JAEA-Research
2012-039

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

Development of Evaluation Method for the Effect of Reducing Equivalent Doses to the Thyroid by Implementing Iodine Thyroid Blocking

木村 仁宣　高原 省五　本間 俊充

Masanori KIMURA, Shogo TAKAHARA and Toshimitsu HOMMA

安全研究センター
サイクル施設等安全研究ユニット

Fuel Cycle Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center

February 2013

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

JAEA-Research 2012-039

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

日本原子力研究開発機構　安全研究センター
サイクル施設等安全研究ユニット

木村　仁宣、高原　省五、本間　俊充

（2012年12月17日受理）

原子力事故での早期防護措置の適切な実施方法を検討するため、原子力機構が開発した確率論的事故影響評価（レベル3PSA）コードOSCAARを用いて、様々な事故シナリオに対し、防護措置実施による被ばく低減効果の評価を進めている。放射性ヨウ素の吸入による甲状腺被ばく線量を低減させるため、安定ヨウ素剤服用は効果的な早期防護措置である。しかし、安定ヨウ素剤の効果を最大限にするためには服用時期が重要であり、そのため、緊急時計画策定にあたり安定ヨウ素剤服用の最も効果的な実施方法をあらかじめ検討しておく必要がある。

本研究では、安定ヨウ素剤の服用時期に応じた被ばく低減効果を評価するため、ヨウ素代謝モデルをOSCAARに導入し、環境への放出が大きい格納容器バイパス事故シナリオを例に取り、屋内退避または避難と安定ヨウ素剤服用の組み合わせによる被ばく低減効果を甲状腺被ばく線量の観点から評価した。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

JAEA-Research 2012-039

Development of Evaluation Method for the Effect of Reducing Equivalent Doses to the Thyroid by Implementing Iodine Thyroid Blocking

Masanori KIMURA, Shogo TAKAHARA and Toshimitsu HOMMA

Fuel Cycle Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2012)

To consider the method of implementing urgent protective actions in a nuclear accident appropriately, the authors have been assessing the effects of reducing doses by taking such actions using a Level 3 Probabilistic Safety Assessment (PSA) code, the OSCAAR, developed by the JAEA. Iodine thyroid blocking is an effective urgent protective action to reduce the equivalent doses to the thyroid due to inhalation of radioactive iodine. However, the timing of the administration of stable iodine is important to maximize the effectiveness for thyroidal blocking. Therefore, the careful consideration should be given to the most effective way of iodine thyroid blocking when preparing off-site emergency plans.

In the present study, the authors introduced a metabolic model of iodine into the OSCAAR for evaluating the effect of the administration of stable iodine for reducing equivalent doses to the thyroid depending on the its timing. Then, examined the effectiveness of iodine thyroid blocking combined with sheltering or evacuation in the containment bypass scenario with large radioactive release to the environment.

Keywords: Nuclear Accident, Thyroid, Metabolic Model, Stable Iodine, PSA, OSCAAR

目次

1. はじめに 1
2. 計算モデルの概要 3
2.1 環境影響評価手法 3
2.2 ヨウ素代謝モデル 7
3. 安定ヨウ素剤服用による甲状腺被ばく低減効果 17
3.1 評価条件 17
3.2 評価結果 17
4. まとめ 23
参考文献 23

Contents

1. Introduction 1
2. Outline of the calculation model 3
2.1 Methodology of accident consequence assessments 3
2.2 Metabolic model of iodine 7
3. The effect of reducing equivalent doses to the thyroid by implementing iodine thyroid blocking 17
3.1 Evaluation condition 17
3.2 Evaluation results 17
4. Summary 23
References 23

表リスト

Table 2.1 Meteorological sampling....11
Table 2.2 Model equilibrium values for stable iodine....11
Table 2.3 Specific Effective Energy (SEE) of radioactive iodine....11
Table 3.1 Source term for the accident scenario....20
Table 3.2 Shielding factor and filitering factor....20

図リスト

Fig. 2.1 Structure of the OSCAAR....12
Fig. 2.2 Multi-puff trajectory dispersion model used in the OSCAAR....12
Fig. 2.3 Meteorological data constructed by using GPV data of the Japan Meteorological Agency....13
Fig. 2.4 Reduction factor of taking stable iodine....14
Fig. 2.5 Metabolic model for radioiodine and stable iodine....14
Fig. 2.6 Reduction in the committed thyroid dose from the administration of stable iodine as a function of time before or after an intake of radioiodine....15
Fig. 2.7 Reduction in the committed thyroid dose to 5-year-old children and adult male from the administration of stable iodine as a function of time before or after an intake of radioiodine....15
Fig. 2.8 Reduction in the committed thyroid dose to 1-year-old children and adult male from the administration of stable iodine as a function of time before or after an intake of ^{131}I - ^{135}I....16
Fig. 3.1 The 50th percentile values of the projected doses in the first 7 days and thyroid doses due to the exposure pathways....21
Fig. 3.2 The equivalent doses to the thyroid for sheltering in normal building at each distance followed by radial evacuation....21
Fig. 3.3 The effect of the delay of iodine thyroid blocking for the equivalent doses to the thyroid for sheltering in normal building at each distance followed by radial evacuation....21
Fig. 3.4 The equivalent doses to the thyroid for sheltering in concrete building at each distance followed by radial evacuation....22
Fig. 3.5 The effect of the delay of iodine thyroid blocking for the equivalent doses to the thyroid for sheltering in concrete building at each distance followed by radial evacuation....22
Fig. 3.6 The equivalent doses to the thyroid for precautionary evacuation to 30 km area....22

1. はじめに

原子力発電所での事故により環境中に放射性物質が放出された場合、国や地方自治体は、住民の被ばくをできる限り低減させるため、屋内退避や避難、安定ヨウ素剤服用等の早期防護措置を速やかに実施しなければならない。そのため、これらの防護措置を効果的に実施するための対応を整備した緊急時計画の策定が重要な課題となる。

チェルノブイリ事故等の過去の経験やシビアアクシデント及び確率論的安全評価（PSA）研究の結果によれば、緊急事態の最中に緊急防護措置に関する決定を行う単独の根拠として放出量や事故進展等のソースターム予測、放出された放射性物質の拡散及び沈着とそれに基づく線量を十分に早く、しかも正確に予測することはほとんど不可能であることを示している。つまり、事故の早期段階では、放射性物質の放出開始時間や継続時間、放出の規模を正確に予測することはできず、より詳細な情報を得るためのさらなる情報を待っても、評価の質が改善されることは期待できない[1)]。2002年に国際原子力機関（IAEA）は、初めて国際安全基準として安全要件GS-R-2「原子力又は放射線緊急事態の準備と対応」[2)]を刊行し、緊急時対応における管理的アプローチと不確実さへの対応という基本的考え方を示した。管理的アプローチでは、緊急時対応での実際的な目標をより確実に達成させるため、最も効率的で効果的な方法を用いて防災システムを作成することが求められる。そこでは、緊急事態への単なる対応より、目標を達成するために効果的な対応を行うための計画の重要さが強調されている。

一方、我が国では、緊急事態への対応に関して、TMI-2事故の翌年1980年（昭和55年）6月に原子力安全委員会が、原子力災害特有の事象に着目し原子力発電所等の周辺における防災活動の円滑な実施が行えるよう技術的、専門的事項を検討した結果として「原子力発電所等周辺の防災対策について（以下、防災指針）」[3)]をとりまとめ、その後、数回にわたり改訂がなされている。本指針では、屋内退避、コンクリート屋内退避あるいは避難という防護措置を実際に適用する場合、防護措置のための指標に応じて異常事態の規模、気象条件を考慮した上で、ある範囲を定めて段階的に実施される必要があるとしている。また、安定ヨウ素剤服用については、屋内退避や避難等の防護措置とともに、その実効性を高める必要があるとして防護措置のための指標が示されている。しかし、それぞれの防護措置を具体的にどのように決定し、どのように運用するかというガイダンスは示されていない。

そこで、報告者らは国や地方自治体による緊急時計画策定に必要な防護措置の実施方法に関する技術的知見を得ることを目的に、原子力機構が開発した確率論的事故影響評価（レベル3PSA）コードOSCAAR[4)]を用いて、これらの防護措置実施による被ばく低減効果の評価を進めてきた。レベル3PSAは、レベル1PSA（原子力発電所の炉心損傷頻度を評価）及びレベル2PSA（格納容器機能喪失に至り環境に放射性物質が放出される事故の発生頻度及び放射性物質の環境への放出量を評価）により得られた事故シナリオに対し、環境に放出された後に拡散、沈着した放射性物質により公衆が受ける健康影響等を、様々な気象条件や防護措置の実施による被ばく低減効果を考慮した上で評価するものである。そのため、緊急時計画策定に必要な防護措置の実施方法を総合的に検討する上で、レベル3PSAは有用な評価手法であると考えられる。

原子力発電所での事故後の早期段階で重要な放射性ヨウ素の吸入による甲状腺被ばく線量を低減させるため、安定ヨウ素剤服用は効果的な防護措置である。しかし、その被ばく低減効果は服用時期によって異なるので、事故の進展に応じた適切な服用時期を評価することが重要である。これまでにOSCAARで整備した安定ヨウ素剤服用の防護措置モデルは、甲状腺等価線量に服用時期に応じた被ばく低減係数を乗じる簡易的な評価モデルである。そのため、安定ヨウ素剤の服用時期に応じて変化す

る放射性ヨウ素の甲状腺負荷量を考慮した甲状腺等価線量を計算できず、正確な被ばく低減効果を評価することはできなかった。

そこで、本研究では、安定ヨウ素剤の服用時期を評価できるヨウ素代謝モデルをOSCAARに導入し、防護措置実施による被ばく低減効果の評価の一例として、放出時期の早い事故シナリオに対する早期防護措置の実施方法を甲状腺被ばくの観点から評価した。本報告では、第2章にOSCAAR及びヨウ素代謝モデルの概要を述べ、第3章に事故シナリオに対する評価結果の例を示す。

