

放射線治療計画装置のコミッショニングはどうすればよいか？

～ Monaco コミッショニングのための文献紹介 ～

エレクタ株式会社 フィジックスサポート

2023年8月24日

放射線治療計画装置(以後 TPS と略します)は放射線治療の精度を担う大事な要素でもありますが、昔から照射事故の大きな要因でした。そこで最近の動向を踏まえながら、TPS の技術面において¹、こういった要因が品質に影響するかを簡単に見てみましょう。文中の波線で示した語句は、文献 1.の章に対応しています。

・ TPS 立ち上げ時における「うっかりミス」

ビームモデリングや、周辺機器との接続設定における「うっかりミス」は常に否定できないもので、ベンダーとユーザーがともに留意し続ける必要があります。TPS では受け入れテストでこの要因をチェックしています。

・ 線量計算が合わない

リニアックから出る放射線の質が悪い、データ測定の質が悪い、作成されたモデルの質が悪い、ということは近年少なくなりました。しかし TPS に本来的に存在する避けがたい誤差もありますし、計算や測定の手順が誤っている可能性もあります。ユーザーは治療の品質を保証するために、これらの手順についてひとつひとつ確認しながら TPS の性能の限界を探っていかなければなりません。これが線量に関与するコミッショニングです。このためには計測学の知識と、TPS 操作の習得が必要です。このコミッショニングが不十分だと、ユーザーは良いのか駄目なのか自分でもよく分からないような、ぼんやりした治療しか行えなくなります。

・ 多数の条件が同時に満たされたときだけに発生する事故がある

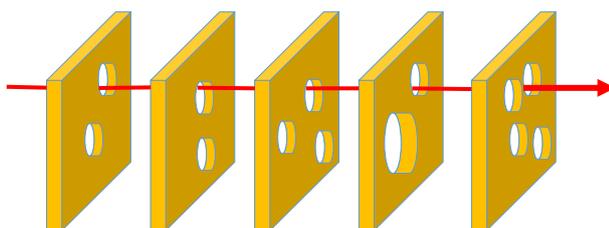
治療の高精度化にともなって多くの機器が治療に関与するようになりました。事故というのは単独要因で起きることはなく、それらの機器がある特定の状態に揃い、人為的チェックをすべてすりぬけた場合に発生します。

ですからユーザーはあらゆる治療において治療前に動作を確認しておかなければなりません

¹組織面にも事故要因——過剰労働、標準手順書の不足、相互チェックの不足など——があります。これらは導入初期のうちに解決しなければなりません。これについては「放射線治療計画におけるリスクマネジメント」放射線治療かたろう会ワーキンググループを参照してください。

http://katarou-kai.kenkyuukai.jp/journal2/journal_detail.asp?journal_id=839

ん。しかし典型的な組み合わせに限っては、臨床を開始する前にまとめて確認してしまう方が効率的です。これを線量に関与しないコミッショニングと呼びましょう。



TPS が導入されて（正確には「ビームモデル」が導入されて）以降、初回計画までの短い期間にユーザーは TPS のコミッショニングを行う必要があります。このときとるべき態度はおおむね以下のようなものです。

事故は複数の条件が同時に発生してはじめて起こることを説明するのがスイスチーズモデルです。

- ・基本的にはすべてを疑う
- ・しかし確認する順序については意識的になる。つまり
 - ・典型的なものを優先して確認する。
 - ・稀な組み合わせに限っては、初回計画以降に適宜行うので構わない
- ・実際に装置が導入される以前にしっかり予習して準備しておく（装置が導入されると忙しくなってしまうのです）。

そこで本文書では、装置導入前の予習の用意として、内外の TPS のコミッショニングに関する文献をカテゴリー別に紹介します。（他にも必読と言える文献は多々ありますが、ここでは TPS のコミッショニングに関連のあるものだけを選択しています）

