

## 緊急被ばく医療ネットワーク会議の役割

●——— 前川 和彦 (東京大学大学院 医学系研究科)

平成9年6月、中央防災会議が改訂した防災基本計画に原子力災害対策編が加えられ、この中でわが国の被ばく医療体制における中核医療機関としての放医研の役割がより明確にされた。これを受けて、平成11年1月、放医研は“緊急時医療の対策と協力関係機関とのネットワークを構築・整備し、より一層の充実を図るため”緊急被ばく医療ネットワーク会議(委員長・前川)を立ち上げた。この委員会は、全国の大学や専門医療機関の放射線医学、救急医学、血液学、外科学、皮膚科学、放射線物理学等の専門家で構成されている。同年7月には、放医研が行う緊急被ばく医療に所外から参画する専門家に対する規程を定めて、具体的なネットワーク作りのための基盤整備を進めた。

幸か不幸か、その約2カ月後に茨城県東海村で臨界事故が起こり、高線量被ばく患者が発生した。今回の事故での高線量被ばく患者の医療の展開には、この緊急被ばく医療ネットワーク会議が極めて重要な役割を果たしたのでその経緯を述べる。これらの高線量被ばく患者の治療はナショナルプロジェクトとして取り上げるべきであるとの当会議委員長(前川)の発議で事故発生の翌日、第1回JCO作業員被ばく事故対応臨時拡大会議と称して臨時の緊急被ばく医療ネットワーク会議が放医研で開催された。ここでは放医研での線量評価、初期対応、および今後の治療の方針等が発表、議論され、線量評価の結果と臨床所見から、少なくとも2人には造血幹細胞移植が必要であること、広範囲熱傷治療に準じた集中治療を要することなどが提言された。これを受けて、翌10月2日の放医研の全体会議で兄弟からの末梢血幹細胞移植と全身管理を目的にO氏の東大医学部附属病院への転院が決定され、その日の内に転院が行われ、S氏に関しては臍帯血移植と全身管理を目的に10月5日に東大

医科研病院に転送された。特記すべきは、S氏の放射線皮膚障害の治療には、ネットワーク会議の構成メンバーである杏林大学病院救命救急センターの献身的な協力が終始あったことである。Y氏の被ばく線量は2~3Gy程度と推定され、放医研で継続して治療を行うこととなった。高線量被ばく医療の初期段階における患者の治療方針の決定や医療機関の選別(トリアージ)には緊急被ばく医療ネットワーク会議が適切な提言を行った。

その後もJCO作業員被ばく事故対応を巡って、現在までに5回の緊急被ばく医療ネットワーク会議が開催され、各症例の臨床経過の報告と検討、症例のデータの発表に関する申し合わせ事項、患者および家族のプライバシーの保護と試料、検体の取り扱い方等の議論を進めてきた。最後の3月25日の当会議では東大医科研に入院中のS氏の今後の治療に関する議論が行われ、東大医科研は臍帯血移植を始め期待された役割を十分に果たしたこと、今後は長期にわたって集学的な治療を必要とすること、などの理由から東大医学部附属病院に転院させた方がよいのではないかと提言され、会議のメンバーである東大医科研の浅野院長から同意を得た。

このように、放医研の緊急被ばく医療ネットワーク会議は、昨年10月1日の最初の会合以来、高線量被ばく患者の治療方針の決定、医療機関の選別、医療支援、情報交換、および患者のプライバシーの保護、試料や検体の扱い、発表に関する申し合わせなどの倫理的自己管理を推進し、急性期被ばく医療体制の中心的な役割を果たしてきた。今回の東海村ウラン加工工場臨界事故を巡るさまざまなレベルでの医療対応の中では、突出してまとまった医療対応であったともいえる。

昨年の事故を契機に、わが国の被ばく医療体制の見直しと整備が喧噪されており、放医研の緊急被ばく医療ネットワーク会議の役割が改めて検討されることがあると思われるが、今回の経験を生かして、“人”のネットワーク作りの重要性を強調して行きたいと考えている。

●——— 有賀久哲 (国立水戸病院 放射線科)

JCO臨界事故において国立水戸病院は、転換試験棟内で被ばくしたJCO作業員3名を一時収容し、放射線医学総合研究所(放医研)への搬送準備が整うまで初期対応を行った。当院が茨城県2次緊急医療施設であり、その後の放医研(3次医療)・緊急被ばく医療ネットワークの活躍が目覚ましかったため、わが国には緊急被ばく医療という体制がしっかりと整備されていると感じられたかも知れない。しかし今回の臨界事故において、準備されていた1次・2次医療体制は全く機能せず、現場は混乱を極めた。初期活動に関与した立場から緊急被ばく1次・2次医療体制の問題を検討し、早急な体制の見直しを提案したい。

●現在の緊急被ばく医療体制

わが国の緊急被ばく医療体制は、周辺住民を対象とする対策と、原子力事業所職員を対象とする対策が、別個に立てられている。前者は「防災指針」に基づき原発立地自治体(今回は茨城県)が行う活動であり、後者の職員被ばく事故は各事業所の責任で医療活動・患者搬送を行うことになっている(図1)。

茨城県は「茨城県緊急時医療マニュアル(マニュアル)」を作成し、具体的な周辺住民の緊急時医療活動、資機材の整備を規定している。この中で1次・2次医療施設の位置づけは、常設の施設ではなく、県が必要と判断した時点で薬品・スタッフ等を調達し立ち上げる体制となっている。ちなみに9月30日午前10時35分に発生したJCO臨界事故に対して、茨城県原子力災害対策本部が設置されたのは午後4時であり、1次医療に相当すると思われる健康影響調査が本格的に立ち上がったのは翌々日の10月2日であった。また緊急被ばく医療の機能は、放射性物質に対する保健衛生的対策を中心に規定されており、被ばく患者を扱う「医療」のための施設

整備はなされていない。茨城県の2次緊急医療施設は正確には当院に併設する「茨城県原子力医療センター」であるが、これは放射能汚染測定・除染施設または測定機器保管施設であり、内部で医療処置を行うことは機能的・物理的に困難である。現「マニュアル」に忠実に緊急被ばく医療活動を行えば、体制的にも機能的にも被ばく患者の救命救急医療を行うことは不可能である。

