解	説
---	---

ICRP Publication 37「放射線防護の最適化における 費用-利益解析」について

井沢庄治^{*1}, 岸田昌美^{*1}

(1984年1月26日受理)

A Brief Introduction of ICRP Publication 37: Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection

Shoji IZAWA^{*1} and Masami KISHIDA^{*1}

KEY WORDS: ICRP publication, optimization of radiation protection, cost-benefit analysis, detriment, collective dose

1. はじめに

ICRP は 1977 年勧告 (Publication 26) でたがいに関連する次の 3 つの基本原則から成る線量制限体系を勧告した。すなわち, ①いかなる行為も, その導入が正味でプラスの利益を生むものでなければ採用してはならない (行為の正当性, justification), ②すべての被曝は, 経済的および社会的な要因を考慮に入れながら, 合理的に達成できるかぎり低く保たなければならない (放射線防護の最適化, optimization), ③個人に対する線量当量は, 委員会がそれぞれの状況に応じて勧告する限度を超えてはならない (線量制限, dose limitation)。

ICRP はこの勧告をおこなった翌年の 1978 年 5 月に ICRP 第 4 専門委員会の課題グループに対し, これら線量制限体系の原則の一つである「最適化」を適用するための原則ならびに方法に関する報告書を作成するように要請した。課題グループは GONZALEZ を議長として 1978 年から作業をおこない報告書を作成した。この報告書は ICRP 第 4 専門委員会 (日本からは吉澤東大教授

がメンバー) で検討され, 1980 年に採択された。その後, 主委員会において 1981 年の東京とイーストボーンでの会議で検討されて, “放射線防護の最適化における費用-利益解析の利用に関する概論”を加えた報告書が 1982 年 6 月に採択され, ICRP Publication 37 として刊行された。

ICRP Publication 37 は「放射線防護の最適化における費用-利益解析」と題し, A 章 概論, B 章 費用-利益解析を用いた放射線防護の最適化の手法, C 章 放射線防護の最適化における費用-利益解析の実際利用, から成る本文と A から H まで 8 つの Appendix および A₁, B₁, D₁, F₁, F₂ の 5 つの Annex で構成されている。

本稿においては, 放射線被曝の最適化のための費用-利益解析の基本概念と利用法に重点を置いて, ICRP Publication 37 の概要を紹介する。

2. 放射線防護の最適化のための費用-利益解析

(1) 基本概念

ICRP は放射線防護の最適化に費用-利益解析の手法が適用されることを示し, ICRP Publication 26 の中でその概念を論じている。

電離放射線の被曝を伴う行為を導入する場合, 社会に対する正味の利益 B は次のような式で表わすことができ

^{*1} 日本原子力研究所東海研究所保健物理部; 茨城県那珂郡東海村 (〒319-11)

Department of Health Physics, Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken.

る。

$$B = V - (P + X + Y)$$

ここで、 V は粗利益、 P は放射線防護のための費用を除いた基礎的生産費用、 X はあるきまった防護レベルを達成するための費用、 Y はその防護レベルにおいて行為の結果として生じる損害の費用である。

ALARA に対応する放射線防護の最適レベルはその正味の利益 B を最大にすることによって得られ、独立変数を集団線量 S とすると最大化は、

$$\frac{dV}{dS} - \left(\frac{dP}{dS} + \frac{dX}{dS} + \frac{dY}{dS} \right) = 0$$

のとき達成される。与えられた行為に対して V と P が S に関し一定であると考え、最適化の条件は $X + Y$ を最小化するところ、すなわち単位集団線量当りの防護の費用の増加分と単位集団線量当りの損害の減少分がちょうどバランスする S_0 値において満たされる。すなわち、

$$\left. \frac{dX}{dS} \right|_{S_0} = - \left. \frac{dY}{dS} \right|_{S_0}$$

であり、微分費用-利益解析と呼ばれる。 X と Y の集団線量 S に対する関係を第 1 図に示す。多くの場合がそうであるが、これら費用は必ずしも連続的な変数ではなく、上式は各変数の増分を示す Δ を用いて

$$\left. \frac{\Delta X}{\Delta S} \right|_{S_0} = - \left. \frac{\Delta Y}{\Delta S} \right|_{S_0}$$

