

## 原子力施設等の緊急時における被ばく評価事例集

Case Studies of Radiation Dose Estimation in  
Emergency Situation of Nuclear Facilities

川崎 将亜 中嶋 純也 吉田 圭佑 加藤 小織  
西野 翔 野崎 天生 中川 雅博 角田 潤一  
菅谷 雄基 長谷川 里絵 古谷 美紗 辻 智也  
竹内 絵里奈 嘉成 由紀子 石井 雅人 森下 剣  
東 大輔

Masatsugu KAWASAKI, Junya NAKAJIMA, Keisuke YOSHIDA, Saori KATO  
Sho NISHINO, Teo NOZAKI, Masahiro NAKAGAWA, Junichi TSUNODA  
Yuki SUGAYA, Rie HASEGAWA, Misa FURUTANI, Tomoya TSUJI  
Erina TAKEUCHI, Yukiko KANARI, Masato ISHII, Ken MORISHITA  
and Daisuke HIGASHI

原子力科学研究部門  
原子力科学研究所  
放射線管理部

Department of Radiation Protection  
Nuclear Science Research Institute  
Sector of Nuclear Science Research

March 2017

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, 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, 2017

## 原子力施設等の緊急時における被ばく評価事例集

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門  
原子力科学研究所 放射線管理部

川崎 将亜、中嶋 純也、吉田 圭佑、加藤 小織、西野 翔、野崎 天生、中川 雅博、  
角田 潤一、菅谷 雄基、長谷川 里絵、古谷 美紗、辻 智也、竹内 絵里奈、  
嘉成 由紀子、石井 雅人、森下 剣、東 大輔

(2017年1月12日 受理)

原子力施設の事故発生時においては、事故による影響及びその範囲を迅速に把握するために、放出された放射性物質による一般公衆への影響や放射線事故による作業者の個人被ばく線量を早期に評価し報告することが求められる。そのため、原子力科学研究所放射線管理部においては、事故発生時の迅速な対応に資するために、一般公衆及び作業者の被ばく線量評価について、評価方法及び必要となる各種パラメータ等を想定される事故事例ごとにまとめ、事例集を整備した。本事例集では、原子力科学研究所で想定される各種事故に加え、過去の原子力事故で放出された放射性物質による被ばく評価について扱っており、これらは緊急時における被ばく評価についての知見・技術の継承にも用いることができる。

## **Case Studies of Radiation Dose Estimation in Emergency Situation of Nuclear Facilities**

Masatsugu KAWASAKI, Junya NAKAJIMA, Keisuke YOSHIDA, Saori KATO,  
Sho NISHINO, Teo NOZAKI, Masahiro NAKAGAWA, Junichi TSUNODA, Yuki SUGAYA,  
Rie HASEGAWA, Misa FURUTANI, Tomoya TSUJI, Erina TAKEUCHI, Yukiko KANARI,  
Masato ISHII, Ken MORISHITA and Daisuke HIGASHI

Department of Radiation Protection, Nuclear Science Research Institute,  
Sector of Nuclear Science Research,  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 12, 2017)

In emergency situation of nuclear facilities, estimation of the radiation dose to public due to discharges of radioactivities and the radiation dose to workers due to radiation accident is required to grasp the influence range of accidents in the early stage. Therefore, we prepare the case studies of dose assessment for public exposure dose and personal exposure dose and contribute them to emergency procedures. This document covers assumed accidents of nuclear facilities in Nuclear Science Research Institute and a past accident of nuclear power plant, and it can be used for inheritance of techniques of emergency dose assessment.

Keywords: Dose Estimation, Dose Assessment, Emergency Exposure, Assumed Accident

目 次

1. 序論 .....	1
2. 概要 .....	1
3. 想定事故における被ばく評価事例 .....	2
3.1 研究用原子炉施設の事故における一般公衆の被ばく線量評価 .....	2
3.1.1 事例1 放射性希ガスの放出事故 .....	2
3.1.2 事例2 放射性ヨウ素の放出事故 .....	10
3.1.3 事例3 トリチウムの漏えい事故 .....	22
3.2 核燃料物質使用施設の事故における個人被ばく線量評価 .....	30
3.2.1 事例4 皮膚被ばく事故 .....	30
3.2.2 事例5 濃縮ウラン吸入摂取事故 .....	32
3.2.3 事例6 傷口汚染事故 .....	36
3.3 過去の原子力事故による一般公衆の被ばく線量評価 .....	40
3.3.1 事例7 汚染環境からの外部被ばく .....	40
3.3.2 事例8 災害廃棄物焼却処理に伴い放出される排気による被ばく .....	47
4. あとがき .....	56
謝辞 .....	56
参考文献 .....	57

Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline .....	1
3. Examples .....	2
3.1 Dose assessment for general public due to the radioactivity released from the research reactor facility .....	2
3.1.1 Case 1. Radioactive noble gas leak accident .....	2
3.1.2 Case 2. Radioactive iodine leak accident .....	10
3.1.3 Case 3. Tritium leak accident .....	22
3.2 Dose assessment for worker due to the accident in the nuclear fuel facility .....	30
3.2.1 Case 4. External exposure of skin .....	30
3.2.2 Case 5. Internal exposure by inhalation of enriched uranium .....	32
3.2.3 Case 6. Wound contamination .....	36
3.3 Dose assessment for general public due to the past accident of nuclear power plant .....	40
3.3.1 Case 7. External exposure under contaminated environment .....	40
3.3.2 Case 8. Exposure by radioactivity released from trash burning site .....	47
4. Postscript .....	56
Acknowledgements .....	56
References .....	57

## 1. 序論

原子力施設の事故発生時においては事故収束に向けた活動はもとより、事故により施設外に放出された放射性物質による一般公衆の被ばく線量、あるいは事故により被ばくした作業者の個人被ばく線量を早期に見積もり、事故の影響を把握する必要がある。国立研究開発法人日本原子力研究開発機構原子力科学研究所（以下、「原科研」という）には多種多様な原子力施設が存在することから、起こりうる事故事象も様々であり、緊急時においてこれらの被ばく評価に対応するためには膨大な資料を収集する必要がある。そのため、原科研放射線管理部では、事故発生時においても早期に被ばく評価の対応できるように、想定される各種事故事象について、事故事例ごとに評価方法、必要となるパラメータ及び換算係数をまとめた評価事例集を整備し、緊急時の対応に備えることとした。また、原科研は公共機関として外部機関からの被ばく評価の依頼を受けることも想定し、過去の原子力発電所の事故により放出された放射性物質による被ばく評価を扱った評価事例も作成した。

## 2. 概要

本事例集では、主に原科研の原子力施設で想定される事故事象について取り扱っており、事例1から事例3では原科研の研究用原子炉施設における放射性物質の放出事故を想定し、放射性希ガスによる外部被ばく線量の評価、放射性ヨウ素による外部被ばく線量及び内部被ばく線量の評価、及びトリチウムによる内部被ばく線量の評価方法について記載している。事例4から事例6では、原科研の核燃料物質使用施設における作業者の被ばく事象について、外部被ばくと内部被ばくとのそれぞれの観点から評価方法を記載している。また、事例7及び事例8は、過去の原子力事故により放出された放射性物質による影響として、放射性物質により汚染された環境下で生活する人々の被ばく評価及び災害廃棄物を処理した焼却場から放出された放射性物質による一般公衆の被ばく評価を扱っている。

### 3. 想定事故における被ばく評価事例

#### 3.1 研究用原子炉施設の事故における一般公衆の被ばく線量評価

ここでは、研究用原子炉施設から放出された放射性物質による、一般公衆の被ばく評価方法についてまとめている。評価方法については、主に「原子力安全委員会 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」<sup>1)</sup>、「原子力安全委員会発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」<sup>2)</sup>を参考としている。

##### 3.1.1 事例1 放射性希ガスの放出事故

###### 想定事故

研究用原子炉施設において、照射実験中に照射カプセルの破損により、放射性希ガスを放出する事故があった。放射性希ガスの外部被ばくによる周辺公衆の実効線量を評価する。

###### 事故の条件

(1) 放出された放射性希ガスはクリプトン (Kr) 及びキセノン (Xe) であり、核種ごとの放出量は、下記のとおりとする。

$^{87}\text{Kr}$	$1.60 \times 10^{12} \text{ Bq}$
$^{88}\text{Kr}$	$1.02 \times 10^{12} \text{ Bq}$
$^{89}\text{Kr}$	$6.99 \times 10^{13} \text{ Bq}$
$^{90}\text{Kr}$	$4.18 \times 10^{14} \text{ Bq}$
$^{135}\text{Xe}$	$5.85 \times 10^{11} \text{ Bq}$
$^{137}\text{Xe}$	$7.70 \times 10^{13} \text{ Bq}$
$^{138}\text{Xe}$	$2.13 \times 10^{13} \text{ Bq}$
$^{139}\text{Xe}$	$3.76 \times 10^{14} \text{ Bq}$

(2) 放出された放射性希ガスを含む排気は、1時間で全量が排気筒から放出されるものとする。

なお、研究用原子炉施設の排気筒の高さは50mとする。

(3) 気象条件は以下のとおりとし、事象発生期間中は一定とする。

- ・ 風速：1.5 m/s
- ・ 大気安定度：B
- ・ 風向：北北東

(4) 原子炉施設の風下方向の敷地境界までの距離は1,150mである。

###### 評価対象

- ・ 一般公衆の被ばく

i) 原子炉施設の風下方向の敷地境界における実効線量

放射性希ガスの放出であるため、内部被ばくは考慮せず、外部被ばくに係る実効線量を求める。

ii) 原子炉施設の風下方向の評価地点における最大実効線量及び施設からの距離

**評価方法**

放射性希ガスの放出事故における評価のフローをFig.3.1.1-1に示す。評価は手順1から手順4に従って行い、それぞれの手順に必要な条件やパラメータ等を (a) から (e) とした。与えられた事故の条件及び評価に必要なパラメータ等をTable 3.1.1-1及びTable 3.1.1-2にまとめた。なお、Fig.3.1.1-1の記号 (a) ~ (e) はTable 3.1.1-1の記号にそれぞれ対応している。

(手順1) 放出率の評価

放出された核種ごとの放出率を次式により求める。

$$Q_i = \frac{A_i}{t} \quad (3.1.1-1)$$

ここで、  
 $Q_i$  : 核種iの排気筒からの放出率 (Bq/h)  
 $A_i$  : 核種iの排気筒からの放出量 (Bq)  
 $t$  : 放出時間 (h)

(手順2) 風下軸上空気カーマ率分布図による特定条件下での空気カーマ率

地上高さ50.0 mの排気筒から放出される放射性雲の風下軸上空気カーマ率分布図 (Fig.3.1.1-2) から大気安定度Bにおける、特定の条件下 (放出高さ: 50.0 m、風速: 1.0 m/s、放出率:  $1.0 \times 10^9$  Bq/h、 $\gamma$ 線平均エネルギー: 0.5 MeV、 $\gamma$ 線実効エネルギー1.0 MeV/dis) での風下方向距離1,150m (施設から敷地境界までの距離) の地点の空気カーマ率及び空気カーマ率が最大となる地点の距離を読み取る。

(手順3) 実際の状況下での空気カーマ率の評価

手順2で読み取った空気カーマ率を、実際の状況下での放出核種の放出率、 $\gamma$ 線実効エネルギー及び気象条件 (風速) により補正する。

$$D_i = \frac{D_0 \times Q_i \times E_i}{U} \quad (3.1.1-2)$$

ここで、  
 $D_i$  : 核種iの実際の状況下での空気カーマ率 (Gy/h)  
 $D_0$  : 分布図上の空気カーマ率 (Gy/h)  
 $Q_i$  : 核種iの放出率 (GBq/h)  
 $E_i$  : 核種iの $\gamma$ 線実効エネルギー (MeV/dis)  
 $U$  : 風速 (m/s)

## (手順4) 外部被ばくによる実効線量の推定

手順3で評価した実際の状況下での空気カーマ率から、一般公衆の放射性希ガスからの外部被ばく実効線量を次式により求める。

$$H_{\gamma i}(\text{Sv}) = K \times D_i \times f_h \times f_o \times t \quad (3.1.1-3)$$

ここで、 $H_{\gamma i}$  : 核種*i*による実効線量 (Sv)  
 $K$  : 空気カーマ・実効線量換算係数 (Sv/Gy)  
 $f_h$  : 建屋の遮蔽係数  
 $f_o$  : 居住係数  
 $t$  : 放出時間 (h)

**評価結果**

## (手順1) 放出率の評価

放出された核種ごとの放出率は以下のとおりとなる。

$^{87}\text{Kr}$	$1.60 \times 10^{12}$ Bq/h
$^{88}\text{Kr}$	$1.02 \times 10^{12}$ Bq/h
$^{89}\text{Kr}$	$6.99 \times 10^{13}$ Bq/h
$^{90}\text{Kr}$	$4.18 \times 10^{14}$ Bq/h
$^{135}\text{Xe}$	$5.85 \times 10^{11}$ Bq/h
$^{137}\text{Xe}$	$7.70 \times 10^{13}$ Bq/h
$^{138}\text{Xe}$	$2.13 \times 10^{13}$ Bq/h
$^{139}\text{Xe}$	$3.76 \times 10^{14}$ Bq/h

## (手順2) 風下軸上空気カーマ率分布図による特定条件下での空気カーマ率

風下軸上空気カーマ率分布図から読み取った、敷地境界地点での空気カーマ率並びに空気カーマ率が最大となる地点の距離及び空気カーマ率は以下のとおりとなる。

- ・分布図上の敷地境界距離 (1,150 m) での空気カーマ率 :  $5.8 \times 10^{-10}$  Gy/h
- ・分布図上の空気カーマ率の最大値 :  $1.9 \times 10^{-9}$  Gy/h (排気筒からの距離280 m)

## (手順3) 実際の状況下での空気カーマ率の評価

計算例 : 分布図上の敷地境界距離 (1,150 m) における、実際の状況下での $^{87}\text{Kr}$ からの空気カーマ率は、

$$D_{Kr-87} = \frac{5.8 \times 10^{-10} \times 1.60 \times 10^{12} \times 0.793}{1.5} = 4.9 \times 10^{-7} \text{ Gy/h}$$

となる。

同様に計算した各評価地点における実際の状況下での空気カーマ率の評価の結果をTable 3.1.1-3に示す。

(手順4) 一般公衆の放射性希ガスからの外部被ばく実効線量の推定

計算例：布図上の敷地境界距離（1,150 m）における、実際の状況下での $^{87}\text{Kr}$ からの外部被ばく実効線量は、

$$H_{\gamma Kr-87} = 1 \times 4.9 \times 10^{-7} \times 1.0 \times 1.0 \times 1.0 = 4.9 \times 10^{-4} \text{ mSv}$$

となる。

同様に計算し、各評価地点における一般公衆の放射性希ガスからの外部被ばく実効線量を推定した結果をTable 3.1.1-4に示す。

評価結果の取扱いについて、原科研では、実効線量が最大となる地点が敷地境界の内側の場合には敷地境界地点の評価値を一般公衆の被ばく線量として採用し、実効線量が最大となる地点が敷地の外側の場合には、実効線量が最大となる地点の評価値を一般公衆の被ばく線量として採用している。よって、本事例では、実効線量が最大となる地点が敷地境界の内側となるため、敷地境界地点における評価値（ $4.1 \times 10^{-1} \text{ mSv}$ ）を一般公衆の被ばく線量として採用する。

