全米職業被曝の解析

(日本原子力研究所) 熊 澤 著

職業人に対する的確な放射線防護を行う一助として近年、職業被曝の解析が活発に行われるようになった。米国環境保護庁では、新連邦放射線防護指針の策定計画の一環として、1980年度における全米職業被曝の要約書を作成した。筆者はこれを全面的に担当する機会を得て、四半世紀における全米職業被曝の解析を、産業の発展や防護技術の進歩と関連させて行なった。本稿では、米国で高い評価を得た本解析結果を紹介する。

I. はじめに

今世紀半ばまでに職業病としての放射線障害が医療分野、夜光塗料工場およびウラン鉱山で多発した。しかし、それ以降は様々な産業分野で一層多くの人員が職業上の被曝を受けるに至ったものの、放射線防護が組織的に進展してそのような事例は激減した。今日、職業人に対する放射線防護は高い安全水準にある産業と同程度に安全であり、かつ満足できる作業条件を作ること目標が置かれるようになった。

米国環境保護庁(EPA)では現在、連邦放射線防護指針の見直しや改訂のために、職業上の被曝に伴う安全水準の評価や改訂に伴う経済的影響の評価を行なっている。これらの評価を行うのに全米規模の職業被曝の要約が不可欠である。しかし、全米規模の職業被曝データを収集し、解析する一元的な機関は米国にないため、EPA自身が5年ごとに解析を行う計画を持っている。

過去において、連邦放射線防護指針の策定された1960年、またEPAの設立された1970年の時点で、全米職業被曝の評価が部分的に行われた。しかし、現在の本格的な全米職業被曝の解析計画は1974年から開始された。最初の計画では、連邦や主要な州の政府機関および民間サービス機関から1975年度の線量データが収集され、1980年に要約書が出された¹⁾。これは新連邦指針提案(1981年1月23日付官報)の策定に活用された²⁾。今回の計画では、大統領に勧告する新連邦指針の策定に活用する目的で、1980年度の要約のみならず1960年以来的動向と1985年の予測が含まれた³⁾。前回の要約書には、使用した線量データの信頼性やデータの解析法に疑問が出されていたため、今回の要約書作成にあたっては、使用データの信頼性を確認する方法の開発を種々行うとともに、原研において筆者らが開発した職業被曝解析法⁴⁾⁻⁶⁾を全面的に適用する機会を得た。

現行の連邦指針の下で見られる全米職業被曝の四半世紀に近い歴史的動向には明確な特徴があり、それは産業の発展や防護技術の進歩と密接に関連し、また産業分野ごとに固有の特性を表わす。本稿では、今回EPAが出した全米職業被曝要約書⁷⁾の内容を簡単に紹介しながら、放射線防護基準の下で見られる職業被曝の性質や動向について述べる。特に、全米職業被曝に占める原子力産業の位置付けを行い、この分野における被曝低減対策が今後とも重要であることを示す。

II. 職業被曝防護の法権限と基準

米国における職業人の放射線防護は第1図に示される法権限の下に行われている。EPAが新連邦指針を大統領に勧告し、大統領が署名すると、各連邦政府機関は新連邦指針に則って詳細な規則を作ることになる。原子力規制委員会(NRC)と州政府機関は連邦指針に必ずしも拘束されないが、実際上は連邦指針に則る配慮を行なっている。

NRCは原子力法に基づき、核原料物質、特殊核物質および核分裂反応による放射性副産物質を取り扱う事業所に対して、連邦規則10 CFR Part 20を適用している。鉱山安全保健局(MSHA)は採鉱精錬事業所に対して連邦炭鉱保健安全法を適用し、また労働安全保健局(OSHA)は加速器産出の放射性物質や電離放射線発生の電子機器を取り扱う事業所に対して労働保健安全法を適用している。各州はより厳しい規則を作らない限り、NRCやOSHAの規則に従うことになる。国防省(DOD)、エネルギー省(DOE)および他の連邦政府機関は、連邦指針、NRCおよびOSHA規則に基づいて細則を作ることになる。ただし、軍事利用の特殊核物質

Analyses of U.S. Occupational Exposure, Shigeru KUMAZAWA.