- A. 3D-CRT を行う際に有用
 1. X線治療計画システムに関する QA ガイドライン
 2. 医療安全のための放射線治療計画装置の運用マニュアル～受け入れ試験から日常管理まで
 3. X線線量計算の不均質補正法に関する医学物理ガイドライン
- B. IMRT/VMAT を行う際に有用
 4. 強度変調放射線治療における物理・技術的ガイドライン 2011
 5. 強度変調放射線治療の線量検証法
 6. IMRT commissioning: Multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119
 7. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218
- C. その他の日本語の文献
 8. 詳説 放射線治療の精度管理と測定技術
 9. 医療用加速器におけるコミッショニングの機器と手順(AAPM TG-106 翻訳)
 10. 外部放射線治療における Quality Assurance(QA)ガイドライン

11. 放射線治療計画装置の問題点 - 外部光子照射治療
 12. 外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法(標準計測法 12)
 13. 放射線治療計画のための品質保証(AAPM TG-53 翻訳)
- D. その他の英語の文献
14. Commissioning and QA of Treatment Planning Dose Calculations — Megavoltage Photon and Electron Beams (AAPM MPPG 5.a)
 15. Quality assurance of treatment planning systems. Practical examples for non-IMRT photon beams (ESTRO Booklet 7)
 16. Guidelines for the verification of IMRT (ESTRO Booklet 9)
 17. Commissioning of Radiotherapy Treatment Planning Systems: Testing for Typical External Beam Treatment Techniques (IAEA TECDOC 1583)
 18. Report of the AAPM Task Group No. 105: Issues associated with clinical implementation of Monte Carlo-based photon and electron external beam treatment planning

紹介するガイドラインやレポートの多くは各学会のウェブサイトからダウンロードできます。

- ・ 日本医学物理学会
<http://www.jsmp.org/education/guideline.html>
- ・ 日本放射線腫瘍学会
<https://www.jastro.or.jp/medicalpersonnel/guideline/jastro/>
- ・ American Association of Physicists in Medicine (AAPM)
<https://www.aapm.org/pubs/reports/>

もちろん文献だけが手がかかりではありません。各種セミナーに出席することは無論、先行施設の経験も大きな助けになると思います。しかし、セミナーの先生方も先行施設の方々も、治療の品質を確保することに対して責任を持っているわけではありません。つまるところ責任を負うのはユーザーです。

A. 3D-CRT を行う際に有用

1. X線治療計画システムに関するQAガイドライン(2007)

日本医学物理学会タスクグループ01

ページ数もさほど多くなく(64 ページ)、にもかかわらず大変広い分野について具体的な記述があります。章立てでいいますと、

- 第1章 はじめに
- 第2章 意義・仕様・定義
- 第3章 放射線治療計画用 CT 装置に関する QA
- 第4章 X線治療計画システムに関する受け入れテスト
- 第5章 線量に関与しないコミッショニング
- 第6章 線量に関与するコミッショニング
- 第7章 定期的な X線治療計画システムに関する QA
- 第8章 おわりに

とあります。基本的に通常の 3D-CRT であればこの一冊で足りると思います。

装置導入前にこの本を読んで、第3章、第5～7章については書かれている項目をひとつひとつ転記し、ご自身の施設に合ったチェックリストを作成することを勧めます。(この手順については本文書の末尾で少し補足しています)

第3章については計画 CT 導入時に、第5～6章についてはビームモデル導入後に、そのチェックリストに従ってコミッショニングを行ってください。

2. 医療安全のための放射線治療計画装置の運用マニュアル～受け入れ試験から日常管理まで(2007)

熊谷 孝三 編

監修 日本放射線技術学会 日本放射線技師会 日本放射線治療
専門技師認定機構

日本放射線技師会出版会

ISBN 978-4-86157-015-5

文献 1.は X 線の 3D-CRT についてしか書かれていませんから、電子線や小線源治療についてはこの本が参考になります。**第3章 外部照射治療のための治療計画装置の運用の内訳**は下記の通りです。

