

# 核能与可再生能源耦合技术概述

张祎轩, 张雪艳, 彭翠婷, 胡梦岩, 杨 军\*

华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年4月23日; 录用日期: 2023年7月18日; 发布日期: 2023年7月25日

## 摘 要

核能是一种清洁、高效、经济和安全的一次能源, 具备稳定、能量密度高、受自然条件影响小的优点。核能及可再生能源的开发利用是能源领域发展的主要趋势。为发挥核能与可再生能源各自的优势特点, 并提高效率, 核能与可再生能源耦合系统的研发和设计已经展开。核能与可再生能源的耦合技术已得到验证并有部分技术得到应用, 耦合后的能源系统具有更高的效率、灵活性和稳定性。本文介绍了核能与太阳能、风能、氢能、生物质能和地热能的耦合技术以及核能、可再生能源和储热技术耦合形成的低碳能源系统, 指出了核能与可再生能源耦合面临的问题和可优化的方向, 并对耦合系统进行了展望。

## 关键词

核能, 可再生能源, 储热, 耦合系统, 耦合技术

# Review of Nuclear and Renewable Energy Coupling Technologies

Yixuan Zhang, Xueyan Zhang, Cuiting Peng, Mengyan Hu, Jun Yang\*

School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Jul. 18<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 25<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Nuclear energy is a primary energy which is clean, efficient, economical and safe. It has the advantages of stability, high energy density and less influenced by natural conditions. The development and utilization of nuclear and renewable energy are a essential part in the field of energy development. In order to give full play to the advantages of nuclear and renewable energy and improve

\*通讯作者。

文章引用: 张祎轩, 张雪艳, 彭翠婷, 胡梦岩, 杨军. 核能与可再生能源耦合技术概述[J]. 核科学与技术, 2023, 11(3): 249-259. DOI: 10.12677/nst.2023.113027

efficiency, the research and design of the coupling system between nuclear and renewable energy have been carried out. The coupling technologies of nuclear and renewable energy have been verified and some technologies have been applied. The coupled energy system is more efficient, flexible and stable. This paper introduces the coupling technologies of nuclear energy and solar, wind, hydrogen, biomass and geothermal energy, as well as the low carbon energy system formed by the nuclear energy, renewable energy and heat storage. It points out the problems faced by the coupling of nuclear and renewable energy and the optimization direction, also the coupling system is prospected.

## Keywords

Nuclear Energy, Renewable Energy, Heat Storage, Coupling System, Coupling Technologies

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

电力等能源的生产和使用是温室气体排放的最大来源，也是全球变暖的主要原因。根据国际能源署发布的《全球能源回顾》，2021 年全球能源领域二氧化碳排放量达到 363 亿吨，达到了历史最高水平，能源领域面临低碳转型的迫切需求。2016 年 11 月，全世界 178 个缔约方共同签署了气候变化协定《巴黎协定》，提出了将全球平均气温升幅控制在 2℃ 以下并努力达到 1.5℃ 以下的长期目标。包括中国在内的许多国家将其转化为国家策略，设定了净零排放和碳中和的目标。

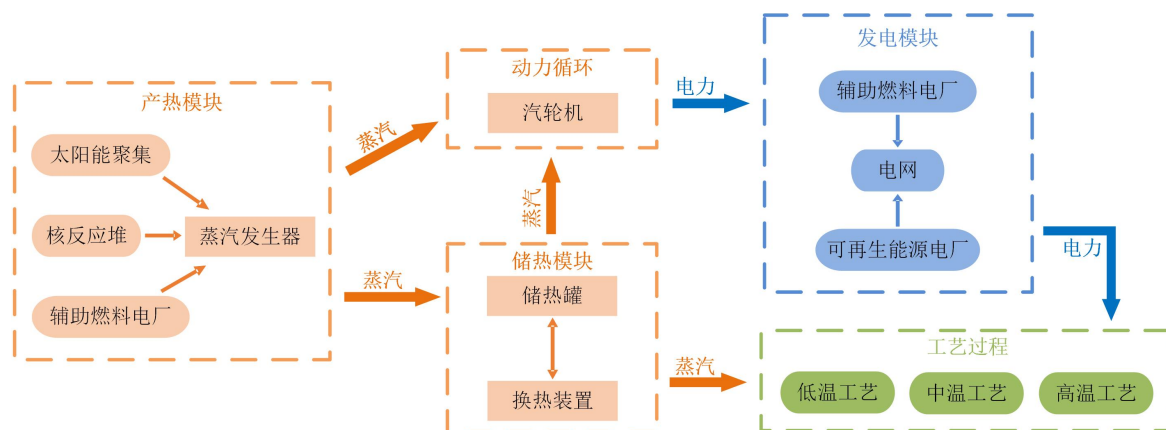
达到碳中和要求可再生能源在能源使用中占有越来越大的比重，但风能、太阳能、水能等可再生能源具有很强的时间间歇性和较差的可调节性。由于负载的多变性，目前电网还不能适应可再生能源的高度参与，可再生能源发电比重的上升会给电网的电力整合和稳定运行带来一定的挑战[1]。因此可再生能源需要与其他能源组合以满足基本负载并消除其对电网带来的不利影响[2]。

