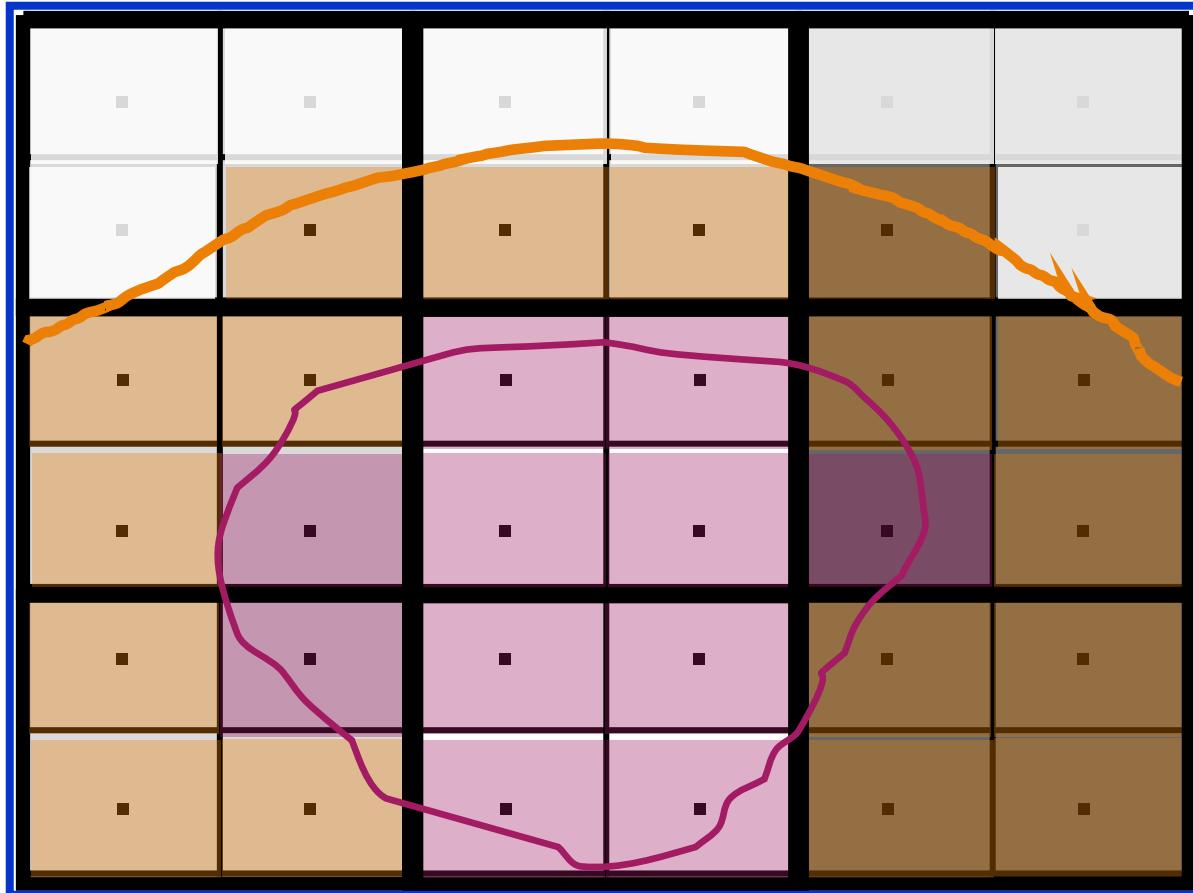
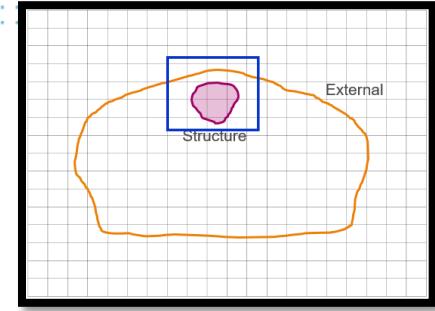
線量ボクセル内の相対電子密度



- このCTボクセルは、4つのサブボクセルから構成されています。
 - 3サブボクセル : RED = 0
 - 1サブボクセル : RED その構造の相対電子密度もしくは"Force ED"によって指定された値

Patient Model

線量ボクセル内の相対電子密度

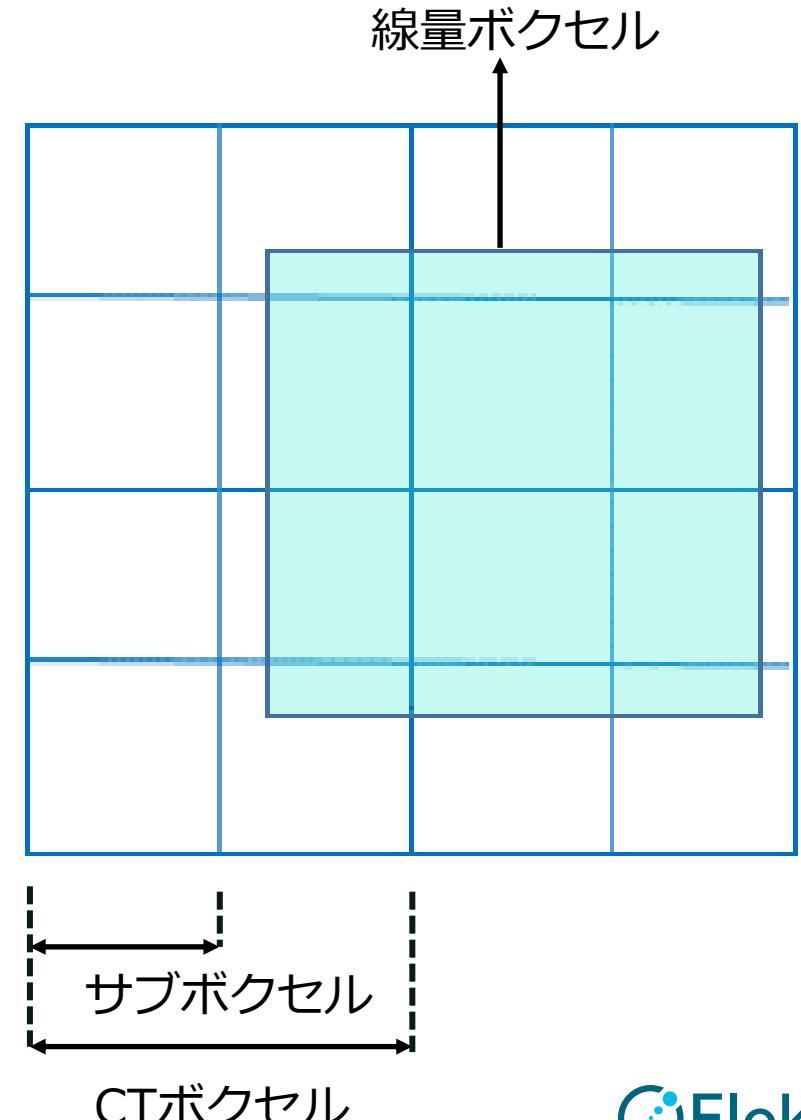


- 複数の構造に属するサブボクセルの場合、Monacoはストラクチャ優先順位リストを使用して、どのストラクチャがサブボクセル密度を定義するかを決定します。
- 重複する輪郭が存在する場合、輪郭の1つに"Force ED"によって相対電子密度の上書きがない限り、CTボクセルが持つ相対電子密度は変わりません。

Patient Model

線量ボクセル内の相対電子密度

- ここで、CTボクセルとそのすべてのサブボクセル（個々の正方形）の上にあるこの線量ボクセル（青い正方形）について考えてみます。
- 線量ボクセルの相対電子密度は、サブボクセルの相対電子密度の加重平均を計算することによって設定されます。



Patient Model

線量ボクセル内の相対電子密度

- ① このサブボクセル ($ED = 0.4$) は、部分的に線量ボクセルの内側にあり、その線量ボクセルの体積の6%にしか寄与しません。

- このサブボクセルの寄与: 0.4×0.06

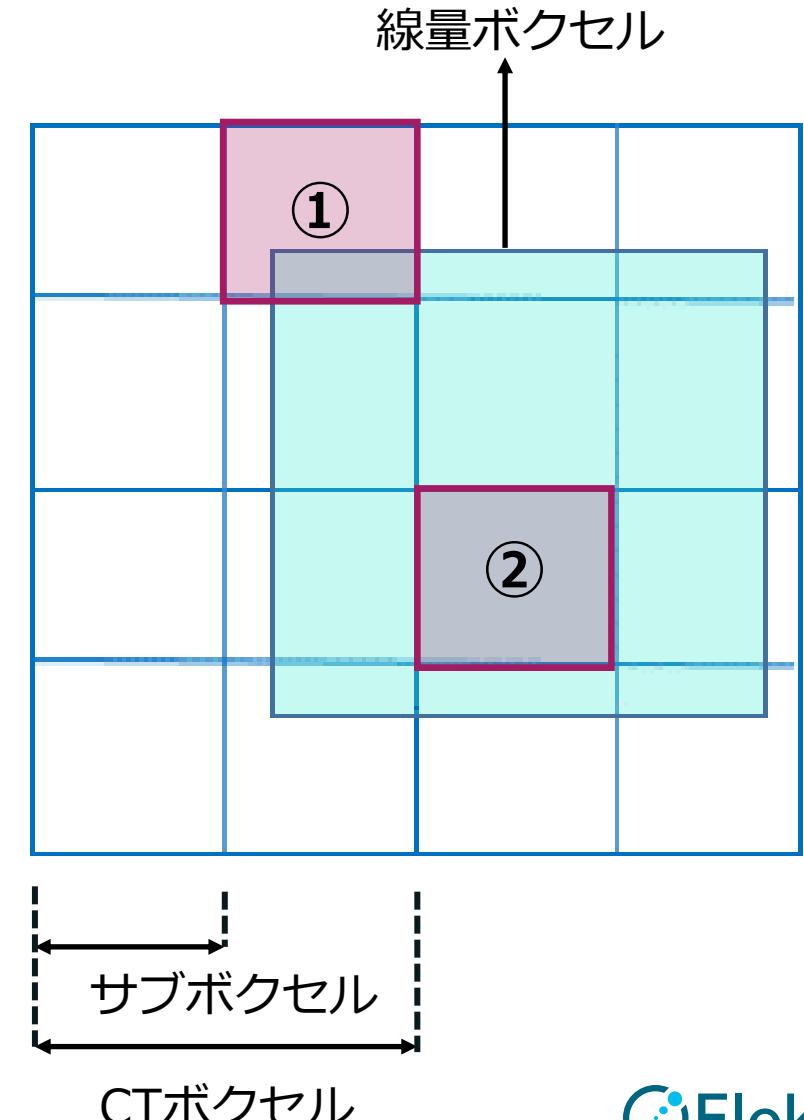
- ② このサブボクセル ($ED = 0.7$) は、部分的に線量ボクセルの内側にあり、その線量ボクセルの体積の20%に寄与します。

