

effect of proliferation and differentiation of rat osteoblasts in vitro[J]. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2009, 108(5): 707-713.

- [18] Dohan Ehrenfest DM, Doglioli P, de Peppo GM, et al. Choukroun's platelet-rich fibrin (PRF) stimulates in vitro proliferation and differentiation of human oral bone mesenchymal stem cell in a dose-dependent way[J]. Arch Oral Biol, 2010, 55(3): 185-194.
- [19] Lee EH, Kim JY, Kweon HY, et al. A combination graft of low-molecular-weight silk fibroin with Choukroun platelet-rich fibrin for rabbit calvarial defect [J]. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2010, 109(5): e33-38.
- [20] Anilkumar K, Geetha A, Umasudhakar, et al. Platelet-rich-fibrin: A novel root coverage approach [J]. J Indian Soc Periodontol, 2009, 13(1): 50-54.
- [21] Mazor Z, Horowitz RA, Del Corso M, et al. Sinus floor augmentation with simultaneous implant placement using Choukroun's platelet-rich fibrin as the sole grafting material: a radiologic and histologic study at 6 months [J]. J Periodontol, 2009, 80(12): 2056-2064.
- [22] Sclafani AP. Platelet-rich fibrin matrix for improvement of deep nasolabial folds [J]. J Cosmet Dermatol, 2010, 9(1): 66-71.

- [23] Simonpieri A, Del Corso M, Sammartino G, et al. The relevance of Choukroun's platelet-rich fibrin and metronidazole during complex maxillary rehabilitations using bone allograft. Part II: implant surgery, prosthodontics, and survival [J]. Implant Dent, 2009, 18(3): 220-229.
- [24] Gassling VL, Acil Y, Springer IN, et al. Platelet-rich plasma and platelet-rich fibrin in human cell culture [J]. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2009, 108(1): 48-55.
- [25] Gürbüz B, Pıkdöken L, Tunali M, et al. Scintigraphic evaluation of osteoblastic activity in extraction sockets treated with platelet-rich fibrin [J]. J Oral Maxillofac Surg, 2010, 68(5): 980-989.
- [26] Dohan Ehrenfest DM, Del Corso M, Diss A, et al. Three-dimensional architecture and cell composition of a Choukroun's platelet-rich fibrin clot and membrane [J]. J Periodontol, 2010, 81(4): 546-555.
- [27] Su CY, Kuo YP, Tseng YH, et al. In vitro release of growth factors from platelet-rich fibrin (PRF): a proposal to optimize the clinical applications of PRF [J]. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod, 2009, 108(1): 56-61.

(收稿日期: 2011-04-18 修回日期: 2011-05-15)

· 综 述 ·

## 核能应用中核辐射与核安全的探讨

王玉婵 综述, 严清波, 袁耿彪<sup>△</sup> 审校

(重庆医科大学附属第二医院核医学科 400010)

**关键词:** 核能; 核辐射; 核安全

doi: 10.3969/j.issn.1671-8348.2011.27.042

文献标识码: A

文章编号: 1671-8348(2011)27-2788-03

核能以环保、节能、高效等优势被多个国家采用。全球人口膨胀、城市化效应和经济快速发展对电能的需求越来越大,特别是经济增长迅速的亚洲地区,核能被广泛地应用于核电站以提供电力。但目前全球的核反应堆仍没有完全安全的设计方案<sup>[1]</sup>。日本地震、海啸引发的福岛核电站事故引起了人们对核能安全使用的担忧<sup>[2]</sup>。现将核能应用、核辐射与核安全的现状综述如下。

### 1 核材料(医用放射性核素)应用

**1.1 核材料** 核材料是指核工业及核科学研究中所专用的材料。包括核燃料及核工程材料(即非核燃料材料)。核燃料是指能产生裂变或聚变核反应并释放出巨大核能的物质。核燃料可分为裂变燃料和聚变燃料(或称热核燃料)两大类。裂变燃料主要指易裂变核素如铀-235(<sup>235</sup>U)、钚-239(<sup>239</sup>Pu)和铀-233(<sup>233</sup>U)等。此外,由于铀-238(<sup>238</sup>U)和钍-232(<sup>232</sup>Th)也可转换成易裂变核素,也称其为核燃料。聚变燃料包含氢的核素氘、氚化合物等。核工程材料是指反应堆及核燃料循环和核技术中用的各种特殊材料,如核反应堆结构、元件包壳、反应堆控

