総説

食品照射研究の現状

藤 卷 正 生*

Present Status of Studies on Irradiated Foods

Masao FUJIMAKI

(Dept. of Agr. Chem., the University of Tokyo:
1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo)

はじめに

X線を用いた食品の殺菌に関する研究は1943年にはじめて米国の MIT で行なわれた。それから20数年を経た今日では、食品照射研究の成果によって照射食品の法的許可からその実用化へふみきっている国々もみられる。わが国でも食品照射の基礎的研究は10年も前から個々

に、あるいは研究班組織で行なわれていたが、1965年に原子力委員会食品照射専門部会が設置され、そのとりまとめの結果として、同年9月に原子力委員会は「食品照射研究開発基本計画」を決定した。

なおこの研究開発を円滑に実施するために原子力局に食品照射研究運営会議が設けられ、同会議は本年6月食

第1表 食品などの放射線照射の応用例¹⁾

照 射 品 目 と 目 的	所 要 線 量 (M rad)
高線量照射 (>1 M rad)	
• ペーコンの完全殺菌とその後の室温貯蔵	4~6
• 食品の特殊材料 (香辛料, セロリ種子など) の完全殺菌	1~3
• 凍結温度での肉類, 魚介類の完全殺菌	3~6
• 医療用具 (縫合糸, プラスチック注射筒, 包帯, ガーゼ, メスなど) および医薬品の完全殺菌	2.5
• 原料羊毛の病原菌の殺滅	2.5
低線量照射 (0.1~1 M rad)	
• 枝肉や包装魚介類の 0~4° における貯蔵期間の延長	0.2~0.5
• 果実・そ菜類の微生物の殺滅による貯蔵期間の延長	0.1~0.5
• 加熱殺菌法との組み合わせ照射	0.1~1
• 冷凍卵, ココナッツ, 肉類, 畜産加工品などのサルモネラ食中毒の防止	0.5~1
• 家畜飼料中のサルモネラ菌, 腐敗菌, 害虫の殺滅	0.1~1
• 乾燥野菜の水もどし時間の短縮	0.25~2.5
極低線量照射 (<0.1 M rad)	
• 肉類の病原寄生虫の防除	0.01~0.1
• 穀類の虫害防止	0.01~0.05
• ジャガイモ, タマネギなど根菜類の発芽抑制	0.006~0.01

* 東大農学部農芸化学科: 文京区弥生 1-1-1

品照射対象品目の選定、共同利用施設の設置について報告を行ない、これは7月、原子力委員会の決定するところとなり、ジャガイモ、タマネギを含む7品目の実施計画によって照射効果や照射食品の安全性、健全性に関する研究などが原子力特定総合研究として推進されるようになった。

わが国におけるこれまでの研究経過から考えて、いわゆる健全性の研究がとくに重視されているのは当然のことである。従来、米国原子力委員会 (AEC) および米国陸軍が推進してきた照射食品の健全性に関する長期にわたる、ぼう大な研究は世界各国から高く評価されてきたが、最近 (1968年7月) かねて米国陸軍より出されていた照射殺菌ハムの申請が、その安全性のデータが不十分であるとの理由で、米国食薬品管理局 (FDA) の承認するところとならず、その申請が取り下げとなったこと、さらにベーコンについても許可データを再審するためにその許可が取り消しに決定したというニュースはいち早く世界各国に伝わり、照射食品の開発にときならぬ暗影を投げかけようとしている。この時点にあって食品照射

研究の現状を簡単に眺めてみよう。

食品照射の目的と照射対象品目

食品照射は生鮮食料品や腐敗しやすい加工食品にコバ

第2表 各種微生物のD値*²⁾

微生物	培地	D値 (Mrad)
<i>Cl. botulinum</i> A型	食品	0.40(最大)
" B型	緩衝液	0.33
<i>B. pumilus</i>	"	0.30
<i>M. radiodurans</i> R ₁	牛肉	0.25
<i>Cl. welchii</i>	肉	0.21~0.24
<i>Cl. sporogenes</i>	緩衝液	0.21
<i>Cl. botulinum</i> E型	肉汁	0.20
<i>B. stearothermophilus</i>	緩衝液	0.10
<i>S. faecalis</i>	好氣的肉汁	0.05
<i>E. coli</i>	"	0.02
<i>Pseudomonas</i> sp.	緩衝液 好氣的	0.004

* 照射により最初の菌数から10%に減少する線量

第3表 米国における照射食品の許可申請と法的許可 (1968年7月)

品名	申請者	線源	線量 (Mrad)	FDA		照射目的
				申請	許可	
ベ一コン	米陸軍	コバルト 60	4.5~5.6	62. 8.17	63. 2. 8	完全殺菌
"	Gen. Elec.	5 MeV 電子線	"	63. 6. 5	63. 8.30	"
"	米陸軍	10 MeV 電子線	"	63. 8.23	65. 4.21	"
"	原子力委	セシウム 137	"	63.12.18	64. 4. 1	"
"	Rad. Dyn. Inc.	5 MeV 電子線 変換 X 線	"	64. 7.23	64.12.19	"
小麦および小麦粉	Brownell ら	ガンマー線	0.02~0.05	62.10. 4	63. 8.21	害虫の殺滅
"	High Volt Eng. Corp.	5 MeV 電子線	"	63.12.18	66. 2.26	"
"	原子力委	セシウム 137	"	64. 9. 1	64.10.10	"
ジャガイモ	"	"	0.005~0.01	64. 4. 1	64.10.10	発芽抑制
"	米陸軍	コバルト 60	"	65. 1.30	64.10.10	"
"	"	セシウム 137	"	63. 6. 6	64. 7. 8	"
"	"	コバルト 60	0.015	65. 1.30	65.11. 9	"
かんきつ (オレンジ, レモン, グレープフルーツ)	原子力委/米陸軍	"	0.075~0.5	63.12.18	—	保存期間延長
かんきつ (オレンジ)	"	"	0.075~0.3	65. 5. 4	67. 8.15 申請取下	"
イチゴ	原子力委	"	0.1~0.25	65. 5.18	"	"
魚類	原子力委/米陸軍	コバルト 60 セシウム 137 10 MeV 電子線 5 MeV X 線	0.1~0.2	65. 9.15	—	"
"	米陸軍	コバルト 60 セシウム 137	3.5~5.6	66. 8.24	—	完全殺菌
包装材料	原子力委	ガンマー線	1	64. 2. 8	64. 8.14	照射食品の包装用

