1 解説

原子力発電の環境問題をめぐって

(放射線医学総合研究所) 小林 定喜

わが国において原子力発電所の設置に伴って生じている環境問題に関して、その基本的課題である放射線問題を概説する。原子力発電所から放出される放射性核種の種類と量、その生態学的挙動、それによって一般公衆が蒙る放射線被曝の種類と程度、微量放射線によって惹き起される身体的障害と遺伝的障害の危険度の見積り、放射線防護の基準と考え方について述べ、また、原子力発電所には放射線に関すること以外にどのような環境問題があるかを紹介して解説する。

I. はじめに

1. 問題点について

わが国で原子力の開発利用が始ってからすでに20年近くを過ぎ、現在操業運転中の原子力発電所は4箇所5基、発電容量182万kW、建設中、計画中のものを合わせると炉数23基、発電容量約1,650万kWに達しており、これが1985年頃には6,000万kW程度の発電規模となると推定されている。このような原子力発電規模の急激な拡大に対して、安全確保・環境保全・公害防止の立場からの不安と反対の声も次第に大きくなって来ており、解決を迫られる大きな課題である「原子力発電の環境問題」となっている。これには非常に広い分野の問題が含まれていて、環境との係わり合いで直接に問題となる放射性物質の放出、温排水の放出、用地用水の取得、景観の変更などの問題に加えて、発電所の設置に伴う地帯整備、税制、補償などに関しての社会的経済的問題や社会心理上的問題も入ってくる。この小文の目的は、このような「環境問題」のなかで最も基本的で重要な課題である「放射性物質の放出」による放射線*の危険について、平常運転時の微量の放射能放出では何が問題となり、それをどう考え、どう扱うかを具体的に紹介し、あわせて、放射線に関すること以外にはどのような問題があるか、その概略を述べることである。社会的・経済的問題については筆者の専門外であるので触れていない。

実際に問題となっている放射性核種の種類と放射線線量については第Ⅱ章で、微量の放射線の生物学的効果と危険度の見積りについては第Ⅲ章で、それぞれやや詳しく述べ、そのような危険度に対して線量限度や立地基準がどう決められているかについては第Ⅳ章

で、放射線以外の問題については第Ⅶ章で、簡単に述べる。

2. 「安全」の考え方

本論に入る前に、前置きとして「安全」ということに対する考え方について触れておきたい。現在の技術社会では「絶対的な安全」はありえず、あるのは「相対的な安全」である。例えば、旅客機は墜落しないように「安全に」作られている。しかし、現実には飛行回数100,000回に1回の割合で墜落している。つまり、旅客機の「安全」はこの範囲での安全である。したがって飛行機に乗れば $\sim 10^{-5}$ の事故死の確率があるわけであるが、ほとんどの旅客はそのようなことを気にせず、事故の直後でも变りなく旅客機を利用している。これは「自分は大丈夫」という錯覚もあるだろうが、他の交通機関の危険度、例えば自動車事故死の $\sim 10^{-4}$ の確率に比べれば、より安全であり、あるいは目的地に早く到着できる便利さに比べればとるに足らぬ程度の危険である、何となく判断しているからであろう。原子力発電所から出る放射線についても同じようなことが言える。放射線は本質的に危険なものであって生物学的影響だけからみると、どんなに微量でも安全とは言えない。したがって、放射線被曝は実行可能な限り低くすることが防護のための基本原則となっているわけであるが、人間生態学的立場からすると、原子力発電によって出されるごく僅かの放射線の危険度が例えば自然放射線の危険度と比べて、あるいは火力発電や他の産業活動から出される環境汚染物の危険度と比

Environmental Aspects of Nuclear Power Generation, Sadayoshi KOBAYASHI.

* 厳密には“電離放射線”と書くべきであるが、以下すべて単に“放射線”と書く。

べて小さければ、比較的「安全」であると認め、あるいは発電によって得られる利益と比べてその危険度が小さければ、容認できるものと認めて「安全」印を押すことになる。

このような判断のために、一方で、原子炉設置により環境中へ出される放射線の線量を正確に把握し、人間および人間の環境に及ぼす危険度を定量的に求めることが必要となるわけである。他方、これと比較すべき他の産業活動の危険度や、危険を代償として受けとる「利益」についても定量的な知識が必要となるが、これらについての情報はまことに乏しい。現在、環境論争が論争らしい論争になかなか得ないことが多いのは、必要な知識が得られていないからである。総合的な判断が要求されているのに、部分的な不十分なデータしか得られていないのが実状であることを認めねばならない。

3. 事故時の問題

この小文では、平常運転時の原子力発電所に係る環境問題だけを取り上げていて、一般大衆の不安の一因である原子炉の大災害事故については触れていない。原子力発電所の設置に際して事前に行われる安全審査では、まず起ることはないと思われるが最悪の場合には起るかも知れぬ「重大事故」*と、それよりも起る確率ははるかに小さく技術的には起ることが考えられないような「仮想事故」**を仮定して、その際にも一般大衆に重大な放射線障害が生じないような設計を確保することになっている。したがって、公衆に被害の及ぶ大災害事故は起り得ないとするのが普通の考え方である。しかし、「重大事故」「仮想事故」は大量の放射性物質が一般居住地域に放出されることがない限度までの事故を仮定しているにすぎないとし、工学的信頼性からみて大災害事故は起り得るとする意見も出されている。

仮りに大災害事故が起るものであるとした時、それでもなお、一般大衆の障害を最低限に押えることは可能であろうか？ そのためにはどのような準備、対策が必要か？ また、そのような考慮は立地基準などの行政指針や実際の行政措置にとり入れられているのか？ 平常運転に伴う環境問題が解決されたとしても、このような「事故」問題が、なお一般大衆に残る根強い懸念であることを、原子力発電を推進するに際しては充分に考慮する必要があることを強調しておきたい。

II. 問題となる放射線被曝の種類と線量

原子力発電に伴って一般大衆はどのようにしてどのくらい放射線を受けるか？

1. 気体廃棄物と液体廃棄物

原子力発電所は通常の運転時において、極く低レベルの気体および液体の放射性廃棄物を環境中へ放出している。

気体廃棄物の中には、 ^{41}Ar 、トリチウム、 ^{133}Xe 、 ^{85}Kr 、 ^{131}I 、 ^{45}Ca (粉塵として出る)などがある。

液体廃棄物の中には普通、トリチウムや、腐食生成物の放射化されたものとして ^{59}Fe 、 ^{60}Co などがあり、また、 ^{137}Cs のような核分裂生成物(F.P.)が含まれていることもある。

これらの放出は、いずれも特殊なフィルターを通したり、イオン交換樹脂で処理されるなどしてできるかぎり低いレベルに押えられている。

2. 外部被曝と内部被曝

これらの放射性廃棄物によって、原子力発電所周辺に居住する人々が放射線を受ける。その場合第1図に示すように、環境中に存在する放射性核種によって体の外から受ける「外部被曝」と、空気や水の中の放射性核種が呼吸や飲用によって身体内に入ったり、あるいは環境中の放射性核種が食物連鎖**を通じて米、野菜、ミルク、卵、獣肉、魚肉などの食品に入り込んで身体に取り込まれ、その結果、身体の内部で放射線を出すために起る「内部被曝」とがある。

* 「重大事故」： 敷地周辺の事象、原子炉の特性、安全防護施設等を考慮し、技術的見地からみて、最悪の場合には起るかもしれないと考えられる重大な事故。

** 「仮想事故」： 重大事故を超えるような、技術的見地からは起ることは考えられない事故(例えば、重大事故を想定する際には効果を期待した安全防護施設のうちのいくつかが動作しないと仮想し、それに相当する放射性物質の放散を仮想するもの)。

*** 食物連鎖 (Food chain): ある生態系において、その構成生物(A, B, C, ...)の間に、AはBに、BはCに、CはDに…捕食されるといった連鎖的な捕食関係があるとき、「食物連鎖」をしているという。例えば、植物プランクトン→動物プランクトン→イワシ→ツノオトシゴ→人。一般にこのような食物連鎖がいくつも係わり合って、食物環 (Food cycle)、食物網 (Food web, 第2図) をなしている。

