

放射性廃棄物の処理について

—欧米での見聞—

山 本 寛

昨年秋2カ月の短い期間ではあったが、原子力関係の調査のために欧米を一巡した。そこでなにか印象記でもとのお話であったが、私の回ったところはノールウェーぐらいをのぞいては、すでに多くの方々が行かれたところでもあり、その上若干の場所を除いては、飛行機によって大都会から大都会へと渡って歩いてだけであるので



写真1 オスロ市公園の一部

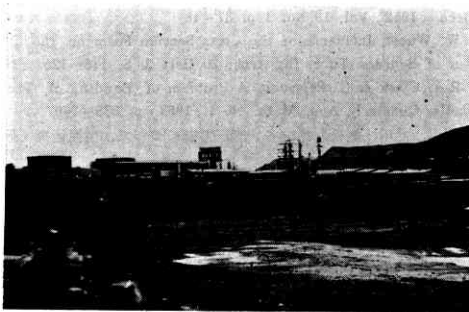


写真2 スウェーデンのシエール地帯
このシエールからウランをとっている

国々の趣きある国情などは知るよすがもなくはなはだ残念であった。ふたたび訪れる機会を得られるならばできれば今度はなるべく汽車を利用してゆっくり歩いてみたり、各地の大学を訪れたり、また地方も旅行したいと思っている。またわたくしの仕事が原子力分野でも一番秘密密度の高い分野に属することの調査にあったから、欧州の小国は別であるが、種々の制約をうけて、たとえば写真なども Brookhaven National Laboratory を除いてはげんげんとすることを許されなかったような次第である。

今回の旅行の本来の目的は使用済核燃料の処理についての調査にあったが、この方面の研究はまだ大部分が classify されており、また大部分の読者には興味の少ないものではないかとも思うので、あわせて見聞してきた放射性廃棄物処理について若干のべることによって責を

はたしたいと考える。この方面についてはすでにかなりの方々が見てきておられるが、大方の読者にとっては再処理よりもまだ関心が深いのではないと思われるからである。

放射能雨の問題が各方面の論議の種となつてからすでに久しい。わたくしどもはなるべく放射線に照射されないことが望ましいのは当然であるが、全くこれからまぬかれるということはできないから、特に放射性物質を扱う人以外の一般人が継続的に吸入しても差支えないという放射性物質の最大許容濃度が定められている。この値については論議のあるところであるが、その数値を示すと、核種が不明な場合には、

| | α | β, γ |
|-----|------------------------------------|--------------------------|
| 空気中 | $5 \times 10^{-12} \mu\text{C/ml}$ | $10^{-9} \mu\text{C/ml}$ |
| 水中 | 10^{-7} '' | 10^{-7} '' |

となっている。 $\mu\text{C/ml}$ の値と cpm とを直接関係づけることは簡単ではないが、この値は最近話題に上っている各地の放射能雨のそれよりはるかに低い値である。

最近わが国では法律によって放射性物質を取り扱う施設(管理区域)外に廃棄物を放出する場合の最大濃度は国際基準に基いてさらに上記の値の 1/10 に定められた。もっともこの値をどのようにしてとるのかは法律からは判然としないが、わたくしどもの研究所においてもこの基準を満たさない限り放射性物質を扱う研究は許可されないことになる。上記の値は実際に測定する上からは極めて低い値であつて、GM 管、シンチレーションカウンタなどを使って直接に測定できる限界よりはるかに低い。したがって計測するにはたとえば水などについては相当量を蒸発乾固してから計数するので常時モニタするのはかなり大変な仕事である。また管理区域の外で上記の濃度の 1/10 といつても、放射性廃ガス、廃水を大気中とか水中に拡散させてうすめても必ずしも均一に稀釈されとは限らない。むしろ均一に稀釈することははなはだ困難であつて、このようなおそれのある時には、すでに、管理区域の中で 1/10 まで落ちて放出することもある必要になる。放射性廃棄物は、放射性物質を扱う場所からはまず出て来ると考えてよいから大変面倒なことである。