2. 計算モデルの概要

2.1 環境影響評価手法

本研究で用いたOSCAARコードシステムの構成を**Fig. 2.1**に示す。OSCAARは事故時に放出された放射性物質の環境への移行とそれに伴う人への被ばく、防護対策の実施による被ばく低減効果、被ばく集団の健康影響及び経済影響を推定するための一連の計算モジュールとデータファイルで構成される。さらに、これらの計算に必要なデータ（気象シーケンス、線量（率）換算係数、人口及び農畜産物生産分布、避難のための集合に要する時間、被ばく集団の生涯リスク等）をあらかじめ整備しておくため、数種のOSCAARモジュールから独立して動作可能な前処理（プリプロセッサ）コードがOSCAARを支援している。各計算モジュール及びその支援コードの機能は、以下の通りである[5)]。

・ 大気拡散・地表沈着解析

大気拡散・地表沈着モジュールADDにて、放出源情報と気象データを用いて、大気中における放射性物質の移流・拡散、地表面への沈着を解析する。支援コードMSでは、評価に用いる気象条件を決定するため、対象サイトで起こりうる広範な気象条件の中から季節的な違いあるいは日変動を考慮し、できるだけ事故による影響の全体像が把握できるように複数の代表的な気象条件を抽出する。

・ 被ばく線量算定

個人及び集団の被ばく線量を推定するため、早期被ばく算定モジュールEARLYでは放射性雲の通過中あるいは通過後の短期間に与える早期の被ばく線量を、長期被ばく算定モジュールCHRONICでは長期にわたって環境に残留する長半減期の放射性核種に起因する被ばく線量をそれぞれ計算する。これらの計算に必要な線量換算係数のデータは、線量換算係数算出システムDOSDAC（外部被ばく）及びDSYS（内部被ばく）であらかじめ整備する。また、集団線量の算定や食物摂取経路による被ばく線量の推定に必要な人口分布及び農畜産物生産量分布のデータは、支援コードCURRENTでOSCAARの標準的な評価メッシュである距離別・方位別の同心円メッシュ毎に区分される。

・ 防護対策による被ばく低減効果の評価

防護対策モジュールPMでは、事故時の被ばく線量をより現実的に評価するため、屋内退避、避難、安定ヨウ素剤服用、食物摂取制限、移転といった防護対策による被ばく低減効果を推定する。

・ 健康影響及び経済影響

健康影響モジュールHEでは、放射線被ばくによってもたらされる早期の身体的影響、晩発性の身体的影響及び遺伝的影響という3つの健康影響を推定する。支援コードHEINPUTは、晩発性の身体的影響及び遺伝的影響について1Gyあたりの生涯リスク、被ばく後における影響の発生率の時間変化等、HEモジュールで必要なデータをあらかじめ計算する機能を持つ。また、経済影響モジュールECONOでは、屋内退避や避難にかかる費用、農畜産物の廃棄や立ち入り制限による損失等の事故による経済的影響を推定する。

ここでは、早期防護措置の実施による被ばく低減効果の評価にあたり、被ばく線量、特に早期被ばくの観点から検討を行う。そのため、これまでに述べたOSCAARの機能のうち、長期被ばく、健康影響及び経済影響については本研究では考慮しない。つまり、OSCAARコードシステム上では、大気拡散・地表沈着モジュールADD、早期被ばく算定モジュールEARLY、防護対策モジュールPMを用いて解析を行う。以下、大気拡散・沈着、被ばく線量算定、防護対策（屋内退避、避難、安定ヨウ素剤服用）についての計算モデルの概要を示す[5)]。

(1) 大気拡散・沈着

① モデルの概要

原子力発電所での事故時には、放射性物質は原子炉建屋から直接あるいは排気筒を通じて大気中に放出される。大気拡散・地表沈着モジュールADDは、大気中に放出された放射性物質の輸送、拡散及び地表面への沈着を予測し、放射性物質の時間的、空間的な分布を求めるものである。大気拡散モデルは多様に存在するが、確率論的事故影響評価では、従来から計算上の簡便さ及び拡散パラメータに関する実験データの豊富さの点からガウスプルームモデルが用いられてきた。そして、複数のソースタームを対象として、多数の気象条件について事故影響の計算を繰り返さなければならないため、計算費用の観点から現在でもサイトの気象データだけを使用するガウス型の直線プルームモデルが大気拡散の評価に広く用いられている。しかし、放射性物質の長時間にわたる放出や放出量の時間変化を伴う場合には特に、サイトの気象データだけに依存した直線プルームモデルでは限界がある。

そこで、OSCAARでは気象場の時間的空間的変動を考慮して放出物の輸送・拡散を解析するガウス型の変動流跡線パフモデルを採用した。変動流跡線パフモデルの概念を**Fig. 2.2**に示す。本モデルは、連続した放射性物質の放出プルームを適当な時間間隔で分割し、それぞれ独立の放出パフとして、入力となる風速あるいは大気安定度に関する気象場を基に大気中における移流・拡散を解析し、最後に、評価地点における放射性物質の大気中濃度あるいは地表沈着濃度を各パフからの寄与の合計として求める方法である。評価地点(x,y,z)における時刻tの濃度$\chi(x,y,z)$は、位置(x_i,y_i,z_i)にあって放射性物質の全量が$Q_i(t)$であるパフiの水平方向及び鉛直方向の拡散がガウス分布であると仮定すると、以下の式で求められる。

$$\begin{aligned}\chi(x,y,z,t) &= \sum_{i=1}^{N}\chi_i(x,y,z,t)\\ &= \sum_{i=1}^{N}\frac{Q_i(t)}{(2\pi)^{3/2}\sigma_{h,i}^2\sigma_{z,i}}\exp\left[-\frac{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2}{2\sigma_{h,i}^2}\right]\exp\left[-\frac{(z_i-z)^2}{2\sigma_{z,i}^2}\right]\end{aligned} \tag{1}$$

ここで、$\sigma_h(t)$、$\sigma_z(t)$は、各々水平方向及び鉛直方向の拡散パラメータである。

OSCAARでは大気拡散モデルの入力情報となる気象データを、気象庁の日本域の数値予報GPV（Grid Point Value）データ（以下、「GPVデータ」）から作成し、3つのスケールの異なる格子網で所有している。広域の風速場では、日本全土を含み水平格子間隔約150 km、3つの気圧面（925、850、700 hPa）での高度と上層風の現況解析値（9時と12時）及び予報値（3時間毎）のデータがある。サイトを含む約400 km四方の狭域の気象場は、格子間隔約20 kmで、地上風と大気安定度の現況解析値（9時と12時）及び予報値（1時間毎）を持っている（**Fig. 2.3**）。

また、降水量の予報値（1時間毎）を基に、OSCAARの評価点を構成する距離別方位別同心円メッシュにおける平均降水量（1時間毎）が準備されている。放出パフの移流には、その位置における地上風と3レベルの上層風の風ベクトルをパフの鉛直濃度分布で荷重平均した平均風ベクトルを用いる。また、鉛直方向の拡散は、大気安定度の関数としてあらかじめ与えた混合層高度によって上部への拡散は阻止されるとする。

事故影響の評価においては、これに放出点近傍の建屋が拡散に及ぼす影響、熱エネルギーを伴った放出物質の浮力による上昇の効果等が考慮される。また、降雨の洗浄効果による湿性沈着は、同心円メッシュで与えられた降雨強度によって変化する洗浄係数（Washout coefficient）を用いたモデルで評価する。したがって、これまでのレベル3PSAで使用されてきたサイトの気象データのみを用いた直線

プルームモデルと異なり、サイトから離れた領域における降雨の影響を的確に評価することができる。また、地表面への乾性沈着は沈着速度の概念を用いて評価し、沈着によるパフ中の放出物の減少は、地表面への沈着によってもパフ中の放出物の鉛直ガウス分布は変わらないものとして、上式中の $Q_i(t)$ の変化として取り扱う放出源減少モデル（Source depletion model）で算定した。

② 気象サンプリング

放出物質の時間空間的な分布は、放出時の気象条件に大きく左右される。レベル3PSAでは、事故発生時における対象サイトのあらゆる可能な気象条件に対してその影響を計算し、その気象条件の出現確率を考慮して事故影響の頻度分布を与えなければならない。しかし、出現する全ての気象条件について計算を行うことは原理的に不可能なだけでなく、計算費用の点からも現実的でない。そこで、解析のためには放出から評価対象領域の影響がなくなるまでの気象条件の時間変化（気象シーケンス）をいくつか選択する必要がある。この場合、気象シーケンスは、出現可能な気象シーケンスの全範囲を代表し、事故影響のできるだけ正確な頻度分布を与えることができるように選択されなければならない。

最も単純な方法には、ランダムに気象シーケンスの出発点（事故開始時刻）を選択するランダムサンプリング法、あるいは一定の時間間隔毎に事故開始時刻を選択するサイクリックサンプリング法がある。OSCAARの気象サンプリングコードMSでは、この両方法を使うことができるが、これらの方法はしばしば、通常のよく出現する条件は選択するが、出現する頻度は小さいものの大きな事故影響を生じるような気象シーケンスが抜け落ちる可能性があるため、使用する場合には、かなり数多くの気象シーケンスを選択してそれを避ける必要がある。また、より洗練された層別サンプリングあるいはインポータンスサンプリングと呼ばれる方法も使用できる。これは、ある放出条件に対して、同程度の事故影響が計算される気象条件を予めグループ化する方法である。例えば、1時間毎で考えると1年8760の気象シーケンスを気象ビンと呼ばれるいくつかの気象パラメータの値で定義されたカテゴリに分類し、分類された気象ビンの中の気象シーケンスからランダムに数個選択するという方法で、気象ビンサンプリング法とも言われている。米国の代表的な5プラントのPSAであるシビアアクシデントリスク研究[6]でも用いられた。

