放射線防護の最適化における単位集団線量の貨幣評価値

高原 省五*¹, 加藤 尊秋*², 本間 俊充*¹

(2013 年 7 月 3 日受理)

(2013 年 8 月 19 日再受理)

Monetary Values of Unit Collective Dose in Optimization of Radiation Protection

Shogo TAKAHARA,*¹ Takaaki KATO*² and Toshimitsu HOMMA*¹

The monetary value of unit collective dose, which represents the benefit of dose reduction due to the protective measures, is a key element in implementing the optimization principle of the radiation protection. The objectives of this paper are to evaluate the country-specific monetary value of unit collective dose reflecting the economic and population characteristics in Japan, as well as to analyze the balance of the cost and benefit of the radiological protective measures. When we calculated the monetary values of unit collective dose in Japan using human capital method and willingness to pay approach, the values were around several million yen/person-Sv and 20 million yen/person-Sv, respectively. In addition, we surveyed the data on costs of radiological protective measures per the avoided person-Sv. As the results of comparing the cost and benefit, the costs of radiological protective measures to reduce the concentration of radon in homes and to protect workers in nuclear facilities were balanced with the benefit. On the other hand, the costs of radionuclide emission control measures at industrial facilities tend to be higher than the benefit of those measures.

KEY WORDS: optimization, cost-benefit analysis, monetary values of unit collective dose, human capital method, willingness to pay approach, cost per life-year saved.

I 緒 論

放射線防護の最適化は、国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection: ICRP) の防護体系を構成する基本的な考え方の一つである¹⁻⁵⁾。特に、ICRP Publ. 9において「経済的及び社会的な計算を考慮に入れたうえ、すべての線量を容易に達成できるかぎり低く保つべきである (52 項)」という ALARA 原則が導入されて以来、放射線防護の損害と便益の定量的な分析手法が導入され、費用便益分析等の意思決定支援

技術の適用が進められてきた⁶⁻⁸⁾。しかし、費用便益分析を利用するためには、防護措置等によって削減された放射線リスクの便益を費用と同じ単位で計測し、それらのバランスを比較考量する必要がある。ICRP や国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency: IAEA) は、1970 年代以降、この課題を解決するために単位集団線量を回避することに対する貨幣評価値の算定を進めてきた^{2, 6, 9)}。

また、近年においては、政策又は規制の導入あるいは中断の影響を分析し、定性的及び定量的な根拠を明確にするよう求められており^{10, 11)}、放射線防護分野でもこれらの評価を実施するために単位集団線量の貨幣評価値に関する整備が各国で進められてきた¹²⁻¹⁵⁾¹⁾。しかし我が国においては、1980 年代に単位集団線量の貨幣評価値に関するいくつかの算定結果¹⁹⁻²¹⁾が示されたのみで、最新の評価方法による実用的かつ具体的な評価値はこれまでに算定されていない。

*¹ (独) 日本原子力研究開発機構安全研究センター：茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4 (〒319-1195)

Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency; 2-4 Sirakata-Sirane Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan.

*² 北九州市立大学国際環境工学部：福岡県北九州市若松区ひびきの 1-1 (〒808-0135)

Faculty of Environmental Engineering, University of Kitakyushu; 1-1 Hibikino, Wakamatsu, Kitakyushu-shi, Fukuoka 808-0135, Japan.

本稿の目的は、単位集団線量の貨幣評価値について、ICRP 及び各国における評価方法を調査・整理し、我が国の現状を反映して予備的な評価結果を提供することである。また、放射線リスク低減策に要する費用についても調査し、その費用と便益のバランスについて考察する。

II 放射線防護体系における最適化と費用便益分析

1. 放射線防護における費用便益分析の定式化

ICRP は ALARA 原則の定量的な履行のために、Publ. 22²⁾を発行した。Publ. 22 の重要な点は、「ある線量をもつと低減することの経済的及び社会的な利得が、この低減を達成するための経済的及び社会的な費用と等しいように線量を選ぶことによって、この線量が経済的及び社会的考慮を計算に入れたうえ、容易に達成できるかぎり低いものであると言えるような点を定めることは可能である (11 項)」として、放射線の利用にともなう費用と便益との定量的な比較によって Publ. 9 の 52 項を履行するための方針を示したことである。

また、Publ. 22 では放射線防護の便益と費用を定量的に比較考量するための手法として費用便益分析の導入について検討すると同時に、便益と費用を定量的に扱うためにいくつかの概念が提案された。第一に、放射線被ばくの「損害」について、「個々の型の悪性の影響の確率だけでなく、それら影響の重篤さも考慮に加えた、ある線量で生ずる害の期待値 (21 項)」との定義を示すことで、集団に対する線量あたりの影響を定量的に評価する方法に道筋がつけられた。そして第二に、直線的なしきい値のない線量影響関係を仮定して、集団の損害を定量的に扱うために集団線量概念を取り入れた²⁾。このような状況を受けて Publ. 26³⁾では、放射線利用に係る「行為」の費用便益分析を (1) 式のように定式化した。

防護措置等のリスク低減策の導入によってもたらされ

る純便益 (net benefit) B は、粗便益 (gross benefit) V から費用と損害に係る成分を差し引いてあらわされる。

$$B = V - (P + X + Y) \quad (1)$$

ここで、

B : 低減策の導入による純便益 (yen)

V : 行為による粗便益 (yen)

P : 防護費用を除く行為の生産費用 (yen)

X : 特定の防護レベルを達成するための費用 (yen)

Y : 特定の防護レベルにおける損害 (yen)

である。

(1) 式を出発点として費用と便益を比較考量し、線量の低減が合理的に行われているか決定するためには、一方においてそのような低減から得られる便益の増加を計測し、他方ではその達成に必要な費用の増分を考慮しなければならない。

(1) 式を集団線量 S で微分すると次式を得る。

$$\frac{dB}{dS} = \frac{dV}{dS} - \left(\frac{dP}{dS} + \frac{dX}{dS} + \frac{dY}{dS} \right) \quad (2)$$

ここで、純便益 B をもたらす放射線リスク低減策が正当化されるためには、その導入前後における正味便益の変化分がゼロ以上になる必要がある。粗便益 V と生産費用 P が集団線量 S に依存しないと仮定すると、(3) 式が成立する。

$$\frac{dX}{dS} \leq -\frac{dY}{dS} \quad (3)$$

(3) 式は、放射線リスク低減策を導入することで集団線量 S が減少する場合に、防護の費用 X の増加分よりも損害 Y の減少分のほうが大きくならなければならないことを表している。

例えば、原子力施設における放射線管理策の導入を考えた際に、規制の強化によって管理策の水準が高められた場合、 V : 発電による便益、 P : 燃料費や人件費などの運転に要する費用、 X : 管理費用、 Y : 計画された被ばくによる損害と考えられ、防護水準が高められれば集団線量 S は減少するのに対して、発電量自体は変わらないので V と P は一定となる。一方、管理策に要する費用 X は増加し、計画被ばくによる損害 Y は減少することになる。このうち費用 X はもともと貨幣価値で計測されているので、(3) 式の比較考量では、損害の減少分、すなわち便益の計測方法として、単位集団線量を回避することに対する貨幣価値がどのくらいになるのかという課題を解決する必要がでてくる。