第1図 原子力発電による人間の被曝の過程

3. 厄介な内部被曝

外部被曝の線量は、放射性核種がどこにどのくらい存在するかがわかれば比較的容易に計算できるし、また、実際に線量の測定も可能である。しかし、内部被曝の場合は核種によって環境中の移行経路が異なり、また、空気、水、食物を通じての体内取り込み量や、肺や消化管から吸収される割合、体内での到着先（影響を受ける身体臓器）、体外へ排泄されるまでの時間（滞留時間）などが、核種の物理化学的狀態や受け入れた人間の年齢・性別・その他の生理的条件によって大きく変化するので、線量の評価は複雑になる。また、被曝によって人間が受ける影響に関しても、外部被曝の場合では実験研究により割合よくわかっているようなことでも、内部被曝の場合は不明であることがほとんどである。

4. 生物による濃縮

内部被曝に関して重要な問題の1つは食物連鎖を通

じて、人間に到達するまでの環境中の移行経路とその間での生物による濃縮の問題である。湖に放出された ^{137}Cs の場合は、第2図に示すように、水中の ^{137}Cs は湖底の泥に沈積し、あるいはプランクトンや植物に取り込まれ、それがオタマジャクシ、エビ、昆虫などを経て次第に濃縮されて行き、人間が食用とする魚、鳥、獣などの段階では濃縮係数（生体内の濃度と水中濃度との比）が数1,000にもなることがある。仮りに、 ^{137}Cs の濃度が飲料水の最大許容濃度である $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/ml}$ となっている池で鯉を飼育すると、鯉肉中の ^{137}Cs の濃度は $4.5 \mu\text{Ci/g}$ となり、この肉20gの中に、人間の長期最大許容体内量（全身に $90 \mu\text{Ci}$ ）に相当する量が含まれていることになる。このように飲んでも安全な濃度であっても自然環境の中ではその濃度が安全な濃度とはならない場合があることに留意する必要がある。物理的に希釈したからといって、その状態が自然界でいつまでも保たれるという保証は生物学的にはあり得ないのである。

身体内に取り込まれた放射性核種が体内にどのくらいの期間とどまり、または蓄積されるかを示す単純な例として、第3図に示すように、 ^{65}Zn を摂取した場合について考えてみる。1回だけの摂取では約90%がそのまま胃腸管を通過して排泄され、体内に吸収されるのは10%である。これがその後徐々に体外に排泄され、同時に物理的な崩壊によって減少していく。体内

(): 濃縮係数

第2図 ^{137}Cs の食物網 (Pendleton, R.C., Hanson, W.C. の原図による)

の量が半分に減るのに要する時間(有効半減期*)は194日である(第3図(a))。一方、これを毎月6 μCi ずつ連続的に摂取すると、最初の1ヵ月後における体内の蓄積量は0.6 μCi となり、さらに摂取をつづけるとこれが重なって増加してゆき、やがて摂取量と減少量がつり合って、毎月の摂取量である6 μCi のレベルで平衡状態に達する(第3図(b))。

以上のようなことを考慮して内部被曝による線量が計算されるが、イギリスのBradwell発電所(ガス冷却型炉)の例では、 ^{65}Zn の毎月の放出率約50mCi、放出口から約500m離れた水域での濃度は約 5×10^{-5} pCi/ml、そこに棲息するカキの濃縮係数は約100,000で(魚では1,000)、カキの肉における ^{65}Zn の濃度は約5 pCi/gであり、これを毎月75g食べるとすると、その人の受ける全身線量は年間約1mremになると計算されている。汚染されたカキの肉を毎日25g食べるということは特殊な例であろうが、食物連鎖を通じての内部被曝線量の計算に際しては、核種の移行経路、食品の種類、摂取量について最も影響が大きく出るような場合を想定して線量の最大値を求め、それが決められている線量限度以下であることを確認する、という手順で放射性核種の放出量の管理が行われている。

5. 内部被曝の特異性

内部被曝でもう一つ重要な問題は、放射性核種が体内に取り込まれた時、核種により、また、核種の物理化学的性質によって、体内での移行の様子や取り込まれる臓器組織が異なることである。 ^{131}I は身体内に入ると特異的に甲状腺**に集まり、この組織を集中的に β 線で照射するので、甲状腺癌が誘発される危険がある。 ^{131}I の1 μCi を2歳以下の幼児が摂取した場合、甲状腺の受ける放射線の線量は15~20rad程度と計算され

ている。同様に ^{90}Sr 、 ^{239}Pu などは骨に集まって骨腫瘍を引き起す危険がある。 ^{137}Cs は筋肉に集まるので全身が照射されることになり、 ^{144}Ce はほとんど吸収されず、経口摂取の時は主として消化管を照射することが知られている。物理化学的性質によって体内分布が異なる例は ^{239}Pu で、静脈内注射による投与後1日の分布をみると、重合体(直径5,000Å)は主として肝臓や脾臓などの網内系組織に取り込まれて骨には行かないのに対し、単量体(直径50Å)は網内系組織と同じ程度に骨に集まる。

6. 放射性核種の成因

原子力発電所の平常運転時に放出される放射性核種の成因は、空気中の諸元素の放射化、冷却材その他各種材料中の諸元素の放射化、および核燃料中で生成され冷却材中に洩れ出てくるF.P.である。これらのうち重要なものを挙げると第1,2表のとおりである。これら核種の生成、放出量は炉型や運転条件、浄化設備によって大きく異っている。加圧水型炉では、反応度制御のために冷却材中にケミカル shim**としてホウ素を入れるが、これがトリチウムの発生源となるので、この型の炉のトリチウム放出量は沸騰水型炉に比べて多くなっている。逆に ^{85}Kr などの希ガスの放出量は沸騰水型炉の方が多(第3表)。ガス冷却炉では ^{41}Ar

* 有効半減期 T_{eff} : 物理的半減期 T_{Phys} と代謝排泄による生物学的半減期 T_{Biol} との関数、 $1/T_{\text{eff}} = 1/T_{\text{Phys}} + 1/T_{\text{Biol}}$ 。

** 脳下垂体にあるホルモン分泌器管、成人で約25gの重さがある。体の全般的な物質代謝を促し成熟を促進させるホルモンを分泌している。

** chemical shim: 加圧水型炉では冷却水中に反応度吸収のため、中性子を吸収するホウ素などを入れる場合があり、これをケミカル shim という。

第1表 中性子により放射化されて生ずる放射性核種

発 生 源	核 種	半 減 期
空 気 冷却材中の H ₂ , B 冷却材中の CO ₂ セメント粉塵 その他の構造物	¹³ N	9.96分
	¹⁶ N	7.1 秒
	¹⁹ O	29.1 秒
	⁴¹ Ar	1.83 時間
	³ H	12.34年
	¹⁴ C	5,730年
	⁴⁵ Ca	164日
	⁶⁰ Co	5.263年
	⁵⁹ Fe	45日
	⁶⁵ Zn	245日
	⁵¹ Cr	27.8日

が主要な放出放射性核種である。

これらの核種のうちで、平常運転時の気体廃棄物として問題になるものは、半減期の長いことと、除染用フィルターなどによって除去され難いため放出量が多いという点で、トリチウム(半減期12.34年)と⁸⁵Kr(半減期10.76年)とが挙げられるが、これらの核種は生物濃縮され難い。生物濃縮の点から注目される核種としては、¹³¹I(半減期8.05日)が挙げられる。¹³¹Iは揮発性のF.P.で、燃料棒からの漏洩によって出てくるものであり、通常、高性能フィルターなどの浄化装置で捕えられるので環境への放出量は発生量のごく一部に過ぎないが、甲状腺への顕著な影響がある点で重要である。

液体廃棄物中に出てくるものの中で特に問題として挙げられている核種には、放出量の多い点ではトリチウムがあり、放出はほとんどないが半減期が極端に長く毒性が高いという点で²³⁹Puなどの超ウラン元素がある。また、水棲生物に濃縮されやすいという点で⁶⁰Co, ¹³⁷Csなどが障害評価上注目される核種となっている。

