

—臨床応用—

甲状腺癌外来アブレーション・I-131 (1,110 MBq) における 診療放射線技師の外部被ばく

長野 圭司¹⁾ 高井 剛¹⁾
表 孝徳²⁾ 板垣 康³⁾

1) 関西電力病院 放射線科 RI 室

2) 関西電力病院 糖尿病・代謝・内分泌内科

3) 関西電力病院 放射線治療科

External Radiation Exposure to Radiological Technologist During I-131 (1,110 MBq) Thyroid Remnant Ablation Therapy

Keiji NAGANO¹⁾, Go TAKAI¹⁾, Takanori HYOU²⁾ and Yasushi ITAGAKI³⁾

1) Department of Radiology, Kansai Electric Power Hospital

2) Center of Metabolism and Clinical Nutrition, Kansai Electric Power Hospital

3) Department of Therapeutic Radiology, Kansai Electric Power Hospital

(article received : Dec 26 2019)

Key words : Thyroid remnant ablation therapy, Differentiated thyroid carcinoma, External radiation exposure, Radiological technologist

1. 緒 言

高分化な甲状腺癌は、正常甲状腺細胞に近い代謝機能を保持しており、甲状腺ホルモンを合成するためヨウ素を取り込む。即ちヨウ素代謝機能のある甲状腺癌では、放射性ヨウ素である I-131 が集積し、I-131 から放出される β 線により病巣にダメージを与える²⁾。甲状腺癌の転移の治療を目的とした RI 内用療法では、あらかじめ原発の甲状腺癌と正常甲状腺を外科的に手術で全摘出し、甲状腺機能低下症に誘導してから I-131 カプセルを経口投与することが原則となる。この I-131 は治療を担う β 線以外に病巣への照射線量に寄与しない高エネルギー γ 線も同時に放出するため患者周囲への放射線被ばくが問題となる^{3,4)}。そのため、公衆への被ばくを考慮し、患者体内の残留放射線量が基準値以下に減少するまで専用の放射線治療病室（以下治療病室）が使用される。一方、本邦では2010年11月に投与量が 1,110 MBq (30 mCi) による遠隔転移のない分化型甲状腺癌患者に対する甲状腺全摘後のアブレーション（以

下本療法）において、積算線量に基づく退出基準を用いることで、退出・帰宅が認められるようになった^{5,6)}。

「放射性ヨウ化 (I-131) ナトリウムカプセルを用いた内用療法の適正使用マニュアル」¹⁾では、I-131 の投与量を 3,700 MBq、作業時間を準備および投与各 5 分、線源との距離を 50 cm とした場合、医療従事者の外部被ばく線量は、準備、投与ともに 0.08 mSv と算出される。本療法では準備、投与以外にも投与後の退出時線量測定、投与数日後の全身シンチグラフィ時にも患者と接する必要がある。また、患者に投与された I-131 は主に尿中に排泄され、少量は唾液、汗及び糞便中に排出される⁷⁾。そのため、患者に接する医療従事者は職業被ばくという観点から放射線防護の配慮をしなければならない。しかし、本療法において核医学を担当する診療放射線技師の実際の外部被ばく線量について検討された報告はない。

以上のことから、今回、診療放射線技師の業務時の外部被ばく線量と従事時間、患者の線量率と排泄機能（腎機能、排便回数）について、前向き

に調査し、本療法における外部被ばく線量の多い業務内容と、外部被ばくを増大させる要因について検討を行った。

2. 方 法

2-1. 対象

2019年4月から2019年8月までに本療法を行った10症例、および施行に携わった診療放射線技師3名(30~50代男性)の外部被ばく線量を対象とした。

2-2. 診療放射線技師の業務分類

診療放射線技師の業務を **Table 1** で示す4つの項目に分類した。

2-3. 診療放射線技師の外部被ばく線量測定と従事時間の記録

診療放射線技師の各業務(**Table 1**)における外部被ばく線量を、半導体式電子ポケット線量計(日立製作所:PDM-122B-SHC)を装着して測定した。半導体式電子ポケット線量計の測定線種およびエネルギー範囲はX線・ γ 線で40 keV~, 測定範囲は0.1 μ Sv~10 Sv, 1 μ Sv/h~1 Sv/h, エネルギー特性は50 keV~1.5 MeVであり, $\pm 30\%$ 以内で評価できるように設計されている。外部被ばく線量は、コントロールモニタとして同様の線量計を用いて測定室のバックグラウンド値を測定し、それを差し引いて算出した。また、各業務に従事した時間を記録した。なお、本療法において、1患者に対して1人の診療放射線技師が全ての業務に従事した。

