

東海村ウラン加工工場 臨界事故に関する放医研報告書



平成 13 年 1 月

放射線医学総合研究所

執 筆 者

(企画室)	菱山 豊	東條三郎	
(技術安全部)	門間静雄 石澤義久	芳田典行	宮後法博
(放射線科学研究部)	平岡 武	野田 豊	
(障害基盤研究部)	早田 勇		
(内部被ばく防護研究部)	石樽信人		
(人間環境研究部)	藤元憲三 湯川雅枝 米原英典	石川徹夫 西澤かな枝	西村義一 松本雅紀
(放射線障害医療部)	辻井博彦 蜂谷みさを 能勢正子	明石真言 黒岩教和 川瀬淑子	平間敏靖 中川憲一 鵜沢玲子
(第4研究グループ)	村松康行 吉田 聡	武田 洋	宮本霧子
(重粒子治療センター)	村田 啓	徳山憲子	

正 誤 表

頁	誤	正
表裏	芳田典行	芳田典幸
21	臭素TMAH	臭素をTMAH
25	なトリウム	ナトリウム
26	$\Phi = 4.61 \times 10^{11}$ (cm ⁻²)	$\Phi = 4.61 \times 10^{11}$ (cm ⁻²)
27	$\Phi = 1.0 \times 10^{12}$ (cm ⁻²)	$\Phi = 1.0 \times 10^{12}$ (cm ⁻²)
27	$\Phi = 6.6 \times 10^{11}$ (cm ⁻²)	$\Phi = 6.6 \times 10^{11}$ (cm ⁻²)
58	文部省からは	文部省に
59	<u>を派遣していただいた。</u>	の派遣を要請した。
66	23時過ぎ	11時過ぎ
66	国立東京災害医療センター	国立病院東京災害医療センター
66	日赤東京医療センター	国立病院東京医療センター
66	千葉大学 4名 10月4日～10月8日	削除
104	厚生省も	厚生労働省、文部科学省も

序 文

平成11年9月30日午前10時35分頃に日本で初めて起きた臨界事故は日本全国をはじめ諸外国にも大きな衝撃を与えた。この事故は、2人の作業者の命を奪い、多数の住民に健康影響への不安を与え、様々な風評をも加えて多大な社会的、経済的影響を惹起した。1年3ヶ月余りを経て冷静な目で振り返ると、多くの人々が、この事故と相対し、真剣に取り組み、様々な場面でそれぞれの役割を果たしていたことが分かる。そして、これまでに種々の形で、報告書や単行本が出版され、貴重な記録が残されつつある。

この事故に様々な形で関わった放射線医学総合研究所（放医研）としては、私達の果たした役割と得た経験をできるだけ正確に記録して、世の中に発信し、後世に残す必要性を認識し、その準備をしてきた。この報告書を出版することで、この事故にかかわった責任の一つを果たしたことになると考えている。

事故当日放医研は米国の核医学者の訪問を受け、型通りの説明と見学を終え、関係者が集まって昼食をとりながら意見交換をしていた。その席から呼び出され、「東海村のウラン加工工場で放射線被ばく者がでたとの連絡が入り、受入れ準備を始めた」との報告を受けた。意見交換を終えて辞去する訪問者と別れの挨拶を交わしながら、この方は私が中座した時の慌ただしさを感じ取ったであろうか、後に報道を見て、あの時だったのかと思い当たるだろうかと考えた覚えがある。事の重大さをこの時点で直感していた。

この直後に始まった未曾有の嵐は、放医研の職員多数を巻き込んで、以後数ヶ月にわたって吹き荒れた。嵐にも例える時期は過ぎた今日でも、関係者はその後の対応に忙しい日々を過ごしている。また、所外の多くの方々にも多大なご協力をいただいた。緊急被ばく医療ネットワーク会議等を通じて、惜しみない協力とご支援を賜った多くの方々に厚く御礼申し上げる。同ネットワーク会議の立ち上げに尽力された青木芳朗原子力安全委員長代理、白尾隆行前管理部長はじめ関係者の皆様の先見に敬意を表し、感謝する。国内外の学会などが企画したJCO事故に関連する報告会が数多く開催された。放医研の企画によるJCO事故対応の種々な側面を取り上げたセミナー及び国際シンポジウムが平成12年12月に開催された。

高度に被ばくした3人の作業者の治療、東海村をはじめ地元への専門家としての支援、住民の行動調査と線量評価、住民への説明、健康相談、住民以外の人々の健康不安への対応、行政への協力等々、放射線を扱う様々な専門分野に従事する放医研職員が果たした役割は多岐にわたり膨大である。本報告書は、様々な場面で各人、各グループが果たした役割の詳細な記録である。また、事故の実態をさらによく理解する上で、また2度と起こしてはならないと再認識する上で貴重な資料となると信じる。

この事故でお亡くなりになった2人の方のご冥福をお祈りするとともに、本報告書が事故への備えに役立つことを願う次第である。

平成 13 年 1 月

放射線医学総合研究所
所 長 佐々木 康人

目 次

1. 事故の概要	1
経緯一覧	3
臨界事故はどこで起きたか	5
作業図	6
2. 事故の発生から患者受入要請、臨界事故が判明する迄の情報伝達	7
2-1 事故発生から放医研まで	7
2-2 放医研到着から事故の実態の解明まで	8
2-3 問題点	9
3. 患者の受入と初期対応	11
3-1 汚染対策	11
3-2 要員の放射線防護	12
3-3 患者の搬送:千葉消防局ヘリポートから放医研まで	14
3-4 患者の受入	14
4. 被ばく線量評価	16
4-1 前駆症状から見た線量評価	16
4-2 物理学的線量評価	18
4-3 染色体分析法による線量推定	38
4-4 線量分布の詳細解析	43
4-5 歯治療金属の放射化による口室内組織の被ばく線量推定	51
5. 治療方針の決定	55
6. 緊急被ばく医療ネットワークと他医療機関との協力	57
6-1 緊急被ばく医療ネットワーク会議	57
6-2 協力体制:他の医療機関等との協力	58
6-3 厚生省、文部省等からの協力	58
6-4 臍帯血バンクネットワーク	59
7. 医薬品の緊急輸入	60
8. 治療と経過	62
8-1 症例	63
8-2 看護体制	65
8-3 放射線障害	67
9. 医療施設における放射線防護	74
10. ウラン加工工場周辺住民への対応	78
10-1 東海村村長への医療顧問の派遣	78
10-2 東海村説明会	79

10-3 東海村における健康相談	79
10-4 ひたちなか市対応	80
10-5 住民行動調査	81
10-6 放医研での対応	84
10-7 周辺住民および低線量被ばく者の染色体分析による線量推定	87
11. 国際対応	92
12. 報道対応	96
13. 原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査委員会及び健康管理検討委員会	97
14. 情報の取り扱いについて	99
15. 放医研における緊急被ばく医療と今後の課題と展望	101
15-1 放医研の被ばく医療体制	101
15-2 今後の展望：放医研に求められるもの	103
巻末	
参考資料-1 REPORT OF AN EXPERT COMMITTEE ON THE MEDICAL MANAGEMENT OF THREE PATIENTS SERIOUSLY IRRADIATED IN THE CRITICALITY ACCIDENT IN TOKAI-MURA (参考資料-1の和訳)	106 112
参考資料-2 被ばく線量推定のための検体提供に関する同意書および同意取得用説 明文書	116
参考資料-3 ウラン加工工場臨界事故に関する医療に係るデータ等の公表について の申し合せ事項	118
参考資料-4 行動調査票	120
JCO事故報告書作成ワーキンググループの名簿	124

1. 事故の概要

平成11年9月30日（木）10時35分頃、茨城県東海村のウラン加工工場で臨界事故が発生した。2人の従業員（A氏、B氏）が硝酸ウラニルを沈殿槽に直接注入しているときに青い光を発生し、 γ 線を示すアラームが鳴り響いた。壁を隔てた廊下にいたもう一人の従業員（C氏）がすぐに事故と気づき、C氏の「逃げろ」という指図により自力で更衣室に避難した。3人は高線量の被ばくをした。その後、A氏は嘔吐、意識消失、全身硬直、B氏はしびれを感じた。A氏は意識を失い、嘔吐したため救急車が要請された。

東海村消防本部より、放医研の辻井放射線障害医療部部長に11時頃連絡が入った。最初、高線量被ばくが疑われるため放医研に搬送したいとのことであったが、汚染がないとの報告と患者の救急処置が優先と判断し、第二次緊急医療施設である国立水戸病院へ搬送するよう指示を出した。搬送中A氏、B氏は嘔吐、下痢の症状が見られた。国立水戸病院での応急処置を受けたが、高線量被ばくの症状と被ばく者の体表面から放射線が検出されたことから判断して第三次医療施設である放医研へ転送されることとなった。放医研では原子力防災対策本部を設置すると共に、患者受け入れの準備に入った。対応メンバーを決め、緊急被ばく医療施設の機器・汚染防止対策・医療機器・用品・医薬品の点検、準備を行った。この時点ではまだ、どの規模の被ばく事故かは不明であった。14時頃、「六フッ化ウラン使用施設で事故がおり、被災者は3名、重症であり内部汚染の可能性がある。」との連絡が入り、第1回の打合わせが14時30分に行われた。国立水戸病院の医師が被ばく者に同行し、茨城県の防災ヘリコプターで14時45分千葉市土^{とけ}気のヘリポートに到着した。放医研放射線安全課職員が待ち受け、土気より放医研緊急医療施設へ千葉市の救急車で搬送された。15時25分放医研到着。A氏、B氏はストレッチャーにて、C氏は徒歩にて入院した。放射線安全課職員はヘリコプター、救急車及び乗員に放射能汚染がないことを確認した。

緊急被ばく医療チームは救命処置に備えた準備態勢を整えた。被ばく者の被ばく・汚染状況を直ちに調べ、医療チームによる治療を開始した。精神状態の安定に努めると共に、バイタルサインチェック、血管確保、脱水症状のための点滴静注を行った。同時に物理学的、生物学的線量測定が専門家により開始された。この時点では正確な被ばく線量の推定ができないが、被ばく者の体表面モニタリング、鼻スメア、衣服の放射能検査より放射線物質による外部汚染はほとんどない、内部汚染の可能性はあるがほとんど問題のないレベルであること、水戸病院での血球数検査、及び臨床症状より高線量（A、B氏においては致死線量）の被ばくを受けているとの判断から緊急被ばく医療施設より、重粒子治療センター病棟（A氏、B氏は無菌病室、C氏は負圧病室）へ搬送した。血圧低下に対するステロイド、感染症防止のため抗生物質、骨髓回復のためサイトカインの投与などを行った。後に、放医研JCO事故線量推定WGにより、臨界事故であり、臨床症状、嘔吐物、血液中の ^{24}Na 、リンパ球数、染色体分析より γ 線に換算してA氏は16-20 GyEq以上(Gy equivalent to γ -ray)、B氏は6-10 GyEq、C氏は1-4.5GyEqと推定された。

放医研は、緊急被ばく医療ネットワーク会議委員長、千葉大学学長、日赤中央血液センター所長、国立がんセンター病院長、文部省、厚生省等に連絡を取り、支援協力を依頼した。

同日夜より臨床検討会を開催。会議の途中で患者の携帯電話や吐物等から ^{24}Na 、 ^{42}K を検出したことから臨界事故と判明したと線量測定班より報告を受ける。これにより中性子を伴う外部被ばく中心の治療に専心することとなった。A、B氏については致死線量の被ばくを受けており、全身状態は安定しているものの、これから予断の許さない状況であった。白血球数の増加及びリンパ球数の減少が顕著であり、自己骨髄の回復が無理であると予想されるために幹細胞移植を行うための準備等をおこなった。また、放医研で組織している『緊急被ばく医療ネットワーク会議』を10月1日に開催することになった。一方、文部省・厚生省の協力により他医療機関からの看護婦・薬剤師等の協力が得られることになった。

緊急被ばく医療ネットワーク会議を開催し検討した結果、A氏、B氏については骨髄機能の廃絶が予想され、造血幹細胞の移植と重篤な消化管障害と感染、皮膚障害などに対する全身管理が必要との判断から、東京大学医学部付属病院及び東京大学医科学研究所付属病院へそれぞれ転院のうえ、杏林大学、日本医科大学をはじめとする各医療機関からの協力をうけながら治療を続けることとした。C氏はサイトカイン等の投与により骨髄の自己回復が見込まれるので、放医研で治療を続けることとした。A氏は実妹よりの末梢血幹細胞移植を、B氏は臍帯血幹細胞移植を受けた。その後集中的な治療にも関わらず、A氏は全身皮膚障害や腎不全を含む多臓器不全の為、被ばく後83日目(平成11年12月21日)に亡くなった。B氏の自己骨髄は回復し、顔面や四肢の皮膚障害に対して培養と死体からの皮膚移植を行い良好な結果が得られたが、肺と腎障害また消化管出血などにより211日目(平成12年4月27日)に亡くなった。C氏は放医研で無菌室での感染防止、及びサイトカイン投与による自己骨髄回復のための治療等を続け、1999年12月20日に退院した。その後は定期的な検査を当研究所で続け、その間は地元病院で受診することとした。入院中、また、退院後も、3人の被ばく患者はもちろんのこと、家族や周りに対する精神的サポートも必要であり、千葉大学からの協力を得た。また、医療だけではなく、警察、検察など行政的対処も必要であった。更に、この3人ばかりでなく周辺住民に対しての健康相談や講演を行い、放射線を正しく理解してもらうように、被ばくに対する不安が少しでも和らぐように現在も努めている。

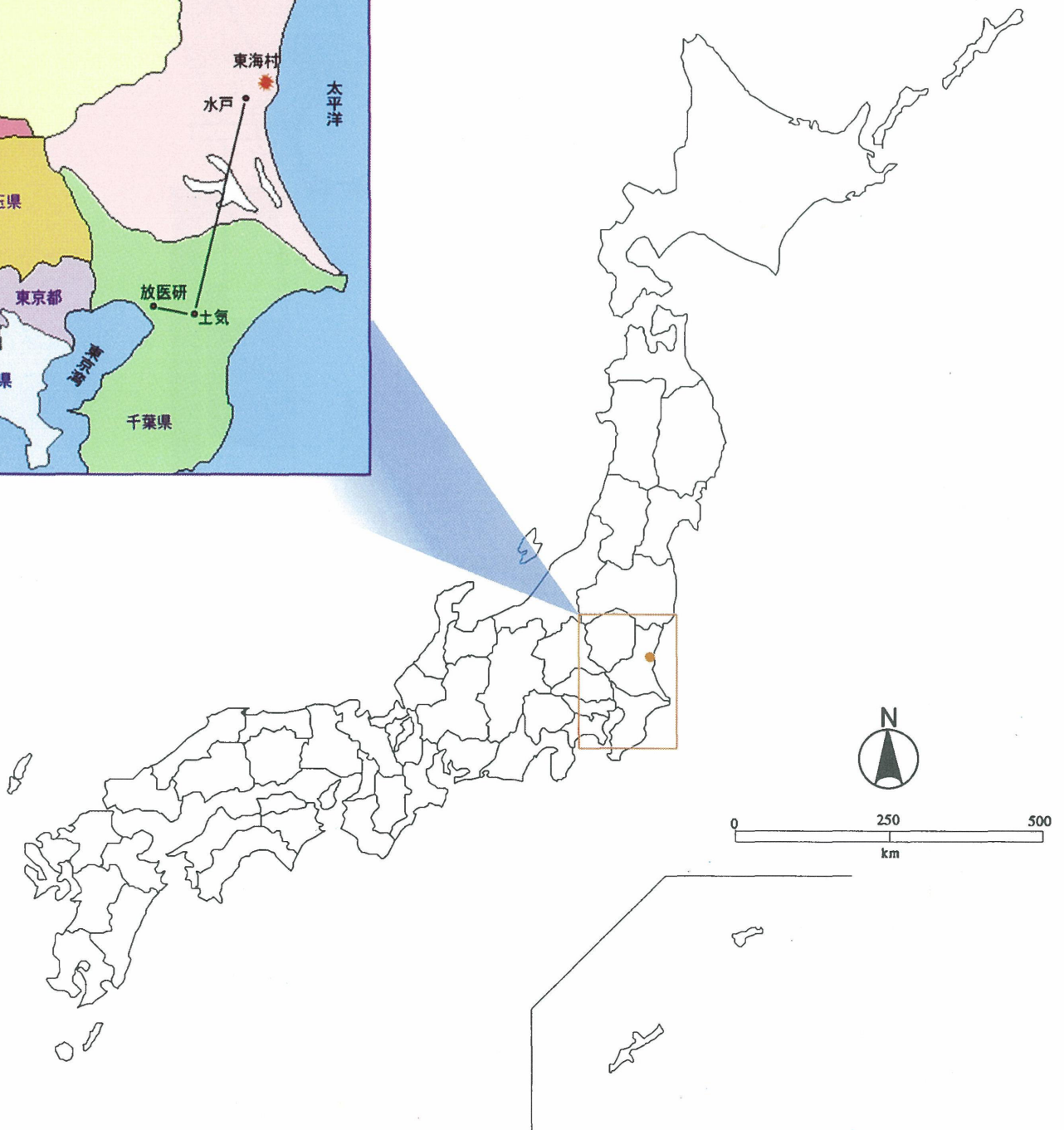
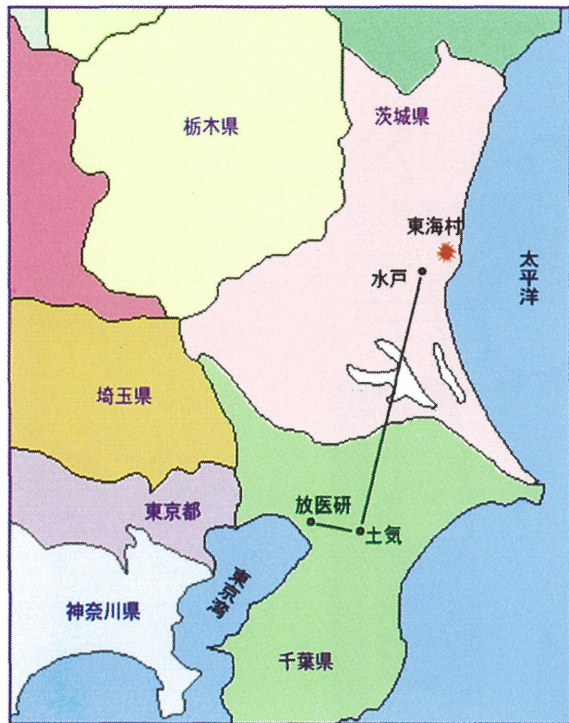
この事故を機会に、「防災基本計画」(中央防災会議)、「原子力施設等の防災対策について」(原子力安全委員会)の改定が行われ、「原子力災害対策特別措置法」の施行など行政的にも大きな影響を与えた。同時に国民や地方自治体の意識を変えた。緊急被ばく医療に関する講演会等への派遣要請は増加し、原子力施設を持たない自治体も放射線に対する教育の必要性を感じ始めた。放医研にとっても緊急被ばく医療には、事故の対策が重要であることを実感させる事故であった。

経 緯 一 覧

日 時	項 目
平成11年 9月30日 10時35分	事故発生
10時43分	JCOから東海村消防本部へ救急車要請
11時00分頃	東海村消防本部から放医研への第一報
12時07分	国立水戸病院に被ばく患者を収容
13時00分頃	東海村消防本部から患者3名の放医研への受け入れ要請 放医研に原子力防災対策本部を設置
13時43分	国立水戸病院出発
14時16分	水戸ヘリポート出発
14時45分	千葉ヘリポート到着
15時25分	放医研到着。緊急被ばく医療施設に患者収容
16時00分	重粒子治療センター病棟へ入院
17時00分	第1回記者会見
18時25分	中性子線被ばく事故との結論
10月 1日 6時00分頃	臨界終息
”	第1回緊急被ばく医療ネットワーク会議開催
10月 2日	A氏東大病院へ転院
10月 4日	B氏東大医科学研究所病院へ転院
10月 6、7日	A氏に2回の末梢血幹細胞移植を実施
10月 8日～	東海村へ医療顧問を派遣
10月 9日	B氏に臍帯血移植を実施
10月12日	第2回緊急被ばく医療ネットワーク会議開催
10月16日	来所したIAEA調査団に、被ばく患者の症状、治療について説明
10月18日	東海村における住民説明会に講師を派遣
”	IAEAにおもむいて、事故について説明
10月19日	東海村における健康相談に医師の派遣開始
10月28、29日	外国の専門家9名来所
10月29日	第3回緊急被ばく医療ネットワーク会議開催
11月20、21日	放医研研究者が周辺住民の線量評価のために事故当日の行動調査
12月20日	C氏退院
12月21日	A氏死亡

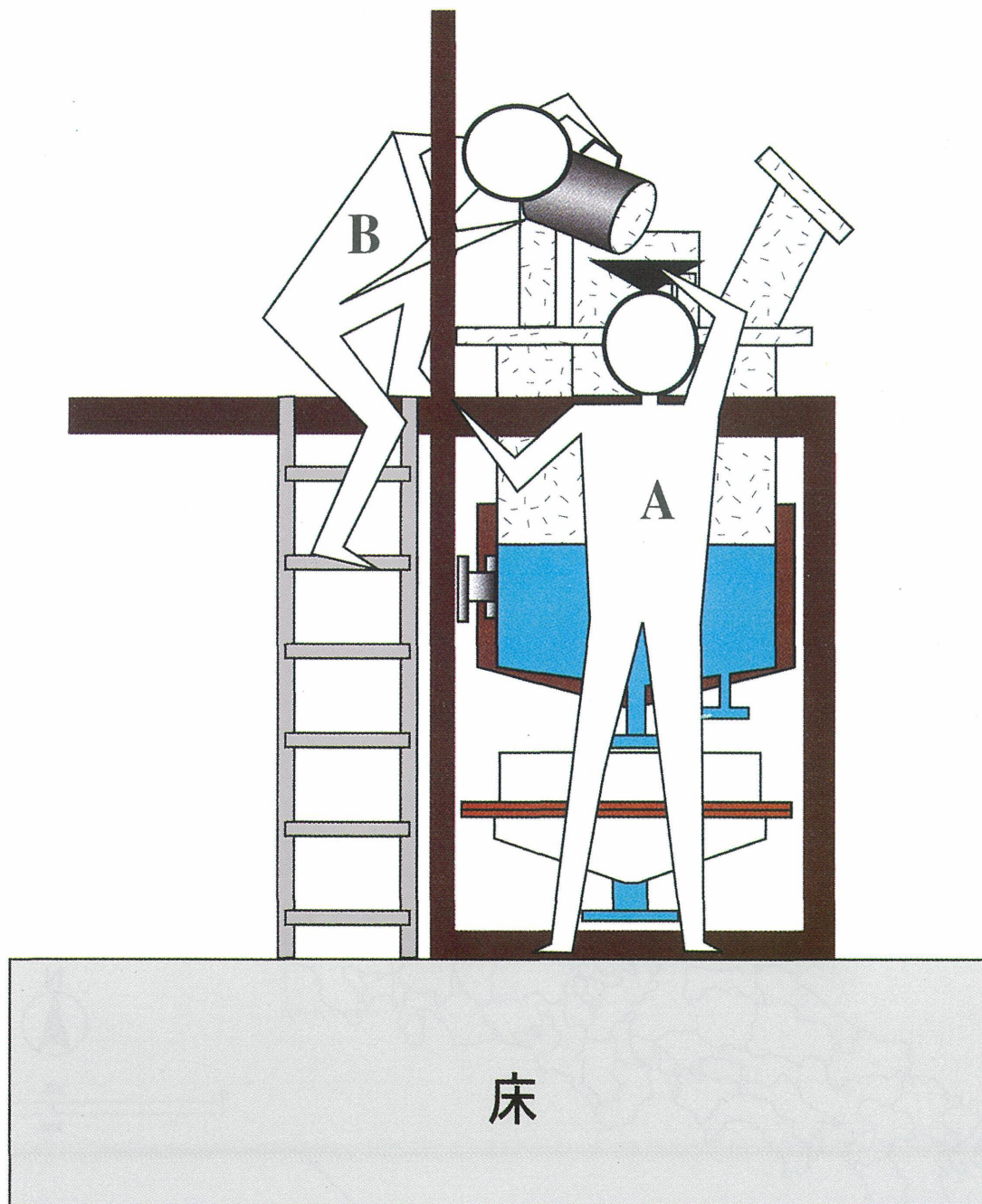
平成12年 1 月 5日	第4回緊急被ばく医療ネットワーク会議開催
2 月 9日	第5回緊急被ばく医療ネットワーク会議開催
3 月25日	第6回緊急被ばく医療ネットワーク会議開催
4 月27日	B氏死亡
12月14、15日	放医研国際シンポジウム ー東海村ウラン加工工場臨界事故ーを開催

臨界事故はどこで起きたか？



東京の北西約120Km、茨城県東海村に(株)JCOがある

作業図



この作業図は、B氏及びC氏の話に基づいて放射線医学総合研究所が作成したものである。原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査委員会に提出したものと、B氏の右足、A氏の左手の位置が異なっているが、現場で行われた再現実験などの後に訂正された。

2. 事故発生から患者受入要請、臨界事故が判明する迄の情報伝達

事故発生から、被ばく患者3名が放医研へ到着・収容されるまでの概要は以下のとおりである。

2-1 事故発生から放医研まで

平成11年9月30日10時35分頃、(株) ジェー・シー・オー（以下、「株JCO」）ウラン加工施設の転換試験棟において、ぱしっという音とともに青い光が発生し沈殿槽内の硝酸ウラニル溶液が臨界に達した¹⁾。同時にγ線を知らせるサイレンが鳴りだし、作業室の外にいたC氏は直ちに「逃げろ。」と作業をしていた他の2名の作業員（A及びB氏）に退避するように指示。A氏およびB氏は自力で急いで更衣室に行った。そこでA氏はトイレに行った後に嘔吐、意識を失った。B氏は全身にしびれを感じた。他の従業員が更衣室に駆けつけ、避難するように言ったがC氏は「人が倒れている。災害です。無理です。」と退避せず、その従業員に救急車を呼ぶように要請した。10時43分に救急車を要請、10時46分に救急車が到着A氏の処置を開始したが、職員がサーベイをしたところレベルが高いため救急隊に移動するように言い、救急隊はA氏を担架で事務室に運んだ。汚染の可能性が問題になったが、結局救急隊員はA氏を正門まで運び、11時27分に3名を救急車に収容後受入施設を探した。東海村消防本部は放医研に、「東海村の事業所で気分が悪くなった者が2名（最初の連絡では患者の数は3名ではなく、2名ということであり、事業所の名前も不明確であった）いるが、患者をどこに連れていったらよいのか。」を問い合わせた。放医研は、「脈拍、血圧、呼吸等のバイタルサインを把握することが先決であること、2次医療機関である国立水戸病院に行くことが適切である。」ことを同消防本部に伝えた。また、放医研では、患者が搬送されることを考慮し、受け入れ準備をしておくことを伝えた。消防本部との数度のやりとりで、場所が住友金属鉱山敷地（JCOの名前は出なかった）の転換試験棟で、10時43分に消防本部に連絡があったこと、この試験棟ではウランを使用していること、一名が泡を吹いて意識が一度無くなり、また戻ったということなどがわかった。しかし、この時点で株JCOは、東海村消防本部に何が起きているのかという情報を伝えていなかったようで、放医研に対しても、被ばくの状況が全く伝わらなかった。このころJCOから科技庁へ第一報(FAX)「2名被ばく。臨界事故の可能性ある。」との連絡が入ったが、放医研では情報がなく放射線安全課を中心に汚染対策として緊急被ばく医療施設の養生を始めた。

11時33分頃、国立水戸病院医事課に、東海村消防本部から被ばく事故の第1報が入り、「JCO施設で放射線被ばく事故があり、3人を搬送したい。2名は嘔吐している。うち1名は最初意識混濁があったが、今は意識がある。」とのことであった。同病院の放射線科医長は、「嘔吐、神経症状から判断するとかかなりの被ばくをしていると考えられる。直ちに放医研に直接搬送した方がよい。」と消防本部に伝えた。結局、消防本部は、「放医研で受け入れ可能かどうか検討している。その間、国立水戸病院で被ばく者を受け入れてもらいたい。応急措置として点滴などをやって欲しいと放医研に指示された。その後についてはまた指示すると言っている。」ということを伝えた。国立水戸病院では、「放医研から受け入れ要請があり、患者に汚染はない。」とのことで患者

を受け入れることを決定。11時49分に救急車は国立水戸病院に向けて出発し12時7分に国立水戸病院に到着した。同病院では、(株)JCOの放射線管理員などの保健物理の専門家が同行していなかったため、① JCOが何を行う施設で、どのような事故が起こったのか。② 臨床的にも外部被ばくのみと思われるのに、なぜ体内から放射線が検出されるのか。③ $30\mu\text{Sv/h}$ を振り切る程度の核種不明な体内汚染が疑われる者に対し、どのような防護処置が適当か。④ 一般病棟への入院は可能か、廊下の移動・入院中にはどのような防護処置が適当か。⑤ 内部被ばくに対する処置は必要かなどの問題が生じ、解決の方法も見出せないまま状況だけが悪化していくように感じていた⁴⁾。国立水戸病院では、「患者の体表面から高い γ 線が検出され、下痢嘔吐が激しく、リンパ球の減少も認められた。」ため放医研に転送することを決定した。

放医研においても消防本部からの連絡だけでは状況がつかめず、科学技術庁原子力安全局に問い合わせたが、情報が入らなかった。13時頃、企画室の菱山総括研究企画官から、科学技術庁水戸原子力事務所長に電話をしたところ、「10時35分頃、(株)JCO開発試験棟でエリアモニターが鳴り、2名が被ばくした。この施設は20%から50%の濃縮ウランを使用する施設であり、敷地境界付近で最高 0.84mSv/h が測定された。(株)JCOとは住友金属鉱山の子会社、臨界事故の可能性がある。」ということが明らかになった。

13時頃、東海村消防本部から放医研に電話連絡が入り、「国立水戸病院から放医研に患者3人を搬送する。搬送手段の手配は消防で行う。」ことが伝えられ、放医研では受け入れの本格的準備を始めた。13時以降の對外窓口は総括研究企画官が行うことになった。また、13時以降、報道関係の照会が多くなった。また、茨城県警、ひたちなか警察署からの状況照会もあった。

13時43分に国立水戸病院を2台の救急車がヘリポートに向けて出発した。このころ放医研では高線量被ばくを想定し、造血幹細胞移植のため日本赤十字社に連絡し、HLAタイピングの準備を開始した。14時頃放医研では「六フッ化ウランによる汚染の可能性も考えて対処するため、稲毛消防署員、除染チームは α 核種汚染に対応するフル装備（フルフェイスマスク、ディスポ手術着、前掛け、帽子、個人線量計）の準備をした。そして千葉市消防本部の救急車により、患者転送対応者（放射線安全課員3名）が、放射線測定機器類、防護服等を携行して千葉市消防局のヘリポート（土気^{とけ}）へ向けて放医研を出発し、14時30分頃に到着し待機した。14時16分水戸を出発した患者を乗せたヘリコプターは、14時45分に千葉市消防局のヘリポートに到着した。2名の患者は下痢・嘔吐の症状あり、応急的な直接サーベイを実施したところ、 α 線は検出できないがGMサーベイメーターでカウントあり、吐物にもカウントあるが、「六フッ化ウランの被ばくがあったとしても医療要員に汚染が広がるレベルではない。」と判断、除染要員の準備からフルフェイスマスクを除く。14時58分には救急車2台で放医研に向け千葉市消防局のヘリポートを出発し、15時25分に放医研に到着した。

2-2 放医研到着から事故の実態の解明まで

放医研では放射性核種の汚染の可能性を考慮し、医師・看護婦はフルフェイスマスクをし、緊急被ばく医療施設廊下にて3名の被ばく患者の表面汚染検査を α 線サーベイメータ及びGMサー

バイメータで行った。A氏は頭部約13kcpm、上半身約26kcpm、B氏は上半身約15kcpm、C氏は頭部約6kcpm、上半身約4kcpm（BG：約100cpm含む。詳細は別項参照）であった。患者に強い発汗、血圧低下が見られたため、点滴開始し、動脈血の酸素分圧の検査後の酸素吸入、ウラン吸入の可能性から重炭酸ナトリウムの点滴、血圧低下のためメチルプレドニソロンの投与をした。廊下に準備した予備のサーバイメータが大きく振れていたことから、汚染が疑われた。一方、 α 線の表面汚染検査はBGレベルであり、患者をくるんだ毛布の汚染も低レベルであり、医療従事者の二次被ばく・汚染はほとんど考えられないこと、嘔吐や発汗による脱水・電解質バランスの喪失の治療等救命措置を第一優先として病院棟へ移送することを決め、緊急被ばく医療施設でのホールボディカウンタ及び甲状腺モニタによる被ばく測定を中止し、重粒子治療センター病棟に搬送した。救急隊員及び運搬車両等のサーバイでは全て、表面汚染は認められなかった。

16時頃になっても放医研では事故の実態に関する情報が得られなかった。サーバイ結果が非常に高かった被ばく患者の持ち込んだ携帯電話をゲルマニウム検出器による γ 線スペクトロメータで計測したところ、 ^{24}Na 、 ^{56}Mn 、 ^{198}Au 、のピークを確認した。それに引き続き、16時40分頃からA氏の吐物の計測に入り、18時25分 ^{24}Na 、 ^{42}K のピーク確認により中性子線による被ばく事故との結論に至った。

2-3 問題点

災害対策に正確な情報は不可欠である。今回の事故を情報の伝達という観点から問題点を挙げてみる。まず臨界直後に作業員C氏が「臨界だ。」と言った言葉が救急隊員に伝わらなかったことがある。当然放医研にも伝わってこない。もしこの情報が現場の放射線管理員に伝わり、臨界についてその可能性を検討し、職員が救急車に同乗して受入医療施設に適切な説明ができていれば、放医研でも不要なマスク等の装備を必要としなかったであろうし、他の施設でも混乱は非常に小さく抑えられたはずである。また事故直後に γ 線アラームがなり、現場の空間線量率が一定の線量を超えたにも関わらず救急隊員が空間線量率の高いところへ入っている。幸い健康影響が出る被ばくは無かったが、五感に訴えるものがほとんどない原子力災害では、特に情報の伝達の重要性が改めて認識された。

平成11年9月30日

	10	10	10	11	11	12	13	14	14	14	15	
	時	時	時	時	時	時	時	時	時	時	時	
	35	43	46	27	49	07	43	16	45	58	25	
	分	分	分	分	分	分	分	分	分	分	分	
時間	10	11			12		13	14		15		16
		↑										
		臨	救	救	救	救	国	水	千	千	放	
		界	急	急	急	急	立	戸	葉	葉	医	
		事	車	車	車	車	水	戸	ヘ	ヘ	研	
		故	要	到	に	出	戸	ヘ	リ	リ	到	
		発	請	着	三	発	病	リ	ポ	ポ	着	
		生		(玄	名		院	ポ	ー	ー		
				関)	収	国	に	ー	ト	ト		
					容	立	収	ト	出	出		
						水	容	離	発	発		
						戸		陸				

- 1) 「ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告PII-3、平成11年12月24日、
原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査委員会
- 2) 同報告書PIV-11
- 3) 菅原光義、「被曝者受け入れから搬送、そして、その後の活動報告」、
INNERVISION, 15・2,P27,2000
- 4) 有賀久哲、第二次緊急医療機、(国立水戸病院)、の役割、
INNERVISION, 15・2,P25,2000

3. 患者の受入と初期対応

3-1 汚染対策

被ばく事故が発生の連絡を受けた直後に、放射線安全課職員を召集し、緊急被ばく医療施設内の放射能汚染防止等の準備作業を開始し、以下を行った。また緊急被ばく医療施設に必要な医療機器を確認、救急、救命の医療に必要な薬剤の手配、その整備（医療用ガスのパイピング不備のため吸引器を移動）、必要物品の搬入を行った。施設内1階の汚染患者処置室、除染室、トリージ室、2階の病室の清掃清拭、ベッドメイキング、必要物品の搬入を行った。

(1) 緊急被ばく医療施設除染施設

緊急被ばく医療施設の搬入口、廊下、トリージ室、除染室、汚染患者処置室、及び計測室各室の床についてビニールシート、ポリエチレン紙による汚染防止措置を行った。

施設・設備の運転確認

- ・ 排気浄化設備、排気モニタ、空気調和器、給排気、給排水等についての運転確認
- ・ 放射線測定機器類と資機材の準備
- ・ α 線、 β 線、 γ 線用サーベイメータ、ポケット線量計及びエアサンプラー、半面マスク、スミアろ紙、ビニール袋等の資機材について準備作業
- ・ 汚染患者処置室のストレッチャー、処置台、台車類をビニールシートでカバー
- ・ 汚染した衣類や水を回収するため大小のビニール袋をあてがったポリバケツ類の設置
- ・ 被ばく汚染患者の搬送に備え、放射線管理区域を設定（非管理区域との境界をロープやテープで明示し、人、物（医療用品や衣類など）の出入りを厳重にチェック

(2) 緊急被ばく医療施設病室（2階）

緊急被ばく医療の知識を持つ6名の看護婦が指名され任務についた。直ちに緊急被ばく医療施設での受け入れ準備を開始した。緊急被ばく医療施設2階病室には必要な備品を病室の清掃後に重粒子治療センターより搬入した。医療施設1階も同様に清掃後、救命救急に必要とする物品の全てを重粒子治療センターより搬入した。

緊急被ばく医療施設に搬送した器具及び機器

- ・ 心電図モニター・パルスオキシメーター・カウンターショック
- ・ レスピレーター・観血的患者監視装置・酸素湿潤器・輸液ポンプ
- ・ シリンジポンプ・輸液スタンド・血圧計・聴診器・ストレッチャー・包交車
- ・ 救急カート一式・各種薬剤・酸素ボンベ（500ℓ・10本）・採血用具一式
- ・ 衛生材料・ディスポシーツ・リネン類・尿器・ポータブルトイレ・バケツ
- ・ ビニール袋・ガウンテクニックの必要物品・スミア用品・記録類

緊急被ばく医療施設への物品の搬入には、各フロアーの看護婦、看護助手をはじめ管理課、薬剤室が協力した。全ての受け入れの準備が整うまでには2時間を要した。

(3) 重粒子治療センター病棟

汚染拡大防止のために放射線安全課に対し搬送経路となる廊下や無菌室、負圧室の床にポリエチレン濾紙での保護を依頼した。他の病棟入院の患者に不安を与えないように移送する廊下と他部所とのしきりにスクリーンを利用した。また重度の外部被ばくの可能性があるとの連絡により、無菌室への収容の可能性が出たため、無菌室の設置されている重粒子治療センター5階病棟に、受け入れの準備が指示された。病室の清掃、ベッドメイキングを行った（マットは汚染防止のためポリエチレン濾紙で覆う）。そして、ガウンテクニックの準備、救命救急に必要な物品を搬入した（以下の物品）。

無菌室に搬入した物品

- ・心電図モニター・吸引用具・救急カート・ポータブルトイレ・包交車
- ・パルスオキシメーター・輸液ポンプ・救急薬剤各種・各種ポリバケツ
- ・レスピレーター・シリンジポンプ・血圧計・尿器・酸素吸入・輸液スタンド
- ・聴診器・ビニール袋