- このサブボクセルの寄与: 0.7×0.20

⋮
⋮
⋮

- 線量ボクセルの相対電子密度は各サブボクセルの寄与を重みづけて次のように計算されます。

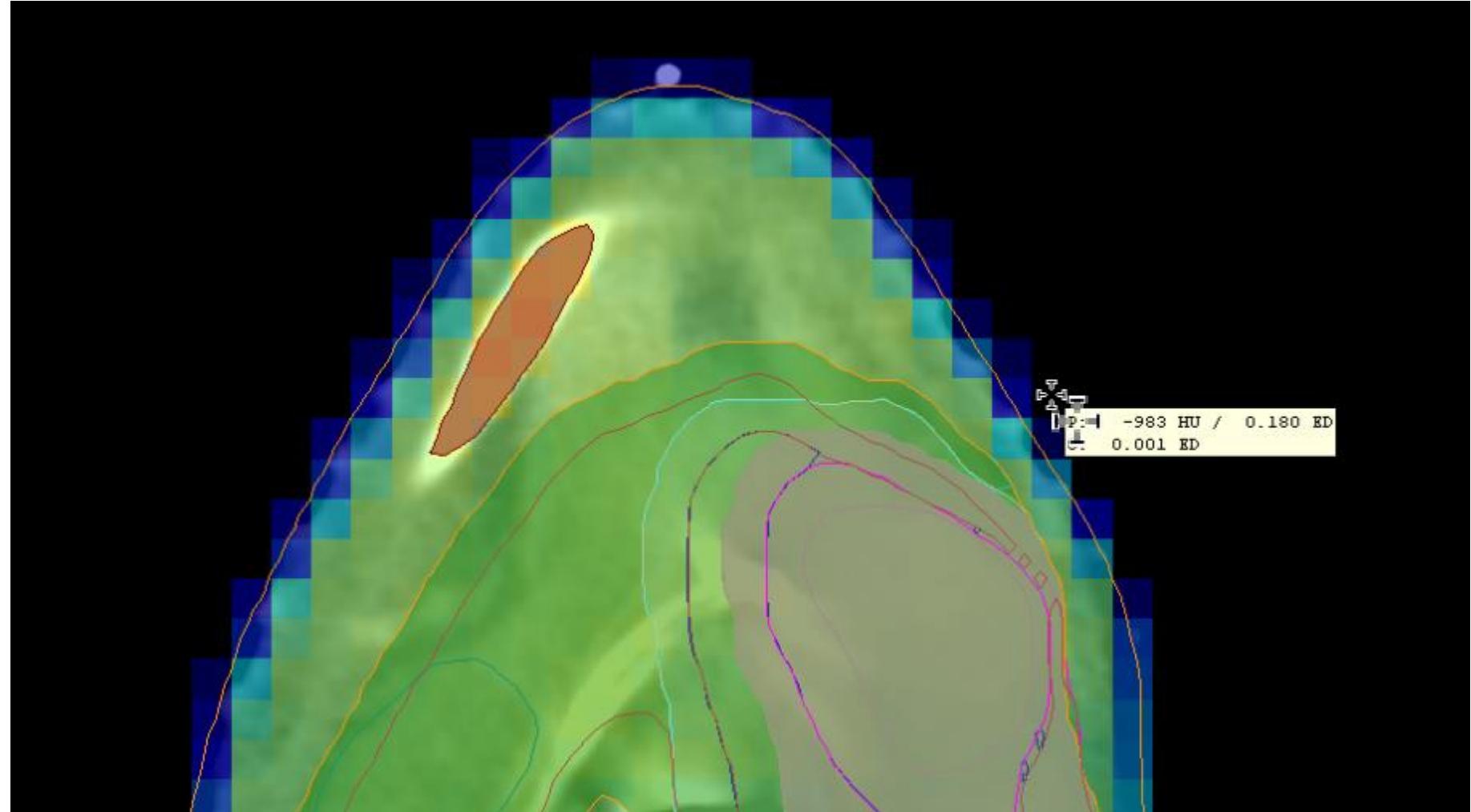
$$\underline{\textcircled{1}}(\underline{0.4 \times 0.06}) + \underline{\textcircled{2}}(\underline{0.7 \times 0.2}) + \dots$$



Calculation Grid

Air Voxels

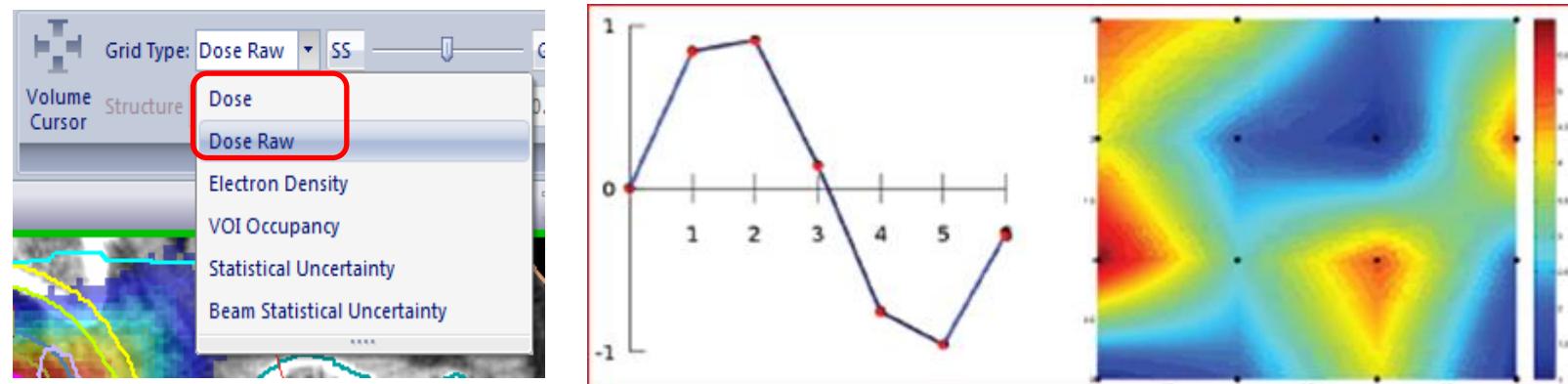
- 磁場が存在するため、Monacoは患者とカウチの外側すべてのボクセルを空気に割り当て、Electron Return Effect (ERE) をシミュレートできるようにしている。



Calculation Grid

Dose Interpolation

- 線量は線量ボクセル(計算グリッド)ごとに計算される。
- 線量は「Raw Dose」(未処理線量) または「Dose」(補間済み) として表示できる。
- 「Raw Dose」は各ボクセルの線量
- 「Dose」では3次元線形補間 (Tri-linear Interpolation) が使われる。

