

氚的辐射危害与防护管理

Radiation hazard and protection management of tritium

Liu Qiang, Chai Zhifang

引用本文:

刘强, 柴之芳. 氚的辐射危害与防护管理[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2023, 47(0): 1-4. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202309026-00361

Liu Qiang, Chai Zhifang. Radiation hazard and protection management of tritium[J]. *International Journal of Radiation Medicine and Nuclear Medicine*, 2023, 47(0): 1-4. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202309026-00361

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202309026-00361>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅谈放射性核素治疗病房的建设与管理

Building and management of the radionuclide treatment ward

国际放射医学核医学杂志. 2019, 43(5): 411-415 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2019.05.005>

天津市35家非医疗机构放射卫生管理的现状分析

Radiation hygiene management status of 35 non-medical institutions in Tianjin

国际放射医学核医学杂志. 2021, 45(5): 300-306 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202104003-00062>

新型冠状病毒肺炎疫情防控期核医学诊疗工作的防护建议

Protection and management proposals on nuclear medicine diagnosis and treatment during the COVID-19 epidemic period

国际放射医学核医学杂志. 2020, 44(10): 622-626 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202002014-00079>

2019年天津市放射诊疗工作场所辐射防护检测结果分析

Analysis of radiation protection testing results in the radiation diagnosis and treatment workplaces in Tianjin in 2019

国际放射医学核医学杂志. 2021, 45(3): 170-175 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202004020-00035>

核医学工作人员和受检者辐射防护现状

The status of radiation protection and control strategy for nuclear medicine workers and patients

国际放射医学核医学杂志. 2017, 41(4): 298-302 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2017.04.012>

辐射防护基因治疗现状与展望

Advancement in radioprotective gene therapy

国际放射医学核医学杂志. 2017, 41(3): 205-208, 219 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2017.03.009>

·述评·

氚的辐射危害与防护管理

刘强¹ 柴之芳²

¹ 中国医学科学院放射医学研究所, 天津市放射医学与分子核医学重点实验室, 天津 300192; ² 苏州大学苏州医学院放射医学与防护学院, 放射医学与辐射防护国家重点实验室, 苏州 215123

通信作者: 柴之芳, Email: zfchai@suda.edu.cn

【摘要】 氚既是核聚变反应的主要原料, 也是核裂变反应堆的中子俘获反应产物, 加强氚对生态环境的影响、对其毒理学及辐射防护体系的研究已成为当务之急。本期专刊重点介绍了氚的环境迁移与监测、氚的辐射危害与评价、氚的辐射防护与管理, 并提出了今后深入开展氚研究的主要方向。

【关键词】 核聚变; 氚; 辐射危害; 辐射防护

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202309026-00361](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202309026-00361)

Radiation hazard and protection management of tritium

Liu Qiang¹, Chai Zhifang²

¹Tianjin Key Laboratory of Radiation Medicine and Molecular Nuclear Medicine, Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Sciences, Tianjin 300192, China; ²State Key Laboratory of Radiation Medicine and Protection, School of Radiation Medicine and Protection, Suzhou Medicine College of Soochow University, Suzhou 215123, China

Corresponding author: Chai Zhifang, Email: zfchai@suda.edu.cn

【Abstract】 Tritium is the main raw material for nuclear fusion reaction, strengthening the research on the impact of tritium on the environment, the harm to living organisms and the radiation protection system has become an urgent issue. This paper mainly introduces the hazard and evaluation of tritium, tritium protection and management, and proposes the main issues of further tritium research.

