VMAT-TBI

Total Body Irradiation

2023-04-10





はじめに

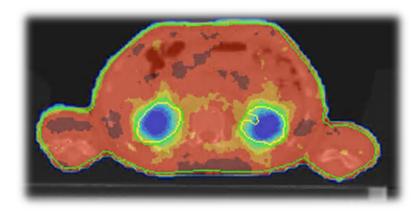
Long SSD法で実施されてきたTotal Body Irradiation(TBI)ですが、近年、以下の利点からVMATで実施されるようになっています。

- 線量集中性と均一性を高められる
- 治療室の構造に制限されず、専用の寝台・固定具・ブロックが不要
- XVIやCatalystによるIGRTを実施できる

本資料では、TBI (Total Body Irradiation)をVMATで実施する際の、

- ワークフロー
- 治療計画
- 患者QA

それらに付随する注意点についてご紹介します。





本資料について

- 本資料では、治療計画装置はMonacoを使用し、治療機はエレクタ社製を想定しています。
- 本資料でご紹介している患者QAでは、2つの検証システム(MapCHECK2、IQM)を使って検討しています。
- 本資料は、補助を目的としており、ユーザーマニュアルに置き換わるものではございません。
- 本資料の参照にあたり、当社が責任を負う場合であっても、当社の故意または重過失がない限り、当社の責任は直接かつ通常の損害に限られるものとします。
- 本資料に関してご不明な点がございましたら、担当スタッフまたはエレクタケアサポートセンターにお問い合わせください。



患者固定と計画用CT





ポイント

• 患者を以下の方法で固定

吸引式固定具(2m以上の大きめの方がよい)

Kneeステップ

枕+頭部シェル(吸引式固定具で代用も可能)

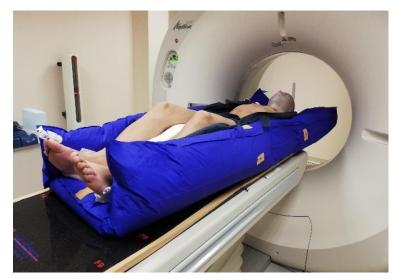
• CTを2回に分けて撮影(身長112cm以上の場合)

1回目はHFSで上半身を撮影、頭から膝上くらいまででよい。

2回目は患者を180°回転してFFSで下半身を撮影、つま先から骨盤まで撮れればよい。

Fusionしやすいように、上半身CTにも映りこむ大腿中央から膝上くらいに、不透過マーカーを貼っておくとよい。

回転後のセットアップを容易にするため、Longitudinal Laserの線も書いておくとよい。







全長の目安

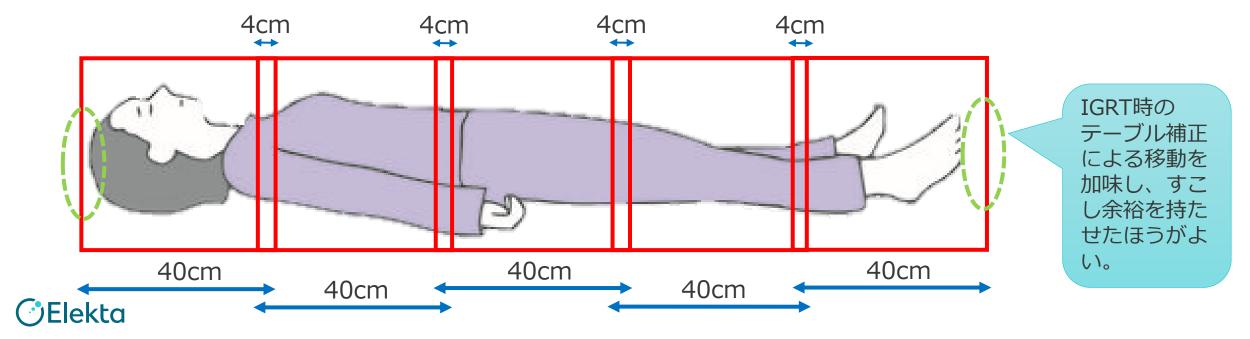
• 患者を寝台に乗せたとき、全長約175 cm以内に収めるのがひとつの目安です。

理由1:5つのVMAT Fieldで照射することができる (照射時間短縮)

理由2:40cm × 5 Field - 4cm (オーバーラップ) × 4 = 184cm

IGRT時のテーブル補正により寝台が動くことを加味し、上記より短く175cmと余裕を持たせる

オーバーラップは、体軸方向の照射野の10%以上に設定することにより、つなぎ目において最良の線量分布が 得られる



その他、注意点

全長が長い場合は、踵を立てた状態で固定し、全長を短くする。



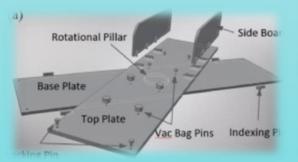
手指を臀部で押さえてバックロックで固めると、痺れる可能性がある。→ 手指を体側に沿わせてバックロックで固める、もしくはクッションを掴んで形どる。

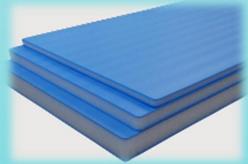


大きく膝を曲げなければならない場合は、膝がFOVの外に出ないよう気を付ける



バックロック破損防止/回転しやすくするため、ローテーション カウチ/スタイロフォームを下に敷いて、バックロックを乗せる。







治療計画

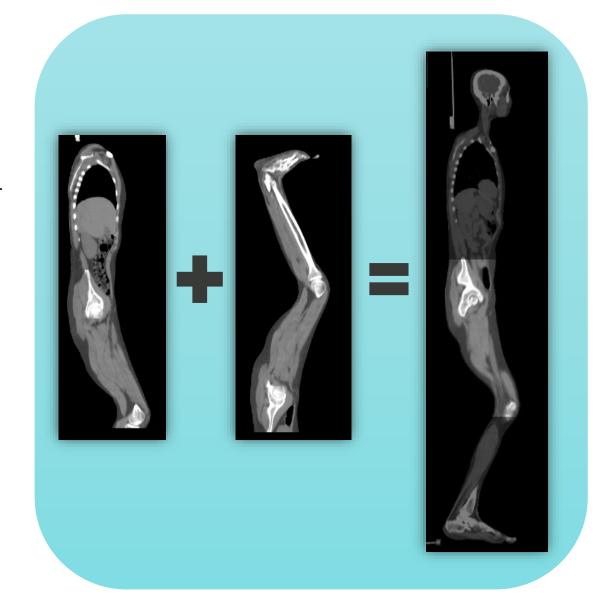
Monaco





Fusion

- 2つのCTデータをMonacoに取り込む
- 1つ目のCTデータをPrimaryにし、2つ目のCTデータをFusionする
- マニュアルで2つ目のCTデータを上下180度回転
- 補助的に不透過マーカーを使用し、骨盤・大腿骨・膝などの骨を目安に合わせる





