DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.07.004

生命健康领域中粒子加速器技术与应用发展研究

任冬林[1]，张桓瑞[1]，范国滨[1,2*]，羊奕伟[2]，蔡寻[1]，刘樑[1]

（1. 西南科技大学经济管理学院，四川绵阳 621010；2. 中国工程物理研究院，四川绵阳 621022）

摘要：随着人口老龄化加剧、环境风险增加、疾病谱系变化，居民的重大慢性疾病发病率持续上升，亟需依托科技手段实现相关疾病的早筛早诊、精准治疗、有效干预；粒子加速器作为多学科交叉集成的重要装备，广泛嵌入放射诊断、放射治疗、放射性药物制备、辐照消毒等生命健康关键场景，开展功能拓展与系统集成价值突出。本文系统梳理了粒子加速器的技术特征与5类典型应用场景，总结了生命健康领域中粒子加速器的应用进展、前沿方向、发展策略以及技术、应用、政策维度面临的发展挑战，提出了诊断加速器的自主化与智能化、治疗加速器的国产替代、核药加速器的集成部署、以粒子加速器为核心的医疗产业平台等重点发展任务。可在构建闭环式政策协同机制、开展核心环节突破与系统集成、提升注册效率与医保适配性、培育协同创新生态并提升社会接受度等方面采取行动，精准推进生命健康领域中粒子加速器的技术攻关与应用拓展，增强我国高端医疗装备自主化发展能力。

关键词：粒子加速器；放射治疗；核素制备；硼中子俘获治疗；闪光治疗；诊疗一体化

中图分类号：TL50　　**文献标识码：**A

Development of Particle Accelerators in the Life and Health Fields

Ren Donglin[1], Zhang Huanrui[1], Fan Guobin[1,2*], Yang Yiwei[2], Cai Xun[1], Liu Liang[1]

(1. School of Economics and Management, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China; 2. Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621022, Sichuan, China)

Abstract: With the intensification of population aging, increasing environmental risks, and evolving disease spectra, the incidence of major chronic diseases in China continues to rise. Addressing this challenge requires the adoption of advanced technologies to enable early screening and diagnosis, precision treatment, and effective intervention. As an essential multidisciplinary and integrative technology, particle accelerators have become deeply embedded in key life and health scenarios, such as radiation diagnostics, radiotherapy, radiopharmaceutical production, and irradiation sterilization, demonstrating significant potentials for functional expansion and system integration. This study reviews the technical characteristics of particle accelerators and classifies five representative application scenarios in the life and health field. It summarizes the current progress, frontier trends, and strategic directions of accelerator applications, and analyzes the major challenges from the technological, application, and policy dimensions. Based on this, the study proposes several key development priorities, including the autonomous and intelligent development of diagnostic accelerators, domestic substitution of therapeutic accelerators, integrated deployment of nuclear medicine accelerators, and construction of medical platforms centered on accelerator technologies. To accelerate the translation and diffusion of accelerator technologies, the study further

收稿日期：2025-07-02；**修回日期：**2025-08-11

通讯作者：*范国滨，中国工程物理研究院研究员，中国工程院院士，研究方向为高能激光与工程管理；E-mail: fanguobin@caep.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“我国新型工业化高质量发展体系构建的关键要素与实现路径研究”(2024-XZ-71)，“先进加速器重大工程领域面向人民健康的技术应用路径与政策研究”(2023-JB-09)，“宁夏与周边省区产业创新和科技创新融合发展研究”(2025BEL01008)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

suggests actions such as establishing a closed-loop policy coordination mechanism, promoting breakthroughs in core components and system integration, enhancing regulatory registration efficiency and medical insurance adaptability, and fostering a collaborative innovation ecosystem with improved public acceptance. These efforts will advance the technological innovation and application expansion of particle accelerators in the life and health sector, and enhance China's independent innovation capacity in high-end medical equipment.

Keywords: particle accelerator; radiotherapy; radionuclide production; boron neutron capture therapy (BNCT); FLASH radiotherapy; integrated diagnosis and treatment

一、前言

居民生命健康事关国家经济社会可持续发展，是公共政策、科技创新、产业战略协同推进的重要领域。近年来，随着人口老龄化加剧、环境风险增加、疾病谱系变化，居民的重大慢性疾病发病率持续上升，不利于公共健康体系安全，亟需依托科技手段实现相关疾病的早筛早诊、精准治疗、有效干预。粒子加速器作为多学科交叉集成的重要装备，在放射诊断、放射治疗（放疗）、放射性药物（放药）制备、辐照消毒等核心环节获得广泛应用[1]；尤其是在肿瘤治疗领域，粒子加速器的质子与重离子放疗具备靶向性强、组织保护性好等优势，对高质量医疗服务构成直接支撑。硼中子俘获治疗（BNCT）、闪光（FLASH）放疗等新兴技术的应用依赖高性能粒子加速器，为难治性疾病提供新的治疗路径[2]。

粒子加速器是带电粒子加速器的简称，广泛应用于科研、医疗等多个领域，基本原理是利用电磁场对质子、电子、离子等带电粒子施加作用力并使之获得高动能。当前，粒子加速器呈现小型化、多用途的发展趋势，对诸多高科技的发展支撑作用不断增强[3]；研究前沿集中在高亮度、紧凑化、新原理等技术方向，应用前沿则聚焦生命健康、集成电路、清洁能源等重点领域。随着技术集成度的提升，粒子加速器在生命健康领域中的重要价值凸显，成为医工学科交叉的重要趋势之一、衡量医疗装备自主可控能力的重要标志。生命健康领域中粒子加速器的研究与应用呈现多维度突破态势，核心价值体现在肿瘤治疗、生物医学成像、同位素制备等方向，如重离子加速器可实现对深层肿瘤的精准杀伤并减少对周围健康组织的损伤，同步辐射光源为生物大分子结构解析提供了“超级显微镜”并确立了抗病毒药物研发的基础条件，粒子加速器广泛用于医疗用放射性同位素生产。也要注意到，粒子加速器技术自主化与产业链协同不足、临床转化与标准体系建设滞后、中小型化与成本控制问题突出，导致我国生命健康领域中粒子加速器的关键技术攻关、产业化发展路径等仍待深化研究[4,5]。

