

未来海水提铀的前景规划与展望

宋艳^{1,2}, 牛玉清^{1,2}, 宿延涛^{1,2}, 李子明^{1,2},
常华^{1,2}, 吴浩天^{1,2}, 李默^{1,2}, 陈树森^{1,2,*}

1. 中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149; 2. 核工业北京化工冶金研究院 中核海水提铀技术重点实验室, 北京 101149

摘要:作为核电运行最重要的核燃料, 铀资源的安全供应是保障我国核电可持续发展的关键, 海水提铀对于保障我国核能的可持续发展具有重要而长远的战略意义。随着海水提铀技术的不断更新和发展, 海水提铀研究工作面临新的机遇和挑战。本文以国内外海水提铀的研究现状为基础, 提出了中国核工业集团有限公司领衔的“海水提铀技术创新联盟”关于海水提铀的前景规划与展望, 指明了未来海水提铀的研究方向, 为海水提铀向工业化迈进提供了技术支撑。

关键词:海水提铀; 前景规划; 工业化

中图分类号: TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2022)03-0229-04

doi: 10.7538/hhx.2022.YX.2022035

Future Plan and Prospect for Uranium Extraction From Seawater

SONG Yan^{1,2}, NIU Yu-qing^{1,2}, SU Yan-tao^{1,2}, LI Zi-ming^{1,2},
CHANG Hua^{1,2}, WU Hao-tian^{1,2}, LI Mo^{1,2}, CHEN Shu-sen^{1,2,*}

1. China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, Beijing 101149, China;

2. China National Nuclear Corporation Key Laboratory on Uranium Extraction from Seawater,
Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing 101149, China

Abstract: As the most important nuclear fuel for nuclear power operation, the safe supply of uranium resources is the key to ensure the sustainable development of nuclear power in China. Uranium extraction from seawater has important and long-term strategic significance to ensure the sustainable development of nuclear power in China. With the updating and development of uranium extraction technology from seawater, the research work of uranium extraction from seawater is facing new opportunities and challenges. Based on the research status of uranium extraction from seawater at home and abroad, this paper puts forward the future plan and prospect of uranium extraction from seawater, which is proposed by “Seawater Uranium Extraction Technology Innovation Alliance” led by China National Nuclear Corporation. It points out the research direction of uranium extraction from seawater in the future, and provides technical support for uranium extraction from seawater to industrialization.

Key words: uranium extraction from seawater; future plan; industrialization

铀资源是核工业发展的基础, 是军民两用且高度敏感的国家战略资源。基于铀的稀缺性和战略

价值以及铀矿产资源的有限性,从海水中提铀作为传统矿石类铀资源的补充,对于保障我国的核震慑力量,支撑核事业的快速发展,具有重要的意义^[1-3]。从海水中提取铀资源的方法主要有吸附法、离子交换法、溶剂萃取法等,吸附法是目前研究最多和最可行的方法之一,其关键是吸附材料的研发^[4-10]。海水中盐浓度高、铀浓度低,故要求吸附材料不但具有选择性吸附铀的性能且吸附效率要高,如何制备经济实用、具有高选择性且稳定耐用的铀提取材料是实现海水提铀工业化的关键。目前世界上许多国家如美国、日本、中国、德国、印度等开展了海水提铀的研究工作,除了日本在2000年前后采用多次锚定吸附方式获得了约1 kg“黄饼”的规模性海洋试验外,其他国家仍致力于在海水提铀材料上寻求突破,尚未见较大规模海水提铀现场试验,未达到海水提铀工程化应用水平^[11-17]。

鉴于海水铀资源研究与开发在战略上的重要性,中国核工业集团有限公司将海水提铀研究作为先导技术研究纳入“创新2030”工程方案,并在“核能技术方向研究及发展路线图”中明确规划在2035年前后建成吨级盐湖、海水提铀试验基地。2019年,中国核工业集团有限公司作为工程化主体和用户,牵头发起成立了“海水提铀技术创新联盟”,国内专业从事海水提铀的研究力量陆续加入,截止到2022年,联盟单位已扩充至24家。自成立以来,联盟以“强强联合、优势互补、统筹谋划、多方共赢”为原则,充分发挥联盟各成员单位在理论研究、人才队伍、装备研制、工装技术等方面的优势,针对关键共性问题组织集体攻关,实现

