

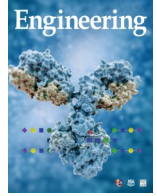


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Nuclear Power—Feature Article

## 中法关于核能与环境的联合研究

赵宪庚<sup>a,\*</sup>, 叶奇秦<sup>a</sup>, Sébastien Candel<sup>b</sup>, Dominique Vignon<sup>c</sup>, Robert Guillaumont<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China

<sup>b</sup> CentraleSupélec, University Paris-Saclay, Paris 75006, France

<sup>c</sup> National Academy of Technologies, Paris 75008, France

<sup>d</sup> Académie des sciences, Paris 75006, France

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 1 November 2021

Revised 14 February 2023

Accepted 4 April 2023

Available online 1 June 2023

#### 关键词

核能

环境影响

放射性废物管理

严重核事故

核安全

#### 摘要

本文聚焦核能的环境影响,将阐述与核能发电相关的四个主要环境问题:①控制正常运行条件下核设施的放射性释放,评估其非放射性环境影响(取水与非放射性水的排放等);②乏燃料与放射性废物的长期管理,特别是在地质处置库处理的乏燃料与放射性废物;③防止和缓解严重核事故及其放射性释放;④改善核安全水平,以限制核能的环境影响,提升公众对核能的接受度。核能的温室气体排放水平非常低,可以提供大规模、按需应变的可调度电力,在气候变化的背景下,核能在此方面具有独特的优势。在正常运行工况下,核电站对周围公众的年有效剂量影响可以忽略不计。人们已经做出了相当大的努力,以确保可持续地管理高放射性长寿命废物,并使其在地质结构中最终得到处置。从严重核事故中获得的经验促成了许多方面的重要的安全改进,其中包括反应堆的设计、运行管理方面的改善,以及事故管理指南的制定等。事实证明,这些是相当有价值的。严重事故的环境风险已经被大幅降低,确保即使发生事故,也可以最大程度地减少放射性物质的释放,并避免大规模的人员疏散。还需要继续采取措施,改善反应堆的安全性,提升核工业与核监管机构的透明度,以进一步降低核能的环境影响。

© 2023 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

### 1.1. 能源需求趋势

全球对一次能源的需求以每年2%~3%的速度增长,在过去40年中翻了一番。2021年,与能源相关的CO<sub>2</sub>排放量创下366亿吨的历史新高[1]。在世界人口增长以及一些国家经济发展和生活质量提高的推动下,能源需求的增加是不可避免的。为了限制气候变化,需要大幅减少能源领域的温室气体排放。这将要求能源领域进行重大转型,

从化石能源利用转向无碳能源利用。电气化将是清洁能源转型的关键推动者之一。如今,世界正处于第一次真正的全球能源危机之中。加快清洁能源转型将有助于缓减这场危机的影响。使用核能发电是输送大量电力的一种方法,同时能够避免化石燃料燃烧。电气化将是清洁能源转型的关键推动者之一。

2021年,全世界436座核反应堆总发电量为2653 TWh。这些核反应堆分别为图1中的各国提供了国内14%以上的电力供给[2]。2021年,欧盟约25%的电力

\* Corresponding author.

E-mail address: [zhaoxiangeng@126.com](mailto:zhaoxiangeng@126.com) (X. Zhao).

2095-8099/© 2023 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2023, 26(7): 159–172

引用本文: Xiangeng Zhao, Qizhen Ye, Sébastien Candel, Dominique Vignon, Robert Guillaumont. A Chinese French Study on Nuclear Energy and the Environment. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.04.011>

来自核能发电[3]。2020年，核电站（NPP）为欧盟贡献了约44%的低碳电力。因此，在欧洲，核能每年可减少5亿吨CO<sub>2</sub>排放量（是使用化石燃料生产相应数量的电力所排放的CO<sub>2</sub>的量）。法国的核电装机容量为61 GW，核能发电占该国总发电量的69%。在当前的欧洲能源危机下，核能再次引起人们的关注。2022年2月，法国总统埃马纽埃尔·马克龙宣布计划建造6座新反应堆，并考虑再建造8台机组。截至2022年12月底，中国大陆共运行核电机组55台，总装机容量为56.99 GW（不含台湾地区）[4]。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出，到2025年，中国在役核电装机容量将达到70 GW [5]。从中长期发展趋势来看，中国的电力需求总量持续增长，低碳电力比重不断提高，化石能源使用减少，电源结构的低碳化转型和清洁能源发展日益加快。积极发展核电是中国长期重大战略选择，在保证安全的前提下，核电可以成为中国绿色能源的支柱。法国的情况已经符合这一目标，其电源结构主要由核电和非间歇性可再生水力发电构成，几乎完全脱碳。

### 1.2. 脱碳承诺,以及不同发电能源 CO<sub>2</sub> 排放情况

1992年,《联合国气候变化框架公约》呼吁将温室气体浓度保持在稳定水平,防止气候变化风险[6]。在2016年正式生效的《巴黎气候变化协定》(Paris Agreement on Climate Change)中,各缔约方的承诺目标是,将全球平均气温较工业化前水平升高幅度控制在2℃以内,并努力将温度上升幅度控制在1.5℃以内[7]。2021年,国际能源署发布的《全球能源行业2050年净零排放路线图》指出,即使各国政府的气候承诺得到充分兑现,但仍无法达到2050年将全球能源相关CO<sub>2</sub>排放量净降至零的水平。该报

告还指出,净零承诺必须得到可信的行动支持。

通常认为,电能 在能源结构中的比例必须显著增加。这将需要使用更多的可再生能源(风能和太阳能),这些能源是间歇性或可变的,并结合核电和水电的低碳可调度能源。在这种情况下,中国正计划提高核电产量[8],而法国正在启动6台新的EPR-2机组建设,并计划将其核能在电力结构中的占比保持在50%以上。显然,核能是达到低温室 气 体 排 放 和 实 现 气 候 目 标 的 重 要 途 径 。

当今核能发电主要采用铀原子裂变技术。1 kg核燃料(铀-235)裂变释放的能量相当于2700吨标准煤燃烧释放的能量。如果对一个常规核电站的燃料量和一个燃煤电厂的燃料量进行比较,将会更直观。假定两个电厂的装机容量均为1 GW,并运行一年,核电站将使用30吨核燃料(即210吨天然铀),而燃煤电厂则需要400万吨煤。在全生命周期中,包括采矿浓缩、燃料制造和后处理设施在内,核能发电每年排放的CO<sub>2</sub>仅不到燃煤发电的1%,这与太阳能和风能供应链相似或比它们更低。核能发电不会排放颗粒物且大气污染物也非常少。

### 1.3. 环境保护要求核能可持续发展

除了低碳和占地少等优点外,核能还必须具有安全性和经济竞争力。评估环境影响也很重要,要考虑核电站运行和核燃料循环设施的放射性物质释放和放射性废物的产生。此外,还必须对反应堆定期卸出的乏燃料的管理措施、储存、后处理和放射性废物最终处置的方式等进行详细审查。

根据安全分析和环境影响评价,核设施允许排放量所致人的放射性和化学毒性剂量水平要低于法规允许的规定值。国家法规至少应达到国际原子能机构(IAEA)的要

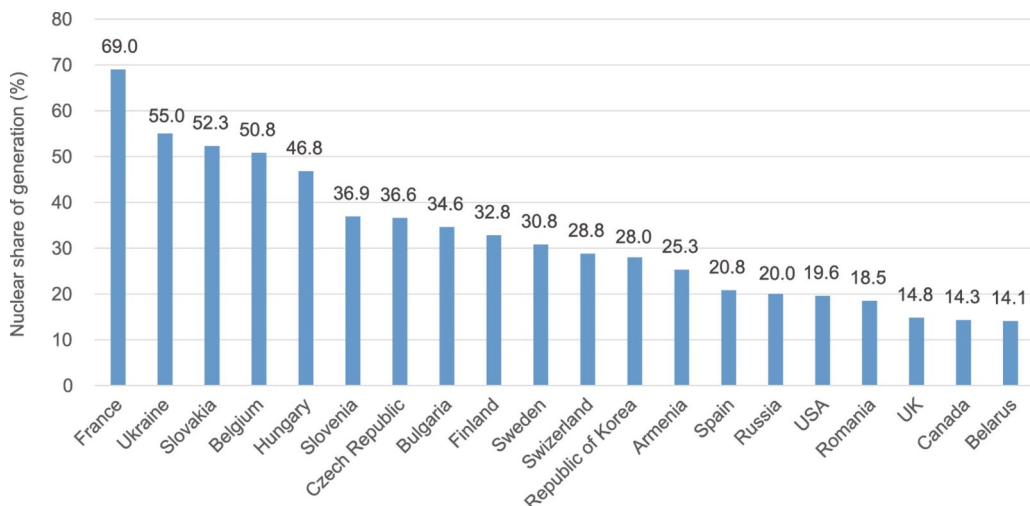


图1. 核电占比超过本国电力供给1/5的国家(2021年12月)。经许可转载自参考文献[2]。

求，但往往会更严格。目标是达到剂量远低于国际放射防护委员会（ICRP）推荐的每年1 mSv的个人剂量限值[9]。流出物排放限值和实际目标越来越低，也越来越严格，这也缘于核设施运行及其放射性物质处理技术的不断改进。排放减少主要是由于在没有燃料泄漏的正常运行情况下，一回路是清洁的。对于液体，该过程浓缩了放射性物质，这些放射性物质可以以固体包装的形式储存，因此释放到环境的放射性物质较少。以下各节将进一步详细考虑这些方面。

