放射線照射と果実・そ菜の生体反応

—発芽抑制と果実の熟度調整をめぐる—

緒 方 邦 安 Kuniyasu OGATA

茶 珍 和 雄 Kazuo CHACHIN

大阪府立大学農学部園芸利用学教室

わが国における果実・そ菜の生産、消費は年々増加の傾向にあり、現在の生産量は果実類で約 515 万トン、そ菜類で約 1,650 万トン（サツマイモを除く）と、ここ 10 年間におよそ 1.7～2.5 倍の生産、消費増がみられる。このうち、約 15～20% は加工原料として用いられ、80～85% がいわゆる生鮮果実・そ菜として消費されている。われわれの食生活には戦後大きな変化がもたらされており、畜産物、油脂、果実・そ菜および各種加工食品などの消費の増大と、穀類などの減少によって代表されているように、今後ますます生鮮果実・そ菜の需要増が見込まれる。しかも、栽培技術が進んだとはいえ、前述のような莫大な数量に加えて、季節性の強いこと、収量、収穫時の変動の激しいこと、地域性の著しいこと、および鮮度が高いだけに変質、腐敗しやすいことなどの特性をもつ果実・そ菜に対し、科学的にどのようにとり扱い、高度に利用していくかということは、食糧生産にたずさわる者はもとより、農学を志す者に与えられた今後の重要な課題ではなからうか。

いうまでもなく、生鮮果実・そ菜は、収穫後も加工処理されるまでは 1 個の独立した生物体であり、生体食品の最たるものである。したがって、鮮度ないしは品質保持を生命とする果実・そ菜のとり扱いにあたっては、果実・そ菜の生理、化学的諸特性を的確に把握するとともに、環境諸条件との種々なかかわり合いについて十分認識する必要がある。しかし、この領域においては、なお解明されなければならない重要な課題が山積しており、しかも基礎的にも応用的にも興味深い問題が蔵されてい

る。果実・そ菜に対する放射線処理の問題もその 1 つといえよう。

放射線を利用して食品を保存しようとする考えは、すでに X 線が発見された当時からあったが、実際に行なわれるようになったのは第二次大戦後のことで、新しい食品処理方法の 1 つとして登場した。食品照射の立場からは、最終的には殺菌、殺虫、防黴、発芽阻止などとして現われる効果を取りあげ、実際面への応用を図ろうとするものである。生体に放射線を照射し、最終効果に至るまでの代謝過程やその機構を究明することは、自然になわっている代謝機能を明らかにする可能性をもたらしことになるであろう。また、それらの代謝作用の変化、変動をうまく利用すれば、放射線処理貯蔵の新しい分野を開拓することができるかもしれない。

ここでは、生体食品である果実・そ菜が放射線処理される場合、どのような生物学的あるいは化学的反応が示されるか、またそれが貯蔵効果のうえにどのようなかわり合いがあるか、といったことを中心に 2, 3 解説してみよう。

根茎菜類の発芽抑制

タマネギ鱗茎やジャガイモ塊茎のような根茎菜類は、収穫後ある一定の期間を過ぎると発芽してくるが、それ以前では、たとえ発芽に好適な条件を与えても発芽しない。いわゆる生理的（自発的）休眠をもつもので、普通、タマネギやジャガイモの休眠というときはこの生理的休眠をさす。休眠を過ぎると再び活動を始め、発芽するよ

うになるが、もしこの発芽をおさえ休眠状態を続けさせようとするれば、それは本来的な休眠ではなく、強制的(他発的)休眠をさせることになる。タマネギやジャガイモがどのような機構で休眠に入り、また目覚めるかについてはよくわかっていない。しかし、これらがもつ休眠期間の延長または短縮は、栽培、採種あるいは貯蔵と関連して、實際上重要な問題であり、基礎的にも応用的にも多くの研究が行なわれている。

生理的休眠を過ぎた後のタマネギ、ジャガイモの発芽を抑制することは、もっぱら貯蔵効果をねらったことで、そのためにはタマネギ、ジャガイモにとって不都合な環境条件を与え、強制休眠状態におくことである。この最も実際的な方法として、低温処理が行なわれる。タマネギは収穫後十分乾燥し、休眠後期に冷蔵 ($0 \pm 1^{\circ}\text{C}$, 湿度 75~85%) するのが効果的である。ジャガイモでは、冷蔵すると発芽は抑制されてもでんぷんから糖への成分転換が行なわれ、増糖現象が起こり、ポテトチップなどに加工する際に著しく色沢を損ねるので、 $4 \sim 7^{\circ}\text{C}$ の低温が最良とされる。また、発芽防止には生長阻害剤であるマレイン酸ヒドラジド(MH)で処理することも有効で、ジャガイモ、タマネギでは、収穫前に葉面散布することによって常温下でも発芽を防止することができる。

