

# ICRP

*Publication 76*

## 潜在被ばくの防護： 選ばれた放射線源への適用

# 潜在被ばくの防護： 選ばれた放射線源への適用

1996年11月に委員会により採択されたもの

社団法人 日本アイソトープ協会





Japanese Translation Series of ICRP Publications  
*Publication 76*

This translation was undertaken by the following colleagues.

Translated by

Japan Radioisotope Association (Tatsuji HAMADA)

Reviewed by

Sadaaki SATO, Mitsumasa HIRANO, Shinichi SUGA

Supervised by

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

---

Hiromichi MATSUDAIRA* (Chair)	Tatsuji HAMADA (Vice-chair)	
Masami IZAWA**	Hideharu ISHIGURO	Jiro INABA*
Tomoko KUSAMA	Sukehiko KOGA**	Toshisou KOSAKO*
Yasuhito SASAKI*	Kazuyoshi BINGO	Kiyohiko MABUCHI*
Katsumune YAMAMOTO		

---

\* ICRP member at the time.

\*\* Former ICRP member.

## 邦訳版への序

本書は国際放射線防護委員会(ICRP)によって1996年11月に採択され、Publication 76として刊行された、専門委員会4の課題グループの報告書

Protection from Potential Exposures: Application to Selected Radiation Sources

(*Annals of the ICRP*, 27, No. 2(1997))

を、ICRPの了解のもとに翻訳したものである。

下訳は日本アイソトープ協会において作成し、同協会のICRP翻訳検討委員会において従来の訳書との整合性について調整を行うとともに、さらに下記の方々に詳細に吟味していただいた。ここに厚く謝意を表する次第である。

佐藤貞明(原子力安全研究協会)、平野光将(原子力発電技術機構)、

須賀新一(日本原子力研究所 国際原子力総合技術センター)

原書には8カ所の明らかな誤りが認められたが、これらの誤りについてはとくにことわることなく訳文を修正してある。

本訳書に採用した訳語とその原語の主なものを下に記す：

Reference Risk (標準的リスク), acceptability (受容性), demand (デマンド),  
identification (同定), initiating event (起因事象)

平成10年6月

ICRP 勧告翻訳検討委員会

(ii)

日本アイソトープ協会

ICRP 勧告翻訳検討委員会

委員長 松平 寛通 ((財)放射線影響協会)  
副委員長 浜田 達二 ((財)原子力安全研究協会)  
委員 伊沢 正実 (元 放射線医学総合研究所)  
石黒 秀治 (動力炉・核燃料開発事業団)  
稲葉 次郎 (放射線医学総合研究所)  
草間 朋子 (大分県立看護科学大学)  
古賀 佑彦 (藤田保健衛生大学)  
小佐古敏荘 (東京大学原子力研究総合センター)  
佐々木康人 (放射線医学総合研究所)  
備後 一義 ((財)放射線計測協会)  
馬淵 清彦 ((財)対放射線影響研究所)  
山本 克宗 (日本原子力研究所)

## 目 次

	頁 ( 項 )
序 .....	v
1. 緒 論 .....	1 ( 1 )
2. 潜在被ばくのケースにおける放射線防護 .....	3 ( 8 )
2.1 受容性の規準 .....	3 ( 10 )
2.1.1. 改善のための選択肢の受容性.....	7 ( 26 )
2.2. シナリオの同定.....	7 ( 27 )
2.3. シナリオの論理構造.....	8 ( 32 )
2.4. システムおよびコンポーネントの信頼性と確率の割当て .....	13 ( 48 )
2.5. 潜在被ばくのリスクと影響 .....	14 ( 53 )
2.5.1 潜在被ばくの算定における損害.....	14 ( 55 )
2.6. 防護の最適化 .....	17 ( 62 )
3. 適用における特別な問題 .....	19 ( 66 )
3.1. 実証された設計と変更 .....	19 ( 66 )
3.2. トレードオフ .....	20 ( 72 )
3.3. 予防と影響緩和 .....	20 ( 74 )
3.4. 低い確率の事象と公衆の被ばく .....	22 ( 79 )
3.5. 深層防護 .....	23 ( 84 )
3.6. ヒューマンエラー .....	24 ( 88 )
3.7. 医学における潜在被ばく .....	25 ( 93 )
4. 規制目的への適合の立証 .....	27 ( 99 )
5. 例.....	29 ( 104 )
5.1. 照射装置における潜在被ばく .....	30 ( 109 )
5.1.1. 新型照射装置の安全設備 .....	30 ( 112 )
5.1.2. 新型照射装置のフォールトツリー解析 .....	34 ( 140 )

5.1.3.	古い設計の照射装置のフォールトツリー解析 .....	37	(146)
5.1.4.	照射装置の性能とリスク拘束値との比較 .....	47	(157)
5.2.	加速器における潜在被ばく .....	48	(159)
5.2.1.	研究用加速器のイベントツリー解析 .....	48	(161)
5.2.2.	同位体製造用加速器の危険の同定とフォールトツリー解析 .....	52	(167)
5.3.	紛失した放射線源による潜在被ばく .....	61	(197)
5.3.1.	移動式工業用ラジオグラフィのイベントツリー解析 .....	63	(201)
5.4.	ガンマ線治療装置による患者の潜在被ばく .....	65	(208)
5.4.1.	ガンマ線治療装置の説明 .....	65	(209)
5.4.2.	治療手順 .....	66	(212)
5.4.3.	放射線治療装置のフォールトツリー解析 .....	68	(216)
6.	引用文献 .....	72	



## 序

国際放射線防護委員会は1993年に、専門委員会4の勧告にもとづいて、潜在被ばくの防護原則の実践的な適用に関する課題グループを任命した。この課題グループの目的は、*ICRP Publication 60*の中で概説され、固定式および移動式の放射線源に係わる潜在被ばくに関する*ICRP Publication 64*の中で詳論された諸原則を発展させることであった。

本書はその課題グループの報告書である。報告書は専門委員会4により、1996年のその会合で草案として承認された。最終テキストは1996年に委員会により承認された。

課題グループの構成員は次の通りであった：

D. Beninson (議長)	R.G. McKinnon
D.A. Cool	P.A. Rathbun
R. Hock	J. Valentin
M. Höfert	

課題グループ以外の多くの人々から貴重なコメントと示唆が提供された。T.J. Georgeの貢献は特に有用であった。

この報告書を準備する間における専門委員会4の構成員は、以下の通りであった：

D. Beninson (議長)	K.H. Lokan
B.C. Winkler (副議長)	F. Luykx
A.D. Wrixon (幹事)	J.-C. Nénot
D.A. Cool	Z. Pan
R.M. Duncan	K.C. Pillai
A.J. González	A.C.B. Richardson
R. Hock	A. Sugier
C.J. Huyskens	K. Ulbak
T. Kosako	J. Valentin

図2はNordion International, Incによって提供されたもの、また図11はElektä Instrument ABによって提供された原図に一部変更を加えたものである。

## 1. 緒 論

(1) 国際放射線防護委員会 (ICRP) の放射線防護の枠組みは、*Publication 60* (ICRP (1991))の中で提示されており、個人の放射線被ばくに影響を及ぼす状況を、行為と介入という2つの幅広いカテゴリーに分けている。ある行為の導入によりもたらされるかもしれない放射線被ばくはまた、通常被ばくと潜在被ばくという2つの幅広いカテゴリーに分けられる。通常被ばくは、起こるのを合理的に予想することができる被ばくである、すなわち、通常被ばくは、それがいつ起こるかに関係なく1あるいは1に近い確率で起こると予測される。通常被ばくには、計画どおり実施される操業からの被ばくと、意図されたものではないが、確率が高く、影響が低い事象からの被ばくが含まれる。

(2) 潜在被ばくは、ある行為の導入もしくは一部変更の結果として、起こることは確かでないが予想することができ、発生の確率を割り当てることができるような被ばくである。この概念は、*Publication 64* (ICRP (1993))の中で論じられているように、全ての被ばくが予想どおり起こるわけではないという事実に基づく。装置は故障することがあり、また、事故に至るような計画された運転手順からの逸脱がありうる。そのような事象は予見することができ、それらの発生確率を推定することはできるが、事象を詳細に予測することはできない。

(3) 潜在被ばくの場合、人のリスクは次の2つのランダムな事象、すなわち、第一にその被ばくの原因となる事象の発生、第二に、有害な影響の出現（その被ばくがあったとして）の結果である。その被ばくに至る事象は起こるかもしれず、また起こらないかもしれないので、したがって、いかなる通常被ばくであっても、それによる個人の損害と集団の損害の概念をこの潜在被ばくのケースにまで拡張する必要がある。委員会は、放射線を使用する行為における通常作業条件下での被ばくに対して、線量限度と線量拘束値の使用を勧告した。これらの限度と拘束値は、それ自体として、潜在被ばくに直接適用されることはない。

(4) もし有害な影響の確率を、受容性または適合性を決定するために使うのならば、これらの線量限度と拘束値を、線量を受ける確率とその線量に関連したいろいろな種類の害の確率の両方を考慮に入れたリスク限度とリスク拘束値によって補うべきである。*Publication 64* (ICRP (1993))の中で委員会はこの概念を敷衍し、潜在被ばくの受容性を判断する道具を提供した。本書の中では、この道具の実際的な適用を、下記のように選ばれたいくつかの例によって示す。これらの例では、論理構造（イベントツリーとフォールトツリー）が、潜在的に被ばくをもたらすシナリオの解析に用いられている。これらのシナリオと被ばくには確率が割り当てられる。結果として生ずる損害をどのように計算して受容性の規準と比較することができ

るかを示し、この報告書の例に対するそのような規準（リスク拘束値）の選択について論じる。

(5) 規制者、製造業者および事業者はこの報告書とその例を使って、単純な施設と操業を手計算で解析し、それらの受容性を査定することができるであろう。しかし、この報告書は、ここに記述された解析法の教科書とすることを意図したものではなく、またそのようにまとめられていない。本書はそのような方法を使う重要性を指摘し、読者が専門家の助言を得る際に、関連質問を作り上げる一助となり、またその気になっている読者に対し出発点として更なる読書範囲を示唆することを目指しているのである。

(6) 潜在被ばく概念には、次の3つのケースが含まれる：

(a) 行為の中で職業的に、または公衆の構成員として、あるいは患者として通常被ばくも受けている個人に対し、潜在被ばくが主に影響を及ぼすような状況。この個人の数は通常少なく、また関与する唯一の損害は、直接被ばくした人への健康リスク、すなわち通常被ばくによる確率的影響のリスクと潜在被ばくによる確率のおよび確定的影響のリスクである。そのような潜在被ばくが起こる過程は比較的単純である。これらの状況の多くにおいて、潜在被ばくがその施設の操業における支配的な脅威であることがある。照射室への潜在的に不安全な立入りはこの一例である。

(b) 潜在被ばくが多数の人々に影響を及ぼし、また健康リスクだけでなく他の起こりうる損害（土地が使えなくなる、食品消費を管理する必要がある、など）も含むことがありうるような状況。潜在被ばくの発生に関与するメカニズムは複雑であり、それらの展開によっては非常に異なる最終結果を生じうる。原子炉の重大事故の可能性はその例である。

(c) 潜在被ばくが遠い将来に発生し、その線量がその後長い時間にわたって与えられることがありうるような状況。深地中埋設場における固体廃棄物処分はその例である。

(7) この報告書は、ケース(a)に記述された潜在被ばくのみを扱う。ここに提示されている単純なやり方は、たとえばINSAG(1995)で詳細にわたって扱われた他の2つのケース、とくにケース(b)に適用するとすれば不適當であろう。しかし、この報告書が、原子炉を含むすべての放射線施設におけるタイプ(a)の状況に適用できることを強調すべきである。ケース(c)は*Publication 46* (ICRP(1985))に概要を記した。

## 2. 潜在被ばくのケースにおける放射線防護

(8) 防護手段の計画または判断を目的とした潜在被ばくの評価は、通常以下の項目が基本となっている：(a)その被ばくに至る事象のシーケンスを一般的に表現することを意図したシナリオの構築；(b)これらのシーケンスの各々についての確率の算定；(c)結果として生ずる線量の算定；(d)その線量に伴う損害の評価；(e)結果と、ある受容性の規準との比較；および(f)防護の最適化。これには前のステップを何回か反復することが必要となることがある。項目(e)が放射線防護の中心の話題であるので、この報告書の以下の記述の順序を変え、項目(e)リスクの受容性と拘束から始めることにする。それから、項目(a)シナリオ、(b)標準の方法を使う確率の算定、(d)損害、および(f)最適化、を扱う。項目(c)線量算定はそれぞれの状況にきわめて特有なものであり、したがって、この報告書では詳細に論議しない。

(9) この報告書ではまた、実証された設計の利点および装置の認められていない変更に伴う危険を始め、この体系の適用における種々の特別な問題を論議する。異なる防護目標の間のトレードオフを考察し、予防と影響緩和について論じる。本書では、ある事象の確率が十分に低く、その更なる低減が正当化されないような場合について解析し、単一の故障による重大な影響を回避する手段としての深層防護を概説し、さらにヒューマンエラーのいくつかの側面を示す。患者の医療被ばくと他の被ばくとのであいのいくつかの違いについて言及する。潜在被ばくに対する防護の適用における事業者、管理者および規制者の役割に一章が当てられている。最後に、この報告書は、提示された方法と技術の実際的な適用と、よくあるケースにおいて遭遇するいくつかの典型的な問題と特徴の両方を示す、6つの例について述べる。

### 2.1. 受容性の規準

(10) 委員会の防護体系においては、個人における有害な影響の確率が、通常被ばくの線源の受容性を判断する1つの尺度として使われている。したがって、線量を受ける確率とその線量に伴う害の確率の両方を考慮に入れたリスク限度とリスク拘束値によって、通常被ばくについて規定された限度と拘束値を補うことは合理的と考えられる。この害は、確率的影響（言い換えると、発生する影響の重篤度でなく、発生確率がしきい値のない線量の関数であるような影響）および、線量が十分に高ければ、確定的影響（その重篤度が線量によって変化し、しきい値が存在する影響）を含むことを念頭に置くべきである。

(11) *Publication 64* (ICRP, 1993) において、潜在被ばくに対しては、リスクの限度は

通常被ばくに対する線量限度が意味する健康リスクと同程度であるべきことが勧告された。同様に、潜在被ばくの拘束値は、通常被ばくに対する拘束値に対応するリスクと同じオーダーのリスクを意味するものであってよい。限度と拘束値の両方について同じようなリスクレベルを選択することは、確定的死亡が放射線の寄与による確率的死亡と同じやり方で評価されるという仮定にもとづいている(56項で論議されている一つの仮定)。被ばくの低減化には種々のアプローチがあるので、拘束値のもとでの最適化は通常被ばくおよび潜在被ばくにいろいろな影響を及ぼしうることは明らかである。

(12) 線量限度またはリスク限度は、全ての関連した線源と行為による線量またはリスクに適用される。*Publication 60* (ICRP, 1991)は、リスク限度は防護体系における用い方として出発点となりうるにすぎないと指摘している。実際的な目的に対しては、*Publication 64* (ICRP, 1993)において、またさらに以下で詳細に論議されるように、線源関連のリスク拘束値を定義することがもっと有用である。拘束値の概念は、ある特別な線源に対し、その線源の防護の最適化に使われる制限値を設定することにもとづいている。拘束値は規制上の意味での限度ではなく、規制者と事業者に対して同様に、装置、訓練などに関する仕様を選択するためのガイダンスを提供する、計画上の道具である。その線源による線量またはリスクを減らすことの困難さに依存して、最適化の結果は拘束値を十分下回ることもあり、拘束値にきわめて近くなることもある。最適化の結果は拘束値ではなく、むしろその線源の実際の操業を実施し評価するために使われるレベルである。あるケースにおいては、それらが監督官庁によって認定レベルまたは認定限度を設定するために使われることがある。他のケースでは、最適化の結果は、事業者の用いるガイダンスレベルまたは調査レベルになることがある。潜在被ばくに対する規制上のアプローチのいくつかの側面については、第4章で論じる。

(13) 潜在被ばくの解析における最初のステップは、潜在被ばくに至るかもしれない起回事象の予想頻度を同定し、定量化することである。この解析については、以下の2.2および2.3節でもっと詳細に論じる。ここでは、起回事象による予想された損害を計算し、受容性の規準と比較することが可能な方法について論じる。

(14) 防護システムが要求される頻度すなわちデマンド率は、考察しているシナリオの1つの重要なパラメータである。もう一つのパラメータは、デマンドがあったときシステムの故障(または故障状態にあるシステム)が発見される確率である。これらの相互に関連するパラメータを適当に組み合わせた尺度は、受容性の規準として使用するための通常被ばくによる寄与死亡の基準となるリスク(以下、標準的リスクという)と比較することができる。

(15) 潜在被ばくによるリスクの評価の実例として、露出した線源の存在する照射室に立入りを企てたケースを考察しよう。このケースは、後の例5.1で詳細に解析する。照射室では、その室への立入りが試みられるとき、大線源が照射位置にあるか、または適切に遮蔽(たとえ

ば、深い水プールの中に) されているかのいずれかである。

(16) その状況をモデル化するために、その室への立入り率 (単位時間あたりの立入りの回数) を  $\Theta$  とし、これらの立入りはその線源が遮蔽された位置にあるときにのみ起こるはずであるとする。簡単のため、ここでの理論的な展開は、1 回に 1 名の人だけが毎回その室に入り、個人リスク規準との比較が適切であると仮定する。初等確率理論を用いることによって、ここでその論法を、たとえば 2 人か 3 人が同時に入るといった他の関連シナリオまで拡張することは容易であろう。防護システム (インターロック、視覚による警報等) は、線源が照射位置にあるとき、個人の立入りを防ぐように設計されている。この防護システムは、その線源が照射位置にあるとき、個人が立入りを企てた場合に作動するよう要求される。

(17) このモデルでは、作動の要求があったときの防護システムの故障の確率を  $\rho$  と呼ぶ。'不安全な立入り' が期間  $T$  にわたって起こらない確率は、ポアソン分布の第 1 項によって与えられる、すなわち不安全な立入りゼロの確率  $= e^{-(\Theta \cdot T \cdot \rho)}$ 。期間  $T$  に 1 回以上の不安全立入りがある確率 ( $P$ ) は、ポアソン第 1 項の補数である：

$$P = 1 - e^{-(\Theta \cdot T \cdot \rho)} \quad (1)$$

(18) 通常、指数  $(\Theta \cdot T \cdot \rho)$  は非常に小さく、不安全な状況の確率は、

$$P \approx \Theta \cdot T \cdot \rho \quad (2)$$

で近似することができる。

(19) ここでモデル化した状況においては、不安全な立入りは照射室に入る人につねに線量をもたらすと仮定してよい。被ばくに関係する線源の強さと時間に依存して、生じる線量は確率的影響を起こす範囲か確定的影響を起こす範囲に入るか、または線量が必ず死ぬほど大きくなりうる。この段階で、われわれはエンドポイントとして死亡 (確率的または確定的) をとることに議論を限定しよう。2.5 節では、局所的な確定的損傷も考慮に入れるように議論を拡張する。

(20) 生じている被ばく (より正確には、その線量) の関数としての死亡 (確率的プラス確定的) の確率を  $f(E)$  とするならば、期間  $T$  にわたる潜在被ばくによる死亡の確率は  $P \cdot f(E)$  によって与えられる。Publication 64 (ICRP (1993)) によれば、この積 (潜在被ばくの健康リスク) は、通常被ばくの標準的リスク (ここでは  $R$  とする) と同程度の大きさであるべきである：

$$P \cdot f(E) \leq R \quad (3)$$

この報告書で扱われる状況において、標準的リスク  $R$  は、線源関連の個人リスク拘束値とみなすことができる。

(21) それぞれがある与えられた被ばく  $E_i$  をもたらす 2 つ以上のシステムの故障が起こりうるならば、いろいろな独立の故障モードに対する健康リスクの合計を標準的リスクと比較

しなければならない。したがって、公式の受容性規準は次のようになる：

$$\sum [P \cdot f(E)] \leq R \quad (4)$$

職業被ばくに対しては 23 項で、また公衆被ばくに対しては 80 項で、標準的リスク  $R$  の数値について論じる。2.5 節では、種々の故障モードに対するいろいろな  $f(E)$  値をもつケースの取扱いを論ずる。式(4)に従ったリスク拘束値の適用の実際的な説明は、例 5.1.4 および 5.2.2 に与えられている。

(22) 式(4)の条件は、たとえば *Publication 64* (ICRP (1993)) において、規準の曲線または表を作るために用いられた。そのような曲線および表の作成には、事故シーケンスの見込み数およびそれらのシーケンスに全リスクを均等に配分するといった、更なる条件が含まれる。したがって、式(4)の使用は、ケース特有の曲線あるいは表の使用よりもさらに一般的な定式化である。

(23) われわれが論じているモデルの仮想的な例を解析可能とするためには、標準的リスク  $R$  の数値が必要である。このモデルでは 1 人の従業員が潜在被ばくのリスクにさらされる。したがって、標準リスクの値は、類似した作業で受ける通常の職業被ばくによるリスクに対応する値を選ぶべきである。拘束値は線源関連であるので、標準的リスクの値は、原則として、いろいろな種類の作業の間で異なることがある。しかし、不安全な状況の確率と生じる線量の推定における不確実性を考えると、少くとも規制上の目的に対しては、個々の作業に関するより特定の研究でなく、通常の職業被ばくについて一般化された標準的リスクの値を用いることで十分ながしばしばある。委員会の線量制限（最適化を含む）の体系が適用されているとき、平均的個人の年間の職業線量が多くの場合およそ 5 mSv 以下であったことは、*Publication 26* (ICRP (1977 a)) の中で認められている。おおまかに言って、平均職業線量は 1970 年代と比較して、現在はほとんど半分になっているが、しかしながら、ある種の作業においては 5 mSv 前後の平均線量が今もなお代表的である (UNSCEAR (1993))。この報告書でわれわれは、年間の受容性規準として  $2 \cdot 10^{-4}$  という個人の職業上の標準的リスク  $R$  を導くために、この年間の線量値  $5 \cdot 10^{-3}$  Sv と職業被ばくに対する ICRP のがん死亡リスク係数  $4 \cdot 10^{-2}$  /Sv を用いている。

(24) ここでわれわれは、われわれの仮想的な例を解析し、この受容性規準が防護装置に関する信頼性要件を導くためにどのように用いられるかを示す。この例では、線源強度が、不安全な立入りが不可避免的な死亡（すなわち  $f(E) = 1$ ）を意味するようなものであると仮定しよう。さらに、施設の遮蔽と運転手順が最適化されており、また結果として生ずる通常被ばくによる年間の最大線量がおおよそ 5 mSv/年であると仮定しよう。これは、上で示唆された職業上の標準的リスクの値 ( $R = 2 \cdot 10^{-4}$ ) が確かに適用可能であることを意味する。この例において、その期間  $T$  は 1 年、また  $f(E) = 1$  である。したがって、 $P$  に対する式(2)の近似と  $R$  に対する

数値を式(4)に代入すると、受容性の条件は、

$$\theta \cdot 1 \cdot \rho \cdot 1 \leq 2 \cdot 10^{-4} \quad (1 \text{ 年間に}) \quad (5)$$

である。

(25) この例をさらに展開するために、防護システム( $\theta$ )の作動を要求するデマンドの率が年あたりおよそ200回の立入りであるとしよう。受容性規準に確実に適合するためには、デマンドあたりの防護システムの故障確率( $\rho$ )は、年あたり標準的リスク( $R$ )を1年間のデマンド数で割った値より小さくしなければならない：

$$\rho \leq 2 \cdot 10^{-4} / 200 = 10^{-6} \quad (6)$$

この確率が防護のサブシステムの組み合わせによっていかに達成されるかについて、以下の章で論じる。

### 2.1.1. 改善のための選択枝の受容性

(26) 上で論じた受容性規準を用いるためには、厳しい影響の確率の絶対値を計算しなければならないが、しかし、防護の選択枝を比較するだけならば、解析から有用な洞察を得るためにリスク限度または拘束値が必要とされることはない。防護システムの脆弱性およびそれらの改善の可能性を示すためには、いろいろな選択枝の相対的な比較を用いることができる。ある安全システムの部分的な解析が着手されているとき、これは特にそうである。たとえば、相対的な比較によって、望ましくない結果が生じるかもしれないようないくつかの異なったやり方のうちの一つがもっとずっと高い確率を持ち、したがって安全を改善する手段の第1の焦点であるべきことが示されるかもしれない。同様に、既存施設の改善の場合、意図された改善が真の改善であるかどうかを示すために相対的な評価が用いられることがある。既存の承認されている施設との類似性にもとづいて、新しい施設の受容性を判断するために、これに似たアプローチを用いることができる(*Publication 64: ICRP (1993)* も参照)。

## 2.2. シナリオの同定

(27) 潜在被ばくの解析のための概念的アプローチは、防護システムがある頻度で機能するようなデマンドがあると仮定し、ついでそのシステムがこれらのデマンドに続いて故障するかどうかを決めることである。デマンド率はそのシナリオの重要なパラメータであり、システム故障の(あるいは、要求があったとき、それが故障状態にある)確率は人と装置の両方の故障率の関数である。

(28) 有効な解析には、現実的で完全なシナリオが必要である。したがって、同定されたシナリオは、全ての利用できる情報を考慮すべきである。解析担当者は、潜在被ばくの重要な要因になりうるシナリオのタイプを同定する必要がある。ある場合には、これはいわゆる思考



