

放射線防護における
最適化と意思決定

ICRP *Publication* **55**

放射線防護における

最適化と意思決定

国際放射線防護委員会専門委員会 4 の課題グループの報告書
1988年 9 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

THE MAGAZINE

OF THE
ROYAL CANADIAN MOUNTED POLICE

VOLUME 10
NUMBER 1

1988

ISSN 0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

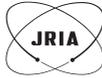
0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000

0000-0000



Japanese Translation Series of ICRP Publications
Publication 55

This translation was undertaken by the following colleagues.

Translated by

Shoji IZAWA, Hiroshi MATSUI, Kenichi MATSUURA,
Hideaki YAMAMOTO, Michio YOSHIZAWA

Editorial Board

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

.....
Eizo TAJIMA** (Chair)

Tatsuji HAMADA (Vice-chair)

Masami IZAWA**

Jiro INABA

Sukehiko KOGA*

Sadayoshi KOBAYASHI

Tsuneo NUMAKUNAI

Yasuo YOSHIZAWA*

Yoshikazu YOSHIDA

.....
* ICRP member at the time.

** Former ICRP member.

邦訳版への序

本書は ICRP Publication 55 として刊行された、ICRP 専門委員会 4 の課題グループの報告書

Optimization and Decision-Making in Radiological Protection

(*Annals of the ICRP*, 20, No. 1 (1989) に発表)

を、ICRP の了解のもとに翻訳したものである。

放射線防護の最適化の方法に関しては、さきに Publication 37「放射線防護の最適化における費用-便益分析」があるが、本書ではその他の手法も含め、意思決定に至る過程が、例示を加えて比較的平易に解説されている。なお、本報告書のあとで 1990 年勧告が刊行され、一部の用語(たとえば、実効線量当量)が変更されたこと、および、146 項に述べられている第三世代以後の損害に対する遺伝的寄与と非致死的悪性腫瘍の寄与は考慮に入れられたことを申し添えておく。また原文の明らかな誤りはことわりなしに訂正した。

翻訳は日本原子力研究所の次の諸氏(五十音順)によって行われた:

井沢庄治, 松井浩, 松浦賢一, 山本英明, 吉沢道夫

この原訳は、当協会の ICRP 勧告翻訳検討委員会による検討をへて成文となった。邦訳に携わられた方々に厚く感謝する。

平成 4 年 6 月

ICRP 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 (社)日本アイソトープ協会)
- 委員 伊澤 正實 (日本原子力発電(株))
- 稲葉 次郎 (放射線医学総合研究所)
- 古賀 佑彦 (藤田保健衛生大学)
- 小林 定喜 (放射線医学総合研究所)
- 沼宮内弼雄 (助放射線計測協会)
- 吉澤 康雄 (東京大学名誉教授)
- 吉田 芳和 (助放射線計測協会)

目 次

	頁 (項)
序	
1. 緒 言	1 (1)
2. 防護の最適化	9 (17)
2.1 最適化の役割	9 (18)
2.2 諸問題に対する体系化された取組み	10 (20)
2.3 意思決定とその意味合い	14 (24)
2.4 最適化と ICRP の線量制限体系のその他の側面との 相互関係	17 (28)
2.4.1 行為の正当化	17 (29)
2.4.2 線 量 限 度	19 (35)
2.4.3 線源上限値	20 (39)
2.4.4 認 定 限 度	20 (40)
2.4.5 その他の拘束因子	21 (41)
2.4.6 設計目標および運転・保守・供用中検査の手順	21 (42)
2.4.7 介入と対策レベル	22 (43)
2.4.8 法規制からの免除	22 (44)
3. 設計段階に適用される最適化手順	23 (45)
3.1 分析される状況の範囲の決定	23 (46)
3.2 選択枝の確定	26 (49)

(iv)

3.3	選択肢の性能の推定	27	(54)
3.4	定量的意思決定支援手法の使用	28	(56)
3.5	感度分析	29	(58)
3.6	最適化検討の結果	30	(61)
3.7	決定への到達	30	(62)
3.8	一般的結果	31	(65)
4.	操業段階に適用される最適化手順	32	(66)
4.1	最適化検討の必要性の確定	32	(67)
4.2	検討範囲の決定	32	(68)
4.3	基本事例の評価と定量	34	(69)
4.4	防護選択肢の確定	35	(71)
4.5	選択肢の性能の推定	35	(72)
4.6	定量的意思決定支援手法および定性的評価の使用	36	(73)
4.7	最適化検討の結果	36	(75)
4.8	決定への到達	37	(76)
4.9	一般操業規則	37	(77)
5.	定量的意思決定支援手法	38	(78)
5.1	費用効果分析	40	(84)
5.2	費用便益分析	43	(87)
5.2.1	放射線防護に適用される費用便益分析の簡単な 定式化	44	(88)
5.2.2	拡張費用便益分析	47	(97)
5.3	多属性効用分析	51	(105)
5.4	多規準優位分析	60	(123)

5.5 手法の選択	65	(133)
6. 定 量 化	66	(134)
6.1 防護努力のための費用	66	(136)
6.1.1 直 接 費	67	(138)
6.1.2 その他の防護努力	68	(143)
6.2 集 団 線 量	69	(145)
6.3 個人線量の分布	70	(147)
6.4 線量の時間分布	71	(149)
6.5 線量を受ける確率	72	(151)
6.6 その他の関連する放射線防護要因	73	(154)
7. 最適化手順の適用	76	(158)
7.1 手順の適用方法	76	(158)
7.2 設計における適用	77	(162)
7.3 操業における適用	78	(166)
7.4 所轄官庁の一般的責任	80	(170)
8. 結 論	82	(172)
参 考 文 献	83	
付録A 種々の最適化手法のウラン鉱山に対する適用例	87	(A1~A16)
付録B 単一属性効用関数および荷重係数の評価	98	(B1~B9)
付録C 事例研究の例をあげた文献目録, 注釈付き	103	(C1)

(文) 50 田舎の生活 2.2

(134) 50 田舎の生活 2.2

(135) 50 田舎の生活 2.2

(136) 50 田舎の生活 2.2

(137) 50 田舎の生活 2.2

(138) 50 田舎の生活 2.2

(139) 50 田舎の生活 2.2

(140) 50 田舎の生活 2.2

(141) 50 田舎の生活 2.2

(142) 50 田舎の生活 2.2

(143) 50 田舎の生活 2.2

(144) 50 田舎の生活 2.2

(145) 50 田舎の生活 2.2

(146) 50 田舎の生活 2.2

(147) 50 田舎の生活 2.2

(148) 50 田舎の生活 2.2

(149) 50 田舎の生活 2.2

(150) 50 田舎の生活 2.2

(151) 50 田舎の生活 2.2

(152) 50 田舎の生活 2.2

(153) 50 田舎の生活 2.2

(154) 50 田舎の生活 2.2

(155) 50 田舎の生活 2.2

(156) 50 田舎の生活 2.2

(157) 50 田舎の生活 2.2

序

1984年に主委員会は、費用便益分析以外の防護の最適化のための方法に関する報告書を作成する目的で、専門委員会4の課題グループを設置した。課題グループの作業が進行するにつれて、主として、費用便益分析を含む種々の最適化手法が複雑さのいろいろなレベルにある諸問題にいかに適切に適用しうるかを示すために、最適化の適用の全分野にわたる報告書を作成する方が有用であることが明確になってきた。

課題グループは数多くの会合をもち、その最終草稿は1988年に専門委員会4の会議で採択された。この最終報告書は、主委員会によりその1988年の会合において採択された。

課題グループの構成員は次のとおりであった：

G. A. M. Webb (委員長)	L. Lombard
J. Baum (1986-)	A. Oudiz
A. B. Fleishman (1984-1986)	B. C. Winkler
A. González	

この報告書が採択されたときの専門委員会4の構成員は次のとおりであった：

H. J. Dunster	R. V. Osborne
G. Bengtsson	S. Prêtre
R. E. Cunningham	A. Salo
A. J. González	S. D. Soman
A. A. Moiseev	F. Steinhäusler
J. -C. Nenot	G. L. Voelz

1. 緒 言

(1) 委員会の勧告が基礎としてきた原則は、50年以上にわたって発展してきたものである。最初、人がX線や自然の放射性核種からかなり大線量の被ばくをしたときに、急性影響が直接観察された。これらの影響は、ある“しきい値”以上の線量においてのみ観察されることが明らかであった。これらの影響の一例は皮膚紅斑である。そのため、初期の頃は、しきい値以下の線量は“耐えられる”ものと考えられていたので、最初の線量制限体系は、その線量を守っていれば有意な有害影響は何も生じないであろうという考えで、“耐容”線量という用語を使って表現された。しかしながら、その後間もなく、放射線被ばくによる影響は他にもあること、とくに遺伝的影響とがんの誘発という影響があり、これらに対してしきい線量が観察されないことが認められ、防護の方法はいつそう複雑にならざるをえなくなった。

(2) がんの誘発は、小線量においては、避けられない統計上の限界があるため実証することができない。それにもかかわらず、電離放射線は、分子レベルおよび、おそらく生きた細胞のレベルで本来損傷を与える性質をもつものである。この損傷のうち、あるものは細胞機構によって修復されたり身体の防御機構によって除去されたりするが、あるものは生き残って悪性な状態、すなわち、がんを引き起こすかもしれない。それゆえに、自然の放射線源からすでに受けている線量を超えて線量がわずかでも増加すると、がんのリスクがいくぶん付加されるというのが、放射線防護上の慎重な仮定となってきた。そうすると、どうしても固定した線量限度に基本的に依存している管理体系では、たとえすべての線量が選定された限度以下であったとしても、常にいくぶんかのリスクが残るということになる。このような体系

(2)

は、ある場合には過度に厳しいものとなるであろうし、またある場合には不必要に高いリスクを許すことになる。このような状況では、たとえ結果として生ずる線量がすでに選定された線量限度以下であっても、すべての被ばくを減らすためのなんらかの合理的な対策をとることが適当であることは明らかである。委員会の放射線防護体系が、現在、主要な構成要素の一つとして、“すべての線量を経済的、社会的要因を考慮に入れながら合理的に達成できるかぎり低く”保つという概念を含んでいるのは、このことに基づいている。

(3) このことから、個人と社会に対する放射線のリスクを減らすためにどの程度の規模の資源を用意すべきか、そしてその資源はどのようにすれば最善の割り振りができるかを考慮することが必要になる。このような考察を行うための方法は非常に多種多様である。それらは単純な常識によるものから費用便益分析や多属性効用分析などのような複雑な手法までわたっている。委員会の見解では、これらの手法はすべて、一つの行為、あるいは一つの行為のうちの識別しうる成分に係わる損害を減らすために、十分な努力が払われている場合、意思決定の助けとなる方法である。もしも損害を減らすための次の手段が、それによる低減とあまりにもかけ離れた資源の投入によってしか達成できないものであれば、すべての個人が適切に防護されているとして、その手段をとることは社会のためにはならない。このとき防護は最適化されたといわれ、被ばくは経済的、社会的要因を考慮に入れて合理的に達成できるかぎり低くされたといわれる。防護を最適化するさいに行われる判断は純粋に定量的なものではない。すなわち、それらはいろいろな種類の損害の間の選択と、財政的費用と健康影響との間の選択を含むが、それらの判断はこの報告書が詳しく示そうとしているやり方での定量的手法によって支えることができる。個人の防護に関する規定は、防護の最適化の手法が、個人を防護するために適用されるであろういかなる限度よりもすでに低くな

っている線量を、さらに減らすための手段としてのみ用いられるものであるということを保証している。このことは教皇庁の教皇科学アカデミー (Holy See's Pontifical Academy of Science) の作業グループによる防護の最適化に関する声明の中に含まれている (Chargas ら, 1985)。

(4) 現在なお展開中のこれらの見解は、委員会の初期の勧告に影響を与え、1955年勧告で明確に確立された (ICRP, 1955)。そこでは次のように述べられていた：

最大許容線量として提案された値は、生命の他の危険性と比べて小さいリスクを含む程度のものであるとはいえ、その値が拠り所としている証拠が不完全であるということと、ある放射線影響は不可逆的にかつ蓄積されるという知識とにかんがみて、すべての種類の電離放射線による被ばくを可能な最低レベルにまで減らすようあらゆる努力を払うことを強く勧告する。

この声明とともに、2つの原則が防護の理念の基調をなすものとして述べられた。一つは、“限度”の原則、すなわち、ある最大許容線量を守ることを要求するものであり、もう一つは“最小化”の原則、すなわち、線量を可能な最小レベルまで引き下げる努力を義務づけるものとして表現された。

(5) この最初の声明は、ICRP Publication 1 (ICRP, 1959) の中で次のように明確化された：

この章で勧告されている最大許容線量は最大の値であることを強調する。委員会は、あらゆる線量を実行可能なかぎり低く (as low as practicable) 保ち、不必要な被ばくはすべて避けるよう勧告する。

この定式化には、委員会によって勧告された線量制限体系の基礎に今もなおなっている2つの考え方の基本が含まれている。すなわち、不必要な被ばくはすべて避けるべきであり、かつ、あらゆる線量を実行可能なかぎり低く保つようにすることである。これらの考え方の発展の一部として、委員会は、実行可能なかぎり低いと考えられる線量レベルを決めるさいに、経済的および

(4)

び社会的という 2 種類の特別な考慮事項を斟酌すべきであることをはっきりと認めている。ICRP Publication 9 (ICRP, 1965) においては、勧告は次の形をとった：

どんな被ばくでもある程度の危険を伴うかもしれないので、委員会は、いかなる不必要な被ばくも避けるべきであること、および、経済的および社会的な考慮を計算に入れたうえ、すべての線量を容易に達成できるかぎり低く保つべきであることを勧告する。

(6) 委員会は、勧告の形が定性的であったことが解釈上いくつかの困難を生じさせていたことを認めた。そのため、委員会はその意図のより詳しい説明を ICRP Publication 22 (ICRP, 1973) で与えた。すなわち、一般声明においては“容易に”という副詞を“合理的”に置き換え、また、放射線により誘発される損害の尺度として集団線量 (collective dose) という量 [初めは国民線量 (population dose) といわれた] を導入した。委員会は、さらに ICRP Publication 22 において、集団線量の値を金銭単位で表すのが有用であるということを次のように示唆し、放射線防護に費用便益分析を適用するための道を開いた：

金銭単位で表すことによって、集団線量を低減することの利点を、この低減を達成するために必要な損害あるいは費用と直接に比較できる。

事実、ICRP Publication 22 の付録では、それ以後よく見かけるようになった費用便益分析の表記法が初めて導入されている。

(7) この基礎となる考え方は発展させられ、いつそう明確にされて、委員会の最新の一般勧告である ICRP Publication 26 (ICRP, 1977) の刊行で現在の段階になった。この中では線量制限体系の 3 つの成分が次のように別々に分けて述べられている。

(a) いかなる行為も、その導入が正味でプラスの利益を生むのでなければ、採用してはならない；

- (b) すべての被ばくは、経済的および社会的な要因を考慮に入れながら、合理的に達成できるかぎり低く保たなければならない；かつ、
- (c) 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。

これらの3つの原則は、それぞれ、行為の正当化、防護の最適化——これは同義語“ALARA”としても知られている——および、個人の線量限度、と一般に呼ばれている。これらの要件は相互に関連しあっていることを認めたくえで、この報告書では二番目の原則である防護の最適化についての解釈をもっぱら扱った。

(8) 防護の最適化の概念は、そもそも実用的なものである。防護のレベルがすべて該当する線量限度以下の線量になっているとして、電離放射線に対する人の防護を取り扱うすべての局面において、どんな防護のレベルにすべきかということについて頻繁に意思決定をする必要がある。最適化は次のような考え方の基本的な枠組みを与える。すなわち、その状況下で達成しうる最善のものを得るため、他の要因および制約の存在のもとで、防護に投じる資源と得られる防護のレベルとの何らかのバランスを持たせることが適当であるというものである。本報告書では、このバランスを求める過程で使用しうる手法とそれら手法の種々のレベルの複雑性についてもいくぶん記している。また、いろいろな種類の問題に対するそれら手法の適用性に関して指針を与える。

(9) 線量管理実務の多くの状況においては、線量管理責任者および作業員自身の両者が、最適化の概念を理解し、かつそれに関与していくこと以上に何か公式の要件があるわけではない。また、複雑な事態に対して、この基礎的レベルでの意思決定に代えて、より定量的な手順を適用することに移行すべきことを意図するものではない。

- (10) 防護の最適化のもっと公式的な検討に用いられる手順はすべて、

(6)

いずれかの形式の“意思決定を支援する”手順である。これらの手順は防護のレベルに関し決定を下さなければならない人々のために、関係する種々の要因を明確にし、合理的かつ必要な場合にはそれらを定量化し、さらに種々の要因間のトレード・オフを体系化することを意図している。

(11) 最適化の関連でいずれの型の意思決定支援法を用いるさいにも、放射線防護の全体系に基礎としてもともと存在する仮定に留意する必要がある。一例として、比例性という基本的な仮定を検討してみよう。これに関連して、電離放射線と物質との相互作用を生物学あるいは物理学の観点から理解することを目的とした科学研究の連続的な過程と、日常的な防護業務の基礎となる実用的な仮定のための必要性を区別することが重要である。比例性の仮定はきわめて実用的なものであることがわかっている。この仮定は、他の被ばく源からの個人の線量について詳しい知識がなくても、一線源からの同じ個人の被ばく線量について意思決定をすることができるという、大きな利点をもっている。しかしながら、これは一つの仮定であって、その仮定が用いられていることにより、体系中に存在する他の面の不確かさに加えて、新たな不確かさが持ち込まれることも銘記しなければならない。仮定の用いられる方法には、被ばくする人々の年齢や性別に関係なく全集団にわたって平均すること、一つの臓器・組織の平均線量を用いること、および、平均リスク係数を用いること、および、飲食物の摂取量、代謝パラメータなどに代表的な値を使用することなどが含まれる。これらは、とくに大集団を取り扱うときには賢明な手法であり一般化したものであるが、一方では、どんな特定の数値的結果にもほとんど定量化できない固有の不確かさがあることを意味している。最適化手順および最適化検討の結果は常にこの不確かさを念頭において用いるべきである。

(12) 人の行為から生ずる放射線被ばくについて、その被ばくを生じさせる行為からの利益を完全になくしてしまうのでなければ、バックグラウン

ドに加わる増加分がゼロになるようにすることは不可能である。一般的指針として、放射線被ばくを減らすために投じられる資源の量は、社会の他の需要に投じられる資源と比較しなければならない。全体的目標は、安全と防護のために最適の資源割当てを行うことである。一般的に健康と安全に関する良好な行為は必ず同じような全体的目標をもっていなければならない。この報告書および委員会の他の報告書に記述されている諸手法は、この目標に向けて作業するさいの、さらには“良好な最適化の行為”を体系化し明確にするさいの支援手段であるとして、それらの正しい状況においてとらえられるべきである。

(13) 防護の最適化は、非常に広範な適用性をもった考え方である。それは、単純な日々の意思決定からいろいろな種類の施設設計の大きかりな分析に至るまでのすべてのレベルにおいて使用することができ、放射線の医療診断利用、自然放射線に対する被ばくの制御、一般産業および原子力発電産業という、もっと公衆に知られている領域における被ばく管理など、放射線防護の全分野に適用できるはずである。最適化の考え方はまた、原理的には、放射線被ばくを引き起こす事故や故障の影響を予防し、または緩和するために計画される諸手順にも適用できるはずである。そのためには、事故の頻度を最小化したりその影響を緩和したりするのに必要な仕事からの日常の被ばくについても考慮するほか、そのような事象の発生確率とその影響を考慮すべきである。この報告書に記述されている手法のいくつかは、これらの非常に広い状況において使用するのに十分な柔軟性をもっている。

(14) 最適化は、また、一たび事故が起こってしまった場合の線量低減対策や被ばく防止対策の範囲に関して意思決定するさいの役割ももっている。この局面での適用の問題は、事象の確率的性質に関係するものではなくて、その事象のあとに必要となる、かなり異なった種類の意思決定と、平常の生活条件へのその直接的影響に関係している。

(8)

(15) ICRP Publication 37 (ICRP, 1983) においては、放射線防護の最適化の一般概念が総合的に明記されているが、防護の問題を分析して最適解を決定するために使用する手法として、費用便益分析法の使用に焦点が当てられていた。この報告書は、防護の最適化の一般概念から始まり、意思決定のいろいろなレベルやいろいろな状況において、費用便益分析がその一つである適当な手法を用いて最適化がどのようにして実行されうるかを示している。

(16) 以前の報告書が行ったように、防護の費用といったすでに費用の値で表現された要因と、多少の困難はあるにしても、費用に変換できる要因に焦点を絞ることは、バランスやトレード・オフという考え方を導入するのにおそらく有用であったと思われる。この強調点は、初期において、最適化の検討のための好ましい手法として費用便益分析法が開発されてきたことと関係が深い。しかしながら、最近では、現実的な意思決定には、定量化しにくくいっそう社会的な要因を考慮する必要があるということがますます認識されてきている。この報告書でより複雑な手法を発展させた主たる理由の一つは、それらの手法がこれらの他の要因をよりいっそう容易に取り込むことができるからである。

2. 防護の最適化

(17) この報告書で議論される防護の最適化についてのすべての側面は、緒言の中の歴史的状況のところで展開された一般概念につき、とくに解説することである。一般に“線量”といった場合、その意味は、ICRP Publication 42 (ICRP, 1985 b) の中で委員会によって定義されているように、体外線源からの実効線量当量と、それと同じ期間中の摂取による預託実効線量当量との和である。

2.1 最適化の役割

(18) 防護の最適化の概念の基本的役割は、放射線被ばくの管理に責任のあるすべての人に、“自分はこれらの放射線量を減らすために合理的に実行できるすべてのことを行ってきただろうか”と絶えず自問するような思考状態を生じさせることである。明らかに、この問いに対する答えは判断の問題である。というのは、それは線量限度について同じようになされる“自分は線量限度を確実に遵守するようになってきただろうか”という問いに対する答えと同じ意味で答えられる問いではないからである。もしもある作業者の受ける線量がモニタされ、その指定された期間の線量の総和がその期間の限度よりも少ないならば、線量限度が守られているかという問いに対する答えは“然り”である。これはもちろん紋切り型の答えであり、たいいていの場合、線量推定値に伴う不確かさを無視したものであるが、それにもかかわらずそれは十分な答えである。最適化の問いの場合には、判断の適用が要求されるためにそのように明解に割り切った技術的な答えは出てこない。このように、最適化手順のおもな機能は、一たん判断を直観で行えるレベルを超えてから

(10)

は、その判断を適用するための手法と枠組みとの範囲を与えることにある。それはまた、それらを適用しようとするさまざまな人が行う判断や、さらに、同じ人が異なる状況下で行う判断についても、系統化された判断を行う助けともなるはずである。長期的には、意思決定支援手法の適用は、もっと筋の通った一貫性のある意思決定を達成するための助けとなるであろう。

(19) ある意味では、最適化概念の重要な実際の、具体的表現となるのは、この報告書のいろいろな節で展開されている最適化手順である。これらの手順は、おもな放射線防護選択枝を、リスク低減、その費用、およびその他の関連要因とともに正しく決められるように、考察されている問題を明確にすることをねらいとしている。このようなやり方でその問題を系統的に解明することによって、そこに含まれる判断の内容が確実に認識されるようになる。作業者の作業時線量管理の分野では、やるべき仕事はいくつかの競合する新しい設計の可能性あるいは作業に係わる選択を評価するものでは必ずしもなく、最適化の原則に適合しているかどうかをみるために、比較的定常的な状況を評価するものであることが多いという点で、その手順は多少異なっよう。この場合は、個人線量の分布によって表現される結果のほか、職業上の線量管理手順とか訓練レベルのような要因にも焦点をあてるのが重要である。しかしながら、このような状況においてさえも、体系化された手順を使うことによって、与えられた経営および管理の体系が最適化の原則に適合しているかどうかについて、より系統的に評価することができるようになろう。