3-2 要員の放射線防護

(1) 防災業務の立場からみた放射線防護の原則

被ばく事故など災害応急に携わる防災業務関係者（医療業務者も含む）は事故の応急対策にあたる際に、できるだけ被ばく3原則を踏まえ二次被ばくの低減を図ることが必要である。状況により、ある程度の予測される被ばくは、前もって被ばく量を把握するために必要な器材や放射線を防護し被ばくを低減させる器材を装着し、無駄な被ばくを避ける事が望まれる。即ち被ばく事故に際して、被ばく線量をモニターしながら作業を行う。このことは、汚染患者を処置する際にも、汚染現場での作業も同様である。作業時間をできるだけ短くすることが大切である。

(2) 要員の放射線防護

ここでは、防災業務関係者の放射線防護の観点から、被ばく患者の救急搬送要員（第2次医療施設から第3次医療施設への搬送要員：ヘリコプター乗務員・2名、国立水戸病院医師・1名、(株)JCO社員・1名、第3次医療施設搬送の千葉市消防局員・6名、放射線安全課員・3名の放医研医療施設までの患者搬送班）、及び患者受け入れ班の防護体制について述べる。

① 患者搬送班

放射線安全課員： 3名

千葉市消防局員： 6名（内訳：救急隊員2名、運転手2名、助手2名）

千葉市消防局救急車： 2台

携帯・準備用品・器材類： 線量測定、線量把握目的の器材、放射線測定機器（GMサーベイメーター）、ポケット線量計、防護服（フル装備：フルフェイスマスク、デイスポ手術着、前掛け、帽子）、簡易マスク、汚染物保管用ビニール袋、スミア用綿棒、除染用用品類、

救急隊員の装備： 事前の打合わせにより、対応する千葉市消防隊員の装備としては感染症を想定した装備（dyspo型白衣、medical mask、ゴム手袋〔感染症用〕）。また各車両の代表者、救急隊員にポケット線量計を携帯させた。

14時、千葉市消防本部手配救急車により放射線安全課員3名が放射線測定機器類、防護服等を携行し作業衣にて放医研を出発し、14時30分ヘリポート到着する。稲毛消防署員の服装は α 核種汚染に対応するフル装備（フルフェイスマスク、デイスポ手術着、前掛け、帽子、個人線量計）で対応する。放射線安全課員は現地での状況に応じて、患者の精神的動揺を加味して放射線防護の観点からの注意を怠らないように作業衣で対応した。

14時40分、茨城県防災ヘリコプターが千葉市消防局ヘリポートに到着した。

② 患者受入班

医療要員： 医師3名、看護婦6名。

身体汚染測要員：放射線安全課員6名

対応内容：放射能汚染の除去、被ばく患者の治療

服 装：中装備（半面マスク、綿手袋、ゴム手袋、タイベックスーツ、オーバーシューズ）

準備機器：GMサーベイメータ、NaIシンチレーションサーベイメータ、 α 線サーベイメータ、呼気集じん器（エアスニフアー）

放射線安全課員の服装：中装備（半面マスク、綿手袋、ゴム手袋、タイベックスーツ、オーバーシューズ）

全員個人線量計を携帯し、被ばくを最小限に抑えるように、医療要員（医師3名、看護婦6名）、身体汚染測定要員（放射線安全課員6名）共に中装備防護衣（半面マスク、綿手袋、ゴム手袋、タイベックスーツ、オーバーシューズ、）に着替えて待機した。医療要員は、ゴム手袋は二重に着用し、内側の手袋の縁はテープで固定し、片端を折り返しておき、二枚目は汚染、破損に備えた。保健物理測定班は、作業衣にて患者サンプルによる核種分析、被ばく線量判定に備え、各部署にて待機した。医療要員において、患者一人にそれぞれ医師、看護婦が組むこと、看護婦は（1）ホット作業者（直接患者に接触する者）、（2）セミホット作業者〔（1）の介助者〕、コールド作業者〔（1）（2）の作業を順調に進行させるための介助者〕、（4）コールド作業者（記録担当者）の4つに割り振った。放射線安全課員による身体汚染測定班は経験の度合いを考慮してペア

を組んだ。放射線安全課員は、身体除染や専門医師による医療処置の判断に必要な身体汚染情報の提供を速やかに提供するために、放射線測定器材、GMサーベイメーター、NaIシンチレーションサーベイメーター、 α 線サーベイメーター（再処理工場の事故である場合必ず必要。）、呼気集じん器の点検等を行い、バックグラウンド放射線レベルを測定し待機した。

3-3 患者の搬送：千葉市消防局ヘリポートから放医研まで

14時40分頃、千葉市消防局ヘリポートに茨城県防災ヘリが到着。被ばく者3名のうち2名については下痢・嘔吐の症状があった。被ばく者の放射線測定では1名が最大12 kcpm（GMサーベイメータ、 α 線は検出せず）が検出された。被ばく者1名の容体がすぐれないため、搬送を最優先にし救急車両で放医研に向かう事になった。15時頃、被ばく者3名の放射線測定結果と被ばく者の身体の容体等について、放医研原子力対策本部に報告する。被ばく者3名と(株)JCOからの付添人、国立水戸病院から同行した医師1名及び放射線安全課員1名が救急車両（2台）に同乗し放医研に向けて出発した。一台には重症患者 A氏、付き添い医師1名（国立水戸病院）、放射線安全課員1名（フィルムバッチ携帯。作業服着用）が、もう一台には、患者B氏、C氏の2名、(株)JCO社員1名が乗り、千葉市消防局員6名（内訳、救急隊員2名、運転手2名、助手2名）はそれぞれ2台の救急車に分乗した。

放射線安全課員2名は防災ヘリコプター、同操縦員の放射能汚染測定（汚染が認められた場合は除染作業も）作業を行うため、千葉市消防局ヘリポートに残った。茨城県防災ヘリコプター内部の放射能汚染測定を行った結果、汚染は認められなかった。また、同ヘリコプター操縦士の放射能汚染測定も行ったが、同様に汚染は認められなかった。

搬送中、車内では GMサーベイメータにより患者の汚染チェックをしていたが、10分位して嘔吐したため、吐物をビニール袋に収納した。

15時25分頃、放医研緊急被ばく医療施設玄関に到着し、同施設に搬入後、再度放射能汚染測定を実施した結果、1名が高い値（測定結果は図1 緊急被ばく医療施設に搬入後の測定結果のとおり。上半身で最大26kcpm、 α 線は検出せず）を示した。同行の医師、千葉市消防局スタッフ6名（救助隊員2名、運転手2名、助手2名）及び救急車のサーベイを行い、作業中、車両共に表面汚染は認められなかった。救急隊員の被ばく測定結果は千葉市消防本部に文書にて報告をした。被ばく患者3名の着衣及び所持品（作業服、下着、携帯電話、時計、硬貨等）、吐物・排泄物それぞれの核種分析を開始した。

3-4 患者の受入

患者A氏、B氏はストレッチャーで運び込まれ、2人に比べて症状の軽いC氏は自力で入った。廊下にて患者の表面汚染検査を2名1チーム（サーベイメータ担当1名、記録員1名）で実施した。サーベイの測定結果は異常に高値を示した。[A氏：頭部13kcpm、上半身26kcpm、B氏：上半身15kcpm、C氏：頭部6kcpm、上半身4kcpm（BG：100cpmを含む）。] α 線の表面汚染はBGレベルであり患者搬送時の毛布の汚染は低レベルであった。3名中2名に口渇、悪心・嘔吐、

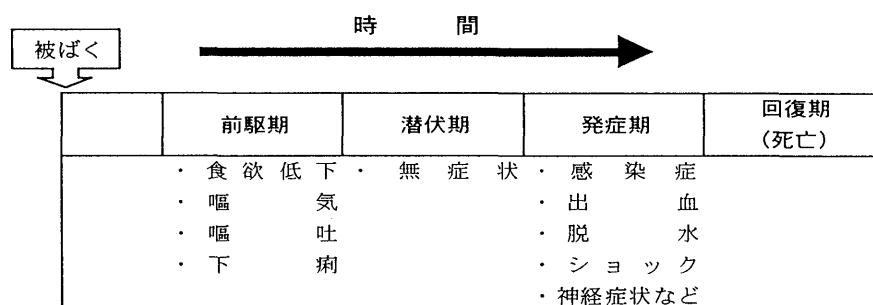
一名に血圧低下がみられ、救急処置を施行した。氏名、症状の確認、意識レベル、発熱、呼吸、脈拍、血圧、体重測定、採血、鼻腔・口角スメア採取、補液開始、連絡先、事故の状況等を聞いた。患者の全身の衣類をぬがせ、検査衣に更衣させ、着衣等身につけていたもの、時計、携帯電話等、吐物、スメア採取の綿棒等は別々に全てビニール袋に入れ、サンプルは日付、名前を記録し、それぞれの測定者に手渡した。入院直後の患者上半身からは高レベル値を示したにも関わらず、衣類からは、3kcpm(β 、 γ 測定値)を示し外部汚染の疑いはなくなり、内部汚染が疑われた。2名は救命救急医療の必要ありと判断され、無菌室のある重粒子線治療センター病棟5階へ移送した。表面汚染チェック及び医療初期対応に要した時間は、約35分であった。

4. 被ばく線量評価

4-1 前駆症状から見た全身線量評価

急性放射線症(acute radiation syndrome)は、被ばく後に現れる症状の時間的経緯により4つの病期に分類されている。被ばく直後から数時間以内に現れる悪心、嘔吐、下痢、体温上昇（前駆症状）が出てくる時期を前駆期と呼ぶ。IAEA Safety Reports Series No.2では、過去の多くのγ線被ばく例をもとに、被ばく線量の相異による急性放射線症の前駆症状のあらわれ方を分類している。以下線量はγ線として考えた場合で表す(GyEq)その基準に照らし合わせると、A氏は、被ばく当日に38.5℃の高熱より少なくとも6GyEq以上の被ばくがあり、10分以内の嘔吐、一時間以内の下痢などから8 GyEq以上の被ばくが推定される。従来の知見では、意識障害は、50GyEq以上で現れるとされているが、今回一時的な意識障害がみられている。一方、B氏は、被ばく当日の38.5℃の高熱から6GyEq以上の被ばくが、一時間前後の嘔吐、下痢なしより4-6 GyEqの被ばくが疑われた。C氏は、ヘリコプター搬送中に軽度の吐き気を覚えた他は前駆症状らしきものが無いことより、4 GyEq以下の被ばくと考えた。

急性放射線症の病期



急性放射線症の主な兆候

線量	1-2 Gy Eq	2-4 Gy Eq	4-6 Gy Eq	6-8 Gy Eq	>8 Gy Eq
潜伏期 (日)	21-35	18-28	8-18	7以下	なし
主な症状	疲労感 脱力感	発熱、感染 出血、脱毛 疲労感	高熱、感染 出血、脱毛	高熱、下痢 めまい	高熱、下痢 脱毛、 意識障害
死亡率 (%) *	0	0-50	20-70	50-100	100

IAEA Safety Reports Series No.2:Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries 1998より引用・改変。

* 数字は、治療を行わない場合のおおよそのものであり、被ばくの状態、治療等でかなり異なる。

急性放射線症における前駆症状

線 量	1-2 GyEq	2-4 GyEq	4-6 GyEq	6-8 GyEq	>8 GyEq
嘔 吐					
(時 期)	2時間以降	1-2時間	1時間以内	30分以内	10分以内
(%)	10-50	70-90	100	100	100
下 痢			中等度	重度	重度
(時 期)	—	—	3-8時間	1-3時間	1時間以内
(%)	—	—	< 10	> 10	100
頭 痛	非常に軽い	軽い	中等度	重度	重度
(時 期)	—	—	4-24時間	3-4時間	1-2時間
(%)	—	—	50	80	80-90
意 識	影響なし	影響なし	影響なし	影響あり	意識喪失のこともあり
(%)	—	—	—	—	100 (50 Gy以上)
体 温	正常	微熱	発熱	高熱	高熱
(時 期)	—	1-3時間	1-2時間	< 1時間	< 1時間
(%)	—	10-80	80-100	100	100

IAEA Safety Reports Series No.2:Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries 1998より引用・改変。
線量は主にγ線被ばく時の線量として示してある。

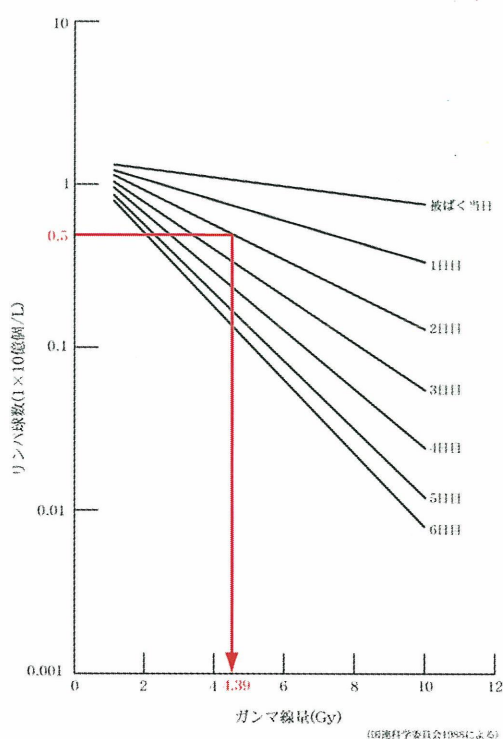
血球・リンパ球減少カーブよりの線量評価

UNSCEAR 1988 Report, ANNEX Gの補遺「チェルノブイリ原子力発電所事故犠牲者における急性放射線効果」²⁾に、0-10 GyEqのレンジのガンマ線で被ばく後のリンパ球減少や好中球や血小板の減少カーブを用いた線量評価法が記載されている。リンパ球は、もっとも放射線感受性が高い細胞に属し、被ばく線量に従って鋭敏に減少する。

リンパ球数よりの被ばく線量推定

一方、リンパ球は治療として用いられた副腎皮質ステロイドや過剰のストレスによっても減少する事も知られている。好中球や血小板の末梢血液中での寿命は短いので、これらの血球の減少カーブは、骨髓の造血幹細胞の減少を反映する。

A氏の末梢リンパ球数は、被ばく第1病日から被ばく第3病日まで計測可能であったが、実際のグラフから読みとる事は出来ず、推測式で計算して推定した。その値から推定される線量は、10GyEq以上(16-23 GyEq)である。好中球は、被ばく後の一過性上昇の後、対数表示で直線的に減少し、被ばく第7病日には0となった。また、血小板も被ばく後に対数表示で直線的に減少し、被ばく第7病日からは血小板輸血が必要となった。



好中球や血小板の減少カーブは、造血幹細胞の大部分が細胞死を起こす10 GyEq以上の被ばくに合致する。

B氏のリンパ球数は、第8病日まで計測可能であった。第1～第3病日のリンパ球数から10GyEq以上の被ばくが疑われたが、第4～第7病日のリンパ球数からは6-8 GyEqの被ばくが推定される。血小板は、第5病日以降に直線的に減少するカーブを描き、その傾きより6 GyEqの被ばくが推定される。

C氏のリンパ球数より推定すると被ばく線量は約1-5 GyEqとなる。一方、C氏の場合臨界から一定の距離がありほぼ均等被ばくと考えられ、入院中の経過では、頭髮に脱毛が観察されている。また、白血球及び血小板数は3週間で最低値をとり血小板輸血を必要とした。これら臨床経過からは、約3GyEqと考えられる。

参考文献

- 1) IAEA / WHO Safety Series No.2, Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries (1998).
- 2) UNSCEAR Sources, Effects And Risks of Ionizing Radiation-UNSCEAR 1988 Report.
- 3) Baranov AE, Guskova AK, Nadejina NM, Nugis Vyu. Chernobyl experience: biological indicators of exposure to ionizing radiation. Stem Cells 13 (suppl 1) : 69-77, 1995

4-2 物理学的線量評価

(1) 放射化生体試料の分析

はじめに

臨界事故時に放出された中性子により3人のJCO従業員は高線量の被ばくを受けた。そこで、中性子の被ばくで放射化され生成された核種を定量することにより、被ばく線量を推定することが可能となる。そのためには、血液、尿、体毛など採取可能な生体試料中に含まれている放射性核種およびそれに関連する安定元素の濃度を測定することが必要である。特に、血液中のナトリウム (^{23}Na) が熱中性子により放射化されてできた ^{24}Na は生成量が多いことと、エネルギーが高いガンマ線を放出することから比較的測定し易く、被ばく線量の推定を行う目的に利用可能である。 ^{24}Na を用いた評価は1997年ロシアのSarovでおこった臨界事故の時にも行われている (IAEA, The criticality accident in Sarov, draft report, 1999)。また、 ^{24}Na 以外にも ^{42}K , ^{82}Br , ^{32}P なども検出されたので、それらの測定データについてもこの節で述べる。特に、 ^{32}P については ^{32}S の(n, p)反応により生成されたものも含まれており速中性子の評価に利用できる可能性も考えられる。

放射性核種の生成量を評価するには、ターゲットとなった安定元素の濃度に関する正確なデータを得ることが必要である。それらの結果から、比放射能 (放射性核種の濃度と安定元素の濃度の比) を求め、中性子の照射量に関する情報を得ることができる。そこで、放射性核種の測定だけでなく、安定ナトリウム、カリウム、リン、臭素などの精密分析も実施した。

① 血液中の放射化生成物(^{24}Na 等)及び安定元素の分析

(a) ガンマ線スペクトロメトリ(^{24}Na 等の測定)

今回の臨界事故で発生した中性子により高線量被ばくした JCO従業員の体内に含まれる安定元素が放射化され放射性核種が生成された。特に中性子の照射により ^{23}Na (n, γ) ^{24}Na の反応で ^{24}Na (半減期: 14.959時間) が生成されるが、体内のナトリウム含有量が高いことと、その反応断面積も0.53 barn と比較的大きいため、 ^{24}Na の生成量は他の放射化生成物と比べても最も大きいことが推定される。このことから、血液中の ^{24}Na の分析を行うことは体全体の被ばく線量を推定する上で大変有効と考えられる。ここでは、3名の従業員の血液試料のガンマ線スペクトロメトリによる ^{24}Na を中心にした測定について述べる。

測定方法

血液試料は、事故発生後5時間5分後の9月30日15時40分頃に3人のJCO従業員が放医研に搬入された直後に採血された試料の一部とその翌日の10月1日に採血したものをガンマ線スペクトロメトリの測定に用いた。従業員より採血した試料をシリンジから、測定容器(スチロール製U8容器、底部分外径50mm内径45mm円筒状)に移し、凝固防止のため少量のヘパリンを加えた後、3台のゲルマニウム半導体検出器でガンマ線の測定を行った。血液の採取量は10月1日については20mlであった。9月30日に採取された試料は、放医研に搬入された直後に医学検査のために採血された血液の注射筒に残された部分から、A氏、B氏、C氏の試料についてそれぞれ6.4ml、11.9ml、7.6mlを採取した。これらの試料は採血してからほぼ20時間が経て部分的に凝固した部分が見られたので、ソルバブル(Packard Bioscience社製Solvable) 2mlを加えて溶解した。

測定結果：事故発生時の ^{24}Na 放射能濃度の推定

9月30日採血の試料については、容量も少なく、試料の均一性が低く、また採血時の従業員の体内における ^{24}Na の均一性に乏しいと考えられることから、事故発生時の ^{24}Na 放射能濃度を推定するには、10月1日の試料に主眼をおいた。ただし、9月30日採血の試料と10月1日の試料の事故発生時の ^{24}Na 濃度推定値を比較すると、B氏の試料については26%程度9月30日採血分が高く、C氏の試料においては逆に15%程度9月30日採血分が低いものの、A氏については、ほぼ一致しており、これらの結果は、排尿などによる生物学的半減期の変動がそれほど大きくないことを示唆している。また ^{24}Na の測定結果については、3台のGe半導体の分析結果は大変良い一致を示した。これらの測定の結果採血時における ^{24}Na 放射能濃度の平均値は以下の値となる。

A 氏 (採血日時: 10月1日12:27)	47.3 ± 1.4 Bq/ml
B 氏 (採血日時: 10月1日13:38)	24.2 ± 0.5 Bq/ml
C 氏 (採血日時: 10月1日14:25)	5.82 ± 0.28 Bq/ml

この測定結果から事故発生時(9月30日10時35分)の ^{24}Na 放射能濃度を推定すると以下の値となる。物理半減期は、14.959時間¹⁾、生物学的半減期についてはICRP Publ.30²⁾で用いている10日を採用した。

A	氏	169	±	5	Bq/ml
B	氏	91.6	±	1.7	Bq/ml
C	氏	22.9	±	1.1	Bq/ml

(b) 安定元素(Na, P, K, Br)の測定

中性子放射化によって生じた ^{24}Na を用いて線量評価を行うためには、血液中に含まれる安定ナトリウム (^{23}Na) を定量し比放射能を求める必要がある。そこで、血液の一部を酸で全分解し、誘導結合プラズマ-発光分析法 (ICP-AES) によって安定ナトリウムの分析を行った。また同時に、中性子放射化による線量評価に有効と考えられる安定カリウム (^{39}K) と安定リン (^{31}P) 並びに安定臭素 (^{79}Br , ^{81}Br) の分析も行った。分析した試料は3人の患者の9月30日採血分と10月1日採血分である。9月30日の試料には採血後ソルバブルを添加してある。そこで、ソルバブルの分析も行い、元素濃度への影響を調べた。

分析方法

血液100 μl をマイクロピペットを用いてテフロン製の分解容器に分取した。この際、9月30日採取の血液は凝固しかけていたため重量で約100mgを計り取った。68%硝酸2mlを加えて密閉した後、マイクロウェーブオーブンをを用いて1時間加熱分解した。分解後、クリーンドラフト内のホットプレート上で加熱し、乾固させた。一旦68%硝酸 (1 ml) を加えて溶かしたものを再乾固した。これを27%硝酸 (0.5ml) を用いて20mlポリエチレン容器に移し、重量を計ることによって20mlに定容して測定用の母液とした (硝酸濃度0.68%、元の血液に対する希釈倍率200倍)。分析の際はこれをさらに希釈し、元の血液に対する希釈倍率2,000倍もしくは10,000倍とした (硝酸濃度0.68%)。分析中の感度の変化を補正するために、全ての測定溶液と標準溶液に内部標準としてイットリウム (溶液中濃度2 $\mu\text{g}/\text{ml}$) を加えた。測定は、ICP-AES (セイコーSPS-7700) を用いて行った。分析に使用した波長 (nm) 並びに積分時間は以下のとおりである。

	波長	積分時間 (s)
Na :	588.995	3
K :	766.490	8
P :	214.914	10

検量線作成には、多元素混合標準溶液 (SPEX-XSTC-21) を希釈して、0.1、0.3、1.0、3.0、10、30 $\mu\text{g}/\text{ml}$ とした溶液を用いた。ソルバブルは100 μl 分取し、血液と同様に分解後分析した。また、全ての試料はそれぞれ2回 (一部は3回) 分解と分析の操作を繰り返し、測定値のばらつきを確認した。ナトリウムは環境中で非常にありふれた元素で、分解・分析の一連の操作中に周囲の雰囲気から混入する恐れがある。このため、操作はクリーンルーム内で行い、分解および希釈の操作にはクリーンドラフトを用いた。また、硝酸は高純度硝酸 (TAMAPURE AA-100) を

使用した。純水はMilli-Q SP TOCを用いて製造した。試料容器は使用前に硝酸と純水で洗浄した。

臭素の分析法の概要は以下の通りである。試料（50-100 μ l）をセラミックボートに秤量し、酸化剤（及び溶剤）として5酸化バナジウムの粉末を加える。それを石英燃焼管（内径22mm、長さ50cm）に入れ、酸素気流を通しながら1000℃で加熱する。揮発してきた臭素TMAH（tetramethyl ammonium hydroxide）の希釈液でトラップする。そのトラップ液を適量に希釈し、ICP-MS（高周波誘導結合プラズマ質量分析器）を用いて分析を行った。（詳しい分析法は、Schettger & Muramatsu: Analyst, 121, 1627-1631, 1996を参照）

分析結果

10月1日の血液中のナトリウム濃度はA氏：2050 μ g/ml、B氏：2110 μ g/ml、C氏：1860 μ g/mlであった。ICRP 23のリファレンスマン（Table108）によると全血中の安定ナトリウム濃度は、 $10.57 \text{ g} / 5200 \text{ ml} = 2030 \mu\text{g/ml}$ である。今回の分析結果は、この値にほぼ一致している。9月30日採取の血液はナトリウム濃度が高く、採血後に添加されたソルバブル中のナトリウムを考慮する必要があることが明らかである。

カリウムとリンに関してはソルバブル中の濃度は小さく、その影響は無視できる。血液中濃度に個人差はほとんどなく、10月1日の血液について得られた値は、カリウムが1390～1500 μ g/ml、リンが320～360 μ g/mlであった。これらの値は、同じ表に示したリファレンスマンの値とほぼ一致している。

(c) 血液中の ^{32}P の測定

低バックグランドベータ線スペクトロメータ（ピコベータ）による血液中の ^{32}P の測定を行った。

試料調製

^{24}Na 測定に供した血液試料20mlを秤量後、プラスチック容器（径50mm、高さ60mm）に入れ、凍結乾燥粉末にした。凍結乾燥した血液は試料皿（径25mm、深さ6mm）に厚さが均等になるようにのせ、薄紙でカバーをしてピコベータ測定用試料とした。

校正曲線

^{32}P 標準溶液は平成11年8月24日に購入した ^{32}P 標識核酸溶液から作成した。10月5日に2 μ lを取り、注射用蒸留水で500mlに第一段階希釈した。第一段階希釈溶液の25mlを注射用蒸留水で100mlに希釈し、 ^{32}P 標準溶液とした。この溶液中の放射能は日本アイソトープ協会によって新たに作成された標準溶液によって検定した結果、1999年10月26日現在で35.4 Bq/mlであった。 ^{32}P 標準溶液の100, 200, 500 μ lを試料皿中のミリポアフィルターに染み込ませ、乾燥後アセトンで固定した。これを測定効率測定用の校正線源とした。 ^{32}P のエネルギー領域を1620keVから40keVとすると、測定効率は26.1%であった。

測定値の減衰補正

^{32}P の測定データは測定日時から被ばく日時（9月30日10時35分）に減衰補正（物理半減期：

14.26日)を行った。

測定結果

血液放射能の測定結果を下記に示した。

9月30日時点における血中の ^{32}P (Bq/ml)

試料採取時	採取量 (ml)	A 氏	B 氏	C 氏
平成11年10月1日	20	2.36	2.35	1.59

② 尿及び嘔吐物中の放射化生成物及び安定元素の分析

(a) ガンマ線スペクトロメトリ

分析に用いた尿試料はB氏の9月30日採尿分と3人の患者の10月1日採尿分である(1日量から一部を分取した)。また、嘔吐物に関しては、A氏とB氏が放医研に運ばれてきてから(又は運ばれる途中)の試料が保存されていたので、それに含まれる放射性核種及び安定元素の分析も行った。試料は、A氏1点、B氏2点であった。初期の段階ですでに何度か嘔吐していたため、固形物は見られず、半透明の胃液状の液体であった。

測定方法

尿試料は、1日量の一部(100ml)を測定用容器に分取した。また、嘔吐物については、B氏の1点は、液体のままビニール袋に保存されていたが、その他の2試料はペーパータオルにしみ込んだ状態であった。そのため、この2試料はペーパータオルより水で洗い出した。採取またはペーパータオルから溶出した全量(13~60ml)を測定用容器に入れた。これらの試料のガンマ線放出核種の定量は血液等の分析と同様、ゲルマニウム半導体検出器を用いて行った。

測定結果

分析の結果、3人の試料からともに ^{24}Na , ^{82}Br , ^{42}K が検出された。10月1日の試料を見る限り、 ^{24}Na の値(事故発生時に補正)はB氏が178Bq/mlと最高を示し、次にA氏で121Bq/ml、また、C氏の値が一番低く40Bq/mlであった。これは血液においてみられた個人差と傾向が異なる。後述する安定元素のデータを見ると、A氏の尿中の安定ナトリウム濃度はB氏とC氏に比べて1/2以下と低い。このため、A氏の尿では ^{24}Na の値も低くなっていると思われる。 ^{42}K と ^{82}Br の値はB氏よりA氏の方が高く、血液中の ^{24}Na 濃度の個人差と同様の傾向であった。また、尿中の ^{24}Na と安定ナトリウムの比(比放射能)をみると、各自の値は血液の比放射能とも近い傾向にあった。(比放射能に関しては後述)

尿中の成分は点滴などの影響も受け、また、被ばくを受けた影響で患者の体内代謝が変化している可能性もある。そのため、尿の分析結果を被ばく線量推定に利用する場合は誤差が大きくなると考える。

嘔吐物のガンマ核種の測定結果ではB氏の液体状の試料で ^{24}Na と ^{82}Br の濃度が他の2試料よりも高かった。これは、上述したように他の2試料はペーパータオルより水で洗い出したため希釈さ

れているからである。嘔吐物中の ^{24}Na と安定ナトリウムの比（比放射能）はA氏とB氏共に血液や尿と比べ同程度か僅かに高い傾向にあった。

(b) 安定元素(Na, P, K, Br)の測定

中性子放射化によって生じた放射性核種を用いて線量評価を行うためには関連安定元素を定量する必要がある。そこで、尿および嘔吐物の一部を酸で全分解し、安定ナトリウム、カリウム、リン及び臭素の分析を行った。安定元素の分析に用いた尿及び嘔吐物の試料は、上述したガンマ核種の測定に用いたものと同じである。

分析方法

尿または嘔吐物試料（1 ml）をマイクロピペットを用いてテフロン製の分解容器に分取した。68%硝酸2 mlを加え、マイクロウェーブオーブンをを用いて1時間加熱分解した。その後の試料溶液の調整法は前述した血液などに用いた方法と同様である。測定は、ICP-AES（セイコーSPS-7700）を用いて行った。分析に使用した波長（nm）、積分時間、分析繰り返し回数、標準溶液の調整等は前述した血液の場合と基本的には同様である。

臭素については、血液などと同様に、試料を石英管中で加熱分離をした後、ICP-MSで定量した。

分析結果

9月30日のB氏の尿中のナトリウムは $3,120\text{ }\mu\text{g/ml}$ であった。10月1日の尿中のナトリウムはA氏 $1,390\text{ }\mu\text{g/ml}$ 、B氏 $3,590\text{ }\mu\text{g/ml}$ 、C氏 $2,940\text{ }\mu\text{g/ml}$ であった。これらの値はICRP 23のリファレンスマンの値 $4,310\text{ }\mu\text{g/ml}$ よりも小さく、特にA氏の値はその約1/3である。尿中のナトリウム濃度が低い1つの原因は、治療のために多量に投与された点滴にあると考えられる。カリウム濃度は $900\sim 1,120\text{ }\mu\text{g/ml}$ 、リン濃度は $17\sim 334\text{ }\mu\text{g/ml}$ の範囲であり、ともにリファレンスマンの値よりも低い。

嘔吐物の安定元素の分析結果によるとB氏の液体状試料を血液と比較すると、ナトリウムは僅かに低かった。一方、 ^{24}Na は血液中の濃度より僅かに高かった。KとPについては濃度が低く今回の分析方法では検出下限値以下であった。

(c) 尿中の ^{32}P の測定

はじめに

放射線医学総合研究所、東大病院、医科学研究所に入院中のJCO従業員3名から毎日採取されていた尿中の放射能を測定中、 ^{32}P が検知された。これは体内のPが放射化されて ^{32}P になったものと推察されるが、尿中に出現した放射能から被ばく線量を推定する方法は確立されていない。しかし、今後、線量評価法の有益な手段になる可能性があるため、尿中に出現した ^{32}P の測定を行った。

(イ) ピコベータによる ^{32}P の測定

試料調製

尿50mlを秤量後、プラスチック容器（径50mm、高さ60mm）に入れ、凍結乾燥した。凍結乾燥した尿の一部（約200～2000mg）は試料皿（径25mm、深さ6mm）に厚さが均等になるようにのせ、薄紙でカバーをしてピコベータ測定用試料とした。校正曲線、減衰補正は血液中の ^{32}P の測定を参照。

測定結果

尿放射能の測定結果を下記に示した。

9月30日時点における尿中の ^{32}P (Bq/ml)

試料採取時	A 氏	B氏	C 氏
平成11 年 10月1日	24.43	12.04	3.58
10月2日		2.64	0.76
10月3日		1.05	0.37
10月4日		0.45	
10月7日	0.96	0.39	
10月8日	0.78	0.40	
10月9日	0.91	0.29	
10月10日	0.81	0.29	
10月11日	0.57	0.24	
10月12日	0.49	0.22	

(ロ) 液体シンチレーション法による ^{32}P の測定

試料調製

凍結乾燥した尿試料（200～2,000mg）に1mlの蒸留水を加えて、組織溶解剤ソルエン-350(1～2ml)および過酸化水素(0.4～0.8ml)を加えた。その後、55℃の恒温槽で30分間加熱して残留する過酸化水素を除き、シンチレータ（ハイオニックフロー、Packard）を加えて液体シンチレーション用の試料とした。

測定条件

計測は5keV～1700keV（チャンネルA）及び50keV～1700keV（チャンネルB）の2チャンネルで行ったが、 ^{32}P 以外の放射能を除く目的でチャンネルBの計測値を用いた。現在、核種同定確認等のため経時的な追跡を行っているが、ピコベータでの測定結果よりもやや高い値が得られている。

③ ^{32}P 測定に関する検討事項

(a) 血液、毛髪、尿試料の ^{32}P を測定したが、 ^{32}P 以外の放射性核種も測定している可能性がある

下表を24頁の表と差し替えてください

9月30日時点における尿中の ^{32}P (Bq/ml)

試料採取時	A 氏	B氏	C 氏
平成11年 10月1日	14.09	10.03	2.40
10月2日	4.30	1.13	0.32
10月3日		0.64	0.21
10月4日		0.36	
10月6日	1.47		
10月7日	0.56	0.13	
10月8日	0.50	0.14	
10月9日	0.78	0.16	
10月10日	0.27	0.21	
10月11日	0.25	0.15	
10月12日	0.43	0.08	

ため、現在継続測定を行い、半減期を追跡するなど核種同定を検討中である。

(b) 液体シンチレーションカウンタでの測定値がピコベータの測定値よりもやや高く、低エネルギーのベータ線も一緒に測定している可能性があるため、半減期を含めて継続して測定中である。

(c) 尿中³²Pからの被ばく線量推定に関する試みとして、ICRP代謝モデル、ERMA (Environmental Radionuclides Movement Analysis System) などのプログラムを用い、現在解析を進めている。

④ 比放射能

中性子が当たることにより生成される放射性核種の量は、ターゲットとなる安定元素の量と中性子束の密度に関係する。上で述べた放射化された生体試料の放射能と安定元素の分析データから比放射能(specific activity)を求めることができる。つまり、放射能濃度(A)を安定元素濃度(m)で割ることにより比放射能 (A/m) が計算できる。結果を、下表にまとめる。得られた値を用いることにより、異なったサンプル（例えば、血液と尿）の結果を直接比較することが可能となる。

3人の患者から採取した試料の比放射能(Bq/g)

(放射能及び安定元素の分析値より計算、事故時に半減期補正をしてある)

	試料 (採取日)	²⁴ Na*	⁸² Br	⁴² K
A氏	血液(10/1)	8.24E+04	5.55E+04	1.51E+04
	尿 (10/1)	8.71E+04	4.79E+04	1.39E+04
	嘔吐物・胃液 (9/30)	9.24E+04	5.11E+04	
	頭髮 (10/1)	6.75E+04		
B氏	血液(10/1)	4.34E+04	2.84E+04	7.19E+03
	尿 (9/31)	5.31E+04	2.63E+04	7.62E+03
	尿 (10/1)	4.97E+04	2.33E+04	6.90E+03
	嘔吐物・胃液 (9/30)	5.74E+04	2.44E+04	
	頭髮 (10/1)	3.97E+04	1.41E+04	
C氏	血液(10/1)	1.23E+04		
	尿 (10/1)	1.37E+04	6.26E+03	2.25E+03

*²⁴Naの値は、前述したが生物学的半減期 (10日) も加味した。

²⁴Naの比放射能の血液のデータから、3人の患者の浴びた中性子の量が比較できる。つまり、A氏を1.0とすると、B氏は0.52、C氏は0.15となる。尿の比放射能の値を使って比較しても、B氏は0.57、C氏は0.16と同様の比率が得られた。但し、比放射能の値自体は、嘔吐物 (胃液)、尿、血液の順で僅かに低くなり、頭髮は明らかに低い値であった (同一患者で比べた場合)。血液の比放射能が尿などに比べ低いのは、点滴液中に含まれる安定なトリウムによる希釈の影響が、血液

の場合は尿や嘔吐物よりも大きく出ているためと推定する。頭髮で特に低いのは、中性子発生源（ウラン溶液）からの距離が離れていることにも関係していると考えられる。B氏の尿試料は2試料測定したが、事故当日（9/30）に採尿したものの方が翌日（10/1）の試料より少し比放射能が高い傾向にあった。これは排出により ^{24}Na が少しずつ減少し、点滴や経口摂取により安定ナトリウムが加わったため比放射能が下がったと考えられる。

^{82}Br については、A氏の比放射能の値を1.0とすると、血液ではB氏は0.51（C氏の血液では ^{82}Br は検出限界以下）、また、尿ではB氏は0.49、C氏は0.13であった。これらの比率は、 ^{24}Na の場合に得られた比率と同程度であった。3人の血液、尿、嘔吐物（胃液）で測定された比放射能の値を比べると、血液、嘔吐物（胃液）、尿の順であった。 ^{24}Na の場合は血液の値が小さかったが、 ^{82}Br では血液の値とほぼ同じか少し大きい傾向にあった。これは、点滴液の中の安定臭素の濃度が低いため、ナトリウムの場合と異なり希釈効果は小さく、比放射能はそれほど下がらなかったであろう。尿では、事故当日（9/30）に採尿したものの方が翌日（10/1）の試料より少し比放射能が高い傾向にあった。これは排出により ^{24}Na が少しずつ減少し、点滴や経口摂取により安定ナトリウムが加わったため比放射能が下がったと考えられる。頭髮中の ^{82}Br はB氏でしか測定できなかったが、比放射能の値は血液などに比べて明らかに低い値であった。 ^{42}K は、半減期が約12時間と短いため限られた試料でしか検出されなかった。A氏の比放射能の値を1.0とすると、血液ではB氏は0.48（C氏の血液では検出限界以下）、また、尿ではB氏は0.50、C氏は0.16であった。これらの比率は、 ^{24}Na や ^{82}Br で得られた比率と同程度であった。血液と尿の比放射能の値は同日に採取された試料ではほぼ同じか血液の方が若干高い傾向にあった。臭素と同様、点滴液の中の安定カリウム濃度は低いと考えられ比放射能はそれほど下がらないと推定する。

これらの値より中性子束の見積もりを試みた。ターゲット原子の数を N とした場合、生成される放射能は以下の式で表される。

$$A = N \Phi \sigma \lambda$$

ここで、
 A は生成核種の放射能（Bq）
 Φ は中性子の線束密度（ cm^{-2} ）
 σ は核反応断面積（barn: $1 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ ）
 λ 生成核種の壊変定数

である。

この式に、放射能及び安定元素の分析データを入れ計算する事により、中性子の線束密度（ A ）を推定することができる。ただし、仮定としてターゲットが1点にあり、核反応断面積の値として熱中性子の数値（ ^{23}Na の場合は0.534 barn）を用いて計算した場合である。ここでは、A氏の血液の結果のみ示すが、以下のとおりである。

$$^{24}\text{Na} \text{と} ^{23}\text{Na} \text{のデータから計算した場合： } \Phi = 4.61 \times 10^{11} (\text{cm}^{-2})$$