一方原子力事業所職員に関しては、常設の事業所内医務室(1次)・契約病院(2次)という、県とは独立した緊急被ばく医療体制が整備されている。事業所内で可能な処置・治療は事業所が行い、重症であれば十分に除染したのち契約病院へ治療を依頼するか、放医研に患者を搬送すると考えられている(図1)。今回のJCO臨界事故は明らかに後者タイプの被ばく事故であったが、事業所としての緊急医療活動はほとんど認められず、契約病院の存在も定かではなかった。

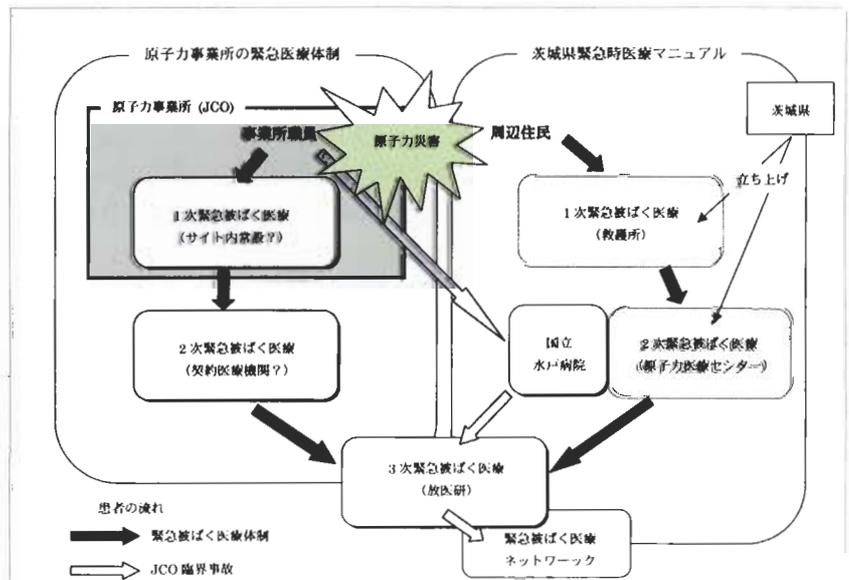


図1 現在の緊急被ばく医療体制とJCO事故における患者の流れ

## ●JCO臨界事故における初期緊急医療の実際

JCOが行った医療活動は、被ばく患者自身が行った作業室からの退出と作業服の脱衣のみと考えられ、患者の避難、体表面汚染検査の指示、搬送医療施設の選定、医療施設への連絡など、全て救急隊・消防指令室の判断で実施された。東海村消防は日本原子力研究所での長期研修などを積極的に行っており、消防署員の原子力災害に対する意識・理解はとても高い。JCOが被ばく事故の可能性を通報しなかったため、何ら準備をすることなく現場に駆けつけた救急隊員が、避けられたかも知れない被ばくを受けてしまったのは大変残念である。被ばく事故が明らかになった後も、JCOは救急隊への被ばく・事故状況の報告、放射線管理者の随行を行わなかったため、その後の医療は被ばくに関する情報がない状態で行われた。

国立水戸病院へ搬送された被ばく患者は、前述のように「原子力医療センター」が医療機能を備えないため、2次緊急医療施設ではなく隣接する病院施設に収容された(図1)。放医研のような専門の緊急被ばく医療施設を有する放射線科単科病院と異なり、当院は一般総合病院であるため、患者を搬入した外来診療棟には1日に1000人近い患者の受診がある。当院の再検査で患者体内からγ線が検出され、消防指令室から伝聞報告された汚染測定結果が事実でないと判ったときは大変混乱した。結果的には2次被ばくが問題となる放射能汚染量ではなく、一般患者、病院診療に影響を与えることなく処置を行うことができた。当院から放医研への防災ヘリコプター搬送は、東海村・水戸市・千葉市消防の働きにより実現した。茨城県に防災ヘリは1台しかなく、活動可能時間も日没までに制限されている。重傷者2名、軽傷者1名はヘリ収容可能なほぼ限界であり、ヘリ救急搬送が滞りなくできたのは幸運であった。ヘリ移送自体の所用時間は30分程度であったが、千葉市ヘリポートから放医研までの搬送時間も短くなかった。ヘリ搬送体制にも改善の余地があるかもしれない。

今回の1次・2次医療において、現在の緊急被ばく医療体制は全く機能しなかった。患者搬送が大過無く機能したのは、現場の救急隊・消防指令室が独自の判断で適切なコーディネートを行ったためであり、また患者の被ばく様式が体表面汚染を伴わない外部被ばくのみであったためと考える。

## ●緊急被ばく医療体制の問題点と提案

わが国の緊急被ばく医療体制は、放射線災害の対策と考

えるには不十分な点がみられる。救急医療を無視した立ち上げ方式、被ばく「医療」整備の欠如、事業所と周辺住民とを分離した対応などは、事故発生現場を混乱させて当然と思われる。その原因のひとつとして、国の「防災指針」が、スリーマイル島原発事故(TMI型事故)で発生した被ばく・汚染形態のみを想定して立案されている点が挙げられる。TMI型事故とは、原子力発電所で発生し、放射性ガスによる軽度環境汚染はあるが、現場で重症患者は発生しない事故であり、原子力が格納容器で覆われているため環境汚染発生までには十分な時間的余裕が前提とされている。原発のTMI型事故のみを想定する根拠が希薄であり、また初期動作を起こすまでに十分な時間的余裕があるというモデルは、緊急時のシミュレーションとしては不適切と思われる。TMI型事故、JCO臨界事故だけでなく、わが国で発生し得る原子力災害すべてに柔軟な対応できるような、現実的緊急被ばく医療体制の整備が期待される。

初期活動に関与した立場から、1次・2次緊急被ばく医療に対して3点ほど提案したい。まずは情報網の整備である。被ばく医療における治療方針の決定には、通常の救急医療情報だけでなく、被ばくに関する情報が重要である。今回の対応では、事業所の協力が不十分であったり、伝聞情報のみで判断が迫られたりと、非常時の情報取扱いとしては不適当な点がみられた。情報ソースと直接情報交換ができる体制を整えると共に、例えば、緊急被ばく1次・2次医療に係わるローカル・ネットワークを作成し、消防、関連病院、原子力事業所、県などが非事故時にも接触して、信頼関係を構築しておくことが必要と思われる。次に、コントロール・センターの常設である。どんなに周到な準備を行っても、緊急時には想定外の事態の発生が予想される。ただ「マニュアル」を作成するだけではなく、その運用を統制するコントロール・センターを同時に開設し、24時間アクセス可能にすることが必要と思われる。放医研のようにスタッフが24時間携帯電話を公開する、緊急被ばく医療を救急医療体制の管轄下に組み込む、各県の体制を放医研の下に組み込む等、方法は様々あると思われる。コントロールされない「マニュアル」は、機能しないだけでなく、現場の対応を誤らせる要因になりかねない。