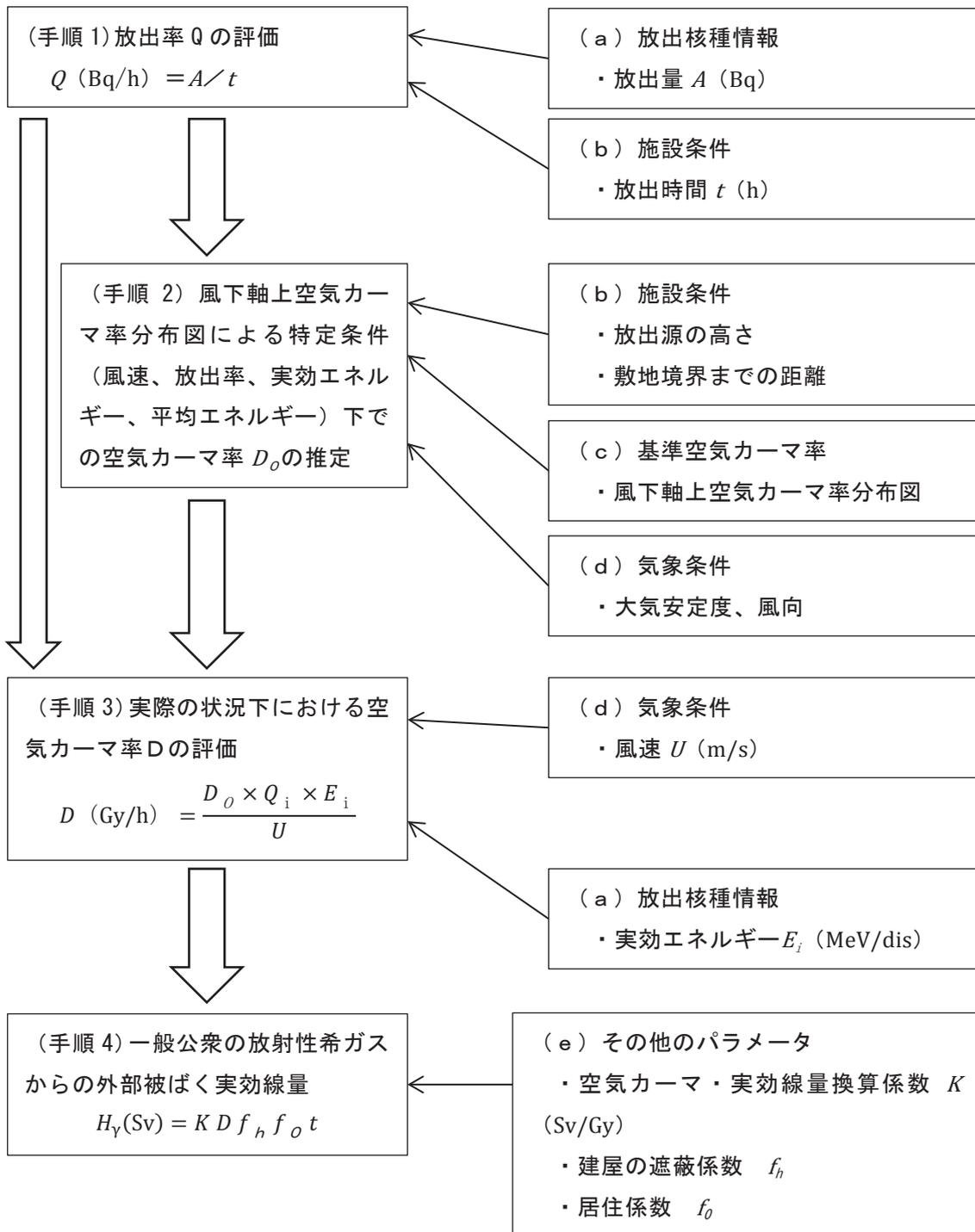


Fig.3.1.1-1 放射性希ガスからの外部被ばく実効線量の評価フロー

風速: 1.0 m/s 放出高さ: 50.0 m 放出率: 1.0E+9 Bq/h  
 $\gamma$ 線平均エネルギー: 0.5 MeV/photon  $\gamma$ 線実効エネルギー: 1.0 MeV/dis

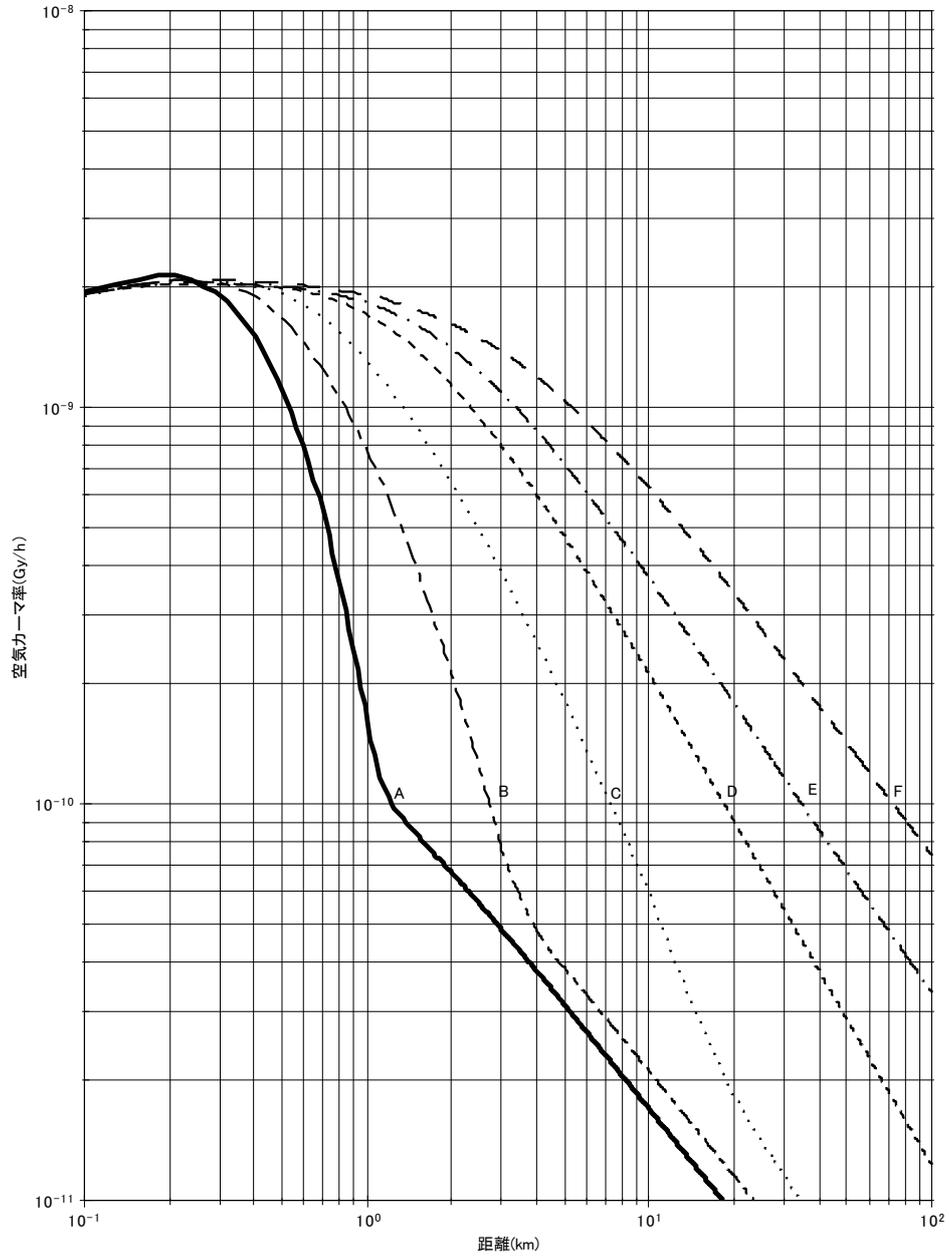


Fig.3.1.1-2 風下軸上空気カーマ率分布図 (放出高さ50.0 m) <sup>4)</sup>

Table 3.1.1-1 被ばく評価に必要なパラメータ等

項 目	備 考
<b>(a) 放出核種情報</b>	
・ 化学形	希ガス単体
・ 核種、放出量	$^{87}\text{Kr}$ $1.60 \times 10^{12}$ Bq $^{88}\text{Kr}$ $1.02 \times 10^{12}$ Bq $^{89}\text{Kr}$ $6.99 \times 10^{13}$ Bq $^{90}\text{Kr}$ $4.18 \times 10^{14}$ Bq $^{135}\text{Xe}$ $5.85 \times 10^{11}$ Bq $^{137}\text{Xe}$ $7.70 \times 10^{13}$ Bq $^{138}\text{Xe}$ $2.13 \times 10^{13}$ Bq $^{139}\text{Xe}$ $3.76 \times 10^{14}$ Bq
・ $\gamma$ 線実効エネルギー	Table 3.1.1-2参照 参考文献3
<b>(b) 施設条件</b>	
・ 排気筒高さ	地上50 m
・ 放出時間（滞在時間） $t$	1 h
<b>(c) 基準空気カーマ率 <math>D_0</math></b>	
・ 風下軸上空気カーマ率分布図	Fig.3.1.1-2参照 参考文献4
<b>(d) 気象条件</b>	
・ 風速 $U$	1.5 m/s
・ 大気安定度	B
・ 風向	北北東 敷地境界まで1,150 m
<b>(e) 空気カーマ・実効線量換算係数 <math>K</math></b>	
建屋の遮蔽係数 $f_h$	1.0 参考文献5
居住係数 $f_0$	1.0 参考文献5

Table 3.1.1-2 放出核種、放出量、 $\gamma$ 線実効エネルギー

核種	$\gamma$ 線実効エネルギー (MeV/dis)
$^{87}\text{Kr}$	0.793
$^{88}\text{Kr}$	1.950
$^{89}\text{Kr}$	2.067
$^{90}\text{Kr}$	1.325
$^{135}\text{Xe}$	0.250
$^{137}\text{Xe}$	0.181
$^{138}\text{Xe}$	1.183
$^{139}\text{Xe}$	0.850

Table 3.1.1-3 核種ごとの空気カーマ率

核種	空気カーマ率最大値点における	敷地境界地点における
	空気カーマ率 (Gy/h) (施設からの距離：280 m)	空気カーマ率 (Gy/h) (施設からの距離：1,150 m)
$^{87}\text{Kr}$	$1.6 \times 10^{-6}$	$4.9 \times 10^{-7}$
$^{88}\text{Kr}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$7.7 \times 10^{-7}$
$^{89}\text{Kr}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$5.6 \times 10^{-5}$
$^{90}\text{Kr}$	$7.0 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-4}$
$^{135}\text{Xe}$	$1.9 \times 10^{-7}$	$5.7 \times 10^{-8}$
$^{137}\text{Xe}$	$1.8 \times 10^{-5}$	$5.4 \times 10^{-6}$
$^{138}\text{Xe}$	$3.2 \times 10^{-5}$	$9.7 \times 10^{-6}$
$^{139}\text{Xe}$	$4.0 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$

Table 3.1.1-4 放射性希ガスからの外部被ばく実効線量

核種	空気カーマ率最大値点における	敷地境界地点における
	実効線量 (mSv) (施設からの距離：280 m)	実効線量 (mSv) (施設からの距離：1,150 m)
$^{87}\text{Kr}$	$1.6 \times 10^{-3}$	$4.9 \times 10^{-4}$
$^{88}\text{Kr}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$7.7 \times 10^{-4}$
$^{89}\text{Kr}$	$1.8 \times 10^{-1}$	$5.6 \times 10^{-2}$
$^{90}\text{Kr}$	$7.0 \times 10^{-1}$	$2.1 \times 10^{-1}$
$^{135}\text{Xe}$	$1.9 \times 10^{-4}$	$5.7 \times 10^{-5}$
$^{137}\text{Xe}$	$1.8 \times 10^{-2}$	$5.4 \times 10^{-3}$
$^{138}\text{Xe}$	$3.2 \times 10^{-2}$	$9.7 \times 10^{-3}$
$^{139}\text{Xe}$	$4.0 \times 10^{-1}$	$1.2 \times 10^{-1}$
合計	1.3	$4.1 \times 10^{-1}$

### 3.1.2 事例2 放射性よう素の放出事故

#### 事故想定

研究用原子炉施設において、燃料破損が発生し、放射性よう素を放出する事故があった。一般公衆における放射性よう素の吸入摂取による内部被ばく実効線量（3月児、1歳児、5歳児、10歳、15歳、成人）及び放射性よう素からの外部被ばく実効線量を評価する。

#### 事故の条件

(1) 放出された放射性よう素は、よう素 131 ( $^{131}\text{I}$ )、よう素 132 ( $^{132}\text{I}$ )、よう素 133 ( $^{133}\text{I}$ )、よう素 134 ( $^{134}\text{I}$ ) 及びよう素 135 ( $^{135}\text{I}$ ) とし、核種ごとの放出量は、下記のとおりとする。

$^{131}\text{I}$              $4.23 \times 10^6 \text{ Bq}$

$^{132}\text{I}$              $2.40 \times 10^8 \text{ Bq}$

$^{133}\text{I}$              $4.25 \times 10^7 \text{ Bq}$

$^{134}\text{I}$              $1.13 \times 10^9 \text{ Bq}$

$^{135}\text{I}$              $1.26 \times 10^8 \text{ Bq}$

(2) 放射性よう素を含む空気は、1時間で全量が原子炉建屋から地上放出されたものとする。

(3) 気象条件は以下のとおりとし、事象発生期間中は一定とする。

- ・ 風速：2.0 m/s
- ・ 大気安定度：C
- ・ 風向：東北東

(4) 原子炉施設の風下方向の敷地境界までの距離は460 mである。

(5) 放射性物質の放出において建屋の影響は考慮しないものとする。

#### 評価対象

- ・ 一般公衆の被ばく（各種年齢層別）

原子炉施設の風下方向の敷地境界における実効線量

放射性よう素の吸入による内部被ばく実効線量及び放射性よう素からの外部被ばく実効線量を求め、両者を合算して評価値とする。なお、地上放出の場合は、放出源付近が実効線量最大値点となるため、敷地境界地点における評価値を一般公衆の被ばく線量とする。

## 評価方法

放射性よう素の放出事故における評価のフローをFig.3.1.2-1に示す。評価は手順1から手順4に従って行い、それぞれの手順に必要な条件やパラメータ等を (a) から (h) とした。与えられた事故の条件及び評価に必要なパラメータ等をTable 3.1.2-1からTable 3.1.2-4にまとめた。なお、Fig.3.1.2-1の記号 (a) ~ (h) はTable 3.1.2-1の記号にそれぞれ対応している。

### (手順1) 放出率の評価

放出された核種ごとの放出率を次式により求める。

$$Q_i = \frac{A_i}{t} \quad (3.1.2-1)$$

ここで、  
 $Q_i$  : 核種*i*の排気筒からの放出率 (Bq/h)  
 $A_i$  : 核種*i*の排気筒からの放出量 (Bq)  
 $t$  : 放出時間 (h)

### (手順2) 風下軸上放射能濃度分布図及び風下軸上空気カーマ率分布図による特定条件下での放射能濃度及び空気カーマ率

地上放出(放出高さ:地上0m)される放射性雲の風下軸上放射能濃度分布図から大気安定度Cにおける、特定の条件下(放出高さ:0.0m、風速:1.0 m/s、放出率: $1.0 \times 10^9$  Bq/h)での風下方向距離460m(施設から敷地境界までの距離)の地点の放射能濃度を読み取る。

地上放出(放出高さ:地上0m)される放射性雲の風下軸上空気カーマ率分布図から大気安定度Cにおける、特定の条件下(放出高さ:0.0 m、風速:1.0 m/s、放出率: $1.0 \times 10^9$  Bq/h、 $\gamma$ 線平均エネルギー:0.5 MeV、 $\gamma$ 線実効エネルギー1.0 MeV/dis)での風下方向距離460m(施設から敷地境界までの距離)の地点の空気カーマ率を読み取る。

### (手順3) 実際の状況下での放射能濃度及び空気カーマ率の評価

#### ・放射能濃度の評価

手順2で読み取った放射能濃度を、放出核種の放出率及び気象条件(風速)により補正する。

$$\chi_i = \frac{\chi_0 \times 10^{-6} \times Q_i}{U} \quad (3.1.2-2)$$

ここで、 $\chi_i$  : 核種*i*の実際の状況下での放射能濃度 (Bq/cm<sup>3</sup>)  
 $\chi_0$  : 分布図上の放射能濃度 (Bq/m<sup>3</sup>)  
 $Q_i$  : 核種*i*の放出率 (GBq/h)  
 $U$  : 風速 (m/s)  
 $10^{-6}$  : 変換係数 (m<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)

・空気カーマ率の評価

手順2で読み取った空気カーマ率を、放出核種の放出率、 $\gamma$ 線実効エネルギー及び気象条件(風速)により補正する。

$$D_i = \frac{D_0 \times Q_i \times E_i}{U} \quad (3.1.2-3)$$

ここで、 $D_i$  : 核種*i*の実際の状況下での空気カーマ率 (Gy/h)  
 $D_0$  : 分布図上の空気カーマ率 (Gy/h)  
 $Q_i$  : 核種*i*の放出率 (GBq/h)  
 $E_i$  : 核種*i*の $\gamma$ 線実効エネルギー (MeV/dis)  
 $U$  : 風速 (m/s)

(手順4) 一般公衆の放射性よう素の吸入摂取による内部被ばく実効線量及び放射性よう素からの外部被ばく実効線量

・放射性よう素の吸入摂取による内部被ばく実効線量

手順3で評価した実際の状況下での放射能濃度から、放射性よう素の吸入摂取による内部被ばく実効線量を評価する。

$$H_{ii} = e_i \times \chi_i \times t \times I \quad (3.1.2-4)$$

ここで、 $H_{ii}$  : 核種*i*による実効線量 (Sv)  
 $e_i$  : 核種*i*の実効線量係数 (Sv/Bq)  
 $t$  : 滞在時間 (h)  
 $I$  : 呼吸率 (cm<sup>3</sup>/h)

・放射性よう素からの外部被ばく実効線量

手順3で評価した実際の状況下での空気カーマ率から、放射性よう素からの外部被ばく実効線量を評価する。

$$H_{\gamma i}(\text{Sv}) = K \times D_i \times f_h \times f_o \times t \quad (3.1.2-5)$$

ここで、 $H_{\gamma i}$  : 核種*i*による実効線量 (Sv)  
 $K$  : 空気カーマ・実効線量換算係数 (Sv/Gy)  
 $f_h$  : 建屋の遮蔽係数  
 $f_0$  : 居住係数

### 評価結果

#### (手順1) 放出率の評価

放出された核種ごとの放出率は以下のとおりとなる。

$^{131}\text{I}$	$4.23 \times 10^6 \text{ Bq/h}$
$^{132}\text{I}$	$2.40 \times 10^8 \text{ Bq/h}$
$^{133}\text{I}$	$4.25 \times 10^7 \text{ Bq/h}$
$^{134}\text{I}$	$1.13 \times 10^9 \text{ Bq/h}$
$^{135}\text{I}$	$1.26 \times 10^8 \text{ Bq/h}$

