

ビキニ事件の追想と今後の放射線安全問題 (1)[†]

Merril Eisenbud^{††}

本日ここで話をするようお招きをうけたことは大変名誉なこと、この機会に長い間お会いすることのなかった多くの日本の友人に再会できることをとくに嬉しく思います。本日は原子力発電における安全の現状についてお話をすることになっていますが、その前に今からちょうど30年前に起こったビキニ事件の回想について触れさせていただきます。

ビキニ事件の回想——その教訓

1954年3月1日、ビキニ環礁で行われた熱核爆弾の実験により数千km²の地域に激しい放射性降下物がまき散らされました。爆発の直後にマーシャル群島の住民と、風下の環礁にいた一群の米軍人が降下物からかなり多量の被曝をうけたことがわかりました。最大の被曝をうけたのは Rongelap 環礁の67名の住民で、全身で約175 rem、また甲状腺の被曝も子供たちに対し最高1,800 rem になると推定されました。

その2週間後3月14日に、日本の漁船“第五福龍丸”の船員たちが焼津港に着きましたが、彼らは爆発のあった時にビキニの西約90マイルのところで操業しており、数時間たつと上空から灰のようなものが降ってきて、ちょうど雪のように船上に積もったということでした。漁夫たちは帰航しはじめましたが、多くの人々はまもなく気分が悪く眼が赤く痛みはじめ、下痢も起こすようにな

りました。3日たつと皮膚障害が現れはじめましたが、これは帰航中の2週間の間漁夫たちはひどく汚染された船上で生活したため体外被曝をうけ、体表には降下物粒子が付き、また降下物で汚染された食物をとっていたことによるものでした。

私がこの事件を最初に知ったのは米国のラジオニュース放送でしたが、2、3時間たつと当時広島のアBCの所長であった John Morton 博士からの電話を受けました。彼はそのときすでに東京におり、漁夫たちの状態について日本の医師たちと相談していたが、この事件については多くの環境問題がありそうなので、私と相談したいというのです。私は当時 AEC の保健安全研究所の所長をしており、研究所は放射性降下物の研究を任としていましたので、結局できるだけ手助けをするため日本へ行くほかないと決めたのでした。2、3時間のうちに私は出発しましたが、今でも思い出すのはその飛行が約40時間もかかったことで、当時はそれが当たり前でした。

私が東京に到着したとき、歓迎陣に対処すべき準備は私にはまったくありませんでした。というのは、私がニューヨークと東京との間を飛んでいた40時間の間、私はなにも情報を得ることができなかったのに、その間にこの福龍丸の事件はまぎれもなく全面的な国際的事件になっていたのです。この事件は、両国間の平和条約が調印されてすぐ後であったことを思い出していただかなければなりません。そして福龍丸事件は調印ののち最初に両国間に起こった嬉しからざる事件だったのです。

30年たつてこの事件を省みると、ここでお話しておいた方がよいと思われる個人的な問題がいろいろあることに気がきます。まずコミュニケーションを難しくするような言葉の障壁がありました。当時は西欧の言葉を上手に話す日本の科学者はきわめて少数でしたので誤解を生ずるものとなったのです。一つだけ面白い例をお話しましょう。東京に着いた翌日、私はメッセージをもらいました。それによると、都築正男先生*がその日福龍丸の母港である焼津を訪ね、夜10時に東京へ帰ってくるはずなので、私に先生の家を訪ねてほしい (call on him at

[†] 去る1984年11月2日に行われた原子力安全研究協会の招きによる講演の草稿をもとに許可を得て安本 正(東京電力㈱原子力保健安全センター)および山県 登(国立公衆衛生院放射線衛生学部)が翻訳したものである。

^{††} Dr. Merrill Eisenbud (ニューヨーク大学名誉教授) 1915年生まれ。1959年までの12年間、米国原子力委員会に在職、この間 Health and Safety 研究所長を兼務。1959～1984年までニューヨーク大学医学部環境医学科教授、環境調査研究所長。1968年～1970年の2年間ニューヨーク大学を賜暇し、ニューヨーク市の初代環境保護局長。

代表的著書 邦訳「ヒューマンエコロジー——環境・技術・健康——」山県 登訳、329頁、産業図書(1981年)、邦訳「環境放射能(第2版)」阪上正信監訳、452頁、産業図書(1979年)

home) ということです。私は、これは少しおかしい、訪問するには時間が遅すぎると思いましたが、とにかく伝言どおりに先生の家に出席しました。私がお宅に着いたとき家は真暗でしたが、案内を乞うと先生は着物姿で現れました。先生の様子は訪問者を待ちうけていたようではなかったのです。先生が伝言を頼んだのは訪問 (call on him) ではなくて、電話をかけてくれ (call him) だったのでしょう。私は初対面でしたが、幸い先生は大変ユーモアのわかる方ですぐに状況を理解して下さり、私たちは初対面の大変楽しいひとときを過ごすことができました。それから親しく友人としてお付き合いをしましたが、先生はもうずいぶん前に亡くなりました。先生は第二次世界大戦での広島と長崎への原爆投下の後に行われた医療サービスを整える上で大きな役割を果たした方でしたから、世界の誰よりも大線量の放射線被曝の影響について多くのことを知っていた優れた医師であり、かつ科学者であったことも疑いありません。この事件のお陰で、私は深刻な国際間の相互不理解がほんのちょっとした翻訳の誤りから起こり得るということを学びました。

仕事のために大変に時間をとられ疲れてどうしようもなくなりました。毎日朝早くから仕事が始まり夜遅くまで続きました。私が夜10時か11時にやっとベッドに入ろうとしていたときは、時差のお陰でニューヨークやワシントンでは朝の仕事が始まろうとしている時間で、電話で知らせをうけ取るためにしばしば眠りがさまたげられ