本文围绕粒子加速器在生命健康领域中的多维应用，辨识基本特征与应用场景，梳理国内外的应用进展与发展策略，阐明我国在本领域的发展挑战、重点方向、保障策略，为先进医疗装备高质量发展、“健康中国”战略实施等提供基础参考。

二、生命健康领域中粒子加速器的技术特征与应用场景

（一）粒子加速器的技术特征

粒子加速器作为特种电磁装置，通过电磁场将微观带电粒子限制在特定的区域（多是真空区域）里并进行加速，使带电粒子达到更高能量；通常由粒子源、真空加速室、束流输运系统、导引聚焦系统4个基本部分构成，还设有各种辅助和控制装置。根据应用需要，可在粒子加速器的后端配备各种专用装置。

在生命健康领域，按照加速粒子能量和类型可将粒子加速器分为低能电子加速器、高能电子加速器、低能质子加速器、高能质子／重离子加速器4种。其中，低能电子加速器产生十万电子伏特能量级别的电子束，打靶生成X射线开展放射诊断成像；高能电子加速器产生兆电子伏特能量级别的电子束，用于肿瘤放疗、医用同位素生产、辐照消毒；低能质子加速器产生兆电子伏特能量级别的质子束，用于生产诊断用同位素；高能质子／重离子加速器产生百兆电子伏特能量级别的质子或重离子束，用于开展质子／重离子放疗、医用同位素生产[6]。

粒子加速器融合了多学科研究成果，相应关键技术涉及加速电场、磁场约束聚焦、真空、束流测控、应用技术等[7]。加速电场是粒子加速器的动力核心，决定着粒子的能量上限。当粒子获得加速后，

磁场约束聚焦成为控制高速粒子轨迹的关键。真空是粒子加速器稳定运行的必要条件，为粒子加速器性能提升筑牢基础。束流测控是粒子加速器的“神经中枢”，确保粒子稳定运行，为科学实验提供可靠数据支持[8]。应用技术是粒子加速器从实验室到工程应用的的转换环节，如科研、医疗、工业、农业等的应用对应着不同的粒子加速器应用技术。

（二）典型应用场景

按照加速粒子的种类与能量水平，不同的粒子加速器在医疗场景中各有侧重应用。① 低能电子加速器主要应用于放射成像（如X射线摄影、计算机断层扫描（CT）），是临床诊断中常见的影像手段。② 中高能电子加速器可用于肿瘤放疗、医疗辐照消毒、医用放射性核素生产，具有广泛的治疗与材料处理功能。③ 质子加速器在能量较低时可用于生产 ^{18}F、^{11}C 等诊断性核素药物，在高能量状态下则广泛服务于质子治疗与放射性治疗核素制备。④ 重离子加速器主要用于高精度肿瘤治疗、BNCT 中子源驱动系统，在组织选择性、治疗深度控制方面优势显著。

1. 粒子加速器开展放射诊断

X射线是最早用于医学诊断、也是当前医疗诊断中常用的放射技术，以穿透人体组织的方式获取骨骼和某些软组织的影像[9]，包括X光片、CT成像等[10]。当前，临床放射成像所需的核心射线源是X射线管装置（又称球管，属于最简单的粒子加速器[11]），内部有发射电子的阴极，管内高电压将电子加速到十万电子伏能量级别然后撞击到阳极的金属靶上产生X射线[12]。

2. 粒子加速器开展放疗

放疗是利用高能射线（如X射线、γ射线、电子、质子、重离子）精准破坏肿瘤细胞的脱氧核糖核酸（DNA）进而治疗肿瘤的方法。临床放疗中使用的射线绝大多数需要通过粒子加速器直接产生，95%的加速器是兆电子伏特能量级别的医用直线加速器（LINAC）[13]；将电子加速到数个兆电子伏特到十几个兆电子伏特的能量，直接电子照射或者轰击金属靶产生X射线照射患者病灶，起到杀灭肿瘤组织的作用。X射线放疗已是成熟的肿瘤治疗方式，在放疗中处于核心地位，相关的机理、临床、器械研究较为充分。

在常用的LINAC以外，可提升放疗精准性和有效性的新型质子/重离子放疗开始投入临床应用（见图1），作为利用高能质子/重离子束精准照射肿瘤的放疗技术，优势在于质子/重离子束具有独特的能量分布特性，即在人体组织中质子/重离子束的能量可逐渐累积，达到一定深度后迅速释放而形成一个尖锐的能量峰值（“布拉格峰”现象）[14]。“布拉格峰”使质子/重离子放疗可在目标区域内形成高剂量区，且在峰值之后能量快速衰减，几乎没有残余辐射，在实现足够肿瘤治疗剂量的同时显著降低对肿瘤周围健康组织的辐射损伤[15,16]。

BNCT是利用中子和硼药物联合作用的放疗模式，通过在肿瘤细胞内发生的 ^{10}B(n,α)^{7}Li 原子核反应杀死肿瘤细胞，属于原子级别的二元靶向治疗方法[17]，在治疗局部复发肿瘤方面优势突出，能够更好地保护正常器官，应用前景良好[18]。传统BNCT所需的中子由核反应堆产生，经济性和便利性不佳，因而国际上开始研发基于粒子加速器的BNCT装置。BNCT装置使用加速器产生的带电粒子（主要是质子）轰击转换靶而产生中子束流，继而照射病灶进行BNCT治疗，是紧凑且经济的放疗装置[19]。

