

改良されたヨウ素動態モデルによる 安定ヨウ素剤投与の内部被ばく線量低減効果の評価

梅田 健太郎* 小林 悌二**

Study on the effect of iodine prophylaxis for reducing internal dose of radioactive iodine based on the improved iodine biokinetic model

Kentaro UMEDA* and Teiji KOBAYASI**

In a nuclear accident, radioactive iodine products may be released to the environment and the population may have a risk to be exposed to them. Iodine prophylaxis is an effective protective action to reduce the internal exposure to thyroid due to radioactive iodine. The effectiveness of iodine prophylaxis has been studied by using the biokinetic model of ICRP Publication 56. Recently an improved biokinetic model for iodine that is planned update of the current model has been proposed. In this report, we estimate the internal dose coefficients for radioactive iodine by applying this improved biokinetic model to internal exposure in 5 yr old children and adults assuming its acute input into blood and analyze the effectiveness of iodine prophylaxis by controlling the timing of the administration time of non-radioactive stable iodine after the injection into blood.

1. はじめに

放射性ヨウ素を体内に摂取すると血液内に取り込まれ、摂取後 24 時間で 10~30%が甲状腺に運ばれ濃縮されるため甲状腺は内部被ばくを受ける[1]。被ばくによる健康上の影響が懸念される場合、非放射性の安定ヨウ素剤を体内に投与することにより放射性ヨウ素の甲状腺への取り込みを抑制し、甲状腺の内部被ばく線量を低減する措置が実施される[2, 3]。

原子力施設事故時の安定ヨウ素剤投与 (Iodine Prophylaxis) の指針は、1999 年に WHO から公表された文献 2 にまとめられている。文献 4~6 では、ICRP (International Commission on Radiological Protection: 国際放射線防護委員会) Publication 56 [7]で公表されたヨウ素の体内動態モデル (以下、現モデルと呼ぶ) を使用して甲状腺に取り込まれる放射性ヨウ素と安定ヨウ素を同時に考慮した体内挙動を解析し、安定ヨウ素剤を投与した場合の放射性ヨウ素の甲状腺摂取率の抑制効果、安定ヨウ素剤投与による被ばく線量低減効果が評価されている。食習慣の違いから体内ヨウ素濃度の平常値が異なる欧米人と日本人ではヨウ素の甲状腺への取り込み割合や甲状腺における生物学

的半減期が異なるとの指摘があり、文献 4, 6 では、日本人に対する安定ヨウ素剤投与効果が議論されている。文献 6 では、安定ヨウ素を過剰摂取した場合に発現するという、甲状腺ホルモンの合成阻害の Wolff-Chaikoff 効果を考慮した甲状腺へのヨウ素移行過程が解析されている。

最近文献 8 で、ICRP からヨウ素の新動態モデルとして提唱計画のある、欧米人を対象とする年齢依存性を考慮した新しいヨウ素動態モデル (以下、新モデル) が提案された。この新モデルでは、現モデルで考慮されている血液、甲状腺、軟組織の他に、肝臓、腎臓、唾液腺、胃壁の組織が加わり、さらに血液、甲状腺、肝臓、腎臓、軟組織に対して無機形ヨウ素と有機形ヨウ素のコンパートメントが定義され、体内に取り込まれたヨウ素が血液内でイオン (I^-) 化し、甲状腺内で有機形ヨウ素となって体内滞留・移行を行う過程がモデル化されている。成人体内の総ヨウ素量の 80 % は甲状腺に分布し、その形態の大部分が有機形ヨウ素として存在していると報告されている[1]。文献 8 では、複数の放射性ヨウ素同位体に関して、放射性ヨウ素が血液注入で瞬時に体内摂取された場合の主な体内組織の放射性ヨウ素の蓄積放射エネルギーや甲状腺の等価線量について、現モデルと新モデルの比較結果を報告している。また、甲状腺が無機形ヨウ素と有機形ヨウ素のコンパート

2018 年 11 月 28 日受理

* 共通教育センター 教授

** (元)新潟大学医学部 教授

メントに区分されている新モデルの特徴を利用し、甲状腺へのヨウ素の取り込みを抑制する効果を模擬できる可能性が述べられている。

本稿では、文献8で報告されたヨウ素の体内挙動に関する新モデルを組み込んだ ICRP Publication 60 [9]に基づく内部被ばく線量評価プログラムを新規に作成し、放射性ヨウ素を血液内に注入した場合（以下単に血液注入と記す）について、甲状腺へのヨウ素取り込み抑制効果を模擬できる新モデルの特徴を活かして、放射性ヨウ素の血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の内部被ばく線量低減効果を評価する。体内に摂取される放射性ヨウ素同位体の種類、被ばく者の年齢、血液注入後の安定ヨウ素剤投与時刻、また、体内摂取が連続的に行われる場合など、内部被ばくが起こる状況の違いが、安定ヨウ素剤投与による内部被ばく線量の低減効果にどのように影響し、その要因は何かについて詳細に検討する。

現モデルを用いてこれまで評価された被ばく線量結果と、新モデルを用いた本研究の評価結果との定性的・定量的な差異をまず確認する。これまでの研究では、安定ヨウ素剤投与による甲状腺に放射性ヨウ素が取り込まれる放射エネルギーの抑制効果は解析されているが、被ばく線量自身の低減効果は直接解析されていない。さらに、放射性ヨウ素同位体、あるいは、体内摂取後の安定ヨウ素剤投与時間の抑制効果の影響についての報告はあるが、影響に関わる要因の分析・議論は十分でないと考えられる。ここでは、これまでの研究で

検討が不足している事項について新モデルを用いた解析結果から定量的に評価・議論する。

2. 計算方法

現在 ICRP から公表されている放射性ヨウ素に関する内部被ばく実効線量係数 [10] は、ICRP Publication 60 勧告 [9]と評価モデル[11]に基づき、ICRP Publication 56 [7, 12]で公表されたヨウ素の動態モデル（現モデル）を使用して評価されている。これに対し本稿では、文献8の新モデルを組み込んだ ICRP Publication 60 に基づく内部被ばく線量評価プログラムを新規に作成し、放射性ヨウ素を直接血液内に注入した場合について、放射性ヨウ素注入後の各組織における残留放射能濃度の時刻歴を解析し、各組織の預託等価線量と預託実効線量を求める。そして、新モデルのコンパートメント構成の特徴を活用し、甲状腺へのヨウ素の取り込み抑制効果を模擬して、注入摂取後に安定ヨウ素剤を投与した場合の預託線量低減効果を評価する。

無機形ヨウ素、有機形ヨウ素コンパートメントによるモデル構成は、それぞれに特徴的な滞留組織・器官の反映とそれら間の移行速度の違いをきめ細かく設定・調整できる特徴を有する。