制、慢化剂、冷却剂、屏蔽材料等<sup>[3]</sup>,均是放射性核素,使用时必须注意防护。对Pu、<sup>233</sup>U、浓缩度大于20%的<sup>235</sup>U实行严格控制与管理。安全保障规程适用于燃料循环的全部环节,包括燃料制造、发电、燃料后处理、贮存和运输。

**1.2 医用放射性核素** 临床诊断和治疗使用的放射性核素均需通过加速器、反应堆、裂变产物中提取和放射性核素发生器淋洗获得,获得途径包括:(1)加速器通过加速质子、氘核、α粒子等带电粒子轰击各种靶核,引起不同核反应,生成多种放射性核素。该途径产生的放射性核素有:碳-11(<sup>11</sup>C)、氮-13(<sup>13</sup>N)、氧-15(<sup>15</sup>O)、氟-18(<sup>18</sup>F)、碘-123(<sup>123</sup>I)、铊-201(<sup>201</sup>Tl)、镓-67(<sup>67</sup>Ga)、铟-111(<sup>111</sup>In)等,目前正电子药物常常采用此种方式。(2)利用核反应堆强大的中子流轰击各种靶核,所生产的放射性核素有:锝-99m(<sup>99m</sup>Tc)、钼(<sup>99</sup>Mo)、锡-113(<sup>113</sup>Sn)、碘-125(<sup>125</sup>I)、碘-131(<sup>131</sup>I)、磷-32(<sup>32</sup>P)、碳-14(<sup>14</sup>C)、氚-3(<sup>3</sup>H)、锶-89(<sup>89</sup>Sr)、氙-133(<sup>133</sup>Xe)、铼-186(<sup>186</sup>Re)、钐-153(<sup>153</sup>Sm)等,常用于核素诊断和体外示踪技术;(3)核燃料辐照后产生400多种裂变产物,有实际提取价值和应用于临床的仅10余种,如

<sup>△</sup> 通讯作者, Tel: (023) 63693339; E-mail: yuan\_gb@126.com.

$^{99}\text{Mo}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{133}\text{Xe}$  等<sup>[4]</sup>。

**1.3 核能和医用放射性核素的应用** 1942 年美国芝加哥大学建成了世界上第 1 座自持式链式反应装置,从此开辟了核能利用的新纪元。核燃料引发的核裂变反应能够产生足够的热量,与煤炭、风能、太阳能、潮汐等相比,具有高效、节能、低碳、低污染、长期有效使用、安全的优势,利用核反应堆维持和控制核裂变链式反应,从而实现核能-热能转换的装置。1 kg 铀的发电量相当于煤 1 170 000 kg。从煤、油、气发电方式看,碳排放量分别是:1 000~1 200 g  $\text{CO}_2^{\text{eq}}$ /kwh、800~100 g  $\text{CO}_2^{\text{eq}}$ /kwh、500~600 g  $\text{CO}_2^{\text{eq}}$ /kwh,而水电、核能、风力均小于 20 g  $\text{CO}_2^{\text{eq}}$ /kwh,太阳能 40~60 g  $\text{CO}_2^{\text{eq}}$ /kwh。1 座核反应堆从开始使用到最后因为放射性废物被废弃,最少可以运行 100~150 年<sup>[5]</sup>。

放射性核素被广泛应用于医疗以解决肿瘤的诊断和治疗。由国际原子能机构(international atomic energy agency,IAEA)提供放射性核素及诊断技术、放射性核素治疗和放射性治疗,各国原子能机构旨在用于肿瘤的预防、早期诊断和治疗。

**1.4 核设施** 核设施是规模生产、加工或操作放射性物质和管理、监督及对各参加缔约国的约束性文件。易裂变材料的设施(包括其场地、建筑物和设备)。如铀富集设施,铀、钚加工与燃料生产、贮存及后处理设施,反应堆、核动力厂、放射性废物管理设施等<sup>[6]</sup>。核电站是目前设备组成和设计最为复杂的系统,不论如何设计和运行,均不可避免地要面临失败<sup>[5,7]</sup>。1979 年美国三哩岛核电站,因为简单的操作失误而引起反应堆堆芯融化,从而导致整个系统的瘫痪,此后 30 年,美国停止了核电站工程建设<sup>[8]</sup>。