科研单位、高校、产品需求方产学研协同互动攻关,促进科技成果转移转化,引领产业技术进步,加快实现海水铀资源开发与利用的工程化。本文介绍了中国核工业集团有限公司领衔的“海水提铀技术创新联盟”对于未来海水提铀的发展规划与展望,以为今后海水提铀的研究工作提供参考。

1 海水提铀的前景规划与展望

为实现我国核能事业大规模可持续发展对铀资源的长远需求,提出了关于未来海水提铀的发展规划建议,制定了2021年至2050年“三步走”的技术战略路线,详细规划了各阶段的研究目标和研究内容,形成了基础研究和工艺技术方法等技术战略路线图(图1),加快推动了海水提铀工程化进程目标的实现。

1.1 第一阶段

第一阶段为现在—2025年:建立海水提铀技术创新基地,突破海水提铀机理理论瓶颈,筛选并优化海水提铀吸附材料,材料在海水中的有效吸附容量为6~10 mg/g,开展海水提铀现场台架试验研究并获得公斤级铀产品,初步构建海水提铀评价标准,海水提铀成本达到每kg铀200~300美元,达到世界先进水平。研究内容主要包括:(1)建立海水提铀海试基地。按照“小核心、大联合、高标准”总体建设思路,瞄准海水提铀“先导性”国际前沿,建立集技术科研、成果转化、人才培养、国际交流等四大功能于一体的海水提铀科研基地(如图2所示),为铀资源终极保障提供坚实基础,实现海水提铀高质量发展。(2)吸附

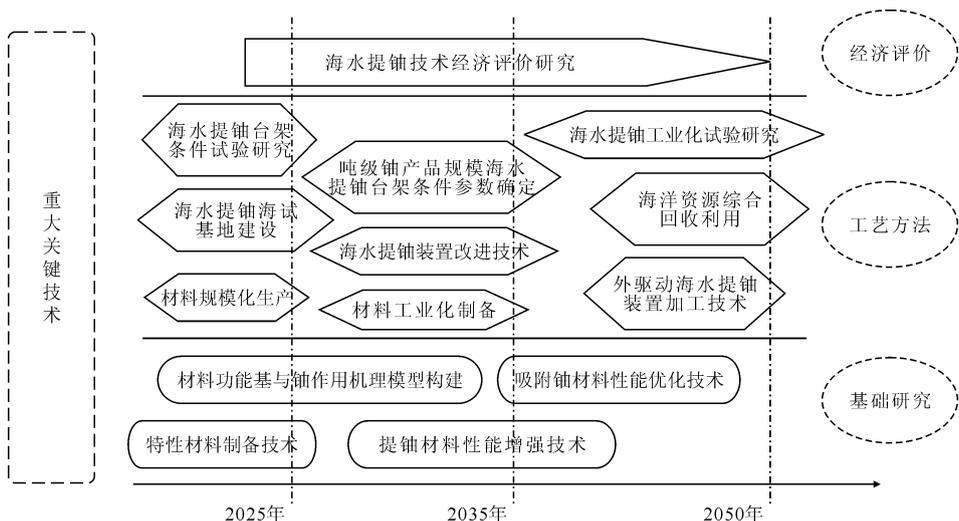


图1 海水提铀的战略路线图

Fig. 1 Strategic roadmap for uranium extraction from seawater

作用机理探究。借助红外光谱、热力学和动力学等研究手段,提出功能基团与铀酰离子的可能构型,并辅以计算机的模拟计算,推断出铀酰离子与材料功能基配位作用的模型,指导材料的合成。(3) 材料规模化生产与公斤级台架工艺研究。通过“产学研用”的合作模式突破海水提铀研究瓶颈,开展不同类型海水提铀吸附材料的规模化制备研究,获得生产工艺参数,对比研究规模化制备材料海试吸附性能,优选出更适用于海水提铀的吸附材料,并进行吨级规模生产,针对不同类型材料设计提铀装置,开展装置布局研究,以其为基础开展海试试验,获得公斤级铀产品。(4) 公斤级铀产品技术经济评价研究。综合考虑海水提铀海试试验过程中材料的性能体现、海试装置、试验布局及运行方式、燃料动力等指标分配权重,开展海水提铀评价标准研究,结合海水提铀材料规模化制备、材料吸附-脱附-再生-回收等全流程经济性评价,构建公斤级铀产品技术经济评价标准。



