

# NEDO燃料电池氢技术发展路线图

-水电解技术开发路线图(解说书) -

2025年3月

## 前言

国立研究开发法人新能源产业技术综合开发机构(以下简称“NEDO”)自1980年创立以来,一直致力于氢燃料电池相关的技术开发。从基础技术开发到各种实证研究、标准规格制定等综合措施的成果,我国于2009年率先将家用燃料电池“enefarm”引入市场,2014年在氢燃料电池领域处于世界领先地位。

随着当今世界各国加速实现碳中和的步伐,人们对氢燃料电池的期待迅速提高。同时,本领域的技术开发和事业开展加速进展,竞争日趋激烈。在这种情况下,我国为了继续引领本领域,为实现碳中和做出贡献,在相关人员之间共享中长期的愿景,战略性且高效地推进举措是必不可少的。

自2005年以来,NEDO发布了燃料电池和氢技术开发路线图,以便产学官能够共享长期愿景并致力于技术开发。本年度,我们以水电解领域为对象,讨论了新的技术开发路线图,水电解领域的技术开发指南的制定是一个紧迫的问题,因为世界上有许多大型项目正在启动。

在制定水电解技术发展路线图时,我们根据水电解技术的发展现状,按照电解类型自下而上地组织了2022财年需要优先解决的技术问题,但从2023财年开始,日本在水电解技术方面应努力的方向是通过建设示范场(短期内,2030年左右)制定技术要求,并在制定技术要求的基础上,进一步降低制氢成本,同时确保廉价清洁电力。

(中长期,~2040年左右)在整理的同时,处于商业化阶段的碱性水电解和质子交换膜(PEM)水电解中长期市场获取的具体目标值和技术开发课题的具体化,新一代阴离子交换膜(AEM)水电解和固体氧化物电解的技术开发课题进行了重新整理,整理在本书中。今后,可再生能源的扩大和系统的价值提供电力基础设施和水电解的关系,实现碳中和的能源转换中,在俯瞰整个社会系统的基础上的战略和课题的具体化进行讨论的同时,氢周围的环境、政策和技术进展的变化也有必要进行修改,各种各样的动向没有等待的情况下,本书讨论技术开发的方向性的基础,成为产学官一体的努力的加速化希望。

最后,在制定本路线图时,得到了企业、研究机构、大学等众多机构的协助。借此机会,我向您表示衷心的感谢。

国立研究开发法人新能源产业技术综合开发机构(NEDO)  
氢/氨部分

# 目录

1. 水电解技术发展状况整理及路线图总体方案1
  - 1.1 制定背景1
  - 1.2 水电解装置的世界现状4
    - 1.2.1 市场动向4
    - 1.2.2 产品动向7
    - 1.2.3 欧洲动向9
    - 1.2.4 美国的动向12
    - 1.2.5 中国动向15
    - 1.2.6 从欧美水电解市场技术动向看战略18
  - 1.3 我国水电解装置应努力的方向19
  - 1.4 获得水电解装置竞争力的方案23
    - 1.4.1 目前~2030年左右(短期) 25
    - 1.4.2 目前~2040年左右(中长期) 34
  - 1.5 降低制氢成本的探讨37
    - 1.5.1 制氢成本结构与估算条件37
    - 1.5.2 用于讨论技术目标的制氢成本水平43
    - 1.5.3 降低制氢成本方案44
    - 1.5.4 关于水电解系统技术目标的总结57
2. 技术开发课题59
  - 2.1 碱性水电解的目标设定及技术开发课题62
    - 2.1.1 概述62
    - 2.1.2 目标设定(技术发展方案和目标值) 63
    - 2.1.3 电池组73
    - 2.1.4 隔膜74
    - 2.1.5 电极75
    - 2.1.6 附属设备76
    - 2.1.7 生产技术76
    - 2.1.8 评价分析标准化77
    - 2.1.9 技术实证79
    - 2.1.10 管制应对79
  - 2.2 质子交换膜水电解的技术开发课题81
    - 2.2.1 概述81
    - 2.2.2 关于高电流密度化和高效率化84
    - 2.2.3 关于高温化及加压运转86
    - 2.2.4 关于减少贵金属使用量的目标87
    - 2.2.5 基于系统模拟的灵敏度分析91
    - 2.2.6 技术发展方案和技术发展挑战96
    - 2.2.7 电池组102

- 2.2.8 膜电极接合体( MEA ) 103
- 2.2.9 电解质膜103
- 2.2.10 阳极106
- 2.2.11 阴极107
- 2.2.12 多孔输送层( PTL ) 107
- 2.2.13 双极板( BPP ) 108
- 2.2.14 评价分析标准化109
- 2.2.15 附属设备110
- 2.2.16 技术实证111
- 2.2.17其他111
- 2.2.18未来路线图讨论的挑战112
- 2.3 阴离子交换膜水电解的技术开发课题114
  - 2.3.1 膜电极接合体115
  - 2.3.2 电解质材料115
  - 2.3.3 电极催化剂116
  - 2.3.4 多孔输送层( PTL ) 117
  - 2.3.5 双极板( BPP ) 117
  - 2.3.6 电池组117
  - 2.3.7 附属设备118
  - 2.3.8 评价分析标准化118
- 2.4 固体氧化物电解的技术开发课题120
  - 2.4.1电极122
  - 2.4.2电解质123
  - 2.4.3 电池组123
  - 2.4.4 系统附带设备123
  - 2.4.5 评价分析标准化124
  - 2.4.6 金属支承模124
  - 2.4.7 质子导电性陶瓷电解单元124
  - 2.4.8 可逆转固体氧化物型燃料电池-水蒸气电解单元124
- 2.5 技术开发课题(系统控制附属设备) 125
  - 2.5.1 系统控制125
  - 2.5.2整流器125
  - 2.5.3 氢压缩机126
  - 2.5.4 纯水制造126
  - 2.5.5 氢精制126
  - 2.5.6 仪表机器126
  - 2.5.7 安全措施126
- A. 基于系统模拟的灵敏度分析127
  - A.1 目的127
  - A.2 方法127

- A.3 计算模型127
- A.4 讨论前提127
- A.5 劣化预测模型和堆栈交换129
- A.6 利用再生能源和系统电力的水电解电力模型129
- A.7 灵敏度分析131
  - A.7.1 参数基准值下的LCOH 131
  - A.7.2 基于灵敏度分析参数的LCOH降低132
  - A.7.3 基于各成本降低项目的LCOH降低灵敏度132
  - A.7.4 低Ir单位面积重量 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 中的LCOH 134
  - A.7.5 性能提高后I-V性能和物性值137
- A.8 总结137

# 1. 水电解技术发展态势梳理和路线图总体方案

## 1.1 制定背景

近年来，面向世界脱碳化的氢相关政策得到了有力的推进，例如2020年那么德国政府于6月制定了国家氢战略，决定对制氢设备免除再利用费用。接着欧盟于7月公布了氢战略，表示将暂时一边利用低碳氢(化石+CCUS)，一边致力于制造、运输、储藏、利用。另外，法国在9月份修改了氢战略，指明了生产绿色氢的方向等，在全世界范围内氢相关技术的开发正在加速。

为了促进实现碳中和的氢的社会安装，必须降低氢供给成本，为此，降低氢制造和运输、储藏两者的成本是重要的。其中，作为氢制造技术，期待今后有飞跃性的普及和扩大的水电解装置<sup>1</sup>是可再生能源<sup>2</sup>利用制造氢，包括热需求的脱碳化和基础化学品的制造等在内，可以以Power to X的形式充分利用，可以最大限度地促进再能源的导入。

关于水电解装置，表示“碱性水电解<sup>3</sup>和质子交换膜水电解<sup>4</sup>”的两种形式处于商用化的技术水平，但水电解的制氢成本仍然较高，为了进一步降低成本，必须降低占其大半的电力成本，关键是确保廉价的再生能源，通过将水电解装置连接到系统上来缓和系统的拥挤，并创造提供调整力等附加值

为了最大限度地利用这样的电力，水电解装置的启动·停止和变动运转的应对是课题，在加速耐久协议的早期确立和评价实证的基础上，提高水电解装置的耐久性是很重要的。

在此基础上，对于水电解装置，在确立了大型化、量产化的技术规格的基础上，着眼于装置规模和量产程度的装置成本降低、电解槽部件的技术进展的努力是必不可少的，并且，根据投入的电力和氢的利用情况，根据电源结构和系统结构的要求最大限度地利用电力来制造氢<sup>5</sup>的构成被要求最优化。而且，降低占水电解装置成本大部分的附属设备的成本和降低安装成本也很重要。

另外，在解决上述课题的同时，期待装置成本的低成本化的“阴离子交换膜水电解<sup>6</sup>”、高温工作且电解效率高的“固体氧化物型电解<sup>7</sup>”的新一代电解的技术开发也需要进行。

氢燃料电池战略协商会议制定的《氢燃料电池战略路线图》（2014年6月制定、2016年3月修订、2019年修订、2023年修订）中，将燃料电池与制氢系统一起

---

<sup>1</sup>“水电解装置”被定义为由“电解槽”及下述“附属设备”构成的成套设备的总称(在氢基本战略中也记为“水电解装置”)。另外，本文中有时记为“水电解系统”。

<sup>2</sup>以下，有时简称为“再能源”。

<sup>3</sup>以下，有时简称为“ AWE ”。

<sup>4</sup>以下有时简称为“PEMWE”或“PEM水电解”。

<sup>5</sup>以下称为整流器或变压器电源装置、纯水制造装置、纯水贮水箱、气液分离器、除湿装置、冷却系统(热交换器)、配管、仪表、以及后段的压缩机(需要升压时)、干燥器等。“BOP”：有时简称为“Balance of Plant”。

<sup>6</sup>以下有时简称为“AEMWE”或“AEM水电解”。

<sup>7</sup>以下，有时缩写为“SOEC”。

提出了政府扩大普及的基本方针和政策目标，预计未来市场规模将扩大。因此，以实现产业技术政策为使命的NEDO明确了实现这些政府目标等需要解决的技术问题，并按时间顺序组织了《NEDO燃料电池/氢技术发展路线图》（以下简称“路线图”）于2005年制定，过去曾四次修订，以反映以燃料电池为中心的最新政策、市场和技术趋势。此后，由于可再生能源的扩张、《巴黎协定》和后冠状病毒经济增长战略以及俄罗斯入侵乌克兰导致欧洲摆脱对俄罗斯天然气的依赖，世界各国加快了建设氢社会的步伐。目前的情况是，为了普及可再生能源水电解，欧美正在推进战略研发、技术示范、生产设备等的支持，中国正在利用廉价的碱性水电解装置和规模经济扩大水电解市场。

在此背景下，本研究根据水电解的政策、市场和技术趋势，总结了日本在2030年左右的短期和2040年左右的中长期方向。国家氢成本目标（CIF 30日元/Nm<sup>3</sup>），我们对实现这一目标所需的电价、水电解系统的设备利用率、总资本成本、效率、耐久性 etc 参数进行了研究，并提出了降低制氢成本的方案。到2040年左右应该实现的技术水平。

日本今后应该努力的方向是，特别是从短期的角度，规划和推进与电力系统设计联动的水电解装置的实证（形成“实证场所”），以及通过实证对电解槽的开发和设计进行反馈，整理了确立作为基础设施设备的电解槽的可靠性和安全性，确立面向量产化和规模化的技术条件的重要性。

为了降低中长期制氢成本，水电解的电力成本占总成本的相当一部分，因此如何确保廉价的电力至关重要。另一方面，由于廉价电力通常具有波动性，导致电解设备利用率下降、电解槽劣化等，因此有必要理清这些权衡关系。此外，当设备利用率下降时，水电解系统成本（资本成本）在制氢成本中的占比相对增加。虽然电流密度的提高导致堆、材料和构件的成本降低，但这些也是耐久性和电解效率的折衷。耐久性是与电堆和部件更换频率有关的因素，影响制氢成本的更换成本。此外，还需要考虑所使用贵金属的资源限制和成本等。

如上所述，由于在考虑制氢成本时存在各种相互权衡的参数，因此需要注意的是，最优解会根据所采购的电力和相应的运行顺序、氢气利用（规模和压力等）的前提条件、技术开发的进展状况等而有所不同，但在本次研究中，我们以PEMWE和AWE为对象，在2040年左右估算了各种参数的目标值，主要是在可再生能源国家主动利用可再生能源（部分也利用廉价的系统电力）。进一步整理了实现这一目标所需的技术开发课题。

为了降低资本成本，不仅降低电解槽的成本，还降低占系统成本一半以上的附属设备的成本，以及降低安装成本等也非常重要，但本次研究主要集中在与电解槽（电池堆）技术开发相关的研究上，降低附属设备成本的具体措施和降低系统成本的效果等的研究是未来的课题。此外，在本研究中，我们参考了过去的文献等。

我们是在假设未来电价和氢气运输成本的情况下进行估算的，但假设可能会因资源价格、物价和汇率的变化而发生变化，为了进行详细的考虑，我们需要考虑未来的政策、市场和技术趋势，加深对实际可以在什么地方采购什么样的电力以及如何运输的理解，并考虑相应的系统配置和操作方法，这是未来的问题。

## 1.2 围绕水电解装置的世界状况

为了实现碳中和社会，预计今后将扩大太阳能、风力等随时间变化的再能源的导入量，但担心电力供需不平衡的增加，对能源储藏技术的关注正在高涨。为了扩大变动再能源导入，需要缓和系统的拥挤和确保调整力，再能源导入量的扩大，从提高国内能源自给率、再能源主电源化的观点来看也很重要，需要解决这些课题。

通过水电解制造绿色氢，作为能够同时实现电力供给侧的能源转换·储存和电气化·困难部门的脱碳化的部门耦合手段，有望为解决这些课题做出贡献。

放眼海外，欧洲为了尽早摆脱对俄罗斯天然气的依赖，在2022年发表“REPowerEU”，推进2030年引进2,000万吨绿色氢，通过设立欧洲氢银行加强对氢供给的支援。美国也将于2023年公布国家清洁氢战略，目标是在2030年提供1,000万吨清洁氢的同时，于2031年实现\$1/kg的氢制造成本

提出了“Hydrogen Shot”的雄心勃勃的目标。中国以世界上最大的可再生资源 and 氢气需求为基础，在政府的大力支持下，以规模经济证实了绿色氢气的制造，目标是建立生产供应体制。

并且，在欧洲通过IPCEI（符合欧洲共同利益的重要项目），开始向包括中小企业在内的电解槽燃料电池制造商大量提供新一代产品的开发、商业化。在美国，通货膨胀抑制法（IRA）以氢制造为对象设定了最大\$3/kg的大规模税收减免，作为水电解装置生产设备扩大的诱因，同时，为了创造氢的市场雇佣，根据总额70亿美元（1兆日元规模）选定氢轮毂（Hydrogen Hubs）<sup>8</sup>决定在超党派基础设施（BIL）中向水电解装置的制造技术、部件开发和供应链构筑等投资4.7亿美元（约750亿日元）<sup>9</sup>等等，除了研究开发之外，从产品开发到提供面向社会实施的实证场所，正在进行综合的措施。

### 1.2.1 市场动向

IEA（国际能源署）的“hydrogen production project database”（2024年10月）点），如图1.2.1-1所示，最近5年水电解的引入容量大幅扩大，预计2023年将达到1.3GW，2024年底将达到5GW。另外，面向2030年公布的计划突破了500GW，但达到最终投资决定（FID）的项目仅限于整体的4%左右，也存在水电解的项目部分中止或延迟的情况，需要面向风险评估和稳定运行的技术

如图1.2.1-2所示，2024年全球制造水电解装置的能力将达到40GW/年，计划从2022年到2024年增加约3倍。制造地区特别是中国、美国、欧洲占主要比例，印度也在逐渐扩大生产能力，但相对于2023年全球制造能力25GW/年，引进的水电解装置仅为1.3GW和5%左右，可以制造

<sup>8</sup><https://www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-selections-award-negotiations>

<sup>9</sup><https://www.energy.gov/eere/fuel-cells/bipartisan-infrastructure-law-clean-hydrogen-electrolysis-manue>

处于力量过剩的状况。2030年全球计划165GW/年的制造能力，在中国、欧洲、美国占半数以上。电解种类被确认的是碱性水电解占整体的约50%，PEM水电解次之，为25%左右，其他详细情况尚不明确。

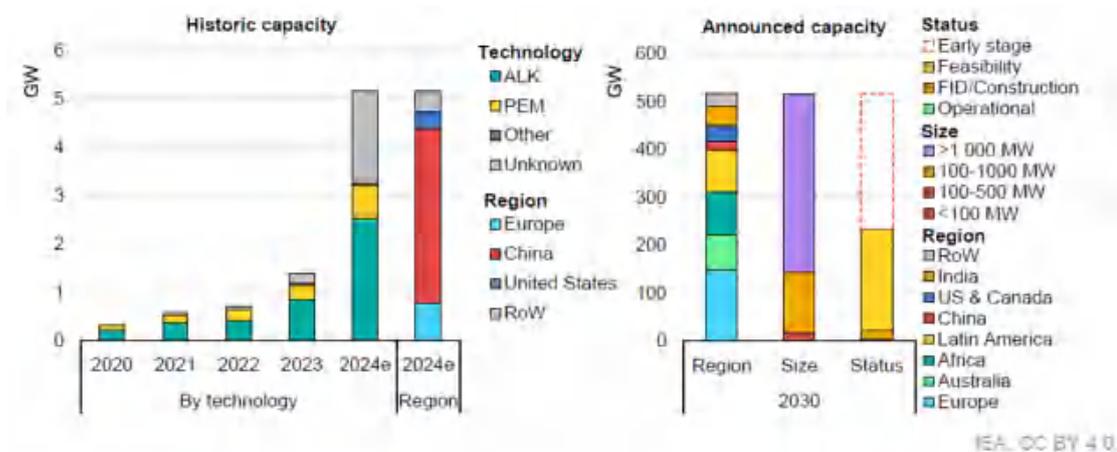


图1. 2. 1-1水电解装置引进量演变及至2030年规划<sup>10</sup>

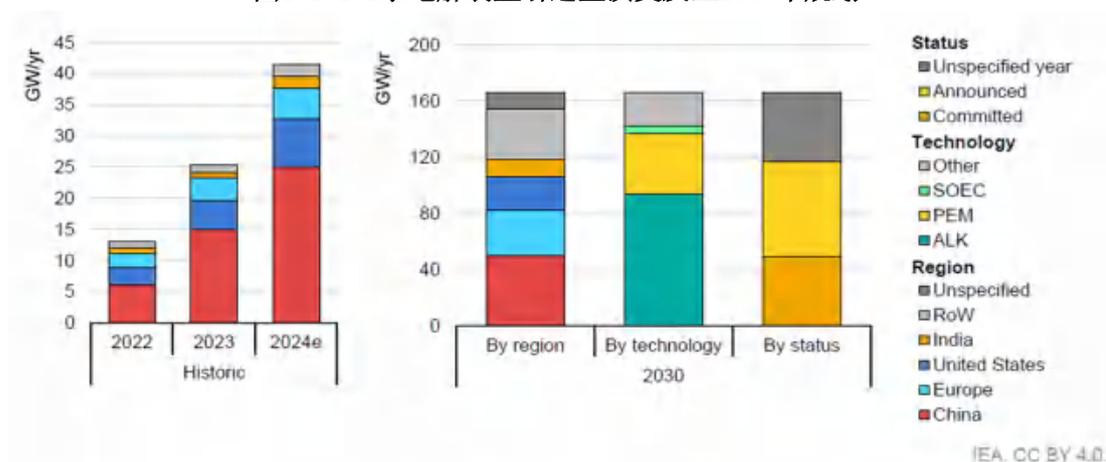


图1. 2. 1-2水电解装置制造能力演变及2030年前规划<sup>9</sup>

在这样的市场动向中，关于水电解再生能源氢制造的项目，达到延期中止的和达到FID的正在被严格区分。延期中止的理由有“氢制造成本、电费高”、“电力供应不足”、“不确定的氢需求”。另外，“获得项目资金的额外性、地理相关性、时间相关性<sup>11</sup>”等获得项目资金的补助制度的主要原因也被列举出来。

另一方面，达到预定2025年以后开始运转的FID的项目到了2024年也在不断增加。表1. 2. 1-1列出了达到FID的主要项目。欧洲地区炼油厂供氢

<sup>10</sup>IEA “全球人力资源审查2024”

<sup>11</sup>追加性:接受为绿色氢生产而追加设置的(在氢生产设施运转36个月前未开始运转的)新设施发电的再利用电力的供应

时间相关性:氢气生产和再生能源发电在同一时间内进行

地理相关性:制氢设施和接受供电的再发电设施位于相同或相互连接的电力招标区

项目、肥料绿色氨出口项目达到FID。据推测，这是因为在2023年9月通过的再能源指令中，确定了到2030年将产业部门消耗的氢量(包括原料利用)的42%、到2035年将60%定为绿色氢主体的RFNBO的具有法律约束力的目标。特别是石油和氨产业目前利用氢，绿色氢利用的壁垒比较低，有义务将2030年之前消耗的氢定为RFNBO，因此认为达到FID的事例有所增加。

但是，在脚下工作水电解装置，如国内的FH2R和后述的图1.2.3-4所示，作为10MW级的发电用燃料和工业用原料是比较小规模装置，因此，对于这样的大规模项目的动向，在今后持续捕捉最新的信息的同时作为我国应该致力于的技术开发的方向性，构筑了面向引进切实的水电解装置的“实证场”，将在细致掌握电力系统(上游)和水电解、水电解和氢利用(下游)的关系的基础上，确立水电解装置的技术规格、量产化方针定为方针。

表1.2.1-1达到FID的主要再生制氢项目(10MW以上)

项目 (氢生产国)	项目概述	规模 (电解槽制造商-)	用途	状况 (时期)
REFHYNE II (德国)	2021年开始运转的RHEFHNE的后续项目。为壳牌莱茵兰德能源化学公园引进100MW电解槽，计划利用太阳能再利用电力和系统电力每天制造44吨氢气(预定2027年开始运转)。制造的氢是Shell的莱茵兰德能源化学公园那么，预计用于SAF、生物燃料制造。	100MW (PEM、ITM Power)	炼油厂 (SAF、生物燃料)	FID已批准 (2024/7)
GET H2 Nukleus (德国)	项目是分阶段实施的计划。2024年，德国大型再能源运营商RWE的林根的发电站引进了100MW的电解装置，利用海上风力发电的电力制造氢气。通过生产的氢气配送时的控制者Nowega和OGE的氢气管道，在BP的Lingen炼油厂、Gelsenkirchen炼油厂、Evonik的马尔化学公园使用。2025年将电解槽容量扩大到200MW，气体配送运营商Thyssengas将氢管线延长到向荷兰的进口点Vlieghuis。2026年将电解容量扩展到300MW，将德国格罗瑙的RWE储氢设施(将天然气储存使用的转用为氢)连接到管道上。预计2030年将在德国萨尔茨吉他Salzgitter Flachstahl公司的钢铁厂连接管道，提供氢气。另外，Nowega和OGE延长了氢气管道，计划向Thyssenkrupp Steel的迪斯堡钢铁厂供氢。GET H2 Nukleus已通过IPCEI。	200MW (PEM、ITM Power)	钢铁厂 化学品 氢还原炼铁	FID已批准 (2024/9)
OranjeWind (荷兰)	2024年7月法国石油运营商TotalEnergies签订了德国再能源运营商RWE取得荷兰正在开发的795MW海上风力发电所OranjeWind 50%股份的合同。TotalEnergies计划为该项目的电力供应350MW电解槽，并为TotalEnergies的炼油厂提供氢气。风力发电装置的建设将于2026年开始，预计2028年全面运转。 TotalEnergies在欧洲拥有6个炼油厂和2个生物燃料炼油厂，均利用氢。该公司将炼油厂每年消耗的50万吨氢，到2030年置换为绿色氢提出思考的构想。	350MW (未知)	炼油厂(石油脱硫、生物燃料)	FID已批准 (2024/7)
AM Green Ammonia (印度)	印度再能源运营商Greenko的创始人成立的AM Green Ammonia表示，到2026年下半年，印度安道尔州将每年生产100万吨绿色氨、提出到2030年年产500万吨的计划。2024年8月第一阶段绿色氨100万吨的已批准身份证。第一阶段，引入1.3GW电解槽，太阳能通过风力混合电源、抽水发电组合的电源	1.3GW (碱, John Cockerill)	绿色氨(肥料等)	FID已批准 (2024/8, 关于第一阶段的绿色氨100吨批准FID)

	然后，投入再能源24小时，将电解槽的开工率提高到最大90%制造绿色氢。 制造的绿色氢因符合再生能源的追加性和时间单位的匹配等欧盟关于绿色氢的RFNBO要求，根据CertifHy方案得到了事先批准。 生产的氨大部分计划出口到欧洲，已经和Uniper、Yara、Keppel等大企业签订了非正式合同的时间表已签订。			
Clean Hydrogen Coastline (德国)	德国电力公司EWE在Clean Hydrogen Coastline项目中致力于氢的制造、储存、运输、利用，作为其中之一，计划在德国的爱模登建设280MW规模的氢制造工厂。 预计每年制造26000吨绿色氢，用于地区产业用途。 预计2027年开始运作。 Clean Hydrogen Coastline项目已获IPCEI通过。	280MW ( PEM, Siemens energy )	产业	FID已批准 ( 2024/7 )
Hyoffwind (比利时)	比利时能源开发巨头Virya Energy与德国工业用燃气巨头Messer等合作，决定将25MW电解槽引入比利时塞布尔日的Hyoffwind项目的FID。 项目每年制造14000吨绿色氢、供给运输和产业部门的构想。 预计2026年开始运作。	25MW (碱, John Cockerill )	产业、运输	FID已批准 ( 2024/7 )

### 1.2.2 产品动向

欧洲美国主要厂家常温水电解的产品一览表见表1.2.2-1。 欧美的制造商中加压型占大半。 加压型水电解具有高电流密度运行时气泡体积下降、出口加压导致工艺后级压缩机级数成本降低等优点，另一方面，需要提高装置的机械强度，产生电解槽内的交叉变大、理论分解电压和过电压增加等问题。 另外，从开发常压型水电解装置的制造商的观点来看，随着加压，单元、堆叠结构发生变化的话，过去的资产将无法利用，也存在零件更换的简便性受损等问题，因此，目前并不是所有的制造商都采用。

水电解装置的基本方针是以由多个堆构成的模块为基本单位，通过将它们排列来应对规模扩大，但关于每一个模块的堆容量，也有因单元面积的大面积化而带来的成本降低效果(由于期待部件个数的削减和成品率的提高) 例如，如图1.2.2-1所示，在欧洲PEMWE的Megastack项目中，英国ITM Power致力于堆栈设计开发，该公司发布了2MW模块(3个堆栈)。 而且在之后的Gigastack项目中，5MW(2个堆栈)开发模块，原计划在GW规模量产的前提下，以模块的价格在400英镑/kW以下为目标，但2022年以后，下调了量产计划，产品阵容也向集中2MW堆栈的方向转变，目前正在开展以2MW堆栈为基础的集装箱解决方案和20MW模块<sup>12</sup>。 这样，决定了与批量生产规模相应的堆栈容量的设计方针。

目前各公司发表的水电解装置的模块，在AWE中为数MW~20MW，在PEMWE中为1MW~数MW左右的容量，它们由多个堆栈构成。 今后，如果推进绿色氢制造项目的大规模化，随之而来的是要求扩大规模的课题，但可以预想，在大规模氢制造设备的构成中，也基本上通过模块的并列来应对各公司。 如果模块的容量变大，配套设备的批量生产效果可能会下降，预计容量与现状没有很大变化的模块将成为基本单位。

<sup>12</sup>HPEM2GAS, “hpe m2 gas-high performance PEM electrolyzer for cost-effective grid balancing applications.”, ITM Power, “gaing tttid

关于AEMWE，目前销售系统的只有Enapter，通过2.4kW的小型系统销售两极无PGM、低浓度碱性溶液的产品，Cipher Neutron也正在开发250kW的AEMWE，但目前已经超过了10kW Verdagy正在开发以广阔的运行范围和响应速度为优势的20MW模块，Evo10H正在开发纯水供应两极无PGM的大型模块。

表1. 2. 2-1主要欧美厂家水电解装置产品一览表

	AWE		PEMWE		AEMWE		
低圧	食塩電解ベース Thyssenkrupp nucera (20MW, 4スタック) 	円筒型 Nel (17.6MW, 8スタック) 	Siemens Energy (17.6MW, 24スタック) 	Hystar (1MW, 1スタック) 	Verdagy Evo10H (注) (不明) Verdagy (20MW)  Evo10H (5MW) 		
	McPhy (18MW, 18スタック) 	John Cockerill (5MW) 	Sunfire (10MW) 	Nel (2.5MW, 2スタック) 	ITM Power (2MW, 3スタック) 	Elogen (5MW) 	H-TEC (1MW) 
加圧	Green Hydrogen Systems (6MW, 6スタック) 	Hydrogen Pro (5.5MW, 2スタック) 	Cummins (5MW, 2スタック) 	Plug Power (5MW) 	Ohmium 	Cipher Neutron (10kW) 	

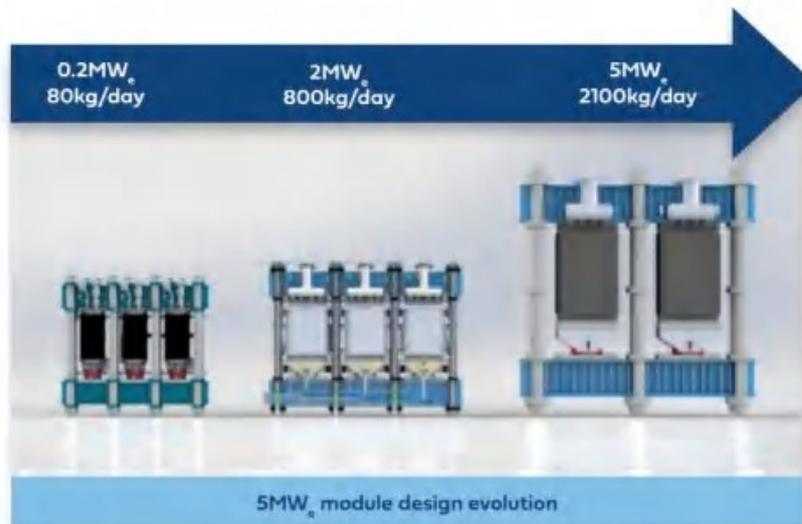


图1. 2. 2-1 ITM Power规划的PEMWE模块和堆栈配置

### 1.2.3 欧洲的动向

在欧洲，迄今为止，在水电解技术的研究开发实证项目上投入了约2.8亿欧元的预算，以促进技术开发和振兴产业。为了在今后的水电解技术领域引领世界，特别是对PEMWE和SOEC分配了很多预算进行支援。在PEMWE上是“RIA”

除了(研究开发)之外，在IA(实证)中也注入了大量的资金，采取了大力支持的方针。另外，在技术成熟度相对较低的SOEC中，对RIA投入了很多资金。从预算分配的变化来看，最近在AWE、AEMWE的技术上也使用了RIA的资金<sup>13</sup>。