¹ 我が国においても多くの分野で規制影響分析 (Regulatory Impact Analysis: RIA) に関する基礎的な調査¹⁶⁾が進められてきた。特に、RIA の中心的な分析手法の一つである費用便益分析や便益計測の方法については、指針等の整備が進められている (例えば、国土交通省の指針など^{17, 18)})。

² 集団線量の利用において留意すべき仮定として、米国放射線防護測定審議会 (National Council on Radiation Protection and measurements: NCRP) は、(i) 生物学的効果のリスクが線量に比例する、(ii) 生物学的応答が線量率に依存しない、(iii) 線量が細胞致死や確定的影響を生ずるほど高くはないことを挙げている²⁰⁾。このほか、きわめて小さな個人線量の加算について、カットオフレベル未満の線量をゼロとして取り扱う考え方も長らく議論されてきた^{22, 23)}。この点について ICRP は、Publ. 77²⁴⁾の 56 項において、「個人線量が小さいという根拠だけで、小さい個人線量による集団線量の成分を無視すべきであるとは勧告しない」との考え方を示している。

2. 単位集団線量の貨幣評価値とその算定方法に関する経緯

(1) α 損害と β 損害

放射線リスク低減策によって損害を回避することの便益を計測する方法として、ICRP は単位集団線量を貨幣評価値に換算するための係数を導入した^{2, 25)}。換算係数の導入当初は、被ばくによる客観的健康損害（以下、 α 損害とよぶ）のみを貨幣評価値に換算する方法が主流であった。しかし、1983 年に刊行された Publ. 37⁶⁾ で損害の範囲が見直され、 α 損害だけでなく、リスク嫌悪や、国による管理上の規則類に依存する他の損害の成分など、客観的でなく健康に関係のない損害（以下、 β 損害とよぶ）も付加的な費用として加えることが望ましいものとして、以下のようにあらためて定式化されている。

$$Y = \alpha \cdot S + \beta \cdot \sum_i \{N_i \cdot f_i(H_i)\} \quad (4)$$

ここで、

α : 単位集団線量あたりの α 損害の貨幣評価値 (yen/person-Sv)

S : 行為に伴う集団線量 (person-Sv)

β : 単位あたりの β 損害の貨幣評価値 (yen/person)

N_i : グループ i に属する個人数 (person)

f_i : グループ i に属する個人のリスク回避傾向に依存するパラメータ

H_i : グループ i に属する個人の線量 (Sv)

である。

β 損害については、ICRP による明確な定義はない。例えば、土居と中島²⁶⁾ は、「 α 損害によって誘発される心理的不安とそれによって新たに引き起こされる社会的・経済的諸影響の集合体」であるとし、個人のリスク削減に対する姿勢や放射線利用の受容に関する社会的特性に依存するとして、社会調査等による β 損害の決定方法について検討している。 β 損害の必要性に対する ICRP の立場は明確であり、 α 損害のみを評価する方法は、放射線損害 Y に対する貨幣評価値の最小値に関する知見を与えるのみであるとの立場をとっている⁶⁾。

集団線量に比例する α 損害だけでは、集団全体としての損害を特定できても、特定の個人に不当に高い被ばくを生ずる状況を特定することはできない。そこで、集団の構成員、一人ひとりの個人線量に依存する形で β 損害を導入したのである。(4) 式の f_i の形状を適切に選び、高い線量を受けている個人の損害をより高く評価することで、個人間に生ずる損害の不公平な分配を制限することが可能である。損害に関するこのような考え方は、

Publ. 37 で導入された後に、集団内のサブグループに対しても適用できるように個人線量をサブグループの集団線量に置き換えて拡張されている²⁷⁾。

(2) 単位集団線量の貨幣評価値の算定における確率的生命の価値の利用

α 損害の貨幣評価値の算定においては、確率的生命の価値 (Value of Statistical Life: VSL)³⁾ が利用される。VSL は単位リスク削減に対する貨幣評価値であり、例えば、死亡リスクを 10^{-3} だけ削減するために 10,000 円を必要であったとすると、VSL は 10,000 円/ 10^{-3} で 1,000 万円となる。この値を用いて削減リスクを貨幣評価値に換算し、施策による便益を評価して、費用とのバランスを分析するのである。

VSL には複数の評価方法が知られており、1970 年代には、人が死亡した際に失われる逸失利益や治療に要した医療費用などを計上して経済性を評価する人的資本法が主流であった。しかし、1980 年代に入ると、人的資本法に対して倫理的な観点からの批判がなされた。例えば、本人あるいは家族などが被る精神的な影響を含んでいないこと、就業していない人に対して極端に低い評価値を与えることなどにより、人の健康を不当に低く評価付けてしまうという批判である²⁸⁻³⁰⁾。英国王立協会によると、人的資本法による VSL は、次に述べる支払意思額 (Willingness To Pay: WTP) アプローチによる VSL よりもおおよそ一桁程度の低い値になると報告されている³⁰⁾。また、VSL とはリスク変化に対する WTP を死亡 1 件あたりに換算したものであって、人的資本法のように一人あたり所得や逸失利益をもとに評価しても無意味であるとの批判もある³¹⁾。

これらの批判を受けて現在では、健康の喪失やリスクを引き受けることに対する個人の姿勢や考え方を反映して WTP を評価するアプローチが盛んに用いられるようになった。WTP とは、あるリスク削減策に支払っても良いと思う最大の金額のことである。削減策に対する WTP をそのリスクの削減幅で除することで、VSL を算定できる。1990 年代以降、WTP アプローチは、人的資本法に代わり経済性分析における標準的な方法となっている。

(3) 確率的生命の価値の評価手法の変更にともなう単位集団線量の貨幣評価値の見直し

米国及び英国では、このような VSL の評価手法の変更のもと、1990 年代に単位集団線量の貨幣評価値の見

³⁾ 統計的生命の価値とも呼ばれる。

直しが行われた。米国では、多様なアプローチで見出された WTP の評価値をレビューして VSL を定め、この値に ICRP の名目リスク係数を乗ずることで、単位集団線量の貨幣評価値を 10 万ドル/person-Sv から 20 万ドル/person-Sv へと改訂した^{29, 32)}。

英国では、自然放射線レベル（～1 μSv/年）に対してベースラインとなる WTP を評価して、リスクレベルに応じた補正を加え、貨幣評価値を変化させる考え方を導入した³³⁾。ベースラインとなる WTP は 1 万ポンド/person-Sv である。また、公衆と職業人が 1 年間で受ける平均的な線量レベルとして、それぞれ数 μSv ～数十 μSv 及び数 mSv と仮定した。自然放射線レベルとこれらの平均的な線量レベルとの違いに応じて、公衆被ばくと職業被ばくにそれぞれ 1-2 及び 6-7 の補正係数を見込み、さらに職業被ばくには就業年齢に関する補正も加えて、公衆に対する単位集団線量の貨幣評価値を 1 万ポンド/person-Sv から 2 万ポンド/person-Sv、職業人に対する値を 3 万ポンド/person-Sv から 5 万ポンド/person-Sv へと改訂した。