第4表 ソ連保健省で許可された照射食品

品 名	照射目的	線 量 (k rad)	許 可
ジャガイモ	発芽抑制	10	1958. 3.14
小麦	殺 虫	30	1959
乾燥果実	"	100	1966. 2.15
乾燥食品濃縮物	"	70	1966. 6. 6
生鮮果実, 野菜	保存期間延長のため菌数減少	200~400	1966. 7.11
生 肉 (牛, 豚, 兎肉フィルム包装)	"	600~800	"
内臓抜き冷チキン (フィルム包装)	"	600	1966. 7. 4
料理用肉製品: (フィルム包装したローストミート, リブステーキ)	"	800	1967. 2. 1
タマネギ	発芽抑制	6	1967. 2.25

L. V. Metlitskii et al.: Rad. Process, Food Prod., page 81, Moscow 1967

ルト60, セシウム137などのラジオアイソトープあるいは放射線発生装置から得られる放射線を照射して、食品中に存在する病原微生物や腐敗微生物の殺菌ないしは滅菌、殺菌などに寄生する有害昆虫の殺滅、農産物の発芽・発根の抑制、果実、野菜類の熟度調整などにより、保存期間の延長あるいは公衆衛生上の問題の解決、また食品によっては照射による品質の改善を行なわんとするもので、食品などの放射線照射の応用例は第1表のごとくである。普通、1 M rad (10⁶ rad) 以上の線量を高線量、以下を低線量と呼んでいるが、照射に用いる線量は照射の目的によって異なり、たとえば殺菌の場合、完全殺菌 radappatization には4~6 M rad, 病原菌殺滅 radicization には0.3~1.0 M rad, また通常腐敗菌の減少 radurization には0.05~1.0 M radの線量が用いられている。完全殺菌の約5 M rad という値は照射にもっとも抵抗性の強いといわれるボツリヌスA型菌の孢子をほぼ完全に死滅させるに足る線量であって、第2表に示してあるD値の約12倍に当たっている。米国およびソ連で許可された照射食品は第3および4表に示してある。

品 目	年 度	42	43	44	45	46	47	48	49
馬鈴薯	←			→					
玉ねぎ	←			→					
米	←					→			
小麦			←					→	
みかん				←					→
水産ネリ製品 ウインナーソー セージ			←					→	

第1図 研究実施計画表

わが国における食品照射対象品目を選定する場合に、考慮されたことはまず第1に、多くの品目に先がけて実用化される可能性のもっとも大きいものということで、この点からジャガイモ、タマネギが選ばれ、また利用価値が高く、実現性の見通しもあり、わが国が率先してと

り上げるべき重要品目として米が選ばれた。これらについて生産ならびに消費量が大きく、照射による損失防止をはかることによって著しい経済的效果が得られ、その成果について技術的に十分見通しのあることを条件として、γ線による殺虫を目的とする小麦、電子線による青カビの発生防止を目的とするミカン、γ線による殺菌を目的とする水産練製品およびウインナーソーセージの4品目が選定され、それらの研究実施計画は第1図のごとくである。図に示してあるように、ジャガイモ、タマネギの研究では、照射効果の研究と安全性、健全性の研究とが平行して3年間で行なわれるが、その他の品目では、原則として照射効果の研究が1年先行するとともに当初の2年間で基礎的な研究を、後の3年間で本格的な開発を行なうようになっている。安全性および健全性の研究は、当初の1年間で基礎的研究を、後の3年間で総合的な検討を実施するが、とくに毒性などの動物飼育試験では、当初の1年間(研究2年目に当たる)で飼育に関する予備試験を、つぎの2年間で飼育し、最後の1年間で検討を行なうことになっている。安全性および健全性の研究は国立衛生試験所、国立予防衛生研究所、国立栄養研究所などの研究機関が担当されている。

なお鮮魚、食肉などについては、照射による効果は期待されるが、明確な技術的見通しの得られないまま、当面は基礎的照射試験を行なうことにとどまっている。

照射によって起こる食品の変化

ジャガイモ ジャガイモの発芽抑制に必要な線量は比較的低線量の約10 k rad であるが、照射条件やイモ自体の状態などによってもいくぶん異なる³⁾。放射線の抑制効果は核酸とヌクレオチドの代謝系の破壊と分裂組織の変質とによるものと考えられている⁴⁾。糖など炭水化物の変化は第5表に示してあるように、10 k rad 以下の照射線量では長期の保存を考えると未照射のもの(未発芽)と実際と同じである。

ジャガイモはビタミンCの重要な給源であるが、そのビタミンC含量は第6表にも示されているように、照射

第5表 照射ジャガイモの炭水化物の変化⁴⁾
(Shalinova ら, 1966)

