

<特集「医学物理士という仕事」>

高線量率密封小線源治療の品質管理

武 中 正*

京都府立医科大学大学院医学研究科放射線診断治療学

Quality Control of High Dose Rate Brachytherapy

Tadashi Takenaka

*Department of Radiology, Kyoto Prefectural University of Medicine
Graduate School of Medical Science*

抄 録

高線量率遠隔操作式後充填法 (High Dose Rate Remote Afterloading System; HDR-RALS) は、放射線治療の一つで、密封された小線源を使用する。この装置は ^{192}Ir 線源を使用し、高い線量率 (12 Gy/h 以上) を持つ特徴がある。HDR-RALS の線源は、線源に近いほど線量が高く、線源から距離が離れると線量が急激に減少する。これにより、病巣には高い線量で照射することが可能で、一方で周囲の正常組織に対する線量は低く抑えることができる。HDR-RALS は、頭頸部 (舌、口腔底、頬粘膜、口唇)、体幹部 (食道、気管支、子宮、前立腺)、四肢 (皮膚、軟部組織など) といった、ほぼ全身の照射が可能である。照射法は、腔内照射、組織内照射、モールド照射、そして腔内照射と組織内照射を組み合わせた組織内照射併用腔内照射がある。それぞれの照射法は、アプリケーションと組み合わせて行う。治療計画装置は、CT (Computed Tomography) や MRI (Magnetic Resonance Imaging) 等の 3 次元画像を使用して、画像誘導小線源治療 (Image-Guided Brachytherapy; IGBT) を可能にする。HDR-RALS を使用して高精度放射線治療を実施するためには、装置の特性、操作方法、治療計画装置の特性と操作ルール、さまざまなアプリケーションの仕様を理解し、適切に使用する必要がある。本稿では医学物理士が行っている品質管理から HDR-RALS 品質保証について現状を報告する。

キーワード: 密封小線源, 高線量率リモートアフタローディング治療装置, HDR-RALS, 医学物理士.

Abstract

The High Dose Rate Remote Afterloading System (HDR-RALS) is a type of radiation therapy that uses a small sealed source. The HDR-RALS uses a ^{192}Ir source and is characterized by a high dose rate (12 Gy/h or higher); the closer the source is to the source, the higher the dose, and the further away from the source, the more rapidly the dose decreases. HDR-RALS can irradiate almost the entire body, including the head and neck (tongue, floor of the mouth, buccal mucosa, lips), trunk (esophagus, bronchus, uterus, prostate), and extremities (skin, soft tissue, etc.). The irradiation method is intracavitary irradiation, intraluminal irradiation, and intravascular irradiation. Irradiation methods include intraluminal irradiation, intratissue irradiation, mold irradiation, and intraluminal irradiation

令和 6 年 1 月 12 日受付 令和 6 年 1 月 15 日受理

*連絡先 武中 正 〒602-8566 京都市上京区河原町通広小路上ル梶井町465番地

ttakenak@koto.kpu-m.ac.jp

doi:10.32206/jkpum.133.02.127

combined with intratissue irradiation, which combines intraluminal and intratissue irradiation. Each irradiation method is performed in combination with an applicator. The treatment planning system enables image-guided brachytherapy (IGBT) using three-dimensional images such as computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI). In order to perform high-precision radiation therapy using HDR-RALS, it is necessary to understand the characteristics of the device, its operation, the characteristics and operation rules of the treatment planning device, and the specifications of the various applicators, and to use them appropriately. This paper reports on the current status of HDR-RALS quality assurance from the viewpoint of quality control performed by medical physicists.

Key Words: Sealed small radiation source, High-dose-rate remote afterloading therapy device, HDR-RALS, Medical physicist.