2.2 諸問題に対する体系化された取組み

(20) 防護の最適化に対する体系化された取組みは、いかなる重要な側面も見落としていないということを確実にする点でも、情報として、また、他の人による評価のためにその分析結果を記録するという点でも重要であ

る。この体系化された解決法の基本的要素は図1のように並べることができる。図に示した各段階を記述する前に、文中で使用される用語を明確にすることが有用である：

防護の選択肢：ある特定された設計または一連の作業手順。

基本事例：その点からの変更を評価するための開始点；設計の検討の場合は通常最も安い選択肢，作業の場合は現在行われている一連の作業手順。

選択肢の性能：ある特定された設計の選択肢または一連の作業手順を適用して得られる結果；得られる個人線量と集団線量，プロセス効率などで表せるもの。

選択肢の費用：その選択肢に直接かかる金銭的費用および資源の費用で，訓練費用などその他のいかなる費用も含む。

要因：ある選択肢の費用あるいは性能のいずれかの決められた尺度，たとえば金銭的費用，集団線量，最大個人線量，訓練の必要性，防護衣着用の不快感。

属性：要因と同義語；多属性効用分析という技術用語で使用。

規準：一つかまたはいくつかの要因に関して受入れ可能なもの，または望ましいものの定量的あるいは定性的な尺度；たとえば，個人線量限度，単位集団線量に対するある特定の値。規準は，ある選択肢の性能または費用を比較することのできる基礎である。

放射線防護要因：達成される防護のレベルに関係する諸要因。これらには，得られる線量分布を何らかの方法で記述するような要因と，線量分布の変更にさいして生ずる費用その他の不利，たとえば，線量低減に寄与する換気率に関連した不快感，を記述する要因が含まれるであろう。

その他の要因：ある選択肢の性能または費用に関係するか，あるいはそれを記述することに関係する要因で，防護のレベルには関係しない要因；たとえば，プロセス効率を上げることに費やされる費用，審美的な理由また

(12)

は広報活動上の理由による費用，パブリックアクセプタンスの可能性を表す
選択肢間の差異，単位時間の処理量のようなプロセス効率の尺度，計画立案
時の考慮事項。これらの要因は，最終的な意思決定を支配するかもしれない
が，放射線防護の最適化の一部ではない。

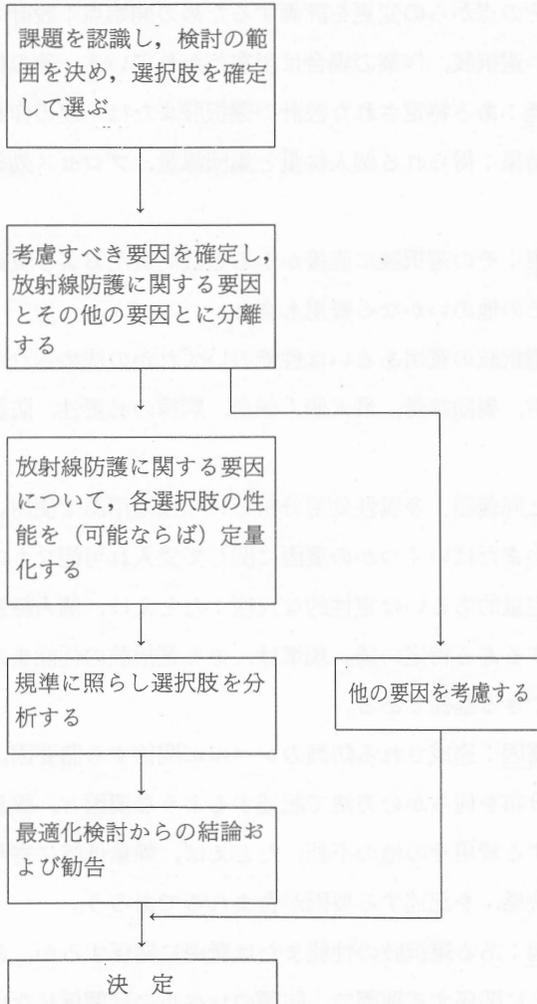


図1 意思決定に関連した防護の最適化に対する
体系化された取組み方

(21) 図1は手順の主要な段階が、次のようなものであることを示している。すなわち、最適化検討の必要性があるということをもとにまず認識することおよび検討範囲を明確に決めること；最適化で考慮すべき要因を決めて定量化すること、およびその要因を放射線防護に関係するものとそれ以外のものとの分離すること；各要因に関する選択肢の性能をなるべくはっきりと規定された規準に照らし合わせて定性的または定量的に分析すること；この分析から勧告すべき最適な選択肢を作り出すこと；どんな対策をとる必要があるかについて結論を出すこと、および放射線防護以外の要因を考慮し政治的な問題も含めた最終的な意思決定を行うこと。この基本的体系の設計時および操業時へのより詳細な適用については3章および4章で記述する。この単純化した図式はすべての可能性を含んでいるわけではなく、たとえば分析が進むに従い、いくつかの点でフィードバック、あるいは再検討を行うことが生ずるかもしれない。

(22) 設計に関しては、最適化検討の必要性は一般に明らかであって、防護、費用を含む努力、およびその他の要因に関して、いろいろ異なった意味合いをもつ設計についての可能な選択肢に焦点が向けられる。これら選択肢の性能は、通常、操業上の意味合いとともに予測されなければならない。

(23) 操業に関しては、意思決定は、しばしば時間ごとに行わなければならないので、最適化は連続的な過程となるであろう。ときには特殊な最適化検討を行う動機が生ずる。この必要性は、たとえば作業者群における高線量が引き金となって管理側内部から発案されたり、あるいは規制上の要件であったりするかもしれない。このような場合に行われる検討は、現状分析が基礎となるのが普通であろう。分析の範囲はこの現状に依存するであろうが、常にそれを明確に決めることが重要である。“選択肢”の選り出しには、作業手順の変更、保守上の要件、教育訓練、管理機構、計測装置や検出器の更新のような面が含まれるであろうし、さらに、設計変更も含まれるかもしれな

(14)

い。この分析の結果から最も適切な選択肢が示されるはずである。最終的な対策の選択では、この分析結果がその他の要因とともに考慮されるであろう。訓練の手順またはそのレベルが最適かどうかを判断するための規準は、定量的な意味ではこれまであまり確立されておらず、検討を実行する人の蓄積した経験に頼らざるをえないかもしれない。しかし、数多くの検討の経験を合わせることであれば、この経験を規準化し、少なくとも定性的な指針とすることが可能であろう。規則や手順に関する状況は各国特有のものであるので、このことは本来所轄官庁の問題である。“所轄官庁”という用語は、この報告書では、広い意味で、設計者および事業者の機能を超える、ある程度の規制上の機能をもついかなる官庁も含むものとして用いられている。

2.3 意思決定とその意味合い

(24) 最も単純な意思決定は、放射線量の低減と資源の節約とが同時に起こるという決定である。これは、最近の研究によって示されているように、まれにしか起こらないという問題ではない (Lochard ら, 1983; Lochard, 1988)。この場合、意思決定者は、ほとんど常に、放射線量を低減することを決定するであろう。これは最適化原則と完全に一致するものである。もっとしばしば起こるのは、線量の低減が、ある努力を要し、資源を追加割当てすることによってのみ達成しうる場合である。この場合は、最も単純な状況においてさえ、結果として得られると思われる線量節減がその節減を得るための努力に値するかどうかを決める必要がある。必要となる努力には財政的出費、訓練の努力あるいは作業手順の組換えなどが含まれる。

(25) 最適化の決定に関するこの基本的な要素が一たん確認されれば、いかなる意思決定も、例えば防護の費用と放射線誘発損害 (通常、放射線量によって表現される) に振り当てられた費用との間で何らかのトレード・オフを暗黙のうちに行っていることが明らかになる。もしこれらの意思決定が

異なる状況下で異なる人によって任意のやり方でなされるならば、最終的な結果に一貫性を期待する理由はない。本委員会や他の機関が、このような状況での主要な意思決定支援手法として、費用便益分析法を用いることを勧告するようになったのは、バランスを示す方程式の一方の側にある資源を含めた費用の重要性を認めるとともに、一貫性を得るための何か簡単な方法を探索した結果である。それが適用された最も簡単な形は、放射線により誘発される健康損害を意味する費用の表現として単位集団線量にある値を割り当てることである。もし線量の全増加分が、関与する個人にとって無視できるようなリスクを意味する程度に低いのであれば、その場合、単位集団線量にある値を割り当てるだけでおそらく十分で、単純な費用便益手法を適用することができる。しかしながら、より複雑な意思決定を考察するときには、意思決定のこの枠組みの中に他の暗黙の仮定が存在することが明らかになる。その理由はおそらく、意思決定に慣れている人々が、この手法そのものが単純な形では普遍的に容認されないという、これらの暗黙の仮定を直観的判断に基づいて認識し、ある範囲でおたがいに合意していなかったためである。たとえば、放射線損害の唯一の尺度として集団線量預託を使用することは、作業者と公衆の構成員の集団線量の間で、または、非常に少ない線量の膨大な人数から作られる集団線量とかなり高い線量の少人数から作られる集団線量の間で、あるいは当該限度の10%の個人線量と90%の個人線量から作られる集団線量の間で、価値が正確に等しいということの意味している。これらすべてのトレード・オフが意思決定者に等しく受け入れられるならば、その場合のみ意思決定者は単純なやり方が有用であることを見出すであろう。その状況について異なる見方をもつある意思決定者は、別の重みづけをすることを必要とするであろう。この報告書で導入されたより一般的な意思決定支援手法は、放射線損害のいろいろな成分の間に異なる種類の重みづけをすることを明白に許容し、また、意思決定者の本来の好みを明確に表現すること

(16)

を可能にする。

(26) これらの手法はあまりにも複雑であるようにみえるかもしれないけれども、そのことは、ある種の決定は複雑であり、たとえそれらが一般に意思決定者の頭の中で行われているとしても、意思決定は複雑な過程であると認めことにすぎない。この“頭の中で行われる”手順はよい決定を生み出すかもしれないけれども、それには、その決定に関する論拠が他の人々には理解しにくく、また同じような状況において他の人によって再現できないかもしれないという不都合がある。意思決定の過程における各ステップを明らかにすることによって、社会の広い範囲に影響を与えるような意思決定をよりわかり易くすることができる。

(27) ありふれた例が、決定に到達するさいの判断の過程で定量化できる要因と定量化できない要因とをどのように使うかを説明するのに役立つかもしれない。自動車を買う場合、私たちは明らかに、値段とか維持費さらに燃料の消費効率といった要因を評価する。もし私達がどのくらいのお金を使うことができるか、というような全体にわたる拘束条件の中で費用便益分析を実行するとしたら、上記の要因はかなり容易に含められることになる。しかしながら、望ましい加速力または最高速度、塗装の色、あるいはステレオシステムの品質のような他の要因を評価するさいには、費用便益分析は容易に適用することはできない。私達はこれらのすべてが決定に関係する要因であると認識して、それぞれの自動車をその要因に対する自分自身の態度にしたがって採点し、そのうち私達の個人的な規準を用いて諸要因間のトレード・オフを行う。私達の各自が行う決定には同じデータベース、すなわち、それぞれの自動車の諸特性を利用しているが、諸要因に対する私達個人の態度やある要因を他の要因に対して比較するための規準によって決定は異なってくる。この報告書に記載された諸手順は放射線防護の意思決定における態度や規準を明らかにし、かつ、説明するのに役立つはずである。

2.4 最適化と ICRP の線量制限体系のその他の側面との 相互関係

(28) 委員会は、線量制限は緒言に記された3要素を有する全体系によって行われ、かつ、放射線量を適切に制限するには体系の3要素のすべてを適用する必要があるということを強調する。にもかかわらず、これらの要素は同等の性格のものではなく、また、異なる問題を検討するさいにそれらが同じ段階で適用されるものでもないということを認識しなければならない。

2.4.1 行為の正当化

(29) 厳密に言えば、行為の正当化として述べられている勧告は、ある行為の“採用”に関係するものであり、次に、その行為の“導入”によって生ずる利益に関係づけられる。すでに述べたように、この勧告は、それゆえ導入しようとしている行為への適用に限定されている：すなわち、この勧告は、現行の行為が新たな行為によって置き代わることになるのでない限り、現行の行為について何らの助言も与えない。しかしながら、初めに導入が決められた状況が変化しているかもしれないので、現行の行為をときどき吟味するということは明らかに賢明であろう。

(30) ある正当化された行為は害に勝る利益を与えるべきものである。害には、それに限られるわけではないが、放射線によって与えられるいかなる害も含まれる。勧告は、ただ、その行為によって不利益よりもより多くの利益が得られることを要求しているのであって、その便益が達成可能な最大のものになることを要求しているのではない、ということに留意することが重要である。もしその行為が、新しい目的をかなえるため、または現行の目的を拡張するために導入されるのならば、その行為は現行の行為とは無関係に検討されるべきである。しかし、もし新しい行為が現行の行為に置き代わ

(18)

るものとして導入されるのならば、変更による正味の便益の評価には、両方の行為についてのすべての便益と損害とを考慮に加えることが必要であろう。同様な一連の全体的論法が現行の行為の定期的再検討に適用することができるかもしれない。

(31) この意味で正当化も意思決定の適用ということになるが、一般的には、最適化に適用される意思決定よりもいっそう広範、かつ、“先験的な”意味合いをもっている。しかしながら、多くの相似点を見ることができる。意思決定者はある幅の選択をもつ。最も単純な場合、選択はその行為を導入するか否かということであろう。もっと一般的な場合、意思決定者は正味の便益を生ずるいくつかの行為とそうでないものとをあげるであろう。そしてこの段階で、正当化の原則を使って、正味の便益を生じさせない行為を消去することができる。

(32) 多くの行為に関して正当化を明白に示すことができる。しかしながら、ときには提案された行為が正負の正味便益の境界線近くにあることがある。これが、最初の検討で退けられた行為を完全には捨てるべきでないという理由である。このような提案は、防護の最適化で用いられる手法によってうまく改善できるかもしれない。そして、この改善された提案は、正当化された選択肢のリストの中に便益と価値を生み出す一つの行為として含められるかもしれない。この繰返しの過程は正当化と最適化の両方にまたがるが、この二つの概念の間に混同を持ち込むことを許すべきではない。

(33) 正当化と最適化の区別は、検討されつつある行為が一たび注意深く規定されれば、明確になる。正当化は、選択がなされるべき利用可能な行為のリストの中にその行為を含めるか否かということに関係している。最適化は、規定された各々の行為の中における防護の手筈の改善に関係している。正当化と最適化の両手順は、特定された目的を達成するために利用できる方法のうち最も適切なものを決める、すなわち放射線被ばくを含む行為の実施

によって社会に対する便益を最大にするという方法を確定する作業に役立つ。意思決定に対する支援、とくにいろいろな種類の便益と害の重みづけを明白に取り扱うことのできる支援は、この過程で有用であろう。

(34) 正当化という言葉が委員会によって特別な意味で使用されているために、ときどき混乱が起こることがある。ある現行の行為に対する変更について“正当化”を考えることはまったく正しい、というような一般的な用法がある。このことは正しいけれども、これは委員会が“正当化”という用語を用いるときの意味ではない。

2.4.2 線量限度

(35) 委員会によって勧告された線量限度と最適化手順との間の関係は明確である。限度は、最適化に関する一つの拘束因子であり、作業員あるいは公衆の構成員に対する該当する限度を満たさないような選択肢は線量制限体系内では許容されない。ただし、その限度が適切でない状況があり、それが最も明白なのは医療目的の放射線に対する患者の被ばくである。

(36) 発生が確率的である事象を取り扱うために線量制限体系がリスクに基づく体系に変換されている場合さえも、適切な場合には、同じ基本原則が保持される。このような変換は、委員会によって ICRP Publication 46 (ICRP, 1985 a) の放射性固体廃棄物の処分に関する状況の中で、線量の限度にリスク限度を追加するというやり方で、実行されている。

(37) 線量限度は拘束因子としての役割の他に、意思決定における関連要因にも作用する影響をもつことがある。たとえば、最大線量または平均線量が該当する線量限度にどの程度接近しているかが関連要因になるかもしれない。というのは、限度近くになると、作業上の柔軟性を阻害することもあるからである。

(38) 線量限度と比較するための線量評価と最適化のための評価との間

(20)

には差異がある。線量限度との比較のための評価では、一般的に悲観的な仮定、すなわち、線量を過大評価する傾向のある仮定がなされる。最適化における評価は、現実に即した仮定に基づくべきである。これらの評価は、2つの場合に異なった数値結果を与えるかもしれないが、それらの相違は予期されることでもあり、説明もすることができる。

2.4.3 線源上限値

(39) 公衆の構成員に関する線量限度は、自然放射線および放射線の医療利用における患者の被ばくを除いた、すべての放射線源からの被ばくに適用されるので、委員会により、ICRP Publication 42 (ICRP, 1985 b)において、個々の放射線源に上限値 (upper bounds) を設定すべきであるということが勧告されている。この線源上限値は、いかなる個人の被ばくも、その人が数個の線源から被ばくしたとしても、該当する線量限度以下にとどまることを保証するための、その線源についての防護の最適化に関する拘束因子として働くであろう。線源上限値の設定の根拠は、他の線源からの放射線被ばくのリスクを十分に見込んだうえで、検討対象としている線源からのリスクが容認できると考えられる、個人リスクの最大値である。したがって、この値は、最適化過程から誘導されるものではなく、基本線量限度を求めるために用いた方法と類似の方法で求められる。

2.4.4 認定限度

(40) 所轄官庁や管理者が、線量率や放射性核種の放出率あるいは環境物質中の濃度のような実用的な量に関して作業限度を設定することが普通行われる。これらは通常“認定限度”として知られている。認定限度は、適切な線源上限値や例外的には線量限度そのものによる拘束を受けた最適化検討の結果を考慮したあとに選定すべきである。認定限度は、最適化検討の結果

よりもいくぶん高めにする事ができる。このようにしないと認定限度の下に作業上の余裕をもたせる必要性から、最適でない手順を採用することが強いられるであろう。認定限度はその後の最適化検討に関し拘束条件になるべきでないということを認識する必要がある。もしこれらの新しい検討によって、見直された最適値が実質的に認定限度と異なることが示されれば、このことは認定限度を高い方かまたは低い方のいずれかの値に変更する必要性を考慮する根拠となるであろう。しかしながら、見直しが行われるまでは、それらは依然として諸行為に対して実用的な拘束条件である。

2.4.5 その他の拘束因子

(41) 委員会の示した線量制限体系の一部ではないが、ときには所轄官庁や管理者によって、ある限定された労働者群における最大個人線量または最大集団線量といった種々の形で表現された拘束が課せられることがある。原則的には、これらは一般的なあるいは一連の特定の最適化検討を基礎として誘導されたものであるべきである。実際には、一度設定されると、それらはそれ以後の最適化の実際的な結論に対する拘束因子となる。

2.4.6 設計目標および運転・保守・供用中検査の手順

(42) 一般的なまたは特定の最適化検討が、たとえば施設またはシステムの設計に関して行われる場合、そのような検討による結果を設計目標値または設計基準として表し、それらを設計技術者にとっていっそう役立つようにすることが望ましい。このように、標準化された設計目標値は最適化検討の結果であるべきで、最適化検討の拘束条件になるべきものではない。同様に、運転・保守および供用中検査の活動に関する最適化検討は、もし実行されたならば最適化の要件を確実に満すような標準的手順を生み出すべきである。

(22)

2.4.7 介入と対策レベル

(43) 個人の行動の自由に対する介入または制限の必要性は、通常、危険にさらされることからの相対的リスクまたは被ばくを避けるために必要な行動からの相対的リスクを、その行動の実行可能性を考慮に入れて、その個人について比較することによって決定されるであろう。危険が集団に及ぶとき、最適化検討が作動し、すべての損害と、対策に関連した費用および労力との間でそのバランスを評価する必要がある。この適用と通常状態における最適化との間にはいくつかの相違がある。まったく対策をとらない場合からわずかでも対策をとる場合への移行は、かなりの初期費用の負担を招くことになりそうであるが、わずかの対策から少し規模を大きくした対策への移行はわずかな費用の増加ですむかもしれない、ということに注意すべきである。

2.4.8 法規制からの免除

(44) ある線源または環境状況を規制から免除するための根拠は2つある。一つは、線源が通常状態でも事故状態でもきわめて低い個人線量と低い集団線量しか生じさせないような場合である。もう一つは、利用可能な規制手順が、その規制に投入する資源量に比べうるほどの線量低減を合理的に達成できない場合である。この二つ目の根拠は、その結果が規制からの免除か規制体系に含めるかであることを除いては、最適化の方法と同等のものである。ある場合には、最適化検討のために必要な資源を振り当てることさえ正当化できないくらい線量が十分低いことがあり、その場合は、それ以上の法規制から自動的に免除すべきであることは明らかである。

3. 設計段階に適用される最適化手順

(45) 最適化の体系化された取組み法についてはすでに2.2節で一般論として述べた。設計に対してもっと詳細に適用する場合のやり方を、Webbら(1986)が示した手順に基づいて、図2に示した。最適化の観点から検討する必要がある設計上の問題があると決まったならば、防護選択肢(より一般的には、さまざまな防護上の側面をもった設計上の選択肢)を確定しなければならない。次に、この手法の後段でこれらの選択肢の比較が行われる。さらに、この最初の段階では、放射線防護上の要因とこれら選択肢の比較にさいして用いられる規準を特定する必要がある。次に特定された要因各々に対応する防護選択肢の性能と費用の定量的推定が、もし必要ならば適当な定量的意思決定支援手法の適用によって、これら選択肢の比較を行うために必要とされる。この結果は最終決定への貴重な入力となるが、2章で述べたように、他の非放射線的要因が優先されるかもしれないという理由で必ずしも最終決定に直接つながるものではない。委員会は、図2にまとめた体系は、最適化手法を設計に対して実行するさいに適切なものであると考える。以下、各段階を詳細に検討する。

3.1 分析される状況の範囲の決定

(46) 選択肢を選べる範囲と最適化手順の上で考慮すべき要因を明確にするために、状況を正しくとらえなければならない。次に示すような比較を含む場合には、問題はいつそう複雑である。すなわち、とくに排出物処理システムに関連する場合の公衆の線量と職業人の線量との比較(LombardとFagnani, 1981)、通常運転時と事故的状況との比較(FitoussiとCandes,