比較のために、A氏の血液の臭素とカリウムのデータから求めた推定値は以下の通りである。

^{82}Br と ^{81}Br のデータから計算した場合： $\Phi = 1.0 \times 10^{12} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$

^{42}K と ^{41}K のデータから計算した場合： $\Phi = 6.6 \times 10^{11} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$

ナトリウムからの推定値と異なる理由としては、臭素とカリウムの放射化の場合は共鳴吸収の影響が大きく（臭素の場合は特に大きい）、熱中性子のみで計算した場合と大きくずれてしまう。その点、 ^{24}Na を用いた線量評価は共鳴吸収の影響が小さく、この効果による不確かさは少なくなる。ここでは、一点にターゲット元素があるとして評価したが、実際は体内にナトリウムが分布しているので、中性子が体内に入った効果も考慮した評価しなければならない。

参考文献

- 1) Richard B. Firestone eds. Table of isotopes eighth edition, 1995
- 2) ICRP, ICRP Publication 30 Part 2, Ann. ICRP, 43/4, Pergamon Press, Oxford, 1981

(2) 血液中 ^{24}Na の測定値に基づく被ばく線量の推定

① まえがき

本稿においては、血液中 ^{24}Na の濃度の測定結果に基づき、高線量被ばく従業員の被ばく線量の理論的推定を試みた。

中性子線量推定の方法はOak Ridge国立研究所（ORNL）の報告書¹⁾に示されているものと基本的に同等である。しかし、本稿では、中性子エネルギースペクトル、人体による中性子の捕獲確率、単位フルエンス（線束密度）当たりの各組織の吸収線量換算係数等、計算に必要な種々パラメータとして、現在手に入る最新のデータを使用した。

② 中性子による全身の平均線量の推定

(a) 照射ジオメトリ

中性子は直立した人体に正面より一様に入射したと仮定した。

各従業員の作業内容から、ほぼ前面から照射されたものと推定される。しかし、ウラン溶液を注入していたB氏は直立していたわけではない。また、A氏は、右手斜め前方から照射された可能性も考えられる。しかしながら、複雑な姿勢を想定した検討は現時点では技術的に困難なため、上記仮定のもとで検討を進めることとした。なお、実際の姿勢をより忠実に模擬した検討を行うため、技術開発を原研と協同して進めており、その検討経過は、4-4節に述べられている。

(b) 中性子のエネルギースペクトル

中性子のエネルギースペクトルとして核燃料サイクル機構より提供されたANISNコードによる球体系の計算結果を使用した。

この計算結果によると、エネルギースペクトルは溶液からの距離によって若干変化している。しかし、3人の被ばく位置は正確には特定できないこと、また、同一人でも身体部位により被ばく距離が異なること、さらに、本来スペクトルは方向依存性であるがANISNによる計算は次元でありこれを表現できないことから、各人に別々のスペクトルを適用することはあまり意味がない。ここでは、A氏が被ばくしたと推定される臨界溶液中心から60cmの点のスペクトルで代表さ

せることとし、3人に共通のスペクトルを適用することとした。計算に使用したエネルギースペクトルの平均エネルギーは1.0 MeVである。

(c) 単色中性子に対する各組織の吸収線量

単色中性子に対する各組織 i の単位フルエンス当たりの吸収線量 $D_i(E)$ (pGy·cm²)として、ICRP Publication 74²⁾の値を使用した。これは、MIRDファントム等を用いた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考えられる。

(d) スペクトルで平均した各組織の吸収線量

前述のエネルギースペクトル $\phi(E)$ に対応する組織 i の単位フルエンス当たりの吸収線量 D (pGy·cm²)を次の式により求めた。

$$D_i = \frac{\int D_i(E) \cdot \phi(E) dE}{\int \phi(E) dE} \quad (4-1)$$

全身に対する吸収線量換算係数は、各組織の吸収線量換算係数を、各組織の質量によって荷重平均することにより求めた。

主な組織、及び全身に対する吸収線量換算係数の計算結果を以下に示す。

骨髄	6.96 (pGy·cm ²)
結腸	9.42 (pGy·cm ²)
肺	9.97 (pGy·cm ²)
全身	9.57 (pGy·cm ²)

(e) 血液中²⁴Naの測定値を用いた中性子フルエンスの推定

安定ナトリウム単位重量あたりに生成する²⁴Naの放射能 a は近似的に次式で表される。

$$a = \lambda / (V\rho) \times (S\Phi) \times (\Sigma_{Na} / \Sigma_T) \times \xi \quad (4-2)$$

上式において

- a : ²³Naの1gあたりに生成する²⁴Naの放射能 (Bq²⁴Na/g²³Na)、比放射能と呼ぶ。
- λ : 壊変定数 (1.28E-5 s⁻¹)
- V : 身体の体積、BOMABファントムの値³⁾ (68280 cm³) を使用
- ρ : 身体中のNaの濃度 (g/cm³)
- S : 身体の投影面積、BOMABファントムの前面垂直照射の値³⁾ (5690 cm²) を使用
- Φ : 入射中性子のフルエンス (cm⁻²)
- Σ_T : 人体組織の熱中性子に対する巨視的吸収断面積⁴⁾ (0.02339 cm⁻¹)

Σ_{Na} : ^{23}Na の熱中性子に対する巨視的捕獲断面積、微視的断面積として $0.534\text{b}^{5)}$ を使用

ξ : スペクトルで平均した中性子捕獲確率。単色中性子に対する捕獲確率 $\xi(E)$ として

Crossらによる薄い食塩水を封入したBOMABファントムの計算値³⁾を使用し、さらに水と人体組織における水素含有率の差を補正⁶⁾して求めた。

以上より、身体に入射した中性子のフルエンスは、比放射能 a ($\text{Bq}^{24}\text{Na}/\text{g}^{23}\text{Na}$) を用い次の式で算出される。

$$\Phi = 6.88 \times 10^6 \times a \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (4-3)$$

(f) ^{24}Na 比放射能に対する中性子線量換算係数

前述の方法により求められた全身に対する単位フルエンス当たりの吸収線量換算係数に前項の(4-3)式を乗ずることにより、 ^{24}Na 比放射能に対する全身の吸収線量換算係数を求めることができる。

以上より、全身の吸収線量 D_n は、比放射能 a を用い次の式で算出される。

$$D_n = 6.58 \times 10^{-5} \times a \quad (\text{Gy}) \quad (4-4)$$

このようにして導出された中性子線量換算係数を種々文献値等と比較した。

中性子線量換算係数の種々文献値等の比較

文献	Sarov*	ORNL ⁷⁾	丸山 ⁸⁾	IPSN**	本報告書
Gy/(Bq/g)	1.02E-4	1.45E-4	2.09E-4	6.8E-5	6.58E-5

* Sarov臨界事故関するIAEA報告書ドラフトによる

**口頭による

Sarovの臨界事故では、血中 ^{24}Na の濃度から全身の平均中性子線量が推定されている。その値とICRP標準人の血中ナトリウム濃度の値⁹⁾とから表中の中性子線量換算係数を算出した。換算係数は本報告書の約1.5倍である。このように相違する理由の一つとして、臨界集合体の材質・構造の違いに起因する中性子スペクトルの違いが考えられる。

ORNLの報告書には、種々材質・構造の臨界集合体に対する中性子線量換算係数⁷⁾が記載されている。表中の値は、溶液系臨界集合体に対する値であり、半径10cmと30cmの平均値である。ORNL報告書の線量は全身の平均値ではなく最大値であることから本報告書よりもかなり大きい値となっている。

丸山による換算係数⁸⁾は本報告書の約3倍である。使用したスペクトルや種々パラメータが違うことによるものである。中でも最大の理由は、丸山論文の線量は全身の平均線量ではなくfirst collision doseであることによる。

放医研は平成11年10月28、29日、被ばく医療及び線量評価に関する9名の海外専門家を招聘した。29日に開催された線量評価に関する検討会の中で、フランスIPSN（放射線防護研究所）の

参加者により、彼らが今回の事故に関して推定した中性子線量換算係数として表中の値が口頭で紹介された。この値は本報告書の値とたいへん近い。

(g) ^{24}Na およびナトリウム元素の血中濃度の測定

事故発生翌日3人の患者から各々20cm³の血液が採取され、その中の ^{24}Na およびナトリウム元素の濃度が測定された。

^{24}Na の測定にはGe半導体検出器が用いられ、3グループによるクロスチェックが実施された。ナトリウム元素濃度の測定にはICP-AESが用いられた。これら測定の詳細は、この報告書の4-2節,第(1)項を参照されたい。

事故発生時の ^{24}Na の放射能を求めるため、物理学的半減期14.96時間、生物学的半減期10日¹⁰⁾が用いられた。なお、A氏およびB氏は被ばく直後から下痢症状を呈したこと、および採血までに輸液を受けたことにより ^{24}Na の排泄が促進された可能性がある。このため、この方法による被ばく線量は過小評価を生ずる恐れがある。

ICRPのモデル¹⁰⁾を用いて計算した種々生物学的半減期に対する ^{24}Na 全身残留率によると、生物学的半減期がICRPモデルの1/2、すなわち5日に早まった場合、事故発生時に生成した ^{24}Na の推定値は約8%増加する。

(h) 中性子による全身の平均線量の推定結果

以上述べた方法により推定された中性子による線量を以下にまとめた。

中性子線量の推定結果		
患者	比放射能（発生時）	全身の平均吸収線量（Gy）
A氏	8.24E4 Bq/g	5.4
B氏	4.33E4 Bq/g	2.9
C氏	1.23E4 Bq/g	0.81

③ γ 線による全身の平均線量の推定

(a) はじめに

沈殿槽周囲の γ 線による線量を推定するためには、事故を起こした臨界沈殿槽及びその周囲を忠実に模擬した体系による詳細な臨界の解析が必要である。現在、原研と協同してより詳細な検討を進めている。現時点では、前項で述べた中性子線量の推定値を基にJCO建屋周辺の空間線量のモニタリングデータ、およびIAEAのマニュアル¹¹⁾を参考にし γ 線線量の暫定値を以下のように推定した。

(b) 1cm線量当量の中性子対 γ 線の比

JCO敷地周辺で9月30日20時45分頃実施された空間線量モニタリングの結果によれば、1cm線量当量の中性子： γ 線の比はおよそ9：1である（平成11年12月22日付科学技術庁事故調査対策本

部発表の添付資料1)。3名の被ばく患者の1cm線量当量の比としてこの値を用い、 γ 線線量を推定した。

(c) 1cm線量当量から吸収線量への換算

ICRP Publication 51には、単色中性子に対する単位フルエンス当たりの1cm線量当量換算係数¹²⁾が記載されている。これらの値と前項で述べた中性子エネルギースペクトルとから、単位中性子フルエンス当たりの1cm線量当量換算係数を求めた。これに、²⁴Naから推定された中性子フルエンスを乗ずることにより各従業員の中性子に対する1cm線量当量を求め、この値の1/9を γ 線に対する1cm線量当量とした。

γ 線に対する1cm線量当量から吸収線量への換算は、以下の手順で行った。

- (イ) ICRP Publication 51には単位 γ 線フルエンス当たりの1cm線量当量換算係数¹³⁾が記載されている。 γ 線に対する1cm線量当量の値をこの値で除することにより γ 線のフルエンスを求める。
- (ロ) こうして得られた γ 線のフルエンスにICRP Publication 74の単位 γ 線フルエンス当たりのカーマ換算係数¹⁴⁾を乗じ、 γ 線カーマを求める。
- (ハ) この γ 線カーマにPublication 74の単位 γ 線カーマ当たりの吸収線量換算係数¹⁵⁾を乗じ、各組織の吸収線量を求め、さらに、各組織の質量によって荷重平均することにより、全身に対する吸収線量を求める。なお、上記換算に当たり γ 線のエネルギーを2MeVと仮定した。1MeVの場合、 γ 線線量は約3%低くなる。

以上の検討により、 γ 線線量 D_γ を与える次の式が導出された。

$$D_\gamma = 1.03 \times 10^{-4} \times a \text{ Gy} \quad (4-5)$$

なお、IAEA Technical Report Series No. 211¹⁶⁾には、臨界溶液の容積あるいは水素原子核数対²³⁵U原子核数の比から γ 線カーマ／中性子カーマ比の目安を読み取るグラフが示されている。このグラフを用いた γ 線線量の推定も実施した。なお、その計算過程は紙面の都合上割愛する。

(d) γ 線線量の推定結果

以上述べた方法によって推定された γ 線による線量を中性子線量とともに次表にまとめた。

中性子および γ 線による全身の平均吸収線量の推定結果 (Gy)

患 者	中性子	γ 線	
		モニタリング結果使用	IAEA 211使用
A 氏	5.4	8.5	13
B 氏	2.9	4.5	6.9
C 氏	0.81	1.3	2.0

④ 生物学的 γ 線相当線量 (GyEq) の試算

リンパ球算定および染色体分析に基づく線量推定では、リンパ球の減少あるいは染色体異常の

発生頻度を指標とする生物学的 γ 線相当線量 (GyEq) が求められている。それらの値との比較のため、RBEの種々の値について本方法による生物学的 γ 線相当線量を試算した。

その結果を下の表に示す。()内は、IAEA211に基づき推定された γ 線線量を用いた場合である。

生物学的 γ 線相当線量 (GyEq) の試算結果									
患者/RBE	1.0	1.2	1.4	1.7	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
A氏	13.9	15.0	16.1	17.7	19.3	22.0	24.7	27.4	30.1
	(18.4)	(19.5)	(20.6)	(22.2)	(23.8)	(26.5)	(29.2)	(31.9)	(34.6)
B氏	7.3	7.9	8.4	9.3	10.2	11.6	13.0	14.4	15.8
	(9.8)	(10.4)	(11.0)	(11.8)	(12.7)	(14.2)	(15.6)	(17.1)	(18.5)
C氏	2.1	2.2	2.4	2.6	2.9	3.3	3.7	4.1	4.5
	(2.8)	(3.0)	(3.1)	(3.4)	(3.6)	(4.0)	(4.4)	(4.8)	(5.2)

なお、ICRP Publication 58¹⁶⁾には確定的影響のRBEに関する動物実験の結果がまとめられている。これによると、1 MeVから5 MeVの中性子のRBEは、皮膚：2.8～3.7、胃腸管：2～3.0、造血組織：2.6である。

⑤ 線源に対面した皮膚（以下、線源対面皮膚）の線量の推定

沈殿槽近傍で被ばくしたA氏は皮膚の障害が著しい。ここでは、沈殿槽に対面した皮膚の吸収線量を推定した。

(a) 中性子による線源対面皮膚線量

中性子による皮膚の線量を推定する方法は、臓器・組織の吸収線量を推定する方法と同じである。ただし、前出の式(4-1)の中の $D_f(E)$ として、ORNLの報告書に記載されている組織表面の吸収線量換算係数¹⁷⁾を使用した。

計算の結果、線源対面皮膚の平均吸収線量 D_{Sn} を与える次の式が導出された。

$$D_{Sn} = 1.24 \times 10^{-4} \times a \quad \text{Gy} \quad (4-6)$$

式(4-4)の定数部との比較から、中性子による線源対面皮膚線量は全身平均線量の約1.9倍となることが示された。

(b) γ 線による線源対面皮膚線量

γ 線による皮膚の線量は、70 μ m線量当量と数値的に等しいと仮定した。70 μ m線量当量は、ICRP Publication 74の単位カーマ当たりの70 μ m線量当量¹⁸⁾に前述の γ 線カーマを乗ずることにより求めた。

以上より、線源対面皮膚の平均吸収線量 $D_{s\gamma}$ を与える次の式が導出された。

$$D_{s\gamma} = 1.26 \times 10^{-4} \times a \quad \text{Gy} \quad (4-7)$$

式(4-5)の定数部との比較から、 γ 線の線源対面皮膚線量は全身平均線量の約1.2倍となることが示された。また、IAEA211のグラフを使用した場合、 $D_{s\gamma}$ は、上記の値よりも55%高くなる。

(c) 線源対面皮膚線量の推定結果

以上述べた方法によって推定された線源対面皮膚の平均線量を次表にまとめた。

中性子および γ 線による線源対面皮膚の平均線量の推定結果 (Gy)

患者	中性子	γ 線	
		モニタリング結果使用	IAEA211使用
A氏	10.2	10.4	16.1
B氏	5.4	5.4	8.3
C氏	1.5	1.5	2.3

(d) 線源対面皮膚線量の不均一性

以上に述べたのは平均的な線量である。A氏の場合は沈殿槽近傍に立っていたことから皮膚の線量もかなり不均一であったと推察される。

本稿では、MIRDファントムを沈殿槽の傍に直立させ、放射線が臨界溶液中心あるいは溶液全体から一様に放出された時、ファントム表面にどのように入射するかをジオメトリのみを考慮してモンテカルロ法でシミュレーションした。

その結果、溶液中心から60cm離れて立っていた場合、溶液中心の推定高さである地上高110cm～120cm付近の胴体表面のフルエンスが最も高く、平均フルエンスの約2倍となることが示された。つまり、A氏の体幹部中心の線源対面皮膚は、中性子、 γ 線合わせて40Gy以上被ばくした可能性を示唆している。

⑥ 臓器ごとの線量の推定

3人の患者のうちC氏は、前方からの一様照射に比較的近い被ばくを受けたと推定される。C氏に関し、ここまでに述べてきた方法により臓器・組織ごとの吸収線量を推定した。その結果を以下に示す。

臓器・組織ごとの吸収線量Gy (C氏)

臓器・組織	中性子	γ 線	
		モニタリング結果使用	IAEA 211使用
生殖腺	1.5	1.5	2.4
骨髄	0.59	1.1	1.8
結腸	0.79	1.3	2.1
肺	0.84	1.3	2.1
胃	1.1	1.4	2.2
膀胱	1.1	1.4	2.2
肝臓	0.94	1.4	2.1
食道	1.1	1.2	1.8
甲状腺	1.3	1.6	2.5
全身皮膚	0.97	1.3	2.1
骨表面	0.62	1.2	1.9
残り組織	0.78	1.3	1.9

吸収線量の値自体のみならず、中性子と γ 線の線量寄与の内訳も臓器によりかなり異なっていることが示されている。

⑦ 今後の検討課題

今回の事故の被ばくの特徴は、線質の異なる中性子と γ 線とが混在していたこと、および線量分布が不均一であったことである。このことが今回の患者の臨床経過に影響しているものと思われる。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んでいない。

臨床経過を含む患者データの詳細な分析、沈殿槽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必要がある。

参考文献

- 1) Y. Feng, et al: ORNL/TM-12028, 1993.
- 2) ICRP: ICRP Publication 74. Ann. ICRP, 26(3/4), p.184-p.198, 1996.
- 3) W.G. Cross: Health Physics, 41, 105-121, 1981.
- 4) G.S.Hurst R.H. Ritchie and L.C.Emerson, Health Phys.,2, 121-133, 1959.
- 5) ibid to 1), p.41.
- 6) IAEA: Technical Report Series No.211,p.142, 1982.
- 7) ibid to1), p.46.
- 8) 丸山隆司: 日医放誌, 27, 1347, 1968.

- 9) ICRP: ICRP Publication 23, p.34, p.314, 1975.
- 10) ICRP: ICRP Publication 30 Part 2, Ann. ICRP, 4(3/4), p.3, 1980.
- 11) ibid to 6), p.41.
- 12) ICRP: ICRP Publication 51, Ann. ICRP, 17(2/3), p.36, 1980
- 13) ibid to 11), p.17
- 13) ibid to 2), p.159.
- 15) ibid to 2), p.160-p.174.
- 16) ICRP: ICRP Publication 58, Ann. ICRP, 20(4), p.11, 1989.
- 17) ibid to 1), p.43.
- 18) ibid to 2), p.179.

(3) ヒューマンカウンタによる線量評価

① ヒューマンカウンタによる全身 ^{24}Na 量の測定

(a) 測定の概要

^{23}Na の (n, γ) 反応によって人体内に生じた ^{24}Na を放医研のスキヤニング型ホールボディカウンタを用いて定量した。なお測定は、重度被ばくしたJCO従業員 3 人のうちC氏についてのみ行った。

(b) 測定条件

イ) 測定日時：平成11年10月2日 14時29分 測定開始

(被ばく後経過時間：51時間54分)

ロ) 測定機器の概要：遮蔽室（約20cm厚の鉄）内の水平ベッドの上下にそれぞれNaI検出器を1個ずつ（直径8インチ×4インチ）、合計2個配置した構造である。2個の検出器は水平方向に一定速度で駆動可能である。

ハ) 測定準備：遮蔽室内の汚染を防ぐため、遮蔽室内の床、壁面、ベッド、検出器はビニールシートで覆った。被験者は測定前にシャワーを浴びるのが原則であるが、今回の測定では被験者の容態などを考慮して、病室で着ていたガウンの上にヒューマンカウンタ用の検診着を着てもらって測定を行った。

ニ) 測定ジオメトリ：NaI検出器の中心軸が被験者の頭頂から足先までスキャンするように、速度10cm/分で検出器を駆動させた。

ホ) 被験者の測定時間：987秒（被験者の身長÷検出器の駆動速度）

ヘ) 被験者の体格：ヒューマンカウンタ室に備えてある計測器で、測定の直前に身長、体重の計測を行った。身長は164.5cm、体重は67.8kgであった。

(c) 校正定数の評価

所有している校正用ファントムは2体（ ^{137}Cs 溶液を封入したもの1体と ^{40}K 溶液を封入したもの1体）のみであった。校正定数は測定するガンマ線のエネルギーによって変化するため、これら

2体のファントムによる測定値から内挿または外挿によって、 ^{24}Na の放出する2本のガンマ線(1369keV、2754keV)のうち、どちらかのエネルギーに対して校正定数を推定する必要がある。 ^{137}Cs (662keV)と ^{40}K (1461keV)の校正定数から外挿によって2754keVの校正定数を推定するよりも、内挿によって1369keVの校正定数を推定するほうが、推定の精度がより高いと考えられるため、内挿によって1369keVの校正定数を評価した。内挿に使用する関数を検討するために、4種類の点線源を用いてエネルギーと単位photonあたりの校正定数との関連を調べた。検出器を水平方向に駆動させずにベッドの上下に固定した状態で、検出器の中心軸が水平ベッドと交差する点に点線源を置いて、校正定数を測定した。

ガンマ線放出率を補正した単位photonあたりの校正定数 E_i は、以下の式によって評価できる。

$$E_i = \frac{S_i}{TA_i I_i}$$

E_i : 校正定数 (cps / photon)

S_i : 光電ピーク面積

i : 着目しているエネルギー (MeV)

T : 測定時間 (秒)

($i = 0.662, 1.369, 1.461$)

A_i : ファントムに封入した放射能 (Bq)

I_i : ガンマ線放出率

上記の式において、測定時間 T は ^{137}Cs 、 ^{40}K ファントムともに1943秒、封入した放射能は測定日の当日に換算して、 $A_{0.662}=1359$ Bq (^{137}Cs ファントム)、 $A_{1.461}=18477$ Bq (^{40}K ファントム)である。ファントムの測定は、被験者の測定と同じ日に行った。ガンマ線放出率はそれぞれ、 $I_{0.662}=0.851$ (^{137}Cs)、 $I_{1.461}=0.107$ (^{40}K)である¹⁾。光電ピーク面積 S_i の求め方には複数の方法があるので、ここでは2つの方法²⁾を比較した。これらの方法は、いずれも光電ピーク部分にガウス関数を適合して光電ピーク面積を求めるものである。この結果1.369MeVのピークに対する校正定数は0.005405 cps/photonと0.005270 cps/photonとなる。

(d) 被験者の体内 ^{24}Na 量(測定時)の推定

被験者のスペクトルに関して、1369keVの光電ピーク面積を測定時間(987秒)で割ると正味計数率が求められる。なお、光電ピーク面積を求める際に、 ^{40}K の寄与及びサムピークによる誤差は2%程度であり無視できるものとした。光電ピーク面積を上記で求めた校正定数で割ることによって体内 ^{24}Na 量を求めた。ファントムと同様に、被験者のスペクトルから光電ピーク面積を求める際には、2通りの方法を用いた。その結果体内 ^{24}Na 量(測定時)は68,880 Bqと69,770 Bqと求められた。

ここで、上記の光電ピーク面積に関して、 ^{40}K からの寄与とサムピークの影響を考慮する必要がある。 ^{24}Na の1369 keVの光電ピーク領域の一部は、健常人の体内に存在する ^{40}K の光電ピーク領域と重なる。定期的に行っている数十人の健常人の測定から、 ^{40}K の光電ピーク面積のうち、 ^{24}Na の光電ピーク面積と重なる部分の面積は2000~3000程度であると推定された。上述の光電ピーク面

積S 1.369は、この程度の過大評価をしていることになるが、これはピーク面積の1 %以下である。

一方で、1369keVと2754keVのガンマ線が同時に検出器に入射することにより生じたサムピーク(4123keV)の面積は2400であった。(3)で求めた1369keVの校正定数を適用するためには、前ページで計算した光電ピーク面積S 1.369にサムピークの補正をする必要がある。4123keVの校正定数に対する1369keVの校正定数の比は、前述のべき乗関数を用いるとおよそ1.2倍である。したがってサムピークの補正をするためには、サムピーク面積2400の1.2倍に当する2900を前ページで計算した光電ピーク面積S 1.369に加えるべきである。しかしながら、この補正分は光電ピーク面積S 1.369の1 %以下である。しかも、 ^{40}K の寄与により過大評価している面積が2000～3000程度と推定されており、サムピークが生じたことによる過小評価をほぼ打ち消し合う程度である。したがって、ここでは ^{40}K の寄与及びサムピークの影響は考慮しなかった。

2通りの光電ピーク面積の計算法によって、結果に大きな差異はなかった(差は1 %程度)ので、これら2つの方法による推定値の平均を取って、測定時の体内 ^{24}Na 量は69300 Bqとした。

② 被ばく時の比放射能の推定

(a) 減衰補正

^{24}Na の物理的半減期：14.959 h¹⁾、生物学的半減期10日³⁾の値を用いて、測定時の ^{24}Na 量を事故時(平成11年9月30日10:35分)の ^{24}Na 量に換算した。その結果、事故時の体内 ^{24}Na 量は89,6200Bqと求められた。

(b) 比放射能の算定

人体の体重1 kgあたりに含まれる ^{23}Na の量はICRPの標準人³⁾によると、1.4gである。被験者の体重あたりに換算すると、全身 ^{23}Na 量は94.9g、比放射能(安定 ^{23}Na 1gあたりに生成される ^{24}Na の放射能)は、9440 Bq/gとなる。しかしながら、別の文献⁴⁾によると、人体の体重1 kgあたりに含まれる ^{23}Na の量は0.92～1.61gという値がある。これによると、全身 ^{23}Na 量は62.4～109.2g、比放射能は8210～14360Bq/gとなる。さらに、Kennedy⁵⁾らは40歳から70歳の健常な男性18人に関して調査した結果、全身 ^{23}Na 量74.8～99.4g(平均83.7g)という値を得ている。この値を用いると比放射能は、9020～11980 Bq/gとなる。いずれにしても、全身 ^{23}Na の量には個人差があり、これによって比放射能の値も変わってくる。

③ 線量への換算

^{24}Na の比放射能から被ばく線量への換算係数は、事故後初期の線量評価においては、丸山による文献値⁶⁾を用いた。これによると中性子による被ばく線量への換算係数は、比放射能(Bq/g)あたりの線量(mGy)の単位で0.2092である。ICRPの標準人に基づいて計算した比放射能と、この換算係数を用いると中性子による線量は、2.0 Gyとなった。

一方で最新の情報に基づいた換算係数は、中性子に関しては比放射能(Bq/g)あたり0.0658 mGy、ガンマ線に関しては比放射能(Bq/g)あたり0.103 mGyと評価されている(本報告書「4-2(2)血液中

^{24}Na の測定値に基づく被ばく線量の推定」を参照)。すなわち、ICRPの標準人に基づいて計算した上記の ^{24}Na の比放射能9440 Bq/gを用いると中性子とガンマ線からの線量はそれぞれ0.62、0.97 Gyと算定される。中性子に対するRBEを1.7とするとヒューマンカウンタ計測によるC氏の生物学的ガンマ線相当線量は2.0 GyEqとなる。従って、現時点の線量推定では、より今回の現象に近い後段の評価結果を用いることとした。

参考文献

- 1) Firestone, R.B. : Table of Isotopes EIGHTH EDITION, 1996.
- 2) 野口正安著：ガンマ線スペクトロメトリー 日刊工業新聞社.
- 3) ICRP : Report of the Task Group on Reference Man ICRP Publication 23.
- 4) 関口光夫：生体に必要な元素 臨床検査 34(11), 1384-1393: 1990.
- 5) Kennedy, N.S. et al. : Normal levels of total body sodium and chlorine by neutron activation analysis. Phys. Med. Bio. 28(3), 215-221: 1983.
- 6) 丸山隆司：事故時における被ばく線量の推定 2.ファントムによる中性子捕獲確率の測定. 日本医学放射線学会誌27(10), 1347-1353: 1968.

4-3 染色体分析法による線量推定

線量推定のための染色体分析はリンパ球に分裂誘起剤を加えて培養し分裂中のリンパ球で解析する。通常の線量推定は体内のリンパ球が完全に混じり合う時間まで待つ必要があるため、被曝後24時間以上を経ってから4週間以内に採血を行なう。しかしながら、本例ではリンパ球の急速な減少が報告されたため急遽早めに採血を行なうことになり、染色体分析用の最初の採血は被曝後9時間目に実施した。その後23時間目、48時間目にも採血し、染色体標本を作成した。

事故後9時間目ですでに末梢血中のリンパ球数はA氏が1.9%、B氏が2.1%、C氏が15%（正常は25 - 48%）であった。A氏とB氏のような血液状態では従来の染色体標本作成法では培養およびハーベスト中にリンパ球が失われてしまい標本作成が出来ない。また、標本ができたとしても分裂細胞の頻度が低く、染色体分析ができないか極めて困難になる。今回、放医研において我々が原子力基盤技術クロスオーバー研究で開発した2つの方法（高回収率染色体標本作成法：Hayata, Tabuchi, Furukawa, et al., J. Radiat. Res. 33, Supple. 231-241, 1992および間期核強制凝縮環状染色体（PCC-R）による簡易高線量推定法：Kanda, Hayata, Lloyd, Int. J. Radiat. Biol. 75, 441 - 446, 1999）を使い生物学的線量推定を実施した。前者の方法は自動装置での染色体標本作成用に開発した方法であり、リンパ球を濃縮して小容器で培養処理する方法でリンパ球が濃縮されている上に遠心分離処理などで失われる細胞が少なく分裂細胞回収効率の極めて高い方法である。後者は従来の分析対象としていた分裂中期細胞ではなく染色体が解けた状態にある分裂間期核をオカダ酸で処理して染色体を強制凝縮させて染色体が見えるようにし、異常染色体を検出する方法である。X線や γ 線で10Gy以上の高線量を被ばくすると細胞周期が停止するため分裂中期細胞の頻度

が激減し染色体が見られなくなるが、オカダ酸で処理した場合には20Gyの被ばくによっても染色体凝集誘導率は低下しない。環状染色体のみを指標とするため、2動原体（n動原体は2動原体がn-1個とする）と環状染色体とフラグメントを計数する従来法と比べて精度は劣るが分析時間は短縮され、特に高線量域で有効な方法である。

今回、線量推定のために用いたの方法の概要を以下に記す。

標本の作成と分析

(a) 末梢血 8 mlよりリンパ球を分離して2等分する。

(b) 組織培養用遠心管に6 mlの下記培養液を入れてそれぞれ培養する。

RPMI1640 + 20% 仔牛血清 + 360 μ g カナマイシン + 120 μ l PHA

(イ) 間期核強制凝縮環状染色体標本用

37℃で47時間培養後、オカダ酸（500nM）を加えて1時間培養を継続する。

(ロ) 2動原体と環状染色体標本用

コルセミド（0.3 μ g）を培養開始時に加えて37℃で48時間培養する。

(c) 高回収率ハーベスト法で細胞を処理・固定し、スライド標本を作成する。

(d) ギムザ染色して顕微鏡で観察して異常染色体を計数する。

(e) 異常と思われる細胞は全て写真撮影して記録する。

線量推定法と線量計算式

被ばく線量の推定は間期核強制凝縮環状染色体（PCC-R）の場合、200 kVX線で末梢血を照射して実験的に得た線量効果曲線と比較して推定値を出した（図1）。2動原体と環状染色体についてはC氏の場合は ^{60}Co γ 線に対する線量効果推定式 $Y = (3.31 \pm 0.88) \times 10^{-4}D + (6.33 \pm 0.25) \times 10^{-6}D^2$ （京都大学、佐々木正夫教授より）を基にし、IAEA Technical Report 260 (1986)の方法に従って線量を推定した。2動原体の数は被ばく線量が6 GyEqを超えるとこの線量推定用算定式により得られる値から離れ始める。A氏とB氏は6 GyEqを超えており、この式が利用できないためNorman & Sasaki (Int. J. Rad. Biol. 1966) によって報告された1.9 Mev X線（線質係数=1）の照射実験による実測値との比較で推定値を出した（図2）。

結 果

(1) 間期核強制凝縮環状染色体（PCC-R）の頻度からの推定

高線量被ばく事故では、被ばく線量を出来るだけ早く知る必要がある。そのため、まず、およその被ばく線量を推定するために被ばく後9時間目に採血して48時間培養したサンプルにより我々の研究室で開発した間期核強制凝縮染色体の環状染色体（PCC-R）の頻度からの推定を行った。

この分析には3名分で約1時間かかり、推定線量は以下の通りであった。

被ばく後9時間目採血分

A氏	75 PCC-R／50細胞	20 GyEq以上＊
B氏	38 PCC-R／50細胞	7.8 GyEq＊
C氏	13 PCC-R／50細胞	2.6 GyEq＊

注：GyEq＊ 放医研での実験による実測値との比較により得た200keV X線相当線量

(2) 分裂中期細胞の2動原体染色体と環状染色体の頻度からの推定

間期核強制凝縮環状染色体による線量推定は世界でこれが初めてのことであったため、従来のフラグメントを伴う2動原体染色体（Dic）と環状染色体（Rc）の頻度を調べる推定法で結果の確認を早急に行なう必要があった。しかし、A氏とB氏の標本は通常の100から1,000分の1程度しか分裂細胞が見られない上に異常が複雑で短時間での分析は不可能なものであった。そのため、とりあえずC氏の標本を分析して確認を行なった。C氏の50細胞の分析に約1時間を要し、推定線量は2.4 - 3.2 GyEq***でありPCC-Rの解析結果と矛盾しなかった。この結果は10月3日10時から始まった事故後3日目の治療検討会議においてPCC-Rによる推定結果と共に報告された。

その後の分析は、精密な線量推定ができる2動原体と環状染色体とフラグメントの分析作業に的を絞った。B氏の標本の分析を始めたが、分裂細胞が少ない上に細胞当りの異常染色体が多く複雑であるため解析に時間がかかった。また、3名についての23時間目、48時間目の採血分についての標本作成や東海村の低線量被ばく者の対応準備などがあって10月7日朝の治療検討会議に追加報告できたのはB氏の9時間目採血分についての13細胞の分析結果のみであったが、13細胞の分析結果から推定される線量は6 GyEq以上であり間期核強制凝縮環状染色体による線量推定結果はB氏についても誤りではないことが確認できた。

10月13日までにA氏の9時間目採血分15細胞とB氏の9時間目採血分53細胞とC氏の23時間目採血分100細胞の分析が出来た。A氏の細胞には激しい染色体異常が認められ、1細胞中の総動原体数（46）の確認ができず、また、環状染色体中の動原体を持つもの（Rc）と、持たないもの（Ra）の区別はできない状態であった。そのため、環状染色体については両者（R）を合計して計数した。また、2動原体の数は確認できた分のみであるため実際の数より少なく、従って、A氏の推定線量値は実際より低く見積もられることになる。A氏についての推定値は下記のように24.5GyEqであり、PCC-Rによる推定と矛盾しないことが事故後13日目に確認できた。

10月13日時点での推定結果

被ばく後9時間目採血分

A氏	158 Dic+R／15細胞	24.5 GyEq**
B氏	160 Dic+Rc／53細胞	8.3 GyEq**
C氏	28 Dic+Rc／50細胞	2.4 - 3.2 (中央値2.8)GyEq***

被ばく後23時間目採血分

C氏	64 Dic+Rc/100細胞	2.7 - 3.3 (中央値3.0)GyEq***
----	-----------------	---------------------------

注: GyEq** Norman&Sasaki (Int. J. Rad. Biol. 1966) によって報告された
照射実験の実測値との比較により推定した1.9 Mev X線相当線量

GyEq*** 線量効果式 $Y = (2.31 \pm 0.88) \times 10^{-4}D + (6.33 \pm 0.25) \times 10^{-6}D^2$ を使い算定
した ^{60}Co γ 線相当線量

その後さらに分析を進め、最終的には被ばく後9時間目、23時間目、48時間目の3者全てのサ
ンプルの分析に成功した。また、PCC-Rについては被ばく後9時間目の血液標本を各100細胞ま
で分析細胞数を増やした。結果は以下の通りであった (Hayata et al., 2001)。

3名の被曝者のPCC-R,及び2動原体と環状染色体の細胞当り頻度

被災者	指 標	9時間目	23時間目	48時間目	合 計	推定線量
A	PCC-R	150/100			150/100	20GyEq*以上
	Dic	445/50	197/20	73/8	715/78	22.6 GyEq**
	Dic+R	563/50	250/20	90/8	903/78	24.5 GyEq**
B	PCC-R	77/100			77/100	7.4(6.5-8.2) GyEq*
	Dic	199/75	127/50	153/50	479/175	8.3 GyEq**
	Dic+Rc	224/75	147/50	166/50	537/175	8.3 GyEq**
C	PCC-R	24/100			24/100	2.3(1.8-2.8) GyEq*
	Dic+Rc	63/100	64/100	64/100	191/300	3.0(2.8-3.2)GyEq***

謝 辞

本分析は放医研障害基盤研究部の早田勇、神田玲子、南久松真子が行なったが、2動原体と環
状染色体 (Dic+Rc) の分析に使用した染色体スライド標本を京都大学放射線生物研究センターの
佐々木正夫教授に送り、確認をして頂いた結果、佐々木教授の推定線量結果は我々の結果とほぼ
同じであったとの返事を頂いた。被ばく線量の推定について貴重な資料とご指導を頂いた佐々木
正夫教授に感謝致します。

文 献

1. Hayata, I., H. Tabuchi, A. Furukawa, N. Okabe, M. Yamamoto and K. Sato: Robot system for
preparing lymphocyte chromosome. J. Radiat. Res. 33, Supple. 231-241, (1992).
2. IAEA Technical Reports Series 260. Biodosimetry: Chromosomal Aberration Analysis for Dose
Assessment. IAEA, (1986).
3. Kanda, R., I. Hayata and D. Lloyd: Easy biodosimetry for high-dose radiation exposures using

drug-induced, prematurely condensed chromosomes. Int. J. Radiat. Biol. 75, 441-446, (1999).

4. Norman, A. and M. S. Sasaki: Chromosome-exchange aberrations in human lymphocytes. Int. J. Radiat. Biol. 66, 321-328, (1966).

