

辐照食品经过多年的研究和发展, 现已在许多国家进入了商业化应用阶段。各种辐照食品可否进入市场都是以大量长期的辐照食品的卫生安全评价为依据的。本书从食品安全的角度系统地总结了国内外辐照食品的卫生安全方面的研究成果, 以期消除人们对辐照食品的误解和顾虑。

本书内容包括辐照食品加工原理、辐照设施和运行管理、辐照食品卫生安全性以及几种辐照食品的研究现状、卫生安全性和加工工艺, 着重阐述了辐照食品的毒理学分析、营养安全和微生物学安全性, 以及国际国内的法规、标准和检测是否经过辐照的基本原理。

本书可供食品储藏加工、食品科学、食品质量与安全等领域的科研人员、管理人员和企业人员参考, 也可以作为农业院校、综合性大学相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

辐照食品及其安全性/哈益明编著. —北京: 化学工业出版社, 2006.4
ISBN 7-5025-8548-6

I. 辐… II. 哈… III. 辐照食品-食品卫生
IV. R155.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 036766 号

辐照食品及其安全性

哈益明 编著

责任编辑: 侯玉周

文字编辑: 焦欣渝

责任校对: 战河红

封面设计: 尹琳琳

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

[http:// www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 316 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8548-6

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

食品辐照是利用电离辐射对食品或农产品的生物学作用，达到抑制食品发芽、改善食品品质、杀虫灭菌和延长货架期等目的的新型食品保藏加工技术。辐照食品是为了达到某种实用目的，按辐照工艺规范规定的要求，经过一定剂量电离辐射处理的食品。

在辐照食品出现之初，世界卫生组织及各国就对其卫生安全性开展了大量研究。我国科学家对辐照食品安全性的研究为国际专家组的评价做出了重要贡献：“辐照是一种处理食物的物理加工过程，如同用加热和冷冻保藏食品……”，“为储存的目的，任何食物受到 10kGy 以下照射量的辐照，……不再需要进行毒理学方面的检验”等。这些权威性的结论，使辐照食品的安全性具有了充分的科学依据。

随着人们对食品安全性的关注以及对食品新鲜度的要求，利用辐照这种非常有效的冷杀菌方法来解决和控制食品的微生物危害的应用前景越来越广阔。鉴于发展中国家往往缺乏冷藏的条件，世界卫生组织倡导发展中国家大力采用食品辐照这一技术。因此，辐照食品不仅自身是安全的，而且，辐照加工处理在提高食品的安全性方面将发挥愈来愈大的作用。在国际范围内，辐照食品研究的深度，涉及的范围以及投入的人力、物力是其他食品加工工艺所不能及的。

本书作者从事了 20 多年辐照食品的科研和教学工作，在辐照食品加工领域有着丰富的研究经验和理论造诣。本书是国内第一部系统阐述辐照食品基础知识和安全性的学术著作。相信该书的出版，将对推动辐照食品的发展，消除公众对辐照食品安全性的顾虑和误解，促进辐照食品加工技术的应用和产业化，都将有着十分重要的意义。

陈君石

2006 年 2 月

前 言

辐照食品加工的历史可以追溯到 100 多年前，人类发现 X 射线后的第 2 年就发现射线对食品中的微生物的杀灭作用。辐照食品的研究先后经历了辐射杀灭微生物现象的发现、辐射化学和生物效应研究、辐照加工工艺研究、辐照食品的卫生安全性评估、食品辐照的加工工艺研究、食品辐照的技术经济可行性研究、食品辐照市场开发和商业化应用等过程。经过多年的研究和开发，辐照食品加工技术已发展成为食品加工领域中的一项高新技术，具有安全、环保、节能高效、技术密集、产业化程度高和高附加值的特点，在食品和农产品储藏加工领域具有广阔的发展前景，并正形成为一门新兴的食品辐照加工产业。

食品辐照技术在控制食源性疾病的发生、减少农产品产后损失、延长货架期、改进农产品和食品质量等方面具有广泛的应用。食品的辐照处理可以大大减少化学防腐剂和熏蒸剂的使用，因而减少了环境中食品本身化学残留物。而食品中的农药残留和兽药残留物是愈来愈受到关注的问题。据国际原子能机构的统计，截止到 2003 年，全球已批准辐照食品的国家达到 52 个，其中有 33 个国家进行了食品辐照的商业化应用。辐照食品的品种包括新鲜水果和蔬菜、香辛料和脱水蔬菜、肉类和畜产品、水产品、谷物和豆类食品，以及一些保健产品。辐照食品的国际贸易也大幅度上升，2003 年全球辐照食品的总量达到 30 万吨。中国食品辐照加工研究始于 1958 年，经过 40 多年的发展，在食品辐照工艺研究、辐照卫生安全性研究、辐照食品法规和辐照装置建设上均取得了很大的成就，对其他国家特别是发展中国家具有很好的借鉴作用。到目前为止，我国食品辐照装置已达 70 多座，全国 28 个省、市、自治区的 100 多个单位分别对 200 多种食品进行了辐照保鲜、杀虫杀菌、改善品质等方面的研究。我国已批准 18 种和 6 大类食品的卫生标准，以及 17 个产品的辐照工艺标准，建有“农业部辐照产品质量检验监督测试中心”，2003 年全国辐照食品总量达 10 万吨，是世界上食品辐照商业化规模最大的国家之一。我国在食品辐照商业化过程中，得到了政府部门的高度重视，积极参与国际原子能机构和区域合作组织在辐照领域的合作，建立了辐照食品的卫生、安全和工艺标准，并大