OAR & PTV

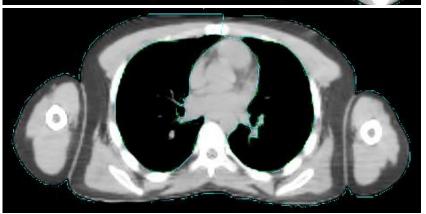
[OAR]

肺、腎臓、水晶体

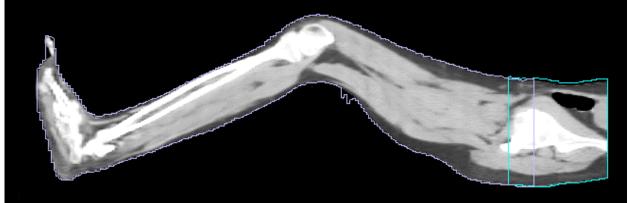
[PTV]

- 上半身のPTVは、皮膚表面、肺、腎臓、水晶 体から3mm離して作成 (ie PTVUpper)
- 下半身のPTVは皮膚表面から3mm離して作成 (ie PTVLower)
- 上半身と下半身のPTVは4cm以上オーバー ラップさせる(線量過不足を防止)~ Fusion 後、PTVUpperを下半身のCTにコピーしてお くと、PTVLowerが描きやすい











体輪郭・External / 注意点

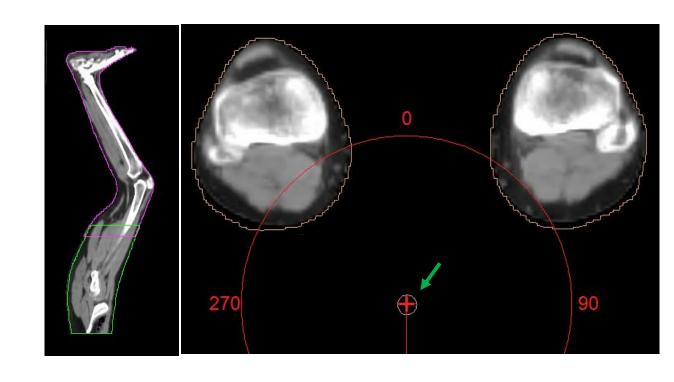
体輪郭をCTの体輪郭どおりに作成し、Externalとして登録する~Catalystを使用する上で特に重要

現象:

アイソセンターを体輪郭の外に配置すると、エラーが出て計算されない。例えば、下部の照射ではアイソセンターが脚の間になることがある。

回避策:

アイソセンターを体輪郭(External)として描く。 もし、体輪郭を最適化に使っている場合は、アイソ センターを含める前の輪郭をpatient_optとして残し ておくと良い。

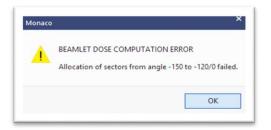




注意点

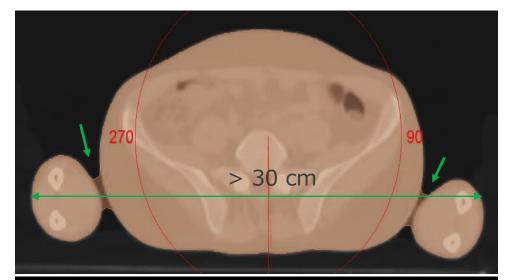
現象:

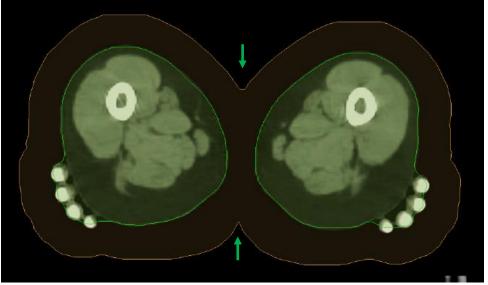
左右の幅が40cmを超え、輪郭が分かれていると、 エラーが出て計算できない場合がある。



回避策:

- 輪郭が分かれないようつなげる
- 体輪郭+5cmの輪郭などを作成し、TypeをCouch にする

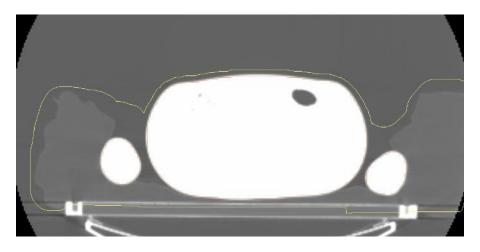


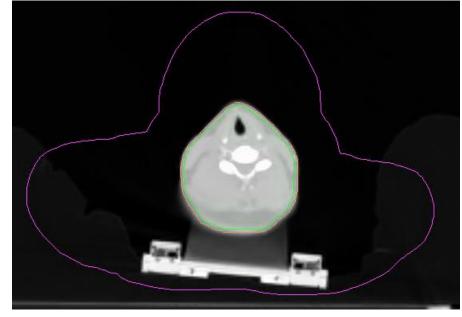




注意点

- 減衰を考慮したい固定具などがある場合、それらをすべて含めた輪郭を作成し、TypeをCouchに設定、あるいはFill ED=0.001に設定する
- Feet First CTの場合、TypeがCouchの輪郭は反転するため注意
- 体輪郭に+5cmの輪郭を最適化に使用すると最大線量 (hot)を上手くコントロールできることがあります。 その場合、TypeがCouchの輪郭は最適化に使用でき ないため、前頁のpatient+5cmの輪郭をコピーして Internalに設定します。(patient+5cm_opt)

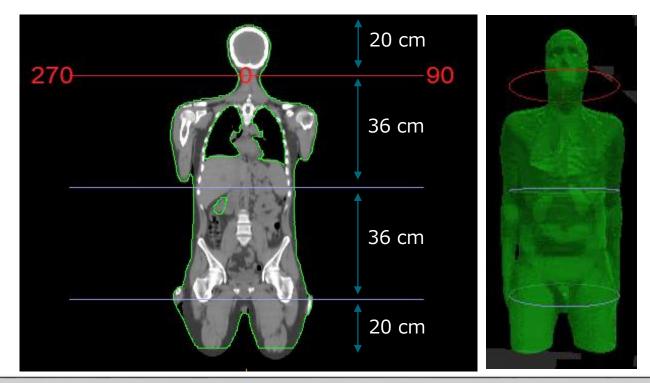






ビーム構成

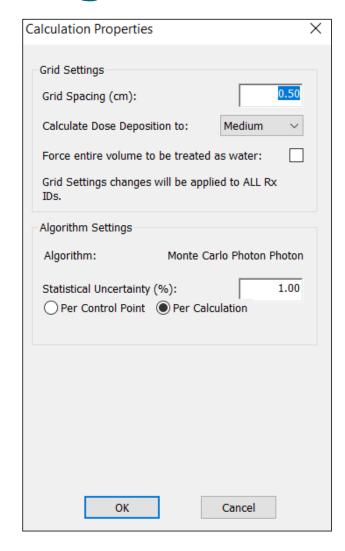
- 6 MV VMAT 2Arcで作成
- 照射野のオーバーラップは4 cmとし、 36 cmおきにビームを配置

