

風險評估研究
第三十七號報告書

輻照食物的安全性

香港特別行政區政府
食物環境衛生署
食物安全中心
二零零九年五月

本報告書由香港特別行政區政府食物環境衛生署食物安全中心發表。未經食物安全中心書面許可，不得翻印、審訂或摘錄本報告書的全部或部分研究資料。若轉載本報告書其他部分的內容，須註明出處。

通訊處：

香港金鐘道 66 號

金鐘道政府合署 43 樓

食物環境衛生署

食物安全中心

風險評估組

電子郵箱：enquiries@fehd.gov.hk

目錄

	<u>頁數</u>
摘要	2
目的	3
引言	3
食物輻照技術的原理	3
電離輻射及輻射源	
電離輻射效應	
影響食物輻照效能的因素	
食物輻照設備	
食物輻照技術的應用	6
減少致病微生物	
淨化	
延長保質期	
殺蟲	
其他可能應用範圍	
輻照食物的安全性	7
輻射安全	
微生物安全	
毒理學安全	
對營養成分的影響	
食物輻照技術的管制	11
結論	13
給業界的建議	13
給市民的建議	13
參考文件	14
附件 I	20
附件 II	23

風險評估研究

第三十七號報告書

輻照食物的安全性

摘要

食物輻照技術是利用電離輻射加工處理食品，以控制食源性致病菌、減少食物的微生物數量和蟲害、抑制塊根類農作物發芽，以及延長易腐壞農產品的保質期。輻照技術已獲准用於約 50 種不同種類的食物，並最少有 33 個國家在商業上應用這項技術。儘管業界數十年來一直使用輻照技術為食物進行消毒，以符合檢疫規定，但食用輻照食物對健康的影響仍是備受關注。這項研究概述了食物輻照技術的基本原理、應用範圍，以及食用輻照食物對消費者構成的潛在健康風險。現有證據顯示，雖然輻照加工會令食物產生化學變化，導致營養素流失，但如按照建議的方法進行輻照加工食物，而且加工過程符合良好製造規範，輻照食物的安全性和營養素質量，與用其他傳統食物加工方法(例如加熱、巴士德消毒和裝罐)處理的食物相若。

目的

這項研究旨在概述食物輻照技術的基本原理和應用，以及探討輻照食物的安全性。

引言

2. 食物輻照技術是利用電離輻射加工處理食品，以控制食源性致病菌、減少食物的微生物數量和蟲害、抑制塊根類農作物發芽，以及延長易腐壞農產品的保質期。¹

3. 根據國際原子能機構的資料，超過 50 個國家已批准使用輻照技術處理約 50 種不同種類的食物，並有 33 個國家在商業上應用這項技術[附件 I]。²各國准許進行輻照加工的食品不盡相同，但一般只限於香料、香草、調味料、某些新鮮水果或乾果和蔬菜、海產、肉類及肉類製品、家禽，以及蛋類製品。儘管業界數十年來一直使用輻照技術為食物進行消毒，以符合檢疫規定，但食用輻照食物對健康的影響仍是備受爭議的問題。食品經輻照後產生的化學物是否具有毒性，以及輻照處理會否改變食品的營養價值，都是令人關注的事宜。

食物輻照技術的原理

電離輻射及輻射源

4. 根據食品法典委員會《輻照食品通用標準》，建議用於食品加工的電離輻射是：(I)放射性核素鈷-60(⁶⁰Co)或銫-137(¹³⁷Cs)產生的伽瑪射綫；以及(II)由機械源產生的電子束(最高能量為 10 兆電子伏特)和 X 射綫(最高能量為 5 兆電子伏特)。³

(I) 放射性核素鈷-60 和銻-137 產生的伽瑪射綫

5. 鈷-60 由高度精製的鈷-59(⁵⁹Co)顆粒在核反應堆中經中子撞擊而成，銻-137 則由鈾裂變產生。鈷-60 和銻-137 發出穿透力強的伽瑪射綫，可用以處理大件或已包裝食物。目前，鈷-60 是最廣泛應用於食物輻照的放射性同位素。⁴

(II) 由機械源產生的電子束和 X 射綫

6. 機械源產生的電離輻射的主要優點是，整個處理系統都不涉及放射性物質。產生電子束的電器裝置由電力驅動，以直線加速器將電子加速至接近光速。但這些高能電子束的穿透力有限，只適用於較薄的食物。⁴

7. 以電子束撞擊金屬靶，可把電子轉化為不同能量的 X 射綫。雖然 X 射綫的穿透力較由鈷-60 和銻-137 產生的伽瑪射綫強⁴，但由於電子轉化為 X 射綫的效率一般低於 10%，以致機械源輻射的應用一直難以推廣。⁵

電離輻射效應

8. 當電離輻射穿過如食物等物質時，能量會被吸收，食物成分的原子和分子會被離子化或激發，引起輻照食物中出現的化學和生物學變化。

食物輻照的化學效應

9. 食物進行輻照時所產生的化學效應，是由於處於激發態的分子及離子分解後，與相鄰分子發生反應，而引發的連串相互反應。主要的化學反應包括分子內部出現異構化和分裂，並與相鄰分子發生反應，產生連串新化學產物(包括高反應自由基)。食物經輻照後而產生的自由基，通常存在時間很短。不過，在一些乾製、冷藏或含堅硬部分(例如骨頭)的食物，由於產生的自由基的活動性有限，因此會存留一段較長時間。^{4, 6}

