

## 2.2 意志決定過程を複雑にする要因

### 2.2.1 法の執行上の配慮

事故による火災爆発により放射性物質が環境中に飛散した場合と異なり、テロにおいては公衆の健康と安全が対策の総てではない。法の執行やその他の安全を保証するための配慮が必要となる。法の執行の観点からは、①事件の情報収集とその制御（爆発物が爆発する前に当局がテロを察知したとしても、そのことがテロリストの知るところとなれば、テロリストは攻撃を早める可能性がある）、②実行犯および共犯者の逮捕、③テロリストを訴追するための証拠収集などが追加される。一方、安全保証という観点からは、①部隊の展開の際に部隊が攻撃される可能性、②放射能のほか化学生物兵器を併用する可能性、③同時多発攻撃の可能性を配慮する必要がある。

### 2.2.2 公衆の健康と安全

公衆の健康と安全に関して意志決定者が考慮すべきことは以下の通りである。①対応部隊の放射線防護、犠牲者の除染と治療、公衆の放射線防護、②対策を講ずる上で、放射能の専門家や測定機器や補給物資はすぐには到着しないこと、③屋内退避や避難を実行できるか否かは、地方や州の法律だけでなく、住民の協力が不可欠であること。にもかかわらず、多くの州で、法によって定められた避難勧告執行人が存在していないこと、④食料や飲料水の摂取制限は、公衆の健康問題であるとともに、経済的問題であること、⑤短期的な予防策が、予想外の長期的影響をもたらす可能性があること（旅行者の減少や地域産物の販売先の減少）。これらの公衆の健康や心理的影響や環境保全や経済的影響といった相互に対立する諸問題を考慮しながらも、決断は時機を失せずに行い、かつそれを周知徹底させることが重要である。

### 2.2.3 大規模災害、基盤設備の損害

自家製の核爆発物、盗まれた核兵器、大型の放射能を飛散させる爆弾（ダーティ爆弾）が都市部で爆発すれば、大混乱が起きることは明白である。医療面では、地域の医療資源の能力を凌駕した大量の犠牲者が発生し、被ばく、外傷、熱傷など複雑な傷害を被った患者が発生する。火災や放射能汚染が、対応を困難にする。核兵器が使用されると、電磁波の発生により通信や電力供給システム、コンピュータ・ネットワークに障害が及ぶ。また、交通手段が損なわれる。いわゆる死の灰の降下や放射化された土壌・建造物が人の接近を阻害する。

### 2.2.4 心理社会的影響

テロリストの目的の一つは、公衆に恐怖心を植え付けるという心理的なものである。放射能が絡むと、五感で感じられないことや歴史的記憶（広島・長崎、チ

エルノブイリ)などが相まって、事件は公衆の恐怖と不安を倍加する。対策策定者は、公衆の恐怖や不安を受け止め、健康と安全を守る対策や情報を伝える手段を確立しなければならない。

### 2.2.5 環境問題

半減期の長い放射性物質が散布されると、長期に亘る除染作業と土壌・建造物の改善修復活動とともに、放射能モニタリングが必須である。事件の対策には、環境の復旧作業、住民や商取引のパートナー、さらに生産品の顧客の自信と信頼を回復するための対策が含まれる。また、放射性廃棄物の処理は、多大な費用が必要なこと、長期の対策が必要なことを認識する必要がある。

## 2.3 機能的な思考方法

対策は、概念的に危機管理 (crisis management) と影響管理 (consequence management) に分けられる。両者の区分は必ずしも明確ではないが、計画立案や対応策の実行の際に役立つ概念である。

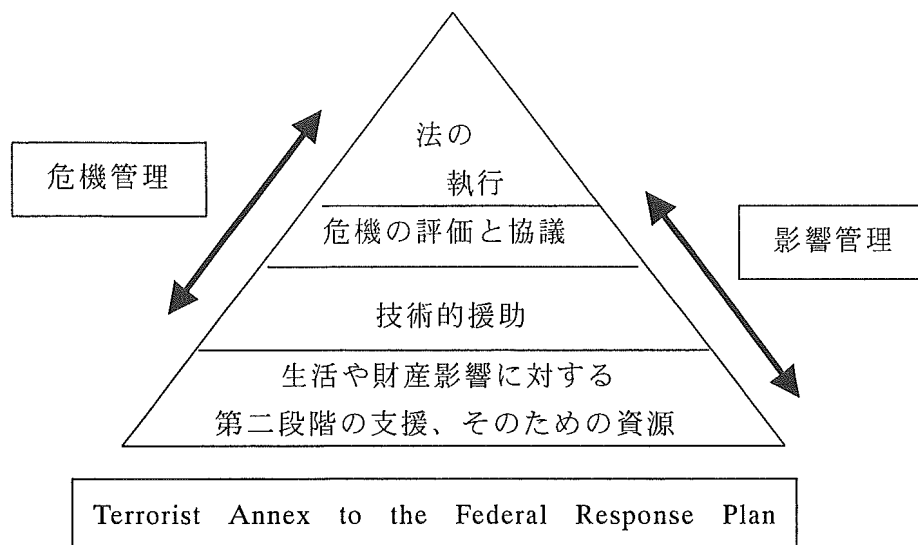
### 2.3.1 危機管理

危機管理は、法の執行活動で、テロリストに対する対応策やテロ活動の予防活動が含まれる。FBI の定義によれば、危機管理においては、テロ事件の原因 (テロリストの正体、動機、能力、武器) に重点を置いて活動する。テロリズムの危険性や活動を事前に察知し、予防し、解消するために必要な資源を同定し、準備しておく。テロ事件が発生した場合には、古典的な法の執行活動 (情報収集、搜索活動、戦術的作戦、行動確認、協議など) のほかに、公衆の健康と安全を守る活動が含まれる。

### 2.3.2 影響管理

テロの結果あるいは予測される結果に対する対応に重点があり、長期的な対策を含む。FBI の定義に従えば、影響管理は、事件が公衆の健康や安全や環境に与えた影響あるいはその可能性に重点をおいた活動で、公衆の健康、安全、環境を守る対策、基本的な政府機能 (サービス) の回復、被害を被った政府・経済・個人に対する緊急援助対策などが含まれる。

下図に示すように、危機管理と影響管理は、同時並行的に活動する。1995年4月19日のオクラホマ市庁舎爆弾テロでは事前予告がなかったため、影響管理対策が先行し、危機管理は後追いになった。