このような発芽抑制法に対し、近年、 γ 線照射による発芽抑制効果が確かめられ、わが国でもようやく実用化の域に近づきつつあるので、以下に γ 線照射による発芽抑制をめぐる諸問題について紹介しよう。

1. γ 線によるタマネギ、ジャガイモの発芽抑制効果

1954年、Sparrowらは放射線照射がタマネギの新しい芽の部分の細胞分裂能を抑えることを発見した。つづいて、Pederson (1956) や Brownell ら (1957) により、ジャガイモの発芽抑制の効果が実証され、わが国では、筆者ら (1959) がタマネギとジャガイモについて報告したのが最初であったと思う。これは当時、タマネギをはじめとする根茎類の休眠生理についての仕事の一環として発表したものである。

タマネギやジャガイモの発芽抑制に必要な線量は、これまでの研究結果から、おおそ 10krad 前後の線量でたりると判断される。この線量は、放射線照射による食品の保蔵あるいは加工食品の改質など、食品への放射線利用の分野では最も低い線量域である(表1)。タマネギ

表 1 食品の貯蔵に対する放射線利用場面

利 用 場 面	適 用 線 量 (krad)	適 用 範 囲	
発 芽 抑 制	5～ 50	ジャガイモ、タマネギ、ニンジンなどの発芽・発根・抽苔防止、クリ果実の発根・発芽防止など	
殺 虫 ・ 殺 卵	10～ 100	貯蔵穀類の害虫駆除、豚肉の織毛虫駆除、乾燥食品の殺虫・殺卵など	
熟度調整その他	50～ 500	果実の追熟促進または抑制、カキ果実の脱渋、アスパラ組織の軟化、リンゴのヤケ病防止など	
冷殺菌	表面殺菌	100～1,000	魚介類、畜肉類、穀類、生鮮果実、そ菜の表面殺菌による一時的保存
	完全殺菌	1,000 以上	加工食品の殺菌、改質など

表 2 放射線量ならびに線量率がジャガイモの発芽抑制に及ぼす影響(緒方, 1964)

線量 および線量率	調査月日	9月	10月	10月	12月	1月
		7日	16日	30日	7日	23日
0 krad		3*	85	100	100	100
10 krad	0.5 krad/hr	0	14	34	65	71
	160 krad/hr	0	0	0	0	0
15 krad	0.7 krad/hr	0	0	10	41	58
	160 krad/hr	0	0	0	0	0
20 krad	1 krad/hr	0	0	0	12	21
	160 krad/hr	0	0	0	0	0

* 発芽率 (%). 品種はアリ。7月29日照射

は品種の区別なく 2krad で抑制されるが、ジャガイモでは 3krad でも効果がない。つまり、タマネギのほうが放射線感受性が強いと思われる。しかし、タマネギでも実際にはそれよりやや高い線量が要求されているのは、箱やカゴ詰として大量照射される場合に、少量照射では各個体均一に照射されにくいことにもよるのであろう。

この発芽抑制の効果は、同一線量でも線量率の高いほうがより大であることは表2からも明らかで、果実・野菜など品質劣化の早いものは、とくに高線量率で短時間に照射を完了することが望まれる。また、照射効果は照射の時期によって異なり、タマネギ、ジャガイモとも、休眠期に照射するほうが適切であり、休眠覚醒期以降の照射では明らかに抑制効果の劣ることが知られている。タマネギの真の生理的休眠期間は、今まで考えられていたよりもかなり短く、ことに「札幌黄」は「泉州黄」に比べてきわめて短期間であるため、照射適期をのがさぬことが大切である。照射により発芽抑制されたタマネギは、ジャガイモと異なり内芽が褐変枯死する特異な現象がみられる。この障害は内芽のみにとどまることが特徴的で、葉部には及ばない。内芽が障害を起こす時期は、休眠期に照射したものよりも休眠覚醒期に照射したもの

のほうが早く、しかも障害部分が大きくなる。したがって、照射は内芽の枯死褐変部分を最小限度にとどめるためにも、収穫後なるべく早く、内芽のまだ動き始めない時期に行なうべきである。