なお、人的資本法から WTP アプローチへの見直しは、米国や英国だけでなく他の各国においてもすでに反映されている。国際職業被ばく情報システム（Information System on Occupational Exposure: ISOE）が各国の当局者に対して行った調査によると、1998 年の時点で、人的資本法に基づく評価値をそのまま採用している当局は存在しないとのことである¹⁵⁾。

一方、ICRP は β 損害の必要性を示して以降、その具体的な評価手法については、長い間、勧告してこなかった。しかし 2006 年に刊行された Publ. 101 において、次のモデルが提案された⁸⁾。

$$\begin{cases} \alpha_{ref}(d) = \alpha_{base} & d < d_0 \\ \alpha_{ref}(d) = \alpha_{base} \left(\frac{d}{d_0} \right)^a & d \geq d_0 \end{cases} \quad (5)$$

ここで、

$\alpha_{ref}(d)$: 被ばく線量 d に対する集団線量の貨幣評価値 (yen/person-Sv)

α_{base} : 貨幣評価値の基準値 (yen/person-Sv)

d_0 : 基準となる線量レベル (Sv)

d : 個人の年間被ばく線量 (Sv)

a : リスク回避傾向を表す係数

である。

このモデルでは、ある特定のレベルを超えるリスクに対して、人々が示す回避傾向を取り入れることで、被ば

く集団内における個人間での線量レベルの違いを考慮できるようになっている。例えば、100 人が 1 mSv ずつ被ばくした場合の集団線量 100 person-mSv と、10 人が 10 mSv ずつ被ばくした場合の集団線量 100 person-mSv とは、集団線量の観点では等しい意味を持つ。しかし、集団線量は等しくても、各個人に課されたリスクは異なるので、これらの状況は意思決定においては区別して議論されなければならないはずである。(5) 式のモデルは、このように集団内での個人線量の分布が異なる状況を意思決定に反映することで、特定の個人が過大なリスクを被る不公平な状況を考慮し、そのような個人の防護を優先することを可能としている。

このモデルの利用においては 3 つのパラメータが必要となる。まず、基準となる貨幣評価値 α_{base} について ICRP は、WTP アプローチだけでなく人的資本法を含む様々な経済的方法をこの評価に利用できると考えている⁸⁾。基準となる線量レベル d_0 は、これよりも低い被ばくレベルではリスク回避傾向を考慮しないとされるレベルであり、被ばく集団のリスクの受容性に依存するとされるパラメータである。リスクの回避傾向を表す係数 a は、被ばくレベルに応じて回避の程度がどのくらい違うかを表すパラメータである。

このうち d_0 と a には被ばく状況に応じて異なる値を設定する必要があるので、公衆被ばくと職業被ばくには異なる値が用いられる。(5) 式のモデルに関する先行研究を調査してみると、職業被ばくに対しては、 d_0 として 1 mSv/年、 a として 1.2-2.0 の範囲が用いられている^{8, 34-39)}。また、公衆被ばくに対しては職業被ばくほどの先行研究はないものの、 d_0 として 0.2 mSv/年、 a として約 2-3 の範囲が示されている⁴⁰⁾。

III 単位集団線量の貨幣評価値の算定

第 II 章でまとめたように、単位集団線量の貨幣評価値を算定する場合、その方法には人的資本法あるいは WTP アプローチのいずれかが用いられてきた。また、個人間での公平性を考慮するために、被ばくレベルの違いに応じて重み付けをするか否かという 2 つの立場が存在する。

評価方法については、1990 年代以降、WTP アプローチが標準的な手法として採用されており、人的資本法を重み付けすることなく利用する考え方は採用されていない。重み付けに対する立場には、これを採用せず、あらゆる状況に対して単一の値を適用する米国のような立場と、個人線量に応じて重み付ける英国や ICRP のような

Table 1 Value of Statistical Life estimates based on willingness to pay surveys.

		10 ⁸ yen (2012)*				Sample size
		Median	Mean	Min.	Max.	
Total		3.47	5.59	0.05	31.5	73
U. S. NRC ²⁹⁾	Consumer Behavior Study	2.78	2.90	1.39	4.29	11
	Wage/risk Compensation	5.80	7.05	0.75	20.4	25
	CVM	3.85	4.99	0.13	19.7	8
	Values employed by U. S. Government Agencies	1.83	2.64	0.38	8.20	10
	Risk-Reducing Regulations	3.66	8.07	0.05	31.5	11
Japan		3.86	7.21	2.15	24.0	8

* Monetary values reported in previous studies are converted into yen as of 2012.

立場がある。

なお、単一の値を適用する米国においても、職業被ばくの場合には、被ばくりスクへの対価を賃金に含むために補正が必要であったり、その他の労働費用を考慮したりすることで、単位集団線量の貨幣評価値が勧告値よりも高くなる可能性のあることが認識されている³²⁾。米国では、これらの点を単位集団線量の貨幣評価値の算定において考慮するのではなく、意思決定プロセスの中で感度解析を実施し、検討に含むことで対応可能であるとされる³²⁾。

このように、WTP アプローチを用いた場合に重み付けを行うか否かは、国や機関によって考え方が異なる。また、重み付けのモデルには、英国のリスク回避曲線によるアプローチ³³⁾と ICRP による (5) 式のモデル⁸⁾が利用されていた。このうち英国のリスク回避曲線は図として与えられているのみであるので、今回の解析には利用できなかった。

以下、本稿では、米国の立場に基づき WTP アプローチで重み付けを行わない方法と、利用可能な重み付けモデルとの併用により人的資本法で重み付けを行う方法の2つについて、我が国における単位集団線量の貨幣評価値を算定する。

1. WTP アプローチに基づく評価

WTP の評価にはいくつかの方法が用いられ、これらは一般に顕示選好法と表明選好法の2種類に分けられる。顕示選好法は、人々の経済行動から間接的に WTP を評価する方法であり、代替法、トラベルコスト法、ヘドニック法などが含まれる。表明選好法は、人々に直接質問することで WTP を評価する方法であり、仮想評価法 (Contingent Valuation Method: CVM)、仮想ランキング、選択型コンジョイント分析などが含まれている⁴¹⁾。

WTP アプローチにより単位集団線量の貨幣評価値を算定する場合、先行研究では2つの方法が用いられてき

た。第一に、VSL の評価事例を文献調査して代表値を決め、これに名目リスク係数を乗ずることで単位集団線量の貨幣評価値を算出する方法である^{29, 32)}。第二に、表明選好法の一つである CVM を用いて、放射線被ばくを回避することに人々が見出す貨幣評価値を質問して直接評価する方法である^{35, 36, 40)}。これらのうち本稿では、前者の方法を採用し、我が国における VSL の評価結果を文献調査して、これをもとに単位集団線量の貨幣評価値を算出する。

NRC による VSL のレビュー結果²⁹⁾と、本調査による日本の VSL のレビュー結果⁴²⁻⁴⁸⁾を併せて Table 1 に示す。日本での評価はいずれも、CVM による評価結果である。レビュー結果は 2012 年の円に換算して示した⁴⁾。米国の CVM による VSL のレビュー結果は中央値で 3.85 億円、日本の VSL は中央値で 3.86 億円となった。

