+	解 説	+
---	-----	---

放射線ホルミシス

(電力中央研究所) 服部 禎男,
根本 和泰, 石田 健二, 御園生 淳,
菅沼 浩敏, 石井 敬一郎, 山岡 聖典

近年, 放射線には生物に対するホルミシス効果があると注目され, 関心が高まってきた。ホルミシス効果とは, 多量ならば有害な作用を及ぼすものであっても, 微量であれば生理的な刺激となり, 生体機能の活性化効果を生じることを意味しており, 低線量放射線の影響に係る重要な研究分野となりつつある。

本稿では, 放射線ホルミシス研究の経緯と最近の研究動向を述べるとともに, 電力中央研究所において実施中の研究を紹介する。

I. 序 論

放射線照射の生物, 特にヒトへの影響については, 低線量の十分なデータがないことから, 例えば, 国際放射線防護委員会(ICRP)では, 放射線のリスクは少なければ少ないほどよいという前提⁽¹⁾⁽²⁾に立って, 放射線の関(しきい)値はないと仮定した放射線防護の考え方を勧告している⁽³⁾。

しかし近年, 放射線生物影響の実験データの再評価⁽⁴⁾⁽⁵⁾や, 原爆被爆者関連の追跡調査⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾などにより, 低線量のある領域では刺激作用や活性化現象(これをホルミシス効果という)をもたらすということが相次いで発表され, 注目されている。

ホルミシス効果が見られる線量域は, 動物と植物とで異なり, 動物が数radから数10radであるのに対し, 植物では数1,000radまでの幅広い線量範囲となっている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。植物の場合, 一般的な意味での低線量といえないのは確かであるが, これと致死線量との比をとると, 動物の場合とほぼ同様の値となる。したがって, 動物でも植物でも, 基本的には同様な反応が起きているものと考えられる。

ホルミシス効果は, 生命現象として普遍的な現象であると推論し得るので, 以下の解説では, 動物とヒトだけでなく, 植物も含めて, ホルミシス効果の研究について述べる。

II. 研究の動向

1. ホルミシス提唱に至る背景

低線量放射線を照射された生物の増殖が, 照射されなかった対照群より顕著であるなど, 低線量放射線を

照射された生物の反応が, 高線量域の研究から推論される線量効果関係とは必ずしも一致しない場合のあることは早くから観察されていた。しかし, このような結果は, 低線量域でも, 高線量域で起こると同質な反応が線量に比例して起こるという従来の考え方に従って, 実験誤差ないしは異常な反応とみなされ, 重要視されないままに終わることが多かった。

薬理学や栄養学の分野では, 多量では毒性を持つ物質でも, 少量の時には生体に刺激作用をもたらす場合のあることが知られており, このような現象をホルミシスと呼んでいた。

Luckeyが, 従来異常とみなされてきた低線量放射線による反応を見直し, これらの反応は, 作用原が何であっても有害量以下の場合には共通して見られる刺激作用であるとして, 「放射線ホルミシス」の概念を提唱した⁽¹⁰⁾のは, 一つの卓見といえよう。

Luckeyは, 放射線が生体に及ぼす影響に関する線量効果曲線を, 第1図に示すような上方に凸な曲線として描き, バックグラウンドの環境放射線のみ存在するときの線量をゼロとすると, 生体反応は線量の増加に伴い上昇し, 極大に達した後, 低下する。この時, 反応量が線量ゼロのときの値と等しくなる線量をゼロ相当点(ZEP)と呼ぶと, これと線量ゼロの間では, 放射線に対する反応は正となるが, ゼロ以下とZEP以上の線量域では, とともに負となる。これは, ZEP以上の線量域では障害が発生し, 環境放射線以下の線量では有

Radiation Hormesis: Sadao HATTORI, Kazuyasu NEMOTO, Kenzi ISHIDA, Jun MISONOO, Hirotohi SUGANUMA, Keiichirou ISHII, Kiyonori YAMAOKA.
(1990年 5月8日 受理)