(1984年 8月11日 受理)

第1図 米国における職業被曝防護の法権限⁽³⁾

からの被曝は、DODとDOEが連邦指針の下で独自に規則を作ることになっている。また、運輸省(DOT)と食品薬品局(FDA)には線源の規制権限がある。

米国における職業被曝の基準は、全身3rem/3ヵ月(最大12rem/yr)と5rem/yrが混在している。現行の連邦指針は年齢N歳までの累積線量が5(N-18)rem未満の条件の下で3rem/3ヵ月の基準を示している。ただし、前提として実際である限り被曝を基準値より十分に低く保つことが明記されている。NRCやOSHAの規則もほぼこれと同じである。ただし、OSHAには被曝低減を求める記述はない。MSHAはRn被曝4WLM/yr、全身5rem/yrの基準を、またDOTや郵政機関は公衆と同じ全身0.5rem/yrの基準を、さらにDODやDOEは全身5rem/yrを採用している。

職業人に対する全身被曝の測定・記録の義務付けは、米国において約0.3rem/3ヵ月以上の被曝が予想される場合である。しかし、これ未満の被曝でも測定・記録されたものは報告が義務付けられている。事実、報告データには検出限界未満の被曝が50%前後含まれている。ただし、OSHAは報告を全く義務付けていない。報告データを「年報」として公表しているのは、NRC、DOEと海軍だけである。他の連邦政府機関は「年報」を出していないが、EPAからの正式要請に応じて1975年以来線量分布統計を提出している。EPAが利用できる被曝データは連邦政府機関から全米職業被曝人員の約28%、主要民間サービス機関から約19%である。残りの約53%は後述のモデル化で補完される。

Ⅲ. 全米職業被曝の解析法

1. 解析の方針

全米の職業被曝は総計19の小産業分野ごとに人員と線量(および年齢)分布を推定し、これらを医療、工業、原子力、政府、その他(教育と輸送)の5大分野および全米規模にまとめた後、次のように要約する。

- (1) 小分野、大分野および全米規模ごとの人員、年間平均線量および年間集団線量
- (2) 全米規模と、大分野ごとの性別を考慮した年間線量分布と年間線量による集団線量分布
- (3) 全米規模と、大分野ごとの性別を考慮した年齢分布と年齢による集団線量分布、および中位値年齢
- (4) 1960年以降5年ごとの(1)と(2)についての動向と1985年における予測
- (5) 新基準として計画中の年間5remを遵守した場合に考えられる1985年の年間線量分布の試算
- (6) 労働生涯を通じて累積された線量、すなわち生涯線量の個人平均値と最大値

解析に利用できる被曝データは1980年度で全米の推定職業被曝人員の50%弱である。原子力と政府分野は連邦政府機関からの線量統計データで両分野とも人員のほぼ100%に達するのに対し、主として民間機関からの被曝データを用いる医療、工業、その他の分野では、推定人員のそれぞれ約30%、15%、50%止まりである。民間機関からの被曝データは50業種以上について

て、性別や年齢別などで与えられているので、小分野ごとにそこに占める複数の業種の人員割合を考慮して線量分布や年齢分布を推定する。

全米の職業被曝はこのように被曝データの単なる集計だけでは要約不可能である。また、多数の政府機関や民間機関が同質の立場で個人モニタリングを実施しているか否か、特に個人モニタリングを義務付けていない作業員への個人モニタリング実施法の違いがどの程度問題となるか、を無視しては要約できない。これによって人員や線量(年齢)分布の推定は影響を受ける。したがって、業種、小分野、大分野および全米規模の各段階において、分野ごとに推定人員の確認や線量(年齢)分布の特徴付けと確認が不可欠となる。また、時間的な制約から、全米規模の的確な要約を最優先とするため、職業被曝人員の多い分野および被曝の大きい分野をそれだけ詳細に解析し、全米規模の人員や線量(年齢)分布の推定誤差を小さく抑えている。