力加强食品辐照质量的监督和管理。

为了推动辐照食品在全球的发展，联合国粮农组织（FAO）、国际原子能机构（IAEA）和世界卫生组织（WHO）在1984年联合成立了联合专家委员会（ICGFI），并在FAO/IAEA联合处下设ICGFI秘书处。2003年7月，国际食品法典委员会（CAC）在意大利罗马召开了第26届大会，讨论通过了新修订的《辐照食品国际通用标准（CODEX STAN 106—1983, Rev. 1—2003）》和《食品辐照加工工艺国际推荐准则（CAC/RCP 19—1979, Rev. 1—2003）》，提出将食品辐照处理作为良好卫生操作规范（GMP）的一部分，以实现合理的工艺目标，对推动辐照食品加工技术的发展起到了重要作用。

应当指出，辐照食品在商业化的应用中仍然受到一定的制约，主要原因在两个方面。其一是严格的立法批准程序要求对辐照食品的充分的基础性研究。各国卫生管理部门在进行审批任何一种辐照食品的标准时，除辐射化学的研究结果外，还要求进行动物性试验，有时甚至是人体试食试验，用以确定辐照食品的安全性。其二是消费者的心理或公众接受性。食品企业对辐照后的产品不愿加贴辐照食品的标识，消费者还不充分了解食品在经受辐照时发生了哪些变化。实际上，对辐照过的食品进行分析，鉴定食品辐照后诱发的辐解产物，开展辐照后食品的安全评价，这样的研究工作已在全球许多实验室中进行过，研究结果已发表在很多出版物中。消除消费者对辐照食品的心理障碍，除了要加强基础研究外，还要依靠媒体加强宣传和知识的普及。食品辐照是一项已被充分研究的技术，有关辐照食品安全性的研究表明至今没有发现任何有害作用。只要执行生产工艺规范，食品辐照是安全和有效的。辐照食品不仅自身是卫生安全的，而且可以在消除食品有害微生物、保证食品卫生安全方面发挥独特的作用。

本书从食品安全的角度对辐照食品的特点和安全性等方面的研究成果进行全面系统地介绍，以期消除人们对辐照食品的误解和顾虑。本书对辐照食品的毒理学评价、营养成分影响及微生物卫生安全方面进行了分析。希望能通过本书的出版引起同行、管理者和消费者的关注，起到抛砖引玉的作用，为推动辐照食品的商业化应用贡献绵薄之力。然而由于作者水平所限，恐怕叙述有所疏漏，解释上亦或有不妥，望读者不吝赐教。

在本书的编著过程中，得到许多前辈和从事辐照食品研究的同行的支持和帮助，使本书得以出版。特别是本人领导的研究课题小组的同事们对辐照食品的研究资料使本书的内容得以完善，在此向他们表示深深的谢意。

目 录

第一章 导论	1
一、辐照食品的发展历程	2
二、辐照食品的发展现状与展望	6
参考文献	10
第二章 食品的辐照保藏技术概论	11
第一节 食品辐照的基本原理	11
一、电离辐射的概念	11
二、电离辐射的测量方法	14
三、食品辐照技术的应用领域	19
四、食品辐照技术的特点	21
第二节 辐照食品的质量因素	23
一、辐照食品的质量要素	23
二、食品的变质及其控制	28
第三节 辐照对食品成分影响的安全评价	36
一、辐照对食品中水分的化学效应	36
二、辐照对食品中蛋白质的影响	38
三、辐照对食品中碳水化合物的作用	40
四、辐照对食品中脂类化合物的作用	40
五、辐照对食品中维生素含量的影响	41
第四节 辐照对食品中有关生物的作用	43
一、食品辐照的生物效应	43
二、辐照对细菌、病毒的杀灭作用	45
三、辐照对酵母、霉菌的灭活效应	47
四、辐照对昆虫、食源性寄生虫的杀灭作用	48
参考文献	49
第三章 食品辐照设施与安全运行控制	51
第一节 辐射剂量学与辐射防护基础	51

一、辐射剂量学概论	51
二、辐射量的计算与分析	57
三、辐射防护基础	68
第二节 辐照装置与运行安全	74
一、食品辐照用辐射源类型	75
二、食品辐照装置的类型	75
三、辐照装置的安全运行	87
第三节 食品辐照过程的安全控制	92
一、辐照食品质量的安全控制	92
二、辐照食品加工质量的安全性	97
参考文献	108
第四章 辐照食品的卫生安全性	109
第一节 概述	109
一、辐照食品卫生安全研究的国际现状	109
二、我国辐照食品安全性研究的状况	111
三、FAO/IAEA/WHO 辐照食品卫生安全性的评价	113
第二节 辐照食品的毒理学分析	116
一、食品毒理学评价的一般程序	116
二、辐照食品毒理学试验方法	120
三、辐照食品毒理学研究的结论	122
第三节 辐照食品的营养安全性	127
一、食品中的营养成分	127
二、食品营养成分的辐射化学效应	133
三、辐照食品的营养安全性	138
第四节 辐照食品的微生物安全性	138
一、微生物污染对食品安全性的影响	139
二、微生物的耐辐射特性	143
三、辐照对致病菌和寄生虫的杀灭作用	145
参考文献	151
第五章 辐照食品的卫生标准和检测方法	153
第一节 辐照食品卫生安全性的讨论	153
一、辐照食品无放射性污染	153
二、辐照食品没有感生放射性	154
三、辐照食品的公众接受性	155