核能目前已广泛应用于发电，随着核能利用技术的发展，特别是第四代核能系统技术的逐渐成熟，核电站具有更高的安全性、更好的经济性和更少的核废料产生量。另外，核能在制氢、供暖、海水淡化、提供工艺热等领域也得到应用[3]-[8]。与传统化石能源相比，核能的清洁、高效和稳定更符合现代工业的要求。核能在确保全球能源供应稳定和可持续方面发挥着重要作用，是多能互补的耦合系统中的重要一环[9]。但核能也存在建设成本高、负荷跟踪能力有限、受限于政策和公众认知等问题。

仅靠核能无法满足全世界的能源需求，但没有核能参与，全球能源领域的低碳化转型可能也难以实现[10]。向可再生能源主导的能源结构的转变在没有核能参与的情况下将可能对环境产生更多的负面影响，同时累计投资成本更高[11] [12] [13]。将可再生能源与核能进行耦合，有望解决二者在独立运行时面临的间歇性、负荷跟踪不足等问题，提供稳定高效的能源供给。因此，核能与可再生能源的耦合是提高清洁能源使用比例的一种有效途径[14]。核能与太阳能、风能、氢能、地热能以及储热的耦合技术已经得到开发和验证，目前研究中的耦合方式如表 1 所示。如图 1，全面的耦合系统包括一个核反应堆、一个动力循环、一个产热或发电的可再生能源子系统、一个储热系统、一个辅助燃料电厂以及一个或多个生产能源或工业产品的工业过程。在耦合技术相对成熟后，耦合系统的优化是主要的发展方向，其灵活性、稳定性、经济性和安全性的提高是优化的主要目标。

**Table 1.** Coupling of nuclear and renewable energy  
**表 1.** 核能与可再生能源耦合方式

耦合能源	耦合方式	输出方式
核能 + 太阳能	热耦合、电耦合	电、热、氢气
核能 + 风能	电耦合	电、氢气
核能 + 氢能	热耦合、电耦合	电、热、氢气
核能 + 地热能	热耦合	电、热、氢气



**Figure 1.** Nuclear energy and renewable energy coupling system

**图 1.** 核能与可再生能源耦合系统

## 2. 核能与太阳能耦合

核能与太阳能的耦合可分为热耦合和电耦合，热耦合又可分为串行热集成和并行热集成两种方式。如图 2，串行热集成是将核能与太阳能直接耦合，以一种能源作为另一种能源的辅助热源来提高耦合系统的效率；并行热集成是通过储热装置将太阳能与核能进行耦合，提高耦合系统的稳定性与灵活性。

在串行热集成下，当核能作为辅助热源时，可以利用反应堆二回路蒸汽余热来预热进入太阳能发电厂的空气[15]。对于热效率为 32.3% 的典型 100 MW 核电站，与太阳能烟囱发电厂耦合形成的联合电厂效率可达 42.0%。太阳能烟囱发电厂还可以起到干式冷却塔的作用，降低核电站对水源的依赖。当太阳能作为辅助热源时，以 Wang 等人设计的以液态重金属为传热介质的核能与太阳能耦合发电系统为例，利用太阳能模块中的高温液态重金属对核电厂产生的蒸汽进行过热与再热[16]。再热器和过热器中完成换热的液态重金属还可继续为海水淡化装置供热。在串行热集成形成的耦合系统中，因为核电厂提供的基荷电力，光热发电不稳定的问题能得到一定的缓解。同时耦合系统的总体热效率得到提高，但辅助能源的利用效率会降低。另外，串行热集成的技术复杂性以及冗余设计带来的成本升高是需要解决的问题。在并行热集成中，储热装置取代了串行热集成中的换热器，具有热耦合和热分配的作用。由产热单元(反应堆与光热转换装置)、储热单元(熔盐储能系统)和发电单元(换热器与汽轮机)组成的耦合系统可以缓解产热波动，降低计划产热和发电热负荷之间的不一致性[17]，但储热单元的加入会带来成本的提升，储热方式和载热流体的选择也需要进行研究分析。

电耦合是指将核电厂与光伏电厂产生的电力一起并入电网，可以缓解光伏发电的不稳定性，如图 3。美国亚利桑那州已实现核能与太阳能的电耦合，在该耦合系统中，核反应堆与光伏装置产生的电力会在运行优化器的调控下以最优的形式分配到电网和海水淡化厂[18]。对其操作优化后的结果显示，尽量减少