### 第3章 放射性物質を伴うテロ事件の特徴とその影響

放射性物質を伴うテロは、以下のようなカテゴリーに分類される。第1のカテゴリーは、放射性物質を通常火薬や他の方法で飛散・散布する装置の使用である。このカテゴリーには核施設や核物質輸送への攻撃、核分裂を伴わない核爆弾の爆発を含めることができる。第2のカテゴリーは、核分裂を伴うもので、自家製あるいは盗難核兵器の爆発がある。

#### 3.1 放射性物質の飛散事件

##### 3.1.1 限局的な飛散

1ないし2、3の小低レベル線源が使用される事件で、主な目的は公衆へ恐怖心を引き起こし、社会秩序の混乱を目的とするテロ事件である。線源は、小型の容器（アンプル、靴箱、スーツケースなど）に収納される程度で、放射性物質が溶液の場合には、水源に投げ込まれたり、狭い地域に散布されたりする。場合によっては、二輪車、自動車、飛行機により散布され、レベルは低いが広範囲に撒かれることがある。この種の事件では、急性の放射線傷害は考えられない。被ばくの晩発影響は少しあるかもしれない（第4章参照）。主な健康影響は、心理社会的なものである（第5章参照）。

被ばくは、主に外部被ばくであるが、吸入や摂取による内部被ばくも起こりうる。汚染が限局しているならば、対応者は、防護服により体表面の汚染を予防し、 $\gamma$ 線からの被ばく線量を低減するために線源との距離、作業時間を制御しながら活動する（第4章、第9章参照）。

### 3.1.2 広域的な散布

もっとも考慮しなければならない事件は、大量の放射性物質を強力な爆発物で広範囲に飛散させる事件である。もし、人口密集地で発生したなら、爆発で負傷した犠牲者は、放射性物質で汚染している。高レベルの放射性物質が使用されれば、被ばくにより生命を脅かされる犠牲者が発生しうる。

第1のシナリオは、固体やペレットや粉末の放射性物質を爆発で飛散させるダークティ爆弾の使用である。ガス状や液体状の放射性物質が使用される場合も考えられる。この爆弾の製造と運搬中にテロリストが致命的な被ばくを受けない程度に放射能レベルは低いと思われる。高レベルの放射性物質を用いるためには、遮蔽材を使用する必要があり、デザインや作成を困難にする。(訳者註：9/11/02の同時多発テロを実行できる組織であれば、この困難性は製造の障害にならないであろう。)このような爆発が起きた場合、放射性物質の破片や塵が土地の汚染を引き起こす。数ブロックの市街地が汚染されうる。

第2のシナリオは、原子炉、使用済み核燃料の保管所、核燃料再処理施設、核物質運搬車両、高レベル廃棄物貯蔵施設への高性能爆薬を用いた攻撃により高レベルの放射性物質が環境中に飛散する事態である。重装備のテロリストによって侵入されたとしても、たまたま原子炉の容器が開かれて燃料棒の交換作業中でない限り、爆薬による攻撃が原子炉内部の放射性物質を環境中に放出する可能性は低い。この場合でも、原子炉が停止中は、短半減期の核種が崩壊しているので、放射能レベルは稼働中より大幅に低下している。また、熱が少ないため、破損した燃料棒からの核分裂生成物を飛散させるエネルギーが低下している。

使用済み燃料棒も攻撃の対象になるが、燃料棒中の放射能レベルは前項の条件より低下している。

影響を被る地域はというと、高放射能レベルの核燃料棒が攻撃された場合にはチェルノブイリ事故と同じ形態の人体影響が考えられるが、影響を被る範囲は狭い。放射性のガスや水溶液や粒子が飛散し、外部被ばくと内部被ばくをおこす。爆発が起きた構造物内には、数時間の間に致命的な被ばくを受けるほど線量率の高い場所ができるかもしれない。現場から遠ざかるに従い、被ばくやその他の危険は低下する。大学などの研究炉は、放射性物質の在庫量は少なく、予測される害も低い。

## 3.2 核兵器

核テロで予想される核兵器は、1個のおそらく小型の核兵器使用であろう。この場合、大惨事には違いないが州・連邦政府の資源および国際的な支援を動員すれば、影響は管理可能な範囲であろう。

### 3.2.1 核爆発の規模

核兵器の開発初期の爆発規模や核兵器製造技術の困難性から、国家より小さい団体が製造可能な核兵器は、10 キロトン (KT) 以下であろう。(訳者註：広島原爆は、16 KT) しかし、高性能の小型核兵器を盗み出すことも考えられる。核兵器を都市に成功裏に設置することは、困難を伴う。容量、重量、放射能が増加するほど発見されやすくなる。自家製の核兵器は、大きくなりがちである。盗み出した核兵器はコンパクトであろうが、防止装置が不正な起爆行為による核分裂の効率を低下させるであろう。

ここでは、0.01 KT というごく小規模な核兵器を解析する。これは、核分裂が核物質の一部でしか起きなかった「しけた核爆発 (fizzle)」の影響を評価するためである。0.01 KT 以下の核爆弾なら、通常爆弾の方が爆発力は高い。しかし、0.01 KT の核爆弾であっても、オクラホマ地庁舎爆発以上の威力を発揮する。

### 3.2.2 影響

#### 3.2.2.1 爆風

爆風と衝撃波により直接建造物の破壊や人的殺傷が起こるほか、間接的に落下破片やガラスなどの飛散物により人的殺傷が起きる。12 per square inch (psi) の爆風で窓際の人間の50%が飛散した窓ガラスにより死亡する(表 3.1)。表は、爆心からの距離により評価してあるが、これは大まかな予測である。爆心に対する窓の方向や人の位置などにより、影響は変わる。

#### 3.2.2.2 放射熱

核爆発により火球が生じ、その温度は絶対温度数千度に達する。火球から離れた場所でも、放射熱により発火し、また火球に伴う光が一時的あるいは永久的に視力を奪う。8 cal/cm<sup>2</sup> の熱への暴露は、暴露した人の50%を死亡させる(表 3.1)。表は、爆心からの距離で評価しているが、これは大まかな予測である。建造物の陰にいた人、熱波の通過時間、皮膚の色、露出面積などにより、影響は変わる。

#### 3.2.2.3 初期核放射線

核爆発は、 $\gamma$ 線と中性子線からなる非常に強い電離放射線の衝撃波を生み出す。爆発後1分以内の放射線を初期核放射線、それ以降の放射線を残留核放射線と呼ぶ。医療を受けなければ、体表面で4グレイ(Gy)の吸収線量(中心軸線量として約3 Gy)は、被ばくした50%の人間の致死線量である(表 3.1)。建造物や地下室は、放射線遮蔽効果がある。