10. 由電離輻射引起的另一個重要化學反應是水輻射分解。水分子經輻照後產生的羥基自由基和過氧化氫屬高反應性，容易與大部分芳香族化合物、羧酸、酮、醛和硫醇等發生反應。⁴這些化學變化對消除食物的微生物具有重要作用。不過，如輻照環境條件控制不善，這些化學變化難免會對某些食品造成不良影響(例如失去原有風味)。⁶

食物輻照的生物學效應

11. 食物輻照處理的主要目的是令活細胞產生變化。這些變化既可影響食物的污染微生物，以減少致病微生物，又可影響食物的細胞，以提高食物的質量。電離輻射對生物產生的效應與生物的體積大小和複雜程度成反比，但我們目前仍未完全了解電離輻射令細胞產生變化的確切機理。不過，上文各段所述的化學變化已知會引致細胞膜結構的改變，降低酶活性，減少核酸合成，通過磷酸化影響能量代謝，以及減少細胞脫氧核糖核酸的成分組合變化。⁶

12. 脫氧核糖核酸受到破壞，可能是因為電離輻射隨機及直接地射在全部兩條或其中一條脫氧核糖核酸鏈上造成損害所致。如兩條鏈都受到損害，可能會令受輻照的細胞死亡。⁷這種對脫氧核糖核酸造成的直接影響，主要是在乾燥的環境進行輻照時出現，輻照乾孢子便是一個例子。另外，可能令脫氧核糖核酸受到損害的情況是，輻射使其他分子(特別是水分子)產生自由基，自由基擴散至脫氧核糖核酸，對其造成破壞。⁶

影響食物輻照效能的因素

13. 電離輻射令微生物失活的效能主要視乎輻射劑量和污染微生物的耐輻射性而定。不同種類的細菌、酵母菌和霉菌，其耐輻射性差異很大。細菌孢子的耐輻射性一般較植物細胞高，主要原因之一是細菌孢子的水分含量較低。酵母菌的耐輻射性和其他耐受輻射的細菌相若，而病毒的耐輻射性則相當高。⁸溫度、酸鹼度、有氧與否及溶質濃度等其他因素，都證實與輻照時產生的輻射分解物數量有關，從而影響電離輻射的最終成效。⁴

食物輻照設備

14. 為深入了解食物輻照技術的實際應用情況，特別是一般輻照規定，以及輻照設施和輻照過程控制的要求，我們實地參觀了一所位於廣州的輻照廠房。

15. 在輻照過程中，廠方利用鈷-60 產生的伽馬射綫作能量源，以提供電離輻射。商用輻照設施的共通之處是設有輻照室，以及用以運送食物進出輻照室的輸送系統。輻照廠房跟其他工業設施在結構上的主要分別是，輻照室四周建有混凝土防護圍牆(厚度一般為 1.5 至 1.8 米)，以防止電離輻射的泄漏。⁵

16. 與一般的伽馬輻照器一樣，放射性核素源會持續發出輻射。當輻射源不用作處理食物時，會貯存在一個水深約 6 米的水池內。水可吸收輻

射能量，是其中一種最佳的阻隔輻射防護物質之一，將輻射源貯存在水裡，可保護須要進入輻照室的工作人員免受輻射照射。⁵

17. 食物輻照設施的輸送系統採用路軌設計，用以運送食物通過輻照室進行輻照處理。通過控制輻照的時間和輻照源的能源，就可以調節食品接受電離輻射照射的劑量，以達致特定的目的。



18. 在國內，工業用的食物輻照設施必須領取許可證，並受國家輻射安全及衛生當局的規管及監察。他們亦有參考其他主管當局制定的輻照標準⁹和實務守則^{10、11、12}。國際原子能機構和聯合國糧食及農業組織合作建立了一個食物輻照設施資料庫，臚列各國的認可食物輻照設施，供公眾參考。¹³

食物輻照技術的應用

減少致病微生物

19. 由於食物的溫度在輻照過程中不會大幅提高，所以輻照技術對於控制海產、新鮮農產品和冷藏肉類產品等引起的食源性疾病尤其重要。電離輻射證實可減少不同食品的致病細菌數目(例如李斯特菌^{14、15}、O157:H7大腸桿菌^{15、16}、沙門氏菌^{17、18}、肉毒桿菌¹⁹、副溶血性弧菌¹⁸等)，而且食物可在包裝內進行電離輻照處理。不過，單靠輻照消毒未必足以減少食物中毒事故，業界必須遵循良好製造規範，以防食物輻照後在加工過程中受到污染。

淨化

20. 香料、香草和蔬菜調味料的價值，在於其獨特的味道、顏色和香味。不過，環境及生產過程往往會令這類食品受到微生物污染。⁵ 在上世紀八十年代以前，香料和香草大多是利用熏蒸方法，並使用環氧乙烷等作為消毒氣體進行消毒。不過，由於環氧乙烷已被證實可以引致癌症，多個國家已禁止使用。於是，輻照技術便漸漸取代熏蒸方法，廣受食物業界採用以消除乾製食物配料中的微生物污染。²⁰ 輻照技術除了可提高不同食物的衛生質量外，還可用來消除草藥中的污染微生物。²¹