3. 粒子加速器制备医用同位素

放药是含有放射性同位素、能在人体内参与代谢或定位的特殊药物，在医学领域主要用于诊断（如影像成像）、治疗（如靶向放疗）。放药的核心特点是利用放射性同位素释放的射线（如γ射线、β射线）与人体组织相互作用，达到疾病精准检测或治疗的目的。诊断用放药通过放射性同位素或其标记的化合物在人体内的特异性分布，再利用单光子发射计算机断层成像（SPECT）、正电子发射断层成像（PET）等成像设备捕捉射线，进而显示器官结构或功能状态。治疗用放药利用放射性同位素衰变

图1　武汉医用重离子加速器（同步加速器系统）

释放的β射线或α射线近距离杀伤病变细胞，对周围的健康组织损伤较小[20]。

全球共有100多种放射性同位素用于医学领域，其中30余种用于疾病的诊断和治疗。主要采用反应堆辐照、粒子加速器辐照、高放废液提取、发生器制备等方式获取医用同位素。诊断用正电子同位素主要通过回旋加速器中加速的质子、α粒子轰击靶材料制备，随着商用回旋加速器能量的提升（见图2），更多种类的放药处于研发过程中。放药的另一主要用途是靶向放疗[21,22]。这类治疗用同位素传统上主要由反应堆生产，导致产量低、工艺复杂、价格昂贵，而粒子加速器制备方法可以克服这些不足。利用强流高能加速器产生的电子、质子、重离子轰击特定靶件可产生对应的医用同位素，这种方式具有医用价值高、装置紧凑、同位素纯度高、提取工艺简单等优点，成为国际上新兴的治疗用同位素制备方式。

4. 粒子加速器灭菌消毒

高能电子束辐照消毒是20世纪50年代发展起来的一种新型灭菌工艺，相对于传统的高温加热法、环氧乙烷气体灭菌法具有冷灭菌、无污染等优势。高能电子束辐照在医疗卫生用品中的消毒应用，主要是以低于10 MeV的电子束对中药材、医疗器械、一次性医疗卫生用品进行灭菌消毒。基本原理是高能电子加速器产生的高能电子束辐照消毒产品，通过高能电子束激发电子的直接作用，将生成的—H自由基、—OH自由基作用于微生物的蛋白质、酶、核酸、DNA，使微生物的功能、代谢、结构发生变化，以将微生物灭活并达到消毒灭菌的目的[23]。

5. 粒子加速器支撑生命科学研究

在直接用于医疗临床外，基于粒子加速器的科研装置在生命科学研究方面也发挥着关键作用。早期通过X射线衍射技术发现了DNA双螺旋结构（将生命科学研究带入了DNA时代），其中的X射线就是通过粒子加速器得到的。当前，粒子加速器驱动的各类分析仪器（小到扫描电子显微镜、大到大型光源设施），为生命科学研究提供了更为精密的观测手段（见图3）。粒子加速器驱动的大型同步辐射光源、散裂中子源等，在生命科学中的应用范围较大，涉及结构分子生物学、微生物学、药物学、细胞生物学、生物医学等。粒子加速器驱动的大型科学装置为生命科学提供了多样的实验方法和研究手段，成为生命科学的重要研究平台之一[24~26]。

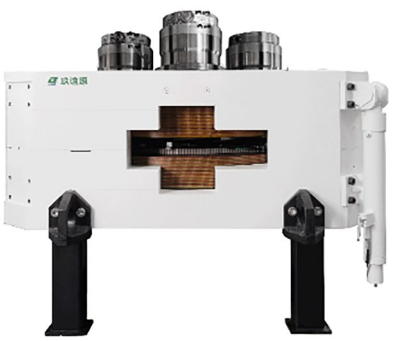

图2　国产20 MeV医用回旋加速器

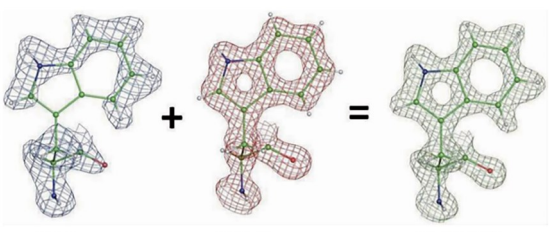

图3　X射线衍射联合精修得到的生物分析图谱

三、生命健康领域中粒子加速器发展现状

（一）应用进展

粒子加速器作为先进制造与现代医学深度交叉的核心装备，在生命健康领域中的应用已有近百年的历史，相关技术路径持续演进、产业规模不断壮大。在世界范围内，粒子加速器医学应用体系覆盖了放射诊断、放疗、核药制备、医疗辐照等关键环节，成为精准医疗和先进治疗方面不可或缺的支撑平台。整体上，发达国家起步早、投入多、标准完善，构建了“临床牵引–技术驱动–医保协同”的完备生态；我国起步较晚，但近年来政策支持直接、技术进步迅速，呈现“全面追赶、部分赶超”的发展态势。

在放射诊断方面，影像装备朝着智能化、多模态方向演进。X射线影像作为发展最早的粒子加速器医学应用，目前仍是全球范围内影像诊断的主力方式。随着X射线球管、探测器、成像算法的演进，现代CT、数字X光、平板C臂等设备广泛进入医院端和移动端场景。截至2024年年底，我国人均CT设备拥有量约为35台/百万人，CT设备布局