第1図 電離放射線の完全な線量効果曲線⁽⁴⁾

効な刺激を与えるには不十分であるため、いずれも反応が低下し、これに対し、ZEPから線量ゼロの間では有効な刺激作用をもたらし、生体機能を活性化することを意味する。つまり、放射線照射による刺激作用は環境放射線よりかなり高いレベルで最もよく認められると説明した⁽⁴⁾。

また、このような刺激作用は、過去のデータでも、成長率、発育、生殖、疾病・外傷に対する抵抗力の増大、寿命の延長などの形で見られていると主張した。さらに、自然放射線を遮蔽してしまうより、その程度の放射線があった方がゾウリムシの増殖率がよいという実験^{(10)~(12)}を例にあげ、低線量の放射線は生物にとって必要なものであると評価した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

2. ホルミシスをめぐる議論

Luckeyの「低線量放射線は生物にとって好ましい効果を与える」という主張は、多くの研究者の興味を引き、賛否両論の議論が行われた。これは、Luckeyのいうホルミシス効果によって説明できることも多い反面、その根拠とする実験データも種々雑多であり、放射線が確かにホルミシス効果が生じると結論するのは時期尚早と考えられたからである。

このため、本格的な議論により問題点を整理する必要があるとの論が米国を中心に起こり、Oakland(1985年)、次いでFrankfurt(1987年)で、放射線ホルミシスに関する会議が開かれた。

(1) Oakland会議

Oakland会議は、低線量被曝の問題に関心の深かった米国電力研究所(EPRI)が中心となって企画し、放

射線ホルミシスの問題点の討議が行われた。

Planelら⁽¹³⁾は、鉛で自然放射線を遮蔽すると、ゾウリムシの増殖率が遮蔽しなかった場合や、遮蔽の内部に²³²Thをγ線源として置いた場合に比べて低くなることを確かめ、生物が現在の自然放射線に適応していることをあらためて証明した。

Liuら⁽¹⁴⁾は、低線量のX線でマウスを1回ないし連続照射すると、免疫機能が昇進されることを見た。また、Bloomら⁽⁷⁾は、米国に在住する原爆被爆者の免疫機能を調べ、線量がゼロの被曝者より、0.50 Gy(50 rad)以下の被曝をした人達の方で高いことを見出した。

Congdon⁽¹⁵⁾は、Lorenz⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾の観察した低線量率で長期間照射されたマウスの寿命が非照射の対照群より延長した現象など、1940年代後半から行われてきた動物実験についてレビューした。しかし、当時のマウスの飼育環境や対照群の死因がほとんど細菌感染であったことなどを勘案すると、Lorenzの観察した現象は、照射により細菌感染に対する抵抗性を獲得した結果であろうと推測されている。

線エネルギー付与(Linear Energy Transfer; LET)の大きなα線に関する報告には、ホルミシス効果は生じないとするものと、生じるとするものがあった。

Maysらの報告では、α核種をビーグル犬に取り込ませると、核種によって線量効果反応の形に幾分の違いは見られるものの、骨肉腫の増加が認められた。また、寿命は対照の97%で差がなかったことから、α線によってはホルミシス効果は生じないとした⁽¹⁸⁾。こ

れに対して、米国エネルギー省(DOE)管轄下にあるPu工場の作業員についての健康調査では、これらの作業員の肺癌による死亡率は米国の平均値に比べて著しく低いことがわかった⁽¹⁹⁾。また、環境中のRn濃度と肺癌の発生頻度との関係を統計的に解析したCohen⁽²⁰⁾は、Rn濃度が高い場所で、むしろ肺癌の頻度が低い傾向があり、両者の間に直線的な線量効果関係は認められないとした。

Puを吸入させたラットの肺癌発生を調べたSandersら⁽²¹⁾の実験でも、発癌の相対リスクには実質的な閾値が認められている。

米国の放射線科医師⁽²²⁾に対する疫学的調査についての報告では、ホルミシスの存在は認められていない。しかし、インドでなされた環境放射線と発癌のリスクに関する調査では、高バックグラウンド地域住民の方が癌による死亡率は低いと報告された⁽²³⁾。