また、日本人集団に対する放射線被ばくによるがん罹患及びがん死亡の名目リスク係数を算出するために、日本原子力研究開発機構 (JAEA) の整備した晩発性健康影響解析コード HEINPUT-GUI⁵⁰⁾に米国環境防護庁 (Environmental Protection Agency: EPA) のモデル⁵¹⁾を組み込んで計算を実施した。一般に放射線リスクの計算では、被ばくによるがんの過剰リスクを、絶対リスクモデルと相対リスクモデルを組み合わせて計算する。EPA モデルは、相対リスクモデルの計算に集団の罹患率や死亡率のハザード関数を利用するものである。計算に必要な人口動態統計データ、がん統計データなどは、データが十分に整備されている 2005 年のものを入力とした。計算の結果として、被ばく時年齢に対する生涯がん罹患リスク及び生涯がん死亡リスクを Fig. 1 に示す。罹患リスク及び死亡リスクともに、女性のほうが男性よりも高い。

⁴⁾ 評価年の異なるものは GDP デフレータを用いて 2012 年の値とした (国民経済計算 (GDP 統計)、四半期別 GDP 速報)⁴⁹⁾。

Fig. 1 Lifetime risk of the Japanese population as a function of age at exposure.

これは、女性の場合に乳房と卵巣への影響を考慮していることが大きな理由である。年齢別では、放射線感受性の高い若年層の方がリスクは高くなる傾向がみられた。この結果に対して、日本人集団の統計データをもとに、年齢分布と性による加重平均を施して、がん罹患リスク及びがん死亡リスクの公衆と職業人に対する名目リスク係数、致死率とQOL (Quality of Life) で調整した名目リスク係数⁵を算出して Table 2 に示す。なお、年齢区分はICRPの名目リスク係数の区分を参考に、公衆に対して全年齢のデータ、職業人に対しては18歳～64歳までのデータを使用した。

WTPのレビュー結果及び名目リスク係数の評価の結果をもとに、日本人集団に対する単位集団線量の貨幣評価値を計算すると、2012年の日本円に換算して、公衆と職業人に対してそれぞれ、2,040万円/person-Sv及び1,830万円/person-Svとなった。

2. 人的資本法に基づく評価

人的資本法による評価には、(a) 国内総生産 (Gross Domestic Product: GDP) をもとに一人あたり所得を評価

する方法、(b) 逸失利益を評価する方法が用いられてきた。ここでは、これら2つの方法を用いて α_{base} を評価した。なお、一連の計算には必要なデータの整備されている2005年の統計を利用した。

(1) 国内総生産に基づく評価方法

(i) IAEA の評価方法

ここではIAEA Safety Series 67⁹⁾の方法をもとに、日本のGDPデータを利用して α_{base} を算出する。

$$\alpha_{base} = LLE \cdot I + C \quad (6)$$

ここで、

LLE : 1 Sv あたりの損失余命 (person-year/person-Sv)

I : 年あたり一人あたりのGDP (yen/person-year)

C : 1 person-Sv あたりの追加的な治療費用 (yen/person-Sv)

である。

I には、2005年の一人あたり名目GDPとして399万円(2005年)を用いる。 C は、がん治療の医療費用を罹患患者数で割って一人あたりの治療費用を算出し、がん罹患率を乗じた値とする。がん罹患患者数とがん治療費用として2005年の統計値を用いたところ一人あたりのがん治療費用は381万円となった。ここで、がん罹患患者数は国立がん研究センターの罹患データ⁵²⁾、がん治療費用は厚生労働省統計国民医療費⁵³⁾の入院費用と入院外費用を合計した値とした。また、 LLE については、日本人集団に対するリスク計算の結果として、公衆に対して1.43 year/Sv、職業人に対して1.13 year/Svとなった。2005年時点の I 及び C を使って (6) 式を計算し、その結果を2012年時点での値に補正すると、 α_{base} は公衆に対して588万円/person-Sv、職業人に対して467万円/person-Svとなった。

(ii) 土居らの評価方法

土居と中島^{20, 21)}は、一人あたりの所得損失に加えて、健康影響の治療費を計上して、公衆に対する α_{base} を次のように算出した。

$$\alpha_{base} = P_1 \cdot \left(\overline{ME} + \frac{\overline{W} \cdot T}{365} \right) + P_2 \cdot (\overline{W} - \overline{C}) \cdot \sum_{t=h}^{\bar{h}} (1+r)^{-(t-h)} + P_3 \cdot (\overline{W} - \overline{C}) \cdot h \quad (7)$$

Table 2 Nominal risk factors for the Japanese population.

	Morbidity of cancer	Mortality of cancer	Nominal risk factor adjusted by mortality and QOL
Public	0.0765	0.0344	0.0530
Occupational	0.0671	0.0315	0.0475

⁵ $Rq + R(1-q)((1-q_{min})q + q_{min})$ と定義される。ここで、 R はがん罹患の名目リスク係数、 q は致死率、 $(1-q_{min})q + q_{min}$ は非致死がんに対する荷重であり、 q_{min} は0.1である (ICRP Publication 103⁵⁾、A144等参照)。

ここで、

P_1 : がんの罹患リスク (Sv^{-1})

P_2 : がんの死亡リスク (Sv^{-1})

P_3 : 遺伝的影響のリスク (Sv^{-1})

$\overline{ME}$: 一日あたり平均入院治療費 (yen/day)

T : 治療日数 (day)

h : がん死年齢 (year)

$\bar{h}$: 平均寿命 (year)

r : 年あたり貨幣価値割引率

$\overline{W}$: 寿命平均所得 (yen/person-year)

$\overline{C}$: 寿命平均個人消費 (yen/person-year)

W : 生涯所得 (yen)

C : 生涯個人消費 (yen)

である。

がん罹患及びがん死亡リスクは **Table 2** の値を用いた。遺伝的影響のリスクは、ICRP Publ. 103⁵⁾ から 0.002 Sv^{-1} を利用した。入院治療費には、厚生労働統計国民医療費⁵³⁾ より一人あたりの入院治療費用 270 万円を用いた。治療日数は地域保健医療基礎統計⁵⁴⁾ をもとに、がんに関する退院患者の平均在院日数 30.2 日を利用した。がん死年齢は、土居らと同様に、ICRP Publ. 27⁵⁵⁾ の作業者の平均被ばく年齢 42 歳に当時知られていた放射線誘起がんの平均潜伏期 23 年を加えた値とした。平均寿命は人口動態統計⁵⁶⁾ をもとに算出して、性別人口の比を考慮した重み付け平均を用いた。割引率は国土交通省の費用便益分析に関する技術指針をもとに 4% とした¹⁷⁾。寿命平均所得及び寿命平均個人消費は、土居らと同様に仮定して、平均寿命から労働開始年齢を差し引いて生涯所得と生涯個人消費を除した値とした。生涯所得は、土居らと同様に仮定し、大卒男子の生涯賃金に退職金及び定年後の収入を加えた金額としてユースフル労働統計 2010⁵⁷⁾ から 3.34 億円 (2005 年) とした。また、生涯個人消費は、土居らと同様に、生涯所得の 35% を仮定して算定した。以上を (7) 式に代入して計算し、2012 年の値に換算すると、公衆に対する α_{base} は 235 万円/person-Sv となった。