快速向中西部地区以及基层的医疗机构延伸。具备人工智能（AI）图像识别、智能伪影校正、低剂量脑血管成像等功能的新型诊断粒子加速器快速普及，部分国产品牌的国际市场突破显现出国产化技术的外溢潜力。同时，磁共振成像（MRI）与PET结合形成的PET-CT、PET-MRI等多模态影像装置成为高端精准筛查应用场景的新支点，为放疗前的精准靶区勾画提供诊断基础。

在放疗方面，从直线加速器逐步发展为包括质子/重离子加速器在内的多样化模式。放疗是最具代表性的粒子加速器临床应用，当前国际医用放疗市场规模超过100亿美元，预计2030年质子/重离子加速器的放疗市场占比将接近20%。LINAC适用于多种实体肿瘤的精准治疗，仍是当前的国际主流；2024年，我国LINAC保有量为3105台，人均配置量仅为发达国家水平的50%。先进放疗技术加速发展，质子治疗依赖回旋加速器或同步加速器提供高能粒子束，具备“布拉格峰”精准定位特性；重离子治疗可在高生物效应剂量比条件下用于放疗耐受性较强的难治性肿瘤。我国建设了上海市质子重离子医院、武汉协和医院重离子医学中心、中国科学院近代物理研究所三大运行中心，在苏州、济南、深圳等地布局了10多个在建项目，初步形成“多点布局–集中转化”的发展格局[27]。同时，国内依托反应堆或加速器中子源逐步实现BNCT装备的国产化，2024年共有18个BNCT项目纳入实施或预建名单[28]。

在医用同位素生产方面，从正电子核素向治疗性同位素拓展。粒子加速器成为生产短寿命正电子核素（如^{18}F、^{11}C、^{68}Ga）的核心装备之一，为PET影像提供关键原料。全球运营过程中的回旋加速器超过1200台，其中约70%用于^{18}F-脱氧葡萄糖的商业化生产。2021年起，我国积极推动“核药中心+质控平台+PET/CT终端”一体化建设，核药生产基地分布于30个省份，部分大型城市的核素供应能力超过100例/日。^{225}Ac、^{177}Lu、^{64}Cu等治疗核素具有良好的靶向放射特性，引发了核药临床研究热潮，但大部分治疗核素依赖进口或反应堆中转提取，产业链前端环节较为薄弱。一些国家开始探索通过电子直线加速器、靶向材料设计、分离纯化系统开展^{99}Mo、^{67}Cu等治疗核素的高效率、低废化生产[29]；苏州、成都等地引入相关装置开展产业化实验，加快制药级粒子加速器装备的国产化突破。

在粒子加速器医疗消毒方面，发达国家将高能电子束辐照技术广泛运用于医疗卫生用品的消毒，60%以上的医疗卫生用品采用辐照法灭菌和消毒。国内的医疗卫生用品消毒灭菌主要采用传统的化学消毒法、高压蒸汽灭菌法，而高能电子束辐照技术未能获得广泛运用[30]。

（二）前沿方向

生命健康领域中粒子加速器的发展前沿集中在粒子加速器性能提升、应用端性能扩展等方面。

发展粒子加速器主要关注经济性、小型化、高亮度3个方面。降低粒子加速器的成本能够普惠更多较低收入患者，可采用新技术、国产化等手段，降低X射线球管、放疗质子加速器、放药生产用回旋加速器的成本。为了消除使用场地的限制，粒子加速器小型化成为趋势，如更紧凑的单室质子放疗设备[31]、基于激光尾场加速的桌面加速器、小型放药生产加速器等（见图4）。更高的性能也是粒子加速器发展的前沿目标，如更准确的能量控制提升放疗的精准度、更高的束流强度提升辐照的时效性、基于超强超快超稳定束流开展超高剂量率放疗等[32]。

生命健康应用的精细化、多学科、智能化是发展趋势。在医学诊断方面，更高精度、多种成像方式联合、AI提升分析速度及精度等成为基础研究和临床应用的热点。在放疗方面，精准放疗成为临床前沿，精密图像引导、AI联合的放疗计划与自适应技术等配合运用，能够更加精准地规划和控制治疗剂量，提高治疗效果。多学科交叉联合在放疗领域

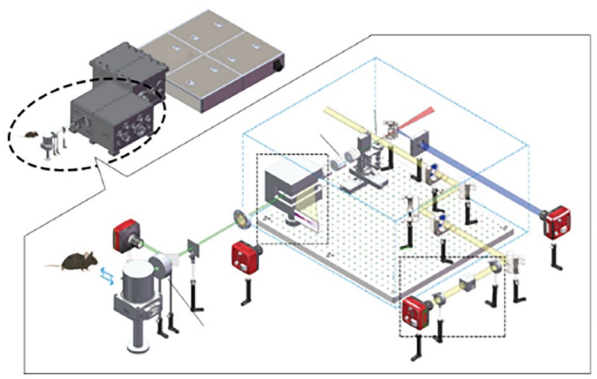

图4 清华大学开发的紧凑型超高能电子束（50~300 MeV）放疗原型机

展现出良好发展前景，“放疗+化疗+免疫”联合治疗方法体现出独特的肿瘤疗效，生物学与化学、临床医学、物理学的联合研究在FLASH放疗、粒子治疗等方面展具有突出的潜力。

FLASH放疗被视为放射肿瘤学中最具前景的技术方向之一，依托粒子加速器产生超高剂量率的（通常>40 Gy/s）辐射场对肿瘤进行瞬时照射，可在保持肿瘤控制率的同时降低对肿瘤周围正常组织的毒副作用。国内外都在开展基于质子和电子加速器的FLASH放疗临床试验，我国的兆电子伏特能量级别X射线FLASH放疗临床试验也在筹备中。当然，FLASH放疗的临床应用还需解决诸多难题，如寻找最优治疗参数、开发适用临床的治疗设备与技术、揭示FLASH效应的科学机理等。

