

## 農学・生物学分野における放射線の利用

出 雲 義 朗

### 1. はじめに

標題分野のうち、農学分野はいわゆる農林水産学を、また生物学分野はあらゆる動植物学を包含して、各領域はきわめて幅広い。一方、放射線には、X線や放射性同位元素 (RI) から放出される  $\gamma$  線などの電磁波のほか、それ自身電荷を有する電子線、陽子線、 $\alpha$  線などの粒子線、粒子線であっても電荷を有しない中性子線、などの種類がある。これらの放射線はいずれにしても物質に衝突 (照射) すると、その物質は直接または間接に電離や励起される。照射された生物では、その電離や励起作用によって遺伝子の障害、突然変異、細胞分裂の阻害、停止、壊死、場合によっては個体死などが引き起こされる。そこで、このような作用はむしろ、食品中における微生物の殺菌・静菌などに応用して食品保存に、また遺伝子や染色体の突然変異を品種・品質の改良や害虫の防除などに、それぞれ利用されている。この際の放射線は物質中の透過性が高いX線や $\gamma$ 線が中心である。他方、目的元素の超微量、高精度、迅速、非破壊など、測定や分析において多くの利点を有する RI やその化合物は放射性トレーサとして、とりわけ生物における代謝の研究に必須であり、多くの施設で連日のように頻用されている。このため、各分野ごとの詳細や頻用例は割愛せざるを得ないので、例数は比較的少ないものの特徴ある例の一端を中心に述べる。

### 2. 放射線照射の利用

放射線の種類により照射される物質中での作用が異なるが、ここでは透過力が高いX線や $\gamma$ 線と、物質元素を放射化する熱中性子線の利用を中心に述べる。

#### 2.1 X線や $\gamma$ 線の照射利用

2.1.1 食品保存 放射線照射による生物への作用を食品の保存に利用しようという研究は、1950年頃から開始された。その保存方法は、①食品中の微生物、とりわけ病原性微生物の殺菌や静菌、②穀物や果実を中心とする殺虫、③果実や野菜の生育を抑制、阻害する発芽防止や熟成の遅延、などである。これらの作用は、生物の種類によって異なるが、照射線量に比例して増大する。一方、線量の増大とともに、④食品成分の分解や毒性の副生成物 (急性・慢性毒性、変異原性、催奇性、発がん性などの生成物) の生成、⑤栄養価 (素) の低下、⑥色調や味覚の劣 (悪) 化、⑦放射性物質の生成、などの懸念が増大する。このうち、④は無視可能であるが、④の問題は十分に解決されなければならない。このため、線量はこれらの懸念が解決される範囲に限定される。本問題が解決される (食品の健全性 Wholesomeness が確保される) と、照射による食品の発熱は無視可能なので、イ. 包装状態での照射が可能、ロ. 短時間で多量、連続、簡便処理が可能、ハ. 費用も比較的安価、など多くの利点がある<sup>1-4)</sup>。日本では、1967年からジャガイモ、タマネギ、など特定7品目につき、照射効果や健全性などが本格的に研究された結果、72年に発芽防止を目的とする<sup>60</sup>Co $\gamma$ 線照射 (~150 Gy) ジャガイモの出荷が許可されている (北海道土幌農協、実用化73年、収穫後8ヵ月の発芽防止、月産10,000トン)<sup>1-3)</sup>。その後、今日まで開発研究は活発に行われてはいる<sup>5)</sup>が、追加の許可例はない。91年における諸外国の許可状況は、発芽防止を目的とするジャガイモ (32国) とタマネギ (28国)、殺菌・殺虫目的の香辛料 (24国)、成育や熟成抑制目的のイチゴ (12国)、パイア (10国) など、計37カ国、45品目になっている<sup>3)</sup>。

2.1.2 品種・品質改良 ①禾穀、果樹、林木、など：植物に放射線を照射して有用な形質を有する品種作出の研究が行われている<sup>6-9)</sup>。日本での研究は1941年に始まるとされているが、56~58年に農林省 (当時) の

