

《技術報告》

原子力緊急事態における内部被ばく医療のための RI 内用療法施設利用と仮設型内部被ばく患者治療施設の 併設に係る提言

渡邊 直行* 佐藤 弘之** 河原 浩** 佐々木康人***

要旨 原子力緊急事態における内部被ばく医療は、一般診療に加えて、内部被ばくを引き起こす非密封性の放射性物質の線量評価、健康影響評価、内部被ばく患者やその治療により排出される放射性物質の保管・管理、が欠かせない。国の「緊急被ばく医療のあり方について」では、内部被ばく患者の緊急医療のあり方が示されている。しかしながら、相当数の内部被ばく患者が発生した場合、策定された緊急被ばく医療体制では対応が適切でないおそれがある。このため、非密封性の放射性同位元素 (RI) を用いて甲状腺疾患であるバセドウ病やがんの治療が行われている RI 内用療法施設を改装・利用し、また、治療に必要な各種装置をユニット化し、医療施設等に一定期間併設し、原子力緊急事態の内部被ばく患者の治療を行う医療設備である仮設型内部被ばく患者治療施設を利用することでより実効的な内部被ばく医療の実施が期待できると提案する。また、より実効的な内部被ばく医療体制は、放射性物質を数々の利便性ゆえに利用する現代社会において、そのセイフティネットの一つと成り得るだろう。

キーワード：原子力緊急事態、内部被ばく医療、RI 内用療法施設、仮設型内部被ばく患者治療施設
(核医学 48: 121-137, 2011)

1. はじめに

平成 11 年 9 月 30 日に株式会社ジェー・シー・オー (JCO) ウラン加工工場で発生した臨界事故の対応を契機に、国は、原子力緊急事態の発生時のみならず原子力緊急事態に至らない場合において、命の視点から、既存の緊急時医療体制をより実効性のあるものとなるよう、平成 13 年 6 月に

「緊急被ばく医療のあり方について」を示した。そこでは、放射線被ばく事故が発生した際に当該施設の従事者と周辺住民等を分け隔てなく平等に治療することを基本理念とし、緊急被ばく医療に従事する者が不安を感じることなく被ばく患者を的確に診療できるよう医療体制の構築と求められる人材の育成について提言している¹⁾。

国の「原子力施設等の防災対策について」では、放射性物質又は放射線の異常な放出が発生した場合に、精神的負担や経済的負担も考慮しつつ周辺住民等の被ばくをできるだけ低減するために講じる措置を防護対策としている²⁾。そして、「緊急被ばく医療のあり方について」において防護対策に含まれる医療処置を、医療介入と改めて認識することが示された¹⁾。医療介入として、行為の正当化と最適化の確保とともに、甲状腺被ばく線

* 群馬県立県民健康科学大学診療放射線学部

** (株) 千代田テクノロアイソトープ営業部

*** (社) 日本アイソトープ協会

受付：23 年 2 月 15 日

最終稿受付：23 年 3 月 22 日

別刷請求先：群馬県前橋市上沖町 323-1

(☎ 371-0052)

群馬県立県民健康科学大学
診療放射線学部

渡 邊 直 行

量低減のための安定ヨウ素剤予防服用として安定同位体の投与により特定の放射性物質による内部被ばくを低減する措置が示されている¹⁾。

吸入や経口摂取等によって放射性物質が体内に取り込まれたり、放射性物質が生体の各所に分布した状態を内部汚染とし、その放射性物質より甲状腺、肺、骨髄、胃腸等の体内組織が放射線を受ける被ばくを内部被ばくという³⁾。主に、大きな電離効果を示す α 線および β 線を放出する放射性物質の内部汚染とそれによる内部被ばくが問題となる。

国の「緊急被ばく医療のあり方について」では、内部被ばく患者の緊急医療について、1) 初期被ばく医療体制である外来診療として内部被ばく患者に放射性物質の排出促進を目的としたキレート剤等の投与を開始すること、2) 二次被ばく医療体制である入院診療として、軽度の内部被ばくの可能性がある患者の診療を開始すること、3) 三次被ばく医療体制である専門的入院診療として重症の内部被ばく患者の診療を行うこと、と具体的に示されている¹⁾。これは、放射性物質により内部被ばくした患者に対する診療に当たっては、一般の診療に加えて、1) 内部被ばく患者にある放射性物質の線量評価、2) 線量評価に基づく健康影響評価と治療計画の策定、3) 内部被ばく患者の、またその治療により患者の尿、便、吐しゃ物等に放射性物質が含まれるので、それら生体試料の管理・保管、が必要だからである。しかしながらこれには、放射線防護の視点から、放射性物質の取扱いについてよく整備された施設や資機材の装備とともに、内部被ばく医療を適切に実施するために専門家の育成や研修が欠かせない。内部被ばく患者の治療に当たって、相当数の患者が発生した場合、現行下での緊急被ばく医療体制では対応が適切ではないおそれがある。このため、あらかじめ非密封性の放射性同位元素（ラジオアイソトープ、RI）の取扱いに習熟し、またRIの生体内挙動についての十分な知識を有するRI内用療法に係る専門家の協力を得て、非密封性のRIを用いるRI内用療法施設を利用することがより効率的か

つ实际的であると考えられる。

本稿では原子力緊急事態の場合により実効性を考慮した内部被ばく医療を実施するために、非密封性RIを用いて代表的な甲状腺疾患であるパセドウ病やがんの治療が行われているRI内用療法施設の緊急被ばく医療時での利用について、現行法令下で適合するモデルを設定、考察し、また国内で緊急時被ばく医療に参加可能なRI内用療法施設から構成される緊急時RI内用療法施設利用ネットワークの構築について述べたい。

2. 内部被ばく医療

放射性物質が体内にあることを内部汚染といい、体内でその放射性物質からの放射線の照射を受けることを内部被ばくと考える³⁾。人体には、その構成元素であるカリウム(K)、炭素(C)として安定同位元素である ^{39}K 、 ^{12}C などに加えて、放射性物質である ^{40}K 、 ^{14}C が含まれている。また、核医学診療では、RIを人体に投与し、診断や治療を行う。しかしながら、人体内にある ^{40}K 、 ^{14}C や核医学診療で投与されたRIにより、内部汚染があり内部被ばくが生じたとはいわない。一方、国際放射線防護委員会(ICRP)は、放射性物質を取扱う作業者を対象として一年間の放射性物質の体内摂取許容限度を算出している⁴⁾。この限度を用いて、内部汚染と内部被ばくを定義することも一案であるが、これはすべての内部汚染や内部被ばくが医学的治療の対象とはならないことを示している。また、この基準は放射性物質や放射線を取扱う作業者が対象であり、取扱い施設の周辺に居住する一般公衆ではない。

このように放射性物質による内部汚染と内部被ばくを定義することは易しくない。本稿では、放射性物質や放射線を取扱う作業者が否かに係らず、意図しない放射性物質の体内摂取を放射性物質による内部汚染、そこから放射線の照射による人体の健康影響のおそれがあることを内部被ばくと考えることとする。内部被ばくのおそれや内部被ばくが認められる者を内部被ばく患者とし、内部被ばく医療の対象者とする。内部被ばく医療で