で近似できる。

一方、放射線防護の費用 X と損害の費用 Y の両者は、たとえば、遮蔽体の厚さや換気流量率などの防護のパラメータ ω に関係する防護のレベルによって変化する。したがって最適化の究極の目標はこれらパラメータの最適値 ω_0 を決めることになる。この防護のパラメータ ω と集団線量 S は相互に関係があるので、多くの場合、独立変数として S よりむしろ ω を用いた微分費用-利益解析

第 1 図 微分費用-利益解析

が実行されることになる。

また、 $(X + Y)$ を最小化する場合、 X と Y 値の両者を制約する因子も考慮されなければならない。ICRP が勧告する線量限度や国の監督機関などによって定められた上限値を超えないようにすること、放射線防護のために利用できる方策に限度があることなどが制約となる。

以上のことから、放射線防護レベルの最適化は次に示す一連の数式の解を求めることによって得られる。

- ① $U = X + Y = \text{minimum} \rightarrow$ 目的関数 (objective function)

ここで、 X : 防護の費用、 Y : 損害の費用

- ② $X = X(\omega) \rightarrow$ 制約関数 (constraining function)
 $Y = Y(\omega)$

または $\Psi[X(\omega), Y(\omega)] = 0$

ここで、 ω : 防護パラメータ

- ③ $H_Z(\omega) \leq H_L \rightarrow$ 制限式 (limit equation)

ここで、 $H_Z(\omega)$: ω において個人 Z が受ける実効線量当量、 H_L : 関連する線量の限度

- (2) 放射線損害とそれに関連する量

i) 放射線損害

委員会は放射線の有害な影響を定量化するために、リスク (risk) と損害 (detriment) の概念を導入した。ある線量に関連したリスクは、ある個人が線量を受けた結果として有害な放射線の影響を誘発するであろう確率を意味するものと考えられる。一方、損害は考えられる有害な影響の確率と重篤度を考慮した、被曝した集団における害の総和に対する数学的期待値と定義され、ある線源または行為に基づく被曝によって生ずる有害な影響の程度を量として表わしたものである。

損害について特徴的なことは、①ある個人についてのあらゆる線源からの影響に関連したものではなく、単一の線源からの放射線に被曝する集団における放射線影響という線源関連的 (source-related) な概念であり、②損害は各々を分離することができ、それらを加算することも可能で、便宜的には包括的な量で表現される、などである。したがってここでは損害を概念的に客観的な健康上の損害 (objective health detriment) と他の諸損害の和として表わしている。すなわち、客観的な健康の損害を Y_H 、その他の損害を $Y_1, Y_2, \dots$ とすると $Y = Y_H + Y_1 + Y_2 + \dots$ である。

ii) 客観的な健康上の損害とその他の損害

放射線防護の最適化はほとんど例外なく個人の被曝が常に線量限度未満であるような範囲で行われる。したがって非確率的影響は防止されるから、被曝の身体的および遺伝的な確率的影響の誘発のみが有害な健康上の影響

に関与すると考えられる。

確率的影響については、リスクの増加は線量当量の増加に比例すると仮定されるから、組織Tの被曝によって確率的影響を被る確率 p_T は

$$p_T = r_T H_T$$

である。ここで、 r_T は単位線量当量当りのリスク係数で H_T は組織Tが受けた平均線量当量である。この式を損害の式 (ICRP Publication 26 で定義されている) に代入すると、1人の人間についての客観的な健康上の損害 $G_{H,1}$ は、

$$G_{H,1} = \sum_T r_T H_T g_T$$

となる。ここで、 g_T は組織Tに対する有害な影響の重篤度を評価するための係数である。放射線防護の目的のために第一近似として、損害は始めの2世代における重大な遺伝的影響の誘発と致死悪性腫瘍とに支配されると仮定され、重篤度の係数1が当てられる。よって

