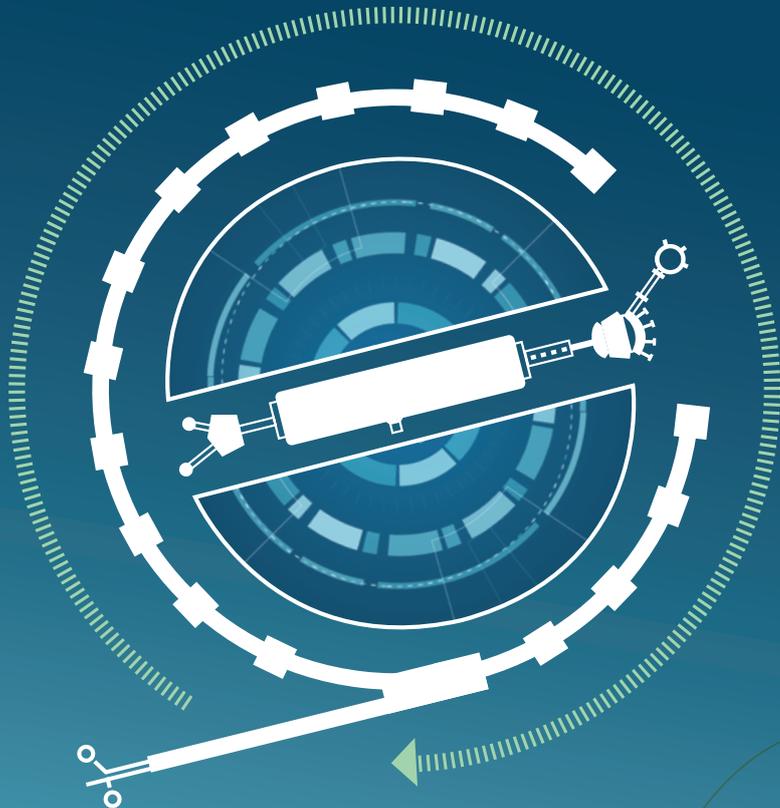


# IAEA BULLETIN

国际原子能机构通报

国际原子能机构旗舰出版物 | 2022年5月 | [www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)



## 加速器 及其他电离辐射源的应用

什么是粒子加速器？ 第4页

古罗马考古学随着核科学复兴， 第8页

在菲律宾及其他地区建立电离辐射设施， 第22页



## 《国际原子能机构通报》

主办单位

国际原子能机构新闻和宣传办公室

地址： 维也纳国际中心

PO Box 100, 1400 Vienna, Austria

电话： (43-1) 2600-0

电子信箱： [iaebulletin@iaea.org](mailto:iaebulletin@iaea.org)

执行编辑： Michael Amdi Madsen

编辑： Miklos Gaspar

设计制作： Ritu Kenn

《国际原子能机构通报》可通过以下网址在线获得：

[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

《国际原子能机构通报》所载的原子能机构资料摘录可在别处自由使用，但使用时必须注明出处。非原子能机构工作人员的作品，必须征得作者或创作单位许可方能翻印，用于评论目的的除外。

《国际原子能机构通报》任何署名文章中表达的观点不一定代表原子能机构的观点，原子能机构不对其承担责任。

封面：

国际原子能机构

请关注我们



国际原子能机构（原子能机构）的使命是防止核武器扩散和幫助所有国家特别是发展中国家从核科学技术的和平、安全和可靠利用中受益。

1957年作为联合国下的一个自治机构成立的原子能机构是联合国系统内唯一拥有核技术专门知识的组织。原子能机构独特的专业实验室帮助向原子能机构成员国传播人体健康、粮食、水、工业和环境等领域的知识和专门技术。

原子能机构还作为加强核安保的全球平台。原子能机构编制了有关核安保的国际协商一致准则出版物《核安保丛书》。原子能机构的工作还侧重于协助最大限度地减少核材料和其他放射性物质落入恐怖分子和犯罪分子手中或核设施遭受恶意行为的风险。

原子能机构安全标准提供一套基本安全原则，反映就构成保护人和环境免受电离辐射有害影响所需的高安全水平达成的国际共识。这些原子能机构安全标准的制定针对服务于和平目的的各种核设施和核活动，以及减少现有辐射风险的防护行动。

原子能机构还通过其视察体系核查成员国根据《不扩散核武器条约》以及其他防扩散协定履行其将核材料和核设施仅用于和平目的的承诺情况。

原子能机构的工作具有多面性，涉及国家、地区和国际各个层面的广泛伙伴的参与。原子能机构的计划和预算通过其决策机关——由35名理事组成的理事会和由所有成员国组成的大会——的决定来制订。

原子能机构总部设在维也纳国际中心。外地和联络办事处设在日内瓦、纽约、东京和多伦多。原子能机构在摩纳哥、塞伯斯多夫和维也纳运营着科学实验室。此外，原子能机构还向设在意大利的里雅斯特的阿布杜斯·萨拉姆国际理论物理中心提供支持和资金。

# 加速器和辐射技术促进可持续发展

文/国际原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西

“**质**子赋予原子身份，电子赋予其个性”，这是作家比尔·布赖森曾对所有物质结构的生动描述。这是对宇宙组成部分的恰当描述。每个原子粒子、化学元素和同位素都揭示了它所形成物质的性质、过去和潜力。加速器和辐射技术是研究和利用原子的宝贵工具。

加速器有多种形状和尺寸，目前全球有20 000多台在运行，用于制造放射性药物、治疗疾病、保存食物、监测环境、强化材料、了解基础物理学、研究过去，甚至处理犯罪问题。

本期《国际原子能机构通报》（《通报》）探讨不同类型的加速器，并研究原子能机构支持加速器用于健康、农业、研究、环境和工业的多种方式。许多加速器技术利用不同类型的辐射工作，提供如此多样的好处。使用加速器和辐射源的大量工业应用对全球经济和追求可持续发展至关重要。

位于奥地利塞伯斯多夫的原子能机构实验室支持世界各地的研究人员以各种方式利用电离辐射，包括利用电离辐射开发抗环境压力的作物，以

及通过特殊虫害防治技术对雄性昆虫进行绝育，抑制拉丁美洲、非洲、亚洲和欧洲的蚊子、舌蝇和果蝇数量。

本期《通报》中的其他例子包括：描述电离辐射如何帮助保护一艘古船、用于重新利用和回收塑料、保护食品免遭腐烂和虫害，以及如何帮助鉴别艺术赝品并确定其制作年代。

在原子能机构，我们正在帮助促进加速器和辐射技术的创新。为此，我们今年将主办两次重要会议：一是“加速器用于研究和可持续发展国际会议”，这是首次此类会议；二是“第二届辐射科学和技术应用国际会议”，此次会议除了加速器，还将深入探讨电离辐射源的大范围应用。

在这些活动中，使用这些技术并从中受益最多的团体将汇聚一堂，分享他们的经验和最佳实践，并以此方式推动和宣传科学促进发展。

随着社会期待科学能解决重大的生存挑战，科学家正在寻求通过加速器及其应用找到答案。正如他们所做的那样，原子能机构与他们一起努力，确保各大洲的国家都能获得这种强大而有益的核应用。



“随着社会期待科学能解决重大的生存挑战，科学家正在寻求通过加速器及其应用找到答案。正如他们所做的那样，原子能机构与他们一起努力，确保各大洲的国家都能获得这种强大而有益的核应用。”

—国际原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西



（图/科英布拉大学A. Abrunhosa）

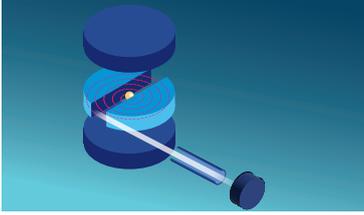


（图/国际原子能机构）





**1 加速器**和辐射技术促进可持续发展



**4 什么是粒子加速器？**



**6 利用加速器了解环境和解决污染问题**



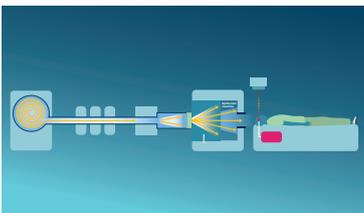
**8 古罗马考古学**随着核科学复兴



**10 塑料污染**  
利用辐射进行回收以保护环境



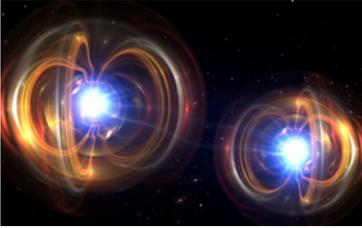
**12 通过辐照简化食品虫害防治**



**14 用中子治疗神经元，用回旋加速器生产放射性同位素**



**16 揭示真相的原子**  
加速器分析技术鉴别艺术赝品



**18 量子改性**

利用加速器注入单个原子进行生物感应



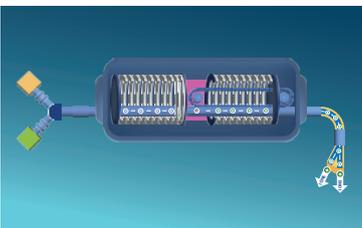
**20 利用核技术开发先进材料**



**22 在菲律宾及其他地区建立电离辐射设施**



**24 通过法律使辐照设施得到安全、可靠和和平利用**



**26 你需要了解的离子束知识**

**问答**

---

**28 工业辐照创造更美好的世界**

**世界观点**

---

**30 “米尔哈”项目：管理放射性废物的加速器驱动系统**

比利时核研究中心国际事务副秘书长、“米尔哈”项目负责人

**国际原子能机构最新动态**

---

**32 新闻**

**36 出版物**

# 什么是粒子加速器?

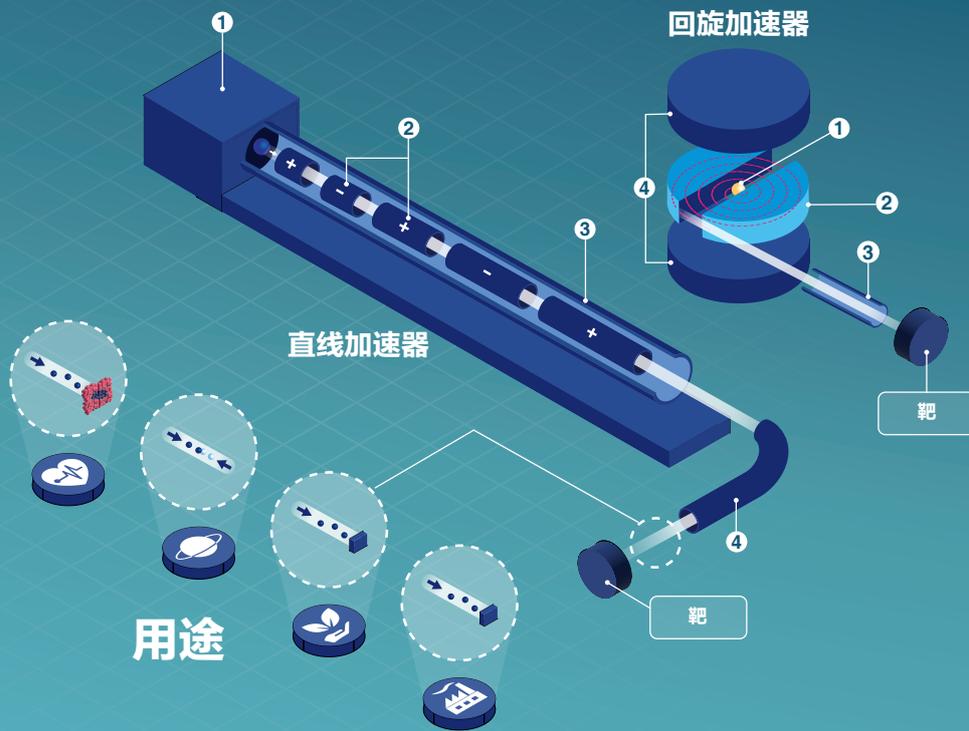
文/Sotirios Charisopoulos和Wolfgang Picot

## 粒子加速器的基本部件

粒子加速器产生并加速原子和亚原子大小的带电粒子束，如电子、质子和离子。它们不仅用于改善对物质理解的基础研究，而且用于与健康、环境监测、食品质量、能源和航空航天技术等领域相关的大量社会经济应用。

粒子加速器的形状可以是线性（直线）或圆形，并且有许多不同的尺寸。它们可以有几十千米长，也可以放在一个小房间里，但所有加速器都有四个主要部件。

- 1 产生带电粒子的源；
- 2 复合装置，通过施加静电场或交流电场向粒子添加能量并使其加速；
- 3 在真空中的一串金属管，使粒子能够自由移动，而不会与空气分子或灰尘碰撞，空气分子或灰尘会使束流消散；
- 4 用于引导和聚焦束流、或在撞击靶样之前改变其轨迹的电磁铁系统。



## 粒子束的用途



### 健康

束流可用于医疗设备灭菌，生产合成用于癌症诊断治疗的放射性药物所需的放射性同位素。大型加速器可以破坏癌细胞，揭示蛋白质和病毒的结构，优化疫苗和新药。



### 研究

一些加速器，即最大型的加速器，用于使亚核粒子发生碰撞，以提升我们对宇宙的认识。其中一些加速器也用于产生中子。



### 环境

通常，质子束可用于检测空气、水或土壤中的痕量化学元素。例如，它们可以揭示不同污染物的浓度和成分，并提供空气质量的独特特征。



### 工业

束流可与靶材原子相互作用，例如，使材料更耐用。

## 粒子加速器类型

### 离子注入机

离子注入机广泛应用于工业领域，例如，使材料更耐磨损、更耐用。全球约有12 000台离子注入机用于制造智能手机和太阳能电池板的半导体，使金属、陶瓷和玻璃饰面硬化。离子注入机还可以提高医用植入物材料的可靠性。

### 工业用电子束加速器

全球有近10 000台电子束加速器在运行。例如，它们可以使材料在极端温度下更耐用，或更耐化学品。电子束还用于医疗产品和食品灭菌，以及污水消毒处理。它们广泛用于汽车和航空航天工业、机器制造以及医疗产品制造。

### 直线加速器

直线加速器的长度从几米到几千米长度不一，其中许多加速器用于科学研究。安装在医院里的医用直线加速器产生X射线束，被引导至肿瘤细胞，将肿瘤细胞杀死。全球约有1000台医用直线加速器在运行。

