

UDC 614.876  
628.518

## 生活の中の放射線

Radiations in Our Life

佐藤 乙丸\*

Otomaru SATO

原子力船むつやアイソトープ利用上の安全管理の不十分さが社会的関心を呼びつゝあるが、放射線と放射能を混合した新聞記事が出されたりして、正しい理解を妨げている向きが強い。そこで、私達が日常生活を営みながらどのように放射線あるいはアイソトープと関与しているのか、その実体を明らかにしながら、いわゆる放射能問題についてまともに対応できる資料をまとめてみたい。

## 1. ま え が き

原子力の平和利用は原子力エネルギーの利用と放射性同位元素(以下ラジオアイソトープまたはアイソトープと称する)の利用に分けられる。前者の代表が原子力発電であり、近い将来重油発電に代るものと期待されているが、すでに稼働中の国内原子力発電所の稼働率が極めて低いなど、なお多くの問題をかかえていることは言うまでもない。

一方後者のアイソトープ利用は、公害調査への利用および医学利用の増加もあって着実に増えつつあるが、それだけに一部に安全取扱い上のミスが起り、それが新聞紙上で誇大に報道されたこともあって、一般国民に警戒心を抱かせている向きが強い。アイソトープ利用技術は顕微鏡導入以来の画期的な実験手段と称されており、その特徴を生かして科学研究分野に広く利用されているばかりでなく、日常生活の中にも導入されてきている。

このような状況の中で、放射線とアイソトープとくに放射線による人体被曝等について正しい知識を持つことは、科学技術研究を進めていく上にも重要である。X線装置は言うに及ばず電子が5keV以上のエネルギーに加速されるような装置は、すべて潜在的放射線源で

あり、場合により適切な防護措置を配慮する必要がある。

この種の研究活動に伴う放射線とアイソトープに関しては近く稿を改めることとし、ここでは、私達が日常生活の中でどのように関与しているかに焦点を絞って述べることにする。

私達が日常的に被曝している放射線のうち、最も量的に多いのは表1のように天然放射線によるものと医療被曝である。このほかに、核実験や原子力発電に伴ういわゆる人工核反応で生成するアイソトープによる被曝や、夜光時計などのアイソトープ利用とテレビ等からの被曝があげられる。また最近では技術の進歩に伴い、原子力産業以外の産業分野において、天然放射能を人為的に増大させることがあるという事実も明らかとなってきた。これらを含めて解説するが、人体に及ぼす放射線の生物学的効果の詳細は他の解説に譲り、ここでは必要事項に止めたい。

## 2. 放射線、放射能、被曝線量

## 2-1) 放射線と放射能

ラジオアイソトープは、原子核内から $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、中性子線などの放射線を放出して異なった原子核に壊変し、またはエネルギー準位のより安定な原子核状態に転移する核種(原子核内に特定の数の中性子と陽子を持つ原子の種類)のことであり、それぞれ固有の半減期(壊変数が1/2に減少する時間)で別な核種、一般には安定な核種、場合により新たな放射性核種(娘核種)に壊変する。

核種はその核種の中性子と陽子の和を元素記号の左肩に添付して表わす。 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{60\text{m}}\text{Co}$ は両者の和が60のCo核種のことであるが、後者は前者よりエネルギー準位が高く、核内から $\gamma$ 線を放出してエネルギー準位の低い $^{60}\text{Co}$ に転移する。このときの半減期が測定できる時間であるときにmをつけて区別している。アイソトープがこのような性質を持っていることを放射能と称し、その強さは、1秒間の壊変数で表わされ、 $3.7 \times 10^{10}$ 壊変毎秒を1Ci(キュリー)と称している。SI単位では1

表1 放射線被曝量  
(mrad/年/人)

	遺伝有意年線量	白血病有意年線量
天然放射線	93	89
X線診断	26.5	169
放射線治療	1.2	41
核医学	0.24	—
核実験	1.5	1.5
原子力発電*	0.2	0.2
職業人	0.15	0.15

\*2000年の予想値

壊変毎秒 (1 disintegration per second, 1dps) を1Bq (ベクレル) と呼ぶことになっている。このように放射能は、元来アイソトープの性質を表わす言葉であるが、その強さをなわちキュリー数を表わす場合のほか、最近ではアイソトープそのものを表わすこともある。

なお、1秒間のカウント数 (cps) は測定している放射線の壊変あたりの放出率、およびその放射線に対する測定器の計数効率を、1dpsに掛けた値である。したがって、効率の小さい測定器を用いれば、放射能強度が大きくとも、cps値は小さくなる。すなわち、放射性核種、放射線検出器および測定方法がわからないときは、cpsを放射能強度 (dps) に換算することができない。

私達の身のまわりに存在する放射能強度は、 $10^{-6}\text{Ci}$  ( $1\mu\text{Ci}$ ) または $10^{-12}\text{Ci}$  ( $1\text{pCi}$ ) 程度であり、それぞれの放射性物質の量を表わすのに、固体の場合 $\text{pCi/g}$ ,  $\mu\text{Ci/g}$ , 液体の場合 $\text{pCi/l}$ ,  $\mu\text{Ci/cm}^3$ , 気体の場合 $\text{pCi/cm}^3$ ,  $\mu\text{Ci/cm}^3$ などが用いられる。

#### 2-2) 照射線量, 吸収線量, 線量当量

X,  $\gamma$ 線は物質を透過する力が強いので、体外からの放射線被曝の大部分がX,  $\gamma$ 線によるものである。X,  $\gamma$ 線の照射により空気1kgにつき放出された電離粒子が、空気中においてそれぞれ $2.58 \times 10^{-4}$ クーロンの電気量をもつ正と負のイオン群を生じるとき、これを1R (レントゲン) の照射線量という。一般にはR/hなどの照射線量率で表わすことが多い。

これに対し、放射線の照射により物質1kgごとに電離粒子によって1/100ジュールのエネルギーが与えられるときの放射線エネルギーの吸収量を吸収線量と称し、1ラド (rad) で表わしている。この場合も、 $\mu\text{rad/h}$ ,  $\text{mrad/年}$ などの吸収線量率が用いられる。

なお、SI単位では1J/kgの吸収線量を1Gy (グレイ) と称する ( $1\text{Gy}=100\text{rad}$ )。照射線量と吸収線量の関係は、物質、放射線の種類、エネルギーによって異なるが、組織中で3MeV以下のX,  $\gamma$ 線の場合、 $1\text{R}=0.95\text{rad} \approx 1\text{rad}$ としてよい。ここでeVは真空中で1Vの電位差をよぎることによって電子が得る運動のエネルギーであり、アイソトープからの放射線のエネルギーは、一般に数keV~数MeVの範囲にある。

放射線の生物学的影響は、放射線の種類とエネルギー、照射条件などによって大きく異なる。放射線生物学はこれを研究する学問分野であるが、放射線防護の立場からは以下のように取り扱われている。すなわち、放射線の種類やエネルギーいかにによって組織へ与える影響が異なることを考慮した線質係数 (QF, quality factor) や、その他の必要な修正係数 (DF, distribution factor) などを、吸収線量に乗じたものを線量当量 (dose equivalent) と称し、レム (rem)

で表わしている。

アイソトープから放出されるX,  $\gamma$ 線や電子の場合は、 $\text{QF} \approx 1$ であるから、これらを体外から被曝するときは、 $1\text{rem}=1\text{rad}$ と考えて差し支えない。しかし体内被曝については、特定の臓器に集まるアイソトープが多いので、DFなどの補正をしなければならない。また中性子は、エネルギーの大小により $\text{QF}=2\sim 10$ と大きく変わり、かつ組織への影響力も大きいので、注意しなければならない。

#### 2-3) 人間への放射線効果

人間に対する放射線効果は、個人に現われる身体的効果とその人の子孫にまで影響する遺伝的效果とに分けられる。前者は急性効果と晩発性効果に分けられるが、日常生活の中で被曝する線量によって急性効果が発生することはまずないとみてよい。また晩発性効果のうち問題となる傷害は白血病であるから、赤色骨髓が受ける線量すなわち、骨髓線量 (CMD, per caput mean bone-marrow dose) によって晩発性効果を求めている。

遺伝的效果は、子供を生まなければ成り立たない。したがって、個人が生殖腺に受ける線量をその個人の性別、年齢と関係する子供期待数で加重平均した、いわゆる遺伝有意線量 (GSD, genetically significant dose) が使われる。結局、人間集団が受ける危険を推定するために、集団中の各個人がうけるCMDとGSDの年平均値を、 $\text{mrad/年/人}$ で算出している。

