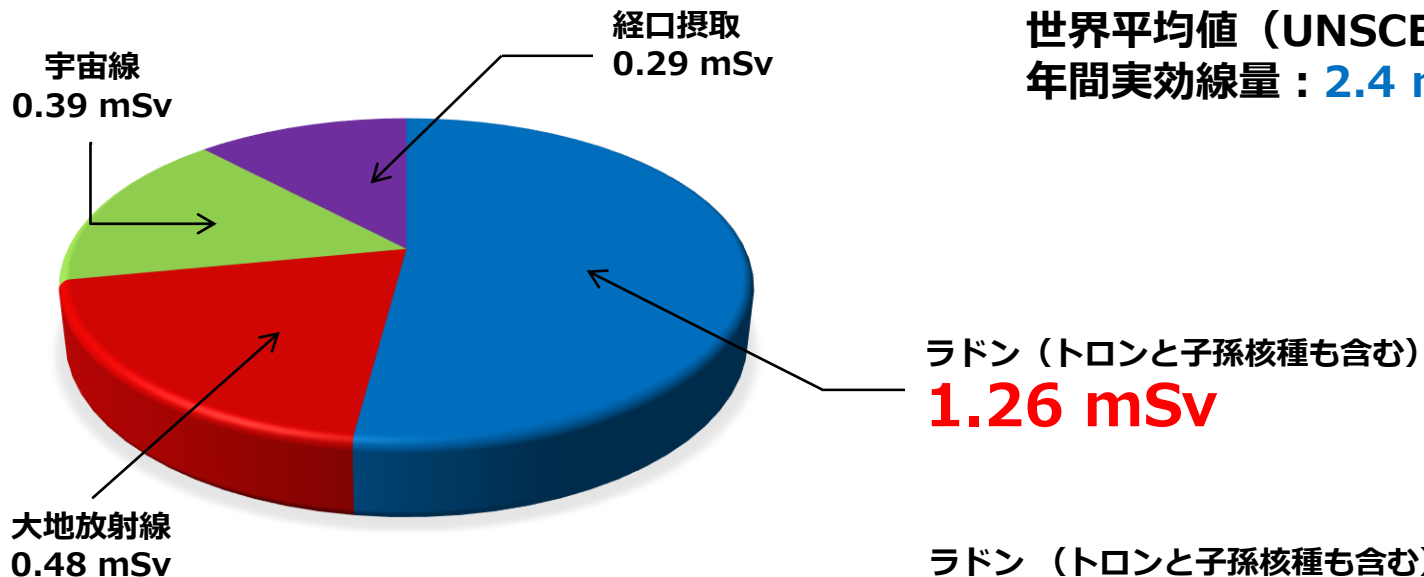


ラドン線量換算係数の最新動向

弘前大学被ばく医療総合研究所
床次眞司

自然放射線源からの年間実効線量

世界平均値 (UNSCEAR 2008)
年間実効線量 : **2.4 mSv**



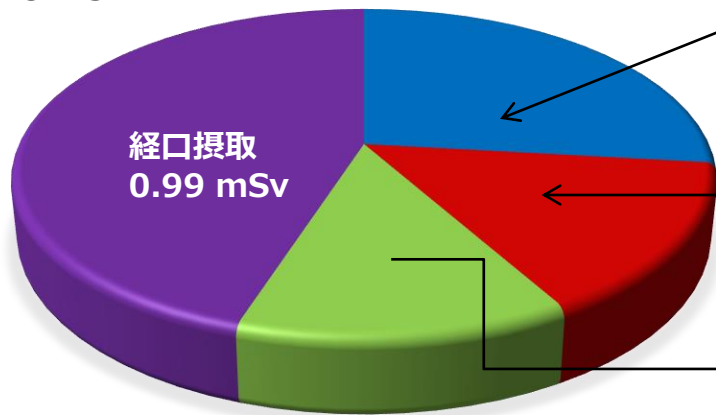
ラドン (トロンと子孫核種も含む)
1.26 mSv

ラドン (トロンと子孫核種も含む)
0.59 mSv

大地放射線
0.48 mSv

大地放射線
0.33 mSv

宇宙線
0.29 mSv



全国平均値 (保物国民線量評価委員会*)
年間実効線量: **2.2 mSv**

*Omori et al. Japanese population dose from natural radiation. *J. Radiol. Prot.* [Epub ahead of print]

