

のような5つの性質によるよってよいでしょう。

- (a)放射能が強い
- (b)発熱が大きい
- (c)毒性が高い
- (d)寿命が長い
- (e)雑多な元素を含む

以下にこのそれぞれについて、簡単に説明をしておきましょう。

(a) 放射能が強い

これはいわば自明すぎるほどのことですが、やはり高レベル廃棄物の最大の特徴です。その放射能毒性のことは、(c)のところでも述べますが、単純に外部放射線量を考えても、高レベル廃棄物の発する放射線はきわめて強いのです。

仮にガラス固化体1体分の発する放射線の量をおよそ考えてみましょう。これは、使用済み燃料1トン分からの放射能とおよそ考えてよい(表IV-1参照)わけですが、その放射能量(ベータ線=45京ベクレル)の大半は、このガラス固化体が燃料の原子炉取出し後10年を経たものと考えたとセジウム-137, ストロントチウム-90, プルトニウム-241によると考えてよいでしょう。このうち外部放射線被曝に関係するガンマ線は、セジウム-137によるものが主として考えられます。そうすると、このキャニスター(キャニスターの肉厚は5mm程度なので、それによる吸収はあまり問題にならないが一応考慮する)からのガンマ線による放射線の強さは、

| | |
|----------|-----------------|
| 1m離れた距離で | 1~10レントゲン/秒 |
| 10cmの距離で | 100~1000レントゲン/秒 |

となるでしょう(内容物によってはもっと大きくなる)。いづれにせよ、キャニスターに納めた状態でも、その近くに数秒から数十秒いたただけで、致死線量を浴びてしまうほどのものです。

第2章 人類最大の負担 ——高レベル廃棄物

この本では、高レベル廃棄物問題を全面的に取り扱うことはできません。それはそれで1冊の書物に優に値するテーマであり、本書の次の作業として、私自身取り組まなくてはならないテーマと考えています。しかし、ごく一般的に、高レベル廃棄物とはどんな性質のものか、本書でも触れておきたいと思えます。

(1) 高レベル廃棄物の基本的性格

高レベル放射性廃棄物とは、使用済み燃料中に発生する死の灰の本体と思ってもらえればよく、人類の発生させたゴミのうちでも最も取り扱いのやっかいなもの、人類最大の負担といっても過言ではないでしょう。よく原子力推進側のパンフレットなどに、「原発のゴミはかさも小さく、取り扱いがやっかいなものではない」などと書かれていますが、原子力開発50年を迎える今日、未だに有効な処分法が見つからず、世界中のどこでも処分地を決定して、最終処分を開始したことがないことから、そのやっかいは証明されるでしょう。

なぜ、高レベル放射性廃棄物はそんなに、やっかい物なのか、それは次

のですから、発熱の問題は、上記の放射線の強さの問題と同根なものが、やはり特記すべきことです。というのは、この発熱という特性によって、高レベル廃棄物の取り扱いには、格段に困難になるからです。

「原発の高レベル廃棄物は体積は小さい。1年分をひとまとめにすれば、1m³以内の塊となる」などという推進側の宣伝が、時々みられます。しかし、どうでしょう。仮に原発1基1年分の廃棄物を純粋に取り出すことができたとして、それをひとまとめに圧縮してみましよう。たしかにその体積は1m³以下になるはずですが、そうしたとたんに、それ自身の出す熱の大きさが、内部から溶け始め、メルトダウンを起こすでしょう。つまり、発熱が大きいため、決して1カ所にひとまとめできないどころか、廃液の状態にせよ、ガラス固化体の状態にせよ、長期間冷却を続けないと、自身の発する熱によって自己崩壊を始めるのです。こんなやっかいなゴミはないといえましよう。

会社側のデータによると、海外返還ガラス固化体1体当たりの発熱量は2.5kW（以下）とされます。これは、使用済み燃料の原子炉取り出しから、日本へのガラス固化体の返還までが10年以上くらくらいたったと考えての話（初期はこの10倍以上に達する）ですが、それでも1取納管当たり9本を納めると総計22.5kWにもなります。これは相当の発熱量で、周りを通風管で囲んで冷気自然循環による冷却によって、昇温を避け、貯蔵を可能としているのです。