橋詰<sup>1)</sup>はCMDが白血病を念頭に考えられた線量であること、同一線量を受けても余命の長短により白血病誘発の可能性が大きく異なること、及び原爆被曝者のデータにより被曝後数年で最も白血病の発病が多く、20年後には非常に減少していることから、CMDに白血病発生因子 (L) を加味した白血病有意線量 (LSD, leukaemia significant dose) の重要性を指摘している。このときのLの値は49才以下の男女に対し0.9~1である。

#### 2-4) 一般人の被曝線量限度

放射線の許容量に関する国際放射線防護委員会 (ICRP) の1965年の勧告<sup>2)</sup>によれば、一般人に対する線量限度 (dose limit) を表2のように定めている。ICRPは、1)利益と危険のバランスをとる、2)危険の推定にあたり起りうる最悪の事態を考える、3)技術的、経済的に可能な限り、放射線の被曝を少なくするという

表2 ICRP勧告 (1965) による一般人の被曝線量限度

		線 量 限 度
個人		職業人の1/10 (0.5rem/年)
集 団	身体線量	0.5rem/年
	遺伝線量	1代あたり5rem

但し、天然放射線と医療放射線による線量を除く

三つの考え方から許容量を設定しているが、放射線によって直接利益を受けることの少ない一般人の許容量に関しては、社会的利益を考慮してきめざるを得ない。このため表2のように職業的に放射線を取扱う者の1/10としている。

アメリカでは、集団が被曝するとき個人の受ける線量がバラツクことを考え、かつその値が個人の線量限度を越えたとしても稀であるように、集団の平均被曝線量の限度を個人の線量限度より低くおさえる必要があるということで、0.5rem/年の1/3すなわち0.17rem/年を採用している。なおここで述べた線量限度は、天然放射線以外の技術的行為による被曝のうち、医療行為によるものを除いた被曝線量を対象としている。

3. 天然放射線

人間は常時1分間に数万個の高速度微粒子にさらされており、かつ大気や地上に存在する天然放射性物質からの放射線を浴びて生活している。前者が宇宙線であり、後者は天然アイソトープからの放射線である。これら両者による人間の被曝線量は表1のように年間平均0.1remに近く、この値は米国の一般人の線量限度0.17rem/年の60%に相当する。

3-1) 宇宙線

宇宙線は太陽活動による数10MeV以下の陽子と、銀河系内で生ずる高エネルギー粒子とから成る。太陽からの陽子は地磁気の影響を受けて直接地表面に影響を及ぼさない。地表面に影響を与えるのは銀河系宇宙線であり、地球外から飛来するこれらの一次宇宙線の組成は表3のとおりである。

表3 一次宇宙線の組成

元 素	記 号	原 子 番 号	宇 宙 線 組 成	宇宙元素組成
H	P	1	100	100
He	$\alpha$	2	7	8
Light	Li, Be, B	3~5	0.15	$<10^{-4}$
Medium	C, N, O, F	6~9	0.45	0.08
Heavy	Ne...K	10~19	0.15	0.02
Very Heavy	Ca...	20~	0.045	0.001
Fe		26	0.015	0.0015
>Fe		>26	$<10^{-5}$	$\sim 10^{-5}$

宇宙線強度は太陽活動の11年周期により、地表面線量で10~20%周期的に変動する、また地磁気の影響により、図1のように高緯度ほど高くなっており、日本における電離成分は3.4 $\mu$ R/hを中心に、北限で+0.1 $\mu$ R/h、南限で-0.1 $\mu$ R/hの照射線量率を示すといわれている。<sup>3)</sup> 高度による強度差はさらに著しい。大気による減弱や大地からの散乱によって、図2のように地表から上空にいくに従って減少し、1~2kmで最低となり、それ

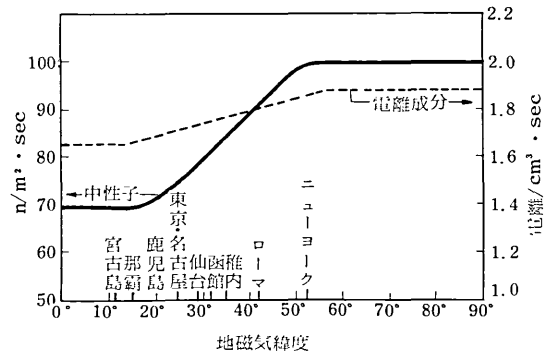


図1 宇宙線電離成分ならびに中性子成分の地磁気緯度依存性 (海面レベル)(1966年国連報告による)

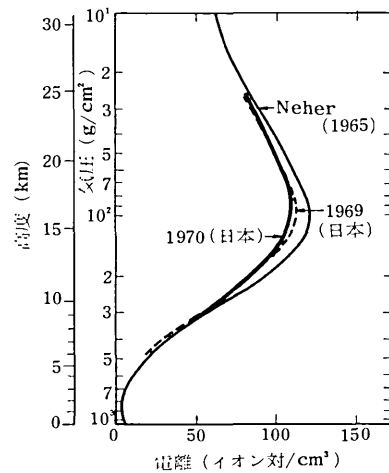


図2 宇宙線電離成分の高度分布 (Neher, 川野らの結果を飯田がまとめたもの)

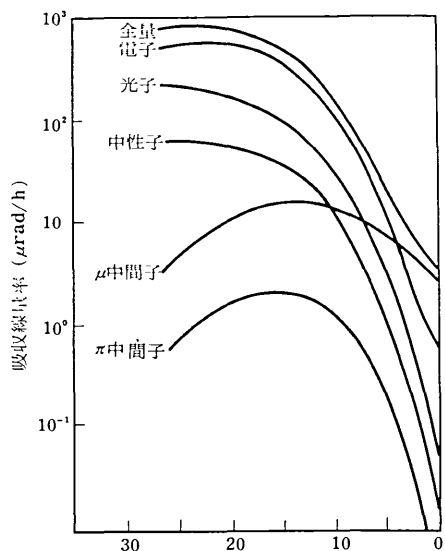


図3 宇宙線の各成分別吸収線量の高度変化

表4 正常地域における天然放射線による線量 (mrad)  
国連科学委員会報告 (1972) より

	生殖腺線量	骨髄線量
体外照射による		
宇宙線電離成分	28	28
宇宙線中性子成分	0.35	0.35
地殻からの放射線	44	44
体内照射による		
<sup>3</sup> H	0.001	0.001
<sup>14</sup> C	0.7	0.7
<sup>40</sup> K	19	15
<sup>87</sup> Rb	0.3	0.6
<sup>210</sup> Po	0.6	0.3
<sup>220</sup> Rn	0.003	0.05
<sup>222</sup> Rn	0.07	0.08
<sup>226</sup> Ra	0.02	0.1
<sup>228</sup> Ra	0.03	0.1
<sup>238</sup> U	0.03	0.06
計	93	89

以上では急激に増えて15km前後で最大となる。線量換算による高度変化は図3のようになる<sup>4)</sup>

正常地域における宇宙線による被曝線量は表4のように年間28mradであるが、高度が高い都市、例えばポリビアのラバスでは高度3,600mで年間線量270mradに達すると云われている。

3-2) 天然放射能

天然放射能は宇宙線によって生成されるアイソトープおよびウラン系列、トリウム系列、アクチニウム系列のほか、<sup>40</sup>Kなどの系列にない長半減期アイソトープからなる。

表5は宇宙線によって生成されるアイソトープのうち、比較的半減期の長い核種の生成方式、対流圏下層濃度などをまとめたものである。このうち、生物体の主要な構成元素の同位体である<sup>3</sup>Hと<sup>14</sup>Cが問題となる。<sup>3</sup>Hの生成率は大気1cm<sup>3</sup>中0.2原子/秒であり、大気中濃度は高緯度ほど高くなっている。<sup>14</sup>Cは大気中の窒素が宇宙線からの中性子により核反応を起して生成し、大気中濃度が1.3~1.6pCi/m<sup>3</sup>である。<sup>3</sup>Hと<sup>14</sup>Cはともにエネルギーの弱いβ線のみ放射して壊変するので、