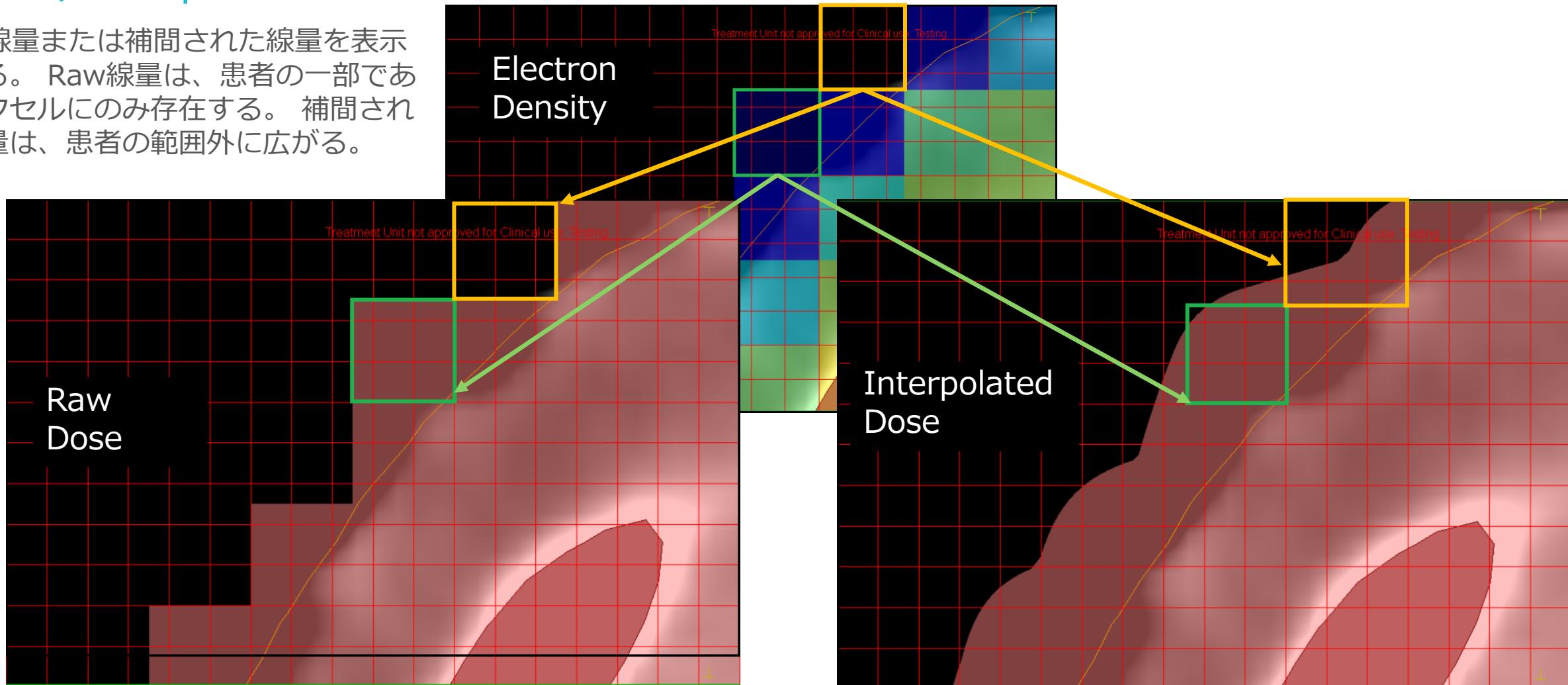


左は1次元、右は2次元補完の例

Calculation Grid

Raw/Interpolated Dose

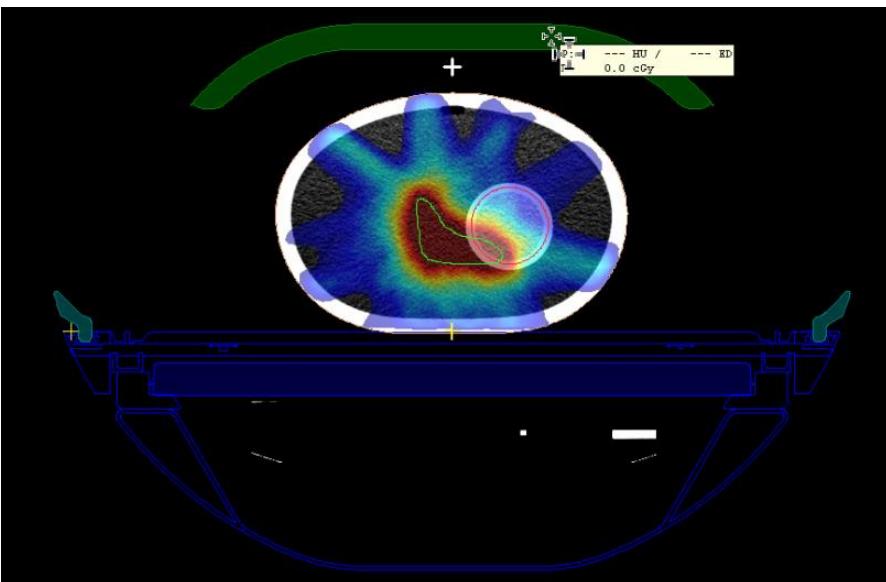
Raw線量または補間された線量を表示できる。Raw線量は、患者の一部であるボクセルにのみ存在する。補間された線量は、患者の範囲外に広がる。



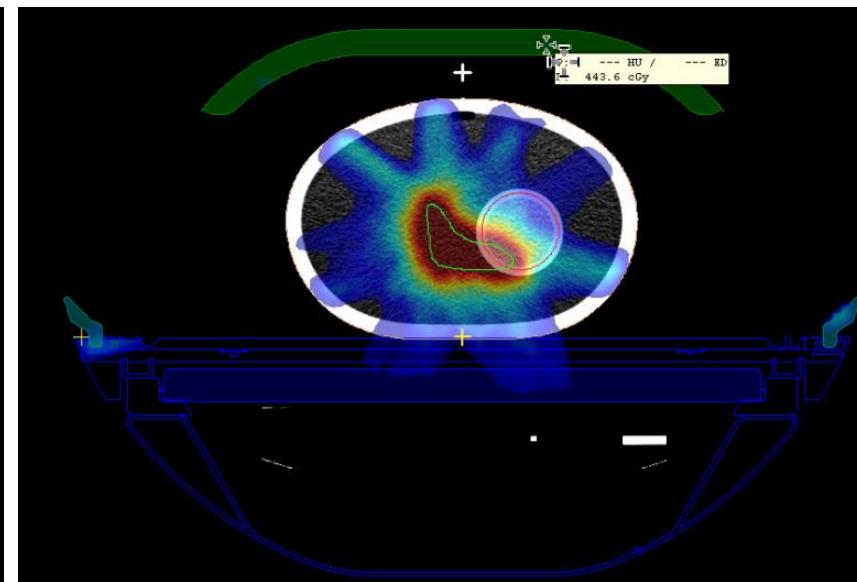
Calculation Grid

Dose Calculation Region

- 線量は、外部輪郭の内側のみに表示される。
- ‘Store and display dose in couch structure’オプションが選択されているかどうかの違いは以下の通り：

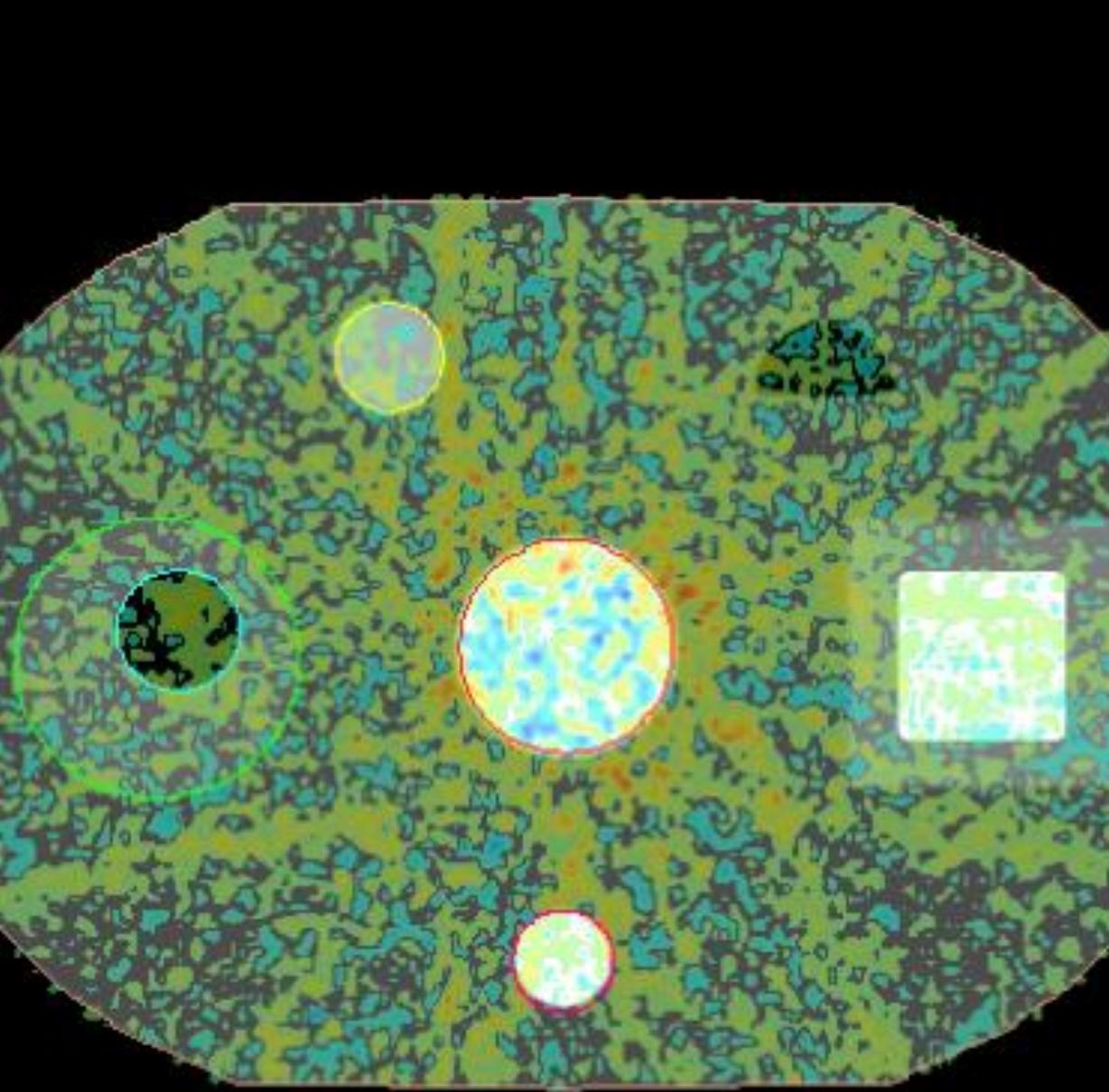


カウチとコイルに線量が表示されない



カウチとコイルに線量が表示される

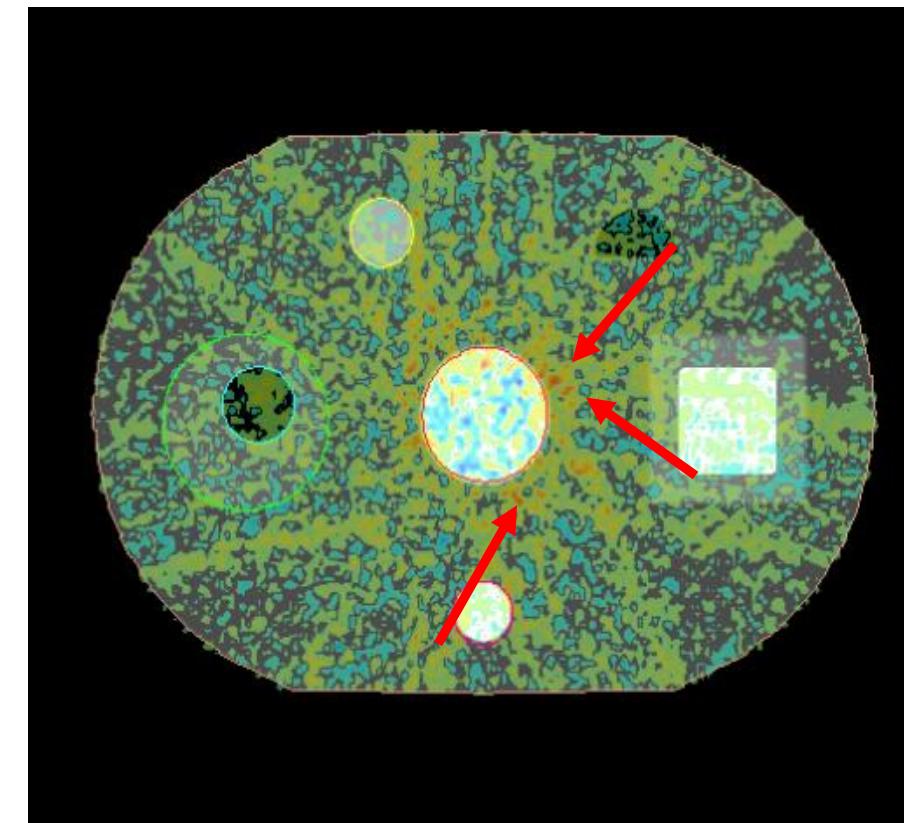
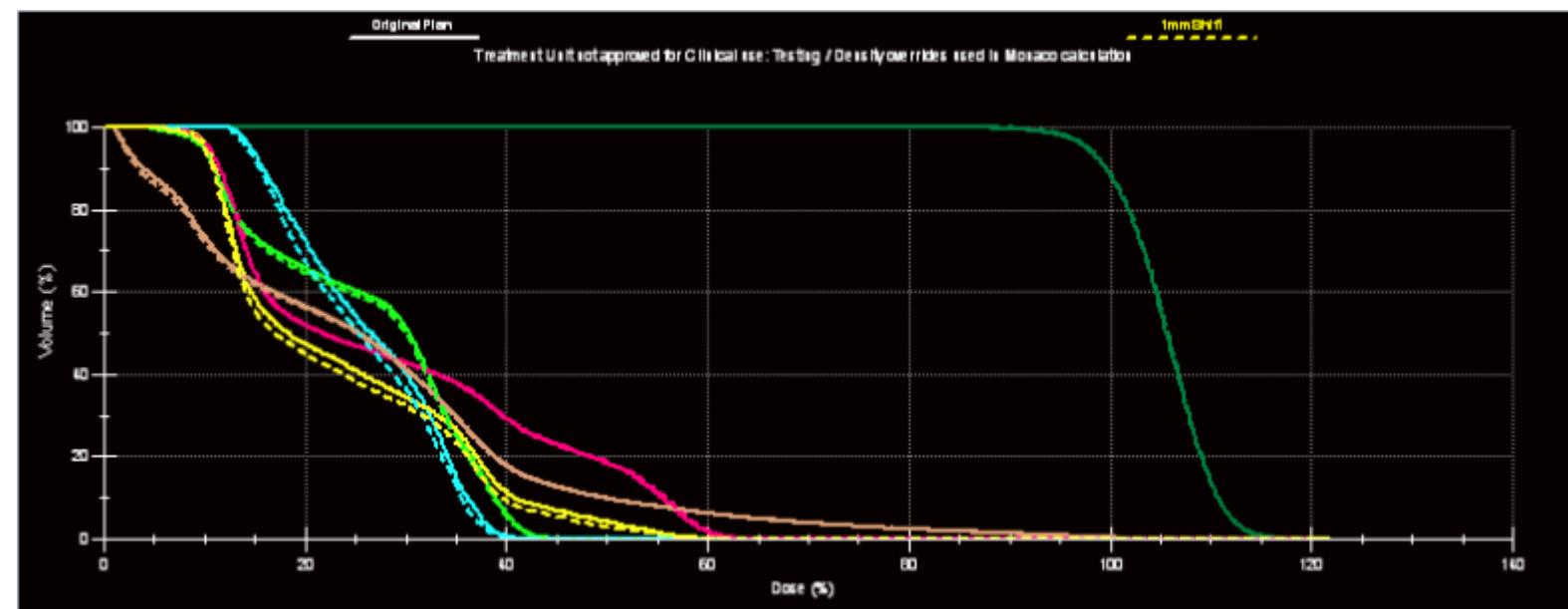