この層別サンプリングの方法に基づいて、OSCAARの変動流跡線パフモデルに適した気象サンプリング法を開発した[7]。これは、予め数10kmまで放出パフの流跡を分析し、

- 降雨遭遇の有無（10km までの移流間）
- 平均大気安定度（10km までの移流間）
- 滞留時間（20km までの移流間）
- 初期移流方向

の4つの気象パラメータで気象条件を分類する方法である。**Table 2.1**に示すように全部で99の気象グループに、それぞれの流跡を分類し、その中から数に応じてランダムに気象シーケンスを選択するものである。全部で144の気象シーケンスを選択し、全8760の気象シーケンスから作られる早期健康影響の頻度分布と比較した結果、大きな早期の健康影響が出現する領域（累積頻度99%）でもファクタ3程度の違いに収まっていることが確認されている。

(2) 被ばく線量算定

事故時に環境へ放出された放射性物質から人への被ばく経路として、OSCAARコードでは以下の5

つの経路が考慮されている。

① 放射性雲中の放射性物質からのγ線外部被ばく

② 通過中の放射性雲の直接吸入による内部被ばく

③ 地表沈着物質からの外部被ばく

④ 地表沈着物質の再浮遊に伴う吸入による内部被ばく

⑤ 汚染された食物の摂取による内部被ばく

早期被ばく算定モジュールEARLYでは、上記の①、②、③の被ばく経路からの線量を期間別に評価する。また、長期被ばく算定モジュールCHRONICでは10年毎に③、④、⑤の被ばく経路からの線量を評価する。

放射性雲及び地表沈着物質からの外部被ばくの算定には、イマージョンモデル[8]（放射性雲の場合は半無限空間に放射性物質が一様に分布、地表沈着物質の場合は無限平面に一様に分布していると仮定。）を用い、放射性物質の空間濃度あるいは地表濃度と、線量換算係数算出システムDSYS[9),10)]であらかじめ整備した線量換算係数を用いて評価する。また、地表沈着からの外部被ばくでは、土壌中への放射性核種の浸透及び降雨等による地表面流亡による減衰の効果を考慮している。

吸入及び経口摂取による内部被ばくの評価においても、体内代謝モデル等から得られる放射性核種の単位摂取あたりの線量をあらかじめDSYSで計算してデータベースとして備え、それを被ばく線量計算に用いる。DSYSは、国際放射線防護委員会（ICRP）が刊行するPubl.66の新呼吸気道モデル、Publ.30の体内動態モデルに排泄過程を考慮したICRP30型体内動態モデル、Publ.56、67、68、69、71、72の新体内動態モデル及び線量計算モデルを組み込んだシステムである。

(3) 防護対策による被ばく低減効果の評価

原子力事故時には、周辺住民の健康影響を低減するために、様々な防護対策がとられる。周辺住民の被ばく線量を現実的に推定するため、防護対策モジュールPMでは計算された潜在的予測線量に防護対策による線量の低減効果を反映させる。OSCAARの防護措置モデルは、導入される期間によって早期防護措置と長期防護措置に大別できる。ここでは、早期防護措置であるコンクリート屋内退避、避難、安定ヨウ素剤服用のモデルの概要を述べる。

環境への放出以前あるいは直後に導入される屋内退避、コンクリート屋内退避及び避難により、放射性雲及び地表沈着物質からの外部被ばく及び吸入による内部被ばくが制限され、早期の健康影響が低減される。これらの防護対策による被ばく低減効果を反映させるため、OSCAARの防護対策モジュールPMで用いられるモデルは比較的単純である。まず、屋内退避による被ばく低減は、退避した建造物によるγ線の遮へい効果を低減係数として外部被ばく線量の算定に導入する。また、吸入による内部被ばくの評価には、建屋のフィルター効果による低減係数を導入する。屋内退避の実施範囲と実施条件については、入力で与える放出点からの範囲と介入レベルで設定する。そして、早期被ばく算定モジュールEARLYで計算された予測線量に基づき、実施範囲内で介入レベルを超える領域が決定され、その領域に対して屋内退避の実施期間中、被ばく線量の低減が図られる。一方、避難については、屋内退避の場合と同様、計算条件で定めた範囲内で介入レベルを超えた領域の住民が、避難の実施前及び行動中は避難元で被ばくし、避難完了後には指定した避難先にて通常被ばくをするというモデルで評価される。

また、安定ヨウ素剤服用については、甲状腺被ばく線量に服用時期に応じた被ばく低減係数を乗じ

るモデルである。被ばく低減係数Fは、以下の式で示される[11)]。

$$F=1-\exp(-0.693(t+0.25)/4) \tag{2}$$

ここで、t は放射性ヨウ素を吸入してから安定ヨウ素剤を服用するまでの時間（h）である。なお、放射性雲の到達前あるいは到達してから 0.25 時間までに安定ヨウ素を服用した場合には、ヨウ素による甲状腺被ばくは 0 と仮定している。**Fig. 2.4** に(2)式による被ばく低減係数 F の経時変化を示す。

2.2 ヨウ素代謝モデル

(1) ヨウ素代謝モデルの導入

2.1 で述べた OSCCAR の安定ヨウ素剤服用モデルは、甲状腺被ばく線量に安定ヨウ素剤服用から放射性ヨウ素吸入までの経過時間に応じた被ばく低減係数を乗じることで、甲状腺の被ばく低減効果を評価する簡易的なモデルである。このモデルで用いられている(2)式に示す被ばく低減係数は、放射性ヨウ素を摂取してから甲状腺に取り込まれるまでの経時変化に関する過去の様々な疫学調査のデータを基に導出したものであるため[12)]、安定ヨウ素剤服用による被ばく低減効果は考慮されていない。また、年齢層により甲状腺の被ばく低減効果は異なるが、(2)式ではそれが反映されていない。

安定ヨウ素剤服用の効果をより現実的に評価するためには、放射性雲の通過時期と安定ヨウ素服用の時期との関係を考慮した上で、放射性ヨウ素または安定ヨウ素剤を摂取してから甲状腺に取り込まれるまでの体内挙動をそれぞれ解析し、甲状腺負荷量（甲状腺中の放射性ヨウ素量）の継時的変化を求めた上で甲状腺被ばく線量を評価する必要がある。それには、安定ヨウ素剤の服用を考慮したヨウ素代謝モデルが必要である。

本研究では、IAEA の Environmental Modeling for Radiation Safety（EMRAS）プロジェクト[13)]に示された、安定ヨウ素剤服用を考慮したヨウ素代謝モデル（以下、Johnson モデル）[14)]を用い、これを OSCAAR に導入することで、年齢グループ（3 ヶ月、1 歳、5 歳、10 歳、15 歳、成人）、服用量、ヨウ素同位体の違いに対し、安定ヨウ素剤の服用時期に応じた被ばく低減効果を評価できるようにした。

Johnson モデルは **Fig. 2.5** に示すように、内臓または肺、血液、甲状腺、軟部組織、膀胱といった複数のコンパートメントで構成される。各コンパートメントでの放射性ヨウ素(Y^r)および安定ヨウ素(Y^s)の時間変化量は、以下の(3)～(11)式に示す一次微分方程式で表すことができる。

・ 内臓または肺（Y_1）

$$\frac{dY_1^r(t)}{dt} = I_r(t) - (\lambda_1 + \lambda_r)Y_1^r(t) \tag{3}$$

$$\frac{dY_1^s(t)}{dt} = I_s(t) - \lambda_1 Y_1^s(t) \tag{4}$$

・ 血液（Y_2）

$$\frac{dY_2^r(t)}{dt} = \lambda_1 Y_1^r(t) + \lambda_4 Y_4^r(t) - (\lambda_5 + \lambda_r)Y_2^r(t) - r_2 \tag{5}$$

$$\frac{dY_2^s(t)}{dt} = \lambda_1 Y_1^s(t) + \lambda_4 Y_4^s(t) - s_2 \tag{6}$$

・ 甲状腺（Y_3）

$$\frac{dY_3^r(t)}{dt} = r_2 - (\lambda_3 + \lambda_r)Y_3^r(t) \tag{7}$$

$$\frac{dY_3^s(t)}{dt} = s_2 - \lambda_3 Y_3^s(t) \tag{8}$$

・ 軟部組織（Y_4）

$$\frac{dY_4^r(t)}{dt} = \lambda_3 Y_3^r(t) - (\lambda_4 + \lambda_6 + \lambda_r) Y_4^r(t) \tag{9}$$

$$\frac{dY_4^s(t)}{dt} = \lambda_3 Y_3^s(t) - (\lambda_4 + \lambda_6) Y_4^s(t) \tag{10}$$

・ 膀胱（Y_5）

$$\frac{dY_5^r(t)}{dt} = \lambda_5 Y_2^r(t) + \lambda_6 Y_4^r(t) - \lambda_r Y_5^r(t) \tag{11}$$

ここで、

Y_i^r ： コンパーメント i 中の放射性ヨウ素量（Bq）
Y_i^s ： コンパーメント i 中の安定ヨウ素量（μg）
I_r ： 放射性ヨウ素の摂取速度（Bq/d）
I_s ： 安定ヨウ素の摂取速度（μg/d）
λ ： 移行係数（$\lambda_1 = 192, \lambda_3 = s_2/M_t, \lambda_4 = 0.053, \lambda_5 = 1.92, \lambda_6 = 0.005$）（1/d）
M_t ： 甲状腺中のヨウ素量（μg）
λ_r ： 各ヨウ素同位体の崩壊定数（1/d）
r_2 ： 血液から甲状腺への放射性ヨウ素の移行速度（$= s_2 Y_2^r/Y_2^s$）（Bq/d）
s_2 ： 血液から甲状腺への安定ヨウ素の移行速度（$= 65M_s/70$）（μg/d）
M_s ： 体重（kg）

