解 説

体内放射性物質の排泄促進法

(放射線医学総合研究所) 渡 利 一 夫,
今 井 靖 子, 西 村 義 一

放射性核種による体内汚染は、実験室や病院における小規模のものから、原子力施設における事故のように地球規模の環境汚染によるものまである。したがって、これまでは緊急時の対策としては放射線関連の人間が対象であったが、広く一般の人についても考慮する必要がある。

本稿では、放射性核種を経口的に摂取した場合の除去法についてメカニズムの面から整理してみたい。放射性核種としては、人体にとって放射線影響が大きいとされている核分裂生成核種 ^{131}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr および ^{106}Ru を中心に述べる。

I. はじめに

放射性核種の体内摂取事故の場合、初期には胃や肺の洗浄あるいは外科的手術が行われるが薬剤による排泄促進も重要な課題である^{(1)~(8)}。実際の事故時には、多数の核種が同時に体内に取り込まれることも多く、核種の種類、摂取時の化学形、体内における存在状態や挙動を知ることも重要になる。複数の除去剤を使用する場合にはそれらの相互作用についても考慮する必要があり、除去のメカニズムを理解した上で方法を選択することが望ましい。

放射性核種の生体内における挙動あるいは存在状態は摂取時の化学形が大きな影響を及ぼすが、生体内にはアミノ酸、蛋白質、脂肪酸など金属と反応する官能基を有しているものが多いので、キレート化合物の生成も考慮せねばならない^{(9)~(12)}。

^{131}I は摂取後甲状腺に濃縮されるが、安定ヨウ素について甲状腺への摂取あるいは抑制、ホルモンの生成とエネルギー代謝、無機化と有機化の変換のメカニズム等詳細な研究が行われている^{(13)~(16)}。

^{137}Cs はアルカリ金属元素の中で K と類似の体内挙動を示すことが知られており、消化管、肺などを通じて容易に全身に分布されるが、代謝の過程で消化管での再吸収も行われる⁽¹¹⁾⁽⁶⁾。 ^{90}Sr は摂取されるとほとんどが迅速に骨に集まる。Ca と物理的、化学的性質が類似しているため骨代謝と密接な関係があり、骨への吸着はイオン交換吸着あるいは表面吸着とされている⁽¹⁵⁾。

Ru は 0 から 8 までのすべての酸化状態の化合物

が知られている唯一の元素で、化学的挙動は極めて複雑である。したがって、 ^{106}Ru の体内挙動も化学形によって大きな違いがある⁽¹⁶⁾。一般に、酸化状態が +3 以上の元素は生体内では水酸化物、炭酸塩など難溶性化合物になり易い。したがって、コロイド状、粒子状で存在することが多いため消化管からの吸収は小さく、多くは肝臓、腎臓、骨などに沈着する。このほか Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn などの放射性核種は生体内必須元素の代謝とも密接な関係にある⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

II. 除去の方法

1. 希釈による方法

(1)多量の水分を強制的に採る最も単純な方法と、(2)対象とする放射性核種の安定同位体あるいは化学的に類似の元素の化合物を投与して、比放射能を小さくしたり競合により排泄をはかる方法がある。一般に希釈法というのは後者のことで、チェルノブイル事故の際に ^{131}I による甲状腺被曝を軽減するためにヨウ素剤がソ連や北欧諸国で幼児や青少年を中心に投与されたのがその例である⁽¹⁹⁾。ヨウ素剤としては主として KI, NaI が、また KIO_3 , $\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$ 等も用いられる。 ^{131}I 摂取前にあらかじめヨウ素剤を投与しておくとはほぼ完全に抑えられるが、時間の経過と

Methods for Reduction of Radionuclides Incorporated into Body : Kazuo WATARI, Kiyoko IMAI, Yoshikazu NISHIMURA.