（三）发展策略

随着粒子加速器在放疗、医用同位素制备、医学影像等生命健康场景中应用的不断拓展，各国将粒子加速器纳入国家科技战略规划和高端医疗装备体系，形成了系统化的发展政策布局。

在总体发展战略层面，美国实施“癌症登月计划”、美国国立卫生研究院（NIH）精准医学计划等，将粒子加速器技术纳入国家癌症应对系统工程；欧盟推动“欧洲粒子治疗网络平台”建设，形成跨国质子治疗协作网络；日本实施“质子/BNCT国家战略”，加强粒子加速器相关治疗体系建设；韩国、新加坡、印度、俄罗斯等国则结合域内需求设定粒子加速器发展路径。我国发布《“健康中国2030”规划纲要》、“十四五”医疗装备专项等，提出构建国产粒子加速器技术体系与临床应用生态的发展目标。

在科研计划与资金机制方面，美国、欧盟、日本等国家和地区分别通过NIH、欧洲投资银行、中央财政等投入渠道，支持粒子加速器的核心设备及技术研发；俄罗斯、印度、韩国等将粒子加速器相关发展计划纳入政府科研拨款体系或国际原子能机构合作框架；我国依托国家重点研发计划、地方财政与专项资金，推进BNCT、质子治疗示范中心等重点任务。

在重点应用方向上，国际上聚焦FLASH放疗、BNCT系统、PET/医用同位素产业链建设，新加坡推动AI智能影像与同步平台建设；我国将质子／重离子放疗、BNCT系统、PET核素产业链、“放疗+核药+影像”集成平台等明确为发展方向。

在临床转化与应用机制方面，美国采用美国食品药品管理局的突破性器械审批、欧洲统一认证机制、政府采购模式等，推动粒子加速器相关设备落地应用；日本、韩国采用医保纳入、财政贴息、公私合营等方式，提高粒子加速器的应用转化效率；我国逐步建立绿色注册通道、医保支付机制、采购补贴政策，积极探索地方产业园区支撑体系。

在核心技术布局方面，美国、欧洲重点突破FLASH加速器和笔形束扫描系统，日本发展紧凑型BNCT装置，俄罗斯构建强束流同步加速器系统；我国围绕粒子加速器控制系统、电源系统、靶材制造、治疗计划系统（TPS）、医用加速器设备等开展国产替代攻关。

四、生命健康领域中粒子加速器面临的发展挑战

（一）技术挑战

我国粒子加速器的科学和技术发展，与国际领先水平差距并不大。然而在生命健康领域中粒子加速器方面，产业化经验缺乏，关键工程技术尚存在不小的差距。粒子源、磁控管、速调管、高压电源等生命健康领域中粒子加速器的关键部件，国内产品的稳定性、寿命、性能等均有所滞后。此外，不同使用场景的配套技术也不够完善：在放射诊断方面，国产图像分析软件及算法与国外产品尚有一定差距，辐射探测器从材料到特性都与国外产品存在不小差距；在放疗方面，智能化和精细化的TPS居于核心位置，但功能和质量有待提高，配套的剂量学测量设备，在精度、稳定性、易用性等方面与国外产品也有较大差距；在放药生产方面，国内尚处于起步阶段，在提纯分离、药物合成、靶点开发等方面还需要提升技术水平。

（二）应用挑战

生命健康领域中粒子加速器面临着应用场景层面的诸多挑战。在成本方面，建造和维护粒子加速器涉及高额投入，对医疗机构、科研机构、相关企业等带来沉重负担，不利于粒子加速器扩大应用范围，导致许多潜在的生命健康相关研究和治疗难以

开展。在市场方面，国外企业在生命健康领域中粒子加速器的设备和应用上长期保持垄断地位，实际上形成了很高的市场准入门槛；相关粒子加速器应用事关生命健康，面临着极高的性能和法规要求，因而国内市场上对国产设备的接受度不高，导致国产设备推广使用难度大，不易积累足够的准入数据和品牌声誉，不利于自主产业构建和良性循环。社会公众“谈核色变”的心理也构成粒子加速器在生命健康领域中应用的挑战，国内核科普水平不高、居民对粒子加速器放射源较为排斥，导致相关的治疗、辐照、科研装置落地困难。

（三）政策挑战

我国初步构建了推动生命健康领域中粒子加速器应用的政策体系，然而在实践层面仍存在结构性挑战，不利于从科研成果向临床服务的高效转化。生命健康领域中粒子加速器相关政策条块分割、监管主体多元，而科技、医疗、工业、医保等管理部门缺乏统筹，导致“研发–注册–准入–支付–应用”链条断点频现，政策协同效率亟待提升。现有的审批制度并不适配粒子治疗、BNCT 等新型装备，临床准入流程复杂、时效性差，影响技术迭代与产品落地节奏。医保支付机制滞后，尚未建立动态评估与快速准入通道，不利于生命健康领域中粒子加速器新技术的患者可及性。相关的行业标准、临床评价体系、数据互认机制等尚不健全，不利于生命健康领域中粒子加速器设备的推广，也制约国内产品的规范化、标准化和市场竞争力。社会公众认知基础薄弱，“谈核色变”的心理广泛存在，生命健康领域中粒子加速器项目的落地过程常伴随政策风险与舆论阻力，影响产业发展速度与社会接受度。后续，需通过制度集成、协同治理、流程优化、社会沟通等共同发力，构建高效、规范、包容的政策支撑体系，保障生命健康领域中粒子加速器技术的快速发展与应用拓展。