最後に、茨城県は第二原子力医療センター(仮称)の建設など新しい取り組みを検討しているが、「防災指針」があるために周辺住民対策から抜け出せないように見える。今回のJCO臨界事故を機会に、国単位での、早急な緊急被ばく体制の見直しを要望したい。

### 放射線皮膚障害 (radiation injury) とは

放射線皮膚障害 (radiation injury) とは高線量の放射線の被ばくによって発生する皮膚の障害を示す。放射線熱傷という言葉とはほぼ同義語である。放射線皮膚障害が温熱熱傷と症状が極めて類似しているがゆえに放射線「熱傷」と表現されるからである。しかし化学損傷 (chemical injury) や気道熱傷 (inhalation injury) と同様に、放射線による皮膚の障害 (injury) であるので放射線皮膚障害 (radiation injury) と表現するのが望ましい (日本熱傷学会用語集より)。

この放射線皮膚障害には 1) Thermal effect による障害と 2) Radiation effect による障害の 2 つの損傷形態が含まれる。Thermal effect による皮膚障害とは被ばく直後の放射線によって発生する体表露出部分の紅斑または衣服の燃焼によって起る Flame Burn を意味し、直後の病態は通常の温熱熱傷と同じである。一方 2) Radiation effect による皮膚障害は、放射線エネルギーによる DNA 損傷が中心で、組織のターンオーバーに一致して細胞や組織死がゆっくりと進行していくものを言う。このタイプの障害は被ばく直後には皮膚症状を呈するものは少ないが一定の潜伏期間において症状が悪化するのが特徴である。広島、長崎の被ばく患者の大半が Thermal effect による熱傷によって早期に死亡したと報告されているが、チェルノブイリの事故では後者の Radiation effect によって 1～3 カ月の経過で皮膚障害が悪化し死亡した。もちろん、この双方が合併する皮膚障害がもっとも重症型であることは言うまでもない。

### 2. 放射線皮膚障害 (radiation injury) と温熱熱傷 (thermal injury) の差異

放射線皮膚障害と温熱熱傷は症状が極めて類似するものの、症状の発現や病態において大きく異なる。通常、温熱熱傷では熱による障害は熱エネルギーが皮膚に影響し受傷直後から全身性に痛み・激しい炎症反応・患部の細胞死・

組織の破壊が起きる。これに対して、放射線皮膚障害では、放射線エネルギーによる DNA 損傷が中心で、組織代謝のターンオーバーに一致して細胞や組織死が緩徐に進行していく。したがって被ばく直後には重傷度の判定は不可能で潜伏期間 (通常 2～3 週単位) を経て発症し、年単位で皮膚障害が続く。さらに温熱熱傷では、熱の作用した患部の細胞・組織すべてが障害を受けるが、放射線皮膚障害の場合は皮膚を構成する細胞により放射線感受性が異なるため同じ線量の被ばくでも一律ではない。

この 2 つの損傷型をエネルギー量という面から比較すると、温熱熱傷で第 2 度熱傷を起こすためには皮膚表面から 1 mm の深さに 4 Cal/cm<sup>2</sup> のエネルギーが加わることが必要であるが、放射線の被ばくでは第 2 度熱傷を起こす線量を (約 30 Gy の  $\gamma$  線に相当) 熱に換算するとわずか 0.126 Cal/cm<sup>2</sup> である。このように温熱熱傷で同程度の皮膚障害を起こすためには、放射線による皮膚障害に比べ 40 倍ものエネルギーを必要としていることになる。

さらに温熱熱傷と放射線皮膚障害の違いとして特徴的な事は 1) 皮膚障害の無自覚：温熱熱傷のように病初期の痛みが無く、全身のどの部分にどの程度の線量が照射されたかを可及的早期に把握することが治療上きわめて困難であること。2) 遅発性：温熱熱傷と異なり通常 14 日間以上の潜伏期を経ってから症状が出現する。一般に潜伏期の長短は被ばく線量と関係が深い。3) 難治性：温熱熱傷の場合は通常表層の障害が最も強く、深部にゆく程障害が少ない。また感染等を伴わないかぎり受傷後に障害が深部に拡大することはない。しかし放射線障害の場合はしばしば深達性であり、大量被ばくの場合は骨や深部組織にまで障害が及ぶことが多い。4) 反復性：温熱熱傷では一度治癒したところが、再度悪化することはほとんど経験されないが、しかし放射線皮膚障害では障害が反復したり、また 6 カ月以上でも、数年単位で血管に対する障害と局所の血流障害のため壊死が深部に進行することがあり、注意深い観察が必要である。