(2) 逸失利益に基づく評価

逸失利益とは、本来得られるはずであったにも拘わらず不法行為等によって得られなかった将来の利益のことである。逸失利益の算定においては、当人の収入や家族構成等をもとに特定の個人に対する金額を見出す必要がある。しかし、放射線防護の最適化においては、特定の個人を想定することはできないため、地域や集団における平均的なデータを適用して算定することになる。

ここでは、橋詰 (1984)¹⁹⁾ を参考に、年齢ごとの名目リスク係数と逸失利益を算出し、これらを日本人集団の年齢分布で重み付けて、全年齢及び就労年齢での α_{base} を算出した。

$$\alpha_{base} = \sum_s \sum_x p(x, s) \cdot R(x, s) \cdot BL(x, s) \quad (8)$$

ここで、

$p(x, s)$: 年齢 x , 性別 s の人口の全人口に対する割合

$R(x, s)$: 年齢 x , 性別 s における名目リスク係数

$BL(x, s)$: 年齢 x , 性別 s における逸失利益

である。

(8) 式での評価に必要なパラメータのうち、年齢別性別の名目リスク係数は **Fig. 1** の値を使用した。逸失利益は日本の民事交通事故訴訟における損害賠償額算定基準⁵⁸⁾ に基づいて計算した。

年齢 x , 性別 s における逸失利益 $BL(x, s)$ は以下のよう算出される⁵⁸⁾。

$$\begin{cases} BL(x, s) = BS(s) \cdot \{1 - a(x, s)\} \cdot \{r(64) - r(18)\} \\ \quad + AP \cdot \{1 - a(x, s)\} \cdot \{r(ML(s)) - r(64)\} \\ \quad 0 \leq x < 18 \\ BL(x, s) = BS(x, s) \cdot \{1 - a(x, s)\} \cdot \{r(64) - r(x)\} \\ \quad + AP \cdot \{1 - a(x, s)\} \cdot \{r(ML(s)) - r(64)\} \\ \quad 18 \leq x < 64 \\ BL(x, s) = AP \cdot \{1 - a(x, s)\} \cdot \{r(ML(s)) - r(x)\} \\ \quad 64 \leq x < ML(s) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、

$BS(s)$: 全年齢、全学歴を平均した性別 s における平均年収

$BS(x, s)$: 年齢 x , 性別 s における基礎年収

AP : 年当たりの年金支給金

$a(x, s)$: 年齢 x , 性別 s における生活費控除率

$r(x)$: x 年に対応するライプニッツ係数

$ML(s)$: 性別 s に対する平均寿命

である。

基礎年収には、損害賠償額算定基準⁵⁸⁾ に掲載されている年収額のうち大学・大学院卒の収入を利用する。なお、就労年齢に含まれない 65 歳以上については男女ともに年金収入による生活を仮定し、国民年金の老齢基礎年金 792,100 円を収入額として用いることにした。この際の間接利息控除に用いるライプニッツ係数は、平均寿命までを損失するものとみなして算出した。生活費控除率は損害賠償額算定基準⁵⁸⁾ に従い、男性について扶養者数 0 人、1 人、2 人以上の場合に対して、それぞれ 50%、40%、30% を用いた。女性については一律 30%

を用いた。男性の扶養者数には、2005年国勢調査の結果をもとに一般的な核家庭モデルを想定した⁵⁹⁾。

これらの入力条件のもとで (9) 式を計算し、2005年国勢調査の年齢別人口で各年齢の逸失利益を加重平均すると、公衆に対する逸失利益は男性3,685万円、女性2,584万円、就業年齢の人口に対しては男性5,020万円、女性3,698万円となった。また、各年齢での逸失利益と名目リスク係数を用いて (8) 式を計算して性平均をとると、2012年での値に換算して、公衆に対する α_{base} は239万円/person-Sv、職業人に対する α_{base} は280万円/person-Svとなった。

(3) 人的資本法による α_{base} の文献値

Table 3 に人的資本法による α_{base} の文献調査の結果を示す^{9, 19-21, 37, 38, 60-64)}。人的資本法による評価結果は、各国の経済状況の相違と経済成長によって変動するため、本研究の評価値とこれらの値を比較する際には注意を要する。世界銀行のデータベースによると2012年のデータは公開されていないものの、2011年における日本の一人あたりGDPと文献調査の対象国の一人あたりGDPとを比較すると、日本の 4.59×10^4 ドルに対して、米国で 4.81×10^4 ドル、イギリスで 3.90×10^4 ドルである⁶⁵⁾。このような経済状況の相違を考慮しても、本稿における評価値は先行研究で報告された範囲に含まれる結果となった。

3. 我が国における単位集団線量の貨幣評価値

WTP アプローチをもとに単位集団線量の貨幣評価値を算定した場合、1 person-Sv あたりの貨幣評価値は約2,000万円となった。この値は、人的資本法による α_{base} の約5倍～10倍程度にあたる。

3種類の人的資本法によって算出した日本人集団に対する α_{base} の平均値を (5) 式で重み付けて Fig. 2 に示す。(5) 式の利用に必要なパラメータには、文献調査の結果をもとに、公衆被ばくに対して $d_0 = 0.2$ mSv、 $a = 2$ 及び3を利用した。また、職業被ばくに対しては、 $d_0 = 1$ mSv、 $a = 1.2$ 及び2を利用した。Fig. 2 には、公衆被ばくと職業被ばくの計画被ばく状況における線量限度である1 mSv/年及び20 mSv/年を上限とする範囲で α_{ref} の値を

示した。公衆被ばくと職業被ばくに対して、人的資本法による評価値を重み付けた α_{ref} は、それぞれの線量限度付近において数億円から数十億円/person-Sv となった。

IV 放射線防護の費用便益分析に関する考察

1. 単位集団線量の回避費用

(3) 式にも示したように、防護措置等のリスク低減策の導入が正当化されるためには、その導入による損害の減少分に対する貨幣評価値が費用の増加分のそれよりも大きくなることが要求される。単位集団線量の貨幣評価値は、損害の減少分に対する貨幣評価値を示しており、(3) 式の右辺に該当する。一方、(3) 式の比較考量を実施するためには、左辺にあたる費用の増加分に対する知見が必要である。

TENGs ら⁶⁶⁾ は、死亡リスク削減のための施策について広範な文献調査を行い、人命を1年救うために必要な費用 (Cost per Life-Year saved: CLY) を報告した⁶⁾。施策は次の4つの観点で分類されている：(i) 規制のタイプ (死亡リスクを削減する施策、薬関連の施策、毒物管理に関する施策)、(ii) 分野 (環境保護、健康管理、労働管

Fig. 2 Monetary values of unit collective dose for the Japanese population incorporating risk aversion and equity consideration.

Table 3 Monetary values of unit collective dose evaluated by human capital methods.

Sample size	10 ⁶ yen/person-Sv (2012)*			
	Median	Mean	Min.	Max.
12	1.65	4.38	0.39	16.3

* Monetary values reported in previous studies are converted into yen as of 2012.

