

200840031A

厚生労働科学研究費補助金

健康安全・危機管理対策総合研究事業

屋内ラドンによる健康影響評価および対策に関する研究

(H19-健危-一般-016)

平成20年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 鈴木 元

平成21(2009)年3月

厚生労働科学研究費補助金

健康安全・危機管理対策総合研究事業

屋内ラドンによる健康影響評価および対策に関する研究

(H19-健危-一般-016)

平成20年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 鈴木 元

平成21(2009)年3月

目 次

I. 総括研究報告

屋内ラドンによる健康影響評価および対策に関する研究	1
鈴木 元、山口 一郎、緒方 裕光、杉山 英男、米原 英典、笠置 文善、 藤原 佐枝子、木村 真三	
添付資料 1. 都道府県別 第 1 期、第 2 期屋内ラドン測定値	5
添付資料 2. 都道府県別屋内ラドン濃度箱ひげ図(季節間変動補正後)	7
添付資料 3. 環境保護庁 住居内ラドンによるリスクの評価(翻訳)	8

II. 分担研究報告

1. 屋内ラドンの季節間変動の調整に関する研究	6 7
山口 一郎	
添付資料 4. 季節間変動補正図表	6 9
2. EPA 屋内ラドンの肺がんリスクモデルの内製化に関する研究	7 1
緒方 裕光	
添付資料 5. 屋内ラドンによる肺がん死亡生涯リスクのシミュレーション	7 4

総括研究報告書

屋内ラドンによる健康影響評価および対策に関する研究

研究代表者 鈴木 元

国立保健医療科学院 生活環境部長

研究要旨

2000年代前半に相次いで報告された屋内ラドンと肺がんに関する症例対照研究プール解析により、屋内ラドンの濃度レベルであっても有意に肺がんのリスクが上昇することが明らかとなった。そこで、本研究では、我が国の屋内ラドンに関する政策決定のための基礎資料を収集する目的で、以下の調査研究を平成19年度より3年間かけて実施する。第1に、屋内ラドンの人口加重全国平均値、その分散、都道府県別の平均値とその分散を求めるために、ラドン・トロン分別測定器を用いて全国3900家屋の測定を行う。第2に、人口加重全国平均値と男女・年齢階層別の喫煙率や喫煙の肺がん相対リスクなどの既存のデータを利用し、米国環境保護庁が開発した屋内ラドンの肺がんリスク推計モデルを用いて、寄与割合を算定する。第3に、屋内ラドンによる健康影響や対策に関する重要文献を翻訳し、行政および専門家に情報提供する。

H19年後半から半年サイクルで開始した調査で、45都道府県で約2150軒の屋内ラドン測定をとして、米国環境保護庁が開発した屋内ラドンの肺がん寄与割合を推計するモデルに関する文書を翻訳した。情報公開のためのホームページ開設準備を進めている。

研究分担者氏名・所属研究機関名及び所属研究機関における職名

山口一郎・国立保健医療科学院・生活環境部 主任研究官

緒方裕光・国立保健医療科学院・情報センター長

杉山英男・国立保健医療科学院・生活環境部 室長

米原英典・放射線医学総合研究所・放射線防護研究センター・グループリーダー

笠置文善・放射線影響研究所・疫学部・副部長

藤原佐枝子・放射線影響研究所・臨床研究部・部長

木村真三・労働安全衛生総合研究所・研究企画調整部

A. 研究目的

2000年代前半に相次いで報告された屋内ラドンと肺がんに関する症例対照研究プール解析により、屋内ラドンの濃度レベルであっても有意に肺がんのリスクが上昇することが明らかとなった。これを受けて、WHOやIAEAなどの国際機関は、屋内ラドン対策に関する参考値レベルの改訂に動き出している。他方、我が国は世界平均に較べると屋内ラドン濃度は低いこともあり、屋内ラドンの健康影響評価は十分行われてはこなかった。そこで、本研究では政策判断の基礎資料となるデータを収集することを目的に、第1に、屋内ラドンの人口加重全国平均値、その分散、都道府県別の平均値とその分散を求めるために、ラドン・トロン分別測定器を用いて全国3900家屋の測定を行う。第2に、人

口加重全国平均値と男女・年齢階層別の喫煙率や喫煙の肺がん相対リスクなどの既存のデータを利用し、米国環境保護庁が開発した屋内ラドンの肺がん推計モデルを用いて屋内ラドンの肺がん寄与割合を算定する。第3に、屋内ラドンによる健康影響や対策に関する重要文献を翻訳し、行政・専門家等に情報提供する。

B. 研究方法

(1) 屋内ラドン測定調査

ラドンには3つの同位元素が存在するが、量的に多く健康問題となるのは狭義のラドン(^{222}Rd)とトロン(^{220}Rn)である。トロンは短半減期なので、土中から家屋への侵入はラドンに比べて少ない一方、トロンは土壁などの建材からも放出されるため、家屋によってはトロンの寄与が増える。本研究では、パッシブ型ラドン・トロン分別測定器(ハンガリーRadoSys社)を用いて、両同位元素を別々に測定する。90年代前半に放射線医学総合研究所がラドンとトロンを分別せずに測定した全国調査があるが、その調査結果の都道府県別の屋内ラドン平均値と標準偏差値、および都道府県別家屋数に基づき、Neyman分配法に従って都道府県毎の測定数を決定した。予算の制約もあるため、3年間で3900家屋を目標に調査を進める。測定期間は半年で、同一地域で春夏期と秋冬期に測定する家屋を分配する。家屋構造の分布は、可能な限りH15年の都道府県の平均的な家屋構造分布に合わせる。

対象家屋は、保健所、地方衛生研究所、放射線関連学会、放射線技師会、薬剤師会、大学など複数の団体を通じて呼びかけてもらい、同意をもらった人の家屋を測定する。

(2) リスク推計手法

本研究は、屋内ラドン濃度と肺がんの関連を直接調査するものではない。本研究は、屋内ラドン濃度の平均値と分散から肺がんリスクを推計する手法をとる。放射線リスクを推定する手法は、ラドン曝露集団の疫学調査(コホート研究ないし症例対照