上記に示す代謝パラメータについて、年齢グループ毎の値を **Table 2.2** に示す。

これらの式のうち甲状腺等価線量を求めるのに必要なのは、甲状腺中の放射性ヨウ素量（Y_3^r）である。これを求めるために数値計算上必要となる、ある時間における甲状腺中の放射性ヨウ素量（Y_3^{r1}）は、Δt（＝計算ステップ）時間前における甲状腺中の放射性ヨウ素量（Y_3^{r2}）の甲状腺での残留量及び、血液から甲状腺への移行量の合計にΔt を乗じることで求められ、以下の式で表すことができる。

$$Y_3^{r1} = \left\{ (1-\lambda_3) \times Y_3^{r2} \times \exp\left[-\frac{\ln 2}{T} \right] + r_2 \right\} \Delta t \tag{12}$$

ここで

Y_3^{r1}: （ある時間における）甲状腺中の放射性ヨウ素量（Bq）
Y_3^{r2}: （そのΔt 時間前における）甲状腺中の放射性ヨウ素量（Bq）
λ_3: 甲状腺から軟部組織への移行係数（1/d）
T: 放射性ヨウ素の半減期（d）
r_2 ： 血液から甲状腺への放射性ヨウ素の移行速度（$= s_2 Y_2^r/Y_2^s$）（Bq/d）
s_2 ： 血液から甲状腺への安定ヨウ素の移行速度（$= 65M_s/70$）（μg/d）
M_s ： 体重（kg）

次に(12)式で得られた単位時間あたりの甲状腺中の放射性ヨウ素量を基に、甲状腺等価線量（50 年預託）を以下の式で計算する。

$$D_{thy} = \sum^{50y} Y_3^{r1} \times SEE \times 3600 \tag{13}$$

ここで、

D_{thy} ：甲状腺等価線量（Sv）

SEE：ヨウ素による甲状腺への比実効エネルギー（Sv/dis）

なお、ヨウ素による甲状腺への比実効エネルギーについては、OSCAARの内部被ばく計算計算システムDSYS[9), 10)]を用いて算出した。**Table 2.3**に各ヨウ素同位体及び年齢グループ毎の計算結果を示す。

(2) Johnson モデルを用いた甲状腺被ばく低減効果の評価

Johnson モデルでは、年齢グループ、安定ヨウ素剤の服用量、ヨウ素同位体といった各パラメータを変化させて甲状腺被ばく低減効果を評価できる。そこで、ここでは、これらのパラメータが被ばく低減効果に与える影響について、安定ヨウ素剤の服用時期と放射性ヨウ素の甲状腺残留割合（=安定ヨウ素剤を服用した場合と服用しない場合との比）との関係から評価することにした。なお、放射性ヨウ素の吸入時期については、放射性雲が通過する際に瞬時に吸入するものと仮定した。

① 年齢グループ

Fig. 2.6にJohnsonモデルを用いて評価した、3ヶ月、1歳、5歳、10歳、15歳及び成人（男性）の各年齢グループに対する安定ヨウ素剤の服用時期と放射性ヨウ素（^{131}I）の甲状腺残留割合との関係を示す。ここでは、安定ヨウ素剤の服用量については世界保健機関（WHO）の推奨値を基に、3ヶ月及び1歳で25 mg、5歳及び10歳で50 mg、15歳及び成人で100 mgとした[15)]。

いずれの年齢グループについても放射性雲の通過と同時に安定ヨウ素剤を服用することで甲状腺残留割合は最小になり、被ばく低減効果は最も高い。また、放射性雲が通過する前に服用する場合、12時間前でも最大で約3%の残留割合となり、被ばく低減効果が高いと考えられるが、その一方で通過した後に服用した場合、通過後3時間では最大で約30%の残留割合となり、その後、被ばく低減効果は急激に低下する。また、放射性雲が通過する前では年齢グループが低い程、甲状腺残留割合は小さくなる傾向が見られるが、通過後ではいずれの年齢グループでもほぼ同様の甲状腺残留割合になることが分かる。

② 安定ヨウ素剤の服用量

Fig. 2.7に5歳及び成人（男性）に対し、安定ヨウ素剤の服用量を変化させた場合についての安定ヨウ素剤の服用時期と放射性ヨウ素（^{131}I）の甲状腺残留割合との関係を示す。安定ヨウ素剤の服用量については、WHOの報告書による推奨値[15)]と原子力安全委員会の原子力施設等防災専門部会による報告書[16)]に示された推奨値（5歳の場合、WHOの報告書では50 mg、原子力安全委員会の報告書では38mg、また、成人の場合、それぞれ100 mgと76 mg）を適用した。5歳、成人とも、放射性雲の通過前では服用量が多いWHOの方が甲状腺残留割合が低減することが分かる。成人に対し、WHOと原子力安全委員会の場合で甲状腺残留割合を比較すると、放射性雲の通過24時間前でそれぞれ約5.4%と約6.7%に対し、放射性雲の通過と同時の場合には約1.0%と約1.3%と、ほぼ差が生じない結果となった。一方、通過後ではどちらの場合でも甲状腺残留割合は同様になり、服用量の違いは見られなかった。

③ ヨウ素同位体

事故後に放出される放射性ヨウ素は^{131}Iだけでなく、他の同位体も含まれるため、評価を行う必要がある。**Fig. 2.8** (a)に1歳、**Fig. 2.8** (b)に成人に対する安定ヨウ素剤の服用時期と各ヨウ素同位体（^{131}I～^{135}I）の甲状腺残留割合との関係を示す。放射性雲の通過前では、^{134}I、^{132}I、^{135}I、^{133}I、^{131}Iの順で甲状腺残量割合が低く、成人に比べ1歳の方が被ばく低減効果が大きいことが確認できた。一方、通過後では、通過前とは逆の順で各同位体の甲状腺残量割合が低くなることが分かる。これは、各ヨウ素同位体の物理学的半減期の違いにより、(12)式で示す放射性ヨウ素と安定ヨウ素剤との存在比で決まる血液から甲状腺への放射性ヨウ素の移行速度r_2が変化することで生じるものと考えられる。

このようにJohnsonモデルをOSCAARの防護対策モジュールPMに組み込むことで、年齢グループ、安定ヨウ素剤の服用量、ヨウ素同位体の違いに対し、安定ヨウ素剤の服用時期に応じた甲状腺被ばく線量の低減効果をOSCAARにより評価することが可能となった。

Table 2.1 Meteorological sampling

風向（人口分布を考慮）		9分割 (NNE, NE, ENE-E, ESE-SE, SSE-S, SSW-W, WNW, NW, NNW-N)		
降雨あり (10kmまで)	5mm以下	G1		
	5mm以上	G2		
降雨なし (10kmまで)	滞留時間 (20kmまで)	不安定	中立	安定
	150分以内	G3	G6	G9
	300分以内	G4	G7	G10
	300分以上	G5	G8	G11

Table 2.2 Model equilibrium values for stable iodine

代謝パラメータ		年齢						
		3 ヶ月	1 歳	5 歳	10 歳	15 歳	成人 女性	成人 男性
体重 M_s（kg）		3.5	7.2	22.0	40.5	58.9	58.0	70.0
甲状腺中の ヨウ素量 M_t（mg）		0.30	0.30	0.99	3.7	8.3	10.0	12.0
移行係数	λ_1：内蔵または肺から血液（d^{-1}）	192	192	192	192	192	192	192
	s_2：（安定ヨウ素の）血液から甲状腺（μg/d）	3.3	6.7	20.4	37.1	54.7	53.9	65.0
	λ_3：甲状腺から軟部組織（d^{-1}）	0.0108	0.0223	0.0206	0.0100	0.0066	0.0054	0.0054
	λ_4：軟部組織から血液（d^{-1}）	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
	λ_5：血液から膀胱（d^{-1}）	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
	λ_6：軟部組織から膀胱（d^{-1}）	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005

Table 2.3 Specific Effective Energy (SEE) of radioactive iodine

年齢	核種				
	^{131}I	^{132}I	^{133}I	^{134}I	^{135}I
3 ヶ月	2.44×10^{-11}	6.52×10^{-11}	5.20×10^{-11}	8.14×10^{-11}	4.79×10^{-11}
1 歳	1.78×10^{-11}	4.76×10^{-11}	3.78×10^{-11}	5.95×10^{-11}	3.50×10^{-11}
5 歳	9.24×10^{-12}	2.50×10^{-11}	1.96×10^{-11}	3.12×10^{-11}	1.83×10^{-11}
10 歳	4.07×10^{-12}	1.11×10^{-11}	8.61×10^{-12}	1.38×10^{-11}	8.14×10^{-12}
15 歳	2.62×10^{-12}	7.25×10^{-12}	5.54×10^{-12}	9.00×10^{-12}	5.29×10^{-12}
成人女性	1.92×10^{-12}	5.36×10^{-12}	4.06×10^{-12}	6.65×10^{-12}	3.90×10^{-12}
成人男性	1.64×10^{-12}	4.57×10^{-12}	3.45×10^{-12}	5.67×10^{-12}	3.33×10^{-12}