計算グリッドはAdaptedプラン
にどのように影響するか？

Planning Considerations

- [Adapt to Position]を使用すると、新しい計算グリッドレイアウトによるDVHの違いが見られる。



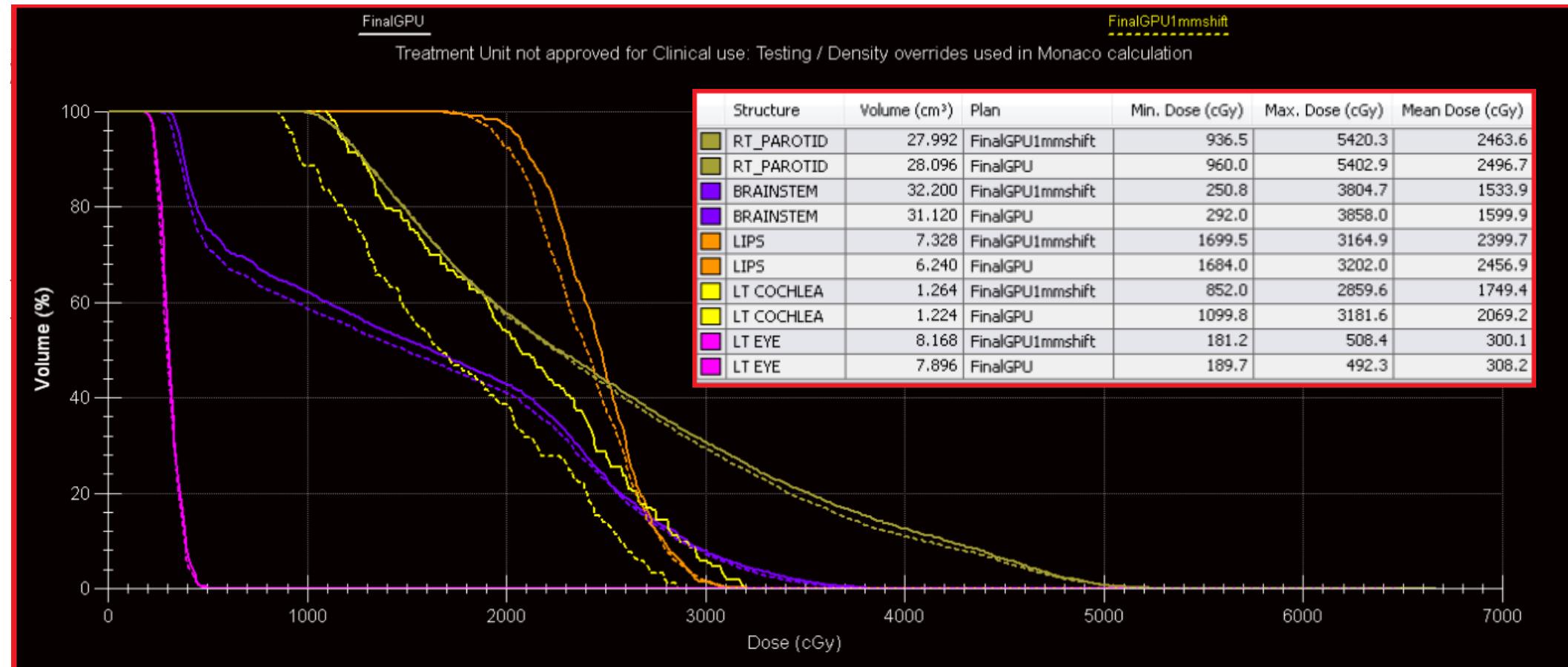
DVH Statistics

アイソセンターシフトで線量と体積の違いを見ることができる

- ・線量補間を最小限に抑えるために、DVHボリュームは間接的にアイソセンターにリンクされている。
- ・DVHボリュームはDVHボクセルボリュームで計算され、Structureボリュームは実際の輪郭で計算されるため(輪郭領域×スライス厚の合計)、DVHボリュームはStructureボリューム間で異なる。