研究)の手法と、ラドン曝露量(あるいは、それより得られた実効線量)当たりのがんリスク係数を用いてリスクを推計する手法とに大別される。私たちは、後者の手法をとり、かつ鉱山労働者の疫学調査から得られたラドンの肺がんリスク係数を援用したモデルを使ってリスク推計する。米国の科学アカデミーBEIR VI委員会は、全世界の鉱山労働者の疫学データから得られたラドン曝露濃度当たりのリスク係数を用いて、喫煙者と非喫煙者の屋内ラドン肺がんリスクを推計するモデルを2種類報告した。環境保護庁EPAは、BEIR VIのモデルを改良して、1種類の屋内ラドンの肺がんリスク推計モデルを考案した(添付資料3)。私たちは、このEPAのリスク推計モデルを内製化し、今回の調査で得られる屋内ラドンの人口加重全国平均値、既知の日本人の男女別年齢階層別の喫煙率、肺がん死亡率、喫煙の相対リスクを使って肺がんリスクを推計する。

(3) 文献調査

昨年度は、PEAの消費者ガイドを翻訳して報告した。またラドン低減化に関する13の論文を翻訳して報告した。今年度は、EPAの「住居内ラドンによるリスクの評価」を翻訳して、これを報告する。

(倫理面への配慮)

本研究は、国立保健医療科学院・研究倫理審査委員会において審議され、平成19年6月21日付けで承認されている(承認番号NIPH-IBRA#07009)。詳細に関しては、昨年度の報告書に記した。

C. 研究成果

(1) 屋内ラドン測定調査

H19年9月—H20年2月の第1期測定データ820軒分およびH20年3月—8月の第2期測定データ828軒分が集まった。測定器の送付は900軒ずつであったが、約1割の対象者が測定に失敗したり、設置しなかったりで、データがとれなかつ

た。H20年9月～H21年2月の第3期データは回収中である。

添付資料1に、県別の集計結果を示した。春・夏期に測定したデータと秋・冬に測定したデータには、系統的な差が見られる。この傾向は、先行研究でも観察されているもので、屋内ラドンが、冬季は換気率が低下する事、暖房により屋内に上昇気流が生じやすいこと、さらには、季節風の影響で土間に陰圧がかかりやすくなり、地下からラドンガスが吸い上げられやすい等の複数の原因で変化するためである。季節間変動の調整方法に関しては、分担研究報告の中で山口が詳述する。要約すれば、春夏期および秋冬期の屋内ラドン共に対数正規分布に従っており、両者は平行移動させることによりほぼ同一の分布となる。そこで、両期の幾何平均値を使って屋内ラドン値を補正する手法により、年間の調整屋内ラドン濃度を算出することとした。

第1期、第2期測定分の35都道府県別の補正後のデータでは、 $0.2\sim 590\text{ Bq/m}^3$ の範囲で分布した。添付資料2に、都道府県別の屋内ラドン濃度を箱ひげ図で提示した。全体の平均値は、算術平均値(SD)で $15.5(24.6)\text{ Bq/m}^3$ 、幾何平均値(GSD)で $11.3(2.1)\text{ Bq/m}^3$ であった。1期2期に測定した地域の中では、北海道と岩手県の屋内ラドン濃度が高い。

次に、 100 Bq/m^3 の濃度を超す家屋数の推計を行った。対数変換後の平均値(SD)は $2.42(0.75)\text{ Bq/m}^3$ であったので、この値から 100 Bq/m^3 (対数変換後4.61)の標準化得点を求め、標準正規確立表をもちいて 100 Bq/m^3 を越す家屋の確率を求めると、 0.17% となる。他方、実数として 100 Bq/m^3 を越える家屋の割合は 0.55% であった。推計された値より大きい理由として、屋内ラドンの対数正規分布がやや2相性(高濃度の方に肩がある)であるため、全国平均値と標準偏差から推計した場合に過小評価になる可能性がある。一方、同様の手法で屋内ラドンの高い北海道および岩手

で 100 Bq/m^3 を越す家屋の確率を求めると、おのおの 5.2% および 7.1% となる。仮に将来屋内ラドン対策を施行する場合は、対策レベル値が定められた場合には、同様の手法により、対策が必要な家屋数の推計が可能である。屋内ラドンの高い地域を中心に対象家屋を同定し、実施することが有効であると思われる。

(2) リスク推計手法

昨年度は、EPAのリスク推計モデルを内製化し、仮に米国の屋内ラドン濃度の1/2の値とした場合の屋内ラドンの肺がんリスクを、既存の我が国の喫煙関連のデータを使ってシミュレーションした。今年度は、生涯リスクや推計の信頼区間等の検討を加えた。結果は、緒方が分担報告書で詳述する。

(3) 文献調査

本年度は、EPAのリスク推計モデルを解説した小冊子、英文88ページの“EPA Assessment of risks from radon in homes”「環境保護庁住居内ラドンによるリスクの評価」を翻訳した。添付資料3に、翻訳版を添付する。

D. 考案

屋内ラドン濃度は、対数正規分布に従っているため、測定したデータの対数変換後の平均値とSDを用いて、一定濃度レベルの家屋存在頻度を推計することが可能である。また、季節間の変動を補正する加重係数を得ることができた。但し、第2期までの結果を使った推計は未だ信頼性が低いため、今後、測定数を増やして信頼性を高める必要がある。

屋内ラドンが土・岩石中のラジウムに由来することを鑑みれば、地域によって屋内ラドンが高い地域と低い地域があることは自然である。測定を行った35都道府県のうち、北海道と岩手県が高い地域となった。今後、近畿や西日本地区のデータを追加して再検討する。

E. 結論

研究は順調に進んでおり、得られた情報を対策に利用しやすい指標値にする準備も整ってきた。

F. 健康危機情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

当該ラドン研究に関しては、原著論文発表はない。

2. 口頭発表

1. 鈴木、緒方、杉山、山口、米原、藤原、笠置、木村：全国屋内ラドン濃度計測に基づく肺癌リスク推計（第一報）、第51回日本放射線影響学会、平成20年11月、北九州市。