写真1 Eisenbud 夫妻

* つづき
都築正男 (1892～1961年) 東京大学 (医学部) 名誉教授、
外科学専攻。

ることになりました。私が当面させられていたこの事件の放射線問題の調査で、私と責任を分かち合ってくれるような米国人は、日本には他に誰もいませんでした。このように大切なときには、人は最良のコンディションになければならないのですが、私の場合いつもそうとはかぎりませんでした。なにかの重大な国際的危機——それは毎日のように起こっていることですが——について書かれたものを読んでいるときによく思い出すのはこの30年前の私の経験です。そして私は、それぞれの国を代表している男も女も、その張りつめた時間の間いつも活動的な精神状態であることができるよう望んで止みません。ここでもまた私にとっての教訓を得たわけですが、それはもし当事者たちが適当な休息もなく何日も仕事をするために起こる疲労を避けることができたならば、いかに多くの国際的危機がもっと速やかに解決されたであろうかということです。

外務省は米国大使館に対して、Dr. Morton と私は、当時公衆衛生院長であった小林六蔵先生が委員長となって作られたある委員会を通してすべての情報伝達を行うよう指示してきました。不幸にして福龍丸に関心をもつ日本の科学者のすべてがこの委員会のメンバーというわけではありませんでしたが、この外務省の指示のため私達はそのような科学者と直接話をすることはできませんでした。また私は自分で新聞発表をしないということにも同意しましたが、それは日本の科学者の作る委員会がするのが当然のことだからです。このような張りつめた日々、私達に接触できないということで気分を悪くした人がいるとすれば、それは私達がこの指示に忠実に従ったためで他意はなかったのです。

よくわかることですが日本の科学者は私個人にあまりにも多くのことを期待する傾向がありました。たとえば私が尿の中の FP の分析をどうやって行うか日本の放射化学者に教えたいと思っても、それは私の専門を越えていることでした。それに私が日本に初めてやってきたときにはフォールアウトの組成について詳しいことは何も知りませんでした。しかし米空軍は、ニューヨークのわれわれの研究所で必要な分析ができるよう、試料を迅速に米国へ送るため協力してくれました。さらに米国からの情報は、必要なときにはただちに電報でわれわれに送られてきました。

最も重要な私の仕事は2つあって、それは漁夫たちの体内汚染の程度を知ることと、ほとんど毎日のように到着すると報ぜられた漁船の汚染マグロに関する報告書を評価する必要があったことです。新聞が汚染マグロにつ



写真2 ビキニ事件後に開かれた日米放射能会議（昭和29年11月15日～19日，日本学術会議（東京・上野））

前列左より 檜山義夫，清水 榮，木村健二郎（日本側委員代表），M. Salisbury，山崎文男，三宅泰雄，前野正久
 前二列目左より W. R. Boss，長沢佳熊，藤岡由夫，J. Harley，中泉正徳，伊藤岳郎，寛 弘毅
 前三列目左より 吉田正男（通訳） P. B. Pearson（アメリカ側委員代表），W. D. Claus，三井進午，田島英三，
 1人おいて，村地孝一
 最後列3人 1人おいて，M. Eisenbud，S. B. Hendricks

いてあまりにも書き立てましたので，米国の缶詰業者は汚染されていないという証明がないかぎり，日本からの魚は受け取れないという声明を出しました。私が日本にいた3週間の間に，私は福龍丸の漁獲物以外に汚染されたマグロを見出すことはできませんでした。発見しようとずいぶん努力をしたのですが，結局この仕事に多くの時間をとられてしまいました。

この事件についてわれわれすべてが関心をもっていたことは，高度に汚染した船上に2週間生活していた間に漁夫たちがフォールアウトに暴露された結果，体内汚染を起こしているのではないかということです。日本の研究者の報告によると，皮膚の表面がひどく汚染され，表面や毛髪，衣服に付着したフォールアウトの粒子によってひどく照射されたため，重篤な放射線火傷を生じているということでした，また，当時利用できた簡単な計測器による身体のスキャンの結果，甲状腺に放射性物質が濃縮されていることを示しましたので，漁夫たちの体内

に放射性ヨウ素が吸収されていたことがわかりました。そのため，被曝の3～4週後に集められた尿試料をニューヨークの研究所に送って分析した結果，ほんの少しのFPしか尿中に排泄されていないことがわかったときは大変驚きました。これらのデータは私の手紙による報告書と共に，日本の学術振興会が1956年に出版した「原子爆弾災害調査報告集」という2分冊の報告書の中に入っています。この報告書は1,650ページにおよぶもので，ビキニ事件についての知見をまとめた優れたものです。

当時の新聞は ^{90}Sr による汚染に非常な関心を示しました。この長半減期核種は好骨核種であることが認められていて，FPの中で最も危険の大きいものと一般にみなされていました。ルーチンの $^{89}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$ 放射化学分析法はまだ開発されていませんでしたが，われわれは尿中の全ストロンチウムの量を報告することができ，それによるとそれ程顕著な量の骨への沈着は起こっていないと思われました。これは，1954年9月に漁夫の一人が亡く

なり、その組織試料の中のFPが東京大学の木村教授によって分析されたことから確認されました。骨中の ^{90}Sr 含量は新鮮組織1g中1pCiと見積もられ、これは当時の正常者よりは高い値でしたが、米国やソ連による原爆実験が頂点に達した1960年代半ばの一般人の場合よりはいくらか低い値でした。原爆の破砕物による大量の汚染というこのユニークな経験によって、その場合 ^{90}Sr による体内沈着は非常に少ないということが示されたのです。