#### 3.2.2.4 残留核放射線

核爆発1分以降の放射線を残留核放射線と呼ぶ。爆心に近いほど高レベルになり、

大部分は、核兵器の破片や中性子線などによって放射化された土壌や他の物質からの放射線である。地表面での核爆発は、これらの放射性物質を大気中に吹き上げ、やがてこれらは放射性降下物として地表に舞い落ちる。その分布は、核爆発規模、爆発高、気象条件により決定される。核爆発後1時間は、短半減期の放射性物質が多いため放射性降下物からの放射線により致命的な外部被ばくが起きる（表 3.1、表 3.2）。この表の予測は、地上爆発の場合である。

表 3.1 重大な影響の発生する範囲<sup>#</sup>（地表高爆発）

核爆発規模 (KT)	爆風による 50%致死範囲 (m)	熱傷による 50%致死範囲 (m)	初期核放射線による 4 Gy 被ばく範囲 (m)	核爆発後1時間に降下物により 4 Gy 被ばくする範囲 (m) *
0.01	60	60	250	1,270
0.1	130	200	460	2,750
1	275	610	790	5,500
10	590	1,800	1,200	9,600

<sup>#</sup> 被害の最大予測値を示す。

\* 他の影響と異なり、降下物の分布は気象条件とりわけ風と雨により左右される。

表 3.2 爆心よりの距離毎の残留核放射線による核爆発後1時間の吸収線量(Gy) <sup>#</sup>（地表高爆発）

核爆発規模 (KT)	1,000 m	2,000 m	10,000 m
0.01	6.7	1.5	0.02
0.1	38	8.3	0.1
1	210	47	0.6
10	1,200	260	3.5

<sup>#</sup> 被害の最大予測値を示す。

### 3.2.2.5 クレータ形成

核爆発により、クレータが形成される。クレータの規模は、核爆発の規模、地表高、地面の性状（硬い岩石、乾燥軟弱岩石、湿った土）で変わる。表 3.3 は、地上高で核爆発が起きた場合の乾燥軟弱岩石のクレータ半径である。

表 3.3 地表高核爆発によるクレータの半径（乾燥軟弱岩石）

核爆発規模 (KT)	クレータ半径 (m)
0.01	5
0.1	10
1	20 (25*, 15 <sup>#</sup> )
10	40

\* 湿った土の場合、<sup>#</sup> 硬い岩石の場合

### 3.2.2.5 地震

核爆発による地震により、地下埋没の基盤構造物に影響が及ぶ。復旧を遅らせる要因となる。

### 3.2.3 考案

核爆発の規模が1 KT を越すと、直接死因の順番が熱傷>放射線>機械的損傷になり、それ以下の規模では、放射線>熱傷>機械的損傷の順となる。空中で作業する対策要員は、特に残留放射線による被ばくに注意する必要がある。表 3.4 に放射能テロに使用される線源や物質毎に、その規模や人体影響をまとめる。

表 3.4 テロに用いられる線源・放射性物質、容積、傷害、状況

線源・物質の種類	線源の容積	傷害	放射能を示す状況
小放射線源（核医学、ブラキ治療用線源、工業計測用線源、小型標準線源等）	数 mm <sup>3</sup> ~ <100cm <sup>3</sup>	外部被ばく	放射能マーク 鉛遮蔽材
大放射線源（治療用 <sup>192</sup> Ir、 <sup>60</sup> Co）	>1 cm <sup>3</sup> ~ 数 m <sup>3</sup> （形状と遮蔽材の有無により異なる）	外部被ばく	放射能マーク 鉛遮蔽材
大放射線源をもちいたダーティ爆弾	>500 cm <sup>3</sup> ~ <1 m <sup>3</sup> （形状、遮蔽材の有無、飛散装置により異なる）	爆発が起きれば爆風、内部・外部被ばく	特異な破片（小金属破片、鉛遮蔽材） 発光の可能性 原因不明の熱
使用済み燃料を用いたダーティ爆弾	>1 m <sup>3</sup> （形状、遮蔽材の有無、飛散装置により異なる）	爆風、内部・外部被ばく	特異な破片（棒、粒状物質、遮蔽材） 発光の可能性 原因不明の熱
商業用原子炉への攻撃、原子炉事故	核燃料棒アセンブリー：~5m長	外部・内部被ばく	自明
研究炉への攻撃、研究炉の事故	商業炉の場合と同様だが、規模小さい	外部・内部被ばく	自明
放射性物質輸送事故	厚紙包装、30~55ガロンドラム缶、低非活性放射能用コンテナ、遮蔽金属塊	外部被ばく、ドラム缶やコンテナが壊れれば内部被ばく	放射能マーク 放射性物質の表示
不発核兵器	ずっと大型の容器	爆風、内部被ばく	特異な破片 高α線レベル 原因不明の熱
核兵器	ずっと大型の容器	爆風、熱、外部・内部被ばく	閃光、高熱、衝撃波 砂状の降下物

## 第4章 放射能災害の医学的管理

この章の目的は、3章に述べられたようなタイプのテロ事変の結果としての放射線被ばくに関連する健康障害、および放射線障害を有する患者の医学管理について述べることである。現場の担当者や患者の治療にあたる病院の医療従事者への指針を提供する。

### 4.1 基本用語

ヒトの放射線被ばくは、放射線源が体外の場合は外部被ばくとなり、放射性物質が体内に入ったときには、内部被ばくとなる。外部被ばくは、からだを透過するもの（例えば、中性子線や $\gamma$ 線）、および透過しないもの（例えば、 $\alpha$ 粒子や $\beta$ 粒子）がある。

放射性物質は、汚染された食物や液体を食べたり飲んだりして、あるいは、皮膚や創傷を通じて、また、ガスや霧状のものを吸入することで体内に入る。体内に入った放射性物質は、その化学的、生理学的性質によって体内分布が決定される。皮膚表面に残った放射性物質は、体内に入らなければ外部被ばく源となる。しかし、皮膚表面の放射性物質も、吸入や口を介して、また、皮膚の傷から体内に入り得る。

電離放射線の影響を記述したり分類したりする際には、多様な用語が使用される。まず、影響が出現する時間の表現として*早期*と*後期*がある。早期影響とは、通常、被ばく後、数日から数ヶ月の間に出現する出来事を指す。後期影響とは、長期にわたる出来事を指し、数年間は出現しないようなものも含む。第二の用語のセットは、*急性*と*慢性*であり、個人が被ばくした時間を基にした被ばく状況を表現するために用いられる。急性被ばくとは、通常、数時間以内の被ばくを示し、慢性被ばくは数日からそれ以上にわたる被ばくを示す。