【Key words】 Nuclear fusion; Tritium; Radiation hazard; Radiation protection

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202309026-00361](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202309026-00361)

核能是通过核衰变、核裂变、核聚变之一的方式释放能量。核裂变在能源发展中已做出了应有的贡献, 但存在着资源利用率低、剩余的废液中含有大量高浓度的放射性核素, 成为危害生物圈的潜在因素; 核聚变能源已成为人类未来最理想的能源, 氚是核聚变反应堆中的重要燃料, 在核能系统的研究及应用中氚占有重要地位。因此, 随着核能的发展, 氚生物效应的研究与核聚变反应堆的开发这一重大课题有着密切关系, 也是当今其能在放射医学、核医学及辐射防护研究领域占有重要位置的主要原因。

1 核聚变运转中放射性核素氚的重要性

核能是 21 世纪世界经济发展中最具有决定力

的五大技术领域之一, 也是一种最高效、最经济、最清洁的新能源。在 21 世纪, 各国政府都将核能资源的利用作为国家可持续发展战略的重要内容。从 1967 年 6 月 17 日的氢弹爆炸试验至 2020 年 12 月 4 日的新一代“人造太阳”实现首次放电, 我国经历了 50 余年的核能发展, 从艰难起步到积极快速崛起, 期间结出了丰硕的成果, 取得了辉煌成就。中国自主研发的高温气冷堆核电站, 将成为世界上首个拥有商业化高温气冷堆核电站的国家^[1]。但是, 在我国核能发展实施“热堆-快堆-聚变堆”三步走的战略中, 核聚变能源的开发对我国未来能源与国民经济的可持续发展将具有重大战略意义, 这必将助力我国政府提出的“碳达峰”和“碳中和”目标的实现。科学家们发现, 实现可控核聚变所需的

反应原料是氘 (deuterium) 和氚 (tritium) [2], 只要将氢的同位素氘与氚的原子核无限接近, 使其发生聚变反应, 就能释放出巨大能量, 可见氘在核聚变运转中极为重要。随着民用核聚变能源技术的发展, 中国必须加大氘在化学、物理学、工艺学以及工程技术等方面的研究[3-7], 同时必须抓住机遇加大氘对生命体的危害评价及氘辐射防护系列的研究。本期氘专刊较为系统地介绍了氘的监测、辐射危害与评价、医学救治与防护等领域研究的科研成果。

此外, 核裂变反应堆也能通过中子俘获反应生成氘, 尤其是重水堆的产氘率相当高。切尔诺贝利核电站和福岛核电站的灾难性事故都有大量的氘释放到环境中, 并且难以排除。

2 国内氘研究的进展

本期氘专刊介绍了从核裂变的运转和核聚变燃料氘释放后, 其在大气圈、水圈、土壤圈、生物圈的转移及监测, 这是当前辐射防护领域的一个开拓性的重要课题。研究者从氘的来源与转移, 从空气、水、土壤、食品、生物样品以及环境中氘水平的监测结果进行了总结和阐述。

自20世纪80年代以来, 国内周湘艳氘研究团队[8]从辐射防护的角度研究核聚变燃料氘低剂量照射下, 以多项生物终点进行了相对生物效能 (relative biological effectiveness, RBE) 的研究。这些研究结果突显了中国在该研究领域系统性的长期研究特点, 如选择以指数递减规律的剂量率和恒定剂量率氘 β 粒子照射、以 ^{60}Co γ 射线作为参考射线、以卵母细胞显性致死突变率、精细胞显性致死突变率、精原细胞显性骨骼突变率、精原细胞存活率、胎肝嗜多染红细胞微核细胞率、黑色素细胞分化异常率和淋巴细胞染色体畸变率等指标作为生物终点, 计算了两种氘照射方式下的RBE值: 在累积剂量为0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 Gy/10 d的条件下, 指数递减和恒定剂量氘照射下获得相应氘的RBE值为2.9~4.2。由此提出: 从辐射防护目的出发, 建议将低传能线密度 (LET) 辐射对生物群的RBE值设定为3.0~3.5。如果估计暴露于氘 β 粒子或其他低LET辐射或接近导出考虑参考水平 (DCRL) 下, 则可能需要较高RBE值进行评估, 以更为准确地估计辐射的危险度更为合适。该项研究曾被2021年公布的国际放射防护委员会 (International Commission on

Radiological Protection, ICRP) 148出版物[9]、联合国原子辐射效应科学委员会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) 2016年报告[10]、加拿大[11]、英国[12]等重要学术组织报道和引用。