同様にほかの放射性核種もわずかししか体内に沈着していないことが示されましたが、放射性ヨウ素だけは例外でした。 γ 線スペクトロメトリは不幸にして当時開発の最中で、漁夫の甲状腺中の ^{131}I の量は満足に測定できませんでした。小林先生への報告書の中で私は ^{131}I の甲状腺負荷が1mCiにおよんだかみしれず、それによる甲状腺線量は1,300remになるはずであると報告しました。しかし、当時私が用いた計算の根拠は、最近の放射性ヨウ素に関する知識に照らしてみると誤りでした。私の知るかぎり、漁夫のうけた甲状腺の線量の信頼するに足りる推定値はありませんが、すべての状況から甲状腺は他の臓器よりもはるかに大きな線量をうけたと考えるのが至当でしょう。

事件から6ヵ月後の1954年11月、日米共催の放射線生物学会議（日米放射能会議）（写真2）が東京で開かれましたが、これはフォールアウトと放射線影響に関する知見を交換するためでした。この会議の席上、当時の最新式のシンチレーション・カウンタ装置をアメリカ政府の名で私の手から既述の委員会に寄贈いたしました。この種の装置は日本の科学者がそれまで利用することのできなかったものです。この会議のお陰でたくさんの科学者の間の友情が生まれ、そしてその多くは今日まで続いているのです。

ビキニ事件の当時は、核エネルギーについての知識の多くは核戦力のためなお秘密にされていましたが、この状況は翌年急速に変化することになります。まず、1955年9月にはジュネーブで第1回の原子力平和利用に関する国連会議が開かれ、ついで12月にUNSCLEAR*の第1回の会議がニューヨークの国連本部で開かれました。引き続き翌1956年には国際原子力機関が設立されました。これらの進展を顧みて、私は日米両国の科学者によってなされた重要な貢献を喜ばしく思うとともに、自分

がその両国の科学者の協力の手助けをする機会に恵まれたことを感謝する次第です。ビキニ事件は悲劇的な経験でしたが、この事件は放射性降下物の危険を夢にも考えていなかった世界中の人に警告を与えたものでした。歴史家は将来この事件を国際関係の歴史における転換点の一つとして、世界中の指導者にこれからは大きな戦争はあってはならぬという認識をさせたものと見るでしょう。この目標はまだ流動的で達せられていませんが、もしいつの日か達成されるとすれば、それはわれわれが1954年のビキニ事件で学んだ教訓に一部負うことになるでしょう。

ビキニ事件後における放射線防護の考え方の変化

ビキニ事件後の30年間に放射線防護の考え方がどう変化したか、また原子力の将来について何か話してくれというお話でした。1954年には核に関する科学技術はまだ幼らん期にあり、戦後約10年のその時代には米国で原子力産業がやっと始まったばかりです。原子力の利用はまだ軍事利用が大部分で、例外として研究用と医学用のRIの製造と利用があっただけです。放射線防護の分野では、シンチレーション・カウンタはまだ一般に利用されておらず、原始的な γ 線スペクトロメータしかありませんでしたし、 α 線スペクトロメータは今でも普通の本の大きさよりそう大きくないのに、当時は大きな部屋を占領する位の大きさで何百という真空管を働かす電力を必要としたものです。1954年にはトランジスタもコンピュータもなかったのです。30年も昔のことを話するときには、放射線計測に関する科学やデータ処理の技術がおそろしく進歩したことを知っておくことが大切です。

1954年には自然放射能に関してあまりわかっていませんでしたが、この分野は日本の科学者が先鞭をつけたもので、それは東京大学の木村教授による基礎的な研究に負うことが大きいのです。比較的低い上空の宇宙線の測定や大地からの γ 線による被曝線量の測定も行われていましたが、利用できるデータはあまりありませんでした。われわれがさらされている自然放射線のレベルは、現在ではその特性がよくわかっています。もっとも、肺が以前考えられていたよりもはるかに多く、ラドン系列による線量をうけていることが認識されはじめたのはほんの数年前のことでしたが、

また、自然放射能のレベルが通常より相当高い場所が世界には何箇所かあることもわかりました。インドやブラジルのモナザイト砂からうける線量についてもよく調

* United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation の略。通称国連科学委員会という。

べられています。そのほか報告された研究としては、米国中西部の飲料水中のラジウムのレベルが高いことや、オーストリアの Bad Gastein におけるラドンによる被曝、ブラジル Minas Gerais 州の食物中のラジウムレベルが異常に高いことが知られています。これら自然放射能に関する研究は、人工的な放射線源の相対的な重要性を導き出すための基本線をきめる助けになっています。しかし残念ながら、これら放射能の異常についての研究に基づいても、被曝集団の大きさが統計的に有意差を結論づけられるほど大きくないため、低レベル放射線の生物学的効果に関する知識に新たな知見を付け加えるにいたっていません。ただ一つ、インドにモナザイト砂の上に生活している約10万人の集団があり、住民は1年当たり1 rem 被曝しているのです、この集団は価値ある情報を提供するのに役立つと考えられています。しかし残念なことには、インド政府はわれわれが知りたいと思っている組織的な疫学的研究を出発させていないのです。

今世紀のはじめに起こった放射線による傷害や死の恐るべき記録のことを考えると、原子力産業が優れた安全の記録を打ち立ててきたことはまったく素晴らしいことだと思います。今世紀のはじめの40年間に地殻から掘り出され医学や産業に利用された²²⁶Raはわずか1 kg 程度に過ぎませんでした。この比較的少量のラジウムが米国で100名以上の人の命を奪ってしまったのです。よく知られているように、この死の大部分は第一次大戦中に夜光塗料を用い文字盤に数字を描いていた労働者の集団の間に起こった骨がんによるものです。またX線装置の使用によっても今世紀のはじめに多くの傷害を生じた記録があります。