植物のホルミシス効果については、多くの種で種子に対する照射が初期生育に効果の認められることが報告された⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾。しかし、種間、品種間の差が大きいこと、生育の初期に見られた効果も、圃場での栽培期間中に環境の影響を受けるため、差が小さくなる傾向も認められた⁽²⁴⁾。

(2) Frankfurt会議

Feinendegenらは、Oakland会議において、細胞膜に結合して存在するDNA合成系の酵素、チミジンキナーゼ(TK)の放射線感受性が極めて高く、照射の4h後に活性が最少となり、以後回復する一過性の変化を示すことを報告した⁽²⁶⁾が、今回は、照射間隔を変えて2回照射を行うことにより、細胞が低線量照射により一時的に放射線に対する耐性を持つようになることを巧みに証明した⁽²⁷⁾。

放射線によるリンパ球染色体の損傷修復に関する適応反応は、ヒト^{(28)~(31)}、培養細胞⁽³²⁾について認められている。Wolffは、これらの例を踏まえ、ヒトのリンパ球を低線量で照射しておく、事後の高線量照射、あるいはブレオマイシン・マイトマイシンCなどの薬剤による染色体異常生成に対して抵抗性となることを報告し、低線量照射により損傷の適応修復が誘導されることを示唆した⁽³³⁾。

なお、この適応反応は前照射の線量と線量率の双方に依存しており、あまり線量率が低すぎても効果のないことが、最近報告されている⁽³⁴⁾。

JamesとMakinodanは、低線量率の連続照射により免疫機能の昂進が見られ、免疫不全系統のマウスを用いた場合に、この効果は顕著であると報告した⁽³⁵⁾。

また、TokudaとAndersonは、固形腫瘍を同系マウスに移植する際、事前にマウスを照射しておく、癌の増殖が遅くなることを見た⁽³⁶⁾が、リンパ腫瘍の移植では、低線量照射は逆に移植腫瘍の増殖を促進することが指摘され⁽³⁷⁾、腫瘍免疫の複雑さが示された。

東北大の宮本と坂本も、皮膚癌の移植実験において、0.1 Gy(10 rad)の全身照射により、半数のマウスに癌を生じさせるに必要な放射線量(TD 50)が2~3倍になることを見ており⁽³⁸⁾、腫瘍の種類によっては低線量の全身照射が効果をもつものと思われる。なお、坂本らは、癌の再発防止や進行の抑制を目指して、低線量全身照射の臨床医療への適用を開始している。

リンパ細胞は、機能の異なった複数の細胞群に分かれ、これらの細胞相互の協同作用により免疫機構が成り立っている。Stewart⁽³⁹⁾は、Pu工場の作業員では、リンパ細胞中のT細胞のヘルパー細胞とサプレッサー細胞の存在比が通常と異なり、ヘルパー細胞が多くなる傾向があると報告した。このようなT細胞の構成の変化と免疫系の活性との関係については、今後の研究の発展が期待される。

(3) 疫学調査などの動向

(1) 原爆生残者の癌発生率

広島・長崎の被爆者の癌発生率も継続的に調べられている。1958~82年の間の原爆被爆者の白血病を含む癌死亡率は、推定被曝線量が0.005~0.05 Gy(0.5~5 rad)の人々では、調査人数と年齢を補正して求めた予想値より小さいとする報告がある⁽⁴⁰⁾。

新線量推定法(DS 86)に基づいて推定された被曝線量と癌死亡率の関係が、清水らにより発表されている⁽⁴¹⁾が、広島・長崎両市とも、推定線量が0.1 Gy(10 rad)程度の被爆者の白血病による死亡率は対照群に比べて低くなっている。近藤は、この点に注目し、癌死亡率が最低に達した後、線量の増加とともに増加し、自然の癌死亡率と等しくなる点の線量を「ホルミシス様臨界値」と定義して(第2図)、清水らのデータを整理したところ、白血病について、広島では0.12 Gy、長崎では0.36 Gyにホルミシス様臨界値が存在することを認めた⁽⁴²⁾。

(2) 高自然放射線地域住民の疫学調査

中国の広東省には、自然放射線が平均より3倍高い地域があり、その地域住民の健康調査を10数年続けた結果が報告され、注目されている。これによれば、高バックグラウンド地域住民の総死亡率は通常環境の対照住民とはほとんど変わらないが、癌による死亡率は、子宮頸部癌を除いて、高自然放射線地域住民の方が有

