

加速器在医学上的应用

鲁振龙

(中国科学院兰州分院)

摘要: 全世界加速器总数的约50%是医用加速器,全世界生产的所有放射性核素中80%以上用于医学。加速器生产多种放射性核素供临床诊断治疗和基础医学研究使用。加速器产生的带电粒子束可用于进行活化分析和核反应分析等,次级中子用于中子活化分析,为生物医学提供快速分析手段。加速器可用于对某些不宜进行高温或化学消毒的医疗器械、用具或药品的辐射消毒。加速器治疗肿瘤前景光明。本文将重点讨论上述几个成就突出的领域。

一、加速器用于放射性核素的生产

1. 核素在现代医学中的地位

核素及核射线在生物医学中的应用,极大地促进了现代医学的发展。

核素作为分析工具的优点在于灵敏度高

和探测的特异性好。突出成就表现在它用于测定体液或组织中含量极微的成分,如微量的维生素、药物、激素等。它还可以在损伤机体的情况下测定体内不易分离的成分。

核素作为示踪原子时的主要医学应用如下:区分内源物质和外源物质;显示物质在体内、细胞内或亚细胞结构中的分布和转移情况;研究和确定代谢转变和转变的具体速

理事会。杨立铭为理事长,孙祖训、沈文庆、杨福家为副理事长,姜承烈为秘书长,卢希庭、龙先灌、刘运祚、余友文、邱锡钧、张纯祥、杜祥琬、郑志豪、夏元复、颜一鸣为常务理事。陈钟麟为副秘书长。

会议期间还初步确定了学会明年的学术活动计划,计有5项国际会议,8项国内会议。具体如下表:

序号	会议名称	主办单位
1	核物理前沿问题国际讨论会	兰州大学
2	国际重离子物理及应用会议	近代物理所
3	国际高能重离子讲习班	北京大学、高能物理所
4	国际小加速器应用会议兼全国第二届离子束分析会议	复旦大学、原子核所

5	工业CT展讲会	原子核所
6	高能核物理小型讨论会	北京大学
7	全国核技术应用战略讨论会	武汉大学
8	穆斯堡尔数据处理学术讨论会	郑州大学、北京钢铁学院
9	第三次全国核靶会议	近代物理所
10	固体径迹探测器交流会	中日原子能科学研究院
11	全国中子计学术会	湖南省交通厅
12	第七次全国少体会	中山大学或武汉大学
13	原子核物理学教师培训班	防化指挥工程学院

度；研究和考察代谢的途径。

核素作为辐射源使用时的用途有两个。其一是利用射线杀伤细胞的性能，进行许多疾病特别是恶性肿瘤的放射治疗。其二是试制新的能源。原来用作宇宙飞行能源的放射性核素，早已用作心脏起搏器。把 ^{170}Tm 等核素用于携带式无电源X线机的射线源，把 ^{238}Pu 作为人工心脏的动力，这些开创研究都在进一步完善中。

2. 加速器生产放射性核素的优点

①加速器生产核素满足了现代医学发展的需要。在1975年以后的国际医学界里，带电脑的 γ 照相机已经普遍使用，正电子照相机也已用于医学研究。短半衰期和发射正电子的放射性核素的生产，就成了临床和诊断的迫切需要。只用反应堆生产核素已经不能胜任，回旋加速器和其它类型加速器生产核素就迅速时髦起来了。

②加速器可以生产短寿命和超短寿命的放射性核素。短寿命的放射性核素，是动态研究生理过程的快速工具，已开拓出生物医学研究的新领域。象 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 等许多有重大价值的短寿命核素，都是用加速器生产的。

③产物大多为无载体放射性核素，放射性比度高。这是因为加速器提供的带电粒子束轰击靶核时，生成的核素与靶核的原子序数不同，这就能够用化学分离的方法制成高放射比度的无载体核素。

④产物多数为缺中子的放射性核素。它们的衰变方式是通过 β^+ 电子发射或电子俘获进行，符合 γ 照相机和正电子照相机探测的需要。它们不发射 β^- 电子，所以病人所受的辐照剂量较小。