常温水电解的项目演变可视化如图1.2.3-1所示，技术开发目标的演变和项目开发情况如图1.2.2-2(PEMWE)和图1.2.2-3(AWE)所示。在欧洲，各RIA项目在研究机构、系统制造商、部件制造商参与的联盟中推进受托。另外，Clean Hydrogen Partnership虽然定期更新目标值，但也有厂商持续参与项目，推进面向目标的技术开发，并逐渐提高了技术水平。

特别是为了降低水电解氢制造的成本，欧洲提出了高电流密度化、高效率化、长寿命化等KPI，例如从最开始就在PEMWE参与项目的英国ITM Power，与比利时Solvay等大型原材料制造商合作致力于技术开发。经过这些10年左右的技术开发，从最初开始就参与了欧洲RIA项目的制造商(上述的ITM Power和法国Elogen)现在占据了业界的中心地位。

另外，也不可忽视的是，正在与RIA项目并行进行与各种电源连接的实证(IA)。系统连接、提供调整力的验证、与变动性强的风力发电的合作、与海上风力合作的海上制氢等，欧洲今后被认为必要性较高的事例的实证正在继续实施，RIA项目参与计划机构也参与了实证，取得了实绩。另外，在评价标准化方面，也和其他领域一样，欧洲早就展现出积极的动态，根据再能的电力模式制定共同的耐久加速评价协议<sup>14</sup>进行了等也是其特征。从一系列政策中可以看出，战略推进这些“技术开发”和“实证”的联动，应对各种各样的水电解的利用案例，获得市场的意图。

---

<sup>13</sup>Clean Hydrogen Partnership, “PROGRAMME REVIEW REPORT 2024”, figure 23, 24

<sup>14</sup>欧洲共同体, “欧盟harmonised accelerated stress testing protocols for low-temperature water electrolyser—a proposal with testing guidance for assesssances”

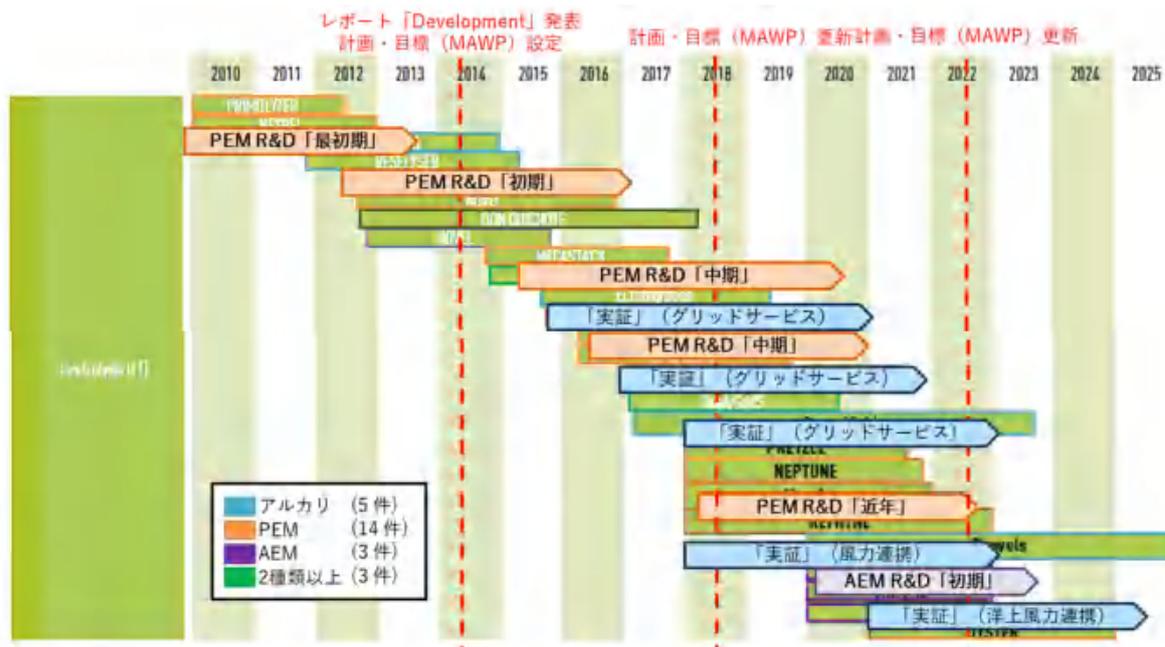


图1. 2. 3-1 欧洲常温水电解的研发技术实证变迁

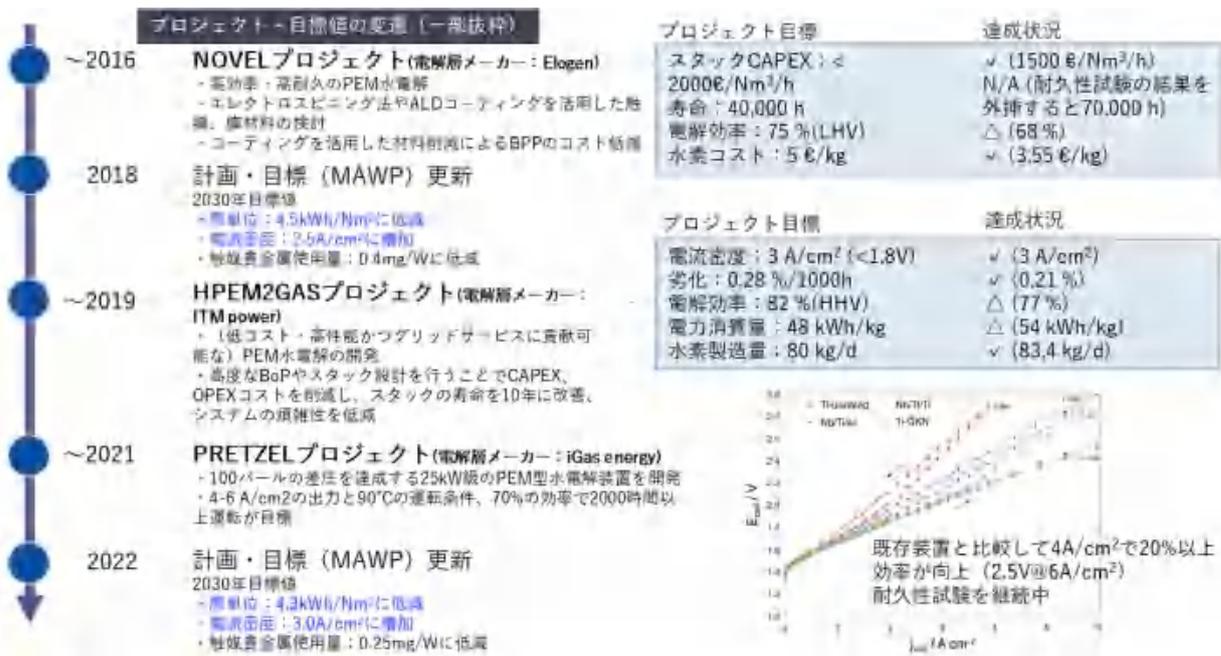


图1. 2. 3-2 欧洲PEM水电解技术进展



图1. 2. 3-3欧洲碱性水电解的技术进展

图1. 2. 3-4显示的是到2023年为止从商用化阶段实证到FID的项目规模电力采购的图。可以看出，目前已实现商用化的项目大多全部或部分利用了通过系统进行的电力采购。为了降低水电解水氢的成本，需要尽可能高的设备利用率，并且筹措廉价的电力，但是变动可再生能源的投入会导致劣化的加速，除此之外，还存在设备利用率被抑制得比稳定电源低的问题。因此，预计目前在水电解中利用可再生能源的情况下，也将部分系统电力进行交换利用。这些技术课题被认为和日本是共通的，为了克服课题的技术实证，对日本来说也是在世界范围内竞争，另外，为了实现国内的再能源扩大的重要课题。

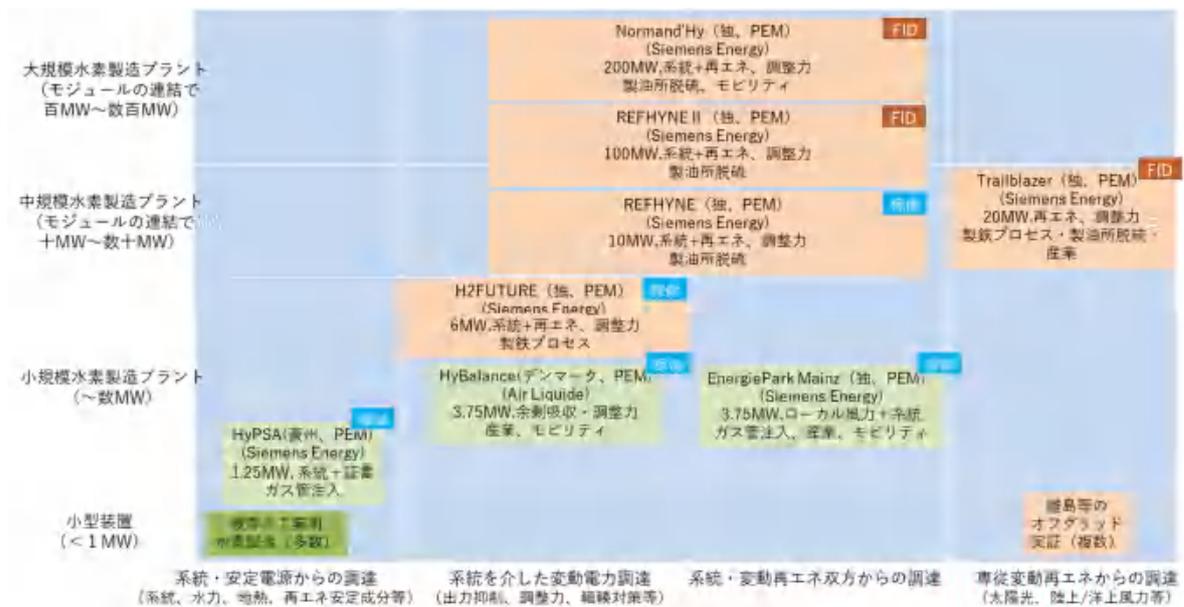


图1. 2. 3-4从商用阶段实证到FID的项目规模电力采购图

### 1.2.4 美国的动向

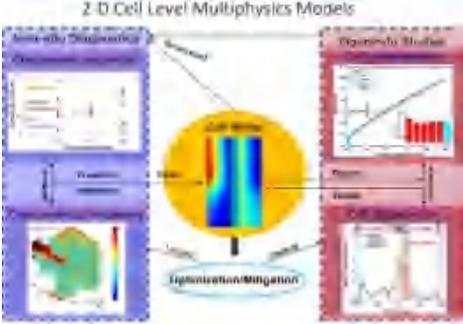
在美国，在DOE的支持下，为了实现同时满足装置成本、耐久性、性能目标的可制造电解槽，致力于组件、材料综合、制造研究开发，作为氢制造成本，到2026年为2美元/kg，到2031年为1美元/kg。用于实现kg(Hydrogen Shot)的项目H2NEW(Hydrogen (H<sub>2</sub>) from next-generation electrolyzers of water)从2020年12日开始。2021~2024年的预算为76百万美元(114亿日元)，其中，PEMWE为40.2百万美元(约60亿日元)，SOEC为24.6百万美元(约37亿日元)，AWE为11.2百万美元(约17亿日元)<sup>15</sup>。

到2020年为止一直专注于催化剂等材料的开发，但在H2NEW中，作为更实用的课题，将焦点放在部件和材料的集成、制造技术的开发上，为了实现上述氢制造成本，未设置系统的成本为150美元/kW(总资本成本210美元/kW)

推进战略性技术开发。表1.2.4-1概述了项目。作为优先度高的课题，特别重视性能、耐久性、扩大规模(大量制造)，在①和②中推进了通过操作数测量评价和建模进行高效设计，在③中推进了适合大量生产的技术开发。

此外，其特征还在于，如图1.2.4-1所示，在技术经济性评价中，同时进行了为了实现目标氢制造成本的技术开发方案的研究。氢气制造成本的投入电费占大半，关键是如何能采购到廉价的电力，能否在运用方面进行应对。仅靠继续量产规模来降低设备成本是很难实现的，其目的在于克服效率提高、材料费降低、从稳定运行向变动再生能源跟踪的转移、与此相反的耐久性提高等技术课题，进而构筑能够以低成本访问清洁电力的综合系统，以进一步降低成本

表1.2.4-1 H2NEW项目简介(文献<sup>16</sup>根据制作)

①构筑耐久性加速试验	②性能(成本效益)基准测试	③扩大规模
<p>由操作数测量引起劣化因子阐明 原位构件测量老化评价 基于上述成果的加速试验体验及劣化抑制对策的构成建筑</p> 	<p>协议构建标准材料评价 小区性能评价、建模 利用上述评价分析技术的膜催化剂等的构件筛选效率设计</p> 	<p>实验室级CCM制造技术(适合大量制造的制造技术(Roll to Roll)) 过渡到 对Ti制PTL的层压制造技术应用</p> 

<sup>15</sup>DOE Annual Merit Review 2024, “H2NEW: Hydrogen (H<sub>2</sub>) from next-generation electrolyzers of water overview”

<sup>16</sup>DOE Annual Merit Review 2021, “H2NEW: Hydrogen (H<sub>2</sub>) from next-generation electrolyzers of water overview”



280美元/kW )，通过基于再能源混合动力(太阳能和风力)的变动运转(电力价格12美元/MWh，设备利用率74%)进行制氢来达成。

实现其目标的重点技术开发见表1.2.4-2。这些技术开发是上述的与H2NEW项目联动持续推进。

表1.2.4-2实现隐藏短时间的重点技术开发

重点技术开发	重点
提高制造吞吐量	<p>为了达到1美元/公斤，需要通过使用先进的高吞吐量生产技术，提高批量生产带来的成本降低效果</p> <p>用于缩短制造节拍时间的方法因电解技术而异。作为所有电解槽的共同思考，电池组组装自动化带来的生产工序削减、质量管理成为课题，机器人</p> <p>需要结合托特工程学、大数据分析、AI、自主系统等进行应对</p>
电解槽性能提高	<p>需要通过“降低资本成本”、“提高性能·效率”、“长寿化”来降低成本，需要从部件层面到系统层面的技术开发</p> <p>各电解槽通用的成本降低方法主要有“批量生产”、“BOP标准化”、“加速老化试验”</p> <p>应对体验的开发和动态驾驶”</p>
能源系统集成	<p>作为与再能源直接连接的课题，提出了\水电解装置的设备利用率的降低\、\变动电力对电解槽的性能和耐久性的影响的理解进化\，并作为课题解决对策提出了以下3个</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-混合动力系统(提高电解槽的设备利用率)</li> <li>-优化运行策略(优化电解槽的运行，例如降低负载而不是停止电解槽，以减少因启动和停止而导致的劣化)</li> <li>-再能源的重新设计(设计再能源系统以优化制氢而不是电力制造，例如设计适合制氢的风力涡轮机)</li> </ul> <p>不仅是硬件成本(电解槽成本和运行成本)，还有软件成本(电解系统所有者可能承担的全部成本)，例如场地准备、土地费、许可、试运行</p> <p>需要减少转移、配送等</p>



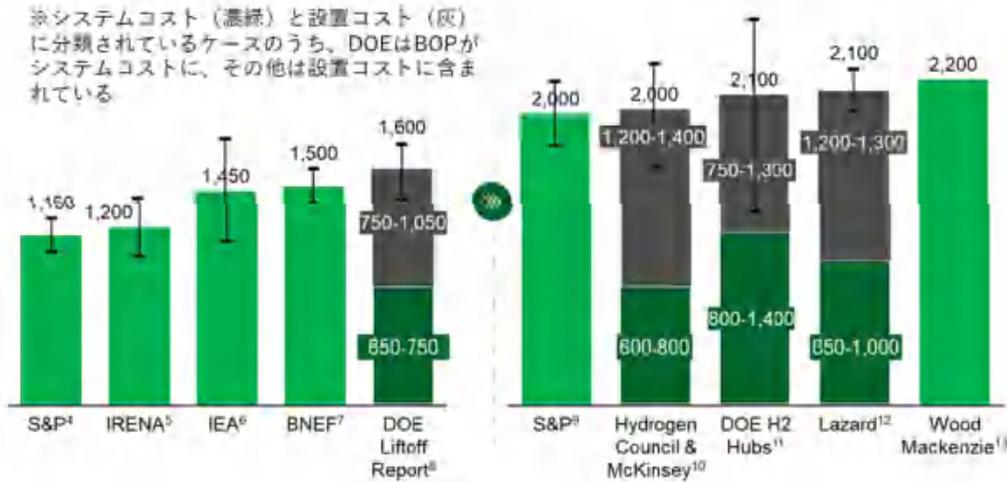
图1.2.4-2美国低碳制氢项目情况<sup>13</sup>

Previous U.S. estimates<sup>2</sup> ~2022年

Current U.S. estimates<sup>3</sup>

2023年

※システムコスト（濃緑）と設置コスト（灰）に分類されているケースのうち、DOEはBOPがシステムコストに、その他は設置コストに含まれている。



2 :除非另有说明, 基于碱和PEM的估计成本的范围。 出示的参考文献是在不同的年份发表的, 请注意通货膨胀可能影响了这些年份的成本变动

3 :除非另有说明, 基于碱和PEM估计成本的范围(全部2022美元)

4:100MW项目规模, 2020年和2025年平均估计使用成本, 2021美元

5:> 10MW项目规模, 2020美元

6:1MW的项目规模、2018年估计使用成本、2018美元

7:>项目规模10 MW, 使用成本2022, 2022美元

来自8:2023DOE清洁H2提升报告。 2MW电解槽规模(假设项目规模没有规模优势), 2020美元

9:100MW的项目规模

基于10:1GW项目规模、调查回复广度和工程分析不确定性的范围

11 :基于所有项目中DOE H2Hub申请人的加权平均(平均350 MW)。 成本范围表示第25位以及第75位百分比。 与其他数据源相比, DOE H2Hubs的系统成本更高, 因为它包括与电解槽堆栈和BOP都相关的设备成本。 PEM项目的申请人通常倾向于项目规模大(平均400MW), 总安装成本低(加权平均1,900美元)。 12:20MW的项目规模

13:250MW的项目规模

Scenario <sup>10</sup> Based on Electricity Source	Capacity Factor (%)	Electricity Price (¢/kWh)	Electrolyzer Installed Capital Cost (2022\$/kW)		
			\$1,500	\$2,000	\$2,500
Grid – Average Scenario	97%	8.3¢	\$6.80	\$7.50	\$8.20
<b>Renewable Electricity Scenarios</b>					
Hydropower	50%	3.4¢	\$5.50	\$6.70	\$7.90
Land-Based Wind (Class 1)	51%	2.9¢	\$5.20	\$6.40	\$7.50
Hybrid Wind-PV	74%	3.3¢	\$4.40	\$5.20	\$6.00

图1. 2. 4-3水电解系统总资本成本现状及制氢成本<sup>14</sup>

### 1.2.5 中国动向

在中国, “以内陆为中心的庞大的再利用资源和以太阳能发电为中心的再利用产业的发展”

“廉价国产碱电解槽”、“世界最大氢气需求”推动绿色制氢项目。 如表1. 2. 4-1所示, 与欧洲、美国不同, 以AWE为中心, 有数10MW级至超过100MW的大型再能源制氢项目正在运行或正在建设中。 最近, 世界各国受到通货膨胀和离岸价格不足等的影响, 在再能源氢制造项目停滞的倾向中, 只有中国显示出了比较顺利的进展。

另外, 像内蒙古和吉林省这样有雄心壮志的地方政府, 出台了直接向当地绿色制氢提供补助金的制度, 其他地区存在以优惠价格提供制氢所需电力的制度。 另外, 国内计划中的过半数绿色化学(特别是农用肥料、

作为尼龙纤维等原料的绿色氨约占整体的60%)，将绿色化学纳入下游的项目在风力和太阳能发电的竞争投标中享有优惠。

主要化学制造商倾向于将现有的氨事业脱碳化，构想作为制造原料向绿色氢的渐进转换，根据2025年以后化学产业很有可能纳入CEA（碳排放限额）制度的预测，推进用途为化工产品的生产、炼铁等绿色化学钢铁

国产的AWE垄断了中国的绿色氢市场，2022年约占投标需求的97%，2023年约占90%。目前，Soffictor根据水电解装置的成本(中国制造为海外制造的1/3左右)来判断是否引进，没有价格优势的海外产品的市场进入状况很严峻。另一方面，在表1.2.5-1的Kuqa项目中，最初设想系统的运行范围为30~100%，但负载率为30%时无法通过安全性试验，为了防止交叉的发生，实际上狭窄为50~100%除了担心经济性恶化(原因是隔膜采用了廉价的PPS(Polyphenylene Sulfide))之外，还存在并联模块控制等系统运用方面的课题。由于制氢成本基本上由电费和设备利用率决定，因此可以说追求可靠性、安全性的水电解装置还有进入市场的空间，但是在中国国内，由于再能源制氢中规模的经济和研究开发的投入，技术水平有可能日新月异地迅速发展。

表1.2.5-1中国主要水电解装置引进情况<sup>22</sup>

项目	所在地	企业者	规模	电解种	并置电源	用途	进度	完成年份
中石化新疆库车绿色氢供应链模型(Kuqa)业务	新疆维吾尔自治区	中国石化	260MW	AWE	PV 300MW	化工生产(本公司消费)	正在运转	2023
内蒙古纳日松太阳能发电绿色制氢模式勒事业	内蒙古自治区鄂尔多斯市	三峡集团、盛世投资集团	75MW 相当于	AWE	PV 400MW	化工生产 铁路货车	正在运转	2023
宁夏宁东基地宝丰能源集团绿色氢气生产利用桃戴尔业务	宁夏回族自治区	宝丰能源集团	150MW 相当于	AWE	PV 200MW	本公司烯烃制造, FC捕集器	正在运转	2021
国家能源集团宁东绿色氢全供应链示范事业 i 期	宁夏回族自治区	国家能源集团、宁夏本地煤炭、地区电力公司	105MW	AWE	PV 62MW	工业生产, FCV	建设中	2024E 年世界杯
大连海水制氢产业一具体化模型项目	辽宁省大连市	大连洁净能源集团氢科技公司	40MW	AWE	PV 100MW	N.A.	建设中	2023E 年世界杯
内蒙古乌兰察布风力太阳能发电生产格里恩氢氨事业	内蒙古自治区乌兰察布市政府	中国石油	250MW	PEMWE (海外制造)	风力350MW PV 150MW	化工生产(本公司消费)	建设中	2024E 年世界杯
吉林大安绿色氢/安莫尼亚	吉林省大安市	吉林电力	230MW 相当于	PEMWE /AWE	风力700MW PV 100MW	N.A.	建设中	2026E 年世界杯
国际绿色氢炼铁模式勒项目	内蒙古自治区包头市	水木明拓氢埃能源	750MW	AWE	风力 500MW	钢铁、金属制品	建设中	2026E 年世界杯

<sup>22</sup>大和总研根据“中国是否在绿色氢方面也掌握主导权(前篇)”等信息制定(关于电解槽规模，在公布值以氢发生量表示的情况下为1,000 nm<sup>3</sup>换算为相当于/h=5MW)

另外，在表1.2.5-1的事例中，在国家电网（SPIC）旗下的大安绿色氢项目中，通过在AWE的基础上引入PEMWE，虽然初期的资本费用变高，但PEM的响应性高，冷启动时间短

虽然AWE和PEMWE的最佳比率依赖于电源的特性，但作为一般趋势，混合方式可以高利用率地利用变动调整幅度较宽的再能源电力，因此，与要求高追随性的离栅氢制造的亲和性也有望较好。另外，可以认为，在电力供应方通过混合变动再能源和系统电力也能在一定程度上获得设备利用率的提高效果。为了降低水电解生产绿色氢气的成本，设备利用率的提高需要从设备型和电力供应方面进行优化，在设备方面混合化是有力的手段之一。

关于混合水电解系统，虽然有优化设计和集成、确保无缝运行和最大效率、混合配置内气液两相输送系统的精密控制机制等需要解决的课题，但通过今后的实证有望取得技术进展。这次，虽然没有整理混合动力方式中固有的技术课题，但作为提高设备利用率、降低制氢成本的方向，今后我国也应该继续研究的技术开发要素。

综上所述，运行下限值较高的中国产品电解槽，虽然在现状安全性方面不如发达国家产品，但通过投入的变动可再生能源、系统整体优化等方法，这些弱点有可能在一定程度上得到解决。在国家 and 地方政府的大力支持下，如果该国制造商通过积累实地经验而提高技术成熟度，廉价的中国制造的电解槽将最终成为威胁，日本也需要采取措施以获得国际市场竞争力。

### 1.2.6 从欧美水电解市场和技术动向看战略

表1.2.6-1整理了迄今为止水电解的市场、主要国家和地区的技术开发和项目动向。在欧美，“通过系统开发创造用例（市场）”和“基本技术的开发（R&D）”“技术验证、实证”、“生产技术、设备的支援”有机地联系推进的姿态，通过这一黎明期水电解市场获得主导地位的架势。另一方面，在中国，在政府和地方政府的支持下，国营企业在国内实施了大规模的产品投入。通过这种方式该国企业可以获得规模效益和技术学习效应，是获取技术竞争力的一大优势。今后，中国企业将在积累现场经验的同时，发展电解槽技术。从现状来看，技术、电解槽技术和运用方面的成熟度有可能大幅提高。表1.2.6-1欧美

水电解市场和技术趋势的战略概述

动作片	概要
制度建设和一体化用例（市场）的创造	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 像在再生能源指令中看到的那样，在能源多消费产业中设定导入义务(欧洲)、在电力市场的参与和氢的认证制度等的完善(欧洲)</li> <li>• 能源系统整合(再生能源混合动力、根据电力的运行优化、适合制氢的再生能源系统设计等)(美国)</li> <li>• 通过提供IPCEI(欧洲)、氢集线器(美国)等“实证场”初期形成市场</li> </ul>
技术实证的推进	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 针对在“实证场”创造的用例，实施通过实证的技术改善</li> <li>• 同时也从早期开始致力于标准化，推进评价协议的完善和信息发布</li> </ul>
要素技术的研究开发	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 连续目标设置和更新</li> <li>• 继续支持企业的培养，将具有研发阶段要素技术的企业培养到实证阶段，由电解槽制造商和供应商研究机构组成的R&amp;D项目的组成(也有助于强化供应链)</li> <li>• 关注创新技术(awepemwe r &amp; d持续、aemwesoeec投资)</li> <li>•</li> </ul>
对生产技术设备的支援	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 支持利用IPCEI支援方案的地区内制造商的生产设备的整備(欧洲)根据通货膨胀抑制法(IRA)引进生产设备(美国)</li> <li>• 同时，作为国家专业人员支持大量生产新需要的高吞吐量技术开发</li> </ul>

### 1.3 日本水电解装置的发展方向

实现碳中和社会的能源转型需要大量的可再生能源，但电气化尤其困难。绿氢作为扇区耦合的关键，被认为是在Hard-to-abate领域推进间接电气化的重要作用。

在可再生能源潜力有限的日本，为了长期、稳定、大量供应绿色氢气，在可再生能源（太阳能、风能、水力发电等）丰富的海外国家和地区生产的氢气及其衍生物的进口很重要（海外进口氢气），可再生能源廉价的国家和地区在全球范围内分布不均，因此未来可再生能源需求增加的情况下，可能会出现获取竞争。届时，为了建立供应链，日本需要尽早从战略上进入廉价的可再生能源国家，并在国际上发展技术，在生产绿色氢的水电解设备市场上赢得市场。

考虑到每个国家和地区在可再生能源潜力、市场规模、能源基础设施等方面的情况各不相同，但为了加快实现引进氢能的社会，2023年6月修订的《氢能基本战略》设定了2030年最多300万吨/年、2050年约2000万吨/年、2040年中期约1200万吨/年的目标。<sup>23</sup>

另一方面，为了提高我国的能源自给率，加强能源安全，关键是扩大我国可再生能源的引进量，即推动可再生能源成为主要电源，需要扩大可再生能源的并网。在现状下，在推进变动再能源的导入时也有着系统的制约，但是将水电解装置连接到系统上，适时地将电力转换为氢气，有可能解决这些课题。因此，在国内，以扩大可再生能源的引进为目标，致力于以能够为系统提供附加价值的形式制造绿色氢，引进水电解装置是很重要的。

有观点认为，目前国内电力成本较高，因此国内可再生能源制氢的成本高于从海外进口氢气的成本。然而，考虑到在可再生能源输出控制的情况下，剩余电价可以变得便宜，适当引入水电解装置可以为系统带来缓解拥堵、提供调节力等附加价值，并且可以抑制系统增强的必要成本等优点，不仅需要从国外进口氢气，还需要引进有助于扩大国内可再生能源的水电解装置，并推进绿色氢气的生产。

电力广域运营推进机构（OCCTO）制定的广域系统长期方针（总体规划）的情景分析<sup>24</sup>基于此，如表1.3-1所示，以可再生能源（太阳能260GW、陆上风电41GW、海上风电45GW、水力、生物质、地热60GW）为前提的可再生能源输出控制率，预计今后的系统增强最多为13%。预计2050年日本可再生能源水电解制氢所需电力需求为1340亿千瓦时，可再生能源制氢量为280万吨/年（水电解能耗为4.3 kWh/Nm<sup>3</sup>假设）。如果能够廉价地采购并最大限度地利用这些剩余的可再生能源，就可以进一步降低国内水电解制氢的成本。

<sup>23</sup>经济产业省《氢基本战略》（2023年6月6日修订）

<sup>24</sup>广域电力运营促进组织（OCCTO），《广域系统长期政策（广域互联系统总体规划）》（2023年3月29日）

如果水电解仅以离网可再生能源为前提，由于氢的需求地和电力的供给地不一致，运输成本的负担导致经济性变得困难，可以设想作为活用“可再生能源氢”的社会基础设施不成立的风险。考虑到氢在所有地点的工业利用，通过从系统采购电力来电解水制氢是必须的，与系统一体化的系统设计是很重要的。

表1.3-1广域系统长期方针(主方案)方案分析

	需求选址引导方案	基本方案	需求选址自然体方案
方案前提	将制氢DAC的约8成分配到再生能源电源附近 再生能源剩余利用需求约8 设想比例可以通过可控方式进行峰值移动	将制氢DAC的约2成分配到再生能源电源附近 再生能源剩余利用需求约2 设想比例可以通过可控方式进行峰值移动	将制氢DAC的全部量分配给需求地附近 假设再生能源剩余利用需求总量为一定负荷
系统增强的投资额※ <sup>1</sup> (年成本※ <sup>2</sup> )	约6.0~6.9万亿日元 (约0.55~0.58万亿日元/年)	约6.0~7.0万亿日元 (约0.55~0.64万亿日元/年)	约6.7~7.9万亿日元 (约0.62~0.73万亿日元/年)
再生能源比率※ <sup>3</sup>	49%(50%)	47%(50%)	47%
再能量输出抑制率※ <sup>3</sup>	10%(7%)	12%(7%)	13%