2-4. 患者の線量率測定

患者の線量率測定は、 γ 線のエネルギー依存性に優れ、広い γ 線のエネルギー帯域でも使える電離箱式サーバイメータ(日立製作所:ICS-311)

を用いた。電離箱式サーバイメータの測定線種はX線・ γ 線・ β 線で1 cm線量等量率の測定範囲は1~10 mSv/h, 制度として指示値に対する許容差は $\pm 10\%$ 以下である。1 cm線量等量率は、患者の体表面から1 mの地点で、高さを床から80 cm, 時定数を10秒, 測定時間を30秒として、立位で測定した。測定は、投与1時間後の退出時および投与72時間後の全身シンチグラフィ撮像時に実施し、それぞれの線量率を1時間後線量率および72時間後線量率と定義した。

2-5. 患者の排泄機能の観察

患者の腎機能を簡易的に知る指標として外因性刺激を加える前(I-131を投与する2日前)のestimated glomerular filtration rate (eGFR)を用いた。さらに、糞便中への排泄の指標として、患者にI-131投与後から72時間後撮像するまでの3日間の排便回数のアンケートを行い、記録した。

2-6. 統計的解析

患者のeGFRと72時間後線量率, 1時間後線量率とその測定時の診療放射線技師の外部被ばく線量, ならびに72時間後線量率と全身シンチグラフィ撮像時の診療放射線技師の外部被ばく線量について、回帰分析を行った。

3. 結 果

3-1. 診療放射線技師の各業務における外部被ばく線量および従事時間

測定した外部被ばく線量および従事時間を**Table 2**に示す。1治療当たりの合計の外部被ばく線量, 従事時間の平均は, 10.2 $\pm$ 4.3 μ Sv(範囲5.8~20.2 μ Sv), 1,139 $\pm$ 195秒(範囲897~1,430秒)であった。最も外部被ばく線量が多い業務は, ②投与補助時で平均7.3 $\pm$ 4.2 μ Sv(範囲3.3

Table 1 外来アブレーションに携わる診療放射線技師の業務内容

診療放射線技師の業務	業務開始時刻	業務内容
①受入保管	7:30	放射性医薬品(I-131)を受取り、管理区域(準備室)で保管する。
②投与補助	13:30	投与前にI-131の放射能測定を実施して医師の投与に立ち合い、安全管理を行う。
③1時間後線量率測定	14:30	患者の管理区域退出時(I-131投与1時間後)に線量率測定を実施する。
④全身シンチグラフィ撮像 (72時間後線量率測定)	3日後 13:30	投与72時間後の全身シンチグラフィ撮像を行い、線量率測定を実施する。

Table 2 外来アブレーションでの診療放射線技師の外部被ばく線量と従事時間

症例	①受入保管		②投与補助		③1時間後線量率測定		④全身シンチグラフィ撮像		合計	
	被ばく線量 (μSv)	時間 (秒)	被ばく線量 (μSv)	時間 (秒)	被ばく線量 (μSv)	時間 (秒)	被ばく線量 (μSv)	時間 (秒)	被ばく線量 (μSv)	時間 (秒)
1	0.5	100	6.8	363	1.4	108	0.3	432	9	1,003
2	0.3	93	7.4	380	1.2	103	0.1	353	9	929
3	0.8	116	17.2	755	2.1	125	0.1	360	20.2	1,356
4	1.3	187	3.7	251	1.5	119	0.1	340	6.6	897
5	0.4	91	8.7	390	1.8	130	0.8	756	11.7	1,367
6	0.5	94	3.3	227	1.2	105	0.8	675	5.8	1,101
7	0.2	82	5.8	347	6.5	414	0.2	400	12.7	1,243
8	0.2	81	6	356	0.4	84	0.4	475	7	996
9	0.6	114	3.6	238	2.4	147	1.2	931	7.8	1,430
10	1	170	10.4	413	0.7	98	0.2	385	12.3	1,066
平均	0.6	113	7.3	372	1.9	143	0.4	511	10.2	1,139
標準偏差	0.4	37	4.2	150	1.7	97	0.4	204	4.3	195