1928年には電離放射線の取扱いに関する危険の存在がよくわかったため ICRP (国際放射線防護委員会) が設置され、それ以来放射線防護の分野で押しも押されぬ存在となったのです。その1年後に米国では National Council on Radiation Protection and Measurements(NCRP) が設置されました。それ以来世界の科学者が放射線被曝による障害の研究を始め、その努力が実って基準が作成され1942年に効力を生ずることになったのです。今世紀のはじめの40年間にわずか1 kg 程度のラジウムが100名以上の人を殺してしまったのに、米国ではその後ラジウム数百トンに相当する放射性物質を処理して使ったにもかかわらず、内部被曝による死者の記録は1人もないのです。他の多くの国でも同じように原子力安全の優れた記録をもっています。

話を急いでウラン鉱山の問題に進めたいと思います。

東欧の鉱夫たちがラドンの吸入によって高い肺がん発生率を示すことは昔から知られており、米国政府が1940年代半ばにウラン鉱山の開発を始めたときにもわかっていたはずで、ところが米国原子力委員会を設置したときの法律の技術上の問題のため、ウラン鉱山における放射線防護の基準を作り執行する権限は地方政府にあると考えられました。それ以外のすべての核燃料サイクル中の問題については原子力委員会の責任でした。不幸にして1960年代半ばまで鉱山での予防対策は不適切でした。そのため鉱夫の間に高い肺がん発生率を示したのでした。NCRP が1942年に勧告した基準が取り入れられてさえいれば、このようなことは避けられたでしょう。

米国では臨界事故による死亡は今までに全部で7名ですが、その最後の例は1964年にある私企業の工場で起こったことで、その後20年まったく起こっていません。これは米国における開発計画の大きさを考えると顕著な安全の記録で、原子力開発をすべての産業の中で最も安全なものとしています。公衆の安全に関する記録も単に米国だけでなく西側世界全体を含めて素晴らしいものです。炉心事故は今までに約1ダースありますが、どれ一つとして公衆に傷害を与えたものはありません。公衆の被曝という観点からみてもっとも重大な事故は1957年英国で起こりましたが、それはプルトニウム生産用の天然ウラン空冷型の原子炉でした。これを除くと西側世界のどこで起こった原子炉事故も、近くの公衆にごく些細な被曝以上のものを与えたものはありません。今までに最も華々しい事故が1979年に Three Mile Island で起こり莫大な経済的損失をもたらせたのですが、近くの住民にはわずかな被曝を与えたに過ぎません。発電所周辺で最大の被曝をうけた人でも約70 mrem と推定され、これはその地方の自然放射線から毎年うける量より小さいのです。

現在数か国で行われている研究によると、原子炉の炉心が破壊されたときに放出されるヨウ素の量は従来過大評価であったことを示唆します。そうであってくれて欲しいと思いますし、軽水炉の炉心溶融に際して放出されるヨウ素の割合についてここ1、2年の間に新たな合意が得られるよう望むものです。放射性ヨウ素のソースタームを10のオーダーで減少できるとすれば——多くの研究者はもっと減少できると信じていますが——その結果、重大な原子炉事故の結果の評価は大幅に安全側のものとなるでしょう。

(つづく)

ビキニ事件の追想と今後の放射線安全問題 (2)[†]

Merril Eisenbud^{††}

放射線の生物影響に関する知見

第二次大戦の時点ですでに実施されていた基準は、識別できるような放射線影響を防止するのに効果がありましたが、1950年頃から新しい考え方が出てきて、それによると放射線基準の適用に当たってもっとより厳しい立場をとることになります。1954年には、がんが体細胞の突然変異によって起こるという考え方が主流となりはじめ、それとともに、しきい値はないかもしれないこと、すなわち線量が減るにしたがってがんを生ずる確率は減るにしても、効果がゼロになるような線量はないとする仮説が主力を占めはじめました。

電離放射線で起こるがんの経験について、1954年の時点では放射線医における白血病、皮膚科の患者における皮膚がん、ラジウム塗料塗布工における骨がん、およびある種のX線治療を受けた患者における甲状腺がんに限られていました。ついで知られたことは、広島・長崎の原爆被爆生存者のうちに白血病が過剰発生することでしたが、これは約 100rad 以上被曝した者に限ると考えられていました。広島・長崎の Radiation Research Effects Foundation で行われている研究の結果、今では白血病の過剰発生は10ないし 49 rad を受けた生存者でも起こることが知られています。また同時にわかってきたことは、白血病の過剰発生が原爆のわずか2～3年

後に見られはじめ、15年後の1960年頃には減りはじめたということです。重要なことは白血病の過剰発生がなくなるのと時を同じくして乳がん、甲状腺がん、および肺がんを含め他種の多くのがんが発生してきたということです。被曝とこれらのがんの発症との間に長い潜伏期があるためデータはまだ集積中ですが、被曝した人びとの中に白血病と同じくおよそ4種の固型がんが起こるように思われます。

広島・長崎に関する研究の主要な不確かさの一つは生存者の被曝線量ということです。1965年に出された評価線量が今まで線量—効果関係を求める基礎になってきましたが、この評価値を見直す必要があると考えられ、線量再評価が主として日本と米国の間で行われています。日本側の研究は田島英三博士を委員長とする委員会のもとで行われています。

日本における経験や米国および欧州における医療被曝を受けた集団に関する研究から引き出せることは、放射線量が与えられればそれにより発生するはずのがんの確率を見積もることができるということです。これを見積もるモデルはたくさんありますが、概数でいうと100万人レムについて約100のがん発生という見積りです。言葉をかえて言うと、個人ががんになる確率は1rem 当たり約 10^{-4} ということになります。