核反应堆的核心为堆芯,核裂变会产生大量的热,热力学定律说明热能转换成电能的转换效率不可能是 100%。现代煤或油电站的效率可达 40%,而核电站的效率目前只有 33%。煤电站有 15%的余热从烟囱排出,45%余热从冷却水排出。但是核电站 67%的余热是从冷却水排入河水或海水中<sup>[9]</sup>。因此,核电站要求:(1)核电站要建立在河岸和海岸边,以便有大量的水用于带走热量,降低反应堆的温度。例如,1999 年法国 Blayais 核电站由于潮水导致 II 级核事故的发生;2011 年日本 Tōhoku 地震引发的海啸导致了福岛核事故的发生。(2)一旦有核事故发生的可能,常规情况下,只需 5 S 就可以关闭核反应堆。在反应堆运行和关机状态下,均需要辅助动力系统驱动冷却装置,如,电力或者柴油发电。福岛核事故正是由于电力中断和柴油发电机的破坏,而导致严重的核事故。一旦发生核事故,就会产生堆芯的融化,温度升高,引起爆炸,导致核燃料不可控制的泄露,使土壤、农作物、蔬菜、空气、水源等都受到不同程度的污染,严重导致人类辐射损伤、遗传疾病和肿瘤等发生。

**1.5 医用放射性核素** 在医院里,通常由核医学科和放射性同位素科制备放射性药物用于放射性核素的诊断,全球约 4 000 万台成像设备,放射性药物 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 用在 80%的核素扫描中,但近来放射性药物的供应严重不足和中断,导致世界各地核医学中心的患者服务受到延误。截止 2008 年 12 月 31 日,全球共有在运行反应堆 438 个,在建反应堆 44 个,共有 54 个反应堆在生产核素,其中仅有 6 个反应堆生产 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 及其他医用核素(加拿大、比利时、荷兰、法国、南非和澳大利亚)加工则由 4 个工业设施进行。生产 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的反应堆数量有限并且已全

部老化,已到了进行维护性关闭的时候。2009 年 5 月 15 日加拿大乔克里弗的国家通用研究反应堆发现<sup>[10]</sup>,少量的重水泄漏而停堆,它是世界上最大的医疗、癌症和心脏病诊断检测用放射性核素的生产商,生产了世界上 40%的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 75%的钴-60( $^{60}\text{Co}$ );2008 年 8 月,由于冷却系统问题,荷兰佩滕(Petten)高通量反应堆维护后被迫推迟了重启时间,该反应堆提供了欧洲 60%和全球 30%用于诊断、治疗和镇痛的医用放射源。两座核反应堆占据了全球 80%以上的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 市场,而中国原子能研究院 101 堆停堆,492 堆通量低,产量低;成都核动力院反应堆处于半停堆状态,中国工程物理研究院的 20 MW 新堆和中国原子能研究院 60 MW 新堆至今未能运行。

虽然目前全球和国内均有理想的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 生产供应计划,但由于 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的半衰期很短,无法储存;世界各国对核武器的敏感,使得高能铀受到了高度的关注,高通量堆的使用受到限制;另外,需求的不断增加,供应受限,导致价格不断上涨。

## 2 核辐射

核辐射,或通常称之为放射性,是原子核从一种结构或一种能量状态转变为另一种结构或另一种能量状态过程中所释放出来的微观粒子流,引起物质的电离或激发,又称为电离辐射<sup>[11]</sup>。正是电离辐射的特性,才使放射性核素在核电站、工业、医疗等方面广泛应用。核辐射是一把“双刃剑”,在对人类做出巨大贡献的同时也带来很多的灾难。