図 1. 間期核強制収縮環状染色体 (PCC-R) の線量効果 (Hayata et al., J. Radiat. Res. 2001より)

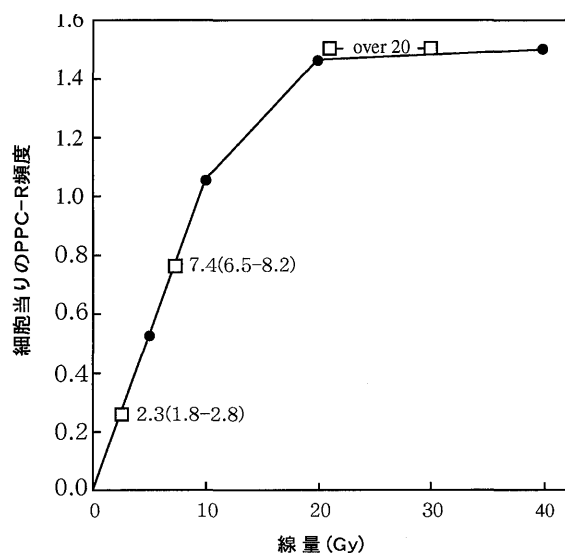
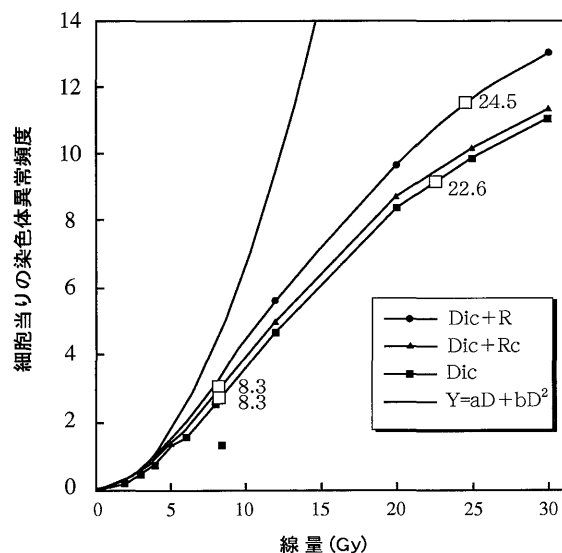


図 2. 分裂中期細胞の2動原体と環状染色体の線量効果：計算値と実測値 (Hayata et al., J. Radiat. Res. 2001より)



東海村臨界事故被災者3名の染色体分析作業経過

平成11年9月30日

- 10時35分 東海村で臨界事故発生
- 15時25分 被災者3名がヘリコプターと救急車で水戸から放医研に到着
- 16時00分 新しく培養液などを作成し培養用試薬類などの準備完了
- 19時30分 血液を9 mlづつ採血、リンパ球分離培養準備開始 (事故後9時間目)
- 20時30分 1回目培養スタート

平成11年10月1日

- 9時30分 2回目染色体検査用採血 (事故後23時間目)
- 10時30分 2回目培養スタート

平成11年10月2日

- 10時30分 3回目染色体検査用採血 (事故後48時間目)
- 11時30分 3回目培養スタート
- 19時30分 オカダ酸を1回目培養の3本に添加
- 20時30分 1回目培養細胞のハーベスト開始
- 21時30分 1回目ハーベスト終了、固定細胞を冷凍庫に保存
- 23時30分 空気乾燥スライド標本を作成、ギムザ染色、包埋完了

平成11年10月3日

1時00分	顕微鏡下で分析開始
2時00分	PCC-Ringの分析3名分終了、線量推定（採血後53時間半、事故後62時間半）
3時00分	Dic+Ring の分析用スライドの作り直し（固定不十分のため）
5時30分	Y氏分のみDic+Ring の分析終了、線量推定（採血後57時間、事故後66時間）
9時30分	オカダ酸を2回目培養の3本に添加
10時25分	治療検討会議で推定線量を報告（PCC-Ringで3名分、Dic+Ring でY氏分）
10時30分	2回目培養細胞のハーベスト開始
11時30分	2回目ハーベスト終了、固定細胞を冷凍庫に保存

平成11年10月4日

10時30分	オカダ酸を3回目培養の3本に添加
11時30分	3回目培養細胞のハーベスト開始
12時30分	3回目ハーベスト終了、固定細胞を冷凍庫に保存

平成11年10月13日

10時30分	Dic+Ringの分析でPCC - Ringの結果がほぼ正しいと確認でき、3名の被曝線量を報告
--------	---

4-4 線量分布の詳細解析

(1) 緒言

今回の事故では、ウラン溶液が臨界に達した瞬間、ごく短時間のうちに、核分裂に伴う中性子、即発 γ 線、および中性子捕獲に伴う2次 γ 線が大量に放出され、沈殿槽周辺で作業中の3名を直撃した。放医研に搬送された後、治療方針策定作業に指針を示すべく、リンパ球等血液成分の分析、染色体分析、血液中 ^{24}Na の分析等により線量推定が実施された。

今回の事故の被ばくの特徴は、線質が異なり、また、体内での減衰率が同じではない中性子と γ 線との混合被ばくであったこと、および、特にウラン溶液を注入していた2名は、著しく不均等に被ばくしたことである。これらのことが患者の臨床症状に関係したのではないかと推察される。しかしながら、前節までに述べられた方法では、全身の平均的な線量が推定されるのであり、また、中性子と γ 線の寄与の内訳を直接推定することができない。

現在、日本原子力研究所（原研）と共同して、被ばく時の位置・姿勢を模擬した放射線輸送に関するモンテカルロシミュレーション、臨界実験装置を用いた再現実験等により、皮膚の各部位、および体内深部の各部位における、中性子、 γ 線それぞれによる吸収線量の推定作業を進めている。これらの結果は、臨床症状との対比等により、重度被ばくがもたらす医学的影響の解明、ならびにその治療法の進歩に寄与するものと考えられる。

以下、それぞれの検討経過の概要を記す。

(2) 計算シミュレーション手法による線量推定

① はじめに

本方法は、沈殿槽の周囲に、A氏、B氏の位置・姿勢を模擬した数学ファントムを配置し、臨界反応および放射線輸送過程を模擬計算し、皮膚の各部位、および体内深部における吸収線量を推定しようとするものである。

② 計算方法

臨界計算および放射線輸送計算には、連続エネルギーモンテカルロコードMCNP-4Bを、中性子断面積ライブラリには、FSXLIB-J3R2を用いた。数学ファントムとして、原研で開発された四肢可動型人体ファントム²⁾を用いた。これは、MIRDファントムの四肢を体幹部から独立させ、肩、ひじ、股間等に球関節を付加した数学ファントムであり、作業姿勢を模擬できる。なお、ファントムは、身長170cm、体重73kgであり、A氏、B氏の体格に比較的近い。

③ 検討経過

計算は、次の手順に従って進められている。

【ステップ1：沈殿槽単体モデルによる空間の線量分布】

作業者の線量計算に先立ち、沈殿槽周囲の中性子束、 γ 線束、および各々のエネルギースペクトルを計算シミュレーション手法により求めた。このようにして得られた放射線場での微小体積要素の組織吸収線量を、中性子に対するカーマ係数、および γ 線に対する質量エネルギー吸収係数³⁾を用いて計算し、沈殿槽周囲における空間の線量分布を推定した。計算結果を図4-1に示す。縦軸は、核分裂数 1×10^{17} 当たりの吸収線量で表した。なお、3名が被ばくした初発暴走出力の核分裂数は $(4 \sim 10) \times 10^{16}$ と推定されている⁴⁾。

ステップ1により明かとなった主な点は以下の通りである。

- (a) 図4-1より、高さ115cm（体幹部表面中央付近）で見ると、 γ 線による吸収線量の方が若干（18%～35%）高い。
- (b) 同じく図4-1より、沈殿槽近傍では、位置による線量の変化は著しく大きい。たとえば、沈殿槽表面から10cmの距離と20cmの距離とでは、線量に約2倍の開きがある。高さ方向に関しても、距離10cmで見た場合、高さ115cmの線量は、165cm（顔面付近）の約2.5倍を示している。
- (c) 本稿には図示されていないが、沈殿槽の側面と上面とでは、中性子スペクトルに大きな差が見られない。
- (d) これも本稿に図示されていないが、 γ 線スペクトルは、数100keV付近にブロードなピークをもち、核分裂 γ 線のスペクトルに近い。また、水素による2.2MeVの捕獲 γ 線のピークが見られないことから、線量に主として寄与するのは核分裂 γ 線と推定される。

【ステップ2：平板ファントムによる解析】

沈殿槽の周囲に、A氏、B氏を想定した平板ファントム（高さ170cm、厚み20cm、横幅40cm）2

体を配置し、ファントムと沈殿槽との距離、および角度をパラメータとして、ファントム内吸収線量分布、 ^{24}Na 生成率を計算した。この検討により、皮膚線量の分布、深部線量の勾配等の概略を明らかにすることができ、皮膚表面の最適な分画方法、深部線量を評価するボクセルの最適な大きさ等、次ステップの計算に必要な条件を設定することができた。

この他、ステップ2により明かとなった主な点は以下の通りである。

- (a) ^{24}Na 生成量 (Bq/g_{Na}) 当たりの全身の平均中性子吸収線量は、第6-2節で述べられた線量換算係数 $[6.6 \times 10^{-5} \text{ Gy} / (\text{Bq/g}_{\text{Na}})]$ と比較的よく一致する。
- (b) 平板ファントムと沈殿槽の中心間の距離が55cmの場合、ファントム位置を5cm前後させることにより、全身の平均中性子吸収線量は、-10%から+15%変化する。
- (c) 平板ファントム内における中性子線量の減衰は急である。不均等被ばくを模擬していることから一律には言えないが、ファントム背面の線量は、前面の1/10以下、部位によっては1/100以下まで減衰する。一方、 γ 線の減衰は、1/3~1/5程度である。

【ステップ3：四肢可動型人体ファントムによる詳細線量評価】

沈殿槽の周囲に、被ばく時の位置・姿勢を模擬した四肢可動型人体ファントムを配置し、皮膚の各部位、および体内深部における、中性子、 γ 線それぞれによる吸収線量を計算する。この作業は現在も進行中である。

ステップ1、2の結果は、線量が、被ばく時の位置・姿勢に極めて敏感であることを示している。ステップ3を進めるに当たっては、これらの正確な推定が不可欠である。そこで、B氏自身、および比較的軽症のC氏への面談を参考に、JCOに設置された転換試験棟のモックアップ施設において、被ばく従業員と同等の身長の高岡研職員が作業の再現を試みた。その時の写真を図4-2に示す。

この模擬作業で推定された位置・姿勢を基本にして、さらに、 ^{24}Na の実測値、特にA氏 B氏の ^{24}Na 放射能の比の実測値と矛盾しないこと、およびA、B両氏それぞれの皮膚症状所見との乖離を生じないことを条件とし、予備計算を繰り返しながら2名の詳細な位置決めを試みている。

作業を進めるために暫定的に設定したモデルの一例を図4-3に示す。

皮膚に関しては、症状が顕著に現れたことから、線量を詳細に評価する必要がある。頭、胴体、および四肢の長手方向は5cm間隔、周長方向は、頭、胴体は22.5度間隔、四肢は45度間隔のメッシュに分画し、それぞれの線量を計算する。体内深部の線量分布に関しては、胴体を対象とし、1cm×1cm×2cm程度のボクセル内の線量を計算することを計画している。

(3) 臨界実験装置TRACYを用いた深部線量分布の検討

① はじめに

原研の核燃料サイクル安全工学研究施設には、事故を起こした沈殿槽と同じく硝酸ウラニルを燃料とする過渡臨界実験装置TRACY (Transient Experiment Critical Facility) が設置されている。今回、TRACYの炉室に、水を充填したファントムを設置し、定出力運転下で、ファントム内部の

線量分布を空洞電離箱により測定した。この実験により、中性子、 γ 線それぞれによる線量のファントム内部における減衰を定量的に評価することができた。

今後、第4-4節、第(2)項で述べた計算シミュレーション手法の妥当性を検証するため、本実験系のモデルについてシミュレーション計算し、その結果を本実験結果と比較することを予定している。

② 実験方法

実験装置の概略を図4-4に示す。

TRACY炉心は、外径50cmの円筒状で、中心には安全棒挿入用の直径7.6cmの円筒状空洞が設けられている。この炉心タンクの中に、濃縮度9.98%の硝酸ウラニル溶液が約110ℓ充填され運転される。なお、冷却水のジャケットは設けられていない。一方、JCOの沈殿槽に注入された硝酸ウラニル溶液は、濃縮度が18.8%であり、溶液量約40ℓで臨界に達した。

使用したファントムは、幅30cm、奥行き20cm、高さ50cmの楕円体容器であり、壁厚5mmのアクリル樹脂で作られている。この中に水道水を満たし、炉心タンクの表面から46.1cmの距離に設置した。

線量測定は、中性子感度が大幅に異なる2種類の空洞電離箱をペアにしてファントム内に挿入し、3次元駆動装置により、ファントム内を走査した。TRACYの出力変動を補正するため、モニタ用電離箱をファントム前面に設置し、測定期間中の出力変動を監視した。電離箱の中性子、 γ 線それぞれに対する感度は、シミュレーション計算から得られたそれぞれのエネルギースペクトルで荷重平均して求めた。

③ 測定結果

ファントムの中心軸に沿った深さ方向の線量分布の測定結果を図4-5に示す。なお、中心軸を通る横方向の線量、および中心軸を通る高さ方向の線量は、位置によらずほとんど同じ値であり、今回の実験が一様照射条件下で行われたことを示している。

図4-5が示すように、中性子線量は深さに対し指数関数的な減衰を示した。見かけの減衰係数は 0.204cm^{-1} である。 γ 線線量の減衰は、それよりもゆるやかであり、線量ビルドアップが生じている。このことにより、深さ0mmへの外挿値、すなわちファントム表面では、 γ 線線量は中性子の2倍となっているが、一方、100mmの深さでは、約10倍に開く。なお、前述のシミュレーション計算のステップ1の結果によると、中性子と γ 線の組織表面での線量には、あまり大きな差は無い。TRACYでは、溶液量がJCO沈殿槽の約3倍であることから、タンク内での中性子の減衰率が大きく、また、捕獲 γ 線の発生も多く、相対的に γ 線の線量が高くなったものと推察される。

(4) 結 語

今回の事故の経験を今後の緊急時医療対策に生かし、また、被害に遭われた方々の労苦に報いるがためにも、被ばく線量は徹底的に解明されなければならない。現在、皮膚の各部位、及び体内深部における、中性子、 γ 線それぞれによる吸収線量の推定作業を進めており、ほぼ最終段階に差し掛かってきた。ここで試みている被ばく者の位置・姿勢をモデル化した計算シミュレーション手法は、これまでに例のないものであり、本手法を発展させることにより、被ばく事故にお

ける詳細線量評価の新しい方法論を開発できるものと期待される。以上4-4で述べたことは、放射線医学総合研究所と日本原子力研究所との間で、平成12年2月1日に締結された「JCO臨界事故における患者の被ばく線量の詳細解析」に関する共同研究契約に基づき実施されているものである。

参考文献

- 1) K. Kosako, et al.; FSXLIB-J3R2: A Continuous Energy Cross Section Library for MCNP based on JENDEL-3.2, JAERI-Data/Code 94-020 (1994).
- 2) 山口恭弘; FANTOME-90: 四肢可動型人体模型を用いた光子外部被曝線量計算コード, 保健物理, 27, 143-148 (1992).
- 3) ICRU; ICRU Report 46: Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues (1992).
- 4) 原子力安全委員会; ウラン加工工場事故調査委員会報告, p.III-17 (1999).

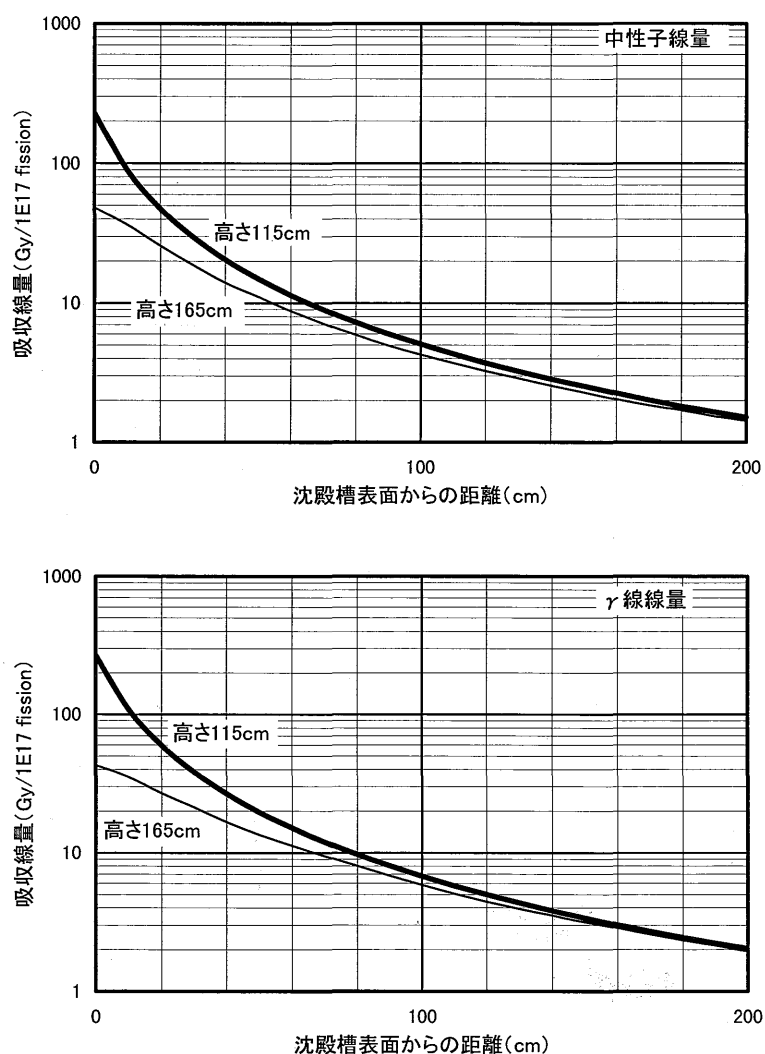


図4-1 沈殿槽周囲の空間の組織吸収線量分布



図4-2 転換試験棟モックアップ施設における作業の再現風景

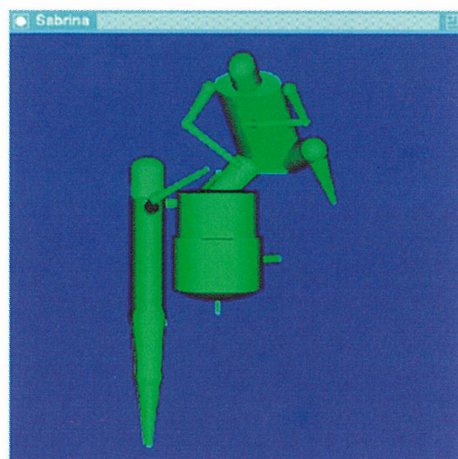


図4-3 暫定的に設定された計算モデル

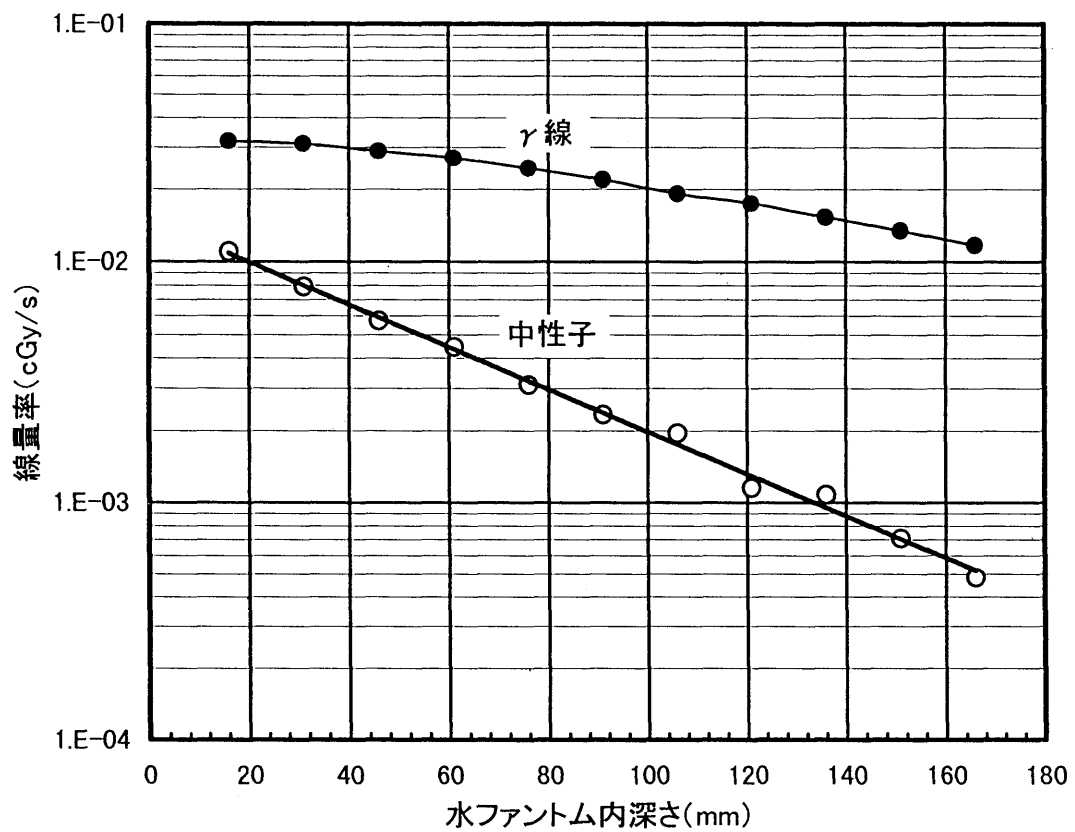


図4-5 ファントム内深部線量分布の測定結果

4-5 歯治療金属の放射化による口腔内組織の被ばく線量推定

2名の患者(A氏及びB氏)が、東大付属病院及び東大医科学研究所に転院後、各々の医師団から口腔粘膜の金属冠周辺の炎症がひどく、これは中性子の影響で放射化した局所の高線量被ばくによるものではないかとの問い合わせを受けた。その可能性を調べるため、放医研の西沢人間環境部室長と芳田放射線安全課員が両病院に出向き、それぞれについて口腔内組織の被ばく線量の測定検査を行った。

熱中性子の全身均等照射と仮定し、血中 ^{24}Na の放射能濃度（B氏91.3Bq/ml、A氏169Bq/ml）¹⁾にあわせ、各核種の放射エネルギーを求めた。血中Naは、血液1g（1mlとする）あたり1.9mgとした。

(1) 口腔内の金属及び生産される可能性のある核種

個々の金属の含有量は不明であるため、一般的に充填される平均的な値を用いた。

B氏の右下顎5,6,7番の金属冠 金属は合計で15gと仮定		A氏上顎右6番アマルガム充填 アマルガムを0.33gと仮定	
組成及び比	生成予想核種	組成及び比	生成予想核種
Au 12% 1.8g	^{198}Au ,	Hg 55.6% 0.183g	^{197}Hg , ^{203}Hg ,
Ag 52% 7.8g	^{108}Ag , ^{110}Ag , ^{110m}Ag	Ag 26.5% 0.087g	^{108}Ag , ^{110}Ag , ^{110m}Ag
Pd 20% 3.0g	^{109}Pd ,	Sn 12.2% 0.041g	
Cu 17% 2.6g	^{64}Cu ,	Cu 5.7% 0.019g	^{64}Cu ,

(Snの放射性同位元素は生成量が低い為計算に入れなかった。)

(2) γ 線による被ばく

歯及び金属自身の吸収は考えないこととし、歯の中心部に放射性同位元素が点線源として存在すると仮定した。点線源からのある距離における線量の計算法によりもとめ、組織/空中線量比が不明な核種は1とした。

① B氏の口腔内組織被ばく線量の計算結果

- ・放射化により生産された可能性のある放射性物質の内、エネルギーと放出率²⁾を考慮し、 ^{64}Cu 、 ^{198}Au 、 ^{110}Ag 、 ^{110m}Ag についてのみ計算した。
- ・中心から5mmの位置の線量を推定した。(歯の奥行きをおよそ1cmと見積もった。)

B氏の γ 線による口腔内組織被ばく線量

初期 放射エネルギー	半減期	空気衝突 カーマ率定数 ^{2), 3)}	初期線量率 at 5mm	積算線量
MBq		$\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2/\text{h}/\text{MBq}$	mGy/h	mGy
^{64}Cu 3.24E- 01	12.07d	0.0250	0.324	5.64
^{110}Ag 1.42E+04	24.57s	0.0041	2330	22.9
$^{110\text{m}}\text{Ag}$ 8.12E- 04	250.4d	0.3510	0.0114	98.7
^{198}Au 4.35E- 01	2.7d	0.0547	0.952	88.8

② A氏の口腔内組織被ばく線量の計算結果

アマルガムは歯の表面頬側にある為、線量を計算する位置は線源から1mmとした。

A氏の γ 線による口腔内組織被ばく線量

初期 放射エネルギー	半減期	空気衝突 カーマ率定数	初期線量率 at 5mm	積算線量
MBq		$\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2/\text{h}/\text{MBq}$	mGy/h	mGy
^{64}Cu 4.33E- 03	12.70h	0.0250	0.108	1.968
^{108}Ag 2.30E+01	2.37m	0.0023	52.6	2.99
^{110}Ag 2.94E+02	24.57s	0.0041	1178	11.60
$^{110\text{m}}\text{Ag}$ 1.70E- 05	250.4d	0.3510	0.006	51.5
^{197}Hg 3.81E- 03	64.14h	0.0079	0.030	2.78
^{203}Hg 6.88E- 05	46.61d	0.0308	0.002	3.41

(3) β 線による被ばく

(a) 歯牙の計算モデルは以下のように仮定した。

- ・ B氏：歯は直方体とし、厚さ10.8mm、幅11.4mm、歯根長7.9mmとした。金属は根部分を除く5面に被せられるものとし、口腔内組織はその1面に接するとした。(図4-6)
- ・ A氏：歯は直方体とし、アマルガムは口腔内組織に接し3×3×1.5mmとした。(図4-7)

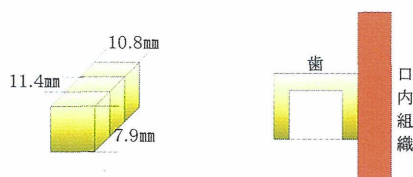


図4-6 B氏の計算モデル

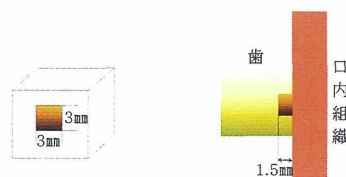
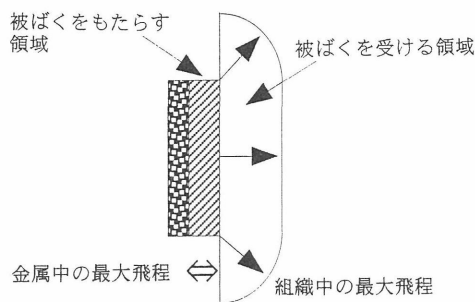


図4-7 A氏の計算モデル

(b) 口腔内組織に被ばくをもたらす領域は、組織に接する面の、金属中の最大飛程の深さとする。この領域から放出された β 線の1/2が口腔内組織に吸収されると仮定する。吸収されるエネルギーは β 線の平均エネルギーを用いて計算した。(図4-8)



(c) 被ばくを受ける領域は、組織に接する面から、組織中の最大飛程までとする。被ばくを受ける組織の重量は、この部分の体積から、密度1として求めた。

図4-8 線源の領域と被ばくを受ける領域

(図4-8)

(d) 被ばく線量 [$\text{Gy}=\text{J}/\text{kg}$] は、吸収されるエネルギー [J] を、被ばくを受ける組織の重量 [kg] で除して求めた。

(e) 結 果

B氏の口腔内組織被ばく線量の計算結果

	積算 放射能	半減期	金属中の 最大飛程	組織中の 最大飛程	吸収される エネルギー	被ばくの 領域	積算 線量
	Bq · s		cm	cm	J	kg	Gy
^{110}Ag	5.02E+11	24.57s	0.137	1.44	9.92E-03	1.37E-02	0.73
^{108}Ag	2.25E+11	2.37m	0.073	0.76	1.36E-03	3.37E-03	0.40
^{198}Au	1.46E+11	2.696d	0.037	0.39	2.52E-04	9.24E-04	0.27
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	2.53E+10	250.4d	0.016	0.17	4.45E-06	2.51E-04	0.018
^{64}Cu	2.03E+10	12.70h	0.022	0.23	7.99E-06	3.82E-04	0.021
^{109}Pd	1.44E+10	13.46h	0.040	0.42	2.97E-05	1.09E-03	0.027

A氏の口腔内組織被ばく線量の計算結果

	積算 放射能	半減期	金属中の 最大飛程	組織中の 最大飛程	吸収される エネルギー	被ばくの 領域	積算 線量
	Bq · s		cm	cm	J	kg	Gy
^{110}Ag	1.04E+10	24.57s	0.059	1.44	3.16E-04	8.25E-03	0.038
^{108}Ag	4.70E+09	2.37m	0.031	0.76	4.29E-05	1.54E-03	0.028
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	5.29E+08	250.4d	0.007	0.17	1.43E-07	5.25E-05	0.0027
^{203}Hg	3.99E+08	46.6d	0.002	0.05	2.46E-08	6.69E-06	0.0037
^{61}Cu	2.85E+08	12.70h	0.009	0.23	1.67E-07	9.26E-05	0.0018

* ^{197}Hg は β 線を放出しない。

(4) まとめ

以上の計算によりA氏・B氏の歯治療金属の放射化による被ばく量は上記の表のように推定した。計算には多くの仮定が使われたため、かなりの誤差を含むものと考えられる。仮定は線量が多くなるように選んだ。この計算は治療の過程で、歯治療金属の放射化により、大線量の被ばくが継続しているか否かの

合計の線量 (mGy)			
	β 線	γ 線	合計
B氏	1466	216	1682
A氏	74.2	74.2	148.4

判断のために応急的に行った。当初は、当時得られていた種々のデータを用いたが、その後、データが整理されたので、本報告作成に当たっては、参考文献¹⁾に示された値を用いて再計算し、RIが十分に減衰するまでの合計の線量として示した。歯の金属の重量等に関しては歯科医師の意見を参考にした。核種の大部分が半減期の短いものであったと推定される所から、大線量の被ばくは事故直後に起こったもので、その後の治療方針、看護体制には影響を与えるものではないと判断された。

[参考文献など]

- 1) 河内清光、他編：ウラン加工工場臨界事故患者の線量推定中間報告書、放医研、2000
- 2) 村上悠紀雄、他編：放射線データブック、地人書店、東京、1982
- 3) 日本アイソトープ協会編：アイソトープ手帳、丸善、東京、199

5. 治療方針の決定

わが国の緊急被ばく医療体制では医療施設を3段階に分け、一次医療施設を事業所内施設、2次医療施設を地域の基幹病院、3次医療施設を放射線障害専門病院（＝放射線医学総合研究所、「放医研」という）としている。内部汚染もしくは高線量被ばく例などは放医研に移送される。国の中央防災会議による防災基本計画では、放医研は大学病院等の高度専門医療機関からなるネットワークを組織し緊急時に備え、より高度な医療を行うことを求めていることはすでに述べた通りである。被ばく患者の治療を行うにあたって最も重要な情報は、被ばく線量と被ばくの性質について、すなわち外部被ばくのみなのか、内部被ばくや汚染を伴うのか、また汚染核種等を明らかにすることである。放医研では患者の時計や携帯電話などの携行品、吐物、血液から ^{24}Na その他の核種を検出し、この事故が臨界事故であること、さらに放射性核種汚染はないことを明らかにした。このように放医研の最大の役割は、被ばくの形態や放射性核種による汚染を明らかにすること、また被ばく線量の推定を行い、これに加えて臨床所見および過去の放射線事故の症例についての情報をあわせて、総合的な評価を行い、向後の病態を予測するとともに治療方針を立てることである。

放射線被ばく事故の治療方針を決定する際、最も重要なことは被ばく線量の推定、被ばくの形態、さらに汚染の原因となる放射性核種の同定である。前項で述べたように、体表面の線量からは医療従事者の二次被ばくの可能性は非常に低く、急性放射線症の前駆症状が出ていることを考慮して一般病棟に入院させることを決定した。一方、物理学的線量評価グループは、携行品や吐物等から ^{24}Na 等が検出し、体表から検出される放射線の原因を解明し、これらの結果から中性子被ばくの可能性が強いことを明らかにした。このことは今後の治療方針の決定を行う際に重要な意味を持っている。すなわち汚染に左右されずに治療を、さらには治療施設を選択できるということである。事故の翌日の10月1日に緊急被ばく医療ネットワーク会議を招集し、第1回事故対応臨時拡大会議を放医研で開催した。線量についての詳細は別項で述べたように、最も被ばく線量の高い患者(A氏)では γ 線に換算して少なくとも10Gyを超えていることが推定され、骨髄の自己回復が困難であることが想定されたため、組織適合抗原（HLA）の検査を入院直後から開始した。同時に皮膚障害、消化管障害などが現れ、また血管の透過性の亢進に対する治療を含めた全身管理が必要と考えられたため翌10月2日ネットワーク会議委員も参加した放医研における症例検討会において、移植医療及び集中治療が可能である東京大学医学部附属病院に転院させ治療を行うことを決定した。

また、10月4日の午前中、症例検討会において次に重篤な患者(B氏)について、推定被ばく線量から骨髄障害の治療に関して議論された。推定被ばく線量は高くとも10Gyであり自己骨髄が回復する可能性について、また造血幹細胞移植の適応に関して議論が集中した。その結果、自己骨髄の回復の可能性はあるが、自己骨髄が回復するまでの骨髄低性形成の期間に生着した移植細胞が感染、出血を防ぐ「橋渡しの」な役割をは果たせば結果的に移植細胞は拒絶されても移植の意味はあるとされた。また臍帯血バンクにHLAが適合し、細胞数が比較的多い臍帯血幹細胞移植

に習熟している東京大学医科学研究所附属病院に転院させた。最も重篤な患者同様皮膚障害、消化管障害等の全身管理が必要であるため、治療に当たっては医科学研究所のみならず、杏林大学及び日本医科大学の医師が協力することになった。

第3例目の患者(C氏)については、自己骨髄の回復が十分可能であり、重篤な皮膚障害や消化管障害が現れる可能性は低く、サイトカイン、無菌室管理等の治療を放医研で行うことになった。同時にこの患者が3人の作業現場の責任者的立場にあったこと等を考慮して、精神科医による精神・心理学的な療法を行うこととした。

6. 緊急被ばく医療ネットワークと他医療機関との協力

6-1 緊急被ばく医療ネットワーク会議

平成9年5月、国の防災基本計画に原子力災害対策編が加えられた。放医研は、「放射線医学総合研究所は、外部専門医療機関との緊急被ばく医療に関する協力のためのネットワークを構築し、このネットワークによる情報交換、研究協力、人的交流を通じて平常時から緊急医療体制の充実を図る。」という記述に基づき、緊急被ばく医療ネットワーク会議を平成10年7月に発足させ、第1回会合を平成11年1月に開催した。また、平成11年7月に第2回会合を開催し、緊急時の医療体制の検討を行った。

今回の事故の際には、事故の連絡直後に、所長から同会議委員長の前川和彦東京大学大学院医科学研究科教授に連絡をしてネットワーク会議の協力を求めた。前川教授は直ちに放医研に来られ、患者の治療に当たられた。事故の翌日の10月1日に同ネットワーク会議を招集し、第1回事故対応臨時拡大会議を放医研で開催した。その際、放医研に搬送された3人の被ばく患者について、被ばく状況、各種測定・検査結果について報告をするとともに、治療方針について助言・協力を得た。様々な医療機関の専門家が集まる会議であり、貴重な情報及び助言が得られた。

10月2日の午前中、ネットワーク会議委員も参加した放医研における臨床会議において、最も重篤の患者について、造血幹細胞移植を行うことが必要であるとの方針が決まり、移植医療及び集中治療が可能である東京大学医学部附属病院に転院させることになった。

また、10月4日の午前中、臨床会議において次に重篤な患者について、臍帯血移植を行うことが決められ、移植医療に習熟している東京大学医科学研究所附属病院に転院させた。治療に当たっては、医科学研究所のみならず、杏林大学及び日本医科大学の医師が協力した。

10月12日には、第2回事故対応臨時拡大会議が開催され、3人の患者の臨床経過が報告されるとともに、放医研で行った線量評価が報告された。また、10月29日には、第3回事故対応臨時拡大会議が開催され、3人の患者の経過報告と今後の治療方針が検討された。この時には、米、露、仏、独からの専門家も参加した。

年が明けて、平成12年1月5日に第4回臨時拡大会議が開催され、また、2月9日に第5回臨時拡大会議が開催され、3人の患者の経過が報告されるとともに、データの公表についての議論が行われた。3月25日、第6回臨時拡大会議が開催され、その際、東京大学医科学研究所で治療を受けている患者の転院について、議論が行われた。

このように、他の医療機関と円滑な協力が可能であったのは、ネットワーク会議を通じた平時における協力関係があったためであると考えられる。第3次医療機関である放医研が、患者を転院させたことについて非難をしている報道も見られたが、放射線単科病院である放医研が、あらゆる集学的治療を行うことは不可能であり、むしろ、他の医療機関に依頼する必要があることからあらかじめネットワーク作りを行っていたのである。

6-2 協力体制：他の医療機関等との協力

放射線による全身被ばくは、一臓器にとどまらない複合障害である。急性放射線症は、数週間以内に現れる全身の症状をいい、線量に応じて骨髄障害、消化管障害、循環器障害、中枢神経障害が重なって現れる。この他にも、一般に急性放射線症に含まれないが皮膚障害と眼障害が現れる。また一定の線量を超えると、数ヶ月後には放射性肺臓炎も現れることも多い。大学病院等の高度専門医療施設であっても一施設で複数の高線量被ばく患者の治療を行うことは困難である。さらに、高線量被ばくという恐怖に対する医学的な療法も必要なこともある。このように高線量被ばく患者の治療を行うためには様々な領域の専門家の協力を必要とする。他の高度専門医療機関が協力することが必要であることを認識し、高度専門医療機関からなるネットワークを構築し医療協力を行った。

東京大学医学部付属病院では救急部を中心に、全病院体制で治療を行い、病棟での医療スタッフの放射線防護や排泄物等は、放医研放射線安全課の指導に基づき管理を行った。また、口腔内の歯冠の放射化による被ばくの可能性と推定被ばく線量は、放医研の研究者と放射線安全課職員が行った。

東京大学医科学研究所付属病院（医科研）では、医科研のスタッフに加えて、ネットワーク構成員である杏林大学医学部および日本医科大学高度救命救急センターのスタッフが皮膚障害の治療および全身管理について医療施設横断的な協力を行った。東京大学付属病院同様に、口腔内の歯冠の放射化による被ばくの可能性と被ばく線量推定は、放医研の研究者と放射線安全課職員が行った。

