

# 核能制氢不同储存和运输方案的经济性研究

李智勇\*, 张一凡

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

**摘要:**为分析核能制氢不同储存和运输方案的经济性,采用IAEA开发的氢经济性评价软件(HEEP)对核能制氢在不同的储存和运输方案下的经济性进行了比较。研究表明,在产氢速率和储运方案一定的条件下,与高温气冷堆耦合的高温蒸气电解制氢的总平准化成本最低,其次是与高温气冷堆耦合的硫-碘热化学循环。对于氢气的储存,采用金属氢化物储存的成本远高于压缩气体或液体储存,且金属氢化物储存对氢气的总平准化成本贡献较大。对于氢气的运输,管道输送比车辆运输更具成本优势,且管道输送更适合远距离和大规模输送;另外,车辆运输虽然存在间歇性和运输能力受限等问题,但运输的灵活性更强。

**关键词:**核能制氢;氢气储存;氢气运输;经济性

中图分类号:TK91

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)06-0257-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.040

## Economic study on different storage and transportation schemes for hydrogen production from nuclear energy

LI Zhi-yong\*, ZHANG Yi-fan

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

**Abstract:**To analyze the economy of different storage and transportation schemes of nuclear hydrogen production, this study uses the hydrogen economic evaluation program (HEEP) developed by IAEA to compare the economy of nuclear hydrogen production under different storage and transportation schemes. The results show that under certain conditions of hydrogen production rate, storage and transportation scheme, the total levelized cost of high-temperature steam electrolytic hydrogen production coupled with high-temperature gas reactor is the lowest, followed by sulfur-iodine thermochemical cycle coupled with high-temperature gas reactor. For hydrogen storage, the cost of metal hydride storage is much higher than that of compressed gas or liquid storage, and metal hydride storage contributes greatly to the total levelized cost of hydrogen. For hydrogen transportation, pipeline transportation has more economic advantages than vehicle transportation, and pipeline transportation is more suitable for long-distance and large-scale transportation. In addition, although vehicle transportation has problems such as intermittence and limited transportation capacity, it is more flexible.

**Key words:** nuclear hydrogen production; hydrogen storage; hydrogen transportation; economy

随着能源需求的日益增加和全球变暖等环境问题的逐步恶劣,许多国家早已开始发展核能和可再生能源。相比于传统的化石能源,氢气由于不含碳、不会导致全球变暖和可储可输等优异特性引起了国内外广泛的关注,被认为是一种很有希望的可再生的能源载体。同时还有助于扩大可再生能源和核能的资源市场,许多专家预测氢将成为解决当前能源和环境问题的重要物质<sup>[1-2]</sup>。

氢元素在自然界中以水的形式大量存在,但利用时需要将其分离出来,为此需要以可持续和环保的方式来生产氢气。现阶段氢气的生产方法主要有天然气重整、煤气化、水电解和热化学分解。核能作为清洁能源可以大规模提供制氢所需的电或热,为此与核能耦合的制氢工艺也引起了广泛研究。现阶段核能制氢的主要工艺有低温电解、高温电解、热化

学循环和混合工艺<sup>[3-4]</sup>。

低温电解(CE)利用核能产生的电直接将水分解成氢和氧,所需的能量较大,为此耗电量较高。高温电解也称高温蒸气电解(HTSE),由于电解蒸气所需的能量低于电解液态水所需的能量,为此考虑将液态的水先加热为800~1000℃的高温蒸气,然后再电解高温蒸气,相比于低温电解,高温电解由于电解所需的能量较低、耗电量较少且将热直接作为能源的一部分可以获得更高的制氢效率<sup>[5-7]</sup>。

热化学循环基于一系列的化学反应,利用核能产生的热量将水分解成氢气和其他副产品。现阶段研究的重点循环有硫-碘热化学循环(SI)、硫酸混合循环(HyS)、铜-氯热化学混合循环(Cu-Cl)、镁氯循环(Mg-Cl)和钙溴循环(Ca-Br)等<sup>[8]</sup>。

但基于安全方面的考虑,核电厂通常在沿海地

收稿日期:2025-08-11;修回日期:2026-03-30

作者简介:李智勇(1991-),男,硕士,高级工程师,研究方向为核能制氢技术及经济性,通讯联系人,lizhiyong893@163.com。

区建设,同时对周边的工业园区还有一定的距离限制,因此核能制氢到最终的用户之间还存在氢气储运的问题。对核能制氢的不同储运方案进行经济性评价,从经济性的角度给出不同储存和运输方案的优势和劣势,具有重要的意义。为此,本文中基于 IAEA 开发的氢经济评价程序(HEEP),重点分析了不同堆型及制氢工艺、制氢的速率和运输距离对储运方案的影响。