放射性廃棄物は態種により 固体、液体、気体の 3 種類に分類でき、それぞれ異なった方法により処理される。

気体廃棄物は端的にいつて処理のしようがない。しかし幸いに一般の研究室のフード、換気などによって排出

される廃気の放射能は極めて低いので、大氣中に拡散させるだけでほとんど十分で、問題となることは少ないと思われる。問題となるのは使用済核燃料の処理をする施設からの廃気とか、原子炉の事故の際の廃気など特定な対象に限定される。

廃気が放射性微粒子を含んだ煙のようなエロゾルの場合には通常の研究室では単にフィルタを通すだけでほとんど十分である。フィルタは普通 2 段階で、まずガラス繊維フィルタによって粗粒子を除き、次にセルローズ・アスベスト・フィルタによって 0.3μ 程度のものでも、99.95% 以上の効率で除去する。元来 $0.3\sim 0.5\mu$ のエロゾルは除去がはなはだ困難であるので、従来のフィルタは 1μ 以上の粒子には性能を発揮しても、それ以下に対しては無効であるため AEC フィルタなど特別なものが使用される。フィルタは塵の厚さが規定以上になったら取り換える。



写真 3 ストックホルム市にある
A.B. Atomenergi の研究所

廃気の安全度について二、三の研究所で質問をしてみた。スエーデンのストックホルム市内にある A.B. Atomenergi の研究所は原子炉が地下に設けられ、その上に化学研究室 (hot lab. を含む) がある。建物およびフードなどからの排気は建物の横に設けた 2 段式の煙突から排出しており、市内 2 か所でコロナ放電式のモニタを使って管理しているが、現在までに限界以上の値になったことはなく、むしろソビエトの原爆の方がよく感知されると担当者が話していた。ここでは小規模ながら使用済燃料の再処理の研究も行っているのであるが、それでも

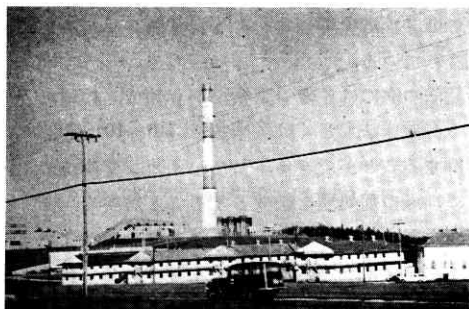


写真 4 Brookhaven 国立研究所の煙突

なおこのような状況にある。

Brookhaven 国立研究所、ここは New York の Penn. station からでる Long Island 鉄道の電車で約 2 時間行った Patchogue で下車し、自動車ですら 30 分足らずの所にあるが、この高い煙突は研究報告にもなっていて有名である。この煙突は原子炉と hot lab のある建物のわきに立っている 100m ぐらいの高さのもので、ここから廃気が大氣中に放出されるのであるが、そのレベルはやはり許容値以下である。

また Idaho chemical processing plant は使用済燃料の再処理をしている工場であるが、この廃気のレベルも担当者の話ではやはり問題になっていない。この研究所は Salt Lake City から飛行機で北方へ約 1 時間 40 分ぐらいの距離にある小さな町 Idaho Falls からさらに約 60 哩ぐらいの所にあり、隣の建物が砂漠の中に点のように見える程の広大な面積を占める研究所である。田舎であるので行くのが不便であるが、見学許可を貰うのも多少面倒である。

固体の廃棄物には、たとえば汚染した材料、器具、装置、時には建物、廃液処理から生ずる汚泥やイオン交換樹脂、気体フィルタなど各種のものがあるが、これらは安全となるまでそのまま格納しておく以外に手段はない。前記のストックホルムの研究所ではこれらの固体は市外の安全な場所に運搬し、特殊のものは無人の島に格納している。国土が広く、雨量の少ない国では簡単に地中に埋没放棄している。たとえばカナダの Chalk River 研究所、米国の Oak Ridge National Laboratory などでは土地を掘ってアスファルトを張り、この中に放棄して、これが一杯になると上からアスファルトを注入して固めている。米国西部の砂漠もこの目的に使われている。わが国のように人口密度が高く、雨量の多い所では高価にはつくが格納庫を作った方が安全で、東海村の原子力研究所では今夏に完成のはずである。

