

[総説]

アルキルシクロブタノン類を指標にした 放射線照射食品の検知法

堤 智昭

国立医薬品食品衛生研究所食品部 (〒 158-8501 東京都世田谷区上用賀 1-18-1)

Detection methods using alkylcyclobutanones as markers for irradiated food

Tsutsumi Tomoaki

Division of Foods, National Institute of Health Sciences 1-18-1, Kamiyoga, Setagaya-ku, Tokyo 158-8501 Japan

1. はじめに

殺菌、殺虫、発芽防止などを目的に、放射線を照射した食品を放射線照射食品（以下、照射食品）という。照射食品の安全性は WHO などの国際機関に確認されており^{1),2)}、FAO/IAEA のレポート（2006 年）³⁾ によると約 60 ヶ国で様々な食品に照射が行われている。

一方、我が国では食品衛生法第 11 条「食品一般の製造、加工及び調理基準」により、馬鈴薯の発芽抑制を目的とした場合を例外として、食品への照射は認められていない。現在、北海道の士幌町農業協同組合で照射された馬鈴薯だけが販売を許可されており、馬鈴薯の外箱には照射した旨の表示が食品衛生法により義務づけられている。しかし、多くの食品を輸入に頼っている我が国では、海外から照射食品が誤って輸入される恐れがある。照射食品を輸入した場合は、食品衛生法 11 条違反として取り扱われる。そのため、特に輸入食品に対して放射線照射の有無を判別する検知法の整備が不可欠である。

照射食品の検知法については、欧州標準化委員会が 1990 年頃から検討を行い、電子スピン共鳴法、熱ルミネッセンス (TL) 法、炭化水素法、及びアルキルシクロブタノン (ACB) 法などをヨーロッパ標準規格法として採用した⁴⁾。我が国では、その一つである TL 法が厚生労働省より 2007 年に公定

法として通知された⁵⁾。これに伴い、検疫所では本法による輸入食品を対象としたモニタリング検査が開始された。しかし、TL 法はケイ酸塩鉱物が分離可能な食品を対象とするため、適用可能な食品が農作物（香辛料、野菜類など）と一部の魚介類（あさり、えびなど）に限られている。畜肉類などの動物性食品の多くは鉱物を分離することが難しく、TL 法を適用することが困難である。このように、動物性食品を対象にした照射食品の検知法の整備は国内で遅れており、国際的に認められた検知法を検証して導入し、照射食品の監視体制を整備することが必要とされている。ACB 法は動物性食品への照射の有無を判定する検知法として、ヨーロッパ標準規格法 (EN1785)⁶⁾ として既に採用されている。そこで筆者らは、国内における ACB 法の運用を目的として、試験室に導入する際の性能評価方法を確立し、EN1785 の動物性食品への適用について詳細に検証した。

2. ACB 法による照射食品の検知原理

ACB 類は放射線照射により、食品中の脂質から生じる放射線特異的分解物質である⁷⁾。ACB 類は一般の環境中には存在しない物質であると考えられるため、本化合物が検出されれば、その食品試料は放射線を照射された可能性が極めて高いと判断できる。放射線照射により食品中で生成する ACB 類は

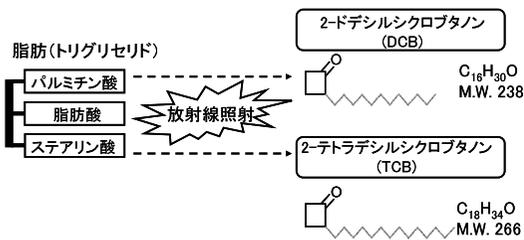


図1 放射線照射により食品中に生成する主な ACB 類

単一物質ではなく、前駆体となる脂肪の側鎖に応じた種々の ACB 類が生じる⁸⁾。ACB 類の中でも、2-ドデシルシクロブタノン (DCB) 及び 2-テトラデシルシクロブタノン (TCB) が照射食品の検知に利用されることが多い (図1)。DCB 及び TCB は検出器として汎用されるガスクロマトグラフ質量分析計 (GC/MS) における感度が良く、さらに食品に含まれる前駆体となる脂肪酸 (パルミチン酸及びステアリン酸) の濃度が高いため、検出が比較的容易であることが理由としてあげられる。