炭水化物	貯蔵期間 (月)	未照射 (対照)	照射		
			5 k rad	7 k rad	10 k rad
単糖類	0*	0.26	0.33	0.25	0.42
	1	0.34	0.43	0.40	0.41
	2	0.33	0.44	0.35	0.35
	5	0.30	0.22	0.26	0.22
	8	0.55	0.31	0.28	0.28
	10	※	0.19	0.21	0.14
しょ糖	0	0.25	0.27	0.50	0.74
	1	0.27	0.22	0.23	0.32
	2	0.13	0.19	0.18	0.25
	5	0.25	0.20	0.25	0.12
	8	0.17	0.13	0.13	0.14
	10	※	0.27	0.23	0.27
デンプン	0	16.25	16.25	17.37	16.25
	1	13.26	14.07	15.20	12.65
	2	12.57	14.00	16.25	16.25
	5	16.35	16.55	16.50	17.10
	8	15.10	18.30	17.20	17.90
	10	※	19.40	17.95	18.45

* 10月より開始

※ ジャガイモ発芽

第6表 照射ジャガイモのビタミンC含量⁵⁾
(mg/100 g)

	線量 (rad)		
	0	11,000	89,000
照射直後	14.6	13.8	10.6
照射後50日貯蔵	12.8	7.8	5.1
50日貯蔵後照射	12.8	10.3	8.7

によって減少する。ジャガイモは収穫後、照射の時期が早ければ早いほどビタミンCの減少は大きいといわれる。ビタミンCは各種ビタミンのなかでもとくに放射線感受性の強いもので、果実、野菜などの放射線障害の目安ともなる位である。ビタミン B₁, B₂ についてはほとんど影響がみられない。

γ線照射がジャガイモの遊離アミノ酸含量におよぼす影響については、第7表の試料2に示してあるように、鎖状アミノ酸、アスパラギン酸およびプロリンの増加、塩基性アミノ酸の減少がみられ、とくにグルタミン酸の減少は著しかった。搾汁(試料1)に照射した場合はほとんどの遊離アミノ酸が減少する。トリクロル酢酸不溶性画分、すなわちタンパク質を構成している(試料3)アミノ酸についてはほとんど照射の影響はみられない。

第7表 照射ジャガイモのアミノ酸含量⁶⁾
(μ moles/g)

アミノ酸	試料 1		試料 2		試料 3	
	非照射	照射	非照射	照射	非照射	照射
Lys	0.740	0.728	1.48	1.32	10.4	10.4
NH ₃	1.02	0.685	2.08	2.04	2.78	2.19
Arg	1.00	0.958	2.19	2.00	6.78	6.71
Asp	2.33	2.20	2.77	4.29	14.9	15.9
Asp NH ₂ Glu NH ₂	12.4	11.5	33.1	34.8		
Glu	0.210	0.195	3.93	2.17	12.0	13.2
Pro	0.403	0.395	0.985	1.46	5.83	5.32
Gly	0.273	0.233	0.489	0.689	5.01	5.21
Ala	0.495	0.468	0.754	1.09	4.89	4.92
Cys	0.034	0.026	0.063	0.034		
Val	1.59	1.38	3.50	3.89	6.45	6.77
Met	0.330	0.275	0.792	0.881	1.61	1.62
Ileu	0.445	0.388	1.38	1.69	5.44	5.44
Leu	0.227	0.206	0.674	1.14	11.7	14.0
Tyr	0.650	0.778	2.34	2.28	4.23	4.85
Phe	0.727	0.585	1.73	1.91	6.49	6.45
Total	22.874	21.200	59.417	62.874		

* 15,000 rad

試料 1: 搾汁の遊離アミノ酸

試料 2: ジャガイモの遊離アミノ酸

試料 3: ジャガイモのタンパク構成アミノ酸

第8表 照射ジャガイモの揮発性化合物^{* 5)}
(mg/kg)

化合物	照射直後			50		
	線量 (rad)			線量 (rad)		
	0	11,000	89,000	0	11,000	89,000
エタノール	0.11	0.13	0.21	0.14	0.12	0.21
プロパノール	0.051	0.048	0.11	0.034	0.033	0.11
アクロレイン	0.007	0.006	0.008	0.004	0.005	0.010
アセトン	0.003	0.006	0.004	0.005	0.004	0.014
インブタナール	0.064	0.071	0.15	0.062	0.078	0.17
ブタナール	0.016	0.015	0.037	0.008	0.008	0.023
イソペンタナール	0.090	0.10	0.20	0.12	0.12	0.22
硫化水素	0.14	0.14	0.15	0.10	0.10	0.10
メチルメルカプタン	0.060	0.059	0.10	0.086	0.080	0.096
総揮発性化合物	0.541	0.575	0.979	0.559	0.548	0.953

* 搾汁を窒素気流中環流下に加熱した

小川らによると、7~10 k rad の照射を受けたジャガイモの組織は黒斑病菌に対する抵抗性を示したという⁷⁾。照射ジャガイモの嗜好性は良好といわれるが、第8表にも示してあるように、11,000 rad を照射したものの揮発性化合物の含量は対照と全く差がみられず、この程度の照射はジャガイモの加熱フレーバーに影響しないことがわかった。

タマネギ タマネギもジャガイモと同様に比較的低線量照射で発芽が抑制される。照射がタマネギの化学成分におよぼす影響はほとんどみられないが、特有の刺激的香味がいくらか弱まるといわれている。タマネギの催涙性香気は主として(+)S-1-propenyl cysteine sulfoxide が酸素によって分解されて生成する propenyl sulfenic acid によるものとされているが、川岸らによると、 1×10^4 R 程度の照射ではその生成にほとんど変化がなかったという。

