

現代化学 2011年4月号 特別付録

放射線の人体に対する影響

杉 浦 紳 之

すぎうら・のぶゆき

近畿大学原子力研究所教授、医学博士。
専門は放射線防御、放射線生物。

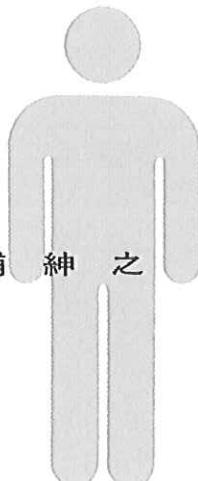
本記事は、現代化学 1999年12月号に掲載したものです。
10年以上前に書かれた内容であることを念頭に置いてお読みください。
また、東海村のウラン燃料加工施設で起こった臨界事故と福島第一原子力
発電所で現在起こっている状況では、事故の種類が異なる点にご留意下さい。

東京化学同人



放射線の人体に対する影響

杉浦紳之



放射線と一口にいっても、 α 線、 β 線、 γ 線、中性子線とさまざまである。これらは、人体にどのような影響を及ぼすのだろうか。放射線の種類、線量などの違いによる人体への影響をまとめてみる。

記事の再掲載にあたって

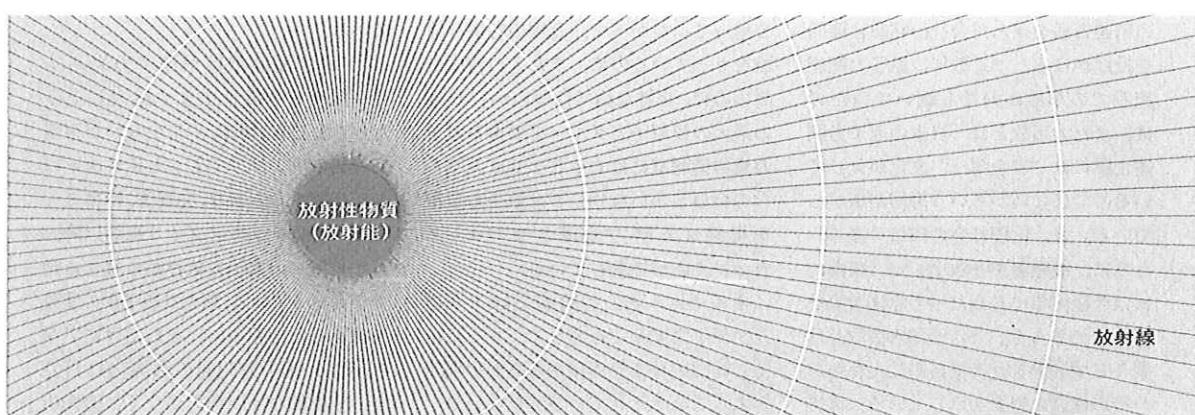
2011年3月11日14時46分ごろ、国内観測史上最大のM9.0の地震が東北地方太平洋沖で発生した。津波による甚大な被害に加え、福島第一原子力発電所の事故に伴う放射性物質の漏えい拡大が懸念されている。放射線被ばくした際の人体影響を考える場合、1) 被ばくした放射線の量(線量)と、2) 被ばくの形式に注目することが重要である。これらを考慮すれば、高線量放射線被ばく者とそれ以外の被ばく者では被ばくした線量の程度がまったく違うので考慮すべき影響が異なることや、住民に対する措置がどのような被ばくを防止するためかを理解できる。小誌では、1999年に東海村のウラン燃料加工施設で起

きた臨界事故の際に以下の記事を掲載した。今回とは事故の状況が異なるものの、被ばくに関する基本的な知識は同様に役立つと考え、著者の許可を得てここに再掲載する。

注：以下の文章で「今回の事故」とあるのは、1999年に東海村で起こった臨界事故を指す。
(現代化学編集グループ)

被ばくの形式： 体外被ばくと体内被ばく

被ばくの形式を考える場合、放射線と放射能の違いを区別する必要がある。放射線とは、運動エネルギーをもった素粒子(あるいはその複合体)をいい、 α 線、 β 線、 γ 線、中性子線などがその例である。厳密には放射線を放出する能力を放射能といい、放射能をもつ物質を放射性物質と呼ぶが、慣用的に放射能を放射性物質の意味に用いる場合が多い。電球を放射能、電球からの光を放射線とするたとえがよく用いられる(図1参照)。