表5 宇宙線によって生成される放射性核種

放射性核種	半減期	主な生成方式	大気中での生成率の計算値 (原子/cm <sup>2</sup> ・y)	対流圏下層における濃度の計算値 (pCi/m <sup>3</sup> )
<sup>3</sup> H	12.3y	<sup>14</sup> Nまたは <sup>16</sup> Oの破砕	8×10 <sup>6</sup>	5×10 <sup>-2</sup>
<sup>7</sup> Be	53d	<sup>14</sup> Nまたは <sup>16</sup> Oの破砕	2.5×10 <sup>6</sup>	0.5
<sup>10</sup> Be	2.5×10 <sup>6</sup> y	<sup>14</sup> Nまたは <sup>16</sup> Oの破砕	1.4~2.6×10 <sup>6</sup>	5×10 <sup>-6</sup>
<sup>14</sup> C	5,760y	<sup>14</sup> N( n, p) <sup>14</sup> C	5.0~6.5×10 <sup>7</sup>	1.3~1.6
<sup>22</sup> Na	2.62y	<sup>40</sup> Aの破砕	1.8×10 <sup>3</sup>	5×10 <sup>-5</sup>
<sup>32</sup> Si	700y	<sup>40</sup> Aの破砕	5~6×10 <sup>3</sup>	8×10 <sup>-7</sup>
<sup>32</sup> P	14.3d	<sup>40</sup> Aの破砕	2.5×10 <sup>4</sup>	1.1×10 <sup>-2</sup>
<sup>33</sup> P	24.4d	<sup>40</sup> Aの破砕	2.1×10 <sup>4</sup>	6×10 <sup>-3</sup>
<sup>35</sup> S	87.9d	<sup>40</sup> Aの破砕	4.4×10 <sup>4</sup>	6×10 <sup>-3</sup>
<sup>36</sup> Cl	3.1×10 <sup>5</sup> y	<sup>40</sup> Aの破砕	3.5×10 <sup>4</sup>	1.2×10 <sup>-8</sup>

表6 系列にない天然放射性核種

核種	岩石圏内での存在比 (ppm)	半減期	α線またはβ線のエネルギー (keV) (放出割合・%)	γ線エネルギー (keV) (放出割合・%)
<sup>40</sup> K	3	1.26×10 <sup>9</sup> y	β・1314(89)	1461(11)
<sup>50</sup> V	0.2	6×10 <sup>15</sup> y	EC	783(30), 1554(70)
<sup>87</sup> Rb	755	4.8×10 <sup>10</sup> y	β・274(100)	no γ
<sup>115</sup> In	0.1	6×10 <sup>14</sup> y	β・480(100)	no γ
<sup>138</sup> La	0.01	1.12×10 <sup>11</sup> y	β・210(30)	810(30), 1430(70)
<sup>147</sup> Sm	1	1.05×10 <sup>11</sup> y	α・2230	no γ
<sup>176</sup> Lu	0.01	2.2×10 <sup>10</sup> y	β・430	88(15), 202(85), 306(95)

表4のように人体内部での被曝に影響を及ぼす。

系列を構成しない天然放射性核種は14種あるが、その主要なものは表6のとおりであり、岩石圏内での存在比率の大きい<sup>40</sup>Kと<sup>87</sup>Rbが一般人の被曝線量に寄与する。とくに標準人体(70kg)内に約140g存在するカリウム中の<sup>40</sup>Kによる被曝線量が、人体内被曝線量の大部分を占めている(表4参照)。

天然放射性物質中カリウムとともに最も広く分布しているのがウラン、トリウムである。図4のウランの壊変系列のように、トリウムおよび<sup>235</sup>Uを親核種とするアクチニウムも、それぞれ別の壊変系列によって娘の放射性核種と放射平衡を保ちながら安定な鉛に達するまで壊変しつづける。

この壊変過程でウラン系列からラドンガス(<sup>222</sup>Rn)、トリウム系列からトロンガス(<sup>220</sup>Rn)が地上に放出され大気中を浮遊する。また<sup>222</sup>Rnの娘核種としての<sup>210</sup>Pb

表7 地表面における放射能濃度<sup>5)</sup>

	放射能濃度
大気中	
ラドンガス	10 <sup>-4</sup> pCi/cm <sup>3</sup>
トロンガス	10 <sup>-6</sup> pCi/cm <sup>3</sup>
<sup>210</sup> Pb	1.4×10 <sup>-8</sup> pCi/cm <sup>3</sup>
土壌中	
全放射能	約 1 pCi/g
ウラン	5.7 ppm
トリウム	0.44 "
カリウム	13 "
海水中	
カリウム	300 pCi/l
ルビジウム( <sup>87</sup> Rb)	30 pCi/l
ウラン	3 pCi/l
トリウム	0.2pCi/l
雨水中	
ラドンガス	1~10μCi/l
トリチウム( <sup>3</sup> H)	150~300pCi/l
地下水中	
ラドンガス	100~1,000pCi/l
ラジウム	0.1~1 pCi/l
表面水中	
ラジウム	0.05~1.5pCi/l
ラドンガス	10 pCi/l

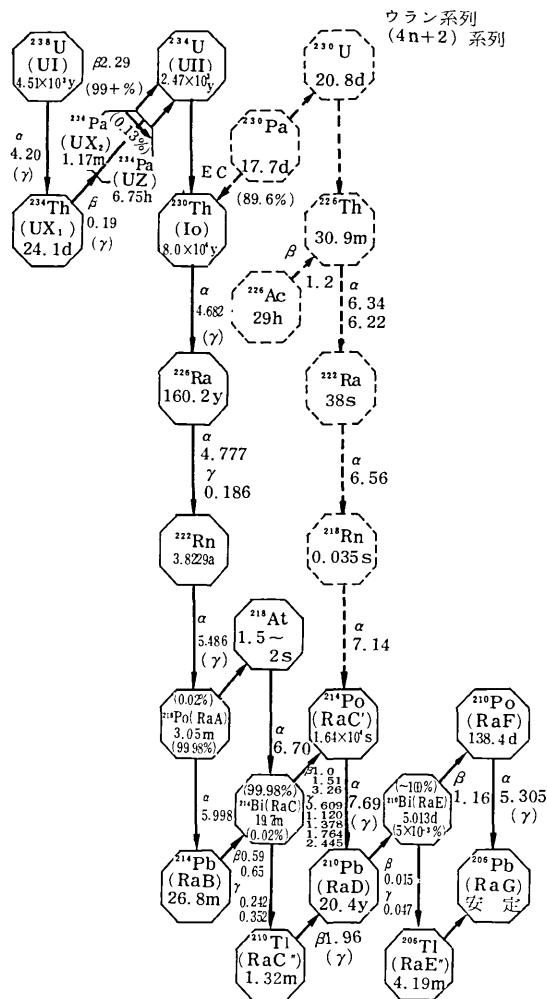


図4 ウラン系列の壊変

とその娘核種などが大気浮遊塵に付着して大気中の放射能を形成する。表7<sup>5)</sup>は天然放射性物質の大気、土壌表面、海水、雨水、地下水、表面水中における濃度をまとめたものであるが、土壌および海水を除きラドンガス濃度によって支配されていることを示している。

トロンガスは半減期が短い(51秒)ため大気中に放出される機会が小さいが、ラドンガスは半減期が3.8日であるため地表面へ出てくる割合が多い。大気に出たラドンガスは図4の壊変を続け<sup>210</sup>Pbになるが、<sup>210</sup>Pbは半減期が20年余であるために長時間大気塵や地表面に存在し、場合により人間に対してかなりの放射線量を与えることが考えられる。

大気中に存在する天然放射性物質および宇宙線による日本各地の照射線量率(μR/h)の測定結果<sup>3)</sup>によれば、6~12μR/hで場所により約2倍の差がある。関東地方は関東ローム層により地下からのラドンガスの放出が遮られることもあって6~7μR/hであるが、関西、中国、四国地方は10μR/h以上のところが多い。

ラドンは地表面から毎秒約1pCi/m<sup>2</sup>の割合で大気中に放出され、その放出量は土壌や地殻中のウランの量、地表面の状況および、気温や大気圧によっても変化する。大気中に放出されたラドンは大気の流れによって

急速に大気圏内に拡散し、平均100pCi/m<sup>3</sup>の濃度で対流圏内（高度10km以下）に分散する。

このラドンと娘核種が雷雨により大気圏内（高さ数km以内）から雨滴となって降下した場合、地表面での線量寄与は図5のように短時間急激に増大する。1時

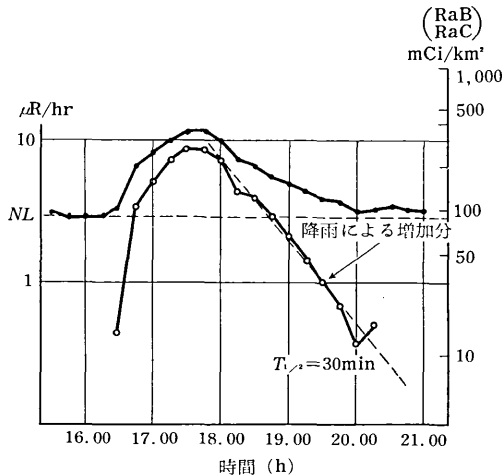


図5 降雨による環境放射線の変動、NLは通常の値

間で数100mCi/km<sup>2</sup>のラドン娘核種の降雨が見られる場合もある。降雨中のラドン等の放射能は図5のように半減期が約30分で、3時間ほどで平常値に戻る。