～17.2 μSv), 従事時間は平均372±150秒 (範囲227～755秒) であり, 全体の71.4%を占めていた。一方, 最も外部被ばく線量が少ない業務は, ④全身シンチグラフィ撮像時で平均0.4±0.4 μSv (範囲0.1～1.2 μSv), 従事時間は平均511±204秒 (範囲340～931秒) であった。また, ②投与補助と③1時間後線量率測定において, 外部被ばく線量が顕著に多かった症例が存在した (Fig. 1)。

3-2. 患者の線量率および排泄機能

排泄機能を含む患者背景および線量率測定結果を Table 3 に示す。1時間後線量率の平均は47.6±4.9 μSv/h (範囲39～56 μSv/h), 72時間後線量率の平均は2.4±1.8 μSv/h (範囲0.5～6.2 μSv/h) で

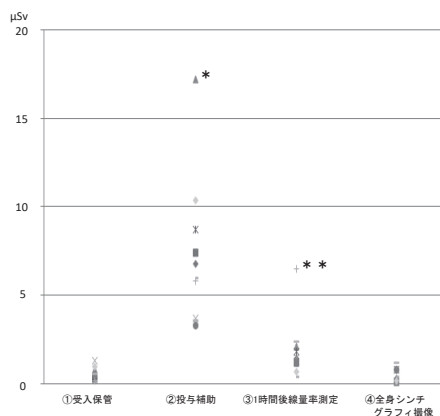


Fig. 1 外来アブレーションに従事する診療放射線技師の業務別の外部被ばく線量
* 症例3 ** 症例7

Table 3 患者背景および排泄機能 (腎機能、排便回数) と線量率

症例	年齢	性別	体重 (kg)	腎機能 (eGFR)* (mL/min/1.73m ²)	排便回数**	1時間後線量率 (μSv/h)	72時間後線量率 (μSv/h)
1	80代	男性	62	61.9	3	46	2.4
2	60代	男性	65	84.1	3	43	4
3	50代	女性	50	87.8	3	56	1.05
4	30代	男性	86	74	3	50	2.8
5	60代	男性	74	43.4	3	51	3.8
6	60代	男性	76	78	3	45	0.8
7	70代	女性	58	82.5	2	45	0.5
8	50代	男性	78	68.7	2	39	0.7
9	70代	男性	70	59.9	2	51	1.8
10	50代	男性	80	56.9	3	50	6.2
平均				69.7		47.6	2.4
標準偏差				14.1		4.9	1.8

* 全症例 rh-TSH (外因性刺激法) を使用のため, I-131 投与2日前の rh-TSH 注射前に測定

** 患者の自己申告にて, I-131 投与後～3日後までの3日間で便通された回数

あった。eGFR の平均は 69.7 ± 14.1 ml/min/1.73m² (範囲 43.4~87.8 ml/min/1.73m²) であり、患者により大きく差が生じていた。患者の線量率は、投与1時間後から72時間後にかけて減少していた (Fig. 2)。また、eGFR が高い患者は、72時間後線量率が低い傾向を示した (Fig. 3) ($y = -0.064x + 6.8664$, $r = -0.49$, $p = 0.15$)。排便に関するアンケート結果は全例便通ありであった。しかし、一部の症例において、全身シンチグラフィ画像より残便によるものと思われる腹部への集積が指摘された (Fig. 4)。

