

基于深海海洋能开发的 海洋命运共同体构建路径思考

赵强^{1,2}, 王红丽³

(1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室 青岛 266237

3. 盐城师范学院城市与规划学院 盐城 224007)

摘要:为践行海洋命运共同体理念和加快推动海洋强国建设,文章从深海海洋能开发的战略意义和价值出发,综述深海温差能开发的研究现状和应用前景,进而提出深海温差能的全球开发构想和开发路径。研究表明:深海海洋能开发在应对全球气候变化、捍卫国家能源安全、加快进入氢能源时代、支撑深海矿产资源开发以及推动构建海洋命运共同体方面均具有重要意义和价值,其中深海温差能是主要开发领域;目前国内外均已开展深海温差能开发研究,随着热电材料和海上平台等技术的发展,深海温差能开发展现巨大的应用前景;深海温差能开发可充分利用热带大洋环流的特点,通过布设大规模浮式平台的方式实现;通过逐步构建南海、RCEP、太平洋、印度洋和大西洋的蓝色能源命运共同体,最终构建全球蓝色能源命运共同体,实现深海温差能的全球开发。

关键词:深海海洋能;温差能;蓝色能源命运共同体

中图分类号:P743

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2022)08-0099-10

The Path of Building Maritime Community with Shared Future Based on the Development of Deep-Sea Marine Energy

ZHAO Qiang^{1,2}, WANG Hongli³

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

2. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology

(Qingdao), Qingdao 266237, China;

3. School of Urban Planning, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, China)

Abstract: In order to practice the concept of “maritime community with shared future” and accelerate the construction of a maritime power, this paper reviewed the strategic significance and value of deep-sea marine energy development, and summarized the research status and application prospects of ocean thermal energy conversion (OTEC), and put forward the global development concept and development path of OTEC. The results showed that the development of deep-sea marine energy was of great significance and value in coping with global climate change, safe-

收稿日期:2021-11-09;修订日期:2022-08-10

基金项目:青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山科技创新计划项目“深海专项总体战略研究”(2016ASKJ11).

作者简介:赵强,助理研究员,博士,研究方向为海洋地质

guarding national energy security, accelerating the arrival of the hydrogen energy era, supporting the development of ocean mineral resources, and promoting the building of “Maritime Community with Shared Future”. Among them, OTEC was the main development target. At present, OTEC had been researched for many years at home and abroad. With the progress of thermoelectric materials and offshore platforms technologies, OTEC showed great application prospects. The OTEC could be realized by making full use of the characteristics of tropical ocean circulation through the deployment of large-scale floating platforms. Through the gradual construction of the blue energy community of the South China Sea, RCEP, the Pacific Ocean, the Indian Ocean and the Atlantic Ocean, the global community of blue energy destiny would be finally built.

Keywords: Deep-sea marine energy, Thermal energy conversion, Maritime community with shared future

0 引言

海洋命运共同体是人类命运共同体在海洋领域的具体表现,有利于破除海洋环境保护领域的“公地悲剧”和海洋资源开发领域的“圈地思维”,为全人类谋福利,是中国积极参与全球海洋治理而贡献的中国智慧和方案。然而要想将“中国倡议”变为“国际共识”,消除来自不同意识形态的猜疑、误解和偏见,化美好的愿景为成功的实践和精彩的现实,须将海洋命运共同体理念落实在具体行动上。

随着陆地资源的日渐枯竭,人类社会正面临严峻的资源与环境危机,资源丰富但尚未充分开发的深海成为人类可持续发展的希望所在,同时是海洋命运共同体建设的重要领域。除储量极为丰富的矿产资源外,深海还是储量近乎无限的可再生能源宝库,理论上可满足人类社会所有的能源需求且清洁、低碳和无污染,有巨大潜力成为未来海洋经济的重要支柱,支撑人类的可持续发展。深海海洋能开发须建设跨越大洋的移动平台体系和传输管道系统,将众多沿海国家紧密相连,极度依赖国际合作,因而与深海矿产资源开发相比,深海海洋能开发具有更显著的“共商、共建、共享”属性,能为海洋命运共同体建设开辟更为广阔的合作空间。

随着海洋科技的快速发展,大规模开发深海海洋能的条件逐渐成熟。尤其是氢能源时代的开启为深海海洋能开发开辟重要通道,使深海温差能发电制氢后供陆地所需。凭借巨大的资源储量,深海

海洋能开发技术一旦突破,必将对全球能源格局产生重大而深远的影响。经过数十年的持续研发,发达国家已在深海海洋能开发技术方面取得明显的领先优势,我国亟须在深海海洋能开发领域加大投入并奋起直追。

1 建设海洋强国和构建海洋命运共同体

党的十八大以来,我国相继提出建设海洋强国的要求以及构建海洋命运共同体的倡议。对我国而言,建设海洋强国与构建海洋命运共同体并行不悖,即在建设海洋强国的过程中推动构建海洋命运共同体,在构建海洋命运共同体的过程中实现海洋强国建设目标。

海洋强国不仅是社会主义现代化强国的应有之义,而且应作为建设社会主义现代化强国的重要支撑而先期实现;由于陆地资源的日渐枯竭,深海开发至关重要。构建海洋命运共同体有利于寻找更多的朋友,消除潜在的发展风险和障碍,使海洋强国之路行稳致远;要想在深海领域推动构建海洋命运共同体,根本上还要依赖重大海洋基础设施工程,将各沿海国家连接成为“利益交织,命运与共”的整体。