第二节	辐照食品的标准与法规	158
一、	CAC 辐照食品的标准和法规	158
二、	主要国家辐照食品的标准法规	159
三、	中国辐照食品标准现状	162
第三节	辐照食品的标识和包装	164
一、	辐照食品的标识	165
二、	辐照食品的包装	165
三、	辐照食品包装材料的安全性	168
第四节	辐照食品的鉴定方法	171
一、	辐照食品鉴定的发展现状	171
二、	辐照食品的鉴定方法	172
	参考文献	178
第六章	辐照食品的加工原理及技术要点	180
第一节	新鲜水果、蔬菜辐照保鲜及加工工艺	180
一、	新鲜水果、蔬菜辐照保鲜机理	181
二、	新鲜水果、蔬菜辐照保鲜的卫生安全性	183
三、	新鲜水果、蔬菜辐照保鲜的工艺要点	188
第二节	脱水蔬菜、香辛料辐照灭菌及加工工艺	193
一、	脱水蔬菜、香辛料辐照灭菌保藏机理	193
二、	脱水蔬菜、香辛料辐照保藏的卫生安全性	196
三、	脱水蔬菜、香辛料辐照灭菌的工艺要点	199
第三节	水产品辐照灭菌保鲜及加工工艺	203
一、	水产品辐照灭菌保藏机理	203
二、	水产品辐照灭菌保鲜的卫生安全性	209
三、	水产品辐照灭菌保鲜技术工艺要点	213
第四节	谷类、豆类及其制品辐照杀虫与加工工艺	216
一、	谷类、豆类及其制品辐照杀虫保鲜机理	216
二、	谷类、豆类及其制品辐照的卫生安全性	220
三、	谷类、豆类及其制品辐照技术工艺要点	223
第五节	畜、禽肉类辐照灭菌保鲜及加工工艺	225
一、	畜、禽肉类辐照杀菌保鲜机理	226
二、	畜、禽肉类辐照杀菌的卫生安全性	230
三、	畜、禽肉类辐照灭菌保鲜技术工艺要点	234
	参考文献	239

附录一	辐照食品国际通用标准	241
附录二	食品辐照加工工艺国际推荐准则	243
附录三	辐照食品卫生管理办法	248
附录四	食品辐照通用技术要求	251
附录五	冷冻水产品辐照杀菌工艺	255
附录六	辐照香辛料及脱水蔬菜热释光鉴定方法	257

第一章

导论

食物是人类赖以生存的基本生活资源，是提供营养和维持生命的物质基础。维护食物安全，促进人类社会的可持续发展是国际社会面临的新的挑战。为解决人类面临的食物安全问题，一方面要充分利用现代科学技术提高食品的产量，另一方面要尽可能减少农产品和食品的损失。目前，由于微生物的活动和虫害，加之气候及食品加工储藏技术上存在不足，每年都造成食物资源大量的损耗。据联合国粮农组织估计，全世界粮食因虫害和霉变造成的损失约占收获量的 20%~25%，热带地区的水产品损失率通常在 30%左右，有时高达 50%~70%，其中发展中国家的损失更为严重。我国也不例外，据有关部门统计，我国粮食损失约占总产量的 10%左右，油料产品为 20%左右，水果年损失量达 15%~20%，肉类及制品的损失接近 30%。不仅造成了巨大的经济损失，还影响了市场供应和经济的发展。目前，食源性微生物危害相当严重，全世界近 80%的人口还不得不食用这样的食品，导致近年来严重的食源性疾病时有发生。由各种致病菌造成的食源性食物中毒仍然占第一位，微生物病原菌、生物毒素和有害寄生虫已严重威胁人类的健康。传统的食品保藏方法，如干燥、加热、冷藏、腌制、罐装等，虽然行之有效，但都有其局限性，如：能耗大，存在添加剂的残留，污染环境以及导致食品品质改变等。因此，如何保藏食品不受病原微生物及有害寄生虫的污染，为人类提供安全、健康和富有营养的食品，减少产后损失，一直是人类追求的共同目标。

食品辐照是采用辐射源产生的 γ 射线，以及加速器产生的高能电子束 (EB) 辐照农产品和食品，利用电离辐射在食品中产生的辐射化学和辐射生物学效应，达到抑制发芽、推迟成熟、杀虫灭菌和改进品质等目的的新型食品储藏保鲜加工技术。食品辐照所用的辐照射线源包括 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 产生的 γ 射线；能量为 5MeV 以下的 X 射线；以及电子加速器产生的 10MeV 以下电子束射线。辐照食品是指，为了达到某种实用目的，如保藏、杀虫、抑芽、灭菌等，按照辐照工艺规范规定的要求，经过一定剂量电离辐射辐照处理过的食品。

