



前立腺がんの外部照射、機器と技術の最先端を知る

神宮 啓一 先生

東北大学病院放射線治療科 教授

本日は放射線治療医という立場から、放射線治療がこの25年で大きく進歩し、かつては考えられないような治療が、次々と実用化され、患者さんのQOLを高めるための新しい取り組みが進んでいることについて、お話しさせていただきます。

放射線治療の基本的な流れ

患者さんに放射線治療室に入ってもらい、リニアックと呼ばれる放射線治療装置のベッドに寝ていただきます。治療のX線が出る装置（ガントリー）の下に入り、部屋を暗くした状態で、室内に設置されているレーザーポインターと体表面に書いた印を合わせて照射位置を調整します。



Oxford University HospitalのYouTube動画より引用

以前は皮膚のマーカーだけで位置合わせをしていましたが、最近ではIGRT（画像誘導）といって、治療装置の横に診断用の弱いX線が出る装置が付いており、それを使って体の中の状態を確認しながら位置合わせを行います。コンビームCTと呼ばれる低線量の装置で、身体の画像を撮って位置を合わせることが標準になっています。照射が終わればその日の治療は終了です。一般的な放射線治療であれば、放射線が出ている時間は1~2分ほどで、治療室に入ってから出てくるまで、5分から10分の治療になります。これを毎日、決められた回数を繰り返します。

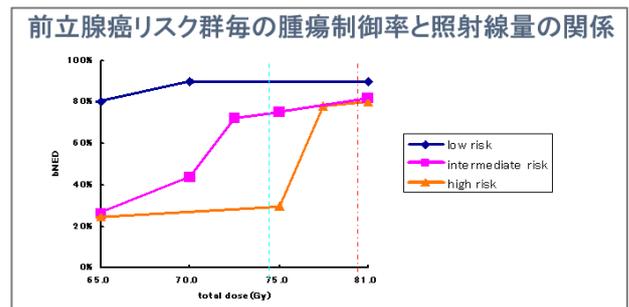
放射線治療には小線源治療、粒子線治療（重粒子

線・陽子線）、IMRT（強度変調放射線治療）などがあります。今日は粒子線治療や小線源治療については詳しく触れませんが、それぞれに一長一短があります。

手術も含めて、どの治療法を選ぶかは、ご本人が情報を得た上で、医療者と相談して決めていただくのがよいと思います。

前立腺がんにおける線量と治療効果

前立腺がんの放射線治療は、リスク群によって必要な照射線量が異なることがあります。



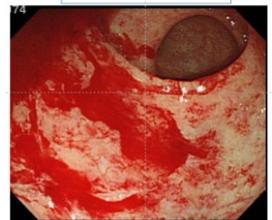
横軸が照射線量で、1回2Gy(グレイ)ずつ照射した場合のトータル線量を示しています。縦軸は制御率です。低リスク群（紺）では、70Gy以上照射すれば9割程度治りますが、中間リスク群（桃）では70Gyでは不十分で、70数Gyあたりで治る率が上がります。高リスク群（橙）では75Gyより少し高いところで治る率が上がるとされています。

前立腺がんの治療には、70Gyを超え76Gy程度の線量が必要になると言われており、それだけの線量を、副作用を抑えながら、いかにうまく当てるかという点で技術が進化してきました。

何も工夫せずに放射線を当てると、前立腺のすぐ後ろにある直腸に強く放射線が当たり、1~2年後にじわじわと出血し、血便と呼ば

放射線直腸炎(Grade2)

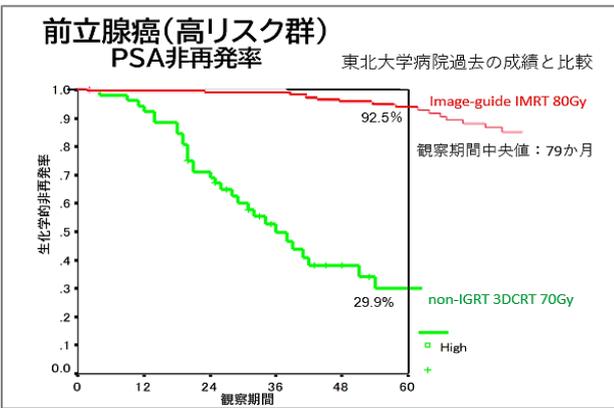
前立腺癌:放射線治療後1年



れる症状が出現してしまいます。QOLを損なう副作用はできるだけ避けたいので、直腸や膀胱に過剰な放射線が当たらないようにする工夫が必要になります。

新旧の治療成績の比較

東北大学病院では2000年頃からIMRTを導入し、その後引き続いてIGRTを始めました。2004年からの7年間の症例を集め、高リスク群205例のうち183例を解析したデータがあります。このデータの事例には、IGRT（画像誘導）もなく、3D-CRTと呼ばれる旧来の方法で70Gyしか照射できなかったため、高リスク群で5年間非再発の方は3割しかいませんでした。