※1：仅记载了用于将零散的电源等向大消费地输电的连接线等广域连接系统的增强成本，不包括伴随再生能源增加的、确保调整力及惯性力同步化力降低等对策成本。另外，HVDC输电成本采用的单价提前了2050年左右的规模优势和技术革新的成本降低，海底电缆工程不包含占用费等，考虑到水深等因素的路线变更可能会导致成本增加。

※2系统增强每年产生的费用(折旧费、运转维持费等)

※3 ( )是作为系统增强以外的措施，进行电源侧选址引导等时的参考值。另外，关于电源，基于国家在最优先的原则下致力于最大限度地导入再生能源的政策性讨论，需要注意各方案中设为相同的条件

在这样的背景下，在面向海外进口氢的扩大和国内的再生能源主电源化的氢制造两方面，根据海外的动向，设定了以下面向国内水电解装置的市场创造的当前应该努力的内容。

- 推进与制度设计联动的水电解装置实证的计划(构筑“实证场”)
- 水电解装置对系统的附加价值提供(调整力提供、系统混乱缓和等)和技术制度方面的课题解决、与水电解相关的电力基础设施的存在方式、以及适合国家、电力行业、氢相关团体、以及系统的电源装置(高次谐波对策设备、变压器、整流器)、蓄电装置、水电解装置 可以提供哪个的产官学成为一体，最大化再生能源主电源化的系统及外围设备存在方式的讨论
- 通过与氢利用侧(下游)的合作来设定氢需求的规模、根据氢的储存利用方式的水电解装置的规模以及确立运用方案
- 为了与电力侧(上游)有效合作，开发水电解系统的运行控制
- 通过实证对电解槽开发设计的反馈，确立了电解槽作为基础设施的可靠性、安全性，确立了面向量产化、规模化的技术要求

对于从海外进口氢气和向海外主要国家出口技术，必须通过在国内“示范场”连接系统和可再生能源来积累技术，然后研究如何在制造现场提供可再生能源电力以及系统方面的问题。了解、建立系统和水电解装置的相关技术以及与之相适应的系统 and 操作至关重要。同时，将推进电解槽加压对应（在运输、储藏的需求侧加压有效的情况下）的验证环境的整备和国际实证，为获得海外市场做好准备。

此外，从中长期来看，为了促进氢气在各个领域的利用，需要进一步降低氢气供应成本，因此，在降低氢载体的运输成本的同时，为了确保水电解装置在可再生能源国家制氢方面的竞争力，有必要以实现制氢成本水平为目标，而不仅仅是传统的延长。

为了降低制氢成本，重要的是通过提高效率（降低电阻、提高催化剂活性）来降低电费，前提是以廉价电力进行水电解，通过提高电流密度来提高氢气产量，通过降低材料成本（减少贵金属和稀有金属的使用量等）来降低电解槽的成本，并且必须解决启动/停止/波动引起的耐久性、高电流密度引起的电极耐久性以及交叉引起的安全性之间的权衡。

此外，相对于水电解装置的规模，优化电解槽的组合、配套设备的规格，以及优化包括启动停止和负荷波动运行在内的规格，降低设备成本和降低运行功率是很重要的。

为此，需要进行材料、构件开发、电解槽设计、系统设计、评价、运用的优化等技术开发，为了加速这些技术，需要建立和运用加速耐久性试验协议等评价分析，这是要素技术开发的PDCA循环的关键，此外，与欧洲领先的加速耐久性评价协议的制定等合作，努力实现这些评价协议的标准化也很重要。通过这些举措，我们将在适当的合作领域和电解槽制造商和零部件制造商的合作下，为通过产学官合作促进技术开发奠定基础。

要推进（供应商）、学院一体化运营，扩大玩家范围，加快技术开发。

另外，如图1.3-1所示，水电解系统未设置成本中，电解槽的成本是整体的20~30%左右，附属设备的成本大半，整流器等电源装置占整体的20%左右（引自Fraunhofer的报告<sup>25</sup>详细情况在1.5.1《制氢成本结构与估算条件》中说明）。如果提高电解槽的性能并实现高电流密度化，则应对大电流的整流器和气体制造量增加对流体设备的负荷也会上升，需要电解槽和附属设备达到平衡的设计。另外，还要求改善将水电解装置作为系统调整力提供时对电源装置上游侧系统的影响、与变动电力对应的附带设备的启动顺序、响应性和运行方法。因此，为了降低制氢成本，不仅需要电解槽的技术开发，还需要附带设备的技术开发和成本降低。

---

<sup>25</sup>Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electer

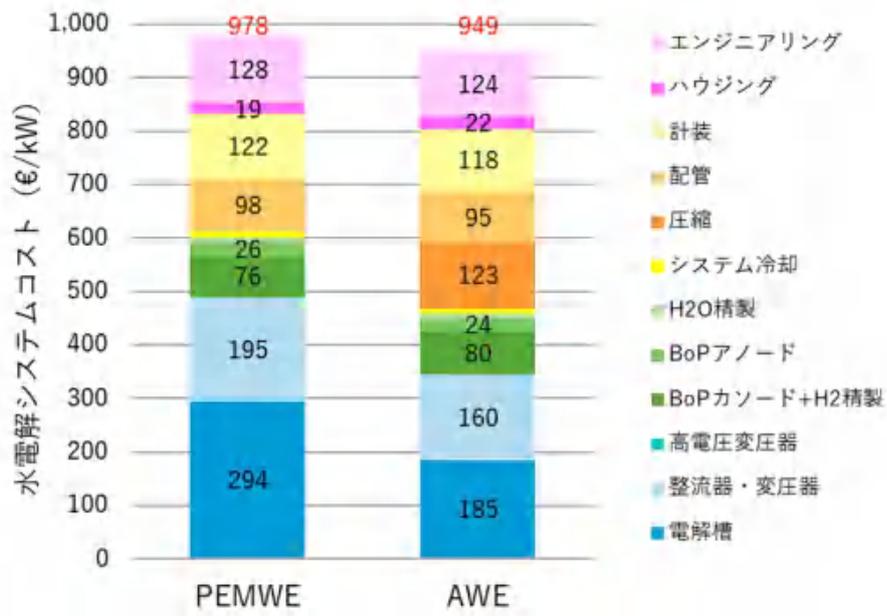


图1.3-1 PEMWE和AWE系统的成本结构

(5MW系统前提, PEMWE为5个1MW堆栈, AWE为2个2.5MW堆栈)

#### 1.4 获得水电解装置竞争力的方案

水电解装置根据投入的电源(系统连接、变动再利用)和氢利用情况(规模、压力等),存在各种各样的权衡。为了获得降低氢制造成本的水电解装置的市场竞争力,需要掌握这些权衡,确立水电解装置的技术规格,为正式普及期做准备。表1.4-1概述了水电解装置的主要权衡。

表1.4-1水电解装置权衡概况

项目	权衡概要
投入电力(系统和再能源)的权衡	<p>相对来说系统电力价格高,再能源便宜。</p> <p>系统可以稳定运转,水电解装置的设备利用率高,但由于再能源受天气、风况等的影响,设备利用率低。</p> <p>作为环境价值,系统会影响发电物种的排放系数,但再生能源通过发电的排放系数为零。</p> <p>一方面系统在稳定运行(从批发电力市场的动态采购除外)下容易确保耐久性,另一方面,再生能源要求抑制因起停引起的逆电流的产生、抑制因负荷变动引起的电极膜的劣化、电解槽附带设备的响应性。(针对投入电力的类型化“表1.4.1-1”也是参照)</p>
制氢与贮运权衡	<p>通过氢利用当地(或附近)的系统连接的氢制造、再能源适合地的氢制造+储藏运输,氢制造成本的想法发生了变化。</p> <p>在需要储氢·运输的情况下,一般需要对氢进行加压,要求水电解的后级工艺中升压,或者根据需要增大电解槽运行压力。</p> <p>可以从系统确保的电量受连接电压的限制,在系统和再能源中为接通电力由于力模式也不同,水电解装置的规模和运用模式也不同。</p>
规模与批量生产的权衡	<p>由于水电解装置适当的规模不明确,导致模块过度大型化需要调整为合适的大小,而不是。</p>
运行压力的权衡	<p>随着运行压力的增大,一方面有可能减少工艺后级的压缩机的级数和降低电力消耗等优点,另一方面,需要提高装置的机械强度,产生电解槽内的交叉变大、效率降低等问题。</p> <p>从开发常压型(0.1 MPa)水电解装置的制造商的观点来看,随着运行压力的增大,迄今为止的单元、堆叠结构的设计有可能发生变化。</p> <p>根据机械强度提高带来的成本增加和后级压缩机的成本减少的平衡,运转压力的增大未必能降低水电解系统整体的成本。</p>
电解槽性能与配套设备权衡	<p>将电解槽的运行实现高电流密度化,会导致因大电流对应整流器和气体制造量增加而导致流体设备的负荷增加和成本增加。</p> <p>提高电解槽起停性和变动追随性是附带设备也与之对应的技术要求技术(特别是放大时热流体的追随性)。</p>
电解槽性能与耐久性权衡	<p>在氢制造成本中,效率的提高与电费的降低有关,电流密度的提高导致氢制造量的增加和贵金属、稀有金属的使用量的削减与资本费的降低有关。</p> <p>为了提高效率的薄膜化会导致交叉增加,难以确保安全性,导致膜的机械强度降低。</p> <p>电流密度提高会发生电极的磨损、剥离,电极的耐久性降低。</p> <p>贵金属使用量稀有金属的削减会因负荷变动时的电极催化剂溶出而导致性能降低(电荷移动过电压增大)。</p>

根据1.3节应努力的方向，整理了今后获得水电解装置竞争力的方案。短期（现在~2030年左右），通过建立“实证场所”，确保水电解装置的市场竞争力和确立技术规格的阶段。从中长期来看（到2040年左右），重要的是通过尽可能便宜的电力来降低电费，并通过尽可能高的设备利用率来降低资本成本等固定成本。对于这些投入的电力形式和氢气利用形式，在考虑最大化利用需求的水电解系统的最佳规格的基础上，通过批量生产效果和附属设备的成本降低来推进资本成本的削减，同时通过建立和利用评价基础（平台）来继续电解槽的技术进步，并在这些成果的实用化时重新考虑规格，进一步提高生产率。图1.4-1显示了方案的概要（摘录了路线图本身）。

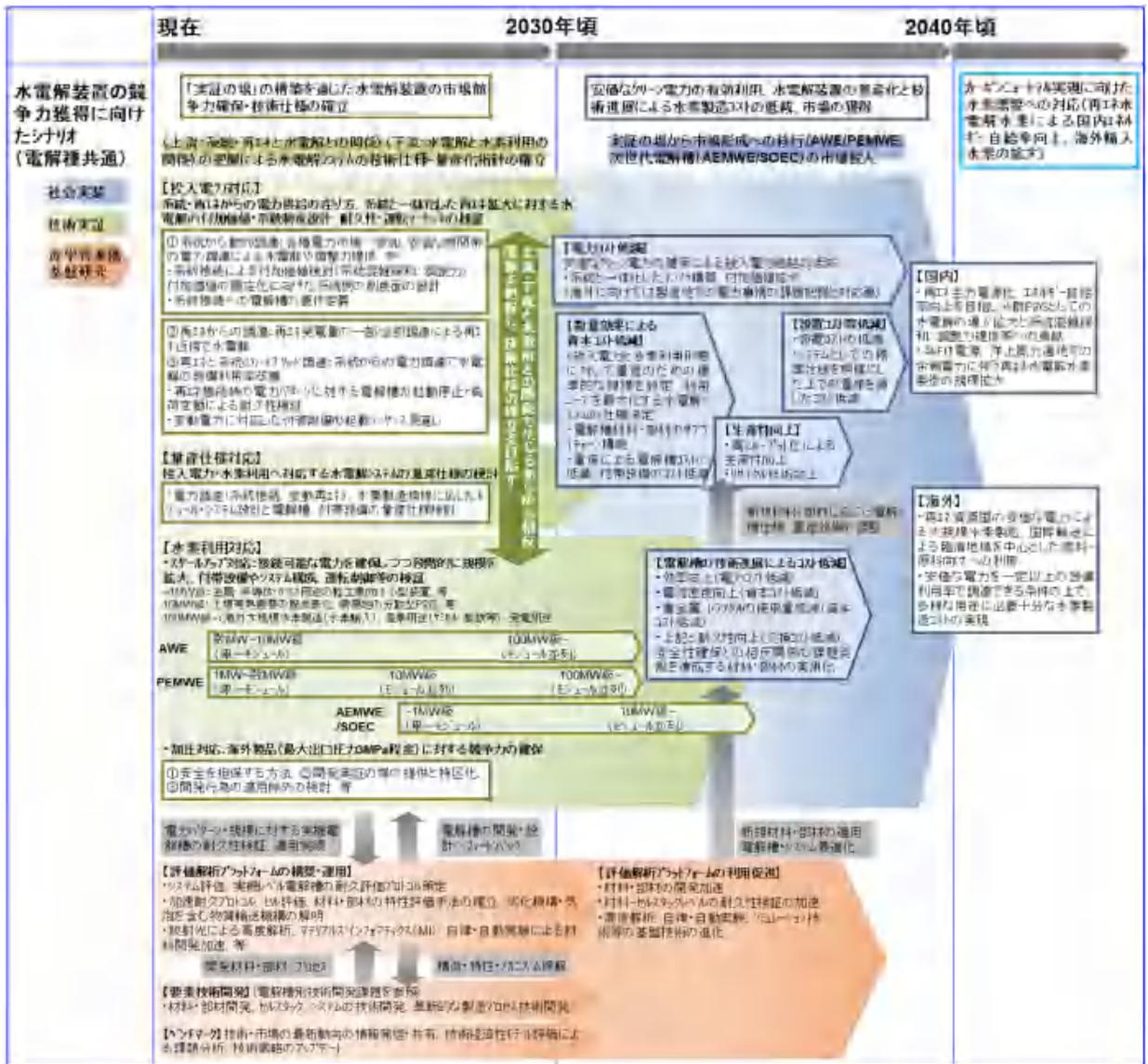


图1.4-1水电解装置竞争力获取方案

#### 1.4.1 从现在到2030年左右（短期）

到2030年左右，我们将在日本建立一个“示范场所”，了解上游（电网/可再生能源电力）与水电解的关系、水电解与下游（制氢规模、压力等），并根据系统连接和系统设计、利用可变可再生能源的海外扩张建立电解槽的技术要求，通过这些建立量产规格以及根据氢利用情况扩大规模的先决条件，被定位为重要阶段。

另外，以储运为主要用途的加压型电解槽在欧美正在推进，但在作为分布式Power to Gas (P2G) 在氢气需求地制造氢气的情况下，在常压（\u003C1MPa）下进行实证，另一方面，也有必要考虑在将来海外的可再生能源适宜地制造氢气，并将其储存、运输到氢气需求地的情况，推进加压对应。

此外，近期欧美及中国水电解装置量产能力与需求在时间轴上存在缺口，存在陷入供过于求的风险。如上所述，在上游侧、下游侧与水电解之间的关系没有得到充分整理的情况下，设备投资先行，这被认为是一个问题。

另一方面，如1.2.1所述，面向2020年代后期，海外100MW级大规模制氢的计划也在推进，未来各公司的量产能力可能直接关系到技术竞争力。另外，也存在像中国这样在国家和地方政府的大力支持下，通过规模经济迅速提高技术成熟度的威胁。

在日本，氢能基本计划中也设定了水电解产能目标，并宣布支持国内企业在GX供应链建设项目中的生产设备投资计划。为了占领国内外市场，需要制定大规模生产和扩大规模的技术规范。需要进一步支持生产技术和设备，以降低未来的设备成本并占领全球零部件市场，前提是通过建立“示范场所”来建立。

在“示范场”中，我们将推进（1）输入电力对应、（2）量产规格对应、（3）氢气利用对应的技术示范，并提供与实际电解槽耐久性验证和运行优化相关的信息，如下所述。可以考虑将其提供给分析平台，并促进对电解槽开发和设计的反馈循环。

## ①输入电源兼容

从系统和可再生能源提供电力的方式和问题、水电解的附加价值和与系统集成的可再生能源的扩展、系统系统设计、耐久性和运行顺序的验证非常重要。

输入电力的采购手段大致分为四种模式，如表1.4.1-1所示。在耐久性和操作顺序方面，今后在国内外各自的市场中，在研究概率高的电力供给形态的同时，要求在假设典型情况的电力模式中进行验证。

作为投入电力的采购手段，从系统提供稳定电力的A型适合水电解装置的大型化，容易确保耐久性，降低装置成本，但电价高，生产氢气的环境价值由排放系数决定。另外，很难成为扩大太阳能和风力等变动再能源的直接推动力。

另一方面，从促进水电解的利用为扩大可再生能源做出贡献的观点来看，作为投入电力的采购手段，从系统动态采购电力的模式B（通过从批发市场购买来吸收系统上的剩余电力或提供调节力等），以及通过可变可再生能源或与系统混合来采购电力的模式C和D可以成为主流。

在模型B中，由于在氢需求地（或附近）制造，可以抑制储运成本，虽然是所谓的分散P2G的典型模型，但由于只在廉价的时间段启动和提供调整力，启动停止次数和陡峭的变动会变多，为了提高设备利用率，甚至会使用电力价格高的时间段，预计制氢成本会上升。

模式C虽然有大规模可再生能源电源可以大规模制氢，但启停和波动较多，水电解系统的耐久性和波动跟随性技术门槛较高，在可再生能源资源国容易获得相对廉价的电力，但设备利用率较低，到氢气需求地的储运成本会增加氢气供应成本。

模型D是模型A/B和模型C的混合体，如果能够确保廉价的系统电力，对于设备利用率的增加，电力价格可以被抑制，如果在氢需求地（或附近）可以自行采购可再生能源，储运成本也可以被抑制，但与模型C一样，除了水电解系统的技术门槛高之外，还可以设想运用方法变得复杂等课题。

表1. 4. 1-1水电解装置输入功率分类

定期从A型系统采购		从B型系统动态采购	
概要	根据系统对氢气的需求稳定调节电力进行水电解	概要	参与各种电力市场，提供廉价时段电力通过采购进行水电解、提供调节力等。
特征（示例）	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 预计设备利用率高，但电价高</li> <li>· 生产氢气的环境价值由系统排放系数决定丸（目前不足以获得低碳氢认证）</li> </ul>	特征（示例）	设备利用率和电力价格根据市场情况而变化制氢的环境价值由购买电力决定
活用例	与非化石证书结合采购清洁电力 ※认证制度的利用在计划认定中得到了认可累了的情况	活用例	批发电力市场廉价时段的电力购买 参与供需调节市场获得副收入 从毕业FIT电源通过异地PPA进行再节能采购等
水电解中的凹陷	由于电力稳定，所以适合大型化不需要应对急剧的变动，耐久性也容易确保，装置成本得到抑制 一般来说，由于电力价格高，所以制氢成本上升 难以成为对再能源扩大的直接推动力 い	水电解中的凹陷	由于在氢需求地(或附近)进行制造，因此可以抑制贮藏运输成本 由于仅在廉价时间段运转或提供调整力，启动停止或急剧的变动变多 为了提高设备利用率，需要提高电力价格使用到较短的时间段，氢制造成本上升
模型c（变动）从再能源采购		模型d（变动）从再能源系统双方采购	
概要	(变动)通过调配来自再能源发电量的全部/一部分，在再能源附近进行水电解	概要	通过模型A/B和c的混合，实现了多源目标是通过来自斯的电力采购来改善设备利用率，提高收益、环境价值
特征(例)	设备利用率根据再节能电源种类而变化制氢的CO <sub>2</sub> 零排放	特征(例)	与单独使用B/C机型相比，可以改善设备利用率 有可能
活用例	再节能适地集中制氢 再能源剩余电力的利用 作为( FIP、毕业FIT电源的)失衡风险对策的氢制造等	活用例	模型A/B和模型c并用，但是，在模型b的情况下，系统电力便宜的时间段和节能的工作时间段的调整成为课题
水电解中的凹陷	有大规模的再能源就可以大规模制氢启动停止和变动多，耐久性和变动追随性的技术门槛高 在再利用资源国容易确保廉价的电力，但设备利用率取决于再利用电源种类，太阳能方面世界平均为16%，风力方面为36%（陆上）-41%（海上） <sup>26</sup> 和相对低 需要到氢需求地的储存运输成本，供氢成本增加	水电解中的凹陷	如果能够确保廉价的系统电力，相对于设备利用率的增加，电力价格会得到一定程度的抑制 如果可以在氢需求地(或附近)进行再能源自行采购，也可以抑制储存运输成本 启动停止和变动多，耐久性和变动追随性的技术障碍高(与模型c相同) 系统的运用方法变得复杂

在欧洲，连接系统的水电解的作用也比我国被认可有多种形态，技术实证领先。今后，在日本扩大再能源导入时，将要求与欧洲存在类似的课题。表1. 4. 1-2整理了系统连接的水电解的作用和面向实施的课题导入效果。

<sup>26</sup>IRENA, “renewable power generation costs 2023”

表1. 4. 1-2系统连接水电解的作用和实施的课题导入效果

系统连接的 水电解的作用	相关欧洲项目案例	面向在日本实施的课题	通过解决课题期待的导入效果 的例子
利用再能源 证书进行绿 色制氢	已经存在多个 证书使用现场水电解氢站 CertifHy项目的氢GO 实证等 ※此外，澳大利亚等部分国家也在讨论国际氢认证制度( i-REC )	\u003C制度性课题> 在欧洲政策上是绿色氢 ( RFNBO )的定义已经确定，但在日本，现状定义并不清晰，需要一个允许利用证书制造水电解氢的定义	水电解设置场所和制氢的时间段变得灵活，可以增加水电解的设备利用率，有助于降低制氢成本
提供调整力	已经存在多个 通过以下项目验证了电解的响应性能和调整力提供能力 HyBalance (2015-2020 ) Demo4Grid (2017-2023 ) H2FUTURE (2017-2021 ) REFHYNE (2018-2022 ) 另外，标准化试验协议的制定和验证正在以下项目中实施 QualyGridS (2017-2020 ) 通过以上积累，最近由联合研究中心( JRC )发表了欧盟的统一协议	\u003C制度性课题> 通过提升DR提供调整力没有得到水电解的认可 (国内仅限降低现状的灾难恢复) 由于目前还没有认可分设备的计量，系统的响应速度决定了主要条件，因此调整力的提供范围有可能仅限于二次②左右(电解槽单体的响应速度足够) \u003C技术问题> 到目前为止，试验协议的制定和实证只停留在个别项目的验证上	例如，在北海道，据估算，今后每追加连接1GW风力发电所的系统，调整力就需要25万~43万kW (基于北海道电力NW在系统WG的报告) 期待访问伴随着这样的再节能扩大而产生的调整力需求
缓和系统拥挤	目前没有以消除系统混乱本身为目的而设定的实证项目 但是，除了在“提供调整力”记载的项目中指出了必要性之外，还有多家机构的建议。 最近荷兰发表了以消除系统混乱的地产当地消费为目的的电解项目的支援制度( 2023/10 )	\u003C技术问题> 通过水电解的连接得到的系统拥挤缓和效果的验证现状不充分(设想有必要对水电解进行基于一定规则的指令，验证拥挤缓和效果)	作为2028年日中高峰需求截面上的系统拥挤预计结果，合计相当于216MW <sup>27</sup> (根据OCCTO的估算，东北地区的主干系统为69MW，东京地区・东北地区的本地系统共计147MW ) 根据条件估算，水电解避免系统增强的成本削减效果为每1MW亿日元以上

今后，作为在国内系统连接的水电解活用的形态，有必要讨论通过缓和系统混乱和提供调整力来追求水电解的附加价值(成本优势)，为此需要采取以下措施。

- 系统拥挤缓解效果验证：  
为了在避免由再生能源增加导致的系统增强的成本增加的同时，避免由水电解装置自身的负载增加导致的系统增强，需要在注意每个同一送电系统的空余容量、水电解装置的负载和电压等级的同时(参照表1. 4. 1-3 )，验证它们作为系统拥挤缓和单元发挥作用
- 调整力提供功能的验证：  
目前，对于被期待作为调整力活跃电源即抽水蓄电池，在长期脱碳电源拍卖中对抽水发电蓄电池所要求的调整功能进行了讨论

<sup>27</sup>第70届广域系统整備委员会(资料3 )，“关于2028年度系统拥挤设想的结果”

另一方面，关于能够发挥同样作用的水电解的讨论还没有进展。因此，有必要以抽水蓄能发电/蓄电池所需的调节功能为一个指标，验证在水电解中假设类似调节功能时所需的技术要求（电解槽/系统的响应性、耐久性等）。

关于上述，今后通过实证推进技术验证是很重要的。具体来说，不是以传统的系统运行形式为前提，将水电解视为电力利用装置，而是设计面向碳中和的电力基础设施，此时，应考虑及时从系统向水电解供电可以获得哪些好处。

此外，降低系统增强成本并不是最终目标，重要的是要考虑整体优化，包括氢作为能源的储存、运输和利用，以利用可再生能源实现碳中和。此外，当使用可再生能源作为电力的水电解氢替代化石燃料时，希望研究在可再生能源发电地生产和运输氢气，以及通过系统运输可再生能源电力并在需求地使用水电解氢的整体最优性。

为了实现这一目标，重要的是如何进行制度设计，使水电解对系统的贡献（避免系统增强成本和提供调节力等）变得明显。为了推进技术验证以深化这些讨论，水电解方面和电力方面的持续讨论是必须的。

另外，在可再生能源资源国家的大规模制氢中，投入水电解的电力的一部分也有可能通过系统采购。虽然上述主要考虑的是国内水电解的系统互联，但通过技术验证获得的知识，在今后进军海外市场时，也可以在掌握制造当地的电力系统情况的基础上，期待得到有益的利用。

**表1. 4. 1-3合同功率和电压等级指南**

主要电压等级	电压类型	合同电力
100V, 200V	低压	50kW或以下
6.6千伏	高压	50kW~2MW
22千伏、33千伏	特高压	2MW~10MW
66千伏、77千伏	特高压	10MW~30MW
154kV或以上	特高压	30MW~

**【补充】**

· 由于电力公司和地区之间存在差异，上表中的电压等级仅供参考，但如果附近没有该等级的输电线路，则比铺设新的输电线路更经济，则不在此限。

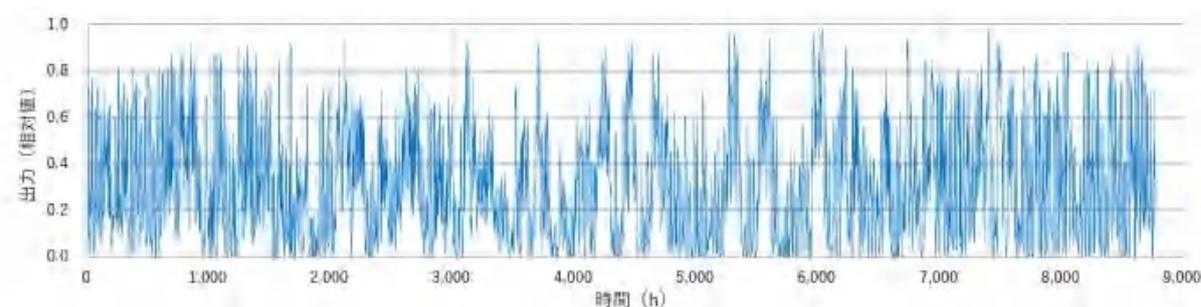
另一方面，在海外可再生能源国家的制氢或在国内以离网形式引入水电解的情况下（例如，要求零排放的工厂等的可再生能源的内部采购和消费），假设输入电力主要是可再生能源，水电解系统所需的波动跟踪性能可以达到更高的水平。因此，根据假设的功率模式，电解槽的启动/停止/负载波动以及高电位操作（高电流密度操作）的耐久性验证变得更加重要。

水电解的启动和停止以及波动幅度和波动速度根据可再生能源的电源类型而变化。例如，太阳能发电取决于当地的太阳辐射条件，但全年平均每天至少发电一次。

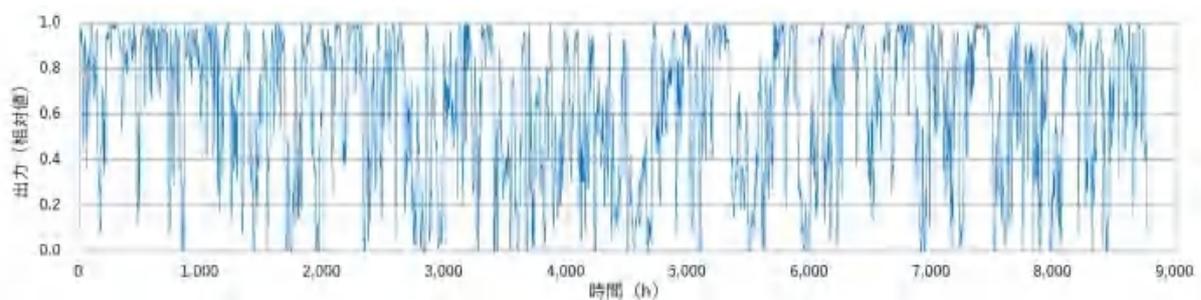
发生停止。另一方面，虽然风力发电的风力状况存在地区差异，但例如，从图1.4.1-1中澳大利亚和智利代表地区的陆上风力发电概况来看，停机次数每年约为10次至200次，与太阳能发电相比相对较少。

但是，投入电力模式根据设计和运行条件也不同，例如水电解容量与可再生能源容量的比率、水电解在低于最低输出的时间段的停止、电力是利用可再生能源的稳定发电部分还是剩余部分。

综上所述，目前还没有确定经过充分技术验证后投入使用的高概率电力模式。因此，在目前的情况下，作为技术规范很难提出统一的指标。今后的课题是，包括电力方面（上游）、制造商、水电解用户方面（下游）的相关人员、国家在内进行讨论，将水电解系统的运行控制具体化，以最大限度地利用投入的电力。



( a ) 澳大利亚昆士兰州Dulacca (杜拉克)地区:停用次数225次/年<sup>28</sup>



( b ) 智利Cabo Negro (黑山)地区:停用次数76次/年<sup>29</sup>图1.4.1-1风力发电概况一例(澳大利亚智利)

<sup>28</sup>水电解的设备利用率为50% (水电解容量与风力发电的比为57%)、最低负荷为10%时

<sup>29</sup>水电解的设备利用率为70% (水电解容量与风力发电的比为84%)、最低负荷为10%时

## ②应对批量生产规格

为了降低氢制造成本，通过水电解装置的量产化来推进资本成本的降低也是重要的技术开发之一。为此，需要明确系统整体的要求规格，推进包括电解槽规格和附带设备在内的模块化。

另一方面，根据投入的电源(系统连接、变动再能源)和氢利用箱(规模、压力)，电解槽的工作范围(电流密度、电压)、启动停止次数和负荷变动、伴随的压差变动等电解槽的暴露状况各种各样。另外，还需要考虑包括电解槽并联串联在内的连接形态、基于电解槽的最大允许电流电压和运行方法的变压器整流器的要求规格等设备的结构。而且，下游氢的接收方所要求的氢对应的气液工艺和精制升压工艺系统的规格等各种要素也各不相同。