放医研では、3名の患者を受け入れたときから多くの医療機関から人的ならびに物的な協力をいただいた。モニター等の医療機器は、帝京大学市原病院と千葉県がんセンターの好意により貸して頂いた。看護婦、薬剤師等医師以外の医療スタッフの協力については別の項で述べているので省略する。治療については、無菌室管理を含めた骨髄の治療は日本医科大学第3内科、循環器系の評価は千葉大学第3内科、歯肉炎等の口腔内疾患については東京歯科大学、精神的なケアは千葉大学精神神経科の医師に來所していただき診察・助言を受けた。

6-3 厚生省、文部省等からの協力

9月30日に3人の高線量被ばく患者が放医研に入院したが、放医研はこのような重篤な患者の治療・看護を3人同時に行うような体制になっていなかったため、看護婦及び薬剤師が不足した。辻井放射線障害医療部長（兼治療・診断部長）の要請を受け、松永管理部長及び佐藤庶務課長（当時）が、10月1日、文部省及び厚生省に協力を要請した。

これに対して、両省には極めて迅速かつ好意的に対応していただいた。文部省は、千葉大学医学部附属病院の看護婦を12名、薬剤師1名を派遣することが可能、厚生省からは、東京災害医療センター等から直ちに派遣可能、全体で12名の派遣可能との返答をいただいた。調整の上、厚生省からは、国立病院東京災害医療センターから8名、国立国際医療センターから4名の看護婦を派遣していただいた。また、文部省からは、千葉大学医学部附属病院から4名の看護婦及び1名の薬

剤師を派遣していただいた。身分上は、総理府技官（重粒子治療センター治療・診断部）に併任するという形をとった。

その後、2名の患者がそれぞれ東京大学医学部附属病院及び東京大学医科学研究所附属病院に転院したため、派遣された看護婦等は順次本務に戻っていただいた。

重篤な患者を24時間体制で看護するためには、多くの看護婦が必要である。今回、文部省及び厚生省に迅速に対応していただいたため、十分な看護体制をとることができたと言える。いつ起こるかわからない事故のために、多くのスタッフを平素から用意するのは非効率であるので、いざという時に円滑な協力が可能となるような体制が必要である。

6-4 臍帯血バンクネットワーク

「日本臍帯血バンクネットワーク」は平成11年8月に設立され、全国各地の9つ（北海道、東京、日本赤十字中央血液センター、東海大学、東海、兵庫、中国四国、福岡県赤十字血液センター、神奈川）の臍帯血バンクが共同で5年間で2万個の臍帯血を保存することを目標としており、臍帯血移植に必要なHLA情報の全国一元管理など、移植が公平かつ安全に行われるための事業を行うことを目的としている。これにより移植希望患者の90-95%に臍帯血が提供できると考えられている。現在のところ臍帯血は3,000個余りが保存されている。

臍帯血バンクの業務には以下のものがある。臍帯血の採取、凍結保存、血液学的検査、血液型検査、HLA検査、感染症検査、無菌検査、臍帯血移植の為の患者登録、臍帯血の提供、搬送、各種データの管理、臍帯血バンクおよび臍帯血移植に関する情報提供などである。

ネットワークの設立と共に、これまで全国の各臍帯血バンクごとに管理されていた保存臍帯血の情報（HLA、細胞数及び感染症検査）を共有・管理し、移植を必要としている患者の主治医及び移植医療機関が検索を行えるコンピューターシステムが開発されている。

現在、「日本臍帯血バンクネットワーク」ホームページ上において、「公開検索」で、患者のHLA、体重などを入力するだけで、移植可能な臍帯血を保存しているバンク名と臍帯血の細胞数などの情報を得ることが出来るようになっている。

今回の事故では、患者が放医研に搬送された時点で、重症被ばくが推定されたため、ただちに同バンクにアプローチを開始した。被ばく患者の移植に使われた臍帯血は同様の方法による検索で、東海臍帯血バンクに移植可能な臍帯血が保存されている事が分かり、東京大学医科学研究所付属病院へ搬送され移植された。

7. 医薬品の緊急輸入

我が国では医薬品として認可されていないか、認可されているが大量に必要なものを緊急輸入を行った。

今回の事故では、下記の医薬品の緊急調達を行った。

(1) ペントキシフィリン（商標名トレンタール）

10月2日、放射線障害医療部の鈴木前室長から企画室に微小循環改善剤のペントキシフィリンを入手したいとの相談があった。この薬剤は、既に医薬品としての承認が取り消されており、市場から回収されていた。医薬品会社であるヘキストジャパンが、市場から回収したペントキシフィリン（商品名トレンタール）を保管しているとの情報があり、同社に放医研への譲渡を依頼した。また、科学技術庁を通じて厚生省にも入手及び使用の支援を依頼した。結局、同社の好意、厚生省及び科学技術庁の協力により、トレンタールは同社から放医研に届けられた。

ヘキストジャパンから届けられたトレンタールは経口薬であったが、症状の進行により、経口投与は困難な状況となり、10月8日（金）には注射薬が必要になった。ところが、国内に注射薬のペントキシフィリンはなく、放射線障害医療部の明石室長がヘキストジャパンに照会したところ、タイ及び韓国のヘキスト社現地法人が在庫を保有していることがわかった。本薬剤は、未承認であるため、医師が自分の責任で使用するために輸入するという手続を取る必要があり、ヘキストジャパンに輸入を依頼することができなかった。そのため、放医研がこれらの現地法人に直接連絡をすることになった。明石室長が韓国のヘキスト社現地法人に連絡をとろうとしたが、休日にあたるらしく、連絡を取ることができなかった。次にタイの現地法人に照会したところ、トレンタールの注射薬を保有していることがわかり、譲ることについて問題はないとのことであった。

緊急に必要なため、輸送手段の確保及び輸入手続の迅速化が問題となった。輸送手段については、企画室の菱山総括研究企画官から運輸省に連絡をし、日本航空の経営企画室の方を紹介していただいた。この方に事情を話したところ、日本航空の飛行機で輸送することを快諾していただいた。また、ヘキスト社の現地法人から日本航空の空港カウンターまで輸送をする必要があり、それについては、宇宙開発事業団の武藤バンコク駐在事務所長に依頼したところ、やはり快諾していただいた。

輸入手続については、科学技術庁から大蔵省関税局監視課及び厚生省医薬安全局監視指導課に連絡をし、可能な限り手続を迅速に行っていただいきたいとの要請を行ってもらった。両省から多大な協力をいただき、航空機が到着したら直ちに入手可能なように措置を講じていただいた。結局、10月8日、22時30分バンコク発、翌日6時20分成田着の日本航空718便で運ばれた。受領は医師であることが必要のため、明石室長が早朝成田空港に受け取りに向かった。

薬剤の緊急輸入に関しては、マニュアルがあるわけではなく、手探りをしながら行った。この過程では、厚生省、大蔵省、運輸省、日本航空、科学技術庁、ヘキストのタイ現地法人、宇宙開発事業団等の方々に大変お世話になった。この場を借りて御礼を申し上げたい。また、この事故

の対応について、政府一体となって取り組むという姿勢が明らかにされていたこともあり、大変スムーズに行うことができたと考えられる。

さらに11月には韓国のハンドク製薬株式会社より購入、以後はドイツ国のヘキスト・マリオン・ルーセル社より供与を受けた。こうして入手されたトレンタールは、放医研で患者C氏に投与されたのみならず、東京大学医学部付属病院に転院した患者A氏、東京大学医科学研究所付属病院に転院した患者B氏のためにも放医研から供給された。なお、トレンタールの投与に際しては、患者側からインフォームド・コンセントを取得した。

(2) サイトカイン

① 遺伝子組換え型ヒトGM-CSF(Granulocyte colony Stimulating factor) (Leukcomax)

東京大学医科学研究所チームが、アイルランドのシェーリング・プラウ社より、遺伝子組換え型ヒトGM-CSF(400マイクログラム入りバイアル)を50本輸入し、被ばくによる口内炎の治療のために患者B氏に投与した。使用法は口内を当薬でリンスするというものである。当薬は日本では未認可であるが欧米では既に認可されている。ただし、今回のように経口投与の適応の可否に関しては欧米でも臨床試験中である。

② 遺伝子組換え型ヒトロンボポイエチン (KRN9000)

東京大学医科学研究所チームが、患者の血小板産生刺激のために、キリンビール社より50マイクログラムバイアルを14本緊急調達し、使用した。当薬は現在日本において未認可であり、臨床試験中である。

これ以外にも、東京大学医科学研究所チームは、

- ・ 遺伝子組換え型ヒトIL11 (YM294) (山之内製薬)
- ・ Stem Cell Factor (AMJ-9302) (アムジェン社)

の緊急調達を行ったが、最終的には患者には使用しなかった。この2薬も我が国では未承認であるが、現在臨床試験中である。

8. 治療と経過

今回の事故では、3名の作業員が重症被ばくによる急性放射線症および皮膚障害を発症した。A氏は35歳男性、B氏は39歳男性、C氏は54歳男性で放射線での被ばく線量評価では、それぞれ16～20 GyEq、6～10 GyEq、1～4.5 GyEqの全身被ばくを受けたものと推定された（線量評価の項参照）。臨床的にも事故当日高線量の被ばくが疑われ、国立水戸病院を経て放射線医学総合研究所へ転送され、初期評価、初期治療が開始された。A氏およびB氏は線量に差はあるが両者とも高線量全身被ばくであると同時に局所的にはこれを上回る被ばくがあり、C氏は前者に比べて線量は低いほぼ均等被ばくであった。このことが予後を大きく左右した。特に重症被ばく2症例の治療に当たっては、移植、被ばく後早期よりの腸管粘膜増殖促進因子であるL-グルタミンの経静脈的大量投与、放射線による肺障害の予防のためにペントキシフィリン(国内ではトレンタール)など現時点での最善の治療が施された。一方、高線量被ばくにおける問題点も現れた。両症例とも移植造血幹細胞は生着したが、GVHD（移植片対宿主病）疑い、血球貧食症候群、無効造血などを合併した。重症2症例は不均等被ばくの特徴を示し、皮膚障害や消化管障害の発現時期と障害の程度は被ばく線量と相関した。

文献上、臨界事故で全身被ばくを受けた長期生存例の報告はなく（最長9日間）、1997年ロシア共和国サロフで起きた臨界事故では被ばく後60数時間で死亡している。また臨界事故以外の被ばく事故では⁶⁰Coによる10 Gy被ばく例で113日の長期生存例があるのみである。従って、教科書的には10 Gy以上の被ばく患者の医療内容に関しての記述は極めて乏しく、日々変化する状態に即応する治療を余儀なくされた。今回の重症被ばく患者2例の治療経験から、10 Gy以上の全身被ばく患者には、膨大な人的、物的資源を必要とする集学的で濃厚な集中治療が必要であることが判明した。また、被ばく線量が救命できないと考えられるほど高い場合、どこまで治療を行うかについても議論は残る。高線量被ばくの治療を議論する機会が望まれる。

全身高線量被ばくによる急性放射線症は多臓器障害である。一方、高線量被ばく患者の治療は医学の進歩によって大きく変わりつつある。従来骨髓抑制や皮膚障害が予後を左右する主要因子と考えられていたが、臍帯血移植などの幹細胞移植また皮膚移植により潜在していた因子が顕在化した。即ち、骨髓や皮膚の治療が功を奏したとしても、消化管や肺の障害の治療ができなければ高線量被ばくを克服できたことにはならないである。自己回復の望めない臓器に対しては移植及び再生医学の臨床応用が不可欠である。また、これらの症例の救命には、骨髓機能のより完全な修復、放射線皮膚障害の早期診断と線維化の予防、肺の線維化の予防などに関してより効果的な治療法の導入が不可欠であることが明らかになった。

放医研に転送後の初期の検査では3症例とも被ばく約6時間後の低酸素血症、高アミラーゼ血症を、重症2例は高尿酸血症を呈した。アミラーゼは唾液腺由来であり、放射線による唾液腺障害によると考えられるが低酸素血症および高尿酸血症については原因は不明であり、今後の研究が必要なことも多い。この項では、3名の患者の臨床経過についてすでに公表されたデータを元に概略した。なお詳細なデータは各施設から出される原著論文を待つことにする。

8-1 症例

(1) 症例 A 35歳男性

この症例は、放射線医学総合研究所での初期評価の結果、早期の造血幹細胞移植術の適応と無菌環境下での集中的な全身管理が必要と判断され、被ばく後2日目に東京大学医学部附属病院へ転送された。東大病院では全科を挙げての治療支援体制をとった。被ばく後3日には末梢血リンパ球数は0になった。被ばく後7日目及び8日目にHLA identicalな家族からの末梢血幹細胞移植を施行し、被ばく後17日目の骨髓生検で移植幹細胞の生着が確認された。一方、被ばく直後より連日4,000ml/日以上 of 輸液を必要とし、肺水腫による低酸素血症の進行のため被ばく後10日目に気管内挿管、人工呼吸管理の開始を余儀なくされた。全身の皮膚障害は顕著で、真皮が露出する強い放射線障害のために大量の体液の漏出をみた。消化管では被ばく後26日目に大量の下痢が始まり、これは被ばく後47日目に下血、50日目には上部消化管出血となって最後まで持続した。皮膚からの大量の体液の漏出と大量の消化管出血のために、連日10,000ml/日以上 of 輸液、輸血を要し、きめ細かな体液管理が必要であった。免疫不全状態にあったにも拘わらず、終末期を除き、感染症の合併をほぼ完全に予防できたが、全腸管粘膜の脱落による消化管出血が致死的となった。しかしながら、死亡に至るまで人工呼吸管理を必要としたものの放射線による肺障害は明らかではなかった。呼吸不全、腎不全、肝障害、消化管出血等を併発し被ばく83日目に死亡した。

この症例で問題になったのは、推定線量から予想されるより消化管障害の発症が遅かったことである。従来 of 知見では10Gy以上の被ばくでは、4から5日以後に症状が現れるとされている。上部（4回）及び下部消化管（6回）の内視鏡的観察からは、14日目には上部消化管に粘膜の再生様の所見があり、7週目の検査では粘膜が確認されている。線質による差、即ち詳細は不明であるが中性子による特殊性があるとしても、臨界で発生した γ 線による腹部での被ばく線量は10Gyを超えており、中性子が無くとも消化管障害の早期発症の可能性は高い。消化管滅菌、アミノ酸投与、抹消血幹細胞移植など治療の効果などを含めて今後の検討課題である。

(2) 症例B 39歳男性

推定被ばく線量から重症の骨髓抑制をきたすと予想され、造血幹細胞移植が必要との判断で、第5病日に東京大学医科学研究所附属病院に転院し、その後臍帯血幹細胞移植を受けた。放射線熱傷、集中治療については、東大医科学研究所のチームを中心に急性期の段階から長期にわたり杏林大学の救急医療チームが支援する体制をとった。本症例は症例Aほどの集中治療を必要とはしなかった。被ばく後7日目に末梢血リンパ球数はゼロとなり、被ばく後10日目に臍帯血移植術が行われた。骨髓障害に対しては、これらの造血幹細胞移植術以外に、G-CSF（顆粒球コロニー刺激因子）、GM-CSF（顆粒球・マクロファージコロニー刺激因子）、TPO（トロンボポエチン）、EPO（エリスロポエチン）等のサイトカイン療法が追加された。移植幹細胞は生着したが終始自己の骨髓機能は残存しており、ドナーとレシピエント両者由来の血液が混在するキメラの状態を維持し、被ばく後約2ヶ月後にほぼ100%自己の血液細胞となった。被ばく後153日目にMRSAによる誤嚥性肺炎を併発し急性呼吸不全に陥った。本症例においても被ばく後145日目頃

より消化管出血が始まり、最後まで持続した。一過性のサイトメガロウイルスの活性化も観察された。特に急性期を乗り越えた本症例では、リンパ球の活性化障害やリンパ球サブセットの異常などが観察され、免疫不全状態は持続し、無菌環境下での治療を必要とした。被ばく後194日目には東大病院へ転院した。

放射線熱傷については両手、顔面、両下肢などの紅斑、水泡といった放射性皮膚障害の発現を3週後からみとめ、その後2ヵ月はゆっくりと皮膚所見が増悪し、受傷後70日目には最大67%にII度熱傷相当の皮膚剥離となった。このため、創傷の自己治癒が不可能と判断された部位（両前腕）と両下腿について植皮手術にふみきった。まず80病日目には両前腕のII度15%相当の部分に死体同種皮膚移植を、さらに88病日には両下腿のII度20%相当の部分に自己培養皮膚移植（東海大学救急医学猪口医師より供与）を行った。この2つの皮膚移植は90%以上の生着をみとめ、これにより全身状態は著明に改善した。さらに120病日には顔面の同種培養皮膚移植を行い、1ヶ月後にはほとんどの移植皮膚部は閉鎖した。これらは拒絶反応を受けることなく最後まで生着した。しかし亜急性期に入って、全身の皮膚の強い線維化が顕著となり、強皮症様の所見を呈した。

150病日を越えるころより咽頭腫脹と嚥下困難を生じた。一時期急性呼吸不全は改善したもの、被ばく後200日目頃より呼吸状態は進行性に悪化し、あらゆる治療にも拘わらず不可逆的な低酸素血症が致死的となり、東大病院で211日目に多臓器不全の状態での死亡した。

(3) 症例C 54歳男性

患者C氏は臨界が発生した瞬間は、沈殿槽と薄い壁を隔てた廊下でデスクについており、沈殿槽は視界には入っていなかったが、「青白い光」が機器等に反射したのを見たのとアラームを聞いて、異常を察知した。彼は患者A氏およびB氏が避難した後も現場に約5分間程とどまり、電話連絡を試みたり室内を覗き込んだりしたという。その間向きを変えながら歩行したので、被ばく形態としては比較的均等であったと想像される。

彼は臨界発生から放医研に搬送されるまでの間、ヘリコプター搭乗中に多少の悪心を覚えたが、それ以外には自覚症状はなかった。入院後、リンパ球数の減少、血清アミラーゼ値の上昇、動脈血酸素分圧の低下が見られた。線量評価を行った結果、この患者には骨髄障害が最大の問題点となることが予想されたため、顆粒球コロニー刺激因子の投与を開始、消化管からの感染を予防するための消化管滅菌、予防的な抗ウイルス剤投与、消化管粘膜の再生促進に期待したL-Glutamineの投与、末梢血流改善に期待したペントキシフィリンの投与等を行った。この結果、患者の白血球及び血小板数は、10月20日前後を底に自立的な回復をみせた。この間、10月19日から27日までの間、無菌病室に収容した。また、数回の血小板輸血を要した。重症の感染症、出血等のトラブルは無かった。この他に、一時的な脱毛と、口腔粘膜の脆弱性が観察されたが大事に至ることはなかった。患者はその後着実な回復を見せ、12月20日には放医研を退院した。患者C氏の診察に関しては、千葉大学の眼科医、循環器科医、皮膚科医、糖尿病の専門医、東京歯科大学の歯科医の多大な協力を得た。また、千葉大学の精神科医によるカウンセリングを定期的に行った。

8-2 看護体制

(1) 被ばく患者の看護

重症度の高いA氏とB氏が無菌室に、またC氏は負圧室に搬入された。患者の看護には緊急被ばく医療の知識を持つ看護婦でチームを結成するため、看護体制は緊急被ばく医療マニュアルにもとづき3から2交代制へと変更された。

中性子線の大量被ばくにより体内安定元素の放射化が起きたため、内部汚染に準じた看護が必要とされた。排泄物、検体の保管処理、器械、器具、リネン類、ごみ類の取り扱いには放射線安全課の指示を受けながら実行した。防護の3原則を念頭にフィルムバッジ、ポケット線量計を装着して看護にあたった。救命救急処置と線量評価に必要な検査処置が次々と頻回に行われた。

・ 検査、処置の種類

心電図 胸X-P 採血 動脈血ガス分析 血液培養 CT MRI
骨髄穿刺 輸液ライン確保 IVHライン挿入 バルンカテーテル挿入 導尿
酸素吸入管理 血中酸素濃度測定 中心静脈圧測定 輸液、輸血、
IVHライン管理 管注介助 輸液ポンプ、シリンジポンプ管理
蓄尿検尿（放射線安全課へ提出） 口腔、鼻腔スワブ採取（放射線安全課へ提出）

・ 看護行為

事故当日は、検査、処置の項目にかかっている全ての介助が深夜0時頃まで続いた。

翌日からも同様な検査、処置が継続された。

バイタルサインチェック（1時間毎）重症観察経過表使用

輸血 輸液準備、管理 内服薬準備、介助 滅菌食介助 飲水介助頻回

排尿、排便介助（便潜血反応チェック）

清拭（タオル、バスタオル、検査着は安全課で保管されるため多くの枚数を必要とした。）

リネン交換 室内清掃 滅菌物保管管理

ICUで必要とされる救命救急処置、1時間毎のバイタルサインのチェックと患者の放射線障害症状の観察とそれに対する対応を継続した。特にA氏の下痢症状は強くポータブルトイレの使用も間に合わないためオムツを使用し、排泄の度に清拭を施行した。一方、患者の放射線障害予後への強い不安や家族への強い思い、また頻回に休む間もなく続けられていく検査処置への不満に対しては、説明を繰り返して協力を求め精神的な看護を続けた。家族への電話連絡と面会の手配を行った他、家族への面談、警察の事情聴取への立ち会いも必要であった。

事故当日は医師、検査技師、放射線技師、放射線安全課職員と多くの人の出入りが24時過ぎまで続き、翌朝は6時より所長をはじめとする医師の診察が開始されその介助にあたった。

10月2日15時30分、A氏は造血幹細胞移植のため東大病院へ転院された。

前日のネットワーク会議で応援看護婦の提案があり10月2日準夜勤より第一陣3名が入った。

また、20時30分無菌室の専門業者による消毒のため、B氏を一時負圧室に移動、消毒後の朝3時過ぎに再度無菌室に搬入した。以後は無菌室への入室基準が手術室の手洗いに準じたものとなり、多数の医師や検査技師、放射線技師、看護婦へのガウン着用の介助におわれた。第二陣の応援看護婦は、放射線安全課のオリエンテーションを受けたため、無菌室への到着は、23時過ぎとなった。

10月4日、B氏も臍帯血幹細胞移植が必要とされ東大医科研へ転院された。

当研究所での患者はC氏一人になったが、準無菌管理と多くの検査処置は、ほぼ入院時と同様に継続された。被ばく後3週間後、骨髓機能が最も低下した時には無菌室での看護が必要となり、イソジン浴後に無菌室への入室となった。患者には、専門医師によるカウンセリングが続けられ看護婦はその立ち会いをした。精神的なフォローは患者だけではなく家族へも必要であった。

(2) 勤務体制

上述したように、事故当日より緊急被ばく医療時のマニュアルにもとづき2交代制に変更された。事故当日と翌日の無菌室の看護要員は最低2名は必要であったが、手配がつかずに1名でおこなった。また負圧室の患者の看護は病棟勤務看護婦で対応した。

厚生省を通じて得られた看護婦の支援

国立東京災害医療センター	3名	10月2日～10月5日
日赤東京医療センター	4名	10月3日～10月8日
国立国際医療センター	4名	10月4日～10月8日
千葉大学	4名	10月4日～10月8日

看護婦の支援が得られた後からは、当院の看護婦と支援看護婦とでチームを組み看護にあたった。緊迫した中での2交代制の勤務は看護婦の疲労を増すことになりつつ1週間継続し、その後は通常の3交代制の勤務に変更された。被ばく患者のための看護チームは看護支援の終了後も継続され10月27日に解除された。また10月の夜勤回数は12回～13回となった。

(3) 他病棟患者への対応

10月2日、他の病棟患者の不安緩和のために、治療診断部長と総婦長とで各患者へ状況を説明し、協力をお願いした。また、千葉県看護協会へボランティア看護婦の派遣が依頼され、2名の看護婦の援助が得られ、病棟患者の検査の移送や、患者との会話による精神的援助を担当してもらった。

(4) まとめ

今回の事故は、当初中性子線の大量被ばくによる ^{24}Na を中心とする体内元素の放射化により、内部汚染に準じた看護が必要と考えられたが、それによる医療者側の被ばくは無視できる程度で、基本的には外部被ばく症例として扱うことができた。このため一般病棟での看護ができ、病棟担当の看護婦と協力して看護を継続することができたが、夜勤回数的大幅な増加となった。一方、

厚生省、文部省を中心とする、応援看護婦の支援が得られた事は大きな力となった。

今後は、緊急被ばく医療時に備えた看護婦間のネットワーク作りも必要と思われる。放射線防護に関しては、防護の3原則を念頭に看護を行ったが、放射線防護専門家の適切な指導が得られた事が、速やかな業務の遂行につながった。

被ばく者の看護では、急性放射線症の症状の観察と対応に加え、放射線障害の予後への不安や、事故の原因に苦悩する患者への精神看護が重要な役割をもつ、今後も緊急被ばく医療の三次医療機関としての看護婦の役割が果たせるように全職員の知識、技術の習得が必要である。

8-3 放射線障害

(1) 放射線熱症（皮膚障害、Radiation burns）

放射線による皮膚障害を放射線熱傷（Radiation burns）と呼び、特に全身被ばくの場合、予後を大きく左右する因子である。1986年に起きたChernobyl事故では56名に重症皮膚障害が生じ、そのうち13名は全身の50%以上にも及んでいる。この事故と1987年のゴイアニアでの事故では、 β 線核種による皮膚の浅層、また γ 線核種により深層の複合皮膚障害が生じ、治療がいっそう困難なものとなっている。また、一方では皮膚の厚さの相違により、症状が大きく異なることも明らかにされている。

① 放射線熱傷と熱傷（Thermal burns）

熱によるいわゆる熱傷と放射線熱傷では多くの点で異なる（表8-1）。熱による障害では、直後に痛み・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熱傷では、はじめは痛みがなく、細胞死や組織死が明らかになるのは再生が起きなくなった結果、表皮が脱落してからである。熱傷では、一般に患部の細胞・組織すべてが障害を受けるが、放射線の場合は皮膚を構成する細胞により感受性が異なるため一律ではない。障害の程度は両者とも組織に付与されたエネルギーの総量、付与率、患部面積等による。放射線熱傷と熱傷を比較した場合、同程度の障害を起こすためには、放射線による障害に比べ熱傷は10から100倍ものエネルギーを必要とする。例えば、皮膚表面から1mmの深さに4 Cal/cm²のエネルギーが与えられると、第2度熱傷を起こすが、これは放射線では約30 Gyの γ 線による障害に相当する。30 Gyを熱に換算すると0.0126 Cal/cm²となる。温度が非常に高いと、蛋白質は凝固し、火炎は炭水化物、脂肪、蛋白質を酸化し水を蒸発させるが、放射線が生体に対して与える影響はより非特異的である。放射線による影響は急性ならびに後発性障害とも皮下、真皮組織への障害であるとともに同時に血管への障害につながる。

表8-1 放射線熱傷(Radiation burns)と熱傷(Thermal burns)

	熱 傷	放射線熱傷
症 状 の 現 れ 方	すぐに痛み 激しい炎症反応 患部の細胞死 組織の破壊	はじめは痛みがない (再生が起きなくなって表皮が 脱落する前から)
病 態	細胞・組織すべてが障害 高温による障害	一律でない (細胞により感受性が異なる) 非特異的障害
エ ネ ル ギ ー (第 2 度 熱 傷)	大 (4 Cal/cm ²)	小 (0.0126 Cal/cm ² (29 Gy))

② 放射線熱傷の症状

初発症状は発赤 (Redness) であり、通常は一過性である (表8-2)。およそ2 Svの被ばくから現れる。それに引き続き、組織の腫脹から生じてくる搔痒感、硬直、針で刺した様なあるいは抓った様な感覚が現れることもある。発赤や浮腫は、障害を受けた細胞が、血管を膨張させその結果透過性を亢進させる物質を放出することにより生じる。これらの初期症状が皮膚や血管系の変化の前兆となる。JCO事故の患者も、皮膚にこのような感覚を訴えている。線量によっても異なるが、時間の経過とともに脱毛 (Epilation)、色素沈着(Pigmentation, Radiation lentigo)、落屑(Desquamation)、水泡 (Blistering)、細胞死や表皮の細胞増殖障害によって生じる疼痛性の潰瘍 (Ulceration) が現れる。細胞分裂の盛んな基底細胞層が放射線によって障害を受けることが多いことが以前から指摘されている。

被ばくした部分の血管内皮細胞が障害を受けると、炎症反応は長期化し、内皮細胞は膨潤し、脈管間隙 (Porosity)は増大し、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する。しかしながら、これらの症状は、発赤や浮腫をのぞいて、循環不全による組織の萎縮、治癒不全、組織欠損が生じるまで出てこない。症状に関して十分な情報が得られれば、患部の被ばく線量は推定できるが、局所被ばくの場合患者は、症状が出るまで気づかず、いつ被ばくしたか、どういう線種によるものか、症状の程度、被ばくの時間等が不明なことが多い。

表8-2 放射線による皮膚反応と処置

	第1度	第2度	第3度	第4度
典型的な症状	発赤、脱毛 (軽い紅斑)	強い紅斑	水疱、びらん	潰瘍
線量 (Sv)	3~4以下	6~15	20~25	30以上
発現までの期間	3週間	2週間	1週間	2~7日
持続期間	3~4週間	4~5週間	6~7週間	持続
早期反応	かさかさ	充血、紅斑 腫脹、脱毛	強い紅斑 腫脹、水疱、びらん	深紅の紅斑、水疱 びらん、再生しない潰瘍
後期反応	色素沈着 脱毛は回復	色素沈着 脱毛、落屑	皮脂腺・汗腺の破壊 皮膚萎縮、毛細血管 拡張、潰瘍を作り易い	色素沈着を伴う瘢痕 辺縁部の毛細血管拡張 中央部難治性潰瘍
処置	保存的処置	保存的処置、対症療法	第3度熱傷に準じる	植皮、形成外科的処置

③ 放射線の線質による障害の相違

α 線の場合、角質層が基底層を保護する。例えば、プルトニウムの α 線は軟部組織における到達距離が約0.04 mmのため表皮の基底細胞層には達しない。しかしながら α 放射体による汚染が経皮的に吸収される可能性と娘核種による β 、 γ 放射体による被ばくの可能性があるために無視する事はできない。皮膚から転嫁されやすい α 放射体による汚染がある場合は摂取や吸入の危険性もある。 β 線では組織の厚さが1 mm程度の場合、ほとんどの β 線は低減するので、表面の β 線汚染から皮下組織へ到達する線量は少ないが、基底層の障害を起こす。これが β 線熱傷でChernobyl事故でみられている。

これに対して、透過性の放射線と言われるX線、 γ 線、中性子線による障害は、皮膚、皮下組織、筋肉、時には骨にも達する。このため筋の損傷によるミオグロビン血症が起きることがある。エネルギーの高い β 、X、 γ 線により高線量（数Gy以上）で皮膚が被ばくすると真皮の毛細血管に障害が残る。

④ 放射線被ばく後の皮膚循環

放射線、特に透過性放射線に被ばくすると、様々な原因により局所の血流は障害される。組織の浮腫による毛細血管の圧迫、血管を収縮させる化学物質の放出、そして時間とともに障害された細胞もしくは増殖細胞による血管の閉塞などにより血流は阻害される。さらに、血流は温度による影響を受けやすく、低温により減少する。また低温はシャント形成を促進し、本来栄養している皮膚表面から血流を減少させる。さらに、血流は心配、ストレスによっても減少するが、これは交感神経系によりエピネフリンが放出され皮膚の血管が収縮するためである。被ばくした部位の循環は喫煙（ニコチンは血管収縮を起こす）や糖尿病、ある種の貧血（鎌状赤血球症）、末梢血管の病気によっても左右される。

⑤ 治療

被ばく部位の微小血管の障害を最小限にする治療は確立されていない。現在感染予防や栄養状態をよくするなど治癒を促進する他に、様々な試みがされている。高圧酸素療法もその一つである。外から圧力をかけると、血管は収縮を起こし表在組織の血流は減少するが、血中の酸素運搬量は増加する。これには赤血球のヘモグロビンばかりでなく、血漿中に物理的に溶解して酸素が運搬される事も関係している。高圧酸素療法は、組織の酸素化を促進するが、微小循環の血流は改善されない。急性障害には効果はなく、後発性に起きる組織の壊死には効果があるという報告もある。また、Chernobyl事故では皮膚移植が行われ、JCO事故でも死体からの皮膚移植、被ばく者の細胞を用いた培養皮膚移植など新しい治療法が試みられている。

不安、交感神経などエピネフリンの分泌を促進するストレスは、血管平滑筋を収縮させ血管内腔を狭小化させる。したがって外科的もしくは薬物等による交感神経ブロックが有効であるとの報告もあるが、そうで無いというものもあり、評価は一定しない。

薬剤では、Cyclooxygenase阻害剤であるアスピリンは、血管収縮を起こすThromboxaneの産生を減らす。動物実験からAngiotensin converting enzyme阻害剤は、腎臓や肺の血管壁で放射線被ばく後に起きる細胞増殖を抑えられている。被ばく症例の多いロシアを中心に使用されているPentoxifylline (Trental)は、赤血球が狭小化した血管内腔を通過し易くすると言われている。

熱傷とは異なり、通常症状が出るまでに時間を要する事は前述の通りである。被ばく線量が多い場合、早くから血管防護対策をとることが必要である。

参考文献

Health Physics. 72(3):343-348;1997

Management of Accidentally Contaminated with Radionuclides

NCRP Report No.65;1993

(2) 造血幹細胞移植

今日一般的に行われている造血幹細胞移植には、骨髄移植、末梢血幹細胞移植、臍帯血移植の3法がある。骨髄移植は、ドナーの骨髄液を採取してレシピエントに静注するもので、古くから行われてきた実績があるため、この中では最も確立された方法であるといえる。しかしながら、骨髄採取の際、全身麻酔を必要とするなどドナーへの侵襲が大きいことが難点である。末梢血幹細胞移植はより新しい方法で、ドナーに造血刺激因子であるG-CSF（顆粒球コロニー刺激因子）を数日間にわたって投与することにより末梢血中に造血幹細胞を動員し、しかる後に末梢血中の造血幹細胞を多く含む分画を採取して、これをレシピエントに静注するという方法である。骨髄移植に比べて、最終的にレシピエントに投与される造血幹細胞の数が多く、移植片の生着までの期間が短い、ドナーへの侵襲が一見小さいといった優位性を持つが、G-CSF投与の際ドナーが経験する骨痛をはじめとする副作用が難点であるといえる。臍帯血幹細胞移植も新しい方法で、出産後に臍帯血を採取しこれをHLAタイピングした後に保存して臍帯血バンクを作っておき、患

者のHLAと適合するものを随時選り出して静注するという方法である。臍帯血は高頻度で造血幹細胞を含むことが知られている。この方法には、ドナーがいわば出産の数だけ存在するため豊富である、移植片対宿主病（GVHD）が軽い、という優位性があるが、一方でレシピエントに投与される造血幹細胞の総数が概して少ない、生着までの期間が長い、ドナーの病歴が不明である、臍帯血バンクの設立と維持に大きな経費がかかるといった難点がある。また臍帯血の取り扱いには倫理上の制約がある場合もある。これらの方法の中から、ドナーが存在するかどうか、また医療施設の方針等を勘案して、造血幹細胞移植の方法は選ばれる。

一般的な造血幹細胞移植と放射線事故後のそれとでは、決定的な相違点が幾つかある。まず、通常の移植の際には前処置として免疫抑制剤の投与および全身照射を行う。これに対して放射線事故の際には、免疫抑制剤をどのように使用すべきかについての明確なコンセンサスはない。全身照射は当然行うことができない。事故による全身被ばくは、計画被ばくと異なり必ず不均等性を持っており、高度の骨髄障害を呈するような症例においてさえ一部の造血巣は残っている可能性が高い。したがって、GVHDの程度に予想し得ない部分があり、また移植片が拒絶される可能性も高い。さらに、患者は放射線による骨髄以外の臓器不全を起こしてくる可能性が高い。

このため、造血幹細胞移植を必要とする程の高線量を被ばくした患者は骨髄以外の臓器不全で死亡することが多く、移植では患者を救命できないという見解も専門家の間には存在する。

過去の幾つかの放射線事故において、その犠牲者に対して造血幹細胞移植が行われた。1957年ピッツバーグで起こった加速器の事故では、患者の一卵性双生児である兄弟からの骨髄移植が行われ、患者は生存した。しかしこの場合、移植片が生着したという証拠はない。1986年のチェルノブイリの事故では、13人が骨髄移植を、5人が胎児肝細胞移植を受けたが、これらのうち生存したのは、移植片を拒絶した2名のみであった。

このように、我々が知る限りにおいて、放射線事故の犠牲者に何らかの造血幹細胞移植を行い、それが生着したことが明確に示され、さらに患者が生存したという報告は歴史的に存在しない。しかしながらそれらの報告は全般的に古く、その移植の手技も、胎児肝細胞移植か同種異型骨髄移植で、また緊急性ゆえか主要組織適合抗原のマッチングも充分ではない例が多い。

IAEA Safety Reports Series No. 2 (1998) のなかでは、放射線被ばく患者について骨髄移植の有用性は限られており、8-12Gyの均等な被ばく例で、かつ重症の皮膚障害、重症の内部汚染、他の合併症がない例についてのみ骨髄移植が考慮されるべきであろうとの見解が述べられている。他の移植方法についてのコメントはない。すなわち総合的には、移植医療の進歩のスピードをも考え合わせると、最新の方法をもって行う骨髄幹細胞移植が放射線事故後に有効かどうかについてのコンセンサスは存在しない。また、移植を行う際は、拒絶の可能性を想定し、患者自身の骨髄が回復するまでの間その免疫をサポートして、消化管障害、皮膚障害を患者が切りぬける可能性を高くすることを一義的な目的とした橋渡しのものになることも想定される。

(3) 消化管障害

全身または腹部の高線量被ばくにより、数日から2週の間、消化管症状をきたす。ヒトにお

いて消化管障害が発生する線量域は、6-10 Gy以上と考えられており、前駆期に続き食思不振による経口摂取減少または不能、下痢、麻痺性腸閉塞とそれに基づく嘔気・嘔吐や腹部膨満と腸吸収減退、脱水、電解質平衡失調をきたし、重症化すると急性腎不全や循環不全も合併しうる。また、より低線量にて発症する骨髓症候群の併存により易出血性・易感染性を呈し、これらの制御が不良の場合は消化管出血や敗血症に移行し、致命的となる。

消化管症状は、消化管の上皮細胞の減少による。これは腸粘膜腺窩（クリプト）の幹細胞が高線量の被ばくにより再生能を喪失することによって細胞の潤渇が生じた結果起こる。すなわち正常状態で持続的に行われている新しい成熟細胞の絨毛への供給が途絶えるためである。腸絨毛での上皮細胞の停留時間は3-4日程度で、幹細胞からの補充がなくなれば3-4日目以降に上皮細胞減少をきたし、症状が出現する。過去の経験から、10 Gy以上で4日目以降、6-10 Gyでは約7日目以降に発症するものと考えられている。

Bergonie-Tribondeauの法則により、細胞分裂の頻度が高いほどその細胞の放射線感受性が高い。消化管粘膜においては腺窩の幹細胞が最も多く分裂を起こしており、同部位が高感受性といえる。再生能喪失の程度は線量に依存する。過去のサルの剖検例（15 Gy以上）では、高度の粘膜萎縮を伴った胃及び結腸の潰瘍が最も顕著な所見であったと報告されている。

