

## シリーズ：内部被ばくの簡易測定（スクリーニング）

## 第1回 放射性ヨウ素による内部被ばくの評価

伊藤 茂樹

放射線管理責任者、及び放射線取扱主任者をはじめとした放射線施設の管理者は、放射性物質の漏洩や被ばく等の事故・トラブルを起こさない管理を行っていくことは当然であるが、一方で、事故・トラブルが発生した場合に、適切に対応できるように日頃から備えておくことも重要である。近年の厳しい財政状況や労働者不足を受けて、大学や病院等も含め少人数のスタッフで管理・運営している RI 施設も少なくない。このような施設では、スタッフ交代に向けて、十分に時間を掛けて引継ぎを行うことが難しい場合も多い。特に、安全管理技術の継承は容易ではなく、事故・トラブルが発生した際、適切に対応できるかどうか不安を抱えている管理者も少なくないと思われる。このような状況の中、昨年、日本の研究施設において、作業員がプルトニウムを摂取するという内部被ばく事故が発生したことは、社会的に大きな衝撃を与えた。これを機に、「非密封 RI 施設の管理に携わる者として、自分が管理に携わる施設で内部被ばくが疑われる状況が生じた際に、施設にある身近な測定器を用いて内部被ばくの有無や被ばく線量を評価する“スクリーニング技術”について、今一度確認しておくことは重要ではないか？」と考え、今回、内部被ばく測定に関する企画を立ち上げた。本企画では、放射性ヨウ素（第1回）、軟β線放出核種（第2回）、陽電子放出核種（第3回）を対象とした内部被ばくの簡易測定法を、それぞれ造詣の深い先生に解説いただく予定である。

(放射線安全取扱部会 広報専門委員会)

## 1. ヨウ素の挙動

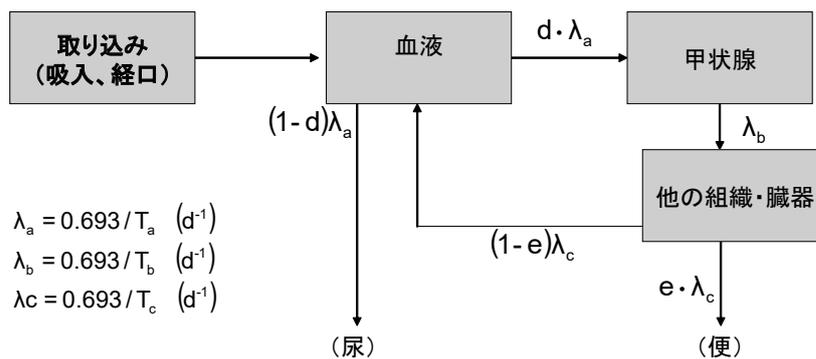
ヨウ素は揮発性物質であり、浮遊する可能性が高い。このため、ヨウ素は、容易に経気道、経口により体内に侵入する。

体内に侵入した放射性ヨウ素の挙動は安定ヨウ素及び放射性ヨウ素とも同様である。侵入したヨウ素はヨウ素イオンに還元され速やかに吸収される。血中に移行したヨウ素イオンの一部は汗、糞便、極少量は呼気からも失われるが、大部分は細胞外液中に均等に分布し(甲状腺外無機ヨウ素プール)、その後、2つの経路を辿る。1つは甲状腺に摂取され、ホルモンの合成に用いられる経路であり、もう1つは腎の糸球体にて濾過され、尿と共に体外へ排泄される経路であるが、この際、一部は尿細管にて再吸収される。すなわち、放射性ヨウ素摂取により、甲状腺の内部被ばくを引き起こす。

甲状腺は、血中からのヨウ素イオンを選択的に捕獲し、これを有機化して様々な代謝の制御過程において重要な役割を果たす甲状腺ホルモン（トリイオドサイロニン (T3)、サイロキシン (T4)) を合成、分泌している。T3 及び T4 は、アミノ酸のチロシンが2つ縮合し、側鎖の芳香環上に3又は4個のヨウ素が付加したものである。したがって、ヨウ素が体内に取り込まれると甲状腺に特異的に集積することとなる。