### 1 HEEP 特性

IAEA 开发的 HEEP 作为一款全面的氢经济性评价软件,将寿命期内产生的一系列支出和收入相对于指定参考年的现值进行贴现,运用平准化成本的概念来计算氢气从生产到分配到最终用户所需的成本<sup>[9-10]</sup>。HEEP 不仅可以用于评估分析与核电厂耦合的制氢工艺的经济性,还可以评估不同工艺下氢气的储存和运输方案的经济性,为用户提供了全流程的制氢经济性分析<sup>[11]</sup>。软件覆盖的堆型广泛,还可以与不同的制氢工艺和储运方案耦合,同时除热能和电力成本外,还对各阶段的资本成本、燃料成本、退役成本、运行和维护成本以及其他耗材进行了成本估算和评估<sup>[12-14]</sup>。考虑的储氢方案主要有压缩气体(CG)、液化(LQ)和金属氢化物(MH),运输方案主要有管道(P)和车辆(V)。HEEP 的主要技

术特征如表 1 所示。

表 1 HEEP 主要技术特性

核电厂	制氢厂	储氢装置	运输
堆型	制氢工艺	压缩气体、液体、金属氢化物	管道、车辆
额定热功率	制氢量	储量	运输距离
产氢装置用热	耗热量	电力需求	燃料或电力成本
发电量	耗电量	资本成本	退役成本
机组数	机组数	压缩机运行成本	其他费用
初始燃料装载量	资本成本	退役成本	
年燃料装载量	外接能源使用成本	其他费用	
资本成本	运行维护成本		
燃料成本	退役成本		
运行维护成本	其他费用		
退役成本			

### 2 方案设计

为比较不同储存和运输方案对核能制氢成本的影响,本文中考虑与先进压水堆(APWR)和高温气冷堆(HTGR)2种堆型耦合的制氢工艺,制氢的方式考虑常规电解、高温蒸气电解和 SI 循环,同时还考虑制氢速率的影响,具体方案如表 2 所示。

表 2 对比方案

项目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
核电厂堆型	APWR	APWR	APWR	HTGR	HTGR
制氢工艺	CE	CE	CE	HTSE	SI
制氢速率	4 kg/s	8 kg/s	12 kg/s	4 kg/s	4 kg/s
储存方案	压缩气体、液体、金属氢化物	压缩气体、液体、金属氢化物	压缩气体、液体、金属氢化物	压缩气体、液体、金属氢化物	压缩气体、液体、金属氢化物
运输方案	管道、车辆	管道、车辆	管道、车辆	管道、车辆	管道、车辆

方案 1~3 为低温电解,为此核电站只需要提供制氢所需的电力,方案 4 为高温蒸气电解,核电站提供制氢所需的电和热,方案 5 中的高温气冷堆只提

供制氢所需的热量,制氢所需的电由外界供应,为此有一部分外接能源使用成本。不同方案核电厂和制氢厂的详细参数如表 3 所示。

表 3 不同方案中核电厂和制氢厂输入参数

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
核电厂参数					
额定热功率/(MW·机组 <sup>-1</sup> )	1089	2178	3385	546.5	630.7
产氢装置用热/(MW·机组 <sup>-1</sup> )	0	0	0	47.9	630.7
发电量/(MW·机组 <sup>-1</sup> )	359.5	719	1117.1	249.3	0
机组数	2	2	2	2	2
初始燃料装载量/(kg·机组 <sup>-1</sup> )	27000	54000	75000	15001	18000

续表

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
年燃料装载量/(kg·机组 <sup>-1</sup> )	9000	18000	25000	5357	6000
资本成本/(MUSD·机组 <sup>-1</sup> )	3160	4660	5960	521	605
发电基础设施占资本成本百分比/%	10	10	10	21	0
燃料成本/(USD·kg <sup>-1</sup> )	1850	1365	1260	3660	5535
运行维护成本/%	1.66	1.67	1.7	5.8	5.75
退役成本/%	10	10	10	10	10
制氢装置参数					
制氢量/(kg·s <sup>-1</sup> )	4	8	12	4	4
耗热量/(MW·机组 <sup>-1</sup> )	0	0	0	95.8	1261.4
耗电量/(MW·机组 <sup>-1</sup> )	719	1438	2234	498.6	0
机组数	1	1	1	1	1
资本成本/(MUSD·机组 <sup>-1</sup> )	428	845	1310	459	666
外接能源使用成本/MUSD	0	0	0	0	27
运行维护成本/%	4	4	4	17.23	6.68
退役成本/%	10	10	10	10	10

