免责声明：凡在本杂志发表的文章只代表作者观点，而非美国国防部、空军部、空军教育和训练司令部、空军大学或美国其他任何政府机构的官方立场。

从公共健康角度分析向太阳发射核废料的可行性

Public Health Considerations of Launching Nuclear Waste to the Sun

默里·贝科威茨博士（Dr. Murray R. Berkowitz）

本文从保护公共健康的角度出发，分析把放射性核废料射向太阳的处置方案。自 2010 年 4 月 20 日英国石油公司在墨西哥湾发生漏油事件以来，所引起的环境和生态问题激起了关于寻找替代能源的讨论。2010 年 5 月 11 日，时任马萨诸塞州民主党参议员约翰·克里（John Kerry）和康涅狄格州独立党派参议员约瑟夫·利伯曼（Joseph Lieberman）提出了一项立法议案，即“美国能源法”，旨在“确保美国的能源未来，奖励国内清洁能源技术的开发，实现意义深远的污染减排。”[1] 核能，作为许多替代能源形式的一种，重新唤起了人们更大的兴趣。然而，2011 年 3 月 15 日发生的九级地震以及随后的海啸对日本福岛第一核电站造成的破坏，还有报道称“艾琳”飓风引发的美国东海岸几处核电站的问题，都加剧了人们对核电安全与健康的担忧。此外，在 2012 年 10 月 29 日“桑迪”超级风暴袭击美国东海岸之后造成停电灾难后，媒体发表了一系列有关核电厂危及公共健康的文章。

核废料释放“电离辐射”，因此对公众健康构成一种危害，危害程度取决于辐照持续时间的长短、距离辐射源的远近、辐射的类型（α, β, γ 射线等），以及是否有任何形式的防辐射保护等情况。[2] 放射性核废料的来源包括：核武器、核发电厂、用于诊断或治疗的医用放射性核素、产生辐射的机器、放射性金属和各种元素的放射性同位素（通常发现于“背景辐射”中）。[3]

辐照的威胁主要产生于导致放射性核物质泄漏（即“核泄漏”）的核事故或事件，它通常危及不到（未受保护的）普通人群。目前通行的处置方法是把放射性核材料收集并封存于安全地点，它要求安全的运输及配有特殊安全设施的存放地。这些存放地必须远离人口居住区，存放设施外有可靠的物理安全保护，擅自（有意或无意）进入设施的可能性极小，也极容易被发现（例如尤卡山核废料贮存库，2010 年弃用）；这些存放地还需选在极少有地震、火山爆发等地质不稳定现象的地区。

另一种处置方法是将放射性核废料掩埋在大洋底下，尤其是大洋中山脉的深缝隙里，或像马里亚纳海沟等极深的地质层中。显然，任何深海埋藏方案都要求远离海洋构造板块接合部——较易发生火山、地震或其他地质活动的部位。按查尔斯·霍利斯特（Charles Hollister）和史蒂夫·纳迪斯（Steven Nadis）的说法，海洋科学家们认为：这样的地方在过去五千多万年内未曾经历过地质活动，那么未来也不太可能会发生这种情况。[4]

过去已有人提出把放射性核废料射向太阳的处置建议，认为这种方法能消除存储设备泄漏或核废料被核恐怖分子盗走而引发的辐射威胁。[5] 该建议所依据的原理是：任何物质进入太阳的引力场，就会在其强大的向心压力下解构，在抵达太阳之前“分裂”。而且，所有物质在抵达日冕之前都将被高温焚化并彻底消耗掉。[6] 具体而言，物质随着温度升高而膨胀，其结构完整性被打破，热能造成分子键断裂。在太阳上，凡是原子序数超过二（即氦）的元素，其原子完整性都不存在。[7] 本质上，极热使这些元素都分解成了构成这些元素的亚原子粒子（如电子、质子、中子，等等）。[8] 如此，放射性核废料绝不会

影响到太阳,对其“生态系统”没有任何影响，因此不可能“损害”太阳。

问题的严重性

然而，就公共健康风险而言，人们必须考虑到发射的事故可能性，比如运载火箭在脱离地球引力之前爆毁，或者在发射后不久爆炸而散落放射性碎片。回顾美国的无人航天计划历史，应能了解发生此类事故的可能性有多大。宇宙神、半人马座、德尔塔、德尔塔 II、土星 5 等运载火箭，已执行过一千多次任务，也发生过事故，事故产生的残骸碎片尺寸从几厘米到几米不等，但都不是放射性物质。在无人航天器发射历史中，涉及运载火箭事故的概率不到百分之三。[9] 这个概率风险虽低，但确实存在。