延長保質期

21. 輻照處理可大大延長多種水果、蔬菜、肉類、家禽、魚類和海產的保質期。⁵ 只要電離輻射劑量適當，食物經輻照後在感官上幾乎沒有或只有輕微變化。因此，利用輻照技術改變農產品在成熟、發芽和老化方面的正常生理變化，對新鮮農產品²² 收割後的品質控制尤其重要。²³ 已證實低劑量輻照可以減慢香蕉、芒果和木瓜的成熟速度、控制草莓因真菌引致腐爛的情況，以及抑制馬鈴薯、洋蔥球、番薯及其他會發芽的食用植物萌芽。^{24、25}

殺蟲

22. 保存穀物及穀物製品面對的最大問題是蟲害。輻照技術證實能有效解決這些產品的蟲害問題，還可取代甲基溴這種最常用的殺蟲熏蒸劑。由於甲基溴會破壞臭氧層，現正逐步停用。殺蟲的目的是減少蟲害對倉存穀物、豆類、麪粉、穀類、咖啡豆、新鮮水果、乾果、乾堅果及其他乾製食品(包括魚乾)所造成的損失。值得一提的是，輻照食物必須妥善包裝，以防再有害蟲滋生。^{5、26}

其他可能應用範圍

23. 研究指出，輻照處理除了可提高食物的衛生質量外，還可減少或消除不良或有毒的物質，包括食物致敏原^{27、28}、可致癌的揮發性 N-亞硝酸胺^{29、30} 以及生物胺³¹。另一方面，亦證實輻照處理可改善含低亞硝酸鹽肉類製品³² 和低鹽發酵食品³³ 的色澤。此外，電離輻射可破壞植物油中的葉綠素 b，因此可用於食油加工業，以防止植物油感光氧化及避免食油變色。³⁴

輻照食物的安全性

輻射安全

24. 在輻照過程中，食物按設定速度通過輻照區，藉以控制食物吸收的能量或輻射劑量。在控制的環境下，食物絕對不會直接接觸輻射源。³⁵

25. 高能量的電離輻射會令食物的某些成分帶放射性。²³ 研究顯示，碎牛肉或牛肉碎屑經 7.5 兆電子伏特電子產生的 X 射綫照射後，能檢測到感生放射性。不過，輻照產生的感生放射性遠低於食物的天然放射性。相應的年劑量比環境中的輻射量要低幾個數量級。因此，即使食物經能量高達 7.5 兆電子伏特電子產生的 X 射綫照射後，對人類來說食用風險也是極低。³⁶

26. 國際原子能機構的研究顯示，如以平均劑量低於 60 千戈瑞的鈷-60 或銫-137 伽馬射綫、10 兆電子伏特的電子束或能量低於 5 兆電子伏特電子束產生的 X 射綫照射食物，人類食用這些輻照食物，所引致的本底輻射量上升幅度很微，可以說是近乎零。³⁷

27. 食品法典委員會根據世界衛生組織、聯合國糧食及農業組織和國際原子能機構的實驗結果，訂定食物的最高輻射吸收劑量不得超過 10 千戈瑞，並把機械源產生的 X 射綫和電子的最高能量水平分別定為 5 兆電子伏特和 10 兆電子伏特，訂出這個限量水平的原因之一是避免輻照食物產生感生放射性。³

微生物安全

28. 以輻照方法處理食物的微生物令人關注到兩個問題，就是天然微生物菌羣減少對致病菌存活的影响，以及產生耐輻射突變體的可能性。

29. 電離輻射會大幅減少食物的原生微生物菌羣數目。有人擔心這些“清潔”食物更有利影响健康的細菌迅速滋生，因為原生微生物羣數目減少，對致病細菌的拮抗作用會下降。³⁸ 此外，有人提出，若食物經輻照後受到污染，會更容易滋生食源性致病菌。³⁹ 不過，有關輻照雞肉和碎牛肉的研究顯示，無論是沙門氏菌(雞肉及牛肉)抑或 O157:H7 大腸桿菌(牛肉)，在輻照和非輻照肉類的滋生速度相同。由此可見，無論肉類是否經過輻照處理，其原生微生物羣一般不會影响這兩種細菌的生長參數。^{40、41}

30. 由於多年前已發現電離輻射能誘發突變，所以輻射突變的問題備受關注。⁴² 實驗顯示，培養菌經多輪輻照後，能誘發耐輻射微生物羣的出現。⁴³ 細菌及其他微生物發生突變後，其毒性或致病性可能較母菌強或弱，也可能與母菌相若。雖然輻照食物理論上可能會引致新致病菌的產生，但

沒有報告指食物經輻照後出現這種情況。^{44、45}由於細菌經輻照誘發突變後較易受外界環境因素影響，所以耐輻射突變體較其非耐輻射母菌容易受加熱影響。^{8、45}

毒理學安全

以動物進行毒性研究

31. 食用輻照食物可能產生的毒性影響，自上世紀五十年代以來一直被廣泛研究。⁴⁶為評估輻照食物的毒理學安全，研究機構把不同的實驗膳食和食物成分給人和多種動物(包括大鼠、小鼠、狗、鵪鶉、倉鼠、雞、豬和猴子)進食作餵飼測試。⁸