第2図 白血病年間死亡率対原爆放射線被曝曲線を例にして、ホルミシス様臨界線量(D_{horm} 値)を求める説明図⁽⁴²⁾

意に低いという⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾。

しかし、疫学調査において注意すべきことは、生活環境、生活レベル、環境汚染などの条件をどのように考慮するかということであり、これらの影響を分離して評価することができなければ、疫学調査で低線量放射線のプラス効果を明確に示すことは難しい。

以上に放射線ホルミシス研究をめぐる内外の研究動向を概観したが、わが国でも、日本放射線影響学会を中心にホルミシス研究会ができるなど、この問題に対する関心が急速に高まって来ている。

Ⅱ. 電中研の研究活動

当研究所では、動植物に対するホルミシス現象の存在を確認し、その発現のメカニズムを解明するための実験的研究、疫学調査などに取り組んでいる。まさに着手したばかりで、確固とした歩みをしているとはいえないが、以下に当研究所の研究状況を紹介します、合わせて関連する外部の研究についても言及する。

1. 動物実験

低線量放射線の生体に対する作用は、照射に伴い細胞内外に生じた活性酸素などの遊離基(ラジカル)による間接作用が主体と考え、動物実験では、生じたラジカルの毒性を弱める反応、ラジカルの影響を受け易い

分子・細胞レベルの反応、総合した影響を受ける個体レベルの反応について、パラメータサーベイを主に実験を進めている。

(1) スーパーオキシドディスムターゼ

(Superoxidedismutase; SOD)活性

生体内に生じた活性酸素(O_2^- , H_2O_2 , $\cdot OH$ など)は細胞膜やその他の細胞成分を酸化し、細胞に障害をもたらす。この有害な活性酸素に対する抗酸化作用を持つ蛋白としてカタラーゼ、メタロチオネイン、SODなどがある。横田らはカタラーゼを誘導した大腸菌⁽⁴⁵⁾、松原らはメタロチオネインを誘導したマウス⁽⁴⁶⁾において、放射線抵抗性が見られることを報告している。

低線量照射により、 O_2^- の毒性を弱めるSODの活性レベルにどのような変化が見られるか、またカタラーゼなどが誘導された場合と同様な放射線抵抗性が見られるかどうかを調べるため、ラットをX線で全身照射し、脾臓、胸腺、骨髄、脳および肝臓について分析した。

臓器ごとに感受性は異なったが、第3図に示すように、低線量域においてSOD活性の昂進を見出した。また、これに関連して過酸化脂質の減少の傾向も認められた^{(47)~(50)}。

(2) チミジンキナーゼ(Thymidinekinase; TK)

活性

第Ⅱ-2(2)項で述べたように、FeinendegenらはTK活性の変化を指標として低線量照射により一時的な耐性誘導⁽²⁷⁾が起こることを見ているが、これが骨髄以外の細胞増殖系組織でも見られるかどうかを調べるため、マウスに低線量放射線を照射し、TK活性が最少となる照射の4h後に2回目の照射を行い、各臓器の反応動態を1回照射の場合と比較した。

小腸では、0.1 Gyの1回照射と、0.1 Gy照射の4h前に0.05 Gyを照射(0.05 Gy+0.1 Gy照射)しておいた場合とで、反応に大きな差は認められなかったが、脾臓・胸腺では、0.1 Gyだけの照射に比べて、あらかじめ0.05 Gyで照射しておいた方が、減少の程度が小さくなった(第4図)。これは、脾臓・胸腺では一時的に耐性が誘導されたことを意味し、Feinendegenらの結果を一部、生体内反応系で裏付けたものと解される⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾。

(3) 免疫活性

免疫機能におけるホルミシス現象を確認するため、ラットを用い、リンパ細胞を人為的に幼若化させた場合に見られる増殖応答について、X線照射の4h後に、照射線量と免疫組織の違いによる応答性の差を調べた。