日本のラドン濃度に対する全国調査

調査期間	家屋数	AM (SD) Bq/m ³	GM (GSD) Bq/m ³	中央値 Bq/m ³	最大 Bq/m ³	実施機関
1 st 1985-1991	5717	20.8	16.9	16.0	313	放医研*1
2 nd 1994-1996	899	15.5 (13.5)		11.7	208	日本分析 センター*2
3 rd 2007-2010	3461	14.3 (14.7)	10.8 (2.1)			国立保健医 療科学院*3
	人口加重平均	13.7 (12.3)	10.4 (2.0)			

*1 Fujimoto et al. *Jpn. J. Health Phys.* (1997). *2 Sanada et al. *J. Environ. Radioact.* (1999). *3 Suzuki et al. *J. Radiat. Res.* (2010).

- ▶ 屋外ラドン濃度 (N = 696) : **6.1 Bq/m³** Ref. Oikawa et al. *J. Environ. Radioact.* (2003)
- ▶ 職場環境ラドン濃度 (N = 705) : **20.8 Bq/m³** Ref. Oikawa et al. *J. Environ. Radioact.* (2006)

ラドンの全国調査に基づく線量評価

UNSCEARの方法による線量評価（保物国民線量評価委員会）

$$AED = Q \times F \times T \times K$$

Q: ラドン濃度 (Bq/m³)

F: 平衡係数

T: 所在時間 (h)

K: 線量換算係数 = **9 nSv/Bq h m⁻³**

Ref. UNSCEAR 2000

ラドン濃度 (Bq/m ³) : 日本分析センター			年間実効線量 (mSv)
屋内	職場	屋外	
15.5 <small>Sanada et al. JER (1999) F = 0.4</small>	20.8 <small>Oikawa et al. JER (2003) F = 0.4</small>	6.1 <small>Oikawa et al. JER (2006) F = 0.6</small>	0.50
年間所在時間 (時間) *1			
屋内	職場	屋外	全体
6059 (69.2%)	1783 (20.4%)	913 (10.4%)	8755

*1 年間所在時間は総務省の2006年のデータベースに基づく

- ▶ トロンの全国調査の結果は報告されていない
 - ➔ 平衡等価トロンの濃度はUNSCEAR 2000を引用
屋内: **0.3 Bq/m³** 屋外: **0.1 Bq/m³**
- ▶ 線量換算係数: **40 nSv/Bq h m⁻³** ➔ **0.09 mSv**

UNSCEARにおけるラドンの取り扱い

年間ラドン濃度 (Bq/m³)



適切な平衡係数を用いる
代表値：0.4

年間平衡等価ラドン濃度 (Bq/m³)



所在時間
例) 家屋内：7000時間

時間積算平衡等価ラドン濃度
(Bq/m³ h)



線量換算係数を用いる
(粒子サイズ、生体パラメータなどを考慮)

年間実効線量 (mSv)

UNSCEARにおけるラドンの取り扱い

UNSCEAR報告書における平衡係数の変遷

UNSCEAR報告書		1977	1982	1988	1993	2000	2006
平衡係数	屋内	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
	屋外	0.6	0.6	0.8	0.8	0.6	0.6

気候、家屋構造や屋内空気の性質によって異なることから国によってはさまざまな値を示す可能性がある

UNSCEAR報告書における線量換算係数の変遷

UNSCEAR報告書		1982	1988	1993	2000	2006
線量換算係数	屋内	8.7	10	9	9	9
	屋外	17	10	9	9	9

単位 : nSv per Bq h m⁻³

UNSCEAR : 独自の線量換算係数を用いてきた

- ➔ ICRP Publ. 65で勧告したラドンの線量換算規約
 - ☆地下鉱山作業者に対する疫学調査結果から導かれた
 - ☆呼吸気道モデルを用いた線量推定から導かれた値と3倍程度異なっていた
- ➔ UNSCEARによる線量モデル結果
 - ☆ICRP Publ. 65による値と2倍以内で一致した
 - ☆線量換算係数は放射線加重係数に依存する