图2 海水提铀海试基地示意图(来自于网络)

Fig. 2 Schematic diagram of testing ground for uranium extraction from seawater(from the network)

1.2 第二阶段

第二阶段为2026—2035年:开展海水提铀材料性能增强研究并实现材料工业化制备,材料在海水中的有效吸附容量为 $20\sim 25\text{ mg/g}$,完成吨级铀产品规模海水提铀现场试验研究,构建完善的海水提铀技术经济评价标准,建成海水提铀吨级示范工程,海水提铀成本达到每 kg 铀 $150\sim 200$ 美元,达到世界领先水平。研究内容主要包括:(1) 材料工业化制备。在前期材料规模化生产的基础上,以绿色合成化学为手段,利用研制的材料工业化生产的装置开展材料工业化制备,优化材料生产工艺流程,研究确定投料比、反应时

间、反应温度等关键工艺参数,突破材料工业化生产关键技术,建设吸附材料示范生产线,为吨级铀产品的海试提供材料支持。(2) 吨级铀产品海水提铀工艺研究。改进提铀装置,在海试基地进行材料海试布局、投放,利用研发的海水提铀产品制备与后处理装置,对吸附铀的材料进行脱附及回收工艺试验,对全流程工艺进行验证,深入研究各环节工艺流程,优化明确工艺参数,获得吨级铀产品。(3) 吨级铀产品规模技术经济评价。以国内外海水提铀技术的研究成果、工程化试验方法的发展和实践经验的总结为基础,结合技术经济评价开发程序和设计规定,参考其他国际通用惯例和标准,构建吨级铀产品规模技术经济性评价标准。

1.3 第三阶段

第三阶段为2036—2050年:突破制约海水提铀工业化关键技术瓶颈,实现海水中提取铀产品连续生产能力及海水提铀技术工业化应用,研究水平整体处于世界领先水平。研究内容包括:(1) 外动力驱动海水提铀装置研制。为了降低海水提铀过程中动力消耗增加海水提铀成本的问题,可采用外动力驱动进行能量输入实现海水与吸附材料的充分有效接触。将风能、太阳能或潮汐能与海水提铀技术耦合(图3),利用海面辽阔空间建设风能或太阳能的发生装置,将海水提铀装置设计安装在海面下,通过泵入海水实现吸附材料周围海水的充分循环,使材料最大程度发挥吸附效力,实现从海水中高效提取铀。(2) 海水提铀工业化试验研究。开展材料工业化连续生

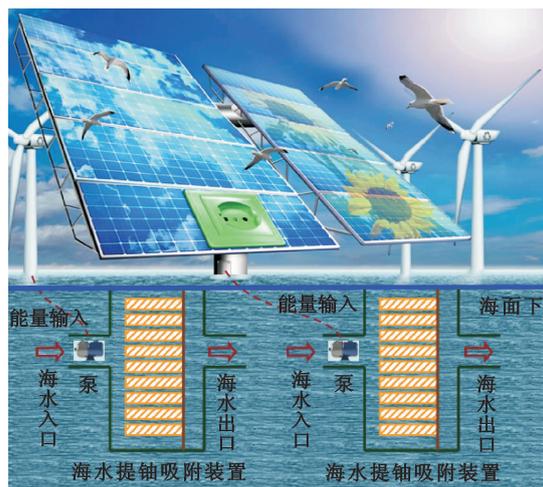


图3 外动力驱动海水提铀装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of uranium extraction device from seawater driven by external power

产、现场海试试验,利用海水提铀吸附-脱附-再生-回收全流程提取工艺,实现海水中提取铀产品连续生产能力,建立海水提铀工业化示范,完成海水提铀的工业化应用。(3)海洋资源综合回收利用。将海水提铀与海水淡化技术进行耦合,对海水淡化产生的浓海水中的有价元素(如铀、镁、锂、钾等)进行富集回收,建立海水中铀元素全流程回收工艺技术方法,确定相关提取工艺,实现海水资源利用最大化。(4)海水提铀工业化技术经济评价。以海水提铀工业化海试试验为依据,综合考虑材料吸附效率、装置及运行方式、燃料动力等指标分配权重,构建海水提铀工业化技术经济性评价标准体系,客观评价海水提铀经济性。