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

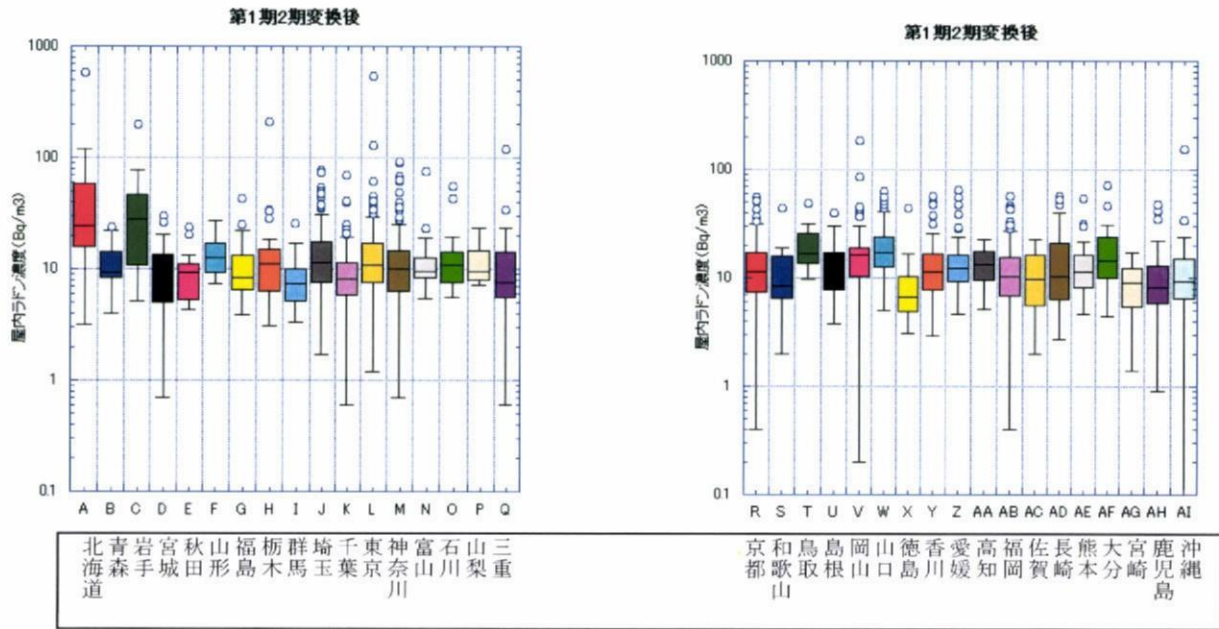
添付資料 1. 第1期・第2期都道府県別屋内ラドン濃度

	第1期						第2期						第1期/第2期比	
	算術平均	SD	対数変換	対数SD	幾何平均	SD	算術平均	SD	対数	SD	幾何平均	SD	算術平均値	幾何平均値
	N = 820						N = 828							
北海道							24.0	34.38	2.0	0.56	7.4	1.76		
青森	14.5	6.60	2.6	1.7	12.9	0.54	8.5	4.44	2.0	0.57	7.4	1.77	1.7	1.7
岩手	49.0	38.24	3.5	2.8	32.9	1.03	24.5	22.36	2.9	0.81	18.0	2.26	2.0	1.8
宮城	18.1	6.90	2.8	1.5	16.8	0.41	5.8	4.42	1.5	0.77	4.5	2.15	3.1	3.8
秋田	13.1	5.20	2.5	1.6	12.1	0.44	6.7	3.79	1.8	0.52	5.9	1.68	1.9	2.0
山形	18.7	7.20	2.9	1.5	17.5	0.39	9.7	3.50	2.2	0.36	9.2	1.44	1.9	1.9
福島	13.9	6.80	2.5	1.6	12.5	0.49	8.0	4.89	1.9	0.51	7.0	1.66	1.7	1.8
茨城														
栃木	18.4	11.40	2.6	2.0	13.9	0.70	14.0	22.39	2.1	0.92	8.1	2.50	1.3	1.7
群馬							5.9	3.27	1.7	0.49	5.3	1.63		
埼玉	21.2	12.40	2.9	1.7	18.3	0.55	10.1	8.02	2.1	0.70	7.8	2.02	2.1	2.3
千葉	14.1	8.60	2.5	2.0	11.7	0.68	7.3	5.78	1.8	0.60	5.9	1.83	1.9	2.0
東京	21.0	16.30	2.8	1.9	16.7	0.64	23.5	48.32	2.2	1.32	8.7	3.75	0.9	1.9
神奈川	18.3	12.00	2.7	2.1	14.5	0.76	9.1	9.03	1.9	0.76	6.5	2.14	2.0	2.2
新潟														
富山	17.8	9.70	2.8	1.6	15.9	0.49	9.7	9.65	2.0	0.62	7.7	1.86	1.8	2.1
石川	18.5	17.50	2.7	1.7	15.3	0.54	9.3	5.90	2.1	0.49	8.2	1.63	2.0	1.9
福井														
山梨							7.7	3.10	2.0	0.35	7.3	1.42		
長野														
岐阜														
静岡														
愛知														
三重							7.8	8.44	1.7	0.79	5.7	2.19		
滋賀														
京都	20.5	12.40	2.8	2.3	16.6	0.83	9.4	6.40	2.1	0.60	7.8	1.82	2.2	2.1
大阪														
兵庫														
奈良														
和歌山	14.9	9.30	2.5	1.8	12.7	0.61	8.8	7.15	1.9	0.83	6.6	2.28	1.7	1.9
鳥取	31.2	12.40	3.4	1.5	29.3	0.39	13.2	6.66	2.5	0.47	12.0	1.59	2.4	2.5
島根	14.5	7.00	2.5	1.7	12.3	0.51	11.6	5.77	2.3	0.58	10.1	1.79	1.3	1.2
岡山	36.1	66.00	3.2	1.8	25.8	0.60	10.5	7.03	2.1	0.76	8.5	2.13	3.4	3.0
広島														
山口	37.3	24.40	3.5	1.8	31.6	0.56	12.1	6.53	2.4	0.50	10.7	1.64	3.1	3.0
徳島							6.3	4.68	1.7	0.52	5.3	1.69		
香川	20.4	11.30	2.9	1.8	17.5	0.59	8.9	6.12	2.0	0.55	7.6	1.74	2.3	2.3
愛媛	20.7	13.70	2.9	1.7	18.0	0.51	10.5	6.49	2.2	0.50	9.2	1.65	2.0	2.0
高知							8.5	3.01	2.1	0.39	8.0	1.47		
福岡	20.9	15.10	2.8	1.8	17.2	0.61	8.0	5.10	1.9	0.62	6.7	1.86	2.6	2.6
佐賀	21.9	10.50	2.9	2.0	18.6	0.67	5.6	3.25	1.6	0.55	4.9	1.74	3.9	3.8
長崎	18.1	11.80	2.7	2.1	14.3	0.73	10.9	8.44	2.1	0.74	8.4	2.10	1.7	1.7
熊本	21.0	10.50	2.9	1.5	19.1	0.43	9.1	5.89	2.1	0.54	7.8	1.71	2.3	2.4
大分							12.0	8.28	2.3	0.61	10.0	1.84		
宮崎	14.2	7.00	2.5	1.7	12.6	0.52	5.6	3.15	1.6	0.69	4.7	2.00	2.5	2.7