高レベル廃棄物を最終的に地層処分する場合も、この発熱のためにやっかいな問題が生じます。埋設廃棄物が周辺の岩石を暖めてしまい、暖まった岩石の“浮き上がり”現象が起こることが考えられるからです。

(c) 毒性が高い

この“毒性”はもちろん放射能毒性のことですが、“毒”を構成する主犯は、ガラス固化体などのように、ある程度（10年くらい）原子炉から取

もう1つ注意すべきことは、中性子の発生が、かなり大きくなると予想されることです。この中性子は、1つは、高レベル廃棄物中に含まれる超ウラン元素（プルトニウム、アメリシウム、キュリウム、カリフォルニウムなど。量的にはアメリシウムが多い）が、自発核分裂反応によって中性子を放出することです。また、アルファ線が強いとそれがガラス中の原子と反応して生じる（ α, n ）反応による中性子の発生も決して無視できません。

これらによる中性子線量の評価は、内容物についての詳しいデータが与えられていない状況で、大変難しいことですが決して小さくなく、その危険性はガンマ線に劣らぬものがあります。というのは、ガンマ線より発生率は低くても、中性子は遮蔽しにくい粒子線ですし、また人体への影響（放射線の生物学的効果）がガンマ線の20倍にも達する有害性の強い電離性放射線です。厚いコンクリートで遮蔽してもそれを通り抜けたり、複雑に散乱してすき間から漏れ出る可能性も大きいのです。

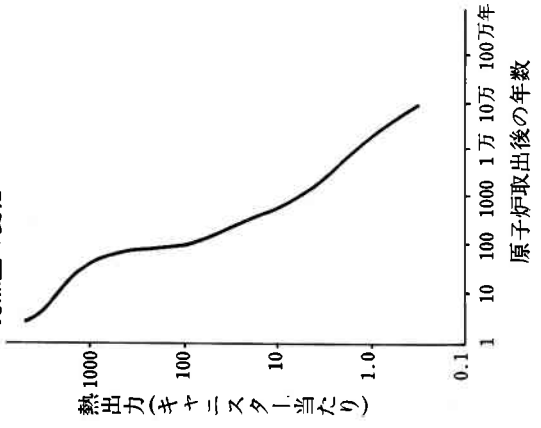
ある推定によると、キャニスター1個当たりの中性子発生量は毎秒約50億個（ 5×10^8 n）ともされます。これは、輸送、施設への受け入れ、ガラス固化体の貯蔵などの各段階で大きな問題を呈しうる線量です（この点についてはさらに第4章を参照）。

いづれにせよ、このような放射線の強さが、高レベル廃棄物の取り扱いを著しく困難にしていることはいまでもありません。それは単に人間が近づきにくく、リモートコントロールが常に必要となる、という問題のレベルにとどまりません。これを納めるガラスや容器（キャニスター）や建屋の壁すらも、長年の放射線照射によって脆化し、放射能漏れの原因となるからです。

(b) 発熱が大きい

放射性物質の発熱は、放射線のエネルギーが熱に変わることで生じるも

図V-4 キャニスター1個分の発熱量的変化



り出した後の時間がたっている高レベル廃棄物では、長寿命のアルファ放射能です。

仮に再処理後の高レベル廃棄物(たとえばガラス固化体)を考えれば、その毒の主な成分はストロンチウム-90 (ベータ放射体) とアメリカシウム-241, キュリウム-244 (いずれもアルファ放射体) といった物質です。その合計は、前のように、"一般人の年摂取限度"を用いて表すと約10兆人分くらいに当たる(10年冷却として)という大きさです。ガラス固化体1本の内容物で数億人以上の人にがんを起こさせる量だといったら、およその毒性の見当がつくでしょう。そんなガラス固化体にして、最大4600本もが、六ヶ所村に集中することになるのです(海外から1440本と再処理工場から3200本)。