第二节讨论了核电站及核燃料循环设施正常运行期间的的环境影响。包括对各类电力生产系统的温室气体和大气污染物排放进行比较，并讨论了正常运行期间的放射性、用水、土地利用和材料消耗等问题。第三节讨论了乏燃料和放射性废物管理，并介绍了预防环境影响的原则、策略和框架。乏燃料和放射性废物管理一般包括放射性废物分类，放射性废物的处理、排放和处置，以及开式和闭式核燃料循环带来的不同影响。此外，还讨论了各个放射性废物管理环节的环境保护措施。第四节回顾了几次严重的核事故（三哩岛、切尔诺贝利和福岛），并强调了从这些事故中吸取的教训。此外，还介绍了现有核电站的升级改造和新的三代核电站的设计改进，以便限制核场址的边界和减少事故造成的环境影响。第五节考虑了与环境有关的核安全问题，讨论了核安全的目标（限制核事故发生的可能性、预防措施以及减轻核事故后果）。

## 2. 核电站和核燃料循环设施正常运行期间的环境影响

本节讨论了核能的环境足迹，比较了核能发电系统与其他发电系统的环境影响，并探讨了引入减小环境影响的新技术趋势。首先是关于当人们希望根据全球环境影响，特别是温室气体排放量，对不同能源系统进行评估时，采用全生命周期分析（LCA）的必要性。

### 2.1. 如何衡量核能的环境影响

根据所考虑的时间和尺度的差异，可通过两种方法评价大型能源生产系统的环境影响。当评价大规模的潜在影响时（比如涉及气候变化和长期持续的影响），建议采用“全生命周期分析”（LCA）方法来评估核设施从开始建造到最终拆除（大约一个世纪）对全球造成的影响。LCA可以充分说明已经记录和预期的影响。当影响仅限于设施厂址及其周围区域，且影响时间仅涉及“日常生活”（即局部影响）时，即时影响和长远延迟影响均非常重要；但

只有前者是可以测量的，后者则需结合实验数据通过建模模拟来获得。

核能排放到环境中的物质是化学物质或放射性物质，抑或被怀疑是放射性物质。化学物质排放必须小心处理，但以下将主要关注核工业特有的放射性排放物。这些放射性物质通常会导致人类和其他生物受到辐射照射。为了进行此类评价，必须始终将核能的辐射照射与天然辐射源的辐射照射（各国居民受到的天然本底辐射年均有效剂量为：法国居民2.9 mSv [10]，美国居民3.1 mSv [11]，中国居民3.1 mSv [12]），或医疗诊断的辐射照射进行比较。值得一提的是，医学成像诊断的辐射照射平均每年为0.62 mSv，长时间飞行的辐射照射约为0.05 mSv [13]，采矿活动和燃煤电厂周围，由于煤的大量利用导致氡照射增强[12]。

在评价过程中，考虑了释放物中存在的全部天然和人工放射性核素与其他元素。可通过模拟方法估算人类或生物群落受到的辐射影响和化学影响。核仪器可以检测和表征非常低水平的放射性，其灵敏度优于用于检测化学毒性的仪器。用于测量环境中痕量化学毒性物质的工具比用于测量放射性的工具更复杂，这使得化学毒性数据的原位获取变得困难。

法国和其他拥有核设施的国家定期对国内核能、工业或医疗设施中现有的材料、放射源和废物进行详细分析，并制定了短期和长期管理规划。据此，可对实际或潜在的放射性释放做出评价。

### 2.2. 核能的流出物、辐射影响及解决方案

一般来说，根据法国核电站在正常运行期间的实际放射性排放量估计的剂量比前面提到的天然放射性剂量水平低三个数量级以上。通过监测中国6座压水堆核电站（PWR）和一座重水堆核电站（HWR）运行期间的气体和液体流出物，发现其排放量远低于监管限值和天然辐射照射水平。多年来，中国和法国的液体和气体放射性排放量都大幅减少。

表1显示了正常运行期间法国核燃料循环设施的辐射影响[14]。据估算，辐射剂量仍然很低，比天然辐射照射的年剂量低2~4个数量级。

图2显示了在中国6座压水堆核电站和一座重水堆核电站运行期间监测到的气体和液体流出物水平[15]。其中显示，2011—2013年这7座核电站各类放射性流出物的平均排放量。最大排放量得到了有效的管控，并且在任何情况下，均远低于监管限值和天然辐射照射水平。估算2011—2013年中国核电站流出物排放所致公众的归一化



表1 基于实际排放量计算的2011年以来法国核燃料循环设施所致关键居民组辐射影响[14]

Nuclear fuel cycle plants	Distance to site (km)	Estimation of received doses per year (mSv)					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Andra/CSA	1.7	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-7}$
Andra's Manche repository	2.5	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
Framatome Romans	0.2	$3 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
Orano Cycle/La Hague	2.8	$2 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$
Orano/Tricastin	1.2	$3 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$

CSA: Centre de Stockage de l'Aube, low level-short lived waste repository.

集体剂量, 约为  $6.4 \times 10^{-2}$  人·Sv·(GW·a)<sup>-1</sup> [15]。

中国核燃料循环的流出物排放得到了良好的控制且对其进行详实记录。2011—2013年, 中国核燃料循环的流出物排放量及所致公众辐射剂量见图3 [15]。

在所有的核能国家, 环境的放射性监测是所有营运单位、安全和环境当局主要关切的问题。法国通过三个远程监控网络实施放射性监测, 中国的监测系统由多层次的环境辐射监测网络构成, 用以监测核设施运行期间的环境辐射水平。

自20世纪50年代以来, 欧美国家一直在核设施厂址周围进行流行病学调查。然而结果表明, 与遥远的对照区相比, 核设施附近居民的癌症死亡率和儿童白血病发病率未发现显著差异[16—17]。

在法国, 每年运输的放射性包裹约有77万批次, 其中约有98万个放射性物质包裹, 或仅占法国每年运输的危险货物包裹总数的一小部分, 大部分来自非核工业和医疗部门。运输的大部分货物为极低水平的放射源和废物。仅12%与核工业的核燃料、乏燃料, 以及低、中或高水平短寿命放射性废物有关。在不同的运输方式(铁路、海运、公路或空运)中, 根据放射性物质的特性和运输要求

进行选择[14]。

法国为被归类为环境保护重点的最危险的设施(ICPE)设立了地方信息委员会(CLI)。法国共设立了53个CLI, 其中38个位于核设施厂址附近。中国建立了“中央督导、政府主导、企业作为、社会参与”的公众沟通工作机制, 以促进“科普宣传、公众参与、信息公开、舆情响应、融合发展”工作。

### 2.3. 核能发电与其他能源发电的环境影响比较

电力生产的环境影响取决于发电技术种类。在气候变化的背景下, 重要的是要考虑不同发电技术相关的温室气体排放。图4 [18]表明, 化石燃料发电站生产每兆瓦时电能的CO<sub>2</sub>排放量, 要比核能、风能、太阳能和水力发电的排放量高1~2个数量级。

核能对温室气体排放的贡献[约  $20 \text{ kg} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$ ]分别比燃煤发电和光伏发电低40倍和4倍。图4所示的数值表明, 核能产生的CO<sub>2</sub>当量排放量非常低, 因此它是一种低碳能源。此外, 与化石燃料发电站相比, 核能产生的SO<sub>x</sub>和NO<sub>x</sub>水平也非常低。