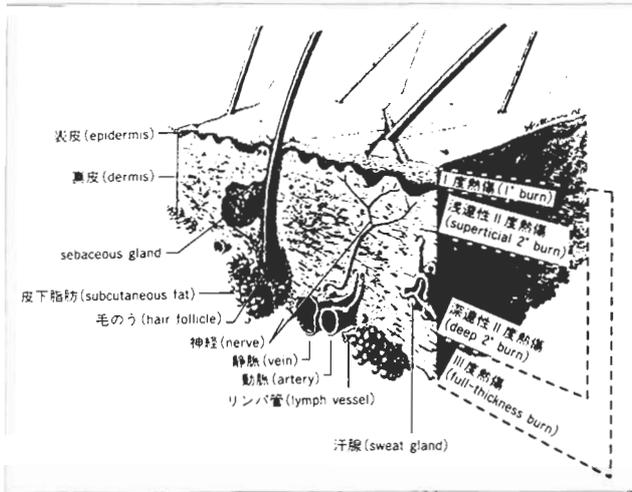


図1 皮膚の正常構造と熱傷深度

### 3. 皮膚の構造と放射線皮膚障害の特徴

皮膚は生体で最大の面積を持つ臓器で、その面積は成人でおおよそ1.3~1.8/m<sup>2</sup>である。皮膚は約0.05mm~0.1mmの表皮層(上皮層)とその10倍位の厚さをもつ約1mm~2mmの真皮層、そしてその下の皮下組織の3層からなる(図1)。表皮(epidermis)はさらに角質層(Horny layer: stratum corneum)と顆粒層(Granular layer: stratum granulosum)、マルヒギー層(Prickle cell layer: stratum Malpighii)、基底層(Basal layer: stratum geminativum)の5層から構成される。とくに基底細胞層近くにはケラチノサイトやメラノサイト、ランゲルハンス細胞といった上皮細胞が豊富に存在し、障害皮膚の修復、再生、細菌侵入に対する防御機能と免疫に関与している。一方、真皮層は表皮にくらべると結合組織が豊富に存在し、そのうちの70~80%はコラーゲンで占められる。真皮層には汗腺、毛根などの皮膚付属器も存在するが、本来これらの組織表皮由来であり、組織表面は表皮細胞で覆われ、真皮層の深い熱傷では皮膚再生の鍵となる。

表皮は身体のほとんどの部分で約0.1mmであるが手掌、指の裏、足底など角質層の厚い部分は手掌と指の手掌側は0.8mmで、足底および足指は1.4mmである。基底層から顆粒層へ細胞増殖のための移行時間が14±6日で顆粒層から表皮までには18±6日かかる。これが皮膚のturn overにかかる時間と考えられている。

放射線学的に皮膚の線量評価のためのサンプルとして適当な部位は、表皮層から平均約0.07~0.1mmの深さにある(手と足の裏を除く)基底細胞層である。この基底細胞層は最も放射線に対する感受性が高く、皮膚の基底層の胚細胞

が損傷することが、紅斑および皮膚剥離の病因となる。この層はまた有糸分裂を起こし、皮膚の再生が始まる。これより表層では分化は起こるが、細胞分裂はしない。したがって基底層のもつ役割は大きい。基底層について感受性の高い部分は真皮の結合組織である。

身体の部位でみると皮膚の湿潤した部分および鼠径部、および皮膚が摩擦を受ける部分などで、更に顔部、肘部および膝部も放射線感受性が高い部分である。一方、感受性の低い部分は、四肢末端の屈曲面、胸部、腹部、顔および背中で、頭皮、手掌および足底部はとりわけ感受性が低い。これらの部分は表皮および真皮が厚くなっており、表皮は平均約0.4mm程度である、多分に放射線に対する感受性の差は、表皮および真皮の厚さが異なっていることによるものである。

放射線皮膚障害の重症度を規定するファクターは、放射線線質、患者の皮膚の色調、種族、部位、年齢などによりかなり違いがある。すなわち、皮膚障害の発生には皮膚の厚さ(とくに角質)被ばく皮膚の放射線感受性、被ばく線量、核種の違いなどのファクターが存在している。たとえば、感受性の低い組織であっても、被ばく線量が高ければ症状は強くなるし、また被ばく線量が低くても、感受性が高ければ障害は強くなる。

表1 Radiation injuryの病期(放射線皮膚障害)

Ⅰ	超急性期	~7日
Ⅱ	急性期	7日~6カ月
Ⅲ	慢性期	6カ月以上

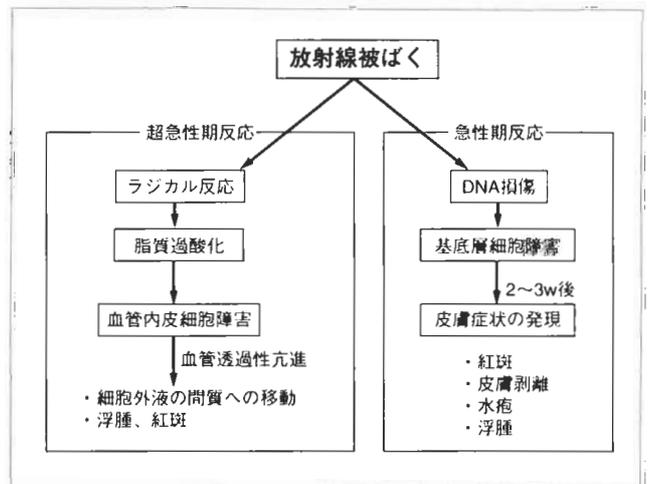


図2 超急性期反応と急性期反応

#### 4. 放射線皮膚障害発生の病態と初期変化

今回の東海村事故の経験から放射線被ばくの症状と病態により、超早期(7日未満)、早期(7日以後～6カ月まで)、慢性期(6カ月以後～数年)の3つの病態に分類することができる(表1)。

##### 1) 超早期(7日未満)の病態と変化

皮膚にエネルギーの高いγ線、Xなどの電磁放射線や、α線、β線、中性子が高線量(数Gy以上)で被ばくすると放射線は細胞内外の原子や分子と衝突し、励起、電離が惹起される。とくに細胞内水分が反応し、酸素ラジカル(とくにhydroxyl radicalやsuperoxide radical, peroxiradical)などが細胞内外の分子生物学的損傷を引き起こす(図2)。放射線によって発生した酸素ラジカルが細胞膜の脂質過酸化を引き起こし血管透過性を亢進させるとともに、ケミカルメディエータの放出が惹起される。発赤や浮腫などの超早期の症状は温熱熱傷と同様これらのラジカルによる障害が原因の全身性の反応の原因である。この症状は3～4日で一度消退するが、こののち、組織の腫脹から生じてくる搔痒感、硬直、針で刺した様な痛みが、次の急性期のおこってくる変化の前兆となる。この時期には酸素ラジカル反応を防ぐための抗酸化剤投与が有効である。

##### 2) 急性期(7日以後～6カ月まで)の病態と変化

一方、ラジカルによるDNA損傷のターゲットとなるのが、もっとも感受性の高い組織である骨髄、皮膚上皮、消化管上皮である。とくにRadiation injuryによって引き起こされる皮膚障害は基底層の胚細胞損傷が主体である。障害