実際にアメリカや日本で原子力発電所の周辺から採取された種々の環境試料中で見つかった放射性核種は、沸騰水型炉の周辺では¹³³Xe, ¹³¹I, ¹³⁷Cs, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr, ¹⁴⁰Baなどであり、加圧水型炉の周辺ではトリチウム, ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ¹²⁵Sb, ¹³⁷Csなどである。このうち¹³¹I, ⁸⁹Sr, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Coなどは核実験による放射性降下物にも含まれているので、その源を見きわめる必要がある。

また、これらの放射性核種をよく取り込み濃縮するため、放射能の検出が容易な生物を指標生物として環境汚染の早期発見に役立てることが考えられている。生育分布が広く、1年を通じて採取が容易な生物が指標生物として最も適当であるが、そのようなものの例として、ムラサキイガイとホンダワラが挙げられる。

第2表 軽水炉†および液体金属冷却高速増殖炉††における主なF.P., 超ウラン元素の生成率(OECD・NEA: 西ヨーロッパにおける放射性廃棄物管理の実例, 1971, から引用)

同 位 元 素	半 減 期	軽水炉から分離 後90日後の放射 能 (Ci/t 燃料)	液体金属冷却 高速増殖炉から 分離後30日 後の放射能 (Ci/t 燃料)
³ H	12.3 年	6.98×10 ²	9.32×10 ²
⁸⁵ Kr	10.76年	1.13×10 ⁴	1.02×10 ⁴
⁹⁰ Sr	51 日	2.14×10 ⁵	6.37×10 ⁵
⁹⁰ Sr	28 年	7.69×10 ⁴	4.34×10 ⁴
⁹⁰ Y	2.60日	7.69×10 ⁴	4.35×10 ⁴
⁹⁵ Zr	65 日	5.24×10 ⁵	2.10×10 ⁶
⁹⁵ Nb	35 日	8.69×10 ⁵	2.66×10 ⁶
¹⁰³ Ru	40 日	2.55×10 ⁵	1.76×10 ⁶
¹⁰⁶ Ru	1 年	4.59×10 ⁵	1.29×10 ⁶
¹²⁵ Sb	2 年	8.48×10 ³	1.96×10 ⁴
¹³¹ I	8 日	3.81×10 ²	1.39×10 ³
¹³³ Xe	5.2 日	—	7.44×10 ⁴
¹³⁶ Cs	13 日	5.10×10 ²	2.88×10 ⁴
¹³⁷ Cs	30 年	1.07×10 ⁵	1.09×10 ⁵
¹⁴⁰ Ba	12.8 日	1.11×10 ⁴	5.23×10 ⁵
¹⁴⁰ La	1.6 日	1.28×10 ⁴	6.01×10 ⁵
¹⁴¹ Ce	32.5 日	2.05×10 ⁵	1.48×10 ⁶
¹⁴⁴ Ce	285 日	8.92×10 ⁵	1.28×10 ⁶
¹⁴⁷ Pm	2.6 年	1.04×10 ⁵	3.53×10 ⁵
²³⁹ Pu	88 年	2.79×10 ³	1.12×10 ⁴
²³⁹ Pu	24,413年	3.30×10 ²	3.53×10 ³
²⁴⁰ Pu	6,580年	4.78×10 ²	4.26×10 ³
²⁴¹ Pu	14 年	1.16×10 ⁵	6.00×10 ⁵
²⁴² Pu	3.869×10 ⁵ 年	1.36	12.7
²⁴¹ Am	432 年	1.72×10 ²	1.57×10 ³
²⁴³ Am	7,340年	17.4	49.6
²⁴² Cm	0.45年	1.93×10 ⁴	6.55×10 ⁴
²⁴⁴ Cm	18 年	2.50×10 ³	1.24×10 ³

† 約1,100MWの軽水炉; 燃料は濃縮U 90t, パーンアップ 33,000MWd/t; 比出力30MW/t

†† 約1,000MWの液体金属冷却高速増殖炉; 燃料約50t(炉心+ブランケット; U+Pu+減損U) 平均燃料バーンアップ 33,000MWd/t, 平均比出力 58MW/t

7. わが国の総線量は?

わが国の原子力発電所から出されている放射線線量はどのくらいであろうか。現在運転中のものについてみると、沸騰水型炉の東京電力福島発電所1号炉(出力46万kW)では、周辺監視区域境界の最も線量の高くなる地点で、年間にγ線0.94mrem, β線0.35mremであり、加圧水型炉の関西電力美浜発電所1号炉(出力34

第 3 表 アメリカ原子力発電所からの放射性廃棄物放出量(1968年度)

原子力発電所	出力 (MW)	気 体 廃 棄 物		液 体 廃 棄 物		ト リ チ ウ ム	
		年間放出量 (Ci)	放出限度に 対する%†	年間放出量 (Ci)	放出限度に 対する%†	年間放出 量 (Ci)	放出限度に 対する%†
加 圧 水 型							
Shippingport	90	0.058	0.143	0.158	0.70	30.13	0.005
Yankee	175	4.57	0.068	0.019	0.047	1,456.00	0.145
Indian Point-1	265	109.40	0.003	21.74	17.50	577.25	0.057
San Onofre	430	89.60	0.016	3.31	5.60	2,925.00	0.155
Connecticut Yankee	573	64.58	0.340	5.37	2.25	2,387.00	0.160
沸 騰 水 型							
Dresden-1	200	395,266	1.16	5.22	15.10	4.45	0.002
Big Rock Point	71	191,826	1.11	5.75	31.60	31.00	0.011
Humboldt Bay	68	389,241	24.60	1.84	1.04	86.50	0.001

† 1970, 10CFR20 による放出限度。

R.M. HOGG: Waste management, *Proc. Southern Conf. on Environment Rad. Protection from Nuclear Power Plant*, 1971, U.S. EPA

万 kW), 2号炉(出力 50 万 kW)では同じく, 年間に γ 線 0.2 mrem, β 線 1.2 mrem と計算されている。

建設中のもの計画中のものすべて合わせると, 福島では 1~6 号炉(出力計 459 万 kW)に対して年間 γ 線 4.2 mrem, β 線 1.3 mrem であり, 美浜では 1~3 号炉(出力計 166.6 万 kW)に対して年間 γ 線 0.46 mrem, β 線 1.6 mrem と計算されている。ただし, これらの値には内部被曝の線量は含まれていない。福島の場合は 1~6 号炉の合計に対し, 内部被曝線量は全身線量で年間約 0.05 mrem と見積られている。

放出量が多くまた半減期が長いことから, 長期的に環境問題として重要な核種であるトリチウムと ^{85}Kr によって将来受けることになる線量については, 日本の場合は田島, 市川, 桑島²⁾の見積りがある。これによると, 西暦 2000 年の時点で, わが国の原子力発電規模 220 GW (GW: ギガワット, 10^9W), 全世界で 4,300 GW, うち 1990 年には世界では 50%, 2000 年には世界で 70%, 日本では 50% が高速炉によっているとした場合, トリチウムによる全身線量は日本の原子炉に起因するものが年 1.5×10^{-2} mrem, 世界の原子炉に起因するものが年 1.7×10^{-2} mrem, 計 3.2×10^{-2} mrem であり, ^{85}Kr による全身線量は, 除去装置なしとして, それぞれ平均で約 10^{-5} mrem, 0.13 mrem であり, ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co などの放射性核種の沿岸放出による内部被曝線量をも含めると, 合計 0.17 mrem 程度であるとされている。

同様な予測を U.S.AEC がアメリカ中部ミシシッピ

ー河周辺の人口 2,900 万人の地域に集中的に原子力発電所を建設した場合について行なっている。この場合は国内周辺地域からの影響は考慮しているが, 世界からの寄与は計算に入っていない。また燃料再処理施設から出るものも含まれているが, 同時に希ガスの除去装置など予想される技術的進歩はすべて採用するものとして予測されている。推算の結果は第 4 表のとおりで, 発電容量 360 GW に対して平均被曝線量は年間 0.17 mrem となっている。

第 4 表 アメリカ中部ミシシッピ河周辺地域の西暦 2000 年における原子力発電による線量予測

(U.S.AEC: *The potential radiological implications of nuclear facilities in a large region in the U.S. in the year 2000*, (1972) による)