固体廃棄物のうちでも可燃性のものは燃焼して容積を減少させることができる。特に国土の狭い国では考慮する必要がある。英国では Harwell 研究所に焼却炉があって稼働している。灰の容積は原容積の約 $1/60$ に減少し、これを容器に入れて大西洋に放棄している。

放射性液体廃棄物の廃棄については三つの方法が考えられる。すなわち

(1) そのまま地中に導いて廃棄する方法 (2) うすめて海、河川などに廃棄する方法 (3) 放射能の低い大量の液と放射能の高い少量の液 (固体のこともある) とにして後者はなんらかの方法で廃棄する。

(1) の方法はもっとも簡単であるが、人口密度の低い広大な土地のある所でなければ実施することができない。カナダではかつて Chalk River 研究所の原子炉が事故を起した際に出た大量の汚染廃水を処理する必要が

ら、これを近くの地中に送入したところ成績がよかったので現在もこの方法を継続している。

Chalk River は Ottawa から普通列車で約 3 時間行程の所にある寒村で、急行を含めて 1 日 3 本の列車の便しかない。Chalk River にはただ一軒のホテルがあるだけで、これはまた村民の酒場をも兼ねているらしく、きこりと思われる男達がたくさん集っていて、中には人相の余りよくないのも混っており、わたくしが唯一の東洋人であったことから多少うす気味悪い思いをした。これはわたくしが事情をよく知らなかったため、研究所で聞くと、ここの人々は Deep River に住んでおり、ここには専属の立派なホテルがあって、Ottawa の日本大使館を通じて頼んでおけば宿泊できる。実はわたくしも大使館には頼んであったが時間の都合で大使館に寄ることができなくなり、オタワの飛行場から停車場にかけつけて、夜遅く Chalk River に着いた上に、Chalk River に宿泊とばかり思いこんでいたのでこのような手違いが生じたわけである。なお Chalk River にはタクシーが 1 台しかなく気の向いた時でないと運転してくれないので注意する必要がある。研究所は Chalk River からも Deep River からもかなりの距離にあるので、所員の車か、バスに便乗させて貰うのがよい。

米国の Oak Ridge National Laboratory でも廃液をタンク車で構内の丘の上に掘った露天の池に入れて地中に吸い込ませている。ここは特別に町から隔絶された所とはいえないが、土壌を検査したところ、ここ土壌が特別に高い吸着能をもっていることが判り、このような方法で放棄しても安全であることが確かめられたので実施しているわけである。

しかしながら上記の二つの研究所にあってもこのような廃棄方法が早晚行きづまることは十分に認識されており、これに代る処理方法が研究されている。またその場合の処理法の主体を、除染効果は少ないが最も経費の少なくてすむ沈澱凝集法にしているのも当然のことであろう。すでに Oak Ridge では昨年から装置が稼働を始めている。地中に放棄した場合 Ru は移動速度が最も速く、Sr は約その 1/10、Pu は投入点に固定される。

(2)の方法は廃棄する液の放射能レベルが比較的 low、核種についても危険な物質が少なくて、液量も多くない場合に行うことができる。かなりの量の稀釈水を必要とするが、小規模の研究所で採用しているところがある。わたくしの巡ったうちではノールウェーのノールウェー・オランダ共同研究所、Baden の近くにあるスイスの研究所がこの方法をとっている。とくに後者では河が下流でライン河に合流し、水道水源となっているので完全にモニタしながら少量ずつ流している。