の発生の時期はcell cycleである2～3週間ごとに細胞障害や組織死が明らかとなるので、障害から潜伏期間(通常2～3週単位)を経て年単位で続く。

ダメージの程度は被ばくした組織の放射線感受性と被ばく線量によってきまる。初期の皮膚症状(発赤、紅斑、浮腫)が3～4日で消退後、再度、組織腫脹、搔痒感、疼痛感が現れることもある。さらに時間の経過や被ばく線量によっては皮膚潰瘍や壊死が起こる。また、皮脂腺や汗腺の破壊による皮膚乾燥(乾皮炎)も起こる。細胞分裂の盛んな表皮細胞(線量と被ばく部位の放射線感受性にもよって異なるが)は時間の経過とともに脱毛、色素沈着、落屑、水疱形成、有痛性の潰瘍が現れる。湿性落屑は水疱が破れたり壊死した基底細胞層の細胞が放射線によって障害を受けることによって起きる症状である。

##### 3) 慢性期(6カ月以後～数年)の病態と症状

放射線皮膚障害では一度障害した皮膚が再上皮化した後も、再度皮膚障害が反復し、潰瘍や皮膚剥離が起きる。また、受傷後6カ月以上経過しても、数年単位で血管に対する障害と局所の血流障害のため壊死が深部に進行することもある。この原因として被ばくによって血管内皮細胞が障害を受けると、炎症反応は長期化、内皮細胞は膨潤し、血管内に血栓形成が起きる。最終的には小動脈・毛細血管の内皮細胞が増殖し循環不全による組織の萎縮、治癒不全、組織欠損が生じ、切断を余儀無くされる。これらの症状は、発赤や浮腫をのぞいて、組織の萎縮がすすむまで出てこない。この時期は白血球の接着による障害が主体となるのでPentoxifyllinやVit.Eなどの投与が有効とされている

表2 放射線皮膚障害における深度分類

	臨床症状	基底層	真皮上層	付属器	真皮深層	潜伏期間
I度	無症状～軽度の紅斑または色素沈着、皮膚乾燥	○	◎	○	◎	4週間
II ss度	落屑がみられるが、損傷面からの上皮化が認められる	○	◎	◎	◎	4週間
II sd度	水疱形成がみられるが、損傷面からの上皮化が認められる	△	◎	◎	◎	4週間
II ds度	水疱形成後表皮が剥離し、周囲ないし残存する付属器から島状に上皮化が起こる	×	○～△	○～△	◎	4週間
II dd度	水疱形成後表皮が剥離し、潰瘍となる創面はフィブリン様組織に覆われて上皮化しない	×	×	×	○～△	2週間
III度	水疱形成後表皮が剥離し、潰瘍化、その後組織は壊死して崩れ落ちる	×	×	×	×	1週間

#### 4) 被ばくによる皮膚変化

被ばくによる急性期の皮膚障害の変化は温熱熱傷と極めて類似している。そのため温熱熱傷と類似した深度判定の分類が帆足らによって考案されている(表2)。

被ばくによる皮膚の病変とその出現時期はそれぞれ被ばくした線量と感受性によりことなる。

a) 浮腫は超早期、早期期、慢性期とどの時期でも発生する。通常、疼痛を伴い、硬く、腫張しており、光沢を伴う。初期の浮腫は被ばく後第1日目から21日目の間に発現する。後期の浮腫は被ばく後数週間から数か月あるいは数年以降に出現し、血管新生の増進に伴う。

b) 一般的には紅斑は3~6Gyで起こってくる(写真1)。さらに線量が増え、10Gy以上になると表皮の落屑が生じる(写真2)。これには乾性表皮炎と滲出液の漏出を伴う滲出性表皮炎があり、乾性表皮炎は10~15Gyで起こり(写真3)、15Gyを超えると滲出性表皮炎を生じる(写真4)。さらに、被ばく線量が25Gyを超えると壊死を生ずる。

c) 水疱は15~20Gyの皮膚への被ばくでおこり(写真5)、とくに基底層に障害が発生したときに発生する。表皮の剝離(落屑)は基底層の細胞死とその付属器の細胞死によって

生ずるが、真皮自体には放射線量は症状がほとんど一致しない。

d) 高線量被ばくによる真皮の血管への影響は、初期は紅斑として、後期は出血として表れる。出血は点状出血から紫斑までみられ、被ばく後は3~4週間目に出現のピークがみられ上半身に多い。紫斑は4~6Gy以上の被ばくで生じる。10~16週目に2回目の紫斑が起こる。これは真皮下層の血管叢の障害によって起こるもので、薄黒い赤紫色で引き続き壊死濃瘍・壊死部の分離が起こる。このような場合、皮膚の疼痛は四肢の被ばくでより深部の障害で発生し、痛みの強さは血管の障害程度と合致し、より重症化へのサインである。

e) 口腔粘膜障害は3~5Gy以上の被ばくで生じる。障害を受けやすいのは、頬部、軟口蓋、舌下部である。障害の少ないのは、歯肉、硬口蓋、耳、舌、後部咽喉頭壁とされている。初期症状は腫脹と発赤の炎症所見である。障害の程度により出血、潰瘍形成、壊死へと変化が進む。口腔粘膜障害と線量の関係をみると5~10Gyで充血が起き、4~5日で浮腫、疼痛を来し10~15日でピークに達し壊死が起こる。2~3週間で粘膜再生が完了する。しかし10~20Gyを



写真1



写真3



写真5

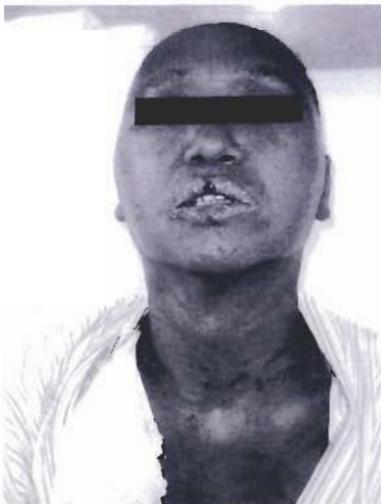


写真2



写真4



写真6

被ばくとすると粘膜の紅斑を生じ疼痛、浮腫を来す。この場合、1～2カ月で粘膜の再生がおこる。この線量では局所の出血と感染の合併が起こりやすい。口腔内は止血が難しく、経口栄養摂取の障害となるので、早めに中心静脈栄養や経管栄養摂取をはかる。

f) 脱毛は2～5Gyからの被ばくで起こり、被ばく後数週間目で起こることが多い。しかし、これらはまた回復して行く(写真6)。永久脱毛は7Gy以上の被ばくで起こる。