$$G_{H,1} = \sum_T r_T H_T$$

この式に全身照射に対する総リスク R を導入すると

$$G_{H,1} = R \sum_T \frac{r_T}{R} H_T$$

比 r_T/R は荷重係数 w_T に置き換えられ、

$$G_{H,1} = R \sum_T w_T H_T$$

となる。ここで R の値は $1.65 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ (致死ガン: $1.25 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$, 遺伝的影響 (2世代): $0.4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$) である。 $\sum_T w_T H_T$ は実効線量当量 H_E であるから、客観的な健康上の損害は、

$$G_{H,1} = R H_E$$

となる。

このように客観的な健康上の損害が線量の情報に基いてある程度定量化できるのに対し、その他の損害の要素を定量化することは難しい。その他の要素は、たとえば、リスクの程度が増加するにつれてそれを避けようとする気持がますます強く働くといったことや、国の監督機関あるいは事業者がおこなう規制によって制限を受けることなどに影響される。したがって個人の被曝線量に依存するもの、すなわち個人線量の関数 $f(H)$ で表現される。

(3) 集団線量の概念

以下に集団線量に関連する諸量を示す。

① 集団実効線量当量 $[S(E)]$

$$S(E) = \int_0^\infty H_E N(H_E) dH_E$$

ここで、 $N(H_E)$ は実効線量当量 H_E の関数として表わされる人数の分布で、 $N(H_E) dH_E$ は H_E から $H_E + dH_E$ の範囲の実効線量当量を受ける人数である。報告書においては特別に限定した場合以外は集団線量は集団実効線量当量を意味するものとされている。

② 集団での客観的な健康上の損害 $[G_H]$

$$G_H = \int_0^\infty R H_E N(H_E) dH_E = R S_E$$

R は総リスクで、 H_E のすべての値にわたって一定であると仮定されている。

③ 集団線量率 $[\dot{S}_E]$

$$\dot{S}_E = \int_0^\infty \dot{H}_E N(\dot{H}_E) d\dot{H}_E$$

ここで、 $\dot{H}_E$ は実効線量当量率である。

④ 集団線量預託 $[S^c_E]$

長い期間にわたる被曝には集団線量預託 (collective dose commitments) が用いられ、集団線量率の無限時間積分として与えられる。

$$S^c_E = \int_0^\infty \dot{S}_E(t) dt$$

なんらかの“とじ込め”策によって放射性核種をある期間生活環境から隔離することができると仮定する。隔離期間 τ の経過後、“とじ込め”がやぶれて放射性核種が環境中に放出されたとすると、預託される集団線量当量は、

$$S^c_E = \int_\tau^\infty \dot{S}_E(t) dt$$

で表わされる。

(3) 費用の評価

放射線防護の最適化にあたって防護の費用 X と損害の費用 Y を定量化することが求められる。この定量化は同じ次元で表現する必要がある。放射線防護の費用が通常金銭的なものであるので、損害の費用も同様に金銭的に表わすことが便利である。それゆえ、両費用に通貨 (報告書の例ではドル) が用いられる。

i) 防護の費用

防護の費用は放射線防護システムの資本の費用と運転の費用を合せたもので表わされる (総費用の評価)。したがって、最初の資本費用を X_C 、年間の運転費用を $\dot{X}_0$ とする設備の総費用 X は、 τ を年を表わしたプラントの寿命とすると、

$$X = X_C + \dot{X}_0 \tau$$

であたえられる。報告書ではこのような総費用を評価する方法のほか放射線防護の費用を評価するための方法として現在価値の評価や年間費用の評価をあげ、解説している。

ii) 損害の金銭的な見積り

集団線量の概念のところで示したように、集団での客観的な健康上の損害は集団線量 S に比例するので、その費用 Y_H も集団線量に比例すると考えられる。よって、

$$Y_H = \alpha S$$

で表わされる。ここで α は単位集団線量当りの費用を表わす定数である。

その他の損害については個人線量の関数 $f(H)$ で表わされることから、その費用は $\beta \sum_j N_j f_j(H_j)$ となる。

ここで、 β は損害を金銭的な費用に変換する定数で、意志決定をする人によって与えられるものである（しかし、報告書では β については詳細な説明もなく、例示もされていない）。 H_j は j 集団 N_j 人の平均線量当量、 f_j は個人線量の関数である。