从现状来看，水电解氢的市场处于黎明期，氢用户和他们追求的氢量和氢性状并不一样。另外，关于投入的电力也是多种多样的，不是特定的电力模式被投入的状况。基于此，为了确立批量生产电解槽及附属设备的规格，重要的是经过水电解和上游、下游技术验证的讨论，明确整体上以最便宜的价格提供氢及利用氢的目的物的要求规格。与推进批量生产规格的具体化并行，生产技术自身的高吞吐量化是为正式普及期做准备的关键。具体来说，从现有的人手组装等制造工艺向自动化的制造工艺过渡、自动化的质量管理技术、能够提高加工性和应对规模扩大的设计技术、用于提高贵金属等的再利用性的设计技术是重要的。预测与上述各技术的完成度相关的批量生产数量，进行设计、技术、生产、技术的改善是很重要的。在充分理解市场还不存在且是流动的情况下，为了不陷入曾经被认为是我国家业的半导体产业和液晶面板产业的状态，“在技术开发上处于领先地位，在商务领域处于领先地位必须研究“以斯取胜”的产业战略。

另外，各种电解种类的系统、电池组、部件的构成和设计极为多样。需要注意的是，结果所采用的技术也会发生变化。

## ③氢利用对应

水电解装置根据氢用户的使用情况(规模、压力)要求的规格也各不相同。以下，叙述水电解装置的规模扩大和对压力的应对。

### (1) 支持横向扩展

如1.2节所示，水电解装置的未来市场仍有很多不透明的部分，但以欧洲为中心，到2024年100MW级项目的FID正在不断增加。另外，在国内，与欧洲再次合作水稻的导入状况和氢气需求量双方都不同，目前还没有大规模的制氢项目立即启动的状况。实际上，在国内，以从短中期的分散P2G(1MW~10MW级)的实证到初期市场的形成为目标，阶段性地解决用于水电解系统在确保作为基础设施设备的可靠性的同时向上扩展的各种技术课题是重要的(附带设备)

目前，国内正在进行FH2R为10MW的AWE、山梨县H2-YES为1.5MW的PEMWE的运行实证，绿色创新（GI）基金事业的目标是确立2030年100MW级系统的技术。包括这样的举措在内，在积累用于在国内扩大规模的可行性研究、技术实证的实绩的同时，以将来的再利用资源国的大规模氢制造（进口氢在Hard-to-abate领域的需求）等为目标，进行国际合作，实现有必要掌握制造地适当的电力供给方法和课题，积累构筑和运用与之对应的系统的经验，从而在2030年以后的正式普及期共同获得水电解市场绿色氢。

另外，考虑到新一代的AEMWE和SOEC的技术成熟度相对来说低于AWE和PEMWE，作为实证阶段的装置规模感，设想了2020年后半期为1MW级别，设想了2030年以后扩大到10MW以上的方案。

表1.4.1-5列出了水电解不同规模的面向国内、国外的市场示意图。考虑到在国内（已经利用氢的）工业用途中通过再生能源水电解进行氢利用的情况下，“完善氢利用体制”被认为是在短中期实现再生能源电解氢的导入方面的好材料。特别是考虑到小型水电解装置的活用时，CO<sub>2</sub>为了减少排放，“利用灰色氢的轻工业”中的绿色氢活用作为短中期的市场被认为是有力的。

而且，在工厂等的热需求、电气化困难的高温热蒸汽供给用中，氢燃料今后也有可能被广泛利用。例如，全国有一定数量的工厂在工艺上需要10t/h级的蒸汽供应，目前可以认为是为了提供这种热量而利用化石燃料，但为了实现碳中和，该过程也需要脱碳。利用绿色氢是实现这一目的的有力手段之一，为了维持上述10t/h的蒸汽量，制造所需的绿色氢的水电解装置的规模感大致为10MW级。被认为是在国内稳步推进水电解装置规模扩大时的有力引进地。

表1.4.1-5各规模市场示意图

	1MW-数MW	10MW級	100MW級以上
国内	<ul style="list-style-type: none"> <li>金属、半導体、ガラス業界等の小型装置のニーズ</li> <li>水素ステーション（乗用車300Nm<sup>3</sup>/h、商用車1,000Nm<sup>3</sup>/h）</li> <li>国の調整力入札量1MW以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>工場等熱需要・近傍での分散型P2G</li> <li>工場ZE化を打ち出す企業も出現、再エネ調達、自家消費による電力の低炭素化のみならず、熱の脱炭素化の必要性</li> <li>系統接続への技術要件も含めて検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>将来の洋上風力発電等の普及による再エネ利用や余剰電力としてのグリーン水素製造の可能性</li> </ul>
			再エネメインとする電力調達
			主に臨海部の化学産業、製鉄、発電等での利用
海外		<ul style="list-style-type: none"> <li>分散型P2G（電力系統は国内と状況と異なるが、国内向けで実証を進め、必要に応じて加圧型電解槽へも対応）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>再エネメイン（系統ハイブリッドを含む）による大規模水素製造（貯蔵・輸送を伴う水素製造）</li> </ul>
			再エネメインとする電力調達

## (2) 支持加压

在欧洲，如表1.2.2-1所示，支持加压化(3MPa左右)的产品很多，但可以设想这是以向输气管道注入等运输、储藏用途为目标的。另一方面，在国内，在高压气体保安法的限制下，通过水电解制造1MPa以上出口压力的氢气相当于高压气体制造。现状国内各公司的产品在出口氢压力方面大多设定为不到1MPa。另一方面，在利用侧要求的氢压力高于此的情况下，进行加压电解也具有可以简化后级的升压工艺的设备的优点，但据认为，如表1.4.1-1所记载，存在加压带来的折衷。

表1.4.1-4显示了各种用途要求的氢的压力范围的例子。在国内，目前通过系统连接进行的分散P2G较为有力，不足1MPa而使用氢的情况也不少，但可以看出在液态氢和氢载体的合成过程等运输、储存和向管道的注入中，需要以高于1MPa的压力供给氢。展望海外市场，为了不使日本产品玻璃化，在着眼于将来有实力的水电解氢的供给地的同时，作为提高产品竞争力的一个途径，在国内也需要能够切实致力于加压对应技术开发的环境。

今后，在详细调查海外限制内容的基础上，按照第1种制造设备相当规模(> 100m<sup>3</sup>/日 包括)、“担保安全的方法(由KHKS提示)”、“实证项目等开发实证的场所的提供和特区化”、“开发行为的适用除外的讨论(得到适用除外的条件和根据条文的明确化)”等，也应该瞄准海外市场，确立确保国内产品竞争力的手段

表1.4.1-4按用途要求的压力范围

用途	假想压力
有机氢化物	~1 MPa
氢锅炉	~1 MPa
炼铁(氢直接还原)	> 0.45 MPa
娱乐性	~3 MPa
炼油厂	2 MPa
FT反应(e-fuel合成)	2~4 MPa
液化氢	2.5~4 MPa
燃气轮机燃烧时	> 3.4 MPa
注入输气管道	0.35~1.6 MPa (欧洲的中低压) ~8 MPa (欧洲高压)
氢气管道	9.7 MPa
氨合成(HB法)	14~30 MPa

Mohammad-Reza Tahan, \ recent advances in hydrogen compressors for use in large-scale renewable energy integration \, 千代田化工建设, “面向碳中和社会的氢供应链构筑的展开-MCH-LOHC系统的安装化-”, 甲烷化官民协议会资料, “关于甲烷化技术的动向”

Primetals Technologies, TERI, Siemens, “green steel through hydrogen direct reduction”

Satu Lipiainen, “use of existing gas infra structure in European hydrogen economy”

根据“JPEC News”技术报告“燃料电池汽车用高纯度氢精制先导装置”(高效氢制造等技术开发事业)等制成

#### 1.4.2 目前~2040年左右(中长期)

从现在到2030年左右的情景方向是，通过建设“示范场”，明确上游与水电解的关系和水电解与下游的关系，提出了确保水电解装置的市场竞争力和建立技术规范，但在2030年后的全面普及期，为了获得国内外市场，有必要在表1.4-1所示的水电解装置的各种权衡的前提下，加速降低制氢成本。

表1.4.2-1显示了降低制氢成本的措施。为了降低制氢成本，重要的是使用尽可能便宜的电力来降低电费，并通过以高设备利用率运行来降低资本成本等固定成本。对于这种投入电力的形态和作为基础设施设想的各种氢利用形态，为了批量生产的标准规模的设定，利用需求最大化的水电解系统的研究，以及构成它的电解槽和附带设备的规格，运用方法的优化是很重要的。

在此基础上，有必要构建降低电解槽成本的材料、构件的供应链，通过批量生产带来的数量效应来降低资本成本。此外，如1.3节所述，还必须降低占水电解系统成本大部分的电源装置和流体设备等附带设备的成本。需要注意的是，通过规模化降低成本固然重要，但需要注意的是，单纯的规模化会导致非通用的设计和运行系统，与通过量产降低成本产生相反的效果。

另一方面，通过提高电解槽效率、提高电流密度、减少贵金属和稀有金属的使用量、提高与之权衡的耐久性、确保安全性等电解槽技术开发的进展来降低制氢成本的措施也需要在中长期内采取。在此基础上，在将这些技术开发的成果实用化时，电解槽的设计可能会发生变化，因此必须对规格进行重新讨论，对供应链、量产设备进行调整。

通过这些措施，进一步提高电解槽的生产率被认为是重要的。需要通过电池堆组装的自动化和制造工序的减少来提高生产线的吞吐量，并通过先进的质量控制和回收技术来提高成品率。

另外，如后文1.5节所述，随着水电解装置市场的扩大，与水电解系统的未设置成本相当的设置成本、土地费、场地准备费用、事前许可费用、其他预备费等间接费用的降低也很重要。关于安装成本，还需要标准化系统的规格，以最大限度地减少安装的复杂性，包括电解槽-电源装置的组合和流体设备的模块化，并在明确系统的标准规格的基础上，通过批量生产来降低成本。

表1. 4. 2-1降低制氢成本的措施

降低成本措施	概要
①现行政策的应对	<p>a. 我们将创建一个能够最大限度地满足输入电力和氢气使用形式的使用需求的系统，并考虑一系列合适的变压器、整流器、电解槽、净化和压缩以及最终使用需求（目标）。在考虑成本的基础上，确定尽可能适用于相同商业模式的水电解系统，以及组成该系统的电解槽和附属设备的规格和操作方法。</p> <p>b. 构建材料和零部件供应链，使电解槽成本最低</p> <p>c. 建立量产工厂，通过数量效应降低电解槽成本</p> <p>d. 降低配套设备的成本（特别是通过降低电源设备的成本、通用化和标准化带来的数量效应来降低成本，但根据输入的电力和氢气的使用形式，需要单独应对）</p>
②电解槽技术进步的措施	<p>a. 通过电解槽技术进步，实现以下成本降低效果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 提高效率（通过降低能耗降低电力成本）</li> <li>· 提高电流密度（通过增加制氢量降低资本成本）</li> <li>· 减少贵金属和稀有金属的使用（降低资本成本）</li> </ul> <p>-实现克服上述耐久性和安全性之间权衡问题的材料和构件的实际应用（降低更换成本）</p> <p>b. ①-a~c需要根据上述电解槽的技术进步进行调整。</p>
③电解槽生产趋势上	<p>在①和②的基础上，制造高通量电解槽以进一步提高数量效应。</p> <p>通过技术提高生产率，改进回收技术</p>
④降低安装成本等	<p>通过模块化或标准化将安装复杂性降至最低的系统设计</p> <p>通过工厂电解槽、附属设备的安装、集装箱化、一体化来降低配送的安装成本</p> <p>在明确系统标准规格的基础上，通过批量生产降低成本</p>

根据这样的举措，在国内，为了实现再能源主电源化，使作为分散P2G的水电解的导入扩大，以及与此相伴的对系统的附加价值显著化，同时随着毕业FIT电源（2032年以后扩大）、其他海上风力发电等的再能源导入增大，在国内

海外以再利用资源国的大规模氢制造和向国内的进口氢为目标，通过在国内构筑“实证场”确立技术规格，掌握海外氢制造地适当的电力供给方法和课题，积累了相应的系统构筑和运用的技术诀窍，在此基础上，在利用GX（绿色变换）投资推进政策中对价格差支援事业的应征者的国产水电解系统的优惠政策的同时，根据该事业者的电源构成和系统构成的要求，最大限度地利用电力制造氢，构成以低成本最大化目的物的电解槽和附属设备

【国内】

- 以再能源主力电源化、能源自给率提高为目标，扩大作为分散P2G的水电解的导入，为缓和系统混乱、提供调整力等做出贡献
- 通过毕业FIT电源及海上风力合适地的剩餘电力扩大再能源・水电解氢制造的规模

#### 【海外】

- 利用再利用资源国的廉价电力大规模制造氢，通过国际运输用于以临海地区为中心的燃料原料
- 在能够以一定以上设备利用率筹措廉价电力的条件下，实现多种用途所需的充分的氢制造成本

另外，为了提高电解槽的水平，重要的是继续推进、实现目前还没有延长的技术开发，并构筑为战略性地致力于这些的体制。正如1.2节中说明的欧美研究开发方案中所述，产学官合作的评价分析的共同基础(平台)是关键。

电解槽制造商、部件制造商(供应商)和学术机构相互协作，使用材料部件共同的测量分析方法和加速耐久协议，致力于解决有助于提高未来电解槽的性能、耐久性的课题，通过放射光进行高度分析、材料信息(MI)、通过自动自律实验加速新材料部件的开发，共享技术实证表明的实机水平的电解槽的耐久性和运用方法上的课题，反馈到电解槽的开发设计被认为是有效的。

特别是，由于投入电力的不同，水电解装置的耐久性也不同，因此在欧洲领先的加速耐久试验协议的早期确立和运用是最重要的项目之一。

另外，关于评价分析相关的方法、技术，以及使用它们的结构、物性、机理的阐明，请参照电解类别的技术开发课题(2.1节~2.4节)。

除了构筑、运用共同的评价、分析基础外，还必须持续进行水电解相关的国内外政策、市场、技术开发最新动向的信息发布、共享(基准)，促进新玩家的进入。另外，通过技术经济性模型评价(Techno-Economic Analysis)定期跟进技术实证和研究开发的进展对氢制造成本的效果、对未来前景的差距分析、课题整理，更新目标值和降低成本的技术开发战略

## 1.5 降低制氢成本的探讨

如前所述，目前水电解制氢项目的实际成果有限，导致水电解装置上游和下游的实际成果较少，水电解系统的技术要求和量产、规模化的方针尚未确立。因此，不是在短期内考虑设定目标值，而是为了获得水电解市场，以通过构建“实证场所”确立技术规格为目标，并在全面普及期进行技术开发，朝着这样的方向实施了剧本的制定。

此外，作为到2040年左右降低制氢成本的中长期战略，设想尽可能以廉价的电力降低电费，通过尽可能以高的设备利用率运行来降低资本费用等固定费用，针对这种投入电力形态和氢利用形态，在讨论了使利用需求最大化的水电解系统的最佳规格的基础上，通过降低批量生产效果和附带设备的成本来推进资本费用的削减，在电解槽的技术进展和这些成果的实用化中，在重新讨论规格的基础上，进一步提高生产率。

如上所述，需要从各个角度考虑降低制氢成本。在此，设定了2040年左右设想的制氢成本水平，并讨论了实现该水平的水电解系统的能耗、总资本成本以及电解槽的性能、寿命（PEMWE中以堆叠、AWE中以零件更换时间为前提）。

此次，我们以海外进口氢气为案例，根据澳大利亚电力数据，对降低制氢成本的系统及电解槽进行了探讨。但是，需要注意的是，根据投入的电力、氢的利用形式和实际安装地区的不同，各种条件也不同。

此外，在上述案例中，我们考虑了PEMWE和AWE电解槽的技术目标，并重新组织了以电池堆、材料和部件为中心的技术开发问题（详情见2.1）。

和2.2节）。再次提到电解槽的长寿命化和高性能化是降低制氢成本的因素的一部分。

### 1.5.1 制氢成本结构及估算条件

为了理解制氢成本的结构，在PEMWE(1MW系统)及AWE(10MW系统)现有性能及资本成本前提下，水电解制氢成本与设备利用率的关系如图1.5.1-1所示。关于该成本估算的水电解装置规格的前提条件(以下，基于

作为准条件)见表1.5.1-1，计算公式见图1.5.1-2。

关于电力价格，作为为了理解成本结构的临时值，2023年太阳能发电的LCOE(均等化发电成本)的全局平均值6.2日元/kWh(0.044美元/kWh<sup>30</sup>2023年的平均汇率为1美元142日元)。

作为氢制造成本的详细内容，考虑水电解装置的成本的贡献时，资本成本加上在电解槽和附属设备的制造成本上附加了制造商的加价的未设置成本、进而设置成本、及间接费用(地租、场地准备费用、事先许可费用、其他预备费等)

---

<sup>30</sup>IRENA, “renewable power generation costs in 2023”, 估算包括设备费和安装费在内的当前资本成本为758美元/kW, 运行维护成本为资本的3%, 设备利用率为16%

Fraunhofer 2021年成本分析报告中提供了PEMWE和AWE的基本成本结构<sup>31</sup>参考，以图1.5.1-3所示系统结构为前提，以水电解系统电解槽及配套设备单位容量成本明细分析结果为基础。这些前提条件和成本分析注意事项请参考脚注中的表述。

图1.5.1-4显示了Fraunhofer的PEMWE及AWE的系统成本分析结果。本报告假设两种电解类型为5MW系统，总资本成本设定为电解槽及附属设备未安装成本的约2倍。也就是说，安装成本和间接费用的合计与未安装成本是相同的。另外，2024年美国NREL的成本分析报告<sup>32</sup>其中也暗示了总资本成本约为未设置成本的2倍。

PEMWE的未设置成本为978欧元/kW，主要细目为电解槽为294欧元/kW，约为未设置成本的30%，整流器变压器等电源装置为195欧元/kW，约为未设置成本的20%。

AWE的未设置成本为949欧元/kW，其中，电解槽为194欧元/kW，约为未设置成本的20%，整流器变压器等电源装置为160欧元/kW，约为未设置成本的17%。AWE为了使最终的氢压力与PEMWE相同，向3MPa的压缩机为123欧元/kW，约为未设置成本的13%。

---

<sup>31</sup>Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electer

**【前提条件】**

PEMWE为1MW堆(运行压力最大3MPa，电解面积1,000 cm<sup>2</sup>、单元数265、动作点1.8V@2.0A/cm<sup>2</sup>)并联5个5MW模块和1个设备附件(系统结构见图1.5.1-3(a))的未安装成本

AWE表示2.5MW堆(运行压力0.1 MPa、电解面积20,000 cm<sup>2</sup>、单元数116、动作点1.8V@0.6 A/cm<sup>2</sup>)两个并联的5MW组件和一台附属设备(包括升压至3MPa的压缩机)的未安装成本(系统配置见图1.5.1-3(b))

· 根据2020年时可用的技术，用自下而上的成本模型进行估算。成本模型由系统级组成，包括电芯、电堆和配套设备，实现了从制造商处收集的主要电堆组件和配套设备的设备成本数据(详情不公开)。

**【成本注意事项】**

· 由于水电解技术刚刚开始进入市场，可用的水电解系统既不是标准化产品，也不是数量众多。它也不是在MW的性能等级中设计和制造的，而是具有相关的非常特殊的制造成本的定制产品。

· 为了降低常温水电解制氢成本，改进电池、电堆和整个系统的设计，开发达到更高功率密度的技术是方向之一。因此，PEMWE需要开发改进MEA的紧凑型电解槽。在AWE中，隔膜电极组件的逐步改进至关重要。

· 加压AWE与常压系统相比，如果能够减少容量等级较小或等级较高的材料和部件的额外投资，则有可能降低成本，但通过推进设计优化，会产生满足特定要求的权衡(寿命缩短导致零件更换成本增加等)。

· 另一个是增加制造量，通过学习效果削减成本的方向性。然而，开发适合系列制造的工艺仍然存在挑战。

· 相对于整个系统的成本，附带设备，特别是电源装置的比例很大，随着电解槽的低成本化的推进，其成本比例确实有增加的倾向，特别是为了降低电源装置的成本的对策很重要。

· 目前，电解系统量产仍处于早期阶段，数量虽然MW系统已经实现，但市场扩张还有很长的路要走。找到符合运营商系统要求的经济高效的解决方案对于降低总资本成本至关重要。

<sup>32</sup>NREL, “updated manufactured cost analysis for proton exchange membrane water electrolyzers” 的报告显示，生产10个1MW系统的PEMWE时的未安装成本为20

/kW, 1美元150日元换算)，总资本成本乘以2的话为40万日元/kW，近年来有上升的倾向。

在这次的讨论中，考虑到近年来能源、物价、人工费等的增加，欧洲的European Hydrogen Observatory的2024年最新信息<sup>33</sup>基于的单位容量总资本成本（PEMWE为2,503欧元/kW，AWE为2,310欧元/kW）修正了图1.5.1-4的值，PEMWE为约40万日元/kW，AWE为37万日元/kW。另外，修正时假设电解槽、各附属设备以及安装成本和间接费用的合计相对于总资本成本的比例不变。作为其修正结果，作为此次PEMWE和AWE基准条件的成本结构如图1.5.1-5所示。

电解槽的更换成本以PEMWE更换堆叠、AWE更换电极催化剂、隔膜的部件为前提，分别设定为总资本成本的15%、6%。根据Fraunhofer的报告，关于AWE，电解槽中两极的电极催化剂以及隔膜的合计成本比例约为整体的59%。

从该图可以看出，设备利用率变大时，氢制造成本的支配因素将变为电费，但将来以廉价的变动再生能源为主使用电力时，设想与稳定运行时相比，在设备利用率得到一定程度控制的条件下运行水电解装置。因此，在使用廉价的再生能源的同时，通过从系统采购电力来提高设备利用率，降低水电解装置的资本费用，通过水电解装置的量产来降低资本费用，通过运转维持（O&M）费用以及高寿命化来降低交换成本也是降低氢制造成本所必需的。

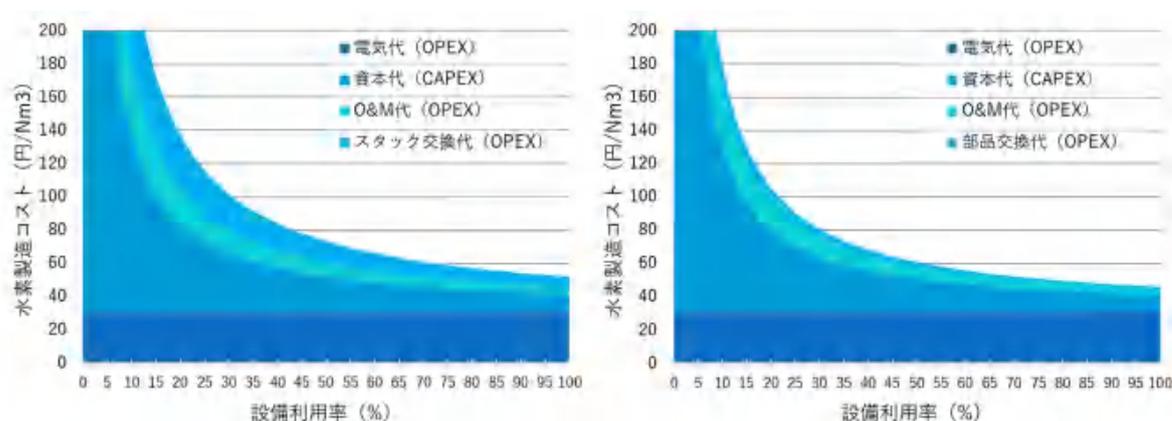


图1.5.1-1 再生能源水电解制氢成本结构实例(左: PEMWE, 右: AWE)

<sup>33</sup><https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/electrolyss>

表1.5.1-1图1.5.1-1估算的前提条件(标准条件)

参数	PEMWE	AWE
系统使用年限	20年	20年
总资本成本(每千瓦) ( )内为总资本成本	40万日元/kW ( 430百万日元)	37万日元/kW ( 4,104百万日元)
每年的并购成本率 <sup>34</sup>	系统总资本的2%	系统总资本的2%
更换时间 <sup>35</sup> (次数)	40,000 h (堆栈更换) ( 4次)	60,000 h (部件更换) ( 2次)
交换成本率 <sup>36</sup>	系统总资本的15%	系统总资本的6%
电解槽系统规格		
系统能耗 ( BOL )	4.68 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.77 kWh/Nm <sup>3</sup>
系统能耗 <sup>37</sup> (平均)	4.91 kWh/Nm <sup>3</sup>	5.01 kWh/Nm <sup>3</sup>
系统容量( BOL )	1.074 MW (AC )	11.10 MW (AC )
辅机能量损失 <sup>38</sup>	5%	8%
整流器转换效率	98%	98%
电解槽容量	1 MW (DC )	10 MW (DC )
电解槽工作点( BOL ) <sup>39</sup>	1.82 V at 2.0 A/cm <sup>2</sup>	1.8 V at 0.6 A/cm <sup>2</sup>
电解池反应面积	1500厘米 <sup>2</sup>	30000厘米 <sup>2</sup>
电解槽的单元数	183	309
制氢量	230纳米 <sup>3</sup> /h	2326纳米 <sup>3</sup> /h
出口氢压力	常压(〇.8MPa左右)	常压+后级压缩(3 MPa )

$$\text{水素製造コスト} \left[ \frac{\text{円}}{\text{Nm}^3} \right] = \text{OPEX (電氣代)} \left[ \frac{\text{円}}{\text{Nm}^3} \right] + \text{CAPEX (資本代)} \left[ \frac{\text{円}}{\text{Nm}^3} \right] + \text{OPEX (交換代)} \left[ \frac{\text{円}}{\text{Nm}^3} \right] + \text{OPEX (O\&M代)} \left[ \frac{\text{円}}{\text{Nm}^3} \right]$$

$$\text{OPEX(電氣代)} \left[ \frac{\text{円}}{\text{Nm}^3} \right] = \text{電力価格} \left[ \frac{\text{円}}{\text{kWh}} \right] \times \text{エネルギー消費量} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \right]$$

$$\text{CAPEX (資本代)} \left[ \frac{\text{円}}{\text{Nm}^3} \right] = \frac{\text{総資本コスト}[\text{円}]}{\text{水素製造量}[\text{Nm}^3]}$$

$$\text{水素製造量}[\text{Nm}^3] = \text{年間水素製造量} \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{年}} \right] \times \text{システム耐用年数}[\text{年}]$$

$$\text{年間水素製造量} \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{年}} \right] = \text{電解による水素生成量} \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right] \times 8,760 \left[ \frac{\text{h}}{\text{年}} \right] \times \frac{\text{設備利用率}[\%]}{100}$$

$$\text{OPEX (交換代)} \left[ \frac{\text{円}}{\text{Nm}^3} \right] = \left( \text{総資本コスト}[\text{円}] \times \frac{\text{交換コスト率}[\%/\text{回}]}{100} \times \text{交換回数}[\text{回}] \right) / \text{水素製造量}[\text{Nm}^3]$$

$$\text{OPEX (O\&M代)} \left[ \frac{\text{円}}{\text{Nm}^3} \right] = \left( \text{総資本コスト}[\text{円}] \times \frac{\text{O\&Mコスト率}[\%/\text{年}]}{100} \right) / \text{年間水素製造量} \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{年}} \right]$$

图1.5.1-2制氢成本计算公式

<sup>34</sup>European hydrogen observatory 2024 ( <https://observatory.clean-hydrogen.eu/hydrogen-landscape/production> )

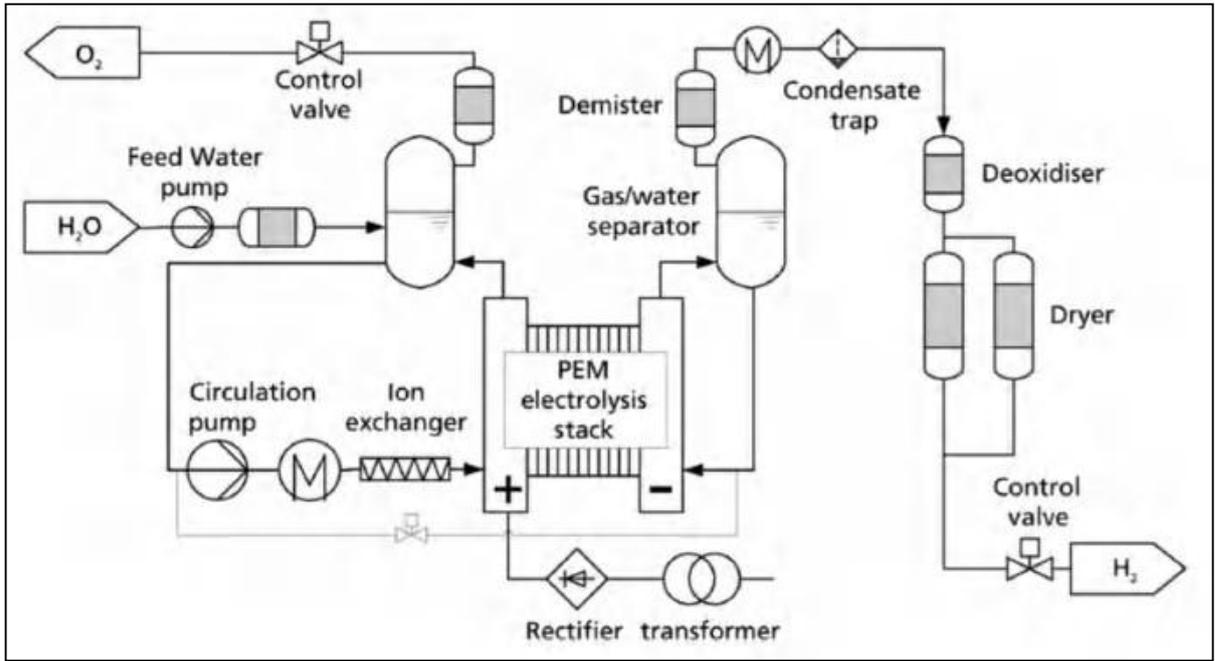
<sup>35</sup>Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis  
年)最低值,但注意是额定运转前提的耐久时间,在本路线图中定义为从电解槽的BOL到电压上升10%的更换时间( PEMWE为堆叠, AWE为部件(电极、隔膜等) )