はじめに

密封小線源治療は放射線治療の一種で、密封された放射性物質を病巣の近くや内部に挿入し、体の内部から放射線を照射する治療法である。高線量率密封小線源治療では、12 Gy/h 以上の高い線量率の密封小線源を使用して照射を行う。線源に近いほど線量は高く、線源から距離が離れると急激に線量が減少する。そのため、病巣には高い線量で照射をすることができ、周囲の正常組織には線量を低く抑えることができる。

当院では2014年7月から高線量率遠隔操作式後充填法 (High Dose Rate Remote Afterloading System : HDR-RALS) の診療が開始された。1名の診療放射線技師が照射と品質管理を兼任していたが、2016年4月から医学物理士が教員として採用され、HDR-RALSの品質管理を行っている。看護師の配置はHDR-RALS治療がある時に1名配置される。治療時は放射線治療専門医1名、診療放射線技師1名、看護師1名、医学物理士1名のチーム体制で運用している。

2014年7月～2023年8月の間に行ったHDR-RALSの新患件数は、372人で、年齢の中央値は66歳だった。依頼科は婦人科からの依頼が多く、次に他院からの依頼が多かった (図1)。新患件数の372人中、子宮頸癌患者の数は248人だった (表1)。子宮頸癌のHDR-RALSでは、子宮腔内にアプリケーションを挿入して治療する腔内照射 (Intracavitary Brachytherapy; ICBT) が従来から多くの病院で行われている。従来の

ICBTは、標的の大きさや形状に関係なく、特定の基準点に治療線量を照射する。

近年では、ICBTで線量が不足する場合には、組織内照射を部分的に加える組織内併用腔内照射 (Intracavitary and Interstitial Brachytherapy; IC/ISBT) が行われるようになった。また、組織内照射 (Interstitial Brachytherapy; ISBT) のみで治療を行う場合もある。

治療計画では、従来のX線透視、撮影を用いた二次元治療計画から、3次元画像情報であるCTやMRIを用いて治療計画を行う画像誘導小線源治療 (IGBT) と呼ばれる高精度放射線治療に発展した。

品質保証の目的

当院では、HDR-RALS治療を用いて、婦人科だけでなく全身の治療が可能である。この治療法では、画像誘導小線源治療を用いて、ICBT, IC/ISBT, ISBTを実施する。さらに、皮膚や口腔内では、型枠 (Mold) 法による高線量率密封小線源治療も可能である。治療計画では、線源の停止時間を0.1秒単位で、線源の停止位置を3次元座標で決定する。そのため、治療時間や位置のわずかな誤差が線量分布の変化につながる¹⁾。HDR-RALS治療の手順は複雑で、高精度な治療装置、線源強度の測定、線源の停止位置、治療計画など、多くの要素が機器に依存する。そのため、品質保証の裏付けがなければ、適切な治療を遂行することが困難になります。本稿では医学物理士が行っている品質管理からHDR-RALS品質保証について現状を報告する。

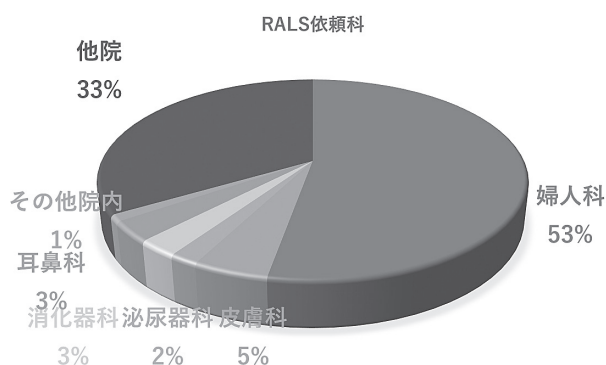


図1 HDR-RALS 依頼科

表1 婦人科 HDR-RALS 治療の照射技術ごとの患者内訳

Variables	Strata	ICBT n = 135		ICIS n = 38		ISBT n = 75	
		No. or Median (range)	(%)	No. or Median (range)	(%)	No. or Median (range)	(%)
Age		64 (27-96)		60 (32-87)		60 (24-95)	
Histology	Squamous cell carcinoma	129	96	36	100	65	87
	Others	6	4	2	6	10	13
FIGO-stage	I	13	10	1	3	3	4
	II	50	37	9	25	12	16
	III	57	42	21	58	37	49
	IV	15	11	7	19	23	31