実験あるいは机上演習を通じてなされることがある。施設または作業の種類によっては、シナリオ同定のためにもっと構造的なアプローチが必要かもしれない。複雑さの増した多種多様なそのような方法が、Cox と Tait (1991) によって概説されており、それらの中には、例 5.2.2 でさらに論じる危険性および実施可能性研究 (hazard and operability study, Hazop) と、本来は装置故障を評価する定性的方法である故障モード影響解析 (failure modes and effects analysis, FMEA) がある。CCPS (1992) には、最初のアイデアと設計から操業を経てデコミッショニングに至るまでの詳細に考察されたある仮想的施設について一連の例を用いて説明された、シナリオの同定と解析のための様々な方法に関する詳細な情報が含まれている。

(29) 各潜在被ばくシナリオに対しては、その起因事象を同定して予想頻度を定量化することが必要である。起因事象には2つの主要なタイプがある：(a) 次の4つの主なカテゴリーに分けられる‘確率的’起因事象、すなわちヒューマンエラー、システム故障、材料損傷およびその施設に影響する外部事象；および(b) 日常的に防護システムの作動を要求することのある‘通常の行動’起因事象。シナリオの展開におけるその後のステップの各々に同じカテゴリーの原因が適用される。

(30) いくつかのシナリオが同定されており、ここでそれらについて言及する。たとえば、固定施設に対しては、一つのシナリオは放射線区域（工業用の照射室、加速器のエンクロージャー等）への不安全な立入りである。もう一つの典型的なシナリオは、遮蔽が不注意に失われたかあるいは取り除かれたという理由、または十分に遮蔽されていない区域に加速器ビームが偶発的に向けられたという理由による、不十分な遮蔽であろう。

(31) 移動式の放射線源に対する典型的なシナリオには、以下のものがある：装置の使用後、適切な位置に戻されなかった線源、紛失あるいは盗まれた線源、輸送事故に巻き込まれた線源。そのようなシナリオはまた、放射性物質が環境にばらまかれるようなところまで展開しうる。これらのタイプのシナリオは、所有権と責任に関する情報の喪失、あるいは線源の所在と特性に関する誤報（線源に対する責任または線源管理の喪失）のような管理上の問題によって悪化しうる。

### 2.3. シナリオの論理構造

(32) すでに知られているコンポーネントやサブコンポーネントの振る舞いから、システムの振る舞いを統計学的に解析するためには、そのコンポーネントの相互依存に関する論理構造を決定しなければならない。論理構造の解析に欠くことのできない考え方は、そのシステム、サブシステムおよびコンポーネントの成功または失敗の概念である。この文脈において、‘成功’はそのシステム、サブシステムまたはコンポーネントが所要の時間で設計目的を達成する適切な性能を意味する。他方、‘失敗’は設計目的が達成されない場合に対応する。あるシステム、

サブシステムまたはコンポーネントは、もう一つのシステム、サブシステムまたはコンポーネントによって要求されるとき、‘成功する’か‘失敗する’ことがある。

(33) そのような論理構造を定量的解析に適するやり方で表わすために、イベントツリーおよびフォールトツリーという2つのモデルが広く使われている。イベントツリーは帰納的解析に使われる。それは起因事象（ある与えられたシステムへのデマンド）に始まり、そのシステムの連続した応答を通して、対応する結果を成功または失敗と記述しながら順次進行する。ツリーを通して進展するにつれて、成功または失敗に確率が割り当てられ、それによって、そのシステムの失敗の全確率の算定が可能になる。

(34) あるシナリオに対してイベントツリーが展開するとき、最初の事象から最終的な影響への論理的な流れは、直列または並列のプロセスあるいはその2つの組合せから成るであろう。同様に、防護の提供を意図したシステムは、直列または並列に配列されたサブシステムの集合としてモデル化できる。これらはまた、2次のオーダー等々のサブシステムから成ることがある。

(35) 複雑なシステムでは数多くの‘起因事象’があることがあり、そのおのおのは別個のイベントツリーによって表現することができる。こうして、これらのイベントツリーの組合せにより、そのシステムの‘安全’の評価が可能になる。

(36) イベントツリーとは対照的に、フォールトツリーは特定の結果（たとえば不安全な立入りを防ぐシステムの故障）から始まり、この望ましくないいわゆる頂上事象がどのように起こりうるかを解析する。そのような頂上事象は、Hazop（例5.2.2参照）のような手法を用いて、しばしば実際のフォールトツリー解析の前に別の解析によって同定される。またフォールトツリーの一般的な構築は、FMEA（28項参照）のような他の予備的解析によって支援することもできる。フォールトツリーは、それらが単一の結果を含み、演繹的解析を通してどんな先行事象がこの結果を生じうるかを示す点において、本質的にイベントツリーの逆である。

(37) 特定のシステムの失敗の確率を解析し定量化するために、イベントツリーとフォールトツリーのいずれかを用いることができる。複雑なケースでは、両方のアプローチを適用することが有用なことがある。単純なシステムに対しては、いずれかのアプローチで十分なはずである。第5章における例は、論理ツリーの使用への実際的な序論を提供するものである。

(38) イベントツリーおよびフォールトツリーの図表示は、通常ある慣習に従っている。イベントツリーでは多くの場合、起因事象と事象シーケンスにおいて、作動が要求される安全機能を一番上に左から右に向かって言葉で書いてある。実際のツリーは、一番上に書かれたこの記述の下に、各安全機能の下で分岐する左から右に向かう線として描かれる。各分岐点で、上向きの枝はトップラインに記述された安全機能の成功を表し、下向きの枝は失敗を表す。このように、イベントツリーは本来バイナリである。（図6および10はこのようなやり方で描か

れたイベントツリーを示す。)

(39) フォールトツリーの図では、頂上事象の簡単な言葉による記述のある枠が一番上に置かれる。頂上事象はプールの論理記号を用いて、中間事象を記述する枠と線によって接続される。これらの記号のうち最も重要なものは、'and' ゲート (半円) と 'or' ゲート (丸められた矢印) である。中間事象は、更なるプールの論理ゲートを通して展開される他の失敗事象の相互作用から生じる。フォールトツリーはイベントツリーとは対照的に多重接続である、すなわち、1つの論理ゲートは3つ以上の下部の事象に接続していることがよくある。ツリーの一番下にある枠と円の中には、更なる展開を必要としない基礎的な事象 (たとえば単純なコンポーネントの故障) に関する記述が入る。ツリーが2ページ以上にわたる場合には、乗り継ぎ点を表すのに三角形を用いる。(図1, 3, 4, 8および13は、このようなやり方で描かれたフォールトツリーを示す。)

(40) 設計目的に従う作動の失敗はデマンド失敗と呼ばれ、デマンドがあったときの失敗の条件付き確率は  $\rho$  で表示される (17項参照)。通常、調べられているシステムは、デマンドの数に依存しない固有の失敗率を持つが、高率のデマンドがそのシステムに疲労を引き起こすことも考えられるので、デマンド失敗の確率が時間とともに増加することがありうる。これは保守活動で補われることがあり、そのため比較的平滑なデマンド失敗率を仮定することができる可能性がある。

(41) 論理構造をもつ事象のシナリオ (システム、人および機械の一連の動作など) をモデル化することで、信頼性あるいは失敗の確率の算定は容易になる。サブシナリオ、サブシステムなどの決定とそれらの失敗の確率の計算により、論理構造のより複雑な領域の一部としてそのような結果を導入することができる。この手順を用いて、そのサブシステムのコンポーネントの集合体を単一のコンポーネントであるかのように、推定された単一の失敗確率で置き換えることによって、複雑なイベントツリーまたはフォールトツリーに関する計算を単純化することができる。

(42) 論理構造がその同定された部分を用いてイベントツリーまたはフォールトツリーとして表されるならば、構造全体の失敗を引き起こすような部分失敗 (カットと呼ばれる) のいろいろな組合せを特定することが可能である。このような組合せをカットセットと呼ぶ。カットセットは、そのカットセットにおける基本事象 (個別のコンポーネント故障) のどれかを除外することでその構造の失敗が防がれるとき、最小カットセットであると言われる。ある与えられた構造に対して、1つより多くの最小カットセットを同定することが、通常可能である。原則として、最小カットセットの概念はイベントツリーとフォールトツリーの両方に適用される。以下の数項における記述は、主にフォールトツリーを念頭において書かれている。

(43) 事象シーケンスが同定されフォールトツリーに表されたとき、結果として生ずる失

敗の確率を計算することが可能である。多くのコンポーネント，起こりうる共通原因故障などを含む複雑なケースにおいては，そのような計算にはかなりの労力を要し，また莫大な量の文献がこの話題について存在する。入門のためには，たとえば Barlow ら (1975)，Vesely ら (1981)，IEEE (1983)，Cox と Tait (1991)，CCPS (1992)，IAEA(1992 a)，Kletz (1992) と Procaccia (1995) を参照されたい。本書は独立の故障事象の単純なケースにおける手順の概要のみを記述する (Grosh (1989) も参照)。そのようなケースにおいては：

- (a) 防護システムの故障に至る独立の故障の最小限の組合せを同定すべきである (最小カットセット)。
- (b) 次に，独立事象の1つの最小カットセットによる，システムの故障確率は，そのカットセットにおける事象の故障確率の積として計算される。フォールトツリーにおいては，最小カットセットを構成する事象は，‘and’ゲートによって連結されている。
- (c) 最小カットセット ( $j, k, l, \dots$ ) の任意の組合せによるそのシステムの故障確率 ( $\rho$ ) は，単一の最小カットセットの故障確率 ( $\rho_j, \rho_k, \rho_l, \dots$ ) から，各最小カットセットの故障確率の補数の，すべての最小カットセットにわたる積の補数として得られる。これは，以下の式によって表される：

$$\rho = 1 - (1 - \rho_j)(1 - \rho_k)(1 - \rho_l) \quad (7)$$

式(7)において， $\rho_j, \dots$  の値が全て  $\ll 1$  であるとき， $\rho$  は近似的に  $\rho_j, \dots$  の合計と等しい。フォールトツリーにおいては，全ての最小カットセットの組合せは ‘or’ ゲートによって頂上事象と結ばれる。

(44) 最小カットセットと最小でないカットセットの違いを説明するために，以下の例を示す。この例では，図1に示す2個の独立のセンサと1個のアクチュエータを持つ非常に単純なインターロックシステムの故障確率を，次のように計算することができる：

起こりうる故障の完全なセットは次のとおりである

- (a) センサ1が故障する
- (b) センサ2が故障する
- (c) アクチュエータが故障する
- (d) センサ1と2が故障する
- (e) センサ1とアクチュエータが故障する
- (f) センサ2とアクチュエータが故障する
- (g) センサ1と2およびアクチュエータが故障する

上記のうち，(a)と(b)はシステム故障をもたらさず，したがってカットセットではない。また(e)，(f)および(g)は，システム故障をもたらすが，システム故障を引き起こすためにはアクチュエータが故障すれば十分であるという理由で，実際には二重である。したがって，42

項で与えられた定義により、これらは最小カットセットではなく、解析に関連しない。このように、それらの確率の算入は、システム故障の不適当な推定の原因となりうる。このことから、カットセット(c)と(d)が最小カットセットとして残る。

(45) ここで、われわれは全システムの故障確率を計算することができる。センサ1の故障確率を  $\rho_1$ 、センサ2の故障確率を  $\rho_2$ 、およびアクチュエータの故障確率を  $\rho_3$  と仮定しよう。初期の事象のこれらの確率が与えられたとき、最小カットセット(c)の故障確率は

$$\rho_k = \rho_3 \tag{8}$$

である。さらに、最小カットセット(d)の故障確率は次のようになる

$$\rho_j = \rho_1 \rho_2 \tag{9}$$

それで、式(7)により、そのシステムの故障確率は

$$\rho = 1 - (1 - \rho_1 \rho_2)(1 - \rho_3) \tag{10}$$

となる。

(46) 上で与えられた単純な例に対するフォールトツリーを図1に示す。明らかに、このシステムは非常に単純である。複雑なケースに対しては、事象の数千もの組合せがありうる。それゆえ、最小カットセットの同定は非常に困難になり、コンピュータ処理を必要とすることがある。フォールトツリーまたはイベントツリーの定量的解析に対する多くのソフトウェアプログラムが市販されている。いくつかの例が、中位の複雑さのフォールトツリーにおける最小カットセットの手計算による同定のためのいくつかの有用なルールとともに、CCPS (1992) によって言及されている。

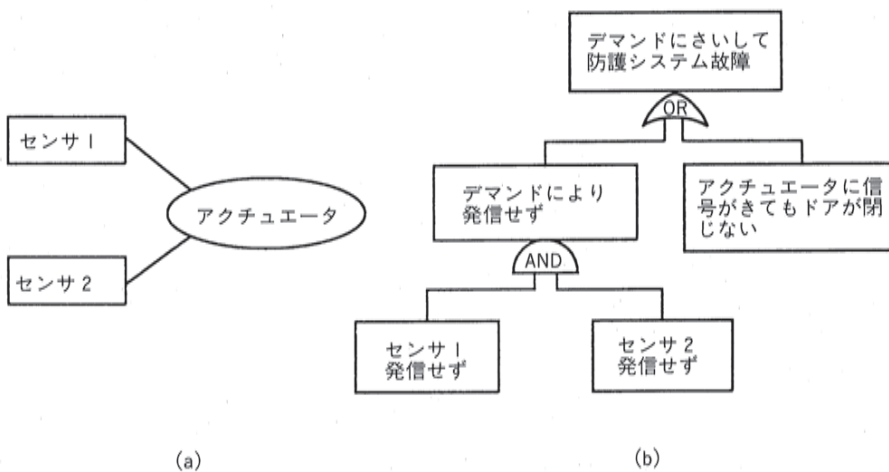


図1 照射室に通じるアクセスドアを制御するセンサとアクチュエータ。センサ1は放射線レベルをモニタし、センサ2は放射線源の位置をモニタし、また、アクチュエータはアクセスドアをブロックする。(a)その装置自体の様式化された表現；(b)フォールトツリー。

(47) 共通原因故障は、冗長性の喪失をもたらすことで事態を複雑にする可能性がある。この例においては、これはたとえば共通の電源の故障に起因するセンサ1および2の共通原因故障でありうる。共通原因故障を同定するさいの困難は、そのシステムのコンポーネント数とともに急速に増加する。また、共通モードの影響から生じる独立性の欠如も、フォールトツリーの定量的解析を複雑にしうる。複雑なシステムにおける依存関係を扱うことができるコンピュータ解析は、特にそのような場合に有用である。

#### 2.4. システムおよびコンポーネントの信頼性と確率の割当て

(48) 一般に、システムデマンドの頻度とシステム故障の確率は、人の信頼性解析、コンポーネントの故障率、運転上の経験、専門家の判断、根本原因分析およびデータベースのような他の情報源を用いて推定されよう。

(49) 論理構造（イベントツリーまたはフォールトツリー）におけるそれぞれ同定された事象に対する確率または予想頻度の割当ては、十分な運転経験があるようなシステムからの既存のデータから導かれるか、または類似したシステムの他のタイプについて利用できるしばしばかなりの量の公表データセットから推定される情報に基づいている。Cox と Tait (1991) および Procaccia (1995) は、そのような多くのデータ源についての文献を表にしており、またヒューマンエラーの頻度の例は Swain と Guttman (1983) によって表にされている。それとも、推定値は、そのシステムの運転に関する専門家の意見によって補われた、入手できる限られたデータに基づく必要があるかもしれない。既存のデータに基づいた値と専門家の意見に基づいた値との間の整合性と一貫性を確保するために注意を払わなければならない。

(50) 電子部品に関する信頼性のデータは、文献といくつかのデータバンクで見つけることができる。通常、故障率は「乳児死亡率」といわれる比較的短期間以降は長期間にわたって一定である。製造された部品について指定されるある年数以降、故障率は増加し、ついで、その部品は実用性を失う (Cox と Tait (1991))。高経年化により故障率が有意に増加する前に、予防保全として部品は交換される。保守が予定通りに実行される場合、故障率は一定であるとみなしてよい。保守は本来過誤を含み、したがって、故障の原因になりうることを考慮に入れるべきである。

(51) 機械部品とシステムの信頼性の算定はもっと複雑である。それには、故障メカニズムについての知識と、応力と変形の条件の明細、疲労、保守および試験結果の明細が必要である。通常、専門家の判断が必要である。

(52) デマンドがあったとき人が適切に行動しない怠慢は、その人を論理構造解析における防護システムの一つのコンポーネントとして導入することにより扱うことができる。しかし、人の失敗に確率を割り当てることは、常に相当不確かな性質のものであり、状況に強く依存す

る。この報告書で論じるシナリオについては、ヒューマンエラーは不履行(omission)または遂行上の過誤(commission)のいずれも、しばしば潜在被ばくの確率の最も重要な要因である。ヒューマンエラーのいくつかの特性は3.6節に論じられている。あいにく、人間が過誤を起こす率は、論理的で一貫したやり方で定量化することが最も困難なものの中にある。ヒューマンエラーの定量化には、たとえば、過誤の発生のための状況を与えるような、作業場所のレイアウト、照明のレベル、騒音の量と注意の散漫、仕事に伴うストレスの程度、以前の訓練などといった行動形成因子の同定が含まれる。デマンドあたり $10^{-3}$ という数字は、多くの複雑な状況におけるヒューマンエラー率に対する合理的な選択であるように思われるが、それは、上で言及した行動形成因子にもよるが、デマンドあたり $10^{-2}$ 以上になりうる。ある与えられた過誤が最初の機会に運の悪い結果をもたらさなかったならば、ヒューマンエラーが繰り返し起こる確率が増加することも考えられる。

## 2.5. 潜在被ばくのリスクと影響

(53) 潜在被ばくの意味するリスクと全体的なリスク規準とのある種の比較を行う目的のためには、そのイベントツリーのエンドポイントの結果としての放射線の害を算定しなければならない。これには各被ばく状況(シナリオ)に対する確率と個人線量の推定が含まれ、そうすることで全ての関連したタイプの害が考察される。

(54) 1991年より前のICRP刊行物において、委員会は死亡または非常に重大な疾病の確率に対する同義語としてリスクを用いていた。*Publication 60* (ICRP (1991))では、リスクは、これらの事象の影響の大きさに加え、特定された諸事象の確率のセットを含むもっと広い概念であることが認められた。本書では、リスクはこのより広い、より特定のでない意味に用いられている。個人またはその子孫に発現する有害な効果を表すために、委員会は害という用語を用いる。健康損害(以下、損害という)は、害の確率、その重篤度および発現の時期を組み合わせた複雑な多次元の概念である。

### 2.5.1. 潜在被ばくの算定における損害

(55) 原則として、損害は影響の重篤度を表す係数で荷重された、放射線誘発健康影響の症例の期待数を表す。*Publication 60* (ICRP (1991))で、実効線量に対する組織荷重係数を定義するさい、委員会は、それぞれ重篤度、死亡率および失われたかまたは損なわれた寿命の相対的時間について適切に荷重された、寄与致死がん、寄与非致死がんおよび重篤な遺伝的影響の確率を含む、損害という総合的表現を採用した。その表現は、確率的影響だけが関連する被ばく状況にあてはまる。しかし、潜在被ばくに対しては、確定的影響と確率的影響の両方を考慮に入れることが重要である。

### 確定的影響による早期死亡

(56) 高い全身線量では、確定的影響による被ばく直後の死亡は、生涯のもっと遅い時期に起こる確率的影響による放射線誘発がん死亡に伴うものより、もっと大きな寿命の損失をもたらす可能性がある。確定的影響によって引き起こされた死亡に、おそらく線量が高いほど次第に高く荷重することで確率的影響の死亡より高い荷重をするか、この2つのタイプの死亡に等しい荷重をするかについては議論がある (IAEA, 1990 a と ICRP (1993) を参照)。しかし、この報告書の目的には、早期死亡に追加の荷重をすることを提案しない。それで、潜在被ばくによる死亡の全確率を計算するには、21 項に示された表記法を用いて  $f(E) < 1$  である確率的影響だけを引き起こす線量範囲における実効線量から計算される健康損害に、 $f(E) = 1$  である確定的影響による死亡確率を単に加えればよい。

### 高線量と高線量率

(57) さらに、高線量と高線量率では、通常被ばく状況で用いられる名目確率係数は、損害の計算に対して不適当なことがある。*Publication 60* (ICRP (1991)) には、潜在被ばく者の状況における有害影響の条件つき確率は、線量を実際に受けた場合、名目確率より高くなるかもしれないことが指摘されている。委員会は DDREF として 2 を用いており、これは、約 0.2 Gy を超える線量と約  $0.1 \text{ Gy h}^{-1}$  を超える線量率においては、この係数を考慮して、*Publication 60* に与えられた名目確率係数に 2 を乗じなければならないであろう、ということの意味している。潜在被ばくから生じる線量が 0.2 Gy を超えそうならば、線量がなお十分低くて確定的影響が相変わらずまれであっても、そのような補正は重要であろう。

### 局所的な確定的影響

(58) 委員会は、重篤な熱傷や指の損失のような身体の部分被ばくによる局所的な確定的影響を考慮に入れるためのいかなる定量的方法も、以前には論議しなかった。*Publication 27* (ICRP (1977 b)) では、それらは現在の線量限度の範囲内での被ばくからはほとんど生じそうにないという議論から、害の指標の展開に明白には考慮されなかった。しかし、そのような影響は、潜在被ばくによる害の重要な側面である。いくつかの作業においてある種の装置を用いる場合、ほとんどすべての事故シナリオは、身体の小さい部分だけの被ばくをもたらすようである。そのような場合には、局所的な確定的影響を考慮に入れる適当な方法が不可欠である。そのような影響は、*Publication 60* (ICRP (1991)) での議論に合わせて、重篤度について荷重すべきである (IAEA (1990 a) も参照)。たとえば健康保険産業の経験を利用して、これを行ういろいろなやり方が考えられる。多くの国では、職業的傷害に対して、個人の健康保険のほ



かにも様々な他の補償体制がある。過度に複雑でなく、また推定された事象確率と結果として生ずる線量に固有の不確実性と比較してあまりに精密にならないような方法を選ぶことが重要であろう。

(59) 表1に、健康保険会社、職業安全保健当局および雇用主協会によって身体の部分または機能の喪失に対する補償を計算するのに用いられた荷重係数のいくつかの例を示す。支払われた実際の金額は国と状況でかなり変わるが、害のいろいろなタイプの相対的な重みづけは比較的整合性がとれているように思われる。保険による補償、他の補償体制、および結果として起こりうる局所的な害にもとづいて、委員会はいま、起こりうる被ばくシナリオを考えて必要とされる時、確定的放射線影響による身体部分の一般的な損失を表すのに0.25という荷重係数 ( $w_{\text{local harm}}$ ) を用いることができるのではないかと提案する。この一般的な荷重係数は、実際に起こった身体部分の損失の重篤度を合理的に代表するものとして、通常認識されるであろう。何かほかの荷重係数を用いるには、その算定をしているグループによって正当化される必要がある。

表1 いくつかの国々におけるいろいろな公文書の付則による、手足等の損失に対する補償の例。課題グループ・メンバーからの私信（個人保険とドイツの同業者傷害保険組合の補償）とデンマーク職業傷害委員会（Arbejdsskadestyrelsen（1996））から得られたデータ

傷害のタイプ	アルゼンチン 個人保険 (%)	カナダ 個人保険 (%)	デンマーク 補償体系 (%)	ドイツ 補償体系 (%)	スウェーデン 個人保険 (%)	英国 個人保険 (%)	米国 個人保険 (%)
死亡、完全廃疾	100	100	100	100	100	100	100
損失：							
両眼	100	100	100	100	100	100	100
一眼	40	67	20	30	20	100	50
下顎	50	—	>8	30	—	30	—
一手の手指全部	48-60	67	50-55	50	53	—	50
一手の母指	14-18	両方で =33	25	10-20	25	20-25	20-30
一手の示指	11-14		10	10-20	10	15-20	-20
その他の手指	6-9	—	8-10	10-15	—	6-10	-20
下腕	—	67-75	60-55	60-70	60	—	50
上腕	52-65	75	65-70	70-80	70	—	—
肩	20-30	—	35	—	—	15-20	—
下肢	—	67-75	30-40	40	25	—	50
上肢	55	75	65	70	40	—	—

(60) このように、エンドポイントを評価するときに考慮すべき害のタイプには、全身被ばくの確定的影響による死亡、がん死亡、非致死性がんまたは身体の全部もしくは一部の被ばくの確率的影響による重大な遺伝的害、および重篤な局所的害が含まれる。全ての失敗モードの各々(i)について、急性死亡以外の他の影響(j)に対する総合された損害  $\sum_j P \cdot f_j(E)$  は、

実効線量および *Publication 60* の適切な名目損害確率係数  $P_{\text{nonlethal dose}} \cdot f_j(E)$  (ICRP (1991)) と、一般的荷重係数を乗じた局所的害の確率  $P_{\text{local high dose}} \cdot f_j(E) \cdot w_{\text{local harm}}$  の和を用いて、確率的影響による損害により近似されるであろう。高い局所線量が生じれば  $f(E) = 1$  であり、またここで提案するように  $w_{\text{local harm}} = 0.25$  なので、数値的には、後の項は  $0.25 P_{\text{local high dose}}$  に等しい。

(61) しかし、多くのケースにおいて、生じている線量の推定だけでなくシナリオ確率の推定も、結果としての絶対リスクの値をやや漠然としたものにするような相当な不確実性を免れない。これらのケースにおいて、いろいろな事象シーケンスによって提起された相対リスクの比較はそれでもなお有用なことがある。そのような解析は、追加の防護手段または影響緩和システムが必要になるような領域に関して、解析者に重要な情報を提供することがありうる。