<sup>36</sup>Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems” 的报告中说

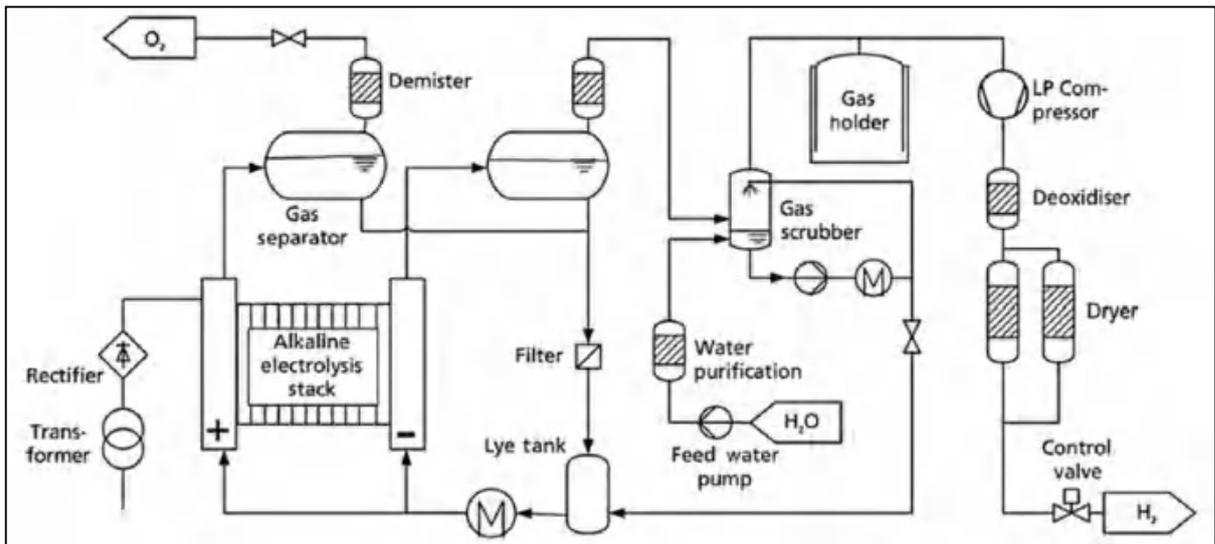
<sup>37</sup> 假设在电解槽更换时期之前平均以BOL的105%电压运行

<sup>38</sup> Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis

<sup>39</sup>PEMWE为s.m.alia et al. “catalyst-specific accelerated stress tests in proton exchange membrane low-temperature electrolysis for insis on.” J. Electrochem. Soc ., 171 024505 (2024 ), AWE参考白井, “绿色制造技术”, 日本能源学会志, 99, 338-343 ( 2020 )



( a ) PEMWE



( b ) AWE

图1. 5. 1-3 PEMWE和AWE系统配置<sup>30</sup>

( 5MW系统前提, PEMWE为5个1MW堆栈, AWE为2个2.5MW堆栈, 每个堆栈连接变压器和整流器)

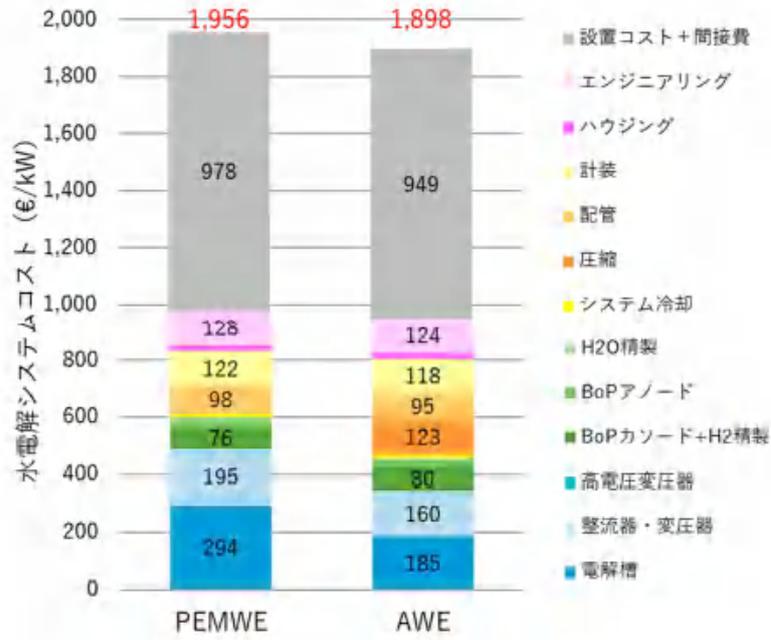


图1.5.1-4 PEMWE和AWE的成本结构  
(5MW系统前提, PEMWE为5个1MW堆栈, AWE为2个2.5MW堆栈)



图1.5.1-5 PEMWE和AWE的成本结构  
(假设PEMWE为1MW堆栈, AWE为10MW堆栈)

## 1.5.2 研究技术目标的制氢成本水平

这次，以从再利用资源国进口的海外氢为对象，设定满足其氢制造成本水平的水电解装置的目标值，探讨了以达到该水平为目标的技术开发的方向性。

关于作为标准的氢气制造成本，国家规定的2030年的CIF价格为30日元/Nm<sup>3</sup>（并不决定低碳氢的制造来源），而从制造到进入国内的成本为11.9日元/Nm<sup>3</sup>扣除后约为18日元/Nm<sup>3</sup>（约200日元/kg）作为一个指标。

CIF价格30日元/Nm<sup>3</sup>在氢基本战略（2023年6月修订）中，作为氢供给成本的目标，2030年左右为30日元/Nm<sup>3</sup>所述方式的替代方案。这个目标值是2017年首次制定的氢基本战略<sup>40</sup>虽然没有变更，但关于以现有化石燃料等价为前提的氢供给成本，现在和当时的燃料价格等可能不同<sup>41</sup>需要特别注意。

关于从氢的制造地到国内到达的运输成本，参考了过去的NEDO事业（2015年度、2022年度）实施的估算结果（国际运输距离10,000 km）。关于氢载体，也可以设想氨和MCH（甲基环己烷），但这里以液化氢为前提。

表1.5.2-1列出了估算结果和前提条件。各分析的标准案例以2030年左右为目标，标准案例中仅运输成本就为24.2~28.2日元/Nm<sup>3</sup>中选择所需的族。在各分析的成本降低方案中为11.9~15.1日元/Nm<sup>3</sup>预计将降低到，在此，基于以未来技术进展为基础的最大导入案例的估算值为前提的想法，运输成本为11.9日元/Nm<sup>3</sup>假设了。但是，关于最新液化氢的输送成本的讨论<sup>42</sup>那么，需要注意的是海运量和博伊斯率等前提条件不同。

---

<sup>40</sup>氢基本战略，[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisai\\_energy/pdf/hydrogen\\_basic\\_strategy.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisai_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf)（2017年10月26日公布）

<sup>41</sup>例如，关于国内天然气价格，2017年为8.61USD/mmbtu，2024年为12.93USD/mmbtu，当时约为上升到了1.5倍

<sup>42</sup>NEDO氢燃料电池成果报告会2024、“面向竞争性氢供应链构建的技术开发事业/与大规模氢供应链构建相关的技术开发/液化氢的高效海上大量输送技术的开发”

表1.5.2-1过去NEDO业务的运输成本估算结果

方案案例	2016年国际空间站 2030年 研发案例 <sup>43</sup>	2016年国际空 间站 2050年 最大部署案例	2023年国际空间站 2030年 成本预测 <sup>44</sup>	2023年国际空间站 2030年 降低成本方案
液化	13.8	6.6	16.7	8.7
装运 地	5.8	3.3	6.1	3.4
国际运输	4.6	2	5.4	3
合计	24.2	11.9	28.2	15.1

项目	IAE (2016 )最大部署案例条件	IAE (2023 )成本降低方案条件 <sup>45</sup>
液化	3台设备容量270 t /天 液化机电力原单位0.54kWh/Nm <sup>3</sup>	15台设备容量50t /天 液化机电力原单位0.55kWh/Nm <sup>3</sup>
土地储藏 (发货基地)	油箱19.12万米 <sup>3</sup> 一座 每氢电力消耗0.055kWh/Nm <sup>3</sup>	油箱5万米 <sup>3</sup> 4座 每氢电力消耗0.055kWh/Nm <sup>3</sup>
海运	相当于LNG运输船的16万米 <sup>3</sup> 2艘卸 油率( BOG ) 0.2%/d 以锅炉废气为燃料推进的燃气发动机	相当于LNG运输船的16万米 <sup>3</sup> 2艘卸 油率( BOG ) 0.2%/d 以锅炉废气为燃料推进的燃气发动机

### 1.5.3 降低制氢成本的方案

以表1.5.1-1所示的水电解装置的规格为基准，研究了通过提高投入电力、数量效果和生产率、安装成本和间接费用、电解槽的性能和耐久性降低氢制造成本的方案，前项的氢制造成本为18日元/Nm<sup>3</sup>进行了为实现的水电解装置的系统总资本成本以及技术目标的整理。

以下，对考虑降低氢制造成本的前提条件进行说明。

#### (1) 投入电力的前提条件

如上所述，为了降低将来的氢气制造成本，使用尽可能便宜的清洁电力，提高设备利用率进行运行是很重要的。

在此，在表1.4.1-1所示的投入电力的类型化中，以因日照、风况的条件而作为再能源适合地之一而闻名的、大规模的再能源发电项目正在进行中、且位于对日本的海运比较有利的地区的澳大利亚的电力数据为例，进行来自系统的动态采购 另外，需要注意的是，作为前提条件的值会根据氢气制造地的电力情况而变化。关于系统的动态采购(型号b)，根据ENEOS株式会社提供的澳洲昆士兰批发电力市场的价格数据(汇率为1澳元100日元)进行整理

太好了。图1.5.3-1显示批发电力市场现货价格变动(2019/1/1~2019/12/31)，2019年全年

<sup>43</sup>NEDO“氢利用等先导研究开发事业/能源载体系统调查研究能源载体系统的经济性评价和特性分析”(2016.2)

<sup>44</sup>令和4年度关于能源供求结构・高度化对策的调查等事业(面向竞争性氢供应链的氢成本分析的调查)报告书(2023.2)

<sup>45</sup>主要是调查将来设想的文献，根据有识之士的听证会推测。川崎重工业，“关于使用起源于低品位煤的无碳燃料实现未来能源系统(氢链模型)的可能性的调查研究”(2012.4)，以及川崎重工业，“关于改善从澳大利亚的低品位煤制造氢的价值链的讨论”(2015)

的设备利用率(相当于年电力购买合计时间的比例)与平均电力价格、每日平均停止启动次数的关系。

设备利用率越高, 购买电力价格越高的时间段的电力, 设备利用率99%时平均电力价格约为7日元/kWh, 设备利用率55%时约为5日元/kWh。另一方面, 设备利用率越高, 连续工作时间越长, 次数越少(0.1~0.2次/天左右), 但在设备利用率为30~85%的范围内, 由于购买时间段变小, 所以启动・停止增加到2次/天以上。最终制氢成本18日元/Nm<sup>3</sup>根据表1.5.1-1的前提条件, 水电解系统的能耗约为5kWh/Nm<sup>3</sup>假定, 电力价格需要低于3.6日元/kWh的水平。

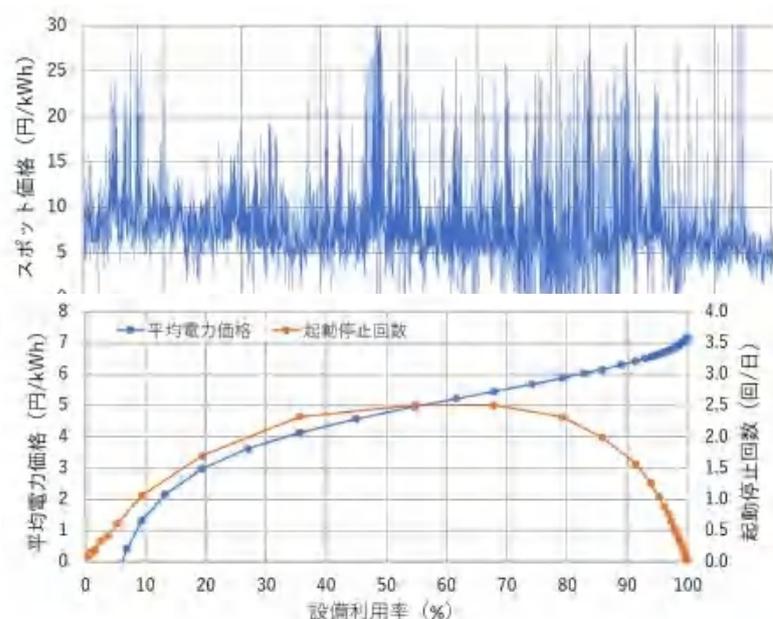


图1.5.3-1批发电力市场动态采购(相当于表1.4.1-1中的模型b)

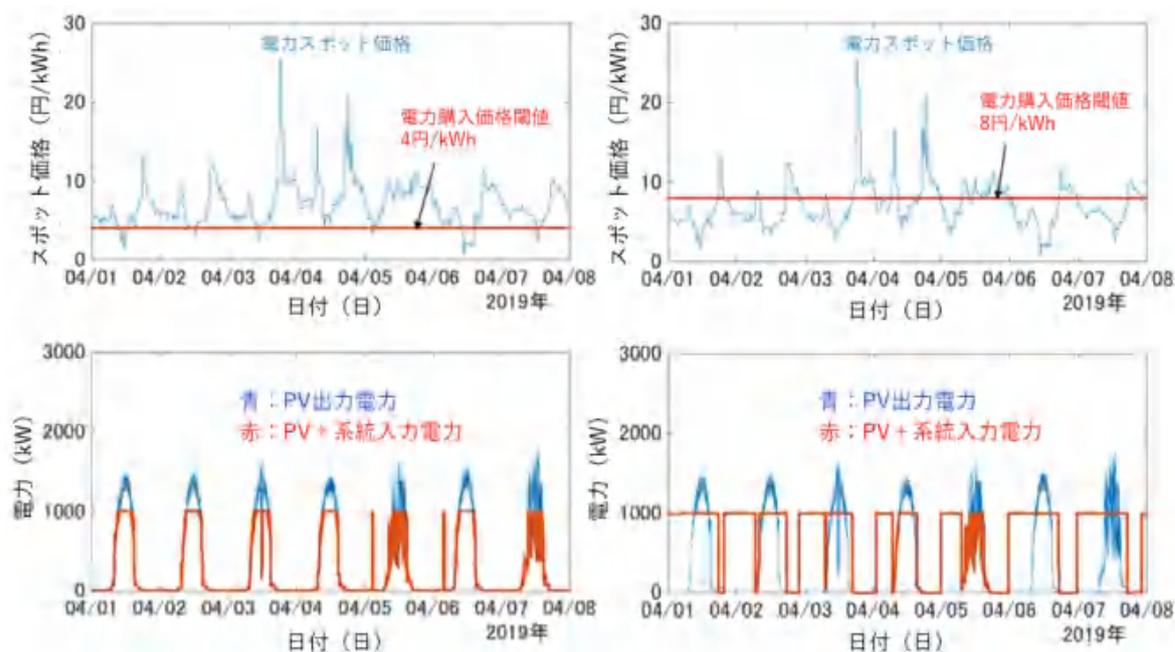
关于来自变动再生能源的采购(模式c)以及与系统的混合(模式d), 设想由ENEOS株式会社提供的澳洲昆士兰的太阳能作为再生能源的电力模式, 作为未来太阳能的发电成本, 资本成本为4.5万日元<sup>46</sup>折旧年数20年, 运转维持成本为资本成本的3%, 设备利用率20%, 电力价格约为2.0日元/kWh, 通过太阳能和水电解装置的容量比的优化, 调整了电力价格和水电解装置的设备利用率, 其结果以设备利用率26.5%为基准。

而且, 为了提高水电解装置的设备利用率, 设想了从与上述太阳能发电在地理和时间上同步的批发电力市场进行电力采购(图1.5.3-1)。在相对于随时间变化电力现货价格成为一定的价格(电力购买价格的阈值)以下的时间段内, 仅进行来自再生能源的采购

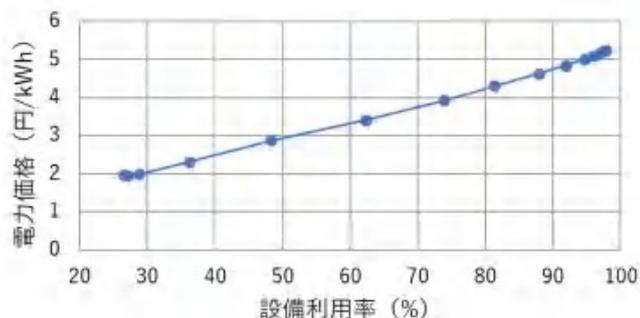
<sup>46</sup>根据IRENA, “renewable power generation costs in 2023”, 包括设备费和安装费在内的资本成本在2023年为758美元/kW, 如果未来太阳能发电的引进容量扩大到2023年的5倍, 则约为300美元/kW

那么，决定只根据不足的部分活用系统电力。由此，可以通过增加阈值来提高设备利用率，有助于氢制造量的增加。此时电力模式、设备利用率和电价的关系如图1.5.3-2所示。

另外，关于起动停止次数，由于太阳能发电时间段与批发电力市场的廉价时间段重复，所以不依赖设备利用率，平均为1.1次/天左右。



( a ) 太阳能及系统混合的投入电力模式(参考Appendix的图A. 6-1 )



( b ) 设备利用率与电力价格之间的关系

图1.5.3-2波动再生能源来源(相当于表1.4.1-1的型号光盘)

基于以上整理，作为本次投入电力的前提条件，假设了表1.5.3-1所示的4种情况。另外，假设表中的电力价格不包括从系统供应时的托运费、从再生能源供应时对当地再生能源的补助金等。

在此次设想的投入电力条件的情况下，目的是通过设想从电力价格最高的接近稳定的运行到在廉价的时间段内从系统进行动态采购、再生能源以及从系统进行混合采购来削减氢制造成本的电费，但是需要应对伴随着起动停止和负荷变动的运行。在理解通过国内实证场的投入电力和水电解的关系的基础上，运用方法

的实证，根据耐久协议进行耐久性验证，在适应海外制造·当地电力情况的同时，要求确立技术规格。

表1.5.3-1投入电力的前提条件

电力模式	电力价格设备利用率	特征
系统动态采购 (模型b)	7.0日元/ kwh 99 %	启动、停止较少，几乎接近稳定运行
系统动态采购 (模型b)	5.0日元/ kwh 55 %	启动·停止的频率约为2.5次/日，比再生能源还多，需要应对启动·停止急剧的变动 也设想提供调整力等，但这次不考虑
来自再生能源的采购 (型号c)	2.0日元/ kwh 26.5 %	启动、停止的频率约为1.1次/天左右
再生能源系统混合采购 (型号d)	2.5日元/ kwh 40 % (最终3.0日元/kWh 也设想为70%)	启动·停止的频率与来自再生能源的采购相同水平 在通过再生能源在白天进行电解的时间段，从系统获得廉价的电力 也设想购买电力并用电池蓄电，在夜间利用其电力进行电解，但这次不考虑

## (2) 水电解系统的前提条件

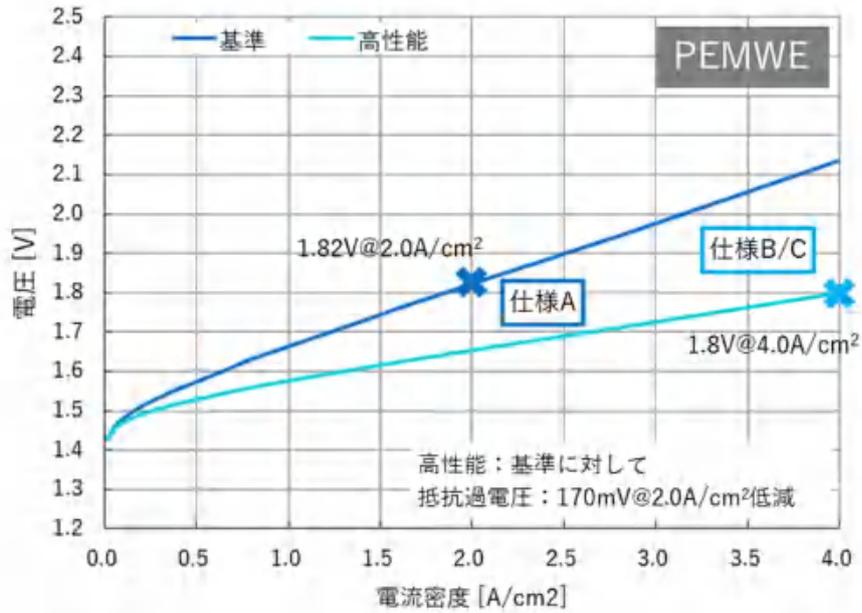
关于电解槽，以表1.5.1-1所示的条件为基准规格，研究了通过减少更换次数(长寿命化)降低更换费(O&M费)、通过高效化降低电费、通过高电流密度化(氢制造量增加)降低资本费以及O&M费。

关于电解槽性能提高带来的成本降低效果，如图1.5.3-3所示，根据PEMWE和AWE的基准条件设想了电阻过电压降低，以及电荷移动过电压降低(关于过电压降低的技术目标的详细内容参照2.1节和2.2节)。

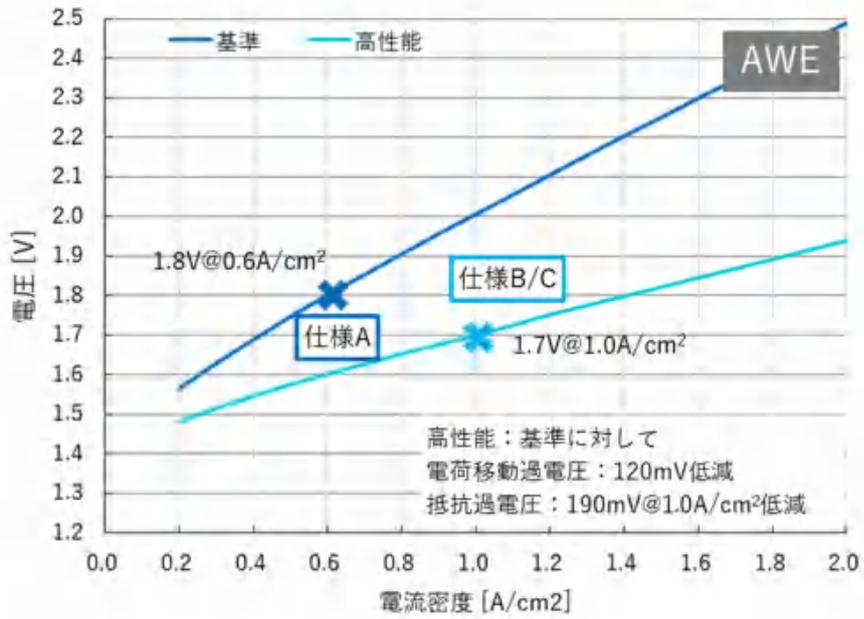
但是，以抑制电阻过电压降低(薄膜化)、交叉增加、机械强度降低、PEMWE的 $I_r$ 、 $P_t$ 的使用量降低、AWE的电荷移动过电压降低(活性提高)、启动停止、负载变动引起的劣化加速、伴随高电流密度化的电极劣化等的权衡为前提，存在加速耐久协议有必要在确立材料构件特性评价方法的基础上，通过材料单元水平的劣化现象的阐明、高度分析和DX(材质信息学、自主自动实验、模拟等)的运用，加快材料构件的研究开发。

为了降低氢制造成本，如表1.5.3-1和表1.5.3-1所示，设想了从基准规格到3规格的技术开发的进展。

- 规格a :电解槽的性能电流密度(氢制造量)相对于基准规格相同，提高了更换时间(寿命)(长寿命化)
- 规格b :相对于基准规格改善电解槽的性能，提高效率，更换时间(寿命)相同，提高电流密度(氢制造量)(高电流密度化)
- 规格c :相对于规格a改善电解槽的性能，提高电流密度(增加氢制造量)，更换时间(寿命)相同(长寿命化+高电流密度化)



( a ) PEMWE ( 电解槽运行温度: 80°C, 运行压力: 最大3 MPa )



( b ) AWE ( 电解槽运行温度: 80°C, 运行压力: 0.1 MPa ) 图 1.5.3-3 基准性能和性能提高的条件

表1.5.3-2提高水电解系统性能耐久性的前提条件( PEMWE )

参数	标准规格	规格a	规格b	规格c
系统使用年限	20年	20年	20年	20年
每年的并购成本率	系统总资本的 2%	系统总资本的 2%	系统总资本的 2%	系统总资本的 2%
更换时间(次数)	40,000 h(4次)	90,000 h(1次)	40,000 h(4次)	90,000 h(1次)
交换成本率	系统总资本的 15%	系统总资本的 15%	系统总资本的 15%	系统总资本的 15%
电解槽系统规格				
系统能量消耗量( BOL )	4.68 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.68 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.62 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.62 kWh/Nm <sup>3</sup>
系统能量消耗量(平均)	4.91 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.91 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.85 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.85 kWh/Nm <sup>3</sup>
系统容量( BOL )	1.074 MW (AC )	1.074 MW (AC )	2.123 MW (AC )	2.123 MW (AC )
辅机能量损失	5%	5%	5%	5%
整流器转换效率	98%	98%	98%	98%
电解槽容量	1 MW (DC )	1 MW (DC )	1.976 MW (DC )	1.976 MW (DC )
电解槽工作点( BOL )	1.82 V at 2.0 A/cm <sup>2</sup>	1.82 V at 2.0 A/cm <sup>2</sup>	1.8 V at 4.0 A/cm <sup>2</sup>	1.8 V at 4.0 A/cm <sup>2</sup>
电解池反应面积	1500厘米 <sup>2</sup>	1500厘米 <sup>2</sup>	1500厘米 <sup>2</sup>	1500厘米 <sup>2</sup>
电解槽的单元数	183	183	183	183
制氢量	230纳米 <sup>3</sup> /h	230纳米 <sup>3</sup> /h	459纳米 <sup>3</sup> /h	459纳米 <sup>3</sup> /h
出口氢压力	常压 (~0.8MPa左右)	最大3 MPa	最大3 MPa	最大3 MPa

表1.5.3-3提高水电解系统性能耐久性的前提条件( AWE )

参数	标准规格	规格a	规格b	规格c
系统使用年限	20年	20年	20年	20年
每年的并购成本率	系统总资本的 2%	系统总资本的 2%	系统总资本的 2%	系统总资本的 2%
更换时间(次数)	60,000 h(2次)	90,000 h(1次)	60,000 h(2次)	90,000 h(1次)
交换成本率	系统总资本的 6%	系统总资本的 6%	系统总资本的 6%	系统总资本的 6%
电解槽系统规格				
系统能耗( BOL )	4.77 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.77 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.51 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.51 kWh/Nm <sup>3</sup>
系统能耗(平均)	5.01 kWh/Nm <sup>3</sup>	5.01 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.73 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.73 kWh/Nm <sup>3</sup>
系统容量( BOL )	11.10 MW (AC )	11.10 MW (AC )	17.48 MW (AC )	17.48 MW (AC )
辅机能量损失	8%	8%	8%	8%
整流器转换效率	98%	98%	98%	98%
电解槽容量	10.01 MW (DC )	10.01 MW (DC )	15.76 MW (DC )	15.76 MW (DC )
电解槽工作点( BOL )	1.8 V at 0.6 A/cm <sup>2</sup>	1.8 V at 0.6 A/cm <sup>2</sup>	1.7 V at 1.0 A/cm <sup>2</sup>	1.7 V at 1.0 A/cm <sup>2</sup>
电解池反应面积	30000厘米 <sup>2</sup>	30000厘米 <sup>2</sup>	30000厘米 <sup>2</sup>	30000厘米 <sup>2</sup>
电解槽的单元数	309	309	309	309
制氢量	2326纳米 <sup>3</sup> /h	2326纳米 <sup>3</sup> /h	3876纳米 <sup>3</sup> /h	3876纳米 <sup>3</sup> /h
出口氢压力	常压	常压	常压	常压

### (3) 数量效应假设

总资本成本的现有值如表1.5.1-1所示，以PEMWE为40万日元/kW(1MW系统)、AWE为37万日元/kW(10MW系统)为前提，根据上游(电力)、下游(利用氢)和水电解的关系的掌握

关于现在的水电解系统的年产规模，此次，由于将水电解系统的总资本成本的当前值作为欧洲的European Hydrogen Observatory的最新信息进行了参考，因此该机构公布的欧洲制造商在2023年的引进实绩(约65MW)<sup>47</sup>与此相对，设想5~6家公司引进，假设水电解系统的年产规模为10MW/年/公司。在此前提下，假设将来的年产规模为100倍(1GW/年/公司)，根据IRENA的报告假设水电解系统的熟练率(Learning Ratio)为9%，根据数量效果预计成本将降低约47%

另外，为了应对2040年左右水电解系统的进一步正式普及，关于电解槽，设想通过开发用于实现制造工序高吞吐量化的工艺技术来提高熟练度，以进一步降低成本为目标。但是，由于电解槽在总资本成本整体中所占的比例很小，最终实现安装成本和间接费用等的降低、在明确系统标准规格的基础上通过批量生产实现成本的降低是很重要的。

### (4) 降低制氢成本的估算结果

基于上述(1)~(3)的前提条件，根据当前值通过成本降低措施(①~⑦)以实现氢制造成本18日元/Nm<sup>3</sup>为目标时，PEMWE和AWE的氢制造成本及电费、资本费、O&M费和交换费(PEMWE和AWE的交换费)另外，表1.5.3-整理成了4。

①在现有水电解系统总资本成本的前提下，通过系统动态调配基本稳定运行时(①-B系统(电价7日元/kWh，设备利用率99%))，制氢成本中电价最高，但制氢成本最低。再利用的筹措(①-C再利用(电力价格2日元/kWh，设备利用率26.5%))中电费便宜，但由于设备利用率低，资本费和并购费反弹，制氢成本最高。部分通过采购来自系统的电力，提高设备利用率(①-D再生能源+系统(电力价格2.5日元/kWh，设备利用率40%))来控制氢气制造成本。为了经由系统将再生能源用于水电解，

正如“1.4.1的①投入电力”中说明的那样，重要的是理解再生能源系统和水电解的关系，通过重新审视该关系，将现行系统的电价体系和运用体系转移到实现碳中和的机制中。

②为了降低制氢成本，要求降低资本成本。相对于上述4种输入电力，在通过数量效应实现电解槽和附带设备的成本降低的情况下，在再生能源的采购(②-C再生能源(电价2日元/kWh，设备利用率26.5%))中制氢成本最高，但在系统的动态采购(②-A系统及②-C再生能源)中

---

<sup>47</sup>European Hydrogen Observatory, “the European hydrogen landscape”, November (2024)

在d的电力采购(②-D再能源+系统(电力价格2.5日元/kWh, 设备利用率40%))中制氢成本最低。

以后是包括启动·停止·负荷变动在内的再能源+系统混合动力的电力采购(②-D再能源+系统(电力价格2.5日元/kWh, 设备利用率40%))作为投入电力的情况, 启动停止或负荷变化 为了应对动态, 在进行电解槽和附属设备耐久性相关技术实证和运转控制技术开发的基础上, 以确立技术规格为前提, 讨论了以下③~⑦。