DCB 及び TCB を GC/MS 測定するためのモニターイオンとしては、定量イオンとしてイオン強度が最も強い m/z 98 が、確認イオンとして m/z 112 が利用される。EN1785 においても DCB 及び TCB を分析対象としており、種々の動物性食品で検知指標としての有効性が示されている^{6), 9)~11)}。

3. ACB 法の性能評価方法

照射食品の検知法は照射の有無を判定する定性試験法である。ACB 法を試験室に導入する際は、定性試験法として十分な性能を達成できているか評価する必要がある。そこで、国内の試験室への ACB 法の導入を目的として、DCB 及び TCB を検知指標とした ACB 法の性能評価方法を考案した。

性能評価方法

放射線が未照射と考えられる対象食品から脂肪を抽出し、陰性試料とする。また、抽出した脂肪に DCB 及び TCB をそれぞれ 0.05 µg/g lipid 添加し、陽性試料とする。DCB 及び TCB の添加濃度は文献値より、約 0.5 kGy 以上を照射した際の生成量に相当すると考えられる。畜肉類や鮮魚の食中毒防止や貯蔵期間延長の殺菌目的には 1 kGy 以上の線量が照

射されることから¹²⁾、この添加濃度は適切であると考えられる。

評価の対象とする方法に従い陰性試料及び陽性試料を分析する。陰性試料については 1 日 2 併行 2 日間、また陽性試料については 1 日 4 併行 4 日間 (あるいは 1 日 2 併行 8 日間) の分析を実施する。分析結果は以下に示す判定内容に基づき陰性、あるいは陽性を判定する。本判定内容は EN1785 に記述されている判定内容に準拠している。

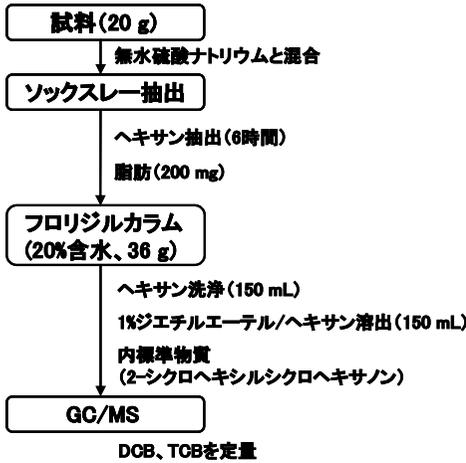
- ①標準溶液と同じ保持時間に、m/z 98 及び m/z 112 に S/N 比 3 以上のピークを認める。
- ② m/z 98 及び m/z 112 で観測されるピーク面積の比は、m/z 98 において近似した面積を与える検量線用標準溶液ピークから得られる m/z 98 及び m/z 112 のピーク面積比の±20%以内である。
- ③保持時間付近で m/z 95 から m/z 115 の範囲でスクラン測定を行うとき、m/z 98 及び m/z 112 が主要イオンである。
- ④上記 1 から 3 の項目を満たした場合の定量値が、検量線用標準溶液の S/N 比 3 から求めた濃度以上である。

各試料の DCB 及び TCB のピークについて、①から④の項目を全て満足する時に陽性と判定し、一つでも満足しない時は陰性と判定する。対象となる食品について 4 個の陰性試料が全て陰性であり、16 個の陽性試料が全て陽性である時、本法の適用が妥当であると判断する。なお、妥当であると判断された試験法は、評価した陽性試料数 (16 試料) から二項分布に従うと、偽陰性率が約 17% の性能で照射 (約 0.5 kGy 以上) の有無を判定することが可能であると考えられる。

4. EN1785 の性能評価

EN1785 の分析法の概要を図 2 に示した。本法は食品からソックスレー抽出により脂肪を抽出した後、フロリジルオープンカラムにより脱脂と精製を行う。DCB 及び TCB を含む分画を採取し、内標準物質 (2-シクロヘキシルシクロヘキサノン) を添加後、GC/MS により測定する。諸外国では鶏肉、豚肉、液卵、カマンベールチーズ、及びサーモンを対象として EN1785 の試験室間共同試験が実施され、本法の妥当性が評価されている^{6), 9)}。