### 回旋加速器

全球有超过1200台回旋加速器，用于产生医用质子束或氦核束，生产放射性同位素用于医疗成像，以诊断和治疗癌症。许多回旋加速器建在医院，用于生产具有短寿命放射性同位素的放射性药物。

### 同步加速器

全球有70多同步加速器，它们是粒子加速器中的巨无霸，被用于科学研究，帮助我们了解宇宙的基本规律。科学家利用同步加速器研究化学、生物医学、自然和文化遗产、环境等问题。

### 静电加速器

静电加速器，特别是串列加速器，成本较低，科学家利用它们研究材料特性、监测环境、支持生物医学研究、研究文化遗产物品等。全球目前有300台静电加速器，专家预计未来几年数量会增加。

目前，全球有超过  
**20 000**  
台加速器在运行。

尺寸

从适合在一个小房间里使用医用直线加速器

到几十千米长同步加速器

# 利用加速器了解环境和解决污染问题

文/Lenka Dojcanova



意大利Elettra-Sincrotrone Trieste公司。  
(图/Elettra-Sincrotrone Trieste公司)

**重**金属和其他有毒化学品会污染空气、水和土壤，从而危害动植物。为了处理这些元素，科学家首先需要更好地了解它们的行为。加速器通过使用带电粒子束撞击选定材料，分析或改变其表面、成分、结构或其他特性，有助于这项工作。

“加速器技术可提供独特的能力，能够以快速、非破坏性和具有成本效益的方式对污染进行深入了解。”原子能机构核仪器仪表物理学家Román Padilla说，“用于了解和改善环境的粒子加速器有各种形状和大小，特别是基于加速器的离子束方法，能够有助于我们表征土壤、沉积物、生物群、水或空气细颗粒物的样品。”

最常用于环境监测样品表征的加速器是静电加速器（见第4页）。

评估空气和水污染对解决全球

健康问题至关重要。亚洲拥有世界上60%以上的人口和13个最大城市。空气和水污染治理成为亚洲主要城市化地区的重要任务。为协助专家确定空气样品特征，原子能机构一直在与15个亚洲国家合作，每周收集空气细颗粒物和粗颗粒物样品，这些颗粒物影响着超过1.1亿人呼吸的空气质量。从2002年至2017年，基于加速器的离子束技术不仅揭示了所收集样品中许多元素的存在状况，而且帮助确定了空气污染的可能来源。

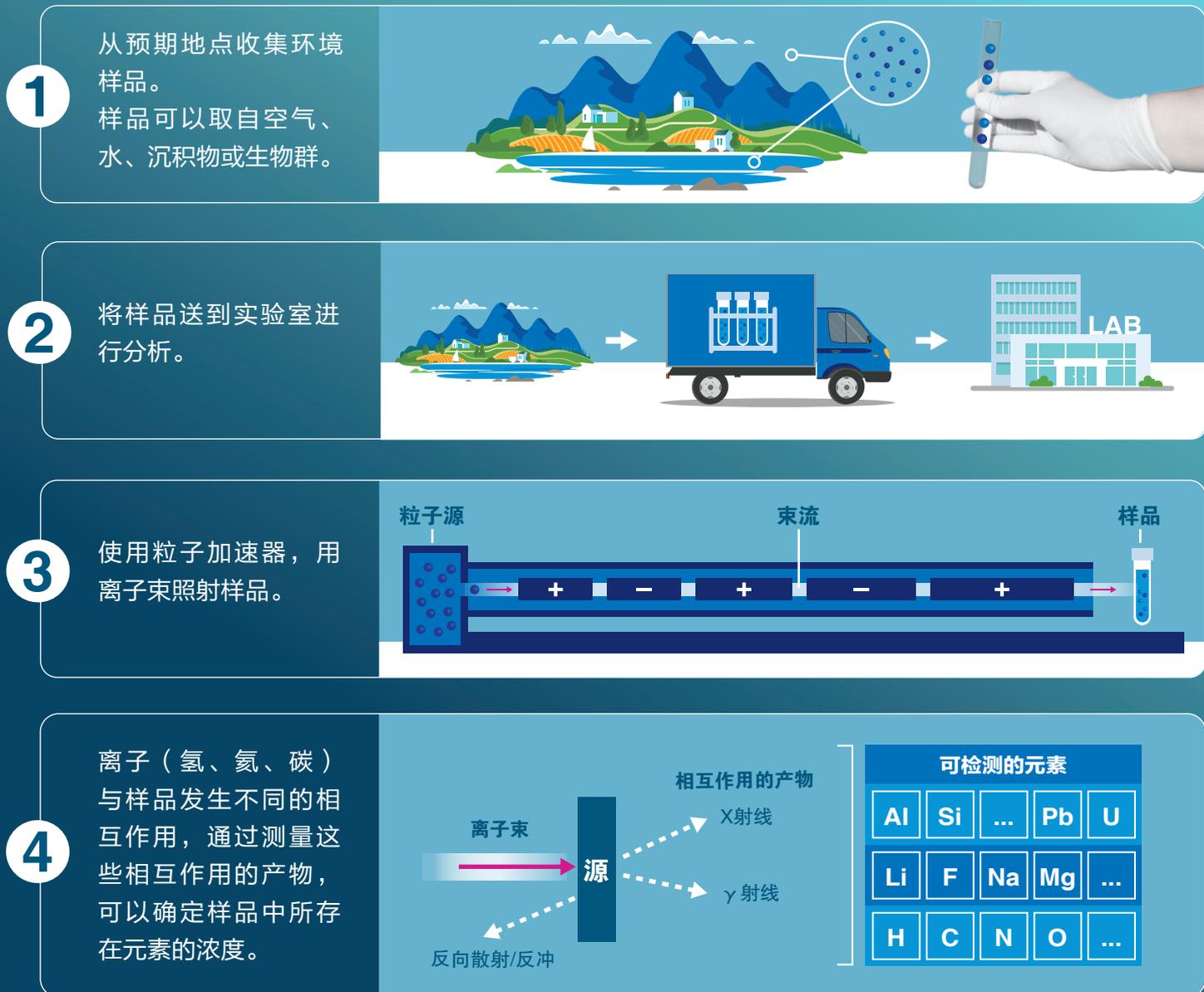
此外，电子束与离子束不同（见第26页），可用于处理废水或塑料（见第10页）。例如，与传统的水处理技术（如化学和生物处理方法）相比，电子束技术具有明显的优势：使用电子束，不需要用化学消毒剂进行微生物消杀。在中国湖北省，有一个专门处理设施，利用电子束技术进行医疗废水消毒灭菌和抗生素分解。该设施每天能够处理3000万升工业废水，是世界上最大的辐照处理废水装置，是在原子能机构转让的技术上建成的。这种处理工艺每年可节省45亿升淡水——足以满足10万人用水需求。

与此同时，同步加速器，一种特殊类型的环形加速器，也被用于环境研究，帮助专家分析元素，绘制元素分布图和确定其化学种类。这些复杂的加速器使用X射线作为探针，可以部署在采矿和工业过程中，而在这些过程中，传统方法无法提供足够的数据库来预测可能的环境结果、生物利用

率或污染带来的风险。例如，在采矿业，同步加速器有助于预测未来的行为，如金属或矿物的移动或溶解。

七年多来，原子能机构一直在与意大利Elettra-Sincrotrone Trieste公司（EST）联合运行多用途X射线荧光束线和光谱分析终端站，并开发了新的硬件和分析方法。原子能机构通过这种协作，支持和促进研究小组基于同步辐射的研究和培训活动，特别是在获得和使用同步辐射

装置的经验 and 资源有限的国家。这些实验为一些国家的环境问题研究提供了帮助，包括匈牙利和约旦大气气溶胶微粒和室内颗粒物研究；西班牙采矿环境周围生长植被中铅的空间分布研究；意大利牡蛎和扇贝中累积镉的分布和化学状态研究；墨西哥利用水处理厂的污泥改良农业土壤中的钛研究；以及减少意大利矿山污染的河流中污染物的微观过程研究。



(图表/国际原子能机构A. Vargas Terrones)

# 古罗马考古学随着核科学复兴

文/ Michael Amdi Madsen

1996年，比利时潜水员René Wauters做出了一生中最重要的考古发现。他在亚得里亚海克罗地亚小岛薇莉-奥朱莉（Vele Orjule）45米深的水域中探索时，发现了一座神秘的古代铜像。借助核技术，研究人员对这座铜像进行了十多年的仔细研究，来确定其年代、起源，甚至其构造方法。

“阿波基希欧梅诺”铜像是一位



研究人员利用基于加速器的技术确定了“阿波基希欧梅诺”铜像的年代、起源和构造方法。

（图/维基共享资源Vassil）

裸体、肌肉发达的男性运动员，他正在刮身上的汗水和灰尘。1999年，当这座严重腐蚀的铜像被从海里拖出时，一个漫长的脱盐和修复过程开始了。2005年完工后，考古学家们感到困惑的是：“阿波基希欧梅诺”铜像的图案并不独特，那么这尊铜像是罗马的还是希腊的？直到2009年，利用加速器澄清了一些问题，才确定了其起源。

原子能机构负责遗产科学的项目助理官员Lena Bassel说：“揭开‘阿波基希欧梅诺’的过去依赖于几种

核技术，以更好地了解其原子层面结构。”她与来自世界各地的专家合作，将核技术应用于文物特征分析。Bassel指出，在2010年发表在《考古学科学杂志》上的一项研究中，研究人员应用加速器质谱法对在“阿波基希欧梅诺”内部发现的有机材料进行分析，确定铜像的碳年代为公元前100年至公元250年之间。

研究人员还应用基于加速器的微粒子诱导X射线发射（PIXE）确定合金的原始成分，并应用多接收器电感耦合等离子体质谱法更好地了解铜像的铅同位素组成。同位素是一种化学元素的特定形式，因原子质量和物理性质而异。科学家可以查看样品中不同铅同位素的比例，将其与地理区域的已知属性对照，以确定样品的来源。Bassel说：“他们使用加速器分析技术将铜像中的铅来源确定为东阿尔卑斯山或撒丁岛，并得出结论，这尊铜像是希腊原件的罗马复制品。”

五年后，研究人员再次使用高横向分辨率PIXE技术检测了“阿波基希欧梅诺”。他们发现铜像镶嵌的嘴唇是一种非常纯净的非合金铜。利用X射线照相法揭示了镶嵌物如何被插入和固定到位，以及肢体的复杂铸造和连接技术。研究人员判定，“阿波基希欧梅诺”显然是更古老（公元前四世纪中期）雕像的复制品，采用间接失蜡法铸造工艺制作，使用的是低铅成分的合金。

“基于加速器的技术在文物的特征分析中具有重要作用，而‘阿波基希欧梅诺’向我们表明，通常需要使用

多种类型的分析方法。原子能机构正在推动这些应用，” Bassel说。自2018年以来，原子能机构及其成员国一直在推动将“原子用于遗产”的倡议，并在去年与法国巴黎-萨克雷大学建立了战略伙伴关系，以加强核技术在文化和自然遗产表征和保护方面的应用。在与原子能机构的合作中，该大学将专注于科学研究和开发，并与世界各地的专家交流知识和最佳实践。

## 从罗纳河畔崛起的罗马人

核技术用于考古学并不局限于表征，长期以来，辐照在文物保护中发挥了重要作用。比较有名的案例是，1977年，对拥有3200年历史的埃及法老拉美西斯二世之木乃伊进行了辐照，以去除真菌和昆虫，此后，该技术在许多其他项目中持续使用。

2004年，在法国阿尔勒的罗纳河水面下不到4米处，发现了一艘公元一世纪的罗马船只。这艘被称为“阿尔勒-罗纳河3号”、31米长的橡木驳船可能是被一场山洪淹没，覆盖在一层细粘土中。

“粘土帮助保存了这艘船只及其珍贵的文物，但厌氧菌溶解了木材的纤维素，纤维素被水取代。2011年，当研究人员计划将这艘船从河床上抬起来并安装在博物馆时，这构成了挑战，因为随着它的干燥，木材会坍

塌，”格勒诺布尔ARC-Nucléart公司研究工程师Laurent Cortella说。

ARC-Nucléart公司想出了一个解决方案：他们将木材浸泡在聚乙二醇中，冷冻干燥，并对船的构件进行辐照处理。原子能机构辐射化学家Bum Soo Han说：“就像用吹风机吹干胶水一样，修复人员用可辐射固化的树脂，使木材的纤维结构保持在一起。” Han正在“原子用于遗产”框架内努力推动利用辐射技术进行文化保护，在全球范围内为文化保护工作提供技术支持，并认为对此类应用的需求正在增长。

Han说：“我们目前可以在阿尔勒考古博物馆参观‘阿尔勒-罗纳河3号’，不需要去法国就能看到利用辐照保护文物；这种技术被广泛应用。”2017年，原子能机构发布了《电离辐射用于有形文化遗产保护》，该出版物展示了这些技术在世界各地的成功应用。Han目前正在编写原子能机构该丛书的下一版，重点是利用电离辐射对文化遗产文物和档案进行消毒的良好实践。该书预计在2023年出版。

“基于加速器的技术在文物的特征分析中具有重要作用，而‘阿波基希欧梅诺’向我们表明，通常需要使用几种类型的分析方法。”

—原子能机构负责遗产科学的项目助理官员Lena Bassel



古罗马船“阿尔勒-罗纳河3号”已用核技术保存下来，并在法国阿尔勒考古博物馆展出。

(图/ Cd13/MDDa/Chaland Arles Rhône 3 © Remi Benali)

# 塑料污染

## 利用辐射进行回收以保护环境

文/ Puja Daya

**亨**德森岛离最近主要陆地也有5000多公里，可能是地球上最偏僻的地方。然而，尽管完全没有人烟，这个天堂般的南太平洋岛屿却充斥着超过40亿个塑料碎片和颗粒。亨德森岛海滩上的垃圾不仅有碍观瞻，而且对被其窒息或困住的海洋生物也是致命的。像这样的塑料碎片只是自1950年以来产生的80多亿吨塑料去向的一个例子。

原子能机构正在与世界各地的专家合作，以改变这种情况，保护海洋生物和环境免受塑料污染。原子能机构与其合作伙伴正在研究和开发电离辐射技术，以经济适用的方式对塑料进行再加工和回收。这些技术涉及使用电子束加速器（见第26页），对废旧塑料进行辐照，以便回收或更易于改造成其他产品。