ジャガイモでは、7~15 krad の照射でもタマネギにみられるような芽の障害は肉眼的にみられないが、顕微鏡で観察すると、明らかに頂芽の先端に肥大細胞がみられる。ジャガイモへの照射は、現在ソ連(1958)、アメリカ(1963)など、すでに7カ国において許可されている。わが国でもその実用化が期待されており、原子力委員会指定による特定総合研究の基本計画に基づいた、“放射線照射によるジャガイモの発芽防止に関する研究”がこのほど終了した。この研究成果の報告書はすでに公表(1971)されており、わが国で収穫されるジャガイモは、休眠期あるいは休眠覚醒期中に照射すれば、7 krad で6カ月間、それ以上の貯蔵を目的とする場合でも15 krad の線量で十分発芽を防止しうることが確認された。

2. 照射と植物ホルモンおよび核酸代謝

このような照射によって発芽抑制の反応効果が現われる原因は、現在次のように考えられている。1) 植物ホルモンの生合成への影響、2) 分裂組織の破壊または核酸の減少、3) 核蛋白の等電点が酸性側へ移行するなどの核蛋白の質的变化、4) 染色体異常、などである。

生長調整物質の代謝の面から休眠現象を追求しようとする研究は、従来数多くみられる。放射線に対し、オーキシン自身は高い感受性を有するとされるが、Brownellら(1955)は、ジャガイモ(Sebago 種)では照射によってかえって生長抑制物質の減少がみられ、γ線照射と発芽抑制との間には直接的な関係はなかったとしている。

図1 γ線照射とタマネギ底盤部の生長調整物質 (Ogata, 1961)

筆者ら(1961)は、休眠覚醒期にあるタマネギ(泉州黄)に10 krad のγ線を照射し、5日後に芽の部分の生長調整物質をアベナテストに供したが、その結果では照射によってとくに促進物質が消失することはみられなかった。しかし、タマネギ鱗茎の底盤部組織(代謝生理の中心部)について、経時的に生長調整物質を測定した結果では、図1に示すように、生長促進物質がいずれの時期でも照射区でいくぶん少なく、照射によって植物ホルモンの生合成がなんらかの形で影響されるものと思われる。ところが、γ線の照射により発芽が抑制されたレタス種子やジャガイモ塊茎にジベレリンやカイネチン、チオウレアなどを処理すると、発芽がみられるようになるが、一方ジャガイモで同様の処理をした場合、濃度が低いと、もとに戻らなかったということもみられ、被照射植物の休眠の深さや処理時期などの複雑な問題があり、さらにこの面での研究に期待がもたれる。

ジャガイモやタマネギのように休眠を行なう貯蔵器官(塊茎や鱗茎)では、休眠中の代謝活性はきわめて緩慢である。ジャガイモ塊茎の芽を含む組織切片や、タマネギ鱗茎の底盤部組織の切片では、休眠中の酸素吸収量や炭酸ガス排出量は非常に微弱であるが、休眠状態を脱するところから徐々に増大する。Korablevaら(1966)は、核酸の生成はエネルギー要求と関係が深いので、核酸代謝の面から追究し、塊茎や鱗茎が休眠状態から脱ける程度に応じて核酸が分裂組織中にしだいに蓄積することを明らかにし、これが貯蔵器官が休眠状態から脱する基本条件の1つであり、また組織中にニュークレオチドが一定レベルに達することが必要であることを指摘した。核酸代謝に最も強力に作用する要因の1つにイオン化放射

表3 γ線照射によるジャガイモおよびタマネギ分裂組織中の総核酸(RNA+DNA)含量の変化 (Korableva, 1967)

線量 (krad)	11月	12月	2月	3月	4月
ジャガイモ					
0	305*	340	289	280	393
5	302	342	291	250	244
8	280	292	244	230	211
タマネギ					
0	1,190	1,523	1,441	954	964
10	1,195	1,110	945	620	562
100	1,110	1,050	811	692	503

* μg P/g 乾物

線があるが、彼らは 5krad 以上の γ 線をジャガイモとタマネギに照射することによって、核酸の合成を著しく弱め(表 3)、その質的組成を変え、さらに分解を起こさせるとし、植物の貯蔵器官の発芽に対する放射線の抑制効果は、まず第一に核酸とニュークレオチド代謝の破壊および分裂組織の変質と関係があると述べている。現在、筆者らは照射ジャガイモとタマネギの窒素化合物の代謝について実験しているが、タマネギの芽で核酸合成や蛋白合成がはじまるまでの時期では、照射タマネギと非照射タマネギの芽におけるこれらの含量に差はない。芽の動き始める時期では、照射タマネギに前述した内芽の障害が発生しはじめることから、DNA、RNA などの量的問題とともに、その質的变化についても十分検討されるべきものとする。また、上記のホルモン生合成反応や染色体の機能の変化、細胞分裂における障害など、その発芽抑制機構についてはなお研究の余地が残されている。