ソーセージ 照射 (1~5 M rad) がポークソーセージの品質におよぼす影響は第9表に示してあるように、室温、空气中で照射すると、1 M rad の低線量でも退色がみられ、加熱ソーセージでは 5 M rad の高線量のものだけに退色した外観が残っている。一方生のソーセージにおいては低線量の照射でも香辛料のフレーバーは失せるし、高線量になると脂肪が酸敗し、いやなにおいになる。加熱後のフレーバーは3および5 M rad の照射では相当悪影響をうけるが、1 M rad ではほとんど影響がない。真空中0°で照射すると、においは対照と同様で、ただ退色が若干感じられ、また低線量でもソーセージの組織はいくらか軟化する。

第9表 照射が生および加熱ポークソーセージの品質におよぼす影響⁹⁾

照射量 M rad	評価: 9点法			
	生ソーセージ		加熱ソーセージ	
	外 観	におい	外 観	軟かさ*
空气中 18° で照射				
0	8.0	7.7	7.0	0.7
1	6.6	6.7	7.1	0.9
2	6.7	6.8	7.0	1.2
3	5.9	4.5	6.3	2.6
5	5.7	4.2	6.0	3.1
真空中 0° で照射				
0	8.1	7.8	—	0.1
0.5	7.0	7.4	—	0.4
1.0	7.1	7.7	—	0.5
1.5	7.2	7.0	—	0.9
2.0	6.9	7.4	—	1.0

* 5点法: 0=硬くも軟かくもない 5=非常に軟かい

第10表 照射ポークソーセージの貯蔵性⁹⁾

貯蔵日数 (1 M rad 照射後 1°)	貯蔵可能日数			
	10° のとき		15° のとき	
	非照射	照 射	非照射	照 射
0	10.5	37	6.7	24
4	9.3	—	4.7	—
8	7.3	—	5.7	—
14	6.0	37	4.0	18
28	0*	30	0	17
42	0	32	0	15
56	0	29	0	12

3 試料の平均値

* 1° で試料は変敗した

○ Irradiated (1 Mrad), ● Unirradiated

第2図 ポークソーセージを空气中、1° に貯蔵したとき脂肪の過酸化価値の変化⁹⁾

第3図 照射線量と牛肉のビタミンB₁ 含量

1°, 1 M rad の照射を行なったポークソーセージの貯蔵性は第10表に示してあるように、著しく改善される。その場合、生ソーセージの外観やにおいの変化はごく微量にすぎないし、加熱を行なったものは外観に変化はな

○ control samples

● irradiated samples (1 Mrad)

第4図 照射時の温度が牛挽肉のビタミン B₁ の破壊におよぼす影響¹⁰⁾

くフレーバーがわずかに変化するだけで、それとて消費者の識別し得る程度を下回るものである。微生物による変敗のはじまりは照射 (1 Mrad) によって1°で3~10週間, 10°で10~37日, 15°で7~24日遅延する。真空中1°の貯蔵で10週間までは官能テストによる品質には全く変化がみられなかった。ソーセージの脂肪の変敗は、第2図からもわかるように、ソーセージを空气中で照射し、貯蔵すると、たとえ貯蔵の温度は1°であっても急速に生じている。したがってソーセージを通気性のない容器で包装するかあるいは抗酸化剤を添加した後、低線量の照射を行なうと、その貯蔵期間を効果的に延長できることがわかった。

牛肉を室温で照射したときのビタミン B₁ の破壊は第

第11表 照射ハムの評点*におよぼす温度の影響

貯蔵期間 (月)	パネリス トの数	照射温度 (3.5~4.4 Mrad) °C				非照射 対照
		+5	-18	-40	-80	
1	30	—	5.9	5.9	6.8	7.5
1	30	5.6	6.1	6.4	7.1	6.9
4	30	5.5	5.8	5.6	6.6	6.1
12	32	5.4	—	—	6.2	6.9
12	32	6.1	—	—	6.8	6.4
総平均		5.65	5.93	5.97	6.70	6.76

* 9点法 9: 著しく好む, 1: 著しく嫌う, 5: 好きでも嫌いでもない, 5点以上の点は良と考えられる

3図のように、5 Mrad までは線量とともに増大するが、第4図に示してあるように、照射時の温度を-75°まで下げると、その破壊を防止することができる。肉の場合のビタミン B₁ の破壊は照射によって生ずる化学変化の1つの尺度と考えられているが、第4図からもわかるように、食品を凍結状態で照射すると、凍結によって細菌のD値も増加するが、照射による変質は少なく、有利であるといわれる。第11表はハムの照射温度を下げると、官能評点の向上することが示されている。

わが国で肉製品中消費量が多く、しかも保存性の劣るウインナソーセージに対する照射効果を検討した結果は、第12表に示してあるように、10°で貯蔵した場合、0.5 Mrad の照射により対照に比べて1週間以上も保存期間を延長できるし、また生菌数の測定結果も第13表のように、ほとんど増加がみられず、かつ照射による脂肪の酸化も認められなかったので、低線量照射と冷蔵の組み合わせはウインナソーセージのねと防止に有効な方法と考えられている。

第12表 照射ウインナソーセージの官能テスト¹¹⁾

線量 Mrad	判定項目	10° 貯蔵日数						20° 貯蔵日数					
		0	4	7	9	14	17	0	3	5	7	9	11
0.00	ネト	—	—	+	卅			—	+	卅			
	変敗臭	—	—	+	卅			—	+	卅			
0.25	ネト	—	—	—	+	卅		—	±	+			
	変敗臭	—	—	—	—	卅		—	—	卅			
0.50	ネト	—	—	—	—	—	+	—	—	+	卅		
	変敗臭	—	—	—	—	—	—	—	—	—	卅		
0.75	ネト	—	—	—	—	—	±	—	—	—	±	+	卅
	変敗臭	—	—	—	—	—	—	—	—	—	±	±	+
1.00	ネト	—	—	—	—	—	±						
	変敗臭	—	—	—	—	—	—						