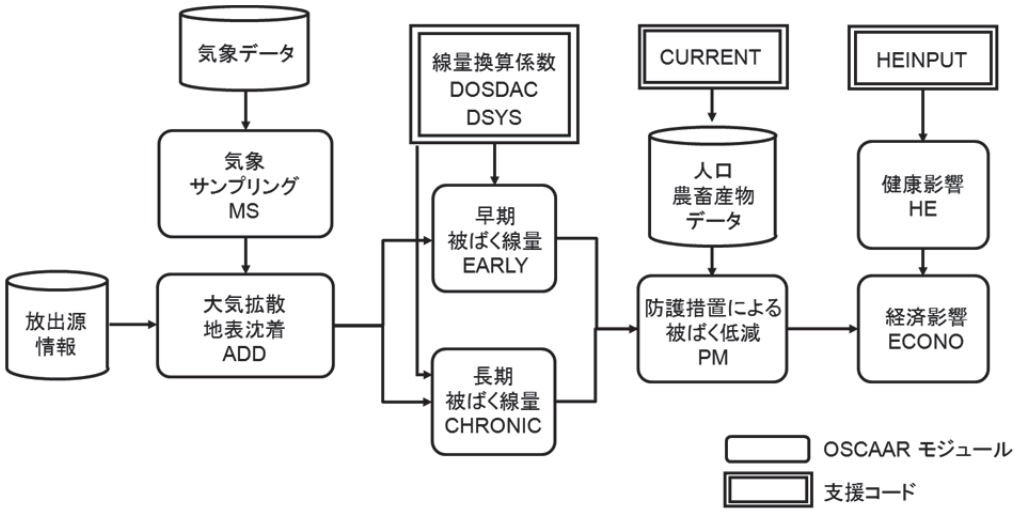


Fig. 2.1 Structure of the OSCAAR.

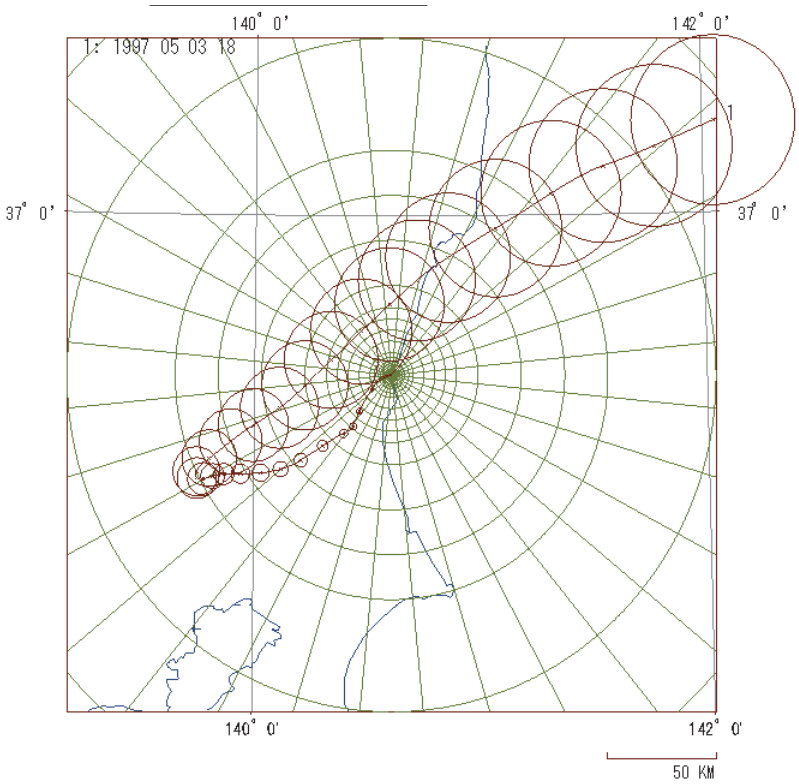
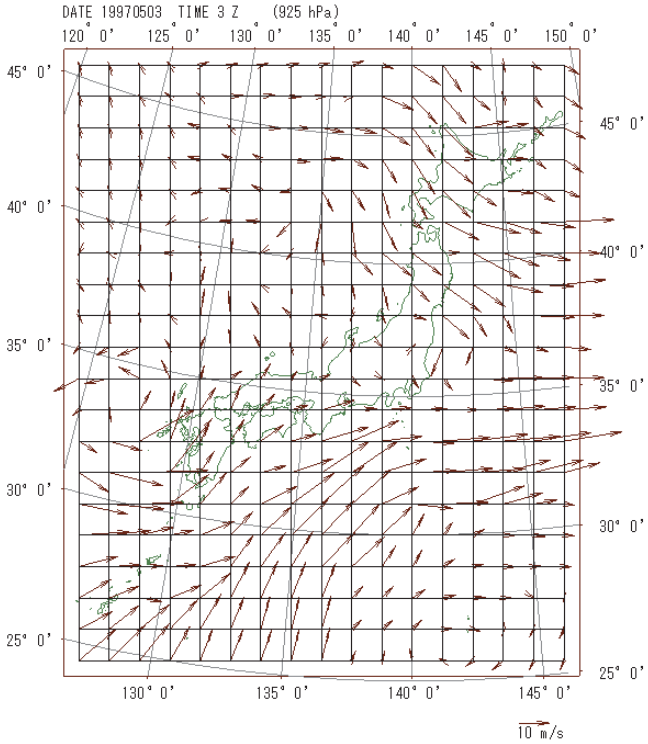
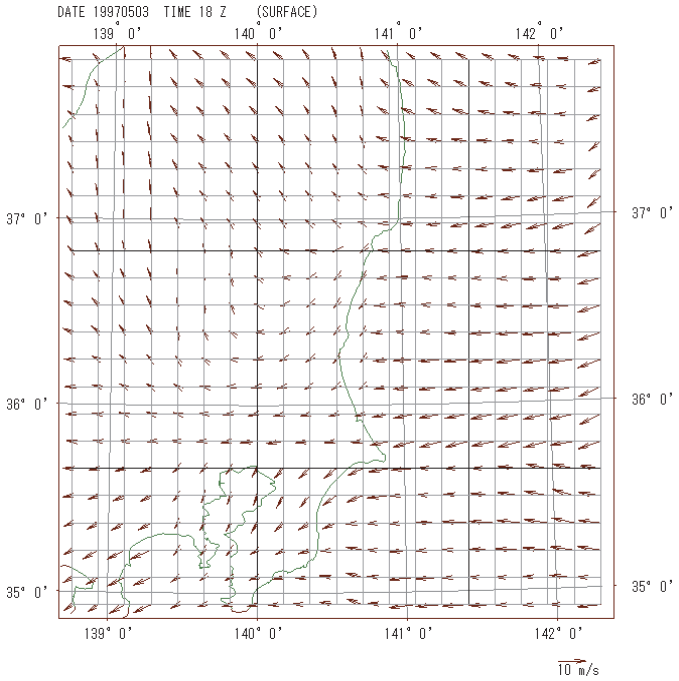


Fig. 2.2 Multi-puff trajectory dispersion model used in the OSCAAR.



(a) Meteorological data on the synoptic scale system



(b) Meteorological data on the meso scale system

Fig. 2.3 Meteorological data constructed by using GPV data of the Japan Meteorological Agency.

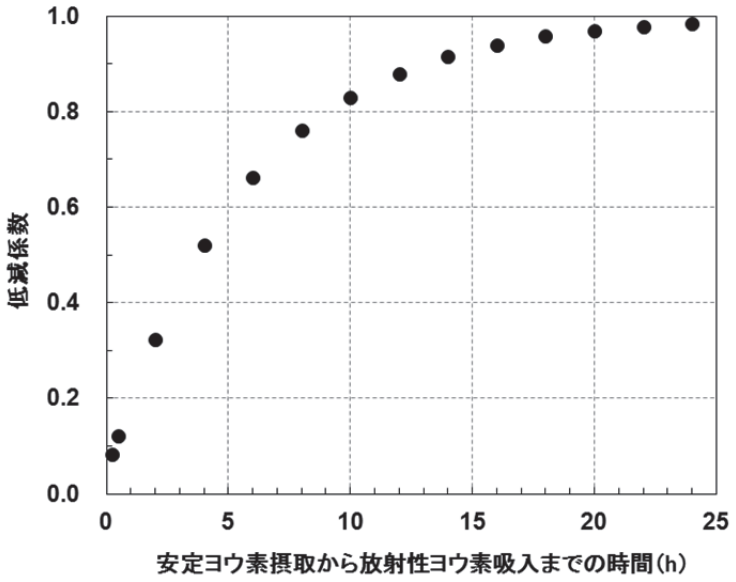


Fig. 2.4 Reduction factor of taking stable iodine.

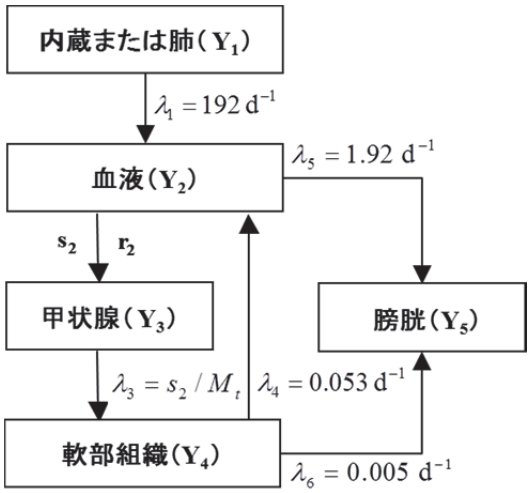


Fig. 2.5 Metabolic model for radioiodine and stable iodine.