3-3. 患者の線量率と診療放射線技師の外部被ばく線量

患者の1時間後線量率と診療放射線技師の外部被ばく線量には、相関は見られなかった (Fig. 5) ($y = 0.0276x + 0.6046$, $r = 0.08$, $p = 0.83$)。しか

し、外部被ばく線量が顕著に多い症例 (症例7) を除外すると相関がみられた (Fig. 6) ($y = 0.092x - 2.9931$, $r = 0.74$, $p = 0.01$)。一方、72時間後線量率と診療放射線技師の外部被ばく線量には、相関はみられなかった (Fig. 7) ($y = -0.0374x + 0.51$, $r = -0.18$, $p = 0.62$)。

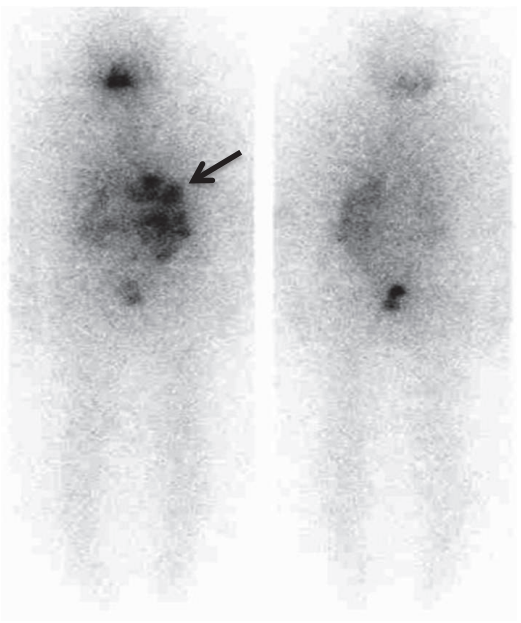


Fig. 4 症例4の患者のI-131全身シンチグラフィ。3日間排便があったと回答があったが、腸管に集積あり。

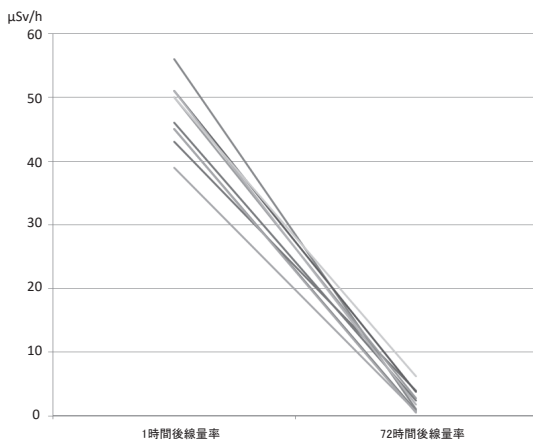


Fig. 2 I-131 投与1時間後と72時間後の患者の線量率

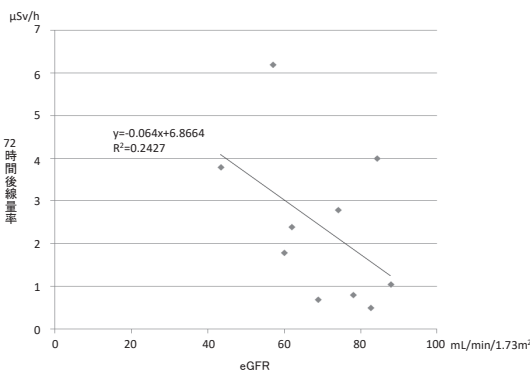


Fig. 3 患者のeGFRと72時間後線量率の関係

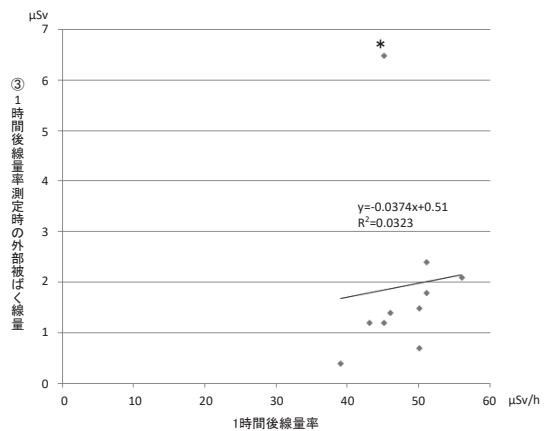


Fig. 5 患者の1時間後線量率と1時間後線量率測定時における診療放射線技師の外部被ばく線量の関係
* 外れ値 (症例7)