線 源 交 換

当院では、HDR-RALS 治療にイリジウム ^{192}Ir という線源を使用している。この ^{192}Ir は原子炉で生成され、半減期は約 73.829 日（約 3 ヶ月）である。つまり、3 ヶ月経つと放射線量が半分になる。 ^{192}Ir から出るガンマ線のエネルギースペクトルは複雑（図 2）で、その平均エネルギーは 360.8 keV である。 ^{192}Ir は ^{137}Cs や ^{60}Co と比べてエネルギーが低いため、遮蔽が容易であり²⁾、装置の小型化が可能である。

しかし、 ^{192}Ir の半減期があり、時間とともに放射線量が減少する。その結果、一定の放射線量を得るためには治療時間が倍になり、患者の負担が大きくなる。そのため、一定の放射線量を維持するために、当院では 3 ヶ月ごとに新しい線源に交換している。

新しい線源が交換される際、出荷元から提供される出荷証明書（図 3）が同封される。この証明書には、線源の製造番号（図 4）、出荷元が測定した線源強度（基準空気カーマ率）、検定日などの情報が記載されている。線源を輸入する際、販売業者は線源強度の簡易的な測定を行い、線源の状態と規格値が適切であることを確認する。しかし、これは治療に使用できる値を保証するものではない。そのため、我々は線源を交換するたびに、トレーサビリティのある線量計で基準空気カーマ率の測定を行う必要がある。これにより、治療に使用する線源の強度が適切であることを確認する。