## 2. 放射性ヨウ素の体内動態モデル

図1はICRPによる放射性ヨウ素の体内動態モデルを示している。呼吸気道への沈着とクリアランスを考慮した呼吸気道モデル(ICRP, Publ.66)では、ヨウ素の性状から元素状ヨウ素、ヨウ化メチル、粒子状エアロゾルに分けて沈着割合を定めている。吸



d: ヨウ素の投与量に対する甲状腺の摂取割合 (30%)  
 e: ヨウ素の投与量に対する大腸上部からの排泄割合 (20%)

図1 ICRPの体内動態モデル（ヨウ素）ICRP Publ. 56

入した元素状のヨウ素のほとんどは気道に沈着し、そのヨウ素の大部分は10分程度の半減期で血液へ移行する（吸収のタイプF）。ヨウ化メチルは、約70%が気道に沈着し、血液への移行は5秒程度の半減期である（吸収のタイプV）。粒子状エアロゾル粒子は大きさに依存するがおおむね10分程度の半減期で血液へ移行する（吸収のタイプF）。

ICRPの胃腸管モデルでは、平均滞留時間を胃（1時間）、小腸（4時間）、大腸上部（13時間）、大腸下部（24時間）としている。ICRPはすべての年齢に対して、食材に混入されたヨウ素は完全に吸収されると仮定しており、その取り込み割合f1は1である（図1<sup>3)</sup>）。

血液に取り込まれたヨウ素は、30% (d=0.3) が甲状腺へ、残りが尿中排泄される。血液中における生物学的半減期は0.25日 (Ta) であり、λaは0.693/Taである。甲状腺に入ったヨウ素の生物学半減期 (Tb) は公衆の年齢毎に異なり、λbは0.693/Tbである。甲状腺から他の組織へ移行したヨウ素の生物学半減期 (Tc) に従い、その20% (e=0.2) は大腸上部からλb=0.693/Tbに従って排泄され、残りは血液中に留まる。再循環したヨウ素は再度甲状腺に取り込まれる。

放射性物質が体内に取り込まれると、放射性物質の壊変に伴って放出される放射線が連続的に体内で照射される（内部被ばく）。その影響の大きさは、放出される放射線の線質によって決まる生物学的効果比 (RBE)、半減期、生物学的半減期と物理学的半減期によって決まる有効半減期（実効半減期）等

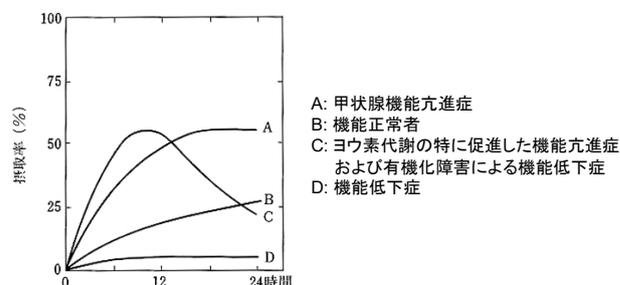


図2 甲状腺放射性ヨウ素摂取の種々なパターン

A New Textbook of Clinical Nuclear Medicine 2nd. Edition, Kinichi Hsada, et al., Kenkyusha Shuppan Co. LTD, 1991

にも依存する。外部被ばくは線源との距離を置くこと、遮蔽体等の対策を講じることによって防護が可能になるが、内部被ばくの場合は、線源が体内にあるため、これを除去しない限り被ばくを受け続ける。

### 3. 甲状腺被曝線量の算出

放射性ヨウ素が体内摂取されたとき、甲状腺摂取される割合（摂取率%）は正常人で、通常24時間値で10~35%の範囲内であり、3時間値は10%以下を示し、24時間値を超えることはない。表1は単位放射能当たりの甲状腺被曝線量を示している。この表を用いることにより、甲状腺摂取量から被ばく線量の算定が容易にできる（図2、表1, 2）。

ただし、本吸収線量計算においては、甲状腺摂取率を25%と仮定した。また、<sup>125</sup>Ieの含有率規格は0.3%であるが、実際含有率は更に低いため、<sup>125</sup>Iを100%として算出した。

表1 甲状腺被ばく線量

Target organ	Maximum thyroid uptake (%)	<sup>123</sup> I	<sup>124</sup> I	<sup>125</sup> I	<sup>131</sup> I
		mGy/MBq	mGy/MBq	mGy/MBq	mGy/MBq
Thyroid	5	0.65	49	38	70
	15	2	140	120	220
	25	3.5	240	210	350