2. 人員、線量分布、年齢分布および生涯線量

推定人員の確認には次の3つの方法を用いている。人員推定モデルに用いる職業被曝人員と強い相関を有する指標(X線装置、放射線科医、NRC認可事業所などの数)、および単位指標当りの人員の歴史的動向を解析して傾向の確実性を確認する。各分野ごとに可能な限り独立した複数の人員推定モデルを設定し、推定値の一致性を確認する。さらに、推定人員を各分野ごとに一般労働人口などと比較して比率の妥当性を確認する。

線量分布の解析には、筆者らの開発した混成対数正規(Hybrid Log-normal, HLN)分布を用いた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この確率分布は3助変数だけで実測線量の全範囲にわたり適合性よく線量分布を特徴付け、しかも個人被曝規制の努力量を意味する助変数を1つ含む⁽⁶⁾。したがって、HLN分布は、①線量区分の粗い不完全な被曝統計から、全体の線量分布を構成する合理的な基礎を与える、②被曝データの歴史的動向や一貫性を詳しく調べるのに役立つ、③集団線量推定の的確で一貫した基礎を与える、さらに④与えられた条件を満たす線量分布を予測するのに使える。

年齢分布の解析にはジョンソンの S_B 分布⁽³⁾(例えば18歳から65歳未満で定義される対数正規分布)の適用性を初めて確認してこれを用いた。この分布は4つの助変数で職業被曝の年齢分布を特徴付ける。性別の年齢分布はリスク評価上重要であり、さらに胚や胎児の放射線防護として妊娠可能な女性の割合を知る上でも重要である。簡単には30歳未満の割合を指標とする。

職業上の生涯線量の解析は生涯リスクを評価する上

で重要である。1970年代後半頃に退職した者の累積線量分布と個人モニタリング年数分布の解析に基づき、分野ごとの平均累積線量/平均年数の比が平均年数に反比例する傾向にあることから平均生涯線量を推定している。また、最大の生涯線量は前述の累積線量を大小順位の関数として両対数用紙に図示して得られる直線的グラフの傾向⁽⁶⁾から推定している。両方法とも初めてのものであり、EPAでは従来の方法よりも現実的な推定値を与えると評価している。

IV. 1980年度の要約

1. 人員、年間平均線量および年間集団線量

1980年度の全米職業被曝の要約を、全米規模および大分野について第1表に示す。全米の職業被曝人員は132万人で、これは米国民1,000人当たり6人、労働人口1,000人当たり12人に相当する。分野別の人員は医療が最大で原子力は4番目である。年間平均線量は全米で110 mremであり、分野別には原子力が最大で政府が最小である。検出限界以上の有意被曝者の年間平均線量は2倍前後に増える。年間集団線量は全米で15万 man-remであり、分野別には原子力が最大比率(37%)を占める。

第1表 1980年度全米職業被曝の要約

分 野	人 数 (10^3 人)		年間平均線量 (mrem)		集 団 線 量 (10^3 man-rem)
	全 員	有 意†	全 員	有 意†	
医 療	584	277	70	150	41
工 業	305	156	120	240	38
原子力	151	91	360	600	54
政 府	204	105	60	120	12
その他	76	31	70	160	5
全 米	1,320	660	110	230	150

† 検出限界以上に有意な被曝を受けた者

2. 線量分布

全米規模の職業上の年間線量区分による人員と集団線量の分布を第2図に示す。半数は検出限界未満で、0.1 rem 以下は約84%、5 rem 以上は0.1%である。集団線量で見ると最大値は1~2 rem区分にあり、0.1 rem 以下は全体の約10%、5 rem 以上は全体の5%である。0.5~5 rem区間にいる全体の5%だけの人員で全体の約65%の集団線量を占めているのが特徴的である。

分野別には年間平均線量の小さい医療では、被曝規制の影響が弱い線量分布、また年間平均線量の大きい

原子力では、被曝規制の影響が極めて強い線量分布となる。

第2図 年間線量区分による全米の
人員と集団線量(1980)⁽³⁾

第3図のHLN 確率紙に医療と原子力分野の線量分布の違いを示す。このように、他の分野においても年間平均線量が大いほど被曝規制の影響がそれだけ強まり、高い被曝の変動は対数正規領域から正規領域にそれだけ移行する傾向が見られる。