電離放射線の生物学的影響は非確率的なものと確率的なものに分けられる。非確率的な影響は、しきい値（それ以下では影響が現れないような被ばくレベル）が存在するもので、影響の重症度は被ばく線量とともに強くなる。対照的に、確率的影響はしきい値を持たず、重症度は、被ばく線量に依存しない。皮膚の発赤（紅斑）は非確率的影響の例であり、大体5~6 Gyのしきい値を有し、被ばく線量の増加とともにより重症となる。放射線による発癌は、確率的影響の一つであり、しきい値はなく、生じた癌の悪性度は被ばく量に依存しない。発癌は後期影響の一つでもあり、被ばくと疾患の出現との間には、通常、年余にわたる長い時間が存在する。

放射線科学で用いられる数量とその単位は2つのカテゴリーに分けられる。この報告で用いられる最も重要な基本的数量は、吸収線量であり、その単位は、ジュール/キログラム ( $\text{J kg}^{-1}$ ) であり、グレイ (Gy) と呼ばれる。

吸収線量から由来し、放射線防護の目的で用いられる数量は、線量当量であり、



Gy に放射線の種類によって異なる線質係数を掛け算した値である。線質係数は、吸収線量を、電離放射線粒子の対象組織における生物学的効果によって重み付けするために選択される (ICRU, 1993)。線量当量の単位は、ジュール/キログラム ( $J\ kg^{-1}$ ) であり、特にシーベルト (Sv) と呼ばれる。

組織あるいは臓器における平均的な吸収線量の重要性を強調するために、国際放射線防護委員会 (ICRP) は、等価線量という数量を導入した (訳者註: 米国では ICRP 1990 年勧告を未だに採用しておらず、古い線量当量という言葉を使っている)。

## 4.2 健康影響スペクトル

### 4.2.1 一般的考察：細胞障害と吸収線量率

電離放射線の健康影響は吸収線量、吸収線量率、および被ばくした臓器や組織に大きく依存する。細胞の遺伝関連物質 (DNA や細胞分裂装置) への放射線障害は細胞死を誘発し、あるいは、もし細胞が生き残った場合は細胞や組織の機能変化を生じる。たとえば、骨髄幹細胞の死は血小板、白血球、赤血球の減少をきたし、その結果、易感染性や出血傾向が出現する。生残細胞における障害を受けた DNA は、突然変異の原因となり、発癌リスクが増加する。

吸収線量率は、放射線障害や個人レベルの危険度に大きな影響をもっている。細胞は、遺伝関連物質の障害に対して修復能を有しており、吸収線量率が低いときには、これらの修復メカニズムによって細胞に対する致死のおよび非致死の障害の頻度を減少させることができる。

### 4.2.2 電離放射線のヒトにおける早期影響

生命を脅かさない影響としては、一時的あるいは永続的な不妊、分裂速度の速い細胞 (例えば骨髄幹細胞) の減少、嘔吐、皮膚発赤、脱毛、および白内障がある。表 4.1 にこれらの影響について急性暴露しきい値の見積もりを示した。一般的に、被ばくが数時間以上の長時間にわたった場合、しきい値はより高くなる。

急性放射線症候群は、広い意味を有する用語であり、特定の臓器の重篤な障害や、数時間から数ヶ月のうちに死に至る場合もある障害を反映する一連の症状を表す。造血症候群、胃腸症候群、心血管症候群、中枢神経 (CNS) 症候群などの特定臓器症候群は多くの文献で詳しく論じられている (Conklin and Walker, 1987; Mettler and Upton, 1995)。次に述べる電離放射線の急性大量被ばくに関する症状は、Armed Forces Radiobiology Research Institute (AFRRI, 1999) が作製した *Medical Management of Radiological Casualties Handbook* から収載した。

表 4.1 急性被ばくによる非確率的影響の推定吸収線量しきい値

健康影響	臓器	吸収線量 (Gy)
一時的不妊	精巣	0.15
吐き気		0.35
造血障害	骨髄	0.5
可逆的皮膚障害	皮膚	2
永久不妊	卵巣	2.5 ~ 6
嘔吐		3
一時的脱毛	皮膚	3 ~ 5
永久不妊	精巣	3.5
皮膚紅斑	皮膚	5 ~ 6

0.35 Gy 程度の少量の吸収線量でも $\gamma$ 線の全身照射によって、吐き気、倦怠感、食欲不振が急性被ばくの数時間以内に出現し得る。これらの症状は数時間以内に消失する。0.70~1.25 Gy の範囲では、被ばく後数時間以内に一過性の吐き気が、5~30%の確率で生じる。慢性感染症のような他の因子によって、被ばくに対してより感受性が高くなっていることがなければ、死亡することはない。1.25~3 Gy の範囲では、吐き気や嘔吐の程度や出現確率が高まり、軽度から中等度の倦怠感も出現する。もし出現すれば、これらの症状は2日目までは継続する。この範囲では、死亡確率は依然低いが、感染、出血、発熱などの医学的問題は出現する。外傷や熱傷は、病的状態や死亡の確率を有意に増加させる。全身の中心軸での吸収線量が3 Gy の範囲（空気中での組織吸収線量は4 Gy）では、治療しなければ、成人では、約60日以内に50%が死亡する（Levinほか、1992）。実験動物での研究では、若年ではさらに感受性が高いことが示されている。低吸収線量で出現する症状は高吸収線量でもみられ、より重症化する。さらに、3、4日のうちに、下痢や食欲不振が頻繁に出現し、体液の喪失が増え、潰瘍が生じ、死亡の確率が劇的に上昇する。5 Gy以上の吸収線量では治療しなければ死亡率は100%となり、一部は2~3週以内の短期間に死亡する（AFRRI, 1999）。効果的な治療（4.4.3章参照）を行うことにより、他の合併症がなければ、10 Gyまでの吸収線量では、急性放射線障害は回復する可能性が高い。

外部被ばくの場合、体の一部が遮蔽されていた場合や、線源の近くで被ばくした場合、不均一なあるいは部分被ばくが生じ得る。たとえば、放射能散布装置（RDD）や降下物からの放射活性を有する物質に接触して防護されていない皮膚が放射性核種で汚染された場合、皮膚や下部組織の限局的な重度の障害が生じ得る。体内に取

りこまれた放射性物質の場合には、吸収線量の分布は、取り込んだ経路、および放射性核種の化学的生理学的な特性によって決定される体内動態に依存する。ある種の核種は実質的に体内に均一に分布する（たとえば $^{137}\text{Cs}$ ）が、他の核種は特定の臓器や組織に片寄って蓄積する（たとえば甲状腺への $^{131}\text{I}$ ）。