我们很早就认识到了电离辐射对健康的危害。在日本广岛和长崎上空爆炸的原子弹、美国及前苏联在 1946 年到 1964 年期间进行的原子弹和氢弹大气层试验、1979 年三里岛核反应堆事故、1986 年切尔诺贝利核电站事故，等等，其所造成的短期和长期健康问题都历历在案。载运放射性废料的运载火箭所涉及的风险,可以与在《禁止核武器试验条约》签订之前大气层核爆炸试验中观察到的核物质散落所涉及的风险相比。

主要决定因素

上面谈到，造成潜在公共健康问题的原因已为公众所熟知。具体说，就是放射性核废料环境对生命有机体的生物效应。电离辐射会破坏维持所有生命的生化、分子及细胞结构。人类行为对这个问题没有直接影响；但是在当前的国际地缘政治环境中，它可能会间接地影响到人们对于处理或封存放射性核废料的安全和 / 或防护的担忧。也就是说，我们必须考虑这种可能性，即这种物质也许会落入恐怖组织之手，他们可能会用这些材料来制造和部署低当量“肮脏”核武器（即核恐怖主义）。

制定政策并确定优先顺序

重述一下，我们可以有两种处置放射性核废料的办法:(1) 送入太空;(2) 收集、隔离、封存于地面之上 / 之下或葬入海洋深处。如果把废物送入太空，尤其是射向太阳（废物会在抵达日冕之前焚化），就能一劳永逸地根除隐患。虽然，如前所述，这一选择会造成运载火箭发射费用，其本身也存在发射事故的风险；一旦发生事故，放射性碎片可能散落在广大地区上空且无法预测。把放射性核废料进行收集、隔离、并封存于地球的陆地之内或之上，这种方法在初始运作和后勤保障方面简单易行且费用低廉，但是需要持续的监控和保安，以防恐怖组织盗窃并用于邪恶目的。再者，放射性废物的封存可能遭受自然灾害（例如地震、火山爆发等）的破坏，从而渗入地下水中，污染地面和 / 或水源。而把核废料葬于海洋深处的做法，可能和送入太空一样耗资。海洋事故可能会使近人口居住区的海洋、捕鱼区等地区容易遭受放射性污染。此外，虽说大洋深处比陆基封存设施更难抵达，但恐怖分子仍有可能威胁其安全并盗出这些放射性物质。再者，这样的设施也将需要持续监控和保安。

无论如何，我们拥有实施上述各种处置方法的科技能力，包括能把核废料载荷发射到太空中的任何目标。[10] 实施中遇到的政治和社会行为障碍，产生于公众对核能生产、使用、副产物等相关风险的认知；事实上，这种风险并非像多数民众想象的那样大。[11] 没有发布的研究结果能证明，在遵守适当保护措施的前提下，核业界人员的健康亚于普通大众；但是，如果不遵守安全操作措施、

或发生了涉及核材料的事故或事件，公众健康就会遭到损害，尤其是在致癌方面。

至于经济方面的考虑，向太空发射有效载荷的成本约为每磅 1 万美元。[12] 向太空每发送 100 吨放射性核废料要花费 22 亿美元，而将其封存于尤卡山设施的费用大约是每年 2 亿美元。[13] 如此算来，11 年的费用就可以完全抵消一次太空发射的费用，而一次太空发射所能处置的核废料要比在地球上一个地点的存放量大得多。

太空处置放射性核废料的方法有益于全球范围的个人、社区和整个社会，因为这种做法消除了这些物质在地球上封存期间发生事故 / 事件或被恐怖分子盗用的可能性。如前所述，太空发射的附带风险，涉及在发射之际或紧随发射、或者过后在离开大气层之前可能发生的事件。显然，在发射之际或稍后发生的事故会影响发射地点下风处的邻近社区（例如佛罗里达州墨尔本、卡纳维拉尔角附近和帕特里克空军基地），放射性碎片在这些地区会迅速积聚并危及公众健康。据约翰霍普金斯大学的一份新闻发布稿说：