这项技术很有前景，因为它并不完全是新技术，而且长期以来已得到成功应用。从汽车上的橡胶轮胎到热水管和食品包装，辐照聚合物随处可见。原子能机构放射性同位素产品和辐射技术处处长Celina Horak说：“如果我们能在工业应用中使用这项技

术获得塑料的新特性，那么没有什么能阻止我们也使用辐照改造和重组塑料，以提高其可回收性，减少塑料的处置量”。

塑料由不同类型的聚合物组成，聚合物是一种由称为单体的重复原子团的长链或网络组成的物质。辐照聚合物会对聚合物产生不同的影响，有益于塑料废物回收、减少和再利用。

一个旨在开发利用电离辐射回收聚合物废物的新的原子能机构协调研究项目正在引领这一领域的研究。菲律宾核研究所科学研究专家Bin Jeremiah Barba说：“辐照材料不再仅仅是一种制造工具，也是一种回收工具，因此用于聚合物改性的电离辐射技术对于塑料废物处理很重要。”她的研究所只是18个国家中的一个，这些国家正在合作研究交联、断链、接枝和其他表面改性等辐射过程如何帮助各国开发更经济适用、更容易获得的回收方法。

### 聚合物交联

交联过程是指利用电子束辐射在聚合物链之间形成桥梁。通过将聚合

自1950年以来，已产生80亿吨塑料，其中大部分没有回收利用，倾倒在垃圾场、海洋或海滩上。

（图/国际原子能机构 M.Gaspar）



物链连接在一起，材料的性能得到增强，并可用于制造更持久、更耐用、质量更好的产品。这是制造汽车轮胎的常见做法，它可以使制造商减少橡胶的用量和厚度，从而降低原材料和生产成本，并使产品更具可持续性。

## 聚合物降解

与辐射交联不同，聚合物降解几乎是用与之相反的方式进行。在断链过程中，聚合物被切割或“降解”。“这个过程使材料更易碎，更容易被研磨成更精细的聚合物。例如，聚四氟乙烯（一种以特氟龙品牌而为人熟知的更常见化学涂层）会被降解，然后用于机油润滑剂和油墨添加剂，”土耳其工作牵头人、哈西德佩大学辐射聚合物专家Olgun Güven说。在这个协调研究项目下，专家们正在考虑如何在化学回收中使用断链技术，即将一种产品分解成基本化学形态，生成新的原材料或燃料。他说，通过断链进行回收利用可以极大地促进使用一次性聚合物生产新产品。

## 聚合物接枝

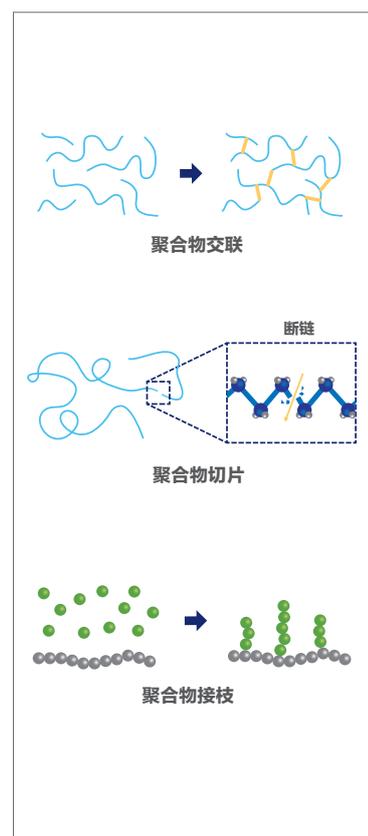
接枝是在另一种聚合物表面引入定制的短聚合物链进行改性的过程。这一技术还可以用于将通常不相容的聚合物结合在一起，以便更容易对废

物进行重塑和重组。

这些技术只是原子能机构探索利用电离辐射从塑料中回收废物的几种方法。Horak说：“工业中使用的这些工具可以应用于回收利用，是减少危害我们环境的塑料废物的解决方案中经济适用和可获得的一部分。”她说，正在进行的协调研究项目将改进和验证这种塑料回收技术，并帮助确定其在各国使用的可行性。它还将制定一项计划进行知识转让和应用。

为了提高全世界应用创新辐射技术的能力，通过回收塑料减少塑料废物，原子能机构于2021年发起了“核技术用于控制塑料污染”（NUTEC Plastics）倡议。该倡议致力于帮助各国利用各种核技术，以科学证据表征和评估海洋微塑料污染，同时展示如何利用电离辐射进行塑料回收，将塑料废物转化为可再利用的资源。

“核技术用于控制塑料污染”倡议将通过协调研究项目帮助提供精确的科学数据，为塑料污染政策提供信息，加强跟踪塑料的方法，以及提高该回收技术的可扩展性。通过该倡议开展的原子能机构技术合作项目将为研究人员提供设备和培训，以进行知识转让和促进塑料回收项目。制定准则将有助于各国建立设施，利用核技术解决塑料污染问题。



# 通过辐照简化食品虫害防治

文/ Joanne Liou

**当**谈到从遥远的产地运到当地杂货店的香料、种子、水果和蔬菜时，不止眼前的这些。小剂量的辐照有助于食品保鲜和途中保存，同时不会传播入侵微生物。

原子能机构与联合国粮食及农业组织（粮农组织）合作，正在支持食品和植物检疫辐照领域的最新发展，以帮助简化虫害防治过程和促进国际贸易。食品和植物检疫辐照使用钴-60等放射源产生的电离辐射或加速器产生的电离辐射进行收获后处理。

粮农组织/原子能机构粮农核技术联合中心食品辐照专家Carl Blackburn说，“电离辐射对食品无害，但对微生物和侵入害虫却毫不留情，它可以促进国际贸易。”

辐照有助于草莓等食品保鲜和长途保存。

（图/R.Mithare/Unsplash）

## “内部”辐照装置

某些食品在运送到最终目的地之前，首先从原产地制备或收集、包装，然后运送到辐照设施。这些设施通常依赖钴-60作为电离辐射源。“钴-60  $\gamma$  射线易于使用，但钴-60的采购和运输可能具有挑战性，” Blackburn说，“原子能机构一直在鼓励一种新的简化方法，在‘内部’利用低能电子束、低能X射线等软射线进行照射，可将辐照装置安置在食品厂或包装厂内。”

2021年，原子能机构的一个协调研究项目证明了使用低能电子束和软X射线减少感染和微生物污染的可行性。“这意味着低能电子束或软电子可以用作表面处理，它们不会影响定性性质。”日本国家农业和食品研究组织研究负责人、项目参与者Setsuko



Todoriki说，“由于与传统电子束相比，低能电子束的能量明显较低，因此可将低能电子束应用于加工生产线并在现场操作。”该项目开发了软X射线剂量测定方法。正在进行的一个新的低能束处理协调研究项目在进一步开发和促进食品“内部”辐射加工的创新，包括与食品行业伙伴合作，开发针对特定食品的低能电子束剂量测定工具和技术。

## 开发通用处理方法

在过去15年中，全球出于植物卫生目的辐照的商品数量显著增加，达到每年近10万吨。然而，交易的辐照食品仅占其他植物检疫措施处理食品的一小部分。例如，美国植物卫生专家Guy Hallman解释说，仅在墨西哥一地，每年接受热水处理的芒果数量就达30万吨左右。Hallman说：“与可能会改变食品味道或质地的低温、高温、熏蒸等其他植物检疫处理相比，植物检疫卫生辐照具有优势。”他还

说，拥有更多国际公认的辐照标准，可以支持进一步采用这种处理方法，并增加贸易。

《国际植物保护公约》是由粮农组织管理的一项多边条约，确立了预防和控制害虫传播的标准。Blackburn说，这些标准是开展有关经处理水果和蔬菜的所有双边贸易协定的基础，但辐照处理标准只引用特定物种的辐射剂量。在《国际植物保护公约》认可的19种辐照处理方法中，只有两种是通用处理方法，可防止果蝇通过新鲜农产品贸易传播，并在可能破坏农业和环境的新地点繁殖。

2022年2月，原子能机构启动了一个协调研究项目，以解决这一问题，并开发了至少五种通用植物检疫辐照处理方法，供《国际植物保护公约》采用，以促进植物检疫辐照的商业使用。Blackburn说，这些新的通用辐照处理可能解决交易水果和蔬菜所遇到的90%以上的检疫问题。

---

“电离辐射对食品无害，但对微生物和侵入害虫却毫不留情，它可以促进国际贸易。”

—粮农组织/原子能机构粮农核技术联合中心食品辐照专家Carl Blackburn

---

## 保健医疗产品辐射灭菌

除卫生、食品质量和植物检疫用途外，自20世纪50年代以来，更高剂量的辐射技术还被用于医疗保健产品的消毒灭菌。医疗领域所有一次性产品，例如绷带、手套、隔离服、口罩、注射器和其他器械中，几乎有一半在制造过程中采用辐射处理。辐射灭菌可以破坏污染性微生物，同时保持产品的特性和特征。

“近50%的医疗产品在采用 $\gamma$ 射线、电子束和X射线等辐射技术进行灭菌消毒，这种趋势在不断增长。”原子能机构放射性同位素产品和辐射技术处处长Celina Horak表示，“此外，电离辐射已成为个人防护设备消毒的一种有效且成熟的工具，在新冠肺炎大流行期间，个人防护设备需求一直较高。”

2020年，在大流行病暴发后，原子能机构研究了用电离辐射对旧医疗器械进行消毒灭菌的可行性。研究得出的结论是，除了N95和FFP2口罩等呼吸面罩外，辐照后的医疗防护服有可能重复使用。研究发现，旧口罩经过辐照，“亚微米级过滤效果明显下降。”这种下降可能是由辐照引起过滤层静电特性发生变化造成的。

# 用中子治疗神经元，用回旋加速器生产放射性同位素

文/ Michael Amdi Madsen

**胶质母细胞瘤**是一种侵袭性恶性肿瘤，约占所有脑肿瘤的15%。即使最初通过治疗得到控制，癌症几乎总是复发。手术和放疗可以延长几个月的生存期，但脑癌一般在确诊后一到两年内结束生命，只有不到5%的人存活期超过五年。与胶质母细胞瘤一样，由于正常脑组织对手术和放疗的敏感性，许多颅内癌症的治疗都是一个挑战，但这种情况有望很快改变，部分原因是加速器产生的强中子源使新疗法成为可能。

“当你想到进行核反应时，你可能不会想到人的头部是进行核反应的最佳场所，但你就错了。”原子能机构核物理学家Ian Swainson说。他正在帮助制定原子能机构关于加速器用于中子生产，包括医学应用的导则。他说，特别是在一种癌症治疗中使用这种技术，即硼中子俘获疗法，前景很好。“向聚集在某些脑癌、头颈部癌症中的硼原子发射中子可以拯救生命。”

硼中子俘获疗法利用中子所能释放的破坏力，并依赖尽可能多地对肿瘤进行局部破坏。利用中子的破坏能力可以通过硼-10同位素来实现。“硼-10是无放射性的，而且非常善于捕获中子。因此，在一个非常局部的核反应中，硼会分解成两个能量碎片。因此，通过给患者注射特殊药物，将硼-10输送到肿瘤部位，我们便在癌症上形成一个大靶心，”Swainson解释说。

硼中子俘获疗法在很大程度上仍

然处于实验中，没有广泛使用，但情况正在改变。2020年，日本郡山和大阪的两个硼中子俘获疗法装置已开始临床治疗。同年，原子能机构和日本冈山大学同意通过活动、知识和信息交流以及开发硼中子俘获疗法设施数据库，加强硼中子俘获疗法的合作。

“硼中子俘获疗法是一种尖端的癌症疗法，”冈山大学校长Hirofumi Makino当时表示，“它是现代核物理学和最新药物细胞生物学的幸福结合。然而，我们不应忘记在发展这一艰难医疗技术中的长期不断努力。”

2001年，原子能机构编写了一份关于硼中子俘获疗法的技术报告，成为该领域的参考文献。当时，涉及的唯一中子源是研究堆。自那时起，新一代基于加速器的紧凑型中子源已开发出来，可以直接安装在诊所里。这使人们对硼中子俘获疗法的兴趣大增。

阿根廷、中国、芬兰和大韩民国也在实施硼中子俘获疗法项目。“20年前，在癌症治疗中使用加速器的中子还只是理论。现在它已成为现实，我们在即将出版的题为《硼中子俘获疗法进展》的技术文件中反映了这一发展，”Swainson说。

## 回旋加速器革命

确定在患者身上进行硼中子俘获疗法的可行性，需要注射用回旋加速器生产的氟-18 (18F) 放射性标记的硼化合物，然后用称为正电子发射断层成像-计算机断层成像 (PET-CT) 的

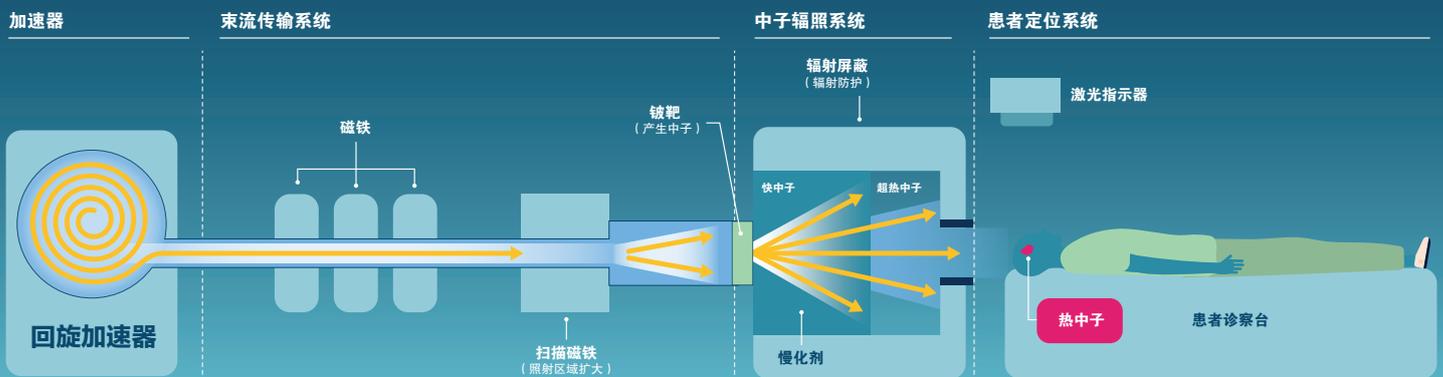
---

“向聚集在某些脑癌、头颈部癌症中的硼原子发射中子可以拯救生命。”