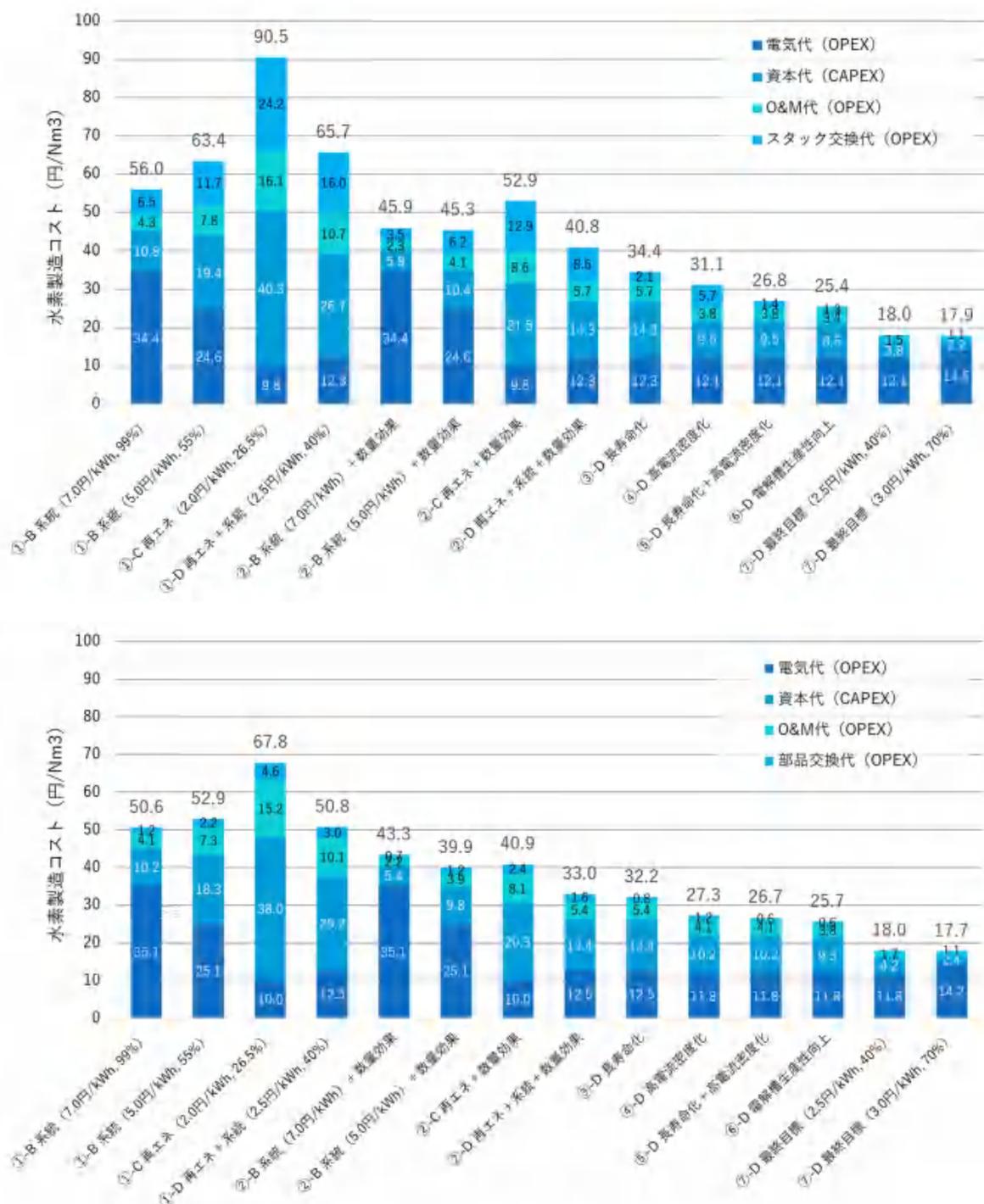
- ③实现水电解系统长寿命化(③-D长寿命化, 水电解系统“规格a”)。通过长寿命化导致的电解槽(PEMWE)或电解槽部件(AWE)的更换次数的减少, O&M费被减少。
- ④实现电解槽高电流密度化(④-D高电流密度化、水电解系统“规格b”)。氢 由于制造量增加, 资本和并购费用降低, 但降低效果与电流密度的增加不成比例。这是因为整流器和流体设备等附属设备的负荷增大, 这些设备的成本增加(注意, 由于工作点从②-D开始变化, 电解槽的容量PEMWE从1MW增加到约1.98MW, AWE从10MW增加到约15.8MW)。
- ⑤长寿命化和高电流密度化并存(⑤-D长寿命化·高电流密度化、水电解系统规格c)。制氢成本约为27日元/Nm<sup>3</sup>下降到。这与考虑2017年氢基本战略当时和现在的能源价格差(天然气价格约为1.5倍)的情况相同。
- ⑥通过电解槽制造的高吞吐量化实现生产率的提高(⑥-D电解槽生产率的提高)。电池组组装的自动化、质量控制、制造工序数的削减很重要, 为此, 机器人工程学、自动自律系统、通过利用AI的图像数据分析等进行质量管理、通过工艺信息学等根据材料、材料、材料、制造工艺的最优化等各种工具
- ⑦最终制氢成本18日元/Nm<sup>3</sup>为了实现, 追求附属设备的低成本化, 降低安装成本和间接费用等(⑦-D最终目标(2.5日元/kWh, 40%))。关于安装成本 包括电解槽-电源装置的组合、流体设备的模块化在内, 为了将安装的复杂性抑制在最小限度内的系统规格标准化, 在明确了作为系统的标准规格的基础上, 还需要通过批量生产来实现成本的降低。

另外, 关于③~⑦, 将水电解系统的设备利用率设为40%进行估算, 如图1.5.3-5所示, 在以基于此次澳洲电力模式的图1.5.3-2(b)的电力价格和设备利用率的条件为前提的情况下, 电力价格为2.5日元/kWh 另一方面, IEA的硬盘产品项目数据库<sup>48</sup>据介绍, 在水电解水氢制造项目中将系统作为投入电力使用的情况下, 平均设备利用率为57%, 在再能源和系统的混合动力中为70%。

---

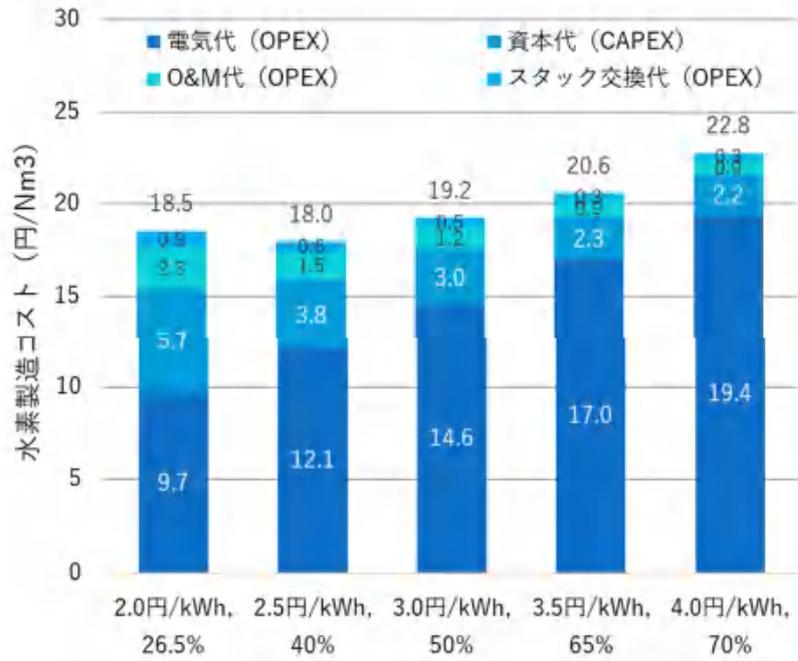
<sup>48</sup><https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-project>

考虑到上游侧的再利用系统、用于使水电解制造的氢的利用需求最大化的下游侧的系统(这次是作为海外进口氢的液化装置等)的设备回收, 希望以尽可能高的设备利用率运转。 如图1.5.3-4所示(㉞-D最终目标(3.0日元/kWh, 70%)), 在设备利用率70%的条件下, 电价降至3.0日元/kWh时制氢成本18日元/Nm<sup>3</sup>知道满足。 为了积极活用通过系统的再利用的系统 and 一体化的制度设计、再利用技术的继续开发和成本的降低对于水电解系统的普及是重要的。

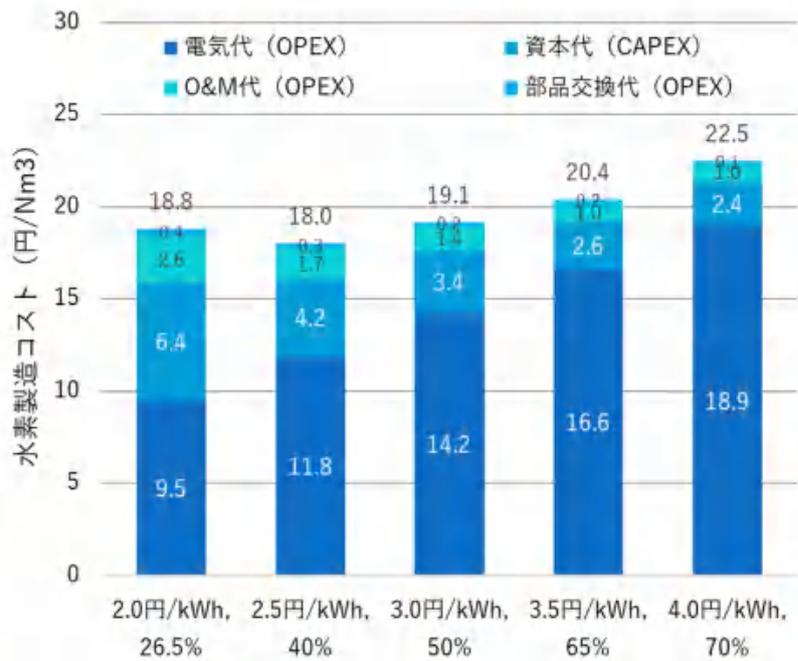


(b) AWE

图1.5.3-4制氢成本细目(电费、资本费、并购费、置换费)变化



( a ) PEMWE (总资本成本5.7万日元/kW )



( b ) AWE (总资本成本6.6万日元/kW )

图1.5.3-5 ⑦-D最终目标制氢成本与电价设备利用率的关系  
(水电解系统规格见表1.5.3-2和表1.5.3-3的“规格c”)

表1.5.3-4制氢成本降低策略与技术发展挑战

成本降低因子 (水电解系统规格)	电力价格 设备利用率	总资本 成本	成本降低效果	主要技术开发课题
①接通功率模式 (基准规格)	<p>【系统动态采购】</p> <p>7日元/ kwh 99 %</p> <p>5日元/ kwh 55 %</p> <p>【再节能】</p> <p>2日元/ kwh 26.5 %</p> <p>【再能源+系统】</p> <p>2.5日元/ kwh 40 %</p>	<p>【PEMWE】</p> <p>40万日元/kW</p> <p>【AWE】</p> <p>37万日元/kW</p>	<p>接通电力(来自系统的</p> <p>动态采购、再节能</p> <p>再次能源系统杂交</p> <p>德)的成本结构</p> <p>是不同的</p> <p>总资本成本高</p> <p>设备利用率高</p> <p>刚才氢气的制造成本是</p> <p>很低</p>	<p>从稳定运行到启动、停止、变动</p> <p>的运行的电解槽；及</p> <p>附带设备的应对、技术规格的确立</p> <p>耐久协议的早期确立和</p> <p>耐久性验证</p> <p>运行控制的技术开发</p>
②数量效应 (基准规格)	<p>【系统动态采购】</p> <p>7日元/ kwh 99 %</p> <p>5日元/ kwh 55 %</p> <p>【再节能】</p> <p>2日元/ kwh 26.5 %</p> <p>【再能源+系统】</p> <p>2.5日元/ kwh 40 %</p>	<p>【PEMWE】</p> <p>22.0万日元/kW</p> <p>【AWE】</p> <p>20.4万日元/kW</p>	<p>电解槽和附属设备的</p> <p>数量效应资本</p> <p>代、O&amp;M代的降低</p> <p>总资本成本下降</p> <p>和电费和资本费的巴巴</p> <p>兰斯发生变化</p>	<p>电力(上游)和水电解的关系</p> <p>掌握系统的电解槽、附带</p> <p>确立设备的批量生产规格</p> <p>对生产技术设备的支援</p> <p>构建供应链</p>
③长寿化 (规格a )	<p>【再能源+系统】</p> <p>2.5日元/ kwh 40 %</p>	<p>【PEMWE】</p> <p>21.4万日元/kW</p> <p>【AWE】</p> <p>19.7万日元/kW</p>	<p>长寿命化(更换次数减少</p> <p>少)导致的O&amp;M代低</p> <p>减分</p>	<p>伴随起动、停止、负荷变动的</p> <p>运用</p> <p>电解槽材料部件的长度</p> <p>寿命化(膜的机械化学劣化</p> <p>化、抑制电极劣化)的技术开发</p> <p>出发</p> <p>加速耐久评价、高级分析技术</p> <p>等阐明劣化机理</p> <p>抗变动性的附属设备</p> <p>的技术开发</p>
④高电流密度化 (规格b )	<p>【再能源+系统】</p> <p>2.5日元/ kwh 40 %</p>	<p>【PEMWE】</p> <p>14.3万日元/kW</p> <p>【AWE】</p> <p>15.8万日元/kW</p>	<p>高电流密度化(氢制</p> <p>制造量的增加)带来的</p> <p>资金</p> <p>降低成本、并购成本</p>	<p>电解槽电阻电荷转移过电压</p> <p>压力的降低和起动、停止、负荷</p> <p>变化</p> <p>由动态引起的膜电极劣化、交叉</p> <p>过抑制材料构件的</p> <p>技术开发(权衡的课题</p> <p>更大)</p> <p>劣化反应物转运机制的</p> <p>综合阐明</p> <p>伴随着对附属设备负荷增加</p> <p>应对</p>
⑤长寿命化、高强度 流密度化 (规格c )	<p>【再能源+系统】</p> <p>2.5日元/ kwh 40 %</p>	<p>【PEMWE】</p> <p>14.3万日元/kW</p> <p>【AWE】</p> <p>15.8万日元</p>	<p>长寿命化和高电流密度</p> <p>兼顾制度化的资本</p> <p>代、O&amp;M代的更低</p> <p>减分</p>	<p>以③和④的技术开发为前提</p> <p>投入电力、电解槽的性能</p> <p>耐久性、电解槽和附属设备等</p> <p>抑制各种权衡的技巧</p>

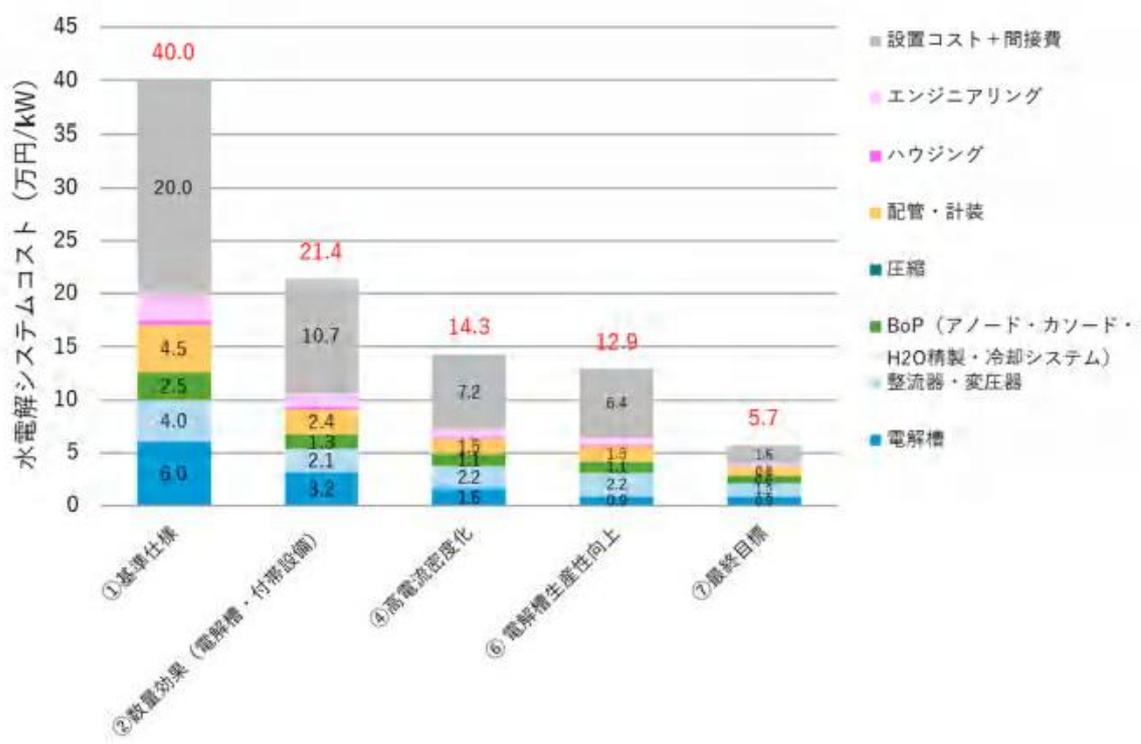
表1.5.3-4中水电解系统总资本成本演变如图1.5.3-6所示。最终的总资本成本估算为PEM we 5.7万日元/kW, awe 6.6万日元/kW。作为参考,这个值与DOE的Hydrogen Shot的2026年中期目标总资本成本385美元/kW是同等的水平。

- 关于根据基准规格通过数量效果降低制氢成本(成本降低因子②),假设电解槽及附属设备的未设置成本的降低率为当前比47%,包括设置成本及间接费用在内的总资本成本仍为未设置成本的2倍(图1.5.3-5的\②数量效果\
- 关于长寿化带来的氢制造成本的降低(成本降低因子③),决定维持电解槽及附带设备的成本,以达到应对起停·停止·负荷变动(假设材料部件的技术进展带来的成本不变)。
- 关于高电流密度化带来氢制造成本的降低(成本降低因子④),电解槽的成本与电流密度成比例地降低,但关于附带设备,电源装置相对于电流密度按1.0次幂律、流体设备的塔槽类、压缩机等(阳极h<sub>2</sub>O精制及冷却系统的BOP)为0.7次幂律,配管和仪表为0.3次幂律<sup>49</sup>中假设了成本增加<sup>50</sup>(图1.5.3-5的“④高电流密度化”)。
- 关于电解槽制造的高吞吐量化带来的生产率提高(成本降低因素⑥),假设电解槽的成本比现在减少70%(参照图1.5.3-5的\⑥电解槽生产率提高\ )。西斯 由于电解槽成本对蒂姆整体成本的比例很小,总资本成本的降低幅度是有限的。
- 制氢成本目标18日元/Nm<sup>3</sup>除了降低附属设备的成本之外,还将安装成本及间接费用设定为未安装成本的100%至40%<sup>51</sup>降低到(参考图1.5.3-5的“⑦降低附属设备设置成本等”)。
- 由于以电源装置为中心的附属设备的成本相对于电解槽成本的比例较大,因此特别是以电源装置的低成本化为代表,追求进一步降低成本的可能性,根据氢利用情况需要在伴随水电解系统的规模扩大的情况下实现流体设备的通用化、模块化带来的成本降低、氢利用方式

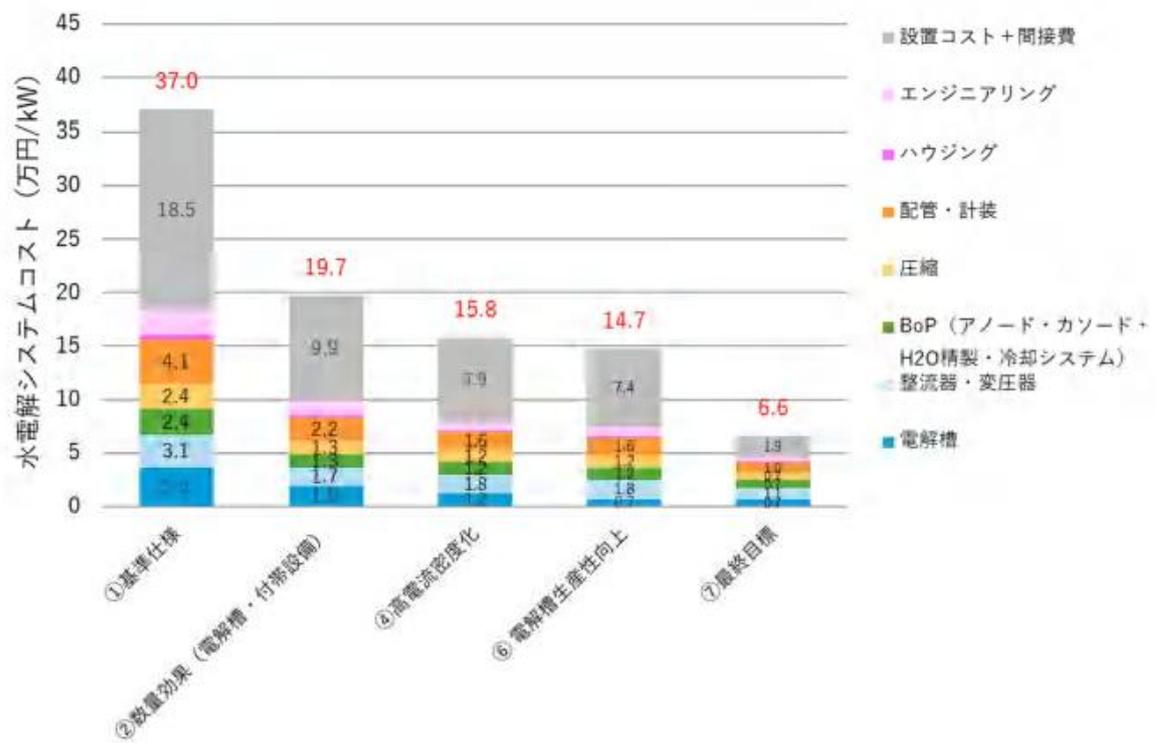
<sup>49</sup>Mark Ruth, Ahmad Mayyas, and Maggie Mann, “manufacturing competitiveness analysis for PEM and alkaline water electrolysis systems” 信息

<sup>50</sup>换算为每千瓦时,电流密度为2倍时,电源装置为1倍,BOP约为0.81倍,配管和仪表约为1倍成为0.62倍

<sup>51</sup>在DOE, “hydrogen shot:water electrolysis technology assessment”, September 2024中,最终目标是未设置成本150美元/kW,总资本成本210美元/kW(未设置)



( a ) PEMWE



( b ) AWE

图1. 5. 3-6水电解系统总资本成本变化

#### 1.5.4 关于水电解系统技术目标的总结

通过太阳能和部分系统的电力采购，电力价格2.5日元/kWh，设备利用率40%或电力价格3日元/kWh、设备利用率70%的情况下，氢气制造成本18日元为/Nm<sup>3</sup>达到要求的水电解系统技术目标汇总见表1.5.4-1。

作为水电解系统技术开发的前提，在假设投入电力和规模的基础上确立技术规格、为积极利用通过系统电力的再能源而与系统一体化的制度设计、再能源技术的持续开发和成本降低是重要的。另外，在需要储氢和运输的情况下，还需要在整个氢供应链中考虑降低制氢成本。

此次，以澳洲昆士兰的再能源(太阳能)及批发电力市场的电力采购为例，制定了投入电力的条件，估算了2040年左右应该达到的技术目标和总资本成本。但是，需要注意的是，根据投入电力形态、氢利用形态、以及实际制造地区的不同，各种条件也不同。

为了实现表1.5.4-1的技术目标，首先，启动停止(取决于日照条件和风况条件、对于太阳能每天1次以上、风力每年数10次~200次左右)以及伴随负荷变动的投入电力的应对很重要，有必要推进电解槽和附属设备耐久性相关的技术实证和运转控制的技术开发，确立水电解系统的技术规格。

在此基础上，为了实现水电解系统的长寿命化，要求开发相对于这样的输入电力的电解槽材料部件的长寿命化(抑制膜的机械化学劣化、电极劣化)的技术，通过对其进行支援的加速耐久评价、高度分析等来阐明劣化机理。另外，还需要开发能够承受变动运行的附属设备的机器。

另外，为了实现高电流密度化，要求降低电解槽的电阻、电荷、移动、过电压，开发抑制因启动、停止、负荷变动引起的膜电极劣化、交叉的材料、部件的技术，并综合阐明支持这些技术的劣化反应物质输送机构。同时，也必须应对负荷增加带来的附属设备。

为了降低总资本成本，在确立水电解系统批量生产规格的基础上，需要通过数量效应降低制造成本(需要根据市场规模设想合适的生产规模)、降低使用材料、部件的成本，以及降低占系统成本大部分的附属设备的成本。而且，电解槽的高吞吐量化带来的生产率提高也是关键，但对于能够通过上述长寿命化和高电流密度化应用的新材料和部件，也需要重新考虑电解槽设计，并需要调整与之相对应的制造工艺。

最终还需要降低安装成本、间接费用等，在明确系统标准规格的基础上，推进通过批量生产降低成本，但有关这些的技术开发的具体化是今后的课题。

表1.5.4-1水电解系统技术目标

(电力价格2.5日元/kWh设备利用率40%或电力价格3.0日元/kWh设备利用率70%时,氢制造成本18日元/Nm<sup>3</sup>满足的水准)

项目	PEMWE		AWE	
	当前值	2040年左右	当前值	2040年左右
系统使用年限	20年	20年	20年	20年
系统总资本成本 (成本总额)	40.0万日元/kW※1 (430百万日元)	5.7万日元/kW (122百万日元)	37.0万日元/kW※1 (4,108百万日元)	6.6万日元/kW (1,150百万日元)
每年的O&M成本率※1	系统总资本的 2%	系统总资本的 2%	系统总资本的 2%	系统总资本的 2%
更换时间(更换次数)	40,000 h (4次)※2	90,000 h (1次)※3	60,000 h (2次)※2	90,000 h (1次)※3
更换成本率※4	系统总资本的 15%	系统总资本的 15%	系统总资本的 6%	系统总资本的 6%
电解槽系统规格				
系统能量消耗量(BOL)※5	4.68 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.62 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.77 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.51 kWh/Nm <sup>3</sup>
系统能量消耗量(平均)※6	4.91 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.85 kWh/Nm <sup>3</sup>	5.01 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.73 kWh/Nm <sup>3</sup>
系统容量(BOL)	1.074 MW (AC)	2.123 MW (AC)	11.10 MW (AC)	17.48 MW (AC)
辅机能量损失※7	5%	5%	8%	8%
整流器转换效率	98%	98%	98%	98%
电解槽容量	1 MW (DC)	1.976 MW (DC)	10.01 MW (DC)	15.76 MW (DC)
电解槽工作点(BOL)	1.82 V at 2.0 A/cm <sup>2</sup>	1.8 V at 4.0 A/cm <sup>2</sup>	1.8 V at 0.6 A/cm <sup>2</sup>	1.7 V at 1.0 A/cm <sup>2</sup>
电解池反应面积	1500厘米 <sup>2</sup>	1500厘米 <sup>2</sup>	30000厘米 <sup>2</sup>	30000厘米 <sup>2</sup>
电解槽的单元数	183	183	309	309
制氢量	230纳米 <sup>3</sup> /h	459纳米 <sup>3</sup> /h	2326纳米 <sup>3</sup> /h	3876纳米 <sup>3</sup> /h
出口氢压力	常压 (~0.8MPa左右)	最大3 MPa	常压 后级压缩(3 MPa)	常压 后级压缩(3 MPa)

※1:European hydrogen observatory 2024 (<https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/prods>)

※2:Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems” 假设E(4.5-8年)、AWE(6.8-9.1年)最低值,但注意是额定运行前提的耐久时间,在本路线图中,从电解槽的BOL到电压上升10%的更换时间(PEMWE为堆栈,AWE为部件(电极、隔膜等))

※3 :最多启动、停止(1次/天)左右,以包含负荷变动的运行为前提

※4:Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems”

※5 :考虑了辅机能量损失及整流器转换效率的值

※6 :假设到堆栈或部件的更换时期为止平均以BOL的105%电压运行(2040年左右停止启动)以包含1天/次左右负荷变动的运行为前提,要求平均在BOL的105%电压下运行)

※8:Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water

## 2. 技术开发课题

作为水电解装置降低制氢成本的共同技术发展方向，重要的是应对波动的输入电力，例如从系统动态采购、从可再生能源采购以及它们的组合。在此基础上，通过提高电解槽和系统的效率来降低电费、提高设备利用率、提高电流密度、减少贵金属和稀有金属的使用量、通过降低附属设备成本来降低资本成本、优化整个系统、降低安装成本（例如集装箱化和一包化）。在明确作为系统的标准规格的基础上，也有必要通过批量生产来降低成本。

此外，在系统的标准化和批量生产中，燃料电池技术和水电解技术的系统结构相似的共性往往受到关注，但作为氢利用侧的小型批量生产设备的燃料电池系统和作为基础设施侧的大型设备的水电解系统所需的系统灵活性和耐久性等基本规格不同。重要的是，不仅要考虑作为要素技术的相似性，还要考虑作为整体系统的差异性。

本章将在降低制氢成本的情景下，为未来电解槽的电池堆和组件设定新的碱性水电解和质子交换膜水电解的技术目标。2.1节重点关注电池堆、组成材料和构件的技术开发问题。在~2.4节中重新整理了电解类别。

另外，对于降低成本很重要的附带设备和系统控制技术也将在2.5节中进行说明，但由于这次没有进行充分的讨论，因此作为今后的课题，再次刊登2022年3月公布的技术开发课题的内容。

如下所述，为了提高电解槽的性能，存在各种权衡关系。了解这些权衡，并报告实际操作中假设的启动和停止、负载波动、高电流密度操作以及从整流器施加到电解槽的电源中包含的纹波可能会影响电解槽劣化。<sup>52</sup>也有必要开发一种在利用廉价电源的同时，满足电解槽所需的耐久性，且对系统也不产生影响的电解系统技术。

另外，为了加速电解槽的材料、部件开发，构筑在评价耐久性和柔软性时能够在短时间内再现实际运转时进行的劣化现象的评价协议很重要，产业界对学术院的期待也很高。关于这些课题，作为各电解种共通的内容，有评价分析的作为“技术开发课题”进行了整理。

在表2-1和表2-2中整理了代表性的电解种4类型的特征和课题。关于AWE和PEMWE，一般认为技术成熟度较高，但如第1章所说明的那样，为了降低氢制造成本，要求确立基于系统再能源的电力供应、根据氢的利用形态所要求的技术规格，以及着眼于消除各种各样的权衡的技术开发

---

<sup>52</sup>Parache, François, et al. \ impact of power converter current ripple on the degradation of PEM electrolyzer performances. \ membranes 12 .