消化管障害に対する治療は、骨髓症候群の治療と並行して行う。無菌室管理下、完全非経口的栄養（中心静脈栄養、エレメンタリーダイエット等）とし、広域スペクトルの抗生物質、抗真菌剤、抗ウィルス剤、サイトカイン投与、造血幹細胞移植、成分輸血や代謝の補正も必要に応じて行う。動物実験では6 Gy以上の被ばくにて消化管から体内へ細菌移行が発生するといわれ、ヒトにおいても6 Gy以上の被ばく患者には早期より選択的消化管除菌を行う必要がある。また消化管粘膜再生の促進にL-グルタミンの大量投与も有効とされる。しかしながら、現状では8 Gy以上の被ばくでは長期的予後は極めて不良である。これは消化管障害が単独の死因というよりも、出血・感染等の複数の因子が関わりより全身状態が重篤化することによる。また、他臓器の障害も多く合併し、消化管障害の急性期を脱した場合でも、後発する肺障害が8 Gy以上では頻度が高く、重大な死因となる。

文献

1) 放射線事故の緊急医療 -RI使用施設から原発サイト-

2) 放射線の線源、影響及びリスク（1990年3月）

3) REAC/TS,

HANDLING OF RADIATION ACCIDENTS BY EMERGENCY PERSONELL

(REFERENCE MANUAL)

4) 緊急被ばく医療の基礎知識（2000年8月）

(4) 精神・心理的側面

① 被ばく事故の犠牲者であること

被ばく事故の犠牲者がおかれる環境を考察すると、幾つかの点で極めて特異である。まず今回のような事業所内での事故では、患者たちは事故発生について当事者であると同時に、唯一の被ばくの犠牲者であるという、社会的に難しい立場に立つことになる。また、患者は事故に対する社会的な関心の影響に曝され、それが被ばく自体よりも患者にとって大きな問題となることがある。つまり患者は放射線以外の要因で苦しむのである。具体的には患者のもとには非常に多数の医師、関係者が訪れ、面会を求めて来よう。結果的に患者は毎日のように楽しからぬ面会を半ば強いられることになる。また、一部のマスコミ関係者の行き過ぎた行動や、事故についての初期の報道に少なくない不正確なもの、感情的なものによる無意味なストレスから患者をいかに守るかということも大きな問題点である。

このような状況の特殊性による極度のストレスに加え、自らの病状の把握についても、急性放射線症の特殊性ゆえに、医師からの説明をもってしても合理的な理解をすることは極めて困難であると予想される。したがって、急速に進行する病状とそれに応じて劇的に変化する周囲の環境に対する不安と恐怖を軽減するためには十分な配慮と方策が必要となろう。具体的には、担当医との信頼関係を築いた上で、不可欠なもの以外の面会の制限、メディアからの隔離などを行うのもオプションである。また、精神科医による助言ないしは直接の診察を求めることも重要であろう。

② 放射線による精神・神経症状

神経系の細胞は、放射線に対する感受性が最も低いものの一つである。教科書的には、20-30Gy以上の被ばく線量で、直後から激しい前駆症状を呈するとともに感情鈍麻、失眠、傾眠、興奮、振せん、痙攣、歩行障害等の様々なレベルの精神・神経症状を呈し、循環虚脱も伴って早期に死亡するとされている。この見解は主として1950年代および60年代の数例の臨界事故に拠っているが、神経症状を呈した例でも病理学的には神経系組織に明らかな異常が認められなかったことなどから、病因論的にはこれらの精神神経症状は、むしろ全身的な循環不全と浮腫による2次的なものと考えられている。動物実験においては、さらに高い線量において、放射線が直接、中枢神経系に障害を与えることが知られているが、ヒトの事故例ではそれ程までの被ばくの記載はない。唯一、広島・長崎の原子爆弾投下時に爆心地付近で被ばくした犠牲者の中にはそのような例があった可能性はある。

9. 医療施設における放射線防護

(1) 施設内の測定

放医研に搬送された3名の被ばく者については、緊急被ばく医療施設において再度全身及び持込品の放射線測定（ α ・ β ・ γ 線）を実施したのち、重粒子治療センター内の無菌病室に収容された。また被ばく者の吐物、排泄物、使用した資機材及び緊急医療に従事した作業員（放医研職員、付添者、国立水戸病院の医師、千葉県消防局の職員）の放射線測定についても同様に実施した。

無菌病室については前室廊下のドアにおいて立入り制限を行うこととし、エリア管理を行った。

担当医、看護婦及び関係者（家族等を含む）の放射線被ばく等を考慮し、①患者の体表面付近（布団の上）②病室内③前室、準備室及び廊下④エリア境界付近においてそれぞれシンチレーションサーベイメータによる放射線測定を実施した（図9-1）。また、エリア入口にはサイベイメータの他ポケット線量計を配備し、立入の際携行することとし、被ばく線量の把握に努めた（図9-2）。なお、病室及びその周辺においてもTLDによる積算線量も測定した（図9-3）。

病室から発生する医療廃棄物、リネン類（シーツ、カバー、パジャマ等）及び排泄物等については、その都度回収・放射線測定し、緊急被ばく医療施設において一時保管した。また、排泄物等については変質等を考慮し、内部被ばく実験棟冷凍実験室において一時保管とした。

(2) 血液・排泄物及び廃棄物等の管理

患者の放医研までの搬送中に発生した吐物、排泄物及び入院・治療中に発生した排泄物等については、被ばく線量の推定等を含め長期にわたって試料として使用する事が考えられたため、内部被ばく実験棟冷凍実験室に一時保管することとした。

今回は長期間の観察が必要なことから、冷凍保存することとなった。患者さん3名の排泄物（し尿で数L／日／人）は基本的には1日毎（1人で数回の場合がある）、各人ごとに分類して収納した。

約1ヶ月を経過した時点で、集積された試料は、①医療用廃棄物・約1.5m³ ②安全管理用廃棄物・約3.0m³ ③リネン類・約1.5m³ 排泄物類・約3.0m³となった。

今回の反省から、患者が多くなり廃棄物の保管期間が長期に及ぶ場合、発生物の減容化、収納方法の効率化を計ったとしても保管スペースの確保は十分に行わなければならない。

東大病院及び医科学研究所に患者が転院する際には放射線安全課員が同行し、関係者（医師、看護婦等）に対し、サーベイメータ、ポケット線量計の貸与、取扱い及び実用的な測定方法等の説明を行った。血液・排泄物の取扱い方法についても核医学関係の廃棄物と同様に取扱う（実際には後日、試料として使用のため、冷凍保存）べく打合せを行った。

立入者測定記録

着用者氏名	着用年月日	着用時間	返却年月日	返却時間	線量当量(μSv)	PDNo.
A	10月1日	17:00	10月2日	10:20	4	R-5
B	10月2日	8:30	10月2日	16:30	0	R-10
C	10月2日	9:00	10月3日	3:00	0	R-8
D	10月2日	10:00	10月2日	21:00	0	R-7
E	10月2日	17:25	10月2日	20:50	0	R-6
F	10月2日	17:25	10月3日	3:55	0	R-4
G	10月2日	17:25	10月3日	3:55	0	R-3
H	10月2日	17:25	10月3日	3:55	0	R-5
I	10月2日	17:30	10月3日	10:30	0	P-61
J	10月2日	17:30	10月3日	9:30	0	R-2
K	10月2日	20:15	10月2日	20:45	記録なし	R-9
L	10月2日	20:15	10月2日	20:45	記録なし	P-63
M	10月3日	8:00	10月3日	18:00	3	R-3
N	10月3日	8:30	10月3日	18:45	0	R-2
O	10月3日	8:30	10月3日	17:30	1	R-9
P	10月3日	8:35	10月3日	17:35	0	P-63
E	10月3日	8:35	10月3日	19:30	0	R-5
Q	10月3日	8:40	10月3日	17:50	0	P-62
R	10月3日	8:41	10月3日	17:50	0	P-64
S	10月3日	9:55	10月3日	17:5	0	P-67
T	10月3日	9:55	10月3日	17:35	記録なし	P-66
U	10月3日	9:55	10月3日	17:35	0	P-65
D	10月3日	10:00	10月4日	2:00	1	R-1
V	10月3日	10:45	10月3日	17:30	記録なし	P-68
H	10月3日	17:15	10月4日	2:45	0	R-7
G	10月3日	17:20	10月4日	2:45	0	R-3
W	10月3日	18:00	10月4日	9:00	1	P-70
X	10月3日	18:45	10月4日	10:00	0	P-61
T	10月4日	0:30	10月4日	9:45	0	P-65
P	10月4日	1:30	10月4日	10:18	0	P-62
S	10月4日	8:45	10月4日	18:00	0	P-61
R	10月4日	9:30	10月4日	18:00	0	P-61
Y	10月4日	10:47	10月4日	18:00	0	P-62
Z	10月4日	10:47	10月4日	18:00	0	P-63
E	10月4日	16:30	10月4日	20:00	0	R-3
A2	10月4日	20:00	10月5日	8:45	記録なし	P-62
R	10月5日	2:30	10月5日	8:45	記録なし	P-61
Y	10月5日	9:30	10月5日	18:50	0	P-61
P	10月5日	17:53	10月6日	1:20	0	P-62
Z	10月5日	17:55	10月6日	1:20	0	P-63
Y	10月6日	0:30	10月6日	9:00	0	P-61
T	10月6日	9:05	10月6日	17:00	0	R-10
B2	10月6日	9:05	10月6日	17:00	1	R-5
S	10月6日	17:00	10月7日	0:50	0	P-61
R	10月6日	17:00	10月7日	0:50	0	P-62
S	10月7日	9:50	10月7日	18:00	0	P-61
V	10月7日	9:50	10月7日	18:30	記録なし	P-62
Y	10月7日	18:45	10月8日	1:00	0	P-63
P	10月8日	1:00	10月8日	9:00	0	P-63

図9-2

TLD測定記録

測定日：平成11年10月01日（金） 無菌病室にて

注）TLDについては患者自身での装着が不可能であったため、
布団の上から装着した。
なお、布団についても測定時間中必ず掛けていたわけではない。

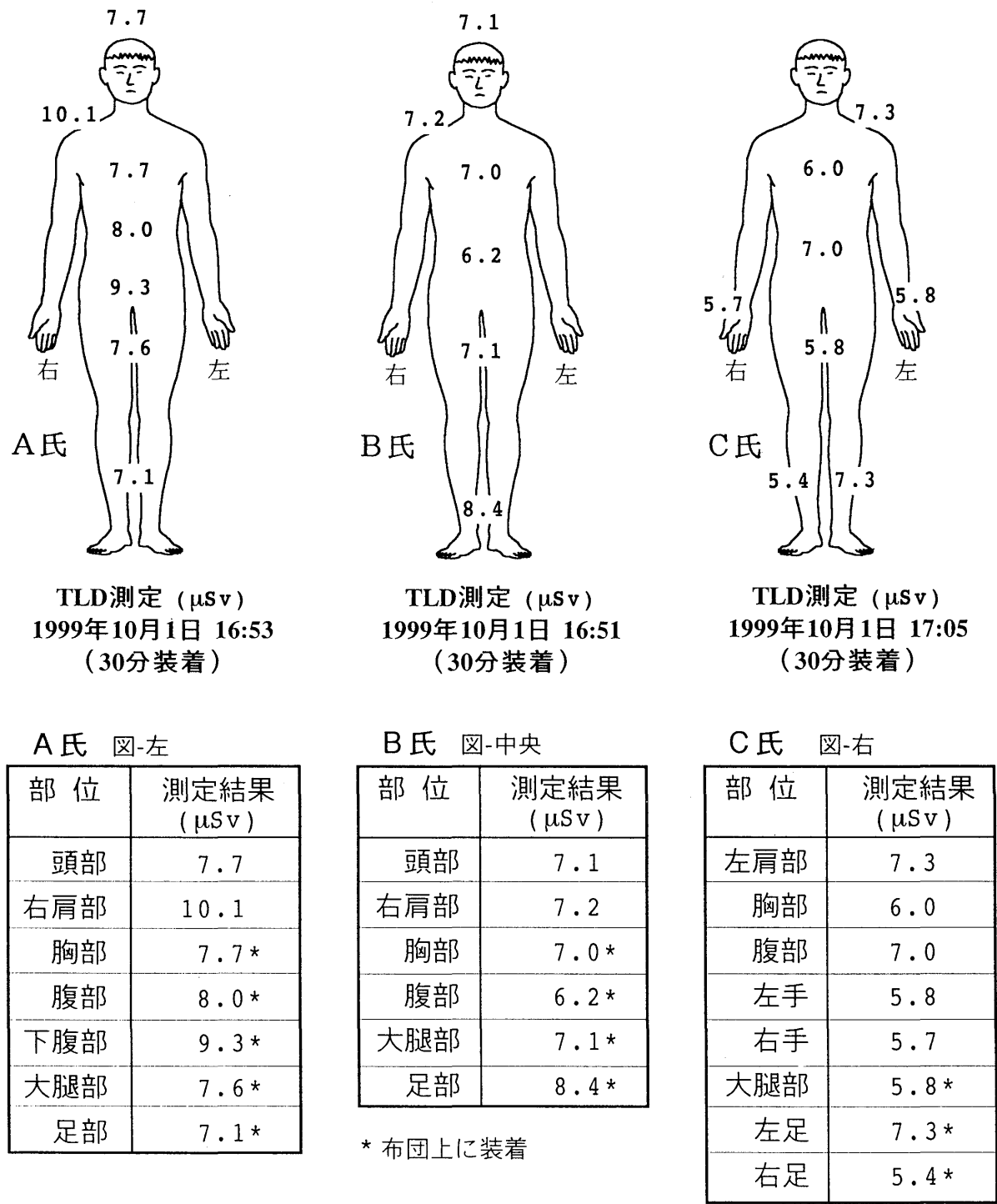


図9- 3

10. ウラン加工工場周辺住民への対応

今回の事故の特徴の一つは、事故を起こしたJCOの職員だけでなく、周辺の住民の被ばくがあったことである。原子力施設の外に放射線が及び公衆の被ばくがあったということは極めて重大なことである。このような放射線の影響については、健康管理検討委員会の報告書によると、「① 確定的影響については、影響が発生する線量レベルではない。② 確率的影響については、放射線が原因となる影響の発生の可能性は極めて小さく、影響を検出することはできない。」とされている¹⁾。とはいえ、住民にとっては、浴びる必要のない放射線に被ばくしたのであり、多くの方が大小の不安を持った。住民の行動調査に携わった研究者から、子どもを持つ住民は心配を抱え、自らに罪悪感を持つような方もいたとの報告があった。

このような事態に対し、高線量被ばく患者の対応に追われ必ずしも十分でなかったが、放医研としても東海村などの地元へ様々な協力を行った。高線量の被ばくをした患者の医療だけでなく、広く住民の健康問題にも関わることになった。放射線障害医療部だけでなく、他の部署の研究者も様々な形で関与したが、住民の健康問題への対処は、防災訓練においても想定していなかったもので、試行錯誤で行わざるを得なかった。また、長期に亘る活動であり、必ずしも放射線による障害とも言えず、所内の協力体制についても検討を要する課題である。

¹⁾ 健康管理検討委員会報告p35、平成12年3月27日、原子力安全委員会健康管理検討委員会

10-1 東海村村長への医療顧問の派遣

東海村長の医療顧問として村田重粒子治療センター長が10月8日東海村へ派遣された。臨界事故から1週間が過ぎ、やや落ち着きを取り戻してはいたものの村役場に設置された「JCO事故対策本部」には本部長の村上村長をはじめ担当職員が、まだ詰め切りの状態が続いていた。直ちに村上村長、大野科技庁安全管理官、センター長でその後の方針を打ち合わせたが、この時点では、周辺住民などの被ばく線量がまだ明確でなく、また10月2～4日に茨城県が行った健康診断の結果も発表されていない状態で、村当局の最大の懸念は臨界事故による周辺住民の健康への影響の有無と、住民の精神的な動揺の鎮静化であった。これに関しての村側の放医研に対する期待は大きかった。

とりあえず、下記の2件を村長に提案して合意を得た。

(1) 放医研の専門家による「周辺住民の健康に関する説明会」

(10月18日東海村文化センターにおいて、河内研究総務官(当時) 及び明石放射線障害医療部室長により行われた。後述)

(2) 住民の健康不安解消のための放医研医師による「健康相談所の開設」

(10月19日から12月21日まで村役場で週2回、計17回実施された。放射線障害医療部医師の他に、高度診断機能研究ステーションや放医研OB医師の協力を得た。(後述)

事故現場から半径500メートル以内の住民など約1,800名について茨城県が行なったリンパ球数などの血液検査の結果が10月12日に発表され、「放射線障害の疑いのある人はいなかった。」とさ

れた。これと前後して県から東海村長へ健診結果が正式に通知されたが、このような場に立会い、データについて医学的見解を述べるのも医療顧問に求められた重要な仕事であった。

その後、体内 ^{24}Na 放射能から推定した周辺の一般作業者、東海村消防署員などの外部被ばく線量も明らかになり、住民健康への影響はほとんどないと考えられるに至ったが、医師による健康相談によっても住民の不安はすぐにはおさまらなかった。

センター長の東海村出張は12月21日までの間に計8回に及んだ。

10-2 東海村説明会

10月8日から村上東海村長の医療顧問を務めていた村田重粒子線治療センター長を通じ、東海村主催で「周辺住民への健康に関する説明会」を開催したいので、放医研から講師を派遣して欲しいとの依頼があった。これを受け、放医研は河内研究総務官(当時)及び明石放射線障害診療・情報室長を講師として派遣することにした。

平成11年10月18日(月)午後2時から5時まで、東海村文化センターにおいて説明会が開催された。河内研究総務官は、放射線の種類と性質、放射線と放射能を表す単位、放射線の半減期と影響等を説明した。また、明石室長は、放射線による急性障害、被ばく線量の測定方法、放射線被ばくの影響等を説明した。その後、質疑応答があった。

東海村は、出席できない村民のために、この説明会の様子のビデオ撮影をして、ビデオテープを希望者に貸し出している。また、村の広報誌に説明概要を掲載している。このように、住民の視線に立って、ビデオや広報誌を作成するということができるのは、住民に密着した行政を行っている村ならではのことである。

平成11年11月13日(土)には那珂町において、14日(日)には東海村において、科学技術庁主催の説明会が開催された。その際、放射線の種類と性質については河内研究総務官が、放射線の健康影響については明石室長が説明を行った。この説明会は、科学技術庁が線量評価結果と今後の取組みを説明するために開催されたものであり、放医研は専門家としての講演を科学技術庁から依頼された。この説明会の後には健康相談が開催され、明石室長及び平間主任研究官が対応した。

10-3 東海村における健康相談

(1) 東海村主催の健康相談窓口への協力

放医研は、東海村における健康相談にいろいろな形で関わってきた。まず、最初の健康相談は、東海村が開設する相談に放医研が協力するという形で、10月19日から毎週火曜日及び木曜日に行われた。この相談には当初、高度画像機能研究ステーションの棚田ステーション長、池平主任研究官、須原主任研究官及び渡邊研究官が交代であたった。途中からは、放医研OBの中尾先生及び館野先生にもお願いをした。また、放射線障害医療部の田野崎主任研究官、黒岩研究員も窓口派遣された。

この健康相談窓口は、最初の数回は希望者が多く、相談に当たった医師は大変であった。しかし、その後は、予想していたよりは相談者は少なく、1日に1人か2人ということもあった。相談

の内容としては、説明会で多人数の前で質問をすることができない住民が持つ不安と不信をぶつけられた。放射線の健康影響の問題というよりも、不安を受け止められる精神科の医師やカウンセラーの方が担当することがふさわしいケースが多々あったとのことである。

(2) 電話相談窓口

11月4日に周辺住民の線量評価が科学技術庁からプレスに発表された。これに対して、東海村役場内に電話相談窓口を設置するので、相談対応者として医師1名と放射線人体影響の知識を有する研究者1名を放医研から出すよう科技庁から依頼が来た。入院中の患者の治療、健康相談窓口への協力などで、医師をさくのは結構難しかったが、緊急事態であるというので放射線障害医療部の医師を交代で出すことにした。また、放射線の人体影響がわかって、相談に当たることができる研究者が放医研にどのくらいいるかもよくわからなかった。一般の方からの相談を受けたことのある研究者はほとんどいなかったと思われる。医師として、放射線障害医療部の平間主任研究官、黒岩教和研究官、中川研究官を交代で現地に送ることにした。また、研究者としては、放射線障害医療部の蜂谷主任研究官、人間環境研究部の湯川主任研究官を送ることにした。

電話相談と当初は言われていたが、窓口を訪問する住民も多かったとのことである。相談している部屋に報道関係者が入り込み、相談の様子の写真を撮ったり、相談内容を書いた質問・連絡票の写真を撮ったりして、かなり混乱していたとのことである。相談者のプライバシーについての配慮が十分とは言えず、報道関係者への対応がきちんとされていなかったという報告があった。このような問題は当初にあったことであり、その後終息した。

12月に行われた住民行動調査に基づいて住民の被ばく線量が計算されたが、平成12年1月29日及び30日にその結果が放医研の研究者から各住民に個別に説明された。そのフォローアップとして、1月31日から放医研の職員を電話相談窓口に派遣して欲しいとの科技庁からの依頼があった。本所及び那珂湊支所から研究者を派遣したが、予想に反し、住民からの相談は少なかった。

(3) 茨城県における健康診断への対応

原子力安全委員会の下健康管理検討委員会報告書に基づき、科技庁の依頼で茨城県が健康診断を平成12年5月13日（土）、14日（日）及び21日（日）に行った。これに先立ち、まず、健康相談が、4月25日（火）、26日（水）及び27日（木）に行われた。これに対しては、放射線障害医療部から、明石室長、平間主任研究官、黒岩研究員、中川研究員が、第3研究グループから荻生総合研究官が、高度画像機能研究ステーションから渡邊研究員が参加した。また、健康診断当日にも健康相談窓口を開設するというので、放射線障害医療部から、平間主任研究官、黒岩研究員、中川研究員が参加した。

住民の健康診断は今後も継続されるので、今後とも放医研の協力が求められると考えられる。

10-4 ひたちなか市対応

- (1) 10月1日(金)にひたちなか市より、住民に対する放射能測定に協力要請があり、那珂湊放射生態学研究センターより、10月1日(金)6名、10月2日(土)8名、10月3日(日)8名が出動、サーベイメ

ーターによるスクリーニングを行った。

(2) ひたちなか市より、地元の水産物について、放射能測定の一任があり、10月1日と10月4日に採取された試料を分析し、「ひたちなか市磯崎および平磯における海藻と貝類中のセシウム-137放射能濃度について」と題する報告書を11月12日に市企画部へ提出した。

(3) 1月24日、市議会総務委員会が来所し、視察見学の後、懇談し、放医研の環境放射能に関する研究業務について理解を深めていただいた。

10-5 住民行動調査

科学技術庁よりウラン加工工場周辺住民等の線量評価の一任を受け、行動調査票の作成、線量計算方法の検討、調査協力依頼文書の作成など実施方法を検討し、科技庁、放医研、茨城県、東海村、那珂町が合同の実施母体となって11月19日(金)と20日(土)に行動調査を行うこととなった。この行動調査予定は11月4日に科学技術庁でプレス発表がなされた。この線量推定に当たっては、原子力安全委員会健康管理検討委員会の助言を踏まえて、東海村及び那珂町の避難要請区域内の48世帯の住民及び18事業所に9月30日に勤務していた人々265名を対象に行動調査を実施した。放医研からは人間環境研究部の13名、放射線科学研究部の4名、医用重粒子物理・工学研究部の4名、那珂湊放射生態学研究センターの4名、第4研究グループの3名、計28名が調査員として参加し、2人一組で茨城県からの保健婦と共に調査を行った。また、事業所への調査に対しては労働基準局の方に付き添っていただいた。放医研では調査に先立ち、調査員に調査票の書き方と住民への説明内容について二度の説明会を開いた。また、住民の方々へは調査協力依頼文書を11月15日に郵送した。

2日間の調査により那珂町の全対象者、東海村の5名を除く全対象者、全対象事業所を調べることができた。東海村の2日間で調査できなかった5名は11月21日(日)22日(月)に那珂湊センターの方々に調査を行ってもらった。また調査もれになった事業所の一部の方については後日電話による聞き取り調査を行った。この結果、対象住民の全ての行動調査を終えることが出来た。

今回の調査では行動調査のみならず、住民の心のケアにも注意を払い、現時点で推定される線量、それからもたらされる放射線のリスク、そのリスクの大きさについて時間をかけて説明を行い、また住民の質問や、心配事についても親身になって相談にのるように心がけた。従って一世帯の訪問時間には1～2時間を要した。住民の反応は1、2の例外を除いてはほとんどは大変好意的で、新聞報道記事にもあるように、専門家の丁寧な説明を受けて安心することができたというものであった。

プレス対応等に接した一部の方々を除いて調査員各員も今回の調査を通して、住民への懇切丁寧な説明の必要性を実感すると共に、住民の反応に大変満足感を得ることができたものと考えている。

今回の心のケアも踏まえた行動調査は放医研の存在意義を大いに示したものと感じている。

以下に行動調査に基づいた線量評価について記述する。

(1) 対象者：

区 分	行動調査実施世帯・事業所	行動調査実施者	事故後20時間内に1km以内に居なかった人(人)	線量推定の対象者(人)	備 考
東 海 村	39世帯 (43世帯)	138 (152)	48 (-)	89* (-)	事業所重複分を除く (事業所重複分を含む)
那 珂 町	9世帯	34	10	24	
事 業 所	18事業所	93	調査対象から除外	86*	
合 計	—	265	58	199*	

* 後日、防災関係者として線量評価された1名および避難要請区域内の事業所に勤務する者のうち、ホールボディカウンタの測定により線量が評価されている7名については、線量推定の対象者から除外している。

(2) 線量評価に使用した項目

◆ 場の線量

JCO転換試験棟内沈殿槽からの30分毎の屋外での積算線量
(10m間隔30分毎の屋外での積算線量を使用)

◆ 滞在時間

聞き取り調査による住民の行動記録。30分間隔でデータ構築。

◆ 家屋の遮蔽

建築専門家による家屋分類と行動調査結果をもとに対象家屋を11分類し、それぞれに壁の部材に対する透過率を割り当てる。

(家屋の中性子の透過率はガラス窓の0.94からコンクリート家屋の0.14まで変化する。)

◆ 移動の有無

聞き取り調査による移動経路、移動手段考慮。

下記のように最短距離に居た時間数として求める。

	瓜連線（県道）	6号線（国道）	側道の例道の例
最短距離	70m	270m	230m
車（10m/s）	0.5分(16.1s)	1分(44.6s)	1分(39.96s)
オートバイ・自転車（4m/s）	1分(40.2s)	2分(111.4s)	2分(99.66s)
徒歩（1m/s）	3分(160.8s)	8分(445.7s)	7分(398.56s)
二軒茶屋交差点での渋滞等	260m	280m	
による待ち時間を車のみ考慮	+0.5分	+1分	無視

(3) 前提条件

◆ JCOからの方向による線量の差異（方向依存性）

原研サーベイ班による測定結果より一部のデータを除いて方向依存性が顕著には無いことを確認しており、今回の計算では方向依存性は考慮しない。

◆ 家屋内の場所による差異

木造モルタル（一部2階建、5部屋）	: 0.36～0.63
鉄骨サイディング（総2階建、8部屋）	: 0.27～0.70
鉄筋コンクリート（総2階建、8部屋）	: 0.046～0.11

上記の透過率の計算例が示すように屋内の線量率は場所によってかなり異なる。現実には居場所がはっきりしない点や同じタイプの家屋でもその家屋毎の差異が存在する点を考えて、しかも、窓際にいる場合にはガラスや雨戸による遮蔽のみを考慮することにより、その他の屋内での位置による差異は考慮せず家屋分類に対して割り当てた透過率のみを用いた。

◆ 身体への放射線の入射角度

安全側にとって前方入射とする。後方、側方からの入射による実効線量当量は前方入射に比べ低い値となる。

◆ 壁のJCO に対する傾き

安全側にとって垂直とする。

80%以上を占める散乱線の入射方向が上方前方で角度分布に広がりがあるため、壁の傾きは考慮しない。

◆ 周辺家屋との重なり

周辺家屋や隣の家との重なりは直接線よりも上方からの散乱線強度が強いため無視する事とした。

◆ 遠方の取り扱い

1km以上は線量無視

◆ 計算例

世帯番号	T**	9月30日															
世帯主氏名		事故後25分間															
通し番号	T**-1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
氏名		1	0.68	0.68	0.68	0.68	0.82	0.82	0.82	0.82	0.68	0.68	1				
線量 (mSv)	1	1	0.81	0.81	0.81	0.81	0.9	0.9	0.9	0.9	0.81	0.81	1				
0.65	中性子線量	1.5E-05	6.5E-05	6.2E-05	5.9E-05	5.7E-05	5.2E-05	5.0E-05	4.8E-05	4.6E-05	4.6E-05	4.4E-05	4.0E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.16	ガンマ線線量	3.1E-06	1.7E-05	1.6E-05	1.6E-05	1.5E-05	1.3E-05	1.2E-05	1.2E-05	1.1E-05	1.2E-05	1.1E-05	8.5E-07	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.81	13.5	1.8E-05	8.2E-05	7.8E-05	7.5E-05	7.2E-05	6.4E-05	6.2E-05	5.9E-05	5.7E-05	5.8E-05	5.6E-05	4.8E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
		0.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.033				
距離 m		230	280	280	280	280	300	300	300	300	280	280	230				
移動		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1				
1.車 2.自転車 3.徒歩		1											1				
方位	11時前帰宅 (バースト時ではない)																
内外 (0/1)		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1				
屋根		1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1					
建物		2	2	2	2	2	スレート	スレート	スレート	スレート	2	2					
階		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					
壁厚 (窓ガラス) cm		0.2	0.2	0.2	0.2						0.2	0.2					
壁厚 (土壁/砂防) cm																	
壁厚 (コンクリート) cm																	
壁厚 (ALC) cm																	
壁厚 (板) cm																	
壁厚 (石膏ボード) cm																	
壁厚 (その他) 材質							スレート	スレート	スレート	スレート							
壁厚 (その他) cm							3	3	3	3							
壁の傾き °		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30					
身体 の 傾き °																	

(4) 線量結果

もっとも妥当な線量を推定するよう種々のパラメータを選定した。但し、屋内での位置や移動などの曖昧な点については過大評価となる計算をした。従って、線量推定結果は過大評価となることはあっても過小評価になることはないと判断される。

周辺住民等の個人線量推定結果				
推定線量 (mSv)	東海村住民 事業所勤務者を除く	那珂町住民	周辺企業で勤務 していた者	計
5未満 (内1mSv以上)	77 (35)	24 (0)	78 (56)	179 (91)
5以上10未満	7	0	8	15
10以上15未満	4	0	0	4
15以上20未満	0	0	0	0
20以上25未満	1	0	0	1
計	89	24	86	199

(5) 結果報告

上記の計算結果を踏まえて、1月28日、29日に再度現地を訪問し、各家庭、事業所を訪問し計算結果を説明した。結果の説明に関しては個人の線量が他人に漏れないように留意した。報告に先立って、平成12年1月25日に再訪問の連絡を行い、相手方の都合を考慮して訪問計画を立てた。放医研からは人間環境研究部の11名、放射線科学研究部の3名、医用重粒子物理・工学研究部の2名、那珂湊放射生態学研究センターの3名、第4研究グループの1名、計20名が調査員として参加し、2人一組で茨城県からの保健婦と共に説明にまわった。今回も前回同様に一世帯毎に1～2時間の時間をかけ、丁寧に説明を行った。

行動調査協力者氏名

人間環境研究部

藤元憲三、古川雅英、床次眞司、西村義一、渡辺嘉人、
河村日佐男、白石久二雄、木村真三、米原英典、
サワ・サラ・クマル、西澤かな枝、松本雅紀、石川徹夫、
吉本泰彦、吉永信治

放射線科学研究部

野田 豊、柴田貞夫、小俣 要、福村明史

医用重粒子物理・工学研究部

佐藤幸夫、二見康之、蓑原伸一、河野耕二

那珂湊放射生態学研究センター

中村清、平野茂樹、中村良一、渡部輝久

第4研究グループ

土居雅広、久保田善久、田上恵子

(下線は11月1月の2回の行動調査に参加した者。)

10-6 放医研での対応

(1) 電話相談

事故直後から、放医研への電話相談が相次いだ。放医研では、対応マニュアル、想定問答集を

関係者に配付して対応した。

相談内容は以下のようなものであった。

- 事故現場の周辺地域および近辺を通過したと思われる方から被ばくの影響について。
- 家庭の中にある食塩など使用してよいのか。
- 衣服や洗濯物がぬれたが大丈夫か。
- 半径10キロ圏内は危険区域に指定されているが、圏外は完全に影響がないか。
- 除染に関して(某大学)。
- 毎週ボディボードをしているが、千葉近辺や湘南の海は安全と考えてよいのか。
- ヨウ素剤の購入の方法。
- 線量測定をしてほしい。

(2) 地方自治体からの問い合わせ

- 万が一事故が起きた場合どうしたらよいのか(原発立地県)。
- ヨウ素剤に関する問い合わせにどのように答えたらよいのか。
- 除染施設に関する設備の規模や、対処方針。

(3) 一般住民からの測定依頼

事故当日に東海村周辺にいた人達や茨城県内を車で通過した人達を中心に42名の線量測定依頼があった。状況から判断して異常値は検出されないと推測されたが、住民の不安を取り除く意味でも測定を希望する全ての依頼者について線量測定を実施した。

測定方法としては、体表面及び当日の衣服・持ち物について β 、 γ 、 α 線用の各種サーベイメータを用い測定した。測定に先立ち当日の行動について、作業位置（事故現場からの）、作業時間等についての聴き取り調査を行った。

測定依頼者42名について体表面を測定した結果、全員に放射能汚染は認められなかった。

また、ヒューマンカウンタによる体内測定を実施した13名についても放射能は検出されなかった。

依頼者の内訳は以下のとおり。

報道関係のヘリコプター操縦士	11名
運送関係	7名
建築関係	13名
事故現場周辺を通過	9名
その他	2名

ヒューマンカウンタによる体内測定結果

No	測定日	年齢	性別	備 考	測定結果	測定方法
1	H11.10.1	28	男	H11.9.30夕方荷物の運搬で10Km圏内に入り雨の中で作業した。自宅でシャワーを浴び、衣服は着替えた。	検出なし	全身スキャン
2	"	34	男	H11.9.30現場から5.8Km離れた場所で1時間働いていた。車で避難(千葉：自宅)。シャワーを自宅で浴びた。	検出なし	胸部固定10分間
3	H11.10.4	51	男	H11.9.30事故取材のためヘリコプターで上空を15分以内飛行した。	検出なし	胸部固定10分間
4	"	43	男	H11.9.30 14時頃から東海PAにて1時間ほど休憩していた。大みか(JCOから約5Km)で、17時から18時くらい雨の中で作業していた。	検出なし	胸部固定10分間
5	H11.10.6	48	男	H11.9.30事故取材のためヘリコプターで上空を2度飛行した。	検出なし	胸部固定10分間
6	"	32	男	H11.9.30事故取材のためヘリコプターで上空を飛行した。	検出なし	胸部固定10分間
7	"	37	男	H11.9.30事故取材のためヘリコプターで上空を2度飛行した。	検出なし	胸部固定10分間
8	"	34	男	H11.9.30事故取材のためヘリコプターで上空を飛行した。	検出なし	胸部固定10分間
9	H11.10.7	47	男	H11.10.1事故取材のためヘリコプターで上空を飛行した。	検出なし	胸部固定10分間
10	"	29	男	H11.9.30夜 運搬でそばまで行った。	検出なし	胸部固定10分間
11	H11.10.8	47	男	H11.9.30事故取材のためヘリコプターで上空を飛行した。	検出なし	胸部固定10分間
12	"	18	男	H11.9.27～30原研構内の一般施設で作業した。	検出なし	胸部固定10分間
13	H11.10.21	38	男	H11.9.30.15:30～16:30頃まで東海村国道6号二軒茶屋交差点付近にいた。なお、体表面の汚染検査は他で受けてきたので、体内汚染のみを測定してほしい、との本人からの要望。	検出なし	胸部固定10分間

※ ヒューマンカウンタとは、スキャニング型ホールボディカウンタであり、遮蔽室（約20cm厚の鉄）内の上下にそれぞれNaI検出器を1個ずつ（直径8インチ×4インチ）、合計2個配置した構造である。

測定方法で、全身スキャンとは、NaI検出器の中心軸が被験者の頭頂から足先までスキャンするように、速度5cm/分で検出器を駆動させて測定を行った。胸部固定とは、NaI検出器の中心軸が被験者の胸部に位置するよう検出器を固定し、スキャンせずに測定を行った。

10-7 周辺住民および低線量被ばく者の染色体分析による線量推定

(1) 対象者43名が決まるまでの経過

事故後放医研に緊急入院した3名の被災者につき染色体標本の作成が終了しないうちに、ホールボディカウンターでの ^{24}Na の計測でJCO社員やJCO社周辺に居た人々の中に軽度被ばくした人がかなり確認されたとの情報が入った。多人数の軽度被ばくした人の染色体分析が必要になると判断し、直ちに100名分の低線量推定用の染色体標本を作成するための準備を行なった。10月4日、日本放射線影響学会会長（京都大学放射線生物研究センター）の佐々木正夫教授が文部省研究助成課に環境放射能と人体影響の両面から学術的調査の必要性を説き、具体的案を提言するとともに、原子力安全委員会に協力を要請した。住田、青木両原子力安全委員等の指示などを受けて低線量被ばくが確認された方々等につき染色体検査を行なうという方針が科学技術庁で検討されるとともに、事故後1週間以内の早い時期に全日本体制で低線量被ばく者を対象とした染色体分析計画が立てられた。また、同じ頃、染色体による線量推定の実績のある英国のNRPB、仏国IPSN、中国の衛生部工業衛生実験所の研究者から次々に染色体分析を分担協力するという電話やE-mailを頂いた。培養染色体分析で低線量被ばくの線量推定を行なうためには、1例当たり少なくとも1,000細胞（染色体数46,000個）、つまり100例では460万個以上の染色体を顕微鏡下で一つ一つ分析する必要があるため、このよう検査協力は必須であった。今回のように膨大な数を1度に分析する必要がある低線量被ばく者の線量推定は放医研以外の機関からの専門家の援助を得て初めて可能になったものである。

茨城県立中央病院では10月2、3、4日の3日間に周辺住民1,844名のリンパ球数を調べた。その結果、8名が異常に低い（910個/ μl 以下）値を示したことから、10月12日に同病院の大倉久直副院長より電話でこれら8名などの周辺住民の染色体分析による線量推定が放医研でできるか問い合わせがあった。染色体標本は被ばく後4週間以内に採血して作成すれば正確な線量推定が可能であるが、低線量被ばくの場合、特に培養時間を正確にするため1度に培養ができる例数は15例以内であり、分析には非常に時間がかかると答えた。そして直ちに採血等のために現地に派遣する職員を選任し、県からの正式な要請に備えた。

10月13日に科技庁に低線量被ばくした人と茨城県立中央病院からの8名等について正確な線量推定を行なうためには出来るだけ早く採血して染色体検査をする必要があることを連絡した。

10月14日に茨城県から正式に8名についての染色体検査の要請があった。10月15日に科技庁原子力局の川原田研究技術課長、原子力安全局放射線安全課の岡本放射線安全企画官および早田障害基盤研究部長が東海村役場と茨城県庁に行き、打ち合わせを行った。