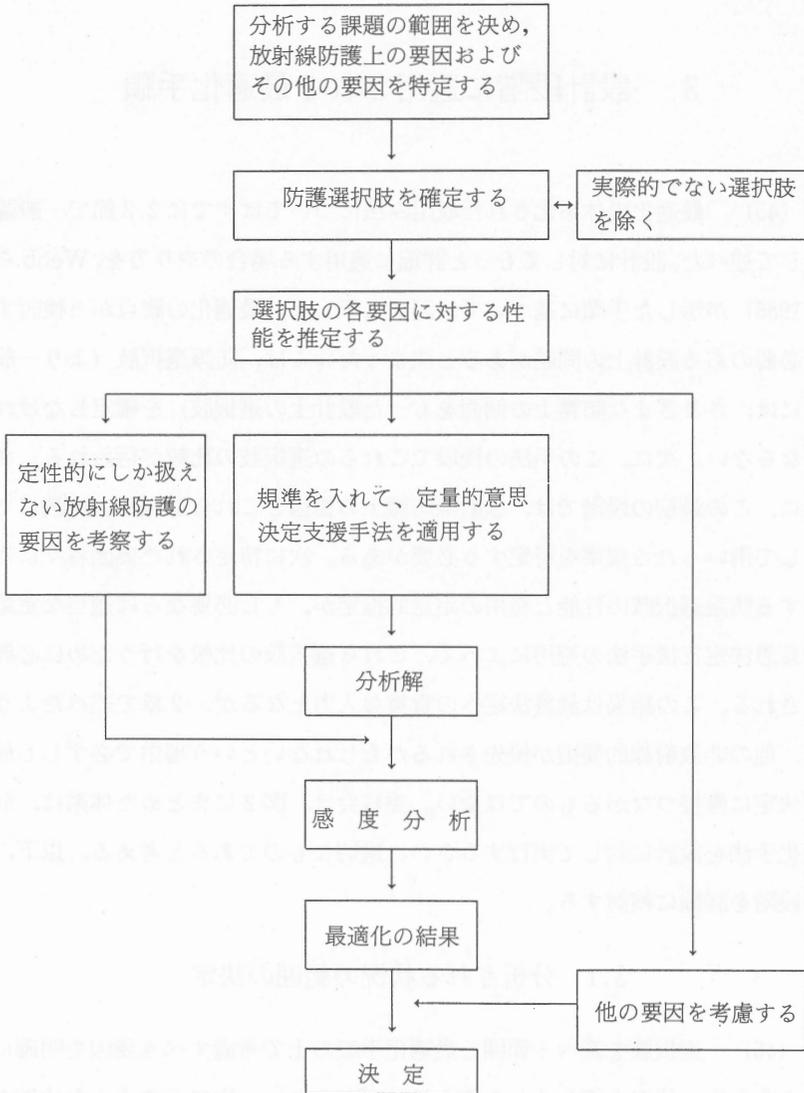


図2 設計段階に適用される最適化手順の図示

1985), とくに長寿命放射性核種の廃棄物管理の場合の短期リスクと長期リスクとの比較, (Fleishman と Clark, 1982), さらに, 個人線量と集団線量との比較である。

(47) 放射線防護上の要因を2つのカテゴリーに区分することができる。一つ目のカテゴリーは分析手順の中に常に含まれていなければならない要因からなり, とくに, 防護費用と集団線量がこのカテゴリーに入る。二つ目のカテゴリーは常に必要とされるもの以外の要因からなる。個人線量の分布はこのカテゴリーに入るが, これはおそらく, 該当する線量限度の百分率か, または, 個人線量の範囲に応じて集団線量を分配することによって表されるものである。線量の時間分布, 被ばく人口, 事象の発生確率, 選択肢の実現可能性等もこのカテゴリーに入る。考慮すべき要因すべてが特定されると, これらの要因のうちから, 分析手順に含めるための定量化が適切にできないものが出てくることありうる。とくに, 単純な手順しか利用できない場合にそうである。この場合, それらの要因は定性的に評価しなければならない。定性的評価の結果は, 最適条件に到達する過程, すなわち, 分析手順の結果を放射線防護の観点からみて望ましい選択肢の勧告に言い換える過程において考慮に入れなければならない。分析手順のこの側面については5章で詳述する。

(48) 2.2節で述べられているようなもので, 放射線防護の範囲からはずれているが最終判断のさいに考慮される他の要因もある。分析手順のこの初期段階でこれらの要因を特定し, 選ばれた選択肢についてそれらを考慮することができるようにしておくとう便利である。現在のところ, これらの要因は別に取り扱われる傾向があるが, 多属性効用分析のような手法の開発によって, これら要因を防護の最適化に関して同じ体系の中にも含める手段が最終的には提供される可能性がある。

3.2 選択枝の確定

(49) この段階は、放射線防護上の課題に対する明解な解答だけでなく、それほど明確でないそのほかの解答についても考慮する機会を提供するものであることから、きわめて重要である。初期の段階として、現実的な選択枝の常識的なセットを作ることが重要である。それで、この段階は、実際には3つの分析作業から構成される。すなわち、まず始めに、考えられるかぎりの選択枝をすべて洗い出す。次に、予備的な評価を行って、明らかに実際的でないものを排除する。最後に、引き続き分析を行う選択枝を決めて特定する。

(50) 設計においては、最適化の考察はまさにその開始のときから行われる。ある新しい課題に対して最初のアイデアが浮かんだときすでに、設計者は、大なり小なり、一般的な目標と規準に照らして代替案の評価を意識的に開始している。したがって、最適化の概念を設計者の思考に導入し、放射線防護の要点が、あとの追加や変更ではなく、最初から概念の一部を形成するようにすることが有益であろう。

(51) 放射線防護上の選択枝は、普通、線量や被ばくの確率を低減させることを狙ったものである。一組の選択枝がどのように作られるかの簡単な例として、集団線量の管理を考えよう。集団線量は、平均線量率、被ばく時間および被ばく人数の積である。これらのうちの一つ以上を変更する可能性を考えれば選択枝を作ることができる。たとえば、線量率を低減するという選択枝には、遮蔽の追加、線源の放射能の低減、または排出物の放出管理が含まれる。被ばく時間を短くするという選択枝もあるかもしれない。それらはときとして、訓練や職員管理といった作業上の手順とも関係するであろう。このほかの設計上の選択枝には、作業者の代わりにオートマチック機構やロボットを使うことで被ばく人数の低減を可能にするというものもあるかもし

れない。選択肢の中には、インターロックや警報装置の設置のような技術によって被ばくの発生確率に影響を与えうるものもある。

(52) 選択肢を確定したあと、これらのうちから考察をより詳細に行う価値のあるものを分析のために選び、適当でないものを除かなければならない。この選択の過程は、まず、線量限度のような既存の拘束条件に明らかに合致しない選択肢や設計上の要件を満足することができるとは思われない選択肢を除くことから始まる。しかし、はなはだしく非現実的であるというわけではない選択肢を早々と排除すべきではなく、最適化手順の初期の結果いかんではあとで再考する必要があるかもしれないということは強調されなければならない。

(53) このような選択肢の予備的選択であっても、費用効果分析や大雑把な多規準優位分析といった定量的な方法の助けを借りることができる。この選択過程は最適化手順の中で考察される選択肢の数と範囲を減少させることになる。重要で複雑な課題を達成するには、プラントの単一項目について詳細な設計検討をするよりは、もっと費用のかかることではあるが、より広範に初期選択肢を分析する方が正しいやり方であろう。

3.3 選択肢の性能の推定

(54) その次は、各選択肢の性能を特定された要因の各々について推定する段階である。これらの推定は可能なかぎり定量的に行うべきである。

(55) 設計の検討においては、既存のプラントに対しては、たとえば線量のような測定値が得られていたとしても、新しい設計は普通は異なったものであり、モデルを用いてその選択肢の性能を予測する必要がある。したがって、モデル化は、この手順の重要な部分となる。多くのモデル、とくに環境移行モデルが開発されており、これによって公衆の構成員における線量分布を合理的に予測できる。これらのモデルは、個々の状況にいつそう的確に

(28)

対応するよう不断の改良が行われている。最適化のために用いるモデルとデータは可能なかぎり現実的なものであるべきである。

3.4 定量的意思決定支援手法の使用

(56) 選択肢の性能と費用とを比較するために、さまざまな定量的手法を使うことができる。それらの多くは Lombard (1981) によって論評されている。定量的手法を選ぶかどうかは作業の範囲によって決まる。防護選択肢が、変更をしようとしているプラントの相当の改造になる可能性があるときには、選択肢の比較には多くの要因が関係する。適切な方法は多くの要因を取り扱うことのできる方法であろう。一方、防護選択肢が、そのプラントのある特定の要素といったより狭い領域だけに関係する場合には、比較のために、2つの要因、すなわち、その選択肢に係わる集団線量と費用とを決めるだけで十分であろう。この場合には、費用便益分析のような、比較的簡便な手法が適切であろう。データの入手可能性やその質といった、その他の考慮もこの手法の選択に影響するかもしれない。不確かさが大きい場合には、多規準優位分析法のように不確かさを扱うことのできる手法の方が簡便な方法よりもよいであろう。しかし、大きな不確かさを伴った入力から正確な解を得ることのできる手法はない。

(57) 手順のこの段階で、特定された要因に対する選択肢の性能を比較するために使う規準を導入する必要がある。これらの規準は、この手順の適用によって特定されたり、適用中に特定されるものではなく、あらかじめ設定されているべきものである。この設定は、のちに7章で示唆するように、所轄官庁によって行われるのが望ましい。このような規準の最もわかりやすい例は拘束条件となる線量限度や、あるいは単位集団線量について定められた金銭的価値である。この値の選択は最適化検討を行う者の手に委ねられるべきではない。それらは、より高いレベルの政策事項として、所轄官庁が最

上位の管理者が担当者に課すべきものである。

3.5 感度分析

(58) 前述の段階はデータやモデルの使用を伴うが、それらには次のようなさまざまな種類の不確かさが含まれる：

- (i) いろいろな状況下における選択枝の性能，または評価に用いられるパラメータやデータ，たとえば線量評価値，選択枝の技術的仕様等についての，不完全な知識に伴う不確かさ。
- (ii) 大気拡散モデルやリスク予測モデルのようなモデルによる予測の不確かさ。これは，そのモデルの形式に本来現実味が欠けていることあるいはモデルが適用されるデータに欠点があることに起因する。
- (iii) 技術革新，新しい構成要素の信頼度あるいは医療措置の効能といった，将来についての知り得ない事項による不確かさ。
- (iv) 変数の統計的な取扱いに起因する本質的な不確かさ。これは発生確率が低い事象から予測される結果を評価するさいにとくに重要である。

(59) 単位集団線量の価値のような最適化検討で使われる規準には，基本的に異なったタイプの可変性が関連している。これらの規準は外部から課せられるべきものであるが，感度分析の一部として，もし異なった規準が導入されたらどのような結果が生ずるかを調べておくことは適切である。

(60) 感度分析により上述の不確かさのいくつかを調査することによって，分析手順におけるデータ，仮定および判断の変化に対する結果の安定性について重要な知見が得られる。とくに，感度分析は，結果に最も大きな影響を与える要因を浮き出させる。感度分析は放射線防護の点で最も重要な事項を指摘し，調査への資源の配分をどこに行うのが知識の空隙を埋めるのに

最も役立つかを示すことができる。

3.6 最適化検討の結果

(61) 定量的手法の適用結果は分析解として知られている。考慮すべき放射線防護上の要因で定量化できないものがある場合には、分析解は最適な解にはならない。真に最適な結果を得るためには定性的な要因を分析解と結合させなければならないであろう。

3.7 決定への到達

(62) 最適化手順を進めると、一般に、一つまたはいくつかの選択肢を推奨するというに至る。単純でかつ限定された設計の問題については、その他の要因が有力な役割を果たすことは滅多にない。さらに、最適化検討は、しばしば、決定の責任を担う人かまたは少なくともその人に近い者によって行われる。このような状況では、最終決定は、しばしば、最適化手順において推奨された結果と同じものになる。

(63) ときには、放射線防護の範疇の外にある要因が問題の複雑さをかなり増加させることがある。したがって、最適化手順から得られた勧告は、決定に到達するためのより幅広い考察への一つの入力にすぎないことは明らかである。このような状況では、最適化検討を行う責任者は最終決定者ではないかもしれない。そこで、このような検討の結論を意思決定者に提示するには、重要な仮定および性能の評価が強調されるように、注意深い配慮が必要である。とくに、感度分析の結果は伝えなければならない。

(64) 最適化検討の結果を意思決定者のためにおよびさらに広範な調査のために提示するさいには、なされた重要な仮定と判断を十分吟味することができ、必要ならば反論することもできるようにそれらを強調することが大切である。たとえば、産業から供給される費用またはモデルで評価された防

護性能などの入力の情報性の程度が、この提示における重要な側面となるかもしれない。過程の全体の記録、すなわち“監査”の記録に関する一つの考え方が環境汚染の管理に関連して提案されており (RCEP, 1988), おそらく最適化検討の文書化に役立つ。

3.8 一般的結果

(65) 同じ設計または類似の設計の問題に対して数多くの最適化検討が行われた場合、また、ある標準的な設計について一般的な最適化が行われている場合、それらの結果から標準化された設計パラメータを抽出することが可能であると考えられる。設計パラメータの目標値を達成すれば、設計は少なくとも第一近似で最適なものになるであろうと期待して、設計技術者やその他の人々はこの標準設計パラメータを直接利用できる。

4. 操業段階に適用される最適化手順

(66) この章では、2章で述べた一般的な手順を操業段階の防護の最適化に適用させることができる方法について記述する。その一般的な手順を図3に示す。各段階を以下に詳細に考察する。

4.1 最適化検討の必要性の確定

(67) プラントや設備の設計は、ある程度、それに続く作業手順を拘束する。しかし、事業者には常にある程度の自由度が残されており、彼らは操業経験の発展を考慮する必要がある。防護の最適レベルを維持するために変更が必要であるかどうかを知るため、作業手順はときどき見直されるべきである。医療行為(Fleishmanら, 1984; Maccia, 1986), 工業ラジオグラフィ(Croft, 1986) および原子力施設の保全(CroftとLochard, 1988)を含む多くの分野で、このような見直しの必要性が示されてきた。見直しを始めるのは、個人線量もしくは集団線量のレベルの変化, 費用の変化, 事故の発生, または単に管理者や所轄官庁による慣行の定期的な見直しの要求のためであろう。これらの見直しの結果は常に設計者に伝達されるべきであり, また, ときとして, かなりの設計変更の必要性を示すこともあろう。

4.2 検討範囲の決定

(68) 操業時の最適化検討の範囲は、ある組織、サイトまたは特定の施設で採用されている手順の完全な見直しから、一つの特定課題の防護面の最適化を目指した検討にまで及ぶ。検討の範囲を決定したのち、検討に含めるべき放射線防護上の要因と、最終決定に影響しそうなその他の要因とを特定

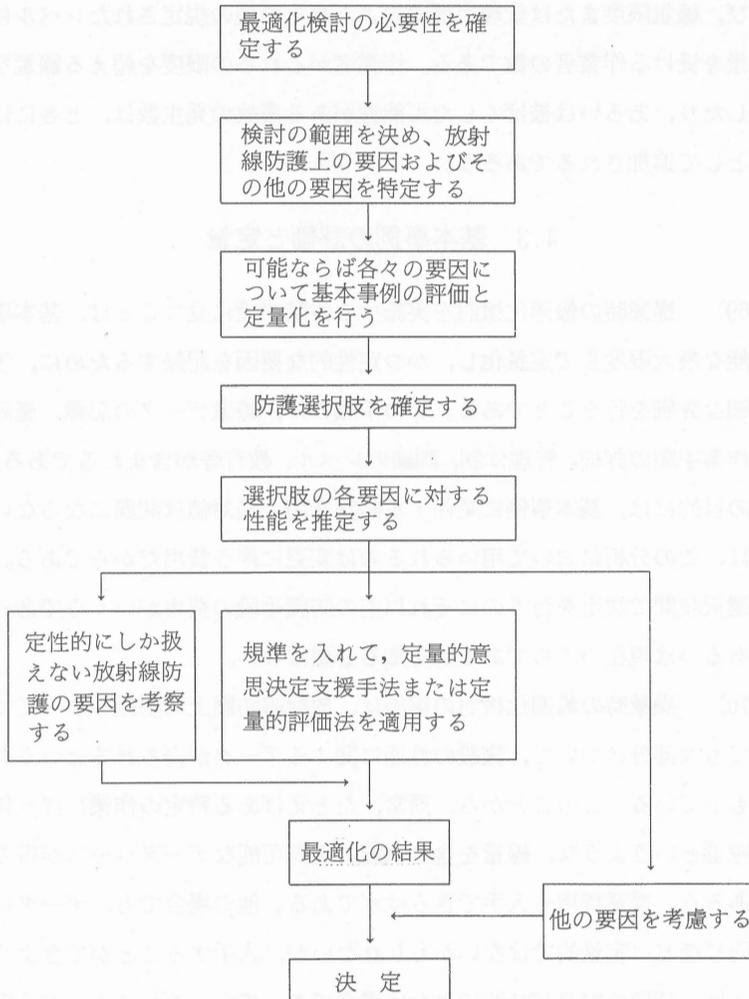


図3 作業時に適用される最適化手順の図示

することが必要になる。これらは、明らかに検討の範囲に依存するが、作業
者群中の職業上の被ばく線量分布を考察することなしに作業時の最適化検討
を行うことはほとんどないであろう。したがって、含めるべき要因は、通常
ある一定期間における作業者群の集団線量とその時間的推移、最大個人線量、

(34)

および、線量限度または管理目標値のようなその他の規定されたレベルに近い線量を受ける作業者の数である。作業者がこれらの限度を超える線量を被ばくしたり、あるいは被ばくした可能性がある事故の発生数は、ときには、要因として追加されるであろう。

4.3 基本事例の評価と定量

(69) 作業時の最適化検討を実施する段階で役に立つことは、基本事例を可能な最大限度まで定量化し、かつ定性的な要因を記録するために、現状の詳細な評価を行うことである。この手順には、線量データの記録、施設および作業手順の詳細、管理体制、訓練のレベル、教育等が含まれるであろう。実際の目的には、基本事例に関係する防護費用の絶対値は問題にならない。それは、この分析において用いられるのは変更に伴う費用だからである。現在の選択肢間で決定を行うのにそれ以前の防護手段の費用がいくらであったか、あるいは現在いくらであるかを知る必要はない。

(70) 作業時の最適化検討の実施は、放射線防護上の要因のすべてではなくても大部分について、施設の性能に関するデータが得られるという有利さをもっている。このことから、通常、たとえばある特定の作業に伴う作業者の線量というような、線量を含む明瞭で確認可能なデータベースが得られるであろう。操業費用も入手できるはずである。他の場合でも、データはこれと同じほどに定量的ではないかもしれないが、入手することができよう。たとえば、公衆の線量が計測できない場合であっても、それによって公衆の線量を計算できるような環境への放出記録があるであろう。また、作業者が出席した訓練課程とその頻度および科目の記録もあるであろう。事故とその程度の記録もあるであろうし、また、その操業の管理体制も利用できるであろう。

4.4 防護選択肢の確定

(71) この段階は、設計の最適化検討における選択肢の確定と類似したものである。ここでは、前段階で実施した現状調査が大いに役に立つ。さらに、たいいていの場合、放射線防護要因のうちいくつかの変更につながるような変化がどこで起こりうるかがこの評価から明らかになるであろう。こうして、作業群の集団線量の定量化において、この集団線量の大部分をもたらす、またそれらの作業の変更の可能性をもたらすようなプラントの運転モードや特定の作業が、この分析によって決められるはずである。この手順の適用は、必然的に、個々の型のプラントや施設に応じて多種多様である。検討対象となりうる可能性のある例としては次のものがあげられる。すなわち、人がいなければならない場所の線量率を低減させるときの遮蔽の効果、とくに高線量率場において運転員の線量を管理するためのモニタリングのレベル、個々の作業員の被ばく歴を日々管理する責任者への情報伝達のための管理上の手順、訓練プログラム、環境への通常放出の管理手順などである。すべての可能性を確認したあと、これはいくらか創造的思考を要する過程であるが、技術上、管理上あるいは組織上のいずれの理由であれ、実際的でないとされる選択肢を排除する必要がある。しかし、どちらともいえないものは、明白な最適条件が得られないとしても再考慮する必要性が生じた場合のために記録しておくべきである。

4.5 選択肢の性能の推定

(72) 段階 4.3 で出発点として集めたデータによって、段階 4.4 で確定した各選択肢の費用と性能とを評価すべきである。この評価のある部分、たとえば、費用の評価は設計におけるよりも難しいであろうが、作業手順の特定の変更やもっと強力な訓練手順が線量に与える効果の定量化はかなり容易

(36)

なはずである。組織体制や内部的な作業手順の変更のようなこのほかの側面は、どちらも定量化は困難であるが、より大きな長期的影響をもつかもしれない。これは、最適化の適用において手法や手順の今後の開発が必要とされる分野である。

4.6 定量的意思決定支援手法および定性的評価の使用

(73) 特定された放射線防護の要因に関して選択肢の性能を比較する必要がある。この比較はときには定性的に行わなければならないこともあろうが、多くの要因については、設計の最適化検討の場合と同様に定量的な手法を使うことができる。3章で述べた規準の多くは操業の最適化検討とも関連しており、あらかじめ設定されているべきである。それらは、作業者群に対する単位集団線量の価値のような一般的な規準であることもあり、また、所轄官庁によって課せられる訓練の規準のような特別の種類の種類に特有のものである場合もあろう。

(74) 前と同様に、定量的評価の結果が分析解となるが、操業時の最適化検討において通常定性的な要素がより多くあるとすれば、分析解の重要性は比較的低そうである。したがって、分析解は図3において分離して示さず、最適化の結果に総合して含めてある。同様に、感度分析は、原則として同程度の重要性をもつものの、定量的に実施するのはいっそう困難になるであろう。

4.7 最適化検討の結果

(75) これら定量的および定性的分析の結果、一般に、どこを変更すると便益もたらさるかを示し、またその変更の、予想される結果も同時に示すような選択肢が明確になるであろう。この検討の実施に利用できたデータにおける食い違いや欠損に関する勧告も、達成されるべき性能のレベル

やその後の見直しの必要性と頻度に対する助言とともに、この結果からおそらく得られるであろう。

4.8 決定への到達

(76) この検討がかなり単純で放射線防護の枠外の要因によって影響されそうもない場合には、これらの検討結果と勧告は一般に決定として採用され、行動に直接転化される。状況がより複雑で他の要因が数多く関与する場合には、最終的にプラント管理者によって決定されるかまたは所轄官庁によって課された行動は、最適化検討から得られた勧告とは異なることもあろう。そのような場合、そのことは、可能ならばその異なった行動の理由とともに記録されるべきである。これは操業と設計の双方に関する将来の最適化検討に資するであろう。

4.9 一般操業規則

(77) 類似した状況における操業に関する数多くの最適化検討の経験から、標準的な作業手順、目標線量値、または目標線量分布に対する一般的な指針の策定が可能になるはずである。この指針は、分析された作業の種類に固有のものであり、かつその指針に適合すればその作業が最適化されたやり方で行われたことを合理的に保証するようなものであるべきである。

5. 定量的意思決定支援手法

(78) すべての防護選択枝の性能と費用の評価が終わったならば、“最適な”防護選択枝を決めるための比較が必要になる。最適なものが自明でないときには、定量的意思決定支援手法を使って比較を行うことができる。この定量的手法の適用結果は分析解として知られている。考慮しなければならない放射線防護上の要因で、定量されないものがあれば、分析解は最適解にはならない。真に最適なものを与えるには、定性的な要因を分析解と組み合わせなければならないであろう。

(79) ここでは、利用可能な種々の手法のうちの4種類について説明しよう。これらは、費用効果分析、微分費用便益分析を含む費用便益分析、多属性効用分析および多規準優位分析である。さしあたって注意すべきことは、第一の方法は、それ自体では完全な最適化検討のためには適切でないが、似たような属性を有する選択枝間にあつて、見込みのあるものを残し、見込みのないものを除くのに使えるということである。問題点と特定された要因の数によるが、残りの手法の一つを使うのが一般的には適切であろう。