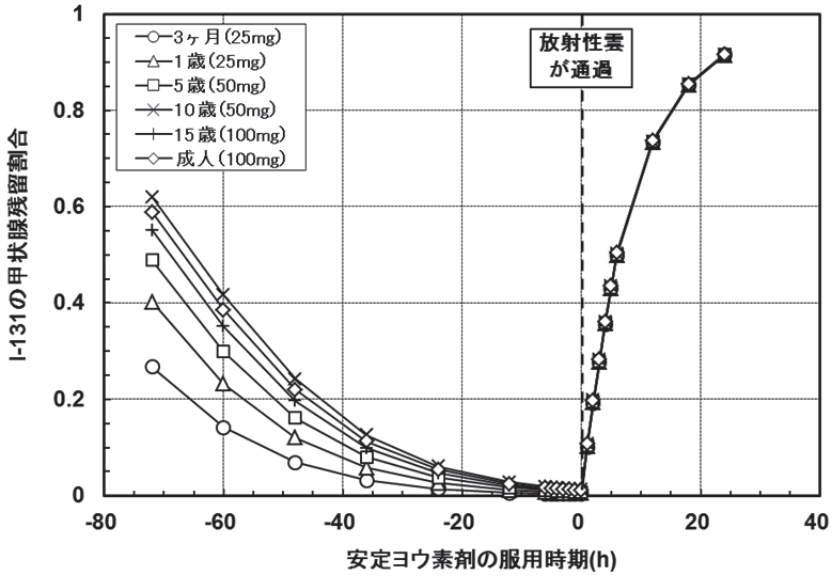


Fig. 2.6 Reduction in the committed thyroid dose from the administration of stable iodine as a function of time before or after an intake of radioiodine.

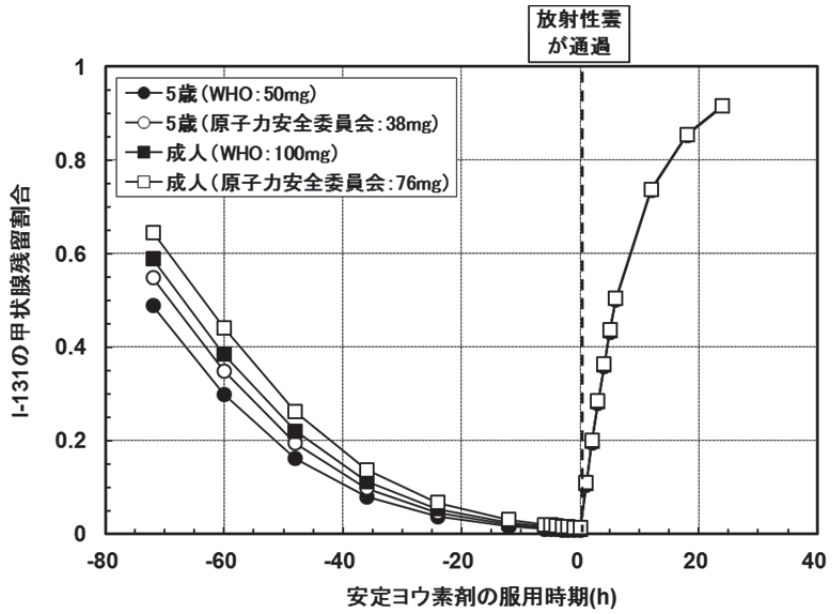
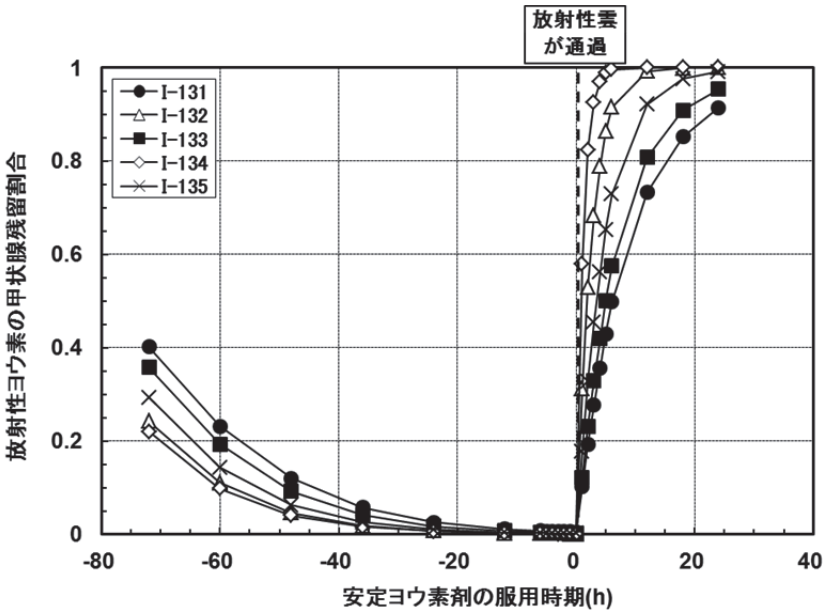
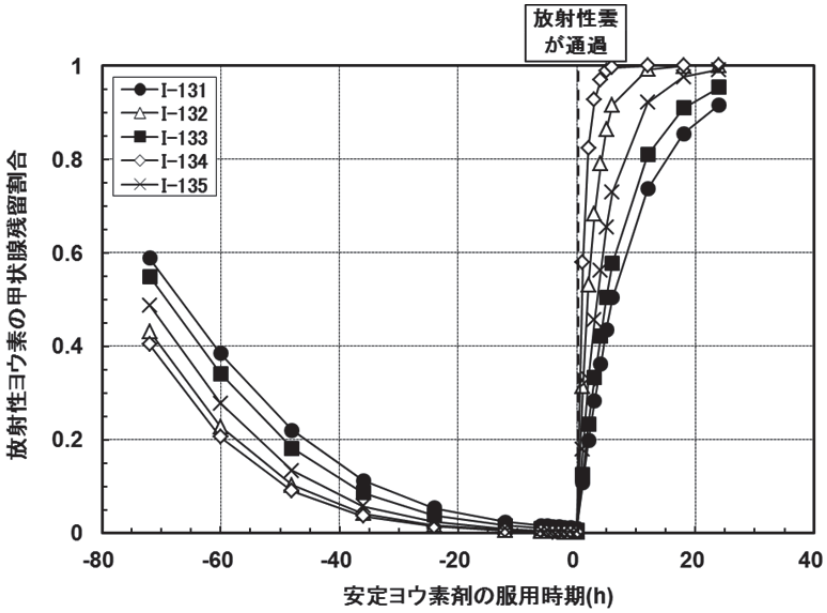


Fig. 2.7 Reduction in the committed thyroid dose to 5-year-old children and adult male from the administration of stable iodine as a function of time before or after an intake of radioiodine.



(a) 1 歳



(b) 成人（男性）

Fig. 2.8 Reduction in the committed thyroid dose to 1-year-old children and adult male from the administration of stable iodine as a function of time before or after an intake of ^{131}I - ^{135}I.

3. 安定ヨウ素剤服用による甲状腺被ばく低減効果

ここでは、前章で説明した安定ヨウ素剤服用を考慮したヨウ素代謝モデル（Johnsonモデル）を組み込んだOSCAARを用いて、ある事故シナリオに対し、防護措置実施による被ばく低減効果を甲状腺被ばく線量の観点から評価した。

3.1 評価条件

(1) ソースターム

本評価では、米国NRCのシビアアクシデント研究（NUREG-1150）に示されるサリー原子力発電所1号機（1250 MWe PWR）での事故シナリオ（格納容器バイパス事故）によるソースタームを用いた[17)]。ソースタームの詳細を**Table 3.1**に示す。本事故シナリオは、ヨウ素の放出割合が10%と大規模な放出を想定したものである。

(2) サイト及び気象条件

軽水炉モデルプラントが原子力機構東海サイトにあるとし、それを中心に、大気中濃度、地表沈着量、被ばく線量、防護措置の実施に関する項目を放出点からの距離で 25 点、同心円状 32 方位で分割し、方位別・距離別に評価を行った。この同心円評価メッシュの値として与えられている人口分布は、平成 2 年国勢調査に基づく地域メッシュデータを基に、支援コード CURRENT にて同心円評価メッシュに変換した。

気象条件については、OSCAAR で整備された 1997 年の気象データ（狭域風速場データ、サイト気象データ、降水データ、気象シーケンスデータ）を用いた。これらのデータは、気象庁の数値予想データ（GPV）の 1 年分（1997 年）から作成した。そして、年間の気象条件（8760 シーケンス）のうち、層別サンプリング法により 248 シーケンスを抽出して評価に用いた。また、地表面からの被ばくに影響する乾性沈着速度については、有機ヨウ素 : 5.0×10^{-4} m/s、有機ヨウ素以外 : 1.0×10^{-3} m/s とした [17)]。

(3) 防護措置実施による被ばく低減効果の評価方法

防護措置実施による被ばく低減効果の評価方法については、まず、気象シーケンス毎に上記の防護措置を実施した際の甲状腺等価線量を方位別・距離別に計算し、距離毎に全方位での最大値を求めた。この時、海上等、人の住んでいない地域を除くため、人口分布を考慮した上で、同心円上での最大線量を選定した。次に、248 全ての気象シーケンスで求めた甲状腺等価線量を低い順に並び替え、気象の累積出現確率 50%及び 95%での甲状腺等価線量について、放出点からの距離との関係を求めた。そして、IAEA の安全要件 GSG-2「原子力または放射線緊急事態に対する準備と対応で用いられる基準」[18)]に示される 7 日間吸入、50 年預託での甲状腺等価線量 50 mSv の指標レベルを基に、防護措置による被ばく低減効果を評価した。甲状腺等価線量の評価にあたり成人（男性）を対象とし、また、安定ヨウ素の服用量を 100 mg とした。

3.2 評価結果

事故後の防護措置は、屋内退避または避難と、安定ヨウ素剤服用との組み合わせで実施されると考えられる。本研究で用いた **Table 3.1** に示す事故シナリオでのソースタームでは、事故発生から放出開始までの期間は 2 時間と短く、また、**Fig. 3.1** に示す被ばく経路毎の被ばく線量の計算結果から、吸入