⑤基本上不存在放射性废物的处理问题。

⑥许多有重大医用价值的核素，只能用加速器生产。其中最常用的有 ^{67}Ga 、 ^{201}Tl 、 ^{111}In 、 ^{51}Fe 、 ^{123}I 、 ^{81}Kr 、 ^{57}Co 、 ^{68}Ga 、 ^{81}Rb 、 ^{123}Xe 和 ^{204}Bi 等。

⑦一些发射正电子的放射性核素，象 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{18}F 等，因为这些元素是人体组成中最基本的元素，用它们快速合成的多种化合物就可以用来研究脑、心肌、肝等多种脏器的病理、生理、生化和代谢过程，推动了疾病早期诊断和发病机制的研究进展。

3. 几项基本考虑

①加速器类型的选择。各种加速器中，用于放射性核素生产中最有效的是回旋加速器。加速器类型的最后选择，还要把使用的目的、经济条件、技术力量和现有设备等因素加以综合考虑及权衡利弊得失才能最终确定。

②生产条件的考虑。往往可以通过多种核反应，都能用加速器生产同一种核素。在生产某种核素之前，第一要选择适当的反应类型；第二要选择合适的轰击粒子和轰击能量，能量必须超过所选核反应的阈能；第三必须周密考虑产品的核纯度。

③通常的抉择。在大多数情况下，选用的轰击粒子是带正电粒子，象 p 、 d 、 ^3He 和 α 等。最常用的核反应有 (p, x_n) 、 $(^3\text{He}, x_n)$ 、 (α, x_n) 和散裂反应等，式中的 x 一般为1到5。另外 (r, n) 和 (r, p) 等反应有时也用于某些放射性核素的生产。

④对于加速器生产放射性核的不足之处，象单次产量较低和成本较高，也应考虑改进。

二、加速器用于活化分析

1. 活化分析

它包括活化和分析两个过程，先用核射线轰击各种元素然后对元素进行定性和定量的超微量分析。一般根据轰击粒子的种类和能量的不同，它分为快中子活化分析、热中子活化分析、带电粒子活化分析、 γ 光子活化分析四大类。

2. 加速器用于快中子活化分析

快中子活化分析所用的中子源主要有中子发生器和放射性核素中子源。前者就是一种最简单的加速器中子源,优点是体积小、产额高、投资少、操作简便、可控性好并且移动方便。后者所用的放射性核素许多都是由加速器生产的。因此,加速器广泛用于快中子活化分析,充分发挥了快速、可靠、简便和便宜的优点,在野外和工业现场分析中大显身手。不足之处是灵敏度不够高,这是因为截面和源强不很高。

3. 加速器用于热中子活化分析

加速器可以制做放射性核素热中子源,然后进行热中子活化分析。该法的优点是能同时进行多元素测定、对比氧重的元素灵敏度很高、无试剂污染、需用的样品量少并且是非破坏性分析。不足之处是对比氧轻的元素无能为力、对元素的化学状态不灵敏、设备和花费都较大。自然环境中和生物体组织及细胞内各种元素含量的测定和研究,是该法成就最大的领域。

4. 加速器用于带电粒子活化分析

加速器是带电粒子束的主要来源。带电粒子活化分析仅适用于分析样品表面或研究薄层样品;低能带电粒子特别适合于分析轻元素,灵敏度可高达 ppm 或 ppb 量级。该法的优点是一次辐照即可对样品进行多元素同时分析,并且是非破坏性的、不会形成放射性废物。由于低能加速器、高分辨探测器和相关计算机的联合使用,该法已进入了复兴中的黄金时代。

5. 加速器用于 γ 光子活化分析

当电子加速器的高能电子能量大于 20 MeV 时,高能电子打在重金属靶上通过韧致辐射就得到高能 γ 光子,然后进行活化分析。该法的优点是对各种元素都有较高的灵敏度。

6. 加速器活化分析的具体医学应用

活化分析是药物、病理、生化、生理、

环境监测和法医鉴定等领域中的重要研究工具,主要用于各种微量元素的测定。

①医药和食品工业。医药工业中用 PIXE 测定金属酶中 Fe、Mo、Co 和 Zn 等的含量从而确定酶的纯度。食品工业中测定产品的特定元素,用全自动化系统进行谷物的蛋白氮测定。