(80) 結果を決定するのは、分析で使われる放射線防護要因と規準の明細であつて選ばれた手法ではないということが、常に認識されているわけではないが、肝要な点である。たとえば、費用と集団線量の2つの要因だけが関係するということがわかった場合には、直接的に最適なものを示す分析解は費用便益分析のような単純な手法によって与えられるであろう。このような単純な課題に、より複雑な手法を適用するのは無駄なことである。しかし、適用すれば、結果としては同じ分析解と同じ最適な選択枝が得られることになるであろう。このことはこの節の後で説明する。しかしながら、多数の要

因が関係することがわかった場合、とくに、そのうちいくつかが定量化にならないときには、単純な手法はこれらの要因のうちのいくつかを取り扱うにすぎず、分析解は最適なものを示さないであろう。最適なものが見出される前に、分析解と残りの要因に関する選択肢の定性的評価とを組み合わせなければならない。すべての要因を扱えるもっと複雑な手法を適用すれば、最適な選択肢を直接的に示す分析解が得られるであろう。これまで述べたことはすべて、選ばれた手法にかかわらず使われる同一の規準に依存する。

(81) この節では、説明のために、同じ問題を、順に複雑さを増した手法を用いて分析する。特定された放射線防護要因の数は使われる規準と同様に同じ数のままとする。Lombardらの研究(1984)に基づいた例を付録Aに詳述するが、要するに、この問題の扱う領域は、小規模なウラン鉱山において作業者を防護するための換気設備の設計である。選ばれた選択肢は公衆の防護には関係しない。最適化に関連性があるとして特定された放射線防護要因は次の4つである。すなわち、作業者の集団線量、防護費用、作業者の個人線量分布、換気率に関連する不快感。これらのうちの最後のものは、2章の定義に従い、放射線防護要因になる。というのは異なった換気率は異なっ

表1 ウラン鉱山の事例で考察されている選択肢のデータ

防護選択肢	1	2	3	4	5
年間防護費用, \$	10 400	17 200	18 500	32 200	35 500
年間集団線量, 人・Sv	0.561	0.357	0.335	0.196	0.178
作業者群別年間平均 個人線量, mSv					
I	40.8	28.4	26.0	17.5	15.8
II	34.5	22.3	21.0	12.6	11.3
III	28.9	17.1	16.3	8.4	7.8
換気の不快感	問題なし	軽度	軽度	重度	作業困難

注：集団線量は、ラドンの測定値から実効線量当量を評価することの難しさのため不確かさが大きい。しかし、それらの差および傾向に対する誤差は比較的小さい。

(40)

た線量につながり、また、それらに従い異なった不快感（費用）がもたらされるからである。使用したデータを表1に示す。

(82) 使われた規準は定量的なものと同性的なものの双方であるが、最終的な分析では、すべての規準は定量的になっている。規準は分析の実施に先立って決めておくことが重要である。これは、各節の始めに説明上の数値で示してある。分析の全体に共通な規準は費用と単位集団線量とを関連づける規準である。個人線量分布に関する規準は、始めは、高い個人線量、とくに、線量限度近くの線量に対する嫌悪として定性的に記述される。拡張費用便益分析に使うときには、このことは、個人線量の特定範囲の中で与えられる集団線量の各成分に適用される β 項で表現する(ICRP, 1983, 1985 b)。これに代わる多属性効用分析では、この規準は別のやり方すなわち最大個人線量に対する効用曲線として表現する。換気率に関連する不快感を記述する規準は多属性効用分析手法を除いてすべての場合に定性的であり、意思決定者が“相当に重視する”として特徴づける。

(83) 多規準優位分析で要求される規準は、同じ判断を扱っているが、異なった種類のものであり、この手法を扱う節の始めに記述してある。

5.1 費用効果分析

(84) 各選択肢には一つの防護費用のレベルとそれに対応する集団線量がある。選択肢間の関係をグラフに表す最も簡単な方法は、図4に示したように、2つの変数の関係をプロットするものである。この例では、選択肢は離散的で、中間の選択肢はない。したがって、図4～図8においては選択肢を点で表したが、わかりやすくするために直線で結んである。連続変数を含む選択肢は滑らかな曲線になるであろう。図4では防護選択肢の各々は白丸で示してある。この図を大雑把に吟味することで、これら2つの要因に基づいた選択肢の予備選択を行うことができる。丸印の中に×印を付けて示した

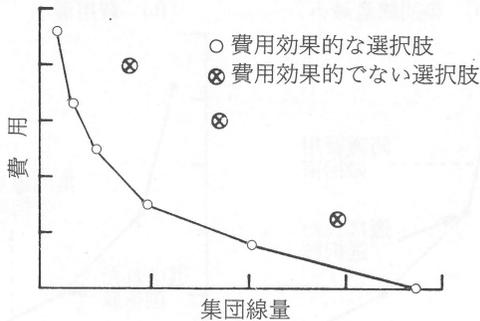


図4 典型的な費用効果曲線

注：この図および図5～図8において、各点を線で結んだのは、わかりやすくするためであって、とくに意味はない。

いくつかの選択枝の近傍には、より少ない費用でより低い集団線量をもたらす選択枝がある。これらの選択枝はその他の点では類似しているとする、×印を付けた選択枝はさらに考察を続けられ消去されるであろう。こうして利用可能な一連の選択枝は費用効果的なものに限定される。この予備選択は、ときとして便利ではあるが、最適解を決めるには不十分である。費用効果の異なった選択枝間でお選択を行わなければならない。

(85) 図5に示すように、集団線量または防護費用に拘束条件を課して、一定の防護費用の下で集団線量を最小にする選択枝、または、制限された集団線量の下で防護費用を最小にする選択枝のどちらかを選ぶというように、データの使用にあたって補足を加えることができるかもしれない。しかし、これらの費用効果分析手順のどちらも防護の最適化には対応しないことを強調しなければならない。これらは防護費用と集団線量との間の基本的なトレード・オフを含まないからである。この理由で、費用効果分析はこの節の冒頭で述べた規準のいずれをも含まないか、または、それらを必要としない。

(86) この手法の適用について説明するために、小規模なウラン鉱山における換気設備の選択に関する例を取り上げるが、詳細は付録Aに述べてあ

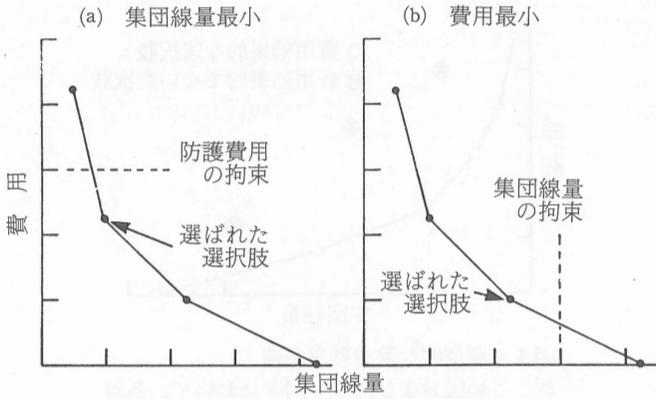


図5 拘束条件を入れた費用効果曲線

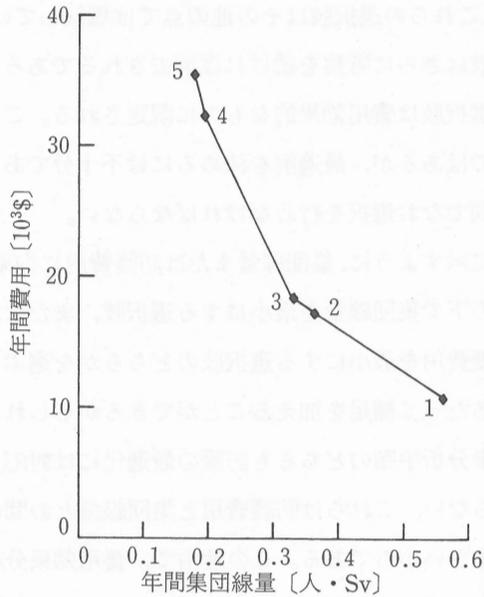


図6 ウラン鉱山の事例で考察された5つの選択肢に関する費用効果曲線

る。利用できる手法が費用効果分析である場合には、定量的分析に含めることのできるのは2つの要因、すなわち、表2に示した年間防護費用と作業者の年間集団線量だけである。ある選択肢から次の選択肢に移ったときの費用の増加 ΔX およびそれに対応する集団線量の減少 ΔS も表2に与えてある。商 $\Delta X/\Delta S$ は費用効果比と呼ばれる。この例では、他のほとんどの場合でも同様であるが、選択肢が1から5へと変わるにつれて比は順次増大する。この比も、また、その傾向も、最適な選択肢を決定する根拠にはならない。

表2 ウラン鉱山の事例で考察された選択肢の費用効果比

防護選択肢	年間防護費用の差 \$	年間集団線量の差 人・Sv	費用効果比 \$(人・Sv) ⁻¹
1	6 800	0.20	33 000
2	1 300	0.02	59 000
3	14 000	0.14	99 000
4	3 300	0.02	180 000
5			

5.2 費用便益分析

(87) 費用便益分析は、厚生経済理論にその起源を求めることができ(Mishan, 1977; SugdenとWilliams, 1978), それは、最も古く、おそらくは最もわかりやすい定量的な意思決定支援手法を代表するものであり、いろいろな行為を通じての利益と損害を比較するのに普通用いられている。費用便益分析のおもな特徴は、意思決定に影響する諸要因が一般に金銭値で表されることである。選択肢に関連する費用と便益を金銭尺度で表し、その総計値が最小になるような選択肢を決める目的で、それらを総計することがその焦点となる。選択肢の決定は直接比較かあるいは微分解析を通して行うことができる。

5.2.1 放射線防護に適用される費用便益分析の簡単な定式化

(88) ICRP Publication 22 および 26 (ICRP, 1973, 1977) にあっては、最適化の目的に直接関係すると考えられる要因は、防護手段のための財政的費用とそれに関連する集団線量のレベルのみであった。このような状況においては、単位集団線量あたりの基準価値、すなわち α 値を用いて集団線量を金銭価値に変換することによって、単純な費用便益分析を行うことができる。分析は、合計費用 ($X + Y$) を得るために防護の費用 X と損害から誘導された費用 Y とを加算して進められる。この合計費用は“良度示数”(figure of merit) に相当するものであって、考察対象の各選択肢について定めることができる。そしてその中で合計費用が最も低い選択肢が分析解となる。分析では合計費用を取り扱うので、すべての選択肢に共通する費用分は、厳密には、最適な防護の選択には関係しない。しかし、實際上、プラントの合計費用の一部は“他の要因”として、最終決定に関係してくるかもしれない。

(89) この手法の適用方法を説明するために、付録Aに示すウラン鉱山の例題を用いることにする。各防護選択肢について、単位集団線量あたりの価値 α が $20\,000\text{\$ (人}\cdot\text{Sv)}^{-1}$ という定量的に規定された規準のみを用いて、

表3 ウラン鉱山の事例で考察された選択肢に関する単純費用便益分析

防護選択肢	年間防護費用 \\$	年間損害費用 \\$	年間総費用 \\$
<u>1</u>	10 400	11 200	<u>22 000</u>
2	17 200	7 100	24 000
3	18 500	6 700	25 000
4	32 200	3 900	36 000
5	35 500	3 600	39 000

注： $\alpha = 20\,000\text{\$ (人}\cdot\text{Sv)}^{-1}$

これ以後の表では、最終結果を有効数字2桁で表した。
分析解には下線を付した。

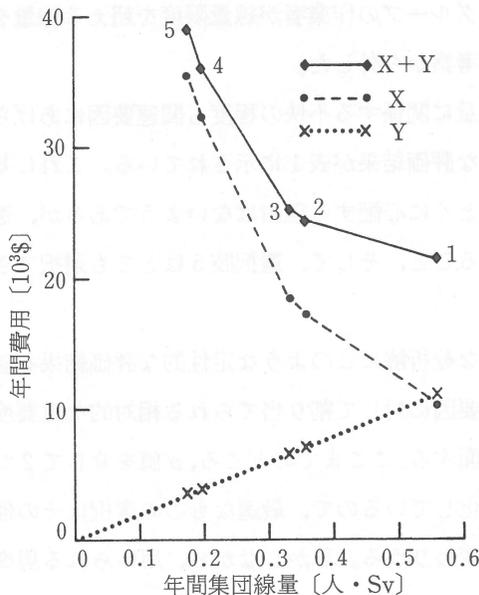


図7 ウラン鉱山の事例で考察された5つの選択肢に関する費用便益曲線

X_i , Y_i および $(X_i + Y_i)$ の値を表3と図7に示す。合計費用 ($X_i + Y_i$) が最小になる選択肢1が分析解である。

(90) 分析解である選択肢1から勧告される最適選択肢に移るさいには、残りの2つの放射線防護要因を定性的な方法で考察しなければならない。個人線量の分布を関連要因の一つとして特定しているのので、表1にそのデータを示す。データは、分析解である選択肢1について1グループの作業員の線量が線量限度にかなり近づいており、おそらくあまりにも近すぎて作業管理の実施が容易でないことを示している。選択肢2に移ると線量低減が効果的に行われるが、選択肢3への移行はそれ以上の利得があまりないようである。選択肢4では、さらにかんりの線量低減が見込まれる。このように、この要因の評価から、選択肢1は魅力がなく、選択肢2あるいは選択肢4にまで移行してもよいことが示されている。付録Aで説明されているように、“ゼ

(46)

口選択肢”では1グループの作業者が線量限度を超える線量を受けることになるため、以下の考察から外した。

(91) 換気流量に関係する不快の程度も関連要因にあげられており、不快レベルの定性的な評価結果が表1に示されている。これに基づくと、選択肢1, 2, 3ではとくに心配する理由はないようであるが、選択肢4の採用にはやや難色があること、そして、選択肢5はとても選択できないことが示されている。

(92) 定量的な分析解にこのような定性的な評価結果を組み合わせる場合、それら4つの要因に対して割り当てられる相対的な重要度をどう決めるかという困難に直面する。ここまでのところ、 α 値を介して2つの要因に対してのみ荷重を定量化しているため、最適なものの選択はその他の要因の定性的な評価に伴って変わりうる。しかしながら、用いられる規準について定性的な評価をすることが可能である。本事例で、高い個人線量に対しては“強く忌避し”，そして、不快感も“相当に重視する”という定性的な規準を用いると、費用効果という点からは選択肢3と4の間できわめて大きな線量低減になってはいるが、上述の論拠から、最適値として選択肢3が適切ということになる。

(93) 本手法を用いるさい、一つあるいはいくつかの選択肢について費用または線量値を変化させ、これが選択にどう影響するかを調べることによって感度分析を行うことができる。感度分析の適用例を付録Aに示す。

(94) 全費用によるこの分析方法に代わるものとして、微分手法を用いることも可能である。微分法では、費用効果の高い選択肢の各対に関連して費用の増加分がそれに対応する集団線量の減少分と比較される。比較は一般的には費用効果比、すなわち、ある選択肢 i とそれより費用の一段低い選択肢 $(i-1)$ が比較されるとき、集団線量の低減分 $\Delta S_i = S_{(i-1)} - S_i$ に対する費用の増加分 $\Delta X_i = X_i - X_{(i-1)}$ の比、を用いて行われる。費用効果の差を用い、

かつ、単位集団線量あたりの基準価値をあらかじめ定めておく必要のあるこの手法が真に最適化手法になるのは、このような場合に限る。この形式は微分費用便益分析として知られている。希にはあるが、選択肢が S の最も高い値から最も低い値へと移行するにつれて費用効果比が一様に増加しない場合に、微分法では単一の解が得られないこともあり、その場合、真の最小値を求めるために全費用法を用いなければならないであろう。

(95) 単位集団線量あたりの価値、すなわち α 値を $20\,000\text{\$}(\text{人}\cdot\text{Sv})^{-1}$ とすると、表 2 に示す $(\Delta X_i/\Delta S_i)$ 比の値はすべて、この標準の価値よりも高い。選択肢 2 を履行することは、基準の価値からみて[すなわち $33\,000\text{\$}(\text{人}\cdot\text{Sv})^{-1}$ を $20\,000\text{\$}(\text{人}\cdot\text{Sv})^{-1}$ と比較して]、集団線量を少なくするにはあまりにも費用がかかりすぎるので、分析解は防護選択肢 1 となる。

(96) 分析解から最適選択肢の選定に進むためには、この節の始めに記述した費用便益分析の結果に適用されたのと同じ一連の定性的な推論が必要となる。ここでも同じ結果、すなわち選択肢 3 を用いることが勧告されるだろう。

5.2.2 拡張費用便益分析

(97) 5.2.1 節で説明した費用便益分析手法は、防護の費用と集団線量を定量的に比較することに厳しく限定されている。分析手法の中に他の関連要因を含めるために、費用便益分析の当初の枠組みを拡張することが可能である。

(a) 個人線量分布についての拡張

(98) 個人線量の高いか低いかが、意思決定の目的に関連する放射線防護要因の一つとして考えられる。これは、多人数であって低い個人線量での集団線量と、集団線量は同じであるが少人数で高い個人線量、とくに線量限

度に近い高レベルの被ばくからの集団線量との差異として表すことができる。拡張費用便益分析によってこの価値判断を組み入れるための一つの方法は、単位集団線量に割り当てられる価値を修正することである (NRPB, 1986)。損害の費用を評価するにあたって、基本の価値 (あるいは α 項) に他の項を補足しなければならない。それで、個人線量のレベルに応じて異なった金銭値を単位集団線量に割り当てる。損害費用のこの新しい成分は、委員会が ICRP Publication 37 (ICRP, 1983) で導入し、またのちに、ICRP Publication 42 (ICRP, 1985 b) において次のように単純化した形で定義した付加項によって表すことができよう：

$$Y = \alpha S + \sum_j \beta_j S_j$$

ここで、 S_j は j 番目のグループの N_j 人の個人に与えられた 1 人あたり線量 H_j に基づく集団線量で、 β_j は j 番目のグループにおいて単位集団線量に割り当てられる付加的な価値である。恣意的な例であるが、この付加規準が次のような β 項を用いて表される：

$$\beta_1 (< 5 \text{ mSv}) = 0$$

$$\beta_2 (5-15 \text{ mSv}) = 40\,000 \$ (\text{人} \cdot \text{Sv})^{-1}$$

$$\beta_3 (15-50 \text{ mSv}) = 80\,000 \$ (\text{人} \cdot \text{Sv})^{-1}$$

(99) この拡張費用便益分析手法についてもウラン鉱山のデータを用いて説明できる。個人線量の分布は単純な数値ではないので、単一の数値として表すことのできる要因によって、分布をどのように特徴づけて表すかを定めることが必要である。拡張費用便益分析においては、特定した個人線量の境界間の集団線量に対応させて一組の要因を導入することが最も便利な方法である。これらは、規準として上で定めたような 3 つの β_i 値である。そうすれば、損害の費用 Y は、集団線量を考慮に入れた α 項と個人線量の分布を考慮に入れた β 項の合計になる。これをウラン鉱山の事例に適用した分析結果が表 4 に示され、図 8 に図示されている。

表4 ウラン鉱山の事例で考察された選択肢に関する拡張費用便益分析

防護選択肢	年間防護費用		年間損害費用		年間総費用
	\$	\$	α 項 \$	β 項 \$	
1	10 400	11 200	44 900	66 000	
2	17 200	7 100	28 600	53 000	
3	18 500	6 700	26 800	52 000	
<u>4</u>	<u>32 200</u>	<u>3 900</u>	<u>10 700</u>	<u>47 000</u>	
5	35 500	3 600	9 600	49 000	

注： $\alpha = 20\,000 \$ (\text{人} \cdot \text{Sv})^{-1}$

$\beta_1 (<5\text{mSv}) = 0$

$\beta_2 (5\text{-}15\text{mSv}) = 40\,000 \$ (\text{人} \cdot \text{Sv})^{-1}$

$\beta_3 (15\text{-}50\text{mSv}) = 80\,000 \$ (\text{人} \cdot \text{Sv})^{-1}$

分析解には下線を付した。

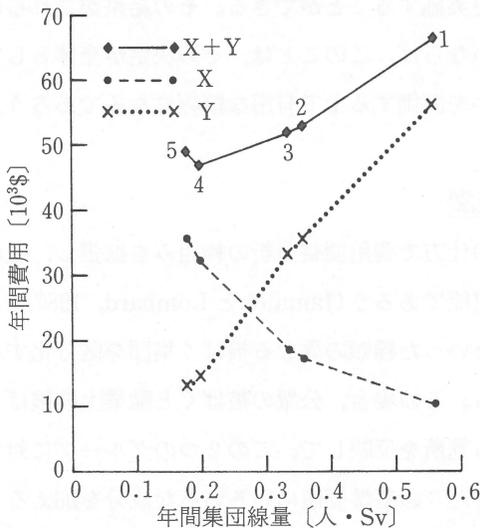


図8 ウラン鉱山の事例で考察された5つの選択肢に関する拡張費用便益曲線

(100) 個人線量分布を斟酌することを分析手法中に含めることによって、損害の費用 Y が増加することになり、合計費用が修正される。その結果、分析解は選択肢 4 になる。この分析解を最適化された勧告値にするには、こ

ここで残ったただ一つの付加的な要因，すなわち換気率に伴う不快感を定性的に取り扱わなければならない。その結果，選択肢3と4の間には相当の差があるので，選択肢4は不適当であることが示される。さらに，合計費用の差がずいぶん大きいことが図8から読みとれるからには，最適解の勧告に関する決定は，この要因につける重みが全体的なバランスを選択肢4よりはむしろ選択肢3に変えるのに十分であるか否かということにかかっている。不快感に対して，“相当に重視する”態度をとるという規準を用いると，合理的に，選択肢3が最適値になりうるであろう。

(101) その規準に特定されている判断に対する分析解の感度を調べるために， β_j に割り当てられる価値もしくは線量域 j に関する分析を含めて，種々の感度分析を実施することができる。その結果がこれらの判断にほとんど感度をもたないならば，このことは，その決定が全体として確固としたものであるかどうかを評価する上で有用な情報になるであろう。

(b) 他の可能な拡張

(102) 同様の仕方で費用便益分析の枠組みを拡張し，他の関連要因を包含させることが可能であろう(Jammet と Lombard, 1987)。たとえば，公衆と放射線作業者とといった種類の異なる被ばく集団を区分化することも適切であると考えられる。この場合，公衆の被ばくと職業上の被ばくの間相対的な重要度に対する判断を反映して，この2つのグループに対する線量に関する単位集団線量あたりの基準価値にいろいろな成分を加えることができるかもしれない(NRPB, 1982)。また，平常操業に起因する日常被ばくと事故によるものに分けて費用便益分析の枠組みを拡張することもできるかもしれない。たとえば，そのような被ばくをもたらす事故の発生確率や頻度に従って，単位集団線量あたりの費用に異なった値を割り当てることによって，低確率ではあるが重大な結果をもたらす事象に対する忌避の程度についての判

断を織り込むことが可能であろう (Cohen, 1984)。

(103) 意思決定者は意思決定にさいして、現在の行為の結果がはるか将来に与える線量に少ない重みをつけることで損害の時間的分布を考慮しよう并希望することができるかもしれない。このことは、通常の割引率は不適切であろうと知った上で費用便益分析の枠組みの中に (一般的な費用便益分析を行う経済学者によって採用されるような) 割引手法を導入するか、もしくは、集団線量率の時間積分に、それ以降の期間については線量は実効的に無視してよいとする打ち切り期間を適切に選択することによって、実行できるであろう (Fleishman と Clark, 1982 ; Lombard, 1986)。