放射線を放出する能力を放射能、放射能をもつ物質を放射性物質と呼ぶ。放射線を浴びることを放射線被ばくという。

図1 放射能と放射線

図2に示すように、体外に存在する放射能からの放射線被ばくを体外被ばく（外部被ばく）といい、体内に取込まれた放射能からの放射線を被ばくすることを体内被ばく（内部被ばく）という（被ばくは放射線を浴びることを示すので、吸入や飲食によって放射能を体内に摂取する過程は体内被ばくとは呼ばない）。今回事故が起きたウラン燃料加工施設からは中性子線および γ 線の放射線が出ていたが、距離による減衰や空気などによる遮へいのために事故現場から離れるほど弱くなるので、体外被ばくを避けるための避難は半径350m圏内とされた。一方、放射能が施設から放出されれば風に乗って遠距離まで運ばれ、体内摂取、体内被ばくを起こすので、屋内退避勧告が出された範囲は半径10km圏内と広かったのである。核分裂生成物であるキセノン(Xe)、クリプトン(Kr)の希ガスや揮発性のヨウ素などの放射能が施設から環境に放出されたが、その量が少ないと判断されたため、屋内退避勧告は比較的早期に解除された。

被ばく線量が同じであれば、被ばくの形式によらず現れる影響は基本的には同じである。しかし、体内被ばくでは、非常に大量の放射能を摂取する状況は考えにくく、急性影響が現れるほどの大線量を被ばくすることはまずないものと考えられる。

体内被ばくで注目すべきことは、放射性物質の種類により蓄積・集積しやすい臓器があることであり、これを臓器親和性という。たとえば、ヨウ素(I)は甲状腺に、ストロンチウム(Sr)は骨に、ブルトニウム(Pu)は骨および肝臓に臓器親和性を示す。原子力防災計画において事故時の安定ヨウ素剤(KI)の投与が検討されているが、これは、放射能のない安定ヨウ素からなるKIを服用することにより、放射性ヨウ素が甲状腺に集まる前に甲状腺を安定ヨウ素で一杯にし、もはや放射性ヨウ素が

入り込む余地をないようにしようとするものである。

体内摂取の経路として、1) 呼吸による吸入、2) 飲食による経口摂取、および3) 創傷面からの経皮摂取の3経路が通常あげられる。今回の事故では中性子線の体外被ばく線量が大きかったため、体内的ナトリウム(^{23}Na 、安定同位体)が放射化して有意な量の放射性 ^{24}Na が体内に生成された。この ^{24}Na による体内被ばく線量は中性子線の体外被ばく線量に比べて小さく、人体への影響の面ではほとんど問題とならないが、 ^{24}Na の体内量を全身カウンターで計測することにより、中性子線の体外被ばくの線量評価に役立てられた。

放射線影響の分類

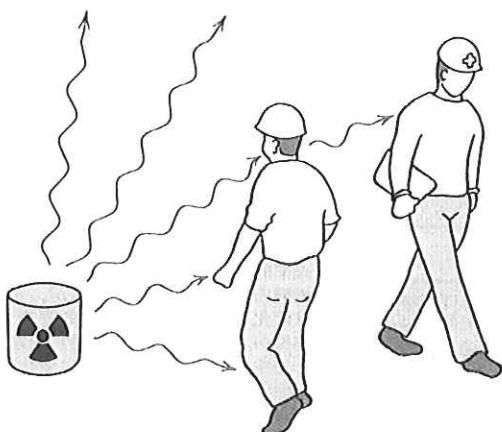
人が放射線に被ばくした際の影響は、被ばく線量と影響の発生頻度との関係により、確率的影響と確定的影響の二つに分類される。この二つの影響のおもな違いは、1) しきい線量の有無、2) 線量と影響の重篤度（症状の重さ）の関係である。