#### (手順2) 風下軸上放射能濃度分布図による特定条件下での放射能濃度及び空気カーマ率

風下軸上放射能濃度分布図 (Fig.3.1.2-2) から読み取った、敷地境界地点での放射能濃度は以下のとおりとなる。

- ・分布図上の敷地境界距離 (460 m) での放射能濃度:  $61 \text{ Bq/m}^3$

風下軸上空気カーマ率分布図 (Fig.3.1.2-3) から読み取った、敷地境界地点での空気カーマ率は以下のとおりとなる。

- ・分布図上の敷地境界距離 (460 m) での空気カーマ率:  $3.4 \times 10^{-9} \text{ Gy/h}$

#### (手順3) 実際の状況下での放射能濃度及び空気カーマ率の評価

計算例: 分布図上の敷地境界距離 (460 m) における、実際の状況下での $^{131}\text{I}$ の放射能濃度は、

$$\chi_{I-131} = \frac{6.1 \times 10^1 \times 4.23 \times 10^6}{2.0} = 1.3 \times 10^{-7} \text{ Bq/cm}^3$$

となる。

また、分布図上の敷地境界距離 (460 m) における、実際の状況下での $^{131}\text{I}$ からの空気カーマ率は、

$$D_{I-131} = \frac{3.4 \times 10^{-9} \times 4.23 \times 10^6 \times 0.381}{2.0} = 2.7 \times 10^{-6} \text{ Gy/h}$$

となる。

同様に計算し、各評価地点における実際の状況下での空气中放射能濃度及び空気カーマ率の評価の結果をそれぞれTable 3.1.2-5及びTable 3.1.2-6に示す。

(手順4) 一般公衆の放射性よう素の吸入摂取による内部被ばく実効線量及び放射性よう素からの外部被ばく実効線量の推定

計算例：3月児の<sup>131</sup>Iの吸入摂取による内部被ばく実効線量は、

$$H_{I-131} = 1.7 \times 10^{-7} \times 1.3 \times 10^{-7} \times 1.0 \times 1.19 \times 10^5 = 2.6 \times 10^{-6} \text{ mSv}$$

となる。

また、<sup>131</sup>Iからの外部被ばく実効線量は、

$$H_{\gamma I-131} = 1 \times 2.7 \times 10^{-6} \times 1.0 \times 1.0 \times 1.0 = 2.7 \times 10^{-9} \text{ mSv}$$

となる。

同様に計算し、一般公衆の放射性よう素の吸入摂取による内部被ばく実効線量及び放射性よう素からの外部被ばく実効線量を推定した結果をTable 3.1.2-7及びTable 3.1.2-8にそれぞれに示す。また、内部被ばく及び外部被ばくによる一般公衆の実効線量の合計値をTable 3.1.2-9に示す。

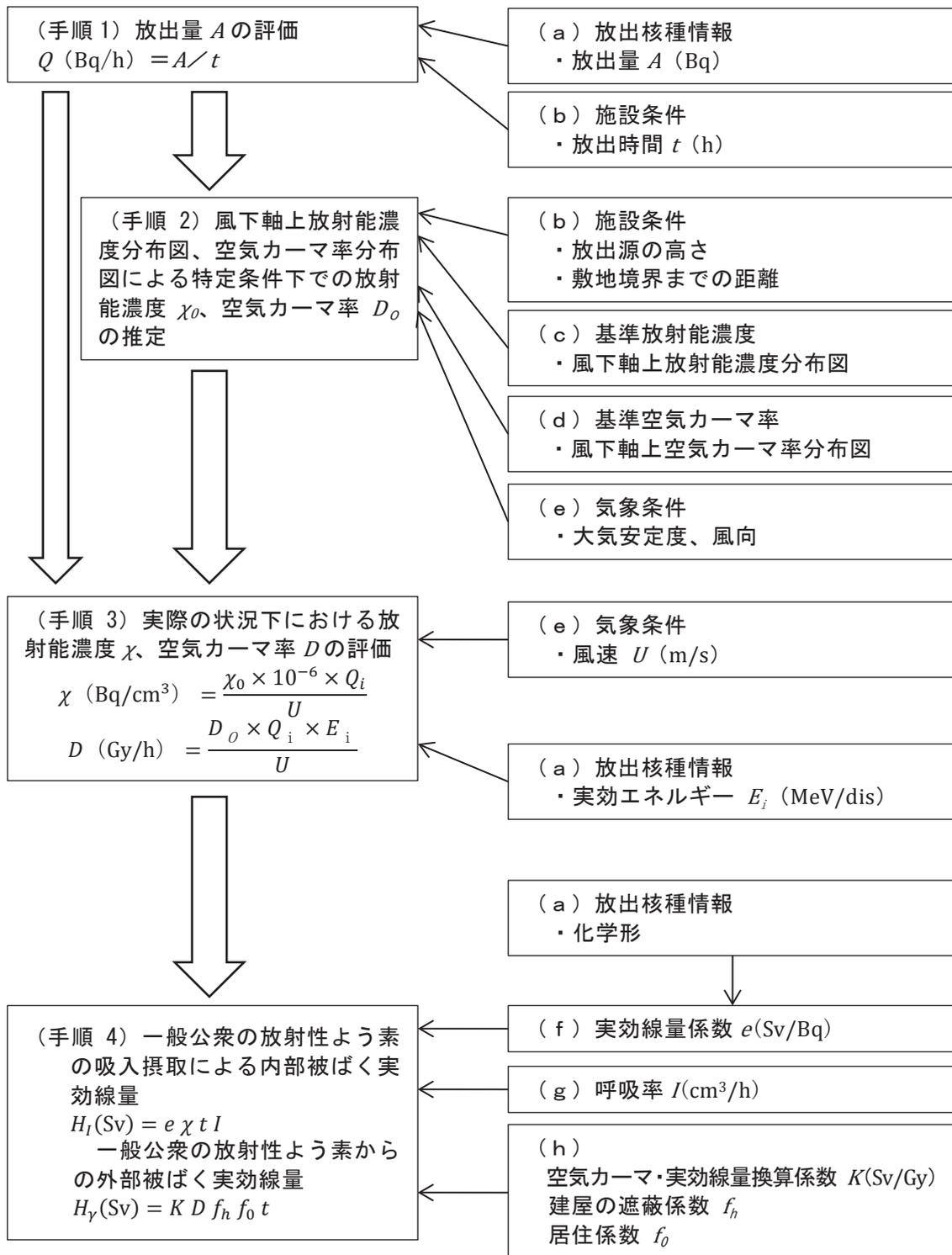


Fig.3.1.2-1 放射性よう素の吸入摂取による内部被ばく及び放射性よう素からの外部被ばく実効線量の評価フロー

風速: 1.0 m/s 放出高さ: 0.0 m 放出率: 1.0E+9 Bq/h

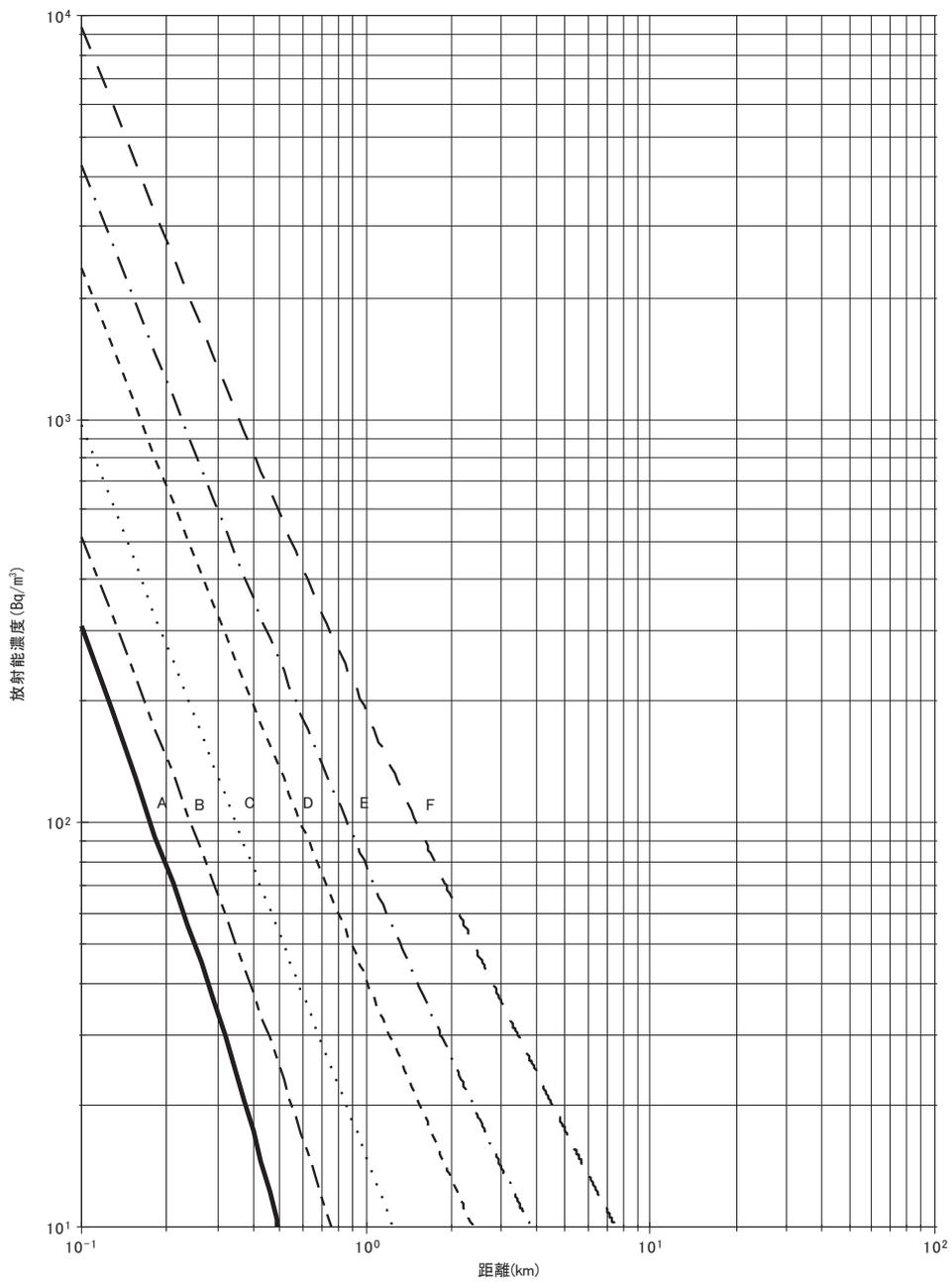


Fig.3.1.2-2 風下軸上放射能濃度分布図 (放出高さ0.0 m) 4)

風速:1.0 m/s 放出高さ:0.0 m 放出率:1.0E+9 Bq/h  
 γ線平均エネルギー:0.5 MeV/photon γ線実効エネルギー:1.0 MeV/dis

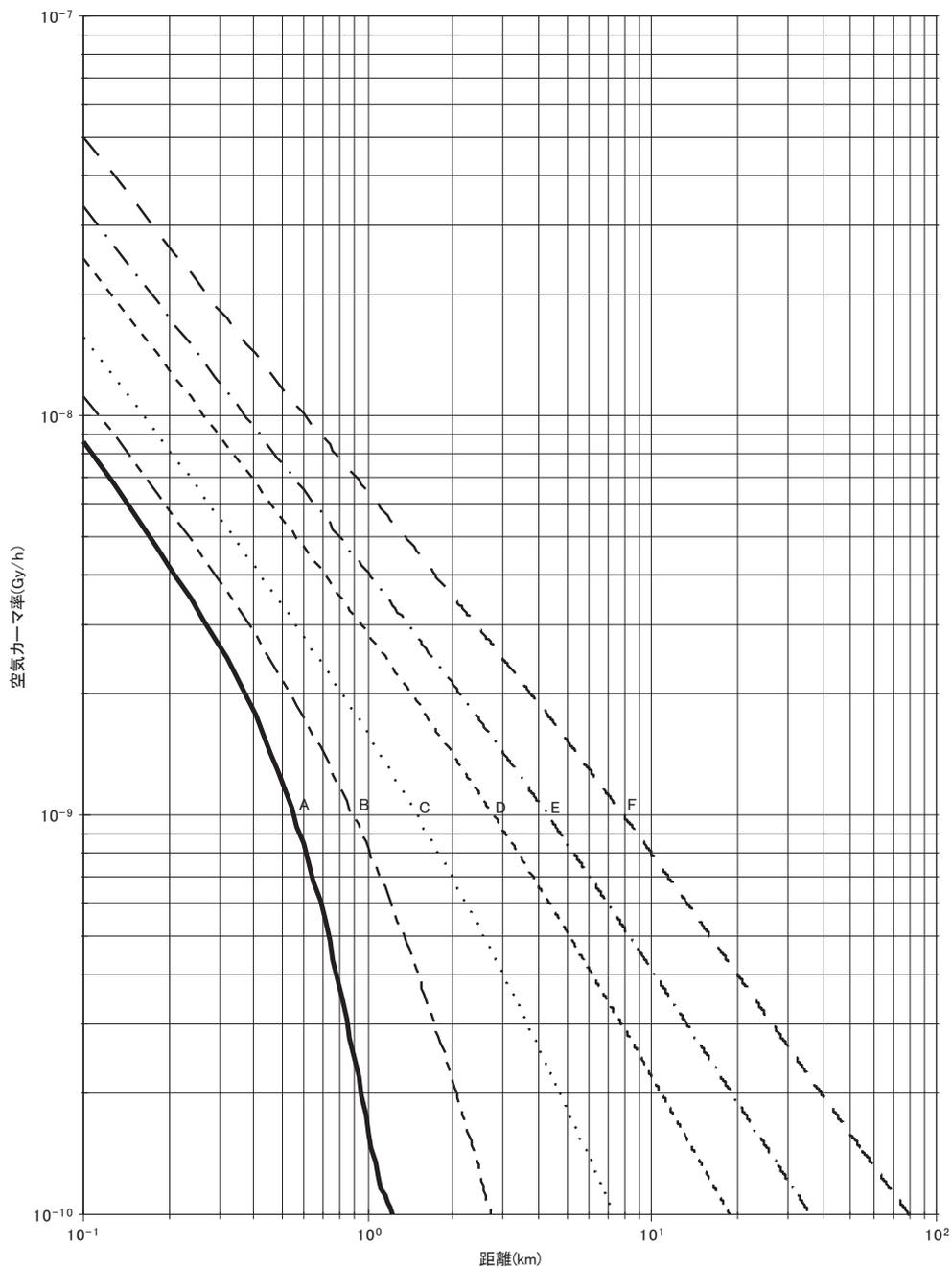


Fig.3.1.2-3 風下軸上空気カーマ率分布図 (放出高さ0.0 m) 4)

Table 3.1.2-1 被ばく評価に必要なパラメータ等

項 目	備 考
(a) 放出核種情報	
・ 化学形	蒸気
・ 放出核種、放出量	$^{131}\text{I}$ $4.23 \times 10^6 \text{ Bq}$ $^{132}\text{I}$ $2.40 \times 10^8 \text{ Bq}$ $^{133}\text{I}$ $4.25 \times 10^7 \text{ Bq}$ $^{134}\text{I}$ $1.13 \times 10^9 \text{ Bq}$ $^{135}\text{I}$ $1.26 \times 10^8 \text{ Bq}$
・ $\gamma$ 線実効エネルギー	Table 3.1.2-2参照 参考文献3
(b) 施設条件	
・ 放出高さ	地上0 m 研究用原子炉施設の炉室より地上放出 ※建屋の影響は考慮しないものとする。
・ 放出時間（滞在時間） $t$	1 h
(c) 基準放射能濃度 $\chi_0$	
・ 風下軸上放射能濃度分布図	Fig.3.1.2-2参照 参考文献4
(d) 基準空気カーマ率 $D_0$	
・ 風下軸上空気カーマ率分布図	Fig.3.1.2-3参照 参考文献4
(e) 気象条件	
・ 風速 $U$	2.0 m/s
・ 大気安定度	C
・ 風向	東北東 敷地境界まで460 m
(f) 放射性よう素の吸入摂取による実効線量係数 $e$	
	Table 3.1.2-3参照 参考文献6
(g) 呼吸率（各種年齢層別） $I$	
	Table 3.1.2-4参照 参考文献6
(h) 空気カーマ・実効線量換算係数 $K$	
建屋の遮蔽係数 $f_h$	1.0
居住係数 $f_0$	1.0

Table 3.1.2-2 放出核種、放出量、 $\gamma$ 線実効エネルギー

核種	$\gamma$ 線実効エネルギー (MeV/dis)
$^{131}\text{I}$	0.381
$^{132}\text{I}$	2.253
$^{133}\text{I}$	0.608
$^{134}\text{I}$	2.750
$^{135}\text{I}$	1.645

Table 3.1.2-3 各年齢層の実効線量係数 (Sv/Bq)

年齢層	$^{131}\text{I}$	$^{132}\text{I}$	$^{133}\text{I}$	$^{134}\text{I}$	$^{135}\text{I}$
3月児	$1.7 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-9}$	$4.5 \times 10^{-8}$	$8.7 \times 10^{-10}$	$9.7 \times 10^{-9}$
1歳児	$1.6 \times 10^{-7}$	$2.3 \times 10^{-9}$	$4.1 \times 10^{-8}$	$6.9 \times 10^{-10}$	$8.5 \times 10^{-9}$
5歳児	$9.4 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-10}$	$4.5 \times 10^{-9}$
10歳	$4.8 \times 10^{-8}$	$6.4 \times 10^{-10}$	$9.7 \times 10^{-9}$	$2.2 \times 10^{-10}$	$2.1 \times 10^{-9}$
15歳	$3.1 \times 10^{-8}$	$4.3 \times 10^{-10}$	$6.3 \times 10^{-9}$	$1.6 \times 10^{-10}$	$1.4 \times 10^{-9}$
成人	$2.0 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-10}$	$4.0 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-10}$	$9.2 \times 10^{-10}$