(国立公衆衛生院 放射線衛生学部)

各試験場等に  $\gamma$  線照射室が設置されると、放射線育種の研究は急展した。その後、62年には、野外での長期連続照射が可能な大規模放射線育種場（ガンマフィールド、半径100mの円形、 $^{60}\text{Co}$  線源111TBq）が新設されると、研究開発は飛躍的に進展した。品種改良に至る概要は、植物への照射→突然変異体の誘発→目的変異体の選抜→育種、生産、の過程である。これまで、多収、耐倒、耐病、耐寒、早熟、など有用形質品種の作出を目指して、膨大な種や系統の改良研究が行われ、イネ（レイメイ、フジミノリなど）、ムギ、クワなどの禾穀、イチゴ、ナシ、柑橘類などの果樹、スギ、マツなどの林木にその成功例があり、研究は現在も活発に行われている<sup>9)</sup>。②水産動物の雌雄産み分け：精子または卵子に各種線量を照射後、それぞれ非照射の正常な卵子または精子と受精させると、その後の胚の生存率は初め線量の増加にともなって減少する。しかし、ある線量に達すると、それ以上では線量の増大にともない生存率はむしろ増加傾向を示して、非照射の場合と同程度に達する（このとき照射された精子または卵子の染色体はほぼ完全に破壊されている）（Hertwig 効果）（例<sup>10)</sup>：図1）。このような現象が漁業生産に有利な水産動物等の雌雄産み分けに応用されている<sup>10-12)</sup>。③雌性発生：その概要（図2）は、まず、高線量照射により精子の染色体を破壊して、非照射正常卵と受精させる。この受精卵では、精子由来の染色体が卵割に関与し得ないので、胚は雌性染色体をもとに

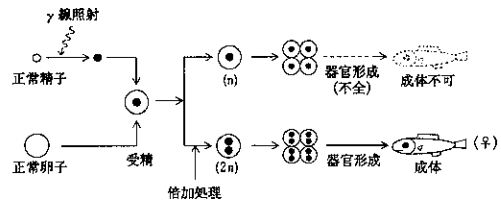


図2 Hertwig 効果を応用した雌性発生の概念図。

増殖する。しかし、この胚は染色体が半数体 (n) のままなので、増殖しても器官形成は不全であり個体までには死亡する。そこで、この間の体細胞分裂期に、水圧処理(約600気圧、数分間など)または温度処理(27℃、10~20分など)により染色体の倍加 (2n) を行うと、胚は個体まで成長する。したがって、成長した個体はすべて雌性になる。④雄性発生：一方、照射精子と非照射正常精子を受精させて上記と同様な処理を行えば、胚はすべて雄性個体になる。このような雌雄の産み分け例は、サケ、マス、カレイ、ヒラメ、ドジョウ、フナ、など<sup>12)</sup>に見られる。

2.1.3 野外の害虫防除 害虫による農作物の甚大な被害がしばしば発生しているが、その大規模な野外での防除に放射線がきわめて有効に利用されている。その概要は、まず、防除対象害虫を大量に自家培養する。のち、これらに放射線を照射して不妊化させ、野外に放飼する。その不妊虫はいずれ野生虫と交尾するが、交尾しても不妊卵になるか、受精してもその後の胚は生育不全を起こす。その結果、野生虫は減少して根絶に至らしめる、という方法である。本法は、不妊虫放飼法とも呼ばれているが、殺虫剤散布による防除法に比べて周辺作物や人畜への被害がなく特定種のみを根絶させ得る、という大きな特徴がある。

日本では、鹿児島県奄美群島以南の島々におけるウリミバエ根絶の画期的な成功例がある<sup>13-14)</sup>。その概要は、大量培養したミバエ生活史（成虫がウリ類などの作物に産卵→作物中で生育→地中でサナギへ→羽化→成虫）における羽化3日前のサナギに、 $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線を照射して (70Gy) 生育後、その不妊成虫を野外へ放飼する方法であり、まず、1975年に久米島で開始後93年までに、宮古・奄美群島、沖縄群島および八重山群島の順に根絶されている。しかし、このような成功に至る過程では、ミバエの生理生態、大量培養技術の確立、