しきい線量があるのが確定的影響である。しきい線量とは影響が現れるための最低の線量をいう。確率的影響には、しきい線量はないものと仮定されている。

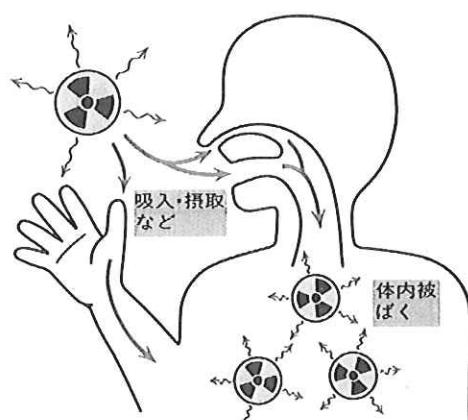
しきい線量を超えて放射線被ばくを受けると確定的影響の重篤度は増大する。確定的影響は、臓器や組織を構成する細胞の被ばくによる細胞死に基づく影響であり、臓器や組織で一定の割合の細胞に細胞死が起きたところで影響が現れ、さらに大きな線量の放射線を被ばくすると、細胞死を起こす細胞数が増加して症状が悪化する。

確率的影響は突然変異に基づく影響である。線量が増加すると突然変異が起こる確率が増加し、確率的影響の発生頻度が増加する。影響の重篤度は線量の大きさによらず一定である。突

体外被ばく



体内被ばく



吸入や摂取などにより体内に取込まれた放射能による被ばくを体内被ばくと呼ぶ。

図2 体外被ばくと体内被ばくの違い

放射線影響を表す単位

吸収線量：グレイ（Gy） 物質の単位質量当たりに与えられたエネルギーを表す。1 Gy は、物質 1 kg 当たり 1 J が吸収された場合に相当する。

等価線量、実効線量：シーベルト（Sv） 同じ吸収線量の被ばくがあった場合でも、放射線の種類によって放射線影響の程度は異なる。たとえば、 β 線、 γ 線に比べて α 線は 20 倍、中性子線はエネルギーにより 5~20 倍影響は大きい。この放射線の種類による違いを考慮に入れた線量概念が等価線量である。

同じ等価線量を受けても、人体の各臓器のがんになりやすさは異なる（表 4 参照）。このがんのなりやすさの違いを考慮に入れた線量概念が実効線量である。

然変異が体細胞に起きた場合にはがんが発生し、生殖細胞に起きた場合には遺伝的影響が発生する可能性がある。これらがんおよび遺伝的影響という確率的影響を除いたすべての影響が確定的影響である。

表 1 および図 3 に上記の関係をまとめて示す。結論的にいようと、被ばく線量が大きくしきい線量を超えるような場合には確定的影響が問題となり、低いレベルの被ばくでは確率的影響の発生頻度を考慮する必要がある。国際放射線防護委員会（ICRP）によれば、放射線防護の目標は、確定的影響の発生を防止し、確率的影響の誘発を減らすために合理的な手段を確実に取ることと述べられている。

確定的影響：急性全身被ばくの場合

全身あるいは身体のかなり広い範囲に、大量の放射線を短時間に被ばくすると、被ばくした線量の大きさに応じた臓器の影

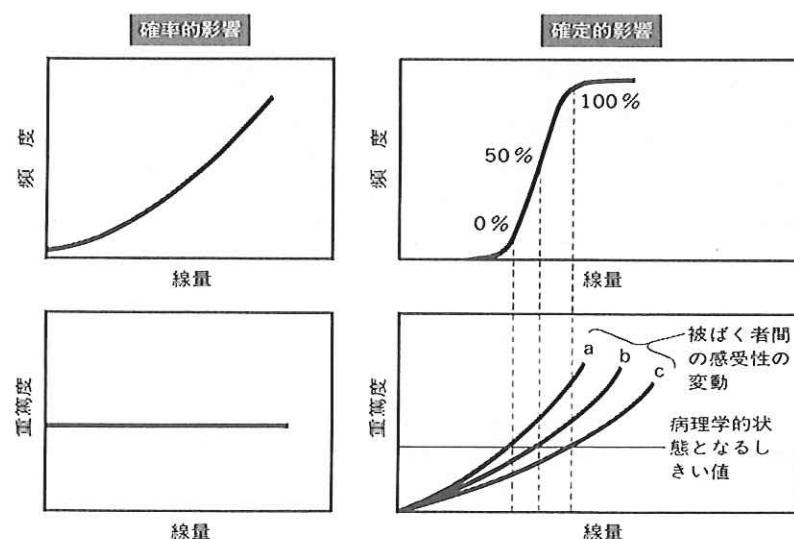
表 1 確率的影響と確定的影響の分類と特徴

種類	しきい線量	線量の増加により変化するもの	例
確率的影響	存在しない	発生頻度	がん、遺伝的影響
確定的影響	存在する	症状の重篤度	白内障、脱毛、不妊など確率的影響以外のすべての影響