(104) 関連する放射線防護要因があまりにも多すぎるか、もしくは、関連要因のいくつかに關係する規準に関する判断を金銭値として定量することが困難である場合、最適化分析を費用便益分析に限定すると、たとえそれが拡張型であったとしても、扱いにくいであろう。したがって、単純な費用便益分析に1つあるいは2つ拡張したものをを用いることが適当と思われる。多くの要因を含むもっと複雑な意思決定には、他の意思決定支援手法を用いるほうがより適切であろう。

5.3 多属性効用分析

(105) この種の研究方法は心理学、工学および経営科学を含むいくつかの研究分野から発展してきたもので (Edwards, 1961 ; Howard, 1968 ; Raiffa, 1968), 意思決定に非常に広く用いられている手法である。とくに、それは、金銭値で定量することが難しい要因を含む場合の問題を克服することができる (Merkhofer と Keeney, 1987)。この手法の要点は、関連する要因に対し採点表 (または多属性効用関数) を用いることであり、もし得点 (または効用) が2つの選択肢について同じならば一方あるいは他方を優先することはないが、選択肢 i の得点が選択肢 m の得点を超えていれば取決めによ

(52)

って m より i を採るという特性をもっている。

(106) 分析者は、最適化検討に含めるべき関連放射線防護要因（または属性）を特定し、これら要因に関して各防護選択肢の結果を定量的に評価したあと、選択肢の分析の中にそれら要因の相対的な重要度に関する規準を導入しなければならない。これは、要因 j がもたらす可能性のある結果の相対的な好ましさを与える効用関数 u_j を通して行われる。一般的には、各要因について最良の結果あるいは悪影響が最も低いもの（たとえば、最低費用、最小集団線量）には効用 u_j に 1 が割り当てられ、最悪の結果には効用 0 が割り当てられる。

(107) この手法の主要な利点は、これらの効用関数が必ずしも線形である必要がないということである。これによって影響の大きさに対する態度に多様性を導入することができる。このことは例として、最大個人線量という要因についての 2 つの異なった効用関数 A と B を示す図 9 に説明されている。関数 A は線形で、結果の受容度が直線的に単調に減少していくことを反映している。関数 B は非線形で、最悪の結果（すなわち最も高い個人線量）に近いほど受容度（効用）が急激に減少することが反映している。後者の関数は、意思決定者が高い個人線量に注意を向けており、結果の範囲の上端での変化により敏感になっていることの結果である。本例題においては最大の個人線量で表されているが、この種の効用関数は、線量分布に関し、拡張費用便益分析で高い個人線量に対して重みをつけるために β 項を含めたのと同じ基本的視点に立ったものである。

(108) これら効用関数の柔軟性によって、費用便益分析において必要とされる金銭値での定量化が容易ではない要因の導入もまた可能になる。このことについては不快感の要因を用いて後述の例題に示す。

(109) 各防護選択肢 i に関連する n 個の要因の種々の効用を表すそれぞれの単一の効用関数 u_i から、多属性効用関数 U_i を求めなければならない。

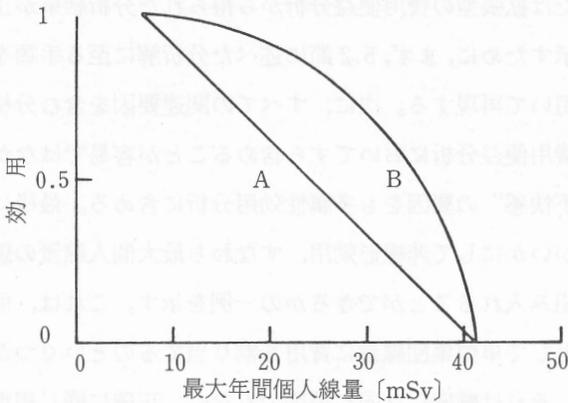


図9 最大年間個人線量の要因に対する2つの部分効用関数の図示

この関数は、各選択肢 i の良度示数 (figure of merit), すなわち “全効用” を表す。異なった要因についての優先性がすべて独立である場合、多属性効用関数は、Fishburn (1977) によって示されているように次のような加算形で表現することができる：

$$U_i = \sum_{j=1}^n k_j u_j$$

ここで k_j は、各因子 j に割り当てられる相対的重要度あるいは重みを表すスケール定数である。これらは、一般的には $\sum k_j = 1$ となるように規格化される。良度示数 (figure of merit) U_i が高いほど、その選択肢の総合順位は高くなり、分析解は U を最大にする選択肢になる。

(110) 単純な費用便益分析を相加多属性効用分析の特殊形と考えると、これら2つの手法間の関係を説明することができる。前者では、すべての単一効用関数は線形であって、 k_j は結果の各单位に割り当てられた金銭値に相当する次元をもつ定数である。

(111) 再度ウラン鉱山の事例にもどると、今度は分析に4つのすべての因子、すなわち、防護費用、集団線量、個人線量の分布および高い換気率による不快感を含めることが可能である。しかしながら、多属性効用分析によ

って単純または拡張型の費用便益分析から得られた分析結果が正確に再現されることを示すために、まず、5.2節に述べた分析解に至る手順を多属性効用分析手法を用いて再現する。次に、すべての関連要因を含む分析解を得るために、拡張費用便益分析においてすら含めることが容易ではなかった要因、すなわち“不快感”の要因をも多属性効用分析に含める。最後に、多属性効用分析手法がいかにして非線形効用、すなわち最大個人線量の線量限度への接近を直接組み入れることができるかの一例を示す。これは、個人線量のレベルの関数として単位集団線量に費用を割り当てるのといくつかの点で共通しているが、それは厳密には同じ要因でもなく、正確に同じ規準で律せられてもいない。

(112) 5.2.1節で行った単純費用便益分析をまず最初に考えると、そこには分析過程の中に防護の費用と集団線量の2つの要因しか含まれていなかった。多属性効用分析の詳細については付録Aで述べるが、重要な要点は、割り当てられる効用関数の形と、スケーリング定数の導出である。単純費用便益分析においては、費用のある変化分はそれが費用のどこの範囲で生じても等価であり、また集団線量についても同様であると、暗黙のうちに仮定されている。したがって、その効用関数は線形である。この2つの要因に関する部分効用関数は、したがって図10および図11に示すようになる。

(113) 単純費用便益分析においては単位集団線量あたりの価値、すなわち α 値として $20\,000\text{\$}(\text{人}\cdot\text{Sv})^{-1}$ の規準が用いられた。これを多属性効用分析で必要とされるスケーリング定数に変換するためには、それら2つの要因の値の範囲を考慮することも必要である。それらは表1から読みとることができ、それぞれ $25\,100\text{\$}$ および $0.383\text{ 人}\cdot\text{Sv}$ である。そうすると、スケーリング定数の値は、範囲 $R(X)$ および $R(S)$ を入れた次の関係式

$$\frac{k(X)}{R(X)} = \frac{k(S)}{\alpha R(S)}$$

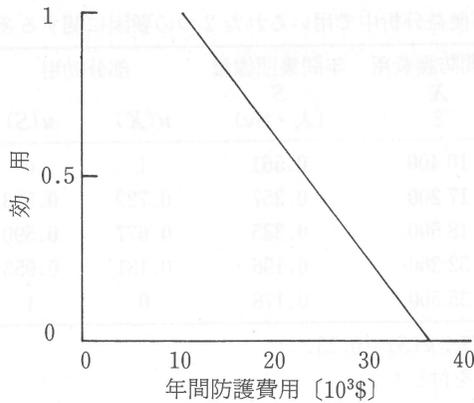


図10 ウラン鉱山の事例で考察された選択肢に関する年間防護費用に対する部分効用関数

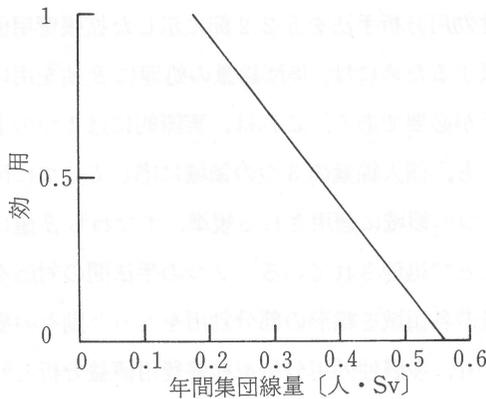


図11 ウラン鉱山の事例で考察された選択肢に関する年間集団線量に対する部分効用関数

を媒介として（単純費用便益分析と）同じ規準を課して拘束し、次に $k(X) + k(S) = 1$ となるように規格化することによって得られる。付録Aに示すように、 $k(X) = 0.77$ および $k(S) = 0.23$ の値が算出される。

(114) そこで、表5に示すように、各選択肢について部分効用を計算し、スケーリング定数を適用して、効用関数 U_i を求めることができる。表5の結

(56)

表5 単純費用便益分析中で用いられた2つの要因に関する多属性効用分析

防護選択肢	年間防護費用	年間集団線量	部分効用		全効用
	X \$	S (人・Sv)	$u(X)$	$u(S)$	
1	10 400	0.561	1	0	0.77
2	17 200	0.357	0.729	0.533	0.68
3	18 500	0.335	0.677	0.590	0.66
4	32 300	0.196	0.131	0.953	0.32
5	35 500	0.178	0	1	0.23

注： $k(X)=0.77$ ； $k(S)=0.23$ 。

分析解には下線を付した。

果と表3の結果との比較から、同じ要因を考察し、同じ規準を採用すれば、手法に関係なく、同じ分析解が得られることが確かめられる。

(115) 多属性効用分析手法を5.2.2節に示した拡張費用便益分析と同じ要因を含めて拡張するためには、集団線量の処理に β 項を用いた疑似効用関数を考察することが必要である。これは、実際的には1つの上向きの非線形関数であるけれども、個人線量の3つの領域に応じて3つに区分された線形関数とし、その3つの領域に適用される規準、すなわち β 値に上向きの非線形条件を課することで処理されている。2つの手法間の対応を明らかにするために、集団線量の各領域を線形の部分効用をもった別々の要因として扱うことになるけれども、多属性効用分析を拡張費用便益分析と同じ構成で実施した。

(116) スケーリング定数を得るために、ここでも線量範囲を考えることが必要で、表1から集団線量の3つの区分に関して0、0.126および0.498人・Svが得られる。次に、スケーリング定数を決めるための式は、集団線量の区分 n に関して次のようになる：

$$\frac{k(X)}{R(X)} = \frac{k(S_n)}{\beta_n R(S_n)}$$

これらの式を、 α 項に相当する $k(S)$ についての先の式と組み合わせ、規格化条件として

$$k(X) + k(S) + \sum_1^3 k(S_n) = 1$$

を用いて付録Aに示すように解くと、スケーリング定数に関する一組の値、 $k(X) = 0.323$, $k(S) = 0.099$, $k(S_1) = 0.0$, $k(S_2) = 0.065$, $k(S_3) = 0.513$ が得られる。

(117) 部分効用を計算し、スケーリング定数をあてはめて、表6に示すような効用関数が得られる。ここでもまた、表4の結果とこの表6の結果を比べてみると同じ分析解が得られていることがわかる。

(118) ここで、分析過程に四番目の関連要因を含めるために多属性効用関数を拡張することが可能になる。これを実行するためには、不快感の定性的な評価を効用関数に変換しなければならない。最大効用1は、明らかに“問題なし”の記述に、最小効用0は“作業が困難”の記述に割り当てられる。最も単純な効用関数は線形であり、中間の記述を常識的に両極端の間に割り当て、図12に示すように設定する。

(119) このことは表6に与えられた部分効用にさらに一組の部分効用を加えることになり、この要因に与えられる相対的な重要度を含めるために、

表6 拡張費用便益分析中で用いられた要因に関する多属性効用分析

防護選択肢	部分効用				全効用 $U = \sum k_j u_j$
	$u(X)$	$u(S)$	$u(S_2)$	$u(S_3)$	
1	1	0	1	0	0.39
2	0.729	0.533	1	0.410	0.56
3	0.677	0.590	1	0.454	0.57
<u>4</u>	0.131	0.953	0	0.986	<u>0.64</u>
5	0	1	0.087	1	0.62

注： $k(X) = 0.323$ ； $k(S) = 0.099$ ； $k(S_1) = 0.0$ ； $k(S_2) = 0.065$ ； $k(S_3) = 0.513$ 。

分析解には下線を付した。

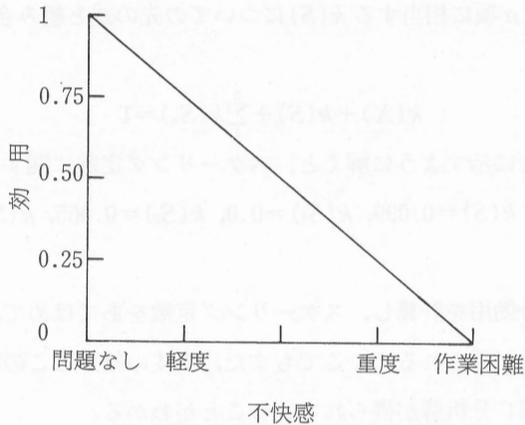


図12 ウラン鉱山の事例で考察された選択肢に関する不快感に対する部分効用関数

スケール定数を再度規格化しなければならない。このためには、分析解から最適解に移行するさい他のすべての手法を使用して適用された判断を定量化することが必要である。意思決定者が換気を“相当に重視する”ならば、それに費用の重要度の半分を割り当てるかもしれないので、

$$k(V) = 1/2 \cdot k(X)$$

この条件を入れると、一組の尺度定数 $k(X) = 0.278$, $k(S) = 0.085$, $k(S_1) = 0.0$, $k(S_2) = 0.055$, $k(S_3) = 0.442$, $k(V) = 0.140$ が得られる。これらの値を適用することによって、表7に示す部分効用と全効用の関数が得られる。これから、分析解は選択肢3であり、この分析から除外された要因はないので、これが最適解になる。

(120) 他の手法で行ったのと同様のやり方で、多属性効用分析で用いた要因や規準のすべてに関し感度分析を実施できることは明らかである。しかしながら、効用のすべては、スケール定数によって修正された部分効用を計算する段階で有効的に規格化されているので、この段階で調べれば多くのことがわかる。このことは付録Aにおける計算と検討から理解でき、この

表7 拡張費用便益分析の場合と同じ構成にした全要因に関する多属性効用分析

防護選択肢	部 分 効 用					全効用 $U = \sum k_i u_i$
	$u(X)$	$u(S)$	$u(S_2)$	$u(S_3)$	$u(V)$	
1	1	0	1	0	1	0.47
2	0.729	0.533	1	0.410	0.75	0.59
<u>3</u>	0.677	0.590	1	0.454	0.75	<u>0.60</u>
4	0.131	0.953	0	0.986	0.25	0.59
5	0	1	0.087	1	0	0.53

注： $k(X) = 0.278$ ； $k(S) = 0.085$ ； $k(S_1) = 0.0$ ； $k(S_2) = 0.055$ ； $k(S_3) = 0.442$ ； $k(V) = 0.140$.

分析解には下線を付した。

分析で支配的な要因は、防護費用、最も高い個人線量の領域における集団線量、および不快感であることがわかる。したがって、感度分析で考察するのはこれらの要因とスケーリング定数によって決まるそれら要因間の関係とに限定すべきである。

(121) 一例として、付録Aに、不快感の要因に割り当てるべき相対的な重みに関して2つの異なった判断がなされた場合について、すなわち、不快感要因の重みを費用要因と等しくした場合と、集団線量に等しくした場合について計算がなされている。これから、不快感の重要度を倍にしても結果に影響しないが、その重要度を半減させると高い個人線量の低減につく重みがこの分析を支配するため、評価の天秤は選択肢4へ傾くことがわかる。

(122) 多属性効用分析を、拡張費用便益分析で実行したのと同じ形に拘束するよりも、むしろ、その分析法が有する本来の形で適用することも可能である。線量分布を取り扱うもう一つの方法は、図9で説明されているように、“最大個人線量”の要因に対して非線形の効用関数をあてることであろう。そのような分析を実施するための手順は、付録Aに与えられている。この手法をウラン鉱山の事例に適用するさい、費用便益分析を通して割り当てられたものと同様ではあるが、相対的重要度がスケーリング定数に直接割り当て

(60)

られることを注意することが重要である。この代替方法から得られる効用は、前と同じやり方で取り扱われた諸要因、すなわち、防護費用、集団線量および不快感について同じであるが、3つの β 項に対応する3組の効用が、最大個人線量に対応する新しい一群の効用に置き替えられている。この分析の結果を表8に示す。かなり異なったスケーリング定数であっても、また異なった組の要因を用いても、分析解は選択肢3であって、あまり影響されない。このことは、分析の総合結果が、分析手法の詳細ではなく、入力データおよび特定の規準に依存することを示している。

5.4 多規準優位分析

(123) 前節までに述べた集成的手法は、決定に影響を及ぼす関連要因を代表するすべての属性を、ある単一の良度示数にまとめあげるものである。この良度示数は、費用便益分析では全費用、多属性効用分析では効用関数である。しかしながら、これを実行するためには、満足しなければならない2つの条件がある。一番目は、考慮するすべての要因を同一の単位で計ることができ、それによって最終的に金銭または効用で各防護選択肢に割り付けられる価値の合計が、関係する各要因について結果への寄与度を適切に表して

表8 ウラン鉱山の事例で考察された選択肢に関する別のスケーリング定数による多属性効用分析

防護選択肢	部分効用			全効用	
	$u(X)$	$u(S)$	$u(d)$	$u(V)$	$U = \sum k_j u_j$
1	1	0	0	1	0.43
2	0.73	0.53	0.69	0.75	0.66
<u>3</u>	0.68	0.59	0.77	0.75	<u>0.69</u>
4	0.13	0.95	0.97	0.25	0.62
5	0	1	1	0	0.57

注： $k(X) = k(S) = k(d) = 2/7$ ； $k(V) = 1/7$ 。

分析解には下線を付した。

いることが必要である。二番目は、ある一つの要因に関する低い性能が他の要因に関するより優れた性能で完全に補償しようということや、問題としてあるすべての防護選択肢から派生する影響の全範囲にわたって、そのようなトレード・オフが受容されることを容認しなければならないことである。

(124) これら2つの条件のため、考察されている諸要因がとくに不均質である場合、あるいは、たとえばパブリックアクセプタンスや職員関係への影響のように、要因を定性的方法でしか評価できない場合は、いくつかの困難な問題が生じうる。また、防護の選択肢があまりにも離れている場合、たとえば、最小防護費用と最大損害費用に相当する選択肢と、最大防護費用と最小損害費用となる選択肢とは、たとえ全費用の和が両者で同じであっても、実際には比較できないと判断されるかもしれない。そのような状況では、Roy と Vincke (1981) が示唆したように、多規準優位分析を利用する方が集合的手法より有用であるかもしれない。

(125) 優位分析法では、各選択肢の性能をある単一の総合的良度示数で表現する代わりに、選択肢 i が選択肢 m より優れている（または望ましい）かどうかを評価するために、各選択肢 i を他のすべての選択肢 m とまず比較する。この対による比較は、一般に、2つの指標に基づく。

(i) “優位指標” (advantage index) は、検討を行う評価者が、選択肢 m よりも選択肢 i の方をどの程度望ましいと考えているかを表す。その指標 $Ad_{i,m}$ は、すべての要因 j に対して、 i が m より望ましいかまたは等価である場合 1 に等しく、また i が m よりまったく望ましくないかまたは等価でもない場合 0 である。そして、いくつかの要因に対して i が m より望ましいかまたは等価である場合、0 から 1 の範囲で変化する。

(ii) “除外規準” (exclusion criterion) は、選択肢 m と比較したときの選択肢 i の不都合の度合いがどの程度かを表すもので、選択肢 i が

(62)

m より望ましくないかまたは等価でない要因に対して重要となる。

ここに示す単純化した説明では、この指標 $Ec_{i,m}$ は、 m よりも i を選択したことによる欠点が非常に大きい場合は 1 に等しく、そうでなければ 0 に等しい。

もし、 $Ad_{i,m}$ が十分に大きくかつ $Ec_{i,m}$ が十分に小さい(この単純な扱いでは 0) ならば、選択枝 i は選択枝 m より“優れている”。

(126) 優位指標の計算において、係数 k_j に付与される重要性について規準を組み込むことが可能である。これは、最も単純な場合、スケーリング定数を利用して実行される。比較に都合がよいように、スケーリング定数は多属性効用分析法におけるスケーリング定数と同じと決める。そうすると、優位指標は、

$$Ad_{i,m} = \sum_j k_j a_j$$

と与えられる。ここで、 a_j は要因 j についての優位指標で、この要因に関して選択枝 i が選択枝 m より優れているかまたは等価ならば 1 であり、そうでなければ 0 である。

(127) 多規準優位分析法の主要な相違点は除外規準にある。これは、基本的には、すべての集合的手法に必要とされる基本的なトレード・オフ要件に合わない選択枝を公式に除く手段である。これを適用するためには、欠点が“非常に大きく”なる点を、定性的または定量的に定める必要がある。この定めた点は、“除外しきい値”(exclusion threshold)として知られており、意思決定者による判断のより進んだ表現となる。もし、ある要因が、選択枝を消去するために十分重要と判断されないなら、その要因に関する除外しきい値は、選択枝対のどの比較についても除外規準が 1 とならないように設定される。

(128) ウラン鉱山の例にこの手法を適用するにあたり、同じ 4 つの要因がやはり関連していると考えられる。さらに、それらの要因と結びついている規

準や重みも、5.3節の終わりで述べた多属性効用分析法のもう一つの適用例と同じとする。分析の詳細は、付録Aに与えられている。

(129) 優位指標を求めるための選択肢対比較では、最後の多属性効用分析法と同じ手順および相対的重みづけを用いる。優位指標の完全な表は付録Aに与えられており、同表から、この根拠に基づくと、おおよそ、番号の大きい選択肢の方が番号の小さい選択肢より優れていることがわかる。

(130) ウラン鉱山の例において最も明確な除外規準は作業者に対する線量限度である。これによって、あらゆる場合、ゼロ選択肢が消去されることになる。もう一つは、換気の不快感に関連した要因でありうるかもしれない。もし、意思決定者が、ひどい不快または劣悪な選択肢をはっきりと差別したいと望むならば、除外しきい値を0.25と0.5の間の効用、たとえば0.4に設定するだろう。この設定によって、選択肢1, 2, 3と選択肢4, 5が区別される。そこで、換気に対する除外規準は、選択肢1, 2, 3間のすべての組合せおよび選択肢4, 5の間に対しては0であるが、選択肢1, 2または3と選択肢4または5と間のあらゆる比較に対しては1になる。

(131) これら2種類の結果から優位関係が決定される。この簡単な例においては、もし、

$$Ad_{i,m} > 0.5, \text{ かつ, } Ec_{i,m} = 0$$

ならば、選択肢*i*が選択肢*m*より優れていると仮定する。

$Ad_{i,m}$ を選択するための0.5という追加の消去規準は、単に、分析解を見出すべき優位関係の数を減らすため、視察によって導入した。表を眺めると次の結果が導かれる：

選択肢2は、選択肢1より優れている

選択肢3は、選択肢1より優れている

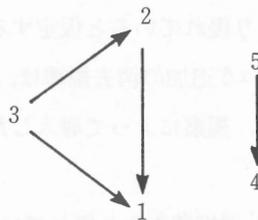
選択肢3は、選択肢2より優れている

選択肢5は、選択肢4より優れている

(64)