1. 線源強度測定の手順

密封小線源の基準空気カーマ率の計測は、有感電離体積が大きく電荷収集効率の高いウエル

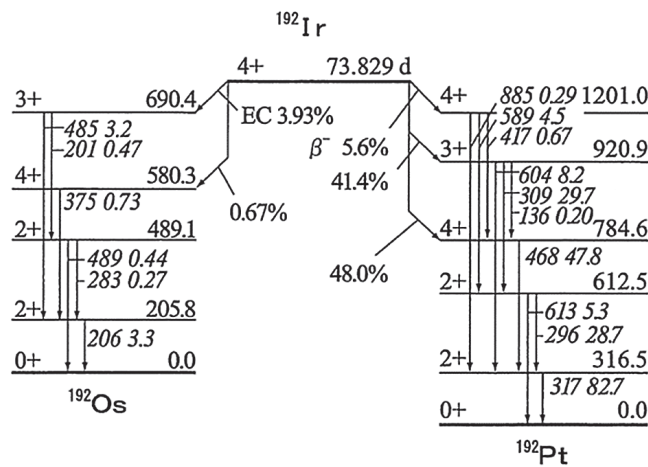


図 2 ^{192}Ir の崩壊図

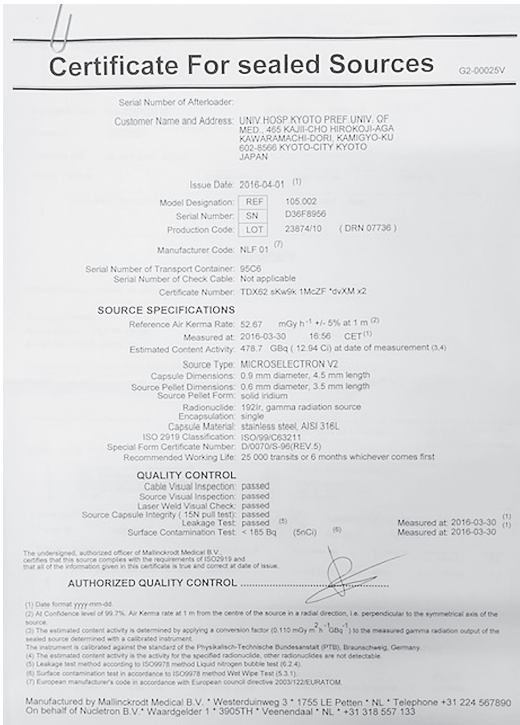


図 3 線源の出荷証明書

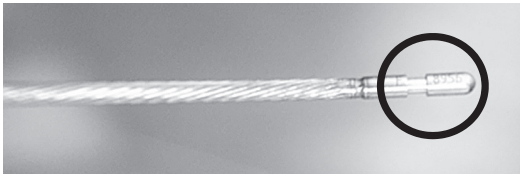


図 4 線源番号の刻印

型電離箱が使用される²⁾。

- ①装置の設置：ウエル型電離箱は，内部の温度が周囲の室温と同じになるように，前日に設置する。
- ②最大感度点の探索：ウエル型電離箱の最も感度が高い点を見つける。
- ③イオン再結合補正係数の計算：二点電圧法を用いて，イオンの再結合損失を補正する係数を求める。
- ④大気補正係数の計算：電離箱内の温度と気圧を測定し，それらの影響を補正する係数を求める。
- ⑤タイマー端効果の除去：120 秒間の測定値から 60 秒間の測定値を引くことで，タイマー端効果（照射開始位置と照射終了時の位置から線源格納までの線量寄与）を除去した測定値を得る。
- ⑥基準空気カーマ率の計算：得られた測定値に各補正係数を掛けることで，基準空気カーマ率を求める（式 1）。

$$K_{\delta,R} = M \cdot N_K \quad (\text{式 1})$$

$$M = (M_1 - M_2) \cdot k_{TP} \cdot k_S \cdot k_{elec}$$

$K_{\delta,R}$: 1 m の基準空気カーマ率 [mGy h⁻¹]

N_K : 空気カーマ校正定数 [mGy h⁻¹ A⁻¹]

M : 必要な補正をした電位計の値 [A]

M_1 : 120 秒の測定値

M_2 : 60 秒の測定値

k_{TP} ：温度気圧補正係数

k_S ：イオン再結合補正係数

k_{elec} ：電位計補正係数（電離箱と電位計一体で校正しているため1である）

密封線源の交換作業は専門業者によって行われ、その作業には約1時間が必要である。その後、医学物理士が基準空気カーマ率の測定を行い、これにはさらに約1時間半が必要である。これらの作業が進行している間に、当院の放射線取扱主任者が原子力規制庁への報告などを行う。

2014年6月から2023年7月までの期間について、出荷証明書に記載された放射線源の強度と実際に測定した値との間には誤差が存在する。特に2017年4月からは、測定値が不安定になり始め、2017年11月には誤差が2%近くまで広がった(図5)。この問題を調査した結果、測定器用ケーブルの不良が原因であることが判明し交換した。

2. 線源停止位置の確認

線源を交換する際には、古い線源から新しい線源への付け替え作業が行われる。この過程で、放射線源を保持するワイヤーの取り付けに問題が生じる可能性があるため、線源の交換が完了した後は、線源が正しい位置に停止しているかを確認する作業を行う。HDR-RALSでは線源の停止位置と停止時間を微細に調整すること

で、放射線の線量分布を作り出す。そのため、放射線源が停止する位置は、品質管理において非常に重要な要素となり、この停止位置の精度は、 $\pm 1\text{ mm}$ 以内であることが求められている。

2023年10月20日の結果を示す(図6)。移送距離1500 mmに設定し停止位置は1500 mmと判断した。これによって線源交換後の線源停止位置に問題無いことを確認した。

品質管理プログラム

1. 始業点検

治療現場で点検を行う目的は、安全に正確な治療を実施するためである。線源・アプリケーション・装置本体・治療計画装置などについて、動作の点検が重要である。点検項目(表2)を示す。簡易的な線源停止位置の点検結果(図7)を示す。

