

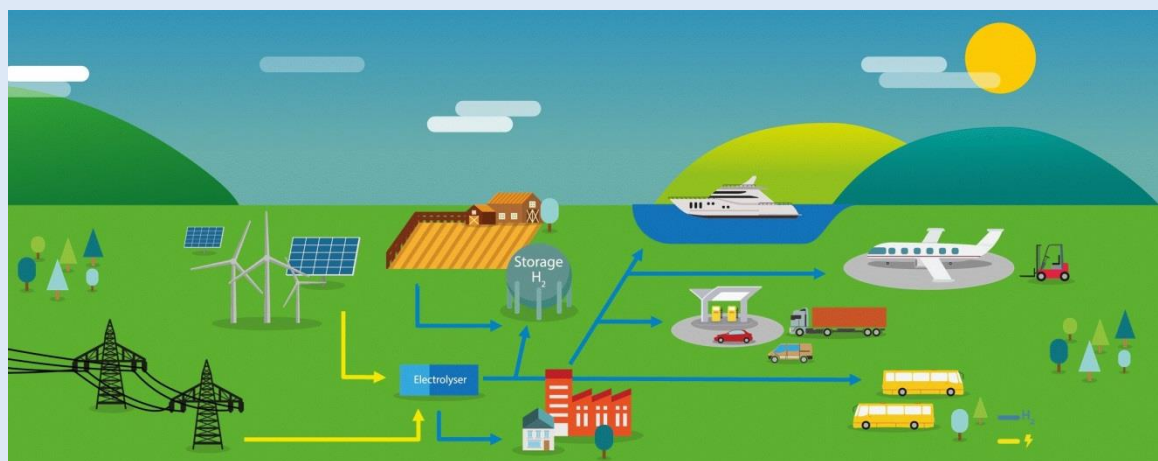
“变革性洁净能源关键技术与示范” A 类先导专项

“面向国家能源结构变革战略研究” 课题



洁净能源重大信息专报

2019 年第 01 期(总第 01 期)



欧盟至 2030 年氢能与燃料电池研究规划

9月4日，欧洲能源研究联盟（EERA）发布了新版《氢能与燃料电池联合研究计划实施规划》，确定了到2030年欧盟在氢能与燃料电池技术领域的研究目标、行动计划和优先事项，以促进氢能与燃料电池技术的大规模部署和商业化。EERA是欧洲最大的低碳能源研究非营利性国际协会，由超过250家公共科研机构 and 高校组成，是欧盟战略能源技术规划（SET-Plan）的研究支柱，目前共开展了17个低碳能源技术领域的联合研究计划，氢能与燃料电池是其中之一。本次更新的实施规划提出了7个子技术领域的研究重点和关键项目，并明确了实施优先级和预算：电解质；催化剂与电极；燃料电池电堆材料与设计；燃料电池系统；建模、验证与诊断；氢气生产与处理；氢气储存。

中国科学院洁净能源创新研究院
中国科学院武汉文献情报中心

目 录

2019 年第 01 期 (总第 01 期)

◆ 领域一：电解质	
1 研究目标.....	1
2 研发实施规划.....	2
◆ 领域二：催化剂与电极	
1 研究目标.....	5
2 研发实施规划.....	5
◆ 领域三：燃料电池电堆材料与设计	
1 研究目标.....	9
2 研发实施规划.....	9
◆ 领域四：燃料电池系统	
1 研究目标.....	13
2 研发实施规划.....	13
◆ 领域五：建模、验证与诊断	
1 研究目标.....	16
2 研发实施规划.....	16
◆ 领域六：氢气生产与处理	
1 研究目标.....	20
2 研发实施规划.....	20
◆ 领域七：氢气储存	
1 研究目标.....	24
2 研发实施规划.....	24

为应对气候挑战，实现欧盟减少温室气体排放的战略目标，欧盟战略能源技术规划（SET-Plan）确定了欧盟能源研究的框架和议程，其中明确指出氢能与燃料电池技术是实现欧盟气候目标的关键技术之一。在过去的十余年中，欧盟的氢能与燃料电池技术已经取得重大进展，但大多数研究都以产品和示范为导向，优先资助工业利益相关者，在基础研究方面有所欠缺。欧盟认为实现氢能和燃料电池在固定式、车载、便携和微型等全领域应用的商业化仍需进行长期、基础的研究。在此背景下，欧洲能源研究联盟（EERA）于 9 月 4 日发布新版《氢能与燃料电池联合研究计划实施规划》¹，确定了到 2030 年欧盟在氢能与燃料电池技术领域的研究目标、行动计划和优先事项，针对 7 个子技术领域提出了研究重点和关键项目，并明确了实施优先级和预算。现将主要内容编译如下，供领导决策参考。

领域一：电解质

1 研究目标

开发电解质以提高聚合物电解质燃料电池温度，降低固体氧化物燃料电池温度，提高燃料电池性能、稳定性和耐久性。研究应包括开发聚合物固体氧化物燃料电池和质子导电陶瓷燃料电池所需的耐用、低成本、高性能电解质，以及填补聚合物电池和氧化物电池工作温度空白区（200-500℃之间）的新型燃料电池和电解槽概念。

¹ Joint Research Programme on Fuel Cells and Hydrogen technologies (JP FCH) IMPLEMENTATION PLAN 2018 – 2030. <https://www.eera-set.eu/wp-content/uploads/EERA-JP-FCH-IP-2018-2030-4.0.pdf>

2 研发实施规划

主题 1.1: 燃料电池和电解质隔膜中输运过程研究。该主题将开发计算和实验工具及方法，以更好地描述燃料电池和电解质隔膜中的输运和扩散过程及其微观结构，还将开发时空分辨技术以对燃料电池和电解质进行表征。

预期成果: 运用实验和计算方法更深入理解燃料电池和电解槽中的传输过程；更好地描述膜的微观结构及其对性能的影响。**关键性能指标:** 输运过程的 5-200 nm 级空间表征和秒级时间表征。具体研发活动及其规划详见表 1。

