

放射線防護の
最適化における
費用-便益分析

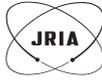
ICRP *Publication* **37**

放射線防護の最適化における
費用-便益分析

国際放射線防護委員会専門委員会4の報告書

1982年6月に主委員会によって採択されたもの

社団法人 日本アイソトープ協会



Japanese Translation Series of ICRP Publications
Publication 37

This translation was undertaken by the following colleagues.

Translated by

Yasuo YOSHIZAWA^{*}, Tomoko KUSAMA,
Shigeru ITO, Yasuharu OKAMURA, Takashi KURODA,
Kenji SUGAI, Takeo NAKAGAWA

^{*}ICRP C4 member at the time.

Editorial Board

The Committee for Japanese Translation of ICRP Publications,
Japan Radioisotope Association

.....
Eizo TAJIMA^{*} (Chair) Tatsuji HAMADA (Vice-chair)
Masami IZAWA^{**} Sukehiko KOGA^{*} Sadayoshi KOBAYASHI
Shinji TAKAHASHI^{**†} Ichiro MIYANAGA
.....

^{*} ICRP member at the time. ^{**} Former ICRP member.

[†] Passed away in April, 1985.

記号リスト

- a 単位電気エネルギー当たりの電気料金。
- a_{nr} 年金係数；すなわち割引率 γ のときの n 年間を通じての割引係数の合計。
- A 放射性物質の流入率または流出率。
- \dot{A}_{ik} 封じ込め装置 k からの放射性核種 i の漏洩率。
- \dot{A}_i 年間に放出される可能性のある放射性核種 i の放射能。
- b 単位体積の空気を循環し調節するために必要な電気エネルギー。
- B ある行為の導入による正味の便益。
- $B(\mu w)$ 線量減衰係数 μ の物質で作られた厚さ w の遮蔽体の線量ビルドアップ係数。
- c 単位空気交換率当たりの換気設備の設置費用。
- $C \equiv C(\infty)$ 平衡状態にある空气中放射性物質濃度。
- $C(0)$ 空气中放射性物質の最初の濃度。
- $C(t)$ 時刻 t における空气中放射性物質濃度。
- \bar{C} 放射性物質の平均濃度。
- C_{Ei} 排出側でのプロセス流中の核種 i の濃度。
- $C_i(Q)$ 換気流量率 Q の状態における放射性核種 i の放射能の平衡濃度。
- C_{Ii} 流入側でのプロセス流中の核種 i の濃度。
- C_{nr} 割引率 γ と計画の寿命に相当する期間の数 n に関する資本回収係数。
- d 微分演算子。
- d_i 放射性核種 i の投与量。

(2)

- D 除染係数。
- D_i 放射性核種 i に関する除染係数。
- EEC ラドンの平衡等価濃度。
- f システムが作動する時間割合。
- f_d 放射能を線量に変換する線量換算係数。
- f_t 該当する居在時間係数。
- f_{tj} 被曝する人々のグループ j の居在時間係数；グループ j の中の個人が線源からの放射線またはある環境からの汚染に被曝する時間割合。
- $f(H)$ リスクに対する嫌悪的な態度と国または管理上の規則とに依存する個人線量の関数。
- F 平衡係数。ラドンと平衡状態にある娘核種の全ポテンシャル α エネルギーに対するある与えられた娘核種濃度の全ポテンシャル α エネルギーの比。
- $F(S)$ 集団線量 S と最大年実効線量当量預託 H^* との定量的な関係を表す関数。
- F_d 放射能濃度を線量率に変換する線量換算係数（すなわち、空気中の放射性物質の単位濃度当たりの、被曝する個人の受ける実効線量当量率）、被曝する人々の平均年齢に対応した平均値と仮定する。
- F_{di} 経口摂取に関する線量換算係数 f_d 。
- F_{di} 吸入に関する線量換算係数 f_d 。
- F_i 有害な影響 i の期待頻度。
- g_i 有害な影響 i の重篤度を表す係数。
- g_T 組織 T に対する有害な影響の重篤度を表す係数。
- G 損害。
- G_H 客観的健康損害。

- $G_{H,1}$ 一人の人に対する客観的健康損害。
- h 高さ（遮蔽壁の）。
- H_E 臓器線量当量の合計すなわち実効線量当量。
- H_{Ei} 吸入による実効線量当量。
- H_{Et} 経口摂取による実効線量当量。
- H_{gon} 生殖腺の線量当量。
- H_L 該当する線量当量限度，または，その限度の一部分で，ある行為に対する天井値として監督官庁により割り当てられた値。
- H_{skin} 皮膚の線量当量。
- H_{thy} 甲状腺の線量当量。
- H_T 組織 T が受ける平均線量当量。
- $H_z(\omega)$ 放射線防護レベル ω における個人の实効線量当量。
- H^* 最大年実効線量当量預託。
- \dot{H} 線量当量率。
- \dot{H}_E 実効線量当量率。
- \dot{H}_L 実効線量当量率の誘導限度で，この値を遵守することは，該当する線量限度，または，ある行為に対する天井値として監督官庁により割り当てられた限度の一部分を遵守することが確実であることを意味するもの。
- \dot{H}_u 最初の最小厚さの遮蔽体の外側表面と接した位置にある仮想的な被照射体受けるであろう最大実効線量当量率 ($\dot{H}_u \leq \dot{H}_L$)。
- \bar{H}_E 平均実効線量当量。
- $\bar{\dot{H}}_E$ 平均実効線量当量率。
- \bar{H}_e 1回の放射性同位体の投与および検査を行うことにより受ける平均線量。
- \bar{H}_{env} 作業環境中の放射線レベルによる平均実効線量当量。

(4)

- \bar{H}_p 患者に対する平均線量。
- i ある与えられた放射性核種。
- j ある与えられた被曝者グループ。
- J 坑道の単位面積当たりのラドンの発散率。
- k 放射性物質のある与えられた封じ込め。
- l 壁状遮蔽体の長さ。
- ℓ 放射線防護のある与えられたサブシステム。
- L 坑道の長さ。
- n n 番めの事象；たとえば n 年目。
- N 個人の数。
- N_j グループ j の個人の数。
- N_p 患者の数。
- N_w 作業者の数。
- $N(H_E)$ 線源からの実効線量当量の人口スペクトル。
- $N(H_E)dH_E$ H_E から H_E+dH_E の範囲の実効線量当量を線源から受ける人数。
- p 坑道断面の周囲の長さ。
- p_i 有害な影響 i の発生確率。
- p_T 組織 T に確率的影響が生ずる確率。
- P 放射線防護の費用を除いたある行為の基礎生産費用。
- Q 流量率 (たとえば換気流量率, ガス流量率)。
- Q_o 最適換気流量率。
- Q_L 最小限界換気流量率。この値を使用することは線量限度を遵守していることが確実であることを意味する。
- r_Q 流量率の増加割合。
- r_T 組織 T の単位線量当量当たりのリスク係数。

- R 全身照射の結果としてある有害な影響を受ける（単位線量当量当たりの）個人の総リスク。
- R_h 暖房のための平均の一人当たりガス消費率。
- R_c 炊事のための平均の一人当たりガス消費率。
- R_{nh} 暖房および炊事以外の家庭内利用のための平均の一人当たりガス消費率。
- S_i 核種 i の単位放射能当たりの集団実効線量当量預託。
- S_E 集団実効線量当量。
- \hat{S}_E 集団実効線量当量率。
- S^c_E 集団実効線量当量預託。
- S^r_E 期間 τ の不完全集団実効線量当量預託。
- S_o 最適化された放射線防護レベルに由来する集団線量。
- t 時間。
- t_1 1 分間。
- T ある与えられた組織。
- U 目的関数。
- V ある行為の導入による粗便益。
- w 遮蔽の厚さ。
- w_o 最適化された遮蔽の厚さ。
- w_T 全身が均等に照射されたとき組織 T におけるリスクの割合を表す係数。
- W 短寿命娘核種と平衡にあるラドンの単位放射能当たりに含まれるポテンシャル α エネルギー。
- WL 作業レベル。鉛-210 にまで崩壊する間に 1.3×10^5 MeV の α エネルギーを放出するような、空気 1 l 中の短半減期のラドン娘核種の任意の組合せと定義される。

(6)

- WLH 作業レベル時間。
- WLM 作業レベル月。
- WLY 作業レベル年。
- X 放射線防護の費用。
- X_a 放射線防護の年間費用。
- X_c 放射線防護の初期資本費用。
- X_F 現在の価値 X_P が、ある与えられた利率で累積した将来の量。
- X_I 放射線防護の設置費用。
- X_o 放射線防護の運転費用。
- X_P 放射線防護費用の現在価値。
- X_S 設置される遮蔽の費用。
- X_v 換気の費用。
- X_V 遮蔽材の単位体積当たりの設置される遮蔽の費用。
- \dot{X}_o 放射線防護の運転費用の率。
- Y 損害の費用。
- Y_H 客観的健康損害の費用。
- $Y_1; Y_2; \dots$ 損害のその他の成分の費用。
- α 放射線防護の目的で単位集団線量に割り当てられた金銭的費用を表すディメンションをもった定数。
- β 客観的健康損害以外のその他の損害の成分の単位当たりに割り当てられた、金銭的費用を表すディメンションをもった定数。
- γ 割引率。
- γ_n 割引率 γ において n 年目に適用すべき割引係数。
- Γ ビルドアップ効果を含む実効減衰係数。
- ∂ 偏微分演算子。
- δ 除染ユニット当たりの費用を表す定数。

- Δ 有限な増分。
- ε_{α} ポテンシャル α エネルギー濃度。
- $\varepsilon_{\alpha 1'}$ 1 分間の成長時間が経過した後の、ラドンの単位濃度当たりのポテンシャル α エネルギー濃度を表すディメンションをもった定数。
- ζ 除染ユニットの交換頻度。
- θ 直列に接続された除染ユニットの数。
- ι 放射線のある与えられた有害な影響。
- κ 平衡係数の算定に関係した種々の不確かさを考慮に入れるための修正係数。
- λ 崩壊定数。
- λ_i 核種 i の放射性崩壊定数。
- μ 線量減衰係数。
- ν ある環境または封じ込め装置の体積。
- ν_D 減衰に用いられる体積。
- ξ 除染ユニットの効率。
- Ξ 単位作業レベル当たりのラドン放射能濃度を定めるディメンションをもった定数。
- Π_n n 個の量の積を求める過程。
- ρ 遮蔽体の外側表面において、集団内の個人が被曝する平均実効線量当量率を最大実効線量当量率で割った商。
- τ ある放射線防護システムの寿命または放射線防護の目的の隔離時間。
- $\tau_{A,B}$ システム A, B の隔離時間。
- ϕ 坑道の断面積。
- χ 換気されている坑道中の空気の移動距離。
- ψ 拘束関数。

(8)

ω 放射線防護レベルを表すパラメータ。

ω_0 ω の最適値。

\sum_n n 個の量の和を求める過程。

\$ 理想的なインフレなしの通貨の単位。

US\$ アメリカ合衆国のドル。

邦訳版への序

本書は ICRP Publication 37 として刊行された、ICRP 専門委員会 4 の報告書

Cost - Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection
(*Annals of the ICRP*, 10, No. 2 / 3 (1983) に発表)

を、ICRP の了解のもとに翻訳したものである。

翻訳は、この報告書を作成した ICRP 専門委員会 4 のメンバーである吉澤康雄教授の指導の下に、東京大学医学部放射線健康管理学教室の草間朋子氏が中心となり、次の方々によって行われた：

伊藤 成，岡村泰治，黒田 隆，菅井研自，中川健朗

この原訳は、当協会の ICRP 勧告翻訳検討委員会による検討と他の刊行物との訳語の調整が行われて成文となった。

この報告書は、放射線防護に費用-便益分析を用いることの原則と適用例を記している。利用にあたっては、次の 2 点が本文中で強調されていることに注目されたい。

- (1) 費用-便益分析はいろいろな最適化手法のうちの一つであり、このほかにも定性的または定量的手法が用いられていること。
- (2) 報告書の本文、付録、および付録への補遺で使われている多数のパラメータのそれぞれの数値は、あくまでも例示にすぎず、代表値でもなく、ICRP が推薦する値でもないこと。

この報告書は他の多くの ICRP 刊行物とはその性格が異なっており、邦訳に

(ii)

はかなりの困難を伴うものであったが、たいへんな努力で翻訳して下さった上記の方々に厚く感謝する。

昭和 60 年 7 月

ICRP 勧告翻訳検討委員会

日本アイソトープ協会

ICRP 勧告翻訳検討委員会

委員長 田島 英三 (立教大学名誉教授)

副委員長 浜田 達二 (日本アイソトープ協会)

委員 伊沢 正実 (日本原子力発電(株))

古賀 佑彦 (藤田学園保健衛生大学)

小林 定喜 (放射線医学総合研究所)

高橋 信次 (愛知県がんセンター) (昭和 60 年 4 月逝去)

宮永 一郎 (日本原子力研究所)

目 次

	頁 (項)
序	1
A. 一般的考察	4 (1)
緒 論	4 (1)
放射線防護の最適化の適用分野	5 (6)
決定分析としての放射線防護の最適化	6 (9)
放射線防護の最適化に関与する規準	9 (19)
放射線防護の最適化のための費用-便益分析手順の概念的基礎	12 (30)
B. 費用-便益分析を用いる放射線防護の最適化の手法	14 (35)
基本的な概念と量	14 (35)
損 害	14 (35)
損害の概念	14 (35)
客観的健康損害	16 (42)
損害のその他の諸成分	19 (48)
集団線量	20 (51)
集団線量の概念	20 (51)
集団線量と客観的健康損害	21 (52)
集団線量率と集団線量預託	21 (53)
不完全集団線量預託	22 (55)
集団線量と損害のその他の成分	22 (56)

(iv)

費用-便益分析の使用	23	(59)
一般的概念	23	(59)
費用の算定	29	(71)
防護の費用	32	(77)
粗費用見積法	32	(78)
現在価値評価法	33	(80)
資本化費用手法あるいは年賦化費用見積法	34	(83)
放射線損害の査定	35	(85)
一般的な定式化	35	(85)
平均余命の変化の査定	37	(90)
α の値	40	(97)
分布の諸問題	40	(98)
最適化のための定量的手法	42	(102)
理想的な最適化	42	(102)
複合したシステムの最適化	44	(109)
一般的な定式化	44	(109)
独立したサブシステム	45	(111)
相互関係のあるサブシステム	46	(114)

C. 放射線防護の最適化における費用-便益分析の

実際の利用	49	(118)
設計による放射線防護の最適化	49	(120)
体外照射に対する防護を意図したシステムによる放射線防護の 最適化の例	52	(126)
簡単な遮蔽の設計による放射線防護の最適化の例	52	(128)
体内照射に対する防護を意図したシステムによる放射線防護の		

最適化の例	56 (135)
換気と空気浄化の設計による放射線防護の最適化の例	57 (140)
放射性物質の環境放出を制限するシステムによる放射線防護の最適化	63 (154)
操業における放射線防護の最適化	66 (160)
道路、鉄道および水路による放射性物質の輸送における放射線防護の最適化の例	69 (170)
放射線の医学利用における放射線防護の最適化の例	71 (175)
放射線診断	73 (179)
放射線治療	75 (182)
核医学	75 (183)
日用品の利用における放射線防護の最適化の例	76 (184)
原子力発電所の操業における放射線防護の最適化の例	78 (187)
個人の作業における放射線防護の最適化の例	82 (195)
付録 A 放射線源に対する単純な平板遮蔽体の設計による放射線防護の最適化の代数的例	85
補遺 A ₁ 単純な遮蔽体の設計による放射線防護の最適化の数値例	89
付録 B 単純で特殊でない換気システムの設計による放射線防護の最適化の代数的例	90
補遺 B ₁ 換気による放射線防護の最適化の二つの数値例	93
付録 C ラドン汚染に関連のある諸変数と最適化過程へのそれらの影響	96

(vi)

付録 D 環境にラドンがある場合の、換気的设计による 放射線防護の最適化の代数的例	102
補遺 D ₁ 鉱山における換気システムのバックフィットによる 放射線防護の最適化の数値例	107
付録 E 単純な空気浄化システムの設計による放射線 防護の最適化の代数的例	111
付録 F 放射性物質の放出制御による放射線防護の 最適化の手順の例	114
補遺 F ₁ 沸騰水型原子炉からの気体放出の制御による放射線 防護の最適化の数値例	115
補遺 F ₂ 再処理施設からのヨウ素-129 の制御による放射線 防護の最適化の数値例	116
付録 G 核医学操作における放射線防護の最適化の例	119
付録 H 天然ガスの家庭内使用における放射線防護の 最適化の例	122
記号リスト	125
参考文献	133

序

1978年5月、国際放射線防護委員会(ICRP)は、線量制限体系の一部である最適化という要件の適用の原則と方法に関する文書を作成するため、専門委員会4の課題グループを指名した。この課題グループの構成員は次のとおりであった：

専門委員会4より

A. J. Gonzalez (委員長)

O. Ilari

J. O. Snihs

主委員会より

D. J. Beninson

H. J. Dunster

委員会以外からの専門家

R. E. Baker

M. J. Clark

R. Coulon

課題グループにとっては、何人かの科学者との議論がためになった。とくに以下の人々の協力を感謝する：

J. H. E. Carmichael；医療被曝についての例を作成し、ICRP 専門委員会3との連絡を保った。

L. Frittelli および A. Tamburrano；緊急事態と対策について助言した。

H. Jammet, B. Lindell, D. Méchali, F. Morley, および F. D. Sowby；課題グループの何回かの会議にオブザーバーとして出席した。

(2)

課題グループは、その作業を成し遂げるために、パリ(1978)、ウィーン(1979)、イスラ(1979)、最後はブエノスアイレス(1980)において、都合4回の会合を開いた。委員会は、経済協力開発機構原子力機関、原子放射線の影響に関する国連科学委員会の事務局、欧州共同体委員会の共同研究センター、およびアルゼンチン原子力委員会がこれらの会議の支援をしてくれたことに感謝する。課題グループの作った文書の清書原稿の作成にあたった Floreal Martinez Nunez 氏に特別の謝意を表す。

ICRP 専門委員会 4 は、パリ(1979)およびブライトン(1980)で開催された会議で、この課題グループの文書を検討し、1980年パリで開催された会議でその報告書を採択した。そのときの専門委員会 4 の構成員は次のとおりであった：

H. Jammet (委員長)	E. Kunz	J. O. Snihs
R. M. Alexakhin	D. Méchali	S. D. Soman
R. M. Fry	D. W. Moeller	R. Wilson
A. J. Gonzalez	F. Morley	B. C. Winkler
O. Ilari	H. Muth	Y. Yoshizawa

ICRP 専門委員会 4 の会議には、国際原子力機関から H. Daw、世界保健機関から E. I. Komarov が出席した。

専門委員会によって採択された技術文書は、次の二つの点から成っていた：

- (i) 費用-便益分析を用いた放射線防護の最適化のための技術的方法の提示(報告書の B 章参照)；および、
- (ii) 代数的例および数値的例を含めて、これらの方法の実際的な使用に関する議論(報告書の C 章および付録と補遺を参照)。

この文書は、東京(1981)およびイーストボーン(1981)の会議で委員会によって検討された。委員会はこの技術文書を採択したが、これに概論的な文章を付け加えるべきであると考えた。そこで、委員会は、委員会の科学幹事、専門

委員会 4 の委員長, および課題グループの委員長と協力して, 費用-便益分析を放射線防護の最適化において使うことに関する一般的考察について記した文章を作成する責任を負うように, D. J. Beninson に依頼した。この新しい文章は委員会によって検討され, 文書の中に A 章として挿入された。最終報告書は, 1982 年 6 月, 委員会によって採択された。

(4)

A. 一般的考察

緒 論

(1) 委員会は、*ICRP Publication 26* の 12 項で、委員会が勧告した線量制限の基本的体系をまとめている²⁹⁾。この体系は、当然のことながらお互いに関連のある次の三つの要件からなりたっている：

- (i) いかなる行為も、その導入が正味でプラスの便益を生むのでなければ、採用してはならない；
- (ii) すべての被曝は、経済的および社会的な要因を考慮にいれながら、合理的に達成できるかぎり低く保たなければならない；
- (iii) 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。

(2) これら三つの要件は、委員会により、以下の略語で言い表されている：

- (i) 行為の正当化、
- (ii) 放射線防護の最適化、
- (iii) 個人の線量当量の限度。

(3) この報告書は主として、線量制限体系のこれらの要件のうちの二番目の要件、すなわち放射線防護の最適化、および、放射線被曝の制御において合理的に達成できるものを確立することの原理と手法に関するものである。

(4) 放射線防護を最適化するためには、多様な手法が利用できる。これらの手法のうちのあるものはオペレーションズ・リサーチから、あるものは経済学から、またあるものは工学から引用されている。ある与えられた手法を使

用することは、最適化の目標と思われるものについての価値判断を、明白あるいは暗黙のうちに意味している。

(5) 放射線防護の最適化に使用される手法の中には、それにかぎられるわけではないが、費用-便益分析に基づく手順を含んでおり、この報告書で詳しく議論されているのはこれらの手順である。その他の手法——そのあるものは定量的であり、またあるものはもっと定性的であるが——も放射線防護の最適化に用いられることがあることを認識することが重要である。

放射線防護の最適化の適用分野

(6) 放射線防護の最適化は、放射線被曝が防護手段によって制御できるすべての状況に適用される。施設および機器のための防護システムの選択と立案、および操業の遂行にあたって、最適化は重要な考察事項の一つである。線量制限体系の一つの要件としての最適化は、厳密には放射線源が制御下にある状況に適用されるものであるが、事故の場合にとるべき防護方策のあるものを計画するためにも同様な考察を使うことができる。

(7) 放射線防護の最適化のために用いられる手法の定量化の程度は用途によりそれぞれ変わるであろう。施設と防護システムを立案する者は、最適化の要件を満たす防護の程度（遮蔽の厚さ、閉じ込め、換気率等）を決めるために、より定量的な手法を用いようとするであろう。監督官庁は、放射線被曝を伴う与えられた種類の施設、放射線源、あるいは行為のための適切な認定限度と要件を導くにあたって、最適化の様式化された定量的手法を使用するかもしれない。

(8) 操業中の放射線防護の最適化は、必ずしもそうとはかぎらないが、多くの場合、定量性は少ない傾向がある。このような最適化には、職員の数と資格、使用される個人用防護具の型式、作業の体制、および必要とされる適切なモニタリングなどに関する決定が含まれる。日常の操業行為のためには、放

(6)

放射線防護の最適化の定量的な算定を行うことは提案しない。日常操業において放射線防護に責任を負う者は、最適化の原則に基づいて監督官庁または管理者が決めた、より簡単な規則に従わなければならないであろう。さらに、定量的というより直観的にはあるが、放射線防護の最適化に関する一般的な意欲が、それらの人々の指針となるであろう。被曝を“合理的に達成できるかぎり低く”保つというこの態度は、放射線防護にとって新しいことではなく、また、線量限度のわずか下で操業するだけでは十分でないであろうということを強調している現在の勧告が奨励していることである。

決定分析としての放射線防護の最適化

(9) 放射線被曝をもたらす施設、放射線源、あるいは行為は、多くの人々にいろいろな放射線量を与えることになる。線量制限体系の第三の要件で規定されているように、かかわりのあるすべての個人の受ける線量が該当する線量限度を超えないことを確実にするために、十分な防護を行うことがつねに要求される。

(10) しかしながら、委員会は、放射線作業で遭遇するような線量の範囲内では、線量と確率的影響の発生確率の間には比例関係があるという、放射線防護の目的のための基本的な仮定を設けた。この仮定の結果、それまでに集積した線量には関係なく、線量が同じだけ増加すれば、同じ量のリスク増加があるという意味で、線量は加算的であることになる。さらに、この仮定の結果として、原理的には放射線防護のレベルを上げて被曝を減らすことによって、ある与えられた状況における放射線リスクを望むだけ減らすことができることになる。

(11) 線量限度を満たすために要求される以上に放射線防護のレベルを上げるために違ったやり方をとると、その結果、費用とリスクの程度が変わり、放射線とは関係のない操業上の不便さを生ずる以外に、線量分布も違うことに

なるかもしれない。ある与えられたより高いレベルの防護を採用した結果、関係しているすべての要因が有利に変化すると考えられるならば、合理的に達成しうることに向けての必要な段階としてそのレベルの採用が自動的に要求されるであろうことは明らかである。

(12) しかし、通常の場合ではこうはならない。一般に、より高いレベルの防護にはより多くの費用がかかる。また、防護を増すための異なる選択をすると、被曝する個人個人が属する集団間で線量の低減の程度は異なり、ときにはある集団の被曝が減って他の集団の被曝が増えることになる。

(13) そのために、最適化の要件を満たす防護レベルの選択は、多くの成分を含んだ決定であり、これらの成分のいくつかは、他の成分と相いれないこともある。この決定問題の成分としては、関連する個人の放射線量、可能な防護レベルを選ぶための費用と困難、作業手順に及ぼす影響、および、この決定に伴って予想されるその他すべての影響が含まれる。

(14) 意志決定の過程は、原則的には、13項で示した各成分を考慮に入れて、防護のすべての選択肢を評価することから成る。この評価は、明示されたあるいは暗黙の、優先規準に関係している。いくつかの方法をこの意志決定に使用することができる。ある方法は選択肢どうしを比較するだけである。たとえば、マルチクライテリア法では、ある選択肢がもう一方の選択肢より優れているか否かを定めるために、すべての規準を考慮にいれながら、さまざまな選択肢を対にして比較し、最終的な決定にいたるまでその過程を繰り返すのである。これらの方法では、ある選択肢の方がよりよいと判断する規準の数が十分あり、残りの規準についても違いがあまり大きくないならば、その選択肢は他の選択肢より優れていると考える。これら二つの条件では、規準に何らか相対的な重みづけをしてこれを使う。通常マルチクライテリア法は、よりよい選択肢を前もって選ぶことはできるが、選択肢間の完全な順位づけを行うことは一般的にはできない。これらの方法の価値は、多くの規準を考慮していることと、

(8)

定性的な面を扱うための簡単な手順を与えていることである。

(15) 集合法といわれる別の方法は、違った選択肢を対にして比較するのではなく、各々の選択肢における規準の価値を一つの価値にまとめようと試みるものである。そして、もっともよい選択肢を選ぶためにそれぞれの選択肢の値を順位づける。種々の規準を適切に定量化することが、これらの方法に特有の要件である。もっとも広く用いられる集合法は、効用関数に基づいた異なる規準を定量化する方法である。効用関数とは、一つの規準のありうべき価値を、0から1の間の数(効用とよばれる)で表した尺度である。この数は、もしある選択肢の成果が他より好ましければ、第一の選択肢の効用は第二の選択肢の効用より大きい、というように決められる。

(16) 効用関数は必ずしも線形ではない。また、ある与えられた規準に関する意志決定者の好み以外の根拠はもっていない。決定は、関係するいくつかの効用の組合せで得られる各々の選択肢の総効用に基づいて行われる。各々の規準に重みづけすることにより、種々の規準の相対的な重要性が考慮に加えられる。最善の選択肢は総効用を最大にするものである。

(17) 効用関数に基づいた唯一ではないが重要な方法は、費用-便益分析の特殊な場合である。この手順は、関係するすべての規準を金銭用語で表すことができ、効用はそのように金銭化された規準と直線関係をもつと仮定される。費用-便益分析においては、異なる規準の重みづけは、それぞれの規準を特徴づける単位としての金銭的な値で行われる。

(18) これらの意志決定の定量的な方法に関してひとこと注意しておく必要がある。選ばれた防護レベルおよびそれを達成するために用いられるシステムの最適条件は、分析に用いられた判断とデータの質に大きく依存する。そのため、判断による入力とデータのうちのいくつかあるいはすべての変動に対する、得られた解の感度を評価することが必要である。このような感度分析は、意志決定にさいしての決定的な成分が何であるかを明らかにし、問題が複雑な

ときにはとくに、より有意義なやり方を作り出すのに役立つ。

放射線防護の最適化に關与する規準

(19) 放射線の有害な影響を定量化するために、委員会はリスクと損害という概念を導入した。ある与えられた線量に伴うリスクとは、その線量を受けた結果として、ある個人にある特定の放射線影響が発生する確率を意味する。これに対して、損害とは、種々の起こりうる有害な影響の確率と重篤度との両方を考慮して求めた、被曝した人々の集団中の害の大きさの数学的な期待値として定義される。有害な影響には、確率的影響と非確率的影響（両者の和は客観的健康損害とときによばれるもの）が含まれ、さらに、リスクにさらされた個人の心配と不安、および放射線被曝があったために生じる種々の拘束によってこれら個人がこうむる快適さへのすべての悪影響も含まれる。

(20) 通常の下で遭遇するような、線量限度以下の被曝レベルでは、非確率的影響は除外される。実効線量当量を定義するのに使われる荷重係数 w_T が各々の臓器または組織の被曝の相対的な損害を適切に反映しているとなれば、また、各々の影響のリスクは対応する線量当量に比例するとされているので、損害の確率的な成分が集団実効線量当量に比例することを示すのは容易である。

(21) 放射線治療または放射線事故のさい起こるような大線量を受けた場合には、客観的健康損害は集団実効線量当量に比例しないことは明らかであろう。このような場合には、客観的健康損害に占める非確率的影響の寄与を知るために、客観的健康損害を算定することに関係するすべての個人線量の知識が必要である。

(22) 放射線に被曝した個人の心配と不安は、理性的な成分と非理性的な成分の両方が混合した結果でありうる。決定のためには理性的な成分が用いられ、これには、リスクのレベルとリスクに対する態度（嫌悪感）が含まれよう。

(10)

勧告の中で委員会が設定した仮定のもとでは、リスクのレベルは個人の実効線量当量に比例する。一方、リスクに対する態度は、すべてのリスクレベルでリスクに比例するとすることはできない。実際に、リスクに対する嫌悪感は、より高いリスクレベルでのリスクに対しては、線形の場合以上に増大するであろう。その結果、損害のこの成分に対する被曝した各個人の寄与は、その個人の実効線量当量の関数（必ずしも線形ではないし、また必ずしもすべての被曝者集団で同じとはかぎらない）となるであろう。

(23) 放射線被曝が存在することによる個人の快適さに影響する制限は、ふつう、個人線量および現在ある国または運用上の規則に基づいて決められる。損害のこの成分もまた、それぞれが個人線量の非線形関数である個人個人の寄与の結果であろう。

(24) 放射線防護の最適化のための意志決定のマルチクライテリア法においては、損害のすべての成分は別々に考察できるかもしれない。費用-便益法では、損害に対し金銭的な値が定められる。15項、16項、および17項での議論を考慮して、客観的健康損害に対し（もし非確率的影響が除外されるなら）、金銭的な値 αS を定めることができる。ここで S は、考慮している施設、線源、あるいは行為による集団実効線量当量であり、 α は、意志決定者によって単位集団線量を表す量の単位量当たり定められた金銭的費用で、たとえば man Sv 当たり定められた費用である。