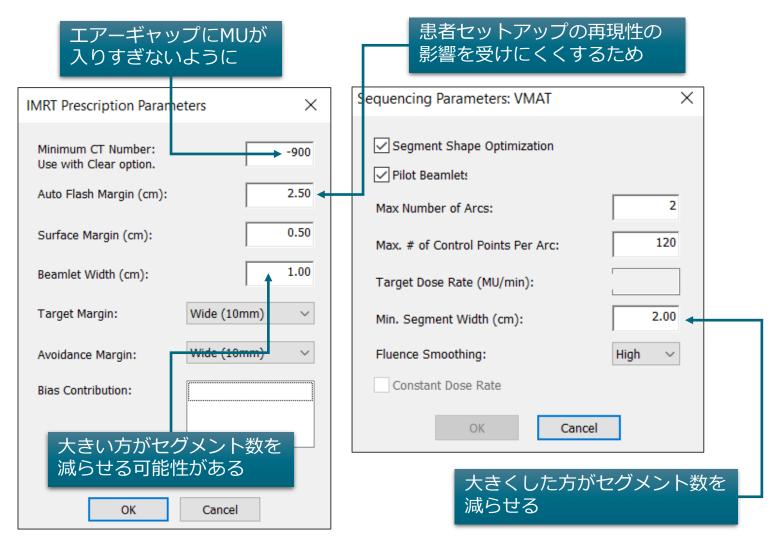


elete Parent	t Beams											
Field ID	Visible	Delivery	G-D Treatment Unit	Modality	Algorithm	G-D Energy	MU / Fx	SSD (cm)	GD Isocenter Location	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	~	VMAT	VersaHDTRN	Photon	Monte Carlo	6.0 MV	1124.32	98.58	Arbitrary Point	3.00	-100.00	0.00
2	~	VMAT	VersaHDTRN	Photon	Monte Carlo	6.0 MV	1252.37	89.97	Arbitrary Point	3.00	-136.00	0.00
3	~	VMAT	VersaHDTRN	Photon	Monte Carlo	6.0 MV	1696.50	89.63	Arbitrary Point	3.00	-172.00	0.00
												1



設定







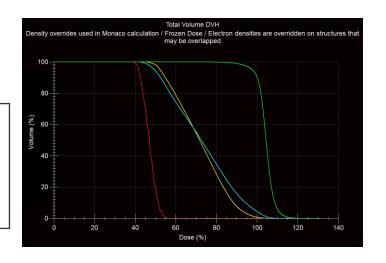
処方と線量制約 (一例)

処方:12Gy / 6 fr

PTV V11.4 Gy > 95% | 水晶体

肺と腎臓 V12 Gy > 90% Mean Dose \leq 10 Gy Max Dose \leq 6 Gy

線量均一性 Heterogeneity Index $HI \leq 1.2$



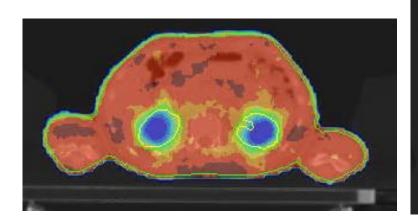
DVH Statistics											
Dosimetric Criteria	Statistics Display										
Structure	Volume (cm³)	Min. Dose (cGy)	Max. Dose (cGy)	Mean Dose (cGy)	Ref. Vol. (cm³)	Ref. Vol. (%)	Ref. Dose (cGy)		Dosimetric Criterion	% in Volume Is in SS	Heterogeneity Index
─ TotalLung	2390.125	595.7	1390.1	920.7				②	Dmean < 1000 cGy	100.00 yes	1.74
PTVupper	53090.185	374.7	1551.5	1267.0	48061.983	90.53	1200.0	Ø	V1200cGy > 90 %	100.00 yes	1.16
					51475.594	96.96	1140.0	Ø	V1140cGy > 95 %		
☐ Kidneys	369.835	581.2	1235.1	891.8				Ø	Dmean < 1000 cGy	100.00 yes	1.60
Lenses	0.785	351.6	500.6	397.6	0.000	0.00	500.6	Ø	Dmax < 600 cGy	100.00 yes	1.26
patient(Unsp.Tiss.) 65898.321	0.0	0.0	0.0						-1.00 no	

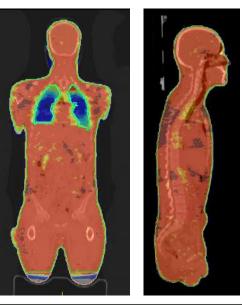


IMRT Constraint

PTVUpper (計算時間: 40分)

Monaco: 5.51 / Workstation: Z840





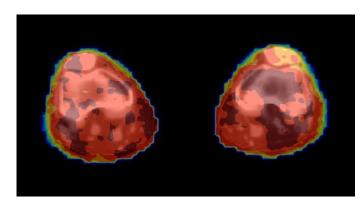
IMI	RT Constraints												
1	↓ Pareto C	onstrained	IMRT Parameters										
	Structure		Cost Function	Delete	Enabled	Status	Manual	Weight	Reference Dose (cGy)	Multicriterial	Power Law Exponent	Shrink Margin (Isoconstraint
	TotalLung	*	Serial		~	On		86.71			1.00		900.0
	PTVupper	*	Quadratic Overdose		~	On		5.61	1290.0				30.0
			Target Penalty		~	On		1.00					1200.0
	Kidneys	*	Serial		~	On		25.06			1.00		900.0
-	Lenses	*	Maximum Dose		~	On		0.28					400.0
	patient	*	Maximum Dose		~	On		0.67					1500.0
								<click a<="" td="" to=""><td>add a new structure></td><td></td><td></td><td></td><td></td></click>	add a new structure>				

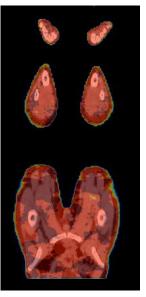


IMRT Constraint

PTVLower (計算時間: 23分)