鹿児島	11.9	8.00	2.3	1.9	9.9	0.64	8.8	7.17	1.8	0.93	6.2	2.53	1.4	1.6
沖縄	19.5	15.60	2.7	2.3	14.6	0.82	10.5	17.18	1.5	1.53	4.6	4.63	1.9	3.2
全体	21.3	21.00			16.9	1.94	10.2	12.62	2.0	0.76	7.49	0.76	2.1	2.3

総数 1648 家屋 算術平均=15.7±18.2 Bq/m³、幾何平均 11.3 (2.2) Bq/m³ (補正前)

添付資料 2. 都道府県別屋内ラドン濃度箱ひげ図 (季節間変動補正後)



分担研究報告に詳述してあるように、第1期(秋冬期)、第2期(春夏期)の幾何平均値を用いて、春夏期測定データから換算した年間屋内ラドン・データは1.63倍、秋冬期測定データから換算した年間屋内ラドン・データは0.72倍することにより、季節間変動を補正した。

EPA Assessment of Risks from Radon in Homes 環境保護庁 住居内ラドンによるリスクの評価

翻訳責任 国立保健医療科学院、生活環境部 鈴木 元、緒方裕光、笠置文善

この翻訳作業は、厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理総合対策事業）「屋内ラドンによる健康影響評価及び対策に関する研究」（課題番号 H19-健危-一般-016）の一環で実施された。（2009年1月）

まえがき

ラドンはよく知られた人間への発がん物質として分類されてきたし疾病管理センターや米国肺協会や米国医学会および米国公衆衛生学会のようなグループにより重大な健康問題であると認識されてきました。それ故、建物内でのラドンの曝露による危険に、EPAは重大な関心を払ってきました。1992年、EPAは、技術支援文書として、1992年版市民のためのラドン・ガイドを公刊しました。それは、室内でのラドンの曝露に伴う肺がんリスクの評価法も記載しています。その方法は、米国科学アカデミー（NAS）から出版された報告書類に基づいたものです。それらの報告書類の1つは、“BEIR IV”(NAS 1988)としての知られているもので、地下坑夫達の職業曝露についての4つのコホート疫学調査の解析を基にした吸入ラドン娘核種によるリスクの評価から、モデルが誘導されています。1994年、EPAは、坑夫コホートと住民研究から利用可能となった追加的な知見を取り込むためもう1つの研究、“BEIR VI”、に資金を提供しました。1999年初頭、NASは“BEIR VI”報告(NAS 1999)を公刊しました。そこでは、11の坑夫コホート研究のデータを基にした新しいリスクモデルが示されています。BEIR VI報告の主要な結論は、ラドンは喫煙の次に肺癌の原因となるということでした。

BEIR VIによる諸発見と推薦を受けて、この報告書では、住居内でのラドン曝露について、EPAの放射線・屋内空気部局（ORIA）が推定した新たに改訂したリスクを示しています。ORIAによる要請に応じて、科学諮問会議（SAB）の放射線諮問委員会（RAC）は、ラドンによる発がんリスクの推定のためのこの報告書で用いられた方法論をレビューしました。1999年の7月にまとめられた初期の提案（SAB 1999）には、いくつかの調整が必要なものの一般的に受け入れられる方法論が示されています。RACは、彼らの推薦案に対するORIAの意見を討議するために、1999年11月に再び会合しました。RAC報告書（SAB 2000）は、「ORIAが信頼できるリスク評価を行い、RACの忠告で示されている勧告によく対応した」と結論しています。彼らはまた追加的なコメントと提案も提出しています。それらのコメントに対する対応は、ロバート・パーシアセプ（空気・放射線局の副理事）の2000年10月5日付けの手紙に見ることができます。

この報告者は、EPA職員のデイビット J パウエルとジェローム S パスキン（ORIA、放射線防御部門）により作成されました。本書を著すに当たり、クリストファー B ネルソンによる貴重な助言、RACによる建設的な査読、ナンシー・チウとウィリアム・ブラティンによる有益な査読意見、これらに深く感謝します。

要 約

背景：米国環境保護庁(EPA)は室内ラドンから健康リスクの評価を更新しました。その主な内容は、国家科学アカデミー(NAS)が、屋内ラドンは喫煙について肺癌の起こす要因と決めた、ということです。このリスク評価は、NAS がいくつかの専門的な調整と拡張を加えた、ラドン健康影響の最近の研究(BEIR VI)で導かれた結論を基礎にしています。BEIR VI では、NAS は、坑夫達の 11 のコホートデータから開発された 2 つの妥当なリスクモデルを用いて、米国で毎年 15,400~21,800 の肺癌による超過死が起きていると見積もっています。

方法：EPA は BEIR VI で使われた研究方法を修正し、拡大しました。第一に、BEIR VI の 2 種の妥当なモデルを使って得られる 2 つの推計値の中間になるようにした単一モデルを構築しました。第二に、BEIR VI の過剰死の定義が、肺がんで偶発的に死亡する人の中で、ラドンによる早期の死を効果的に除いていることに注目して、EPA は BEIR VI の結論をすべてのラドン由来の肺がん死を含むものに修正しました。第三に、EPA は、BEIR VI で使われたよりも、一層詳細な喫煙率データ、より最近の死亡率データを用いました。4 番目に、BEIR VI がラドンによる肺癌の部分的な増加を推定したのに対し、EPA は、単位曝露当たりのリスク[労働水準月(working level month, WLM)当たりの肺癌死]の数値的推定も提供しています。