最近、IGRT（画像誘導）とIMRT（強度変調放射線治療）を用いて、2Gy×40回の計80Gyで治療したところ、5年で9割、10年でも8割程度が非再発という治療成績が得られています。以前より線量を10Gy増やすことで、大幅な治療成績の向上が得られました。

通常分割照射と寡分割照射について

NCCN Guidelines Version 3.2026 Prostate Cancer

PRINCIPLES OF RADIATION THERAPY

Table 1. Below are examples of regimens that have shown acceptable efficacy and toxicity. The optimal regimen for an individual patient warrants evaluation of comorbid conditions, voiding symptoms, and toxicity of therapy. Additional fractionation schemes may be used as long as sound oncologic principles and appropriate estimate of BED are considered. See treatment pages and Principles of ADT (PROS-Q) for other recommendations, including recommendations for neoadjuvant/concomitant/adjuvant ADT.

EBRT Regimen	Preferred Dose/Fraction	Definitive RT						Post-Treatment RT			Advanced Disease	
		Low	FIR	UIR	High	Very-High	Regional	Post-RT	Post-RT	Primary Tumor	Metastases	
Conventional	1.8-2 Gy x 37-45 fx											
	1.8-2 Gy x 30-39 fx											
Moderate Hypofractionation	3 Gy x 20 fx (preferred) ^a											
	2.7 Gy x 26 fx 2.6 Gy x 28 fx											
Ultra Hypofractionation (SBRT)	2.63-2.75 Gy x 20 fx 2.5 Gy x 25 fx											
	9.5 Gy x 4 fx											
	7.25-8 Gy x 5 fx 6 Gy x 6 fx 6.1 Gy x 7 fx											
	9-10 Gy x 3 fx 12 Gy x 2 fx 16-24 Gy x 1 fx											
Monotherapy												
Iodine 125	145 Gy											
Palladium 103	125 Gy											
Cesium 131	115 Gy											
Iridium 192	13.5 Gy x 2 implants 9.5 Gy BID x 2 implants											
EBRT + Brachytherapy Boost												
Iodine 125	110-115 Gy											
Palladium 103	90-100 Gy											
Cesium 131	85 Gy											
Iridium 192	15 Gy x 1 fx 10.75 Gy x 2 fx											

(^a Preferred; ◯ Acceptable based on clinical and medical need. Regimens shaded gray are not recommended)

これはNCCNガイドラインの最新版です。外照射を分割回数で分けるとこのようになります。

- ① 通常分割照射：2Gy×37~40回程度
 - ② 中等度寡分割照射：3Gy×20回程度
 - ③ 超寡分割照射：7.2Gy~7.25Gy x 5回程度
- 定位放射線治療は③となります。

どれを選ぶべきかは難しいところですが、この表のリスク分類に応じて、チェック(✓)のあるものが望ましいとされており、太陽(☼)のマークでも、状況により考慮して良いということになっています。要は、いずれのリスク分類でも用いる余地があるということになります。

以前やっていた通常分割の放射線治療では40回通う必要があり、近隣の方でも大変でした。そこでコロナをきっかけに、できるだけ患者さんが外出しなくて済むよう、週5回で4週間、ちょうど半分の計20回で終わる中等度寡分割照射を始めました。

今日、これからお話しするのは、さらに少ない回数で治療が終わる超寡分割照射についてです。

MRリニアックの登場

MRI linacの基本設計(2004)

1.5テスラMRIの外周に回転ガントリを設けて、MRIとリニアックを一体化

MRIの外側に回転ガントリを配置
アクティブ磁気シールド技術により電子銃位置のMRI静磁場を遮蔽
リニアック側で非磁性部品を採用

MRリニアックの基本設計は、2004年、オランダのユトレヒト大学でなされており、私達も何度か見学に行ったり、派遣留学も行ってきました。

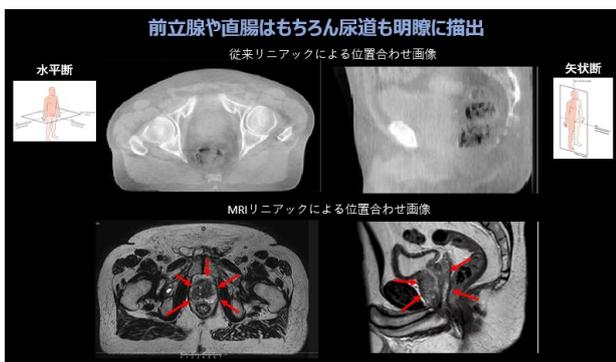
MRリニアックとは、高解像度のMRI（1.5テスラ）の外周に、X線の発生装置（リニアック）が巻き付いたもので、MRIを撮るようにこのトンネル内に患者さんをスライドさせると、超電導コイルのスリットから治療用のX線を照射できる装置です。