—原子能机构核物理学家  
Ian Swainson

---

## 日本临床批准的硼中子俘获疗法系统示意图



(图表/原子能机构A. Vargas Terrones)

核医学技术对患者成像。这种氟-18标记的化合物称为4-二羟硼基-2-18F-氟-苯丙氨酸 (FBPA)。

“FBPA很重要，因为它向医生证实肿瘤已吸收一种含硼化合物，并已成为硼中子俘获疗法作好准备。没有它，该疗法可能不会奏效。随着硼中子俘获疗法变得更加广泛，我们将需要回旋加速器来满足FBPA需求。”原子能机构放射性同位素和放射性药物化学家Amirreza Jalilian说。回旋加速器是一种粒子加速器，通过向稳定同位素发射粒子束生产核医学使用的放射性同位素。这种相互作用的结果是发生核反应，产生短命放射性同位素。由于这些放射性同位素迅速衰变，它们需要在治疗现场或附近生产，并立即使用。

Jalilian指出，尽管用于生产放射性同位素的研究堆数量相当稳定，但新型多功能、经济更加实惠的回旋加速器在全球范围内不断增加。许多用于患者的短寿命放射性同位素可以由医院的回旋加速器生产，这是该技术的一大优势。

放射性药物氟脱氧葡萄糖只是一个例子。它依赖氟-18，可以用回旋加速器生产。约95%的PET-CT程序都使用这种放射性示踪剂，因此对神经成像和诊断癌症至关重要。

放射性药物中的另一个主力是镓-68 ( $^{68}\text{Ga}$ )，它是一些诊疗性放射性药物的关键成分，诊疗性放射性药物通过释放辐射同时使用放射性同位素进行诊断和治疗，这种放射性药物在癌症的诊断和随访中发挥着重要作用，在治疗前列腺癌方面前景尤为突出。然而，生产镓-68确实存在挑战。

“当前，生产镓-68最常见的方法是使用一种称作发生器的非加速器系统，但发生器的产量根本无法满足需求。回旋加速器提供了一种有效的直接生产替代手段，并且已显著扩大镓-68的可用性。”Jalilian说，全世界有10个中心正在例行使用回旋加速器生产镓-68。原子能机构目前正在协调一个研究项目，支持交流基于回旋加速器生产镓-68方面的国际专门知识，并在2019年发布了专门针对该主题的出版物《镓-68回旋加速器生产》。

# 揭示真相的原子

## 加速器分析技术鉴别艺术赝品

文/Joanne Liou

一幅画背后的故事通常从识别艺术家和作品制作的时间开始。说实话，有一些据称很珍贵的画作，讲述了一个犯罪欺骗的故事。伪造艺术品是有利可图的，而且不会被发现，但分析技术，包括使用加速器质谱法进行放射性碳测年，可以鉴别赝品。

“核分析技术在确定样品的成分、起源、真实性和年代方面能力极强，因此与法证学直接相关。”原子能机构核物理学家Aliz Simon说，“在这方面，核技术可有效地用于各种目的，例如调查艺术品伪造，侦查非法贸易，识别假冒食品 and 不合格药品，还可以用于痕量证据分析，例如犯罪现场的玻璃碎片分析。

法证学是指应用科学方法或专业知识查验证据，协助刑事调查。它包括多种分析，从DNA和指纹分析到成分和玻璃分析。在法证学领域，加速器被用来分析材料的成分、结构、年代和其他属性。“X射线、中子和离子提供了比传统方法更多的优势，” Simon说，“它们可以分析数百万个粒子中的一个，并非常准确地确定来源，同时保持证据的完整性。”

### 放射性碳定年法

所有有生命的东西，包括一幅画的画布（由天然纤维制成）或画框（由木材制成），都从大气中吸收碳，包括碳-14。碳-14是一种不稳定性同位素，以已知的速度衰变。当植物或动物死亡后，就不再吸收碳，而已经积累的放射性碳会衰变。使用加速器质谱法测量碳同位素的比例，以确定存在的碳-14数量，就可以确定材料的年代，这种技术称为“放射性碳定年法”，广泛用于测定化石年代，最近还被用于测定可能为赝品的艺术品的年代。法国巴黎-萨克雷大学碳-14测量实验室负责人Lucile Beck说：“对画布进行放射性碳测年，可以获得艺术品可能制作的最早日期，因为从采摘亚麻制作画布到实际绘制作品之间有一段时间。”

大气中碳-14数量在最近历史中，特别是从20世纪40年代中期和50年代开始，因为核武器试验一直在波动。大气中碳-14浓度在1964年前后达到峰值，此后一直下降。“我们可以很容易地识别含有现代武器衍生的放射性碳的材料，因为它们的碳-14浓度水平高于20世纪50年代以前的水平，” Beck说。

---

“核分析技术在确定样品或物品的成分、起源、真实性和年代方面超强，因此与法证学直接相关。”

—原子能机构核物理学家  
Aliz Simon

---

在2019年法国打击非法贩运文化物品中央办公室对潜在赝品进行调查期间，Beck对两幅被认为源自19世纪末和20世纪初的收藏品进行了测试。研究人员收集了画布上的纤维样本，并将其还原为大约一毫克的碳，然后用加速器质谱法进行测量。

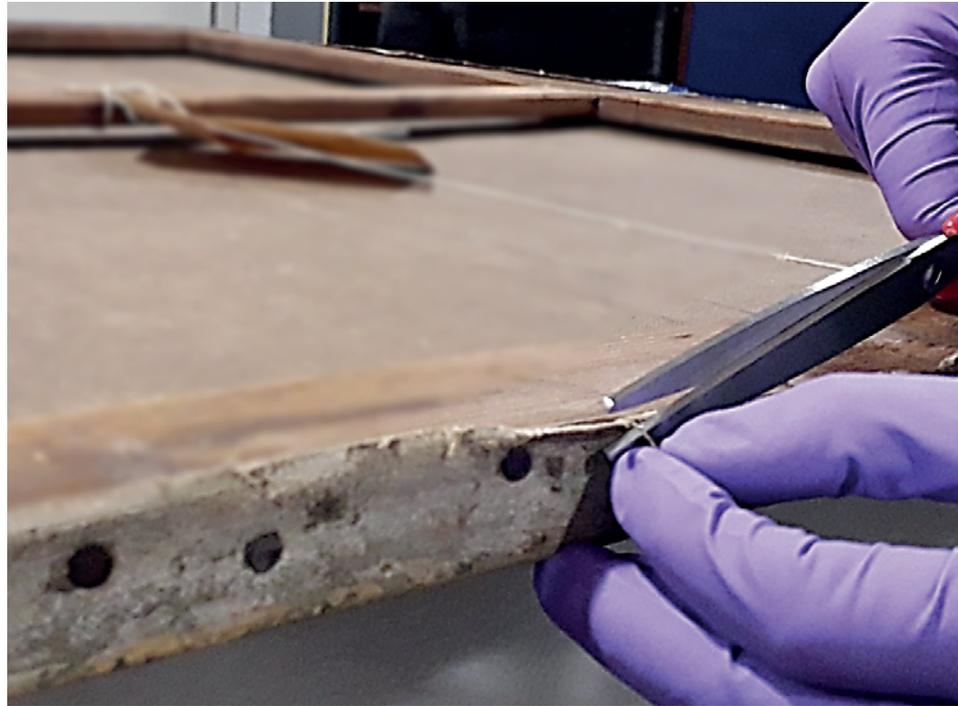
“通过加速器质谱法放射性碳测龄，我们成功地证明了这两幅画——一幅是印象派，另一幅是点阵派——都是赝品。” Beck总结说，“根据在纤维中检测到的过量碳-14，这些画作并不是由所谓的艺术家在20世纪初绘制的，他们在20世纪40年代就已去世。纤维的含量显示这些画布是在20世纪50年代中期，或者更有可能是2000年之后制造的。”测得的碳-14水平大概与20世纪60年代达到的峰值水平相对应。

## 促进核技术用于法证学

2017年，原子能机构开始了一个为期四年的协调研究项目，以加强核分析技术，满足法证学的需要。该项目侧重于三个主要领域：玻璃分析、食品认证和文化遗产，包括对艺术赝品的调查。项目参与者来自巴西、克罗地亚、芬兰、法国、匈牙利、印度、以色列、意大利、牙买加、葡萄牙、新加坡、斯洛文尼亚、瑞士和越南。项目的一些成果，从咖啡到挡风玻璃样本的分析，以及法国艺术赝品的研究，已发表在《国际法证学》杂

志专刊上。

在该项目框架下，2019年，原子能机构与阿卜杜勒·萨拉姆国际理论物理中心在意大利的里雅斯特联合主办



了一次讲习班，强调了基于加速器的技术如何能够补充刑事调查中的标准法证学方法。同时，原子能机构还推出了一个关于核分析技术用于法证学的网上学习课程。

在成功完成该项目的基础上，原子能机构于2021年与联合国区域间犯罪和司法研究所签署了一份谅解备忘录，以促进通过核科学和技术预防和打击犯罪活动方面的合作。

作为下一步，原子能机构计划启动一个后续协调研究项目，重点是侦查文物非法交易和贵金属非法开采。

从一幅所谓的印象派画作的画布上取下一块纤维，以检测作品是否为赝品。

（图/巴黎-萨克雷大学L. Beck）

# 量子改性

## 利用加速器注入单个原子进行生物感应

文/ Joanne Liou

量子技术领域，加速器在过去十年内一直被大量用于材料改性和表征。基于加速器的技术使用高能离子改变材料原子结构，使科学家能够控制单个原子的行为。加速器的主要用途是离子注入，该技术广泛用于半导体，已有几十年。

“就半导体而言，我们注入大量离子改变例如硅的电性能。”新加坡国立大学副教授Andrew Bettioli解释说，“而对于量子技术，我们的目标截然不同。我们想对离子进行单个控制。我们不是在注入数百万或数十亿个离子，而是在注入一个离子。”

单离子注入方面的挑战是确定何时、何地以及是否确实植入了单个离子。“而且，仅仅因为我们把离子植入材料，并不意味着它的工作方式应该是量子位元或色心，”Bettioli说。量子位元，或称量子比特，是传统

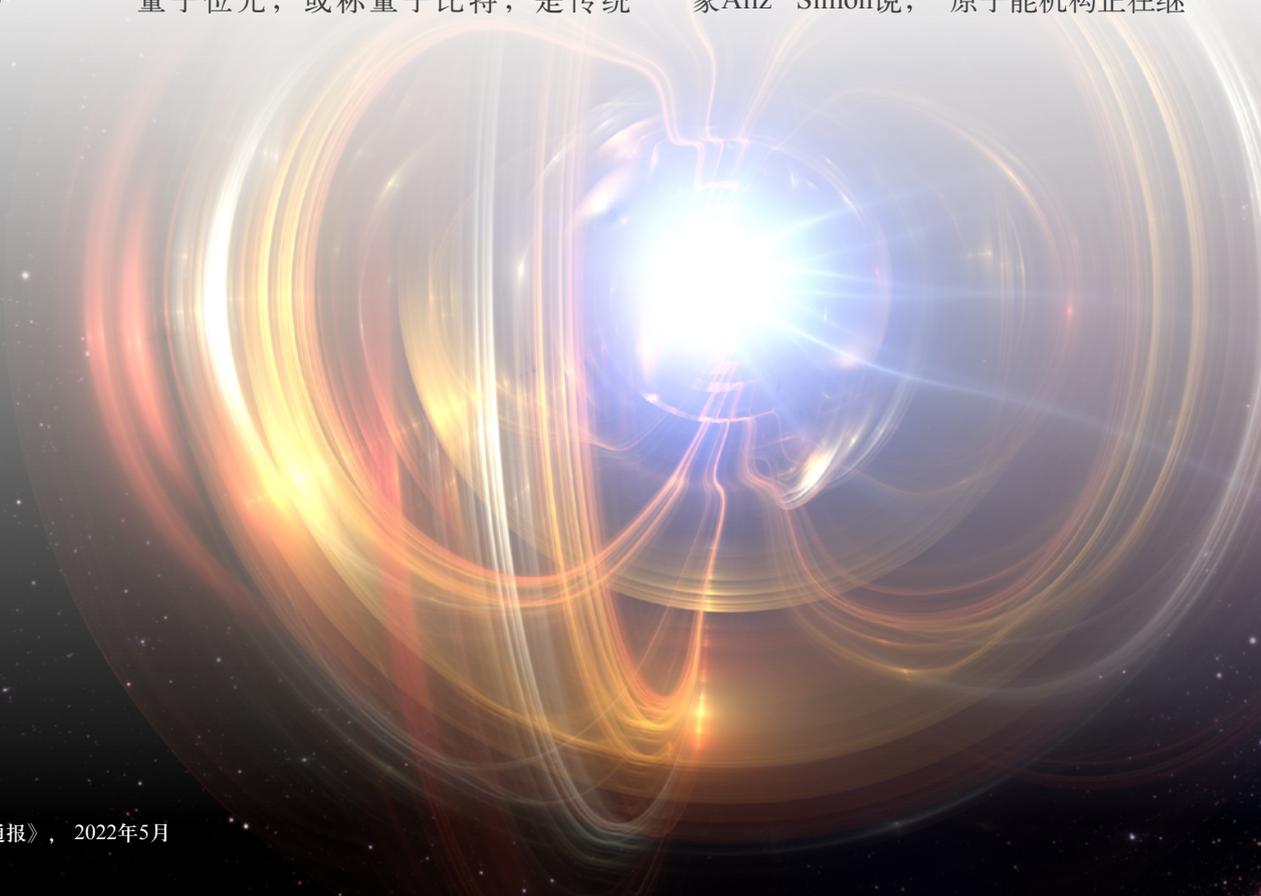
计算中使用的信息搭载比特的复合版，而色心是发射光进行量子感应的缺陷。

2021年5月，原子能机构举办了一次为期四天的“离子束应用于材料工程”培训讲习班。讲习班介绍了聚焦离子束仪器和单离子检测。80多名参与者，其中一半来自发展中国家，参加了这次线上讲习班，讲习班是在一个协调研究项目下实施的，旨在提高对量子领域的认识并让新来者参与其中。举办该讲习班的同时，还推出了原子能机构网络课程“量子技术材料的离子束工程”，旨在吸引下一代量子专家。