は、一般診療に加えて、1) 放射性物質による内部汚染の有無を確認する、2) 内部被ばく患者の放射性物質の線量評価を行う、3) 内部被ばく患者の人体の確率的影響や非確率的影響などの健康影響を評価する、4) 必要に応じて内部被ばく患者の人体の確率的影響や非確率的影響などを軽減する治療計画を策定し、ブロッッキングやキレーティングなどの治療を開始する、5) 内部被ばく患者の治療経過観察を行い、内部被ばく患者から、また治療により内部被ばく患者より排出される放射性物質を管理・保管することより、周囲に二次的汚染や被ばくを引き起こさないための措置を講じる、ことが必要である。

3. RI 内用療法

非密封性 RI を人体に投与することで疾病の診断・治療を行う医学分野を核医学といい、特に RI で疾病の治療を行うことを RI 内用療法という。 ^{131}I 利用の歴史が古く、60 年以上にわたって疾病の治療に使われている。特に甲状腺疾患の治療には ^{131}I が欠かせない。甲状腺の良性疾患で甲状腺機能亢進症を示すバセドウ病では、甲状腺でヨード (I) 摂取率の亢進が見られ、甲状腺が腫大する。経口的に投与された ^{131}I の約 10% が正常甲状腺に摂取されるが、バセドウ病では～80% 程度となる⁵⁾。 ^{131}I は 606 keV の β 線を放出しながら 8 日の物理的半減期でその量は減衰する⁶⁾。 ^{131}I は摂取された甲状腺細胞から 2 mm 程度の範囲内の細胞・組織に対して放射線による強い殺傷作用を引き起こすため、 ^{131}I を服用したバセドウ病患者の甲状腺機能は約 2 ヶ月で正常化し甲状腺腫は縮小する⁷⁾。 ^{131}I は甲状腺癌の肺、骨転移などの RI 内用療法にも用いられている。甲状腺癌細胞は正常甲状腺細胞のように ^{131}I を摂取する性質があり、遠隔転移した甲状腺癌細胞もまた ^{131}I を摂取する。甲状腺癌の原発部位を手術で摘出した後、大量の ^{131}I が経口的に投与されると、甲状腺癌の転移巣を RI からの放射線で治療することができる⁵⁾。甲状腺癌遠隔転移に対して、 ^{131}I による RI 内用療法が唯一の治療法である⁵⁾。バセドウ病で

は投与した ^{131}I の～80% 程度が目的とする甲状腺に取り込まれる⁷⁾。一方、甲状腺癌転移部への ^{131}I の摂取は約 1% と、あまり高くない。よって甲状腺癌の RI 内用療法では、バセドウ病の治療に比べてはるかに大量の ^{131}I (3.7～7.4 GBq) を投与しなければならない⁷⁾。 ^{131}I は β 線に加えて 364 keV の γ 線を放出するので、 ^{131}I を内服した患者は、患者自身やその排泄物により、周囲の人々に γ 線による放射線被ばくを生じさせる可能性がある⁶⁾。このため公衆に対する放射線被ばく防止の視点から、 ^{131}I を内服した患者を一定期間、特別な施設に収容しなければならない。これが、医療法に従い、一般病棟が持つ機能に加えて突起物や目地に隙間がなく壁・床などが平滑であること等の養生を施した診療用 RI 使用室、貯蔵施設、廃棄施設、放射線治療病室の施設を有し、また実効線量、表面密度、空気中濃度の線量限度等の基準を規定した管理区域を設定し、RI 内用療法と放射線防護の専門家により、周囲に二次汚染を発生させないために一般公衆に対する放射線被ばく防止について適切な措置を講じている RI 内用療法施設である。

4. 内部被ばく医療のための RI 内用療法施設の利用

自然界の放射性物質は 60 種程度、人工の放射性物質は 1,500 種以上ある。原子力緊急事態の場合に内部被ばくを起こす可能性のある放射性物質は、その物理学的半減期が極端に短かったり、存在量が極端に少なかったりするので、取扱う施設によって異なると考えられる。1) 火災、爆発、漏えい等によって核燃料施設からエアロゾルとして放出される放射性物質であるウラン (^{234}U , ^{235}U , ^{238}U)、プルトニウム (^{239}Pu)、2) 原子炉施設等から周辺環境に異常に放出され広域に影響を与える可能性が高い揮発性放射性物質である ^{131}I 、核分裂生成物であるストロンチウム (^{90}Sr)、セシウム (^{137}Cs)、3) 再処理施設から超ウラン元素の α 線を放出する放射性物質であるアメリシウム (^{241}Am)、キュリウム (^{244}Cm)、カリフォルニ

ウム (^{252}Cf)、4) 病院などでは医療用線源である ^{137}Cs 、コバルト (^{60}Co)、イリジウム (^{192}Ir)、ラジウム (^{226}Ra)、また、5) 大学・研究機関での事故では研究用線源となるトリチウム (^3H)、炭素 (^{14}C)、リン (^{32}P)、が考えられる^{1~3)}。これらの放射性物質は、被ばくの低減化措置が十分に講じられなければ、吸入・吸引や摂食により、また傷口から体内に摂取され、内部汚染により内部被ばくを引き起こすこととなる。

空中に飛散した放射性物質を吸入すると、気体の状態やエアロゾルの大きさにもよるが、鼻咽頭、気管、気管支、肺胞などの呼吸器系に沈着し、そこからリンパ液や血液を介して一部の放射性物質が特異的に甲状腺、肝臓、骨などの体内臓器へ分布し、痰、糞尿によりさらに一部の放射性物質が体外へ排泄される^{3,6)}。また、放射性物質に接触することで、皮膚を通して体内に放射性物質が摂取されることがある^{3,6)}。この時、皮膚に傷や熱・化学物質による熱傷などの炎症があると、皮膚からの放射性物質の摂取が促進される^{3,6)}。また、放射性物質が環境に放出された場合、飲食物を介して消化管より放射性物質が吸収され、特異的な臓器へ分布する^{1~3,6)}。放射性物質の化学形状により体内への吸収は大きく異なる^{3,6)}。 ^{131}I は揮発性が高く吸入により体内へ吸収され、甲状腺に集積し、一部は尿中に排出される⁶⁾。セシウムは化学的性質がカリウムと似ていて全身の筋肉に一樣に分布し、約100日の生物学的半減期により、尿中に排出される⁶⁾。ストロンチウムはカルシウムに似た体内挙動を示し、数十年の生物学的半減期により、骨に沈着すると、長期間にわたり骨や骨髄を β 線で照射することとなる⁶⁾。ラジウムは骨に蓄積するが、多くは糞便に排泄される⁶⁾。 ^{226}Ra の内部汚染の場合、 α 崩壊により3.82日の物理学的半減期の希ガス ^{222}Rn が呼気中に含まれるため、二次被ばくを防止するために、空気中の放射性物質の濃度管理が欠かせない。ウランは化学形態により体内挙動が異なるが、吸入の場合、肺に長期間にわたり沈着し、血液を介して腎臓や骨へ分布する^{3,6)}。ウランの場合は、物理学的半減