## 2.6. 防護の最適化

(62) 放射線防護の最適化のための方法は、単純な常識から複雑な定量的手法にまでわたっている (*Publication 37* と *55*; ICRP (1983; 1989) を参照)。特に確率が低く影響が大きいときの潜在被ばくに対する防護の最適化は、現在もおおむね未解決である (NEA/OECD (1995))。この報告書は通常被ばくと潜在被ばくからのリスクを概念的に同等と考えているけれども、両方のタイプの被ばくに対する防護を同時に型どおり最適化することは困難であろう。しかし、潜在被ばくに対する防護装置の使用には、ここで概説されるように、すでに最適化の要素が含まれている。また、この報告書で用いられている標準的リスクは、職業人の線量限度での線量に伴うリスクでなく、最適化された作業における最も高い職業線量に伴うリスクに対応する。それでもなお、潜在被ばくに対する最適の防護は、通常被ばくに対する最適の防護と同じレベルのリスクで必ずしも達成されるというわけではない。これは、通常被ばくと潜在被ばくからのリスクを減らす費用が非常に異なっていることがあるからである。

(63) これらの理由で、この報告書は、通常被ばくに対する防護の最適化手順を勧告し、ついで、その結果生じる通常リスクを、潜在被ばくに対する防護を評価するための標準的値として用いる。もし更なる防護手段が有効であり、容易に実行され、かつ合理的な費用に思われるならば、それらを含めることによって生じる防護を常識的な最適化の観点から検討することは、勧められてよい。さらに、この報告書で論じる潜在被ばくは、通常一つの好ましくない事象が1人かせいぜい2、3の人に損害を引き起こすようなものである。このことによって、防護の最適化に対する定量的算定手順の適用が単純化されることがある。単一の死亡が算定の唯一の結果とみなされるならば、事象あたりの損害は一定であり、防護の選択肢は微分費用－便益分析や多属性分析のような定量的方法によって比較することができよう。

(64) 放射線防護の最適化は基本的に、問題の同定および防護選択肢の比較と選択への組

織的に組み上げられたアプローチを用いて、防護に投入された資源のバランスをとることに關する思考の枠組みである。この思考の枠組みは、設計および建設のレベルと毎日の作業方法のレベルの両方で適用される。最適化の手順においては、費用－便益分析のような型どおりの定量的方法は単なる道具であり、それはしばしば適切で有用であるが、いつもそうであるというわけではない。実際には、経験を単独にあるいは数学的解析と組み合わせて、あまり形式的でない最適化に対して用いることができる。堅実な工学的原則の使用は、最適化における防護選択肢の定性的比較に対してとくに適切なことがある。そのような最適化のいくつかの側面は、IAEA (1990 a) によって論じられている。照射装置のような施設に対する現在適切な安全手段の多くは、そのような経験にもとづいた改善の直接の結果である（第5章参照）。

(65) 事象が2つ以上の影響(すなわち、1人あるいは2、3人を超える人数が害を被り、おそらくまた、個人健康損害以外の放射線影響、たとえば地表汚染、がある)を生じるとき、問題は多少もっと複雑になる。その場合、ある事象が実際に起こったときに結果が期待値と非常に異なるかどうか依存して、影響の数学的期待値は有用かもしれないし有用でないかもしれないような値になる。そのようなケースは、微分費用－便益分析によって容易に定量的解析を行うことができないであろう。しかし、この報告書に述べられる潜在被ばくのタイプに対しては、そのような状況はありそうにない。

### 3. 適用における特別な問題

#### 3.1. 実証された設計と変更

(66) *Publication 64* (ICRP (1993)) に示されるように、基本的な放射線防護原則に加えて、放射線源の設計、建設および操業は、安全を改善する研究と工夫の必要性を条件として、試験と経験によって実証された健全な工学的原則と慣行にもとづくべきである (IAEA, 1996 a も参照)。これらの原則は、承認された規定と基準に反映され適切に記録された文書の形にされる。

(67) 実証された設計とシステムは一般に高いレベルの防護を与えるが、検知されたことのない危険に直面すると、進歩と発展のない安全レベルの不利をさらけ出すことがある。したがって、ある防護システムの生涯において3つの状況を区別することが有用であろう：

- (a) 最初の設計、建設、および十分確立されたラインに沿った操業；
- (b) 確立した規定に従う計画された成果または方法の展開；
- (c) オペレータにより現場で実行された変更。

(68) これらの中で、第1の状況は、予想された危険（‘容認された’リスク）のためおよび未知の危険のゆえに、潜在被ばくをもたらすことがあるが、そこでは、それらの大きさは、どんな確立された設計あるいは方法に対しても小さいことが期待される。

(69) 第2の状況は、一般に、既存の実証されたシステムの改善を意味するが、予見されなかったリスクが加わることがある。これらの改善が、原則として、新しい展開によって触れられることのない既存システムの他の部分にいかなるマイナスの影響も持たないように、とくに注意が払われなければならない。その設計または方法が導入される前に、承認された指針と基準に従う厳密な理論的解析と実際的な試験を行うことが、未知の危険を減らすために期待される。

(70) 第3の状況すなわち既存システムの現場における変更は、非常に大きい潜在被ばくのリスクを引き起こすことがあり、最大の注意をもって注視しなければならない。それにもかかわらず、そのような変更はときには不可避である。たとえば、与えられた状況において装置の一つをその要求された機能を実行するために改造しなければならないかもしれないし、またある方法を特定の状況にあるいはさらに個々のオペレータのために適合させなければならないかもしれない。

(71) ほとんど全てのケースにおいて、オペレータによる現場での変更は、ヒューマンエ

ラーを高い確率で起こしやすい。したがって、現場変更が避けられるかぎり、それらをできるだけ制限しなければならない。とくに、装置または方法をほんのわずかに変更したり、いじくったりすると、人の健康と意図された作業に予想外の危険を含むかもしれないこと(後の事実は、ある作業者に彼ら自身の健康のどんな脅威よりももっと強い印象を与えることがある)を全ての職員に印象づけるべきである。即時の行動が状況の悪化を防ぐために必要な緊急の状況を除いて、状況の徹底的な安全評価が実行され、提案された変更と評価が明確に実証されるまでは、いかなる変更も実行すべきでない。緊急な事故状況において不可避な場合を除き、同一人が変更を提案し、評価し、実行すべきでない。

### 3.2. トレードオフ

(72) 特定のタイプの被ばくを減らすためにとられた処置が、もう一つのタイプの被ばくの増加をもたらすことがときどきある。一例として、コンポーネントが誤動作または故障を起こす前に欠陥を見つけるため、数多くの点検が定期的に実行される。たとえば放射線場が通常存在するような(放射性核種を作っている加速器または研究室といった)区域における点検頻度の増加は、不調の早期発見率を向上させ、したがって機器故障後の事故による潜在被ばくの確率を減少させることがあろう。しかし、高い点検頻度はまた、職業的線量の増加を引き起こす。このように、実際の被ばくと潜在被ばくの間にはトレードオフがある。放射性同位元素の商業的製造用加速器に係わる例5.2.2で、このタイプのトレードオフを論ずる。この場合、最適化過程の間で実際の被ばくと潜在被ばくを比較するとき、被ばくの2つのタイプによる予想される損害は等しく荷重されるべきであることに留意する必要がある。

(73) 他のタイプのトレードオフについても考察しなければならない。たとえば、ある施設の点検中の実際の被ばくはすべて職業被ばくであるが、一方ある種の潜在被ばくは事故によるため、公衆に影響を及ぼすことがありうる。たとえば、放射性線源の紛失の後にこれが起こりうる。さらに、ある種の潜在被ばくは将来にのみ起こるのであろう。このように、被ばくタイプの間には実際の被ばく対潜在被ばく、職業被ばく対公衆被ばく、および現在の被ばく対将来の被ばくといったいろいろな範囲のトレードオフがある。これらのトレードオフを考察し、社会的および経済的因子を考慮に入れて適切な決定を下すことは、事業者と放射線防護当局の責任であろう。

### 3.3. 予防と影響緩和

(74) 潜在被ばくの重要な点は、被ばくをもたらすかもしれないような起こりうるシナリオまたはシーケンスの予測的解析である。それゆえ、この努力の焦点は、工学的手段の改善または追加のいずれかもしくは手続的要件の設定を通じて、望ましくないシナリオまたはシー

ケンスを予防することにある。潜在被ばくの解析は、明確に影響を緩和するのに有効な手段がとられることをはっきりと認めながら、事象の発生を防ぐことに焦点が置かれる。

(75) いったん事象が起これば、状況は変わる。このケースでは制御システムは損なわれており、緩和手段が有効に働かない限り、個人の被ばくは起こりうる。個人が被ばくしているならば、*Publication 60* (ICRP (1991)) に述べられているように、状況は介入としての処理を必要とする。

(76) 影響緩和という用語は、ある事象が起こったときに、被ばくの低減を目指す行動または活動の一般的な状況の中でしばしば用いられてきた。この一般的な状況において、ある種の影響緩和は介入を含むと考えることができるかもしれない。しかし、この用語をもっと特定の用いるときには、緩和手段は、ある事象が起こったときに被ばくを防ぐために機能するあらかじめ計画された活動または装置を含むとみなすことができ、したがって防護システムの一部として考えられるかもしれない。ラジオグラフィ線源が照射容器の外に存在するかどうかを決定するための放射線サーベイの実施は、そのような活動の一例である。このケースでは、事象は線源の脱落（おそらく、紛失の原因となる）である。サーベイが有効であるならば、線源の存在は発見され、線源は回収されて、被ばくは実際に起こらない。そのような防護システムが部分的にしかあるいは全く機能しないならば、被ばくが起こるかもしれず、被ばくを防ぐか減らすための更なる行動を介入の形で考えなければならない。

(77) 放射線源の使用者は、広範囲にわたる起こりうる事象を扱う用意があるべきである。緊急時の状況において適切な介入措置をとることができ、また実際にとられることを確実にするため、緊急時計画を準備し、当局および介入組織と調整しなければならない (IAEA (1996 a) も参照)。とくに、緊急時計画は、想定された事故と、詳細には同定されなかった起こりうる事象シーケンスに対する、合理的な余裕の両方を包括する十分保守的な施設または操業の安全解析にできる限りもとづくべきである。

(78) 緊急時計画の基礎をなしている安全解析において、上に述べたように、被ばくを防ぐために機能するあらかじめ計画された活動または装置は、安全システムの一部と考えることができるかもしれない。被ばくを引き起こすことがあるような好ましくない事象がすでに起こったときには、線量の回避を目指す介入活動が実行されるので、介入活動は緊急時計画の一部であるべきであり、通常は安全システムの一部と見なすべきでない。システムの脆弱性を同定するために解析を実施するとき、すなわちいろいろな防護選択肢の間で相対比較をするときには、任意の与えられた事象に至る種々のシナリオまたはシーケンスの相対的重要性の決定は、事象が起こった場合の介入の可能性に影響されないという理由で、介入措置に対する関心は減る。

## 3.4. 低い確率の事象と公衆の被ばく

(79) 潜在被ばくの評価において、それ以下では更なる解析が正当化されないような事象の確率のレベルを同定することは、実際的な理由から重要である。潜在被ばくは通常被ばくに起因するリスクを上回るリスクを引き起こすべきでない、という委員会の勧告を用いることによって、この問題を正しく位置づけることができる。*Publication 64* (ICRP (1993)) では、この勧告は、リスクと線量限度に関してだけ明白にされていた。この文書の2.1節では、この勧告をリスクと線量拘束値（ここで論じられている限られた事故に関して）まで拡張している。この勧告は、免除レベルにまでさらに拡張することができる。この勧告は、職業被ばくと公衆被ばくの両方に適用されるべきである。公衆被ばくは、不運な健康影響についてもっと低い確率が要求されるという点でより制限的である。それゆえまた、公衆に関して取るに足らないとみなされる被ばくの確率は、職業的ケースにおいては自動的に取るに足らないとみなされる。したがって、以下の項においては、われわれは議論を公衆被ばくのケースに限ることにする。

(80) 核施設からの通常放出による‘決定グループ’の個々のメンバーへの線量の最適化によって、これらの線量はしばしば1年間で約0.01 mSv以下になる。最適化の結果はまた、0.1 mSv/年のオーダー以下に拘束されることがよくある。このように、20項で定義された公衆被ばくに適用される標準的リスク  $R$  は、線量拘束値  $10^{-4}$  Sv に、公衆被ばくに対するICRPのがん死亡リスク係数  $5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$  を乗じたもの、すなわち  $5 \cdot 10^{-6}$  となろう。

(81) IAEA (1996 a) の勧告によれば、行為またはある行為の範囲内の線源は、公衆のいかなる構成員への実効線量も  $10 \mu\text{Sv}$  のオーダーかそれ以下であり、また1年の行為の実行によって預託される集団線量がおよそ  $1 \text{ man Sv}$  より小さいという条件で、更なる考慮なしで免除してよい。この文書の中で論じられている限られたタイプの事故は、一度に1人か2、3人に影響を及ぼすことがありうるだけである。したがって、IAEA (1996 a) によって用いられた、免除に対する集団線量の規準に対応した特定の制限は、ここで必要とは思われない。最適化の後に得られる‘決定グループ’の個々の構成員への線量は、 $10^{-5} \text{ Sv} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$  すなわち年あたり  $5 \cdot 10^{-7}$  より低いがん死亡の寄与確率が、いかなる更なる防護努力も正当化しないであろうことを意味する。この取るに足らないリスク値もまた、公衆の個々の構成員に対する線量に関するIAEA (1996 a) の免除レベルに正確に対応する。

(82) 潜在被ばくに対しては、リスクは原因となる事象の確率的性質と、事象から生じる線量に依存する。いくつかの事故シナリオ (i) が起こりうるとされる場合、前項で  $R$  に対して導かれた取るに足らないリスク値を代入して21項における式(4)を用いて受容条件が満たされるならば、そのリスクは取るに足らないとみなされよう、すなわち、

$$\sum_i [P_i \cdot f(E_i)] \leq 5 \cdot 10^{-7} \quad (11)$$

上式を用いる簡便なやり方は、各シナリオからのリスクの寄与が等しいと仮定することである。たとえば、起こりうるシナリオの数が5の程度であると仮定し、全てのシナリオのうち‘最悪の’（最も限定的な）ケースは同じ確率であると仮定するならば、各シナリオに対する受容性の条件は、

$$P \leq (10^{-7})/f(E) \quad (12)$$

になる。

(83) 前に言及したように、 $f(E)$ は生じた線量の関数であり、この線量が大きければ $f(E)$ の数値は1に近づくが、1を超えることは決してない。したがって、たとえ結果として生じた線量が非常に大きいとしても、 $10^{-7}$ またはそれ以下のオーダーの事象の年間確率( $P$ )は容認できるであろう。このように、通常操業における防護の努力との一貫性を仮定するならば、 $10^{-7}$ より低い事故シナリオの年間確率は、いかなる更なる低減あるいは解析の努力をも正当化しないであろう。この結論は、それぞれの不運な事象が1人か2、3人の人々に影響しうるだけであり、またどの個人もいろいろな線源からの潜在被ばくのリスクに同時にさらされそうもないような、この文書で考察されている限られたタイプの事故に対してのみ、もちろん妥当である。

### 3.5. 深層防護

(84) 深層防護は放射線安全の重要な原則である。この方法では、線源によって生じるリスクと見合う多重化された安全設備の連続した層（構築物、コンポーネント、システム、手順またはこれらの組合せ）が、一つのシステムに課される。一般に、おのおのの連続した防護層の故障確率は相乗的なので、独立した防護層を組み合わせることによって低い全故障確率が達成される。安全優先シーケンスにおけるように、人の行動に対する信頼より技術的な防護層のほうが、通常よいとされており、これは次のように順位づけられている：(1)危険を最小限にするための設計、(2)安全装置（たとえばインターロック）による危険の低減、(3)安全警報装置（たとえば放射線警報）、(4)作業者のための手順と訓練、および(5)管理を審査するための、残された危険の同定。深層防護の原則の実際的な適用には、同じ防護層の複数のコピーまたはバージョンを並列に利用する冗長性と、ある特定の問題に対して防護の代替モードが利用できる多様性がある。解析を実施するさい、同じ防護層または異なった防護層における、共通モード故障によって効力がなくなる安全設備を同定することに注意を払うべきである。

(85) 深層防護の原則は十分に確立されており、小さい放射線源にも大きい線源にも等しく有効である。例として、移動式の工業用 $\gamma$ 線ラジオグラフィを考察しよう。作業の後、線源は事故被ばくに対して内側の防護層を提供するケーブルによって、その遮蔽容器中に引きこまれるよう設計されている。線源の収納が失敗したか成功したかは、通常、位置表示器（次の防護層）によって示される。あるケースでは、装置は2つの独立の線源位置表示器を持つことが



あり、このステップで冗長性が追加される。

(86) たとえ線源の収納失敗の表示がなくても、オペレータは線源が正しく納められたことを確かめるために、手順に従い、モニターで作業区域を点検するべきであり、また、多様性を提供する音響による警報付きの線量計を着用するべきである。このステップは、人の介入とよい判断が安全システムの不可欠な部分であるという原則の例証である。もし線源が正しく収納されなかったことを位置表示器またはエリアモニタリングのいずれかが示しているならば、オペレータは、線源が回収されるまで一時的にこの区域を柵などで仕切っておかなければならず、これは更なる防護層となる。

(87) この例では、装置とそのオペレータにデマンドが出されている。しかし、日常の作業と合理的に予見できる失敗に対しては、通常（上で述べたように）人の行動でなく主に複数の技術的防護層に頼るほうが好ましい。

### 3.6. ヒューマンエラー

(88) 人の信頼性は、信頼できるシステムに必要な人間活動だけの実行の成功確率と定義できるかもしれない(SwainとGuttman(1983))。ヒューマンエラーは人の失敗事象(Tortorelli(1995))とも呼ばれ、これは人の信頼性を減らす。人の信頼性とヒューマンエラーを解析する方法は、SwainとGuttman(1983)およびBellとSwain(1983)によって論じられている。そのような解析においては、行動形成因子(performance shaping factors, PSF)の考察が重要である。外的PSFには、全作業環境、その状況の特性、装置設計と手順または指示が含まれる。これらの因子の全てが、注意、記憶、認知、状況評価または検証の失敗から生じるヒューマンエラー、あるいは不完全または不正確な知識の適用によって引き起こされるヒューマンエラーの確率に影響する。それに加えて、上で言及された失敗を引き起こしそうな、たとえば注意力散漫、精神的または身体的ストレス、高い作業負荷、決まった作業手順、状況あるいは計画の変更、手順、訓練あるいはリーダーシップの不適切、貧弱なマンマシンインターフェイス、もしくは貧弱な通報といった、ストレス要因のPSFと内的PSFを同定することができる。

(89) ヒューマンエラーは、不安全な行動および必要とされる行動の不履行を含むと一般に考えられている。有害な影響を作り出すことを意図した悪意のある振る舞いはそれ自体重要なリスクであろうが、そのような振る舞いは含めない。不安全な行動の例外的なタイプには、誤った意図や故意の規則違反が含まれる。これらの状況では、人々はこの用語の日常的な意味におけるヒューマンエラーを犯すのではなく、むしろ彼らは、彼らがそのとき正しいと信じた目標に達するために、安全規則を回避したり選択したりするのである。そのような行動は、その原因において他の種類の不安全な行動とははっきりと異なる。これらの状況はしばしば解析されないままになるが、しかし、ここで論議中のシナリオでは、それらは潜在的に重要なリス

ク要因である。安全規則の回避に関与した人が、その行動によって引き起こされた危険に気づいた場合、その人は復旧手段をとるよう試みることもあり、また試みることができることさえある。

(90) ある与えられた装置のリスク評価を実行することによって、これらの失敗または過誤が実際に起こる前に、不安全な結果を生じうるいろいろな種類のヒューマンエラーあるいは装置故障を同定することができる。その時、施設の管理者とオペレータは、そのような過誤または失敗が起こった事象においてどのような処置をとるか、あるいは設計または作業慣行のある単純な変更が、個人が害を受ける前にその潜在的危険性を取り除くことができるかどうか計画することができる。それに加えて、リスク評価技術を用いることによって、管理者は、作業の変更（たとえば人員配置の変更）が安全に影響を持つかどうか調べることができるかもしれない。

(91) 事象シーケンスの調査が示すところでは、振る舞いのある重要なパターンが、現在まで実行された伝統的なリスク評価では必ずしも認識されていない役割を潜在被ばくにおいて演ずるようである。多分、これらの最も重要なものは、規則の回避（故意ではあるが、しかし、悪意をもって意図されたものではない職員の安全規則違反）である。たとえば、米国における最近の出来事では、一つには、室内放射線警報が間違った信号を出す傾向があったという理由で、技術者が故意に警報を無視している。警報信号を無視するこの現象は、安全の侵犯に対するその寄与の点で重要である。ほとんどの場合、人々は、頻繁な事前誤警報、時間的または作業上の圧力、あるいは‘規則が仕事に合っていない’という感覚のために、そのような振る舞いをする。これは、次の言葉によってしばしば要約される：‘精通は軽視を引き起こす’。照射装置に関する例がIAEA（1990 b）によって論じられている。

(92) もう一つの重要なヒューマンエラーの問題は、過誤が起こる状況が異常なことである。ヒューマンエラーは、装置の設計と操作性における弱点および施設内活動の管理によって生じうる。今日用いられているリスク評価方法は、ヒューマンエラーのこれらの原因を部分的にモデル化できるにすぎない。

### 3.7. 医学における潜在被ばく

(93) *Publication 60* (ICRP (1991)) は医療被ばくを、個人が自分自身の診断または治療の一部として受ける被ばくおよび、診断または治療中の患者の介護と慰安をする個人が承知の上で自発的に受ける被ばく（職業被ばく以外の）と定義している。*Publication 60* に論じられているように、医療被ばくに対する防護体系は職業被ばくと公衆被ばくに対する防護とは概念的に異なる。医療被ばくの場合、実施上の要件は、患者の診断または治療において与えられる被ばくの正当化と最適化に対するものである。与えられるべき被ばくには詳細な項目が適用

されるが、防護体系の中で線量限度が役割を演ずることはない。

(94) 医療被ばくでは、指定された線量が患者の特定の部分に与えられ、それによって、意図された診断または治療の結果が得られる。過誤あるいは意図されない被ばくには2つのタイプがあろう。第一に、与えられた被ばくが意図されるより大きいかまたは小さいことがある。害は、被ばくの大きさまたは意図された線量と与えられた線量の違いに直接に関係があることもあり、ないこともある。しかし、与えられた線量と意図された線量の違いは、処方を正確に満たすという観点から見た性能の尺度である。たとえば、リスク評価で出会う多くの他の状況と違って、より低い線量では疾病の治療に失敗し、それによって死に至ることがありうるので、より安全な線量は必ずしもより低い線量と同等ではない。第二に、意図とは異なる患者の部位あるいは異なる患者の被ばくさえ起こることがある。たとえば、診断のX線フィルムの反転は、その後身体の間違った側に治療を行うという結果を招くかもしれない。患者の別の部分が被ばくするときの被ばくのリスクは、被ばくが意図された場所に与えられなかったという理由で、被ばくした身体部分に対する害と、診断または治療が行われなかったことによる‘害’の両方を含む。

(95) したがって、医療被ばくの状況における潜在被ばくは、上記のタイプの過誤のうちの一つにあてはまる。線量は、加速器または放射性同位元素装置のような外部線源への被ばく、または体内への放射性核種の投与の結果としての内部被ばくからのいずれかによって起こりうる。意図したより低い被ばくと高い被ばくの両方が重要になりうるので、潜在被ばくの重要性を決めるための規準の概念は直接適用できない。

(96) しかし、与えられた線量と意図された線量の確率と差の解析は、それが重要なリスク要因の同定に役立つ、したがって、この報告書で論じるリスク解析技術を適用できるという理由で、やはり関係がある。重要な要因を同定し患者へのリスクを引き下げるためにとられるかもしれない手段に焦点を合わせるためには、これらの技術は相対的なやり方で適用される。

(97) あらゆる種類の医用放射線利用は、患者の潜在被ばくの原因になりうる。しかし、放射線治療においては、用いられる高い線量と強い線源のため、他の医療行為におけるよりも多くの重大な事故の機会がありうる。放射線治療に関する安全解析については、有用な出発点が、Purdyら(1993)の医療用加速器の危険と安全との考慮に関する詳細な研究によって提供されている。

(98) 医療装置が故障したときの介入によって、あるいは線源がはずれて患者の体内に残っていると、患者へのリスクに加えて、装置のオペレータと公衆構成員へのリスクが生じることもある。後のケースは、例5.3において後で論じる紛失線源に概念上類似している。

#### 4. 規制目的への適合の立証

(99) *Publication 60* (ICRP (1991)) には、潜在被ばくの状況における規制の簡単な議論が示されている。最初のステップは、不運な事象の予想頻度と起こりうる影響の評価を実施する義務を操業管理者に課すことである。その時、規制者は事業者の評価を審査する手順を制定すべきである。この過程において、事業者には、事故を防ぐかまたは最小にし、事故が起こったときにその影響を緩和するために適切な手段が備えられていることの立証を要求すべきである。

(100) *Publication 60* は、そのような立証がどのように行われるべきかを、詳しく述べなかつた。これらの原則を実行するためには、承認の明細を、確率、リスクまたは類似したタイプの規準で表すことができない。これらの概念は規制上の明細の選択についてガイダンスを与えるけれども、明細は一般に、装置、システム、保守、訓練および他の運転上のパラメータと手順によって表されるであろう。明細は全体として、実証された設計と深層防護に対する一般的な要件を反映するであろう。最初の段階での適合は、設計が上に与えられたこれらの要件に合うこと、所要の運転上のパラメータと手順が取り入れられていること、安全装置とシステムがテストされ、容認できる信頼性をもって機能すること、および職員が割り当てられた任務に対して適切に訓練されていることを示すことによって立証できる。