第 3 図 全身照射の線量と脾臓のSOD活性との関係

TK活性は ^{125}I で標識したIUdR(Iodo-deoxyuridine)の取り込み量で表わした。

▲.....▲ 0.1 Gy 1回照射, ●——● (0.05 Gy + 0.1 Gy) 照射

第 4 図 TK活性とX線1回照射および2回照射の影響

第5図に示すように、0.05 Gy (5 rad)の照射により、脾臓では、リンパ細胞の分裂・増殖を誘導する試薬、ConA(コンカナバリンA)に対する応答が昂進し、免疫機能の活性が上昇する傾向が見られた。しかし、骨髓と胸腺では対照との間に差が認められなかった。また、脾細胞のConAに対する応答の変化は、照射4h後をピークとする一過性の反応であることが明らかとなった^{(58)~(59)}。なお、マウスでも0.025 Gy (2.5 rad)の線量域で同様な反応が見られた⁽⁵⁷⁾。

(4) 放射線抵抗性の誘導

あらかじめ放射線で照射された生物が、事後の放射線照射に対して抵抗性となるという例は知られていた^{(58)~(60)}が、事前の照射により放射線感受性の個体が淘汰された結果ではないかとの反論があった⁽⁶¹⁾。Maisonらがラットを幼若期に0.05 Gy (5 rad)で照射し、約2ヵ月後に半数致死線量程度の線量で再照射した実験では、生残率は非照射の対照群よりも高くなったが、有意差は得られなかった⁽⁶²⁾。

第5図 全身照射の線量と脾細胞のConAに対する応答との関係

低線量照射による放射線抵抗性の誘導が個体レベルでもあるかどうかを確認するため、マウスを0.025～0.15 Gy(2.5～15 rad)のX線で全身照射し、その後2ヵ月間飼育した時点で7.75 Gy(775 rad)を照射して、30日後生存率を比較した。生存率は前照射の線量を0.05～0.1 Gy(5～10 rad)とした場合に、前照射を行わなかった対照群より有意に高くなり(第6図)、低線量の前照射による放射線抵抗性の誘導という現象には再現性のあることが確かめられた⁽⁶³⁾⁽⁶⁴⁾。

2. 疫学調査

低線量放射線が人体に及ぼす影響の解明を図るため、長崎大学との共同研究により、被災者の被爆情報、病理剖検情報などにに基づき、比較的被曝線量の少ない人々の発癌率・死亡率を主対象とした疫学調査を進めている。

第7図は、1970～88年における被爆者の癌以外の死亡者数と被曝線量の関係を図示したものである。爆心から3 km以遠で被爆した被災者を対照群とし、これに対する相対的な危険率として示してあるが、男性の0.5～0.99 Gy(50～99 rad)の線量域において、相対危険率は1より小さく、この差は危険率10%で有意である⁽⁶⁵⁾。被爆者を対象に行われている定期健康診断の受診率には、対照群との間に差が見られないことから、健康診断の効果以外の因子の寄与が考えられ、興味深い。

3. 植物実験

植物に対する放射線の照射効果については数多くの報告があり⁽⁴⁾⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾、一般的にいえば、劣悪な生育条

第6図 低線量予照射による放射線抵抗性の誘導

件下で栽培された場合に照射効果の認められる例が多いように思われる。しかし、再現性に問題のあることも指摘されており⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾⁽⁶⁶⁾、照射線量・線量率の違い、実験に用いた種・品種の違い、照射対象が種子か、作物

第 7 図 長崎市における原爆被爆者の癌以外死亡者数と被曝線量との関係

体かの違いに加えて、栽培時の環境条件の違いも原因として考えられている。

そこで、植物種子に対する放射線照射がホルミシス効果を生じる条件を明確にするため、5~30 Gy 照射した野菜種子について、発芽試験法に則り、温度・水分

などの環境条件を一定にして発芽試験を行なった。

ホウレンソウにおいては、照射直後の発芽率には差が認められなかったが、照射種子を約1年間、室温(20~25℃)で保存した場合、一部の品種で発芽率の低下は認められたものの、無照射で保存した種子に比べ