方案 1~3 考虑相同的堆型和制氢工艺,通过改变制氢的速率来研究不同的制氢规模适合的储运方案。方案 1、方案 4 和方案 5 在相同的制氢规模下考虑不同的堆型和制氢工艺对氢气储运成本的影响。同时每个方案可以考虑不同的储存方案和运输方案对制氢成本的影响,氢气默认在 20 MPa 的压力下储存 168 h,运输时管道和车辆的具体信息如表 4 所示。

表 4 运输方案基本信息

管道		车辆	
运输距离/km	200	运输距离/km	200
管道半径/mm	125	车辆容量/kg	181
氢气入口压力/MPa	5.17	每次装载时间/min	120
输送压力/MPa	5	平均速度/(km·h <sup>-1</sup> )	40
氢气温度/K	293	运输损耗/(L·km <sup>-1</sup> )	2.5
摩擦系数	0.01	平均寿命/a	15

### 3 结果和讨论

#### 3.1 不同堆型及制氢工艺的影响

为研究不同堆型及制氢工艺对制氢成本的影响,考虑氢气的储运方式都为压缩气体储存和管道运输。根据设置的案例,核电站和制氢厂的主要输入参数如表 3 所示,其中建设期按 5 a,运营期按 40 a 考虑,贴现率取 5%,计算结果如表 5 所示。

表 5 核能制氢不同工艺成本对比

制氢方案	储运方案	制氢速率/(kg·s <sup>-1</sup> )	氢气平准化成本/(美元·kg <sup>-1</sup> )				
			核电厂	制氢厂	储存	运输	合计
APWR+CE	CG+P	4	5.44	0.50	0.45	0.34	6.73
APWR+CE	CG+P	8	4.02	0.50	0.41	0.29	5.22
APWR+CE	CG+P	12	3.31	0.50	0.38	0.27	4.46
HTGR+HTSE	CG+P	4	1.54	1.00	0.41	0.31	3.26
HTGR+SI	CG+P	4	1.93	1.04	0.41	0.31	3.69

从表 5 中可以看出,在产氢速率和储运方案一定的条件下,与高温气冷堆耦合的高温蒸气电解制氢的平准化成本最低,其次是与高温气冷堆耦合的硫-碘热化学循环。但与常规的电解工艺相比,高温蒸气电解和硫-碘热化学循环由于高温和化学循环的复杂性对材料的性能和反应的控制要求较高,导致其制氢厂的成本明显高于常规的电解。

另外,在整个氢气的平准化成本当中,与 APWR 堆型相比,HTGR 堆型的核电站成本占比较低,主要原因在于高温气冷堆属于先进堆型,整体的经济性有所提高,从表 3 的核电站参数中也可以看出,同样生产 1 MW 的热量,HTGR 的成本明显低于 APWR。同为压缩气体储存和管道运输,在不考虑后端氢气储运的情况下,若定义核能制氢的总热效率为:

$$\text{核能制氢总热效率} = (\text{氢气生产速率} \times \text{氢气热值}) /$$

$$[\text{制氢耗热量} + (\text{制氢耗电量} / \text{核电厂热效率})]$$

则可计算出与 APWR 耦合的常规电解以及

HTGR 耦合的高温蒸气电解和硫-碘热化学循环对应的核能制氢总热效率,如表 6 所示,其中氢气热值为  $1.43 \times 10^8$  J/kg。

表 6 不同案例核能制氢总热效率

	APWR+ CE	APWR+ CE	APWR+ CE	HTGR+ HTSE	HTGR+ SI
制氢量/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	4	8	12	4	4
制氢耗热/MW	0	0	0	95.8	1261.4
制氢耗电/MW	719	1438	2234	498.6	42.8
核电厂热效率/%	33	33	33	50	50
核能制氢总热效率/%	26.3	26.3	25.3	52.3	42.5

从表 6 中可以看出,与 HTGR 耦合的高温蒸气电解和硫-碘热化学循环的核能制氢总热效率达到了 52.3% 和 42.5%,明显高于与 APWR 耦合的常规电解。在相同的制氢速率下,同为 HTGR 堆型,高温蒸气电解的制氢平准化成本更低,主要原因在于硫-碘热化学循环的总热效率只有 42.5%,而高温蒸气电解的总热效率达到了 52.3%,较高的热效率降低了反应堆的单位热容量,从而降低了总体的制氢成本。另一个原因在于硫-碘热化学循环需要从商业电网中购买部分电力,相比于直接利用核电厂本身产生的电力,成本有所提高。