ICRPにおけるラドンの取り扱い

ICRP Publ. 65 (1993)

“Protection Against Radon-222 at Home and at Work”

ラドン濃度に対する対策レベルの設定

住居内ラドン：200–600 Bq/m³

このラドン濃度は住居内の年間滞在時間を7000時間と仮定すると年間実効線量として約3–10 mSvとなる

職場環境：500–1500 Bq/m³

➡ 住居と同じ年間実効線量3–10 mSvをベース

職業人に対して公衆とは異なった線量換算係数と年間労働時間（2000時間）を使用

職場環境のラドンに対する防護

➡ 他の放射線被ばくに対する防護とは別に考慮

職業被ばくとしての実効線量限度

5年間で平均20 mSv（4 WLM）

いかなる1年でも50 mSv（10 WLM）を超えない

ICRPにおけるラドンの取り扱い

ICRP Publ. 115 (2010)

“Lung Cancer Risk from Radon and Progeny & Statement on Radon”

ラドンとその子孫核種による被ばくによる**肺がんリスクの評価値を更新**

低レベルのラドンに被ばくした鉱山作業者のコホート研究の結果に加え、初めて屋内ラドンによる肺がんに関する疫学研究結果も考慮された。

↪ 屋内ラドン濃度の増加とともに肺がんリスクが直線的に増加する
(欧州での大規模な疫学研究の結果より)

喫煙とラドンが肺がんに与える影響を同時に評価

生涯にわたる**非喫煙者**の75歳までの肺がんの絶対リスク

= ラドン濃度 : 0、100、400 Bq/m³ ➔ 0.4%、0.5%、0.7%

喫煙者では非喫煙者に比べて肺がんリスクは約25倍高い

生涯にわたる**喫煙者**の75歳までの肺がんの絶対リスク

= ラドン濃度 : 0、100、400 Bq/m³ ➔ 10%、12%、16%

重要な結論

非喫煙者と喫煙者が混在した成人集団における肺がんに対する損害で調整された名目リスク係数は 8×10^{-10} per Bq h m⁻³ ($=1.4 \times 10^{-4}$ per mJ h m⁻³)まで引き上げるべき

➔ Publication 65 で勧告された数値の約2倍

➔ 参考レベルの最大値 : **600 Bq/m³** → **300 Bq/m³**

ICRPにおけるラドンの取り扱い

ICRP Publ. 126 (2014)

“Radiological Protection against Radon Exposure”

Publ. 115 (2010)にある**新たな科学的知見**とPubl. 103 (2007)にあるICRPの**最新の原理原則と方法論**を考慮

全ての建物内のラドン被ばくに対する**防護**のための統合した取り組みを勧告

建物の目的や占有者が仕事をしているか否かに関わらず**同じ参考レベルが適用**
全ての状況において**防護が最適化**されるべき

年間約 **10 mSv**の**上限基準値** (Publ. 65) を継続

参考レベルを**100-300 Bq/m³**の範囲で合理的に達成可能な限り低く設定すべき

ICRPにおけるラドンの取り扱い

ICRP Publ. 137 (2017)

“Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3”

線量評価

- 作業者が地下鉱山のように複数の線源から被ばくする際に防護の目的で価値がある
- 公衆被ばくの線源を比較するために必要

成人に対する線量換算規約（疫学研究）：**3.3 mSv per mJ h m⁻³**

名目リスク係数： 1.4×10^{-4} per mJ h m⁻³ (Publ. 115)

損害で調整された名目リスク係数（作業者）： 4.2×10^{-2} per Sv (Publ. 103)