王冰等氘研究者[13-15]对低剂量氘致发育中的中枢神经系统的影响及其机理进行了系统性研究并取得了重要的研究成果。他们采用向孕鼠腹腔内单次注射氘水的方法来模拟事故时所导致的母体体内氘水污染, 对子代动物的生长发育、神经行为学、脑组织病理学、脑组织神经生物化学、初代培养大鼠大脑组织细胞电生理学和初代培养小鼠中脑细胞形态学与生物化学的变化等方面, 使用了总计56项生物学终点作为评价指标, 从多层次综合地探讨了低剂量氘子宫内照射对发育中的中枢神经系统的影响及其机理。该研究在世界上是第1次在同一系列实验系统中, 从分子、细胞、器官到整体; 从组织结构、神经生化、行为到学习记忆功能; 从动物的个体到细胞离体培养综合评价了低剂量氘 β 粒子射线连续照射对发育中的中枢神经系统的危险度。这些重要的研究成果为全面系统地评价氘辐射的危险度, 提供了最具有可信度和权威性的科学依据。在国内外中、英文杂志共发表30余篇文章, 并被ICRP和UNSCEAR等权威国际组织引用和报道[9-11]。

刘芬菊研究团队[16-17]多年来开展氘标记化合物的基础研究及临床相关指标的检测。他们将氘标记化合物广泛应用于医学、生物分子的代谢、生物体内的扩散和交换等领域, 并进行了深入探讨, 提供了药物在生物体内的物料平衡、测量生物吸收利用度、器官与组织分布, 计算排泄的速度与途径等重要数据与资料。该研究团队采用经典的放射性同位素标记方法, 研究生物大分子及临床药物的筛选, 观察放疗前后的效果及药代动力学改变。这些研究结果有利于更加全面、深入地了解氘标记化合物在放射医学及核医学等各个领域中的广泛应用; 探究氘在DNA分子、细胞、组织及体内的分布、合成及辐射生物学作用; 在国内, 为临床用药的筛选及疗效观察提供极为重要的理论依据。

崔凤梅氘研究团队[18]近20年来利用细胞、小鼠和斑马鱼等为研究对象, 围绕氘的毒性机制开展了系列研究、获得了丰厚的科研成果。该团队建立不同初始浓度和染毒时间的氘内污染小鼠动物模

型,观察了外周血白细胞和骨髓嗜多染红细胞微核、血生化和自由基的改变,发现了它们在急性氚内污染时的变化规律。检测了染毒小鼠基因组甲基化谱和DNA的变化规律;同时对染毒小鼠肝脏组织进行miRNA表达芯片检测,筛选并分析与氚暴露相关的关键miRNAs;接着建立人脐静脉内皮细胞(HUVEC)氚水急性染毒模型,探索了miR-34a参与氚水诱发的DNA损伤修复调控过程,并检测了氚水诱发的差异LncRNAs和mRNAs,聚焦在SQSTM1、CXCL8(IL-8)和ITPR1等几个关键基因的信号通路导致HUVEC细胞的毒性效应。成功建立HUVEC细胞氚水慢性染毒模型,证实长期氚水暴露可通过IL-8介导,诱发血管内皮细胞出现衰老、通透性下降和粘附性改变等,从而失去维持血管稳态的功能。为了全面评估氚水的生态毒性,建立了斑马鱼氚水染毒模型,在构建斑马鱼胚胎和成鱼数字化模型基础上,进行剂量和剂量率的详细估算;同时观察了氚水对斑马鱼生长发育的影响,并筛选和验证了参与心脏毒性的关键分子TnC/TPM4信号通路。在阐明氚水毒性机制的同时,还着手寻找物美价廉的氚促排和防护药物,制备了1种由黄芪提取物和茶叶提取物组成的组合物,可应用于氚水内污染促排和防护,从而获得了1项发明专利。