(3)の方法は最も普通の方法であって、わが国の原子力研究所でもこの方法によることになっている。もっと

も少量の廃液しか扱わない場合と大量の液の出る所とでは処理方法が異なるべきである。ただし少量の高レベルの液しか出ない時にはそのまま貯蔵しておく方が簡便である。

大量の廃液を扱う場合普通にとられている方法は、沈澱凝集法、イオン交換法、蒸発法の三つで、これらを組合わせて処理をする。これらの方法のうち最も安価なのは沈澱凝集法で、最も高いのは蒸発法である。アメリカの国立研究所のデータを見ると、蒸発法に要する費用は償却を含めて大体廃液 1 キロリットルを処理するのに 7,000~14,000 円ぐらいかかっており、平均 1 万円の処理費を必要とするとみてよい。廃棄処理に要する費用はなんら生産と結びつかないものであるから、極力費用が少なくてすむように処理法の研究をする必要がある。蒸発法は最も有効な除染方法として欠くことはできないが、上記のようにたいへん費用が高くつくので、これにける液量を極力少なくするような方法を考えたり、また大量に処理することがやむをえないときには効率のよい蒸発法、たとえば多重効用缶の使用とか、蒸気圧縮法なども考慮の対象になる。わたくしの聞いたところではスウェーデンの Studsvik の研究所 (MTR を建設する予定) では後者を使う計画があるようである。ここでは高、中レベルの廃液をそれぞれの蒸発缶で処理して、凝縮水を低レベルドレーンと一緒に海に放棄する。低レベルドレーンは別にイオン交換で処理されている。海への廃棄量は 36 C/月 (Sr は 2.4 C/月以下、Cs, Y, 稀土類は 15 C/月以下) でかなり多いようであるが、湾口の岬と島の間の狭い海峡の海流の速い個所に管で導いて放出し、拡散後は国際基準濃度以下になる計画である。北欧では英国の Windscale の高い放出量が基準になっているようで廃棄量を論ずるときにはすぐにこれが引合いに出される。

除染係数 (原水の汚染を処理したあとのそれで割った値、D.F. とかく) からみると蒸発法が最も大きく 10^4 は期待することができる。しかしこの値はもちろん液中の放射性物質に関係するもので、もし揮発性成分が含まれていれば当然小さくなる。現在わたくしどもが試験している小型の蒸発装置では 10^6 程度の値が得られている。このように除染効果からみれば蒸発法が最も確実でかつ優れている。

蒸発法の次にはイオン交換法が有効で、核種によって異なるが混床法もしくは 2 床法で $10^2 \sim 10^3$ 程度の D.F. を期待することができる。ただしイオン交換法にける場合には液の前処理を必要とすることが多く、とくに濁度が高いときにはあらかじめ下げておかねばならない。またイオン交換樹脂は放射性イオンばかりでなく、すべてのイオンを吸着するので、化学研究室のドレーンを処理する場合は、研究室用の水を予め脱塩しておくことが

望ましい。ストックホルムの研究所ではこのような方法でイオン交換法だけで処理を行っている。このような処理法は特に中小規模の研究施設に適していると考え、使用した樹脂の放射能はかなり高くなるので、取替えとか弁の開閉は遠方から操作することが望ましく、ストックホルムでは二間ぐらいの棒を使ってやっている。また脱塩水を使ったときには、使用済の樹脂は少量ならば再生しないでそのまま放棄した方が簡単であり、費用も決して高くはつかない。

沈澱凝集法では特別な注意を払って、極めて緩かにフロックを生成させた場合には 10^2 もしくはそれ以上の D. F. がえられることもあるが、通常は困難で、処理する核種によって異なるが大体 3~10 程度のことが多い。このように沈澱凝集法の除染効果は比較的 low、またできた汚泥の処理も面倒であるが、処理費が安くすむので実施しているところが多く、また蒸発法、イオン交換法における前処理操作としても使えると思われる。