(101) 規制上のアプローチは、設計と最初の操業条件に限定されず、操業の監督も含むことがある。たとえ実際の被ばくがなかったとしても、予想外の事象（出来事）を報告し解析することは、線源を用いる事業者にとって重要である。その報告書は、線源の安全設備に関する貴重な情報を提供し、悪化している操業条件の指標になることがある。そのような報告書のうちよく知られ広く配布されたシリーズである、異常事象に関する国会への報告書 NUREG-0090 が米国原子力規制委員会から出版されている。英国では、いくつかの機関の電離放射線事故データベース (IRID) が、国立放射線防護庁によって整理されている (Thomas ら (1996))。また、安全システムの性能と信頼性の定期的試験の結果の評価も、操業の継続的評価の一部とすべきである。最初の仮定と要件からの重大な逸脱は、予防と緩和の手段およびシステムを修正する必要を示すことがある (3.1 節における議論を参照)。実際は、前例のない事故は少ないので、事故と事象の遡及的解析は、解析の完全さを決定づけるために不可欠である。

(102) 事業者、製造業者および規制当局の間の交流のレベルは、考察中の施設に特有の属性を反映すべきである。たとえば、工業用ゲーシング装置の安全性は、ほとんどその装置の設計と組立てによって与えられるだけであり、その装置が置かれている施設とはおおよそ無関係

で、オペレータの最小の訓練を必要とするだけである。他方、移動式工業用ラジオグラフィ装置の場合には、支配的な安全手段は操作手順の厳守である。事故シーケンスの解析から得られた経験は、他の使用者や設計の活動に組み込まれる必要があることがある。より古い設計は、解析され運転経験を取り入れたもっと新しい設計と同じレベルの防護を提供することはないであろう。既存の設計への新機能の組入れは、新機能を加えることがすべての点で適切かどうかを決めるため、あるタイプの安全解析と最適化を行うべきである。

(103) このやり方の適用、すなわち線源の評価と実際経験に基づいた要件の以後の調整によって、事故の予防に相当な改善がなされた。たとえば照射装置の場合、第5章で説明されるように、オペレータの放射線リスクは数桁も減った。しかし、経験によるこの学習方法には弱点がある。大きな事故は起こりうるものであるが、その事故は、原因となっている潜在的経路のもっと洗練された解析を含む予測手法を用いることによって、可能性をもっと小さくできたかもしれない。そのような予測手法は開発されており、航空工学と宇宙工学におけるような厳しい影響のある事故が起こりうる状況に対して必要とされていた。例5.4は、そのような予測手法が新しい医療装置に適用されたケースである。

## 5. 例

(104) この議論でわれわれは、6つのシナリオの論理構造を導くためにイベントツリーまたはフォールトツリーを用いることにする(2.3節参照)。特にわれわれが論じるのは、照射装置(放射線を用いて物質を殺菌するために設計されたプラント)の2つの例、研究用大型加速器の1例、工業規模の同位体製造用加速器の1例、移動式の放射線源を用いる工業用ラジオグラフィ装置の1例、および患者の放射線治療のための、特別なタイプの医療装置の1例、である。

(105) 2つの照射装置の例(5.1.2と5.1.3)は、フォールトツリーを用いて解析される。これらのフォールトツリーとそれに関連する最小カットセットの実際的な構造と解析をいくらか詳細に論じる。これらの例では、運転経験と解析に基づいた追加の安全設備の開発と適用も説明する。二番目の照射装置の例(5.1.3)は、最新技術と比べてもっと古い施設では潜在被ばくに対する防護が不十分であることを立証する。この例は、いくつかのインターロックを設け、職員の更なる訓練を行うと、死亡事故の確率はほとんど3桁減るといったように、防護がいかかに改善されるかを示している。2つの照射装置の例はまた、解析結果とリスク拘束値との公式的な比較を示すためにも用いられている。

(106) 研究用加速器の例(5.2.1)では、様式化され、単純化されたイベントツリーによって、過誤が起こる可能性がありまた実際に起こっている主な領域に着目する。この例では、潜在被ばくのリスクに寄与するヒューマンファクタを強調する。この解析は1つのシナリオだけに集中しているので、リスク拘束値との公式的な比較には手をつけていない。同位体製造用加速器(5.2.2)の例では、フォールトツリー解析が行われている。この例は、起こりうる故障の完全な同定を保証するやり方を強調し、感度解析を説明する。その結果は、形式的にリスク拘束値と比較されている。

(107) 移動式工業用ラジオグラフィの例(5.3)はイベントツリーを用いて解析され、そのいくつかの枝は公衆構成員の被ばくに至る。結果として生じる線量についても、被ばくした公衆構成員の数についても何の仮定も設けていないので、したがって結果はリスク拘束値と比較しない。最後に、医療の例(5.4)においては、調べられている装置の相対的リスクと機械的故障モードがフォールトツリーで説明されている。患者の医療被ばくに対しては、この報告書で論じるタイプのリスク拘束値と比較することは適切でないが、この解析は防護選択肢間の選択を容易にするために用いることができる。

(108) これらの例は本物のケーススタディから導かれたものであるが、この報告書の目的

のために単純化され、改作されている。すべての例において、故障率に対するいくつかの仮定的数値は、説明の目的だけのために用いられている。これらの値は単に想定上の数字であり、委員会にとって合理的で矛盾がないと思われる“本当の”故障率を表すと解釈すべきでない。この理由で、これらの例の利点は数字で表した結果にあるのではなく、論理的な推論にある。

### 5.1. 照射装置における潜在被ばく

(109) 図2に示す工業用照射装置は、製造後それらの最終輸送用ボール箱の中に通常は包装された大量の製品に、規定された線量の放射線を自動的に照射するために用いられる。照射される製品は、使い捨ての注射器または縫合糸のような医療用具あるいはスパイス、肉、果物または野菜のような食品である。

(110) 照射装置は、線源ラックと呼ばれる金属フレームに取り付けられた放射性線源物質（通常<sup>60</sup>Co）から成る。典型的な線源強度はおおよそ40 PBqであろう。線源ラックは、放射線に対して十分な防護を与えるためにコンクリート遮蔽内に入れられ、操作される。使用の必要がないときには、コンクリート遮蔽中への職員の安全な立入りを可能にするため、線源ラックは線源ホイスト機構によって十分な深さの水の満たされたプールの中へ降ろされる。

(111) 処理される製品は、迷路と呼ばれるコンクリート遮蔽された通路を通して走る自動コンベアで照射室へ搬入され、またそこから搬出される。滅菌される製品の持込みを可能にする一方で十分な遮蔽を与えるために、迷路には多数の屈曲部がある。職員の立入りができるように、別の立入り用迷路が備えられている。

#### 5.1.1. 新型照射装置の安全設備

(112) この例は、過去30年間運転されてきた古い照射装置の多くのものよりもっと多くの防護設備を持つ、最新の照射装置を解析する。設計は、この期間にわたって得られた運転経験に由来する改善を加えることによって発展した。以前の経験の教訓を学習し、産業の安全性能を改善するためにとることのできる行動に関して製造業者、運転会社および監督官庁へ勧告をするという産業界の努力の結果、オペレータは今日、ずっとよく訓練されている。このことによって、設計、訓練、運転慣行および保守における改善と、安全要件への意識の一般的改善がもたらされた。

(113) この例に述べられた制御システムと安全設備は、多くの最新の照射装置の代表的なものである。それらは、妥当な安全目標を達成するための唯一のやり方を表そうと意図したものではない。これらの目標は、さまざまな方法で達成することができるのである。

(114) 立入りが安全でない時に職員の立入りを防ぐため、各出入り口にはインターロック付きのバリアドアが備えられている。照射運転を始めるためには、オペレータは照射室に入り、





探索と施錠手順を実行することを要求される。これによって、マシンを安全に起動することができ、また、線源が露出したときに照射室に人がいないことが保証される。

(115) 制御システムには、事故が起こるのを防ぐように設計された数多くの安全設備とインターロックが含まれる。これらの設備の多くは、図2の図面中に示されている。

#### キー管理

(116) 照射装置運転キーは、ある定められた時間における運転に対して1つのキーだけが利用できることを確実にするために厳しく管理される。マシンの単一キー管理によって、オペレータが常にマシンを管理していることが保証される。制御装置の操作に必要なものと同じキーが、職員立入りバリアにおいて入室するためにも必要である。また、このキーは照射室内の探索と施錠の間に、安全タイマを用いる起動手順を始めるのにも必要である。これは、起動前に、線源が遮蔽位置にある状態でマシンのスイッチが切られていることを確実にするためである。起動の間に他のキーが利用できないことを確実にするため、予備のキーは放射線安全担当者の管理下にある安全な場所に閉じこめ、放射線安全担当者によって認められたときにのみ使用することができる。

(117) オペレータが照射室に入るとき携帯用放射線測定器を持って行くことを確実にするため、通常は測定器が鎖によって運転キーに結ばれている。

#### 職員バリアドア

(118) バリアドアが閉じられるとドアは自動的にロックされ、それを開くためにはソレノイドに電力が必要である。ドアは常に、内部から単に取っ手を回すことによって開くことができる。ドアロックボルトがしっかりと噛み合っていない場合、ドアはスプリングによって強制的に開かれる。

(119) ドア内のリミットスイッチにより、ドアが開くときまたは閉じるときが検出される。ドアに隣接するキースイッチは、制御コンソールを操作するのと同じキーを用いて作動させなければならない。このキースイッチは、照射室エリアモニタの正しい作動が確実にテストされた後でのみ、電圧が加えられる。

(120) 線源がその意図された運転位置またはその安全な保管位置のいずれかに完全にないときには、ドアの上にある放射線警告灯が点灯し、またベルが鳴りつづける。

(121) 線源が上または下へ動いているときは、ドアの上の回転灯が、音の大きいブザーと共に作動する。

(122) ドア立入りキースイッチには試験用の小線源が置かれ、立入りに先立って放射線サーベイメータをテストすることができる。

(123) 照射室エリアモニタ制御コンソールは、職員立入りドアに隣接して置かれている。その検出器プローブは照射室内にある。線源が、線源 down リミット・スイッチによって定められた保管位置に完全に下がっているとき、プローブは放射線場を感知するようになる。このモニタの試験回路は、電力がドアロックソレノイドに加えられる前に、モニタが正しく機能することを実証するために作動されなければならない。照射室に異常な放射線場がある場合、モニタインターロックによりドアが開くための通電は妨げられる。このモニタはまた、モニタコンソール上の警報指示灯を点灯する。このメータが通常状態、バックグラウンド状態または警報条件のいずれを示しているかが、ディスプレイ上に示される。

#### 職員ドアの内側

(124) バックアップアクセス管理は、無許可の立入りを防ぐための補助システムである。これは、立入りを検出し、回転灯および警笛による警報を出す一連のフォトセンサから成る。また、このシステムは線源を安全な保管場所に戻し、制御コンソール上に故障指示を出す。

(125) 迷路への入口では、通路を横切って張られた鎖が立入りを妨げる。鎖をはずすと、線源ホイストを動かすのに必要な空気が断たれ、線源の上昇を防ぐ。

(126) 緊急時牽引ケーブルが迷路の壁に沿って走っており、それを引くことによりマシンの運転を停止または起動手順を中止することができる。

(127) 照射室にある安全タイマキースイッチの中のマシンキーを回すことによってマシン起動手順を始めるときはいつも、回転灯と音響による警報が作動する。

#### 照射室の中

(128) 緊急時牽引ケーブルが壁のまわりに張り巡らされている。ケーブルを引くと、マシン運転は停止するかまたは起動手順が中止される。

(129) 安全タイマキースイッチは迷路入口から最も遠い点の壁の上であり、オペレータがキーに到達するためには、室内の立入り可能区域の全てを歩かなければならないようになっている。これによってオペレータは、起動手順を始める前に、無許可の職員の探索ができる。

(130) 線源保管プールの水位スイッチは、前もって設定された高レベルと低レベルの間の水位を制御する。これはまた、異常に低い水位を検出し、ドアロック回路の接点を通じて立入りを防ぐ。

(131) 保管プールの底にある線源 down 検出器は、線源ラックが完全にその保管位置にあるとき、その位置を示す。

(132) 線源ガイドケーブル上にある線源 up スイッチは、線源が完全に露出しているときを示す。

### 製品バリアドア

(133) 製品バリアドアは、バリアの内側にある空気シリンダーによって空気圧で操作される。リミットスイッチがドアの開位置と閉位置を検出する。ドアは製品運搬装置がすぐその前にあるときにのみ開き、それがドアを通過しきるとすぐ閉じる。バックアップアクセス管理は、職員バリアにおけるそれと同様、各製品バリアの内側に置かれている。

(134) 製品出口にはエリア放射線モニタがある。これは、製品用迷路内の放射線を検出し、製品コンベアを止め、線源を安全な保管位置に戻す。

### 制御装置

(135) 警告灯は、線源 up, 線源 down および線源移動中の位置を示す。タイマは線源の上昇および下降の移動時間をモニタし、それがプレセット時間を上回る場合には、故障信号を出して、線源を安全な保管位置に送ることを試みる。

(136) タイマはマシン起動手順をモニタする。照射室にある安全タイマキースイッチをいったん作動すると、オペレータが迷路を通り抜けて安全鎖をつなぎ、ドアを閉じ、マシンを起動するために制御装置コンソールにあるキーを回すのに十分な時間だけが、プレセット時間によって許される。何らかの過度の遅れがあるとタイムフォールトを起し、起動手順は中止される。

(137) 製品バリアドアの開放と閉鎖も時間を測定されており、ドアがあまりに長く開いている、製品運搬装置が転送位置にない場合には、故障としてマシンを停止するようになっている。

(138) 照射室内の製品移動サイクル時間もモニタされ、線源部通過コンベアの動きを遅らせるいかなる不具合も故障を引き起し、マシン運転を止め、線源をその安全な保管位置に戻す。

(139) 照射装置はこの特定の例に関連しない他の安全設備も持っているが、それらはここでは記述しない。

#### 5.1.2. 新型照射装置のフォールトツリー解析

(140) 照射装置に対する解析の原則と方法を説明するために、潜在被ばくの原因となりうる数多くの故障シナリオを考察した。これらのシナリオは、考察されたシーケンスの多くが重大な影響を持つことを示しているが、可能性の全てを含むと解釈すべきでない。更なる情報は、たとえば Trager (1989) にある。

(a) 線源は遮蔽されておらず、オペレータが職員立入りドアを通して照射室に入る。こ

れには、オペレータが職員ドアを通して入ることによって、線源全体あるいは線源集合体から偶発的に切り離された一部分または断片により被ばくするかもしれない多くのやり方が含まれる。表2は、このケースにおいて立入りを防ぐ防護層を表にしたものである。

表2 内部に高レベル放射線があるときの立入りに対する防護層

制御コンソールにある表示装置：

- ・線源位置表示灯
- ・故障表示灯
- ・‘マシン on’ 表示灯
- ・‘水位低’ 警告灯
- ・運転と立入りのための単一のキー（‘マシン on’ のときコンソールに捕捉され、‘マシン off’ のときのみ解放される）

立入りドアの外側：

- ・放射線高警告灯（線源が down 位置にないときに点灯する三葉記号）
- ・線源移動警報（音響または視覚による警報。線源位置が ‘down’ でも ‘up’ でもないとき）
- ・照射室エリアモニタ（線源が down のときのみ電源が入る）

視覚による表示 OK の場合は緑色

バックグラウンドの 10 倍を超えるとき警報は赤色

別個の赤色警告灯

音響による警報

- ・マシンはコンソールでスイッチを切られ、入口ドアのキーが使えるようになる（キーは携帯用線量率計についている）
- ・電氣的ドアロックキースイッチ；退出は常に自由である；立入りのための電力は次のときのみ得られる：
  - 線源 down
  - 照射室、水脱塩装置または製品出口でのモニタからの警報なし
  - 照射室モニタがテストされており、正しく作動する
  - 水位低でない
- ・携帯用測定器の機能をテストする試験用線源が立入りドアのところで使える

立入りドアの内部：

- ・バックアップアクセス管理用の視覚または音響による警報のついた光センサ（線源が down でなく、マシンが ‘on’ であるのみ、電力が得られる）
- ・線源ホイス安全鎖とパルプ（立入りのときチェーンを手で取り除くと、線源ホイスの空気の供給を断ち、ホイス空気の大気放出弁を開く）
- ・緊急時牽引ケーブル（マシン停止または起動中断）

- (b) 線源は遮蔽されておらず、オペレータが製品ゲートを通して入る。これは、項目(a)にすでに説明したのと同じ起こりうるオペレータの被ばく様式を含むが、オペレータは異なる出入口を通して入る。
- (c) 線源の断片が外に運ばれる。これは、線源から切り離された断片が輸送コンベアシステムの上へ落ち、遮蔽の外へ運ばれ、外部で作業者に照射による被ばくを引き起こす可能性を調べる。

(d) 照射室内の人が線源移動停止に失敗する。これは、線源が遮蔽された照射室内に人がすでに居り、もう一人の人の行動または線源移動制御システムの故障のいずれかによって被ばくするかもしれないという、起こりうる様式を調べる。

(141) 照射装置の例について記述されたシナリオに対するフォールトツリーを図3に示す。このツリーの構築と評価は、以下のようにしてなされる：

- (a) 望ましくない最後の事象はツリーの最上位に置かれる。
- (b) 説明の付いた頂上事象に至るかもしれない次の事象を選んで、‘and’ ゲートまたは ‘or’ ゲート記号によってそれらを頂上事象へ結ぶ。‘and’ ゲートは、上記の結果を与えるためには事象の全てが起こらなければならない所に用いられる。‘or’ ゲートは、事象のいずれか一つが上記の結果を与えるところに用いられる。
- (c) ツリー上に記された各事象について、記述された結果を生じるより低い事象を、さらにもっと低い事象が記述できなくなるまで、選び続ける。
- (d) 図3に示されたモデルを用いてツリーが造られたら、他の事象の結果ではない全てのそれらの基本事象に適切な予想頻度を割り当てる。他の事象に依存する番号は長方形の中に入れられ、一方、基本事象の番号は楕円形の枠に入れられる。基本事象の値の選択に関する助言は、2.1および2.3節に与えてある。
- (e) 2.3節に与えられた記述を用いて、このツリーに対する最小カットセットを同定する。
- (f) ツリーの底から始めて、各最小カットセットの経路に対する寄与を計算し、‘or’ ゲートまで至る番号についての加算と、‘and’ ゲートまで至る番号についての乗算を実行する。
- (g) 頂上事象の発生頻度は、各カットセットからの寄与の合計である。

(142) 表3は、照射装置故障シナリオについて最小カットセットを表の形にしたものである。事象番号と文章を記した各経路を持つ17の最小カットセットが存在する。各最小カットセットからの寄与が、それが頂上事象の予想発生率の全値に寄与するパーセンテージと共に同定される。

(143) 表3は、記述されたタイプの照射装置において、高い（致死）線量を受けるオペレータに対して予想された頻度が、年あたりおよそ  $2 \cdot 10^{-6}$  であることを示す。これを160に達するプラントから30年にわたって生じた5件の死亡事故である産業経験（IAEA（1996 b））が、年あたりおよそ  $10^{-3}$  の頻度を与えることと比較すると、かなり大きな違いが認められる。しかし、この例に用いられた最近の新しいモデルの照射装置には、経験と規制上の要件の結果として、将来における事故の再発生を防ぐために加えられた設計上の改善が含まれるので、これは期待されたところである。もっと早い時期に製造された照射装置は、これと同じ基準または要

件 (5.1.3 節参照) どおりには製造されていなかった。

(144) 表 3 を調べると、いろいろなカットセットの相対的な重要性もわかる (Vesely ら (1981) 参照)。最小カットセットのうち No. 1 は、最終的な予想頻度の値におよそ 80% の寄与があり、これに対する経路は、事象 D 122 (制御装置システム故障)、D 121 (照射室内に人がいる)、D 123 (安全鎖無効) および D 2 (緊急時停止不作動) を通るものである。これはまた、どの事象またはシステムが、改善努力の結果、最も大きい利得を生むか決めるために、フォールトツリーをどのように用いることができるかを説明する。また、ここに示す全カットセットでなく、個々の事象のパリエーションに対する結果の感度を調べることも可能である。下の例 5.2.2 で、そのような感度解析を論ずる。

(145) また、このフォールトツリーと表 3 は、人々が職員バリアドアか製品ドアのいずれかを通して入ったときに起こった 5 件の死亡事故において、現在これらの事故は、この設計における全故障確率の主要な要因ではない最小カットセット No. 5, 7 または 8 に入るであろうことを示している。

### 5.1.3. 古い設計の照射装置のフォールトツリー解析

(146) 5.1.2 節でわれわれは、多くの冗長性と多様性を持つ安全設備を含む最新設計の照射装置を解析した。それに加えて、現在、オペレータは最初の照射装置が運転に入ったときと比較してはるかに高い基準で訓練されている。5.1.2 節に示されるように、これは最新の照射装置において死亡事故の確率が非常に低い原因となっている。