Monaco: 5.51 / Workstation: Z840





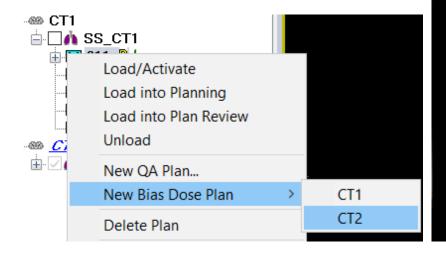


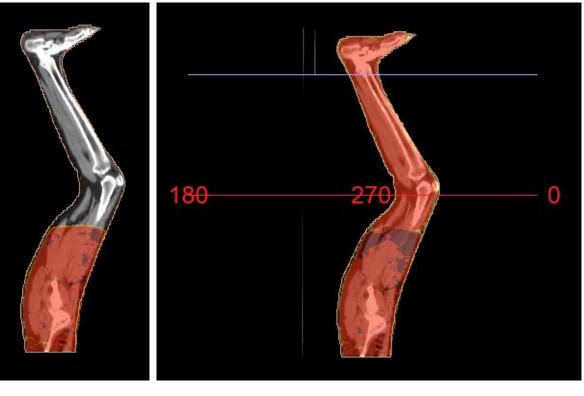
IME	T Constraints												
1	Pareto Constraine	d IMRT Parameters											
	Structure	Cost Function	Delete	Enabled	Bias Dose	Status	Manual	Weight	Reference Dose (cGy)	Multicriterial	Power Law Exponent	Shrink Margin (Isoconstraint
_	PTVlower	 Quadratic Overdose 		~	~	On		11.27	1290.0				50.0
		Target Penalty		~	~	On		1.00					1200.0
-	PTVupper	 Quadratic Overdose 		~	~	On		0.01	1290.0				50.0
-	patient_opt	 Maximum Dose 		~	~	On		0.08					1550.0
							<d< td=""><td>ick to add a n</td><td>ew structure></td><td></td><td></td><td></td><td></td></d<>	ick to add a n	ew structure>				



Bias Plan: PTVLower

PTVUpperのプランをBase Planとし、 PTVLowerが描かれている2つ目のCTに Bias Planを作成します。







Elekta

検討事項: PTVLower

dMLC(Gantry 0度 + 180度) やVMAT1arcでも可能だが、左右半分ず つセグメンテーションできるVMAT2arcが一番いい結果となった。

VMAT2arc

VMAT1arc

dMLC

Max Number of Arcs: 2

Max. # of Control Points Per Arc: 45



Max. # of Control Points Per Beam: 20

Number of segments 144

Number of monitorunits (# MU) 933.85 MU

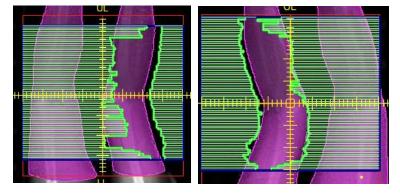
Estimated total delivery time 299.01 seconds



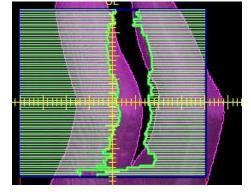
Number of segments 76

Number of monitorunits (# MU) 1131.66 MU

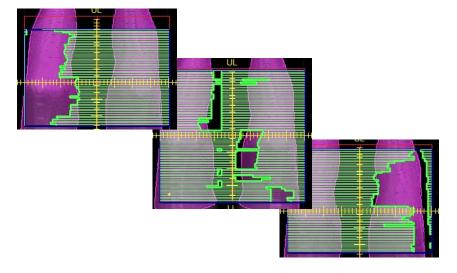
Estimated total delivery time 379.38 seconds



半分ずつ効率よくセグメンテー ションしており、照射時間も短い



照射野が広く、脚の間を通過 するセグメントが多く発生



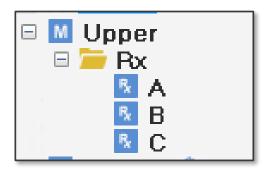
転送用プラン作成

XVIを使用する場合、プランをアイソセンターごとに作成しておく必要がある

1. アイソセンター混合のプランを作成



- 2. Plan Templateとして保存
- 3. Add RxからそのTemplateを使用し、ビーム本数分の複数処方を作成
- 4. 各処方から不要なビームを削除





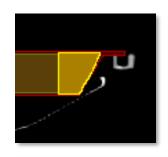
検討事項

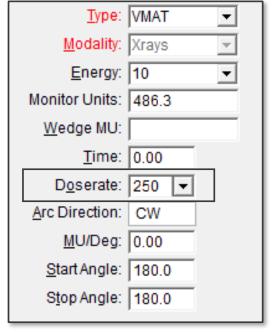
• 天板のつなぎ目部分の減弱の影響

VMATで全身を照射するため避けられないが、ビームが通過する範囲が狭く、影響を受ける角度も限定されている。参考文献にも特に記載はなかった。輪郭に密度を設定し影響を反映させることは可能。ビーム毎につなぎ目を回避できる位置にセットアップする方法でもよい。

肺野部分の線量率

線量率の上限を設定したい場合は、該当ビームのみMOSAIQ上で線量率を 指定すればよい。







Dosimetric Summary

		PTV				OAR		
Plans	D95 (cGy)	Mean (cGy)	Max (cGy)	н	Lungs	Kidneys	Lenses	照射時間
					Mean (cGy)	Mean (cGy)	Max (cGy)	
PTVUpper	1170.5	1267.0	1551.5	1.16	920.7	891.8	500.6	16分
PTVLower	1196.0	1284.1	1678.7	1.19	N/A	N/A	N/A	5分