### 3.2 制氢速率的影响

从表 5 中 APWR 与常规电解耦合的制氢工艺,采用压缩气体储存和管道运输时不同的制氢速率对氢气平准化成本的影响可知。对于常规电解,氢气的总成本随制氢速率的增加而降低,为此可以作为一种规模效应来预测,即产能的提升有助降低氢气生产及储运的总成本。采用压缩气体储存和管道运输时,氢气的总平准化成本随制氢速率的增加而降低,当制氢的速率从 4 kg/s 增加到 12 kg/s 时,氢气的总平准化成本降低了 34%;其中核电厂的成本降幅最大为 39%,其次是氢气的运输,降幅达 21%。主要原因在于对于 APWR 与常规电解耦合的制氢工艺,氢气的总平准化成本大部分来自核电厂,而核电厂的建造能体现出规模效应,但制氢厂主要为电解槽的成品模块组合,基本没有规模效应。

同时从表 5 中也可以看出,随着制氢规模的增加,氢气的储运成本逐步降低,主要原因在于管道的运输具有规模优势,相比于车辆运输的间接性问题,管道输送能提供不间断的输送能力,且产能的提升有助于降低运输成本,为此对于核能大规模制氢,可以采用管道输送以提升整体的经济性。

### 3.3 储运方案的影响

为研究不同储运方案的影响,考虑在核电厂、制氢厂以及产氢速率一定时,采用压缩气体储存、液体储存和金属氢化物储存以及管道或车辆运输时对氢气平准化成本的影响。计算结果如表 7 所示,运输距离取 200 km。

表 7 不同储运方案对氢气平准化成本的影响

制氢方案	储运方案	制氢速率/ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	氢气平准化成本/(美元· $\text{kg}^{-1}$ )				
			核电厂	制氢厂	储存	运输	合计
APWR+CE	CG+P	4	5.44	0.50	0.45	0.34	6.73
APWR+CE	LQ+V	4	5.86	0.50	0.45	2.30	9.11
APWR+CE	MH+V	4	5.03	0.50	4.22	2.30	12.05

从表 7 中可以看出,对于氢气的储存,采用压缩气体或液体储存时成本区别不大,且占氢气总平准化成本的比重较小,均低于 7%;但对于金属氢化物储存,储存的成本不仅远高于压缩气体储存和液体储存,且占氢气总平准化成本的比重较大,达到了 35%,主要原因在于金属氢化物的制取成本较高。对于氢气的运输,管道输送明显比车辆运输更具成本优势,主要原因在于车辆运输存在间歇性、运输能力受限等问题,且车辆主要适合液态氢气或金属氢化物运输,而管道天然适合压缩气体输送。

### 3.4 运输距离的影响

表 8 为在相同的核电厂和制氢厂以及产氢速率下不同的运输距离对氢气平准化成本的影响。随着距离的增加,氢气的运输成本有所增大,与管道输送相比,车辆输送的成本对运距的敏感性较强。当运输距离从 200 km 增加到 1 000 km 时,管道输送的成本增幅小于 5%,而车辆运输的成本不论是运输液态氢还是金属氢化物,成本增幅均大于 70%。导致车辆运输成本大幅增加的原因主要在于车辆的燃油成本,这表明对于短距离的输送,可以考虑车辆运输,但对于远距离的输送,还是管道更具有经济性优势。

表 8 不同运输距离对氢气平准化成本的影响

储运方案	不同运距氢气平准化成本/(美元· $\text{kg}^{-1}$ )				
	200 km	400 km	600 km	800 km	1000 km
CG+P	6.73	6.81	6.88	6.95	7.03
LQ+V	9.11	11.34	13.57	15.81	18.04
MH+V	12.05	14.28	16.51	18.75	20.98

另外,由于管道输送主要适合压缩气体,对于有液态氢或金属氢化物需求的特殊场合以及小规模或短距离的输送,可以考虑车辆运输。对于大工业园

区以及大规模的氢气用户,通常对氢气的需求较大且需要保持不间断,为此可以建立输送管网充分利用管道的规模优势,但对于氢气需求不连续且最终用户分散的地区,可以考虑车辆运输的灵活性。

#### 4 结论

基于 IAEA 开发的 HEEP 软件,对核能制氢不同储存和运输方案的经济性进行了研究,通过计算分析得到如下结论。

(1) 与 APWR 堆型相比,HTGR 堆型由于效率更高更具成本优势。特别的,当氢气的生产速率和储运方案一定时,与 HTGR 堆型耦合的高温蒸气电解制氢的平准化成本最低。