- 3.1 設置時の確認項目
- 3.2 測定に用いる確認事項
- 3.3 治療計画装置への測定データの入力・転送
- 3.4 検証

- 3.5 治療計画装置および基本操作
- 3.6 治療計画の応用
- 3.7 TCP、NTCP
- 3.8 線量計算アルゴリズムのコミッショニング
- 3.9 受け入れ試験
- 3.10 治療計画装置の計算結果と独立した計算による検証
- 3.11 日常の QC 手順
- 3.12 定期的な QA チェック
- 3.13 システムのバージョンアップの対応
- 3.14 治療計画装置による事故事例と防止策

受け入れ試験やコミッショニング、日常の QA に特化した書籍ではなく、あくまで運用全般について記されている包括的な書物ですから、背景となる理論や解説（たとえば放射線生物学のモデル）、データ（たとえば各社の線量計のデータシート）なども載っています。その分チェックリスト作成のお手本として使うためには、やや読み込まないといけない面もあります。お手元に置いておいて損はない本です。TPS のコミッショニングとしては 3.8～3.14 項が参考になります。

3. X 線線量計算の不均質補正法に関する医学物理ガイドライン(2011)

日本医学物理学会タスクグループ 0 2

こちらは線量計算アルゴリズムに関する詳細が載っています。

- 第 1 章 はじめに
- 第 2 章 X 線線量計算アルゴリズム
- 第 3 章 コミッショニング
- 第 4 章 治療計画における注意事項

とあり、特に第 3、4 章についてはどのユーザーも必読と言えます。

この本の第 3、4 章は、線量計算というのはパーフェクトではないのだ、とすれば精度を保証できる限界はどこにあるだろうか、その限界を見極めるにはどうしたらいいだろうか、ということが、非常に実践的に書いてあります。一般的な治療ではもちろん、高精度な治療をするときにも役立つと思います。臨床開始前に第 3、4 章に目を通されることをお勧めします。第 2 章も基礎知識の習得として大事です。

B. IMRT/VMAT を行う際に有用

4. 強度変調放射線治療における物理・技術的ガイドライン 2011(2011)

日本放射線腫瘍学会 QA 委員会 IMRT 物理 QA ガイドライン専門小委員会

IMRT や VMAT を施行するにあたって必要な多くのチェック項目が、短いページ数（29 ページ）の中で網羅されています。特に TPS に直結するのは、

- 5 治療計画装置
- 6 付属機器
- 7 治療計画
- 8 線量検証

の 4 つの章です。

この文書自体、IMRT や VMAT を施行するにあたっては必読と言えます。ただし文献 2. と同様あくまでガイドライン然とした条文の連なりではあって、図や写真、具体的なスプレッドシートやチェックリストの例は含まれていません。読みやすい文章で簡潔に書かれていますし、網羅性はありますから、ここからチェックシートを作るのは難しくはありませんが、しかし、より具体的な記述のある参考資料がある方がよいと思います。

5. 強度変調放射線治療の線量検証法 (2011)

日本医学物理学会 2008-2009 年度研究援助課題

「強度変調放射線治療における吸収線量測定法の標準化に関する研究」

200 ページを超える長大なガイドラインですが、何一つ無駄がありません。IMRT の実測検証についてすべてが書いてあります。ほとんど教科書と言えます。線量検証法とありますが、もちろん TPS が正しく計算できているかどうかを実測で検証するわけですから、TPS の計算の検証でもあるわけです。

ただしこれはチェックリストを作るための文書ではありません。どうやってリストの各項目をチェックすればいいか、という方法論が書いてあるものです。

6. IMRT commissioning: Multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119 (2009)

American Association of Physicists in Medicine Radiation Therapy Committee Task Group 119

この英文のレポートでは IMRT を開始するにあたって何をすればよいか、が具体的に述べられています。いくつかの測定方法とテスト用のプランが紹介され、まずそのテストプランを逆方向計画法で達成できること、ついでそれを照射したときに計画通りの線量分布が得られることを確認します。計画通りの線量分布が得られないときはどう考えればよいか、ということも書かれています。テスト用プランのための輪郭取得済みの CT 画像も別途入手することができます。