成人に対する線量係数（線量モデル）

☆鉱山作業者：**3.3 mSv per mJ h m⁻³** ➡ 疫学的比較に基づいた値と極めて良く一致

☆座って作業するオフィス労働者：4 mSv per mJ h m⁻³

☆住居内：3.7 mSv per mJ h m⁻³

☆観光用洞窟：6.7 mSv per mJ h m⁻³

☆作業者が滞在時間の2/3を活動すると仮定する場合の屋内作業環境：5.7 mSv per mJ h m⁻³

両者の方法とそれに関連した不確かさを考慮 ➡ 値を丸める

☆建物と地下鉱山：**3 mSv per mJ h m⁻³** (~10 mSv/WLM)

$$= 5.6 \times 10^{-6} \text{ mJ/m}^3 = \mathbf{16.7 \text{ nSv per Bq h m}^{-3}}$$

ICRPにおけるラドンの取り扱い

ICRP Publ. 137 (2017)

“Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3”

Publ. 137では公衆被ばくに焦点を当てていない

➔ **3 mSv per mJ h m⁻³**は住居内被ばくにも当てはまる

☆公衆を対象としたラドンを含む放射性物質摂取に対する線量係数は近日刊行予定

参考レベル推奨値の上限 (300 Bq/m³) のラドン被ばく (標準的な仮定条件)

作業環境 : **4 mSv** 居住環境 : **14 mSv**

かなりの物理的活動を含む屋内作業・観光用洞窟での被ばくに対する線量係数
6 mSv per mJ h m⁻³ (~20 mSv/WLM)

☆エアロゾルの性状が明らかに典型的な状況と異なる場合

☆十分に信頼できるエアロゾルのデータが利用可能な場所において評価された線量がより詳細な考察を保証する場合



Publ. 137で与えられるデータを用いた場所固有の線量係数の計算が可能

ICRPの線量係数に関する変遷

発表年	疫学的手法 mSv/WLM	線量学的手法 mSv/WLM	参考
1987		6.4 (屋内) 8.9 (屋外)	ICRP Publ. 50/NEA
1993	5 (職場) 4 (家屋)		ICRP Publ. 65
1994		13.4 (職場)	ICRP Publ. 66/RADEP ¹⁾ (Birchall and James, 1994)
2000		15 (家屋)	ICRP Publ. 66/RADEP (Marsh and Birchall, 2000)
2001		13.7 (職場) 14.3 (家屋)	ICRP Publ. 66/LUDEP ²⁾ (Ishikawa et al., 2001)
2010	9 ³⁾ (職場) 7 ³⁾ (家屋)		ICRP Publ.115 & 60
2014	12 ⁴⁾ (職場) 9 ⁴⁾ (家屋)		ICRP Publ. 126 & 103
2017		10 (職場)	ICRP Publ.137

1) RADEP: Radon Dose Evaluation Program

2) LUDEP: Lung Dose Evaluation Program

3) 生涯過剰絶対リスク(LEAR)が 2.8×10^{-4} から 5×10^{-4} へと変更された(ICRP Publ. 60の名目リスク係数から計算)

4) ICRP Publ. 103の名目リスク係数とICRP Publ. 115と同じ生涯過剰絶対リスクから計算

ICRP Publication 137

住居での線量係数

3 mSv per mJ h m⁻³ for homes (= 10 mSv/WLM)

3 [mSv per mJ h m⁻³] × 5.6 × 10⁻⁶ [mJ m⁻³ per Bq m⁻³ EERC]
= 16.8 × 10⁻⁶ [mSv per Bq h m⁻³ EERC]

17 [nSv per Bq h m⁻³ EERC] (ICRP Publ. 137)



9 [nSv per Bq h m⁻³ EERC] (UNSCEAR2006)

ラドン（トロンと子孫核種も含む）による年間実効線量

0.59 mSv



1.21 mSv

* トロンに対する線量係数
107 nSv per Bq h m⁻³ EETC

IAEAにおけるラドン線量換算係数の検討

ラドンに対する新しい線量換算係数の影響に関する技術会合

2019年10月1日～4日@ウィーン国際センター

IAEA、ICRP、UNSCEAR、WHOの国際機関を含む34か国から56名の参加



IAEAにおけるラドン線量換算係数の検討

国際機関からの報告

UNSCEAR “Updates on scientific data and dose conversion factors”