特に始業点検は電源立ち上げ時に同時に行う。もし故障により立ち上がらない場合、患者にアプリケーション挿入術前に故障対策が可能である。アプリケーションの始業点検時にアプリケーションの破損を発見した例が2022年度末にあった。そのアプリケーションは購入から8年経過したものであった。アプリケーションの価格が高額故に買い換えができなかった物であった。購入後3年経過後からアプリケーション点検体制を強化していたため患者に影響はなかった。現在、古いアプリケーションの全てを使用中止にした。

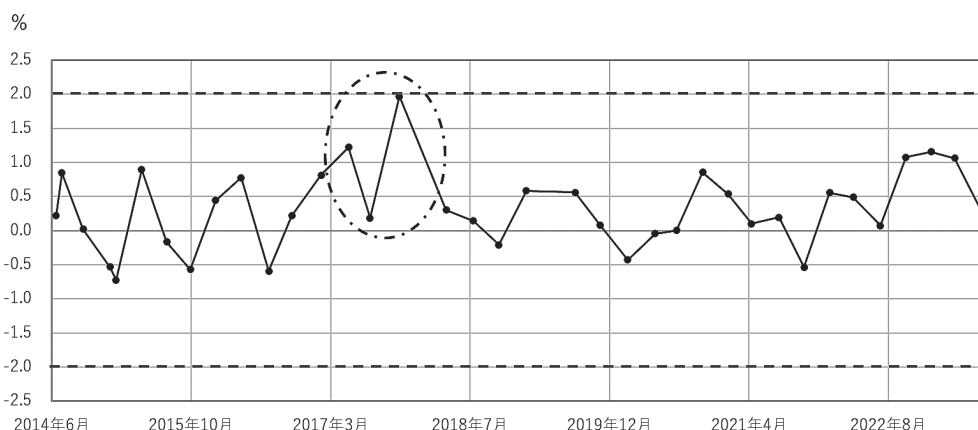


図5 出荷証明書の線源強度と実測値の誤差



図 6 線源停止位置の確認

表 2 始業点検項目

始 業 点 検 項 目	
電源投入	セルフテストの実施、正常終了
	時刻や線源強度などの表示
	電子カルテやRISとの接続
	監視カメラと通話装置の動作
	緊急用備品の確認
	サーバイメータの動作
	照射室の使用ランプの点灯
テスト照射 設定時	HDR-V3装置の破損有無
	移送チューブの捻れ、破損有無
テスト照射時	ドアインターロック
	エアモニタの動作確認
	照射室の照射中ランプの点灯
	操作卓の照射中ランプの点灯
	透視による簡易な線源位置確認
	タイマによる照射終了
テスト照射 終了後	照射室の照射中ランプの消灯
	操作卓の照射中ランプの消灯
	線源収納
	治療システムの異状有無
透視撮影	線源強度の確認
	X線発生装置 Warm up
	撮影台の昇降
透視機能の確認	透視機能の確認
	ハードウェア、DBの動作
治療計画装置	ネットワークの確認（TCS通信確認）

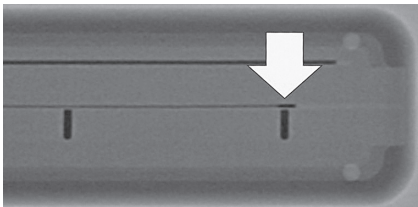


図 7 簡易な線源停止位置の確認

2. 定期的な品質管理

HDR-RALS では、定期的な品質管理が非常に重要である。この治療法では、アプリケーションなどを患者の体内に挿入するため、装置等に何らかの問題が発生し治療を中止または延期しなければならない状況は、患者にとって大きな不利益となる。そのため、可能な限りそのような状況を避けるために、装置の品質管理を行うことが求められている³⁾。治療計画装置（表 3）、と HDR-RALS 装置（表 4）の定期的な品質管理項目を示す。特に線源が入っている状態では危険な項目（RALS 装置と移送チューブ間の接続インタロック動作、アプリケーションの閉塞による線源引き戻し試験、手動線源引き戻し機構の動作）は業者の技術者が行う定期点検時に一旦線源を装置から抜いて、ダミー線源に交換して実施する。また機構上頻繁に試験を行うと装置に大きな負担がかかる緊急停止ボタンの動作なども業者の定期点検時に同時に行う。