3. 照射ジャガイモの褐変

ジャガイモの発芽抑制の線量範囲内で、照射ジャガイモの維管束周辺に褐変の発生することが、特定総合研究実施中に発見された。このような褐変発生の程度は、品種、栽培条件、熟度、照射時期によって異なると思われるが、實際上、照射ジャガイモの品質劣化につながる問題であり、好ましくない。筆者ら(1970, 1971)がこれまで調べたところでは、低線量域(5~40krad)の照射でも、褐変の発生は線量が高くなると増大し、いずれも 3~7 日に急激に進行する。また、収穫後 1 か月以内では照射後早期に照射するほど増大する傾向があるが、収穫後 2 か月では、10krad ではほとんどみられず、20 あるいは 40krad でも発生は減少する。かりに収穫時における塊茎の大、小をもって熟度による褐変発生の相違をみると、未熟な塊茎ほど発生が多い。したがって、このような褐変発生現象を考慮し、しかも発芽抑制効果を高めるためには、少なくとも収穫後 1 か月から 2 か月くらい、つまり休眠中期~後期に照射するのが適当である。また、同一品種「男爵」について九州から北海道まで 7 産地を選び、産地別による褐変発生状態の違いをそれぞれ照射 1 週間後にみると、産地によってかなり差があり、栽培期間の長い地方の試料、すなわち熟度の進んだもののほうが褐変しにくい傾向がみられた。

このような褐変発生に関与する物質としては、ポリフ

ェノール物質が考えられ、照射により *o*-diphenol が増加すること、polyphenoloxidase や peroxidase などの活性が高まることなどが、小川ら(1969, 1970)や筆者らによって追跡された。ジャガイモの褐変は、放射線に限らず物理的損傷や病菌の感染時などでも生じ、これらの場合にもフェノール物質の増加がみられ、mono-および diphenol の酸化により褐変質物質がつけられることが知られている。このフェノール物質の異常蓄積はフェノールプロパノイドの生合成系の活性化によるものと考えられ、南川ら(1965)はサツマイモを切断すると phenylalanine ammonialyase (PAL) の活性が増加すると述べ、放射線照射と関連しては、後述の Riov ら(1968)がオレンジの果皮で PAL 活性が著しく高まることを指摘している。このようなことから、照射ジャガイモであっても、照射直後塊茎内のフェノールプロパノイド生合成系が活性化され、*o*-diphenol 含量が高まり、その結果褐変が生ずることは十分考えられることである。

現在、実際的立場から照射ジャガイモの褐変防止対策について種々検討が加えられている。

果実の熟度調整

果実の種類によっては、ある一定の段階まで発育していれば、樹上での成熟をまたずにかなり未熟なときに収穫しても、その後成熟作用が行なわれ、可食果実としての成分構成が起こって利用できるものがある。バナナ、洋ナシ、トマトなどはその典型的な例である。このような果実の収穫後における成熟現象を追熟(after ripening)とよぶ。追熟可能な果実に共通してみられる生理的特性は、果実が完熟に近づくと呼吸の特異な上昇現象がみられることで、これを呼吸の climacteric rise とよんでい

図 2 バナナとミカンの貯蔵中の呼吸の変化

る。呼吸の climacteric maximum またはその直前直後に、果実の着色や軟化が起り、香がよくなって可食状態になる。これに対し、オレンジを初めミカン、レモンなどの柑橘果実やカキなどでは climacteric rise がみられず、収穫後の呼吸は徐々に減退していく(図2)。

追熟現象を示す果実は、この呼吸の climacteric の時期および程度を人工的に調整することにより、追熟作用を抑制したり、促進したりすることができるわけである。いうまでもなく、climacteric の発現の時期は品種や収穫時期などによって左右されるが、温度、空気組成、エチレングスなどの貯蔵環境条件の制御いかんによって大いに影響される。放射線処理による果実の熟度調整効果も、このような観点からみいだそうとするものである。この果実追熟に伴う呼吸の climacteric rise 発現の機構、つまりは果実追熟の生理機構については、植物生理学あるいは園芸利用学的に多くの研究があるが、その詳細については別の機会にゆずりたい。