こう言えるための根拠は線量と効果の間に直線性を仮定しているからです。線量—効果関係を表すのに使う方程式がいくつか考えられていますが、その中で最もよく使われるのがいわゆる直線—二次曲線モデルといわれるもので、低線量では効果と線量との間に直線関係、高線量では曲線関係を示すものです（諸種の線量—効果関係モデルについてスライドで示す。略）。

体外被曝による傷害に関する疫学的知見は、比較的高い線量を高い線量率で受けた集団についての研究から得られたということに注目しなければなりません。このようにして得られたリスク係数が、低線量率での低い線量100mrem/年のオーダー）の場合に外挿できるかどうかということはわかっていません。このことに関連して重

[†] 去る1984年11月2日に行われた原子力安全研究協会の招きによる講演の草稿をもとに許可を得て安本 正（東京電力原子力保健安全センター）および山県 登（国立公衆衛生院放射線衛生学部）が翻訳したものである。

^{††} Dr. Merrill Eisenbud（ニューヨーク大学名誉教授）
1915年生まれ。1959年までの12年間、米国原子力委員会に在職、この間 Health and Safety 研究所長を兼務。1959～1984年までニューヨーク大学医学部環境医学科教授、環境調査研究所長。1968年～1970年の2年間ニューヨーク大学を賜暇し、ニューヨーク市の初代環境保護局長。

代表的著書 邦訳「ヒューマンエコロジー——環境・技術・健康——」山県 登訳、329頁、産業図書（1981年）、邦訳「環境放射能（第2版）」阪上正信監訳、452頁、産業図書（1979年）

要なことは、米国科学アカデミーの1980年の報告「低線量電離放射線被曝の集団に対する効果」に、年に約 100 mrad の γ 線および X 線が人に有害であるかどうかは不明であると述べられていることです。1 rem の影響は低線量率の場合、高線量率の場合より小さいということは認められていますが、米国 NCRP は線量率による減小因子について数値を示すことはまだしていません。ただし、この因子は吸収線量が 20rad またはそれ以下で線量率が年に 5 rad を超えない場合に 2 ないし 10 の間にあることが示唆されています。したがって、一般公衆が通例被曝する線量である年に 100mrad のオーダーに対する減小因子の効果については大胆な推測の範囲を出ないのです。

もう一つ残された重大な課題は、被曝とがんの発症との間の潜伏時間に対する線量の影響です。固型がんの潜伏期はある場合には30年以上です。主に第一次大戦とその少し後に被曝した米国の夜光塗料による患者の研究によれば、最大のラジウム体内負荷量をもった者は比較的短時間に骨がんを発生しましたが、体内負荷量が小さくなるにつれてがん発生までの期間が長くなっています。これに対し、まだしきい値があると想定すべき根拠はないとはいいながら、潜伏期がその人の寿命よりも長くなるような線量、すなわち実効しきい値 (practical threshold) があることが示唆されています。興味あることは、広島・長崎のデータでも低い線量を受けた被爆生存者に白血病が遅れて発生していることが示唆されており、動物実験でもまたそのように考えられています。実効しきい値が存在するかどうかという問題はきわめて重要で、それはとくに原子力の廃棄物管理に対するリスク評価の場合で、半減期の長い超ウラン元素の α 線放出核種によって非常に長い期間にわたるきわめて低い線量を生ずると考えられるからです。

低線量における直線性仮説から生ずる問題

低線量における線量-効果関係が直線的でありしきい値がないという仮説から、いくつかの公共政策上の難しい問題が生じます。この仮説によると、どんなに小さな線量であっても影響を生じうることになります。現在使われているリスク係数は、人によってはどんなに小さな線量に対しても使えると考えられているので、直線仮説によるときわめてささいな被曝レベルに対しても影響が数字になって出てきます。最近の放射能測定技術を使うと α 放射体の 10^{-18} Ci という低いレベルまで検出できるので、線量の予測値は驚くほど小さなものになっ

てしまいます。さらに最近の環境のモデル化の方法を使うと、はるか先の未来にわたって、現在使えるどんなに進歩した測定器をもってしても測れないほど低い濃度まで予測することができるのです。たとえば TMI の事故では、その周辺50マイル以内に住民の1人当たり平均被曝線量を約 1 mrem と推定しています。平均線量は実測されたものではなく——利用できる最高の機器を使っても測定不可能です——環境被曝線量モデルを使って推定したものです。

直線的でしきい値がないという仮説によると、きわめて小さな線量を非常に多くの人の集団に当てはめた場合、ゼロではない数のがんが発生することを予測できることになります。しきい値がないと仮定すると、絶対的に安全な線量はないということになりますから、ALARA の考え方が米国その他の国で出されることになったのです。ALARA というのは As Low As Reasonably Achievable の頭文字をとった略語ですが、その根本的な問題は“reasonable”という語について一般に受け入れられている定義がないということで、ALARA というクライテリアは国によって大きく異なっているのです。

ALARA の使い方の極端な例として米国環境保護庁の高レベル放射性廃棄物の保管場(写真1)の安全に関する提案がありますが、それによると、世界全体で1万年の期間にわたって年平均0.1のがんによる死亡以下でなければならないということになります。世界人口が21世紀に100億人というレベルで平衡に達すると仮定し、これからの1万年の間に約300世代が生まれるとすると被曝する全人口は約 3×10^{12} で、生涯にわたる発がんの



写真1 アメリカの高レベル放射性廃棄物処理施設
[M. H. Cambell 編: "High-Level Radioactive Waste Management", American Chemical Society (1976)] (写真は編者挿入)