32. 動物餵飼試驗包括對動物進行終生和多代的研究，以確定動物會否因進食不同種類的輻照食物而出現生長、血液化學、組織病理學或生殖方面的變化。由聯合國糧食及農業組織 / 國際原子能機構 / 世界衛生組織共同組成的輻照食物衛生安全聯合專家委員會評估過多項研究的數據後，於一九八零年作出結論：“用低於 10 千戈瑞以下劑量輻照處理的任何食品，不會引起毒理學上的危害，因此用這樣的劑量所照射的食品不再需要作毒理性測試。”⁴⁵ 近期就輻照消毒的膳食進行實驗研究亦證實，輻照食物是安全的。以輻照劑量介乎 25 至 50 千戈瑞(遠高於輻照人類膳食所用的劑量)的食物餵飼數代實驗動物，這些動物的身體並沒有因進食輻照食物而出現基因突變、畸型及腫瘤等毛病。⁴⁷

人體臨床研究

33. 在人體進行的試驗相對較少，而相關研究大部分都是由美國軍方進行。這些臨床研究對受試者的心臟、血液和肝腎功能作出評估，這些研究全屬短期性質。在試驗進行後一年內，並無發現受試者有任何臨床異常情況。⁴⁸

34. 其中最廣為人知的人體膳食試驗在一九七五年進行，15 名營養不良的印度兒童接受試驗，食用含輻照小麥(劑量為 0.75 千戈瑞)的食物。在試驗期間，發現受試兒童的多倍性頻率和異常細胞數量增加，而在他們停止食用輻照膳食後，異常細胞便回復到基礎水平。有關研究報告的作者認為上述情況是由於食用輻照食物所致。⁴⁹不過，如果我們仔細閱讀報告內容，就會知道有關研究所計算的，只是每組五名兒童每人體內的 100 個細胞。基於這樣少的樣本數目，不足以作出結論。⁵

35. 輻照食物對健康的影響引起多方面的關注，其中有人批評毒理學安全體外研究的設計和實施方法。這些研究利用食物汁液、提取物和消化物，用取自哺乳類動物、細菌和植物的細胞進行基因突變測試，結果大都呈陰性反應。雖然研究報告指出，有染色體變化和細胞毒性影響的情況出現，但由於食物含有許多化合物，可能有礙測試，因而令測試結果不能作準。⁵⁰有人關注到，世界衛生組織發表了有關劑量高於 10 千戈瑞的輻照食物衛生安全報告中，忽略了五份經同行評核，指出輻照食物具毒性的試食試驗報告。⁴⁶此外，亦有人指出，食物會否致癌通常需時數十年才能證實，現時所有動物研究都為期太短，不足以揭示輻照食物的致癌性。⁵¹

化學毒理學研究

36. 輻照食物含有多種化合物，其中以 2-烷基環丁酮和呋喃的安全性最令人關注。

2-烷基環丁酮

37. 在輻照過程中，輻射會令含脂肪食物的三酸甘油酯分解，產生一組分子，即 2-烷基環丁酮。⁵²目前發現，2-烷基環丁酮只於經輻照的含脂肪食物中存在，以其他食物加工方式處理的非輻照食物則檢測不到。^{53、54}因此，這種化合物被視為輻照食物的獨有物質。輻照食物的 2-烷基環丁酮含量，與其脂肪含量和輻照吸收劑量成正比。⁵⁵輻照食物的 2-烷基環丁酮濃度視乎輻照吸收劑量而定，由每克脂肪 0.2 至 2 微克不等。⁵⁶

38. 過去研究每日讓老鼠服用高純度 2-烷基環丁酮溶液，並為老鼠注射致癌物質氧化偶氮甲烷，結果在注射六個月後，發現同時服用 2-烷基環丁酮的老鼠結腸腫瘤總數，比只注射氧化偶氮甲烷一組老鼠多出三倍，而且只有同時服用 2-烷基環丁酮和注射氧化偶氮甲烷的老鼠體內才驗到中型和較大的腫瘤。這一點證明只於含脂肪的輻照食物中出現的 2-烷基環丁酮，可能會令注射化學致癌物質的動物較易患上結腸癌，但亦顯示單純 2-烷基環丁酮不會引發結腸癌。不過，值得注意的是，這項研究所用的 2-烷基環丁酮劑量，遠高於一個人從日常含輻照食物的膳食中攝取的 2-烷基環丁酮的分量。

呋喃

39. 呋喃是國際癌症研究機構認為可能會致癌的物質。⁵⁷有關方面已進行多項研究，探討伽馬輻照對食物內呋喃含量的影響，結果顯示，食物的

呔喃含量會隨着輻照劑量增加而按比例上升，而且食物的酸鹼度和底物濃度會影響輻照產生的呔喃量。⁵⁸近期研究亦顯示，單糖含量高而酸鹼度低的水果(例如葡萄和菠蘿)經輻照後會產生少量呔喃。⁵⁹不過，從美國超級市場購買的輻照食物檢測到的呔喃含量，普遍遠較一些經加熱處理的食物為低。^{60、61}

對營養成分的影響

40. 食品加工和配製通常會令部分營養素流失，以輻照方法處理食物也不例外。輻照令食物產生的營養成分變化，與烹煮、裝罐、巴士德消毒、焯及其他加熱處理方式類似。⁶²輻照引致食物的營養價值改變取決於多項因素：輻照劑量、食物種類、輻照時的溫度及空氣環境、包裝和貯存時間。一般來說，常量營養素(蛋白質、脂質和碳水化合物)不會因輻照而質量受損⁸，礦物質亦證實在輻照後保持穩定。⁶²不過，令人關注的是維他命在輻照過程中流失的情況，並對多種不同食物進行相關詳細研究。