- タスクグループを立ち上げ、2006年報告書以降のラドン曝露に対する肺がんリスクに関する文献をレビュー
- トロンについては情報量が十分ではないためタスクグループでの議論からは除外
- 線量学及び疫学的手法のそれぞれの不確かさを考慮して、住居及び職場環境におけるラドンの線量換算係数は変更しない
 - 引き続き **9 nSv per(Bq h m⁻³)**を使用
- UNSCEAR が提案している線量換算係数の使用
 - 放射線防護の目的ではなく **他の線源からの曝露による年間実効線量との比較**のために用いる

ICRP “Updates on scientific data and dose conversion factors”

- ICRPの線量係数の変遷とPubl.137における線量係数

WHO “ WHO’s perspective on radon: A matter of public health”

- WHOがIAEAと共同執筆したIAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3の概要とラドンハンドブック（2009）の紹介

ILO 安全基準の実装を支援するだけの確固たる科学的根拠、データや情報に基づく線量換算係数の改訂であれば受け入れる

IAEAにおけるラドン線量換算係数の検討

各国からの報告を受けたまとめ

表 技術会合参加国で設定している参考レベル

国・機関	参考レベル (Bq m ⁻³)		備考
	居住環境	職場環境	
国際原子力機関	300	1,000	
欧州連合	300	300	ポーランドは 2019 年 9 月 23 日に導入
イラン	—	—	
アルジェリア	—	—	
インドネシア	—	—	
モロッコ	300	300	
南アフリカ	—	—	
カナダ	200	200	
イギリス	200	300	
スウェーデン	200	200	欧州連合加盟国
ヨルダン	—	—	
オーストラリア	200	200	ほとんどの職場環境
		1,000	防護対策が求められる職場環境
タイ	—	—	
スイス	300	300	ラドン曝露環境下での作業者の閾値 (参考レベルはない) : 1,000 Bq m ⁻³

“—” は現時点で未設定であることを示す。

Ref. 細田. ラドンに対する新しい線量換算係数の影響に関する技術会合の参加報告. 保健物理. 54(4), 226-230 (2019)

IAEAにおけるラドン線量換算係数の検討

各国からの報告を受けたまとめ

ブラジル：NORM 産業における対策レベル：1,000 Bq/m³

インドネシア：参考レベルの設定はない
(ガイドライン) 居住環境：300 Bq/m³
職場環境：1000 Bq/m³

アメリカ合衆国：居住環境の対策レベル：148 Bq/m³

インド：ウラン鉱山における空气中放射性物質濃度限度
平衡等価ラドン濃度：1000 Bq/m³

ペルー：居住環境：200 Bq/m³ (対策レベル)
職場環境：1000 Bq/m³ (対策レベル)

IAEAにおけるラドン線量換算係数の検討

各国からの報告を受けたまとめ

- a. 日本、インド、カナダ等ではICRP Publ. 65とICRP Publ. 60を基本とした規制を行っており、ICRP Publ. 103 を基本としたIAEA GSR 3の導入は行われていない。
- b. EUでは、参考レベルである 300Bq/m^3 （ラドンガス濃度）を基準として、測定によってこの値を超えているか否かを判断する。その際、参考レベルを超えた場合に線量評価を行う。年間実効線量として 6mSv が基準であり、超えていれば計画被ばく状況として低減措置を行う。
- c. 職場環境におけるラドン曝露に対してICRPの新しい線量係数を導入することは現状と比べてより高い線量を与えることになる。その結果、規制に対してより多くの労力をもたらすことになり、新しい線量係数の導入と運用のために加盟国間での合意が必要となる。
- d. 住居と職場環境におけるラドン曝露に対する新しい線量係数は、多くの加盟国の規制と放射線防護体系に重要な影響を及ぼす。IAEAからの新しい線量係数の適用に関するガイダンスを期待する。
- e. トロンの被ばくに関する情報が圧倒的に少なく、データの蓄積が重要性である（ICRP、UNSCEAR担当者のコメント）。
- f. トロン曝露に対する線量評価について、トロンガス濃度に不確かさが非常に大きな平衡係数を乗じる手法は放射線防護上適切ではない。
- g. 線量係数はラドン(トロン)子孫核種の粒径に大きく依存する。トロンだけでなくラドンの平衡係数も環境によって代表値とは大きく異なる可能性がある。しかし、これらのデータは非常に少なく信頼できるデータの蓄積が重要である。