響による全身症状がみられる。線量が大きくなるのに従い、骨髄障害、小腸障害、中枢神経障害がみられる。この一連の症状・症候群を急性放射線症という。線量の大きさに応じて障害の現れる臓器が変わるのは各臓器の放射線感受性の違いであり、症状が現れるまでの期間（潜伏期）は線量が大きいほど一般に短い。

1) 骨髄障害 0.25~0.5 グレイ（Gy、囲み記事参照）の被ばくを受けると、リンパ球をはじめとした白血球数の減少が認められる。これ以下の線量では、一般に急性障害は起こらないとされている。

線量がさらに大きくなり 1 Gy 程度の被ばくを全身に受けると、10% 程度の人に吐き気、嘔吐などがみられる。同時に、食欲不振、全身倦怠感、めまいなどの症状も現れることから、放射線宿醉と呼ばれる（宿醉とは二日酔のことである）。1.5 Gy が死亡のしきい線量であり、白血球の減少による抵抗力の低下と血小板の減少による出血性症状の増大が死亡の原因である。したがって、治療には感染症対策のために無菌室に入れ、白血球、血小板の成分輸血や必要に応じて骨髄移植が行われる。死亡に至る場合は造血臓器の機能不全が主であるため、骨髄死（あるいは造血死）と呼ばれる。何の治療も施されない場合、被ばくした人の半数が死亡する半致死線量（LD₅₀）は 3~5 Gy であ



確率的影響では、線量の増加に伴って影響の発生頻度は増加するが、重篤度は変化しない。一方、確定的影響では、線量がある値（しきい線量）を超えると発生頻度、重篤度が急激に変化する。確定的影響に対する放射線感受性には個人差があるが、破線はその分布を知る目安になる。