⁶⁾ TENGs ら⁶⁶⁾ の調査対象となる文献は次の3つの条件を満たしている。(i) 英語で記述されていること、(ii) 米国に関連する施策であること、(iii) 人命1年に対する費用を算出できるだけ十分な情報が記載されていることである。

理, 住居関連, 輸送関連), (iii) 関連する規制当局, (iv) 防止の段階 (第一段階, 第二段階, 第三段階) である。なお, 毒物管理に関する施策には, 屋内ラドン管理や施設における放射線管理などの放射線リスク低減に関するものも含まれている。ここでは, TENGs らの調査をもとに, 単位集団線量を回避するために要する費用を評価して, (3) 式の比較考量を実施する。

TENGs ら⁶⁶⁾ による CLY のレビュー結果を **Table 4** に示す。調査対象となった全タイプの施策に対する CLY の中央値は 471 万円であった。施策ごとに中央値をみると, 薬関連の施策で 222 万円, 死亡リスク削減策で 545 万円, 毒物管理 (放射線リスク低減策を除く) で 2.69 億円, 放射線リスク低減策で 3.60 億円であった。放射線リスク低減策の費用は, 薬関連の施策や死亡リスク削減策と比べて 1 桁から 2 桁ほど高い。また, 各家庭でのラドン管理と比べて, 施設の放射線管理策の方が CLY は大きくなる傾向がみられた。

日本の放射線防護分野において CLY を評価した事例はない。そこで, 放射線防護基準の変更が原子力発電所の建設コストに及ぼす影響を評価した事例⁶⁷⁾ をもとに, CLY を算出すると 10.3 億円となった。この値は, TENGs らの報告に含まれる値の範囲におさまる値である。この事例では, 現行の放射線防護基準値を 0.2 倍低くすると, 総建設費に対して建設コストが 0.215% 増となる。総建設費は約 4,000 億円であるので, 基準値の変更による費用の増加分は 8.6 億円となる。一方で, これだけの費用をかけても, 既にバックグラウンドリスクが低い状態からリスクを削減しているので, その削減幅は小さな値にとどまる。実際, この評価では, 基準値を 0.2 倍低くした場合に低減される集団線量は 0.87 person-Sv/ 年程度である。確率的影響の名目リスク係数を 1 Sv あたり 0.053

とすると, 回避される死亡リスクは約 0.05 person/ 年となる。CLY は必要な費用を死亡リスクの削減幅で割った値なので, 費用の増加分が大きく, 削減幅が小さい場合には CLY の値が高くなってしまふのである。

つまり, 施設関連の放射線管理策に対して CLY が高くなる理由を検討してみると, (i) 原子力関連施設のように大規模な施設では, 施策の導入により設計を変更した場合に費用の変動が大きくなること, (ii) バックグラウンドリスクが低い状態からリスクを低減していることが影響していると考えられる。

2. 単位集団線量を回避するために必要な費用と回避することによる便益との比較

CLY に平均余命と名目リスク係数を乗じて単位集団線量を回避するための費用を算定し, 本稿で見出した α_{ref} と比較した。TENGs ら⁶⁶⁾ の示した 26 件の放射線リスク低減策について単位集団線量の回避費用を算出すると, 全 26 件に対する中央値で 9.3 億円/person-Sv, 各家庭でのラドン管理に対する中央値で 720 万円/person-Sv, 施設での放射線管理策 (ALARA プログラムと放出管理策を含む) に対する中央値で 15 億円/person-Sv となった。

各家庭でのラドン管理に対する単位集団線量の回避費用と本稿で見出された α_{ref} とを比較すると, WTP アプローチによる約 2,000 万円/person-Sv と比べた場合, α_{ref} はほぼバランスが取れている。人的資本法による評価値を重み付けした場合, 個人の被ばく線量レベルによって α_{ref} は変動する。日本での屋内ラドンによる平均的な内部被ばく線量は年間 0.4 mSv であり, ラドン濃度の分布によってはこの数倍程度の値も考えられる⁶⁸⁾。このような線量レベルに対する公衆被ばくの α_{ref} は, およそ数千万円から数億円の範囲に含まれる (**Fig. 2**)。したがって, 人的資本法で重み付けた場合にも, 単位集団線量の

Table 4 Comparison of cost per life-year saved among the various risk reduction measures.

	Sample size	yen/life-year (2012)*		
		Min.	Median	Max.
All type	497	3.60×10^3	4.71×10^6	9.14×10^{12}
Medicine	265	3.60×10^3	2.22×10^6	3.13×10^{12}
Fatal injury reduction	119	6.38×10^3	5.45×10^6	1.66×10^9
Toxin control	87	6.82×10^3	2.69×10^8	9.14×10^{12}
Radiological countermeasure	All	5.64×10^5	3.60×10^8	3.13×10^{12}
	Radon remediation in homes	5.64×10^5	3.23×10^6	1.29×10^7
	ALARA program at Nuclear facilities	1.02×10^8	—	2.31×10^8
	Radionuclide emission control at Nuclear facilities	4.52×10^6	8.49×10^8	3.13×10^{12}
	Others	2.13×10^6	—	1.75×10^{10}

* Monetary values reported in TENGs et al.⁶⁶⁾ are converted into yen as of 2012.

回避費用と α_{ref} はバランスが取れるといえる。

施設での放射線管理策に対する単位集団線量の回避費用は全 21 件の中央値で 15 億円/person-Sv となり、WTP アプローチによる α_{ref} と比べて 2 桁以上も高い値となる。TENGs らのレビューには、(i) 施設内の就業者に対する線量を削減するための施策 (2 件)、(ii) 施設から放出される放射性物質量を低減し公衆の線量を削減するための施策 (19 件) が含まれる。データ数が十分でないものの、(i) と (ii) に関する単位集団線量の回避費用の範囲と中央値は、それぞれ数億円/person-Sv 及び 23 億円/person-Sv であった。

施設での放射線管理策のうち (i) について、ISOE アジア技術センターの活動記録⁽⁶⁹⁾によると、2009 年度の日本の軽水炉における放射線業務従事者の年間平均被ばく線量は約 1 mSv で、15–20 mSv の従事者数が 258 名、20 mSv を上回る従事者が 7 名と報告されている。Fig. 2 をみてみると、15 mSv/年に対する職業被ばくの α_{ref} は 1 億円/person-Sv を上回る範囲にあるので、従事者の被ばく状況によっては、単位集団線量の回避費用と α_{ref} はバランスが取れる可能性がある。

施設での放射線管理策のうち (ii) に関連する施策は、環境中への放射性物質の放出管理に関するものなので、公衆に対する α_{ref} との比較になる。原子力発電所の通常運転時における環境への放射性物質の放出に伴う公衆の被ばく線量は、目標値として実効線量で年間 $50 \mu\text{Sv}$ に設定されている。このため、Fig. 2 から $50 \mu\text{Sv}$ に対する α_{ref} を読み取ると、ベースラインとなる数百万円/person-Sv となる。この値と、施設での放射線管理策 (ii) に対する単位集団線量の回避費用 23 億円/person-Sv とを比較すると、回避に要する費用の方が便益よりも大きいという結果になった。したがって、施設での放射線管理策 (ii) は、上述の年間目標値が守られているならば、経済性の観点からは不合理な施策であることが示唆された。