炉 型	発電容量 (GW)	計
加圧水型軽水炉	138	360
沸騰水型軽水炉	46	
液体金属冷却高速増殖炉	172	
被曝線量 (mrem/yr)		
平 均		0.17
立地点の 1 マイル以内		0.02~0.05
集団の 1% 以下		1.2
再処理施設から 1 マイル地点		7.0
(トリチウムの放出を1/1000に押える)		

† アメリカ国内の他の地域(隣接地域のものは含む)。

他国, 世界全体からの寄与は含まない。

自然放射線, すなわち宇宙線および大地や建築材料

に本来含まれている U, Th, K などの放射性核種から出される放射線によって受ける線量は、太陽活動の状況や緯度、高度、土地の性質などによって変動するが、日本では関東ローム層地帯で年間約 40 mrem (戸外γ線23~37)、関西の花崗岩地帯では年間約 100 mrem (戸外γ線79~119)となっている。アメリカの値は平均 130 mrem である。これらの値と比較すると、原子力発電による線量は西暦2000年の時点で1%以下である。第5表に比較の対象となる線量の例を示してある。

第5表 アメリカにおける年間の
全身被曝線量率(1970年)⁽⁵⁾

線 源	平均線量率 (mrem/yr)
環 境	106
{ 自然放射線	102
{ 放射性降下物	4
{ 原子力発電	0.003
医 療	73
{ 診 断	72†
{ 放射性薬剤	1
職 業 上	0.8
そ の 他	2
総 計	182

† 腹部線量

Ⅲ. 低線量放射線の生物学的影響と その危険度推定の現状

人が微量の放射線を受けるとどのような影響があるか？ 白血病や遺伝的障害が起きる危険度はどのくらいと見積られているか？

1. 放射線影響のいろいろ

人が放射線を受けるとどのような影響が生ずるだろうか？ これは2つに分けて考えられる。すなわち、放射線を受けた人自身に現われる身体的影響と、その人ではなくその人の子孫に現われる遺伝的影響とである。微量の放射線の場合に問題となる身体的影響は、放射線を受けてから数年以上経ってから発現する「晩発性障害」である。この章ではこれらの2つの影響がどのようなものであるかを簡単に説明し、それが放射線によってどのくらい惹き起こされるのかについての推定の例を述べる。

2. 身体的影響と遺伝的影響

晩発性の身体的影響としては、白血病や身体の種類臓器の癌などの重大な悪性疾患、眼の水晶体の混濁な

どの機能障害、胎児の発生異常(身体的不具や知能障害)、はっきり何が原因であるかを定めることができないような全身的效果として「寿命の短縮」*などがある。遺伝的影響には中立突然変異**といわれるもののようには必ずしも有害な影響として発現しないものもあるが、大部分は悪影響をもたらすものである。発現機構からみて、生殖細胞(精子と卵子)の核の中に存在している染色体が変化する「染色体異常」**と、染色体を構成する機能単位である遺伝子が変化する「遺伝子突然変異」**とに区分される。後者はさらに、影響の現われ方によって優性突然変異、劣性突然変異、伴性突然変異、多因子性突然変異に分類されている。これらの影響の程度は、①その個体を死に至らしめる致死、②身体上および精神上の重大な不具や異常(可視型)、③生存力、生殖力の低下、④全般的な健康度の低下(種々の疾病)、など重大なものから、気づかれぬような軽度のものまで、様々である。

これらの身体的および遺伝的影響はいずれも放射線を受けなくても自然に起っているものや、他の原因で起るものと区別することはできない。その上、影響は被曝後長期間を経てから、あるいはその子供に初めて現われるのであるから、放射線によって起ったものか否かという因果関係を、個々の事例について明らかにすることは人間の場合には非常にむずかしい。このような影響の、放射線による誘発の問題は統計的な考え方と手法で初めて取り扱うことができるものである。提案されているいくつかの危険度推定値も、あくまでも統計的な意味合いのものであることに留意する必要がある。

3. 発生異常と寿命の短縮

晩発性の身体的影響のうち、眼の水晶体の傷害(白内障)は比較的高いある一定線量(γ線中性子線混合照射で200 rad)以上の被曝で発現するので、ここで取り

* 「非特異的な効果」という。癌など病因のわかっていない病気による死亡はこの範疇に入れない。

** 例えば、血液中の赤血球に含まれている蛋白であるヘモグロビンのアミノ酸配列が突然変異によって変化することがあるが、ヘモグロビンの機能には影響がない。

** 染色体異常：染色体(遺伝物質を伝える構造体)が分断されて断片が生じたり、それが再結合する時以前のとおりにならず逆になってついたり、他の断片と入れ換ったりして起る、数と形状の変化。顕微鏡で観察できる。

** 遺伝子突然変異：染色体を構成している遺伝物質(DNA)の質的な変化による。顕微鏡では見えない。

上げるような低線量ではあまり問題にならない。胎児の発生異常に関しては、実験動物の胎児期の被曝では25radで形態学的変化が認められている。人間の場合は広島、長崎の原爆被曝者の子供で妊娠初期2～3ヵ月の間に50～100radの胎内被曝を受けたものでは小頭症、知恵遅れが起っており、線量が低くなればそれに従って軽度の行動障害が起るという報告がある。ちなみにイギリスでは、胎児の被曝による奇形や白血病発生の危険を考慮して、妊婦については腹部は勿論のこと胸部のX線撮影もごく例外的なケースを除いて全面的に禁止する措置がとられている。

放射線による非特異的な寿命の短縮に関しては、広島、長崎の原爆被曝生存者、放射線治療を受けた強直性脊椎炎患者、比較的大きな職業上の被曝を受けた放射線科医、放射線技師について、いわゆる疫学的調査が行われているが、複雑な社会的生物学的要因が関与しているため、放射線によって寿命短縮が起るという結論は必ずしも一致して得られてはいない。ハツカネズミやビーグル犬を用いた動物実験もまだ進行段階であり、ある程度高線量では寿命短縮が起ることははっきりしているが、低線量域ではまだ充分な資料は得られておらず、低線量での定量的な危険度推定は現在のところは全く不十分なものである。アメリカのMorganら⁽⁸⁾は1人当りの短縮寿命を積算し、70年の寿命短縮を死亡1例と換算して、全身に0.5rem被曝すると100万人当り120例の死亡が起ると推算している。このような換算の仕方は生物学的には無理があるが、仮りにこれにならうと、年間170mremの被曝では100万人当り年間40例、日本全体では年間4,000例の死亡が見込まれることになる。

4. 悪性新生物

低線量の放射線被曝で最も重大な問題になるのは白血病などの悪性新生物である。白血病と甲状腺癌に関しては、広島、長崎の原爆被曝生存者、放射線治療を受けた強直性脊椎炎患者および胎児期に低線量のX線に被曝した小児(母親が妊娠中にX線写真撮影を受けた)などで、ある程度ははっきりした線量効果関係が評価できるような資料が得られており、また、これを支持するような動物実験結果も得られている。重要なことは、これらの癌が誘発される感受性は、胎児あるいは幼児では成人の数倍も高いことである。国連科学委員会の報告⁽⁹⁾によると、被曝後数年から25年までの全発生数でみると、100万人1rad当りで、白血病は15～40例(最も可能性の高い値は20)、甲状腺癌は、男性で20～40例、女性で10～80例(40例)、乳癌は6～20例(低めの値)、

肺癌は10～40例、その他の癌は合わせて40例の発生率となっている。

Gofman と Tamplin の推算⁽¹³⁾では、すべての型の癌が放射線に誘発され、その発生率が放射線の線量に対して線量率とは無関係に*直線的に増加し、倍加線量**がすべての型の癌に対して同じ値であり、胎児および幼年者ほど癌が誘発されやすいと仮定すると、全米の住民すべてが年間170mremの放射線を受けるならば、癌、白血病による年間死亡数の増加は、悲観的な値としては104,259例(34.3%増加)、楽観的な値としては9,428例(3.1%増加)となる。これらの推定値は両氏の推定の根拠となった仮定—低線量域での直線性、線量率効果、すべての型の癌に対して倍加線量が等しいとする点など、について疑問が持たれることから、過大な値であると考えられる。