による被ばくが支配的であることが分かる。そのため、ここでは、放射性雲の通過時に対する防護措置の実施方法が重要となると考えられる。そこで、木造建屋またはコンクリート建屋で屋内退避（2日間）を実施して放射性雲の通過後に避難、あるいは、放出前にあらかじめ避難を行う予防的避難、そして、これらに安定ヨウ素剤服用を組み合わせる方法に対して被ばく低減効果を評価した。**Table 3.2** に本評価で用いた木造建屋またはコンクリート建屋に対する被ばく低減係数（遮へい係数及び換気係数）の一覧を示す[5)]。

(1) 屋内退避

Fig. 3.2 に木造建屋で屋内退避を実施した場合における放出点からの距離と甲状腺等価線量との関係を示す。甲状腺等価線量は、防護措置をしない場合に対し、屋内退避を実施した場合には半減、また、放出と同時に安定ヨウ素剤のみを服用した場合には約 1/100 に低減した。これは、本事故シナリオでは吸入による被ばく経路からの寄与が大きく、安定ヨウ素剤服用による効果が大きいためであると考えられる。ここでは屋内退避を実施した上で放出と同時に安定ヨウ素剤を服用した場合での被ばく低減効果が最も高く、気象の累積出現確率 50%の場合で約 15km 以遠、95%の場合で約 50km 以遠の範囲で指標レベルを下回ることが分かった。また、**Fig. 3.3** に木造建屋での屋内退避の実施における安定ヨウ素剤の服用時期の違いによる被ばく低減効果への影響を示す。放出点周辺では、放出開始と同時に安定ヨウ素剤を服用した場合に比べ、服用時期が遅れる程被ばく低減効果は小さくなるが、放出点から離れるにつれて服用時期が遅れてもその被ばく低減効果は同時に服用した場合と同様になる。例えば、気象の累積出現確率 50%で安定ヨウ素剤の服用が 3 時間遅れた場合には約 12.5 km、6 時間遅れた場合には約 50 km 遠方の評価地点がそれに該当する。これは放出点から評価地点まで遠方である程、放射性雲の到達に時間を要するので、全ての評価地点で同時に服用すると仮定した本評価では、評価地点ごとに服用時期が異なることによって生じたと考えられる。つまり、放出点周辺では放出後に服用した状況であっても、放出点から遠方の地域では放出前に服用した状況と同様になる。本評価結果を基に気象の累積出現確率 95%という厳しい気象条件で考えた場合、放出点から 50 km 以遠の地域においては放射性雲の到達に時間を要するため、放出から 6 時間遅れて安定ヨウ素剤を服用しても指標レベルを下回ることが分かった。

次に、**Fig. 3.4** にコンクリート建屋で屋内退避を実施した場合における放出点からの距離と甲状腺等価線量との関係を示す。コンクリート屋内退避を実施することで、防護措置をしない場合に比べ、約 1/5 に低減した。また、コンクリート屋内退避を行った上で放出と同時に安定ヨウ素剤を服用した場合、気象の累積出現確率 50%の場合で約 10km 以遠、95%の場合で約 30km 以遠にて指標レベルを下回ることが分かった。また、**Fig. 3.5** にコンクリート建屋での屋内退避の実施における安定ヨウ素剤の服用時期の違いによる被ばく低減効果への影響を示す。木造建屋での屋内退避と同様に、放出点周辺では、放出開始と同時に安定ヨウ素剤を服用した場合に比べ、服用時期が遅れるにつれて被ばく低減効果は小さくなるが、放出点から離れるにつれて服用時期が遅れてもその被ばく低減効果は同時に服用した場合と同様になる傾向が見られる。本評価結果を基に気象の累積出現確率 95%で考えた場合、放出点から約 30 km の地域では放出と同時に服用し、また、それ以遠の地域では放射性雲の到達に時間を要するため、放出から 6 時間遅れて安定ヨウ素剤を服用しても指標レベルを下回ることが分かった。

(2) 予防的避難

Fig. 3.6 に予防的避難を実施した場合における放出点からの距離と甲状腺等価線量との関係を示す。

予防的避難の実施にあたり、30km 以内の範囲を対象に避難先を 30 km 地点として評価した。予防的避難のみ実施した場合、防護措置を実施しない場合に比べて大きな被ばく低減効果が得られるが、気象の累積出現確率 50%の場合でも約 30km 以内の範囲で指標レベルを下回ることはなかった。一方、予防的避難を完了し、放出と同時に安定ヨウ素剤を服用した場合には気象の累積出現確率 95%の場合で指標レベルを上回る可能性はあるものの、気象の累積出現確率 50%の場合には全ての範囲で下回ることが確認できた。また、避難が放出開始から 3 時間遅れて完了し、放出と同時に安定ヨウ素剤を服用した場合、気象の累積出現確率 50%の場合でも約 10 km 以内の範囲で指標レベルを上回る。これは、2 章で述べたように OSCAAR の避難モデルでは、移動中は移動前の地域で被ばくするという保守的な評価をするためである。しかし、避難の遅れは被ばくの増加を招くことになるため、放出前に避難完了させるための実施方法を十分に検討しておく必要があるといえる。一方、予防的避難を完了し、放出から 3 時間遅れて安定ヨウ素剤を服用した場合、気象の累積出現確率 95%の場合で指標レベルを上回る可能性はあるものの、気象の累積出現確率 50%の場合には全ての範囲で下回ることが確認できた。これは避難先に放射性雲が通過する前に安定ヨウ素剤を服用できたために被ばく低減効果が十分得られたと考えられる。このように本事故シナリオでは、予防的避難を完了できるよう、その実効性を十分に検討する必要があり、また、安定ヨウ素剤服用については、予防的避難を完了した上で避難先にて放射性雲が通過する前に服用すれば十分な効果が得られることが分かった。

以上のようにヨウ素代謝モデルを OSCAAR に取り入れることで、屋内退避または避難と、安定ヨウ素剤服用との組み合わせによる甲状腺被ばく低減効果について安定ヨウ素剤の服用時期を考慮して評価できることが確認できた。

Table 3.1 Source term for the accident scenario

放出開始までの時間 (h)	放出期間 (h)	放出高さ (m)	放出率						
			Xe-Kr	有機ヨウ素	無機ヨウ素	Cs-Rb	Te-Sb	Ba-Sr,Ru	La
2.0	1.0	10	1.0	0.001	0.1	0.1	0.05	0	0
3.0	5.0	10	-	-	-	-	0.05	0.01	0.001

Table 3.2 Shielding factor and filitering factor

被ばく経路	屋外	木造建屋	コンクリート建屋
放射性雲からの外部被ばくの遮へい係数	1.0	0.8	0.4
地表面からの外部被ばくの遮へい係数	0.7	0.4	0.3
吸入による内部被曝の換気係数	1.0	0.5	0.2
再浮遊物質の吸入による内部被ばくの換気係数	1.0	0.5	0.2

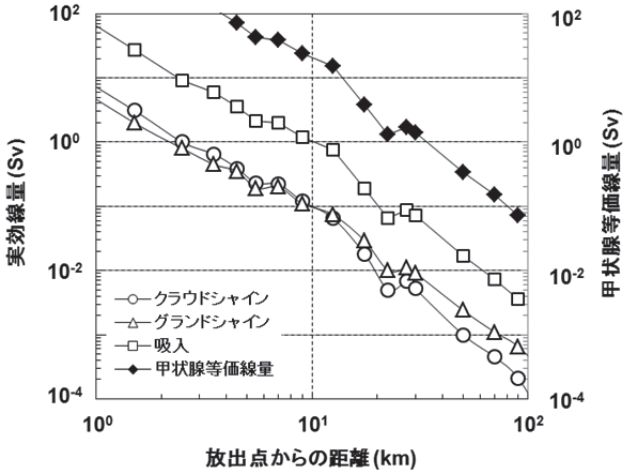


Fig. 3.1 The 50th percentile values of the projected doses in the first 7 days and thyroid doses due to the exposure pathways.

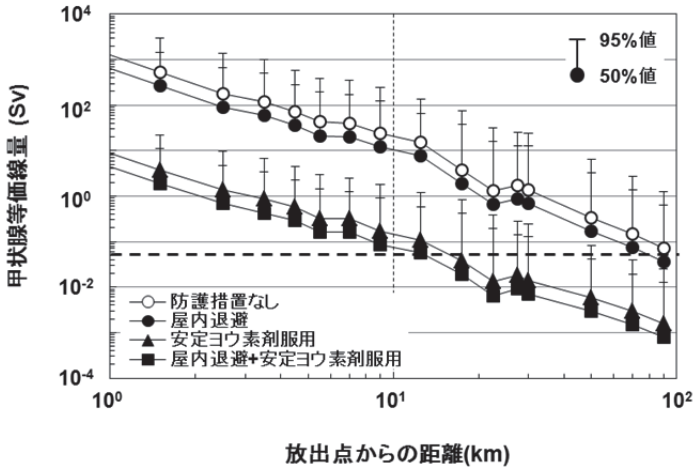


Fig. 3.2 The equivalent doses to the thyroid for sheltering in normal building at each distance followed by radial evacuation.