(1992年 3月3日 受理)

ともに効果は減少し、24時間後ではほとんど効果がない⁽²⁰⁾。有機ヨウ素、例えば放射性ヨウ化メチルの場合も、NaI投与により甲状腺摂取が抑制される⁽²¹⁾。

^{137}Cs の場合には安定 Cs のほか、Na, K の化合物が検討された^{(22)~(24)}。第1図に示すように、飼料中の K の含有量を増大させると ^{137}Cs の排泄が促進される⁽²³⁾。また、高濃度の Na や K を与えると、水の摂取量が増え尿量が増加するいわゆる洗い出し効果や、Cs, Rb をごく少量入れた生理食塩水の点滴を行うことも提案されている⁽¹⁾。

第1図 ^{137}Cs 全身残留率に及ぼす K の影響(ラット)⁽²³⁾

^{90}Sr に対しては、塩化物、炭酸、乳酸あるいはグルコン酸ストロンチウムが用いられる。同じアルカリ土類元素の Ca や Ba の化合物も検討されている

第2図 高 Ca (10%) 飼料による ^{85}Sr の排泄(ラット)⁽²⁶⁾ (事前飼育の影響)

が、第2図に示すように、投与量、投与時期あるいは共存するリン酸濃度等により効果に大きな差がある⁽¹⁾⁽¹⁷⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。一般に胃腸管内では効果があるが、一たん骨に沈着した ^{90}Sr を除去することは困難である。

このほか、 ^{226}Ra には BaSO_4 、また ^{65}Zn には ZnSO_4 が用いられるが、 ^{45}Ca 、 ^{60}Co 、 ^{32}P 、 ^{35}S 等もそれぞれの安定同位体あるいは、化学的に類似の挙動をとる元素の化合物が用いられる⁽¹⁾。

2. 錯体(錯塩)の生成による方法

放射性核種に分子やイオンを配位結合させ錯体の形にして体外に除去する方法で、U を摂取した場合に Na_2CO_3 により $(\text{Na}_4[(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3])$ のような安定な錯体にして尿中に排泄する方法などがある。錯体の生成には複数の供与原子をもつ試薬、すなわちキレート剤が普通用いられる⁽²⁷⁾。初期には代表的なキレート剤である EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid) が人体にも適用されたが、その後 DTPA (diethylenetriaminepentaacetic acid) が開発され、主として Pu について多くの実験が行われた⁽⁵⁾⁽²⁷⁾。

^{106}Ru に対しても DTPA が用いられるが、その効果は一定しないとされている⁽¹⁾。DTPA は希土類元素 Zr, Zn, Mn, Th, U 等にも用いられるが、通常 Ca 塩、Zn 塩として投与される⁽¹⁾。その後、親油性をあげて細胞膜透過性を改善した“Puchel”が合成された⁽⁵⁾⁽²⁷⁾。最近ではカテコール基の超ウラン元素に対する親和性が注目されている。カテコールアミド (CAM) から作られるリニヤカテコール (LICAM) 化合物や CBMIDA についての検討も行われている (第3図)⁽⁵⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。このほか、毒ガスの防護剤として知られる BAL (dimercaptopropanol), Pb の毒性低下に用いられた DFOA (desferrioxamine), Cu や Hg のキレート剤の PEN (penicillamine) 等が除去剤として用いられる⁽¹⁾。

^{90}Sr に対しては、クエン酸など多くのキレート剤が試みられた⁽²⁹⁾。摂取した直後、すなわちイオン状態にある時にキレート化して骨への沈着を防がねばならないが、Sr のキレート化合物は一般に Ca のそれにくらべて安定度が小さいかあるいは同程度であるため Ca が存在すると生成が妨害される。

一方、クラウンエーテルやクリプタンドのような大環状化合物、すなわち環状骨格の環の中に金属イ

第 3 図 キレート剤の例

オンを包摂する化合物も今後の課題である⁽⁸⁾⁽³⁰⁾。配位子を大環状とした時の錯体安定度の増加、選択性の向上および特異な錯体構造が特徴である⁽⁸⁾⁽³⁰⁾。例えば、クラウンエーテルはアルカリ金属やアルカリ土類金属イオンを捕捉するが、多くのものは細胞の Na や K の輸送に関連して毒性を示すのが難点である。除去例はほとんどないが、動物実験で Kryptofix-222 が⁹⁰Sr に効果のあることが報告されている⁽³¹⁾。最近、毒性の小さい Silacrown や、窒素原子に-CH₂COOH のついたクリプタンドも作られており、医学的な利用が期待される⁽²⁷⁾。