患者セットアップ





セットアップのずれの影響

体軸方向のセットアップのずれが 6mmのとき、肺のMean Doseは 4%程度増加する

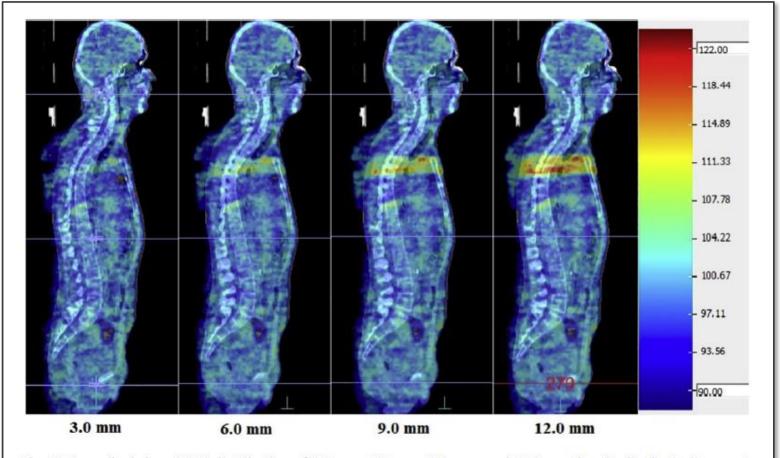
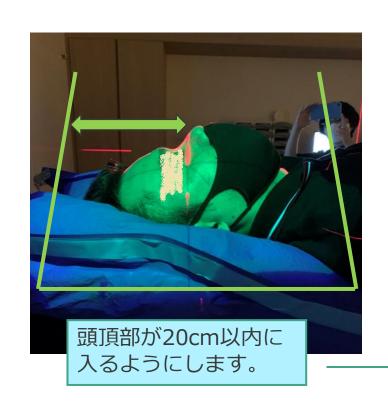
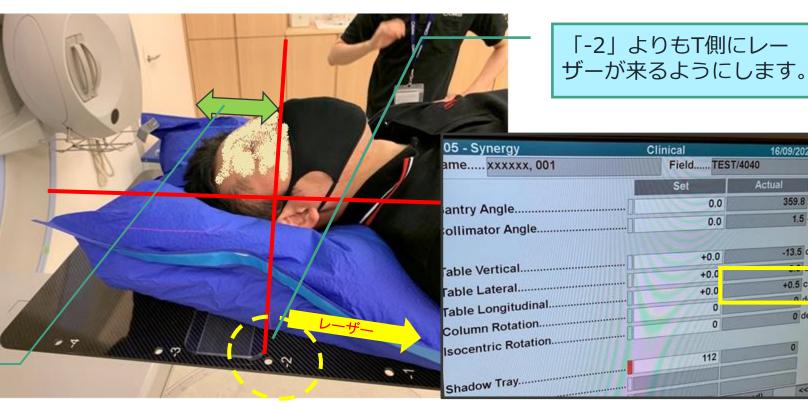


Fig. 6. Prescribed-dose (95%) distribution of 3.0-mm, 6.0-mm, 9.0-mm, and 12.0-mm longitudinal misalignments.







頭頂部が20cm以内に収まっていることを確認。 40×40cm²の光照射野を表示させながら、作業す ると位置を確認しやすい。正中線をしっかりと マークしておく。

目安として、寝台の「-2」の穴よりもターゲット(T) 側にレーザーがくるようにし、「-2」のG方向には約 20cmの余裕があるようにする。

16/09/2022 17:47:4

359.8 deg

-13.5 cm

+0.5 cr

0 deg

1.5 deg

Actual

0.0

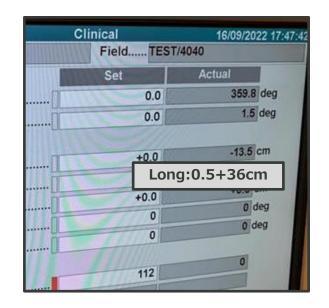
0.0

+0.0

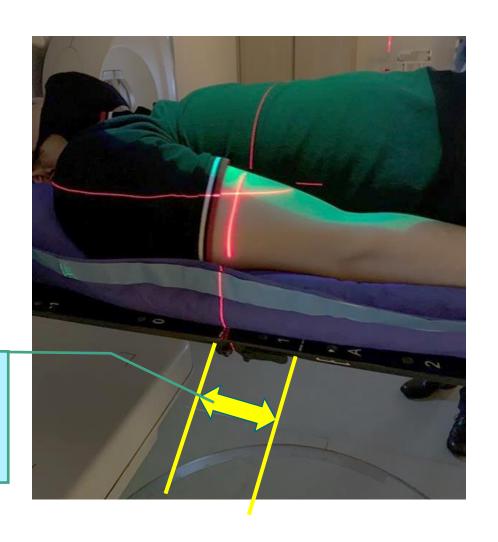
+0.0



- Field 1から寝台を36cm Long方向に移動する(計画はField のつなぎ目を4cmのオーバーラップで作成)
- 正中線をガイドにまっすぐ移動させる



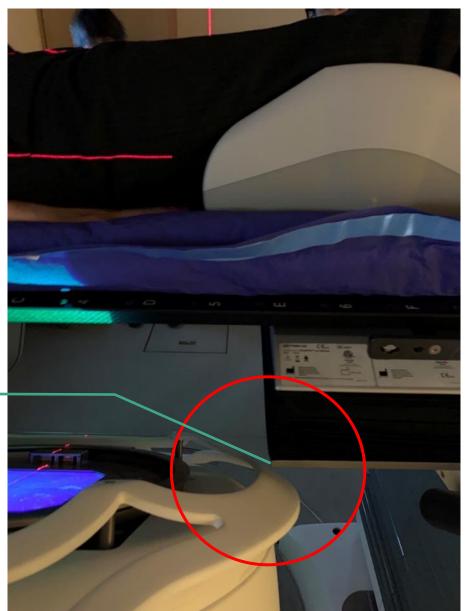
このフィールドでは天板 のつなぎ目が含まれる。 ビームの減弱の考慮は治 療計画装置にて可能。





- 寝台とガントリが衝突しないか確認しながら、更に 36cm寝台をLong方向に移動する
- ガントリーを180度付近にし、干渉を目視確認する
- 3軸補正で治療することを前提
- 正中線をガイドにまっすぐ移動させる

体厚によって干渉する位置は変わる

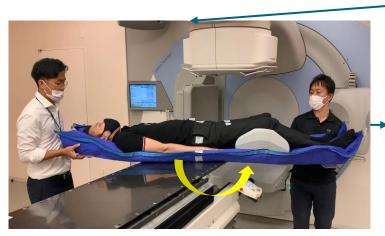


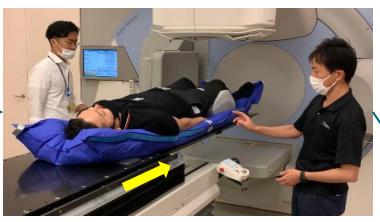


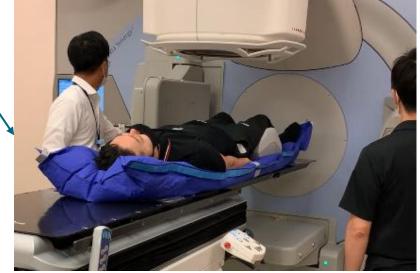




- 患者を回転させるため、Field 3のLongの位置を 記憶(記録)し、テーブルをTableEnd側に引く
- 回転の際は、バックロックが傷つかないように注意する:回転寝台/スタイロフォームがあればなおよい
- テーブルとガントリの干渉のない位置に戻すため、 テーブルをField 3のLong位置に戻す
- 目印となる罫書き線を頼りにセットアップする



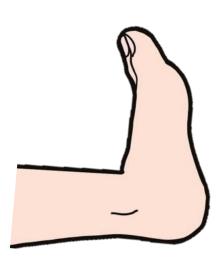






再度38cm、TableEnd側に移動させる。







治療の流れ

- Upper PTV、Lower PTVともに照射前にアイソセンターごとにCBCTを撮影して位置を確認
- Catalystはポジショニングとモニタリングに使用
- Upper PTVのすべての照射が終わったら、固定具ごと180度患者を回転させる
- 下肢のポジショニングにもCatalystを使用
- 入室から退室まで55分
- 位置確認をCatalystのみで代用できればさらなる時間短縮も可能