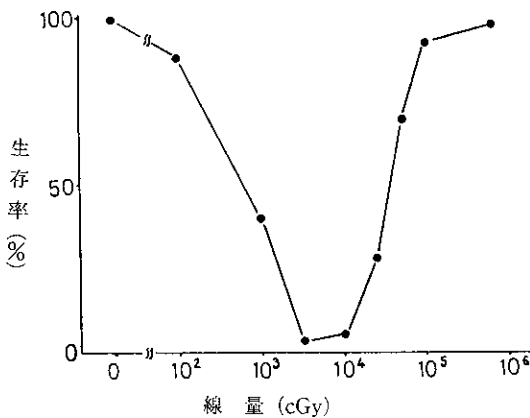


図1 Hertwig 効果の例<sup>10)</sup>。  
— $\gamma$  線照射したサケの精子と正常卵子受精後の胚の生存率—

$\gamma$ 線の最適照射線量と照射時期、放飼効果の判定法などの基礎的研究成果や、大規模実用化に向けた多大な努力があったことはいうまでもない。ちなみに、沖縄群島では、根絶に要した4年半に放飼不妊虫数は週最大1億8500万匹、計310億匹、防除要員は延べ135,000人、費用は46億円、とされている。しかしながら、根絶による農業収入は年間約100億円と見積もられている<sup>14)</sup>ので、本防除法は経済的にも成り立つといえよう。その他、小笠原諸島において柑類類に寄生するミカンコミバエに同様な根絶例がある<sup>15)</sup>。なお、ラセンウジバエ、チチュウカイミバエなどの害虫への適用の研究も行われている<sup>13)</sup>。

**2.1.4 その他 X線照射による写真撮影法(ラジオグラフィ)**は非破壊のまま体内の状態を調べ得るので、人体のみならず動植物にも広く利用されている。また、元素にX線を照射すると、元素はその軌道電子が励起されて各元素に固有の特性X線(蛍光X線)が発生することから、各種試料中に存在する多元素の同時分析(蛍光X線分析)に利用されている<sup>16)</sup>。なお、屈折角を変化させながら単色X線を物質に衝突させると、その変化に応じたX線強度の放射線が測定されることを利用して、蛋白質など生体試料の結晶構造の解析にも利用されている<sup>17)</sup>。

## 2.2 粒子線照射の利用

**2.2.1 熱中性子線照射(放射化)** ①放射化分析：本法は、原子炉等から放出される熱中性子線を試料に照射して存在元素を放射化し、その元素固有の放出放射線を測定して定性、定量する方法<sup>18-27)</sup>である。本法の検出感度(例)(表1)は、照射される元素の生成放射

能A(Bq)と密接に関連し、次式  $A = N \cdot f \cdot \sigma \cdot (1 - e^{-\lambda t})$  で示される。ここで、N：元素の原子数で  $N = W \times 6.02 \times 10^{23} / M$ 、W：元素の質量(g)、M：元素の分子量、f：中性子束密度( $n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ )、 $\sigma$ ：元素の中性子捕獲反応断面積( $10^{-24} cm^2$ )で同位元素に固有の大きさを有する、 $\lambda$ ：生成RIの崩壊定数で  $\lambda = 0.693 / T$ 、T：生成RIの物理学的半減期(秒)、t：照射時間(秒)、である。したがって、N、f、 $\sigma$ はいずれも大きいほど、一方Tは短いほど、Aは大きくなる。このうち、 $\sigma$ は希土類元素が比較的大きいため放射化されやすく、高感度である。生成RIのTや放出 $\gamma$ 線もRIに固有の値を持つので、本法は、多元素を非破壊のまま同時に定性、定量することが可能であり、動物組織<sup>21)</sup>、林木<sup>22)</sup>、穀物<sup>21,24)</sup>、水産生物<sup>24)</sup>、などの各試料の分析に利用されている。