表 1 电解质领域主题 1.1 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
低温燃料电池/电解槽	聚合物和无机纳米结构复合材料中的离子输运研究	立即实施	700
	将宽带电子光谱 (BES)、核磁共振 (MRI) 同步加速器和中子散射技术用于聚合物、氧化物/陶瓷材料的化学和输运特性研究	2020 年后	500
所有燃料电池/电解槽	多相氧化物材料中的离子输运研究	立即实施	700
	将宽带电子光谱 (BES)、核磁共振 (MRI) 同步加速器和中子散射技术用于聚合物燃料电池的化学和输运特性研究	2020 年后	500

主题 1.2: 电解质材料降解过程及其缓解方法研究。该主题将通过诊断工具、表征技术和建模仿真探索导致隔膜变薄、破裂、穿孔的原因，以及燃料电池和电解质隔膜化学和机械不稳定性之间的关系，并提出缓解电解质材料降解的方法。

预期成果: 新的表征和诊断工具及方法；确定燃料电池/电解槽更优的运行方式；更深入了解降解路径及其与运行工况的关系；确定缓解电解质降解的方法；改进降解路径模型。**关键性能指标:** 输运过程的 5-200 nm 级空间表征和秒级时间表征；加速老化时间不得超过正常老化时间的 1/10。具体研发活动及

其规划详见表 2。

表 2 电解质领域主题 1.2 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
质子交换膜低温燃料电池/电解槽	质子导电陶瓷基电解质材料的降解研究（尤其是在高压电解模式下）	立即实施	700
所有燃料电池	开发监测隔膜降解的原位诊断传感器	立即实施	1100
	利用 BES、MRI、同步加速器和中子散射等技术开发电解质降解现象的化学、结构和形态变化表征新技术	2020 年后	1100
	开发监测电解质降解的原位诊断传感器	立即实施	1100
低温燃料电池	开发增强聚合物膜化学稳定性和机械稳定性的方法，并进行验证	立即实施	600

主题 1.3: 新型膜材料和薄膜电解质沉积方法。该主题将开发新型电解质以拓宽燃料电池/电解槽的工作温度范围，并填补 200-450℃ 的温度空白区间，开发新的电解质隔膜解决方案以解决随运行时间老化问题，开发实验和建模工具及方法用于对电解质进行表征，开发薄膜电解质沉积的新工艺和方法。

预期成果：新型膜材料，可改善电池性能；符合车载和固定式燃料电池及电解槽长期性能目标的膜材料；具有机械强度和化学稳定性的薄膜，可在宽温度范围内以较低的相对湿度具备高电导率；400-600℃ 下的高导电性和长期稳定的质子陶瓷电解质；用于乙醇燃料电池的新型选择性膜；200-450℃ 下的新型电解质材料。**关键性能指标：**运行条件下面积比电阻：0.025 Ω/cm^2 ；燃料与氧化剂最大交叉渗透电流：2 mA/cm^2 。具体研发活动及其规划详见表 3。

表 3 电解质领域主题 1.3 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/万欧元
碱性燃料电池	开发稳定的碱性阴离子交换膜	立即实施	1400
中温燃料电池	开发具备质子电导率的中温固体氧化物燃料电池电解质	立即实施	700
高温燃料电池/电解槽	利用 3D 打印技术生产高表面积电解质的可行性研究	2020 年后	400
所有燃料电池/电解槽	开发适用于 200-450℃的质子导电材料	2020 年后	300
	开发薄膜电解质沉积的新工艺和方法	立即实施	700
低温燃料电池/电解槽	通过新的电解质膜化学、设计和架构开发智能、自适应材料，以缓解材料随时间的老化	立即实施	700

主题 1.4: 膜电极界面电解质研究。该主题将通过表征技术、计算方法、仿真等进行膜电极界面的基础研究，以及离聚物的特性、分布等，探索电解质粘结剂的老化和降解现象，新型粘结剂的制备、加工和测试等。

预期成果：新一代烃类高分子？粘结剂；改良的全氟磺酸粘结剂；粘结剂分散体新型加工方法；膜/电极界面对特定电解质的降解/老化效应以及缓解策略。**关键性能指标：**采用创新粘结剂的电池比目前电池的性能和耐用性水平至少高 25%。具体研发活动及其规划详见表 4。

表 4 电解质领域主题 1.4 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/万欧元
低温燃料电池/电解槽；中温燃料电池	通过性能、制备、加工路线、表征技术和工具研究，开发用于膜电极界面的改进离子聚合物	立即实施	500
	包含新型离聚物材料的油墨催化剂，研究电池运行过程中聚合物的降解现象	2020 年后	500

主题 1.5: 实际运行工况下膜电极组件电解质的性能和耐久性验证。该主题将研究以燃料电池或电解槽模式运行的电池的电性能，确定最佳运行参数，通过加速应力测试确定新型电解质材料的耐久性，开发诊断工具以评估电池健康状况，并进行

工业扩大规模的可行性评估。

预期成果: 膜电极的概念验证; 研究成果可用于规模扩大。

关键性能指标: 采用新型电解质的电池比目前电池的性能和耐用性水平至少高 25%。具体研发活动及其规划详见表 5。

表 5 电解质领域主题 1.5 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池/电 解槽	新型材料的耐久性研究	立即实施	500
	主题 1.2 和 1.3 中的新型电解质的验证	立即实施	500
	建立燃料电池和电解槽长期测试数据的开放获取数据库	立即实施	500
	材料重复利用的可行性研究	2020 年后	300

领域二：催化剂与电极

1 研究目标

从性能优化、制造工艺和开发新型材料等方面进行催化剂和电极材料研究，了解燃料电池/电解槽的电化学过程和降解机理，进行电极、催化剂和载体的计算设计和建模，将电极优化整合到电池架构中，并探索乙醇、生物燃料、低分子量碳氢化合物等替代燃料的电化学工程，扩展燃料电池的工作温度范围，提高燃料电池性能、稳定性和耐久性。