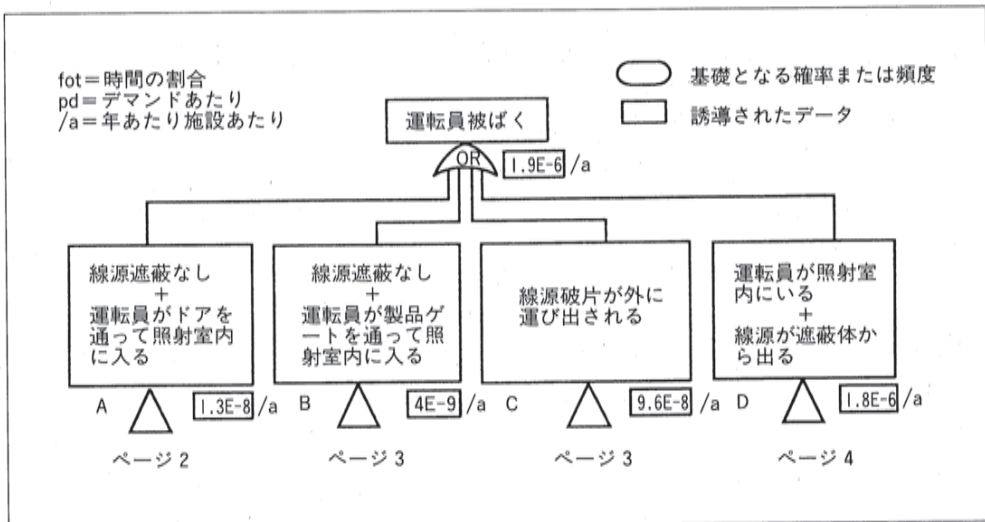


図 3(a) 最新の照射装置における潜在被ばく (フォールトツリー解析, ページ 1/4)。

見やすくするために、この図および以降の図中の科学的表記法において、確率“ $10^{-00}$ ”を表示するために短縮形書式“E-00”を用いる。



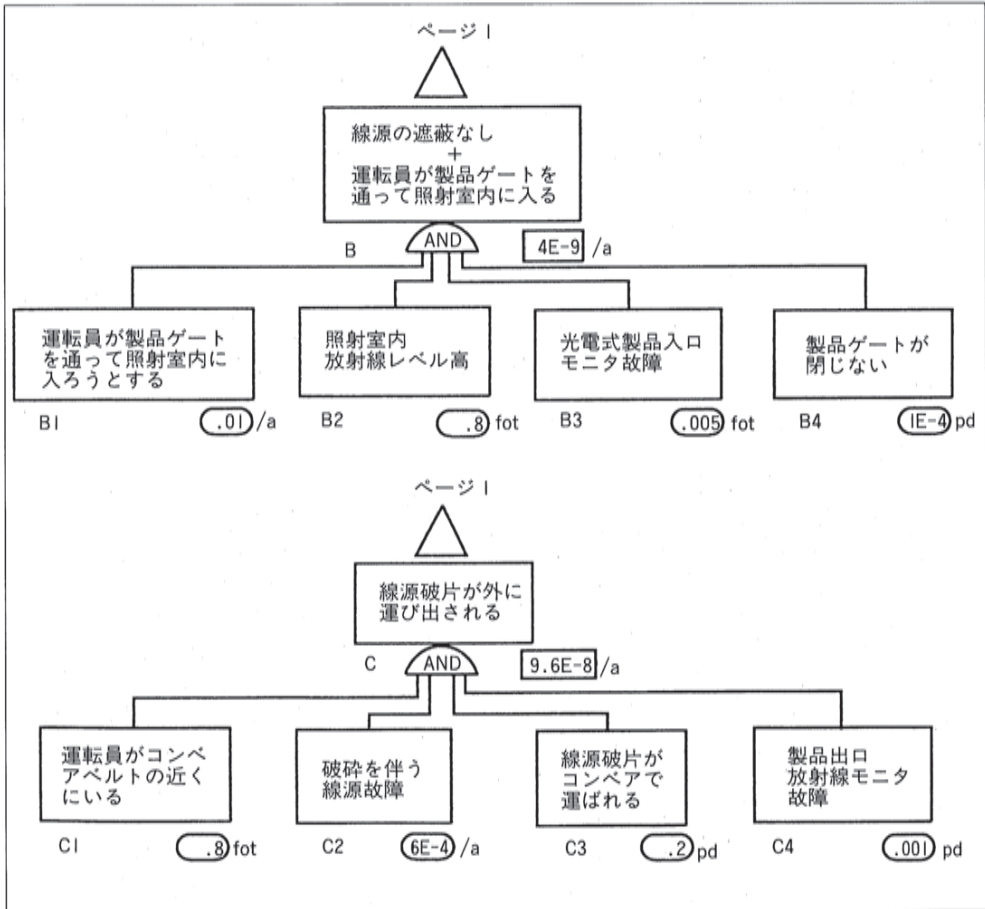


図 3(c) 最新の照射装置における潜在被ばく (フォールトツリー解析, ページ3/4)。



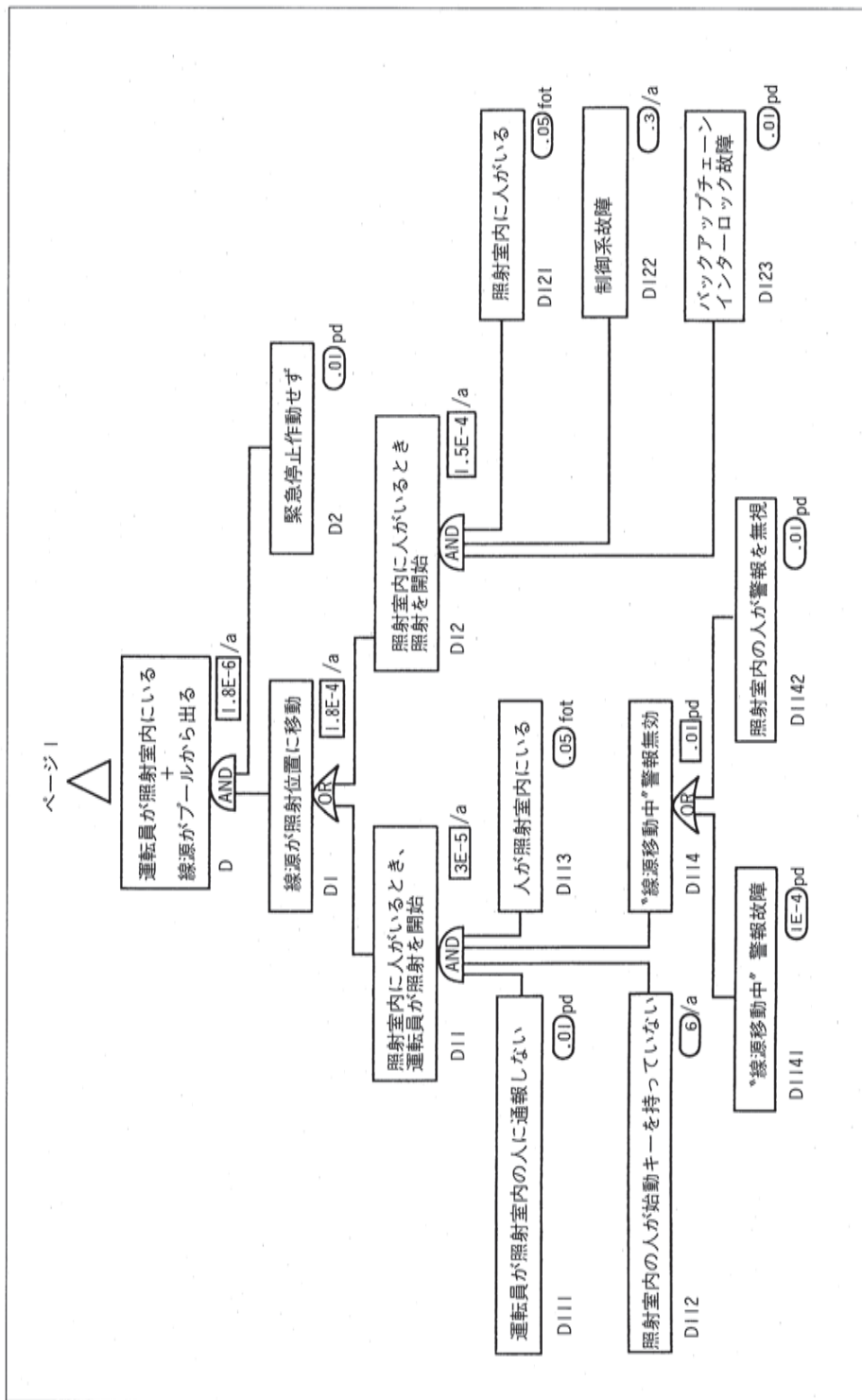


図 3(d) 最新の照射装置における潜在枝ばく (フォールトツリー解析, ページ4/4)。

表3 照射装置のフォールトツリー解析の結果。オペレータが照射施設内で高い(致死)線量を受ける予想頻度：年あたり $1.92 \cdot 10^{-6}$ 

個々の最小カットセットの寄与：				
No.	%	予想頻度	イベントID	イベントの説明
1	78.25	$1.50 \cdot 10^{-6}$	D122	制御システム故障
			D121	照射室内に人がいる
			D123	安全鎖無効
			D2	緊急停止作動せず
2	15.66	$3.00 \cdot 10^{-7}$	D111	オペレータが照射室内の人に気付かない
			D2	緊急停止作動せず
			D121	照射室内に人がいる
			D112	照射室内の人が始動キーを持っていない
3	5.01	$9.60 \cdot 10^{-8}$	D1142	照射室内の人が警報を無視する
			C1	オペレータがコンベアベルトの近くにいる
			C2	破片を形成する線源の破壊
			C3	破片がコンベアで運ばれる
4	0.35	$6.80 \cdot 10^{-9}$	C4	製品出口の放射線モニタ故障
			A3	照射室内の放射線測定をしない
			A42	携帯型放射線測定器を無視
			A1	オペレータがドアを通過して照射室に入ろうとする
5	0.21	$4.00 \cdot 10^{-9}$	A22	照射室内に遮蔽されない線源破片が存在する
			B2	照射室内の放射線レベル高
			B1	オペレータが製品ゲートを通過して照射室に入ろうとする
			B3	バックアップアクセス検出器故障
6	0.16	$3.00 \cdot 10^{-9}$	B4	製品ゲートが閉まらない
			D1141	‘線源移動中’警報故障
			D112	照射室内の人が始動キーを持っていない
			D121	照射室内に人がいる
7	0.11	$2.13 \cdot 10^{-9}$	D2	緊急停止作動せず
			D111	オペレータが照射室内の人に気付かない
			A2311	ドアインターロック故障
			A1	オペレータがドアを通過して照射室内に入ろうとする
8	0.11	$2.12 \cdot 10^{-9}$	A42	携帯型放射線測定器を無視
			A3	照射室内の放射線測定をしない
			A232	バックアップアクセス検出器故障
			A2331	安全鎖インターロック故障
9	0.09	$1.70 \cdot 10^{-9}$	A2332	安全鎖インターロックバイパス
			A232	バックアップアクセス検出器故障
			A3	照射室内の放射線測定をしない
			A42	携帯型放射線測定器を無視
	0.09	$1.70 \cdot 10^{-9}$	A1	オペレータがドアを通過して照射室内に入ろうとする
			A2311	ドアインターロック故障
			A211	水位低インターロック故障
			A1	オペレータがドアを通過して照射室内に入ろうとする
			A42	携帯型放射線測定器を無視

			A3	照射室内の放射線測定をしない
			A212	水位制御系動作せず
10	<0.01	$8.50 \cdot 10^{-11}$	A2312	ドアインターロックバイパス
			A1	オペレータがドアを通して照射室内に入ろうとする
			A42	携帯型放射線測定器を無視
			A3	照射室内の放射線測定をしない
			A232	バックアップアクセス検出器故障
			A2332	安全鎖インターロックバイパス
11	<0.01	$8.50 \cdot 10^{-12}$	A2331	安全鎖インターロック故障
			A232	バックアップアクセス検出器故障
			A3	照射室内の放射線測定をしない
			A42	携帯型放射線測定器を無視
			A1	オペレータがドアを通して照射室内に入ろうとする
			A2312	ドアインターロックバイパス
12	<0.01	$6.80 \cdot 10^{-12}$	A22	照射室内に遮蔽されない線源破片が存在
			A1	オペレータがドアを通して照射室内に入ろうとする
			A41	携帯型放射線測定器故障
			A3	照射室内の放射線測定をしない
13	<0.01	$2.13 \cdot 10^{-12}$	A2332	安全鎖インターロックバイパス
			A232	バックアップアクセス検出器故障
			A2311	ドアインターロック故障
			A1	オペレータがドアを通して照射室内に入ろうとする
			A41	携帯型放射線測定器故障
			A3	照射室内の放射線測定をしない
14	<0.01	$2.12 \cdot 10^{-12}$	A3	照射室内の放射線測定をしない
			A41	携帯型放射線測定器故障
			A1	オペレータがドアを通して照射室内に入ろうとする
			A2311	ドアインターロック故障
			A232	バックアップアクセス検出器故障
			A2331	安全鎖インターロック故障
15	<0.01	$1.70 \cdot 10^{-12}$	A3	照射室内の放射線測定をしない
			A41	携帯型放射線測定器故障
			A1	オペレータがドアを通して照射室内に入ろうとする
			A211	水位低インターロック故障
			A212	水位制御系動作せず
16	<0.01	$8.50 \cdot 10^{-14}$	A3	照射室内の放射線測定をしない
			A41	携帯型放射線測定器故障
			A1	オペレータがドアを通して照射室内に入ろうとする
			A2312	ドアインターロックバイパス
			A232	バックアップアクセス検出器故障
			A2332	安全鎖インターロックバイパス
17	<0.01	$8.5 \cdot 10^{-14}$	A2331	安全鎖インターロック故障
			A232	バックアップアクセス検出器故障
			A2312	ドアインターロックバイパス
			A1	オペレータがドアを通して照射室内に入ろうとする
			A41	携帯型放射線測定器故障
			A3	照射室内の放射線測定をしない

(147) しかし、これはいつもそうというわけではなかった。もっと古い設計の安全設備はあまり洗練されたものではなかったし、オペレータの訓練は最新の基準に照らして不十分であった。したがって、143 項に述べたように、過去に数多くの放射線事故が起こった。これらの事故は、いろいろなタイプの照射装置で起こっている。

(148) この報告書に述べる解析手法の能力を示すために、われわれはこの節で、これらのより古い設計のうちの 1 つの照射装置について、過去にさかのぼった解析を行う。この遡及的解析に対し、われわれは、主要な改善の影響を定量化できるようにするために、5.1.2 節で解析されたものより前の設計を選んだ。この解析もまた、図 4 に示したフォールトツリーを用いることにより実行されている。

(149) この照射装置は、124 項に述べたような、バックアップアクセス管理システム(光電式ドアモニタ)も、125 項に述べた安全鎖インターロックも持っていなかった。したがって、これらの装置によって制御されているという理由(前の例における項目 A 232, A 2331 および A 2332 を参照)から、新しい設計ではあまり起こりそうもない故障モードが、そのようなより古い設計ではもっとずっと頻繁に起こったであろうと予想できる。オペレータがそのようなもっと古い施設で入室を試みたとき、線源が up 位置にあり、かつインターロックが故障していたかまたはバイパスされている確率は、(以下の 151 項で記述される理由で)新しい設計における  $2.5 \cdot 10^{-7}$  ではなく 0.015 であったと推定された。

(150) マシンオペレータの訓練は不十分であり、しばしば携帯用放射線測定器を持っていなかった。これは、一つには、当時測定器がマシンキーと鎖でつながれていなかったという事実によるものであった。122 項に述べたように、測定器が正常に働くことを照射室に入る前にチェックしないことがしばしばあった。放射線指示値を無視する確率は、今日のよりよく訓練されたオペレータについてのデマンドあたり 0.01 に対して、当時は 0.05 であったろうとわれわ

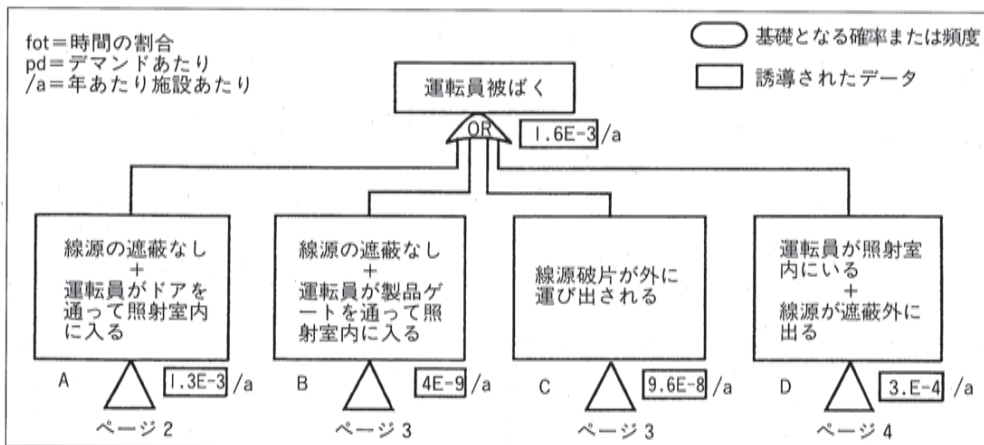


図 4 (a) 古い設計の照射装置における潜在被ばく (フォールトツリー解析, ページ 1 / 4)。

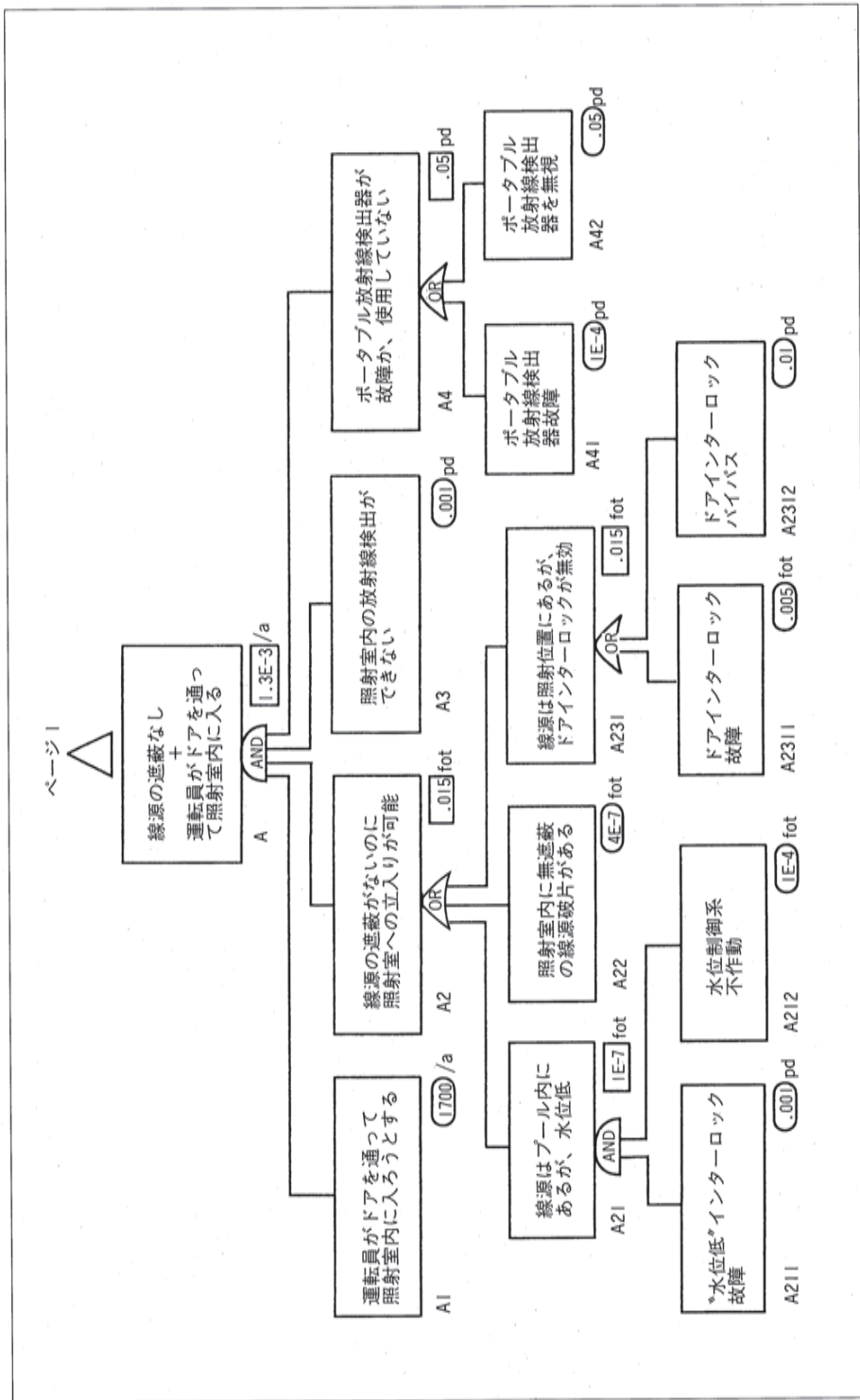


図 4 (b) 古い設計の照射装置における潜在被ばく (フォールトツリー解析, ページ 2/4)。

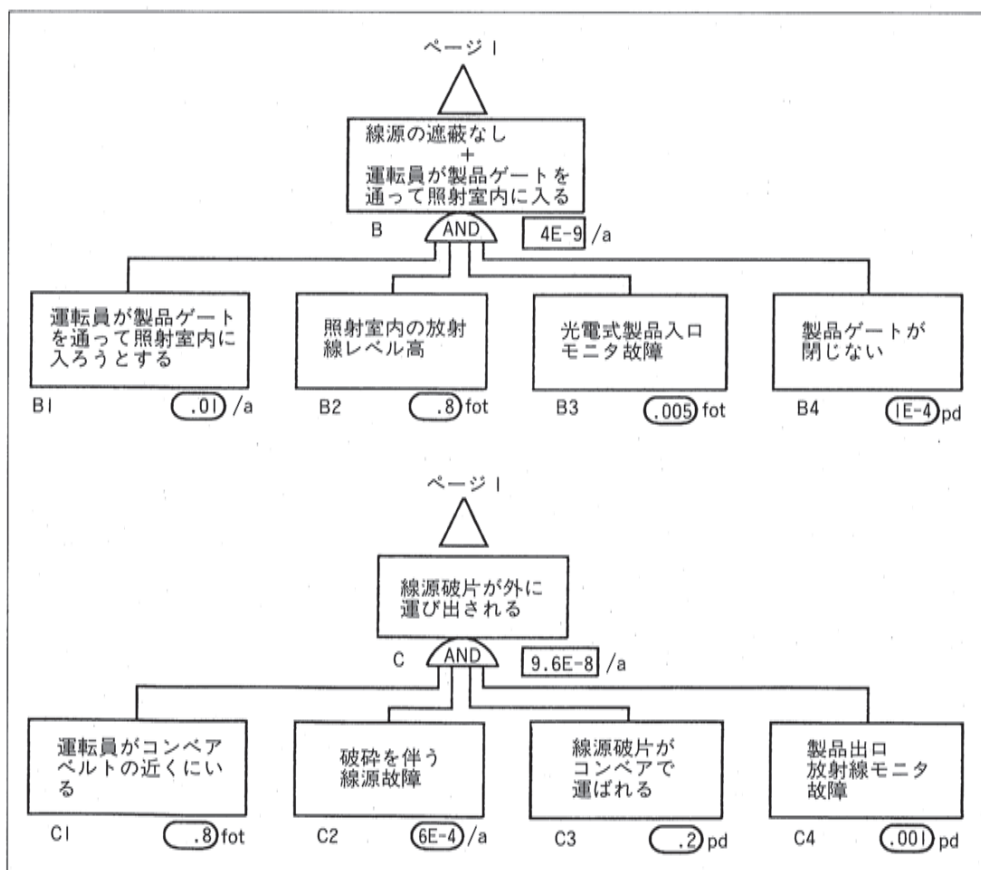


図 4 (c) 古い設計の照射装置における潜在被ばく (フォールトツリー解析, ページ 3/4)。

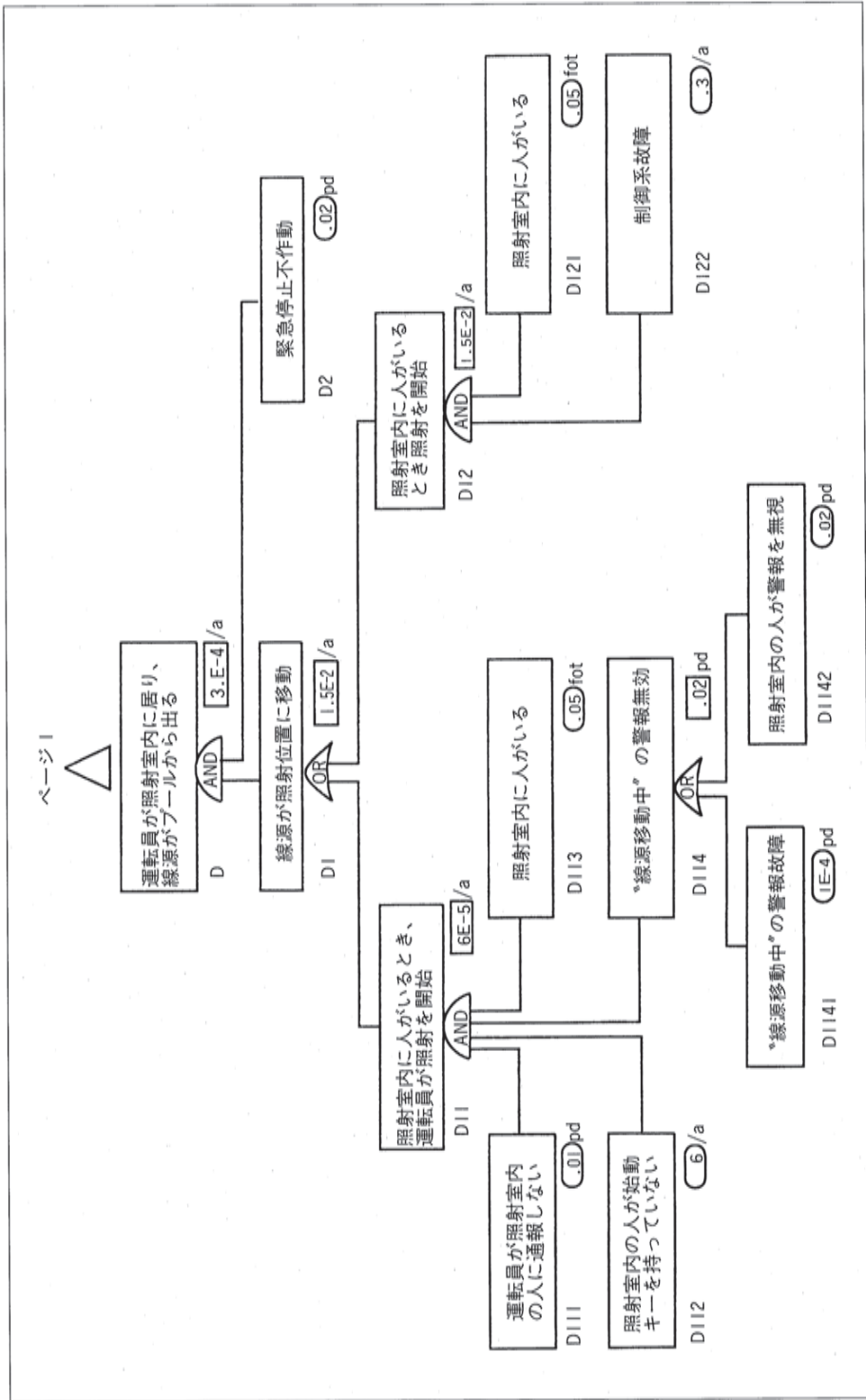


図 4 (d) 古い設計の照射装置における潜在被ばく (フォールトツリー解析, ページ 4 / 4)。

れは推定する。

(151) 123 項に述べた照射室エリアモニタは、当時は適切に保守されておらず、そのため照射室の職員バリアドアを開くことがしばしば困難になった。オペレータはこの問題を、照射室に立入るためにこのインターロックをバイパスすることでたびたび克服した。149 項に述べたように、これは、部分的には、線源 up の照射室に入る確率を増やす結果となった。

(152) オペレータが照射室に（たとえば保守などの理由で）いる間に、線源がプールから出て、オペレータが偶発的に照射されるもう一つの可能性がある。照射室にいる人がこのケースで鳴るであろう警報音を無視する場合に、これは起こることがある。この事象の確率は、最新の訓練がなされたときのデマンドあたり 0.01 に対して、以前は 0.02 であったとわれわれは推定する。

(153) 人が照射室において制御システムが故障し、そのため線源が遮蔽位置から出て行くときには、152 項に述べた事故もまた起こりうる。新しい設計では、これは‘バックアップ安全鎖インターロック’（新しい設計における項目 D 123）によって予防される。

(154) 152 および 153 項で述べた改善は、線源がその遮蔽から出て行くときに照射室に人がいる予想頻度を、年あたり  $3 \cdot 10^{-4}$  から新しい設計での  $1.8 \cdot 10^{-6}$  に減らすと評価される。

(155) 以前 5.1.2 節で用いられたやり方でこれらの変更の結果を計算すると、オペレータが高い（致死）線量を受ける予想頻度は、5.1.2 節の年  $2 \cdot 10^{-6}$  に対して、年およそ  $1.6 \cdot 10^{-3}$  であった。

(156) この例は、システム全体の安全が、単純な部品の追加を通じての装置の改善、もっと有効な安全訓練および有効な保守と安全点検によって、いかに大きく改善されるかを示している（Trager, 1989; IAEA, 1992 b, 1996 b も参照）。