本法を筆者らの試験室に導入するにあたり、既述



【GC/MS 測定条件の一例】

GC/MS: Agilent製 7890A/5975C
 GCカラム: DB-5ms(内径 0.25 mm X 長さ 30 m、膜厚 0.25 μm)
 昇温条件: 60°C(1 min)→8°C/min→300°C(5 min)
 流速: 1 mL/min(He)
 注入量: 1 μL(スプリットレス注入)
 SIM測定(定量イオンm/z 98、確認イオン m/z 112)
 スキャン測定(スキャン範囲 m/z 95~115)

図2 EN1785におけるACB分析の流れ

した性能評価のための試験を牛肉、豚肉、鶏肉及びサーモンに対して実施した。対象食品について実施した性能評価の結果を表1に示した。陰性試料4試料及び、陽性試料16試料について得られた各判定項目の値をまとめて示した。各食品について、陰性試料では全ての試料が陰性と判定された。一方、陽性試料では全ての試料が陽性と判定され、本法の適用が妥当であると判断できた。なお、試験した食品におけるDCBの回収率は75%から138%、TCBの回収率は72%から142%であった。DCBとTCBの回収率が顕著に低い食品は認められなかった。

5. EN1785による照射食品の分析

本法の照射食品を検知する性能を確認するため、種々の線量を照射した食品を本法により分析した。γ線 (0.5 ~ 4 kGy) を照射した牛肉、豚肉、鶏肉、及びサーモンの分析結果を表2に示す。未照射試料ではDCB及びTCB共に不検出であった。一方、照射試料では両化合物が検出され、既述した判定項目を満たしたことから、照射陽性と判定された。検出されたDCB及びTCBの濃度は食品種毎に大きく異なるが、同一の食品においては照射された線量が高くなるほど検出濃度も高くなった。牛肉とサーモンのSIMクロマトグラムの一例を図3に示した。

表1 動物性食品におけるEN1785の性能評価結果

牛肉の性能評価結果

分析対象物	試料	試料数	判定内容 ¹⁾				
			① S/N比		②ピーク面積比 近似する標準溶液との比較%	③スキャン測定 (m/z 98と112の合計強度の割合%)	④濃度 (μg/g lipid)
			m/z 98	m/z 112			
DCB	陰性試料	4	—	—	—	11 ~ 15	—
	陽性試料	16	86 ~ 148	94 ~ 163	+ 1 ~ + 9	65 ~ 79	0.038 ~ 0.051
TCB	陰性試料	4	—	—	—	1 ~ 3	—
	陽性試料	16	51 ~ 135	56 ~ 117	- 5 ~ + 1	71 ~ 82	0.036 ~ 0.048

1) 各項目は下記の条件をみたく場合に陽性と判定した。

- ① m/z 98 及び m/z 112 に S/N 比 3 以上のピークを認める。
- ② m/z 98 及び m/z 112 で観測されるピーク面積の比は、m/z 98 において近似した面積を与える検量線用標準溶液から得られるピーク面積比の、± 20% 以内である。
- ③ 保持時間付近で m/z 95 から m/z 115 の範囲でスキャン測定を行うとき、m/z 98 及び m/z 112 が主要イオン (2 つのイオンの合計強度が目安として 50% 以上) である。
- ④ 定量値が検量線用標準溶液の S/N3 から求めた濃度 (DCB は $0.021 \times 10^3 \mu\text{g/g lipid}$ 、TCB は $0.065 \times 10^3 \mu\text{g/g lipid}$) 以上である。

表1 動物性食品における EN1785 の性能評価結果 (つづき)

豚肉の性能評価結果

分析対象物	試料	試料数	判定内容 ¹⁾				
			① S/N 比		②ピーク面積比	③スキャン測定 (m/z 98 と 112 の 合計強度の割合%)	④濃度 ($\mu\text{g/g lipid}$)
			m/z 98	m/z 112	近似する標準 溶液との比較%		
DCB	陰性試料	4	—	—	—	6 ~ 11	—
	陽性試料	16	76 ~ 122	44 ~ 96	+ 7 ~ + 14	66 ~ 74	0.046 ~ 0.069
TCB	陰性試料	4	—	—	—	3 ~ 15	—
	陽性試料	16	31 ~ 92	20 ~ 71	+ 1 ~ + 7	72 ~ 76	0.043 ~ 0.071