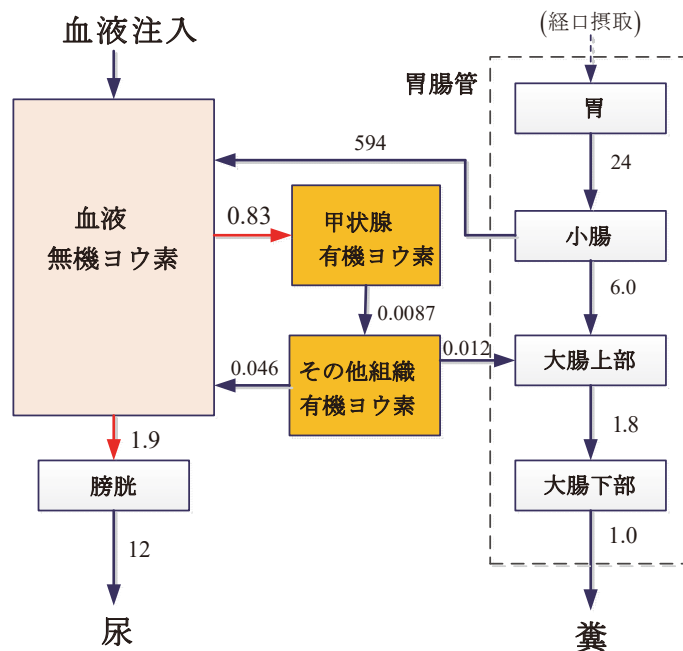


図1 現モデルのコンパートメントモデル（文献7に基づき作成）

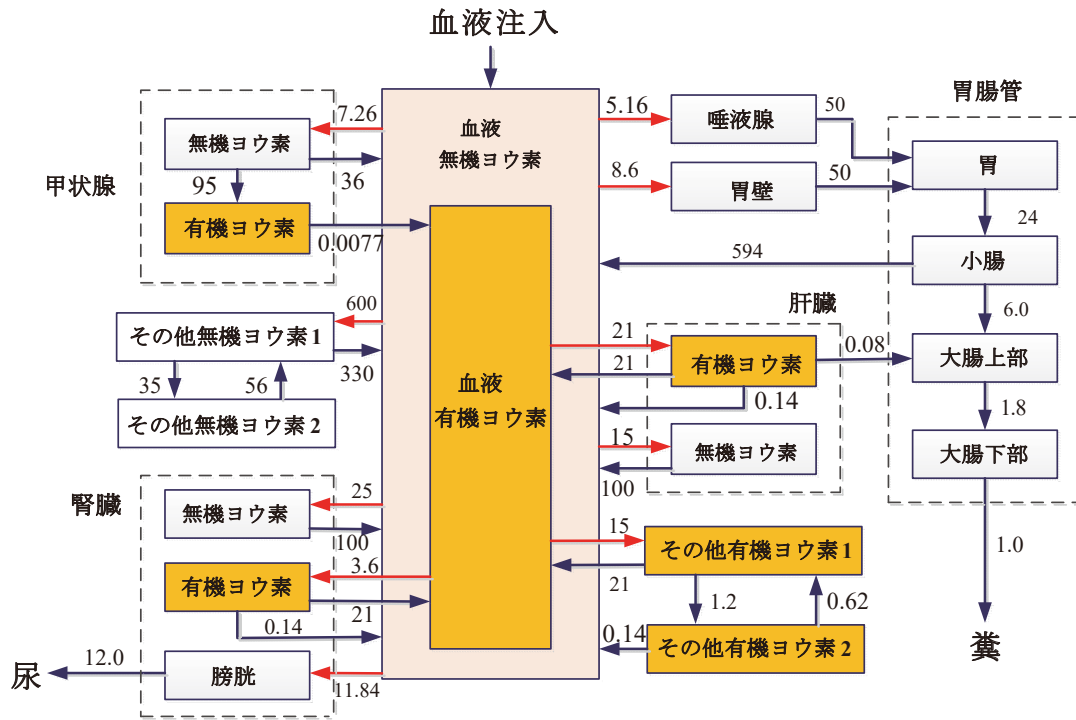


図2 新モデルのコンパートメントモデル（文献8に基づき作成）

評価は、原子力発電所事故時に炉内の放射能インベントリー量が多い ^{131}I 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{134}I 、 ^{135}I の核種 [13]、および物理的半減期が非常に長くその生物学的半減期が安定ヨウ素の体内挙動に対応する ^{129}I を含む6核種について行う。

適用対象をICRPが定める5歳児と成人(20歳)の標準人とし、各放射性ヨウ素同位体1Bq(ベクレル)を血液注入で瞬間摂取した場合の、注入後の体内の各組織に残留する放射性ヨウ素の放射能濃度を新モデルで評価し、ICRP Publication 60 (ICRP1990年勧告)の評価モデル[9, 11]に従って、各標的組織の預託等価線量および預託実効線量を解析する。ICRPの内部被ばく評価モデルの詳細については文献14とそこで参照している文献に譲り、ここでは概略を述べる。

2.1 ヨウ素の新動態モデル

図1は、現在ICRPから公表されているヨウ素に関するICRP Publication 56 動態モデル(現モデル) [7, 12]である。血液に取り込まれた無機形ヨウ素の30%が甲状腺に、70%が膀胱に移行し、膀胱から尿中に排泄される。甲状腺に取り込まれたヨウ素は有機形ヨウ素として滞留し、一部が甲状腺から甲状腺外の他の体内組織に移行し、さらに甲状腺外の組織から血液あるいは大腸上部に移行するモデルとなっている。大腸上部に移行したヨウ素は糞中に排泄される。図1中の数字は、

成人の場合の各コンパートメント間のヨウ素の移行定数[1/d]である。現モデルにおける移行定数は年齢依存を考慮した値となっている。詳細は文献7, 12で見ることができる。

現モデル公表後のヨウ素の体内挙動に関する新たな研究成果・知見に基づき、図2に示すより詳細な新モデルが提案された[8]。体内に摂取されたヨウ素は大部分がヨウ素イオンとして血液に取り込まれ、無機形ヨウ素のまま唾液腺、胃壁、甲状腺、肝臓、腎臓、膀胱、その他軟組織に移行する。甲状腺に取り込まれた無機形ヨウ素の大部分が有機形ヨウ素となり、有機形ヨウ素となった一部は血液を介して肝臓、腎臓、その他の軟組織に移行・滞留・循環するモデルとなっている。ヨウ素が糞中に排泄される経路は、肝臓に滞留した有機形ヨウ素の一部が胆汁を介して大腸に移行する経路として組み込まれている。体内中のヨウ素を無機形ヨウ素と有機形ヨウ素で区別して取り扱うため、血液、甲状腺、肝臓、腎臓、軟組織に対して無機形ヨウ素と有機形ヨウ素のコンパートメントが定義されている。図2中の数字は、成人の場合に設定された各コンパートメント間のヨウ素の移行定数[1/d]である。新モデルにおいても移行定数は年齢依存を考慮したモデルとなっている[8]。新モデルでは、5歳児(成人 括弧内: 以下同様)に対する甲状腺、甲状腺外組織の生物学的半減期(同位体に共通)として、研究成果

に基づきそれぞれ 30 日 (90 日), 5 日 (7 日) の値が設定されている。

新モデルを使用した甲状腺におけるヨウ素の取り込み抑制効果は, 甲状腺の無機形ヨウ素コンパートメントから有機形ヨウ素コンパートメントへの移行定数を変化させることで模擬する。本解析では, 安定ヨウ素剤を投与しその効果が持続している間は, この移行定数をゼロにすることで, 甲状腺における有機形ヨウ素コンパートメントへのヨウ素の取り込みを完全に阻止する。

2.2 放射性ヨウ素の放出放射線エネルギーおよび実効半減期

表 1 に, 本稿で解析対象とした放射性ヨウ素同位体 ^{129}I , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I 核種の壊変形式, 物理的半減期, および, 1 壊変当たり放出される電子, γ 線の放出エネルギーを示す[15]。 ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I 核種の物理的半減期は短く, 1 日未満であり, また, 放出される γ 線のエネルギーは ^{129}I , ^{131}I に比べて高い。

表 1 放射性ヨウ素壊変情報 [15]

核種	物理的半減期	壊変形式	1 壊変当たりの放出エネルギー (MeV)	
			電子	γ 線
^{129}I	1.57×10^7 y	β^-	0.0651	0.0252
^{131}I	8.0207 d	β^-	0.1918	0.3828
^{132}I	2.295 h	β^-	0.4930	2.2645
^{133}I	20.8 h	β^-	0.4142	0.6120
^{134}I	52.5 m	β^-	0.5776	2.5953
^{135}I	6.57 h	β^-	0.3465	1.5815

表 2 新モデルにおける実効半減期

核種	実効半減期 (d)			
	甲状腺		甲状腺外	
	5 歳児	成人	5 歳児	成人
^{129}I	30	90	5.0	7.0
^{131}I	6.3	7.4	3.1	3.7
^{132}I	0.095	0.096	0.094	0.094
^{133}I	0.84	0.86	0.74	0.77
^{134}I	0.036	0.036	0.036	0.036
^{135}I	0.27	0.27	0.26	0.26

表 2 はこれらの核種に関する新モデルで与えられた甲状腺および甲状腺外組織の生物学的半減期を用いて求めた実効半減期である。 ^{129}I , ^{131}I の核種は体内に摂取された後, 数日以上にわたって体内に存在するが, その他の核種は 1 日未満で大部分が体内から消滅することになる。

2.3 残留放射能の評価

放射性ヨウ素注入後の体内の組織・器官における残留放射能の評価は, 新モデルで定義された組織・器官 (以下, 線源器官) のコンパートメントに関して行い, コンパートメント間の放射性ヨウ素の移行および自然壊変による消滅を考慮した (1) 式の微分方程式で求める。

$$\frac{dq_{Sj}(t, t_0)}{dt} = I_{Sj}(t) + \sum_{S'} \lambda_{S' \rightarrow S} \cdot q_{S'j}(t, t_0) + \sum_j \lambda_j \cdot q_{Sj}(t, t_0) - \sum_{S''} \lambda_{S \rightarrow S''} \cdot q_{Sj}(t, t_0) - \lambda_j \cdot q_{Sj}(t, t_0) \quad (1)$$

ここで, $q_{Sj}(t, t_0)$ は, 年齢 t_0 において放射性核種 j を摂取したとき, 摂取後の年齢 t における線源器官 S での核種 j の残留放射能[Bq]である。(1) 式の右辺第 1 項は年齢 t における単位時間当たりの線源項 (供給項), 第 2 項は核種 j が線源器官 S' から線源器官 S に移行して来る流入項で, $\lambda_{S' \rightarrow S}$ はその移行速度である。第 3 項は放射性核種 j が壊変し放射性核種 j が生成される供給項で, λ_j は核種 j の壊変定数である。第 4 項は線源器官 S から線源器官 S'' へ核種 j が移行する流出項, 第 5 項は核種 j の自然壊変による消滅項であり, λ_j は核種 j の壊変定数である。図 1, 2 に示すように, 核種の体内挙動を模擬するためのコンパートメントは複数で構成されているため残留放射能を評価する方程式は連立微分方程式となる。微分方程式は各線源領域に取り込まれる放射性核種の放射能を初期値として解かれる。本解析では瞬間的な無機形ヨウ素血液コンパートメントの体内摂取を仮定する。

2.4 等価線量・実効線量の評価[14]

放射性ヨウ素の体内摂取で内部被ばくする組織・器官 (以下, 標的器官) の等価線量, および実効線量は, ICRP の内部被ばく評価モデル[14]に従い, 各線源器官の残留放射能を用いて下記の (2), (3) 式で評価する。

放射性核種 j を年齢 t_0 で摂取した後の年齢 t における標的器官 T の等価線量を $H_T(t, t_0)$, および,

実効線量を $E(t, t_0)$ とし、線源器官 S での残留放射能 $q_{Sj}(t, t_0)$ を既知としたとき、等価線量 $H_T(t, t_0)$ の時間変化は微分方程式

$$\frac{dH_T(t, t_0)}{dt} = \sum_S \sum_j q_{Sj}(t, t_0) \cdot SEE(T \leftarrow S; t)_j \quad (2)$$

