

令和4年度原子力規制庁委託成果報告書

令和4年度放射線対策委託費
(放射線健康リスク評価コードの開発) 事業

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

令和5年3月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

まえがき

放射性物質等の利用や原子力災害時の対応等、人々を放射線から適切に防護するためには、それらの線源から人が受ける放射線の量（線量）と、その際に人体に発生する健康への影響（健康リスク）の2つを評価することが不可欠となる。これらの評価に関する科学的な知見は、最新の関連データをもとに、国連科学委員会や国際放射線防護委員会等での議論を経て刻々と更新され続けている。したがって、最新の科学的知見に基づいて、国際的にコンセンサスの取れた方法で線量評価や健康リスク評価を実施しその品質を維持し続けるためには、継続的な調査やコード開発・改良という作業が必要となる。

我が国においては、原子力規制委員会の安全研究プロジェクトとして「放射線防護のための線量及び健康リスク評価精度向上に関する研究（令和4年～令和8年度）」が実施されており、同プロジェクトの中で線量評価と健康リスク評価という両輪に関する研究が進められている¹。

このような背景のもと、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構安全研究センターでは、原子力規制庁より令和4年度放射線対策委託費による委託業務として、令和4年度「放射線健康リスク評価コードの開発」を受託した。本事業では、放射線被ばくに伴うがんリスクを定量的に予測するためのコード開発に関する基礎的な調査として、国内外で開発されたコード及び放射線リスク推定に関する疫学研究等の調査を実施する。また、これらの調査結果をもとに、放射線健康リスク評価コードの開発に当たって、現状の課題や今後のコード活用法等を明確にする。

¹ 原子力規制委員会 HP 参照 (https://www.nra.go.jp/activity/anzen/bunya/bougo_risk.html)

目次

まえがき	i
目次	ii
表リスト	iv
図リスト	vi
事業の概要	vii
1. はじめに	1
1.1. 目的	1
1.2. 本報告書の記載内容	1
2. 既存コードに関する調査	2
2.1. 国内外で開発されたコードの調査結果	2
2.1.1. Blue Book Model	2
2.1.2. HEINPUT	7
2.1.3. MACCS内の健康リスク評価モデル	11
2.1.4. Korean Specific Model	14
2.1.5. RadRAT	19
2.1.6. X-ray RISK	26
2.1.7. IREP	32
2.1.8. ProZES	42
2.1.9. その他 (PACE, LARisk)	49
2.2. 既存コードに関する調査のまとめ	51
2.2.1. 背景と目的	51
2.2.2. 手法 (モデル、パラメータ、ベースラインリスク)	51
2.2.3. 予測精度	58
2.2.4. 不確かさの取扱い	58
2.2.5. コード活用例の情報	59
3. 疫学研究に関する文献調査	66
3.1. 原爆被爆者の疫学研究の文献調査	66
3.2. 海外の放射線被ばく疫学研究に関する報告書の調査	74
3.2.1. UNSCEAR	74
3.2.2. ICRP	75
3.2.3. BEIR VII	76
3.2.4. EPA	76
3.3. 国内外の放射線被ばく疫学研究に関する調査	77
3.4. 疫学研究に関する調査のまとめ	85

3.4.1.	原爆被爆者の疫学研究の調査	85
3.4.2.	国際機関の放射線被ばく疫学研究に関する報告書の調査	85
3.4.3.	国内外の放射線被ばく疫学研究に関する調査	86
4.	現状の分析・評価及び課題の抽出	87
4.1.	既存コードに関する現状分析・評価	87
4.1.1.	既存コードの活用先の整理	87
4.1.2.	既存コードの入力の整理	89
4.1.3.	既存コードのリスクモデルの整理	89
4.1.4.	既存コードの出力の整理	90
4.1.5.	既存コードのソフトウェアの整理	98
4.2.	疫学研究に関する現状分析・評価	99
4.2.1.	修飾効果の整理	99
4.2.2.	線量応答の整理	101
4.3.	コード開発の概念設計に向けて抽出された課題	113
4.3.1.	コードの目的範囲に関する課題	113
4.3.2.	コード出力の利用法に関する課題	113
4.3.3.	コードの入力のオプションに関する課題	114
4.3.4.	コード出力の不確かさの出力方法に関する課題	114
4.3.5.	ソフトウェアに関する課題	115
5.	リスク予測のあり方及びコード活用法に関する検討	116
5.1.	コードの目的の範囲の検討	116
5.2.	コード出力の利用法	116
5.3.	コード入力のオプション	117
5.4.	コード出力の不確かさ	117
5.5.	ソフトウェア	117
6.	研究に必要な国内外の情報収集	119
6.1.	関係する会議等への参加	119
6.2.	既存コード開発者・利用者へのヒアリング	125
7.	委員会の設置及び開催	127
7.1.	検討委員会委員名簿	127
7.2.	第一回検討委員会議事概要	128
7.3.	第二回検討委員会議事概要	135
7.4.	第三回検討委員会議事概要	145
8.	参考文献	155

表リスト

表 2-1	HEINPUTの入力項目	8
表 2-2	HEINPUTの評価の対象としているがん.....	9
表 2-3	Korean Specific Modelのリスク評価モデルのフィッティングパラメータ の値	16
表 2-4	Korean Specific Modelのリスク評価モデルのフィッティングパラメータ の不確かさ分布.....	18
表 2-5	RadRATの入力項目	20
表 2-6	RadRATのリスク評価モデルのフィッティングパラメータの値	22
表 2-7	X-ray RISKの入力項目 (1/2)	27
表 2-8	IREPの入力項目 (1/2)	33
表 2-9	NIH-IREPで評価の対象としているがん部位	35
表 2-10	ProZESの入力項目	43
表 2-11	ProZESで評価するがん部位.....	45
表 2-12	BEIR VIIのリスク評価モデルのフィッティングパラメータの値と重み係 数.....	54
表 2-13	ICRP Pub.103のリスク評価モデルのフィッティングパラメータの値... 56	56
表 2-14	リスク転換に用いたERRモデルとEARモデルの臓器・組織別の割合 57	57
表 2-15	レベル3PRA関連のコードの比較.....	60
表 2-16	生涯寄与リスクを出力するコードの比較	61
表 2-17	原因確率を出力するコード	62
表 2-18	評価の対象としているがん部位の比較 (1/2)	63
表 2-19	Blue Book Modelにおける残りのがんの構成部位.....	65
表 2-20	ProZESにおける残りのがんの構成部位	65
表 3-1	放射線影響研究所が発表した原爆被爆者の最新のがん罹患研究(1/2) 67	67
表 3-2	放射線影響研究所の最新の原爆被爆者の疫学研究のがん部位(1/2)..... 70	70
表 3-3	原爆被爆者の全固形がんの単位線量当たりのERRの推定値と信頼区間... 73	73
表 3-4	原爆被爆者の2018年以降の疫学研究の論文(1/2)	78
表 3-5	職業被ばく（原子力施設）の2018年以降の疫学研究の論文(1/2)..... 80	80
表 3-6	医療被ばく（医療従事者）の2018年以降の疫学研究の論文..... 82	82
表 3-7	医療被ばく（患者）の2018年以降の疫学研究の論文	83
表 3-8	その他の2018以降の疫学研究の論文.....	84
表 4-1	各コードの活用先の分類.....	88
表 4-2	RadRATを活用した論文のまとめ.....	88

表 4-3	Blue Book Modelの再現値とEPA2011 (Table 3-23) の値との比較	91
表 4-4	コード間比較の入力条件	94
表 4-5	LARのコード間比較 (全固形がん、平均値)	95
表 4-6	各コードで扱われている不確かさ*	98
表 7-1	検討委員会委員名簿	127

図リスト

図 2-1	MACCSで使用しているがんリスク評価モデル	12
図 2-2	RadRATのDDREFの評価	23
図 2-3	IREPのDDREFの確率分布（慢性被ばく時）	39
図 2-4	ProZESのDREFの累積確率	46
図 2-5	ProZESの最小潜伏期間によってリスクを調整する乗数の経時変化	47
図 4-1	Blue Book Modelの再現値とEPA2011との比較（男性）	92
図 4-2	Blue Book Modelの再現値とEPA2011との比較（女性）(1/2)	93
図 4-3	被ばく時年齢ごとのLARのコード間比較（全固形がん、罹患、男性）	96
図 4-4	被ばく時年齢ごとのLARのコード間比較（全固形がん、罹患、女性）	96
図 4-5	被ばく時年齢ごとのLARのコード間比較（乳がん、罹患、女性）	97
図 4-6	原爆被爆者と最新の疫学研究の全固形がんのERR/Gyの比較（罹患率）	102
図 4-7	原爆被爆者と最新の疫学研究の全固形がんのERR/Gyの比較（死亡率）	103
図 4-8	原爆被爆者と最新の疫学研究の全固形がんのERR at 100mGyの比較（罹患率）	106
図 4-9	原爆被爆者と最新の疫学研究の肺がんのERR/Gyの比較	108
図 4-10	原爆被爆者と最新の疫学研究の白血病のERR at 100 mGyの比較（罹患率）	109
図 4-11	原爆被爆者と最新の疫学研究の白血病のERR at 100 mGyの比較（死亡率）	110
図 4-12	原爆被爆者と最新の疫学研究の甲状腺がんのERR/Gyの比較（罹患率）	111

事業の概要

本事業では、放射線被ばくに伴うがんリスクを予測するためのコードを開発するために、国内外の既存コードに関する調査及び最新の疫学研究に関する調査を実施した。

国内外で開発されたコードとして、Blue Book Model、HEINPUT、MACCS内の健康リスクモデル、Korean Specific Model、RadRAT、X-ray RISK、JAXAのコード、IREP、ProZES、PACE内の健康リスク評価コード、及びLARiskを調査した。各コードに対して、コードが開発された背景、目的、手法（モデル、パラメータ、ベースラインリスク）、予測精度、不確かさの取り扱い、及びコード活用例の情報を収集し、調査結果を整理した。

疫学研究の調査として、原爆被爆者の疫学調査、国際機関の放射線被ばくの疫学研究に関する報告書の調査、最新の疫学研究のレビューを実施した。それらの調査を踏まえてリスク評価コードの現状の分析・評価及び課題を抽出し、リスク予測のあり方及びコード活用法に関して検討した。加えて、関連する学会に参加することなどにより、研究に必要な国内外の情報収集を実施した。さらに、検討委員会を設置、開催して専門家の委員との議論をまとめた議事録を作成した。

1. はじめに

1.1. 目的

放射線被ばくに伴うがんリスクの定量的な予測は、放射線安全や原子力災害に関する防護の判断等における主要な根拠の一つである。中でも、緊急時において、小児や妊婦、高齢者等、特定の集団に対する防護措置を考える場合には、当該集団の属性に基づいて放射線被ばくに伴うがんリスクを精緻に予測する必要があるが、我が国においては、放射線防護を目的とした汎用のがんリスク評価コード（以下、がんリスク評価コードをコードとする）が整備されておらず、最新の科学的な知見に基づき、必要な情報を十分に提供できていないのが現状である。この現状を鑑み本事業では、放射線被ばくに伴うがんリスクを定量的に予測するためのコード（以下、本リスク評価コード）の開発に先立ち、国内外で開発されたコードの調査及び放射線リスク推定に関する疫学研究等の調査を行い、現状の課題や今後のコード活用法等を明確にすることで、次年度以降の本リスク評価コードの開発の概念設計に資することを目的とする。

1.2. 本報告書の記載内容

1.1に記載した目的のもと、本報告書では、以下の章においてそれぞれの調査内容を記載する。第2章では、既存コードに関する調査を記載する。第3章では、疫学研究に関する調査を記載する。第4章では、現状の分析・評価及び課題の抽出と題して第2、3章の内容を分析・評価した内容を記載する。第5章では、リスク予測のあり方及びコード活用法に関する検討と題して前章の内容を踏まえて次年度以降のコード開発の概念設計に資する検討内容を記載する。第6章では、研究に必要な国内外の情報収集の結果を記載する。第7章では、検討委員会の設置及び開催として委員名簿と議事概要を記載する。

2. 既存コードに関する調査

本章では、放射線被ばくに伴うがんリスクの定量的な予測を目的として国内外で開発されたコードについて調査した内容をまとめる。本調査においては、既存コードが開発された背景（開発の主体と時期等を含む）、目的、手法（モデル、パラメータ、ベースラインリスク）、予測精度、不確かさの取扱い、コード活用例の情報を収集した。なお、本事業での“予測精度”は、「他のコードと評価結果を比較して、コードの妥当性を検証する」という意味で用いる。

本調査では、多岐にわたる活用例を収集すること、各国の規制要件にがんリスク等がどのように利用されているかを調査するために、以下の11のコードを調査した。なお、調査コードに対する過不足が無いことに関しては、検討委員会で確認されている。

- ・ Blue Book Model
- ・ HEINPUT
- ・ MACCS内の健康リスク評価モデル
- ・ Korean Specific Model
- ・ RadRAT
- ・ X-Ray RISK
- ・ JAXAのコード
- ・ IREP
- ・ ProZES
- ・ PACE内の健康リスク評価コード
- ・ LARisk

2.1.国内外で開発されたコードの調査結果

2.1.1. Blue Book Model

(1) 背景・目的（開発の主体と時期、コードの公開状況を含む）

1) 開発主体、開発年、参考文献

開発主体：米国環境保護庁（U.S. Environmental Protection Agency: EPA）

開発年：1994年（更新年：2011年）

参考文献：(EPA, 1994, EPA, 2011)

2) 背景

EPAの報告書(EPA, 1994, EPA, 2011)では、Blue Book Modelが開発された背景やニーズは明確に記載されていない。1994年の報告書(EPA, 1994)の背景では、米国における電離放射線の生体影響に関する諮問委員会（The Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing

Radiations: BEIR) の報告書シリーズ第3巻 (BEIR III) ²(Fabrikant, 1980)を基に低LET放射線によるリスクの推定が行われていたが、その後、新たなデータが入手されたため、計算方法の改訂を行ったとの記載がある。2011年の報告書(EPA, 2011)の背景では、BEIR VIIモデル(National Research Council, 2006)を用いて大部分のがん部位の放射線リスクに関する計算方法の改訂を行ったとの記載がある。ちなみに、Blue Book Modelの名称は、EPAの報告書「EPA Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population」(EPA, 2011)の表紙が青色であることに由来している。

3) 目的

EPA (2011)の報告書は、米国人の低線量放射線被ばくによるがん罹患と死亡リスクを評価するために公表された。最終的には、1999年に発行した「Federal Guidance Report 13 (FGR-13), Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides」(EPA, 1999)で与えた核種毎のリスク係数（生涯寄与リスクと内部被ばく線量係数から算出）を更新することが目的である。

さらに、BEIR VIIでは、出生前被ばく、腎臓、骨、非メラノーマ皮膚がんが取り上げられなかったため、それらのがんリスク推定に関連する不確かさを分析することもEPAの報告書(EPA, 2011)の目的に含まれている。

4) モデルの公開状況

評価コードとしては公開されていない。過剰相対リスク (Excess Relative Risk: ERR) と過剰絶対リスク (Excess Absolute Risk: EAR) を評価するモデル（以下、リスク評価モデル）やそれに付随するパラメータが報告書にまとめられている。

(2) 手法（モデル、パラメータ、ベースラインリスク）

1) 評価の対象としているがん

評価の対象としているがんはBEIR VIIで考慮されている10個の固形がん（胃、結腸、肝臓、肺、乳、子宮、卵巣、前立腺、膀胱、甲状腺）と白血病に加えて、腎臓、骨及び皮膚である。

2) リスク評価モデル

Blue Book Modelでは、固形がん（腎臓がん、骨がん、皮膚がん及び甲状腺がんを除く）、乳がんおよび白血病のERRとEARにはBEIR VIIのモデルを用いて、被ばく時年齢から生涯にわたる生涯寄与リスクを推定している。BEIR VIIモデルについては、2.2.2(1) 項に記載し

²以下、BEIR による報告書シリーズについては、その巻号と委員会名を組み合わせで表記する。例えば、第7巻の評価は、「BEIR VII」とする。NATIONAL RESEARCH COUNCIL 2006. BEIR VII Phase 2, Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Washington, D.C.: The National Academies Press.

ている（式(2-26)~式(2-29)参照）。ここでは、Blue Book Modelで新たに加えられた腎臓がん、骨がん、皮膚がん及び甲状腺がんのリスク評価モデルを示す。

腎臓がん

腎臓がんに対して、ERRモデルは残りのがんのERRモデルをそのまま使用し、EARは残りのがんのEARモデルから次式を用いて算出している。

$$EAR_{Kidney}(g, e, a) = \frac{\lambda_{I,Kidney}(g, a)}{\lambda_{I,Remainder}(g, a)} EAR_{Remainder}(g, e, a) , \quad (2-1)$$

ここで、

$EAR_{Kidney}(g, e, a)$:	腎臓がんの絶対過剰リスク
$\lambda_{I,Kidney}(g, a)$:	腎臓がんのベースライン罹患率
$\lambda_{I,Remainder}(g, a)$:	残りのがんのベースライン罹患率
$EAR_{Remainder}(g, e, a)$:	残りのがんの絶対過剰リスク
D	:	被ばく線量 (Gy)
G	:	性別 (m : 男性, f : 女性)
E	:	被ばく時年齢 (y)
A	:	到達年齢 (y)

骨がん

高LET放射線に対する骨がんのEARモデルが次式のように与えられ、低LET放射線に対する骨がんのEARは次式の算出値の1/10としている。

$$\Delta r = \alpha \cdot D \cdot g(e) \cdot h(t) , \quad (2-2)$$

ここで、

Δr	:	高LET放射線に対する骨がんの絶対過剰リスク
α	:	$\alpha = 1.782 \times 10^{-3} \text{ Gy}^{-1}$
D	:	被ばく線量 (Gy)
$g(e)$:	$g(e) = \exp[-0.0532(e - 30)]$
$h(t)$:	$h(t) = (2\pi\sigma)^{-\frac{1}{2}} \times \exp\left[-\frac{\{\ln(t) - \ln(t_0)\}^2}{2\sigma^2}\right] \times \frac{1}{t}$
		$\sigma = 0.612$
		$t_0 = 12.72 \text{ (y)}$
e	:	被ばく時年齢 (y)
t	:	被ばくからの経過時間 (y)

皮膚がん (非メラノーマ)

皮膚がんはERRのみを評価し、そのERRのモデル式は次式とされている。

$$ERR = (D, e) 0.2D(0.88)^{e-7} , \quad (2-3)$$

ここで、

$ERR(D, e)$:	皮膚がん (非メラノーマ) の相対過剰リスク
D	:	被ばく線量 (Gy)
e	:	被ばく時年齢 (y)

甲状腺がん

甲状腺がんはERRのみを評価し、そのERRのモデルとパラメータは次式とされている。

$$ERR(D, e, t) = \beta DA(e)T(t) , \quad (2-4)$$

ここで、

$ERR(D, e, t)$:	甲状腺がんの相対過剰リスク
D	:	被ばく線量 (Gy)
e	:	被ばく時年齢 (y)
t	:	被ばくからの経過時間 (y)

β	10.7
e	$A(e)$
<5	1.0
5-9	0.6
10-14	0.2
15-19	$0.2\exp[-0.083(e - 15)]$
20+	$0.2\exp[-0.083(e - 15)]$
t	$T(t)$
<5	0
5-14	1.15
15-19	1.9
20-24	1.2
25-29	1.6
30-40	0.47
40+	0.47

3) リスク転換

重み付き算術平均で評価している（すなわちBEIR VIIが採用する重み付き幾何平均よりも生涯寄与リスクは大きい傾向となる）。ERRとEARの重みはほとんどの部位に対して、BEIR VIIと同じ値（ERR : EAR = 0.7 : 0.3）が使用されている。値が異なるものとして、甲状腺と皮膚ではERR : EAR = 1.0 : 0.0、乳房と骨ではERR : EAR = 0.0 : 1.0、肺ではERR : EAR = 0.3 : 0.7、卵巣ではERR : EAR = 0.8 : 0.2、腎臓で男性に対してERR : EAR = 0.8 : 0.2、女性に対してERR : EAR = 0.6 : 0.4が使用されている。

4) 線量・線量率効果係数

Dose and Dose Rate Effectiveness Factor（DDREF）はBEIR VIIと同様に1.5が適用されている。ただし白血病、骨がん、及び皮膚がんにはDDREFを適用していない。

5) 最小潜伏期間

BEIR VIIと同様に白血病で2年、固形がんで5年と固定している。

6) データソース

利用した原爆被爆者の疫学調査：原爆被爆者の疫学調査（Life Span Study: LSS）第13報

(LSS死亡率データ（調査期間：1950~1997年））(Preston et al., 2003)

(3) 予測精度、不確かさの取扱い

1) 予測精度

生涯寄与リスク（Lifetime Attributable Risk: LAR）に対して、Blue Book ModelとBEIR VIIとの比較が行われている(EPA, 2011)。これらの比較では、95%信頼区間の値が利用されている。その結果、ほとんどの部位でLARは約30%以内で一致していた。例外として、前立腺がん、卵巣がん、女性の甲状腺がんに対して、Blue Book Modelで求めたLARの95%信頼区間の上限値はBEIR VIIに比べて2倍以上小さかった。しかしながら、この要因はEPAの報告書(EPA, 2011)では言及されていない。

2) 不確かさの取扱い

生涯寄与リスクの不確かさ評価に関して、発生源として、①EARとERRのフィッティングパラメータ、②DDREF、③リスク転換のERRとEARの重み、④疫学調査の不完全な追跡期間（LSSの追跡期間が未だ途中であり、追跡期間外のリスク推定値を外挿することによる不確かさ）、⑤線量計測の誤り（DS02（2002年線量推定方式）の不確かさ）、⑥がんの検出と診断の誤り、⑦原爆被爆者集団の選択バイアス（放射線に鈍感な対象者の選択によるバイアス）が挙げられる(EPA, 2011)。

Blue Book Modelの不確かさ評価では、発生源に応じて、2種類の不確かさの考慮方法が用いられている。1つ目はモンテカルロ法を用いた方法であり、EARとERRのフィッティングパラメータをサンプリングすることで生涯寄与リスクの不確かさを評価する。2つ目は生涯寄与リスクに不確かさ係数³を除することで不確かさを評価する。DDREFとリスク転換のERRとEARの重みも不確かさ係数を用いて評価され、その他の疫学調査の不完全な追跡期間なども不確かさ係数を用いた評価となる。

特にリスク評価モデルの評価式中のフィッティングパラメータのサンプリングは、仮定した確率分布からのサンプリングではなく、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて行われる。

(4) コード活用の具体例

連邦ガイダンス報告書第13号（FGR-13）(EPA, 1999)で与えられている、核種毎の発がんリスク係数を導き出すために使用された。

³例えば、幾何平均1.5、幾何標準偏差1.35の対数正規分布を考えた場合、95%信頼区間の上下限値は、幾何平均1.5に対数正規分布の2.5%タイル値(0.8)と97.5%タイル値(2.7)を除いた値となる。ここでは、0.8と2.7が不確かさ係数と呼ばれる。

2.1.2. HEINPUT

(1) 背景・目的（開発の主体と時期、コードの公開状況を含む）

1) 開発主体、開発年、参考文献

開発主体：日本原子力研究開発機構（Japan Atomic Energy Agency: JAEA）

開発年：2015年

参考文献：高原ら(高原 省五 et al., 2015)

2) 背景

JAEAは、原子炉事故の確率論的リスク評価（Probabilistic Risk Assessment: PRA）⁴研究の一環として、レベル3PRAのための確率論的事故影響評価コードOSCAAR（Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Release in Reactor Accident）を開発し、公開した（JAEA, 2020）が。OSCAARコード内では、がんリスクの推定モデルが利用されており、推定モデルに用いる放射線被ばくに起因する晩発性の身体的影響と遺伝的影響を予め計算しておく必要がある（外川 織彦 et al., 1999）。

3) 目的

OSCAARコード内における健康評価モジュールHEの前処理プログラムとして、放射線被ばくによる確率的影響のリスクを評価することが目的である。

4) コードの公開状況と入出力

OSCAARコードパッケージ（HEINPUTは含まれていない）はWindows上で実行可能なデスクトップアプリケーションであり、JAEAのコンピュータプログラムなどの検索システムPRODAS（<https://prodas.jaea.go.jp>）を通して入手可能である。HEINPUTはOSCAARの前処理プログラムであり、独立で動作する。HEINPUTは現時点（2023年1月30日時点）では、ソースコードも含め非公開であるが、最新版であるHEINPUT-GUI ver2.0(高原 省五 et al., 2015)の公開を検討中である。

入力項目を表 2-1に示す。入力リスク評価モデル、リスク評価モデル関連パラメータ、人口統計情報を予め選択するようになっている。リスク評価モデルは1994年と2011年の米国環境防護庁EPAの報告書(EPA, 2011, EPA, 1994)、及び米国原子力規制委員会（U.S. Nuclear Regulatory Commission: U.S. NRC）の報告書(U.S.NRC, 1993)の3つ（EPA(1994), EPA(2011)及びNUREG(1993)）のいずれかを選択できるようになっている。

⁴原子力施設等で発生するあらゆる事故を対象として、その発生頻度と発生時の影響を定量的に解析してリスクを算出し、安全性を評価する方法。このうち、事故シーケンスによる公衆の健康影響及び経済的影響を評価する部分が“レベル 3PRA”である。

表 2-1 HEINPUTの入力項目

入力項目	値
リスク評価モデル	<ul style="list-style-type: none"> • EPA (1994) • EPA (2011) • NUREG (1993)
リスク評価モデル関連パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> • EPA (1994)の場合： <ul style="list-style-type: none"> - EPA (1994)のパラメータを利用 • EPA (2011)の場合： <ul style="list-style-type: none"> - EPA (2011)のパラメータを利用 • NUREG (1993)の場合： <ul style="list-style-type: none"> - NUREG (1993)のパラメータを利用 - 本間ら(本間 俊充 et al., 2000)パラメータを利用
人口動態統計関連データ	<ul style="list-style-type: none"> • EPA (1994)の場合： <ul style="list-style-type: none"> - EPA (1994)の人口動態統計データを利用 - 日本の1983~1995年の人口統計データを利用 • EPA (2011)の場合： <ul style="list-style-type: none"> - EPA (2011)の人口動態統計データを利用 - 2014年2月時点で日本の最新の人口統計データを利用 • NUREG (1993)の場合： <ul style="list-style-type: none"> - NUREG (1993)の人口動態統計データを利用 - 日本の1983~1995年の人口統計データを利用

(2) 手法（モデル、パラメータ、ベースラインリスク）

1) 評価の対象としているがん

利用するリスク評価モデルにより、評価の対象としているがんが異なる。各モデルで取り扱っているがんの種類を表 2-2に示す。

表 2-2 HEINPUTの評価の対象としているがん

部位	EPA (2011)	EPA (1994)	NUREG (1993)
胃	○ ¹⁾	○	胃腸がんとして扱う
結腸	○	○	胃腸がんとして扱う
肝臓	○	○	胃腸がんとして扱う
肺	○	○	○
乳房	○	○	○
前立腺	○	その他の部位に含む	その他の部位に含む
子宮	○	その他の部位に含む	その他の部位に含む
卵巣	○	○	その他の部位に含む
膀胱	○	○	その他の部位に含む
その他	○	○	○
甲状腺	○	○	○
白血病	○	○	○
食道	その他の部位に含む	○	胃腸がんとして扱う
腎臓	△ ²⁾	○	その他の部位に含む
脳と中枢神経	その他の部位に含む	その他の部位に含む	その他の部位に含む

¹⁾ ○：個別に評価の対象としているもの

²⁾ △：個別のモデルは存在しないものの、EARの扱いにおいて、その他の部位に基づいて別途推計されている。

2) リスク評価モデル

HEINPUTでは、3つのリスク評価モデル（U.S. NRCの報告書(U.S.NRC, 1985, U.S.NRC, 1993)、米国環境保護庁の報告書(EPA, 2011, EPA, 1994)）が整備されており、ユーザーは始めにどのリスク評価モデルを参照するかを選択できるようになっている。例えば、EPA (2011)のリスク評価モデルを選択した場合、Blue Book Model(EPA, 2011)のリスク評価モデル（2.1.1項）を用いて、被ばく時年齢から生涯にわたる生涯寄与リスクが推定される。

3) リスク転換

重み付き算術平均で評価している（すなわちBEIR VIIの重み付き幾何平均よりもリスクは大きい傾向となる）。ERRとEARの重みはBlue Book Modelと同じである（2.1.1(2)参照）。

4) 線量・線量率効果係数

DDREFはBlue Book Modelと同じ設定である。つまり、白血病、骨がんおよび皮膚がんに対してはDDREFを適用せず、それ以外に対してはBEIR VIIと同様に1.5を適用している。

5) 最小潜伏期間

BEIR VIIと同様に白血病で2年、固形がんで5年と固定している。

6) データソース

原爆被爆者の疫学調査：LSS 第13報（LSS死亡率データ（調査期間：1950~1997年））
(Preston et al., 2003)

人口分布：表 2-1の人口動態統計データ参照。任意のデータも入力可能。

がん死亡率：表 2-1の人口動態統計データ参照。任意のデータも入力可能。

がん罹患率：表 2-1の人口動態統計データ参照。任意のデータも入力可能。

生命表：表 2-1の人口動態統計データ参照。任意のデータも入力可能。

(3) 予測精度、不確かさの取扱い

1) 予測精度

HEINPUTとEPAの生涯がん罹患リスクと生涯がん死亡リスクの比較が行われている(高原省五 et al., 2015)。白血病を除く部位では10%以内で一致していた。なお、被ばく時年齢15歳未満の甲状腺がんに関して、EPAの結果は単調減少しているのに対し、HEINPUTの結果は5歳刻みで増減を繰り返す傾向となっていた。この傾向の違いは、EPAの結果を5歳刻みで出力するために5歳刻みのデータを利用し、HEINPUTの結果を1歳刻みで出力するために1歳刻みのデータを利用していることに加え、バックグラウンドリスクが年齢に伴って増加することに起因している。また、式(2-4)のA(e)は0~14歳までは5歳おきに一定値となっており、HEINPUTでも0~4歳、5~9歳、10~14歳は同じ値を利用したことも要因の一つである。白血病に関しては、HEINPUTの値はEPAの値に比べて数10%小さかった。この原因として、全く同じバックグラウンドデータを使用できなかったこと、データの年齢の刻みが異なっていた（EPAでは10年、HEINPUTでは1年）ことが考えられる(高原省五 et al., 2015)。

2) 不確かさの取扱い

不確かさ評価は行っていない。

(4) コード活用の具体例

OSCAARコードの前処理プログラムとして利用されている。

2.1.3. MACCS内の健康リスク評価モデル

(1) 背景・目的（開発の主体と時期、コードの公開状況を含む）

1) 開発主体、開発年、参考文献

開発主体：米国原子力規制委員会（U.S. Nuclear Regulatory Commission: NRC）

開発年：1997年（更新年：2022年（2023年1月30日時点））

参考文献：(U.S. NRC, 2022)

2) 背景

U.S. NRCが原子力発電所事故の公衆への影響を評価するためにレベル3PRAコードのMACCSコードを開発した(U.S. NRC, 2022)。MACCSが出力するがんリスク推定値は安全目標との比較や費用便益分析のために使用されている。

3) 目的

U.S. NRCの安全目標との比較及び費用便益分析のために、MACCS内で出力された住民の臓器線量と実効線量に対して、放射線被ばくによる早期影響及び晩発影響（がん）を評価することが目的である。

4) コードの公開状況と入出力

MACCSはWindows上で実行可能なデスクトップアプリケーションである。ただし、アプリケーションのダウンロードにあたっては、U.S. NRCの許可が必要である。なお、ソースコードは非公開である。

(2) 手法（モデル、パラメータ、ベースラインリスク）

1) 評価の対象としているがん

個別に評価せずに、全部位として評価している。

2) リスク評価モデル

MACCS内の健康リスク評価モデルは、BEIR V(National Research Council, 1990)とU.S. NRCのレポート(U.S.NRC, 1997)を参考にしている。

線形モデル、線形二次モデル、年間しきい値モデル、Piecewise線形モデルを選択して、被ばく時年齢から生涯にわたる生涯寄与リスクを推定する。それぞれのモデルに対して、年間の被ばく線量に対する個人のがんリスク係数が与えられている。ただし、性別、被ばく時年齢、到達年齢といった修飾効果は考慮されていない。しきい値モデルのデフォルト値として年50 mSv以下が設定されている。

3) リスク転換

MACCSにおいてリスク転換は考慮されていない。

4) 線量・線量率効果係数

線形モデル、しきい値モデル、Piecewise線形モデルに対して、線量が年間200 mSv以下の場合に2.0のDDREFを使用する。

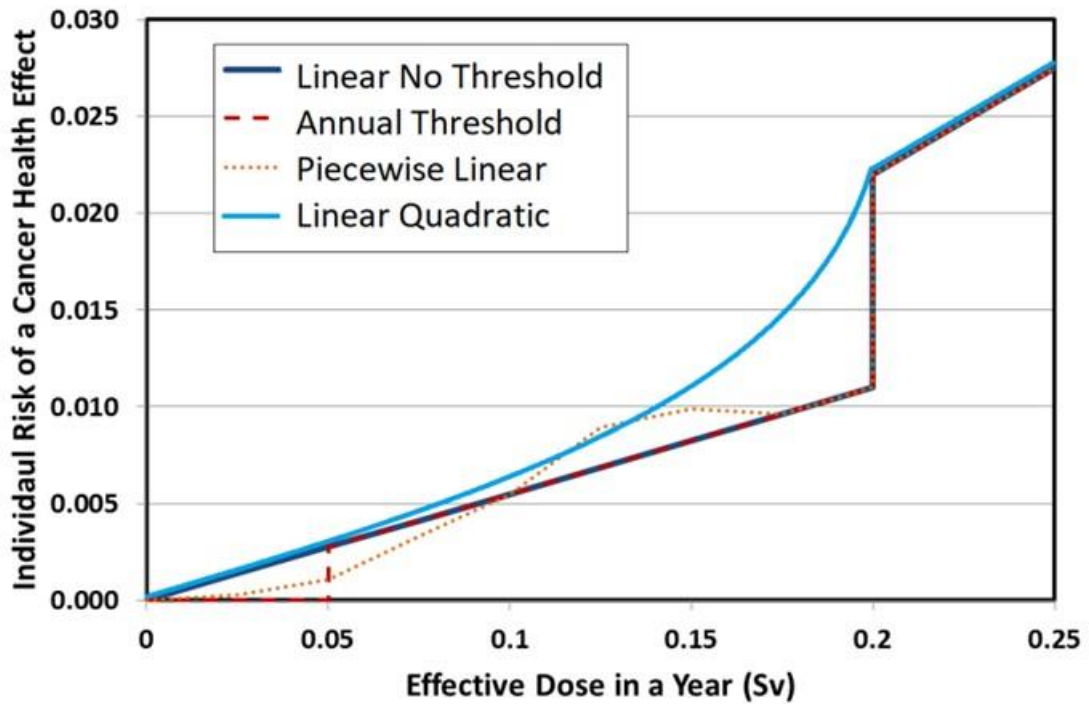


図 2-1 MACCSで使用しているがんリスク評価モデル

出所：MACCS Theory Manual Fig 6-1(U.S.NRC, 2021)

5) 最小潜伏期間

MACCSにおいて最小潜伏期間は考慮されていない。

6) データソース

原爆被爆者の疫学調査：LSS 第11報（LSS死亡率データ（調査期間：1950~1985年））
(Shimizu Y, 1990)

人口分布：米国の原子力施設周辺地域の人口分布

がん死亡率：ベースラインによる計算が行われておらず未考慮

がん罹患率：ベースラインによる計算が行われておらず未考慮

生命表：ベースラインによる計算が行われておらず未考慮

(3) 予測精度、不確かさの取扱い

1) 予測精度

MACCS内の健康リスクコードを他のコードと比較した例はない。

2) 不確かさの取扱い

線量から健康リスクへの換算係数には不確かさは考慮されていないが、4種類の線量応答モデルが選択可能なことから、線量応答モデルの選択に伴う不確かさは考慮可能と言える。

(4) コード活用の具体例

米国では、MACCSが5基の軽水炉プラントのPRA(U.S.NRC, 1990)に利用され、そこでは、発電所周辺の個人に対する急性死亡及びがん死亡リスクが、U.S. NRCの安全目標（原子力発電所の事故による急性死亡については、一般の事故による死亡リスクの0.1%、がん死亡については、一般のがんによる死亡の0.1%以下とする）(U.S.NRC, 1983)に比べ十分小さいことが示された。

2.1.4. Korean Specific Model

(1) 背景・目的（開発の主体と時期、コードの公開状況を含む）

1) 開発主体、開発年、参考文献

開発主体：韓国科学技術情報通信部（Ministry of Science and ICT: MSIT）

開発年：2020年

参考文献：(Lee et al., 2020)

2) 背景

2011年に起きた東京電力福島第一原子力発電所事故後の韓国における原子力発電所の安全性改善の対策として、韓国において2016年にレベル3確率論的安全評価（Probabilistic Safety Assessment: PSA⁵）の実施が通達として制定された(韓国原子力研究院, 2017)。それまでの韓国では、韓国固有のレベル3 PSAコードが無く、韓国内におけるレベル3PSAの大半をU.S. NRCのMACCSで実施していたものの、MACCSで出力される健康リスクを韓国人の集団に適用するには限界があった。

3) 目的

放射線起因のがんリスクを民族性および地域性を反映し、早期死亡やがん死亡の観点から安全目標を達成するための影響解析を関連機関が実施できるようにすることが目的である。

4) コードの公開状況と入出力

Korean Specific Modelのソースコードは公開されていない。韓国人集団に対するリスク評価をレベル3PSAに組み込むことが将来予定されている。

(2) 手法（モデル、パラメータ、ベースラインリスク等）

1) 評価の対象としているがん

評価の対象としているがんは、BEIR VIIと同様で、11個の固形がん（胃、結腸、肝臓、肺、乳、子宮、卵巣、前立腺、膀胱、甲状腺、残り）および白血病である。

2) リスク評価モデル

BEIR VIIのERRとEARのモデルを使用して、被ばく時年齢から生涯にわたる生涯寄与リスクを推定している。ただし、白血病、甲状腺および乳がんはBEIR VIIと異なったモデルを採用している。白血病に関しては日本の原爆被爆者の1950年から2001年までの罹患率データ(Hsu et al., 2013)に基づいたモデルを用いている。甲状腺がんと乳がんに関しては、Preston et al. (Preston et al., 2007)の日本の原爆被爆者データの罹患率データに基づいたモデル

⁵ PSAはPRAと同様の意味で用いられる。

ルを用いている。BEIR VIIモデルについては、2.2.2(1) 項に記載している（式(2-26)~式(2-29)参照）。ここでは、BEIR VIIとは異なる甲状腺がん、乳がん及び白血病のリスク評価モデルを示す。

甲状腺がんと乳がん

甲状腺がんと乳がんのERRとEARは、次式とされている（フィッティングパラメータ β 、 γ 、 η は表 2-3を参照）。

$$\begin{aligned} ERR \text{ or } EAR &= \beta_g D \times \exp[e^* \ln(1 + \gamma)] \times \left(\frac{a}{70}\right)^\eta, \\ e^* &= \frac{e - 30}{10}, \end{aligned} \quad (2-5)$$

ここで、

$ERR \text{ or } EAR$:	過剰相対リスクまたは過剰絶対リスク
D	:	被ばく線量 (Sv)
g	:	性別 (m : 男性, f : 女性)
e	:	被ばく時年齢 (y)
a	:	到達年齢 (y)

白血病

白血病のERRとEARは、次式とされている（フィッティングパラメータ β 、 θ 、 δ 、 γ 、 η は表 2-3を参照）。

$$\begin{aligned} ERR &= (\beta D + \theta D^2) \times \exp\left[\eta \ln\left(\frac{a}{70}\right) + \delta \ln\left(\frac{t}{40}\right)\right], \\ EAR &= (\beta D + \theta D^2) \times \exp\left[\gamma e^* + \eta \ln\left(\frac{a}{70}\right) - 0.158 - 0.42g\right], \\ e^* &= \frac{e - 30}{10}, \end{aligned} \quad (2-6)$$

ここで、

$ERR \text{ or } EAR$:	過剰相対リスクまたは過剰絶対リスク
D	:	被ばく線量 (Sv)
e	:	被ばく時年齢 (y)
a	:	到達年齢 (y)
t	:	被ばくからの経過時間[y] ($t = a - e$)
g	:	性別 (男性のとき0, 女性のとき1)

表 2-3 Korean Specific Model のリスク評価モデルのフィッティングパラメータの値

がん部位	ERR				EAR			
	β [per Gy]		γ	η	β [per 10 ⁴ person-year-Gy]		γ	η
	Male(β_M)	Female(β_F)			Male(β_M)	Female(β_F)		
白血病 ⁽¹⁾	0.79	0.79	-	-1.09	1.06	0.70	0.41	-1.45
	$\theta=0.95$	$\theta=0.95$	$\delta=-0.81$		$\theta=1.09$	$\theta=0.71$		
甲状腺	0.49	0.65	-0.31	-1.5	0.5	1.9	-0.46	0.6
乳房	-	0.87	0.00	-2.3	-	9.2	-0.37	1.7

⁽¹⁾ Chronic Lymphocytic Leukemia（慢性リンパ性白血病）と Adult T-cell Leukemia（成人T細胞白血病）を除く

3) リスク転換

重み付き算術平均で評価している（すなわちBEIR VIIの重み付き幾何平均よりもリスクは大きい傾向となる）。ERRとEARの重みはほとんどの部位に対して、BEIR VIIと同じ値（ERR : EAR = 0.7 : 0.3）が使用されている。肺では他の部位と値が異なるものの、BEIR VIIと同じ値（ERR : EAR = 0.3 : 0.7）が使用されている。BEIR VIIと値が異なるものとして、甲状腺と乳房ではERR : EAR = 0.5 : 0.5が使用されている。

4) 線量・線量率効果係数

総線量及び線量率に応じてDDREFを適応している。線量が100 mGy未満または線量率が0.1 mGy min⁻¹未満の場合に1.3のDDREFを使用している。この値は、Kocherの論文を基にしている(Kocher et al., 2018)。Kocherらは、LSSコホートにおける固形がんの罹患率または死亡率の線量反応の曲率の解析、及び低線量率における労働者または公衆の固形がんの罹患率または死亡率のリスクとLSSコホートのリスクとの比較によって、DDREFを推定している。

5) 最小潜伏期間

BEIR VIIと同様に白血病は2年、固形がんは5年と固定している。

6) データソース

原爆被爆者の疫学調査 : LSS第13報（LSS死亡率データ（調査期間：1950~1997年）(Preston et al., 2003)、LSS罹患率データ（調査期間：1958~1998年）(Preston et al., 2007)、LSS罹患率データ（白血病、リンパ腫、多発性骨髄；調査期間：1950~2001年）(Hsu et al., 2013, Preston et al., 2003)

(3) 予測精度、不確かさの取扱い

1) 予測精度

Korean Specific Modelを他のモデルと比較した例はなく、予測精度に関する記載はない。

2) 不確かさの取り扱い

不確かさの評価は、BEIR VIIとEPA (2011)を基に評価する。生涯寄与リスクの不確かさの評価に関して、不確かさの発生源として、①EARとERRのフィッティングパラメータ、②DDREF、③リスク転換のERRとEARの重み、④疫学調査の不完全な追跡期間（追跡期間が未だ途中であり、追跡期間外のリスク推定値を外挿することによる不確かさ）、⑤がんの検出と診断の誤り、⑥原爆被爆者集団の選択バイアス（放射線に鈍感な対象者の選択によるバイアス）が挙げられている(Lee et al., 2020)。

①ERRとEARのフィッティングパラメータ、②DDREF、および③リスク転換のERRとEARの重みは、リスク評価モデル自体が持つパラメータの不確かさである。①ERRとEARのフィッティングパラメータの不確かさ分布は表 2-4のように設定されている。②DDREFの不確かさ分布は対数正規分布を仮定し、幾何平均 (GM) 1.31、幾何標準偏差 (GSD) 1.80を設定し、③リスク転換のERRとEARの重みはベルヌーイ分布を仮定し、次のように設定している。

- ・ $P(w=0)=0.3, P(w=1)=0.7$ (甲状腺がん、肺がん、および乳がん以外のがん)
- ・ $P(w=0)=0.7, P(w=1)=0.3$ (肺がん)
- ・ $P(w=0)=0.5, P(w=1)=0.5$ (甲状腺がんと乳がん)

$w=0$ はEAR、 $w=1$ はERRを示す。

また、④疫学調査の不完全な追跡期間、⑤がんの検出と診断の誤りおよび⑥原爆被爆者集団の選択バイアスは、それぞれEPA (2011)の場合と同様に不確かさの要因として評価する。それぞれの不確かさ分布は次のように設定している。

- ・ GM = 1, GSD = 1.2 の対数正規分布 (疫学調査の不完全な追跡期間)
- ・ GM = 1, GSD = 1.05 の対数正規分布 (がんの検出と診断の誤り)
- ・ GM = 1, GSD = 1.1 の対数正規分布 (原爆被爆者集団の選択バイアス)

(4) コード活用の具体例

韓国の原子力安全法（規定第3章第9条）では、原子炉施設の事故による、敷地付近の住民のがん死亡リスクを計算し、一般のがん死亡による全体のリスクが0.1%以下⁶であることを確認することとなっており、このリスクを確認するためにKorean Specific Modelが利用される(韓国原子力研究院, 2017)。

⁶ここでの全体のリスク 0.1%とは、U.S. NRCの安全目標（原子力発電所の事故による急性死亡については、一般の事故による死亡の0.1%、がん死亡については、一般のがんによる死亡の0.1%以下とする）を念頭においた記述と考えられる。