リスクは 3×10^{-9} ということになります。今日のがんの統計を未来にまで外挿し死因の16%をがん死とすれば、がんで死ぬ人はざっと 5×10^{11} 人で、これに加えて廃棄物保管に基づく 10^3 人が生ずるという結果になります。

この種のリスク評価はもちろん直線仮説を認めることによってのみ可能なのですが、評価をする人に対しては大変興味ある演習問題を与えてくれます。しかしそれと同時に、われわれが知的ならびに財政的資源をどう使うかというやり方を決める際に深刻な問題を投げかけるものです。何千年も先に残る最後のビコキュリー量の行方まで予測するために働いている科学者や技術者を、現在われわれが当面しているずっと重要な不健康の原因から生ずるリスクの解析に振り向けた方が得策ですし、常識では考えられないほど低いレベルの放射線を制御するために現在費われている金をもってすれば、たくさんあるもっと重要な公衆へのリスクをなくすことができるでしょう。私は米国についてしか実情をよく知りませんのでお許しを願ってもう1例だけ紹介させていただきますが、最近リン酸塩鉱石から元素状のリンを抽出する工場からの排気基準に関する提案がなされました、というのはその鉱石に100 ppm 程度のウランが含まれていることがあるからです。工程中で ^{210}Po が分離され大気中に放出されるのです。環境保護庁の計算によれば、5箇所のリン酸塩処理工場からの放出によって毎年0.01の発がん、すなわち1世紀に1件の発がんを生ずるというものです。その提案ではポロニウムを除去するためにスクラバーを設置すべきだというもので、設置と運転に年間200万ドルの費用がかかると環境保護庁は見積もっています。つまり、毎年約200万ドルをかけて1世紀間に生ずると仮定されるがん死を1件だけ減らそうということで、これはおそらく歴史始まって以来の高価な予防施設でしょう。いつの日か社会が大層豊かなものになり、健康に危険をもたらすものがほとんどないために、かくも小さなリスクに大層なお金を費えるようになればよいと思います。しかしわれわれは、そんな歴史上の時点からは程遠いところにいるのです。

放射性廃棄物管理に関する原理的問題点

多くの国が高レベル放射性廃棄物の管理計画を建てつつあります。現在のところよく考えられているのは地質学的な深層における貯蔵ですが、深海底への埋没といった可能性もあります。この計画には研究と開発が共に含まれ、各地の図書館には莫大な数の中間報告や学術論文が集まりつつあります。しかし、将来多くの技術的決定

をする場合に不可欠になるある種の準技術的ないしは哲学的な問題に関しては、ほとんど考慮が払われていません。

そのような問題として少なくとも次の三つを挙げることができそうですが、それぞれについて簡単に説明したいと思います。

- (1) 核エネルギーについてなぜこのように大衆の誤解があるのか？
- (2) 廃棄物貯蔵の評価モデルは将来のどの時点まで有効なものを考えるべきか、そしてどのような判定条件を用いて後世の人びとに適用できる基準を作ればよいのか？
- (3) 自然界から類推によってどれだけ学びうるか？

これらの疑問に答えることは、将来廃棄物管理を実施する際にきわめて大きな影響を与えることになります。

この問題についてなぜ大衆の誤解が大きいのか？

高レベル放射性廃棄物貯蔵施設の建設に対する主な障壁は、もはや技術的なものではなく社会的なものです。多くの国で、大衆の役割というところに深い関心が持たれた結果、法令および手続への要求が複雑となり貯蔵施設の立地を困難なものとしています。多くの研究が示すように、大衆の一部の人が考えている低レベル放射線のリスクは、真のリスクとは比較にならないものです。大衆は確率論の評価という形式の議論を理解しないように思えます。自然放射能のバックグラウンドとその変動について知っている人はほとんどいません。われわれ科学技術者は、低レベル放射能という事柄について大衆を啓蒙する仕事に十分な時間を割いてこなかったようです。

このような矛盾が生じていることについては多くの理由があります。放射能は神秘的な物性の一つです。大人の多くは放射能という言葉を広島原爆の発表の時にはじめて聞いたのです。本質的な問題の一つは、放射能の話に出てくる量がとんでもなく大きな幅をもっていることです。たとえば TMI のことを書いたある記事を思い出しますが、そこに出てきた放射能にはビコキュリーから数百メガキュリーという幅があるのです。それは10の20乗に達するので科学者でさえ多くは理解の範囲を超えているでしょう。このような違いは原子の直径と地球から太陽よりもっと遠い宇宙空間のある点までの距離との比較に相当するものです。したがって大衆の多くが原子力平和利用におけるリスクの問題に困惑してしまうのも不思議ではありません。

どれくらい遠い将来まで、どのような基準によって子孫を護るべきか？

現在では必要なだけ長い期間にわたって人類の被曝を評価するモデルができており、ある研究では100万年の長きにわたっています。このような長い期間にわたってリスク評価をして悪いという理由はないにしても、そんな先までそのモデルが成り立つことを保証する手だてもなく、また不確実さは先に行くほど当然大きくなるということを確認しなければなりません。1,000～1万年先の予測は1万～10万年先の予測より信頼がおけるといえます。ここにこそ哲学的な考慮が加えられるべきゆえんがあるのです。また同時に必要なことは、気候や地質や水理に起こるかもしれない変化を知ることに加え、社会の発展を予測する際の莫大な不確かさを正しく評価するための歴史に関する知識です。