41. 不同種類的維他命對輻照的敏感性各有不同。部分維他命如核黃素、菸酸和維他命 D 的耐輻照性相當高，但維他命 A、B1(硫胺素)、E 和 K 則對輻照較敏感。維他命對輻照的敏感度要視乎食物的複雜性、維他命屬水溶性抑或脂溶性，以及輻照時的空氣環境而定。一般而言，低劑量輻照(不高於 1 千戈瑞)對食物的營養價值影響甚微，但在有空氣的環境進行中等劑量輻照(1 至 10 千戈瑞)則影響可能較大。高劑量輻照(10 千戈瑞以上)可能會令對輻照敏感的維他命(例如硫胺素)大量流失。不過，如採取保護措施，例如在低溫和真空的環境加工處理和貯存食物，可減少維他命流失。由於輻照食品通常只佔日常飲食的一部分，所以食用輻照食物對個別營養素的總攝取量影響輕微。⁴⁵

食物輻照技術的管制

國際情況

42. 由聯合國糧食及農業組織、國際原子能機構和世界衛生組織共同組成的食品輻照聯合專家委員會，對食品輻照技術在國際上的發展至為重要。該委員會由一羣科學家組成，致力研究輻照食品的衛生安全，並提供有關食品輻照的安全事宜的關鍵建議。食品法典委員會根據專家委員會的意見，制訂並通過《輻照食品通用標準》³及相關的《國際食品處理輻照設施應用推薦操作規程》^{12、63}，分別訂明食物輻照程序的一般規定和技術要求，以及提供指引，確保安全正確地進行食物輻照加工。

43. 食品法典委員會亦制訂了一套輻照食物標籤指引。《預包食品標識法典通用標準》⁶⁴載有輻照食品標籤的條文，規定以電離輻射處理過的食物標籤上，在食品名稱附近以文字說明這種處理。此外，下圖所示的國際食品輻照標誌亦可供選用(非強制性)。⁶⁴



44. 如食品的配料經過輻照，亦應在配料表予以說明。此外，如以輻照過的原料製作食品的配料，產品標籤應附有原料經輻照處理的說明。⁶⁴根據上述標準，各國已自行制訂輻照食品標籤規例[附件 II]。

香港的情況

45. 雖然本港目前沒有食物輻照處理設施，但《公眾衛生及市政條例》(第132章)《食物及藥物(成分組合及標籤)規例》載有輻照食物標籤規定，訂明所有貯存經輻照食物的容器均須清晰用英文大楷列明“IRRADIATED”或“TREATED WITH IONIZING RADIATION”及用中文列明“輻照食品”。

46. 當局現時會進行定期檢查，監察輻照食物標籤是否符合規定。有關部門在進口和零售兩個層面收集食品樣本，檢查經電離輻射處理的食品是否已加上適當標籤。

47. 二零零零年，當局抽取了 69 個食物樣本，進行電離輻射檢測，其中六個樣本呈陽性反應。由於這些食品沒有適當的輻照標籤，當局向有關銷售商發出警告信，要求他們從市面回收這些產品或在產品加上適當標籤。有關食品已全部回收。其後進行的監察行動(二零零一至二零零八年)，並無發現不符合規定的食品。

48. 政府化驗所恆常用以測試輻照食品的其中一種方法是電子自旋共振技術。這技術可用以檢測輻射產生的自由基，以確定某些食物是否經輻照處理。⁶⁵

結論

49. 食物業界使用電離輻射進行食物加工，有助控制食物的致病細菌和寄生蟲，減少收成後的食物損耗，以及延長易腐壞食物的保質期。各地已進行多項研究，評估輻照食物的安全性和營養充足程度。雖然有證據顯示輻照加工會引致化學變化和營養素流失，但如食物按照建議的方法進行輻照加工，而且加工過程符合良好製造規範，輻照食物的安全性和營養素質量，與用其他傳統食物加工方法(例如加熱、巴士德消毒和裝罐)處理的食物相若。

給業界的建議

- 嚴格遵照國際指引所訂有關食物輻照加工實務守則行事，以確保食物的輻照吸收劑量在安全水平，而且不會破壞食物的營養價值、結構完整性和感官特質。
- 每個盛載輻照食物的容器須附有適當標籤。
- 經輻照的食物應在質量受控制和符合衛生的情況下進行處理，以免受到污染。

給市民的建議

- 如食物按照建議的方法進行輻照加工，而且加工過程符合良好製造規範，輻照食物的安全性和營養素質量，與用其他傳統食物加工方法處理的食物相若。食用輻照食物對個別營養素的總攝取量影響輕微，對人類健康亦不會構成較大風險。
- 保持均衡飲食，切勿偏食。