②中性子ラジオグラフィ：本法は、試料に中性子を照射して放射化したのち、その生成放射能をそのまま写真撮影して存在元素の分布や移行などを調べる方法であり、植物根の形態<sup>25)</sup>、大麦の葉<sup>26)</sup>、土壌中の水分動態<sup>27)</sup>、などへの利用例がある。試料全体に存在する各種元素の分布や移行を、この場合も非破壊のまま調べ得る特徴がある。

**2.2.2 陽子、 $\alpha$ 線照射** 陽子線や $\alpha$ 線などの荷電粒子を加速して試料に照射すると、試料中の存在元素はその軌道電子がはじき飛ばされる(励起される)。しかし、元素はその欠損電子を埋め合わせるように固有の特性X線を発生する。そこで、このX線を測定、分析して、元素の定性や定量に利用する粒子励起X線スペクトロメトリー法(PIXE法)<sup>28)</sup>が行われている。本法は、③多元素(X線発生性の性質から原子番号12~92番まで)、同時の定性、定量、④高感度：1mg以下の微量試料で1ngの元素の検出、⑤表層から深層(2mm程度)までの連続走査分析、⑥短時間(10分程度)の測定、などが可能なので、動物組織<sup>29)</sup>、海藻<sup>30)</sup>、その他各種試料の分析に広く利用されている。なお、本法は、特性X線を測定する点では上記(2.1.4)と同様であるがその発生方法が異なり、このため分析対象元素とその検出感度も異なる。

表1 熱中性子線の照射による元素の放射化検出感度(日下<sup>18)</sup>から抜粋)。

元素 (標的核種)	生成核種	半減期	$\gamma$ 線エネルギー (MeV)	検出感度* ( $\mu g$ )
<b>稀土類元素</b>				
<sup>151</sup> Eu	<sup>152m</sup> Eu	9.3h	0.96	$3.5 \times 10^{-6}$
<sup>152</sup> Sm	<sup>153m</sup> Sm	46.8h	0.103	$1.8 \times 10^{-4}$
<sup>176</sup> Lu	<sup>177</sup> Lu	6.8d	0.208	$1.5 \times 10^{-3}$
<b>重金属元素</b>				
<sup>55</sup> Mn	<sup>56</sup> Mn	2.6h	0.85	$1.9 \times 10^{-5}$
<sup>66</sup> Zn	<sup>67m</sup> Zn	13.9h	0.44	$4.0 \times 10^{-2}$
<sup>76</sup> As	<sup>76</sup> As	26.4h	0.56	$1.7 \times 10^{-3}$
<sup>110</sup> Cd	<sup>117m</sup> Cd	3.1h	0.27	$1.0 \times 10^{-2}$
<sup>198</sup> Hg	<sup>197m</sup> Hg	23.8h	0.134	$5.5 \times 10^{-3}$

\* 熱中性子： $3.5 \times 10^{12} n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ 、1h照射、測定：3inch、NaI(Tl)、感度：10cpmの計測値。

### 3. トレーサ利用

動植物などにおける元素およびその化合物の代謝や移行、動態の調査研究において、元素のトレーサとしてRIを用いる場合(放射性トレーサ法)のほか、安定同位元素(SI)を用いる場合(安定トレーサ法)がある。このうち後者には、分析に際して上記放射線照射による方法と照射しない方法があるが、ここでは、本題の趣旨に添って照射する場合(熱中性子線照射)について述べる。一方、トレーサとして、化学形に着目して調べる方法(化学的トレーサ法)と、これには一切着目せずもっぱら物理的状态を調べる方法(物理的トレーサ法)がある。