②病理研究。研究微量元素与某些疾病发生发展的关系,研究地方病和流行病的病因调查对比。对于癌症、心血管疾病、肝硬化、龋齿和某些地方病的研究都取得了明显进展。

③用于临床诊断。在血和尿等的常规化验中,活化分析能同时分析样品的多元素,优点是准确快速。用全身活化分析可以直接快速地测定体内元素,并且受检者的辐照剂量不会大于常规放射性核素诊断。

④用于法医学检查。它可用于鉴定头发、药物、纤维等罪证样品的研究,以便进行来源确认。它可用于检查和测定人体组织、排泄物、血清及食品中的毒物。它可用于研究确定火药离开武器的转移。它为案件侦破提供可靠的判据。

⑤用于环境监测研究。它对添加的示踪剂的扩散与分布进行追踪研究,从而对污染的程度及范围加以确定。它对大气、土壤、水、肉类、蔬菜等环境样品,进行所含微量元素水平的监测。它对人群中摄取和排出的微量元素的数量及在一些主要组织中的含量进行监测研究。它还用于主要污染源与大气成分的研究、人类活动对全球大气影响的研究、污染变化的历史重现研究。

⑥用于食品分析研究。它用于检测食品和农产品中是否有毒性元素和含量。它用于营养学中各种必需元素的供应和消耗研究。在用农药处理过的谷物、蔬菜、水果中, Hg、Br、As、Ni 等有害元素的微量分析已得到广泛应用。

三、加速器用于辐射消毒

1. 辐射消毒的特点

在辐射消毒中,利用高能射线把医药制品中污染的微生物进行抑制或杀死。它的优点在于能够先包装后消毒和保证消毒质量,实现全过程的自动化。它有宽得多的适用范围,特别适用于对不耐热或化学性质活泼的物品进行辐射消毒。它的不足之处是需要的设备和一次性投资较高,需要研究所用的合适剂量。

2. 加速器用于辐射消毒

①加速器用于制作辐照装置。用于辐射消毒的高能射线中, γ 射线、X射线和高能电子束是最常用的。加速器在强放射性核素源的研制中,起着巨大的作用。

②加速器本身直接用作辐照装置。在辐射消毒中,直接用作辐照源的多是电子加速器。由于电子束的穿透能力不大,在被照物中剂量分布很不均匀,在离表面一定深度处常出现最大剂量,所以在用于包装薄和体积小的物品的消毒时最为有利。另外用电子束进行辐照时,在很短时间就可达到所需剂量,包装材料的降解可以大大减小。电子加速器与 ^{60}Co 源相比,建筑投资费和运用费要分别降低6倍和2倍。我们特别指出,最近的趋势是使用能量为3MeV、75KW和150KW的加速器。这种情况得到大量的X射线,其穿透性上和 ^{60}Co 的 γ 射线几乎完全相同。利用这种X射线进行辐射消毒时,在消毒效果几乎相同的同时,还可以经济可靠。

3. 加速器辐射消毒的医学应用

在辐射消毒进行灭菌与消毒的应用领域中,已越来越走向成熟和完善。这些领域已十分广泛,主要包括医疗器械、橡皮制品、塑料制品(象塑料制容器、导管、针筒、假肢等)、纤维制品(象外科包扎用品、脱脂棉、纱布等),当然还包括中成药、激素、维生素和抗生素等许多医药制品。

四、加速器用于临床治疗

1. 临床治疗的理论依据

简单说来,加速器和放射性核素源产生的核辐射有强大的生物效应,核辐射粒子束对某些病灶主要是肿瘤的细胞起破坏或抑制生长的作用,从而在临床上达到治疗的目的。

核射线的生物效应就是生物机体接受了射线的能量传递后造成的生物学后果。目前的公认看法是机体吸收射线能量后,细胞结构内的原子和分子会发生电离或激发,导致分子键的断裂和蛋白质、核酸等高分子的直接破坏。射线对病灶细胞的破坏是个十分复杂的问题,与物理因素、生物学因素和照射条件都有关系。