アプリケーションの受け入れ試験と
コミッショニング

2022 年度に導入した新型アプリケーションは婦人科悪性腫瘍治療に使用するタンデム・オボイド型で組織内併用腔内照射が可能である（図 8）。正確な線源停止位置で照射できるか、移送チューブや付属品が正常に接続でき、無理なく外せるかなど製造上の欠陥がないかチェックする。

第一線源停止位置（当院の場合、装置から最も遠い位置である 1500 mm の地点）とアプリケーションの先端までの距離、第一線源停止位置とアプリケーションの内部の最先端までの距離（これをオフセットと呼ぶ）を、アプリケーションごとに測定する。当院では FPD 方式の透視装置が利用できるので模擬線源と ¹⁹²Ir 線源の位置を比較した（図 9）。

これにより、治療の精度を確保することが可能となった。

また移送チューブとの接続、取り外しも問題なく、臨床使用を開始しても問題ないことが確認ができた。

表3 HDR-RALS 治療計画装置の定期的な点検項目

使用前	許容範囲
ハードウェアの不具合やデータベース簡便な確認	正常動作
治療計画データの操作卓へ転送	正常動作
毎月	
計画に関連するハードウェアの詳細な動作確認	正常動作
3か月	
複雑な治療計画(数線源, 多チャンネル最適化算)	≤ 3%
イメージガイドに関する項目	各装置のQC項目を参照
バックアップとリストア	正常動作
プリンタや入力装置などの付属機器	正常動作
登録した線源強度や校正日時などの情報	確認
バージョンアップごと	
線源情報	確認
単純な線量分布計算の不変性	≤ 3%
DVH から算出した線量指標の不変性	≤ 3%
治療計画の再現性(End-to-end テスト)	≤ 5%

表4 HDR-RALS 治療装置の定期的な点検項目

メーカー定期点検ごと	
非常用バッテリーの動作	正常動作
HDR装置と移送チューブ間の接続インタロック動作	正常動作
治療中断ボタンの作動と再開	正常動作
緊急停止ボタンの作動と再開(注)	正常動作
アプリケーションの閉塞による線源引き戻し試験(注)	正常動作
手動線源引き戻し機構の動作	正常動作
タイマの時間精度(300秒)	≤ 1%
線源駆動部やセンサなどの異常の有無(注)	異常なし
システムの配線, コネクタの緩みや亀裂など異常	異常なし
コンピュータウイルスのチェック(注)	異常なし
エラーのログ解析	異常なし
線源交換ごと	
電離箱による線源強度測定(仕様書との相違)	≤ 3.0%
簡易的なHDR装置からの漏れ線量測定	異常なし
線源停止位置精度の詳細な評価	≤ 1 mm
線源位置移動時間の不変性(タイマ端効果)	≤ 10%
年ごと	
緊急時対応のスタッフトレーニング	—
詳細なHDR装置からの漏れ線量測定	異常なし
移送チューブの寸法測定	≤ 1 mm
チェックケーブルやアプリケーションなどの放射能汚染検査	汚染無し