図 3 確率的影響と確定的影響の分類と特徴

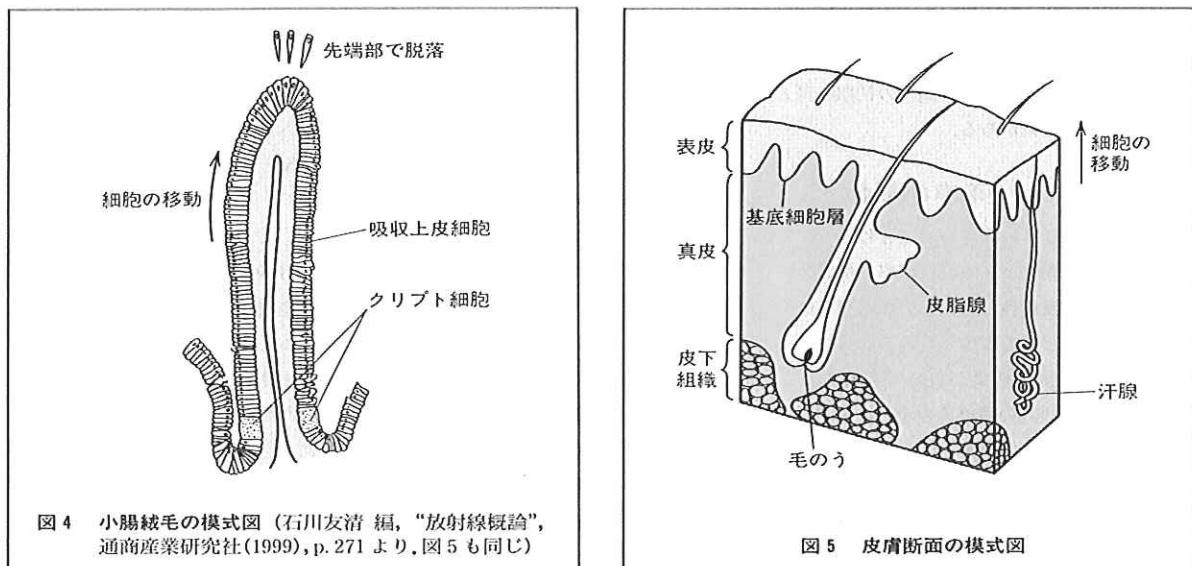


図4 小腸絨毛の模式図（石川友清 編，“放射線概論”，通商産業研究社(1999), p. 271より、図5も同じ）

図5 皮膚断面の模式図

り、被ばくした人のほぼ全員が死亡する全致死線量 (LD_{100}) は 7~10 Gy といわれている。ヒトが骨髓死に至る期間は 60 日までとされている。

2) 小腸障害 さらに線量が大きい 5~15 Gy の被ばく線量域では、小腸の症状が主となる。図4に示すように、小腸の粘膜には絨毛があり、その付け根にクリプト細胞と呼ばれる分裂を盛んに行う細胞がある。クリプト細胞から分化する細胞は吸収上皮細胞であり、順次先端方向へ押し上げられていき、先端部で寿命を全うし、脱落していく。小腸クリプト細胞の細胞死により吸収上皮細胞の供給が絶たれ、その結果として粘膜剥離が起こり、脱水症状、電解質平衡の失調、腸内細菌への感染が生じ、死亡に至る。消化管、とくに小腸の障害が原因で死亡するため、腸死と呼ばれる。この線量域では、骨髓障害の重篤度が増すほか、放射線肺臓炎により呼吸困難となる場合がある。治療は、感染症対策、電解質バランスの改善などの対症療法が主となるが、治療が困難となる場合が多い。平均生存期間は 10~20 日間である。

3) 中枢神経障害 15 Gy を超える高い線量の放射線を被ばくすると、神経系の損傷が現れはじめる。この場合でも神經

細胞の放射線感受性はきわめて低いため、神経細胞自体の細胞死は起こらず、血管系および細胞膜の損傷が主要な原因となる。全身けいれんの症状が特徴的で、ショックなどにより 1~5 日後に死亡する。中枢神経の障害を伴うため、中枢神経死と呼ばれる。

表2に低LET(線エネルギー付与)放射線の急性全身被ばくの場合の死亡に関する線量と生存期間を示す。

4) 皮膚障害 以上に述べた全身症状とは別に、皮膚も放射線感受性の高い組織であり、上記の線量域の被ばくがあれば皮膚の障害も無視できなくなる。皮膚は、図5に示すように表面から深部に向かって、表皮、真皮、皮下組織の順に配列している。表皮の最下層は基底細胞層といわれ、細胞分裂を盛んに行っている放射線感受性の高い部分である。基底細胞層は波打っているが、表面から平均 70 μm の深さにある。分裂した細胞は表面方向に押上げられ、順次、角質化し脱落している。基底細胞の被ばくは、皮膚紅斑や落屑(表皮の角質化したもののがはがれ落ちた状態)の原因となる。また、毛のうは真皮内にあり、細胞分裂を盛んに行い、毛の伸長のもとなっている。毛のうの放射線感受性は高く、放射線被ばくは脱毛の原因となる。

表2 低LET放射線の急性全身被ばくによる死亡に関する線量と生存期間

全身吸収線量(Gy)	死亡をもたらすおもな影響	被ばくから死亡までの期間(日)
3~5	骨髓の損傷 (LD_{50})	30~60
5~15	胃腸管および肺の損傷 ¹⁾	10~20
15 以上	神経系の損傷 ¹⁾	1~5

1) とくに高線量における血管系と細胞膜の損傷が重要である。

表3 皮膚の放射線影響としきい線量

線量	放射線影響
3 Gy 以上	脱毛
3~6 Gy	紅斑・色素沈着
7~8 Gy	水泡形成
10 Gy 以上	潰瘍形成
20 Gy 以上	難治性潰瘍(慢性化、皮膚がんへの移行)

表3に皮膚の放射線影響としきい線量を示す。被ばく線量が増すと、潜伏期が短くなり症状の重篤度が増す。紅斑（発赤）には、3 Gy くらいでみられる一過性の初期紅斑と、5 Gy 以上でみられる持続性の紅斑がある。