表 2-4 Korean Specific Modelのリスク評価モデルのフィッティングパラメータの不確かさ分布

がん部位	パラメータ ⁽¹⁾	ERR ⁽²⁾		EAR ⁽²⁾	
		Male	Female	Male	Female
白血病	β	W(-0.266,2.48,1.30)	W(-0.266,2.48,1.30)	W(-0.188,2.47,1.54)	W(-0.098,2.53,0.97)
	θ	W(0.0855,2.61,1.04)	W(0.0855,2.61,1.04)	W(0.0797,2.55,1.23)	W(0.0558,2.50,0.81)
	δ	W(-1.59,3.22,0.872)		-	
	γ	-		W(0.0866,3.14,0.365)	
	η	W(-2.67,3.87,1.71)		W(-2.58,3.61,1.24)	
甲状腺	β	W(-0.02,2.10,0.69)	W(-0.35,2.62,0.63)	W(0.22,1.47,0.61)	W(1.06,1.59,1.58)
	γ	W(-0.78,2.77,0.55)		W(-0.82,2.50,0.45)	
	η	W(-3.94,3.06,2.75)		W(-1.56,3.30,2.41)	
乳房	β	-	W(0.35,2.62,0.63)	-	W(5.08,2.92,4.76)
	γ	-	W(-0.32,2.75,0.37)	-	W(-0.56,2.90,0.22)
	η	-	W(-4.56,3.43,2.52)	-	W(0.49,2.97,1.392)
胃	β	LN(0.21,1.39)	LN(0.48,1.24)	LN(4.9,1.36)	LN(4.9,1.23)
結腸	β	LN(0.63,1.32)	LN(0.43,1.41)	LN(3.2,1.33)	LN(1.6,1.42)
肝臓	β	LN(0.32,1.42)	LN(0.32,1.80)	LN(2.2,1.57)	LN(1.0,1.60)
肺	β	LN(0.32,1.48)	LN(1.4,1.23)	LN(2.3,1.47)	LN(3.4,1.21)
前立腺	β	LN(0.12,0.29)	-	LN(0.11,0.45)	-
子宮	β	-	N(0.055,0.08)	-	N(1.2,0.71)
卵巣	β	-	LN(0.39,1.96)	-	LN(0.7,1.82)
膀胱	β	LN(0.5,1.69)	LN(1.65,1.57)	LN(1.2,1.76)	LN(0.75,1.56)
その他の固形(残り)	β	LN(0.27,1.36)	LN(0.45,1.30)	LN(6.2,1.28)	LN(4.8,1.23)

⁽¹⁾ 白血病、甲状腺、および乳房以外は β のみ不確かさを考慮する

⁽²⁾ W(a,b,c)はワイブル分布 (a=位置パラメータ, b=形状パラメータ, c=尺度パラメータ)、LN(a,b)は対数正規分布 (a=幾何平均、b=幾何標準偏差)、N(a,b)は正規分布 (a=平均、b=標準偏差)

2.1.5. RadRAT

(1) 背景・目的（開発の主体と時期、コードの公開状況を含む）

1) 開発主体、開発年、参考文献

開発主体：米国国立衛生研究所（National Institutes of Health: NIH）

開発年：2012年（最新更新年：2022年（2023年1月30日時点））

参考文献：(Berrington de Gonzalez et al., 2012)

URL：https://irep.nci.nih.gov/radtrat

2) 背景

RadRATを紹介した論文にはRadRATの開発背景として以下の内容が記述されている。「低線量被ばくによる放射線に起因したがんのリスク推定法が確立されてきている。観察研究によってリスクを直接推定することは、合理的な統計的検出力を得るために実現不可能なほどの大規模な研究と調査期間の追跡調査が必要となる。リスク推定法は、米国におけるCTスキャン、核実験によるフォールアウト、住居内でのラドンなどの様々な被ばくに対して、放射線由来のがんのリスクを評価するために使用されてきている。しかし、複数の臓器への被ばくを考慮する場合には、リスク推定が複雑になる。そこで、我々（著者ら）はユーザーが指定した被ばく履歴に従い、放射線関連がんの生涯リスクとその不確かさ分布を推定するために使用できる対話型オンラインコンピュータープログラムRadRATを開発した」(Berrington de Gonzalez et al., 2012)

3) 目的

オンライン上でユーザーが指定した被ばく歴に従って放射線によるがんの生涯リスクとその不確かさ分布を推定することが目的である。

4) コードの公開状況と入出力

RadRATのソースコードは非公開であるが、Webアプリケーションでありオンライン（https://irep.nci.nih.gov/radtrat）で動作できる。現行のバージョンは4.3（2023年1月30日時点）である。

入力項目を表 2-5に示す。入力には人口統計情報と被ばく情報に分けられており、人口統計は内部で設定された項目から選択するようになっている。

生涯寄与リスクと将来寄与リスクの平均値と90%信頼区間の計算結果が出力されるとともに、ベースラインと全将来リスク（ベースラインと将来寄与リスクの和）が出力される。

表 2-5 RadRATの入力項目

人口統計情報	値
・ 性別	女性 男性
・ 誕生年	整数
・ 人口統計	U.S.2015-2019 U.S.2015-2019 White U.S.2015-2019 Black U.S.2000-2005 U.S.2000-2005 White U.S.2000-2005 Black France 2003-2007 Spain 2003-2007 England 2011-2012 Japan 2010 Korea 2010 Brazil 2001-2005
被ばく情報 (複数被ばくのとき行を追加)	値
・ 被ばくイベント	整数
・ 被ばく年	整数
・ 臓器	Apply dose to all organs Oral Cavity and Pharynx Esophagus Stomach Colon Rectum Gallbladder Pancreas Lung Breast Ovary Uterus Prostate Bladder Kidney Brain/CNS Thyroid Other and ill-defined site Leukemia
・ 被ばく状況	acute chronic
・ 臓器線量の単位	Gy rad(cGy) mGy mrad
・ 臓器線量の確率分布タイプ	Lognormal (median, geometric standard deviation) Normal (mean, standard deviation) Triangular or LogTriangular (minimum, mode, maximum) Uniform or LogUniform (minimum, maximum) Fixed Value (value)
・ 臓器線量の確率分布のパラメータ 1	実数(確率分布タイプにより入力)
・ 臓器線量の確率分布のパラメータ 2	実数(確率分布タイプにより入力)
・ 臓器線量の確率分布のパラメータ 3	実数(確率分布タイプにより入力)
仮定, 設定およびオプション(デフォルトでは非表示)	値
・ サンプル数	整数
・ 乱数の種	整数
・ 現在の年	整数
・ 追加因子の確率分布タイプ	上記の確率分布タイプと同じ選択
・ 追加因子の確率分布のパラメータ 1	実数(確率分布タイプにより入力)
・ 追加因子の確率分布のパラメータ 2	実数(確率分布タイプにより入力)
・ 追加因子の確率分布のパラメータ 3	実数(確率分布タイプにより入力)

(2) 手法 (モデル、パラメータ、ベースラインリスク)

1) 評価の対象としているがん

評価の対象としているがんはBEIR VIIの11個の固形がん (胃、結腸、肝臓、肺、乳、子宮、卵巣、前立腺、膀胱、甲状腺、残り) 及び白血病に加えて、口腔、食道、胆嚢、膵臓、直腸、腎臓、脳/中枢神経系である。加えられたがん部位は、1958~1998年のLSSで症例数が少なくとも100例あり、LSS第13報(Preston et al., 2003)で詳細に評価されているものである。

2) リスク評価モデル

BEIR VIIと等しいERRとEARモデル式を使用して、被ばく時年齢から生涯にわたる生涯寄与リスクと評価時点から生涯にわたる将来寄与リスクを評価する。新たに加えられた部位のリスク評価モデルはBEIR VIIの固形がん (甲状腺がんを乳がん除く) のリスク評価モデルと同じであり、2.2.2(1) 項に記載している (式(2-26)~式(2-29)参照)。フィッティングパラメータを表 2-6に示す。本表の灰色塗り部分は、BEIR VIIでも対象としている評価部位であり、フィッティングパラメータも同じ値が利用されている (ただし乳がんのリスク評価モデルはBEIR VIIと同じであるが、フィッティングパラメータはBEIR VIIと異なっている)。なお、リスク評価モデルは甲状腺のみBEIR VIIと異なっており、下記の式で与えられる。

甲状腺がん

$$\begin{aligned} ERR(D, g, e) &= \beta_g D \exp(\gamma e^*) , \\ EAR(D, g, e) &= 0 , \\ e^* &= \frac{e - 30}{10} , \end{aligned} \tag{2-7}$$

ここで、

<i>ERR or EAR</i>	:	過剰相対リスクまたは過剰絶対リスク
<i>D</i>	:	被ばく線量 (Sv)
<i>g</i>	:	性別 (<i>m</i> : 男性, <i>f</i> : 女性)
<i>e</i>	:	被ばく時年齢 (y)

表 2-6 RadRAT のリスク評価モデルのフィッティングパラメータの値

がん部位	ERR モデル ⁽²⁾				EAR モデル ⁽²⁾			
	β_{males} (95%信頼区間)	β_{females} (95%信頼区間)	γ	η	β_{males} (95%信頼区間)	β_{females} (95%信頼区間)	γ	η
口腔	0.23 (<0, 0.66)	0.53 (0.13, 1.24)	-0.3	-1.4	0.44 (0.08, 1.1)	0.29 (0.06, 0.66)	-0.41	0.5
食道	0.51 (<0, 1.13)	0.82 (<0, 3.1)	-0.3	-1.4	0.88 (0.11, 2.1)	0.14 (<0, 0.63)	-0.41	2.8
胃	0.21 (0.11, 0.4)	0.48 (0.31, 0.73)	-0.3	-1.4	4.9 (2.7, 8.9)	4.9 (3.2, 7.3)	-0.41	2.8
結腸	0.63 (0.37, 1.1)	0.43 (0.19, 0.96)	-0.3	-1.4	3.2 (1.8, 5.6)	1.6 (0.80, 3.2)	-0.41	2.8
直腸	0.12 (<0, 0.38)	0.12 (<0, 0.38)	-0.3	-1.4	0.34 (0.09, 1.1)	0.34 (0.09, 1.1)	-0.41	2.8
胆嚢	-0.018 (<0, 0.29)	-0.018 (<0, 0.29)	-0.3	-1.4	NA	NA	NA	NA
膵臓	0.36 (<0, 0.88)	0.36 (<0, 0.88)	-0.3	-1.4	0.49 (0.09, 1.1)	0.49 (0.09, 1.1)	-0.41	2.8
肝臓	0.32 (0.16, 0.64)	0.32 (0.10, 1.0)	-0.3	-1.4	2.2 (1.9, 5.3)	1.0 (0.40, 2.5)	-0.41	4.1
肺	0.32 (0.15, 0.70)	1.40 (0.94, 2.1)	-0.3	-1.4	2.3 (1.1, 5.0)	3.4 (2.3, 4.9)	-0.41	5.2
乳房	NA	NA	NA	NA	NA	10 (7.0, 14.2)	-0.50	3.5 (a<50) 1.0 (a≥50)
卵巣	NA	0.38 (0.10, 1.4)	-0.3	-1.4	NA	0.70 (0.2, 2.1)	-0.41	2.8
子宮	NA	0.055 (<0, 0.22)	-0.3	-1.4	NA	1.2 (<0, 2.6)	-0.41	2.8
前立腺	0.12 (<0, 0.69)	NA	-0.3	-1.4	0.11 (<0, 1.0)	NA	-0.41	2.8
膀胱	0.50 (0.18, 1.4)	1.65 (0.69, 4.0)	-0.3	-1.4	1.2 (0.4, 3.7)	0.75 (0.3, 1.7)	-0.41	6.0
腎臓	0.34 (<0, 1.0)	0.34 (<0, 1.0)	-0.3	-1.4	0.31 (0.08, 0.68)	0.31 (0.08, 0.68)	-0.41	2.8
脳/中枢神経系	0.71 (0.26, 1.34)	0.24 (0.09, 0.47)	-0.3	-1.4	NA	NA	NA	NA
甲状腺	0.53 (0.14, 2)	1.05 (0.28, 3.9)	-0.83	0	NA	NA	NA	NA
残り	0.87 (0.45, 1.69)	0.80 (0.33, 1.93)	-0.3	-1.4	2.73 (1.55, 4.82)	1.06 (0.49, 2.28)	-0.41	2.8
白血病	β_{males} (95%信頼区間)	β_{females} (95%信頼区間)	γ	δ	ϕ	θ		
ERR モデル	1.1 (0.1, 2.6)	1.2 (0.1, 2.9)	-0.4 (-0.78, 0)	-0.48 (-1.1, 0.2)	0.42 (0, 0.96)	0.87 (0.16, 15)		
EAR モデル	1.62 (0.1, 3.6)	0.93 (0.1, 2.0)	0.29 (0, 0.62)	0.0	0.56 (0.31, 0.85)	0.88 (0.16, 15)		

出所：RadRAT(Berrington de Gonzalez et al., 2012)のTable 1

(1) 灰色塗りの部分はBEIR VIIでも対象としているがん部位である。

(2) 「<0」のとき赤色で示した

3) リスク転換

重み付き算術平均で評価している（すなわちBEIR VIIの重み付き幾何平均よりもリスクは大きい傾向となる）。ただし、白血病はBEIR VIIと同様に加重平均で評価している。ERRとEARの重みは肺がんのみ異なっており、BEIR VIIと同じ値（ERR : EAR = 0.3 : 0.7）が使用されている。

4) 線量・線量率効果係数

BEIR VIIでは、100 mGy未満の低線量を評価対象としていたが、RadRATでは100 mGy以上の被ばくも評価できるようにDDREFにロジスティクス関数および線量限度 D_L が導入されている（図 2-2、評価式はIREP(Kocher et al., 2008)を参照）。

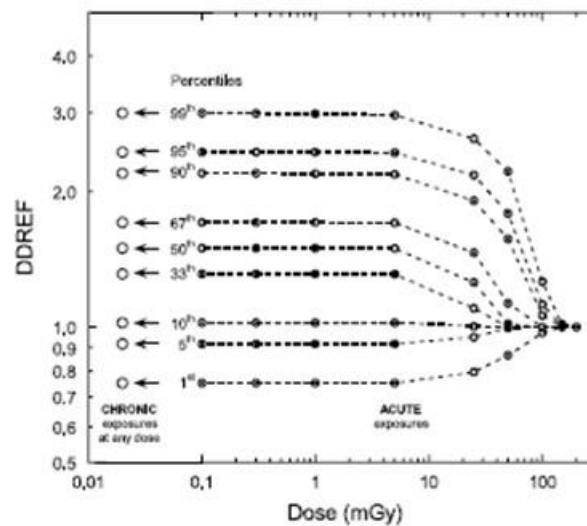


図 2-2 RadRATのDDREFの評価

5) 最小潜伏期間

BEIR VIIでは最小潜伏期間は白血病のとき2年、固形がんのとき5年と固定されていた。すなわち、これら最小潜伏期間を超えるまでリスクは顕在化しないこととなっていた。

一方、RadRATでは急にリスクが現れるのではなく連続的に変化するように、BEIR VIIの固定された最小潜伏期間を連続に調節する乗数 $F_{latency}$ が導入されている。この乗数は、固形がんに関して被ばく後4年から11年、白血病に関して被ばく後0.4年から4.1年、甲状腺がんに関して被ばく後2.5年から7.6年の間、段階的に変化するように式(2-8)で与えられている。

$$F_{latency} = \frac{1}{1 + e^{-\frac{t-\mu}{s}}} \quad (2-8)$$

ここで、

$F_{latency}$:	最小潜伏期間を調整する乗数 (-)
t	:	経過時間 (y)
μ	:	変曲点 ($F_{latency} = 0.5$ となる t) 固形がんのとき $\mu = 7.5$ 甲状腺がんのとき $\mu = 5$ 白血病のとき $\mu = 2.25$
S	:	形状係数 固形がんのとき $t = 4, 11$ で $F_{latency} = 0.01, 0.99$ となるように設定 甲状腺がんのとき $t = 2.5, 7.6$ で $F_{latency} = 0.01, 0.99$ となるように設定 白血病のとき $t = 0.4, 4.1$ で $F_{latency} = 0.01, 0.99$ となるように設定

最小潜伏期間を調整する乗数の不確かさは変曲点 μ の確率分布（三角分布）で与えられる。すなわち、それぞれの三角分布を固形がんではT（5, 7.5, 10）、甲状腺がんではT（3, 5, 7）、白血病ではT（2, 2.25, 2.5）としている。

6) データソース

原爆被爆者の疫学調査：LSS第13報LSSの罹患率データ（調査期間：1958~1998年）
(Preston et al., 2007)

人口分布	:	表 2-5の人口統計参照 ⁷
がん死亡率	:	表 2-5の人口統計参照
がん罹患率	:	表 2-5の人口統計参照
生命表	:	表 2-5の人口統計参照

(3) 予測精度、不確かさの取扱い

1) 予測精度

被ばく時年齢別に、毎年0.1 Gy被ばくする場合の繰り返し被ばく後の全がんリスクの推定値がRadRATとBEIR VIIとで比較された(Berrington de Gonzalez et al. 2012)。全被ばく時年齢において、RadRATの推定生涯リスクはBEIR VIIよりわずかに高く、ほとんどの部位および被ばく時年齢で差が15%未満であった。この差は日米のベースライン率の違いを考慮する場合によって必要となるリスク転換のERRとEARの重みが、BEIR VIIでは対数スケールで行われたのに対し、RadRATでは算術スケールで行われたことが主な原因であると推測された。このことは、全ての部位別がんに対して当てはまり、その差は被ばく時年齢が若い

⁷ 人口統計の詳細なデータは不明である。デフォルトで選択される「US2015-2019」は、2015年から2019年の Surveillance Epidemiology and End Results (SEER) の米国人口がん罹患率を使用していることを確認。

ほど大きく、また女性よりも男性の方が大きかった。

2) 不確かさの取り扱い

生涯寄与リスクの不確かさの評価に関して、不確かさの発生源として、①EARとERRのフィッティングパラメータ、②DDREF、③最小潜伏期間の評価式のパラメータ μ 、④リスク転換のERRとEARの重み、⑤被ばく線量が挙げられている(Berrington de Gonzalez et al., 2012)。

各パラメータに確率分布を設定して、ラテンハイパーキューブサンプリングを行い、モンテカルロ法によって、不確かさの評価が行われる。

(4) コード活用の具体例

RadRATは、計画被ばく状況での職業被ばく、公衆被ばく及び医療被ばくにおいて活用されている。例えば、職業被ばくでは医療従事者の甲状腺がん生涯寄与リスクの推定(Adliene et al., 2020)、医療従事者のがん生涯寄与リスクの推定(Lee et al., 2018)、公衆被ばくではカナダのダーリントン原子力発電所で発生する仮想的な過酷事故による住民の甲状腺がんリスクの推定(Burt et al., 2020)、医療被ばくではマルファン症候群の患者に対してCT撮影血管造影モニタリングによる放射線がんリスクの推定(Chaosuwannakit et al., 2022)、20歳未満の小児患者のCT検査によるがんリスクの予測(Journy et al., 2017)に活用されている。

2.1.6. X-ray RISK

(1) 背景・目的（開発の主体と時期、コードの公開状況を含む）

1) 開発主体、開発年、参考文献

開発主体：米国放射線技師学会（American Society of Radiologic Technologists: ASRT）

開発年：2018年

参考文献：記載文献無し

URL：<https://www.xrayrisk.com/>

2) 背景

米国では毎年6200万回のCTスキャンが行われていると推定されている。最近の研究では、世界中のがんの1～3%に関して医療画像撮影からの放射線被ばくが原因と示唆されており、医療画像撮影の使用増加に伴い、患者の医療被ばくが増加していることに懸念が高まっている。

3) 目的

医療画像撮影によるがんリスクの増加について患者と医療提供者の両方に情報を提供できるリソースがこれまでなかったため、Webサイト内でリスクを評価可能なX-Ray Riskが開発された。

4) コードの公開状況と入出力

X-ray RISKのソースコードは非公開であるが、Webアプリケーションでありオンライン(<https://www.xrayrisk.com/>)で動作できる。

入力項目を表 2-7に示す。入力は、はじめに診断部分を選択し、Standard ExamとRecurring Examのどちらかを選択する。Standard ExamまたはRecurring Examで被ばく条件の入力項目が異なる。

合計実効線量、生涯寄与リスク、ベースラインがんリスク、及びベースラインがんリスク＋生涯寄与リスクが出力される。

表 2-7 X-ray RISKの入力項目 (1/2)

診断部分	値
<ul style="list-style-type: none"> • Plain Films (x-rays) 	Chest x-ray (2 views) Abdomen x-rays Pelvis x-rays Hip x-rays (unilateral) Neck x-rays Upper Back x-rays Lower Back x-rays Extremity x-rays (Hands, Feet, etc) Mammogram (unilateral) Dental x-ray (panoramic) Dental x-ray (4 intraoral bitewings) Skull x-rays DEXA Scan (Bone Density)
<ul style="list-style-type: none"> • CT Scans 	Brain CT (Standard) Brain and Neck CTA/CTP Neck CT Thoracic Spine CT Lumbar Spine CT Chest CT (Low Dose Screening) Chest CT (PE Study) Chest CT (Standard) Cardiac CT (Coronary CTA) Cardiac CT (Calcium Scoring) Abdomen CT Abdomen CT (Dedicated Liver) Abdomen and Plevis CT Chest, Abdomen and Pelvis CT Plevis CT Sinus CT Virtual Colonoscopy CT Dental CT
<ul style="list-style-type: none"> • Fluoroscopy 	Upper GI (Barium Swallow) Small Bowel Follow-through Barium Enema IV Pyelogram Hysterosalpingogram
<ul style="list-style-type: none"> • Nuclear Medicine 	Lung Scan (Ventilation Perfusion - VQ) Cardiac Stress Test (Technetium) Cardiac Stress Test (Thallium) Liver Scan (HIDA) Renal Scan Whole Body PET/CT Bone Scan Tagged WBC Study Gastric Emptying Study GI Bleeding Study Thyroid Scan Parathyroid Scan Brain Scan Radionucilde Ventriculogram (RVG) Urea Breath Test Gallium Scan
<ul style="list-style-type: none"> • Interventional Procedures 	Coronary Angiogram (diagnostic) Coronary Angiogram (stent, ablation) Pulmonary Angiogram Abdominal Angiogram Head and Neck Angiogram TIPS Pelvic Vein Embolization ERCP Endomyocardial Biopsy

表 2-7 X-ray RISKの入力項目 (2/2)

被ばく条件 (Standard Exam の場合)	値
・ 性別	男性 女性
・ 研究時の年齢 (被ばく時年齢) [years]	実数
・ 検査回数	整数
・ 実効線量[mSv]	実数
・ DLP (Dose Length Product) [mGy cm]	実数 (任意)
被ばく条件 (Recurring Exam の場合)	値
・ 性別	男性 女性
・ 検査の間隔	1年に2回 1年に1回 2年に1回 5年に1回
・ 開始年齢[years]	実数
・ 終了年齢[years]	実数
・ 平均線量[mSv]	実数
・ DLP (Dose Length Product) [mGy cm]	実数 (任意)

(2) 手法 (モデル、パラメータ、ベースラインリスク)

1) 評価の対象としているがん

X-ray RISKでは、BEIR VIIのように部位別のがんのリスク評価ではなく、すべてのがんで代表し、すべてのがんの生涯寄与リスクを用いて医療画像撮影の診断部分ごとに患者のがんリスクを評価している。

2) リスク評価モデル

X-ray RISKはBEIR VIIのすべてのがんに対する0.1 Gyの被ばくによる男女の各被ばく時年齢の生涯寄与リスクを用いてリスク評価を行っている。BEIR VIIの生涯寄与リスクの結果を使用しているため、評価方法はBEIR VII (2.2.2(1)項に記載している式(2-26)~式(2-29)参照)と同じである。

3) リスク転換

BEIR VIIの生涯寄与リスクの結果を使用しているため、評価方法はBEIR VIIと同じである。

4) 線量・線量率効果係数

DDREFはBEIR VIIと同様に1.5を適用している。

5) 最小潜伏期間

BEIR VIIと同様に白血病で2年、固形がんで5年と固定している。

6) データソース

原爆被爆者の疫学調査 : LSS第13報 (LSS死亡率データ (調査期間 : 1950~1997年))

(Preston et al., 2003)

- 人口分布 : 報告書等に情報無し⁸
- がん死亡率 : 報告書等に情報無し
- がん罹患率 : 報告書等に情報無し
- 生命表 : 報告書等に情報無し
- その他 : 医療診断の種類 (表 2-7参照)

(3) 予測精度、不確かさの取扱い

1) 予測精度

0.1 Gyの被ばくによる男女の各被ばく時年齢の生涯寄与リスクは、BEIR VIIの全てのがんに対する0.1 Gyの被ばくによる男女の各被ばく時年齢の生涯寄与リスクと同じ値となった。

2) 不確かさの取扱い

点推定値であるため、不確かさの評価は行っていない。

(4) コード活用の具体例

X-ray RISKを用いて計算した医療画像撮影による発がんリスクの情報を患者と医療従事者に提供し、十分な情報を得たうえで診断の可否について議論を行うために使用されている(Loughenbury et al., 2021)。

また、診断方法の最適化 (被ばく線量、診断効率等) に関する検討のために使用されている(Keller et al., 2021)。

⁸ 計算した線量との比較のために、アメリカ人の平均的な被ばく線量を記載しているため、アメリカの人口統計データを利用していると推測される。

JAXAのコード

(5) 背景・目的（開発の主体と時期、コードの公開状況を含む）

1) 開発主体、開発年、参考文献

開発主体：宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA）

開発年：2013年

参考文献：(JAXA, 2013)

2) 背景

宇宙飛行士の国際宇宙ステーション（International Space Station: ISS）での長期滞在では、宇宙放射線による被ばくが大きな問題となる。ICRP Pub.103（2007年勧告）に基づき、JAXAにおける宇宙飛行士の放射線被ばく管理規定の改正を行った。

3) 目的

ISSに滞在する宇宙飛行士の宇宙放射線被ばくによる放射線障害の発生を防止することが目的である。

4) コードの公開状況と入出力

コードとしては公開されていない。

(6) 手法（モデル、パラメータ、ベースラインリスク）

1) 評価の対象としているがん

評価の対象としているがんはICRP Pub.103で考慮されている固形がん（食道、胃、結腸、肝臓、肺、皮膚、乳房、子宮、卵巣、膀胱、甲状腺、口腔・咽頭、直腸、胆嚢・胆管、膵臓、喉頭、前立腺、腎など、脳・中枢神経系）および白血病である。

2) リスク評価モデル

JAXAのコードでは、固形がんと白血病のERRとEARにICRP Pub.103(ICRP, 2007)のモデルを用いて、被ばく時年齢から生涯にわたる生涯寄与リスクを推定する。リスク評価モデルは2.2.2(2)項に記載している（式(2-30)と式(2-31)参照）。

3) リスク転換

ICRP Pub.103と同様に、重み付け算術平均で評価している。

4) 線量・線量率効果係数

ICRP Pub.103と同様に、DDREFは2と固定している。

5) 最小潜伏期間

ICRP Pub.103と同様に、固形がん5年、白血病2年と固定している。

6) データソース

原爆被爆者の疫学調査：(Preston et al., 2007, ICRP, 2007)原爆被爆者の疫学調査：LSS罹患率データ（調査期間：1958~1998年）(Preston et al., 2007, ICRP, 2007)

(7) 予測精度、不確かさの取扱い

1) 予測精度

JAXAのコードを他のモデルと比較した例はなく、予測精度に関する記載はない。

2) 不確かさの取扱い

点推定値であるため、不確かさの評価は行っていない。

(8) モデル活用の具体例

放射線被ばく管理規定（国際宇宙ステーション搭乗宇宙飛行士放射線被ばく管理規定（第19条より））に対応するため、ISS搭乗宇宙飛行士に対して利用されている。(JAXA, 2013)

放射線被ばく管理規定では以下のように定められている。

被ばく管理者はISS搭乗宇宙飛行士に対し、飛行前に、飛行中の放射線被ばくに係る次のリスクについて説明し、その内容を理解していること及び当該飛行業務を遂行する意思を有していることを書面により確認しなければならない。

1. 発がん（がん死亡）に係るリスク
2. 遺伝的影響に係るリスク
3. 男性の一時的及び永久不妊に係るリスク
4. 骨髄、水晶体、皮膚等の組織または臓器の確定的影響（組織反応）に係るリスク
5. 胎児への影響に係るリスク

2.1.7. IREP

IREPにはNIH-IREPとNIOSH-IREPの2種類が存在し、NIH-IREPはアクセス可能である（URL：<https://radiationcalculators.cancer.gov/irep/>）が、NIOSH-IREPはWebページが存在するがコードへのアクセスができない（URL：<https://www.cdc.gov/niosh/ocas/nioshirep.html>）。ここではNIH-IREPを取り上げ、IREPの文献について調査した。

(1) 背景・目的（開発の主体と時期、コードの公開状況を含む）

1) 開発主体、開発年、参考文献

開発主体：米国国立衛生研究所（National Institutes of Health：NIH）

開発年：2003年（更新年：2021年）（2023年1月30日時点）

参考文献：(Kocher et al., 2008)

URL：<https://radiationcalculators.cancer.gov/irep/>

2) 背景

2000年のEnergy Employees Occupational Illness Compensation Program Act（EEOICPA）は、1985年のNIH Tablesががんの補償請求の裁定の根拠を提供するものであると規定した。そこで国立労働安全衛生研究所（NIOSH）は、米国労働省（DOL）がEEOICPAに基づく請求の裁定に使用するためにIREPを採用し、エネルギー労働者の補償プログラムのニーズに対応するためにIREPを修正してきた。

3) 目的

国立がん研究所（National Cancer Institute, NCI）と疾病予防管理センター（Centers for Disease Control and Prevention, CDC）のワーキンググループによって、1985年のNIH Tablesを更新することが目的である（本テーブルは放射線被ばくによって引き起こされた可能性のあるがんに対する補償請求の裁定に活用された）。

4) コードの公開状況と入出力

NIH-IREPのソースコードは非公開であるが、WEBアプリケーションでありオンライン（<https://radiationcalculators.cancer.gov/irep/>）で動作できる。現行のバージョンは5.7.1（2023年1月30日時点）である。

IREPは、放射線に被ばくしたことによるがん発症の原因確率または割当成分を評価するWebベースの対話型コードである。IREPで計算された原因確率（Probability of Causation, PC）または割当成分（Assigned Share, AS）を”PCあるいはAS”と呼び、次式で定義する。

$$PC\text{あるいは}AS = \frac{R}{R + B}, \quad (2-9)$$

ここで、

- PC あるいは AS : 原因確率 (割当成分)
 R : 関心のある線源からの放射線被ばくによるがんの過剰リスク (過剰絶対リスクとも呼ばれる)
 B : がんのベースラインリスク

一方、 ERR は $ERR = RR - 1$ (RR : 相対リスク = $(R + B)/B$) で定義されることより $R = ERR \times B$ であるから PC あるいは AS は過剰相対リスクを用いて次式で表すことができる。

$$PC\text{あるいは}AS = \frac{ERR}{ERR + 1}. \quad (2-10)$$

$IREP$ は、 PC あるいは AS を評価する際に、 ERR を用いて式(2-10)で評価している。

入力項目を表 2-8に示す。入力は個人情報と被ばく情報に分類し、値の入力または項目の選択するようになっている。

原因確率の1、2.5、5、10、25、50、75、90、95、97.5、99%タイル値の計算結果が出力される。

表 2-8 $IREP$ の入力項目 (1/2)

個人情報	値
・ 性別	女性 男性
・ 誕生年	整数
・ 診断年	整数
・ がんモデル(臓器)	Oral Cavity and Pharynx (140-149) Esophagus (150) Stomach (151) Colon (153) Rectum (154) All digestive (150-159) Liver (155) Gallbladder (156) Pancreas (157) Lung (162) Other respiratory (160,161,163-165) Bone (170) Non-melanoma skin-Basal Cell (173) Non-melanoma skin-Squamous Cell (173) Female breast (174) Ovary (183) Female Genitalia, excluding ovary (179-182,184) All Male Genitalia (185-187) Bladder (188) Urinary organs, excluding bladder (189) Nervous system (191-192) Thyroid (193) Ill-defined sites (170-172;174 (male);175;190;194-199) Lymphoma & multiple myeloma (200-203) Leukemia, excluding CLL (204-208, excluding 204.1) Acute Lymphocytic Leukemia (204.0) Acute Myeloid Leukemia (205.0) Chronic Myeloid Leukemia (205.1)

表 2-8 IREPの入力項目 (2/2)

被ばく情報	値
・被ばく年	整数
・被ばく率	acute chronic
・放射線の種類	electrons E<15keV electrons E>15keV photons E<30keV photons E=30-250keV photons E>250keV neutrons E<10keV neutrons E=10-100keV neutrons E2-20MeV neutrons E>20MeV alpha
・臓器線量(cSv)	Lognormal (median, gsdev) Normal (mean, sd) Triangular (min, mode, max) LogTriangular (min, mode, max) Uniform (min, max) LogUniform (min, max) Constant (value)
・臓器線量の確率分布のパラメータ 1	実数(確率分布タイプにより入力)
・臓器線量の確率分布のパラメータ 2	実数(確率分布タイプにより入力)
・臓器線量の確率分布のパラメータ 3	実数(確率分布タイプにより入力)
皮膚がんの入力(皮膚がんのとき表示)	値
・人種/民族	All races/Race not specified American Indian or Alaska Native Asian or Native Hawaiian or Other Pacific Islander Black White-Hispanic White-Non-Hispanic
肺がんの入力(肺がんのとき表示)	値
・被ばく源	Radon Other Sources Radon+Other Sources
・喫煙履歴	Never smoked Former smoker Current smoker (? cig/day) <10 cig/day (currently) <10-19 cig/day (currently) <20-39 cig/day (currently) <40+ cig/day (currently)
仮定、設定およびオプション(デフォルトでは非表示)	値
・サンプリング数	整数
・乱数の種	整数
・追加因子の確率分布タイプ	上記の確率分布タイプと同じ選択
・追加因子の確率分布のパラメータ 1	実数(確率分布タイプにより入力)
・追加因子の確率分布のパラメータ 2	実数(確率分布タイプにより入力)
・追加因子の確率分布のパラメータ 3	実数(確率分布タイプにより入力)

(2) 手法（モデル、パラメータ、ベースラインリスク）

1) 評価の対象としているがん

NIH-IREPで評価の対象とされているがん部位を表 2-9に示す。

表 2-9 NIH-IREPで評価の対象としているがん部位

がん部位	ICD-9*
口腔と咽頭	140-149
食道	150
胃	151
結腸	153
直腸	154
すべての消化器	150-159
肝臓	155
胆嚢	156
膵臓	157
肺	162
その他呼吸器	160,161,163-165
骨	170
非メラノーマ皮膚-基底細胞	173
非メラノーマ皮膚-扁平上皮細胞	173
女性乳房	174
卵巣	183
卵巣を除く女性器	179-182,184
すべての男性器	185-187
膀胱	188
膀胱を除く泌尿器	189
神経系	191-192
甲状腺	193
不明確な部位	170-172;174(male);175;190;194-199
リンパ腫と多発性骨髄腫	200-203
慢性リンパ性白血病を除く白血病	204-208, excluding 204.1
急性リンパ性白血病	204.0
急性骨髄性白血病	205.0
慢性骨髄性白血病	205.1

*世界保健機関（WHO）が分類した国際疾病分類第9回改訂版（ICD-9）。番号によって、疾病が振り分けられている。

2) リスク評価モデル

IREPにおいてリスク評価モデルを構築するのに使った日本の原爆被爆者のデータは、1987年までの原爆被爆者のがん罹患データ(Thompson et al., 1994, Preston et al., 1994)である。原因確率で使用するERRの評価式は、次のようになっている（なお評価式中の統計解析から評価するパラメータ値は文献中では与えられておらず(NIH, 2003)が参照されている）。

固形がん

甲状腺、皮膚および肺がんを除く固形がんとリンパ腫および多発性骨髄腫に対するERRは、次式で与えられている。

$$\begin{aligned} \text{ERR/Sv} &= \alpha \times h(e, a; \gamma, \delta) , \\ h(e, a; \gamma, \delta) &= \exp[\gamma f(e) + \delta g(a)] , \end{aligned} \quad (2-11)$$

$$\begin{aligned} f(e) &= \begin{cases} -15 & \text{if } e \leq 15 \\ e - 30 & \text{if } 15 < e \leq 30 , \\ 0 & \text{if } e > 30 \end{cases} , \\ g(a) &= \begin{cases} \ln(a/50) & \text{if } 0 < a < 50 \\ 0 & \text{if } a \geq 50 \end{cases} , \end{aligned} \quad (2-12)$$

ここで、

ERR/Sv	:	単位線量当たりの過剰相対リスク (Sv ⁻¹)
<i>e</i>	:	被ばく時年齢 (y)
<i>a</i>	:	到達年齢 (y)
α, γ, δ	:	統計解析から評価するパラメータ

甲状腺がん

甲状腺がんでは、原爆被爆者と小児期に治療によるX線被ばくをした集団が含まれるデータ(Ron, 1995)を用いて統計解析を行っている。このときのERRは次式で与えられている。

$$\text{ERR}(D, e) = \text{Dexp}(\theta_1 I_1 + \dots + \theta_n I_n + \gamma e) , \quad (2-13)$$

ここで、

$\text{ERR}(D, e)$:	過剰相対リスク
<i>D</i>	:	被ばく線量 (Sv)
<i>e</i>	:	被ばく時年齢 (y)
I_1, \dots, I_n	:	インジケータ関数
$\theta_1, \dots, \theta_n, \gamma$:	統計解析から評価するパラメータ

皮膚がん

皮膚がんでは、原爆被爆者のデータ (Ron et al., 1998) を用いて統計解析を行っている。このときのERRは次式で与えられている。

$$\begin{aligned} \text{ERR/Sv} &= \alpha \times h(e; \gamma) , \\ h(e, a; \gamma, \delta) &= \exp[\gamma f(e)] , \end{aligned} \quad (2-14)$$

$$f(e) = \begin{cases} -30 & \text{if } e \leq 10 \\ e - 40 & \text{if } 10 < e \leq 40 , \\ 0 & \text{if } e > 40 \end{cases} \quad (2-15)$$

ここで、

ERR/Sv	:	単位線量当たりの過剰相対リスク (Sv ⁻¹)
<i>e</i>	:	被ばく時年齢 (y)
α, γ	:	統計解析から評価するパラメータ

なおNIH-IREPでは、皮膚がんは2種類の非メラノーマ皮膚がん（基底細胞がん、basal cell carcinomaおよび扁平上皮がん、squamous cell carcinoma）を評価し、基底細胞がんは式

(2-14)と(2-15)を用い、一方、扁平上皮がんは $ERR/Sv = \alpha$ ($\gamma = 0$) として評価している。

肺がん

肺がんはラドン被ばく以外とラドン被ばくの2種類のリスク評価モデルが与えられている。

ラドン被ばく以外るとき

$$\begin{aligned} ERR/Sv &= \alpha \times h^*(s, e, a; \beta, \gamma, \delta) , \\ h^*(s, e, a; \beta, \gamma, \delta) &= \exp[\beta s + \gamma f(e) + \delta g(a)] , \end{aligned} \quad (2-16)$$

ここで、

ERR/Sv	:	単位線量当たりの過剰相対リスク (Sv^{-1})
e	:	被ばく時年齢 (y)
a	:	到達年齢 (y)
s	:	$s = \begin{cases} -0.5 & \text{for males} \\ +0.5 & \text{for females} \end{cases}$
$f(e), g(a)$:	式(2-12)
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$:	統計解析から評価するパラメータ

ラドン被ばくするとき

$$ERR(WLM, a, t) = \alpha \times WLM^\beta \times \exp[\gamma f(a) + \delta g(t)] , \quad (2-17)$$

$$\begin{aligned} f(a) &= \begin{cases} 0 & \text{if } a \leq 45 \\ a - 45 & \text{if } 45 < a \leq 75 \\ 30 & \text{if } a > 75 \end{cases} , \\ g(t) &= \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq 5 \\ t - 5 & \text{if } 5 < t < 25 \\ 20 & \text{if } t \geq 25 \end{cases} , \end{aligned} \quad (2-18)$$

ここで、

$ERR(WLM, a, t)$:	過剰相対リスク
WLM	:	Working Level Month (ラドンによる累積被ばく量を表す単位、SI単位系では ($J h m^{-3}$))
a	:	到達年齢 (y)
t	:	被ばく後の経過時間 (y)
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$:	統計解析から評価するパラメータ

白血病

慢性リンパ性白血病（CLL）を除く白血病のERRは、次式で与えられている。

$$ERR(D_\gamma, D_n, e, a) = \alpha(D_\gamma + 10D_n + D_\gamma^2) \exp(\beta e + \gamma t + \delta e t), \quad (2-19)$$

ここで、

$ERR(D_\gamma, D_n, e, a)$:	過剰相対リスク
D_γ	:	γ 線の被ばく線量 (Sv)
D_n	:	中性子線の被ばく線量 (Sv)
e	:	被ばく時年齢 (y)
a	:	到達年齢 (y)
t	:	被ばく後の経過時間 ($t = a - e$) (y)
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$:	統計解析から評価するパラメータ

3) リスク転換

原因確率（PCあるいはAS）はERRから算出できる。このERRは、日本の原爆被爆者のデータから評価しているため、ベースラインリスクが異なる米国人に適用するにはリスク転換を行う必要がある。IREPにおけるリスク転換は次式に示す重み付き算術平均によって評価している。

$$(ERR/Sv)_{US} = y \times \left(\frac{ERR}{Sv} \right) + (1 - y) \times \left[\left(\frac{ERR}{Sv} \right) \frac{B_{Japan}}{B_{US}} \right], \quad (2-20)$$

ここで、

$(ERR/Sv)_{US}$:	米国人に対する単位線量当たりの過剰相対リスク
B_{Japan}	:	日本人のベースラインリスク
B_{US}	:	米国人のベースラインリスク
y	:	重み

なお、重み y の確率分布として次の台形確率分布を仮定している。

$$f(y) = 0.9091 \times \begin{cases} (10 \times y) + 1 & \text{if } -0.1 < y < 0 \\ 1 & \text{if } 0 \leq y \leq 1.0 \\ 11 - (10 \times y) & \text{if } 1.0 < y < 1.1 \end{cases}, \quad (2-21)$$

4) 線量・線量率効果係数

IREPでは、急性被ばくと慢性被ばくで適用するDDREFを分けている。慢性被ばくにおいて、二つの確率分布が設定されている。一つは固形がん（乳がんと甲状腺がん除く）に対してであり、もう一つは乳がんと甲状腺がんに対してである（図 2-3）。DDREFの平均値は固形がん（乳がんと甲状腺がん除く）に対しては1.8であり、乳がんと甲状腺がんに対しては1.6である。急性被ばくのDDREFは、慢性被ばくのDDREFを用いて、次式のように線量によって連続的に変化するようにしている。

$$DDREF_{acute} = \begin{cases} \frac{1}{1 - \left\{ \frac{1 - \frac{1}{DDREF_{chronic}}}{1 + e^{\frac{(D-D_L)}{S}}} \right\}} & \text{if } D < D_L \\ 1 & \text{if } D \geq D_L \end{cases}, \quad (2-22)$$

ここで、

- $DDREF_{acute}$: 急性被ばくの線量・線量率効果係数
- $DDREF_{chronic}$: 慢性被ばくの線量・線量率効果係数
- D_L : 参照線量 (Sv)
- D_I : 変曲点 ($D_I = 0.5 \times D_L$) (Sv)
- S : 形状係数 ($S = D_I / \ln(500)$) (Sv)

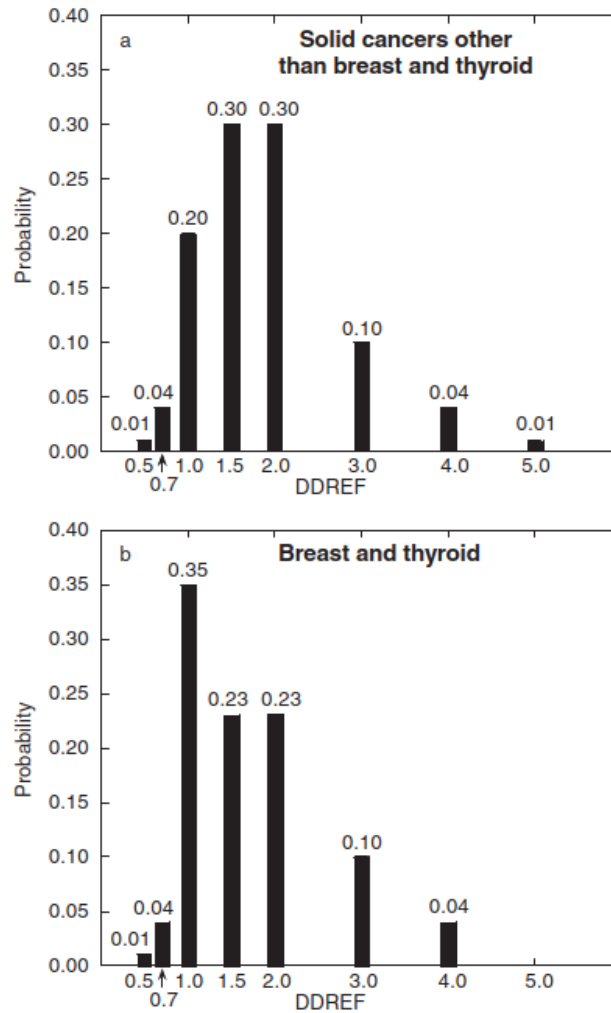


図 2-3 IREPのDDREFの確率分布 (慢性被ばく時)

出所 : IREP(Kocher et al., 2008)のFig. 5

5) 最小潜伏期間

被ばくからがん発症の最小潜伏期間は、被ばくからの経過時間に関して0から1まで連続的に変化する関数とし、ERRに乗算する補正係数として用いる。その評価式は次式である。

$$F_{latency}(t) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{(t-\mu)}{S}}} \quad (2-23)$$

ここで、

$F_{latency}$:	最小潜伏期間を考慮したERRの補正係数
t	:	被ばくからの経過時間 (y)
μ, S	:	変曲点、形状係数
		甲状腺と骨がんを除く固形がん (リンパ腫と多発性骨髄腫を含む)
		$\mu = 7.5 \text{ y}$
		S は $F_{latency} = 0.01 (t = 4 \text{ y}), 0.99 (t = 11 \text{ y})$ となるように設定
		甲状腺と骨がん
		$\mu = 5 \text{ y}$
		S は $F_{latency} = 0.01 (t = 2.5 \text{ y}), 0.99 (t = 7.6 \text{ y})$ となるように設定
		白血病
		$\mu = 2.25 \text{ y}$
		S は $F_{latency} = 0.01 (t = 0.4 \text{ y}), 0.99 (t = 4.1 \text{ y})$ となるように設定

6) データソース

原爆被爆者の疫学調査 : LSS罹患率データ (白血病、リンパ腫、多発性骨髄腫 ; 調査期間 : 1950~1987年) (Preston et al., 1994)、 LSS罹患率データ (固形がん ; 調査期間 : 1958~1987年) (Thompson et al., 1994)

人口分布	: 原因確率はERRのみで計算可能なため必要なし
がん死亡率	: 原因確率はERRのみで計算可能なため必要なし
がん罹患率	: 原因確率はERRのみで計算可能なため必要なし
生命表	: 原因確率はERRのみで計算可能なため必要なし

(3) 予測精度、不確かさの取扱い

1) 予測精度

IREPの報告書では他のコードと比較した例はなく、予測精度に関する記載はない。

2) 不確かさの取り扱い

原因確率の不確かさの評価に関して、発生源として、①ERRのフィッティングパラメータ、②被ばく線量、③最小潜伏期間の評価式のパラメータ μ 、④リスク転換のERRとEARの重み、⑤DDREFの評価式のパラメータ D_L が挙げられている(Kocher et al., 2008)。