**2.1 核事故引发的核辐射** 核电站产生的放射性液体在排放前经过衰变,稀释到无害水平才允许排放到湖泊、河流或海洋中。核电站产生的放射性气体排放前经过衰变或用活性炭吸附,达到允许标准后才由高空烟囱排至大气。核电站正常的气体排出物或废水的放射性对公众和环境的影响较轻微。但是一旦发生核事故。就会引起辐射效应,例如福岛核事故,福岛核电站建于 1970 年,是一座具有 40 年历史的核电站,核电站的设计并没有考虑到地震会产生 7 m 高的海啸,后者导致该核电站电力中断和柴油发动机的损坏<sup>[12-13]</sup>,电力中断后冷却系统无法将冷却水泵入原子炉中,导致热能以蒸汽的形式释放,引起一系列的爆炸和辐射,福岛 20 万人口需要撤离。在核事故的污染区,释放到空气、水源、土壤、农作物中的放射性核素通过对 DNA 分子的作用使细胞受到损伤,导致各种健康危害。危害的性质和程度因辐射的物理学特性和机体的生物学背景而有所不同。它可以是发生在受照者本人的躯体性效应,也可以是因生殖细胞受到照射引起的受照者后裔的遗传性效应。可以是超过一定水平照射后必然出现的必然性效应,也可以是受照水平虽低也不能完全避免的随机性效应<sup>[14]</sup>。

常用希沃特或希弗(Sievert, Sv)作为国际单位,用来衡量辐射对生物组织的伤害。通常使用毫希、微希(mSv、 $\mu\text{Sv}$ )表示。国际辐射防护委员会(international commission on radiological protection, ICRP)推荐非职业性人员的年有效剂量为 1 mSv<sup>[15]</sup>,职业性人员照射剂量限值为年平均 20 mSv<sup>[16]</sup>。对于日常工作中不常接触辐射的人来说,每年正常的天然辐射(主要是空气中的氡辐射)为 1 000~2 000  $\mu\text{Sv}$ (也就是 1~2 mSv)。当短时辐射物质摄入量低于 100 mSv 时,对人体没有危害;100~500 mSv 时,没有疾病感觉,但血液白细胞数减少;1 000~2 000 mSv 时,辐射会导致轻微的射线疾病,如疲劳、呕吐、食欲减退、暂时性脱发、红细胞减少等;2 000~4 000 mSv 时,人的骨髓和骨密度遭到破坏,红细胞和白细胞数量极度减

少,有内出血、呕吐等症状;大于 4 000 mSv 时,将会直接导致死亡<sup>[17]</sup>。

**2.2 医用辐射效应** 在放射性诊断和放射性治疗过程中,辐射源、放射性药物等被广泛应用,说明这些核辐射也有积极的医疗价值和作用。常用的<sup>99m</sup>Tc、<sup>131</sup>I、<sup>89</sup>Sr、<sup>18</sup>F 衰变时,可以释放各种放射性射线和带电粒子<sup>[16]</sup>,如: $\alpha$ 、 $\gamma$  射线,正电子等,主要用于肿瘤、冠状动脉粥样硬化性心脏病、神经性疾病等早期诊断、甲状腺肿瘤、转移性骨肿瘤等的治疗,目前<sup>125</sup>I 用于多种实体瘤的治疗。其他还有外放射设备,如:<sup>60</sup>Co、直线加速器等,利用 X、 $\gamma$  射线对多种肿瘤进行辅助放疗。挽救了部分患者的生命,延长了部分患者的生存期,提高了患者的生活质量。

**2.3 核安全** 欧洲原子能机构、国际原子能机构、联合国粮农组织、经济合作与发展组织核能机构、联合国环境规划署、WHO 等多个国际性机构共同制定了国际原子能机构安全标准的保护人类与环境的基本安全准则<sup>[18]</sup>。《国际原子能机构规约》要求原子能机构促进国际合作,通过交流经验和提高控制危险、预防事故、应对紧急情况和减缓任何有害后果的能力来促进和加强全球安全。国际安全相关公约、行为准则和安全标准为开展国际合作提供了便利<sup>[19]</sup>。

相关公约和准则包括《及早通报核事故公约》、《核事故或辐射紧急情况援助公约》、《核安全公约》和《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》都对缔约国规定了具体义务<sup>[20]</sup>。安全标准还对《放射源安全和保安行为准则》和《研究堆安全行为准则》的适用提供支持。安全标准包括《安全基本法则》、《安全要求》和《安全导则》,这些安全标准由原子能机构和共同倡议组织适用于其各自的业务,并被推荐给各国和国家当局以及其他国际组织在其各自的活动中采用。国际公约和原子能机构安全标准为有效保护人类和环境免于辐射危险奠定了坚实而全面的基础。