で表されるとする。ここで、 $SEE(T \leftarrow S; t)_j$ は比実効エネルギー[16]であり、年齢 t において線源器官 S に存在する放射性核種 j が 1 壊変したときに放出される放射線のエネルギーが標的器官 T に吸収される量である。

等価線量 $H_T(t, t_0)$ は、この微分方程式を積分して

$$H_T(t, t_0) = \int_{t_0}^t \left\{ \frac{dH_T(t', t_0)}{dt'} \right\} dt' \quad (3)$$

から得られる。

等価線量が求められれば、実効線量は

$$E(t, t_0) = \sum_T w_T H_T(t, t_0) \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 w_T は標的器官 T の組織荷重係数である。

摂取後の積分時間は70歳までが基準として採られ、その期間に対応する等価線量、実効線量をそれぞれ、預託等価線量、預託実効線量と呼ぶ[9, 11]。

3. 計算結果と考察

ヨウ素の体内挙動に関する新モデルを用い、 ^{129}I 、 ^{131}I 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{134}I 、 ^{135}I の 6 核種について評価を行った 5 歳児、成人の標準人に関する血液注入による内部被ばく線量を、現モデルの評価値と比較しながら議論する。その結果を基に、新モデルの特徴を活用し、甲状腺へのヨウ素の取り込み抑制過程を模擬した時間解析を行い、放射性ヨウ素注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の内部被ばく線量係数の低減効果と被ばく条件の違いの影響について評価し、その要因を考察する。

3.1 新モデルによる放射性ヨウ素の預託線量係数

表 3 に、新モデルで評価した 1Bq の放射性ヨウ素が血液注入で体内に瞬間摂取された場合の、各放射性ヨウ素同位体に関する甲状腺預託等価線量係数と預託実効線量係数を示す。

ICRP1990 年勧告[9]で与えられている甲状腺の組織荷重係数 0.05 を用いて求めた、預託実効線量に占める甲状腺預託等価線量の寄与率は、5 歳児（成人）について ^{129}I 、 ^{131}I 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{134}I 、 ^{135}I

の各核種に対してそれぞれ 1.0(1.0)、1.0(0.99)、0.86(0.70)、0.98(0.95)、0.77(0.55)、0.94(0.85) である。5 歳児についてはどの核種も、成人に関しては ^{132}I と ^{134}I の核種を除いて、預託実効線量の大部分が甲状腺の被ばくによるものといえる。

表 4 は、新モデルで評価した各放射性ヨウ素の甲状腺預託等価線量係数と預託実効線量係数の現モデルで評価された値に対する比率を示す。新モデルで評価される 5 歳児および成人の内部被ばく線量係数は、現モデルと比べてほぼ同じかあるいは若干高めであり、モデルの変更でこれら線量係数には著しい違いはない。ただし、 ^{132}I と ^{134}I の核種に関しては、線量係数が現モデルに比べて高めの傾向になっている。

表 3 新モデルによる血液注入の預託線量係数

核種	新モデルによる預託線量係数 (Sv/Bq)			
	5 歳児		成人	
	甲状腺 等価線量	実効線量	甲状腺 等価線量	実効線量
^{129}I	4.6E-6	2.3E-7	2.5E-6	1.2E-7
^{131}I	2.2E-6	1.1E-7	4.5E-7	2.3E-8
^{132}I	3.1E-8	1.8E-9	5.6E-9	4.0E-10
^{133}I	5.1E-7	2.6E-8	9.1E-8	4.8E-9
^{134}I	8.0E-9	5.2E-10	1.5E-9	1.3E-10
^{135}I	1.1E-7	5.9E-9	2.0E-8	1.2E-9

表 4 血液注入に関する内部被ばく線量の新モデル対現モデルの比率

核種	新モデル線量係数 / 現モデル線量係数			
	5 歳児		成人	
	甲状腺 等価線量	実効線量	甲状腺 等価線量	実効線量
^{129}I	1.3	1.3	1.2	1.1
^{131}I	1.1	1.1	1.0	1.0
^{132}I	1.2	1.3	1.2	1.4
^{133}I	1.1	1.1	1.1	1.1
^{134}I	1.5	1.6	1.5	1.8
^{135}I	1.1	1.2	1.1	1.2

現モデルによる内部被ばく線量の評価は、ICRP Publication 60 1990 年勧告[9]に従った内部被ばく線量評価コード IDEC (Internal Dose Easy Calculation code) [17]を用いて行った

図 3 は、放射性ヨウ素 ^{131}I と ^{132}I の核種に関する血液注入した場合の、新モデルで評価した 5 歳児の各標的器官の預託等価線量・預託実効線量の現モデルの評価値に対する比率である。

新モデルで評価される食道、胃壁、腎臓、肝臓、胸腺の標的器官の等価線量は、現モデルに比べて数倍以上高くなっている。これは、新モデルでは食道や胸腺に近い唾液腺、また、胃壁、腎臓、肝臓の器官が線源器官として個別に定義されているが、現モデルではこれらの器官が線源器官として定義されていないためと考えられる。

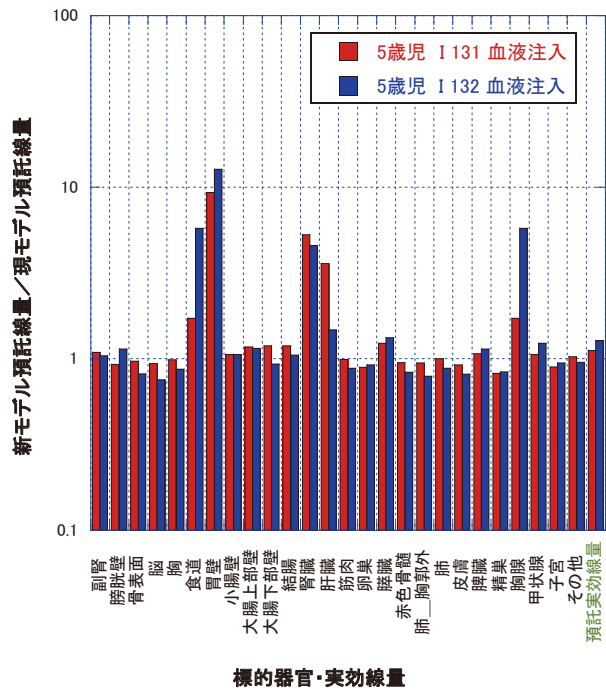


図 3 新モデルで評価した 5 歳児を対象とする ^{131}I , ^{132}I 血液注入の各標的器官預託等価線量および実効線量の現モデルに対する比率

なお、新モデルが報告された文献 8 に、 ^{129}I , ^{131}I , ^{134}I の核種に関する、血液注入時の 5 歳児 (成人) の甲状腺の預託等価線量の現モデルで求めた値に対する比率が報告されており、 ^{129}I , ^{131}I , ^{134}I の核種に対してそれぞれ 1.3 (1.2), 1.1 (1.0), 1.5 (1.5) となっている。これらの値は 5 歳児・成人に関する本解析で評価した値といずれも同じであり、本解析のために作成した評価プログラムへの新モデルの組み込みは妥当に行われてい

ると判断できる。

3.2 安定ヨウ素剤を投与した場合の線量低減率

放射性ヨウ素を体内摂取したときの内部被ばく線量を低減するために行われる安定ヨウ素剤投与の効果は、新モデルを用いて評価した。

ICRP Publication 63 [18]によると 1 回の投与で 2 ~ 3 日間効果があり、また、服用ガイドブック [3]によると服用回数は原則 1 回であり、内部被ばくの期間が 24 時間以上にわたる場合には、24 時間以上の期間を空けて服用することを推奨している。経口投与して効果が始まるのは投与後 30 分であることが報告されている [1]。

本解析では、安定ヨウ素剤投与後直ちに効果が始まるとし、投与と同時に甲状腺の有機形コンパートメントへの放射性ヨウ素の移行は無くなり、その効果は文献 18 をもとに 2 日間持続するとした。

安定ヨウ素剤の効果は、投与時刻が放射性ヨウ素を血液注入した直後、および、注入から 30 分後、1 時間後、3 時間後、5 時間後、7 時間後、10 時間後、15 時間後、24 時間後の 9 時刻の場合について評価した。

図 4a および図 4b にそれぞれ預託実効線量、甲状腺の預託等価線量に関する、安定ヨウ素剤を投与した場合の ^{129}I , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I 核種の 5 歳児、成人の線量低減率を示す。図中の曲線は解析データ点をスプライン補間した線である。