各パラメータに確率分布を設定して、ラテンハイパーキューブサンプリングを行い、モンテカルロ法によって、不確かさの評価が行われる。

(4) コード活用の具体例

がんに対する補償請求の裁定に活用されていた1985年のNIH Tablesの更新版 (NIH, 2003) を作成する際に、IREPが活用された。

2.1.8. ProZES

(1) 背景・目的（開発の主体と時期、コードの公開状況を含む）

1) 開発主体、開発年、参考文献

開発主体：ドイツ連邦放射線防護庁（Bundesamt für Strahlenschutz: BfS）

開発年：2013年（更新年：2022年（2023年1月30日時点））

参考文献：(Jacob et al., 2017, Ulanowski et al., 2020)

URL：https://www.bfs.de/EN/topics/ion/service/prozes/prozes_node.html

（このURLからProZESをダウンロード可能）

2) 背景

ドイツでは、電離放射線による職業被ばく後のがんに対する補償の対象かどうかの司法判断において、がんの発生確率に占める放射線の原因確率の推定値に基づいて行われるため、これを推定する方法が必要である。

3) 目的

労働者災害補償委員会の専門家に対して、電離放射線による職業被ばく後のがんに対する補償請求に関する判断を科学的にサポートすることが目的である。

4) コードの公開状況と入出力

ProZESはWindows上で実行可能なデスクトップアプリケーションで.NET Framework⁹を必要とする（インストール時に必要な.NET Frameworkがチェックされる）。ProZESの現在のバージョンは3.0である。（2023年1月30日時点）。なお、ソースコードは公開されていない。

ProZESは、被ばく時年齢から到達年齢までのがん罹患の原因確率（割当成分）を評価する。慢性被ばくの評価では、複数回の急性被ばくで評価する。なお肺がんに関しては、喫煙による影響、坑道採掘と室内のラドン吸入によるリスクを評価できる。

入力項目を表 2-10に示す。入力は個人条件と被ばく条件に分けられており、肺がんを選択したときにだけ喫煙の条件が入力可能となる。被ばく条件は複数考慮でき、ラドン吸入を評価する場合には、坑道採掘ラドン吸入と室内ラドン吸入を選択できる。

出力はテキスト（中央値、信頼区間など）表示またはグラフ（累積確率）表示である。

⁹.NET Framework は、Windows でアプリケーションをビルドして実行するためのソフトウェア開発フレームワークである。

表 2-10 ProZESの入力項目

個人条件	値
・性別	男性 女性
・誕生年	1940～2022
・診断年	1995～2022
・診断	Stomach cancer ICD10:C16 Colon cancer ICD10:C18 Cancer of lung, bronchi and trachea ICD10:C33,34 Female breast cancer ICD10:C50 Thyroid cancer ICD10:C73 Cancer of other digestive organ ICD10:C00-15,17,19-26,48 Cancer of urinary organs ICD10:C64-C68 Cervical cancer ICD10:C53 Cancer of uterus, ovary and other female genital organs ICD10:C51,52,54-58 Cancer of male genital organs ICD10:C60,61,63 Cancer of brain, central nervous system and eye ICD10:C69,70-72 Non-melanoma skin cancer ICD10:C44 Solid cancers of remaining organs ICD10:C30-32,37-41,43,45-47,49,62,74-76,80 Acute lymphoblastic leukaemia(ALL) and other ICD10:C91.0,91.3,91.9 Chronic lymphoblastic leukaemia(CLL) and lymphomas ICD10:C81-86,88,91.1,91.4 Acute myeloid leukaemia(AML) and other ICD10:C92.0,92.2-92.5,93-96 Chronic myeloid leukaemia(CML) ICD10:C92.1 Multiple myeloma ICD10:C90
・喫煙 (肺がんのみ)	あり ✓詳細あり → 一日当たりのたばこの本数、喫煙開始年齢と終了年齢 ✓詳細なし なし 不明
被ばく条件 (複数を考慮可)	値
通常	
・被ばく年	整数
・等価線量[mSv]	実数
・低線量率	チェックのとき期間[h]を入力
・不確かさ分布	チェックのとき分布 (一様、三角、正規、対数正規) とパラメータを入力
坑道採掘ラドン	
・被ばく年	整数
・被ばく[WLM]	実数
・不確かさ分布	チェックのとき分布 (一様、三角、正規、対数正規) とパラメータを入力
室内ラドン	
・ラドン濃度[Bq/m3]	実数
・期間[h]	実数
・活動	軽い活動、激しい活動
・不確かさ分布	チェックのとき分布 (一様、三角、正規、対数正規) とパラメータを入力
追加パラメータ	
・サンプル数	1000～100000
・原因確率の詳細分布	チェックのとき原因確率の詳細な分布を出力

(2) 手法（モデル、パラメータ、ベースラインリスク）

1) 評価の対象としているがん

ProZESで評価するがん部位を表 2-11に示す。本表の左側に示した各グループ（STOMACHやGNF1など）に関してリスクを評価している。これら評価の対象としているがんはBEIR VIIに比べて細分化されており、特に血液がんについてはBEIR VIIでは1分類であったが、ProZESでは4分類となっている。

2) リスク評価モデル

ERRとEARともに、BEIR VIIのように部位ごとに1つのモデル式を適用するのではなく、独自の複数のモデル式を適用している。さらにベースラインがんのモデル式も独自のものを適用し、LSSデータへのフィッティングを行っている（これらのモデル式などはProZESのSupplementに示されている）。

ERRとEARのそれぞれの複数のモデル式からそれぞれ1つのERRとEARを評価するには、マルチモデル推論（Multi-Model Inference : MMI）を適用している。MMIは、モデル式のLSSデータへのフィッティングのときに評価される赤池情報量基準¹⁰から次式の重みを算出し、重み付き平均によって評価している。

$$w_i = \frac{e^{-\frac{1}{2}\Delta AIC_i}}{\sum_{i=1}^M e^{-\frac{1}{2}\Delta AIC_i}}, \quad (2-24)$$

ここで、

- w_i : モデル*i*の重み
- M : 考慮するモデル数
- ΔAIC_i : モデル*i*の赤池情報量基準と候補モデルの中の最小赤池情報量基準との差

¹⁰ 統計モデルの良さを評価するための指標である。ある測定データを統計的に説明するモデルを作成する場合、パラメータの数や次数を増やすほど、その測定データとの適合度を高められる。しかし、ノイズなどの変動にも合わせるため、同種の他のデータに適用できなくなる可能性がある。赤池情報量基準（AIC）はこの問題の解決のための一つの使用であり、次式が最小となるモデルを選択すれば、良いモデルが選択できる。AIC = -2lnL+2k。Lは最大尤度、kは自由パラメータの数。

表 2-11 ProZESで評価するがん部位

Model name	がん部位	ICD-10*
Solid cancers		
STOMACH	胃	C16
COLON	結腸	C18
LUNG	肺と気管	C33,C34
BREAST	女性乳房	C50
THYROID	甲状腺	C73
DIG	口腔	C00-C14
	食道	C15
	小腸	C17
	直腸	C19-C21
	肝臓	C22
	胆嚢	C23,C24
	膵臓	C25
	その他の消化器	C26,C48
URI	腎臓	C64
	腎盂と尿管	C65,C66
	膀胱	C67
	その他の泌尿器	C68
GNF1	子宮頸	C53
GNF2	子宮体	C54
	不特定な子宮がん	C55
	卵巣	C56
	その他の女性生殖器	C51,C52,C57,C58
GNM	前立腺	C61
	その他の男性生殖器	C60,C63
BCNS	眼	C69
	脳と中枢神経系	C70-C72
SKIN	皮膚(非黒色腫皮膚がん)	C44
REM	鼻腔	C30,C31
	喉頭	C32
	胸腺	C37
	心臓と胸郭内	C38,C39
	骨	C40,C41
	結合組織	C45-C47,C49
	睪丸	C62
	副腎	C74
	その他の内分泌	C75,C76
Hematopoietic malignant diseases		
HEM1	急性リンパ芽球性白血病	C91.0
	B細胞型の前リンパ球性白血病	C91.3
	リンパ性白血病/詳細不明	C91.9
HEM2	ホジキンリンパ腫	C81
	非ホジキンリンパ腫	C82,C83,C85,C86
	末梢および皮膚T細胞のリンパ腫	C84
	悪性免疫増殖性疾患	C88
	慢性リンパ芽球性白血病	C91.1
HEM3	有毛細胞白血病	C91.4
	急性骨髄性白血病	C92.0
	亜急性骨髄性白血病	C92.2
	骨髄性肉腫	C92.3
	急性前骨髄球性白血病	C92.4
	急性骨髄単球性白血病	C92.5
	単球性白血病	C93
	特定の細胞型の他の白血病	C94
	細胞型が特定されていない白血病	C95
その他または不特定	C96	
HEM4	慢性骨髄性白血病	C92.1

出所：ProZES(Ulanowski et al., 2020)のTable 1

*世界保健機関（WHO）が分類した国際疾病分類第10回改訂版（ICD-10）。悪性腫瘍はCで分類され、番号によって部位が振り分けられている。

3) リスク転換

重み付き算術平均で評価している（すなわちBEIR VIIの重み付き幾何平均よりもリスクは大きい傾向となる）。

4) 線量・線量率効果係数

ProZESでは、DDREFではなく、線量率効果係数（DREF）を適用している。その不確かさの分布は、次のような幾何平均と幾何標準偏差を持つ対数正規分布としてDREFを評価している。

DREFの対数正規分布

幾何平均（GM） : $GM = 1$

幾何標準偏差（GSD） : $GSD(dr) = \begin{cases} 1.1803 - 0.2317 \log_{10}(dr) & \text{for } dr \leq 6 \text{ mGy h}^{-1} \\ 1 & \text{for Otherwise} \end{cases}$
(dr : 線量率)

図 2-4に異なった線量率に対するDREFの累積確率を示す。線量率が変化したとしても中央値（50%値）はDREF=1の固定値を持ち、線量率が大きくなるとともにDREFはほぼ1となる。

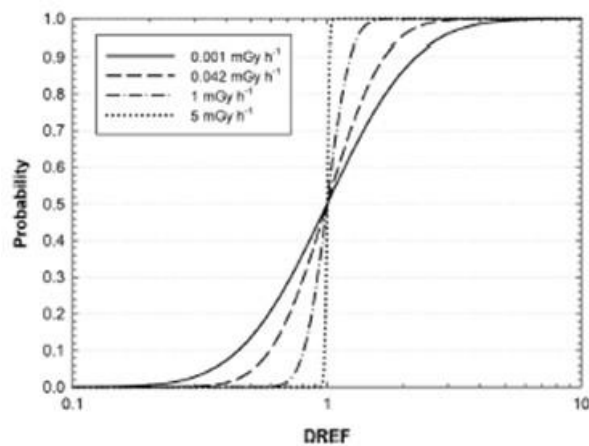


図 2-4 ProZESのDREFの累積確率

出所：ProZES(Ulanowski et al., 2020)のFig.1

5) 最小潜伏期間

がん発症の最小潜伏期間は、BEIR VIIのように固定値ではなく、連続的に変化する関数として与えられている。

$$F_L = \left[1 + \exp \left(-\eta \cdot \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \right) \right]^{-1}, \quad (2-25)$$

ここで、

- F_L : 最小潜伏期間によってリスクを調節する乗数 (-)
- η : 遷移期間の幅を調節するパラメータ (-)
 固形がんのとき 6.25
 白血病のとき 7.66
- t_0 : 最小潜伏期間によってリスクを調整する乗数の中央値 (y)
 固形がんのとき [3,4]の一様分布
 白血病のとき [1.25,1.75]の一様分布
- t : 被ばくからの経過年 (y)

図 2-5に固形がんと白血病の最小潜伏期間によってリスクを調整する乗数の経時変化を示す。実線が t_0 の中央値、破線が t_0 の上限值、点線が t_0 の下限值に関する変化を表す。固形がんでは η が小さいため変化が緩やかで、逆に白血病では η が大きいため変化が急激となっている。

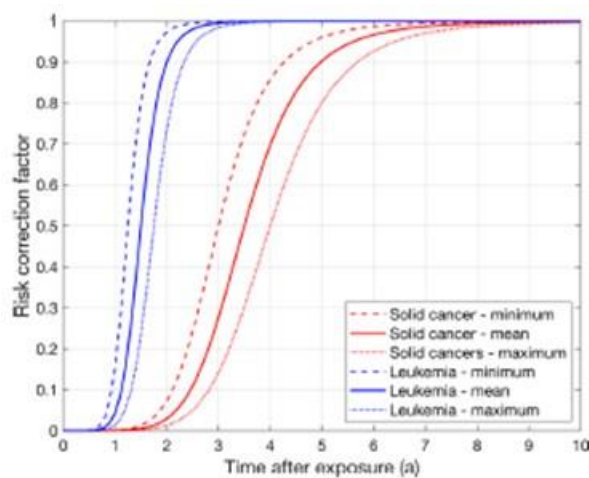


図 2-5 ProZESの最小潜伏期間によってリスクを調整する乗数の経時変化

出所：ProZES(Ulanowski et al., 2020)のFig.2

6) データソース

原爆被爆者の疫学調査 : LSS罹患率データ (調査期間 : 1958~1998年) (Preston et al., 2007, Preston et al., 2003)

人口分布 : 原因確率はERRのみで計算可能なため必要なし
がん死亡率 : 原因確率はERRのみで計算可能なため必要なし
がん罹患率 : 原因確率はERRのみで計算可能なため必要なし
生命表 : 原因確率はERRのみで計算可能なため必要なし

(3) 予測精度、不確かさの取扱い

1) 予測精度

被ばく時年齢20歳と50歳で1回の急性被ばく (1 Sv)、20~49歳まで33 mSv/yの慢性被ばく、20歳、40歳、および60歳でのラドンによる被ばく (100, 300, 700 WLM) に対して計算された原因確率 (到達年齢70歳) をProZES (Ver. 2であり、古いバージョン) とIREP(Kocher et al., 2008)とで比較した(Ulanowski et al., 2016)。その結果、条件や評価部位により差が大きく異なり、誤差10%以内で一致するものもあれば、2倍以上異なるケースも見られた。例えば、白血病 (表 2-11のHEM4) において、20~49歳時に毎年33 mSvを被ばくした場合の男性では、ProZESでの原因確率の50%タイル値は約0.6に対し、IREPでの値は約0.05であり、大きな差が見られた。一方、同条件の女性では、ProZESでの値は約0.7に対し、IREPでの値は約0.6であり、男性に比べて差が小さかった。報告書では、比較の図のみが示されており、差の原因については言及されていない。

2) 不確かさの取扱い

原因確率の不確かさ評価に関して、不確かさの発生源として、①EARとERRに関して複数のモデルをMMIで統合したが、MMIの重み w_i に比例するようにランダムに1つのモデルをEARとERRに対して選択、②選択したモデルに対するEARとERRのフィッティングパラメータ、③最小潜伏期間 F_L 、④リスク転換のERRとEARの重み、⑤DREF、⑥被ばく線量が挙げられている(Jacob et al., 2017, Ulanowski et al., 2020)。

各パラメータに確率分布を設定し、モンテカルロ法によって、不確かさの評価が行われる。

(4) コード活用の具体例

ProZES開発担当者へのヒアリング調査(6.2節参照)によると、ドイツでは多くの裁判で裁判官が職業被ばくによるがんの損害賠償の根拠としてProZESの計算を要求している。

2.1.9. その他 (PACE, LARisk)

(1) PACE 内の健康リスク評価コード

開発主体 : イギリス健康保全保障局¹¹ (UK Health Security Agency: UKHSA)

開発年 : 2020年

参考文献 : (Charnock TW, 2020)

評価リスク : 生涯寄与リスク

公開状況 : コード非公開

PACEは、イギリスで開発されたレベル3PRAコードである。前述したレベル3PRAコードであるMACCS (2.1.3項) と同様に、PACE内にも健康リスクを評価するコードが組み込まれている。

開発主体であるUKHSAは、原子力発電所の新しい設計が健康に及ぼす潜在的影響について、アドバイスする役割を担っている。緊急事態の影響を確率論的アプローチで考慮し、地理情報システム内に構築された新しいPRAとしてPACEが開発された。

PACE内の健康リスク評価コードでは、リスク評価モデルはICRP Pub.103とUNSCEAR(UNSCEAR, 2006)のモデルを参照しており、ERRモデル、リスク転換、DDREF、最小潜伏期間はICRP Pub.103を基にしている。評価の対象としているがんは食道、胃、結腸、肝臓、肺、骨、皮膚、乳房、卵巣、膀胱、甲状腺、骨髄、膵臓である。

他のコードと比較した例はなく、予測精度に関する記載はない。また、不確かさ評価も行っていない。

開発担当者へのヒアリング調査(6.2節参照)によると、PACEは開発されて間もなく、現在も改良中であるため、活用された例はない。また、イギリスでのレベル3PRA評価でPACEが利用されるかはまだ決まっていない。

¹¹ 2021年10月より英国公衆衛生庁 (Public Health of England: PHE) から完全移管された。

(2) LARisk

開発主体 : 韓国慶北大学

開発年 : 2022年

参考文献 : (Lee et al., 2022)

評価リスク : 生涯寄与リスク

公開状況 : Rのパッケージをダウンロードして利用可能。R上で動作。

RadRATは放射線に起因する生涯がんリスクを評価するために広く使用され、簡便で使いやすいように設計されている。しかし、大規模なデータ解析や複数症例のバッチファイルを使用することや、特定の集団におけるベースライン発生率や生命表などを利用することは困難である。そこで、RadRAT上に構築された放射線関連がんの生涯寄与リスクを計算するための追加パッケージとしてLARiskが開発された。

LARiskはRadRATの追加パッケージであるため、ERRモデル、リスク転換、DDREF、最小潜伏期間、評価の対象としているがんはBEIR VIIと同じである。

他のモデルと比較した例はなく、予測精度に関する記載はない。また、生涯寄与リスクの不確かさの評価に関して、発生源として、①EARとERRのフィッティングパラメータ、②DDREF、③最小潜伏期間の評価式のパラメータ μ 、④リスク転換のERRとEARの重み、⑤被ばく線量、⑥ベースライン発生が挙げられている(Lee et al., 2022)。モンテカルロ法に基づき、各パラメータに確率分布を設定して、不確かさの評価が行われている。

LARiskは開発されて間もないため、活用された例はない。RadRATとは異なり、関心のある全ての集団に適用できる、といった特徴がある。

2.2.既存コードに関する調査のまとめ

本調査結果より、出力に応じて既存コードを大きく3つに分類（レベル3PRA関連のコード、生涯寄与リスクを出力するコード、原因確率を出力するコード）でき、それぞれの調査結果を整理して表 2-15から表 2-17に示す。各コードが評価している部位について表 2-18から表 2-20に示す。以下、本節では、背景と目的、手法、予測精度、不確かさの取扱い、及びコード活用例の情報について記載する。

2.2.1. 背景と目的

(1) 背景

レベル3PRAコードが開発された背景は共通しており、原子力発電所での事故による公衆への影響を評価するためである。なお、レベル3PRAコードの出力の一つであるがんリスクは、安全目標との比較または経済損失を推定するためなどに使用されている。

生涯寄与リスクを出力するコードが開発された背景は、コードによって異なる。RadRATでは、今までのリスク評価が複雑であること、X-ray RISKでは、医療被ばくによるがん発生率が数%を占めていること、JAXAのコードでは、宇宙飛行士に対する放射線被ばく管理規定に対応することが背景として記載されている。

原因確率を出力するコードが開発された背景は共通しており、ドイツやアメリカでは、職業被ばく後のがん発生が賠償の対象かどうかの判断は、がんの発生確率に占める放射線の割合の推定値に基づいて行われていることが記載されている。

(2) 目的

レベル3PRA関連のコードの目的は共通しており、レベル3PRAコードに放射線被ばくによるがんリスクを入力することである。

生涯寄与リスクを出力するコードの目的は、背景と同様にコードによって異なっており、背景で指摘された問題を解決するために開発されている。RadRATでは、ユーザーが指定した被ばく歴に従って放射線によるがんの生涯リスクを推定すること、X-ray RISKでは、患者と医療従事者の双方に医療画像撮影によるがんリスクの増加に関する情報を提供すること、JAXAのコードでは、ISSに滞在する宇宙飛行士の宇宙放射線による放射線障害の発生を防止することである。

原因確率を出力するコードの目的は共通しており、電離放射線による職業被ばく後のがんに対する補償請求において利用し、専門家の判断を科学的にサポートすることである。

2.2.2. 手法（モデル、パラメータ、ベースラインリスク）

表 2-15から表 2-17に示したように、既存コードの多くではBEIR VIIのモデルを採用してコードが開発されていた。JAXAのコードでは、ICRP Pub.103のモデルが採用されている。

以下、本項では、BEIR VII及びICRP Pub.103のモデルの概要とBEIR VIIと調査した既存コードに実装されたモデルとの相違点を記述する。

(1) BEIR VIIの概要

1) BEIR VIIで利用した原爆被爆者の疫学調査

BEIR VIIのリスク評価モデルは、原爆被爆者の疫学調査LSS第13報（LSS死亡率データ）(Preston et al., 2003)を基に作成された。この調査期間は1950年から1997年である。

2) 対象としているがん

BEIR VIIにおける個別に推定値を提供すべき部位を決定する際の考慮事項は、原爆被爆者データにおいて、がんが放射線被ばくと明らかに関連があるか、及び信頼できるリスク推定値を推定するためのデータの妥当性があるかである。また、部位を選択的に照射する被ばくシナリオがあるかも考慮される。例えば、吸入被ばくは肺を選択的に照射し、経口摂取は消化器官を選択的に照射する。以上の考慮事項より、BEIR VIIで個別に評価の対象にしているがん部位は胃、結腸、肝臓、肺、乳、子宮、卵巣、前立腺、膀胱、甲状腺、及び白血病である。個別に扱われないがんは、Remainder（残り）として扱われる。

3) リスク評価モデル

BEIR VIIでは、固形がん（甲状腺がんと乳がん除く）、甲状腺がん、乳がん、及び白血病のERRとEARは、下記のモデル式を用いられている。モデル式は放射線影響研究所の研究(Preston et al., 2003)と同様に、原爆被爆者の疫学調査に対してEPICUREソフト(Preston DL, 1993)を利用して求められた。モデル式のフィッティングパラメータを表 2-12に示す。

全てのがん部位に対して、リスク評価モデルを作成することは理論上可能である。しかしながら、データ数が少ないため、あまり一般的でないがん部位に対しては、グループとして分析されたものよりも精度が低くなる。特に、性別、被ばく時年齢、到達年齢などの変数の修飾効果を定量的に評価することは困難となる。そのため、個別に評価しない「残り」のがんに対しては、合算したデータが用いられている。このように解析することで、一般的でないがん部位に対しても、がん症例数や死亡者数を増やすことができ、統計的精度が向上するという利点がある。

固形がん

$$EAR(D, g, e, a) \text{ or } ERR(D, g, e, a) = \beta_g D \exp(\gamma e^*) \left(\frac{a}{60}\right)^\eta, \quad (2-26)$$
$$e^* = \frac{e - 30}{10} \quad (e < 30), \quad e^* = 0 \quad (e \geq 30),$$

ここで、

<i>ERR or EAR</i>	:	過剰相対リスクまたは過剰絶対リスク
<i>D</i>	:	被ばく線量 (Sv)
<i>g</i>	:	性別 (<i>m</i> : 男性, <i>f</i> : 女性)
<i>e</i>	:	被ばく時年齢 (y)
<i>a</i>	:	到達年齢 (y)

甲状腺がん

甲状腺がんはERRのみを評価し、そのERRのモデルとパラメータは次式で与えられる。

$$ERR(D, e) = \beta D \exp[\gamma(e - 30)/10],$$
$$ERR/Gy = 0.53 \exp[-0.083(e - 30)] \text{ for males,} \quad (2-27)$$
$$ERR/Gy = 1.05 \exp[-0.083(e - 30)] \text{ for females,}$$

ここで、

<i>ERR</i>	:	過剰相対リスク
<i>D</i>	:	被ばく線量 (Sv)
<i>e</i>	:	被ばく時年齢 (y)

乳がん

$$EAR(e, a) \text{ per } 10^4 \text{ woman - years per gray} \\ = 9.9 \exp[-0.05(e - 25)] (a/50)^\eta, \quad (2-28)$$

ここで、

<i>EAR</i>	:	過剰絶対リスク
<i>e</i>	:	被ばく時年齢 (y)
<i>a</i>	:	到達年齢 (y)

白血病

$$EAR(D, e, t) \text{ or } ERR(D, e, t) \\ = \beta_g D (1 + \theta D) \exp[\gamma e^* + \delta \log(t/25) + \phi e^* \log(t/25)], \quad (2-29)$$

ここで、

<i>ERR or EAR</i>	:	過剰相対リスクまたは過剰絶対リスク
<i>D</i>	:	被ばく線量 (Sv)
<i>e</i>	:	被ばく時年齢 (y)
<i>t</i>	:	被ばくからの経過時間 (y)

4) リスク転換

重み付き幾何平均で評価する。表 2-12 に各部位での重みを示す。

5) 線量・線量率効果係数

DDREFは1.5と固定している。

6) 最小潜伏期間

白血病は2年、固形がんは5年で固定している。

表 2-12 BEIR VII のリスク評価モデルのフィッティングパラメータの値と重み係数

がん部位	重み係数 ERR(ω)	ERR				EAR			
		β_M^*	β_F^*	γ^\dagger	η	β_M^\ddagger	β_F^\ddagger	γ^\dagger	η
白血病	0.7	1.1 $\delta=-0.48$	1.2 $\delta=-0.48$	-0.4 $\delta=0.87$	N/A	1.62 $\delta=-0.48$	0.93 $\delta=0.56$	0.29 $\delta=0.88$	N/A
甲状腺	1	0.53	1.05	-0.83	N/A	No model			
乳房	0	No model				N/A	9.9	-0.51	3.5 ^{II} 1.1 ^{II}
胃	0.7	0.21	0.48	-0.3	-1.4	4.9	4.9	-0.41	2.8
大腸	0.7	0.63	0.43	-0.3	-1.4	3.2	1.6	-0.41	2.8
肝臓	0.7	0.32	0.32	-0.3	-1.4	2.2	1	-0.41	4.1
肺	0.3	0.32	1.4	-0.3	-1.4	2.3	3.4	-0.41	5.2
前立腺	0.7	0.12	N/A	-0.3	-1.4	0.11	N/A	-0.41	2.8
子宮	0.7	N/A	0.055	-0.3	-1.4	N/A	1.2	-0.41	2.8
卵巣	0.7	N/A	0.38	-0.3	-1.4	N/A	0.7	-0.41	2.8
膀胱	0.7	0.5	1.65	-0.3	-1.4	1.2	0.75	-0.41	6.0
その他の 固形がん	0.7	0.27	0.45	-0.3	-2.8	6.2	4.8	-0.41	2.8

*ERRの単位は Sv^{-1} 。添え字Mは男性、Fは女性。

† 単位はper 10年

‡ EARの単位は $per\ 10^4\ person\cdot/(Sv\ or\ Gy)$ 。添え字Mは男性、Fは女性。

II 到達年齢50歳以下では $\eta = 3.5$ 、それ以外は $\eta = 1.1$ 。

(2) 最小 ICRP の Pub.103 のリスク評価モデルの概要

1) ICRPで利用した原爆被爆者の疫学調査

ICRP Pub.103のリスク評価モデルは、原爆被爆者の疫学調査(Preston et al., 2007 , ICRP, 2007)を基に作成された。これは、調査期間が1950年から1998年の罹患率データである。

2) 対象としているがん

ICRP Pub.103で評価の対象としているがん部位は、食道、胃、結腸、肝臓、肺、皮膚、乳房、子宮、卵巣、膀胱、甲状腺、口腔・咽頭、直腸、胆嚢・胆管、膵臓、喉頭、前立腺、腎など、脳・中枢神経系、および白血病である。

3) リスク評価モデル

ICRP Pub.103では、固形がんと白血病のERRとEARは、下記のモデル式が用いられている。モデル式のフィッティングパラメータを表 2-13に示す。

固形がん

$$EAR(D, g, e, a) \text{ or } ERR(D, g, e, a) = \beta_g D \exp \left[\gamma e^* + \eta \log \left(\frac{a}{70} \right) \right] , \quad (2-30)$$
$$e^* = \frac{e - 30}{10} ,$$

ここで、

<i>ERR or EAR</i>	:	過剰相対リスクまたは過剰絶対リスク
<i>D</i>	:	被ばく線量 (Sv)
<i>g</i>	:	性別 (<i>m</i> : 男性, <i>f</i> : 女性)
<i>e</i>	:	被ばく時年齢 (y)
<i>a</i>	:	到達年齢 (y)

白血病

$$EAR(D, g, e, a) = \beta_g (D + 0.79 \times D^2) \exp[\gamma(a - e - 25)] , \quad (2-31)$$

ここで、

<i>EAR</i>	:	過剰絶対リスク
<i>D</i>	:	被ばく線量 (Sv)
<i>g</i>	:	性別 (<i>m</i> : 男性, <i>f</i> : 女性)
<i>e</i>	:	被ばく時年齢 (y)
<i>a</i>	:	到達年齢 (y)

4) リスク転換

ERRとEARの重み付き算術平均で評価する。表 2-14に各部位での重みを示す。

5) 線量・線量率効果係数

DDREFは2と固定している。

6) 最小潜伏期間

固形がんは5年、白血病は2年で固定している。

表 2-13 ICRP Pub.103のリスク評価モデルのフィッティングパラメータの値

がん部位	ERR モデル				EAR モデル			
	β_{males}	β_{females}	γ	η	β_{males}	β_{females}	γ	η
罹患率								
全固形がん	0.35	0.58	-0.17	-1.65	43.2	59.8	-0.24	2.38
食道	0.40	0.65	-0.17	-1.65	0.48	0.66	0.64	2.38
胃	0.23	0.38	-0.17	-1.65	6.63	9.18	-0.24	2.38
結腸	0.68	0.33	-0.17	-1.65	5.76	2.40	-0.24	2.38
肝臓	0.25	0.40	-0.17	-1.65	4.18	1.30	-0.24	2.38
肺	0.29	1.36	0.17	-1.65	6.47	8.97	0.01	4.25
乳房	NA	0.87	0.00	-2.26	NA	10.9	-0.39	3.5 (a<50) 1.0 (a≥50)
卵巣	NA	0.32	-0.17	-1.65	NA	1.47	-0.24	2.38
膀胱	0.67	1.10	-0.17	-1.65	2.00	2.77	-0.11	6.39
甲状腺	0.53	1.05	-0.56	0.00	0.69	2.33	-0.24	0.01
残り	0.22	0.17	-0.34	-1.65	7.55	10.5	-0.24	2.38
死亡率								
全固形がん	0.35	0.58	-0.31	-0.74	28.91	29.9	-0.24	3.63
食道	0.76	1.27	-0.31	-0.74	0.98	0.98	-0.24	3.63
胃	0.26	0.43	-0.31	-0.74	5.79	5.79	-0.24	3.63
結腸	0.25	0.25	-0.31	-4.46	2.24	2.24	-0.24	3.63
肝臓	0.21	0.34	-0.31	-0.74	6.46	2.36	-0.24	5.56
肺	0.55	0.92	-0.04	-0.74	6.72	6.72	-0.24	6.56
乳房	NA	0.96	-0.31	-0.74	NA	15.73	-0.44	5.78 (a<50) -2.83(a≥50)
卵巣	NA	0.67	-0.31	-0.74	NA	1.40	-0.24	3.63
膀胱	0.74	1.24	0.12	-0.74	0.83	0.83	0.00	8.04
残り	0.13	0.22	-0.56	-0.74	3.68	3.68	-0.52	3.63

出所：ICRP Pub. 103(ICRP, 2007)のTable A.4.6-A.4.9

表 2-14 リスク転換に用いたERRモデルとEARモデルの臓器・組織別の割合

がん部位	ERRモデル	EARモデル
食道	50%	50%
胃	50%	50%
結腸	50%	50%
肝臓	50%	50%
肺	30%	70%
皮膚	100%	0%
乳房	0%	100%
子宮	50%	50%
卵巣	50%	50%
膀胱	50%	50%
甲状腺	100%	0%
口腔・咽頭	50%	50%
直腸	50%	50%
胆嚢・胆管	50%	50%
膵臓	50%	50%
喉頭	50%	50%
前立腺	50%	50%
腎など	50%	50%
脳・中枢神経系	50%	50%
その他の部位	50%	50%
白血病	0%	100%

(3) BEIR VII と既存コードに実装されたモデルとの相違点

ここでは、BEIR VIIのモデルと既存コードに実装されたモデルとの相違点について整理する。なお、ここで取り扱う既存コードは、BEIR VII以降に開発され、BEIR VIIのリスク評価モデルを利用している5個のコード（HEINPUT、Korean Specific Model、RadRAT、X-Ray RISK、Blue Book Model）とする。

1) 利用した原爆被爆者の疫学調査データ

RadRATでは、LSS第13報(Preston et al., 2003)に加えて、調査期間1998年までの罹患率データ(Preston et al., 2007)も利用されている。(Preston et al., 2003)に加えて、調査期間1998年までの罹患率データ(Preston et al., 2007)及び調査期間2001年までの造血器悪性腫瘍罹患率データ(Hsu et al., 2013)も利用されている。

2) 評価の対象としているがん

評価対象としているがん部位について、BEIR VIIと既存コードとの相違点として、X-Ray RISKでは部位別のがんについて評価を行っておらず、全てのがんのみを評価している（表 2-18～表 2-20）。また、RadRATでは、口腔、食道、胆嚢、膵臓、直腸、腎臓、脳／中枢神経系、Blue Book Modelでは腎臓、骨、及び皮膚（これらは残りのがんとして構成され

ている) が加えられている。

3) リスク評価モデル

リスク評価モデルについて、BEIR VIIと既存コードとの相違点として、Blue Book Modelでは、腎臓がん、骨がん、皮膚がん、及び甲状腺がん、RadRATでは甲状腺、Korean Specific Modelでは甲状腺、乳房、及び白血病のリスク評価モデルがBEIR VIIと異なっている。なお、RadRATでは、乳房のリスク評価モデルがBEIR VIIと同じであるものの、リスクフィッティングパラメータは異なっている。

4) リスク転換

リスク転換について、BEIR VIIと既存コードとの相違点として、Blue Book Model、RadRAT、及びKorean Specific Modelは重み付き算術平均で評価されている。ただし、RadRATの白血病に関しては、BEIR VIIと同じ評価方法である。

5) 線量・線量率効果係数

Korean Specific ModelとRadRATではBEIR VIIと異なるDDREFが使用されている。BEIR VIIでは、固形がんのDDREFは1.5が使用されている。Korean Specific Modelでは、固形がんのDDREFは1.3（線量が100 mGyまたは線量率が0.1 mGy min⁻¹以下）が使用されている。RadRATでは、固形がんのDDREFは対数正規分布の確率分布で与えられている。ただし、幾何平均は1.5であり、幾何平均値はBEIR VIIのDDREFと同じである。

6) 最小潜伏期間

最小潜伏期間について、BEIR VIIと既存コードとの相違点として、RadRATでは最小潜伏期間後急にリスクが現れるのではなく、連続的に変化するように、BEIR VIIの固定された最小潜伏期間を連続に調整する乗数 $F_{latency}$ を導入し、この乗数をS字関数の確率分布として与えられている。

2.2.3. 予測精度

予測精度について、RadRAT、X-ray RISK及びBlue Book ModelはBEIR VIIと比較し、部位によって異なるものの概ね30%以内で生涯寄与リスクがBEIR VIIと一致することが報告されている。また、ProZESは、IREPと比較し、部位や条件によって10%以内で一致するものから2倍以上の差があることが報告された。

2.2.4. 不確かさの取扱い

不確かさを取り扱っているコードでは、EARとERRのフィッティングパラメータ、

DDREFまたはDREF、リスク転換の不確かさは全てのコードで取り扱われていた。全てのコードで取り扱われていないものの、がんの検出と診断の誤り、原爆被爆者集団の選択バイアス（放射線に鈍感な対象者の選択によるバイアス）、疫学調査の不完全な追跡期間（追跡期間が未だ途中であり、追跡期間外のリスク推定値を外挿することによる不確かさ）、被ばく線量、及びマルチモデル推論が不確かさとして取り扱われている。

2.2.5. コード活用例の情報

レベル3PRA関連のコードの活用例として、レベル3PRAコードのがんリスク評価の部分を支援し、実際の原子力発電所に対する仮想事故影響を評価することが挙げられる。

生涯寄与リスクを出力するコードの活用例は、コードの開発目的に応じて異なる。RadRATでは、計画被ばく状況での職業被ばく、公衆被ばく、及び医療被ばくのがんリスクの推定のように、汎用的に活用されている。一方、X-ray RISKでは、患者に対してCTスキャン等による発がんリスクに関するレポートを作成するために活用され、JAXAのコードでは、放射線被ばく管理規定に対応するため、ISS搭乗宇宙飛行士に対して、飛行前に、飛行中の放射線被ばくに係るリスクを説明する際に活用されるように、特定の状況に特化した形で活用されている。

原因確率を出力するコードの活用先は共通しており、電離放射線による職業被ばく後の発がんに対する補償請求に活用されている。

表 2-15 レベル3PRA関連のコードの比較

コード名	HEINPUT	MACCS 内の健康リスク評価モデル	Korean Specific Model
開発主体	日本 JAEA	米国 NRC	韓国 MSIT
開発年（更新年）	1999 (2015)	1997 (2021)	2020
モデル	NRC1985, NUREG1993, EPA2011	BEIR V, NUREG/CR-6555(1997)	BEIR VII（甲状腺、乳房、及び白血病は別モデルを利用）
原爆被爆者の疫学調査	LSS 13	LSS 11	LSS 13, Preston et al., 2007、Hsu et al., 2013
ソフトウェア	Windows 版パッケージソフト	Windows 版パッケージソフト	Web 上に情報なし
入手可否	インストール不可	U.S. NRC の許可後、PC にインストール	Web 上に情報なし
背景	原子力発電所での事故による影響を定量的に評価するために OSCAAR コードが開発された。がんリスクの推定モデルについては、最新の知見を反映して随時更新する必要がある	原子力発電所事故の公衆への影響を評価するために MACCS コードが開発された。がんリスク推定値は安全目標との比較又は経済損失を推定するために使用されている	それまでの韓国では固有のコードがなく、レベル 3 PRA の大半は MACCS で実施されてきたが、韓国の集団に適用するには限界があった
目的	OSCAAR コードシステムにおける健康評価モジュール HE の前処理プログラムとして、放射線被ばくによる確率的影響のリスクを評価するため	安全目標との比較、費用便益分析のために MACCS 内で出力された住民の臓器線量、実効線量に対して、放射線被ばくによる晩発影響（がん）を評価するため。（早期影響も計算可）	韓国では 2016 年にレベル 3PSA が通達として制定され、早期死亡やがん死亡の観点から安全目標を達成するための影響解析を行うことが関連機関に義務づけられたから
活用例	OSCAAR コードの前処理プログラム	米国の実際の原子力発電所に対する仮想事故影響を評価（SOARCA プロジェクト）	韓国の原子力発電所の規制当局と電力会社が放射線被ばくによる長期的な健康影響を評価する
出力	放射線関連がんの生涯リスク（罹患・死亡）（点推定値）	平均死亡リスク、生涯がんリスク（死亡・罹患数）（点推定値）	がん発生率リスク、放射線誘発がん発生率の生涯帰属リスク（コードでないため、出力される統計値は不明）
予測精度の評価に関する記述予測精度	EPA2011 と比較して数%以内で一致（腎臓、白血病以外）	記載無し	記載無し
不確かさの取り扱い（パラメータの分布に基づいてモンテカルロ解析を実施）不確かさの取り扱い	点推定値のため無し（なお、OSCAAR の出力としては、気象条件の不確かさを考慮した健康リスクを出力）	点推定値のため無し（なお、MACCS 自体の出力は、大気拡散沈着の不確かさを考慮した健康リスクを出力）	<ul style="list-style-type: none"> • EAR と ERR のフィッティングパラメータ • DDREF • リスク転換 • がんの検出と診断の誤り • 原爆被爆者集団の選択バイアス • 疫学調査の不完全な追跡期間

表 2-16 生涯寄与リスクを出力するコードの比較

コード名	RadRAT	X-ray RISK	Blue Book Model	JAXA のコード
開発主体	米国 NCI	米国 ASRT	米国 EPA	日本 JAXA
開発年（更新年）	2012 (2022)	2018	1994 (2011)	2013
モデル	BEIR VII（甲状腺がんは別モデルを利用）	BEIR VII	BEIR III, BEIR VII（腎臓がん、骨がん、皮膚がん、及び甲状腺がんは別モデルを利用）	ICRP 103
原爆被爆者の疫学調査	LSS 13, Preston et al., 2007	LSS 13	LSS 13	ICRP 103
ソフトウェア	オンラインで動作	オンラインで動作	Web 上に情報なし	Web 上に情報なし
入手可否	コード非公開のため、入手不可	コード非公開のため、入手不可	Web からの入手は不可	Web からの入手は不可
背景	リスク予測法は様々な被ばくの潜在的放射線関連がんリスクを評価するために使用されてきたが、多臓器被ばくを考慮する場合には、これらの計算は複雑になる	米国では年間 6,200 万件の CT スキャンが実施されているなか、医療画像撮影による放射線被ばくががんの 1~3%に関与しているという報告があった	BEIR VII では、出生前被ばく、腎臓、骨、非メラノーマ皮膚がんが扱われていなかった	宇宙飛行士の ISS での長期滞在では、宇宙放射線による被ばくが大きな問題となる。ICRP2007 年勧告に基づき、放射線被ばく管理規定の改正を行った
目的	ユーザーが指定した被ばく歴に従って放射線によるがんの生涯リスクとその不確かさ分布を推定するため	医療画像撮影による発がんリスクの増加について、患者と医療従事者の双方に情報を提供するため	BEIR VII で取り上げられなかった放射線誘発のがんリスク推定に関連する不確かさを分析するため	ISS に滞在する宇宙飛行士の宇宙放射線被ばくによる放射線障害の発生を防止するため
活用例	計画被ばく状況での職業被ばく、公衆被ばく、及び医療被ばくにおけるがんリスクの推定	患者が自身の画像記録より、発がんリスクに関する X 線リスクレポートを作成	連邦ガイダンス報告書第 13 号 (FGR-13) において発がんリスク係数を導き出すために使用された	放射線被ばく管理規定に対応するため、ISS 搭乗宇宙飛行士に対して利用
出力	放射線関連がんの生涯リスク（10 万人のうち発生数） （平均値と 90%信頼区間）	医療における放射線被ばくによる発がんリスク（点推定値）	低線量への曝露による米国人口の EPA がん発生率、死亡リスク係数（コードでないため、出力される統計値は不明）	宇宙放射線の被ばくにおける実効線量制限値と寄与生涯がん死亡確率（点推定値）
予測精度の評価に関する記述	BEIR VII と比較して、ほとんどの部位で結果は約 15%以内で一致していた	全てのがんに対して、BEIR VII と比較し、一致していた	BEIR VII と比較し、ほとんどの部位で結果は約 30%以内で一致していた	記載無し
不確かさの取り扱い （パラメータの分布に基づいてモンテカルロ解析を実施）	<ul style="list-style-type: none"> • EAR と ERR のフィッティングパラメータ • DDREF • リスク転換 • 最小潜伏期間 • 被ばく線量 	点推定のため無し	<ul style="list-style-type: none"> • EAR と ERR のフィッティングパラメータ • DDREF • リスク転換 • がんの検出と診断の誤り • 原爆被爆者集団の選択バイアス 	点推定のため無し

表 2-17 原因確率を出力するコード

コード名	IREP	ProZES
開発主体	米国 NIH	ドイツ Bfs
開発年（更新年）	2003 (2021)	2013 (2022)
モデル	NCI と NIOSH のモデル	独自に開発
原爆被爆者の疫学調査	Preston et al., 1994; Thompson et al., 1994	Preston et al., 2007
ソフトウェア	オンラインで動作	Windows 版パッケージソフト
入手可否	コード非公開のため、入手不可	インストール可能
背景	米国公法には「特定の線量を受けた人がその結果としてがんを発症する可能性を推定する放射線疫学表を考案し、公表する」とある	ドイツでは、電離放射線による職業被ばく後のがんに対する補償の対象かどうかの司法判断は、がんの発生確率に占める放射線の割合の推定値に基づいて行われている
目的	1985 年の NIH Tables (放射線被ばくによって引き起こされた可能性のあるがんに対する補償請求の裁定に利用) を更新するため	電離放射線による職業被ばく後のがんに対する補償請求において、労働者災害補償委員会の専門家の判断を科学的にサポートするため
活用例	電離放射線による職業被ばく後のがんに対する補償請求	電離放射線による職業被ばく後のがんに対する補償請求
出力	原因確率（1, 2.5, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 97.5, 99% タイル値）	低 LET 放射線に被ばくした際の固形がん、造血器悪性疾患、ラドンに被ばくした際の肺がんの発生確率（中央値、信頼区間、累積確率）
予測精度の評価に関する記述	記載無し	IREP と比較し、部位や条件によって 10%未満から 2 倍以上の差
不確かさの取り扱い（パラメータの分布に基づいてモンテカルロ解析を実施）	<ul style="list-style-type: none"> • EAR と ERR のフィッティングパラメータ • DDREF • リスク転換 • 最小潜伏期間 • 被ばく線量 	<ul style="list-style-type: none"> • EAR と ERR のフィッティングパラメータ • DREF • リスク転換 • 最小潜伏期間 • 被ばく線量 • マルチモデル推論

表 2-18 評価の対象としているがん部位の比較 (1/2)