1. γ 線による果実の熟度調整効果

一般に、50~500 krad の γ 線を果実生体に照射すると、種々複雑な生理的变化や組織の軟化などが起こる。これらの変化現象をうまく利用すれば、果実の熟度調整を行なう可能性をみいだすことができる。しかし、果実の種類によって放射線感受性は著しく異なるので、すべてのものにその効果を期待することはできない。さきにも述べたように、果実類は収穫後の呼吸特性から climacteric rise を有するものと有しないものがあるが、放射線による果実の熟度調整効果は、climacteric rise を有する果実に大きくみられるようである。しかし、目的によっては climacteric rise を有しない果実でも、その効果を発揮させることができる。

a) Climacteric rise を有する果実

呼吸の climacteric rise を有する果実では、ある線量の範囲では照射による生体機能の障害から回復しようとする repair process (修復反応) が働くと考えられ、この間に果実の追熟が抑制される。洋ナシパートレットでは、追熟適温 (20°C) 下、250~500 krad の照射で、明らかに呼吸の climacteric のピークの現われる時期が遅れ、それだけ果実の追熟が遅延される(図3)。1,000 krad もの高線量になると、果実は黄化せず、組織は粉質化し、追熟は阻止される。また、高線量ほど果皮が傷つき

図3 γ 線照射が緑熟洋ナシの呼吸およびエチレン生成に及ぼす影響(緒方ら, 1967)

太線: 呼吸量, 細線: エチレン生成量

やすく、微生物の侵害を受けやすくなる。照射洋ナシのでんぷんは、照射直後には分解がみられるが、追熟中の分解は抑制され、1,000 krad を照射した洋ナシの pectin methylesterase や polygalacturonase の活性は無処理のものより低い値を示す。アミノ酸については、アスパラギン酸とグルタミン酸は線量が高いほど減少するが、高線量でむしろ増加するものもある。蛋白質からの分解によるアミノ酸の増加なども考えられ、照射果実の遊離アミノ酸代謝の複雑性が認められる。なお、照射するしないにかかわらず、貯蔵中にプロリンが増加し、その程度が照射果実に著しいことは興味深い。一般的にみて、標品であるアミノ酸溶液は照射によって分解されやすいが、生体内では比較的影響されにくいようである。

比較的未熟(緑熟果)なトマトに 200~400 krad 程度の γ 線を照射すると、呼吸の climacteric の発現が遅れ、明らかにクロロフィルの分解とリコピンの発現がおさえられ、追熟が抑制される。しかし、照射による果肉の若干の軟化はまぬがれず、500 krad 以上になると嗜好性も低下する傾向がみられる。

洋ナシやトマトのように、緑熟バナナでも照射により追熟調整が可能であるかどうかについては、これまで検討されたところでは 50~100 krad の照射で追熟は抑制され、色はきわめて悪い汚れた黄色となる。また、多少熟度の進んだものや、さらに黄色になったバナナに照射しても、やはり果皮は黒変する。このように、バナナはある線量では追熟を抑制することができるが、果皮が黒変するので、放射線を照射することによってバナナを鮮明に黄色化させたり、あるいは黄色に保持させることは、実際上困難であると思われる。しかし、オゾンを除いて照射すれば果皮の黒変が防止され、追熟も順調に行なわ

図4 γ 線を照射したグレープフルーツとオレンジのフラベドにおけるフェニルアラニン・アンモニアラーゼ (PAL) 活性とフェノール成分 (Riov ら, 1968)

○—○, ●—●: 200 krad, ○-----○, ●-----●: control
黒丸: 実験1, 白丸: 実験2

れるという Ferguson ら (1966) の報告もあるので、今後検討すべき課題の1つであろう。

b) Climacteric rise を有しない果実

Non-climacteric group に属する果実としては、柑橘類やカキ、イチゴ、ブドウなどがあげられる。緑色レモンに 200 krad の γ 線を照射すると緑色がより早く消失し、線量が高くなるとブロンズ色になるといわれる。このような現象は早生温州ミカンでもみられ、果実の外観は 100~1,000 krad の照射でいずれもブロンズ色になり、劣変する。この現象は、照射による果皮中のフェノール物質の蓄積または酸化が原因であると考えられる。Riov ら (1968) は、収穫直後のグレープフルーツおよびオレンジに 200 krad の γ 線を照射し、外果皮の PAL 活性とフェノール成分を経時的に測定した。その結果、図4のように γ 線が照射されたものには、PAL 活性がフェノール成分の増加を伴って顕著に発現することを認めた。ところで、この PAL 活性発現の経過は、植物組織が光線を受けたり切断されたりした場合ときわめて類似していることは注目に価する。しかし、PAL 活性増大に対する放射線の作用機構については明らかでない。

50 krad の線量では、果実表面に付着する *Penicillium* 菌を殺滅する効果があるので、オレンジや温州ミカンなどについて表面殺菌による貯蔵性の延長が試みられている。たとえば、黒崎ら (1971) によれば、温州ミカンに 50 krad の γ 線を照射すれば貯蔵性の延長が期待でき、梅田 (1969) らは 200 krad (0.5~0.1 MeV) の β 線を照射し 5°C で貯蔵すると良好な結果が得られたという。また、