“原子能机构一直与各国和国际倡议保持一致，站在协调量子技术国际合作、研究和发展的最前沿，”在原子能机构从事加速器工作的核物理学家Aliz Simon说，“原子能机构正在继

原子能机构的新项目将促进一个生物传感器平台的建立和优化，以便探索亚细胞机制。

(图/ Adobe Stock)



续努力进行协调研究，使量子更好地造福社会。”预计将在今年晚些时候启动一个新项目，将促进一个基于钻石色心的生物传感器平台的建立和优化，以便探索亚细胞机制。在量子领域，钻石被用作半导体，从而感知单个活细胞中的电场和磁场。

## 利用色心进行量子传感

最纯净的钻石是一种碳原子晶格，有500多个记录在案的缺陷可以发光。这些已知缺陷之一是氮-空穴色心。当取出一个碳原子制造一个空位，而一个相邻碳原子被一个氮原子取代时，就会出现一个氮-空穴色心。“氮-空穴色心可以自然发生，并且随机分布。利用加速器，我们可以用离子植入法人为地创造这种缺陷，并在纳米级钻石晶体内的特定区域制造缺陷。”Bettioli说。在钻石的已知缺陷中，氮-空穴中心可以嵌入到纳米级钻石晶体中，而且它可以在室温下控制，具有生物相容性，对生命系统无害亦无毒。

钻石氮-空穴中心具有通过光学检

测磁共振（ODMR）技术进行磁场感应的能力。对磁场成像的能力对生物学和材料科学都有影响。“这是一种观察光发射和检测生物过程中发生的极微小磁场的量子方法。”Bettioli解释说，“这种量子生物传感技术可用于显示或测量在细胞层面工作并具有极小磁场的过程，例如我们大脑中神经元发射时产生的磁场。”

Bettioli目前的研究将光学检测磁共振技术用于检测疟疾。“感染了疟疾的红血球有微小的磁性颗粒，可以用光学检测磁共振检测。”他说，“任何产生电磁场的东西都有可能用这种方法检测出来。”

原子能机构即将开展的项目将进一步研究使用光学检测磁共振的量子感应，以及传感设备的表征和优化。这个新项目将汇集对生物传感有共同兴趣的研究人员，源于以前的一个项目，该项目范围更广，旨在推进基于加速器的离子束工具。Bettioli说：“原子能机构是一个很好的合作载体，它为专家们创造了一个交流信息和相互学习的平台。”

---

“这种量子生物传感技术可用于显示或测量在细胞层面工作并具有极小磁场的过程，例如我们大脑中神经元发射时产生的磁场。”

—新加坡国立大学副教授  
Andrew Bettioli

---

# 利用核技术开发先进材料

文/AnassTarhi

从装载精油的纳米复合材料制成的活性食品包装，到辐射接枝法制造的超级吸水剂聚合物，经辐射加工的先进材料在减少食物浪费、提高农业经济效益、改善医疗保健等方面发挥着越来越重要的作用。

除了重量轻和易于制造之外，利用核技术改性的先进材料还具有更强的性能和耐久性。包括加速器在内的辐射技术通过许多应用使自身地位变得更加重要，并为可持续发展作出贡献。

## 先进材料用途

为了创造先进材料或改善高性能材料生产，一些辐射辅助工艺现已成熟，并在工业中实施。例如，经辐射处理的塑料或橡胶的适用性增加，能够生产各种材料，如用于建筑物中循环水和加热液体的耐热、耐压塑料管。

“用辐射生产的高性能材料无处不在。”原子能机构放射性同位素产品和

辐射技术处处长Celina Horak说，“它们在日常物品中处处可见，这些物品更坚固、更安全。其中一些材料甚至用于提高人们生活方式的可持续性。”

辐射处理还用于无溶剂油漆、油墨和涂料的干燥或硬化，以及改善生物基材料和可生物降解包装材料的强度、耐温性和防渗性。加入了由原位法制作的纳米银颗粒的多孔陶瓷现在用于各国农村社区的水净化。

## 先进材料有益于应对气候变化问题

在应对气候变化的同时满足日益增长的能源需求，需要进一步发展可再生能源的生产、贮存和回收。法国香槟-阿登大区兰斯大学教授Xavier Coqueret说：“辐射技术非常适用于为燃料电池技术制造特定专用膜和块体复合材料，提高了可再生能源生产效率。”他说，辐射预处理可用于改善木质纤维素的生物量或通过先进光伏技

---

“用辐射生产的高性能材料无处不在。它们在日常物品中处处可见，这些物品更坚固、更安全。其中一些材料甚至用于提高人们生活方式的可持续性。”

—原子能机构放射性同位素产品和辐射技术处处长  
Celina Horak

---

术转换太阳光能的效率。

为了解决另一个环境问题，即全球塑料垃圾负担，Coqueret说，在设计先进塑料和复合材料产品时，需要使用辐射技术的有效回收方法，如果使用传统方法则无法重复利用。（见第10页）。

## 辐射对先进材料的影响

坚固、有韧性和耐用的材料在一般工业中至关重要，在核工业中尤其重要，因为反应堆的安全和燃料循环运行的可行性取决于所使用的材料。对于核反应堆中的材料来说，两个最大的挑战是热（通过冷却系统解决）和辐射。

“核反应堆内的结构材料易受到快中子的破坏，快中子将原子击出位置，并产生气体形式的氢或氦。这最终会导致膨胀，产生空隙，以及其他各种结构和机械变化，从而限制其最终使用寿命。”原子能机构核物理学家Ian Swainson说，“因此，对材料进行辐射测试至关重要，而加速器可有助于更广泛地进行测试。”

带电粒子在穿过材料过程中会失去大部分能量，造成重大但局部的损

害。出于这个原因，研究人员计划使用离子束加速器产生的带电粒子测试未来核反应堆的候选材料。

Swainson说：“用加速器测试材料比使用反应堆测试更快。”他解释说，用加速器一天就能完成的工作，用高通量测试反应堆需要一年时间。通常情况下，样品不会产生放射性，而且受损区域可以被仔细切片，并用显微镜技术检查。

2016年，Swainson协助组织了一个长达五年的原子能机构协调研究项目，将相同材料的样品配送到多个加速器设施，在相同的条件下进行辐照，并在俄罗斯联邦的BOR-60研究快堆进行比较。辐照后的分析将有助于提高加速器设施之间的现场可重复性，并阐明加速器如何筛除性能不佳的材料。

2022年8月，原子能机构将举行“第二届国际辐射科学与技术应用会议”（ICARST-2022），探讨这些问题，聚焦核技术应用和电离辐射发展。除其他议题外，会议将重点关注先进材料特定领域的进展和当前的技术或经济限制，并将帮助总结成熟的辐射工艺在改善材料性能方面的成果。

核反应堆中使用的燃料元件由先进材料制成，必须具有抗热和抗辐射能力。

（图/Adobe Stock）

# 在菲律宾及其他地区建立电离辐射设施

文/ Puja Daya

**根**据2020年全球癌症观察站的数据，癌症是菲律宾的第二大致死原因，因为该国每年有近10万例死亡与癌症有关。减少这一死亡人数的关键是早期检测肿瘤，但由于医疗成像扫描的平均费用接近2000美元，许多菲律宾人负担不起。

“菲律宾面临的一个主要问题是缺乏开发和维持癌症检测的资源。这导致许多癌症患者没有得到诊断和治疗。”菲律宾核研究所所长Carlos Arcilla说。Arcilla及其团队希望通过在马尼拉建立一台新的回旋加速器（一种电离辐射设施）来解决这种能力不足的问题，以便生产对诊断和治疗癌症以及大脑和心血管疾病至关重要的放射性药物。

目前，菲律宾只有四台回旋加速器，而且都属于私有，同时该国正电子发射断层成像-计算机断层成像（PET-CT）设施有限，这意味着只有5%的癌症患者能够得到癌症诊断。回旋加速器是生产放射性药物的加速器，患者在接受PET-CT扫描之前，

会注射这些药物。PET-CT扫描是一种医疗扫描，可以创建高质量的三维图像，通常是器官和组织的图像，以帮助检测疾病和显示肿瘤。有了新的回旋加速器，菲律宾可以在国内生产更多的放射性药物，从而更多地使用PET-CT扫描。

新的核医学研究和创新中心拥有一台国有回旋加速器和PET-CT扫描仪，每年约5000名患者能够获得准确的癌症分期诊断。

Arcilla说：“我们的目标是为该中心和邻近的迪利曼菲律宾总医院生产放射性药物，使我们能够为更多的患者服务，并作为癌症研究的工具。”他说，中心还将成为该地区的一个培训中心，使菲律宾和邻国都能在生产和使用放射性药物方面实现自力更生。

## 新电离辐射设施的好处

回旋加速器、同步加速器和其他类型加速器等电离辐射设施所生产的放射性同位素和粒子束，可用于医学和保健、水安全、粮食和农业、研

泰国素罗娜丽科技大学的同步加速器用于农业、医学、药学和工业。

（图/同步辐射光源研究中心）



究、能源生产、工业和消费产品、法证调查、文化遗产保护。

在世界各地建立更多加速器设施，将使人们更好、更经济地受益。因此，除了菲律宾之外，阿根廷、马来西亚和泰国也正在建立新的设施，所有这些都得到了原子能机构的支持。

在全球范围内，对这种电离辐射设施的需求正在增长，为了更好地帮助各国满足这种需求，原子能机构计划在今年发布《建立电离辐射设施导则》。“参与开发电离辐射设施的人可以受益于这些导则，这些导则将使他们能够井然有序地开展项目，使项目顺利地实施，并在设施开始运行和提供服务后得到充分利用。”负责该出版物的原子能机构研究堆专家Nuno Pessoa Barradas说：“该出版物将通过整合关于建立新设施和改进现有设施的专家建议来实现这一点。”

电离辐射设施可以包含不同类型的设备，以达到电离的目的。泰国同步辐射光源研究所正计划建造第二台同步加速器。该国首台加速器（见图片）已运行20年，帮助泰国专家可持续地利用电离辐射保护文化遗产文物（见第8页），指导法证调查（见第16页），以及促进研究和发展。

现有设施已在该国产生重大

影响。”同步辐射光源研究所学术事务所长助理、研究设施部主任SupargornRugmai说，“一开始，我们缺乏知识，但在该地区内设立了培训计划后，我们逐渐成为专家。有了新的设施，我们能产生更大的社会影响，并更广泛地应用该技术。”

同步辐射光源有助于建立和推进工业、医疗和基础研究。泰国的新同步加速器产生的能量将比旧同步加速器多2.5倍。它将用于推进科学研究，并通过利用其高强度X射线进行工业产品改进和创新，改善国家经济。

阿根廷和马来西亚的专家也在开发新的电子束加速器设施。这些设施能为医疗诊断和治疗生产更多的放射性同位素，并在这些国家内促进研究和技术的发展。

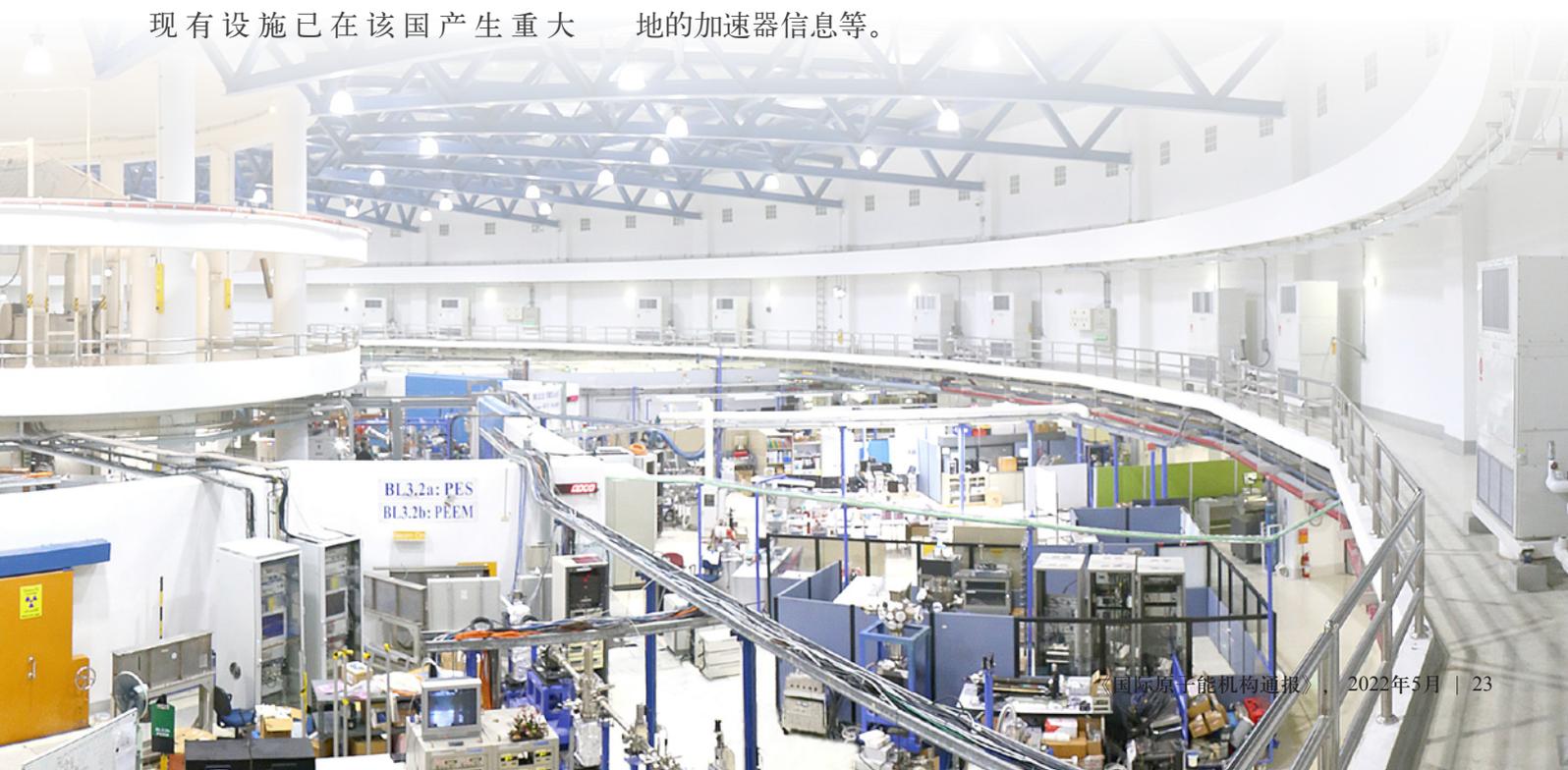
通过其技术合作计划，原子能机构正在向阿根廷、马来西亚、菲律宾、泰国等国派遣专家，通过培训当地专家，帮助他们安全地建立和维护电离辐射设施，使他们能够独立地运行和维护这些设施。除了这种支持外，原子能机构还发布安全标准，提供线上课程，以及建立关于加速器知识门户的电子学习平台，即一个服务于加速器行业并由行业提供相关资源的网站，用于提供培训材料、世界各地的加速器信息等。