あるいはチェルノブイリとの対比で考えることもできるでしょう。チェルノブイリで放出されたセシウム-137は、 10^{17} (10京)ベクレルともその倍近いとも言われています。仮に 10^{17} とみると、ガラス固化体としてもちこまれるものは、固化体4600本として460倍になります。あのすさまじい土地と食品の汚染を生じ、世界中の人々の食卓を襲い、いまなおウクライナや白ロシア(だけではありません)に多くの悲劇を生みつつある、あのセシウムの何百倍もが集中する。しかも、それよりはるかに毒性の高い放射能も多量に持ち込まれるのです。

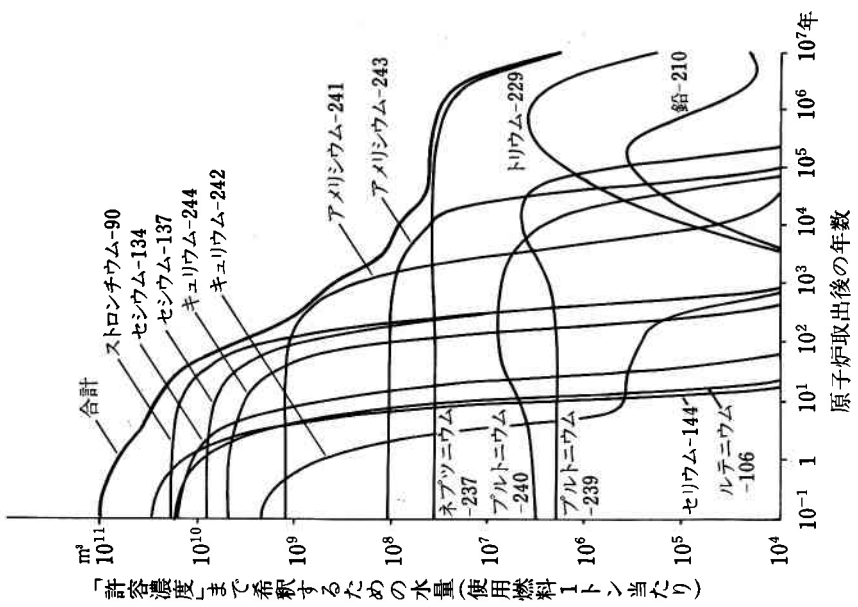
もちろん、こういう言い方に対しては、会社側は「ぜったいに事故は起こさない」と言うわけですが、この量の大きさということは誰もが頭に入

れておいた方がよいことだと思います。

(d) 寿命が長い

毒性が高く、発熱性も大きい放射能の中には、寿命が相当に長いものがあります。その寿命の長さを、よく用いられる図を使って表してみよう。まず図V-4には、キャニスター1個分のおよその発熱量の変化を示します。キャニスターの内容量についての十分な

図V-5 高レベル廃棄物の毒性変化



情報が必要でもないのですが、申請書では、1本当たり2.5kW以下(初期値)と言っていますので、それに合わせてあります。後述する放射能毒性の変化に比べると足が早い(減少が早い)といえますが、それでも、100年後に約100W/本の発熱が残ることになります。1ピット720本では、72kWもの熱出力があることになり、決して油断はできません。

さて、最大の問題は毒性の寿命です。プルトニウムやウランを再処理で抽出した後の高レベル廃棄物の毒性変化を、図V-5に示します。これは

リートではとても、そんな役割は期待できません。

専門家仲間の話では、「金の容器だとよいのだが……」という話になるのですが、もちろんその先はため息で終わる話です。数百万年という期間となると、岩盤（これらを天然バリアといいます）でも、とても保証されそうもありません。そんな先まで地殻の変動を予想できるような科学の用意がないからです。