照射による柑橘果実のカロチノイド色素への影響についても、彼らの詳細な研究がある。呼吸の面では低線量での反応性は大きく、照射直後いったん増加した炭酸ガス排出量は貯蔵中に漸次低下するが、1,000 krad の高線量を受けたものは照射後すでに 100 krad のものより低い値を示し、貯蔵中の減少も著しい。

渋ガキを γ 線照射によって軟化脱渋するという興味ある現象が、白石 (1959)、北川 (1964)、筆者ら (1962, 1968) により報告されている。たとえば、「平核無」では 150 krad で 3~

5日、「宮崎核無」は約10日で軟化脱渋する。1,000 krad では、150, 250 krad 照射のものよりかえって軟化脱渋が遅れる。しかし、同じ渋ガキでも「愛宕」ではこのような線量の違いによる軟化脱渋の相違はみられず、線量増加に伴って軟化脱渋する。このように、渋ガキが照射によって脱渋され、可溶性タンニン含量が減少することは興味深いことではあるが、軟化を伴うので、照射後の適切な処理が必要である。さきの洋ナシでは追熟が抑制されるのに対し、渋ガキでは軟化が進むことは注目される。照射後の呼吸は、照射直後には増大するが、以後す

図5 γ 線照射が平核無カキの呼吸に及ぼす影響 (緒方ら, 1968)

みやかに減少し、貯蔵中に減少の一途をたどる。4,000 kradもの照射では果実は崩壊状態となり、他の照射区よりも呼吸量の低いことが知られる(図5)。いずれにしても、柑橘果実やカキ果実などでは、climacteric riseを有する果実におけるような照射線量による修復反応はみられず、一般に照射によって熟度の促進がみられる。

2. 組織切片および細胞顆粒の呼吸

放射線の呼吸への影響は、前述のように主として果実全体から排出される炭酸ガス量で検討されており、呼吸代謝の質的变化について生理化学的に研究を進めているのは、Romani 一派とその他2,3の研究グループに限られている。ここでは、とくに呼吸の climacteric riseを有する果実についての研究結果から考えてみたい。

呼吸の climacteric rise の原因については諸説があり、まだ統一された見解はないが、その1つに呼吸とリン酸化の変化によるとする考えかたがある。古ら(1965)によれば、バナナの組織切片の酸素吸収量に対する2,4-dinitrophenol (DNP) の添加効果は、果実の未熟な段階で大きい、果実が熟するにつれて減少し、climacteric rise が maximum に達するところでは消失すると述べている。筆者ら(1965, 1967)は、照射バナナやトマトで照射直後 DNP 添加効果が小さくなることを認めている。照射したものに対する DNP の添加効果が、無処理果実でみられるものと質的に同じかどうかは判断しにくい、少なくとも照射によって呼吸と酸化的リン酸化にすみやかな変化が生じていることは考えられる。Yang ら(1958)は、バナナ果実の climacteric maximum 時に ATPase の活性が増大することを示しているが、Rubin ら(1961)による照射ジャガイモの呼吸の増大は

図6 γ 線照射洋ナシのミトコンドリアのコハク酸酸化能力 (Romani, 1966)

ATPase の活性化によること、筆者ら(1965)による照射ジャガイモ切片の酸素吸収量に対する DNP の添加効果は急激に減少することから考えて、照射直後の照射果実でも同様なことが起こっているとすれば、興味のある問題である。Dadwaldesai ら(1969)によれば、300 krad を照射した緑熟トマトから調整したミトコンドリアの酸素吸収量は、リンゴ酸を基質とした場合、照射直後は減少し、その後いったん無処理のものに近づき、再び減少する。その場合の P/O ratio は無処理のそれよりやや低い。また、調製したミトコンドリアを *in vitro* で照射した実験では、コハク酸を基質とした場合、150~300 krad で酸素吸収量は減少するが、P/O ratio はほとんど変化しないことを明らかにしている。

つぎに、呼吸基質の酸化または脱炭酸系の変化をみよう。climacteric group の果実では、果実が熟するにつれて pyruvate decarboxylase の活性が増大するのが一般的傾向であるが、照射果実では、この酵素の活性化が抑制されるもの(バナナ)、逆に促進されるもの(トマト)がある。また、malic enzyme も正常追熟過程で活性度が増大するものの1つであるが、洋ナシではこの酵素の活性増大が 250 krad の照射で一時的に抑制されると推察されている。Romani ら(1966)によると、250 krad を照射した洋ナシから調製したミトコンドリアの α -ケトグルタル酸やコハク酸の酸化能は、照射直後低下するが、その後回復し、無処理のものより高くなるという(図6)。これは、図3に示した 250 krad 照射洋ナシの呼吸の climacteric rise の発現が遅れ、かつそのピークが相対的に高いことを説明する一助となろう。さらに、彼らは