一方、副作用が少ないことなどから、キレート能を有する天然高分子が注目されている。一般に、多糖類系と蛋白質系の天然高分子は分子間の相互作用によりゾルからゲルへの転換が起こるが、多くの場合、橋かけ領域の部分と溶解鎖部分からなる共重合体を形成する⁽³²⁾。アルギン酸は褐藻の細胞間を充填する粘質多糖で、D-マンヌロン酸(M)とL-グルロン酸(G)の共重合体で、多くの金属元素と錯体を生成する。アルギン酸の Na 塩に Ca²⁺ が導入されると、“egg box function”と呼ばれる結合をしてゲル

第 4 図 アルギン酸のゲル化構造⁽³³⁾

化が起こる(第 4 図)⁽³²⁾。M と G の比率によりゲルの性質が異なることもわかってきた。

アルギン酸ナトリウムによる⁹⁰Sr の排泄促進の実験は、数多く行われているが、効果の差が大きい⁽²⁵⁾⁽³³⁾。そして、⁹⁰Sr の人体への吸収抑制は、G の存在比の高い方が効果があることが明らかにされており、データのバラツキは G と M の存在比が関与しているものと考えられる。事故時には除去剤として利用するように勧告されているが応急処置を目的

とした研究⁽³⁴⁾, DTPA との比較を行なった例も報告されている⁽³⁵⁾。

また、甲殻類、昆虫の体表面の骨格物質の主成分であるキチンを脱アルカリして得られるキトサン⁽³⁶⁾は、第5図のような構造で-NH₂基を有し、多くの重金属と有色の錯体(Cu(青色), Co(桃色), Ni(緑色), Fe(Ⅱ)(黄褐色), Fe(Ⅲ)(黄緑色)など)を生成する。最近、キトサンはラット中の⁸⁵Srの排泄にも効果があることが明らかにされている(第6図)⁽³⁷⁾。食品添加物、化粧品、人工皮膚、土地改良剤等用途も広く、廃液や海水中の放射性核種や微量重金属元素の濃縮についても検討されている⁽³⁶⁾。

キトサンの金属錯体の構造については、橋かけモデルとペンダントモデルの2つの説があり、いずれ

第5図 キチン、キトサン類の化学構造

第6図 水溶性キトサン(3%)による⁸⁵Srの排泄効果(ラット)⁽³⁷⁾

も金属イオンを単核的に配位することを前提としている。しかし、金属の種類により錯体の型が異なることも報告されている。特に、Fe(Ⅲ)の場合は単核錯体ではなく、セルロースのFe(Ⅲ)錯体に近いこと、そしてセルロースFe(Ⅲ)錯体は実際には“セルロース・Fe(OH)₃”錯体であることが明らかにされている⁽³⁸⁾。Srのキトサンに対する親和性は他の金属イオンに比べて小さいので、動物実験において認められた放射性Srの除去効果は、単純なキレート形成だけでは説明ができない。キトサンの種類や共存物質、特にCaの影響も無視できない。キレート形成とともにその他の機構も考慮する必要がある。

天然高分子の金属イオン吸着性、特にUについていくつかの興味のある知見が得られている⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾。キチン、キトサン、セルロースをそれぞれリン酸誘導体にするると吸着性が增大すること、またカルボキシル基の多いペクチン酸が大きな吸着性を示す現象は、リン酸やカルボキシル基とのキレート化合物生成によるものと考えられる。ペクチン酸やタンニン酸を多く含む柑橘類、果実の外皮やクリ皮上皮もUを吸着する能力がある(第1表)。また、ある種のバクテリアはFeの存在下でThやUとカテコールを含む化合物を生成するが、これらは細胞内のPuの除去にも有効とされている⁽²⁷⁾。