結果：その分析に基づいて、EPA は 1995 年の国の肺癌死の総計、146,400 の中で、21,100 の(14.4%)がラドン関連であったと推定しています。非喫煙者 (NS)の中で、26%がラドン関連だと推定しました。単位曝露当たりのリスクの見積りは、米国住民について WLM 当たり 5.38×10^{-4} 、喫煙者 (ES) では 9.68×10^{-4} /WLM、非喫煙者(NS)では 1.67×10^{-4} となりました。4pCi/L 作用レベルで生涯曝露を受けた場合のリスク見積もりは、全体では 2.3%、ES では 4.1%、NS では 0.73%です。専門家の意見を余り重視しないでもよいような定量化できる因子に基づいてモンテ=カルロ不確実性解析を行ったところ、米国人と ES の推定値は、約 2~3 の係数の範囲以内で正確であることを示しています。

結論：喫煙とラドンの影響は相乗的です。そのため喫煙者はラドンにハイリスクであるわけです。それゆえ、米国の喫煙率が予期される率で減少が維持されるならば、ラドン由来の肺がん数の一定の減少、不随して肺がんの減少、が期待されます。それにもかかわらず、室内ラドンは重要な公衆衛生問題として残り、年間で肺がんにより数千人の死亡が生じるでしょう。

内 容

まえがき	8
要約	9
表一覧	12
図一覧	13
上級委員会要約	14
I. イントロダクション	17
II. 科学的な背景	17
III. リスクを計算するための従来の方法	20
IV. BEIR VI のリスク・モデル	21
A. 鉱夫データにあった統計処理	21
B. 鉱山から住居への外挿	22
C. 喫煙	23
D. 寄与リスクと肺がん死数の計算	23
V. 住居研究	24
VI. ラドン・リスクを算出する方法	25
A. 概要	25
B. ラドン誘発肺がん死の生涯リスクのための生命表の導入	26
1. 男性と女性、ESとNS、それぞれの肺がん死亡率	26
2. 相対リスクモデルの選択	28
3. 濃度モデルおよび期間モデルの適用	29
4. 肺がん死の年齢別リスクの平均化	33
5. 米国公衆の統合リスク推定	34
C. 病因割合	34
D. 単位曝露および単位濃度当たりのリスク	36
E. がん死年齢と生命損失年	38
F. 以前の推定値との比較	40
1. 曝露パラメータ	40
2. ベースラインの率	40
3. 死亡率データ	41
4. 相対リスクモデル	41
G. 致死性肺がん以外の影響	41
H. 現喫煙者	42
I. 肺がん死亡率の喫煙依存性	43
J. 要約	44
VII. 不確実性	45
A. 背景	45
B. 鉱夫データの不確実性	46
1. 曝露量推定における誤差	46
2. 他の曝露による交絡	46

3. 鉦夫の喫煙	47
C. 住居の曝露への外挿に伴う不確実性	47
1. K-ファクター	47
2. リスクの性依存性	48
3. リスクの曝露時年齢依存性	48
4. 米国人集団の喫煙パターン	49
D. 平均住居曝露量の推定の不確実性	49
1. 平均ラドン濃度 (C) の不確実性	50
2. 平行割合 (F) の不確実性	50
3. 平均居住係数 (Ω) の不確実性	50
E. モンテカルロ・シミュレーション	50
F. 低曝露率への外挿に伴う不確実性	53
G. リスク推定値にあたるラドン曝露による健康影響に関する仮説の感度解析	55
補遺 A: 年齢別既喫煙者率の推計	57
補遺 B: EIR VI 相対リスク関数のスムージング	61
補遺 C: 記号と数式 (省略)	
補遺 D: ラドン・レベルおよび喫煙状況による肺がんリスク	62
文献	63

表 一 覧

表の題名	ページ
1. 鉦夫コホート、曝露人数、疫学的フォローアップ人年、肺がん死	19
2. 鉦夫コホート、ラドン曝露によるWLM曝露当たりの 過剰相対リスクの見積値と95%信頼区間 (CI).....	20
3. BEIR VIモデルのパラメータの推定値.....	22
4. 1985-1989の米国人の死亡率 (NAS 1999) を用いて国内のラドン曝露によるARの推定.....	24
5. 1995年、米国における、居住用室内のラドン子孫核種の曝露に起因する肺がん死亡数の推定..	24
6. BEIR VIの濃度および期間モデルに基づくWLM当たりのリスク	29
7. 喫煙カテゴリーと性により推定される病因割合	34
8. 1995年の肺がん死の中のラドン起因の推定割合	35
9. 53%の男性と41%の女性がESであるとした定常的集団について、 喫煙と性別のカテゴリーによる推定病因割合	35
10. 3%の男性と41%の女性がESである固定集団での、 喫煙カテゴリーと性別によるWLM当たりのリスク推定値.....	37
11. 肺がん死の推定平均年齢	39
12. 肺がん死当たりの推定生命損失年.....	39
13. 1992年以降の方法論の変動に依存したリスク見積値の変動	41
14. 現喫煙者と前喫煙者のラドン誘発肺がん死の推定	42
15. 白人に対する、喫煙未経験者に対する現および元喫煙者の致死性肺がんの、 年齢別相対リスクと年齢補正相対リスク	44
16. NSと比較した場合のESの致死性肺がんの複数の相対リスク推定値に対する WLM推定値当たりのリスクの感受性.....	44
17. 中国のスズ鉦夫コホートにおけるWLM当たりのERRに対するラドン曝露開始年齢の影響.....	49
18. 濃度モデルにおけるリスク因子の不確実性分布のためのパラメータ	52
19. WLM当たりのリスク、EF、YLL、平均居住曝露および ラドン起因性致死性肺がん数のモンテカルロ・シミュレーション.....	52
20. 曝露因子を公称値に固定した場合のEF、YLL、平均居住曝露および ラドン起因性致死性肺がん数のモンテカルロ・シミュレーション.....	53
21. WLM当たりのリスクおよびEF推計値のNSリスク係数への依存性.....	55
22. WLM当たりのリスクおよびEF推計値の小児リスク係数への依存性.....	56
23. 相対リスクが曝露後期間に応じて低下する状態に関する仮定への WLM当たりのリスク推計値およびEF推計値の依存性.....	56
A1 年齢グループ別男性の既喫煙者 (ES) 率の推計.....	58
A2 年齢グループ別女性の既喫煙者率 (ES) の推計.....	59
A3 平滑化された男性と女性の年齢別ES率.....	60
B1 BEIR VI 濃度モデルおよび期間モデルの Φ のスプライン平坦化	61
D1 非喫煙者、現喫煙者および一般集団のラドン・レベル毎の肺がん死亡生涯リスク	62