刘玉龙团队^[19-20]近年来对氚内污染病例的医学处理在国内做出了突出贡献。在本专刊中他们重点梳理了国内外几起涉氚事故所致氚内污染人员的临床医学处理资料,提出了氚内污染的救治要点,并介绍了近年来涉氚事故医学应急与管理方面的丰富经验。强调我国对于核与辐射突发事件拥有较为完善的管理制度与救援方案,在涉氚事故发生后,可以针对涉氚事故发生的特点,结合现有的法律法规相关规定,对涉氚事故实施三级医学应急救援体系、对受照人员开展医学管理及心理援助等,为今后对涉氚事故医学应急与管理起到建设性作用。

中核核电运行管理有限公司泰山第三核电厂王孔钊团队^[21]根据国家相关法律法规,主要参考了国外重水堆的法规和经验,并结合自身的管理特点,不断完善和优化氚内照射监测以及估算方法。从而使重水堆核电厂氚内照射剂量的监测管理工作持续得到改进,形成了一整套系统规范且行之有效的管理模式,为我国重水堆电厂集体剂量管理、人员非计划摄入氚的发现和处置,进而保障涉氚放射

工作人员的辐射安全,都发挥了决定性作用。

3 思考与展望

氚是核聚变反应的重要核素之一,而聚变能是核能发展中更为清洁和安全的能源形式。现有的氚科技水平已无法满足未来聚变堆开展大规模操作的应用需求,氚的科学技术研究面临新的机遇与挑战。我国已经向世界展现了核聚变研发中的中国力量,朝着核聚变发电的实施稳步前行。为满足我国核安全和核能可持续发展的重大需求,提高和加强氚科学技术研究,围绕氚的防护展开充分的讨论是迫切和必要。为此,今后随着核能的快速发展,围绕氚辐射危害评价和防护管理的前沿与热点研究,将为国家核聚变能大发展的战略进一步提供支持与决策十分重要。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 刘强负责文章的撰写与修改;柴之芳负责文章的审阅与修订

参 考 文 献

- [1] 张廷克,李闯榕,潘启龙.中国核能发展报告(2019)[M].北京:社会科学文献出版社,2019.
Zhang TK, Li MR, Pan QL. The report on the development of China's nuclear energy (2019)[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2019.
- [2] 彭述明,王和义.氚化学与工艺学[M].北京:国防工业出版社,2015.
Peng SM, Wang HY. Tritium chemistry and technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [3] 蒋国强,罗德礼,陆光达,等.氚和氚的工程技术[M].北京:国防工业出版社,2008.
Jiang GQ, Luo DL, Lu GD, et al. Tritium and industry techniques of tritium[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [4] 王佩璇,宋家树.材料中的氦及氚渗透[M].北京:国防工业出版社,2002.
Wang PX, Song JS. Helium in materials and the permeation of tritium[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [5] 列·阿·连斯基.氚的物理和化学[M].毛世奇,江祖荫,译.北京:原子能出版社,1991.
Lensky LA. Physics and chemistry of tritium[M]. Mao SQ, Jiang ZY, trans. Beijing: Atomic Energy Press, 1991.
- [6] 张伟,姚守忠.氚工艺[M].北京:原子能出版社,2012.
Zhang W, Yao SZ. Tritium process[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2012.