第1表 種々のバイオマスのウラン吸着能⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾

バイオマス	ウラン吸着量(%)	
	淡水系	海水系
ク リ 外 皮	81.0	59.7
ク リ 内 皮	79.4	79.6
タ マ ネ ギ 外 皮	72.0	0
ピー ナ ッ ツ 外 皮	48.4	0
ピー ナ ッ ツ 内 皮	73.9	4.9
オ レ ン ジ 外 皮	81.2	0
グ レ ー プ フ ル ツ 外 皮	77.3	0

3. 吸着による方法

放射性核種を不溶性の吸着体に吸着させて糞と共に排泄させる方法で、最も単純なものは活性炭がある⁽⁴¹⁾。活性炭はその細孔構造、表面積、表面酸化物等複雑な吸着特性を有し、早期であればいずれの核種にも一応の効果は期待される。最近、ソ連で開発された活性炭は、チェルノブイル事故によって摂取された多くの種類の放射性核種に有効であるとされている⁽⁴²⁾。

吸着法で初期に研究されたのはイオン交換体であ

る。イオン交換吸着を利用する方法は、対象とする放射性核種がイオン状態にあることはもちろんであるが、共存イオンの影響も無視できない。 ^{137}Cs についてはイオン交換樹脂や天然あるいは合成の無機イオン交換体が検討された。これらは Na, K, Ca 等の濃度が増加すると、 ^{137}Cs の吸着性は低下する。しかし、一般的にプルシアンブルー (PB) として知られるフェロシアン化鉄 (ヘキサシアノ鉄 (II) 酸鉄) は顕著な除去効果を示す (第 7 図) ^{(43)~(45)}。

第 7 図 プルシアンブルーによる人体中 ^{137}Cs の排泄 ⁽⁴⁶⁾

PB が生体中の ^{137}Cs の除去に著効を示すのは、吸着性が他のアルカリ元素に比べて極めて大きいため、 ^{24}Na , ^{42}K , ^{86}Rb の分配係数がそれぞれ 1, 10, 10^3 であるのに対し、 ^{137}Cs のそれは 10^4 以上の値である ⁽⁴⁶⁾。Cu, Ni, Co, Zn 等のフェロシアン化物も ^{137}Cs に対して大きな吸着特性を有し、放射化学分析や廃液処理の分野で選択的捕集剤としても利用される。これらのうち、溶解度が小さく、酸、アルカリに対する安定性、また Cs に対する吸着性が大きい Ni のフェロシアン化物を陰イオン交換樹脂と結びつけた“吸着体”は、ラットおよび人体中 ^{137}Cs の排泄に有効であることが確かめられている ⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾。最近、フェロシアン化鉄 (II) アンモニウムも利用されている ⁽⁴⁹⁾。また、塩化第二鉄とフェロシアン化カリウムを別個に投与し、体内で PB を生成させて ^{137}Cs を共沈、吸着することも可能である。

^{90}Sr についても、はじめイオン交換樹脂による詳細な動物実験が行われた。Ca 代謝に及ぼす影響等も考慮すると Ca 形の陽イオン交換樹脂が有効であ

る ⁽⁶⁾。このほか、分析試薬である硫酸マグネシウム、ロジゾン酸などによる ^{90}Sr の排泄も検討された。これらは適当量の担体が存在すれば、骨中への ^{90}Sr の吸収を抑制するがキャリアフリーの場合には効果がなく、条件により排泄が阻害される現象も生じる ⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾。また、ミネラルの吸収を抑制するフィチン酸も、腸管内の pH 領域では難溶性の沈殿を生成するので、糞中への排泄が増加する ⁽⁵⁰⁾。フィチン酸が金属イオンと沈殿を生成する際に Ca が相乗効果を示す現象 ⁽¹²⁾ も興味深い。

III. 代謝の攪乱による方法

体内に沈着してしまった放射性核種の除去は一般に難しいが、ホルモン剤などにより代謝を乱したりある種の元素の摂取を過剰あるいは欠乏の状態にして排泄させることができる。