接下来, 研究了不同技术的土地利用情况。表2统计

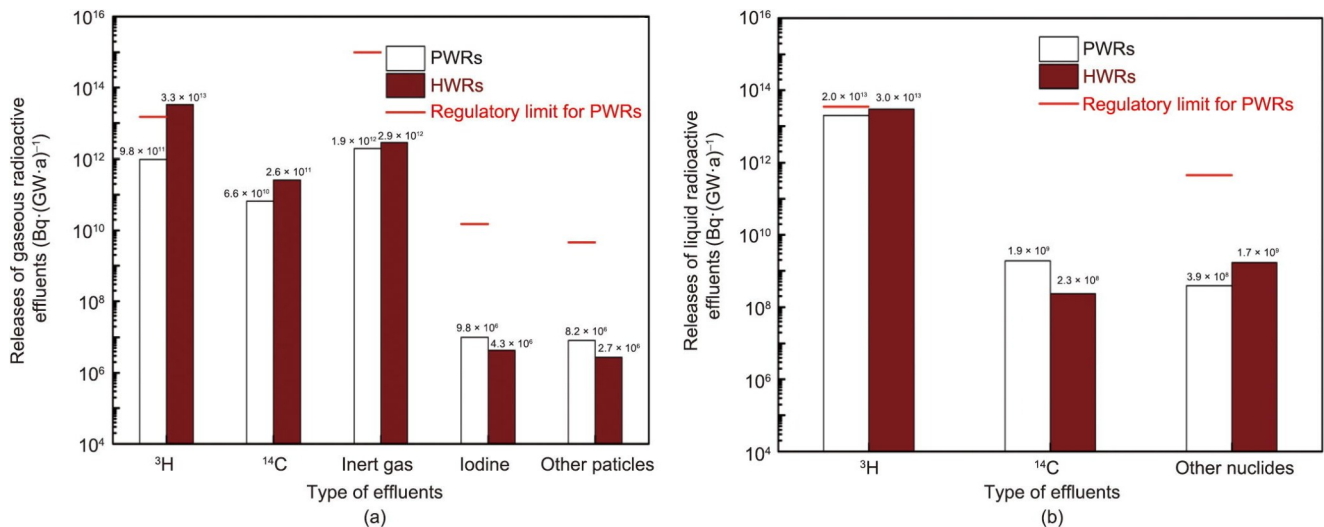


图2. 中国核电站平均放射性流出物排放量(2011—2013年)。经许可转载自参考文献[15]。

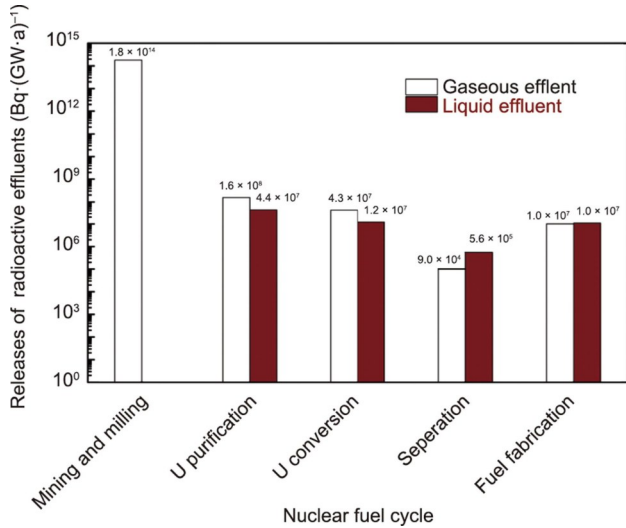


图3. 中国核燃料循环放射性流出物的平均排放量（2011—2013）。经许可转载自参考文献[15]。U：铀。

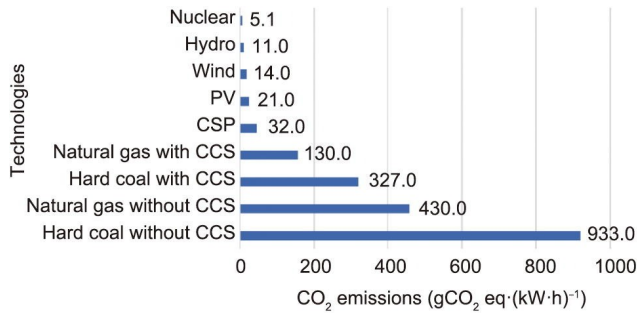


图4. 不同发电技术全生命周期 CO<sub>2</sub> 当量排放量。按中值递增排列 [gCO<sub>2</sub>eq·kWh<sup>-1</sup>，即每千瓦时的 CO<sub>2</sub> 当量排放量克数]。经许可转载自参考文献[18]。CCS：碳捕获和封存；CSP：聚光太阳能发电。

了各种能源系统每兆瓦装机容量的土地占用面积，从表2 [19–20]可以看出核电站的土地占用相对较低。全生命周期情况下，核能所需土地较少。如果以 m<sup>2</sup>·(MW·h)<sup>-1</sup> 进行比较，则对核能更加有利，因为不同能源的负荷因子不同。法国陆上风能的典型负荷因子约为 23%，光伏发电 (PV) 的负荷因子不会超过 13%。比较时还应考虑对风能和太阳能固有的可变性进行补偿的必要性，这就需要有额

表2 不同能源系统单位装机容量的土地利用强度[19–20]

Energy technology	Installed power (m <sup>2</sup> ·MW <sup>-1</sup> )	System boundary/energy resource extraction area plus power plant site
Hydropower/reservoir	20 000–10 000 000	Site of reservoir and generators
Solar PV	10 000–60 000	Site of PV system, which includes the area for solar energy collection. PV systems on pre-existing structures have essentially no net increase in land use
Solar thermal	12 000–50 000	Site for concentrating solar thermal system, which includes the area for solar energy collection
Wind	2 600–1 000 000	Low-end value is for the site only, which includes the physical footprint of the turbines and access roads. The high-end value includes the land area between turbines, which is typically available for farming or ranching
Nuclear	6 700–13 800	Low estimate is site only. High estimate includes transmission lines, water supply, and rail lines, but does not include land used to mine, process, or dispose off the waste

外的生产或储存能力，进而导致额外的土地占用。

表中水力发电的数字似乎很高，但是发电只是大坝的多种用途之一（水也用于灌溉、家庭和工业用途、航运和防洪）。土地利用取决于需要建造水库的地方的大小。关于能源供应，建水库的目的不仅是输送电力，还在于灵活储存电力，这是一项重要资产以增加电网容量来满足需求。

核电的直接土地利用相当低。因此，在土地占用方面，核能是一个有利的选择，从而保护因土地占用和人工化而受到破坏的生物多样性。

本文比较了不同发电技术的材料用量。可以比较单位装机容量所需的材料质量 (kg·MW<sup>-1</sup>) (图5 [21])，或者在全生命周期生产单位电量所需的材料量 [t·(TW·h)<sup>-1</sup>] (图6)。各种能源对材料的利用情况如图7所示。

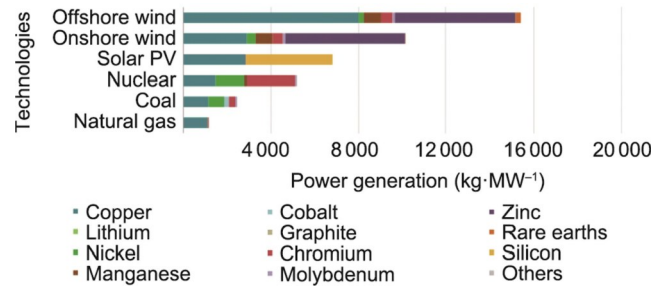


图5. 不同发电技术所需的材料量（不包括燃料），以单位装机容量 (MW) 所需的材料质量表示。经许可转载自参考文献[21]。

图5表明，核电站每兆瓦装机容量需要的材料比天然气和燃煤发电站更多，尤其是土建工程。然而，核电站使用的材料比太阳能光伏发电以及陆上和海上风力涡轮机发电少。该图中引用的值需要由图6中所示的值来补充，是指在特定电厂的寿期内每生产单位能量需要的材料量。图6考虑了太阳能光伏相对较低、风力涡轮机相对较高的负荷因子（在法国，太阳能光伏的负荷因子约为0.13，陆上风电为0.23，海上风电为0.35~0.40）。图6中出现的数

据需要更新，但该图中给出的估计值不会有太大变化。之所以将该数据用于本文，是因为这些数据更好地表明了各种技术在生产能源方面各自的优点。

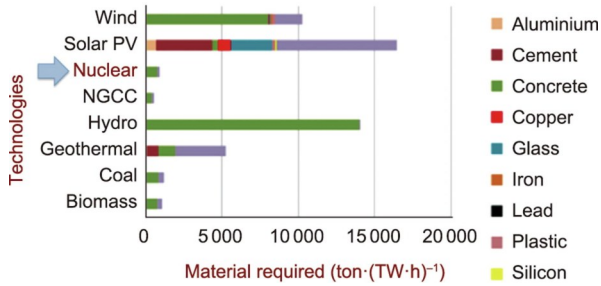


图6. 不同发电技术所需的材料量（不包括燃料），以 $t \cdot (TW \cdot h)^{-1}$ 的形式表示。NGCC：天然气联合循环；DOE：美国能源部。经许可转载自参考文献[20]。

根据图6，陆上风力发电站生产每太瓦时的电力需要的混凝土比核电站更多，因为它们的负荷因子相对较低。如果选择重力式地基，铺设在海底地面上的海上风电站就需要更多的水泥、骨料和堆石料用于海底地基的建造。目前，关于漂浮式海上风力发电站的研究太少，无法提供合理的基础需求量数据，但其骨料和堆石料的需求量将远低于在海底地面上铺设的风桅杆的数量。

太阳能光伏发电站以及集中式太阳能发电站也需要钢筋和混凝土。这两种发电站都需要钢筋混凝土板和钢支架。由于负荷因子较低，电力集中度不高，导致输送每太瓦时电能的材料需求量相对较高。需要指出的是，这里没有考虑光伏电站和风力发电站的维护。

水力发电站和其他能源发电站对混凝土的利用如图7所示。水力发电的材料需求约为 $15\,300 t \cdot (TW \cdot h)^{-1}$  [22]。事实上，对于水电站的估算结果并不十分有价值，因为骨料和水泥用量需求的多寡，取决于坝址附近是否有足够多的岩石和骨料。许多大型水坝都采用土石坝设计，因为这

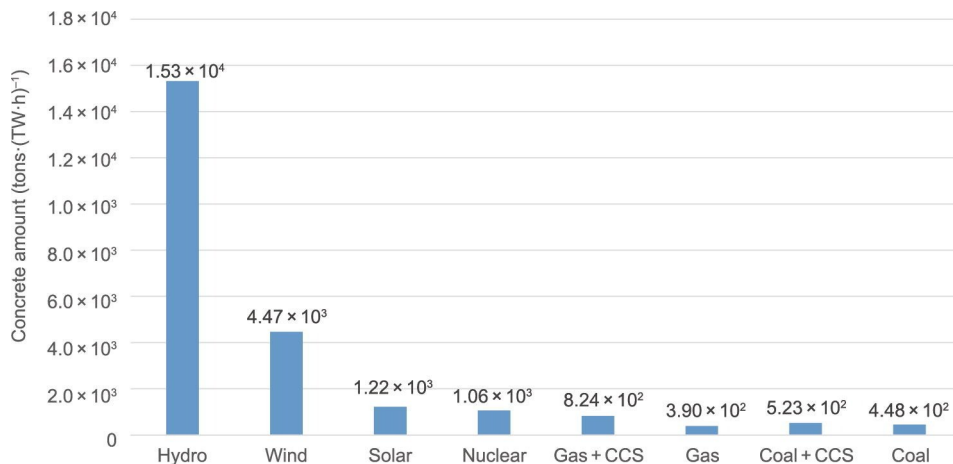


图7. 从全生命周期分析中推断的各种发电形式所需混凝土量 $[t \cdot (TW \cdot h)^{-1}]$ 。经许可转载自参考文献[22]。

是最具性价比的解决方案。然而，土石坝使用的混凝土体积在很大程度上取决于最大洪水的规模和装机功率。

太阳能和风能技术相对较短的使用寿命也反映在图7中，其中混凝土量是根据电厂整个寿命期产生的总能量来测算的。现在或将来的拆除和重建相对频繁，部分材料的回收是一个悬而未决的问题。