確率的影響

被ばく線量がしきい線量を超えてなければ確定的影響は発生せず、発生する可能性があるのは確率的影響のみである。表4に国際放射線防護委員会（ICRP）による確率的影響の発生頻度を示す。値は、主として広島と長崎の原爆被ばく者についての長年にわたる疫学調査結果から算定されている。1シーベルト（Sv、囲み記事参照）の被ばくの場合、全がんで5%，遺伝的影響で1%の発生頻度の増大ということになる。しかし、上述の通り、1 Sv という線量は相当に大きいものであり、たとえば、現行法令における放射線業務従事者の線量限度は1年間当たり50 mSv とされている。限度いっぱいに被ばくした場合、0.25% のがんの発生確率の上昇ということになる。放射線で誘発されるがんは特異的なものではなく、他の要因から発生したがんとは区別できないし、がんは日本人の死因の30%以上を占めている現状を考えると、放射線業務従事者ががんになったとしても放射線被ばくが原因でがんが発生したと特定することは一般に困難である。したがって、確率的影響については個人1人当たりのがんあるいは遺伝的影響の発生については通常議論せず、放

射線被ばくをする集団についての総線量を考え（集団線量という）、その集団の放射線被ばくの適否を考える。集団線量が大きく、確率的影響の発生が見込まれる場合はその放射線被ばくを伴う行為は許されないと、遮へいを施こし、被ばく線量を下げるための対策をとるなど、集団としての放射線被ばくの管理が行われる。

原爆被ばく者の疫学調査においてがんの発生率の上昇が統計学的に有意にみられるのは 200 mSv 以上の被ばく者群についてであり、また、最近の放射線生物学の研究では低線量放射線には刺激効果があり、人体にとってかえって有益なものである（ホルミシス効果）とする知見も出されている。低線量の放射線影響については厳密には未解明な部分もあり、上述した通り、低線量域における確率的影響にしきい線量がないとするのは、現段階での放射線防護上の仮定であることに留意し、その適用法についても注意する必要があろう。

遺伝的影響については、原爆被ばく者の疫学調査結果でも有意な発生頻度の上昇ではなく、ヒトについての遺伝的影響は確認されていない。しかし、ショウジョウバエ、マウスなどの実験結果では遺伝的影響があることが認められているので、ヒトに対しても何らかの影響があるものと考えられている。遺伝的影響は、生殖腺に被ばくを受けた人が子供をもうける場合にのみ考慮される。つまり、子供を産み終えた50歳の人が生殖腺に被ばくした場合や15歳の人が指に被ばくした場合などは遺伝的影響は議論されない。

表4 組織・臓器別の名目確率係数*

1シーベルト被ばくした場合のがん発生確率の増加率。全集団は一般公衆を指しており、すべての年齢群を考慮している。作業者は18歳～65歳の放射線作業者に対するものである。

組織・臓器	致死がんの確率 (10^{-2} Sv^{-1})	
	全集団	作業者
膀胱	0.30	0.24
骨 骼	0.50	0.40
骨表面	0.05	0.04
乳房	0.20	0.16
結腸	0.85	0.68
肝 臓	0.15	0.12
肺	0.85	0.68
食 道	0.30	0.24
卵 巢	0.10	0.08
皮 膚	0.02	0.02
胃	1.10	0.88
甲状腺	0.08	0.06
残りの臓器・組織	0.05	0.40
合 計	5.00	4.00
重篤な遺伝性障害の確率		
生殖腺	1.00	0.60

*この数値は、男女同数で幅広い年齢層の集団に関するものである。

おわりに

ここで述べたように、確かに放射線は人体にとって有害な影響を及ぼすものであるが、その影響を考える場合に最も重要な視点は線量の大きさと被ばく部位であると考えられる。線量の大きさによる影響の違いについては本文の中で述べたし、同じ20 Gy という線量でも全身が被ばくした場合と指のみが被ばくした場合には人体に対する影響がまったく異なることは容易に理解頂けるものと考えられる。放射線は、その言葉をよく耳にする一方で、その実体や人体への影響については一般に知られていないようと思う。本稿が理解の一助となれば幸いである。

参考文献

1. (財)放射線影響協会 編，“放射線の影響がわかる本”，(財)放射線影響協会 (1997).
2. 日本保健物理学会、日本アイソトープ協会 編，“新・放射線の人体への影響”，丸善 (1993).
3. 石川友清 編，“放射線概論”，通商産業研究所 (1999).
4. 青山喬 編，“放射線基礎医学(第8版)”，金芳堂 (1997).
5. “ICRP Publication 60 ——国際放射線防護委員会の1990年勧告”，日本アイソトープ協会 (1991).