英国の Harwell 研究所では廃水を surface, sewage, process, low level の 4 系統に区別し各別に処理しているが、sewage water と蒸発缶にかけられる low level water の一部を除く液は沈澱凝集法にかけて処理されている。液は delay tank から 30 万ガロンの大きなコンクリート製の予備処理槽に入り、ついで薬品が加えられてゆっくりフロックを生成し、上澄液はそのまま排出、底部からの汚泥水は汚泥器に送られる。処理した水は他の系統の水と混ぜてモニタした上で Thames 河に入れられる。河への投入点にはダムを作り、落水の底に均一に放出して十分混合するように配慮してある。Thames 河はロンドン市の上水源であるので河水のレベルには慎重な注意を払っているが、国際基準の 1/100 以下であるといわれる。ここの研究所で珍らしいのは凍結乾燥法を使っていることで、その報告は今夏のジュネーブ会議に出されるはずである。余談であるが Harwell の見学日は月 2 日に限られているので訪問希望の方は半年ぐらい前までにロンドンの大使館を通じて申込んでおかないと見学できないことがある。もっとも特別の知人があれば、その人の研究室だけは特別の許可を得て見ることができる。

米国の Oak Ridge 国立研究所でも昨年から沈澱凝集法の装置が動いている。ここでは廃水に石灰とアルカリを加え、フロックの一部を循環する通常の方法であるが、わたくしの見た時にはフロックの分離が不十分であった。処理水も汚泥も丘の上の池に放棄するのでこの程度でもよいのであろうか？

また永久処理とも関連するがノールウェーの JENER では吸着剤としてイオン交換樹脂の代りに、やすい無機質天然イオン交換剤 vermiculite の使用を研究している。研究者の話ではとくに Sr に対する吸着能が大きい



写真 5 ノールウェー・オランダ共同研究所

という。また Brookhaven 国立研究所ではやはり無機質天然イオン交換剤 montmorillonite clay を使う研究がなされている。

実際の廃棄処理の場合は経済的観点と除染効果の両方から適当に 3 者を組み合わせて行うことになる。なお廃棄処理のために要するごく大体の費用は気、液、固体処理を合わせて研究所経費の 1% 程度といわれる。

このような処理で生じた高放射能の液または固体はなんらかの方法でさらに処置をする必要がある。高放射能の廃棄物の取扱については特に使用済燃料の再処理の際に分離される核分裂物質が問題である。これらの核分裂物質は 300~500 年の永きに亘って安全に保管する必要があるので永久廃棄の問題は真剣に考える必要がある。

現在の段階では永久廃棄とは、なんらかの手段で地球上に安全に隔離して管理することを意味する。再度原子炉で放射性廃棄物に中性子をあてて半減期の短い安全な物質に変えろとか、ロケットによって地球外へ放棄することなども考えられるかも知れないが、現在の段階では極めて高価につくので問題にならない。

上記の意味での永久廃棄法には次のようないくつかの方法が研究され、このうちのあるものは実行に移されている。

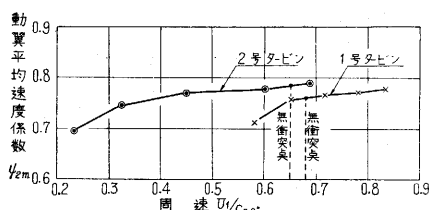
a) タンク貯蔵：現在使用済核燃料から生ずる核分裂物質の保管に米、英、仏などで広く一般に行われている方法であるが、相当高くつくのでこれに代る方法が要望されている。濃縮した液を地下貯槽か十分遮蔽したタンクの中に貯蔵する。わたくしが Idaho Chemical Processing Plant によった時には丁度タンクの増設工事中であった。

b) 深井戸への放棄：たとえば石油廃井の中へ流しこむのがこれに当る。

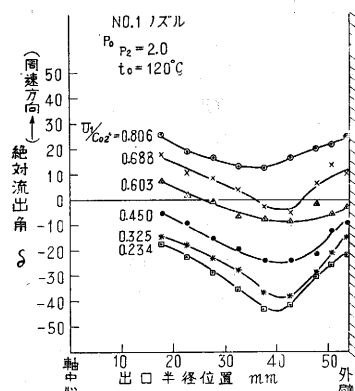
c) 岩塩採取後のドームに流しこむ方法：(b)、(c)の方法は現在検討中のもので、実施された例は少ない。

d) 浅い地下放棄：人口密度が低く、雨量の少ない砂漠などに考えられる。米国西部の砂漠は現にある程度使われているようである。

研究速報



第 9 図



第 10 図

行った実験結果と同一傾向を示している。タービン出口の全半径にわたっての速度係数の流量平均を出せば第9図のようになる。動翼平均速度係数は1号タービンの場

合も、この速度係数を第8図に示す。

$$U_1/c_{02} = 0.65$$

(No. 1 ノズルの場合)