我国历来高度重视深海矿产资源勘探开发,在深海海底多金属结核、多金属硫化物和富钴铁锰结壳等领域开展全方位布局。相比之下,深海海洋能的技术水平和研发力量较为落后,有可能成为我国深海开发的薄弱环节。

2 深海海洋能开发的战略意义和价值

深海海洋能是相对浅海海洋能而言的,主要包括深海温差能和深海波浪能。深海波浪能的储量非常丰富,但主要富集于狂暴的南大洋且开发难度太大,因此在浅海波浪能开发实现广泛商业化前,深海波浪能开发不具有可行性。本研究中的深海海洋能主要指深海温差能。

深海温差能是指海洋表层与深层海水之间的温差储存的热能,利用这种热能可以实现热力循环并发电。只有当表层与深层海水的温差大于 20°C 时才有开发价值,因而深海温差能主要富集于 $20^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{N}$ 的热带海域^[1]。深海温差能发电(海洋热能转换,OTEC)的设想于1881年由法国科学家阿松瓦尔提出^[2],而后由其学生克劳德完成原理实验并成功在古巴马坦萨斯海湾建成首个深海温差能发电装置^[3]。

海洋是世界上最大的太阳能集热器和储能系统,深海温差能约占海洋可再生能源储量的90%。不同研究人员对深海温差能开发潜力的估算有较大出入^[4-6],有研究表明利用海洋环流模型估算深海温差能的可采储量达300亿kW,是全球总装机容量的数倍^[1]。深海温差能作为储量巨大的可再生能源,具有受昼夜和季节影响小、不存在间歇以及不占用土地资源等特点,被国际社会普遍认为是最具开发价值和潜力的海洋资源。深海温差能开发对于应对全球气候变化、捍卫国家能源安全、加快进入氢能源时代、支撑深海矿产资源开发以及推动构建海洋命运共同体均具有重要意义。

2.1 应对全球气候变化

应对气候变化和实现可持续发展是当今人类社会面临的2个重大问题。人类进入工业化时代以来,能源消耗量急剧增加,在短短的100余年内便将地球数亿年来累积的化石能源消耗过半,造成大气中二氧化碳含量以每年约2ppm的速度^[7]极速增加。作为重要的温室气体之一,大气中二氧化碳含量的增加直接导致气候变暖、冰川消融、海平面上升和海洋酸化等全球环境变化现象^[8],间接加剧生态系统恶化、加快物种灭绝速度以及加大旱涝灾害频率和强度,从而严重威胁人类社会的可持续发展。为此,2016年170余个国家的领导人齐聚联合

国总部并共同签署《巴黎协定》^[9],旨在加强对气候变化威胁的全球应对,主要路径是大力发展可再生能源并实现对常规化石能源的革命性替代。作为潜力巨大的可再生能源,深海温差能可为减少温室气体排放以及推动能源消费结构的清洁和低碳转型开辟新的来源,为有效应对全球气候变化做出重要贡献。

2.2 捍卫国家能源安全

我国能源供需矛盾突出,能源安全已经成为国家重大经济安全问题之一。自2011年起我国超过美国成为世界第一能源消费大国,随着我国经济的进一步发展,未来多年的能源需求总量还会进一步升高。常规化石能源是我国一次能源消费的主体,作为“富煤贫油少气”的国家,煤炭一直是我国能源消费的主力,而石油和天然气则大量依赖进口。巨大的能源支出不仅加重国家发展负担,而且提高国家能源风险。

为化解能源危机和摆脱能源依赖,近年来我国大力发展非化石能源。根据《中国能源电力发展展望2020》,到2050年我国电力总装机容量可能达到47亿~57亿kW,到2060年我国新能源装机容量将占总装机容量的66%,新增装机容量将以光伏和陆上风电为主,气电、核电和水电均缓慢增长。此外,《中国能源电力发展展望2020》提出以化石能源和可再生能源满足未来我国的所有能源需求,而对深海可再生能源开发未做前瞻性考虑,在一定程度上加大我国生态环境压力。深海属于全人类共同财产,深海温差能有巨大潜力成为支撑人类社会可持续发展的重要清洁能源,其大规模开发一旦实现,可为国家发展开辟稳定的清洁能源供应渠道,实现氢能源对油气能源的战略接替,从而有效捍卫国家能源安全,助推我国能源消费结构的清洁和低碳转型。

2.3 加快进入氢能源时代

目前全球氢能源开发已取得长足进步,人类正快速步入氢能源时代。根据国际氢能源委员会的报告^[10],到2050年全球终端能源需求的18%将来自氢能源,氢能源的市场规模将超过2.5万亿美元。根据《2050年世界与中国能源展望》^[11],2035年前后氢能源汽车的商业化成本和便捷性可与传统汽

车竞争,2050 年氢能源占交通用能的比重可达到 32.9%。目前氢能源已经成为备受关注的新能源发展热点,美国、日本、韩国和欧盟等国家和地区以及一些传统能源公司都相继制定氢能源产业发展战略和政策^[12-15],越来越多的汽车和金融公司也纷纷涉足氢能源相关业务,并形成多产业协同创新发展的新格局。全球众多政府和跨国企业已在氢能源发展战略上达成一致,即氢能源开发将成为全球产业和能源革命的发展方向。面对世界氢能源迅猛发展的大势,我国亦不甘落后,2019 年的《政府工作报告》写入氢能源开发,各地方政府的氢能源扶持政策^[16]和氢能源产业园区如雨后春笋般涌现^[17];根据中长期规划,到 2025 年我国氢能源产值将超过 5 100 亿元,并最终发展成万亿市场。