1) 各項目は下記の条件をみたまつ場合に陽性と判定した。

① m/z 98 及び m/z 112 に S/N 比 3 以上のピークを認める。

② m/z 98 及び m/z 112 で観測されるピーク面積の比は、m/z 98 において近似した面積を与える検量線用標準溶液から得られるピーク面積比の、 $\pm 20\%$ 以内である。

③ 保持時間付近で m/z 95 から m/z 115 の範囲でスキャン測定を行うとき、m/z 98 及び m/z 112 が主要イオン (2 つのイオンの合計強度が目安として 50% 以上) である。

④ 定量値が検量線用標準溶液の S/N3 から求めた濃度 (DCB は $0.021 \times 10^3 \mu\text{g/g lipid}$, TCB は $0.065 \times 10^3 \mu\text{g/g lipid}$) 以上である。

鶏肉の性能評価結果

分析対象物	試料	試料数	判定内容 ¹⁾				
			① S/N 比		②ピーク面積比	③スキャン測定 (m/z 98 と 112 の 合計強度の割合%)	④濃度 ($\mu\text{g/g lipid}$)
			m/z 98	m/z 112	近似する標準 溶液との比較%		
DCB	陰性試料	4	—	—	—	13 ~ 23	—
	陽性試料	16	72 ~ 134	87 ~ 292	+ 1 ~ + 9	68 ~ 73	0.037 ~ 0.053
TCB	陰性試料	4	—	—	—	0	—
	陽性試料	16	106 ~ 220	79 ~ 171	- 9 ~ - 3	78 ~ 83	0.036 ~ 0.050

1) 各項目は下記の条件をみたまつ場合に陽性と判定した。

① m/z 98 及び m/z 112 に S/N 比 3 以上のピークを認める。

② m/z 98 及び m/z 112 で観測されるピーク面積の比は、m/z 98 において近似した面積を与える検量線用標準溶液から得られるピーク面積比の、 $\pm 20\%$ 以内である。

③ 保持時間付近で m/z 95 から m/z 115 の範囲でスキャン測定を行うとき、m/z 98 及び m/z 112 が主要イオン (2 つのイオンの合計強度が目安として 50% 以上) である。

④ 定量値が検量線用標準溶液の S/N3 から求めた濃度 (DCB は $0.021 \times 10^3 \mu\text{g/g lipid}$, TCB は $0.065 \times 10^3 \mu\text{g/g lipid}$) 以上である。

表1 動物性食品における EN1785 の性能評価結果 (つづき)

サーモンの性能評価結果

分析対象物	試料	試料数	判定内容 ¹⁾				
			① S/N 比		②ピーク面積比 近似する標準 溶液との比較%	③スキャン測定 (m/z 98 と 112 の 合計強度の割合%)	④濃度 ($\mu\text{g/g lipid}$)
			m/z 98	m/z 112			
DCB	陰性試料	4	—	—	—	5 ~ 10	—
	陽性試料	16	66 ~ 109	96 ~ 174	- 0.3 ~ + 10	61 ~ 70	0.041 ~ 0.060
TCB	陰性試料	4	—	—	—	5 ~ 8	—
	陽性試料	16	66 ~ 145	58 ~ 106	- 3 ~ + 1	71 ~ 75	0.038 ~ 0.057

1) 各項目は下記の条件をみだす場合に陽性と判定した。

① m/z 98 及び m/z 112 に S/N 比 3 以上のピークを認める。

② m/z 98 及び m/z 112 で観測されるピーク面積の比は、m/z 98 において近似した面積を与える検量線用標準溶液から得られるピーク面積比の、 $\pm 20\%$ 以内である。

③ 保持時間付近で m/z 95 から m/z 115 の範囲でスキャン測定を行うとき、m/z 98 及び m/z 112 が主要イオン (2 つのイオンの合計強度が目安として 50% 以上) である。

④ 定量値が検量線用標準溶液の S/N3 から求めた濃度 (DCB は $0.021 \times 10^3 \mu\text{g/g lipid}$, TCB は $0.065 \times 10^3 \mu\text{g/g lipid}$) 以上である。表2 EN1785 による照射食品の分析結果¹⁾