(25) 損害のその他の成分をまとめたものは個人線量に関係するであろう。ある被曝集団内の一個人の寄与は、リスクに対する嫌悪的な態度、および国または管理上の規則に依存する個人線量の関数 $f(H)$ で表すことができる。 $f(H)$ の型は必ずしもすべての被曝集団で同じではないし、すべての社会的態度がそうであるように、時間とともに変化するであろう。損害のこれらの成分の費用は、 $\beta \sum_j N_j f_j(H_j)$ として算定される。ここで H_j は、グループ j 中の個人

の線量当量, N_j はグループ j 中の個人の数, そして β は損害のこれらの成分の単位量に対して意志決定者によって決められた金銭的費用である。

(26) 放射線防護の最適化のための費用-便益分析の手順を論じているこの報告書の技術的な内容の諸章では, 損害の費用を $Y = \alpha S + \beta \sum_j N_j f_j(H_j)$ と表している。費用-便益分析法を実際に適用する場合には, 意志決定者によって定められる α と β の値は, 損害のそれぞれの成分の相対的な重みの値の決め方に関係するであろう。たとえ β を無視しうることはしないとしても, 多くの状況下で $Y = \alpha S$ という式が損害の費用に対するよい近似であろうことを指摘しておくべきである。すべての個人線量が小さく, かつ関数 $f_j(H_j)$ が線量の減少とともに急速に減少するような場合にこうなるであろう。

(27) 放射線防護の最適化の手順には, 放射線による損害に加えて, ほかの要因も考察する必要がある。費用-便益分析の手順においては, これらの要因は防護の費用とよばれるものにまとめることができる。防護のレベルをあげようとするどのような努力も, 作業, 時間, 材料, そしてリスクの点でも, 社会にとっての費用を伴う。

(28) 防護費用の評価は, ときにはきわめて複雑であることがわかる。たとえば, もし, ある与えられた防護レベルの選択が, 一つの防護システムを製作し, 設置し, さらにその操業を確実に行うことを含むのであれば, 費用にはふつう, これらの操業にかかる経費だけではなく, このシステムのための基本材料または構成要素を入手するためにかかる経費およびこれら一切の操業に伴う害に関連して社会がこうむる費用も含まれなければならない。しかし, 通常は, これらすべての費用は, このシステムの入手, 設置, および操業の金銭的費用にすでに含まれていると仮定することができる。

(29) 防護費用の金銭的査定は, 実際の経費とその時間的な分布とを考慮した, 通常の経済学的手法に基づいて行われる。これらの手法については,

(12)

この報告書の技術的な内容の諸章で論じており、会計手法に関する利用できる文献に詳細に記載されている。

放射線防護の最適化のための費用-便益分析手順の概念的基礎

(30) 費用-便益分析技術を意志決定に適用する場合の基本的な考え方は非常に単純である。すなわち、結果として得られる正味の便益が、次善の代替案の便益より大きいならば、その選択肢を選び、そうでなければそれを選ばない。放射線被曝を伴う行為を導入する場合、社会に対する正味の便益は、理想的には $B = V - (P + X + Y)$ で表すことができる。ここで B は、この行為を導入することによる正味の便益、 V は粗便益、 P は放射線防護のための費用を除いたすべての生産費用、 X は選ばれたレベルの放射線防護を達成するための費用、 Y はその放射線防護のレベルに付随する損害の費用である。

(31) 最適化の要件を満たす値を探すということは、いずれも防護レベルの関数である防護の費用 X と損害の費用 Y との間に、 $X(\omega) + Y(\omega)$ が最小となるような相互関係をみつけることである。ここで、防護の費用と放射線損害の費用は、 ω で表される防護レベル（たとえば、遮蔽の厚さ、換気率、代わりの防護機器など）の関数である。もし、 V と P とが ω と無関係であるとすれば、 X と Y との値の最適な組を選択することにより、その行為の導入による正味の便益が最大となるであろうことは明らかである。

(32) しかし、ある場合には、防護レベルが変化すると、行為の粗便益に影響を与えることを指摘しておくべきである。このような場合には、最適化の過程は、正味の便益を最大にするという主目標を維持するため、これらの変化を考慮に入れなければならない。たとえばこれは、患者の防護を最適化するような場合である。

(33) 最適化のための手順は、いろいろな制限条件の範囲内で行われなければならない。これらの制限の一つは、すべての個人線量を該当する線量限度

以下に保つという要件から生じる。その他の制限は、その状況に特有の技術的
条件あるいは資材の利用の可能性がかぎられていることによるであろう。

(34) この報告書の技術的な内容の諸章では、放射線防護の最適化のため
の費用-便益分析の方法について詳しく論じている。しかし、放射線防護の最適
化は、一般工学における最適化と同じように、基本的には直観的な過程である
ことを強調すべきである。この報告書で論じている定量的な手法は、最適化に
とりかなりの助けとはなるが、それだけでは完全な過程ではない。

B. 費用-便益分析を用いる放射線防護の 最適化の手法

基本的な概念と量

損 害

損害の概念

(35) 放射線損害の概念は、放射線防護に費用-便益分析を適用するのに不可欠なものである。委員会はこの概念を、電離放射線に対する被曝によるすべての有害な影響を同定し、可能なときにはこれを定量化するために導入した。この概念は、ある与えられた放射線源あるいは行為に対する被曝の結果生ずるいろいろな有害な影響の複合効果を表す単一の量を与えるために考え出されたものである²⁹⁾。必ずしも放射線によってひき起こされるのではない。その他の有害な影響たとえば通常の職業上の傷害も、選ばれたレベルの放射線防護を達成するさいに起こりうる。しかし、防護を実行することによってひき起こされるそのような害の値は、損害の成分でないと仮定する (72 項参照)。

(36) 損害は外延量で都合よく記述ができる。すなわちそれは、放射線の害全体を特徴づける量で、数えたり加えたりできるいくつかの部分に分けることができる。したがって概念的には、損害の成分とそれらの加法を定義することが可能なはずである。たとえば、種々の線源が個別に与えられた損害を生ずるのであれば、それらが同時に発生した場合には、それらの損害を合計したものが生じるであろう。損害は成分に分けることが可能なので、これら成分の一つ一つを別々に算定することが可能であるべきである。この報告書では、損害の概念は、いま考えている単一の線源から被曝する集団に対する放射線の影響

の線源関連概念として使用し、一人の個人に対するすべての線源からの影響を表すのには使わない。

(37) *ICRP Publication 26*²⁹⁾では、損害の定義を与えるさい、加法概念を使用している。被曝した集団中の損害は、各々の種類の有害な影響の頻度とその影響の重篤度とを考慮に加えた、受けるはずの害の期待値と定義されている。 F_i を影響 i の期待数(すなわち、その線源によってひき起こされる影響 i の期待頻度)であると、その重篤度が係数 g_i で計られるならば、損害 G は、

$$G = \sum_i F_i g_i$$

で与えられる。

(38) 被曝した個人の総数 N が決まれば、ある与えられた発生確率 p_i のとき、ある影響の期待頻度は N に比例する。37 項の式より、損害は次のように表すことができる。

$$G = N \sum_i p_i g_i$$

上の式は、*ICRP Publication 26*²⁹⁾に与えられた形式的な定義を表しており、各個人に現れる損害の N 倍を意味し、等しい被曝をした N 人の個人についての加算性の要件を示している。

(39) 一方、リスクという語は、放射線被曝の結果、ある個人に起こるであろう有害な影響の確率を意味するものとして委員会が用いているものである²⁸⁾。そこで、リスクの概念と損害の概念とは関連があることになる。いくつかの影響が照射の結果生ずるならば、それぞれの影響 i のリスク p_i の関数として表される総リスク R (すなわち、発生する可能性のある影響のどれかに遭遇する確率) は、

$$R = 1 - \prod_i (1 - p_i)$$

となる。放射線防護で関心のある線量領域では、 p_i の値はふつう小さいので、

$$R \cong \sum_i p_i$$

(16)

となる。

(40) 放射線被曝により生じる損害には、被曝した個人に起こる確率的および非確率的健康影響と次世代以降に起こる重大な遺伝的影響、およびその他の有害な影響を含ませることができる。その他の影響の例としては、さまざまな地域への立入りの制限を必要とするほどの環境汚染に伴うであろう快適さの損失および、汚染地域からとれる食品の消費の制限がある。また、認定限度を超える可能性による管理上の拘束に加えて、個人の被曝のレベルに由来する不安が労働者集団、公衆、あるいは当局に生ずることがあり得る。

(41) これらのその他の影響は、その本質上、頻度と重篤度で定量化することは難しい。しかし、そのような影響が明確にわかったならば、損害の算定にさいしてそれらを考慮すべきである。損害を決定する合計値は成分に分けることができるから、損害は、概念的には、客観的健康損害にその他の損害を加えたものとして表すことができる。損害のこれらの成分は以下の項で検討する。

客観的健康損害

(42) 放射線防護の最適化は、わずかの例外(たとえば、182項参照)はあるが、個人線量がつねに線量限度以下の場合に行われる。したがって、非確率的影響は防止されるはずであるので、放射線による身体的および遺伝的な確率的影響の誘発のみが、有害な健康影響に寄与することになる。また、その他の影響(たとえば心理的な不安)もあり、それらは健康に関連していると考えられるけれども、定量化が難しいという共通の特徴があるので、損害のその他の成分とともに論ずる(48項以降参照)。

(43) 確率的影響に関しては、リスクの増分は、線量当量の増分に比例すると仮定される。そこで、組織 T の被曝によって確率的影響を生ずる確率 p_T は、その組織が受ける平均線量当量 H_T に比例すると考えてよい：

$$p_T = r_T H_T$$

ここで、 r_T は組織 T における単位線量当量当たりのリスク係数である。この式

を損害に関する式(38項参照)に代入すると、一人の人に対する客観的健康損害 $G_{H,1}$ は：

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

となる。ここで、 g_T は組織 T の有害な影響の重篤度を表す係数である。

(44) 重篤度の係数に値を与えるにはいくつかのやり方を試みることができよう。*ICRP Publication 27*³¹⁾は、害の指標として平均余命減少(正常の平均余命との関連で)の使用を検討した。職業被曝の場合には、重篤度の定量化の一つの可能性は労働時間の損失であるとする事ができよう。放射線防護の目的には、第一近似として、損害の支配的なものは、最初の二世代における重篤な遺伝的影響の誘発と、致死的な悪性腫瘍であると仮定できよう。これらの影響のそれぞれに対して重篤度の係数は1ととった。この場合、一人の人に対する客観的健康損害は

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

となる。

(45) 全身照射に関する総リスク R をこの式中に導入すると便利であり、一人の人に対する客観的健康損害は次のように表現できる。

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

ここで、合算するのは荷重平均された全身被曝であり、割合 r_T/R は係数 w_T で表されるもので、全身が均等に照射されたときに組織 T が受けるリスクの総リスクに対する割合である。 R の値はシーベルト当たり 1.65×10^{-2} とする(致死がんが $1.25 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 、最初の二世代の遺伝的影響が $0.4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$)³¹⁾。

(46) 確率的影響のリスクを制限するために、*ICRP Publication 26*²⁹⁾は、上記の荷重平均全身被曝を制限するという概念を導入した。この概念は、ある与えられた放射線防護のレベルでは、身体の全部が照射されるかあるいは部分

(18)

的に照射されるか、また均等に照射されるかあるいは不均等に照射されるかに関係なく、リスクは同じであるべきである、という原則に基づいている。この条件は、以下に定義する実効線量当量³⁰⁾ H_E とよばれる量に対して制限を適用することによって満たされる：

$$H_E = \sum_T w_T H_T$$

(w_T の勧告値は、委員会によって与えられている^{29,30)}。)したがって、一人の人に対する客観的健康損害の式は以下のように表すことができる：

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

(47) 前項で示した個人の客観的健康損害の算定には、第三世代以降の世代の損害に対する遺伝的影響の寄与と、死にいたらないがんによるものを含んでいない。なぜなら、実効線量当量の定義にこれらの影響を考慮に入れなかったからである。さらに、単位実効線量当量当たりの実際のリスクは、性、年齢、その他の要因に依存するであろう。これらの悪影響が放射線防護の最適化にどんな影響を与える可能性があるかは委員会によって検討され、以下の声明となった³⁴⁾：

“ICRP Publication 26 の刊行以来、線量限度と比較するためだけでなく、最適化の過程での集団線量の算定のためにも、実効線量当量を用いる場合が増えている。その場合に、全遺伝障害と致死的でないがんとに考慮を払わないで実効線量当量を用いてよいかどうか、という疑問が生じた。

委員会はこの問題を検討して、最適化のさいの算定に実効線量当量を用いることに関して次に述べる結論に達した。将来にわたる遺伝障害を加えることは、全身均等被曝の場合、公衆の場合には $0.4 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ のリスクを、平均的作業者の場合にはこれより低いリスクを、さきに仮定された全リスクの $1.65 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ に加えることになろう。つまり全損害がたかだか 24% 増すことになろう。全身均等被曝でなく生殖腺がおもに照射されるという、より起

りにくい場合には、遺伝障害は実効線量当量のみが意味する値の2倍となろう。

致死的でないがんによる追加の損害の重みは、致死のがんにより死亡したための寿命損失の期間とくらべての、致死的でないがんが全快するまでの間、正常な健康から失われる、これと同じ長さの期間に与えられる比重に依存するであろう。この比重 (K) を0.1とすれば (*ICRP Publication 27*)、致死的でないがんと良性腫瘍の誘発による損害は、全身均等被曝の場合に遺伝損害以外の全損害を2%増加させることになる。甲状腺と皮膚のようにがんによる致死率が低い臓器が単独で照射されるならば、そして K に0.5という大きな値をあてはめると、全損害は実効線量当量のみが意味する値の約2倍に近くなる。しかし体外被曝または放射性核種の混合物への被曝の多くの場合には、実効線量当量だけを使うことが全損害をかなり過小に見積ることにはならないであろう。”

損害のその他の諸成分

(48) 客観的健康損害は線量がわかれば定量化することができるのに対して、損害のその他の成分の定量化は、通常はもっと困難である。その他の影響は、それらがどのようにして損害に直接影響を及ぼしうるかにとくに注目して、個々の事例について考察する必要がある。多くの場合、とくに個人被曝が非常に低いときには、その他の損害は無視してもよいであろう。しかし、潜在的な被曝がひき起こすかもしれない心理的なストレスを損害と考えるならば、被曝は実際には起こらないが、仮想上は起こるかもしれない場合でさえ、その他の損害が問題となりうる。

(49) 正式な最適化では、個人個人が該当する線量限度を超えないということが、特定の拘束条件として要求される。しかしながら、ある場合には、個人線量が線量限度に近く、その他の損害とともに、客観的健康損害もひき起こす。これらの場合の潜在的なその他の悪影響としては、線量限度の存在するこ

(20)

とによってリスクを感じて不安をもつことがあろう。認定限度を超えたならば管理上の拘束を受けるかもしれないと知れば、関係する人々の間に不安をもたらす。一方、リスクを認識することによる不安は、定量化することが難しく、かつ客観的リスクと複雑にからみ合いがちな損害であろう。個人個人に認識されるリスクは、実際のリスクと等しいこともあれば、大きかったり小さかったりもする。リスクのレベルが高くなるに従ってますますリスクを避けようとするのが、リスク嫌いの態度の特徴である。それとは逆のリスク容認の態度はこれと反対で、その人々にとっては、リスクのレベルが増すにつれて線量増加分の重要さは減る。そのような態度を絶対的に定量化しても、お互い反対にはならないかもしれないが、これは不安の影響を無視すべきであることを意味しているのではない。

(50) 個人の線量が線量限度よりもずっと低いときには、48項で述べた心理的影響の可能性を無視するならば、上で論じたその他の影響は無視できる。その場合には、客観的健康損害を、全損害の唯一の尺度として用いることができる。個人線量が増加するにつれて、客観的健康損害に一つの成分をつけ加えることによって、不安から生じるその他の損害を最適化の過程で考慮しなければならないかもしれない。この成分は、高い被曝をする人々の集団での平均の線量当量、および各集団の人数に関連するであろう (25項参照)。

集団線量

集団線量の概念

(51) ある与えられた線源にさらされる集団の集団実効線量当量 S_E は、次のように定義される：

$$S_E = \int_0^{\infty} H_E N(H_E) dH_E$$

ここで $N(H_E)$ はその線源に由来する実効線量当量に関する人口スペクトルで

あり、 $N(H_E)dH_E$ は H_E から H_E+dH_E の範囲の実効線量当量をその線源から受ける人数である。この種の積分は、通常、荷重積とよばれており、集団実効線量当量は、この線源に由来する実効線量当量と被曝集団の人数との荷重積となる。この報告書では、集団線量という言葉は、とくに条件をつけないかぎり、集団実効線量当量を意味することとする。

集団線量と客観的健康損害

(52) 一人の人に対する客観的健康損害は実効線量当量に比例する(46項参照)から、集団線量は客観的健康損害の指標として有用である。実効線量当量 H_E を受ける N 人から成る被曝集団の客観的健康損害は次式で与えられる：

$$G_H = NRH_E$$

その線源からの実効線量当量に関する人口スペクトルが定義できるならば、客観的健康損害は次のようになる：

$$G_H = \int_0^{\infty} RH_E N(H_E) dH_E = RS_E$$

ここで、基本となる仮定は、単位実効線量当量当たりの全身照射の総リスク R は、 $N(H_E)$ が零でないすべての H_E の値について一定ということである。

集団線量率と集団線量預託

(53) ある場合には、集団の被曝は、ある期間にわたり時間的に変化する線量率で与えられる。このような場合、実効線量当量率と集団の人数との荷重積として集団線量率 \dot{S}_E を定義すると便利である：

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

総集団線量率は、考察対象としている集団の中で、その線源からある線量率で照射を受けているすべての個人を含めることにより得られ、時間の関数である。

(54) ある期間にわたる集団の総被曝の尺度として、集団線量預託という量が用いられる。ある与えられた事象、決定、あるいは行為による集団線量預

(22)

託 S_E^c は、その事象、決定、あるいは有限の行為によって引き起こされる、時間の関数としての集団線量率 $\dot{S}_E(t)$ の無限時間積分と定義される。すなわち、

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

したがって集団線量預託は、ある線源あるいは行為からの総客観的健康損害の尺度となる。

不完全集団線量預託

(55) ときに、ある放射線防護の選択肢では、ある有限の期間、いくつかの核種を隔離し(最終的には人々がそれに被曝することになるのであるが)、その後は、これらの核種は環境にもどって、滞留しなかった場合と同様に拡散すると仮定する。すると、ある与えられた隔離期間 τ に関して、実際に預託される集団線量は次式で与えられる。

$$S_E^c \int_{\tau}^{\infty} \dot{S}_E(t) dt$$

放射線防護の二つの選択肢 A と B の集団線量預託の差は、62 項、63 項で示すように最適化の分析に直接関連する量であり、次のようになる：

$$\Delta S_E^c = \int_{\tau_A}^{\infty} \dot{S}_E(t) dt - \int_{\tau_B}^{\infty} \dot{S}_E(t) dt = \int_{\tau_A}^{\tau_B} \dot{S}_E(t) dt$$

$$\Delta S_E^c = \int_0^{\tau_B} \dot{S}_E(t) dt - \int_0^{\tau_A} \dot{S}_E(t) dt$$

これら二つの型の積分は、この報告書において不完全集団線量預託 S_E^c とよばれる。

集団線量と損害のその他の成分

(56) 集団線量は、リスクの増分と線量の増分との間に比例関係を仮定することができる線量範囲内で客観的健康損害と関連をもつものであるが、これが損害のその他の成分を適切に記述することは期待されない。そのため、損害の算定と意志決定の過程において、国家当局は、もし必要ならば、集団線量によって得られる情報以上の情報を必要とするかもしれない。

(57) 放射線防護のレベルが変わると、集団線量の値が変わるだけでなく、個人線量の分布も変わることがありうる。客観的健康損害、したがって集団線量のみに基づいた最適化では、低レベルの個人線量当量を受ける大きな集団からの集団線量が、より大きく寄与する。しかし、ある特定の場合には、監督官庁は、損害の他の成分に特別な重要性をもたせて、線量が認定限度に近いかもしれないような比較的高線量の被曝をする一部の人々の小集団に特別な注意を払うかもしれない。この場合、監督官庁からみたよりよい放射線防護とは、特定の個人線量をさらに減少させることにより達成されるかもしれないが、最適な防護のレベルは、客観的健康損害のみを用いる場合よりきびしくなることがある。集団線量と個人線量の両方を考慮に入れた損害の費用を査定するための定式化を 25 項、26 項および 87 項に示した。

(58) この報告書の中で示した放射線防護の最適化のための費用-便益分析の使用に関する代数的および数値的な例では、客観的健康損害だけを考察することとし、これは集団線量預託に比例するものとする。

費用-便益分析の使用

一般的概念

(59) 委員会は、合理的に達成できるかぎり低くという表現は、放射線防護の最適レベルを確立する費用-便益分析の手法によって解釈することができると結論し、*ICRP Publication 26*²⁹⁾において、そのような分析を実行する簡単な方法を定めた。委員会によって勧告された費用-便益分析手法は、放射線防護の最適レベルを確立するために費用のバランスをとることを含んでいる。*ICRP Publication 26*²⁹⁾で使われている数学的表現では、電離放射線がかかわるある行為の導入による正味の便益 Bは、粗便益から放射線防護の費用およびその他の損害の費用を含むその行為の費用を差し引いたものである。これは次式で表現できる：

(24)

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

ここで、

B はある行為を導入することの正味の便益；

V はそのような行為の導入の粗便益；

P は放射線防護の費用を除いたその行為の基礎生産費用；

X はある選ばれた放射線防護レベルを達成するための費用；

Y はその選ばれた放射線防護レベルでのその行為による損害の費用である。

(60) 委員会によって勧告された費用-便益分析において、便益とは、特定のグループまたは個人が受けるものだけでなく、社会にとっての便益のすべてを含むものとする。費用とは、金銭的費用および人間の健康または環境に対するいかなる損傷も含んだ、ある操業のすべてのマイナス面の総合計であると考える (ICRP Publication 26²⁹) 16 項を参照)。費用と便益、とくに便益を決定し、この両者を共通な項で表現するためには、経済理論の適用が必要とされる。しかしながら、この報告書は、人々が便益を個人的に値づけることの効果のような、より複雑な面はどれも含めることを意図していない。考慮しているほとんどの状況の場合、便益の変化は、損害の性質の変化ではなくむしろ損害の大きさの変化の結果であるから、この簡略化は通常は適切であろう。委員会によって提案された定式化は、必要と思われる場合にはそのような面を含ませることができるようになっている。この観点からの費用と便益との定量化は、実際には難しさがときにはあるであろうが、その原則は重大なものであるので、委員会が勧告したのである。

(61) 59 項に示された一般式の諸項は、放射線防護レベルだけでなく、その行為の生産物の生産高のレベルのような、その他の変数にも依存する。しかしながら、ここで示されている方法は、行為そのものの最適化ではなく、その行為の放射線防護の最適化のためだけに費用-便益分析の手法を利用しよう

とするものである。放射線防護は、通常それらの他の変数とは独立であるから、提示された手法は、放射線防護の最適レベルの探索にかぎられるであろう。

(62) *ICRP Publication 26*²⁹⁾ に示されているように、放射線防護の最適レベルは、その行為の導入の正味の便益を最大にすることによって得られる。集団線量 S が適切な独立変数であると仮定すると、次式を満足するときに便益の最大値が得られる：

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

ある与えられた行為について V と P とは S が変化しても一定であると考えて、*ICRP Publication 26*²⁹⁾ は、最適化の条件は、単位集団線量当たりの防護費用の増加分と単位集団線量当たりの損害の減少分とがつりあう値 S_0 のときに満たされることを示している。

すなわち、

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

(63) 最適化の解を得るために上述の手法を用いるので、最適化の手法を微分費用-便益分析とよぶようになった。この式で決まる被曝のレベルは、放射線防護の費用の限界増加分と損害の費用の限界減少分とが正確につりあいがとれている値である。多くの場合、費用は連続変数ではなく、代替の放射線防護の選択肢をとると費用はある値だけ増加する。この場合、方程式は次式のように近似することができよう。

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

ここで Δ は変数の増加の変化分を表す。代替手段の数が有限であるときでも、すべての達成しうる選択肢を考慮に入れなければならない。というのは中間の選択肢を勘定に入れることを怠ると、ときに間違った結果を導くことになるからである。

(26)

(64) 一方、費用-効果分析に基づく意志決定の手順はもっと簡単であって、費用-便益分析に基づく最適化方法と誤解すべきではない。費用-効果分析は、変数が独立に変動することを回避するものであり、ある決まった資材から得ることのできる最も効果的な防護を決定するため、あるいは、ある与えられたレベルの被曝達成のための最も安価な防護を決定するためにのみ用いることができよう。特定の線量減少が要求されるとき、あるいは、放射線防護のために使うことのできる金額が決まっているときに、費用-効果分析が実行される。この場合、正味の便益 B は、 Y を一定にして X を変化させ、または、 X を一定にして Y を変化させることにより、最大とする。したがって、費用-効果分析が決定できるのは、ある特定の被曝の減少を達成するための最も費用のかからない方法、あるいは、決まった費用で達成することができる被曝の最大の減少だけであり、この報告書に示されているわく組のもとでの放射線防護の最適化はできない。したがって、この型の分析は、厳密には放射線防護の正式な最適化のために委員会が勧告した分析ではない。しかしながら、費用-効果分析は、いくつかある選択肢のうちのあるものを簡単な手法であらかじめふるいわけのために使えるかもしれないことは注目すべきである。そこで、ある場合には、費用-効果分析は、正式な最適化分析に先だって行われ、またこれを簡略化できるであろう。

(65) 放射線防護の費用 X も損害の費用 Y も防護レベルによって変わり、その防護レベルは代表的な防護パラメータ ω によって特徴づけることができる。防護パラメータの例には遮蔽の厚さ、換気流量率および、被曝時間のような作業の特徴がある。最適化の最終目標は、これらのパラメータの(最適な)値 ω_0 を決定することである。 ω と S とは互いに関係があるので、多くの場合、独立変数として S よりもむしろ ω を用いて微分費用-便益分析を行う方が技術的に便利である。

(66) 放射線防護の最適化は、一般的には、放射線防護の費用 X と損害の

費用 Y の最良の組合せを、 ω の関数として $(X+Y)$ の和を最小にすることすなわち正味の便益が最大になるようにすることにより、選択することに限定できる。すでに示したように、この過程は、多くの行為においては、 V および P が防護パラメータとは独立であるという仮定のもとで行われる。しかし、粗便益 V および生産費用 P が防護に依存することが認められているような特別な場合があり、これらのいくつかはこの報告書で簡単に議論することとする(182 項, 186 項および 198 項参照)。

(67) $(X+Y)$ を最小にすることは、いくつかの拘束のもとで実行されなければならない。その分析は、いくつかの放射線防護パラメータの変動を考慮に入れ、これらのパラメータの変化によって X および Y の両方がどう変わるかを算定すべきである。一方、線量限度(あるいは、一つの行為について天井値として監督官庁が割当てた線量限度の一部)を尊重する必要から、 X および Y の値の範囲が限定されることがある。それ以外の制限、たとえば、放射線防護のために資材を使用するうえでの制限を考慮に入れなくてはならないかもしれない(69 項参照)。

(68) それゆえに、放射線防護レベルの最適化は、公式には次のように、同時に解が与えられなければならない一連の数学的な表現によって表すことができる。

(i) $U = X + Y = \text{最小}$

ここで、 U は最適化の手法の最終結果を表し、通常は目的 (objective) 関数 (これは操業の目的 (object) を表すことを意味していて、主体的 (subjective) 関数の反対のものを意味しているのではない) とよばれている。これはまた、“一次設計方程式”あるいは、“最適化関数”ともよばれている；

X は放射線防護の費用；

Y は損害の費用

(28)

である。

$$(ii) \quad X = X(\omega)$$

$$Y = Y(\omega)$$

$$\text{あるいは } \Psi[X(\omega), Y(\omega)] = 0$$

ここで、一対の方程式 $X(\omega)$ および $Y(\omega)$ は、一般的な関数 Ψ のパラメトリックな型を表し、放射線防護パラメータ ω の関数である。ある場合には、 ω (および $X(\omega)$ と $Y(\omega)$) は連続かもしれないし、一方、ある場合には不連続の値しかとることができないことに注意すべきである。

(ii) の各式は、目的関数の変数の間の相互関係であるが、これらは通常は拘束関数とよばれる。 Ψ にはまた、“均等拘束”および“補助設計方程式”という名がある。これらの関数は、一般には、物理学の法則から、あるいは損害の査定に関連してなされた決定から生ずる。用語上の混乱を避けるために述べておくが、線量限度が最適化の過程に対する拘束の一つであると委員会は指摘しているけれども、この制限は、拘束関数によっては実行できず、後述する拘束不等式によって実行される。多くの簡単な最適化の算定においては (計算機技術が用いられるなら複雑な場合を含めて)、 Ψ のパラメトリックな表現、たとえば $X(\omega)$ および $Y(\omega)$ のみが必要とされる。しかしながら、たとえば複雑に相互に関係し合った場合の解法のためにラグランジュ乗数が用いられるならば (116 項参照)、 Ψ の式を最適化の過程において導入しなければならない。

$$(iii) \quad H_z(\omega) \leq H_L$$

ここで、 $H_z(\omega)$ は、放射線防護レベル ω において個人 z が受ける個人の実効線量当量であり、 H_L は該当する線量限度である。この行為によって被曝する個人の数と同じ数の拘束不等式 (iii) があるべきである。これらの式は通常、制限式とよばれている。

(69) 放射線防護のために利用できる資材が制限因子であるときには、最

適化の算定を実行する場合実際にはもう一つの拘束を考慮に入れなければならないかもしれない。この制限式は、単純な場合には $X \leq X_L$ の形をとり、いくつかの補助システム l をもつ場合には、 $\sum_l X_l \leq X_L$ の形をとりうる。ここで X_L は放射線防護の目的に利用できる制限資材である。他の型の境界条件を考慮することが必要なこともありうる。この例としては次のようなものがある：(i) 集団線量預託の制限（たとえば、現在および将来の行為に起因する将来の個人線量がある適切な限度を超えないことを確実にするための）；および、(ii) 防護パラメータそのものの範囲の物理的限度。

(70) 目的関数，拘束関数および制限式の正式で連立の解は，単純な場合には必要ないであろう。このような場合には，最適化の手法は，概念的には，線量制限式を満足することが確実な放射線防護レベルから始まり，それ以外の型の制限はないと仮定することができるかもしれない。そのときには，拘束関数中に目的関数を代入して，最適化の算定はその関数における最小値を同定することになる（102 項以降参照）。

費用の算定

(71) 放射線防護の最適化のために勧告された方法をうまく実行するには，二つの関連するパラメータの定量化が必要である。それは，放射線防護の費用 X と損害の費用 Y である。この定量化は，一貫性のあるディメンションを使って行われる必要がある。放射線防護費用は通常は金銭で表されるので，損害の費用も（不可欠ではないが）同じ量で算定するのが便利である。したがって，通貨を放射線防護および損害の両者の費用の算定に用いることができる。この報告書では，単位をドルで表した理想的なインフレのない通貨を，費用の算定の議論とこの報告書でとりあげた例示で用いる。