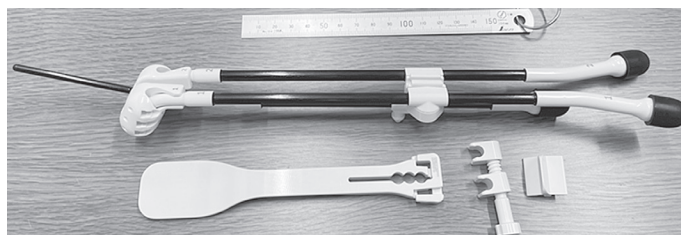


図8 組織内併用腔内照射に対応したアプリケーター

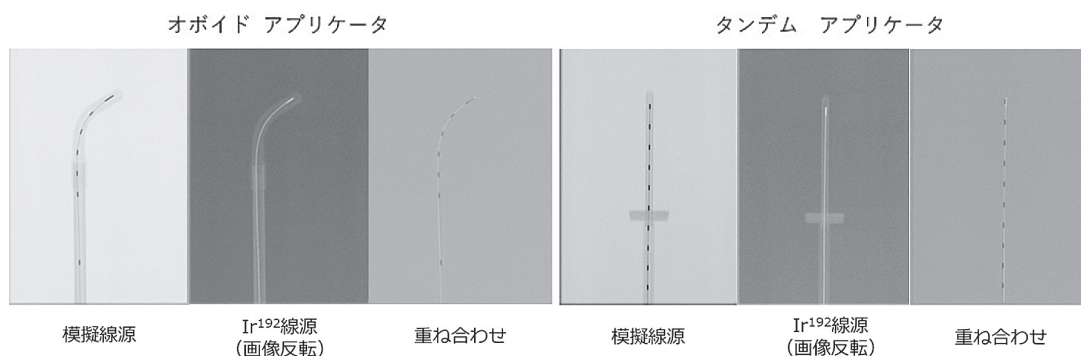


図9 線源停止位置の確認 (X線透視)

高線量率密封小線源治療の 品質管理の課題

婦人科領域では、画像誘導小線源治療のもとで腔内照射、組織内照射、そして組織内併用腔内照射法が発展し、高精度放射線治療が可能となった。他院からの依頼が増え、患者数も増加している。品質管理の時間が短縮されることが予想されるため、品質管理業務の効率化が必要となってきている。また、他の施設と品質管理の方法や情報を共有することも重要である。

一方、2014年からHDR-RALS治療が新規装

置で再開され、すでに使用開始から9年が経過している。この間、スタッフの努力により大きな事故や故障は発生していない。しかし、システムの耐用期間はすでに経過し、数年後にはサービス終了となる。これから機器が更新されるまでの数年間で、危険な故障が起きないか心配である。さらに、人材不足の中で、現状の品質管理で危険な故障の予兆や現象を発見できるかが懸念される。

開示すべき潜在的利益相反状態はない。

文 献

- 1) 日本放射線腫瘍学会小線源治療部会. 小線源治療部会ガイドラインに基づく密封小線源治療診療・物理QAマニュアル, 金原出版, 2013.
- 2) 日本医学物理学会. 密封小線源治療における吸収線量の標準計測法: 小線源標準計測法 18, 通商産業研究

- 社, 2018.
- 3) 日本放射線腫瘍学会小線源治療部会. 小線源治療部会ガイドラインに基づく密封小線源治療診療・物理QAマニュアル 第2版 第2版, 金原出版, 2022.

著者プロフィール



武中 正 Tadashi Takenaka

所属・職：京都府立医科大学附属放射線診断治療学講座・助教
 学歴：昭和62年9月 行岡医学技術専門学校第2放射線科 卒業
 職歴：昭和59年7月 今村外科放射線科 助手
 昭和63年4月 きっこう会多根病院 放射線科技師
 平成2年2月 国立病院療養所 敦賀病院診療 放射線技師採用（非常勤）
 平成4年4月 国立京都病院 診療放射線技師
 平成15年4月 国立舞鶴病院 診療部放射線科 特殊撮影主任
 平成16年4月 国立病院機構 舞鶴医療センター 統括診療部放射線科
 特殊撮影主任 転任
 平成18年2月 国立病院機構 大阪医療センター 医療技術部放射線科
 照射主任
 平成26年4月 国立病院機構 姫路医療センター 統括診療部放射線科
 副診療放射線技師長
 平成28年4月 京都府立医科大学 放射線診断治療学講座 助教
 （医学物理士）
 現在に至る
 資格：昭和62年11月 診療放射線技師
 平成18年10月 医学物理士
 平成18年10月 放射線治療専門放射線技師
 平成19年4月 放射線治療品質管理士