氢能源开发的关键环节在于获取大规模且廉价的氢气。目前制氢的主要方式包括氯碱工业副产氢、电解水制氢、化工原料制氢(甲醇裂解、乙醇裂解和液氢裂解等)、石化资源制氢(石油裂解和水煤气法等)和新型制氢(生物质和光化学等)。2017 年全球氢气产量约为 6 000 万 t,其中 96%来自热化学重整,而电解水制氢仅占 4%^[18],原因在于电解水制氢的成本高昂。然而要真正叩开氢能源时代的大门,大规模制氢必须摆脱对化石能源的依赖,因此利用可再生能源制氢是进入氢能源时代的必然要求。

氢气是二次能源,制氢须大量消耗一次能源。从远期来看,利用“可控热核聚变”的能量是理想的制氢方案,但据美国能源部预测这可能在 30~50 年后才会成为现实。从近期来看,规模化开发弃水、弃光和弃风等清洁能源是获取廉价氢气的重要方法,但因其规模有限仅能算是补充性能源渠道,而大规模开发陆地可再生能源制氢则远不如直接用电更加经济实惠。从中远期来看,建立专门的深海浮动发电平台,将潜力巨大而尚待开发的深海温差能利用起来发电制氢,可一举解决大规模氢气来源和深海温差能资源闲置的问题,因而可能是通往氢能源时代的最佳路径,从而加速氢能源时代的到来。

值得关注的是,2019 年韩国发布《氢能经济发展路线图》^[12],希望以氢燃料电池汽车和燃料电池为核心,将韩国打造成世界最高水平的氢能源经济

领先国家,使韩国从化石燃料资源匮乏国转型为清洁氢能源产出国。日本是最重视氢能源开发的国家,2017 年发布《氢能源基本战略》^[13]提出在全球率先实现“氢社会”,以摆脱能源困境和确保能源安全,甚至期待未来占据该产业链顶端并成为能源出口国。日本和韩国均是世界排名前列的石油进口国,严重缺乏常规化石能源,但都力争成为氢能源时代的能源出口国,不免令人质疑其制氢的能源来自何处?从近年来日本和韩国在深海温差能发电方面所采取的举措不难推测,深海温差能发电制氢将是其重要选项。

2.4 支撑深海矿产资源开发

矿产资源是国家建设和社会发展的物质基础,而诸多陆地矿产资源有可能在未来数十年甚至数十年内枯竭。根据《全球矿业发展报告 2019》^[19],全球锑、锡、金、锌、铅和银的储产比小于 20 年,而镍、铜、钨、锰、铬、钼和钴的储产比小于 50 年。与此同时,上述矿产资源大多在深海有着极为丰富的储量,在不远的将来,开发深海矿产资源是人类实现可持续发展的必由之路。截至 2021 年,国际海底管理局(ISA)已与 22 个承包商签订 31 个为期 15 年的深海海底多金属结核、多金属硫化物和富钴铁锰结壳勘探合同^[20]。自 2017 年以来,国际海底管理局通过“年度承包者大会”制度对深海矿产资源的开发规章、数据共享和环境管理等开展多年探讨,并在全球形成从勘探向开发转变的共识。目前国际海底管理局正加快制定深海矿产资源开发的国际规则,并有望在短期内获得通过。

在深海矿产资源开发技术方面,许多国家已成功试采^[21-23],虽然与陆地矿产资源开发相比成本仍较高,但随着科技进步,尤其是机器人和人工智能技术的快速发展,技术条件已不再是深海矿产资源开发的最大阻碍。除技术条件外,深海矿产资源开发还是高耗能产业,须有大量能源作为支撑。在全球能源消费结构向清洁和低碳转型的背景下,未来的深海矿产资源开发不能依赖常规化石能源,也不能依赖陆地的可再生能源(成本高),唯有依赖深海自身(可再生能源)才是最佳解决途径。深海温差能开发将为深海矿产资源开发提供大量廉价而清洁的可再生能源,从而助

推深海矿产资源开发的早日实现。

2.5 推动构建海洋命运共同体

海洋命运共同体的最终实现须在调节各国在海洋领域的利益和纷争中凝聚全人类最大共识,推动文化交流融合,增进全人类共同福祉。在海洋领域,全人类的最大福祉就是海洋环境的保护和深海资源的公正、有序与和平开发。其中,构建海洋命运共同体的基础在于海洋环境的保护,而重点则在于深海资源的开发。与西方文化相比,中国文化更加重视和谐与包容,更有希望将未来的深海资源开发导向公正、有序与和平。

目前全球深海矿产资源勘探与开发有陷于“圈地思维”的风险,国家之间的技术鸿沟也可能造成新的不公。开发规则如何制定还有待观察,然而无论矿区如何分配,深海矿产作为固定的不可再生资源,其开发天然具有独占性和排他性特征。而深海温差能是流动的可再生资源,不专属于某国和某地,其开发须由各国在法律、制度、设施和后期维护等方面开展深度合作并结成利益共同体,因此深海温差能开发更有利于推动构建海洋命运共同体。