東北大では2022年に、このMRリニアックを導入し超寡分割照射を開始しました。

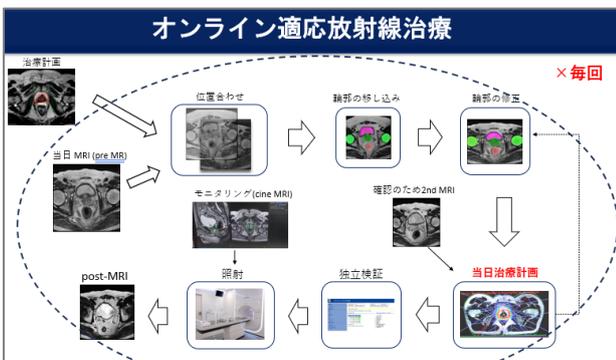
MRリニアックの特徴

MRリニアックにはいくつか特徴があります。

1つ目は、位置合わせをMRIで行うため、前立腺の位置が明確に分かることです。コーンビームCTは画質が粗く、骨は分かりますが、前立腺や膀胱など軟部組織の境界が分かりにくいことがあります。そのため金マーカーを入れる施設もあります。MRIでは前立腺の境界がはっきりし、膀胱や尿道も明確に描出されるため、位置合わせが正確にできます。



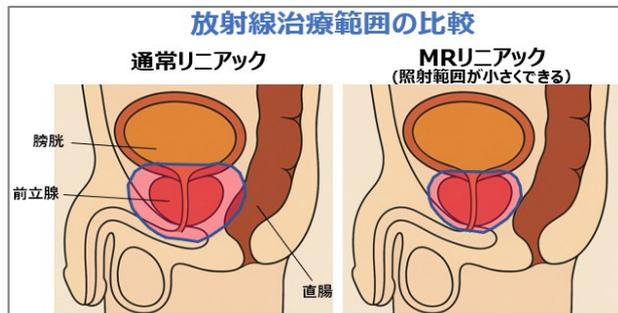
もう一つの特徴は、治療直前に即時適応放射線治療が可能な点です。通常の放射線治療では、治療開始の1~2週間前に治療計画CTを撮影し、そのCTに基づいて治療計画を作成します。治療中は当日のコーンビームCTで位置を合わせ、最初に作った治療計画のまま数週間治療を続けます。しかし、即時適応放射線治療では、当日にMRIを撮影し、その画像で前立腺、膀胱、直腸などの輪郭を修正し、当日分の治療計画を再度作成します。治療計画の作成中に体内の状態が変わるため、もう一度MRIを撮影してズレがないことを確認してから治療を始めます。



治療はIMRTの技術を使って行います。治療中も0.2秒遅れの体内画像を撮影しながら放射線を照射します。ガスが降りてきて前立腺を押し、狙っている位

置から外れてしまうこともありますが、常に監視しながら治療できるため、安全で正確な照射が可能です。

リアルタイムでモニタリングできることで、さらに正確に放射線を当てることができ、余計なりしろが不要になります。



通常のリニアックでは適応放射線治療が行えず、体内のモニタリングも難しく、画像上の位置合わせも正確ではないため、少なくとも5ミリ、多いところでは1センチほどのりしろをつけて照射するのが一般的です。そのため膀胱に当たる範囲が大きくなったり、直腸や尿道丘に強く当たって、副作用が出ることがありました。

MRリニアックを使うことで、のりしろを完全にゼロにはできませんが、2~3ミリ程度に絞ることができ、周囲の被ばくを大幅に減らすことが可能となりました。

放射線治療プロトコルの変遷

このような研究発表や先行事例を基に、私達は放射線治療のプロトコルを、より短期で治療を終えられるよう、改善を図ってきました。

通常分割照射 with 3D-CRT	通常分割照射 with IMRT+IGRT	寡分割照射 with IMRT	超寡分割照射 with MRL
計70 Gy	計80 Gy	計60 Gy	計36.25-40 Gy
35回	40回	20回	5回
7週間	8週間	4週間	10日間
163.3 GyBED	186.7 GyBED	180 GyBED	211.5 GyBED