> 由事故或恐怖主义所产生的核放射微粒沉降含有可致甲状腺癌的放射性碘，它尤其会危害婴儿和 18 岁以下的儿童。碘化钾片能防止甲状腺吸收放射性碘，从而保护腺体。
>
> “由核事件引发的甲状腺癌历来是个重大公共健康问题，这些事件包括对日本长崎的轰炸和乌克兰切尔诺贝利核事故，”约翰霍普金斯大学内分泌及代谢科主任保罗·莱迪逊（Paul W. Ladeson）医学博士如是说。[14]

防护计划呼吁对住在核事件地点 20 英里范围内的居民发放碘化钾片。

如果核事故发生在高层大气，高空风和喷气流会将放射性碎片吹散，并影响到人口居住区域，受影响区域的数量和位置取决于事故是发生在北半球还是南半球。此外，核碎片会扰乱海洋生物和商业。现实地说，这种不太可能发生的事故所产生的影响，不会比前面提到的任何大气核弹试验的结果更糟糕——一次大气核弹试验势必要引爆有数百万吨级爆炸力的核武器，这些武器产生大量尘埃形式的放射性碎片。而我们在此讨论的核废料总量并不属于“百万吨级”范畴。

相关风险评估

多项风险评估（又称环境评估）都直接关系到核材料的收集和运输，其中包括安全问题、对潜在事故 / 事件所造成的威胁的分析、公共健康考虑等。美国能源部的国家核安全管理局（NNSA）进行了多次这种评估。在 2004 年 1 月，它完成了一项对可裂变核材料的收集和运输的调研。该项调研假设把高浓缩铀从俄罗斯空运到美国田纳西州诺克斯维尔附近的一个安全地点，并评估由此引发的潜伏癌症导致人口死亡的风险。NNSA 的评估考虑了这么几种情况:“无事故 / 事件”发生、飞机在飞行中解体或毁坏、飞机在地面坠毁（即“着陆失事”）、地面运输这种材料的车辆撞毁（例如卡车事故）、“不采取行动”，等等。NNSA 确定，在所有设想情景中，最坏的情形是一个人在地面交通事故现场“最大程度地遭到”放射性物质的照射，估计这种潜伏癌死亡几率为“1.4×10^{-10}，或者说低于十亿分之一。”对于负责把高浓度铀包装箱从飞机上转移到卡车上的工作人员来说，其几率低于十四万分之一。[15] 因此 NNSA 的评估结果是：“没有显著影响。”得出相同结论的类似风险评估报告还有：查理顿山谷生物发电项目风险评估、芝加哥附近阿贡国家实验室的核反应堆设施清污和退役工程风险评估、南

卡罗来纳州艾肯附近的核反应堆燃料设施建设项目风险评估，等等。[16]

1997 年做出的发射“卡西尼”号探测器探访土星的决定意义非凡，也与本文建议的概念密切相关。首先，这项使命涉及到把一个有效载荷发射到地球轨道以外的目的地；其次，该航天器（即“卡西尼”轨道飞行器）采用的是核动力;第三,它的有效荷载,即“惠更斯”（Huygen）探测器，包含核部件。跨部门核安全审查小组为国家航天局进行的风险评估审视了这样几种设想情况：发射事故、运载火箭和有效载荷意外重返地球大气层而解体或毁坏事故、航天器为提高行星际航行段的惯性速度而进行“秋千式摇摆”机动时由于地球引力导致意外重返地球大气层事故。在“卡西尼”号使命报告的最终环境影响陈述中，所评估的癌症死亡率中值为“1.4 x 10^{-6}”。[17] 这个值的变化范围在“130 亿分之一”到“2800 亿分之一”之间。[18] 该报告所设想的事故 / 事件及分析值得注意，因为它们和向太阳发射核废料的建议中可能发生的情况颇为相似。

结论及建议

本文发现，把放射性核废料射向太阳的处置方法对公众健康的危害风险甚微。具体说，“卡西尼”号小组（根据在此建议的发射情景可能发生的类似情况）所报告的癌症死亡率中值为 38 亿分之一，而且这种情况也只有在发生运载火箭事故时才会出现，此值显著小于一般人群的癌症死亡率（五千分之一）。鉴于对公共健康的风险极其微小，同时考虑到上文提到的尤卡山核废料封存设施已被弃用的事实，本文建议，美国应重新考虑向太阳发射核废料这一经济可行的核废料处置方案。♣