項目	部位	ICD-10 ⁽¹⁾	ICD-9 ⁽¹⁾	HEINPUT	MACCS	Korean ⁽²⁾	BEIRVII ⁽³⁾	RadRat ⁽⁴⁾	X-ray RISK ⁽⁵⁾	Blue Book ⁽⁶⁾	JAXA	ProZES ⁽⁷⁾	IREP ⁽⁸⁾
日本のがん統計の部位	口腔・咽頭	C00-C14	140-149	×	×	×	×	△(口腔のみ)	×	×	×	×	○
	食道	C15	150	×	×	×	×	○	×	×	×	×	○
	胃	C16	151	○	×	○	○	○	×	○	×	○	○
	結腸	C18	153	○	×	○	○	○	×	○	×	○	○
	直腸	C19-C20	154	×	×	×	×	○	×	×	×	×	○
	肝臓	C22	155	○	×	○	○	○	×	○	×	×	○
	胆嚢・胆管	C23-C24	156	×	×	×	×	△(胆嚢のみ)	×	×	×	×	○
	膵臓	C25	157	×	×	×	×	○	×	×	×	×	○
	喉頭	C32	161	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	肺	C33-C34	162	○	×	○	○	○	×	○	×	○	○
	皮膚	C43-C44	172-173	×	×	×	×	×	×	×	×	△(C44のみ)	△(173のみ)
	乳房	C50	174-175	○	×	○	○	○	×	○	×	○	△(174のみ)
	子宮	C53-C55	179-182	○	×	○	○	○	×	○	×	×	△(184を含む)
	子宮頸部	C53	180	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×
	子宮体部	C54	182	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	卵巣	C56	183	○	×	○	○	○	×	○	×	×	○
	前立腺	C61	185	○	×	○	○	○	×	○	×	×	×
	膀胱	C67	188	○	×	○	○	○	×	○	×	×	○
	腎・尿路 (膀胱除く)	C64-C66,C68	189	×	×	×	×	△(腎臓のみ)	×	×	×	×	○
	脳・中枢神経系	C70-C72	191-192	×	×	×	×	○	×	×	×	△(目(C69)を含む)	○
甲状腺	C73	193	○	×	○	○	○	×	○	×	○	○	
悪性リンパ腫	C81-C85,C96	200-202	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△(203を含む)	
多発性骨髄腫	C88-C90	203	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
白血病	C91-C95	204-208	△(204.1 ⁽⁹⁾ を除く)	×	△(204.1 ⁽⁹⁾ を除く)	△(204.1 ⁽⁹⁾ を除く)	△(204.1 ⁽⁹⁾ を除く)	△(204.1 ⁽⁹⁾ を除く)	×	△(204.1 ⁽⁹⁾ を除く)	×	×	△(204.1 ⁽⁹⁾ を除く)

(1) 日本のがん統計のエクセルファイルには、ICD-10とICD-9の対応が表記されていたのでそれを記載した。

(2) LEE et al.(2020)の文献を参照した。

(3) BEIR VII(NRC, 2006)の文献を参照し、記載の部位名およびEPA(2011)の文献を参照しICD-10と対応させた。

(4) Berrington et al.(2012)の文献を参照し、記載の部位名からICD-10と対応させた。なお、同文献では口腔と胆嚢との記載であるが、ProZESを見ると咽頭と胆管を含む可能性がある。

(5) WEBサイト：<https://www.xrayrisk.com/>を参照した。「すべてのがん」のICD-10は不明で、元はBEIR VIIのTable12D-1を参照しているが、同文献も部位名のみ記載である。

(6) EPA(2011)の文献を参照した。

(7) Ulanowski et al.(2020)の文献を参照した。

(8) WEBサイト：<https://radiationcalculators.cancer.gov/irep/model/inputs/>のWEBアプリの部位名(ICD-9)を参照した。

(9) ICD-9の204.1は、慢性リンパ性白血病である。

“×”は残りの部位として評価されている (MACCS, X-Ray RISK, JAXAを除く)

表 2-18 評価の対象としているがん部位の比較 (2/2)

項目	部位	ICD-10 ⁽¹⁾	ICD-9 ⁽¹⁾
ProZES に特徴的な部位	消化管 口腔 食道 小腸 直腸 肝臓 胆嚢 膵臓 その他	C00-C14 C15 C17 C19-C21 C22 C23-C24 C25 C26,C48	
	尿管 腎臓 腎盂尿管 膀胱 その他	C64 C65-C66 C67 C68	
	女性生殖器 子宮体部 子宮／部位不明 卵巣 その他	C54 C55 C56 C51,C52,C57,C58	
	男性生殖器 前立腺 その他	C61 C60,C63	
	急性リンパ性白血病 急性リンパ性白血病 B細胞型の前リンパ球性白血病 詳細不明	C91.0 C91.3 C91.9	
	慢性リンパ芽球性白血病を含むリンパ腫 ホジキンリンパ腫 非ホジキンリンパ腫 末梢および皮膚 T 細胞のリンパ腫 悪性免疫増殖性疾患 慢性リンパ性白血病 有毛細胞白血病	C81 C82,C83,C85,C86 C84 C88 C91.1 C91.4	
	急性骨髄性白血病 急性骨髄性白血病 亜急性骨髄性白血病 骨髄肉腫 急性前骨髄球性白血病 急性骨髄単球性白血病 単球性白血病 特定の細胞型のその他の白血病 細胞型不明の白血病 詳細不明	C92.0 C92.2 C92.3 C92.4 C92.5 C93 C94 C95 C96	
	慢性骨髄性白血病	C92.1	
MACCS, X-ray RISK, JAXA に特徴的な部位	すべてのがん		
IREP に特徴的な部位	すべての消化器		150-159
	その他の呼吸器		160,161,163-165
	骨		170
	男性生殖器		185-187
	不明部位		170- 172,174(male), 175,190,194-199
	急性リンパ性白血病		204.0
	急性骨髄性白血病		205.0
慢性骨髄性白血病		205.1	

斜線は世界保健機関（WHO）が分類した国際疾病分類第 9 回改訂版と第 10 回改訂版（ICD-9 と ICD-10）で分類されていないものである。なお、ProZES は ICD-10 が参照されており、IREP は ICD-9 が参照されているため、どちらかにしか表記されていない。

表 2-19 Blue Book Modelにおける残りのがんの構成部位

残り(構成部位)	Blue Book Model (ICD-O-2)
口腔の固形がん, 食道	C00-C15/3
小腸	C17/3
直腸	C19-C21/3
胆嚢,膵臓	C23-C25/3
その他消化器系	C26/3, C422/3
鼻腔,咽頭,その他呼吸器系	C37-C39/3
胸腺	C379/3
腎臓	C649/3
中枢神経系	C70-C72/(2,3)
腎盂を含む,尿管	C659/3, C669/3
非メラノーマ皮膚がん	C44/3, M8270-8279
骨がん	C40/3, C41/3
結合組織	C47/3, C49/3
その他の生殖器	C51/3, C52/3, C57(7,8,9)/3, C58/3, C60/3, C63/3
その他の固形がん	C42(0,1,3,4)/3, C69/3, C74-C76/3, C77/3, C809/3

出所：EPA(2011), Table 3-1

表 2-20 ProZESにおける残りのがんの構成部位

残り(構成部位)	ProZES (ICD-10)
鼻腔	C30, C31
喉頭	C32
胸腺	C37
心臓と胸郭内	C38, C39
骨	C40, C41
結合組織	C45-C47, C49
睾丸	C62
副腎	C74
その他の内分泌腺	C75, C76

出所：Ulanowski et al.(2020) , Table 1

3. 疫学研究に関する文献調査

本章では、放射線リスク推定に関する国内外における主要な疫学研究について文献調査した結果をまとめる。文献調査においては、原爆放射線の健康影響に関する寿命調査に加え、放射線業務従事者や医療被ばくに関する研究調査等、放射線被ばくによる人体への健康影響に関する最新の疫学研究について情報を収集した。

本章では以下の項目について、それぞれ記載する。

- 3.1 原爆被爆者の疫学研究の文献調査
- 3.2 国際機関の放射線被ばく疫学研究に関する報告書の調査
- 3.3 国内外の放射線被ばく疫学研究に関する文献調査

3.1. 原爆被爆者の疫学研究の文献調査

本リスク評価コードの基となる基礎情報を整理するために、まずは原爆被爆者の疫学研究の最新の論文を調査した。ここで、LSSは死亡率に関する報告書を指すため、がん罹患率の研究は含まれていない。本報告書では、原爆被爆者のがんの罹患と死亡を特に区別しない場合は、「原爆被爆者の疫学研究」と記載する。また、本報告書では、「死亡」、「罹患」の用語に対して、特に断りがなければそれぞれ、がんによる死亡、罹患を意味する。

(1) 原爆被爆者の最新の疫学研究の文献調査

主な原爆被爆者の最新の疫学研究としては、死亡率に関してはLSS第14報、罹患率に関しては全固形がんに対して公開されている(Ozasa et al., 2012)。LSS第14報の死亡の研究の調査期間は1950年から2003年である。表 3-1に放射線影響研究所が発表した最新の原爆被爆者の罹患研究の一覧を示す。全固形がんに対しては、調査期間を1958年から2009年とした研究が2017年に公開されている(Grant et al., 2017)。個別のがんの多くに対しても、全固形がんと同様に、調査期間を1958年から2009年とした研究が2017年以降に公開されている。一方、皮膚がん(Sugiyama et al., 2014)、甲状腺がん(Furukawa et al., 2013)及び白血病(Hsu et al., 2013)については、2009年よりも前までの調査期間のデータに基づく研究が最新であった。論文に記載されているERR及びEARのパラメータを推定する基となる疫学調査の数値データが放射線影響研究所のホームページに公開されている。2023年1月時点では、LSS第14報の死亡率データ、調査期間1998年までの罹患率データ(Preston et al., 2007)、論文に記載されているERR及びEARのパラメータを推定する基となる疫学調査の数値データが放射線影響研究所のホームページに公開されている。2023年1月時点では、LSS第14報の死亡率データ、調査期間1998年までの罹患率データ(Preston et al., 2007)、表 3-1内の論文では、白血病など(Hsu et al., 2013)の罹患率データ等が公開されている。

表 3-1 放射線影響研究所が発表した原爆被爆者の最新のがん罹患研究(1/2)

がん部位	調査期間 最終年	論文タイトル	参考文献
肺（女性）	2009	The possible impact of passive smoke exposure on radiation-related risk estimates for lung cancer among women: the life span study of atomic bomb survivors	(Hu et al., 2021)
胃、小腸、 直腸	2009	Gastrointestinal Cancer Survival and Radiation Exposure among Atomic Bomb Survivors: The Life Span Study	(Bockwoldt et al., 2021)
腎臓、膀胱、 その他の 尿路	2009	Radiation Risks for the Incidence of Kidney, Bladder and Other Urinary Tract Cancers: 1958-2009	(Grant et al., 2021)
前立腺	2009	Risk of Prostate Cancer Incidence among Atomic Bomb Survivors: 1958-2009	(Mabuchi et al., 2021)
卵巣	2009	Radiation Risk of Ovarian Cancer in Atomic Bomb Survivors: 1958-2009	(Utada et al., 2021)
大腸	2009	Radiation risk of incident colorectal cancer by anatomical site among atomic bomb survivors: 1958-2009	(Sugiyama et al., 2020)
中枢神経系 腫瘍	2009	Radiation risk of central nervous system tumors in the Life Span Study of atomic bomb survivors, 1958-2009	(Brenner et al., 2020)
肝臓、胆 道、膵臓	2009	Radiation and Risk of Liver, Biliary Tract, and Pancreatic Cancers among Atomic Bomb Survivors in Hiroshima and Nagasaki: 1958–2009	(Sadakane et al., 2019a)
口腔、食 道、胃	2009	Radiation-Related Risk of Cancers of the Upper Digestive Tract among Japanese Atomic Bomb Survivors	(Sakata et al., 2019)
子宮	2009	Radiation Risks of Uterine Cancer in Atomic Bomb Survivors: 1958-2009	(Utada et al., 2018)

表 3-1 放射線影響研究所が発表した原爆被爆者の最新のがん罹患研究(2/2)

がん部位	調査期間 最終年	論文タイトル	参考文献
乳房	2009	Incidence of Breast Cancer in the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958-2009	(Brenner et al., 2018)
肺、喉頭、その他の 呼吸器	2009	Radiation Risks of Uterine Cancer in Atomic Bomb Survivors: 1958-2009	(Cahoon et al., 2017)
全固形がん	2009	Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009	(Grant et al., 2017)
皮膚	1996	Skin cancer incidence among atomic bomb survivors from 1958 to 1996	(Sugiyama et al., 2014)
甲状腺	2005	Long-term trend of thyroid cancer risk among Japanese atomic-bomb survivors: 60 years after exposure	(Furukawa et al., 2013)
白血病、リンパ腫、 多発性骨髄腫	2001	The incidence of leukemia, lymphoma and multiple myeloma among atomic bomb survivors: 1950-2001	(Hsu WL, 2013)

(2) 原爆被爆者の疫学研究の海外の報告書への反映状況の調査

原爆被爆者の疫学研究で海外の報告書に反映されている論文は、死亡率に関してはLSS第13報のデータがBEIR VIIのモデルの作成に利用されている。また、罹患率に関してはPreston (2007) がICRP Pub.103に採用されている。調査した既存コードに実装されたリスク評価モデルは第2章の既存コードに関する調査において示した通り、主にBEIR VIIとICRP Pub.103を参考に行っていることから、今回の調査の範囲では、原爆被爆者の最新の疫学研究(Ozasa et al., 2012, Grant et al., 2017)を反映したリスク評価コードはなかった。ただし、ProZESは複数のリスク評価モデルを積み重ねて使用しているため、原爆被爆者の最新の疫学研究を考慮してしいる可能性がある。

(3) 原爆被爆者の最新の疫学研究のがん部位の網羅性の調査

次に、原爆被爆者の最新の疫学研究が対象としたがん部位が、既存コードの評価対象とするがん部位をどの程度網羅しているかを調査した。表 3-2に放射線影響研究所の最新の原爆被爆者の罹患率調査でリスクが評価されているがん部位を示す。ここで、表 3-2の1列目で示したがん部位は、評価期間が1998年までの研究(Preston et al., 2007)で評価されたがん部位である。さらに、ICRP Pub.103で組織荷重係数の評価対象となった臓器に*印を付けた。

表 3-2より、最新の原爆被爆者の疫学研究では主ながん部位は評価済みであることが分かった。一方、未評価のがん部位は、その他の消化器系、呼吸器系、骨、女性性器、泌尿器、中枢神経、その他の固形がんであった。また、ICRP Pub.103の組織加重係数の対象となっている臓器・組織のがんのうち、骨がんのみが最新の原爆被爆者の疫学研究では未評価であった。

表 3-2 放射線影響研究所の最新の原爆被爆者の疫学研究のがん部位(1/2)

出版年	筆頭著者	種類	調査期間	がん部位	solid*	Oral Cavity and Pharynx	esoph*	stomach*	colon*	rectum	liver*	gallbldr	pancr	othdig	respca	lung*	bone*	melanoma*	nmskin*
2021	Audray E. Hu	罹患	2009	肺												○			
2021	藤原恵	罹患	1994	リンパ															
2021	Brandie Bockwoldt	生存率	2009	胃、小腸、直腸			○	○	○										
2021	Eric J. Grant	罹患	2009	腎臓、膀胱、その 他の尿路															
2021	Dale L. Preston	罹患	2009	前立腺															
2021	歌田真依	罹患	2009	卵巣															
2020	杉山裕美	罹患	2009	大腸					?										
2019	定金敦子	罹患	2009	肝臓、胆道、膵臓							○	○	○						
2019	坂田律	罹患	2009	口腔、食道、胃		○	○	○											
2019	歌田真依	罹患	2009	子宮															
2018	Alina V. Brenner	罹患	2009	乳房															
2017	Eric J. Grant	罹患	2009	固形がん	○														
2017	Elizabeth K. Cahoon	罹患	2009	肺、喉頭、その他 の呼吸器												○			
2014	杉山裕美	罹患	1996	皮膚														○	○
2013	古川恭治	罹患	2005	甲状腺															
2013	Wan-Ling Hsu	罹患	2001	白血病、リンパ 腫、多発性骨髄腫															

表3-2 放射線影響研究所の最新の原爆被爆者の疫学研究のがん部位(2/2)

出版年	筆頭著者	種類	調査期間	がん部位	breast*	femgenca	uterus	ovary*	prost	urinca	bladder*	kidney	renal	othurin	cnsca	thyroid*	othsol*	leukemia*	lymphoma*	myeloma*
2021	Audray E. Hu	罹患	2009	肺																
2021	藤原恵	罹患	1994	リンパ															○	
2021	Brandie Bockwoldt	生存率	2009	胃、小腸、直腸																
2021	Eric J. Grant	罹患	2009	腎臓、膀胱、その他の尿路							○	○	○	○						
2021	Dale L. Preston	罹患	2009	前立腺					○											
2021	歌田真依	罹患	2009	卵巣				○												
2020	杉山裕美	罹患	2009	大腸																
2019	定金敦子	罹患	2009	肝臓、胆道、膵臓																
2019	坂田律	罹患	2009	口腔、食道、胃																
2019	歌田真依	罹患	2009	子宮				○												
2018	Alina V. Brenner	罹患	2009	乳房	○															
2017	Eric J. Grant	罹患	2009	固形がん																
2017	Elizabeth K. Cahoon	罹患	2009	肺、喉頭、その他の呼吸器																
2014	杉山裕美	罹患	1996	皮膚																
2013	古川恭治	罹患	2005	甲状腺												○				
2013	Wan-Ling Hsu	罹患	2001	白血病、リンパ腫、多発性骨髄腫														○	○	○

(4) 原爆被爆者の疫学研究のリスクモデルの比較

調査したERR及びEARのリスクモデルは線量応答と修飾効果に分けて以下の式でモデル化されている。

$$\text{ERR or EAR} = \rho(d,s)\varepsilon(s,a,e,x) \quad (3-1)$$

ここで、 $\rho(d,s)$ ：線量応答関数、 $\varepsilon(s,a,e,x)$ ：修飾効果関数、 d ：線量(Gy)、 s ：性別、 a ：到達年齢、 e ：被ばく時年齢、 x ：都市（広島、長崎）である。

(a) 線量応答

調査期間が2009年までの疫学調査(Grant et al., 2017)では、罹患率に対して4種類の線量応答関数（線形、線形二次、線形しきい値、ノンパラメトリック）の適合を議論している。最新の全固形がんの罹患率では、男性のERRの線量応答は線形二次モデルが線形モデルよりも適合が良いと報告されている。さらにBrennerでは、原爆被爆者の全固形がんの死亡・罹患率に対する線量応答が分析されている(Brenner et al., 2022)。この論文では、男性は全被ばく時年齢に対して、女性は被ばく時年齢が0-19歳において線形二次モデルの線量応答に適合するような、下に凸の湾曲があると報告している。

(b) 修飾効果

原爆被爆者の疫学研究で示された修飾効果関数の表記は論文によって異なっているが、それぞれモデル化されている変数はいずれの論文においても、性別、被ばく時年齢、到達年齢、都市（広島、長崎）である。ただし、最新の全固形がん罹患リスクのERRモデル(Grant et al., 2017)では、修飾効果関数の中に4 Gy以上被ばくした生存者の調整項が追加されているが、詳細は不明である。一方、LSS第13報 (Preston et al., 2003)をベースにしているBEIR VIIのリスクモデルの修飾効果関数は、被ばく時年齢が30歳以上の影響は一定であると仮定している。これは、30歳以上の年齢によるリスクの変化が小さいことをBEIR VIIで議論したうえで、BEIR VIIが独自のモデルとして開発したものである。しかし、最新の原爆被爆者の全固形がん罹患のERRについて、BEIR VIIのERRの被ばく時年齢モデルと対数線形被ばく時年齢モデルの2つのモデルをそれぞれ適用したところ、BEIR VIIの被ばく時年齢モデルよりも、対数線形被ばく時年齢モデルの方が適合性が高いことが報告されている(Grant et al., 2017)。

次に、疫学調査の期間やリスク評価の方法が異なる複数の原爆被爆者の全固形がんのリスク推定値を比較し、最新の原爆被爆者の疫学研究が過去の原爆被爆者の疫学研究とどの程度異なるかを調査した。

表 3-3に原爆被爆者の全固形がんの単位線量当たりのERR(ERR/Gy)の推定値と信頼区間を示す。信頼区間の範囲は論文によって90%又は95%と異なっていた。表 3-3よりERR/Gyの推定値はほぼ同じであり、信頼区間の範囲にも大きな違いは見られなかった(Grant et al., 2017, Preston et al., 2003, Preston et al., 2007, Ozasa et al., 2012)。なお、最新の固形がんの罹患率Grant(2017)では、喫煙調整の有無とその方法によって、ERR/Gyの値が0.47~0.56と変化することが示されている。この喫煙調整の有無とその方法によるERRの違いは、ベースラインと非被ばく者集団の違いによる。喫煙未調整の場合[a]は喫煙者を含んだ非被爆者全体がベースラインとなっており、喫煙調整をした場合[b][c]は、それぞれ非喫煙非被爆者の場合(相加モデル)、喫煙状況が等しい非被爆者の場合(相乗モデル)をベースラインとしたERRを推定している。放射線と喫煙の相加及び相乗モデルを全固形がん罹患率データへ適応した場合のdeviationは相加モデルの方が良かったが、喫煙を考慮していない。これ以前の結果、及び、LSS以外の放射線被ばく集団の研究結果との比較を考慮し、詳細な解析においては相乗モデルが使われている。

表 3-3 原爆被爆者の全固形がんの単位線量当たりのERRの推定値と信頼区間

参考文献	死亡 ／ 罹患	調査期間	ERR/Gy	CI	CIの種類
Preston (2003)	死亡	1950-1997	0.47	(0.37,0.57)	90%CI
Preston (2007)	罹患	1958-1998	0.47	(0.4,0.54)	90%CI
Ozasa (2012)	死亡	1950-2003	0.47	(0.38,0.56)	95%CI
Grant (2017)[a]	罹患	1958-2009	0.5	(0.42,0.59)	95%CI
Grant (2017)[b]	罹患	1958-2009	0.56	(0.46,0.66)	95%CI
Grant (2017)[c]	罹患	1958-2009	0.47	(0.39,0.55)	95%CI

[a]Unadjusted for smoking [b]Adjusted for smoking, additive joint effect [c]Adjusted for smoking, multiplicative joint effect

3.2. 海外の放射線被ばく疫学研究に関する報告書の調査

ここでは、放射線疫学研究の全体的な動向を把握するため、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR）、ICRP、米国のBEIR VII及びEPAの報告書を調査した結果を報告する。

3.2.1. UNSCEAR

UNSCEARは、科学的・中立的な立場から、放射線の人・環境等への影響等を調査・評価等を行い、毎年国連総会へ結果の概要を報告するとともに、数年ごとに詳細な報告書を出版している。UNSCEARの報告書の中で、放射線の疫学研究に関する最新の報告書は2019年に出版されたUNSCEAR 2019 Report Annex A “Evaluation of selected health effects and inference of risk due to radiation exposure”（以下、UNSCEAR2019）であった(UNSCEAR, 2019)。UNSCEAR2019の主な記載内容は、以前のUNSCEARの疫学関連の報告書(UNSCEAR, 2006, UNSCEAR, 2013, UNSCEAR, 2012)のまとめに加えて、2013年以降の疫学研究のレビューであった。UNSCEAR2019でレビューされた疫学研究のコホートの種類は、原爆被爆者、チェルノブイリ原発事故の作業員、原子力施設の放射線業務従事者、医療放射線従事者、高自然放射線地域等であった。UNSCEAR2019では各コホートに対して、対象人数、罹患・死亡数、フォローアップ年数、人年（対象人数×フォローアップ期間）、線量評価方法、線量応答（ERR/EAR/1 Gy or 100 mSv, 95%信頼区間）が整理されている。さらに、仮想的な被ばくシナリオに対する過剰リスクの推定値が示されている。

UNSCEAR2019においてレビューされたがんの種類は、固形がん、甲状腺がん、白血病（小児期）、白血病（成人期）であった。UNSCEAR2019では心疾患に関するレビューもされているが、がん以外は本年度の調査の対象外であるので本報告書への記載を外した。以下、UNSCEAR2019で示された原爆被爆者とそれ以外の疫学研究との比較から得られた知見をまとめる。

固形がんでは、原爆被爆者の疫学研究のみがリスクモデルの修飾効果に被ばく時年齢と到達年齢が考慮されていた。この理由として、原爆被爆者以外の疫学研究はまだフォローアップ期間が短いことが挙げられている。単位線量当たりのERRの比較では、原爆被爆者のERRは他の疫学研究のERRの不確かさの範囲内に概ね含まれていた。唯一、MayakのERRは原爆被爆者よりも低い値であったが、これはMayakではプルトニウムによる内部被ばくが想定される肺、肝臓、骨がんを除いたがんのERRと比較したことが原因と考えられている。

甲状腺がんでは、原爆被爆者に対してFurukawa(Furukawa et al., 2013)とJacob(Jacob et al., 2006)の2種類のERRモデルが開発されていた。Furukawaらは10 mm以下の腫瘍を除外して分析している一方、Jacobは報告されたすべての甲状腺がんを含めて分析していた。これらのERRのモデル式は若干異なるが、線量応答の値に大きな違いは見られなかった。さらにウクライナ・アメリカの疫学研究における甲状腺がんリスクと原爆被爆者の甲状腺がんリ

スクが比較された。ウクライナーアメリカの疫学研究で得られたERRモデルの修飾効果には被ばく時年齢がモデル化されていたが、到達年齢はモデル化されていなかった。また、甲状腺がんの生涯リスク推定値において、被ばく時年齢10歳及び30歳時点の推定値は、原爆被爆者とウクライナーアメリカでは大きな違いは見られなかった。ただし、甲状腺がんのERR推定値の被ばく時年齢（10歳）のERR推定値は原爆被爆者の疫学研究とウクライナーアメリカの疫学研究でウクライナーアメリカの疫学研究の方が3倍程大きかった。

白血病（小児期）では、原爆被爆者とUK-CTスキャンのERRモデルが比較されている。UK-CTスキャンのERRは線量応答のみがモデル化されており、被ばく時年齢等の修飾効果はモデル化されていなかった。白血病のリスク推定値は、被ばく時年齢1歳で30歳までのフォローアップでは、UK-CTスキャンと原爆被爆者は10%未満の差で非常に良好な一致を示した。ただし、UK-CTスキャンのERRは被ばく時年齢によらず一定である一方、原爆被爆者のERRは被ばく時年齢が上がるほど急激に減少する。そのため、小児白血病のリスク評価では被ばく時年齢を詳細に設定する際には、原爆被爆者とUK-CTスキャンのリスクモデルではリスク推定値の結果が大きく異なると言える。

白血病（成人期）では、原爆被爆者とINWORKSのERRモデルが比較されている。INWORKSのERRは線量応答のみがモデル化されている一方、原爆被爆者のERRでは線量応答は線形二次モデル、修飾効果は到達年齢がモデル化されている。原爆被爆者とINWORKSのリスク推定値は、60歳までのフォローアップでは良好な一致を見せたが、90歳までフォローアップ期間を延ばすと一致は良くなかった。これより、UNSCEAR2019は、INWORKSのERRモデルを高年齢へ適応するには課題があると述べている。また、成人期の被ばく期間が30歳～45歳までの生涯リスク評価に関して、急性被ばくの前爆被爆者よりも慢性被ばくのINWORKSの方が男性労働者の白血病死亡リスクを評価するためには適切な情報を提供すると述べている。

3.2.2. ICRP

ここでは、ICRPのPublicationのうち、がんリスクに関する報告書を調査した。

- Pub. 99：放射線関連のがんリスクの低線量外挿(ICRP, 2005)

この報告書は、高線量からの外挿において不確かさを考慮したDDREFを組み合わせることによって、LNT仮説は低線量率での放射線防護における基礎となると結論している。これより、放射線防護の目的で使用するのであれば、本リスク評価コードではLNT仮説を前提にリスク評価を実施することが適切と言える。また、本リスク評価コードの不確かさの扱いを検討する際には、Pub.99で提案された確率限界などを詳細に検討する必要があると言える。

- Pub.150：プルトニウムとウランの内部被ばくによるがんリスク(ICRP, 2021)

プルトニウム被ばくについて、ロシア連邦のMayakと英国のセラフィールドの原子力施設の労働者のコホートに対して肺がんリスクが評価されている。それらの肺がんのERRモ

デルの修飾効果として到達年齢がモデル化されている。また、原爆被爆者の肺がんリスクとの比較により単位吸収線量Gyあたりの α 粒子のリスクがガンマ線のリスクと比較して20倍程度であることを示した。これより、これらの疫学研究によって α 線の放射線荷重係数が20であることを裏付けた。一方、核燃料サイクルに従事する欧州および北米の労働者のコホートにおいて、ウラン被ばくに対する疫学研究が行われている。現在のところ、全てのがんについても、ウランの線量リスクモデルを信頼性高く導出することはできないと述べている。

3.2.3. BEIR VII

2.2.2.を参照

3.2.4. EPA

2.2.1.を参照

3.3.国内外の放射線被ばく疫学研究に関する調査

3.2節において、UNSCEAR2019よりリスクモデルの修飾効果として被ばく時年齢及び到達年齢、及び性差を考慮した唯一の疫学研究は原爆被爆者の疫学研究であることが分かった。本節では、UNSCEAR2019以降に発表された最新の疫学研究を調査した。

最新の疫学のコホート研究はPubMedの検索を用いて調査した。検索条件は以下のキーワードを設定し、放射線のがんリスクを調査した疫学研究を検索した。ここで、放射線治療の線量評価、紫外線によるがんの研究を除外するためのキーワードを設定した。論文の発表の期間はUNSCEAR2019発行の一年前の2018年以降とした。

- ・ PubMedの検索条件

(radiation) AND (cancer) AND (risk) AND (dose) AND (epidemiological) NOT(therapy)NOT(UV)

- ・ 検索結果

2023年1月時点で472件の論文が得られた。なお、キーワードを(radiation)から(radiological)に変更しても新たな論文は得られなかった。

PubMedで検索した472件の論文に対して、スクリーニングとして論文タイトルと抄録から放射線被ばくの疫学研究を選定した。スクリーニングでは、新たにERRの値が得られない論文を除いた。除かれた論文の内容は、線量評価が目的、CTスキャンによるがんの発見、直線しきい値無し (Linear Non-Threshold: LNT) モデルの妥当性の議論、疫学調査のレビュー論文である。このスクリーニングにより43件の論文を取得した。43件の論文のうち、原爆被爆者の疫学研究に関する論文が17件あった。この17件の論文には放射線影響研究所以外の研究論文も含まれる。本調査においてレビューした2018年以降の疫学研究を次の表に示す。ここではコホートの種類ごとに表を整理した。その結果、原爆被爆者は17件、原子力施設の従事者は14件、医療従事者は6件、医療被ばく患者は2件、その他は4件の疫学研究の論文が該当した。

表 3-4 原爆被爆者の2018年以降の疫学研究の論文(1/2)

疫学調査 期間	論文タイトル	がん部位	罹患・死亡	参考文献
1958-2009	A semiparametric approach to evaluate the harm of low-dose exposures.	All solid cancers	Incidence	(Furukawa and Misumi, 2018)
1958-2009	Effect of follow-up period on minimal-significant dose in the atomic-bomb survivor studies.	All solid cancers	Incidence	(Cologne et al., 2018)
1950-2003, 1958-2009	Population Density in Hiroshima and Nagasaki Before the Bombings in 1945: Its Measurement and Impact on Radiation Risk Estimates in the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors.	All solid cancers	Mortality	(French et al., 2018)
1958-2009	Assessing the Relative Biological Effectiveness of Neutrons across Organs of Varying Depth among the Atomic Bomb Survivors.	All solid cancers	Incidence	(Cordova and Cullings, 2019)
1958-2009	Effect of follow-up period on minimal-significant dose in the atomic-bomb survivor studies.	All solid cancers	Incidence	(Cologne et al., 2018)
1958-2009	The possible impact of passive smoke exposure on radiation-related risk estimates for lung cancer among women: the life span study of atomic bomb survivors	Lung	Incidence	(Hu et al., 2021)
1950-1994	Incidence of lymphoid neoplasms among atomic bomb survivors by histological subtype, 1950 to 1994	Lymphoid neoplasms	Incidence	(Fujihara et al., 2022)
1958-2009	Radiation Risk of Ovarian Cancer in Atomic Bomb Survivors: 1958-2009	Ovarian	Incidence	(Utada et al., 2021)
1958-1998	Radiation-Related Risk of Cancers of the Upper Digestive Tract among Japanese Atomic Bomb Survivors	Upper Digestive Tract	Incidence	(Sakata et al., 2019)

原爆被爆者の疫学調査：対象者数：111917人、女性率=59%

表3-4 原爆被爆者の2018年以降の疫学研究の論文(2/2)

疫学調査 期間	論文タイトル	がん部位	罹患・死亡	参考文献
1950-2012	Mortality among individuals exposed to atomic bomb radiation in utero: 1950-2012.	All solid cancers	Mortality	(Sugiyama et al., 2021)
1958-2009	Incidence of Breast Cancer in the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958-2009	Breast	Incidence	(Brenner et al., 2018)
1958-2009	Radiation risk of central nervous system tumors in the Life Span Study of atomic bomb survivors, 1958-2009	Central nervous system tumors	Incidence	(Brenner et al., 2020)
1958-2009	Radiation risk of incident colorectal cancer by anatomical site among atomic bomb survivors: 1958-2009	Colorectal	Incidence	(Sugiyama et al., 2020)
1958-2009	Radiation Risks for the Incidence of Kidney, Bladder and Other Urinary Tract Cancers: 1958-2009	Kidney, Bladder and Other Urinary Tract	Incidence	(Grant et al., 2021)
1958-2009	Radiation and Risk of Liver, Biliary Tract, and Pancreatic Cancers among Atomic Bomb Survivors in Hiroshima and Nagasaki: 1958-2009	Liver, Biliary Tract, and Pancreatic	Incidence	(Sadakane et al., 2019b)
1958-2009	Comparison of All Solid Cancer Mortality and Incidence Dose-Response in the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors, 1958-2009	All solid cancer	Incidence/ Mortality	(Brenner et al., 2022)
1958-2009	Risk of Prostate Cancer Incidence among Atomic Bomb Survivors: 1958-2009	Prostate	Incidence	(Mabuchi et al., 2021)

原爆被爆者の疫学調査：対象者数111917人 女性率＝59%

表 3-5 職業被ばく（原子力施設）の2018年以降の疫学研究の論文(1/2)

国	コホートの種類	調査期間	論文タイトル	がん部位	罹患・死亡	対象者数	女性率	線量	参考文献
UK	UK national registry for radiation workers	1960-2011	Cancer mortality and incidence following external occupational radiation exposure: an update of the 3rd analysis of the UK national registry for radiation workers.	All solid cancers	Mortality	167,003	10%	Mean 25.3 mSv	(Haylock et al., 2018)
UK	UK national registry for radiation workers	1955-2001	Cerebrovascular Disease Mortality after occupational Radiation Exposure among the UK National Registry for Radiation Workers Cohort.	Cerebrovascular Disease	Incidence	166,812	10%	0- 700mSv+	(Hinksman et al., 2022)
UK	UK, the Nuclear Industry Workers	1955-2011	Extended analysis of solid cancer incidence among the Nuclear Industry Workers in the UK: 1955-2011.	All solid cancers	Incidence	172,452	10%	Mean 77.7 mSv	(Hunter et al., 2022)
UK	UK. occupationally exposed workers	1955-2011	Risk of Leukemia Associated with Protracted Low-Dose Radiation Exposure: Updated Results from the National Registry for Radiation Workers Study.	Leukemia	Incidence	173,081	10%	Mean 25.5 mSv	(Gillies et al., 2019)
U.S.	Tennessee Eastman Corporation (TEC) uranium processing workers	1943-2019	Mortality among Tennessee Eastman Corporation (TEC) uranium processing workers, 1943-2019	Lung	Mortality	26,650	52%	32.7 mGy for women and 18.9 mGy for men	(Boice et al., 2022b)
U.S.	U.S. nuclear power plant workers	1957-2011	Mortality from leukemia, cancer and heart disease among U.S. nuclear power plant workers, 1957-2011.	Leukemia	Mortality	135,193	3%	Mean 37.9 mGy	(Boice et al., 2022d)
U.S.	U.S. Workers at the Los Alamos National Laboratory	1943-2017	Mortality among workers at the Los Alamos National Laboratory, 1943-2017	Lung	Mortality	26,328	25%	Mean 28.6 mGy	(Boice et al., 2022c)

表3-5 職業被ばく（原子力施設）の2018年以降の疫学研究の論文(2/2)

国	コホートの種類	調査期間	論文タイトル	がん部位	罹患・死亡	対象者数	女性率	線量	参考文献
U.S, Canada	Five occupational cohorts within the Million Person Study and a Canadian Fluoroscopy Cohort Study	*	Sex-specific lung cancer risk among radiation workers in the million-person study and patients TB-Fluoroscopy.	Lung	Incidence	445,684	11%	Mean 166.3 mGy range 6 to 1,055 mGy	(Boice et al., 2022e)
Russia	Russia, Mayak Workers	1948–1982	Risk of stomach cancer incidence in a cohort of Mayak PA workers occupationally exposed to ionizing radiation	Stomach	Incidence	22,377	25%	0.46±0.66Gy	(Zhuntova et al., 2020)
Russia	Russia, Mayak Workers	1948–1982	Lung Cancer in the Mayak Workers Cohort: Risk Estimation and Uncertainty Analysis.	Lung	Mortality	25,757	25%	Mean 419 mGy	(Stram et al., 2021)
Russia	Russia, Mayak Workers	1948–1982	Risk of skin cancer by histological type in a cohort of workers chronically exposed to ionizing radiation.	BCC	Incidence	22,377	25%	0.50 ± 0.73 Gy	(Azizova et al., 2021)
Japan	J-EPISODE	1991–2010	Reanalysis of cancer mortality using reconstructed organ-absorbed dose: J-EPISODE 1991–2010.	All solid cancers	Mortality	204,103	0%	Mean 11.0 mGy	(Furuta et al., 2022)
French	French, nuclear workers	1950-1994	Impact of considering non-occupational radiation exposure on the association between occupational dose and solid cancer among French nuclear workers	All solid cancers	Mortality	59,004	0%	9.2 mSv	(Fournier et al., 2018)
French	French, nuclear workers	1968-2014	Updated Mortality Analysis of SELTINE, the French Cohort of Nuclear Workers, 1968-2014	All cancers	Mortality	80,348	13.5%	23.1 mSv	(Laurent et al., 2022)

表 3-6 医療被ばく（医療従事者）の2018年以降の疫学研究の論文

国	コホートの種類	調査期間	論文タイトル	がん部位	罹患・死亡	対象者数	女性率	線量	参考文献
U.S.	U.S. medical radiation workers	1965-2016	Mortality among medical radiation workers in the United States, 1965-2016.	Leukemia	Mortality	109,019	49%	0-500mSv+	(Boice et al., 2021)
U.S.	U.S. radiologic technologists	1983-2012	Lung cancer mortality associated with protracted low-dose occupational radiation exposures and smoking behaviors in U.S. radiologic technologists, 1983-2012.	Lung	Mortality	104,978	76%	Mean 5 mGy range: 0-810 mGy	(Velazquez-Kronen et al., 2020)
U.S.	U.S. radiologic technologists	1983-2012	Occupational radiation and haematopoietic malignancy mortality in the retrospective cohort study of US radiologic technologists, 1983-2012.	Leukemia	Incidence	110,297	76%	mean 8.5 mGy, range 0-430 mGy	(Linet et al., 2020)
U.S.	U.S. radiologic technologists	1983-2013	Occupational radiation exposure and thyroid cancer incidence in a cohort of U.S. radiologic technologists, 1983-2013.	Thyroid	Incidence	89,897	73%	mean 57 mGy, range 0-1,600 mGy	(Kitahara et al., 2018)
South Korea	South Korea, diagnostic medical radiation workers	1996-2011	Occupational radiation exposure and cancer incidence in a cohort of diagnostic medical radiation workers in South Korea.	All solid cancers	Incidence	93,920	43%	Mean 7.20 mSv	(Lee et al., 2021)
South Korea	South Korea, medical radiation workers	1996-2015	Thyroid cancer risks among medical radiation workers in South Korea, 1996-2015.	Thyroid	Incidence	93,095	43%	9.9±32.3 mSv	(Lee et al., 2019)

表 3-7 医療被ばく（患者）の2018年以降の疫学研究の論文

国	コホートの種類	調査期間	論文タイトル	がん部位	罹患・死亡	対象者数	女性率	線量	参考文献
European countries	European EPI-CT study	1977- 2014	Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study	Brain cancer	Incidence	948,783	31%	Mean 47.4 mGy	(Hauptmann et al., 2023)
Netherlands	Netherlands, pediatric CT Scans	1979-2012	Radiation Exposure From Pediatric CT Scans and Subsequent Cancer Risk in the Netherlands.	Leukemia	Incidence	1,201,357	45%	Mean 9.5 mGy	(Meulepas et al., 2019)

表 3-8 その他の2018以降の疫学研究の論文

国	コホートの種類	調査期間	論文タイトル	がん部位	罹患・死亡	対象者数	女性率	線量	参考文献
Ukraine	Ukrainian, CHORNOBYL CLEAN-UP WORKERS	1986-2012	RADIATION RISKS OF THYROID CANCER IN CHORNOBYL CLEAN-UP WORKERS USING THE ALTERNATIVE ESTIMATES OF DOSES OF EXTERNAL EXPOSURE	Thyroid	Incidence	150,813	0%	in 1986 - 0.103 Gy, in 1987 - 0.073 Gy in 1988- 0.037 Gy	(Pryszazhnyuk et al., 2018)
Russia	Russian, Chernobyl emergency workers	1992-2017	Relationship between follow-up periods and the low-dose ranges with statistically significant radiation-induced risk of all solid cancers in the Russian cohort of Chernobyl emergency workers.	All solid cancers	Incidence	69,440	0%	132.9 mGy	(Ivanov et al., 2020)
U.S.	U.S. military participants at eight aboveground nuclear weapons test series	1945-2010	Mortality among U.S. military participants at eight aboveground nuclear weapons test series.	Leukemia	Mortality	114,270	0%	Mean 6 mGy (maximum 108 mGy)	(Boice et al., 2022a)
**	Pooled lymphoid neoplasm data in nine cohorts first exposed to external radiation aged <21 years	**	Lymphoma and multiple myeloma in cohorts of persons exposed to ionizing radiation at a young age	Lymphoma and multiple myeloma	Incidence	143,136	57%	Mean 0.14 Gy range 0-5.95 Gy	(Little et al., 2021)

3.4. 疫学研究に関する調査のまとめ

本章では、放射線リスク推定に関する国内外における主要な疫学研究について以下の3つの項目について調査した。

3.4.1. 原爆被爆者の疫学研究の調査

主な原爆被爆者の最新の疫学研究は、死亡率に関してはLSS第14報(Ozasa et al., 2012)として論文が公開され、罹患率に関しては全固形がんに対して2017年に論文が公開されており(Grant et al., 2017)、部位別がんに対しては、主に2017年以降に論文が公開されている。一方、原爆被爆者の疫学研究で国際機関の報告書に反映されている研究は、死亡率に関してはLSS第13報(Preston et al., 2003)がBEIR VIIのリスクモデルとして採用され、罹患率に関しては調査期間が1998年までの研究(Preston et al., 2007)がICRP Pub.103に採用されている。調査した既存のリスクコードのリスクモデルは、主にBEIR VIIとICRP Pub.103を参考にしていることから、原爆被爆者の最新の疫学研究を反映したリスクコードはほとんどないと言える。

原爆被爆者の最新の疫学研究が既存のリスクコードが評価してきたがん部位をどの程度網羅しているかを調査した結果、原爆被爆者の最新の疫学研究は主ながん部位は評価済みであることが分かった。

原爆被爆者のこれまでの疫学研究で示されたリスクモデルの線量応答をそれぞれ比較した結果、男性は全被ばく時年齢に対して、女性は被ばく時年齢が0~19歳において線形二次モデルの当てはまりが良いことが示された(Grant et al., 2017, Brenner et al., 2022)。さらに、原爆被爆者のこれまでの疫学調査のリスクモデルの修飾効果をそれぞれ比較した結果、それぞれの論文において性別、被ばく時年齢、到達年齢、都市（広島、長崎）がモデル化されていた。また、LSS第13報をベースにしているBEIR VIIのリスクモデルの修飾効果関数は、被ばく時年齢が30歳以上の影響は一定であると仮定していた。

疫学調査の期間やリスク評価の方法が異なる複数の原爆被爆者の全固形がんのリスク推定値を比較し、原爆被爆者の最新の疫学研究がこれまでの疫学研究とどの程度異なるかを調査した結果、調査した論文で示されたERR/Gyの推定値とその信頼区間に大きな違いは見られなかった一方、喫煙調整の有無とその評価方法によって、ERR/Gyの値が変化することが示された。

3.4.2. 国際機関の放射線被ばく疫学研究に関する報告書の調査

UNSCEARの報告書の中で、放射線の疫学研究に関する最新の報告書は2019年に出版されたUNSCEAR 2019 Report Annex Aであった。UNSCEAR 2019によれば、原爆被爆者のみが固形がんのリスクモデルの修飾効果に被ばく時年齢、到達年齢及び性差が考慮されていた。また、単位線量当たりのERRの比較では、原爆被爆者は他の疫学研究のERRの不確かさの

範囲内に概ね入っていた。甲状腺がんでは、原爆被爆者に対してFurukawaとJacobの2種類のERRモデルが開発されているが、線量応答の値に大きな違いは見られなかった。白血病（小児期）では、原爆被爆者とUK-CTスキャンのERRモデルが比較されており、10%未満の差で非常に良好な一致を示したが、UK-CTスキャンのERRは被ばく時年齢によらず一定である一方、原爆被爆者のERRは被ばく時年齢が上がるほど急激に減少するため、被ばく時年齢を詳細に設定する際には結果が大きく異なることが分かった。白血病（成人期）では、原爆被爆者とINWORKSのERRモデルが比較されている。原爆被爆者とINWORKSのリスク推定値は、60歳までのフォローアップでは良好な一致を見せたが、90歳までフォローアップ期間を延ばすと一致は良くなかった。これより、UNSCEARはINWORKSのERRモデルを高年齢へ適応するには課題があると報告している。

3.4.3. 国内外の放射線被ばく疫学研究に関する調査

次に、UNSCEAR2019以降に発表された最新の疫学研究を調査した。

PubMedで検索した472件の論文に対して、ERRの値が新たに取得可能な43件の論文を取得した。論文をコホートの種類ごとに分類した結果、原爆被爆者は17件、原子力施設の従事者は14件、医療従事者は6件、医療被ばく患者は2件、その他は4件の疫学研究の論文が該当した。4.2章においてそれぞれの論文で示された線量応答と原爆被爆者の疫学研究の線量応答とを比較し、これらの研究成果を本リスク評価コードに採用する際の課題を抽出する。

4. 現状の分析・評価及び課題の抽出

第4章では、上記2章及び3章の調査結果を踏まえ、既存コード及び疫学研究に関する現状を分析・評価し、次年度以降のコード開発の概念設計に向けて検討すべき課題を抽出する。

4.1. 既存コードに関する現状分析・評価

4.1.1. 既存コードの活用先の整理

既存コードの活用先について文献調査とヒアリング調査を行い、その活用先を被ばく状況と対象により分類した（表 4-1）。RadRATは職業被ばく、公衆被ばく、及び医療被ばくに活用され、汎用的に使われていることが分かる。一方でその他のコードはある特定の対象のみに使われているケースが多かった。