电力向电网的分配可以带来更大的经济效益。中国也在进行核能与太阳能耦合的应用，2022年4月，国家电投海阳核电“核能+光伏”工程正式投运[19]。目标是将核电与光伏发电结合，拓宽其应用场景，优化厂区的用能结构，形成核光互补、低碳清洁的厂区能源系统。国家电投山东核电还计划持续探索实施“核能+新能源+储能”模式，加大新能源与在运、在建核电机组耦合应用场景的创新和开发[20]。

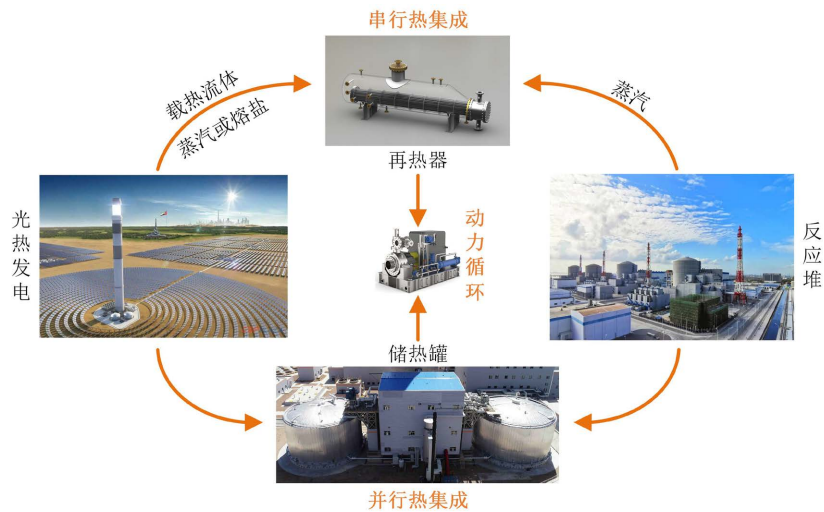


Figure 2. Serial and parallel heat integration [15] [16]

图 2. 串行与并行热集成[15] [16]

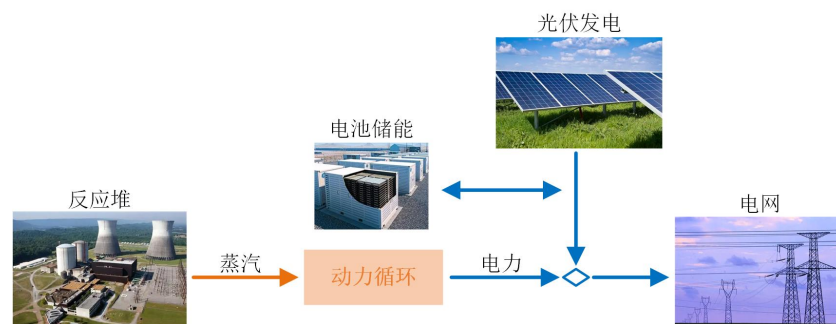


Figure 3. Electrical coupling of nuclear and solar energy [18]

图 3. 核能与太阳能的电耦合[18]

### 3. 核能与风能耦合

风力发电是目前最成熟、经济效益最高的可再生能源发电技术，但当大容量风电场的负荷较小时，风电会影响电网的稳定性[21]。与核电不同，风力发电是机械能向电能转换的过程，因此二者耦合形式是比较单一的，大多是在电力传输过程中进行耦合。另外，风能可以与其他可再生能源一起与核能进行耦合，达到降低成本，稳定电力输出的目的。

核风耦合时，往往需要加入一种或多种工业过程来消纳耦合系统在满足电网需求后的多余电力，避免风电对电网稳定性的影响。因此，在核风耦合系统中核反应堆可以保持满负荷运行，成本得以降到最低[22]。图 4 是一个带有聚合风电场的混合能源系统，由 SMR (小型模块化反应堆)、生物质加工厂与制氢厂组成[23]。通过动态能量转换，SMR 可以在汽轮机和生物质加工厂之间调整其蒸汽供应。在电网负荷较低时，过剩的电力可以用来生产氢气。综合考虑供热与发电效率，SMR 的最佳功率应在 200~300 MWe

之间。在这一系统中，核能的总体利用率得到了提高，风电场输出电力与电力需求之间的偏差也降低了32%，在制氢装置加入后，该偏差进一步降低30%，这意味着风电的弃电问题得到有效解决。

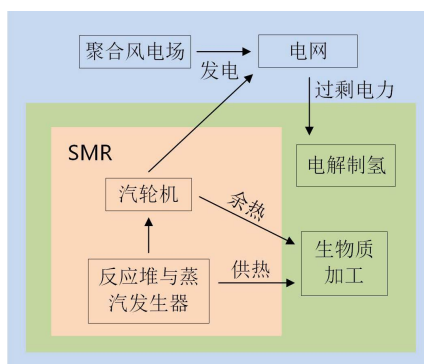


Figure 4. Wind farm and hybrid energy system [23]