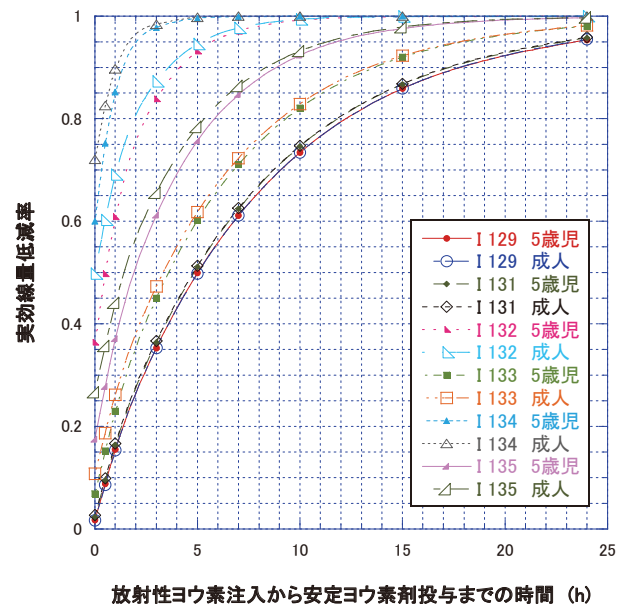


図 4a 血液注入から安定ヨウ素剤投与までの経過時間と実効線量低減率の関係

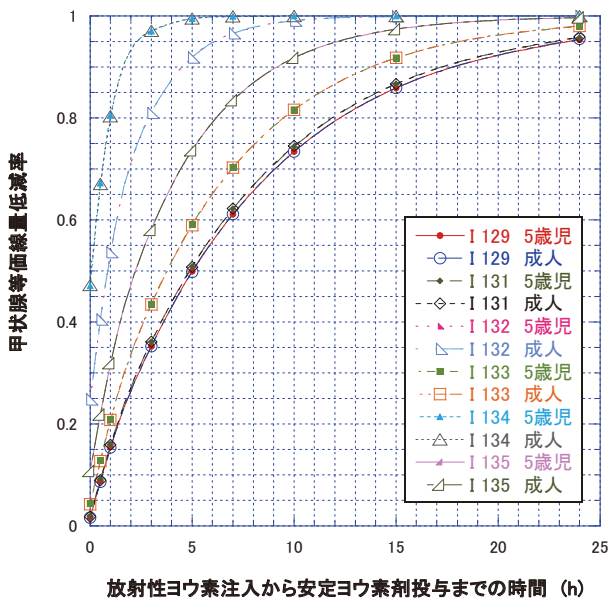


図 4b 血液注入から安定ヨウ素剤投与までの経過時間と甲状腺等価線量低減率の関係

線量低減率は、安定ヨウ素剤を投与しない場合の被ばく線量に対する投与した場合の被ばく線量の比率で定義する。低減率が 0 に近いほど低減効果が大きく、1 に近いほど低減効果が無いことになる。

実効線量に関する線量低減率は、5 歳児と成人とで年齢依存性が区別できるが、甲状腺の等価線量については年齢による違いは区別できない。

半減期が長い核種ほど、注入直後に安定ヨウ素剤を投与した場合に低減効果は大きい。 ^{129}I 、 ^{131}I 核種の低減率は 0.05 未満であるが、半減期が 1~2 時間である ^{132}I 、 ^{134}I 核種の低減率は 0.3 前後から 0.6 前後で安定ヨウ素剤投与の効果は小さい。

^{131}I 核種に関しては多くの文献[1~3, 18]で報告されているように、注入後 5 時間後の投与で低減率は約 0.5 となるため、被ばく線量を低減するためには、放射性ヨウ素を体内摂取した直後にできるだけ早く（2~3 時間以内 [1]）安定ヨウ素剤を投与することが望まれる。

現モデルを用い、甲状腺に取り込まれる放射性ヨウ素と安定ヨウ素の体内挙動を同時に解析して求めた安定ヨウ素剤を投与した場合の放射性ヨウ素の甲状腺摂取率の抑制効果の結果が文献 5 に報告されている。 ^{131}I 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{134}I 、 ^{135}I 核種の成人に関する、体内摂取後の安定ヨウ素剤の投与時刻と甲状腺における放射性ヨウ素残留放射能の低減率の関係をグラフから読み取ると、投与時間が摂取後 5 時間の場合の値は、それぞれ 0.42, 0.85, 0.50, 0.95, 0.65 である。図 4b に示す本解析の線量低減率とほぼ同じ値である。

図 5 は、放射性ヨウ素 ^{131}I および ^{132}I に関する、5 歳児に血液注入した直後に安定ヨウ素剤を投与した場合の各標的器官の等価線量と実効線量の低減率を示したものである。 ^{131}I の場合は、甲状腺に ^{131}I が取り込まれることが抑制されると膀胱壁、胃壁を除く多くの標的器官の等価線量および実効線量において低減効果が確認されるが、 ^{132}I の場合は、甲状腺の等価線量と実効線量には低減効果が認められるものの、それ以外の標的器官の等価線量の低減効果は認められず、むしろわずかに被ばく線量が大きくなることを示している。

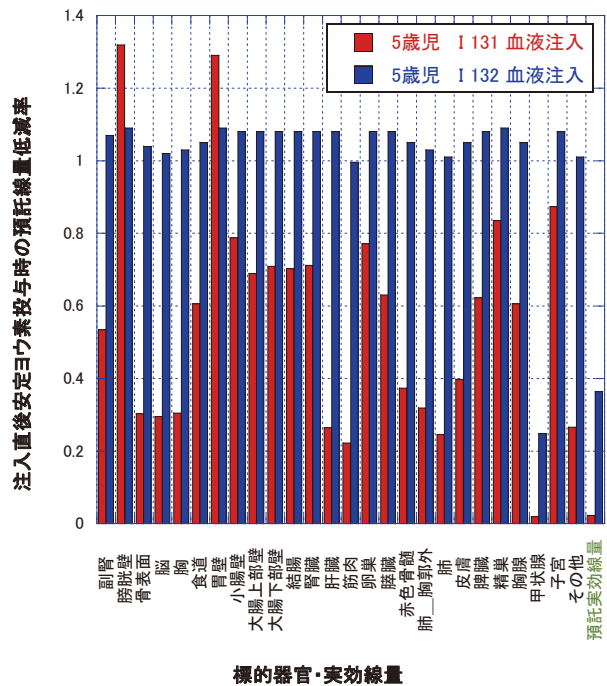


図 5 5 歳児に関する ^{131}I 、 ^{132}I 血液注入直後に安定ヨウ素剤を投与した場合の各標的器官の等価線量および実効線量の低減率

次に、放射性ヨウ素の体内摂取が瞬時に起こるのではなく、体内への摂取が連続して起こる状況を想定し、1 Bq の放射性ヨウ素の体内摂取が血液注入により 2 日間にわたり一様に連続的に起こる場合の解析を行った。

図 6a および図 6b は、 ^{131}I 、 ^{132}I の核種が 2 日間にわたり連続的に摂取された場合の、それぞれ預託実効線量、甲状腺の預託等価線量の 5 歳児、成人に関する線量低減率である。解析した安定ヨウ素剤投与の時刻は、血液注入開始直後、および、注入開始から 30 分後、1 時間後、3 時間後、5 時間後、7 時間後、10 時間後、15 時間後、24 時間後の 9 時刻である。

1 回の投与による甲状腺への取り込み抑制有効

時間が2日である場合には、体内摂取開始から投与までの時間が24時間の範囲では、 ^{131}I に関する実効線量、甲状腺の等価線量の低減率はいずれも5歳児、成人とも0.2~0.35程度、 ^{132}I については実効線量（甲状腺の等価線量）の低減率は、5歳児が0.4~0.6（0.3~0.55）、成人が0.5~0.7（0.3~0.55）程度であり、解析で仮定した2日間の有効期間・2日間の連続摂取の場合では1回限りの安定ヨウ素剤投与の効果は充分でない。

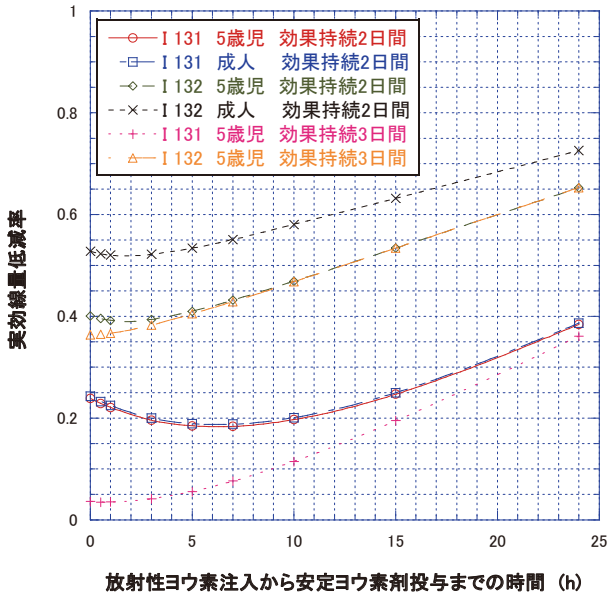


図 6a 2日間連続注入の場合の注入開始から安定ヨウ素剤投与までの経過時間と実効線量低減率の関係

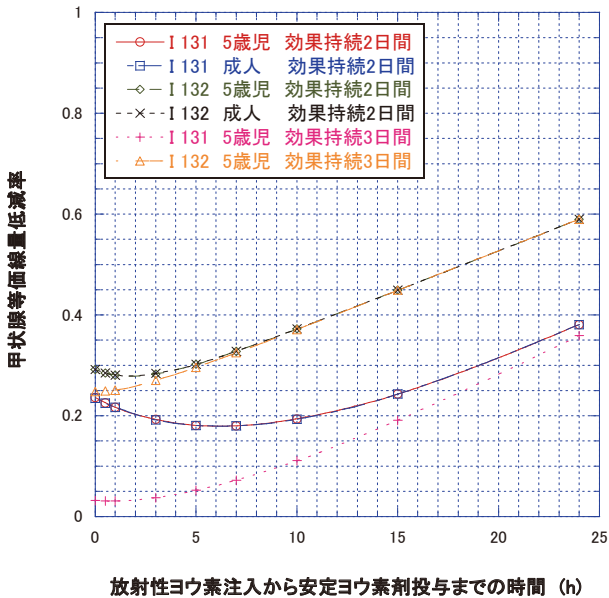


図 6b 2日間連続注入の場合の注入開始から安定ヨウ素剤投与までの経過時間と甲状腺等価線量低減率の関係

そこで複数回投与することを想定し、1回の投与の有効期間を3日間とした場合の解析結果を図6a、図6b中に示した。 ^{131}I 核種においては、放射性ヨウ素の体内摂取が連続的に起こる場合に、摂取開始後できるだけ早く安定ヨウ素剤を投与し、かつ投与の効果が摂取の期間中にわたり持続するようにした場合には実効線量、甲状腺の等価線量とも投与による低減効果が期待されるが、短半減期核種である ^{132}I の場合は、たとえ複数回の投与により効果を持続したとしても安定ヨウ素剤投与による被ばく線量の低減効果は限定的であることを示している。