#### 5.1.4. 照射装置の性能とリスク拘束値との比較

(157) 受容性の規準が満たされるかどうかを評価するためのやり方については、2.1 節で論じた。この比較のためには、個々のオペレータの死亡リスクが必要である。この照射装置の例における解析では、致死線量の頻度として、古い設計については  $1.60 \cdot 10^{-3}$ /年、もっと新しい設計については  $2 \cdot 10^{-6}$ /年となった。これらの頻度の根拠となる立入り回数がこの施設について計算されているが、これらの立入りは一般に 3 交替のオペレータの間で等分に分けられているであろう。したがって、計算値の 3 分の 1 が、個々のオペレータへのリスクとして用いられることになろう。それゆえ、個々のオペレータが致死線量を受ける確率は、古い設計について  $5.3 \cdot 10^{-4}$ 、また比較的新しい設計について  $6.7 \cdot 10^{-7}$  となる。

(158) このように、これらの値は 2.1 節で述べた量  $\sum P_i \cdot f(E_i)$  の計算の 2 つの異なる結果である。それらは、適切に選ばれたリスク拘束値  $R$  と比較することができる。2.1 節では、一



度に少数の従業員だけが潜在被ばくのリスクにさらされるような単純なケースに対する個人のリスク拘束値として $2 \cdot 10^{-4}$ という R 値を提案した。式(4)を用いてこれら2つの観察結果とこのリスク拘束値とを比較すると、これらの例の仮定では、古い照射装置は容認できると思われなかったが、もっと新しい設計は容認できるようである。

## 5.2. 加速器における潜在被ばく

(159) 加速器は、産業、医学および研究において広く使われている。電子ビーム、陽子ビームおよび高エネルギーイオンビームが、工業および農業利用、放射線治療および粒子物理学研究に使用されている。ビーム強度は一般に高いので、加速器およびそれらの結果として生ずる粒子ビームは周辺区域の人々を防護するために厚い遮蔽によって囲まれる。高強度ビームへの被ばくは厳しい放射線傷害を引き起こし、致命的ですらありうるので、加速器エンクロージャーへの立入りは厳重に管理され、特別なインターロックのついたドアだけを通じて可能である。誰かが加速器の予定された運転の間に立入りを試みると、ビームは直ちに止まる。

(160) 以下の2つの例で、異なる加速器設定の中で経験されるいくつかのタイプの問題を説明する。5.2.1節は大きい研究施設を扱う。このタイプの加速器での作業は研究目標が変わるという特徴があり、いろいろな国籍の訪問研究者がしばしば存在する。対照的に、5.2.2節で論じる放射性同位元素の商業生産のための工業用加速器は、常勤職員によって日常的に運転される。

### 5.2.1. 研究用加速器のイベントツリー解析

(161) 特に研究用加速器施設では、一次ビーム区域と二次ビーム区域を区別することが重要である。前者は重い遮蔽で囲まれていなければならないのに対し、二次ビーム区域では、人がビームラインに接近するか粒子ビームの中に入る場合にのみ、被ばくのリスクがある。下に、一次ビームまたは二次ビームのいずれかの中での潜在被ばくの原因となりうるいくつかの事象の例を表にまとめてある(括弧の中に説明がある)：

- (a) 遮蔽の喪失。(遮蔽ブロックが一次ビーム区域から誤って取り外されることがある。ビームが on のとき、これは隣接区域に高い線量率をもたらさう。必要な深層防護を与えるために、放射線モニタと警報システムが一般に設置されている。)
- (b) 防護装置の撤去。(格子のような物理的バリアが照射プラントにない場合、作業員はその手および身体の一部を一次ビーム中に入れることが可能である。)
- (c) ビーム区域への侵入。(格子あるいは類似のバリアをこじ開けて一次または二次ビーム区域に入るか、または乗り越えて二次ビーム区域に入る。)
- (d) 運転停止期間に続いて起動する前の、ビーム区域および加速器ホールの不十分な探

索。(この区域内にいる人が探索手順の中で見のがされ、置き去りにされることがある。)

- (e) インターロック故障。(インターロック故障によってあるいは故障の間に、ビームが使用可能になるかもしれない確率を減少させるため、出入り管理システムの中に深層防護が組み込まれる。)
- (f) 1個のアクセスキーまたは個人用アクセスカードを用いて2人以上の人が二次ビーム区域に入る。(1人がアクセスカードを忘れ、同僚と一緒にビーム区域に入るが、その同僚とともに必ずしも区域を立ち去るとは限らないときに、特にこのことが起こる。)
- (g) 二次ビーム区域へのアクセスドアが少し開いたままにしておかれる。(スプリングメカニズムによりアクセスドアは強制的に閉じられるが、鉛レンガのような物を用いてドアを開いたままにしておくことがときどきある。人が気づかれずにビーム区域に入り、ついで置き去りにされることがある。)
- (h) オペレータの失敗。(一次ビーム区域への立入りがオペレータによって管理されている場合、入る人数を数えるときに、オペレータがストレスの下で働く場合はとくに、数え落としが起こることがある。誰かが入るが、入ったとは思われず、置き去りにされるという重大なリスクがありうる。一次ビーム区域に対しては、一度に1人の人だけの通過を許し、それに加えて、その人の同定ができるような電気機械的装置が非常に重要と考えられる。)
- (i) 予定より高いビーム強度。(ビームラインの不適切な運転は、不十分に遮蔽された二次ビーム区域に高強度ビームを放出する原因となりうる。放射線モニタと警報システムが、そのような事象に対する人の防護のための深層防護として一般に用いられる。)
- (j) 訓練の不足。(出入り管理システムを用いる全ての人が彼らの安全責任を理解し、共通の間違いを避けるために十分に訓練されることを確実にするのは、管理者の義務である。)
- (k) 通報の問題。(何がなされるべきかを理解することまたは誤解の原因となる設備、警報等の正しい説明の不履行。)

(162) 加速器での事故シナリオの例を下に記す。図5は、二次ビームラインの想定上のレイアウトを示す。図6の様式化されたイベントツリーにおいて、2つの仮定がなされている。第一に、二次ビーム区域に入ろうと試みる人がその場所に全く慣れていないと仮定する(たとえば、その区域内で長い遅れた塗装工事を終えようとしている外部の会社からの労働者)。第二の仮定は、人が深層防護として安全システムに組み込まれた多くの防護層を故意に無視するこ

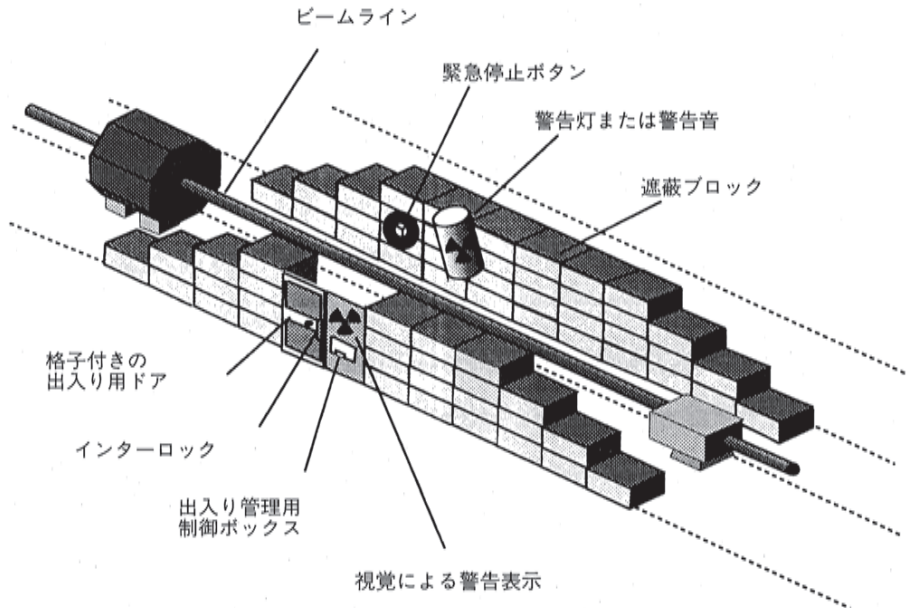


図5 大型研究用加速器におけるいくつかの安全設備。

とである。

(163) 人が二次ビームエンクロージャーへのアクセスドアの前にいる。ここでは、彼はビームが on であることを示す視覚による警告に直面しているはずである。彼が警告を無視するか、理解しないか、または警告標識の電球が切れているかもしれない。それゆえ、彼はドアまで進み、開けようと試みる。通常のケースとしてドアがロックされているならば、彼はその状況を尊重するか、または彼はビーム区域内での彼の仕事を終えたくてたまらないので、ドアをこじ開けるかのいずれかである。通常の条件下では、インターロックを壊せばビームは止まるが、ここでは、被ばくの原因となりうる一つのシナリオとして、インターロックの接点が故障していると仮定する。彼が区域に無理矢理に立ち入るもう一つのやり方は、梯子を用いて二次ビーム区域へ乗り越えて入るか、彼の前にある格子のような物理的バリアの一部を取り除くことによって、ドアとそのインターロックをうまく避けることである。

(164) ビーム区域内に入れば、その人はビームが運転中であるという視覚または音響による信号に直面する。再び、その人は警告を無視するかまたはそれを理解さえないか、あるいは警告信号が作動しないことがある。いずれのケースにおいても、今や彼が事故被ばくをする確率は高い。最後の防護ラインとして、緊急停止ボタンを押すとビームは切られる。しかし、このボタンが押されないか、または作動しないと仮定することができる。この場合、その人は被ばくする。

(165) 図6のイベントツリーの解析が示すところでは、この例の仮定で、そのような被ば

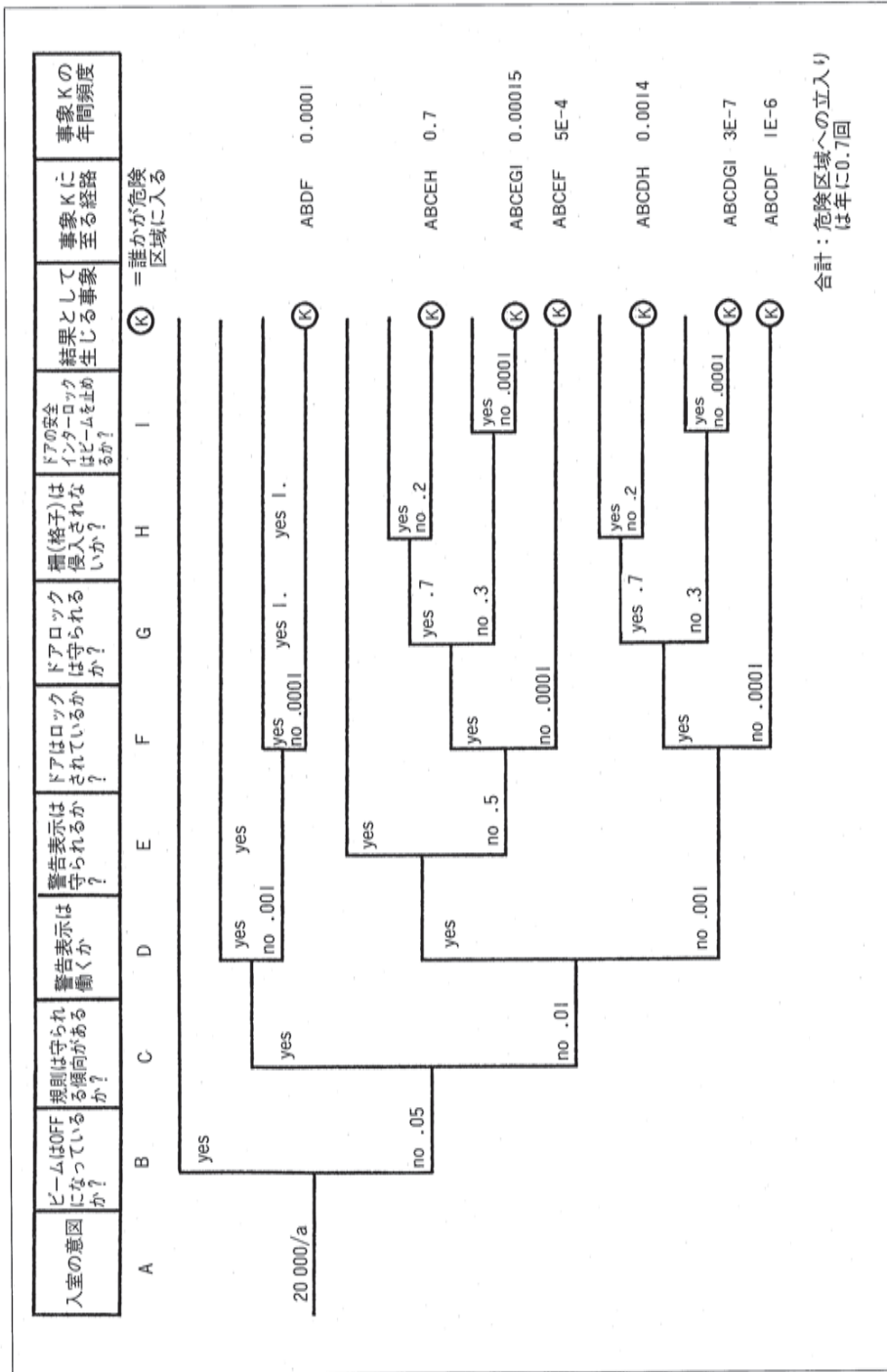


図 6(a) 加速器における潜在被ばく (イベントツリー解析, ページ 1/2)。

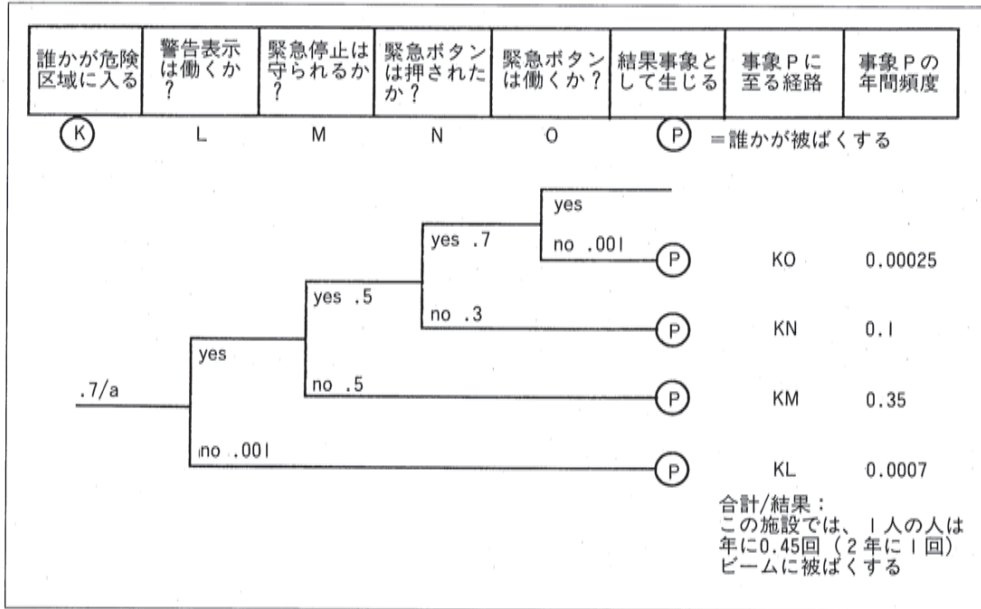


図 6 (b) 加速器における潜在被ばく（イベントツリー解析，ページ 2 / 2）。

くは年におよそ 0.45 回起こる。この率はその施設自体に付随するものであり、リスク拘束値と比較することはできない。個人のリスクを計算するためには、被ばくの確率と受けた線量に関して更なる仮定を設けなければならない。それに加えて、リスク拘束値との比較には、他の関連シナリオを解析することが必要であろう。

(166) この例から、人の失敗がこの環境での潜在被ばくのリスクに大いに寄与することは明白である。実際、この環境の中では、合理的と思われる多くの防護層を持ち、また安全鎖に用いられる電気機械的安全コンポーネントと装置の技術的故障率が非常に低い深層防護システムでさえ、人間の不安全な行動、怠慢および故意の規則違反に対しては限られた程度の防護を与えるにすぎない。

### 5.2.2. 同位体製造用加速器の危険の同定とフォールトツリー解析

(167) この例で論じるサイクロトロンでは、特定の放射性同位元素の商業生産のために、ターゲットを照射する陽子ビームが作られる。前の例と同様、ビーム強度は高く、ビームラインに沿ったターゲットから 1メートルでの線量率は  $30 \text{ Gy h}^{-1}$  のオーダーである。

(168) この例は、照射用ビームへのオペレータの事故被ばくを防ぐために意図されたインターロックシステムの設計について記述する。危険同定への組織的なアプローチとしての危険性および実施可能性 (Hazop) 手法の使用とリスク定量化段階での感度解析の応用を説明する。ついで、最終的なリスク評価データを、設計の受容性を実証するためのリスク規準と比較する。

### 施設の説明

(169) この例で解析するサイクロトロンは、30 MeV の陽子ビームエネルギーと  $250 \mu\text{A}$  のビーム電流で運転される。サイクロトロンは  $10 \times 20 \text{ m}$  の面積と 2 m 厚の壁を持つコンクリートで遮蔽された加速器室に収納されている。モータを動力とする厚さ 2 m のコンクリート遮蔽ドアを通して出入りが行われる。施設の一般的なレイアウトを図 7 に示す。このサイクロトロンは、陽子ビームを生産するために 3 つの異なる主電源を必要とする。これらは、磁石(MG)、イオン源 (IS) および高周波発振器 (RF) のためのものである。これら 3 つの電源のうちの少なくとも 1 つが遮断されたならば、ビームは生産されず、したがって、電離放射線の危険は減って、加速器室の残留誘導放射能からの被ばくだけになる。

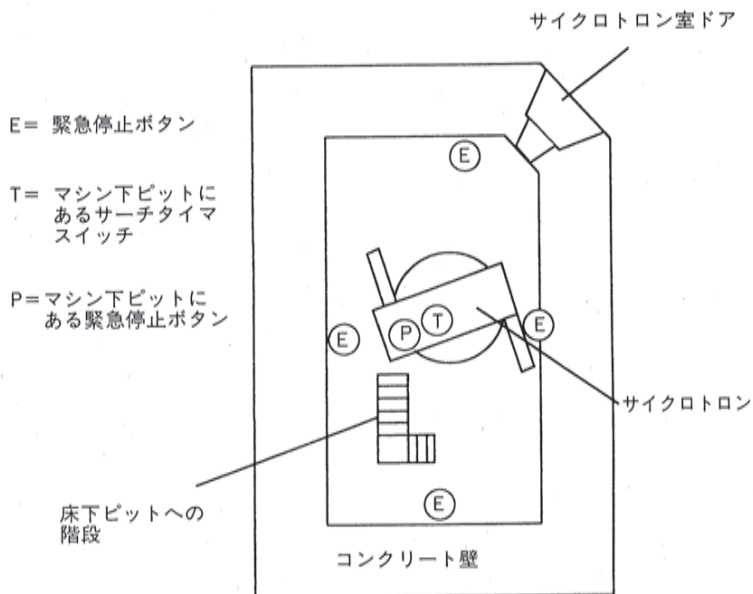


図7 緊急時停止ボタンと探索タイマスイッチの位置を示す、サイクロトロン室のレイアウト。

### インターロックシステムと設備

(170) ビームへの被ばくを避けるために、インターロックのシステムと設備が設けられている。これらのハードウェアシステムは、サイクロトロン主電源と加速器室への出入りドアに取り付けられた機械的および電気的なインターロックである。このシステムは、サイクロトロンオペレータの被ばくの原因となりうるリスク評価（下にさらに述べる）で同定された3つのシナリオを防ぐように工夫されている：

- (a) 加速器室遮蔽ドアが開いている間に、加速器が起動され、ビームを生産する；
- (b) 加速器が運転されている間に、加速器室遮蔽ドアが開かれる；

- (c) 加速器室内にオペレータがいるのに、加速器室遮蔽ドアが閉じられる。

### 電源遮断

(171) サイクロトン磁石、イオン源および高周波発振器に電源を接続している3つのキャビネットには、それぞれ安全な設計の遮断キー（電源キー）が備えられている。各ケースにおいて、電源がonである間はキーは捕捉されたままであり、電源がoffであるときにのみそれを解放することができる。いったん電源がoffにされ、キーが解放されて取り外されると、電源はキーの使用なしでonにすることができない。したがって、3つの電源のうちの少なくとも1つが遮断されたという条件で、サイクロトンはビームへの被ばくに関して安全になる。

### キー交換

(172) 運転の間、出入りドアのキー（ドアキー）は、立入りを防ぐため、すなわち170項のシナリオ（b）を防ぐために、捕捉キー交換ユニットの中に残される。いったん加速器の3つの電源のどれかがoffにされ、関連する電源キーが取り外されると、そのとき、このキーをキー交換ユニットに挿入することができる。電源キーは捕捉され、ドアキーは解放されて、加速器室への立入りができるようになる。同様に、ドアキーが交換ユニットに戻されると、ドアキーは捕捉され、電源キーは解放されて、加速器電源の操作ができるようになる。

### 出入りドア

(173) 遮蔽された加速器室への主な出入りドアには、ドアが閉じた位置にあるとき床の中へ押し下げられるようになった大きいステンレス鋼ボルトが取り付けられている。この主ドアボルトは、それを上げた（ロックを外した）位置または下げた（ロックした）位置のいずれかにしっかり固定する2つのキー、すなわちドアキーと探索キーによって操作される。加速器室ドアを開くためには、キー交換ユニットからドアキーを手に入れて、加速器室ドアボルトを上げるために用いる。そのとき、このドアキーは、ドアが開いている間電源キーとの交換を防ぐために、すなわち上記シナリオ（a）を防ぐために、ドアの中に捕捉される。ドアボルトを上げた位置にしっかり固定すると、探索キーは解放され、ついでそれを下に述べる加速器室ドア閉鎖操作のために使用できる。

(174) 加速器室ドアの閉鎖操作は、オペレータがサイクロトンの運転に先立ち加速器室内に閉じ込められることがあるという、上記シナリオ（c）に対する防護になる。1人のオペレータが加速器室ドアのそばに配置され、プッシュボタンスイッチを操作してタイマシステムを使用可能にするが、それ自体はタイマを始動しない。このオペレータは、全ドア閉鎖シーケンスの間は加速器室ドアのところにとどまり、シーケンスがうまくゆくようにボタンを操作し

続けなければならない。

(175) 二番目のオペレータはドアボルトから探索キーを手に入れ、加速器室ドア入口でキースイッチを操作するためにこのキーを使用し、それによって加速器室探索手順を始めるのに必要なタイマを始動する。次にこのオペレータは数多くの探索位置を訪れ、さらにキースイッチを操作し掛け金をかけるために、加速器室内に入る。全ての探索位置で操作が行われることを機械的システムで確実にする一方で、オペレータは全ての職員が加速器室から退去したことを保証するために、加速器室を物理的に捜す。ドアの閉鎖が差し迫っていることを警告する音響による警報によって、加速器室ドア閉鎖手順はさらに強力なものとなる。

(176) 探索手順が、正しいシーケンスの中でかつ指定された時間に全部完了したならば、加速器室ドアでの最後のキースイッチ操作により、モータ閉鎖制御装置によるドア閉鎖が可能になる。ドアが閉じられたとき、主ドアボルトは探索キーを用いて下げられ、キーはドアに捕捉される。そうすると、ドアキーは解放され、キーを交換ユニットに戻すことができ、それによってサイクロトロンを運転するための電源キーが解放される。

(177) 上記に加えて、遮蔽された加速器室エリアと制御室には緊急時停止ボタンが備えられている。運転中にこれらのボタンを押すと、サイクロトロン電源は遮断される。

### 診断運転

(178) 設計段階において、加速器室ドアを開いたまま RF 電源を on にしてサイクロトロンを運転できることが必要となる診断的保守モードが定められていた。加速器室ドアにはドア開放の場合にマシンを遮断するようこの電源に作用する防護スイッチが備えられているので、この運転要件を満たすために追加の設備が必要であった。この問題に対する容認できる工学的解答を準備することが賢明と思われた。そうしないと、オペレータが彼らの作業目的を達成するために、このインターロックシステムの一部をバイパスするのを奨励することになるかもしれないからである。設計上の解決は、3つの電源遮断スイッチの横にもう一つの診断キースイッチを設けることであった。この診断キースイッチにより、RF 電源キーがキー交換ユニットの中であってドアが開いているのを許しているにもかかわらず、RF 電源を操作することができるが、他の2つの電源キーのうちの1つ (MG か IS ただし、RF でない) によってのみこれを操作することができる。このようなやり方で、3つの電源のうちの少なくとも1つがなお遮断されているので、マシンの防護は保たれる。

### 追加の考慮

(179) 加速器室内のオペレータを発見するための更なる装置が、設計段階において考察されたが、加速器室エリア内の設備が重大な放射線損傷を受け、そのため動作と信頼性が損なわ



れたことがあるという理由で、それらは退けられた。また、この環境中で放射線検出器を使用することも、これらの理由およびその装置の潜在的に高価な開発費のために退けられた。

### 危険の同定

(180) 設計が確定し、その詳細が公式の申し立てと審査のために提出された。危険性および実施可能性 (Hazop) 手法 (Kletz (1992)) を用いて、コンポーネントおよびシステムの故障を同定するために、定性的アプローチがとられた。この研究の成果は、定量化されたリスク評価の根拠となっている。

(181) Hazop 技術は、それぞれの設計意図からの逸脱について、“少しもない”、“それ以上の”、“の一部”、および“より以上の”といった一連の見出し語を適用することによって、各コンポーネントおよび操作を詳細に考察する。この見出し語は、各ケースの中で、一つの特定の故障に注意を集中するために用いられる。可能性のある故障原因が調べられ、その影響が列挙される。Hazop 技術は、シナリオ解析における不完全さによるエラーを最小にするためにしばしば用いられる。