第 13 表 照射ウインナーソーセージの生菌数¹⁾

線量 Mrad	生 菌 数 (10 ³ /g)											
	10° 貯蔵日数						20° 貯蔵日数					
	0	4	7	9	14	17	0	3	5	7	9	11
0	3>	140	∞				3>	∞	∞			
0.25	3>	3>	70	∞			3>	∞	∞			
0.50	3>	3>	3>	3>	3>	3>	3>	210	∞	∞		
0.75	3>	"	"	"	"	3>	3>	15	110	650	∞	∞
1.00	3>	"	"	"	"	3>	3>	3>	—	87	320	720

第 14 表 0~1° でγ線照射した牛肉タンパク質の
アミノ酸含量¹²⁾
(アミノ酸残基 g/全窒素 16g)

アミノ酸	5 Mrad		20 Mrad	
	照射前	照射後	照射前	照射後
Asp	8.08	8.49	8.00	8.03
Thr	4.21	4.14	3.94	3.97
Ser	3.58	3.62	3.42	3.64
Glu	15.70	15.39	14.69	14.80
Pro	3.75	3.50	3.33	3.75
Gly	3.80	3.77	3.51	3.53
Ala	5.13	5.20	4.98	5.19
Val	4.83	4.89	4.74	4.50
Met	2.88	2.58	2.67	2.44
Ileu	4.63	4.67	4.45	4.28
Leu	8.31	7.88	7.63	7.52
Tyr	3.84	3.39	3.32	3.19
Phe	4.51	3.92	4.24	4.39
Lys	8.97	8.79	8.64	8.38
His	3.75	3.40	3.51	3.45
Arg	6.75	6.34	6.21	6.02
Total	92.72	89.97	87.28	87.08

第 15 表 照射食品中の主要栄養素利用率 (%)²⁾

栄 養 素	非 照 射	照 射 (5.58 Mrad)
タンパク質	85.9	87.2
脂 肪	93.3	94.1
炭水化物	87.7	87.9

照射食品の健全性 (wholesomeness)

ここでいう健全性の定義は、1961年開催の国際会議で決定されたもので、栄養学的適格性および摂取の安全性を意味している。すなわち照射によって食品中に存在する栄養素はそこなわれず、またあらたに食品中に毒性物質も生じないということである。殺菌あるいは部分殺菌

第 16 表 タンパク質の消化率におよぼす加熱なら
びに照射の影響²⁾

タンパク質	未 処 理	加熱処理	照射処理 (2.79 Mrad)
エンドウマメ	92.2	91.4	90.8
小麦グルテン	98.7	98.5	99.1
牛 肉	100	—	100

第 17 表 食品中のビタミン破壊に対する加熱と照
射の影響の比較²⁾

ビ タ ミ ン	分 解 率 (%)	
	加 熱	照 射 (2.79 Mrad)
チ ア ミ ン	60~70	55~65
リボフラビン	18~22	6~10
ピリドキシン	28~32	24~25
ニコチン酸	30~35	0~14
葉 酸	35	0
ビ タ ミ ン A	20	31~70
ビ タ ミ ン E	?	61

に要する線量でも、食品の味およびにおいに変化を生じることもあるが、食品の主成分にはみるべき化学変化はほとんど生じない。個々のビタミンまたは主栄養素を単独に照射した場合に、それらが食品の成分として照射された場合に比べて一般に大きい変化をうけるのは、栄養素が互いに保護作用しているためと考えられる。牛肉を0°で5あるいは20 Mrad のγ線照射を行なっても、第14表に示すように、タンパク質のアミノ酸含量に差がみられず、牛肉タンパク質の栄養価はこのような高線量の照射でも低下しないことが明らかにされているし、またキワダマグロ肉に-5°~-5°で1.4 Mrad のγ線照射を行なった場合、その栄養価の低下はきわめて僅少であった¹⁸⁾。栄養素利用率、タンパク質の消化率はそれぞれ第15、16表に示してあるように、照射によってほとんど変化しない。照射によってビタミンの損失がおこる。損失の程度はビタミンおよび食品の種類、線量および外因条

第 18 表 各種食品の健全性 (wholesomeness) 試験²⁾

食 品	照射線量 (Mrad)	健全性試験
牛 肉	2.79, 5.58	a, b, c, d
豚 肉	"	"
ベ ー コ ン	"	"
ハ ム	0.5, 2.0	a, b, c
鶏 肉	2.79, 5.58	a, b, d
魚	2.79	a (ハドック, マグロ), b (タラ), d (タラ, マグロ)
乾 燥 全 卵	"	"
牛 乳	2.79, 5.58	a (粉末), b, d, c (濃縮)
キ ャ ベ ツ	"	a, b, d
モ モ	"	a, b, g
ジャガイモ	0.0015, 0.0075	a, b, c; d, f
小麦他穀物類	0.01~5.58	a, b, c, d, e, f

a ネズミ, 3 か月

b " 一生または 2 年

c ハツカネズミ, 一生

d イヌ, 2 年

e 家禽, 6~12 か月

f ブタ, 6 か月

g サル, 2 年

件などで異なる。第17表に示してあるように、水溶性ビタミンのうち、チアミン、ピリドキシンおよびアスコルビン酸は照射でもっとも破壊されやすい。

照射食品について、第18表に示してあるような健全性試験を行なった結果、どの試験においても照射食品は試験動物に対して無害であったという²⁾。

照射タマネギの健全性試験 生後8週間のブタ、生後4週間のラットを用い、生換算で照射および未照射タマネギを25%混入した飼料でそれぞれ18および12週間飼育し、飼料消費量、体重増加量、病理および臨床学的差異は見い出されなかったが、照射試験区のラットの赤血球数は有意差を示す程度に減少し、さらに長期の毒性試験が必要であるという報告がみられる¹⁴⁾。しかしヌを用いた18か月の飼育試験¹⁵⁾、ラットを用い、10および25%の8 k rad および 100 k rad 照射タマネギを混入した1年間の飼育試験¹⁶⁾、同様にしてラットの累代飼育試験¹⁷⁾、などの結果では臨床学的条件、体重増加量、繁殖率、血清学的検査ならびに病理学的検査においてそれぞれの試験区の間に全く差異がみられなかったという。