2 研发实施规划

主题 2.1: 燃料电池和电解槽电化学反应过程和材料基础研究。 该主题将探索催化剂/电极材料的化学特性与活性之间的关系，确定性能和寿命与电极结构、材料和界面的化学和电性能的关系，优化氧气还原、燃料氧化及水的氧化还原等电化学反应的催化剂和电极性能。

预期成果：新的表征技术可对催化剂表面和界面进行原位表征和运行过程表征；确定单个燃料电池和电解槽的运行方案；电极降解的定量模型；评估电催化剂/电极性能的标准化测试；具备更好的活性、选择性和稳定性的催化剂和电极材料。**关键性能指标：**面积比电阻 $< 0.1 \Omega/\text{cm}^2$ ；燃料反应效率 $> 95\%$ ，氧电极反应效率 $> 90\%$ ；催化剂/电极寿命达到 40000 小时。具体研发活动及其规划详见表 6。

表 6 催化剂与电极领域主题 2.1 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池和电解槽	电极、催化剂和载体的模型和表征	立即实施	800
	新型分段式双极板	立即实施	800
	实际运行条件下的催化剂表面结构研究	立即实施	800
	用于高温、电压跨度大的稳定氧电极	2020 年后	400
	优化催化剂和电极性能	立即实施	800

主题 2.2：电极、催化剂和载体的设计和开发策略。该主题将开发和实施系统化的设计方法，可调整催化剂和载体的性能，还将评估新的催化剂设计和电极结构，开发替代载体材料以提高稳定性和催化剂利用率，并开发用于新型先进电解槽的电极材料。

预期成果：低温燃料电池和电解槽的非贵金属催化剂；新型电极结构提高贵金属利用率；计算辅助模型描述不同催化剂和载体的组成及结构；用于中温电池(200-600℃)的新型电极；用于陶瓷燃料电池的长期稳定电极；组合式再生燃料电池的双效电极；中温燃料电池中直接利用碳氢化合物的新型阳极电催化剂；贵金属阳极电催化剂，用于低温下直接氧化甲醇/乙醇。**关键性能指标：**面积比电阻 $< 0.1 \Omega/\text{cm}^2$ ；电极原材料成本达到

1 欧元/kW；质子交换膜电池电极铂载量 $<0.1 \text{ mg/cm}^2$ 。具体研发活动及其规划详见表 7。

表 7 催化剂与电极领域主题 2.2 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
碱性电解槽；低温燃料电池；质子交换膜电解槽	集成电荷转移和催化活性的多功能电催化剂，用于含碳燃料	立即实施	600
	改进化学稳定性的质子交换膜燃料电池、便携式微流体燃料电池、直接甲醇/乙醇燃料电池，使电池具有更高活性和更佳性能	立即实施	600
	用于干燥环境的多相电极、结构化电极	立即实施	1200
固体氧化物电池	耐腐蚀高温电极	2020 年后	900
中温电池	中温电池（200–600℃）新型电极	2025 年后	600
低、中温电池	纳米级催化剂、氧化物陶瓷电极和载体的稳定与控制	立即实施	1200
固体氧化物燃料电池/电解槽	用于中温燃料电池中碳氢化合物直接利用的新型阳极电催化剂	2020 年后	900
低温燃料电池/电解槽	低贵金属含量的阳极电催化剂，用于低温直接氧化甲醇/乙醇	2025 年后	500

主题 2.3: 改进催化剂性能。该主题将探索和开发电催化剂和电极材料的新制造工艺，并确保制造过程环保、低成本、快速和低能耗。

预期成果：基于湿化学、声电化学、火焰喷雾热解和物理气相沉积开发新型无极和有机电催化剂；氧还原反应和析氧反应的低贵金属含量电催化剂的合成；用于质子导电和碱性膜电解的纳米结构催化剂。**关键性能指标：**面积比电阻 $<0.2 \text{ } \Omega/\text{cm}^2$ ；电极除原材料以外的成本达到 1 欧元/kW；批量生产成本 <10 欧元/kg。具体研发活动及其规划详见表 8。

表 8 催化剂与电极领域主题 2.3 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
主要用于高温电池，也可用于低温燃料电池/电解槽	多功能电极材料，用于直接转化和合成氢载体，使用无毒、无害的原料作为电催化剂	立即实施	1200
低温燃料电池/电解槽	非贵金属电催化剂的合成与表征	立即实施	1000
碱性电解槽	耐碱性介质腐蚀电极，质子-电子混合导电电极	2020 年后	1000

主题 2.4: 材料集成、电极设计与制造。该主题将通过开发和优化加工方法制造先进电催化剂和电极，还将开发新的制造技术，评估电池性能，如电催化活性、燃料效率、输运性能等。

预期成果: 新型电催化剂和电极、纳米结构电极设计以及新制造工艺的概念验证；电极油墨制备方法、电极无溶剂制备技术以及沉积技术的优化。**关键性能指标:** 面积比电阻 $< 0.3 \Omega/\text{cm}^2$ ；燃料电池在 0.9 V 时电流密度 $> 0.3 \text{ A}/\text{cm}^2$ ； $0.5 \text{ A}/\text{cm}^2$ 或 $0.4 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时电极效率：燃料反应效率 $> 90\%$ ，氧气电极反应效率 $> 80\%$ ；电极成本 2 欧元/kW；催化剂/电极寿命 40000 小时；电池成本 < 10 欧元/kW。具体研发活动及其规划详见表 9。

表 9 催化剂与电极领域主题 2.4 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池	电池中先进电极的集成和示范	立即实施	1500
	使用最少电催化剂的纳米结构电极概念原型	2020 年后	1200
	通过可升级、环保和自动化制造技术开发纳米结构电极	2025 年后	2300

领域三：燃料电池电堆材料与设计

1 研究目标

开发能够承受快速频繁热循环和负荷循环的电堆，可适应机械振动、瞬态运行、燃料和空气污染及其他运行工况。通过基础研究改进材料并识别新材料，优化材料加工工艺，开发新型燃料电池电堆和模块。

2 研发实施规划

主题 3.1: 连接件和双极板。该主题将使用新的制造技术降低成本，以及采用低成本的替代材料。测试连接件和双极板的耐腐蚀涂层。对于固体氧化物燃料电池中的涂层，如果保持良好则将使用更低成本的金属制造连接件和双极板。