### 5) 皮膚症状に対する軟膏療法と外科的治療

原則的には放射線皮膚障害の治療は温熱熱傷の治療と同様、全身管理、局所管理からなる。急性放射線症の全身治療は成書に譲るが、温熱治療と同様、呼吸、循環、栄養、代謝管理が、局所管理と咬み合わさってこそ治療に成功する。治療にあたっては、温熱熱傷との類似点、放射線皮膚障害の特徴である、遅発性、難治性、反復性などの特徴を十分理解する必要がある。

a) I度熱傷相当放射線皮膚障害の治療：いわゆるI度熱傷相当では、被ばく3～4週後以内に紅斑、浮腫、等を生じるが、数週～数カ月の経緯で徐々に上皮化する。放射線治療後2～3週間でおこる軽症の紅斑では処置はほとんど必要ない。照射は通常強いエネルギーがよくコントロールされているので皮膚反応は最小である。皮膚は痒いて痒くなるので、あたりのやわらかなベビーローションなどが必要であり、紅斑の部分に接着性に高いテープまたは刺激を与える衣類をつけないようにする。これらの皮膚障害では外科的治療の対象とはならずステロイドやワセリン基剤のバラマイシン軟膏などの閉鎖療法が選択される。実際、I度～浅達性II度に対しては、ステロイド含有軟膏の局所投与が疼痛予防に有効であったとチェルノブイリの事故でも報告されている。

b) 浅達性II度は10～20Gyの被ばくで発現し、被ばく後1～2週で強い紅斑が生じ、その後水泡を形成し、これがやぶれて浸潤し真皮面に容易に感染をおこしやすい。感染がおきると皮膚の障害は更に深部におよび、皮膚全層の壊死へと進み潰瘍を生じる。数カ月の経緯で癒痕を残して一旦閉鎖するが、被ばくした局所は外力に耐えず弱くしばしば機械的な刺激や損傷で簡単に上皮の剥離、感染、潰瘍形成が起こる。疼痛は放射線皮膚障害の特徴であり、重篤化するサインでもある。そのコントロールは麻薬系または非麻薬系の鎮痛剤の使用(座薬または注射薬)によってなされるべきである。

c) 深達性II度は紅斑、水泡、皮膚剥離、最終的には深部真皮組織壊死に進展する。これらの変化が同時に起こる

と、抗生物質の投与が必要となるWound sepsisの問題が起こる。このような深達性II度～III度熱傷相当の創に対しては抗菌力をもつシルバースルファダイアジン(SSD)軟膏またはシルバースルファダイアジン徐放材貼付(ミカキュア)の良い適応である。

d) 早期からIII熱傷と同様な壊死を起こすものや、潰瘍底にフィブリンが付着し、血流に乏しいもの、2～3カ月の軟膏療法で治癒傾向のないもの、深達性II度～III度熱傷相当は植皮手術の対象となる。しかしながら潰瘍面や壊死組織の切除・切断または皮膚移植の正確な時期の判断はかなり難しい。もし手術があまりに早期に行われたならば、あらたな壊死組織が起こる可能性を残している。また、逆すぎる判断は感染による死亡の危険性と患者を不必要に苦しませることになる。温熱熱傷での手術時期は障害の範囲と深度が決定した10～20日後に行われることが多いが、放射線皮膚障害では、おおむね症状の固定をみる3カ月以後となることが多い。結局、放射線障害の特質上、早期には手術の決定は困難を極めることになる。

通常、放射線皮膚障害での手術方法として分層自家植皮が適応となることが多い。しかし、高線量被ばくで全身の皮膚(一見正常と思われる場所でも組織学的には障害を受けていることも多く、ここから採皮を行うと皮膚が上皮化しなくなり、新たな創を作ってしまうことになる)に障害がある場合は同種凍結保存皮膚移植が良い適応となる。すなわち、新たなドナーサイトを作らない方法として、同種凍結保存皮膚移植が選択されるべきである。しかも、骨髄機能が抑制されているので同種凍結保存皮膚は数カ月にわたって生着が期待できる。もう一つのドナーサイトを作らない方法として、浅達性II度から感染のない深達性II度創面であれば培養皮膚移植(同種、自家)が良い適応である。培養皮膚は3週間の期間があれば、約1.0m<sup>2</sup>の大きさまで自己の線維芽細胞やメラノサイトを増殖させることが可能であり、上皮化を促進する意味でも重用である。通常では数日で上皮化するような浅い潰瘍も放射線障害によっておきたものであれば、なかなか治癒しないからである。いずれにしてもこの種の手術の決定は温熱熱傷の専門機関の専門医によってのみなされねばならないし、そのようなためには、サーモグラフィーや表皮血流のドップラー装置によって損傷部位の組織障害の評価を試みる事が必要になる。これらの検査は、明らかな表在性損傷がない部位での局所的微小循環機能の評価に役立つことは言うまでもない。

## Na-24血中濃度による臨界事故線量評価法

●———石 樽 信 人 (放射線医学総合研究所 内部被ばく・防護研究部)

### 1. まえがき

本稿で紹介する血中<sup>24</sup>Naの濃度測定による線量評価法は、IAEAのマニュアル<sup>1)</sup>およびORNL(Oak Ridge国立研究所)のレポート<sup>2)</sup>に準拠したものであるが、今回放射医研で実施した新しい試みも若干加味した。

### 2. <sup>24</sup>Naの生成と入射中性子フルエンスとの関係

人体に入射した速中性子は、主に人体中の水素原子核(陽子)との弾性散乱により減速される。衝突された水素原子核の方は比較的高いエネルギーを得て組織中を飛び(反跳陽子)、原子の励起や電離を引き起こす。中性子による線量の主な部分はこうした反跳原子核によるものであり、その大きさは、入射中性子のエネルギーが高いほど大きい。

中性子は減速される過程で、あるものは人体から逃れ、またあるものは人体構成物質に捕獲される。代表的なものは水素原子核による捕獲である。

一方、人体には熱中性子を捕獲しやすいNaが数10グラム以上含まれている。中性子は減速過程でこの原子核にも捕獲され、その結果、半減期14.96時間の<sup>24</sup>Naが生成される。このような<sup>24</sup>Naが臨界事故線量評価に利用されるのである。