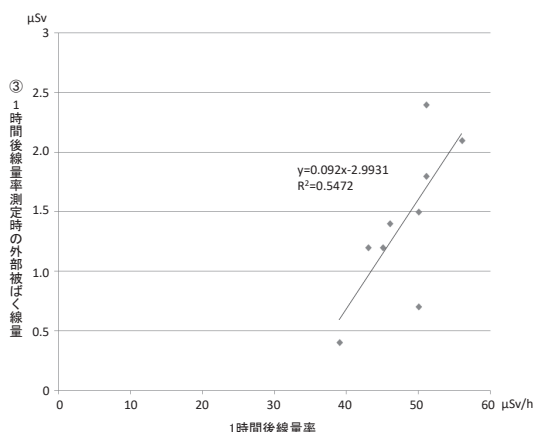


Fig. 6 患者の1時間後線量率と1時間後線量率測定時における診療放射線技師の外部被ばく線量の関係 (外れ値 (症例7) 除外)

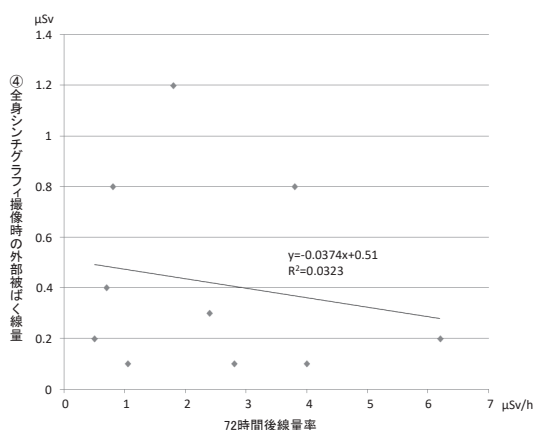


Fig. 7 患者の72時間後線量率と全身シンチグラフィ撮像時における診療放射線技師の外部被ばく線量

4. 考 察

「放射性ヨウ化 (I-131) ナトリウムカプセルを用いた内用療法の適正使用マニュアル」¹⁾では、I-131 の投与量を 3,700 MBq、作業時間を準備および投与各 5 分、線源との距離を 50 cm とした場合、医療従事者の外部被ばく線量は、準備、投与ともに 0.08 mSv と算出されている。この算出法を基に、I-131 の投与量を 1,110 MBq とすると、準備、投与を合わせて 0.048 mSv と試算される。本検討は前向きに実施したため、診療放射線技師の行動にバイアスが生じた可能性もあるが、外来アブレーションにおける診療放射線技師の1治療における外部被ばく線量は 10.2 μSv、作業時間は 1,138.8 秒 (18.98 分) であり、作業時間が 10 分以上に関わらず、外部被ばく線量が試算値 0.048 mSv の約 1/5 の値であり、男女の実効限度線量を十分に下回っていることが確認された。

Table 1 に示す①、②の作業で生じる外部被ばくについては、I-131 カプセルを取扱う際の外部被ばくと考えることができる。一方、③、④の作業は、患者の体内残留放射能に影響されると考えられ、投与後の患者は放射線源と考える必要がある。

取扱う放射性医薬品 (I-131) は鉛容器に封入されていても高エネルギーのγ線が漏洩している。鉛容器は梱包した段ボール箱 (230 mm×200 mm×285 mm) で専門運送業者から早朝に届くが (Fig. 8)、この箱の表面からの線量率を測