參考文件

- ¹ Codex Alimentarius Commission. Recommended international code of practice for radiation processing of food (CAC/RCP 19-1979, Rev. 2-2003). 2003. [cited 3 March 2008] Available from:
http://www.codexalimentarius.net/download/standards/18/CXP_019e.pdf
- ² International Atomic Energy Agency (IAEA). Food irradiation clearances database. 2007. [cited 3 March 2008] Available from: URL:
http://nucleus.iaea.org/NUCLEUS/nucleus/Content/Applications/FICdb/DatabaseHome.jsp?nav_method=databasehome&module=cif
- ³ Codex Alimentarius Commission. Codex general standard for irradiated foods (CODEX STAN 106-1983, Rev.1-2003). 2003. [Cited 7 March 2008] Available from:
http://www.codexalimentarius.net/download/standards/16/CXS_106e.pdf
- ⁴ Stewart ES. Food irradiation chemistry. In: Molins RA editor. Food Irradiation: Principles and Applications. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p.37-76.
- ⁵ International Consultative Group on Food Irradiation (ICGFI). Facts about food irradiation. 1999. [Cited 10 March 2008] Available from:
<http://www.iaea.org/nafa/d5/public/foodirradiation.pdf>
- ⁶ Grandison AS. Irradiation. In: Grennan JG editor. Food Processing Handbook. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. kGaA. 2006. p.147-172.
- ⁷ Dickson JS. Radiation Inactivation of Microorganisms. In: Molins RA editor. Food Irradiation: Principles and Applications. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p.23-35.
- ⁸ Joint FAO/IAEA/WHO Study Group. High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. WHO Technical Series 890. Geneva: WHO; 1999. Available from:
http://www.who.int/entity/foodsafety/publications/fs_management/en/irrad.pdf
- ⁹ International Atomic Energy Agency (IAEA). IAEA safety standards. 2007. [cited 2 April 2008] Available from: URL: <http://www-ns.iaea.org/standards/>
- ¹⁰ International Atomic Energy Agency (IAEA). Code of practice on the international transboundary movement of radioactive waste. November 1990. [cited 2 April] Available from: URL: <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/inf386.shtml>
- ¹¹ International Atomic Energy Agency (IAEA). Code of conduct on the safety and security of radioactive sources. 2004. [cited 2 April] Available from:
http://www-pub.iaea.org/MTCDD/publications/PDF/Code-2004_web.pdf
- ¹² Codex Alimentarius Commission. Recommended international code of practice for the operation of irradiation facilities used for the treatment of foods (CAC/RCP-19-1979, Rev.

1-1983). 1983. [Cited 2 April 2008] Available from:
http://www.codexalimentarius.net/download/standards/18/CXP_019e.pdf

- ¹³ Joint FAO/IAEA Programme -- Nuclear Techniques in Food and Agriculture. Databases. [cited 5 August 2008]. Available from: <http://www-naweb.iaea.org/nafa/databases-nafa.html>
- ¹⁴ Minitzer AM and Foley DM. Electron beam and gamma irradiation effectively reduce *Listeria monocytogenes* populations on chopped romaine lettuce. *Journal of Food Protection* 2006; 69(3):570-4.
- ¹⁵ Badr HM. Elimination of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* from raw beef sausage by gamma irradiation. *Molecular Nutrition and Food Research* 2005; 46(4): 343-9.
- ¹⁶ Edwards JR and Fung DYC. Prevention and decontamination of *Escherichia coli* O157:H7 on raw beef carcasses in commercial beef abattoirs. *Journal of Rapid Methods and Automation in Microbiology* 2006; 14(1): 1-95.
- ¹⁷ Talbot EA, Gagnon ER and Greenblatt J. Common ground for the control of multidrug-resistant *Salmonella* in ground beef. *Clinical Infectious Diseases* 2006; 42(10): 1455-62.
- ¹⁸ Jakabi M, Gelli DS, Torre JCMD Rodas MAB, Franco BDGM, Destro MT, et al. Inactivation by ionising radiation of *Salmonella Enteritidis*, *Salmonella Infantis*, and *Vibrio parahaemolyticus* in oysters (*Crassostrea brasiliana*). *Journal of Food Protection* 2003; 66(6): 1025-9.
- ¹⁹ Lim YH, Hamdy MK and Toledo RT. Combined effects of ionising-irradiation and different environments on *Clostridium botulinum* type E spores. *International Journal of Food Microbiology* 2003; 89(2-3): 251-63.
- ²⁰ Farkas J. Radiation decontamination of spices, herbs, condiments, and other dried food ingredients. In: Molins RA editor. *Food Irradiation: Principles and Applications*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p.291-312.
- ²¹ Farkas J. Irradiation as a method for decontaminating food. *International Journal of Food Microbiology* 1998; 44:189-204.
- ²² Niemira BA and Fan X. Low-dose irradiation of fresh and fresh-cut produce: Safety, sensory, and shelf life. In: Sommers CH and Fan X editor. *Food Irradiation Research and Technology*. Iowa: Blackwell Publishing; 2006. p.169-84.
- ²³ World Health Organization (WHO) and Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Food irradiation: A technique for preserving and improving the safety of food*. Geneva: World Health Organization; 1988.
- ²⁴ Thomas P. Irradiation of fruits and vegetables. In: Molins RA editor. *Food Irradiation: Principles and Applications*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p.213-40.