MIRD PRIMER for absorbed dose calculations, The Society of Nuclear Medicine, pp.50, 1991

表2 甲状腺被ばく線量 (MIRD 法により算出)

臓器	ヨードカプセル-123 3.7MBq投与あたり (mGy)	ヨウ化ナトリウム ( <sup>131</sup> I)カプセル 3.7MBq投与あたり (mGy)
甲状腺	13	1300
胃壁	0.21	1.4
肝臓	0.027	0.48
卵巣	0.031	0.14
精巣	0.012	0.09
赤色骨髄	0.03	0.26
全身	0.029	0.71

ただし、本吸収線量計算においては、甲状腺接種率を25%と仮定した。また、<sup>123</sup>Iの含有率規格は0.3%であるが、実際含有率は更に低いため、<sup>123</sup>Iを100%として算出した。

4. 内部被曝線量評価法

一般的に内部被曝線量は、体外計測、バイオアッセイ、計算の3方法によって評価されるが、放射性ヨウ素による内部被曝線量評価は、体外計測又は計算によって評価されている。バイオアッセイには唾液の放射性ヨウ素濃度を基に測定する方法もあるが、一般的ではない。

摂取された放射性ヨウ素は甲状腺に選択的に蓄積するので、放射性ヨウ素による内部被ばく線量は、甲状腺へ蓄積した放射性ヨウ素の量を基に評価される。

体外計測では甲状腺蓄積量を直接測定するが、計算では仮定を基に甲状腺蓄積量を推定する。体内に摂取された放射性物質は物理的半減期による減衰と排泄によって時間と共に減少する生物学的半減期を合わせた実効半減期で減少するが、その間も被ばくは続く。<sup>131</sup>Iの場合、物理的半減期は8日であり、実効半減期は7.6とされている。

被ばく線量は、次式で計算される。

$$E(50) = I \times e(50) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Iは体内に取り込まれた放射性物質の摂取量 (Bq) であり、e(50) が実効線量係数と呼ばれ、

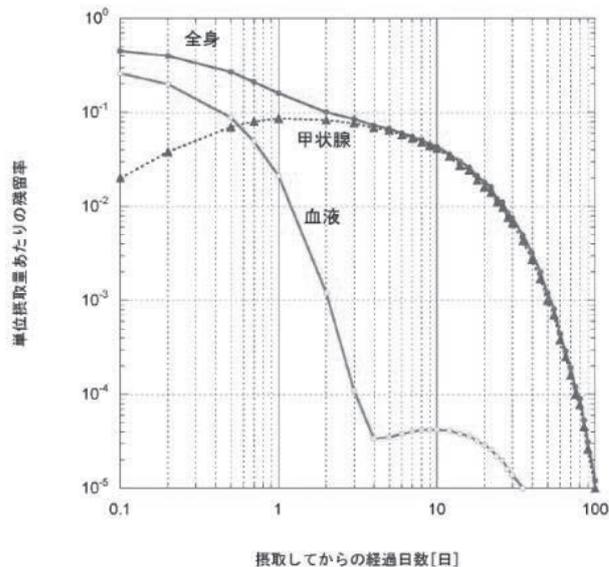


図3 <sup>131</sup>Iの体内残留率 (吸入摂取, 粒径1μm)

単位放射能 (1 Bq) 摂取したときの50年間の預託実効線量を与える係数 (mSv/Bq) である。

摂取量 I は、ホールボディカウンタや甲状腺モニタによって測定された値ではなく、摂取した放射能量である。測定値と摂取量との関係は、残留率を介して以下の関係にある。

$$I = \frac{M}{R} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、Mは測定値、Rは残留率 (図3) である。

4.1 体外計測と計算法の長所と短所

体外計測法及び計算法は、それぞれ長所と短所を持っている。体外計測法は信頼できる方法であるが、検査の対象となる人 (被験者) を1人ずつ測定しなければならないので、被験者数が多い場合は膨大な測定作業量となる。しかしながら、個別の被ばく線量を算定する意義は将来の放射線障害の予測が可能になる点からその意義は非常に大きい。ただし、体外計測法は、計測時点の評価であり、継続的に被ばくをしている場合には積算する必要がある。また、