#### 4. 人工核反応によるアイソトープ

広島、長崎を始めとする大気圏内における度重なる核爆発は、地球上に大量の放射性物質をまきちらし、一人あたり年間1.5mremの余分な放射線被曝を強いられている（表1参照）。また、原子炉とくに発電用原子炉や船用原子炉および原子炉の燃えかすを処理する廃棄物処理工場からも放射性物質が環境中へ放出されている。原子炉等から排出される放射性物質の量は、核爆発によるものと比べるとまだ問題にならない程少量であるが、各国とも原子力発電所を増設する方向にあるので、できるだけ放射性物質を放出しないような技術的改善が望まれている。

##### 4-1) 核爆発

核爆発実験が最初に行なわれたのは1945年7月、アラモゴルドにおいてであり、同年8月の広島・長崎に続いて現在までに数多くの実験が核保有国の手によって行なわれてきた。これらの一連の核実験のうち1963年以前に行なわれたものがずばぬけて大きく、これが地球全体の放射能汚染の源となっている。しかし、成層圏内に注入された核分裂生成アイソトープは殆んどすべて1967年頃までに地球表面に降下してしまい、現在では残留放射能の大部分が土壌、農作物および動物

や人体組織内に存在している。

国連科学委員会1972年の報告によれば、1971年以前に行なわれた核実験の結果、その当時までに世界人口が受けた線量と今後2000年までに受けると予期される線量の和を線量預託 (dose commitment) と称し

表8 1971年以前に行なわれた核爆発実験からの線量預託 (1972年国連科学委員会報告による)

放射源	北半球中緯度地帯における線量預託 (mrad)		南半球中緯度地帯における線量預託 (mrad)		全世界住民に対する線量預託 (mrad)	
	G (生殖腺)	BM (骨髄)	G	BM	G	BM
体外照射						
短半減期	65	65	19	19	44	44
<sup>137</sup> Cs.....	59	59	16	16	40	40
<sup>90</sup> Kr.....	2 × 10 <sup>-4</sup>	2 × 10 <sup>-4</sup>	2 × 10 <sup>-4</sup>	2 × 10 <sup>-4</sup>	2 × 10 <sup>-4</sup>	2 × 10 <sup>-4</sup>
体内照射						
<sup>3</sup> H.....	4	4	1	1	4	4
<sup>14</sup> C.....	12	12	12	12	12	12
<sup>59</sup> Fe.....	1	0.6	0.3	0.2	0.7	0.4
<sup>90</sup> Sr.....		62		17		42
<sup>137</sup> Cs.....	26	26	7	7	18	18
<sup>239</sup> Pu.....						
総計	170	230	55	72	120	160

\* : 2000年までの積算値

て、表8のように推算している。表中<sup>14</sup>Cは半減期が長い(5730年)ため、2000年までに全体の線量預託(生殖腺180mrad、骨髄230mrad)の1/10以下しか寄与しないので、いずれも12mradとしてある。

さて上記線量預託のうち、外部被曝の半分以上は現在までに与えられており、今後は<sup>137</sup>Csからの被曝が問題となる。また内部被曝については、人体内の<sup>137</sup>Csによる線量の3/4近くが与えられたと考えられるが、長期間人骨に保持される<sup>90</sup>Srについては大部分がこれから被曝することとなる。

<sup>90</sup>Srの1972年および1973年における年間降下量は過去のどの年よりも低い値が測定され、牛乳中の<sup>90</sup>Srは北半球では1966年以来減少し、南半球でもほんの僅かではあるが減少している。人骨中の<sup>90</sup>Sr濃度も成人脊椎骨で僅かに減少している。<sup>90</sup>Srは経根的に植物に吸収され、消化管から体内に摂取されて骨に沈着し長年にわたって骨髄を照射する。

<sup>137</sup>Csは水稻を通して吸収され、消化管から容易に人体内に取り込まれ全身に分布して生殖腺線量に寄与するが、70~150日の生物学的半減期で体外に排出されるので、体内被曝線量は小さい。しかしかなりのエネルギーのγ線を放射するために外部被曝線量が問題となる。

<sup>131</sup>I は牛乳を通して甲状腺に選択的に集まる。また母乳を通して乳児へ移行するが、半減期が短い(8日)ため核爆発後数週間に限り注意すればよい。<sup>14</sup>C は1973年までの核爆発により、核実験開始以前に天然に存在した量の1.55倍になっていると推定されており、核爆発後1~2年で体内濃度も平衡状態に達する。

1955年から1970年までの核爆発によって、世界集団全体が1955年~2000年に受ける一人あたりの線量総計は、天然放射線によるもののおよそ2年間分に相当するといわれている。

4-2) 原子炉からのアイソトープ<sup>3)</sup>

最も問題となるのは原子力発電所から環境へ放出されるアイソトープである。1974年末における世界の原子力発電設備容量は表9<sup>7)</sup>のとおりで、運転および建設計画中のものを炉型で分類すると、軽水炉82.4%、ガ

表9 原子力発電所設備容量 (1974. 12)

(単位: MWe; Net)

国名	運 転 中		建設・計画中		合 計	
	設備容量	基数	設備容量	基数	設備容量	基数
アメリカ	36,792.4	55	195,613	182	232,405.4	237
イギリス	5,668	29	15,656	23	21,324	52
ソ連	4,285	21	12,770	16	17,055	37
日本	3,708	8	14,264	19	17,972	27
西ドイツ	3,388	8	22,685	22	26,073	30
フランス	2,834	10	29,958	31	32,792	41
スウェーデン	2,600	4	7,884	9	10,484	13
カナダ	2,514	6	14,104	21	16,618	27
スペイン	1,073	3	23,738	25	24,811	28
スイス	1,006	3	6,775	7	7,781	10
インド	582	3	1,006	5	1,588	8
イタリア	564.0	3	4,688.6	6	5,252.6	9
オランダ	502	2	3,840	4	4,342	6
東ドイツ	435	2	4,365	11	4,800	13
ブルガリア	405	1	1,215	3	1,620	4
ベルギー	395	1	2,999	4	3,394	5
アルゼンチン	319	1	1,952	3	2,271	4
パキスタン	125	1	500	1	625	2
チェコスロバキア	112	1	1,656	4	1,768	5
イラン	—	—	8,600	9	8,600	9
台湾	—	—	4,908	6	4,908	6
韓国	—	—	2,328	4	2,328	4
その他	—	—	23,129	38	23,129	38
合計	67,307.4	162	404,633.6	453	471,941.0	615

注) 30MWe以上の発電炉を対象

ス炉6.2%, 重水炉5.7%, その他5.7%となる。各国とも経済状況の停滞を反映して建設遅延や契約延期が相次いでいる。

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、空気や原子炉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漏出してくる核分裂生成物である。これらのアイソトープの生成量は炉の型式、運転条件、浄化設備などによって大きく異なっ

てくる。特に問題となるのは気体廃棄物としての<sup>3</sup>Hと<sup>85</sup>Kr、液体廃棄物としての<sup>3</sup>H、<sup>54</sup>Mn、<sup>59</sup>Fe、<sup>58</sup>Co、<sup>60</sup>Co、<sup>137</sup>Cs、<sup>65</sup>Znなどである。

地球上の<sup>3</sup>Hガスは、天然に存在するもの約27MCi、さらに核爆発により1962年までに約1,700MCi加えられ、これに原子力発電によるものが加わっている。こうして核爆発以前の表面水中濃度(0.6~2.4)×10<sup>-2</sup>pCi/mlが大きく汚染され、最近の日本の河川中の<sup>3</sup>H濃度はこの約10倍に増えている。

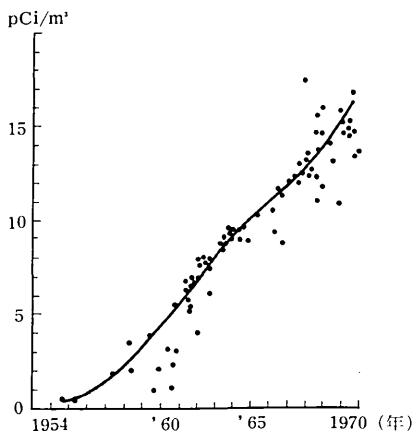


図6 北半球における地表大気中の<sup>3</sup>H濃度変化

大気中の<sup>3</sup>Hは図6のようにほぼ直線的に増大し続け1970年で15pCi/m<sup>3</sup>となっている。大気中に均一に分布しているものと仮定すると1970年で約53MCiとなる。

さて、世界全体の原子力発電設備容量は1970年で20GWeであり、原子力発電の増加テンポを1980年350GWe、1990年1600GWe、2000年4300GWeと、かなり大きく見積り、かつ1990年頃と2000年頃にはそれぞれ50、70%が高速炉に切り換えられているものと考え、各年ごとの<sup>3</sup>Hと<sup>85</sup>Krの存在量と濃度を推算すると表10が得られる。