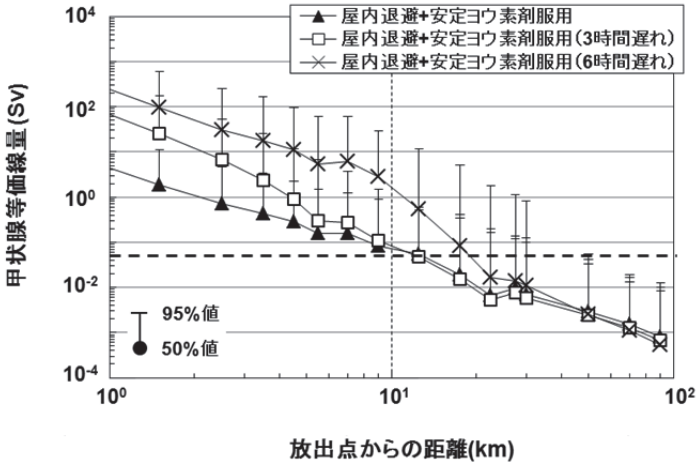


Fig. 3.3 The effect of the delay of iodine thyroid blocking for the equivalent doses to the thyroid for sheltering in normal building at each distance followed by radial evacuation.

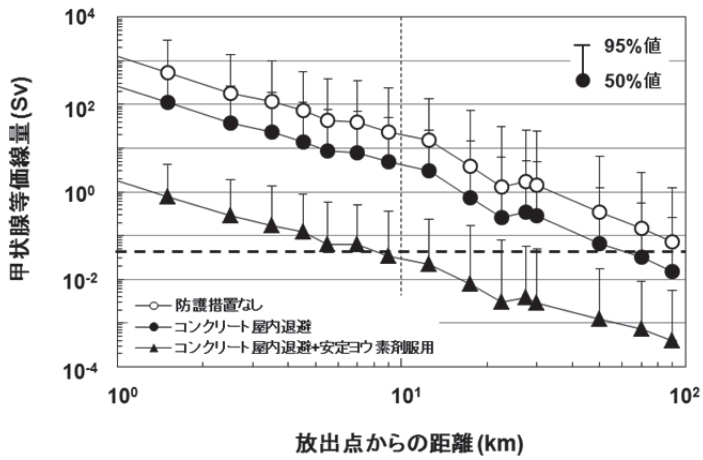


Fig. 3.4 The equivalent doses to the thyroid for sheltering in concrete building at each distance followed by radial evacuation.

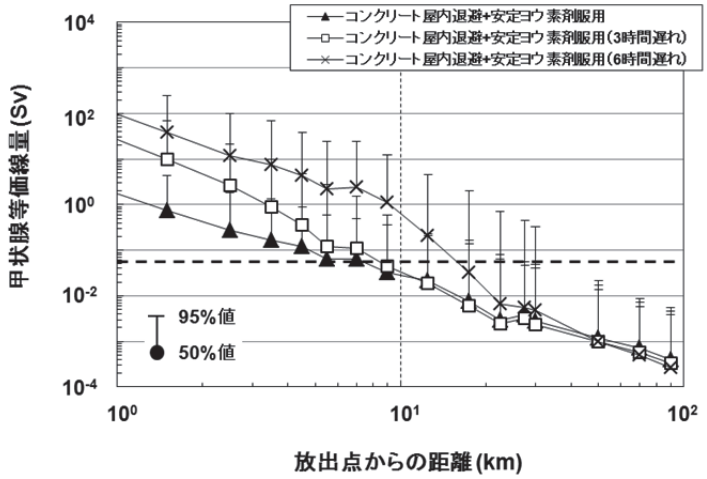


Fig. 3.5 The effect of the delay of iodine thyroid blocking for the equivalent doses to the thyroid for sheltering in concrete building at each distance followed by radial evacuation.

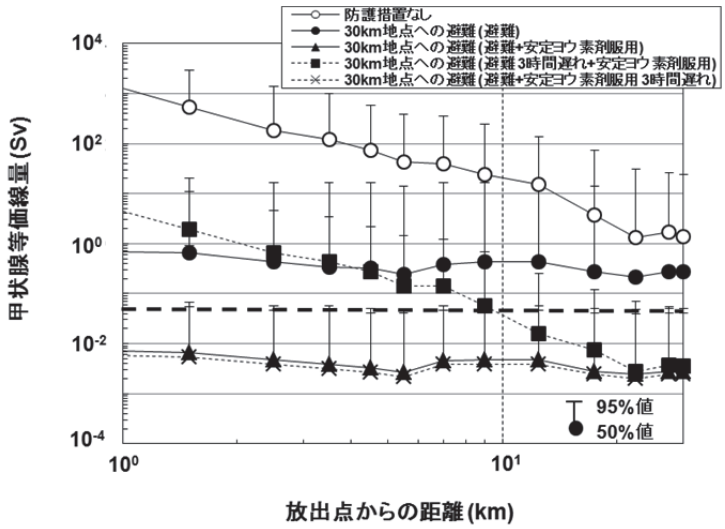


Fig. 3.6 The equivalent doses to the thyroid for precautionary evacuation to 30 km area.

4. まとめ

国や地方自治体による緊急時計画策定に必要な防護措置の実施方法に関する技術的知見を得ることを目的に、本研究では、安定ヨウ素剤の服用時期を評価できるヨウ素代謝モデル（Johnsonモデル）を原子力機構が開発したレベル3PSAコードOSCAARに導入し、防護措置実施による被ばく低減効果の評価の一例として、放出時期の早い事故シナリオに対する防護措置の実施方法を甲状腺被ばくの観点から評価した。

Johnsonモデルで構成される、内臓または肺、血液、甲状腺、軟部組織、膀胱といった複数のコンパートメントでの放射性ヨウ素および安定ヨウ素の時間変化量を基に甲状腺等価線量を計算できるようにすることで、安定ヨウ素剤の服用時期を考慮した防護措置の実施による被ばく低減効果の評価をOSCAARで実施できるようにした。次に、評価の一例として、事故発生から短期間に放出が開始され、吸入による被ばくが支配的な格納容器バイパス事故シナリオに対し、屋内退避を実施して放射性雲の通過後に避難あるいは放出前にあらかじめ避難を行う予防的避難に、安定ヨウ素剤服用を組み合わせる防護措置について、OSCAARを用いてこれらの防護措置実施による被ばく低減効果を評価し、防護措置の実施範囲や実施時期について検討した。その結果、ヨウ素代謝モデルをOSCAARに取り入れることで、安定ヨウ素剤による被ばく低減効果を、その服用時期を考慮して評価できることが確認できた。このように、本研究で開発した評価手法は、緊急時計画策定に必要な防護措置の実施方法を検討するにあたり、有用であると考えられる。

参考文献

1) Crick M, McKenna T, Buglova E, Winkler G, Martincic R. Emergency management in the early phase. Radiation Protection Dosimetry. 109 (1-2), 2004, pp.7-17.
2) Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, United Nations Office for the Co-ordination of Humanitarian Affairs and World Health Organization, Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. Safety Standards Series No. GS-R-2, (Vienna: IAEA) (2002).
3) 原子力安全委員会, 原子力施設等の防災対策について, 昭和 55 年 6 月, 平成 20 年 3 月一部改訂, 2008.
4) Homma T, Tomita K and Hato S. Uncertainty and sensitivity studies with the probabilistic accident consequence assessment code OSCAAR, Nuclear Engineering and Technology. 37 (3), 2005, pp.245-258.
5) 本間俊充, 石川淳, 富田賢一, 村松健, 軽水炉モデルプラントの広範な事故シナリオに対する環境影響評価, JAERI-Research 2000-060, 2000, 80p.
6) United States Nuclear Regulatory Commission. Severe accident risks: an assessment for five U.S. nuclear power plants, final summary, NUREG-1150, vol. 1, USNRC (1990).
7) Homma T, X. Liu and Tomita K. Uncertainty and sensitivity of meteorological sampling scheme on accident consequence assessments, in proceeding of the 5th international conference on probabilistic safety assessment and management, November 27 – December 1, Osaka, 2000.

8) Kocher, D. C. Dose-rate conversion factors for external exposure to photons and electron radiation from radionuclides occurring in routine releases from nuclear fuel cycle facilities. Health Physics, 38, 1980, pp.543-621.
9) 波戸真治, 本間俊充, 原子炉事故時放射線影響解析で用いるための内部被ばく線量係数, JAERI-Data/Code 2005-006, 2005, 549p.
10) 波戸真治, 寺門正人, 富田賢一, 本間俊充, 内部被ばく線量係数計算システム DSYS-GUI のユーザーズマニュアル, JAEA-Data/Code 2008-031, 2009, 75p.
11) Jones J A, Mansfield P A, Haywood S M, Hasemann I, Steinhauer C, Ehrhardt J and Faude D. 1995 PC COSYMA (Version 2): An Accident Consequence Assessment Package for use on a PC. EUR 16239. Luxembourg, EC (1995).
12) Kovari M D, Effect of delay time on effectiveness of stable iodine prophylaxis after intake of radioiodine. Journal of Radiological Protection. 14(2), 1994, pp.131-136.
13) Krajewski P. Working Group on the Chernobyl I-131 release: model validation and assessment of the countermeasure effectiveness. EMRAS - Environmental Modeling for Radiation Safety (http://www-ns.iaea.org/projects/emras/emras-iodine-131-wg.htm); 2003-2007.
14) Johnson J. R. Radioiodine Dosimetry. Journal of Radioanalytical Chemistry. 65, 1981, pp.223-238.
15) World Health Organization. Guidelines for Iodine Prophylaxis following Nuclear Accidents Update 1999 (1999).
16) 原子力安全委員会 原子力施設等防災専門部会, 原子力災害時における安定ヨウ素剤予防服用の考え方について, 2002, 61p.
17) OECD Nuclear Energy Agency and European Commission. Probabilistic accident consequence assessment codes, Second international comparison. Technical report EUR-15109, 1994, 338p.
18) Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Office, Pan American Health Organization and World Health Organization. Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. Safety Standards Series No. GSG-2, (Vienna: IAEA) (2011).

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	$1L=1=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3\ kg$

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G =1Mx\ cm^{-2} =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています