講 演

原子炉設置に伴う環境の問題

Environmental Problems of Reactor Siting

By L. Silverman*

(1961年7月12日 日本都市センターにおいて講演)

座長 矢木 栄 氏

ま え が き

私が与えられた題目は「原子炉設置に伴う環境の問題」であるが、むしろわれわれが Harvard 大学で行なっている研究について話す方が私としては良く準備ができているように思う。というのは、私の個人的感想として、大学におけるわれわれの研究に関する話の方が、原子炉の設置に関する話よりも、その性質上より正確に、より科学的に記述できると思うからである。原子炉の立地という問題は、いろいろの条件を考慮する必要がある、取り扱うべき範囲と規模において、まだ十分に確立された分野とは考えられない。したがって、私がこれから述べる原子炉設置に関する事柄は、1つの科学というよりは1つの技巧(art)であると思ふべき点の多いことはやむを得ない。その理由は、われわれはこの問題を1つの科学として取り扱って得るに十分な経験をまだ持っていないということである。もちろん工学の分野においては、たとえば橋梁設計のように、技巧(art)が1つの重要な因子となるような分野が少なくない。このような場合の設計に当たって考慮すべき安全率は、まだ十分に評価することが不可能な各種の条件を考慮に入れねばならないということから決まるものである。

つぎに私の話の梗概を項目順に列記しておこう**。

- (1) 基本的因子
- (2) 運転前のサーベイ
- (3) 運転中のサーベイ
- (4) 運転上の問題点と放射能放出の問題
- (5) アメリカにおける環境上の諸研究
- (6) 原子炉立地規準の問題
- (7) 事故発生後の問題

われわれは原子炉および他の原子力施設の立地に当って、日本で議論されているのと全く同様な問題に直

面している。われわれは広大な隔離された地域をもつので、原子炉と公衆の間に設けるべき防壁の数について、おそらくそれほど慎重に考えなくてもよいかも知れないという点で好条件にあるといえるが、しかし基本的にはこれらの問題は公衆の問題であり、この点で大いに研究調査を要する分野が多く残されている。たとえば、放射線による身体障害について、われわれは特定の器官に対する直接の障害よりも、より複雑な、白血病のような障害を重要視する。長期にわたって考えれば、最も強い影響を受けるのは造血器官である。また、ある種の動物実験および限られた数の人間の場合の例から知られた放射線による寿命の短縮という問題がある。現在の研究の多くのものによれば、これはある特定の器官に関係した事柄ではなく、放射線による一般的な生体組織の劣化によるものであるらしい。また、この問題に関して、動物実験の結果をいかに適用すべきかについても大いに議論の余地があり、実際ごく最近の研究によれば、低レベルの放射線照射によって寿命がかえって延びることが、少なくともマウスについて、またおそらくより大きい哺乳類についてもいえることが示されている。この放射線レベルは約0.1 r/day で、1930年頃に放射線防護規準として採用された値にはほぼ対応している。周知のように、この放射線防護の規準許容値は常により低い値に改められ、殊に最近大幅に引き下げられたが、その理由は、主に放射線の影響がつぎの世代にも及ぶおそれがあるという遺伝学者達の意見によるものである。技術者としてではなく、自由な立場での発言を許されるならば、

* US.AEC 原子炉安全諮問委員会委員長、Harvard 大学(環境衛生工学)教授。

** 項目(6)および(7)は時間の不足のため省略された。この点については次稿の Morris 氏の講演(本号 p.954~599)である程度述べられている。

私はこれらの遺伝学者に対して、放射線はすべて悪い影響を与えるものだとする彼らの議論に疑問を提出したい。もちろん確かなことではないが、何千年もの昔、バックグラウンドレベルがずっと高かった頃、われわれ人類がこの放射線の照射による改良の結果できたものであると想像されないものでもない。実際に植物の場合、放射線によってできた雑種の中にはその繁殖能力において改良されたものもあり得る。

さてわれわれは、日本の人々と同様、この問題を公衆の問題として慎重に考えているが、おそらくわれわれの原子力計画の開始がずっと早かったために、より多くのことを学ぶことができたと思う。もちろんわれわれも、公衆との関係において誰でもが犯すような過失を犯したし、実際この公衆の問題は原子炉の設計者や運転者のすべてにとってきわめて重要な問題である。新しい原子力施設の設置が申し出されれば、それは常に公衆の問題として採り上げられる可能性があるわけである。しかし、放射線に対する公衆の関心は、原子力施設の運転からよりも、むしろ核兵器実験による放射能降下 (fall-out) によって強められたといえよう。原子力施設の安全性の概念を改良する基礎となるようないくつかの事故の例をわれわれは持っている。アメリカにおいては14の臨界事故の例があるが、そのうち3例は重大な事故であり、4例は原子炉とは関係のない化学処理工場におけるものであり、他のほとんどは臨界装置によるものであった。最近の最も不幸な原子炉事故は SL-1 の事故であったが、世界中の例を見ても、重大な原子炉事故の例はそれほど多くない。Yugoslavia での事故は運転員に傷害を与えて社会的な問題となった。Windscale の事故は、牛乳の汚染が起こったために、おそらく最も強く社会的関心をひいたものであろう。Marcoule (France) でも2, 3の人員に傷害を与える事故が起こったし、アメリカでは SL-1 の事故で人員が死亡した。このようにわれわれはすでにある程度の歴史をもっている。

I. 基本的因子

原子炉設置に伴う環境の問題を議論する際に、どのような基本的因子を考慮すべきであろうか。第一には、人口の密度と分布について考えねばならない。この問題は、原子炉とその周辺の条件自体の問題と切りはなしては考えられないが、しかしこの点は原子炉立地にあたって最初に考慮すべきことであり、この考慮によって隔離の度合いが判定される。

つぎに、気象条件を以下に述べる2つの観点から考慮しなければならない。まず気象条件は事故の際その

及ぼす影響の度合いを評価する直接の方法として重要である。しかし私は気象学は通常の運転条件の場合を解析するためにより重要な役割をもっていると思う。

つぎに重要な因子は水文学 (hydrology) である。これは地下水、河川、飲料水、工業用水などの汚染の問題に関係している。アメリカにおける個人の使用水量はかなり高く約 200 gal./day であり、またこの量の約3倍程度が工業用水として用いられている。したがって水の汚染は重要な問題であり、公衆衛生局も大きな関心を示し、たとえば Colorado 川や Animas 川の場合には原子炉ではなくウラン製錬所のために河水が汚染されていることを発見した。原子炉のために起こった汚染の例は Columbia 川、South Carolina 州のある川および Shippingport 原子力発電所に近い Ohio 川に見られた。いずれの場合も測定の結果は問題となるほどのものではなかったが、われわれはこれらの問題を無視することはできない。また2, 3の原子炉について、地下水の汚染が重要な問題となり、それを防ぐため格納容器を設置し、使用済燃料貯蔵水槽用の水もすべてその格納容器内に貯わえる必要を生じた例がある。

つぎの問題は、特にアメリカ西部で重要となる地震に関する条件である。この問題は日本でわれわれ以上に強い関心をもたれているが、この点でアメリカ西部は日本とほぼ同等の条件にあるから、われわれも充分な関心を払わねばならない。

つぎに、以上述べた点のすべてと関連のある問題であるが、許容されるべき危険率 (risk) とは何かということが重要な因子の1つである。知識の向上、工業の発展、生活条件の改善などの利益を得るためには、われわれはある程度の危険率、たとえばある許容できる程度の放射線被曝、またはきわめて低い確率にせよ重大な放射線災害の可能性を考慮せざるを得ない。したがって、われわれは利益と危険率の釣合いを考えねばならないが、この点はより高度の権威者による政策決定による問題である。

以上のような安全性の考察にあたっては、原子炉以外の原子力施設についても充分考慮しなければならない。私は通常運転の条件下では原子炉施設よりむしろ化学処理施設や廃棄物処理施設の方がより注意する必要があるものと考えている。実際原子炉については非常に入念に設計および安全審査が行なわれるのであるから、私自身は化学処理工場や廃棄物処理設備の運転に一層の関心がある。この他にも核燃料の輸送、ホットセル設備、核燃料加工工場なども注意の対象となるが、その度合いはそれほど強いものではないであろう。

Ⅱ. 運転前のサーベイ

原子炉施設の完成前に、周辺の放射線量に関して運転前のサーベイを行なうことがアメリカにおける実際上の慣例となった。ある場合にはこの検査が必要以上に精細に行なわれた場合もあるようである。この場合に問題となることは、アメリカにおいて主として原子力発電にたずさわるのは民間企業あるいは地方公共体であるために、これらの施設の運転に関連した法律規制の問題である。このために、原子炉が未だ完成しない前に、付近の水、土壌、空気におけるバックグラウンドレベルを測定し、また通常運転および事故の際の放射能の拡散に関連して、気象配置、風向などの気象条件を十分に調査しておくことが必要となる。このように運転前のサーベイはきわめて詳細に行なわれる傾向にあったが、われわれは水、土壌、空気のバックグラウンド計数と、ヨウ素、ストロンチウム、セシウムについて測定を行えば多分充分であろうと考えている。運転前のサーベイで問題となることとして、放射能降下(fall-out)が減少している場合、バックグラウンド計数が原子炉の建設終期においてその初期よりも減少していることがあることである。これは一種の矛盾を引き起こすことで、民間企業はその立場を有利にするためにこの事実を利用し、すべての放射能は他の原因によるものだ主張できる可能性があることになる。実際ある地域では花崗岩からのバックグラウンドがかなりある場合があった。そしてこのバックグラウンドがベグマタイト中のウランおよびラドンによるものであることを確かめるために相当広範な調査が行なわれた。また、たとえば Illinois 州の Argonne 研究所付近では、水中のラジウム含有量が相当高いが、これは何も研究所の存在とは関係のないことであることがわかっている。しかし、この場合にもこれらの放射能を測定しておくことは、研究所を法的に守る意味においても必要なことである。運転前のサーベイについてさらに問題となる点は、どの程度まで精密に調査を行なうべきかという問題である。もし誰かが10万ドル以上の費用をこのような調査のために費やしたとしたら、それほど大げさな調査は正当でないといいようであろう。毎月1回程度サンプルをとり、最小限の必要な核種の分離測定を行なう程度で充分なのであり、上述の費用は普通必要と考えられるものの約10倍の値と考えてよいであろう。

Ⅲ. 運転中のサーベイ

運転開始後の放射能管理もほぼ運転前のサーベイと同様な考えに基づいて行なえばよい。ただし、もし放

射能の放出の可能性が少しでも考えられる場合は、ヨウ素の分離測定を行なわなければならないであろう。しかし何よりもまず、われわれは、煙突からの放出ガスおよび廃水の放射能監視装置を信頼しなければならないということを注意しておこう。濃度が高い場合はもちろんこの点問題はないが、これらの規制はICRP 勧告にもとづいて与えられているから、希ガスその他の核種の場合に、多くの設置許可申請者は測定に十分な感度をもつ計測器を持たないために困難を感じている。このことは、日本ではICRP 勧告値の10分の1を採用していることを考えると一層よく考慮しなければならない点であるように思う。われわれは現在のICRP の値ですでに困難を感じているが、日本の場合はその10分の1を測定することができることを示すためには相当の困難が予想される。ある核種についてはこの点問題にならぬものもあるが、核分裂ガスの場合はかなり問題であろう。煙突からの廃ガスを充分多量モニタすることと、それに要する費用が主な問題である。それゆえ、このような許容濃度に関する規制にたずさわっている人々は、これらの規制が守られているかどうかを監視することができるか、設置者に要求しているこれらの規制値を実際に測定することができるかについて考慮する必要がある、原子炉運転の他の条件に比べてあまりにかけ離れた苛酷な条件を放射能の監視に与えることは望ましいことではない。

Ⅳ. 運転上の問題点と放射能の放出の問題

さて、一たん運転を開始した後の放射能管理の方式には、ある程度の融通性があると考えられる。たとえばある化学処理工場においては、われわれは積分的放出(integrated release)の概念を用いることを許している。すなわち、これはICRP などによる規制を13週間の全放出量に基づいて適用する方式であり、放射線の効果が積分的効果であるという考え方によるものである。この場合は、きわめて低いレベルでもなく、また大被曝線量でもない、気体または粒子の最大許容濃度程度のものについて考えているのであるが、たとえばヨウ素の放出の場合、われわれは13週間の全放出量で考えてよいと思う。この点は健康管理の専門家の間である程度問題にされているが、各個人の診断上問題とされるヨウ素による線量は、13週間の積分最大許容濃度から推定される線量より遙かに大きい。われわれは1日で13週間の許容量に等しい量の放出を許すこともあり、とにかく13週間の積分値で規制している。この方式はバッチ方式とも呼ぶべきもので、これによれば放出を行なうのに最も適した気象条件の日を選ぶこ

とができる。このような融通性を考慮することは、この種の施設の運転に際して当然許されるべきであろう。動力炉施設はこの点、試験炉施設に比べて事情がやや異なる。電力会社は当然できる限り連続運転を望むから必ずしも上述の方式を利用しないかも知れない。原子炉施設でこの方式を用いている例は、NASA 試験炉(MTR 型)で、すべての廃ガス、換気ガスは貯蔵タンクに圧入されてモニタ後放出される。放射能レベルが高い場合にはその減衰を待ち気象条件を考慮して適当に希釈して放出される。この方式はつい最近始められたものであるが、気体について液体と同様にこのような方式が用いられない理由はないし、費用もそれほどのことにはならない。California 州南部に設置を提案されている動力炉の場合は、頻繁な逆転層の発生、不利な拡散条件などの悪い気象条件のために、この方式を採用することになっている。またこの方式は酸化ウラン精製工場、化学処理工場、同位体分離工場などにも用いられている。