以下の節では、物理的半減期が数時間未満の放射性ヨウ素と数日以上放射性ヨウ素とでは安定ヨウ素剤を投与した場合の線量低減効果が異なる要因を考察する。

3.3 安定ヨウ素剤を投与しない場合の甲状腺等価線量・実効線量の時間変化

放射性ヨウ素が体内に摂取された場合の内部被ばく線量は、甲状腺の被ばく線量の寄与が大きい。したがって、安定ヨウ素剤投与による被ばく線量の低減効果は甲状腺の被ばく線量を低減することで達成できる。3.2節で示したように、安定ヨウ素剤投与による低減効果は、放射性ヨウ素摂取後の投与時間に大きく依存する。この要因を、安定ヨウ素剤を投与しない場合の甲状腺の等価線量および甲状腺における放射性ヨウ素の残留放射能の時間変化から検討する。

図7a、7bはそれぞれ5歳児、成人に関する安定ヨウ素剤を投与しない場合の各放射性ヨウ素同位体に対する甲状腺等価線量の時間変化を示す。

5歳児（成人）に対する甲状腺等価線量が預託等価線量（グラフ右端収束値）の50%に達する血液注入後の時刻（日）は、 ^{129}I 、 ^{131}I 、 ^{132}I 、 ^{133}I 、 ^{134}I 、 ^{135}I のそれぞれの核種について40(120)、6.9(7.9)、0.18(0.18)、1.1(1.1)、0.071(0.071)、0.44(0.45)であり、同様に90%に達する時刻（日）は138(404)、22(25)、0.43(0.44)、3.1(3.1)、0.18(0.18)、1.1(1.1)である。等価線量は甲状腺に存在する放射性ヨウ素の残留放射能の積分値であるため、等価線量は甲状腺に滞留する残留放射能の時間変化に大きく依存する値である。

図8a、8bはそれぞれ5歳児、成人に関する安定ヨウ素剤を投与しない場合の甲状腺における各放射性ヨウ素同位体の残留放射能の時間変化を示す。

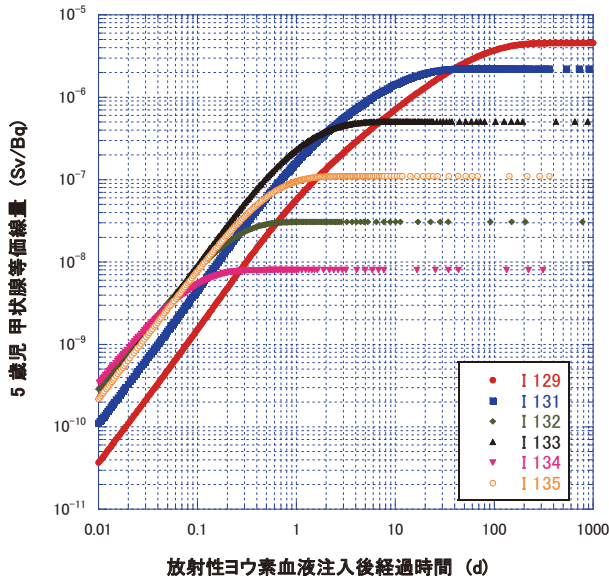


図 7a 5 歳児に関する安定ヨウ素剤を投与しない場合の、血液注入後の経過時間と甲状腺等価線量の関係

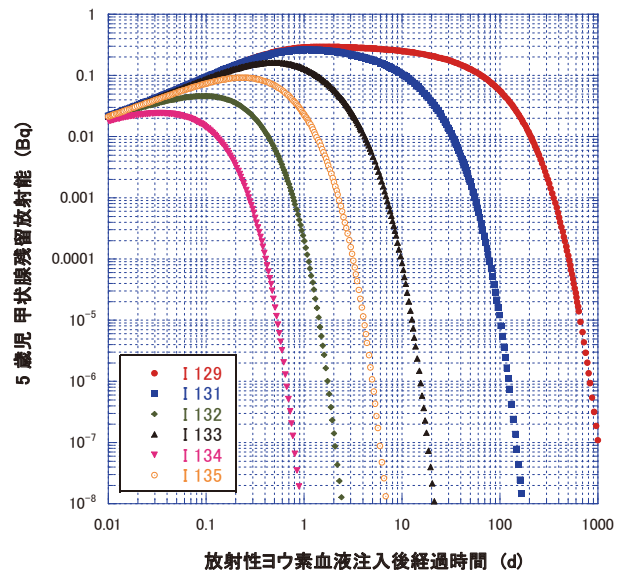


図 8a 5 歳児に関する安定ヨウ素剤を投与しない場合の、血液注入後の経過時間と甲状腺残留放射能の関係

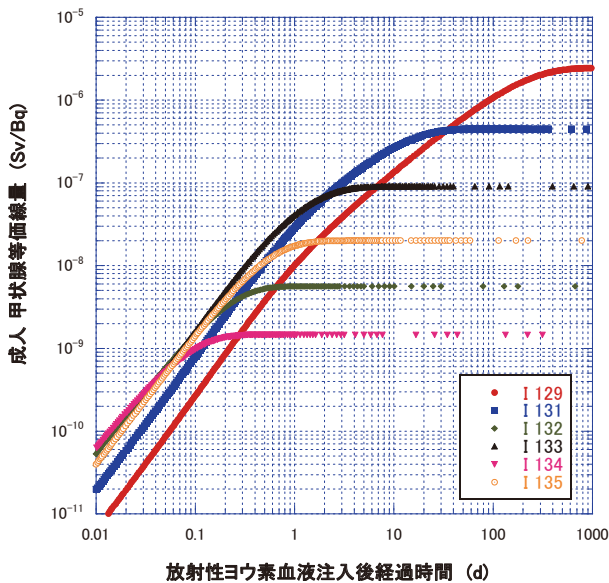


図 7b 成人に関する安定ヨウ素剤を投与しない場合の、血液注入後の経過時間と甲状腺等価線量の関係

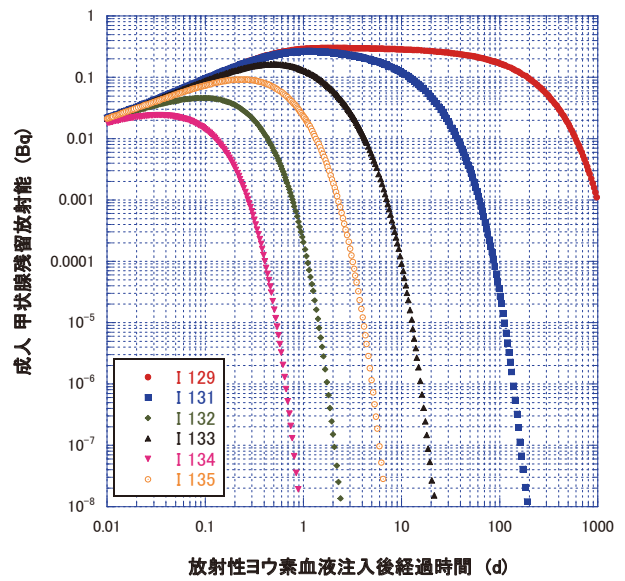


図 8b 成人に関する安定ヨウ素剤を投与しない場合の、血液注入後の経過時間と甲状腺残留放射能の関係

5 歳児 (成人) に対する甲状腺の残留放射能が最大残留値の 50 % に達する血液注入後の時刻 (日) は, ^{129}I , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I のそれぞれの核種について 0.19(0.20), 0.17(0.17), 0.013(0.013), 0.088(0.088), 0.0041(0.0041), 0.039(0.039) であり, 同様に 90 % に達する時刻 (日) は 0.66(0.70), 0.55(0.55), 0.051(0.051), 0.28(0.28), 0.017(0.017), 0.13(0.13) である。

放射性ヨウ素が血液注入で体内に摂取された場合, 甲状腺の残留放射能は非常に短い時間で最大となり, 長半減期の ^{129}I でさえも注入後 1 日未滿で最大残留量に達している。したがって, 安定ヨウ素剤の投与により内部被ばく線量を低減するためには, 放射性ヨウ素が甲状腺に取り込まれ長期間にわたり有機形ヨウ素として残留する前に, すなわち, 甲状腺に有機形ヨウ素として取り込まれる前に甲状腺への取り込みを阻止しなければならない。3.2 節で述べたように, ^{131}I に関す

る本解析では、血液注入後 5 時間後に投与した場合の低減率は約 0.5 でしかない。

3.4 安定ヨウ素剤を投与した場合の残留放射能の時間変化

放射性ヨウ素が環境中に放出された際の内部被ばくの影響が最も重大である ^{131}I について、内部被ばくの影響が成人よりも大きい 5 歳児を対象に、血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の体内の主な組織における ^{131}I の残留放射能の時間変化を新モデルで解析し、安定ヨウ素剤投与の効果を検討する。

以下に示す結果は、安定ヨウ素剤の投与と同時に甲状腺の有機形コンパートメントへの ^{131}I の移行が無くなり、その移行阻止効果は 2 日間持続すると仮定した解析結果である。