#### 4.2.3 放射線発癌

電離放射線は、良性および悪性腫瘍を誘発する可能性があるが、これは一般的には確率的影響とされている。これらは、いわゆるしきい値のない影響であり、個人の吸収線量が増えると発癌の確率が上昇するが、その重症度にはほとんどあるいは全く影響しない。

一般人の認識とは異なり、電離放射線の発癌作用は比較的弱い。たとえば、広島、長崎の約 86,000 人の原爆被爆者を 1950 年から 1990 年まで調査したところ、固形癌による過剰死亡は 334 名のみ（7,244 名の期待値に対し、7,578 名）であり、白血病による過剰死亡は 87 名のみ（162 名の期待値に対し、249 名）であった（Pierce ほか、1996）。多くのタイプの腫瘍が放射線によってヒトで誘発されるが、放射線発癌についての感受性は特定の組織によって有意に異なっており、いくつかの新生物は放射線によって誘発されないようである（たとえば慢性リンパ性白血病）。放射線が原因となった腫瘍でも、生じた後は、他の原因による腫瘍と臨床的あるいは病理学的に区別はつかない。

放射線誘発癌は、潜伏期、すなわち放射線被ばくと疾患の臨床的発症との間に、時間経過があることが特徴である。最短の潜伏期間は、白血病で 2~3 年、骨癌で 3~4 年、甲状腺癌で 4~5 年、その他の固形癌では約 10 年である。もし、放射線被ばく後、非常に短期間のうちに腫瘍が見出された場合、電離放射線以外の原因を真剣に疑う必要がある。

中等度の被ばくによる発癌リスクのデータは疫学的調査から得ることができ、一般的に、吸収線量の増加とともにリスクも高まる。治療による大線量（数グレイ）についてのいくつかの研究では、非常に高い線量ではリスクは低下することが示唆されている。非常に高い線量での腫瘍発生量の減少は、生存すれば癌を生じたであろう傷害細胞が死滅していることを反映していると考えられる。

放射線発癌についてのいくつかの数学的な量 - 反応モデルが提唱されている。もっともシンプルなもの、線形非しきい値リスクモデルといわれているものである。このモデルでは、吸収線量に直接比例して発癌確率の上昇が認められる。

バックグラウンドよりもわずかに増加した吸収線量では、線形非しきい値モデルは通常、除外されないが、また確定もされない。このような統計学的限界のため、ヒト集団を用いた研究では低線量のリスクを正確に推定することは不可能である。最近の原爆被爆者の死亡調査では、固形癌について、急性の吸収線量で 0.05 Gy までは、線形の量反応関係があてはまることを示唆している（Pierce and Preston,

2000; Pierce ほか, 1996)。

放射線防護の目的で、NCRP は一応、高線量率で被ばくした集団についてすべての年齢で、 $10 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$  という致死癌の生涯リスクを承認した (1993a; 1993b)。低線量や遷延被ばくでは、NCRP は致死癌のリスクは吸収線量とともに直線的に変化するが、しきい値はなく、リスク係数は正常の生体の回復能力を考慮して 2 分の 1 程度に低減するべきとしている。

#### 4.2.4 子宮内被ばくの影響

テロ事変の際に妊娠中の女性が放射線や放射性核種に暴露される可能性がある。そのため、胎児に対する影響の可能性についていくつかの情報を述べる。

誕生前の子供の成長は 3 つの主要な段階に分けられる。それらは：(1) 受精から着床までの着床前期、(2) 第 3 週からだいたい第 8 週までの主要臓器形成期、(3) 第 9 週から誕生までの胎児成長期で、第 8 週から 25 週までは中枢神経発達の主要な時期である。

0.1 Gy から数 Gy までの吸収線量は有意な胎児障害をひきおこす。電離放射線は実質上のしきい値以上では、妊娠中、細胞死や未修復の DNA 損傷によって、死亡、中枢神経異常、白内障、成長遅滞、奇形、行動異常などの広い範囲の異常を引き起こす可能性がある。子宮内で神経系は最も感受性が高いため、ヒトにおいては神経系の病的変化は常に他の異常を伴う。

胎児への放射線影響は、受精からの時間に依存する。胎芽における細胞数が少なく、それらの性状が特徴付けられていない時期では、障害の影響は、着床障害や認知されない死というかたちをとる。受精後最初の 3 週間のうちの被ばくは、中枢神経や心臓が第 3 週には発達し始めているにもかかわらず、生きて生まれた子供への影響は生じない。通常第 3 週からの残りの主要な臓器発達期では、被ばく時にちょうど発達している臓器の奇形が生じる可能性がある。これらの影響のしきい値は最低でも 0.1 Gy である。

第 8 週から 25 週までの期間は、中枢神経は放射線に対して比較的感受性が高い。0.1 Gy 以上の胎児吸収線量は、知能指数 (IQ) の低下をきたす可能性がある。同時期の 1 Gy の被ばくは重度の精神発達遅滞を生じる可能性が高い。広島、長崎で胎内被ばくした子供の中に IQ の低下を示す場合があることが報告されている。

放射線による胎児への発癌リスク影響の可能性は、妊娠のほとんどの時期で存在する。第 3 週から出産までは、被ばくは白血病および小児期腫瘍のリスクを高めるとされている。リスクの大きさについて多くの論文で検討されているが、それらの解釈については議論が残されている。

0.1 Gy 以下の胎児吸収線量では、胎児死亡や奇形、精神発達障害に対するリスクは実質上、無い。さらに、0.1 Gy での小児癌や白血病のリスクは約 170 分の 1 である。したがって、ICRP (2000) は、このレベル以下の吸収線量では妊娠中絶を行う

医学的根拠はないと結論している。

#### 4.2.5 その他の後期影響

その他の考えておかなければならない後期影響は、(1)次の世代への重篤な遺伝的影響と(2)放射線被ばくに関連する他の死因で非悪性のものである。いずれかの両親における生殖腺の被ばくが子供に有害な影響を与えることは示されていない。過去30年間において、放射線による異常が子供に受け継がれるリスクは同定されていない。

“他の非悪性疾患による死因”のカテゴリーには、循環器、消化器および呼吸器の疾患が含まれる。原爆被爆者において、これらの疾患による統計学的に有意な死亡率の上昇が観察されている。線量-反応関係を確定するためのデータは充分ではないが、現在のデータでは曲線のようにあり、0.5 Sv 以下では実質的にゼロリスクである。1 Sv に暴露された個人におけるこれらの疾患による死亡率の増加率は約10%である (Shimizu ほか, 1999)。