特記事項: CBCT / Catalyst による位置合わせ

CBCT(XVI)

・ クリップボックスを使用 設定FOVをなるべく広くとり全体で合わせる





・ GrayValue(T+R)を使用

3軸補正を行うが、回転方向にどれくらいずれがあるか確認しておく

6軸補正をすると、Long方向にずらしたときにさらに位置ずれが大きくなってしまうことがあるため、 患者を正中に寝かすことが重要

アイソセンター毎にCBCTで6軸補正をする方法でもよい

Catalyst

・ 下肢のISOセンターが空中にある部位でも、問題なくポジショニング/モニタリング可能



患者QA

IQM & MapCHECK2









臨床プランの作成 - IQM



- Integral Quality Monitor (IQM、iRT、Germany) はリニアックのガントリーヘッドにマウントし、治療中のビームをリアルタイムにモニタリングが可能な透過型の検出器
- IQMは最大照射野 40 x 40cm²でも検証が可能、照射野のオーバーラップが4 cm、36 cmおき にビームを配置したプランを用意

照射野	設定					General Geo	metry	Treatment A	Aids	Setup Beams
GD Field	Margin (cm)	Asym		Width1 (cm)		Width2 (cm)		Length1 (cm)		Length2 (cm)
[Auto] 🔻	1.00	~	X1	20.00	X2	20.00	Y2	20.00	Y1	20.00
[Auto] 🔻	1.00	~	X1	20.00	X2	20.00	Y2	20.00	Y1	20.00
[Auto] 🔻	1.00	✓	X1	20.00	X2	20.00	Y2	20.00	Y1	20.00

elete Paren	t Beams	ビーム	配置									
Field ID	Visible	Delivery	GD Treatment Unit	Modality	Algorithm	C-D Energy	MU / Fx	SSD (cm)	GD Isocenter Location	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	~	VMAT	VersaHDTRN	Photon	Monte Carlo	6.0 MV	1124.32	98.58	Arbitrary Point	3.00	-100.00	0.00
2	~	VMAT	VersaHDTRN	Photon	Monte Carlo	6.0 MV	1252.37	89.97	Arbitrary Point	3.00	-136.00	0.00
3	~	VMAT	VersaHDTRN	Photon	Monte Carlo	6.0 MV	1696.50	89.63	Arbitrary Point	3.00	-172.00	0.00

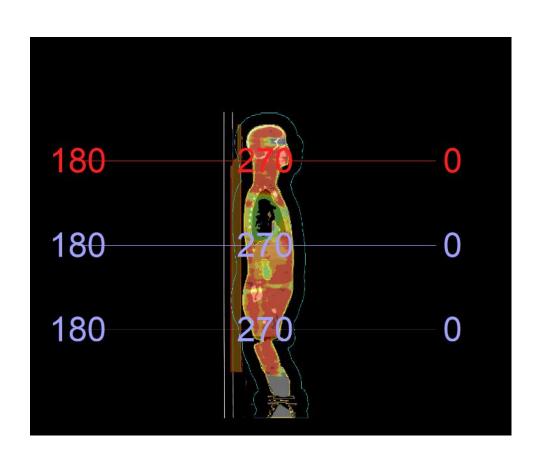


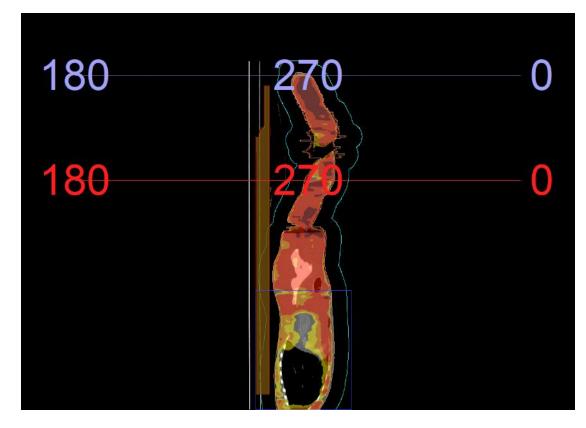
臨床プランの作成 - IQM



3 Isocenter





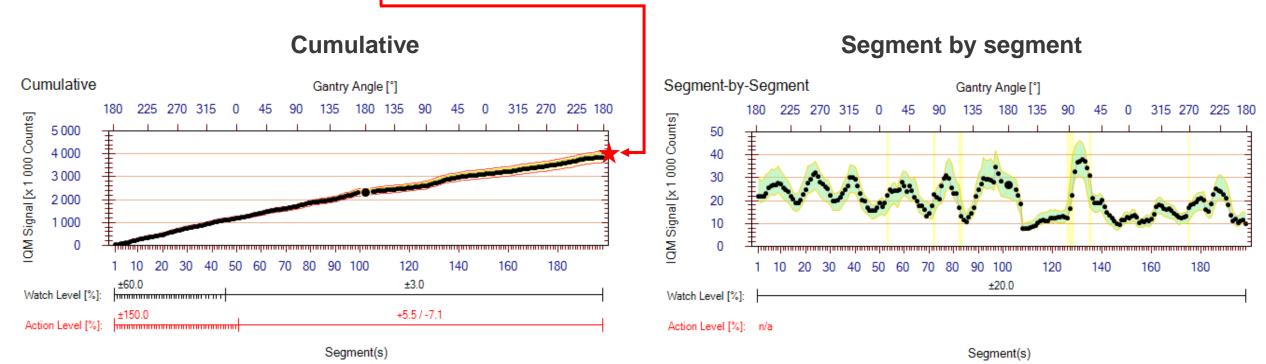




評価方法- IQM



- IQMは照射中、リアルタイムにプランとの乖離を評価することができます。
- プランとの乖離は積算値(Cumulative)、セグメント毎(Segment by segment)で表示されます。
- 今回は最終積算(Final cumulative)でIC毎に評価を行いました。