(72) 防護の費用の算定は，ふつうに使われている簡単な原価計算手法を用いて実施することができる。しかしながら，理論的には，この防護手法の導

(30)

入に関連する害に対する値を表す追加の項を、防護の粗費用に加えるべきであることに注意すべきである。被曝のレベルを減少させるためには、材料、エネルギー、マンパワーおよびその実施に必要なその他の資材を含む、改善された放射線防護方策が必要である。この追加の努力は、たとえば、必要な原材料およびエネルギーの生産、放射線防護システム用の構成部品の製造、およびそのシステムの設置など、放射線防護の増強につながる一連の活動の結果、必ずしも放射線に関係するとはかぎらない関連する害を通常伴う。たとえば、放射線源のための遮蔽壁を増強することによって、ある与えられた放射線場を減らすようにするという決定をしたとする。この決定は、放射線の損害を減らすことになるであろうが、一方、必要な遮蔽物の量を増加させる結果となろう。追加の材料（たとえばコンクリート）の取りつけは、遮蔽を製造し設置するために必要な活動に従事する人々に対する潜在的な害を生むことがあるかもしれない。それはたとえば、セメント用石灰石の採掘および粉砕に伴う職業上の害である。前に示したように、放射線の損害を変えようとする活動の結果生ずる放射線防護に伴う害の変化は、関連した放射線防護の限界費用を算定するさいに評価され、考慮に入れるべきである。しかしながら、これは、通常の有害な影響に基づく包括的なデータが欠如していることがおもな理由となって、非常に困難な挑戦である。この報告書で示される最適化の方法は、通常の害は放射線防護システムの直接の費用の中にすでに含まれているものと仮定している。

(73) 損害の費用の算定はさらに複雑である。損害の費用は、議論の余地があり、健康の価値(したがって生命の価値)、そしてある場合には健康に関係しない害の価値に関する、暗黙のあるいは明示された判断を含むことがある。損害は外延量(36項以降を参照)であるので、損害の費用 Y は、概念的には別々に取り扱うことのできる成分に分解することができる。

$$Y = Y_H + Y_1 + Y_2 \dots$$

ここで、 Y_H は損害のうちの客観的健康損害成分の費用、

$Y_1, Y_2 \dots$ はさまざまなその他の重要な損害の成分の費用、である。

(74) 客観的健康損害の査定は、実際の資材の費用と人間の健康に関する影響を同じディメンションに換算し、ひき続いてその基礎のうえでそれらを集計し、比較をすることを含むものとして考えることができる。この手法は、人間の生命、健康および安全に金銭的価値をもたせるという理由で、批判されてきた。しかしながら、この批判は次の実態を認識していない。すなわち、社会が利用できる資材は有限であること、および安全性の改善は通常これらの有限な資材のいくつかに手をつけることになり、この資材は、将来、他の目的に利用できなくなるということである。ある特定の安全性の改善に関するいかなる決定も、必然的に健康の相対的査定を含んでいる。費用-便益分析において、この相対的査定が典型的には金銭で行われるということは、ただ単に便利さの問題である。価値のいかなる他の共通の尺度でも、原則として、同様にうまくいくであろう。

(75) 損害のその他の成分の原価計算にはさらに議論の余地があることを理解しておくべきである。この報告書で示した例では、損害の他の成分は無視しているが(58項参照)、25項、26項および87項で個人線量の分布に関連した損害の他の成分の費用の査定についての定式化が導かれている。

(76) 大部分の投資の決定には費用と便益との時間的なさまざまな流れの分析が必要であり、そして、そのため、競合する計画の首尾一貫した比較をするための会計上の工夫がなされてきた。一般的には、費用と便益はある与えられた時間の間の1点あるいは数点で規格化され、このことは、広い範囲の決定を行うための入力として有用でありうる。放射線防護においては、損害の費用の減少は放射線防護の費用とは時間的に異なる分布を示すことがありうるので、これと同様な方法を用いることを考慮すべきである(101項参照)。会計手法の選択は、正式な最適化の結果に影響を及ぼす可能性があることに注意すべ

(32)

きである。

防護の費用

(77) 放射線防護の費用は、希望する放射線防護のレベルを得るために社会が行うすべての努力を包含したもので、通常は金銭で表される。これは、放射線防護システムの資本費用とその後の操業費用を組み合わせたものである。この組合せを適切に行うためには、いま考えている国で現在用いられている会計手法を用いるべきである。用いることのできる会計手法についてすべて述べることはこの報告書の範囲を超えているが、投資と費用-便益分析に一般に用いられている方法——これは、次に放射線防護の費用の算定にも用いられるものであるが——の概要を示す。放射線防護費用を算定するための三つの一般的な方法、すなわち(a)粗費用見積法、(b)現在価値評価法、および、(c)資本化費用手法あるいは年賦化費用見積法、を述べる。

粗費用見積法

(78) 粗費用の見積法は、投機が不確実であると見なされるときに民間部門の投資の分析にときに用いられる⁴⁷⁾。初期資本費用が X_0 、年間操業費用が \dot{X} である、ある施設の粗費用は、次のように与えられる：

$$X = X_0 + \dot{X}\tau$$

ここで、 τ は年で表したプラントの寿命である。この費用あるいはこれを各1年に分配した値は、正味の便益があるか否かを確認するために、時間 τ の期間に生ずる便益と直接比較することができる。このやり方は、代替の投資と比較できるように、正味あるいは平均の収益率のような規準によって、通常、補足される^{47,57)}。

(79) 粗費用見積法は、金銭的資産の時間的な変動を無視しており、それゆえ、資本費用が高く操業費用が低い放射線防護システムと、資本費用が低く操業費用が高い放射線防護システムとの区別をしない。しかし、この報告書に示された例では、放射線防護費用を決定するために粗費用見積法を用いている。

金銭の価値の時間的な変動を考慮に加えなければならないならば、経済学者と費用-便益分析の専門家が一般に用いているような、もっと精巧な会計手法を用いることが必要になるかもしれない。これらの手法には、費用と便益の連続した値をある特定の時点における単一の値に還元すること、あるいは、年賦化の方法を用いることが含まれる。

現在価値評価法

(80) 時間を考慮に入れるためには、割引の手法が一般に用いられる^{57,67)}。割引を実施するさいには、時間の経過につれて割引係数を費用に乗ずる。割引の使用にまつわる議論は複雑であって、損害の費用に対するこの手法の適用は101項で議論されている。ここでは、割引の手法を放射線防護システムにおける投資に関してのみ述べることにする。

(81) n 年目の費用に適用される割引係数 γ_n は次のように定義することができる⁶⁷⁾：

$$\gamma_n = \frac{1}{(1+\gamma)^n}$$

ここで、 γ は割引率である。将来の費用は、現在の費用よりも明らかに低く見積られる。したがって、割引は複利投資の逆数であると見なすべきである。ある与えられた現在の量 X_P が n 年間に利率 $\gamma\%$ で累積したとき、その将来の量が X_F であるならば、

$$X_P = \frac{X_F}{(1+\gamma)^n}$$

となる。

(82) 操業費用あるいは保守費用がそのプラントの寿命を通じて一定であると仮定できるときには、現在価値の計算は年金係数⁶⁷⁾を用いることにより簡略化できる。年金係数は時間経過を通じての割引係数の和であり、次のように定義される：

(34)

$$a_{nr} = \frac{(1+\gamma)^n - 1}{\gamma(1+\gamma)^n}$$

ここで、 a_{nr} は年金係数；

γ は金利あるいは割引率；および

n はこの計画の継続期間に相当する年数

である。

年金係数 a_{nr} は標準表でさがすことができる^{57,67)}。

資本化費用手法あるいは年賦化費用見積法

(83) 現在価値の計算に代わる一手段は、費用を年賦化する方法である。資本化費用手法は標準的な工学的費用分析手法で、放射線防護システムの購入、設置および操業の資金を供給するためある与えられた利率で借金し、毎年返済すると仮定する。ある時間の間に生じる便益を時刻零における単一の費用に換算するかわりに、年賦化では初期の（そして通常は大きな）資本費用を施設的设计寿命にわたって分散させて1年当たりの操業および保守の費用に直接加算できるようにする。この方法は、費用-便益分析への一つの入力情報として推奨されてきた⁵³⁾。費用を年賦化するための理論は実際のであって、通常は、ある計画の資金を供給するために借金をし、そして毎年毎年支払いをしながらその計画の期間を通じて返済（償却）する。

(84) 年賦化費用見積法からの毎年の支払いは、年金係数の逆数として定義される資本回収係数 C_{nr} ^{53,57)} を用いて計算できる：

$$C_{nr} = a_{nr}^{-1} = \frac{\gamma(1+\gamma)^n}{(1+\gamma)^n - 1}$$

この係数を初期資本費用に乗ざると、年賦化された費用が得られる。したがって、既知の現在価値 X_P (たとえば資本費用) を n 年間にわたって完済するのに必要な1年ごとの支払い X_a は次のようになる：

$$X_a = X_P \frac{\gamma(1+\gamma)^n}{(1+\gamma)^n - 1}$$

放射線損害の査定

一般的な定式化

(85) 査定のために考慮される全損害の成分には、客観的健康損害の成分とその他の成分、たとえば、個人個人の被曝レベルに対する不安および個人の線量当量が認定限度のかなりの部分を占めるときの管理者側の懸念（48項以降参照）などが含まれる。職業上の被曝の場合にはとくに、個人個人が該当する限度の小さい割合しか被曝していないと自動的に仮定されないであろうから、損害のその他の成分も損害の査定において考慮しなければならないかもしれない。このようなその他の成分を定量的な最適化に組み込むことは、つねに可能とはいえないであろう。

(86) 最適化の算定には、放射線による損害を費用で表現することが必要である。ある状況においては、損害の変化の個人的査定ではなくて真の費用を用いることが適切である。また、客観的健康損害は集団線量に比例するので、客観的健康損害の費用 Y_H も集団線量 S に比例すると結論するのが適切である（24項参照）。すなわち：

$$Y_H = \alpha S$$

ここで、 α は放射線防護の目的のために単位集団線量当たりの費用を表すディメンションを合わせた定数である。

これは自明な仮定ではない。健康損害とその費用との関係においては健康上の考察と経済的考察との区別をすべきである。

(87) 放射線損害のその他の成分を考慮に加えるときには、その費用は客観的健康損害の費用に加算されるべきである。25項で示されているように、損害のその他の成分を一括して考えたとき個人線量に依存するならば、その損害の費用は次の一般的な形で表すことができる：

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

(36)

ここで、 αS は、先に述べた客観的健康損害の費用；

β は、意志決定者によって決められた損害のこれらの他の成分の単位量当たりの金銭的費用；

f_j は、危険を嫌悪する態度および国家あるいは管理上の規則類に依存する個人線量の関数；

H_j は j 番目のグループの N_j 人の平均線量当量である。

Y の式の第 1 項は集団線量だけに関係している。第 2 項は、ある複雑な状況においては、客観的でない面および健康に関係のない損害を考慮するため、損害の付加的な成分に関連した費用を加えるのが望ましいであろうという可能性を反映している。

(88) この報告書に示されている (102 項以降参照) 最適化の手法では、86 項に示された Y の式と前述の 87 項で与えられた Y の一般式の両者を用いる。しかし、この報告書に示されている代数的例および数値例では、損害の費用は客観的健康損害 (したがって集団線量) に比例すると仮定して、86 項に示された Y の式だけを用いることにする。

(89) 先に論じたりスク係数 (42 項以降参照) により、放射線被曝の結果起こりうる最も重要な健康影響を予測することが可能になる。これらの係数は、集団線量預託の概念と組み合わせて、ある行為の結果として生じるがんおよび重大な遺伝的影響の数の統計的な予測を与えることができる。何らかの方法により、これらの確率的健康影響に対して金銭的な値を割り当てることのできるものとすれば、 α の値は容易に計算できる。たとえば、がんによる統計上の死の各々に対してある値を割り当てることのできるとしたならば、 α の値はこの値を全身照射の結果生ずる致死的ながんの誘発にあてはまるリスク係数で除した値と近似的に等しいであろう。この方法は、種々の異なった状況に一貫して適用できるために、かなり魅力がある。一方、統計上の死の査定は、安全性の決

定の中にはつねに含まれている。たとえ生命の価値をはっきりとした形では考慮に入れていないときでさえ、暗黙の査定はなされている。しかし、この手法には本質的に議論の余地があることを認めるべきである。放射線防護の場合には、この議論の中で考慮すべき重要な因子は、潜在的な健康影響の確率的な性格と、影響を受ける個人を特定できないという事実である。つまり、いかなる査定も統計上の生命についてのものであって、特定の個人についてのものではない。たとえば、不特定の個人の平均余命の変化の値は実際に算定されているにもかかわらず、特定の個人に対してはいかなる値も定めてはいないのである。

平均余命の変化の査定

(90) 長年の間、経済学者などは、資材の配分が平均余命を変えることができるような状況での意志決定の助けになるものとして、平均余命の査定方法を研究してきた。実際には、これらの資材は有限であり、もし、これらが健康と安全のいろいろな領域に、公正でかつ一貫した方法で配分されるならば、統計的な生命の査定は意志決定過程に有用な情報を提供できる。査定の方法は、文献で論評されており^{9,38,47,48}、そのうちのいくつかについて簡単な検討と批評を示すのが適切であると思われる。次のおもな査定法を以下の項に示す：すなわち、人的資本法、世論で暗黙に認められている査定法、法的補償法、保険からの類推法、および国民所得法である。個人的査定法についても簡単に議論する。これらの方法はいずれも、平均余命の変化の査定法として用いることができるが、これらはおもに個人ベースのものであり、社会に対する真の費用を表していない（保険からの類推法および国民所得法を例外として）かもしれないことを理解すべきである。

(91) 生命の査定においては、個人個人は、その潜在的生産力が早すぎる譲渡で失われるような種類の資本設備の一つの型と似ていると仮定する。生命の価値は、個人の将来の所得の損失を反映した生計の価値と等しいと置かれる。この手法は、直接の定量化が困難ではないために、過去に最も頻繁に用いられ

た方法の一つである。別に取り扱う同等のやり方では、国民所得の損失を考える(95項参照)。しかし、生命の査定観点から基礎的な経済的費用を考察することは、受け入れられないような結論を導くことになりうる。たとえば、そのことを固定的に容認すれば高齢の市民の早すぎる死亡は社会に正味の便益を与えるという結論を導くことになる。このような容認できない巻き添えを避けるために、正味の生産の尺度として正味の所得を用いた人的資本法に社会的費用に関する価値判断を通常はつけ加える。いずれにしても、これは、早すぎる死亡を避けるために費やされるべき絶対的な最低の金額として大いに検討されるべきである。

(92) 生命を明確に査定することは明らかに困難であるが、人間の生命が危険にさらされる領域への資材の配分に関する行政上の決定を通じて、社会はすでに幅広い範囲の暗黙の値を用いていることは明らかである。行政上の決定を行う人は、公衆の意見に答える人間としての彼等の役割の中で、生命の真の社会的価値を算出できるような意志決定を行うであろうという主張もありうる。このことは、彼らが社会の必要を完璧に知っていて、短期間の行政上便宜的な手段を採用することはないと仮定している。さらに、意志決定者に示される代替手段の範囲は、正確に評価された真の優先順位を反映したものであると仮定している。これらの仮定に基づいて、生命の査定値は、幅広い範囲の値をとってきた。実際には多様な理由で意志決定がなされるから、値が広い範囲をとることは、いろいろな決定の間の唯一共通分母が死亡率の低下である場合にはおそらく驚くにあたらないであろう。したがって、この方法から得られる定量的な結果は、条件づけと広汎な価値判断なしではきわめて限定されたものとなるであろう。

(93) 法廷の多くの機能の一つに傷害あるいは死亡の結果として支払うべき損害賠償額を算定することがあり、したがって、損害の裁定額の大きさが、補償に関する社会の価値を反映するという主張がありうる。早すぎる死亡の社

会的費用は、その傷害によって平均余命は変化しないが重大な傷害を受けた個人に対して支払われる補償金の額から推定できるかもしれない。この手段は、厳密には犠牲者の親族を償うだけのものである、死亡に関する裁定額を採用する代わりに仮定されてきた。この方法にはいくぶん魅力はあるが、いくつかの固有の欠点ももっている。すなわち、多くの場合、補償額は法廷外で同意されるので、データベースは信頼できないことがある。また、補償額は過失という不法行為を考慮してしばしば裁定される。すなわち、犠牲者の側の過失が証明されれば、補償額は減らされる。これは、法廷の裁定額から生命の価値について何らかの結論に到達する場合における重大な弱点である。

(94) もう一つの可能性は、ある活動に従事していることによる死亡確率を分析することである。リスクを補償するために支払われる生命保険料のデータを用いて、生命の暗黙の価値を計算することが可能である。しかし、保険料は死亡のリスクに直接の効果をもつものではなく、単に他の者を補償することにより死亡のもたらす結果を償うものにすぎない。ある人が生命保険に入らないという事実が、その人がその人自身の生命を評価していないということにはならないということが指摘されてきた。

(95) いくつかの国では、 α の暫定値、つまり統計上の生命の暫定値を決定するために別の手法が用いられてきた⁴⁰⁾。これは、平均的な労働者の死亡による国民所得の損失プラス健康および社会的対策の費用に基づいている。

(96) ある場合には、個人的査定のある形のを^{38,46,47,48,60)}、リスクのレベルのいかなる金銭化にも組み込むことは、概念的には可能であるように思われる。配分の決定が直接に健康と安全に影響する場合には、これらの査定は、リスクの減少のために個人が払う用意のある金額、あるいは逆に、リスクの増大のための補償として個人が受け入れるであろう金額のいずれかに、どのような形かで基づくべきである。原理的には、そのような個人的査定はサーベイの手法によって直接に測りうるが、サーベイの結果を解釈することが難しければ、

(40)

このような査定を達成するために間接的な方法がしばしば用いられる。

α の値

(97) 集団線量の推定値を金銭単位に都合よく変換できるように、単位集団線量の値を決めるための多くの試みが長年にわたってなされてきた。価格がある特定の年の価格に修正することをしない場合、これらの値は man Sv 当たりおよそ 1 000 US\$ からおよそ 100 000 US\$ の範囲にあった^{1,11,12,16,21,41,43,49,56,58,59,62,73}。長年にわたって異なる個人および組織がいろいろな方法を使って単位集団線量の異なる値を出したことを示している以外には、はっきりした結論は何もこの範囲からは得られなかった。さらに、ある個人および機関は、放射線作業者と一般住民について、および日常作業と異常事態について、それぞれ異なる値を用いることを提案している。しかし、幅広い範囲の値が提案された多くの場合に、これらの値は、この報告書で示されているものとは明らかに異なる概念的なわく組の中で導き出されたものであることをあげておくべきである。この報告書で与えられている数値的な例では、man Sv 当たり 10 000 から 20 000 \$ の範囲の α の値が用いられている。

分布の諸問題

(98) 放射線を扱う行為の多くは、たとえば、その行為から損害をこうむる人が、必ずしも同じ程度の便益を受けるとはかぎらないであろうというような、分布の問題を生じる。空間的な分布の問題は、その行為が行われているところ以外の地域にいる人々がその行為による費用の一部を負うときに生ずるのであろう。一方、その行為の行われた時期とは別な時期に生ずる費用は、時間的な分布をひき起こす。分布の問題にてらして費用の査定を調整する必要があると考えられることがあるかもしれない。異なる時期に、異なる集団に分布する費用、損害および便益の問題は、少なくとも道義的観点からは複雑である。また政治的および法律的な複雑さも存在するであろうから、ここでは一般的な指針しか与えることができない。

(99) 客観的健康損害は、最適化の過程で用いる場合、一つの行為から零でない線量を受けたすべての人々の集団線量に基づいている。たとえば、放射性物質が国境を越えて広がる場合には、最適化過程で用いられる α の値は、地域に関係なく、受けた全線量に適用されるべきである。しかし、 α の値は国ごとに異なるかもしれない。この問題の重要さは、もし、国際的に容認できるある最小の限度を α の値について選定して、集団線量のうちの国際的な成分に適用することができれば、減らすことができるであろう。いずれにせよ、他の国々に適用されるべきの α の値は、発生源の国の中で適用される値よりも低い値であるべきではない。

(100) 費用と損害が異なる期間にわたり生ずることに関わる分布の問題は、放射線防護において頻繁に起こりそうである。とくに、ある行為が、将来の集団にも被曝をもたらすかもしれない長寿命放射性核種による環境汚染をひき起こすようなときにそうである。集団線量当量預託の概念は、時間積分の上限値は無量大であるから、このような場合の損害の計算に用いることができる。それにもかかわらず、55項に示されているように、不完全集団線量当量預託という量のある種の公式な最適化算定、たとえば、かぎられた期間通用する異なる放射線防護の政策および技術どうしを比較するような場合に用いることができる。

(101) 異なる時期の費用を比較する方法として割引手法（ディスカウント法）がしばしば用いられる。防護の費用の場合に比べて将来の損害の費用を割引する可能性にはさらに多くの議論の余地があり、また、損害の費用が続く期間は防護の費用の期間よりもしばしば非常に長いことが多い。損害の費用の割引手法を使うことは、この報告書で述べられている原則を変えはしないが、通常用いられるいろいろな割引手法を用いると、定量的な結果に非常に大きな変化をもたらす。したがって、いかなる形式であれ損害費用の割引を用いようとする国家当局は、このような使用の実際上の意味を注意深く考慮すべきであ

(42)

る^{10,13,73)}。

最適化のための定量的手法

理想的な最適化

(102) 理想的な最適化の場合には、ただ一つの被曝集団とただ一つの放射線防護パラメータ（あるいは一組の簡単な放射線防護の選択肢）だけを考慮することができる。集団線量当量預託 S と個人の年実効線量当量の最大値 H^* との間の定量的関係も次のように仮定することができる：

$$H^* = F(S)$$

(103) 損害の費用の式 (86, 87 項参照) を 68 項で示された目的関数に代入することにより、この関数は、個人線量の分布に関連した損害の成分が考慮に入っているかいないかによって、次のいずれかで表すことができる：

$$U = X(\omega) + aS(\omega) = \text{最小}$$

あるいは

$$U = X(\omega) + aS(\omega) + \beta \sum_j N_j f_j [H_j(\omega)] = \text{最小}$$

(104) 先に定義した記号を用いて、この理想的な場合の最適化は、したがって、次の一組の条件で表される：

$$(i) \quad X(\omega) + aS(\omega) = \text{最小}$$

または、

$$X(\omega) + aS(\omega) + \beta \sum_j N_j f_j [H_j(\omega)] = \text{最小}$$

$$(ii) \quad X = X(\omega)$$

$$S = S(\omega)$$

および

$$(iii) \quad F(S) \leq H_L$$

(105) 目的関数の最小値は、微分してその結果を零と置くことによって求

めることができる。用いられた目的関数によって、結果は次のようになる：

$$\frac{dX}{d\omega} \Big|_{\omega_0} = -\alpha \frac{dS}{d\omega} \Big|_{\omega_0}$$

あるいは

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

ここで ω_0 は最適化された防護パラメータである。

(106) 最適化された放射線防護パラメータ ω_0 に相当する集団線量の値 S_0 は、制限式 $F(S_0) \leq H_L$ を満たさなければならない。したがって、この理想的な場合には、最適化は、 $F(S_0) \leq H_L$ の条件で、上の微分方程式の一つを満たすような集団線量預託の値 S_0 において達成される。つまり、 $F(S_0) \leq H_L$ ならば、 S_0 の値は $S_0 \leq F^{-1}(H_L)$ を満たす値として選ばなければならない。この手法は、個人線量と集団線量との間に一定不変の関係を仮定している（作業行為は変えることができず、設計の変更のみが実施可能な場合に、そのようになる）。しかし、関数 F を変形することによって線量限度の制限を達成できる場合もありうる（129 項および A-11 項参照）。

(107) ある種の最適化の算定では、唯一の、連続的に変化する放射線防護パラメータを同定することは難しいが、必ずしも単一のパラメータでは規定されるとはかぎらない異なる防護選択肢は得られる。防護のレベルの変化は、 X および S ともに連続変数ではなく不連続な値としてある選択肢から別の選択肢に変わったときの X および S の有限な増加分によって表される。防護レベル A からもっと費用のかかる防護レベル B へ移る決定は、次のようなときに行われるであろう：

$$-\frac{{}_B X - {}_A X}{{}_B S_E^c - {}_A S_E^c} \leq \alpha$$

あるいは

(44)

$$-\frac{{}_B X - {}_A X}{{}_B S_E^c - {}_A S_E^c} \leq \alpha + \beta \sum_j \frac{{}_B N_j f_j({}_B H_j) - {}_A N_j f_j({}_A H_j)}{({}_B S_E^c - {}_A S_E^c)_j}$$

ここで下つきの文字 A および B は、それぞれの変数が対応する選択肢 A, B に関係するものであることを示す。

(108) このような場合には、最適化は、繰返しの過程により達成することができる。すなわち、放射線防護をだんだんと高いレベルにして検討し、上の方程式が要求する値のところで止めることにより得られる。通常は、最も高い被曝をする個人について十分な放射線防護となる選択肢を用いて分析を始めることにより、選定された線量天井値を守ることができる。多くの代替手段が使用可能であり、費用の高くなる順に並べられると、最適な代替手段の探索を止める決定をする前に（というのは上述の項で示された条件があてはまらないから）、それらの条件が放射線防護のレベルのありうるその他の変化にあてはまらないことを確かめておくことと便利であろう。したがって、最適条件は、他の選択肢へのいかなる急転も、107 項の方程式に従わないような条件である。客観的健康損害だけを考慮に入れるときには、最適レベルはグラフを用いた簡単な方法によって容易に見出すことができる。まず、その費用 X および集団線量予測 S_E^c の値によって定義されるすべての代替手段の可能性をふつうの軸をもった $X-S_E^c$ 平面上にプロットしなければならない。次に $-\alpha$ に等しい傾きをもつ直線を左下から右上へ移動させなければならない。この直線と最初に接した点が最適解である。最適な選択肢を確定するもう一つの簡単な方法は、各々の選択肢について防護と損害の両者の費用の和 $X+Y$ を算出し、それから、最小の和を与える選択肢を選ぶ方法である。

複合したシステムの最適化

一般的な定式化

(109) 放射線防護システムの複数の成分が同時に最適化されなければならず、かつ各々の成分が複数の被曝集団の放射線防護に寄与するときには、最適

化算定を単純な微分費用-便益分析によって行うことはまれである。拘束関数および制限式によって拘束される目的関数の解はもっと複雑になる。この章ではこの一般的な場合について議論する。

(110) ある与えられた線源あるいは行為からの被曝が、それぞれが適切な放射線防護手段を必要とする複数のサブシステム l に起因したのから構成されると見なすことができれば、最適化は次の目的関数のどれかを意味する：

$$\sum_l (X_l + \alpha S_l) = \text{最小}$$

あるいは、

$$\sum_l [X_l + \alpha S_l + \beta \sum_j N_j f_j(H_{jl})] = \text{最小}$$

ここで、 X_l はサブシステム l の放射線防護の費用；

S_l はサブシステム l から生じる集団線量預託；

H_{jl} は j 番目のグループの N_j 人の個人のサブシステム l からの平均線量当量

である。

独立したサブシステム

(111) サブシステムがそれぞれ独立であれば、複合システムのための最適化の手法は、理想的な場合よりも難しいということはない。サブシステムのうちの一つで行われる管理が他のシステムからの集団線量預託に影響しないという意味でサブシステム l が独立な場合には、拘束関数は容易に設定することができる⁵⁾。

(112) この場合、一般的な目的関数を各々の S_l について微分し、得られた各関数を零とおくことにより、 $l=1,2,\dots$ について以下のような方程式の組が得られる：

$$\frac{\partial X_l}{\partial S_l} + \alpha = 0$$

(46)

あるいは

$$\frac{\partial X_{\ell}}{\partial S_{\ell}} + \alpha + \beta \sum_j N_j \frac{\partial f_j(H_{j\ell})}{\partial S_{\ell}} = 0$$

これは、サブシステムが互いに独立なため、 $\ell' \neq \ell$ であるようなすべての $X_{\ell'}$, $S_{\ell'}$ について、 S_{ℓ} に関する導関数は零に等しくなるからである。すなわち、

$$\frac{\partial X_{\ell'}}{\partial S_{\ell}} = 0 \quad \frac{\partial S_{\ell'}}{\partial S_{\ell}} = 0$$

(113) 個人の年線量は認定限度を超えるべきではないので、一組の制限式が得られる：

$$\sum_{\ell} F_{\ell}(S_{\ell}) \leq H_L$$

両方の式の組から、最適化は、各々の独立したサブシステムを別々に最適化することにより得られることになる⁵⁾。同様に、ある与えられた敷地に存在する複数の施設からの複合した被曝についての最適化は、独立条件があてはまるとすれば、各々の施設における放射線防護を別々に最適化することにより達成することができる。

相互関係のあるサブシステム

(114) サブシステムが互いに独立でない場合には、最適化の手法は非常に複雑になりうる。最適化されるべき放射線防護は概念的にサブシステム $\ell=1, 2, \dots, n$ に分割することができ、一方、被曝グループは、サブグループ $j=1, 2, \dots, k$ から成ると考えることができる。あるサブグループ j におけるあるサブシステム ℓ に起因する集団線量預託を $S_{\ell,j}$ とする。あるサブシステム ℓ に起因するあるサブグループ j における最大年実効線量当量を $H_{\ell,j}^*$ と表す。このサブシステムおよびサブグループは、 $S_{\ell,j}$ と $H_{\ell,j}^*$ との間には次のように規定される関係があるように選定されなければならない。すなわち、

$$H_{\ell,j}^* = F_{\ell,j}(S_{\ell,j})$$

極端な場合、各サブグループは一人の個人に対応するかもしれない。

(115) 前項で述べられた条件のもとでは、最適化は次の関係の組合せで定式化される：

(i) 目的関数

$$\sum_{\ell} (X_{\ell} + \alpha \sum_j S_{\ell,j}) = \text{最小}$$

あるいは

$$\sum_{\ell} [X_{\ell} + \alpha \sum_j S_{\ell,j} + \beta \sum_j N_{j,f_j}(H_{\ell,j})] = \text{最小}$$

(ii) 拘束関数

$$S_{\ell,j} = \Psi_{\ell,j}(X_{\ell})$$

(iii) 制限式

$$\sum_j F_{\ell,j}(S_{\ell,j}) \leq H_L$$

(116) サブシステムおよびサブグループの数が少ないならば、解は分析的に(たとえば、ラグランジュ乗数を用いて)得ることができる³⁹⁾。しかしながら、ほとんどの場合に、変数の数はたいへん多く、もっと高度の計算技術が要求されるであろう⁶³⁾。普遍的な最適化技術というべきものはないので、ある特定の方法の選択は、考えているシステムと用いることのできる計算手段に依存すべきものである。ある場合には、システムは非線形方程式と非線形プログラミングを用いてはじめてモデル化でき、あるいは動力的計画法が必要とされるかもしれない。これらの最適化手法は、計画工学⁶³⁾および経済計画において現在さまざまな度合で用いられている。方法の選択および方法の複雑さは、考えているシステムに依存し、一般的な指針を与えることはできない。