### 4.3 放射線障害の医学的管理

#### 4.3.1 現場でのトリアージ

生命に危険を及ぼす損傷の治療は、放射能汚染や被ばくを示すための検査よりも優先される。そのような損傷を負った患者は、可能ならば固定し、早急に医療施設へ搬送するべきである。もし、医学的な対応を遅らせるものでなければ、放射線防護の訓練を受けた者が放射線防護の援助をするために患者に同伴するべきである。患者の外部あるいは内部の汚染の可能性については、患者の状態によるが、現場、治療施設への搬送中、あるいは病院で判断する。その他の受傷者については、標準的な医学的トリアージガイドラインにしたがって、分類しなければならない。ただし、汚染された患者は、最終的な治療を行うために病院に運ぶ前あるいはその途中で、予備的な除染を行うために隔離されなければならない。

大量の放射線を浴びた場合の症状としては、吐き気、嘔吐、倦怠感、脱力がある。大量の放射線を浴びた人に起こる症状については、4.2.2 章により詳しく述べられており、付録 A にまとめられている。これらの症状は多くの毒物への暴露でも生じ、また、大きな心理的なストレスでも生じることが報告されている。これらの症状を起こすためには、大量の吸収線量が必要であり、患者の外部汚染だけで生じる可能性は低い。

外部汚染の証拠がなく、外傷や吸入あるいは摂取による内部汚染の可能性のある場合には、通常の病室や救急室で治療可能である。しかし、血液、吐物、尿、あるいは便は汚染されている可能性があるため、注意して取り扱う必要がある。

外傷部位に大量の放射活性を有する物質が埋め込まれた状態の患者には、特別な

注意が必要である。というのは、中性子で活性化された金属のなかには、非常に放射活性の高い核種が含まれる可能性があり、治療者が被ばくする危険性が充分あるからである。対象物に非常に近ければ、線量率は  $1 \text{ Sv h}^{-1}$  にもなる。そのような状況は、原子炉の爆発の場合に起こり得る。

外部汚染のみでその他の受傷がなければ、そのような人はできれば病院以外の場所で除染されるべきである。そのような人を病院に連れて行くと、重症の患者に必要な医療手段を割く事になる。

#### 4.3.2 患者の放射線学的評価

受傷した個人の放射線学的評価は、放射線の健康影響についてトレーニングを受けた人員によってなされるべきであり、現場の医療スタッフの監督下でのみ行われるべきである。この評価には、放射能の測定と除染や治療に必要な情報を集めることが含まれる。

放射能で汚染された人の早期の医療管理に有用であり、現場や病院への搬送中に医療/放射線スタッフによって収集可能な情報の例を下に示す。

事故の状況：

- ・ テロ事象がいつおこり、事故の状況はどうか？
- ・ 最も考えられる被ばく経路は？
- ・ どのくらいの量の放射性物質が含まれ得るか？
- ・ どのような傷害が発生したか？
- ・ 放射性核種の汚染以外にどのような医学的な問題が生じる可能性があるか？
- ・ 事故の現場でどのような測定が行われたか(たとえば空気モニター、塗抹標本、固定放射能モニター、鼻腔塗抹カウント、皮膚の汚染レベル)？
- ・ 放射性核種以外に、工場産物、生物学的物質、化学物質などが含まれているか？
- ・ これらに対してなんらかの処置が行われたか？

患者の現状

- ・ もし分かれば、どのような放射性核種に患者が汚染されているか？
- ・ からだのどの部分でどのくらいの放射能の測定値があったか？
- ・ 患者は透過性の放射線にも暴露されたか？もし、線量測定の情報、例えば、フィルムバッジ、熱ルミネセンス線量計、携帯電離箱式線量計があれば、個人の線量について何がわかったか？わかっていなければ、いつ情報が得られそうか？
- ・ 放射性核種を含む化合物の化学的および物理的性質についてどのような情報が得られているか(たとえば溶解性、粒子サイズ)？
- ・ もしすでに試みられていれば、どのような除染が行われたか？それは、どのく

らい効果があったか？

- ・ 阻害剤や同位元素の希釈など、治療的処置として何が行われたか？

#### 患者の経過追跡

- ・ 現場に脱いで残された衣服は保存されているか？
- ・ 他に何が収集されたか？
- ・ 誰がそれらを保有しているか？
- ・ どのような分析が予定されているか？
- ・ それはいつ行われるか？

#### 4.3.3 除染操作

この章は、他に実質的な傷害のない、あるいは適当な医学的管理のもとにある、汚染された個人についてのみ適用される。

内部汚染は外部汚染にくらべてはるかに問題が大きい。というのは、取り除くのが難しく、体内の残留時間が大変長くなる可能性があるからである。したがって、外部汚染の除染操作は、患者やその対応にあたる人の内部汚染を最小にまた回避するように考えられている。傷ついていない皮膚の表面に付着した放射核種は、患者や医療スタッフに障害をもたらすような量の吸収線量を生じることほとんどない。

外部除染操作は、単純でもっとも効果的な操作：汚染された個人の衣服を取り去ることではじまる。これによって、通常、もっとも外表の汚染は取り除かれる。衣服は密封可能な容器（例えばプラスチックバッグ）に入れる。それぞれの容器は、患者名、場所、時間と日付をラベルし、“放射能あり - 捨てるべからず”とはっきりと表示する必要がある。これらのものは、放射性核種の同定や、吸入による内部被ばくの評価に有用な、粒子サイズ分析に使用されるであろう。汚染された衣服を脱がせた後、吸入が疑われた場合には、後で分析するために、清潔な拭き棒で両方の鼻孔から試料を採取する。汚染の程度や患者の容態にもよるが、全身のシャワーを次に行う。

より限局した部分の汚染では、単純な洗浄だけでよい。弱い洗剤の入った、または入らない微温湯が通常、大変有効である。高い温度の水は、皮膚の充血を避けるために用いない。皮膚が充血すると汚染物質の吸収を促進するからである。冷たい水は、皮膚孔を閉じさせ、放射能物質を取りこんでしまうので用いない。傷ついていない皮膚の除染は、汚染の程度の最も強い部分からはじめ、汚染度の低い部分へと広げていく。すべての操作は、汚染されていない場所が汚染されないよう気をつけて行う。傷ついていない皮膚は、内部汚染に対する強力なバリアーなので、引っかいたりしてこのバリアーを弱めるようなことをしないよう細心の注意を払う。髭などを剃ったり、ごしごしこすったりするような処置は不適當である。通常は必要