図 一 覧

図の題名	ページ
1. 年齢と性による既喫煙者 (ES) 率の変化.....	28
2. 0.181 WLM/yのラドン曝露としたときの、 BEIR VIの (調整されていない) 濃度モデルによる年齢別過剰リスク	31
3. 0.181 WLM/yの一定ラドン曝露率としたときの平滑化した年齢別過剰相対リスク	31
4. ESの男性と女性についての肺がん死の比率.....	32
5. NSの男性と女性のための肺がん死の比率	32
6. 53%の男性と41%の女性がESである定常的集団についての肺がん死の割合	32
7. 0.181のWLM/yの生涯曝露での、ES率による病因の割合の変化.....	36
8. ラドン終生曝露を1pCi/Lとした場合のES率の関数としての早期肺がん死の確率	38
9. 曝露年齢の関数としてのWLM当たりのリスク	38
10. ラドン誘発死による生命損失年の密度関数	39
11. 致死性のラドン誘発がん当たりの生命損失年	40

上級委員会要約

ラドン-222 はラジウム-226 の放射性崩壊によって生じる希ガスです。そして、それは土と岩の中に広く分布しています。ラドン-222 は、一連の半減期の短い放射性同位元素へと壊変します。これらの壊変生成物は、ラドン子孫核種または娘核種としばしば呼ばれます。ラドンは化学的に不活性なので、吸入された大部分のラドンは速やかに吐き出されます。しかし、吸入された壊変生成物は肺で容易に沈着し、そこで気道の感受性細胞に放射線被ばくを起し、肺がんのリスクを増加させます。

1999 年に、米国科学アカデミー (NAS) の米国研究審議会が BEIR VI 報告 (ラドン曝露の健康影響 (NAS 1999)) を出版しました。そこで、米国人への住居でのラドンのリスクを評価しています。環境保護庁が後援するこの BEIR VI 調査では、ラドンと他のアルファ放射体によるリスクについて、従前の BEIR IV 報告書では利用できなかった広範囲な新たな情報を使えるという恩恵を受けました (NAS 1988)。鉱夫からの疫学的データおよびアルファ線放射の生物学的影響の理解に基づいて、委員会は居住に伴うラドンの曝露が住民の肺がんの原因となりえると結論しました。職業的に曝露された地下鉱夫の 11 のコホートに関する疫学的データの統計分析に基づいて、委員会は、2 つの比較的優れたリスクモデルを開発し、それぞれのモデルで毎年米国での 15,400 または 21,800 人の過剰な肺がん症例発症を見積もっています。不確実性の解析から、年当たりで 3000~33,000 症例の範囲が示されました。委員会は、「これらは公衆衛生上問題であり、室内のラドンは喫煙に次いで肺がんの第 2 の主要な原因となる」と結論しました。

BEIR VI 委員会が提起した 2 つのモデルの両方とも過剰相対リスク (ERR) を基本としています。そして、その過剰相対リスクは特定の曝露 (脚注 1) による肺がんリスクの部分的な増加量を意味しています。任意の年齢時における過去の曝露から受ける個人のリスクは、ある年齢、さらに適切であるならば性や喫煙による階層分類後に、ベースラインの肺がん率に ERR 係数をかけることで得られます。任意の曝露からの生涯リスクは、競合している死因を取り入れた生命表で特定されたリスクモデルを使って計算することができます。これらの BEIR VI モデルの両方とも、ERR は曝露後経過期間と到達年齢が増加するに従って減少します。それでも、ベースラインの肺がん率は年齢と共に増加するために、所定の曝露によるリスクの算出値は年齢とともにしばしば増加します。

脚注 1. 曝露は、労働レベル月 (WLM) の単位、すなわち短寿命のラドン壊変生成物から放出されるアルファ粒子エネルギーの空気 1L 当たりのポテンシャルで測られる。

BEIR VI での重要な発見 (更新、拡張された鉱夫データに基づく) は、その所定の曝露によるリスクが、より長時間にわたる曝露で増加する傾向があることです。比較的低い曝露率、あるいは EPA がもっとも懸念する長い持続時間の場合、単位曝露 (WLM) 当たりのリスクは、ラドン曝露に対して線形に増加します。

もう一つの新しい発見は、推定された ERR が喫煙経験者 (ES) は喫煙未経験者 (NS) の約 2 倍になるということです。ラドン曝露による肺がん死亡が、ES では肺がん死の 1/8、NS では 1/4 を占めると推定されました。しかし、ES は NS よりも非常に高いベースラインの肺がん率を有しているため、ES でのラドンによって誘発された肺がんのリスクは、絶対目盛りでは NS よりもまだ非常に高いのです。

住居での肺がんとラドン曝露時間との相関を示す疫学的研究 (症例対照研究) が蓄積されつつあります。しかし、これらの結果は高いラドン・レベルの家での過剰な危険を明確には示していません。また定量的なリスク評価の根拠としては不十分です。このため、室内の曝露のリスクの推定は、鉱夫データに由来するモデルを使って外挿しなければならないのです。外挿に当たっては、坑道と室内の曝露の重要な数多くの違いを考慮しなければなりません。

最初に、物理的かつ生理的要因のために、肺の標的細胞へのアルファ粒子の WLM 当たりの線量は、住居での曝露の場合、鉱山での曝露に比較して高いのか、あるいは低いのか考慮しなければなりません。リスクは線量に比例していると思われるので、鉱夫データに由来するモデルは、これらの違いを考慮して調整する必要があるかもしれません。BEIR VI のリスク推定は、これらの要因が全体として互いがほ