食品辐照处理大都采用具有较高能量和穿透力较强的射线，使处理过程能够穿透被照食品的包装材料和透射到食品的深层和内部，具有很强的杀灭有害

寄生虫和杀灭致病微生物能力。 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 产生的 γ 射线, 能量为 5MeV 以下的 X 射线, 以及电子加速器产生的 10MeV 以下电子束都是目前所采用的射线类型。辐照处理的食物不接触放射性核素, 不会使食物和环境产生放射性物质的污染。食物辐照处理从根本上来讲属于“冷杀菌处理”的物理加工方法, 其最大特点就是能够保持食物原有的色、香、味等食用品质。对于某些食物, 比如冷冻食物、香辛料及调味品等, 采用传统加热灭菌处理方法会造成食物失去原有风味、芳香性和商品价值, 而辐照处理在保持此类食物特有风味和卫生安全方面具有明显的技术优势。

辐照食物加工技术是一项极具发展潜力的高新技术, 具有安全、环保、节能高效、技术密集、产业化程度高和高附加值的特点, 是一种安全、卫生、经济的食物绿色储藏加工技术。世界各国高度重视食物辐照技术的研究和开发, 联合国粮农组织 (FAO)、国际原子能机构 (IAEA) 和世界卫生组织 (WHO) 都积极鼓励和支持食物辐照技术在全球范围的应用。食物辐照在食物和农产品保藏和加工领域具有广阔的应用前景, 正在逐步形成一门新兴的食物加工产业。

一、辐照食物的发展历程

辐照食物的研究和技术应用涉及食物科学与工程、辐射物理与化学、食物化学、食物微生物、食物毒理学等学科, 是一门综合性较强的食物加工技术。食物辐照和辐照食物的发展历史, 可以追溯到伦琴 1895 年发现 X 射线的第 2 年, 也就是 1896 年。当时人们就发现 X 射线的杀菌作用, 并利用射线来杀死食物中的病原微生物和昆虫, 这些就是最早辐照食物加工储藏的探索性研究。从总体上看, 辐照食物的发展先后经历了辐射化学和辐射生物效应研究、辐照食物的卫生安全评价、辐照食物的加工工艺研究和商业化应用等三个主要历史过程。

(一) 辐射化学和辐射生物效应研究

1895 年, 德国物理学家伦琴发现 X 射线。1896 年, 法国科学家贝可勒尔发现铀的天然放射性, 揭开了人类利用原子能时代的序幕。同年, 人类第一次发现 X 射线对病原细菌有致死作用。1899 年, 研究又证实了 X 射线对寄生虫有致死作用。1916 年, 人们发现了 X 射线能使昆虫产生不育效应。这些研究结果揭示了人们对射线的生物效应和遗传效应的认识, 促进了利用射线进行辐照保藏食物的研究探索。早在 1905 年, 英国人就提出了可以应用 α 射线、 β 射线和 γ 射线辐照处理食物的设想。到了 1921 年, 美国农业部研究并提出可以应用 X 射线杀死猪肉中的旋毛虫。1930 年德国工程师的研究表明: 保存在容器中的各类食物均可以应用能量较高的硬 X 射线杀菌。1943 年, 美国麻省理工学院率先进行了应用射线处理汉堡包的研究和探索。随着技术的发展, 到 1947 年科学家开始应用脉冲电子束辐照食物的研究。首先报道了利用高能电子脉冲对肉类和其他一些食物的消毒作用, 并发现在低温和无氧条件下可以避

免辐照异味的产生。到了 1950 年,前苏联、英国的科学家也开始了辐照食品的研究和探索。与此同时,美国麻省理工学院研究辐射处理对食品和生物材料的辐射效应。美国原子能委员会 (USAEC) 1950 年组织了电离辐射保藏食品的国际联合研究项目, ^{60}Co 辐照源和电子加速器作为研究推荐的辐照设施,开始应用于食品辐照保鲜。英国设在剑桥的低温研究实验室开展了电离辐射对食品的效应的研究,随后在英国原子能研究院的 Wantage 研究室也开展了食品辐照研究。美国军方支持了低剂量和高剂量辐照应用研究,重点开展肉类产品的辐照杀菌研究,以替代罐头食品和冷冻产品。在马萨诸塞州, Natick 建立了食品辐照实验室,并很快成为食品辐照研究的国际中心。随着世界各国科学技术的发展和经济实力的增强,加之第二次世界大战结束后,面对原子弹给人类带来的战争创伤,原子能与核技术的和平利用已成为各国关注的焦点。1953 年,美国总统艾森豪威尔向联合国提出了“和平利用原子能计划”。在此计划的支持下,1955 年在日内瓦召开了第一届世界和平利用核能大会。1957 年成立了国际原子能机构 (IAEA) 负责组织协调原子能和平利用和核安全的监督工作。