ないが、髪を除かなければならないときにはハサミで切る。

一部の放射性物質は皮膚表面に固着する場合があるので、完全な除染は通常不可能である。バックグランドレベルの2倍程度に除染を行えば、通常充分と考えられる。放射能検出によってそれ以上除染が進んでいないことがわかり次第、除染を再評価するか一時中止する。さらに、現場での除染は、その状況で実行可能なもので充分であることを認識するべきである。

このような現場での作業のまとめについては表4.2に示す。予備的な除染が終わったら、さらに処置が必要な患者は治療施設へ搬送する。現場と受け入れ病院との連携によって、運び込まれる患者に医療スタッフが対応する準備ができていようにする。

多人数を除染する必要がある状況では、一人一人について監視することはできない。そのような状況では、汚染されている可能性のある人々は適当な場所（たとえば、スポーツセンター、軍施設）へ移送されるべきである。これらの場所は、大きなシャワー設備があるか、屋外に一時的なシャワー施設を設置できる場所である。場合によっては、当局は、人々に対して施設が空くまで待っている間に、自宅でシャワーを使用するよう助言することも考えてもよいかもしれない。

表 4.2 - 現場対応者に推薦される処置<sup>a</sup>

1. 現場対応者は、手袋やガウンあるいはその他の防護衣を身に着けるべきである。対応者一人一人が個人線量計を持つべきである。
2. 医学的に容態の不安定な患者は、早急に病院に搬送するべきである。救急車の中で、放射能の検出、除染処置、汚染物の格納操作などを行う際には、より緊急性を有する患者の医学的処置を妨げない範囲で行うべきである。
3. 患者が医学的に安定しており、現場の状況が許せば、さらなる被ばくを防ぐために、被ばくのより少ない場所へ患者を移す。患者の衣服を脱がせ、布のシートか毛布で包み、患者を扱えるようにする。患者の覆いはゆるくし、体温の上昇を防ぐとともに医療スタッフが患者に容易に接触できるようにする。
4. 事件によって生じた患者の傷害（熱傷、切傷など）をまず治療し、それから、必要があれば、放射線障害に対する対症的治療（制吐剤などの投与）を行う。開放創がある場合には、清潔な包帯で覆う。
5. 医学的に安定している患者は、放射能検査が終わるまでは、救急スタッフに渡してはいけない。もし、汚染が確定すれば、予備的な除染を行う。放射能検査の結果を記録し、それから患者を除染する。
6. 医学的に安定している患者は、放射能汚染を除去するために、微温湯で洗浄する。このときは、もっとも汚染の強い部分から始める。除染はゆるやかにいき、この除染は予備的なもの



であること、さらに十分な除染は医療施設で行われることを心しておく。終了したら、放射能検査をもう一度行い、最終結果を記録する。衣服や寝具、金属類（例えば装身具、硬貨、ベルトのバックルなど）をすべて保存する。鼻孔の擦過試料採取は、放射能汚染物吸入の検出のため推奨される。それぞれの保存物品には患者名、場所、時間と日付を付けておく。適切な収納容器に入れ、はっきりと“放射能あり - 捨てるべからず”と表示する。

7. さらなる治療のため、患者を医療施設へ搬送する。放射線被ばくした患者を受け入れる病院には、あらかじめ知らせておき、適切な医療プロトコルを実行できるようにする。放射線障害を有する患者が放射能を有するとは限らないが、皮膚や着衣が放射能で汚染されている可能性があることは心しておかなければならない。最初の対応者の放射線防護については放射線源について集中するべきである。

現場対応者は、責任を全うするために、次のような基本的な放射線防護原則に従うことを念頭に置くべきである。

時間：被ばく時間を短くする。

距離：放射線源からの距離を長くする。

遮蔽：放射線源と自分との間に遮蔽物を使用する。

---

<sup>a</sup>1998FBI 大量破壊兵器のための緊急計画 (FBI, 1998)。

## 4.4 放射線障害の病院管理

### 4.4.1 病院の準備

病院の救急室は事故の知らせを受けたら、放射線学的対応計画の実行を早急に開始すべきである。汚染された患者の入口は通常の救急の入口とは違うかもしれないので、救急隊員にはそのように知らせておく必要がある。適切な場所に警備員を配置しておき、救急車の運転手に方向を示し、必要な人員だけが近づけるように制限することは有用である。救急車が到着したら、患者は治療室に入れられる。もし、治療室に屋外に開く扉がなければ、汚染を広げずに患者を移動するための方法がいくつかある。ひとつは、すべらないプラスチックのシートを廊下に敷き、その上を救急ストレッチャーが移動できるようにする。もし患者が重症でなければ、救急車内の汚染されている可能性のあるストレッチャーから、きれいなストレッチャーに患者を清潔な毛布あるいはシーツにくるんで移動させることも可能である。そうすれば汚染物を包んだ状態で、患者を通常の廊下を通して搬送することができる。

強く念頭に置かなければならないのは、放射能汚染（内部であっても外部であっても）は、すぐに生命の危険を生じるものではなく、したがって、放射線学的評価や除染は、重要な医学的容態に優先するものではないことである。汚染され、傷病

のある患者の一般的管理方針は、おおよそ重要性の順番からは以下のものである。

1. 応急処置と心肺蘇生
2. 容態安定化
3. 重篤な傷病の最終的な治療
4. 内部被ばくの防止/最少化
5. 外部汚染の評価と除染
6. 他の軽症傷病の治療
7. 汚染物の格納と他の人員の汚染防止
8. 治療者への外部被ばくの最少化
9. 内部汚染の評価
10. 内部汚染の処置（上記の処置の多くと同時に進めてもよい）
11. 部分的な放射線障害/放射線熱傷の評価
12. 一定以上の全身被ばくあるいは内部被ばくを受けた患者の注意深い長期経過観察
13. 予想される長期影響とそのリスクについて患者と家族に念入りにカウンセリングを行う

放射能汚染を除くために、切断などの激しい外科的処置や広範な探索を行うべきではない。外科的な侵襲を伴う除染は、放射線被ばくによる生涯リスクのいかなる低減をもはるかに凌ぐ副作用があるかもしれない。高放射能を有する破片を外科的に取り除くことは、大量被ばくを避けるために必要な場合がある。

患者の精神的サポートの必要性はあまりにしばしば救急管理の際に忘れられている。落ち着いて頼もしい態度は、患者および家族の世話をする際には必須である。早期及び長期の被ばく影響について患者と注意深く話し合うことは、他の治療的な側面と同様に重要である。この話し合いでは、放射線被ばくや汚染は必ずしも友人や家族に害を及ぼすものではないことについて安心させるべきである。患者との接触について一時的な警戒が必要な場合にはこれらについても話し合われるべきである。