以上をまとめると、(a) 多様なリスク削減策と放射線リスク低減策とを比較した場合、放射線リスク低減策は薬関連や死亡リスク削減策に比べて単位リスクを削減するためにより高い費用を必要とする傾向がある。(b) 放射線リスク低減策の費用と便益を比較してみると、各家庭での低減策や、施設内従事者に対する管理策については、単位集団線量の回避に要する費用より便益の方が大きくなる傾向がみられた。一方、施設からの放出管理に関する施策については、公衆にもたらされる便益よりも費用の方が大きくなる傾向がみられた。

上記の (a) や (b) のような結果は、この結果だけで、

放射線リスク低減策よりも他の死亡リスク削減策を優先したり、施設からの放出管理に対する否定的な決定を支持するものではない。費用便益分析による定量的な情報は最適化プロセスで参照される唯一の情報ではなく、社会的考慮と価値、技術的な制約、実利的関心など定性的な判断もまた、このプロセスに必要なアプローチである。ICRP^{8, 70)} が強調しているように最適化プロセスにおいては、防護策に利害と関心を有す人々の関与の下でこれらの定性的な項目についての検討が必要である。

V 結 論

放射線リスク削減の便益計測における原単位の評価に関する国際機関と各国の取り組みを調査・整理し、我が国の現状を反映して便益計測の原単位を評価した。また、評価結果をもとに、放射線リスク低減策に関する費用と便益のバランスについて分析した。

放射線リスク削減の便益は、単位集団線量あたりの貨幣評価値によって計測され、その算定方法には、WTP アプローチと人的資本法が利用されている。また、被ばく線量レベルに応じて重み付けをする立場と、重み付けをしない立場が存在する。重み付けをせず WTP アプローチに基づく評価を実施したところ、単位集団線量を回避することの便益は約 2,000 万円となった。また、人的資本法として、国民総生産を用いる方法、健康損害と逸失利益を計上する方法を用いて単位集団線量の貨幣評価値を算定したところ数百万円となった。人的資本法による評価値を ICRP のモデルを用いて重み付けると、公衆被ばく及び職業被ばくのいずれについても、それぞれの線量限度レベルにおいては数億円から十数億円程度となる。

単位集団線量を回避するために要する費用を文献調査し、この結果と比較すると、家庭でのリスク低減策や施設内従事者の管理策については、回避に要する費用よりも便益の方が大きくなる傾向がみられた。しかし、施設からの放出管理に関する施策については、便益よりも費用の方が大きくなる傾向がみられた。

なお、本稿における検討は限定されたデータに基づくものであり、WTP 及び CLY については、福島事故後の従事者の被ばく状況など、我が国における最新の状況を反映しながらさらに多くの知見を蓄積する必要がある。

謝 辞

この研究の一部は (独) 原子力安全基盤機構の原子力安全基盤調査提案公募研究の一環として実施された。

参 考 文 献

- 1) ICRP; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 9 (1966), Pergamon Press, Oxford.
- 2) ICRP; Implications of Commission Recommendations that Doses be Kept as Low as Readily Achievable, ICRP Publication 22 (1973), Pergamon Press, Oxford.
- 3) ICRP; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1 (3) (1977).
- 4) ICRP; 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3) (1991).
- 5) ICRP; The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4) (2007).
- 6) ICRP; Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection, ICRP Publication 37, Ann. ICRP 10 (2/3) (1983).
- 7) ICRP; Optimization and Decision-Making in Radiological Protection, ICRP Publication 55, Ann. ICRP 20 (1) (1989).
- 8) ICRP; The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process, ICRP Publication 101, Part 2, Ann. ICRP 36 (3) (2006).
- 9) IAEA; Assigning a Value to Transboundary Radiation Exposure, IAEA Safety Guides, Safety Series No. 67 (1985).
- 10) OECD; "Regulatory Impact Analysis: Best Practices in OECD Countries", (1997), OECD Publishing, Paris.
- 11) OECD; "Regulatory Impact Analysis: A Tool for Policy Coherence", (2009), OECD Publishing, Paris.
- 12) NRC; Regulatory Analysis Technical Evaluation Handbook, NUREG/BR-0184 (1997).
- 13) NRC; Regulatory Analysis Guidelines of the U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/BR-0058 Rev. 4 (2004).
- 14) IAEA; Optimization of Radiation Protection in the Control of Occupational Exposure, IAEA Safety Reports Series No. 21 (2002).
- 15) C. LEFAURE; Monetary Values of the Person-Sievert, From Concept to Practice: The Findings of an International Survey, CEPN Report No. 254 (1998).
- 16) 規制に関する政策評価の手法に関する研究会; 規制に関する政策評価の手法に関する調査研究報告書 (2004).
- 17) 国土交通省; 公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針 (2004).
- 18) 国土交通省; 仮想的市場評価法 (CVM) 適用の指針 (2009).
- 19) T. HASHIZUME; Cost per collective dose, *Jpn. J. Health Phys.*, **19**, 159-166 (1984).
- 20) M. DOI and Y. NAKASHIMA; Valuation of α for optimization of the radiation protection in Japan, *Jpn. J. Health Phys.*, **19**, 225-230 (1984).
- 21) M. DOI and Y. NAKASHIMA; The recent α_0 -Value based on the Japanese economical data, 1983, *Jpn. J. Health Phys.*, **20**, 192-194 (1985).
- 22) NCRP; Principles and Application of Collective Dose in Radiation Protection, NCRP Report No. 121 (1995).
- 23) B. LINDELL; Concepts of Collective Dose in Radiological Protection, A Review for the Committee on Radiation Protection and Public Health of the OECD NEA (1984).
- 24) ICRP; Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste, ICRP Publication 77, Ann. ICRP 27 (supl.) (1997).
- 25) J. INABA; Estimates of cost of man-rem for the use of cost-benefit analysis: A survey, *Jpn. J. Health Phys.*, **12**, 109-116 (1977).
- 26) M. DOI and Y. NAKASHIMA; Some considerations on cost-benefit analysis in the optimization of radiation protection—Proposals for social research technique to estimate beta-detriments—, *Jpn. J. Health Phys.*, **23**, 303-308 (1988).
- 27) ICRP; A compilation of the major concepts and quantities in use by ICRP, ICRP Publication 42, Ann. ICRP 14 (4) (1985).
- 28) M. W. JONES-LEE; "The Economics of Safety and Physical Risk", p. 10 (1989), Basil Blackwell, Oxford.
- 29) NRC; Value of Public Health and Safety Actions and Radiation Dose Avoided, NUREG/CR-6212 (1994).
- 30) Royal Society; "Risk: Analysis, Perception and Management", p. 135-201 (1992), The Royal Society, London.
- 31) T. OKA; Application of cost-benefit analysis to the regulation of foodstuffs contaminated with radioactive substances, *Jpn. J. Health Phys.*, **47**, 181-188 (2012).
- 32) NRC; Reassessment of NRC's Dollar Per Person-Rem Conversion Factor Policy, NUREG-1530 (1995).
- 33) NRPB; Values of Unit Collective Dose for Use in the