Table 3.1.2-4 各年齢層の呼吸率

年齢層	呼吸率 ( $\text{cm}^3/\text{年}$ )	呼吸率 ( $\text{cm}^3/\text{時間}^*$ )
3月児	$1.04 \times 10^9$	$1.19 \times 10^5$
1歳児	$1.88 \times 10^9$	$2.15 \times 10^5$
5歳児	$3.18 \times 10^9$	$3.63 \times 10^5$
10歳	$5.58 \times 10^9$	$6.37 \times 10^5$
15歳	$7.34 \times 10^9$	$8.38 \times 10^5$
成人	$8.10 \times 10^9$	$9.25 \times 10^5$

\* 1年間を8760時間とした (365日/年 $\times$ 24時間/日)

Table 3.1.2-5 核種ごとの放射能濃度

核種	敷地境界地点における 放射能濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> ) (施設からの距離 : 460 m)	
	<sup>131</sup> I	$1.3 \times 10^{-7}$
<sup>132</sup> I	$7.3 \times 10^{-6}$	
<sup>133</sup> I	$1.3 \times 10^{-6}$	
<sup>134</sup> I	$3.4 \times 10^{-5}$	
<sup>135</sup> I	$3.8 \times 10^{-6}$	

Table 3.1.2-6 核種ごとの空気カーマ率

核種	敷地境界地点における 空気カーマ率 (Gy/h) (施設からの距離 : 460 m)	
	<sup>131</sup> I	$2.7 \times 10^{-12}$
<sup>132</sup> I	$9.2 \times 10^{-10}$	
<sup>133</sup> I	$4.4 \times 10^{-11}$	
<sup>134</sup> I	$5.3 \times 10^{-9}$	
<sup>135</sup> I	$3.5 \times 10^{-10}$	

Table 3.1.2-7 放射性よう素の吸入摂取による内部被ばく実効線量

核種	敷地境界地点における実効線量 (mSv) (施設からの距離 : 460 m)					
	3月児	1歳児	5歳児	10歳	15歳	成人
<sup>131</sup> I	$2.6 \times 10^{-6}$	$4.4 \times 10^{-6}$	$4.4 \times 10^{-6}$	$3.9 \times 10^{-6}$	$3.4 \times 10^{-6}$	$2.4 \times 10^{-6}$
<sup>132</sup> I	$2.4 \times 10^{-6}$	$3.6 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$	$2.1 \times 10^{-6}$
<sup>133</sup> I	$6.9 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$9.9 \times 10^{-6}$	$8.0 \times 10^{-6}$	$6.8 \times 10^{-6}$	$4.8 \times 10^{-6}$
<sup>134</sup> I	$3.6 \times 10^{-6}$	$5.1 \times 10^{-6}$	$4.9 \times 10^{-6}$	$4.8 \times 10^{-6}$	$4.6 \times 10^{-6}$	$4.8 \times 10^{-6}$
<sup>135</sup> I	$4.4 \times 10^{-6}$	$7.0 \times 10^{-6}$	$6.3 \times 10^{-6}$	$5.1 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-6}$	$3.3 \times 10^{-6}$
合計	$2.0 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-5}$

Table 3.1.2-8 放射性よう素からの外部被ばく実効線量

核種	敷地境界地点における実効線量 (mSv)	
	(施設からの距離 : 460 m)	
<sup>131</sup> I	$2.7 \times 10^{-9}$	
<sup>132</sup> I	$9.2 \times 10^{-7}$	
<sup>133</sup> I	$4.4 \times 10^{-8}$	
<sup>134</sup> I	$5.3 \times 10^{-6}$	
<sup>135</sup> I	$3.5 \times 10^{-7}$	
合計	$6.6 \times 10^{-6}$	

Table 3.1.2-9 内部被ばく実効線量及び外部被ばく実効線量の合計値

	敷地境界地点における実効線量 (mSv)					
	(施設からの距離 : 460 m)					
	3月児	1歳児	5歳児	10歳	15歳	成人
内部被ばく	$2.0 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-5}$
外部被ばく	$6.6 \times 10^{-6}$					
合計	$2.7 \times 10^{-5}$	$3.9 \times 10^{-5}$	$3.6 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{-5}$

### 3.1.3 事例3 トリチウムの漏えい事故

#### 事故想定

研究用原子炉施設において高濃度トリチウムを含む重水系配管あるいは機器類が損傷して重水が漏えいし、その結果、重水中のトリチウムが排気筒から環境に拡散した。一般公衆におけるトリチウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量（3月児、1歳児、5歳児、10歳、15歳、成人）を評価する。

#### 事故の条件

- (1) 漏えいした重水は、50℃の飽和蒸気の形態で大気へ放散される。
- (2) 事故発生後、手動操作により重水区画は隔離された（約1時間）。
- (3) 施設からの情報提供で、大気へ放散された重水蒸気を含む空気量は、重水区画を隔離するまでの900 m<sup>3</sup>（約1時間）と回収作業が終了するまでの300 m<sup>3</sup>（約1時間）の合計1200 m<sup>3</sup>であった。（実際には、建屋排気率と作業時間で決定される。）
- (4) 重水中のトリチウム濃度は $3.7 \times 10^8$  Bq/cm<sup>3</sup>である※。
- (5) 漏えいしたトリチウムを含む排気は、2時間で全量が排気筒から放出されるものとする。なお、研究用原子炉施設の排気筒の高さは40mとする。
- (6) 気象条件は以下のとおりとし、事象発生期間中は一定とする。
  - ・ 風速：1.5 m/s
  - ・ 大気安定度：C
  - ・ 風向：東
- (7) 当該原子炉施設の風下方向の敷地境界までの距離は350 mである。

※ トリチウムモニタにより、直接、排気中トリチウム濃度が与えられる場合もある。

#### 評価対象

- ・ 一般公衆の被ばく（各種年齢層別）
  - i) 当該原子炉施設の風下方向の敷地境界における実効線量
  - ii) 当該原子炉施設の風下方向における最大実効線量及び施設からの距離

### 評価方法

トリチウムの漏えいにおける評価のフローをFig.3.1.3-1に示す。評価は手順1から手順4に従って行い、それぞれの手順に必要な条件やパラメータ等を (a) から (g) とした。与えられた事故の条件及び評価に必要なパラメータ等を、Table 3.1.3-1からTable 3.1.3-3にまとめた。なお、Fig.3.1.3-1の記号 (a) ～ (g) はTable 3.1.3-1の記号にそれぞれ対応している。

#### (手順1) 放出量、放出率の評価

放出時間帯にわたるトリチウム放出量を次式により求める。

$$A = \frac{S \times V}{D} \times C \quad (3.1.3-1)$$

ここで、  
 $A$  : 放出量 (Bq)  
 $S$  : 飽和水蒸気量 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )  
 $V$  : 排気筒からの空気の放出量 ( $\text{m}^3$ )  
 $D$  : 重水密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 $C$  : 重水中のトリチウム濃度 ( $\text{Bq}/\text{cm}^3$ )

トリチウムの放出量から放出率を次式により求める。

$$Q = \frac{A}{t} \quad (3.1.3-2)$$

ここで、  
 $Q$  : 放出率 ( $\text{Bq}/\text{h}$ )  
 $t$  : トリチウムの放出時間 (h)

#### (手順2) 風下軸上放射能濃度分布図による特定条件下での放射能濃度

地上高さ40.0 mの排気筒から放出される放射性雲の風下軸上放射能濃度分布図 (Fig.3.1.3-2) から大気安定度Cにおける、特定の条件下 (条件: 高さ40.0m、風速: 1.0 m/s、放出率:  $1.0 \times 10^9 \text{ Bq}/\text{h}$ ) での風下方向距離350m (施設から敷地境界までの距離) の地点の放射能濃度及び放射能濃度が最大となる地点の距離を読み取る。

#### (手順3) 実際の状況下での放射能濃度の評価

手順2で読み取った放射能濃度を、トリチウムの放出率及び気象条件 (風速) により補正する。

$$\chi = \frac{\chi_0 \times 10^{-6} \times Q}{U} \quad (3.1.3-3)$$

ここで、  
 $\chi$  : 実際の状況下での放射能濃度 (Bq/cm<sup>3</sup>)  
 $\chi_0$  : 分布図上の放射能濃度 (Bq/m<sup>3</sup>)  
 $Q$  : トリチウムの放出率 (GBq/h)  
 $U$  : 風速 (m/s)  
 $10^{-6}$  : 変換係数 (m<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)

(手順4) 一般公衆のトリチウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量

手順3で評価した実際の状況下での放射能濃度から、トリチウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量を次式により求める。

$$H_I = e \times \chi \times t \times I \times f_S \quad (3.1.3-4)$$

ここで、  
 $H_I$  : 実効線量 (mSv)  
 $e$  : 実効線量係数 (mSv/Bq)  
 $I$  : 呼吸率 (cm<sup>3</sup>/h)  
 $f_S$  : 皮膚吸収による増加係数 (※)

※トリチウム水で汚染した雰囲気下では、皮膚を通じての吸収が、摂取された全トリチウム水のおよそ3分の1に寄与する。

#### 評価結果

(手順1) 放出量、放出率の評価

放出されたトリチウムの放出量及び放出率は以下のとおりとなる。

- ・ 放出量  $3.34 \times 10^{13}$  Bq
- ・ 放出率  $1.67 \times 10^4$  GBq/h

(手順2) 風下軸上放射能濃度分布図による特定条件下での放射能濃度

風下軸上放射能濃度分布図から読み取った、敷地境界地点での放射能濃度は以下のとおりとなる。

- ・ 分布図上の敷地境界距離 (350 m) での放射能濃度 : 21 Bq/m<sup>3</sup>
- ・ 分布図上の放射能濃度の最大値 : 24 Bq/m<sup>3</sup> (排気筒からの距離450 m)

(手順3) 実際の状況下での放射能濃度の評価

実際の敷地境界距離（排気筒からの距離350 m）での放射能濃度は、

$$\chi_{350\text{m}} = \frac{2.1 \times 10^1 \times 10^{-6} \times 1.67 \times 10^4}{1.5} = 2.3 \times 10^{-1} \text{ Bq/cm}^3$$

となる。

また、実際の最大放射能濃度地点（排気筒からの距離450 m）の放射能濃度は、

$$\chi_{450\text{m}} = \frac{2.4 \times 10^1 \times 10^{-6} \times 1.67 \times 10^4}{1.5} = 2.7 \times 10^{-1} \text{ Bq/cm}^3$$

となる。

(手順4) 一般公衆のトリチウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量の推定

計算例：3月児のトリチウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量は、

$$\begin{aligned} H_{I,350\text{m}} &= 6.4 \times 10^{-11} \times 2.3 \times 10^{-1} \times 2 \times 1.19 \times 10^5 \times 1.5 \\ &= 2.6 \times 10^{-3} \text{ mSv} \end{aligned}$$

となる。

同様に計算し、一般公衆のトリチウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量を推定した結果をTable 3.1.3-4に示す。本事例では、実効線量が最大となる地点が敷地境界の外側となるため、最大となる地点（排気筒の風下方向距離450mの地点）における評価値を一般公衆の被ばく線量として採用する。