食品	対象	線 量 (kGy)				
		0	0.5	1	2	4
牛 肉	DCB	ND	0.068	0.18	0.30	0.75
	TCB	ND	0.078	0.21	0.37	0.93
豚 肉	DCB	ND	0.045	0.10	0.21	0.45
	TCB	ND	0.064	0.17	0.36	0.78
鶏 肉	DCB	ND	0.091	0.21	0.42	1.1
	TCB	ND	0.041	0.090	0.18	0.48
サーモン	DCB	ND	0.054	0.14	0.24	0.48
	TCB	ND	0.013	0.037	0.071	0.15

1) 各線量を照射した試料 ($n = 2$) を EN1785 により試験した。脂肪重量あたりの濃度 ($\mu\text{g/g lipid}$) を表示した。

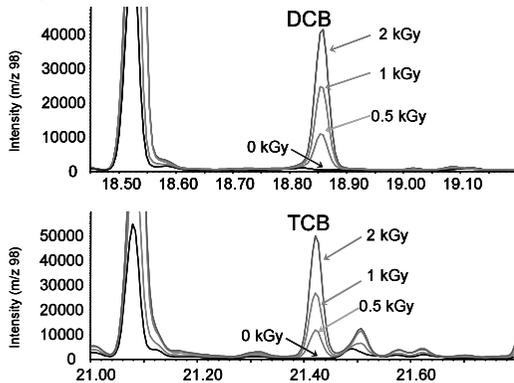
照射試料では DCB 及び TCB の明瞭なピークが認められている。

6. 他試験室における EN1785 の性能確認

他試験室においても本法が同等の性能を有するか検証するため、1 機関で性能評価のために試験を実施した上で、照射試料をブラインドで分析した。性能評価試験の結果、全ての対象食品 (牛肉、豚肉、

鶏肉、及びサーモン) について陰性試料は全て陰性と判定された。一方、陽性試料は全て陽性と判定され、本法の適用が妥当であると判断された。次に、各食品につき照射履歴をブラインドにした 10 試料 (未照射 2 試料、照射 8 試料) を分析した。全ての試料で、未照射及び照射が正しく判定され、正答率は 100% であった (表 3)。このように、他試験室においても本法は照射食品の検知法として必要な性能

牛肉



サーモン

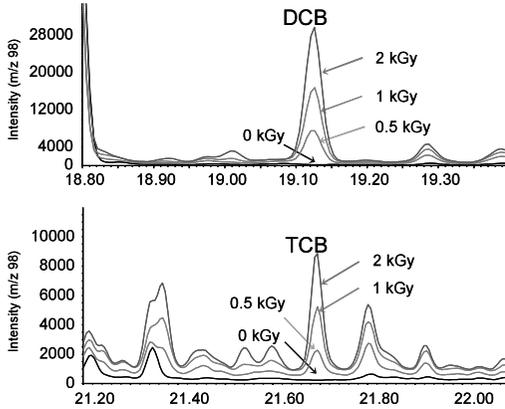


図3 未照射及び照射食品のSIMクロマトグラム

の再現が可能であった。

7. 冷凍保存した照射食品の分析

畜肉、鮮魚は冷凍保存された状態で日本へ輸入されるのが一般的である。そこで、照射食品を冷凍保存した後も、EN1785により検知が可能であるか検討した。牛肉、豚肉、サーモンは1 kGy、鶏肉は0.5 kGyをγ線照射し、6カ月以上冷凍保存した後に本法で分析した。その結果、保存後もDCB及びTCBの検知に支障はなく、全ての冷凍保存試料で照射陽性の判定が可能であった。また、冷凍保存によるDCB及びTCBの濃度変化について考察するため、各食品の保存前後の濃度を比較した(図4)。その結果、全食品についてDCB及びTCB濃度に保存前後で顕著な違いは認められなかった。保存前の濃度を100%とした場合、保存後の各食品の濃度はDCBで82%から113%、TCBで74%から124%であった。尾花らは1年間冷凍保存した畜肉類及びサーモンについて分析した結果、DCBは僅かな減少、TCBは殆ど減少しないことを報告している¹³⁾。本結果は尾花らの結果と類似していた。