これらの関係は、図 13 に図式的に示されている。この図は、選択肢 3 と 5 の各々は他より優れているが、3 と 5 同士の優劣はつけられないことを表している。この分析では、唯一の解は得られないが、より弁別性のある消去規準を適用すれば得られるであろう。もし消去規準を 0.6 といった値まで引き上げるならば、選択肢 3 が選択肢 2 より優れているという優劣関係のみが残るので、分析解は選択肢 3 となる。すべての要因がこの分析に含まれているから、この解は放射線防護の最適条件にもなる。この解は、この簡単な例においては多属性効用分析法で選ばれたものと同じ選択肢である。しかし、必ずしも常に同じであるとはかぎらないだろう。なぜなら、多規準優位分析法は、集合的手法とは異なる形の優先規準を導入しており、それゆえ、異なる解が得られるかもしれないからである。

(132) 他のすべての分析手法と同様、感度分析が実行可能である。さらに、除外しきい値の選択はもう一つの重要な点であり、それについての感度分析により、意思決定者の示した判断の結果が決定者本人に直接明らかになる。一たんこの手法の使用に関して多少の経験を積んでくれば、感度分析の多くは、付録 A に示されているように、一部分または全部の優位標数と除外規準のマトリックスを見ることによって実行できる。



$i \rightarrow m$ は、選択肢 i が選択肢 m より優れていることを意味する。

図 13 ウラン鉱山の事例で考察された選択肢の優位関係

5.5 手法の選択

(133) 委員会は、この報告書では、どの特定の種類の分析に関してもある特別な手法を勧告することを意図的に差し控えた。むしろ、重要なのは以下の点であることを示すことに強調点がおかれている。すなわち、一連の選択肢を作成するために問題を初期分析すること、関連する要因を決めて定量化すること、選択肢の性能と費用を比較するための規準に関して明解な判断を採用すること、および、分析プロセスをより点検しやすいようにすること、である。このような背景のもとで、完全な分析には、多くの場合、定量的および定性的成分の両方の組合せが必要となりそうなことに留意すると、手法の選択はあまり重要ではなくなる。委員会は、多くの状況では、単純な費用便益分析または拡張型費用便益分析よりも複雑な手法が要求されることはないであろうと予想している。しかしながら、より適応性のある手法とくに多属性効用分析法は容易には定量化できない要因の取扱いに見通しを与え、また、それによって理解が深まるということから、それらの手法を考慮することを推奨する。

6. 定 量 化

(134) 5章で見てきたように、最適化の手順では、防護の選択肢および関連する放射線防護要因を確定することが必要である。次に、最適化の過程で用いるために選択肢の費用および性能を定量化しなければならない。この章では、各要因に適した単位による定量化の方法に限って述べることにする。

(135) 3および4章で議論したように、最適化へと導いてゆく分析手順には、常に、いくつかの放射線防護要因が含まれていなくてはならない。それらの要因は、集団線量と防護の費用である。考察対象となる問題に応じて、ときには他の要因の定量化が必要となるであろう。

6.1 防護努力のための費用

(136) 防護の費用には、望まれる防護レベルを達成するためのすべての財政的努力およびそれ以外の努力が含まれる。防護の費用は、通常、金銭単位で表されるけれども、訓練計画や管理監督のように、防護要素の定量化がもっと困難な側面も含むことがある。

(137) 最適化検討に係わる費用は、規制上または管理上の要件を満たすための包括的要件の一部であり、それゆえ間接費として扱うべきであることに注意する必要がある。これらの費用はすべての選択肢の考察を含み、選択肢間に割り振ることができないので、選択肢の決定には影響を及ぼさない。特殊な例として、定量的検討そのものの費用が得られる便益を越えてしまうと思われる場合が起こることがあるが、この場合の最適の手順は、検討を実行せず、したがって防護レベルも変えない、ということである。

6.1.1 直接費

(138) 防護の費用の算出については、すでに、ICRP Publication 37 (ICRP, 1983) でやや詳細に議論されているが、ここで再度簡潔にまとめておく。防護の費用を算定するためには、3つの一般的方法がある。

- (a) 粗費用見積り法
- (b) 現在価値評価法
- (c) 年賦化費用見積り法

(139) 1つの施設または設計の費用の最も簡単な評価法は、単純に、予想される操業年数にわたる年間操業費用の合計に初期資本費用を加えるやり方である。これらの粗費用見積り法では、時間変化をまったく無視しており、資本費用が高く操業費用が低い選択肢とその逆の選択肢との間の区別はできない。その選び方が明快であるという理由で粗費用見積り法がよい効果をあげてきた最適化検討例は多い。このことはある程度この報告書の緒言で議論した最適化の全手順の不正確さの反映である。

(140) 経費の見かけの値の時間変化を考慮することが望ましいとみなされる場合、経済界で用いられる方法は割引である。 n 年目の費用に適用される割引率 r_n は、次のように定義される：

$$r_n = \frac{1}{(1+r)^n}$$

ここで、 r は年割引率である。

割引の結果、将来の費用は、意思決定上現在の費用よりも小さい重みをつけられることになる。

(141) もし操業費用または保守費用が、プラントの寿命を通じて実質額において一定と仮定されるならば、現在価値の計算は年金係数を用いることにより簡略化できる。年金係数は、当該期間にわたる割引係数の和であり、次のように定義される：

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

ここで、 a_{nr} は年金係数、 r は年利、すなわち割引率、そして n は年で表したこの事業計画の寿命である。年金係数は、Park (1973) によって作成されたもののような標準表に見出すことができる。そうすれば現在価値は年間費用に年金係数を乗じたものとなる。

(142) 現在価値の計算に代わる方法は、費用を年賦化することである。年賦化を実行するために、放射線防護システムの購入と操作の資金を調達する目的で、ある利率で借金をし、毎年返済すると仮定する。この手順により、初期の資本費用は、施設の予測寿命にわたって分散され、年間の操作および保守の費用に加算できる。毎年の支払い額は、上で定義された年金係数の逆数である年賦償還係数を用いて計算できる。そして、この係数を初期資本費用に乗ずると、年賦化された費用が得られる。したがって、既知の現在価値たとえば資本費用を n 年間で完済するために必要な年間支払い額は以下のようになる：

$$X_a = X_p \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

ここで、 X_a は年賦額であり、 X_p は資本費用である。

6.1.2 その他の防護努力

(143) 防護の費用のいろいろな側面のうちしばしば無視されるのは、放射線作業者およびその他の者の訓練に関連した労力である。訓練のレベルは防護の最適化における重要な要因であって、多くの場合、プラント全体にわたる線量が合理的に達成できるかぎり低いかどうかを決める主要な要因であることは明らかである。訓練課程の費用計算には、しばしば一般に認識されていない要素が含まれている。訓練プログラムを、防護を目的とした成分と

機能向上を目的としたものに分けることは、ときとして困難なことがある。これらの理由から、防護の最適化において訓練に言及する場合には、その種類、量、レベル等を示すことによって定性的に行うのが最良であろう。

(144) 同様な意見は、最適化された防護および安全を実現するために必要な、管理の関与の程度および管理組織の質にもあてはまる。すべての状況で最良の結果を達成できそうな特別な組織はなく、管理組織は、個々の国の通常の行為、手順および法令に適合しなければならないであろう。しかしながら、良好な行為に関するいくつかの一般的指針には、必要な場合、安全と防護に責任を有する者がライン管理に対し生産または他の操業上の配慮を無効にさせる権限が含まれる。防護の決定を検討し実行させるための管理組織規定も明らかに重要である。これらの問題を定量的方法で手順にのせることは容易にはできない。

6.2 集団線量

(145) 被ばく集団の集団実効線量当量は、被ばくしたすべての個人の実効線量当量の和である。公式な定義は ICRP Publication 42 (ICRP, 1985 b) にある。集団線量は、とくに防護の最適化の手順で重要である。なぜなら、すべての線量が非確率的影響を無視できるほど低いという条件のもとで、集団線量が客観的健康損害を表すために用いられるからである。ある防護の選択肢の総客観的健康損害は、通常、集団実効線量当量預託に比例するものとする。原理的には、この預託を評価するさいに用いられる将来の集団実効線量当量率の評価は、環境条件の将来の変化に関する予測を考慮に加えることができる。しかしながら実際には、これを実行するのは困難であるため、通常、現在の条件が永続すると仮定することになる。これらの仮定の意味合いについては、6.4 節でさらに議論される。

(146) 客観的健康損害の評価のために集団実効線量当量を用いること

(70)

は、第三世代以後の損害に対する遺伝的寄与と非致死的悪性腫瘍の寄与を除外することになる。これらを除外することによる影響は委員会によって検討され、次のような声明となっている。それは、ほとんどの場合、実効線量当量をこの目的のために用いることは適当であるが、もし被ばくした集団の年齢分布が一般集団のものと著しく異なっているならば修正が必要になるかもしれない (ICRP, 1980), というものである。

6.3 個人線量の分布

(147) 集団実効線量当量預託で表現される客観的健康損害は、あらゆる最適化検討の主要な成分であると一般に認識されているけれども、そのような検討を実行する人々の多くは個人線量の分布にも関心がある。一般に、その関心は分布の両端における線量、すなわち自然バックグラウンドからの年平均線量といったものに比べて極端に小さい個人線量か、または、公衆の構成員または作業者に対する線量限度に十分匹敵するほどのかなりの大きさの個人線量に向けられる。ある場合には、この情報は容易には入手できないが、これは、しばしば、職業被ばくに関する初期段階のデータベースの一部となる。したがって、最適化検討への入力情報の一つとして個人線量の分布を数量化することは賢明であると思われる。ICRP Publication 37 (ICRP, 1983) で述べられているように、放射線誘発成分の付加的成分としてこの分布を含めることに合うような数量化の方法の一つは、集団線量を個人線量のある幅ごとに分割することである。したがって、全集団線量は以下のように表されることになろう：

$$S = \sum_j N_j H_j$$

ここで、 H_j は j 番目のグループの N_j 人に対する平均線量当量である。この表現方法は、とくに、5.2.2 節で述べられた拡張費用便益分析を用いる場合に適当である。

(148) しかしながら、ある状況下では、決定グループの構成員に対する最大個人線量または平均線量が、どれくらい線量限度または該当する線源上限値に近いかを把握していることの方が、意思決定者にはより有用であろう。そうすると、個人被ばく線量分布を当該限度に対する割合で表すことの方が望ましいかもしれない。この方法は、5.3節または5.4節で述べられた多属性効用分析法または多規準優位分析法にとってもっと役に立ちうるかもしれない。

6.4 線量の時間分布

(149) 防護の選択肢を比較選択する場合、放射線影響の明らかに異なる面または成分のみが選択に関連する。集団線量預託の算定においてこのことは、時間積分を、以後の影響の寄与がすべての代替案で同じになるか、または、選択肢間でもはや区別できなくなったときに終え、不完全集団線量預託すなわち打ち切り集団線量預託を得ることを意味する。このことが最も重要になるのは放射性廃棄物の処分の場合で、ICRP Publication 46(ICRP, 1985 a)においてすでに以下のことが指摘されている。すなわち、同じ廃棄物に対する多くの処分選択肢に関して、起こるであろう集団線量率の長期間後の“尾の部分”は互いに区別できない、つまり、これらは互いに相殺し、選択肢間の選択に影響を与えない。算定を打ち切る時間は、検討されているシステムによって異なるであろう。それは先験的に設定されるべきではない。打ち切りを行う別な理由は、いくつかの状況においては、集団線量率の長期成分には大きな不確実性が伴うため、この放射線影響の物指しを選択肢の識別に用いることができないであろうということである。

(150) 集団線量の短期成分と長期成分を別個に扱うことに関する上記の技術的理由に加えて、意思決定者がその決定において異なる重みをつけることになる異なった時期での線量について社会の感じる重要性に関連した理由

(72)

もあろう。そのような重みづけは、意思決定を行うための要素の一つとして集団線量率の時間分布が提示されている場合にのみ、適用可能であることは明らかである。したがって、委員会は、もし可能ならば、最適化検討のために提示される情報に、線量の時間分布を含めるべきであることを勧告する。

6.5 線量を受ける確率

(151) 線量制限体系を確率的事象を含めたものに拡張する場合、線量による害の確率ばかりでなく、線量を受ける確率も考慮する必要がある。さらに、個人線量のうちあるものは、確率的影響の範囲外にあるかもしれない。それゆえ、委員会は、ICRP Publication 46 (ICRP, 1985 a) において、固体放射性廃棄物処分に関して確率的事象を含めるため“リスク”の定義を拡張した。この拡張により、 D から $D+dD$ の間の線量を与える事象による個人または決定グループに対するリスクについての委員会の定義は、次のように与えられる：

$$dR = P(D) \cdot dD \cdot p(\text{eff}|D)$$

ここで、 $P(D)$ は確率密度、 $P(D) \cdot dD$ は決定グループを代表する個人に D から $D+dD$ の間の線量を与える初期事象その他の環境変化の確率であり、そして、 $p(\text{eff}|D)$ は線量 D が発生した場合のその個人または子孫に対する重大な有害健康影響の確率である。この $p(\text{eff}|D)$ という関係の大切な特徴は、約1 Svまでの確率的影響の領域では確率と線量とは比例関係にあり、非確率的影響も発生する1-2 Svから5-10 Svの線量範囲に関しては非比例関係、そして致死線量領域では一定確率となることである。もし線量が非確率的影響の領域にあるならば、個人線量分布の情報がリスク分布を算定するために不可欠である。この目的のためには、線量分布を詳細に知る必要がある。

(152) 被ばくをもたらす事象がある確率で発生し、その放射線影響を計算するという状況では、確率と影響の両方を最適化手順で考慮すべきである。

防護のこの側面における情報の表現方法と組立て方は複雑であって、合意の得られた適切な手法はまだ現れていない。しかしながら、確率が非常に小さいかまたは影響が非常に大きい場合には、集団線量という量に対応する損害の期待値は意思決定手順への十分な入力情報でないことは明らかである。過去の決定を調べると、意思決定者は、実際の結果の範囲が平均と大きく異なる場合と結果の範囲が平均に近い場合とで、期待値に異なる重要度をつけていることがわかる。結果の表現方法もまた複雑である。それは、急性の健康影響および大量の人々の避難によって引き起こされるような混乱を含む、その他多くの、そして異なる影響が存在するからである。

(153) それにもかかわらず、最適化検討への入力情報の一部としてこの情報を示すこと、および、包括的最適化検討において NEA (NEA, 1988) によって整理されたようなデータを含めるために、5.3 節および 5.4 節で述べたような手法の使用を発展させることが必要である。委員会は、そのような総合的検討を実施するための手法を開発し、実際問題にそれらを適用するために、よりいっそう努力を払うことを奨励したい。

6.6 その他の関連する放射線防護要因

(154) 6 章ですでに述べたいろいろな事柄は、最適化の決定のさいに考慮する必要のある主要な放射線防護要因であるけれども、特定の状況で関連するかもしれない他の諸要因もある。この節の重点は、関連するであろう要因のすべてを列挙することではなく、ただ単に、考慮した方がよいかもしれない要因の種類とそれらを定量化する方法に関していくぶんの指摘をすることである。しかしながら、これら要因を考慮するさい、これらの要因がたとえ間接的にでもこれまで含まれていなかったことに注意を払うべきである。

(155) 保健物理の実務においてきわめて重要となりうる要因の一つは、作業が行われている場所の線量率である。高線量率下での線量管理の実施に

おける困難の一つは、線量率モニタまたは直読式積算線量モニタの使用を含む迅速な線量算定の必要性である。もう一つの要因は、小規模な異常または事故のためある個人が高線量率区域へ立ち入ったり、予定以上にそこに留まる結果、過剰に被ばくする可能性に関連するものである。

(156) 最適化検討の一部として設計上のいろいろな選択肢を比較する場合、よく確立され完全に理解されている工学的手順に基づいた選択肢と、どちらかといえば新奇なものとを比較することが必要になるかもしれない。この場合、費用と推定線量がほぼ同じであっても、考えられる信頼性に関する差異がおそらく意味をもってくるであろう。このような要因は、直接数字として定量化するのは難しいけれども、一般的な言葉で表現でき、そして、5.3節で述べた多属性効用分析法といったより高度な意思決定支援手順に組み込むことができる。したがって、そのような要因を、“信頼性が高い”または“よく実証されている”およびその反対である“信頼性に疑問”または“新奇である”といった言葉を用いて定量化することは十分許される。

(157) 集団線量や個人線量分布の記述と関連するであろうが、しかし、必ずしもその中にあるとは限らないもう一つの要因は、被ばくする人々の種類である。この場合、その情報は、しばしば、決定分析の枠組みに直接組み込むような方法で表されるが、関連する放射線防護要因として考慮に入れる必要があるかもしれない。最も明確な区別は、被ばくが職業人であるか公衆の構成員であるかであるが、これらのカテゴリーの中になお、さらに細分化されたものがあるであろう。たとえば、操業状況において、作業者が作業過程で放射線を使用して被ばくしたのか、単に付随的に被ばくしたのかが関連するかもしれない。公衆の構成員の被ばくを考察する場合、異なるグループが含まれているかもしれない。最も極端な例は、医療診断手順における最適化の場合に存在する。すなわち、ある場合には、被ばくグループは幼児または胎児であり、他の場合は、被ばくグループは余命が非常に短い高齢の患者

であるかもしれない。これらの場合に放射線誘発損害に割り当てられる価値は、Russell および Webb (1987) が提案したように、非常に異なったものでありうる。この情報は、これらの状況の最適化手順においては関連する要因であろう。被ばくグループが、被ばくの原因となっているかまたはそれを規制している国の国民で構成されているのか、それとも、他の国の国民であるのかを考慮に入れることが必要と考えられるかもしれない。IAEA(1985)は、国境を越える環境汚染の管理または最適化に関連して、これら2つのグループを等価と考えるべきであることをとくに勧告している。

7. 最適化手順の適用

7.1 手順の適用方法

(158) 最適化の要件が満足される程度は、所轄官庁、設計者および操業者を含むすべてのレベルの人々の力の入れ方にかかっている。明らかに、所轄官庁は、最適化を適用することを要件にしようと望むであろう。しかし、どんな場合でも、管理組織体は、原子力施設の設計、操業および保守、および、電離放射線を発生するその他の行為に伴う活動の全範囲にわたって、最適化検討が確実に実行できるよう、十分な人的および物的資源を利用可能にしておくことを保証すべきである。

(159) 線量制限体系の一部としての最適化が公式な要件となり、この要件に関連したより定量的手法が適用される以前に設置された施設および設備が現在多く存在することは明白である。これらの事例に対しては、4章で述べたような操業経験の分析を優先することが最も適当であると思われる。あとからの改造は原設計より困難でありまた高価であることを認識し、最適なものを目指した改良について最優先の問題としてを考慮すべき設計、操業、保守および供用中検査上の問題点を確定するために、この情報を利用することができる。

(160) 委員会が、放射線防護を最適化すべきであるという基本勧告を出して以来、その勧告を誰が実行すべきであるかが明確にされていなかった。この基本的な疑問は、その後、費用便益分析によって最適化要件を明確化し、定式化したにもかかわらず、存続していた。ICRP Publication 37 (ICRP, 1983) では、“(その出版物で) 展開された費用便益分析手法は、設計者、操

業者および意思決定者に向けられた分析手段である”と述べられている。委員会は、より広い観点から最適化を扱っているこの報告書において、防護の最適化に関する勧告を実行すべき意思決定のレベルを明らかにしておくことが有用であろうと信じる。

(161) 大規模施設の場合、通常、必要な検討は受注業者または被許可者によって行われ、その施設あるいはそこでの問題に特定されたものとなるであろう。別の例たとえば工業用ラジオグラフィでは、被ばくを引き起こす行為は使用している装置および作業手順において普及し、かつ、かなり定形化するであろう。しかし、おそらく専門的意見は得られず、最適化検討を行う操業者の資源も限られる可能性がある。そこで、所轄官庁が、標準化された手順を導き出す一般的な検討を行うかあるいは委託し、装置および作業規則の適切な修正を決めてそれを実施させることがより適切であり、効果的であろう。

7.2 設計における適用

(162) 放射線防護のレベルを決定する主要点が固められるのは、設計時である。この段階で技術的問題はほぼ解決され、周辺環境の線量率や汚染といった量のレベルを最終的に決定する設計パラメータが確立される。このように、設計時に下される決定は、最適化要件の遵守を確実なものにするために最も重要である。この段階では、設計者からプロジェクトリーダー、そして管理者にわたるすべての人が、設計における最適化を念頭に置き、かつそれに係わるべきである。

(163) 委員会は、設計技術者はそれにふさわしい資格を有するべきであり、しかも、放射線防護に関する基本的概念を当然含む教育訓練を受けているべきであることを勧告する。さらに、彼らには、明確な規制上または管理上の要件、意思決定支援手法に関する指針および勧告、および放射線防護レ

(78)

ベルに影響を与えるあらゆる設計上の問題に用いなければならないパラメータを提供すべきである。設計技術者は、通常、放射線防護規準の設定には責任をもたないけれども、彼らがそれらの規準および適切な手法を理解し使用することが、実際に最適化を確実に達成するためにきわめて重要である。

(164) プロジェクトチームまたは設計チームのリーダーは、設計における最適化の遂行にとってきわめて重要な役割を担う。プロジェクトリーダーは、単に規制値の遵守を達成するだけでなく、設計を最適化するためにどれだけ余分に放射線防護に努力するかを決定する人物である。プロジェクトリーダーが最適化の遂行を効果的に行えるよう、明確で厳格な規則または要件を確立すべきである。

(165) 最適化を扱った規則または要件は、管理の最上級レベルで承認されていなければならない。管理者の役割は、おもに、政策決定、基本方針の組織全体での維持、および最適化遂行による全体的な財政的影響の容認に関係したものであろう。このことは、“実証済みの設計”に最適化を適用することが決定された場合、とくに重要であろう。なぜなら、これは、通常、設計の最適化に関する最終決定を支配するかもしれない重大な財政的意味合いをもつからである。そのような政策決定への入力情報は、必ずしも設計者または受注者に限らず、顧客または公益企業から出てくることもある。

7.3 操業における適用

(166) 委員会は、これまで、操業時の放射線防護に関する定量的な最適化手法について特定の勧告を出してこなかった。しかしながら、委員会は、ICRP Publication 37 (ICRP, 1983) の中で、操業時に達成できる防護のレベルは、設計段階で達成できるレベルよりも定量的な最適化がされにくいことを認めている。なぜならば、選ばれた設計によって選択の幅が制限され、また、考慮すべき要因の定量化が難しいことがあるからである。それにもか

かわらず、この種の検討が今までに報告されている(KhanとBaum, 1987)。したがって、操業中の最適化の実行は、設計時よりもいっそう、すべてのレベルで責任のある人々、とくに作業者自身、彼らの直属の現場監督、放射線防護担当者、および管理者の力の入れ方と専門知識に依存する。

(167) 作業レベルでは、普通の状況下で防護の最良レベルを達成する必要があることを常に承知しておくべきである。単純な評価がしばしば役立っており、また委員会は、高線量率区域からの退去、短半減期核種の可能なかぎりの使用、または非使用時の線源の遮蔽体への格納といった、実際の操業レベルでの常識的な非定量的手順によって、多くの被ばくが低減されてきたことを知っている。したがって、委員会は、そのような簡単な最適化の実行が奨励されるべきであると認識しており、また、このレベルにおける最適化を向上させる最良の方法は、電離放射線を伴う作業に携わるすべての作業スタッフ、すなわち作業者自身および彼らの直属の現場監督の全員に適切な教育と訓練を施すことであると信じる。そのような訓練はその作業特有で、放射線防護の訓練を含み、さらに、最適化に前向きな姿勢を作り出すことを狙った要素を含むものとすべきである。