图 4. 聚合风电场与混合能源系统[23]

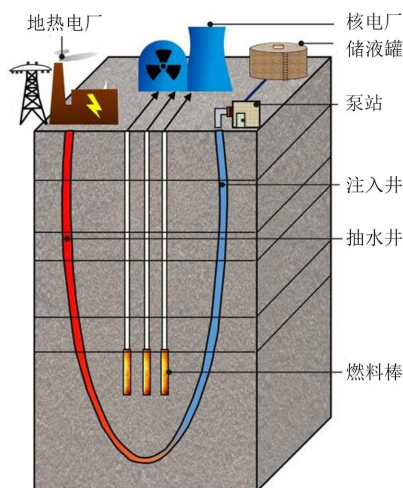


Figure 5. A nuclear and geothermal energy coupling system with fuel rods placed underground [12]

图 5. 燃料棒安放在地下的核能与地热能耦合系统[12]

#### 4. 核能与氢能耦合

氢能被称为最洁净的能源，还具有燃烧热值高的优点，氢的制取也成为近年来研究的热点[24]。与其他制氢技术相比，核能与氢能的耦合即核能制氢，具有无温室气体排放、高效、可实现大规模制氢等优势。高温热化学循环与高温蒸汽电解两种工艺是目前被用来与核能结合的主流制氢工艺[25]。核电厂可以同时输出电和热，与上述两种制氢工艺能较好匹配。核能制氢是未来氢气大规模供应的重要解决方案。

由于氢气的不稳定带来的安全隐患，氢气的储存与运输面临很大的困难，在核能制氢中这个问题同样需要重视。Ho 等人模拟了一种核能与氢能的耦合系统[26]。主要能源是由一个 SMR 提供的，产生的电力一部分直接送入电网，一部分进入储电装置进而驱动氢电解槽和压缩机。氢气被压缩后储存在盐洞中，当电网负载较大时，氢气减压后进入燃气轮机燃烧做功，为电网提供额外电力。与独立电厂相比，混合电厂的年发电量增加了 16.9%，可以满足 93% 的电力需求。另外，这一核能制氢方法避免了氢气的

运输问题，同时用氢气作为储能载体也提高了发电系统的灵活性。

## 5. 核能与地热能耦合

地热流体温度较锅炉蒸汽温度低，约为 10%~23%，导致地热发电效率较低，是地热能无法得到广泛应用的原因之一，因此利用反应堆产生的热提高地热流体的温度是大规模应用的地热能的发展方向。核能与地热能的耦合方式包括：将核反应堆燃料棒安放在地下；使用核电站产生的蒸汽加热地热源。

在图 5 所示系统中，将核电厂的燃料棒安放在地下，用于加热周围的基岩。基岩温度的升高可以提高地热系统的整体效率。Hine 和 Heads 设计了一种混合式热力系统，利用核反应堆放热提高地热流体的温度进而提高地热电厂的效率[27]。该设计中使用的是一种球床式超高温反应堆，由于反应堆的固有安全性和基岩储热规模的巨大，反应堆的运行温度可达到 1600℃，因此将具有更高的热效率。如图 6，使用蒸汽加热地热源时传热面积更大、加热效率更高，但地质成为重要的影响因素。岩石渗透率、传热系数等都会影响到耦合系统的效率[28]，例如流体渗透岩石时的压力损失需要降低到 0.1 MPa/km。在理想的情况下，核电站和热电厂会形成两个独立热循环，载热流体互相隔离，但地下空间的不稳定因素导致冷热流体可能出现混合。

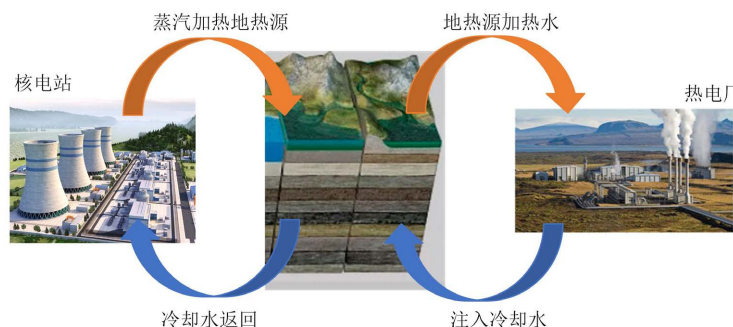


Figure 6. A nuclear and geothermal energy coupling system with steam heating rocks [28] [36]

图 6. 蒸汽加热地热源的核能与地热能耦合系统[28] [36]