3 深海温差能开发的研究现状和应用前景

3.1 研究现状

3.1.1 国外

深海温差能发电技术近50年来得到较快的发展。美国从20世纪60年代开始研究温差能发电技术,并于1979年在夏威夷建成首个温差能发电装置;该装置额定功率为50 kW,净输出功率为18.5 kW,系统验证温差能开发的可行性^[24]。受20世纪70年代石油危机的影响,美国曾制定深海温差能开发的宏大计划,拟利用墨西哥湾暖流的热能在东部沿海建立500座海洋热能发电站,发电能力达2亿kW;但限于当时的技术条件以及石油美元确立带来的能源危机消解,美国对温差能发电的研究热情急速冷却。与此同时,以美国洛克希德·马丁公司和马凯公司为代表的企业多年致力于深海温差能开发技术研发,完成大量的实验和测试,拥有多年的研究基础和经验。2013年洛克希德·马丁公司计划建设全球第一座10 MW陆基 OTEC 电站,但最后因其他原因终止;2015年马凯公司在夏威夷建成100 kW的 OTEC 示

范电站并成功并入美国国家电网,该电站成为全球第一个真正的闭式温差能电站^[25]。

日本早在1981年即在太平洋赤道附近建设100 kW实验电站,2013年冲绳县久米岛50 kW的 OTEC 电站首次发电成功^[26]。2009年法国国有船舶制造集团在法属留尼汪岛进行10 MW岸基 OTEC 电站研发测试,并计划在法属马提尼克岛建设16 MW漂浮式 OTEC 电站以及在安达曼-尼科巴群岛建设20 MW的 OTEC 电站。2016年韩国船舶与海洋工程研究院在南太平洋建成1 MW的 OTEC 电站,并计划在美属维尔京群岛建造15 MW的 OTEC 电站以及在萨摩亚等地建设 OTEC 电站或海水空调(SWAC)装置^[26]。此外,荷兰Bluerise BV公司正在斯里兰卡建造10 MW的 OTEC 电站,法国巴多集团计划为马尔代夫建造2 MW的 OTEC 系统,伦敦贝尔-皮里电力公司计划在菲律宾建设10 MW的 OTEC 电站。

总之,近年来国外的深海温差能开发技术取得实质性进展,10 MW级和20 MW级的 OTEC 电站将陆续建成并将成为研发100 MW级 OTEC 电站的基石。深海温差能开发产业化进程的不断加快在很大程度上得益于科技的进步,尽管温差能发电的成本尚不能与其他可再生能源竞争,但随着相关技术的改进,其成本将进一步降低。

3.1.2 国内

自20世纪80年代初,中国科学院广州能源研究所、中国海洋大学和国家海洋技术中心等陆续开展深海温差能开发研究。2005年天津大学研制用于混合式深海温差能开发的200 W氨饱和蒸汽试验用透平;2012年自然资源部第一海洋研究所(原国家海洋局第一海洋研究所)利用电厂温排水研制15 kW的 OTEC 试验装置^[27],在温差为19.7℃时达到额定功率为15 kW,透平发电效率约为73%,并于2017年开展高效氨透平和热交换器等关键技术研发^[28-29]。自2016年开始,中国海油集团公司通过引进国际先进技术,开展深海温差能开发技术研究。

与国外相比,国内的深海温差能开发技术存在明显差距,具体体现在研发力量分散、缺少专门研发机构和公共研发平台以及创新力度明显不足等方面,而

最重要的是缺少深海温差能开发的长期规划。

3.2 应用前景

深海温差能的发展潜力毋庸置疑,但其能否成为具有战略价值的清洁能源以支撑人类社会可持续发展还有赖相关技术的进一步发展。自从 1881 年利用深海温差能发电的设想产生以来,现有 OTEC 电站的基本原理一直未有重大变化,都是利用海洋表面的温海水加热某些低沸点工质并使之汽化,或通过降压使海水汽化以驱动汽轮机发电,同时利用海底的冷海水将做功后的乏汽冷凝,使之重新变为液体,如此循环往复。由于冷、热源之间的温差较小,20℃温差下的理论最大热力循环效率为 6.77%,朗肯循环效率仅为 3%,混合工质高效热力循环使目前的热力循环效率提升到约 5%^[28],而这一能量转换效率仍然较低。

与此同时,深海温差能发电还有热电海洋热能转换(TE-OTEC)的技术路线,即利用塞贝克效应将深海温差能直接转换为电能。具体方法为:将 P 型半导体和 N 型半导体在热端连接,则在冷端可得到 1 个电压;1 个 PN 连接所能产生的电动势有限,而将多个 PN 连接串联起来就可得到足够的电压并成为温差能发电机。该技术路线无须以工质流体为中介,省却机械能转换的环节^[30],在设计上更为简洁且安全性和可靠性更高。然而 TE-OTEC 发电的效率通常比常规 OTEC 电站还低,其效率的提升高度依赖热电材料的优值(ZT 值),而数十年来寻找高优值材料的进展缓慢,从而极大地限制这一技术路线的发展。

近十年来,随着热电材料科技的进步,原本在概念上存在的二维、一维乃至零维材料有了实现的可能。近年来已发现多种 ZT 值接近 3 的热电材料,如 PbTe (ZT=2.6)、 Sn_{1-x}Se (ZT=2.8) 和 Cu_{2-x}Se ^[31],而室温下的热电材料 ZT 值已达到 2.4^[32]。据估算,如果 ZT 值超过 3,TE-OTEC 发电的效率可接近理想卡诺机发电;如果 ZT 值达到 4,TE-OTEC 发电技术便具有广泛的商业价值;如果 ZT 值达到 6,TE-OTEC 发电的效率即接近地热发电;如果 ZT 值达到 20,TE-OTEC 发电的效率将接近燃煤机组发电。2019 年奥地利维也纳工业大学的恩斯特·鲍尔团队发现由铁、