(e) 雑多な元素を含む

これは、一般にあまり指摘されないことですが、放射性廃棄物の取り扱いがたいへんなのは、何十種類もの化学元素（放射性ですが）を含み、それらの化学的性質が大きく異なることです。おおよそゴミと名のつくものは、そんなに純粋でないことが多いわけですが、それでも、毒物がある程度特定できれば、その化学的性質に則した管理ができます。ところが、放射性物質の場合は、それぞれ周期表の端から端まで、性質の異なる元素を含むので、そのどれかに焦点を合わせるような、閉じこめ策ができないのです。

実は高レベル放射性物質の固化（閉じこめ）にガラスを用いるのは、ガラスが非結晶性物質で、化学構造的にいうとかなりデタラメな配置をしているという点を、逆手にとって、雑多なものを閉じこめさせているのです。ガラスは、教々の問題点をもっているのですが、この点が特徴で、いわば窮余の一策といったところでしょう（ガラスの問題については次章を参照）。

しかし、この化学的性質の雑多性は、やはり、放射性廃棄物の取り扱いをやっかいなものにし、時に予期せぬような腐食や漏洩を起こす原因となるので、要注意なのです。

使用済み燃料1トン当たりの値ですから、やはりガラス固化体キャニスター1本分とみてよいでしょう。縦軸は、よくやられるように、「毒性指標」が目盛られています。「毒性指標」とは、その放射能を年摂取限度に対応する水中濃度にまで（濃度限度＝許容濃度と考えてよい）希釈するのに必要な水の量です。つまり、許容濃度にまでうすめるのに必要な水の量の毒の大きさを表しているわけです。

一番上側のカーブが合計の毒性で、10年後では約400億トンになります。これはたとえば、一辺が3.4kmの巨大な立方体に水を満たした時の体積です。キャニスター50本分で地上の全河川水量に当たり、4600本分ではほぼ全湖水量に当たります。毒性がいかにか大きいかかわかろうというものは、ここで問題にしたいのは、図V-5に表されている毒性の持続する長さです。最初の1000年ぐらいたとえ、毒性が100分の1以下に減ります。これはストロンチウムとセシウム（それにキュリウム）などの数十年単位の半減期のものが死に絶えるためです。

しかしその後にはなかなか毒性が減ってくれません。寿命の長いアルファ放射体（超ウラン元素）が、がんばるからです（プルトニウムが一部含まれるのは、再処理で除去しきれず、不純物として廃棄物に入ってくる分です）。長期的に考えれば最大の問題は半減期210万年のネプツニウム-237で、これは1000万年も地上の生命を苦しめることになるでしょう。

寿命の長さは、次のようなことから理解できるでしょう。毒性指標すなわち希釈水の量は、100万年後にも約3000万トン、つまり最初（10年冷却時）の1000分の1の毒性を維持するわけで、それは100億人分もの人の年摂取限度に当たると勘定です。

このように寿命が長いと、放射性廃棄物を処分する場合でも、容器や建造物（これを人工バリアと称します）では、とても長期の閉じこめを保証できない。せめていったん大きく放射能が減る1000年くらいのところまで、人工バリアがもってくれればと有難いのですが、ステレンスやコソク

表IV-1 使用済み燃料中に含まれる主な放射性物質
(原発使用済み燃料1トン当たりの量)