预期成果：连接件和双极板经济高效的制造技术；固体氧化物燃料电池寿命达到 4-10 万小时，低温燃料电池寿命超过 2 万小时。**关键性能指标：**质子隔膜寿命达到 4 万小时；成本 3 欧元/kW；电导率 >100 S/cm；固体氧化物燃料电池寿命超过 10 万小时；连接件成本 300 欧元/kW；电堆成本 1000 欧元/kW；铬阻隔保护层成本 50 欧元/kW。具体研发活动及其规划详见表 10。

表 10 燃料电池电堆材料与设计领域主题 3.1 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池	开发用于高温燃料电池和电解槽的无腐蚀陶瓷连接件的 3D 打印新工艺	立即实施	500
固体氧化物电池	开发用于连接件的 3D 打印材料	2020 年后	400
	开发 3D 打印的连接件设计	2020 年后	800
	开发连接件的铬蒸发阻挡层的低成本涂层技术	2020 年后	500
	开发用于低温运行的新型连接件材料	2020 年后	400
低、中温电池	开发质子交换膜燃料电池双极板的非贵金属涂层	立即实施	600
固体氧化物电池；质子导电电池	开发用于燃料电池和电解槽管状电池的连接件	立即实施	600
	开发燃料电池和电解槽双极板性能和稳定性的原位表征方法	2020 年后	600

主题 3.2: 接触和气体分布研究。该主题将对优化结构进行建模并使用新的涂层以降低双极板中的气流阻力，测试电解槽的新材料和替代材料。探索烧结发生的条件以减少这一现象的发生。

预期成果：开发能够满足导电性和低气流阻力要求，同时又具有较高机械稳定性的双极板新材料；开发可保证电解槽长期运行的低电阻高稳定性材料；改进电接触，确保在运行模式下接触层不会烧结。**关键性能指标：**包括气体扩散层和密封的膜电极装配体成本 14 欧元/kW。具体研发活动及其规划详见表 11。

表 11 燃料电池电堆材料与设计领域主题 3.2 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
质子交换膜电解槽	低电阻和高稳定性质子交换膜燃料电池微孔层研究	立即实施	500
固体氧化物电池	热循环过程的接触损耗原因研究	立即实施	700
	电堆中电池互连的接触行为建模和仿真	立即实施	300
	新型阴极柔性接触层的开发	2020 年后	400
	通过增材制造改善接触并减小面积比电阻	2020 年后	300

主题 3.3: 电堆密封。该主题将测试替代封接玻璃或密封剂的材料,开发电堆密封新概念,测试制造电堆密封的替代方法。开发强度更高的玻璃材料以及具有自修复特性的隔离器。

预期成果: 获得可在宽温度范围使用的低温燃料电池替代材料; 确定运行稳定的材料, 可用于替换缺陷循环电堆单元, 而不会破坏整个电堆; 获得修复电堆的方法, 如激光封接玻璃; 改进玻璃材料以实现自修复, 开发高强度材料作为隔离器, 并最终获得将两者结合的解决方案。**关键性能指标:** 固体氧化物燃料电池密封寿命大于 200 次热循环。具体研发活动及其规划详见表 12。

表 12 燃料电池电堆材料与设计领域主题 3.3 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
固体氧化物电 池; 质子导电燃 料电池; 质子导 电电解槽	固态反应烧结法开发陶瓷密封	2020 年后	500
	铸造和/或成型接近最终形状密封件的自动化生产	立即实施	500
固体氧化物电 池	固体氧化物电池电解运行对电堆密封胶影响研究	立即实施	100
质子交换膜电 池	开发双极板或膜电极密封的低成本集成生产工艺	立即实施	500
固体氧化物电 池	开发用于模块的玻璃-陶瓷密封胶	2020 年后	200
	研究耐用和低成本密封的精确成型增材制造技术	立即实施	300
	开发密封材料以提高固体燃料电池电堆耐用性, 实现 200 次以上热循环	立即实施	400
	不同玻璃-陶瓷密封胶材料的测试和表征	立即实施	300
	开发玻璃-陶瓷密封胶在工作条件下的表征方法	立即实施	300
	热循环过程中电堆热应力建模与仿真	立即实施	300

主题 3.4: 电堆新型设计。该主题将进行新型电堆设计, 以获得热循环性能好、成本低且易于制造的电堆。新的流场设计, 以优化燃料气体 (或蒸汽) 的分布, 降低压力损失以确保气体均匀分布。将传感器集成到电堆中实现电堆的在线诊断, 显著提高电池组耐久性。

预期成果：新型电堆的建模及测试；确定改进的气体通道的测试模型；集成温度和气体传感器的连接件和双极板。**关键性能指标：**对剩余寿命的评估误差不超过 5%。具体研发活动及其规划详见表 13。

表 13 燃料电池电堆材料与设计领域主题 3.4 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
固体氧化物电池；质子导电燃料电池/电解槽	基于 O ₂ 压力差和/或湿度传感器开发燃料利用率传感器	2025 年后	400
固体氧化物电池；质子交换膜电池	嵌入式传感器	2020 年后	500
	将诊断算法和传感器等硬件直接集成到现有燃料电池辅助系统 (BoP) 组件中	立即实施	500

主题 3.5：电堆和辅助系统 (BoP) 新型设计。该主题将通过 BoP 和电堆的集成设计减少热损失，降低成本。进行电堆模块化设计以构建更高功率的系统。

预期成果：BoP 与电堆的集成；开发模块化电堆单元并进行测试。**关键性能指标：**质子交换膜电堆成本 20 欧元/kW；燃料电池和超级电容混合系统的功率密度达到 10 kW/kg。具体研发活动及其规划详见表 14。