期が7~45億年と非常に長い、比放射能が低いために、放射線による被ばく影響よりも化学毒性について注意を払わなければならない^{3,6)}。プルトニウムはウランに比べ比放射能が高くなる^{3,6)}。消化管や皮膚からの吸収は小さく、吸入や傷口からの吸収が問題となる^{3,6)}。吸入では、肺に長期間にわたり大部分の放射性物質が沈着し、一部は肝臓、骨へ分布し、体内に長く残留する^{3,6)}。このため内部被ばく患者で初期には骨髄などの造血細胞への影響で、易出血性、易感染性、貧血などの健康影響が、晩期にはがんの発生の健康影響が生じるおそれがあり、適切に対処しなければならない。

放射性物質による内部被ばく患者の診療の場合でも、医療の原則通り、生命を脅かす疾患の治療を行うことが最優先とされる^{1~3)}。このため必要な救命処置を行い、放射性物質による汚染の拡大を防ぐ措置を講じると同時に、問診などにより得られた事故あるいは状況の詳細から内部被ばくの診療の必要性を判断することとなる。本稿では救命処置が終了し放射性物質の内部汚染による急性放射線障害の可能性がないが晩発性放射線障害のおそれがある、内部被ばく医療を必要とする内部被ばく患者を想定する。内部被ばく患者は、速やかな全身カウンターを用いた内部被ばくのモニタリングによる線量評価を行うとともに、内部被ばくによる被ばく線量の低減化により、放射線による将来の生物学的影響が減少されなければならない。このため体内に沈着した放射性物質を減少させたり、放射性物質の吸収を抑制したり、体内の放射性物質を除去し排泄を促進したりする医療措置が必要となる。放射性物質を経口摂取した場合は、嘔吐を促進させる催吐剤、下痢を誘発する緩下剤、プルシアンブルー、アルミニウムを含む制酸剤、硫酸バリウムの経口投与により消化管で放射性物質の吸収を低減化する^{3,6)}。安定同位体であるヨウ素、ストロンチウム化合物やリン酸塩の経口投与で、放射性物質が特異的に分布する臓器を、安定同位体元素で代謝過程を飽和することで放射性物質の分布を減少させる^{3,6)}。トリチウムは水の経口投与でその排泄を促進することができ

る^{3,6)}。また放射性物質が金属元素である場合、重金属中毒の治療に用いられるキレート剤の経静脈性投与により、体内で放射性物質と結合させて、腎臓からの排泄を促進させ、放射性物質の体内貯留を短縮させる^{3,6)}。EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid), DTPA (Diethylene triamine pentaacetic acid), ジメルカプロール, ペニシラミンが体内の放射性物質の除去のために有効なキレート剤として知られている^{3,6)}。上記の薬剤の中には、患者の全身状態や副作用に注意しながら薬剤を使用しなければならないものが少なくない。また、キレート剤は日本では使用が認められていないものが多く、その使用や投与量の決定に当たっては医師の裁量で行わなければならない場合もある。このため、患者の全身管理ができる病室や医療専門職が必要であり、加えて内部被ばく患者に存在する放射性物質から放出される γ 線による公衆の被ばく防止や患者からの排泄物等に含まれる放射性物質による周囲への内部汚染や内部被ばくの二次的拡大を防止する管理が欠かせない。また、医療行為を実践している医療専門職により常時稼働している施設でより信頼の高い医療が期待される。このことから、非密封性の RI の取扱いに熟知し RI の生体内挙動などについて十分な知識を有する RI 内用療法の専門家の協力を得て、RI 内用療法施設を利用することで、内部被ばく医療をより適切に実施できることと考える。

5. RI 内用療法施設利用の課題

内部被ばく医療のための RI 内用療法施設の利用に当たって課題がある。RI 内用療法施設は、医療法や医療法施行規則に基づき使用する RI (診療用 RI) の届け出を行い、RI に対する施設の各構造設備や放射線障害の防止に係る基準が規定されている。このため、原子力緊急事態の場合での内部被ばく患者を受け入れるために、ウラン、プルトニウム、セシウム、アメリカシウム、キュリウムなどの内部被ばくを引き起こす可能性がある α 線を放出する放射性物質の施設内での取扱いについて、緊急時にそのような放射性物質を取扱うこと

ができるような制度が法的に整備されなければならない。また、内部被ばくを引き起こす可能性がある放射性物質は診療に用いられる RI と異なり、きわめて長い物理学的半減期を有するものもある。また α 崩壊後、さらに α , β , γ 線を放出する多数の娘核種が生成されるために、一般公衆のための放射線障害防止の視点から新たな放射線管理の措置を講じておくことが欠かせない。

6. RI 内用療法施設の改装について

診療で用いられる ^{131}I は、約 8 日の物理学的半減期で β^- 崩壊し、放射線を放出しない安定同位体元素 (Stable Isotope, SI) である ^{131}Xe となる^{5,6)}。このため、 ^{131}I は施設で一定期間保管することで放射能はゼロになり、施設での放射線管理に基づいた措置は物理学的には必要なくなる。原子力緊急事態においては、内部被ばく患者から、また治療により排出される放射性物質には、きわめて長い物理学的半減期を有する放射性物質も少なくない。また、きわめて高い濃度の放射性物質である場合もあると考えられる。既存の RI 内用療法施設で内部被ばく患者の診療を行えば、内部被ばく患者の退院後、主に廃棄施設である RI 排水設備から放射性物質を外界へ放出することができないため、その後、施設が使用できなくなるおそれがある。このため RI 内用療法施設の利用に当たっては既存の廃棄施設に加えて、病室からの排水施設などの新たな廃棄施設を増設するという RI 内用療法施設の改築が欠かせない。内部被ばく患者の受け入れに当たっては、排水設備の切り替え装置で、RI 内用療法のために使用されている既存の廃棄施設から新たな廃棄施設を利用し、きわめて長い物理学的半減期の放射性物質などを既存の RI 内用療法に由来する RI とは別に管理するなどの工夫が必要となる。内部被ばく患者を受け入れ、その患者の退院後、通常の RI 内用療法施設としてまた以前のように使用できることとなる。既存の RI 内用療法治療施設の改築の考え方を図 1～4 に示す。

内部被ばくを引き起こす放射性物質の種類は放

放射性物質の取扱い施設により予測はある程度できるが、放射性物質の量をあらかじめ推測することは易しくない。本稿では、既存の RI 内用療法施設を利用するに当たって、現行法令下で内部被ばく患者の診療に必要な設備の能力と受け入れ可能な内部被ばく患者の α 線を放出する放射性物質の量を推測してみたい。以下のようなモデルを設定する。

- 1) 入院する内部被ばく患者は 1 名とし、入院期間は最大 3 ヶ月とする。
- 2) 患者のトイレ使用回数は最大 10 回/日、洗浄水量は 10 l/回とする。