注释:

1. Senate, A Bill to Secure the Energy Future of the United States, to Provide Incentives for the Domestic Production of Clean Energy Technology, to Achieve Meaningful Pollution Reductions, to Create Jobs, and for Other Purposes [参议院议案：保障美国的能源未来、奖励清洁能源技术的国内生产、取得意义重大的污染减排、创造就业机会及实现其他目标], 111th Cong., 2nd sess., 11 May 2010, [1], http://www.kerry.senate.gov/imo/media/doc/APAbill3.pdf.
2. Francis W. Sears and Mark Waldo Zemansky, “Radioactivity and Nuclear Physics,” in University Physics [大学物理教程中“放射性与核物理”], 2nd ed. (Reading, MA: Addison-Wesley Publishing, 1962), 901-16.
3. C. L. Cheever, “Ionizing Radiation,” in Fundamentals of Industrial Hygiene [工业卫生基本原理教程中“电离辐射”], 5th ed., ed. Barbara A. Plog and Patricia J. Quinlan (Itasca, IL: National Safety Council Press, 2002), 257-80.
4. Charles D. Hollister and Steven Nadis, “Burial of Radioactive Waste under the Seabed” [海底埋葬放射性废物], Scientific American 278, no. 1 (January 1998): 60-65.
5. A. V. Zimmerman, R. L. Thompson, and R. J. Lubick, Summary Report of Space Transportation and Destination Considerations for Extraterrestrial Disposal of Radioactive Waste [关于地球外处置放射性废物的空间运输及目的地考虑的总结报告], NASA TM X-68211 (Cleveland, OH: Lewis Research Center, April 1973), http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19730012836_1973012836.pdf.
6. Markus J. Aschwanden, Physics of the Solar Corona: An Introduction [日冕物理导论], New York: Springer, 2004), 26-29.
7. Mark Waldo Zemansky, “Change of Phase” and “Applications of Thermodynamics to Special Systems,” in Heat and Thermodynamics [热与热力学教程中“相变化”和“热力学对特别系统的应用”], 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1957), 317-38; 280-316.
8. Francis W. Sears and Mark Waldo Zemansky, “Spectra and Atomic Physics,” in University Physics [大学物理教程中“光谱与原子物理学”], 2nd ed. (Reading, MA: Addison-Wesley Publishing, 1962), 884-900.
9. Chuck Walker with Joel Powell, Atlas: The Ultimate Weapon by Those Who Built It [宇宙神运载火箭:建造者的终极武器], (Burlington, Ontario: Apogee Books, 2005), 265-78; 另参看 Roger D. Launius and Dennis R. Jenkins, To Reach the High

Frontier: A History of U.S. Launch Vehicles [抵达高边疆：美国运载火箭历史], (Lexington: University Press of Kentucky, 2002), 102-46, 148-87; 另参看 Ed Kyle, "2013 Space Launch Report" [2013 年太空发射报告], 21 January 2013, http://www.spacelauchreport.com/log2013.html.

10. Edward M. Purcell, "Space Travel: Problems of Physics and Engineering" [太空旅行：物理与工程问题], 收录于 Models of the Atom [原子模型], ed. Richard P. Feynman (New York: Holt, Reinhart and Winston, 1968), 221-44; 另参看 Curtis D. Cochran, Dennis M. Gorman, and Joseph D. Dumoulin, eds., Space Handbook [航天手册], (Maxwell AFB, AL: Air University Press, 1985).

11. Eric Aakko, "Risk Communication, Risk Perception, and Public Health" [风险沟通、风险认知和公共健康], Wisconsin Medical Journal, 103, no. 1 (2004): 25-27, https://www.wisconsinmedicalsociety.org/_WMS/publications/wmj/pdf/103/1/25.pdf.