照射小麦粉、とくに高線量照射したときの健全性試験 コバルト60のγ線で5 M rad の照射を行なった小麦粉をマウスの飼料中に50%の割合で用いると、繁殖能力および寿命に関するいくつかの病理変化をある程度ひき起こすのがみられ、また腫瘍の発生も照射飼料区のマウス

に多いような結果が得られた。したがって5 M rad のような高線量の場合には特別な注意が必要であろうと考えられている。

米国における照射殺菌ハムの申請取り下げをめぐる照射食品の健全性の問題

最近わが国の食品雑誌にも海外情報として照射食品の見直し悪化と題する記事が紹介されたが、このニュースはいち早く世界各国に伝わり、わが国はもとより、オランダ、西独、イスラエル、WHO、FAO、IAEA などの関係者に軽い驚愕、疑惑から打撃、挫折、憤怒までを与えている。この問題に関する信頼すべき資料を最近入手する機会に恵まれたので簡単に紹介してみたい。

FDA の准コミッショナーである Daniel Banes 博士が1968年7月30日の原子力に関する合同委員会で述べた、ハムに関する陸軍の許可申請の問題から入ることとする。博士によると、FDA が照射食品に関する研究経過中にデータの必要条件を変更した意図について、科学の分野は静止しているものではなく、たえず変化し、発展しているものであるからわれわれは最新の知識に照らして決定を下すことを強調している。1つの食品に関する動物実験のデータから他の食品の評価に置きかえる場合についてFDA がその見解を変更したのは、最近の実験によると、種々の食品を照射するとき異なった化学変化が考えられることがわかり、一定の照射条件下で種々の食品にみられる影響についてもっと多くの知見が集まらないことにはデータの置きかえは許されないということである。だからといって、この立場は、照射によって同一変化が期待されるような1つの食品の動物実験のデータを密接な関連のある他の食品の場合に置きかえることを拒むものではないのである。認識さるべきは、FDA による申請の評価は主として申請者により提供されるデータ、文献で報告された知識の積み重ねによるデータおよびわれわれの実験室で明らかにされた事実に基づいていることである。われわれに提示されたデータ中には、それらの研究のほとんどすべてを完全に評価するとき認められる有害作用についてはこれを釈明するような研究は1つも見い出されないし、またデータの分析で明らかになった作用はある場合には申請側の研究者によって見落とされ、他の場合には観察し、報告しているが、それらの作用を偶然の変化に帰して却下している。これらの作用のあるものは軽微であるが、あるものは重要である。

ハム申請で報告されている研究には実験の計画と実施に多くの重要な欠点が含まれ、さらに実験で得られたデータのあるものは無視できない有害作用を示している。

観察された好ましくない影響は総合して

- 1) 繁殖過程に対する重要な影響
- 2) 抗栄養素因子の明らかな生成
- 3) 死亡率、体重増加、赤血球数およびヘモグロビン

第 19 表 食品の低線量照射と貯蔵性

食 品 名	線 量 (M rad)	照射後の 貯蔵温度 ℃	貯蔵期間 (日)	
			非照射	照 射
ハドックフィレー	0.1~0.25	0~2	10~14	30~37
タラフィレー	"	"	12~14	30
エ ビ	0.15~0.25	"	14~16	21~28
貝	"	0~5	2~8	20~30
生 肉	0.05~0.15	0~3	5~7*	10~21*
マ ン ゴ **	0.075~0.1	7~24	4~8	10~14
パ パ イ ア	0.021~0.028	16	***	***
"	0.075~0.1	16	14	18
マッシュルーム	0.25~0.05	0~4	5~7	10~14
イ チ ゴ	0.15~0.25	"	5~7	7~10

* 包装材料, 水分, 色沢の状態如何により異なる

** コクゾウムシ殺虫には0.025, 保存期間の延長には 0.075 M rad

*** 殺虫線量

に対する明らかな影響

4) 白内障 (ソコヒ) および腫瘍の危険性増加の可能性

があげられ, また実験計画および実施の欠点としては

- 1) 照射源
- 2) 照射レベルにおける安全因子の不足
- 3) 飼料中微量栄養素の過剰
- 4) 動物数の不足 (とくにイヌ)
- 5) 腫瘍を検査した動物数
- 6) 視力障害に対する検査の不足

が示されている。

国による食品照射計画に関する原子力合同委員会 (1968年7月18日)における原子力委員会 (AEC) の見解は結論としてつぎのごとくである。

FDA によって認められた特別の取定書に従って行なわれたわれわれの健全性の研究は低線量照射食品の健全性について好ましくない結果は少しも現われていない。一方 FDA の許可申請の寄託のための計画のタイミングは FDA のエスカレートした必要条件のために妨げられたが, 食品照射の予想された利益は遭遇したこの困難にもかかわらず, この計画を依然として力強く追求することを要求するものである旨述べたい。参考として第19表に食品の低線量照射と貯蔵性が示してある。われわれは原子力の平和的利用に関する国家的計画のこの重要な分野の科学的, 技術的, 実際の長所を信頼しつつける者であると結んでいる。