## 6. 核能与储热系统耦合

核电站以恒定功率运行时所需的运营成本是最小的，因此以可变核电满足大范围内居民生产生活需求是不经济的，核电站电力输出的固定使核电站与高可再生能源比例的电网不兼容[29] [30]。将储热系统与核电站耦合，使核电站在热输出恒定的情况下实现可变电力输出，是一种提高电网灵活性的有效途径。同时储热装置可显著提高可再生能源的消纳比例[31]，提高可再生能源发电与目前电网的兼容性。目前熔盐储热、地热储能与核能的耦合已得到验证。

熔盐储热是一种显热储热技术，利用熔盐在升温或降温过程中的温差来实现热能的储存和释放。在熔盐储热循环和放热循环中，储热盐始终保持液态。熔盐储热系统可分为单罐与双罐系统，双罐系统储热量大，适用于大面积供热；单罐系统采用温跃层技术利用浮力将冷热流体分离，所需载热流体少，成本低[32] [33]。

熔盐作为直接载热流体和中间载热流体时工作环境是不同的，因此在选择盐种类时需要考虑其化学和热力学性能[34]。美国泰拉能源公司和通用电气 - 日立核能公司在 2020 年 8 月共同发布 Natrium [35]，如图 7 所示。Natrium 技术包括一座 345 MWe 钠冷快堆和千兆瓦级双罐熔盐储能系统，可针对特定市场进行优化。该储能系统可以在需要时将系统的输出功率提高到 500 MWe，持续超过五个半小时。熔盐储

能作为高温蓄热最现实的技术途径，与核电站耦合具有良好的应用前景。

地热储能是指利用反应堆放出的热量加热地下岩石实现储能。其原理是核电厂输出的高温蒸汽与中间载热流体进行换热，载热流体再对岩石进行加热。与温度低于 300℃ 的轻水堆或大型集中太阳能热系统耦合的千兆瓦每年的地热储能系统已初步得到验证[36]。地热储能具有储能量大、经济性好的优点，能很好的提供可变电力，满足电力的季节性需求[36] [37]。

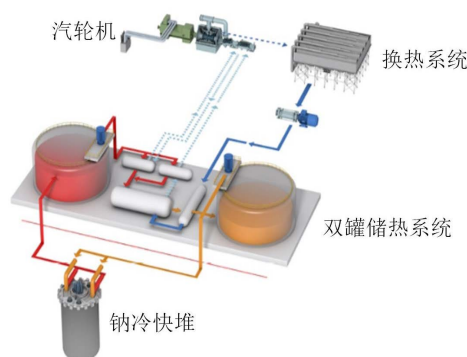


Figure 7. Natrium technology [35]  
图 7. Natrium 技术[35]

## 7. 核能、可再生能源与煤化工过程耦合

世界 40% 的电力是通过煤炭燃烧产生的，煤炭是许多生活必需品的生产原料，但煤炭利用产生的二氧化碳占化石燃料二氧化碳总排放量的 40%。为提高合成气的氢碳比，超过 50% 的碳通过水煤气变换反应转化为二氧化碳并排放到空气中[38]。因此，可以通过充足的氢气供应代替水煤气变换反应提高合成气的氢碳比。通过核能和可再生能源制氢是煤化工行业减少二氧化碳排放的关键[39] [40] [41]。

图 8 是一种核能、可再生能源与煤化工过程耦合的工业流程[42]。核能与可再生能源耦合系统可以提供稳定的热电供应从而保证氢气产量充足，电解制氢过程中产生的氧气用于煤气化过程，然后在合成气纯化过程中通入氢气提高其氢碳比。合成气主要由一氧化碳和氢气组成，在其后续处理过程中合理运用碳捕集技术可实现煤炭整个使用过程的低碳化[43]。

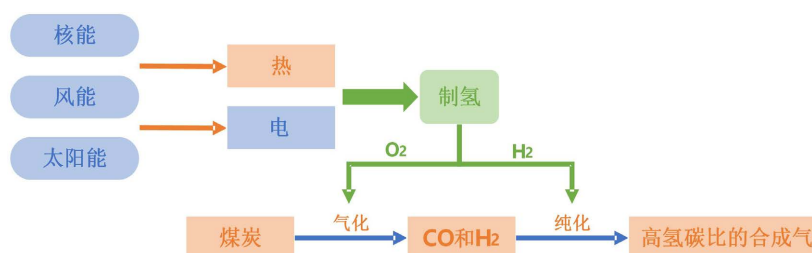


Figure 8. Coal gasification process with low carbon emission [42]  
图 8. 低碳煤气化过程[42]

## 8. 发展与挑战

### 8.1. 核能与可再生能源耦合系统展望

面对能源领域的低碳转型，核能和可再生能源是实现零碳排放的重要能源[44]。国际原子能机构正在开展一个为期三年的新合作项目，旨在提高成员国对核能与可再生能源耦合系统的建模、模拟和分析的