在国际和平利用原子能的大背景下,食品辐照技术也得到了较快的发展。积极开展了对辐照杀虫、辐照杀菌、抑制发芽、延长食品货架期的适宜条件(例如辐照剂量、产品成熟度、包装材料、温度和气体环境的影响等)的研究。全球 20 多个国家开展了包括禽肉、水产类 (50 多种),水果、蔬菜 (40 多种),香料、调味品 (50 多种)的辐照食品技术和基础应用研究。1958 年,前苏联成为世界上第一个批准辐照食品供人类消费的国家,首次宣布批准利用 ^{60}Co 辐射源进行 0.1kGy 辐照处理的马铃薯可供人们消费。美国国会 1958 年通过法案,将食品辐照列为食品添加剂进行管理,这不仅在概念上不合适,而且对美国乃至全球的食品辐照的发展产生了长期的负面影响。直到 1963 年,美国才首次批准高剂量辐照的罐头熏肉上市。在国际原子能机构和联合国开发计划署 (UNDP) 的支持下,1965 年在土耳其建立了世界上第一个工业化规模的辐照谷物示范工厂,该辐照装置在 1967 年正式运行,对国际原子能机构全球示范项目的开展起到了积极的推动作用。加拿大 1960 年批准了抑制马铃薯发芽的辐照商业化应用,并开始 ^{60}Co 辐照马铃薯的产业化示范,达到年辐照量 1.5 万吨的规模。1966 年,在德国召开了第一届国际食品辐照研讨会,交流了世界各国在食品辐照方面的研究进展。1969 年,在日内瓦召开了 FAO/IAEA/WHO 联合专家委员会,会议暂定批准辐照小麦及其制品和马铃薯可供人食用。这是辐照食品的卫生安全性第一次得到国际组织的认可,对食品辐照在国际范围的研究起到了积极的推动作用。

总的看来,辐照食品早期的研究和发展主要集中在辐射化学和辐射生物效应研究。尽管辐照食品在这一阶段也遇到了一些人们关注的卫生安全性等问题,但还是得到了较好的发展,并进行了一定规模的研究和示范。由于辐照食

品的卫生安全性的研究尚不够深入，所以在这一阶段卫生部门对食品辐照的商业化态度不甚积极。仅有前苏联、加拿大和美国批准 5 种辐照食品可供人类食用，尽管公众对辐照食品持积极态度，但辐照食品对人们生活和经济发展的影响力尚未形成。

（二）辐照食品的卫生安全评价

第二次世界大战结束后，国际上掀起的反核运动对原子能和平利用带来负面的影响，并在一定程度上也影响了辐照食品的发展。随着食品辐照技术研究不断深入，使辐照食品加工在技术上逐步发展成熟，并基本具备了工业化生产的条件。但由于对辐照食品及辐照技术的宣传和普及教育的欠缺，使辐照食品不得不面对公众和媒体的误解，同时面对食品卫生管理部门的严格管理和控制。鉴于这一时期辐照食品的卫生安全问题已成为制约辐照食品商业化发展的主要障碍，在国际原子能机构等有关国际组织和各国政府重视和支持下，辐照食品卫生安全性的研究在全球范围内广泛深入地开展起来。联合国粮农组织（FAO）、国际原子能机构（IAEA）、经济合作与发展组织（OECD）1970 年共同发起了辐照食品国际项目（IFIP），对这一研究起到了积极的推动作用，世界卫生组织（WHO）后来也参与了该项目的咨询工作。这一国际项目的主要研究内容包括：长期的动物饲养实验，危害分析和风险评估，短期的毒理学分析，对比实验和 10kGy 以下的辐照对食品化学成分的变化和营养的影响。项目的研究结果将成为 FAO/IAEA/WHO 辐照食品联合专家委员会（JECFI）评估辐照食品卫生安全性的重要依据。

到了 1976 年，FAO/IAEA/WHO 辐照食品联合专家委员会（JECFI）总结了国际上关于辐照食品的研究结论后，首次阐明食品辐照同热加工和冷藏一样，实质上是一种物理加工处理过程，辐照食品卫生安全性评价涉及的问题应该与食品添加剂和食品污染所遇到的问题区别开来。该委员会积极推动辐照食品的商业化进程，同年审查并批准 8 种（类）辐照食品可供人类消费，其中无条件批准了小麦及其制品、马铃薯、鸡肉、番木瓜、草莓的辐照，暂定批准了洋葱、鳕鱼和鲱鱼、大米的辐照。1980 年，FAO/IAEA/WHO 辐照食品联合专家委员会（JECFI）在日内瓦再次召开会议，进一步总结国际合作项目的研究结果和深入讨论辐照食品卫生安全性问题。与会专家根据国际上不同国家实验室的长期的毒理学、营养学和微生物学研究结论和实验资料以及辐射化学分析结果，提出“任何食品辐照保藏处理其平均吸收剂量最高达 10kGy 时，不会有毒害产生，用此剂量处理的食物可不再要求做毒理学试验”。这是辐照食品卫生安全性研究领域的标志性的结论和重大突破，对推动辐照食品的发展具有划时代的意义。1983 年，国际食品法典委员会（CAC）制定并通过了《国际辐照食品通用标准》和附属的技术法规，确立了辐照技术的卫生安全性，对推动辐照食品的发展起到积极的法律保障作用，并对辐照食品今后的发展产生