(182) この例では、Hazop 研究による審査が概念設計段階で実行され、ついで詳細設計段階で設計の最終テストを行うために繰り返された。これらの Hazop セッションは、このシステムの電気工学と機械工学、放射線安全と一般的な安全、および操作を完全に評価し、審査することができるように、専門家の小さいチームによって遂行された。それに加えて、オペレータとハードウェアシステムとの相互作用の評価と審査を確実にするために、ヒューマンファクタが特に考察された。設計の意図をコンポーネントについて表にし、システム操作およびシステムを操作するために必要な人の行動の場合には、作業流れ図の形に作った。見出し語を用いて、関連する原因、影響、議論および行動を記録して、Hazop 研究出力の形にした。

### フォールトツリーを用いる定量的リスク評価

(183) Hazop による審査とコンポーネントおよびシステムの信頼性評価の結果を用いて、定量化されたリスク評価を主な故障シナリオについて作った。このリスク評価は、システムのいろいろな部分からのリスクの定量的比較を提供し、設計の中の主な欠点を同定するために役立ち、また初期の設計原則の確立を可能にした。

(184) リスク評価は、サイクロトロンオペレータの被ばくのリスク評価への統合化されたアプローチを形づくるために、ハードウェアシステムとヒューマンファクタの両方を考察した。この例については、170 項で言及した 3 つのシナリオが同定された：(a) 加速器室ドアが開いているときの加速器の起動、(b) 加速器運転中における加速器室ドアの開放、および (c) 加速器室内に閉じ込められたオペレータ。この状況のうち、シナリオ (a) のフォールトツリー解析

に限って詳細な議論を行う。

#### シナリオ(a)：加速器室ドアが開いているときの加速器の起動

(185) このケースでは、マシンは診断モードでの保守のためにオフラインの状態になっていると仮定する。RF 電源キーはキー交換ユニットの中に捕捉されている。他の2つの電源キーのうちの1つ (IS か MG のいずれか) が、診断キースイッチ中にある。このように、このキーは RF システムに電力を供給し、同時に残りのキャビネットのうちの1つ (たとえば、IS) への電源を遮断している一方で、第3のキャビネット (ここでは MG) は電源キーがそこにあり、通常やり方で電力が供給される。図8のフォールトツリーで示されるように、ドアが開いている (ヒューマンエラー) にもかかわらず、また同時に、電源の1つが遮断されていない (技術的なエラー) にもかかわらず、もし起動が試みられるならば、加速器室内のオペレータは被ばくするであろう。システムのコンポーネント故障の頻度または確率は、図の中に示されている。これらの値は、規則的な間隔での検査およびそのような検査の間に検出された故障の修正にもかかわらず残っている残留故障率である。

(186) 起動シーケンスには、サイクロトロンチームによる一連の操作の完結が必要である。チームがこれらの操作の間に加速器室ドアが開いていることに気づかない確率、すなわち怠慢という一般的な誤りを犯す確率を  $3 \cdot 10^{-3}$  と仮定する。

(187) 電源遮断の失敗は2つのやり方で起こりうる。主電流遮断器が自然に閉じるか、または、電源キーが関連する電源を予想どおり遮断することなくパネルから解放され、ついで、もう一つのパネルに移動してもう一つの電源が入るかのいずれかである。

(188) 電源キーの誤った解放とそれにつづく転送は、今度は2つのシーケンスに沿って起こりうる。ひとつは、電源キーが診断モードに入る前に、そのキャビネット (たとえば IS) から解放され、それから診断キースイッチの方へ移動するとき、キャビネット (ここでは IS) への電源を遮断しない。もう一つは、診断モードを完了した後、電源キーが RF への電源を遮断することなく診断キースイッチから解放され、それからそのキャビネット (ここでは IS) に戻される。

(189) 電源キーの誤った解放は、今度はキー捕捉装置の機械的故障か電氣的システムの故障のいずれかの結果であろう。3種類の電氣的システムの故障が認められている。すなわち、電源の共通原因故障があるか、キースイッチが閉じなくなるか、あるいは電気機械的故障があるか、である。ソレノイドが開のままになるか補助の接点が閉じなくなり、同時に、プッシュボタンまたは電流遮断器が閉じなくなれば、電気機械的故障が起こるであろう。

(190) シナリオ(a) “加速器室ドアが開いた状態での起動” におけるオペレータの被ばくの確率は、年に  $3.01 \cdot 10^{-6}$  である (図8のフォールトツリーの中には、丸められた値  $3 \cdot 10^{-6}$  が

与えられている)。Veselyら(1981)によって言及されているように、それぞれの基本事象の確率または頻度の変化に対する頂上事象（すなわちオペレータの被ばく）の確率の感度を解析することが可能である（上の例5.1.2は、基本事象よりむしろ全カットセットの相対的重要性を説明している）。表4には、この例における比較的重要な基本事象に対する感度を記してあるが、感度の定義は、頂上事象値の相対変化を基本事象値の相対変化で割ったものである。たとえば、主電流遮断器の自然閉鎖がなかったならば（基本事象値の100%の変化）、全てのキャビネットが電力を供給されている確率は、 $2 \cdot 10^{-5}$ （フォールトツリーに与えられている）から $6.3 \cdot 10^{-6}$ まで変わるであろう。したがって、頂上事象の確率は、 $3.01 \cdot 10^{-6}$ から $9.45 \cdot 10^{-7}$ まで変わり、これは頂上事象値の68.6%の変化で、感度は0.686である。

表4 例5.2.2 放射性同位元素の商業生産用加速器のシナリオ(a)  
“加速器室ドアが開いた状態での加速器の起動”に対するフォールトツリーの感度解析

説明	感度
加速器室内操作の頻度	1
マシン起動完了	1
主電源遮断器自動閉	0.686
オペレータがキーで電力を復帰	0.314
キースイッチが閉じない	1件あたり 0.140
共通原因電源故障	1件あたり 0.0149
キースイッチまたはパネル解放キーの故障	1件あたり 0.0015
ソレノイド開固着	1件あたり 0.0002
検査間隔	0.967

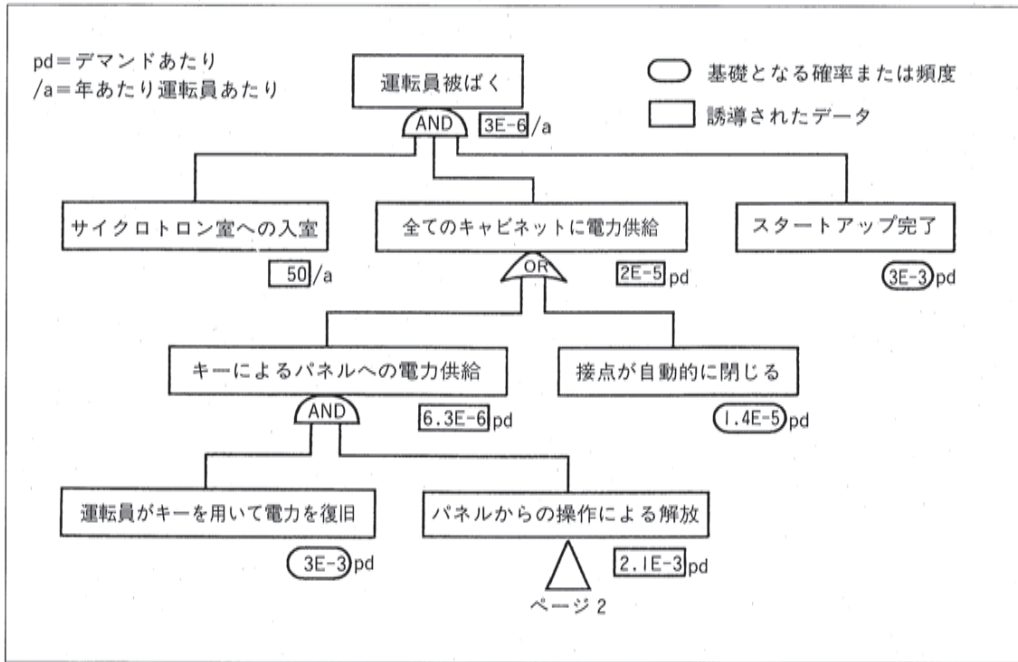


図 8(a) サイクロトロンにおける潜在被ばく (フォールトツリー解析, ページ 1/3)。

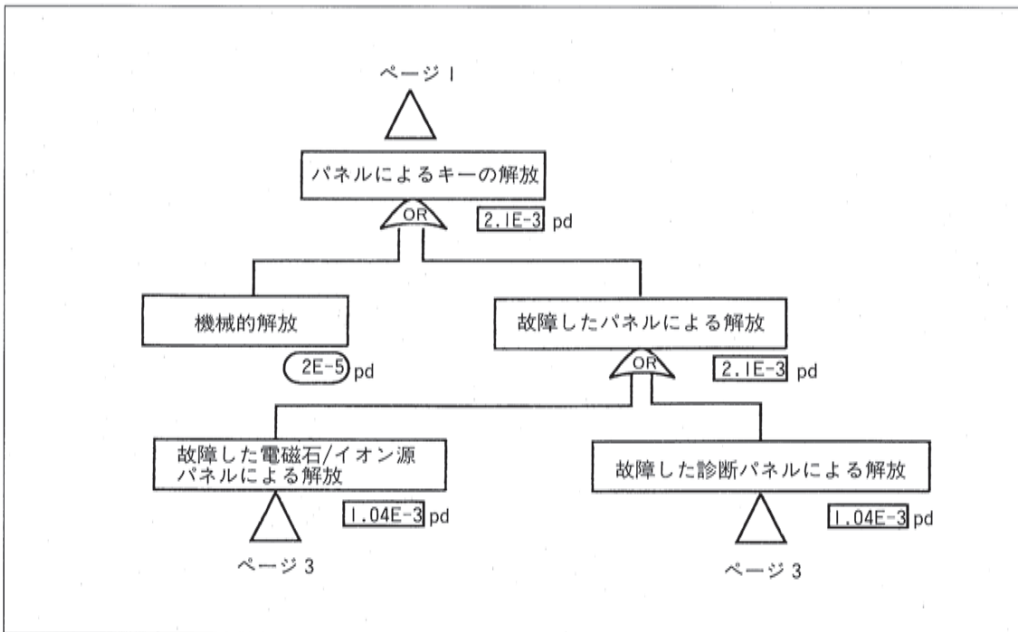


図 8(b) サイクロトロンにおける潜在被ばく (フォールトツリー解析, ページ 2/3)。

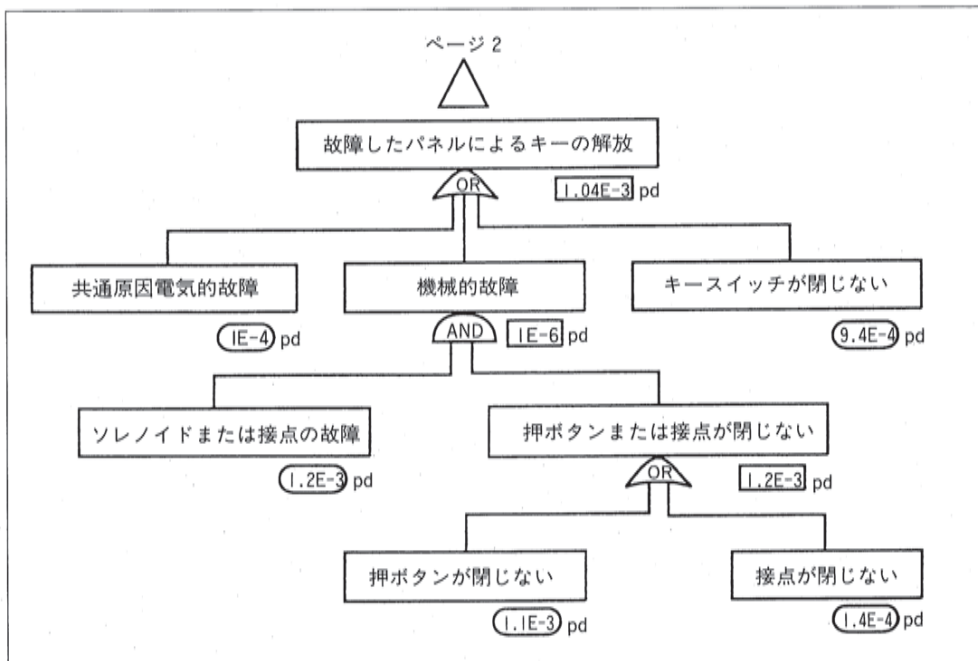


図 8(c) サイクロトロンにおける潜在被ばく（フォールトツリー解析，ページ 3 / 3）。

(191) この感度解析は，起動作業の完結，主電源遮断器の故障およびキースイッチ故障が最も重大であることを示している。根本にある基礎的コンポーネントの故障率および検査の間隔の詳細はここに与えていないけれども，この解析はまた，頂上事象の確率が，検査の間隔の長さに非常に敏感である（もっと正確には，検査の間隔の変更に起因するコンポーネント故障の残された率の変化に敏感である）ことを示している。これは，インターロックコンポーネントの正しい作動を実証する定期的な検査の重要性を同定するものである。

#### シナリオ (b)：加速器運転中に加速器室ドアが開かれる

(192) ここには提示されていないこのシナリオのフォールトツリー解析の示すところでは，オペレータ被ばくの確率は 1 年につき  $1.5 \cdot 10^{-7}$  である。4 つのサブケースが同定され，それらはドアマイクロスイッチ，キースイッチおよび RF 電源遮断器の故障によるものであったことが，感度解析により示された。

#### シナリオ (c)：加速器室の中に閉じ込められたオペレータ

(193) ここに示されていないこのシナリオのフォールトツリー解析は，1 年につき  $3.4 \cdot 10^{-6}$  のオペレータ被ばくの確率を示した。このシナリオの評価には，ヒューマンファクタの詳細な解析が必要であった。次の 4 つの主なサブケースが考察された：(1) 人が加速器室ドア閉

鎖手順の間に加速器室内で発見されるが、加速器室内に残ることを許される；(2)ドア閉鎖手順の間に加速器室にいる人が発見されず、加速器室内に残る；(3)人が、たとえば自殺をするために、加速器室内に故意に身を隠す；(4)加速器室ドア閉鎖手順の間、加速器室内の意識不明の人が発見されない。

(194) この評価の中で、長期および短期の目標(3.2節参照)の間に起こりうる対立を含む数多くの重大な問題が同定された。サイクロトロンオペレータは、その場の制御レベルおよび限度に適合するため日常的な放射線被ばくを制御する必要性を常に意識している。加速器室内の探索に費やされる時間が長くなるにつれて、加速器室に残留する誘導放射能による線量が増加するので、これは完全な探索をするという目標と対立する。探索は生産に先立って実行され、探索をすみやかに完了するほど早く生産が始められるので、生産圧力もまた対立を作り出している。

(195) それに加えて、オペレータの経験のレベルとその違いのほか、ドア閉鎖と探索の手順におけるオペレータの訓練のレベルとタイプも考察された。オペレータグループの交替勤務パターンも、評価の中で起こりうる因子として、睡眠妨害の問題を提起した。

#### リスク拘束値に対するリスク評価結果の比較

(196) 定量的リスク評価によると、オペレータの放射線への被ばくの全リスクは、1年につき  $6.5 \cdot 10^{-6}$  であり、シナリオ(a)からの寄与は1年につき  $3 \cdot 10^{-6}$  (すなわち46%)である。マシン運転中の加速器室内の放射線場は非常に高いため、これらの値は、被ばくがあったときの個人の条件つき死亡リスクに等しいとみなされる。言い換えると、この単純化された解析において、2.1節に述べた量  $\sum R \cdot f(E_i)$  は  $6.5 \cdot 10^{-6}$  であり、一時に潜在被ばくのリスクにさらされるのは少数の被雇用者にすぎないという単純なケースについて2.1節に提案された  $2 \cdot 10^{-4}$  という個人リスク拘束値  $R$  より明らかに低い。この評価されたリスクはまた、この例のもとになっている実際の施設の管理者によって実際に選ばれたいくぶんもっと制限的な設計目標すなわち  $10^{-5}$  に適合している。

### 5.3. 紛失した放射線源による潜在被ばく

(197) 放射線源の紛失は、固定施設ばかりでなく、移動式装置でも起こりうる。ここでは、移動式の線源の紛失を論じる。移動式の線源は、この報告書の中ですでに論じたものと似た事故被ばくに含めることができる。それに加えて、これらの線源は、通常は意図された場所とは違う場所にある線源に起因して引き起こされる、それら特有の典型的なシナリオを提供する。このことは、次のシナリオによって例証することができる：

- (a) 作業上の不運または過失による線源紛失；

(b) 線源に対する責任の不明確；

(c) 線源の特性または所在に関する誤報の原因となる，紛失線源に対する責務の欠如。

(198) 移動式線源による事故は頻繁に起こっており，これには職業被ばくと公衆被ばくの両方が含まれている。いくつかのケースにおいて，これらは重大な確定的障害を起こした。

(199) 移動式線源の安全な使用は主に良い作業手順に基づいており，したがって，そのような線源からの潜在被ばくの定量的解析は，設計された安全設備を持つ固定施設についての対応する解析よりももっと困難で不確実である。手順上の安全が損なわれる率はケースに大きく依存し，潜在被ばくの解析は非常に主観的になることがある。モデルシステムとして工業用ラ

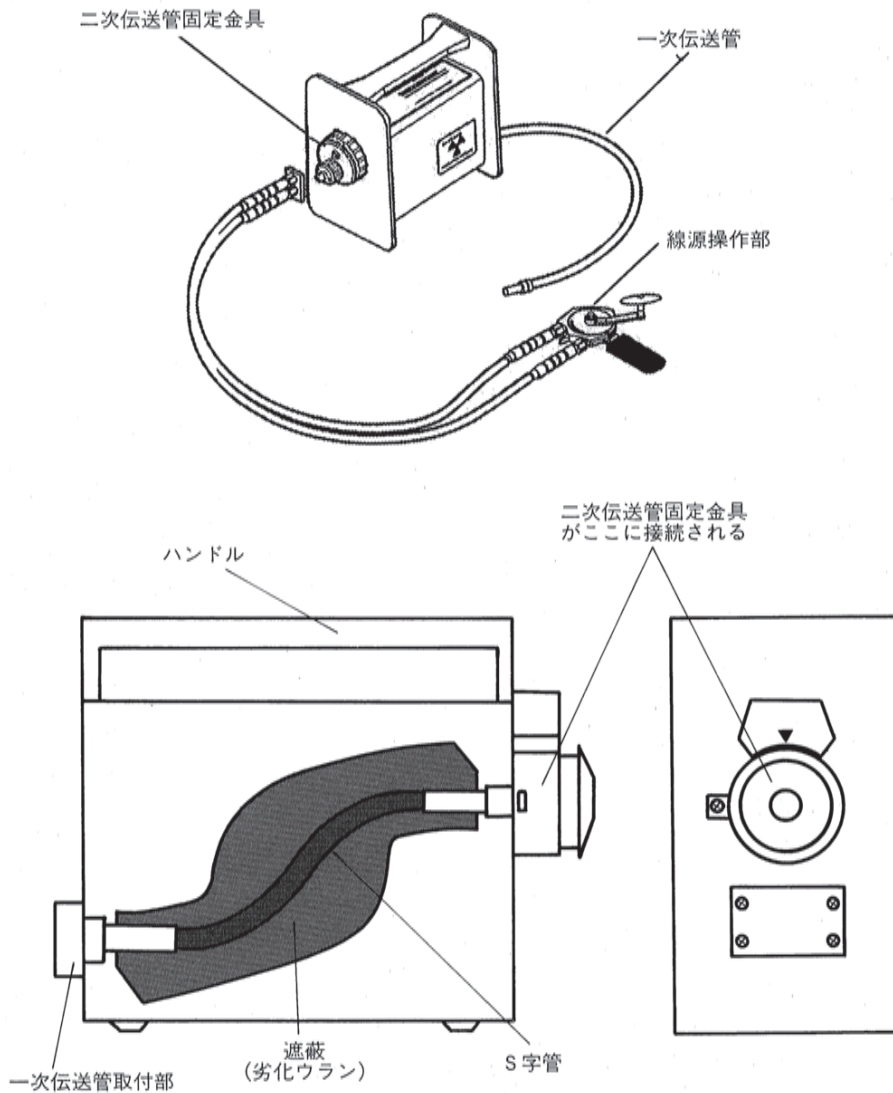


図9 移動式工業用ラジオグラフィ装置。  
上：装置の一般的なレイアウト；下：内部を示した図。

ジオグラフィを用い、移動式線源に係わる問題の一例を下に解析する。

(200) 工業用ラジオグラフィは通常、1-10 TBq の典型的な線源強度を持つ  $^{60}\text{Co}$  または  $^{192}\text{Ir}$  の密封線源を用いて実行される。線源は照射容器 (図 9 参照) の中に収納されており、これは劣化ウランのような遮蔽に囲まれた S 字形のチューブを持つ遮蔽容器である。線源は、伝送管を照射容器に取り付け、リモートコントロールケーブルを線源に接続することによって露出させられる。容器内の線源はリモートコントロールケーブルによって、ラジオグラフィ撮影位置へ達するガイドチューブの役目をする伝送管の中へ移動する。照射が完了したら、ケーブルを格納することによって線源は照射容器に戻され、閉じ込められて、次の照射の準備をすることができるようになる。

#### 5.3.1. 移動式工業用ラジオグラフィのイベントツリー解析

(201) ラジオグラフィの作業中には、潜在被ばくの原因となるような数多くの状況が生じうる。これらには、なかんづく線源の脱落やケーブルの詰まりが含まれる。以下の例は、線源脱落シナリオに対するイベントツリー (図 10) を概説したものである。

(202) このシナリオは、線源が照射位置にある間にコントロールケーブルから脱落するという事象で始まる。これは、線源ホルダの破損の結果として、または単に線源ホルダがコントロールケーブルから外れることによって起こることがある。この例に対しては、脱落の総合確率が必要とされるすべてである。

(203) このシナリオは、放射線技師が次の照射に備えてケーブルを格納すると仮定することによって継続する。放射線技師は手順に従って、線源が照射容器中に正しく格納されたことを保証するために、照射容器と伝送管 (ガイドチューブ) をサーベイすることになっている。これは、イベントツリー中の二番目の事象であり、サーベイが実行されるかされないかから成る。

(204) サーベイが実行されるならば、次の決定点はサーベイ測定器が働いているかどうかである。サーベイにとりかかるとき、測定器は作動状態または故障状態にある。測定器が働いていると仮定するならば、シーケンス中の最後の事象は、放射線技師が (伝送管中になお存在している密封線源によって) 放射線が存在するという測定器の指示に応答するかどうかであろう。放射線技師が測定器の指示に注意を払うならば、この例証の目的には、放射線技師が線源を戻すために適切な行動をとり、潜在被ばくは起こらないと仮定する。

(205) 放射線技師は、線源がなお伝送管 (ガイドチューブ) 中にあることがわからず、引き続き装置を次の場所の方へ動かす準備をするために、照射容器から伝送管を分離することがある。さしあたり、線源が伝送管の中に残っていると仮定すると、線源の入った伝送管の取扱いから、放射線技師の潜在被ばくが生じるであろう。この潜在被ばくの大きさは、線源の位



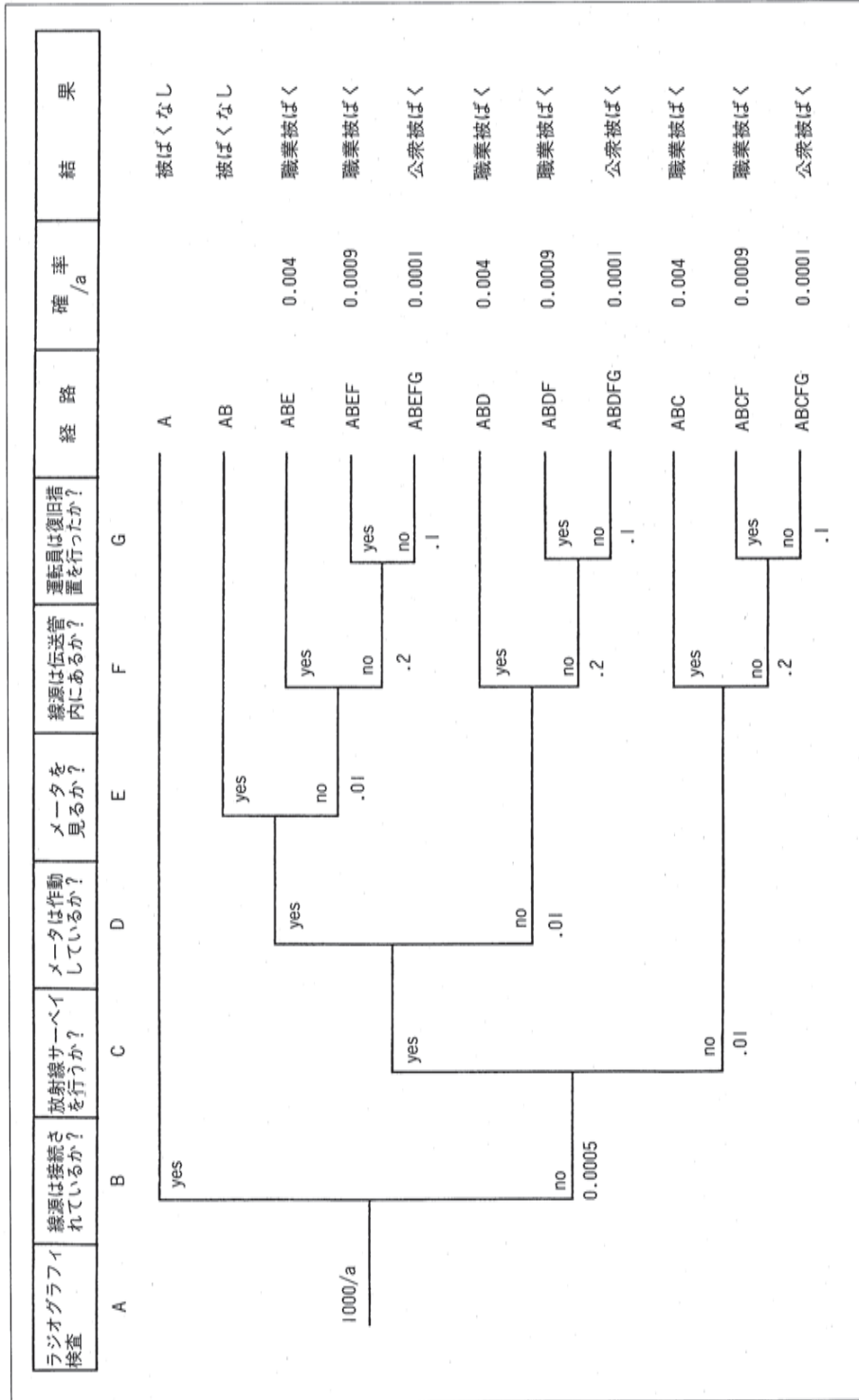


図10 移動式工業用ラジオグラフィからの潜在被ばく（イベントツリー解析）。

置、線源からいろいろな距離で過ごす時間、および数多くの他の因子に依存するであろう。この例については、放射線技師の潜在被ばくが起これという事実がエンドポイントである。