したがって、放射線損害の費用は、

$$Y = \alpha S + \beta \sum_j N_j f_j(H_j)$$

で与えられ、客観的な健康上の損害のみを損害とする場合は、

$$Y = \alpha S$$

となる。

(iii) α の値の算定

ここでは、生命の価格査定の方法を紹介し、それらの方法について批判を加えるにとどまっている。方法としては、人的資本アプローチ (human capital approach)、世論が暗黙に認めている査定法 (publicly implied valuation)、裁判補償金アナロジ (court compensation analogies)、生命保険アナロジ (insurance premium analogies)、国民所得アプローチ (national income approach)、個人価格査定アプローチ (individual valuation approach) があげられている。

今までに α の値、すなわち単位集団線量当りの金銭的な値を決める試みがおこなわれてきた。それらの値は、man·Sv 当り約 1,000 から 100,000 \$ (US\$) の範囲にある。報告書で数値例として使われている α の値は、man·Sv 当り 10,000 から 20,000 \$ の範囲である。

(4) 理想状態での最適化の方法

単一の被曝集団で単一の放射線防護パラメータ（複数であってもそれらの単純な組合せ）の場合は理想状態での最適化例とみなすことができる。最適化は、基本概念

のところで述べたように、関連する次式を解くことによっておこなわれる。

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad & X(\omega) + \alpha S(\omega) = \text{minimum} \\ & \text{または } X(\omega) + \alpha S(\omega) + \beta \sum_j N_j f_j(H_j(\omega)) \end{aligned}$$

$$= \text{minimum}$$

$$\textcircled{2} \quad X = X(\omega)$$

$$S = S(\omega)$$

$$\textcircled{3} \quad F(S) \leq H_L$$

ここで、 $F(S)$ は集団線量預託の関数であるが、ここでは最大の個人年実効線量当量 H^* との間に $H^* = F(S)$ の関係が仮定されている。

目的関数①式の最小値は、微分し、その結果をゼロと置くことによって得られ、次のようになる。

$$\left. \frac{dX}{d\omega} \right|_{\omega_0} = -\alpha \left. \frac{dS}{d\omega} \right|_{\omega_0}$$

または、

$$\left. \frac{dX}{d\omega} \right|_{\omega_0} = -\alpha \left. \frac{dS}{d\omega} \right|_{\omega_0} - \beta \sum_j \left. \frac{d[N_j f_j(H_j)]}{d\omega} \right|_{\omega_0}$$

ここで、 ω_0 は最適化した防護パラメータである。この ω_0 に対応する集団線量 S_0 を求めて、 $F(S_0) \leq H_L$ の条件が満たされるならば、その S_0 値において最適化が達成されることになる。

X および S が連続変数ではなく離散値をとる場合は、異った放射線防護の方策（この例では A, B）に対応する X および S について次式で示される条件が満たされる場合は防護のレベル A から B へ移行することが有効であると、以下 C, D, E, … と順次高いレベルの防護方策について評価を行う。この結果、移行の条件を満足し、かつ防護レベルが最も高い方策が最適な方策である（例題参照）。

$$-\frac{B X - A X}{B S^c E - A S^c E} \leq \alpha$$

または、

$$\begin{aligned} -\frac{B X - A X}{B S^c E - A S^c E} &\leq \alpha \\ &+ \beta \sum_j \frac{B N_j f_j(B H_j) - A N_j f_j(A H_j)}{(B S^c E - A S^c E)_j} \end{aligned}$$

3. 放射線防護の最適化における費用-利益解析の実際的利用

ここでは、費用-利益解析の実際的利用として、設計段階での最適化と操業時における最適化の例が説明されている。設計段階については体外被曝および体内被曝に対する防護を意図したシステムあるいは放射性物質の環境への放出を制限するためのシステムにおける最適化の例があげられており、体外被曝に関しては簡単な遮蔽設