図7 γ 線照射チェリーのミトコンドリア量の変化 (Romani, 1966)
18,000 $\times$ g, 15 分間遠心分離
100 $\times$ g (10 分) で細胞破砕物を除いた上澄中の全 N に対するミトコンドリア・フラクションの N の 100 分率で表わす。

果実のミトコンドリアに対する放射線の影響について数多くの研究を行なっている。チェリーのミトコンドリアの収量に対する放射線の影響については、照射直後ではかなり減少しているが、その後徐々に増加し、やがて無処理果実のそれと同じ収量を示すようになる(図7)。このことは、照射された果実のミトコンドリアは一時的には物理的影響を受けるが、その後徐々に損傷から回復することを示唆する。また、彼らは、250~1,000krad 照射した洋ナシから分画されたミトコンドリア膜の性質、構造、大きさ、密度にはほとんど変化がみられないが、照射によって蛋白質が更新されたり、リボゾームのRNAへの³H-ウリジンのとり込みが大きくなることもあるとしている。

以上のような結果からみると、呼吸とリン酸化反応が低下することはあったとしても、climacteric groupの果実では、少なくとも高エネルギーリン酸化合物を必要とする生成系が、照射によって促進される場合のあることから、照射による損傷から回復しようとする修復反応が起こるものと推察できる。

3. 照射果実のエチレン生成

果実の成熟に伴いエチレンが生成されることは古くから知られており、本誌にも葛西(1971)によって、果実のみのりの生理とエチレンの関連について興味深い解説がなされている。果実体のエチレンと生成反応は、とくに前述の洋ナシやバナナのように追熟可能な果実の呼吸のclimacteric riseと密接な関係にあることや、追熟に伴うエチレンの生成機構ならびに作用機構などについて多くの研究が行なわれている。

ところで、果実が照射を受けると climacteric の有無にかかわらず、一時的にエチレンの生成が促進されるこ

とが認められている。表4にその一例を示したが、エチレン生成の程度は果実の種類、熟度、線量などによって異なり、照射直後におけるエチレン生成増大の現象は呼吸増大のそれとよく類似する。しかし、この照射に伴うエチレンの増加はきわめて一時的なもので、その後ただちに急減する。照射直後に生成されるエチレンは、一部のアルコール類、TCA サイクルの酸、リノレイン酸の分解によって生ずること、およびこの反応にはフリーラジカルがなんらかの形で関与することが示唆されている。

図3に貯蔵中のエチレンの消長について、その一例を示した。すなわち、pre-climactericの緑熟洋ナシに250krad および1,000kradのγ線を照射すると、照射直後エチレンの生成がみられるが、その後急減し、250krad照射のものでは無処理果より遅れて再びエチレン生成がみられるようになり、ピークに達する。この時期に呼吸のclimacteric maximumがみられるようになり、前述のように果実の追熟が抑制される。1,000krad くらいに線量が高くなると、エチレンの生成もなく、呼吸のピークもみだれ、果実の追熟は阻害される。同様な現象は緑熟トマトや青ウメでもみられ、このような果実に適当な線量の放射線照射をすると、追熟中の果実のエチレン生成が抑制され、果実追熟の抑制と密接な関係にあることがわかる。

他方、照射によって追熟の抑制された果実に人工的にエチレンを処理した場合、洋ナシではエチレン生成は多くなるが、もはや正常な追熟が行なわれず、バナナでは追熟が回復するという現象があり、放射線照射とエチレン処理による組合せも、果実の熟度調整の問題と関連して興味ある課題である。

生体内におけるエチレン生成過程については、現在逐一明らかにされつつあるが、Lieberman ら(1965)は、phosphate buffer+Cu²⁺+ascorbate+methionine系でエチレンが生成され、さらにこの系にH₂O₂を共存させるとエチレン生成がより促進されると述べている。また、アイソトープを用いた実験で、ピルビン酸、アセトアルデヒド、酢酸などからもエチレンが誘導されることから、加藤ら(1967)は照射によるエチレン生成反応性の高いウメ果実の切片を用い、貯蔵中におけるエチレン生成へのγ線の影響について調べている。それによれば、照射7日後の切片にH₂O₂のみを添加することにより、エチレンがかなり発生する。クエン酸、L-メチオニン、アセ

表 4 果実の C₂H₄ 生成と CO₂ 排出量に対する
γ 線照射の影響 (緒方, 1968)