さて運転上の問題としては、何か予期しない事態に対する考慮をはらうことが望まれるが、多くの民間原子炉*について問題となった1つの問題点を述べよう。これらはいずれも格納容器を備えているが、試験炉であるので当然燃料要素その他の部分の試験、テストループ試験などが行なわれるから、原子炉格納容器内で放射能の放出が起こる可能性がある。この際問題となるのは、格納容器からの人員の待避が必要となる程度の放出である。これらの原子炉施設には煙突廃ガスモニタが備えてあり、放出が起こればモニタが警報を発し、人員は格納容器から出て安全な場所に待避することができる。このような事態が起こった例の多くの場合、放出された核分裂ガスはきわめて迅速に減衰した。ただ1つの例では少量のヨウ素が放出され数人の人が甲状腺許容線量以上の被曝を受けた。これらは格納容器を設けることは公衆に対してはきわめて有効であるが、操作員に対しては必ずしも最良の方法ではないことを示しており、安定規則がある点では運転上の問題を引き起こす原因となり得ることを注意したい。

格納容器内で放射能放出が起こった場合については多くの研究がイギリスで行なわれており、1960年12月に Harwell で開かれた会議で数多くの報告が行なわれている。たとえば、ある報告では格納容器内に故意にヨウ素を放出させ、それがどの程度容器の壁や容器内の装置によって吸着されるかを調べている。この場合、放射性的ヨウ素と通常のヨウ素とを共に放出したが、興味あることは、はじめ健康管理上問題とならな

い程度の放射性ヨウ素を放出した後、通常のヨウ素を放出すると、同位体の交換反応が起こり、一たん吸着された放射性ヨウ素がある程度壁から放出されることである。いずれにせよ格納容器内の放射能放出の場合、容器の壁や空気中の塵が放射能のかんりの量を吸収することは確かである。したがって、容器内の放射能は壁や塵による吸収によって時間的にある値まで減少してゆくことが観察される。

格納容器内の空気中に放出された放射能を除去するためには3つの方法がテストされた。

- (1) 塩基性溶液のスプレーを使ったスクラップ
- (2) 銀の被覆をした粒子の充填層
- (3) 木炭による吸収

であった。スクラップと銀の充填層の効率は時間と共に低下したが、木炭の効率は一定であった。細かい粒子の捕獲については、木炭層はきわめて良好、スクラップはきわめて細かい粒子の場合やや効率が悪く、銀の充填層もあまりよくなかった。いずれにせよ格納容器内に放出されたヨウ素のほぼ90%は壁に吸着され、なんらかの脱着操作を行なわない限り壁の表面から失われない。容器壁に銀被覆を行なうことは、軟鋼、熱絶縁材、音響防止材(Dounreay 材料試験炉の例)などが充分ヨウ素の吸収を行なうから必要でない。またヨウ素以外のものはこの場合大した問題とはならない。

このような格納容器内の放射能放出については、操作員の待避を必要とするほどの放出は行なえないよう規制されているが、この点あるいは操作員にとって不満かも知れない。しかし、たとえ警報が鳴った場合でも、運転中の原子炉を放置して待避することはできないであろうし、必要な処置をすべて完了した後 AEC に報告しなければならない。AEC はこのような放出の例について充分な資料をもっていると思う。

V. アメリカにおける環境上の諸研究

US.AEC は原子力施設の設置に伴う環境上の問題に関して大きな努力を続けている。このことについては AEC の報告 "*Atomic Energy Research in Life and Physical Science for 1960* (January 1961, US AEC)" を参照されたい。AEC 以外の機関においてもこの分野の研究は盛んに行なわれている。公衆衛生局は放射線衛生部を設けてこの分野の計画に対する予算

* GETR, WTR, NASA など。ただし NASA は政府所有の原子炉であるが、運転は他の組織によって行なわれるので、設置運転許可をとることを必要とする。

を要求しつづけている。生物学、医学を含めた環境上の研究を考えれば、その予算はぼう大な額になる。例えば AEC の生物、医学部は 5,000 万ドルの年間予算をもっているが、これは生物、医学上の研究や R.I. の治療への応用を含むもので、原子炉や化学処理施設などの設置に伴う環境上の問題に関連した研究に AEC は年間約 150 万ドル程度の予算を使っている。