五、生命健康领域中粒子加速器技术与应用的发展重点

（一）诊断加速器的自主化与智能化

医学影像是生命健康领域中粒子加速器最早开展的工程化应用，而国产 CT 等高端放射诊断设备在结构设计、系统性能、核心部件等方面仍依赖外资厂商，球管、探测器阵列、图像重建软件等主要模块的国产替代进展也有限。推进诊断加速器自主可控，在突破底层硬件瓶颈的基础上，强化系统集成与智能算法协同，构建高性能国产成像平台。加快球管国产化替代、数字探测器升级，提升图像清晰度和系统稳定性。基于深度学习、图神经网络等信息技术，发展智能成像与 AI 辅助诊断能力，支持低剂量、高分辨率成像和伪影消除。推动 CT、PET、SPECT 等模态融合，支持从结构成像向功能成像、分子影像延伸。面向基层医疗机构、应急医学、车载诊疗需求，发展便携化、模块化、低成本的诊断系统，扩大基层场景中粒子加速器的应用空间。建设“软件+硬件+算法”一体化的诊断加速器产业集群，提升影像平台的自主创新能力与系统适配性，为精准诊断体系建设提供技术支撑。

（二）治疗加速器的国产替代

粒子加速器在肿瘤治疗中的关键作用不断提升，成为建设高质量放疗体系的核心支撑。世界高端放疗装备市场由少数国际品牌主导，相关产品价格高昂且治疗标准体系较为封闭。国产粒子加速器放疗系统在可及性、适应性、拓展性方面仍存在突出短板，需从三方面同步推进：开展治疗设备的国产替代与规模化制造，形成自主可控的技术路径；加快布局前沿治疗手段，突出质子、重离子、BNCT、FLASH 等方向，自主构建系统级解决方案；强化多学科交叉协同机制，推动物理、工程、医学、生物等领域的联合攻关。在 FLASH 放疗方向，国内在装置开发、动物实验、剂量机制方面已有先发优势，具备全球领先的转化条件；以国家级专项为牵引，推动构建“设备–剂量验证–临床适应证–注册转化”的完整链条，加速开展临床转化。针对 TPS、图像引导系统、质量保障体系等附属模块，推进国产集成方案研发，打破系统生态依赖进口产品的局面。建设多中心协作平台，推动治疗指南本土化、注册路径标准化、跨科室协同常态化，构建粒子加速器放疗标准体系。

（三）核药加速器的集成部署

粒子加速器应用于医用同位素制备是实现精准医学闭环的关键环节。相较诊断与治疗端，核药领

域面临“应用需求快速增长–技术平台供应弱–流通机制待完善”的结构性矛盾。在医用同位素的制备过程中，粒子加速器加速质子、电子、重离子轰击靶材产生放射性核素，随后经分离纯化、化学标记、剂量调配等工艺流程制成具有特异性作用的诊断或治疗性药物。可见，粒子加速器仅承担第一阶段“核素生成”任务，起到核药加速器作用，后续仍需依赖专门的标记与药物制备体系来完成最终成药环节。为此，推动医用同位素产业链高质量发展，需要统筹放射性核素产能优化、靶材系统集成、标记技术标准化、药物注册与监管衔接等方面。

在诊断性核药方面，加快小型医用回旋加速器的国产化与应用部署，提升区域医院的核素自供能力。在治疗型核药方面，鉴于重点核素品种依赖进口、价格昂贵，亟待推动用于治疗或诊疗一体型核药的靶材设计、放射性标记、成药性等研究。结合国外积极推动粒子加速器制备医用同位素新工艺突破的发展趋势，自主研发新一代α/β发射核素的高效制备技术，加快填补市场空白[33]。

在技术路径方面，开展包括智能化、高通量靶材制造，远程控制系统，标准化质控流程等关键环节在内的集成攻关。在机制路径上，构建国家级“核药+加速器”研发平台，推动PET核药产业链延伸、注册通道优化、应用监管协同，形成覆盖研发、生产、运输、临床的全链条体系。重点推动“影像–药物–靶点”三位一体诊疗平台建设，作为未来核药加速器高质量发展的核心支点。

（四）以粒子加速器为核心的医疗产业平台

随着粒子加速器在生命健康领域中的持续渗透，相应的研发、生产、转化、应用涉及单位众多、链条复杂，具有“高科技+跨领域+强耦合”特征，对产业组织模式、政策支持体系等提出新要求。构建以粒子加速器为核心的医疗产业平台体系，推动相关技术落地转化并形成高质量供给能力。围绕“诊断–治疗–放药”全链条，建设涵盖上游制造、中游集成、下游应用等环节的产业集群，形成生命健康领域中粒子加速器的重大布局。可在有基础的地区（如上海市、江苏省、广东省、四川省）设立国家级医疗粒子加速器创新中心，汇聚高校、科研院所、企业、临床机构开展协同攻关与应用示范。健全技术成果转化与准入机制，贯通“技术研发–标准制定–临床验证–医保纳入”全流程。设立公共检测平台、剂量验证平台、注册试验中心等基础设施，提升粒子加速器医疗装备的产业化能力。建立“政产学研医”多元参与的长效机制，按照任务牵引、应用导向的方式，建设具有自主知识产权和国际市场竞争力的粒子加速器医疗装备产业生态。