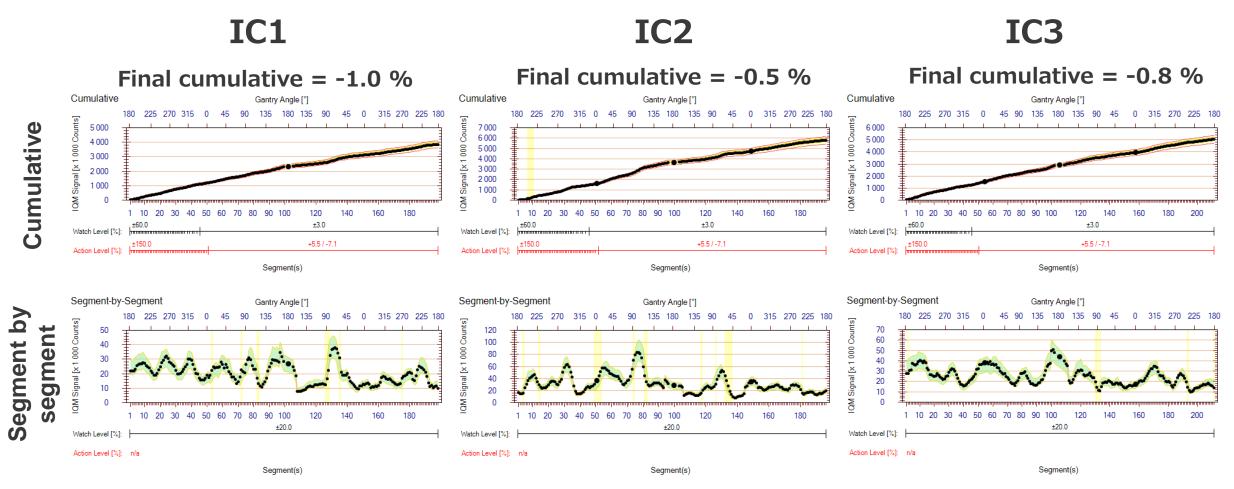




検証結果 - IQM

PTV Upper





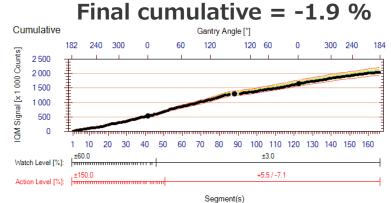


検証結果 - IQM

PTV Lower

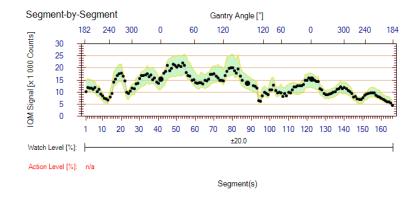






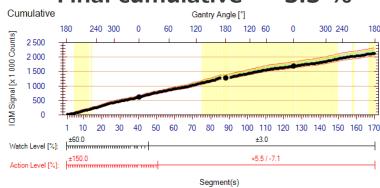


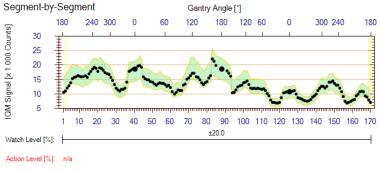
Cumulative



IC5

Final cumulative = -3.3 %





Average Final cumulative:



 $-1.5 \pm 1.0 \%$

臨床プランの作成 - MapCHECK2

- TBIのような大照射野の検証では検出器の測定可能なフィールドサイズに合わせて頭尾方向を制限してプランを作成する必要がある
- 今回はMapCHECK2の頭尾方向の検出できるField size を考慮して、下記の通り設定

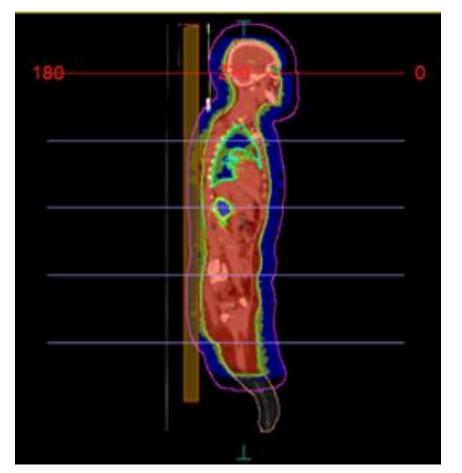
Ø F	ield		Margin	As	Width1 (Width2 (Length1 (Length2 (
[Fixed]		Ŧ	1.00	\checkmark	X1 20.00	X2 20.00	Y2 12.00	Y1 12.00
[Fixed]		-	1.00	V	X1 20.00	X2 20.00	Y2 12.00	Y1 12.00
[Fixed]		-	1.00	V	X1 20.00	X2 20.00	Y2 12.00	Y1 12.00
[Fixed]		-	1.00	V	X1 20.00	X2 20.00	Y2 12.00	Y1 12.00