---

“参与开发电离辐射设施的人可以受益于这些导则，这些导则将使他们能够井然有序地开展项目，使项目顺利地实施，并在设施开始运行和提供服务后得到充分利用。”

—原子能机构研究堆专家  
Nuno Pessoa Barradas

---



# 通过法律使辐照设施得到安全、可靠和和平利用

文/ Anthony Wetherall 和 Chenchen Liang

**安**全、可靠、和平的核技术有望给社会带来巨大的利益，但如此多的应用所必需的电离辐射会给人们的健康和环境带来重大风险。需要有完善的法律安排来评估、管理和控制这种辐射，从而尽量减少这些风险。

电离辐射设施在许多涉及核技术的领域都很重要（见第22页），不会造成与核电厂相当的辐射风险，因此不需要采取与反应堆相同的辐射安全和核安保要求。电离辐射设施及其相关活动必须遵守与分级方法一致的安全标准。也就是说，它们必须接受监管机构的许可、监管和检查。

各国负有建立、维护和加强包括监管框架在内的全面国家法律框架的根本责任。许多国家的法律层级是：处于最高级的是宪法文书，然后是法定一级的立法框架，包括法律的颁布。

这一框架为实施例如以下具有法律约束力和不具法律约束力的国际文书提供了法律基础：《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》《放射源安全和安保行为准则》，以及原子能机构相关安全标准和核安保导则。

立法框架是监管控制制度的基础，并为建立或指定一个具有必要独立性、人力和财力以及一套明确职能的监管机构作出规定。这包括标准制定、授权、检查和执法，以及责任的明确划分和协调。这一立法框架对安全、可靠和和平利用电离辐射至关重要

要，各国期待原子能机构协助建立这一框架。

## 制定法律并不总是那么容易

多年来，各国政府纷纷在建立或加强其国家核技术法律框架方面寻求援助。“经验告诉我们，制定核法律并不总是一项容易的事。”原子能机构核法律和条约法律处处长 Wolfram Tonhauser 说，“三大技术领域——安全、安保和保障——都需要以充分和全面的方式加以解决。”

此外，国家核法律必须符合每个国家法律体系的宪法和制度要求，同时寻求最大程度地与其他国家的核领域立法框架协调一致。

重要的是，决策者需要认识到核技术及其应用的特殊性，尤其是因为它可能涉及政治性、敏感性和战略性问题，以及国家、国际和地区关注的安全风险。此外，立法者需要认识到核技术及相关设施和活动的跨行业性，在健康、能源、工业、运输、水、食品和农业等多个部门和领域都可能遇到。

因此，制定法律，需要对各种现有相关政策、法律和监管框架及安排进行全面评估。通常情况下，需要对涉及重大跨机构监管问题的现有政策进行重大或复杂的修改。对许多立法起草人来说，核能是一个高度专业化、复杂化和技术性的领域，因此往往要在

---

“经验告诉我们，制定核法律并不总是一项容易的事。三大技术领域——安全、安保和保障——都需要以充分和全面的方式加以解决。”

—原子能机构核法律和条约法律处处长 Wolfram Tonhauser

---

国家立法中使用技术术语和定义。

为了应对这些及其他挑战，原子能机构立法援助计划为各国主管部门提供支持。支持是在原子能机构技术合作计划范围内实施的，以提高核法律方面认识和加强核法律方面能力建设，从而制定安全和安保标准，包括电离辐射设施及其许可证审批、监管和检查的标准。

原子能机构的多方面支持包括与决策者、政策制定者、高级官员和立法者（如国会议员）会面；为广大官员举办国家、次地区和地区讲习班；以及审查核立法草案和已颁布的立法。该计划通过培训课程进一步建设能力，例如在核法律研究所，由原子能机构每年组织为期两周的核法律培训课程，

重点是立法起草。仅在过去十年中，就有500多名官员在核法律研究所接受了培训，并开展了200多次双边立法起草活动，同时还举办了53次国家讲习班和18次地区、次地区讲习班。

最近，关于核法律的网络研讨会进一步推动了与成员国的核法律对话。在过去的十年中，亚洲及太平洋地区的10多个国家、欧洲的10个国家和非洲的20多个国家在原子能机构的起草援助下通过了新立法或修订了立法。例如，新安装了回旋加速器的文莱达鲁萨兰国和菲律宾，以及拥有加速器的约旦，均受益于这种援助。最后，原子能机构《核法律手册》，特别是《核法律手册：实施立法》，仍然是该领域的首选出版物。

仅在过去十年中，就有500多名官员在核法律研究所接受了培训。

（图/原子能机构 D. Calma）



# 你需要了解的离子束知识

文/ Puja Daya和SotiriosCharisopoulos

**在** 无论是确定污染物的来源、表征食品中的污染物、对单个生物细胞进行成像，还是确定历史文物的年代，科学家都能使用离子束获得答案。但什么是离子束？如何使用离子束？

离子束，顾名思义，是带电的原子流。离子束中的离子是由称为离子源的特殊仪器产生的。粒子加速器中产生电场，离子进入电场后开始加速，并由磁场引导和聚焦，在金属管内的真空中以平行轨迹移动。根据加速器的类型，离子束可以被加速到接近光速。

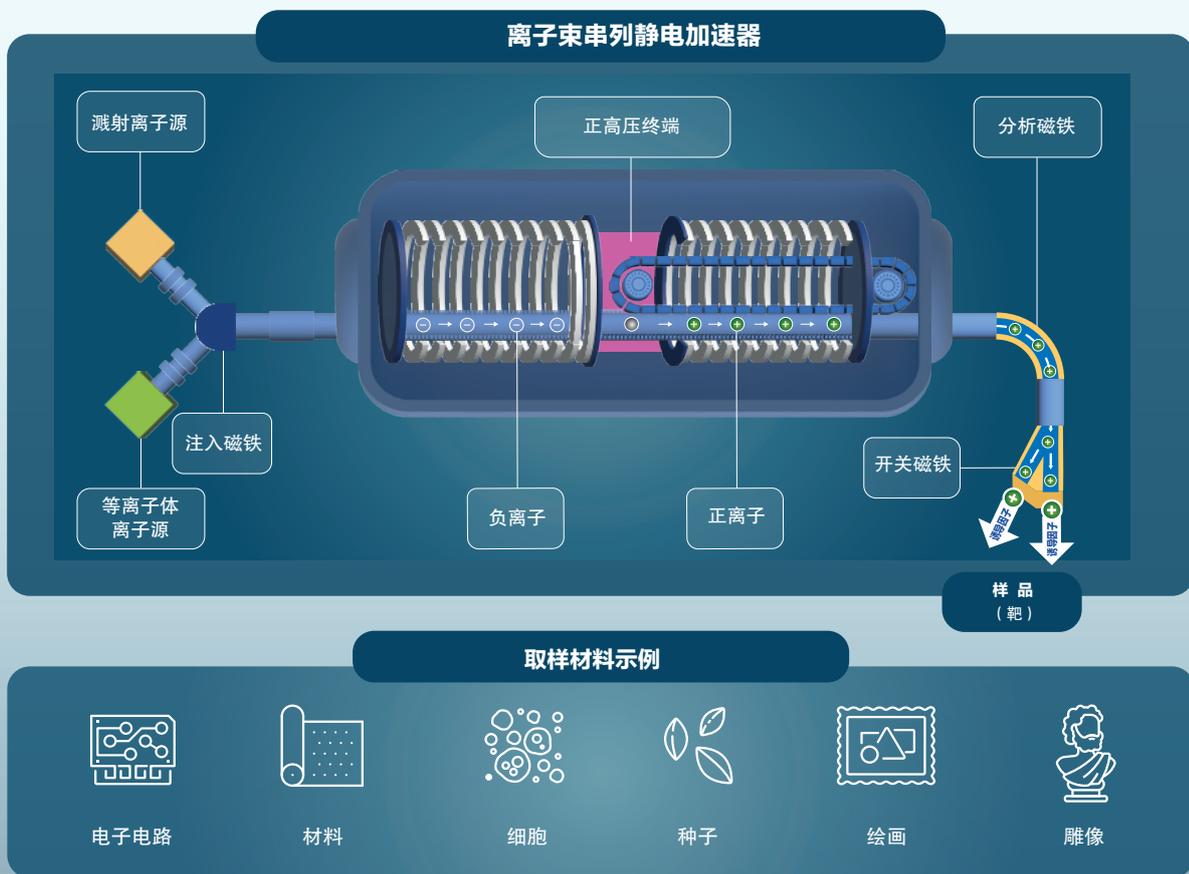
就串列静电加速器（见图）而言，离子束被轰击到一个材料样品或物体上。与材料的相互作用可以迫使离子束中的离子改变方向，或者碰撞可以导致粒子或辐射释放，主要以X射线或 $\gamma$ 射线的形式释放。然后可以检

测和分析这种辐射。

能量和所发射辐射的特性可揭示被轰击样品的组成细节，例如它是否是晶体、硬度如何，以及对新兴技术有意义的物理特性。被轰击样品材料或物体也可能在物质的形状和相态上有所不同，可以是薄薄的箔片；小土球；人类、动物或植物细胞；种子；岩石；液体；甚至是历史文物或铜像。根据材料的形式和组成，轰击可以在真空或空气中进行。

由于其独特的分析和改进能力，加速离子束有许多应用。在植物突变育种中，使用离子束辐照植物材料或幼苗，通过诱导突变加速其自然进化过程，从而研发出更高产或抗病抗旱的作物。

质子和其他离子被广泛用于生产所需的放射性同位素，制造用于诊



断和治疗癌症的放射性药物。在癌症治疗中，质子和碳离子束被用来轰击癌症肿瘤，特别是在其他疗法不可行的情况下。这些束流将能量传递到肿瘤，加热并分解肿瘤。

随着对更强、更好材料的需求不断增加，各种各样的离子束还被用来改变材料特性，加强材料抗性。例如，航天器或核聚变堆需要能够承受恶劣辐射环境的材料。

## 电子束

与离子束相似的是电子束。电子束是由各种加速器中的电子源产生的电子流，用来产生X射线，在医学治疗中用于辐照和杀死癌细胞。电子束或X射线也被用于辐照食品，在不降低食品的营养价值、质量或味道的情况下，杀死有害细菌。

## 原子能机构未来离子束设施项目

世界各国都可以从离子束和电子

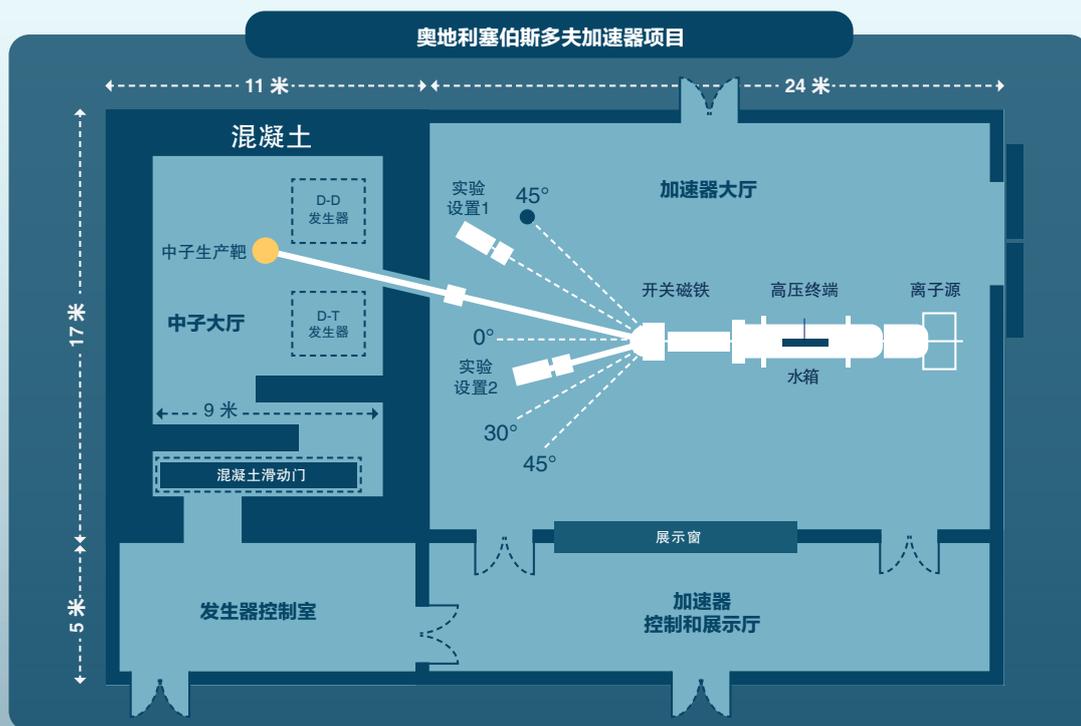
束应用中受益，原子能机构正计划在奥地利塞伯斯多夫建立最先进的串行离子束设施。有了这个加速器，原子能机构就能够为世界各地的科学家提供离子束多样化应用（包括产生中子等二次粒子）方面的研究、教育和培训支持。

“粒子束是独特的探针，不仅可以用来更好地了解宇宙，而且可以分析并利用物理过程来改善生活，支持经济增长。”原子能机构物理处处长 Danas Ridikas说，“粒子加速器是一项具有成本效益的投资，有助于实现可持续发展。通过新的串行离子束加速器，原子能机构可进一步帮助各国加强其在加速器技术及其应用方面的能力。”