先進国では技術の発展が爆発的な速度で進行しつつあります。およそ1万年前に人類がごく単純な農業のシステムを生み出すまでに200万年近い時間がかかりました。さらに6,000年かかって地殻から鉄を取り出すことに成功し、さらに3,500年かかって約500年前に印刷技術を発明しました。その後の技術的発展は急に加速されはじめ、蒸気機関はわずか200年前、最初の大規模発電所はほんの100年前にできたばかりです。現在では大きな技術的発展が毎年のように行われ、何年も先の発展を現時点では正しく評価できないことは、1世紀前にトランジスタや原子炉やコンピュータが誰にも予測できなかったことと同じことです。

現在われわれは、人類の発展における技術時代というべきもののスタートラインに立っているにすぎないと私は信じています。もし社会がいかにして平和に生き、その環境と天然資源を守っていくかを学んだとすれば、来たるべき世紀におけるわれわれの生き方は、現在の生き方が18世紀とは違っているのと同じように今とは違ったものとなるでしょう。各世代はその環境を一時的に管理運用しているにすぎないのですから、後続の世代が資源も環境も共に利用し楽しむことができるように保護する義務があるのです。過去の時代の人びとはこれをよく理解していなかったように思われます。周知のように多くの例が、貧弱な計画と、人間と環境との関係についての理解の不足とがひどい環境破壊を起こしたことを示しています。そしてこれは、地球の資源を無尽蔵と考え害をも顧みずに開発を進めた人たちのまったくの貧欲に負うところが大きいのです。人間と環境との関係に技術が与えた主な影響は、エネルギーを使ってより多くの食糧を獲得し、生活の向上のために多くの天然資源を利用できるようにしたということです。以前と比べ、より多くの

人がより良い生活を送れるようになりました。後世に残す最大の害悪は、彼らが豊富で、安全で、清浄なエネルギー資源を手に入れられなくしてしまうことではないかと思います。

医科学、農学、都市開発、交通、エネルギーのいずれにせよ、新たな便益にはなにがしかのリスクが伴うというのは進歩の特質です。多くの素晴らしい薬が開発されましたが、その多くのものが利用者のごく一部の人に重篤な副作用を起こしました。食品添加物は食品の在庫期間をのばし害虫による損害を減らしたことで社会に役立つものですが、その中には人間にがんを起こす可能性をもつものがあるという問題にいつも直面させられています。われわれの生活を向上させるのに役立つどのような技術的進歩にも、必ずなにがしかのリスクが伴うものです。そしてわれわれは、人類に対し最小のリスクで最大の利益をもたらすような利口なやり方で技術の未来を計画できるよう、どのような技術革新からも生ずるリスクと便益を共に評価することを学びつつあります。いうまでもなくわれわれは後世に莫大な利益をもたらすような知識の総体を残そうとしているのであり、私の知っているリスク評価のどれをとってみても、今日利用できる技術を使って行われる高レベル放射性廃棄物の貯蔵によって生じる将来のリスクは、原子力発電の結果もたらされる利益に比べ、とるに足りないほど小さなものであることも同様に明らかなことです。

周知のように発電によってかなりの環境問題をもたらした、時には傷害や死亡も生じました。さらに発電によるリスクの中には将来の世代に及ぼされるものがあり、たとえば大気中での二酸化炭素の蓄積による将来の気候変化の可能とか、石炭灰の化学的および放射能汚染、原子力の場合にはその結果生ずる廃棄物による放射線被曝のリスクなどです。幸いなことに、廃棄物管理の体系は今や将来の世代の被曝をゼロまたはきわめて小さなものにできると信ずる理由があるのです。

自然界から類推によって何を学べるか？

高レベル廃棄物の管理に関する重要な課題の一つは、大部分の核分裂生成物が減衰しきってしまった遠い将来になおかつ残ると思われるプルトニウム、アメリシウム、ネプツニウムなどの超ウラン元素から生ずるリスクで、もし廃棄物貯蔵所に地下水の侵入があった場合、昔の貯蔵物である超ウラン元素の残留物がどのような挙動をとるかという問題です。特に関心が払われるのはこれらが α 線を出す核種できわめて長い半減期をもつからです。

写真2 ガボン共和国にある Oklo の天然ウラン鉱床。17 億年以上も前にここで造られたプルトニウムは現在まで移動せずにこの地にある。〔“Radioactive Waste”, IAEA, Vienna (1983)〕(写真は編者挿入)



これらの元素の環境における挙動に関する知識の多くは原爆実験がもたらした降下物から、あるいは主要な原子力施設の周辺環境の汚染に関する研究から得られたものです。これらの研究では汚染物の化学形や物理的形態が、廃棄物貯蔵所で生ずると思われるものと違うため多くの疑問が答えられずに残されています。しかも、これら人工元素がわずか40年前に初めて作り出されたものであるため、必要なだけ長期の年代にわたって生ずる地球化学的なプロセスを考えることが不可能なのです。貯蔵所に何かの欠陥が生じた場合、それから人間が受ける線量を予測する移行モデルが種々開発されていますが、これらの線量評価に不確かな点が多くあるため場合によって数桁のオーダーの違いが生じます。

そこで自然に存在しこれらの超ウラン元素と似た性質をもつ元素について研究すれば、現在用いられている移行モデルよりもっと信頼できるものが作れるのではないかと思います。

昨日私がある所で講演したのは、われわれがブラジルで実施した研究の結果ですが、そこにはトリウムと希土類元素の大きな鉱床があり、これをアメリシウム、キュリウム、そしておそらくネプツニウムの類推として使えます。この鉱床は地質学的に大変古いもので、初生鉱物はすでに風化されています。問題になる元素は粘土鉱物に固着しており年間約 10^{-9} の割合で離脱されます。これは、もし超ウラン元素がこの類推物と同じような挙動をするとすれば、その場で減衰してしまうことを意味しますが、これはまた約10億年前に西アフリカのガボンの国にあったと考えられる天然原子炉、す