第 8 図 ホウレンソウの発芽に及ぼす照射の効果(1988年8月に照射し、約1年間室温で貯蔵した種子を用いた)

高い発芽率が得られた(第8図)。

ハウレンソウ・インゲンの発芽は発芽床の水分条件に左右され、水分量が適湿より多いと発芽が抑制される。しかし、過湿条件下で発芽させた場合、照射種子は無照射で保存した種子に比べ発芽率が高く、種子照射による発芽促進効果は、発芽が抑制される悪い環境条件下で認められる傾向にあった⁽⁶⁷⁾。

なお、発芽後の生育を観察した結果、奇形は認められなかった。

Ⅳ. 今後の課題

ホルミシス研究として今後検討すべき課題としては、染色体損傷など、分子レベルの損傷に対する修復機構の適応反応、細胞レベルの損傷に対する修復機構の適応反応、および免疫機能の昂進とこれによる発癌抑制が考えられる。

また、低線量照射による酵素活性の作用として物質代謝促進の可能性があるが、これが放射線による加令現象とどのように関係するかも興味のあるところである。

放射線による刺激だけが特別な作用を持つわけではなく、放射線以外の刺激、例えば、各種のストレス要因、微量な重金属などによるホルミシス効果も、比較研究する必要があるものと思われる。

刺激に対する生物の応答には、必ずプラスとマイナスの2面がある。したがって、プラス・マイナス両面からの追求によりホルミシス効果の総合的な評価が可能となるだろう。

ホルミシス研究を進める上で最も肝心なことは、ヒトについて、どのような方法によりホルミシス効果を確認し、その機構を解明するかということである。

放射線に対するヒトの反応はマウスなどの実験動物とは必ずしも同一ではないので、ヒトについてのデータを得るには疫学調査が必要不可欠である。一方、疫学調査には比較すべき集団間の条件を同一に整えるのが困難という欠点があり、その結果を検証するには動物実験が必要となる。

このためには、動物実験のあり方および疫学調査のあり方を含めた実験方法の標準化が重要であり、各研究者の間で早急な検討が必要といえよう。

植物においては、どのような条件下でホルミシス効果が発現するか、また再現性が認められるかの確認が肝要である。このため、ホルミシス効果の発現する条件の調査とその理論的裏付けのために機構解明を進めることが課題となろう。

Ⅴ. 結 語

放射線による発癌などのリスクを評価するに当たって、ICRPは線量効果関係として、0.5 Sv(50 rem)以上のデータから、データのほとんどない0~0.5 Sv(0~50 rem)の線量域でも直線関係が成り立つとみなしている。

しかし、低線量放射線に対する生物の反応に係わる研究の進展に応じて、この分野には極めて興味深い研究課題の含まれていることが明らかとなってきた。特に免疫機能および癌抑制に関する照射効果(または刺激的影響)については、国内外において広く研究が進められている。

さらに、遺伝的影響についても広島・長崎の原爆被災者では明らかな悪影響が認められないことは、興味深い内容が含まれているといえる。

このような観点から今後、低線量放射線被曝と生物影響に関する研究分野に積極的に取り組む必要があると思われる。

ホルミシス研究を進める上で、次の方々より実験のご指導を頂いた。

近畿大学原子力研究所 近藤宗平教授、岡山大学薬学部 山本 格教授、岡山大学医学部 森 昭胤教授、長崎大学医学部 奥村 寛教授、(財)体質研究会 武田篤彦博士、大阪府立大学 虎谷博一教授、米澤司郎助教授、都立アイソトープ総合研究所 須田広勝主任研究員。

また、研究計画の立案、結果の評価などにおいて、以下の方々よりご指導を頂いた。

国立がんセンター研究所 田ノ岡 宏放射線研究部長、岡田重文東京大学名誉教授、岡山大学医学部 古元嘉昭教授、東北大学医学部 坂本澄彦教授、菅原 努京都大学名誉教授、東京大学医学部 松原純子助教授、放射線医学総合研究所生物研究部生物第1研究室 山田 武室長、横浜市立大学医学部 渡辺正己助教授。