能力, 达到将耦合系统推向商业化的目标。耦合系统的商业化需要从经济性、安全性、稳定性和灵活性等方面予以考虑。

耦合系统的经济性是其能否稳定长久运行的决定性因素之一, 取决于建设成本、维护成本以及耦合的工业过程所带来的经济效益, 目前已有许多研究将人工神经网络、模糊算法等方法运用在耦合系统上来优化系统参数, 提高经济性。Mahmoudi 等人使用一种基于模糊逻辑控制器和重力搜索算法的新方法对耦合系统的不同模式进行了评估[45]。根据负载的不同以及系统中输入能源的不同, 该方法可选择出最具经济效益的组合模式。核能在耦合系统中所占比例的确定, 即反应堆功率大小的选择, 同样影响着耦合系统的经济性。Guo 等人开发了一种方法, 使用 MATLAB-Simulink 建立模型, 对不同核能比例进行仿真, 通过系统成本确定核能比例的最佳值[46]。

## 8.2. 核能与可再生能源耦合面临的问题

核能与可再生能源的耦合面临着一些共性的问题, 首先是核能在耦合系统中所占比例的选择。在核能与太阳能、风能这类具有间歇性的能源耦合时, 由于负载的多变性, 选择的反应堆功率较小则可能无法满足基本的负载需求, 选择的反应堆功率较大则需要考虑剩余电力的处理。因此这是一个多目标优化问题, 系统的成本、稳定性以及能源的利用效率是优化的主要目标。

另外是耦合工业过程的选择。通过比较多种工业过程在耦合系统中的表现, 和只使用电力的工业过程相比, 直接消耗热能的工业过程具有更高的经济效益, 其中燃料合成的经济效益最好[47][48]。针对安全性, 海水淡化则是最适合的。同时, 耦合能源的种类以及耦合系统的地理位置也是影响工业过程选择的原因。

最后, 核电站的安全问题一直受到重点关注, 自福岛核事故以来, 世界各国花费更大精力在维护核电站的安全运行上。在耦合系统中, 其他部分出现的安全问题, 例如燃料合成过程中的意外燃烧或爆炸, 可能会导致核电站事故的发生。因此除了各组成部分各自的安全问题外, 核能与可再生能源耦合系统还面临耦合带来的安全隐患, 例如中间耦合装置内核辐射的传递等。核能的参加使得耦合系统的安全问题尤为重要。

## 9. 总结

本文详细总结了世界范围内对核能与可再生能源耦合系统的研究与应用, 对耦合系统进行了展望并指出了其面临的问题。

核能与可再生能源的开发与利用是实现能源领域低碳化转型的重要环节, 且在世界范围内核能与可再生能源还有很大的发展空间。将核能与可再生能源进行耦合可以有效解决二者在单独利用时面临的问题, 同时提高效率。核能与太阳能、风能、氢能和地热能以及储热系统、煤化工过程的耦合技术已得到验证和部分应用, 耦合系统的经济性已得到较为全面的评估。

将核能与可再生能源耦合时需要考虑耦合后系统的经济性、稳定性和安全性等因素。根据目前的分析结果, 从经济性的角度出发, 选择燃料合成作为耦合的工业过程是效益最高的; 从安全性和灵活性角度出发, SMR 是最适合耦合系统的堆型, 海水淡化是较安全的工业过程之一。