#### 3.1 放射性トレーサ法

**3.1.1 特徴** 本法の特徴を述べるのは今さらの感もあるが、①トレーサとして $\gamma$ 線放出RIを用いると、投与動物個体を生かしたまま放射能を体外計測するだけで経時的な全身代謝の測定が可能であり、さらに、Ge(Li)検出器と波高分析器を使用すれば多核種の同時、分別測定が可能なので、同一元素の異なる標識化合物や他元素との同時測定、も可能である。②また、試料中の共存物質に影響されず、化学的分析処理も行わずに非破壊のままトレーサの放射能を計測するだけでよいので、簡単、迅速、高精度である。③さらに、きわめて高感度な検出が可能である。たとえば、 $^{32}\text{P}$  1Bqの放射能を液体シンチレーションカウンタで計測する場合1分計測で容易に検出し得るが、この $^{32}\text{P}$ の化学量は約1万分の1pg(1=λN, 上記2.2.1からWを算定)にすぎない。④このため、投与による生体への毒性や生理的影響も無視可能である。一方、本法は、使用施設設備の維持、管理、取扱い、などに法律上の制約があるほか、取扱い者もごく微量ながら放射線被ばくは避け難いなどの欠点がある。しかし、上記利点はこれらの欠点を補って余りある。

**3.1.2 化学的トレーサ利用** 多くの施設で連日のように多用されており、利用例は枚挙にいとまがないので、筆者らの経験例を中心に述べる。

(例)：魚類(マダイ)全身における多種RIの同時とりこみ過程の測定 海洋魚類の放射能汚染機構解明の一端として、実験水槽中のマダイ全身における $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{144}\text{Ce}$ など各 $\gamma$ 線放出RIの経時的

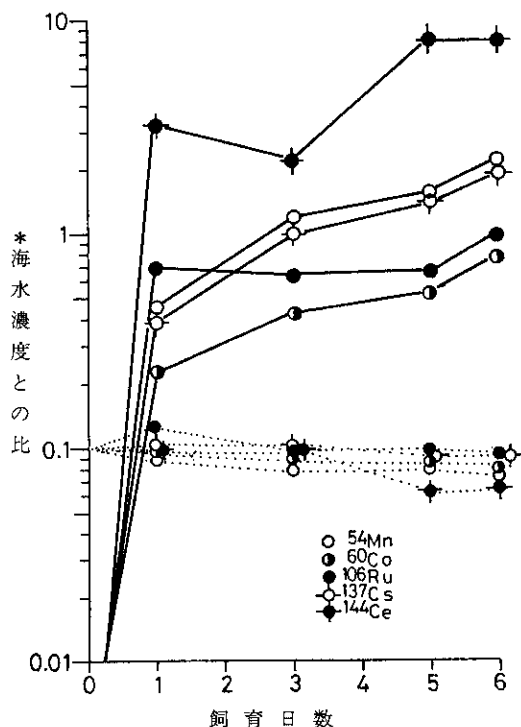


図3 マダイ(全身)における海水からの $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ および $^{144}\text{Ce}$ の同時とりこみ<sup>31)</sup>。  
\*マダイの放射能(cpm/g生)/海水のRI濃度(cpm/ml)。

なとりこみ過程につき、Ge(Li)検出器と多重波高分析器で個別に1~2分ずつ測定した例<sup>31)</sup>を図3に示したが、本例には上記多くの特徴が活かされているといえよう。同様な利用法は、 $^{54}\text{Mn}$ や $^{60}\text{Co}$ のほか、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{65}\text{Zn}$ 、 $^{67}\text{Cu}$ など $\gamma$ 線を放出する他の必須元素との組み合わせによる動植物の代謝の研究にも、きわめて有効であろう。なお、 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{32}\text{P}$ 、 $^{35}\text{S}$ など生化学分野で多用されている $\beta$ 線放出RIと上記各 $\gamma$ 線放出RIの組み合わせによる分別測定も比較的容易なので、筆者らは、培養細胞における $^3\text{H}$ -thymidineと $^{60}\text{Co}$ の同時とりこみ\*などにも利用している。

#### 3.1.3 物理的トレーサ利用

(例)：RI標識大腸菌の利用による海洋動物の細菌

\*緒方裕光, 出雲義朗, 寺田 宙: X線照射マウスの脾細胞におけるコバルト元素のとりこみ, 日本放射線影響学会第37回大会講演要旨集, p280, 1994.