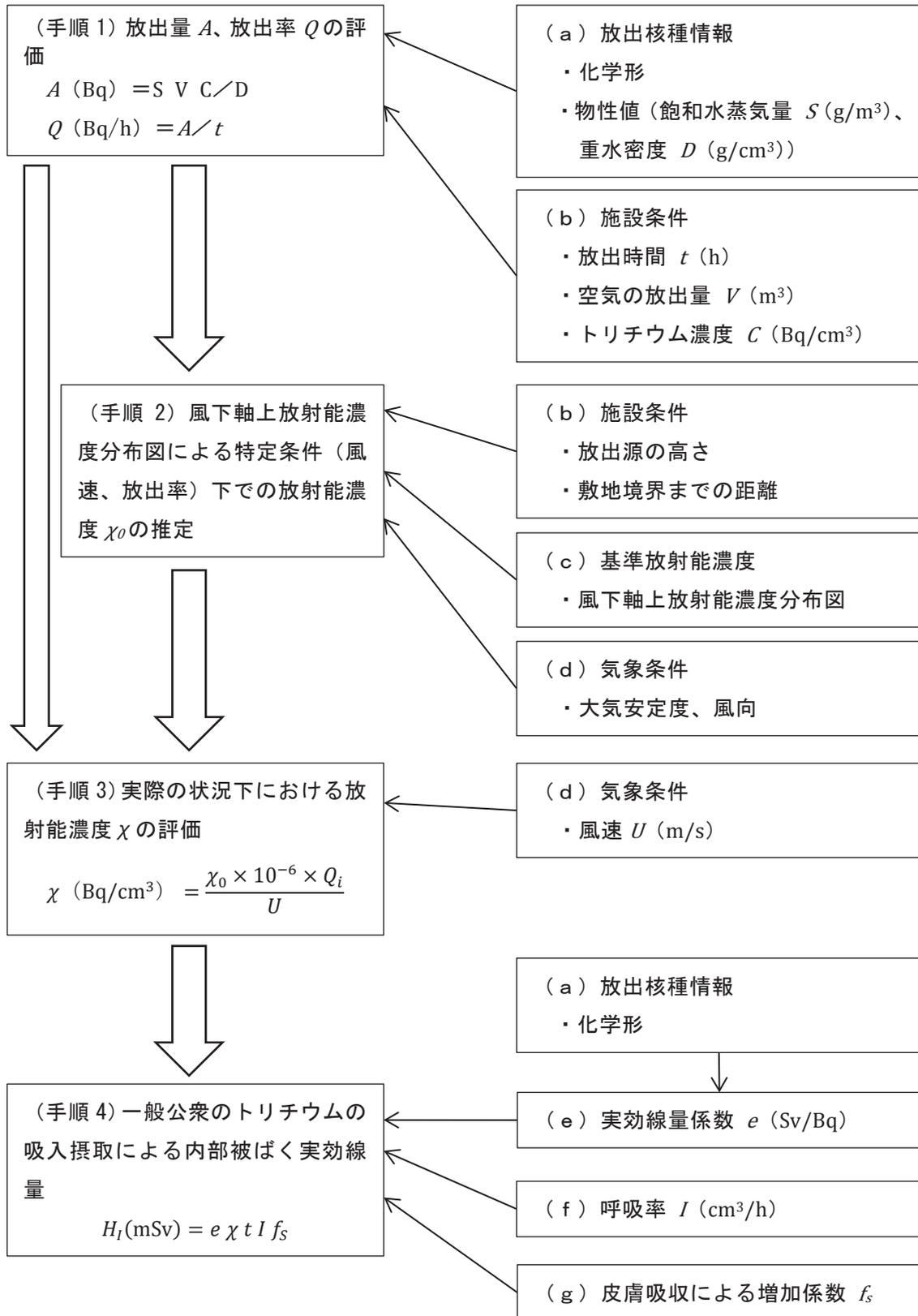


Fig.3.1.3-1 トリチウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量の評価フロー

風速: 1.0 m/s 放出高さ: 40.0 m 放出率: 1.0E+9 Bq/h

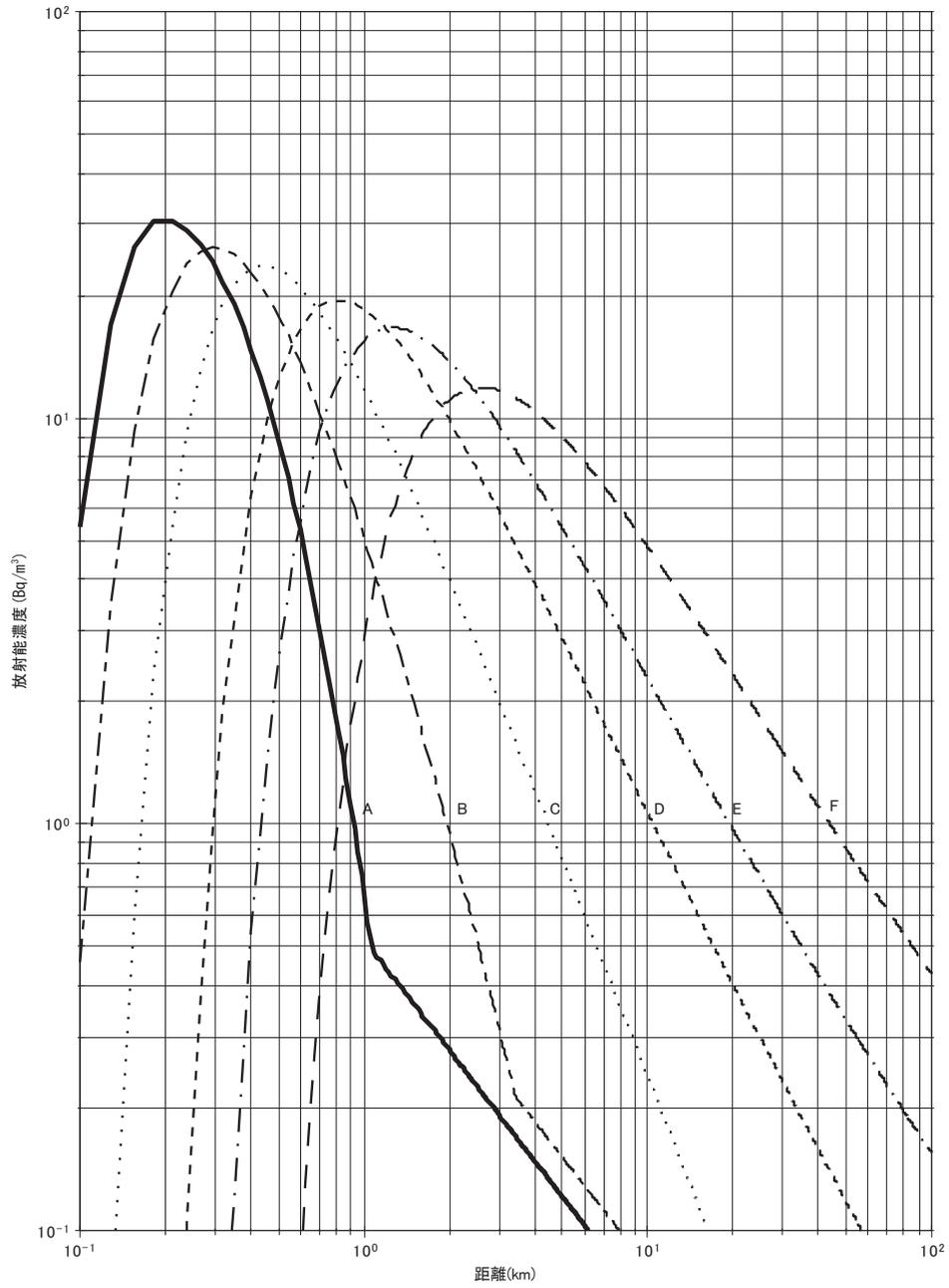


Fig.3.1.3-2 風下軸上放射能濃度分布図 (放出高さ40.0 m) <sup>2)</sup>

Table 3.1.3-1 被ばく評価に必要なパラメータ等

項目	備考	
(a) 放出核種情報		
・化学形	D <sub>2</sub> O蒸気	
・飽和水蒸気量 (50℃)	約83 g/m <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> Oの物性値で代用した。
・重水密度	約1.105 g/cm <sup>3</sup>	1atm、20℃
・重水中トリチウム濃度	3.7×10 <sup>8</sup> Bq/cm <sup>3</sup>	
(b) 施設条件		
・排気筒高さ	地上40 m	
・放出時間 (滞在時間) <i>t</i>	2 h	
(c) 基準放射能濃度 $\chi_0$		
・風下軸上放射能濃度分布図	Fig.3.1.3-2参照	参考文献2
(d) 気象条件		
・風速	1.5 m/s	
・大気安定度	C	
・風向	東	敷地境界まで350 m
(e) トリチウムの吸入摂取による実効線量係数 <i>e</i>		
	Table 3.1.3-2参照	参考文献7
(f) 呼吸率 (各種年齢層別) <i>I</i>		
	Table 3.1.3-3参照	参考文献6
(g) 皮膚吸収による増加係数 <i>f<sub>S</sub></i>		
	1.5	参考文献8、9

Table 3.1.3-2 各年齢層の実効線量係数

年齢層	実効線量係数 (Sv/Bq)
3月児	6.4×10 <sup>-11</sup>
1歳児	4.8×10 <sup>-11</sup>
5歳児	3.1×10 <sup>-11</sup>
10歳	2.3×10 <sup>-11</sup>
15歳	1.8×10 <sup>-11</sup>
成人	1.8×10 <sup>-11</sup>

Table 3.1.3-3 各年齢層の呼吸率

年齢層	呼吸率 (cm <sup>3</sup> /年)	呼吸率 (cm <sup>3</sup> /時間*)
3月児	1.04 × 10 <sup>9</sup>	1.19 × 10 <sup>5</sup>
1歳児	1.88 × 10 <sup>9</sup>	2.15 × 10 <sup>5</sup>
5歳児	3.18 × 10 <sup>9</sup>	3.63 × 10 <sup>5</sup>
10歳	5.58 × 10 <sup>9</sup>	6.37 × 10 <sup>5</sup>
15歳	7.34 × 10 <sup>9</sup>	8.38 × 10 <sup>5</sup>
成人	8.10 × 10 <sup>9</sup>	9.25 × 10 <sup>5</sup>

\* 1年間を8760時間とした (365日/年 × 24時間/日)

Table 3.1.3-4 トリチウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量

年齢層	敷地境界地点における	放射能濃度最大値点における
	実効線量 (mSv) (施設からの距離 : 350 m)	実効線量 (mSv) (施設からの距離 : 450 m)
3月児	5.3 × 10 <sup>-3</sup>	6.1 × 10 <sup>-3</sup>
1歳児	7.2 × 10 <sup>-3</sup>	8.3 × 10 <sup>-3</sup>
5歳児	7.9 × 10 <sup>-3</sup>	9.0 × 10 <sup>-3</sup>
10歳	1.0 × 10 <sup>-2</sup>	1.2 × 10 <sup>-2</sup>
15歳	1.1 × 10 <sup>-2</sup>	1.2 × 10 <sup>-2</sup>
成人	1.2 × 10 <sup>-2</sup>	1.3 × 10 <sup>-2</sup>

### 3.2 核燃料物質使用施設の事故における個人被ばく線量評価

ここでは、核燃料物質使用施設で発生した事故における作業者の被ばく評価方法についてまとめている。評価方法については、主に「原子力安全技術センター 被ばく線量の測定・評価マニュアル」<sup>10)</sup>を参考としている。

#### 3.2.1 事例4 皮膚被ばく事故

##### 想定事故

核燃料物質使用施設において、使用済み燃料の分離変換試験の作業終了後に作業者の身体サーベイを実施したところ、皮膚に汚染が確認された。

##### 事故の条件

- (1) GM管式表面汚染検査計による測定の結果、表面汚染密度は1 MBq/cm<sup>2</sup> (汚染面積100 cm<sup>2</sup>) であり、 $\gamma$ 線波高分析装置による核種分析を行ったところ、セシウム137 (<sup>137</sup>Cs) が確認された。
- (2) 作業者の作業開始から除染終了までの時間が1時間であった。

##### 評価対象

- ・作業員の外部被ばく線量

##### 評価方法

皮膚表面の汚染密度及び汚染核種又は $\beta$ 線最大エネルギーが既知の場合、皮膚の70 $\mu$ m線量当量率を次式により求める。<sup>11)</sup>

$$H_{70\mu\text{m}} = A \times D(E_{\text{max}}, h) \times C \quad (3.2.1)$$

- ここで、
- $A$  : 皮膚表面の汚染密度 (Bq/cm<sup>2</sup>)
  - $D(E_{\text{max}}, h)$  : 核種又は $\beta$ 線の最大エネルギー $E_{\text{max}}$ 及び線源の大きさに応じた単位放射能面密度当たりの皮膚の吸収線量率 ((nGy/h)/(Bq/cm<sup>2</sup>))
  - $C$  : 皮膚の吸収線量から線量当量への線質係数 (=1) (nSv · nGy<sup>-1</sup>)

汚染面積 100 cm<sup>2</sup>における<sup>137</sup>Csによる単位放射能面密度当たりの皮膚の吸収線量率 $D(E_{\text{max}}, h)$ は、参考文献10及び11より、1 Bq/cm<sup>2</sup>あたり1537 nGy/hである。

##### 評価結果

<sup>137</sup>Csの皮膚被ばく線量 (70 $\mu$ m線量当量) は、

$$\begin{aligned} H_{70\mu m} &= 10^6 \times 1537 \times 1 \\ &= 1.537 \times 10^9 \text{ nSv/h} \\ &= 1.537 \text{ Sv/h} \end{aligned}$$

よって、皮膚被ばく線量は除染終了までの1時間で 1.537 Sv となる。

・他の文献による計算結果

Generic procedures for assessment and response during radiological emergency, IAEA-TECDOC-1162, (2000)<sup>13)</sup>に記載されている算出式及び換算係数を使用して計算した結果、皮膚被ばく線量は1.6 Svとなり同様の結果が得られた。

## 3.2.2 事例5 濃縮ウラン吸入摂取事故

## 想定事故

核燃料物資使用施設において、濃縮ウランを取り扱う実験中に汚染が発生した。作業員1名の内部被ばくが疑われたため、胸部計測及び尿バイオアッセイ分析を実施した。

## 事故の条件

- (1) 取り扱っていた濃縮ウランの化学形は、三酸化ウラン ( $\text{UO}_3$ ) 及び酸化ウラン ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ) であった。
- (2) 濃縮ウランの同位体比は、ウラン 234 ( $^{234}\text{U}$ ) が 0.029 %、ウラン 235 ( $^{235}\text{U}$ ) が 3.5 %、ウラン 238 ( $^{238}\text{U}$ ) が 96.471 %であった。
- (3) 胸部計測の結果：43 Bq ( $^{235}\text{U}$ )、尿バイオアッセイの結果：6.5 Bq/1日尿 ( $^{238}\text{U}$ )
- (4) 胸部計測は摂取から約2時間後に実施し、尿試料は摂取後24時間分を全て採取し分析した。

## 評価対象

- ・作業員の内部被ばく線量

## 評価方法

与えられた事故の条件及び評価に必要となるパラメータをTable 3.2.2-1にまとめた。

(評価方法1) 胸部測定に基づく濃縮ウラン吸入による実効線量の評価

胸部測定の結果から吸入した濃縮ウランの摂取量を次式により求める。

$$A_i = B_i / C \quad (3.2.2-1)$$

- ここで、
- $A_i$  : U(質量数:i)の摂取量 (Bq)
  - $B_i$  : 胸部測定で得られたU(質量数:i)の胸部残留量 (Bq)
  - $C$  : 摂取から2時間後の肺中残留率

濃縮ウランの吸入による実効線量を次式により求める。

$$E_i = A_i \times D_i \quad (3.2.2-2)$$

- ここで、
- $E_i$  : U(質量数:i)による実効線量 (Sv)
  - $D_i$  : U(質量数:i)による実効線量換算係数 (Sv/Bq)

実効線量  $E$  (mSv) は、

$$E = E_{234} + E_{235} + E_{238} \quad (3.2.2-3)$$

(評価方法2) 尿バイオアッセイに基づく濃縮ウラン吸入による実効線量の評価

尿バイオアッセイの結果から吸入した濃縮ウランの摂取量を次式により求める。

$$A_i = B_i / C \quad (3.2.2-4)$$

ここで、  
 $A_i$  : U(質量数 : i)の摂取量 (Bq)  
 $B_i$  : 尿バイオアッセイで得られたU(質量数 : i)の尿中排泄量 (Bq/日尿)  
 $C$  : 1日当たりの尿中排泄率 (日尿<sup>-1</sup>)  
 濃縮ウランの吸入による実効線量を次式により求める。

$$E_i = A_i \times D_i \quad (3.2.2-5)$$

ここで、  
 $E_i$  : U(質量数 : i)による実効線量 (Sv)  
 $D_i$  : U(質量数 : i)による実効線量換算係数 (Sv/Bq)

実効線量  $E$  (mSv) は、

$$E = E_{234} + E_{235} + E_{238} \quad (3.2.2-6)$$

上記 (A)、(B) において、肺中残留率、尿中排泄率及び実効線量換算係数は、摂取したウラン化合物の化学的性質によって異なる値をとる。体内へのウラン吸収速度の違いにより、Fタイプ (吸収が速い)、Mタイプ (中くらい)、Sタイプ (遅い) に大別でき、難溶性のUO<sub>3</sub>はMタイプ、不活性のU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>はSタイプに分類される。

本想定事故では、UO<sub>3</sub> (Mタイプ)、U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (Sタイプ) の混合比が不明であるため、吸入したウランの全量がMタイプであった場合、Sタイプであった場合についてそれぞれ評価し、より大きな実効線量を与える結果を上限値として採用することとする。

#### 評価結果

(評価方法1) 胸部測定に基づく濃縮ウラン吸入による実効線量の評価

$$B_{235} = 43 \text{ Bq}$$

$$C = 7.0 \times 10^{-2} \text{ (Mタイプ)}, 7.5 \times 10^{-2} \text{ (Sタイプ)}$$

摂取2時間後の値は参考文献10による

(3.2.2-1) 式より、<sup>235</sup>Uの摂取量は、

$$A_{235} = B_{235} / C = 6.14 \times 10^2 \text{ Bq (Mタイプ)}$$

$$5.73 \times 10^2 \text{ Bq (Sタイプ)}$$

次に、U同位体比からU放射能比を求める。

U (質量数  $i$ ) の原子数  $N_i$  と放射能  $A_i$  の間には以下の関係が成り立つ。

$$N_{234} : N_{235} : N_{238} = \frac{A_{234}}{\lambda_{234}} : \frac{A_{235}}{\lambda_{235}} : \frac{A_{238}}{\lambda_{238}}$$

ここで、 $\lambda_i$  は崩壊定数

$$\lambda_{234} = \ln(2) T_{234}^{-1} (\text{y}^{-1}) = 9.00 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_{235} = \ln(2) T_{235}^{-1} (\text{y}^{-1}) = 3.12 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_{238} = \ln(2) T_{238}^{-1} (\text{y}^{-1}) = 4.91 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

$$N_{234} : N_{235} : N_{238} = 0.029 : 3.5 : 96.471$$

であるから、

$$(A_{234}, A_{235}, A_{238}) = (1.47 \times 10^4, 6.14 \times 10^2, 2.67 \times 10^3) \text{ Bq (Mタイプ)}$$

$$(1.37 \times 10^4, 5.73 \times 10^2, 2.49 \times 10^3) \text{ Bq (Sタイプ)}$$

(3.2.2-2) 式より、

$$(E_{234}, E_{235}, E_{238}) = (3.08 \times 10^1, 1.11 \times 10^0, 4.27 \times 10^0) \text{ mSv (Mタイプ)}$$

$$(9.32 \times 10^1, 3.50 \times 10^0, 1.42 \times 10^1) \text{ mSv (Sタイプ)}$$

(3.2.2-3) 式より、実効線量  $E$  (mSv) は、

$$E = 36.2 \text{ mSv (Mタイプ)}$$

$$\underline{111 \text{ mSv (Sタイプ)}} \quad \leftarrow \text{上限値として採用}$$

※預託実効線量 (50年間)

(評価方法2) 尿バイオアッセイに基づく濃縮ウラン吸入による実効線量の評価

$$B_{238} = 6.5 \text{ Bq/1日尿}$$

$$C = 2.5 \times 10^{-2} \text{ (Mタイプ)}, 7.0 \times 10^{-4} \text{ (Sタイプ)}$$

摂取1日後の値は参考文献10による

(3.2.2-4) 式より、 $^{238}\text{U}$ の摂取量は、

$$A_{238} = B_{238}/C = 2.60 \times 10^2 \text{ Bq (Mタイプ)}$$

$$9.29 \times 10^3 \text{ Bq (Sタイプ)}$$

胸部測定 (A) と同様の方法で、U同位体比からU放射能比を求める。

$$(A_{234}, A_{235}, A_{238}) = (1.43 \times 10^3, 5.99 \times 10^1, 2.60 \times 10^2) \text{ Bq (Mタイプ)}$$

$$(5.11 \times 10^4, 2.14 \times 10^3, 9.29 \times 10^3) \text{ Bq (Sタイプ)}$$

(3.2.2-5) 式より、

$$(E_{234}, E_{235}, E_{238}) = (3.01 \times 10^0, 1.08 \times 10^{-1}, 4.16 \times 10^{-1}) \text{ mSv (Mタイプ)}$$

$$(3.48 \times 10^2, 1.31 \times 10^1, 5.30 \times 10^1) \text{ mSv (Sタイプ)}$$

(3.2.2-6) 式より、実効線量E (mSv) は、

$$E = 3.53 \text{ mSv (Mタイプ)}$$

$$\underline{414 \text{ mSv (Sタイプ)}} \quad \leftarrow \text{上限値として採用}$$

※預託実効線量(50年間)

Table 3.2.2-1 被ばく評価に必要なパラメータ

項目		備考
<b>(a) 放射線核種情報</b>		
・核種	$^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$	
・同位体比	$^{234}\text{U}$ :0.029 %, $^{235}\text{U}$ :3.5 %, $^{238}\text{U}$ :96.471 %	
・化学形	$\text{UO}_3$ 及び $\text{U}_3\text{O}_8$	両者の混合比は不明
<b>(b) 胸部測定</b>		
・胸部残留量	43 (Bq ( $^{235}\text{U}$ ))	$^{235}\text{U}$ の放射能
・測定時刻	摂取から約2時間後	
・摂取後の肺中残留率	$7.0 \times 10^{-2}$ (Mタイプ), $7.5 \times 10^{-2}$ (Sタイプ)	参考文献10
<b>(c) 尿バイオアッセイ</b>		
・尿中排泄量	6.5 Bq ( $^{238}\text{U}$ ) /1日尿	$^{238}\text{U}$ の放射能
・摂取後の尿中排泄率	$2.5 \times 10^{-2}$ (Mタイプ), $7.0 \times 10^{-4}$ (Sタイプ)	参考文献10
<b>(d) 吸入摂取したウランによる実効線量換算係数 (Sv/Bq)</b>		
$^{234}\text{U}$	$2.10 \times 10^{-6}$ (Mタイプ), $6.80 \times 10^{-6}$ (Sタイプ)	参考文献14
$^{235}\text{U}$	$1.80 \times 10^{-6}$ (Mタイプ), $6.10 \times 10^{-6}$ (Sタイプ)	
$^{238}\text{U}$	$1.60 \times 10^{-6}$ (Mタイプ), $5.70 \times 10^{-6}$ (Sタイプ)	