#### 2.4. 新技术展望

发电和供热占全球燃料燃烧产生的 $CO_2$ 排放量的40%以上，燃煤发电厂排放的 $CO_2$ 占相关排放量的70%以上（1971—2020年，超过203个国家和42个地区）[23]。因此，必须大幅限制这些行业，甚至停止其使用化石能源。

减少燃料燃烧的碳排放的两个主要途径包括：碳捕获和封存（CCS），或直接生产无碳电力。CCS技术面临着三个挑战：降低成本、提高公众的接受度以及发展封存能力。目前全球只有 $42.5 Mt \cdot a^{-1}$ 的 $CO_2$ 封存能力（即仅超过2050年所需的百分之一[24]）。尚未证明以所需规模储存 $CO_2$ 的可能性。碳储存只能减少 $CO_2$ 排放，但不足以实现碳中和。另外，风能和太阳能正在成为生产无碳电力的领先技术，但它们具有相同的间歇性限制。因此，本研究认为只有水力发电和核能发电才有潜力产生可调度的无碳电力，然而水力发电的可用场地又很少。

### 3. 乏燃料和放射性废物管理

核工业的特殊性在于其使用的燃料在“燃烧”后不会消失。核工业不能采用化石燃料行业的方式管理废物，即一方面按照标准的废物处置途径以温室气体的形式排放到大气中，另一方面将固体残渣堆积放置。核燃料发生的裂变和其他核反应能够产生短寿命和长寿命放射性核素（即



放射性同位素)。这些放射性核素的化学性质截然不同。当从核反应堆中卸下时,核燃料的放射性活度从几 $\text{kBq}\cdot\text{cm}^{-3}$ (新燃料)上升到 $10^{10}\text{kBq}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $10^{11}\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-3}$ (乏燃料)。因此,放射性废物管理是核燃料循环的一部分。目前,所有利用核能的国家都需要执行放射性废物管理。绝大多数放射性废物(放射性水平较低、数量较大)最终都在地表/地表下处置库中得到处置,剩余的放射性废物(放射性水平较高、数量较少)则被贮存在贮存库中,以待深地质处置库建成后进行进一步处理。尽管从事此类操作的人员已高度小心,但放射性物质仍然存在于乏燃料和核废料中,造成少数放射性核素释放到环境中。在遥远的未来(几百年到几十万年),预计一些放射性核素将会从被处置于岩石圈的放射性废物中返回到生物圈。然而,无论何种情形,当前均已采取了应对措施,确保不管地域和时间尺度如何,辐射影响均维持在天然放射性水平的波动范围之内。

本节将重点探讨放射性废物管理的环境影响。

### 3.1. 放射性废物管理的原则、策略和框架

第一个基本原则是代际公平,即当代人不能将其技术决策带来的负担留给后代。环境是世世代代共有的财产。给予子孙后代留下一个清洁的环境是当代人的重要责任,尤其应抑制在天然放射性物质基础上增加人工放射性物质。第二个基本原则是确保每代人都了解国家和国际层面上放射性废物管理实践。为阻止放射性核素向环境释放,所有核设施的营运单位必须在核设施放射性废物管理中采用最佳可行技术(BAT),以减少放射性废物的产生。

世界上放射性废物管理的策略包括:①在反应堆内最大程度地燃烧放射性物质;②浓集和包容放射性核素和有毒物质;③最后在处置库中处置最终的放射性废物。这些专门设计的基础设施旨在尽可能延长放射性核素返回生物圈的时间(数百年或数十万年),从而将放射性废物与生物圈隔离。

国际放射性废物管理框架主要有《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》(IAEA, INFCIRC/546, 1997年12月24日)和所有国家均需考虑的适用于电离、辐射、防护和辐射源安全的基本安全标准(IAEA, 安全标准系列, No. GSR Part 3, 2014)。

### 3.2. 放射性废物的特性和分类

有核国家会根据本国工业状况调整放射性废物的分类,因而各国对放射性废物类别的管理可能有所不同,但也有许多共同之处。使用的传统放射性废物类别如下:极

低放废物(VLLW)、长寿命低放废物(LLW-LL)、短寿命低中放废物(LILW-SL)、长寿命中放废物(ILW-LL)和高放废物(HLW)。放射性水平最高的放射性废物(ILW-LL和HLW)的类型取决于有核国家就乏燃料所做出的决策。

与化石能源相比,核能每兆瓦时产生的废物要少得多。这是因为核能的能量密度非常高,约为化石燃料的数千倍,具体取决于核燃料的燃耗和反应堆类型。放射性废物管理的主要环境影响包括,使公众暴露于电离辐射环境下,以及改变水生和陆地生态系统(可能导致生物多样性丧失)。可按照试验方法对含有放射性或有毒物质的气体或液体排放产生的剂量(外部和内部)进行评估,其结果将被提交给国际机构审查(全球循环比对试验)。由于仍然缺乏非人类生物圈的数据,因此很难量化放射性和毒性对其他生态系统的影响。与其他物种相比,人类通常对辐射危害更敏感。当人类获得充分的辐射防护时,非人类物种也将得到适当的保护。

就环境影响而言,区分短寿命和长寿命放射性废物具有重要意义。事实上,短寿命放射性废物通常在地表/近地表设施中处置,因此在逻辑上,这显然会对当代环境造成直接影响。长寿命放射性废物通常在数百米以下的深地质处置库中处置,因此环境影响很可能在遥远的未来才会发生。尽管如此,对这两种策略都需仔细研究。此外,还应区别放射性废物中的放射性核素来源——是天然(铀、钍及其子体)还是人造(锕系元素、裂变产物、氚)的。仅含有铀的放射性废物来源于核燃料循环前端。与核燃料循环后端有关的放射性废物还含有许多其他放射性核素。

### 3.3. 放射性废物处理和流出物排放

当待处理的原生放射性废物量最低时,放射性废物管理导致环境影响的风险最小。要使放射性废物的量最小化,首先要对所有设施产生的放射性物质进行分类,如此可以排除处于放射性检测极限或低于清洁解控水平的废物(如果存在)。下一步是对放射性废物进行包装,以减少放射性核素在运输和贮存过程中的扩散。目前存在许多包装技术,因此可在包装和贮存造成的直接环境影响和地质处置造成的间接环境影响之间找到最经济的方案。但在任何情况下,通常都需要采用最佳可行技术。

几乎所有国家都设定了放射性废物的清洁解控水平或检测限值,这使得非放射性材料中潜在放射性废物的分类被取消。这种可用于公共用途的材料的解控使得最丰富的VLLW的数量大大减少。这涉及放射性物质的豁免概念和清洁解控概念。第一个概念用于对有限数量(如1t)物

质的放射性浓度 ( $\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$  或  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$  或总活度) 进行判定, 低于该限值, 则无需进行任何控制来确保辐射防护, 或当使用回收材料时, 环境影响可忽略不计。第二个概念需要考虑去污材料再利用时的放射性浓度 ( $\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$  或  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$  或总活度小于/等于豁免值)。通用清洁解控水平应确保在任何不利情景下, 辐射影响每年低于  $0.01 \text{ mSv}$  (IAEA 安全准则 RS-G-1.7 和欧洲原子能共同体指令 96/29 的建议剂量)。如此低的剂量不会对环境产生影响。

另一种减少放射性废物总量的方法是回收类似低放废物的金属材料。可以使用去污方式对它们进行熔炼。熔炼是唯一一个可使回收材料的放射性实现均匀化的过程, 也便于放射性监测。似乎不大可能通过再循环来减少核燃料循环过程中产生的其他放射性废物的量。

如前所述, 向环境中释放的气态或液态流出物是环境所受直接影响的主要来源。对于放射性废物管理而言, 流出物与初始放射性废物包装同样重要。必要时, 可对气态流出物进行过滤或利用适宜的溶液冲洗, 以便去污。这将产生二次固体废物和净化后的气体。这些气体将根据监管要求排放到大气中。在对核设施工艺中产生的液态流出物进行局部处理后, 会产生净化的液体溶液, 并按照授权规定排放到环境中; 处理后, 还会产生固体放射性废物和放射性浓缩液体。

### 3.4. 放射性废物处置

对于低活度或极低活度 (小于  $10^2 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 的放射性废物, 甚至是含有微量长寿命放射性核素 (如铀) 的放射性废物, 世界上的大多数有核国家基本上都采用填埋场处置 (地表或近地表)。一般来说, 这种放射性废物数量很大。IAEA 建议通过挖沟进行地表/近地表管理。法国将必须处置超过  $2.0 \times 10^9 \text{ m}^3$  的 VLLW, 大约是目前处置库容量的 4~5 倍[25]。VLLW 主要产生于反应堆和核设施的拆除过程。中国拥有 4 座在运的 VLLW 填埋场, 至今共处置了  $10\,000 \text{ m}^3$  的 VLLW [26]。