-
- ²⁵ Thomas P. Irradiation of tuber and bulb crops. In: Molins RA editor. Food Irradiation: Principles and Applications. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p.241-272.
- ²⁶ Ahmed M. Disinfestation of stored grains, pulses, dried fruits and nuts, and other dried foods. In: Molins RA editor. Food Irradiation: Principles and Applications. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p.77-112.
- ²⁷ Lee JW, Yook HS, Lee KH, Kim JH, Byun MW. Conformational changes of myosine by gamma irradiation. Radiation Physics and Chemistry 2000; 58:271-7.
- ²⁸ Lee JW, Kim JH, Yook HS, Kang KO, Lee WY, Hwang HJ et al. Effects of gamma radiation on the allergenicity and antigenicity properties of milk proteins. Journal of Food Protection 2001; 64:272-6.
- ²⁹ Ahn HJ, Yook HS, Rhee MS, Lee CH, Cho YJ, Byun MW. Application of gamma irradiation on breakdown of hazardous volatile N-nitrosamines. Journal of Food Science 2002; 67:596-9.
- ³⁰ Ahn HJ, Kim JH, Jo C, Lee CH, Byun MW. Reduction of carcinogenic N-nitrosamines and residual nitrite in model system sausage by irradiation . Journal of Food Science 2002; 67:1370-3.
- ³¹ Kim JH, Anh HJ, Kim DH, Jo C, Yook HS, Park HJ et al. Irradiation effects on biogenic amines in Korean fermented soybean paste during fermentation. Journal of Food Science 2003; 68:80-4.
- ³² Byun MW, Lee JW, Yook HS, Lee KH, Kim KP. The improvement of colour and shelf life of ham by gamma irradiation. Journal of Food Protection 1999; 62:1162-6.
- ³³ Byun MW, Lee KH, Kim DH, Kim JH, Yook HS, Ahn HJ. Effects of gamma radiation on the sensory qualities, microbiological and chemical properties of salted and fermented squid. Journal of Food Protection 2000; 63:934-9.
- ³⁴ Byun MW, Jo C, Lee JW. Potential applications of ionising radiation. In: Sommers CH and Fan X editor. Food Irradiation Research and Technology. Iowa: Blackwell Publishing; 2006. p.249-262..
- ³⁵ US Environmental Protection Agency. Food safety. November 2007. [cited 9 April 2008] Available from: URL: http://www.epa.gov/rpdweb00/sources/food_safety.html
- ³⁶ Grégoire O, Cleland MR, Mittendorfer J, Dababneh S, Ehlermann DAE, Fan X et al. Radiological safety of food irradiation with high energy X-rays: theoretical expectations and experimental evidence. Radiation Physics and Chemistry 2003; 67:169-83.
- ³⁷ International Atomic Energy Agency (IAEA). Natural and induced radioactivity in food. International Atomic Energy Agency Technical Documents (IAEA-TECDOCs) 2002; 1287:136.

-
- ³⁸ Jay JM. Foods with low numbers of microorganisms may not be the safest foods OR Why did human Listeriosis and Hemorrhagic colitis become foodborne disease? Dairy, Food and Environmental Sanitation 1995; 15: 674-7.
- ³⁹ Dickson JS. Radiation inactivation of microorganisms. In: Molins RA editor. Food Irradiation: Principles and Applications. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p.23-35.
- ⁴⁰ Szczawiska ME, Thayer DW and Philips JG. Fate of unirradiated *Salmonella* in irradiated mechanically deboned chicken meat. International Journal of Food Microbiology 1991; 14: 313-24.
- ⁴¹ Dickson JS and Olson DG. Growth of salmonellae in previously irradiated ground beef. Proceedings of the 86th International Association of Milk, Food and Environmental Sanitarians Annual Meeting; 1999; Dearborn, MI.
- ⁴² Muller HJ. Mutations induced in *Drosophila*. Genetics 1928; 13: 279-87.
- ⁴³ Davies R and Sinskey AJ. Radiation-resistant mutations of *Salmonella typhimurium* LT2: development and characterisation. Journal of Bacteriology 1973; 113: 133-44.
- ⁴⁴ Ingram M and Farkas J. Microbiology of foods pasteurised by ionising radiation. Acta Alimentaria 1977; 6: 123-85.
- ⁴⁵ Joint FAO/IAEA/WHO Study Group. Wholesomeness of irradiated food. WHO Technical Series 659. Geneva: WHO; 1981
- ⁴⁶ Olson DG. Irradiation of food: science status summary. Journal of Food Technology 1998; 52:56-62.
- ⁴⁷ Kava R. Irradiated foods. 6th ed. New York: American Council on Science and Health; 2007.
- ⁴⁸ Fielding L. The safety of irradiated foods: a literature review. Technical Report. Food Standards Agency; 2007 January Project A05009.
- ⁴⁹ Bhaskaram C and Sadasivan. Effects of feeding irradiated wheat to malnourished children. American Journal of Clinical Nutrition 1975; 28: 130-5.
- ⁵⁰ Ashley BC, Birchfield PT, Chamberlain BV, Kotwal RS, McCellan SF, Moynihan S, et al. Health concerns regarding consumption of irradiated food. International Journal of Hygiene and Environmental Health 2004; 207: 493-504.
- ⁵¹ Tritsch GL. Food Irradiation. Nutrition 2000; 16: 698-718.
- ⁵² LeTellier PR and Nawar WW. 2-Alkylcyclobutanones from radiolysis of lipids. Lipids 1972; 7: 75-6.
- ⁵³ Crone AVJ, Hand MV, Hamilton JTG, Sharman ND, Boyd DR, Stevenson MH. Synthesis, characterisation and use of 2-tetradecylcyclobutanones together with other

cyclobutanones as markers of irradiated liquid whole egg. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 1993; 62: 361-7.

⁵⁴ Ndiaye B, Jamet G, Miesch M, Hasselmann C, Marchioni E. 2-Alkylcyclobutanones as markers for irradiated foodstuff, (II) The CEN (European Committee for Standardisation) method filed of application and limit of utilisation. *Radiation Physics and Chemistry* 1999; 55: 437-45.