### 3.2.3 事例6 傷口汚染事故

#### 想定事故

核燃料物質使用施設において、セル内作業中に前腕部に約  $5 \text{ cm}^2$  の裂傷が発生した。応急処置後、GM 管式表面汚染検査計で傷口を測定したところ汚染が確認された。

#### 事故の条件

GM管式表面汚染検査計による測定の結果、皮膚汚染は  $10 \text{ kBq}$  であり、 $\gamma$  線波高分析装置による核種分析を行ったところ、セシウム137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) が確認された。

#### 評価対象

- ・作業員の内部被ばく線量及び外部被ばく線量

#### 評価方法

与えられた事故の条件及び評価に必要なパラメータをTable 3.2.3-1にまとめた。

(評価方法1-①) 傷口に付着した $^{137}\text{Cs}$ の $\beta$ 線による皮膚の等価線量の評価

- ・ $^{137}\text{Cs}$ は、傷口内に付着しているが、皮膚汚染と同程度の等価線量を与えると仮定して評価する。
- ・ $^{137}\text{Cs}$ が皮膚表面に留まり続けると仮定する。
- ・ $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線による皮膚等価線量への寄与は十分小さいと思われるので評価しない。

皮膚の等価線量  $H$  (mSv) は、次式により求める。

$$H = \bar{C} \times CF_8 \times SF \times T \quad (3.2.3-1)$$

- ここで、 $\bar{C}$  : 皮膚上の放射性核種の平均表面密度 ( $\text{Bq}/\text{cm}^2$ )  
 $CF_8$  : 放射線核種の皮膚 $\beta$ 線量率換算係数 ( $(\text{mSv}/\text{h})/(\text{Bq}/\text{cm}^2)$ )  
 $SF$  : 衣類などによって生じる遮蔽を考慮するための遮蔽係数  
 $T$  : 被ばくの時間 (h)

(評価方法1-②) 傷口に付着した $^{137}\text{Cs}$ の $\gamma$ 線 (点状線源を仮定) による実効線量の評価

- ・簡単のため、点状線源を仮定

点状線源からの実効線量  $E$  (mSv) は、次式により求める。

$$E = \frac{A \times CF_6 \times T \times (0.5)^{\frac{d}{d_1/2}}}{X^2} \quad (3.2.3-2)$$

ここで、 $A$  : 線源の放射能 (kBq)  
 $T$  : 被ばくの時間 (h)  
 $CF_6$  : 実効線量換算係数 ((mSv/h)/(kBq))  
 $X$  : 点状線源からの距離 (m)  
 $d_{1/2}$  : 遮蔽材の半価層 (cm)  
 $d$  : 遮蔽厚 (cm)

(評価方法2) 傷口より取り込んだ $^{137}\text{Cs}$ による内部被ばく実効線量の評価

・核燃料物質使用施設におけるセル内作業を想定し、取り込み時の $^{137}\text{Cs}$ の物理的状态は、“Particle (粒子状)” または、“Fragment (破片状)”を仮定する。また、 $^{137}\text{Cs}$ の全量が体内に取り込まれたと仮定する。

体内に取り込んだ $^{137}\text{Cs}$ による実効線量  $E$  (Sv) は、次式により求める。

$$E = A \times C \quad (3.2.3-3)$$

ここで、 $A$  : 線源の放射能 (Bq)  
 $C$  : 傷口から取り込んだ放射性物質による実効線量換算係数 (Sv/Bq)

#### 評価結果

(評価方法1-①) 傷口に付着した $^{137}\text{Cs}$   $\beta$ 線による皮膚の等価線量の評価

$$\bar{C} = 10 \text{ kBq} / 5 \text{ cm}^2 = 2 \times 10^3 \text{ Bq/cm}^2$$

$$CF_8 = 1.6 \times 10^{-3} \text{ (mSv/h)/(Bq/cm}^2)$$

$$SF = 1 \text{ (衣類等による遮蔽なし)}$$

$$T = t \text{ (h)}$$

(3.2.3-1) 式より、

$$\begin{aligned} H &= 2 \times 10^3 \text{ Bq/cm}^2 \times 1.6 \times 10^{-3} \text{ (mSv/h)/(Bq/cm}^2) \times 1 \times t \text{ (h)} \\ &= 3.2 \text{ mSv/h} \times t \text{ (h)} \end{aligned}$$

- ・約1週間で、皮膚の等価線量限度 (for worker) 500 mSvに到達する。
- ・取り込み時の物理的状态によっては、傷口付近に、長時間留まる可能性がある。
- ・移行の様子を、何らかの方法でモニタする必要がある。

(評価方法1-②) 傷口に付着した $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線 (点状線源を仮定) による実効線量の評価

$$A = 10 \text{ (kBq)}$$

$$T = t \text{ (h)}$$

$$CF_6 = 6.2 \times 10^{-8}$$

$X = 0.3$  (m) (傷口から胸部前面までの距離)

遮蔽材なし ( $d = 0$  cm)

(3.2.3-2) 式より、

$$E = 10 \text{ kBq} \times 6.2 \times 10^{-8} \text{ (mSv/h)/(kBq)/(0.3 m)}^2 \times T \text{ (h)}$$

$$= 6.89 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{Sv/h} \times t \text{ (h)}$$

1年間被ばくし続けたとしても、 $\sim 60 \text{ } \mu\text{Sv}$ である。

(評価方法2) 傷口より取り込んだ $^{137}\text{Cs}$ による内部被ばく実効線量の評価

$$A = 10 \times 10^3 \text{ Bq}$$

$$C = 1.03 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq (粒子状)}$$

$$= 4.77 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq (破片状)}$$

(3.2.3-3) 式より、

$$E = 10 \times 10^3 \text{ Bq} \times 1.03 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq} = 103 \text{ } \mu\text{Sv (粒子状)}$$

$$10 \times 10^3 \text{ Bq} \times 4.77 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq} = 4.77 \text{ } \mu\text{Sv (破片状)}$$

\* 預託実効線量 (50年間)

なお、 $^{37}\text{Cs}$ 取込時の物理的状态が、最も大きい実効線量換算係数を与える溶液状 (weakly retained) の場合でも、 $136 \text{ } \mu\text{Sv}$ となる。

Table 3.2.3-1 被ばく評価に必要なパラメータ

項目		備考
(a) 放射線核種情報		
・核種	$^{137}\text{Cs}$	Ge検出器により同定
・数量	10 kBq	GMサーベイメータにより測定
・物理的状态	固体 (粒子状または破片状)	セル内作業中
(b) 傷口の情報		
・傷口位置	前腕部	直立姿勢で、胸部から30cmの位置と仮定
・傷口面積	5 cm <sup>2</sup>	傷口に $^{137}\text{Cs}$ が一様に分布していると仮定
(c) $^{137}\text{Cs}$ による皮膚のβ線量率換 算係数 $CF_8$	1.6 (μSv/h)/(Bq/cm <sup>2</sup> )	参考文献13
(d) $^{137}\text{Cs}$ 点状線源から1m位置に おける実効線量換算係数 $CF_6$	$6.2 \times 10^{-8}$ (mSv/h)/(kBq)	参考文献13
(e) 衣類などによって生じる遮蔽 を考慮するための遮蔽係数 $SF$		
(f) $^{137}\text{Cs}$ の傷口摂取による実効線 量換算係数 $C$	1.03 × 10 <sup>-8</sup> Sv/Bq (粒子状) 4.77 × 10 <sup>-10</sup> Sv/Bq (破片状)	参考文献15

### 3.3 過去の原子力事故による一般公衆の被ばく線量評価

ここでは、過去の原子力事故により環境中に放出された放射性物質により汚染された環境下で生活する人々の被ばく評価及び災害廃棄物を処理した焼却場から放出された放射性物質による一般公衆の被ばく評価方法についてまとめている。評価方法については、事例7は主に「文部科学省 放射能測定法シリーズ ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」<sup>15)</sup>を、事例8は主に「原子力安全委員会 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」<sup>1)</sup>、「原子力安全委員会 発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」<sup>2)</sup>を参考としている。

#### 3.3.1 事例7 汚染環境からの外部被ばく

##### 想定事故

ある地域の居住区周辺において土壌を採取し、乾燥及び均一化した後に放射能測定を行ったところ、原発事故で放出された放射性セシウムによる汚染が認められた。

##### 事故の条件

- (1) 土壌の採取面積は 0.050 m<sup>2</sup>、乾燥後の土壌の総質量は 3.0 kg とする。
- (2) セシウム137 (<sup>137</sup>Cs) 及びセシウム134 (<sup>134</sup>Cs) の放射能濃度は、採取時点でそれぞれ10 Bq/g 乾土及び4.0 Bq/g乾土とする。
- (3) 原発事故による汚染から3年が経過したものとする。

##### 評価対象

- ・放射性セシウムによって汚染した居住区において1年間生活した場合の外部被ばく線量

##### 評価方法

放射性セシウムによって汚染した居住区において1年間生活した場合の外部被ばく線量の評価のフローをFig.3.3.1-1に示す。評価は手順1から手順5 (①、②) に従って行い、それぞれの手順に必要なパラメータ等を (a) から (j) とした。与えられた事故の条件及び評価に必要なパラメータ等をTable 3.3.1-1にまとめた。なお、Fig.3.3.1-1の記号 (a) ~ (j) はTable 3.3.1-1の記号にそれぞれ対応している。

(手順1) 採取した深さまでの土壌の単位面積当たりの放射能 $I_{i,z}$  (Bq/ cm<sup>2</sup>) の評価

採取した土壌は均一化されているため、 $I_{i,z}$ を次式により求める。

$$I_{i,z} = \frac{C_{i,z} \times m \times 10^3}{A \times 10^4} \quad (3.3.1-1)$$

ここで、 $I_{i,z}$  : 核種iの採取した深さまでの土壌の単位面積当たりの放射能 (Bq/cm<sup>2</sup>)

$C_{i,z}$  : 核種iの採取した土壌の放射能濃度 (Bq/g)

$M$  : 乾燥土壌質量 (kg)

$A$  : 採取面積 (m<sup>2</sup>)

(手順2) 地表面における放射能濃度  $C_{i,0}$  (Bq/g) の評価  
核種*i*の放射能濃度の深さ変化は次式で表される。

$$C_i = C_{i,0} \times e^{-\frac{z}{\beta}} \quad (3.3.1-2)$$

ここで、 $C_i$  : 核種*i*のある質量深さにおける放射能濃度 (Bq/g)

$C_{i,0}$  : 核種*i*の地表面における放射能濃度 (Bq/g)

$z$  : 採取の質量深さ (g/cm<sup>2</sup>)

$\beta$  : 鉛直分布を表すパラメータ (g/cm<sup>2</sup>)

また、 $z$ は次式により求める。

$$z = \frac{m}{A} \quad (3.3.1-3)$$

式(3.3.1-2)を $z$  (g/cm<sup>2</sup>) について積分をすると、採取した深さまでの土壌の単位面積当たりの放射能  $I_{i,z}$  (Bq/cm<sup>2</sup>) を得ることができる。

$$I_{i,z} = \int_0^z C_{i,0} e^{-\frac{z}{\beta}} dz = C_{i,0} \beta (1 - e^{-\frac{z}{\beta}}) \quad (3.3.1-4)$$

$C_{i,0}$ についてまとめると

$$C_{i,0} = \frac{I_{i,z}}{\beta (1 - e^{-\frac{z}{\beta}})} \quad (3.3.1-5)$$

<sup>137</sup>Csによる被ばく評価を行う場合、被ばくは子孫核種<sup>137m</sup>Baからの $\gamma$ 線によるものなので、Cs-137の放射能から<sup>137m</sup>Baの放射能を求める必要がある。

$$C_{\text{Ba-137m},0} = \frac{I_{\text{Cs-137},z}}{\beta (1 - e^{-\frac{z}{\beta}})} \times 0.944 \quad (3.3.1-6)$$

※0.944はCs-137のうち、Ba-137mに壊変するものの割合 (参考文献11)

(手順3) 採取場所におけるインベントリ  $I_{i,\infty}$  (kBq/m<sup>2</sup>) の評価

採取場所におけるインベントリ  $I_{i,\infty}$  (kBq/m<sup>2</sup>) を次式により求める。

$$I_{i,\infty} = C_{i,0} \beta \times 10^{-3} \times 10^4 \quad (3.3.1-7)$$

ここで、 $I_{i,\infty}$  : 核種iの採取場所におけるインベントリ (kBq/m<sup>2</sup>)

(手順4) 実効線量率  $\dot{E}_i$  (μSv/h) の評価

実効線量率  $\dot{E}_i$  (μSv/h) を次式により求める。

$$\dot{E}_i = I_{i,\infty} K_{i,a} K_b \quad (3.3.1-8)$$

ここで、 $\dot{E}_i$  : 核種iによる実効線量率 (μSv/h)

$K_{i,a}$  : 核種iの放射性核種インベントリと地上高1mでの空気カーマ率との関係 ((μGy/h)/(kBq/m<sup>2</sup>))

$K_b$  : 空気カーマから実効線量への換算係数 (Sv/Gy)

(手順 5-①) 核種 i の壊変を考慮する場合の、1年間の生活における外部被ばく線量  $E_i$  (mSv)

1年間の生活における外部被ばく線量  $E_i$  (mSv) を次式により求める。

$$E_i = \int_0^t \dot{E}_i e^{-\lambda_i t} dt = \frac{\dot{E}_i}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \times 10^{-3} \quad (3.3.1-9)$$

ここで、 $E_i$  : 核種iによる1年間の生活における外部被ばく線量 (mSv)

$\lambda_i$  : 核種iの壊変定数 (1/h)

$t$  : 居住区の滞在時間 (h)

1日あたりの屋内及び屋外の滞在時間と屋内における木造家屋の低減効果の考慮すると

$$E_i = \frac{\dot{E}_i}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \left( \frac{t_{in} f}{24} + \frac{t_{out}}{24} \right) \times 10^{-3} \quad (3.3.1-10)$$

ここで、 $t_{in}$  : 1日あたりの屋内の滞在時間 (h)

$f$  : 木造家屋の低減効果

$t_{out}$  : 1日あたりの屋外の滞在時間 (h)

(手順 5-②) 1年間の生活における外部被ばく線量  $E_i$  (mSv) (核種 i の壊変を考慮しない場合)

$$E_i = [(\dot{E}_i t_{in} f) + (\dot{E}_i t_{out})] \times 365.25 \times 10^{-3} \quad (3.3.1-11)$$

**評価結果**

(手順1) 採取した深さまでの土壌の単位面積当たりの放射能 $I_{i,z}$  (Bq/cm<sup>2</sup>) の評価

$$I_{Cs-134,z} = \frac{4.0 \times 3.0 \times 10^3}{0.050 \times 10^4} = 24 \text{ Bq/cm}^2$$

$$I_{Cs-137,z} = \frac{10 \times 3.0 \times 10^3}{0.050 \times 10^4} = 60 \text{ Bq/cm}^2$$

(手順2) 地表面における放射能濃度 $C_{i,0}$  (Bq/g) の評価

$$C_{Cs-134,0} = \frac{24}{3.0 (1 - e^{-\frac{6.0}{3.0}})} = 9.25 \text{ Bq/g}$$

$$C_{Ba-137m,0} = \frac{60}{3.0 (1 - e^{-\frac{6.0}{3.0}})} \times 0.944 = 21.8 \text{ Bq/g}$$

(手順3) 採取場所におけるインベントリー $I_{i,\infty}$  (kBq/m<sup>2</sup>) の評価

$$I_{Cs-134,\infty} = 9.25 \times 3.0 \times 10^{-3} \times 10^4 = 278 \text{ kBq/m}^2$$

$$I_{Ba-137m,\infty} = 21.8 \times 3.0 \times 10^{-3} \times 10^4 = 654 \text{ kBq/m}^2$$

(手順4) 実効線量率 $\dot{E}_i$  (μSv/h) の評価

$$\dot{E}_{Cs-134} = 278 \times 3.27 \times 10^{-3} \times 0.8 = 7.27 \times 10^{-1} \text{ μSv/h}$$

$$\dot{E}_{Ba-137m} = 654 \times 1.27 \times 10^{-3} \times 0.8 = 6.64 \times 10^{-1} \text{ μSv/h}$$

(手順5-①) 1年間の生活における外部被ばく線量 $E_i$  (mSv)