Fig. 8 I-131 カプセルが入った鉛容器を梱包した段ボール箱

定したところ 50 μSv/h であった。放射線防護の 3 原則である、時間、距離、遮蔽物を上手く使うことが基本⁸⁾とされるが、単純作業である①受入保管では、どうしても距離・遮蔽物を有効に使うことは難しい。そのため、取扱い時間の短縮するように、意識的に被ばく低減を考慮した行動を取る必要がある。

②投与補助は、本業務において全体の外部被ばく線量の約 7 割を占め、投与する I-131 カプセルを直接取扱う業務のため当然ではあるが、従事する上で最も外部被ばくが多く、作業時間に注意を

払う業務であることが再確認された。本検討において、その中でも外部被ばく線量が顕著に多い症例（症例3）が存在した。この要因は、作業担当者がI-131カプセルを準備した投与直前に、患者からの質問に対応し、平均時間329秒（症例3を除く9症例の平均）の業務に2倍以上の755秒を要したことであった。このことから、I-131カプセルを準備後、速やかに投与が行えるよう、事前に作業環境を整える必要があり、また、医師から患者への説明を事前に行っておくように協力を依頼することが重要であると考えられた。

患者の1時間後線量率と③1時間後線量率測定における診療放射線技師の外部被ばく線量は、外部被ばく線量が顕著に多い症例（症例7）を除外することにより相関がみられた。症例7の外部被ばく線量が顕著に多かった要因は、作業担当者がサーベイメータで測定している最中に、患者への説明に時間を要し、平均時間113秒（症例7を除く9症例）の業務に3倍以上の414秒を要したことであった。外部被ばく線量を低減するには、患者サービスを損なわない範囲での迅速な業務を実施し、患者との接触時間を短くすることが必要であることが示された。

患者の72時間後線量率と④全身シンチグラフィ撮像時の診療放射線技師の外部被ばく線量には相関はみられなかった。Marriotら⁹⁾は、甲状腺癌の内用療法を受けた外来患者の介護者の外部被ばく線量について調査し、投与後4時間から72時間までの外部被ばく線量の減少は、I-131の体内からの排出によると報告している。本検討では、投与患者の線量率は、投与1時間後の39～56 $\mu\text{Sv/h}$ から、72時間後は0.5～6.2 $\mu\text{Sv/h}$ と大幅に減少しており、さらに、eGFRが高い患者において72時間後線量率が低い傾向を示していた。患者はすべてrhTSHを使用し甲状腺ホルモンは継続して服用しているため、甲状腺機能低下症に起因する腎機能低下は生じず、また、透析が必要となるような腎機能低下症例も含まれていなかった。一部の症例において、排便のアンケート結果では便通ありにも関わらず、残便によるものと思われる腹部の集積が指摘されたが、最も集積が強い症例4においても72時間後線量率は2.8 $\mu\text{Sv/h}$ であり、症例4を除く平均値2.4 $\mu\text{Sv/h}$ と同等の値であっ

た。これらのことから、排便の72時間後線量率に対する影響は低く、投与されたI-131は、Marriotらの報告⁹⁾と同様に72時間後までに体内より排出され、そのほとんどが尿より排泄されると考えられる。よって、診療放射線技師の外部被ばくを増大させる要因は、72時間後撮像時においても、患者の残留放射線量よりも患者と接する時間の長さであると考えられた。

当院では、診療放射線技師3名が、核医学検査と核医学治療に分かれて従事している。そのため、核医学治療には特定の診療放射線技師が携わることになり、それに伴って外部被ばく線量が増えることになる。外部被ばくの低減には、被ばく防護の3原則に従った業務遂行に加え、患者への事前説明を十分に行うなどの患者対応の工夫や、均等な勤務体制を構築する必要がある。