短寿命放射性废物 ( $10^2\sim 10^6 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 主要产生于核电站的运行。一些短寿命放射性废物中含有极少量的长寿命放射性核素。对于短寿命放射性废物包装, 通常在专门设计的地表/近地表设施中进行处置, 深度可达数十米。包装物可以是密封或不密封的钢桶、混凝土桶或大容器。安全与环保当局负责根据处置场址的特征、废物包装结构和工程屏障, 确定处置库关闭时可接受的放射性容量, 以及各放射性核素或有毒材料的容量。确定地表处置设施容量限值要考虑的因素是, 当数百年后短寿命放射性核素消失 (但长寿命放射性核素不会消失) 时, 放射性废物处置

场能够恢复到绿地状态。法国将必须处置现有核领域产生的  $1.5 \times 10^9 \text{ m}^3\sim 2 \times 10^9 \text{ m}^3$  的 LILW-SL [25]。这类废物相当于中国的低放废物, 可在近地表设施中进行处置[27]。

LLW-LL ( $10\sim 10^5 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 含有一些放射性核素如  $^{36}\text{Cl}$  或  $^{14}\text{C}$ , 难以通过工程屏障或天然屏障封隔, 且数量大到无法在深层地质处置库中处置, 因而不可在 LILW-SL 或 LLW 处置库中处置该类放射性废物。如果考虑近地表处置, 则必须在选择处置场址时考虑这类放射性核素的长时间封隔要求。因此, 处置库必须足够深, 以保证天然屏障的足够厚度并发挥良好功能。预计法国现有核领域的 LLW-LL 总量为  $190\,000 \text{ m}^3$ 。法国核废物管理机构 Andra 将继续确定潜在的黏土场址。在中国, 对于主要含长寿命放射性核素的放射性废物 ( $10\sim 10^5 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ ), 核素活度浓度低于 LLW 活度浓度上限的属于 LLW, 核素活度浓度高于 LLW 活度浓度上限值的属于中放废物 (intermediate level waste)。

核与地质学专家表示, 在采用多重屏障设计的情况下, 可在深地质结构中进行 ILW-LL ( $10^6\sim 10^9 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 和 HLW ( $10^9 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$  及以上) 的环境隔离和放射性核素封隔。选择对这些废物进行地质处置的根本原因是出于社会学中的社会稳定性考虑, 而这种社会稳定性是几个世纪以来都无法保证的。可根据深地质处置库场址的地质岩层 (如黏土或花岗岩) 确定采用不同的深地质处置库概念。到目前为止, 仅芬兰在花岗岩中成功开挖竖井, 其目的是建造一个深达  $450 \text{ m}$  的地下乏核燃料处置库 [名为“安克罗” (Onkalo)]。在法国, 装有玻璃固化体的外包装将被放置在水平隧道中, ILW-LL 的外包装将被放置在  $130 \text{ m}$  厚的水平延伸黏土层 (Callovo-Oxfordian 黏土) 中心竖向开挖的大洞室中。在过去数十年间, 有 10 个国家在积极准备, 希望在未来数十年内启用处置库。由于流程较多 (如场址表征、分析和最终选择), 涉及大量科研工作, 以及政客和公众亦参与了决策过程, 地质处置库的实施工作历时弥久。国际组织 [欧盟、经合组织核能机构 (OECD-NEA) 和 IAEA] 也为此设立了国际联合研究项目, 旨在了解控制放射性核素迁移的基本现象并测试工程屏障。

根据目前的核燃料循环策略, 预计需要在法国深地质处置库中处置约  $72\,000 \text{ m}^3$  的 ILW-LL 和  $12\,000 \text{ m}^3$  的 HLW。这些废物正在贮存中, 以待 Cigeo 处置场试运行成功[25]。在中国现行的放射性废物分类体系中, 中放废物是指将在中等深度设施中处置的废物。中国计划分别在 2020 年和 2050 年左右建设一个地下实验室 (URL) 和一个地质处置库[28]。

铀矿开采产生的大量铀放射性废物由尾矿、矿石加工



(为获取黄饼)废物残渣以及其他技术废料组成。该放射性废物包含铀、钍的所有不挥发子体以及其他化学物质( $^{226}\text{Ra}$ 是唯一一种含量较大的化学物质)。法国已有50年的铀矿开采历史,目前已停止铀矿开采作业,已从250个场地开采了5200万吨矿石,并提取了80 000吨铀。中国目前有80个铀矿,其中30多个已退役。采矿放射性废物包括3400万吨挖掘岩石和尾矿以及1100万吨采矿废渣[26]。

### 3.5. 开式/闭式核燃料循环产生的废物

放射性废物管理的环境影响程度,与反应堆和设施运行(包括采矿)所释放的放射性核素和产生的放射性废物量有关。可根据这些指标对两种核燃料循环进行比较。法国原子能和替代能源委员会(CEA)对法国实际运行的开式核燃料循环(OFC)和单次回收钚的闭式核燃料循环(CFC)的估算如下:CFC中的后处理会向大气释放大量的惰性放射性气体和氙 $[5.50 \times 10^{11} \text{ Bq} \cdot (\text{TW} \cdot \text{h})^{-1}]$ ,同时向海洋中排放一些低放射性液体 $[2.24 \times 10^{10} \text{ Bq} \cdot (\text{TW} \cdot \text{h})^{-1}]$ ,但无明显放射性影响。对于这两种核燃料循环,LLW和LILW-SL的产量没有显著差异,但是CFC产生的ILW-LL是OFC的4倍[分别为 $1.18 \text{ m}^3 \cdot (\text{TW} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.32 \text{ m}^3 \cdot (\text{TW} \cdot \text{h})^{-1}$ ],CFC产生的HLW则是OFC的四分之一[分别为 $0.36 \text{ m}^3 \cdot (\text{TW} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $1.17 \text{ m}^3 \cdot (\text{TW} \cdot \text{h})^{-1}$ ][29-30]。

### 3.6. 新技术

如果采用四代快中子反应堆发电,如钠冷快堆(SFR),由于取消了所有的前端循环操作,废物释放量和生成量将大幅减少。达到平衡状态的SFR可以使用自身产生的乏燃料和额外的贫铀运行,并有可能燃烧次锕系元素。理论上讲,钚和铀的多次回收以及次锕系元素嬗变需要附加的乏燃料后处理步骤,可将HLW危害的持续时间从几十万年缩短至几百年。在法国,已经通过千克单位的小规模试点证明了提取次锕系元素的可行性。但只有当四代快中子反应堆趋于成熟后,才可能被扩大到工业规模。研究表明,只有当所有SFR都能嬗变锕系元素时,才有可能发生次锕系元素的嬗变。快中子反应堆基本上可燃烧

贫化铀,从而绕过燃料循环的前端(特别是铀矿开采),进一步减少核能系统的环境足迹。根据法国核设施基地的全生命周期分析,表3[30]进行了不同方案的比较。

实施再循环可大幅度减少高放废物量,从而决定了其高余热能所要求的地质处置库的大小:经再循环后,处置库的体积和面积可缩小到原来的一半以下。

就环境而言,进行化学处理的放射性物质越多,放射性核素释放的风险越大。

使用加速器驱动次临界洁净核能系统(ADS)进行次锕系元素嬗变的其他方法正在被研究,该方法将反应堆和加速器耦合。在ADS中,临界状态是通过添加外部中子源来实现,该中子源是由外部加速质子束的散裂产生的,高通量的中子使长寿命次锕系元素嬗变成短寿命裂变产物。然而,这在物理和化学领域都面临重大的技术挑战。最先进的ADS项目是比利时的Myrrha。法国在过去的10年里已制定了一项雄心勃勃的研究计划,准备在2040年左右启动第一台四代商用SFR,但如今正在重新考虑这一目标。中国的目标是,在2035年左右推出第一台商用SFR,2050年左右开始大规模建设。中国也已启动了一个ADS项目。

应由辐射防护和健康防护机构负责对人员所受的放射性和化学影响进行评估。这类评估应根据可靠的科学数据和经过验证的受照模型进行。但是,需要持续进行研发,以降低数据的不确定性并改进模型。在对电离辐射产生的生态系统影响进行评估时,未能获得足够的支持,需要加大这方面的研发力度。在社会意义方面,必须以透明的方式让公众注意到放射性废物管理对环境造成的现有或潜在影响。

## 4. 严重核事故

自20世纪50年代和平利用核能以来,核能经过大规模发展已经成为主要的电力来源之一。商用核反应堆50年来的正常运行证明,其辐射影响极低,且远低于天然辐射水平。然而在核电发展的历史上发生的三次严重核

表3 三种燃料循环方案比较[30]

Fuel cycle	CO <sub>2</sub> emissions (g·(kW·h) <sup>-1</sup> )	SO <sub>x</sub> emissions (g·(MW·h) <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> emissions (g·(MW·h) <sup>-1</sup> )	Land use (m <sup>2</sup> ·(GW·h) <sup>-1</sup> )	Liquid chemical effluents (kg·(GW·h) <sup>-1</sup> )	Gaseous radioactive release (MBq·(kW·h) <sup>-1</sup> )	Liquid radioactive release (kBq·(kW·h) <sup>-1</sup> )	HLW (m <sup>3</sup> ·(TW·h) <sup>-1</sup> )
OTC	5.45	18.73	29.01	222.6	333.92	0.80	2.80	1.17
TTC	5.29	16.28	25.30	211.0	287.53	1.22	27.20	0.36
TTC	2.33	0.59	3.83	50.2	12.60	0.53	3.56	0.30

OTC: once through fuel cycle; TTC: twice through fuel cycle; SFR: Gen-IV fast neutrons reactors fuel cycle; HLW: high level waste.