図 9a, 9b, 9c はそれぞれ、 ^{131}I の血液注入後の血液内無機形ヨウ素、血液内有機形ヨウ素、血液内無機形・有機形ヨウ素の合計に関する残留放射能の時間変化である。

血液内無機形ヨウ素の残留放射能は、図 9a に示すように、安定ヨウ素剤を投与した場合には、安定ヨウ素剤を投与しない場合に比べて投与と同時に高値になり、尿を介して体外に排泄されて減少していく。移行阻止有効期間を越えて安定ヨウ素剤の効果が消滅すると、甲状腺有機形コンパートメントから血液内有機形ヨウ素コンパートメントへの ^{131}I の移行が図 2 の対応経路の非常に小さい移行定数のもとでゆっくり回復し、血液内有機形ヨウ素コンパートメントから肝臓、腎臓、

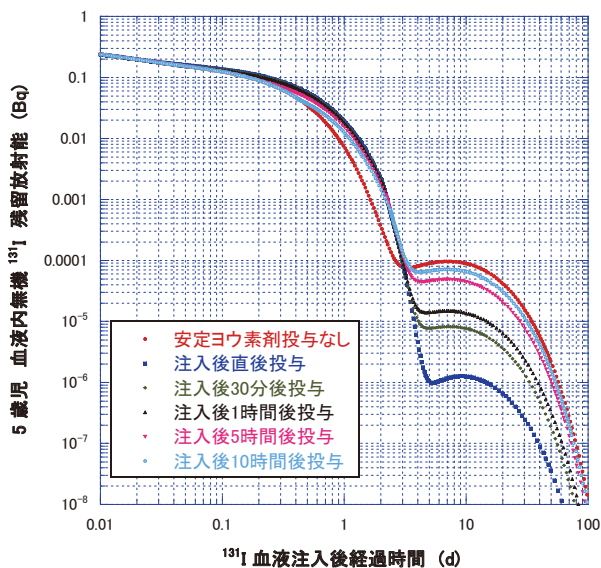


図 9a 5 歳児に関する血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、注入後の血液内無機形 ^{131}I の残留放射能時間変化

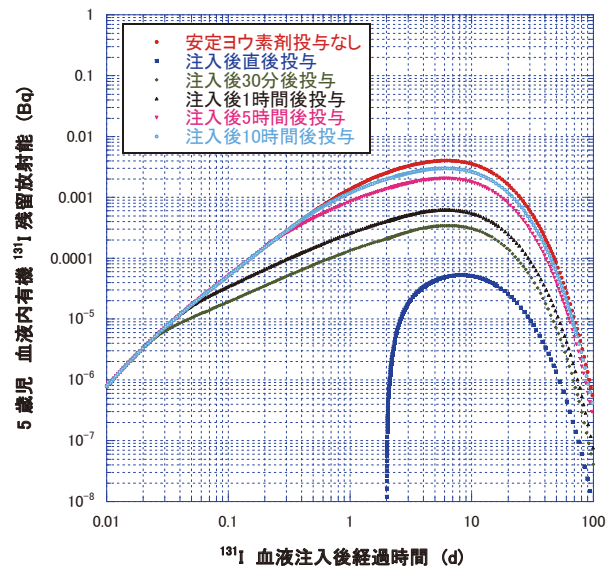


図 9b 5 歳児に関する血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、注入後の血液内有機形 ^{131}I の残留放射能時間変化

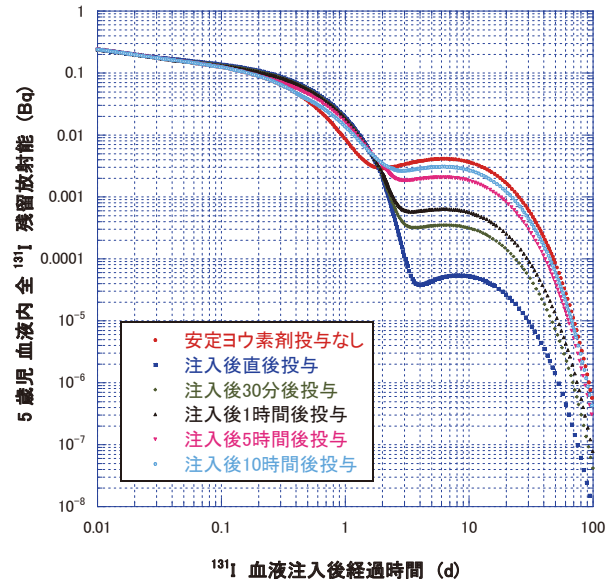


図 9c 5 歳児に関する血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、注入後の血液内全 ^{131}I の残留放射能時間変化

その他の組織への ^{131}I の移行が始まり、それらの組織から血液への循環を通して、再び無機形 ^{131}I が血液内無機形ヨウ素コンパートメントに供給されるため (図 2 の臓器・組織無機ヨウ素から血液無機ヨウ素に向かう紺矢印)、残留放射能は増加に転じ、続いて他の組織へ移行するため次第に減少していく。

血液内有機形ヨウ素の残留放射能は、図 9b に示すように、安定ヨウ素剤の投与と同時に ^{131}I の甲状腺有機形コンパートメントへの移行が阻止されて、血液内有機形ヨウ素コンパートメントへ

の ^{131}I の供給が減少するために、安定ヨウ素剤を投与しない場合に比べて低値となるが、肝臓・腎臓・その他の組織有機ヨウ素からの供給もあるため、増加は持続する。移行阻止有効時間 (2 日) が経過し安定ヨウ素剤の効果が消滅すると、有機形ヨウ素 ^{131}I の供給元である甲状腺内有機形ヨウ素の残留放射能が増加し、血液内有機形ヨウ素コンパートメントへの ^{131}I の移行は増えるが、甲状腺内有機形ヨウ素の残留放射能が最大値に達して減少し始めるとともに (後述の図 10b 参照)、

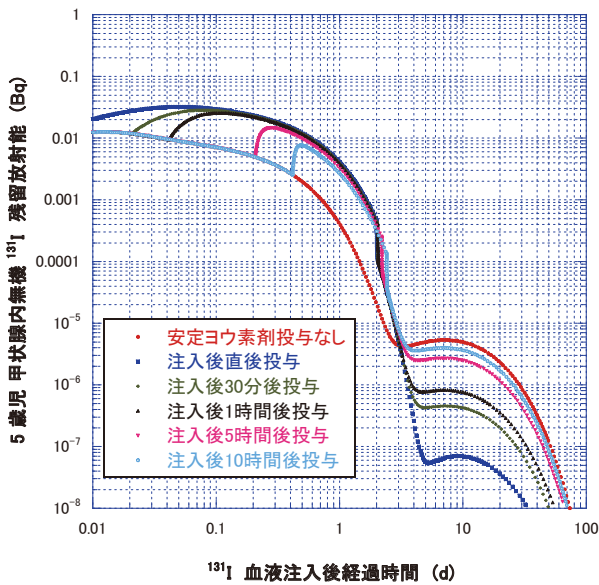


図 10a 5 歳児に関する血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、注入後の甲状腺内無機 ^{131}I の残留放射能時間変化

血液内有機形ヨウ素の残留放射能は減少する。

図 9a, 9b, 9c を比較すると、血液内に長期的に残留する ^{131}I の形態は有機形ヨウ素であり、無機形のヨウ素の 10 倍以上である。血液注入後 5 時間後あるいは 10 時間後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、安定ヨウ素剤の効果が消滅した注入後の時間における血液内の無機形、有機形、および、それらを合計した ^{131}I の残留放射能は、いずれも投与しない場合の残留放射能の時間変化に非常に接近している。

図 10a, 10b, 10c はそれぞれ、 ^{131}I の血液注入後の甲状腺内無機形ヨウ素、甲状腺内有機形ヨウ素、甲状腺内無機形・有機形ヨウ素の合計に関する残留放射能の時間変化である。

甲状腺内無機形ヨウ素の残留放射能は、図 10a に示すように、安定ヨウ素剤の投与と同時に ^{131}I の甲状腺有機形コンパートメントへの移行が阻止されるため、安定ヨウ素剤を投与しない場合に比べて段階的に増加するが、血液内無機形ヨウ素コンパートメントへの移行があるため次第に減少していく。安定ヨウ素剤の効果が消滅すると、甲状腺有機形コンパートメントから血液内有機形ヨウ素コンパートメントへの ^{131}I の移行量が回復するため、血液内有機形ヨウ素コンパートメントからの循環を介して、血液内無機形ヨウ素コンパートメントから ^{131}I の供給が回復し残留放射能は再び増加に転じるが、血液への移行があるため次第に減少している。

甲状腺内有機形ヨウ素の残留放射能は、図 10b

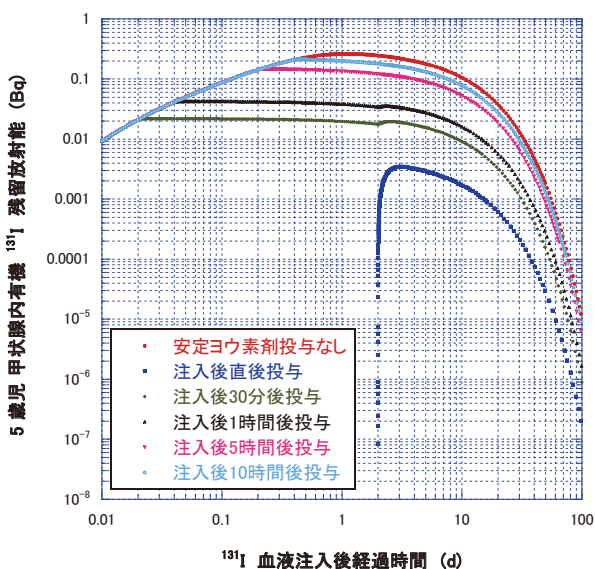


図 10b 5 歳児に関する血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、注入後の甲状腺内有機形 ^{131}I の残留放射能時間変化