ば相殺しているとの想定をおこなっており、調整することは不必要という前提に基づいています。この前提に対する疑いは、カバルロによって表明されました(Cavallo, 2000)。カバルロは、BEIR VI 報告書の中で鉱山と住居の曝露による被ばく線量がどの様に比較されているかを述べた部分の矛盾に正当に注目して、BEIR VI 報告が住居の露出時間からリスクを誇張しすぎたかもしれないと示唆しています。最近では、ジェームズらも、カバルロによって持ち出された問題を注意深く再検討したレポートを提出しています(James et al. 2003)。ジェームズらは、住居と鉱山の線量の違いの影響が互いにほぼ相殺して、住居内のリスク算出の際に調整が不要なことを再確認しました。この結果は、カバルロが指摘した BEIR VI の矛盾があっても、ラドンからのリスクが過大評価されたことにはならないということです。

第 2 に、地下鉱山の空気の他の物質（例えばヒ素、シリカ、ディーゼル排ガス）が、ラドン子孫核種の曝露と関連した肺がんリスクを修飾する可能性があります。これらの内で、シリカ、ディーゼル排ガスへの曝露は多分リスクに強く影響はしないが、ヒ素はリスク評価にポジティブなバイアスとなるかもしれないという根拠を BEIR VI は例証しています。

第 3 に、住居での曝露率は、鉱山で過剰リスクが明確な最低のレベルの曝露率よりもさらに低いことが一般的です。従って、屋内のラドンのリスクの評価は、より低い曝露率まで外挿する必要があります。鉱夫データと放射線生物学的なデータの両方とも、単位曝露量当たりのリスクは一定であることを示唆していますが、最も低い鉱夫曝露率から下方に外挿する想定は問題があると言われてきました。地域相関研究は、肺がん率が、米国全域で平均ラドン濃度と負の相関を示していました(Cohen 1995)。この結果は、ラドンが非常に低いレベルでのリスクは過剰評価しており、そのような曝露レベルでは肺がんに対して防護作用もありえることを示唆しています。低い線量では発がん性が大幅に減少すると見積る生物学的モデルも提案されています（たとえば Moolgavkar and Luebeck 1990, Elkind 1994）。多数の批評家（BEIR VI 委員会を含む）は、地域相関研究の方法論的な限界のためその結果を割引して考えてきました。また、生物学的モデルは、未だに非常に不確かなままです。BEIR VI 委員会は、ラドン誘発肺がんのメカニズムについての現在の理解に基づく線形閾値なし仮定を採用しましたが、この理解は不完全で、したがって、この仮定の根拠が決定的でないことを認めています。

この文書の中で、EPA は、主に BEIR VI 報告に基づき、室内のラドンによる健康リスクの評価をいくつかの技術的調整と拡大をもって最新のものにしました。第 1 に、EPA は 2 つの BEIR VI の推奨モデルを使って得られる値の中間の結果が得る単一モデルを構築しました。第 2 に、過剰リスクについての BEIR VI 委員会の定義では、結局肺がん死で死ぬであろう人々の中でラドンに起因する早死が除かれていることに注目して、EPA はすべてのラドン誘発肺がん死を含むものに BEIR VI 計算を修正しました。第 3 に、BEIR VI 委員会が成人の男性または女性の固定した割合が ES であると仮定したのに対して、EPA は年齢別の喫煙率を使っています。第 4 に、BEIR VI がラドンによる肺がんの増加割合を推定したのに対し、EPA はさらに単位曝露当たりのリスクの数値的推定 [労働レベル月 (WLM) 当たりの肺がん死] と、がん死当たりの生命損失年を提供しています。

その解析に基づいて、EPA は全国的に 1995 年の合計 146,400 の肺がん死から、21,100 (14.4%) がラドン関連であったと見積もりました。空気中からラドンを完全に除去することは不可能ですが、EPA が暫定基準とする値である 4 ピコキュリー/L (pCi/L) を上回る住居のラドン濃度を削減することにより、ラドン関連の肺がんの約 3 分の 1 は予防できると見積もられます (NAS 1999)。

すべての肺がん死の 93% は ES 群で観察されますが、ラドン関連の肺がん死の 86% は ES 群であると見積もられます。予測平均生命損失年は、全体の肺がん死では 12 年で、ラドン関連の症例では 17 年とより高くなっています。単位曝露当たりのリスク推定値は、以下の通りです。5.38 × 10⁻⁴/WLM (全体) ; 9.68 × 10⁻⁴/WLM (ES) ;そして、1.67 × 10⁻⁴/WLM (NS)。ラドンとその壊変生成物間の平均平衡比率を 40%、室内居住率を 70% と仮定して、4pCi/L の暫定基準の生涯曝露で推定されたリスクは 2.3% (全体)、4.1% (ES)、0.73% (NS) です。推定絶対リスクは、ES では NS より非常に高くなりますが、推定相対リスクは NS がより高くなります。NS 群では肺がんのおよそ 4 分の 1 (26%) が、ES 群ではおよそ 8 分の 1 (12%) が、ラドンに起因すると見積もられます。現喫煙者のリスク推定は、より難しいです。鉱夫コホートのデータの限界のため、BEIR VI モデルは喫煙中の者の過剰相対リスクを明示していませんでし

た。現喫煙者（彼らが18歳で煙草を始め、現在もやめていないとの前提で計算）のリスク推定は、WLM 当たり 1.5×10^{-3} 、あるいは生涯曝露量 4 pCi/L で 6%以上です。