了重大影响。

联合国粮农组织、国际原子能机构、世界卫生组织 1984 年成立了国际食品辐照咨询组 (ICGFI), ICGFI 的主要职能是评估全球食品辐照领域的发展状况, 出版有关辐照食品安全性、辐照设施控制、辐照食品商业化、食品辐照法规、辐照食品接受性的有关材料, 举办各类食品辐照培训班, 并建有介绍食品辐照技术和辐照食品的专业网站。1988 年 12 月, IAEA/FAO/WHO 以及联合国贸易发展会议和关贸总协定下属国际贸易中心 (UNCTAD/GATT/ITC) 在日内瓦联合召开了辐照食品接受、控制及贸易国际会议, 制定了有关辐照食品接受、控制及在成员国之间进行贸易的文件, 评价辐照加工技术对于减少农产品收获后的损失和由食品引起的疾病发生率的作用, 以及对于国际食品贸易的影响。世界卫生组织将辐照技术称为“保持和改进食品安全性的技术”, 并鼓励大力开展食品辐照技术的应用。尽管辐照食品的卫生安全性得到了国际承认, 但关于辐照食品卫生安全性的疑问依然存在。为此, WHO 应其成员国的请求, 成立了一个独立的专家组评估 1980 年以来辐照食品研究的结果, 并对 FAO/IAEA/WHO 辐照食品联合专家委员会 (JECFI) 的评估材料进行分析。该工作小组经过大量工作, 认为: “食品辐照技术是一项被充分研究的技术, 有关辐照食品安全性的研究表明至今没有发现任何有害作用。通过延长货架期和杀灭病原菌和有害寄生虫, 食品辐照将有助于食物的卫生安全和增加食物供应。只要执行辐照食品的生产工艺规范, 食品辐照技术是安全和有效的, 辐照食品是富有营养和卫生安全的。”

(三) 辐照食品的加工工艺研究和商业化应用

在肯定了辐照食品卫生安全性的基础上, 国际原子能机构和联合国粮农组织又积极推动食品辐照技术经济可行性研究。欧洲、美洲、非洲和中东地区的许多国家进行了食品辐照中试研究或技术经济可行性研究, 为食品辐照技术商业化的发展奠定了基础。自 20 世纪 90 年代以来, 大规模食源性病原菌导致的食物中毒事件引起了国际社会对食品安全的严重关注。食品辐照技术由于具有独特的优势, 其应用日益受到重视。在食品加工领域中, 辐照杀菌保障食品的卫生安全的作用愈加明显。特别是香辛料、调味品和脱水蔬菜的辐照处理在许多国家得到广泛的商业化应用, 辐照食品的数量和品种得到快速增加。特别要指出的是, 美国的食品加工企业在经历了对辐照食品的观望后, 面对严峻的食品安全问题, 认清了辐照处理的独特作用, 进而加快了食品辐照技术应用的商业化步伐。大部分发展中国家在国际原子能机构的支持下, 在 90 年代纷纷建立起食品辐照的商业化处理设施。同时也在 CAC 标准的基础上, 建立了与本国情况相适应的食品辐照技术法规、工艺标准和卫生标准等辐照食品标准化体系, 使全球食品辐照技术的商业化应用进入了全面发展时期。

辐照食品工艺研究开始于 1997 年。FAO/IAEA/WHO 高剂量食品辐照研

究小组评估了 10kGy 以上的高剂量辐照对食品安全的影响, 根据研究结果, 该小组认为食品辐照同其他食品加工的物理方法是一样的。食品的卫生、营养和感官品质取决于加工的综合条件, 以及工艺水平的控制。在实际辐照操作中用于保证食物安全的剂量一般低于影响食品感官品质的剂量, 即最大耐受剂量。因此, 联合研究小组认为没有必要设定食品辐照剂量的上限, 在低于或高于 10kGy 的合理辐照工艺剂量条件下, 辐照食品加工剂量由影响食品加工卫生要求、营养和感官品质要求的综合技术参数确定。

在 2000 年召开的 ICGFI 年会上, 国际食品法典委员会 (CAC) 提出对任何食品的辐照应在规定的工艺剂量范围内进行, 其最低剂量应大于达到工艺目的所需要的最低有效剂量, 最大剂量应低于综合考虑食品的卫生安全、结构完整性、功能特性和品质所确定的最高耐受剂量。1999 年, FAO/IAEA/WHO 的高剂量辐照食品研究小组经过长期的研究工作, 明确指出了超过 10kGy 剂量的辐照食品也是卫生安全的结论。2003 年 5 月, 在美国芝加哥召开了第一届世界食品辐照大会, 在会上进行的 7 项问卷调查中, 辐照食品名列最具发展前景、公众关注、市场潜力、产业规模和贸易需求 5 项第一。与会代表同时还交流了食品辐照在法规协调、辐照设施建设、辐照检疫、辐照食品商业化和国际贸易等方面的进展, 讨论了辐照食品面临的机遇和今后发展的方向, 对食品辐照和辐照食品贸易在全球的发展起到了积极的推动作用。2003 年 7 月, 国际食品法典委员会 (CAC) 通过了《辐照食品国际通用标准 (CODEX STAN 106—1983, Rev. 1—2003)》和《食品辐照加工工艺国际推荐准则 (CAC/RCP 19—1979, Rev. 1—2003)》, 从而在法规上突破了食品辐照加工中 10kGy 的最大吸收剂量的限制, 允许在不对食品结构的完整性、功能特性和感官品质发生负面作用和不影响消费者的健康安全性的情况下, 食品辐照的最大剂量可以高于 10kGy, 以实现合理的辐照工艺目标。