事故对核能发展以及全球对核能的认知造成了巨大影响。因此，有必要回顾这三次核事故，深刻总结事故经验教训，梳理事故后核能行业在降低严重事故发生概率及其后果方面所采取的设计改进和措施。

#### 4.1. 三次核电站严重事故回顾

三次核电站严重事故对全球核工业产生了显著影响，分别为1979年发生在美国的三哩岛核电站事故；1986年发生在前苏联的切尔诺贝利核电站事故；2011年发生在日本的福岛第一核电站事故。重要的是在现阶段审视这些核事故，并总结核工业从中吸取的教训和改进措施。

三哩岛核电站采用美国早期的压水堆机型，事故起因包括设备故障、操作人员对系统状态了解不充分以及随后的决策不当，导致堆芯熔化，大量裂变产物进入安全壳。幸运的是，安全壳保持完好，有效包容了事故产生的放射性物质。对周围公众的最大剂量低于年度天然本底剂量，仅为后者的十分之一。没有造成人员伤亡，也没有对环境造成中长期的影响[31]。

切尔诺贝利核电站事故发生的主要原因是俄罗斯石墨慢化水冷堆（RBMK）堆芯在某些条件下不稳定，核电站运行管理存在缺陷和安全文化缺失[32]。瞬发超临界导致反应堆功率急剧上升，引发爆炸，造成大量放射性物质泄漏到大气中。欧洲的大部分地区均在一定程度上受到了切尔诺贝利核泄漏的影响。大部分释放物是短半衰期的放射性核素，长半衰期的核素释放量较小[33]。134名应急工作人员罹患急性放射病，其中28人死于辐射。在受到中等剂量照射的工作人员中，发现了白血病和白内障危险增加的证据。在受到照射的儿童和青年期人群中，甲状腺癌的发生显著增加，其归因于在事故早期饮用了放射性碘污染的牛奶[34-36]。

福岛第一核电站采用美国最早的商用核电站技术——沸水堆。福岛第一核电站事故的触发是由于超强地震引发超强海啸远超设计标准。9级地震及海啸对周边地区交通、电力等基础设施造成的严重破坏导致场外电源直到地震后9天才恢复，时间之长远超设计考虑范围。柴油发电机的气密性不足，进气口被水淹没，最终导致所有交流电丧失，三台运行机组和乏燃料池的余热未能排出，导致堆芯熔化、氢气产生和积聚，最终引发爆炸，将放射性物质释放到环境中。在核电站设计中，如果在发生严重事故时缺乏预防和缓解措施可能会产生严重后果[37-38]。

#### 4.2. 为降低事故环境影响采取的改进措施

鉴于上述事故的教训，业界对在运和在运的二代压水

堆核电站实施了许多重要技术改进。按照“提高核电站安全性、可用性、可靠性和经济性”的全面要求，核工业界提出了三代压水堆核电站的概念，从而实际消除严重事故后大量放射性释放。

完善的严重事故预防与缓解措施，使得三代反应堆安全等级更高。三代压水堆均设置了先进的大型安全壳，能够承受地震、龙卷风等外部自然灾害和火灾、爆炸等人为事故的破坏与袭击，以及大型商用飞机恶意撞击；耐受严重事故情况下所产生的内部高温高压、高辐射等环境条件，并保持其完整性，避免放射性物质向环境释放。法国和中国的核工业界均已研发了各自的三代压水堆技术，分别为EPR和“华龙一号”（HPR1000），首堆工程已并网发电。另外，中国核工业界对公众特别关注的“内陆核电”（inland nuclear power plants）安全性问题做了针对性的技术改进。

为进一步提高核电站的安全性能，特别是压水堆核电站安全性能，核工业界积极开发新型技术，如开发新一代事故耐受燃料（ATF）或严重事故后堆内熔融物的滞留技术。

福岛第一核电站事故发生后，中国和西方国家的所有核电站运营商都积极进行自检。根据监管机构的要求，已经实施了几项技术改进，包括提高对外部洪水的抵抗力，改进应急堆芯冷却系统和相关设备，以及采取以下措施：①应急控制中心；②可运输备用电源；③乏燃料池监测；④氢气监测与控制；⑤辐射环境监测与应急响应；⑥应对外部自然灾害的手段。

近年来，小型模块化反应堆（SMR）的发展取得了巨大进展。目前的项目覆盖一系列功率范围，并处于不同的设计和实施阶段，包括CAREM25（阿根廷）、KLT-40S（俄罗斯）、Nuscale（美国）、ACPI100（中国）和Nuward（法国）。SMR倾向于通过固有和非能动系统增强安全性，并提供更好的经济性。一些SMR设计具有较低的功率密度和输送热量的能力，大多数拟议的SMR概念都有建在地下乃至水下空间的潜力，以加强抵抗自然灾害和恶意攻击的能力[39]。

#### 4.3. 对于未来可能发生的严重事故的见解

在已经发生的三次严重核事故中，真正造成严重后果的是切尔诺贝利核电站事故和福岛第一核电站事故。

如前所述，切尔诺贝利核电站事故的原因是，反应堆设计缺陷和操作人员多次违反安全操作规程，致使反应堆失去控制和保护，引入超瞬发临界反应性，使得功率剧增引起反应堆爆炸。事故后，业内几乎彻底摒弃了带有正反

馈效应的堆芯核设计方案，反应堆的固有安全属性得到了增强。

由大地震引发海啸而导致的福岛第一核电站事故，是历史上第一次由外部灾害引发的核电站事故，也是人类史上继切尔诺贝利核电站事故后的第二个被评为国际核与辐射事件分级（INES）7级的核事故。福岛第一核电站事故后，中国进行了沿海核电站地震海啸安全性分析。无论从地震的震源条件还是海域的水深条件，中国沿海都与日本完全不同。法国也是如此，千百年来，这种极端的自然灾害从未被观测到。导致福岛第一核电站事故如此严重的几个原因也已被消除。

当前，全球在建核电机组均进行了明显的设计改进，属于三代核电技术；并且随着运行经验的不断积累，核电机组的运行管理能力均得到有效提升；即使最坏的情况下，放射性物质向环境释放的风险也降低到了非常低的水平。与此同时，安全监管机构也发布了事故应急和补救指南，相关法规还强制要求营运单位承担实施这些指南的义务。

除了大型商用反应堆外，还对其他新型反应堆进行了大量研究，其中一些已进入建设阶段。2021年10月，国务院发布了碳达峰相关行动方案的通知，提出积极推动高温气冷堆、快堆、SMR、海上浮动堆等先进堆型示范工程，开展核能综合利用示范。在新型反应堆的研发和设计过程中，将更加关注非能动和固有安全系统的实施。此外，在核工程项目选址过程中，还将根据IAEA和中国核安全法规进行筛选和分析，包括地震评估、水资源、气象条件等因素，以确保场地条件符合安全要求。

综上，无论从反应堆设计、自然灾害发生条件还是安全保障方面来看，类似切尔诺贝利和福岛第一核电站这类造成大量放射性物质释放的事故都不可能在中国、法国发生。

## 5. 核安全与环境

核安全的基本目标是保护人类和环境免受电离辐射的有害影响。这一目标主要是通过通过在核电站和燃料循环设施的正常运行期间，控制人员的辐射照射和放射性物质向环境的释放来实现。放射性物质的释放量越小，核设施对环境的影响就越小。第二节中提到，核设施的放射性释放处于持续监测和控制下，对环境辐射水平的影响远远低于天然辐射。此外，核设施的放射性释放保持在合理可行尽量低的水平，而且记录显示，释放量随时间在不断减少，已降至核安全与环境保护机构批准允许值的很小份额。如第

三节讨论，废物经地质处置后长期放射性释放导致的辐射照射水平预计比天然辐射照射水平低得多。本节讨论了核安全的另外两个目标：限制核事故发生的可能性和减轻此类事故发生的后果。

### 5.1. 核电站的安全性及其环境影响

在过去，核电站的安全分析是基于“设计基准事故”（DBA）做出的。1975年和1990年人们通过概率安全评估方法获知，DBA未能涵盖需要考虑的所有核安全事故情形[40–41]。不幸的是，发生的堆芯熔化事故恰恰证实了这一点。

在三哩岛核电站事故后，核电站设立了定量安全目标。例如，与因反应堆事故所导致的立即死亡、因核电站运行所导致的癌症死亡的风险有关的两个“千分之一”规则。但是切尔诺贝利核电站事故和福岛第一核电站事故证明，核安全不仅应考虑核事故的致死后果，还应考虑可能要求人员撤离和重新安置的环境后果。因此，一些国家的法规中增加了涵盖严重事故考量的最新安全目标。福岛第一核电站事故发生后，欧盟为欧洲所有核电站进行了“压力测试”，并向公众公布测试结果。目前，作为大型改造项目（Grand Carénage）的一部分，法国正在对所有反应堆进行升级改造，尽可能接近三代反应堆的安全要求。中国政府也采取了提高核电站安全性的措施，防止严重事故情况下大量释放放射性物质。

建议“实际消除”（根据WENRA的表述）任何可能导致大量或早期放射性释放的情景，通过提高安全裕量、采取补充安全措施和加强纵深防御等手段，大幅度降低剩余风险。补充安全措施的设计和设置的主要原则是，核安全可合理达到尽量高的水平以及没有负面效应。为此，可以综合考虑各类因素，包括发生概率和剩余风险的后果，避免对正常运行、预计运行事件（AOO）、DBA和设计扩展工况（DEC）的响应功能造成不利影响。