アメリカ科学アカデミーの推定⁽⁵⁾も同様に直線性を仮定しているが、これによると全住民が年間170mrem被曝して25年経過した場合の癌による年間死亡数は、これより1桁低く3,000～15,000例と見積られている。この後者の推定を日本に当てはめると、1億の人口に対して癌による死亡数の増加は年間170mremの被曝では年間1,500～7,500例、集団に対する現行の線量限度である年間500mremの被曝では4,400～22,000例となる。実際に受けることが予想される線量である年間10mremの被曝では、これはおよそ90～440例となる。

5. 推定値の幅

ほかにも、例えば古いものではICRP⁽¹⁰⁾が行なっているものもその1つであるが、いくつかの推定値が出されている。ここで紹介した国連科学委員会とアメリカ科学アカデミーによる推定は最も最近のものである。Gofman と Tamplin の推算は、それが発表された当時は荒唐無稽であるとの批判が大きかったものであるが、その考え方の一部は今回のアメリカ科学アカデミーの報告に取り入れられる結果となっている。いづれにせよ、確かめられていないいくつかの仮定の上に立っての推算であること、したがって、推定値に大きな幅があることに気をつけねばならない。推定者によって値が変わるのは科学的なデータが大いに不足しており、仮定すべき条件が多いからであって、このことは遺伝的影響の危険度推定の場合も同様である。

* 動物実験では、線量率が低ければ回復作用が働くため放射線の効果は減少することが判っている。

** 発生率を自然に起きている発生率の2倍にするような線量。これがすべての型の癌で同じとするのは無理な考え方である。

6. 突然変異と染色体異常

(1) 優性遺伝子突然変異と染色体異常

この場合にはその効果が直ちに次代の子供に現われる。優性突然変異は、親の一方に変異が起ればその影響が必ず子供に発現するもので、「致死」のものは子供が死んでしまうのでそれ以上影響は伝わらないし、「不稔性(生殖力低下)」のものも子供が生れないので影響はそこで止ってしまう。しかし、これら以外のものは一旦それが起れば、次代から子々孫々へずっと必ず発現し続けて行くことになる。染色体異常では大部分は致死あるいは不稔性で次の代で影響が止まるものが多いが、中には後代に伝わって行くものもある。受精した卵子が子宮壁に着床する前に死んでしまうような場合では、単に月経不順と思われて流産と認められずに見過されてしまう。このような場合の大部分は染色体異常が原因である。また着床後の死は流産または死産となるが、自然に起っている流産の約20%は染色体異常によるといわれている。

(2) 劣性遺伝子突然変異

これは同じ遺伝子について両親の双方に変異を生じている場合に初めて子供に現われるもので、片親のみが変異遺伝子を持っている場合は例外的な場合(ヘテロ劣性発現)を除いては発現せずに潜在していくことになる。したがって、通常は法律的に許されているイトコ結婚の子供で初めて現われる。太陽光線に当たると皮膚に紅斑が生じ、さらに潰瘍を生じて次第に癌化していく遺伝性疾患である色素性乾皮症(Xeroderma, 知能障害を伴う)は劣性突然変異によるものであるが、この発生率は一般の結婚では23,000人に1人であるのに対し、イトコ結婚ではその10倍の2,200人に1人の高率となっている。したがって、劣性突然変異の発現に関しては、近親結婚の割合や通婚圏(結婚の行われる地域範囲)の大きさが重要な要素となる。

(3) 伴性突然変異

これは性染色体*に生じた変異によるもので、性別に密接につながって発現する点が特徴である。主として問題になるのは、X染色体上の劣性突然変異による男性での発現であるといわれている。現在知られている伴性の遺伝疾患の数は約86種であるが、この数は診断医学の進歩によって今後増加するものと思われる。

(4) 多因子性形質の突然変異

人間の知能、生存力、身長などの形質の大部分は単一の遺伝子ではなく、多数の遺伝子(Polygene)が係わり合って決められるものであって、多因子性形質(半量的形質)といわれる。このような形質に関する突然

変異はまだほとんどわかっていないが、動物実験では多因子性形質突然変異は単一遺伝子突然変異に比べて放射線による誘発率が高いことが知られており、また、人間の腎臓結石、消化性潰瘍などの一般的疾患の何10%かはこれによるものと推測されている。

7. 遺伝的危険度の推定

このような遺伝的影響が、実際にどの程度低線量放射線で引き起されるであろうか? 国連科学委員会、ICRP、アメリカ科学アカデミーなどが、主としてアメリカで行われたハツカネズミを用いた実験に基いていくつかの推定値を報告している。しかしながら、実際はまだ動物実験のレベルにおいても、染色体異常や多因子性形質突然変異の放射線誘発率に関する情報が欠けており、また、動物実験の結果を人間に当てはめるための比較動物学的研究や物理的および生物学的修飾因子に関することなど、種々の基礎研究面でのデータが不足しているため、これらの値は大ざっぱな推定の域を出ていないことは身体的影響の場合と同様である。

現在の線量限度である30年に5rem(年間170mrem)を被曝した場合の危険度の増加について、安田**は次のような概算をしている(第6表)。

第6表 年間170mrem 被曝による遺伝的危険度

	接合子†1,000個当りの増加例数
(1) 遺伝子突然変異	3.32
(2) 多因子性 //	1.00
(3) 染色体異常	18.01
計	22.01

注: ICRP⁽¹⁰⁾ では(2), (3)は不明として推定していない。
国連報告では(3)の一部分について出生児100万人に1~2例と推定している。

† 接合子: 精子と卵子が接合したもの、ここでは子宮に着床する前の受精卵の意味である。

この表で問題となるのは染色体異常の高い発生率である。この推定では傷害を受けた生殖細胞が分化の過程で除去されてしまう可能性や、精子と卵子が接合してから、異常の程度によって子宮に着床しない、あるいは着床しても分裂、成長しないので排除される(早期流産)ことを計算に入れていないので、実際に生きた状態で生れて来て社会負担となる障害者の数はこれより

* 人間の性別を決める染色体。X染色体とY染色体とがあり、通常XYの組合せの時男性となり、XXの組合せの時女性となる。

** 安田徳一(放医研集団遺伝研究室長): 放射線科学, No. 4, (1973)印刷予定。

も少ない。

アメリカ科学アカデミーの報告⁽⁵⁾では、同じく30年間に5 rem被曝することによる危険度として、

- 「(1) 優性と伴性(X染色体)突然変異による重大な障害発生は、第1世代では年間出生児360万人につき100~1,800例(0.05%)、数世代後ではこの5倍となる。
- (2) 劣性突然変異と染色体異常によるものは奇形65~80例、流産430~520例となる。
- (3) 多因子性のものまで含めると、第1世代で年間200~3,600例(0.1%)、数世代後では年間1,100~27,000例(0.75%)となる。
- (4) 上記のものをすべて含め、さらに突然変異性の「不健康状態」(ill-health)を全部合計すると、不健康状態すべてのうちの5~50%が突然変異によると考えられるので、仮りにこれを20%とし、倍加線量を20remと仮定すると、全体で5%の不健康状態の増加が起る。」

と推定している。このような推算の方法を仮りにわが国に当てはめてみると、同じく30年間に5 rem, すなわち年間170 mremの被曝で年間出生数200万人(1972年度出生数2,057,000人, 1975年までは増加の見通しである)について、優性および伴性突然変異による重大な障害例は、平衡状態に達した世代で最大の値が年間約5,000人, 多因子性のものを含めると年間約15,000人であり、また、精神的, 身体的な不健康状態の自然発生が出生数の30%とすると、すべての遺伝性の疾患と不健康状態の総計として年間約30,000人の発生増加となる。

以上のような遺伝障害の危険度推定値は、身体的障害の場合と同じく高線量, 高線量率での実験結果に基づいた危険度の上限となるような値である。雄ハツカネズミを用いた劣性遺伝子突然変異誘発の実験に基づいた推定では、男性の低線量, 低線量率照射によって生ずる突然変異率は、高線量急照射の時の約1/3に低下し、雌での実験に基づく推定では、被曝してから十分に長い期間を経てから受精が起るのであれば、女性の低線量, 低線量率の照射によって子孫に生ずる突然変異の頻度はほとんどゼロと推定されているので、実際の危険度はこれより低くなる可能性がある。