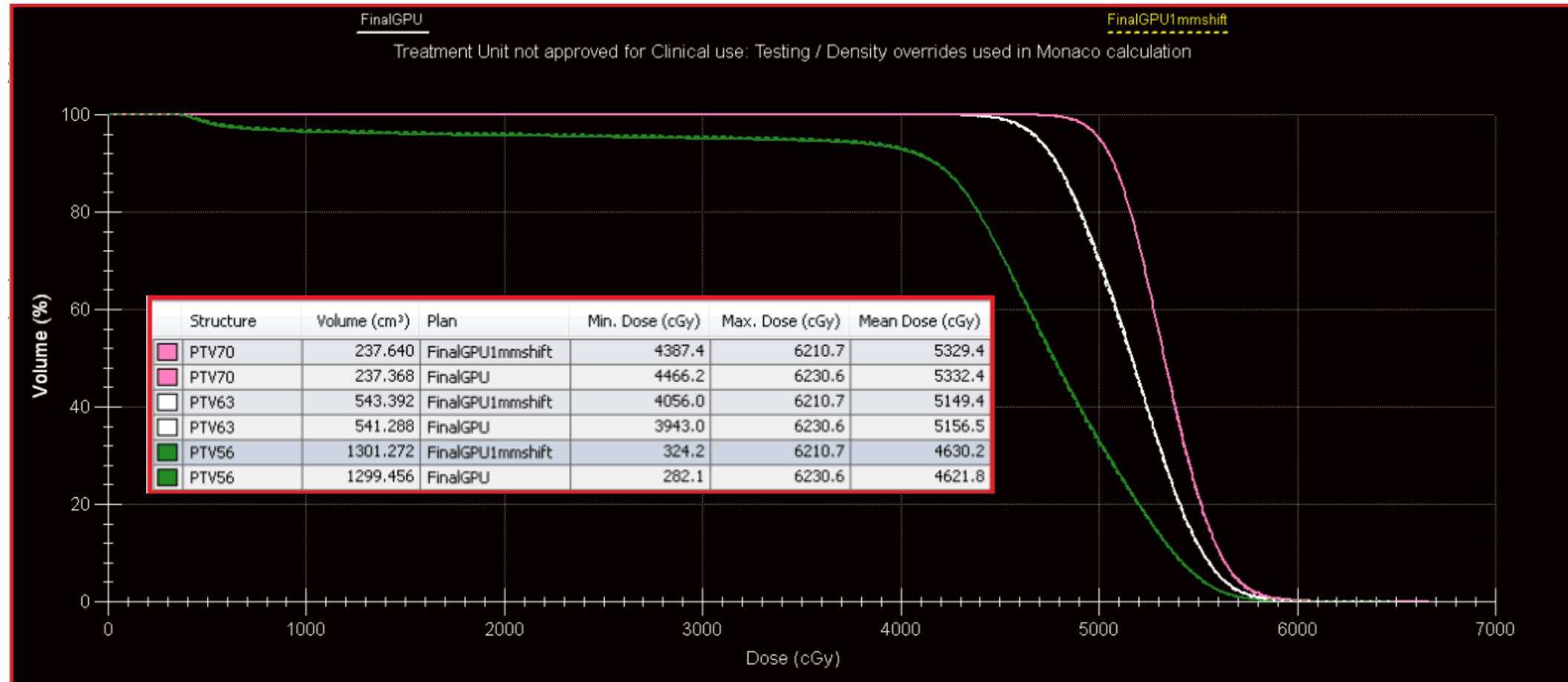
DVH Statistics

アイソセンターシフトで線量と体積の違いを見ることがある。



DVH Statistics

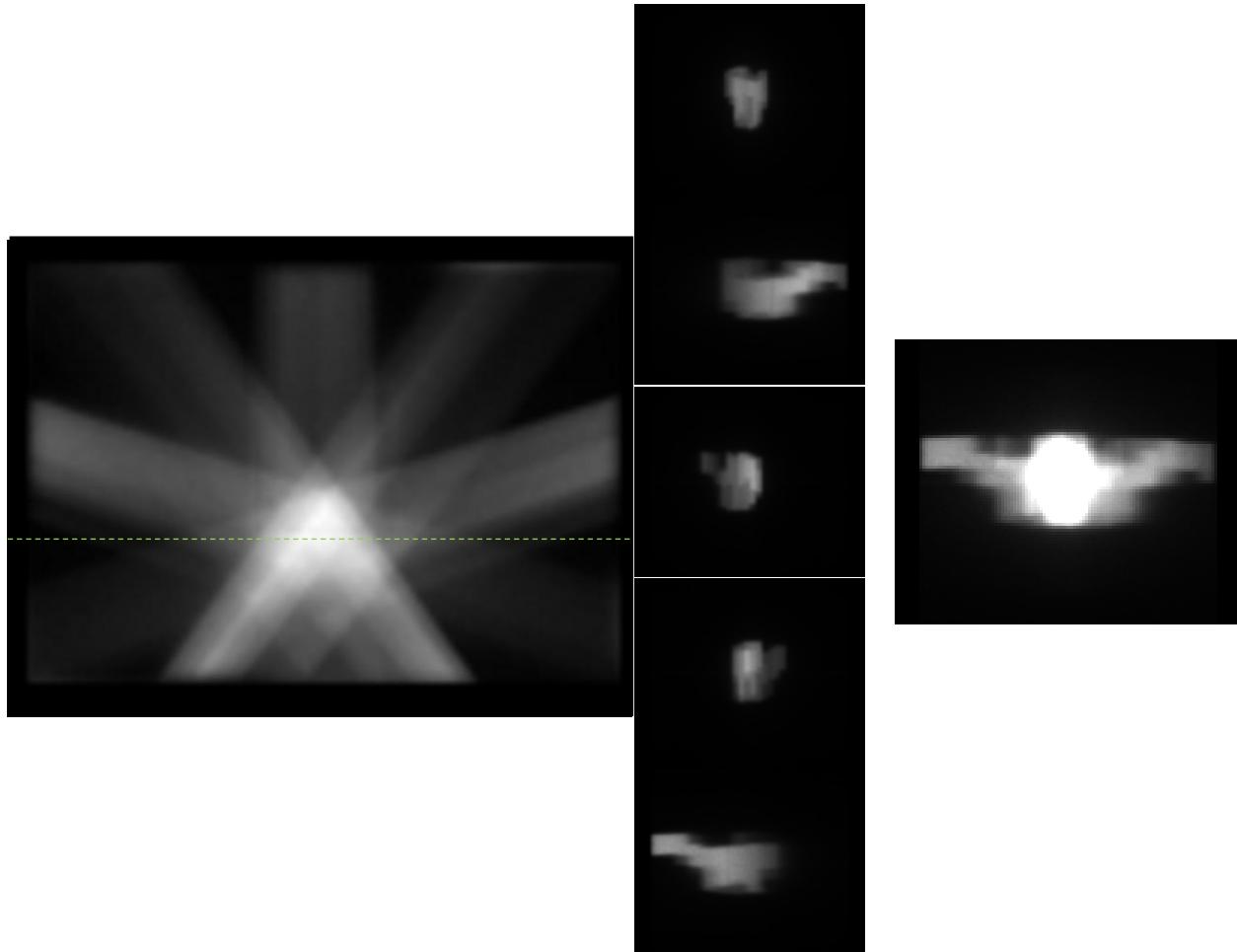
アイソセンターシフトで線量と体積の違いを見ることができる。



50 rs

 Elekta

DICOM RT Dose Export

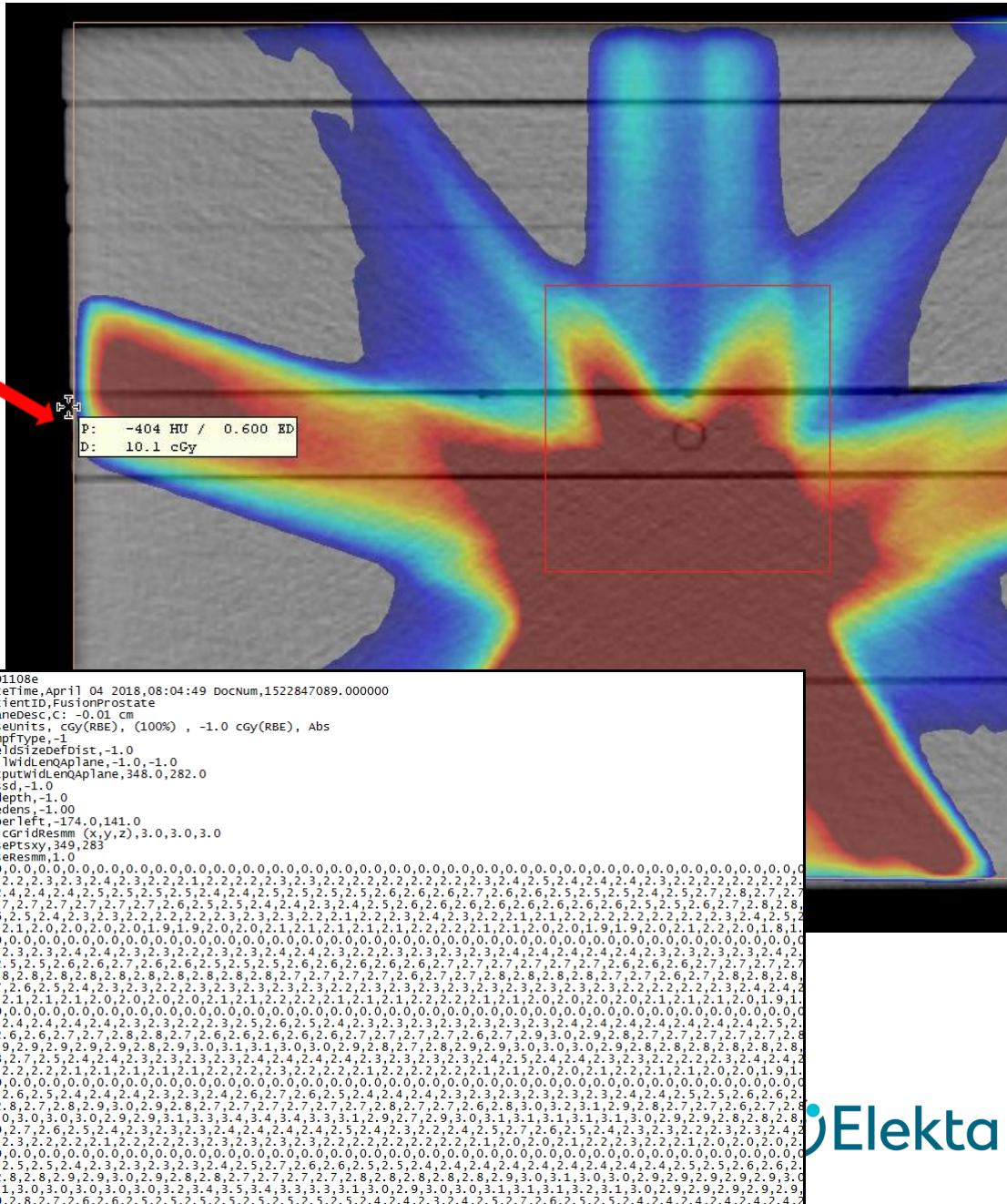


51 rs

- Monacoは、グリッドタイプ「DoseRaw」で表示される線量をエクスポートする。
- Dose Rawは、ボクセルあたりの線量を表示する（線量は補間されない）。
- ボクセルのサイズは、計算グリッドの間隔と同じ。
- DICOM RT線量ファイルのポイント間隔は、計算グリッド間隔と同じ。

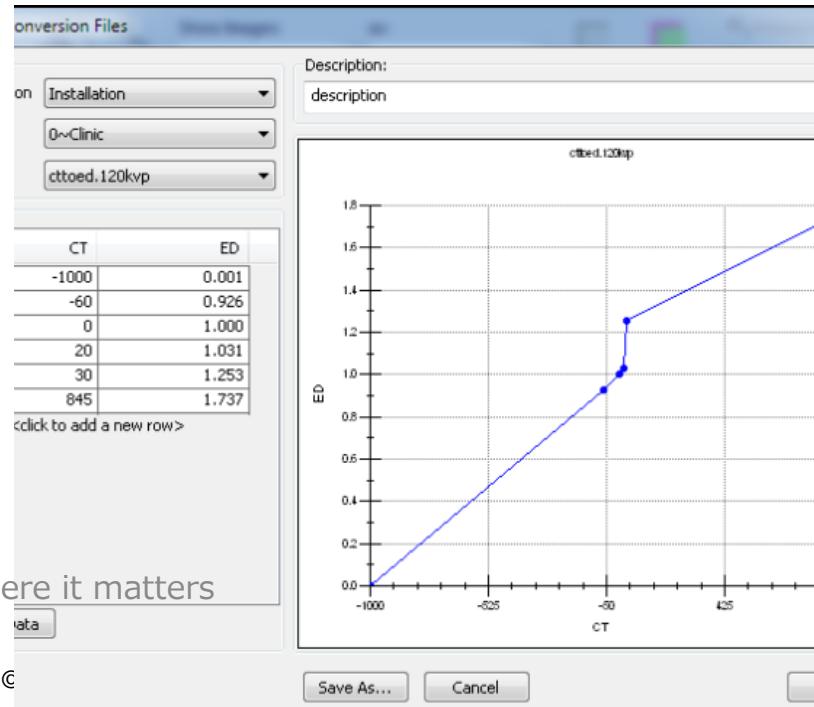
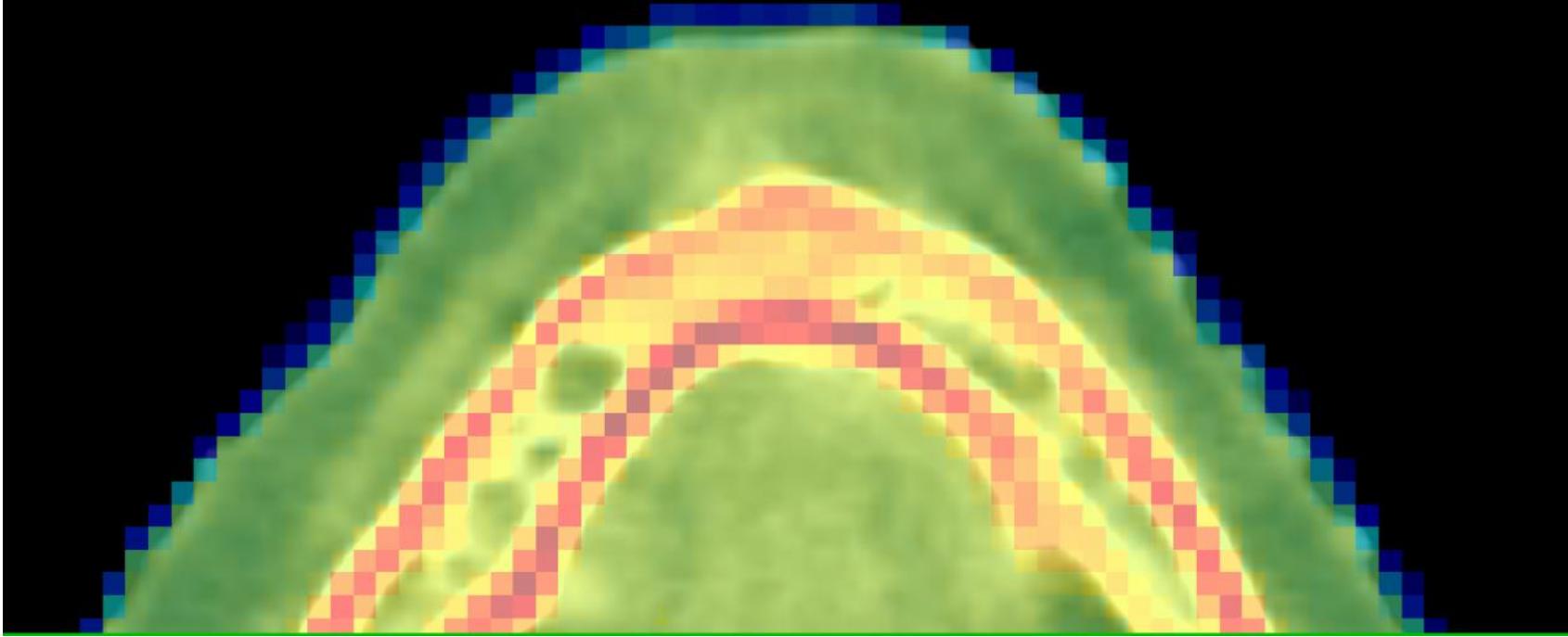
Dose Plane Export