RadRATを活用した論文の概要を表 4-2にまとめる。前述の通り、RadRATは様々な対象に使われており、また開発国の米国以外ではタイ、イギリス、カナダ等でも使われている。特にBurt (Burt et al., 2020)の論文では、RadRATを用いてカナダの原子力発電所での仮想的な過酷事故による住民の甲状腺がんリスクを推定しており、筆頭著者にコード活用についてヒアリングしたところ、以下のコメントを受けた（詳細は6.2節）。

- ・ カナダの原子力緊急時対応の基準には線量を利用しており、がんリスクは利用していない。
- ・ 本研究の実施理由は、防護措置を利用した場合の線量がカナダの包括的判断基準¹²を下回っているかを確認すること。
- ・ カナダ原子力安全委員会は、論文中で求めた値を基に、ステークホルダーとの協議やその他の対話において、カナダ規格協会¹³に対して専門的な助言を行う予定。

¹² 防護措置を実施する基準値。カナダの安定ヨウ素剤投与の基準値はIAEAと同値（7日間で甲状腺等価線量 50 mSv）である。

¹³ カナダ規格協会（CSA）は、カナダにおける原子力発電産業のための基準を策定し、原子力発電産業を支援している。CSAの基準の多くは、国の規制の枠組みに組み込まれ、カナダ全土の原子力施設の規制文書、ライセンス等で参照されている。<https://www.csagroup.org/standards/areas-of-focus/nuclear/>

表 4-1 各コードの活用先の分類

	職業被ばく	公衆被ばく	医療被ばく
計画被ばく状況	RadRAT ^(1,2) JAXA ⁽³⁾ ProZES ⁽⁴⁾ IREP ⁽⁵⁾	RadRAT ⁽⁶⁾ HEINPUT ⁽⁷⁾	RadRAT ^(9,10,11) Blue Book Model ⁽¹²⁾ X-ray RISK ⁽¹³⁾ IREP ⁽¹⁴⁾
緊急時被ばく状況	現時点では該当なし	現時点では該当なし	—
現存被ばく状況	現時点では該当なし	IREP ⁽⁸⁾	—

⁽¹⁾ (Adliene et al., 2020), ⁽²⁾ (Lee et al., 2018), ⁽³⁾ “ISS搭乗宇宙飛行士放射線被ばく管理規定の制定”より,
⁽⁴⁾ 開発者へのヒアリング (詳細は6.2節), ⁽⁵⁾ (吉永 信治, 2021), ⁽⁶⁾ (Burt et al., 2020), ⁽⁷⁾ (Takahara, 2015),
⁽⁸⁾ (Land et al., 2010), ⁽⁹⁾ (Paddick et al., 2021), ⁽¹⁰⁾ (Chaosuwannakit et al., 2022), ⁽¹¹⁾ (Journey et al., 2017)
⁽¹²⁾ (Andersson et al., 2017), ⁽¹³⁾ X-ray RISK公式サイトに多数の活用論文掲載, ⁽¹⁴⁾ (Journey et al., 2014)

表 4-2 RadRATを活用した論文のまとめ

タイトル (和訳)	活用	文献
医療従事者の職業性放射線被ばくと リトアニア核医学従事者のがんリスク 評価	医療従事者の甲状腺がん生涯 寄与リスクの推定	(Adliene et al., 2020)
韓国における医療放射線診断従事者 の職業性放射線被ばくによる生涯発 癌リスクの予測	医療従事者のがん生涯寄与リ スクを推定	(Lee et al., 2018)
頭蓋内定位放射線手術後の頭蓋外線 量と放射線誘発性悪性腫瘍のリス ク：治療参考レベルを設定する時期 にきているか？	患者の放射線誘発がんの生涯 リスクを推定し、治療参考レ ベル (TRL) の概念を提案	(Paddick et al., 2021)
タイ東北部で大動脈のCT撮影を受け たマルファン症候群患者における累 積放射線量と生涯発癌リスクの決 定。5年間のレトロスペクティブ・コ ホート研究	マルファン症候群 (MFS) の 患者に対してCT撮影血管造 影 (CTA) モニタリングによる 放射線がんリスクを推定	(Chaosuwannakit et al., 2022)
英国における小児用CTの過去・現 在・将来の実施に潜在的に関連する がんリスクの予測	20歳未満の小児患者のCT検 査によるがんリスクを予測	(Journey et al., 2017)
カナダにおける仮想的な過酷原子力 事故後の放射線被ばくによる一般公 衆の甲状腺がんリスクに関する予測	ダーリントン原子力発電所で 発生する仮想的な過酷事故に よる住民の甲状腺がんリス クを推定	(Burt et al., 2020)

4.1.2. 既存コードの入力の整理

(1) ユーザー入力値

コードのユーザーが入力する情報として、線量、部位、被ばく回数、被ばく状況（慢性被ばくまたは急性被ばく）被ばく年、誕生年、性別がある。ProZESでは、肺がんを対象とした時に喫煙歴を入力する。X-Ray RISKは他のコードとは異なり、部位を選択せずに検査の種類（CT等）を入力するようになっている。レベル3PRAコード関連の健康リスクコード（OSCAAR等）では、レベル3PRAコードの出力（個人線量、被ばく人数、集団線量、発電所からの距離）を入力するようになっている。

(2) ベースライン死亡率・がん罹患率に関するデータセット

コードに備わっていてユーザーが変更できないデータセットとして、人口統計、生命表、がん死亡率、がん罹患率が挙げられる。また、X-Ray RISKには医療診断に必要な情報が組み込まれている。

これらのデータセットは国ごとに異なるため、コードを利用する国ごとに整備する必要がある。例えば、Korean Specific ModelはBEIR VIIのリスクモデルを参照しているが、人口統計などのデータセットは韓国に対応したものとなっている。また、RadRATでは開発国である米国のデータのみならず、フランス、スペイン、英国、日本、韓国、ブラジルのデータをユーザーが選択できるようになっている（ただし、どのようなデータセットであるかはユーザーからアクセスできない）。

4.1.3. 既存コードのリスクモデルの整理

(1) リスクモデル

各コードがリスクモデルを作成するにあたり利用したデータはLSS第13報がほとんどである。一部、ICRP Pub.103や古いLSSが利用されているコードもある。生涯寄与リスクを出力するコードのほとんどはBEIR VIIを参照し、一部修正が行われている。コード間でリスクモデルが異なる部位は、甲状腺、乳房、及び白血病である。

原因確率を出力するコードは上記とは異なり、ProZESは独自に開発されたモデルを用い、IREPはNCIとNIOSHのモデルを参照しており、それぞれBEIR VIIを参照していなかった。

(2) 評価がん

評価がんに関して、生涯寄与リスクを出力するコードは、MACCS内の健康リスク評価モデル、X-Ray RISK、及びJAXAのコードのように部位ごとに評価せずに全てのがんとして評価結果を示すものと、部位ごとのがんを評価するものがある。部位ごとに評価するコードでは、BEIR VIIで評価している部位（胃、結腸、肝臓、肺、乳房、子宮、卵巣、前立腺、膀胱、甲状腺、白血病）は少なくとも評価されていた。それらの部位に加えて、一部のコードでは口腔、胆嚢、皮膚、腎臓、脳・中枢神経系が評価されており、コードによっ

て評価されている部位は異なる。

原因確率を出力するコードは、上記と評価する部位が大きく異なる。また、部位ごとではなく、口腔、食道、胆嚢などを”消化管”としてまとめて評価するコードも存在する。

4.1.4. 既存コードの出力の整理

(1) 出力項目

出力項目は大きく2つに分けられ、一つが生涯寄与リスク（RadRAT他）であり、もう一つが原因確率（ProZESとIREP）である。

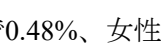
(2) 予測精度

各コードの報告書等の調査結果から、他のコードと出力値を比較した例は少なく、比較した場合でもほとんどがBEIR VIIとの比較であった(Berrington de Gonzalez et al., 2012, EPA, 2011)。そこで本事業では、採用するモデル式と計算方法が文献より取得可能なRadRAT、Blue Book Model、Korean Specific Model、及びBEIR VIIの4つのモデルの出力値をそれぞれ比較した。なお、コード間の計算方法の違いによる出力値の差異を検討する際、同じデータベース（生命表とがん罹患率）を使用することが必須である。そこで、ここでは全てのコードに対して、文献で得られたモデル式と計算方法を基にJAEAが独自に作成したプログラムを用いて出力したLAR(Lifetime Attributable Risk: 生涯寄与リスク)を比較することとした。

1) モデルの再現性

まず初めに、文献より取得したモデル式と計算方法を用いて、文献値を再現できるかを確認した。ここではLARの値が比較可能なBlue Book Modelを独自にプログラミングして出力したLARとEPAの報告書(EPA, 1994, EPA, 2011)とを比較した。EPA報告書のTable3-23では、LARとして1万人に対する部位ごとの生涯がん罹患数が表記されている。ここでは、全固形がんのリスクを比較するために、骨、白血病、皮膚がんを除いた臓器のがんリスクの合計値を全固形がんのLARとした。

モデルへの入力値として、生命表とがん罹患率は米国におけるがん登録（Surveillance, Epidemiology, and End Results: SEER）プログラムをもとに、SEER 13と18にまとめられている1998~2002年の平均値を用いた。被ばく線量の条件は全身への急性被ばく1 Gyとし、がん到達年齢は120歳とし、DDREFは1.5とした。最小潜伏期間は5年に設定した。

文献を基に再現した被ばく時年齢0~120歳までのLARの平均値（再現値）とEPA報告書（Table3-23）の値との比較を表 4-3に示す。表 4-3に示すように、再現値とEPA2011報告書の値の差は、男性で0.48%、女性で0.78%であった。また、 4-1 4-2に被ばく時年齢ごとのLARの平均値を示す。被ばく時年齢毎のLARにおいても再現値はEPA2011報告書の値を良く再現している。これより、Blue Book Modelを独自にプログラミングして出力したLAR

の値はEPA報告書を概ね再現できることが分かる。どのデータベースを使用しているかが不明なRadRATとKorean Specific Modelの再現値の妥当性検証は今後の課題とする。

表 4-3 Blue Book Modelの再現値とEPA2011 (Table 3-23) の値との比較

	EPA 2011 ¹	再現値 ¹	再現値とEPA 2011との 相対誤差 ² (%)
男性	861	865	0.48
女性	1279	1289	0.78

1. それぞれ10,000人に対する全固形がんのがん罹患数を表す。

2. (相対誤差%) = $\frac{(\text{再現コードのがん罹患数}) - (\text{EPA 2011のがん罹患数})}{(\text{EPA 2011のがん罹患数})} \times 100$ とする。

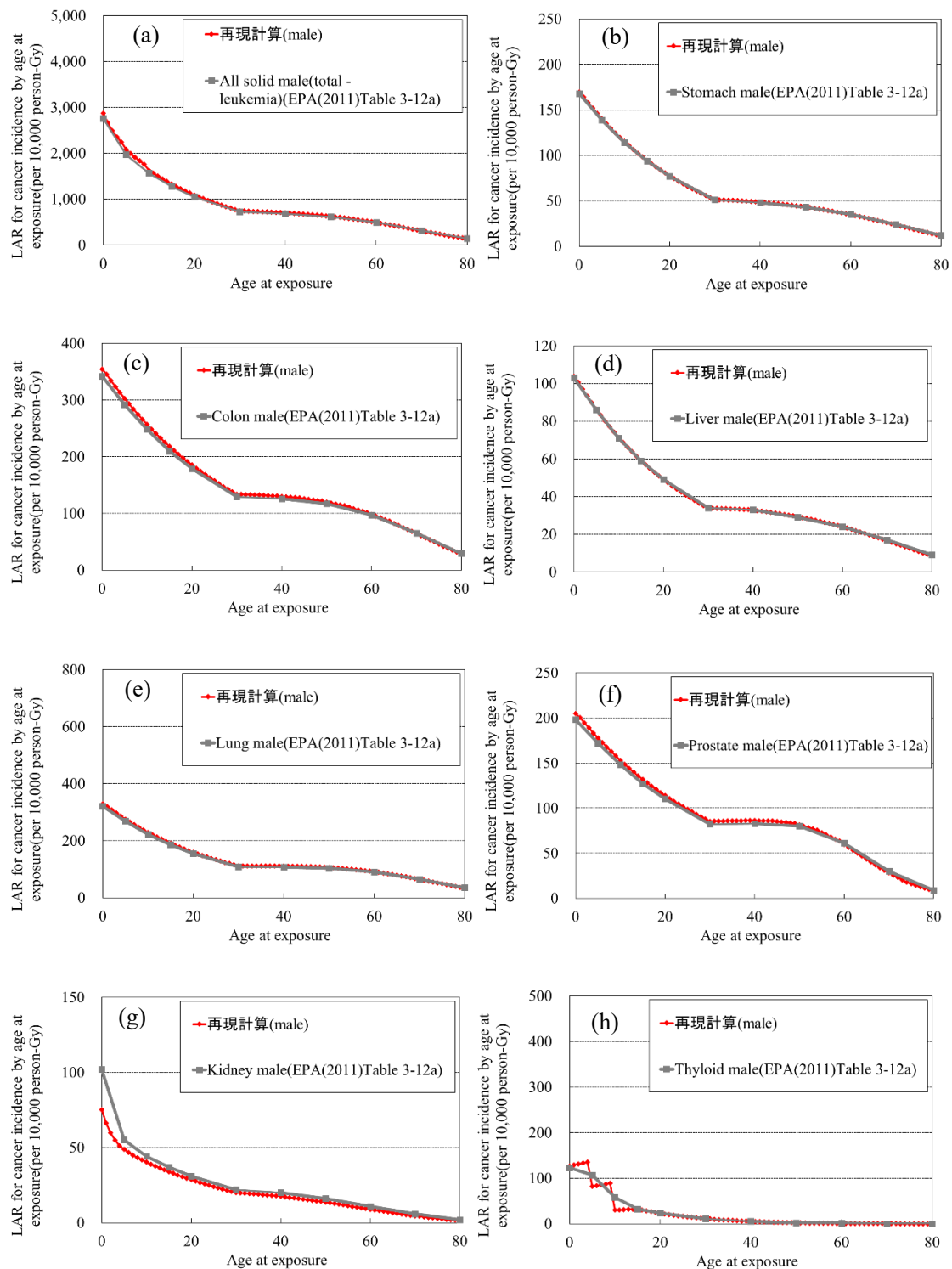


図 4-1 Blue Book Modelの再現値とEPA2011との比較 (男性)

(a)全固形がん(b)胃がん(c)結腸がん(d)肝臓がん(e)肺がん(f)前立腺がん(g)腎臓がん(h)甲状腺がん

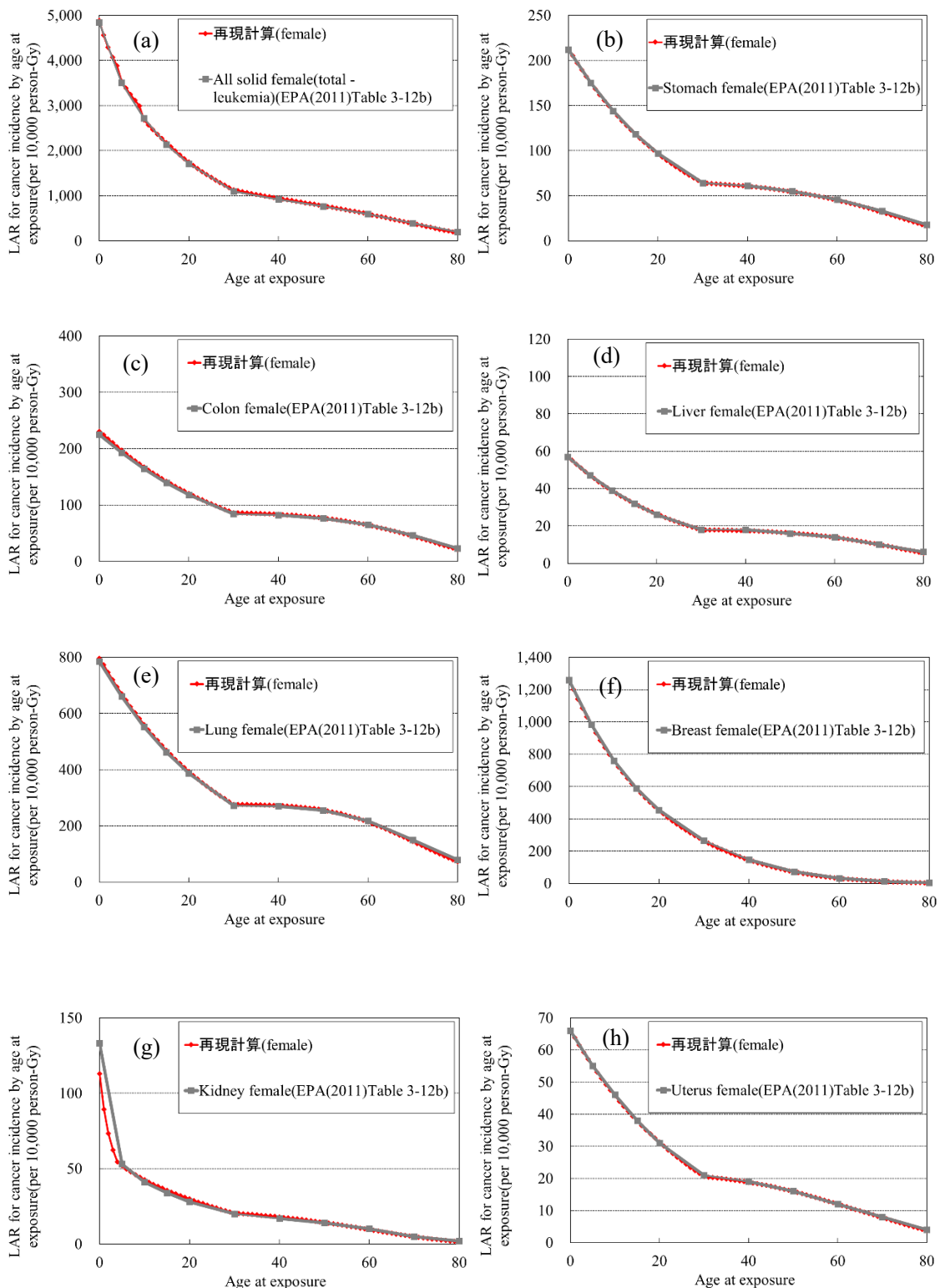


図 4-2 Blue Book Modelの再現値とEPA2011との比較 (女性) (1/2)

(a)全固形がん(b)胃がん(c)結腸がん(d)肝臓がん(e)肺がん(f)乳がん(g)腎臓がん(h)子宮がん(i)卵巣がん(j)甲状腺がん

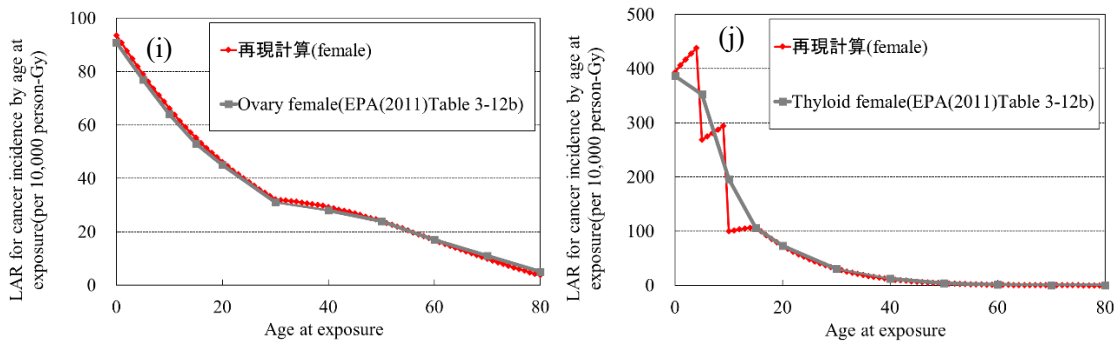


図 4-2 Blue Book Modelの再現値とEPA2011との比較（女性）（2/2）

(a)全固形がん(b)胃がん(c)結腸がん(d)肝臓がん(e)肺がん(f)乳がん(g)腎臓がん(h)子宮がん(i)卵巣がん(j)甲状腺がん

2) コード間比較の入力条件

コード間の出力を比較するため、RadRAT、Blue Book Model、Korean Specific Model、及びBEIR VIIに対して次の入力条件を設定した（表 4-4）。表 4-4に示した入力値のうち、最小潜伏期間以外の入力条件は、コード間で共通である。ベースラインリスクは日本人のがん罹患率とし、国立がんセンターのがん情報サービスの全国推計値がん罹患データ（1975年～2015年）における2015年のデータを用いた。生命表は、がん罹患率データの年次と合わせるために2015年を用いた。ここで、生命表、がん罹患率データの5年刻みの年齢区分を1歳刻みにするために、線形補間をした。被ばく条件は全身への急性被ばく100 mGyとした。最小潜伏期間は、RadRATでは固形がんS字関数（4~11年）、他のコードでは5年と設定した。

表 4-4 コード間比較の入力条件

項目	入力内容
対象集団	日本人
生命表	簡易生命表 2015年
がん罹患率	全国年齢階級別推定罹患率、2015年
ベースラインデータの補間方法	線形補間
被ばく線量	100 mGy
被ばく状況	急性
最長評価年齢	120歳
最小潜伏期間	RadRAT: S字関数、他コード：5年

3) コード間比較の結果

各コードで出力した全固形がんLARを表 4-5に示す。ここで、LARは10万人当たりのがん罹患患者数とし、被ばく年齢が0歳から120歳までの平均値である。被ばく時年齢ごとのLARの比較を図 4-3と図 4-4に示す。表 4-5より、BEIR VIIとの相対誤差は男性では3.76~18.73%、女性では-6.71~12.56%であり、男性よりも女性の方がコード間の違いが大きくなった。及びのBEIR VIIとの相対誤差は先行研究で比較された値の範囲内であった（表 2-16に記載。RadRATはBEIR VIIと15%以内で一致、Blue Book ModelはBEIR VIIと30%以内で一致）。

図 4-3と図 4-4より、被ばく時年齢ごとのLARは概ね一致していることが分かる。ただし、Korean Specific Modelに関しては、女性について被ばく時年齢15歳前後から、他のモデルよりもLARの値は高くなり、被ばく時年齢40歳では、他のコードと比較して約1.5倍大きかった。

表 4-5 LARのコード間比較（全固形がん、平均値）

Model		男性	女性
BEIR VII	LARの平均値 ¹	680.88	1060.19
RadRAT	LARの平均値	726.77	989.09
	BEIR VIIとの相対誤差 (%)	6.74	-6.71
Blue Book Model	LARの平均値	706.48	1003.42
	BEIR VIIとの相対誤差 (%)	3.76	-5.36
Korean Specific Model	LARの平均値	808.42	1193.31
	BEIR VIIとの相対誤差 (%)	18.73	12.56

1. 0歳から120歳までの平均値とする。

2. (相対誤差%) = $\frac{(\text{各再現コードのがん罹患数}) - (\text{BEIR VIIのがん罹患数})}{(\text{BEIR VIIのがん罹患数})} \times 100$ とする。

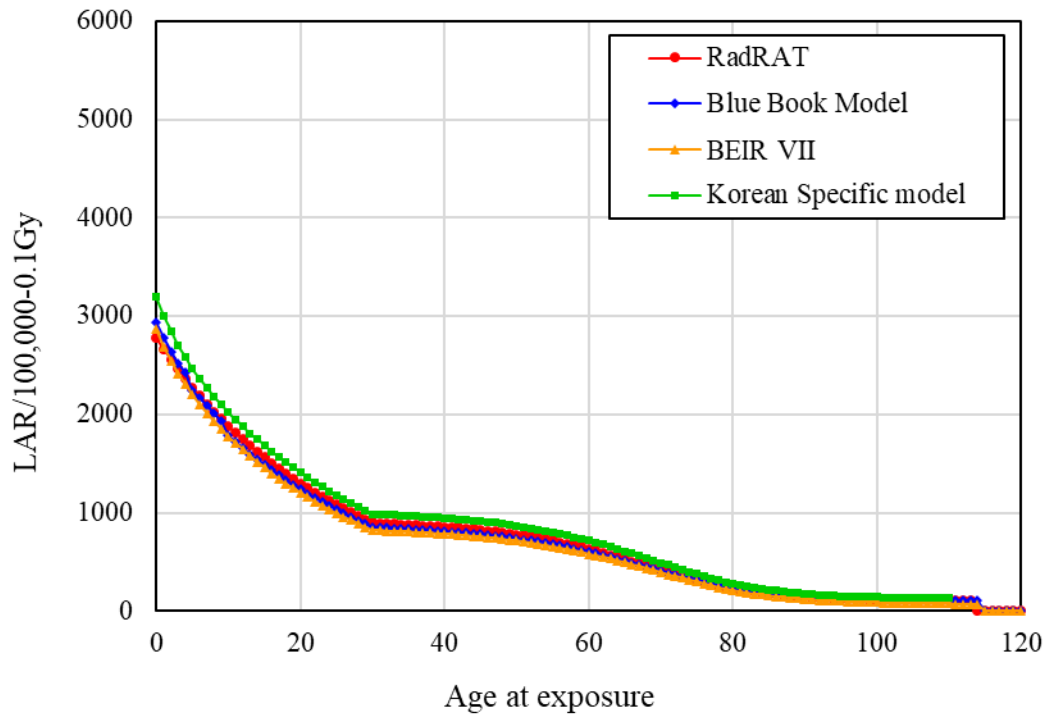


図 4-3 被ばく時年齢ごとのLARのコード間比較（全固形がん、罹患、男性）

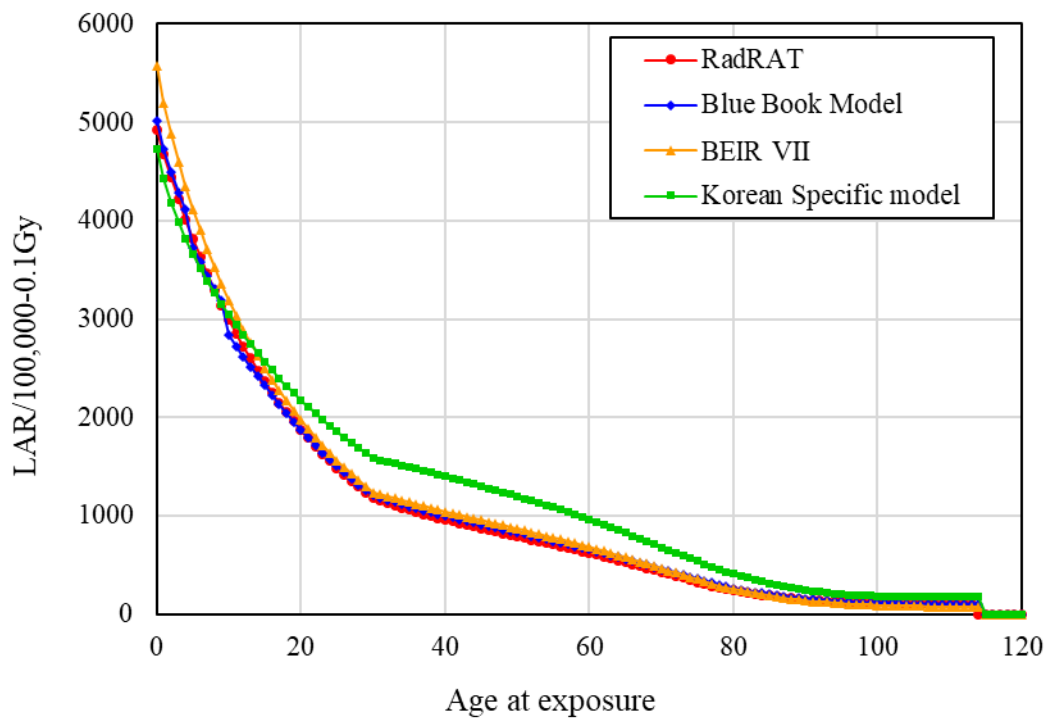


図 4-4 被ばく時年齢ごとのLARのコード間比較（全固形がん、罹患、女性）

4) コード間比較の考察

ここでは、女性のがん罹患LARにおいてKoren Specific Modelが他のコードよりも高くなった理由を考察する。男性の結果はほぼ一致していることから、女性特有のがんとして乳がんのリスク推定の出力を調査した。図 4-5に乳がんに対する被ばく時年齢ごとのLARを示す。入力条件は2)と同様である。図 4-5より、Koren Specific Modelの乳がんが約15歳から他のコードの出力よりも高くなることがわかる。全固形がんの出力差においても、Korean Specific Modelが約15歳から他のコードの出力よりも高くなった結果と一致し、全固形がんの出力差には乳がんの出力差が関与していると言える。

乳がんのリスク評価手法において、BEIR VII、RadRAT、Blue Book Model、及びKoren Specific Modelの大きな違いは、リスク転換におけるERRとEARの重み付けである。BEIR VII、RadRAT、及びBlue Book Modelの乳がんのリスク評価にはEARのみを使用している。一方、Koren Specific ModelはERRとEARの重みづけを0.5ずつに設定している。このリスク転換の違いにより、Koren Specific Modelの女性に対するがん罹患LARが他のコードよりも高くなったと考えられる。ただし、ERRおよびEARの重みづけの値がLARに与える影響を定量的に評価するためにはさらなる検討が必要である。

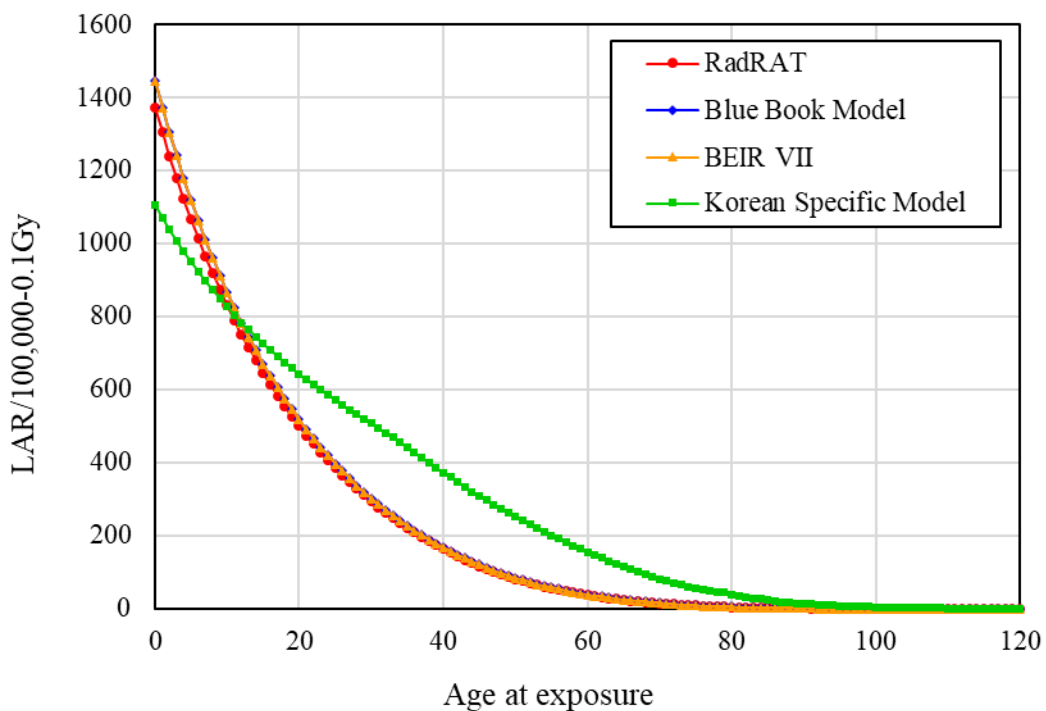


図 4-5 被ばく時年齢ごとのLARのコード間比較 (乳がん、罹患、女性)

(3) 不確かさの扱い

各コードで取り扱われている不確かさを表 4-6にまとめる。点推定値のみを出力するコード（HEINPUT、X-Ray RISK、JAXAのコード）の場合には、不確かさの評価を行っていない。一方、他のコードは95%信頼区間または確率分布で出力しており、表 4-6に示した発生源が考慮されている。モンテカルロ法に基づき、各パラメータに確率分布を設定し、サンプリングを行って不確かさの評価が行われている。

表 4-6 各コードで扱われている不確かさ*

	Korean	RadRAT	Blue Book	ProZES	IREP
EARとERRのフィッティングパラメータ	○	○	○	○	○
DDREF、DREF	○	○	○	○	○
リスク転換	○	○	○	○	○
最小潜伏期間	×	○	×	○	○
がんの検出と診断の誤り	○	×	○	×	×
原爆被爆者集団の選択バイアス	○	×	○	×	×
被ばく線量	×	○	×	○	○
疫学調査の不完全な追跡期間	○	×	○	×	×
線量計測の誤り	×	×	○	×	×
マルチモデル推論	×	×	×	○	×

*HEINPUT、X-Ray RISK、JAXAのコードは不確かさの評価を行っていない。MACCS内の健康リスクコードはレベル3PRA特有の不確かさの評価である。

4.1.5. 既存コードのソフトウェアの整理

今回対象としたコードでは、オンライン上で動作するもの（RadRAT、X-Ray RISK、IREP）、デスクトップ上で動作するもの（HEINPUT、MACCS内の健康リスクコード、ProZES）、非公開のためソフトウェアは不明（Korean Specific Model、Blue Book Model、JAXAのコード）の3種類であった。なお、デスクトップ上で動作するものは、開発機関等に認可を得る必要がなくURL等でダウンロード可能なもの（ProZES）と、開発機関等に対して必要な手続きしてダウンロードできるもの（MACCS内の健康リスクコード）があった。HEINPUT-GUI ver2.0 は公開を検討中である。

4.2.疫学研究に関する現状分析・評価

まず、原爆被爆者の最新の疫学研究を調査して得られた知見より、本リスク評価コードを開発するにあたって、以下の課題が挙げられる。

- ・ ERR,EARのパラメータの平均値と信頼区間の幅だけでなく分布も取得するには、原爆被爆者の疫学調査の数値データが必要になることから、放射線影響研究所の情報公開の状況には注視する必要がある。
- ・ 原爆被爆者の最新の疫学研究では評価されていないがん部位を本リスク評価コードで評価するかどうかを検討する必要がある。
- ・ 本リスク評価コードに採用する線量応答関数は、線形モデルだけでなく線形二次モデルの採用も検討する必要がある。
- ・ 本リスク評価コードに採用する修飾効果関数において、被ばく時年齢の影響を詳細に検討する必要がある。

次に、UNSCEAR2019から得られた知見として、原爆被爆者以外の疫学研究は被ばく時年齢等の修飾効果がモデル化されていないことが挙げられる。これより、本リスク評価コードは原爆被爆者の疫学研究を基軸にリスクモデルを構築するのが最良と考えられる。

さらに、UNSCEAR2019以降の原爆被爆者以外の疫学研究で修飾効果がモデル化されている論文が無いか確認するため、UNSCEAR2019以降の疫学研究をレビューした。これらの最新の疫学研究の論文に対して、修飾効果のモデル化について整理し、線量応答について原爆被爆者の疫学調査の論文と比較・整理した。

4.2.1. 修飾効果の整理

原爆被爆者の疫学研究以外のUNSCEAR2019以降の疫学研究のうち、以下の3件の論文において修飾効果が考慮されていた。

1. MEULEPAS, J. M., 2019. Radiation Exposure From Pediatric CT Scans and Subsequent Cancer Risk in the Netherlands. J Natl Cancer Inst, 111, 256-263.(Meulepas et al., 2019)
2. LINET, M. S2020. Occupational radiation and haematopoietic malignancy mortality in the retrospective cohort study of US radiologic technologists, 1983-2012. Occup Environ Med, 77, 822-831.(Linnet et al., 2020)
3. STRAM, D. 2021. Lung Cancer in the Mayak Workers Cohort: Risk Estimation and Uncertainty Analysis. Radiat Res, 195, 334-346.(Stram et al., 2021)

1件目はオランダにおける18歳未満のCTスキャン受験者に対する白血病と脳腫瘍のリスク評価である。この論文では、白血病のリスクモデルの修飾効果として被ばく時年齢と経過年齢が考慮されていた。ただし、論文では相対リスク(Relative Risk: RR)からERRを推定したと記載しているだけでERRの導出方法についての記載はなかった。さらに、モデルパ

ラメータの値が論文中に示されていなかった。

2件目は米国における放射線技師に対する白血病のリスク評価である。白血病のERRの修飾効果として性差と最初の被ばく年齢が考慮されていた。しかし、モデルパラメータの値が論文中に示されておらず、被ばく時年齢別のERRの値が示されているだけであった。

3件目はロシアにおけるMayakの作業者に対する肺がんのリスク評価である。肺がんのERRとして、喫煙、外部被ばく、プルトニウムの内部被ばくに対する3つのERRが示されている。このうち、外部被ばくのERRの修飾効果として性差のみが考慮されていた。

以上の調査結果より、白血病の疫学研究において修飾効果が考慮されている2件の文献を確認したが、それぞれの修飾効果のパラメータ値が論文には示されておらず、性差と年齢別のERRの値が示されているだけであった。また、肺がんの疫学研究において1件の文献を確認し、修飾効果として性差が考慮されていた。

これより、最新の疫学研究の調査より得られた知見として、リスクモデルの修飾効果として被ばく時年齢、到達年齢、性差の3つ全てを考慮した疫学研究は2023年1月時点では原爆被爆者に関する研究のみであることが分かった。

4.2.2. 線量応答の整理

次に、原爆被爆者及びUNSCEAR2019以降の疫学研究のリスク係数（ERR/Gy, ERR at 100 mGy）を比較・整理し、原爆被爆者のリスク係数が他の疫学研究とどの程度異なるかを評価し、原爆被爆者の疫学研究の線量応答の代表性を検討する。ここでは、リスク係数が論文に記載されている全固形がん、肺がん、甲状腺がん、白血病の比較を示す。

- ・ 全固形がん

原爆被爆者の疫学研究と原爆被爆者以外の最新の疫学研究の全固形がんのERR/Gyを罹患と死亡に対してそれぞれ比較した。ここで、原爆被爆者の疫学研究の罹患、死亡はそれぞれ最新の論文(Grant et al., 2017, Ozasa et al., 2012)のERR/Gyの値を示している。ここで、原爆被爆者の男性の罹患のERR/Gyは、UK放射線作業員（罹患）(Hunter et al., 2022)における考察の記述と合わせるために線形モデルの値を用いた。図 4-6及び図 4-7より、原爆被爆者の疫学研究の全固形がんのERR/Gyの推定値は最新の疫学研究のERR/Gyの不確かさの幅に含まれることが分かる。

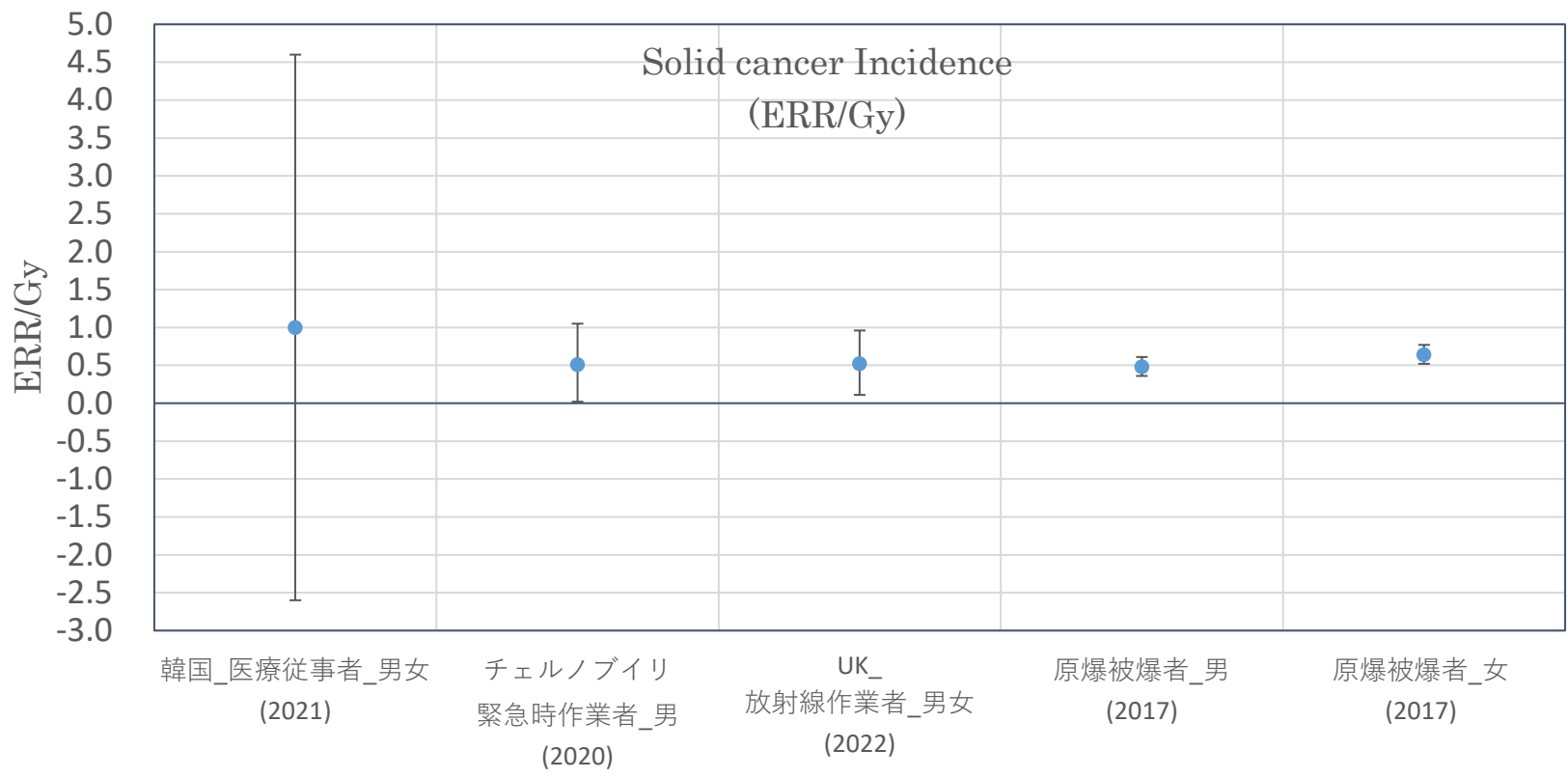


図 4-6 原爆被爆者と最新の疫学研究の全固形がんのERR/Gyの比較（罹患率）

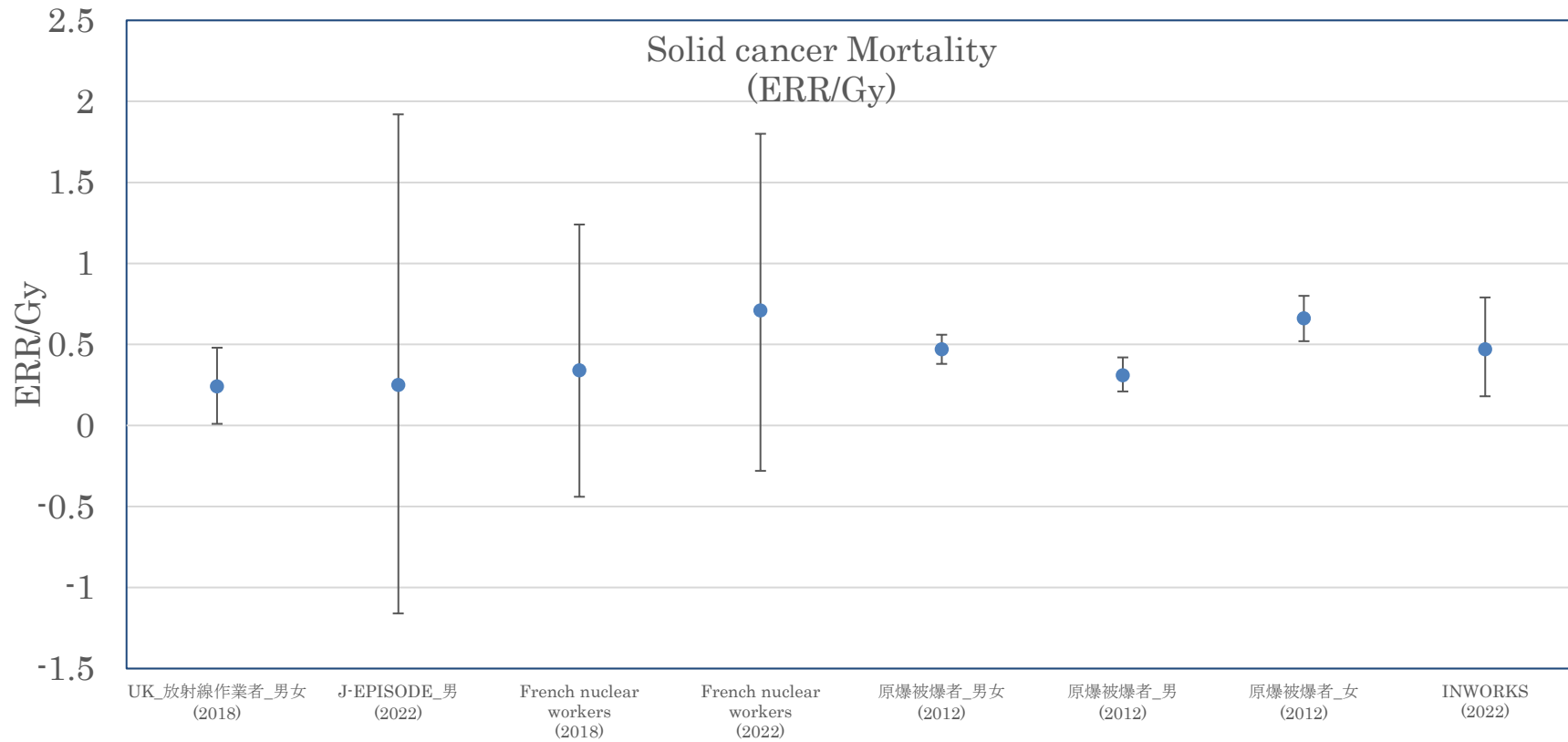


図 4-7 原爆被爆者と最新の疫学研究の全固形がんのERR/Gyの比較 (死亡率)