另一方面，AEMWE缓和了PEMWE和AWE的电解槽的课题，作为低成本的电解技术的可能性备受瞩目，但需要阴离子交换膜的离子导电性和耐久性提高、无贵金属的材料开发等进一步的技术进展，关于SOEC，与常温电解相比效率大且优异，特别是在可以期待排热利用的工艺中利用更有力，但与AWE和PEMWE相比，在耐久性和负荷跟踪性等方面还有改善的余地等，从技术成熟度的角度出发，设想了在要素技术开发方面需要提前期。

以下，关于AWE和PEMWE，说明了技术目标的设定和面向其实现的技术开发课题，关于AEMWE和SOEC，以整理技术开发课题为中心进行说明。

表2-1电解类别的水电解特征(awepemwe)

	碱性水电解 ( AWE )	质子交换膜水电解 ( PEMWE )
概念图		
TRL	商业化阶段	商业化阶段
特征	<p>技术方面最成熟，除了大输出装置的引进实绩丰富外，设备成本也比其他装置经济</p> <p>由于包括外围设备在内装置有变大的倾向，所以设想在技术上适合集中型氢制造</p>	<p>与碱型相比，负荷追随性优异，设备变得紧凑是特长</p> <p>设想适合与变动较大的再资源的连接和分散型氢制造</p> <p>要素技术部件与固体高分子型燃料电池共同点多，也设想有降低成本的潜力</p> <p>因为需要很多贵金属，所以为了普及，需要贵金属减少使用量和回收利用很重要</p>
课题	<p>由于AWE使用多孔隔膜，因此与PEMWE相比氢纯度低</p> <p>为了抑制交叉需要加厚隔膜，与PEMWE相比，电流密度低</p> <p>减少负荷时，交叉有可能增加，下限运行范围有限制</p> <p>启动停止时发生反向电流，电极劣化加剧</p> <p>装置占地面积大</p>	<p>在目前的阳极催化剂中的Ir使用量中，随着将来PEMWE的大量导入，Ir的年使用量有可能超过年供给量，因此需要压倒性地降低阳极催化剂中的Ir使用量的技术和再利用</p> <p>阴极催化剂和多孔运输少(PTL)双极板降低(BPP)的Pt使用量也很重要</p> <p>电解质目前以氟系为主流，但有可能成为PFAS限制的对象</p>

表2-2电解类别的水电解特征 ( aewwesoc )

	阴离子交换膜水电解 ( AEMWE )	固体氧化物型电解 ( SOEC )
概念图		
TRL	技术开发阶段	实证阶段
特征	<p>具有能够活用AWE和PEMWE优点的潜力</p> <p>由于是碱性环境，因此可以适用非贵金属催化剂，与PEMWE相比可以减少贵金属使用量，从这一点来看备受关注</p> <p>与PEMWE相比，向阴极的水透过量少，有可能简化系统</p> <p>据说通过降低电解液浓度可以抑制逆流问题，消除处理高浓度碱溶液的复杂性</p> <p>好处</p>	<p>特别是与常温电解相比，效率更高，在可以期待废热利用工业工艺中的利用被认为是有力的 (约10kWh/kg-H<sub>2</sub>的热度40kWh/kg-H<sub>2</sub>的耗电量)</p> <p>该技术也可以以共电解方式适用于作为e-methane、e-fuel、化学品等原料的合成气制造</p> <p>与目前的碱性PEM相比，在耐久性和负荷跟踪性方面，技术成熟度还有改善的余地</p>
课题	<p>阴离子交换膜离子传导性、化学稳定性、机械强度并存成为大的课题，特别是在高浓度碱溶液中，劣化明显加剧</p> <p>无贵金属催化材料的开发</p> <p>面向装置大型化的大面积应对技术也是方向之一 ( AWE资产的活用)</p> <p>确保纯水供给时的导电率及性能</p>	<p>由于是高温，因此根据构成物质热膨胀的关系，冷启动、负荷变动需要时间</p> <p>需要在高温、水蒸气存在的环境下运转，在确保材料耐久性和气体密封性方面存在问题</p> <p>基本上，具有与SOFC大型化的课题相同的课题 (平板型的单元面积的大面积化及起动器库克化)</p>

## 2.1 碱性水电解的目标设定及技术开发课题

### 2.1.1 概要

AWE一直以来被广泛应用于恒负荷下的电解，但为了今后在扩大引进、再能源的变动下进行活用，我们认为有必要提高耐久性和柔软性。为此，有必要弄清楚投入水电解槽的电力变动带来的劣化现象的机理。

作为具体劣化现象的例子，例如在AWE中，由于在起动停止时产生反向电流，电极的劣化加剧<sup>53</sup>除了已知之外，还有报告称电力变动可能影响电极表面的形状，导致电极性能降低<sup>54</sup>。

为了提高对变动再能源的应对能力，或者降低系统成本，克服这些劣化性能下降被认为是很重要的，但另一方面，其机理还存在不明之处。为了提高耐久性和低成本化，在阐明与以往稳定运转不同的条件下的劣化机理和开发用于评价分析各种性能的基础技术的同时，不仅要抑制现在的AWE中的高成本部件的利用量和提高电极特性，而且要开发用于实现超高活性、高耐久、低成本的创新催化剂材料和电极材料

在本节中，我们将描述为明确具体举措和达到的水平而进行的研究的内容和结果，目的是制定促进AWE上述举措的路线图。该研究是根据第1章中所述的水电解技术开发状况整理和降低制氢成本的研究设定的方案进行的。根据2022财年制定的路线图，在整理了AWE认为特别重要的问题后，我们根据公开信息和专家意见更新了具体的技术开发问题，并确定了目标值。我们考虑了应该设定的项目和具体目标值。作为讨论的结果，对于AWE，设定了关于总资本成本、能源消耗量、堆叠性能、部件更换时间、电荷转移过电压、物质转移过电压（电阻）的目标值。为了降低制氢成本，为了低成本地利用再生能源，为了应对波动电力，需要提高启动和停止耐久性，同时维持和提高零件更换时间，同时提高性能，增加电解系统的生产规模，降低系统成本，包括占系统成本大部分的配套设备，以及降低安装成本等间接成本。

在本节中，我们特别考虑了技术问题，但我们提出了一个问题，即如何应对压力电解槽，这在国外也有很多努力，但重点是与常压电解槽的不同之处，我们无法设定目标。关于加压型电解槽和低负荷时成为课题的交叉，目前还没有合适的估计模型，无法反映到具体目标设定中。此外，在变功率对耐久性和制氢成本的影响以及为提高性能而分配过电压分量的过程中，无法基于变功率剖面进行研究。此外，特别是在考虑成本时，需要详细的产品规格、成本结构、性能、操作方法和耐用性等背景数据。

---

<sup>53</sup>Divisek, J., R. Jung, and Britz. "Potential distribution and electrode stability in a bipolar electrolysis cell." *Journal of*

<sup>54</sup>刘英, 康英, et al. "Influence of power fluctuation on Ni-based electrode degradation and hydrogen evolution reaction performance in alkaline water electrolysis: The effect of renewable energy on water electrolysis." *Catalysts* 14.5 (2024): 307.

虽然很重要，但是由于数据的不足，没能对照我国的实际情况进行讨论。希望能积累包括今后的技术实证和原理的阐明在内的数据，并运用于讨论中。

## 2.1.2 目标设定(技术发展方案和目标值)

论述本路线图中AWE的技术开发课题和目标设定。在设定目标时，在1.5.1节中叙述的目标讨论的前提标准条件(表1.5.1-1)以及1.5.3节中叙述的实现目标的方案下进行了讨论。以下，整理AWE中的氢制造成本降低相关的技术课题，并说明按照方案的目标值的讨论和讨论结果。

### ①应对降低氢成本的变动电力

为了降低氢成本，必须尽可能地使用廉价的电力。1.5.3关于“降低氢制造成本的方案”中叙述的水电解的投入电力和运行方法，AWE在现行的电力系统中存在以下课题，需要开发应对其的技术。

为了降低水电解制氢成本中电费的贡献，在无法获得廉价电力的时间段，停止装置而不进行水电解，在可以获得廉价电力的时间段，如果能够尽可能提高设备利用率来制氢是最理想的（由于投入电解槽的电力是间歇性的，为了方便起见，这里称为“间歇运行”：图2.1.2-1的上图）。

在以这个廉价的时间段为中心的电力采购中，虽然存在运用上的课题，例如近年来发电成本显著下降，利用太阳能发电等变动的再能源，或者随着近年来再能源的扩大，相对于电力需求出现供给过剩的时间段（剩余电力），因此可以设想在这个时间段购买系统电力等。在任何一种情况下，所提供的电力对于水电解来说都是不稳定的。<sup>55</sup>。

在现有的AWE系统中，当设备停止时，通过歧管在电极之间产生反向电流，导致电极的腐蚀和催化剂的分离，因此从系统耐久性的角度来看，优选在不完全停止设备的情况下执行抑制反向电流的操作。在这种情况下，可以设想即使在不需要氢制造的时间段内，以最低限度的负荷维持系统为目的的运行电解槽的对应（由于不伴随完全停止，为了方便起见这里称为“连续运行”（图2.1.2-1下图））。

---

<sup>55</sup>实际上，根据特定的可变可再生能源电源的发电曲线运行水电解槽，或仅在剩余发电时提供电力，会显著降低水电解槽的设施利用率，因此即使可以抑制电费，也需要注意设施成本在制氢成本中的贡献会增加。也就是说，为了抑制和优化制氢成本，需要在确保一定程度的设备利用率（为了抑制资本成本的贡献）的同时，在该范围内确保尽可能便宜的电力（为了抑制电费）。但是，本节的宗旨是指出（不仅仅是指出抑制电费的重要性）应对投入电力的时间变动的必要性今后在水电解中也会扩大。

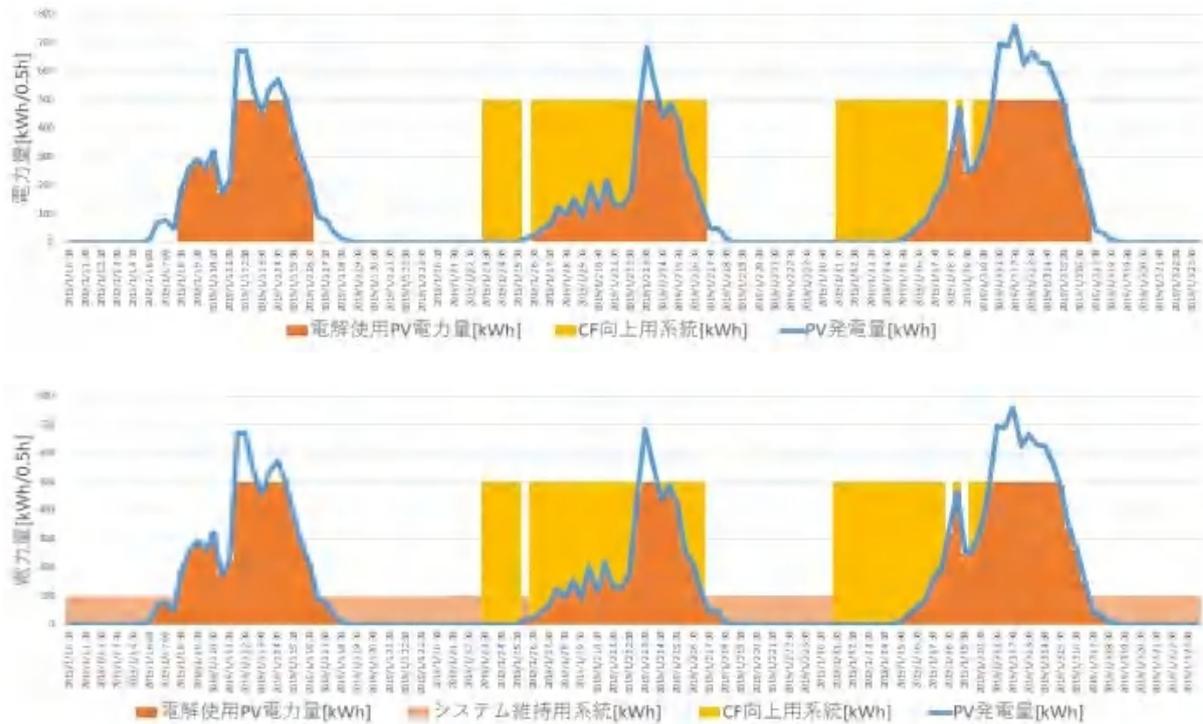


图2. 1. 2-1 AWE用电示例（上：间歇运行，下：连续运行）

在连续运转的情况下，维持系统所需的电力(下图“系统维持用系统”部分)需要长时间筹措，因此如何确保该电力便宜是重要的。AWE系统可运转的最低输出越低，越能够抑制维持系统所需的电费，因此需要降低系统的最低输出<sup>56-57</sup>。

在进行断续运行的情况下，虽然不需要维持该系统所需的电力，但由于其运行模式伴随着频繁的起动停止，因此从耐久性提高的观点出发，需要抑制这种起动停止时的电极劣化等。关于目前的AWE系统，部件的更换时间为60,000小时(1.5.3“面向降低水电解成本的方案”的表1.5.3-3的基准规格)，这是设想为不伴随启动·停止的稳定运行。因此，为了应对变动的电力，停止启动(1.5.3“在“降低水电解成本的方案”的表1.5.3-1的混合采购中，以进行约1.1次/天、约400次/年左右)为前提，需要确立用于使能够维持现有的部件更换时间的起动·停止耐久性成立的技术开发·技术实证评价方法。

另外，在进行再能量的变动吸收和调整力的提供的情况下，要求AWE系统具有优异的响应性<sup>58</sup>。为此，需要提高相对于变动引起压力变化的机械耐久性，提高附属设备的响应速度

<sup>56</sup>作为运转范围的事例，公布了以下数值。

10-100%:thyssenkrupp nucera网页<https://ThyssenKrupp-nucera.com/ja/green-hydrogen-solutions/>  
 10-100%:McPhy网页<https://McPhy.com/en/equipment-services/electrolyzers/>  
 15-100%:Nel网页<https://nelhydrogen.com/product/atmospheric-alkaline-electrolyser-a-series/>  
 25-100%:Sunfire网页<https://www.sunfire.de/en/hydrogen>  
 40-100%:John Cockerill网页<https://hydrogen.johncockerill.com/en/products/electrolyzers/>

<sup>57</sup>实际上，低负荷运行时电解槽内的气体溢出会增加，由此导致爆鸣的发生风险上升，因此需要在考虑安全性的基础上制定适当的运行范围。

<sup>58</sup>作为变化率的事例，公布了以下的数值。

虽然要求提高精度，但后者被认为是制氢系统越大型化，作为技术课题的重要性就越大。

另外，以上课题是基于现行电力系统的电价体系和运用体系，为了将来经由系统将再能源用于水电解，将现行系统的电价体系和运用体系过渡到实现碳中和的结构是很重要的。虽然设想必须开发降低最低负荷、提高启动・停止耐性、应对附带设备响应性等变动电力的技术，但与系统一体化的水电解装置的运用方法将是今后的课题。

### ②提高电解特性以降低制氢成本

作为降低氢制造成本的AWE系统的应对，需要降低影响氢制造成本的电费和邻&米费等，降低资本费。关于AWE的电解特性，通过降低过电压，每单位氢制造量的消耗电力降低，电费降低。另外，如果同一装置也能够进行提高了电流密度的运行，则有望增加氢制造量，降低资本成本的贡献。但是，这将与能源消费量的增加导致的电费的增加和为了抑制能源消费量的资本费的增加进行权衡。

以欧美为中心，加压型电解槽的开发和产品化也在进行。需要对加压具有耐久性的电解槽、附带设备，一方面期待气泡体积减少的效果，也期待后段的附带设备的简单化，另一方面，依赖于电解槽的成本增加和效率降低的关系。

因此，对于期待降低氢制造成本的效果，实际上存在各种各样的权衡，因此，需要解开这些相关性，开发解决问题的技术。

### ③技术课题的整理

将以上所述的降低氢制造成本的技术课题和相关的技术开发整理在表2.1.2-1中。关于权衡，在注释中进行了整理。

第一重要的课题是应对变动电力。列举了通过降低最低负荷来扩大运行范围、启动・停止耐久性、包括附带设备在内的变动响应性等技术课题。电解槽的性能提高也有助于氢制造成本的降低，但如后述的图2.1.2-4所示，通过高效化(过电压降低)来降低电费(过电压减少0.1V，约为▲0.7日元/Nm<sup>3</sup>)通过高电流密度化降低资本费用(在电解电压1.7V、总资本成本19.7万日元/kW的条件下电流密度为0.6A/cm<sup>2</sup>至1.0A/cm<sup>2</sup>的增加约▲4.8日元/Nm<sup>3</sup>)的效果很好，在提高电解槽性能的课题中，高电流密度化的重要性很高。

---

±500kW/s (最大输出比5%/s) : “东芝能源系统株式会社、东北电力株式会社、东北电力网络株式会社、岩谷产业株式会社、旭化成株式会社、氢社会构筑技术开发事业/氢能系统技术开发/再利用氢系统的事业模式构筑  
最大输出比> 10%/min:Ne1网页<https://nel-hydrogen.com/product/atmospheric-alkaline-electrolyser-a-series/>

表2. 1. 2-1降低制氢成本的技术挑战

技术课题项目		降低氢制造成本所期待的效果	技术开发等	连续运转 ※※	断续运转 ※※
应对变动 电力	扩大运行范围 <sup>56</sup> (最低负荷降低)	· 通过系统维持最低负荷的连续运行降低电费 · 通过提高断续运行中的开工率、降低启动、停止次数实现长寿命化	· 降低低负荷运行时的交叉 ※1※2	◎	○
	起动停止耐久性	· 通过再生能源系统使用廉价电力来降低电费	· 通电停止时的逆电流引起的电极催化剂劣化对策※3	—	◎
	变动响应性 <sup>58</sup>	· 应对变动的再生能源，提高作为系统调整力的附加价值	· 针对变动的电极隔膜老化对策※4※5 · 提高辅机的响应性，缓和变动影响※6	○	○
性能提高	过电压降低	· 通过提高效率降低电费	· 电荷移动过电压物质移动过电压的降低※2※7※8	○	○
	高电流密度化	· 通过增加氢制造量降低资本费用的贡献	· 高电流密度化引起的电极隔膜老化对策※9	◎	◎
	加压型电解槽	· 通过气泡体积的减小降低物质移动过电压 · 通过简化后段的附属设备(压缩、精制)来降低资本费及提高系统效率的可能性(但是，依赖于电解槽的成本增加和效率降低)	· 提高部件的机械强度和耐久性※4※10 · 提高部件的化学耐久性※11 · 支持对加压的密封※10 · 减少因气体溶存量增加引起的交叉※1※2 · 支持辅机加压※12	○	○

※※为了降低各运转中的氢制造成本的技术开发的重要度:◎最重要、○重要

【设想的权衡】

※1为了减少跨界而使用昂贵的隔膜是资本费用增加的主要原因，增加电解液的流量是O&M费用增加的主要原因

※2隔膜的气体分离性能和离子透过阻力有相关倾向，物质移动过电压降低可能与交叉增加相关，交叉降低可能与物质移动过电压增加相关

※3在阴极室设置牺牲阳极是资本费增加的主要原因，如果使用保护电流则是电费增加的主要原因，为了确保耐久性而使用高价催化剂时是资本费增加的主要原因

※4为了提高隔膜的机械强度，进行隔膜的致密化、压膜化等时，会导致物质移动、过电压增加，电费增加

※5为了使其具有对变动引起的振动的耐性，采用提高了机械强度的结构是资本费用增加的主要原因

※6提高变动响应速度，通过缓和辅机的变动的影响等进行特别的对策的话，资本费会增加

※7为了降低过电压而使用昂贵的电极隔膜，如果需要对电极单元结构采取特别的对策，则资本费增加的主要原因

※8催化剂活性和耐久性有相反的倾向，使用电荷移动过电压低的高活性催化剂时，耐久性有可能降低

※9为了应对老化而使用高价的电极隔膜等是资本费用增加的主要原因

※10采用提高机械强度等耐高压的结构有可能增加资本成本(取决于与性能的平衡)

※11如果需要提高化学耐久性的特殊部件，就会成为资本费用增加的主要原因

※12应对加压时辅机类的能量损失增加是电费增加的主要原因

#### ④提高耐久性、提高性能的探讨

为了降低氢制造成本，为了提高耐久性和高性能化(1.5.3节)，根据前项的课题整理，作为技术开发的方向性，针对运行AWE的IV特性的范围，设定了下表2.1.2-2、图2.1.2-2所示的情况。

表2.1.2-2提高耐久性和高性能化的技术开发方向

方向性	电流密度	说明	主要技术课题
过电压降低	0.6A/cm <sup>2</sup>	降低过电压，提高效率 包括只降低电荷移动过电压情况和降低电荷移动过电压、物质移动过电压双方的情况	降低电荷移动过电压(提高催化剂活性) 高活性和耐久性催化剂的开发 物质移动阻力降低(隔膜、电极结构) 通过提高隔膜阻气性等同时降低交叉和降低物质移动阻力
高电流密度化	1.0A/cm <sup>2</sup>	通过高电流密度化降低资本成本的贡献 降低电荷移动过电压物质移动过电压双方	提高电极隔膜对高电流密度的耐久性 降低电荷移动过电压(提高催化剂活性) 物质移动阻力降低(隔膜、电极结构) 通过提高隔膜阻气性等同时降低交叉和降低物质移动阻力 气体产生量的增加对物质移动阻力的抑制增加

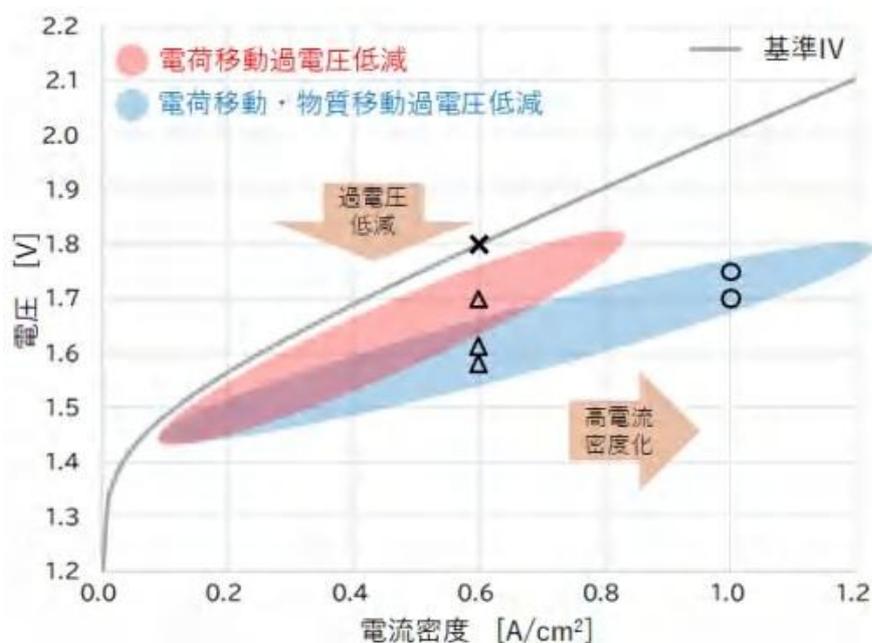


图2.1.2-2目标值讨论的讨论案例和技术课题

这些情况下，为了应对变动电力，实现了最低负荷降低，且相对于作为基准的现状的系统的动作点(图2.1.2-2 X标记)，通过过电压降低(△标记)实现了高效率化和部件单元的长寿命化，进而实现了高电流密度化(○标记)但是，还需要通过实施降低过电压的方案和针对高电流密度化导致的劣化的对策，从而不增加成本的方案。

为了实现AWE系统高性能化的具体讨论，关于IV曲线，使用了基于大量实验数据制作的模型公式<sup>59</sup>以此为基础，在工作压力0.1MPa、温度80℃、电解液KOH浓度6M的条件下确定了电解性能、电荷移动过电压、物质移动过电压(电阻)。

设定的电解性能过电压及iv曲线如表2.1.2-3、图2.1.2-3所示。对于作为基准的IV曲线，设定了提高性能的曲线(性能1~3)。性能1为相对于基准降低了电荷移动过电压，性能2为降低了电荷移动过电压和物质移动过电压两者

有，性能3将其定位为更进一步的东西(参照图2.1.2-2)。

表2.1.2-3的电荷移动过电压和物质移动过电压的设定，从基准过电压开始，首先确定电荷移动过电压的降低幅度，然后设定了达到目标性能电压的物质移动过电压(电阻)。关于电荷移动过电压的降低幅度，根据模型公式<sup>59</sup>及关于碱水电解中催化剂的综述<sup>60</sup>基于进行了设定。关于物质移动阻力的降低幅度，是关于碱性水电解中欧姆阻力的综述<sup>61</sup>基于进行了设定。

**表2.1.2-3目标方案电解性能过电压的设定**

项目	标准 <sup>62</sup>	性能1	性能2	性能3
性能	1.8V@0.6 A/cm <sup>2</sup> 2.0V@1.0 A/cm <sup>2</sup>	1.70V@0.6 A/cm <sup>2</sup> —	— 1.75V@1.0 A/cm <sup>2</sup>	— 1.7V@1.0 A/cm <sup>2</sup>
电荷移动过电压 <sup>63</sup>	0.36V@0.6 A/cm <sup>2</sup> 0.39V@1.0 A/cm <sup>2</sup>	0.26V@0.6 A/cm <sup>2</sup> — 相对现状比 ▲0.1V@0.6 A/cm <sup>2</sup>	— 0.29V@1.0 A/cm <sup>2</sup> 相对现状比 ▲0.1V@1.0 A/cm <sup>2</sup>	— 0.27V@1.0 A/cm <sup>2</sup> 相对现状比 ▲0.12V@1.0 A/cm <sup>2</sup>
物质移动过电压	0.27V@0.6 A/cm <sup>2</sup> 0.45V@1.0 A/cm <sup>2</sup>	0.27V@0.6 A/cm <sup>2</sup> 0.45V@1.0 A/cm <sup>2</sup> 相对现状比 (无变更)	— 0.29V@1.0 A/cm <sup>2</sup> 相对现状比 ▲0.16V@1.0 A/cm <sup>2</sup>	— 0.26V@1.0 A/cm <sup>2</sup> 相对现状比 ▲0.19V@1.0 A/cm <sup>2</sup>
物质移动阻力 <sup>64</sup>	0.45 Ω cm <sup>2</sup>	0.45 Ω cm <sup>2</sup> 相对现状比 (无变更)	0.29 Ω cm <sup>2</sup> 相对现状比 ▲0.16 ω 厘米 <sup>2</sup>	0.26 Ω cm <sup>2</sup> 相对现状比 ▲0.19 ω 厘米 <sup>2</sup>

<sup>59</sup>Matheus T. de Groot, Joost Kraakman, Rodrigo Lira Garcia Barros, optimal operating parameters for advanced alkaline water electrolysis 国际劳工能源, Volume 47, issue 82, 2022。

<sup>60</sup>Hoang, Anh Linh, et al. \ high-performing catalysts for energy-efficient commercial alkaline water electrolysis. \ 可持续能源 & fuels 7.1 (2023 ):31-60。

<sup>61</sup>de Groot, Matheus T., and Albert us w.vre man. \ oh mic resistance in zero gap alkaline electrolysis with a zir fon diaphragm. \ 电子公司 369 (2021 ):137684。

<sup>62</sup>基于脚注59文献模型，在工作压力0.1MPa、温度80℃、电解液KOH浓度6M的条件下，可逆电位为1.169V、电流密度0.6A/cm<sup>2</sup>(1.0A/cm<sup>2</sup>)下的电荷移动过电压计算为0.362V(0.388V)。以\单元电压=电荷移动过电压+物质移动过电压\方式设定物质移动过电压和物质移动电阻0.448 Ω cm<sup>2</sup>计算出。

<sup>63</sup>在性能1、性能2、性能3中，电荷移动过电压削减幅度分别为0.10V@0.6 A/cm<sup>2</sup>、0.10V@1.0 A/cm<sup>2</sup>、0.12V@1.0 A/cm<sup>2</sup>中选择所需的族。此时，根据脚注59文献的模型，Tafel梯度(阳极+阴极)分别计算为85mV/decade、87mV/decade、81mV/decade。脚注60的HER催化剂OER催化剂中存在低于它们的组合，因此，假设至少能够使交换电流密度相等，则电荷移动过电压的削减幅度为适当的水平。

<sup>64</sup>脚注61中关于零间隙结构碱性水电解下欧姆电阻的综述刊登了与目标值同等水平的实验数据。但是，这些实验中的单元面积为本研究中设想的单元面积30,000 cm<sup>2</sup>的规模为1/1000~1/100，需要在大规模的单元中达成这个目标值。

关于图2.1.2-3的IV曲线，表示相对于性能1~3，成为从高效的能量利用的观点出发求出的LHV（电压效率）70%的大致标准的电压1.8V以下的电流密度的水平。

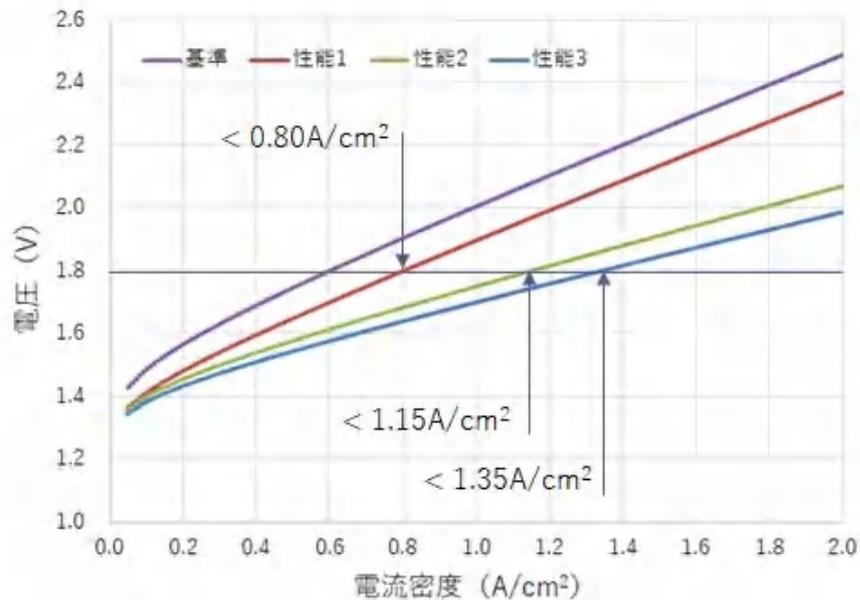


图2.1.2-3目标方案电解性能设定和iv曲线

基于这些性能设定，以下，为了降低氢制造成本，应对变动电力(通过再能源和系统的混合动力使电力价格达到2.5日元/kWh设备利用率40%的投入电力)、数量效果(削减系统成本47%)、长寿命化(部件更换90、部件更换

作为起点的系统是具有现在的基准性能的AWE系统(11.1MW，堆栈性能1.8V@0.6A/cm²总资本成本19.7万日元/kW)。针对该系统提高了性能(性能1根据~3)，设想在表2.1.2-4的动作点运转，考虑因过电压降低导致的用电量的削减、伴随高电流密度化的氢制造量的增加和附属设备的成本上升，计算出氢制造成本的结果如图2.1.2-4所示。

表2.1.2-4通过提高标准和性能达到的工作点(△○对应图2.1.2-2)

工作点	电流密度	电压
×	0.6A/cm²	标准1.80V
△	0.6A/cm²	性能1 1.70V 性能2 1.61V 性能3 1.58V
○	1.0A/cm²	性能2 1.75V 性能3 1.70V