EPA もリスク推定の不確実性を再検査しています。通常の住居で遭遇するよりも高いラドンの濃度に曝露される鉱夫の観測から見積もられたリスクから外挿する際の不確実性を推定するのに、BEIR VI は、住居での生涯曝露相当レベルに相当する 50WLM 未満に曝露された鉱夫の限定的なデータセットを用いました。そして、このデータセットに統計的に適合するリスク係数が変化しない相対リスクモデルを使って、妥当な不確実性の境界（信頼限界 95%で 3,300~32,600）を計算しました。この限られたデータベースではサンプリング誤差は大きく、結果として、得られる信頼範囲が広すぎる可能性があります。EPA は、他のアプローチを採用しました。すなわち、BEIRVI の妥当なモデルを基に、モデルの不確実性に明確な考慮を加えて、不確実性の推定をしました。しかし、BEIR VI と同様、EPA も不確実性に関連したすべての要因を定量化することはできておりません。これらの不確実性は、定性的（または半定量的）に議論されています。そして、全体像を得るため、これらの変数のいくつかについて感度解析の結果が含まれています。それらの定量化された不確実性のモンテカルロ分析から、EPA は一般集団のために、WLM 当たり $2 \sim 12 \times 10^{-4}$ の肺がん死の 90%主観的信頼区間を推定しています。1995 年のラドン誘発肺がん症例に対応する 90%信頼間隔は 8000~45000 です。その信頼区間は、分析に更なる不確実性の要因が加わるとより広くなるので、ラドン誘発死数は 8,000 より少ないことはあり得ます。しかし、それが 3,300 まで少ないことはないでしょう。しかし、喫煙が肺がんの主要な原因であることから、ラドンが 45,000 程度の死亡あるいは WLM 当たり 12×10^{-4} の肺がん死の原因となることはありえないでしょう。特定の亜集団（特に子供たちや NS や元喫煙者）への曝露リスク見積は、一般集団の見積より高い不確実性があります。

ラドンとタバコ喫煙の影響は相乗的であり、そのため喫煙者にとりラドンはより危険です。従って、米国の喫煙率が予想されたように減少していけば、ラドン誘発肺がんの若干の減少が期待できます。付随して、全体としての肺がんも減少します。それでも、室内ラドンが重要な公衆衛生問題のままであることが予想され、毎年何千もの肺がん死に関与するでしょう。

I. イントロダクション

1992年に、EPAは技術支援文書1992年版市民のためのラドン・ガイドを出版しました。その中には、住居でのラドンへの曝露に関連した米国での肺がんリスクの推定方法が記載されていました。その方法は、主に米国科学アカデミー(NAS)による“BEIR IV”(NAS 1988)と“比較的被ばく線量評価法報告書”(NAS 1991)の2つのレポートに基づいていました。BEIR IVでは、モデルは、職業的に曝露された地下鉱夫の4つのコホートの疫学的分析を基にして、吸入されたラドン後継種のリスク推定を導きました。比較的被ばく線量評価法報告書では、肺の潜在的標的細胞への放射線量が、鉱山と住居の状況、それぞれの下で計算されました。結果は、住居で個人への単位曝露当たりのアルファ線エネルギーの摂取量を、鉱山での鉱夫のそれと比較して、比率(K)で表されました。単位曝露当たりの線量は、一般的に、住居では鉱山(K.0.7)よりおよそ30%低く、住居環境に適用できるリスク係数は鉱夫データから推定される値から30%減ずることが結論されました。

その後、EPAは、もう一つのNAS研究(BEIR VI)を主導し、より完全な情報(NAS 1999)に基づき、新しいリスクモデルとKファクターの推定を提案しました。現在、BEIR IVモデルが基にした4つのコホートのフォローアップを含む11の鉱夫コホートに関するデータが利用可能となっています。そのうえ、鉱山と住居における曝露状況についての若干の新情報が利用可能となり、K値の改訂が可能となりました。BEIR VIでのKファクター(Cavallo 2000)に関する疑問に対して、EPAは1つの研究を支援しました。その研究から、BEIR VIで使用されている曝露想定の下では、Kファクターに使われた値が適切であると結論づけられました(James et al. 2003)。

EPAは、現在BEIR VIでの調査結果と勧告を考慮して、室内のラドンのリスクのその評価を改訂しています。改訂された方法論は、BEIR VIのアプローチを考慮して、いくらかの拡張や変更を含んでいます。これらの拡張や変更はEPAの放射線諮問委員会(RAC)の助言的なレビューを取り入れています。総体として、これらの調整は、毎年のラドン誘発肺がんの推定数に、小さな影響を及ぼすだけです。

この文書は、住居内のラドンのリスクのEPAの推定の技術的な根拠として用いられるでしょう。それは、単位曝露についてのリスクの推定と、米国の毎年のラドンによる肺がん死亡数の予測を可能とします。それも、男性と女性、喫煙経験者と喫煙未経験者、それぞれについて別々の予想結果を提供します。最後に、本書では、これらの予想における不確実性を議論しています。ここで提示される方法論と結果は、高いラドン・レベルの住居について、市民の手引き書になるでしょう。これらの結果は、規制目的のためにも使われるかもしれませんが、例えば、土壌中のラジウムの浄化レベルの設定とか、あるいは、飲料水中のラドンの最大濃度の設定とかいったように。

II. 科学的な背景

ラドン-222はラジウム-226の放射性壊変によって生じる希ガスです。そして、ラジウム-226はウランを含む土壌や岩石の中に広く分布しています。ラドンは容易に土壌または岩石から出て、周辺の水や空気に侵入します。人間の曝露で最も重要な経路は、建物下の土壌ガスが建物内へ浸透する経路ですが、室内のラドンは水や外気あるいは建材含有のラジウムからももたらされます。ラドン-222は、3.82日の半減期で壊変して、ラドン娘核種あるいは子孫核種と呼ばれる一連の半減期の短い放射性同位元素になります。それらは化学的に不活性であるので、吸入されたラドン-222の大部分は速く吐き出されますが、吸入された子孫核種は肺の気道に容易に沈着します。これらの娘核種のうちポロニウム-218とポロニウム-214の二つの核種は、アルファ粒子を放出します。これが肺で起こると、放射線は気道の内側を覆っている細胞に損傷を与えて、最終的にがんにつながる可能性があります。(ラドン壊変生成物の核壊変においては、ベータ粒子と高エネルギー光子の形でエネルギーが放出されますが、これらの放出で生じる生物学的損害はアルファ粒子によるものと比較して小さいとされています。)

他に2種のラドン同位元素であるラドン-219(アクチノン)とラドン-220(トロン)が自然界では発生していて、放射性ラドン娘核種を生成します。アクチノンの半減期は非常に短いため(3.9s)、アクチ