二、辐照食品的发展现状与展望

食品辐照以减少农产品和食品的损失、提高食品质量、控制食源性疾病等独特的技术优势, 越来越受到世界各国的重视, 表现出技术应用的美好前景。据联合国粮农组织/国际原子能机构/世界卫生组织 (FAO/IAEA/WHO) 公布的统计报告显示, 全世界已有 40 几个国家批准辐照食品 200 多种, 年市场销售总量达 30 万吨左右, 食品辐照加工已经被 FAO/IAEA/WHO 推荐为国际重点推广项目。已批准的辐照食品包括新鲜水果和蔬菜、香辛料和脱水蔬菜、肉类和禽产品、水产品、谷物和豆类食品, 以及一些保健产品。世界上已有 33 个国家进行了食品辐照的商业化应用, 在推进辐照食品的发展过程中, 食品辐照产业也迎来良好的发展机遇。仅以我国的发展情况为例, 据中国辐射行业协会的最新统计, 到 2004 年底, 全国工业规模 γ 辐照装置已超过 73 座,

设计总装源量已达 6200 万居里^①，实际装源量约为 3000 万居里。另有 19 座设计总装源能力超过 3500 万居里的新的辐照装置正在建设中。统计表明，全国功率 5kW 及以上的辐射加工用电子加速器已达 72 台，总功率近 4400kW。另有 19 座大功率电子加速器装置正在建设中，待其投入运行后全国辐照加速器的总功率可达 5709kW。随着我国技术的进步和经济的快速发展，食品辐照用的辐射装置发展前景非常广阔。由于加速器具有自动化程度高、可实现在线生产以及无放射性废源产生等优点，再加上近年来在技术上的突破，电子束辐照保藏食品有望成为食品辐照装置的发展方向。据报道，我国目前这些食品辐照装置辐射加工总产值已超过 32 亿元。我国已先后开展了辐照马铃薯、洋葱、大蒜、蘑菇、板栗、蔬菜、水果、鲜猪肉、牛羊肉、鸡鸭肉及其制品、水产、鲜蛋、酒和中成药、中药材等的试验研究，取得了一大批科研成果。1984 年，我国正式加入国际原子能机构（IAEA），1994 年加入国际食品辐照咨询组（ICGFI），先后承担 IAEA 食品辐照研究合同（协议）和技术援助项目 10 多项，扩大了我国在国际上的影响力。随着我国辐照食品产生的社会效益和经济效益日益显著，我国食品辐照技术应用的成果赢得了国际同行的广泛赞誉，在辐照食品品种、数量、法规体系和宣传普及等许多方面进入世界前列。在国家的支持下，连续多年开展了辐照食品卫生安全及公众接受性的研究。到 1994 年止，我国卫生部已批准了 18 种辐照食品的卫生标准。1996 年颁布了《辐照食品管理办法》。1997 年又公布了 6 大类食品的辐照卫生标准。专门设立了“食品辐照商业化加工工艺研究”的国家攻关项目，制定和颁布了 17 个辐照食品加工工艺标准。2003 年国家农业部又批准制定了 5 个包括水产品在内的饲料、茶叶等辐照工艺的行业标准。辐照食品的卫生标准和加工工艺标准的制定，使我国辐照食品的标准体系逐步形成，同时辐照食品的加工处理也纳入了法制化管理的轨道，为我国辐照食品标准和商业化实践与国际接轨、确保辐照食品质量符合国际贸易的基本准则、促使食品辐照行业健康发展创造了良好的条件。

随着经济的快速发展，人民的生活水平不断提高，饮食习惯和饮食结构都发生了较大变化。对食品的品质和营养，特别是食品的卫生质量的要求将会更高。在杀灭有害微生物，减少食源性疾病危害和控制食品污染、霉变所造成的损失，延长储存期，提高食品卫生质量方面，食品辐照是目前解决这些问题的最佳技术方法之一。可以相信，随着人们对辐照食品的认识程度的提高，食品辐照技术将会得到更快的发展，辐照食品的工业化生产和商业化应用规模将会更大，品种、数量将会更加迅速地增加。辐照食品工艺、辐照食品检测、辐照食品标准和规范及国际贸易法规等方面将会做得更加完善，以推动辐照食品的

① 1 居里 (Ci) = 37GBq。

健康发展。食品辐照加工作为一项绿色、安全的加工技术将在全球经济的发展中发挥更加重要的作用。

应用辐照技术保证食品的安全性已成为保证食品卫生的重要措施，其发展趋势是将辐照处理作为现代食品生产过程中质量控制（HACCP）的一个重要步骤，以满足《国际辐照食品通用标准》确定的原则。辐照已经证实为一种有效的可改善食品卫生质量和延长货架期的食品加工手段，能提高食品的卫生安全性和生物安全性，减少化学处理的应用，并促进食品贸易的发展。在消费者了解辐照食品的加工原理和特点后，许多国家已不存在消费者对辐照食品的抵制，食品辐照技术正加速向工业化转移。这些已有的发展基础将进一步推动食品辐照的应用，特别是在国际食品和农产品贸易中发挥更大的作用。辐照食品在获得国际组织和各国政府食品主管部门的认可后，其公众接受性成为影响食品辐照技术发展的重要因素之一。一般说来，在政府通过立法批准辐照食品后，公众一般对辐照食品认可，但由于各国的社会经济情况不同，公众对辐照食品的接受性表现出差异。影响公众对辐照食品接受性的原因主要是缺乏对辐照食品加工原理和卫生安全性的了解。大量有关辐照食品公众接受性的市场消费调查表明，一旦公众了解辐照食品的加工过程、卫生安全性及杀灭病菌的有效性后，会对辐照食品表现出相当高的接受性。值得注意的是，近年来由于一些公共卫生事件的出现，加上媒体的客观宣传报道，加强了政府部门、食品生产企业、销售部门和消费者对辐照技术在促进食品的卫生和安全性中的作用的认知，增加了公众对辐照食品的接受性。随着辐照技术不断发展和法律法规的完善，辐照食品的公众接受性将不会成为影响食品辐照发展的重要问题。