(117) これまで述べてきた方法は、線量を合理的に達成できるかぎり低く保つための放射線防護の最適化への費用-便益分析の使用に関し、委員会が勧告する定式的な方法を、客観的考察と主観的考察とをできるだけ区別しながら述べたものである。これらの方法を適用して得られる放射線防護のレベルは、費用-便益分析技術のわく組の中では、放射線防護に関するかぎり理論的には最適

(48)

である。しかし、実際上は、放射線防護の実際のレベルに関する最終決定には、意志決定者によるいっそうの考慮が必要であるかもしれない、必ずしも放射線防護には関連しない他の判断規準およびパラメータにとくに注目する必要があるかもしれない。この報告書で記した方法のほかにも、放射線防護において意志決定に用いることができる諸方法がある（4項、5項および9項以降参照）⁴⁵⁾。

C. 放射線防護の最適化における費用-便益分析の 実際の利用

(118) B章で展開した費用-便益手法は、設計者、施設経営者、および意志決定者のための分析的手段であり、放射線防護の最適化に使うことができる。これらは、個人の線量限度を守ることを保証することのできる放射線防護システムだけでなく、線量を合理的に達成できるかぎり低く保つための設計条件と操業条件にも関係させるべきである。前章で導入した方法はこの目的を意図したものであるけれども、それらの実際の利用には、いくつかの困難が伴うであろう。放射線防護の最適化のための費用-便益分析手法の実際の利用をこの章で議論し、いくつかの代数的および数値的な例を示す。

(119) この章に例示されている分析手法は、放射線防護のレベルの決定にかかわる複雑な過程の一部にすぎない。これらの例は、放射線防護の最終的なレベルについての意志決定の過程に関連したすべての問題を含んでいるわけではなく、多くの理由から、そのレベルは、費用-便益分析の結果得られる最適値よりもさらに控えめでありうる。さらに、これらの例は、パラメータが不確かであり直観しか使えないであろうような場合を無視する。操業中の防護に影響する単純な決定が、通例はすぐれた工学的判断という単純な根拠から行われるときには、直観的な最適化が暗黙のうちに適用されている。

設計による放射線防護の最適化

(120) 設計によって放射線防護を最適化するときには、多くの変数を考えるべきである。そのうちのいくつかは設計のさいの変数であり、制御可能なものも不可能なものもある。前者は、設計者がいつでも調整できるパラメータ、

すなわち要求される放射線防護のレベルになるように概念的な設計が可能な被曝制御パラメータ（遮蔽の厚さと換気流量率のような）である。後者は、はじめから修正できない量である。このよくある例としては、遮蔽材の固有の特性（これは、形式的には材料や組成を選ぶことによって制御することができるが、多くの場合実際には変えることはできない）および、換気している外気の温度がある。また設計者は、設計で条件を決める量（たとえば換気用送風機の電圧、線源の放射能）および、放射線防護システムに関連した環境の特性といった外的な条件をも取り扱う。最後に、時間によって変動するかもしれないパラメータもある。この章の中で示す設計の最適化の例は、制御可能な設計上の変数の最適化のみを扱う。他のすべての変数は設計の条件であり、最適化の過程の対象ではないと仮定する。

(121) 電離放射線を伴う行為は、一般に人々の被曝を制御するための多重システムをもった複雑な施設内で行われることが要求されるかもしれない。このような場合には、放射線防護の総合的な設計の最適化はかなり複雑な過程となりうる。それらのシステムが独立でない場合、または被曝を制御するパラメータが、最大個人線量と最大集団線量の両方に同じ割合で影響を与えるのではないときには、さらに複雑になるであろう。しかし多くの場合、ただ一つの制御装置を使うか、または、個人線量にも集団線量にも同じ比率で影響を与える制御パラメータに頼っている独立なシステムを使うことによって、放射線防護は達成される。この章では、このような単純化された例のみを示すことにするが、最適化の過程を通じて個人線量の分布が変化すると仮定される、単純で形式的な例も示す（付録 A, A-11 項参照）。

(122) ただ一つの制御の選択肢を考える単純な場合においても、次のような二段階の最適化手法を使うべきである。すなわち、被曝を制御するための最も費用-効果の高い方法についての決定をまず第一に行い、その後、選ばれた制御パラメータを最適化すべきである。しかし、この章で示す例については、

制御パラメータは、なんら特別の予備分析なしに選ばれたものであることに注意すべきである。

(123) 放射線防護は、患者、作業者および一般公衆の被曝を制御するための工学的な特徴を利用して行う。最適化の算定においては、放射線防護のおもな対象としたグループと、その他の被曝する人々との間の相互作用に適切な注意を払うべきである。たとえば、環境への放出を減少させることは、主として公衆の便益にはなるであろうが、職業上の被曝を増加させるかもしれないし、またその逆もありうる。そのようなことは、この章の例示では考慮に入っていない。

(124) 最適化の算定における重要な因子は、集団線量を決定するために使われる線量評価モデルである。個人線量の制限を確実にするための一般的なやり方は、控えめな線量評価モデルを使うことであるが、最適化の算定の場合には、計算に不当な偏りが生じないように、現実的なモデルを使うべきである。この章で示した例では、線量評価モデルはできるかぎり現実的であるように意図されている。

(125) これまでの諸項で示された制約の範囲内で、この章では、体外被曝と体内汚染に対する防護のシステム、および、環境中への放射性物質の放出を制御するためのシステムの設計例をいくつか示す。代数的な取扱いはこの章の付録に示し、またいくつかの単純化した数値例は補遺に示す。それらの例をあげたおもな目的は、B章で提示した最適化の方法は実行可能であることを示すためである。設計の最適化のすべての実際的な解と難しさを考察することも、放射線防護のための特定の手法を勧告することも意図しているのではない。例示から得られる最適化されたパラメータは、例として用いることのみを意図したものであって、委員会によって勧告されたものであると解釈すべきではないことを強調しておく。さらに、数値例は一例としての値にすぎず、したがってその結果は、例の中で述べられている状況を代表するものと解釈すべきではな

い。

体外照射に対する防護を意図したシステムによる放射線防護の最適化の例

(126) 体外照射に対する被曝を制御するための方策としては次のものがある：

- (a) 放射線源の特性（たとえばその放射能）の修正；
- (b) 線源と被曝する人との間の距離の変更；
- (c) 被曝時間を修正するというような作業手順；
- (d) 放射線ビームの遮蔽。

したがって、体外照射を受ける人々の集団線量および放射線防護の費用は、たとえば線源の放射能と線源からの距離、遮蔽の厚さと減衰係数、被曝する人の居在時間などのような関連する制御パラメータと関係づけられるであろう。原理的には、これらのパラメータの一つ一つは連続的に変えることができ、値の最適な組合せを決定することができる。しかし実際には、これらのパラメータのいくつかは、はじめから修正することができず、少なくとも容易には変えられない。

(127) 放射線源の放射能は、通常は制御できないパラメータであるが、ときには最適化の過程の対象となる場合もある。たとえば、原子炉内の一次系およびその他の補助系の放射能は除染によって制御することができ、それに関連した制御パラメータは最適化されるであろう。放射線源から被曝する個人までの距離は、変更することが難しいもう一つのパラメータであるが、原理的にはそれも最適化される。実際には、遮蔽の厚さと作業行為の特徴が、体外放射線が存在するときの放射線防護を最適化するために通常選ばれるおもな制御パラメータであると思われる。

簡単な遮蔽の設計による放射線防護の最適化の例

(128) 遮蔽された放射線源に対する防護の最適化の手法を、例として提示

する⁴⁵⁾。防護の費用と損害の両者に影響するどのような変数を用いてもよいが(たとえば遮蔽によって防護される人数のように作業行為に関係する任意の変数(160項以降参照)),ここでは、簡単な平板遮蔽の厚さを、唯一の制御パラメータとして用いることにする。この例のためには、制限式を適用する代わりに、被照射体がつねに遮蔽体の表面に接触しているというような控えめな条件のもとでも、最小の厚さの遮蔽が個人線量の認定限度を守ることを確実にするのに十分でなければならないという、設計の理想化された条件を仮定する。こうして、最高の線量を受けると考えられる想像上の個人が限度内にあることを保証することによって、自動的にこの集団中のいかなる個人も限度を超えないことを保証するような最初の(最小の)遮蔽の厚さから、最適化の過程がはじまる。この最初の設計条件はきびしすぎるかもしれない。もし最適化の過程の結果として得られた設計上の線量率が、該当する認定線量限度から導かれた線量率の制限値をはるかに下回る(たとえば職業上の被曝について $25 \mu\text{Sv h}^{-1}$ をはるかに下回る)ならば、その他の考察は必要はない。これに反して、結果として得られた線量率が制限条件に近いならば、その結果は偏っている可能性があるので最適化の過程に制限式を導入すべきである。制限式は、この例の数学的定式化には含めない。

(129) 放射線場で被曝する作業者は、遮蔽体の表面において受ける可能性のある線量よりも実際には低い線量を受ける。ある場合には、実際の個人線量は、線量限度を十分下回る線量の範囲で、対数正規分布として表現できるということが示されている⁶⁹⁾。この分布が、どの特定の作業にも成り立つと仮定できるという根拠はないが、この例のためには、個人線量の平均値と最大値との間に一定の比が存在すると仮定することができる。また、遮蔽の厚さの最適化は、個人線量のレベルの変化をもたらすが、線量分布は変わらないと仮定することもできる。平均線量率と最大線量率との一定の比 ρ を、この例の中で基本的には使うが、個人線量分布の変動を仮定した形式的算定法も示されている(付

(54)

録 A, A-11 項参照)。

(130) 線量率と厚さとの間には単純な指数関数関係が成り立つことも仮定されるかもしれない。比 ρ が一定ならば、平均線量率 (および集団線量率) は遮蔽の厚さに関して指数関数的に変化する。したがって、86 項の式を使うと、損害の費用 Y は遮蔽の厚さに対して指数関数的な関係をもつと仮定しよう。代数的な定式化は付録 A の中で示されており、次の結果が得られている：

$$Y(w) = aNf_t\tau\rho\dot{H}_u e^{-\Gamma w}$$

ここで、 a は単位集団線量に割り当てられた費用を表すディメンションをもつた定数；

N は被曝する個人の数；

f_t は居在時間係数；

τ は施設の寿命；

ρ は平均線量率と最大線量率との一定の比；

\dot{H}_u は最初の最小厚さの遮蔽体の外側表面と接した位置にある仮想的な被照射体が受けるであろう最大実効線量当量率 (実際の遮蔽設計においては、 \dot{H}_u は、遮蔽の外側の着目している居在地点における最大線量当量率とすることができる) ——いかなる場合においても、

$$\dot{H}_u \leq \dot{H}_L$$

Γ は実効減衰係数；

w は遮蔽の厚さ、 $e^{-\Gamma w}$ は線量低減係数

である。

(131) 遮蔽の費用は、設置された遮蔽材料の費用と支持設備の費用を含む。この例のためには、操業費用は遮蔽の費用よりずっと低いと考えられるので無視できるであろう。したがって、最小の厚さから最適の厚さまでの範囲における遮蔽の費用 X_s は、次のように遮蔽材料の量に比例して変わると仮定してよい：

$$X_s = X_v V_s + X_I$$

ここで、 X_v は設置された遮蔽材料の単位体積当たりの費用；

V_s は遮蔽材料の体積；

X_I は、この例のために、厚さの変動が小さな範囲内では厚さには関係なく一定であると仮定された、支持設備の費用である。

(132) 遮蔽材料の体積は遮蔽の厚さに比例するので、直方体の平板遮蔽の費用は遮蔽の厚さと次のような直線関係がある：

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

ここで、 h は遮蔽の高さ；

l は遮蔽の長さ；

w は遮蔽の厚さ

である。

(133) いったん拘束関数が設定されると、この例に関する最適化された線量低減係数は、B章で紹介された手順に従って導き出すことができる。代数的公式は、付録Aに示されている。その結果、最適化された線量低減係数は単位遮蔽体積当たりの費用に正比例し、次のパラメータに反比例することがわかる：遮蔽の寿命 τ ； α の選定値；実効減衰係数 Γ ；最大実効線量当量率 \dot{H}_u ；居在係数 f_t ；単位遮蔽面積当たりの人数 N/hl ；そして平均個人線量と最大個人線量の比 ρ ；である。すなわち、

$$e^{-\Gamma w_0} = \frac{X_v h l}{\tau \alpha \Gamma \dot{H}_u f_t N \rho}$$

となる。その結果、最適化された追加の遮蔽の厚さ w_0 は、上述の式から導くことができる。こうして、最適化された遮蔽の厚さは、最初の厚さと追加された厚さととの和に等しくなる。

(134) 133項の公式に基づいた数値例は、補遺A₁に示されている。より複

雑な事例に関する最適化された低減係数の定式化は、付録 A で提示する。それらの例で得られる遮蔽の厚さは、異なる費用と便益をもたらすいくつかの異なる材料からできていたかもしれなかったことに注目すべきである。そして、それらの選択を、最適化の過程に先立って行われるべき費用-効果分析の一部としてではなく、最適化の過程の一部として考えることは、形式的には適切であったであろう。

体内照射に対する防護を意図したシステムによる放射線防護の最適化の例

(135) 空気汚染の存在する場所で作業する人々は、線源からの体外放射線だけでなく、体内に取り込まれた物質からの放射線にも被曝することになる。この空気中に分散した物質に起因する体外放射線による被曝は、一般的には線量預託にわずかな寄与をするだけなので、ときには無視してよい。放射性物質は主として空気中に分散している物質の吸入によって体内に取り込まれるので、空気中の浮遊放射性物質の濃度を制御することによって最適化を効果的に遂行することができる。

(136) 空気汚染の制御にはいくつかの放射線防護手法が使える。その例は、線源の隔離、空気浄化を含む換気、呼吸器および全身の放射線防護などである。最後の二つの手法は、基本的には作業手順と考えることができるので、この章では議論しない。

(137) ある与えられた発生源に由来する放射性物質による汚染の可能性があるとき、ふつう最初に行われる放射線防護の方法は、次のいずれかによって発生源を閉じ込めることである：(i) 物理的バリア（たとえばグローブボックス、ホットセル）によって放射性物質を閉じ込める静的隔離、または (ii) いくつかの空気動力学的システム（たとえば放射化学フード）によって閉じ込めを行う動的隔離。ある場合には、静的隔離と動的隔離の両方を合わせて使うこともできる（たとえば、負の圧力差で使用されるボックスとセル）。静的隔離

の費用は、ふつう物理的バリアからの漏洩率に依存し、概念的には定量化が可能である。動的隔離は、汚染する可能性のある場所へ空気が確実に流れ込むように、物理的バリアに圧力勾配をつくることによって、ふつう達成される。この制御パラメータは隔離境界にかかる圧力勾配で、開口部を通る空気の流れを維持するのに必要なエネルギーに関係する。動的隔離の費用は換気の費用(143項から145項を参照)と同じ根拠で算定できるであろう。静的封じ込めおよび動的封じ込めの両方からの漏洩率と、それによって生じる被曝との間の関係は非常に複雑で、前もって設定することができないので、あらかじめ最適設計することを難しくしている。しかし、隔離の最適化は、あとから見直すことによって達成できるであろう。

(138) 換気と空気浄化の最適化の例は、140項以降に示されている。これらの放射線防護手法は、他の放射線防護システムとは独立しているのも、それらは独立に最適化することができる。制御パラメータは空気流量率と除染効率で、両方とも個人線量と集団線量と同じ割合で影響すると仮定されている。

(139) ラドンとラドン娘核種による被曝の放射線防護を行う換気システムの最適化は付録でやや詳細に考察されている。その例は、放射線防護のもっと一般的な面とともに、最適化の基本的な方法の議論も含んでいる。ラドンの例で数学的に技巧を要するのは、最適化の過程ではなくて、ラドンとその娘核種自身による汚染の算定に関連する部分である。

換気と空気浄化の設計による放射線防護の最適化の例

(140) あるかぎられた空間が自然換気では空気の汚染を制御することができないとわかったならば、機械的な換気装置を導入すべきである。単純な換気システムは一般に、ある与えられた率でかぎられた環境の中に新鮮な清浄空気を送り込むことによって動作し、それによって空気中の放射性物質の濃度は下がり、放射線被曝も下がる。単純なワンスルーシステムでは、制御パラメータは空気流量率である。

(58)

(141) この章の目的には、単純な換気システムは、吸気フィルタ、送風機および換気ダクトを含むと仮定する。排気フィルタシステムは、換気システムの一部としてではなく、それ自体が気体状排出物中の放射性物質の放出を制限することを意図したシステムであると仮定してよい(「放射性物質の環境放出を制限するシステムによる放射線防護の最適化」、154 項以降参照)。

(142) かぎられた空間の中に留まっている人々が受ける集団線量、したがって損害の費用は、空気中の放射性物質の残留濃度に比例する。これに関連する定式化は、付録 B の B-1, B-2 項にあり、この濃度は空気流量率に逆比例することを示している。したがって、損害の費用は次のように換気流量率に逆比例する²⁰⁾：

$$Y = \alpha N f_i \tau F_d \frac{\dot{A}}{Q}$$

ここで、 α は単位集団線量に割り当てられた費用を表すディメンションをもつ定数；

N は被曝した個人の数；

f_i は居在時間係数；

τ は施設の寿命；

F_d は放射能濃度を線量率に変換する線量換算係数(すなわち、空気中の放射性物質の単位濃度当たりの、被曝した個人の受ける実効線量当量率)で、これは被曝した人の平均年齢に対応した平均値であると仮定される；

\dot{A} はかぎられた空間への放射性物質の一定の流入率；そして

Q は換気流量率

である。

(143) 換気の費用には、換気システムの費用、その運転費用およびその設置に関連する他の費用(たとえば、換気システムを設置するために必要となる

構造物の改造)を含む。この例では、運転費用がシステムの費用のおもな成分であると仮定する。ダクトがあまり長くなく、建物の改造が不必要ならば、この仮定は現実的であろう。一方、空気流量率の変更はシステムの費用を変えることがあるが、最適化の過程により流量率がわずかに変化するだけならば、その費用は、流量率に関しては実際には一定のままであろう。しかしある場合には、これらの条件はあてはまらない。たとえば鉱山においては、ダクトや換気坑は非常に長くなりうるし、換気システムを設置する費用は運転費用と比べて無視できなくなるかもしれない(補遺 D₁ 参照⁶⁴⁾)。一般に非常に低い流量率が使われる住居の中では、運転費用は通常は設置費用より低い。

(144) 換気の運転費用は、空気を循環させるため、そして必要なときには空気調節をするために要するエネルギーの費用を含み、ある場合には空気調節の費用が支配的となりうる。保守材料の費用と賃金のようなその他の運転費用の成分は、この例のためには、エネルギー費用に比べれば無視できると仮定する。層流(すなわち流線状の流れ)を伴った換気システムでは、圧力降下と流量率との間には直線関係がある。乱流(すなわち渦状の流れ)では、その関係は二次になる。送風機システムの換気坑において必要な力は、理論的には、(流れが層流であるか乱流であるかに応じて)流量率の2乗か3乗のいずれかに比例し、また効率にも比例する。効率はまた、流量率の関数である。実際には、関連するすべての要因が組み合わさった結果として、システムを循環する空気の単位質量当たり消費される電気エネルギーは、ある場合にはほぼ一定と仮定することができ、この例ではそう仮定することにする。いくつかの実際の換気システムで得られた値は、循環空気1立方メートル当たりの電気エネルギーで数キロジュールのオーダーである^{20,64)}。一方、ある与えられた質量の空気を調節するのに必要なエネルギーも空気流量に対して一定なので、必要とする全エネルギーは、運転中に換気システムによって動かされる空気の量に、ほぼ比例すると考えることができる。単位エネルギー当たりの電気料金は広い範囲にわ

(60)

たつて一定であり、また空気の総量は流量率に比例するので、この例のためには、換気システムの運転費用と空気流量率との間にはほぼ直線関係が存在すると大まかに仮定する。

(145) プラント寿命の間運転費用が支配的であると仮定し、またさきに仮定した諸条件があてはまるならば、換気の費用 X_v は次のようになる；

$$X_v = abf\tau Q$$

ここで、 Q は換気流量率；

a および b はそれぞれ、単位電気エネルギー当たりの電気料金および単位体積の空気を調節し循環させるために消費されるエネルギーを表す定数；

τ はシステムの寿命；

f はシステムが作動する時間の割合を表す係数

である。システムの運転中ずっとそこに人がいると仮定すると、 f は f_i に等しくなる。 b が定数であるという仮定は、かなり小さな“等価オフィス”がある施設においてはとくに、現実的でないことがありうるので、注意して使うべきである。

(146) 前述した仮定のもとで、運転費用が支配的である単純な換気の場合について、最適流量率 Q_0 を導き出すことができる。このような単純で特殊でない換気システムの代数的公式化を付録 B に示す。最適流量率は、次の四つのパラメータ、すなわち (i) かぎられた空間への放射性物質の一定の流入率 A ；(ii) 被曝する人の数 N ；(iii) 線量換算係数 F_d ；(iv) 集団線量を単位量低減するために置き換える必要のある空気の体積 a/ab 、の平方根の関数となる。すなわち、

$$Q_0 = \left(\frac{a}{ab} N F_d A \right)^{1/2}$$

上記の公式を用いて求めた二つの数値例を補遺 B₁ に示す。 b が一定でない場合

の数学的取扱いは、関数 Q_0 の指数が $1/2$ より小さくなる可能性があること以外
は同じである。

(147) 付録 B で展開される代数的例は、単純化され理想化された状況を記
述している。たとえばそれは、局所的な濃度勾配は考慮していない。ある場合
には、特別な作業をするかぎられた数の作業者が、非常に接近した場所で高濃
度になる可能性にさらされることがある。このような特定の場合には、空気の
流量を増すことによって、個人線量と集団線量はまったくちがったふうに変化
するであろう。このような場合には、放射線防護は、全体の換気の増加という
形よりも、むしろ局所的な空気の処理という形をとる方がよいかもしいない。
この場合の最適化の形式的な扱いは、同じ環境内の異なる区域の各換気流量率
について最適値を探すこと以外は、原則的には同じである。

(148) またその例では、特定の場合には換気率の増加が必ずしも放射線防
護の改善につながらないという事実を無視している。たとえば、非常に短寿命
の放射性核種が、被曝する可能性のある人から非常に遠いところで放出された
とすると、長い通過時間の間の放射性崩壊が、被曝を有意でないレベルまで制
限するのに十分であろう。しかし、空気流量率（そして、線源と被曝する可能
性のある人々との間の空気流速）の増加のような、あるメカニズムによって通
過時間（そしてそれに伴う崩壊）が減少するならば、被曝レベルは実際には増
加することになる。

(149) さらに、付録 B に示した簡略化した例では、放出点と被曝点との間
の浮遊性の放射性核種の同位体組成の変化を考えていない。放射性核種が浮遊
性になり、その崩壊が放射性娘核種を生成し、それがさらに娘核種を生成する
ような崩壊をするときには、空気中の数種の核種のそれぞれの濃度を表すよう
な分析モデルは複雑になる。各々の放射性核種は特有の崩壊率をもち、親核種
の発生源の放出率は変わりうるし、限定された空間での滞留時間は換気流量率
が変わることによって変化する。たとえば、ラドン-222 で汚染された環境の換

(62)

気についての最適化では、このような特殊な問題が存在する。ラドン-222 はラジウム-226 の崩壊によって生成される天然の放射性核種である。それは、ラドンを含む土壌、建築材料、水、その他の物質から空気中に拡散しうる。ラドン-222 は、吸入摂取により気道に与えられる線量におもに寄与する娘核種に崩壊する。ラドン-222 で汚染した空気中の放射能濃度は、換気システムによって取り入れられる新鮮な空気による希釈によってだけでなく、換気される空間を通過時間の間のラドン娘核種の放射性同位体組成の変化によっても変わる。

(150) ラドンの汚染を伴う場合の換気最適化も、付録 B に示された方法を使って概念的には行うことができるが、代数的扱いと結果として得られる式がより複雑になるのは避けられない。その最適化の算定において考慮すべき特別な重要な量は、ラドンとその娘核種のポテンシャル α エネルギー、ラドン娘核種の平衡係数、およびラドンの平衡等価濃度である。最適化に関する、これらの量に関係する諸問題と不確かさについての議論は付録 C に示されている。ラドンとその娘核種による被曝を算定するときのさらにもう一つの問題は、集団線量の推定における不確かさである。最適化による算定において、ラドンによる被曝からの集団線量を定量化するさいに用いられる線量係数（線量換算係数）に関する簡単な議論を付録 C に示す。

(151) 付録 D には、ラドンの汚染のある場所の換気流量率を最適化するための簡略化した代数的取扱いと、ウランその他の鉱山の換気を設計によって最適化する、より複雑な形式的な例を示す。ウラン鉱山にすでに設置されている換気システムをバックフィットさせるための手順を概説した数値例を補遺 D₁ に示す。

(152) もし換気システムが空気浄化機能を含んでいるならば、最適化の過程はさらに複雑になろう。空気浄化は、閉鎖された環境内の空気の除染をするために使われる特定の換気技術である。基本的には、空気浄化システムは閉回路の換気システムとして使われる。汚染した空気の一部は作業環境から取り

出され、通常は放射能を除去するろ過その他の方法によって、除染される。一度浄化されると、その空気は再び作業環境の中に入れられる。この再循環は部分的に行うこともできる。たとえば、交換される空気のある部分は新鮮なものとし、ある部分は再循環させることができる。

(153) 空気浄化の最適化の数学的な定式化は、基本的には換気のそれと同じである。しかし、他のパラメータすなわち、空気浄化システム（たとえばろ過または他の汚染除去システム）の全除染効率および再循環させる空気の割合も考慮に加えなければならない。付録 E には、全量再循環すると仮定した空気浄化の簡単な例の代数的取扱いを示す。放射線防護の費用は換気の費用と同じ根拠に基づいて決定されるが、空気除染システムの運転費用は使用される除染ユニット（たとえば各フィルタ）の数に比例するという仮定も使う。流量率と除染ユニットの数の最適な組合せの一つが、この例では得られている。

放射性物質の環境放出を制限するシステムによる放射線防護の最適化

(154) 次にあげるいくつかの手順によって、排出物中の放射性物質による被曝からの線量を変えることができる：(i) 放出モードを変えること；たとえば、気体放出の高さの変更は、放出場所近傍の排出物の拡散を変えうる；(ii) 排出物の放出を遅延させること；たとえば、減衰タンクの使用は、核種の崩壊によって排出物中の放射性物質の相対的な組成と放射能を変えうる；(iii) ろ過その他の処理によって排出物の流れから物質を部分的に除去することによって、放出される放射性物質の量を減らすことができる。長寿命放射性核種の場合には、排出物の流れから放射性核種を除去し、捕集した物質を保持し、ある十分な期間、環境からその物質を確実に隔離するような方法で処分することによって、被曝の制御を達成することができる。

(155) 制御技術の分析には、それが採用されることになる施設の設計に関する詳細な知識を必要とする。放射性核種のインベントリ、環境中への放射

(64)

性核種の放出の機構と経路，体積流量率，およびそのプロセス流の物理的，化学的特性を同定するために，過程の各段階が分析されなければならない。放出方法の修正は放出点近くの個人の線量に影響するが，多くの場合そのような修正は，その放出による集団線量を有意に変化させることはできず，最適化の過程において重要な役割を果たすことはない。たとえば，最適化は排気筒の高さだけでなく，気体状排出物の浄化にも適用されるべきことは明らかである。しかしながら，排気筒の高さを変更しても集団線量が有意に変化しないならば，最適化は排気筒を高くすることを支持しないであろうから，放出の遅延とそれによる放射性崩壊によって放出量を減少させるシステムと，排出物の流れから物質を除去するシステムのみを，例として議論する。

(156) 崩壊を利用して放出量を制御する連続放出システムに該当するパラメータは，放射性核種の発生源からそれらが環境へ放出されるまでの経過時間である。この経過時間は，崩壊のために用いることのできる容積と排出物の体積流量率との関係によって支配される。放出に対して適用される低減係数は，該当する各核種 i に対して次の式で計算することができる：

$$fr = e^{-(\lambda_i v_D / Q)}$$

ここで， fr は時刻 v_D / Q に存在する放射性線源の，はじめの量に対する割合；

λ_i は核種 i の放射性崩壊定数；

v_D は崩壊に用いることのできる容積；

Q は体積流量率

である。

(157) 排出物放出のいかなる特定のモードについての除去過程も，該当するそれぞれの核種 i に対して，次の関係式で定義される除染係数 D_i によって規定することができる；

$$D_i = \frac{C_{Ei}}{C_{Li}}$$

ここで、 C_{i_i} は流入側でのプロセス流中の核種 i の濃度；

C_{E_i} は排出側でのプロセス流中の核種 i の濃度

である。それぞれの核種の年間に放出する可能性のある放射能 \dot{A}_i によって決まる、ある与えられた最初の排出物組成について、集団線量預託 S_E^c は次の式で与えられる：

$$S_E^c = \tau \left(\sum_i s_i \dot{A}_i D_i + \dot{S}_{E,0} \right)$$

ここで、 s_i は放出された核種 i の単位放射能当たりの集団線量預託；

τ はこの施設の寿命；

$\dot{S}_{E,0}$ はこの制御システムからの職業被曝による年集団実効線量当量；ある場合には、この項は集団線量預託にほとんど寄与しない、である。

(158) 放出制御の最適化の大部分の実際的な算定においては、制御レベルの変化は、ともに段階的で連続的な変数ではない X と S^c で表される制御の選択肢によって決まる有限な増加分によって達成される^{4-6,25)}。制御レベル A から、より費用のかかる制御レベル B に移るという S_E^c の決定は、

$$-\frac{{}_B X - {}_A X}{{}_B S_E^c - {}_A S_E^c} \leq \alpha$$

ならばなされるであろう。このような場合には、最適化は 108 項に述べられているいかなる過程によっても達成することができる。

(159) 付録 F に、放出制御の最適化に対する実際的な手順を示す。補遺 F₁ と補遺 F₂ では、付録 F で与えられた手順を使った二つの数値例を紹介する。最初の例は、沸騰水型原子炉からの短寿命の気体の制御の最適化に関するものである。第二の例は、再処理プラントからの排出物中のヨウ素-129 の制御の最適化の例を示している。

操業における放射線防護の最適化

(160) ある操業に関する放射線防護のレベルは、その設計にも関連のある要因、たとえば、放射線を放出する装置の位置決め、作業者が通るべき通路、設計基準となる放射線および汚染のレベルなどにある程度依存する。この点に関しては、設計と操業との間の明確な区別はできない。一般に、これらの要因はその設計が行われるときにすでに決まっており、このことは操業段階における放射線防護の最適化の可能性をいくぶん拘束することになる。しかしそれにもかかわらず、ある与えられた操業の結果生ずる集団被曝とそれに関連した放射線損害は、その操業がどのように行われるか、行われる方法、従事する作業者の数と能力、作業者の个人防护具の種類、道具の選択（手動操作か遠隔操作か）、管理と作業指示書の質、その他の要因によっても非常に異なったものになりうる。放射線防護レベルの変動へのこれらここにあげた諸要因の影響を、定量的な形で予測するのは困難である。このような理由から、操業に伴う放射線防護は、定量化が困難な人的要因によってずっと大きく影響されるので、設計段階よりも最適化を受け入れにくい。