六、生命健康领域中粒子加速器发展建议

（一）强化战略统筹与跨部门协调，构建闭环式政策协同机制

应对条块分割、链条断裂的政策体系现状，建议从体制机制层面推动顶层统筹。考虑在国家层面设立医用粒子加速器发展协调机制，由科技、卫生健康、药品监督、医疗保障、工业和信息化等管理部门参与，统筹制定发展规划、设备注册路径、应用准则。适时发布粒子加速器医疗应用专项行动计划，明确研发方向、资源配置方式、阶段性考核机制，构建涵盖“研发–注册–准入–支付–推广”的闭环式政策体系。逐步破解现有“多部门管理、无部门主抓”的行业发展困境，提升政策供给的系统性与衔接性，实现从行政分治到平台协同的转变。

（二）聚焦技术短板与工程转化瓶颈，开展核心环节突破与系统集成

应对工程化能力不足、设备性能差异显著的技术挑战，可围绕放疗、放药、诊断三大系统中的核心技术短板，系统性提升工程成熟度与国产替代能力。聚焦粒子束控制、高频电源、靶材系统、同步磁体、超导部件等技术节点，设立专项研发计划；在TPS、质控仪器、图像引导等配套模块方面系统化开展国产替代工作，提升整体可用性和用户友好度。针对有技术但无产品、能研发但难转化的问题，鼓励优势企业与医院联合建立临床验证平台和应用示范项目，加快从技术可行性转向临床实用性的发展进程。

（三）优化制度供给机制，提升注册效率与医保适配性

应对制度未适配、审批路径滞后带来的应用推广障碍，关键在于提升技术与制度之间的适配速度

及执行效率。建议设立医用粒子加速器快速审评绿色通道，将FLASH、BNCT等新型治疗装备纳入真实世界数据评估与创新医疗器械特别审批机制，合理缩短注册周期，同时提高审核透明度。在医保支付方面，建议设立医保目录动态更新机制，优先支持国产放疗方案与核药组合，开展医保准入试点。建设医用粒子加速器示范中心，集成注册评价、医保支持、数据积累、模式复制等功能，作为政策试点平台，增强制度对技术演进的适应性。

（四）培育多学科协同创新生态，提升社会认知与应用接受度

应对“认知基础薄弱、社会误解严重”的非技术性挑战，重在构建多元参与、开放融合的创新生态。建议组建粒子加速器医疗技术协同创新联盟，联合物理学、临床肿瘤学、核医学、影像科学、信息技术等学科力量，形成跨学科联合实验平台与人才培养机制。在产业层面，着力推动企业、临床机构、科研院所建立“研发–平台–场景”联动机制，激发终端应用维度的牵引式创新能力。在社会层面，积极开展核科普行动与传播策略设计，增强社会公众对“粒子加速器≠核污染”的科学理解。通过“专业共识+社会沟通”改变社会公众“谈核色变”的心理，科学化解粒子加速器项目落地的舆论阻力。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 2, 2025; **Revised date:** August 11, 2025

Corresponding author: Fan Guobin is a research fellow from Chinese Academy of Engineering Physics, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include high energy laser, engineering management. E-mail: fanguobin@caep.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Key Elements and Implementation Pathways for Building a High-Quality Development System of China’s New-Type Industrialization” (2024-XZ-71), “Technological Application Pathways and Policy Research for Major Advanced Accelerator Projects Oriented Toward Public Health” (2023-JB-09), “Research on the Industrial and Technological Innovation and Integrated Development of Ningxia and Neighboring Provinces” (2025BEL01008)

参考文献

[1] Schippers J M, Seidel M. Accelerators for medical application: What is so special [R]. Geneva: The 5th International Particle Accelerator Conference, 2014.

[2] 周永茂. 迈入新世纪的硼中子俘获疗法(BNCT) [J]. 中国工程科学, 2012, 14(8): 4–13.
Zhou Y M. The boron neutorn capture therapy (BNCT) status to go into the new era [J]. Strategic Study of CAE, 2012, 14(8): 4–13.

[3] Steerenberg R. Basics of accelerator physics and technology [R]. Geneva: CERN Accelerator School, 2021.

[4] 焦毅. 粒子加速器驱动的同步辐射光源: 现状与展望 [J]. 科技导报, 2025, 43(5): 37–44.
Jiao Y. Synchrotron radiation sources driven by particle accelerators: Current status and prospects [J]. Science & Technology Review, 2020, 43(5): 37–44.

[5] 轻便型低成本激光驱动加速器将成为现实——令人振奋的实验结果有力支持了采用新型粒子加速器开发X射线源的计划 [J]. 科技导报, 2025, 43(4): 12–13.
Cho A. Lightweight and low-cost laser-driven accelerators will become a reality-exciting experimental results strongly support the plan to develop X-ray sources using new particle accelerators [J]. Science & Technology Review, 2020, 43(4): 12–13.

[6] Hamm R W. Review of industrial accelerators and their applications [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009.

[7] 王盛, 王洁, 李海鹏. 粒子加速器真空系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2023.
Wang S, Wang J, Li H P. Particle accelerator vacuum systems [M]. Beijing: Science Press, 2023.

[8] Schippers J M, Seidel M. Operational and design aspects of accelerators for medical applications [J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2015, 18(3): 034801.

[9] CT theory of operation [EB/OL]. [2025-06-11]. https://oncology-medicalphysics.com/ct-design-and-operation/.

[10] 天河 640 uCT 960+ [EB/OL]. [2025-06-11]. https://global.united-imaging.com/zh-cn/product-service/products/ct/uct-960.
Tianhe 640 uCT 960+ [EB/OL]. [2025-06-11]. https://global.united-imaging.com/zh-cn/product-service/products/ct/uct-960.

[11] X-ray tubes development—IOMP history of medical physics [EB/OL]. [2025-06-11]. http://mpijournal. org/pdf/2018-SI-01/MPI-2018-SI-01-p08.pdf.