ところで、<sup>24</sup>Na原子核の生成数は、とりまなおさず<sup>24</sup>Naに捕獲された中性子の個数に等しい。従って、<sup>24</sup>Naの生成数、ひいては生成放射能は次の量に比例することになる。

(a) 人体へ入射する中性子の個数、すなわち中性子フルエンス $\Phi$ と投影面積 $S$ との積

(b) 入射中性子が人体に捕獲される確率( $\xi$ )

(c) 捕獲される中性子のうち<sup>24</sup>Naに捕獲されるものの割合。この値は、人体を構成する各原子核の捕獲断面積に各原子核濃度を掛けて合計したもの( $\sum \rho_i \sigma_i$ )と<sup>24</sup>Naの捕獲断面積 $\sigma$ に<sup>24</sup>Na原子核濃度 $\rho$ を掛けたものとの比で表される。

一方、人体中のNaの質量は、<sup>24</sup>Naの原子核濃度 $\rho$ と人体の体積 $V$ との積に比例する。

以上より、生成放射能を人体中のNaの質量で除した値、すなわち比放射能 $a$ は、次の簡単な四則演算の形で表すことができる。

$$a = \frac{N_A \lambda \cdot S \cdot \Phi \cdot \xi \cdot \sigma}{A_{Na} V \cdot \sum \rho_i \sigma_i} \quad (1)$$

ここで $N_A$ はアヴォガドロ定数、 $N_{Na}$ はNaの質量数、 $\lambda$ は壊変定数である。

上式中の各定数はIAEAマニュアルに与えられている。それらの値を用い、さらに、式を変形することにより、入射中性子のフルエンス $\Phi$ ( $\text{cm}^{-2}$ )を、体内の<sup>24</sup>Naの比放射能 $a$ ( $\text{Bq/g}_{(\text{Na})}$ )で表す次の式が得られる。

$$\Phi = 6.88 \times 10^6 \times a \quad (2)$$

被ばく直後を除けば、全身のNaの同位対比は一定と考えられるので、血液中の比放射能を直接測定することにより、入射中性子のフルエンスを求めることができる。

### 3. 単位フルエンス当たりの中性子線量

中性子線量を求めるためには、前章の式(2)から得られる中性子フルエンスに、単位フルエンス当たりの吸収線量換算係数を乗じる必要がある。

ORNLレポートには、種々エネルギーの中性子に対する吸収線量換算係数が与えられた。しかし、それらの値は、人体表面での値、および体内の線量の最大値であり、全身の平均的な線量の評価に用いることは適切ではない。

今回新しい試みとして、ICRP Publication 74<sup>3)</sup>に与えられた換算係数を使用した。これは、最新のシミュレーション結果をまとめたものであり、現在手に入る換算係数としては最も信頼性が高いと思われる。そのうちの代表的な組織に対する換算係数を図1に示す。

この図が示すように、中性子エネルギーによって吸収線量換算係数が大きく異なる。本稿では、次に示すいくつかの中性子スペクトルについてスペクトルで平均化した線量換算係数を試算した。

スペクトル(a)：IAEA Technical Report series 180<sup>4)</sup>に与えられたスペクトルで、半径10cm(体積4.2リットル)の球体系の核分裂性水溶液に対応するもの。

スペクトル(b)：同じく半径30cm(体積113リットル)の球体系の核分裂性水溶液に対応するもの。なお、今回の事故の臨界溶液体積は約40リットルと考えられている。

スペクトル(c)：今回の事故の臨界集合体を模擬した1次元拡散計算コードANISNによる、最も重症の患者が被ばくしたと推定される場所のスペクトル。

スペクトル(d)：今回の事故の臨界集合体を模擬した3次元モンテカルロ計算コードMCNP-4Bによる、最も軽症の患者が被ばくしたと推定される場所のスペクトル。

このうち、スペクトル(c)と(d)を図2に示した。

計算結果を以下に示す。なお、全身の値は、Publication 74に記載されたすべての組織について換算係数を求め、その値を各組織の質量で荷重平均したものである。

表1 単位フルエンス当たりの吸収線量換算係数 (pGy・cm<sup>2</sup>)

	スペクトル(a)	スペクトル(b)	スペクトル(c)	スペクトル(d)
骨髄	9.00	8.89	6.96	4.52
結腸	12.1	12.0	9.42	6.28
肺	13.2	13.0	9.97	6.42
全身	12.6	12.4	9.57	6.27

これら表1の値を前章の式(2)の中性子フルエンスに乗ずることにより、比放射能から吸収線量を求める式が導出される。その式の係数部分、すなわち比放射能当たりの吸収線量換算係数を次の表に示す。

表2 比放射能当たりの吸収線量換算係数 Gy/(Bq/g<sub>eq</sub>)

	スペクトル(a)	スペクトル(b)	スペクトル(c)	スペクトル(d)
全身	8.67×10 <sup>-5</sup>	8.53×10 <sup>-5</sup>	6.58×10 <sup>-5</sup>	4.31×10 <sup>-5</sup>

この表が示すように線量換算係数は中性子スペクトルに強く依存する。事故時にスペクトルが実測されることはまず無く、通常は、仮定やモデルに基づく計算あるいはシミュレーション結果を用いることとなる。しかしながらモデルの設定に必要な精度の高い情報がすぐに得られるとは限らないし、シミュレーションが可能な施設も限られている。スペクトルに起因するこのような誤差は、本方法の大きな問題点である。

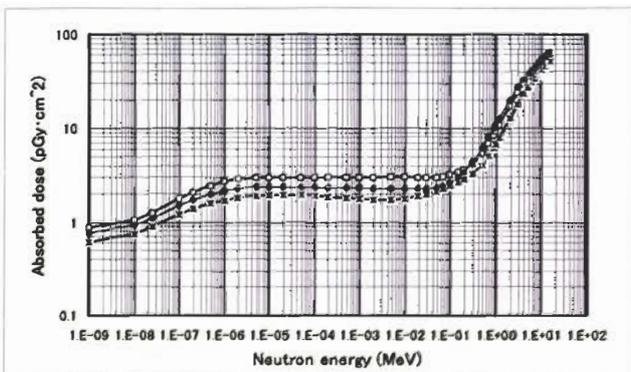


図1 中性子単位フルエンス当たりの吸収線量(ICRP Publ. 74)  
□：結腸、●：肺、\*：骨髄

#### 4. γ線線量の推定

今回の事故のように溶液系臨界集合体では、核分裂に伴う即発γ線に加え、中性子が溶液中の主に水素原子核に捕獲され、大量のγ線が発生する。これらのγ線による吸収線量は、しばしば中性子線量を上回る。しかし、本稿で紹介している<sup>23</sup>Naの分析からはγ線線量を直接推定することは原理的に不可能である。