第3図 医療、原子力および全米の1980年
線量分布のHLN 確率紙プロット

3. 年齢分布

全米規模の職業被曝の年齢区分による人員と、集団線量の分布を第4図に示す。両分布とも20代後半に最

大値を持ち、中位値年齢はともに31歳である。全人員の半数近い女性は30歳未満で男性の1.5倍、30歳以上で男性の1/2程度のため、女性の中位値年齢は男性より5歳若く28歳である。年間平均線量は男性160 mrem、女性50 mrem、また年間集団線量の男女比率は8:2である。女性の年間集団線量の約75%は医療分野、そのまた55%は30歳未満の女性による寄与である。原子力分野の女性は男性の7%、年間集団線量は男性の1.5%と少ない。そのまた65%は30歳未満の女性による寄与である。

第4図 年齢区分による全米の人員
と集団線量(1980)⁽³⁾

V. 歴史的動向と予測

1. 人員、年間平均線量および年間集団線量

1960年以降5年ごとに人員、年間平均線量および年間集団線量の動向を、5大分野と全米規模について要約したものが第5図である。横軸は人員、縦軸は年間平均線量、斜線は等年間集団線量を表わす。1985年予測は1975~80年の動向から求め、その任意の予測誤差±20%は□で図示してある。この図から1960年以降の動向に占める1980年度推定値の位置付けが知られる。すなわち、全米の人員と年間集団線量は増加傾向にあり、年間平均線量はわずかに減少傾向にある。このような傾向の背景を次に見てみよう。

米国において線源の生産や利用は1950年代後半以来増加し、この傾向は分野別に職業被曝の推定人員と強い相関を持つ。したがって、全米の職業被曝人員は1960年の50万人から約15年ごとに倍増する勢いであり、1985年には164万人に達するであろう。米国民1,000人当たりで見ると、1960年の3人から1985年の7人に増えることに相当する。分野別の人員比率は1960年以来、医療と工業で約3/4、原子力と政府で約1/4を占める。人

第 5 図 人員, 年間平均線量, 年間集団線量の 1960 年以来的動向と 1985 年の予測⁽³⁾

員増加率が最大の分野は原子力であり, 1985 年には全米予測人員の 12% に達すると見られる。

全米の年間平均線量は 1965 年まで 180 mrem にとどまり, その後医療と政府分野の被曝低減努力により大きく減少した。しかし, 1975 年以降はあまり減少せず, 1985 年には 105 mrem にとどまるであろう。これは, 全米の年間集団線量の担い手が, 最大の人員を抱える低年間平均線量の医療分野から, 最大の年間平均線量を持つ小人員の原子力分野に 1975 年以降変わったことによる。

年間集団線量は, 経年的に医療と政府分野で被曝低減が人員増に勝り減少, 原子力, 工業, その他の分野で人員増が被曝低減に勝り増加している。この減少と増加の合成結果, 全米の年間集団線量は 1975 年まで増加が抑えられたのち増加の傾向に転じ, 1985 年には 17 万 man-rem に達すると予測される。この増加傾向を抑えるのに, 原子力と工業分野における ALARA (as low as reasonably achievable) 計画は一層関心を引くと思われる。原子力分野では, すでに放射性腐食生成物の低減化や高線量率作業の自動化を含む ALARA 計画が進められている。しかし, さらに木目(キメ)の細かい検討が必要となろう。

2. 線量分布

現行連邦指針の下で年間線量分布はどのように被曝規制の影響を受けて来たかを示す。第 6 図の対数正規確率紙に 1960 年以降 5 年おきの年間線量分布を示す。グラフはいずれも適合性を確かめた後 HLN 分布に当