8. 内部被曝の障害と複合汚染

内部被曝による身体的, 遺伝的影響に関しては、第II章でふれたように、内部被曝により身体の臓器や組織が照射される様相が非常に複雑であるため、危険度の推定が一層困難となっている。透過力の弱い α 線や

β 線を出す核種は外部被曝の場合にはあまり問題とならないが、内部被曝ではこれがごく限られた組織や細胞,あるいは核酸や蛋白などの重要な生体高分子に、局所的に高い線量を与えることがあり、また、生体高分子の中に組み込まれた核種が崩壊することにより、その分子が影響を受けるといった現象もあって、全身の線量としては小さい場合でも癌や突然変異をひき起す可能性がある。 ^{14}C や特にトリチウムについての危険度の推定に関しては、このような内部被曝に特有な特殊な条件による特殊な効果をどう評価するかによって意見が大きく分かれている。第7表に、内部被曝によって生ずることが疫学的研究によってわかっている身体障害の例を示す。

第7表 疫学的研究による内部被曝による身体的障害

核種	疾病	対象となる人
^{131}I	白血病	^{131}I 投与患者
^{131}I	甲状腺癌	//
^{32}P	白血病	^{32}P 投与真正多血病患者
^{226}Ra	骨腫瘍	ラジウムダイアルペイント†
^{228}Th	肝癌など	トロトラス(トリウムを含む造影剤)投与患者
^{222}Rn	肺癌	ウラン鉱山坑夫

† 夜光時計の文字板を書く人

現実の社会では、人間に障害をひき起す可能性のある環境汚染因子は、亜硫酸ガスや一酸化チン素その他の種々の排気ガス, 重金属や農薬, 食品添加物など, 放射線以外に多種多様にあつて、いわゆる「複合汚染」の状態になっている。放射線がそういった環境因子と一緒に生体に作用した場合に、その効果は単に「足し算」の効果となるのか、あるいは「乗算」的になるのかが問題となるが、このような研究もまだ緒についたばかりで、環境因子全体としての総合的な危険度評価が可能となるのはまだまだ先のことと思われる。

参考のために、日本の1970年度における交通事故と病気による死亡率を示すと次表のようになる。

原因	10万人当り発生数
交通事故による死亡	21
負傷	200以上
癌による死亡	117
脳出血と脳梗塞による死亡	131

年間170 mremの被曝による10万人当りの予想発生数

癌	2~8
重大な遺伝障害	250

人口1億, 年間出生数200万と仮定

Ⅳ. 放射線防護の基準と その基礎となる考え方

放射線障害を防ぐための線量基準はどのような考え方で、どう決められているか？

1. ICRP 勧告と線量基準

世界各国において現在採用されている放射線防護のための線量基準は、いずれも制定および改訂の時期による相異や多少の修正による差異はあるが、根本的にはみな ICRP およびアメリカでは NCRP (アメリカ放射線防護委員会) の勧告に基づいている。これらの勧告の基となる考え方は、

「人類が長年にわたる進化の過程で適応して来たと考えられる自然の放射線レベルより余分に放射線を受けることは、それがいかに僅かであっても人類にとって有害であり、どんなに少量の放射線も、ある程度の危険を伴うものであること、したがって、いかなる被曝も実行可能な限り低く保つべきである。」

ということである。

ICRP (および NCRP) による放射線防護の目的は

2つあって、第1は被曝後直ちに現われる急性効果を防止すること、第2は遺伝的效果と晩発性効果の危険を容認できる(acceptable)レベルに制限することである。急性効果は、発電炉の通常の運転時の場合に問題となるような線量よりもはるかに大きな線量で初めて生ずるものであることが確認できているので、このような「防止する」という絶対的表現が可能である。しかし、第2の遺伝的および晩発性効果に関しては、前章で述べたように低線量、低線量率での効果に関して信頼度の高い資料がいまだに得られていないので、安全側にとって見積った推定「危険度」(Risk)が「容認できるレベル」であるか否かを考慮することになる。これには2つの考察が必要である。第1は、その危険度が他の産業や環境汚染源による危険度や一般生活上遭遇している危険度に比較してどうであるか、という危険度相互の比較判断である。第2は、その被曝によって得られる利益(Benefit)の大きさが危険度に比してどうであるかといういわゆる「利益と危険とのバランス」の検討である(第4図)。

しかしながら、ある線量の放射線による危険度については、前章で述べたような一応の推定値が得られて

第4図 放射線の利益と害のバランス⁽⁴⁾

第 8 表 線量限度の勧告値

	NCRP(1971年)	ICRP(1965, 1969, 1970年)
職業上被曝に対する最大許容線量当量 (全身複合被曝)	眼の水晶体を含む	眼の水晶体は除く
事前 (Prospective)年間線量限度	5 rem/yr	} 5 rem/yr 3 rem/4半期 (N-18)×5 rem
事後 (Retrospective) //	10~15 rem/yr	
N歳までの長期蓄積線量限度	(N-18)×5 rem	
皮膚	15 rem/yr	30 rem/yr 15 rem/4半期 (骨, 甲状腺も同じ)
手 (Hands)	75 rem/yr, 25 rem/4半期	} 75 " 38 " 15 " 8 "
前腕 (Forearms)	30 " , 10 "	
その他の器官, 組織, 器官系	15 " , 5 "	
妊娠可能な婦人 (胎児に注目して)	0.5 rem/妊娠期間	妊娠可能な婦人について, 腹部照射 1.3rem/4半期 妊娠判明後胎児について 1 rem
公衆または極くまれに被曝する個人 に対する線量限度	0.5 rem	職業上被曝のそれぞれ1/10
極くまれに被曝する個人	0.1 rem	" " 1/100
学 生		
集団に対する線量限度		
遺伝的	0.17 rem平均/yr	5 rem/30yr
身体的	0.17 "	規定なし
緊急時における計画的職業上被曝		
生死にかかわる重大事の時, 個人 (可能なかぎり45歳以上)	100 rem	} 1回の緊急作業について 年間最大許容線量の2倍まで 一生を通じて 年間最大許容線量の5倍まで
手と前腕	200 rem (上に加えて合計 300 rem)	
緊急度が上記より低い時, 個人	25 rem	
手と前腕	100 rem	

いるが、これと比較すべき他産業や一般生活上の危険度は国によって当然異なるであろうし、また、その推定値も十分に得られていないこと、利益との比較も共通の尺度での評価が困難な上に国情によって評価条件が異なることに留意する必要がある。ICRP および NCRP はそれぞれ第 8 表に示すような職業人に対する最大許容線量(M.P.D.)と一般人に対する線量限度(Dose Limits)の値を勧告している。

これらの数値はあくまでも、ある一つの指針として出されたものであって、一般原則は「被曝を実行可能な最低レベルに抑えること」である。これが「一つの指針」であることは以下に引用する ICRP の「集団の被曝」の項の記述***からも理解されよう。

「[59項]……危険と利益との収支勘定に影響を及ぼす諸因子は国によって変るであろうし、最終的決定は各国に残されていることを十分知らなければならない。

[60項] この点について指針(guidance)が緊急に必要であったので、委員会は1958年勧告で全集団の被

曝に対する暫定的な上限(an interim ceiling)を示唆(suggest)した。この提案されたレベルは…中略…。すでに述べた理由から、この限度(limit)は考へ得る害と(Possible harm)と可能な利益(Probable benefit)との間の適正な収支勘定を実際に表わしていないかもしれない、ということが強調されるべきである。」

* ICRP Publ. 6, (日本語版), p.63, 59~60項
下線()内は筆者が追記したもの。

ICRP Publ. 9, 83項にも同様な記述がある。

** この訳はやや判りにくいところがある。筆者の仮訳を示すと以下のとおりである。

「さらに、利益と危険とをどのようにバランスさせるかということにはいろいろな要因が影響するが、それらの要因は国によって異なるものであること、および、線量限度をどう定めるかという最終決定は各国それぞれに任されている問題であることをよく理解せねばならない。

この点に関して緊急に指針を示す必要があったので、委員会は1958年勧告で一般人の集団全体の被曝に対する暫定的な上限値を提案した。……中略……ここで強調せねばならぬことは、すでに述べたような理由で、起るかもしれない害と、手に入れ得る利益との間のバランスがこの線量限度の値で正しくとられていることには、実際は、なっていないかもしれないことである。」