*放射線治療の効果は総線量と1回線量のかけ算

寡分割への移行が進み、照射回数が減るごとに、1回の線量は増えるのですが、掛け算による総線量は減っているように見えます。しかし、これは生物学的等価線量に換算すれば、中等度寡分割照射ではBED

180Gyだったのが、超寡分割照射ではBED210Gyとなっており、むしろ大きくなっています。

こんな事例をきっかけに

65歳の患者さんの事例を紹介します。自宅で商店を経営し、介護が必要なご家族を抱えておられ、診療で休みが取りにくい状態が続いていました。中間リスクの前立腺がん、放射線治療をする予定で、すでに半年前からホルモン療法が始まっていました。

地元の病院は車で15分ぐらいなので、通院は可能でしたが、IMRTができる病院までは片道1時間20分かかるので、20回でも毎日通院するのは難しく、5回の超寡分割照射をやっている私どもを紹介していただいたわけです。しかし、ご家族の介護も考えると、それでもなかなか難しいという事情があり、この経験をきっかけに、私達はさらに一歩踏み込んだ治療を始めることになりました。

究極の超寡分割

2025年1月から、地域医療格差の是正と、働きながらのがん治療の推進を目指し、地方の高齢者でも先進的ながん治療を受けられる環境を整備するために、土曜日だけの「週末放射線治療」を開始しました。

患者さんの利便性と更なる効果を求めて

土曜日のみ！ 2回で終了！



**究極の超寡分割照射
with MRL**

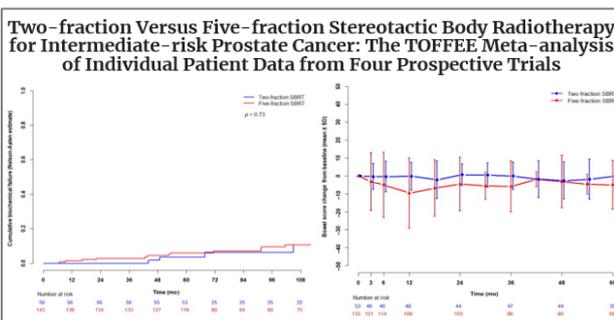
26 Gy

2回

1週間

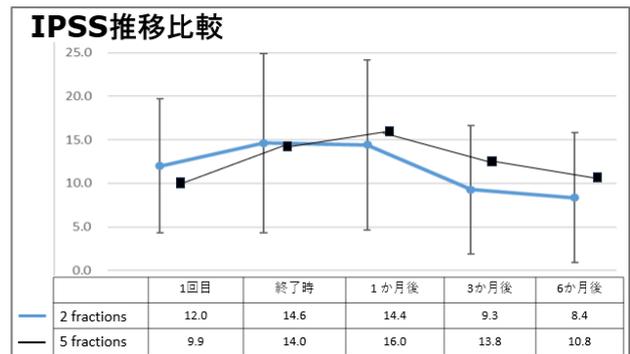
251.3 GyBED

病院の理念「先進の医療やさしさと共に」にも合致、病院長の賛同も得られ、看護師、放射線技師、医学物理士の協力を得て治療を始めています。週末の土曜日、計2回で終了する13Gy×2回の治療は、究極の超寡分割照射と言えるのではないのでしょうか。



この治療は、まだ始めたばかりなので、私たちのデータはありませんが、すでに海外では、5回と2回で、治療成績はほぼ変わらないというデータが出ています。

排尿に関する自覚症状を比較したデータでも、1か月後はまだ排尿関連の評価スコアが上がっていますが、6か月後はほとんど元の状態に戻っており、5回と2回の治療では、副作用にもほとんど差がありません。



私たちは、自信を持ってこの治療を行っていますが、念のため、現時点では低リスクと中間リスクの患者さんに限って治療を行っています。

放射線治療の進化と今後の期待

前立腺がんのMRリニアックの年間症例数は、この治療を始めた2022年が約100人、23年が150人弱、24年が150人強、25年は250人近くまで増えており、すでに累計500例を超え、各ドクター・スタッフが十分な経験を積み、自信を持って治療を提供できていると思っています。

今日は、定位放射線治療、MRリニアックを中心に話をさせていただきましたが、粒子線治療なども含め、放射線治療はどんどん進化しています。私が10年前には想像もしなかった治療が現実となっており、今後10年でもさらに発展すると思います。放射線治療全体のさらなる進歩に期待していただければと思います。

(要約：大森 隆)