钒、钨和铝元素组成的薄膜合金材料的 ZT 值为 5~6^[33],实现近年来热电材料领域的重大突破;但也有研究认为热电材料的属性要在相同方向测量才有效,而此类薄膜合金材料在属性测量方面存在困难,因而其 ZT 值可能被高估^[31]。2019 年日本丰田和住友的联合研究团队在 Cu_2Se 中测得超过 400 的 ZT 值,并在 340~400 K 的狭窄温度区间内得到超过 $\pm 2 \text{ mV/K}$ 的巨塞贝克效应^[34-35];研究团队认为这种巨塞贝克效应是由两相共存的相变过程中自调谐载流子的浓度效应所引起,震惊学界。尽管相关研究仍须进一步检验和改进,但由热电材料突飞猛进的发展趋势推测,新型高 ZT 值热电材料的研究可能随时取得重大突破。常温热电材料研究一旦取得重大突破并应用,深海温差能开发便会展现光明前景。

深海温差能开发须借助海上固定或移动浮式平台。在移动浮式平台方面,石油钻井行业在海上平台系泊和锚固方面已积累大量技术,现有技术和施工工艺已可构建至少 100 MW 容量的 OTEC 移动浮式平台,且有 30 年的运行寿命和承受强烈风暴的能力^[36]。但就未来的深海温差能开发而言,移动浮式平台的规模和使用寿命仍须数倍提升。2012 年我国提出 160 万 t 的千米级超大平台整体设计方案,我国第一座海上核动力项目平台建设也取得重大进展,这些成果都可作为深海温差能发电移动浮式平台的研发基础。此外,OTEC 电站的排水量很大,1 座 400 万 kW 的 OTEC 发电平台如以 5% 的热电转换效率计算,其总排水量将达 4 000 m^3/s ,已接近黄河汛期流量,足以改变平台周边海域的水体结构,从而对海洋生态环境造成不利影响;为尽可能减少排水对海洋环境和水体结构的不利影响,须将水排入与周边海域温度相近的水层,且排水层的厚度要尽可能薄,使其被周边水体快速消解,这就要求移动浮式平台的规模须达到千米级。

OTEC 发电平台的电力须转换为氢气才能在陆地上使用。按照现有制氢工艺,我国已示范生产的电解水制氢设备的单台制氢能力已达 5 000 m^3/h ,单台设备全年可制氢 3 800 t;以每个深水移动浮式平台安装 100 台该类型制氢设备计,在电力充足的情况下,单座移动浮式平台可年产氢气超过 30 万 t。为便于

氢气的储藏和运输,还可用二氧化碳和氢气反应生产甲醇^[37],采用该技术的千吨级液态太阳燃料合成示范项目已于 2020 年通过验收^[38]。

以目前电解水制氢的能效 50% 计,每座移动浮式平台的发电功率须超过 270 万 kW。设想的 OTEC 发电平台大小为 1 500 m×400 m,两侧搭载小型独立可拼接的单个功率为 10 万 kW 的 OTEC 发电单元,便于维修或更换,每个 OTEC 发电单元的占地空间为 100 m×100 m;抽、排水泵体系以

及制氢和储氢设备均集中于平台主框架内;在平台顶面铺设太阳能电池板作为辅助电源,以启动平台管泵体系运作(图 1)。

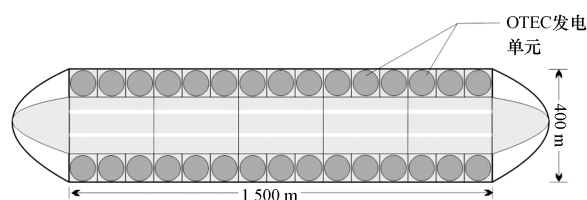


图 1 300 万 kW 深海温差能发电平台

未来深海温差能开发可同时采用 OTEC 和 TE-OTEC 模式,并综合开发太阳能^[39](图 2)。据估算,添加热电模块比仅使用太阳能和闭式温差能可在能效上提高 6.27%,其中热电材料的 ZT 值估计为 0.9;随着材料科学的进步,未来能效还有较大的提升空间。

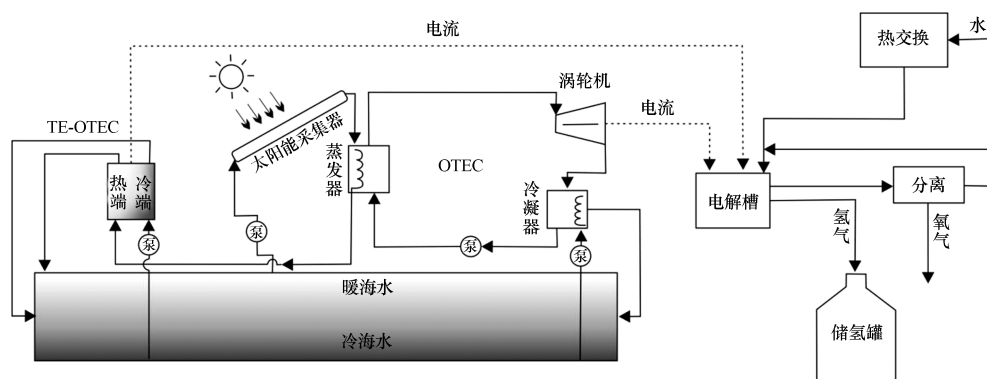


图 2 深海温差能综合开发

4 深海温差能的全球开发构想

全球深海温差能主要富集于 20°S—20°N 的热带海域。在东北信风和东南信风的持续吹拂下,该海域在赤道两侧分别形成由东向西流动的北赤道暖流和南赤道暖流,二者遇到陆地阻隔后分化和折返,在靠近赤道的海域又形成北赤道逆流和南赤道逆流并再次浩荡东归。赤道暖流、赤道逆流以及 2°S—2°N 之间的赤道潜流共同构成热带海洋上层横贯大洋的复杂环流系统。深海温差能全球开发应充分利用热带大洋环流的特点,科学布设发电平台。