2 结论和建议

(1)海水提铀研究工作将进入一个崭新的阶段,本文提出了中国核工业集团有限公司领衔的“海水提铀技术创新联盟”对于未来海水提铀的发展规划与展望,并制定了“三步走”的技术战略路线,通过对海水提铀关键共性技术攻关,解决制约海水提铀发展的技术难点,实现海试工程从“量”到“质”的突破,推动海水提铀向工程化迈进,为国家核能事业可持续发展提供铀资源保障。

(2)建议将海水铀资源开发关键技术纳入国家资源调查和科技规划、计划,并给予必要支持,利用技术进步提高经济可采资源储量,通过提前战略布局掌握未来铀资源制高点。

参考文献:

- [1] 陈树森,任宇,丁海云,等.海水提铀的研究进展[J].原子能科学技术,2015,49(3):415-423.
- [2] 李昊,文君,汪小琳.中国海水提铀研究进展[J].科学通报,2018,63(5-6):481-494.
- [3] David S S, Ryan P L. Seven chemical separations to change the world[J]. Nature, 2016, 532(7600): 435-437.
- [4] 杜阳,邱咏梅,但贵萍,等.海藻吸附水中铀离子初步研究[J].原子能科学技术,2007,41(4):416-419.
- [5] Krishnan C, Dheram K, Jayaraman A. Dispersive liquid-liquid micro extraction of uranium(VI) from groundwater and seawater samples and determination by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry and flow injection-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Analytical Methods, 2011, 3: 2140-2147.
- [6] Davies R Y, Kennedy D J, Mcilroy R W, et al. Extraction of uranium from sea water[J]. Nature, 1964, 4950: 1110-1115.
- [7] Tan L, Liu Q, Jing X, et al. Removal of uranium(VI) ions from aqueous solution by magnetic cobalt ferrite/multiwalled carbon nanotubes composites[J]. Chem Eng J, 2015, 273: 307-315.
- [8] Tian G, Geng J, Jin Y, et al. Sorption of uranium(VI) using oxime-grafted ordered mesoporous carbon CMK-5[J]. J Hazard Mater, 2011, 190(1-3): 442-450.
- [9] Ma L, Gao J, Huang C, et al. UiO-66-NH-(AO) MOFs with a new ligand BDC-NH-(CN) for efficient extraction of uranium from seawater[J]. ACS Appl Mater Inter, 2021, 13: 57831-57840.
- [10] Wang Y, Lin Z, Zhang H, et al. Anti-bacterial and super-hydrophilic bamboo charcoal with amidoxime modified for efficient and selective uranium extraction from seawater[J]. J Colloid Interf Sci, 2021, 598: 455-463.
- [11] Wang Y, Li Y, Zhang Y, et al. Nanocellulose aerogel for highly efficient adsorption of uranium(VI) from aqueous solution[J]. Carbohydr Polym, 2021, 267: 1-10.
- [12] Tamada M. Current status of technology for collection of uranium from seawater[R]. Japan: Japan Atomic Energy Agency, 2009.
- [13] Carboni M, Abney C W, Liu S B, et al. Highly porous and stable metal-organic frameworks for uranium extraction[J]. Chem Sci, 2013, 4: 2396-2402.
- [14] Das S, Pandey A K, Manchandab V K. Chemical aspects of uranium recovery from seawater by amidoximated electron-beam-grafted polypropylene membranes[J]. Desalination, 2008, 232: 243-253.
- [15] Feng L, Wang H, Feng T, et al. In-situ synthesis of uranyl-imprinted nanocage for selective uranium recovery from seawater[J]. Angew Chem, 2021, 61(13): 1-9.
- [16] Ju P, Liu Q, Zhang H, et al. Hyperbranched topological swollen-layer constructs of multi-active sites polyacrylonitrile(PAN) adsorbent for uranium(VI) extraction from seawater[J]. Chem Eng J, 2019, 374: 1204-1213.
- [17] Xu X, Zhang H J, Ao J X, et al. 3D hierarchical porous amidoxime fibers speed up uranium extraction from seawater[J]. Energ Environ Sci, 2019, 12: 1979-1988.