^{131}I は一たん甲状腺に蓄積されるとヨウ素剤による効果はほとんどないが、抗甲状腺薬のメチマゾールは摂取後約 1 週間経過したのちでも生物学的半減期を減少させることができる ⁽²⁰⁾。また、1 価アニオン、例えば ClO_4^- , SCN^- などによって I^- の甲状腺への摂取を抑えることもできる ⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。甲状腺への親和性は $\text{ClO}_4^- > \text{SCN}^- > \text{I}^- > \text{Br}^- > \text{Cl}^-$ であり、この順序は陰イオン交換体への吸着性の強さに似ている ⁽¹⁵⁾。このほか、 TcO_4^- , ReO_4^- , BF_4^- , NO_2^- , NO_3^- , SeCN^- 等についても検討され、イオンの大きさ、蛋白への結合性、 Na^+ や K^+ との関連など興味ある知見が得られている ⁽¹⁴⁾。

^{137}Cs の場合、前述の高 Na 摂取や利尿剤の利用による排泄促進も代謝の攪乱によると考えることもできる。

^{90}Sr に関しては、上皮小体ホルモンやビタミン D を投与することにより、骨代謝を活発にしたり骨構造を変化させて排泄を促進することが試みられた ⁽⁶⁾⁽¹⁶⁾。副腎より分泌されるコルチコステロイドは ^{90}Sr の尿中排泄を 3 倍増大させ、またプレドニン、メチルプレドニンも効果があるとされている ⁽¹⁾。

一方、Ca や P の欠乏食によって骨からの ^{90}Sr の離脱も検討されたが、単に骨吸収を高めただけでは排泄を促進することは難しい ⁽²⁵⁾⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾。例えば、第 8 図に示すように、低 Ca 食群では ^{90}Sr の総排泄量が対照群に比し小さい現象もみられ、また低 Ca 低 P 食の場合も、Ca の骨吸収は増大するものの、 ^{90}Sr の排泄効果がほとんど認められない。しかし、低 P 食

第8図 放射性Srの排泄に及ぼす食餌中のCa, Pの影響(ラット)⁽⁵⁴⁾

群では20日間で投与量の72%を排泄し、対照群に比し約2倍の排泄率を示す。この場合の低Ca食および低Ca低P食中のCa含量はそれぞれ正常食の1/55, 1/40で、骨形成阻害が明らかであるにもかかわらず、 ^{90}Sr の排泄と残留量は正常食群との間にほとんど差が見られない。すなわち、比較的軽度の低P食を行えば、骨のCa含量を減少させることなく ^{90}Sr の排泄が可能である。低P食によってCaの尿中排泄が増加することと、 ^{90}Sr の排泄促進が密接な関係にあることも示唆されている⁽¹⁷⁾。 ^{90}Sr の除去にAl化合物が有効であるとされているが、Alがリン酸塩を生成するために低P食と同様の効果があるためと思われる。

IV. その他

近年、微生物や生体物質と金属イオンとのかわり、あるいは重金属元素の中毒学や栄養学上の問題を生化学的にとらえる研究において、興味のある現象が明らかにされている。例えば、GS 15と呼ばれる鉄還元バクテリアはUも還元して摂取することが見いだされており、U鉱石に見られる還元Uはバクテリアが関与していることを示唆している⁽⁵⁴⁾。クロレラや放線菌などの微生物もUを濃縮する。特に、クロレラは各種藻体中で最も吸着能力に優れ、各種金属イオンについて調べた結果は UO_2^{2+} に特異的で、取り込まれたUはEDTAのようなキレート剤で溶出できる。無機水銀から有機水銀への変換は主として微生物の作用であるが、その反応の主役はメチルコバラミンで、生体内でも反応が生じる可能性が推定されている⁽¹²⁾⁽⁵⁶⁾。

生体内における金属元素間の相互作用、例えばCu

やWの摂取量の増大とMoの欠乏症、Caの代謝に及ぼすZnやPbの影響等々、数多くの現象が明らかにされている。Hgの毒性がSe化合物によって修飾されるメカニズムとしては、不活性の“Hg-Se”複合体の生成あるいは金属結合蛋白“メタロチオネイン”との結合による不活性化が考えられている⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。このような研究例のいくつかは、将来、放射性核種除去にも応用できるものと考えられる。