合) 付近のとき最大断熱効率を出す。このときのタービン出口における動翼速度係数の分布は0.70~0.86の範囲にあり、出口外壁付近およびボス付近で悪くなり、両者の中間位置において速度係数は高くなる。これは1号タービン

(第4報)について

合も、この速度の2号タービンの場合も同様な傾向を示しており、この結果から、この種のタービンの動翼の速度係数は大体

0.78~0.79 であることがわかる。

このときのタービン出口における流出絶対速度が軸心方向となす角度を第10図に示す。 $U_1/c_{02} = 0.65$ 付近で流れはほとんど軸心に平行に流出していることがわかる。また出口軸流速度を第11図に示す。点線は第1報の理論計算から求めた軸流速度分布である。本実験結果では大体理論計算の結果と一致しているが、なお若干ボス付近で多く流れ過ぎ、外壁付近で減少する傾向を示しているが、第10図および第11図の結果から、動翼内の流れは大体理論通りの流れ方をしており、exducer内の流れについての遠心力と半径方向の圧力勾配の釣合いおよび動翼内の流れの滑りについての補正方法(第4報)は妥当であることがわかる。

(1958. 3. 12)

次号予告(7月増大号)

研究解説

| | |
|---------------------|--------|
| 船側におけるウェーブ・プロフィルの記録 | 高橋 幸伯 |
| 屋根の防火性能について | 星野 昌一 |
| ソイルセメント | 三木 五三郎 |
| 銅浴中酸素分析試料採取法について | 松下 幸雄 |

海外事情

| | |
|---------|-------|
| フランス留学記 | 井口 昌平 |
|---------|-------|

研究速報

| | |
|---------------------------|--------|
| 岡本 舜三 | |
| 吊橋の耐震設計公式(第1報) | 久保 慶三郎 |
| 伯野 元彦 | |
| アルギン酸のイオン交換反応の研究 | 高橋 武雄 |
| 江村 悟 | |
| アルギン酸のイオン交換反応によるAlとBeとの分離 | 高橋 武雄 |
| 白井 ひで子 | |
| 金属材料の変形抵抗 | 橋爪 伸 |
| ステンレス鋼線引抜用の造膜剤について | 鈴木 弘 |
| 大井 澄佳 | |

(19ページより続く)

e) 海洋放棄: 現在すでに実施されているがご承知のように問題がすべて解決されているとはいえない。わたくしが立ち寄った所では Harwell, Brookhaven, ロスアンゼルス の N.A.A. が行っており, Saclay も行っているようである。また日本でもごく少量が投入されている模様である。

f) 固体にして格納する方法: 水に対して浸出度の低い固体にして、水に触れないように格納しようとするもので種々の方法が研究中である。その代表的なもののいくつかを示せば、1) 粘土による吸着法: 主として Brookhaven 国立研究所で研究され、montmorillonite clay に吸着させて1,000°C ぐらいに煅焼し不浸出性にする。

2) カルシネーション法: 熔融塩による方法で Brookhaven で研究された。3) 焼結法: 石灰とソーダで凝集したスラリーを乾燥焼結する方法で Oak Ridge で研究された。4) 流動煅焼法: 煅焼して酸化物粉末にする方法で Argonne, Idaho で研究中。5) ガラス化法: ネフエリン・サイアナイトと石灰を加えてガラス化する方法で Chalk River, スウェーデンで研究中。(1958. 5. 2)