第1回目の採血はリンパ球数が異常に少なかった上記8名を対象として10月18日に東海村の旧役場で茨城県保健福祉部の方々の立会いの下で茨城県立中央病院の医療班が実施した。1名は幼児であるため染色体検査をしないことになり、実際には7名の採血を行った。この7名の方々の中には被ばく前から血液疾患や慢性疾患の治療を受けていた人や高齢者も含まれていた。インフォームドコンセントを得るために染色体検査の説明を行なった上で健康状態や事故時の居場所などの

詳細をひとりひとり尋ねたため、7名の採血には2時間以上を要した。採血準備、血液塗末標本の作成、血液を保存用液入り遠心管へ入れる無菌操作は障害基盤研究部の神田玲子、南久松真子、放射線障害医療部の川瀬淑子と早田の4名が行ない、7名の血液を保存用液に入れて血液塗末標本と共に放医研に持ち帰った。これらのサンプルはリンパ球を分離して採血後8時間以内に培養を開始させた。血液塗末標本は分裂細胞が全く無いなど万一の予想外の異常が発見された時、その例の血液像を確認するために作成したが、その必要はなかった。

10月20日東海村役場で役場担当者と村田重粒子センター長、原子力安全局原子力安全課大野安全管理官と早田障害基盤研究部長が事故現場周辺村民の染色体検査の実施につき相談を行なった。

第2回目と第3回目の採血は10月21日と22日に国立水戸病院で行なった。有賀放射線科医長のご尽力で近隣作業所従業員7名、JCO従業員26名、消防士3名、合計36名が来院した。この36名はホールボディカウンターで ^{24}Na を測定し被ばくがすでに確認されている方々で高齢者は含まれていなかった。厚生省、科学技術庁、放医研の佐々木所長等による事前の依頼があったため、国立水戸病院を上げての大掛かりな支援で作業は素早く行なわれ、4グループに分けて実施したが、いずれも比較的短時間で終了した。インフォームドコンセントを得るために、染色体分析により被ばく線量の推定が可能であること、事故がなくても自然放射線により誰でも常時放射線に被ばくしていること、今回の事故よりも被ばく線量が多いと推定される中国の高自然放射線地域住民にはガンや白血病の増加が認められていないこと、染色体異常は放射線以外の環境変異原などによっても誘発され、その数が多いために低線量被ばくの影響は見えなくなってしまうこと、など我々の研究室や、日中共同による研究結果をグループごとに説明した。また、質問に答えて今回の染色体検査は遺伝子の検査ではなく、放射線によって細胞に付けられたキズを数えることによって被ばく線量を推定する検査であることを説明した。血液は無菌的に保存液に入れて放医研に持ち帰り21日分は2回に分けて、22日分は1回でそれぞれリンパ球を分離して培養をスタートさせた。

10月29日水戸市の茨城県庁会議室で茨城県主催のJCO事故施設周辺住民等の健康対策連絡会議があり、早田部長が出席して染色調査に関する対応状況と今後の予定を説明した。

このような経緯で、東海村、茨城県、茨城県立中央病院、国立水戸病院、放医研、科学技術庁、厚生省、文部省、原子力安全委員会等の多くの方々の援助、協力を得て、第1回目に7名、第2回目に24名、第3回目に12名から採血し、合計43名について染色体分析による線量推定を実施することになった。

(2) 低線量被ばく推定用の染色体標本作成

染色体標本作成は放医研で開発し、我々が中国広東省の高自然放射線地域住民の染色体調査で使用している方法 (Hayata et al., 2000) に従った。方法の概略は以下の通りである。

- ① 保存用液 (240 μg のカナマイシンを含むRPMI1640培養液0.8 ml + 仔牛血清0.2 ml) の入ったリンパ球分離用管に約30単位のヘパリンを混ぜた末梢血約3 mlを無菌的に入れ氷で冷やして採血後8時間以内に培養室まで運ぶ。

- ② 培養室で直ちにリンパ球を分離し、仔牛血清20%、PHA120 μ l、カナマイシン360 μ g、コルセミド0.3 μ gを含む6mℓのRPMI1640培養液に入れ、攪拌する。
- ③ 15mℓ培養用遠心管に入れ恒温水槽で37℃に温めた後、キャップを緩めて5%炭酸ガス恒温器で48時間培養する。
- ④ 遠心して細胞を回収し、0.075 MのKCl液に入れ37℃で20分間低張処理する。
- ⑤ 酢酸アルコール（1:3）を約50 μ l入れ攪拌後遠心する。
- ⑥ 酢酸アルコール（1:3）で2回固定し、-20℃以下で3時間以上保存する。
- ⑦ 温度27 - 30℃、湿度約80%の箱の中でエアドライ標本を作りギムザ染色する。

(3) 染色体の分析

京都大学放射線生物研究センターの佐々木教授のご尽力で、京都大学放射線生物研究センター（佐々木正夫）、放射線影響研究所（児玉善明）、広島大学原爆放射能医学研究所（鎌田七男）、長崎大学薬学部（児玉靖司）、放射線医学総合研究所（早田勇）の5研究機関（括弧内は代表者）から構成される染色体分析による被ばく線量推定のための科学技術庁、文部省、厚生省の合同調査班が結成された。第1回目の班会議は放医研で11月5日に開催され、染色体分析と結果記載法の具体的詳細が話合われた。43例のスライド標本はすべて放医研で5枚ずつ作成し、上記5研究機関に各1枚（合計43枚）ずつ送り、各機関が各例当り200細胞以上ずつ分析し、検出された異常および異常候補細胞はすべて顕微鏡写真を撮り記録する事になった。分析中に気付いた注意事項や各研究機関の分析集計結果はE-メールを使いお互いに知らせ合った。結果の集計にはマイクロソフト社のプログラムExcelを全員が使用して総集計が簡単に出来るようにした。3月6 - 7日に京都大学放射線生物研究センターで第2回目の班会議を開催し、5機関で検出された全ての染色体異常および異常候補の顕微鏡写真を持ち寄って異常染色体のクロスチェックをして最終判定を行なった。従って、得られたデータは精度が高く、信頼性の高いものである。最終判定結果からの線量計算は後述の方法に従って行なった(Hyata et al,2001)。

染色体分析作業（写真焼き付け作業を含む）リスト（○印は判定者）

京都大学放射線生物研究センター：○佐々木正夫

放射線影響研究所：○児玉善明、三浦美和、松本知子

広島大学原爆放射能医学研究所：○鎌田七男、田中公夫

長崎大学薬学部：○児玉靖司

放射線医学総合研究所：○早田勇、南久松真子、神田玲子、古川章、鈴木晴子、山岸洋子、森本泰子、川瀬淑子

(4) 被ばく線量の推定

合計67,879細胞（分析染色体数約312万個）、平均1,579細胞／例（分析染色体数約73,000個／例）を分析した結果、2動原体染色体と環状染色体は合計107個検出された。その内、被ばく線量計算に用いたフラグメントを伴う2動原体染色体と環状染色体は87個である。個人被ばく線量の推定値は以下のようにして算出した。

染色体異常の線量効果関係

$$Y=C+aD+bD^2$$

ただし Y：フラグメントを伴う2動原体と環状染色体の頻度

C：自然発生率

D：線量

a,b：線量反応定数

2動原体と環状染色体の自然発生率Cは健常日本人についてはTonomuraら（1983）に従い、リンパ球数減少者については佐々木正夫（未発表データ）に従い、線量反応定数a,bは佐々木教授の⁶⁰Co γ線の実験による値(a=3.31±0.88、b=6.33±0.25)に従った。

染色体異常の頻度から直接求められる平均吸収線量（Gy-Equivalent）は染色体異常を基準としたγ線線量当量（rech、Roentgen equivalent chromosomal）であり、一般にリスク評価の基準となっているシーベルト（Sv）には必ずしも対応しない。中性子のカーマ寄与線量Aは、数mGyの中性子の平均RBEを50、直接求められた線量をD、今回のγ線と中性子の平均カーマ比を1:1とすると、 $D=A+A \times 50$ である。放射線防護上の中性子のRBEは10とされているから $A+A \times 10=D'$ である。

従って、 $D'=D \times 11 \div 51$ から線量当量（Sv）を算定した。

自然発生染色体異常を差し引くと、リンパ球数が異常に低かった7例（第1回採血例）全例で被ばくによると思われる染色体異常の頻度の上昇は検出されなかったが、残り36例中の18例には染色体異常の頻度の上昇が認められた（図10-1）。18例についての染色体分析による推定線量の中央値は5 mSv以下が13名、6-10 mSvが3名、11-16 mSvが2名であった。

(5) おわりに

5月初めに、各個人の推定被ばく線量はリンパ球数が異常に低かった7名については医師を通して通知し、その他は各個人の自宅宛に郵便で知らせた。結果の通知は3月末以降になると説明してあったため、4月中旬頃より結果の問い合わせが3件あった。また、結果を通知した後、2件の問合せがあった。

染色体異常の出現頻度を指標とした被ばく線量推定法ではX線やγ線などの低LET放射線の場合20mGyから頻度の上昇が認められると報告されている。染色体異常を指標とした場合の中性子線のRBEは10 mGy以下の線量域では20を越えるため、中性子線では1 mGy以下の被ばくをしても染色体異常の頻度の上昇が検出できることになる。今回の5研究機関の共同による精密で大がかりな調査によってそれが実際に証明された。染色体分析法が低線量被ばくの線量推定に大きな威力を発揮することが実証され、天文学的な数の染色体の形状を一つ一つ顕微鏡下で分析した担当者の地道な努力は報われたが、この専門技術の後継者が激減している現状が憂慮される。対策としては民間の染色体検査センターの技術者にこの特殊技術を習得して頂くことが考えられ、話し合いを進めているが、その解決策はまだ見出されていない。

文献

1. I.Hayata, C-Y.Wang, W.Zhang, D-Q.Chen, M.Minamihisamatsu, H.Morishima, Y-L.Yuan, L-X.Wei and T. Sugahara: Chromosome Translocation in the Residents in High Background Radiation Area, the Southern China. J.Radiat Res. 41, in press (2000).
2. A. Tonomura, K. Kishi, and F. Saito: Types and frequencies of chromosome aberrations in peripheral lymphocytes of general populations. In: Radiation-Induced Chromosome Damage I Man, Eds. T. Ishihara and M. S. Sasaki, pp606-616, Alan Liss Inc., New York (1983).
3. I. Hayata, N. Kamada, Y. Kodama, S. Kodama, and M. S. Sasaki: Chromosome aberration analysis in persons exposed to low-level radiations from criticality accident. J. Radiat Res. Suppl. (2001).

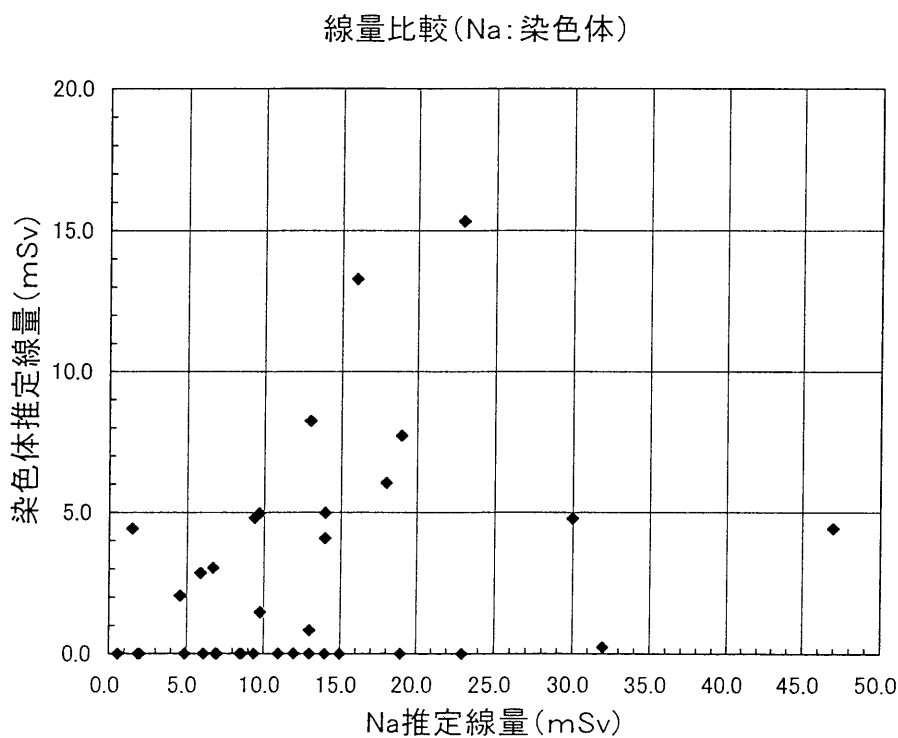


図 1 0 - 1

11. 国際対応

ウラン加工工場臨界事故は我が国で初めての臨界事故であり、高線量被ばく患者の治療も未経験のことであった。患者受入当初から世界的に注目され、外交ルート、所長への書簡、関係研究者への電子メール等様々な形で支援の申し入れ、情報の提供があった。事故直後に訪問されても、その対応に追われる可能性があることから、訪問についてはお断りしたが、各種報告書や論文等の情報については数多く提供していただいた。

(1) IAEA調査団の受入れ

10月16日（土）、Dr. Dominique Delattre、Dr. Malcolm Crick及び井上義和博士（放医研からIAEA事務局へ出向中）の3人から成るIAEAの調査団が放医研を訪問した。この調査団の目的は、事故に関する情報を収集すること、日本の当局が求めた場合に助言を行うこと、事故の原因、結果及び影響に関する事務局長への報告書を準備することであった。したがって、医療関係機関以外にも事故現場等を訪問している。

放医研からは、佐々木所長、村田重粒子治療センター長、辻井放射線障害医療部長、鈴木放射線障害医療部室長（現放射線影響研究所部長）、明石放射線障害医療部室長、下 内部被ばく研究部長及び菱山総括研究企画官が出席した。最初に佐々木所長から挨拶と放医研の役割の説明を行い、次に鈴木室長から緊急被ばく医療体制の説明を行った。また、辻井部長から事故から患者受入までの状況についての説明が行われ、続いて明石室長から診断及び治療についての説明が行われた。その後調査団は、病院及び緊急被ばく医療施設を視察した。

放医研の後、調査団は、他の患者が入院している東京大学医学部附属病院及び東京大学医科学研究所附属病院を訪問した。

調査団は、ウィーンに戻り、報告書を作成した。この報告書は、IAEAのホームページで見ることができる。

(2) IAEAにおける説明

平成11年10月18日、科学技術庁からの依頼によりオーストリアのウィーンにある国際原子力機関（IAEA）へ藤元人間環境研究部長が、科学技術庁原子力安全局下村放射線安全課長と核燃料サイクル開発機構安全管理部金盛安全対策課長とともに赴き、JCOの臨界事故説明を行った。説明内容はその時点までに分かった内容に関しての公式見解を発表するものであった。説明会は10時からIAEAボードルームにおいて開催され、準備したブリーフィング資料200部を大きく上回る約400名の出席があった。ゴンザレスによる説明者3人の紹介に続いて、下村氏からOHPを用いてブリーフィング資料に沿った事故説明がなされ、その後、活発な質疑が交わされた。特にそのなかで私への質問の主なものは下記の内容であった。ICRPの重鎮であるベニンソンから「アルゼンチンでは83年及び93年の2度にわたり臨界事故を経験しているが、その際2人が死亡している。今回のJCO事故では致死量の線量18GyEqを浴びているのにまだ死亡していないのは線量評価が間違っているのではないか。」との指摘があった。「3人の線量はそれぞれ、18、10、2.5 Gy Eqであり、

現時点での暫定的な線量である。しかし、4種類の方法により線量推定を行っており、現時点では適切な線量だと判断している。現在まで生存し得ているのは集中治療、各種薬剤の利用、腸内消毒等が効いていると思われる。」と説明した。

線量評価の単位としてシーベルトとGyEqのどちらを使うべきか、という質問に対しては、「シーベルトは放射線防護に用いる単位で今回の事故には用いるべきではない。中性子と γ 線が混在している場なのでGyEqを使用した。」と答えた。

その他、IAEAの専門家から被ばく線量の単位、評価法、臨界事故時の核分裂数、環境への放出量等の質問がなされた。主な質疑応答は以下の通りである。

【質問】 今回の事故の環境への影響はどの程度か。

【回答】 重大な環境への影響はなかった。

【質問】 γ 線のレベルからすると、1kW級の原子炉と同程度だったのでは。

【回答】 核分裂数は10の17乗から18乗だと思われるが沈殿槽からサンプルを採取し、分析をしなければわからない。

【質問】 臨界事故の規模はどの程度だったのか、転換試験棟の天井が吹っ飛んでしまう規模だったのか。

【回答】 建屋、タンクは健全で、希ガス、ヨウ素が換気系統から少し外に出たレベルだった。

【質問】 日本の規制体系、手続きはどのようなものか。

【回答】 基本的には再処理施設は原子力発電所と同様な規制体系で、科学技術庁と安全委員会が審査されている。但し、ウラン燃料転換施設では、年一回の定期検査等の義務付けはない。

【質問】 計算上、ヨウ素が1キューリー生成されていると考えられ、これが放出されれば、発電所の1年間の量と同程度だと考えられる。もっと環境に影響を与えたのではないか。

【回答】 臨界量は評価中である。排気系には高性能フィルターがついており希ガス、ヨウ素はこの換気系統を通じ屋外へ少量放出されていた。環境中の土壌等分析結果でもその濃度は低レベルに留まっている。

【質問】 許認可上、ウラン濃縮度は何%まで取り扱うことが出来るのか。

【回答】 20%まで取り扱われるよう変更申請がなされた。その時にオペレーティングマニュアルの審査がなされた。その後は、オペレーティングマニュアル等の変更申請はなかった。

【質問】 いつも18.8%の濃縮燃料の処理をやっているのか。

【回答】 軽水炉用は5%以下であり、今回の18.8%の燃料は高速炉用の燃料であった。

【質問】 何がいつものオペレーションと違ったのか。

【回答】 調査中である。

【質問】 今回の工程は核兵器廃棄ウランを処理するプロセスではないのか。

【回答】 関連する情報を持っていない。

【質問】3人の被ばく線量はどの程度なのか。

【回答】それぞれ、18、10、2.5 GyEqであり、線量推定には、リンパ球の数、血液中の²⁴Na放射能濃度の測定、全身計測(WBC)を用いた²⁴Naの定量、染色体異常計測法を用いた。

【質問】溶解槽の臨界の安全管理はなされているのか。

【回答】許認可上は10%~20%の場合、臨界管理として、2.4 kgまでの質量管理をする規制となっている。

最後に出席者を代表してゴンザレス放射線・廃棄物安全部長から、JCO事故説明のための日本からの訪問に対し感謝の意を告げられるとともに、今後の詳細な報告書を期待する旨の発言があった。

また、急遽、翌日の朝（10月19日）にアジア・太平洋地域の原子力施設の安全に関する Advisory Group Meeting に出席を要請され、JCOの事故説明を行った。

(3) 米、仏、独、露の専門家の受入れ

放医研は、10月29日の緊急被ばく医療ネットワーク会議が開催される機会をとらえ、海外の被ばく医療及び線量に関する専門家を受け入れ、高線量被ばく患者への医療に関する意見交換、医療現場の視察を行った。米国から2名、ドイツから1名、フランスから4名、ロシアから2名の計9名が参加した。これらの緊急被ばく医療の専門家は、以前より放医研が情報交換など交流を行っていた施設からであった。まず、10月28日（木）の午前中に放医研を訪問し、経緯、治療内容、線量評価等の説明を放医研から受けるとともに意見交換を行った。その後、医師は東京大学医学部附属病院及び東京大学医科学研究所附属病院を訪問し、線量評価の専門家は放医研に残り、放医研の専門家との意見交換を行った。翌29日、緊急被ばく医療ネットワーク会議にオブザーバーとして出席し、委員との間でも意見交換が行われた。海外専門家は、離日する前に報告書を取りまとめ残していった（巻末の参考資料1）。報告書においては、緊急被ばく医療ネットワーク及び放医研が極めて良く機能したこと、患者への医療はすばらしく、また、最新の技術が取り入れられていることなどが述べられている。

これらの海外専門家は、事故直後から貴重な情報を提供していただいた方たちであった。これらの専門家を受け入れるに当たっては、平常時の招へいとは異なり、時間的余裕がなく、外務省、在外公館の科学技術担当官、科学技術庁の多大な協力をいただいた。米国から日本を訪問するに当たって、ビザをどうするのかという問題も持ち上がったが、どうにか予定通りの活動を行うことができた。また、旅費の負担に関しては、大学の研究者については放医研が全部又は一部を負担、公務員については先方負担、ただし、ロシアは途上国扱いで放医研が全部負担という方針を予定していた。放医研としては、米国のREAC/TSの専門家は公務員であると考えていたが、ロシアからの専門家が招へい費を受領しているのを見たのをREAC/TSに報告し、滞在費支払いを米国に帰国してから要請してきた。このようないわゆるロジスティックス(招へいの事務、スケジュール作成等)の面では、いろいろとトラブルがあったが、いずれも何とか解決し、サブスタンス(実質的な内容)の面では、今回の緊急被ばく医療について、海外の一流の専門家からの高い評価を受

けたという点で、成功したと考えられる。

(4) 国際担当部署の必要性

調査団の受入の企画、調整については企画室が担当した。事務手続きについては、企画室のスタッフで十分に対応することができた。しかし、国内の様々な対応や事故以外の業務もある中、事務手続きを越えた様々な連絡調整が必要とされたため、何とか切り抜けたものの企画室で十分な対応ができたとは言えない。国際協力業務や海外滞在の経験があり、海外の機関と直接やりとりができ、適切な判断を行える者を国際対応の責任者として置くことの必要性を痛感した。

12. 報道対応

9月30日(事故当日)午後1時過ぎに、企画室長から東海村の原子力関連の施設で、事故が発生した様子。事故の内容によっては、患者が放医研に搬送されることになるかもしれない。このため、報道対応を考えておく必要がある。第1会議室を記者会見の場所として会場設営を早急に行っておくように。との指示があり、企画室の職員が会場設営にあたった。

報道機関の車両(特にTV局の中継車)が、13時30分過ぎころから本部棟脇の駐車場に集まり始めた。報道各社の記者から事故の概要や患者の到着時間、その手段などの質問がで始めたが、この時点では、正確な情報がなく対処は困難であった。

患者が到着した場合に収容する緊急被ばく医療施設前は、報道関係者などの立ち入り規制をおこなった。

患者が15時30分頃に放医研に搬送されることが知らされると、報道各社は、TV中継の体制をとり始めた。患者が到着し緊急被ばく医療施設に入った後、報道各社の記者から患者の状況、会見時間や会見の出席者等に関する質問がきた。

19時に研究所としての記者会見を行い、翌10月1日には、緊急被ばく医療ネットワーク会議の前川委員長も同席し、記者会見が行われた。

10月2日から4日にかけては、高線量被ばくの2名が、東大付属病院と東大医科学研究所付属病院に搬送されることについての記者会見がおこなわれた。

記者会見で放射線に関する質問に、あまりにも幅がありすぎたので放射線に関する正しい理解を深めてもらうため、10月2日に生物影響、線量評価、さらに10月22日に放射線障害医療の講習会を開催した。

10月28日には海外の専門家が来訪し、緊急被ばく医療ネットワーク会議に出席したが、この一部は報道機関に公開された。

今回の事故に伴う報道対応は、緊急時であった割には、非常によく行われた。反省としては、記者会見後に、各社の記者から放射線に関する専門的なことを質問され、広報担当で回答できないケースが多々あり、その都度忙しいさなかの医療や線量評価に携わっている専門家に、対応をしてもらわざる得なかった。今後は、最初から専門家が広報の一員に加わり対応することが必要と考える。

13. 原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査委員会及び 健康管理検討委員会

(1) 原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査委員会¹⁾

事故原因の徹底究明等を行うという内閣総理大臣を本部長とする政府対策本部の決定（10月4日）を受け、同日、原子力安全委員会は、広く有識者の参加を得て、第三者の立場から事故原因を徹底的に究明し、万全の再発防止策の確立に資するため、ウラン加工工場臨界事故調査委員会の設置を決定した。構成員は、原子力安全委員以外に、吉川弘之日本学術会議議長を主査とし、24名の有識者から成り、放医研からは佐々木所長が唯一の医療専門家の委員として参加した。同委員会は、平成11年10月8日に第1回会合を開催して以来、11回の会合を開催するとともに、事故現場の現地調査が行われた。11月5日、事故の社会的影響の大きさ等にかんがみ、必要な対策が適時・的確に講じられていくことが重要であるとの視点から、それまでの5回の委員会での検討の結果を踏まえ、「緊急提言・中間報告」を政府に提出した。

同委員会は、より詳細な検討を行うため、「技術・評価」、「企業・産業」、「社会・安全」の3つの検討チームを発足させ、事実や原因の把握、事実の背後にある構造的・倫理的な問題を含めて検討を行い、12月24日、「ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告書」をとりまとめた。放医研に関わる部分としては、原子力災害時における医療対策として、緊急被ばく医療への準備状況、高線量被ばく患者への対応、医療の実際、被ばくの種類の同定と被ばく線量評価、近隣住民等への対応、今後必要な措置等が記述されている。

検討の対象が事故全体であったこと、医療の専門家が一人のみであったことなどから、医療関係者から見ると医療や人々の健康に関する議論が十分であったとは言えないという印象があるようである。放射線の健康への影響等については、医療や放射線防護等の専門家が集まった健康管理検討委員会において詳細に行われている。

(2) 原子力安全委員会健康管理検討委員会²⁾

ウラン加工工場臨界事故に関し、今後の健康管理のあり方を検討するため、原子力安全委員会は、健康管理検討委員会を設置した。構成員は、長瀧重信（財）放射線影響研究所理事長を主査とし、11名の有識者から成り、放医研からは明石真言放射線障害診療・情報室長が委員として参加した。同委員会は事故の線量評価を踏まえた健康管理のあり方について検討を行い、行政庁に対し健康管理の方針を提言することを目的として、

① 線量評価を踏まえた健康管理の必要性の検討

② ①の結果を踏まえた具体的な健康管理の方法の検討

について、平成11年11月8日以降、12回の調査審議を行った。審議において熱心な議論が行われたが、その他、電子メールを介しても多くの議論が交わされた。

平成12年1月25日には中間とりまとめを公表し、周辺住民等の健康管理について基本的な方針を示した。これに対する意見公募を行い、寄せられた意見を踏まえて更に検討を行い、3月27日、「健康管理検討委員会報告」をとりまとめた。この報告書においては、まず、放射線の基礎と人体

への作用について記し、次に、放射線による健康影響について詳述してある。また、健康管理のあり方については、放射線被ばくの際の健康管理について総論的に検討を加えた上で、今回の事故による周辺住民等の健康不安に対して必要な健康診断や心のケアを含む健康相談に関する具体的な健康管理方策について提言している。この報告書の理解を助けるため、放射線に関する様々な疑問をわかりやすく説明した参考資料が添付されている。

この報告書に基づき、健康診断が行われていることは既述のとおりである。

- 1) この項の記述は、ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告書（平成11年12月24日）を参考にしている。
- 2) この項の記述は、健康管理検討委員会報告（平成12年3月27日）を参考にしている。

14. 情報の取扱いについて

(1) 被ばく線量推定に関するインフォームドコンセント

この事故で高線量の被ばくをされた患者さんの医療に関するデータは極めて貴重なものである。今後、万が一同様の患者さんが出現するようなことが起きた場合に、どのような治療を行うべきなのかを検討する上で有益なものであり、また、医療や学問の進歩のためにも医療関係者や関連の専門家で共有することが望ましい。どのような被ばく医療体制を構築すべきであるかの検討が、各自治体や原子力安全委員会等で行われているが、実際にどのような医療が行われたのかを知らなければ、体制を描いたところで実際の医療は動かないと考えられる。他方、高線量の被ばくをされた患者さんが3人であり、そのうちお二人が亡くなれていることから、医療情報が誰のものであるかが容易に同定されてしまう可能性が高い。したがって、医療や学問の進展のための情報公開とプライバシーの保護というある意味では背反する原則を調整する必要があり、この微妙な点について関係者は早い時期から配慮してきた。

医療の分野では、近年インフォームドコンセントが重視されているのは一般に知られているところである。インフォームドコンセントは、1964年6月にヘルシンキで開催された第18回世界医師会総会において採択されたヘルシンキ宣言にさかのぼる。インフォームドコンセントは、「試験内容を被験者によく知らせて、納得してもらい、同意を得た上で、初めてヒトでの試験をすることができる。」というものである。

放医研は、このようなヘルシンキ宣言の趣旨に基づき、3人の高線量被ばく患者本人あるいはご家族から、「被ばく線量推定のための検体提供に関する同意書」（巻末の参考資料一2）をいただいている。すなわち、放医研は、患者の血液・便・毛髪・体毛・歯等の検体を検査することにより被ばく線量を推定すること、その推定が治療方針を決定し予後を推測する上で非常に重要であること等について説明を行い、個人の秘密が最大限に尊重されることを前提に、その結果を医学知識の向上、科学の進歩及び社会における安全体制の向上のために、医学専門誌に掲載すること、学会に発表すること及び公的委員会に報告することに同意を得た。

(2) 緊急被ばく医療ネットワークにおける申し合わせ

3人の患者の医療に関するデータの取扱いについて、緊急被ばく医療ネットワーク会議では、平成12年1月6日に開催された会議で議論が始まり、3月25日に合意された。患者数が少ないため、プライバシーが侵害されやすいこと、医療に関するデータ及び試料・検体は極めて貴重であること、様々な機関が関わっていることなどから慎重な取扱いが必要であると考えられた。このようなことを踏まえ、どのような発表が行われているのか全体を把握するため、著作物、学会報告、講演等の発表をした者はその旨届け出るように努めることが要請されている。また、患者の試料・検体の利用に関しては、東京大学医学部附属病院、東京大学医科学研究所附属病院及び放射線医学総合研究所でそれぞれ窓口が定められた。さらに、発表に際しては、患者個人が特定されないように努め、患者及びその家族のプライバシーに十分配慮することが要請されている。発表

について、必要に応じ、インフォームドコンセントを取得することも要請されている〔緊急被ばく医療ネットワーク会議申し合わせ事項については（巻末の参考資料－3）〕。

(3) 週刊誌による患者の写真の掲載

ところが、関係者が予想していない形で患者さんの写真がある週刊誌に掲載された。平成12年5月15日発売の週刊誌は、第3回日本臨床救急医学会総会で発表された患者さんの写真を、遺族、発表者及び学会のいずれにも了承を得ることなく、また、目隠しなどをすることもなく掲載した。これに対して、治療に関与した医師団連名で抗議文をその週刊誌に、また、その写しを新聞及びテレビ局各社に送付した。抗議文の送付はいくつかの新聞が報道し、また、その後数号にわたって、その週刊誌は記事を掲載した。

5月28日（日）、担当医は、患者のご遺族に会い、週刊誌に患者の写真が掲載され、家族の方々にご迷惑をかけたことに対して謝罪をするとともに、週刊誌が発売された5月15日以降の取組について説明し、今後このようなことが二度と起こらないように取り組むことをお伝えした。

再発防止のため、緊急被ばく医療ネットワーク会議委員長は、委員に対して次の方針を示した。

- ① 被ばくされた患者さんに関する診療録、検査データ、病理組織標本、肉眼写真、検体、試料等の厳重な管理
- ② 学会発表、論文発表、講演等で患者さんの資料を使用する場合、東大医学部附属病院、医科研附属病院、放医研でそれぞれ窓口を定め、事前に窓口に連絡をする。
- ③ 家族が心情的に納得できない、あるいは故人の尊厳を侵害すると思われる写真及び情報の公開は当分の間差し控える。
- ④ 学問上の貴重な情報を共有するという立場からどうしても顔、全身等の写真をスライド等で発表する必要があると考えられた場合（例えば、被ばく医療の悲惨さをどうしても訴えたい、あるいは熱傷治療の専門家に放射線熱傷の実態を伝える必要があるなど）は、目隠しなどの配慮をした上で窓口代表者を通して、家族の方々に実際に発表する内容を見ていただいた上で承諾を得ることとする。さらに、発表に際しては、学会の主催者に報道関係者による写真撮影の禁止を徹底してもらうこと、会場では聴衆に撮影の禁止を訴える等の配慮をした上で発表すること、そうした形で発表した後の結果については発表者が全責任を負うこと。

このようなことを遵守することにより、患者のプライバシーを保護しつつ、医療の進展を図るように努力することが求められる。他方、一般の週刊誌に写真が掲載されたことにより、医療関係者や研究者の間で必要な情報が流通しなくなるなどの影響が出ることが危惧される。

今回の事故は、全く初めてのことであり、患者の医療に関するデータの取扱いや報道機関への対応等についても試行錯誤のところがあったのは事実である。学会における発表が、一般向け週刊誌等の記事になり得ることも念頭に置く必要がある。

15. 放医研における緊急被ばく医療と今後の課題と展望

作業員2人の命を奪い、わが国最悪の原子力事故になった東海村臨界事故を契機に、緊急被ばく医療体制のあり方についてこれまでにない高い関心が寄せられるようになった。ハード面の安全性は飛躍的な進歩を遂げているが、原子力利用が続く限り今後も原子力災害や被ばく事故が起こる可能性を否定することはできない。今回の事故は、それに対して万全の備えをすることの重要性を再認識させられた。緊急被ばく医療は放医研に課せられた重要な任務と位置付けられている。しかしながら、今回の事故は、改めて防災対策の必要性和防災対策は人への健康影響を最小限にするためにあることを痛感させられた。また、放医研が緊急被ばく医療に対して今後どのような体制で臨むべきか、またわが国の一元的体制作りの中で求められている役割は何か、といったものを考える上で実に多くのことを教えてくれた。

15-1 放医研の被ばく医療体制

(1) 体制の整備について

原子力安全委員会の「原子力施設等の防災対策について」と中央防災会議の「防災基本計画」では、放医研を「放射線障害専門病院」としており、放医研の任務は、緊急被ばく医療実地現地体制派遣チーム（被ばく医療チーム）を現地緊急時医療本部に派遣すること、より専門的な診断・治療が必要とされる被ばく者を受け入れること及び外部専門医療機関とネットワークを構築し、情報交換、研究協力、人的交流を行うことにより平常時から緊急医療体制の充実を図ること、としている。放射線障害は一臓器にとどまらない複合障害であり、治療には各領域の専門家を必要とする。これは高度専門医療機関と連携をとりながら適切な対応を行うことを意味している。つまり、集中治療に限らず骨髄移植や皮膚移植など放射線障害の治療に特異的ではないが専門的と思われる治療については、外部医療機関の協力の元に治療を円滑に行うことができるよう協力関係を結ぶことが求められている。放医研は過去10年余にわたり「緊急被ばく医療に関する検討会」及び「緊急被ばく医療対策会議」を開催し有識者により放医研における緊急被ばく医療体制について検討を加えてきた。平成9年には「わが国の緊急被ばく医療における放射線医学研究所の役割について」を著わし、放医研の役割を明らかにするとともに、ネットワーク医療の構築の構想を明文化した。この考えは改訂された「防災基本計画」に反映され、平成11年にはこの会を発展的に解消し「緊急被ばく医療ネットワーク会議」を立ち上げ、大学や専門病院、研究機関の医師・研究者による被ばく医療のためのネットワーク構築に務めてきた。今回の臨界事故では、この「緊急被ばく医療ネットワーク会議」が極めて有効に機能したと評価されているが、それにはネットワーク構成員の積極的かつ献身的な協力があつたことも大きい。

放医研ではこの被ばく医療ネットワークの構築とともに、トリアージ、除染、応急手当て、測定、一時入院などが可能な緊急被ばく医療施設を整備した。一般病院棟には無菌室を設置、特に汚染検査や被ばく線量評価のための測定機器や測定車の整備については重点的に行った。またわが国では入手困難な体内除染剤の安全性の検討と備蓄、また搬送のための訓練を行い緊急事態に

素早く対応できる体制作りに努めてきた。被ばく医療のための設備・備品の整備と同時に必要な人員の教育にも重点をおいてきた。米国エネルギー省（DOE）が経営するRadiation Emergency Assistant Center/Training Site (REAC/TS) が行っている緊急被ばく医療の講習へ職員の派遣、諸外国の放射線障害関連学会・研究会への参加、米国、ロシア、ドイツ、中国、韓国など各国で緊急被ばく医療を担っている施設との情報交換、世界保健機構（WHO）の緊急被ばく医療データベースへの協力、外国から被ばく患者の受け入れ等を行ってきた。このようにわが国唯一の放射線障害専門病院として機能の充実を図ってきた。過去の経験では線源による事故でかつ局所被ばくが多く、今回の事故は日本で死者を出す程の原子力事故特に臨界事故が起こるという点では、「予期せぬことが事故である。」と言うことを再認識させられた。一方では、放射線障害専門病院であるのにもかかわらずどうして他の医療施設に患者を転送したのか、という批判を所内外から受けた。重症被ばくの治療は高度な専門的な技術が必要であることはすでに述べたが、これらの患者を一施設が複数受け入れることの困難さ、人員や施設面から放医研の限界等をあらかじめ考慮してネットワークを構築してきた経緯などを十分に説明する努力がされていなかったことは反省させられる。その他、住民対策や派遣チームなどいくつか不手際が指摘されたりもしたが、我が国で初めての重大事故であり経験のなさには弁解の余地はないが、少なくとも被ばく者に最善の医療を施すことが出来たのはせめてもの救いである。

（2） 病院機能について

放医研は1954年(昭和29年)に太平洋上ビキニ環礁で米国が行った核実験により23名の日本人漁師が被ばくした事件を契機に、放射線の人体影響を調べることに、また放射線のもつ有害性を抑止するとともにその医学利用を進めるため、医学、物理、生物等の幅広い研究者を有する科学技術庁直属機関として昭和32年に発足した。この設立趣旨に基づいて、放医研は科学技術庁のなかで唯一の病院機能を持つことになったが、病院の診療開始は1961年（昭和36年）で、それから4年後の1965年には現放射線障害医療部の前身である障害臨床研究部が設置された。ビキニ環礁での被ばく者と第二次大戦中に使用された血管造影剤トロトラスト沈着症患者のfollow-up study、1972年に千葉県市原市で起きたイリディウム線源による事故における患者の受け入れ・線量評価、2000年には千葉県八日市場市で起きた非破壊検査時の事故患者の受け入れ・線量評価など、不十分とは言え放医研の被ばく医療に対する取り組みはすでに30年以上の歴史を有している。

被ばく者が放医研に移送されてくると、まず被ばくの種類や程度、汚染の有無、創傷の有無等が調べられ、必要に応じて除染作業や創傷の治療が行われる。入院治療が必要と判断されればそのまま入院となるが、相当量の汚染が残存していれば緊急被ばく医療施設に、そうでない場合は無菌施設を含めた一般病棟に収容される。被ばく医療が一般の救急医療と異なる点は、放射線障害の診断・治療とともに、被ばく線量の推定や放射性核種の同定や汚染の測定・除染作業なども行わなければならないなど医療要員のほかに放射線防護・管理の専門家を必要とすることである。放医研の存在意義はまさにこの点にあり、医療チームとともに線量測定・評価チームが共同で対処することになっている。この意味で、放医研は現在、我が国唯一の施設であり、放医研と同様な施設を全国に作ることは非常に難しい。