なお、特殊な例として高酸化状態の ^{106}Ru 、例えば揮発性 RuO_4 、あるいは RuO_2^- 、 RuO_4^- のような陰イオンの形で摂取した場合がある。これらは有機物と接触すると直ちに還元されて不溶性の二酸化物として沈着し、通常の方法では脱着は難しい⁽⁵⁷⁾。実際に気体状 RuO_4 による人体汚染事故例⁽⁵⁸⁾も報告されており今後の検討課題である。

V. おわりに

除去法の選択は、摂取量や存在状態によって決めねばならない。除去剤の投与順序あるいは相互の作用も考慮する必要がある。 ^{137}Cs と ^{90}Sr を比べた場合には、両者の代謝の観点から ^{90}Sr の除去を優先すべきである。また、陽イオン性と陰イオン性の除去剤の組合せは好ましくないし、キレート剤と重金属元素を含む除去剤の同時投与も避けるべきである。そして、なるべく複数の核種が同時に除去できる方法が望ましい。例えば、 ^{137}Cs と ^{131}I の場合、ヨウ素剤のKIは両核種に対して希釈作用があるし、 ^{90}Sr と ^{131}I には CaI_2 、 $\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$ が効果がありそうである。また、PBとヨウ素剤を投与する場合には、フェロシアン化物へのアルカリ金属の吸着性から、希釈剤として用いるヨウ素剤はKIよりもNaIの方が有効であろう。P欠乏食とアルギン酸やキトサンの組合せも ^{90}Sr の除去効果の増大が期待できる。将来、副作用の少ない新しい合成キレート剤の開発が期待されるが、天然物質や生化学的現象の利用も興味深い。特に、Caとの類似性から有効な除去法のない ^{90}Sr に対しては生物の持つCa, Srの識別能力を利用することも考えられる。

以上、体内放射能の除去法について主として化学的な立場から記したが、動物実験の結果が必ずしも人体にはあてはまらないことも多く、また、実施に際しては医学、薬学、生物学等の総合的な判断が必要である。

本稿をまとめるに当りご助言,ご協力を頂いた川崎医科大学望月義夫学長,六高台病院中尾 恵院長,宮崎医科大学坂口孝司教授,静岡大学工学部花木 昭教授および放射線医学総合研究所薬理化学研究部色田幹雄部長,内部被曝研究部稲葉次郎部長に感謝の意を表します。