- Dose Planeの線量は、3次元線形補間 (trilinear interpolation) を使用して1mm グリッド間隔に補間される。
 - この補間は、患者の外側、および患者のビルドアップ領域に物理的ではない結果をもたらす。
 - 結果として得られるDose Plane出力を調べると、最後の非ゼロボクセルの線量から患者の外側のボクセルの中心までの補間が明らかになる。

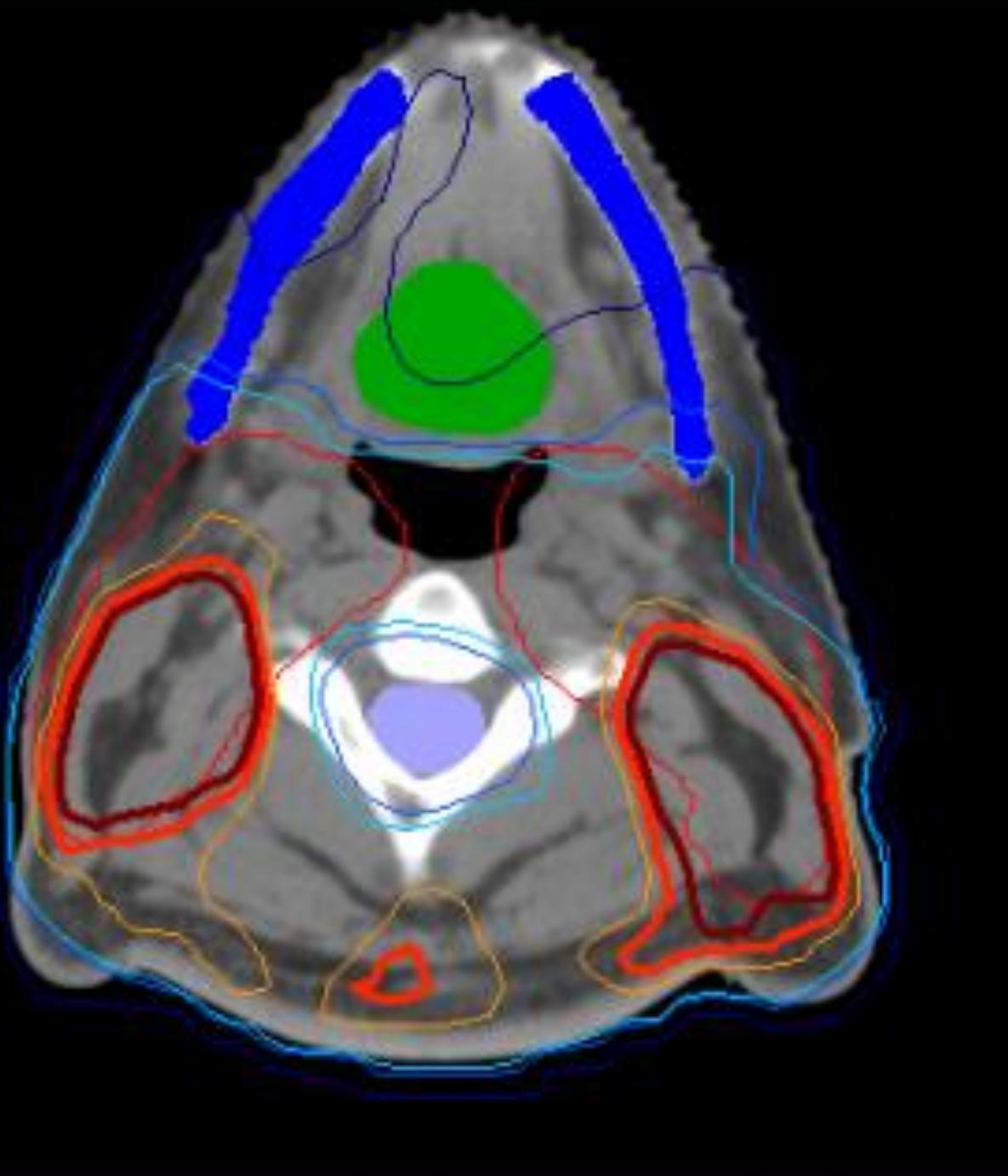


CT to Mass Density

- このセクションでは、各ボクセルに質量密度がどのように割り当てるかを理解する。



CT to Mass Density



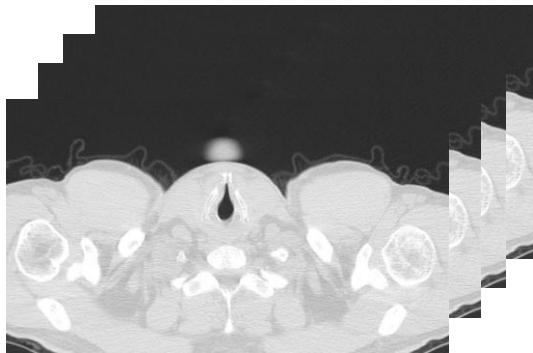
CT to Mass Density

Voxel Assignment

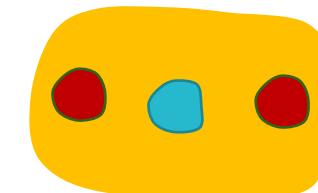
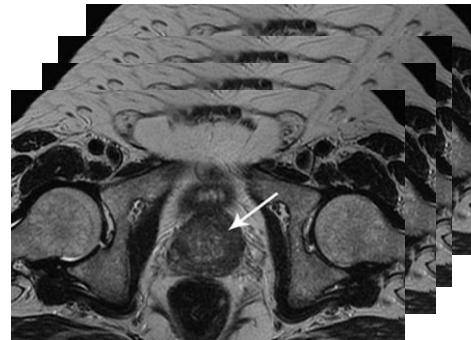
- 各患者ボクセルには、指定された材質と質量密度 ρ_{mass} が含まれている。
- ボクセルの化学組成と質量密度は、線量計算時に使用される。

CT to Mass Density

Voxels do not all have a mass density found in the LUT



OR



Monacoでは、ユーザーは
CT-HUをEDに変換するため
に、CTからEDファイルを作
成する。

ユーザーはMonaco内で相対電
子密度p / pwを強制できる。

これはMR画像には必須

カウチストラクチャは変更でき
ない固定REDで保存されている。

$$\rho = \begin{cases} 0 & \text{For } \text{RED} < 0.0 \\ \frac{\sqrt{0.99^2 + 4.0 * 0.01 * \text{RED}} - 0.99}{2.0 * 0.01} & \text{For } 0.0 \leq \text{RED} < 1.0 \\ \frac{(\text{RED} - 0.15)}{0.85} & \text{For } \text{RED} \geq 1 \end{cases}$$

相対電子密度 (RED) は、
Monacoの式に従って質量
密度 (ρ) に変換される。

Lookup table

ρ_0	material 0
ρ_1	material 1
...	
ρ_N	material N

質量密度は、ルックアップテーブル
に従って物質に変換される。

CT to Mass Density

Look Up Tables

Patient Look Up Table

Mass Density [g/cm ³]	Nominal Mass Density [g/cm ³]	Material
0.002	0.0012048	Air (dry, near sea level)
0.002		Mixes of Air with LowDensMuscleSkeletalICRP = MuscleSkeletalICRP with nominal mass density (0.82)
0.82		Mixes of LowDensMuscleSkeletalICRP = MuscleSkeletalICRP with nominal mass density (0.82) and AdiposeTissueICRP
0.91	0.92	Adipose Tissue (ICRP) Filename: AdiposeTissueICRP.*
0.95		Mixes of HighDensAdiposeTissueICRP = AdiposeTissueICRP with nominal mass density (0.95) and MuscleSkeletalICRP
1.04	1.04	Muscle, Skeletal (ICRP) Filename: MuscleSkeletalICRP.*
1.08		Mixes of Muscle, Skeletal (ICRP) and BoneCortical ICRP
1.85	1.85	Bone, Cortical (ICRP) Filename: BoneCorticalICRP.*
3.00		Titanium Filename: Ti
5.00	4.54	
5.00		Stainless Steel
9.00	7.99	
9.00		Gold
12.00	11.0	