(206) これに対して、線源が伝送管から落ちれば、放射線技師だけでなく一般公衆の構成員の潜在被ばくも起こりうる。これら2つの潜在被ばくの相対的大きさは、線源がもはや制御の下にないことに放射線技師が気づく前の経過時間、線源の近くでの放射線技師の行動、および、線源が回収されるかどうか、またいつ回収されるかによって決まる。

(207) この例では、放射線技師および公衆構成員の事故被ばくの確率は、図10のイベントツリーの中に与えられている。異なるイベントシーケンスは異なる線量をもたらしそうなので、いくつかの $f(E_i)$ 値は1未満であると予想される。言い換えると、量 $\sum P_i \cdot f(E_i)$ の値は、 $\sum P_i$ のみによって推定することはできない。その代わりに、線量と損害の算定が、個人リスクの推定のために必要とされる。このコメントは公衆被ばくについても妥当であり、それに加えて、被ばくする人の見込み数についての仮定が、公衆構成員の個人リスクを計算するために必要である。これらの理由から、リスク拘束値との比較は行わない。

#### 5.4. ガンマ線治療装置による患者の潜在被ばく

(208) この節は、頭蓋内病巣のガンマ線照射に利用される特別なタイプのガンマ線治療装置の使用における、潜在被ばくの解析について述べる。この例は、その相対的な簡単さと公表された解析および情報 (Jones ら (1995 a, b)) が得られることから選ばれている。その技術的な側面のいくつかは、検討する特定の装置に特有なものであるが、この例では解析の一般原則を説明する。この装置は、ほんの少しの可動部分しかない比較的単純な機械であるが、この装置を使用する際、医療チームは、患者の治療を計画し正しい線量を投与するために大きな注意を払わなければならない。この例は、物理的 (機械的、水力的および電氣的) 側面、放射線安全ならびに装置の安全システムに限っており、担当医師の責任である患者選定または線量の処方のような問題について言及することはしない。

##### 5.4.1. ガンマ線治療装置の説明

(209) 定位放射線手術 (stereotactic radiosurgery) は、脳腫瘍および脳動静脈奇形のような正確に限定される頭蓋内組織体積に精密な線量を与える、定位用ガイド装置に関連した外部放射線の利用である。ガンマ線定位放射線手術は、線量体積に集中するように幾何学的に配列された全放射能 220 TBq ( $\pm 10\%$ ) の 201 個の固定  $^{60}\text{Co}$  線源による、病巣の閉頭下单回照射である。

(210) ここで考察する装置 (もっと完全な説明は、Jones ら (1995 b) の文献に与えられている) は、照射ユニット、4種類の交換可能なコリメータヘルメット、患者治療台、油圧シス

テム、制御コンソールおよび治療計画コンピュータシステムからなっている。装置の主要構成部分を図11に図示する。照射ユニットの201個の $^{60}\text{Co}$ 線源は、大きくて重い遮蔽ケース(8000 kg)内に配列され、各線源からの放射線は球の中心に集中する細いビームにコリメートされる。移動できるコリメータ装置すなわちヘルメットは、油圧で押し進めることによって球の内側に固定された内部コリメータと一致する。焦点でのビームの断面直径は、ヘルメット内の円形コリメータ孔のサイズを変更することによって変えることができる。さらに、ヘルメットのどの孔も閉鎖プラグで塞ぐことができる。これによって、目のレンズのような決定組織の放射線被ばくを最小にするといった、患者ごとの照射パターンを作ることができる。各ヘルメットについて、一对のトラニオンが定位用フレームに対する固定点となり、このフレームはまた4本のピンによって患者の頭蓋の外表面に取り付けられる。

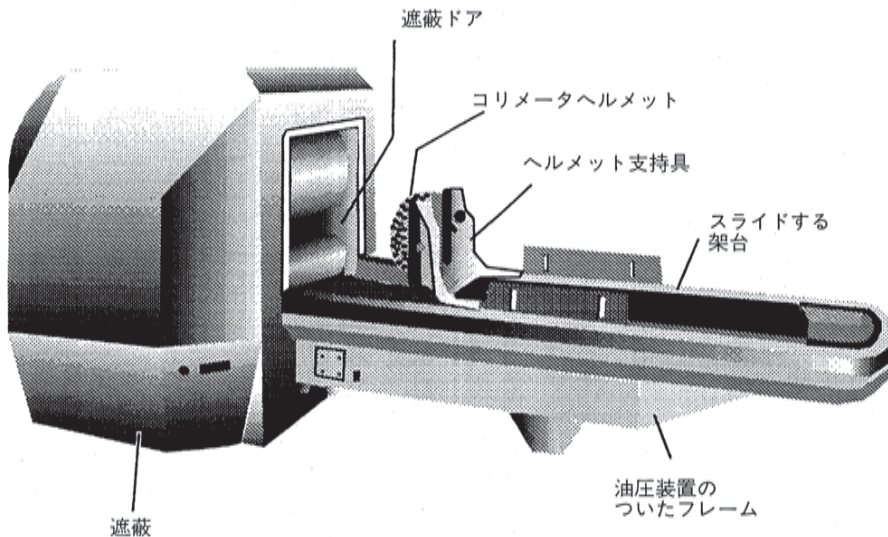


図11 例5.4のガンマ線治療装置。

(211) 患者の頭部は定位用ヘッドフレームの中に保持され、治療の間、頭蓋内の標的体積の中心がビームの焦点にあるように配置される。標的体積の外側の輪郭に与えられる全線量は、 $^{60}\text{Co}$ 線源の放射能、病巣の輪郭に合致する等線量線および患者の頭部が装置内に配置されている時間の長さに依存する。

#### 5.4.2. 治療手順

(212) 患者は、治療の間、トラニオンによってコリメーション用ヘルメットに取り付けられた定位用フレームをつけて、治療台上に横たわる。放射線ユニットの鉄遮蔽ドアの開閉およびユニットへの治療台の出入りの移動は油圧システムによって制御される。電源または油圧系

の故障の場合、治療台を照射装置から出して遮蔽ドアを閉じるために、治療台を解放するのに十分な圧力を提供するよう油圧流体の貯蔵容器が設計されている。治療を始める前に職員は治療室から退去し、ドアインターロックをかける。治療手順は、コンソール上のカウンタをセットし、ボタンを押すことによって始まる。患者と外部コリメータヘルメットを保持する台が油圧でユニット内へ押し進められると、放射線ユニットの遮蔽ドアが開く。定められた時間が経過した後、コリメータヘルメットと患者は自動的に装置から引き出され、遮蔽ドアは閉まる。もし治療計画により追加の分割治療が必要ならば、座標、コリメータおよびカウンタはリセットされ、治療過程が反復される。全ての分割照射は、通常、単一の治療セッションの中で与えられる。新しい<sup>60</sup>Co線源を持つ装置では、治療時間はわずか5-15分と短くすることができるが、線源が時間の経過により減衰した古い装置では、もっとずっと長くなりうる。

(213) この装置の使用の中で経験された問題のタイプには、以下のものが含まれる：治療サイクルの間の患者の被ばく、通常の医療および緊急時条件の間における担当医療職員および公衆の被ばく；急速な圧力変化での容器およびコンポーネントの油圧の喪失；不注意な電気の開閉および電気的コンポーネントと電源の故障；および装置の誤った機械的操作。

(214) 治療過程に含まれるいろいろな活動は、図12に示されている。図中に示された治療過程の各ステップの中で、一連の治療タスクとサブタスクが実行される。イメージングと位置限定の過程に対しては、正しい患者の同定、フィルムが正しくラベルされていることを確実にすること、病巣を定位用フレームの中心におくこと、およびフレームを患者の頭に固定すること、といった作業が、治療の究極の精度にとってきわめて重要である。同様に、治療計画の過程の中で、治療計画装置をチェックすること、頭蓋骨計測を行うこと、コンピュータに頭蓋骨データを入力すること、患者の頭部の位置を入力すること、アイソセンタの座標を決めること、等線量曲線をプロットすること、処方された線量を入力すること、などといったサブタスクは、治療計画に不可欠の作業である。プラグパターンの設定、ヘルメット（コリメータサイズ）の選択、アイソセンタ座標の設定、患者の頭部の位置決めおよび治療時間の設定と監視のような作業は、患者が正しい位置に置かれ、正確な治療が行われることを保証するために不可欠である。

(215) 上記のタスクおよびサブタスクの多くについて、主要なリスク要因はヒューマンエラーである。しかし、この例については、焦点はヒューマンエラーモードよりもむしろ装置故障モード（言い換えると、ガンマ線装置自体の操作または施設のシステムと機能に関連した主要な潜在的故障モードまたは異常な操作事象）であろう。これらの事象は患者、職員または公衆の望ましくない放射線被ばくをもたらすことがありうるが、ここでの議論は患者の望ましくない放射線被ばくに特に焦点を合わせることにする。

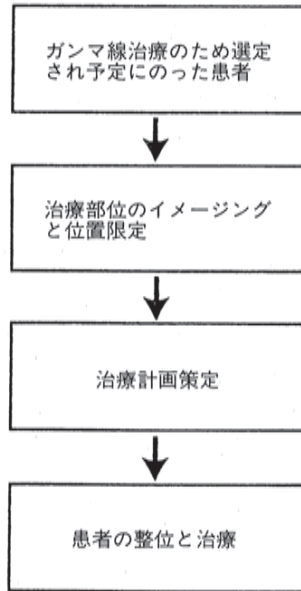


図12 ガンマ線治療装置による治療過程。

#### 5.4.3. 放射線治療装置のフォールトツリー解析

(216) 施設と装置に対する故障モードは、ガンマ線治療装置の運転経験と使用経験のある専門家の推定に基づいて解析された。これらの専門家は、医師、医学物理士および製造業者の代表者を含んでいた。この報告書および *Publication 64* (ICRP (1993)) の中で論じられているように、これは運転経験と専門家による判断評価技術の組合せの例証である。

(217) 事象データと専門家の判断を用いた評価に基づいて、望ましくない事象の発生確率は、患者5人に1人 (0.2) から患者1000人以上に1人 (0.001) にわたると推定された。全治療過程中のエラーの多くは患者あたり一度だけ起こるので、デマンド率は患者あたりで与えられた。他方、機械的、電気的および油圧のシステムは、照射が1回でなく一連の分割照射を用いているため、同じ患者の治療の間に何回か作動しなければならない。それらのケースにおいては、患者あたりの推定値になるように、デマンドあたりの故障確率を典型的な治療分割数で調整した。

(218) 相対確率でランク付けされたこのガンマ線治療装置に関連する故障モードを、表5に示す。2つの数が与えられている場合、これらは実際の確率値があると推定される値の範囲を表す。

表5 ガンマ線治療装置における故障の、ピンごとに分けられた相対確率

故障モード	確率推定値の範囲
音声または視覚による通報の故障	0.02—0.1
職員による治療介入（治療停止または緊急中断）	0.01—0.02
遮蔽ドアがまだ開いている間にドアインターロックが中断	0.01—0.02
緊急処置実行	0.01
運転モードの不注意な起動	0.002—0.01
職員が寝台を引き出すことができない	0.002—0.01
遮蔽ドアが完全に閉まらない	0.001—0.002
カウンタまたはタイマが故障	0.001—0.002
コンソール運転ボタン操作不能	0.001—0.002
放射線モニタが不正確または操作不能	0.001—0.002
電氣的コンポーネント故障	0.001—0.002
電源喪失	0.001—0.002
油圧コンポーネント故障	0.001—0.002
油圧流体の圧力降下	0.001—0.002
移動中の寝台の停止	0.001
ヘルメットが内部コリメータとうまく結合しない	0.001
ヘルメットマイクロスイッチの誤動作	0.001
ドアインターロック故障	0.001
移動安全タイマ故障	0.001
状態指示灯故障	0.001
緊急停止操作不能	0.001
緊急時解放ロッド不 작동	0.001
非常灯またはモニタがない	(場所に依存する)

(219) 説明の目的のために、放射線装置の中で誤って被ばくした患者に対するフォールトツリーを図13に示す。このツリーは装置故障だけを含み、デマンドのさいの特定の故障について示された確率が患者の誤った被ばくの全確率とどのように組み合わせることができるかを説明している。

(220) この例は、開発が完了しておらず、また信頼できる統計データを確立するほど十分には長く運転されていない装置またはシステムを解析するために、確率論的評価の技術がどのように用いられるかを示すために準備されたものである。故障推定値を特定の原因に割り当てるのに用いられる情報の精度に大きな不確実性がある場合にも、これらの技術はシステムの解析に使用されることがある。この例は、運転の安全を改善するために変更がなされているとき、どのシステムを優先するかを決めるために確率論的技術を、相対的な意味で、用いることを示している。この例の価値は誘導された数字にあるのではなく、いろいろな防護システムの相対的寄与を示す数字の比較にある。

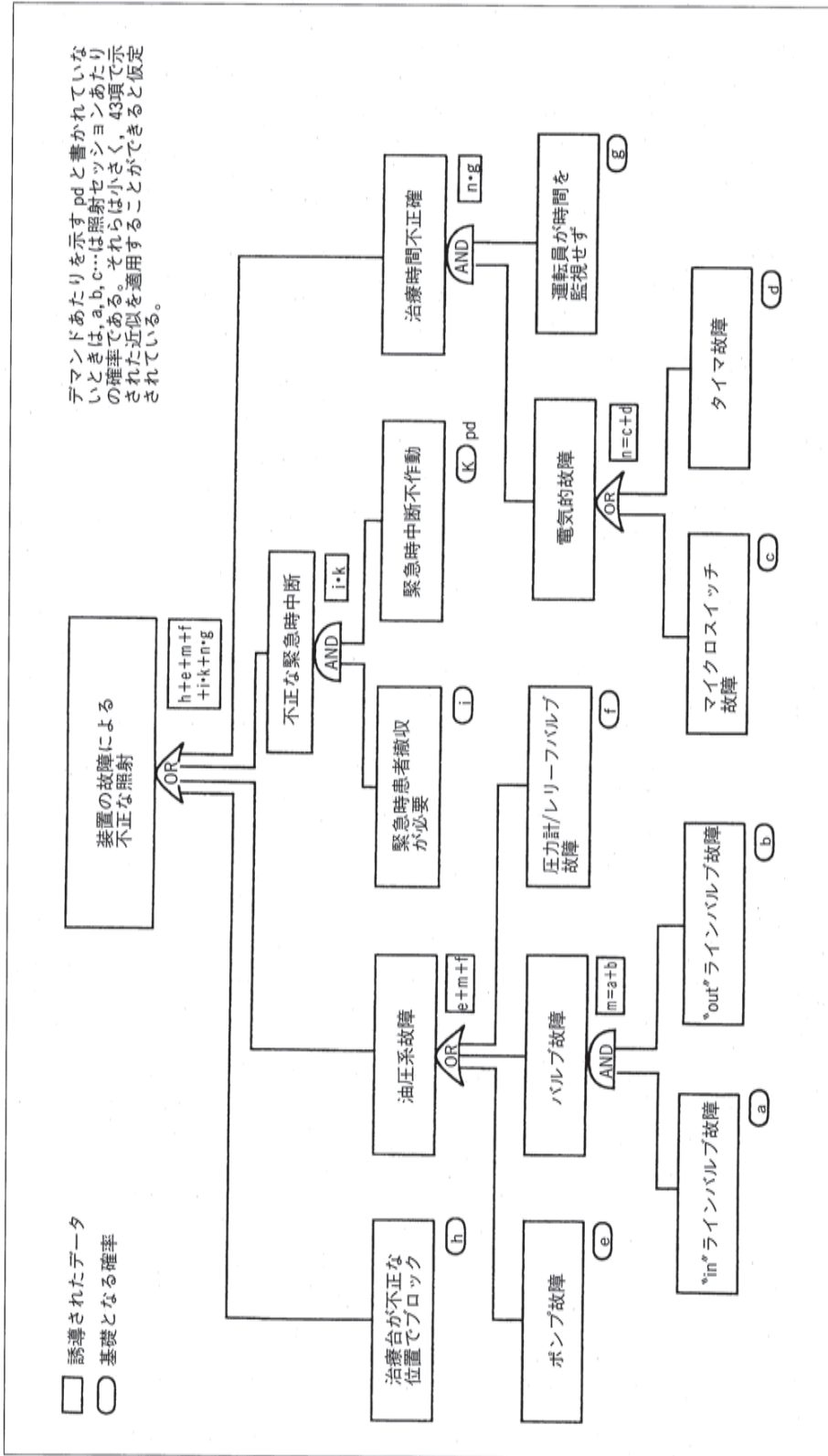


図13 ガンマ線治療装置による潜在被ばく（フォールトツリー解析）。

(221) 6人の専門家の予備的推定値が、確率推定値の範囲を決めるために集められた。望ましくない事象の推定頻度は、患者5人に1人から患者1000人に1人にわたり、5つの異なるグループ（ビン）にかたまる傾向があった。解析のために、各ビンに対して代表的な確率値を設定した。ある与えられたビンに割り当てられた全ての事象について、設定されたそのビンの確率が、予備的推定値の代わりに用いられた。望ましくない事象の頻度がそのビン内の事象に対してのみ比較値を表すとする限り、それらは各事象の相対的重要性を比較するために価値があろう。

(222) 以下の記述は、装置の運転時に認められた一つの事象の例示である。このケースでは、患者はある一回の分割照射でその分割に処方された線量の2倍よりいくらか大きい線量を受けた。分割照射のうちの1つに対する治療時間の終わりに、ユニットの油圧システムにあるソレノイド駆動のオンオフ弁の故障のため、患者ベッドが治療位置から引き戻せなくなった。職員が、(1)手で油圧システムのポンプを動かし、(2)ポンプをonにして、ベッドを引き戻すことができるように圧力を上げようと試みた。弁は'bed in'位置で固着しており、内部にあるスプリングによって、ベッドが動かせるように弁をリセットすることができなかった。この弁故障のため、装置の通常のおよび主要な緊急時の患者引き戻しシステムの両方が使用不能になり、その結果、患者は意図された3分間の治療時間より長い3.8分間の照射を受けた。医療職員が室内に入り、ベッド上の圧力均等化ラッチを引き、およそ50cmベッドを動かすことができた。その後、彼らはユニットから手でヘルメットを分離し、治療室から患者を移した。



## 引用文献

- Arbejdsskadestyrelsen (1996). Méntabel (in Danish). Arbejdsskadestyrelsen, PO Box 3000, DK-2100 Copenhagen, Denmark.
- Barlow, R. E., Fussell, J.B. and Singpurwalla, N.D. (1975). *Reliability and Fault Tree Analysis, Theoretical and Applied Aspects of System Reliability and Safety Assessment*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA.
- Bell, J. and Swain, A.D. (1983). *A Procedure for Conducting a Human Reliability Analysis for Nuclear Power Plants*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, NUREG/CR-2254.
- CCPS (1992). *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. Second Edition with Worked Examples*. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 345 East 47 th Street New York, NY, USA.
- Cox, S.J. and Tait, N.R.S. (1991). *Reliability, Safety and Risk Management. An Integrated Approach*. Butterworth-Heinemann. Oxford, UK.
- Grosh, D.L. (1989). *A Primer of Reliability Theory*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- IAEA (1990 a). Extension of the principles of radiation protection to sources of potential exposure, safety report. *Safety Series 104*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (1990 b). *The Radiological Accident in San Salvador*, STI/PUB/847, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (1992 a). Procedures for conducting probabilistic safety assessments of nuclear power plants (Level 1): a safety practice. *Safety Series 50-P-4*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (1992 b). Radiation safety of gamma and electron irradiation facilities: a safety guide. *Safety Series 107*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (1996 a). International basic safety standards for protection against ionising radiation and for the safety of radiation sources. Safety Standards. *Safety Series 115*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (1996 b). *Lessons Learned from Accidents in Industrial Irradiation Facilities*. STI/

- PUB/1015, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- ICRP(1977 a). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. *Annals of the ICRP* **1**(3), Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP(1977 b). Problems involved in developing an index of harm. ICRP Publication 27. *Annals of the ICRP* **1**(4), Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP(1983). Cost-benefit analysis in the optimization of radiation protection. ICRP Publication 37. *Annals of the ICRP* **10**(2/3), Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP(1985). Radiation protection principles for the disposal of solid radioactive waste. ICRP Publication 46. *Annals of the ICRP* **15**(4), Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP(1989). Optimization and decision-making in radiological protection. ICRP Publication 55. *Annals of the ICRP* **20**(1). Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP(1991). 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP* **21**(1-3), Pergamon Press, Oxford, UK.
- ICRP(1993). Protection from potential exposure: a conceptual framework. ICRP Publication 64. *Annals of the ICRP* **23**(1), Pergamon Press, Oxford, UK.
- IEEE(1983). *PRA Procedures Guide. A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, USA, NUREG/CR-2300.
- INSAG(1995). *Potential Exposure in Nuclear Safety*. A report by the International Nuclear Safety Advisory Group. *INSAG Series No. 9*. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- Jones. E. D., Banks, W. W., Altenbach, T.J. and Fischer, L.E. (1995 a). *Regulative Risk Analysis in Regulating the Use of Radiation-Emitting Medical Devices*. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA, NUREG/CR-6323.
- Jones, E. D., Banks. W.W. and Fischer, L.E. (1995 b). *Quality Assurance for Gamma Knives*. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA, NUREG/CR-6324.
- Kletz, T. (1992). *Hazop and Hazan: Identifying and Assessing Process Industry Hazards*. Institution of Chemical Engineers, Davis Bldg, 165-171 Railway Terrace, Rugby, UK.
- NEA/OECD(1995). *The Meaning and Application of the Concept of Potential Exposure*, A Report from the CRPPH/CSNI/CNRA/RWMC Expert Group, OCDE/GD(95) 145. Organisation for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency, Le Seine Saint-Germain 12, Boulevard des Îles, F-92130, Issy-les-Moulineaux, France.

- Procaccia, H. (ed.) (1995). *Guidebook on the Effective Use of Safety and Reliability Data*. Société Française d'Etudes et Réalisations, 5, Passage Delessert, Paris, ESReDA Series on Statistics No. 2, Société Française d'Etudes et Réalisations.
- Purdy, J. A., Biggs, P. J., Bowers, C., Dally, E., Downs, W., Fraass, B. A., Karzmark, C. J., Khan, F., Morgan, P., Morton, R., Palta, J., Rosen, I. I., Thorson, T., Svensson, G. and Ting, J. (1993). Medical accelerator safety considerations, report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 35. *Med. Phys.* **20**, 1261-1275.
- Swain, A.D. and Guttman, H.E. (1983). *Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, NUREG/CR-1278.
- Thomas, G. O., Croft, J. R., Williams, M.K. and McHugh, J.O. (1996). *IRID : Specifications for the Ionising Radiations Incident Database*. National Radiological Protection Board, Chilton, Didcot, Oxon, UK.
- Tortorelli, J.P. (ed.) (1985). *A Workshop on Developing Risk Assessment Methods for Medical Use of Radioactive Material* (2 vols), Idaho National Engineering Laboratory, Lockheed Idaho Technologies Company, Idaho Falls, ID, USA, NUREG/CP-0144.
- Trager, E. A., Jr. (1989). *Review of Events at Large Pool-Type Irradiators*. US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA, NUREG-1345.
- UNSCEAR(1993). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. UN Publication Sales No. E. 94.IX.2. United Nations, New York, NY. USA.
- Vesely, W. E., Goldberg, F. F., Roberts, N.H. and Haasl, D.F. (1981). *Fault Tree Handbook*. US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA, NUREG-0492.

潜在被ばくの防護：選ばれた放射線源への適用

定価（本体 2,100円＋税）

---

平成10年 8月10日 初版第1刷発行

© 1998

翻 訳 社 団 日 本 ア イ ソ ト ー プ 協 会  
お よ び 法 人  
発 行

〒113-8941 東京都文京区本駒込二丁目28番45号  
電 話 (03) 5395-8082  
振 替 東京00180-4-614865

発売所 丸 善 株 式 会 社

---

印刷・製本 富士美術印刷(株)

ISBN4-89073-110-5 C3340