表 14 燃料电池电堆材料与设计领域主题 3.5 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
固体氧化物电池；质子导电燃料电池/电解槽	通过结合氧气输运膜更好地回收燃料	立即实施	900
	开发加压制氢电解槽新型设计，具有更高稳定性和更低成本	立即实施	500
低温燃料电池/电解槽	通过结合氧气输运膜更好地回收燃料	立即实施	500
固体氧化物电池；质子导电电解槽	开发加压制氢电解槽新型设计，具有更高稳定性和更低成本	立即实施	500
质子交换膜燃料电池	基于氢能和燃料电池的轻便高效便携式发电新概念	立即实施	100
	质子交换膜电池和超级电容深度集成的电堆概念	立即实施	400
	质子交换膜电池和超级电容的直接组合	立即实施	300

领域四：燃料电池系统

1 研究目标

对燃料电池系统和组件进行优化改进，前者包括：提高系统效率；开发创新系统概念以减少组件数量；设计具有新功能的系统，如用于氢气和发电联产或冷热电联产的系统；新型概念设计，将燃料电池系统与储能电池、燃气轮机和常规发电系统集成；运用先进控制和诊断技术以提高系统性能和运行可靠性。而在组件级别，将进行优化改进以降低组件成本、延长组件寿命，以及提高组件可用性，具体将针对热管理、功率调节和电网连接、集成电化学储能、控制系统、供气系统以及 BoP 组件老化和寄生损耗等方面进行改进。

2 研发实施规划

主题 4.1：系统组件材料开发。该主题将开发低成本新型材料，以延长使用寿命，并开发可保护组件避免老化的涂层材料。

预期成果：改善连接材料和 BoP 组件的耐腐蚀性，改进重整器和燃烧器催化剂的寿命并提高其性能。**关键性能指标：**BoP 系统中 1000 小时铬累计蒸发量低于 0.0002 kg/m^2 ；固体氧化物电池在运行温度下的氧化增重低于 0.2 mg/1000 小时 ；有涂层组件寿命超过 40000 小时；涂层成本低于 700 欧元/m^2 ，涂层对组件性能影响不超过 10%；催化剂寿命大于 4 万小时，允许稳定情况下性能比初始降低 10%。具体研发活动及其规划详见表 15。

表 15 燃料电池系统领域主题 4.1 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池/电 解槽	低成本高度耐腐蚀合金	立即实施	300
	高温 BoP 组件新型材料	立即实施	300
	高温热交换器用涂料开发	立即实施	350
	BoP 组件耐腐蚀涂层开发	立即实施	350
	用于部分氧化重整的新型催化剂/载体	2020 年后	200
	蒸汽重整用先进材料	2020 年后	150
	用于 CO ₂ 重整的材料	2025 年后	150

主题 4.2: 组件/功能开发。该主题将开发不同燃料电池系统的专有 BoP 组件，以实现不同的性能、寿命和成本。

预期成果: 低压降的高温热交换器，使用寿命长且易于制造。**关键性能指标:** BoP 系统成本低于 400 欧元/kW；系统成本降低 5%，系统效率至少提高 3%。具体研发活动及其规划详见表 16。

表 16 燃料电池系统领域主题 4.2 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池/电 解槽	在电堆中集成重整器和热交换器	2020 年后	500
	开发选择性膜和其他燃料废气净化装置以获取热量、电力和氢气	立即实施	600
	开发阳极废气的再循环风机，用于蒸汽重整	立即实施	400

主题 4.3: 新系统概念开发。该主题将开发创新系统概念，比当前系统成本更低、更高效且寿命更长。

预期成果: BoP 组件的集成，如将重整器、燃烧器或热交换器集成到电堆中，实现紧凑的系统设计，具有较高热集成度并降低了成本。**关键性能指标:** 系统选择效率超过 70%；电池和燃料电池混合系统的响应时间低于 1 毫秒；固体氧化物电池和储热混合系统比单独系统至少改进 2 个功能。具体研发活动及其规划详见表 17。

表 17 燃料电池系统领域主题 4.3 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
固体氧化物燃料电池+燃气轮机	高度灵活的热电联产系统	立即实施	450
质子交换膜燃料电池+储电； 固体氧化物燃料电池+储电	固体氧化物燃料电池和燃气轮机联合系统，以实现最高效发电	立即实施	450
可逆固体氧化物电池+储热	固体氧化物电池和储热结合，以最大化能量转换效率	2020 年后	300
可逆固体氧化物电池+液态有机氢载体储氢 质子交换膜燃料电池+液态有机氢载体储氢	固体氧化物电池和液态有机氢载体储氢结合，用于汽车和航空	2020 年后	300

主题 4.4: 燃料电池和电解槽传感器及诊断工具。该主题将开发低成本、可靠的传感器和诊断工具，以监控系统及其组件（尤其是电堆）状态，确保系统的运行寿命。

预期成果: 经济、可靠的在线测量或评估技术，以监测固体氧化物燃料电池电堆的温度和电压分布。**关键性能指标:** 传感器的寿命超过 4 万小时，传感器成本 10 欧元/个。具体研发活动及其规划详见表 18。

表 18 燃料电池系统领域主题 4.4 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池/电解槽	集成燃料、温度、流量传感器的高温固体氧化物燃料电池系统	2020 年后	500
	集成传感器低温燃料电池和电解系统	立即实施	500

主题 4.5: 系统控制。该主题将通过开发有效的系统控制，延长系统寿命，实现系统可靠自主运行，并提高系统运行状态的预测能力。

预期成果: 确定不同用途燃料电池系统最佳运行策略。**关键性能指标:** 系统效率至少提高 5%；系统误差小于 0.05%；在 40%负荷下系统仍灵活运行。具体研发活动及其规划详见表 19。

表 19 燃料电池系统领域主题 4.5 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池/电 解槽	基于脚本的系统控制和运行自动化，以实现系统 生命周期内简易低成本检测电堆性能	2020 年后	500
	基于神经网络和人工智能的系统容错控制	立即实施	500

领域五：建模、验证与诊断

1 研究目标

增强对降解机理、加注气体混合物成分影响、热机械应力及其对燃料电池和电解槽的影响等理解，以及工况、组件结构和化学性质与电池耐用性之间的关系。基于催化剂化学和结构特性以及运行工况参数，进一步发展现有的动力学模型。加速老化测试的实验开发，预测系统性能和寿命，优化系统控制算法等。