(核種 $i$ の壊変を考慮する場合)

$$E_{Cs-134} = \frac{7.27 \times 10^{-1}}{3.830 \times 10^{-5}} (1 - e^{-3.830 \times 10^{-5} \times 1 \times 365.25 \times 24}) \left( \frac{16 \times 0.4}{24} + \frac{8}{24} \right) \times 10^{-3}$$

$$= 3.3 \text{ mSv}$$

$$E_{\text{Ba-137m}} = \frac{6.64 \times 10^{-1}}{2.621 \times 10^{-6}} (1 - e^{-2.621 \times 10^{-6} \times 1 \times 365.25 \times 24}) \left( \frac{16 \times 0.4}{24} + \frac{8}{24} \right) \times 10^{-3}$$

$$= 3.5 \text{ mSv}$$

以上より、この居住区において1年間生活した場合の外部被ばく線量は、

$$E = 3.3 + 3.5 = 6.8 \text{ mSv}$$

となる。

(手順5・②) 1年間の生活における外部被ばく線量 $E_i$  (mSv)

(核種 $i$ の壊変を考慮しない場合)

$$E_{\text{Cs-134}} = [(7.27 \times 10^{-1} \times 16 \times 0.4) + (7.27 \times 10^{-4} \times 8)]$$

$$\times 365.25 \times 10^{-3}$$

$$= 3.8 \text{ mSv}$$

$$E_{\text{Ba-137m}} = [(6.64 \times 10^{-1} \times 16 \times 0.4) + (6.64 \times 10^{-4} \times 8)]$$

$$\times 365.25 \times 10^{-3}$$

$$= 3.5 \text{ mSv}$$

以上より、この居住区における1年間の生活における外部被ばく線量は、

$$E = 3.8 + 3.5 = 7.3 \text{ mSv}$$

となる。

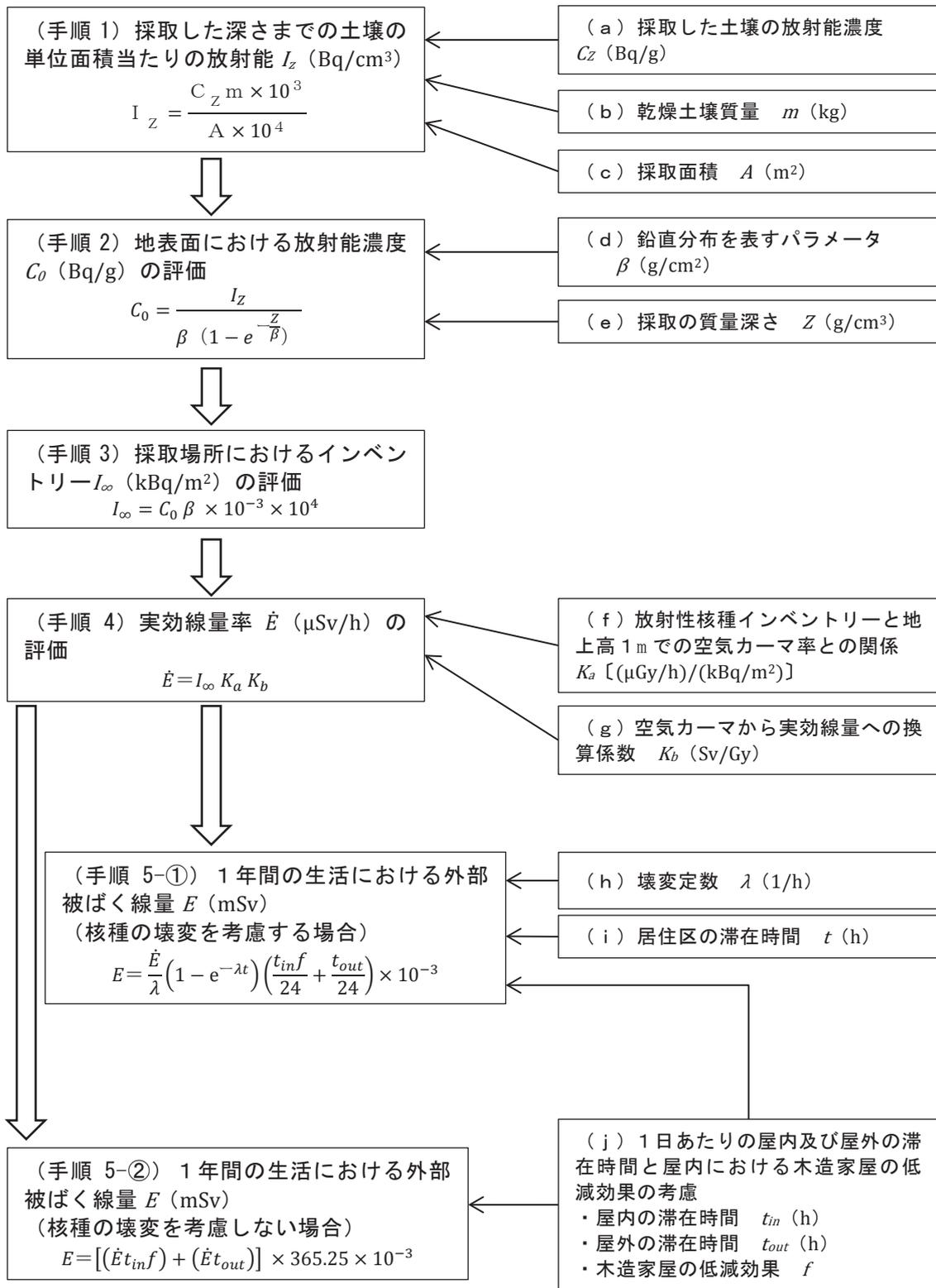


Fig.3.3.1-1 汚染した居住区において1年間生活した場合の外部被ばく実効線量の評価フロー

Table 3.3.1-1 被ばく評価に必要なパラメータ等

項 目		備 考
(a) 採取した土壌の放射能濃度 $C_z$	Cs-134 : 4.0 Bq/g Cs-137 : 10 Bq/g	
(b) 乾燥土壌質量 $m$	3.0 kg	
(c) 採取面積 $A$	0.050 m <sup>2</sup>	
(d) 鉛直分布を表すパラメータ $\beta$	3.0 g/cm <sup>2</sup>	参考文献16
(e) 採取した質量深さ $z$	6.0 g/cm <sup>2</sup>	乾燥土壌質量/採取面積
(f) 放射性核種インベントリーと 地上高1 mでの空気カーマ率 との関係 $K_a$	Cs-134 : $3.27 \times 10^{-3}$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )/(kBq/m <sup>2</sup> ) Ba-137m : $1.27 \times 10^{-3}$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )/(kBq/m <sup>2</sup> )	参考文献16
(g) 空気カーマから実効線量への 換算係数 $K_b$	0.8 Sv/Gy	参考文献5
(h) 壊変定数 $\lambda$	Cs-134 : $3.830 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ Ba-137m : $2.621 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ (Cs-137と永続平衡が成立)	半減期 (参考文献12) Cs-134 : 2.0648 y Cs-137 : 30.1671 y
(i) 居住区の滞在時間 $t$	8766 h	$1 \times 365.25 \times 24$
(j) 1日あたりの屋内及び屋外の滞在 時間と屋内における木造家屋の 低減効果の考慮	屋内の滞在時間 : 16 h 屋外の滞在時間 : 8 h 木造家屋の低減効果 : 0.4	参考文献17

### 3.3.2 事例8 災害廃棄物焼却処理に伴い放出される排気による被ばく

#### 想定事故

ある焼却施設において、原発事故で放出された放射性セシウムで微量に汚染した災害廃棄物を焼却処分した。

#### 事故の条件

- (1) セシウム 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) 及びセシウム 134 ( $^{134}\text{Cs}$ ) の放射能濃度は、処分の時点でいずれも 100 Bq/kg とする。
- (2) 1日の災害廃棄物の処理量は 45,000 kg とする。
- (3) 焼却物の 80%が飛灰へ移行し、残り 20%は主灰として焼却炉内に残るものとする。
- (4) 排気フィルタによるセシウムの除去率は99.9%とする。
- (5) Cs-137及びCs-134は地上高さ60mの排気筒から24時間連続で放出されるものとする。
- (6) 気象条件は以下のとおりとし、事象発生期間中は一定とする。
  - ・ 風速：2.0 m/s
  - ・ 大気安定度：C
  - ・ 風向：北東

#### 評価対象

- ・ 一般公衆の被ばく

この処分に伴い大気中に放出された放射性セシウムについて、

- i) 地表での風下軸上の最大放射能濃度の地点（焼却施設からの距離）とその濃度
- ii) 地表での風下軸上の最大空気カーマ率の地点（焼却施設からの距離）とその値
- iii) 最大放射能濃度の地点（屋外）に一般成人が1日間滞在した場合の実効線量
- iv) 最大空気カーマ率の地点（屋外）に一般成人が1日間滞在した場合の実効線量

#### 評価方法

放射性セシウムの放出における評価のフローをFig.3.3.2-1に示す。評価は手順1から手順4に従って行い、それぞれの手順に必要なパラメータ等を (a) から (h) とした。与えられた事故の条件及び評価に必要なパラメータ等をTable 3.3.2-1及びTable 3.3.2-2にまとめた。なお、Fig.3.3.2-1の記号 (a) ~ (h) はTable 3.3.2-1の記号にそれぞれ対応している。

#### (手順1) 放出量、放出率の評価

放出時間帯（24時間）にわたる放射性セシウムの放出量を次式により求める。

$$A_i = C_i \times V \times \frac{f}{100} \times \left(1 - \frac{\eta}{100}\right) \quad (3.3.2-1)$$

ここで、  
 $A_i$  : 核種*i*の放出量 (Bq)  
 $C_i$  : 核種*i*の災害廃棄物中の放射能濃度 (Bq/kg)  
 $V$  : 1日の災害廃棄物の処理量 (kg)  
 $f$  : 飛灰への移行割合 (%)  
 $\eta$  : 排気フィルタによるセシウムの除去率 (%)

放射性セシウムの放出率を次式により求める。

$$Q_i = \frac{A_i}{t} \quad (3.3.2-2)$$

ここで、 $Q_i$  : 核種*i*の放出率 (Bq/h)  
 $t$  : 放出時間 (h)

(手順2) 風下軸上放射能濃度分布図及び風下軸上空気カーマ率分布図による特定条件下での放射能濃度及び空気カーマ率

地上高さ60.0 mから放出される放射性雲の風下軸上放射能濃度分布図 (Fig.3.3.2-2) から大気安定度Cにおける、特定の条件下 (放出高さ: 60.0 m、風速: 1.0 m/s、放出率:  $1.0 \times 10^9$  Bq/h) での放射能濃度が最大となる地点の放射能濃度及び風下方向距離を読み取る。

地上高さ60.0 mから放出される放射性雲の風下軸上空気カーマ率分布図 (Fig.3.3.2-3) から大気安定度Cにおける、特定の条件下 (放出高さ: 60.0 m、風速: 1.0 m/s、放出率:  $1.0 \times 10^9$  Bq/h、 $\gamma$ 線平均エネルギー: 0.5MeV、 $\gamma$ 線実効エネルギー1.0MeV/dis) での空気カーマ率が最大となる地点の空気カーマ率及び風下方向距離を読み取る。

(手順3) 実際の状況下での放射能濃度及び空気カーマ率の評価

・放射能濃度の評価

手順2で読み取った放射能濃度を、放出核種の放出率及び気象条件 (風速) により補正する。

$$\chi_i = \frac{\chi_0 \times 10^{-6} \times Q_i}{U} \quad (3.3.2-3)$$

ここで、  
 $\chi_i$  : 核種*i*の実際の状況下での放射能濃度 (Bq/cm<sup>3</sup>)  
 $\chi_0$  : 分布図上の放射能濃度 (Bq/m<sup>3</sup>)  
 $Q_i$  : 核種*i*の放出率 (GBq/h)  
 $U$  : 風速 (m/s)  
 $10^{-6}$  : 変換係数 (m<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)

・空気カーマ率の評価

手順2で読み取った空気カーマ率を、放出核種の放出率、 $\gamma$ 線実効エネルギー及び気象条件（風速）により補正する。

$$D_i = \frac{D_0 \times Q_i \times E_{e,i}}{U} \quad (3.3.2-4)$$

ここで、 $D_i$  : 核種iの実際の状況下での空気カーマ率 (Gy/h)  
 $D_0$  : 分布図上の空気カーマ率 (Gy/h)  
 $E_{e,i}$  : 核種iの $\gamma$ 線実効エネルギー (MeV/dis)

(手順4) 一般公衆の放射性セシウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量及び放射性セシウムからの外部被ばく実効線量

・放射性セシウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量

手順3で評価した実際の状況下での放射能濃度から、放射性セシウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量を次式により求める。

$$H_{ii}(\text{Sv}) = e_i \times \chi_i \times t \times I \quad (3.3.2-5)$$

ここで、 $H_{ii}$  : 核種iによる実効線量 (Sv)  
 $e_i$  : 核種iの実効線量係数 (Sv/Bq)  
 $t$  : 滞在時間 (h)  
 $I$  : 呼吸率 (cm<sup>3</sup>/h)

・放射性セシウムからの外部被ばく実効線量

手順3で評価した実際の状況下での空気カーマ率から、一般公衆の放射性セシウムからの外部被ばく実効線量を次式により求める。

$$H_{\gamma i}(\text{Sv}) = K \times D_i \times f_h \times f_o \times t \quad (3.3.2-6)$$

ここで、 $H_{\gamma i}$  : 核種iによる実効線量 (Sv)  
 $K$  : 空気カーマ・実効線量換算係数 (Sv/Gy)  
 $f_h$  : 建屋の遮蔽係数 (1.0)  
 $f_o$  : 居住係数 (1.0)

**評価結果**

(手順1) 放出量、放出率の評価

放出された核種ごとの放出量は、

$$A_{\text{Cs-134}} = 100 \times 45,000 \times 0.8 \times \left(1 - \frac{99.9}{100}\right) = 3,600 \text{ Bq}$$

$$A_{\text{Cs-137}} = 100 \times 45,000 \times 0.8 \times \left(1 - \frac{99.9}{100}\right) = 3,600 \text{ Bq}$$

となる。

また、核種ごとの放出率は、

$$Q_{\text{Cs-134}} = \frac{3,600}{24} = 150 \text{ Bq/h}$$

$$Q_{\text{Cs-137}} = \frac{3,600}{24} = 150 \text{ Bq/h}$$

となる。

(手順2) 風下軸上放射能濃度分布図による特定条件下での放射能濃度及び空気カーマ率

風下軸上放射能濃度分布図及び風下軸上空気カーマ率分布図から読み取った、各地点での放射能濃度及び空気カーマ率は以下のとおりとなる。

- ・ 分布図上の放射能濃度の最大値： 10 Bq/m<sup>3</sup> (排気筒からの距離700 m)  
同地点での空気カーマ率： 1.3×10<sup>-9</sup> Gy/h
- ・ 分布図上の空気カーマ率の最大値： 1.5×10<sup>-9</sup> Gy/h (排気筒からの距離400 m)  
同地点での放射能濃度： 5.1 Bq/m<sup>3</sup>

(手順3) 実際の状況下での放射能濃度及び空気カーマ率の評価

各評価地点における実際の状況下での空气中放射能濃度及び空気カーマ率の評価の結果を Table 3.3.2-3及びTable 3.3.2-4に示す。

(手順4) 一般公衆の放射性セシウムの吸入摂取による内部被ばく及び放射性セシウムの外部被ばく実効線量実効線量

放射能濃度が最大となる地点における内部被ばく実効線量及び外部被ばく実効線量を Table 3.2.2-5に、空気カーマ率が最大となる地点における内部被ばく実効線量及び外部被ばく実効線量を Table 3.2.2-6に示す。本事例における、一般公衆の被ばく線量としては、内部被ばく及び外部被ばくの実効線量の合計値が最大となる地点（排気筒の風下方向距離700mの地点）で、1.9×10<sup>-10</sup>mSvとなる。