以太平洋为例。北赤道暖流从加利福尼亚半岛尖端的东南部开始向西横贯太平洋,长约 1.4 万 km,宽度为 10°N—22°N,厚约 200 m,流速冬季快、夏季慢,平均为 0.2~0.3 m/s;至菲律宾东岸,北赤道暖流的 1 个分支向南与南赤道暖流北向分支汇合成东向

的赤道逆流,而主流则北上形成黑潮。与北赤道暖流相对应,由东南信风引起的南赤道暖流东起科隆群岛附近,向西穿越太平洋,宽度为 3°N—20°S,8 月的平均流速为 0.5~0.6 m/s;至新几内亚岛附近,南赤道暖流的 1 个分支向北加入赤道逆流,而主流则向南形成东澳大利亚暖流。北赤道逆流是全球大洋中最强的赤道逆流,夏季的宽度为 4°N—10°N,冬季向南移动约 2°;从菲律宾外海向东流经 1.5 万 km 到达巴拿马湾,流动幅宽为 300~700 km;流速西部快、东部慢,平均流速为 0.4 m/s,最快时达 1.5 m/s。南赤道逆流的宽度为 5°S—10°S,西起所罗门群岛附近海面,向东可达秘鲁海岸附近;流速也是西部快、东部慢,在 170°E 处约为 0.15~0.30 m/s。

借助于热带太平洋环流系统,OTEC 平台可在相对稳定的洋流通道内循环往复移动而不致四处漂移,从而使平台运行相对安全可控。可在平台漂移轨迹下方布设跨越大洋的海底输气管道,并每隔

一定距离(至少 2 000 km,具体须根据平台漂移速度以及制氢和储氢能力而定)设置 1 个接收氢气的平台,将制取的氢气快速向陆地输送。

与锚定式 OTEC 平台相比,移动浮式平台的温排水相当于在 200~300 m 的深度以 0.2~0.3 m/s 的速度铺设厚约 10~20 m、宽约 1~2 km 的薄层“水毯”,能够更快地被规模巨大的大洋表层环流所吸纳和消解,经过短暂的时间便能恢复至正常状态,不会使平台周边的海洋环境和水体结构发生根本性改变,从而减小对海洋环境的不利影响。可在热带太平洋环流系统内布设 1 000 座 300 万 kW 的大型 OTEC 平台(总功率为 30 亿 kW),其中北赤道暖流—赤道逆流系统与南赤道暖流—赤道逆流系统各 500 座。将每 2 座平台编为 1 组,各组平台即便布设于同一纬度,前后相距也有 100 km 以上;以 0.2~0.3 m/s 的平台漂流速度计,在下一组平台抵达前,平台排水有 3 d 以上的恢复期。如果各组平台错开纬度 1°布设成 2 排,则每排前后相距 200 km 以上,平台排水的恢复期可超过 7 d,从而保证热带大洋环流系统有充足时间恢复到自然状态。

由于平台排水能随时被大洋环流带走而不会在平台附近聚集,OTEC 平台也可按不同纬度间隔布设固定浮式平台。如此无须布设动力装置,排水管道的设计也更为简单;也无须另外布设氢气接收平台,平台制氢可直接经由管道向陆地输送,从而降低成本。

同理,在大西洋和印度洋赤道附近海域的热带环流系统内可同样布设此类 OTEC 平台,从而推动深海温差能的全球开发。

5 深海温差能的全球开发路径

深海温差能开发的最终理想是绿色开发深海可再生能源,满足人类可持续发展对清洁能源的需求,有效化解能源危机,为构建海洋命运共同体夯实根基。对我国而言,深海温差能开发的最终目标是为国民经济和社会发展提供足够的清洁能源,转变高度依赖常规化石能源的能源生产和消费结构,快速进入氢能源时代,彻底解除能源安全隐患,助力海洋强国建设。深海温差能开发是规模浩大且耗时持久的宏伟工程,其实现路径注定艰难曲折,

我国须付出极大的耐心和努力,分阶段和分区域实现。

5.1 构建南海蓝色能源命运共同体

我国的深海温差能开发要从南海起步。以《南海各方行为宣言》和“南海行为准则”为基础,与周边国家深化合作,共同构建南海蓝色能源命运共同体,共同开发南海深海温差能,化争议之海为和平之海和合作之海。