専門分野：放射線治療学，放射線治療物理学

学会活動：平成21年度～ 日本放射線腫瘍学会 小線源治療部会 幹事
 平成22年～26年 日本医学物理学会 評議委員 教育委員，測定委員
 平成28年 日本医学物理学会 小線源標準計測法 18 編集委員
 令和4年～ 日本医学物理学会 代議員

主な業績：1. Takenaka T, Yoshida K, Ueda M, Yamazaki H, Miyake S, Tanaka E, Yoshida M, Yoshimura Y, Oka T, Honda Assessment of daily needle applicator displacement during high-dose-rate interstitial brachytherapy for prostate cancer using daily CT examinations. *J Radiat Res*, **53**: 469-74, 2012. Epub 2012 Apr 9.
 2. Takenaka T, Yoshida K, Tachiiri S, Yamazaki H, Aramoto K, Furuya S, Yoshida M, Ban C, Tanaka E, Honda K. Comparison of dose-volume analysis between standard Manchester plan and magnetic resonance image-based plan of intracavitary brachytherapy for uterine cervical cancer. *J Radiat Res*, **53**: 791-797, 2012. doi: 10.1093/jrr/rrs033. Epub 2012 Jul 10.
 3. Takenaka T, Yamazaki H, Suzuki G, Aibe N, Masui K, Shimizu D, Nishimura T, Nakashima A, Ogata T, Matsushita K, Yoshida K, Yamada K. Correlation Between Dosimetric Parameters and Acute Dermatitis of Post-operative Radiotherapy in Breast Cancer Patients. *In Vivo*, **32**: 1499-1504, 2018. doi: 10.21873/in vivo.11406.
 4. Takenaka T, Yamazaki H, Suzuki G, Masui K, Shimizu D, Kotsuma T, Tanaka E, Yoshida K, Yamada K. Initial tumor volume as an important predictor for indication of intra-cavitary brachytherapy, intra-cavitary/interstitial brachytherapy, and multi-catheter sole interstitial brachytherapy in cervical cancer patients treated with chemoradiotherapy. *J Contemp Brachytherapy*, **15**: 191-197, 2023. doi: 10.5114/jcb.2023.128895. Epub 2023 Jun 23.
 5. Takenaka T. [6. 画像誘導小線源治療のための放射線治療を計画する際の注意事項]. *日本放送技術学会雑誌 i*, **78**: 1217-1223, 2022. doi: 10.6009/jjrt.2022-2100.
 6. Tachibana H, Watanabe Y, Kurokawa S, Maeyama T, Hiroki T, Ikoma H, Hirashima H, Kojima H, Shiinoki T, Tanimoto Y, Shimizu H, Shishido H, Oka Y, Hirose TA, Kinjo M, Morozumi T, Kurooka M, Suzuki H, Saito T, Fujita K, Shirata R, Inada R, Yada R, Yamashita M, Kondo K, Hanada T, Takenaka T, Usui K, Okamoto H, Asakura H, Notake R, Kojima T, Kumazaki Y, Hatanaka S, Kikumura R, Nakajima M, Nakada R, Suzuki R, Mizuno H, Kawamura S, Nakamura M, Akimoto T. Multi-Institutional Study of End-to-End Dose Delivery Quality Assurance Testing for Image-Guided Brachytherapy Using a Gel Dosimeter. *Brachytherapy*, **21**: 956-967, 2022. doi: 10.1016/j.brachy.2022.06.006. Epub 2022 Jul 25.
 7. Murakami N, Masui K, Yoshida K, Noda SE, Watanabe M, Takenaka T, Ii N, Atsumi K, Umezawa R, Inaba K, Iijima K, Kubo A, Igaki H, Shikama N, Ikushima H. Hands-on seminar for image-guided adaptive brachytherapy and intracavitary/interstitial brachytherapy for uterine cervical cancer. *Jpn J Clin Oncol*, **53**: 508-513, 2023. doi: 10.1093/jjco/hyad012.