VMAT 以前の文書ではありますが、VMAT に対しても TG-119 は依然として有効です。残念ながら日本語訳はありませんが苦心してでも読む価値はあります。

ただし TG-119 に代わる試験がないわけではありません。TG-119 の利点は「他の施設も同じ試験をやっていることが多いので、自分の施設の結果が非常に良好と言ってよいのか、あるいは改善すべきなのか、の判断がしやすい」ということにあります。

7. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218 (2018)

American Association of Physicists in Medicine Radiation Therapy
Committee Task Group 218

このレポートでは IMRT プランの検証においての方法論や検証結果の許容値について具体的に述べられています。過去のレポートとは違い VMAT に関しても述べられており、IMRT・VMAT を実施するにおいて参考になります。

C. その他の日本語の文献

8. 詳説 放射線治療の精度管理と測定技術

監修 岡本裕之

編著 黒岡将彦 宮浦和徳 脇田明尚 遠山尚紀 熊崎祐

中外医学社

ISBN978-4-498-06526-0

この本はタイトルの通り、TPS に限定された内容が書かれているわけではありません。しかし TPS のための測定の技術について書かれたパートはかなり実践的です。全体としても非常に優れた書籍ですので、リニアックの据え付け前に熟読されることをお勧めします。

9. 医療用加速器におけるコミッショニングの機器と手順(2008)

米国医学物理学会・治療物理委員会タスクグループ 106

(翻訳 Jpn. J. Med. Phys. Vol. 33 No. 1: 16-57 (2013))

原題 : *Accelerator beam data commissioning equipment and procedures:*

Report of the TG-106 of the Therapy Physics Committee of the AAPM

このレポートはリニアックのコミッショニングのための「機器」と「手順」、すなわち計測学的について書かれています。何がどう影響を及ぼしうるか、何に気をつけないと適切な測定ができないか、が実例を交えて具体的に書かれており、そのどれもが治療を行うにあたっては必須の事項と言えます。TPS のためのビームデータ測定を始める前に目を通して

おくべきです。翻訳が日本医学物理学会ウェブサイトから入手できます。

10. 外部放射線治療における Quality Assurance(QA)ガイドライン(2000)

日本放射線腫瘍学会 QA 委員会

すこし古い資料であるのは事実ですが、そのボリュームと具体性においては、いまでも十分活用できる資料だと思います。ただし治療計画装置周辺の記述については ICRU Report 24 が参照されており、この資料自体はほとんど何も書かれていません。

11. 放射線治療計画装置の問題点 - 外部光子照射治療(1993)

入船 寅二

J. Jpn. Soc. Ther. Radiol. Oncol. 5: 153-163 1993

外部照射 X 線の線量計算について書かれた論文です。もう 20 年も前の論文ですが、しかしつまるところ線量計算アルゴリズム自体はこの時代から大して進歩していないのですから、ここで書かれている方法論はいまでも有効と考えるべきでしょう。

12. 外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法(標準計測法 12)(2012)

日本医学物理学会編

通商産業出版社

ISBN978-4-860-45120-2

これまで治療以外の分野にいた方が、はじめて治療に従事することになった時、この本を読んで勉強することになると思います。しかしながらそういったケースにおいて、この本は十分に理解されているかと言うと、やはり不十分なケースは多々あります。

この本を理解することそのものが、TPSのコミッショニングの大切な一部分とも言えます。

13. 放射線治療計画のための品質保証(1998)

米国医学物理学会放射線治療委員会タスクグループ 5 3

原題 : *American Association of Physicists in Medicine Radiation Therapy Committee Task Group 53: Quality assurance for clinical radiotherapy treatment planning*

原語版が AAPM サイトから、日本語訳は日本放射線腫瘍学会ウェブサイトからダウンロードできます。(以前に AAPM から出ていたレポートは、タスクグループ番号とレポート番号が別個のものでしたので、ファイル名の番号が食い違っています。通常はタスクグループ番