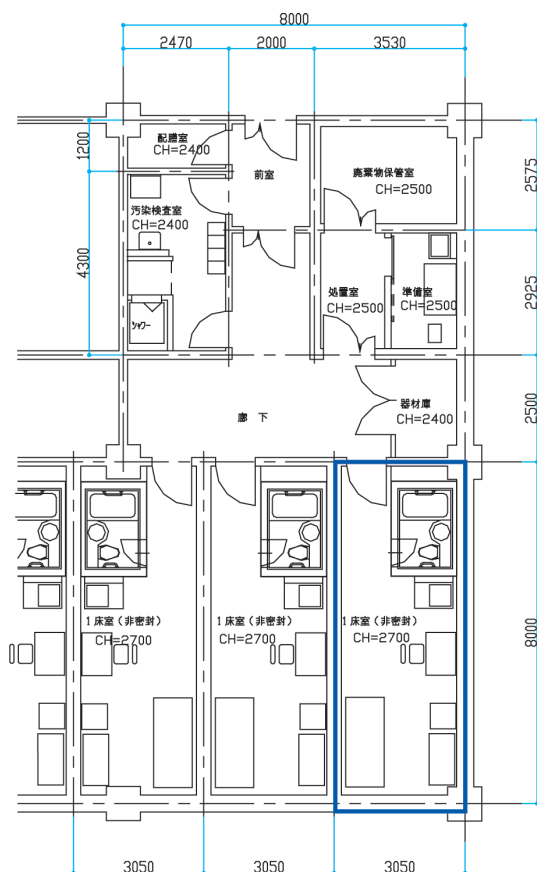


図1 改築検討のための独立した3床の病室を有する RI 内用療法施設モデル。
青い線で囲まれた独立した病室の1床を内部被ばく患者用の病室とする。

- 3) 患者のシャワー使用回数は最大 2 回/日、排水量は 200 l/回とする。
- 4) 患者の洗顔、歯磨き、手洗い等で発生する生活排水量は 40 l/日とする。
- 5) 患者の衣類、寝具などは、ディスポーザブルとし再使用しない。
- 6) 病室に立ち入る医師 1 名、看護師 1 名の手洗い等で発生する排水量は 20 l/日とする。

内部被ばく患者の入院期間に発生する排水総量は、内訳を表 1 に示すように、21,580 l となる。このため RI 内用療法施設の廃棄設備で増設すべき貯留タンクは、余裕をみて 25 m³ の容量があることが望ましい。長い物理学的半減期を有する α 線を放出する放射性物質などを体内に取り込んだ内部被ばく患者から排出される廃液は、既存設備に増設した専用の排水管と専用の排水設備で貯留する必要がある。現行法令下では、 α 線を放出する放射性物質を含む廃液は、減衰・希釈処理をせず、施設において保管・管理することになっている。廃液は長期間にわたり保管・管理しなければならないので、貯留槽には排気システムを併設し、放射線防護の視点から公衆への被ばくを防止

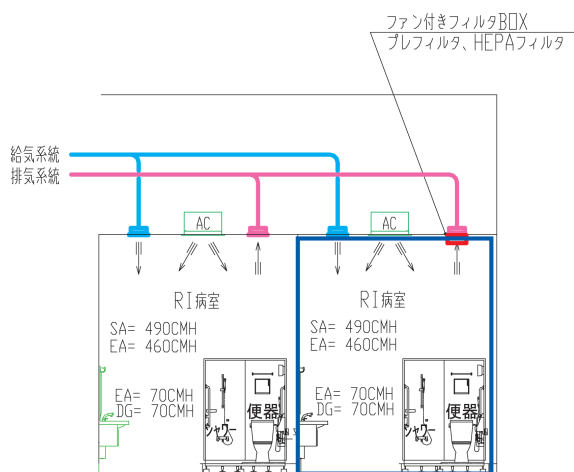


図2 RI 内用療法施設の 1 病室に内部被ばく患者を受け入れるための排気設備の改築。
内部被ばく患者が入院する青い線で囲まれた病室の排気設備は、既存の設備にフィルターを追加装着する。

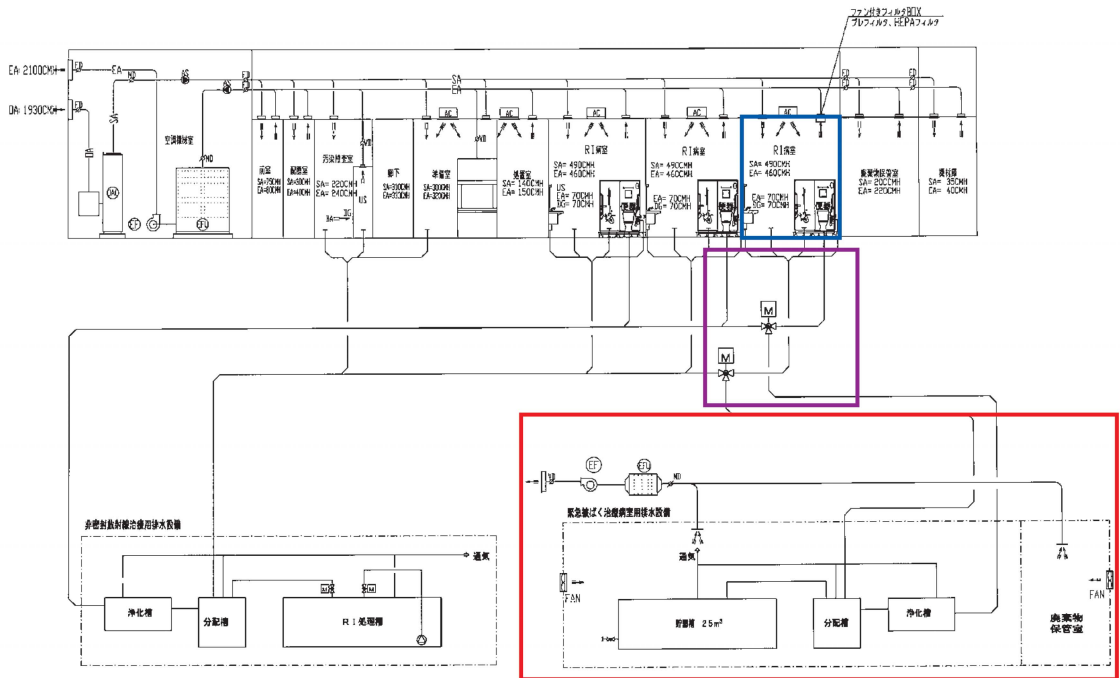


図3 既存の RI 内用療法施設に 1 名の内部被ばく患者を受け入れるための排気設備、排水設備などの必要な改築。
排気設備にフィルターを追加し、紫や赤い線で囲まれたように切り替え装置を持つ新たな排水管、放射性物質を含む廃液を中間保管・貯蔵する排水処理施設が必要となる。

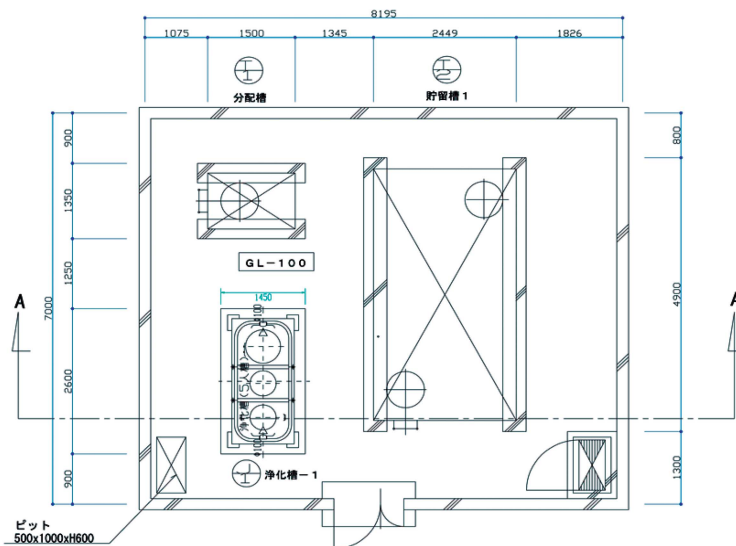


図4 既存の RI 内用療法治療施設に増設する廃棄設備。
内部被ばく患者の糞尿や排水に α 線を放出する放射性物質が含まれる場合、その崩壊過程で γ 線が放出されるので廃棄設備をコンクリート遮蔽体で囲み、公衆への防護措置を講じる。