次に、最新の疫学研究の論文の考察において原爆被爆者の疫学研究とそれぞれの疫学研究を比較した記述の要約を示す。

- **United Kingdom: (UK) 放射線作業員（罹患）(Hunter et al., 2022):** 「UK放射線作業員で得られた推定値の範囲と、原爆被爆者調査およびINWORKS調査との間には、信頼区間が重なるという意味で、かなり良い一致が見られる。固形がんの結果は、0-100 mSvの線量域で有意なリスクの増加を示したINWORKSと日本の原爆研究の知見を支持する。UK放射線作業員のリスク推定値とINWORKSのリスク推定値は同様であったが (ERR/Sv =.81; 90% CI:0.01;1.64)、原爆データの同等リスク推定値はUK放射線作業員のリスク推定値の半分以下 (ERR/Gy=0.49, 95% CI:0.026;1.01) であった。」
- **Chernobyl：緊急時作業員（罹患）(Ivanov et al., 2020):** 「コホートの追跡期間が長くなるにつれて統計的に有意な線量が減少するという傾向が得られたが、この傾向はLSSコホートで報告されたものと同様である。」
- **韓国：医療放射線従事者（罹患）(Lee et al., 2021):** 原爆被爆者と比較した記載はなかった。
- **日本：J-EPISODE(Furuta et al., 2022):** 「Richardsonらは、INWORKSの結果がLSSと統計的に互換性があると報告した(Richardson et al., 2015)。固形がんのERR/Gyと90%CIは、INWORKSでは0.47、95%CI 0.18、0.79だったが、LSSでは20～60歳男性のERR/Svは0.32、95%CI 0.01-0.05であった。さらにLeuraudらは、類似の年齢とフォローアップ期間を用いて比較を制限することにより、LSSのERR/Gyが0.28、95%CI 0.18、0.38、INWORKSが0.29、95%CI 0.07、0.53と異なる研究による結果を補完的に見出したと強調した(Leuraud et al., 2021)。一方、J-EPISODEのサブコホートの結果は、白血病を除く全てのがんにおいて、統計的に有意ではなかった。しかし、ERR/Gy=0.25の点推定値は、INWORKSの白血病を除く全てのがんのERR/Gy=0.48の90%CI:0.20-0.79の範囲内であった。適切な比較のためには、さらに人年単位の追跡調査の蓄積が望まれる。」
- **UK：放射線作業員（死亡）(Haylock et al., 2018):** 「本研究で得られた固形がんおよび肺がんと胸膜がんを除く固形がんの死亡率と発生率のリスクと、LSS14データの同等のサブセット¹⁴に線形モデルを適合させて本研究のために導き出したリスクは、よく一致していた。最大の違いは固形がん死亡率で、更新されたNational Registry for Radiation Workers (NRRW) の結果は、比較可能なLSS14ベースの推定値よりも17%小さかった。」

以上の全固形がんのリスクに対する調査結果より、最新の疫学研究の全固形がんリスク推定値は、原爆被爆者の結果と良い一致をしていると考察されている。ただし、UK放射線

¹⁴ 肺がんと胸膜がんを除く固形がんと想定されるが、文献に詳細は記載されていない。

作業員（罹患）(Hunter et al., 2022)などの罹患率の研究において、原爆被爆者の男性罹患(Grant et al., 2017)の線形二次モデルとの比較はされていない点に注意が必要である。下に凸の線形二次モデルの場合、低線量領域において線形モデルよりもリスクが低く推定されることになる。

そこで、原爆被爆者の男性罹患(Grant et al., 2017)の線形二次モデルの線量応答と最新の疫学研究のリスクとを100 mGyにおけるERRの値で比較した。参考として調査期間が1998年までの論文(Preston et al., 2007)の男性の全固形がんの線形モデルのERRを加えた。最新の疫学研究で全固形がんの罹患リスクが示されているのはUKの放射線作業員とChernobyl原発事故の緊急時作業員であった(Hunter and Haylock, 2022, Ivanov et al., 2020)。ここで、線形モデルの100 mGyにおけるERRの値 (ERR at 100 mGy) はERR/Gyの値に0.1を乗じて算出した。

図 4-8に、疫学研究毎の全固形がんの罹患に対するERR at 100mGyの値を示す。この結果より、原爆被爆者_男(Grant et al., 2017)の線量応答のモデルが線形二次モデルの場合、原爆被爆者男性の推定値はイギリスの放射線業務従事者の信頼区間の下限値付近になることが分かった。

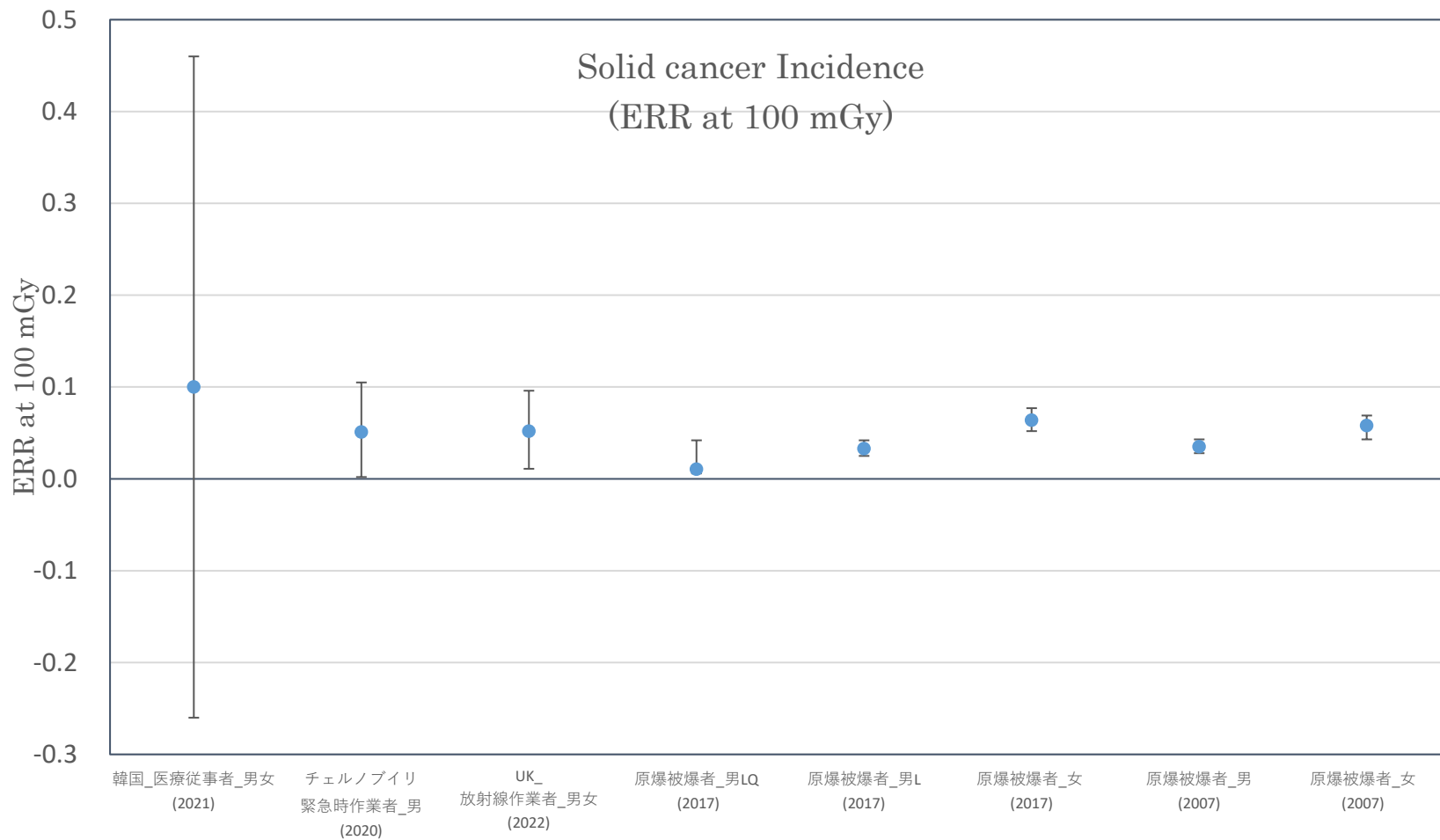


図 4-8 原爆被爆者と最新の疫学研究の全固形がんのERR at 100mGyの比較（罹患率）

- ・ **肺がん**

図 4-9に肺がんの死亡または罹患のERR/Gyの比較を示す。図より原爆被爆者の疫学研究の肺がんERR/Gyの推定値は最新の疫学研究のERRの幅に概ね含まれるが、ロシアのMayakの男性の死亡リスクは原爆被爆者の死亡または罹患リスクよりも低い。これは、Mayakの男性の肺がん死亡のERRを推定する際に禁煙の情報が取得されていないこと、プルトニウムによる被ばくの影響が調整されていることが原因と考察されている(Stram et al., 2021)。

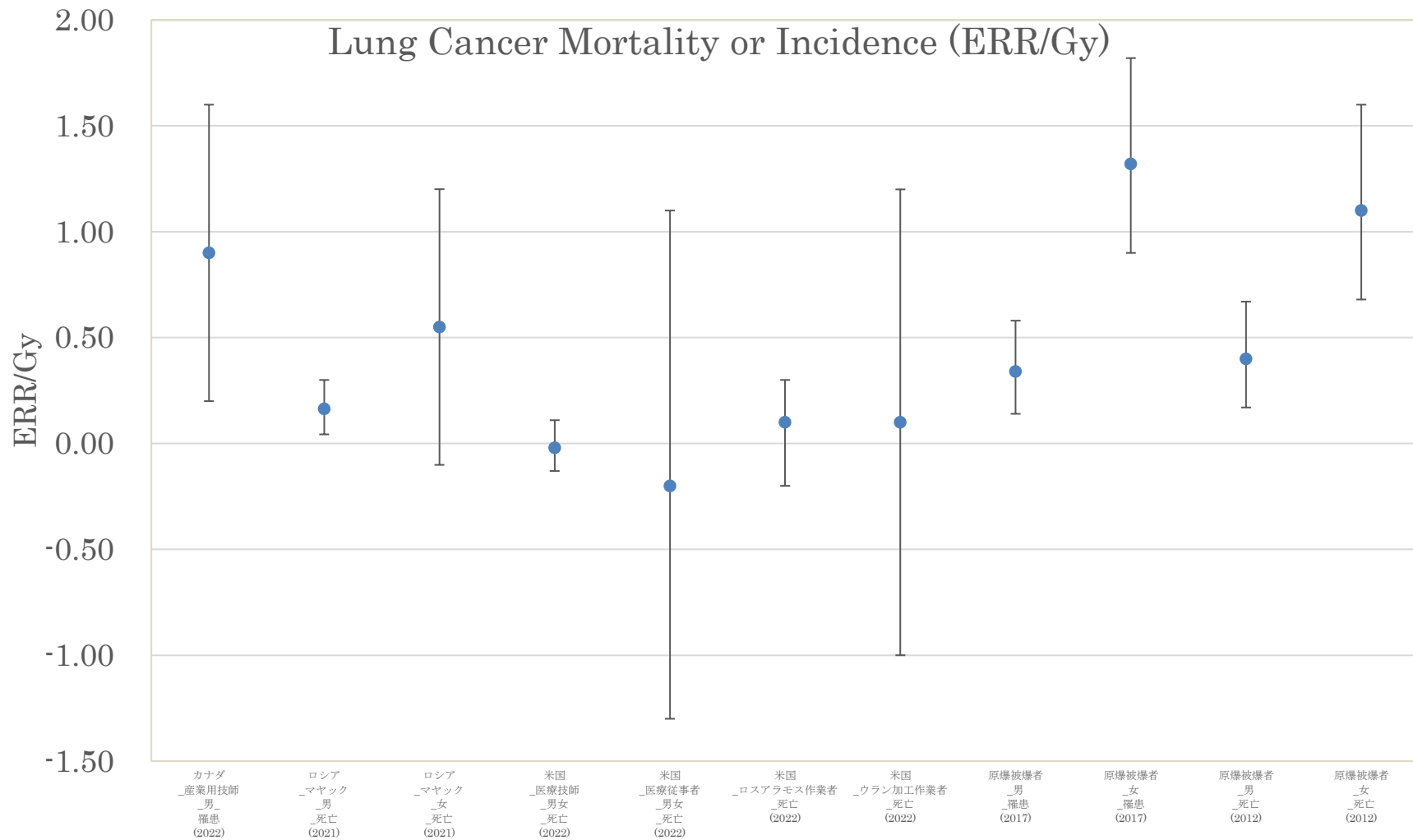


図 4-9 原爆被爆者と最新の疫学研究の肺がんのERR/Gyの比較

- 白血病

図 4-10、図 4-11に白血病の罹患、死亡のERR at 100mGyの比較を示す。図より、原爆被爆者の白血病のERR at 100 mGyの推定値は最新の疫学研究のERRの不確かさの幅に概ね含まれることが分かる。

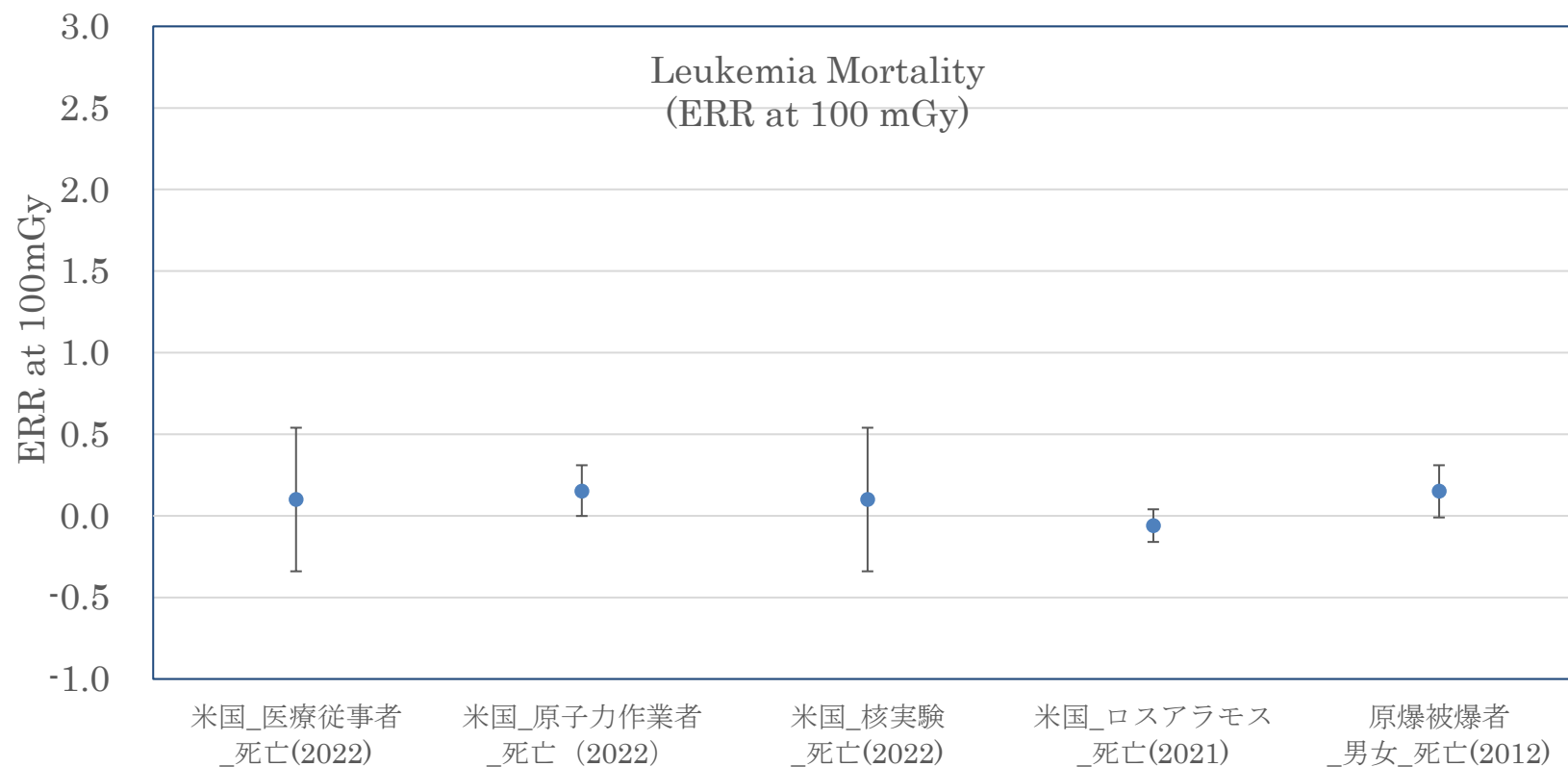


図 4-10 原爆被爆者と最新の疫学研究の白血病のERR at 100 mGyの比較（罹患率）

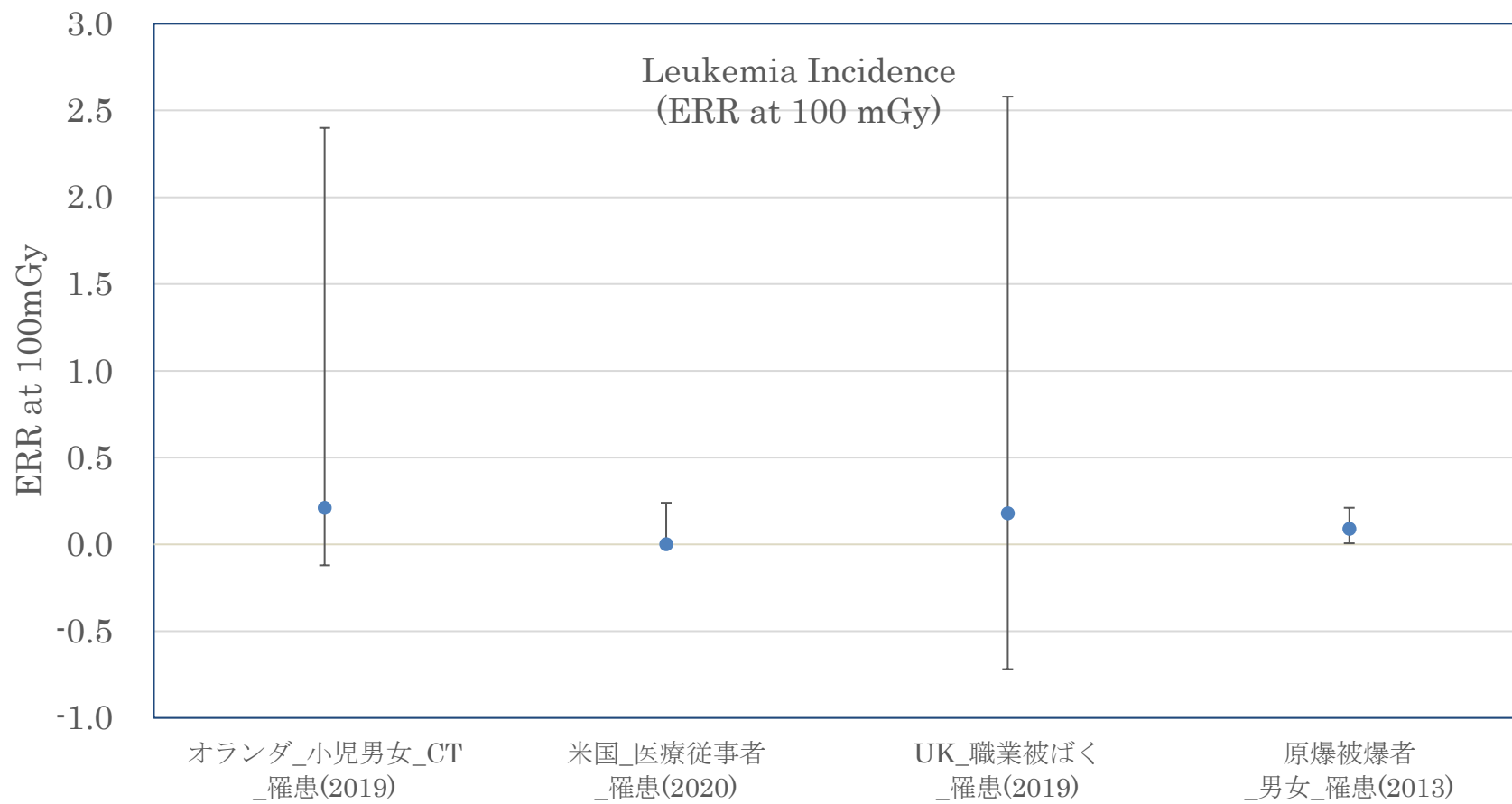


図 4-11 原爆被爆者と最新の疫学研究の白血病のERR at 100 mGyの比較 (死亡率)

・ 甲状腺がん

図 4-12に原爆被爆者と最新の疫学研究の甲状腺がん罹患のERR/Gyとの比較を示す。図より、原爆被爆者の甲状腺がんのERR/Gyの信頼区間は最新の疫学研究のERR/Gyの不確かさの幅と概ね重なることが分かる。

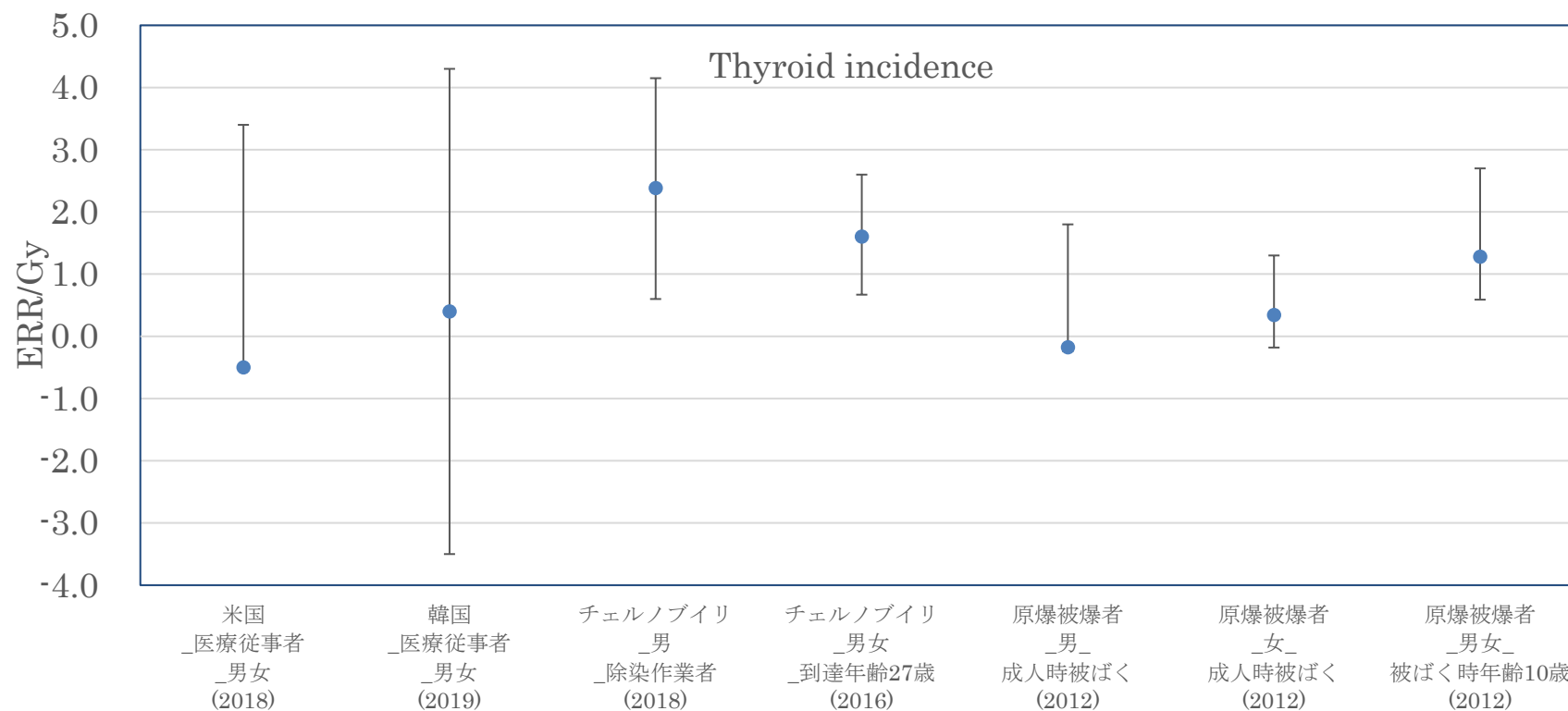


図 4-12 原爆被爆者と最新の疫学研究の甲状腺がんのERR/Gyの比較 (罹患率)

以上の原爆被爆者の疫学研究と最新の疫学研究のリスク係数との比較により、原爆被爆者のリスク係数は最新の疫学研究の不確かさの範囲内に概ね含まれることを確認した。これらの結果より、原爆被爆者のリスクモデルとリスク係数が放射線の疫学研究を代表していると言える。したがって、本リスク評価コードに原爆被爆者リスクモデルとリスク係数を採用することは問題ないと言える。ただし、調査期間が2009年までの原爆被爆者の疫学調査(Grant et al., 2017)の男性の全固形がん罹患のERRモデルに線形二次モデルを採用するかは検討する必要がある。また、Mayak男性の肺がん死亡リスクは喫煙リスクを調整したことによりLSSの肺がんリスクよりも低くなったことを考慮し、本リスク評価コードの肺がんリスク評価においては喫煙リスクの調整を検討する必要があると言える。

4.3. コード開発の概念設計に向けて抽出された課題

4.1 節、4.2 節、及び検討委員会でのコメントを踏まえて抽出されたコード開発の概念設計に向けた課題を示す。

抽出した課題は下記の 5 つに分けられ、それぞれについて検討すべき項目を示す。

1. コードの目的範囲に関する課題
2. コード出力の利用法に関する課題
3. コード内のオプションに関する課題
4. コード出力の不確かさの出力方法に関する課題
5. ソフトウェアに関する課題

4.3.1. コードの目的範囲に関する課題

課題：

- ・リスク評価の対象、コードのユーザー、コードの活用先をどこまで想定すべきか？

コードの目的範囲を検討する上で、今まで調査したコードの活用先から、職業被ばく、医療被ばく、原子力事故時の住民の被ばくの確率論的リスク評価（レベル 3 PRA）などの様々な状況にコードが利用されていることが示された。例えば、本リスク評価コードを職業被ばくに活用する場合、職業被ばくの年間の線量限度を検討することが考えられる。Level 3 PRA に活用する場合、小児や妊婦、高齢者等、特定の集団に対する避難等の防護措置を事前に検討することが考えられる。本リスク評価コードの利活用は、リスク評価の対象、コードのユーザー、活用先をどこまで想定するべきかを今後検討する必要がある。

4.3.2. コード出力の利用法に関する課題

課題：

- ・どの種類のリスク指標を出力するか？
- ・そのリスク指標をどのように利用するか？
- ・他のリスクと比較すべきか？その場合、コード内で出力すべきか？

コード出力の利用法を検討する上で、各コードの出力は生涯寄与リスクまたは原因確率であることが示された。しかし、その出力値がどのように利用されているかの説明はコードの出力の内に記載されていなかった（つまり、リスクの値を示すのみであり、そのリスクの値の持つ意味等をコードにおいて示されていない）。先に示した目的に合わせて、どのリスク指標を出力するか、その値にどのような意味があるのかを本リスク評価コードは説明すべきかを検討する必要がある。また、検討委員会では、化学物質などの他のリスクと比較することも手段の一つとの意見が挙がり、比較する必要性、比較すべき他のリス

ク、それらをコード内で出力すべきかを検討する必要がある。例えば、RadRATでは、放射線被ばくに伴うがんリスクの値に加えて、対象集団の自然がんリスクの値もコードの出力の画面内に出力されている。

4.3.3. コードの入力のオプションに関する課題

課題：

- ・ユーザーがリスクモデル及びパラメータの入力できる範囲をどこまで設定するか？
- ・コード開発者が予め備えておくパラメータ、データセットセットは何か？
- ・パラメータやデータセットセットの更新が必要な場合、誰が更新するか？
- ・どのがん部位をリスク評価に加えるべきか？

コードの入力のオプションを検討する上で、ユーザーが入力できる範囲とコード内で整備されておりユーザーが関与できない情報（データセット）を第2章に示した。仮にユーザーがデータセットを含めたすべてのパラメータを自在に入力できるコードの場合には、そのコードの汎用性は大きく広がる可能性はある。ただし、不適切な入力値を与える可能性もあるため、ユーザーが入力できる範囲を予め定めておき、コード開発者が備えておくべきパラメータ及びデータセットを検討する必要がある。

また、パラメータの更新時の対応についても検討する必要がある。例えば、リスクモデルで使用されているパラメータは新たな疫学調査が公開されることによって更新される必要がある。このような場合に、それらのパラメータを更新すべきか、また更新するにはユーザーとコード開発者のどちらが実施すべきかを検討する必要がある。

コード調査において、個別に対象としているがん部位はBEIR VIIが対象としているがん（胃、結腸、肝臓、肺、乳房、子宮、卵巣、前立腺、膀胱、甲状腺、白血病）が多かった。RadRATはこれらに加え、口腔、食道、胆嚢、腎臓などを加えて評価している。他にも、がん部位は多数あるものの、症例数が少なく、リスク評価の対象としても不確かさが大きくなるものもある。そのため、疫学調査の不確かさも踏まえながら、どのがんを評価対象に加えるべきかを検討する必要がある。

4.3.4. コード出力の不確かさの出力方法に関する課題

課題：

- ・出力方法（点推定値、確率分布、95%信頼区間など）はどれを選択するか？
- ・がんリスクベースラインの扱いをどうするか？

コード出力の不確かさの出力方法を検討する上で、各コードの出力は点推定値、確率分布、95%信頼区間の3つに大別できることを第2章において示した。計算コストや出力の

分かりやすさ（例えば、自然がんリスクと比較）などで、それぞれのメリットとデメリットを検討し、コードの目的に応じた最適な出力方法を検討する必要がある。また、確率分布や95%信頼区間を出力するためには、入力に対してどういった不確かさを考慮し、そのパラメータの確率分布をどのように設定すべきかを検討する必要がある。例えば、今回調査した全てのコードのベースラインは常時一定と仮定している。ただし、実際には世代間で死亡率や罹患率が異なることや、将来のベースラインを推定することなどを考慮することが必要になる可能性もある。

4.3.5. ソフトウェアに関する課題

課題：

- ・ どういったソフトウェアでコードを作成するか？
- ・ コードの公開方法をどうするか？
- ・ コードの著作権をどうするか？

ソフトウェアを検討する上で、今回調査したコードのソフトウェアは、非公開、アプリ、オンラインソフトの3つに大別できる。著作権、想定されるユーザーの利便性等を踏まえ、どのユーザーまで公開すべきか、ソースコードまで公開するかどうかを検討する必要がある。

また、コードの保守方法などを考慮し、どういったソフトウェアでコードを開発するかを検討する必要がある。

5. リスク予測のあり方及びコード活用法に関する検討

第5章では、第4章の検討結果を踏まえ、放射線防護基準の策定、緊急時の防護措置の立案等、それぞれの目的に応じたリスク予測のあり方及びコード活用法について検討する。

5.1. コードの目的の範囲の検討

第4章で示した課題：

- ・ リスク評価の対象、ユーザー、活用先をどこまで想定すべきか？

今後の展開案：

- ・ ポテンシャルユーザーにコードの利活用についてヒアリングし、来年度の概念設計の段階で、コードの具体的なニーズを検討する。ここで、ポテンシャルユーザーとして、原子力発電所立地道府県の原子力防災関係者、医療従事者（診療放射線技師、看護師）、リスクコミュニケーション関係者などを想定している。
- ・ コードの利用目的によって入出力は異なるが、リスク計算の基本（ERR、EAR）は同じであるため、ユーザーが利用開始時に目的別のバージョンを選択する方法も必要に応じて検討する。
- ・ コードを利用するシナリオ、ストーリーを検討する。
- ・ 社会がどのようなリスク情報を必要としているかを調査する。
- ・ 評価対象とする被ばく線量の範囲を検討する。コードのニーズ調査を踏まえて、100 mSv以上の高線量、自然放射線程度の低線量率も評価対象とするかを検討する。
- ・ 評価の目的に応じた入力データの種類を検討する。例えば、食品摂取に起因する内部被ばくによる健康リスクを算出することを目的とした場合、食品中の放射能濃度と当該食品摂取量が入力値となることが考えられる。

5.2. コード出力の利用法

第4章で示した課題：

- ・ どの種類のリスク指標を出力するか？
- ・ そのリスク指標をどのように利用するか？
- ・ 他のリスクと比較すべきか？その際、コードで出力すべきか？

今後の展開案：

- ・ 対象とするがん部位や目的に応じたリスク指標を検討する。放射線健康リスク評価において一般的に用いられているLARに加えて、寿命損失、DALY（Disability-adjusted Life Year）等が想定される。
- ・ コード出力に、出力値の解説や、他リスクとの比較を示すかを検討する。RadRATでは自然がん罹患・死亡リスクと比較されている。
- ・ コード出力に他のリスクとの比較を示す場合、被ばく状況や対象に応じて比較するリスクを検討する。例として、自然がん罹患・死亡リスクとの比較、職業被ばくでは、他の職業の疾病リスクと比較、緊急時被ばく状況では、避難に伴うリスクと比

較するなどが考えられる。

5.3. コード入力オプション

第4章で示した課題：

- ・ ユーザーがリスクモデル及びパラメータについて入力できる範囲は？
- ・ コード開発者がデフォルト値として予め備えておくパラメータ、データセットセットは？
- ・ ユーザーが入力しないパラメータやデータセットセットの更新が必要な場合、誰が行うか？
- ・ どのがんをリスク評価に加えるべきか？
- ・ がんリスクベースラインの扱いをどのようにすべきか？

今後の展開案：

- ・ ポテンシャルユーザーにパラメータの入力等についてヒアリングをしつつ、ユーザーがパラメータやデータセットを操作できる範囲を変えた複数のバージョンの作成についてセット検討する。
- ・ ユーザー入力項目ではないパラメータ値等の更新が必要な場合の対応案について検討する。
- ・ モデルやパラメータに対して、事前に感度解析等を実施することにより、影響度の大きいパラメータを把握して、本リスク評価コードの設計において参考とする。具体的には、出力値の不確かさに対する影響度の小さいパラメータは固定値を設定し、影響度の大きいパラメータは確率分布の入力が可能な設定とする等が考えられる。
- ・ ベースラインを更新する必要があった場合の対応案を検討する。

5.4. コード出力の不確かさ

第4章で示した課題：

- ・ 点推定値、確率分布などのリスクの出力の種類をどう設定するか？

今後の展開案：

- ・ ポテンシャルユーザーにコードの出力についてヒアリングし、出力方法の違いによるメリットデメリットをまとめ、出力方法を検討する。

5.5. ソフトウェア

第4章で示した課題：

- ・ どういったソフトウェアでコードを開発するか？
- ・ コードの公開方法は？

今後の展開案：

- ・ コードの著作権の種類を検討する。例として、日本保健物理学会が開発した健康リスクコードは著作権がフリーのMITライセンスを採用した。コードにMITライセンスを採用することにより、ユーザーが研究者の場合はこのコードを改良して新たな研究を実施し、研究内容を発表しやすくなる設定と言える。
- ・ コードの公開方法を検討する。
- ・ 公開した場合のデメリットを予測して対応しておく。具体的には、目的外利用による社会への影響などを想定し、注意書き等を用意する。目的外利用の一例として、低線量×大人数による死亡者数を予測するなど、Chernobyl 原発事故の被害予測といった事例が挙げられる。
- ・ コードの活用として、大学等での教材としての利用も検討する。
- ・ 原子力災害等の緊急時の防護措置の検討に使用する場合、不確かさの範囲によっては極端なワーストケースを示すことがあるので、コード出力の解釈、留意事項等も検討する。

6. 研究に必要な国内外の情報収集

本事業の実施に当たっては、放射線防護分野（影響、線量、医療、防護）に関する多岐にわたる高い専門性が必要であることから、事業成果の向上・精緻化を図ることを目的として、適宜事業内容に関連する国内外の専門家と意見交換等を行った。研究に必要な国内外の情報収集として、放射線健康リスクに関係する会議等に参加し、放射線健康リスク評価等に関連する情報を入手した。さらに、既存コードの開発者、利用者にヒアリングを試みた。ここでは、6.1節に第4回日本保健物理学会日本放射線安全管理学会合同大会に参加して得られた内容、6.2節にヒアリングした結果についてまとめる。

6.1.関係する会議等への参加

「第4回日本保健物理学会日本放射線安全管理学会合同大会」参加報告

1. 日時：令和4年11月24—26日
2. 場所：九州大学伊都キャンパス
3. 参加者：(JAEA) 嶋田和真、鯨岡郁雄

概要：放射線健康リスク評価コードの開発に資する最新の研究情報を取得するため、放射線防護を専門とする学会に参加し関連する発表を聴講した。以下に紹介する研究発表は、疫学調査、労働者のリスク評価、リスク評価コードの開発及びICRP次期主勧告に関連するセッションである。発表の概要及び質疑応答を示し、最後にコード開発に向けた知見を取りまとめる。

放射線健康リスクに関連する主な発表

○「J-EPISODEにおける新コホートの特性と予想される結果」

発表者：工藤伸一（放射線影響協会）

概要：放射線影響協会では低線量放射線による健康影響についての知見を得るための疫学調査を1990年より実施している。2015年度以降は調査のフレームワークを変え、生活習慣等アンケート調査を実施し、喫煙等の生活習慣情報を取得し、新しいコホートを設定した。調査結果は、累積線量の増加と共に喫煙割合も増加する傾向がみられた。これは旧コホートにおいても同様の傾向が見られ、喫煙調整は放射線リスク推定値を減少させることがわかっているため、新コホートにおいても喫煙調整による放射線リスク推定値の減少が予想される。さらに、線量と喫煙、教育年数に相関がみられるので、リスク指定値が下がる可能性がある。一方、肝炎ウイルスと線量の相関は見られなかった。

質疑応答：

- 喫煙に関してはどんな情報を取得しているのかという質問に対して、一日の喫煙本数と喫煙年数を調べていると回答があった。

- 禁酒者のリスクが高い理由についての質問に対して、飲酒により体調を崩した人がこのグループに入ると回答があった。
- 教育歴とがんリスクの関連についての質問に対して、引き続き背景を調査したいと回答があった。
- 喫煙は放射線のがんリスクに相加的か相乗的かどちらで影響をするかの質問に関しては、現時点ではモデルパラメータを変えてもリスクはほとんど変わらないことから、どちらか明言できないと回答があった。

○放射線業務従事者コホートJ-EPISODEの第Ⅶ期解析計画

古田裕繁（放射線影響協会）

概要：放射線影響協会は、1990年から放射線業務従事者を対象に、低線量放射線の健康影響調査(J-EPISODE)を行っている。第Ⅶ期解析では観察期間を、死亡データは2015年から2021年末に、がん罹患データは2016年から2020年末に設定し、線量は放射線従事者中央登録センターから1957-2021年度の記録線量を取得し解析を行った。解析の結果、死亡解析の予想観察人年は約30万であり、信頼区間の幅が広いことが予想される。がん罹患解析の予想観察人年は約20万と死亡解析より少ない値になった。一方、2019年全国の死亡/罹患(MI)比は0.38であり、がん死亡数の倍以上のがん罹患数が期待できた。これらは、主要な疫学調査との比較を可能とし、更なる追跡継続によってLSSと比較可能な精度の高い結果が得られることが期待される。また、通常の作業における個人線量の値から臓器線量への換算係数を整備した。

質疑応答：

- 治療技術が向上している時代背景の違いについてどう見ているかという質問に対して、死亡と罹患は違ってくることが考慮すべきだという意見があった。その回答として、死亡については住民票で判別しているが死因がわからないため、人口動態調査表の死亡診断書とマッチングすることで死因を同定していると回答があった。

○日本の労働者リスク評価に向けた情報整理と課題

木村 建貴（電力中央研究所）

概要：職業リスクの包括的な評価のために、障害調整生存年数（DALY）を用いて日本の労働者リスクを分析した。DALYに使用される損失生存年数（YLL）は、前回報告した死亡率と死亡時平均年齢を用いて評価し、障害生存年数（YLD）は、非致死労災について分析整理して疾病別の発生数を推定した。その後、疾病ごとにYLDを評価した。その際の疾病の重み付けDWの値は最大値と最小値を仮定して計算した。結果の一例として、東日本大震災の影響が大きい2011年を除くと、2002～2019年の製造業のDALYは 9 ± 6 年（YLL = 3.5 ± 1 年、YLD = 5.5 ± 5 年）と推定し、WHOの値と比較を行った。疾病の程度の分布と疾病分類の詳細さに依存するため、このDALY値には、大きな不確かさが付随する。

質疑応答：

- 労働災害のデータにおいてがんのような晩発影響はどれほどあるのかという質問に対して、労働災害は身体の切断や骨折などが多く、がんについて報告例は少ないと回答があった。
- 放射線被ばくと一般災害を比較しても良いのかという質問に対しては、本研究は参考として比較をしていると回答があった。

○放射線被ばくに伴うがんリスクの推定コードの開発(1)リスク計算の概要と特徴

佐々木 道也（電力中央研究所）

○放射線被ばくに伴うがんリスクの推定コードの開発(2)Rコード及びPythonコード

佐藤 大樹（日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター）

○放射線被ばくに伴うがんリスクの推定コードの開発(3)数値の検証と展望

甲斐 倫明（日本文理大学）

概要：日本保健物理学会の専門研究会として、放射線被ばくに伴うがんリスク評価コードを開発した。リスク評価コードを公開することは国際的なコードの比較やコードの問題点を議論することが期待される。本発表は3件のシリーズ発表、(1)リスク計算の概要と特徴、(2)R及びPythonコード、(3)数値の検証と展望であった。

（質疑応答はまとめて実施された）

質疑応答：

- このリスク評価コードにおける慢性被ばくに関する質問に対しては、入力ファイルの1行ごとに被ばくした年の被ばく線量を入力して計算が可能であると回答された。
- このリスク評価コードの評価対象は個人なのか集団なのかという質問に対しては、これはリスク予測を行うものであるため、集団に対する評価であると回答があった。
- 被ばくの種類に対する質問では、このリスク評価コードは全身被ばくのみを評価したうえで各臓器がんを考慮していること回答された。

○JHPS 企画セッション6

若手研究会「ICRP次期主勧告の理解を深める—放射線防護と安全の最適化—」

栗原千絵子（神奈川歯科大学）

本間俊充（原子力規制庁）

概要：ICRP次期主勧告の理解を若手が深めるため、「放射線防護の安全の最適化」に関する勉強会を開催した。講演1「放射線防護と倫理的側面」として、栗原千絵子氏からICRP Pub.138に関して、主に倫理的・社会的側面と放射線防護の接点について解説の解説があった。続いて、講演2「倫理的側面を踏まえた放射線防護の最適化」として、本間俊

充氏からICRP Task Group (TG) 114の活動及び課題の解説があった。

講演1「放射線防護と倫理的側面」

概要：放射線防護の倫理的側面はICRP Pub.138にまとめられており、日本語訳も公開されている。現在は、TG109と126において特に医学応用において倫理的側面が議論されている。まず、善行／無危害、慎重さ、正義、尊厳という4つの中核となる倫理的価値について示された。さらに、これらの倫理的価値が放射線防護の原則、正当化、最適化、線量限度とどのように関わっているかを示された。善行／無危害はリスクベネフィットのバランスを考えるALARAに関連している価値である。慎重さは、不確実な状況の中で注意深く意思決定して行動することから、LNT仮説を採用して100mSv以下の被ばく線量を管理することに関連している価値である。正義は利益と不利益の分配の公平性と手続きの公平性として、個人線量限度に関連している価値である。尊厳は個人が情報に基づいて自ら決定できるようにステークホルダーの参加を重視する根拠となる価値である。さらに、説明責任、透明性、ステークホルダーの参加という3つの手続き上の価値が強調された。

質疑応答：

➤ 放射線防護の現場におけるリスクコミュニケーションにはパブリックエンゲージメントが必要であり、コミュニケーションが欠落していると言われており、コミュニケーション、エンゲージメントと倫理との関係がもう少し明確になるといいのではないかという意見に対して、これらの関係について現在は医療の分野では整理されていると思っているが、他の分野になると整理しきれていないので、今後はより実務の役に立つように関わっていくと回答があった。

➤ 研究者は正確なデータを出す科学だけに尽力し、判断に関わってはいけないという意見をどのように受け止めればいいのか、学会の中でも科学と判断が混在しているという意見・質問に対して、現在の科学論の一つであるレギュラトリー科学では、科学者が意見を求められすぎている風潮があることを回答があり、放射線防護のルール作りに関わる科学者もいることから、科学に基づいてルールを決めることはあり、その都度、自身の役割分担をはっきりすればよいと回答があった。さらに、科学としてデータを集めて解析しているのか、データに基づいて何かを判断するのかを分けて行動することが重要であり、規制判断のためにデータを集めると科学が歪んでしまう危険があると回答があった。

➤ 防護の正当化、最適化は功利主義に偏り、義務論に欠けているという議論はなかったのかという質問に対し、今は義務論の方に議論が寄ってきているという回答があった。

➤ ICRP は西洋人が多いので、西洋的な価値観を押し付けられるのではないかと、東洋の価値をこの Pub138 に反映できないかという質問に対して、この委員会の議長が韓

国人だったので、儒教の考え方も取り入れている。しかし、儒教はトップダウンの考え方なので、日本人の和を重んじて空気を読んで分かりあうことを重視することはまだ反映されていないと回答があった。

講演2「倫理的側面を踏まえた放射線防護の最適化」

概要： TG114 Reasonableness and Tolerability in the System of Radiological Protectionにおける議論を紹介した。現時点ではまとまった成果はないので、CEPNのテリーシュナイダー氏の発表を基に紹介した。まず、Tolerabilityの日本語訳である耐容性は、医療分野から来ているが、日本語のニュアンスとしては受忍に近い。ICRP77年勧告において他の職業リスクと比較して放射線のリスクが受忍できるかどうかの判断が取り入れられた。また、90年勧告において耐容性の言葉が初めて使われた。英国保健安全局HSEが示したリスクの区分が2014年のバージョンにおいて3つから2つに変更になり、UnacceptableがUntolerableに名前が変更された。

質疑応答：

➤ 英国保健安全局 HSE の 2014 年の文章においてリスクの大きさの区分が 3 つ (Unacceptable, Tolerable, Acceptable) から 2 つに変更したことに大きな意味はないと発表があったが具体的にはどのような違いなのかという質問に対して、2014 年の文章は ISO を反映しており、用語は変わったが意味の違いはほとんどなかったためと回答があった。

➤ 保守的な管理・対応をする際のコストは誰が負担するのか。またリスクに見合った対応が必要になるかどうかという議論は委員会で行われているのかという質問に対し、そのような意見は出ているが、どのようにリスクを測るのが問題である。これまではコストベネフィット評価が軽視されてきたので、バランスをとることが重要であると回答があった。