誌面を借りて、深く感謝の意を表します。

— 参考文献 —

- (1) ICRP Publ. 2, (1959).
- (2) ICRP Publ. 10, (1968).
- (3) ICRP Publ. 26, (1977).
- (4) LUCKEY, T.D.: "Hormesis with Ionizing Radiation", (1980), CRC Press, Boca Raton, FL.
- (5) idem: Health Phys., 43, 771 (1982).
- (6) BLOOM, E.T., et al.: Radiat. Res., 96, 399 (1983).
- (7) BLOOM, E.T., et al.: Health Phys., 52, 585 (1987).
- (8) 近藤宗平: アイソトープニュース, 1988年3月号, 2.
- (9) 三根真理子, 他: 公衆衛生誌, 28, 33 (1987).

- (10) PLANEL, H., SOLEILHAVOUP, J.P., TIXADOR, R.: *Compt.-Rend. Acad. Sci.*, **260**, 3770 (1965).
- (11) PLANEL, H., et al.: *Biological and Environmental Effects of Low Level Radiation*, Vol. 1, 127 (1976), IAEA, Vienna.
- (12) PLANEL, H., et al.: *Life Sciences and Space Research*, **XVI**, 139 (1979).
- (13) PLANEL, H., et al.: *Health Phys.*, **52**, 571 (1987).
- (14) LIU, S.Z., et al.: *ibid.*, **52**, 579.
- (15) CONGDON, C.C.: *ibid.*, **52**, 593.
- (16) LORENZ, E.: *Am. J. Roentgenol. Radium Ther. Nucl. Med.*, **63**, 176 (1950).
- (17) LORENZ, E., et al.: *"Biological Effects of External X and Gamma Radiation"*, Part 1, (ZIRKLE, R.E. ed.), 24 (1954), McGraw-Hill, New York.
- (18) MAYS, C.W., et al.: *Health Phys.*, **52**, 617 (1987).
- (19) TIETJEN, G.R.: *ibid.*, **52**, 625.
- (20) COHEN, B.L.: *ibid.*, **52**, 629.
- (21) SANDERS, C.L., McDONALD, K.E., MAHAFFEY, J.A.: *ibid.*, **55**, 455 (1988).
- (22) MATANOSKI, G.M., STERNBERG, A., ELLIOTT, E. A.: *ibid.*, **52**, 637 (1987).
- (23) NAMBI, K.S.V., SOMAN, S.D.: *ibid.*, **52**, 653.
- (24) SHEPPARD, S.C., REGITNIG, P.J.: *ibid.*, **52**, 599.
- (25) MILLER, M.W., MILLER, W.M.: *ibid.*, **52**, 607.
- (26) FEINENDEGEN, L.E., et al.: *ibid.*, **52**, 663.
- (27) FEINENDEGEN, L.E., et al.: *Int. J. Radiat. Biol.*, **53**, 23 (1988).
- (28) OLIVIERI, G., BODYCOTE, J., WOLFF, S.: *Science*, **223**, 594 (1984).
- (29) WIENCKE, J.K., et al.: *Mutagenesis*, **1**, 375 (1986).
- (30) SHADLEY, J.D., WOLFF, S.: *ibid.*, **2**, 95 (1987).
- (31) SHADLEY, J.D., AFZAL, V., WOLFF, S.: *Radiat. Res.*, **111**, 511 (1987).
- (32) IKUSHIMA, T.: *Mutat. Res.*, **190**, 131 (1987).
- (33) WOLFF, S., et al.: *Int. J. Radiat. Biol.*, **53**, 39 (1988).
- (34) SHADLEY, J.D., WIENCKE, J.K.: *ibid.*, **56**, 107 (1989).
- (35) JAMES, S.J., MAKINODAN, T.: *ibid.*, **53**, 137 (1988).
- (36) ANDERSON, R.E., WILLIAMS, W.L., TOKUDA, S.: *ibid.*, **53**, 103.