γ線線量の推定に利用できるデータとして、IAEAマニュアルには、臨界溶液の容積あるいは水素原子核数対<sup>235</sup>U原子核数の比からγ線カーマ/中性子カーマ比の日安を読み取るグラフが示されている。一方、今回の事故では、臨界状態が長時間持続し、この間に空間線量のモニタリングが実施され、1cm線量当量のγ線/中性子比が測定された。これらのデータから近似的に吸収線量の比を推定することは可能である。

今回の事故に関する推定では、IAEAマニュアルに基づく場合、γ線線量は中性子線量の2倍強、空間線量モニタリングに基づく場合は約1.6倍であった。

#### 5. 今後の検討課題

臨界事故の被ばくの特徴は、線質の異なる中性子とγ線との混合被ばくであること、および、近傍での被ばくにより線量分布が不均一になることである。しかしながら、臨界事故に適用される従来の線量推定手法から得られる情報はいずれも全身の平均的な線量であり、また、中性子とγ線の寄与の内訳に関する直接的な情報も含まない。

放医研では、臨界集合体周囲の放射線場の詳細な解析、実際の作業にできるだけ忠実な姿勢を反映する放射線輸送シミュレーション、臨界実験装置による線量の実測等により、被ばく線量の詳細をさらに明らかにする検討を進めている。

- 参考文献  
 1) IAEA: Technical Report Series No.211, 1982.  
 2) Y. Feng, et al: ORNL/TM-12028, 1993.  
 3) ICRP: ICRP Publication 74, Ann. ICRP, 26(3/4), 1996.  
 4) IAEA: Technical Report Series No.180, 1978.

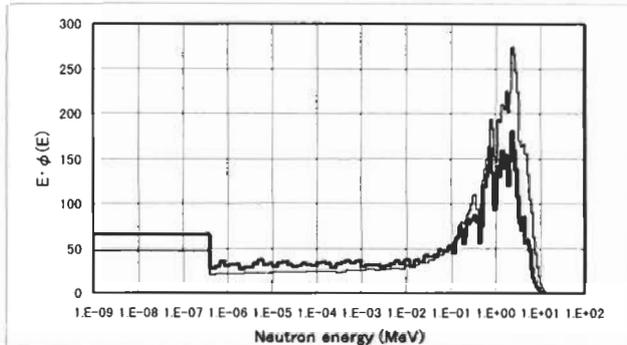


図2 MCNP-4BおよびANISNコードで計算された中性子スペクトルの比較(元データは核燃料サイクル機構より提供)。  
—— MCNP-4B —— ANISN

## ◆第4回放射線事故医療研究会、緊急被ばく医療フォーラムのお知らせ◆

◆日時：平成12年8月25日(金) 9:00～18:00 場所：神戸産業振興センター(JR神戸駅から徒歩10分)

◆テーマ：「臨界事故1999年9月での医療一経験と課題」

◆連絡先：三菱重工神戸病院外科 衣笠達也 〒652-0863 神戸市兵庫区和田宮通6-1-34

TEL：078-674-7705 FAX：078-672-2352 E-mail：tatsya\_kinugasa@kind.kobe.mhi.co.jp

### 会長からのメッセージ

1999年9月30日、東海村ウラン加工施設で起こった臨界事故は、我が国で起こった放射線事故の中でももっとも深刻なものであり、初めての死亡例を出した事故でもありました。被ばく患者の医学的処置、情報の公開と患者のプライバシー保護、事故の概要とその背景、医療の果たした役割と今後の課題、緊急被ばく医療体制の点検等、議論すべき項目は沢山あります。

限られた時間ではありますが、私共の経験した事を検証し、緊急被ばく医療の今後の課題、さらには今後の方向性を示せる会となりますよう、みなさまのご参加、睿智の結集を切望いたしております。

## 8号目次

### 巻頭言

緊急被ばく医療ネットワーク会議の役割

前川和彦(東京大学大学院医学系研究科)

—1～2—

### 事例研究

JCO臨界事故における緊急被ばく1次・2次医療とその問題点

有賀久哲(国立水戸病院放射線科)

—3～4—

### 事例研究

被ばく事故による放射線皮膚障害と治療

田中秀治(杏林大学救急医学)

—5～9—

### 事例研究

Na-24血中濃度による臨界事故線量評価法

石博信人(放医研内部被ばく防護研究部)

—10～11—

### お知らせ・編集後記

—12—

## 編集後記

16年過ごした放医研を離れ、広島市の放影研に赴任して3カ月がたった。研究所のある比治山には桜が咲き誇り、毎朝坂を上りながら香りが楽しめる。

2月に起きたタイのコバルト60被ばく事故に対して、国際原子力機関(IAEA)は医療ミッションの派遣を決定し、放影研の長瀧理事長に対して人選を依頼してきた。依頼から2日目の早朝(2月26日)鈴木、大谷(広大)、田野崎(放医研)の3名は成田を発ち、3月1日までタイの関係者を援助してきた。事故は、屑鉄業者が古いコバルト治療装置を盗みだし、その線源部分をジャンクショップで解体する事によって発生した。線源解体時に線源が作業現場に落ち、19日間にわたり被ばくが続いた。被害者は、作業現場に近づくたびに急性症状を起こすレベルの被ばく線量を繰り返し受けたと思われる。入院してきたときには汎血球減少症が始まっており、治療は困難を極めた。

日本からはG-CSFを持参したほか、HLAタイピング、染色体分析、臍帯血バンク、砂糖を使った線量評価などに関して協力を申し出た。残念ながら、既に3名の患者さんが亡くなっている。被ばく医療では、事前準備がなによりも重要であることを改めて感じるとともに、国際協力の難しさも実感した。これを機会にアジア地区の緊急被ばく医療ネットワークを進めることができればと思う。(鈴木 元)