8. その他のACB法

EN1785はソックスレー抽出やフロリジルオープンカラムを使用するため、前処理に要する時間が長い(2日程度必要)。そのため迅速化を目的として種々のACB法が検討されている。例えば、尾花らは高速溶媒抽出装置(ASE)と、簡便な脱脂操作、

表3 ブラインド試料の分析結果¹⁾

試料	線量 (kGy)	試料数	正しく判定した試料数	正答率 (%)
牛肉	0	2	2	100
	0.5, 1, 2 及び 4	8	8	100
豚肉	0	2	2	100
	0.5, 1, 2 及び 4	8	8	100
鶏肉	0	2	2	100
	0.25, 0.5, 1 及び 2	8	8	100
サーモン	0	2	2	100
	0.5, 1, 2 及び 4	8	8	100

1) 各線量を照射した試料 (n = 2) をブラインド試料として1機関に送付し、EN1785により試験した。

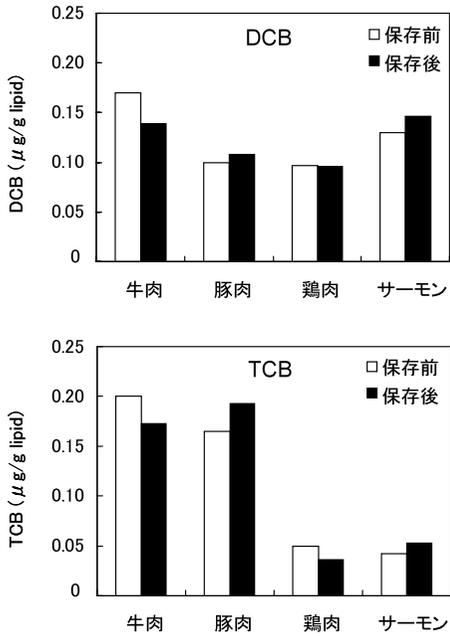


図4 凍結保存によるDCB及びTCB濃度の変化
照射後(鶏肉は0.5 kGy, 他の試料は1 kGyを照射), 10日以内に分析した試料を保存前試料とした。一方, 照射後, -30°C で6~9カ月密封保存した試料を保存後試料として分析した。棒グラフは $n=2$ の平均値を示す。

及びシリカゲルミニカラムを使用して迅速に動物性食品中のDCB及びTCBを検出する試験法を報告している¹⁴⁾。本法の前処理時間は7~8時間程度であり, EN1785と比較し前処理に要する時間が大幅に短縮されている。また本法の適用範囲は広く, 畜肉類, 魚介類等の生鮮食品の他, 照射された食品(卵や鶏肉など)を原料に使用したパンケーキ, フライドチキンなどの加工品についても適用されている¹⁵⁾。その他, ソックスレー抽出の代わりに迅速な超臨界流体抽出(SFE)の利用も行われている。SFEとフロリジルやシリカゲル等を組み合わせたACB法が検討されており, 畜肉類, 魚のほかマンゴー, パパイアなどの果実に対しても適用されている^{16)~18)}。いずれのACB法も6時間程度で分析が終了するため, EN1785と比較すると迅速な分析法である。ASEやSFEを使用したACB法は, 特殊な抽出機器が必要になる欠点があるが, 迅速性の観点

からは有望である。

またごく最近, Tewfikはヘキサシクロブタノン:ヘプタシクロブタノン=9:1を抽出溶媒に使用した迅速な直接溶媒抽出法を報告している^{19), 20)}。試料を上記の抽出溶媒により振とう抽出し, 抽出液はフロリジルを通過させた後, GC/MSにより測定する。本法は特別な抽出機器を必要とせず, 分析時間が約90分であることから極めて簡便で迅速である。但し, DCBのみを測定対象としていることや, 適用されている食品が鶏肉, 卵, カマンベールチーズに限られており, 実用化のためには更に検証が必要である。

9. おわりに

厚生労働省はACB法を放射線照射された食品の検知法として, 2010年3月に通知した²¹⁾。ここで紹介したEN1785は例示の試験法として通知に記載されている。本通知の特徴としては特定の試験法を限定しておらず, 前述した性能評価のための試験を満足すれば, EN1785以外の試験法も各試験室で運用が可能である。既述したASEやSFEを使用したACB法はEN1785より迅速であり, 積極的な利用が期待される。