(161) ある操業に伴う放射線防護レベルの変動による微分費用の算定は、上述したように人的要因が存在するため、とくに困難になる。実際に、ある与えられた操業上の手順が異なる放射線防護レベルに対応した代替案に変えられるときには、上述のパラメータすべては修正される。しかし、その結果生ずる操業費用の変化へのこれらパラメータの寄与を決定することは、ある場合には困難である。これらには、雇用されている作業者の種類と能力に関連する人件費、モニタリングと管理の費用、労働事故その他の作業実施上の異常から生ずる費用が含まれる。微分損害の算定においても同様の困難に遭遇する。

(162) 結論として、操業における費用と損害の定量化および、それに続く最適化の過程が完全に行われることはまれで、この状況は代替の操業手順に関

する決定を、定量的でない価値判断をかなり伴っていて、非常に定性的、直観的なものにして¹⁴⁾いる。この制限は、設計の最適化においてはほとんど経験されることはない。いずれにしても、いくつかの実際の場合には定量的な値を、おおよそまたはある範囲内で算定することができ、そしてたいいていの場合、これで操業上の放射線防護の目的に対しては十分である¹⁵⁾。しかし、価値判断を含んでいるとはいえ実際の判断が可能ないくつかの状況がある。放射線診断に関する場合がこれにあたるであろう。この場合には、操業の実施における最適化の原理を広く適用することができる(179項以降参照)。

(163) 以上のような考察にもかかわらず、異なる種類の操業に関する最適化の過程のいくつかの例もこの報告書の中に含まれている。すでに述べられた理由により、それらの例は、一つの規則を例示するために組み立てられたモデルの諸問題を展開するというのではなくて、操業における最適化に関連するおもな問題を、概念的に明らかにすることのみを意図している。125項に示された注意が、操業の最適化のこれらの例にもあてはまる。

(164) 操業という用語は、いろいろな意味に用いることができる。操業の範囲は、一つの国で不定期間続く、放射線被曝を伴う同質の行為のすべてをまとめている場合から、特定の施設でかぎられた期間続く単一、あるいは一連の行為にまで及ぶ。そのような広範囲の操業における放射線防護のレベルの選択に最適化の過程を利用するには、ケースバイケースの対処が必要であろう。そしてこの章の目的には、同じような操業をまとめていくつかの型に分類することが有用かもしれない。

(165) 操業の第一のグループには、国や地域レベルで放射線源が広く分布することによって特徴づけられるような、ある与えられた行為のわくの中で行われる活動の全範囲が含まれる。これらの行為がすでに正当化の過程を経たとしても、これらの履行にさいしては、さらに放射線防護の最適化が必要かもしれない。それらの操業の例としては、放射性物質の輸送、放射線および放

放射性核種の医学利用，そして自然放射能（たとえば天然ガスとか建築材の）も含めて，放射性物質を含有する消費材の利用である。これらを履行するために，これらの操業に含められる活動は，特定の設備や装置の設計と製造をかなり必要とすることがあろう。しかし，全操業の総合的な最適化は，このような特定の設備や装置の放射線防護の最適化の後に行われ，それを妨げないと仮定することができる。これらの操業に対する放射線防護の最適化は，行政当局から運転員にいたるまで数多くの異なった関係者を含んで，国または地域レベルにおいて実行されるであろう。

□ (166) 操業という概念のより狭い意味は，計画，設計および建設段階が完了した後で，ある単一の設備の操業段階に適用されるものである。典型的な例は，原子力施設の操業や，工業プラントや病院でのある X 線装置や放射線源の使用である。その施設における放射線防護は，計画，設計および建設段階ですでに最適化されていると仮定されている。しかし，ふつう，それ以上の最適化を正当化し，必要とするような操業や手順の変更を許すのに十分な余地がかなり残されている。最適化は，個々の施設のレベルで実行され，操業の管理者と放射線防護スタッフのみが関係するのがふつうであろう。ときとして，とくに高い出費が見込まれる場合や，ある与えられた施設に関する最適化の結果が，同様な施設にも拡張されると見込まれる場合には，意志決定のさいにより高いレベルの管理者が関与するであろう。この種の操業の計画において，人的要因が関連すると正式な最適化の手順の達成を難しくするかもしれない。しかし，少なくとも直観的な最適化は考慮されるべきである。

□ (167) 操業のその他のグループには，より広い観点からの操業という意味で特定の目的をもち，範囲と時間の点ではもっと限定される個人の作業上の行為あるいは活動を含んでいる。その例としては，ある決まった機器の保守や修理，原子力施設の供用中検査，個々の診断または放射線治療，あるいは放射線被曝を伴う単一の研究実験がある。

(168) 操業の特別な種類としては、通常の操業で予測されるような軽度の故障とは見なすことのできない不慮の故障および事故において経験されるものがある。典型的な例は、原子力事故が発生した場合にとられる緊急対策である。この場合、最適化は事故の発生した時点のその場所の状況に依存するが、想定される事故基準に基づいて、予備的計画をあらかじめ立案することができる¹⁹⁾。この場合には、人的および社会的要因が特別な役割を演ずるであろうから、正式にそして定量的に最適化の過程を適用することは困難である。

(169) これまでの諸項で分類した操業の種類いくつかを分析し、それに伴う放射線防護の最適化の例を議論する。これらの例は、最適化の過程に関連するおもなパラメータを概念的に確認することを、基本的には目標としている。それらが、それ自体として操業の最適化の実際の場合を解決するためのモデルとして受け入れられることは期待していない。

道路、鉄道および水路による放射性物質の輸送における放射線防護の最適化の例

(170) 放射性物質の輸送には、核燃料サイクル関連物質（核分裂性物質、新しい原子炉燃料、使用済燃料、放射性廃棄物）および研究、工業および医療における放射性核種および放射線源の種々の応用に関連した物質の規則的な移動が含まれる。この過程は、このような物質が生産される場所と使用される場所とを結ぶ経路のネットワークにわたって行われる。上述の2点間の一つ一つの移動は、正常な輸送状態における被曝、および放射性物質の放出にいたるような事故の場合に起こりうる被曝の結果として、従事している作業者と輸送経路の沿線に住んでいる住民に対して、放射線リスクをもたらす。ここでは放射性物質の輸送のみちすじを決めることのみを扱うことを目的とした最適化の理論的な例を論ずる。しかし、最適化が最も効果的に貢献するのは、比較的小さな放射性線源用の容器の標準的な設計における応用に見られることに注目すべ

(70)

きである。

(171) 通常の輸送状態における実際の被曝も輸送事故に伴う潜在的な被曝も、損害で評価することができる。事故被曝とその損害についての考察は、とくに高線量を伴う発生確率の低い事故に関しては、この報告書の範囲を超えている⁷⁾。しかし、この型の考察においては放射線防護の最適化を無視することができるであろう。いずれにしても、低レベルの放射線被曝の原因となるより起こりやすい小さな事故を避けたり、軽減したりするために必要な防護は、正式に最適化されるかもしれない。もしそうなら、通常の輸送作業に関連した損害だけでなく、輸送中の小さな事故による損害にも注意を向けるべきである。

(172) ある与えられた輸送作業に起因する集団に対する損害を算定するためには、次のようなことが必要であろう：(a) 輸送される放射性物質の種類と量、輸送容器の特性、輸送車内と周辺における距離の関数としての放射線被曝率、および起こりうる小さな事故による放出（およびその確率）を含む、ソースタームの決定；(b) 輸送経路に沿う種々の位置での個人に対する線量当量の分布を算出するための線量算定モデルの開発（これは、輸送車のまわりの放射線被曝率、輸送車の速度、経路の物理的特性およびその他の要因に依存するであろう）；そして、(c) 特定の経路に沿った輸送作業に起因する集団線量預託を算出するために、道路、鉄道あるいは水路からある与えられた距離内における実際の人口分布に、上述のモデルを適用すること。この中には、輸送従事者の被曝からの寄与分を含めるべきであり、また、小規模な事故にも通常の輸送状態にも適用すべきである²⁾。

(173) この計算は、概念的には、放射性物質の製造地点と使用地点とを結ぶ輸送経路の全ネットワークに拡張することができる。したがって、その国における放射性物質の輸送の全システムに付随する損害の合計を理論的には評価することが可能である。一般に、システムの中の任意の2点間の輸送は、異なった代替輸送経路（空路、道路、鉄道または水路）によって行うことができ、

それには、その輸送の種々な特性（包装基準、速度、輸送路の特性）および人口分布の相違に起因して、放射線損害が種々の値をとるのがふつうである。そのような代替手段は、一般に、輸送手段の型と輸送経路の特性によるとともに代替経路の長さの相違によっても、輸送費用に差異を生じる。もし、考慮された各々の代替輸送網とシステムに付随する損害と費用とを定式化することができれば、B章に述べられている方法を用いることにより理論的な最適化を行うことができる。

(174) 上述の例は、輸送作業の立案において、輸送容器の設計とは異なつて防護の最適化が重要な要因になりそうもない特別な一例を示している。他の要因、たとえば物理的な安全が、作業自体の立案において重要な役割を演じるであろう。それにもかかわらず、この例は最適化の概念の応用の原理を説明している。

放射線の医学利用における放射線防護の最適化の例

(175) 概念的には、放射線防護の最適化は、放射線医学検査または治療を受ける患者の被曝の低減にも適用される。しかし、数多くの実際上の困難が出てくる。まず第一に、患者のためになる意図的な被曝、したがって得られる臨床上の結果に影響を与えることなく不必要な被曝を減らすことは、しばしば困難である。第二に、もし被曝した患者の集団の年齢と性の分布、すなわち平均余命が、ICRPの臓器荷重係数を求めるさいに使われた標準的な集団に仮定された特性と実質的に異なるなら、算定の基準として（集団）実効線量当量を使うことには多くの制約がある。

(176) 第一の困難は最も重要なものである。もし、放射線防護の最適化が“純粹”でないとすると、防護手段が臨床結果に影響を与えるので、その考察は、代替的な解決方法の正当化と防護の種々の要素の最適化とが混ざったものになる。防護の最適化は、より広い意味での“最適化”に変わる。たとえば、異な

った線量を与えるような放射線診断の代替システムが異なる費用で利用可能ならば、費用と損害における変化を釣り合わせるだけでは、どのシステムが放射線防護の最適なレベルを与えるかを決定するのに十分ではない。むしろ、次のようないくつかの他の考察がなされるべきである：(i) “陽性”と“陰性”の両者について“真”と“為”を変えることになる、放射線医学上の手順の正確さを低下させる可能性；(ii) あるシステムから別なシステムへの変更は、この代替手段に起因する他のリスクの変化を生ずるかもしれないということ；(iii) “最適化された”システムは、使用がより困難であるため最終的にはより高い線量になるかもしれないこと。(たとえば、もし防護システムのために、透視が手際よくいかなかったり、あるいは像が不鮮明になるならば、より長い透視時間が必要となるかもしれない。)；(iv) 同じ防護費用であっても、患者一人当たりのより高い線量が必ずしも悪いとはかぎらない。というのは、それによってより多くの患者が、放射線の便益を受けることができるかもしれないからである。(たとえば、離れたところにある核医学施設が、十分なスキャナをもっていなければ、必要な検査をより多くの患者について行うために、患者一人当たりにより多量の放射性同位体を投与することは、価値のあることかもしれない。)

(177) さらに、放射線の医学利用によって生ずる便益と損害とに影響を与える典型的な要因がいくつか存在し、それらは定量化するのが困難である。患者の救命あるいは罹病期間の減少についての値は、90 項以降に示された方法では定量化できないかもしれない便益である。事実、これらの評価の方法は、ある与えられた個人の生命よりも、むしろ統計上の生命に対し適用することができる。ある放射線医学検査は、その他の診断検査を避けることによって、患者に便益をもたらすかもしれない。そして、このようにして生じた便益は、その他の検査によって生ずることが予想される損害の不確かさのために、算定するのが困難なもう一つの要因である。放射線の適正な利用は、伝染性疾患の発生

および入院期間の短縮のように公衆の健康に追加の便益をもたらすかもしれないが、これらは考慮に入れるのが困難な要因である。さらにまた、手術が避けられたことにより痛みを受けなくてすむことの価値のような便益があるし、重篤な疾患をもっていないことを知ることは、個人にとって便益となる。これらは、根本的には主観的なものであり、おそらく定量化できないものである。損害に影響を与えるいくつかのその他の要因は患者の特性に依存するが、これはまた定量化するのが困難である。たとえば、子供の損害と老年の患者の損害、健康な患者の損害と不治の疾病をもった患者の損害である。

(178) 上述の諸項で示された問題があるにもかかわらず、放射線診断、放射線治療および核医学での放射線防護の最適化における費用-便益技術の利用に関して、いくつかの様式化した例と議論を以下に示す。医学における最適化は、当然、定量的な正式な方法よりは、むしろ直観的な決定で拘束されるべきものと思われるので、以下は例を示すことのみを意図している。

放射線診断

(179) X線その他の電離放射線を用いた医学診断からの放射線の被曝は、集団線量に寄与するものとしてとくに注目されてきた^{17,18,26,27,36,72)}。事実、医学的な放射線診断は、おそらく人工線源からの集団線量に寄与する主要なものである。それゆえ、放射線医学における放射線防護の最適化は、全体的な放射線影響を有意に減少させるであろう。最適化は、概念的には、最初の検査依頼からフィルムについての最終的な報告まで、放射線医学上の全過程に適用することができる。

(180) 医学診断における最適化概念の適用の例として、X線設備に希土類元素スクリーンを備えることについて検討してみよう。標準的なX線サービスにおいては、検査の大きな割合が希土類元素スクリーンを用いて行うことができると仮定することは、合理的なことと思われる。このことは、また、現在受けている総集団線量の大部分を低減することができるかもしれないということ

(74)

も意味する。集団線量の低減は、全体のおよそ2/3までなると仮定できる。各希土類元素スクリーンの価格とその寿命は、かなりよくわかっているから、大まかな費用の総額は容易に推定できるであろう。もし、この算定が現在の数値を使ってなされるなら、 $\Delta X/\Delta S$ は、皮膚線量当量の man Sv 当たりおよそ数十 US\$ になるであろう。(実効線量当量では、この値はもう少し高くなるはずである。)この値は、いくつかの国家機関によって使われている α の数値とよく合い、最適化過程の適用が価値のあることを示している⁸⁾。しかし、画像の質が異なると、診断の質が異なってくることを指摘しておくべきである。これは、最終的な決定において考慮されるべき重要な要因である。

(181) 別の例としては、不合格の診断用 X 線フィルムの数を減らすための、品質管理プログラムの最適化である。X 線部門における不合格率は、数%から数十%までかなり変動している。もし品質管理の手段によってこの不合格率を減少させることができれば、現在受けている集団線量の総量のかんりの部分を減らすことが可能である²²⁾。不合格のフィルムの減少を達成する品質管理計画(その作業構造における弱い部分を見つけ出す努力をする)、簡単な試験による発生器の出力の確認、感光したフィルムと感光計あるいは多分その他の手段による、現像過程のチェックにかかる費用は、きわめて低いものであろう。しかし、これ以上の試験の実施には通常優秀な物理学者の協力が必要であり、その人件費と利用可能性から、このプログラムはまれにしか、おそらく年に一度か二度しか、実行することはできないであろう。上に述べた形以外の品質管理は、毎日または毎週、常任の部門スタッフが行うことができる。しかし、再撮影率は品質管理によって改善されるというものの、それは要求される正確さにも依存するということを強調しておくべきである。もし、もっと多くの標準以下のフィルムが許容されると、診断を誤まるリスクはもっと大きくなる。したがって、ある種の主観的な最適化が、どのフィルムを撮り直すかを決定するさいに必要とされるかもしれない。

放射線治療

(182) 放射線治療を受けている患者の放射線防護も、最適化を必要とする対象であるが、この領域での最適化手法の使用には、もっと特殊な問題が存在するであろう。この場合も、一般的なわく組を与える原則は、他の行為の場合と同じである。しかし、この原則を適用する方法はいくぶん異なっており、前に議論したものより必然的により複雑である。一方において、治療を受けている患者は、避けることのできない非確率的影響を受けるであろう。したがって、影響の重篤度はこの場合には線量に依存するであろうから、集団線量の値は、客観的な健康損害の尺度にはならないであろう。他方、実効線量当量の概念自体、高線量被曝のこれら特殊な場合には適用することはできない。したがって、放射線治療に最適化の原則を適用する方法論を展開するには、さらに研究が必要である。放射線治療行為における放射線防護の最適化の例は、この報告書のかぎられたわく組の中では試みられなかった。

核医学

(183) 医療行為における最適化のその他の例は、核医学における放射線源と放射性物質の利用においてみることができ。放射性核種を用いた医学的診断装置の操作に伴う放射線損害は、明らかにそれにかかわる人（患者と職員）の数に依存する。さらに、使用される放射性核種の種類、投与される量および放射線測定に使われる装置の性能（とくにその感度）にかなり依存する。とくに、長半減期の放射性核種のかわりに短半減期のものを使うことによって、患者一人当たりの線量当量したがって放射線損害を低減させることができるが、職員の被曝と損害は増加するかもしれない。他方、より高い感度をもった検出器と測定装置を使うことにより、同じ診断上の情報をより少ない量の放射性同位体の投与で得ることが可能であり、その結果、公衆と作業者に対する損害は低減することになる。これらのパラメータは、最適化の過程の中で結びつけることができる。異なる種類の放射性核種（異なる半減期と異なる放出放射線ス

ペクトルをもつ)と、異なる種類の測定装置(異なる感度と精度をもつ)を採用するための費用を、それにかかわる放射線損害の費用に対して釣り合いをとることは可能である。核医学行為における放射線防護の最適化の例は、付録Gで議論されている。

日用品の利用における放射線防護の最適化の例

(184) 多くの国において、一般公衆が少量の放射性物質(人工または天然の)の入った日用品を利用することと関連した行為が導入されており、またされつつある。これらの行為は、それらの正当化の検討に基づいて、監督官庁により認定されるべきである^{50,55)*}。それにもかかわらず、たとえその行為の大部分が低レベルの被曝しか伴わないものであっても、最適化を必要とするであろう。しかし、もし予想される集団線量預託がきわめて低い場合には、得られる利益よりも最適化の過程そのものの費用の方が高いことがあるので、最適化を適用するときには注意すべきである、ということを指摘しておく。

(185) ある場合には、最適化の手順は比較的簡単であるように思われる。概念的に簡単な例としては、放射性物質を含む天然ガスの家庭内利用の例がある。この場合には、燃焼生成物中の放射性的汚染原物質による利用者の被曝から生ずる集団線量で損害を推定することが可能である^{3,37)}。このためには、天然ガスの生産率、その放射性物質含有量および異なる使用形式(工業用か家庭用か)による消費率を含む、ソースタームを決定することが必要である。次に、このガスを使用するにあたっての集団の習慣および放出の機構と放射性物質の挙動に関する適切な仮定をおくことが必要である。これをもとに、人々の放射線被曝の経路と機構を記述するモデルを開発することができ、単位ガス消費率

* 国際放射線防護委員会 「自然放射線源に対する公衆の被曝を制限するための諸原則」 ICRP 専門委員会4の報告書(現在準備中¹⁾)も参照。

† 訳注 専門委員会4の報告書ではなく、ICRPの報告書として刊行された[ICRP Publ. 39 (1984)]。

および単位放射性核種含有量当たりの平均個人線量当量を算出することができる。もし、ソースタームのデータおよび関連する人々の数と分布に関するデータがその平均に適用されるならば、対応する集団線量とそれに伴う健康損害を算定することが可能である。すべての利用条件が変化しなければ、個人および集団の被曝のレベルは、本質的には、使用場所でのガスの放射能含有量で規定される。これは、生産地で、あるいは供給網において、種々のガス精製システムを使うことにより多分大きく変動しており、したがって、放射線被曝と損害はかなり異なったレベルとなる可能性があるが、これは容易に算定することができる。いろいろなガス精製システムに伴う費用も推定することができる。したがって、最適化の過程を用いることができ、種々のレベルの放射線防護に伴う費用と、これに対応する損害のレベルの間の最適バランスの決定は簡単のようである。付録 H に、天然ガスの家庭内使用における防護の最適化の例の代数定式化が示されている。

(186) より複雑な例として、人工的に濃度が高められた天然放射性物質を含む建築材料の使用という行為がある。工事中、およびそこに住んでいる間、建築材からの被曝によって人々が受ける損害を低減するために、建設産業において最適化の過程を検討することは妥当なことと思われる^{14,15)}。国内の天然の建築材料の分布、(人工の)建築材(化学工業からの副産物を含む)を生産する産業で使われる原材料の供給源、放射能含有量の異なる材料の採取と輸送の費用を考慮して、さらに、労働事故による害の費用その他のものも含めて、建築材料の選択については、国ごとの異なる政策に考察を加えるべきである。各々の政策に付随する費用は、これに対応する損害の費用と同様に計算できるであろう。しかし、価値判断を基礎としてのみ扱うことのできるいくつかの他の考慮すべき点がかかなりの影響をもつために、この報告書で示した単純な費用-便益分析を使うだけでは、異なる選択枝間の最適バランスを計算することは、おそらく困難であろう。それらには、たとえば、労働現場を国内のある場所から他

の場所へ移したり、与えられた原材料の供給源の取捨をその産業に指示したりすることの社会的、経済的な意味合いや、新築の家と古い家のどちらに住んでいるかによって、集団の異なるセクター内に意図的に種々のレベルの損害をもたらすことになるという公衆衛生学的な問題が含まれる。このような要因を、最適化の方法論に関連して、金銭的に定量化することは困難である。さらにこの場合には、生産費は、放射線防護の費用からも損害の費用からも独立であるとは仮定できないかもしれないという事実のため、さらに複雑になるであろう。

原子力発電所の操業における放射線防護の最適化の例

(187) ある施設の操業段階における放射線防護の最適化の最も一般的で複雑な例は、おそらく原子力発電所のような大型原子力施設の操業に関連したものである。この場合、最適化で影響を受けることのある操業上の特徴としては、次のようなものがある。すなわち、原子炉燃料の品質と管理政策、プラントの化学処理と除染の手順と実施、プラントの保守と検査の方針と手順、職員の技術と訓練実施、職員の輪番制についての方針と防護服の使用、遠隔操作器具とモックアップを利用する程度、モニタリング資材および保健物理的監視の程度、そしてその他の多くのものである。このような特徴に関係するパラメータの任意のものを修正することにより、作業員や集団の被曝を変えることができる。通常、それらのどれを変化させても、経済的費用が変化する。したがって、関連した各々のパラメータについて(もしお互いに独立ならば)、または互いに関連しているパラメータの適切な組合せの各々について、最適化されたバランスを算出することが可能と思われる。しかし残念ながら、それらの操業上のパラメータの多くは、技術的または経済的な点で定量化するのが困難な要因(人的またはその他)に、本質的に基づいている。それゆえ最適化の過程にある程度の不確かさと明確さの欠如をもちこむことになり、これは意志決定にさいし、定性的な価値判断によってのみ克服することができるものである。さらに、集

団線量のいくぶんの増加を許しても個人線量を減少させるかどうかを決定する問題が通常起こるのは、原子力発電所の操業においてである。この報告書に示されるように、線量限度は、最適化にステップ関数的拘束を加える。したがって、個人線量が限度を下回るならば、最良の選択肢はいつも、与えられた防護費用で集団線量をもっとも低くするようなものであるべきである。しかし、個人線量が線量限度に近づくにつれて、客観的健康損害以外の損害の追加成分が考慮されるかもしれない、その費用は客観的健康損害の費用につけ加えられるべきである (87 項参照)。

(188) 原子力発電所の従業員の被曝は、燃料要素の核分裂生成物保持性能、一次および補助冷却系内への放射性腐食生成物の付着の程度、他の特定の装置の信頼性や施設の配置などの多くの変数の影響を受ける⁵⁴⁾。この被曝の大部分は、保守、廃棄物の取扱い、供用期間中の検査、燃料交換および非日常的な仕事 (修理や改修のような) の間に受けるものである。放射性腐食生成物は、水冷却炉の運転に関連した放射線の主要な源である。このため、腐食生成物の生成と、それらのプラントの循環システム内への付着を最小にすることにより、プラント従業員の被曝をかなり低減することができる。適切な設計によって大きな改善をすることができるのは明らかであるが、一次冷却水中の酸素濃度と pH を連続的にモニタリングし調整すること、主要なサービス可能な構成部を定期的に化学除染すること、および、装置の保守または交換のような作業に先立って、このシステムの排水と洗浄をすることによっても良好な結果が得られる⁵⁴⁾。

(189) よりよい除染方法の開発、循環システムの排水、洗浄および除染によって、操業手順を改善する費用を計算することは可能である。また、そのような改善によってもたらされる放射線損害の減少も推定することができ、したがって最適化を適用することが可能である。同様に、燃料の品質管理のための方策も、最適化の過程の対象となりうる。

(190) 人的要因およびその他の無形要因が、多かれ少なかれ重要な役割を占め最適化をより複雑にしている領域がある。これらの要因のいくつかの例は、187項で述べられている。これらのどれか一つを変えると、放射線損害は変化するであろう。しかし、作業の遂行、手順の管理、および作業者の被曝の相互の間には複雑な関係が存在し、これらの関連を定量化することはほとんど行われてきていない。それらは、放射線防護の全体としての最適化に重要な寄与をするであろう。

(191) 機器の保守と供用期間中検査の方策は、頻度、期間、程度、用具(たとえば、遠隔操作具または検査用具の使用)の面で、放射線に対する従業員の被曝に直接関係がある。保守または検査の頻度が少なく詳細でないほど、当然に損害レベルは低くなる。この場合、他の点も考慮しなければならないかもしれない。たとえば、原子力安全の要請(ずっと厳密な保守と検査作業を必要とする)と、放射線防護の要請(これとは反対の状況から便益を受ける)との間の適切なバランスである。しかし、もし必要とされる安全レベルが固定されていれば、種々の可能な保守と検査の方策の費用とそれに対応する費用との間で、最適化はもっと簡単に達成されるであろう。種々の方策を決定するのに伴う費用には、遠隔操作具の形式とそれらが用いられる程度、作業の期間と必要とされる従業員の熟練度に関連して種々の作業に入ってくるマンパワー、個人の防護システムと防護衣の型式とその利用程度、モニタリングと保健物理的管理の適用範囲の程度と型式、および必要とされる従業員の除染が関連するであろう。

(192) この最適化の過程は、上述のパラメータが費用と損害に対して異なった影響をもち、同時に、密接に関連しあい相互に作用しあっているため、とくに複雑である。たとえば、呼吸防護具を含む防護衣の使用は、作業を完了するのに要する時間を長くし、運動性と器用さ(これはまた、安全をも意味する)を減じてしまう。防護衣は体内への放射能の摂取を減少させるけれども、作業

時間が長くなってしまいうために、体外放射線からの線量は増加する⁴²⁾。したがって、防護衣の利用は、いくつかの代替的な保守と検査方法に対応した体内汚染レベルに対して、それ自体では最適化することはできず、体内被曝と体外被曝との間および種々の代替方策間のより詳しいバランスを見い出すことが必要である。この体内被曝の要請と体外被曝の要請とのバランスは、保守と検査に関連したいくつかのその他のパラメータ、たとえば、作業の種類と存在する放射線レベルおよび汚染レベルに依存し、場合場合で異なる。

(193) 最適化の過程の複雑さに関係するその他の面として、保守または修理において特定の作業を交替制で行う追加の職員が常勤の職員のほかに必要となる可能性があることである。この場合、これら追加職員から予測される追加の損害を決定することの困難さによって微分費用-便益分析は妨げられることがありうる。単一の作業を遂行するために短期間に数多くの人を使用するという非効率性は、放射線損害にマイナスの影響を与えることがあるであろうが、その推定は困難である^{20,71)}。一方、余分の職員費用は、要求される仕事や技能レベル、適切な作業者の得やすさとその配置、および計画放射線被曝⁴²⁾をすでに受けてしまった職員の有効な雇用といった考慮により、影響を受けるであろう。

(194) 上の例から、大規模原子力施設の操業における放射線防護の最適化は、とくに困難な仕事であることがわかる。一方、それは、放射線防護を改善できる大きな可能性のゆえに挑戦する価値があり、被曝を制限するために金銭を使うことが、まったく正当化されないほどの低い集団線量預託を伴う職業被曝の少数の場合を除いて最適化をなしとげるのによい例がある¹⁵⁾。いずれにしても、操業中の放射線防護を最適化するためには、操業経験と経済情報を含めて十分なデータベースを集めることが必要であり、それらから被曝を制御する最適化のための規準が定量的なものとして導き出されよう。さしあたり、原子力施設での最適化は、より定量的な手法に対するいくつかの試みが最近報告されている²⁰⁾とはいえ、ケースバイケースで、適切な工学的判断に本質的には依

存しており、定性的な指針（たとえば、適切な行為の目標、目的および声明）の形をとる傾向にある。

個人の作業における放射線防護の最適化の例

(195) 167項で述べたように、ある与えられた種類の操業は、かざられた目的、範囲、期間をもつ個々の行動を含み、それらはより広い範囲の操業の枠内で実行される。被曝を合理的に達成できるかぎり低く保つために放射線防護の専門家および操業の管理者がとる通常のやり方は、最適化の過程に似た多くの側面や論理的な手法を含んでいるが、それを定量的な最適化と定義づけることはできない。一般に適用されるやり方は、ある与えられた計画された作業に含まれる対比パラメータを実際に同定し評価することであり、定性的な判断に基づいて、それらの間のバランスをとることを試みることである。個々の作業における放射線防護の最適化には直観的な方法が大切な役割を果たす。

(196) これに対して、完全に定量的な最適化の過程は、この報告書のB章に記載された手順の全部の適用を必要とするであろう。典型的な例は、この場合も原子力施設における個々の供用期間中検査、保守または修復作業である。放射線に対する被曝に影響を与えうる数多くのいろいろな種類のパラメータがあり、計画された操業を最適化しようとするならば、それらを定量化する必要がある。操業を計画する基礎として、操業中に遭遇するかもしれないような放射線場、表面汚染と空気汚染および物理的、機械的な問題についての情報を得るために、予備的なサーベイをすることが必要かもしれない。このサーベイは、経済的な費用に加えて、サーベイを行う作業者の被曝による放射線損害も伴うであろうが、しかし、適切な操業に携わる作業者の被曝が低減される結果、放射線損害が次々と減少することも意味する。現存の放射線レベルは、事前の排水、洗浄あるいはその他の除染方法によって、または構成要素を取り外し、それらを放射線レベルのより低い区域で扱うために輸送することにより、しばし

ば低減することができる⁵⁴⁾。そのような準備行動は、やはり経済的費用と放射線損害の費用を伴うが、それらは、それに引き続く操業の実施における放射線損害の減少によって相殺される。最適化には、上述の相対する寄与についての慎重なバランスが必要とされる。