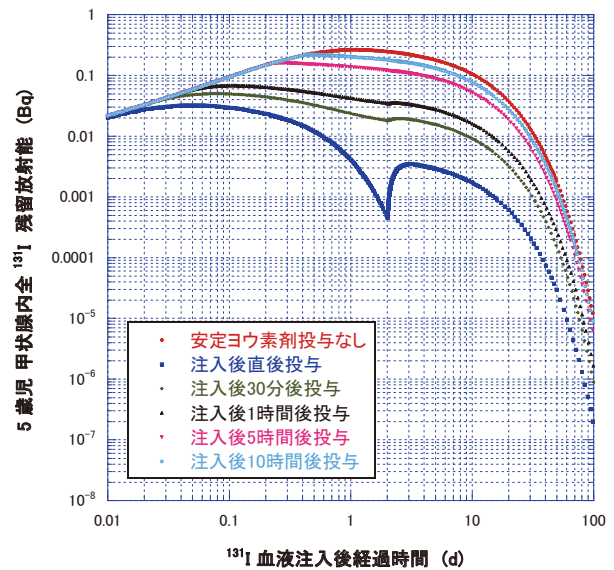


図 10c 5 歳児に関する血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、注入後の甲状腺内全 ^{131}I の残留放射能時間変化

に示すように、安定ヨウ素剤の投与と同時に甲状腺有機形コンパートメントの ^{131}I の移行が阻止されて甲状腺内有機形ヨウ素コンパートメントへの供給がなくなるため、安定ヨウ素剤を投与しない場合に比べて減少する。安定ヨウ素剤の効果が消滅すると、甲状腺有機形コンパートメントへの ^{131}I の移行が再開されるため、甲状腺内有機形ヨウ素の残留放射能は再び増加する。その後、甲状腺の生物学的半減期で残留放射能は減少する。

図 10a, 10b, 10c から、甲状腺内に長期にわたって残留する ^{131}I の形態は大部分が有機形ヨウ素であることが分かる。したがって、甲状腺の等価線量を低減するためには甲状腺内に残留する有機形ヨウ素をできるだけ少なくすることが必要になる。

血液注入後 5 時間後あるいは 10 時間後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、安定ヨウ素剤の効果が消滅した注入後の時間における甲状腺内の無機形、有機形、および、それらを合計した ^{131}I の残留放射能は、血液内の ^{131}I の残留放射能と同様、投与しない場合の残留放射能の時間変化に近接しており、血液注入後 5 時間以上経過して安定ヨウ素剤を投与する処方は、被ばく線量の低減効果が期待されないことを示している。

続いて、新モデルで線源器官として個別に定義された組織の一つである肝臓に関して ^{131}I の残留放射能の時間変化を示す。図 11a, 11b, 11c はそれぞれ、 ^{131}I の血液注入後の肝臓内無機形ヨウ素、肝臓内有機形ヨウ素、肝臓内無機形・有機形ヨウ素の合計の残留放射能の時間変化である。

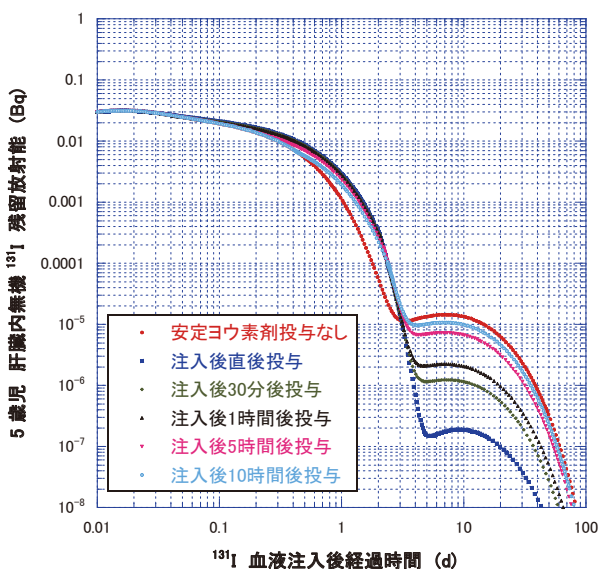


図 11a 5 歳児に関する血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、注入後の甲状腺内無機形 ^{131}I の残留放射能時間変化

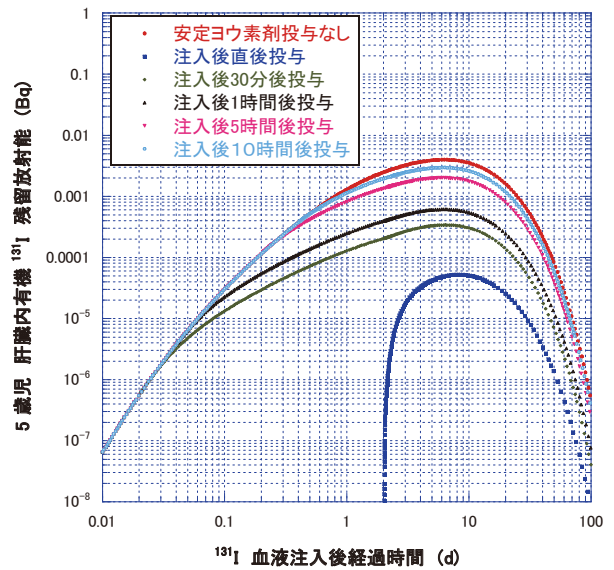


図 11b 5 歳児に関する血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、注入後の甲状腺内有機形 ^{131}I の残留放射能時間変化

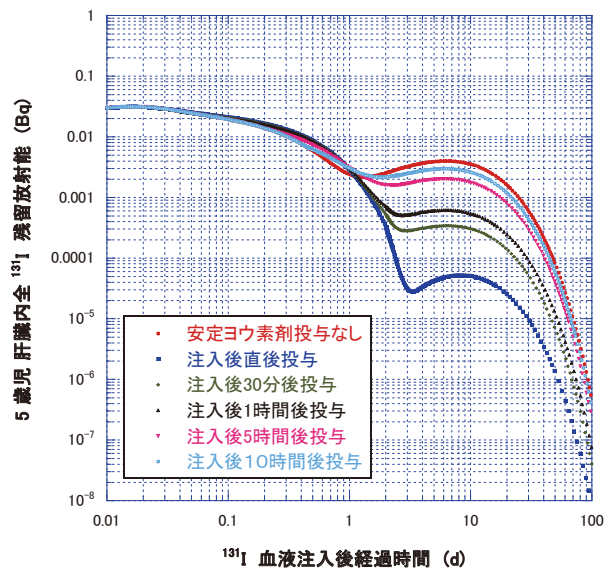


図 11c 5 歳児に関する血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、注入後の肝臓内全 ^{131}I の残留放射能時間変化

肝臓内無機形ヨウ素への ^{131}I の供給元は血液無機形ヨウ素、肝臓内有機形ヨウ素への供給元は血液有機形ヨウ素、そして、肝臓内無機形ヨウ素からの移行先は血液無機形ヨウ素、肝臓内有機形ヨウ素からの移行先は大腸上部である。このため、肝臓内無機形ヨウ素、肝臓内有機形ヨウ素、および、その合計の残留放射能の時間変化は、それぞれ供給元の血液無機形ヨウ素、血液有機形ヨウ素の残留放射能の時間変化を反映するため、血液に

類似した時間変化を示している。

最後に図 12 に、安定ヨウ素剤を投与した場合の体全体の ^{131}I 残留放射能の時間変化を示す。安定ヨウ素剤の抑制効果は 2 日間としているため、効果が無くなった時間後は、血液内に残留していた ^{131}I が甲状腺内に取り込まれ有機形ヨウ素として滞留するため、無機形ヨウ素に比べて減少が緩やかになり、やがて生物学的半減期で次第に体内から消滅している。 ^{131}I が残留している組織は主に甲状腺である。無機形ヨウ素に比べて有機形のヨウ素は長期間体内残留し、その放射性ヨウ素により内部被ばく線量が増大することになる。放射性ヨウ素の血液注入後直ちに安定ヨウ素剤を投与しなければ、体内に有機形のヨウ素が残留することになり、投与しない場合と比べて被ばく線量は顕著には低減しないことになる。

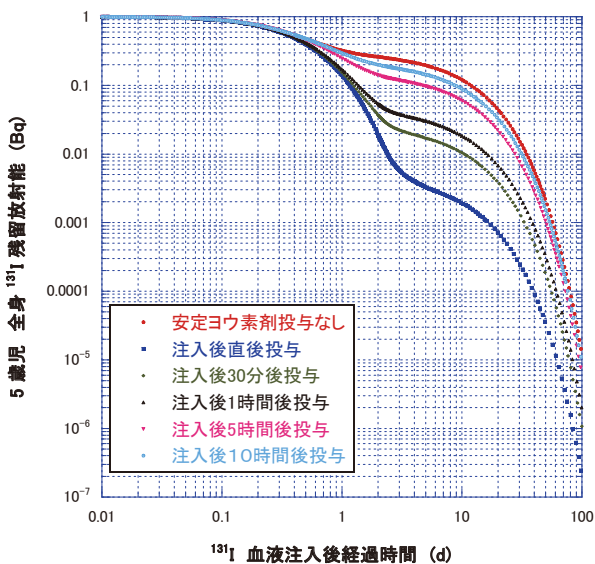


図 12 5 歳児に関する血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の、注入後の全身中の ^{131}I の残留放射能時間変化