**汚染機構の研究** 海洋動物（食品）の細菌汚染機構の解明に、各種 RI を標識した大腸菌をいわば生物物理学的な粒子のトレーサとして利用する例である。標識菌は、 $^{32}\text{P}$  添加培地で培養した大腸菌のほか、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  親・娘核種の混液から化学的に分離した（ミルクィング） $^{90}\text{Y}$  のほか、市販の  $^{91}\text{Y}$ 、 $^{110m}\text{Ag}$ 、 $^{203}\text{Hg}$ （各塩化物）などを取りこませ、あるいは吸着させた大腸菌である。これらの標識菌は、飼育海水中に添加後、各種海洋動物（アサリ、ハマグリ、カキ、アジなど）にとりこませ、とりこみ部位、飼育水温、塩分濃度、菌濃度、などの影響が調べられている<sup>32-34)</sup>ほか、その後の清浄海水中における菌の排出、すなわち汚染浄化などの研究<sup>35)</sup>にも応用されている。この実験では、 $^{90}\text{Y}$  以外はいずれも  $\gamma$  線放出 RI なので、菌数（放射能測定値）は動物の放射能を体外から 1～2 分計測するだけでよい。このため、RI を使用しない場合の試料処理（解剖、ホモジナイズ、培養、など）や菌数計測に比べて、きわめて迅速、高精度、簡便である。なお、これら標識菌のとりこみ量は水質の汚染（濁）程度に強く影響されることが明らかになり、このとりこみ量を指標とする生物検定法<sup>36)</sup>が開発されている。

### 3.2 安定トレーサ法（アクチバブルトレーサ法）

**3.2.1 特徴** 本法は、トレーサとしては SI を用いるが、その検出には上記放射化分析(2.2.1)を行うので、アクチバブルトレーサ法ないし後放射化法、などといわれている。トレーサは非放射性であるため、前記使用場所等の制約から解放され、野外での貴重な利用が種々行われている。ただ、検出には、試料中の存在量が少ない一方、放射化されやすいこと（高感度）が有利なので、希土類元素がしばしば使用されている。

**3.2.2 使用例** ①海産魚（サケ）の回帰追跡：サケ、マスは重要な漁業資源である。しかし、その生態、とりわけ母川回帰には不明な点が多いが、その一端が本法によって見事に解明されている<sup>37)</sup>。従来の回帰調査手法の多くは、比較的簡便な幼魚のヒレ切り（標識）法であるが、回帰時の成魚（3～5年魚）の標識部位は不明確になる欠点がある。そこで、この欠点を克服するため本法が検討された。その標識法は、まず、高濃度の Eu 添加餌料で稚魚を 1 カ月間飼育する。のち、Eu 無添加餌料で 1 年間飼育するが、この間、体内臓器中の Eu は 1 カ月以内に大部分消失する。しかし、ウロ

コと耳石には 1 年後も明瞭に残存し続ける。そこで、同様に投餌、飼育した大量の稚魚を河川に放流し、その後に回帰した成魚のウロコと耳石を採取、放射化して  $^{152m}\text{Eu}$  を検出する方法で、回帰が調べられた。その結果、回帰率（ $^{152m}\text{Eu}$  の検出率）は 3 年魚で 77%、4 年魚で約 55% になること、などが判明している。なお、同様な使用例は、栽培漁業の研究に関連して、Eu をとりこませたクルマエビの幼魚を沿岸海洋に放流後の回収率の調査<sup>38)</sup>に利用されている。

②昆虫の生態研究：一方、陸上では、害虫とその天敵など野外の生態系における捕食・被捕食関係の解明に利用されている例<sup>39)</sup>が見られる。本法も上記と同様であり、Eu 添加餌料で培養したハスモンヨトウの幼虫（被捕食虫）をイモ畑に放飼後、その畑地周辺の各種昆虫を採捕して放射化によりその捕食の有無を検出する方法である。その結果、捕食昆虫は主としてゴミムシ、ハサミムシ、エンマコオロギなどであった、という。本法は、他の昆虫類や動物への適用のほか、水生生物の生態学的研究にも大きく道を拓く成果であるといえよう。