表 1 内部被ばく患者が入院する 1 病室の排水量

排水の種類	1 日の発生量 (l/日)	1 週間の排水量 (l/週)	3 月間の排水量 (l/3 月)	備 考
医療従事者からの排水	40	280	3,640	2 名/日
患者のトイレ水	100	700	9,100	10 回/日
患者のシャワー水	200	400	5,200	2 回/週
洗顔・歯磨き等の生活排水	40	280	3,640	
合 計			21,580	

表 2 α 線を放出する放射性物質の放射線障害防止法による濃度限度

対 象	空气中濃度限度 (Bq/cm ³)	排気中濃度限度 (Bq/cm ³)	排水中濃度限度 (Bq/cm ³)
α 線を放出する放射性同位元素 (半減期が 30 日以上)	3.0×10^{-8}	2.0×10^{-10}	2.0×10^{-4}

するためにコンクリート塀を周りに設置することなども欠かせない。

受け入れ可能な内部被ばく患者の α 線を放出する放射性物質の量を以下の条件で算定する。

- 1) RI 内用療法治療施設は独立した 3 床の病室を有する。
- 2) 物理学的半減期が 30 日以上の α 線を放出する放射性物質による内部被ばく患者 1 名を受け入れる。
- 3) 放射線障害防止法告示別表 3 の放射性物質の濃度限度に従う (表 2)⁹⁾。
- 4) 内部被ばく患者の呼気から排出される放射性物質の割合は、体内に取り込んだ量の 100% とする。
- 5) 内部被ばく患者が入院する 1 病室の排気量は、一般的と考えられる、460 m³/時間とする。
- 6) 治療施設ユニットの排気のためのフィルターはヘパフィルターとチャコールフィルターの併用により、 α 線を放出する放射性物質が気体以外の化学形態の場合、そのフィルター効率率は 99% とし、¹³¹I の場合、そのフィルター効率を 90% とする。
- 7) α 線を放出放射性物質の崩壊で生じる可能

性があるラドンは、²²²Rn として取扱う。空中飛散率は 100% とし、気体であるのでそのフィルター効率は 0 とする。

- 8) 内部被ばく患者の治療に携わる医療専門家の病室内での外部放射線による被ばくを 1 週間あたり 1 mSv 以下とするために、空气中的放射能濃度と濃度限度の割合は、外部被ばくを、立ち入り制限により、0.2 と考慮して、0.8 とする。

以下に示す病室内の α 線を放出する放射性物質の空气中濃度式より、 α 線を放出する放射性物質の 1 日最大使用数量を求め、これを受け入れ可能な内部被ばく患者の α 線を放出する放射性物質の量と考える。

$$A1 = a \times n \times (k/100) \times (1/V)$$

$$R1 = A1/MPC1$$

A1: 病室内の空气中放射能濃度 (Bq/cm³)

a: 1 日最大使用数量 (Bq)

n: 1 週間の使用日数 (日/週)

k: 飛散率 (%)

V: 使用室の 1 週間当たりの排気量 (m³/週)

R1: 空气中濃度と濃度限度の割合

MPC1: 空气中濃度限度 (Bq/cm³)

表 3 内部被ばく患者が入院する 1 病室の排気量

1 時間当たりの排気量 (m ³ /時間)	1 日の稼働時間 (時間/日)	1 週間当たりの 稼働日数 (日)	1 週間当たりの 排気量 (m ³ /週)
460	24	7	77,280

表 4 受け入れ可能な内部被ばく患者の α 線を放出する放射性物質の量の推定

核 種	1 日最大使用数量 (MBq)	1 週間使用日数 (日/週)	飛散率 (%)	空気中の濃度限度 (Bq/cm ³)	放射能濃度 (Bq/cm ³)	割合
α 線放出性 放射性物質	0.00185	1	100	3×10^{-8}	2.4×10^{-8}	0.8
割合の合計						0.8

表 5 独立する 3 床の病室を有する RI 内用療法治療施設で 1 名の内部被ばく患者が入院する時の放射性物質使用量

A. ¹³¹I の使用量

核 種	1 日最大使用数量 (MBq)	3 月間使用数量 (MBq)	年間使用予定数量 (MBq)
¹³¹ I	5,550	99,900	399,600

B. α 線を放出する放射性物質の使用量

核 種	1 日最大使用数量 (MBq)	3 月間使用数量 (MBq)	年間使用予定数量 (MBq)
α 線放出性放射性物質	0.00185	0.00185	0.00185

表 6 独立する 3 病室を有する RI 内用療法施設の総排気量

1 時間当たりの排気量 (m ³ /h)	1 日の稼働時間 (h/日)	3 月間の日数 (日/3 月)	3 月間当たりの排気量 (m ³ /3 月)
3,010	24	91	6,573,840

表 7 独立する 3 床の病室を有する RI 内用療法施設で 1 名の内部被ばく患者が入院する時の最終排気口における放射能濃度の推定

核 種	3 月間 処理量 (MBq)	飛散率 (%)	フィルター 効率 (%)	排気中の 濃度限度 (Bq/cm ³)	放射能濃度 (Bq/cm ³)	割 合
α 線放出性放射性物質 (物理学的半減期 30 日以上)	0.00185	100	99*	2×10^{-10}	2.82×10^{-12}	0.0141
²²² Rn	0.00185	100	0†	2×10^{-5}	2.82×10^{-12}	1.41×10^{-5}
¹³¹ I	99,900	0.1	90††	5×10^{-6}	1.52×10^{-6}	0.304
合 計						0.318

*; ヘパフィルター使用

†; 気体

††; チャコールフィルター使用

内部被ばく患者が入院する治療病室に専用の排気設備を設けることは、一般的な施設の状況を考えて、構造上の問題が生じてくるために現実的ではないと考えられる。対象病室の空気吸入口に高性能フィルターを追加し、病室内の空気を浄化した後、既存の RI 排気ダクトを利用して排気することとする。内部被ばく患者が入院する 1 病室の排気量は表 3 に示され、受け入れ可能な内部被ばく患者の α 線を放出する放射性物質の量は表 4 のように、1.85 kBq と算出される。

RI 内用療法治療施設の最終排気口における放射能濃度の評価は、表 5 のように治療量の ^{131}I と既存の RI 内用療法施設で受け入れることができる量の α 線を放出する放射性物質の取扱いにに基づき、表 6 に示すように独立した 3 病室を有する RI 内用療法施設の総排気量を 3,010 m³/時間と仮定すると、表 7 のように施設での最終排気口における放射能濃度と濃度限度の割合の合計は 0.318 となり 1 を超えることなく現行法令を満足し、通常の RI 内用療法を中断することなく、内部被ばく患者をその診療のために受け入れることができる。