この表の濃度から、2000年における<sup>3</sup>Hの人体組織への被曝線量は、1pCi/mlの<sup>3</sup>Hを含む環境水を使用す

表10 世界の原子力発電施設に由来する<sup>3</sup>Hと<sup>85</sup>Krの将来推定

西暦(年)	1970	1980	1990	2000	備 考	
原子力発電規模(GWe)	20	350	1600	4300	Spinrad (1970) による。	
高速炉(%)			(50%)	(70%)		
<sup>3</sup> H	存在量 MCi	0.4	34	200	720	自然 <sup>3</sup> Hと核実験 <sup>3</sup> Hを含まず。
	濃度 pCi/m <sup>3</sup>	1.5×10 <sup>-3</sup>	1.2×10 <sup>-2</sup>	7.3×10 <sup>-2</sup>	2.6×10 <sup>-1</sup>	30°~50°Nの表層海水に混じるとする。
<sup>85</sup> Kr	存在量 MCi	27	680	3170	9360	発電によるもののみ
	濃度 pCi/m <sup>3</sup>	15*	410	1900	5620	対流圏の大気の1/2に混じるとする。

\* この値は実測値なので核実験由来のものその他(軍事利用?)を含む。

る人の組織線量率を $6.4 \times 10^{-2} \text{mrem/年}$ とすると、 $1.7 \times 10^{-2} \text{mrem/年}$ となり、人口1億人の我が国の国民線量(国民全体がうけている線量総和)は $1.7 \times 10^3 \text{man-rem/年}$ となる。また同様に $^{85}\text{Kr}$ は2000年で $0.13 \text{mrem/年}$ となり、国民線量は $1.3 \times 10^4 \text{man-rem/年}$ となる。

原子力発電所からの液体廃棄物は、立地条件からみて海洋に放出されることとなる。これらのアイソトープの海水中の濃度は極めて低いが、海棲生物特有の濃縮作用によって、人間が食用とする魚、鳥などの体内に濃縮される。生体内の濃度と水中濃度との比を濃縮係数と称するが、この値が数1000になることもある。したがって、海棲生物を食用する私達の場合、水中濃度が低いからといって安心してははいかない。

田島らは一定の仮定をして2000年における液体廃棄物中のアイソトープの人体への摂取量を求め、被曝線量を算出しているが、それによると、2000年の発電容量を220GWeとしたときの国民線量は $1 \text{man-rem/年}$ である。

我が国では核燃料再処理工場からの廃液の海洋への放出は行なわれていないが、イギリスの工場の10数年にわたる運転実績を参考にし、現在運転開始直前の我が国の再処理工場の放出量を年間300Ciとすれば、全身に対する国民線量は $0.5 \text{man-rem/年}$ となる。2000年頃35倍の規模の工場が稼動するものとすれば、 $20 \text{man-rem/年}$ となる。

表11 2000年における原子力発電にもとづく日本の国民線量の推定

被曝源		全身 (man-rem/年)	皮膚 (man-rem/年)	
世界の施設	$^3\text{H}$	$1.7 \times 10^3$		
	$^{85}\text{Kr}$	$1.3 \times 10^4$	$5.6 \times 10^5$	
日本の施設	$^3\text{H}$	$1.5 \times 10^3$		
	大気放出	発電	$10^3$	$5.1 \times 10^3$
		再処理	$1.2 \times 10$	
	沿岸放出	発電	1	$5.1 \times 10^3$
再処理		$2 \times 10$		
合計		$1.7 \times 10^4$	$5.6 \times 10^5$	

表11は、上記線量と日本の原子力発電の開発に伴う局地的な線量寄与分を、2000年頃220GWeの発電規模になるものと予想して同様に算出し、まとめたものである。実際は $^{85}\text{Kr}$ の回収装置の開発など、放出アイソトープを減少させる技術的改善が行なわれるものと考えられるので、かなり下まわった国民線量となるであろう。

5. 人工放射線源とアイソトープ

人工放射線源およびアイソトープにより、日常生活の中で被曝するおそれが最も大きいのが医学利用である。医療用X線装置をはじめとして、最近では診断用に各種のアイソトープが用いられているので、それからの被曝も問題となる。医学的利用以外のアイソトープ利用は、時計の夜光塗料をはじめとして、煙探知器、グローランプなど、いくつかの応用が試みられている。さらに放射線源として製造されたものではないが、テレビの高電圧整流管や受像管から軟X線が生成するので注意が必要である。

5-1) 医療放射線とアイソトープ<sup>8), 9)</sup>

X線装置による放射線検査は19世紀末にレントゲンがX線を発見して以来、直ちに医学への利用が試みられ、現在では、各種臓器の疾患のみならず血管やリンパ管の造影法など複雑な検査にまで偉力を発揮している。このようなX線診断への利用は直接撮影、間接撮影およびX線透視の三つに分けられる。1969年の調査結果によれば表12のようになり、人口1億人としたとき年間1人あたり、直接、間接、透視をそれぞれ1.8, 0.66, 0.17件づつ受けていることになる。

表12 医療放射線利用頻度と年間線量

	件数 (万件)	年間線量 (mrad/年/人)			
		GSD	LSD	CMD	
診断	直接撮影	18,000	15.2	33	37
	間接撮影	6,600	0.8	25	27
	透視	1,700	10.5	112	126
	核医学小計		0.24		
			26.7	169	189
治療	ビーム	18	0.98	37	210
	Ra小線源	4.5	0.044	4	
	核医学小計		0.21		
			1.2	41	210
総計		27.9	210	399	

X線検査は医学以外の公衆衛生分野でも利用されており、その代表は胸部集団検診である。1968年に5741万人が受診したと云われている。胃や乳房関節の集団検診も多く、1970年の胃集団検診受診者は220万人以上と推計されている。

X線検診を受ける際に問題となるのは皮膚、骨髄および生殖腺への被曝線量である。表12に年平均CMD, GSDとして骨髄および生殖腺への年間線量を表示しておいたが、この値は全体としての平均値であり、個人がX線曝射を受けたときの線量ではない。

皮膚線量は実測できるが、検査技術だけでなく照射部位、体格などにより大きく変動する。胸部間接撮影の場合成人が280~400mrad, 小学1・2年生が120~



160mradという測定値もある。また胃の造影撮影では、曝射1回あたり正面で530mrad、側面で1480mrad程度であるから、1回の胃の検診により数rad以上の皮膚線量をうけることとなる。

透視のときの皮膚線量はX線テレビを用いた場合で1分間あたり1.1~4.4rad、蛍光板透視の場合で1.5~7radとされており、10分間透視を受ければ数10ラド前後の皮膚線量となる。しかし脱毛などの軽い皮膚傷害は400rad程度の被曝を受けないと現われないので、100rad以下であれば皮膚傷害のおそれはない。

直接撮影1回あたりの平均骨髄線量は表13のとおりである。赤色骨髄は全身の骨に分布しており、脊椎、骨盤など比較的多い部位で60~80mradとなっている。

表13 X線直接撮影1回あたりの平均骨髄線量 (mrad)

頭	部	12	妊 娠 腹 部	65
頸	椎	13	腎 孟	29
食 道		47	子 宮 卵 管	21
鎖 骨・肩		9	骨 盤 計 測	83
胸 椎		67	膀 胱	22
胸 部		7	骨 盤	39
肋 骨・胸 骨		20	腰 椎	56
胃		24	腰 仙 椎	61
胆 の う		22	股 関 節, 大 腿	21
腸		42	大 腿 下 部	4
腹 部		39	下 腿	0.1

橋詰氏らによる。

表14 X線直接撮影1回あたりの平均生殖腺線量 (mrad)

	男	女
	1969	1969
胃・十 二 指 腸	1.3(20)	15(340)
腎 孟 撮 影	10	56
腹 部	67	67
注 腸	160(216)	79(1500)
骨 盤	460	110
腰 椎	26	80
腰 仙 椎	350	120
大 腿 骨 上 部	230	58
妊 娠 腹 部		230
骨 盤 計 測		230
腹 部	0.13	0.48
頭 部	0.03	0.02
歯 科 撮 影		
四 肢		

括弧内は透視による線量。橋詰氏らによる。

この場合も透視を併用するときは0.5~1radを加算する必要がある。

同様の平均生殖腺線量は表14となる。生殖腺から離れた部位の線量は小さいが、下腹部の線量は皮膚線量に近く200~400mradとなる。妊娠被期の婦人の胎児が放射線に対する感受性がきわめて大きいことを考えるとき、婦人の下腹部撮影に際し十分な配慮が必要なことはいうまでもない。