てはめて得たモデル曲線である。図から, 約 2 rem 以上の線量領域で年代を追うとグラフの曲率の増加する傾向が見られる。HLN 分布モデルによると, これは個人線量を基準値以下に低減する管理が強められて, 高い線量の変動特性が対数正規分布から正規分布の傾向へと連続的に移行するためと解釈される。この移行の程度を表わす量 $\rho(\text{rem}^{-1})$ が, 被曝低減の努力の強さを反映していると解釈される。この量は年代を追うと直線的に増加する傾向が見られ, これに基づいて 1985 年線量分布予測が初めて可能となる。この結果は第 6 図に点線グラフで示してある。これより, 1970 年以降において数 100 mrem 以上の被曝人員割合はあまり変わらない反面, 5, 12 rem 以上の被曝は 5 年ごとにそ

第 6 図 全米の年間線量分布の歴史的推移⁽³⁾

れぞれ $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{10}$ に減少している。

分野別に年間平均線量の小さい医療では、基準値以下に被曝低減する努力量は小さいながら年代的には直線的な増加傾向を示す。他方、年間平均線量の大きい原子力分野では、基準値以下に被曝低減する努力量は大きく、しかも年代的に指数関数的な増加傾向を示す。このような傾向に基づいて各分野の1985年線量分布予測が可能である。

3. 新基準下の1985年度線量分布の試算

新連邦指針には全身相当5 rem/yrの基準が導入される計画である。前述の1985年線量分布予測では5 remを超える被曝人員が全米で600人ほどになる。仮に、1985年の推定人員164万人、推定年間平均線量105mremを一定、すなわち年間集団線量を一定にして、検出限界以上の被曝者内で線量を再配分して5 rem以上の被曝を1人程度に低減すると、線量分布にどのような変化が生ずるかの1例を示す。これは新基準導入の影響を考察する上で重要な解析である。この解析は、HLN分布に検出限界未満と5 rem以上の人員割合および年間平均線量の3条件を与えることで達成される⁽⁴⁾。この結果は1960年以降の動向と比べると明快である。

第7図は、与えられた線量を超える全米職業被曝人員の動向を、1960年以降5年おきに図示したものであ

る。12 rem以上の被曝人員は大きく減少し、5 rem以上の被曝人員も1965年以降減少している。全米の職業被曝人員の増加は2 rem以下の線量領域で生じている。図中の破線と点線はそれぞれ1985年予測に対する前述の歴史的動向法と5 rem 遵守法の結果である。破線は過去の動向になじむ一方、点線は変化が大き過ぎ1985年の実現は難しいと判断される。点線グラフの傾向から、約0.8 rem以上の線量領域で被曝低減化が進行し、同時にそれ以下の線量領域で被曝増加が進行することにより集団線量が一定に保たれていることがわかる。このように年間集団線量を固定して5 rem規制を達成すると、低線量領域で被曝が増大するという変化をもたらす。したがって、被曝源それ自身の低減化や大線量作業の自動化が集団線量の低減化に不可欠で、次の的確な作業計画や教育訓練が被曝低減のために求められることになる。

4. 生涯線量

労働生涯を通じて累積される生涯線量には、次の性質が見出される。分野別の平均個人モニタリング年数が長いほど、年当りの平均生涯線量はそれだけ減少する傾向にあり、両者の積は分野別に1 rem前後である。したがって、労働生涯で受ける平均生涯線量は1 rem程度と推定される。生涯線量の大小順位は約500番まで両対数紙上で順位と直線関係にあり、その最大値は110 remである。したがって、労働生涯で受ける最大生涯線量は100 rem程度と推定される。この評価に用いたデータには1940年代の被曝も一部含むので、最大値に関しては高めの評価といえよう。しかし、平均値に関しては古い時代の占める人員と集団線量が少ないため、その変化は少ない。

Ⅶ. まとめ

米国環境保護庁における新連邦放射線防護指針策定計画の一環として行われた全米職業被曝の解析を簡単に紹介した。すなわち、米国における職業被曝の法権限と基準、全米職業被曝の解析法、全米職業被曝の1980年度要約および全米職業被曝の歴史的動向と予測である。米国の各産業分野で線量の生産利用の拡大に呼応して職業上の被曝人員は確実に増加している。同時に、放射線防護技術の進歩に伴い年間平均線量は減少し、年間集団線量の増加も小さく抑えられ、さらに基準値に近づく被曝は確実に減少している。しかし、新基準として計画されている5 remの遵守にはかなりの対応が必要である。また、今後年間集団線量の増加を抑制するには、原子力と工業分野でのALARA計画