このように RI 内用療法施設の廃棄設備に適切な改築を加えることで、最大 1.85 kBq の α 線を放出する、物理学的半減期が 30 日以上放射性物質による内部被ばく患者を、国内の RI 内用療法施設に受け入れることが可能となる。

7. 仮設型内部被ばく患者治療施設

RI 内用療法治療施設では 1 施設当たり患者病室は 3 床程度であることが多い。複数の内部被ばく患者が発生した場合、一施設で患者の受け入れが十分でないおそれが生じる。このため、既存の

RI 内用療法治療施設に、内部被ばく治療のための仮設型施設を一定期間併設することで、内部被ばく患者に対応できることも一案である。この仮設型内部被ばく患者治療施設は、組み立てタイプの内部被ばく患者の治療施設として、オフサイトセンターなどで各パーツを保管・管理し、要請に応じて各パーツをトラックなどで輸送し、RI 内用療法治療施設に 24 時間以内に組み立て、併設できる施設とする。また、内部被ばく患者の退院後、この治療施設は分解され、その各パーツは保管場所ですべて整備後、管理される。

仮設型内部被ばく患者治療施設は、トラック輸送が可能な 240 cm (横)×720 cm (縦)×230 cm (高さ)の大きさのコンテナルームを内部被ばく患者の治療病室とすることを基本とし、治療病室ユニット、汚染検査および廃液施設ユニット、排気・空調ユニット、支援機械ユニットからなる。

内部被ばく患者の診療に必要な施設の能力を以下のようなモデルで考察する。

- 1) 入院する内部被ばく患者は 1 名とし、入院期間は最大 3 ヶ月とする。
- 2) 患者のトイレは、施設の排水量を最少にするためにバイオトイレを使用する。
- 3) 患者のシャワー使用回数は最大 2 回/日、排水量は 200 l/回とする。
- 4) 患者の洗顔、歯磨き、手洗い等で発生する生活排水量は 40 l/日とする。
- 5) 患者の衣類、寝具などは、ディスポーザブルとし再使用しない。
- 6) 病室に立ち入る医師 1 名、看護師 1 名の必要な手洗い等は、既存の RI 内用療法治療施設で行う。

表 8 内部被ばく患者が入院する簡易型内部被ばく患者治療施設の排水量

排水の種類	1 日の発生量 (l/日)	1 週間の排水量 (l/週)	1 月間の排水量 (l/月)	備 考
患者のシャワー水	200	400	1,600	2 回/週
洗顔・歯磨き等の生活排水	40	280	1,120	
合 計			2,720	

内部被ばく患者は、水洗式トイレではなくバイオトイレ (Composting Toilet) を利用する。バイオトイレは好気性微生物により排泄された糞尿を分解することで垂れ流しや蓄積による汲み取り作業は必要ない。このバイオトイレを利用することで、内部被ばく患者の入院期間に発生する排水総量は、内訳を表 8 に示すように、2,720 l まで抑えることができる。このため、RI 内用療法施設の廃棄設備で増設すべき貯留タンクは余裕をみて 3 m³ の容量があることが望ましい。また、内部被ばく患者から排出される放射性物質の多くは糞尿に含まれるが、バイオトイレを利用することで、廃棄設備の一つである排水設備の構造を簡素にする。

受け入れ可能な内部被ばく患者の α 線を放出する放射性物質の量を以下の条件で算定する。

1) RI 内用療法治療施設は独立した 3 床の病室

を有する。

- 2) 物理学的半減期が 30 日以上 α 線を放出する放射性物質による内部被ばく患者 1 名を受け入れる。
- 3) 放射線障害防止法告示別表 3 の放射性物質の濃度限度に従う (表 2)⁹⁾。
- 4) 内部被ばく患者の呼気から排出される α 線を放出する放射性物質の割合は、体内に取り込んだ量の 100% とする。
- 5) 内部被ばく患者が入院する 1 病室の排気量は 460 m³/時間とする。
- 6) 治療施設ユニットの排気のためのフィルターはヘパフィルターとチャコールフィルターの併用により、 α 線を放出する放射性物質が気体以外の化学形態の場合、そのフィルター効率 99% とする。
- 7) α 線を放出放射性物質の崩壊で生じる可能

表 9 内部被ばく患者が入院する 1 病室の排気量

1 時間当たりの排気量 (m ³ /時間)	1 日の稼働時間 (時間/日)	1 週間当たりの 稼働日数 (日)	1 週間当たりの 排気量 (m ³ /週)
460	24	7	77,280

表 10 受け入れ可能な内部被ばく患者の α 線を放出する放射性物質の量の推定

核 種	1 日最大 使用数量 (MBq)	1 週間 使用日数 (日/週)	飛散率 (%)	空気中の 濃度限度 (Bq/cm ³)	放射能 濃度 (Bq/cm ³)	割 合
α 線放出性放射性物質	0.00185	1	100	3×10^{-8}	2.4×10^{-8}	0.8
割合の合計						0.8

表 11 内部被ばく患者が入院する病室での放射性物質使用量

核 種	1 日最大使用数量 (MBq)	3 月間使用数量 (MBq)	年間使用予定数量 (MBq)
α 線放出性放射性物質	0.00185	0.00185	0.00185

表 12 仮設型内部被ばく患者治療施設の総排気量

1 時間当たりの排気量 (m ³ /h)	1 日の稼働時間 (時間/日)	3 ヶ月間の日数 (日/3 月)	3 ヶ月間当たりの排気量 (m ³ /3 月)
980	24	91	2,140,320

表 13 仮設型内部被ばく患者治療施設の最終排気口における放射能濃度の推定

核 種	3 月間 処理量 (MBq)	飛散率 (%)	フィルター 効率 (%)	排気中の 濃度限度 (Bq/cm ³)	放射能濃度 (Bq/cm ³)	割 合
α 線放出性放射性物質 (物理学的半減期 30 日以上)	0.00185	100	99*	2×10^{-10}	8.67×10^{-12}	0.0434
²²² Rn	0.00185	100	0†	2×10^{-5}	8.67×10^{-12}	4.34×10^{-5}
					合 計	0.0434

*; ヘパフィルター使用

†; 気体

性があるラドンは、²²²Rn として取扱う。空中飛散率は 100% とし、気体であるのでそのフィルター効率は 0 とする。

- 8) 内部被ばく患者の治療に携わる医療専門家の病室内での外部放射線による被ばくを 1 週間あたり 1 mSv 以下とするために、空気中の放射能濃度と濃度限度の割合は、外部被ばくを、立ち入り制限により 0.2 と考慮して、0.8 とする。

病室内の α 線を放出する放射性物質の空气中濃度式より、 α 線を放出する放射性物質の 1 日最大使用数量を求め、これを受け入れ可能な内部被ばく患者の α 線を放出する放射性物質の量と考える。内部被ばく患者が入院する病室の排気量は表 9 のように示され、受け入れ可能な被ばく患者の α 線を放出する放射性物質の量は、表 10 のように 1.85 kBq と算出される。