アイソトープを人体内に投与して行なう核医学診断は、目的の臓器にアイソトープが集積する状況を体外から計測記録する動態機能検査と、集積または沈着したアイソトープの分布状況を体外から描写するシンチグラムとに分けられる。箕原<sup>10)</sup>および北畠ら<sup>11)</sup>が行なったそれぞれ1972年、73年における核医学診断の実態調査から推定すれば、現在年間50万件近く適用されているものと考えられる。

1972年のアイソトープ投与件数では、<sup>131</sup>I 51.5%、<sup>198</sup>Au 23.3%、<sup>99m</sup>Tc 8.5%、その他となっており、使用数量からみると、<sup>99m</sup>Tc 47.9%、<sup>198</sup>Au 16.8%、<sup>131</sup>I 9.8%、その他の順である。<sup>99m</sup>Tcは核医学診断にとってきわめて優れた核特性を持っているため、<sup>99m</sup>Tcの投与件数が急増し、<sup>131</sup>Iと代りつつあるものと考えられる。

アイソトープを体内に投与したときの患者の防護についてはICRP Publication 17に述べられている。主として使用されるいくつかの放射性医薬品が100~1000μCi投与されたとき、目的臓器に与える線量予想値(rad)は表15のとおりである。できるだけ少ない線量ですむようなアイソトープ医薬品を開発し、同時に健康保険適用薬品に指定させることが重要である。

たとえば<sup>99m</sup>Tcを甲状腺シンチグラフィに用いれば、<sup>131</sup>I 100μCi、25%摂取で35radの甲状腺被曝があるのを、<sup>99m</sup>Tc 1 mCiで0.2~0.3rad、すなわち

表15 核医学診断による患者の被曝線量の一例

検査器官	医薬品名	投与量 (μCi)	主要器官のうける線量(rad)			
			甲状腺	肝臓	脾臓	腎臓
甲状腺	<sup>123</sup> I	100	2.0			
	<sup>125</sup> I	50	58			
	<sup>131</sup> I	50	103			
	<sup>132</sup> I	100	2.0			
	<sup>99m</sup> TcO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1,000	0.2~0.3			
肝 臓	<sup>198</sup> Au	150		6.0	7.2	
	<sup>99m</sup> Tcコロイド	1,000		0.31	0.14	
脾 臓	<sup>197</sup> HgMHP	100				3.6
	<sup>201</sup> HgMHP	100				76
	<sup>99m</sup> Tc赤血球	1,000			0.43	

1/100 以下に減らすことができる。しかし健保適用外のため使用できない。このような矛盾は直ちに解決されねばならない。

さて体内投与されたアイソトープは、患者の排泄物中に混って体外に放出される。使用アイソトープの半減期が  $^{99m}\text{Tc}$  ように短い (6 時間) ときは、入院中に減衰するが、 $^{131}\text{I}$  のように長い (8 日) 場合は問題となる。体内のアイソトープは特有の半減期とその元素の生物学的半減期 (体外に排泄されて 1/2 になる時間) によって排泄されるので、どちらかが短かければ問題ない。しかし後者は短いものでも 1 日前後であるから、アイソトープの半減期によって支配される場合が多い。

アイソトープが通院患者に投与された場合は、患者はアイソトープを体内に保持した状態で自宅に帰り、周囲の健康人に放射線を被曝させ、また一般人と同様に排泄する。この過程で或程度の放射性汚染が生ずることはいうまでもない。この意味からも診断に十分でしかも、できるだけ半減期の短いアイソトープの利用開発が望まれている。

患者からの排泄物に関しては、米国のオハイオ州 Cincinnati 市の 10ヶ所の核医学診療施設を含む下水処理施設の出口の放射能を調べたところ、1973年8月の月～金曜日に毎日  $^{99m}\text{Tc}$ , 70mCi,  $^{131}\text{I}$  24mCi が下水処理場からオハイオ河へ流出していたという報文<sup>12)</sup>がある。

核医学診断による年間線量は GSD で 0.24mrad/年/人であり、その他の診断と比べてほとんど問題にならない線量といえよう。

放射線治療は X 線,  $\gamma$  線, 電子線などをビーム状にして悪性腫瘍に照射するビーム照射, ラジウム ( $^{226}\text{Ra}$ ) や  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{198}\text{Au}$  などの小線源を病巣に直接挿入する照射, およびバセドウ氏病治療に 5 mCi の  $^{131}\text{I}$  を投与するように、アイソトープ投与によって治療する核医学治療の三つに分けられる。

ビーム照射は外部から患部に対し、積算線量数千 rad 前後を 4～6 週間にわたり照射する治療であるが、比較的高年令の患者が多いために GSD は大きくない。しかし、CMD はきわめて大きくなる (表 12 参照)。子宮癌、舌癌などの治療に用いられる小線源挿入治療法も規模が小さいだけで同じような傾向を持っているが、核医学治療はアイソトープの使用数量が約 100 mCi 以下でしかも半減期がそれほど長くないために、年間線量への寄与は小さい。

#### 5-2) アイソトープの利用

夜光塗料は硫化亜鉛系の蛍光体粒子表面にアイソトープを固着させて発光粉末とし、これを合成樹脂などと混合しペイント状にして塗装するものである。人工アイソトープが造られる前は、 $^{226}\text{Ra}$  が用いられてきた

が、 $^{226}\text{Ra}$  からの  $\alpha$  線によって蛍光体が放射線損傷を受け、発光量が減衰する欠点をもっていた。戦後人工アイソトープの利用が盛んになるにつれて、各種のアイソトープを利用する研究が行なわれ、生研においても  $^{90}\text{Sr}$  の利用研究がなされた。しかし放射線安全の観点から実用化にいたらず、国産時計にはもっぱら  $^{147}\text{Pm}$  が用いられている。

$^{147}\text{Pm}$  は半減期 2.6 年で最大 0.22 MeV の  $\beta$  線を出して壊変し、そのエネルギーが蛍光体を損傷させるエネルギーよりわずかに低いため、高輝度、長寿命でしかも安価であるという特長を持っている。 $^{147}\text{Pm}$  は  $\text{Pm}(\text{Cl})_3$  などの水溶液として蛍光体に加え、アルカリで  $\text{Pm}(\text{OH})_3$  として粒子面に沈着させ、乾燥して  $\text{Pm}_2\text{O}_3$  とするか、または硫酸によって不溶性の硫酸塩にして使われている。使用放射能は 100  $\mu\text{Ci}$  以下で、アイソトープ障害防止法の適用除外となっている。

外国では  $^{147}\text{Pm}$  のほかに、 $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^3\text{H}$  なども使われており、ORNL (Oak Ridge National Laboratory) の Butler<sup>13)</sup> が近所の 48 戸の家庭の夜光時計について調べた結果によると、227 ヶの時計のうち 35 ヶが夜光時計で、そのうち 17 ヶが  $^{226}\text{Ra}$  を使用していた。これらの夜光時計は寝室に置かれ、2m 以内の地点で自然計数率の 2 倍の計数率を示した。したがって外国製夜光時計を使用する場合は十分注意しなければならない。

わが国では、100  $\mu\text{Ci}$  以下の  $^{147}\text{Pm}$  を含むものが、腕時計全生産量の約 20%、置・掛時計では約 80% 生産され市販されており、使用者個人の推定線量は十分に小さく安全と考えてよいが、時計の修理に従事する労働者の被曝線量は無視できない量に達する恐れがある。なおこの夜光塗料を釣り用のうきに塗っている向きもあるが、このような利用法は好ましくない。

夜光塗料のほかに、蛍光灯の点弧の遅れをなくする目的で、グローランプの中に少量のアイソトープを使用していることがある。従来は  $^3\text{H}$  や  $^{85}\text{Kr}$  をガスのまゝガラス管内に封入したり、 $^{147}\text{Pm}$  を塗料状にしてガラス管内壁に塗ったりしていたので、数  $\mu\text{Ci}$  のアイソトープが用いられてきたが、最近では電極にニッケルとともに 1  $\mu\text{Ci}$  以下の  $^{147}\text{Pm}$  をメッキし、その上をさらにニッケルの電着層で被覆した、かなり密封度の高いものが用いられている。<sup>14)</sup> このグローランプによって、11 秒のおくれを 2～3.5 秒に縮めることができる。

冷陰極放電管の点弧のおくれを改善する目的では、1970年のヨーロッパ原子力機構の報告によれば、13種の電子部品に  $10^4 \sim 10^3 \mu\text{Ci}$  のアイソトープが利用されている。国内でどの程度利用されているかは不明であるが、数字表示放電管、定電圧放電管および電話器保護のため電話線引き込みの軒下に取りつけてある避雷用放電管などの一部に利用されている。電子管の使用