放医研は、1994年6月より、医療用としては世界初の重粒子線がん治療装置（HIMAC: Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba）を用いてがんに対する重粒子線臨床試験を実施している。このため、1997年、患者受け入れをさらに円滑にするため無菌室を備えた新病院棟（重粒子治療センター病院）を建設し、同時に緊急被ばく医療施設（旧病院棟）の全面改装・整備を行った。当病院は放射線診療単科病院としては日本唯一のもので、日常は重粒子線治療以外に、一般の光子線治療や、小線源治療、画像診断なども行われている。病床数は全部で100床で、このうち6床を緊急被ばく医療専用としている。6床中4床は緊急被ばく医療施設内の汚染患者用で、2床は新病院棟にある無菌室である。従って、94床が新病院棟で放射線治療患者用に用いられているが、これも必要となれば、放射性核種汚染のない被ばく患者を収容するためにあてられている。なお、緊急被ばく医療施設にある汚染患者用ベッドは4床であるが、ここには最大10人近くの患者を収容できるスペースを有している。

すでに述べたように、被ばく医療において放医研の主な役割は、被ばく線量の評価、内・外部汚染の有無の測定、除染作業（第1、2次医療機関では困難なもの）、病態の予測及び汚染患者の管理など緊急被ばく医療としての特殊な被ばく者の治療さらに緊急被ばく医療のコーディネーションである。われわれは、救命救急のための集中治療や、骨髄移植、皮膚移植等高度に専門的治療が必要であると判断された時は、速やかにこれらの医療が可能な施設に送るという考え方でネットワークを構築した。東海村臨界事故で高線量被ばくのあった2人の患者はそれぞれ、東大医学部附属病院と東大医科学研究研附属病院に移送されることに決まった。その結果、高線量被ばくを負った2人に対して、教科書的にはそれぞれ1週間と1か月以内の生存しか見込まれないところ、3か月と7か月生存に結びつく医療を提供することが出来たのである。

17-2 今後の展望：放医研に求められるもの

放射線は無味・無臭・無色であり、障害もすぐに現れない。したがって原子力災害は起きているのかどうかさえ不明なこともある。このことが不安を増加させる。また原子力災害は基本的に人災であり、医療であっても責任など行政的部分がしめる割合は大きい。今回の事故は、これらすべての面から対処すべきことを教訓として残した。患者の治療と被ばく線量評価はもちろんのこと、住民に対する放射線被ばくの説明、法的責任問題から警察・検察に対して科学的根拠に基づく情報や予測の提供を行い、一方では個人のプライバシーの保護と人権の尊重に努力した。また住民とは別に自治体職員・警察・消防・マスコミ関係者の不安や健康に対する説明を行い、マスコミにも被ばくに関する正しい知識を持ってもらうよう、できうる限り説明する機会を設けた。患者の治療を依頼したネットワークの医療機関に対しても、医療従事者が安心して医療を行うことができるように排泄物の回収を含めた放射線防護指導に当たった。事故後の放射線の影響に関する電話による問い合わせは急増し、原子力施設設置自治体以外からの問い合わせも殺到した。放医研は患者のための緊急被ばく医療を行うこととされているが、測定・線量評価に関する部分を除いても緊急被ばく医療施設自体が他の医療施設とは異なった特殊性を有しており、事故から得られた教訓は今後の放医研の在り方に反映されなくてはならない。

今回の事故はわが国では初めての原子力災害であり、上述したようにこれまでの放医研が描いていた緊急被ばく医療シナリオに含まれていないことも露見された。その一つが住民の健康影響の評価と説明や不安を取り除くこと、即ち早い時期からの現地での活動である。放医研は、緊急被ばく医療実施体制現地派遣チームを派遣し災害対策本部のもとで指導・医療活動を行うことになっている。しかしながら今回の事故で求められていたのは現地での除染でも救護活動でもなく、住民との対話であった。現地に医療チームを派遣することと同時に被ばく患者を受け入れることの人的資源の面からの難しさもあり、地元の要請を受ける形で行われたのが実状であった。行くタイミング、行ふべきこと、派遣手段など新たにこのチームの役割として位置づける必要性がさらに認識された。またこの事故を契機に原子力施設設置自治体もマニュアルを改訂し、放医研に対する期待も大きくなっている。また、厚生省もサイト近隣の医療機関の本格的な整備に乗り出していることから、将来もし同様の事故が発生した場合、放医研の現地での活動がさらに期待される。以上のことを踏まえ、派遣チームの在り方を十分検討し、住民に対して正確な情報に基づいた健康対策が行えるよう十分な検討が必要である。検討に当たっては、住民への説明会や個別相談などへの対応があることを考慮し、放医研の医師や研究者が、放射線の影響をわかりやすく説明するような体制を用意しておくことなども課題とする必要がある。また、原子力施設の立地地域においては、保健所の保健婦等が住民との接点となることが大きく（東海村では実際に保健婦が住民対応をした）、放医研や地方自治体が行う研修や講習会への保健婦等の参加を考慮していただく必要がある。

治療システムに関しても残された課題は大きい。被ばくした方のうち2名がわが国最先端の医療にもかかわらず死亡に到った。緊急被ばく医療は重度外傷・熱傷に対するような緊急性はないものの、放射線障害特に高線量被ばくは多くの臓器・器官の障害であり、集学的な治療体制を必要とすることは明らかである。このために、救命救急医療、集中治療、皮膚移植、あるいは造血幹細胞移植などについても円滑・迅速に対応できるような体制、すなわち緊急被ばく医療ネットワークを放医研は構築してきた。一方、東海村は放医研から約110 kmの距離にあり、ヘリコプターでの患者の移送に大きな問題はない。しかしながら九州や北海道であった場合、ヘリコプターによる輸送にも限界があると同時に、遠隔地への患者輸送は患者にとってもデメリットも多い。このため現在国内を幾つかに分け各ブロックごとに既存の医療機関を活用した緊急被ばくネットワークをつくる構想がある。緊急被ばくネットワークに必要な要素は測定・線量評価と専門医療施設であるが、これを同時に備えた施設をつくることは難しい。専門医療施設にホールボディカウンター等の測定器を備えるのも一法ではあるが、維持・管理や測定・評価をするためには専門家の力が必要であり、放射性核種の同定、体内汚染の評価などの問題も同様である。契約、訓練を通して必要な時に放射線管理・防護の専門家のいる施設からの協力が速やかに得られる医療施設の整備が実質的な地域ネットワークになろう。これを円滑に運営するためには、地域における人材の養成が必要となり、現地におけるセミナーや教育訓練を行う点においても放医研は、講師となるような専門家を所内で育成していくことが急務である（ヒューマンウエアーの充実）。また、原子力施設立地地域においては、緊急被ばく医療への関心は大きく、放医研は原子力防災訓練へ

の職員派遣及び研修・講習会への職員派遣を数多く求められているが、このような要望へ応えることも課題である。

最後に残った課題は研究面である。緊急被ばく医療に必要な研究は大きく分けて高線量被ばくの治療・診断に関するものと除染特に体内除染に関する領域、後発性障害の低減化、さらに迅速かつ正確な測定法の開発である。公的な放射線障害専門研究機関として行うべき研究に順位をつけるとすれば、上記の中で他の研究機関が行わないもしくは行うことが困難な研究が上位にくる。放医研では、平成13年度独立法人化後のプロジェクト研究として高線量被ばくの病態生理に関する基礎研究、放射性核種の体内除染剤の開発、放射線防護剤、測定の迅速化を中心にした研究を所内で行う計画を持っており、再生医学等の必要であるが放医研ではできない研究に関しては所外の研究機関との共同もしくは委託研究を計画している。このように緊急被ばく医療の研究については、国内外の施設を通してリーダーシップの取れる研究機関を目指すことが求められている。また、このような研究の実施と前述のような地域の要望に応じた講習や研修を両立させることが大きな課題である。さらに被ばく治療データの収集や被ばく時の「119」ダイヤルなどリファレンスセンターとしてのニーズも増大している以上、放医研の果たす役割はこれからもますます大きくなるものと思われる。



わが国において、原子力は国内のエネルギー供給の約4割を占め、今や必要不可欠な存在となっている。原子力エネルギーを今後とも安心して利用していくためには、日頃の安全確保が第一条件であるが、その一方で、万一に備えて緊急被ばく医療という保険をかけておく必要もある。保険は利用しないで済めばそれに超したことはないが、現実には、東海村臨界事故というあってはならない事故が起きてしまったことをみても、保険をかけることの大切さが改めて痛感される。同じようなことが二度と起こらないという保障がない以上、緊急時に備えて被ばく医療体制を構築しておく必要があることを改めてわれわれは学んだ。

わが国では、幸いなことに医療を必要とする放射線事故も非常に少ない。しかしながら、放医研で行われている緊急被ばく医療に関する講習会の受講者からは、被ばく事故が起きた場合どこに連絡をすれば測定を含め対処してもらえるのか、という問いかけもある。2000年（平成12年）には、局所被ばくではあるが千葉県内でX線による高線量被ばく事故が起き、長野県・埼玉県・千葉県ではモナザイトが見つかった。またタイ、エジプトでは放射線被ばくによる死亡事故が起きている。これからは、国内における被ばく事故医療体制を充実させるとともに単にわが国のためだけではなく、国際的にも貢献できるような緊急被ばく医療体制作りが強く望まれる。

REPORT OF AN EXPERT COMMITTEE ON THE MEDICAL MANAGEMENT OF THREE PATIENTS SERIOUSLY IRRADIATED IN THE CRITICALITY ACCIDENT IN TOKAI-MURA

General Background:

A criticality accident occurred in Tokai-mura, Japan on September 30, 1999 at 10:35. There were three patients who were nearby and received high doses of radiation and who suffered from the acute radiation syndrome. By 12:07 the patients were at a National Regional Medical Hospital and by 15:25 the patients were at the National Institute of Radiological Sciences (NIRS) in Chiba. One patient remained there while the other two were transferred to the University of Tokyo Hospital and the Hospital of the Medical Research Institute of the University of Tokyo.

An expert group consisting of 5 physicians, 3 health physicists and one radiobiologist was invited by NIRS to come to Japan on October 28-29, 1999 to share their experience and to potentially provide advice regarding the ongoing medical care of these three highly exposed patients. The advice was sought since this accident and the circumstances of exposure as well as the medical care that has been provided are unique. There have only been about 10 similar radiation accidents over the last 50 years. Most occurred decades ago and often resulted in early fatalities.

The advanced nature of the medical, scientific and research resources available in Japan has resulted in survival of the patients for a period that has rarely been observed before. This success has also posed unique medical problems and questions. The expert group was not requested to review the accident itself. The experts were from France, Germany, Russia and the United States. Names and affiliations of the expert group as well as the schedule and activities of the group are attached.

The Japanese government has a coordinated response plan for radiation accidents through a Network provided by the Council for Radiation Emergency Medicine. The plan is coordinated by NIRS and functioned extremely well. This plan and coordination was a direct and positive contributor to the welfare of these patients. The quick response and coordinated quality effort that these patients received has been of exemplary nature..

Health Physics Aspects:

In the setting of a radiation accident, a primary goal of health physicists and radiobiologists is to provide radiation dose estimates. This can be done in a number of ways including numerical accident reconstruction, examination of dosimeters, analysis of induced radioactivity. Indicators of effect are the temporal sequence of blood elements and biological dosimetry. As might be expected all these methods

give somewhat different values and in most accidents (and this one) only a range of estimated dose can be provided. Physicians and scientists at NIRS have done a good job in estimating the average whole body dose. The so-called 'dicentric method' has major limitations at very high absorbed doses and in a mixed flux. NIRS scientists brought to bear a method that they had developed in their research (a modified PCC method) and which has not been used in accidents before. It appears to be a very promising method to estimate very high absorbed doses.

The difficulty with application of most of the methods described above is that they give most information about an average whole body dose and in accidents such as this, the radiation dose is very non-uniform. For example, the doses to the hand of some of these workers is likely to be many times more than to some other parts of their body. Furthermore, a criticality accident is characterized by mixed field irradiation (neutron and gamma) which have different penetration and biological effects. The clinical evolution of these patients was dominated by the non-uniformity of absorbed dose. Initial medical treatment of the patients remains primarily dependent on the effect and the repair potential of a particular tissue and physicians therefore must rely on the individual patient response rather than on calculated dose estimates. Absorbed dose estimates do remain useful for correlation with the observed medical effects and for late effects risk estimation.

The absorbed dose in the body may be in the range of about 40% due to neutrons and 60% due to gamma photons. The biological expression however, may be different since the RBE of neutrons is dependent upon the tissue of interest and energy of the neutrons.

Medical Aspects:

The medical care provided to these patients has been exemplary. The three patients were all brought to the Hospital at NIRS for initial evaluation. The transfer of 2 patients to different hospitals was necessary and appropriate. Such critically ill patients require an extremely high level of care that must be provided by physicians who deal with these problems on a daily basis and in a hospital with the necessary resources pertinent to the individual patients needs.

Patient O is the most seriously injured. He was standing very close to the mixing tank and holding a funnel when the accident occurred. He received instantaneous and very large radiation doses to the arms, head and anterior torso. He appears to have suffered from an almost immediate transient incapacitation syndrome and a prompt very severe acute radiation syndrome. Historically, such exposures have been fatal within approximately 1-2 weeks. As a result of massive intensive care efforts (including hematopoietic growth factors) and a peripheral blood stem cell transplant from a HLA identical sister on the 6th day, he

remains alive at 29 days post exposure. Current major problems include tissue necrosis, pain, renal insufficiency, diarrhea and incomplete bone marrow recovery. Future problems may include multiple organ failure (due to extensive local radiation injury), radiation colitis, pneumonitis, local radiation injury of both arms and sepsis. His prognosis can best be described, as very guarded and intensive supportive care will continue to be needed. The staff at the University of Tokyo Hospital are in a unique situation in providing care in an area where there is no prior medical precedent and we can only offer limited advice.

Patient S is also seriously injured. He was standing on a platform pouring material into the tank. He also received very high doses of radiation to the arms, head and neck but to a lesser extent than patient O. Patient S also rapidly experienced a severe form of the acute radiation syndrome with severe bone marrow depression. Since he did not require massive intensive care efforts, he was transferred to the Hospital of the Medical Research Institute of the University of Tokyo where there have been pioneering efforts and excellent clinical results in the field of bone marrow transplantation. Patient S received unrelated umbilical cord blood cell transplantation on the 9th day. To our knowledge, this is one of the first times that fetal stem cells have been used in the history of radiation accidents. Patient S appears to be recovering some of his own marrow at this time, but he has problems with swelling and blisters of the arms and face, severe pain and incomplete bone marrow recovery, particularly with regard to thrombocytes. If radiation pneumonitis, potential graft versus host disease and sepsis can be prevented it appears that he will survive, although there likely will be major problems over the next 6 months with pain control and local radiation injury of his hands, forearms and feet.

Patient Y was in the next room (probably about 5 meters) away from the accident. He experienced a form of the acute radiation syndrome, but it is much less severe than that of the other two patients. He remains in the hospital at the NIRS. He had some initial mild to moderate bone marrow depression but this has recovered with supportive treatment (including administration of G-CSF). His prognosis is good although in the long term he may require cataract surgery and he will be at higher than normal risk for future cancer and leukemia.

Recommendations:

1. The Network and the role of NIRS have worked extremely well and should be continued.
2. The medical care that these patients have received has been superb and has included new and innovative techniques. Patients O and S remain with serious problems at this time and extensive medical care will continue to be necessary for the foreseeable future.
3. The experience of these patients is very unfortunate but unique. There is only rare information about neutron, high dose and non-uniform exposure as well as the effects of various medical therapies. These

patients should be the subject of extensive analysis and should result in scientific publication and presentation on scientific forums.

4. The indications and effects of various types of stem cell transplantation in situations such as these are not well known. It would be useful to analyze possible complications, benefits and to develop criteria for future use of these treatment modalities. If patients O and S survive, the probability of radiation cataracts will be very high.
5. In the long term these three patients will be at a higher than normal risk for leukemia and other tumors. After recovery, consideration might be given to storing some of their stem cells, should malignancy arise.
6. Psychological aspects of radiation accidents are important for the patients, their families, other workers and the public. Some efforts have been made in this regard and should be continued.
7. The press has been getting updates from on the status of the patients. This education and communication of information to the public is very important. It should be commended and continued.
8. Health physics efforts and biological dosimetry should continue particularly in an effort to determine the inhomogeneity of the doses to different body parts. This can be done to some extent by numerical reconstruction of the accident, evaluation of P-32 in hair samples and ESR analysis of tooth enamel, fingernails and personal articles. Absorbed doses in Gy from both neutrons and gamma rays should be specified. For biologic dosimetry it is important to promote research activity, especially with the PCC method.
9. When possible, better details of the physical aspects of the accident such as neutron energies, flux and fission product yield should be determined. For example, evaluation of building material may be useful. These are necessary to better understand the medical effects that were observed.
10. We understand that there were approximated 70 other persons who may have received doses in the range of 10-100 mGy. Although this was not in our original charge, we feel for a number of reasons that they should be followed up at this time. We would recommend that they have a complete blood count at approximately 4-5 weeks post exposure and that over the next several months that they have a baseline eye examination relative to the presence or absence of cataracts.

The expert group has felt it was a privilege to be invited and is willing to assist in the future, should the need arise. Sharing this opportunity with us will help us evaluate other accidents in the future. We wish to thank all the physicians and scientists who spent time with us sharing their experience. In particular, we wish to thank Dr. Yashuhito Sasaki.

A. Baranov

T. Fliedner

I. Gusev

N. Gorin

P. Gourmelon
F. Mettler
A. Rannou
R. Toohey
P. Voisin

List of Participants from Overseas

France

Prof. Patrick Gourmelon, M.D.

Head of Human Health Protection and Dosimetry Div., Institute for Protection and Nuclear Safety (IPSN)

Prof. Norbert-Claude Gorin, M.D.

Head of the European Data Management Office of the European Cooperative Group for Blood and Marrow Transplantation (EBMT), Paris

Dr. Alain Rannou

Head of the Dosimetry, IPSN

Dr. Philippe Voisin

Head of the Multiparametric Biological Dosimetry Laboratory, IPSN

Germany

Prof. Theodor M. Fliedner, M.D.

Arbeitsgruppe Strahlenmedizinische Forschung und WHO-Kollaborationeszentrum fuer Strahlenunfallmanagement, Ulm University

Russia

Dr. Alexandre Eugenievitch Baranov, M.D.

Head of division of Therapy of Acute Radiation Sickness- Radiation, State Research Center of Russia - Institute of Biophysics

Dr. Igor Alexeevitch Goussev

Major Researcher of Health Physics Laboratory - Radiation Medicine Department, State Research Center of Russia - Institute of Biophysics

U. S. A.

Prof. Fred A. Mettler

Health Sciences Center, Department of Radiology, University of New Mexico

Dr. Richard Toohey

Hazards Management Team Leader, Radiation Emergency Assistance Center/Training Site

Schedule

Oct. 28 (Thursday)

9:00 Presentation on the clinical courses and the radiation dose estimation of the 3 patients and discussion

Program for MDs

14:00- Hospitals of the Univ. of Tokyo

15:30 Leave for the Institute of Medical Sciences

16:00- Hospital of the Institute of Medical Sciences of the Univ. of Tokyo

Program for PhDs

13:00 Exchange of views on radiation dose estimation with scientists in the NIRS

Oct. 29 (Friday)

9:00 Site visit to the hospital and facilities in the NIRS.

10:00 Attend the meeting of The Council for Radiation Emergency Medical Network chaired by Prof. Kazuhiko MAEKAWA as observers

13:00 Formulating a report

東海村臨界事故における3人の高線量被ばく患者の治療に関する 専門家委員会の報告

事故の概要及び背景:

1999年9月30日午前10時35分、日本の東海村で臨界事故が起こった。近くにいた3人が高線量の放射線被ばくをし急性放射線症に罹患した。患者らは、12時7分までに地域の国立病院に搬送され、さらに15時25分までに千葉の放射線医学総合研究所(放医研)に転送された。三人の患者の中、一人は放医研で加療を続け、他の二人は東京大学医学部附属病院と東京大学医科学研究所附属病院へ転院した。

放医研は5名の医師、3名の保健物理学者および1名の放射線生物学者からなる外国の専門家のグループを平成11年10月28日-29日に招聴した。彼らと経験を分かち合うとともにこれら3人の高線量被ばく患者に現在行われている治療について可能であれば助言を与えることが目的であった。今回の事故そのもの、被ばくの状況およびそれに対して行われている治療が他に類をみない特殊なものであるために助言が必要とされたのである。過去50年間にこれと似た放射線事故は約10件あったのみである。その大部分は何十年も前に発生したもので、患者が早期に死亡した事例が少なくない。

日本の先進的医学、科学及び研究資源のおかげで、患者はほとんど前例がないほど長期間生存している。この成功によってこれまでに例をみない医学的な問題点および疑問が提起されている。この専門家のグループはこの事故そのものの総括を求められたのではない。専門家グループはフランス、ドイツ、ロシアおよび米国から来ており、この専門家グループの個々の氏名、所属は、グループのスケジュールと活動の詳細ともに別添されている。

日本政府は緊急被ばく医療ネットワーク会議によって提供される高度専門医療機関により構成されるネットワークを通じて、放射線事故に協力して対応する体制を有している。この体制は放医研が中心になって運営しているもので、今回非常にうまく機能した。この体制及び放医研の調整機能が、これらの患者の身体状況に対して直接的かつ明らかに貢献した。これらの患者が受けた迅速な対応と調和のとれた診療努力は、質の高い模範的なものである。

保健物理学的な側面:

放射線事故という状況においては、保健物理学者と放射線生物学者の第1の目標は被ばく線量の評価を行うことである。これは、計算上での事故の再構築、線量計の検査、生じた放射能の解析等を含む幾つかの方法で行うことができる。放射線の影響の指標となるのは、血液成分の経時的な変化、および生物学的な線量測定である。当然予想されることであるが、これらあらゆる方法で得られる結果はそれぞれ若干異なっており、今回を含む大部分の事故においては、

単にある幅をもった評価線量を示すことができるに過ぎない。放医研の医師と研究者は全身の平均被ばく線量の評価においてはいい成果を挙げている。いわゆる「ダイセントリック法」は、非常に高い吸収線量の領域および線質が混合した放射線の場合においては適さない。放医研の研究者達は、これまでの研究によって開発した、従前の事故においては使われた前例のない新しい方法(PCC変法)を活用した。この方法は、非常に高い吸収線量を評価するためには将来大変有望な方法のようである。

上記の大部分の方法を用いる際に難しい問題は、得られる主な情報が全身の平均線量であるのに、今回のような事故においては放射線の線量が極めて不均一である事である。例えば、今回の作業員の中には、手への線量が体の他の部分に対する線量の何倍も高いと考えられる人がいた。さらに、臨界事故の特徴は、透過性と生物学的影響が異なる放射線(中性子と γ 線)が混在していることである。今回の患者の臨床経過には、吸収線量が不均一であることが大変大きく影響している。初期治療は、まずある組織への放射線の影響とその組織の修復能に基づくべきものであり、したがって医師は、計算の結果の吸収線量よりも、患者の個々の反応に基づいて判断を行わなければならない。その場合でも、吸収線量の評価は、実際に観察される医学的影響と関連させる上で、また映発性影響のリスク評価のために有用である。

患者の身体への吸収線量は、おおよそ40%が中性子、60%が γ 線(光子)によるものであろうかと思われる。しかしながら中性子の生物学的効果比(RBE)は、注目する臓器および中性子のエネルギーに依存するので、生物学的な影響の現れ方は異なるかもしれない。

医学的な側面:

これらの患者に施されてきた治療は模範的なものである。患者は3人とも、初期評価のために放医研の病院に運ばれた。2人の患者を別の病院に転院させたことは、必要かつ適切であった。このような重体の患者には非常に高いレベルの診療が必要であり、そのような診療は日常的にこのような問題を扱っている医師と、患者の個々のニーズによって必要な対応ができる医療資源を保有する病院によって提供されなければならない。

患者Aは最も重症である。彼は事故発生時、攪拌槽の極近傍に立ってロータを保持していた。彼は一瞬のうちに非常に高い線量を、上肢、頭部及び体幹前面に受けた。彼はほとんど直後に一過性のincapacitation syndrome(無力症)を、また極早期に大変重症の急性放射線症を呈した様である。歴史的にみると、このような被ばくは、1ないし2週間の間に致命的な転帰をとっている。造血因子を含む徹底的な集中治療と、6日目に行われたHLAが一致する妹からの末梢血幹細胞移植の結果、彼は被ばく後29日の時点でも生存している。現在の主要な問題としては、組織の壊死、疼痛、腎不全、下痢、骨髓の回復がまだ不完全であること等があげられる。将来的には、(極度の局所的放射線障害による)多臓器不全、放射線大腸炎、肺臓炎、両上肢の局所的放射線障害、および敗血症等が問題となるとと思われる。彼の予後を一番うまく表現するならば、細心の注意をもって集中的な支持療法を行うことがこれからも必要であろう、といったところである。東

大病院のスタッフは、医学的前例がなく、また我々も限られた助言を与えることしかできない領域の治療を行うという、前例のない立場にある。

患者Bもやはり重症である。彼はプラットホームに立って槽の中に材料をそそぎ込んでいた。彼もまた、上肢、頭頸部に非常に高い線量を被ばくしたが、患者Aに比べるとその程度は軽かった。患者Bもまた早期に、重症の急性放射線症と重症の骨髄抑制を呈した。彼には徹底的な集中治療は必要なかったもので、骨髄移植の分野では先駆的な業績と優れた臨床成績を持つ東大医科研病院に転院となった。彼は、9日目に、非血縁者からの腰帯血の移植を受けた。我々の知る限りでは、これは、放射線事故の歴史において胎児の幹細胞が用いられた最初の類例の一つである。現時点において、自前の骨髄の回復がいくらか見られるようであるが、上肢と顔面の腫脹と水痘形成、極度の落痛、血小板について特に顕著な骨髄の回復不良(特に血小板について)が問題点である。もし放射線肺臓炎、移植片対宿主病および敗血症を予防できれば彼は生存するように思われる。但し、今後6ヶ月にわたって、疼痛のコントロールおよび、両手、両前腕、両足の局所的放射線障害が大きな問題となることが予想される。

患者Cは隣の部屋にいて、おそらく5mほど事故から離れていた。彼は急性放射線症候群の一例を呈したものの、他の2人の患者に比べるとずっと軽い。彼は放医研の病院に入院している。当初、軽度ないし中等度の骨髄機能の低下があったが、これは(GCSF投与を含む)支持治療で回復した。彼の予後は良好であるものの、長期的には白内障の手術が必要になる可能性があり、また将来がん及び白血病に罹患するリスクは正常よりも高いであろう。

提案事項:

1. ネットワークと放医研の役割は非常に良く機能しており、継続されるべきである。
2. これらの患者が受けた治療は素晴らしいうえに、新しく革新的な技術を含んでいる。患者AとBは現時点では深刻な問題を抱えており、徹底的な治療が今後もずっと必要であり続けるだろう。
3. これらの患者の経験したことは大変不幸であるが他に例がないことでもある。中性子による、高線量、不均一な被ばく及び様々な治療の効果に関する情報は非常に貴重である。これらの患者については徹底的な解析を行い、最終的には科学的な出版物とし、また科学的な会合で発表するべきである。
4. このような状況下での様々な種類の幹細胞移植の適応と効果についてはよく知られていない。考え得る合併症と患者にとっての利益を解析し、将来こういった治療を行うための基準を作ることは有用であると思われる。患者AとBが生存したとしても、放射線白内障をおこす確率は非常に高い。
5. 長期的には、これら3人の患者には、白血病および他の腫瘍の発症については正常よりも高いリスクがある。回復後に、悪性疾患が発症したときのために患者の幹細胞を保存しておくことを考慮してもよいかもしれない。

- 6.放射線事故の心理学的な側面は、患者、その家族、他の従業員および一般の人々にとって重要である。この点に関してはある程度対策がとられており、その継続が望ましい。
- 7.報道関係者は患者の状態に関する最新情報を手に入れている。このように一般の人々に情報を伝達し、教育することは大変重要である。これは推奨すべきことであり、続けるべきである。
- 8.身体の一部位に対する線量の不均一性を明らかにすることに力を入れ、保健物理学的な努力と生物学的な線量測定が続けられるべきである。計算上でこの事故を再構築すること、毛髪サンプルでP-32を評価すること、歯のエナメルや爪は患者の所有物をERS.で分析することで、これはある程度行うことができる。中性子と γ 線両方の吸収線量をGy単位としてはっきりさせるべきである。生物学的な線量測定に関しては、特にPCC法については、研究を推進することが重要である。
- 9.できる時期が来れば、例えば中性子のエネルギー、流れ及び生じた核分裂産物の量などの、事故の物理学的な面についてのより詳細ををはっきりさせるべきである。例えば建材の評価は有用かもしれない。こういった詳細は、観察された医学的な影響についてより良く理解するために必要である。
- 10.我々の理解するところでは、10-100mGyの範囲の線量を被ばくしたかもしれない人が他に約70人存在した。これは我々の当初の責務には含まれないことであるが、幾つかの理由から、現時点ではその人々は追跡調査を受けるべきであると我々は思う。その人々については、被ばく後およそ4ないし5種に血算を行うこと、今後数ヶ月の間に、白内障の有無に関するベースラインの目の検査を行うことを勧める。

われわれ専門家のグループは、招聴されたことを名誉に感じたし、将来も、もし必要が生ずれば喜んで手助けしたいと思っていある。この機会を共有できたことは、我々が将来他の事故を評価する上で役に立つであろう。我々は、ともに時間を過ごしその経験を共有できたすべての医師と研究者に感謝したい。特に往々木康人先生には感謝したい。

A.Baranov	(署名)
T.Fliedner	(署名)
I.Gusev	(署名)
N.Gorin	(署名)
P.Goummelon	(署名)
F.Mettler	(署名)
A.Rannou	(署名)
R.Toohy	(署名)
P.Voisin	(署名)

被ばく線量推定のための検体提供に関する同意書および同意取得用説明文書

施設名： 科学技術庁 放射線医学総合研究所 （以下放医研）

1. はじめに

これから、あなたの血液（骨髄も含む）・便・毛髪・体毛・歯等の検体からの被ばく線量推定に関しての説明を致します。あなたは、その内容について正しく理解した上で、あなた自身の意志に基づいて、提供に同意するかしないかを決めて下さい。もし不明な点があれば、ご遠慮なく質問して下さい。

2. 人権保護に関する事項

1) 提供に同意しない場合でも不利益は受けないこと

検体の提供に同意するかどうかはあなたの自由意志です。同意されない場合であっても、そのために不利益を受けることはありません。

2) 検体の提供に同意した場合でも随時これを撤回できること

検体の提供に同意した後でも理由の如何を問わず、いつでも辞退することは自由です。また、これによりあなたが不利益を受けることはありません。

3) その他、人権保護に関し必要な事項

検体の提供は自発的なことですから、あなたの意志を尊重して行われます。従って、何か知りたい事や心配事がありましたら、いつでもご遠慮なく申し出て下さい。

また検体の提供におけるプライバシーは尊重されますので、あなたの名前が外部に公表されることは決してありません。医学知識と科学の向上のために、結果を医学専門誌に掲載もしくは学会に発表することはありますが、個人の秘密はいかなる場合も明らかにされることはありません。

4) 検体提供の目的

放射線による障害の治療は、症状が出る以前にそれを予測し素早く対応することが求められます。そのためには、どのくらいの放射線に被ばくしたかを推定する事が必要です。体が放射線に被ばくすると、様々な組織・器官は何らかの変化を受けます。その変化は、血液・尿・便・爪・毛髪・体毛、歯等を物理学的、化学的、生化学的、細胞遺伝学的に調べることによりとらえることができ、被ばく線量を推定する有力な証拠となります。また身に付けていた金属やボタンなどからも線量を推定する事ができます。過去に国内外で起きた事故時にもこれらの方法で被ばく線量を推定し、治療方針の決定に大きく役立っています。

被ばく線量推定は上述の様に、放射線による障害の治療に不可欠であります。医師・看護婦・技師などの医療従事者だけではできません。物理学者、化学者、保健物理学者、細胞遺伝学者の他に放射線管理の専門家によって行われます。

同意文書

私は、今回の事故により放射線の被ばくを受けました。被ばくした線量を正しく推定することは、今後の治療方針を決定し予後を推測する上で非常に重要な事であること、線量の推定は放射線の被ばく事故時に広く行われていることの説明を受けました。

この推定線量の結果を医学知識向上及び科学の進歩のために、医学専門誌に掲載すること並びに学会に発表することに同意しますが、個人の秘密はいかなる場合も明らかにされないことも理解しました。

私は、医学的にみて有意な量の被ばく線量を推定するため検体（血液、尿、便、爪、毛髪、体毛等）を提供することに自らの自由意志で希望します。同時に、線量推定の意味、重要性についての説明を受け、これを十分に理解しましたので、検体の提供に同意しました。同意する証として署名・捺印の上、本書を提出します。

放射線医学総合研究所長

佐々木康人 殿

放射線医学総合研究所 担当医師

平成 年 月 日

本人署名

氏名

印

代理人署名

氏名

印

ウラン加工工場臨界事故に関する医療に係る データ等の公表についての申し合せ事項

平成12年3月25日

放射線医学総合研究所

緊急被ばく医療ネットワーク会議

(平成12年5月19日改訂)

平成11年9月30日に(株)JCOで起きた臨界事故(以下「事故」)において高線量の被ばくをした3人の患者の医療についての著作物の刊行、学会報告、講演等の発表に関し、次のとおり申し合わせる。

1. 著作物、学会報告、講演等

著作物、学会報告、講演等の発表をした者は、著作物については1部を、学会報告及び講演等についてはプログラム及び要旨をネットワーク会議事務局に提出するように努める。

なお、著作物の刊行、学会報告、講演等の発表を行う者は、研究協力を行った者、機関等と共に著者について十分な調整を行い、問題が生じないように努める。

2. 患者の試料・検体を利用した研究

患者の試料・検体の利用に関する窓口は、次のとおりとし、必要に応じて調整を行う。

東京大学医学部附属病院：前川 和彦 教授

東京大学医科学研究所附属病院：山田 芳嗣 助教授

放射線医学総合研究所：明石 真言 室長

また、患者の試料・検体を利用した研究を行う者は、緊急被ばく医療ネットワーク会議事務局にその内容を届け出る。

3. 事務局の役割

緊急被ばく医療ネットワーク会議事務局は、事故の医療についての発表に関する調整機能を果たすように努めることとし、例えば、照会を受けた場合にはそれまでの発表に関する情報に基づき、重複等をさけるための助言を適宜行う。

4. 放射線医学総合研究所報告書

放射線医学総合研究所は、研究所として事故への対応に関する報告書を刊行する。その報告書の内容には、緊急被ばく医療ネットワーク会議の活動も含まれるので、必要に応じ、同ネットワーク会議の委員に原稿をお願いすることもある。

5. 患者等のプライバシーとインフォームド・コンセント

被ばくされた患者の医療についての学会等における発表に際しては、患者の個人名を使用しな

いなど患者個人が特定されないように努め、患者及びその家族のプライバシーに十分配慮する。

被ばく患者の医療に関する学会発表、誌上発表については、必要に応じ、患者若しくは家族等からインフォームド・コンセントを取得する。また、患者の試料・検体の利用については、患者の治療を実施した機関において、患者もしくは家族等からインフォームド・コンセントを取得する。

患者及び家族が感情的に納得できない、あるいは故人の尊厳を侵害すると思われる写真及び情報の発表は学術的な目的であっても当分の間差し控える。(この段平成12年5月19日追加)

①	整理番号	家族構成員数		行 動 調 査 票 (1)				調査日時	平成11年11月 日 時 分 ～ 時 分				
	- 1			生年月日 (大正昭和平成)				調査担当者氏名					
②	ふりがな氏名	男・女	満才	電話番号	()	妊娠の有無		無し	年齢	出産予定日			
③	現住所	東海村 石神外宿・舟石川 那珂町 大字本米崎						有り →	0 ～ 7 週 H12年5月1日～7月10日	8 ～ 25 週 H11年12月25日～H12年4月30日			
	時間経過	10:35 事故発生		平成11年9月30日				15:30 避難要請 (東海村)					
④	居場所及び行動	移動方法 (徒歩、自転車等)		11:00		12:00		13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
	別添地図及び見取り図上に (あ) (い) (う) . . .)	1km 以遠の場合は◎		事故後 25 分間									
⑤	屋内 (内) / 屋外 (外)												
⑥	屋根の材質:瓦、スレート、コンクリート												
⑦	建物の種類	1. 木造 (土壁) 2. 木造 (新建材) 3. コンクリート 4. その他 ()											
⑧	滞在した階 (1階、2階等) *												
⑨	JCO に面した壁厚												
	窓ガラス (cm)												
	土壁 (cm)												
	コンクリート (cm)												
	板 (cm)												
	その他 () (cm)												
⑩	JCO への壁面の傾き (度)												
⑪	事故後 25 分間の身体角度 (JCO に対して)												

滞在した階 (1階、2階等) * : 2階以上の場合には床の材質及び厚さを記入 (材質 : コンクリート、軽量コンクリート、量、フローリング等) と (厚み cm)

整理番号
- 2

行 動 調 査 票 (2)

②	氏 名	9 月 30 日												10 月 1 日			
	時間経過	18:40 避難要請 (那珂町)															
		18:00	↓ 19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	6:15	臨界停止	
④	居場所及び行動 移動方法 (徒歩、自転車等) 別添地図及び見取り図上に (あ) (い) (う) (....) 1km 以遠の場合は◎																
⑤	屋内 (内) / 屋外 (外)																
⑥	屋根の材質: 瓦、スレート、コンクリート																
⑦	建物の種類 1. 木造 (土壁) 2. 木造 (新建材) 3. コンクリート 4. その他 ()																
⑧	滞在した階 (1 階、2 階等) *																
	JCO に面した壁厚																
	窓ガラス (cm)																
⑨	土壁 (cm)																
	コンクリート (cm)																
	板 (cm)																
	その他 () (cm)																
⑩	JCO への壁面の傾き (度)																

滞在した階 (1 階、2 階等) * : 2 階以上の場合には床の材質及び厚さを記入 (材質: コンクリート、軽量コンクリート、畳、フローリング等) と (厚み cm)

整理番号	世帯主氏名
- 3	

行 動 調 査 票 (3)

ブロック塀等が存在する場合にはその場所に材質と厚みを記載すること。

↑ JCO の方向

見取り図

--

整理番号	世帯主氏名
- 6	

行 動 調 査 票 (6)

今後相談をお受けになりたいですか。

はい ・ いいえ

質問、心配事など相談内容

JCO事故報告書作成 ワーキンググループの名簿

委員長	村 田 啓	重粒子治療センター長
副委員長	明 石 真 言	放射線障害医療部 室長
委 員	河 内 清 光	前 研究総務官
委 員	菱 山 豊	企画室 総括研究企画官
委 員	門 間 静 雄	技術安全部長
委 員	早 田 勇	障害基盤研究部長
委 員	藤 元 憲 三	人間環境研究部長
委 員	西 澤 かな枝	人間環境研究部 室長
委 員	辻 井 博 彦	放射線障害医療部長
事務局	東 條 三 郎	企画室 広報専門官

東海村ウラン加工工場臨界事故に関する放医研報告書

発 行 2001年1月26日

編 集 村 田 啓 明 石 真 言

発行者 放射線医学総合研究所
〒 263-8555 千葉県稲毛区穴川4-9-1
電話 043-251-2111(代表)

印 刷 株式会社 コームラ

本報告書の内容を無断で複写・複製転載すると著作権の侵害と
なることがありますのでご注意ください。