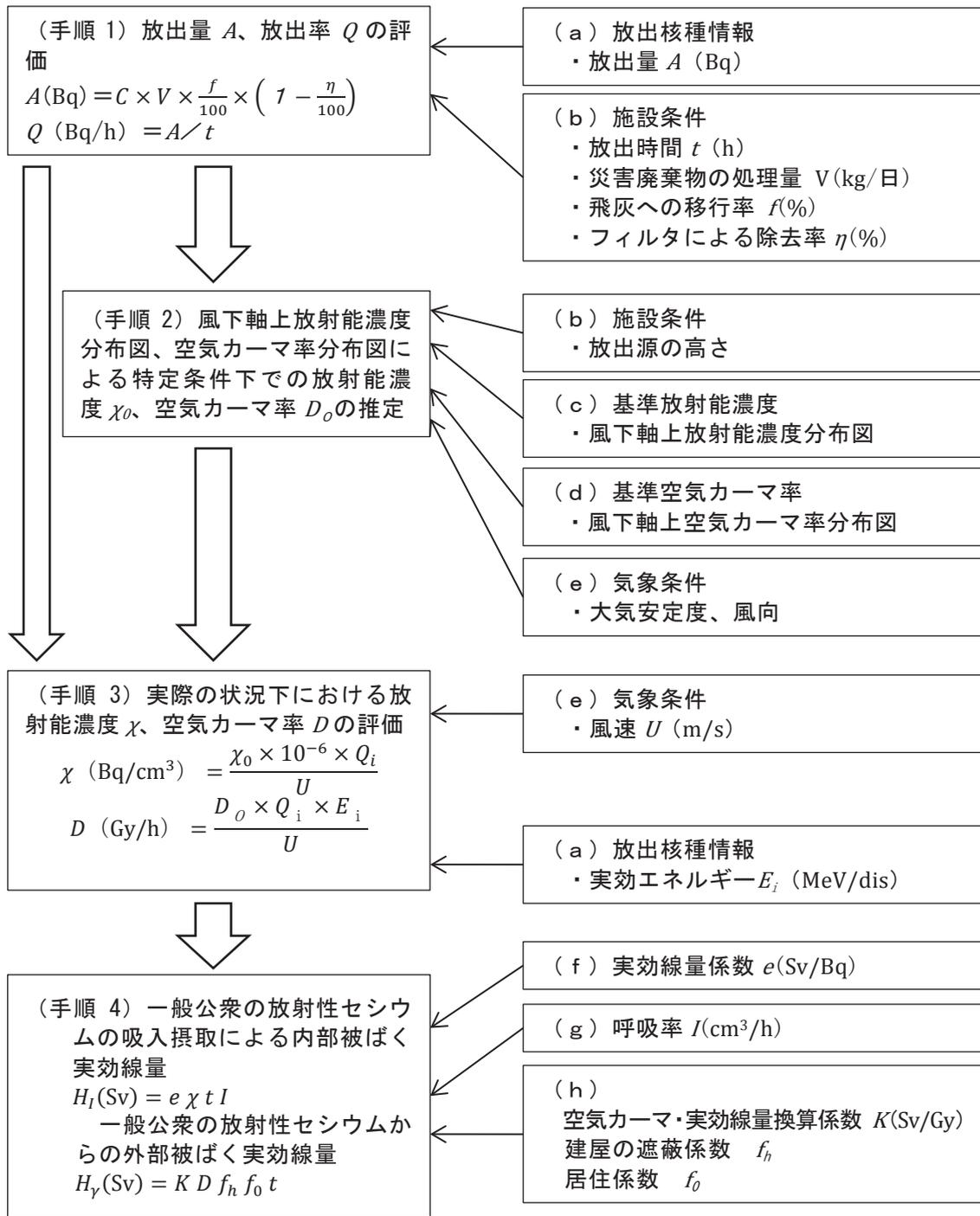


Fig.3.3.2-1 放射性セシウムの吸入摂取による内部被ばく及び放射性セシウムからの外部被ばく実効線量の評価フロー

風速: 1.0 m/s 放出高さ: 60.0 m 放出率: 1.0E+9 Bq/h

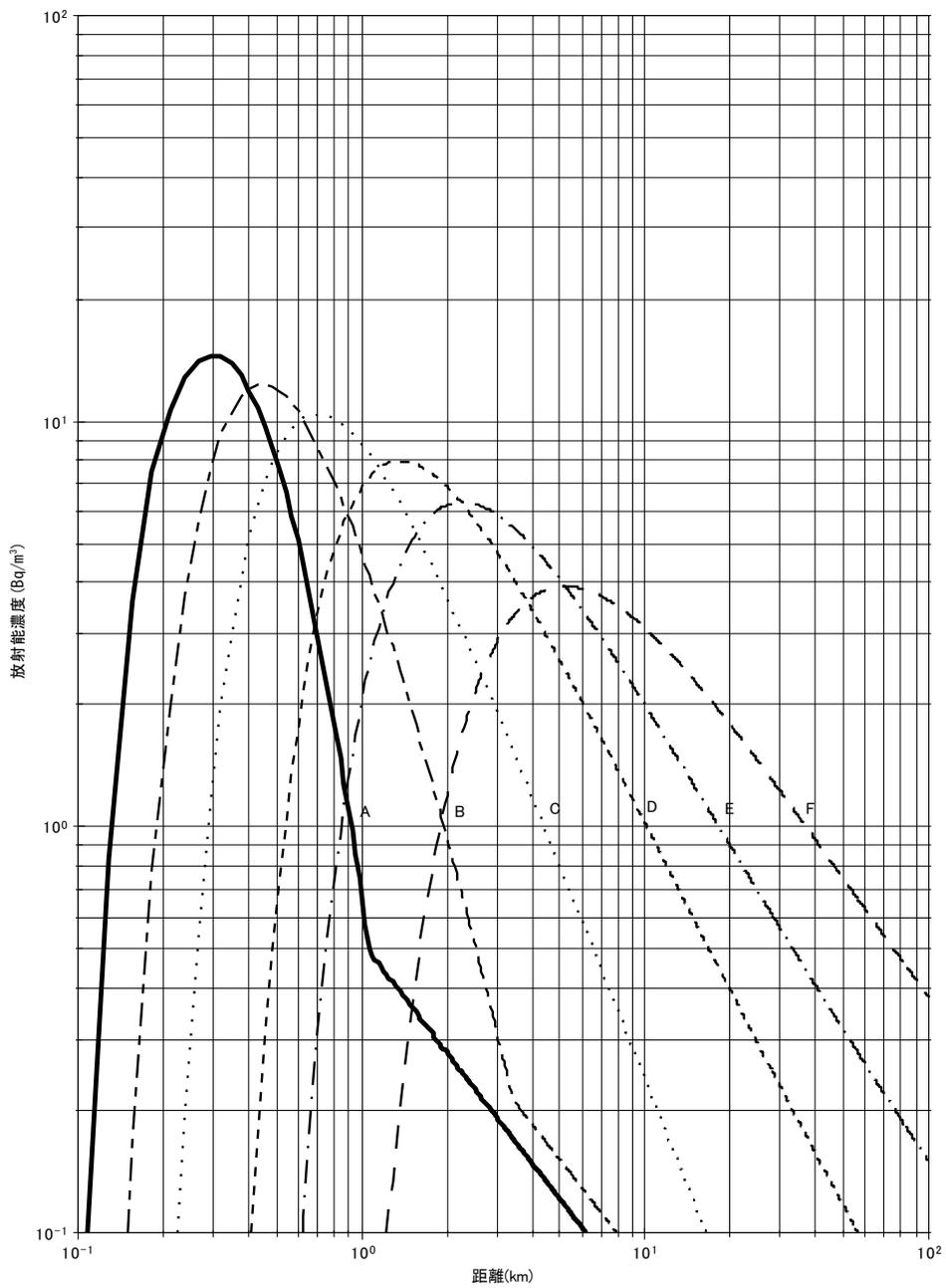


Fig.3.3.2-2 風下軸上放射能濃度分布図 (放出高さ60.0 m) 4)

風速: 1.0 m/s 放出高さ: 60.0 m 放出率: 1.0E+9 Bq/h  
 $\gamma$ 線平均エネルギー: 0.5 MeV/photon  $\gamma$ 線実効エネルギー: 1.0 MeV/ds

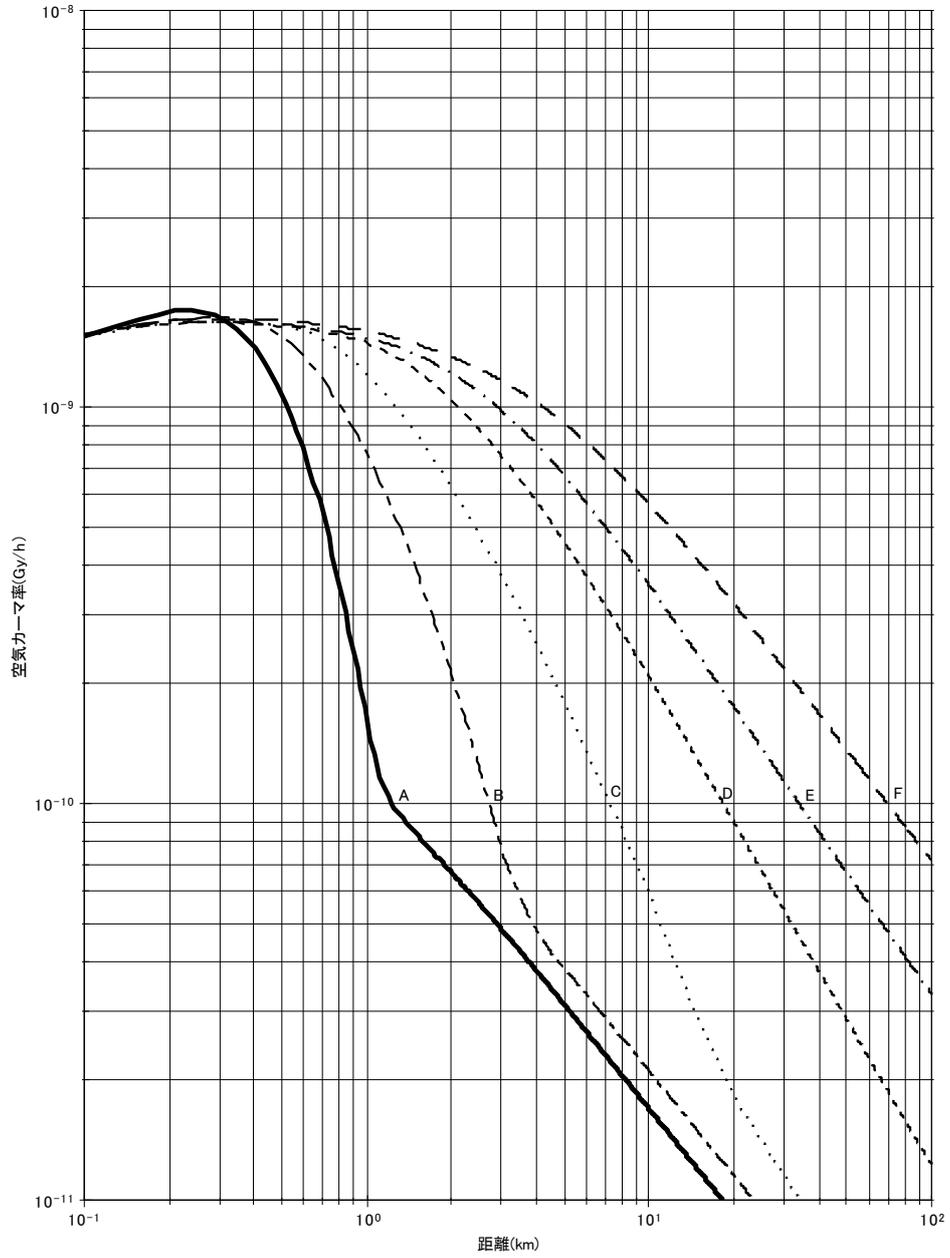


Fig.3.3.2-3 風下軸上空気カーマ率分布図 (放出高さ60.0 m) <sup>4)</sup>

Table 3.3.2-1 被ばく評価に必要なパラメータ等

項 目	備 考
<b>(a) 放出核種情報</b>	
・排気中の存在状態	飛灰（塵埃）
・核種、放射能濃度、 $\gamma$ 線実効エネルギー	Table 3.3.2-2参照 参考文献12
<b>(b) 施設条件</b>	
・放出高さ	地上60 m
・放出時間（滞在時間）	24 h
・飛灰への移行率	80 % 参考文献18
・フィルタによる除去率	99.9 %
・1日の災害廃棄物の処理量	45,000 kg
<b>(c) 基準放射能濃度 <math>\chi_0</math></b>	
・風下軸上放射能濃度分布図	Fig.3.3.2-2参照 参考文献4
<b>(d) 基準空気カーマ率 <math>D_0</math></b>	
・風下軸上空気カーマ率分布図	Fig.3.3.2-3参照 参考文献4
<b>(e) 気象条件</b>	
・風速	2.0 m/s
・大気安定度	C
・風向	北東
<b>(f) 放射性セシウムの吸入摂取による実効線量係数（成人）</b>	
	$^{134}\text{Cs}$ :
	$6.6 \times 10^{-9}$ Sv/Bq
	$^{137}\text{Cs}$ :
	$4.6 \times 10^{-9}$ Sv/Bq
	参考文献6
<b>(g) 呼吸率（成人）</b>	$9.25 \times 10^5$ cm <sup>3</sup> /h 1年間を8760時間とした。 (365日/年×24時間/日)
<b>(h) 空気カーマ・実効線量換算係数</b>	
	1 Sv/Gy 参考文献2
建屋の遮蔽係数	1.0 参考文献5
居住係数	1.0 参考文献5

Table 3.3.2-2 放出核種、放射能濃度、 $\gamma$ 線実効エネルギー

核種	放射能濃度 (Bq/kg)	$\gamma$ 線実効エネルギー (MeV/dis)
$^{134}\text{Cs}$	100	1.512
$^{137}\text{Cs}$	100	0.566

Table 3.3.2-3 放射能濃度が最大となる地点 (排気筒からの距離700 m) における放射能濃度と空気カーマ率

核種	放射能濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> )	空気カーマ率 (Gy/h)
$^{134}\text{Cs}$	$7.5 \times 10^{-13}$	$1.5 \times 10^{-16}$
$^{137}\text{Cs}$	$7.5 \times 10^{-13}$	$5.5 \times 10^{-17}$

Table 3.3.2-4 空気カーマ率が最大となる地点 (排気筒からの距離400 m) における放射能濃度と空気カーマ率

核種	放射能濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> )	空気カーマ率 (Gy/h)
$^{134}\text{Cs}$	$3.8 \times 10^{-13}$	$1.7 \times 10^{-16}$
$^{137}\text{Cs}$	$3.8 \times 10^{-13}$	$6.4 \times 10^{-17}$

Table 3.3.2-5 放射能濃度が最大となる地点 (排気筒からの距離700 m) における実効線量

核種	内部被ばくによる実効線量 (mSv)	外部被ばくによる実効線量 (mSv)
$^{134}\text{Cs}$	$1.1 \times 10^{-10}$	$3.5 \times 10^{-12}$
$^{137}\text{Cs}$	$7.7 \times 10^{-11}$	$1.3 \times 10^{-12}$
小計	$1.9 \times 10^{-10}$	$4.9 \times 10^{-12}$
合計	$1.9 \times 10^{-10}$	

Table 3.3.2-6 空気カーマ率が最大となる地点 (排気筒からの距離400 m) における実効線量

核種	内部被ばくによる実効線量 (mSv)	外部被ばくによる実効線量 (mSv)
$^{134}\text{Cs}$	$5.6 \times 10^{-11}$	$4.1 \times 10^{-12}$
$^{137}\text{Cs}$	$3.9 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{-12}$
小計	$9.5 \times 10^{-11}$	$5.6 \times 10^{-12}$
合計	$1.0 \times 10^{-10}$	

#### 4. あとがき

原子力施設の事故発生時において迅速な被ばく線量評価を効率的に行うために、本事例集の活用が期待される。また、本事例集は、緊急時の被ばく評価における参考資料として用いるほか、被ばく評価についての知見・技術の継承に用いることも期待できる。なお、本事例集は、原子力科学研究所で想定される事故について基本的な評価の考え方を示したものであるため、実際に本事例集を参考に評価を行うに当たっては、対象となる施設の特性に応じたパラメータを選定し、かつ最新の知見を取り入れた上で評価を行うことが望ましい。

#### 謝 辞

本事例集の作成にご協力いただいた放射線管理部活性化タスクグループメンバー（山外功太郎氏、山田克典氏、高橋聖氏、上野有美氏、阿部琢也氏）及び放射線管理部 吉澤道夫部長に感謝いたします。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会, 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針, 昭和57年1月28日(平成13年3月29日一部改訂).
- 2) 原子力安全委員会, 発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針, 平成2年8月30日(平成13年3月29日一部改訂).
- 3) 原子力安全委員会, 被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について, 平成元年3月27日(平成13年3月29日一部改訂).
- 4) 橋 晴夫, 他, 排気筒から放出される放射性雲の等濃度分布図および放射性雲からの等空気カーマ率分布図, JAERI-Data/Code 2004-010, 2004, 19p.
- 5) 原子力安全委員会, 発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針, 昭和51年9月28日(平成13年3月一部改訂).
- 6) ICRP, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part4 Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publ. 71, 1995.
- 7) 科学技術庁告示第二十号, 試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則等の規定に基づき、線量限度等を定める告示.
- 8) ICRP, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication.30 - Part 1, 1979.
- 9) ICRP, Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients, ICRP Publication.72, 1995.
- 10) 原子力安全技術センター, 被ばく線量の測定・評価マニュアル, 2000.
- 11) ICRU, Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection, ICRU report 56, 1997.
- 12) 日本アイソトープ協会, アイソトープ手帳 11 版, 2011.
- 13) 放射線医学総合研究所, 放射線緊急事態時の評価及び対応のための一般的手順 (翻訳), 2005.(IAEA, Generic procedures for assessment and response during radiological emergency, IAEA-TECDOC-1162, 2000.)
- 14) 日本アイソトープ協会, 作業者の内部被ばくの個人モニタリング (翻訳), 2001.(ICRP, Individual monitoring for internal exposure of workers, ICRP Publ. 78, 1997.)
- 15) R.E.Toohy, L.Bertelli, S.A.Sugarman and D.R.Christensen, Dose coefficients and Derived Guidance and Clinical Decision Levels for Contaminated Wounds, Health Physics, 2014.
- 16) 文部科学省, ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法, 放射能測定法シリーズ 33, 2008.
- 17) 除染情報プラザ: 福島県・環境省ホームページ, 避難基準に関する Q&A, <http://josen-plaza.env.go.jp/> (2016年11月9日参照).
- 18) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センターホームページ, 放射性物質を含む廃棄物の適正な処理処分 (技術資料: 概要版), [http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo\\_publicver\\_120725ss.pdf](http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_publicver_120725ss.pdf) (2016年11月9日参照).

This is a blank page.

# 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량	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組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射線当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> 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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エントロピー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
放射線輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	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=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> 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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	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 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォトル	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応關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=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