为了使离子束设施项目能够获取串行加速器、所需基础设施和相关仪器仪表，以及其运行所需的资源，原子能机构正在筹集约460万欧元。

“粒子束是独特的探针，不仅可以用来更好地了解宇宙，而且可以分析并利用物理过程来改善生活，支持经济增长。”

—原子能机构物理处处长 Danas Ridikas



(图表/原子能机构 A. Vargas Terrones)

# 工业辐照创造更美好的世界

文/ Michael Amdi Madsen

“辐射”这个词让一些人感到恐惧，但100多年来，辐射在工业和食品安全方面一直发挥着无形、有益且往往至关重要的作用。无论是应用于医疗器械消毒、新鲜农产品灭菌，还是强化工业聚合物，辐照技术都是现代世界不可或缺的一部分。

为了更好地了解工业辐照的重要性，并了解其技术如何发展，我们采访了国际辐照协会主席兼秘书长Paul Wynne。

国际辐照协会是一个非营利组织，由来自世界各地的公司、研究机构、大学和政府机构组成，为全球辐照工业和科学界提供支持。

**问：基于加速器的工业辐照在哪里影响最大，您认为这项技术的发展方向如何？**

**答：**加速器在工业规模上用于改善聚合物性能已有约60年的历史。其中一项主要应用是处理电缆绝缘子，以提高其耐高温性，从而有助于消防安全和设备耐久性。还有许多基于电子束诱导的其他化学改性应用，例如制造用于地板的木塑复合材料，或制造汽车行业使用的泡沫。其中许多应用是专有的，并应用于制造现场。

大功率加速器的引入拓宽了可处理产品的范围，使该技术能够与放射性同位素钴-60发出的 $\gamma$ 辐照相竞争。可处理的产品范围扩大，包括医疗器械和包装的灭菌、药品和化妆品成分的消毒，以及食品的微生物控制。到目前为止， $\gamma$ 辐照在这些应用中仍然占主导地位。

**问：辐照是否有从使用放射源向基于加速器的技术转变的趋势？**

**答：**有这样的动力，它主要涉及医疗器械的灭菌，因为对医疗器械的



---

未来，传统 $\gamma$ 辐照市场的大部分增长很可能会流向加速器。

—国际辐照协会主席兼秘书长Paul Wynne

---

需求以及由此产生的灭菌需求正在迅速增加。在全球需要灭菌的大量设备中，差不多一半设备首选辐照进行灭菌， $\gamma$ 灭菌占80%以上。各种情况，其中一些可能是暂时的，最近使钴-60的供应无法跟上需求的增长。医疗器械制造商通常不会对某种方法有偏好，他们只是希望其产品经过适当的

灭菌。

利用钴-60源进行 $\gamma$ 灭菌有两大优点：简单和可靠。加速器也有优点：只需要用电驱动，并且可以暂停电离辐射发射。市场力量将决定这些技术中的哪一种将在未来占主导地位，但是，就目前而言，重要的是它们都能保持可用，因为它们都是满足灭菌需求所必需的。

应该注意的是，就处理能力而言，凡是能用电子加速器处理的，都能用 $\gamma$ 射线处理，但反之则不行。然而，有些加速器可以安装金属靶，将电子束转化为X射线，而X射线的特性与 $\gamma$ 射线相似。

**问：对基于加速器的工业应用的需求正在增长，特别是在发展中国家。这些技术需要克服哪些挑战才能变得更容易获得？**

**答：**未来，传统 $\gamma$ 辐照市场的大部分增长很可能会流向加速器。加速器供应商的数量超过了钴-60供应商的数量，但对于高能和大功率机器来说，供应商数量仍然限制在十几家左右，对于具有X射线能力的加速器而言，供应商数量要少得多。X射线系统的发展仍然有限，但正在从较低的基数快速增长。

加速器在许多发展中国家尚未得到大量采用。主要原因包括所需投资高、与 $\gamma$ 辐照器相比机器更加复杂，以及无法获得充足稳定的电力供应。人力资源、财政限制和满足安全要求也是障碍，但可能比基础设施和市场规模问题容易克服。就目前而言，基于加速器的技术似乎并不适合所有发

展中国家。

**问：国际辐照协会和原子能机构就各种举措开展合作，例如举办国际会议、为年轻研究人员组织讲习班。这对增加加速器技术的使用有什么好处？**

**答：**协会的目标与原子能机构的一些目标一致。国际辐照协会在促进辐射技术的安全和有益使用方面是技术中立的。原子能机构的对应方是政府及其机构，而国际辐照协会主要代表工业辐照市场。国际辐照协会与原子能机构合作开展了越来越多的活动。

**问：您对哪种基于加速器的工业辐照发展感到最兴奋？它会成为“游戏规则改变者”吗？**

**答：**利用低能电子和低能X射线进行在线辐照是一种非常有前途的新方法。这种创新以使用微型气体踏板或发射灯为基础，可以使许多行业的制造商都能接触到辐照。低能射线穿透材料限制了潜在的应用，但发射器具有紧凑的优点，可以集成到制造生产线中。最初的应用包括在制药业灌装前对注射器灭菌，以及在牛奶或软饮料的无菌包装线上对材料进行高速灭菌。

仅举一例，一家瑞士公司已开发一种用于食品原料去污的机器，其大小与一个大橱柜差不多。这种系统也被用于使用昆虫不育技术的害虫防治（原子能机构是该技术的倡导者）以及辐射生物学研究。需要更多的努力来扩大潜在的应用领域，特别是使用紧凑的低能X射线系统，但毫无疑问，这可能会改变游戏规则。

# “米尔哈”项目：管理放射性废物的加速器驱动系统

文/ Hamid Aït Abderrahim



Hamid Aït Abderrahim是比利时核研究中心国际事务副秘书长，也是“米尔哈”项目及其非营利组织的负责人。他是天主教鲁汶大学反应堆物理和核工程教授，是欧盟委员会与渐进式核系统、高放核废物分离和嬗变管理有关的各种项目的协调员和合作伙伴。作为多个科学理事会、研究组织和国际机构的成员，2014年，他被比利时国王提名为皇冠勋章的高级官员，以表彰他在核能科学和闭合燃料循环领域的贡献。

反对核电有时引用的一个主要且错误的理由是：核废物问题没有解决办法。未经后处理的乏核燃料在大约30万年内仍然具有超过天然铀矿石中所发现水平的放射性毒性，其中绝大多数铀和钚仍未燃烧。虽然存在这种长期处置的技术解决方案，但还有另一条途径：核燃料回收。

乏燃料中的铀和钚都可以通过后处理回收，并用于新的核燃料以进一步发电。然而，一般后处理产生的残留物会留下次锕系元素，即元素周期表中接近铀的元素，这些元素不能在现有的动力堆中燃烧。含有这些元素的放射性废物仍然需要1万年才能恢复到自然水平。

高科技应用多功能混合研究堆（MYRRHA，以下称“米尔哈”）是比利时核研究中心（SCK CEN）目前正在建设的一个基于加速器驱动次临界洁净核能系统概念的项目（ADS），旨在解决锕系元素，特别是次锕系元素。该项目寻求在工程层面证明基于加速器驱动系统，以及证明在工业规模进行次锕系元素嬗变的可行性。通

过减少放射性毒性，这可以将高放废物体积减少99%，将贮存所需时间减少到300年。

“米尔哈”的设计在两个重要方面与当前大多数反应堆不同。首先，它使用快中子，这是裂变次锕系元素所必需的。其次，它可以在次临界模式下运行，即不引起自持链式裂变反应，因为它与高能质子加速器耦合，通过散裂反应在反应堆堆芯中心产生所需的初级中子。这对于确保燃烧次锕系元素时的反应性控制是必要的，并提供了额外的优势，即加速器停止时，链式裂变反应停止，反应堆关闭。作为一项重要的安全措施，其设计使残余衰变热通过自然循环排出，而无需任何能动系统或干预。

为了转化世界上大部分的乏燃料废物，需要一个工业设施网络。迄今，“米尔哈”所涉技术已分别在实验设施的实验室规模上得到证明。因此，“米尔哈”是一个工业化前的试点装置，旨在整合这些技术和进行规模测试，同时大幅提高可靠性。

在这个首创项目的开发过程中，

需要应对许多科学、工程和监管方面的挑战。比利时核监管机构在与项目开发商密切协商后进行的许可前审查，没有发现任何足以使“米尔哈”的未来许可受到质疑的问题。我们希望这将吸引比利时和其他地方的许多年轻人进入核领域，比利时认为核领域非常重要。

虽然该项目的主要重点是管理放射性废物，但该设施在尖端研究和开发方面还有许多其他应用。“米尔哈”项目分为三个阶段。第一个阶段已在建设中，将完成质子加速器综合体的低能（100兆电子伏）部分，许多研究活动预计将在2027年左右开始。这些活动将围绕同位素在线分离（ISOL@MYRRHA）系统展开，该系统可以选择用于放射性药物的单个同位素，并为各种核物理实验产生放射性离子束，同时辅以适合聚变材料研究的全功率设施。

由“米尔哈”同位素在线分离系统提供的放射性束可以进行高精度测量，这也可能有助于了解粒子物理“标准模型”的有效性。如果第一阶段成功，并证明基于加速器驱动系统所需的加速器具有前所未有的可靠性，那么第二阶段将使质子加速器达到全功率（600兆电子伏）。最后阶段将是建造次临界反应堆本身。铅铋（Pb-Bi）用作冷却剂，以排出核反应堆产生的

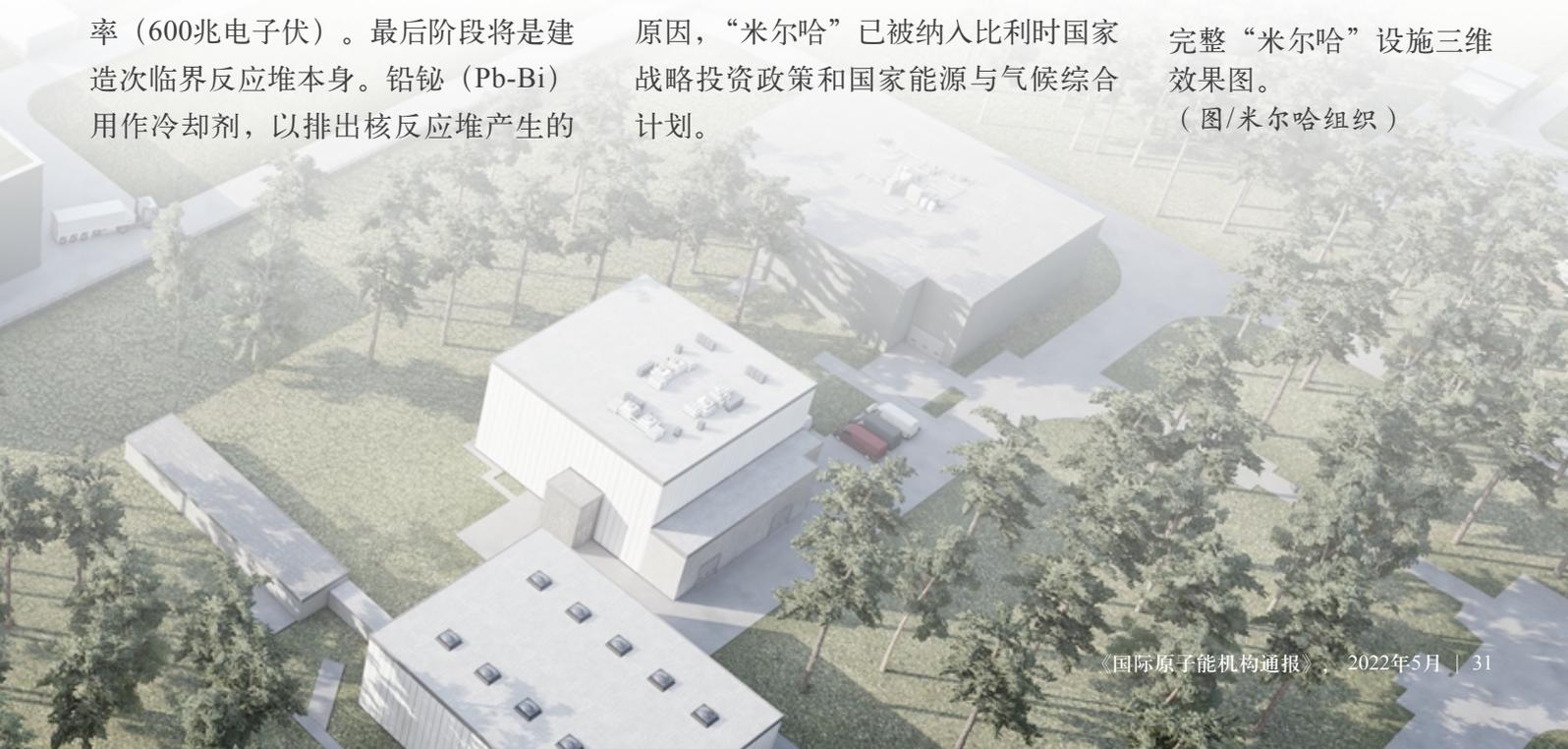
热量。反应堆堆芯设计灵活，可以装载混合氧化物燃料、次锕系元素和医用同位素生产靶。它将为裂变快堆甚至未来聚变堆的未来结构材料的辐照和腐蚀测试提供平台。“米尔哈”铅-铋冷却反应堆可作为第四代铅冷快堆的实验技术测试装置。

迄今，比利时政府已在“米尔哈”项目上投资约2亿欧元，并根据约16亿欧元的总体项目概算，在2018年为2019-2038年追加了5.58亿欧元。已创建一个非营利实体。这将使“米尔哈”能够吸引外国政府和实体的未来投资，从而进入第二和第三阶段，并作为一个国际组织运作。“米尔哈”已被列入欧洲研究基础设施战略论坛，该论坛由研究界认定的前沿项目组成，核物理欧洲合作委员会已将“米尔哈”同位素在线分离系统纳入其欧洲主要核物理设施的长期计划。旨在鼓励低碳技术的欧洲战略能源技术计划（SET计划）也将“米尔哈”列入其中，这使其能够从欧洲投资银行获得融资。

将铀和钚回收作为快中子能谱系统燃料这种潜力，也会减少对铀矿开采的需求，并显著增加从铀矿中回收的能量。提高原材料利用效率和减少废物是许多行业的高要求，由于这些原因，“米尔哈”已被纳入比利时国家战略投资政策和国家能源与气候综合计划。