第7図 全米職業被曝人員の動向と予測⁽⁴⁾

が一層強く求められる。

誌面の関係上、我が国や諸外国の職業被曝との比較は省略した。関心のある方は国連科学委員会1977年および1982年報告書の職業被曝という付属書を参照して頂きたい⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。我が国については丸山らの文献がよい⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。ただし、職業被曝の対象者、産業分野の取り方は必ずしも同じではなく、年間平均線量も単純に比較できないことに注意して頂きたい。

— 参 考 文 献 —

- (1) COOK, J.R., NELSON, D.R.: *EPA* 520/4-80-001, (1980).
- (2) U.S. Environmental Protection Agency: *EPA* 520/4-81-003, (1981).
- (3) KUMAZAWA, S., NELSON, D.R., RICHARDSON, A.C.B.: *EPA* 520/1-84-005, (1984).
- (4) KUMAZAWA, S., NUMAKUNAI, T.: *Health Phys.*, **41**, 465 (1981).
- (5) 熊澤 著, 島崎潤也, 沼宮内弼雄: *JAERI-M* 82-035, (1982).
- (6) 熊澤 著, 松井 浩: 保健物理, **15**, 101 (1980).
- (7) KUMAZAWA, S., NUMAKUNAI, T.: *Health Phys.*, **43**, 166 (1982).
- (8) 熊澤 著: 電子通信学会論文誌, J65-A, 2, 201 (1982).
- (9) United Nations: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, (1977).
- (10) 同 上, (1982).
- (11) 丸山隆司: 保健物理, **13**, 259 (1978).
- (12) MARUYAMA, T., et al.: *J. Radiat. Res.*, **22**, 204 (1981).

投 稿 歓 迎!

(1982.1. 一部改正)

本会「和文誌」投稿欄の種別は、次のとおりです。(※ 欧文は「欧文誌」に掲載)

◆掲載料は1篇5ページ以内は1ページにつき5,000円; 6~10ページは1ページにつき10,000円; 11ページ以上は1ページにつき15,000円でありますので、ご了承願います。◆

① 研究論文*	研究の対象・方法あるいは結果に独創性・創造性があり、かつ明確で価値ある結論や事実を含み、未公開のもの。
② 技術報告*	材料の製作・施設・設備・装置等の設計・試験・運転などの新しい経験やその結果をまとめた実用価値のある技術的報告で、未公開のもの。(「本誌」, 24[1], 86(1982)を参照)
③ ショート・ノート*(3頁以内)	研究・技術上の独創的かつ重要な発見または結論を含む論文の速報。
④ レター*(1~2頁)	掲載論文に対する質疑応答または意見。
⑤ 資 料*	研究・技術に関する参考資料または調査集計報告など。
⑥ 私のノートから(2頁以内)	各専門分野の研究または技術上の経験, 斬新なアイディア, 珍しい実験結果など。(掲載料不要)
⑦ 談 話 室(2頁以内)	内外の会議・学会などの見聞記・感想, あるいは原子力を含む科学・技術に対する提言など。(同 上)
⑧ 新 刊 紹 介(約0.5頁)	会員の役に立ち, 興味のあると思われる内外の出版物の書評および紹介。(同 上)
⑨ 会員のこえ(約0.5頁)	本会または「本誌」に対する希望・意見などの自由投書(用紙自由, 誌上匿名可)。(同 上)

巻頭言, 特別寄稿, 解説, 講演, 特集, 等は編集委員会で作案・企画して執筆依頼する。

ご投稿には、「投稿規程」および「投稿の手引」に従って、所定の原稿用紙(30枚綴り1冊200円, 〒240円; 欧文は市販タイプ用紙)、「投稿票」(付チェックリスト)に記入して事務局宛ご送付下さい。

なお、「投稿規程」および「投稿票」の中の、専門分野「分類項目」が改訂されましたので、「本誌」2月号(Vol. 26, p. 179)を参照願います。