(2) 对于常规的电解,氢气的总平准化成本随制氢规模的增大而降低,即提升产能有利于提升经济性。同时相比于车辆运输,管道输送更具有规模优势,更适合大规模制氢。

(3) 氢气采用金属氢化物储存的成本远高于压缩气体或液体储存,且金属氢化物储存对氢气的总平准化成本贡献较大。对于氢气的运输,管道输送明显比车辆运输更具成本优势,且车辆运输存在间歇性和运输能力受限等问题。

(4) 运输距离的增加对管道输送的成本影响较小,但对车辆运输的成本影响较大。对于短距离、小规模的输送,可以考虑管道或车辆输送,但对于远距离和大规模的氢气输送,管道输送更能体现规模效应和经济性优势。

#### 参考文献

[1] 张平,于波,徐景明.核能制氢技术的发展[J].核化学与放射化

(上接第 256 页)

#### 参考文献

- [1] 石春艳,张国帅,李益,等.碳中和背景下的钢化联产发展趋势[J].过程工程学报,2022,22(10):1317-1324.
- [2] 郭玉华.高炉煤气净化提质利用技术现状及未来发展趋势[J].钢铁研究学报,2020,32(7):525-531.
- [3] 张琦,向婷,田硕硕.钢铁-化工联产系统构建及未来发展趋势[J].钢铁研究学报,2023,35(4):375-384.
- [4] 袁伟霞.构建钢焦融合钢化联产模式 推动绿色低碳发展[N].中国冶金报,2022-03-24(001).
- [5] 郭玉华,周继程.中国钢化联产发展现状及前景展望[J].中国冶金,2020,30(7):5-10.
- [6] 龙素安,吴楠燕.钢铁联合企业副产煤气资源化利用现状[J].燃料与化工,2023,54(2):42-45,49.
- [7] 顾光临.变压吸附法在高炉煤气提纯 CO 中的工业应用[N].中

学,2011,33(4):193-203.

- [2] 李永恒,陈洁,刘城市,等.氢气制备技术的研究进展[J].电镀与精饰,2019,41(10):22-27.
- [3] 王涵,李世安,杨发财,等.氢气制取技术应用现状及发展趋势分析[J].现代化工,2021,41(2):23-27.
- [4] 裴一,倪红军,吕帅帅,等.制氢技术的研究现状及发展前景[J].现代化工,2013,(5):31-35.
- [5] Şahin S, Şahin H M. Generation-IV reactors and nuclear hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(57):28936-28948.
- [6] 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.
- [7] 曹军文,张文强,李一帆,等.中国制氢技术的发展现状[J].化学进展,2021,33(12):2215-2244.
- [8] Nikolaidis P, Poullikkas A. A comparative overview of hydrogen production processes[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67:597-611.
- [9] El-Emam R S, Khamis I. Advances in nuclear hydrogen production: Results from an IAEA international collaborative research project[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(35):19080-19088.
- [10] Khamis I. An overview of the IAEA HEEP software and international programmes on hydrogen production using nuclear energy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(6):4125-4129.
- [11] El-Emam R S, Ozcan H, Dincer I. Comparative cost evaluation of nuclear hydrogen production methods with the Hydrogen Economy Evaluation Program (HEEP)[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(34):11168-11177.
- [12] Dewita E, Prassanti R, Widana K S, et al. Cost analysis of nuclear hydrogen production using IAEA-HEEP 4 software[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 2048(1):012005.
- [13] Sorgulu F, Dincer I. Cost evaluation of two potential nuclear power plants for hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(23):10522-10529.
- [14] Abdalla A M, Hossain S, Nisfindy O B, et al. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 165:602-627. ■
- 国钢铁新闻,2019-12-12(05).
- [8] Guo Y, Lu J Y, Zhang Q, et al. Co-production of steel and chemicals to mitigate hard-to-abate carbon emissions[J]. Nature Chemical Engineering, 2024, 1:365-375.
- [9] 师少杰.钢铁与化工耦合发展技术研究及实践[J].煤化工,2024,52(3):40-42,51.
- [10] 袁伟霞.为什么说钢焦融合、钢化联产才是现实有效的减排新模式?[N].中国冶金报,2022-06-06(02).
- [11] Muhammad T, Rana J N M, Amani A, et al. The novel contribution of non-noble metal catalysts for intensified carbon dioxide hydrogenation: Recent challenges and opportunities[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 279:116755.
- [12] 闫小凤,周晗超,闫占辉,等.焦炉煤气催化制甲烷和低碳醇研究进展[J].洁净煤技术,2024,30(4):72-89.
- [13] 冯士超,秦子然,丁瑞锋.碳中和背景下“钢化联产”现状与前景[J].冶金经济与管理,2022,(3):48-50. ■