Patient Positioning System Look Up Table

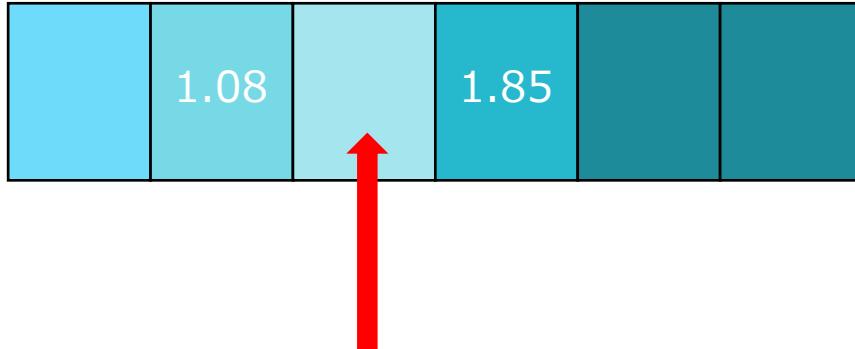
Mass Density [g/cm ³]	Nominal Mass Density [g/cm ³]	Material (Zones)
0.002	0.0012048	Air (dry, near sea level) Material name: DryAir
0.002		Interpolation of Dry Air and Rohacell
0.06		Rohacell
0.08	0.07	Material name: PPS_Rohacell
0.08	0.09000	2ATL_AnteriorCoil_G Material name: PPS_AnteriorCoil_1060372-DW-G
0.095	0.10450	Zone 8 Material name: PPS_FoamMattress_1060372-DW-G_Zone8 Mattress 0.088 g/cm ³ uncompressed 0.1045 g/cm ³ 1.5 mm compressed
0.12	0.11475	Zone 10 Material name: PPS_GRP_F_1060372-DW-G_Zone10 Mattress 0.11475 g/cm ³ uncompressed 0.125 g/cm ³ 1.5 mm compressed

Phantom Look Up Table

Mass Density [g/cm ³]	Nominal Mass Density [g/cm ³]	Material (Zones)
0	0.0012048	Air (dry, near sea level)
0.002		Mixes of Air and Gammex_LungLN300
0.2		
0.2	0.300	Gammex_LungLN300
0.9		
1.0	1.0	Liquid water
1.008		
1.008	1.014	Phantom_CIRS_Plastic Water_1995
1.01		
1.01	1.03	Phantom_CIRS_Plastic Water_2015
1.04		
1.04	1.046	Gammex_SolidWater_457
1.3		
1.3	1.819	Gammex_SolidWater_457
3.0		
3.0		
9.0		

CT to Mass Density

Not all voxels have a mass density correlating to one in the LUT



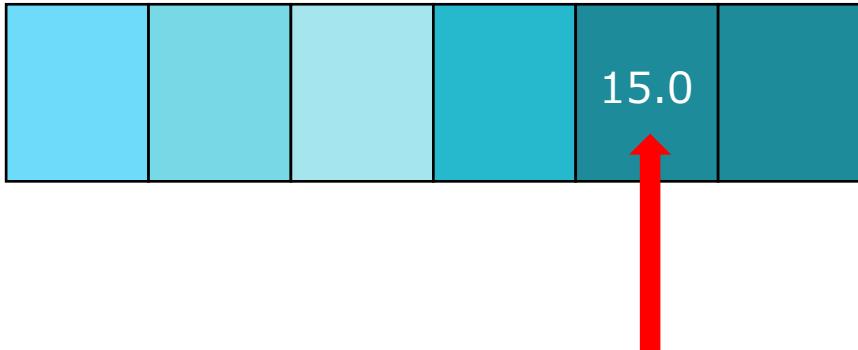
このボクセルは、75%は密度1.85で、
25%は密度1.08

- Monacoは、材質間の質量密度を補間する。これは、患者とファントムLUTで行われる。例として、患者のLUT密度1.08~1.85があります。ここでは、筋肉骨格（ICRP）と骨皮質（ICRP）を混合している。
- MonacoはPPS LUTに材質を混合しない。既知のPPS材質のみが指定されている。

CT to Mass Density

High Density Voxels

- LUTの最高のREDは12.00で、これは鉛に値する。
- GPUMCDのMonacoは、REDが12.00を超える場合、RED15.00の鉛の密度として扱う。

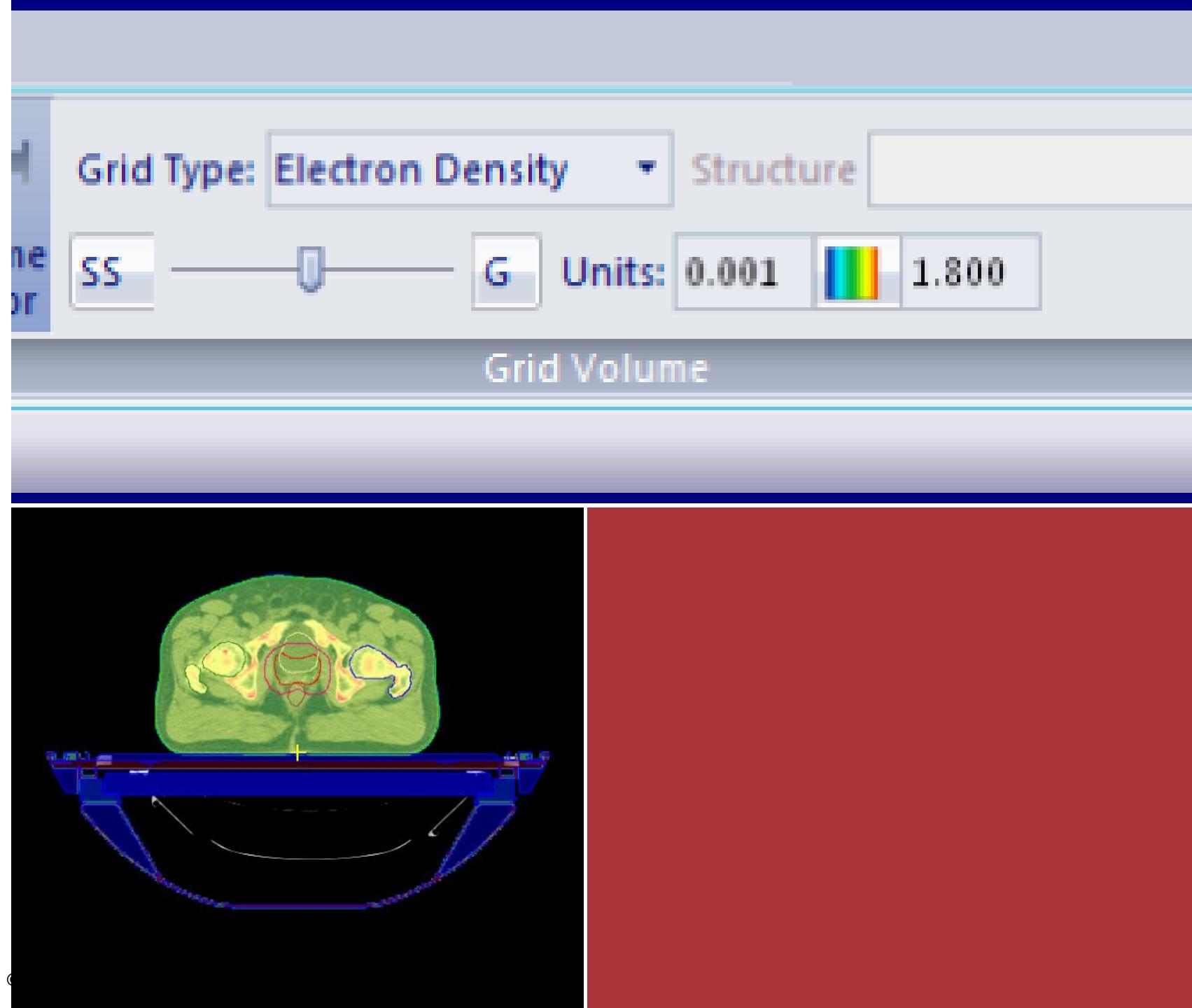


Patient LUT

5.00	7.99	StainlessSteel316
9.00		<i>Filename:</i> <i>StainlessSteel316.*</i>
9.00	11.35	Lead
12.00		<i>Filename:</i> <i>Lead.*</i>

Electron Density Assignment

- Adaptedプランにて電子密度がストラクチャにどのように割り当てるか理解する。



Electron Density Assignment

The Structure Tab has two subtabs:

Structures						
View: Contoured All Layers ⚠ Adapt Setup						
Structures						
Name	Color	Visible	Volume (cm ³)	Type	Force ED	Relative ED
BLADDER	Yellow	<input checked="" type="checkbox"/>	212.643	Internal	<input checked="" type="checkbox"/>	1.500
CTV	Cyan	<input checked="" type="checkbox"/>	57.386	Internal	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000
GTV	Red	<input checked="" type="checkbox"/>	43.064	Internal	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000
patient	Brown	<input checked="" type="checkbox"/>	7227.945	External	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000
PTV	Blue	<input checked="" type="checkbox"/>	122.444	Internal	<input checked="" type="checkbox"/>	1.200
RECTUM	Green	<input checked="" type="checkbox"/>	63.469	Internal	<input checked="" type="checkbox"/>	0.800
SV	Light Blue	<input checked="" type="checkbox"/>	11.259	Internal	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000