IAEAにおけるラドン線量換算係数の検討

RASSC会議に向けた技術会合（TM）での成果のまとめ

TMでは[GSR Part 3 の早急な改定を必要としない](#)ことで合意。ただし、加盟国に対して以下のコメントとともに方針説明書を出すように勧めた。

- ① 住居だけでなく現存被ばく及び計画被ばく状況にある職場環境に対しても**10 mSv/WLM**を使用する。一方、トロンに関しては **5 mSv/ WLM**を使用する。
- ② 現存被ばく状況におけるラドンの管理のために、**300 Bq/m³と 1000 Bq/m³の放射能濃度で示される参考レベルを維持**することを IAEA に望む。
 - 新しい線量係数を導入することにより、現在よりも線量が高くなることについての説明は必須。
 - 加盟国は IAEA GSR Part 3 よりも低い参考レベルを設定することができることを考慮すれば、現在提案されている参考レベルで問題ない。
 - 現存被ばく状況にある職場環境では、ほとんどの[参加加盟国がICRPの新しい線量係数を受け入れる予定](#)。ただし、ドイツは2021年まで導入するか否かの決定を延期する。
- ③ 新しい線量係数の導入によって、加盟国の中には監視下におかれる職場環境の増加や職業被ばくに分類される作業者の増加をもたらすかもしれないことに注意が必要。
- ④ 計画被ばく状況における個人線量を記録する政府の責任者に対して、実測もしくはは線量評価に用いられたいくつかの仮定についてアドバイスが必要である。
- ⑤ ICRPとUNSCEARに対して、それぞれの線量係数の適用とその際に使用する平衡係数を明らかにするようにIAEAから提案してほしい。さらに、IAEAは不確かさを含む、いかなる変更（変更しなくても）の正当性について加盟国に情報共有してほしい。

IAEAにおけるラドン線量換算係数の検討

技術会合後のICRPとUNSCEARの状況（2020年5月）

ICRP

- **放射線防護の目的**で線量係数を報告している。
- 線量データに加えて疫学的データが考慮されている。
- 疫学的な主な観察結果は、鉱山労働者の研究に基づく肺がんリスクの推定値は、一般的に被曝レベルが低いほど高くなることである（データの質が高いため）。
- 疫学データにより、ICRPが使用した名目リスク係数は、 2.83×10^{-4} per WLMから 5×10^{-4} per WLMに変更された。これに基づき、ICRPはより低い参考レベルを勧告した。(ICRP Publ.115)
- 実効線量係数は、中央値である $3 \text{ mSv per mJ h m}^{-3}$ (10 mSv per WLM) に更新され、これは職場や家庭でのほとんどの被ばく状況に適用できる。これは、 $6.7 \text{ nSv per Bq h m}^{-3}$ に相当し、平衡係数を0.4とすれば **$16.8 \text{ nSv per Bq h m}^{-3}$ EERC**となる。
- 職業被ばくの状況がより詳細な検討を必要とし、信頼できる代替データが入手可能な場合は、ICRPが提供する方法論を用いて場所固有の線量を評価することができる。

UNSCEAR

- 線量換算係数は、**他の国際機関の任務である放射線防護目的**とUNSCEARの任務に直接関連する**他の放射線源との比較目的**のために必要である。
- ラドンとその子孫核種の吸入に起因する肺がんの疫学研究と線量モデルの結果の包括的なレビューを提供している。**これらのデータで観測された範囲は以前の評価で観測された範囲と類似しており、両者に適用される不確実性を認識している。**
- したがって、ラドンの線量換算係数として**引き続き $9 \text{ nSv per h Bq m}^{-3}$ EEC**を公衆および労働者の線量評価におけるラドン被ばくレベルの推定に使用する。
- UNSCEARのデフォルトである屋内と屋外の平衡係数をそれぞれ0.4と0.6として適応すると、ラドン濃度の換算係数は屋内では $3.6 \text{ nSv per h Bq m}^{-3}$ 、屋外では $5.4 \text{ nSv per h Bq m}^{-3}$ となる。