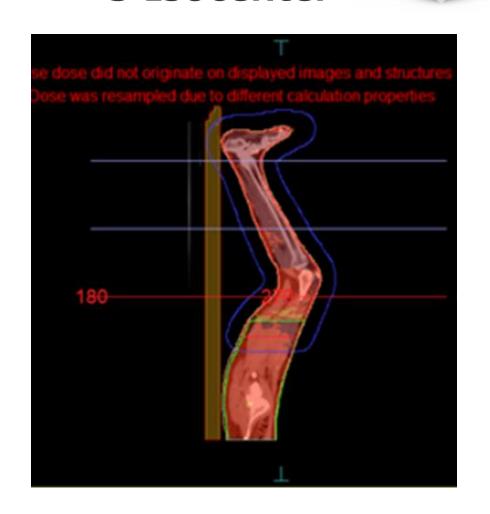


臨床プランの作成 - MapCHECK2

5 Isocenter



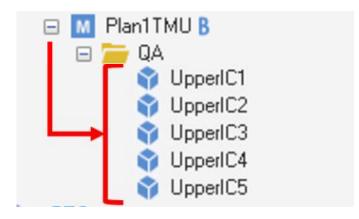
3 Isocenter



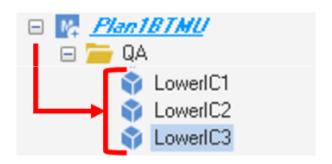


各門検証 - MapCHECK2

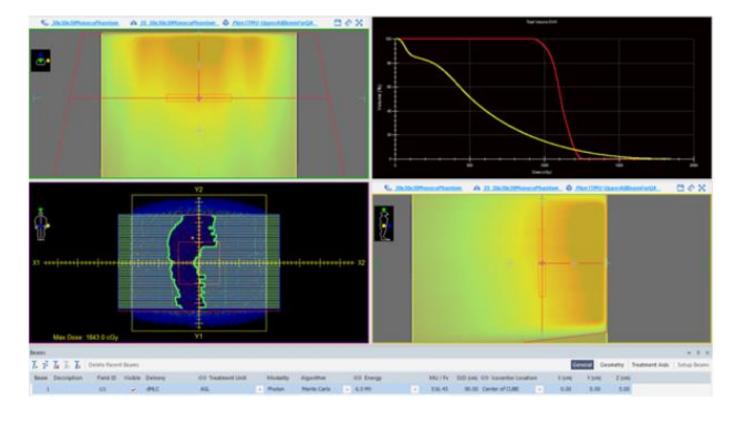
PTV Upper



PTV Lower

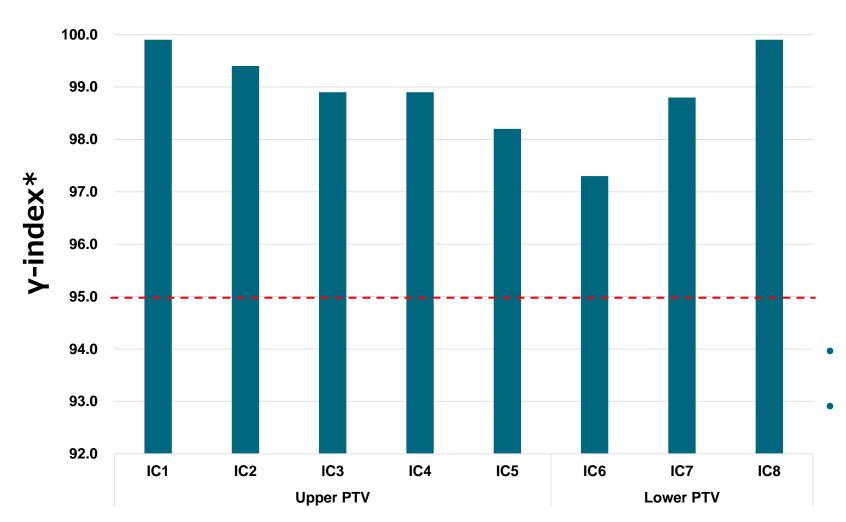


• それぞれのプランにガントリー角度0度で固定した検証 用プランを作成し、水等価ファントムに移し込み





各門検証 - MapCHECK2





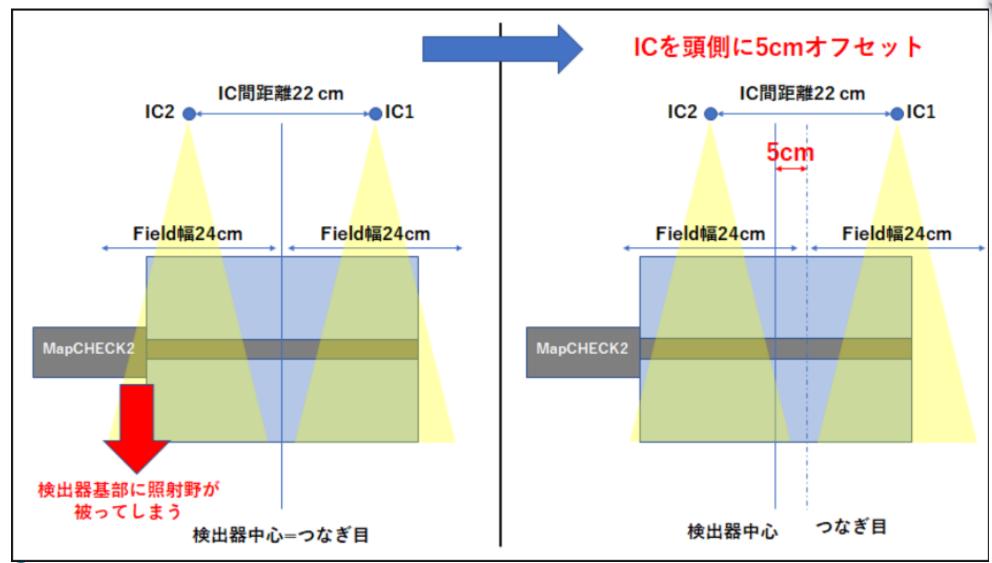
全ICでγ-pass ratio ≥ **95%**

Average \pm SD: **98.9** \pm **0.81%**

*2mm/3%, Global normalization, Threshold 10%

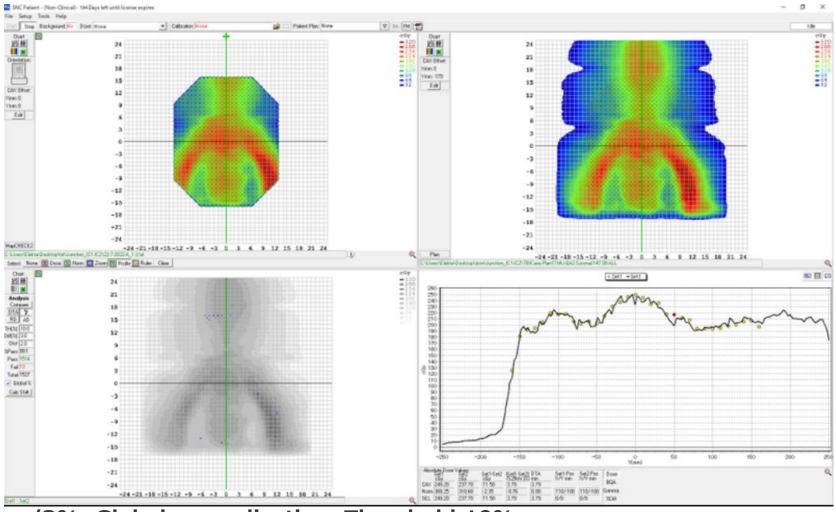


IC1/IC2のつなぎ目の検証 - MapCHECK2





IC1/IC2のつなぎ目の検証 - MapCHECK2





• γ-pass ratio: **99.1%**

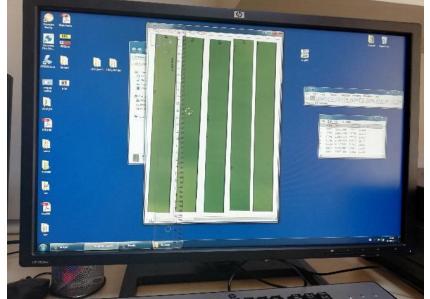




End to End テスト

- 各フィールドのつなぎ目など含めた総合的な照射精度はフィルムなどを利用したend to end テストによるご確認を推奨します。
- 臨床的な導入に先立って自施設で十分に検討いただければと思います。
- ご施設の運用決定の参考になれば幸いです。







参考文献





Tas, Bora, et al. "Total-body irradiation using linac-based volumetric modulated arc therapy: Its clinical accuracy, feasibility and reliability." Radiotherapy and Oncology 129.3 (2018): 527-533.

doi: 10.1016/j.radonc.2018.08.005.

Losert, Christoph, et al. "Novel rotatable tabletop for total-body irradiation using a linac-based VMAT technique." Radiation Oncology 14 (2019): 1-10. doi: 10.1186/s13014-019-1445-3.

Loginova, Anna Anzorovna, et al. "Optimized conformal total body irradiation methods with helical TomoTherapy and elekta VMAT: Implementation, imaging, planning and dose delivery for pediatric patients." Frontiers in Oncology 12 (2022). doi: 10.3389/fonc.2022.785917. eCollection 2022.