[12] Tanabe E, Fineberg Y, Matsumoto H, et al. Medical applications of C-band accelerator technologies [R]. Vienna: European Physical Society Accelerator Group, 2000.

[13] Elekta infinity: The clinical freedom to do more for your patients [EB/OL]. [2025-06-11]. https://www. elekta. com/products/radiation-therapy/infinity/.

[14] 龙斌, 王颖, 于金明. 粒子放射治疗的进展 [J]. 检验医学与临床, 2025, 22(1): 1–6.
Long B, Wang Y, Yu J M. Advances in particle radiotherapy [J]. Laboratory Medicine and Clinic, 2025, 22(1): 1–6.

[15] 杨小龙, 陈惠贤, 陈继朋, 等. 医用质子重离子加速器应用现状及发展趋势 [J]. 中国医疗器械杂志, 2019, 43(1): 37–42.
Yang X L, Chen H X, Chen J P, et al. Application status and development trends of medical proton and heavy ion accelerators [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2019, 43(1): 37–42.

[16] 首台医用重离子加速器成功应用 [EB/OL]. (2021-08-16)[2025-06-11]. https://www.cas.cn/cm/202108/t20210816_4801968.shtml.

First medical heavy ion accelerator successfully applied [EB/OL]. (2021-08-16)[2025-06-11]. https://www.cas.cn/cm/202108/t20210816_4801968.shtml.

[17] Kiseleva V, Gordon K, Vishnyakova P, et al. Particle therapy: Clinical applications and biological effects [J]. Life, 2022, 12(12): 2071.

[18] 刘志凯, 程炜诗, 吴王锁, 等. 硼中子俘获疗法的原理及临床应用 [J]. 协和医学杂志, 2023, 14(4): 698–705.
Liu Z K, Cheng W S, Wu W S, et al. Principles and clinical applications of boron neutron capture therapy [J]. Medical Journal of Peking Union Medical College Hospital, 2023, 14(4): 698–705.

[19] 中硼医疗加速器BNCT治疗系统“极锋刀”通过注册检验 [EB/OL]. (2024-03-31)[2025-06-11]. https://www. neuboron. com/news/361.html.
Zhongboron Medical’s accelerator BNCT treatment system “NeuPEX” passes registration inspection [EB/OL]. (2024-03-31)[2025-06-11]. https://www.neuboron.com/news/361.html.

[20] Cuttone G. Applications of particle accelerators in medical physics [R]. Catania: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, 2013.

[21] Biscari, C, Falbo, L. Medical applications [R]. Geneva: CAS-CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics, 2014.

[22] 20 MeV医用回旋加速器: 玖源-20 [EB/OL]. [2025-06-11]. https://long-beam.com/shebei/31.html.
MeV medical cyclotron Jiuyuan-20 [EB/OL]. [2025-06-11]. https://long-beam.com/shebei/31.html.

[23] 我国首个电子束辐照处理医疗污水示范项目投产 [EB/OL]. (2020-11-25)[2025-06-11]. http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c16049016/content.html.
China’s first electron beam irradiation treatment demonstration project for medical wastewater commissioned [EB/OL]. (2020-11-25)[2025-06-11]. http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c16049016/content.html.

[24] 程贺, 张玮, 王芳卫, 等. 中国散裂中子源的多学科应用 [J]. 物理, 2019, 48(11): 701–707.
Cheng H, Zhang W, Wang F W, et al. Applications of the China spallation neutron source [J]. Physics, 2019, 48(11): 701–707.

[25] Nextbeam. Medical device sterilization. [EB/OL]. [2025-06-11]. https://nextbeam.com/medical-device/.

[26] 生物大分子晶体学光束线站 [EB/OL]. [2025-06-11]. https://ssrf.sari.ac.cn/dkxzz/tbfs/gsxz_gb/xzdl_tbfs/bl02u1/xzjs/.
Macromolecular crystallography beamline station [EB/OL]. [2025-06-11]. https://ssrf.sari.ac.cn/dkxzz/tbfs/gsxz_gb/xzdl_tbfs/bl02u1/xzjs/.

[27] 韩晶晶, 储祥蔷. 利用中子散射探索生命世界中的物理奥秘 [J]. 物理, 2019, 48(12): 780–789.
Han J J, Chu X Q. Using neutron scattering to explore the mysteries in biophysical sciences [J]. Physics, 2019, 48(12): 780–789.

[28] Gulliford S, Baker C. Particle therapy: Advantages, disadvantages, current status and challenges [EB/OL]. [2025-06-11]. https://www.uclh.nhs.uk/research.

[29] Silari M. Introduction to medical accelerators [R]. Geneva: European Organization for Nuclear Research, 2010.

[30] 邓桥, 陈昭斌. 高能电子束在医疗卫生用品消毒中的应用 [J]. 中国消毒学杂志, 2018, 35(12): 943–945.
Deng Q, Chen Z B. Application of high energy electron beam in disinfection of medical and health products [J]. Chinese Journal of Disinfection, 2018, 35(12): 943–945.

[31] Guo Z Y, Liu S, Zhou B, et al. Preclinical tumor control with a laser-accelerated high-energy electron radiotherapy prototype [J]. Nature Communications, 2025, 16: 1895.

[32] FLASH electron ray radiotherapy sytem [EB/OL]. [2025-06-11]. https://www. zojoflash. com/html/web/en/chanpinfuwu/enpingtaichanpin/1915690245997535234.html.

[33] 彭述明, 杨宇川, 杨夏, 等. 我国放射性药物创新体系发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 116–126.
Peng S M, Yang Y C, Yang X, et al. Development strategy for innovation system of radiopharmaceuticals in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 116–126.