2. 电子加速器的使用

比较几种医用电子加速器的使用情况可以看到,电子直线加速器具有一系列优点。它有高而可调的剂量率,运行噪声比较小,轻便可靠,并且它的电子束和X射线束都可以使用。它已经把电子感应加速器淘汰,现在又进而有取代 ^{60}Co 治疗机之势,已经成了电子加速器中用途最广的实用类型,并已系列化商品化生产。电子回旋加速器的优点在于,对电子能够进行多次加速,这就容易做到只用较小的高频功率就可以使电子达到较高的最终能量,在近年来的医学应用中已逐渐时髦起来。

3. 医用回旋加速器的使用

它的优点是结构紧凑合理、管理方便、功耗低并且占用房屋面积不大,目前已经成了国际现代化医疗中心必不可少的先进设备之一。它们多是等时性回旋加速器,提供的粒子束能量高并且流强大。

4. 加速器临床治疗癌症

①快中子治癌。多利用回旋加速器提供的质子束、氦束或 ^3He 束等,去轰击Be靶或Li靶就可以产生出快中子束。最常用的反应

是现已熟知的 ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$ 反应。适用于治疗癌症的中子束要满足两个要求。其一是在穿入组织10cm时, 剂量率能达到原来剂量率的一半。其二是在离靶100到125cm时, 剂量率可以达到10到20rad/min。另外轰击Be靶的氘束只有达到几十 μA 的流强, 才能产生足够治疗使用的强中子束。如果只用于治疗浅表肿瘤, 尽管小回旋加速器提供的中子束平均能量不高, 也已经可以满足要求了。但是, 用于治疗深部肿瘤时, 就只有使用能量大于30MeV的氘束, 也就是需要大的回旋加速器了。

②负 π 介子治癌和质子治癌。负 π 介子治癌装置中, 多采用质子同步加速器、高能质子直线加速器和高能电子直线加速器。该类装置中所用的 π 介子, 来自高能质子或电子与靶核的反应。质子治癌装置中, 多采用的加速器类型是直线加速器、同步回旋加速器和同步加速器, 提供的束流平均能量要求大于200MeV。我们将要看到, π 介子治癌和其它重离子治癌都有美好的前景, 是有其深刻原因的。

③重离子治癌的美好前景。迄今为止, 人类已经把加速器治疗肿瘤推进到使用重离子束的新阶段。医学界通常认为, 这些重离子包括质子、快中子、 π^- 介子和其它更重离子。重离子治癌有几个先天的优势。首先是带电重离子在穿入组织后的深度剂量分布曲线有个突出的特点, 那就是在末端存在一个骤增的峰, 通常称之为Bragg峰, π^- 介子的峰效应更加明显。其次是这些重离子(除质子外)与X射线和 γ 射线及电子束相比, 更加有利于消灭肿瘤的缺氧细胞。Bragg峰的存在,

使深部肿瘤区能够得到相对集中得多的剂量, 同时周围未癌变区的组织所受剂量甚少。再加上重离子的线能量传递高、对有氧和缺氧环境中的癌细胞都有较好的杀伤效果, 也就是氧增比小。上述几个优势, 使重离子治癌展现了美好的前景。重离子治癌装置中, 通常采用分离扇形重离子加速器和重离子直线加速器。我们深信, 随着更多专门设计的医用重离子加速器的建造和更多更重的离子束的提供使用, 人类最终攻克癌症堡垒的理想必将变得切实可信和不再那么遥远。

参考文献

1. E.A.Evans et al., Radiotracer Techniques and Applications(V.1~2)New York and Basel, Marcel Dekker, 1977
2. 赵惠扬等编, 核医学, 上海科学技术出版社, 上海, 1981
3. P.N.Goodwin et al., An Introduction to the Physics of Nuclear Medicine. Springfield, Thomas, 1977
4. F.A.Mettler et al., J.Nucl.Med.26 (1985)201
5. H.N.Wagner, J.Nucl.Med.26(1985)679
6. D.K.Lathrop et al., Appl.Phys.Lett.51 (1987)1554
7. N.N.Sardesai et al., J. Radioanal. Nucl. Chem.127(1988)227
8. B. Blanpain et al., Nucl. Instr. and Meth.B34(1988)459
9. N.S.Rajurkar et al., J. Radioanal. Nucl Chem. 127(1988)333
10. C. Janicki et al., Nucl. Instr. and Meth.B34(1988)483