4. まとめ

ICRP から現在公表されている放射性ヨウ素に関する内部被ばく線量係数[10]は ICRP Publication 56 動態モデル（現モデル）[7, 12]で評価された値である。2017 年に、ヨウ素に関する新しい動態モデルとして ICRP から提唱される計画にある新しい動態モデルが公表された（新モデル）[8]。新モデルは、現モデル以降の研究成果を取り入れ、ヨウ素の体内挙動を現モデルよりも詳細に分析できるコンパートメント構成になっており、また、体内におけるヨウ素の存在形態を無機形ヨウ素と有機形ヨウ素とに区別している。このため、甲

状腺に移行してきた無機形ヨウ素が有機形ヨウ素として取り込まれる過程を抑制する解析が可能である。

本稿では、公開されたこの新モデルを組み込んだ ICRP Publication 60 [9]に基づく内部被ばく線量評価プログラムを作成し、放射性ヨウ素を血液注入した場合について、血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の内部被ばく線量低減効果を解析した。体内に摂取される放射性ヨウ素同位体の種類、被ばく者の年齢、血液注入後の安定ヨウ素剤投与時刻、また、体内摂取が連続的に行われる場合について、このような被ばく状況の違いが、安定ヨウ素剤投与による内部被ばく線量の低減効果にどのように影響し、また、その要因は何かについて検討した。

これまでの研究では、安定ヨウ素剤投与による、甲状腺に放射性ヨウ素が取り込まれる放射エネルギーの抑制効果は解析されているが、被ばく線量の低減効果については解析されていない。また、放射性ヨウ素同位体、体内摂取後の安定ヨウ素剤投与時刻の抑制効果への影響についての議論は少ない。本稿では、新モデルで得られる評価結果と現モデルの結果との定性的・定量的な差異を確認し、また、これまでの研究で分析が不足している事項について定量的な検討を行った。本解析で得られた結果は、以下の通りである。

- 1) ^{129}I , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I の 6 核種について、5 歳児、成人の標準人を対象に、血液注入に関する内部被ばく線量を解析し、新モデルで算出される預託実効線量に占める甲状腺の被ばく線量の寄与を評価した。放射性ヨウ素同位体による内部被ばくは、大部分が甲状腺の被ばくによるものであることを確認した。新モデルで評価された被ばく線量を現モデルによる評価値と比較した。その結果、預託実効線量、甲状腺の預託等価線量については両モデルで大きな差はなく、新モデルの評価値は現モデルに比べて 1.0~1.3 程度であった (^{134}I 核種は 1.5~1.8)。ただし、新モデルで線源器官として個別に考慮された胃壁、肝臓、腎臓、膀胱やその近傍に存在する食道の等価線量は、現モデルに比べて数倍以上高めに評価される。
- 2) 同位体ごとに、安定ヨウ素剤投与による線量低減効果を評価した。安定ヨウ素剤投与の効果は、血液注入直後、および、注入から 30 分後、1 時間後、3 時間後、5 時間後、7 時間後、10 時間後、15 時間後、24 時間後の 9 時刻で評価した。安定ヨウ素剤を投与しない場合の被ばく

線量に対する投与した場合の被ばく線量の比を線量低減率とし、その値で投与の効果を評価した。

安定ヨウ素剤投与の効果については、放射性ヨウ素の内部被ばくで最も影響が重大である ^{131}I 核種について主に述べられている[1~3, 18]。文献 18 は、体内摂取後 6 時間以上経過してからの投与はほとんど有効でなく、12 時間以降の投与は価値がないと報告している。新モデルを用いた本解析においても同様な結果が得られた。 ^{129}I , ^{131}I の物理的半減期が比較的長い核種では摂取後 5 時間以内の投与では 0.5 以下の線量低減効果が期待できるが、 ^{129}I , ^{131}I 以外の半減期が短い核種については、安定ヨウ素剤投与の効果が長半減期核種に比べて小さく限定的であり、効果を得るには体内摂取後 1 時間以内の投与が必要となる。

- 3) 安定ヨウ素剤投与による被ばく線量低減効果は、放射性ヨウ素摂取から投与するまでの時間に大きく依存する。甲状腺の被ばく線量は甲状腺に蓄積される残留放射能の積分値で決まるが、甲状腺における残留放射能の最大値は核種の半減期に強く依存し、本解析は、摂取後 1 日未満の短い時間で起こることを示した。安定ヨウ素剤投与により内部被ばく線量を低減するためには、放射性ヨウ素が甲状腺に無機形ヨウ素として取り込まれ、そこで有機形ヨウ素に変化する前にできるだけ早く甲状腺への取り込みを阻止しなければならず、甲状腺における放射性ヨウ素の残留量時刻歴から、その時間が摂取後およそ 5 時間未満であることが解析から示唆される。
- 4) 5 歳児を対象とした ^{131}I に関する、血液注入後に安定ヨウ素剤を投与した場合の体内の主な組織における ^{131}I の残留放射能の時間変化を解析した。注入後 5 時間以上遅れて安定ヨウ素剤を投与した場合の、甲状腺内の ^{131}I の残留放射能の時間変化は、甲状腺の預託被ばく線量に寄与する経過時間において、注入後 5 時間以上遅れた投与では、投与時間が遅くなるとともに安定ヨウ素剤を投与しない場合の時間変化に急激に近づき、投与の効果が急激に小さくなる傾向を示していた。

ヨウ素に関する新しい動態モデルを用いた内部被ばく線量の解析結果は、これまでに ICRP から報告されてきた現モデルを用いた評価結果と定性的に類似するが、新モデルは、その特徴を活用して安定ヨウ素剤投与の線量低減効果を容易

に解析できるとともに、体内の主な組織の放射性ヨウ素の挙動を詳細に検討できるモデルである。今後は、新モデルを用いて実測データを解析することにより、モデルの信頼性をさらに深め、また、問題点がある場合には改善されることが期待できる。

参 考 文 献

- [1] 放射線医学総合研究所監修, 青木芳朗, 渡利一夫編, "人体放射能の除去技術 挙動と除染のメカニズム", 講談社サイエンティフィク, 1996.
- [2] World Health Organization, "Guidelines for Iodine Prophylaxis following Nuclear Accidents Update 1999", WHO/SDE/PHE/99.6 (1999)
- [3] 日本医師会, "2017 年度版 原子力災害における安定ヨウ素剤服用ガイドブック"
- [4] 松永武, 小林健介, "放射性ヨウ素吸入時の甲状腺被曝線量と安定ヨウ素剤投与効果の感度解析", 保健物理, 36(1),31~44(2001)
- [5] 木村仁宣, 高原省五, 本間俊充, "安定ヨウ素剤服用による甲状腺被ばく低減効果の評価手法の開発, JAEA-Research2012-039(2013)
- [6] 谷幸太郎, 栗原治, 小佐古敏荘, "安定ヨウ素剤投与時期の ^{131}I 甲状腺摂取率抑制効果の評価~体内動態モデルによる日本人を対象とした計算~, RADIOISOTOPES,63,461~469(2014)
- [7] ICRP, ICRP PUBLICATION 56,"Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part 1 ",Pergamon Press,1989.
- [8] Rich Leggett, "An age-specific biokinetic model for iodine", Journal of Radiological Protection, 37, 864~882(2017)
- [9] ICRP, ICRP PUBLICATION 60," 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", Pergamon Press,1991.
- [10] ICRP, ICRP PUBLICATION 119, "Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60", ELSEVIER ,2012.
- [11] ICRP, ICRP PUBLICATION 68,"Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, Replacement of ICRP Publication 61 ", Pergamon Press,1994, ICRP, ICRP PUBLICATION 71,"Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part 4 Inhalation Dose

- Coefficients”, Pergamon Press,1995,
ICRP, ICRP PUBLICATION 72,”Age-dependent
Doses to Members of the Public from Intake of
Radionuclides : Part 5 Compilation of Ingestion
and Inhalation Dose Coefficients”,Pergamon
Press,1995.
- [12] ICRP, ICRP PUBLICATION 67,”Age-dependent
Doses to Members of the Public from Intake of
Radionuclides : Part 2 Ingestion Dose
Coefficients”,Pergamon Press,1993.
- [13] 西原健司, 岩元大樹, 須山賢也 : 「福島第一
原子力発電所の燃料組成評価」 ,
JAEA-Data/Code 2012-018 (September 2012)
- [14] 梅田健太郎, 小林悌二, ” 放射性核種の体内
除去による内部被ばく線量の低減効果につ
いて” , 東北工業大学紀要 I : 理工学編, 第
34号, pp.1-17, 2014年3月.
- [15] ICRP, ICRP PUBLICATION 107, “Nuclear
Decay Data for Dosimetric Calculations”,
ELSEVIER ,2007.
- [16] M.Cristy, K.F.Eckerman, ”SEECAL: Program to
Calculate Age-Dependent Specific Effective
Energies”, ORNL/TM-12351(1993).
- [17] 山口武憲, ” 被ばく線量の測定・評価マニ
ュアル 内部被ばくについて” , 保健物理,
36(1),pp.11-17, 2001.
- [18] ICRP, ICRP PUBLICATION 63,”Principles for
Intervention for Protection of the Public in a
Radiological Emergency”, Pergamon
Press,1991.