材料であるニッケルに $1\mu\text{Ci}$ 以下の $^{63}\text{Ni}$ をメッキした形で使われている場合が多い。

煙探知器は諸外国ではかなり前から使用されてきたが、我が国では1960年代末より使用され始め、1970年3月の消防法改訂以来急激に利用が増えている。現在約3百万個ほど使用されているものと推定される。使用アイソトープはほとんど $^{241}\text{Am}$ 、数 $\mu\text{Ci}$ 以下で、二重電離箱方式のものである。一方を密閉して常時一定の電離電流を流しておき、開放電離箱内に煙が入るとその電離電流が減少し、両者の電流のバランスがくずれることを利用して警報を鳴らすようになっている。外側のケースで $^{241}\text{Am}$ をしゃへいしているため、外部漏洩線量はきわめて小さい。しかも天井に取りつけられているので、人体への放射線被曝は無視できる。旅館、ホテル、劇場、高層建築物などに用いられている。

外国では $^{85}\text{Kr}$ 数m Ci以上を用いた煙探知器も使用されているが、これは $^{241}\text{Am}$ が生物学的危険度の大きい $\alpha$ 線放射核種でしかも半減期が長い(458年)ため使用数量が多くなると、環境汚染の点で、危険度の小さい $^{85}\text{Kr}$ より問題があるという配慮に基いている。

### 5-3 テレビからのX線

ICRPの勧告によれば、電子が5keV以上のエネルギーに加速されるような装置は潜在的放射線源とみ

なされるべきであると述べられている。家庭用テレビには20kV前後の高電圧で動作する受像管と高圧整流管が組み込まれているので、両者からX線が放出される。ICRPは家庭用テレビセットのどの表面から5cmのどんな位置での照射線量率も0.5mR/hをこえてはならないと勧告し、これを保証するのはメーカーの責任であると述べている。

白黒テレビ受像管は10~15kVで動作するがカラーの場合は25kV前後となるので漏洩線量が問題となる。我が国で製作されたカラーテレビの表面および側面の照射線量率を熱蛍光線量計によってWang<sup>15)</sup>が実測した結果は表16のとおりである。受像管表面がプラスチックやガラス等で覆われているため、かなり低い線量率を示しているが、テレビセット内部の受像管周囲では0.25mR/h程度となる。また同一メーカーの場合、寸法が大きくなるにつれて漏洩線量率が増えていく傾向を示している。この表では裏面にある高圧整流管からのX線による寄与分が不明であるが、裏面からの漏洩線量率がかなり大きい場合があることを指摘しておく。

### 6. 技術進歩に伴う天然放射線の増加

天然放射線および天然アイソトープによる被曝は、日常生活の中で避けることはできない。最近人間の環境を無視した科学技術の適用により、公害問題が深刻となってきているが、これと同じように、天然放射線やアイソトープからの放射線による人間の被曝線量の増加が問題となりつつある。T. F. Gesell<sup>16)</sup>らはこの現象をTENR (technologically enhanced natural radiation) と名づけ、原子力技術以外の技術の進歩によって人間が余分に天然放射線や天然アイソトープに曝されている事実を指摘し、その増加分を明らかにして必要なレベルを設定すべきことを述べている。図7は、放射線に対する人間の被曝状況を、TENRを考慮して表した、マトリックスである。

表16 国産カラーテレビからのX線照射線量率

受像管寸法 (インチ)	メーカー	照射線量率 ( $\mu\text{R}/\text{h}$ )		
		前面	側面	受像管周囲
12	ソニー A	36 $\pm$ 1	30 $\pm$ 1	(テレビ 内部で 測定)
	ソニー B	12 $\pm$ 1	1 $\pm$ 0	
14	日立	9 $\pm$ 1	5 $\pm$ 2	
	ナショナル	23 $\pm$ 4	14 $\pm$ 1	
16	ソニー	14 $\pm$ 2	6 $\pm$ 1	
	ナショナル	7 $\pm$ 1	5 $\pm$ 1	
	サンヨー	10 $\pm$ 2	1 $\pm$ 1	
	シャープ	11 $\pm$ 2	1 $\pm$ 0	
18	日立	51 $\pm$ 5	6 $\pm$ 1	
	日立	23 $\pm$ 8	3 $\pm$ 1	
	ナショナル	9 $\pm$ 2	6 $\pm$ 2	
19	ソニー	18 $\pm$ 3	2 $\pm$ 1	
	ナショナルA	9 $\pm$ 2	7 $\pm$ 1	
	ナショナルB	17 $\pm$ 2	9 $\pm$ 2	
	サンヨー	15 $\pm$ 1	10 $\pm$ 6	
20	東芝	5 $\pm$ 1	2 $\pm$ 1	
	ビクター	2 $\pm$ 1	1 $\pm$ 0	
	シャープ	11 $\pm$ 1	4 $\pm$ 0	
20	ナショナル	16 $\pm$ 1	4 $\pm$ 0	255 $\pm$ 14
	サンヨーA	74 $\pm$ 11	12 $\pm$ 1	
	サンヨーB	40 $\pm$ 7	5 $\pm$ 1	
	シャープ	11 $\pm$ 1	4 $\pm$ 0	224 $\pm$ 12
				247 $\pm$ 9

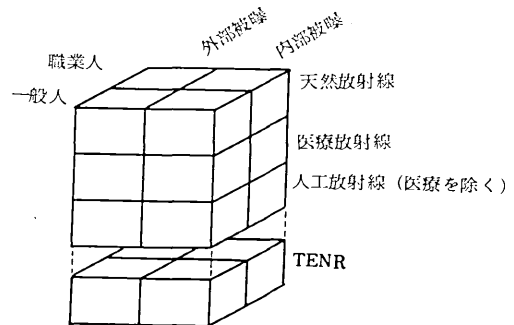


図7 個人被曝線量のマトリックス表示

## 6-1) 石炭, 重油, ガス

石炭中には1pCi/g程度のラジウムが含まれている。したがって石炭を燃料とする火力発電所からの飛散灰中にかんりのラジウムやトリウム系列核種が含まれていることが予想できる。1,000MWeの火力発電所の年間消費石炭量を $2.3 \times 10^6$  tとすれば、ラジウム含有量は約2 Ciである。収率を99.5%とすれば、年間10mCiのラジウムが大気中に放出される。

原子力発電所から放出される $^{85}\text{Kr}$ ガスと比べると、 $^{85}\text{Kr}$ とラジウムの空気中の最大許容濃度( $^{85}\text{Kr}:3 \times 10^{-5}$ ,  $^{226}\text{Ra}1 \times 10^{-11}$   $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ )を考慮したとき、年間 $3 \times 10^3$  Ciの $^{85}\text{Kr}$ を放出する原子力発電所と等価な影響を及ぼしているものと考えられる。工業地帯から150 km離れた地点の永河中の $^{226}\text{Ra}$ 濃度が過去80年間に50倍に増加しているという報文もある。一方重油火力発電所からのラジウム飛散量は、重油中の含有量が小さいことと飛散灰量が少ないことから、同規模の石炭火力発電所と比べて、 $10^{-3}$ 程度と推定されている。

石炭や重油などの化石燃料の大量消費は、もう一つの天然アイソトープ、 $^{14}\text{C}$ の大気含有量に大きな影響を及ぼす。 $^{14}\text{C}$ の人間に対する線量率は年間1~1.6 mremと称され、1900年以前は炭素中の $^{14}\text{C}$ の分布は一定であった。1900年以降、 $^{14}\text{C}$ を含まない $\text{CO}_2$ が大量に放出されたため、炭素化合物 $^{14}\text{C}$ 中の $^{14}\text{C}$ の放射能すなわち比放射能は次第に低下しつつある。この現象はTENRの逆の現象でSuccess効果と称され、化石燃料による発電予測によれば、1954年から2000年の間に人間に対する被曝線量が約3 mrem低減すると称されている。

天然ガス中にも $^{222}\text{Rn}$ ガスが含まれており、換気の悪い部屋の中で燃焼させると、室内の $^{222}\text{Rn}$ ガス濃度が上昇する。LPG(liquefied petroleum gas)は液化の過程でラドンガスが濃縮されるため、もとのガスの約8倍の $^{222}\text{Rn}$ 濃度となる。しかし処理中に減衰し、捕捉されるために、原料のガスよりも人間に対する被曝は少ない。ただ液化処理工場内で $^{222}\text{Rn}$ の娘核種が捕集される場所の外部照射線量率が数mR/hに達するので、従業員の職業的被曝が問題となる。

$^3\text{H}$ を含むメタンガスを用いて料理をした場合、ガス中の $^3\text{H}$ がどの程度食物中にとり込まれるかを調べた結果<sup>17)</sup>によれば、食物中の $^3\text{H}$ の量は表面積、料理時間、水分含有量によって変り、その比放射能は食物の内部よりも表面近くが大きい、ガスから食物への移行は0.1~1%で、かなり少ないことを物語っている。