線 量 (krad)	洋 ナ シ (緑色果) C ₂ H ₄ CO ₂		ウ メ (緑色果) C ₂ H ₄ CO ₂		イ チ ゴ (成熟果) C ₂ H ₄ CO ₂	
無 処 理	100*	100	100	100	100	100
250	118	205	238	264	118	131
500	138	240	749	414	155	142
1,000	190	310	—	—	—	—
無処理測定値	0.97**	20***	2.14	77.7	0.35	176.8

* 照射直後における無処理区の値を100としたときの比較,
** μl/kg/hr, *** mg/kg/hr

図 8 放射線によってひき起こされる果実・野菜の反応の相互関係

トアルデヒドを加えても、無照射のものとエチレンの発生はそれほどかわらないが、これに H_2O_2 を加えるとエチレン発生量が高まる。しかも、その発生量は照射果実切片では明らかに少なく、この時期に果実全体として測定されるエチレン量が、無処理果よりも照射果実が少ないことと一致する。なお、最近ではエチレン生成と PAL 活性との関係についても論じられており、生体内におけるエチレンの生理機構や役割については未解決の問題が多く、放射線照射による果実熟度調整とエチレン生成の機構などについても、今後一層研究されることが期待される。

以上、放射線照射による果実・野菜の生体反応を、発芽抑制ならびに熟度調整効果との関連において解説した。低～中線量の照射でひき起こされる果実・野菜の反応の相互関係を図 8 に模式的に示した。今後、さらに放射線を用いた諸反応が生化学的に追求されたとともに、食品利用の立場からも十分検討が加えられ、食品処理に対する放射線の新しい利用分野が開拓されることが望まれる。すでに記したように、タマネギ、ジャガイモなど、一部の食品に対して放射線の使用を許可している国々もあり、わが国における放射線処理貯蔵の実用化もそれほど遠くないものと思われ、食品の世界にも原子力時代の訪れを感じる。

文 献

- 1) L. E. Brownell, F. G. Gustafson, J. V. Nehemias, D. R. Isleib & W. J. Hooker: *Food Technol.*, 11, 306 (1956).
- 2) 茶珍和雄, 加藤勝一, 緒方邦安: *食品工誌*, 12, 9, 367 (1965).
- 3) 茶珍和雄, 山中博之, 緒方邦安, 加藤勝一: *園学雑*, 39, 93 (1970).
- 4) 葛西善三郎: *化学と生物*, 9, 634 (1971).
- 5) 加藤勝一, 茶珍和雄, 緒方邦安: *園芸学会研究発表要旨* (1967, 10).
- 6) N. P. Korableva & L. V. Metlitsky: *日本食品照射研究協議会刊行物第 10 集* (1967).
- 7) M. Lieberman & A. T. Kunishi: *Biochem. J.*, 97, 449 (1965).
- 8) E. C. Maxie, N. F. Sommer, C. Muller & H. L. Rae: *Plant Physiol.*, 41, 437 (1966).
- 9) K. Ogata, T. Iwata & K. Chachin: *Bull. Inst. Chem. Res. Kyoto Univ.*, 37, 425 (1959).
- 10) 緒方邦安: *園芸食品の加工と利用*, 養賢堂 (1963).
- 11) 緒方邦安: 第 8 回アイソトープ会議報文集, 977 (1968).
- 12) 緒方邦安, 山中博之, 茶珍和雄: *食品工誌*, 15, 519 (1968).
- 13) 緒方邦安, 茶珍和雄: *食品工誌*, 16, 167 (1969).
- 14) 緒方邦安, 山中博之, 加藤勝一, 茶珍和雄: *食品工誌*, 11, 391 (1969).
- 15) 緒方邦安, 辰巳保夫, 茶珍和雄: *食品工誌*, 17, 298 (1970).
- 16) M. Ogawa & I. Uritani: *Agr. Biol. Chem.*, 34, 870 (1970).
- 17) J. Riou, S. P. Monselise & R. S. Kahan: *Plant Physiol.*, 44, 631 (1969).
- 18) R. Romani: *Radiation Botany*, 6, 87 (1966).
- 19) B. A. Rubin, & L. V. Melitsky: *Proc. 5th Intern. Congress of Biochem.*, Moscow, 8, 161 (1961).
- 20) 佐藤友太郎: *Radioisotopes*, 20, 631 (1971).
- 21) A. H. Sparrow, & E. Christensen: *Nucleonics*, 12, 16 (1954).
- 22) 梅田圭司, 川嶋浩二, 佐藤友太郎, 伊庭慶昭, 西浦昌男: *食品工誌*, 16, 397 (1969).

以上のほか、本文に引用した数多くの文献原著者に対し謝意を表する。