风险指引的纵深防御体系（RDIDS）如表4 [42–43]所示。该体系采用了专设安全设施、附加安全设施和补充安全措施。

核电站各个阶段都在迅速实现数字化，因此需要特别考虑网络攻击和恐怖主义等新的安全威胁。运营单位应该设置首席安全官（CSO）岗位，并在CSO的带领下组建一个专门的网络安全部门，负责制定和实施组织内部各层级的网络安全政策[44]。

虽然恐怖主义也并非核电站特有的威胁，但不幸的是，其导致的后果将相当严重。原则上，在应对这一特定威胁时同样应采用纵深防御理念。需要指定一个国家机构



表4 风险指引的纵深防御体系[42-43]

Level of RDIDS	Objective	Basic measures	Conditions of NPP
Level 1	Prevention of abnormal operation and failures	Conservative design, and high-quality construction and operation	Normal operation
Level 2	Control of abnormal operation and detection of failures	Control, restriction, and protection of systems and monitoring facilities	AOOs
Level 3	To restrict accidents within design basis	Engineered safety features and accident response procedures	DBAs (to assume a single postulated initial event)
Level 4	To control severe conditions, including prevention of severe accidents (4a) and mitigation of consequences (4b)	Additional safety features and accident management	DECs, including multi-failures (4a) and severe accidents (4b)
Level 5	Engineering rescue under extreme conditions; mitigation of consequences of radioactive releases	Supplementary safety features, guidelines for management of extensive damage condition, and off-site emergency response	Residual risks

4a: design extension condition without core damage; 4b: design extension condition with core damage.

负责确定需要考虑的安全威胁因素。运营单位应与国家安全部队（警察、军队等）合作，共同制定这些威胁因素的防御应对措施。

## 5.2. 核电站选址

核电站的选址既要考虑电力需求和电源布局要求，更要从安全角度考虑核电站址的适宜性要求。国际业界关于核设施选址的基本要求达成了以下共识：①厂址安全；②环境保护；③应急准备。此外，厂址选择时还需要考虑大件设备的运输、经济性以及公众接受度等方面的问题，尽管这些问题与安全无关。

内陆厂址和沿海厂址的安全要求是一致的，但考虑的因素（如台风、海啸、溃坝）可能有差异。中国开展了大量研究，制订了事故后安全壳内废水处理的四项原则，即确保放射性废水“能存储”“能封堵”“能处理”“能隔离”。法国也进行了类似的研究工作，提出了适用于各厂址和设施的解决方案，并定期进行审查。法国和中国负责此类事务的机构之间应积极开展交流。

在福岛第一核电站事故发生后，中国核电发展受阻，尤其是内陆核电。由于“好的”沿海厂址短缺，一些以往被视为条件“不是很好的”沿海厂址（特别是地震风险比较高的厂址）被再次评估，并被认为适宜建设三代核电站。在地震风险较大的区域建造核电站时，需要各方高度关注，进行包括安全裕量在内的深入研究，保守决策，确保安全。

法国每十年对核电站厂址的适宜性进行一次审查，审查通过后方可批准在未来10年继续运营。数个厂址（以Cadarahe和Fessenheim为例）设施寿命期内的抗震设计标准有所提高；与此同时，还要证明设计足够的裕量可应

对更高的要求，同时不会损害设施安全。

## 5.3. 安全责任及政府职责

安全的首要责任必须由对产生辐射危险的设施和活动负责的个人或组织承担[45]。从法律角度看，负责人或组织是指核安全许可证持有者（有时称为“所有者或运营单位”）必须承担全部安全责任，并应证明有足够的资源来确保自己能够履行职责。

IAEA指出，核设施运营单位对核安全负首要责任，并建议：有必要与世界核电运营者协会（WANO）合作，获取最佳实践建议，帮助运营单位充分履行职责。

政府的职责是保护人员和环境。政府应围绕安全问题建立法律和政府框架，包括设立独立的核安全监管机构。继而，核安全监管机构根据核法规颁发建造和运行许可证。为了检查是否符合许可证的要求，核安全监管机构应对运营单位或许可证持有者进行监督检查。但是，无论监管机构如何管控，这种监督检查不会减轻运营单位对核安全承担的全部责任。

为了落实上述原则，中国于2018年1月1日实施的《中华人民共和国核安全法》中，明确了核安全责任各方的法律责任、义务和权利。在法国，上述原则已被纳入《环境法典》（第L591-1条及其后各条）和相应法令中。

## 5.4. 核安全与公众接受度

由于核电技术的复杂性以及诸如福岛第一核电站事故等重大事故带来的负面影响，公众仍然有“恐核”（nuclear panic）心理，对核能的和平利用心存疑虑。公众对核电的“邻避效应”（NIMBY）日益突出，表现为对核电建设项目的抵制和反对情绪不断升级。无论核电在成本和CO<sub>2</sub>排放方面有何优势，公众接受度已经成为制约核电发

展的瓶颈。核安全问题的公众沟通工作任重道远。

改进核安全，更好地预防严重核事故和减轻其后果是进一步接受核能的先决条件。但同样重要的是，公众要意识到并了解这些改进措施。加强公众沟通，增强公众对核能的信心，是核能健康发展的重要组成部分。良好的公众沟通需要有效和透明的信息、积极的公众参与，以及与地方当局和公众的长期对话。在技术问题上，应当将更好地为公众提供技术教育作为教育体系的目标，这需要从教师和教育工作者开始，以及从小学开始。

核安全监管机构应注重实施公开透明的核安全监督和管理，构建“中央督导、地方主导、企业作为、社会参与”的公众沟通机制。虽然促进核能发展不是核安全监管机构的职责，但应向公众解释其履行职责的方式，以及为何有信心颁发核安全许可证。应完善政府网站，如搭建信息公开平台，以积极推进涉核项目环评报告、全国辐射监测结果、项目审批信息等相关文件公开。在政策制定和项目环评过程中应广泛听取公众意见，提高公众参与程度。

总体而言，公众对接受现有厂址的扩建基本没有问题，这可能是由于当地公众（包括当地政府）已经比较了解核电，感受到了核电带来的地区经济发展和社会发展的益处，而并没有认为与核电站为邻会带来任何安全风险。然而，新建厂址仍然面临着公众接受度问题，因为当地居民对于这类新项目尚未获得良好的体验。

## 6. 结论

在正常条件下，核能对环境的影响有着良好的记录，而且环境中放射性核素的浓度是很容易被测量的，因此可对此类设施进行独立监控。核国家都会根据辐射防护的安全规定对流出物的辐射水平进行管控，实际的释放量仅为授权水平的百分之几，而授权水平本身也远低于天然辐射的影响。因此得出如下结论：在正常运行条件下，核电站的辐射影响是微乎其微的，或者说是非常有限的。

放射性废物管理的每一步均需考虑环境保护问题，尤其是在：

- 废物包装的隔离和密封；
- 针对各类放射性废物的近地表或深地质设施的贮存和处置方法。

尖端工程技术的发展、放射性核素/有毒物质在工程屏障和岩石圈中行为的研发成果以及大规模的国际合作，都将促进放射性废物管理方案的进步。

从放射性废物的产生到处置库的处置（将放射性废物与岩石圈隔离），所有的操作都会得到监测，其中处置库

可以将废物包装与生物圈隔离开来。这些设施周围的本底水平将永久性地被监测，反馈的监测结果表明正常的释放值远远小于设施许可时安全和管理机构的预测值和批准值。处置库关闭后，监控将在测试期间持续进行，安全性将从能动变为非能动。

一个尚未解决的问题是低剂量或极低剂量的长期效应。尽管世界上绝大多数流行病学研究证明它们是无害的，但是科学界和核能界还未能就此问题达成一致。

本文讨论的其中一个主要问题是核能发展史上严重事故对环境的影响。一方面，7级INES事故（切尔诺贝利和福岛事故）对环境造成了重大影响，降低了公众对核能发电系统的信心。另一方面，从事故中获得的经验反馈则在诸多方面都大大提高了核电的安全性，比如反应堆设计、运行管理和重大事故管理指南。事实证明，这是相当有价值的。

将来可能发生的重大事故对环境的影响已经大大降低。此外，在运和在建的核电站都制定了减轻损失的措施和方法，这将减少事故对环境的影响。这些措施的目的是最大程度减少受影响的区域，避免污染和大规模人员的长期撤离。

严重事故的全面保护和缓解措施提高了三代反应堆的安全水平。三代反应堆配备了先进的大型安全壳，能够抵御外部危害并保持其完整性，从而避免放射性物质释放至周围环境。

经验反馈推动了现有核电站的升级，改进了新反应堆设计，也改进了目前由核电站营运单位实施的安全指南，从而大大降低了切尔诺贝利和福岛等事故再次发生的可能性。如果发生这样的事故，放射性物质的泄漏将被降到最低，并且不需要大规模或长期的人员疏散。如果IAEA或世界核电运营者协会的评估能够证明全球范围内在运的核电站已经进行了高水平升级，那么这将是很有意义的。

鉴于安全管理对环境保护至关重要，本文强调了以下观点：

- 事实证明，风险导向型的纵深防御体系是一种更加先进、完整的安全方法。它由5个安全等级构成，可以大大降低严重事故的剩余风险和发生概率，这相应地也会对环境产生重要影响。

• 核电站的选址不仅应当考虑电力需求和电厂布局，还应从安全的角度出发，考虑选址的适宜性，也就是综合衡量选址的安全性、环境保护和应急准备状态。另外，应在国际范围内就核设施选址的基本要求达成共识。

- 安全机构在安全改进和控制方面发挥着重要的作

用，但核电站运行方仍要承担全部责任。双方应积极开展对话，提供最高水平的环境保护。

总的来说，本文的目的是全面评估核能对环境的影响。一方面，核能在生产能源方面具有诸多优势，且排放的温室气体极少，不像化石燃料能源系统那样排放空气污染物、固体纳米或微小颗粒。当前，人类活动导致的气候变化已成为人类面临的最困难的挑战之一，空气污染也成为许多国家面临的主要问题，在这种情况下，核能具有不可或缺的价值。另一方面，放射性废物管理和严重事故的多重后果，也使人们更加关注核能对地区乃至全球环境的影响。人类已经做出了相当大的努力，以制定出可持续管理高放废物的方案，从而使其在地质结构中最终处置。从三大事故中吸取的经验教训有助于优化核反应堆设计并降低放射性物质释放发生的概率，并确保即使发生事故核设施对环境的影响依然有限。

## 致谢

本文主要基于中法两国三院(中国工程院、法国国家技术学院和法国科学院)在2019年联合发布的研究成果,非常感谢三院对这项工作的支持。感谢为这项工作付出良多的三院诸多贡献者,并向在2019年1月去世的法国国家技术学院名誉院长、法国原子能和替代能源委员会(CEA)前任主席阿兰·布加特先生表示感谢。

## Compliance with ethical guidelines

Xiangeng Zhao, Qizhen Ye, Sébastien Candel, Dominique Vignon, and Robert Guillaumont declare that they have no conflict of interest and no financial conflicts to disclose.