## 4. あとがき

放射線は、その利用によって多くの大きな利点をもたらす。このため、今日では多くの施設で頻用されており、上記の利用例はそのほんの一端にすぎない。とりあげなかった利用例は紙面の制約に起因することが大きかったが、なかにはすばらしい例も多々あるに違いない。この点は、筆者の知見の貧しさに起因する。なお、本稿では、利用の利点を中心に述べたが、一部にも述べた(3.1.1)ように欠点も少なくない。とりわけ、取扱い者の被ばくや施設設備の安全管理には十分留意して利用することが重要である。おわりに、資料の収集に御協力と御教示を賜った元農林省農業土木試験場部長木村重彦博士、水産庁養殖研究所中山一郎博士、東北大学農学部中野俊樹博士、放射線医学総合研究所石川昌史博士、沖縄県ミバエ対策事業所西村真氏、の方々には心から謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 西垣晋, 山口彦之, 佐藤友太郎, 山田芳雄: 農業における利用—改定 3 版ラジオアイソトープ講義と実習,

- 日本アイソトープ協会編, 丸善, 東京, 436-441, 1975.
- 2) 辺野喜正夫, 粟飯原景昭, 内山光編: 食品衛生学, 朝倉書店, 東京, 163-172, 1979.
  - 3) 林 徹: 放射線処理—食品衛生ハンドブック, 南江堂, 東京, 514-521, 1992.
  - 4) FAO/IAEA/WHO Expert committee: Wholesomeness of Irradiated Food, WHO Technical Report Series, No. 659, WHO, Geneva, 1981.
  - 5) 科学技術庁: 昭和63年度国立機関原子力試験研究成果報告書, 第29集, 1989.
  - 6) 三井進午, 西垣 晋: 作物品種改良への利用—ラジオアイソトープ講義と実習, 日本放射性同位元素協会編, 丸善, 東京, 205-211, 1959.
  - 7) 農業技術研究所: 農業技術研究所八十年史, 農林統計協会, 東京, 1974.
  - 8) 山口彦之: 放射線応用技術ハンドブック, 朝倉書店, 東京, 328-335, 1990.
  - 9) 壽 和夫: 黒斑病に強くなった“二十世紀”: *Isotope news*, **3**, 6-7, 1991.
  - 10) 小野里 坦: γ線照射によるサケの Hertwig 効果と雌性発生誘起, 日水誌, **48**(9), 1237-1244, 1982.
  - 11) 小野里坦, 名古屋博之: 海産魚類の染色体操作—マリンバイオテクノロジー, 宮地重遠監, 裳華房, 東京, 102-115, 1991.
  - 12) 名古屋博之: 染色体操作による魚類の雄性発生について, 水産育種, **20**, 1-7, 1994.
  - 13) 沖縄農林水産部: 沖縄県ミバエ根絶記念誌, サン印刷, 1994.
  - 14) 伊良部忠男: ウリミバエ根絶に至る経緯, *Isotope news*, **3**, 8-9, 1991.
  - 15) 原子力委員会: 平成3年版原子力白書, 大蔵省印刷局, 東京, p73, 1993.
  - 16) 合志隆一: 放射線応用技術ハンドブック, 朝倉書店, 東京, 122-131, 1990.
  - 17) 芦田玉一, 田中信夫: 生体高分子結晶の構造解析—新実験化学講座6, 日本化学会編, 丸善, 東京, 257-304, 1977.
  - 18) 日下 讓: 放射化分析, 共立出版, 東京, 1973.
  - 19) 日本アイソトープ協会: 放射化分析による環境調査—微量・多元素・同時分析の手法, 同協会, 東京, 1979.
  - 20) 永塚澄子: 中性子放射化分析法と他方との比較検討, *Radioisotopes*, **35**(4), 206-214, 1986.
  - 21) 檀原 宏: 農・生物試料の実用放射化分析技術(VII)(6)動物試料の放射化, *ibid.*, **28**(1), 55-61, 1979.
  - 22) 富田道男, 片山幸士, 高田実弥, 西村和夫: 蛇紋岩風化土壌に生育する樹木中の元素濃度, *ibid.*, **39**(7), 298-303, 1990.
  - 23) Nakanishi, T.M., Kumazawa, K.,: Element Distribution in Soybean Root with Excess Na, K and Mg in Nutrient, *ibid.*, **40**(4), 142-145, 1991.