本事業のリスク評価コードの開発に向けて学会参加により得られた知見

● 喫煙習慣の考慮

J-EPISODEの新しいコホートに喫煙習慣を含めた生活習慣が考慮された。発表では喫煙習慣と線量に相関がみられ、喫煙調整によるリスク推定値の低下が示唆された。将来、J-EPISODEの知見を本事業のリスク評価コードに反映することを想定すると、予めリスクモデルの修飾効果やベースラインリスクに喫煙習慣を考慮することを検討する必要がある。

● リスク評価コードの公開方法

日本保健物理学会の専門研究会が開発したリスク評価コードはソースコードを含めてオンライン上で公開すると発表された。専門研究会のコードは専門家をユーザーとして想定し、著作権をMITライセンスに選定した。これより、本リスク評価コードも

具体的なユーザーを想定してから公開方法や著作権などを検討する必要がある。

- **リスク指標 DALY の検討**

疾病による生活の質（QOL）の低下を考慮したDALYを用いて職業上の疾病リスクを評価する発表があった。QOL低下を考慮する指標も選択肢として検討する上で、本研究におけるDALYを用いて職業上の疾病リスクが参考となりえる。

- **放射線リスクの倫理的側面**

放射線防護の倫理的側面の講義を受講したうえで、本リスク評価コードは、人々が放射線リスクを耐えられる（Tolerable）か、耐えられないか（Intolerable）の判断を支援することが目的の一つと考えた。これより、本リスク評価コードの出力の在り方について、単に数字を示すだけでなく、リスクの数値の意味を明確化するなど、ユーザーの受け取り方を考慮した出力方法の検討をする必要がある。例えば、同じリスクの値でも医療応用か原子力事故かの被ばく状況の違いや、ユーザーの年齢性別の違いなどによって異なる出力方法が考えられる。

6.2.既存コード開発者・利用者へのヒアリング

質問先：カナダ原子力安全委員会（CNSC）のJulie Burt氏（RadRAT活用論文(Burt et al., 2020)著者）

ヒアリング方法：電子メール

ヒアリング日：2022年12月

質問：カナダの原子力緊急時対応等の意思決定に放射線のがんリスクが使われているか？

回答：カナダの原子力緊急時対応の基準には線量を利用しており、がんリスクは使用していない。

質問：この論文では甲状腺がんリスクが推定されているが、このリスク情報はカナダの原子力緊急時対応等の意思決定にどのように活用されているか？

回答：この研究を実施した理由は、防護措置をした場合の線量がカナダのGC¹⁵を下回っているかを確認することである。CNSCは論文中で求めた値をもとに、ステークホルダーとの協議やその他の対話において、カナダ規格協会に対して専門的な助言を行う予定である。

質問先：Markus Eidemueller氏（ProZES開発者の一人）

ヒアリング方法：電子メール

ヒアリング日：2022年11月

質問：ドイツにおけるProZESの具体的な活用例について教えて欲しい。

回答：ProZESはドイツ連邦放射線防護局（BfS）のもとで、ドイツで職業被ばくの賠償請求を扱う組織で利用され、多くの裁判で裁判官がProZESの計算を要求している。

質問先：Thomas Charnock氏（UK Health Security Agency）（PACE開発者の一人）

ヒアリング方法：電子メール

ヒアリング日：2022年6月7日~17日

質問：イギリスではがんリスクを評価するモデルまたはコードがあるか？

回答：イギリスのがんリスクモデルは持っていない。生涯がんリスクの計算には、ICRP Pub.103のモデルまたはUNSCEARのモデル（UNSCEAR, 2006）を用いている。また、レベル3PRAコードPACEの健康リスクを評価する部分では、ICRP Pub.103のリスクモデルを利用している。

質問：PACEを実際の規制に対して利用しているか？または今後利用する可能性はあるか？

¹⁵ GC（Generic criteria, 包括的判断基準）：防護措置を実施する基準値。カナダの安定ヨウ素剤投与の基準値はIAEAと同値（7日間で甲状腺等価線量 50mSv）。

回答：開発されて間もなく、まだ改良中のため、利用されていないが、PACEが適用される可能性のある規制は2つある：①新規原子力発電所の場合、事業者は、計画が原子力規制庁の安全評価原則に準拠していることを証明しなければならない；②既存の原子力発電所やその他の施設については、事業者は放射線緊急事態準備および公共情報規則に基づく義務を負う。

他のコンタクト先として、RadRAT開発者（Amy Gonzalez氏）にコンタクトを試みたが、ヒアリングすることはできなかった。

7. 委員会の設置及び開催

「放射線健康リスク評価コードの開発に関する検討委員会」を設置し、本事業の実施方針や実績等について審議を行った。ここでは、委員の名簿と3回の検討委員会の議事概要を示す。

7.1. 検討委員会委員名簿

表 7-1 検討委員会委員名簿

職務	氏名	所属
委員長	甲斐 倫明	日本文理大学 新学部設置準備室 教授
委員	岸本 充生	国立大学法人 大阪大学 データバリエティフロンティア機構 教授
委員	古川 恭治	久留米大学 バイオ統計センター 教授・所長
委員	川口 勇生	国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門 放射線医学研究所 放射線規制科学研究部 主任研究員
委員	坂田 律	公益財団法人 放射線影響研究所 疫学部 副部長
委員	吉永 信治	国立大学法人 広島大学 原爆放射線医学研究所 計量生物研究分野 教授

7.2. 第一回検討委員会議事概要

日時 : 令和4年8月18日(木) 9:00~12:00

場所 : AP丸の内 Aルーム

出席者 : 甲斐委員長、岸本委員、古川委員、坂田委員、吉永委員

規制庁 高橋統括技術研究調査官、荻野技術計画専門職、伊豆本技術研究調査官

(オンライン出席 本間技術参与、喜多技術参与)

JAEA (高原、嶋田、廣内、鯨岡) (オンライン 野口)

議事

1. 検討委員会の運営及び委員名簿の確認【資料1】
2. 本年度の実施作業【資料2】
3. 現時点での進捗【資料3】
4. その他

配布資料

資料1 令和4年度放射線健康リスク評価コードの開発に関する検討委員会の運営等について

資料2 令和4年度放射線対策委託費(放射線健康リスク評価コードの開発)事業の実施概要

資料3 令和4年度放射線対策委託費(放射線健康リスク評価コードの開発)事業の進捗

開会

開会として、高橋統括技術研究調査官から以下のように挨拶があった。

本事業は、放射線被ばくに伴うがんリスクの定量的な評価について、特に放射線防護を目的とした評価コードの開発ということを目的としている。5年間の計画となっているが、本年度が初年度として、まずコード開発に先立って国内外で開発されたコードの調査および放射線リスク推定に係る研究等の調査を行い、現状の課題、今後のコード開発の活用等を明確にするということで、次年度以降のコード開発の概念設計に資するというを目的としている。

本委員会は、この内容についての実施方針、実績等について審議を行う場としてるので、活発にご議論いただきたい。

1. 委員会の運営および委員会名簿の確認

事務局より資料1を用いて検討委員会の設置と目的について説明し、本委員会の委員長として、規制庁の承諾を得たうえで日本文理大学の甲斐先生を指名したことを報告した。各委員より、専門、今までの経験等が紹介された。

2. 本年度の実施作業

事務局より資料2を用いて本年度の実施作業を説明した。今年度の実施作業として、大きく分けて4つあり、①既存コードに関する調査、②疫学研究に関する調査、③それらを整理して現状の分析評価および課題を抽出する、④リスク予測の在り方およびコード活用法に関する検討を行う、ことを説明した。これに関する質疑応答は以下の通り。

コードの完成形のイメージ

(古川委員) 本事業は5年間の予定であり、最終的にはコード完成・職業被ばくリスク算出という、記載があるが、最終的な目標としては職業被ばくのリスクの計算がメインの目的ということになるのか。

(規制庁) 職業被ばくにこだわらず、小児・妊婦・高齢者等幅広くコードを作成するというを目的としている。

(岸本委員) 今回のコードの定義、イメージはどういったものか。

(古川委員) 単なるコード開発のみなのか、あるいはコードを含む幅広いシステムなようなものなのか。

(事務局) 一体どういうものを作るのか、誰が何のために使って、どういったものが使いやすいのかというところまで、概念設計のフェーズにおいて議論していきながら詰めていくことを考えている。

(規制庁) 使いやすさ、あるいはどのようなインプットがあつてどのようなアウトプットを出すことが有用であるか、あるいはどのように使うことでその最終的な目的に合致したものとなるかという部分も含めて、今年度の調査をベースにして、来年度以降の概念設計から最終的なコード開発に至るところで、ご議論いただきたい。そして最終的に使う完成したコード、システムが、多くの方に有用であり、使われるものを作っていくことを目的としているので、ぜひそこを、今後ご議論いただきたい。

(岸本委員) 最後のR8年度のコード完成というイメージを考えるというのも早めに考えておいた方がいいのではないか。

(甲斐委員長) 完成形のイメージをその都度、議論を固めていければと思う。

(規制庁) 具体的には来年度、概念設計していくなかで、あるいは今年度の調査で、ほかの国々がどういった目的でどういう活用をしているのかがわかったなかで、日本もこのようなことが必要だという議論をしていく。

(甲斐委員長) 使い方を広くとればとるほどアウトプットは非常に難しくなってくる。単に数値と不確かさを出しただけでは説明も難しい。どのようにデータを解釈すべきか、どのように出力を説明するのかを一体化しないと、単なる数値だけのコード出力ではかえって誤解を生んだり、一人歩きしてしまったりする。

(規制庁) 今回最初から幅広く情報を集めているのは、活用法によって入力すべきパラメータなども変わり、精度も変わる。Retrospective、Prospectiveでも変わってくる。そのため、最初から目的を決めるというよりは、その活用法によってどのようにモデル、パラメータの選び方が変わって来ているかということをもまず調査したうえで、目的に応じて選んでいくという視点が必要かと思い、広く選んでいる。なぜ違うものが使われているかということもきちんと把握して、目的に応じたモデル、パラメータを選択していく部分が今後重要になるかと思うので、ぜひ事務局の方はそのような視点で今後取りまとめていくと考えてほしい。

(吉永委員) 参考情報だが、IAEAが職業被ばくに関連した、がんリスクの予測に関するTECDOC (TE-1985) を去年2021年に出している。そこには適応例、実例、あるいは不確かさの扱いとかを簡潔にまとめているので、それも今回に加えていただくと役に立つと思う。

コード内で対象とするもの

(坂田委員) 基本的に見るものはがんの罹患のリスクなのか。他の病気も入るのか。

(事務局) 基本的に死亡も罹患も調べていく。臓器別など、どこまでコード化するかは概念設計の中で相談させていただきたい。

(甲斐委員長) 脳卒中を含めた他の血管疾患の影響は視野に入れていないのか。

(事務局) がん以外についても情報を収集していきたい。ただし、がん以外のものをど

う取り扱っていくというところは考えていきたい。

(規制庁) 令和7年度のがん以外のリスクへの対応等に向けた検討、令和8年度のコードの高度化に向けた検討の中では、循環器系疾患、白内障といったものも調査していき、どうやってコードに取り入れていくべきかを検討していく予定である。今年度は、日本と他の国がどういったコードを作成しているかを調査し、日本としてどういうコードを持つべきかを議論するところから始める。来年度はその結果を踏まえて、概念設計（実際どういったところで使われるのかという現場の適用まで考える）をする。

(吉永委員) この事業のリスク評価の対象は日本人と限定して良いか。

(事務局) 現時点での我々の考えは、日本人を対象としている。

疫学研究に関する調査

(吉永委員) がんリスクの評価に役立つという研究であるため、定量化されていることは最低条件である。放射線の健康影響の疫学は様々であるため、主要なものとしてはここに挙げられているもので、分類としては結構である。

(甲斐委員長) ほとんどの健康リスクでデータベースとして一番使われているのは、広島長崎の原爆被爆者なので、放影研が発表、公表している研究論文は押さえておかなければならない。そういった意味では、最新のがん罹患は全部発表・公表されているのか。個別のがんについても発表の区切りはついているのか。

(坂田委員) 今全体のサマリーの論文が、ジャーナルの最終レビューに入っている。

(甲斐委員長) 5年10年すればフォローアップの論文が出てくるだろうが、今の段階では現時点での最新データをまとめた論文に注目することにする。

3. 現時点での進捗

事務局より資料3を用いて既存コードに関する調査結果を説明した。ここでは、RadRAT、ProZES、Blue Book Model、Xray RISK、Korean Specific Model、LARisk、PACE、JAXAのコード、HEINPUT、及び既存コードにおける不確かさの取り扱いについて説明した。これに関する質疑応答は以下の通り。

調査に追加すべきコード

(吉永委員) ProZESのみが後ろ向きの評価をしているか。アメリカのNIHが後ろ向きの原因確立等を評価するIREPがあるので、それも追加してはどうか。

(事務局) IREPも調査する。また、調査項目に前向き後ろ向きの項目も整理していく。

不確かさの取り扱い

- (岸本委員) 不確かさをどのように扱っているか、出てきたリスク評価の結果をどのように解釈するべきかの点も調査してほしい。
- (甲斐委員長) 生活習慣が変わってきており、同じ日本人であっても、原爆被爆者で40、50歳とこれからの40、50歳とでは、明らかに違う可能性があり、その点は課題である。不確かさに対してどんな考え方でどういう議論がされているかというのは大事である。放影研では不確かさの問題についてどう考えているのか。
- (坂田委員) 検討しなければいけないが、なかなか手を付けられていない。原爆被爆者たちが生きた時代と今の時代では、生活習慣も違い、医療の水準も違い、寿命もかなり伸びてきている。そのため、がんの生涯罹患リスクが相対的に高くなってきている。そういうものも予測という面、コードを作るということになったら、どういう風に入れていくかということが問題になる。また、循環器等の他の罹患についてのバックグラウンドが取られていないので、それをどういう風に入れていくかという問題はある。
- (甲斐委員長) 生活スタイルがリスクの修飾要因となる。喫煙は評価されているが、それ以外の修飾要因はどこまでデータがあるのか。BMIはもう取り込んであるのか。
- (坂田委員) BMIも入れて計算は一部行われている。ただし、自己申請の自記式のアンケートなので、回答がどの程度正確であるかの問題はある。
- (甲斐委員長) 不確かさの要因を挙げればいっぱいある。しかし、それがどこまで影響しているのか、の判断をしていかないといけない。コード開発をするところかで判断していく必要がある。その点はしっかり議論の中でやっていく必要がある。
- (古川委員) ProZESは不確かさに関して丁寧に入れており、参考になるのではないかと。RadRATはDDREFの不確かさの取り入れ方に関して丁寧に行っている。

コード作成で基にされているモデル

- (古川委員) どのデータを利用するかにも依存するというが、今回調査したのは全てLSSのみと理解してよいのか。
- (甲斐委員長) データベースそのものは原爆データが基本。BEIRは独自のモデルを少し作っているが、考え方は放影研で行われたもの。最終的にコード、プログラムを作る際に、不確かさ、利用目的をにらみながら、どういう風にこのプログラムの中でモデル化するかを考える必要がある。例えば、固形がんごとにリスクが違うので、ある程度Groupingするとか、Risk Transfer的なものをどういう風にリスクをGroupingするとかを考えることが一番難しいところである。そこは疫学の先生方とディスカッションを行い、もう一つは生物学的な知見が力になり得るかどうか、その両方を考え、視野に入れておかなければいけない。

事務局より資料3を用いて疫学調査に関する調査結果、現状の分析・評価及び課題の抽出、リスク予測の在り方及びコード活用法の検討について説明した。これに関する質疑応答は以下の通り。

LSSの公開データ及び分散共分散

(坂田委員) 今公開データとしている4つのデータは、Hsu先生を除いてオンラインから消えている。がん登録のデータをがん罹患の研究で使っているが、がん登録の利用申請する際に、この研究以外では使いませんという条件になっている。検証してもらうために放影研としては、データを出しているが、他のことに使われる可能性があるということで、オンラインで非公開にしている。今後、オンラインでデータを公開するという目的で申請して、それががん登録の方で認められれば公開できると考えている。

(甲斐委員長) P11の表中の丸のついているデータは、引き続き公開か。

(坂田委員) それも現状はオンラインから消えている。Hsu先生の論文に関しても、その申請書の内容を見て、オンラインから消すことになるかもしれない。がん登録に利用申請し直すので、それが承認されればもう1回出すということになる。手続きは秋ぐらいにはおこない、いずれは公開したい。

(事務局) オンラインで公開されていないという理解で良いか。申請すれば、P11の表中に丸がついていないものでも使えるというような理解で良いか。

(坂田委員) 共同研究でデータシェアリングということになるけれども、リサーチプロトコルを書いていただき放影研の中で認められて、がん登録の利用申請も通れば自由に使えるようになる。

(甲斐委員長) 使えるのはグループデータなのか。個別データは扱わない方針は変わらないのか。

(坂田委員) オンラインで公開するデータに関して、基本的にグループドデータにするという方針は変わっていない。データシェアリングという形であればIndividualのデータも使うことができる。

原爆被爆者の疫学研究

(甲斐委員長) 次のLSS15はいつ頃になる予定か。

(坂田委員) 計画としては来年頃公開に論文を投稿する予定である。アクセプトと同時にデータを公開する予定である。全死亡と新しく入力したファクターの分布位を予定している。他臓器はまた、死亡率は別のレポートに別のレポートとして投稿しようと思っている。LSS15として出そうと思っているものは2017年までのもの。2017年までの追跡データを使って解析する予定にしている。

事業成果の発信

(甲斐委員長) 年度毎に成果はパブリッシュすることは考えているか。例えば、コード開発の現状を整理し、レビューするだけでも学術的には有用な情報である。

(事務局) 年度毎にできればまとめの発表もぜひ進めていきたいと思っている。

4. その他

(甲斐委員長) 今日の議事次第に沿って議論させていただきました。先生方色々ご意見いただきありがとうございました。今年度の内容で、コードの調査、それから疫学研究の現状調査ということが進みますので、また進んだ段階で、また集まっていただいてご意見いただく。その段階では岸本委員がおっしゃったような、最終アウトプットのイメージを考えていくのも大事である。そういう意味では今回の調査の中から学ぶことになるかと思うが、そういうことをやっていただけるようによろしく願いいたします。

(事務局) たくさんの意見を委員の先生方からいただきましたので、これから反映しながら事業を進めてまいりたいと思います。

以上

7.3.第二回検討委員会議事概要

日時 : 令和4年12月21日(水) 13:00~15:00

場所 : AP丸の内 Aルーム

出席者 : (オンライン出席 甲斐委員長、岸本委員、古川委員、坂田委員、吉永委員)

規制庁 高橋統括技術研究調査官、荻野技術計画専門職、伊豆本技術研究調査官

(オンライン出席 森泉主任技術研究調査官、喜多技術参与)

JAEA (高原GL、嶋田研究副主幹、廣内研究員、鯨岡) (オンライン出席 野口)

議事

1. 前回議事録の確認【資料1】
2. 進捗報告【資料2】
3. その他

配布資料

資料1 議事録_第1回令和4年度放射線健康リスク評価コードの開発に関する

検討委員会_簡略版

資料2 事業の進捗

資料3 第2回令和4年度放射線健康リスク評価コードの開発に関する検討委員会_議事次第

開会

開会として、事務局より議事次第及び資料の確認、本日の参加者の紹介があった。

1. 前回議事録の確認

資料1を用いて前回の検討会の議事録について、委員よりコメントの有無を確認した。委員からのコメントは既にメールで頂いており、会議の場でのコメントはなかった。

2. 本年度の実施作業の進捗

事務局より資料2を用いて本年度の実施作業の進捗を説明した。今年度の実施作業は、大きく分けて4つあり、(1) 既存コードに関する調査、(2) 疫学研究に関する調査、(3) 現状の分析評価および課題の抽出、(4) リスク予測の在り方およびコード活用法に関する検討を説明した。これらに関する質疑応答は以下の通り。

(1) 既存コードに関する調査

(古川委員) X-ray RISKのリスクモデルとRadRATのリスクモデルは同じか？

(甲斐委員長) どちらもBEIRVIIで同じと考えてよい。しかし、出力がRadRATでは確率分布、X-Ray RISKでは点推定で異なる。X-ray RISKは医療被ばくを意識しているため、実効線量を入力として、コードの中で検査の種類から臓器の線量に換算し、BEIRVIIのリスクモデルを用いて、ERRなどを出力し、生涯寄与リスクを推定していると考ええる。

(吉永委員) BEIRVII等の各モデルの基となったLSSのデータが何年から何年までの罹患データであるかを示すと良いのでは。

(甲斐委員長) BEIRVIIは2003年のPreston論文、HEINPUTはEPAのレポートをベースにしている。ProZES、IREPについてはどうか？

(古川委員) ProZESは基本的にLSSのPreston2007の罹患データをベースにしている。肺がんのERR、EARは私の2010年の論文を使っている。ERR、EARの重み付けは、ドイツと日本のベースラインなどを比較しながら不確かさを考慮しつつ独自に行っている。

(川口委員) 旧JNESの「確率論的影響評価のための生涯リスク解析に関する報告書」の中にがんリスク解析に関していろいろな部位について計算しているので、これも調査の検討候補にしてはどうか？

(事務局) 発注したのはJNESの熊沢蕃氏、これはコードとして公開されていないと思われる。必要であればソフト会社を通じて聞いてみる。

(川口委員) この報告書では、生涯リスクや信頼区間を出力していて、内容として本事業と近いと思われる。リスクモデルはPreston2007年を引用している。

(古川委員) HEINPUTではユーザーが入力する情報が記入されていない(スライド11)が、ユーザー入力がなくてどのように情報を出力しているのか。

(事務局) HEINPUTはLevel 3 PRAで使用する単位線量当たりのがんリスクを計算するための前処理コードである。ユーザーはベースラインとリスクモデルを選択するだけで、臓器ごとの線量当たりのがんリスクを出力している。つまり、ユーザーは被ばく線量を入力する必要はない。また、HEINPUTは単位線量当たりの臓器ごとの性別や年齢を考慮した生涯リスクの変化などを指定して、グラフに示すことが可能である。

(2) 疫学研究に関する調査

(甲斐委員長) Mayakの肺がん死亡リスクは喫煙リスクを調整しているが、原爆被爆者の肺がんリスクも喫煙を調整しているのか？

(事務局) Mayakのリスクは死亡なので、比較している原爆被爆者の疫学調査は小笹先生の2012年の死亡リスクの論文であるので、喫煙リスクは調整していない。

(古川委員) 論文をPubMedで検索しているが、必要な研究が網羅されているかが気になる。修飾効果がモデル化している文献の内、日本はLSS4件となっているが、他のこれに含まれていない多くの個別のがんの論文でもリスクモデルには修飾効果のモデル化がされていると思われる。例えば、肝臓がんや胃がんなど。

(坂田委員) (個別のがんに対しても) 修飾効果は考慮している。修飾効果をモデルに入れた場合の結果によっては、モデルから外している部位もあるが、全般的に被ばく時年齢、到達年齢は一度入れて、フィットが有意に向上しない場合、修飾効果が有意でない場合は外している。修飾効果が有意でない場合も著者によってはそのまま入れてモデル化している。

(甲斐委員長) 今の古川委員の質問は、この検索でそこが拾われているかどうか。つまりこれらのキーワードで落としているものがあるか？たとえば原爆の近年の最新の部位ごとの罹患の研究など。

(事務局) こちらの文献調査では、修飾効果のモデル化と次のERRの比較のレビューとやり方を変えており、結果が混合してしまった。事務局で再度整理をして修正する。日本の(近年の原爆被爆者の疫学調査研究)は4件だけではないことは理解している。

(甲斐委員長) (疫学研究のレビューは)コホートに注目した方が効果的だと思う。広く知られているコホートとしては、原子力作業者のINWORKS関連があり。アメリカは最近ミリオンスタディを実施している。また、同じコホートで追跡期間が延びてデータが増えてれば新たなモデルで解析されている。

(事務局) コホートでの整理を試みる。

(甲斐委員長) 今回の調査である修飾効果のモデル化に対して、どのような調査方法が良いかアドバイスはあるか？

(坂田委員) Brennerが筆頭著者で原爆被爆者の個別のがんの罹患のサマリーの論文を準備中である。サマリーの論文では全部位について性、年齢、到達年齢、全部を入れたモデル、同じモデルで全部解析した結果を載せているので、それを見てから個々の部位別の論文を見比べるとよい。

(甲斐委員長) 現時点での結論は、LSSが年齢を含めて長い期間のフォローアップを持つので、修飾効果のモデル化についてはLSSのみであった。

(古川委員) 年齢効果に関して、明確に書いてあるのはLSS以外には非常に限られている。性差に関して、LSS以外で性差があるのはほとんどなく、Mayakの肺がんの男女差があるぐらいである。そのあたりはリスク評価、生涯リスクの予測をするうえでLSSが中心になっていくのがよくわかった。LSSでも被ばく時年齢、到達年齢、性差があったとしても、がん部位別に考えた場合は精度が足りない場合があり、おかしなリスク予測になってしまうことがある。全固形がんとか白血病は問題ないと思うが、部位別では問題があったりする。リスク評価ツールでよく使われているBEIRVIIモデルは、そのあたりに強い仮定を入れている。修飾効果として、被ばく時年齢、到達年齢の効果は全てのがんで推定したモデルを個別のがんに対して入れ、ERRの値だけを変えている。だから部位別がんに対してはLSSのデータの結果があったとしてもリスク評価は難しい。

(甲斐委員長) チェルノブイリの緊急時作業者の2020年の論文という報告では、固形がんのリスクが有意になっている。私の理解では、チェルノブイリの疫学研究で明らかに放射線の影響が見えているものは白血病と甲状腺がんということで、国際的にもそのように理解されていたと思うが、固形がん全体でも見えてきているということか？

(事務局) 資料に示した通り、チェルノブイリの緊急時作業者の全固形がんのERRの値が有意になっているといえる。

(坂田委員) 論文を整理するうえで、観察された集団の中の男女の割合も併せて検討した方がよい。

(吉永委員) 修飾効果に関して、原爆被爆者は平均線量が200mGy程度なので放射線の主効果が比較的大きく、他の因子による修飾効果が統計的に見やすい。一方、Nuclear Workerの被ばく線量は10~20mGy程度の平均累積線量しかないので評価が

難しい。さらに被ばく形態が1回ではなくて、複数回で長期間に渡り被ばくするので、それをどのように扱うかで修飾効果の評価が難しいという限界がある。また、原爆被爆者の研究と他の研究を比較するという点に関しては、被ばくの形態が、1回の高線量被ばくか長期にわたる低線量率被ばく、あるいは分割被ばくと1回被ばくの違いを見ていることになる。そのような違いを見ようとしても、今のところ線量当たりのERRに大きな差はなかったという結果を示している。これは、今後のリスクのモデルを開発するうえで有益な情報になったと思う。

(甲斐委員長) 多くの疫学研究は慢性被ばくなので、被ばく時年齢の扱いは原爆被爆者とは違ってくる。最近のEPI-CT コホート研究についても、検査開始時年齢というのが1つの修飾要因になっているが、CT検査は必ずしも1回ではなく何年にもわたって行われるので、なかなか被ばくの状況が論文の中からは見えてこない。

続いて、事務局より (3) 現状の分析評価および課題の抽出、(4) リスク予測の在り方およびコード活用法に関する検討について説明があった。主な質疑応答は以下の通り。

(3) 現状の分析評価および課題の抽出

(甲斐委員長) コードの活用として、汎用か目的別かという点で、目的別は非常に明確だが、実際的意思決定は線量で対応している。最終的にリスクを使うという場面の多くがコミュニケーションである。線量では説明しにくい場合にリスクを使って説明している。また、職業被ばくでは最適化という言葉が出てきたが、最適化も線量を使って実施されている。医療では最適化までいってないが、患者さんに説明をするコミュニケーションという意味では、リスクは非常に重要な言葉になりうるという印象を持った。確かに、リスク評価とは何の目的の評価かをもう少し明確にしなければいけない。医療被ばく、職業被ばく、緊急時被ばくの目的別であっても、コミュニケーションのツールとしてのリスク評価と、緊急時被ばくにおける防護やデザインとしてのリスク評価が考えられる。先ほど韓国の例であった、緊急時を計算してリスクを0.1%に抑えるのは、その立地距離などのコントロールできるデザインのレベルでそのリスクの値を目指し、事故が起きても0.1%を超えないというセーフティゴール的な考え方だろうと思われる。リスク評価コードは、デザインベースのためのツールか、コミュニケーションのためのツールか、ということに絞られてくる気がする。この二つ以外にリスク評価の活用として、職業被ばく補償があったが、それ以外の利用例は何かあるか。

(古川委員) 定量的リスク評価の活用法とその意義で一番わかりやすいのが医療被ばくのケースだと思う。検診のCTスクリーニングを受ける場合に被ばくによるリスクとそれを検診による早期発見から死亡率低下などのベネフィットを定量的に比べ

るケースはいくつかある。そういった活用もできるというのが一番わかりやすい。

(岸本委員) RadRATなどが活用された論文を抽出しているが、活用した省庁の機関の報告書とかはないのか？

(事務局) 論文以外となると調べるのは容易でないので、論文の著者にコンタクトを取り、開発国内でのコードの活用について問い合わせている。RadRATに関しては、現在回答待ちという段階である。

(4) リスク予測の在り方およびコード活用法に関する検討

(古川委員) リスクコミュニケーションの説明で、例えば、がんになる確率が0.2%増えるというリスク予測をして、いろんな場面で使われるという話があったが、果たしてこれはコミュニケーションになっているのかが気になっている。先ほどのリスクベネフィットの定量的な比較、例えば、死亡率の低下によるベネフィットがリスクを上回るなどに比べ、リスクコミュニケーションとしてどれだけ意味を持つのかというのが気になっている。

(甲斐委員長) 今ご指摘いただいた点は、これまで福島事故以後のリスクコミュニケーションとして行われている。しかし何をもって人々に信頼できる情報が伝わり、理解されるのか、またそれで何かを判断するのかが、まだ明快な回答がない。リスクというものを伝える側も伝えられる側も十分に理解しないといけない。例えばリスクがどういう情報に基づいてどんな不確かさを持っているのかも十分に伝わっていない現実もあるように私は感じてきた。そういう意味のリスクコミュニケーションであれば、どういうふうはこのリスク評価を使うのかという目的をしっかりと詰めなければ、リスクコミュニケーションとしては使えないことになるのではないかと思う。その明快な回答は、今のところはないので、リスクを計算するところから一歩先がなかなかない。補償はゼロか1の判断だから、その減額率を例えば50%にするのか10%にするかは国ごとに判断が違い、議論はあるが、それは行政が扱うものである。リスクを本当にコミュニケーションに使うとしたら、どうあるべきなのかは、今後しっかり議論しなければならない点である。

(岸本委員) そのコミュニケーションで使う場合に、放射線リスク単体で使うケースもあると思うが、その場合でも何かと比べないとその数値の意味が理解できないので、自然放射線やCTスキャンとかの被ばくと比較する必要がある。また、放射線以外の他のリスクと比較する場合もあるかもしれない。また、何かと何かのトレードオフになっている場合は、その直接のトレードオフになっているリスクと比較し、場合によっては交通事故とか全然違うものと比較してコミュニケーションするという例があるかもしれない。リスク評価の使い方話に入ってくるので、調査範囲を広げる場合はリスクの比較対象の調査をお願いする。

(川口委員) 原子力規制庁は、開発するコードに対する具体的な目的はあるのか、それとも使い方含めて検討する委託になっているのか？

(規制庁) 本事業の仕様書に目的が示されており、第1回検討委員会でも紹介した。原子力災害の緊急時において、避難や一時移転といった防護対策を考える場合、小児や妊婦、高齢者等の集団の属性に基づいて放射線被ばくに伴うがんリスクを予測する必要があるが、我が国においては放射線防護を目的とした汎用の評価コードが整備されておらず、必要な情報を十分に提供できていないのが現状である。本事業は5ヶ年間のプロジェクトとして進めており、今年度は諸外国における既存コードについて調査している。また、LSS以外の主要な疫学研究についても調査しており、LSSの知見を中心にコードを開発してよいか、確認しながら進めていく。諸外国における既存コードの開発背景や活用例を調査し、国内関係者やポテンシャルユーザーも含めて活用先を明らかにした上で、来年度、コード開発の概念設計を行う。緊急時対応というものが背景にはあるが、具体的な活用方法を検討し、関係者も含めてしっかり認識を揃えながらコード開発を進めていきたい。

(甲斐委員長) 事業の進め方としては、シナリオと目的を想定して、そのためにはどういった機能や性能、入出力を持った方がいいかを検討するのがいいかと思うが、その方向性についてはどのように考えるか？目的をいくつか挙げておいてその目的に沿ったコード開発をすすめるやり方はどうか。

(岸本委員) 一般論としては、いろいろ余地を残して開発するのはもちろんいいが、どこまでが共通で、どこからが目的に応じて、ファインチューニングをしていくのか、その辺りによると思う。今回、諸外国でどのような使われ方をしているかを調査して、我々の想像力を働かせてこんな使い方もできるかを足して最大限に広げたプールを作って、そこから逆に絞っていくみたいなプロセスでやるのがいいかと思う。

(甲斐委員長) 目的を規制庁から述べられた災害時の防護対策を基本に置きながら、他にもどういう活用ができるかと検討する方向かという印象を持ったのだが、それはどうか？それともあまり最初は限定せずにRadRATのような汎用コードの方向性で、どういう活用ができるのかを検討するのもあり得る。

(古川委員) モデリングについてコメントすると、リスク予測の上では、リスクモデルの種類（線形モデルや線形二次モデル）などのオプションが多すぎる。それを開発者が決めるのか、あるいはユーザーが決めるのかを決める必要がある。ユーザーが決める場合は負担にはなると思うので、開発者の立場からどのリスクモデルを使うのかが、大きな問題になると思う。

(甲斐委員長) 今のご意見は、疫学の本質になる。原爆データに関して、線量反応関係

の曲率もフォローアップすることによって曲がってきた。また、過去の被ばく者の最近の生活習慣は変わってきているので、そういうベースラインにも影響受けている可能性がある。つまり、ベースラインにもコホート効果が入っている。それを他の集団に当てはめるときにどこまで考えるのか。これはユーザーが決めるのは不可能だと思う。そういう意味では専門家が目的を絞らないといけない。

(岸本委員) コードがWebブラウザ上で動くようなものだとしたら、最初に目的を選んでもらう仕様がないと駄目なのかもしれない、使い方の注意書きが出てきて、そこから入力画面に移るワンクッションが必要になるかもしれない。

(甲斐委員長) それもありうると思う。そういう目的を選ぶことによってある程度その中の計算の流れや出力が少し変わるのはありうると思う。いずれにしても目的と適用範囲を意識しないと、モデルにも影響してくることは間違いない。計算の限界を押さえておかなければ、誤解や誤用されてしまうので、目的を明確にする必要がある。

(坂田委員) 原因確率と生涯寄与リスクでは、原因確率でしたらバックグラウンドが過去のものになるので、観察されたがんに対してリスクがどれだけあったかの評価である一方、生涯寄与リスクは将来のベースラインがん罹患リスクがどう増えていくかで予測するので、その部分にも予測が入りエラーバーがさらに広がる。そのような不確かさまで考慮する必要が出てくるのか？

(甲斐委員長) ベースラインの将来予測は5年先ぐらいでしたら難しくないかもしれないが、10年先になるとかなり不確かさが大きくなると思う。どこまでベースラインの予測をするかというのは、今の段階でももちろん結論は出せないが、今後の課題と思う。やはりプロスペクティブな計算をするのだから、例えば災害時に子供ならば、がんは40年50年先になって出てくるので、将来のベースラインが相当影響してくることは確かである。

(古川委員) 将来にわたってベースラインリスクが現在と同じかどうかという質問の答えとしては、現時点では現在の一番新しいがん罹患ベースラインがそのまま未来まで続くという強い仮定に基づいている計算している。ただ、一般的ながんの予測モデルで使われているのは、例えばAge-period-cohort modelを用いて、年齢、ピリオド(暦年)、コホート(出生年)の効果をそれぞれ分けて考えた上で、ピリオド効果を将来に向けて外挿する方法などがあるが、そういう方法を用いるのが本来は妥当である。放射線リスクの将来リスク予測に関しては、そういうことは行われていない。誰かやったら面白い。

(甲斐委員長) 福島で問題となり社会的な関心の高い甲状腺がんについては、将来のベースラインリスクが必要かもしれない。地域的に甲状腺がんのベースラインが違

うので、災害時の将来予測となるとこれを考えなければいけない。どういうがんに注目するかにも影響してくる。やはり原子力発電所の事故であれば、そのヨウ素による甲状腺がんは注目しなければならないし、目的対象があるからそういう問題が出てくると思う。今日の議論にあるように、このコードをどういう対象に、どういう目的でどう使うかをある程度のイメージを持った上でコード開発をする必要があると思う。何がポイントかを整理しなければ、効果的なものにならない。

(坂田委員) 子供の生涯寄与リスクを計算する場合と、ある程度歳を取った60歳ぐらいの人の生涯寄与リスクを計算するのでは、エラーの幅が違う。それを何らかの情報として提供することはあるのか？

(古川委員) 子供は将来までの時間が長いから不確かさが大きくなるので、それ考慮して結果に反映させるべき。今の不確かさは結局リスクモデルの不確かさを反映させているだけで、ベースラインは固定している。坂田委員がおっしゃられる将来の時間が長いからその分の（ベースラインの）不確かさを反映させるべきだけど、（今のリスク評価は）反映されてはないと思う。

(甲斐委員長) コミュニケーションとして人に情報を伝えて説明する点では相手はそういう情報を求めるわけなので、それに応えられるようなメッセージを提供していかなければならない。正確な情報っていうのは将来のことなので無理なわけですが、どのような情報が影響してくるのか、この仮定で計算していることだけを伝えるのではとどまらないと思う。そこは課題として考えていく必要があるとは思う。

(坂田委員) 先ほどの規制庁からのお話の中で、妊婦の方のリスクを評価する話があった。そのリスク評価の中には、胎児のリスクを評価するとか、流産とか不都合な妊娠終結のリスクを評価することも入るのか？

(規制庁) 資料2の2ページ目に5ヶ年間の事業スケジュールが示してある。令和5年度にコード開発の概念設計を行い、その後、令和6年度に固形がん、令和7年度に白血病を対象としたコードを開発し、令和8年度にはがん以外への対応についても検討する計画である。がん以外とは、白内障や循環器系疾患を意識して書いている。胎児の直接的な健康影響について、現時点では少なくともこの5ヶ年間のスコープには含まれていない。コード開発はこの5年で全て終わるわけではなく、継続して開発していく中で必要があれば反映していくものと考えている。

(甲斐委員長) 胎児以外についても、閾値のある組織反応として捉えられている。このリスクコードでは確率の計算をすることになっているので、閾値の推定をするわけではないので、これらは分けて開発する。閾値となれば線量推定が重要になるので、違う問題と個人的に思う。このリスク評価コードの基本はがんであり、もちろん非がんについても、確率的な影響で考えることになれば変わるが、そうい

う視点を持っておくことは大事だと思う。今の段階ではがんを中心に評価すると思うのだが。

(岸本委員) 緊急時の利用となると、どう使うのかを具体的に議論してもいいと思う。避難とかの判断に使うとか。そうなる和被ばく量の推計の方がボトルネックになると思う。それなら、事前の想定シナリオでやるのか。福島のときを思い出すと、被ばく量の推計で大気拡散モデルが使われなかったなどボトルネックになる。いくら立派なリスク評価コードができて使えなかつたりするので、そういう連携も含めていろいろ考えてみた方がいい。

(甲斐委員長) 通常このリスク計算はデザインに影響すると思うが、デザインという事前評価で活用するか、それともコミュニケーションにするか。

(岸本委員) その中間で、リアルタイムで使えるかどうかの話はあるか？

(甲斐委員長) リアルタイムのリスク評価は難しい。福島原発事故後の3月の時点ではリスクの議論は難しかったと思うが、4月5日以降になって少し落ち着いてくると、放射線被ばくはどんなリスクなのかと関心があり、100 mSvあたり0.5%というICRPの名目リスク係数をもって、新聞報道は広がった。そのリスクに対して専門家として私達も説明が求められた。そういう場面では、どういう情報をもとにどういうリスクをコミュニケーションとして使うかを、具体的に考えていかないと答えは見えてこないと思う。そういう意味で目的をある程度絞った上でどう活用するのかのイメージを持ってコードを作っていた方がいいと思う。そこまで最初から絞るのは適切かどうか議論があるかもしれないが、少なくともそういうプロセスは踏んだ方がいいと思う。そのリスク評価がどう使うのかを常に議論をしてゆく。来年度もまた早い段階でこの委員会が開催されるとしたら、そういう具体的な目的を想定した使い方や、入出力と活用に絞った議論ができる。

3. その他

(事務局) 今年度中に、第3回会合がございます。第3回の会合はおそらく2月3月になりまして、日程調整にご協力いただけますと幸いです。あともう一点、本日の議事録につきましては事務局で作成した後、前回と同様に先生方にお配りしたいと思っておりますのでご確認の方よろしくお願いいたします。

以上

7.4. 第三回検討委員会議事概要

日時 : 令和5年2月28日 (水) 13:00～15:00

場所 : オンライン

出席者 : 甲斐委員長、岸本委員、古川委員、坂田委員、吉永委員、川口委員

規制庁 高橋統括技術研究調査官、森泉主任技術研究調査官、荻野技術計画専門

職、伊豆本技術研究調査官、本間技術参与、喜多技術参与

JAEA (高原GL、嶋田研究副主幹、廣内研究員、鯨岡)

議事

1. 前回議事録の確認【資料1】

2. 進捗報告【資料2】

3. その他

配布資料

資料1 議事録_第2回令和4年度放射線健康リスク評価コードの開発に関する
検討委員会_簡略版

資料2 事業の進捗

資料3 第2回令和4年度放射線健康リスク評価コードの開発に関する検討委員会_議事次第

開会

開会として、事務局より議事次第及び資料の確認、本日の参加者の紹介があった。

1. 前回議事録の確認

資料1を用いて前回の検討会の議事録について、委員よりコメントの有無を確認した。委員からのコメントは既にメールで頂いており、会議の場でのコメントはなかった。

2. 本年度の実施作業の進捗

事務局より資料2を用いて本年度の実施作業の進捗を説明した。今年度の実施作業は、大きく分けて4つあり、(1) 既存コードに関する調査、(2) 疫学研究に関する調査、(3) 現状の分析評価および課題の抽出、(4) リスク予測の在り方およびコード活用法に関する検討である。これらに関する質疑応答は以下の通り。

(1) 既存コードに関する調査

(古川委員) 資料ページ5に利用LSSとあるが、LSS13などは死亡率データだが、RadRATは罹患率に対する予測ツールであるので、この表記は誤解を生む。

(甲斐委員長) 古川先生、坂田先生に確認したい。LSS13は死亡率のレポートだが、罹患率レポートはどのように表現しているのか。例えば、罹患率と死亡率について別々に番号をつけて表記しているか。

(坂田委員) 死亡率の場合はレポート番号を付けているのでレポート1からレポート14までであるが、罹患率の場合は、そのような番号を付けていない。

(甲斐委員長) そうすると、罹患率の調査を引用する場合は、その論文の著者名と論文の番号で書いた方が良いのか。

(坂田委員) それが一番わかりやすいと思うが、一目見て分かりやすいのはLSSレポート13と書いてあればいい。

(甲斐委員長) 先ほどの古川先生のコメントは、RadRATは罹患率のデータも扱っているので、必ずしもLSS13ではないということ点である。LSS13のデータも使っているが、罹患率のデータも使っている。それは2007年のPreston論文か。

(坂田委員) 2007年のPreston論文である。LSSレポート13とPrestonの2007年版の論文と併記されると、mortalityとincidenceの両方を使っているのが分かる。

(甲斐委員長) では、そのレポート番号と論文の両方を表記するのが間違いないのでしょうか。

(事務局) LSSだけで表せないものもあるので、「Preston, 2007」のように併記できれば良い。

(古川委員) 関連したコメントであるが、利用LSSというのは、データのことだと思うので論文名と調査期間があればそのデータを使ったことが分かる。もう一つ重要

な情報として、どのようなモデルを使ったかである。LSS13、あるいは論文の筆頭著者名でもよいが、そのモデルを使ったか、あるいはLSSデータを使って独自にモデルを開発したかでちがう。モデルは下の段に記載されていたことを了解した。

(甲斐委員長) 参考モデルに書いてある「NUREG」「EPA」「BEIR」、あとは「独自に開発」、ProZESが独自に開発、RadRATも「BEIR VII」モデルである。

(古川委員) RadRATについては、この表でそこまで詳しく言う必要はあるか分からないが、BEIR VIIモデルと全て同じではなく、BEIR VIIで考慮していないがんについても扱っている。

(事務局) Blue Bookのように一部修正という記載が、RadRATにも抜けているので、そのあたり修正していきたい。

(甲斐委員長) 重要なポイントは表の中に入れた方が、注釈のノートよりもいいと思う。モデルについても、大事な点なので記載をきちんとお願いしたい。

(甲斐委員長) ProZESの中に「マルチモデル推論」というのがあるが、これはどういう内容か。

(事務局) 色々なフィッティング方法があり、その方法による不確かさのようだと調査の中で感じた。

(古川委員) これはドイツ・ミュンヘンのヘルムホルツ研究所のグループがよくやっている方法である。普通のモデル選択では、線形か、線形二次か、どちらかのモデルフィットを比較し、線形の方が妥当なら、それ以降は線形モデルだけを使用してリスク予測する。一方でドイツのグループは、モデル選択にも不確かさがあるので、線形モデルだけではなく、線形モデルと線形二次が少ししか当てはまりが違わなかったら、当てはまりのよさに応じて重み付けしたモデルの平均をとる方法がマルチモデル推論である。

(甲斐委員長) そうすると、複数のモデルで推定してリスクの予測する時に、推定をする際にそれらのモデルを組み合わせて推定をすることか。例えば過剰相対リスクと過剰相加リスクを組み合わせるように。

(古川委員) ここでやっているかどうか知らないがそういうこともしていると思う。

(吉永委員) これらのコードのリスクを評価する対象は、開発主体の国の集団と考えてよいか。これはリスク転換の話にも関わってくる。

(事務局) 大体のモデルがその開発主体の国である。RadRATでは一部、他の国の集団に対しても評価できるようになっている。例えば日本人や韓国人が評価できるようになっている。