号で呼ばれます)

文献 1.の参考となった文書の一つですが、しかし正直に言ってこの本は最初に読む本としては難しすぎます。もともとの英語版も決して読みやすい方ではありません。これは他の文書を読んでから、参考程度に眺めるのがよいのではないかと、思います。

D. その他の英語の文献

14.AAPM Medical Physics Practice Guideline 5.a.: Commissioning and QA of Treatment Planning Dose Calculations — Megavoltage Photon and Electron Beams (2015)

J B Smilowitz, I J Das, V Feygelman, et. al

Journal of Applied Clinical Medical Physics Vol. 16 No. 5:
14-34 (2015)

しばらく前から AAPM は従来の Task Group Report ではなく、Medical Physics Practice Guideline という、より学会勧告に近い形でのガイドラインを出版しています。このガイドラインは TPS の線量計算アルゴリズムについて述べています。AAPM Task Group Report や、IAEA の各種ガイドラインを広く参照しており、全体を俯瞰するのに使えます²。

15.Quality assurance of treatment planning systems. Practical examples for non-IMRT photon beams (2004)

B Mijnheer, A Olszewska A, C Fiorino, et.al

(ESTRO Booklet No.7)

文献 1.の参考となった文書の一つです。英語版しかありませんが、3D-CRT の範囲であれば、TPS のコミッショニングのための資料としては非常に良い参考資料だと思います。

16.Guidelines for the verification of IMRT(2008)

M Alber, S Broggi, C De Wagter, et.al

(ESTRO Booklet 9)

同じく ESTRO のガイドラインです。これもよくまとまった文献ですが、文献5.でもほとんどカバーされているため、直接に参照する必要性は薄いと思います。

² <https://www.aapm.org/pubs/MPPG/>

17. Commissioning of Radiotherapy Treatment Planning Systems: Testing for Typical External Beam Treatment Techniques (IAEA-TECDOC-1583)(2008)

IAEA

ISBN 978-92-0-100508-3

線量に關与するコミッショニングの部分をカバーする IAEA のガイドラインです³。非常に例示も多く、よい文書だと思いますが、実のところこの領域については文献 1., 16.などでほとんど語りつくされていますから、実際はあまり話題になることは多くありません。

18. 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)American Association of Physicists in Medicine Radiation
Therapy Committee Task Group 105

この文書はモンテカルロ線量計算を（商用 TPS に限りません。自作 TPS も含みます）臨床に使用する際の諸問題について述べたものです。非常に広い話題を取り上げていて、ここからコミッショニングの際の注意点だけを読み取るのは容易ではありません。モンテカルロ線量計算の独特な点につまずいてしまうユーザーも多いので、より適切な資料が望まれます。

19. Beam modeling and beam model commissioning for Monte Carlo dose calculation-based radiation therapy treatment planning: Report of AAPM Task Group 157 (2019)American Association of Physicists in Medicine Radiation Therapy
Committee Task Group 157

近年では商用 TPS にモンテカルロ(MC)ベースのアルゴリズムが標準的に搭載されるようになりました。MC ベースの TPS は患者を通過する放射線粒子の輸送をシミュレートし、吸収線量を計算するために患者に入射する放射線ビームに関する詳細な情報を必要とします。つまり MC ベースの TPS の計算精度はビームモデルに依存しています。このレポートでは MC ベースのビームモデルの受入試験及びコミッショニングに必要な最小限の項目に関する推奨事項を提示しています。

³ https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1583_web.pdf

付録 『X線治療計画システムに関する QA ガイドライン』 に沿った コミッショニングの実施方法

この文書の一番最初に上げた文献 1. をどう使うか、について考えてみましょう。まず一通り読んでみてください。その際下記の章

第3章、第5章、第6章、第7章、第8章

においては、同時に下記の事をしていくとよいと思います。

- 1) Excel などを使い、チェックリストを作成していきます。おおむね各章・各エネルギーに1つのタブを使う感じです。
- 2) チェックリストを作成しながら、必要な測定機材があるかどうか、また必要な TPS の操作を習得しているか、を確認していきます。
準備ができてないものがあれば、準備をするか、代替手段を考えましょう。