— 参 考 文 献 —

- (1) 中尾 恵編:“放射線事故の緊急医療”,(1986),ソフトサイエンス社.
- (2) NCRP No. 65, (1980).
- (3) IAEA Safety Series, No. 47, (1978).
- (4) ICRP Pub. 28, (1977).
- (5) 松岡 理:緊急時の被曝評価と医療,放医研シンポジウムシリーズ, No. 19, (1987).
- (6) 原安協報告-17,放射線障害防護薬剤の現状, (1969), 原安協.
- (7) VOELZ, G.L.:“*Medical Management of Radiation Accidents*”, (1991), CRC Press, Boca Raton, Florida.
- (8) 花木 昭,他:放射線科学, **33**, 382 (1990).
- (9) 鈴木継美,他編:“中毒学と栄養学”, (1978), 篠原出版.
- (10) 井村伸正,他編:“中毒学における生化学的アプローチ”, (1980), 篠原出版.
- (11) 木村修一,左右田健次編:“微量元素と生体”(1989), 秀潤社.
- (12) 木村修一:ぶんせき, **1**, 38 (1989)
- (13) NCRP No. 55, (1977).
- (14) WOLFF, J.: *Physiol. Rev.*, **44**, 45 (1964).
- (15) LISSITZKY, S.:“*Physiology of the Thyroid, Endocrinology*”, Vol.1, (DEGROOT, L.J., ed), (1989), W.B. Saunders, Philadelphia.
- (16) GREEN, W.L.:“*Mechanisms of Action of Antithyroid Compounds, The Thyroid*”, (WERNER, S.C., INGBAR, S. H., ed), (1971), Medical Dept., Harper & Row Publ., New York.
- (17) 色田幹雄,松島美一:医学のあゆみ, **39**, 671, (1961).
- (18) 渡利一夫,他:原子力誌, **28**, 493 (1986).
- (19) 今堀 彰:同上, **30**, 135 (1988).
- (20) TANAKA, S., et al.: *Proc. Symp. on Diagnosis and Treatment of Deposited Radionuclides*, p.298 (1967), Richland, Washington.
- (21) 田中 茂,他: *Radioisotopes*, **18**, 44 (1969).
- (22) MRAZ, F.R., et al.: *Arch. Biochem. Biophys.*, **66**, 177 (1957).
- (23) RICHMOND, C.R., FURCHNER, J.E.: *Proc. Soc. Exptl. Biol. Med.*, **108**, 797 (1961).
- (24) FURCHNER, J.E., RICHMOND, C.R.: *ibid.*, **110**, 185 (1962).
- (25) “*Strontium Metabolism*”, (LENIHAN, J.M.A., ed), (1967), Academic Press.
- (26) 西村義一,他:第27回日本保健物理学会, (1992).
- (27) BULMAN, R.A.:“*Structure and Bonding 67*”, (1987), Berline Heidelberg.
- (28) FUKUDA, S., et al.:保健物理, **26**, 101 (1991).
- (29) 久保寺昭子,他:薬学誌, **87**, 511 (1967).
- (30) 平岡道夫:“クラウン化合物”, (1978), 講談社.
- (31) MILLER, W.M.: *Proc. 5th Congr. Int. Radiation Protection Soc.*, (1980), Pergamon Press.
- (32) 日本化学会編:“化学総説”, (1990), 学会出版センター.
- (33) 市川龍資:化学と生物, **7**, 208 (1969).
- (34) 甲斐倫明,他:保健物理, **17**, 111 (1982).
- (35) CHUNG, In-Yong: *Hakhoichi*, **14**, 16 (1989).
- (36) キチン, キトサン研究会編:“キチン, キトサンの応用”, (1990), 技報堂出版.
- (37) 西村義一,他: *Radioisotopes*, **40**, 244 (1991).
- (38) 剣持泰彦,横井 弘:第40回錯体化学討論会要旨集, (1990).
- (39) 坂口孝司,他:農芸化学誌, **53**, 149 (1979).
- (40) 中島 暉,坂口孝司:化学と生物, **25**, 78 (1987).
- (41) 柴田貞夫,他: *Radioisotopes*, **39**, 226 (1990).
- (42) 渡利一夫,今井靖子:放射線科学, **33**, 290 (1990).
- (43) NIGROVIC, V.: *Int. J. Rad. Biol.*, **7**, 307 (1963).
- (44) MADSHUS, K., et al.: *ibid.*, **10**, 519 (1966).
- (45) RICHMOND, C.R., BUNDE, D.E.: *Proc.Soc. Exptl. Biol. Med.*, **121**, 664 (1966).
- (46) WATARI, K., et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **4**, 190 (1967); **5**, 309 (1968).
- (47) MATSUSAKA, N., et al.:保健物理, **6**, 15 (1971).
- (48) INUMA, T.A., et al.: *Health Phys.*, **20**, 11 (1971).
- (49) LEITGEB, R., RATHEISER, N.: *Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident, IAEA-SM-306/39*, Vol. 2, p. 234 (1990).
- (50) 内山 充:薬学誌, **78**, 254 (1958).
- (51) 伊藤四十二,他:同上, **76**, 1406 (1956).
- (52) ITOH, Y., et al.: *Pharm. Bull.*, **6**, 115 (1958).
- (53) 伊藤四十二,他:薬学誌, **78**, 76 (1958).
- (54) LOVLEY, D.R., et al.: *Nature*, **350**, 413 (1991).
- (55) 坂口孝司:放射線科学, **28**, 149 (1985).
- (56) 浮田忠之進,井村伸正:科学, **41**, 586 (1971).
- (57) 竹下 洋,他:保健物理, **25**, 19, (1990).
- (58) WEBBER, G.E., HARREY, J.W.: *Health Phys.*, **30**, 355 (1976).