(甲斐委員長) 今の関連の質問だが、確率論的リスク評価 (PRA) のモデルはどうか。

その国の原子炉を想定しているのか、原子炉のタイプによっても異なるのか、一般的な原子炉を想定しているのか。

(事務局) MACCSは、アメリカの各発電所に対して評価可能である。アメリカの発電所周辺住民の人口分布を考慮して、死亡者数、がん罹患数を計算できる。

(甲斐委員長) 基本的にコードは開発国の公衆を対象にしている。それ以外の国の人口統計も考慮可能だが、基本的には開発国を対象としているのでよいか。

(事務局) その通りである。

(甲斐委員長) JAEAが開発しているOSCAARのHEINPUTも日本の原子炉 (BWRとPWR) の2つの原子炉を想定しているか。

(事務局) OSCAARは日本の原子炉を対象としている。

(甲斐委員長) それぞれの開発国ごとに評価することが主な目的であることは当然だが、汎用性のあるRadRATもある。

(古川委員) 資料中の不確かさの取り扱いが赤と黒で記載されているが違いはあるのか。

(事務局) 黒の記載は点推定で不確かさの取り扱いがないもので、赤は考慮しているものとして分けている。

(古川委員) 不確かさの取り扱いとして、Blue Book Modelで「選択バイアスの不確かさ」、「がんの検出と診断の誤り」、Korean Specific Modelで「不完全な追跡期間」などがあるがどのような意味か。

(甲斐委員長) ご指摘のように、不確かさ評価のパラメータを注目してもよい。フォローできているのであれば、今簡単に説明していただけますか。

(事務局) 報告書にはまとめているが、今すぐには説明できない。

(甲斐委員長) 特に被ばく者集団の「選択的バイアス」これは昔アメリカ・イギリスのAlice M Stewartという研究者が、原爆の被ばく者集団は生き残った人々だから、免疫的に強い人たちが生存しているバイアスがあると議論になった。2~30年前だが、そのあたりの事を挙げているのか。

(事務局) そのような内容だと思うが、再度文献を確認する必要がある。

(甲斐委員長) これからも不確かさ評価について皆さんに議論できればと思う。

(事務局) 赤字の部分の話だが、スライドの4枚目のところに赤字の注釈がある。今回の第3回の検討会は今年度実施した事業内容全てについて説明する位置づけなので、第一回、第二回の内容も含めて説明資料を作成している。先程の不確かさに関しても第二回の後には調査して新たに分かった点を追記した。

(甲斐委員長) 報告書は委員の先生方で共有されるか。

(規制庁) 専門的で客観的な立場からのご意見をいただければと思う。委員の先生方によるレビューも入れた形で報告書を作成できるよう進めていきたい。

(事務局) 承知した。報告書提出のタイミングは後ほどお知らせする。委員の先生方にも共有させていただく。

(2) 疫学研究に関する調査

(甲斐委員長) 患者の表でEpiCTに関する論文でオランダが記載されているが昨年のフランスの小児CTのコホートは出てこなかったのか。

(事務局) 情報をいただけると幸いです。

(古川委員) 表記の「コホート数」だとコホートの数になるので、この場合には「対象者数」の方が良いのではないか。

(事務局) 訂正する。

(吉永委員) 表記のコホートはLSS以外でも放射線の健康影響に関連した代表的なコホートだが、研究デザインはすべてコホートであるか。

(事務局) 論文をひとつずつ確認する必要がある。

(甲斐委員長) PubMedの検索条件にはコホートとは入っていないか。

(事務局) epidemiologicalのワードは入れている。

(甲斐委員長) コホートは入っていないので、ケースコントロールが入る可能性がある。前向きのコホートなのか、後ろ向きのコホートなのか、ケースコントロールなのか分けても良いかもしれない。

(古川委員) Cancer SiteにおいてAll Solid CancersとAll Solid Cancerはどのような違いか。

(事務局) それらに違いは無いので、表記を確認して統一する。

(古川委員) 今後、部位別のがんのリスクモデルを考える場合には、部位別の情報も入れたほうが良い。表のサイズが大きくなる可能性があるが。

(事務局) 報告書の中では可能な限り表記したいと思う。

(吉永委員) 被ばく者の集団は全年齢、職業人は成人、小児の被ばくは小児期なので結果を単純に比較できない。

(事務局) コホートを比較する際は注意する。

(甲斐委員長) 様々なコホートがあるので情報の整理が問題となる。

(古川委員) 論文のファーストオーサーの名前はフルネームで書く必要はない。

(事務局) 修正する。

(3) 現状の分析評価および課題の抽出

(甲斐委員長) LSS以外の疫学研究とLSSを比較し、不確かさの範囲内でおおむね一致しているのでリスクモデルとしてLSSが妥当ということだが、これは全固形がんなのか、白血病なのか、部位ごとなのかを明確にしておいた方がよい。

(事務局) 現状では部位別のがんに関して検討はしていない。これは全固形がんに関する結論である。

(甲斐委員長) まだ白血病は検討していないことを明確にした方がよい。

(古川委員) LSSのデータ利用が妥当だと思うが、LSSのリスクモデルの利用は曖昧だと思う。LSSのデータを使ってどういうリスクモデルを使うかがポイントである。BEIR VIIのような大きな委員会でも議論しながらリスクモデルを決定することが出来ない限り、他のモデルを使うしかない。自身で開発できない場合はLSSの論文に書かれているモデルをそのまま使う。これはUNSCEARがやろうとしている。放影研の報告書だけではリスク予測に必要な情報を得られないかもしれない。疫学調査のデータが使えるかどうか問題になってくる。

(坂田委員) データの公開については、GrantらのCancer Incidenceの最新のデータは公開の見込みが立っていない。もし論文に書かれていないパラメータが必要ならば、データ共有の申請をした方がよい。

(甲斐委員長) 公開できない理由は何か。

(坂田委員) Cancer Incidenceは広島・長崎県のがん登録がデータを収集しており放影研が集めているわけではない。そして、データの利用申請の際に、この研究にのみ使用するという申請をしているためである。公開すると申請以外の研究に使われるので、それを助長することはできないということである。新たな研究に使うということを県のがん登録に認められればデータを利用することが出来る。

(4) リスク予測の在り方およびコード活用法に関する検討

(岸本委員) この事業目的の原子力災害時の防護対策の意思決定は、平常時に災害時の防護対策を決めるときに使うか、緊急時に使うかでは全然違う。他の用途や出力も文字だけではわかりにくいので、シナリオやストーリーとしてまとめた方がわかりやすい。他のリスクと比較するのも、どのようなストーリーが想定されるのか、なぜ比較する必要があるか。典型的なシナリオを作ってみるとよい。

(古川委員) 目的が原子力災害時の防護対策の意思決定の支援ということで、LSSのリスクモデルを使って数字を出すことは出来るが、その妥当性は疑問に思う。

(甲斐委員長) コードの作成段階では現在の科学的な知見に基づいて汎用性の高いコードを作り、いろいろなリスク指標を出力できるようにした後で、コードの使用を限定できるようにしたほうが良いと思う。

(事務局) リスクの妥当性について、LSSは1回の急性被ばくであるのに対して、原発事

故で汚染された地域では慢性被ばくで違うことから妥当性を得るのが難しいという理解ですか。

(古川委員) その通りである。シナリオに一番近い研究から得られたリスクモデルでも予測することが重要である。

(事務局) 急性と慢性のDDREFをどのように設定するかは議論になる。

(古川委員) LSSのモデルを使う場合はDDREFの検討も必要になる。

(甲斐委員長) LSSの情報だけではリスク予測できない場面がある。LSSで得られない情報は追加で考え、そのモデルの妥当性も課題である。

個人的な印象として、ユーザーやシナリオを限定すると、一般的なリスク情報が得られにくい。どういう社会がどんなリスク情報を求めているか、線量だけではないリスク情報がどんな社会で必要になるか。福島事故の時は1 Svでがん死亡リスクが5%という数字が独り歩きして説明が十分にできなかった。どんなリスクの情報を求めているかを把握することは一つのステップだと思う。

(岸本委員) 高い線量を対象にしていると思うが、計画被ばく状況のような少ない線量に対してもコードを活用しても良いのか。

(事務局) 線量の範囲に関しては、現時点では明確に決めていない。

(岸本委員) 食品中の放射線は有害物質と比較してどれぐらいのリスクがあるかをコードでシミュレーションすることを想定するか、それともコードを使用する線量の下限値を設定するか。

(事務局) 直線しきい値なし仮説で計算する想定なので、低線量・低線量率被ばくのリスク計算は可能であるので、食品中の他の物質とのリスク比較は可能と思う。

(岸本委員) コードの利用を制限するか、活用状況を推奨するのか、何も言わないのかはいずれ考える必要がある。

(甲斐委員長) リスク評価の対象を縛りこんで制限するのは難しいが、使い勝手の部分で説明することは必要である。不確かさ、ストーリー、低線量被ばく、慢性被ばく、リスク予測には限界があるが、限界をどのように説明するかが重要である。

(事務局) 出力結果に関して、不確かさが大きすぎる出力は信頼度が低いと示すことも検討する。

(甲斐委員長) これは今のリスク計算の限界である。低線量・低線量率を語るには疫学だけでなくbiologicalな情報も含めて総合的にリスクを見ないといけない。低線量では不確かさが大きくなりリスクが高いと理解されてしまう。

(事務局) リスクをどのような場面で使うかの問題は、コードの中の不確かさで対応する考えもあるが、たとえばOSCAARでは公開を限定し、ユーザーが技術的・研究的な知識を持っているか確認して限定配布している。リスクコードをどう使うかに関して公開方法のところで議論してほしい。

(川口委員) コードの目的を検討するために、入力するものから考える方法もある。たとえば原子力事故時の食品中の放射能濃度や、環境中の空間線量率、職業被ばくなら個人線量計の測定値などが入力する情報である。それらの入力値からコードの目的を絞るのも一つの手と思う。食品の内部被ばくを考えたときに、リスク評価ツールとして内部被ばく計算コードまで入れるか。入れた場合に臓器別の線量まで算出して臓器ごとのリスクを計算する。どのような情報を入力するかを絞った方が良い。

(甲斐委員長) 原爆のようなケースを想定すると全身被ばくの実効線量とか空間線量率などの入力情報に応じてリスクを評価するかを整理した方が良い。計算上は線量が得られればリスクが出力されるが、それが妥当かどうか。今の段階では視野を広く見て問題点を整理したのちに、絞ったほうが良い。入力データのタイプも意識するとよい。

(坂田委員) 資料p21の事業目的は原子力災害時の防護対策の意思決定の支援とあるが、その重要度はどれくらいか。この場合、原子力災害時の防護対策には避難も想定しているか。それとも様々な規制を想定しているのか。内部被ばくの問題も入ってくると思う。

(事務局) 内部被ばくは別事業で内部被ばく線量評価コードを作成して。そのコードで出力された臓器の線量をこちらのリスクコードでも利用して計算するだけでなく、こちらリスクコードでも内部被ばくに関する何かを作る必要があるということか。

(甲斐委員長) 内部被ばく線量は内部被ばく線量計算用のコードを使って計算する。内部被ばくのリスクを計算する場合は、そのアウトプットを活用する。

(事務局) 別事業で内部被ばくを計算するコードを作成しているので、その出力をリスクコードが受け取れば、等価線量、実効線量から臓器別のがんリスクを評価可能である。

(甲斐委員長) 原子力災害時の内部被ばくはヨウ素131の甲状腺、プルトニウムなどの α 線の被ばくがある。原子力災害であれば内部被ばくは避けられないので、重要なポイントである。

(事務局) リスクコードの活用対象とする防護措置を避難に限るか食品の摂取制限に限るかは現時点では考えていないので幅広く考えてゆきたい。

(岸本委員) これは緊急時のリアルタイムのリスク評価の話か、事前のリスク評価の話か。

(甲斐委員長) 緊急時の防護措置の意思決定の話である。緊急時の準備、防災計画の段階で検討する意味も含んでいる。実際に緊急時が発生したときにどのようにコードを活用するかも検討する。

(岸本委員) 緊急時は線量などの情報不確実になる前提で考えたとき、通常時は確率分布の期待値で考えるが、緊急時はワーストケースをあえてつかう運用の方法もある。そうすると出力結果もワーストケースとなり、何かと比較するときには注意が必要である。

(甲斐委員長) 線量は放射線関係者にとっては重要で信頼できる値であるが、線量だけでは世間に対して説明不足である。その線量がどれぐらいのリスクをもつのかを示すことが必要。放射線関係者でも一般的なリスク係数しか知らず、年齢依存も考えていない。このコードはそのギャップを補うことになる。コードの活用に関して、このように活用すれば有用になることを議論してゆきたい。原子力災害だけでも検討課題は多くあるが、災害以外でも低線量での比較でも参考になる。参考にならない場合はその理由を考えても良い。

(岸本委員) このコードは教材としても利用することを検討して欲しい。

(甲斐委員長) リスク認識を深めるために、防災、医療分野でコードを活用してリスクを考えることができると思う。現在、ICRPの中で放射線リスクに関して一番意識が高いのは医療分野の方々である。なぜなら患者に対して普段から高い線量を照射して診断をしているからである。そのケースにどのようなリスクがあり、そのリスクを医療関係者が理解し、患者とリスクコミュニケーションをとることが求められている。医療に特化したリスク指標を作ることも主張されている。

(岸本委員) 医療関係なら、リスクベネフィットの比較はかなり優先度が高く、その場合にはDALYのような指標も必要となると思うが、原子力災害ならDALYまでではなくても良いと思うので、シナリオを描いてみるのが重要だと思う。

(規制庁) 今年度、事務局が諸外国における既存コードを調査した中で、本日委員の先生方より指摘のあった点に関して、入手している情報があれば紹介していただくと議論がより深まるのではないか。例えば、コードで扱うことのできる線量範囲に関する注意書き、ユーザーが入力するデータの情報（個々の臓器線量、全身の実効線量、周辺環境の放射線レベル情報等）、使用が想定されている時期（平常時における準備段階、発災直後の緊急時）など。

(事務局) レベル3PRAは事故が起こる前に計算して様々な防護対策を検討するコードである。それ以外のコードは被ばくした後にがんリスクがあるかを計算することが目的である。レベル3PRAの使い方について、ICRPにリスク拘束値があるが、防護措置の実施基準にリスクが採用されているものはほとんどない。リスク拘束値は潜在被ばくに対して与えられているものなので、レベル3PRAは事前の計画で使用する位置づけになる。MACCSもそのように使われている。こういった線量領域を対象にしているかは、Blue Book Modelを再現した際に白血病だけ再現でき

ず、開発者に問い合わせたところ、検証する線量が高すぎるということが分かった。これより、Blue Book Modelはかなり低い線量域を想定して開発されたと言える。
(甲斐委員長) それぞれのコードの対象領域、線量域について明確にしておいた方がよい。

(川口委員) 医療被ばくの診断なし治療なしのリスクはどうか。

(事務局) 医療被ばく、CTスキャンで診断した場合の線量からのがんリスクと診断しなかった場合でがんが見つかった場合の比較を想定した。

(古川委員) それぞれのベースラインリスクか。

(川口委員) 治療なしのリスクはがんが見つかる人なので、ベースラインが違っていると思う。

(事務局) 表現について検討する。

3. その他

(事務局) 今年度の検討委員会は今回をもって終了となる。本日いただいた意見を踏まえて報告書を作成していく。

以上

8. 参考文献

- ADLIENE, D., GRICIENE, B., SKOVORODKO, K., LAURIKAITIENE, J., PUIISO, J. 2020. Occupational radiation exposure of health professionals and cancer risk assessment for Lithuanian nuclear medicine workers. *Environmental Research*, 183, 109144.
- ANDERSSON, M., ECKERMAN, K., MATTSSON, S. 2017. Lifetime attributable risk as an alternative to effective dose to describe the risk of cancer for patients in diagnostic and therapeutic nuclear medicine. *Phys Med Biol*, 62, 9177-9188.
- AZIZOVA, T. V., BANNIKOVA, M. V., GRIGORYEVA, E. S., RYBKINA, V. L. 2021. Risk of skin cancer by histological type in a cohort of workers chronically exposed to ionizing radiation. *Radiat Environ Biophys*, 60, 9-22.
- BERRINGTON DE GONZALEZ, A., IULIAN APOSTOAEI, A., VEIGA, L. H., RAJARAMAN, P., THOMAS, B. A., OWEN HOFFMAN, F., GILBERT, E., LAND, C. 2012. RadRAT: a radiation risk assessment tool for lifetime cancer risk projection. *J Radiol Prot*, 32, 205-22.
- BOCKWOLDT, B., SUGIYAMA, H., TSAI, K., BHATTI, P., BRENNER, A. V., HU, A., KERR, K. F., MORENZ, E., FRENCH, B., PHIPPS, A. I. 2021. Gastrointestinal Cancer Survival and Radiation Exposure among Atomic Bomb Survivors: The Life Span Study. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 30, 412-418.
- BOICE, J. D., COHEN, S. S., MUMMA, M. T., CHEN, H., GOLDEN, A. P., BECK, H. L., TILL, J. E. 2022a. Mortality among U.S. military participants at eight aboveground nuclear weapons test series. *Int J Radiat Biol*, 98, 679-700.
- BOICE, J. D., COHEN, S. S., MUMMA, M. T., HOWARD, S. C., YODER, R. C., DAUER, L. T. 2021. Mortality among medical radiation workers in the United States, 1965–2016. *International Journal of Radiation Biology*, 1-25.
- BOICE, J. D., JR., COHEN, S. S., MUMMA, M. T., GOLDEN, A. P., HOWARD, S. C., GIRARDI, D. J., ELLIS, E. D., BELLAMY, M. B., DAUER, L. T., ECKERMAN, K. F., LEGGETT, R. W. 2022b. Mortality among Tennessee Eastman Corporation (TEC) uranium processing workers, 1943-2019. *Int J Radiat Biol*, 1-21.
- BOICE, J. D., JR., COHEN, S. S., MUMMA, M. T., GOLDEN, A. P., HOWARD, S. C., GIRARDI, D. J., ELLIS, E. D., BELLAMY, M. B., DAUER, L. T., SAMUELS, C., ECKERMAN, K. F., LEGGETT, R. W. 2022c. Mortality among workers at the Los Alamos National Laboratory, 1943-2017. *Int J Radiat Biol*, 98, 722-749.
- BOICE, J. D., JR., COHEN, S. S., MUMMA, M. T., HAGEMEYER, D. A., CHEN, H., GOLDEN, A. P., YODER, R. C., DAUER, L. T. 2022d. Mortality from leukemia, cancer and heart disease among U.S. nuclear power plant workers, 1957-2011. *Int J Radiat Biol*, 98, 657-678.
- BOICE, J. D., JR., ELLIS, E. D., GOLDEN, A. P., ZABLOTSKA, L. B., MUMMA, M. T.,

COHEN, S. S. 2022e. Sex-specific lung cancer risk among radiation workers in the million-person study and patients TB-Fluoroscopy. *Int J Radiat Biol*, 98, 769-780.

BRENNER, A. V., PRESTON, D. L., SAKATA, R., COLOGNE, J., SUGIYAMA, H., UTADA, M., CAHOON, E. K., GRANT, E., MABUCHI, K., OZASA, K. 2022. Comparison of All Solid Cancer Mortality and Incidence Dose-Response in the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors, 1958–2009. *Radiation Research*, 197, 491-508, 18.

BRENNER, A. V., PRESTON, D. L., SAKATA, R., SUGIYAMA, H., BERRINGTON DE GONZALEZ, A., FRENCH, B., UTADA, M., CAHOON, E. K., SADAKANE, A., OZASA, K., GRANT, E. J., MABUCHI, K. 2018. Incidence of Breast Cancer in the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958-2009. *Radiat Res*, 190, 433-444.

BRENNER, A. V., SUGIYAMA, H., PRESTON, D. L., SAKATA, R., FRENCH, B., SADAKANE, A., CAHOON, E. K., UTADA, M., MABUCHI, K., OZASA, K. 2020. Radiation risk of central nervous system tumors in the Life Span Study of atomic bomb survivors, 1958-2009. *Eur J Epidemiol*, 35, 591-600.

BURTT, J. J., RICKARD, M., MCALLISTER, A., BERGMAN, L., ZABLOTSKA, L. B. 2020. Projecting thyroid cancer risk to the general public from radiation exposure following hypothetical severe nuclear accidents in Canada. *J Radiol Prot*.

CAHOON, E. K., PRESTON, D. L., PIERCE, D. A., GRANT, E., BRENNER, A. V., MABUCHI, K., UTADA, M., OZASA, K. 2017. Lung, Laryngeal and Other Respiratory Cancer Incidence among Japanese Atomic Bomb Survivors: An Updated Analysis from 1958 through 2009. *Radiat Res*, 187, 538-548.

CHAOSUWANNAKIT, N., AUPONGKAROON, P., MAKARAWATE, P. 2022. Determine Cumulative Radiation Dose and Lifetime Cancer Risk in Marfan Syndrome Patients Who Underwent Computed Tomography Angiography of the Aorta in Northeast Thailand: A 5-Year Retrospective Cohort Study. *Tomography*, 8, 120-130.

CHARNOCK TW, B. A., SHERWOOD J, HIGGINS NA, FIELD S, SMITH J AND BROWN IK 2020. The probabilistic accident consequence evaluation

(PACE) software methodology for version 3.3.2. *In: PHE (ed.) CRCE-RAD-006-202.*

COLOGNE, J., PRESTON, D. L., GRANT, E. J., CULLINGS, H. M., OZASA, K. 2018. Effect of follow-up period on minimal-significant dose in the atomic-bomb survivor studies. *Radiat Environ Biophys*, 57, 83-88.

CORDOVA, K. A., CULLINGS, H. M. 2019. Assessing the Relative Biological Effectiveness of Neutrons across Organs of Varying Depth among the Atomic Bomb Survivors. *Radiat Res*, 192, 380-387.

EPA 1994. Estimating Radiogenic Cancer Risks. *In: AGENCY, U. S. E. P. (ed.) EPA 402-R-93-076.*

EPA 1999. Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. *Federal Guidance Report No. 13*.

EPA 2011. EPA Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population. Washington,DC: U.S.

FABRIKANT, J. I. 1980. The BEIR III Controversy. *Radiation Research*, 84, 361-368.

FOURNIER, L., CLÉRO, E., SAMSON, E., CAER-LORHO, S., LAURIER, D., LEURAUD, K. 2018. Impact of considering non-occupational radiation exposure on the association between occupational dose and solid cancer among French nuclear workers. *Occup Environ Med*, 75, 199-204.

FRENCH, B., FUNAMOTO, S., SUGIYAMA, H., SAKATA, R., COLOGNE, J., CULLINGS, H. M., MABUCHI, K., PRESTON, D. L. 2018. Population Density in Hiroshima and Nagasaki Before the Bombings in 1945: Its Measurement and Impact on Radiation Risk Estimates in the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors. *American Journal of Epidemiology*, 187, 1623-1629.

FUJIHARA, M., SAKATA, R., YOSHIDA, N., OZASA, K., PRESTON, D. L., MABUCHI, K. 2022. Incidence of lymphoid neoplasms among atomic bomb survivors by histological subtype, 1950 to 1994. *Blood*, 139, 217-227.

FURUKAWA, K., MISUMI, M. 2018. A semiparametric approach to evaluate the harm of low-dose exposures. *Journal of Radiological Protection*, 38, 286-298.

FURUKAWA, K., PRESTON, D., FUNAMOTO, S., YONEHARA, S., ITO, M., TOKUOKA, S., SUGIYAMA, H., SODA, M., OZASA, K., MABUCHI, K. 2013. Long-term trend of thyroid cancer risk among Japanese atomic-bomb survivors: 60 years after exposure. *International journal of cancer*, 132, 1222-1226.

FURUTA, H., KUDO, S., ISHIZAWA, N., SAIGUSA, S. 2022. Reanalysis of cancer mortality using reconstructed organ-absorbed dose: J-EPISODE 1991–2010. *J Radiol Prot*, 42.

GILLIES, M., HAYLOCK, R., HUNTER, N., ZHANG, W. 2019. Risk of Leukemia Associated with Protracted Low-Dose Radiation Exposure: Updated Results from the National Registry for Radiation Workers Study. *Radiat Res*, 192, 527-537.

GRANT, E. J., BRENNER, A., SUGIYAMA, H., SAKATA, R., SADAKANE, A., UTADA, M., CAHOON, E. K., MILDER, C. M., SODA, M., CULLINGS, H. M., PRESTON, D. L., MABUCHI, K., OZASA, K. 2017. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009. *Radiat Res*, 187, 513-537, 25.

GRANT, E. J., YAMAMURA, M., BRENNER, A. V., PRESTON, D. L., UTADA, M., SUGIYAMA, H., SAKATA, R., MABUCHI, K., OZASA, K. 2021. Radiation Risks for the Incidence of Kidney, Bladder and Other Urinary Tract Cancers: 1958-2009. *Radiat Res*, 195, 140-148.

HAUPTMANN, M., BYRNES, G., CARDIS, E., BERNIER, M. O., BLETTNER, M., DABIN,

J., ENGELS, H., ISTAD, T. S., JOHANSEN, C., KAIJSER, M., KJAERHEIM, K., JOURNY, N., MEULEPAS, J. M., MOISSONNIER, M., RONCKERS, C., THIERRY-CHEF, I., LE CORNET, L., JAHNEN, A., POKORA, R., BOSCH DE BASEA, M., FIGUEROLA, J., MACCIA, C., NORDENSKJOLD, A., HARBRON, R. W., LEE, C., SIMON, S. L., BERRINGTON DE GONZALEZ, A., SCHÖZ, J., KESMINIENE, A. 2023. Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study. *Lancet Oncol*, 24, 45-53.

HAYLOCK, R. G. E., GILLIES, M., HUNTER, N., ZHANG, W., PHILLIPSON, M. 2018. Cancer mortality and incidence following external occupational radiation exposure: an update of the 3rd analysis of the UK national registry for radiation workers. *Br J Cancer*, 119, 631-637.

HINKSMAN, C. A., HAYLOCK, R. G. E., GILLIES, M. 2022. Cerebrovascular Disease Mortality after occupational Radiation Exposure among the UK National Registry for Radiation Workers Cohort. *Radiat Res*, 197, 459-470.

HSU WL, P. D., SODA M, SUGIYAMA H, FUNAMOTO S, KODAMA K, KIMURA A, KAMADA N, DOHY H, TOMONAGA M, IWANAGA M, MIYAZAKI Y, CULLINGS HM, SUYAMA A, OZASA K, SHORE RE, MABUCHI K. 2013. The incidence of leukemia, lymphoma and multiple myeloma among atomic bomb survivors: 1950-2001. *Radiat Res*, 179, 361-382.

HSU, W. L., PRESTON, D. L., SODA, M., SUGIYAMA, H., FUNAMOTO, S., KODAMA, K., KIMURA, A., KAMADA, N., DOHY, H., TOMONAGA, M., IWANAGA, M., MIYAZAKI, Y., CULLINGS, H. M., SUYAMA, A., OZASA, K., SHORE, R. E., MABUCHI, K. 2013. The incidence of leukemia, lymphoma and multiple myeloma among atomic bomb survivors: 1950-2001. *Radiat Res*, 179, 361-82.

HU, A. E., FRENCH, B., SAKATA, R., BHATTI, P., BOCKWOLDT, B., GRANT, E. J., PHIPPS, A. I. 2021. The possible impact of passive smoke exposure on radiation-related risk estimates for lung cancer among women: the life span study of atomic bomb survivors. *International Journal of Radiation Biology*, 97, 1548-1554.

HUNTER, N., HAYLOCK, R. 2022. Radiation risks of lymphoma and multiple myeloma incidence in the updated NRRW-3 cohort in the UK: 1955-2011. *J Radiol Prot*, 42.

HUNTER, N., HAYLOCK, R. G. E., GILLIES, M., ZHANG, W. 2022. Extended analysis of solid cancer incidence among the Nuclear Industry Workers in the UK: 1955-2011. *Radiat Res*, 198, 1-17.

ICRP 2005. Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk. *ICRP Publication 99*.

ICRP 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 103*, Ann. ICRP 37

ICRP 2021. Cancer risk from exposure to plutonium and uranium. *ICRP Publication 150*.

IVANOV, V. K., KARPENKO, S. V., KASHCHEEV, V. V., LOVACHEV, S. S., KASHCHEEVA, P. V., SHCHUKINA, N. V., TUMANOV, K. A., KOCHERGINA, E. V., MAKSIOUTOV, M. A. 2020. Relationship between follow-up periods and the low-dose ranges with statistically significant radiation-induced risk of all solid cancers in the Russian cohort of Chernobyl emergency workers. *Radiation and Environmental Biophysics*, 59, 415-421.

JACOB, P., BOGDANOVA, T. I., BUGLOVA, E., CHEPURNIY, M., DEMIDCHIK, Y., GAVRILIN, Y., KENIGSBERG, J., MECKBACH, R., SCHOTOLA, C., SHINKAREV, S., TRONKO, M. D., ULANOVSKY, A., VAVILOV, S., WALSH, L. 2006. Thyroid Cancer Risk in Areas of Ukraine and Belarus Affected by the Chernobyl Accident. *Radiation Research*, 165, 1-8.

JACOB, P., KAISER, C., ULANOVSKY, A. 2017. ProZES - a tool for assessment of assigned share of radiation in probability of cancer development. Germany.

JAEA 2020. User's manual for the OSCAAR code package. *JAEA-Testing 2020-001*.

JAXA 2013. 国際放射線防護委員会 2007 年勧告 (ICRP Publication103) の「国際宇宙ステーション搭乗宇宙飛行士 放射線被ばく管理規程」への取入れに係る検討結果報告書.

JOURNY, N., ANCELET, S., REHEL, J. L., MEZZAROBBA, M., AUBERT, B., LAURIER, D., BERNIER, M. O. 2014. Predicted cancer risks induced by computed tomography examinations during childhood, by a quantitative risk assessment approach. *Radiat Environ Biophys*, 53, 39-54.

JOURNY, N. M., LEE, C., HARBRON, R. W., MCHUGH, K., PEARCE, M. S., BERRINGTON DE GONZÁLEZ, A. 2017. Projected cancer risks potentially related to past, current, and future practices in paediatric CT in the United Kingdom, 1990-2020. *Br J Cancer*, 116, 109-116.

KELLER, G., AFAT, S., AHREND, M. D., SPRINGER, F. 2021. Diagnostic accuracy of ultra-low-dose CT for torsion measurement of the lower limb. *Eur Radiol*, 31, 3574-3581.

KITAHARA, C. M., PRESTON, D. L., NETA, G., LITTLE, M. P., DOODY, M. M., SIMON, S. L., SIGURDSON, A. J., ALEXANDER, B. H., LINET, M. S. 2018. Occupational radiation exposure and thyroid cancer incidence in a cohort of U.S. radiologic technologists, 1983-2013. *Int J Cancer*, 143, 2145-2149.

KOCHER, D. C., APOSTOAEI, A. I., HENSHAW, R. W., HOFFMAN, F. O., SCHUBAUER-BERIGAN, M. K., STANCESCU, D. O., THOMAS, B. A., TRABALKA, J. R., GILBERT, E. S., LAND, C. E. 2008. Interactive RadioEpidemiological Program (IREP): a web-based tool for estimating probability of causation/assigned share of radiogenic cancers. *Health Phys*, 95, 119-47.

KOCHER, D. C., APOSTOAEI, A. I., HOFFMAN, F. O., TRABALKA, J. R. 2018. Probability Distribution of Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor for use in Estimating Risks of Solid Cancers From Exposure to Low-Let Radiation. *Health Phys*, 114, 602-622.

LAND, C. E., BOUVILLE, A., APOSTOAEI, I., SIMON, S. L. 2010. Projected lifetime cancer

risks from exposure to regional radioactive fallout in the Marshall Islands. *Health Phys*, 99, 201-15.

LAURENT, O., SAMSON, E., CAER-LORHO, S., FOURNIER, L., LAURIER, D., LEURAUD, K. 2022. Updated Mortality Analysis of SELTINE, the French Cohort of Nuclear Workers, 1968-2014. *Cancers (Basel)*, 15.

LEE, J., KIM, Y. M., PARK, Y., JANG, E., YOO, J., SEO, S., CHA, E. S., LEE, W. J. 2022. LARisk: An R package for lifetime attributable risk from radiation exposure. medRxiv.

LEE, S.-H., KIM, K., KIM, H., KIM, S., HAN, S., KIM, E.-H. 2020. Development of the Korean-specific radiation-induced cancer risk model for level 3 probabilistic safety assessment (PSA). *Journal of Nuclear Science and Technology*, 57, 755-765.

LEE, W. J., CHOI, Y., KO, S., CHA, E. S., KIM, J., KIM, Y. M., KONG, K. A., SEO, S., BANG, Y. J., HA, Y. W. 2018. Projected lifetime cancer risks from occupational radiation exposure among diagnostic medical radiation workers in South Korea. *BMC Cancer*, 18, 1206.

LEE, W. J., KO, S., BANG, Y. J., CHOE, S. A., CHOI, Y., PRESTON, D. L. 2021. Occupational radiation exposure and cancer incidence in a cohort of diagnostic medical radiation workers in South Korea. *Occup Environ Med*, 78, 876-883.

LEE, W. J., PRESTON, D. L., CHA, E. S., KO, S., LIM, H. 2019. Thyroid cancer risks among medical radiation workers in South Korea, 1996-2015. *Environ Health*, 18, 19.

LEURAUD, K., RICHARDSON, D. B., CARDIS, E., DANIELS, R. D., GILLIES, M., HAYLOCK, R., MOISSONNIER, M., SCHUBAUER-BERIGAN, M. K., THIERRY-CHEF, I., KESMINIENE, A., LAURIER, D. 2021. Risk of cancer associated with low-dose radiation exposure: comparison of results between the INWORKS nuclear workers study and the A-bomb survivors study. *Radiation and Environmental Biophysics*, 60, 23-39.

LINET, M. S., LITTLE, M. P., KITAHARA, C. M., CAHOON, E. K., DOODY, M. M., SIMON, S. L., ALEXANDER, B. H., PRESTON, D. L. 2020. Occupational radiation and haematopoietic malignancy mortality in the retrospective cohort study of US radiologic technologists, 1983-2012. *Occup Environ Med*, 77, 822-831.

LITTLE, M. P., WAKEFORD, R., ZABLOTSKA, L. B., BORREGO, D., GRIFFIN, K. T., ALLODJI, R. S., DE VATHAIRE, F., LEE, C., BRENNER, A. V., MILLER, J. S., CAMPBELL, D., SADETZKI, S., DOODY, M. M., HOLMBERG, E., LUNDELL, M., ADAMS, M. J., FRENCH, B., LINET, M. S., BERRINGTON DE GONZALEZ, A. 2021. Lymphoma and multiple myeloma in cohorts of persons exposed to ionising radiation at a young age. *Leukemia*, 35, 2906-2916.

LOUGHENBURY, P. R., GENTLES, S. L., MURPHY, E. J., TOMLINSON, J. E., BORSE, V. H., DUNSMUIR, R. A., GUMMERSON, N. W., MILLNER, P. A., RAO, A. S., ROWBOTHAM, E., KHAN, A. L. 2021. Estimated cumulative X-ray exposure and additional cancer risk during

the evaluation and treatment of scoliosis in children and young people requiring surgery. *Spine Deform*, 9, 949-954.

MABUCHI, K., PRESTON, D. L., BRENNER, A. V., SUGIYAMA, H., UTADA, M., SAKATA, R., SADAKANE, A., GRANT, E. J., FRENCH, B., CAHOON, E. K., OZASA, K. 2021. Risk of Prostate Cancer Incidence among Atomic Bomb Survivors: 1958-2009. *Radiat Res*, 195, 66-76.

MEULEPAS, J. M., RONCKERS, C. M., SMETS, A., NIEVELSTEIN, R. A. J., GRADOWSKA, P., LEE, C., JAHNEN, A., VAN STRATEN, M., DE WIT, M. Y., ZONNENBERG, B., KLEIN, W. M., MERKS, J. H., VISSER, O., VAN LEEUWEN, F. E., HAUPTMANN, M. 2019. Radiation Exposure From Pediatric CT Scans and Subsequent Cancer Risk in the Netherlands. *J Natl Cancer Inst*, 111, 256-263.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL 1990. Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR V. Washington (DC): National Academies Press (US)

Copyright © 1990 by the National Academy of Sciences.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL 2006. BEIR VII Phase 2, Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Washington, D.C.: The National Academies Press.

NIH 2003. NCI-CDC Working Group to Revise the 1985 NIH Radioepidemiological Tables. In: U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, N. I. O. H., NATIONAL CANCER INSTITUTE (ed.).

OZASA, K., SHIMIZU, Y., SUYAMA, A., KASAGI, F., SODA, M., GRANT, E. J., SAKATA, R., SUGIYAMA, H., KODAMA, K. 2012. Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950–2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases. *Radiation Research*, 177, 229-243.

PADDICK, I., CAMERON, A., DIMITRIADIS, A. 2021. Extracranial dose and the risk of radiation-induced malignancy after intracranial stereotactic radiosurgery: is it time to establish a therapeutic reference level? *Acta Neurochir (Wien)*, 163, 971-979.

PRESTON, D. L., KUSUMI, S., TOMONAGA, M., IZUMI, S., RON, E., KURAMOTO, A., KAMADA, N., DOHY, H., MATSUO, T., MATSUI, T., ET AL. 1994. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. *Radiat Res*, 137, S68-97.

PRESTON DL, L. J., PIERCE DA, MCCONNEY ME 1993. Epicure users guide. In: CORPORATION, H. I. (ed.). Seattle.

PRESTON, D. L., RON, E., TOKUOKA, S., FUNAMOTO, S., NISHI, N., SODA, M., MABUCHI, K., KODAMA, K. 2007 Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiat Res*, 168, 1-64.

PRESTON, D. L., SHIMIZU, Y., PIERCE, D. A., SUYAMA, A., MABUCHI, K. 2003. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality:

1950-1997. *Radiat Res*, 160, 381-407.

PRYSYAZHNYUK, A. Y., TROTSYUK, N. K., GUDZENKO, N. A., CHUMAK, V. V., BAKHANOVA, O. V., FUZIK, M. M., BELYAEV, Y. M., FEDORENKO, Z. P., GOROKH, Y. L., ROMANENKO, A. Y., BAZYKA, D. A., KHUKHRYANSKA, O. M. 2018. RADIATION RISKS OF THYROID CANCER IN CHORNOBYL CLEAN-UP WORKERS USING THE ALTERNATIVE ESTIMATES OF DOSES OF EXTERNAL EXPOSURE. *Probl Radiac Med Radiobiol*, 23, 200-215.

RICHARDSON, D. B., CARDIS, E., DANIELS, R. D., GILLIES, M., O'HAGAN, J. A., HAMRA, G. B., HAYLOCK, R., LAURIER, D., LEURAUD, K., MOISSONNIER, M., SCHUBAUER-BERIGAN, M. K., THIERRY-CHEF, I., KESMINIENE, A. 2015. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ*, 351, h5359.

RON, E., J.H.LUBIN,R.E.SHORE ET AL. 1995. Thyroid cancer after exposure to external radiation:a pooled analysis of seven studies. *Radiation Research*, 141, 259-277.

SADAKANE, A., FRENCH, B., BRENNER, A. V., PRESTON, D. L., SUGIYAMA, H., GRANT, E. J., SAKATA, R., UTADA, M., CAHOON, E. K., MABUCHI, K., OZASA, K. 2019a. Radiation and Risk of Liver, Biliary Tract, and Pancreatic Cancers among Atomic Bomb Survivors in Hiroshima and Nagasaki: 1958-2009. *Radiat Res*, 192, 299-310.

SADAKANE, A., FRENCH, B., BRENNER, A. V., PRESTON, D. L., SUGIYAMA, H., GRANT, E. J., SAKATA, R., UTADA, M., CAHOON, E. K., MABUCHI, K., OZASA, K. 2019b. Radiation and Risk of Liver, Biliary Tract, and Pancreatic Cancers among Atomic Bomb Survivors in Hiroshima and Nagasaki: 1958-2009. *Radiation Research*, 192, 299-310.

SAKATA, R., PRESTON, D. L., BRENNER, A. V., SUGIYAMA, H., GRANT, E. J., RAJARAMAN, P., SADAKANE, A., UTADA, M., FRENCH, B., CAHOON, E. K., MABUCHI, K., OZASA, K. 2019. Radiation-Related Risk of Cancers of the Upper Digestive Tract among Japanese Atomic Bomb Survivors. *Radiat Res*, 192, 331-344.

SHIMIZU Y, K. H., SCHULL WJ 1990. Life Span Study Report 11. Part 2. Cancer mortality in the years 1950-85 based on the recently revised doses (DS86). *Technical Report No. 5-88*.

STRAM, D. O., SOKOLNIKOV, M., NAPIER, B. A., VOSTROTIN, V. V., EFIMOV, A., PRESTON, D. L. 2021. Lung Cancer in the Mayak Workers Cohort: Risk Estimation and Uncertainty Analysis. *Radiat Res*, 195, 334-346.

SUGIYAMA, H., MISUMI, M., BRENNER, A., GRANT, E. J., SAKATA, R., SADAKANE, A., UTADA, M., PRESTON, D. L., MABUCHI, K., OZASA, K. 2020. Radiation risk of incident colorectal cancer by anatomical site among atomic bomb survivors: 1958-2009. *Int J Cancer*, 146, 635-645.

SUGIYAMA, H., MISUMI, M., KISHIKAWA, M., ISEKI, M., YONEHARA, S., HAYASHI,

T., SODA, M., TOKUOKA, S., SHIMIZU, Y., SAKATA, R., GRANT, E. J., KASAGI, F., MABUCHI, K., SUYAMA, A., OZASA, K. 2014. Skin cancer incidence among atomic bomb survivors from 1958 to 1996. *Radiat Res*, 181, 531-9.

SUGIYAMA, H., MISUMI, M., SAKATA, R., BRENNER, A. V., UTADA, M., OZASA, K. 2021. Mortality among individuals exposed to atomic bomb radiation in utero: 1950-2012. *Eur J Epidemiol*, 36, 415-428.

TAKAHARA, S. H., AKIHIDE; OGINO, TAKASHI 2015. Development of HEINPUT-GUI ver. 2.0 for estimating the late somatic and genetic effects induced by radiation exposure. *JAEA-Data/Code 2015-001*.

THOMPSON, D. E., MABUCHI, K., RON, E., SODA, M., TOKUNAGA, M., OCHIKUBO, S., SUGIMOTO, S., IKEDA, T., TERASAKI, M., IZUMI, S., ET AL. 1994. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part II: Solid tumors, 1958-1987. *Radiat Res*, 137, S17-67.

U.S. NRC, S. N. L. 2022. MACCS (MELCOR Accident Consequence Code System) User Guide – Version 4.0, Revision 1). *SAND2022-7112*.

U.S.NRC 1983. Safety Goals for Nuclear Power Plant Operation. *NUREG-0880 Revision 1*.

U.S.NRC 1985. Health Effects Models for Nuclear Power Plant Accident Consequence Analysis. *NUREG/CR-4214*.

U.S.NRC 1990. Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants. *NUREG-1150*.

U.S.NRC 1993. Health Effects Models for Nuclear Power Plant Accident Consequence Analysis. *NUREG/CR-4214 Rev. 2, Part I*. Washington, DC

U.S.NRC 1997. Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis. *In: NUREG/CR-6555 (ed.)*.

U.S.NRC 2021. MACCS Theory Manual. *SANDIA REPORT*

ULANOWSKI, A., EIDEMÖLLER, M., GÖTHLIN, D., KAISER, J. C., SHEMIAKINA, E., JACOB, P. 2016. Quantitative Abschätzung des Strahlenrisikos unter Beachtung individueller Expositionsszenarien, Teil 2 - ProZES: a tool for assessment of assigned share of radiation in probability of cancer development (Part II) *In: (BFS), B. F. S. (ed.) BfS-RESFOR-116/16*.

ULANOWSKI, A., SHEMIAKINA, E., GÖTHLIN, D., BECKER, J., PRESTON, D., APOSTOAEI, A. I., HOFFMAN, F. O., JACOB, P., KAISER, J. C., EIDEMÖLLER, M. 2020. ProZES: the methodology and software tool for assessment of assigned share of radiation in probability of cancer occurrence. *Radiat Environ Biophys*, 59, 601-629.

UNSCEAR 2006. EFFECTS OF IONIZING RADIATION. *UNSCEAR 2006 REPORT VOLUME I Annex A - Epidemiological studies of radiation and cancer*.

UNSCEAR 2012. SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION Annex A: Attributing health effects to ionizing radiation exposure and inferring risks.

UNSCEAR 2013. Report Volume 1 REPORT TO THE GENERAL ASSEMBLY SCIENTIFIC ANNEA A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 Great East-Japan earthquake and tsunami. United Nations, New York.

UNSCEAR 2019. Evaluation of selected health effects and inference of risk due to radiation exposure. *UNSCEAR 2019 Report Annex A*.

UTADA, M., BRENNER, A. V., PRESTON, D. L., COLOGNE, J. B., SAKATA, R., SUGIYAMA, H., KATO, N., GRANT, E. J., CAHOON, E. K., MABUCHI, K., OZASA, K. 2021. Radiation Risk of Ovarian Cancer in Atomic Bomb Survivors: 1958-2009. *Radiat Res*, 195, 60-65.

UTADA, M., BRENNER, A. V., PRESTON, D. L., COLOGNE, J. B., SAKATA, R., SUGIYAMA, H., SADAKANE, A., GRANT, E. J., CAHOON, E. K., OZASA, K., MABUCHI, K. 2018. Radiation Risks of Uterine Cancer in Atomic Bomb Survivors: 1958-2009. *JNCI Cancer Spectr*, 2, pky081.

VELAZQUEZ-KRONEN, R., GILBERT, E. S., LINET, M. S., MOYSICH, K. B., FREUDENHEIM, J. L., WACTAWSKI-WENDE, J., SIMON, S. L., CAHOON, E. K., ALEXANDER, B. H., DOODY, M. M., KITAHARA, C. M. 2020. Lung cancer mortality associated with protracted low-dose occupational radiation exposures and smoking behaviors in U.S. radiologic technologists, 1983-2012. *Int J Cancer*, 147, 3130-3138.

ZHUNTOVA, G. V., AZIZOVA, T. V., GRIGORYEVA, E. S. 2020. Risk of stomach cancer incidence in a cohort of Mayak PA workers occupationally exposed to ionizing radiation. *PLoS One*, 15, e0231531.

外川 織彦, 本間 俊充, 益村 朋美 1999. 放射線による晩発性身体影響と遺伝影響を推定するための計算コードHEINPUT. *JAERI-Data/Code 99-002*.

韓国原子力研究院 2017. Nuclear Technology Development Program A Study of Base Technology of Korean Specific Level 3 PSA Code Development. *In: KAERI/RR-4232 (ed.)*.

吉永 信治 2021. 原因確率を用いたがんの放射線起因性の評価：課題と展望. *保健物理*, 56, 306-314.

高原 省五, 日高 昭秀, 萩野 隆 2015. 放射線に起因する晩発性健康影響を推定する計算コードHEINPUT-GUI ver. 2.0の開発. *JAEA-Data/Code 2015-001*.

本間 俊充, 高橋 知之, 米原 英典 2000. 原子炉事故時放射線影響解析で用いるための健康影響モデル (II) . *JAERI-Review 2000-029*.