仮設型内部被ばく患者施設の最終排気口における放射能濃度の評価は、表 11 のように、受け入れることができる量の α 線を放出する放射性物質の取扱いに基づき、表 12 に示すように、施設の総排気量を 980 m³/時間と仮定すると、表 13 のように、施設での最終排気口における放射能濃度と濃度限度の割合の合計は 0.0434 となり 1 を超えることなく現行法令を満足する。

α 線を放出する放射性物質は、その崩壊過程で、 γ 線を放出する。このため、仮設型内部被ばく治療施設のデザインでは、公衆のための放射線防護の措置を講じなければならない。ここでは以

下のように ¹³¹I による RI 内用療法をモデルとする。

- 1) ¹³¹I の RI 内用療法で、¹³¹I の 5.55 GBq を服用した患者が 3 ヶ月入院する。
- 2) ¹³¹I の 1 日最大使用数量 5.55 GBq、3 ヶ月使用数量 5.55 GBq、年間使用数量 22.2 GBq とする。
- 3) 治療施設ユニットの排気のためのフィルターはヘパフィルターとチャコールフィルターの併用により、¹³¹I の場合、そのフィルター効率を 90% とする。
- 4) ¹³¹I の RI 内用療法で利用する遮蔽体付ベッドを治療病室ユニット内で使用する。
- 5) 治療病室ユニット中心から 3.6 m 離れた場所の実効線量は 3 ヶ月間で 1.26 mSv を超えない。

内部被ばく患者から放出されると想定される γ 線の遮蔽のために、図 5 のように、病室内での遮蔽体付ベッドの使用、病室の周囲に最大 35 cm 厚コンクリートの囲い、そして遮蔽体付ベッドと連動した病室天井の 55 mm 厚鉄性遮蔽体の覆いが必要となる。

内部被ばく患者から γ 線や α 線を放出とした場合 (表 14)、仮設型内部被ばく患者治療施設の最終排気口における放射能濃度と濃度限度の合計は表 15 のように 0.0952 となり、内部被ばく患者を受け入れることができる。

このように仮設型内部被ばく患者治療施設を併設することで、適切な改築を受けた RI 内用療法

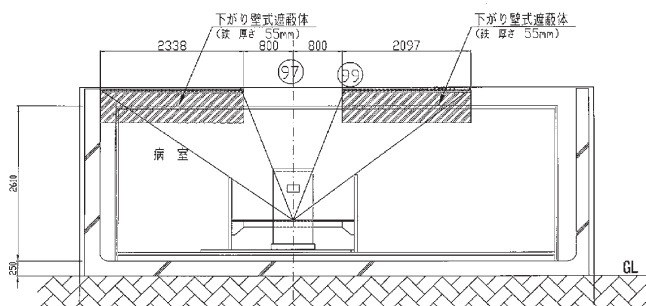


図5 仮設型内部被ばく患者治療病室の γ 線の遮蔽体について。
病室に遮蔽体付ベッド、病室周囲にコンクリートによる囲い、病室天井に鉄製遮蔽体により公衆への γ 線の防護対策を講じる。

表 14 仮設型内部被ばく患者治療施設での放射性物質使用量

A. 公衆に対する放射線防護の基準として下記 ^{131}I 使用量を考える

核 種	1 日最大使用数量 (GBq)	3 月間使用数量 (GBq)	年間使用予定数量 (GBq)
¹³¹ I	5.55	5.55	22.2

B. α 線を放出する放射性物質の使用量

核 種	1 日最大使用数量 (MBq)	3 月間使用数量 (MBq)	年間使用予定数量 (MBq)
α 線放出性放射性物質	0.00185	0.00185	0.0027

表 15 仮設型内部被ばく患者治療施設の最終排気口における放射能濃度の推定

核 種	3 月間 処理量 (MBq)	飛散率 (%)	フィルター 効率 (%)	排気中の 濃度限度 (Bq/cm ³)	放射能濃度 (Bq/cm ³)	割 合
α 線放出性放射性物質 (物理学的半減期 30 日以上)	0.00185	100	99*	2×10^{-10}	8.67×10^{-12}	0.0434
²²² Rn	0.00185	100	0 [†]	2×10^{-5}	8.67×10^{-12}	4.34×10^{-5}
¹³¹ I	5,550	0.1	90 ^{††}	5×10^{-6}	2.59×10^{-7}	0.0518
					合 計	0.0952

*; ヘパフィルター使用

†; 気体

†: チャコールフィルター使用

施設に加えて、最大 1.85 kBq の α 線を放出する、
物理学的半減期が 30 日以上放射性物質による
内部被ばく患者を RI 内用療法施設に受け入れる
ことが可能となる。

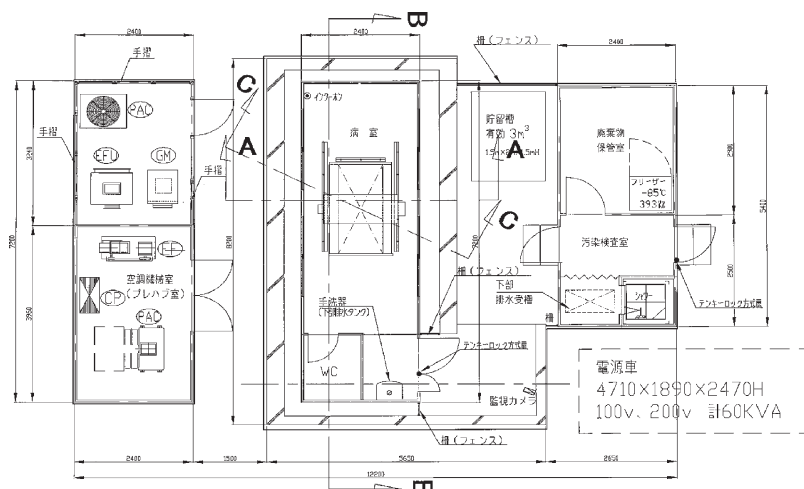


図6 仮設型内部被ばく患者治療施設の概観。

治療病室ユニット，汚染検査および廃棄施設ユニット，排気・空調ユニット，支援機械ユニットからなり，治療病室を中心に γ 線に対する遮蔽体による措置を講じる。

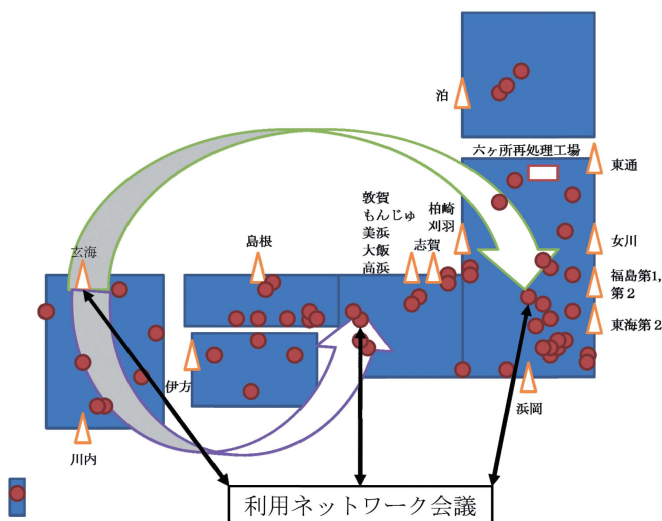


図7 RI内用療法施設原子力緊急事態時利用ネットワーク会議構想。

原子力緊急事態の場合に発生した内部被ばく患者を，地域ブロックの二次被ばく医療機関や地域の三次被ばく医療機関で対応するのではなく，RI内用療法施設原子力緊急事態時利用ネットワーク会議を介して，全国のRI内用療法施設で受け入れる考え。△：稼働中の原子力発電所の立地点，□：試験運転中の再処理工場，○：RI内用療法施設。