2 研发实施规划

主题 5.1: 燃料电池组件建模。该主题将从组件单元级别进行建模，以改善燃料电池和电解槽性能及寿命。将开发三种模型，第一种模型模拟正常状况下燃料电池和电解槽组件的行为，并可调整适应新材料；第二种模型考虑影响组件寿命的主要机制，以通过材料和电池设计优化或新材料开发改善组件寿命；第三种模型考虑随电极面积增加而带来的复杂性。

预期成果: 获得双极板、扩散层和催化剂层等组件的气体、电荷、水和热传输所有相关参数；提出新的技术要求以达到更好性能；获得材料性能变化的影响；确定会导致材料退化的运行条件。**关键性能指标:** 基于从头计算和材料特性表征的电池

组分模型，其验证结果超过预期目标。具体研发活动及其规划详见表 20。

表 20 建模、验证与诊断领域主题 5.1 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池	利用从头计算法和连续模型，研究催化剂层的结构和物理特性，以改善其性能和耐久性	立即实施	200
	基于模型优化有源层结构以增加电池功率密度	立即实施	200
	多尺度输运机理研究以确定不同组件的最佳材料结构，开发快速可靠的多组件老化模型	立即实施	400
质子交换膜电池	通过双极板相变两相流仿真模拟优化设计	2020 年后	200

主题 5.2: 燃料电池单元、双极板建模及实验验证。该主题将基于分子动力学、热力学建立新的可靠模型，进行电池组件和电堆级别的开发。研究微观结构演化、输运、电化学等机制与不同模型的耦合，以更可靠预测燃料电池/电解槽性能和耐久性。

预期成果: 通过多尺度数学模型确定特定的电池结构，预测给定系统寿命，并提供最佳运行指导。**关键性能指标:** 实现燃料电池电堆的三维计算流体动力学开源模型；定义用于模型验证的测试案例。具体研发活动及其规划详见表 21。

表 21 建模、验证与诊断领域主题 5.2 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池	电堆三维计算流体动力学 (CFD) 开源模型	立即实施	200
	下一代电池组的双极板设计和膜电极的共同优化	立即实施	300
	开发电堆先进三维模型，为开发模块化电池做准备	2020 年后	200
	模型的实验验证	2020 年后	200

主题 5.3: 燃料电池电堆建模。该主题将结合电堆材料和设计，开发新的电堆模型。将开发模型用于测试新的电堆设计并确定双极板、夹板、端板、集电器的最佳参数、几何形状和配

置，减少电堆设计时间，研究电池组与其他电气设备的相互作用。

预期成果：热管理和水管理及电堆整体性能的改进方法；简化散热组件；准确的仿真工具可减少电堆设计时间；先进知识和工具用于燃料电池/电解槽电堆建模。**关键性能指标：**电堆机械模型可优化概念及验证；电堆寿命延长模型，其结果超过预期目标。具体研发活动及其规划详见表 22。

表 22 建模、验证与诊断领域主题 5.3 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池	优化双极板、集电器等的参数、几何形状和配置，开发模型测试助剂对电池组性能的影响，并研究电池组与其他电气设备的相互作用，以优化电堆设计	立即实施	500
	电堆三维仿真、专有设计规则和最佳实践	2020 年后	300

主题 5.4：系统建模与控制。该主题将开发和验证具有退化机制的物理系统模型，定义和开发灵活可靠的健康状态指标 (SOH)，开发 SOH 的诊断方法及在线算法。还将开发系统的预测命令，以优化系统效率和耐用性。

预期成果：具备退化机制的燃料电池/电解槽系统模型，已经过不同工况验证；具有健康状态指标约束的能量管理策略；提高燃料电池/电解槽耐久性的预测命令和提高效率的自适应命令，两者均由健康状态决定；可根据实际应用和运行条件优化成本、性能和寿命的仿真工具；模型在环开放平台，可加速新架构设计和控制。**关键性能指标：**燃料电池电堆零维模型及辅助程序库可在开源平台使用。具体研发活动及其规划详见表 23。

表 23 建模、验证与诊断领域主题 5.4 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池	开发可预测寿命的动态多物理场燃料电池系统模型	2020 年后	200
	建立燃料电池系统数据库	2020 年后	200
	不同环境下运行状况与寿命关系的模型研究	2025 年后	200
	优化燃料电池管理系统, 包括电池组和系统级的性能和耐用性	立即实施	400
	快速原型仿真开放平台用于优化车用燃料电池系统	立即实施	400

主题 5.5: 开发表征工具。该主题将开发电池组件内输运现象的表征工具并进行实验验证, 并开发表征单个现象和微观结构的异位测试方法, 以及进行加速老化实验和分析。

预期成果: 减少现有方法的干扰性并提高时间分辨能力, 进一步优化 3D 重建技术以从催化剂分布、多孔网络等方面表征电池组件的微观结构; 先进异位测量技术; 改进和新的技术及方法, 可在电池运行期间以较高的时间和空间分辨率实时监测退化机理。**关键性能指标:** 用于模型验证和非回归的测试案例; 用于模型验证和确认的实验数据库。具体研发活动及其规划详见表 24。

表 24 建模、验证与诊断领域主题 5.5 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
所有燃料电池	从纳米级到微米级结构的多尺度表征	立即实施	300
	分段式双极板, 用于局部检查和实时诊断	立即实施	300
	开发用于表征单个现象和微观结构的燃料电池先进异位测试方法, 用于模型参数识别和模型验证	立即实施	300
	加速压力测试以验证老化模型	2020 年后	200

领域六：氢气生产与处理

1 研究目标

通过改进材料以及开发新型优质材料，优化材料工艺以及制氢系统的创新突破性设计，研究和开发具有成本效益的高效非电化学生制氢方法。

2 研发实施规划

主题 6.1：生物质/生物废物制氢。该主题将改进催化剂的耐用性和寿命，以降低催化剂成本，进而降低通过热化学过程进行生物质制氢的总成本。改进过程控制，以优化氢气质量和实现氢气连续生产；分析各种废物成分对氢气和合成气质量的影响，并确定处理特殊有害成分的策略。提高废物/生物废料产氢的工艺效率，并研究生物废物材料和成分对氢气生产和纯度的影响。