⁵⁵ Hartwig A, Pelzer A, Burnouf D, Titéca H, Delincée H, Briviba K et al. Toxicological potential of 2-alkylcyclobutanones – specific radiolytic products in irradiated fat-containing food – in bacteria and human cell lines. *Food and Chemical Toxicology* 2007; 45: 2581-91.

⁵⁶ Marchioni E, Raul F, Burnouf D, Miesch M, Delincée H, Hartwig A et al. Toxicological study on 2-alkylcyclobutanones – results of a collaborative study. *Radiation, Physics and Chemistry* 2004; 71: 145-8.

⁵⁷ International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: dry cleaning, some chlorinated solvents and other industrial chemicals. Lyon: IARC; 1995. 63: 393-407.

⁵⁸ Fan XT. Formation of furan from carbohydrates and ascorbic acid following exposure to ionizing radiation and thermal processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2005; 53: 7826-31.

⁵⁹ Fan X and Sokorai KJB. Effect of ionizing radiation on furan formation in fresh-cut fruits and vegetable. *Journal of Food Science* 2008; 73: C79-83.

⁶⁰ US Food and Drug Administration (FDA). Exploratory Data on Furan in Food. 2007. [cited 13 May 2008] Available from: <http://www.cfsan.fda.gov/~dms/furandat.html>.

⁶¹ Pauli GH. Regulation of irradiated foods and packaging. In: Sommers CH and Fan X editor. *Food Irradiation Research and Technology*. Iowa: Blackwell Publishing; 2006. p. 37-41.

⁶² Diehl J. *Safety of irradiated food*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker; 1995.

⁶³ Molins RA. Introduction. In: Molins RA editor. *Food Irradiation: Principles and Applications*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p.1-21.

⁶⁴ Codex Alimentarius Commission. General standard for the labelling of prepackaged foods (CODEX STAN 1-1985, Rev. 1-1991). 1991. [Cited 19 May 2008] Available from: http://www.codexalimentarius.net/download/standards/32/CXS_001e.pdf

⁶⁵ Stewart EM. Detection methods for irradiated foods. In: Molins RA editor. *Food Irradiation: Principles and Applications*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p.347-86.

主要國家批准進行輻照處理的食物

國家	劑量 [#]	目的	產品
澳洲	低	控制發芽、殺蟲	草本製劑、香料及香草
		檢疫	麪包果、楊桃、番荔枝、荔枝、龍眼、芒果、山竹果、木瓜(萬壽果)、紅毛丹
	中	控制微生物	草本製劑、香料及香草
加拿大	低	殺蟲	小麥及小麥製品
		抑制發芽	洋葱、馬鈴薯
	中	控制微生物	乾製蔬菜調味料、香料
中國	低	控制寄生蟲	豬肉
		殺蟲	豆、穀物(米、小麥)、乾堅果及乾果
		延長保質期	各類鮮果
		抑制發芽	各類新鮮蔬菜
	中	控制微生物	牛肉及禽肉(冷藏)、禽畜食用的熟肉飼料、花粉、香料、番薯酒
日本	低	抑制發芽	馬鈴薯

韓國	低	殺蟲	栗子、菇類
		抑制發芽	蒜、洋蔥、馬鈴薯
	中	殺蟲	穀物或豆類及其粉末(作為食品配料)
		控制微生物	海藻食物、蘆薈、穀物或豆類及其粉末(作為食品配料)、動物源乾製食品(肉類、魚類)、乾製蔬菜、蛋粉、酵素製劑、人參、其他粉狀食品(豆醬、辣醬、醬油)、醬汁、大豆及紅辣椒醬、豉油、香料(乾製)、澱粉(作為食品配料)、消毒膳食(供第二次巴斯德消毒)、茶(較後期才包括在批准之列)、蔬菜調味料(乾製)、酵母粉
新西蘭	低	檢疫	麪包果、楊桃、番荔枝、荔枝、龍眼、芒果、山竹果、木瓜(萬壽果)、紅毛丹
	中	控制發芽	草本製劑、香草、香料
		殺蟲	草本製劑、香草、香料
		控制微生物	草本製劑
中至高	控制微生物	香草、香料	

美國	低	控制寄生蟲	豬肉
	中	減慢成熟 / 生長速度	各類鮮果及蔬菜
		殺蟲	各類鮮果及蔬菜、小麥及小麥粉
		檢疫管制	各類鮮果及蔬菜
		抑制發芽	馬鈴薯(白馬鈴薯)
		控制微生物	酵素製劑(乾製或脫水)、供發芽用的種子
	高	減少致病微生物	新鮮雞蛋、禽肉及其製品、紅肉及肉類副產品、介貝類水產(新鮮或冷藏)
		延長保質期	禽肉及其製品、紅肉及肉類副產品
		控制微生物	動物飼料及寵物食品、香草、香料、蔬菜調味料

低劑量輻照 — 不高於 1 千戈瑞；中劑量輻照 — 介乎 1 至 10 千戈瑞；高劑量輻照 — 10 千戈瑞以上⁵。

主要國家標籤輻照食物的慣常做法

國家	輻照食物須 附有文字說明 其經輻照處理	須使用國際食品 輻照標誌	如輻照食品用作配 料，須在配料表標示
澳洲	√		√
加拿大	√	√	√ (>10%)
中國	√	√	√
歐盟	√		√
新西蘭	√		√
美國	√	√	