- 1990s, Document of the NRPB, 4 (2), 77–80 (1993).
- 34) J. LOCHARD, C. LEFAURE, C. SCHIEBER and T. SCHNEIDER; A model for the determination of monetary values of the man-sievert, *J. Radiol. Prot.*, **16**, 201–204 (1996).
- 35) K. EGED, B. KANYÁR, Z. KIS, T. TATAY, Á. IVÁDY and G. VOLENT; Determination and use of the monetary values of the averted person-sievert for use in radiation protection decisions in hungary, *Health Phys.*, **80**, 137–141 (2001).
- 36) K. EGED, B. KANYÁR, Z. KIS and T. TATAY; Assessment of the aversion coefficient in nuclear safety in hungary, *Health Phys.*, **82**, 825–830 (2002).
- 37) F. HARDEMAN, N. PAUWELS, B. V. de VALLE, P. DEBOODT and P. De MEESTER; The monetary value of the person-sievert; A practical approach in case of occupational exposures, *Health Phys.*, **74**, 330–336 (1998).
- 38) S. H. NA and S. G. KIM; A step function model to evaluate the real monetary value of man-sievert with real GDP, *Appl. Radiat. Isot.*, **67**, 1307–1310 (2009).
- 39) B. L. LEE, D. H. SUH, S. I. KIM, M. S. JEONG and Y. K. LIM; The monetary value of the man-mSv for korean NPP radiation workers assessed by the radiation aversion factor, *Radiat. Prot. Dosim.*, **150**, 516–519 (2012).
- 40) T. KATONA, B. KANYÁR, K. EGED, Z. KIS, Á. NÉNYEI and R. BODNÁR; The monetary value of the averted dose for public exposure assessed by the willingness to pay, *Health Phys.*, **84**, 594–598 (2003).
- 41) 栗山浩一; “環境の価値と評価手法—CVMによる経済評価”, p. 15–22 (1998), 北海道大学図書刊行会, 札幌.
- 42) 山本秀一, 岡 敏弘; 飲料水リスク削減に対する支払意思調査に基づいた統計的生命の価値の推定, 環境科学会誌, **7**, 289–301 (1994).
- 43) 今長 久; 道路交通事故の社会的損害額の推計, 道路交通経済, 2001–7, **96**, 98–105 (2001).
- 44) 松岡俊二, 白川博章, 本田直子, 竹内憲司, 松本礼史; 東アジアにおける環境政策の効率性評価に関する研究: マレーシア・クアラルンプール, 広島市を例に, 国際東アジア研究センター Working Paper Series 2002–10 (2002).
- 45) 経 環, 山中英夫, 田村英嗣; CV 調査と SG 調査を用いた交通事故の人的費用の計測, 土木計画学研究・論文集, **21**, 137–144 (2004).
- 46) T. TSUGE, A. KISHIMOTO, K. TAKEUCHI; A choice experiment approach to the valuation of mortality, *J. Risk Uncertainty*, **31**, 73–95 (2005).
- 47) K. ITAOKA, A. KRUPNICK, M. AKAI, A. ALBERINI, M. CROPPER and N. SIMON; Age, health, and the willingness to pay for mortality risk reductions: a contingent valuation survey of Shizuoka, Japan, residents, *Environ. Econ. Pol. Stud.*, **8**, 211–237 (2007).
- 48) 栗山浩一, 岸本充生, 金本良嗣; 死亡リスク削減の経済的評価—スコープテストによる仮想評価法の検証, 環境経済・政策研究, **2**, 48–63 (2009).
- 49) 内閣府; 国民経済計算 (GDP 統計), <http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data.html>, 閲覧 2013 年 5 月 24 日.
- 50) 高原省五, 本間俊充, 西村優基; 放射線による晩発性健康影響を推定する計算コード HEINPUT の改良と GUI 作成, JAEA-Data/Code 2009–001 (2009).
- 51) EPA; Estimating Radiogenic Cancer Risks, United Environmental Protection Agency, EPA 402-R-93-076 (1994).
- 52) 国立がん研究センターがん対策情報センター; 地域間登録全国推計によるがん罹患データ (1975 年～2008 年), <http://ganjoho.jp/professional/statistics/statistics.html>, 閲覧 2013 年 5 月 24 日.
- 53) 厚生労働省; 国民医療費, <http://www.mhlw.go.jp/toukei/list/37-19.html>, 閲覧 2013 年 5 月 24 日.
- 54) 厚生労働省; 平成 21 年地域保健医療基礎統計, <http://www.mhlw.go.jp/toukei/list/142-1.html>, 閲覧 2013 年 5 月 24 日.
- 55) ICRP; Problems Involved in Developing an Index of Harm, ICRP Publication 27, Ann. ICRP 1(4) (1977).
- 56) 厚生労働省; 人口動態統計, <http://www.mhlw.go.jp/toukei/list/81-1.html>, 閲覧 2013 年 5 月 24 日.
- 57) 労働政策研究・研修機構; ユースフル労働統計 2010 労働統計加工指標集, <http://www.jil.go.jp/kokunai/statistics/kako/2010/index2010.html>, 閲覧 2013 年 5 月 24 日.
- 58) 日弁連交通事故相談センター東京支部; 民事交通事故訴訟損害賠償額算定基準上巻 (基準編), (2010).
- 59) JAEA; 平成 21 ～ 23 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 原子力発電の社会・環境経済学的研究, p. 215–216 (2011).
- 60) J. J. COHEN; Plowshare: New challenge for the health physicist, *Health Phys.*, **19**, 633–639 (1970).
- 61) J. LEDERBERG; Squaring an infinite circle: radiobiology and the value of life, *Bull. Atomic Sci.*, **27**, 43–46 (1971).
- 62) L. A. SAGAN; Human costs of nuclear power, *Science*, **177**,

- 487–493 (1972).
- 63) H. J. OTWAY; The Quantification of Social Values, LA-4860/CONF-711123, 1–13, (1972)
- 64) B. LINDELL; Radiation and man, the 1973 sievert lecture, *Health Phys.*, **31**, 265–272 (1976).
- 65) The World Bank; Data, <http://data.worldbank.org/>, 閲覧 2013 年 5 月 24 日 .
- 66) O. T. TENGs, M. E. ADAMS, J. S. PLISKIN, D. G. SAFRAN, J. E. SIEGEL, M. C. WEINSTEIN and J. D. GRAHAM; Five-hundred life-saving interventions and their cost-effectiveness, *Risk Anal.* **15**, 369–390 (1995).
- 67) 吉田和生, 服部隆利, 伊地知猛, 辻 政俊; 放射線防護基準の変更が原子力発電所建設コストに及ぼす影響の評価, 電力中央研究所報告, L05001 (2005).
- 68) 下 道國; 自然環境中のウラン—環境中ウラン濃度とウランのクリアランスレベル—, 原子力バックエンド研究, **14**, 43–50 (2007).
- 69) JNES; 平成 22 年度 ISOE アジア技術センター活動報告, JNES/NRWG11-0003 (2011) http://www.jnes.go.jp/isoe/activities/pdf/add_2010.pdf, 閲覧 2013 年 5 月 24 日.
- 70) ICRP; Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure, ICRP Publication 82, Ann. ICRP 29 (1–2) (1999).

高原 省五 (たかはら しょうご)

長野県生まれ。現在, (独) 日本原子力研究開発機構安全研究センター研究員。放射線リスクの評価・管理手法について研究中。

E-mail: takahara.shogo@jaea.go.jp