実施要綱⁵⁾にある「I-131 (1,110 MBq) を投与された患者の退出記録」では、退出時に患者の体表面から1メートルの点における線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) を測定し、介護者（同居家族）の被ばくの積算線量 (mSv) を求める。この数値が介護者の許容される被ばく線量の5 mSvを超えないことが確認できれば帰宅することが可能となる¹⁰⁾。本検討では退出時の測定では39～56 $\mu\text{Sv/h}$ の線量率であり、積算線量に換算すると0.33～0.47 mSvであった。極めて高い安全側 (< 5 mSv) に配慮された結果と言える。核医学を担当する診療放射線技師は、被ばく線量が放射線診療従事者の中でも突出して多い¹¹⁾。年間に許容される被ばく線量以下であるが¹²⁾、内用療法では取り扱う核種の半減期が比較的長く、もし汚染等が発生すると被ばくを多方面に及ぼすことになる。患者家族や公衆そして医療従事者の被ばく低減のためには、患者への対応や放射性医薬品の取り扱いに注意を払わなければならない。本検討で得られたデータを活用し、今後の内用療法に対する診療放射線技師の放射線管理業務を充実させたい。

5. 結 論

外来アブレーション施行時において、診療放射線技師の外部被ばく線量の多い業務は、投与補助時の高線量のI-131カプセル取り扱い時であった。また、外部被ばく線量を増大させる要因としては、

I-131 カプセルの取り扱い時間や患者への対応時間の長さが挙げられた。

6. 謝 辞

本調査を遂行するあたり、薬剤に関する情報提供を頂いた富士フィルム富山化学(株)の東 俊博氏、野村茂樹氏に深く感謝いたします。

7. 利益相反と倫理的配慮

本調査に関して利益相反はありません。なお、本調査は倫理委員会の承認(承認番号: 19-101)を得た上で実施した。

8. 参考文献

- 1) 日本医学放射線学会, 他監修: 放射性ヨウ化 (I-131) ナトリウムカプセルを用いた内用療法の適正使用マニュアル. 日本アイソトープ協会医学・薬学部会, 2008
- 2) 笠木寛治, 岩田政広, 御前 隆, 他: 核医学による治療の進歩. NIPPON ACTA RADIOLOGICA, **60**: 729-737, 2000
- 3) 絹谷清剛: 非密封アイソトープによる治療 I. 甲状腺癌の放射性ヨード(放射性ヨウ素) ^{131}I 内用療法. RADIOISOTOPES, **56**: 141-152, 2007
- 4) 笠木寛治, 宮本信一, 御前 隆, 他: ラジオアイソトープの治療への応用, III. RI 内用療法の実際—甲状腺機能亢進症, 甲状腺癌の ^{131}I 治療. RADIOISOTOPES, **43**: 635-646, 1994
- 5) 日本医学放射線学会, 他監修: 残存甲状腺破壊を目的とした I-131 (1,110 MBq) による外来治療実施要綱. 2013
- 6) Kiyoko K, et al: Thyroid remnant ablation using 1,110 MBq of I-131 after total thyroidectomy: regulatory consideration on release of patients after unsealed radioiodine therapy. Ann Nucl Med, **26**: 370-378, 2012
- 7) International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 94: 6. ヨウ素131 による被ばくの決定経路. 非密封放射性核種による治療を受けた患者の解放. 日本アイソトープ協会, 2007
- 8) 利波紀久, 他: 核医学担当技師が診療で受ける被曝. アイソトープ診療ハンドブック, 6: 148-149, 2006
- 9) Marriot CJ, Webber CE, Gulenchyn KY: Radiation expose for caregivers during high-dose outpatient radioiodine therapy. Radiation Protection Dosimetry, **123**: 62-67, 2007
- 10) 細野 眞, 日下部きよ子, 伊藤公一, 他: 甲状腺癌の放射性ヨード (^{131}I) 内用療法: 甲状腺全摘後の残存甲状腺の破壊: ^{131}I 1,110 MBq (30mCi) 投与・退出における安全管理に関する研究, 平成21年度厚生労働科学研究費補助金(地域医療基盤開発推進研究事業) 医療放射線の安全確保に関する研究
- 11) 渡辺正好, 石川直文, 伊藤國彦, 他: ^{131}I 治療施設における放射線診療従事者(特に看護師)の被ばくの検討. 核医学, **41**: 25-31, 2004
- 12) 医療法施行規則(抄), アイソトープ法令集 II 2011: 日本アイソトープ協会, 35-36, 2011