(197) 特定の操業のため作業者を訓練し、および適切な技能と経験をもった作業を選択することは、本来経済的費用を必要とするが、それによって健康上の損害を低減することができるであろう。これに関連して、評価されるべき特定の観点は、モックアップ装置での模擬操作の採用である。これは、作業者の訓練のためだけではなく、実際の状況で遭遇する可能性のある問題点を識別し、作業者の被曝の可能性を減ずるために特殊な道具および手順を選んだり用意するためにも有益である。移動可能なあるいは一時的な放射線遮蔽、換気システム、封じ込めと囲い込み、および使い捨ての床のカバーなどを準備することによって、作業中の作業者の体外被曝と体内照射を低減することができるが、それにはもちろん、計算に入れるべき費用を伴う。個人線量がある限度以下に保つための作業者の交代は、ふつう集団線量を増加させ、そしてそれは、すでに原子力施設における操業に関連して議論したように、もう一つの重要なパラメータである。

(198) ありうる重要なパラメータに関する上述のリストは網羅的なものではなく、検討しようとする特定の操業によってはいくつかの他の要因を、ケースバイケースで費用と損害について評価しなければならないかもしれない。上述のパラメータのいくつかは定量化（費用としてあるいは放射線損害への影響として）が困難であり、そのいくつかは相互依存の関係にある。（それは過程の各段階においてたった一つのパラメータしか含まないステップバイステップの最適化でさえ妨害あるいは阻止する。）最後に、それらのうちのいくつかは、放射線防護のみでなくプラントの利用度にも影響を及ぼしうる。（たとえば、プラントの機能停止の必要な期間は、作業者の放射線防護の最適化を考慮して操業を

準備し実施するために用いられる手順による。)この最後の可能性は、生産費用 P が一定でなく、選択された放射線防護のレベルに依存するので、最適化をさらに複雑にするであろう。

付 録 A

放射線源に対する単純な平板遮蔽体の設計による
放射線防護の最適化の代数的例

(A-1) 単純な平板遮蔽体の最適化された設計例を示す。例示のために、単純な平板遮蔽体の外表面上の一点における実効線量当量率 \dot{H}_E は、近似的に、

$$\dot{H}_E = \dot{H}_u e^{-\Gamma w}$$

であると仮定することにする。

ここで、 \dot{H}_u は最初の最小厚さの遮蔽体の外表面に接した位置にいる仮想的な被照射体が受けるであろう最大実効線量当量率（実際の遮蔽設計においては、 \dot{H}_u は、遮蔽の外側の着目している居在地点における最大線量当量率とすることができる）——どんな場合でも $\dot{H}_u \leq \dot{H}_L$ である；

Γ は実効減衰係数（ビルドアップの効果を含む）；

w は追加の遮蔽体の厚さ；したがって、

$e^{-\Gamma w}$ は追加の遮蔽体による線量低減率である。

(A-2) 個人線量の平均値と最大値との間には一定の比 ρ が存在すると仮定されているので（129 項参照）、被曝する人々の受ける平均実効線量当量率は、次のようになる：

$$\overline{\dot{H}_E} = \rho \dot{H}_u e^{-\Gamma w}$$

(A-3) この例での遮蔽体の寿命を τ とし、 N 人が時間割合 f_i (居在時間係数) の間この放射線場で被曝すると仮定すると、集団線量は次式で表すことができる：

(86)

$$S_E = Nf_i \tau \bar{H}_E = Nf_i \tau \rho \dot{H}_u e^{-r_w}$$

したがって、損害の費用の関数 $Y = Y(w)$ は、次のような式になる：

$$Y(w) = a Nf_i \tau \rho \dot{H}_u e^{-r_w}$$

(A-4) さらに、この例の遮蔽体が長方形であると仮定すると、防護費用の関数 $X = X(w)$ (厚さの関数としての遮蔽体の費用) は、次のようになる (132 項参照)：

$$X(w) = X_s = X_v h l w + X_I$$

ここで、 X_v は設置される遮蔽材料の単位体積当たりの費用；

h は遮蔽体の高さ；

l は遮蔽体の長さ；

w は遮蔽体の厚さ；

X_I は支持設備の費用であり、この例のためにはせまい範囲で

の厚さの変化に対して一定であると仮定する。

(A-5) この例の目的関数は、費用の式を合計したものである：

$$U = X(w) + Y(w) = X_v h l w + X_I + a Nf_i \tau \rho \dot{H}_u e^{-r_w}$$

(A-6) 最適な遮蔽体の厚さ w_0 を求めるためには、目的関数を w に関して最小としなければならない。B 章で示したように、これは目的関数を w に関して微分して、それを零とおくことによって求められる。すなわち、

$$X_v h l - a Nf_i \tau \rho \dot{H}_u \Gamma e^{-r_w} = 0$$

(A-7) ここに示した例においては、最適化された線量低減率 $e^{-r_{w_0}}$ は、A-6 項の式から導くことができる：

$$e^{-r_{w_0}} = \frac{X_v h l}{a Nf_i \tau \rho \dot{H}_u \Gamma}$$

最適化された遮蔽体の厚さは、最初の厚さに、上記の最適化された線量低減率から得られる厚さの追加分を加えた合計に等しくなる。補遺 A₁ に、上述の代数的手法を特定の状況に適用した場合の数値例を示す。

(A-8) 異なる居在時間率をもついくつかの人のグループが被曝し、線量ビルドアップ係数が遮蔽体の厚さの単純な指数関数でない場合には、上の例を拡張することにより、より形式的な取扱いができる。この場合、集団線量は次式で記述される：

$$S_E = \sum_j N_j f_{t_j} \tau \rho_j \dot{H}_u B(\mu w) e^{-\mu w}$$

ここで、 \dot{H}_u は最初の最小厚さの遮蔽体の外表面に接した位置にいる仮想的な被照射体が受けるであろう最大実効線量当量率（実際の遮蔽設計においては、 \dot{H}_u は、遮蔽体の外側の着目している居在地点における最大線量当量率とすることができる）——どんな場合でも、 $\dot{H}_u \leq \dot{H}_L$ である；

$B(\mu w)$ は遮蔽の線量ビルドアップ係数；

μ は線量減衰係数；

w は追加される遮蔽体の厚さ；したがって、

$\dot{H}_u B(\mu w) e^{-\mu w}$ は追加される遮蔽体の表面での最大実効線量当量率；

ρ_j はグループ j に属する被曝する人々中の個人の平均実効線量当量率と最大実効線量当量率との比；

τ は設備の寿命；

f_{t_j} は被曝する人々のグループ j の居在時間係数；これはグループ j の個人が線源からの放射線に被曝する時間割合を示すものである；

$f_{t_j} \tau \rho_j \dot{H}_u B(\mu w) e^{-\mu w}$ は、したがって追加の遮蔽体を設けた結果、グループ j の構成員が受ける平均実効線量当量；

N_j はグループ j の人数

である。

(A-9) したがって、目的関数は次の形になる：

$$U = a \dot{H}_u B(\mu w) e^{-\mu w} \tau \sum_j N_j f_{t_j} \rho_j + X v h l w + X_I^*$$

* 訳注 原書では X_I が抜けている。

(88)

これを厚さに関して最小にすべきである。

(A-10) 最適な厚さは、目的関数を w に関して微分して、それを零とおくことにより決めることができる：

$$a\dot{H}_u\tau\sum_j N_j f_{t_j} \rho_j e^{-\mu w} \left(\frac{dB(\mu w)}{dw} - \mu B(\mu w) \right) + X_v h l = 0$$

したがって、ある選ばれた材料の単純な壁型遮蔽体の最適な線量低減率は、以下のとき得られる：

$$e^{-\mu w_0} = - \frac{X_v h l}{a\dot{H}_u\tau\sum_j N_j f_{t_j} \rho_j \left(\frac{dB(\mu w_0)}{dw_0} - \mu B(\mu w_0) \right)}$$

最初の遮蔽体の厚さに加える最適な追加の厚さ w_0 を上式から算定することによって、 w の値に対する解が得られる。

(A-11) 最適化の過程を通じて、個人線量の分布が変化すると仮定することもできたかもしれない。これは、最適化の結果遮蔽体の厚さが大幅に変わり、そのために、より厚いか、またはより薄い遮蔽体のもとで作業のやり方が変わる結果、作業パラメータが修正される場合に起こるかもしれない。この問題は、平均線量率と最大線量率との比 ρ が、遮蔽の厚さ w の関数であると仮定することにより、概念的には解くことができる。この場合、A-9 項で導かれた目的関数は次のようになる：

$$U = a\dot{H}_u B(\mu w) e^{-\mu w} \tau \sum_j N_j f_{t_j} \rho_j(w) + X_v h l w + X_I^*$$

したがって、最適な線量低減率は次のようになる：

$$e^{-\mu w_0} = \frac{X_v h l}{a\dot{H}_u\tau\sum_j N_j f_{t_j} \left(B(\mu w_0) \frac{\partial \rho(w_0)}{\partial w_0} + \rho(w_0) \frac{\partial B(\mu w_0)}{\partial w_0} - \rho(w_0) \mu B(\mu w_0) \right)_j}$$

* 訳注 原書では X_I が抜けている。

補 遺 A₁単純な遮蔽体の設計による放射線防護の
最適化の数値例

(A₁-1) 実験室の“ホット”の廊下にある単純な遮蔽体の最適化の数値例を示す⁵⁾。遮蔽材料は標準的なコンクリートとし、その設置費用は $100 \text{ \$ m}^{-3}$ と仮定する。 α の値は $10^4 \text{ \$ (man Sv)}^{-1}$ と仮定する。 γ 線エネルギーは約 0.7 MeV とすると、実効減衰係数は $\sim 14 \text{ m}^{-1}$ となる。 ρ の値は 10^{-1} と仮定する。全被曝時間(すなわち、設備の寿命に居在係数を乗じたもの)は、20年であるとする。作業者の数は、遮蔽体の面積 15 m^2 につき一人であると仮定する。追加の遮蔽がないときの最大実効線量当量率 \dot{H}_u は、 0.05 Sv y^{-1} (5 rem y^{-1}) であるとする。

(A₁-2) 上の仮定のもとで A-7 項の式を用いることにより、最適な線量低減率が求められる。

$$e^{-r w_0} = \frac{X_v}{\tau \alpha \Gamma \dot{H}_u f_i \rho} \frac{h l}{N}$$

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

よって

$$e^{-r w_0} = 0.1$$

したがって、最適な線量低減率は 10^{-1} となる。これは、この例においては、設計目標としては、限度の線量率(すなわち、線量限度に従うことを保証する線量率)を10分の1に減らす価値があることを意味している。

付 録 B

単純な特殊でない換気システムの設計による
放射線防護の最適化の代数的例

(B-1) 流量率 Q で換気されていて、一定率 A で放射性物質が放出源から漏洩している体積 v の限定された空間においては、浮遊性放射性物質濃度の時間的挙動 $C(t)$ を記述する微分方程式は、次のように近似できる：

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{A}{v} - \left(\frac{Q}{v} + \lambda \right) C(t)$$

ここで、 Q は換気システムにより連続的に注入される流量率；

λ は汚染核種の放射性崩壊定数である。

したがって、 $C(t)$ は以下ようになる：

$$C(t) = \frac{A}{(Q + \lambda v)} \left(1 - e^{-\frac{(Q + \lambda v)}{v} t} \right) + C(0) e^{-\frac{(Q + \lambda v)}{v} t}$$

ここで、 $C(0)$ は最初の濃度である。通常は、 $Q \gg \lambda v$ および、 $C(0) = 0$ である。一方、放射線防護の目的には、平衡濃度 $C \equiv C(\infty)$ を算定することで十分である。したがって以下ようになる。

$$C = \frac{A}{Q}$$

(B-2) 換気されている空気汚染環境で被曝した結果受ける集団線量預託 S^c_E は、以下のように表すことができる²⁰⁾：

$$S^c_E = N f_i \tau F_a C = N f_i \tau F_a \frac{A}{Q}$$

ここで、 N は被曝した集団の人数；

τ は設備の寿命；

f_t は居在時間係数；

F_a は放射能濃度を線量率に変換する線量換算係数(すなわち、空気中の放射性物質の単位濃度当たりの、被曝する個人の受ける実効線量当量率)であり、これは被曝する人々の平均年齢に対応した平均値と仮定する；

したがって、損害の費用は以下の式で表される。

$$Y = Y(Q) = aNf_t\tau F_a \frac{\dot{A}}{Q}$$

(B-3) 換気的全費用は運転費用のみとすることができ、また、143項および144項でとられた仮定があてはまるものと仮定すると、放射線防護の費用は次式のようになるであろう：

$$X = X(Q) = abf\tau Q$$

ここで、 a および b は、それぞれ、単位電気エネルギー当たりの電気料金、および単位体積の空気を調節し循環させるのに消費されるエネルギーを表す定数；

f はシステムが操業される時間割合

である。

(B-4) したがって、目的関数は次のようになる；

$$U = aNf_t\tau F_a \frac{\dot{A}}{Q} + abf\tau Q$$

目的関数を最小とするには、上の式を換気の流量率に関して微分し、零に等しいとおけばよい。それゆえ、もし b が Q と独立であると仮定すれば次のようになる：

$$-\frac{aNf_t\tau F_a \dot{A}}{Q^2} + abf\tau = 0$$

したがって最適な流量率は、以下の式より決定される：

(92)

$$Q_o = \left(\frac{\alpha}{ab} N F_d \dot{A} \right)^{1/2}$$

b と Q とが互いに独立であるとの仮定は、注意して用いるべきであることを強調しておく(144項参照)。いくつかの実際の場合においては、 b は Q の関数となるであろう。これらの場合には、 Q_o を規定する関数の指数は $1/2$ よりも小さくなるであろう。

(B-5) B-4項の式は、以下のことを仮定して一般化することができる：

(i) 空気中に数種の核種 i が存在する；(ii) それらの核種はいくつかの封じ込め装置 k から、異なる率 A_{ik} で放出される；および(iii) 人数が N_j で、居在時間係数 f_{ij}^* の、いくつかの集団 j の人々が被曝する。一般式は以下のようになる；

$$Q_o = \left(\frac{\alpha}{abf} \sum_j f_{ij} N_j \sum_i F_{di} \sum_k A_{ik} \right)^{1/2}$$

ここで、 f は換気システムの運転される時間割合を表す係数である。

(B-6) 換気されている限定された空間における放射線防護は、二段階で達成することができる。第一段階では、線量限度を確実に守ることができるように、ある与えられた核種の空气中濃度をその該当する誘導空气中濃度(DAC)よりも低く保つことができる最小限界流量率 Q_L を定め、第二段階では、線量を合理的に達成できるかぎり低く保つことが確実にできるように、最適なレベルにまで流量率を増加する。流量率の増加割合 r_q は、次に与えられる関係によって決定することができる：

$$r_q = \frac{Q_o}{Q_L}$$

(B-7) B-1項に示されている式を用いると、 Q_L は

$$Q_L = \frac{A}{\text{DAC}}$$

* 訳注 原書の F_{ij} は誤り。

となる。

(B-8) したがって、与えられた核種に対する r_q は、次の式で表すことができる。

$$r_q = \text{DAC} \left(\frac{\alpha N F_d}{abA} \right)^{1/2}$$

ICRP Publication 30³²⁾ は、職業上の被曝に対する DAC の値を勧告している。補遺 B₁ では、上の公式を用いた二つの数値例を提示する。

補 遺 B₁

換気による放射線防護の最適化の二つの数値例

(B₁-1) 年当たり数 TBq のヨウ素-131 を含む放射性医薬品を扱っている工場の実験室の換気システムについての検討例を示す。約 12 名の常勤の作業者が換気された実験室内にいる。実験室内へのヨウ素の漏洩率 A は、 $3.1 \times 10^9 \text{ Bq y}^{-1}$ ($3.7 \times 10^5 \text{ Bq h}^{-1}$ または $10^{-5} \text{ Ci h}^{-1}$) であった。この特定の実験室についての定数 a/ab の値は $10^8 \text{ m}^3(\text{man Sv})^{-1}$ [$10^6 \text{ m}^3(\text{man rem})^{-1}$] と仮定する (すなわち、 $\alpha = 10^4 \text{ } \$ (\text{man Sv})^{-1}$; $a = 0.064 \text{ } \$ \text{kW}^{-1}\text{h}^{-1}$; $b = 5.2 \text{ kWm}^{-3}\text{s}$)。線量換算係数は $F_d = 2 \times 10^{-5} \text{ Sv y}^{-1} / \text{Bq m}^{-3}$ ($0.73 \times 10^8 \text{ rem y}^{-1} / \text{Ci m}^{-3}$) であり、ヨウ素-131 の誘導空気中濃度 DAC は $7 \times 10^2 \text{ Bq m}^{-3}$ ($1.9 \times 10^{-8} \text{ Ci m}^{-3}$) である³²⁾。付録 B に示されている公式を用いると、流量率の増加割合 r_q は次のように与えられる：

$$r_q = \text{DAC} \left(\frac{\alpha N F_d}{abA} \right)^{1/2}$$

$$r_q = 7 \times 10^2 \text{ Bq m}^{-3}$$

$$\times \left(\frac{10^8 \text{ m}^3(\text{man Sv})^{-1} \cdot 12 \text{ man} \cdot 2 \times 10^{-5} \text{ Sv m}^3 \text{ Bq}^{-1} \text{ y}^{-1}}{3.1 \times 10^9 \text{ Bq y}^{-1}} \right)^{1/2}$$

(94)

$$r_q \cong 2$$

これは、最小換気流量率を2倍にするだけで価値があることを意味している。

(B₁-2) もう一つの例は、加圧重水型原子炉内の、トリチウムを含む高压の重水を通して配管が設置されている部屋の換気である。トリチウムの通常の漏洩率 \dot{A} は約 $3.1 \times 10^{12} \text{ Bq y}^{-1}$ ($3.7 \times 10^8 \text{ Bq h}^{-1}$, または $10^{-2} \text{ Ci h}^{-1}$) である。その環境にいる人の数は運転状況により変わりうるが、平均は常勤の作業者が約10名である。トリチウム(水として)に対する線量換算係数は $6.3 \times 10^{-8} \text{ Sv y}^{-1} / \text{Bq m}^{-3}$ ($2 \times 10^5 \text{ rem y}^{-1} / \text{Ci m}^{-3}$) であり、誘導空气中濃度 DAC は $8 \times 10^5 \text{ Bq m}^{-3}$ ($2.2 \times 10^{-5} \text{ Ci m}^{-3}$) である³²⁾。この場合自家発電なので電気料金はより安く、また送風機の効率がよりよいため、 a/ab の値は $10^9 \text{ m}^3(\text{man Sv})^{-1}$ [$10^7 \text{ m}^3(\text{man rem})^{-1}$] とする(すなわち、 $a = 10^4 \text{ \$}(\text{man Sv})^{-1}$; $a = 0.012 \text{ \$} / \text{kWh}$; $b = 2.9 \text{ kW m}^{-3}\text{s}$)。 r_q の値は次のようになる：

$$r_q = \text{DAC} \left(\frac{aNF_d}{ab\dot{A}} \right)^{1/2}$$
$$r_q = 8 \times 10^5 \text{ Bq m}^{-3}$$
$$\times \left(\frac{10^9 \text{ m}^3(\text{man Sv})^{-1} \cdot 10 \text{ man} \cdot 6.3 \times 10^{-8} \text{ Sv m}^3 \text{ Bq}^{-1} \text{ y}^{-1}}{3.1 \times 10^{12} \text{ Bq y}^{-1}} \right)^{1/2}$$

したがって、

$$r_q \cong 11$$

この例では、線量限度を守るために必要とされる最小換気流量率を大幅に増加(一桁以上)させる価値があることが結果から示される。

(B₁-3) この補遺に示された、パラメータに実際の値が使われている二つの例から、いくつかの場合には、放射性核種による汚染の可能性が存在するかぎられた区域の換気システムの運転に、最適化の手順が容易に適用できることが示される。これらの例では、最適化を達成するために必要な換気の運転の調整は可能であった。実際には、換気は、作業者が快適であるように、あるいは、

付 録 C

ラドン汚染に関連のある諸変数と最適化過程への
それらの影響

(C-1) ラドン汚染を扱うときには、最適化の算定にはこの核種に関連した特殊な量を使う必要がある。これらの量とそれらの相互関係とは、原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR) の 1982 年報告の付属書の一つにおいて十分に議論されている⁷⁰⁾。そこでは、ラドン、トロン、およびその崩壊生成物に対する被曝が調査されている。この付録では、関連した線量算定に関する点を含めて、ラドンが関係する最適化の算定にとり重要な諸量についての要約を示す。また、この付録では、これらの量の測定における不確かさと最適化に与えるそれらの影響についても議論する。

(C-2) 付録 B で議論されたように、屋内の空気汚染の場合には重要な防護パラメータは換気流量率である。この場合、線量は空気中に残留しているその核種の濃度をもとにして算定することができる。しかしながら、汚染核種がラドンの場合には、重要な線量算定上の量は、ラドン濃度ではなく、ラドン娘核種のポテンシャル α エネルギー濃度である。これら相互に関連のある量のいずれも、またラドン娘核種濃度も、最適化の算定に用いることができる。

(C-3) 空気中のラドン娘核種のポテンシャル α エネルギー濃度とは、すべての娘核種原子のポテンシャル α エネルギーの和 (すなわち、単位体積の空気当たりの、各原子が完全に崩壊してしまうまでに放出される全 α エネルギーの和) のことである。ある実際の適用にさいしては、ラドン娘核種濃度は作業レベル WL で表され、被曝は被曝期間中の空気中濃度の積分値 (たとえば、作

業レベル月, WLM) で表されてきた。WL は、もともとは、完全に崩壊してしまうまでに 1.3×10^5 MeV の α エネルギーを放出する、空気 1 l 当たりの短寿命のラドン娘核種の任意の組合せと定義されたものである。

(C-4) もう一つの重要な量は平衡係数 F である。平衡係数は、ある与えられた娘核種濃度についての全ポテンシャル α エネルギーの、ラドンと平衡状態にある娘核種の全ポテンシャル α エネルギーに対する比と定義される。平衡係数は次のように表すことができる。

$$F = \Xi \frac{\epsilon_{\alpha}^*}{C_{Rn}}$$

ここで、 ϵ_{α} はポテンシャル α エネルギー濃度(たとえば、ラドン娘核種の WL で表されたもの)；

C_{Rn} はラドンの放射能濃度；および

Ξ はディメンションをもった定数

である。

積 FC_{Rn} はラドンの平衡等価濃度 (EEC) といわれる。

(C-5) 異なる換気率に対する平衡係数 F の値は、次式から算出でき、この式はコンパートメントモデルで完全に記述できる状態について成り立つ。

$$F = \frac{\frac{\lambda_A/\nu}{\lambda_A/\nu+1}A + \frac{\lambda_B/\nu}{\lambda_A/\nu+1} \frac{\lambda_B/\nu}{\lambda_B/\nu+1}B}{W} + \frac{\frac{\lambda_A/\nu}{\lambda_A/\nu+1} \frac{\lambda_B/\nu}{\lambda_B/\nu+1} \frac{\lambda_C/\nu}{\lambda_C/\nu+1}C}{W}$$

ここで、 λ_A, λ_B および λ_C はそれぞれ、 RaA, RaB および RaC の崩壊定数；

ν は壁の効果を無視した純粋な換気率；

A, B および C はそれぞれ、 RaA, RaB , および RaC の単位放射能当たりのポテンシャル α エネルギー；および、

* 訳注 原書の ϵ_{α} は誤り。

W は、短寿命娘核種と平衡状態にあるラドンの単位放射能当たりのポテンシャル α エネルギー量 ($W = E^{-1}$) である。

(C-6) F 値も、次式により近似的に表すことができる(ここで、 ν は h^{-1} で表示されなければならない)：

$$F(\nu) = 0.8e^{-0.75\nu} + 0.18 \quad \text{ただし } \nu < 5 h^{-1} \text{ のとき}$$

または一次式により表すと：

$$F(\nu) = -0.3\nu + 0.85 \quad \text{ただし } 0.2 h^{-1} < \nu < 1.5 h^{-1} \text{ のとき}$$

$$F(\nu) = -0.08\nu + 0.55 \quad \text{ただし } 1.5 h^{-1} < \nu < 5 h^{-1} \text{ のとき}$$

$$F(\nu) = -0.006\nu + 0.21 \quad \text{ただし } 5 h^{-1} < \nu < 30 h^{-1} \text{ のとき}$$

$$F(\nu) = F_{30}e^{-0.019(\nu-30)} \quad \text{ただし } 30 h^{-1} < \nu < 100 h^{-1} \text{ のとき}$$

これらの近似式は付録 D に示す例で用いられる。

(C-7) かぎられた空間におけるラドン濃度は、ラドン放散率に比例し、換気率に逆比例する。娘核種の濃度は、このかぎられた空間内におけるこれら娘核種の滞留時間に影響され、それゆえ、換気率にも依存する。 F 値は、これらの要素を考慮に入れて、理論的に決定することができるが、実測値はこの計算値と大ききずれを示している⁶⁹⁾。 F の平均値を換気のみに基づいた理論値の 0.5 倍とすると、実際の F の値は、ほとんどの場合、理論値の $\pm 50\%$ 以内におさまるであろう。したがって、ラドンの測定では、対応する実際のラドン娘核種濃度は $\pm 50\%$ の不確かさで推定することができる。

(C-8) 最適化の目的で設計をバックフィットするときには、つねに現在および将来の状況を知っておく必要がある。ラドン娘核種による被曝の場合、ラドン娘核種の濃度は、ラドン測定またはラドン娘核種の測定により決定される。どちらの方法にも欠点があり、 $10 \sim 20\%$ の不確かさはまれではない。さらに、建物内の隣接した場所でも変わる、一桁にも及ぶ濃度の日変動および季節変動がある^{66,68)}。したがって、ラドンおよびラドン娘核種濃度の実際の平均値を

決定するのは困難で時間のかかる仕事であり、数回の測定では最善の場合でも実際の年平均とは±50%もちがう推定平均値を与えることがある。

(C-9) ラドン娘核種ではなくラドンを測定する場合には、1年間に数回の測定を繰り返さないと、年平均濃度の推定は不確かさがきわめて大きくなり、おそらく75%にもなる。ラドン娘核種濃度の実質的な変化は、二組の測定あるいは一組の測定と換気の変更による将来の計算値のいずれかに基づく二つの値の差から推定される。これらの推定がつけ加わるため相対誤差は増大する。たとえば、低減された集団線量預託の単位量当たりの防護費用の微小増加分が、勧告された値のたとえば2倍までなら、ラドン換気システムの換気率を変化させるだけの価値は依然としてあるかもしれない。この例においては低減された集団線量預託は、実際には推定値よりもはるかに小さいかもしれない。75%という不確かさは、真の値が推定値の1/4以下かもしれないことを意味しているので、低減された集団線量預託の単位量当たりの費用が、勧告値の8倍になることがありうる。したがって、どちらとも決定しにくい範囲は費用が勧告値の0.25~2倍のときである。この議論は次のように要約することができる：

- $\Delta X/\Delta S > 2\alpha$ ならば、その対策は価値がない（すなわち、最適化の算定結果は否定的である）；
- $0.25\alpha < \Delta X/\Delta S < 2\alpha$ ならば、その対策はどちらとも判断しにくい（不確かな状態にある）；
- $\Delta X/\Delta S < 0.25\alpha$ ならば、その対策は実施する価値がある（すなわち、最適化の算定結果は肯定的である）。

(C-10) 上に述べられた不確かさには、ラドンの被曝による集団線量の現実的な（控えめではない）推定に関連した不正確さを含んでいない。もし、これらを考慮に入れるとすると、ラドンの問題を含む最適化の算定には、さらに大きな不確かさが生じるであろう。たとえば、閉鎖された環境中のエアロゾルの粒径分布と濃度は、ラドン娘核種のエアロゾルへの付着に影響し、その結果、

(100)

人体の呼吸気道内における娘核種の取込みと線量分布にも影響する。換気率を大幅に増大させる（たとえば、鉱山において）ような最適化の算定においては、被曝-線量関係に影響しうるエアロゾルの特性がかなり変化することがしばしばある。

(C-11) ICRP は、ラドンおよびその娘核種に対する職業上の被曝について適切な個人の限度を勧告した³⁵⁾。勧告された吸入の年摂取限度は、吸入されたポテンシャル α エネルギーとして、1 年間に 0.02 J である。そして、これに対応する誘導空気中濃度は 0.3 WL である。これらの限度は該当する線量限度に従っていることを確実にすることを第一に意図したものであるが、職業被曝について導かれたこの線量換算係数は、それらが本来的に控えめであるにもかかわらず、職業上の被曝を制御する換気システムの最適化のために、暫定的に用いることができよう。

(C-12) 特定の状況のもとでの公衆の構成員に関する線量換算係数の誘導も、いくつかの仮定のもとに試みられている。たとえば、公衆の呼吸率は工場の作業者のそれより低い。肺におけるラドン娘核種の取込みは両者とも等しいと仮定することができる。一方、家庭と通常の作業場所とでは居在の程度は異なる。これらの要素をすべて考慮に入れて、UNSCEAR 報告では、公衆の構成員の被曝のレベルを評価するための線量換算係数を概算している⁷⁰⁾。これらの係数は、公衆の被曝を伴うときの最適化の算定に暫定的に用いることができる。

(C-13) 以下に示すのは、最適化の目的で、ラドン被曝から集団線量を算定するのに用いることができる暫定的な線量換算係数である：

職業上の被曝 $3.5 \times 10^{-5} \text{ Sv y}^{-1} / \text{Bq m}^{-3}$

(あるいは $\sim 120 \times 10^{-3} \text{ rem y}^{-1} / \text{pCi l}^{-1}$)

(あるいは $\sim 120 \times 10^{-3} \text{ Sv y}^{-1} \text{ WL}^{-1}$)

公衆の構成員の被曝（屋内） $6 \times 10^{-5} \text{ Sv y}^{-1} / \text{Bq m}^{-3}$

(あるいは $\sim 200 \times 10^{-3} \text{ rem y}^{-1} / \text{pCi l}^{-1}$)

公衆の構成員の被曝（屋外）

$$3 \times 10^{-5} \text{ Sv y}^{-1} / \text{Bq m}^{-3}$$

（あるいは $\sim 120 \times 10^{-3} \text{ rem y}^{-1} / \text{pCi l}^{-1}$ ）

職業上の被曝に関する ICRP の限度および UNSCEAR から導かれたこれらの係数は、ラドン娘核種に 1 年間被曝することによる実効線量当量を表したものであり、ここでの放射能は、ラドンの平衡等価濃度 (EEC) で表されている。