表 16 RI 内用療法施設等に係る費用について

	RI 内用療法施設新設	RI 内用療法施設改築	仮設型内部被ばく患者治療施設併設
建築工事費 建築工事 空調設備工事 衛生設備工事 電気設備工事	309,600 千円 (600 m ² ×516 千円/m ²)	—	104,000 千円
特殊設備			
排気処理設備	20,000 千円	20,000 千円	6,000 千円
排水処理設備	75,000 千円	100,000 千円	25,000 千円
放射線モニタ設備	30,000 千円	30,000 千円	45,000 千円
備付届・ 使用許可申請 作成費	2,000 千円	2,000 千円	2,000 千円
合 計	436,600 千円	152,000 千円	182,000 千円

8. RI 内用療法施設緊急時利用ネットワーク会議の構築

このように、わが国の実効性の高い内部被ばく医療の実践のために、RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設の利用の可能性が考えられる。

全国では、2010 年時点で RI 内用療法施設は 68 施設あり、138 病床が稼働中である¹⁰⁾。各々の RI 内用療法施設が既存の 1 病床を改築し、全国組織の RI 内用療法施設緊急時利用ネットワーク会議を構築すれば、最大 68 名の内部被ばく患者を速やかに収容でき、より実効的な診療が可能になると考えられる(図 7)。また原子力緊急事態の場合に、要請により、各オフサイトセンターなどにあらかじめ保管されている仮設型内部被ばく患者治療ユニットをトラックなどで輸送し既存の RI 内用療法施設で組立て、仮設型内部被ばく患者治療施設として併設すれば、最大 136 名の内部被ばく患者の診療が可能となると考えられる。このように、全国的なネットワーク会議を構築し RI 内用療法施設を利用することは、放射性物質を利用することが多い現代社会における心強いセーフティ

ネットと成り得ることだろう。

9. RI 内用療法施設利用に係るコストについて

RI 内用療法病室 1 床を有する RI 内用療法施設を新設するには、概算であるが、表 16 に内訳を示すように 436,600 千円の費用がかかる。一方、既存の RI 内用療法施設で、その 1 床で内部被ばく医療の実施を可能にするために、その改築費用は 152,000 千円となり、また、仮設型内部被ばく患者治療施設の併設に当たっては、182,000 千円とおよその費用を現時点で見積もることができる。このように RI 内用療法施設の改築や簡易型内部被ばく患者治療施設併用に係る費用は、RI 内用療法施設の新設費用に比べて比較的安価となると考えられる。

10. おわりに

原子力緊急事態の場合に、内部被ばく医療に既存の RI 内用療法施設を利用し仮設型内部被ばく患者治療施設を併設することで、内部被ばく患者の診療のより高い実効性が確保される可能性があることを提案する。それは、内部被ばく患者の命

の視点からの緊急被ばく医療の信頼ある実践とともに、内部被ばく患者から発生するおそれのある公衆への放射線被ばくをより効果的に防止することも考慮することを意味している。そして、内部被ばく医療に既存の RI 内用療法施設を利用し、仮設型内部被ばく患者治療施設を併設することは、数々の利便性ゆえに放射性物質を利用する現代社会での一つのセイフティネットと成り得ることであろう。今後、本稿を一案として、原子力緊急事態の内部被ばく医療のあり方について議論が進められることが期待される。

文 献

- 1) 緊急被ばく医療のあり方について 内閣府原子力安全委員会 2001 年 (2008 年 10 月一部改訂).
- 2) 原子力施設等の防災対策について 内閣府原子力安全委員会 1980 年 (2010 年 8 月一部改訂).
- 3) *Medical management of radiation accidents*. Gusev IA, Guskova AK, Mettler FA (ed), CRC Press, Florida, USA, 2001.
- 4) Limits for intakes by workers, International Commission on Radiological Protection, ICRP publ. 30. *Ann ICRP*, 18, 1988.
- 5) 最新臨床核医学 (第 3 版) 久田欣一 (監), 利波紀久, 久保敦司 (編), 金原出版, 東京, 1999 年.
- 6) 人体内放射能の除去技術 挙動と除染のメカニズム 放射線医学総合研究所 (監修), 青木芳朗, 渡利一夫 (編), 講談社サイエンティフィク, 東京, 1996 年.
- 7) 遠藤啓吾: 序 悪性リンパ腫に対する RI 標識抗体を始めるにあたって, 特集 2 悪性リンパ腫に対する RI 標識抗体療法の基礎と臨床. 血液フロンティア 2009; 19: 87-90.
- 8) Nilsson S, Larsen RH, Fossa SD, Balteskard L, Borch KW, Westlin JE, et al: First clinical experience with alpha-emitting radium-223 in the treatment of skeletal metastases. *Clin Cancer Res* 2005; 11: 4451-4459.
- 9) アイソトープ法令集 (1) 放射線障害防止法関係法令 (2010 年版), 日本アイソトープ協会 (編), 2010 年.
- 10) 日本核医学会分科会 腫瘍・免疫核医学研究会 甲状腺 RI 治療委員会: 甲状腺癌の放射性ヨード内用療法における RI 治療病室稼働状況の実態調査報告 (第 2 報). 核医学 2011; 48: 15-27.

Summary

Utilization of Radionuclide Therapy Facility and Assembly-Temporary Type Therapeutic Facility for Medical Treatment of Radioactivity Contaminated Patients in Nuclear Emergency

Naoyuki WATANABE*, Hiroyuki SATO**, Hiroshi KAWAHARA** and Yasuhito SASAKI***

**Gunma Prefectural College of Health Sciences*

***Chiyoda TECHNOL Co. Ltd.*

****Japan Radioisotope Association*

Medical management of patients internally contaminated in nuclear emergency needs, in addition to general medical treatment, to evaluate doses due to intakes of radioactive materials, to conduct effective treatment with stable isotopes and chelating agents and to keep public away from radioactive materials in and excreted from patients. The idea of medical treatment for internal contamination is demonstrated in the general principles on medical management of victims in nuclear emergency issued by the Cabinet Office in Japan. However, if impressive number patients with internal contamination are generated, the current medical management scheme in nuclear emergency is not able to admit them. The utilization of radionuclide therapy fa-

cilities where patients with thyroid diseases are treated with radioisotope and assembly-temporary housing type treatment facilities dedicated for internal contaminated patients may be expected to complement the medical management scheme in nuclear emergency. The effect or more medical management system for patients internally contaminated may become one of the safety nets in the contemporary society that inclines to use nuclear energy on account of accessibility.

Key words: Medical management in nuclear emergency, Medical treatment of internal contamination, Radionuclide therapy facility, Assembly-temporary type therapeutic facility.