62 rs

Contoured

Adapt Setup

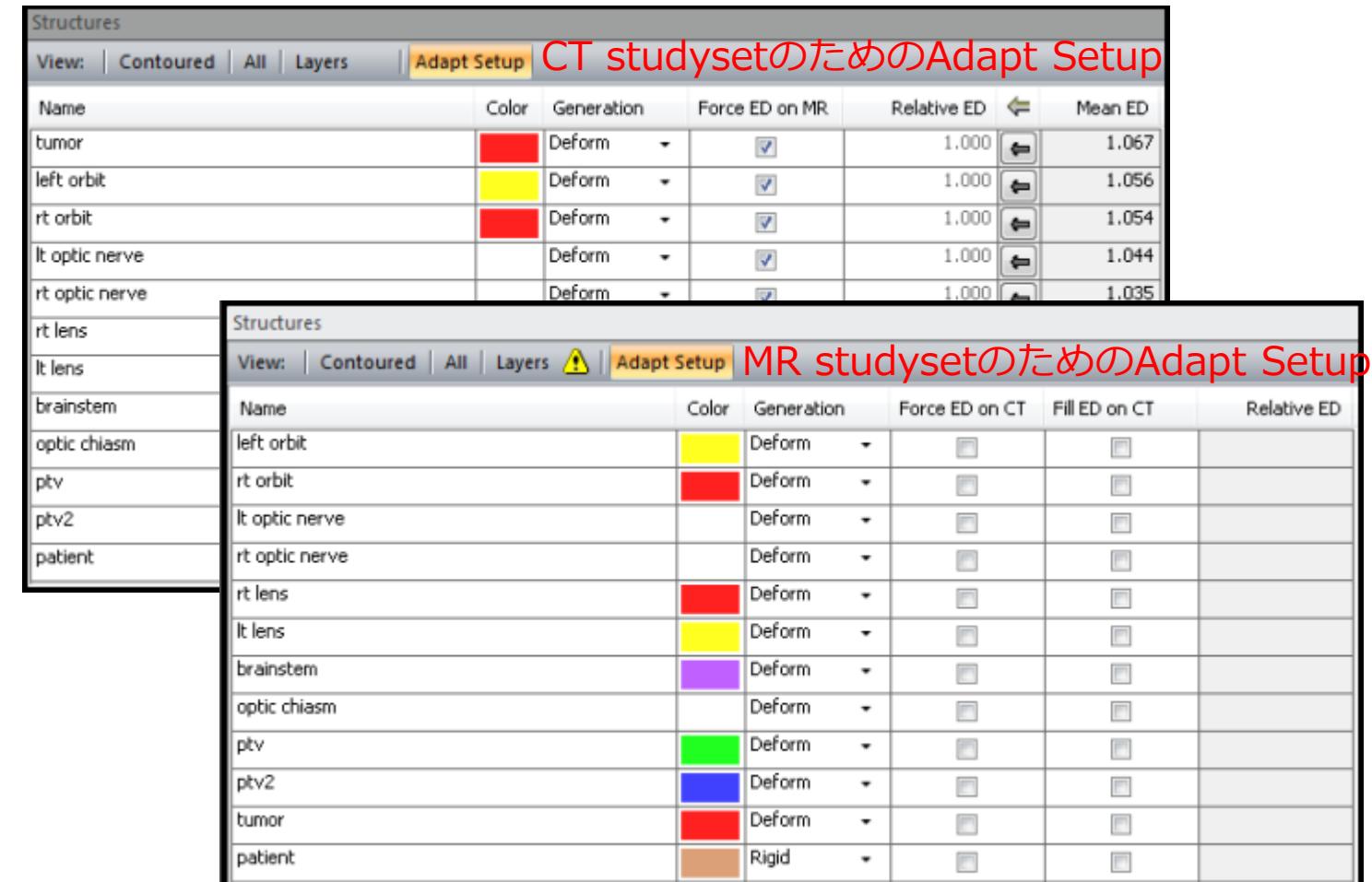
Structures						
View: Contoured All Layers ⚠ Adapt Setup						
Name	Color	Generation	Force ED on CT	Fill ED on CT	Relative ED	
GTV	Red	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
SV	Light Blue	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
BLADDER	Yellow	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
PTV	Blue	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
CTV	Cyan	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
RECTUM	Green	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
patient	Brown	Rigid	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

両方のタブには電子密度の割り当てが含まれており、電子密度をあてがうことができる。

Electron Density Assignment

Structure Control – Adapt Setup tab

[Adapt Setup]タブのオプションは、アクティブなスタディセットのイメージタイプに基づいている。



The image shows two tables from the Elekta Structure Control software, illustrating the 'Adapt Setup' tab for different study sets.

CT studyset (Top Table):

Name	Color	Generation	Force ED on MR	Relative ED	Mean ED
tumor	Red	Deform	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000	1.067
left orbit	Yellow	Deform	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000	1.056
rt orbit	Red	Deform	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000	1.054
lt optic nerve		Deform	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000	1.044
rt optic nerve		Deform	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000	1.035

MR studyset (Bottom Table):

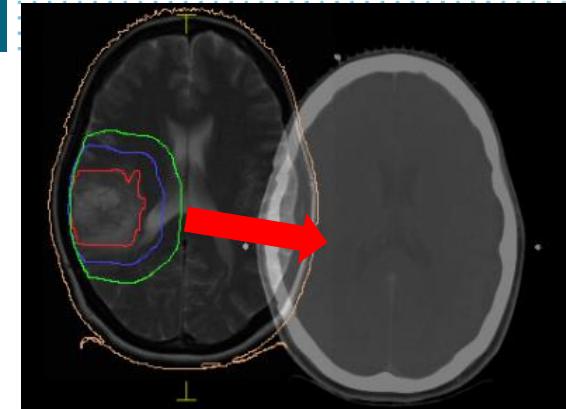
Name	Color	Generation	Force ED on CT	Fill ED on CT	Relative ED
left orbit	Yellow	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
rt orbit	Red	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
lt optic nerve		Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
rt optic nerve		Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
rt lens	Red	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
lt lens	Yellow	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
brainstem	Purple	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
optic chiasm		Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
ptv	Green	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
ptv2	Blue	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
tumor	Red	Deform	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
patient	Brown	Rigid	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Electron Density Assignment

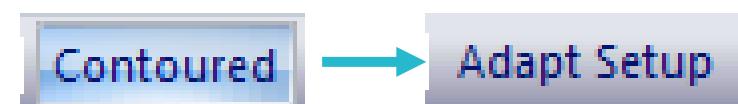
Electron Density Propagation – Switching Modalities

Anatomyを新しいイメージセットにAdaptさせる場合:

- ストラクチャボリュームは、次の場合に[AdaptSetup]タブから電子密度設定を取得する:
 - Anatomy をCT 画像からMR画像にAdaptする
 - Adapt to Shape ワークフロー
 - Anatomy をMR画像からCT画像にAdaptする
 - MRの輪郭, CTでプラン



この状況では、新しいAdaptストラクチャセットの[Adapt Setup]タブに、元のストラクチャセットの[Contour]タブの情報が入力される。



Electron Density Assignment

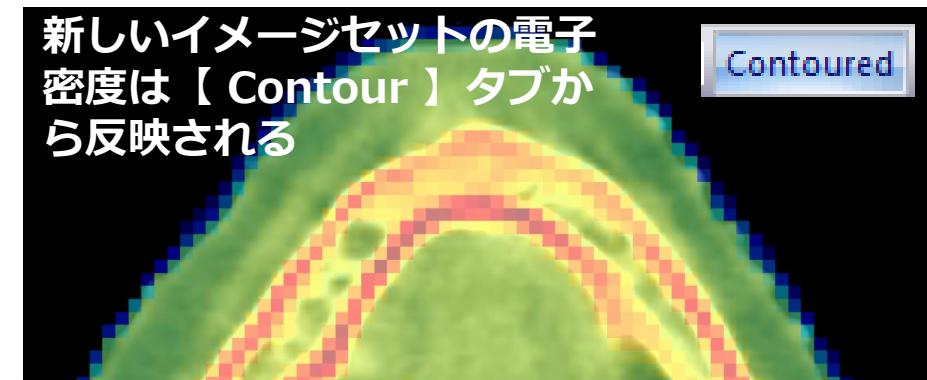
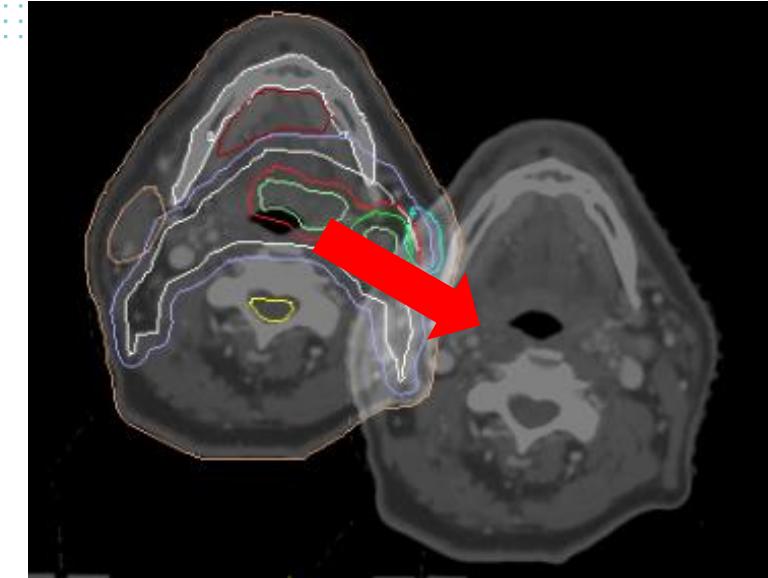
Electron Density Propagation – Same Modality

Anatomyを新しいイメージセットにAdaptさせる場合：

ストラクチャボリュームは、次の場合に[Contour]タブまたは元のイメージセットから電子密度設定を取得する：

- AnatomyをMR画像からMR画像にAdaptする。
 - Adapt to ShapeワークフローはリファレンスイメージセットとしてMRイメージセットを使用する。

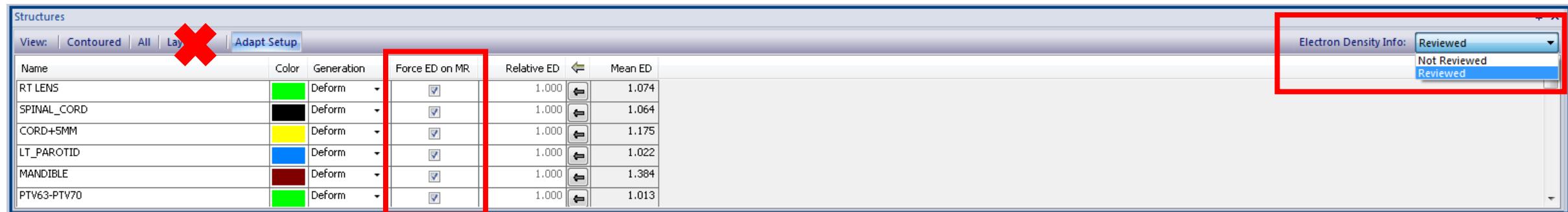
上記のシナリオでは、新しいAdaptedストラクチャセットの[AdaptSetup]タブに、元のストラクチャセットの[AdaptSetup]タブの情報が入力される。



Electron Density Assignment

Electron Densities on MR Images

- MR画像にAdaptedプランを作成するときは、Force EDを使用する必要がある。
- Adaptedプランでは、ストラクチャプロパティまたはストラクチャLayerの順序を編集できない。
- リファレンスプランをApproveおよびExportする前に、[AdaptSetup]タブでApproveする必要がある。



Thank you

お疲れ様でした。
ご不明点等ございましたらご遠慮なくお問い合わせください。

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
〒108-0023 東京都港区芝浦3-9-1 芝浦ルネサイトタワー7F
ヘルプデスクTEL：0120-659-043
Mail：SoftwareService-Japan@elekta.com
URL：<https://www.elekta.co.jp/>