2. 最大許容線量と線量限度

これらの勧告の中では、職業人に対して「最大許容線量」、一般人に対して「線量限度」という用語が区別して用いられている。前者の「許容」という語句は「それを受けても安全である」という意味ではないから(過去においてはそのような意味であったが)、本来は使用を止めるべきであるが、職業人の場合はその意味が充分理解されているであろうとの理由で慣用どおりに用いられており、「最大」許容量はこれを越えてはならぬ上限値という意味である。一方、「線量限度」は一般公衆の場合は職業人のように厳密に線量を測定管理することは實際上不可能であるので、「一般人の各々がある定められた線量以上に被曝することが起り得ないように放射線発生源の設計や運転について基準を与える」ことを意図した概念の用語である。一般人の中には被曝期間が成人よりも長くなる可能性があり、かつ放射線感受性が成人よりも高い幼児、胎児が含まれていること、一般人は職業人の場合のような被曝線量管理が受けられぬことなどの理由で、線量限度は最大許容線量よりも低く1/10以下に決められている。

3. わが国の法的規制

わが国における放射線障害防止のための法的規制としては「放射線障害防止の技術的基準に関する法律」(昭和33年, 法律162号)、「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」(昭和32年, 法律167号, 障害防止法)があり、これに職業人および一般人について ICRP の勧告値とはほぼ同じ値が挙げられている。原子力発電所周辺の一般人および一般集団に対してはこれらの法律によるもののほかに、「核原料物質および原子炉の規制に関する法律(原子炉等規制法)」(昭和32年, 法律166号)に基づいて行われる安全審査と、原子炉等の運転基準である「保安規定」の認可に際して行われる行政指導により ICRP 勧告値の年間500 mrem を充分下まわるような措置がとられている。欧米諸国の立地線量基準を参考のために列挙すると、第9表のとおりである。なお、原子炉安全審査は、原子力委員会に設けられた原子炉安全専門審査会が、指示された安全審査指針に従って行なっているが、その審査対象は「放射線に対する安全性の確保」であって、放射線安全に関すること以外の一一般の環境社会要因については考慮しておらず、またはかにこれを専門に審議する機関も現在のところは設けられていない。この点に関しては日本原子力産業会議から政府に対して「原子炉環境専門審査会」の設置などが要望されており(1972. 8. 28), 政府側でもこれを含めた審査体制の充実が検討さ

れている。

V. その他の環境問題

放射線に関すること以外では何が問題となっているか?

1. 温排水の問題

放射線以外の一般環境問題として大きな問題は、温排水である。現在実用化されている軽水炉は熱効率が低く大量のタービン冷却水による温排水を放出しており、その量は同じ出力当りでは在来の火力発電所の50%増と言われている。ヨーロッパでは温排水に対処するため冷却塔が早くから採用されているが、これはヨーロッパでは、①内陸立地の発電所が多く大量の冷却水の使用が難しいこと、②気温が低く冷却塔による冷却効率が良いこと、③温排水の放出が温度の影響が消失し難い河川、湖沼に行われるため生態学的影响も大きいこと、などの理由である。この軽水炉を開発したアメリカでは、ヨーロッパに比して水資源が豊富なこと、夏期の気温が高く熱の放射効率が悪いことなどの理由により対策が遅れていたが、近年熱汚染に対する社会的関心が高まるのに従って、大規模な発電所では冷却塔や冷却池の採用が増している。(写真1)

写真1 冷却塔の例(アメリカ Three Mile Island 原子力発電所の冷却塔。日立製作所 角村正雄氏提供)

わが国の原子力発電所はすべて海岸立地であるため、タービン復水器の冷却には海水を使用する一過式冷却方式を採用している。河川、湖沼の場合に比して、海では熱影響は比較的小さいと考えられるが、発電所の大型化、集中化とともに近年この熱汚染が問題となっている。欧米の場合と異り、従来わが国では単なる環境保護運動ではなく、漁業保護のための経済的な側面が強く出されていて、残念ながら生物環境への影響を科学的に充分に調査し評価して対策をたてるという発想がなかった。しかし現在では、水質の変化、資源全般への影響、漁場条件や漁獲に及ぼす影響を科学的に

第 9 表 原子炉立地に

国 名	日 本	ア メ リ カ	カ ナ ダ
所管官庁	科学技術庁等	U.S. AEC	Atomic Energy Control Board (AECB)
規制基準の名称、種類	原子炉規制法 放射線障害防止法	Radiation Safety Standard	Atomic Energy Control Regulations SQR/60-119
方 針	ICRP 勧告(1956)に準拠	ICRP, NCRP, FRC 勧告に準拠	ICRP 勧告に準拠
特 徴	<p>①平常時</p> <p>集団線量の考えによる数値規制はない。原子力施設周辺環境における一般人の被曝線量が ICRP 勧告による一般公衆の線量限度 500 mrem/yr に対して、これを十分下まわるよう保安規定等の認可にあたって行政指導を行なっている。</p> <p>安全審査に際しては 'as low as practicable' の考え方を採用しているが、数値としての目安は示されていない。</p> <p>②事故時の審査指針</p> <p>(a)重大事故</p> <p>全 身 25 rem 甲状腺 150 rem (小児)</p> <p>(b)仮想事故</p> <p>全 身 25 rem 甲状腺 300 rem (成人)</p> <p>公衆集団全国 2×10⁶ manrem</p>	<p>①集団中の個人の線量限度を 500 mrem/yr とする。</p> <p>②集団中の任意のグループ中の個人平均線量を 170 mrem/yr とする。</p> <p>(②により①が確保される)</p> <p>③1970年「排出物中の放射能レベルを 'as low as practicable' にする」ことを規則 (rule) に採択</p> <p>④1971年 'as low as practicable' について実際の数値による guidance を提案。</p> <p>① plant 外 (off-site) および内の個人線量限度を 5 mrem/yr</p> <p>② トリチウムを除いた全放出放射能を 5 Ci/yr 以下</p> <p>③ 希釈前の放出液体廃棄物年平均濃度を 20 pCi/l 以下</p> <p>④ トリチウムは 5,000 pCi/l 以下とすることを設計目標 (design goal)。</p>	<p>平常時および事故時の両方について man-rem による集団線量の規制がある。</p> <p>①平常時</p> <p>(a)境界における一般公衆中の個人 全 身 0.5 rem/yr 甲状腺 5 rad/yr</p> <p>(b)公衆集団全体 10⁶ man-rem/yr 10⁶ man thyroid-rad/yr ただし、個人線量が 5×10⁻³ rem/yr, 甲状腺で 3×10⁻² rad/yr 以上となる区域について集計する。</p> <p>②事故時</p> <p>(a)境界における一般公衆中の個人 全 身 25 rem 甲状腺 250 rad</p> <p>(b)集団全体 10⁶ man-rem 10⁶ man thyroid-rad ただし、個人線量 0.5 rem 以上となる区域について集計する。</p>

とらえ、同時にそれらの資料に基づいた規制措置を施し、また、日本の実情に即した冷却技術の開発を進めて行くことが必要であることが認識されて来ている。また熱効率のよい炉型の開発を早めてエネルギーの無駄な消費を減らすこと、防ぎ得ない排熱に対しては、例えば魚の温水養殖などその有効利用を図るといった対策もとられている。

2. 海域の温度上昇の 1 例

わが国の原子力発電所から出される温排水による海域の温度上昇について、福井県水産試験所が行なった実地調査の 1 例を以下に述べる。日本原子力発電(株)敦賀発電所(沸騰水型、出力 35.7 万 kW 放水量 20 m³/sec)からの温水放出海域である浦底湾での 1971 年 11 月の測定例をみると、海表面で放水口付近では約 4°C 上昇、200～500 m で 3°C 以内の上昇であり、1～2°C の上昇が見ら