(168) 原則的には上級管理者はすべての面に責任を有しているけれども、通常、どの組織にも、しばしば保健物理担当者または放射線防護担当者として名づけられた放射線防護に実際に責任をもつ人がいる。このレベルの人々は助言者として活動することが多いが、実際には、彼らの助言は通常受け入れられ、操業上の条件となる。これは、予期できない保守または修理のような非定常作業の場合、とくにそうである。保健物理担当者または放射線防護担当者は、仕事のすべての面で自分が関係している操業時の放射線防護の最適化を実行するさいに独特の役割を果たし、しかも、放射線区域、なかでも線量率が高い区域における作業の体系的計画を確実に立てることができる。これらの人々は、作業者の線量と特定の作業とを関係づけることができるし、

(80)

また、プラントの故障報告書および訓練等の再検討および評価をも実行すべきである。このレベルの人々の資格と訓練が適切なものであることと、ときに操業時の放射線防護の最適化に関する訓練を含めることが重要である。

(169) 放射線防護の最適化に関する多くの管理上の決定は、毎日の作業手順でなされているものと同様本来定性的であるかも知れないが、より広範囲な管理者の意思決定プロセスにおいてはもっと程度の高い定量化が必要であることは明白である。保健物理担当者は、よりよい放射線防護を達成することに専心できるが、管理者は、放射線防護を最適化する責任と資源を配分して操業の継続を確保する責任との間にあつて利害関係の葛藤に直面するであろう。定量化は、決定の基礎を明確にする保証の助けとなりうる。操業段階における放射線防護の最適化の定量化は、ときに困難ではあるけれども、管理者、操業者および放射線防護に責任がある者の努力を総合して、これを達成するために努力すべきである。この意味で、4章で述べた操業時の放射線防護の最適化への体系化された方法を使用することを勧告する。

7.4 所轄官庁の一般的責任

(170) 所轄官庁は、大規模な設計から作業場所での個人線量管理に及ぶすべての状況の下で行うべき放射線防護の最適化のための一般的要件を課することを望むことがあろう。これらの一般的要件の実行を助けるため、所轄官庁は最適化手順を実行するのに必要な一般的規準を定めるべきである。しかしながら、放射線防護に関する最終的責任は操業者の側にあることを忘れてはならない。

(171) 所轄官庁が援助できる特定な方法は、次のとおりである：

- (i) 最適化評価に適した意思決定援助手法の開発を奨励し、それらの使用を勧告すること。
- (ii) 単位集団線量の価値といったような、最適化評価を実施するため

の重要な基本的規準を確立すること。この機能を実行するための手法に関する指針は、付録 B に与えられている。

- (iii) いろいろな種類の最適化検討で考慮に入れるべき関連因子を勧告すること。
- (iv) 最適化の要件を場合に依じてどう適用するかについて設計者および管理者を指導すること。
- (v) 最適化検討で用いるための、関連する放射線防護パラメータおよび、モデルを決定するのに適した情報の提供を奨励すること。
- (vi) 最適化された設計パラメータを確立するために一般的評価を実施または委託し、最適化されていると考えられる基準を勧告すること。
- (vii) 設計、操業および保守における放射線防護最適化の実行の包括性および質を、適切な実施規則および活動の達成度の監査によって確実にすること。

8. 結 論

(172) 自然線源からの線量につけ加わるいかなる線量増加分もリスクの増大をきたすという、説得性がありかつ慎重な初期仮定のもとでは、放射線防護体系は、防護の最適化とここで呼んでいる種類の、ある要素——すなわち被ばくを低減するためのすべての合理的手順の使用——を含んでいなければならぬ。ここで述べた手法は、すべて、本質的に実用的なものであり、一般常識によるものから、意思決定手順を支援するための高度であるが一般的に行われている定量的手法にまでわたっている。それらの手法には、しばしば放射線量の大きさとはまったく関係のない外的要因が考慮に加えられなければならないという事実、および、その要因が最終決定の放射線防護的側面よりはるかに重要になるかもしれない、という事実も考慮されている。この報告書の手法は、しばしば、そのような状況を識別し、明確にするであろう。

(173) 委員会は、これらの手法の利用が進むことによって、防護がすでに十分である作業の分野に不必要な拘束条件を課することなく、防護基準の改善が望ましい作業分野ではそれが改善されることを希望する。

参 考 文 献

- Chargas, C. *et al.* (1985) Report of the Working Group on Biological Implications of Optimisation in Radiation Procedures, May 2-5, 1983. Pontificiae Academiae Scientiarum Documenta 14.
- Cohen, J.J. (1984) Optimization of public and occupational radiation protection at nuclear power plants. Considerations in factoring occupational dose into value impact and cost benefit analysis. NUREG/CR-3665, Vol. 2, USNRC.
- Croft, J.R. (1986) Optimisation of the design of an industrial radiography facility. In: *Optimisation of Radiation Protection*, pp. 335-348. IAEA, Vienna.
- Croft, J.R. and Lochard, J. (1988) Status of achievements reached in applying optimisation of protection in design and normal operation of nuclear facilities. Proceedings of Ad Hoc Meeting on the Application of Optimisation of Protection in Regulation and Operational Practice. NEA, Paris, 16-18 March, 1988.
- Edwards, W. (1961) Behavioural decision theory. *Annual Review of Psychology* 12.
- Fishburn, P.C. (1977) Multi-attribute in expected utility theory. In: *Conflicting Objectives in Decisions* (D.E. Bell, R.L. Keeny and H. Raiffa, Eds). IIASA, John Wiley and Sons, Chichester.
- Fitoussi, L. and Candes, P. (1985) Evaluation des exigences en matière de sûreté nucléaire par rapport aux exigences de la protection radiologique. In: *Interface Questions in Nuclear Health and Safety*, pp. 104-147. OECD-NEA, Paris.
- Fleishman, A.B. and Clark, M.J. (1982) Evaluating future detriment from radioactive discharges; judgements and implications for optimisation of protection. NRPB-R132, Chilton.
- Fleishman, A.B., Notley, H.M. and Wilkinson, J.M. (1984) Optimization of protection for gynaecological radiotherapy. In: *Radiation Protection Optimization 'As Low as Reasonably Achievable'*, pp. 311-328. CEC Report EUR 9173.
- Howard, R.A. (1968) The foundations of decision analysis. IEEE transactions on systems science and cybernetics. SSC-4, 211-218.

- IAEA (1985) Assigning a value to transboundary radiation exposure. IAEA Safety Series No. 67, Vienna.
- ICRP (1955) *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Br.J.Radiol. Supplement 6. BIR.
- ICRP (1959) *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 1. Pergamon Press, Oxford.
- ICRP (1965) *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 9. Pergamon Press, Oxford.
- ICRP (1973) *Implications of Commission recommendations that doses be kept as low as readily achievable*, ICRP Publication 22. Pergamon Press, Oxford.
- ICRP (1977) *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26. *Ann.ICRP* 1 (3), Pergamon Press, Oxford.
- ICRP (1980) *Statement and recommendations of the 1980 Brighton Meeting of the ICRP*. *Ann. ICRP* 4 (3/4), Pergamon Press, Oxford.
- ICRP (1983) *Cost-benefit analysis in the optimisation of radiation protection*, ICRP Publication 37. *Ann.ICRP* 10 (2/3), Pergamon Press, Oxford.
- ICRP (1985a) *Radiation protection principles for the disposal of solid radioactive waste*, ICRP Publication 46. *Ann.ICRP* 15 (4), Pergamon Press, Oxford.
- ICRP (1985b) *A compilation of the major concepts and quantities in use by ICRP*. ICRP Publication 42. *Ann.ICRP* 14 (4), Pergamon Press, Oxford.
- Jammet, H. and Lombard, J. (1987) Towards a general model of health detriment cost evaluation. *Health Phys.* 52, 1, 91-101.
- Khan, T.A. and Baum, J.W. (1987) Optimisation of the control of contamination. NRC Report FIN A3813, Washington DC.
- Lochard, J. (1988) Cost-effectiveness of robotics and remote tooling for occupational risk reduction at nuclear facilities. Proceedings of International Conference on Man-Machine Interface in the Nuclear Industry, Tokyo, Japan, 15-19 February, 1988.
- Lochard, J., Maccia, C. and Pagès, P. (1983). Cost-effectiveness considerations in reducing occupational exposures in nuclear power plants. *Nucl. Safety* 24 (6), 821.
- Lombard, J. (1981) Review of some decision-aiding methods. In: *Radiation Protection Optimisation*, pp. 56-74. Pergamon Press, Oxford.
- Lombard, J. (1986) Comment tenir compte de la distribution temporelle du

- detriment radiologique. International Symposium on optimisation of radiation protection. IAEA ; OECD NEA, Vienna, Austria, 10-14 March.
- Lombard, J. and Fagnani, F. (1981) Equity aspects of risk management : trade-offs between public and occupational hazards in the Nuclear Industry. *Nucl. Safety* **22**, 5. Sept-Oct, 1981.
- Lombard, J., Oudiz, A. and Zettwoog, P. (1984) Contribution à l'optimisation de la protection radiologique du personnel dans un mine d'uranium. Rapport CEA R5263.
- Maccia, C. (1986) L'évaluation de l'exposition professionnelle dans le domaine du radiodiagnostic médical—Application du principe ALARA. 14th Congrès National de l'ATSR, Paris.
- Merkhofer, M.W. and Keeney, R.L. (1987) A multiattribute utility analysis of alternative sites for the disposal of nuclear waste. *Risk Analysis* **7** (2), 173-194.
- Mishan, E.J. (1977) *Cost Benefit Analysis*. George Allen and Unwin, London.
- NEA (1988) Implications of nuclear safety requirements for the protection of workers in nuclear facilities. OECD/NEA, Paris.
- NRPB (1982) Cost-benefit analysis in the optimisation of protection of radiation workers: a consultative document. National Radiological Protection Board, Chilton.
- NRPB (1986) Cost-benefit analysis in the optimisation of radiological protection. ASP 9 National Radiological Protection Board, Chilton.
- Park.W.R. (1973) Cost engineering analyses: a guide to the economic evaluation of engineering projects. Wiley, New York.
- Raiffa, H. (1968) *Decision Analysis*. Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Roy, B. and Vincke, P. (1981) Multicriteria analysis: survey and new directions. *European Journal of Operational Research* **8** (3), November 1981, pp. 207-218. North Holland Publishing Company, Amsterdam.
- Russell, J.G.B. and Webb, G.A.M. (1987) Valuing the man-sievert in X-ray diagnosis. *Br. J.Radiol.* **60**, 715.
- RCEP (1988) Best practicable environmental option. Twelfth Report of the Royal Commission on Environmental Pollution. Cm 310, HMSO.
- Sugden, R. and Williams, A. (1978) Principles of practical cost benefit analysis. Oxford University Press.

Webb, G.A.M., Oudiz, A., Lochard, J. *et al.* (1986) Development of a general framework for the practical implementation of ALARA. In: *Optimisation of Radiation Protection*, pp. 123-136. IAEA, Vienna.

付録A：種々の最適化手法のウラン鉱山に 対する適用例

(A1) この付録は、最適化のための種々の意思決定支援手法の利用について記述した本文の5章で用いられている例題に関して、詳細な計算を示したものである。規準の選択およびすべての論議に関する理論的根拠は、本文中に記述されている。

A.1 事例研究

(A2) この例題は、小規模のウラン鉱山における換気システムの選択に関するものである。データはすべて Lombard の文献 (Lombard ら, 1984) から引用された。関連すると思われる放射線防護の要因は、年賦化された防護費用および外部 γ 線とウラン粒子やラドン娘核種の吸入によって生ずる年間の職業上の集団線量、それに、個人線量の分布および坑道や採掘場における高い換気率に関連した不快感である。基本事例すなわちゼロ選択肢は、作業者の一つのグループが線量限度を超えそうなので、それ以上の考察から除く。残る5つの防護選択肢については、その各々が職業上の線量限度内に十分入っているの、考察対象として検討を続ける。表A1に示すように、これらの選択肢は、鉱坑内の一次と二次の換気流量と、各採掘場の行き止まりの場所において空気の滞留を防ぐために補助送風機を使用するかどうかということに関して特徴づけられている。表A2には、基本事例および5つの選択肢に対する年賦化された防護費用とそれに伴う年間集団線量が示されている。この例題においては、推定線量は、文献に記載されたものそのままを採用した。實際上、ラドンの測定値から実効線量当量を推定することは難し

表 A1 各選択肢についての換気流量特性

防 護 選択肢	換気流量		送風機 の使用	不快のレベル
	一次	二次 (m^3s^{-1})		
0	10	2	無	なし
1	20	3	無	問題なし
2	30	3	無	軽度
3	30	3	有	軽度
4	60	3	有	重度
5	60	5	有	作業困難

表 A2 選択肢に対する年賦化された防護費用
および年間の集団線量

防 護 選択肢	年間防護費用 X \$	年間集団線量 S 人・Sv
0	0	0.686
1	10 400	0.561
2	17 200	0.357
3	18 500	0.335
4	32 200	0.196
5	35 500	0.178

注：本表と以後の付属書の表で3桁の有効数字をとっているのは、単に早すぎる丸めにより生ずる明らかな矛盾をさけるためである。最終結果は、2桁の有効数字で本文に与えられている。

く、推定線量がかなり不確実なものとなることは免れない。しかし、線量の差には少ししか影響を及ぼさず、推定線量の差の傾向に対する影響はさらに小さい。

(A3) 個人線量の分布を考慮に入れるために17人の鉱山労働者を3つのグループに区分した。区分は、鉱坑の種々の区域(すなわち、坑道あるいは採掘場)における鉱山労働者達の居在率つまり彼らの個人線量レベルによった。最も多く被ばくする4人の鉱山労働者(採掘場内での掘削夫)はグル

ープI, 他の4人はグループIIとし, 残りの9人はグループIIIとした。基本事例および選択肢に関する各グループの鉱山労働者達の平均個人線量を, 全集団線量とともに表A3に示した。

表A3 各選択肢についての3作業グループでの平均個人線量とそれに対応する集団線量

防護 選択肢	平均年間個人線量			年間集団線量		
	I	II mSv	III	I	II 人・Sv	III
0	55.2	41.8	33.1	0.221	0.167	0.298
1	40.8	34.5	28.9	0.163	0.138	0.260
2	28.4	22.3	17.1	0.114	0.089	0.154
3	26.0	21.0	16.3	0.104	0.084	0.147
4	17.5	12.6	8.4	0.070	0.050	0.076
5	15.8	11.3	7.8	0.063	0.045	0.070

A.2 費用効果分析

(A4) 5つの選択肢についての費用効果比を, 5章で述べたようにして計算し, 表A4に示す。

表A4 考察対象選択肢についての費用効果比

防護 選択肢	年間防護費用	ΔX \$	年間集団線量	ΔS 人・Sv	費用効果比
	X \$		S 人・Sv		$ \Delta X/\Delta S $ \$(人・Sv) ⁻¹
1	10 400	6 800	0.561	0.204	33 000
2	17 200		0.357		
3	18 500	1 300	0.335	0.022	59 100
4	32 200	13 700	0.196	0.139	98 600
5	35 500	3 300	0.178	0.018	183 300

A.3 費用便益分析

(A5) 各防護選択肢 i に対応する合計費用 ($X_i + \alpha S_i$) を評価するために、 α 値について定められた規準を使用しなければならない。単位集団線量に割り当てられた費用は、この例では単位人・Sv あたり 20 000 \$ という値を採用し、その結果、それぞれの集団線量に関する損害の費用 Y_i は、20 000 \$ S_i となる。これをもとに、表 A5 に示した結果が得られる。

表 A5 考察対象選択肢についての単純費用便益分析

防護選択肢	年間防護費用 X \$	年間損害費用 Y \$	総年間費用 ($X + Y$) \$
<u>1</u>	10 400	11 200	<u>21 620</u>
2	17 200	7 140	24 340
3	18 500	6 700	25 200
4	32 200	3 920	36 120
5	35 500	3 560	39 060

注：本表および以後の該当する表において、分析解には下線を付した。

A.4 拡張費用便益分析

(A6) この手法においては、 α 値に加えて例として 3 つの β 値が規準として定められている。

$\beta_1 = 0$ 年間個人線量が 5 mSv 未満

$\beta_2 = 40\,000 \text{ \$} (\text{人} \cdot \text{Sv})^{-1}$ 年間個人線量が 5-15 mSv の範囲内

$\beta_3 = 80\,000 \text{ \$} / (\text{人} \cdot \text{Sv})^{-1}$ 年間個人線量が 15-50 mSv の範囲内

そうすると、損害の費用 Y は以下のように与えられる：

$$\begin{aligned}
 Y &= \alpha S + \beta_1 S_1 + \beta_2 S_2 + \beta_3 S_3 \\
 &= 20\,000 S + 0 S_1 + 40\,000 S_2 + 80\,000 S_3
 \end{aligned}$$

ここで、 S は全集団線量であり、 S_1 、 S_2 および S_3 は、それぞれ 5 mSv 未満、

5-15 mSv, および 15-50 mSv の年間個人線量から派生する集団線量である。表 A 3 のデータから計算された各集団線量の分布はこの書式によって、各選択肢についての損害費用 Y とともに表 A 6 に示されている。全費用 ($X + Y$) は表 A 7 に示す。

表 A6 考察対象選択肢についての各個人線量域における年間集団線量と総損害費用

防護 選択肢	S	年間集団線量		S_3	年間損害費用 Y \$
		S_1	S_2 人・Sv		
1	0.561	0	0	0.561	56 100
2	0.357	0	0	0.357	35 700
3	0.335	0	0	0.335	33 500
4	0.196	0	0.126	0.070	14 560
5	0.178	0	0.115	0.063	13 200

表 A7 考察対象選択肢についての拡張費用便益分析

防護選択肢	年間防護費用	年間損害費用	総年間費用
	X \$	Y \$	$(X + Y)$ \$
1	10 400	56 100	66 500
2	17 200	35 700	52 900
3	18 500	33 500	52 000
4	32 200	14 600	46 800
5	35 500	13 200	48 700

A.5 多属性効用分析

(A 7) 多属性効用分析手法を用いるさいに、単純費用便益分析および拡張費用便益分析の結果と対比するためには、効用関数に拘束を課し 5 章に述べたものと同じ規準に整合させるようスケーリング定数を設定する必要がある。単純費用便益分析については、必要なスケーリング定数は $k(S)$ と $k(X)$ で、これらは次の 2 つの式を解くことによって得られる：

(92)

$$\frac{k(S)}{k(X)} = \frac{20\,000 \times 0.383}{25\,000} = 0.305$$

および

$$k(X) + k(S) = 1$$

これにより、 $k(X) = 0.77$ 、 $k(S) = 0.23$ となる。これらのスケーリング定数と図10と図11における年間防護費用および年間集団線量について示された線形部分効用関数を用いることによって、部分効用および全効用を計算することができる、それらを表A8に示す。

表A8 単純費用便益分析に対応して計算された考察対象選択肢についての部分効用と効用

防護 選択肢	年間 防護費用 X \$	年間 集団線量 S 人・Sv	部分効用		スケーリングされた 部分効用		効用 U
			$u(X)$	$u(S)$	$k(X)u(X)$	$k(S)u(S)$	
1	10 400	0.561	1	0	0.77	0	0.77
2	17 200	0.357	0.729	0.533	0.56	0.12	0.68
3	18 500	0.335	0.677	0.590	0.52	0.14	0.66
4	32 300	0.196	0.131	0.953	0.10	0.22	0.32
5	35 500	0.178	0	1	0	0.23	0.23

(A8) 拡張費用便益分析の場合と同様、必要な付加的スケーリング定数を、5章に述べたように以下の一連の数式を解くことによって算出しなければならぬ：

$$k(S) = 0.305k(X)$$

$$k(S_1) = 0$$

$$k(S_2) = 0.201k(X)$$

$$k(S_3) = 1.587k(X)$$

および

$$k(X) + k(S) + \sum_1^3 k(S_n) = 1$$

これにより、 $k(X) = 0.323$ 、 $k(S) = 0.099$ 、 $k(S_2) = 0.065$ 、 $k(S_3) = 0.513$ と

なる。表 A 6 の集団線量の分布および表 A 8 からの費用と集団線量にこれらのスケーリング定数を適用することにより、各選択肢について、部分効用、スケーリングされた部分効用および全効用が表 A 9 のように与えられる。

表 A 9 拡張費用便益分析に対応して計算された考察対象選択肢についての部分効用と効用

防 護 選 択 肢	部 分 効 用				スケーリングされた部分効用				効 用 <i>U</i>
	$u(X)$	$u(S)$	$u(S_2)$	$u(S_3)$	$k(X)u(X)$	$k(S)u(S)$	$k(S_2)u(S_2)$	$k(S_3)u(S_3)$	
1	1	0	1	0	0.323	0	0.065	0	0.388
2	0.729	0.533	1	0.410	0.235	0.053	0.065	0.210	0.563
3	0.677	0.590	1	0.454	0.219	0.058	0.065	0.233	0.575
4	0.131	0.953	0	0.986	0.042	0.094	0	0.506	0.642
5	0	1	0.087	1	0	0.098	0.006	0.514	0.618

(A 9) 拡張費用便益分析は、さらに費用に割り当てるスケーリング定数の半分を換気による不快感に対して割り当てることによって、それを含む完全な多属性分析に組み込まれるに至った。これにより次式が付加され、

$$k(V) = 0.5k(X)$$

条件式が次のように修正される：

$$k(X) + k(S) + \sum_{n=1}^3 k(S_n) + k(V) = 1$$

これにより、 $k(X) = 0.278$ 、 $k(S) = 0.085$ 、 $k(S_2) = 0.055$ 、 $k(S_3) = 0.442$ 、および $k(V) = 0.140$ となる。これらを表 A 9 の部分効用に適用し、図 12 の換気に伴う不快感についての効用関数をつけ加えると表 A 10 に示すような結果が得られる。

(A 10) 感度分析は、データの入力、効用関数の割り当ておよびスケーリング定数に内在する規準に関して行うことができる。一例として、表 A 10 のデータが、換気に伴う不快感の相対的重要度に関する 2 つの異なった判断について再計算された。異なる判断を、それぞれ次の 2 つの条件のいずれかで表すことにする。すなわち、

表A10 拡張費用便益分析に基づくほかに不快感の要因を含めて考察された各選択肢についての部分効用と全効用

防 護 選択肢	換気による不快 感の部分効用 $u(V)$	スケールリングされた部分効用					効用 U
		$k(X)u(X)$	$k(S)u(S)$	$k(S_2)u(S_2)$	$k(S_3)u(S_3)$	$k(V)u(V)$	
1	1	0.278	0	0.056	0	0.139	0.473
2	0.75	0.203	0.045	0.056	0.182	0.104	0.589
<u>3</u>	0.75	0.188	0.050	0.056	0.202	0.104	<u>0.600</u>
4	0.25	0.036	0.081	0	0.435	0.035	0.587
5	0	0	0.085	0.005	0.442	0	0.532

$$k(V) = k(S)$$

あるいは、

$$k(V) = k(X)$$

換気に対し低い重要度を割り当てた一番目の条件による結果を表A11に、そして、より高い重要度を割り当てた二番目の条件による結果を表A12に、それぞれ示す。

表A11 換気に低い重要度を割り当て ($k(V) = k(S)$)、表A10のデータを用いて行った感度分析

防 護 選択肢	スケールリングされた部分効用					効 用 U
	$k(X)u(X)$	$k(S)u(S)$	$k(S_2)u(S_2)$	$k(S_3)u(S_3)$	$k(V)u(V)$	
1	0.294	0	0.059	0	0.090	0.443
2	0.214	0.048	0.059	0.191	0.068	0.580
3	0.199	0.053	0.059	0.212	0.068	0.591
<u>4</u>	0.039	0.086	0	0.460	0.023	<u>0.608</u>
5	0	0.090	0.005	0.467	0	0.562