- (37) GERBER, M., DUBOIS, J.B.: Abstracts of Workshop on "Low Dose Radiation and Immune System", Frankfurt, 5~8 May, 1987.
- (38) 宮本美弥子, 坂本澄彦: 癌の臨床, **33**, 1211 (1987).
- (39) STEWART, C.C.: 文 献 訪.
- (40) FREMLIN, J.H.: *Atom*, **390**, 4 (1989).
- (41) 清水由起子, 他: 放射線影響研業績報告, TR 12-87, 広島, (1987).
- (42) 近藤宗平: 放射線生物研究, **23**, 198 (1988).
- (43) High Background Radiat. Res. Group, China: *Science*, **209**, 877 (1980).
- (44) WEI, L., et al.: *J. Radiat. Res.*, **31**, 119 (1990).
- (45) YOKOTA, R., et al.: *ibid.*, **29**, 41 (1988).
- (46) MATSUBARA, J., TAJIMA, Y.: *ibid.*, **29**, 45.
- (47) 山岡聖典, 他: 電中研報, T89002, (1989).
- (48) YAMAOKA, K., et al.: *J. Radiat. Res.*, **30**, 85 (1989).
- (49) YAMAOKA, K., EDAMATSU, R., MORI, A.: *ibid.*, **31**, 67 (1990).
- (50) 山岡聖典, 他: 電中研報, T89063, (1990).
- (51) KODAMA, S., et al.: *J. Radiat. Res.*, **30**, 85 (1989).
- (52) KODAMA, S., et al.: *ibid.*, **31**, 67 (1990).
- (53) ISHII, K., et al.: *J. Radiat. Res.*, **30**, 86 (1989).
- (54) 石井敬一郎, 武藤徳男, 山本 格: 電中研報, T88067, (1989).
- (55) ISHII, K., et al.: *J. Radiat. Res.*, **31**, 66 (1989).
- (56) 石井敬一郎, 武藤徳男, 山本 格: 医学放射線誌, 投稿中.
- (57) 同 上: 電中研報, T89044, (1990).
- (58) BETZ, H.: *C.R. Soc. Biol.*, **144**, 1439 (1950).
- (59) CRONKAITE, E.P., et al.: *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, **73**, 184 (1950).
- (60) DACQUISTO, M.: *Radiat. Res.*, **10**, 118 (1959).
- (61) BACQ, Z.M., ALEXANDER, P.: *"Fundamentals of Radiology"*, (Revised 2nd ed.), 389 (1966), Pergamon Press, Oxford.
- (62) MAISIN, J., et al.: *"Immediate and Low Level Effects of Ionizing Radiations"*, (BUZZATI-TRAVERSO, A.A., ed.), 183 (1960), Taylor & Francis, London.
- (63) YONEZAWA, M., TAKEDA, A., MISONOO, J.: *J. Radiat. Res.*, **31**, 65 (1990).
- (64) *idem*: *ibid.*, 印刷中.
- (65) 三根真理子, 他: 放射線影響学会第32回大会講演要旨集, 196 (1989).
- (66) WOLFF, S.: *Science*, **245**, 575 (1989).
- (67) 菅沼浩敏, 御園生 淳, 重光 司: 未発表データ.

HPI 技術セミナー

◇ 圧力技術の現状と将来 ◇

主 催 日本高圧力技術協会, 協 賛 本会はか13学協会
 会 期 9月4日(火)~6日(木)
 会 場 神田・学生会館201号室
 本セミナーは、圧力技術を広く高圧工学・技術に関係する
 研究者、技術者に周知する目的で企画しました。
 参加申込 所定申込書により8月17日までに下記へ。
 参加費 協賛会員 40,000円 (定員80名)
 問合せ・申込先 (〒101) 東京都千代田区神田佐久間町1-11
 日本高圧力技術協会
 (03-255-3486, FAX 03-255-3488)

日本原子力文化振興財団発行

○アトム博士のマンガ講義○

監修 住田健二(阪大), 漫画 松尾龍之助, はらこ つとむ
 新書判, 220p, 1990年3月.

内容 第1章 電気とエネルギー, 第2章 原子力と放射線,
 第3章 原子力発電のしくみ, 第4章 私たちの社会
 と原子力

○放射線の世界○

—放射線ビジュアル読本—

B5判, 64p, 1990年3月.

希望者は、日本原子力文化振興財団(03-504-1381)へ。