## 6-2) 建築物

花崗岩のような建築資材には天然放射能が多く含まれているため、TENRの好例となる。またウラン工場の鉍滓を使用している場合も問題となる。コロラド州には、ウラン鉍滓を建築物中に含むもの5,000棟以上、

基礎のみに含むもの、3,000棟以上あるが、1972年11月に301棟の室内におけるラドン娘核種の濃度を調べたところ、5 pCi/l(大気中濃度0.1pCi/l)以上のラドン濃度が検出された。

英国でも過磷酸肥料工場のカスから製造された石膏中に17pCi/gのラジウム等価比放射能が検出された。この石膏はプラスターボードとして室内壁の装飾に用いられており、磷鉍石中のラジウム含有量いかんによっては、かなり大きい被曝線量を人間に与える恐れがある。

天然放射能の多い灰分から成る接着陶器や溶鉍炉からの発泡鉍滓を用いている建築物の中には、人間が生活するのに安全と考えられているレベル以上の $^{222}\text{Rn}$ 放射能を示すものがあることが指摘されている。しかし一方では天然放射能が少なく、建築材料のおかげで天然放射線をしゃへいしている場合も多いことをつけ加えておこう。

カリフォルニア州のリバーモアの近くで、主として100戸の木造家屋における環境放射線からのバックグラウンドを調べた結果<sup>18)</sup>によれば、年間被曝線量は52~100 mR,平均63mRで、この地方の平均バックグラウンド60 mRとよく一致しており、一階と二階の差も5%以下である。

$^{222}\text{Rn}$ は建築材料から室内に放出されるために問題となる場合が多く、その放出割合は図8<sup>19)</sup>のように大気圧に反比例する。 $^{222}\text{Rn}$ の放出を防ぐ目的でコンクリートにエポキシ樹脂を塗装すれば、塗装前の約1/4に減らすことが可能である。<sup>20)</sup>いづれにせよ、部屋の換気を十分にすれば、 $^{222}\text{Rn}$ による無用の被曝を大きく減らすことができよう。

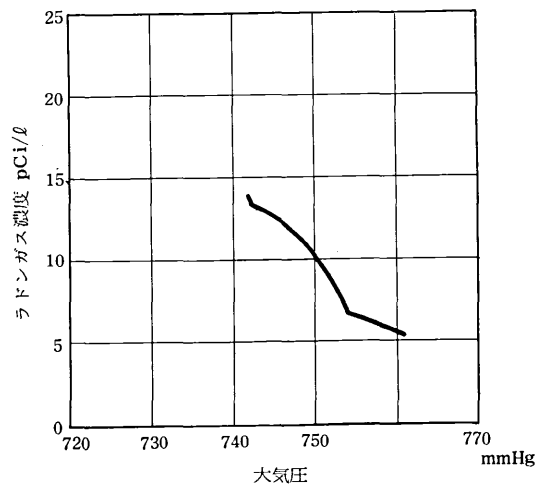


図8 気圧上昇時のラドン濃度変化

## 6-3) 肥料, 地下水

燐鉱石には300ppmものウランを含有するものがあり, このような鉱石から肥料を製造する工程で, ウランの大部分およびいくつかのラジウム系列核種が肥料中に移行する. このため, 燐酸肥料の中にはウラン含有量400ppm以上のものもある. したがって農地に施肥したことにより, その地点の局部照射線量率が0.5 $\mu$ R/h程度増加したり, 表面水の放射能レベルをかなり上昇させたりする現象がおこる. また倉庫内に保管中は燐酸肥料からの<sup>222</sup>Rn濃度が上昇し, 10pCi/lに達した例もあるので, 十分注意する必要がある.

地下水中には天然放射能がかなり含まれている.<sup>222</sup>Rn含有量の多い水を飲用したときの消化器官に及ぼす線量の計算なども行なわれてきたが, 最も問題となるのは住宅内における水から室内への<sup>222</sup>Rnの放出である.<sup>222</sup>Rnの水中濃度を $2 \times 10^4$ pCi/l, 住宅内空間200m<sup>3</sup>, 1日の使用水量1000l, 1時間に1回換気し,<sup>222</sup>Rnガスの水から大気への放出効率を50%とすると, 室内の<sup>222</sup>Rnの平均濃度は約2pCi/lとなる, この数値は一般公衆のためにICRPがきめた許容値0.33pCi/lよりかなり大きい. 主として水を取り扱う台所や風呂場の<sup>222</sup>Rn濃度が局部的に大きくなることは言うまでもない.

## 6-4) 高空飛行

高空飛行時の電離放射線の主要な成分は太陽の異常活動期を除けば銀河系からの宇宙線である. 音速以下で高度10~12kmを飛行する場合の被曝線量率は約1000 $\mu$ rem/hと云われており, 地上における値10 $\mu$ rem/h (最近は海面上で3.7 $\mu$ rem/hと称されている)の約100倍である. 超音速飛行の場合は高度も増すので1600 $\mu$ rem/hと考えられている.

超音速飛行または18km以上の高度を飛行する場合に問題となるのは太陽面爆発による異常被曝である. 1956年2月23日の爆発時の計算によれば, 超音速飛行時の被曝線量率は3rem/h程度となる. 若し高度を下げて音速以下の飛行を行えば一路線あたり0.45rem程度におさえることができるものと考えられる. 太陽爆発などの異常時には欠航するなどして異常被曝を浴びないようにすることが望ましい.

## 7. おわりに

以上, 日常生活の中でどのように放射線の被曝を受け, かつその線量はどの程度であるのかに関し, 現在まで明らかにされている研究成果の一端を紹介してきた. 線量限度や許容線量に対する考え方, および微量放射線の影響などについて, 異論もあるし未解決の問題も多いので, 一般に受け入れられている事実の解説に止め, 論評は避けてきた.

人類の将来にまで悪影響を及ぼす遺伝的效果を支配しているのが天然放射線と医療放射線であることが, 案外知られていなかったのではなからうか. 天然放射線の影響は木造家屋の方がコンクリート建家より一般に弱いが, どこに生活していようと, 一定の影響を受けることを避けるわけにはいかなない.

人工的に生産される放射線は, どんな過程で生ずるものにせよ, 少しでも減らす研究を進める必要があることは言うまでもない. 筆者らの「散乱線低減材に関する研究」もその一環である.

人工放射線の中で最も被曝線量の多い医療放射線に関しては, ICRPもX線診断および核医学診断における患者の防護について2つの勧告を1971年に発表しており, わが国でも学協会の協力により文献9がまとめられている. 関心のある方の一読をすすめたい.

原子力発電所の増加に伴う線量は, 発電容量の推定を大きめに見積ってもそれ程大きくならないという結論であるが, 事故時の線量増ならびに近在住民の線量を考えるにつけ, いわゆるゼロ放出をめざした研究が重要である.

原子力産業以外の産業の技術的進歩に伴い, 以外な所で天然放射能を増加させている可能性があることを指摘してきた. しかしわが国においては, この種の研究は殆んど手がけられていない現状であるので, 今後の研究に期待したい.

(1975年9月10日受理)

## 文 献

- 1) 橋詰, 日本原学誌, 15, (12), 809-821(1973)
- 2) ICRP Publication 9. 国際放射線防護委員会勧告, 日本アイソトープ協会 (1965)
- 3) 阿部; Isotope news, (4), 2-5(1975)
- 4) 岡野; 原子力工業, 21, (1), 65-68 (1975), 21 (2) 75-79 (1975)
- 5) 岡野; 原子力工業, 18, (7), 102(1972)
- 6) 田島ら; 日本原学誌, 14, (3), 131-137(1972)
- 7) 原子力産業新聞 771号 50年4月17日, 日本原子力産業会議
- 8) 館野; 放射線と人間, 岩波新書 (1974)
- 9) 日本医学放射線学会, 日本アイソトープ協会編; 放射線診断における被曝管理, 日本アイソトープ協会 (1974)
- 10) 寛ら; Radioisotopes, 22 (10), 593-605(1973)
- 11) 北畠ら; ibid, 23, (4), 260-266(1974)
- 12) V. J. Sodd, et al; Health Physics, 28, 355-359(1975)
- 13) H. M. Butler; ibid, 28, 299-301(1975)
- 14) 鶴飼; 第11回理工学における同位元素研究発表会, 19P-II-4 (1974)
- 15) Y. S. Wang; Health Physics, 28, 78-80 (1975)
- 16) T. F. Gesell, et al; ibid, 28, 361-366(1975)
- 17) R. G. Potzer, et al; ibid, 23, 501-507(1972)
- 18) C. L. Lindeken, et al; ibid, 24, 81-86 (1973)
- 19) N. Jonassen; ibid, 29, 216-220(1975)
- 20) J. A. Auxier, et al; ibid, 27, 390-391(1974)