#### 4.4.2 外傷あるいは熱傷を有する患者

開放創があり、汚染されていない場合には、汚染部位から汚染が移らないように透水性のない包帯類で被うべきである。汚染された傷は、外科用スポンジでゆるくこすり、水で流すことによりきれいになる。汚染除去のための壊死組織切除は注意深く考慮されるべきであり、創傷切除は外科的に合理性のある場合に行われるべきである。放射能汚染物質は傷の表面にあり、組織を切除すればともに取り除かれるであろう。

放射能で汚染された熱傷の救急管理は難しい問題である。救急スタッフが直ちに

考えることは汚染を取り除くために徹底的に洗浄することである。いくつかの理由でこれは行われるべきではない。もし熱傷が広範であれば、どのような洗浄であっても、低体温と血圧低下によって患者を死の危険に導くであろう。熱傷が限局していても、擦ることによって、かろうじて生き残っている皮膚をはがすことになり、熱傷の治療をさらにひどく困難にすることになる。熱傷組織には体液循環はないので、汚染物は死滅組織層にとどまり、適正に取り扱われれば、内部汚染にいたる可能性は非常に低い。通常、局所的な熱傷をゆるやかにすすぐことがまず必要なことのすべてである。そして熱傷をおおっておけば、数日のうちに浸出液が多くの汚染物質を包帯のほうへ押し上げてくれる。水疱は閉じたままにしておき、破れた水疱は洗浄し、熱傷の適切な治療プロトコールにしたがって処置する。

#### 4.4.3 電離放射線に大量被ばくした患者の治療

電離放射線の大量被ばくでは、初期の症状は被ばく後数時間以内に出現する。吐き気、嘔吐、下痢、倦怠感、脱力、発熱、頭痛が含まれる。これらの症状は通常、被ばく後 24～48 時間以上続かないが、漠然とした脱力や倦怠感の持続期間はとくに決められない。これらの症状の出現時間や程度、持続時間は線量や線量率に依存している。それらは種類別白血球数と合わせて、急性放射線症候群の存在と重症度を決定するために用いることができる。

血液細胞の減少速度や減少程度はともに線量に依存している（表 4.3）。有用な経験則：24～48 時間以内にリンパ球が 50% 減少し  $1 \times 10^3 \mu\text{L}^{-1}$  以下になり、これらの状態を引き起こす他の医学的状況がなければ、患者は少なくとも中等度の線量の被ばくを受けている（Goans ほか、1997）。複合的な傷病を有する場合にはリンパ球は、信頼できない指標となる。一つ以上の臓器系統に重症の熱傷と/あるいは外傷を負った患者では、しばしばリンパ球減少が生じる。合併した傷害（外傷/熱傷）は標準的なやり方で評価されるべきであるが、組織損傷の兆候や症状は、放射線被ばく影響

表 4.3—被ばく後 24～48 時間におけるヒトリンパ球数

リンパ球数 ( $10^3 \mu\text{L}^{-1}$ )	吸収線量範囲 (Gy)	無治療での死亡率 (%)
3	0 ～ 0.25	—
1.2 - 2	1 ～ 2	<5
0.4 - 1.2	2 ～ 3.5	<50
0.1 - 1.2	3.5 ～ 5	50 ～ 99
0 - 0.1	>5.5	99 ～ 100

の急性期と似ており、それをわかりにくくすることを念頭におくべきである。これらの理由により、有効な医療介入がもっとも必要な吸収線量範囲（最近では 2~10 Gy）において、全身および局所的な放射線被ばくを确实、迅速に評価する生物学的な方法の開発が必要とされている。

感染症の防止と治療が治療の主体である。熱のない患者では、抗生物質による予防は、感染リスクが最も高い場合に考慮されるべきである。これらの患者では、1 マイクロリッターあたり 100 細胞以下が 7 日間以上続いたと考えられる重篤な白血球減少を有する。白血球減少の程度が感染症発症の最も大きい危険因子である。白血球減少の期間が長引けば、二次的な感染のリスクも高まる。これらの理由により下に述べるような補助的治療法が高線量被ばく者の治療には非常に重要となる。

中等度および重度の放射線被ばくによる医学的障害の初期対策としては、病原体の摂取を減少させるための処置、特に低細菌含有食物、許容できる水の供給、頻繁な手洗い（あるいは手袋の装着）、および空気のろ過、を早期に確立することが含まれるであろう。白血球減少期には、好気性菌を抑制し嫌気性菌を保つような選択的な腸の除菌剤を抗生物質とともに使用することが推奨される。スクラルファートあるいはプロスタグランジン類似体の使用により、胃のはたらきを抑えることなく、胃の出血を防止できる。もし可能なら、早期の経口栄養摂取は、経静脈栄養よりも、腸の免疫学的、生理学的機能を保つためには望ましい。

filgrastim（商品名 Neupogen<sup>®</sup>）（顆粒球コロニー刺激因子）や sargramostim（商品名 Leukine<sup>®</sup>）（顆粒球-マクロファージコロニー刺激因子）などの造血因子は、強力な造血刺激剤であり、好中球の回復に要する時間を短縮する。感染とそれに伴う合併症の危険は、好中球減少の程度と期間に直接関連する。臨床的には抗生物質や新鮮照射血小板および血液製剤を投与する。filgrastim や sargramostim の使用とともに、感染症の著明な抑制によって合併症や死亡を抑制できる。重度の好中球減少が長引けば長引くほど、二次的な感染のリスクは高まる。コロニー刺激因子のさらなる利点は好中球の機能を高める作用のあることであり、細胞による宿主防御の積極的な側面としての感染防御に貢献する。filgrastim や sargramostim は、最大の臨床効果を得るためには、被ばく後 24~48 時間以内に開始する必要がある。これによって最大の回復が得られる可能性がある。望ましい効果を得るためにはサイトカインの投与は連日で続ける必要がある。骨髄移植あるいは臍帯血幹細胞移植による生存の改善は示されていない。

#### 4.4.4 内部汚染の治療

放射性核種の排泄の促進と/あるいは取り込み阻害は、臨床状態の安定化と除染の後に病院で行われる。特異的な治療は、体内に取り込まれた特定の放射性核種に合わせて行われる。希釈したり、洗浄（胃、肺）、あるいは放射性核種の便や/または尿への排泄を促進し、個人の吸収線量を低減するための詳しい処置については NCRP