- [7] International Atomic Energy Agency. Modelling the environmental transport of tritium in the vicinity of long term atmospheric and sub-surface sources[R]. Vienna: IAEA, 2003.
- [8] 周湘艳, 董金婵, 周舜元, 等. 氚相对生物效应的实验研究及遗传危害的估计[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1988, 8(6): 369-374. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1988.06.101](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1988.06.101).
Zhou XY, Dong JC, Zhou SY, et al. Experimental study on genetic effect and RBE values of tritium[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1988, 8(6): 369-374. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1988.06.101](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.1988.06.101).
- [9] Higley K, Real A, Chambers D, et al. ICRP publication 148: radiation weighting for reference animals and plants[J]. *Ann ICRP*, 2021, 50(2): 9-133. DOI: [10.1177/0146645319896548](https://doi.org/10.1177/0146645319896548).
- [10] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2016 report. Report to the general assembly, scientific annexes A, B, C and D[R]. New York: United Nations, 2017: 345, 358-359.
- [11] Report of the Independent Advisory Group on Ionising Radiation. Review of risks from tritium[R]. Health Protection Agency, 2007.
- [12] Fairlie I. Tritium hazard report: pollution and radiation risk from Canadian nuclear facilities[R]. Greenpeace, 2007: 85.
- [13] 王冰, 吕慧敏, 刘玉龙, 等. 低剂量氚照射对仔鼠中枢神经系统的影响及其机理研究[J]. *辐射防护通讯*, 2019, 39(5): 2-18. DOI: [10.3969/j.issn.1004-6356.2019.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-6356.2019.05.002).
Wang B, Lyu HM, Liu YL, et al. Effects of low-dose tritium irradiation on the central nervous system of offspring rats and its mechanism[J]. *Radiat Prot Bull*, 2019, 39(5): 2-18. DOI: [10.3969/j.issn.1004-6356.2019.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-6356.2019.05.002).
- [14] 吕慧敏, 周湘艳, 董金婵, 等. 氚水通过不同创伤皮肤的吸收率[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1995, 15(6): 411-413.
Lyu HM, Zhou XY, Dong JC, et al. Absorption rate of tritium through different traumatic skins[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1995, 15(6): 411-413.
- [15] 王春燕, 刘玉龙. 氚水诱发染色体畸变的研究进展[J]. *辐射防护通讯*, 2019, 39(5): 36-41, 46. DOI: [10.3969/j.issn.1004-6356.2019.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-6356.2019.05.006).
Wang CY, Liu YL. Research progress on chromosome aberrations induced by tritiated water[J]. *Radiat Prot Bull*, 2019, 39(5): 36-41, 46. DOI: [10.3969/j.issn.1004-6356.2019.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-6356.2019.05.006).
- [16] 刘芬菊, 苏燎原, 刘克良, 等. 冻结肩病人的免疫功能测定[J]. *苏州医学院学报*, 1992, 12(1): 56-57, 73.
Liu FJ, Su LY, Liu KL, et al. Determination on the frozen shoulder patients' immunologic function[J]. *Acta Acad Med Suzhou*, 1992, 12(1): 56-57, 73.
- [17] 刘芬菊, 苏燎原. 维生素A对CD4⁺和CD8⁺细胞辐射效应的影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 1995, 13(1): 29-32.
Liu FJ, Su LY. The effect of vitamin A on CD4⁺ and CD8⁺ cells irradiated by ⁶⁰Co γ -ray[J]. *J Radiat Res Radiat Proc*, 1995, 13(1): 29-32.
- [18] Zuo XY, Chen Q, Li HW, et al. Effects of Chahuangjing on decorporation and radiation protection against tritiated water [J/OL]. *Dose-Response*, 2018, 16(4): 1559325818810650 [2023-09-25]. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1559325818810650>. DOI: [10.1177/1559325818810650](https://doi.org/10.1177/1559325818810650).
- [19] 刘玉龙, 马楠. 核能运转中氚的防护[J]. *中国辐射卫生*, 2021, 30(3): 386-390. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2021.03.025](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2021.03.025).
Liu YL, Ma N. Tritium protection in the operation of nuclear energy[J]. *Chin J Radiol Health*, 2021, 30(3): 386-390. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2021.03.025](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2021.03.025).
- [20] 陈炜博, 刘玉龙, 卞华慧, 等. 1例氚内污染人员的剂量估算与医学处理[J]. *中国卫生检验杂志*, 2015, 25(12): 1952-1955.
Chen WB, Liu YL, Bian HH, et al. The dose estimation and the medical treatment of one person with tritium internal contamination[J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2015, 25(12): 1952-1955.
- [21] Wang KZ, Sun L, Xiong KH, et al. Monitoring of tritium internal exposure doses of heavy-water reactor workers in Third Qinshan Nuclear Power Plant[J/OL]. *Dose-Response*, 2019, 17(4): 1559325819890498 [2023-09-25]. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1559325819890498>. DOI: [10.1177/1559325819890498](https://doi.org/10.1177/1559325819890498).

(收稿日期: 2023-09-26)