构建南海蓝色能源命运共同体是构建全球蓝色能源命运共同体的示范和先导项目,须突破深海温差能开发的关键技术并降低开发成本,使深海温差能开发达到商业化水平。应加快建设国内深海温差能开发研究机构,有效利用国内外研发力量,攻克深海温差能发电装置在高效转换、高可靠性和低成本建造上的关键技术难关;使用新材料和新技术打造海上无人智能浮动平台,实施深海温差能发电与制氢浮动平台示范工程,研发海上浮动平台抗风暴、抗腐蚀和生物附着技术,攻克海上平台高效制氢和存储等方面的关键技术难关;研究并有针对性地减小深海温差能开发装置对海洋生物和海洋环境的不利影响;通过多方协商确立南海深海温差能开发合作机制,联合南海周边国家建立深海温差能测试平台和研究基地以及海上浮动平台制造和维修基地,打造氢能源运输网络。

5.2 构建 RCEP 蓝色能源命运共同体

经过多年的谈判,包括中国、日本、韩国、澳大利亚、新西兰和东盟 10 国在内的 15 方成员于 2020 年签订《区域全面经济伙伴关系协定》(RCEP)。此后,中国、日本和韩国商定在 RCEP 的基础上进一步打造“RCEP+”自贸区。

亚洲是未来全球经济增长最快的地区,也是能源需求增长最快的地区。东亚和东南亚国家普遍能源匮乏且需求巨大,不同程度地面临能源安全挑战。RCEP 成员在能源安全领域具有深切的合作意愿,在南海和西太平洋深海温差能开发方面具有广阔的合作空间。因此,在 RCEP 框架内开展深海温差能开发合作将极大地缓解各国对进口能源的依赖,同时有利于节能减排,使能源消费更加绿色和清洁并早日进入氢能源时代。

值得注意的是,日本和韩国在深海温差能开发方面较我国领先,且在氢能源汽车制造方面已处于全球领先地位。日本和韩国都已制定远大的氢能源发展目标,而深海温差能开发是成功实现氢能源发展目标的基石。因此,积极与日本和韩国开展深海温差能开发合作,有利于快速提升我国深海温差能开发的技术水平。

构建 RCEP 蓝色能源命运共同体应充分利用现有的产业链合作基础,充分发挥各国优势,在中国、日本和韩国的合作中突破系列关键技术并形成产业示范,再逐步向其他 RCEP 成员辐射和推广。各国应充分协商,大国、强国和具有区位优势的国家应适当让步,综合考虑投资、人口、技术、领海和基础设施等方面的贡献公平分享成果,既让人民享受廉价能源,又要兼顾企业经济效益。

5.3 构建太平洋蓝色能源命运共同体

太平洋广阔的深海蕴藏丰富的温差能资源,太平洋深海温差能开发不仅可为周边国家的发展提供源源不绝的清洁能源,而且可为深海矿产资源开发提供廉价能源和电力支撑。在依托 RCEP 开发西太平洋深海温差能的基础上,通过成立太平洋深海温差能开发合作组织向太平洋全域扩展,由各方政府和企业出资成立专业开发公司,实现共商、共建和共享,最终构建太平洋蓝色能源命运共同体。

值得关注的是,太平洋深海温差能开发将为太平洋岛国带来新的发展机会,并可能使其成为全球重要的氢能源供应基地以及浮动平台设备保障基地。太平洋岛国是“一带一路”和“人类命运共同体”建设的重要组成部分,我国应尽早布局,积极与太平洋岛国合作开发深海温差能,借助“中国-太平洋岛国经济发展合作论坛”平台,全方位推进与太平洋岛国的合作关系。

5.4 构建全球蓝色能源命运共同体

印度洋和大西洋的深海温差能同样具有巨大的开发价值。除波斯湾地区外,印度洋周边国家普遍能源匮乏且需求巨大。维护印度洋地区的和平与稳定是我国以及印度洋周边国家的共同愿望和追求,我国应发挥技术、产业链和产能方面的优势,积极参与并支撑印度洋深海温差能开发,推广成熟

的区域合作模式,进一步推进与印度洋周边国家的友好往来和经济合作,构建印度洋蓝色能源命运共同体。在构建太平洋和印度洋蓝色能源命运共同体的基础上,积极参与大西洋深海温差能开发,推动构建大西洋蓝色能源命运共同体,最终构建全球蓝色能源命运共同体。

6 结语

深海是我国建设海洋强国和构建海洋命运共同体的重要领域,深海海洋能是人类可持续发展的重要战略资源,因而深海海洋能开发对于我国建设海洋强国和构建海洋命运共同体具有极为重要的意义和价值。随着大规模开发深海海洋能的条件日益成熟,我国亟须在深海海洋能开发方面加大研发投入、尽快占据技术前沿以及制定总体规划,协调各国早日实现深海海洋能全球开发。

参考文献

- [1] RAJAGOPALAN K, NIHOUS G C. Estimates of global Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) resources using an ocean general circulation model[J]. *Renewable Energy*, 2013, 50(2): 532—540.
- [2] D'ARSONVAL A. Utilisation des forces naturelles. Avenir de l'électricité[J]. *Rev. Sci.*, 1881, 17: 370—372.
- [3] CLAUDE G. Power from the tropical sea[J]. *Mech. Eng.*, 1930, 52(12): 1039—1044.
- [4] JOHNSON F A. Closed-cycle Ocean Thermal Energy Conversion [A]. SEYMOUR R J. *Ocean energy recovery: the state of the art* [M]. New York: ASCE, 1992: 70—96.
- [5] ABELSON P H. Renewable energy from the ocean: a guide to OTEC[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1994, 21(1): 66.
- [6] NIHOUS G C. An order-of-magnitude estimate of Ocean Thermal Energy Conversion resources[J]. *Journal of Energy Resources Technology Transactions of the Asme*, 2005, 127(4): 328—333.
- [7] NOAA. Monthly average mauna loa CO₂ [EB/OL]. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>, 2021—11—04.
- [8] GATTUSO J P. Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios [J/OL]. <https://doi.org/10.1126/science.aac4722>, 2021—11—02.
- [9] United Nations Framework Convention on Climate Change. The Paris agreement [EB/OL]. https://unfccc.int/fifiles/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_