計の例が、体内被曝に関しては換気と空気清浄設備の設計例が示されている。なお、数値を入れた実例が後述する付録に示されている。

作業時における最適化例としては、①道路、鉄道、水路による放射性物質の輸送、②放射線診断、放射線治療、核医学における放射線使用、③消費材の利用、④原子力発電施設の運転、⑤個人作業におけるものが解説されている。

これらの中から、遮蔽と放出制御における設計時の最適化例を紹介する。

〔簡単な遮蔽設計の例〕

遮蔽設計において最適値（この例では遮蔽体の厚さ）を決定する問題である。遮蔽体の厚さ W をパラメータに防護および損害の費用を求めると、防護の費用 $X(W)$ は、厚さが W の平板遮蔽体を考えるとき、

$$X(W) = X_v h l W + X_I$$

となる。ここで、 X_v は遮蔽体の単位体積当りの費用、 h 、 l はそれぞれ遮蔽体の高さと横幅、 X_I は補助設備の費用である。

一方、損害の費用 $Y(W)$ は、

$$Y(W) = \alpha N f_i \tau \rho \dot{H}_u e^{-\Gamma W}$$

で表わされる。ここで、 N は人数、 f_i は滞在時間係数（対象としている期間（たとえば装置の寿命）に対する被曝時間の割合）、 τ は装置の寿命、 ρ は線量率の平均値と最大値の比、 $\dot{H}_u$ は最大実効線量当量率、 Γ は実効減衰係数、 W は遮蔽体の厚さである。

目的関数はこれらの費用の合計で、

$$U = X(W) + Y(W) = X_v h l W + X_I + \alpha N f_i \tau \rho \dot{H}_u e^{-\Gamma W}$$

で表わされる。遮蔽設計の最適条件は目的関数を微分し、ゼロと置くことによって得られるので、最適な遮蔽体の厚さ W_0 に対する線量低減係数 $e^{-\Gamma W_0}$ は、

$$e^{-\Gamma W_0} = \frac{X_v}{\alpha \Gamma \dot{H}_u \rho f_i \tau} \frac{h l}{N}$$

となる。

いま、普通コンクリートによる簡単な遮蔽を考え、建設費は $100 \$ \cdot m^{-3}$ とする。 α の値は $10^4 \$ (man \cdot Sv)^{-1}$ と仮定する。 γ 線エネルギーを約 $0.7 MeV$ とすると実効減衰係数は $\sim 14 m^{-1}$ となる。 ρ の値は 10^{-1} と仮定する。被曝の合計時間、すなわち〔装置の寿命 $\times$ 滞在時間係数〕は20年を採用する。作業者の人数は遮蔽面積 $15 m^2$ 当り1人と仮定する。最大実効線量当量率 $\dot{H}_u$ には $0.05 Sv \cdot y^{-1}$ ($5 rem \cdot y^{-1}$)を採用する。以上の値を上式に代入すると、最適化された線量低減係数は、

$$e^{-\Gamma W} = \frac{10^2 \$ m^{-3} \cdot 15 m^2 man^{-1}}{10^4 \$ (man \cdot Sv)^{-1} \cdot 14 m^{-1} \cdot 5 \times 10^{-2} Sv y^{-1} \cdot 0.1 \cdot 20 y} = 0.1$$

となり、線量当量率を $1/10$ に低減するような遮蔽体の厚さ W_0 が最適値ということになる。

〔排出放射性物質の制御に関する最適化例〕

X と S が離散値である場合の例として、排出放射性物質を制御するための方策に関する最適化問題が示されている。いま、排出を制御する n 個の方策（代替案）を考え、それぞれの案について防護の費用 X と集団線量 S を評価し、第1表に示すように防護レベルの低いものから高いものへ順にならべる。前述のようにAからBへの移行、 $A \rightarrow B$ は次式が満足される場合に有効である。

$$-\frac{X_B - X_A}{S_B - S_A} \leq \alpha$$

ここでは沸騰水型原子炉から放出される短半減期の放射性ガスを放出遅延の手段によって減衰させる制御システムの最適化例をあげる。制御の代替手段は、

- A. サンドタンク
- B. サンドタンク+再結合物
- C. サンドタンク+再結合物+活性炭カラム
- D. C案+非放射性のグラントシール系

である。AからD案までについて諸条件を入れて評価した結果を第2表に示す。 α の値として $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4 \$ (man \cdot Sv)^{-1}$ を用いると、 $B \rightarrow C$ 以降では上式の条件を