预期成果：流化床和气流床生物质气化的催化剂，使用寿命达 4 万小时；气化炉焦油裂化催化剂；降低生物质合成气焦油含量的新方法；提高超临界水气化产氢的稳定性；提高废物/生物废料产氢稳定性，新型合成气净化技术和气化工艺，混合太阳能加热气化技术。**关键性能指标：**生物质制氢寿命达到 4 万小时，制氢成本 3 欧元/kW，电导率大于 100 S/cm；废物气化原材料含水量最高达 50%。具体研发活动及其规划详见表 25。

表 25 氢气生产与处理领域主题 6.1 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
高性能气化炉	非贵金属催化剂生物质制氢	2020 年后	400
	高性能气化炉实现废物气化连续运行一万小时以上	立即实施	600
	改进催化剂并优化过程控制,提高废物气化的连续运行时间	2020 年后	400
	废物制燃料的标准化以及开发燃料在线分析方法	立即实施	600

主题 6.2: 藻类制氢。该主题将分析不同藻类材料产氢对日照/照明条件和营养物质的依赖性,设计优化的反应器配置,测试和评估产氢率,并确定高效制氢的藻类品种。分析藻类和营养物质对氢气纯度的影响,进行氢气分离工艺的设计和评估。还将改善工艺性能和效率,实现氢气和甲烷生产的结合与平衡。

预期成果: 识别光转换效率高于 5%的藻类;产氢纯度高于 99%;产率较当前水平提高 10 倍。**关键性能指标:** 光转换效率高于 5%;氢气纯度高于 99%。具体研发活动及其规划详见表 26。

表 26 氢气生产与处理领域主题 6.2 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
生物选择	确定光转换效率高于 5%的高性能藻类	立即实施	1600
聚合物和金属膜	藻类制氢用膜的开发,如聚合物和金属膜	2025 年后	800
藻类和细菌的生物过程	生物水煤气变换反应中一氧化碳脱氢酶和[镍铁]-氢化酶对碳纳米管的生物功能化	2025 年后	1200

主题 6.3: 水热分解制氢。该主题将开发可实现中温水热分解制氢的新型催化剂。

预期成果: 降低反应温度。**关键性能指标:** 实现 2500℃ 以下的水热分解制氢。具体研发活动及其规划详见表 27。

表 27 氢气生产与处理领域主题 6.3 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
太阳能、光热发电与固体氧化物电解槽结合	开发水和二氧化碳低温热分解的新型催化剂	2025 年后	600

主题 6.4: 更高效的光催化制氢。该主题将开发纳米结构过渡金属氧化物半导体以改善电极性能，改进当前的析氧催化剂（磷酸钴）以降低过电位并提高析氧速率；开发用于光催化制氢的无铂催化剂，识别电子扩散长度与光吸收深度相当的稳定电极材料；使用除水以外的其他流体（如醇类）进行光催化制氢；开发高效的水分解装置。

预期成果：提高光催化制氢产率；降低光催化制氢的催化剂成本；提高光催化制氢的灵活性；水分解装置效率（太阳能到氢气）达到 10%。**关键性能指标：**光催化制氢效率超过 5%，最高达 10%。具体研发活动及其规划详见表 28。

表 28 氢气生产与处理领域主题 6.4 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
光催化	共掺杂 TiO ₂ -Co ₃ O ₄ 纳米结构异质结作为光阳极，通过光催化水分解生产氢	2020 年后	300
	通过改进光催化剂提高产氢率	2020 年后	300
	用于光催化水分解和生产太阳能燃料的纳米结构非贵金属催化剂	2025 年后	200
	光催化重整醇类制氢的催化剂	2020 年后	300
	光催化重整生物质制氢	2020 年后	300
	人工光合作用的多尺度模型开发	2025 年后	200

主题 6.5: 氢气压缩、液化和净化。该主题将改进高压储氢和液态储氢，降低各种氢气压缩机的能耗；开发新的磁热过程和绝缘材料以实现快速有效的正仲氢转换；改进储氢罐保温材料

料以减少损失和提高液化效率。

预期成果：降低压缩机功耗；降低氢气液化能耗以及压缩过程中的吸热；低成本高效扩散膜。**关键性能指标：**压缩机的压缩功降低一半；降低氢气液化能耗以及压缩过程中的吸热。具体研发活动及其规划详见表 29。

表 29 氢气生产与处理领域主题 6.5 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
电化学氢压缩	70 MPa 运氢用金属氢化物氢压缩机的应用	2025 年后	200
综合技术	将氢气液化能耗降低至现有值的 1/3	2025 年后	200
金属和陶瓷膜	开发金属膜和陶瓷膜等材料，提高气体分离膜化学稳定性和机械稳定性及选择性	2020 年后	300
集成膜反应器	金属氢化物氢压缩机	2020 年后	300

主题 6.6: 制氢方法的安全、规范和标准。该主题将针对制氢方法的安全、规范和标准进行严格评估，以促进经济、安全制氢技术的商业化。通过制定长期监测氢气质量的方法，开发传感器，以及评估质量下降对氢装置的影响，以确保氢气纯度。从大规模生产的角度，评估各种制氢方法的有效性，以确定制氢安全策略和工程解决方案。评估氢气生产的安全性和风险，以确定安全生产和处理氢气的规范和准则。

预期成果：确定降低车载运氢纯度的影响和成本变化；监测氢气质量的低成本方法；封闭空间中使用氢气的准则；氢气生产和处理安全准则。**关键性能指标：**车载运氢纯度从 99.999% 降至 99.9%。具体研发活动及其规划详见表 30。

表 30 氢气生产与处理领域主题 6.6 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
监控；传感器	开发氢气质量传感器；开发可利用低品质氢气的固体高分子燃料电池	立即实施	400
监控；传感器；压缩机	通过监控设备、传感器等评估在建筑物等空间内对氢气的处理	立即实施	100
风险评估	氢气生产的安全性和风险评估	立即实施	100
光催化	建筑物中氢气使用的风险评估和指南	2020 年后	200