なお1960年の AEC 計画の開始以来, つぎの件は FDA と特別の了解到達していた。

1. 照射殺菌食品を用いる陸軍の2年間の動物飼育試験で得られた健全性のデータは90日の亜急性毒性試験を追加すると, 低線量の照射で処理した同一食品の申請に

際して AEC が利用することができる。

2. 1つの食品のデータを同様な化学組成を有する他の食品に外挿することは認められる。

しかるに1966年12月, FDA は考え方を改め, AEC で求めていた申請は申請が出されていた低線量処理食品について長期 (2か年) の動物飼育試験によって支持されねばならぬことが助言されたのである。

米陸軍側のステートメントとして陸軍 Natick 研究所の E. Josephson 博士の見解はつぎのごとくである。

1968年4月19日 照射殺菌ハムに関する陸軍の申請を承認できぬ旨の FDA による通告, 1968年7月3日 申請取り下げ, 同年7月5日 照射殺菌缶詰ベーコンの許可食品リストよりの削除切迫の旨の通告, これらの重大な後退にもかかわらず陸軍の高線量照射による食品貯蔵計画の最後の成功に対する私の信念は不動であり, 過去において健全性の証明よりもっと困難な照射による食品貯蔵の科学的問題が解決されている。実験上わずかにより多くの忍耐と精励によって, 青信号が与えられるならば, 照射殺菌食品は全く健全であることを FDA の満足するまで立証できるものと信じている。

最後に, 米国防食品照射計画に関するインホームション (1968年7月31日, 質疑応答の形になっている) は以下のごとくである。

問1. 食品照射計画に関する1965年9月の聴聞会における陸軍軍医総監の陳述によると, コバルト60のγ線または電子線による吸収線量 5.6 M rad に照射された食品は健全である, すなわち安全で栄養的に適切であるということであった。総監はその考えを変えたのか, その考えが変わったのならそれは何か。

答. 総監の考えは, 当初もくろまれたよりもより厳密な解釈が実験データになされたので, FDA の現在の

第 20 表 米陸軍食品照射プログラム中、健全性に関する総支出額

財政年度	財政年度
1954 90,000ドル	1962 550,000ドル
1955 255,000	1963 490,000
1956 395,000	1964 286,000
1957 827,000	1965 50,000
1958 962,000	1966 20,000
1959 1,080,000	1967 20,000
1960 818,000	1968 40,000
1961 306,000	計 6,189,000

必要条件を満たすためには追加実験が必要であるということを除いては、基本的には変わっていない。

21の照射食品の健全性に関する研究は FDA によって審査された動物実験取定書に基づいて1954年に開始された。これらの研究は1965年まで続いた若干の補足的な研究を除いて1963年には実質上完了している。その間の研究支出額は第20表のごとくである。史上にいかなる他の加工法もこのような長期の毒性試験と発癌試験をうけた例がないので、照射食品の安全性を確立するために立案された実験は適切以上のものと信じられた。これらの研究継続中、定期的な検閲と諮問委員会は毒性あるいは非健全性を示すような変化は全く見出しなかったもので1965年この報告に基づいて軍医総監が上述の陳述を行なったものである。FDA によって提出された現在の質問は、10～15年の古いデータには種々の解釈がなされるので満足に答えることはできない。

問 2. 1968年4月19日 FDA のコミッショナーから陸軍准将 Gerace への手紙によると、照射ハムは摂取して安全であることが示されてないと述べ、その理由はつぎのごとくである。

i) 動物の繁殖過程におよぼす好ましくない影響は偶然に基づくことは全くありそうにない。

ii) 死亡率、体重増加、赤血球数におよぼす悪影響

iii) 照射食品をとった動物は対照よりも白内障と腫瘍の発生が多いという示唆

iv) 食品照射が処理食品中に抗必須栄養素因子を生ずる可能性の示唆

これらの見解に関する陸軍の見解如何。

答. i) 繁殖に関する質問については、陸軍のデータの統計処理は FDA のそれと異なっている。FDA による質問は新しい動物実験なくしては適切に答えられないと考える。この問題は、問題になっている研究において動物飼料中の限界の栄養不足によるものかもしれないのであって、飼料の照射によるものではないかもしれぬという示唆がある。死亡率の増加、体重の減少、赤血球数の減少は統計的に有意とは考えられない。これらの発見について、陸軍によるデータの評価は観察された差異

は偶然のみによるものらしいことを示している。

iii) 白内障と腫瘍に関する質問は現在のデータでは適切に答えられない。研究実施後10年を経た今日、研究者と審査官との診断の差異を明らかにする実験記録を探して持参することはできない。総監はこの問題は照射と関係がなく、追加実験で満足に答えられようとしている。

iv) 照射食品が抗必須栄養素因子を生ずることを示唆する科学的根拠は全く見出し得ない。このことが推察以上であるならばわれわれはそのデータやデータの出所を知らない。

問 3. 総監は照射缶詰ハムに関する新しい健全性の研究を今企てる準備はあるか。

答. もし必要があり、材料が入手できればイエスである。陸軍は新しい動物飼育実験の取定書を立案し、これが FDA で審査された後、必要人員と経費を定める分析が行なわれる。その開始と照射缶詰ハムの研究完了に要する時間とは陸軍省で入手し得る材料によるであろうし、またこの研究が申請の許可に必要なデータを与えるものであるということに陸軍と FDA との見解が一致するかどうかにかかっているものであろう。