## 致 谢

感谢王诗琦老师对文章英文摘要写作的指导。

## 基金项目

华中科技大学自主创新研究基金(5003120076)。



## 参考文献

- [1] Hamsic, N., Schmelter, A., Mohd, A., *et al.* (2007) Increasing Renewable Energy penetration in Isolated Grids Using a Flywheel Energy Storage System. *Proceedings of the 2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Setubal, 12-14 April 2007, 195-200. <https://doi.org/10.1109/POWERENG.2007.4380112>
- [2] Gabbar, H.A., Abdussami, M.R. and Adham, M.I. (2020) Techno-Economic Evaluation of Interconnected Nuclear-Renewable Micro Hybrid Energy Systems with Combined Heat and Power. *Energies*, **13**, Article 1642. <https://doi.org/10.3390/en13071642>
- [3] 张平, 徐景明, 石磊, 等. 中国高温气冷堆制氢发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(1): 20-28.
- [4] 张平, 于波, 徐景明. 核能制氢技术的发展[J]. *核化学与放射化学*, 2011, 33(4): 193-203.
- [5] Al-Othman, A., Darwish, N.N., Qasim, M., *et al.* (2019) Nuclear Desalination: A State-of-the-Art Review. *Desalination*, **457**, 39-61. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.01.002>
- [6] Misra, B. (2007) Seawater Desalination Using Nuclear Heat/Electricity—Prospects and Challenges. *Desalination*, **205**, 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.555>
- [7] Peakman, A. and Merk, B. (2019) The Role of Nuclear Power in Meeting Current and Future Industrial Process Heat Demands. *Energies*, **12**, Article 3664. <https://doi.org/10.3390/en12193664>
- [8] 曾斌, 李言瑞, 屈凡玉, 等. 核能供热发展模式研究[J]. *能源*, 2022(3): 68-71.
- [9] International Atomic Energy Agency (2007) Non-Electric Applications of Nuclear Power: Seawater Desalination, Hydrogen Production and Other Industrial Applications. *Proceedings of an International Conference 2007*, Oarai, 16-19 April 2007, 4-8.
- [10] Abu-Khader, M.M. (2009) Recent Advances in Nuclear Power: A Review. *Progress in Nuclear Energy*, **51**, 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.05.001>
- [11] Hong, S., Bradshaw, C.J. and Brook, B.W. (2015) Global Zero-Carbon Energy Pathways Using Viable Mixes of Nuclear and Renewables. *Applied Energy*, **143**, 451-459. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.006>
- [12] Suman, S. (2018) Hybrid Nuclear-Renewable Energy Systems: A Review. *Journal of Cleaner Production*, **181**, 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.262>
- [13] Karakosta, C., Pappas, C., Marinakis, V. and Psarras, J. (2013) Renewable Energy and Nuclear Power towards Sustainable Development: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **22**, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.035>
- [14] Chen, J., Garcia, H.E., Kim, J.S., *et al.* (2016) Operations Optimization of Nuclear Hybrid Energy Systems. *Nuclear Technology*, **195**, 143-156. <https://doi.org/10.13182/NT15-130>
- [15] Fathi, N., Mcdaniel, P., Aleyasin, S.S., *et al.* (2018) Efficiency Enhancement of Solar Chimney Power Plant by Use of Waste Heat from Nuclear Power Plant. *Journal of Cleaner Production*, **180**, 407-416. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.132>
- [16] Wang, G., Yin, J., Lin, J., Chen, Z. And Hu, P. (2021) Design and Economic Analysis of a Novel Hybrid Nuclear-Solar Complementary Power System for Power Generation and Desalination. *Applied Thermal Engineering*, **187**, Article ID: 116564. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116564>
- [17] Zhao, B., Cheng, M., Liu, C. and Dai, Z. (2018) Conceptual Design and Preliminary Performance Analysis of a Hybrid Nuclear-Solar Power System with Molten-Salt Packed-Bed Thermal Energy Storage for On-Demand Power Supply. *Energy Conversion and Management*, **166**, 174-186. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.015>
- [18] Garcia, H.E., Chen, J., Kim, J.S., *et al.* (2016) Dynamic Performance Analysis of Two Regional Nuclear Hybrid Energy Systems. *Energy Conversion and Management*, **107**, 234-258. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.128>
- [19] 金龙华. 海阳核电“核能+光伏”工程将正式投运! [EB/OL]. <http://www.nengyuancn.com/newenergy/124696.html>, 2022-04-12.
- [20] 杨晓冉. 海阳核电“核能+光伏”工程正式投运[EB/OL]. [http://www.cnenergynews.cn/dianli/2022/04/21/detail\\_20220421122133.html](http://www.cnenergynews.cn/dianli/2022/04/21/detail_20220421122133.html), 2022-04-21.
- [21] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. *电网技术*, 2007, 31(3): 77-81.
- [22] Curtis, D.J. and Forsberg, C.W. (2016) A Nuclear Renewable Oil Shale System for Economic Dispatchable Low-Carbon Electricity and Liquid Fuels. *Nuclear Technology*, **195**, 335-352. <https://doi.org/10.13182/NT16-14>
- [23] Papaioannou, I.T., Purvins, A., Shropshire, D., *et al.* (2014) Role of a Hybrid Energy System Comprising a Small/Medium-Sized Nuclear Reactor and a Biomass Processing Plant in a Scenario with a High Deployment of On-shore Wind Farms. *Journal of Energy Engineering*, **140**, Article ID: 04013005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000142](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000142)