领域七：氢气储存

1 研究目标

明确储氢相关所有研发活动，通过全面的技术评估为每种技术确定研发议程，将关注压缩储氢、液态储氢和氢载体储氢等技术，以加速先进储氢设备的部署和市场化。

2 研发实施规划

主题 7.1：压缩储氢和液态储氢。该主题将研究气态储氢的新型储罐制造工艺，增强对高压氢引起的材料疲劳的认识，开发裂纹检测仪器以及压缩储氢的安全性、可靠性测试方法，降低储氢成本，以在车载和加氢站中推广压缩储氢技术。对于液态储氢，则将进一步优化储氢罐材料，提高液化过程效率以降低成本。

预期成果：压缩储氢的新型储氢罐制造工艺，以及高压储氢罐快充的控制系统；进一步了解低温液态氢对材料的影响。

关键性能指标：压缩储氢的储氢罐容量 2-3 公斤，大规模生产储氢罐的资本支出 500 欧元/kg H₂，氢气加注时间 3 分钟；液态储氢液化效率 ≤ 6.5 kWh/kg。具体研发活动及其规划详见表 31。

表 31 压缩储氢和液态储氢领域主题 7.1 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
压缩储氢	低于目前压缩气态储氢压力的碳纤维替代材料， 如玻璃纤维或芳纶纤维	2020 年后	300
	高压氢气对氢气管路、阀门、比例调节器的影响	立即实施	100
低温液态储氢	高压氢气罐快速加注的控制系统	2020 年后	100
	液态氢对连接管线、阀门、比例调节器等的影响	立即实施	100

主题 7.2: 氢气载体。该主题将关注利用金属和复合氢化物储氢的技术，如可逆储氢材料的合成，材料结构研究及氢吸附-解吸过程的表征等。还将研究通过多孔材料（如碳基结构、金属有机框架材料等）储氢的技术，以开发具有高储氢能力的材料，并寻求降低成本、扩大规模的途径。此外，将研究化学氢化物储氢技术，例如液态有机化合物

预期成果：200℃以下储氢量达到 5-10 wt%，储氢密度大于 50 g/L；开发液态化学储氢的低成本低温催化剂，提高催化活性和耐久性。**关键性能指标：**固体材料储氢工作温度低于 200℃，加注/析氢效率高于 95%，析氢能耗不高于 10 kWh/kg H₂，每个周期的存储容量损失小于 0.2%，氢气载体储氢量最高达 10 wt%，储氢密度高于 50 kg H₂/m³；金属氢化物储氢输入压力低于 2 MPa，输出压力达到 90 MPa。具体研发活动及其规划详见表 32。

表 32 压缩储氢和液态储氢领域主题 7.2 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
固体材料储氢	酰胺/酰亚胺基材料	立即实施	200
	基于氨硼烷和/或硼氢化物的混合系统	2020 年后	100
	在环境条件下不稳定但在较高氢气压力下稳定的材料	2020 年后	100
固定式储氢	利用体心立方结构合金储氢	2020 年后	100
	新型稀土-镁-过渡金属三元氢化物实现在环境条件下固态储氢	2020 年后	100
移动储氢	基于轻元素的复合氢化物	2020 年后	100
复合氢化物性质的 基础研究	复合氢化物	2020 年后	100
	高熵氢化物	2020 年后	100
多孔材料结合金属 /复合氢化物储氢	过渡金属-合金和金属有机框架 (MOFs) 复合材料, 可在低温条件下吸附和吸收氢气	2025 年后	100
多孔材料储氢	多孔材料 (如包合物、多孔冰) 储氢	2025 年后	200
多相催化	用于液态化学储氢的硼氢化钠溶液及其他化合物 (如氨硼烷)	立即实施	300
	甲酸作为液体有机氢载体	立即实施	300
合成; 催化	液体有机氢载体, 如芳烃、乙醇等	立即实施	200
	低成本金属和氢化物化合物副产物的可控水解和回收	2020 年后	200
可输出 90 MPa 高压氢的氢压缩机的 氢气载体	金属氢化物	2020 年后	200

主题 7.3: 储氢系统。该主题将开发压缩储氢和固体储氢相结合的技术, 以及加氢站中压缩储氢与液态化学储氢的组合方案并进行概念验证。解决热管理、能量管理及运行策略等问题, 以促进车载储氢罐与燃料电池系统的集成。开发生物质制氢、电解槽等低压储氢方式, 并考虑将储氢与化学反应器和涡轮机连接。通过提高可靠性、能效和降低成本, 促进车载和固定式储氢技术的工业化。此外还将评估车载储氢和固定式储氢的安全性。

预期成果: 储氢组合方案的概念验证; 储氢系统的实验室规模示范; 储氢安全策略、准则和工程解决方案。**关键性能指**

标：固体材料储氢、气态储氢和氢载体固定式储氢系统的工作温度低于 200°C，加注/析氢效率高于 95%，析氢能耗不高于 10 kWh/kg H₂，储氢罐储氢量最高达 5 wt%，储氢密度高于 40 kg H₂/m³。具体研发活动及其规划详见表 33。

表 33 压缩储氢和液态储氢领域主题 7.3 具体研发规划

适用技术	推荐项目	优先级	预算/ 万欧元
固体材料储氢及 气态储氢	低温压缩、固态压缩	立即实施	300
	基于多孔冰的低温压缩、固态压缩	2020 年后	200
基于氢载体的固 定式储氢系统	储氢罐与燃料电池系统集成	立即实施	200
储氢系统安全性 规范开发	制定储氢规范	2020 年后	100
基于氢载体的储 氢系统规范开发	制定储氢规范	2020 年后	100



《洁净能源重大信息专报》

编辑出版：中国科学院武汉文献情报中心
联系地址：武汉市武昌区小洪山西 25 号 (430071)
联系人：陈伟 郭楷模 岳芳
联系电话：(027) 87199180
电子邮件：energy@whlib.ac.cn