## References

- [1] International Energy Agency. World Energy Outlook 2022. Paris: International Energy Agency; 2022.
- [2] World Nuclear Association. World Nuclear Performance Report 2022. London: World Nuclear Association; 2022.
- [3] Eurostat. Nuclear energy statistics [Internet]. 2022 Dec [cited 2023 Feb 10]. Luxembourg: Eurostat. Available from: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Nuclear\\_energy\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Nuclear_energy_statistics).
- [4] China Nuclear Energy Association. National nuclear power operation [Internet]. 2023 Feb 2 [cited 2023 Feb 10]. Beijing: China Nuclear Energy Association. Available from: <https://www.china-nea.cn/site/content/42324.html>.
- [5] The Xinhua News Agency. The 14th Five-Year Plan (2021–2025); 2021 Mar 13 [cited 2023 Feb 10]. Beijing: The Central People's Government of the People's Republic of China. Available from: [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm). Chinese.
- [6] UNFCCC. The United Nations framework convention on climate change; New York: United Nations; 1992.
- [7] UNFCCC. The Paris Agreement; New York City: United Nations; 2016.
- [8] IEA. Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector [Internet]. 2021 May [cited 2023 Feb 10]. Paris: International Energy Agency. Available from: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [9] ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Elsevier; 2007.
- [10] ASN. ASN Report on the state of nuclear safety and radiation protection in France in 2017 [Internet]. 2018 Jun 27 [cited 2023 Feb 10]. Paris: French Nuclear Safety Authority. Available from: <http://www.french-nuclear-safety.fr/Information/Publications/ASN-s-annual-reports/ASN-Report-on-the-state-of-nuclear-safety-and-radiation-protection-in-France-in-2017>.
- [11] NCRP. Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States. NCRP Report No. 160; Bethesda: National Council on Radiation Protection & Measurements; 2009.
- [12] Pang Z, Liu S. Radiation level in China. Beijing: China Atomic Energy Publishing and Media Co. Ltd; 2011.
- [13] United Nations Environment Programme. Radiation effects and sources [Internet]. 2016 [cited 2023 Feb 10]. Nairobi: United Nations Environment Programme. Available from: <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7790>.
- [14] ASN. ASN Report on the state of nuclear safety and radiation protection in France in 2021 [Internet]. 2022 Jul 7 [cited 2023 Feb 10]. Paris: French Nuclear Safety Authority. Available from: <https://www.french-nuclear-safety.fr/asn-informs/publications/asn-s-annual-reports/asn-report-on-the-state-of-nuclear-safety-and-radiation-protection-in-france-in-2021>.
- [15] "Assessment on radioactive environmental impact from both nuclear power chain and coal power chain" group. Assessment on radioactive environmental impact from different power sources. Beijing: China Atomic Energy Press; 2017. Chinese.
- [16] Laurier D, Bernier MO, Jacob S, et al. Epidemiological studies of leukemias around nuclear facilities in children and young adults: a critical review [Internet]. 2008 [cited 2023 Feb 10]. Paris: Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire. Available from: <https://www.irsn.fr/rapport-dexpertise/etudes-epidemiologiques-des-leucemies-autour-des-installations-nucleaires-chez>. French.
- [17] Spix C, Schmiedel S, Kaatsch P, Schulze-Rath R, Blettner M. Case-control study on childhood cancer in the vicinity of nuclear power plants in Germany 1980–2003. *Eur J Cancer* 2008;44(2):275–84.
- [18] UNECE. Carbon neutrality in the UNECE region: integrated life-cycle assessment of electricity sources [Internet]. 2022 [cited 2023 Feb 10]. Genève: United Nations Economic Commission for Europe. Available from: [https://unece.org/sites/default/files/2022-08/LCA\\_0708\\_correction.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-08/LCA_0708_correction.pdf).
- [19] Fritsche UR, Berndes G, Cowie AL, Dale VH, Kline KL, Langeveld H, et al. Global land outlook working paper—energy and land use. Bonn: UNCCD and IRENA; 2017 Sep.
- [20] Department of Energy. Quadrennial technology review: an assessment of energy technologies and research opportunities [Internet]. 2015 Sep [cited 2023 Feb 10]. Washington, DC: Department of Energy. Available from: <https://www.energy.gov/quadrennial-technology-review-2015>.
- [21] IEA. The role of critical minerals in clean energy transitions—analysis [Internet]. 2022 Mar [cited 2023 Feb 10]. Paris: International Energy Agency. Available from: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- [22] Bright new world. Materials use in a clean energy future [Internet]. 2021 Jun 26 [cited 2023 Feb 10]. Available from: <https://www.brightnewworld.org/media/2021/1/27/materials-use-project>.
- [23] IEA. Greenhouse gas emissions from energy data explorer [Internet]. 2021 Nov 10 [cited 2023 Feb 10]. Paris: International Energy Agency. Available from: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>.
- [24] Global CCS Institute. Global status of CCS 2022. Report. Washington DC: Global CCS Institute; 2022 Oct.
- [25] Government of France. National plan for management and disposal of radioactive materials and waste. Paris: Ministry of Ecological Transition and Territorial Cohesion Ministry of Energy Transition Secretary of State for the Sea. French.
- [26] Pan Z, Hu S, Liu S; research group on waste disposal management strategy. Report on the Key Consulting Project of China Academy of Engineering: strategic research on radioactive waste management in China. Report. 2018. Chinese.
- [27] National Nuclear Safety Administration (China) National Reporting Commission. Fourth National Report for the Joint Convention on the Safety of



- Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Report. Beijing: National Nuclear Safety Administration; 2017.
- [28] Government of China. Research and development planning guide for high-level radioactive waste geological disposal; 2006 Feb. Chinese.
- [29] Serp J, Poinssot C, Bourg S. Assessment of the anticipated environmental footprint of future nuclear energy systems. Evidence of the beneficial effect of extensive recycling. *Energies* 2017;10(9):1445.
- [30] Poinssot C, Bourg S, Ouvrier N, Combernoux N, Rostaing C, Vargas-Gonzalez M, et al. Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles. *Energy* 2014;69:199–211.
- [31] GPO. Report of The President's commission on the accident at Three Mile Island. Report. Washington, D. C: U. S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information; 1979.
- [32] IAEA. INSAG-1: Summary report on the post-accident review meeting on the Chernobyl accident. Report. Vienna: IAEA; 1986.
- [33] IAEA. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2006.
- [34] IAEA; WHO; UNDP; FAO; UNEP; UN-OCHA, et al. Chernobyl's legacy: health, environmental and socio-economic impacts and recommendations to the governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. 2nd ed. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2006.
- [35] UNSCEAR. Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. Vienna: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; 2011.
- [36] Pan Z. How much impact of Chernobyl and Fukushima nuclear accidents on human health. *China Nuclear Power* 2018;11(1):11–4. Chinese.
- [37] IAEA. The Fukushima Daiichi accident—report by the director general. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2015.
- [38] The National Diet of Japan. The official report of the Fukushima nuclear accident independent investigation commission—executive summary. Report. Tokyo: The National Diet of Japan; 2012.
- [39] Sornette D, Kröger W, Wheatley S. New ways and needs for exploiting nuclear energy. Berlin: Springer; 2019.
- [40] USNRC. Reactor safety study: an assessment of accident risks in US commercial nuclear power plants [NUREG-75/014(WASH-1400)]. Washington, DC: United States Nuclear Regulatory Commission; 1975.
- [41] USNRC. Severe Accident Risks: An Assessment for Five US Nuclear Power Plants [NUREG-1150]. Washington, DC: United States Nuclear Regulatory Commission; 1990.
- [42] Chai G, Yang Z, Xiao J, Wang Y, Ding C, Zhong Y. Nuclear safety improvement actions and safety requirements in post-Fukushima era. *A Energy Science and Technology* 2022;56(3):399–409. Chinese.
- [43] Yang Z, Li F, Chai G. Status and perspective of China's nuclear safety philosophy and requirements in the post-Fukushima era. *Front Energy Res* 2022;9:819634.
- [44] IAEA. Computer security at nuclear facilities—IAEA nuclear security series No. 17. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2011.
- [45] IAEA. Fundamental safety principles: safety fundamentals. Principles 1 and 2. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2006.