問 4. 照射ジャガイモと照射小麦粉に関する軍隊の計画如何。

答. 軍隊による照射ジャガイモと小麦粉の今後の使用は消費者テストの結果による。これらの食品は生産テスト数量で貯蔵しているにすぎない。ジャガイモのテストを続けるかどうかは軍隊はまだ決定していない。軍隊は本年12万5千ポンドの照射小麦粉の消費者テストを行なう。昨年の缶包装した13万1千ポンドの照射小麦粉との比較のために、小麦粉は多層クラフトペーパー袋に包装される。

問 5. 陸軍はこれまで集積したすべてのデータに基づいて、照射食品は健全であることを確信しているか。

答. 健全であると確信している。ただ健全性の研究計画中に総監による審査がいくつかの疑わしい発見、すなわち心臓障害と出血性体質に注意を集中したことは注目すべきことで、それらは満足な答を出すために追加実験を必要としたものである。これらの疑問は FDA による現在の質問よりはるかに答えることがむずかしいというのが総監の見解である。

問 6. 12-D の概念は食品照射殺菌計画における線量決定の根拠であると理解される。もしも低線量照射が適当であるならば研究上いかにすべきであるか。

答. 12-D の概念の下に、必要な照射殺菌線量を下げるためにつぎの実験的アプローチが考えられている。

(1) 添加物、NaCl, NaNO₂, NaNO₃, タイロシン、ナイアシン、メタ重亜硫酸塩、トリポリリン酸塩、EDTA

(2) コールドショック ポツリヌス菌胞子の照射感受性をたかめる試みで、食品を2～4°に7～30日間貯蔵す

る。

(3) 加熱と照射の組み合わせ

(4) もしもわれわれがボツリヌス菌胞子の構造中に照射により sensitive たらしめ得る、いわゆるアキレスの踵を発見できるならば、これをしらべるために、胞子の耐照射性の機構を研究する。

問7. 陸軍の FDA 申請計画 (1968~1974) の現状如何。

答. 第21表を参照されたい。

第 21 表 FDA 許可申請計画, 米陸軍省
(1968~1974)

品 名	線 量 (Mrad)	目 標
豚 肉	4.5~5.6 (室温)	殺 菌
鶏 肉	" (-30°±10°C)	"
牛 肉	4.7~5.6 (")	"
エ ビ	3.7~4.7 (")	"
コ ー ン ビ ー フ	4.5~5.6 (")	"
ハ ン バ ー ガ ー	"	"
ポークソーセージ	"	"
タ ラ ケ ー キ	"	"
フランクフルトソーセージ	昨年より研究開始	"
ベーコン(フライ)	2.9~3.5	"
ランチオンミート	研究未着手	"
包 装 材 料	研究完了	6 Mrad 使用にた える食品包装材
鶏 肉	0.35~0.60	パストリゼーショ ン

問8. 陸軍はハム申請取り下げに関する外国の反応について情報をなにかもっているか。

答. イエス、深い関心が寄せられている。1965 年 6 月の陸軍と FDA による原子力合同委員会における聴聞会記録は、照射食品は健全であることに基づいてさらに先へ進行するに必要な確信を世界各国に与えた。陸軍のハム申請取り下げは海外多数の同僚の努力に好ましくない影響を与え、各国政府による計画の継続支持を危うくするものであろう。リーダーシップをとってきた米國が信頼を回復させ、計画を継続させるために、FDA

の健全性に関する疑問に答えることが肝要である。

おかしな表現かもしれないが、米は余っているとはいえず、日本の食糧は今でも不足しているのもであり、日本の食糧の自給は成立しているのでもない。今後、食糧の供給は国際的にもますます困難となることが憂慮されており、食品の流通、貯蔵の方法を改善することはその解決のための1つの方策と考えられている。この意味からも、食品照射の研究はこれからもより積極的に取り組むべきものであろう。

終わりに、米國の照射食品の健全性に関する最近の資料入手につきご厚配を賜った農林省食糧研究所佐藤友太郎、梅田圭司両博士およびその使用を許可された食品照射研究協議会幹事会に厚く御礼申し上げます。また一部文献の整理に援助された東大農学系大学院田島真氏に謝意を表する。

文 献

- 1) 松山 晃: 化学と生物 **6**, 393 (1968).
- 2) Report of the Working Party on Irradiation of Foods, London (1964).
- 3) 科学技術庁: わが国における食品照射の現状と問題点 (1966).
- 4) 食糧——その科学と技術, 第10号, 27 (1967).
- 5) M. Tajima, et al.: Agr. Biol. Chem. **31**, 935 (1967).
- 6) M. Fujimaki, et al.: ibid. 印刷中.
- 7) 小川正巳ら: 第3回日本食品照射研究協議会大会講演要旨 (1967).
- 8) 川岸舜朗ら: 同上.
- 9) B. Coleby, et al.: J. Sci. Fd. & Agric. **13**, 628 (1962).
- 10) G. M. Wilson: ibid. **10**, 295 (1959).
- 11) 高坂和久ほか: 食工誌. 印刷中.
- 12) D. N. Rhodes: J. Sci. Fd. & Agric. **17**, 180 (1966).
- 13) K. Shirai & T. Oku: Bull. Coll. Agr. & Vet. Med., Nihon Univ. No. 26, 1 (1968).
- 14) W. T. Cliver, et al.: AECL-2706, 99 (1967).
- 15) W. G. Hillard, et al.: ibid. 107 (1967).
- 16) G. R. Van Petten, et al.: AECC-2706, 114 (1967).
- 17) G. R. Van Petten, et al.: ibid. 122 (1967).
- 18) L. Bugyaki, et al.: Atompraxis, **14** 112 (1968).