なわち OKLO (写真2) で行われた研究を再確認するものです。

自然界における類推を研究することにより、長寿命放射性核種の挙動に関する有用な知識を得る道が拓かれると私は信じています。このような研究により、地質学的な長い時間にわたって廃棄物とその場に残留するような、地球化学的な条件を細かく決める方法を知ることができるでしょう。いかにして廃棄物を安全に貯蔵できるかを自然が語ってくれるのです。

結 論

第一の、そして最も重要な結論は、現有の技術をもって他のいかなる形の発電とも同様に、またはより安全を保ちつつ原子力発電を順当に発展させることができるかということです。それに対する障壁は技術ではなく、むしろ社会的なもので、特に大衆の考え方というものが必要であり、しかもこれに対処することは困難なのです。

大衆の考え方が混乱している原因の一つは発がんのプロセスと信じられている確率の問題です。しきい値がないのですから、どんな線量も絶対安全と言いえることができないのです。問題は安全な線量はどれだけかということではなく、どれだけ安全ならば十分安全といえるかということです。不幸にして社会は受容できるリスクを決める方法をまだ持っていないことで、換言すれば受けるべき利益とひきかえに受け入れることのできるリスクの大きさを決めるための合理的な方式がないのです。

もう一つの問題は大衆が確率でものを考えることに馴れていないことです。原子力に反対する人のうちどれだけの人が 10^{-7} のリスクという意味を本当に理解しているのでしょうか？

さらにもう一つの問題は、エネルギー生産に関する悪い面だけがいつも強調されることから生じます。どれだけ多くの人が、原子力の危険と十分なエネルギーが得られないことから生ずる危険とを結びつけて考えられるのでしょうか？ 子供たちは核戦争の恐ろしさと同じように原子力平和利用の有難さを教えられているのでしょうか？

科学技術者としてわれわれは、原子力の分野で新しい物質、生産技術と品質管理、そして新しく高度の設計技術が開発されてきたことを知っています。しかし将来においては、便益とリスクとを秤りにかけることに馴れていない大衆の中に新しい技術が導入されたときに起こる問題について、もっと多くの注意を払う必要があります。リスクの性格についておぼろげな理解しかもたず、

技術革新の便益やそれを拒否したときに社会が蒙る不利益についてまったく理解できない人にとって、リスクを受け入れるということはきわめて困難なことなのです。

この問題の取扱いは単純ではありません。リスクの考え方については小学校で取り入れることから始めなければなりません。リスクも便益も両方とも持っている技術の進歩について例をあげて説明しなければなりません。法による規制がどのように働くかを教え、手続や防護策を組み込むことが必要になるということを知ることから技術導入に自信をもてるようにしなければなりません。

皮肉な言い方をすれば、若年世代がリスクと便益についてもっとよく知っていたならば、日常生活でもっと利

口な選択をしていたにちがいないのです。彼らがそのような訓練によってもっと定量的にリスクをとらえることができているならば、新しい世代は原子力のもつリスクについてもっと合理的に受け入れるばかりでなく、自動車の運転や喫煙、飲酒についてももっと慎重な態度をとることになったでしょう。将来もしそうなれば、なんと素晴らしいことではありませんか。生活様式を選ぶことの方が、エネルギー開発に課せられているようないかなる禁止より福祉に絶大な影響を与えるのだということを若い人達に教えることは公衆衛生に多大な貢献をすることはないのです。(終)



グライダーで大空の散歩

志 田 寿 夫

人類の空への憧れは、古今東西を問わず共通のものであり、営々と研究、開発が行われ、ジェット機時代を迎えたわけである。これと平行して、無動力のグライダーも、木製、羽布貼りの時代から、現在では FRP 製、金属製が主流を占め、高性能化し、1,000km 長距離飛行、12,000m の高度記録も作られるようになった。グライダーは、偉大な自然との調和であり、三次元のスポーツである。無動力であるから、ある高さまでは飛行機に曳行されて、あるいは1,000m のワイヤをウインチで捲き取る速度で上昇し、平穏な状態では位置エネルギーを消費して15分位飛行するが、熱上昇風、山の斜面に起こる斜面上昇風あるいは高山を越えてくる長波を利用して、意や大鷲のごとく上昇するのである。

さて、私のグライダー歴は約30年であるが、飛行するたびに自己の技術の未熟さを痛感する、きわめて奥の深いスポーツである。慎重、冷静、果敢な判断、智力、体力などが必要であり、一歩間違えば死につながるだけに、常に自己研鑽と気象、空力学的な勉強が要求される。一見優雅なようであるが、厳しいものであり、余裕がでけると、自然とデュエットを組み、高空より見た地上、時に雪を頂く富士山、浅間山などを遠くに見て、積雲をかすめて飛ぶ壮快さは、他のスポーツにない醍醐味であり、この味をしめたら止められない。日本は国土が狭く距離飛行には不適なので、広大なオーストラリア



写真 英国機 FRP グライダーケストレル17に乗る飛行直前の筆者
(群馬県藤岡町渡瀬川河川敷板倉グライダー場にて、1985年1月17日)

で飛ぶ人達が多くなってきた。私も機会があれば、いつかは果たしたい夢である。グライダーを通じての諸外国の友人も多く、昨年は西ドイツで13年振りに飛んで来たが、そのクラブでは私の事を記憶されており、歓迎パーティーを催して楽しい一夜を共に過ごしたのは忘れ得ない喜びであった。また、数年前より、フォルクスワーゲンのエンジンを搭載したモーターグライダーで、子供達、A先生、B先生と学会を抜け出しての飛行も思い出である。(珪肺労災病院)