付 録 D

環境にラドンがある場合の、換気の設計による
放射線防護の最適化の代数的例

(D-1) 同じラドン娘核種濃度にさらされた、かざられた人数 (N) の集団線量預託 S_E^c は：

$$S_E^c = NF_d(\text{EEC})\tau f_t$$

ここで、 F_d はラドン娘核種に関する線量換算係数 (付録 C 参照)；

EEC はラドンの平衡等価濃度 (付録 C 参照)；

τ は施設の寿命；および

f_t は関連する居在時間係数

である。

(D-2) EEC の値は、ラドン濃度と係数 F (C-4 項参照) との積として表されてきた。換気率が 0.1 よりも大きく、取入れ空気中のラドン濃度が無視できるならば、室内のラドン濃度は空気交換率あるいは換気率 ν に近似的に逆比例して変化する。

$$\text{EEC} = \frac{C_0 \nu_0}{\nu} F \kappa$$

ここで、 C_0 は換気率 ν_0 のときのラドン濃度；

F は換気率 ν のときの平衡係数；および

κ は F の算定に関係した種々の不確かさを考慮に入れた修正係数 (付録 C 参照) で、0.5 と仮定する。

(D-3) 換気率が低い範囲では一次式を用いるとすると、 S_E^c の式は次のよ

うになる (B-2 項および C-6 項参照)。

$$S^c_E = NF_a f_t C_0 \nu_0 0.5 \left(\frac{0.85}{\nu} - 0.3 \right) \tau$$

(D-4) 143 項以降で指摘したように、設置費用が運転費用と比較して無視できるとは仮定できない実際の事例がある。この例では、換気の全費用には設置費用が含まれている。設置費用は、通常、流量率の不連続関数である。しかし、ときには、流量率に比例すると仮定される。これらの特定の例における費用方程式は、次のように書くことができる：

$$X_o(Q) = c \frac{Q}{\nu} + abf\tau Q$$

または

$$X_o(\nu) = c\nu + abf\nu\nu$$

ここで、 $\nu = Q/\nu$ は空気交換の回数、すなわち交換される空気の体積率；

ν は換気すべき閉区画の体積；

c は単位空気交換率当たりの設置費用を表す定数；

a および b はそれぞれ、単位電気エネルギー当たりの電気料金、および単位体積の空気を調節し、循環させるのに費やされるエネルギーを表す定数；および

f はシステムが運転される時間割合

である。

$X_o(Q)$ および $X_o(\nu)$ は、いずれも換気費用の拘束関数を表している。

(D-5) したがって、一般的な目的関数は次のように表すことができる：

$$U = aNF_a f_t C_0 \nu_0 0.5 \left(\frac{0.85}{\nu} - 0.3 \right) \tau + c\nu + abf\nu\nu$$

最適化は、目的関数を空気交換率に関して微分し、零に等しいとおくことにより得ることができる。 $f = f_t$ と仮定する。その結果は：

(104)

$$-aNF_{af_i}C_0\nu_00.43\frac{1}{\nu^2}\tau + c + abf\nu\tau = 0$$

ところが、

$$(c + abf\nu\tau) = \frac{X_{\nu_0}}{\nu_0}$$

ここで、 X_{ν_0} は換気率 ν_0 に対応する総費用である。したがって、空気交換率の最適値 ν_{op} は次の式から得られる。

$$\nu_{op} = \left(\frac{\nu_0^2 NF_{af_i} C_0 \tau 0.43 \alpha}{X_{\nu_0}} \right)^{1/2}$$

(D-6) ν を連続的に変化させることが実際的でないならば、最適化は段階的に行うことができる。 ν_1 から ν_2 への段階的な移行と、対応する費用の増加分 (ΔX) および集団線量の減少分 (ΔS_E^c) は、次の数式により表される：

$$\frac{\Delta X}{\Delta S_E^c} = \frac{X_{\nu_0}/\tau}{f_i NF_d C_0 \nu_0^2 0.43} \nu_1 \nu_2$$

ここで、分数 X_{ν_0}/τ は、空気交換率 ν_0 およびラドン濃度 C_0 を達成するために要する年間の費用である。補遺 D₁ に、上記の式を用いて、鉱山の換気システムをバックフィットさせるさいの換気最適化の数値例を示す。

(D-7) 坑道の換気システムの設計における放射線防護の最適化という特定の事例は、以下の仮定をおくことにより例示することができる：

(i) 単位流量率当たりの換気費用は、このシステムの操業に要するエネルギーの費用のみに依存するとする。(これは、最適化の過程で流量率に小さな変化しかもたらさない場合には、ほぼ正しい。) および、(ii) 坑道内には、ウランを多く含んだ鉱石とか、ラドンに富んだ水のような、局所的なラドン発生源は存在しないとする。したがって、ラドンの発生源は、坑道を囲む岩石中に分布しているラジウム-226 であると仮定する。ラドンの発散率は、鉱石の品位に依存し、一次近似として、空気中のラドン-222 の平均放射能濃度 C は、次式で決めることができる：

$$C = \frac{JpL}{Q}$$

ここで、 J は単位時間当たり、単位面積当たり坑道内に放出される放射能で表される発散率（一定）；

p は坑道断面の周囲の長さ；

L は坑道の長さ；および

Q は換気流量率

である。

(D-8) 娘核種のポテンシャル α エネルギー濃度は時間とともに増加し、ラドン濃度が一定のときには、40 分を超えなければ $t^{0.85}$ にほぼ比例する³³⁾。ここで t は分で表された成長時間である。したがって、ラドン娘核種を完全に除去してから t 分後の、ラドン-222 濃度が C のときの空気中のポテンシャル α エネルギー濃度 ε_a は、次の一般式によって推定することができる：

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a_1} C \left(\frac{t}{t_1} \right)^{0.85}$$

ここで、 t_1 は 1 分；および

ε_{a_1} は 1 分間の成長時間が経過した後のラドン-222 の単位濃度当たりのポテンシャル α エネルギー濃度。(単純化のために、ラドンとその娘核種との平衡は、この最適化の過程で使われる Q の範囲では変化しないと仮定する。)

(D-9) 上の D-8 項の式から、坑道内の種々の地点におけるポテンシャル α エネルギー濃度を定式化することができる。坑道内のある与えられた作業場所において、坑道内のある与えられた位置から発生したラドンにより生成されるポテンシャル α エネルギーの微小（微分）濃度 ($d\varepsilon_a$) は、発生地点におけるラドンの微分濃度、および発散地点から作業場所までの通過時間に比例するであろう。発生地点におけるラドンの微分濃度は、

(106)

$$dC = \frac{Jpdx}{Q}$$

であり、発生場所から作業場所までの通過時間は、次のようになる：

$$t = \frac{\chi\phi}{Q}$$

ここで、 ϕ は坑道の断面積；および

χ は発生地点から作業場所までの空気の移動距離

である。

したがって、D-8 項の一般式に代入することにより、

$$d\varepsilon_\alpha = \varepsilon_{\alpha_1} \frac{Jpdx}{Q} \left(\frac{\chi\phi}{t_1 Q} \right)^{0.85}$$

となる。

(D-10) 空気取入れ口から距離 χ の位置にある作業場所においては、空気取入れ口から χ までの坑道の表面から発散するラドンから生成する全ポテンシャル α エネルギー濃度は、 $d\varepsilon_\alpha$ を積分することにより得られる。その結果、

$$\varepsilon_\alpha(\chi) = \frac{\varepsilon_{\alpha_1} Jp\phi^{0.85}}{1.85 t_1^{0.85} Q^{1.85} \chi^{1.85}}$$

したがって、換気空気取入れ口から距離 χ の坑道内で、時間 t の間働く N 人のグループが受ける集団実効線量当量預託 S_E^c は、次のようになる：

$$S_E^c = \frac{\varepsilon_{\alpha_1} Jp\phi^{0.85}}{1.85 t_1^{0.85} Q^{1.85} \chi^{1.85}} F_d N f_t \tau$$

ここで、 F_d は単位体積当たりのポテンシャル α エネルギーを実効線量当量率

に関連づける線量換算係数；

N は被曝する鉱山労働者の数；

f_t は該当する居在時間係数；および

τ は施設の寿命

である。

(D-11) この例のために、換気費用は運転費用だけであると仮定すると、この理論的な場合に関する目的関数は、次のように表すことができる：

$$U = \frac{a\epsilon_{a'} J p \phi^{0.85} \chi^{1.85} F_d N f_t \tau}{1.85 t_i^{0.85} Q^{1.85}} + abf\tau Q$$

ここで、 a および b は、それぞれ、単位エネルギー当たりの電力料金、および単位体積の空気を調節し、循環させるのに費やされるエネルギーを表す定数；そして

f はシステムが運転される時間割合； $f = f_t$ と仮定する。

である。

(D-12) 最適化は、目的関数を最小にする必要がある。したがって、目的関数を換気流量率に関して微分し、それを零とおくことにより、次の最適流量率が得られる：

$$Q_{op} = \left[\frac{F_d a N \epsilon_{a'} J p \chi \left(\frac{\phi \chi}{t_i Q_{op}} \right)^{0.85}}{ab} \right]^{1/2}$$

これは、次のように表すこともできる：

$$Q_{op} = \left(\frac{F_d a N \epsilon_{a'} J p \chi^{1.85} \phi^{0.85}}{ab t_i^{0.85}} \right)^{\frac{1}{2.85}}$$

補 遺 D₁

鉱山における換気システムのバックフィット による放射線防護の最適化の数値例

(D₁-1) この例においては、約 400 人の鉱山労働者が働いており、年間約 100 万 t の鉱石を採掘している鉱山に機械的な換気装置を導入する価値があるか否かを考察する。機械的換気装置を設置する前のラドン娘核種濃度は平均 1

(108)

WLであり、設置後は0.1 WLにしようとする。設置費用および運転費用は、およそ次のとおりである：

600 m たて坑	$0.75 \times 10^6 \$$
300 m 坑道	$0.13 \times 10^6 \$$
90 kW の送風機 3 台	$0.075 \times 10^6 \$$
加熱系	$0.05 \times 10^6 \$$
<hr/>	
機械類 (合計)	$1 \times 10^6 \$$
<hr/>	
3 台の送風機の電力	$0.05 \times 10^6 \$ y^{-1}$
加熱系用の燃料油	$0.04 \times 10^6 \$ y^{-1}$
<hr/>	
年間運転費用 (合計)	$0.09 \times 10^6 \$ y^{-1}$

したがって、設置費用が10年間の短い寿命で償却されるのであれば、総年間費用はおよそ $0.2 \times 10^6 \$$ で、設置費用と運転費用とは等しい。

(D₁₋₂) 集団線量の減少分は

$$\Delta S = N \Delta C F_d$$

である。ここで、

N は鉱山労働者の数 (この場合 400 人)；

ΔC はラドン娘核種濃度の変化分 (この場合は 0.9 WL)；および

F_d は職業上の被曝に関する線量換算係数 ($120 \times 10^{-3} \text{ Sv } y^{-1} \text{ WL}^{-1}$)

である。これより、

$$\Delta S = 400 \text{ man} \cdot 0.9 \text{ WL} \cdot 120 \times 10^{-3} \text{ Sv } y^{-1} \text{ WL}^{-1} = 43.2 \text{ man Sv } y^{-1}$$

そこで、 $\Delta X / \Delta S$ の比は、

$$\frac{\Delta X}{\Delta S} \cong 0.5 \times 10^4 \$ (\text{man Sv})^{-1}$$

となる。したがって、 $\alpha > 0.5 \times 10^4 \$ (\text{man Sv})^{-1}$ であれば、機械的換気装置を設置し、使用する価値があると思われる。

(D₁₋₃) 機械的な換気を主とする鉱山内のラドン娘核種濃度の低減には、

鉱山全体が関係することも、あるいは坑道内のいくつかの作業場所だけが関係することもある。前者の場合には、既存のたて坑の空気流量率を増加することは運転費用が高くなりすぎるので、新しいたて坑を造る必要があるかもしれない(送風機の所要電力は流量率の相対的な増加の3乗で増加する)。前項で与えられた例においては、年間の追加費用は新しいたて坑がない場合には約 0.4×10^6 \$, 新しいたて坑が造られた場合には約 0.2×10^6 \$ となろう。たとえラドン娘核種濃度が 0.01 WL にまで減少したとしても、 $\Delta X/\Delta S$ は約 10^5 \$(man Sv)⁻¹ となり、いずれの場合も価値がないであろう。

(D₁-4) 局所的な放射線防護の問題は、作業場所の流量率を増加させることにより解決される。もしこれを流量率に比例した断面積をもつ配管に変えることにより行うのであれば、追加費用は流量率の増加に比例する。経済的な理由のため、管内に空気を吸引するよりも、管から空気を吹き出すことによる作業場所の換気が選ばれることがしばしばある。送風の場合には、作業場所における発生源以外からのラドンのビルドアップはない。空気を吸引する場合あるいは坑道を通じて空気を流す場合には、坑道内を空気が輸送される間にラドンのビルドアップが生じるであろう(付録 D の D-7 項以降参照)。最適化の過程においては、ラドン濃度と空気流量率の逆数との間に比例関係があると仮定し、さらに適切な平衡係数 F を用いて、低減された娘核種濃度とそれに対応する集団線量預託を計算することができる。鉱山では、 $1 \sim 10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の流量率はまれではなく、これは $\nu \cong 10 \sim 1000 \text{ h}^{-1}$ に相当する。正確な値は換気される作業場所の体積に依存する。これは、空気の平均滞留時間が分のオーダーで、ラドン娘核種の放射能はおもに RaA から成るであろうことを意味する。このような高い換気率のときには、係数 F は近似的に指数関数で表すことができる(付録 C の C-6 項参照)。

$$F(\nu) = F_{30} e^{-0.019(\nu-30)} (30 \text{ h}^{-1} < \nu < 100 \text{ h}^{-1})$$

ラドンの平衡等価濃度 (EEC) は、次のように表される(付録 C 参照)：

(110)

$$EEC = \frac{C_0 \nu_0}{\nu} 0.5F = \frac{C_0 \nu_0}{\nu} 0.5F_{30} e^{-0.019(\nu-30)}$$

(D₁-5) 次の例では、5人の鉱山労働者が継続して働いている典型的な100 mの坑道についての最適化の手順について考察する。換気の増加分の費用は、前と同じように、方式の選び方に依存する。同一の管を通す空気流量を増加させることは、空気流量率の相対的な増加の3乗に比例するエネルギーを必要とすることになる。その代わりにもっと太い管を用いるならば、費用は、流量率の増加分と設置費用との合計に比例して増加する。この例で換気率を2倍にするために後者の方法を用いると、費用はおよそ次のようになる⁶⁵⁾：

<u>設置費用</u>	
管 (100 m, $\phi=70$ cm) : 1 200 \$	管 (100 m, $\phi=100$ cm) : 1 700 \$
送風機 (10 kW) : 2 500 \$	送風機 (<20 kW) : 5 000 \$
3 700 \$	6 700 \$
<u>年当たりの運転費用</u>	
電力 : 2 000 \$	4 000 \$
10年間の寿命に対する全年間費用	4 670 \$
2 370 \$	4 670 \$

したがって、限界費用は2 300 \$となる。換気は3交替勤務の作業者のために6 000時間運転され、設置費用は10年間で償却されると仮定している。

(D₁-6) 作業者の数は15名、換気を30 h⁻¹から60 h⁻¹に増加し(F の値はそれぞれ $F_{30}=0.040$ および $F_{60}=0.022$ となる)、そして、 $C_0=3.5 \times 10^4$ Bq m⁻³と仮定すると、 $\Delta X/\Delta S$ は 2×10^4 \$(\text{man Sv})^{-1}\$となる。 3.5×10^4 Bq m⁻³のラドン濃度は、平衡等価濃度700 Bq m⁻³または0.2 WLに相当する。したがって、ラドン娘核種濃度が0.2 WL以上で、交換される空気の体積率が30 h⁻¹であれば、 $\alpha > 2 \times 10^4$ \$(\text{man Sv})^{-1}\$という仮定のもとでは、換気率を少なくとも2倍にすることは価値があろう。

付 録 E

単純な空気浄化システムの設計による
放射線防護の最適化の代数的例

(E-1) 典型的な空気浄化過程を表す微分方程式は：

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{A}{V} - C(t) \left[\frac{Q}{V} \left(1 - \prod_1^{\theta} p \right) \right]$$

ここで、 p は一つの除染ユニットの透過率で $p = 1 - \zeta$ 、 ζ はこのシステムの一除染ユニットの効率で、プレフィルタがあるか、あるいは空気中の飽和粒子が十分に除かれているとの仮定のもとでは一定と仮定される；個々のユニットに高性能エア (HEPA) フィルタが使われている場合には、 $\zeta = 0.9997$ ；

θ は直列の除染ユニットの数；

であり、その他のすべての変数は、付録 B で述べたとおりである。

$Q \gg \lambda_0$ および $C(0) = 0$ とここでも仮定して (付録 B 参照)、平衡時における C は、次のように表すことができる：

$$C = \frac{A}{Q \left(1 - \prod_1^{\theta} p \right)}$$

(E-2) 空気浄化システムの運転費用には二つの成分が含まれる：一つは空気の循環に、もう一つは除染に関係したものである。前者は換気費用と同様にして決定することができ、後者は基本的には θ に比例する。それゆえ、設置費用 X_I が θ および Q と独立であると仮定すると (これは、最適化を行った結果、 θ と Q がわずかしか変わらない場合には現実的である)、総費用は

(112)

$$X = (abQ + \delta\zeta\theta)\tau + X_I$$

ここで、 δ は除染ユニット当たりの費用を表す定数；

ζ は交換頻度

である。

上の式は、最適化過程の結果流量率が変わっても、除染ユニットの数は変更する必要がないと仮定している。もし流量率の変動がかなり大きいと、前述の仮定は成立しないかもしれない。この場合には、 δ の値に、流量率を各除染ユニットの定格流量で除した値に比例する係数を乗じる必要がある。さらに、直列の除染ユニットの一分岐のみが含まれていると仮定したので、そうでない場合には、かっこ内の第2項に、並列分岐の数を乗じるべきである。

(E-3) 空気浄化システムにより除染されているかぎられた空間で働く人々の受ける集団実効線量当量預託は、次のように定式化することができる：

$$S^c_E = f_i N \tau F_d \frac{\dot{A}}{Q \left(1 - \prod_1^o p\right)}$$

ここで、線量換算係数 F_d は、その場にいる人々の平均年齢に対応した平均的な値と仮定される。損害費用の拘束関数は次のようになる：

$$Y = a f_i N \tau F_d \frac{\dot{A}}{Q \left(1 - \prod_1^o p\right)}$$

(E-4) したがって、空気浄化システムを最適化するとき、目的関数は次の式で表すことができる：

$$U = a f_i \tau N F_d \frac{\dot{A}}{Q \left(1 - \prod_1^o p\right)} + (abQ + \delta\zeta\theta)\tau + X_I$$

(E-5) 目的関数を最小とすることにより、除染ユニットごとに一つの、最適な流量率の一组が次のように得られる：

$$Q_0 = \left(\frac{\alpha}{ab \left(1 - \prod_1^{\theta} p \right)} f_t N F_a \dot{A} \right)^{1/2}$$

除染ユニットの数 θ は通常はあまり大きくはないから、一組の Q_0 (それぞれの除染区域に対応する) を算定し、そのそれぞれに対して目的関数の値を決定するのが簡単であろう。これらすべての目的関数の値を最小値にする Q_0 の値が最適流量率となり、それに対応する θ_0 が最適な除染ユニット数となるであろう。

付 録 F

放射性物質の放出制御による放射線防護の
最適化の手順の例

(F-1) 放出制御のための一連の代替手段から最適解を得るための簡単な手順は、それぞれの代替手段の費用および集団線量を、下の表に示すように表の形にすることである；代替手段間の、これら変数の増加分とその比は容易に算定することができる。

代替手段	A	A→B	B	B→C	C	C→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		$X_B - X_A$		$X_C - X_B$		$X_D - X_C$	$X_n - X_{n-1}$	
$-\Delta S$		$S_A - S_B$		$S_B - S_C$		$S_C - S_D$	$S_{n-1} - S_n$	
$-\frac{\Delta X}{\Delta S}$		$\frac{X_B - X_A}{S_A - S_B}$		$\frac{X_C - X_B}{S_B - S_C}$		$\frac{X_D - X_C}{S_C - S_D}$	$\frac{X_n - X_{n-1}}{S_{n-1} - S_n}$	

(F-2) 代替手段 A は、まったく制御していないか ($X_A=0$)、または、個人の線量をあらかじめ設定されたあるレベル以下にしておくために必要な最小限の制御しかしていないことを意味する。最適な結果は、最終行の値が α の選定値よりも大きく、かつ最もそれに近いものとして得られる。補遺 F₁ および F₂ に、この手順を用いた数値例を示す。

補 遺 F₁沸騰水型原子炉からの気体放出の制御による
放射線防護の最適化の数値例

(F₁-1) 放出を遅らせた間の減衰に基づく放出物制御システムに最適化を適用する例として、沸騰水型原子炉からの短寿命気体の放出について議論する。BWR では、蒸気流中の非凝縮性ガスを主復水器の空気抽出系で連続的に除去している。このガスはおもにここで気体状廃棄物の流れの中に入る。副次的な発生源は、プロセス流のオフガスが含まれる。

(F₁-2) この例は特定の型式の BWR に対して適用されるもので、決められた代替手段の費用は、ある特定の国の状況についてのものである⁵⁾。燃料の 0.1% がピンホール損傷をもつという仮定、運転特性に関する情報、放出物処理の各代替手段の効果および環境の線量算定モデルに基づいて、集団線量当量預託を算定する^{65,69)}。

(F₁-3) ここで考える減衰に基づく制御の代替手段のレベルは次のとおりである：

- (A) 減衰のための遅延用としてのサンドタンク (Oskarshamn 1号炉および2号炉に使用されている型式)
- (B) サンドタンクと再結合器 (Barsebäck 1号炉および2号炉に使用されている型式)
- (C) サンドタンクと再結合器と活性炭カラム (Forsmark 1号炉および2号炉に使用されている型式)
- (D) C の型式に非放射性のグランドシールシステムを加えたもの。

(116)

(F₁-4) 制限式（個人線量は“被曝源の天井値”として用いられる線量限度の一部分を超えるべきでない）に従っていることを確実にするためには、選択肢 A が必要最低要件であると考えられる。まったく制御されないときには、数百 μSv という年間天井値を超えるかもしれない決定グループの線量は、選択肢 A では、 $2 \times 10^{-4} \text{ Sv y}^{-1}$ （1年につき 20 mrem）となる。

(F₁-5) それぞれの代替手段を実施したあとの集団実効線量当量頂託（プラントの寿命を 40 年としたとき）、およびそれぞれの代替手段の費用（設置費用を含む）を、最適化の手法の適用結果とともに下の表に示す：

代替手段	A	A→B	B	B→C	C	C→D	D
$S_E(\text{man Sv})$	120		1.60		0.12		0.08
$X(10^6 \$)$	2.32		3.26		4.66		9.32
$\Delta X(10^6 \$)$		0.94		1.4		4.66	
$\Delta S(\text{man Sv})$		118.40		1.48		0.04*	
$\frac{\Delta X}{\Delta S} \$ (\text{man Sv})^{-1}$		7 900		9.46×10^5		116.5×10^6	

(F₁-6) α として、 $10^4 \sim 2 \times 10^4 \$ (\text{man Sv})^{-1}$ の範囲の値を用いると、表は最適化の結果として代替手段 B を選択することを示す。決定グループ内の個人の年線量は、代替手段 B では約 10^{-6} Sv である。

補 遺 F₂

再処理施設からのヨウ素-129 の制御による 放射線防護の最適化の数値例

(F₂-1) 放出物の除染を行うことによる放出制御の最適化の例として、再

* 訳注 原文の 4 は誤り。

処理施設からのヨウ素-129の放出について議論する。この例は、1年につき60 GW(e)yの使用済燃料を取り扱う仮想の再処理施設を扱う⁵²⁾。

(F₂-2) ヨウ素-129の放射能半減期は 1.7×10^7 年である。放出物処理システムは放出物から大部分のヨウ素を取り除くことができ、捕集されたヨウ素を環境から隔離する手段を講ずることができる。ヨウ素-129の半減期がきわめて長く、その取扱いに関する直接の経験がほとんどないことを考慮すると、以下のような隔離技術の実施には、次のようなかなりの不確かさがある：安定な化合物への転換；比較的不活性な材料中への封入および地中または海底の深層部への埋蔵。これとは反対の明確な情報がないので、この例については、放射能半減期に比べごく短い期間、たとえば、 10^4 年しか隔離しておけないと仮定することができる。さらに、隔離されたヨウ素-129の放出は、工場区域から放出されるのであれば、隔離しないで放出されたときと同じように拡散すると仮定することもできる。この例における集団線量預託の重要な部分は 10^4 年にわたって積分された不完全集団線量預託である；すなわち、ただちに放出した場合の集団線量預託と隔離によって遅らせた放出によるものとの差である：

$$S_E^r = \int_0^{\infty} \dot{S}(t) dt - \int_{\tau}^{\infty} \dot{S}(t) dt = \int_0^{\tau} \dot{S}(t) dt$$

ここで、 τ は 10^4 年である。

(F₂-3) 制御のための代替手段の選択肢は次のとおりである：

選択肢	除染係数
(A) 非制御	1
(B) 溶解槽オフガスの銀ゼオライトによる保持	100
(C) 全オフガスの銀ゼオライトによる保持	500

この例においては、いずれの選択でも、決定グループの受ける年線量はきわめて小さく、最小限の選択肢は要求されない。

(F₂-4) 20年間の操業の費用および集団線量預託の両方を計算し、集団線

(118)

量預託の計算を 10^4 年で打ち切り、UNSCEAR の線量算定モデル⁶⁹⁾を用いて算定すると、次の結果が得られる：

代替手段	A	A→B	B	B→C	C
$S_E^{0.4y}(\text{man Sv})$	2.52×10^3		2.52×10^1		5.04
$X(10^6 \$)$	0		2.4		4.8
$\Delta X(10^6 \$)$		2.4		2.4	
$\Delta S(\text{man Sv})$		2.49×10^3		2.02×10^1	
$\frac{\Delta X}{\Delta S} \$(\text{man Sv})^{-1}$		9.6×10^2		$1.2 \times 10^{5*}$	

(F₂-5) ここでも、 α に $10^4 \sim 2 \times 10^4 \$(\text{man Sv})^{-1}$ の範囲の値を用いると、最適化の結果として代替手段 B が選択されることを表は示している。前にも示したように、決定グループの受ける個人線量はきわめて小さいので、それが制限的な影響をもつことはない。

* 訳注 原文の 1.02×10^5 は誤り。

付 録 G

核医学操作における放射線防護の最適化の例

(G-1) 核医学操作における放射線防護の最適化の一例を議論する。核医学操作における放射線防護を最適化するために適用される諸段階は、次のとおりである：

- (a) 同程度の診断効果をもった、ある与えられた種類の検査を実行するのに利用できる、放射性核種と測定機器との種々の組合せを確定すること。たとえば、甲状腺のスキニングの場合、ヨウ素-131, ヨウ素-123 またはテクネチウム-99m のような核種を用いることができる。同様に、種々のレベルの感度と正確さをもった種々の機械的スキナも、ガンマカメラも用いることができる。
- (b) 放射性核種と測定機器のこのような組合せのそれぞれについて、満足すべき診断結果を得るために必要とされる放射性核種の投与量を算定すべきである。たとえば、甲状腺のスキニングの場合、典型的な投与放射線量は、ヨウ素-123 で 10^6 Bq, テクネチウム-99m で 10^8 Bq のオーダーである。これらの値は、採用する測定機器の型によって、かなり広い範囲で変動することがありうる。
- (c) 上述のそれぞれの組合せに対して、各検査ごとに患者および作業者の受ける個人の平均実効線量当量を算定すべきである。この例においては、職業人と患者の被曝を足し合わせているが、一般には、これらは別々に取り扱ってよいということに注目しておくべきである。患者について平均した実効線量当量 $\bar{H}_p (\bar{H}_p = \sum_i d_i f_i)$ の算定は簡単である。ここで、 d_i

(120)

は放射性核種 i の投与放射能, f_d は単位投与放射能当たりの実効線量当量を表す適切な線量換算係数である。

(G-2) 個々の作業員に対する平均実効線量当量は、次の二つの成分の合計である：(i) \bar{H}_e , 放射性同位体の 1 回の投与と検査を行うことにより受ける平均線量；(ii) \bar{H}_{env} , 作業環境中の放射線レベルと、貯蔵、希釈その他の操作中の取扱いに由来する平均線量。第一の成分は患者当たりの投与放射能に比例する。第二の成分は、放射性同位体原液の出荷、入荷、貯蔵、希釈および放射化学操作のさいの操作の頻度と種類の違いが作業員の被曝に影響することを考慮している。

(G-3) 上述の組合せのそれぞれについて、 N_w (作業員の人数) および N_p (患者の人数) が一定であると仮定すると、作業員および患者に対する集団実効線量当量 (または、適切な集団臓器線量当量) は、次式で計算することができる：

$$S = N_w \left[\bar{H}_e \frac{N_p}{N_w} + \bar{H}_{env} \right] + N_p \bar{H}_p$$

ここで、 N_p/N_w は作業員一人当たりの平均受持患者数である。

それぞれの組合せについて、かかる費用も算定すべきである。総費用 X は、 X_a (測定機器の費用)、 X_o (労働力を含む操作費用) および X_r (放射性同位体の供給の費用) の合計として計算することができる。一次近似として、 X_o は一定であると仮定することができる。

(G-4) 特定の α の値が設定されていたならば、目的関数の値を計算することができる。さらに、さまざまな組合せを、 $(X + \alpha S)$ の値の減少する順に並べることができ、この和がもっとも小さくなる選択肢を最適化されたものとして選ぶことができる。かわりの方法として、考慮したさまざまな組合せを、 X の値の増加する順 (そして、おそらく S の値の減少する順) に並べることができる。そして、107 項で与えた不連続な変数の場合の最適化のための簡単な式

を、並べられた組合せの各対に適用することができ、108項で述べたように、次第に高いレベルの放射線防護を試していき、次式が α より低く、かつもっとも高くなるところでやめる反復法を行うべきである。

$$\frac{{}_B X - {}_A X}{{}_B S_E^c - {}_A S_E^c}$$

(G-5) 放射性同位体診断手順に関するこの簡単な例においては、診断情報の質で表されるこの行為の便益は、放射性核種および測定機器が変わっても一定であり、したがって、達成される放射線防護のレベルが変わっても一定であると仮定した。これは、他の型の検査、とくに照射レベルにより質が影響を受ける X 線診断においては、あてはまらないかもしれない(179項以降を参照)。さらに、この例では、用いる核種の必要量の生産に由来する集団線量預託は、代替手段の選択肢により変化しないと仮定した。

付 録 H

天然ガスの家庭内使用における放射線防護の
最適化の例

(H-1) 天然ガスを家庭内で使用する場合の放射線防護の最適化の一例を示す。定義すべきソースタームには、放射性物質を含む天然ガスの生産率 Q 、および使用場所での平均濃度で表した放射能含有量 \bar{C} がある。したがって、 $\dot{A} = Q\bar{C}$ が、ソースターム、すなわち、ガスの家庭内使用における異なる経路からの集団の被曝にかかわる毎年の総放射能である。 R_h を暖房のための一人当たりの平均ガス消費率、 R_c を炊事のための一人当たりの平均ガス消費率、 R_{nh} を家庭でのその他の用途（たとえば、湯わかし器、冷蔵庫、および衣類乾燥機）の対応する値とすると、被曝する個人の数、 N は次のようになる：

$$N = \frac{Q}{R_h + R_c + R_{nh}}$$

(H-2) 地下核爆発により刺激されて出てきた、天然ガス中に含まれるトリチウム、あるいは天然ガス中に存在するラドンおよびその娘核種に対して適用されたこの問題に関する研究により、直接の被曝のみを考えると、排気口のない器具またはヒーターからのガス燃焼生成物に対する家庭内での被曝が、決定被曝経路であることが明らかにされている³⁾。もう一つの決定経路は、このガスを使って調理された食物の経口摂取であることがある。これは、地下核爆発で刺激されたガス井戸からのガスの場合にはとくに重要である。したがって、平均個人実効線量当量 \bar{H}_E は、吸入 (H_{E_i}) および汚染ガスを使って調理された食物の経口摂取 (H_{E_f}) の二つの寄与の和である：

$$\bar{H}_E = H_{E_i} + H_{E_f} = \bar{C}(R_h + R_c + R_{nh})F_{d_i} + \bar{C}R_c F_{d_f}$$