れたのはおよそ 1,400 m までであった(第 5 図)。放水口から 1 km の範囲で、1°C 以上の上昇があるのは水深 4 m くらいまでの表層である。

3. 海産生物への影響の問題

このような温水拡散の様相は季節、海象の変化や地形によって影響を受けるし、また、取水や放出の深度、放出の方法によっても異なる。敦賀の例では、一般的な深層採水・表層水平放出であるので表層への影響は広いが、底層にはほとんど温度変化がみられない。深層放出あるいは垂直放出であれば温度拡散の範囲は多少狭くなるが、ある程度底層まで温度変化が生ずることになる。こうした海水の温度変化によって当然、生物への影響が現われることが予想される。温度変化がほとんど表層にとどまるため、回遊魚のコースが影響されることはあっても、成魚自体には直接はあまり

際しての線量制限基準

西 ド イ ツ	ソ ビ エ ト	イ ギ リ ス								
German Atomic Commission German Radiation Protection Ordinance, Radiological Protection Guidelines ICRP 勧告に準拠 ①隣接地域の一般公衆に対して 150 mrem/yr ②気体排出物中の放射能濃度は ICRP の MPC 値の1/10とする。 ③委員会の勧告値としては2 rem/30 yr(≈66 mrem/yr)が採用され、こ れが licencing practice で用いら れている。内訳： (i)気体中の放射能によるものに対して 30 mrem/yr (ii)飲料水 " 10 mrem/yr (iii)食物 " 10 mrem/yr (iv)外部放射線に対して 10 mrem/yr	Ministry of Health Convention No. 11510 on protec- tion of people against ionizing radiation Health Regulation No. 333-60, 392-62 ICRP 勧告にはほぼ準拠 MPC, MPD 値が一部異なる。 ①一般公衆集団に対する線量限度： 2 rem/30yr (=66 mrem/yr) ②職業人に対する最大許容量は0.05 R/日。 ただし、放射線作業者には1日労働 時間5～6時間、年間有給休暇24～30 日その他の特典が与えられている。 ③発電炉 100m 高の排気筒出口の濃 度 <table><tr><td>Sr</td><td>10⁻³Ci/日</td></tr><tr><td>¹³¹I</td><td>0.1 "</td></tr><tr><td>その他</td><td>0.5 "</td></tr><tr><td>希ガス</td><td>3,500 "</td></tr></table> ④人口30万以上の都市の 25km 以内 には立地しない。	Sr	10 ⁻³ Ci/日	¹³¹ I	0.1 "	その他	0.5 "	希ガス	3,500 "	Ministry of Labour and Na- tional Service Ministry of Health Factories Act 1961 The Radioactive Substance Act 1960 The Nuclear Installations Act ICRP 勧告に準拠 ①(a)職業人のMPDは5 rem/yr で なく、5(N-18)の全蓄積線量 で規制 (b)緊急被曝時も平常時と同じ MPD ②公衆集団線量限度：1 rem/30 yr ③さらに 'as low as practic- able' を規定(条文中に) ④立地基準として(内規) 1) 原子炉から800m以内に居住者な し 2) 30°の角度×1.6kmの扇形区域内 居住者500人以下。 3) 1.6 km 以遠の人口分布に関して 敷地指数 1,500 以上のもの(クラ スⅡ,Ⅳ)には立地を認めない。
Sr	10 ⁻³ Ci/日									
¹³¹ I	0.1 "									
その他	0.5 "									
希ガス	3,500 "									

影響はないと思われる。しかし、プランクトン、魚介類の卵、幼生、稚魚(例えばシラス)、藻類(遊走子)など表層の生態系には、冷却水と共に復水器細管を通過する際の直接影響も合わせて影響を与え、結果的には生態系全体に不均衡が生ずるおそれがある。

留意せねばならぬことは、温排水の影響の程度は海水の温度の測定のみではわからないことで、海水の温度上昇の幅のみについていうと、冬期と夏期とでは冬期の方が影響が大きいといえるが、生物が受ける影響は逆に夏期の方が大きいことが知られている。さらに生態系への影響のほか、発電規模が大型化し、あるいは発電所立地が集中化して排熱量が大きくなると、霧の発生など、異常気象の原因となる可能性も考えられている。

4. 一般用水・景観の問題

一般用水もまた、周辺の産業や生活用水との関係で問題となる。四国の伊方地方における柑橘類栽培の灌漑用水をめぐる問題がこの例である。これは海水の脱塩使用のような、ある程度の設備投資によって周囲に迷惑をかけずに用水を得る方策があり得るので、本質的には解決が可能な問題であろう。

景観の変更に関しては、用地が国立、県立公園地域に入っている場合を除いては必ずしも現在は十分な配慮がなされておらず、関心の高まりと共に次第に大きく取り上げられることになろう。

発電所設置に伴ういわゆる“地帯整備”もまたある意味で逆に環境問題となり得る。過疎地であったところが道路が整備され、急にレジャー産業が盛んになったり、あるいは他の一般産業が誘致されるなどして無秩序な開発が進むようなことがあると、環境に解決困難

放射線に関しては他の環境汚染物に比べて早くから対策がとられ、はるかによくわかっているとよく言われている。確かにこれは事実であるが、一方、現実には放射性核種の環境内移行経路、人体内蓄積線量、生物学的効果、危険度の推定に関して、具体的定量的な情報が非常に乏しいのも事実である。これは工学的開発がまず先行し、それに伴って生ずる医学生物学の問題の研究は、生物研究の常として結果を得るまでに時間がかかるのにもかかわらず、工学的開発が既成事実となってから初めてスタートする、あるいはそれでもなおスタートしないのが、わが国では通常の現象であるからであろう。ある工学的課題には、必ずそれ固有の解決すべき生物学的問題が付随するものであることが理解されれば(例えば、高速増殖炉の開発に伴う「プルトニウム、ナトリウム」の危険度の問題)、環境問題の一因は解決されたといってよからう。長年にわたりこの分野の研究、対策に、わが国とはまことに比較にならぬ大規模な研究体制をもって当り、研究人材と資金を注ぎこんでいるアメリカにおいて、1972年11月、連邦放射線審議会の求めに応じて科学アカデミーが「低線量放射線の集団に及ぼす影響」について提出した報告書⁹⁾の結論の最後の一文を以下に紹介してこの小文の終りとする。

「……生態学的研究を改善、強化して、放射性核種の環境中への放出についての、以下の如き質問に答えるための研究計画を実行に移すべきである。

- (1) どのような型の放射能がどのくらい、どこへ放出されるか。
- (2) それがどのように環境中に移行するか。
- (3) 自然界のどこにそれが濃縮されるか。
- (4) 人間に到達するまでどのくらいの時間を要するか。
- (5) 環境自体に対してどのような影響があるか。
- (6) 潜在する種々の危険が顕在化するのを防ぐための警報システムとして、これらの情報をいかに利用するか。

すべての現存の、および予定されている放射線発生源から出される放射線線量を正確に推定し、予測するためにあらゆる努力を払うべきである。このためには、環境中の移行、代謝、放射線の生物学的効果に関して現在得られている知識を活用することと共に、多くの問題点についての研究をさらに進めることが必要である。」

本稿の執筆に助力していただいた多くの方々に感謝の意を表する。

—参考文献—

- (1) 田島英三, 板倉哲郎, 市川竜資, 他: “原子力産業における環境問題”, (昭47), ソフトサイエンス社.
- (2) 田島英三, 市川竜資, 桑島謙臣: 本誌, 14[3], 131~137 (1971).
- (3) U.S. EPA: *Proc. South. Conf. on Environmental Rad. Protection from Nuclear Power Plant*, ORP/SID 72-4, (1971).
- (4) U.S.EPA: *Estimate of Ionizing Radiation Doses in the United State 1690-2000*, ORP/CSD 72-1.
- (5) U.S. Nat. Academy of Sci.: “*The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*”, (1972).
- (6) *A Report of the U.N. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly*, (1972).
- (7) U.N.IAEA: *Peaceful Uses At. Energy*, 11, (1972).
- (8) IAEA: “*Environmental Aspects of Nuclear Power Stations*”, (1971).
- (9) ICRP Publ. 6 および 9.
- (10) ICRP Publ. 8, 放射線による危険度の評価.
- (11) WHO: “*Protection against Ionizing Radiation*”, (1972).
- (12) *The Ecologist*, A Blueprint for Survival, 2, No. 1, (1972).
- (13) GOFMAN, J.W., TAMPLIN, A.R.: “*Population Control through Nuclear Pollution*”, (1970), Nelson-Hall Publ. Co.