第1表 防護の各代替手段についての防護の費用および集団線量

代替案	A	A $\rightarrow$ B	B	B $\rightarrow$ C	C	C $\rightarrow$ D	$n-1 \rightarrow n$	n
防護の費用 (X)	X_A		X_B		X_C			X_n
集団線量 (S)	S_A		S_B		S_C			S_n
ΔX		$X_B - X_A$		$X_C - X_B$		$X_D - X_C$	$X_n - X_{n-1}$	
$-\Delta S$		$S_A - S_B$		$S_B - S_C$		$S_C - S_D$	$S_{n-1} - S_n$	
$-\frac{\Delta X}{\Delta S}$		$\frac{X_B - X_A}{S_A - S_B}$		$\frac{X_C - X_B}{S_B - S_C}$		$\frac{X_D - X_C}{S_C - S_D}$	$\frac{X_n - X_{n-1}}{S_{n-1} - S_n}$	

第2表 沸騰水型原子炉からの排出放射性ガス制御システムにおける最適化例

代 替 案	A	A→B	B	B→C	C	C→D	D
S_E (man Sv)	120		1. 60		0. 12		0. 08
X (10^6 \$)	2. 32		3. 26		4. 66		9. 32
$4X$ (10^6 \$)		0. 94		1. 4		4. 66	
$4S$ (man Sv)		118. 40		1. 48		4	
$\frac{4X}{4S}$ \$ (man Sv) ⁻¹		7900		$9. 46 \times 10^5$		$116. 5 \times 10^6$	

〔注〕 代替手段 A：サンドタンク，B：サンドタンク＋再結合器，C：サンドタンク＋再結合器＋活性炭カラ
ム，D：C案＋非放射性のグラندシール系。

満足せず、最適な方策としてB案を選ぶべきことがわかる。

4. 付録について

報告書においては、最適化の実例について、代数学的な論述が Appendix に、これらの数式に実際的な数値を代入したものが Annex に掲載されている。内容は上述した2例の他に、換気システムの設計、空気中のラドンに対する換気設備の設計、簡単な空気浄化システムの場合における放射線防護の最適化例である。また、特にラドン汚染に関しては最適化評価に関連する諸量（たとえば、ラドン娘核種の潜在アルファ線エネルギー濃度や平衡係数）について別に Appendix をもうけて解説されている。

5. あとがき

放射線防護における最適化のための費用-利益解析の手法を述べた ICRP Publication 37 について紹介した。この刊行物は ICRP が放射線防護の最適化およびその手法についての考え方、原則を示すことを目的にしたもの

であるが、ここでは理解を容易にするため数式や例題に重点を置いて紹介した。したがって、報告書を読むにあたっては、ICRP が“例題は適用の手法の例示を意図したもので、そこに用いられた最適化したパラメータおよび実際の数値を入れて計算した結果は委員会によって勧告されたものと解すべきでないことを強調する”と述べていることも念頭においておかなければならないだろう。

将来におよぶ場合の評価にあたって“discounting”を明確にすること、あるいはαやβ値をどう決めるかなどの問題は残るにしても、放射線防護の最適化を考える上で本報告書が有益な資料になるものと思われる。

最後に、本稿を執筆するにあたって、日本原子力研究所保健物理部のいくつかの方々と ICRP Publication 37 の輪講をした際の資料を参考にさせていただいたことに謝意を表するとともに、御助言をいただいた吉田芳和、赤石 準両博士に感謝の意を表する。