例) この QA ガイドラインは 2007 年当時の状況を踏まえて、(封筒入りの) ラディオクロミックフィルムを想定して書かれていますが、自動現像機をお持ちでない施設も多いと思います。もちろんガフクロミックフィルムで問題ありませんが、多少の読み替えを必要とします。

例) Monaco には一次元線量プロファイルを出力する機能がありません。そのために二次元線量プロファイルまたは DICOM RT Dose ファイルから一次元線量プロファイルを抽出する方法を調べておかないといけません。

文献 1. が執筆されてからすでに 11 年が経過しており、Monaco に使うには多少不適切なところがあります。おおまかな注意点を書いておきます。

1. XiO など従来の TPS には完全なビームモデリングツールが含まれていることが多いですが、Monaco にはビームモデリングツールは含まれていません。したがってビームモデルの実体そのものをユーザーが確認することはできず、モデルに同梱してあるレポートの記述をご覧ください必要があります。
2. XiO のビームモデルは単純なので、登録した値通りの計算を行います。この変換には TSCF や WF を使いますから、登録値を間違えればその通りに計算も誤ります。たとえばほかの照射野は合っているのに 7x7 付近だけ合わない、ということがあり得ます。

一方 Monaco では実際のリニアックヘッドを模した合理的なモデルを使用しており、登録した値が間違っていれば、モデリング作業の段階で検出できます。したがって Monaco では 7x7 だけ合わないというようなことは起こり得ません。

この違いから、XiO の受け入れ試験では行っていた「登録されたファクターを読み上げ確認する」作業は Monaco では不要となりました。また線量に関するコミッショニングもある程度減らすことができます。

同様に現在では、事情の違いにより欠けている部分が少なからずあります。例えば

- ・治療用のカーボン天板を計画 CT 機でも使用する場合、天板の同一性のコミッショニングはどうするか
- ・フィルムではなく配列検出器を用いてコミッショニングをする場合、配列検出器自体のコミッショニングはどうするか

こういったものがたくさんあるはずですから、ユーザーは現実に沿ったチェックリストを作成しなければなりません。

チェックリストができたなら、「そのチェックはいつやるのか」「どれくらい時間がかかるのか」「後回しにできるのはどれか」を見積もっていきましょう。コミッショニングすべきは TPS だけではありませんから、ひよっとしたら非現実的な見積もりになってしまうかもしれません。

ビームモデル納品から 3D-CRT の初回照射までの間に、最低 1 週間、理想的には 2 週間は必要です。その間にこれらのコミッショニング作業を行いきましょう。その期間の疑問点はベンダーに問い合わせ解決しましょう。

ところで**第 4 章 X 線治療計画システムに関する受け入れ試験**は、通常ベンダーが試験項目を用意するものです。「仕様書通りのものが、仕様書通りの状態で納品されているかどうか」を確かめるものであって、ユーザー様ごとの要求仕様を反映して個別に試験項目が組み立てられているわけではありません。ですからユーザーは項目の選択についてはあまり気にしなくても構いません。大雑把に、

- ・仕様書通りのハードウェアかどうか。欠品がないかどうか。
- ・周辺機器とのデータ転送が正しく行えているかどうか
- ・ベンダー提供のチェックリストの通りにソフトウェアが動作するか
- ・ベンダー提供の計算精度のベンチマークに合格しているか
- ・使用に必要なマニュアル類はすべて揃っているか

ですから、この章に対してユーザーがやるべきことは、

- ・試験についてはすべて立ち会う
- ・ベンダーの担当者が定型作業ゆえに見落としがちなことをフォローする
- ・何が確認されたのか、をしっかりと把握し、以降のコミッショニングのスタート地点を把握する。

ということになります。