  - 24) 渋谷政夫: 農・生物試料の実用放射化分析技術(VIII)(7)魚体試料の非破壊放射化分析, *ibid.*, **28**(1), 62-66, 1979.
  - 25) Nakanishi, T.M., Matsumoto, S., Kobayashi, H.,: Morphological Change of Root Revealed by Neutron Radiography, *ibid.*, **41**(12), 63-64, 1992.
  - 26) Nakanishi, T.M., Matsumoto, S.,: Element Distribution of Na, Mg, P, Ca and Mn in Barley Leaves, *ibid.*, **40**(3), 107-111, 1991.
  - 27) Nakanishi, T.M., Inagawa, S., Kobayashi, H.,: "Non-destructive Analysis of Rape Plant Pod by Neutron Radiography", *ibid.*, **40**(3), 126-128, 1991.
  - 28) 千葉 廉編: PIXEによる微量元素分析, 日本原子力学会誌, **26**(10), 827-853, 1984.
  - 29) Horowitz, P., Aronson, M., Grodzins, L., Ladd, W., Ryan, J., Merriam, G., Lechene, C.,: Elemental Analysis of Biological Specimens in Air with a Proton Microprobe, *Science*, **194**, 1162-1165, 1976.
  - 30) Ishikawa, M., Kitao, K., Imaseki, H., Ishii, T., Uchida, S.,: Application of PIXE Analysis to Environmental Samples. Stable Element Distribution in Sea Algae by Scanning Microprobe Analysis, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **82**(1), 189-200, 1984.
  - 31) Izumo, Y., Ogata, H., Morita, S.,: Accumulations Simultaneous of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{144}\text{Ce}$  par le Poisson, *Chrysophrys major*, *La Mer*, **26**, 155-163, 1988.
  - 32) 高瀬明, 尾藤朋子, 石原 敦: 食品衛生分野における RI 標識細菌の応用に関する研究(第2報), 第3回日本アイソトープ会議報文集, 950-953, 1960.
  - 33) 高瀬 明, 尾藤朋子: 放射能標識細菌による飼育カキの細菌汚染に関する研究, 公衛院研究報告, **10**(4), 243-254, 1961.
  - 34) 高瀬 明, 尾藤朋子: 放射能標識細菌によるカキの細菌汚染に関する研究. II. 公衛院研究報告, **12**(3), 166-172, 1963.
  - 35) 高瀬 明, 成瀬宇平, 橋本江一, 関根敏明, 渡辺 隆, 出雲義朗: 食品衛生分野における RI 標識細菌の応用(第5報) 海産魚の細菌汚染, 浄化について, 第7回日本アイソトープ会議報文集, 410-412, 1966.
  - 36) 高瀬 明, 内山公夫, 出雲義朗: 貝類の放射性微粒子とりこみを指標とした水質汚濁 Bioassay 法と一般水質試験法との相関, 公衛院研究報告, **19**(1), 70-75, 1970.
  - 37) 渋谷政夫: アクチバブルトレーサ法によるサケ回帰追跡, 原子力工業, **24**(10), 23-27, 1978.

- 38) 渋谷政夫, 結田康一, 前波 雅: アクチバアルトレーサ法による漁場放流用クルマエビの標識および再捕率の研究, 水産庁, 1966.      Determination of Predator-Prey Relationship with an Activable Tracer, Europium-151, *Kontyû*, **40**(4), 278-283, 1972.
- 39) Ito, Y., Yamanaka, H., Nakasuji F., Kiritani, K., :