- english_.pdf, 2021-11-04.
- [10] Hydrogen Council. Hydrogen scaling up: a sustainable pathway for the global energy transition [EB/OL]. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>, 2021-11-04.
- [11] 中国石油集团经济技术研究院. 2050 年世界与中国能源展望 [R/OL]. <http://etri.cnpc.com.cn/etri/qydt/201909/9de35221b0b04df180c21e02f8a87a43.shtml>, 2020-05-20.
- [12] 亚洲经济中文网. 韩政府发布氢能经济发展路线图 [EB/OL]. <http://korea.people.com.cn/n1/2019/0118/c407882-30576970.html>, 2020-05-10.
- [13] 新华网. 日本发布“氢能源基本战略” [EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/2017-12/26/c_129775996.htm, 2020-05-20.
- [14] U.S. Department of Energy. Energy department hydrogen program plan [EB/OL]. <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>, 2021-11-04.
- [15] EU hydrogen strategy [EB/OL]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1259, 2021-11-04.
- [16] 澎湃新闻. 短短 6 个月, 37 项国家和省市地方氢能政策集中发布 [EB/OL]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_8175064, 2021-11-04.
- [17] 北极星储能网. 21 个氢能小镇 (氢谷、氢能产业园、氢能中心) 在中国忽如一夜春风起 [EB/OL]. <https://chuneng.bjx.com.cn/news/20190408/973198.shtml>, 2021-11-04.
- [18] 观研报告网. 2019 年我国氢能行业制氢与储氢技术发展现状分析 [EB/OL]. <http://free.chinabaogao.com/nengyuan/201902/02203cR42019.html>, 2021-11-04.
- [19] 自然资源部中国地质调查局国际矿业研究中心. 全球矿业发展报告 2019 [R/OL]. http://www.mnr.gov.cn/zt/hu/gjkydh/2019nzggjkydh/hydt_33148/201910/t20191011_2470470.html, 2021-11-04.
- [20] ISA. Exploration contracts [EB/OL]. <https://www.isa.org/jm/exploration-contracts>, 2021-11-05.
- [21] 刘少军, 刘畅, 戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 8-18.
- [22] 戴瑜, 刘少军. 深海采矿机器人研究: 现状与发展 [J]. 机器人, 2013, 35(3): 13.
- [23] 王春生, 周怀阳, 倪建宇. 深海采矿环境影响研究: 进展、问题与展望 [J]. 海洋学研究, 2003(1): 56-65.
- [24] 王传崑. 海洋能资源分析方法及储量评估 [M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [25] VYAWAHARE M. Hawaii first to harness deep-ocean temperatures for power [J/OL]. <https://www.scientificamerican.com/article/hawaii-first-to-harness-deep-ocean-temperatures-for-power/>, 2020-10-04.
- [26] 岳娟, 于汀, 李大树, 等. 国内外海洋温差能发电技术最新进展及发展建议 [J]. 海洋技术学报, 2017(4): 82-87.
- [27] 刘伟民. 15 kW 温差能发电装置研究及试验 [J]. 中国科技成果, 2014(10): 17.
- [28] 刘伟民, 麻常雷, 陈风云, 等. 海洋可再生能源开发利用与技术进展 [J]. 海洋科学进展, 2018, 36(1): 1-18.
- [29] LIU W, XU X, CHEN F, et al. A review of research on the closed thermodynamic cycles of ocean thermal energy conversion [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2020 (119): 1-11.
- [30] BOHN M S, BENSON D K, JAYADEV T S. Thermoelectric Ocean Thermal Energy Conversion [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1980, 102(2): 119-127.
- [31] SHI X L, ZOU J, CHEN Z G. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices [J]. Chemical Reviews, 2020, 120(15): 7399-7515.
- [32] VENKATASUBRAMANIAN R, SIIVOLA E, COLPITTS T, et al. Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit [J]. Nature, 2001(413): 597-602.
- [33] HINTERLEITNER B, KNAPP I, PONEDER M, et al. Thermoelectric performance of a metastable thin-film Heusler alloy [J]. Nature, 2019, 576(7785): 85-90.
- [34] Byeon D, Sobota R, Delime-Codrin K, et al. Discovery of colossal Seebeck effect in metallic Cu₂Se [J]. Nature communications, 2019, 10(1): 1-7.
- [35] BYEON D, SOBOTA R, SINGH S, et al. Long-term stability of the colossal Seebeck effect in metallic Cu₂Se [J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(5): 2855-2861.
- [36] AVERY W H, WU C. Renewable energy from the ocean: a guide to OTEC [M]. New York: Oxford University Press, 1994.
- [37] 中国能源网. 李灿院士: “液态阳光”将有效解决氢能存储难题 [EB/OL]. <https://www.china5e.com/news/news-1105225-1.html>, 2021-11-05.
- [38] 潇湘晨报. 千吨级“液态太阳燃料合成示范项目”通过科技成果鉴定 [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1680632408362098118&wfr=spider&for=pc>, 2021-11-05.
- [39] NOAA Satellite and Information Service. Coral reef watch [EB/OL]. https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index_5km_sst.php, 2020-05-25.