- [24] 顾忠茂. 氢能利用与核能制氢研究开发综述[J]. 原子能科学技术, 2006, 40(1): 30-35.
- [25] Pinsky, R., Sabharwall, P., Hartvigsen, J. and O'Brien, J. (2020) Comparative Review of Hydrogen Production Technologies for Nuclear Hybrid Energy Systems. *Progress in Nuclear Energy*, **123**, Article ID: 103317. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103317>
- [26] Ho, A., Mohammadi, K., Memmott, M., *et al.* (2021) Dynamic Simulation of a Novel Nuclear Hybrid Energy System with Large-Scale Hydrogen Storage in an Underground Salt Cavern. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 31143-31157. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.027>
- [27] Hine, G. (2016) System and Method for Power Generation Using a Hybrid Geothermal Power Plant Including a Nuclear Plant. US Patent No. 9303629 B2.
- [28] Lee, Y.H., Forsberg, C., Driscoll, M., *et al.* (2010) Options for Nuclear-Geothermal Gigawatt-Year Peak Electricity Storage Systems. *Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2010 (ICAPP 2010)*, San Diego, 13-17 June 2010, 2175-2184.
- [29] Denholm, P., King, J.C., Kutcher, C.F. and Wilson, P.P.H. (2012) Decarbonizing the Electric Sector: Combining Renewable and Nuclear Energy Using Thermal Storage. *Energy Policy*, **44**, 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.055>
- [30] Forsberg, C., Brick, S. and Haratyk, G. (2018) Coupling Heat Storage to Nuclear Reactors for Variable Electricity Output with Baseload Reactor Operation. *The Electricity Journal*, **31**, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2018.03.008>
- [31] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 2018, 42(4): 11-24.
- [32] Pacheco, J.E., Showalter, S.K. and Kolb, W.J. (2001) Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic trough Plants. Paper No: SED2001-158, 453-460. <https://doi.org/10.1115/SED2001-158>
- [33] Hoffmann, J.-F., Fasquelle, T., Goetz, V., *et al.* (2017) Experimental and Numerical Investigation of a Thermocline Thermal Energy Storage Tank. *Applied Thermal Engineering*, **114**, 896-904. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.053>
- [34] Roper, R., Harkema, M., Sabharwall, P., *et al.* (2022) Molten Salt for Advanced Energy Applications: A Review. *Annals of Nuclear Energy*, **169**, Article ID: 108924. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108924>
- [35] Terrapower (2023) Natrium. <https://www.terrapower.com/our-work/natriumpower/>
- [36] Forsberg, C.W. (2012) Gigawatt-Year Geothermal Energy Storage Coupled to Nuclear Reactors and Large Concentrated Solar Thermal Systems. *Proceedings of the Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, 30 January-1 February 2012, SGP-TR-194.
- [37] Forsberg, C.W. (2013) Hybrid Systems to address Seasonal Mismatches between Electricity Production and Demand in Nuclear Renewable Electrical Grids. *Energy Policy*, **62**, 333-341. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.057>
- [38] Chen, Q., Lv, M., Gu, Y., *et al.* (2018) Hybrid Energy System for a Coal-Based Chemical Industry. *Joule*, **2**, 607-620. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.02.015>
- [39] Buchheit, K.L., Smith, J.D., Guntupalli, U., *et al.* (2016) Techno-Economic Analysis of a Sustainable Coal, Wind and Nuclear Hybrid Energy System. *Energy & Fuels*, **30**, 10721-10729. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02113>
- [40] Graves, C., Ebbesen, S.D., Mogensen, M. and Lackner, K.S. (2011) Sustainable Hydrocarbon Fuels by Recycling CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O with Renewable or Nuclear Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.014>
- [41] 核能与可再生能源结合探索[EB/OL]. <https://power.in-en.com/html/power-2385536.shtml>, 2021-03-24.
- [42] Chen, Q., Tang, Z., Lei, Y., *et al.* (2015) Feasibility Analysis of Nuclear-Coal Hybrid Energy Systems from the Perspective of Low-Carbon Development. *Applied Energy*, **158**, 619-630. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.068>
- [43] Rubin, E.S., Mantripragada, H., Marks, A., *et al.* (2012) The Outlook for Improved Carbon Capture Technology. *Progress in Energy and Combustion Science*, **38**, 630-671. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2012.03.003>
- [44] 王建强, 戴志敏, 徐洪杰. 核能综合利用研究现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 460-468.
- [45] Mahmoudi, S.M., Maleki, A. and Ochbelagh, D.R. (2022) A Novel Method Based on Fuzzy Logic to Evaluate the Storage and Backup Systems in Determining the Optimal Size of a Hybrid Renewable Energy System. *Journal of Energy Storage*, **49**, Article ID: 104015. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104015>
- [46] Guo, Y., Jia, G., Lu, H., *et al.* (2022) A Methodology for Determining the Proportion of Nuclear Energy in a Nuclear-Renewable Hybrid Energy System. <https://ssrn.com/abstract=4028646>
- [47] Ruth, M.F. (2021) Opportunities and Challenges for Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems. Joint Institute for Strategic Energy Analysis (JISEA) <https://www.osti.gov/biblio/1826532>

- 
- [48] Redfoot, E.K., Verner, K.M. and Borrelli, R.A. (2022) Applying Analytic Hierarchy Process to Industrial Process Design in a Nuclear Renewable Hybrid Energy System. *Progress in Nuclear Energy*, **145**, Article ID: 104083. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.104083>