表3 体外計測法の種類と検出器

測定系	検出器
1 ホールボディカウンタ	Ge, NaI(Tl), プラスチックシンチレータ
2 甲状腺モニタ	NaI
3 サーベイメータ	GM, NaI(Tl)
4 核医学用甲状腺摂取率測定器	NaI(Tl)
5 画像解析	イメージングプレート (IP)
6 簡易甲状腺モニタ	NaI(Tl) (GMも可)

標準的人体モデルを想定して甲状腺摂取量から預託実効線量を算定することが可能であるが、個体差による誤差は少なからず存在する。

計算法は、典型的な体型や飲食習慣を持つ架空の人（標準人）を対象として被ばく線量を評価する。ICRP や放射線障害防止法や各種マニュアル、ガイドライン等（法令等）では、計算法で被ばく線量を評価し規制の根拠としている。法令等、不特定多数の人を対象とするので、このような方法を取らざるを得ないのが実情である。

### 5. 簡易的体外計測法

体外計測法には、表3のような方法がある。

ホールボディカウンタと甲状腺モニタは、重装備な遮蔽を要するために設置されている数が限られている。サーベイメータではNaI(Tl)を用いるのが一般的であるが、GM管でも測定は可能である。ただし、サーベイメータは測定精度が劣る。

医療施設で行われる核医学用の甲状腺摂取率測定器を用いるのが最も簡便で測定精度もよい。イメージングプレート (IP) を検出器として用いる画像解析法 (IP モニタ) は、検出された汚染を画像として記録を残せる特徴がある。

核医学用の甲状腺摂取率測定器の原型であるNaI(Tl) 検出器に計数装置を接続する簡易甲状腺モニタリングシステム (簡易甲状腺モニタ) は、計測実施者自身がシステムを組み立てることが可能であり、最も簡単な方法である。このシステムはNaI(Tl) 検出器に波高分析器及び被ばく線量まで計算するプログラムをインストールしたパソコン (PC) を接続することにより、測定終了と同時に被ばく線量を出力することができる。NaI(Tl)、GM サーベイメータでも測定方法は同様である。

簡易甲状腺モニタは移動可能で、高感度かつ高機

能である。計測方法も核医学用甲状腺摂取率測定器と同様である。

以下に、核医学用甲状腺摂取率測定器、簡易甲状腺モニタによる測定の流れを示す。

#### 5.1 核医学用甲状腺摂取率測定器

核医学用甲状腺摂取率測定器は、通常、検出器に2インチφ×2インチ厚 NaI(Tl) シンチレーション検出器が用いられている。近年では、CdTe シンチレータを用いた検出器も使用されている。検出器は鉛製の円筒管で覆われている。計測は、患者頸部に鉛板を設置した状態と鉛板が無い場合の2回の計測を行い、それぞれの計数値の差が甲状腺内の計数値として扱われる。すなわち、鉛板ありの計測値は、甲状腺を除く部位からの放射線量を表し、鉛板なしの計測値は、甲状腺及びその他の部位からの放射線量を表している。計測値の誤差は、検出器と頸部の間の距離及び、患者の個人差も含まれるため、20%程度であると言われている。検出器と頸部の間の距離を近くすることにより誤差も減少するが、検出部が甲状腺を包含できなくなるため、一定の距離が必要である。

#### 5.2 簡易測定法

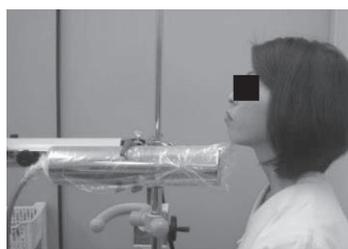
簡易甲状腺モニタのシステム構成は核医学用甲状腺摂取率測定器と同様である。検出器のコリメータ及び支持体は摂取率測定装置のものを流用できるほか、支持体等の材料がない場合は点滴用の支柱を流用し、クランプで固定することも可能である (図4)。この場合、検出器の鉛製円筒管は装備せず、NaI(Tl) 検出部にのみ鉛製の円筒管 (コリメータ) をセットする必要がある。この状態であれば、摂取率測定装置を用いた場合と同程度の誤差で測定が可能である。更に、NaI(Tl) 検出器+PC (波高分析器内蔵) 型の一体型機種もある開発されている (図5)。