完整“米尔哈”设施三维效果图。

（图/米尔哈组织）



## 迈向“公正”的能源转型 核电在清洁能源领域拥有收入最高的工作



根据新的研究，投资核能发电比投资其他低碳电力来源能产生更多高薪工作岗位。

(图/原子能机构)

根据在国际原子能机构的一次活动上提出的新研究，转向清洁能源将创造的就业机会多于从化石燃料过渡所失去的就业机会，而且收入最高的工作将继续在核电领域，核电提供大量可持续的就业，有利于地方和地区经济。

随着130多个国家承诺或考虑到2050年实现温室气体净零排放的目标，因此，为这一能源转型将如何影响就业市场做好准备至关重要。来自清洁能源行业的代表参加了原子能机构最近举行的一次网络研讨会，讨论如何在能源投资与气候目标相一致的情况下，确保提高生活水平和创造就业机会。

“摆脱使用化石燃料决不能

让任何人掉队——这是‘公正’转型的概念。”原子能机构规划和经济研究处处长Henri Paillere在“投资低碳技术：为公正能源转型创造就业机会”的网络研讨会上表示，“需要大规模投资所有清洁技术，而且必须以创造就业和经济增长，并支持可持续发展的方式进行。”

根据国际货币基金组织的一份工作文件，投资太阳能、风能和核能等清洁能源对国内生产总值有积极影响，其影响是投资天然气、煤炭和石油等化石能源的两到七倍。国际可再生能源机构在网络研讨会上提出的一项分析预测，在全球升温限制在1.5°C的情况下，按照全球气候目标，到2030年，可再生

能源部门的工作岗位可能从1200万增加到3800万。

国际可再生能源机构知识、政策和金融中心计划官员Michael Renner表示，其他与能源转型相关的工作岗位同期可能从1600万增加到7400万。相比之下，常规能源工作岗位将从3900万减少到2700万。

根据国际货币基金组织的文件，在所有清洁能源中，核电投资产生的经济乘数效应最大。该文件还显示，核电每单位电所创造的就业机会比风电多25%左右，而核电行业的工人收入比可再生能源行业的工人多三分之一。

世界核协会高级顾问Philippe Costes也提出了类似的结

论。“核电提供的工作岗位薪金比任何其他能源技术都高，大约高出25%~30%。但重要的是，虽然在建造期间，核电与风电一样，为电厂周围和地区经济提供工作岗位，但只有核电在运行期间为当地和地区经济提供重要和可持续的工作岗位。” Costes在网络研讨会上说。

Costes说，世界核协会的研究发现，在法国和美国，核电每

单位电提供的就业机会比风电多25%，而且这些工作报酬丰厚、时间长，且主要是在当地。他补充说，核电的长期经济效益还体现在新启动核电国家的本土化水平不断提高，以大韩民国为例，其核电规模的扩大恰好与该国在20世纪90年代中期成为世界第11大经济体同步。核能发电几乎占大韩民国电力的三分之一。

根据国际能源署的数据，到

2030年，清洁能源、能源效率和低排放技术所需的3000万新工人中，约60%将从事新的高技能工作，需要中等以上教育，如职业资格证书或大学学位。国际能源署跟踪可持续转型部门负责人Daniel Wetzel表示，各国政府和学术机构需要开始制定政策，以培养未来的劳动队伍。

文/Nicholas Watson 和 Lucy Ashton

## 在原子能机构和粮农组织的支持下，突尼斯口蹄疫毒株以创纪录时间得到确认



在突尼斯东北部纳比尔地区，一名兽医在从一头疑似感染口蹄疫的奶牛身上采集口腔样本。

(图/突尼斯农业、水资源和渔业部T. Ben Hassine)

2022年初，突尼斯的一家病毒学实验室收到了兽医怀疑感染口蹄疫的奶牛的口腔样本。口蹄疫是一种影响牛、猪和山羊等偶蹄动物的高度传染性疾病，可导致动物和动物产品的地区和国际贸易中断。该病的特征是发烧和蹄间、口腔、舌头和嘴唇上出现

水疱样疮。

突尼斯兽医研究所病毒学实验室的病毒学家Soufien Sghaier在将样本提交给基因测序服务机构的几天内，收到了有助于确认口蹄疫毒株正在传播的结果。Sghaier得以通知兽医当局实施控制措施，以防止疾病蔓延。

对毒株的及时确认，由原子能机构与联合国粮食及农业组织（粮农组织）合作完成。粮农组织为测序服务提供便利，并提供处理结果所需的培训。

“我们很快收到了一例口蹄疫疑似病例的测序结果。样本于周五被送往柏林的一家实验室，

我们于周一下午收到了测序结果。” Sghaier解释说，“这使我们能够在创纪录的时间内进行分析，确定口蹄疫的具体毒株。到星期二，我们已将关于口蹄疫毒株的报告发送给兽医当局。”为了选择或开发有效的疫苗，需要对口蹄疫毒株进行鉴别。

基因测序对于确定一种流行疾病是地方性疾病还是外来输入疾病非常重要。粮农组织/原子能机构粮农核技术联合中心动物卫生官员Ivancho Naletoski说：“基因测序可帮助我们了解病原体（引起疾病的生物体）属于哪个毒株，以及哪种疫苗对病原体有效。”根据基因测序，可以创建绘制物种谱系的系统发育树。

“我们通过系统发育分析，确定我们已经有一种可以保护

我们牛群的疫苗。兽医当局实施了周边疫苗接种，以减少口蹄疫传播的风险。” Sghaier说。周边疫苗接种，或缓冲带疫苗接种，有助于防止病毒传播到其他地理区域。

## 原子能机构/粮农组织基因测序服务

免费基因测序服务使各国能够为深入分析病原体进行测序。迄今，来自非洲、亚太、欧洲和拉丁美洲24个国家的30个实验室已提交5300多个样本。

“在当地实验室实施基因测序技术相当昂贵，” Naletoski说，“不存在对每一个分离物进行测序的大规模需求；只需要从选定的分离物中提取少数样本。就经济可行性而言，明智

的作法是使对应方能够利用测序服务的途径。”原子能机构已制定并分发用于处理原始数据，并根据所提供结果对当地流行病原体生成系统发育树的分步技术说明书。

此外，粮农组织/原子能机构联合中心于2017年在摩洛哥和2018年在阿根廷为实验室主办了关于如何使用该服务的培训班。在国家一级，该服务在疾病监测计划中发挥作用。在全球一级，该服务支持相关研究，并为全球科学界作出贡献。迄今，基于通过测序服务获得的结果，已有30多篇文章发表在同行评审期刊上，还有数十个序列发表在开源数据库中。

文/ Joanne Liou

## 改善使用透视医疗程序中的辐射防护

与传统手术相比，图像引导的微创手术风险更小、住院时间更短、恢复时间更快，现在在全世界范围内被越来越多地使用。2020年，总共进行了2400万例此类程序，自2008年以来增加了六倍多。然而，可能会有一个问题：如果没有适当的预防措施，患者和医务人员都可能受到不必要的X射线照射，这些射线是透视检查时医生用来“查看”体内情况的。

原子能机构辐射防护专家Jenia Vassileva说：“由于这些程序的技术发展和复杂性增加，以及在改善患者和工作人员辐射防

护的导则和培训方面可能存在的差距，我们已发现辐射防护的新挑战。”

X线透视显示连续X线图像，由穿过身体的光束产生，显示在监视器上。

在最近的一次原子能机构会议上，作为对医疗界支持的一部分，来自42个国家和18个国际组织和专业机构的100多名专家讨论了在X线透视引导下介入程序中取得的进展和面临的挑战。他们重点讨论了在应用这些程序时如何加强对患者和医务人员的辐射防护，因为这些程序可能导致患者的皮肤损

伤和执行介入程序的医务人员的辐射诱发白内障。

## 对患者和医务人员的辐射防护管理

通常情况下，组织反应只涉及皮肤发红或脱发，但在少数情况下，会出现更严重的反应，如溃疡或皮肤坏死，有时是几周、几个月甚至几年后。

会议主席、美国哥伦比亚大学临床放射学和医学教授Stephen Balter说：“与高剂量有关的因素是患者的体型和程序的医学复杂性，这需要长时间的透视；然而，在大多数情况下，由于操作



X线透视显示连续X线图像，由穿过身体的光束产生，显示在监视器上。在此程序中，对患者和医务人员进行辐射防护至关重要。

（图/保加利亚索非亚国家心脏病医院Desislava Kostova-Lefterova）

者缺乏知识和认识，会发生意外的严重组织反应。”

Hal Workman，一位14年前因心脏介入手术而遭受严重皮肤损伤的患者说：“过了一年多，才有人能确定是我长时间的透视手术造成了我的伤害，在超过15个月的时间里，我每次的睡眠时间都不超过两个小时。这是你能想象的最糟糕的痛苦。”

与会者还了解了透视技术的最新发展，包括一种具有彩色或灰度的辐射剂量视觉分布的皮肤剂量图。这为操作者提供了剂量监测信息，以便更好地调整程序的设置，避免伤害患者的皮肤。

“经过20年的努力，发生皮肤损伤案例已大幅减少。” Balter

说，“主要原因是透视设备和这些手术医疗器械得到改进。”他强调，重要的是要做好计划，特别是对肥胖患者和接受多种手术的患者，当需要在复杂手术中使用大量辐射时，要不断监测所提供的剂量，并主动跟进可能的皮肤反应。

此外，监测医务人员的剂量在许多国家仍是一项挑战。加强辐射防护工作包括，例如，使用实时电子剂量计、自动跟踪工作人员的视频系统，以及虚拟模拟器。

Vassileva说，提高医务人员对辐射防护的认识也将对减少工作人员和患者的照射量有很大帮助。与会者表示，在这方面，通过视频方式开展以实践为导向的

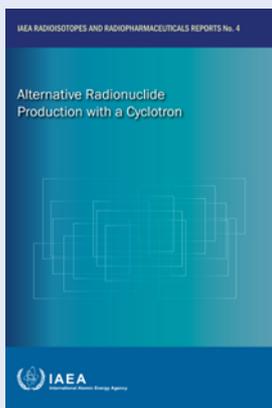
培训，例如原子能机构关于介入手术中辐射防护的新实践教程，十分有效。

## 原子能机构提高认识研究

为了弥补患者组织反应数据方面的现有差距，并对国际上的实践进行比较，原子能机构已启动一项关于透视引导下介入手术的患者剂量和组织反应的国际研究。

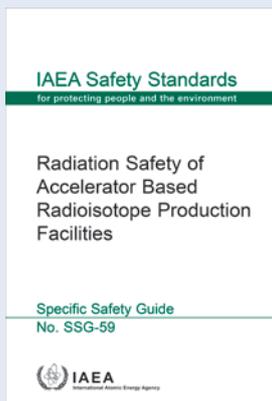
Vassileva说：“我们的目标是在全球范围内收集数据，这将有助于我们更新用于启动有皮肤反应风险的患者的随防程序的剂量值。”

文/ Margherita Gallucci 和 Natalia Ivanova



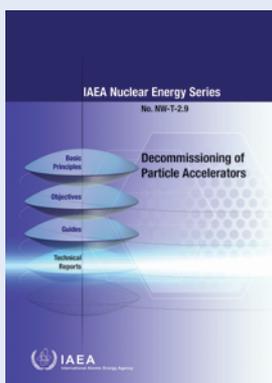
## 《利用回旋加速器替代放射性核素生产》

回旋加速器目前用于制备各种放射性核素，供单光子发射计算机断层成像（SPECT）和正电子发射断层成像（PET）使用。因此，原子能机构成员国强烈要求在利用回旋加速器生产的放射性同位素进行放射性药物生产方面提供支持。本出版物描述在不同能量范围内使用回旋加速器生产放射性核素的潜在路线，提供靶标开发方法，以及提供从靶标材料中分离放射性核素的化学细节。本出版物的读者包括科学家、有兴趣将这项技术付诸实践的操作员、已经在从事回旋加速器工作并希望提高现有机器效用的技术专家，以及正在本国建立放射性核素设施的管理人员。在相关领域攻读更高学位的学生也可能受益于本出版物。



## 《加速器放射性同位素生产装置的辐射安全》

放射性同位素在世界范围内用于医疗、工业、研究和学术应用。这些放射性同位素中有一部分是在粒子加速器中生产的，例如，运行直线加速器或回旋加速器以及制造和分销放射性药物的机构数量很大，而且在不断增加。当加速器在没有足够辐射安全措施的情况下运行时，使用粒子加速器生产放射性同位素会对工人、公众和环境造成严重的辐射危害。本安全导则为在涉及放射性同位素生产和使用的此类装置中实施辐射防护和安全措施提供实用导则。



## 《粒子加速器退役》

本出版物介绍从粒子加速器退役项目的实施中获得的经验教训。基于这些信息，并突出典型问题和关注点，本出版物为所有在这一过程中发挥作用的人提供实用信息。本出版物面向加速器设施的营运者，尤其是接近退役阶段或将设施维持在延期拆除状态的营运者，以及监管机构、废物管理者、政府决策者、地方当局、退役承包商和加速器设计者。预计本出版物中所述的经验教训将有助于新设施设计阶段的退役规划，从而在不影响结构特征和施工有效性的情况下最大限度地减少放射性废物的产生。



## 《紧凑型加速器中子源》

20世纪70年代，随着大功率质子加速器的建造，通过散裂获取中子，加速器生产中子开始。与此同时，利用电子加速器、离子束加速器、回旋加速器和低能直线加速器产生中子的低能驱动中子过程也相继出现。这种种类繁多的加速器中子源被称为“紧凑型加速器中子源”。本出版物概述当前可用或计划在不久的将来使用的各种“紧凑型加速器中子源”技术，描述中子的许多分析应用和其他应用。鉴于功率和成本的多样性，本出版物还旨在表明，除了在某些功能上取代国家中通量研究堆外，小型区域中子源可能变得可行，这可能最终扩大中子设施的使用范围。

欲了解更多信息或订购图书，请联系：

国际原子能机构市场和销售科

Marketing and Sales Unit

International Atomic Energy Agency

Vienna International Centre

PO Box 100, A-1400 Vienna, Austria

电子信箱：sales.publications@iaea.org



在线阅读本期和其他各期《国际原子能机构通报》：  
[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

更多了解国际原子能机构及其工作，请访问网址：  
[www.iaea.org](http://www.iaea.org)

或通过以下方式关注我们：