公衆衛生局は年間約 100 万ドルをウランの鉱山や精錬所からの水の汚染の調査に支出している。またウラン鉱山従業員の健康調査についてもかなりの予算を使っている。この点については、ここ 3 年間に従業員の約半数について調査を行なうことができた。それによればウラン鉱山従業員の場合、肺がんにかかる割合が普通の鉱山従業員より 3～4 倍も高いことが判明した。また事故死の割合が通常に比べて 20 倍も高いこともわかった。肺がんにかかった人々もこの事故死の中に入ると考えても、いずれにせよわれわれは空気中のラドンとその娘核の濃度を減すと同時に、普通の機械的事故の数を減すためにもなんらかの手段を講じなければならない。この気管支がんの原因はラドンの娘核であることは明らかであるから、ウラン鉱山で空気の汚染または希釈を行なうような処置がとられつつある。

環境上の研究問題としては、放出後の核分裂生成物の移動、水棲生物や哺乳類などの生物による摂取などがある。Oak Ridge では運転に伴う放出の影響を研究したが、驚くべきことにその施設から数マイルにわたる樹木上に放出された物質、特にヨウ素によるガンマ放射能が付着していることが認められた。風上側ではフォールアウトしかないはずで、このような放射能は認められなかった。もちろんその量は測定にかかったというだけで許容量より遙かに低いけれども、これはホットセル、化学処理工場、破損燃料要素試験設備、原子炉などの運転から放出される全放射能を測定しようとする 1 つの方法である。

また、許容線量を決定するため、被曝線量の及ぼす影響について広範な研究が行なわれている。これは主として医学的研究であるが、原子力施設の立地にも関連する問題で、放射性の塵の粒径に関する研究も大に行なわれているが、これは原子炉事故または化学処理工場、特に原鉱処理工場に関連した問題である。

環境上の問題に関する研究の約半分は廃棄物処理すなわち廃棄物の固定 (fixation) に向けられている。特に液体廃棄物の処理に関しては、AEC は最初、最も簡単な方法すなわち大きなタンクに中または高レベル

の放射性廃棄物を入れて中和して貯蔵する方法をとった。現在 Hanford, Oak Ridge, Idaho Falls など約 1,000 万 gal. の液体廃棄物が大きなタンクに貯蔵されている。前二者では軟鋼製タンクを用い、廃棄液は中和されていて、タンクの腐食速度はあらかじめわかっている。後者ではタンク容積を小さくするために、溶液を中和せずその代わりにステンレス製タンクを用いて腐食を抑えるため冷却装置を付けた。いずれにせよこのような方法では、タンクが破損したときのことを心配となる。他の種々の容器同様、地震による破壊も考えられるわけで、AEC は液体廃棄物を固体にする方法の開発に努力している。たとえばガラス状に変換した後地中に貯蔵すれば溶け出のおそれもない。ただし Argonne で開発された流動層による固体化操作では、その際発生するエアロゾルが問題となった。

Harvard における私の研究は、空気および気体の浄化の問題に向けられている。可燃性固体廃棄物の処理にインシネレータを用いて燃焼を行なう操作があるが、われわれはこの場合空気を直接浄化することを研究している。また、ヨウ素の除去、有効粒子径とフィルタ効率などの研究にもたずさわり、放射能の検出に関する仕事も行なっている。さらに、われわれは伝染病学者のグループをもっており、彼らは医師または生物学者で、放射線などが多くの人口に対して及ぼす影響について研究を行なっている。たとえば Illinois 州および New York 州の一部には、住民が通常の 3～4 倍も高いバックグラウンドレベルに曝されている地方がある。彼らはこの地域について水質の影響を調べたり、病院の記録から畸形児の発生数を調査したりして、高い放射能地域の住民に及ぼす放射線の影響を研究している。彼らのこの仕事における 1 つの問題は、このような場合の放射線の測定法であるが、われわれはプラスチックシンチレータのフィルムバッジを開発した。これはプラスチックシンチレータと普通のフィルムバッジを組み合わせたもので、通常のフィルムバッジより現像の費用はやや高くつくが、感度はその 10 倍ほどもあるもので、多数の人々に対して低い線量を比較的安価に測定できる点で、きわめて有用なものである。これについては現在なお研究中であるが、10 mr 程度の線量を比較的短時間で、ある程度の信頼度をもって測定できるので、公衆に対するバックグラウンドの測定に用いることができると思われる。

(東京大学 清瀬量平記)