簡易甲状腺モニタの検出下限値は、5分計測の場合でも7.2 Bqであり、十分な精度を確保できる。

### 6. 甲状腺測定のための校正法

#### 6.1 甲状腺ファントム

甲状腺放射能は、人体を模擬した頸部-甲状腺ファントムあるいは甲状腺摂取率検査用ファントム



計測の様子



鉛なし

鉛あり

甲状腺モニタでは鉛板ありの場合と鉛板なしの場合の2回の測定を行う

図4 簡易甲状腺モニタリングの計測の様子



図5 NaI(Tl) 検出器をPCに接続できる装置

(ORIN phantom 等) を用いて得られた計数値 - 放射能換算係数を用いて決定する (図6)。

## 6.2 標準線源

$^{123}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{129}\text{I}$  及び  $^{131}\text{I}$  標準線源 (いずれも  $\pm 1.0\%$  の精度) は日本アイソトープ協会を通して入手可能であり, これらを使用して  $\gamma$  計数効率を求めることができる。また, 放出される  $\gamma$  線の若干のエネルギー差により, 測定精度は劣るが,  $^{123}\text{I}$  では  $^{139}\text{Ce}$  (166 keV, 79.9%),  $^{125}\text{I}$  では  $^{129}\text{I}$  (29.8 keV, 57.0%),  $^{131}\text{I}$  では  $^{133}\text{Ba}$  (356 keV, 62.1%) の校正用線源が代用できる。

$^{125}\text{I}$  及び  $^{131}\text{I}$  については, 模擬線源 ( $^{241}\text{Am}$  and  $^{129}\text{I}$  for  $^{125}\text{I}$ , Mockiodine ( $^{133}\text{Ba}$  and  $^{137}\text{Cs}$ ) for  $^{131}\text{I}$ ) も日本アイソトープ協会を通して入手可能であるが, 線源形状が一定であるため, 未知の試料定量については, 試料の容積に合わせて計数効率を補正する必要がある。

## 6.3 計数効率 (計数値 - 放射能換算係数) 決定法

核医学用甲状腺摂取率測定器及び簡易甲状腺モニタ

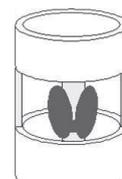
ORINS式  
ITS型甲状腺ファントム  
UN型甲状腺ファントム  
自作

図6 甲状腺ファントム

タを用いる場合の計測方法は, 核医学における甲状腺摂取率測定と同様である。

まず, NaI(Tl) シンチレーション検出器を頸部 - 甲状腺ファントムの甲状腺部に固定する。頸部ファントム表面から検出器までの距離は 30 cm (固定) とし, 放射能が 1 kBq 程度になるまで経時的に計測 (1 分計測) する。甲状腺放射能が 1 kBq 未満の場合には, 距離を 10 cm 程度とし, 計測時間を 5~10 分として数 10 Bq 程度になるまで経時的に計測 (1 分計測) する。計数値と放射能の関係から計数率 - 放射能換算係数 (CF) を得る。

対象者の甲状腺計測は医療で行われている方法と同様に実施する。計測の際, 甲状腺部に鉛板を設置した場合と設置しない場合の2種類の計測を行う。甲状腺部に鉛板を設置した場合の計測値を対象者からのバックグラウンド計数値とし, 設置しない場合の計数値から差し引く。装置の検出下限は, 検出部を頸部に密着させた場合で, 100 Bq であり, 検出器と頸部間が 10 cm の場合はおよそ 1,000 Bq 程度と推定される。

## 参考文献

- 1) 西澤邦秀, 伊藤茂樹, 野川憲夫, 佐瀬卓也, 松田尚樹, 清水喜久雄, 放射性ヨウ素の安全取扱法の標準化に向けて一その1, 日本放射線安全管理学会誌, 8-2, 109-112 (2009)  
DOI : <https://doi.org/10.11269/jjrsm.8.109>
- 2) 西澤邦秀, 放射性ヨウ素安全取扱法の標準化に向けて一パート2一, 日本放射線安全管理学会誌, 9-1, 15b (2010)  
DOI : <https://doi.org/10.11269/jjrsm.9.15b>
- 3) 伊藤茂樹, ⑤放射性ヨウ素による内部被ばく評価に関する中間報告, 日本放射線安全管理学会誌, 10-2, 112a (2011)  
DOI : <https://doi.org/10.11269/jjrsm.10.112a>

(熊本大学大学院生命科学研究部 医用画像学分野)