核能的研发和利用与人类的存在息息相关,因此,人类更加依赖于核能,但是核能研发利用的每一个环节都可能导致核事故、核损害的发生。因此,在开发利用核能的同时,也有公众反对核能的开发利用。但毋庸置疑的是,人类必将越来越多地依赖核能,因此,核的安全性越来越受到重视。

总之,随着全球资源需求的增长,特别是发展中国家和亚洲新兴经济发展地区,对核能的需求日益增加。全球核能以每年 10% 的速度发展,而亚洲地区特别是中国核能的发展受到世界的瞩目。但通过日本福岛核事故,全球应该更加谨慎地对待核能的发展,低通量堆、III、IV 核电站技术以及更多涉及人类健康的核素应用将对人类的发展起到更大的推动作用。

#### 参考文献:

[1] Jacobson, Mark Z, Delucchi, Mark A. Providing all Global Energy with Wind, Water, and Solar Power, Part I: Technologies, Energy Resources, Quantities and Areas of Infrastructure, and Materials[J]. Energy Policy, 2011, 39 (3): 1154-1169.

[2] Sovacool BK. Second Thoughts About Nuclear Power [M]. Singapore: National University of Singapore, 2011: 1-9.

[3] 陈竹舟, 叶常青. 如何应对核与辐射恐怖[M]. 北京: 科学

出版社, 2006: 59.

- [4] 北京大学医学部. 核医学网络课程[DB/OL]. (2008) [2010-03-19]. [http://www.med126.com/education/Nuclear-Medicine/Web/Kechengneirong/1\\_2.htm](http://www.med126.com/education/Nuclear-Medicine/Web/Kechengneirong/1_2.htm)
- [5] Jan Willem Storm van Leeuwen. Nuclear power-the energy balance[EB/OL]. (2008) [2011-03-21]. <http://www.stormsmith.nl/report20071013/partG.pdf>.
- [6] 中华人民共和国国家原子能机构. 什么是核设施[EB/OL]. (2009-11-10) [2010-03-21]. <http://www.caea.gov.cn/n16/n1253/n1448/92310.html>.
- [7] Francois Diaz Maurin. Fukushima; Consequences of Systemic Problems in Nuclear Plant Design [J]. Econ Polit Wkly, 2011, 46(13): 10-12.
- [8] Stephanie Cooke. In Mortal Hands: A Cautionary History of the Nuclear Age[M]. New York: Bloomsbury USA, 2009: 280.
- [9] 中华人民共和国国家原子能机构. 核废物与核污染[EB/OL]. (2005-12-22) [2011-03-20]. <http://www.caea.gov.cn/n16/n1253/n1418/46684.html>.
- [10] 邓启民, 李茂良, 程作用, 等. 医用核素生产堆(MIPR)生产<sup>99</sup>Mo 的应用前景[J]. 核科学与工程, 2006, 26(2): 3.
- [11] 匡安仁, 李林. 核医学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 9.
- [12] Jason Clenfield. Japan Nuclear Disaster Caps Decades of Faked Reports, Accidents[EB/OL]. (2011-03-17) [2011-03-29]. <http://www.bloomberg.com/news/2011-03-17/japan-s-nuclear-disaster-caps-decades-of-faked-safety-reports-accidents.html>.
- [13] Gusterson H. The lessons of Fukushima -Bulletin of the Atomic Scientists [EB/OL]. (2011-04-18) [2011-04-29]. <http://www.thebulletin.org/web-edition/columnists/hugh-gusterson/the-lessons-of-fukushima>.
- [14] 邵建章. 核辐射对机体的损伤作用及其防护技术[J]. 消防技术与产品信息, 2004(7): 42-47.
- [15] International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection[M]. New York: Pergamon Press, 1971: 1-25.
- [16] International commission on radiological protection. Protection against Ionizing Radiation from External Sources Used in Medicine[M]. New York: Pergamon Press, 1979: 1-17.
- [17] 中华人民共和国卫生部. 核与辐射事故医学应急问与答[EB/OL]. (2011-03-17) [2011-04-30]. <http://www.moh.gov.cn/publicfiles//business/htmlfiles/wsb/index>
- [18] 陈绍亮. 核医学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2009: 20.
- [19] International Atomic Energy Agency. Nuclear Security Guidelines[R]. Vienna: IAEA, 2011.
- [20] International Atomic Energy Agency. No. SF-1 Foundational Safety Principles[S]. Vienna: IAEA, 2007: 2.