12. "Advanced Space Transportation Program: Paving the Way to Space" [先进太空运输计划：铺设太空之路], Marshall Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration, http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/astp.html; 另参看 David Kestenbaum, "Spaceflight Is Getting Cheaper, but It's Still Not Cheap Enough" [航天飞行成本趋低但仍不够便宜], National Public Radio, 21 July 2011, http://www.npr.org/blogs/money/2011/07/21/138166072/spaceflight-is-getting-cheaper-but-its-still-not-cheap-enough; 另参看 Frank Sietzen Jr., "Spacelift Washington: International Space Transportation Association Faltering; the Myth of $10,000 per Pound" [太空运输华盛顿：国际太空运输协会踌躇不前；每磅 1 万美元的神话], SpaceRef, 18 March 2001, http://www.spaceref.com/news/viewnews.html?id=301; 另参看 R. L. Thompson, J. R. Ramler, and S. M. Stevenson, Study of Extraterrestrial Disposal of Radioactive Wastes, Part 1 [放射性废物地球外处置的研究，第一部分], NASA TM X-71557 (Cleveland, OH: Lewis Research Center, May 1974), 35, 37, http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740014663_1974014663.pdf. (说明：1974 年的成本按照 2012 年 12 月的通货膨胀做了调整。)

13. "Defense Nuclear Waste Disposal: Proposed Appropriation Language" [国防核废物处理：建议的拨款说明], in FY 2000 Congressional Budget, (Washington, DC: Congressional Budget Office, 2000).

14. Karen Blum, "Johns Hopkins Conference to Study Prevention of Thyroid Cancer during Nuclear Events" [约翰霍普金斯大学——关于预防核事件期间甲状腺癌的研讨会], press release, Johns Hopkins Medical Institutions, 26 February 2003, http://esgweb1.nts.jhu.edu/press/2003/FEBRUARY/030226.HTM.

15. Department of Energy (DOE) / Environmental Assessment (EA)-1471, "EA for the Transportation of Highly Enriched Uranium from the Russian Federation to the Y-12 National Security Complex" [关于从俄罗斯联邦运送高浓缩铀到美国橡树岭国家实验室的环境评估], 15 January 2004, v, http://energy.gov/sites/prod/files/nepapub/nepa_documents/RedDont/EA-1471-FONSI-2004.pdf.

16. DOE/EA-1475, "Finding of No Significant Impact for the Chariton Valley Biomass Project Environmental Assessment" [查理顿山谷生物发电项目环境评估没有发现严重影响], 10 July 2003, http://energy.gov/sites/prod/files/nepapub/nepa_documents/RedDont/EA-1475-FONSI-2003.pdf; 另参看 DOE/EA-1483, "Environmental Assessment for Decontamination and Decommissioning of the Juggernaut Reactor at Argonne National Laboratory—East Argonne, Illinois" [伊利诺伊州东阿贡——阿贡国家实验室 Juggernaut 核反应堆的清污及退役环境评估], March 2004, http://energy.gov/sites/prod/files/nepapub/nepa_documents/RedDont/EA-1483-FEA-2004.pdf; 另参看 DOE/EA-0170, "Finding of No Significant Impact, Fuel Materials Facility, Savannah River Plant, Aiken, South Carolina" [对南卡罗来纳州艾肯萨凡纳河电厂核燃料设施的调查结果没有发现重大影响], July 1982, http://energy.gov/sites/prod/files/nepapub/nepa_documents/RedDont/EA-0170-FONSI-1982.pdf.

17. Solar System Exploration Division, Final Environmental Impact Statement for the Cassini Mission [对卡西尼号使命的最终环境影响陈述], (Washington, DC: Office of Space Science, National Aeronautics and Space Administration, June 1995), 4-97 through 4-98, http://saturn.jpl.nasa.gov/spacecraft/safety/chap4.pdf.

18. 同上，4-100 到 4-101。

默里・贝科威茨博士（Dr. Murray R. Berkowitz），纽约大学理工学院理学士，哥伦比亚大学文理硕士，约翰霍普金斯大学 Bloomberg 公共卫生学院公共卫生硕士，德莫因大学骨科医学中心骨科医学与外科学院骨科医学博士，现任费拉德尔菲亚骨科医学院乔治亚校区终身副教授及防治和社区医学主任，兼任德州沃思堡骨科医学研究中心研究员。他在马里兰州健康与心理卫生部接受普通防治医学和公共卫生实习医师训练。他是医学委员会认证的神经肌肉骨科医学、骨科干预医学及预防医学与公共卫生专科医师，并拥有职业医学证书。他曾在美国陆军作为医疗兵团军官服现役，进入医学院之前在陆军和空军担任过多项任命。他是美国骨科医学院学报科学编辑（主编），发表过 100 余篇手稿、论文及讲演。贝科威茨博士毕业于装甲军官高级教程、海军陆战队指挥参谋学院、空军指挥参谋学院和空军战争学院。