| 核種 | 半減期 | 放射能 (単位:兆ベクレル) | | | 許容量の約何倍か* (1年後に對して) |
|------------|--------|----------------|-------|-------|---------------------|
| | | 1年後 | 3年後 | 10年後 | |
| トリウム | 12.3年 | 19 | 17 | 12 | 33万倍 |
| ウラン-235 | 7.1e8年 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 280万倍 |
| プルトニウム-239 | 2.4e4年 | 330 | 290 | 180 | 230倍 |
| ストロンチウム-90 | 28.8年 | 2700 | 2600 | 2190 | 9600倍 |
| セシウム-137 | 30.1年 | 3700 | 3600 | 3100 | 510倍 |
| セシウム-134 | 2.1年 | 4100 | 2100 | 200 | 820倍 |
| セシウム-132 | 6.6年 | 3600 | 3600 | 3100 | 510倍 |
| セシウム-131 | 8.0日 | 18000 | 3100 | 6.1 | 12000倍 |
| セシウム-130 | 2.6年 | 3900 | 2300 | 360 | 390倍 |
| セシウム-129 | 1.6e5年 | 360 | 310 | 175 | 9倍 |
| セシウム-127 | 4.5e7年 | 220 | 167 | 55 | 33倍 |
| セシウム-125 | 2.3e7年 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 33倍 |
| プルトニウム-239 | 2.4e4年 | 83 | 83 | 69 | 16兆 |
| プルトニウム-240 | 1.1e4年 | 11 | 11 | 11 | 2.5兆 |
| プルトニウム-241 | 13.2年 | 4400 | 4000 | 2860 | 4.3兆 |
| プルトニウム-242 | 38万年 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 20兆 |
| プルトニウム-243 | 433年 | 11.2 | 24.5 | 62 | 140兆 |
| プルトニウム-244 | 1.6e8年 | 298 | 13 | 0.12 | 2.5兆 |
| 合計 | 17.6年 | 55 | 51 | 39 | 1.5兆 |
| | | (約)89000 | 30000 | 14000 | 約60兆倍 |

注: R. E. Wymer and B. L. Vondra: Light Water Reactor Nuclear Fuel Cycle に基づく (一部補正)

* : この項は高木による。「許容量」とは職業人の年摂取限度の50分の1を一般人の年摂取限度とみての値 (諸化学形、人体への経路のうち最も厳しいものを対象とした)。
 a) 気体のため定義できない。
 b) ストロンチウム-90は崩壊してイットリウム-90となる。イットリウム-90は半減期が60時間とそれ自身は短い。ストロンチウム-90が存在する限り平衡量 (同放射能) 存在する。
 c) ルテチウム-106 と平衡量のロジウム-106 (29.8秒) も存在する (ルテチウム-106の娘)。
 d) ヨウ素-131 は原子炉内の生成量は大きい。半減期が短い。一般に再処理工場では原発におけるような大きな問題とならない。
 e) アメリシウム-241 はプルトニウム-241 の娘であり、プルトニウム-241 の崩壊に伴って、逆に増えてくることに注目。

は、取り出し直後より上のような期間における放射能で、主に問題となりそうなるものを列記してあります。これは1つの原子炉 (軽水炉) についての計算例ですから、実際には原子炉ごとに少しずつ違ってくるのが考えられます。なお、表の最後の欄は、一般人の年摂取限度を、法律に定められた職業人の年摂取限度の50分の1 (線量限度が5000ミリレム対100ミリレムなので) として計算した、倍数です。つまり、一般人の許容摂取限度の何十倍もの放射能が、1トンの使用済み燃料には含まれていることがわかります。実際にはそんな使用済み燃料の何百トン、何千トンが再処理工場に集中することになるわけです。

ウィズケール再処理工場の事故

この有名な事故は1973年9月26日の午前11時、イギリスのウィズケール (現在のセラフィールド) 再処理工場B204棟で起こりました。

放射能漏れを告げるアラームがいつせいに鳴り響き、35人の作業員全員が避難しましたが、すでに建物内の空気汚染は進行して、全員が大量のルテチウム-106 (半減期1年の放射性物質) を吸いこみました。後からの調査では事故時の空気中の放射能濃度は許容量の約100倍にも達し、肺に15~30レムの被曝をしたものが4人、30~140レムが10人、最大の被曝者は生涯の推定累積線量が1500レムにも達するほどだったといわれています。

事故の調査結果によると、燃料の不溶解残渣 (主としてルテチウム) が給液槽の底に積もり、その発熱によって有機溶媒が揮発し、圧力が上がって給液槽からあふれ出し、揮発性のルテチウムが空気に放出されたためであることがわかりました。この事故の影響は決定的で、それ以降、セラフィールドの軽水炉用再処理施設は閉鎖したままになっています (現在、まったくあたらに、THORPという施設を建設中。235ページを参照)。