謝 辞

ここで紹介した研究成果は厚生労働科学研究費補助金(課題名 放射線照射食品の検知技術に関する研究)の支援のもとに実施したものである。放射線照射にご協力頂いた根井大介博士, 等々力節子博士に深謝致します。また, 本研究を実施するにあたり, ご協力を頂いた(財)食品環境検査協会の中西広一氏, 金子将幸氏, 国立医薬品食品衛生研究所の石井利華氏, 渡邊敬浩博士, 松田りえ子博士に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) WHO. Wholesomeness of irradiated food. *Technical Report Series*. No. 659, (1981).
- 2) WHO. High-dose irradiation:wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group. *Technical Report Series*. No. 890, (1999).
- 3) IAEA. *Food and Environmental Protection Newsletter*. 9(1), (2006).

- 4) 等々力節子. 照射食品の検知技術. *食品・食品添加物研究誌*. **209**(12), p.1060-1068 (2004).
- 5) 放射線照射された食品の検知法 (TL 試験法). 食安発第 0706002. (平成 19 年 7 月 6 日)
- 6) European Committee for Standardization. Foodstuffs - Detection of irradiated food containing fat - Gaschromatographic/Mass spectrometric analysis of 2-alkylcyclobutanones. EN1785. (2003).
- 7) Stevenson, M.H.; Crone A.V.J. Irradiation detection. *Nature*. **344**, p.202-203 (1990).
- 8) Nawer, W.W. Volatiles from food irradiation. *Food Reviews International*. **2**(1), p.45-78 (1986).
- 9) Stevenson, M.H. "Validation of the cyclobutanone protocol for detection of irradiated lipid containing foods by interlaboratory trials". Detection methods for irradiated foods. McMurray, C.H. et al. eds. London, The Royal Society of Chemical, p.269-284 (1996).
- 10) Ndiaye, B. et al. 2-Alkylcyclobutanones as markers for irradiated foodstuffs II. The CEN (European Committee for Standardization) method: field of application and limit of utilization. *Radiation Physics and Chemistry*. **55**(4), p.437-445 (1999).
- 11) Stewart, E.M. et al. 2-Alkylcyclobutanones as markers for the detection of irradiated mango, papaya, Camembert cheese and salmon meat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. **80**(1), p.121-130 (2000).
- 12) 伊藤 均. 食品照射の基礎と安全性—食品衛生・貯蔵にはたす放射線処理の可能性—. 日本原子力研究. *JAERI-Review*. 2001-029, (2001).
- 13) Obana, H. et al. Detection of irradiated meat, fish and their products by measuring 2-alkylcyclobutanones levels after frozen storage. *Shokuhin Eiseigaku Zasshi*. **48**(6), p.203-206 (2007).
- 14) Obana, H. et al. Analysis of 2-alkylcyclobutanones with accelerated solvent extraction to detect irradiated meat and fish. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. **53**, p.6603-6608 (2005).
- 15) Obana, H. et al. Detection of 2-alkylcyclobutanones in irradiated meat, poultry and egg after cooking. *Journal of Health Science*. **52**(4), p.375-382 (2006).
- 16) Tewfik, I.H. et al. A rapid supercritical fluid extraction method for the qualitative detection of 2-alkylcyclobutanones in gamma-irradiated fresh and sea water fish. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. **50**, p.51-56 (1999).
- 17) Horvatovich, P. et al. Supercritical fluid extraction of hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones for the detection of irradiated foodstuffs. *Journal of Chromatography A*. **897**, p.259-268 (2000).
- 18) Stewart, E.M. et al. Isolation of lipid and 2-alkylcyclobutanones from irradiated foods by supercritical fluid extraction. *Journal of AOAC International*. **84**(3), p.976-986 (2001).
- 19) Tewfik, I. A rapid direct solvent extraction method for the extraction of cyclobutanones from irradiated chicken and liquid whole egg. *International Journal of Food Science and Technology*. **43**, p.108-113 (2008).
- 20) Tewfik, I. Extraction and identification of cyclobutanones from irradiated cheese employing a rapid direct solvent extraction method. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. **59**(7-8), p.590-598 (2008).
- 21) 放射線照射された食品の検知法について. 食安発第 0330. (平成 22 年 3 月 30 日).
(2010 年 7 月 23 日受理)