ここで、 F_{d_i} および F_{d_f} は、それぞれ、吸入および経口摂取についての線量換算係数で、線源となるガス中の Bq 当たりの Sv で表される。そして、対応する集団線量預託は次のようになる：

$$S^c_E = N(H_{E_i} + H_{E_f}) = N\bar{C}[(R_h + R_c + R_{nh})F_{d_i} + R_c F_{d_f}]$$

$$S^c_E = \frac{Q\bar{C}}{R_h + R_c + R_{nh}} [(R_h + R_c + R_{nh})F_{d_i} + R_c F_{d_f}]$$

$$S^c_E = Q\bar{C} \left(F_{d_i} + \frac{R_c}{R_h + R_c + R_{nh}} F_{d_f} \right)$$

(H-3) 他方、ガス処理および精製のための設備費用は、次のように表すことができる：

$$X = X_I + X_O$$

ここで、 X_I は設備費用；

X_O は保守、エネルギー、および労働力を含んだ操業費用である。

(H-4) 技術的内容の章で述べたように、多くの最適化の過程は段階的で、 X および S の両方とも連続変数でなく、不連続である。この場合には、107 項で示したように、 ${}_B X > {}_A X$ および、 ${}_B S^c_E < {}_A S^c_E$ となるようなガスの処理および精製についての選択肢 A と B を考察すると、最適化の条件は：

$$-\frac{{}_B X - {}_A X}{{}_B S^c_E - {}_A S^c_E} \leq \alpha$$

のとき満たされる。その他すべての使用条件が変化しないとすると、最適化の過程における支配的なパラメータは、ガスの処理および精製システムの費用と、それに対応する、ガス中の着目放射性核種の使用場所における平均濃度である。これらは次のようになる：

$${}_A X = X_{I_a} + X_{O_a}$$

$${}_B X = X_{I_b} + X_{O_b}$$

(124)

$${}_A S^c_E = Q \bar{C}_A \left(F_{di} + \frac{R_c}{R_h + R_c + R_{nh}} F_{df} \right)$$

$${}_B S^c_E = Q \bar{C}_B \left(F_{di} + \frac{R_c}{R_h + R_c + R_{nh}} F_{df} \right)$$

\bar{C}_A および \bar{C}_B はそれぞれ、条件 A および条件 B の処理および精製を行ったガス中の着目放射性核種の平均濃度である。

(H-5) したがって、最適化の条件は次の式により満たされる：

$$\frac{(X_{I_b} - X_{I_a}) + (X_{O_b} - X_{O_a})}{(\bar{C}_A - \bar{C}_B) Q \left(F_{di} + \frac{R_c}{R_h + R_c + R_{nh}} F_{df} \right)} \leq \alpha$$

$$\frac{(X_{I_b} - X_{I_a}) + (X_{O_b} - X_{O_a})}{\bar{C}_A - \bar{C}_B} \leq Q \alpha \left(F_{di} + \frac{R_c}{R_h + R_c + R_{nh}} F_{df} \right)$$

もし、三つ以上の選択肢があるときには、108 項で示した過程のどれかを用いて最適化を達成しなければならない。

記号リスト

- a 単位電気エネルギー当たりの電気料金。
- a_{nr} 年金係数；すなわち割引率 γ のときの n 年間を通じての割引係数の合計。
- \dot{A} 放射性物質の流入率または流出率。
- \dot{A}_{ik} 封じ込め装置 k からの放射性核種 i の漏洩率。
- \dot{A}_i 年間に放出される可能性のある放射性核種 i の放射能。
- b 単位体積の空気を循環し調節するために必要な電気エネルギー。
- B ある行為の導入による正味の便益。
- $B(\mu w)$ 線量減衰係数 μ の物質で作られた厚さ w の遮蔽体の線量ビルドアップ係数。
- c 単位空気交換率当たりの換気設備の設置費用。
- $C \equiv C(\infty)$ 平衡状態にある空气中放射性物質濃度。
- $C(0)$ 空气中放射性物質の最初の濃度。
- $C(t)$ 時刻 t における空气中放射性物質濃度。
- \bar{C} 放射性物質の平均濃度。
- C_{Ei} 排出側でのプロセス流中の核種 i の濃度。
- $C_i(Q)$ 換気流量率 Q の状態における放射性核種 i の放射能の平衡濃度。
- C_{Ii} 流入側でのプロセス流中の核種 i の濃度。
- C_{nr} 割引率 γ と計画の寿命に相当する期間の数 n に関する資本回収係数。
- d 微分演算子。
- d_i 放射性核種 i の投与量。

- D 除染係数。
- D_i 放射性核種 i に関する除染係数。
- EEC ラドンの平衡等価濃度。
- f システムが作動する時間割合。
- f_d 放射能を線量に変換する線量換算係数。
- f_t 該当する居在時間係数。
- f_{tj} 被曝する人々のグループ j の居在時間係数；グループ j の中の個人が線源からの放射線またはある環境からの汚染に被曝する時間割合。
- $f(H)$ リスクに対する嫌悪的な態度と国または管理上の規則とに依存する個人線量の関数。
- F 平衡係数。ラドンと平衡状態にある娘核種の全ポテンシャル α エネルギーに対するある与えられた娘核種濃度の全ポテンシャル α エネルギーの比。
- $F(S)$ 集団線量 S と最大年実効線量当量預託 H^* との定量的な関係を表す関数。
- F_d 放射能濃度を線量率に変換する線量換算係数（すなわち、空気中の放射性物質の単位濃度当たりの、被曝する個人の受ける実効線量当量率）、被曝する人々の平均年齢に対応した平均値と仮定する。
- $F_{d\ell}$ 経口摂取に関する線量換算係数 f_d 。
- $F_{d\ell}$ 吸入に関する線量換算係数 f_d 。
- F_ℓ 有害な影響 ℓ の期待頻度。
- g_ℓ 有害な影響 ℓ の重篤度を表す係数。
- g_T 組織 T に対する有害な影響の重篤度を表す係数。
- G 損害。
- G_H 客観的健康損害。

- $G_{H,1}$ 一人の人に対する客観的健康損害。
- h 高さ（遮蔽壁の）。
- H_E 臓器線量当量の合計すなわち実効線量当量。
- H_{Ei} 吸入による実効線量当量。
- H_{Et} 経口摂取による実効線量当量。
- H_{gon} 生殖腺の線量当量。
- H_L 該当する線量当量限度，または，その限度の一部分で，ある行為に対する天井値として監督官庁により割り当てられた値。
- H_{skin} 皮膚の線量当量。
- H_{thy} 甲状腺の線量当量。
- H_T 組織 T が受ける平均線量当量。
- $H_z(\omega)$ 放射線防護レベル ω における個人の実効線量当量。
- H^* 最大年実効線量当量預託。
- \dot{H} 線量当量率。
- \dot{H}_E 実効線量当量率。
- \dot{H}_L 実効線量当量率の誘導限度で，この値を遵守することは，該当する線量限度，または，ある行為に対する天井値として監督官庁により割り当てられた限度の一部分を遵守することが確実であることを意味するもの。
- \dot{H}_u 最初の最小厚さの遮蔽体の外側表面と接した位置にある仮想的な被照射体が受けるであろう最大実効線量当量率 ($\dot{H}_u \leq \dot{H}_L$)。
- \bar{H}_E 平均実効線量当量。
- \bar{H}_E 平均実効線量当量率。
- \bar{H}_e 1回の放射性同位体の投与および検査を行うことにより受ける平均線量。
- \bar{H}_{env} 作業環境中の放射線レベルによる平均実効線量当量。

- \bar{H}_p 患者に対する平均線量。
- i ある与えられた放射性核種。
- j ある与えられた被曝者グループ。
- J 坑道の単位面積当たりのラドンの発散率。
- k 放射性物質のある与えられた封じ込め。
- l 壁状遮蔽体の長さ。
- l 放射線防護のある与えられたサブシステム。
- L 坑道の長さ。
- n n 番めの事象；たとえば n 年目。
- N 個人の数。
- N_j グループ j の個人の数。
- N_p 患者の数。
- N_w 作業者の数。
- $N(H_E)$ 線源からの実効線量当量の人口スペクトル。
- $N(H_E)dH_E$ H_E から H_E+dH_E の範囲の実効線量当量を線源から受ける人数。
- d 坑道断面の周囲の長さ。
- d_l 有害な影響 l の発生確率。
- d_T 組織 T に確率的影響が生ずる確率。
- P 放射線防護の費用を除いたある行為の基礎生産費用。
- Q 流量率（たとえば換気流量率，ガス流量率）。
- Q_0 最適換気流量率。
- Q_L 最小限界換気流量率。この値を使用することは線量限度を遵守していることが確実であることを意味する。
- r_Q 流量率の増加割合。
- r_T 組織 T の単位線量当量当たりのリスク係数。

- R 全身照射の結果としてある有害な影響を受ける（単位線量当量当たりの）個人の総リスク。
- R_h 暖房のための平均の一人当たりガス消費率。
- R_c 炊事のための平均の一人当たりガス消費率。
- R_{nh} 暖房および炊事以外の家庭内利用のための平均の一人当たりガス消費率。
- S_i 核種 i の単位放射能当たりの集団実効線量当量預託。
- S_E 集団実効線量当量。
- \dot{S}_E 集団実効線量当量率。
- S_E^c 集団実効線量当量預託。
- S_E^r 期間 τ の不完全集団実効線量当量預託。
- S_o 最適化された放射線防護レベルに由来する集団線量。
- t 時間。
- t_1 1 分間。
- T ある与えられた組織。
- U 目的関数。
- V ある行為の導入による粗便益。
- w 遮蔽の厚さ。
- w_o 最適化された遮蔽の厚さ。
- w_T 全身が均等に照射されたとき組織 T におけるリスクの割合を表す係数。
- W 短寿命娘核種と平衡にあるラドンの単位放射能当たりに含まれるポテンシャル α エネルギー。
- WL 作業レベル。鉛-210 にまで崩壊する間に 1.3×10^5 MeV の α エネルギーを放出するような、空気 1 l 中の短半減期のラドン娘核種の任意の組合せと定義される。

(130)

WLH	作業レベル時間。
WLM	作業レベル月。
WLY	作業レベル年。
X	放射線防護の費用。
X_a	放射線防護の年間費用。
X_c	放射線防護の初期資本費用。
X_F	現在の価値 X_P が、ある与えられた利率で累積した将来の量。
X_I	放射線防護の設置費用。
X_o	放射線防護の運転費用。
X_P	放射線防護費用の現在価値。
X_S	設置される遮蔽の費用。
X_v	換気の費用。
X_V	遮蔽材の単位体積当たりの設置される遮蔽の費用。
\dot{X}_o	放射線防護の運転費用の率。
Y	損害の費用。
Y_H	客観的健康損害の費用。
$Y_1; Y_2; \dots$	損害のその他の成分の費用。
α	放射線防護の目的で単位集団線量に割り当てられた金銭的費用を表すディメンションをもった定数。
β	客観的健康損害以外のその他の損害の成分の単位当たりに割り当てられた、金銭的費用を表すディメンションをもった定数。
γ	割引率。
γ_n	割引率 γ において n 年目に適用すべき割引係数。
Γ	ビルドアップ効果を含む実効減衰係数。
∂	偏微分演算子。
δ	除染ユニット当たりの費用を表す定数。

- Δ 有限な増分。
- ε_α ポテンシャル α エネルギー濃度。
- $\varepsilon_{\alpha 1'}$ 1 分間の成長時間が経過した後の、ラドンの単位濃度当たりのポテンシャル α エネルギー濃度を表すディメンションをもった定数。
- ζ 除染ユニットの交換頻度。
- θ 直列に接続された除染ユニットの数。
- ι 放射線のある与えられた有害な影響。
- κ 平衡係数の算定に関係した種々の不確かさを考慮に入れるための修正係数。
- λ 崩壊定数。
- λ_i 核種 i の放射性崩壊定数。
- μ 線量減衰係数。
- ν ある環境または封じ込め装置の体積。
- ν_D 減衰に用いられる体積。
- ξ 除染ユニットの効率。
- Ξ 単位作業レベル当たりのラドン放射能濃度を定めるディメンションをもった定数。
- Π_n n 個の量の積を求める過程。
- ρ 遮蔽体の外側表面において、集団内の個人が被曝する平均実効線量当量率を最大実効線量当量率で割った商。
- τ ある放射線防護システムの寿命または放射線防護の目的の隔離時間。
- $\tau_{A,B}$ システム A, B の隔離時間。
- ϕ 坑道の断面積。
- χ 換気されている坑道中の空気の移動距離。
- Ψ 拘束関数。

(132)

ω 放射線防護レベルを表すパラメータ。

ω_0 ω の最適値。

\sum_n n 個の量の和を求める過程。

\$ 理想的なインフレなしの通貨の単位。

US\$ アメリカ合衆国のドル。

参考文献

1. National Academy of Sciences—National Research Council. *The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation*. Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, National Academy of Sciences—National Research Council, Washington, DC 20006 (1972).
2. Atomic Energy Commission, Directorate of Regulatory Standards, Washington, DC. *Environmental survey of transportation of radioactive materials to and from nuclear power plants*. WASH-1238, December 1972.
3. Barton, C. J. *Estimated radiation doses from food cooked with natural gas from nuclearly stimulated wells*. ORNL-TM-4735, 7 pp. Oak Ridge National Lab. TN (USA), December 1974.
4. Beninson, D. J. *Justification and optimization in radiation protection*. Proceedings of the 5th International Congress of the International Radiation Protection Association. Jerusalem, March 1980. *Radiation Protection: a systematic approach to safety*, 2, 827-834. Pergamon Press, Oxford, 1980.
5. Beninson, D. J. *Optimization of radiation protection*. Proceedings of a topical seminar on the practical implications of the ICRP recommendations (1977) and the revised IAEA basic standards for radiation protection: Application of the dose limitation system for radiation protection. Vienna, 5-9 March 1979. Proceedings series. IAEA-SR-36/53, pp. 85-95. Vienna IAEA, 1979.
6. Beninson, D. J. and González, A. J. *Application of the dose limitation system to the control of releases of Carbon-14 from heavy water moderated reactors*. International Symposium on the Application of the Dose Limitation System in Nuclear Fuel Cycle Facilities and other Radiation Practices. Madrid, 19-23 October 1981. IAEA-SM-258/53, 20 pp. Organized by IAEA, WHO, OECD/NEA, ICRP.
7. Beninson, D. J. and Lindell, B. *Critical views on the application of some methods for evaluation of accident probabilities and consequences*. Proceedings of an International Conference on Current Nuclear Power Plant Safety Issues. Stockholm, 20-24 October 1980. Proceedings series. IAEA-CN-39/4, 2, 325-341. Vienna, IAEA, 1981.

8. Carmichael, J. H. E. Personal communication, 1979.
9. Clark, M. J. and Fleishman, A. B. *The cost of collective does equivalent*. Proceedings of a Topical Seminar on the Practical Implications of ICRP Recommendations (1977) and the revised IAEA Basic Standards for Radiation Protection. Application of the Dose Limitation System for Radiation Protection. Vienna, 5-9 March 1979. Proceeding series. *IAEA-SR-36/3*, pp. 143-160, Vienna, IAEA, 1979.
10. Clark, M. J., Fleishman, A. B. and Webb, G. A. H. *Optimization of the radiological protection of the public*. (A provisional framework for the application of cost-benefit analysis to normal operations.) *NRPB-R120*, 40 pp. July 1981. National Radiological Protection Board, Chilton (UK).
11. Cohen, J. J. (1973). On determining the cost of radiation exposure to populations for purposes of cost-benefit analyses. *Health Phys.*, **25** (5), 527-528.
12. Cohen, J. J. (1970). Plowshare: new challenge for the health physicist. *Health Phys.*, **19** (5), 633-639.
13. Demin, V. F. *Discounted dose commitment as a basis for assessment of detriment due to biosphere radioactive contamination by nuclear power facilities*. Moscow, I. V. Kurchatov Institute of Atomic Energy; *A-3524/3*, 8 pp. 1981.
14. Dunster, H. J. (1973). Costs and benefits of nuclear power. *New Scientist*, **60** (868), 192-194.
15. Dunster, H. J. Personal communication, 1978.
16. Dunster, H. J. and McLean, A. S. (1970). The use of risk estimates in setting and using basic radiation protection standards. *Health Phys.*, **19** (1), 121-122.
17. Food and Drug Administration, Rockville, Md. (USA). *Health Physics in the healing arts*. Seventh Midyear Topical Symposium, San Juan, Puerto Rico, 11-14 December 1972. *FDA-73-8029*, 658 pp. March 1973.
18. Food and Drug Administration, Rockville, Md. (USA). Nationwide evaluation of x-ray trends. *FDA-76-8003*, 1976.
19. Frittelli, L. and Tamburrano, A. *An application of cost-effectiveness analysis to restrict the damage caused by an accidental release of radioactive material to the environment*. Proceedings of the 5th International Congress of the International Radiation Protection Association. Jerusalem, 1980. *Radiation protection: a systematic approach to safety*, **2**, 785-789. Pergamon Press, Oxford, 1980.
20. Gonzalez, A. J. *et al.* *Optimización de la protección radiológica en el diseño y*

- la operación*. International Symposium on the Application of the Dose Limitation System in Nuclear Fuel Cycle Facilities and Other Radiation Practices. Madrid, 19-23 October 1981. *IAEA-SM-258/54*. Organized by IAEA, WHO, OECD/NEA, ICRP.
21. Hedgran, A. and Lindell, B. (1970). PQR—a special way of thinking? *Health Phys.*, **19** (1), 121.
 22. Hendee, W. R. and Rossi, R. P. *Quality assurance for conventional tomographic x-ray units*. US DHEW, HEW Publication *FDA-80-8096*. Bureau of Radiological Health, Rockville, Maryland 20857 (USA) (1979).
 24. Hofmann, W., Steinhäusler, F. and Pohl, E. *Age-, sex- and weight-dependent dose distribution patterns for human organs and tissues due to inhalation of natural radioactive nuclides*. Proceedings of the 3rd Natural Radiation Environment Symposium. Houston, Texas (USA). 23-28 April 1978.
 25. Horn, H. G., Bonka, H. and Grundler, D. *Will the cost-benefit analysis give an additional decision-aid to the retention of radioactive effluents in nuclear facilities?* International Symposium on the Application of the Dose Limitation System in Nuclear Fuel Cycle Facilities and other Radiation Practices. Madrid, 19-23 October 1981. *IAEA-SM-258/3*, 15 pp. Organized by IAEA, WHO, OECD/NEA, ICRP.
 26. Iinuma, T. *et al.* (1977). Benefit-risk analysis for mass screening of stomach cancer in Japan, 1. Life-saving vs. loss of life. *Nippon Igaku Hoshasen Gakkai Zasshi*, **37** (12), 1109-1121.
 27. Iinuma, T. *et al.* (1978). Benefit-risk analysis for mass screening of stomach cancer in Japan, 2. Genetic risk and cost of mass screening. *Nippon Igaku Hoshasen Gakkai Zasshi*, **38** (7), 625-632.
 28. International Commission on Radiological Protection. *Implications of Commission recommendations that doses be kept as low as readily achievable*. A report by Committee 4 of the International Commission. *ICRP Publication 22*, 23 pp. Pergamon Press, Oxford, 1973.
 29. International Commission on Radiological Protection. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. *ICRP Publication 26*. Pergamon Press, Oxford, 1977. 53 pp. *Annals of the ICRP*, **1** (3), 1977.
 30. International Commission on Radiological Protection. *The principles and general procedures for handling emergency and accidental exposures of*

- workers. A report of Committee 4 of the International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 28*. Pergamon Press, Oxford, 1978. 22 pp. *Annals of the ICRP*, 2 (1), 1978. This issue also contains a statement from the 1978 Stockholm meeting of the ICRP.
31. International Commission on Radiological Protection. *Problems involved in developing an index of harm*. *ICRP Publication 27*. Pergamon Press, Oxford, 1977. 24 pp. *Annals of the ICRP*, 1 (4), 1977.
 32. International Commission on Radiological Protection. *Limits for intakes of radionuclides by workers*. A report of Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 30*. Pergamon Press, Oxford. Part 1, 116 pp. *Annals of the ICRP*, 2 (3/4), 1979. Supplement to Part 1, 555 pp. *Annals of the ICRP*, 3 (1/4), 1979. Part 2, 71 pp. *Annals of the ICRP*, 4 (3/4), 1980. Supplement to Part 2, 751 pp. *Annals of the ICRP*, 5 (1/6), 1981. Part 3, 124 pp. *Annals of the ICRP*, 6 (2/3), 1981. Supplement A to Part 3, 440 pp. *Annals of the ICRP*, 7 (1/3), 1982. Supplement B to Part 3, 8 (1/3), 1982. Index to ICRP Publication 30, *Annals of the ICRP*, 8 (4), 1982.
 33. International Commission on Radiological Protection. *Radiation protection in uranium and other mines*. A report of Committee 4 of the International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 24*. Pergamon Press, Oxford, 1977. 30 pp. *Annals of the ICRP*, 1 (1), 1977.
 34. International Commission on Radiological Protection. *Limits for intakes of radionuclides by workers*. A report of Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 30*. Pergamon Press, Oxford, 1980. Part 2, 71 pp. *Annals of the ICRP*, 4 (3/4), 1980.
 35. International Commission on Radiological Protection, *Limits for inhalation of radon daughters by workers*. *ICRP Publication 32*. Pergamon Press, Oxford, 1981. 24 pp. *Annals of the ICRP*, 6 (1), 1981.
 36. Isherwood, I. *et al.* (1975). Radiation dose to the eyes of the patient during neuroradiological investigations. *Neuroradiology*, 10, 137-141.
 37. Johnson, R. H. Jr. *et al.* Assessment of potential radiological health effects from radon in natural gas. *EPA-520-1-73-4*, 68 pp. November 1973. Environmental Protection Agency, Washington, DC (USA).
 38. Jones-Lee, M. V. *The value of life ; an economic analysis*. London, M. Robertson, 162 pp. 1976.

- tritium, carbon-14, krypton-85 and iodine-129 arising from the nuclear fuel cycle, 222 pp. Paris, OECD, 1980.
53. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC. Office of Standards Development. *Cost-benefit analysis for radwaste systems for light-water-cooled nuclear reactors. REG/G-1.110 (3-76)*, 86 pp. March 1976.
 54. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC. Office of Standards Development. *Information relevant to ensuring that occupational radiation exposures at nuclear stations will be as low as is reasonably achievable. REG/G8.8 (6-78) Rev. 3*, 16 pp. June 1978.
 55. OECD/NEA. *Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials*. Report by an NEA Group of Experts. Paris, OECD, 34 pp. 1979.
 56. Otway, H. J. *Human values in standard setting*. Proceedings of the Health Physics Society Midyear Topical Symposium. Radiation Protection Standards; QUO VADIS. Richland, Washington, 2-5 November 1971. CONF-711119-3.
 57. Park, W. R. *Cost engineering analyses ; a guide to the economic evaluation of engineering projects*, 308 pp. J. Wiley, New York, 1973.
 58. Rudolph, H. Bureau of Radiological Health, DHEW. *Letter to manufacturers of diagnostic x-ray systems and other interested parties regarding possible changes to 21 CFR 1000 16 (d)*. (BHR, HFX-70). 1 September 1978.
 59. Sagan, L. A. (1972). Human costs of nuclear power. *Science*, **177** (4048), 487-493.
 60. Schelling, T. C. *The life you save may be your own ; problems in public expenditure analysis*. Washington, Brookings Institute, 1968.
 61. Segado, R., López Lizana, F. and Reyes, R. *Código de cálculo para la optimización de la protección radiológica*. International Symposium on the Application of the Dose Limitation System in Nuclear Fuel Cycle Facilities and Other Radiation Practices. Madrid, 19-23 October 1981. IAEA-SM-258/56, 14 pp. Organized by IAEA, WHO, OECD/NEA, ICRP.
 62. Shepherd, J. G. *The application of cost-benefit analysis to problems of radiological control*. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Lowestoft (UK) ((MAFF). Fisheries Radiological Laboratory. *Technical Note, RL*, No. 3/74, 1974.
 63. Siddall, J. N. *Analytical decision-making in engineering design*, 431 pp.

39. Klein, B. (1955). Direct use of extremal principles in solving certain problems involving inequalities. *Operations Res.*, **3**, 168.
40. Kunz, E. and Bucina, I. *Some problems in practical application of the dose limitation system*. Proceedings of a topical seminar on the practical implications of the ICRP recommendations (1977) and the revised IAEA basic standards for radiation protection. Applications of the Dose Limitation System for Radiation Protection. Vienna, 5-9 March 1979. Proceedings series. *IAEA-SR-36/54*, pp. 255-269, Vienna, IAEA, 1979.
41. Lederberg, J. Squaring an infinite circle; radiobiology and the value of life. *Bull. Atomic Sci.*, **27** (7), 43-45, September 1971.
42. Legg, G. G. *Designing to minimize radiation exposure*. AECL 5521, 18 pp. June 1976. Atomic Energy of Canada Ltd, Ottawa, Ontario.
43. Lindell, B. (1976). Radiation and man. *Health Phys.*, **31** (3), 265-272.
44. Lombard, J. and Oudiz, A. *Utilization d'une analyse multicritère en vue de l'optimisation des rejets du cycle fuel combustible du reactor PWR*. Proceedings of the Seminaire Européen sur les Méthodes d'Optimisation de la Protection dans la Domaine Nucléaire. Luxembourg, 1979.
45. Lochard, J. (1981). Optimization of radiation protection. *Nuclear Safety*, **22** (4), 484-490.
46. Maller, R. G. and Wyzga, R. E. *Economic measurement of environmental damage*, 152 pp. Paris, OECD, 1976.
47. Mishan, E. J. *Cost-benefit analysis ; an informal introduction*, 2nd edn, 454 pp. G. Allen and Unwin, London, 1975.
48. Mooney, G. H. *The valuation of human life*. Macmillan Press, London, 1977.
49. Office of the Federal Register. National Archives and Records Service. General Services Administration (USA). *Code of Federal Regulations*. 10. Energy. *Part 50-Domestic licensing of production and utilization facilities*. *App. I, Sec. II D*, p. 373, 1979.
50. Nuclear Energy Agency, Paris. *Basic approach for safety analysis and control of products containing radionuclides and available to the general public*, 31 pp. Paris, OECD, 1970.
51. Nuclear Energy Agency, Paris. *Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials*. Paris, OECD, 1979.
52. Nuclear Energy Agency, Paris. *Radiological significance and management of*

Prentice Hall, Englewood, New Jersey, 1972.

64. Skochinsky, A. and Komarov, V. *Mine ventilation*. Moscow, MIR, 1969.
65. Snihs, J. O. Personal communication, 1979.
66. Strandén, E., Berteig, L. and Ugletveit, F. (1979). A Study of radon in dwellings. *Health Phys.*, **36** (3), 413-421.
67. Sugden, R. S. and Williams, A. *The principles of practical cost-benefit analysis*, 275 pp. Oxford University Press, Oxford, 1978.
68. Swedjemark, G. A. *Ventilation requirements in relation to the emanation of radon from building materials*. Proceedings of the 1st International Indoor Climate Symposium. Copenhagen, 30 August-1 September 1978.
69. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and effects of ionizing radiation*. 1977 report to the General Assembly, with annexes, 725 pp. New York, United Nations Publication No. E. 77. IX. 1, 1977.
70. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Ionizing radiation: sources and biological effects*. 1982 Report to the General Assembly, with annexes. 773 pp. New York, United Nations Publication E. 82. IX. 8, 1982.
71. Verna, B. J. (1977). Occupational exposure. *Nuclear News*, **20** (9), 38-40.
72. Villforth, J. *The status of patient radiation exposure*. Proceedings of the 19th Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana di Fisica Sanitaria e di Protezione contro le Radiazioni. Levico Terme, September 1975.
73. Webb, G. A. M., Fleishman, A. B. and Clark, M. J. *Optimisation of protection of the public; the application of cost-benefit analysis*. International Symposium on the Application of the Dose Limitation System in Nuclear Fuel Cycle Facilities and Other Radiation Practices. Madrid, 19-23 October 1981. *IAEA-SM-258/14*, 13 pp. Organized by IAEA, WHO, OECD/NEA, ICRP.

放射線防護の最適化における
費用-便益分析

定価1,800円

昭和60年7月25日 初版第1刷発行

編集 社団 日本アイソトープ協会
および 法人
発行

113 東京都文京区本駒込二丁目28番45号

電話 (03) 946-7111

振替 東京 8-143345

発売所 丸善株式会社

印刷・製本 三美印刷株式会社

ICRP 刊行物

日本アイソトープ協会翻訳・編集

丸善(株)発売

Publ. 26 国際放射線防護委員会勧告 (1977年1月17日採択)
——ストックホルム (1978), プライトン (1980),
ワシントン (1983), スtockホルム (1984) 会議声明付——
ICRP の基本的考え方と線量当量限度値を勧告。他
の刊行物の基礎をなすもの

A 5・125頁 800円

Publ. 27 「害の指標」をつくるときの諸問題
放射線の影響を放射線以外の諸要因による影響と比較
するため「害の指標」を提案

A 5・46頁 500円

Publ. 28 作業者の緊急被曝と事故被曝に対処するための
諸原則と一般的手順
異常被曝をした作業者の初期医療処置を中心に、線
量推定の手順や人事管理上とるべき措置等に言及

A 5・34頁 500円

Publ. 29 放射性核種の環境への放出：人に対する線量の算定
環境に放出される放射性核種による個人の線量当
量、線量当量預託を、事前に予測するための方法論

A 5・119頁 1,500円

Publ. 30 作業者による放射性核種の摂取の限度 Part 1-3
作業者の体内被曝の制御に関する報告書。線量算定
法、放射線防護上重要な放射性核種に関する代謝デ
ータ、年摂取限度 (ALI) と誘導空気中濃度 (DAC)
の計算値を記載。放射性物質を取扱う人に必携の書

Part 1 A 5・212頁 2,000円
Part 2 A 5・134頁 1,500円
Part 3 A 5・226頁 2,300円

Publ. 35 作業者の放射線防護のためのモニタリングの
一般原則
作業者の放射線管理実務の中心的役割を果たすモニ
タリングの基本原則を詳述

A 5・72頁 900円

Publ. 39 自然放射線源に対する公衆の被曝を制限する
ための諸原則
室内空気中のラドンなど、自然放射線源に対する被
曝を制限するための新しい原則を勧告。

A 5・15頁 580円