世界上的食品辐照设备主要包括钴 60 源和电子加速器辐照装置。钴 60 源放射源主要利用 ^{60}Co 和 ^{137}Cs ，根据食品辐照的目的、市场和技术经济条件，各国建立了一批不同规模的辐照设施。放射性钴源的发展方向是大型化、自动化和系列化。在产品多样化地区需要考虑辐照源的多用途，而在产品单一和产量高的地区则要考虑专业化。美国已建成用于畜禽肉辐照的水平式 ^{60}Co 辐照装置，最大的装源量达 1600 万居里。在机械源辐照装置方面，已建成 200kW 的能够产生高达 10MeV 能量的电子加速器辐照装置，以及大功率、高通量的 X 射线辐照装置。辐照设施主要采用来料加工的辐照方式，需要将食品从不同地区运到辐照中心进行辐照，降低了食品辐照的效率。电子束辐照装置不需要辐射源，同时具有可调节功率的特点，可以与生产线相连接，实现在线食品辐照。由于历史的原因，我国现有的大部分辐照装置的特点可用小、乱、杂来反映，专业化、大型化装置只是近几年才开始建造。电子束辐照食品的研究刚刚开始，无论设备还是工艺研究方面问题都很多，电子束辐照食品任重而道远。随着食品加工和贸易部门对辐照食品接受性的增加，食品辐照装置与食品

生产过程相连接，专业化、大型化辐照装置在线生产将成为辐照食品加工装置研发应用的发展方向。

自 1983 年国际食品法典委员会 (CAC) 通过《国际辐照食品通用标准》和附属的技术法规以来，国际社会一直在进行辐照食品法规及标准体系架构工作。辐照食品法规是食品辐照技术推广和应用的法律基础，同时也是保证辐照食品卫生安全的根本保障。辐照食品法规包括国际法规、地区性法规和国内法规三个层次。食品辐照处理作为食品加工良好卫生操作规范 (GMP) 的一部分，在高于 10kGy 或低于 10kGy 的辐照剂量条件下，均能够保证食品的卫生安全性和充分的营养。在 ICGFI 的大力推动下，这一结论已列入《辐照食品国际通用标准 (修订本)》。由于《辐照食品国际通用标准》是世界贸易组织 (WTO) 认可的国际法规，新修订的《辐照食品国际通用标准》，可以说是辐照食品法规及标准体系建设上的重大突破。我国的辐照食品标准体系建设已取得了令世人瞩目的成就，不仅颁布了《辐照食品管理办法》，1997 年又公布了按大类批准的 6 大类食品的辐照卫生标准，专门设立了“食品辐照商业化加工工艺研究”的国家攻关项目，制定和颁布了 17 个辐照食品加工工艺标准。由于按食品类别批准辐照食品是建立在大量实验研究基础上的一种科学方法，同时也能够加快辐照食品的批准进程。今后应在国际原子能机构的协调下，推动各国依据 ICGFI 的建议，按照食品类别批准辐照食品。但我国辐照食品的鉴定标准的建设尚未起步，功能食品、水产品等大类食品的卫生、工艺标准的制定仍制约着我国辐照加工业的快速发展。建立我国辐照食品质量标准体系是推动和保证我国辐照食品健康发展的重要环节。

20 世纪 60 年代，IAEA 提出了辐照食品检测课题。在不到半个世纪的时间内，辐照食品检测和国际贸易对辐照食品的分析检测技术取得了飞速进展。特别是 IAEA 于 1989 年组织了为期 5 年的辐照食品分析检测方法的国际协调研究，将辐照食品检测方法由实验室推向了实际应用。2001 年，CAC 第 24 届会议上批准了“辐照食品鉴定方法”的国际标准。该标准给出了 5 种辐照食品的鉴定方法。辐照食品检测方法的建立，不仅提供了鉴定食品是否已被辐照和测定辐照食品吸收剂量的方法，而且强化了有关辐照食品的国家法规，提高消费者对辐照食品的信任度和对消费的食品辐照与否的知情权，推动了国际贸易和辐照食品商业化的进一步发展。

综上所述，食品辐照技术作为一种绿色、安全、高效的食品加工技术，已被越来越多的食品辐照商业化的成功实践所证明。辐照食品的市场消费和国际贸易份额也处于上升阶段。辐照食品的总量 2002 年达到 30 万吨，近年来增加迅速。国际贸易的辐照食品主要为香辛料、脱水蔬菜、调味品等，辐照冷冻水产品 and 大宗谷物的国际贸易已开始进行，但总体规模小。由于电子束辐照装置的核心设备的生产较为复杂而受到技术的限制，目前生产大功率、高能量加速