表A12 換気に高い重要度を割り当て ($k(V) = k(X)$)、表A10のデータを用いて行った感度分析

防 護 選択肢	スケールリングされた部分効用					効 用 U
	$k(X)u(X)$	$k(S)u(S)$	$k(S_2)u(S_2)$	$k(S_3)u(S_3)$	$k(V)u(V)$	
1	0.244	0	0.049	0	0.244	0.537
2	0.178	0.040	0.049	0.159	0.183	0.609
<u>3</u>	0.165	0.044	0.049	0.176	0.183	<u>0.617</u>
4	0.032	0.071	0	0.383	0.061	0.547
5	0	0.075	0.004	0.386	0	0.467

(A 11) 拡張費用便益分析の形式に拘束されないこの完全多属性効用分析においては、年間の防護費用および年間の集団線量についての部分効用関数を、図 10 および 11 に示したようにやはり線形と考えている。

(A 12) 最大個人線量を線量分布を特徴づける要因として用いると、リスク嫌悪の態度に対応して部分効用関数は上向きの非線形となる。この例題については、この関数は、付録 B にさらに詳しく述べられている減少型リスク嫌悪関数の式によって設定した。これは、座標点 (15.8, 1), (40.8, 0) および意思決定者によって選ばれた補足の座標点 (25, 0.8) を結ぶ次式で与えられる。

$$U(x) = a + b(-e^{-cx})$$

これにより、図 9 の曲線 B と同様の一般形をもつこの関数は、以下のようになる：

$$U(d_i) = 1.243 - 0.243 \exp[0.0653(d_i - 15.8)]$$

(A 13) これらの効用関数および表 A 1, A 2, A 3 からのデータを用いて、各要因についての部分効用が、表 A 13 に示すように計算できる。5 章で述べたようにスケーリング定数を割り当てれば、すなわち、

$$k(X) = k(S) = k(d) = 2/7; k(V) = 1/7$$

とすれば、スケーリングされた部分効用は表 A 14 に示すように計算される。

表 A13 別のスケーリング定数による多属性効用分析を用いて考察された選択肢に関する各要因についての部分効用

選択肢	年間 防護費用	年間 集団線量	最大年間 個人線量	換気による 不快感	部分効用			
	X \$	S 人・Sv	d mSv	V	u(X)	u(S)	u(d)	u(V)
1	10 400	0.561	40.8	問題なし	1	0	0	1
2	17 200	0.357	28.4	軽度	0.729	0.533	0.690	0.75
3	18 500	0.335	26.0	軽度	0.677	0.590	0.770	0.75
4	32 200	0.196	17.5	重度	0.131	0.953	0.971	0.25
5	35 500	0.178	15.8	作業困難	0	1	1	0

表A14 別のスケーリング定数による多属性効用分析を用いて考察された選択肢に関するスケーリングされた部分効用と効用

選 択 肢	スケーリングされた部分効用				効 用 U
	$k(X)u(X)$	$k(S)u(S)$	$k(d)u(d)$	$k(V)u(V)$	
1	0.286	0	0	0.143	0.429
2	0.208	0.152	0.197	0.107	0.664
<u>3</u>	0.193	0.169	0.220	0.107	<u>0.689</u>
4	0.037	0.272	0.277	0.036	0.622
5	0	0.286	0.286	0	0.572

A.6 多規準優位分析

(A 14) この分析では、5章に述べたように、別のスケーリング定数による多属性効用分析で用いたものと同じ4つの要因が用いられる。それらは、防護費用 X 、集団線量 S 、最大個人線量 d 、および換気に伴う不快感 V であり、それらの値は、表A13の最初の部分に示されている。

(A 15) 多規準優位分析手法は、5章に述べた2つの指標を通して、一方が他方より優れているかどうかを評価するために、選択肢を対にして比較する方法である。どのように計算するかの一例を示すと、 $Ad_{1,2}$ は X と V の荷重係数の和に等しく、これら2つの要因のみを比較するかぎりでは、選択肢2より選択肢1が好ましいことになる。前に述べたように、 $k(X)=k(S)=k(d)=2/7$ および $k(V)=1/7$ とすると、荷重係数の合計は、 $3/7$ 、すなわち0.43に等しくなる。優位指標のすべての組合せを表A15に示す。

(A 16) この優位分析手法の簡単な例においては、除外規準は、5章に述べたように1あるいは0のみである。一例として、表A16に、効用で表したしきい値を0.4としたときの換気要因についての除外規準を示す。不快感に関して選択肢2と選択肢1との差は、 $1-0.75=0.25$ に等しい。この値はしきい値0.40より小さいので、除外規準 $Ec_{2,1}=0$ である。

表A15 相互に比較をした考察対象選択肢に関する優位指標

m	1	2	3	4	5
i	$Ad_{i,m}$				
1	—	0.43	0.43	0.43	0.43
2	0.57	—	0.43	0.43	0.43
3	0.57	0.71	—	0.43	0.43
4	0.57	0.57	0.57	—	0.43
5	0.57	0.57	0.57	0.57	—

表A16 換気による不快感について相互に比較した考察対象
選択肢に関する除外規準

m	1	2	3	4	5
i	$Ec_{i,m}$				
1	—	0	0	1	1
2	0	—	0	1	1
3	0	0	—	1	1
4	1	1	1	—	0
5	1	1	1	0	—

参考文献

- Lombard, J., Oudiz, A. and Zettwoog, P. (1984) Contribution à l'optimisation de la protection radiologique du personnel dans un mine d'uranium. Rapport CEA R 5263.

付録B：単一属性効用関数および荷重係数の評価

(B1) 多属性関数 U_i は、防護選択肢 i の総体的な良度指数を表す。この関数 U_i は、選択肢 i の各関連要因 (すなわち属性) j に対する良度指数を表す単一属性効用関数 $u_{j,i}$ を、要因 j の相対的重要度をスケーリング定数 k_j により考慮して、加え合わせたものである。すなわち、

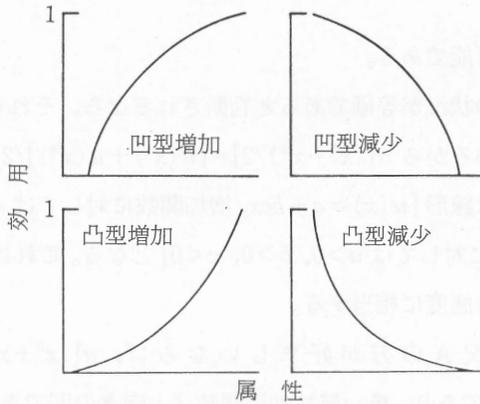
$$U_i = \sum k_j u_{j,i}$$

である。この意思決定支援手法を実行するために、さまざまな $u_{j,i}$ 関数と k_j をまず決めなければならない。

B.1 単一属性効用関数 $u_{j,i}$ の作成

(B2) これらの関数は、いくつかの異なった手法 (Keeney, 1978, 1980; Keeney と Raiffa, 1976) によって作成できる。最も単純なものの一つは、ここで述べるようなもので、3つ以上の選択肢を比較する場合にのみ利用されるものである。通常、各要因に対して、最大費用、最大集団線量などをこの要因に関する性能の最悪値 x^0 に0という単一属性効用を割り当て、1という単一属性効用を最良値 (最小費用、最小集団線量など) x^* に割り当てる。そして、その他すべての性能に対して0から1の間の単一属性効用を割り当てる。

(B3) すべての非線形単一属性効用関数に対しては、少なくとも第三の点に関する知識が単一属性効用関数を特徴づけるために必要になる。可能なすべての非線形関数 (折線形, 指数, 対数など) のうちから、一般には指数形が選ばれる。3点の相対的位置により、単一属性効用関数の一般形は、増加または減少する凹または凸型関数として決定され、そして、この関数の一



図B1 部分効用関数の例

表B1 いろいろな一般の効用関数について仮定される解析的表現

関数形	表現	パラメータ		
凹関数：増加	$a - be^{-cx}$	$a > 0$	$b > 0$	$c > 0$
減少		$a > 0$	$b > 0$	$c < 0$
凸関数：増加	$a + be^{cx}$	$a > 0$	$b > 0$	$c > 0$
減少		$a > 0$	$b > 0$	$c < 0$

般的表現を利用することができる。これらを表B1および図B1に示す。表B1にあるいろいろな定数 a 、 b 、 c は、3点の座標から計算される。ときには、第三の点の座標は、たとえば $(x, u(x) = 1/2)$ というように点を定めることのできる意思決定者によって直接決定される。もしこれが直接得られないならば、その座標は、しばしば、さまざまな質問を通じて決定される。たとえば、最端点 x^0 および x^* と中間点 $(x^0 + x^*)/2$ をもとにした以下のような決め方が、提案されるだろう。

(B4) あなたはAとBのどちらの状況を好みますか？

A：結果が確実に $(x^0 + x^*)/2$ となる状況。

B：結果が x^0 となる確率が0.5、および、結果が x^* となる確率が0.5とな

(100)

る状況。

3種類の解答が可能である。

- (1) もし2つの状況が等価であると判断されるなら、それらに付随した効用は等価であるから $u[(x^0+x^*)/2]=[u(x^0)+u(x^*)]/2$ であり、単一属性効用関数は線形 $[u(x)=a+bcx]$, 増加関数に対しては $a>0, b>0, c>0$, 減少関数に対しては $a>0, b>0, c<0$ となる。これは、いわゆる“リスク中立”の態度に相当する。
- (2) もし、状況Aの方が好ましいならば、 $u[(x^0+x^*)/2]>[u(x^0)+u(x^*)]/2$ であり、単一属性効用関数は上向きの凹である。これは、いわゆる“リスク嫌悪”の態度である。
- (3) もし、状況Bの方が好ましいならば、 $u[(x^0+x^*)/2]<[u(x^0)+u(x^*)]/2$ であり、単一属性効用関数は下向きの凸である。これは、いわゆる“リスク受容”の態度である。

(B5) 後者2つの場合、続けて他の同じような質問をすることによって、必要な第三の点の座標 $[(x^0+x^*)/2, u(x^0+x^*)/2]$ を評価でき、 a, b, c のパラメータを算定できる。二、三の特別な場合、関数が単調ではなく、3点では関数を評価するのに十分ではなくなる。そのときには、他の点を得るために同様な質問がなされる。単一属性効用関数の形は、しばしば、防護費用に関しては減少する線形として、また、集団線量に関しては減少する線形、最大個人線量に関しては減少する凹形曲線 (図B1参照) として選ばれる。

B.2 スケーリング定数の評価

(B6) 属性 j の相対的重要度を表すさまざまな k_j の評価は、2つの方法で実行することができる。

B.2.1 直接評価

(B7) ときとして、 k_j は概算で十分であろう。そのときには、関連要因を種々のカテゴリー（重要な要因、重要でない要因）に序列化し、これから k_j の定性的評価が得られよう。この手法は、各要因を重要なものとそうでないものとの分類するために、その要因に関する値の幅 $[x^*-x^0]$ を考慮する必要があるので、ときに偏りを生じる可能性がある。たとえば、2つの最端値の間の差異が 10^3 \$でなくて 10^6 \$であるならば、費用要因はより重要なものと分類しなければならない。

B.2.2 置換えレート

(B8) 種々の k_j を評価する古典的方法は、置換えレート (Fishburn, 1967) に基づくものである。すなわち、まず、関連要因を最も重要なものから最も重要度の低いものへ順序づける。次に、各要因の重要度を、最も重要なものを基準にして割り当てる。たとえば、序列化が $f_1 > f_2 > f_4 > f_3$ であるならば、以下の質問を試みよう：

要因2について、性能の最悪値 x_2^0 から最良値 x_2^* に到達するために、最も重要な要因 k_1 に関して、あなたはどれぐらいまでの損失に同意しますか？

たとえば、 f_1 を費用、 f_2 を集団線量と仮定してみよう。すると、質問は次のようになる：

集団線量を最大値 S^0 から最小値 S^* にするために、あなたはいくら費用を払いますか？ 要因 f_1 の単位である金銭で表された答A2から、

$$k_2 = k_1 \cdot A2 / (x_1^* - x_1^0)$$

が得られる。

回答A3およびA4を得るために同様な質問を行い、これから k_3 および k_4 が得られる。要因の当初の序列 $f_1 > f_2 > f_4 > f_3$ を実証するためには、その回答は、 $x_1^* - x_1^0 > A2 > A4 > A3$ という順序に従っていなくてはならない。直接見

(102)

積りおよび置換えレートというこれら2つの手法は、多規準優位分析法にも利用できる。

B.3 勧告値への追従

(B9) もし、単位集団線量あたりの基準価値がすでに勧告されているならば、スケーリング定数はこの価値に従っていなくてはならない。この手順は、5章において、費用便益分析の規準に対して k_j を拘束するために用いられていた。これは、費用に関するスケーリング $k(X)$ と集団線量に関する $k(S)$ を、これら2つの要因に関する値の幅 $R(X)$ および $R(S)$ を考慮に入れて比較することによって実行できる。すなわち、以下の条件が実証されなくてはならない：

$$\frac{k(S)R(X)}{k(X)R(S)} = \text{基準価値}$$

参考文献

- Fishburn, P.C. (1967) Methods for estimating additive utilities. *Management Science*, **13**, 435-453.
- Keeney, R.L. (1978) The art of assessing multi-attribute utility functions. *Organisational Behaviour and Human Performance* **19**, 267-310.
- Keeney, R.L. (1980) Siting energy facilities. Academic Press, New York.
- Keeney, R.L. and Raiffa, H. (1976) Decision with multiple objectives, preferences and value trade-offs. John Wiley and Sons, New York.

付録 C：事例研究の例をあげた文献目録，注釈付き

(C 1) この文献目録は，単なる例示であって，完全を期したものではない。

J. W. Baum and G. R. Matthews, “Compendium of cost-effectiveness evaluations of modifications for dose reductions at nuclear power plants”. NUREG/CR-4373. Brookhaven National Laboratory, USA. (1985).

“原子力発電所における線量低減のための改良策の費用効果評価の概説”

問題の種類：原子力発電所

考慮されている要因：種々

手法：おもに費用効果分析および費用便益分析

結果：種々

D. J. Beninson and A. J. Gonzalez, : “Application of the dose limitation system to the control of carbon-14 releases from heavy-water moderated reactors”. In: *The Dose Limitation System in the Nuclear Fuel Cycle and in Radiation Protection*(Proceedings of a Symposium. Madrid, 19-23 October, 1981. Sponsored by IAEA, WHO, NEA (OECD), ICRP). IAEA-SM-258/53. IAEA, Vienna (1982).

“重水減速炉から放出される ^{14}C の制御に対する線量制限体系の適用”：「核燃料サイクルと放射線防護における線量制限体系」シンポジウム報告集

問題の種類：PHWR炉から放出される ^{14}C の制御

考慮されている要因：集団線量預託/防護費用

(104)

手法：費用便益分析

結果：制御システムの最適な保持能力

D. J. Beninson, "Application of the dose limitation system to design". In : *Proceedings of an International Conference on Nuclear Power Experience*, held by the IAEA in Vienna, 13-17 September, 1982, Vol.4. IAEA-CN-42/82. IAEA, Vienna (1983).

“線量制限体系の設計への適用”

問題の種類：遮蔽

考慮されている要因：集団線量/防護費用

手法：費用便益分析

結果：最適化された追加遮蔽についての線量低減係数

D. J. Beninson and A. J. Gonzalez, "Optimization in relocation decisions" In : *Optimization of Radiation Protection* (Proceedings of a Symposium. Vienna 10-14 March, 1986, jointly organized by IAEA and NEA (OECD)). IAEA-SM-285/37. IAEA, Vienna (1986).

“移住の決定における最適化”

問題の種類：緊急時後の移住に関する介入レベル

考慮されている要因：集団線量/防護費用（避難措置を維持するための費用）

手法：費用便益分析

結果：移住のための最適な時期における線量率

H. Bruno, C. Nollman and E. Palacios, "Estudio de optimizacion de la proteccion radiologica mediante el control de descargas de efluentes en una planta de obtencion de UO₂". In : *Annales IER. Congreso Mundial de Ingenierie y Ambiente*. Organized by World Federation of Engineer-

ing Organisations, held in Buenos Aires, Argentina, 16-18 November, 1981.

“ UO_2 製造工場における排出物の放出制御による放射線防護の最適化の検討”

問題の種類： UO_2 工場における液体排出物の制御

考慮されている要因：集団線量預託/防護費用

手法：費用便益分析

結果：最適化された放出率

A. J. Gonzalez, E. Palacios, A. Curti, O. Agatiello and J. Majchrzak, “Ejemplos de optimizacion de la proteccion radiologica en el diseño y la explotacion”. In: *The Dose Limitation System in the Nuclear Fuel Cycle and in Radiation Protection* (Proceedings of a Symposium. Madrid, 19-23 October, 1981. Sponsored by IAEA, WHO, NEA (OECD), ICRP). IAEA-SM-258/54. IAEA, Vienna (1982).

“設計と操業時における放射線防護の最適化の例”

問題の種類：放射性同位元素製造用の商用プラントの換気

考慮されている要因：集団線量率/防護費用率（排風機のエネルギーの費用率）

手法：費用便益分析

結果：最適流量

A. J. Gonzalez, E. Palacios, A. Curti, O. Agatiello and J. Majchrzak, “Ejemplos de optimizacion de la proteccion radiologica en el diseño y la explotacion”. In: *The Dose Limitation System in the Nuclear Fuel Cycle and in Radiation Protection* (Proceedings of a Symposium. Madrid, 19-23 October, 1981. Sponsored by IAEA, WHO, NEA (OECD),

(106)

ICRP). IAEA-SM-258/54. IAEA, Vienna (1982).

“設計と操業時における放射線防護の最適化の例”

問題の種類：Atucha 原子力発電所における保守係員の訓練のレベル

考慮されている要因：訓練された係員および訓練されていない係員による保守に必要な時間の関数としての保守および修理作業による集団線量と、訓練された係員および訓練されていない係員の人・時間あたりの費用

手法：費用便益分析

結果：保守要員のうちで訓練された係員が占める最適な割合

A. J. Gonzalez, E. Palacios, A. Curti, O. Agatiello and J. Majchrzak,

“Ejemplos de optimizacion de la proteccion radiologica en el diseño y la explotacion”. In: *The Dose Limitation System in the Nuclear Fuel Cycle and in Radiation Protection* (Proceedings of a Symposium. Madrid, 19-23 October, 1981. Sponsored by IAEA, WHO, NEA (OECD), ICRP). IAEA-SM-258/54. IAEA, Vienna (1982).

“設計と操業時における放射線防護の最適化の例”

問題の種類：Atucha 原子力発電所における高度に専門化された保守係員に対する個人線量の割り当て

考慮されている要因：高度に専門化された係員の数を関数とした集団線量と、高度に専門化された係員の費用

手法：費用便益分析

結果：個人線量の割り当てが適用される高度に専門化された保守係員の最適な割合

P. Hubert, J. Lombard and P. Pages, “Multi-criteria analysis of protection actions in the case of transportation of radioactive materials”. CEPN R-112, 1986.

“放射性物質の輸送の場合における防護対策の多規準分析”

問題の種類：放射性物質の輸送

考慮されている要因：輸送費用/軽度の事故の経済的影響/重大事故の経済的影響/短期の死亡率/短期の罹病率/晩発性放射線影響

手法：決定分析

注釈：安全に対する最適化への多規準の適用

J. Kay and R. Touzet, “Optimizacion del sistema de ventilacion del recinto del reactor RA-6 (Centro Atomico Bariloche)”. In : *Informe de Actuacion-Division Control de Instalaciones Nucleares*, CNEA P. S. CIN NRO.161/80. CNEA. Buenos Aires (1980).

“RA-6 原子炉 (バリローチェ原子力センター) 建家の換気系の最適化”

問題の種類：RA-6 研究炉室の換気

考慮されている要因：集団線量率/防護費用率 (排風機のエネルギーの費用率)

手法：費用便益分析

結果：最適流量

J. Lochard, C. Maccia and P. Pages, “Optimization of public radiation protection at nuclear power plants and risk transfer to workers”. CEPN R-108, 1986.

“原子力発電所における公衆の放射線防護と作業者に転化されるリスクの最適化”

問題の種類：原子力発電所

考慮されている要因：防護の費用/公衆の集団線量/職業上の集団線量

手法：費用便益分析

注釈：公衆と作業者の線量間のトレード・オフの説明

(108)

J. Lombard, "Multi-criteria analysis of public protection in PWR's".
CEPN R-113, 1986.

“PWRにおける公衆の防護の多規準分析”

問題の種類：原子力発電所

考慮されている要因：防護の費用/公衆の集団線量/職業人の集団線量/定性的な安全指標

手法：多規準優位分析

注釈：種々の要因の間（公衆と作業員、安全性と通常状態）のトレード・オフの説明

C. Maccia, P. Pages and J. Lochard, "Optimization of occupational exposure in PWR's". CEPN R-107, 1986.

“PWRにおける職業被ばくの最適化”

問題の種類：原子力発電所

考慮されている要因：防護の費用/発電費用/職業人の集団線量

手法：費用便益分析

注釈：発電と防護の費用間の相互影響の説明

A. Oudiz and J. Lombard, "Optimization of occupational exposure in an uranium mine". CEPN R-109, 1986.

“ウラン鉱山における職業被ばくの最適化”

問題の種類：ウラン鉱山労働者の放射線防護

考慮されている要因：防護の費用/職業人の集団線量

手法：費用便益分析

注釈：本報告書付録 A に与えられている事例研究の原本

P. Pages and P. Hubert, "Optimization of public protection in the case of

transportation of radioactive materials”. CEPN R-106,1986.

“放射性物質輸送の事例における公衆の防護の最適化”

問題の種類：放射性物質の輸送

考慮されている要因：防護の費用/予想される死亡の費用

手法：費用便益分析

注釈：安全性への最適化の適用

E. Palacios and C. Menossi, “Optimization of radiation protection in the transportation of radioisotopes”. In: Proceedings of the 7 th International Symposium on Packaging and Transportation of Radioactive Materials(PATRAM' 83). Held in New Orleans, Louisiana, USA,15-20 May,1983, CONF-830528-Vol.1.

“放射性同位元素の輸送における放射線防護の最適化”

問題の種類：放射性同位元素の輸送において最適化された防護レベルを達成するために必要な追加遮蔽の厚さ

考慮されている要因：輸送容器の輸送の結果、作業者と公衆が受ける集団線量および防護の費用（追加遮蔽、輸送容器および輸送の費用）

手法：費用便益分析

結果：最適な追加遮蔽の厚さ

放射線防護における最適化と意思決定

定価 2,575円 (本体 2,500円・税75円)

平成4年6月20日 初版第1刷発行

© 1992

翻 訳
および
発 行

社 団 法 人 日 本 ア イ ソ ト ー プ 協 会

〒113 東京都文京区本駒込二丁目28番45号
電 話 (03)3946-9682
振 替 東京8-143345

発 売 所 丸 善 株 式 会 社

印刷・製本 富士美術印刷(株)