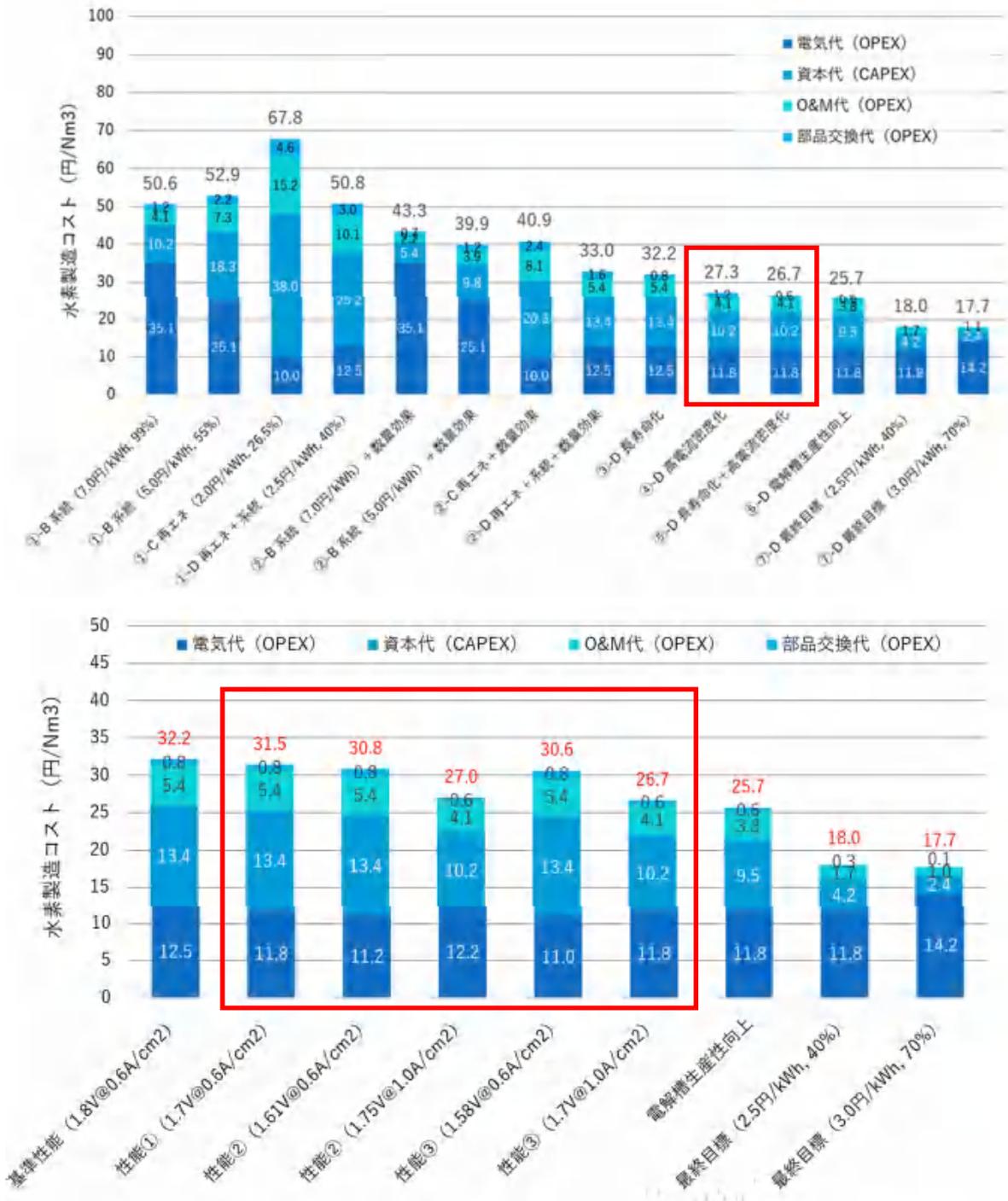


图2. 1. 2-4耐久性提高高电流密度化降低制氢成本  
 (上段复盖图1. 5. 3-4 (b) AWE, 下段讨论电力价格2. 5日元/kWh设备利用率40%、更换时间90, 000 h时的高效率化和高电流密度化双方)

本研究中为0. 6A/cm²仅通过维持降低过电压，氢制造成本为0. 7~1. 6日元/Nm³的下调，但为1. 0A/cm²根据的高电流密度化，为5日元/Nm³结果降低了程度。在这些性能动作点范围内，氢制造成本为18日元/Nm³最接近的性能3 (1. 7V@1. 0A/cm²) 设定为目标。

另外，即使在设定的性能动作点下，作为目标的氢制造成本也为18日元/Nm<sup>3</sup>为此，除了电解槽制造的高吞吐量化带来的生产率提高以外，还需要降低附带设备、安装成本和间接费用等，在明确了作为系统的标准规格的基础上，通过批量生产降低成本。在此过程中，降低水电解系统总资本成本对应于图2.1.2-5所示②→④→⑥→⑦。

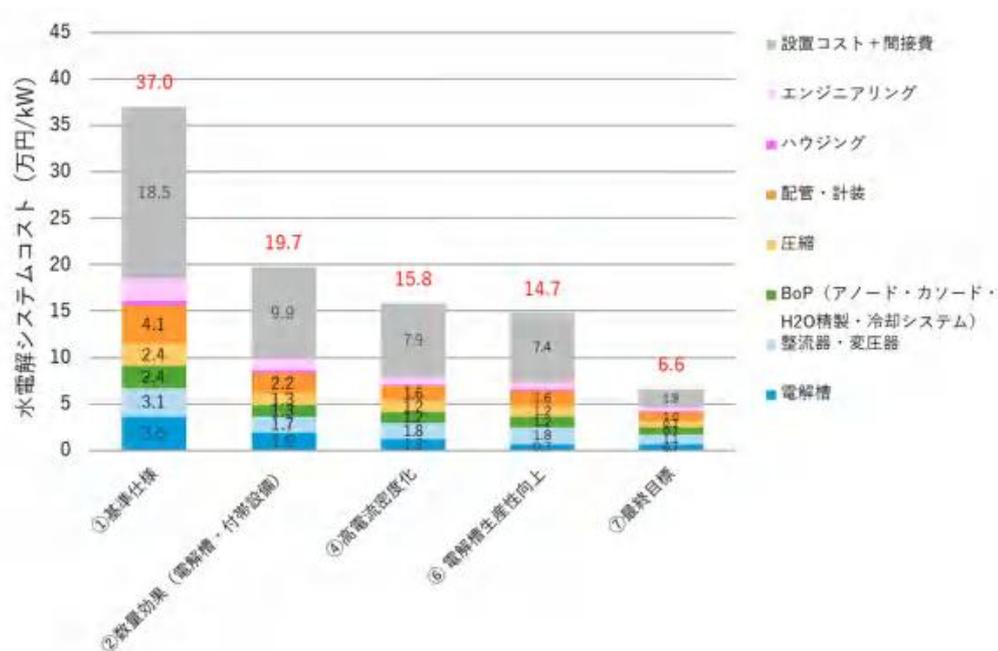


图2.1.2-5水电解系统总资本成本的变化(图1.5.3-6 (b) AWE复牌)

### ⑤ 目标设定

以1.5节中研究的技术目标(表1.5.4-1)和本节中工作点过电压的研究为基础，进行了目标方案的合理性，设定了awe 2040年左右的的目标值。设定的目标值如表2.1.2-5所示。

**表2.1.2-5 AWE系统的技术目标值**  
 (电力价格2.5日元/kWh设备利用率40%或电力价格3.0日元/kWh设备利用率70%时, 氢制造成本18日元/Nm<sup>3</sup>满足的水准)

	项目	当前值	2040年目标值
系统	系统使用年限	20年	20年
	系统总资本成本※1	37.0万日元/kW※2 (4,108百万日元)	6.6万日元/kW (1,150百万日元)
	每年的O&M成本率※2	系统总资本的2%	系统总资本的2%
	零件更换时间(更换次数)※3	60,000 h (2次)※4	90,000 h (1次)※5
	更换成本率※6	系统总资本的6%	系统总资本的6%
	能耗(BOL)※7	4.77kWh/Nm <sup>3</sup>	4.51kWh/Nm <sup>3</sup>
	能耗(平均)※8	5.01 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.73 kWh/Nm <sup>3</sup>
	系统容量(BOL)	11.10 MW (AC)	17.48 MW (AC)
	辅机能量损失※9	8%	8%
	整流器转换效率	98%	98%
	制氢量	2326纳米 <sup>3</sup> /h	3876纳米 <sup>3</sup> /h
	出口氢压力	常压后级压缩(3 MPa)	常压后级压缩(3 MPa)
电解槽	电解槽容量	10.01 MW (DC)	15.76 MW (DC)
	电解槽工作点(BOL)※10	1.8V @ 0.6A/cm <sup>2</sup> (2.0V @ 1.0A/cm <sup>2</sup> )	1.70V @ 1.0A/cm <sup>2</sup>
	电解池反应面积	30000厘米 <sup>2</sup>	30000厘米 <sup>2</sup>
	电解槽的单元数	309	309
部件 ※11	电荷移动过电压	0.36V @ 0.6A/cm <sup>2</sup> (0.39V @ 1.0A/cm <sup>2</sup> )	0.27V @ 1.0A/cm <sup>2</sup> 相对现状比▲0.12V @ 1.0A/cm <sup>2</sup>
	物质移动过电压※12	0.27V @ 0.6A/cm <sup>2</sup> (0.45V @1.0A/cm <sup>2</sup> )	0.26V @ 1.0A/cm <sup>2</sup> 相对现状比▲0.19V @ 1.0A/cm <sup>2</sup>
	物质移动阻力※12	0.45 Ω cm <sup>2</sup>	0.26 Ω cm <sup>2</sup> 相对现状比▲0.19 Ω cm <sup>2</sup>

※1系统成本包括堆栈和BOP的制造成本、制造商的加价(含未设置成本)、安装成本及间接费用。

※2 European hydrogen observatory 2024 ( <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/productttid> )

※3从电解槽的电池盒到电池电压上升10%的时间。设定为部件(电极隔膜/单元)更换时间。

※4 Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems”

※5以最大启动停止(1次/日)左右、包含负荷变动的运行为前提。

※6 Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water eler

※7考虑了辅机能量损失及整流器转换效率的值。

※8假设在零件更换时期之前平均以BOL的105%电压运行(2040年左右,以停止启动1天/次左右、包含负荷变动的运行为前提,要求平均以BOL的105%电压运行)。

※9 Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water eler

※10电解槽性能的前提是工作压力0.1MPa、温度80℃、电解液KOH浓度6M。

※11温度以80℃为前提。

※12关于物质移动过电压物质移动电阻,不限于膜电阻,以电池组中作为物质移动过电压表达的成分为对象。

### 2.1.3 电池组

- 关于树脂加工、橡胶材料、密封材料的加工，必须确保在给定的规格环境下的耐久性，需要开发能够实现批量生产、规模扩大、成本鼎足的生产技术。
- 有必要支持利用两相流模拟技术的电解槽设计。 具体而言，实现电解液均匀供给、高效的气体排出的电解槽内部的流路双极板<sup>65</sup>等设计支援技术等被列为开发项目。
- 作为与电池组的结构和组装相关的课题，可以列举出降低电阻和简化结构等实现高生产率并存的电解槽、大面积、气体扩散性高、低成本的电解槽、降低零间隙结构下电极和隔膜接触应力的结构的开发。 在这样的开发中，通过模拟进行设计支援也是必要的。
- 由于海外制造商产品的AWE也具有3 MPa左右的出口氢压力， 国内和海外市场 在展望面向产品开发的情况下，有必要考虑将来的加压水电开发，进行能够耐受加压环境的高强度电池组的设计和对应加压的密封技术开发等。
- 加压型电解槽采用内部歧管方式。 作为内部集成式电解槽的共同课题，由于连接电池后无法对每个电池进行内部交叉泄漏试验，因此需要检测电池连接后各电池内部的针孔的技术。 作为电池组的逆电流对策，可以列举出外部负荷对电解槽放电行为的控制等。

文献中记载零间隙结构下的电极与隔膜的接触也对交叉泄漏产生影响<sup>66</sup>在中被报告。 文献中报道的“隔膜使用Agfa的PEAL UTP 500、UTP 220时氧中的氢浓度<sup>67</sup>”如图2.1.3-1所示。 实测的结果中记载了错误条，可以看出结果具有一定的宽度。 文献中得出结论，即使是相同的零间隙结构，阴极和隔膜之间有时也会产生微小的间隙，依赖于该间隙，隔膜附近的溶解氢的过饱和水平发生变动，交叉泄漏量的变动幅度变大。 另外，虽然在论文中通过考虑了溶解现象的交叉泄漏模型对交叉泄漏量进行了分析，但实际测量和模型中的预测结果可知(虚线)有背离。 由此推测，目前还没有建立能够准确评价零间隙结构碱性水电解交叉泄漏量的模型，还需要进一步探讨。

---

<sup>65</sup>以下有时简称为“BPP”。

<sup>66</sup>Barros, Rodrigo Lira Garcia, et al. \ impact of an electrode-diaphragm gap on diffusive hydrogen crossover in alkaline water electelectrolytion

<sup>67</sup>以下有时简称为“HTO”。

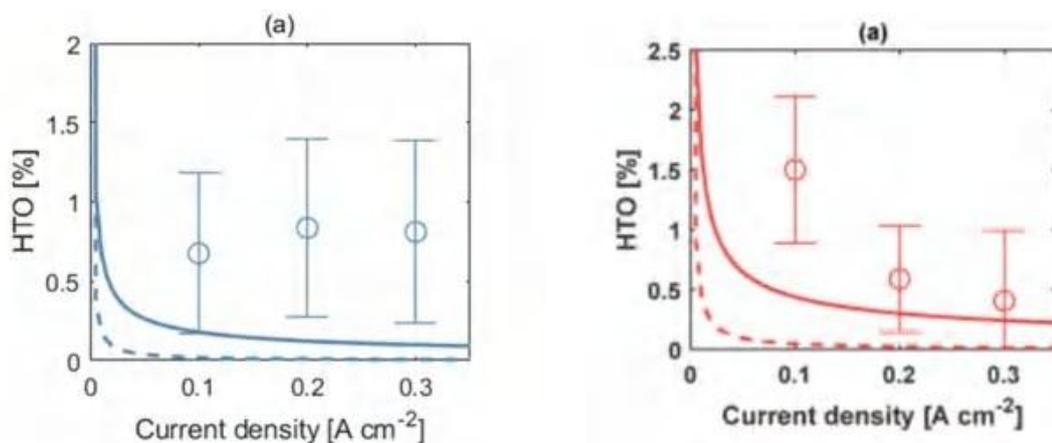


图2.1.3-1零间隙结构中的HTO（左：PEAL UTP 500，右：UTP 220）

【图例】带误差条的圆圈进行实测。实线是考虑了溶解的交叉泄漏模型中的预测结果，虚线是未考虑溶解的交叉泄漏模型中的预测结果

【运行条件】温度：25 °C、压力：1 bar、电解液浓度：12 wt%

【来源】Barros, Rodrigo Lira Garcia, et al. \ impact of an electrode-diaphragm gap on diffusive hydrogen crossover in alkaline water electrolysis. \ international journal of hournal

#### 2.1.4 隔膜

- 除了提高耐差压性等机械特性、提高耐碱性外，还需要兼顾薄膜化带来的电阻极化降低和气体分离性能。
- 需要探索上述要求性能优异的创新材料和结构。特别重要的技术有无孔隔膜。作为无孔隔膜的例子，AEMWE以往一直在进行小型装置的研究开发，但最近国外也出现了将无孔隔膜应用于AWE的企业，作为新一代的AWE形式，今后的动向备受关注。在此，作为“面向水电解技术开发路线图制定的课题整理”，在AEMWE中详细记载了无孔隔膜的开发，作为AWE的“隔膜”的技术开发课题，参照了AEMWE的记述。
- 隔膜要求耐碱性和气体分离性。过去使用过具有耐碱性的石棉，但被指出有毒性，现在不再使用。Polyphenylene sulfide作为替代材料<sup>68</sup>使用（PPS）。作为PPS的课题，列举了由于高熔点·难溶性而难以处理的点和由于疏水性而气泡容易蓄积的问题。在提高耐碱性和气体分离性的同时，需要开发能够解决这些课题的材料，追加氧化物陶瓷等其他亲水性化合物，开发出提高整体润湿性的膜。作为广泛使用的东西，Zirfon<sup>TM69</sup>这是PPS纤维增强的Polysulfone (PSU)和ZrO<sub>2</sub>成为粒子的多孔复合膜。
- 在AWE中，为了应对变动电力，扩大运行范围很重要。特别是，降低最低负荷时，阳极中氧中的氢浓度会增大。因此，最低负荷

<sup>68</sup>以下有时简称为“PPS”。

<sup>69</sup>Agfa网页<https://www.agfa.com/specialty-products/solutions/membranes/separator-membranes-for-alkaline>

为了减少，需要提高气体分离性。另外，为了实现高电流密度化，需要提高隔膜的耐久性。需要开发能够提高耐碱性、薄膜化、化学耐久性、扩大运转范围的材料。

- 加压运行时交叉会增大，因此提高隔膜的气体分离性能很重要。另外，由于堆叠时的连接压增大，隔膜的机械强度也需要提高。

创新的无孔隔膜研究开发的一个例子是通过将KOH溶液引入亲水性聚合物上发挥传导性的离子溶剂化膜。离子溶剂化膜中主要研究的是KOH doped polybenzimidazole<sup>70</sup>。PBI通过吸收KOH溶胀，形成均匀的三元(水、KOH、高分子)电解质。在电解液KOH浓度20~25 wt%时，KOH的吸收量最大，电导率也取最大值。另外，膜也可以无孔地变薄。作为课题，虽然列举了耐久性低，但通过用PTFE支撑来实现1000小时的运转(运转1000小时后电解性能为1.8 V、1.8 A/cm<sup>2</sup>)的研究事例<sup>71</sup>也存在。

### 2.1.5 电极

- 需要开发在大幅减少电极和催化剂所需贵金属使用量的同时，实现比以往大幅提高的电极活性、耐久性和杂质耐性的创新性电极材料·催化剂材料。以创新材料的探索为首，为了加速开发进程，有必要同时进行材料信息学(MI)、自主自动实验、与电极结构相关的模拟等基础技术的开发。
- 作为开发出的新材料能够发挥所希望的特性的验证，除了电极材料单体的评价外，还需要将电极组装到实机上进行启动·停止耐久性的评价。在AWE中，由于存在常压型外部歧管方式、欧洲和中国主流的圆筒型电解槽的内部歧管方式等不同的电池组方式，且设想运行时的内部状态也不同，因此需要分别确立评价方法。
- 考虑到电解槽的实际运行，不仅在特定的一个条件下，而且在具有宽度的条件下，有必要对耐启动·停止性进行评价。希望能以协议的形式确立可在宽条件下简洁实施评价的评价方法。
- 启动停止运转时的电极寿命取决于启动停止时的条件(温度等)，但各制造商的想法不同。因此，为了构筑评价协议，有必要明确启动·停止的标准。
- 关于氢脆，虽然设想3 MPa左右不会产生影响，但需要开发能够明确氢脆实际上不成问题的评价试验和材料开发相关的措施。

<sup>70</sup>以下有时简称为“PBI”。

<sup>71</sup>Trisno, Muhammad Luthfi Akbar, et al. \ reinforced gel-state polybenzimidazole hydrogen separators for alkaline water electrolysis. \

- “提高催化活性”是指利用现有电极材料提高电极活性的努力，与设想开发创新材料的“开发超高活性、高耐久性、低成本电极材料”不同。此外，“减少金属使用量”是指减少包括贵金属以外的金属的使用量。
- 在国外，作为下一代AWE的电池结构，报告了将混合催化剂的浆料涂敷在隔膜上，制成隔膜和催化剂层一体的Catalyst Coated-Diaphragm，并将其用作具有类似于PEMWE的催化剂层的阴极来实现高性能化的事例。具有类似结构的电极的开发也适用于阳极。在这样的背景下，在技术开发中，作为开发类似PEMWE的催化剂层的前一阶段，有必要探索促进气泡排出的电极和隔膜的结构。

作为碱性水电解的阳极，钙钛矿型氧化物、尖晶石型氧化物、层状金属氧化物基催化剂等的研究正在进行中。作为阴极，合金电镀等的研究正在进行中。作为创新电极，阳极的例子包括使用由烧绿石氧化物基超高性能催化剂组成的新材料的阳极。OER超高活性新型烧绿石氧化物催化剂在电解液浓度为0.1 MKOH、25℃下可达到0.1 V以下的反应起始过电压，高度分散负载该催化剂的电极材料的过电压比镍基催化剂降低200 mV以上。

<sup>72</sup>。

#### 2.1.6 配套设施

- 近年来，用作耐碱管道构件的Ni的价格不断上涨，通过减少Ni的使用量来降低管道构件的成本是一个重要的技术问题。此外，在减少管道构件中Ni的使用量之后，从管道中洗脱的金属特别使阴极中毒并导致其劣化，因此提高阴极的耐比毒性和从碱性电解液中有效地去除阴极的技术成为重要的技术问题。洗脱金属被有效去除后，“从大气中污染的CO<sub>2</sub>”<sup>2</sup>我们还需要致力于开发“从碱性电解液中去除”的技术。
- 水电解系统的成本大部分被电解槽以外的附属设备所占据，为了降低系统整体的成本，不仅是电解槽，附属设备的成本的削减也很重要<sup>73</sup>。附属设备关于(特别是整流器等)的课题，作为电解种类间的共同课题，有“2.5技术开发课题(系统控制附属设备)”中记载。

#### 2.1.7 生产技术

- 对于焊接等金属加工、电极制造、电池组的组装、检查等，有必要推进自动化，提高生产率。

<sup>72</sup>莫卧儿, masatsugu. \ kinetics of oxygen catalyst based on pyro chlore oxide nano-particles for low temperature water electrolysis. \ electro cheme ing abstracts 245.no.34.the electro chemical society, Inc ., 2024。

<sup>73</sup>Holst, Marius, et al. \ cost forecast for low-temperature electrolysis-technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis fer institute for solar energy systems ise:freiburg, Germany (2021 )。

- 使用树脂制零件时，如果要进行大型加工，成本会上升。关于树脂加工、橡胶材料、密封材料的加工，即使批量生产，从单体来看数量也很少，所以成本不相称。即使隔膜是GW刻度，与电池用膜的制造面积相比也只是较少的量，成本很难下降。有必要开发批量生产、规模扩大、成本能够鼎立的生产技术。
- 对于AWE中使用的等级的树脂/密封材料进行大型加工时，每次设计变更都需要改变加工工序。有必要开发能够应对这种情况的量产技术。

## 2.1.8 评估分析/标准化

- 材料水平
  - 有必要制定评估方案来评估单个材料，并使评估方法标准化。此外，在材料评价中，希望能够在没有实际设备评价的情况下确定所开发的材料的适用性。
  - 支持材料开发的测量技术（如用于观察催化剂电子状态的操作数测量技术）和分析/分析技术的开发也很重要。
  - 有必要建立一种与实际耐久性/寿命相关的膜、电极和其他构件的加速耐久性测试方法。希望建立一种测试方法，能够明确评估构件的耐久性和寿命。
- 单元堆栈级
  - 有必要开发技术和研究开发机制，使其能够结合开发的电极催化剂和隔膜来评估性能和耐久性。
  - 为了达到水电解槽的要求寿命（10年=约9万小时运转），必须开发能够在短时间内再现9万小时运转下的劣化模式的加速劣化协议。具体地说，希望能够在900小时或更短的时间内再现，即90,000小时的百分之一。
  - 在加速劣化协议的开发中，从提高材料开发效率的观点出发，有必要在早期确立的范围内随时公布成果，并与材料开发研究人员密切合作，以加速材料开发。此外，从国际竞争力的角度来看，评估方法标准化的活动也很重要。还需要利用通过分离经时劣化时的过电压和阐明劣化机理而获得的知识，开发耐久性能模拟技术和现场劣化诊断技术。
  - 需要一种模拟技术，利用从模块数量较小的测试设备获取的数据来预测大规模模块中的行为。此时，可以认为多个模块中的每一个在性能上都存在偏差。模拟需要在考虑各模块性能的偏差的基础上能够预测大规模模块的行为。
- 系统级
  - 作为电解装置有必要对以下内容进行标准化。
    - ◇ 作为电解装置(也包括电池以外)原单位( kWh/Nm<sup>3</sup>)的测量方法(动作模式、环境条件等)的标准化。
    - ◇ Beginning of Life(BOL )结束生命( eol )定义的标准化。

- ◇ 作为电解装置(也包括电池以外)的劣化性能的测定方法(工作模式、环境条件等)的标准化。
  - ◇ 作为电解装置(也包括单元以外)的各种性能(变动速率等)的测定方法(动作模式、环境条件等)的标准化。
  - ◇ 作为电解装置(也包括电池以外)的LCA标准化。 数值分
- 析
    - 有必要通过开发不仅在定负荷运转时,而且在变动运转时的气液两相流分析技术,来支持电解槽设计。
    - 一般认为电极反应产生的氢、氧一旦溶解在电解液中,就会变成气泡,但气泡产生的机理尚不十分清楚,需要借助数值分析来阐明这一点,有助于电极的设计。
    - 在研究水电解装置的系统性能(原单位、变动追随性等)时,需要明确使用水电解装置的最终用户为了达到电解装置所要求的运行条件和输出所需的电解装置的系统性能。需要开发用于根据运转条件等决定系统性能的系统仿真模型、单元劣化模型和性能评价模型等双方。
  - 高级操作数测量技术开发
    - 有必要将基于高度操作数测量技术的气泡移动和气液两相流举动可视化技术与气液两相流数值分析技术联合起来,加速机理阐明和分析技术的精度提高。

新能源产业技术综合开发机构(NEDO)“氢利用等领先研究开发事业/为提高水电解氢制造技术的基础技术开发”中,正在进行水电解的各种评价法的开发。在该举措中,提出了如图2.1.7-1所示的模拟电解槽启停的水电解用加速老化试验协议。希望开发出能够积累基于这样的试验协议的评价结果和基于实机的评价结果,并根据试验协议的结果来预测实机的评价的技术。

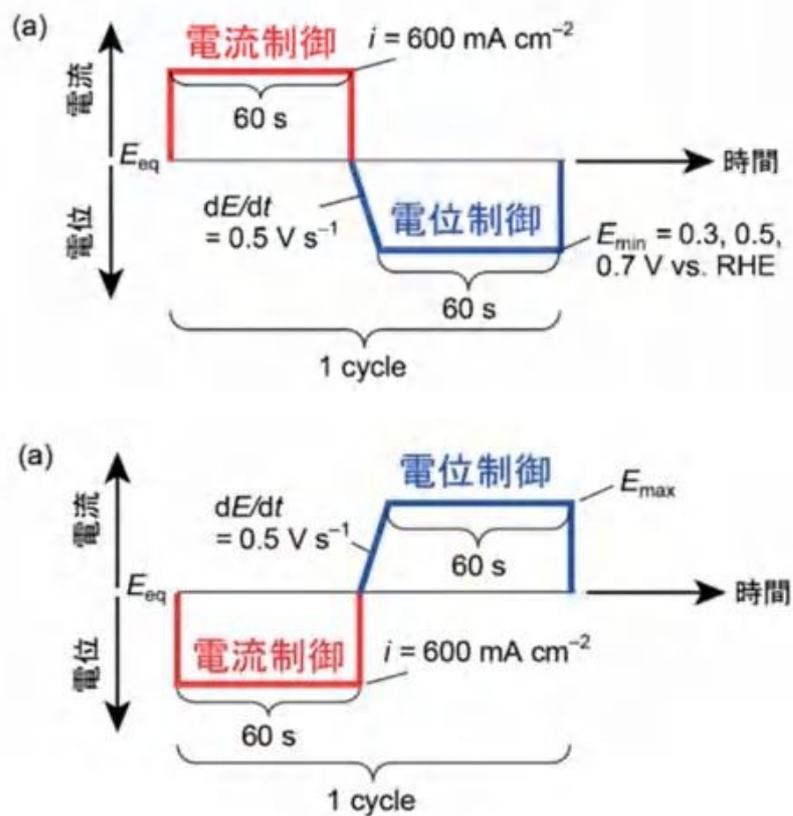


图2.1.8-1模拟电解槽启停的水电解加速老化试验协议  
(上图:阳极, 下图:阴极)

【来源】光岛重德, et al. \水电解用电极及电极催化剂测定方法. \ 电化学90.2 (2022 ):136-158 .

### 2.1.9 技术实证

- 在对变动电源的应对要求提高的过程中, 为了开发对启动・停止具有充分耐久性的电解槽, 通过实证取得实际数据, 以及通过其分析积累知识和经验是很重要的。
- 大型装置也需要增设、增强可以评价的大规模实证设备, 增加利用实机进行评价的机会, 同时可以与实验室级装置、小型装置的结果进行比较。
- 在国外, 将实证还不充分的装置导入实际的现场(表1.2.5-1的大规模模型事业等)以供运用, 试图通过应对产生的课题来提高产品水平, 同样的措施也需要在日本推进

### 2.1.10 管制对应

- 制定加压试验指南
  - 在国外, 具有约3 MPa出口压力的水电解装置是主流。在日本, 在高压气体安全法中, 存在对制造常用温度下的表压1 MPa以上的压缩气体的限制, 目前以水电解装置的出口压力小于1 MPa为主要例子。设想将来将我国的水电解装置向海外发展, 为了提高国际竞争力

必须加快开发具有与国外兼容的法规和规范的水电解装置。为了使《高压气体安全法》不成为研究开发和商业化的障碍，并在确保安全的基础上创造一个可以进行加压操作的环境，还需要制定进行加压试验时应遵循的指导方针。

- 使用强碱溶液时设备应具备的功能指南、安装指南、安全对策指南制定AWE中用作电解液的氢氧化钾、氢氧化钠等高浓度碱溶液是有害物质，因此为了普及，有必要制定高浓度碱溶液特有的功能和安全设计指南，如碱溶液从设备流出的对策和流出时的应对措施。

## 2.2 质子交换膜水电解的技术开发课题

### 2.2.1 概要

PEMWE的特点包括能够在高电流密度下工作，具有优异的波动响应性能等。另一方面，贵金属和电解质等使用部件的成本高，电解槽的成本高于AWE。特别是，阳极催化剂中使用的Ir是一种极其稀有的贵金属，预计未来引入足够量的PEMWE所需的Ir需求量与可用Ir资源量之间的关系将成为瓶颈。因此，Ir使用量降低·自由化技术的开发不仅是低成本化，也是面向将来普及的紧迫课题之一。

另外，为了今后在变动再生能源导入扩大下的活用，认为有必要提高变动运转下电解槽及附带设备的耐久性和响应性，在推进基础技术的开发、评价分析的同时，对革新性材料开发和高成本部件的使用量抑制进行反馈是很重要的。

本次研究根据2022财年《水电解技术发展路线图制定问题整理》的内容，对技术问题进行了重新研究和整理。特别是，本研究主要以研究与电解槽材料、构件、评价分析方法等研究开发相关的目标值为主轴，制定了2040年电解槽技术开发目标和实现该目标的技术开发方案。

第1章中，2040年左右利用再生能源和从系统获取的电力进行绿色氢气制造应该达到的氢制造成本水平为18日元/Nm<sup>3</sup>讨论了电价2.5日元/kWh、设备利用率40%或电价3.0日元/kWh、设备利用率70%工况下水电解系统的技术目标，总结如下表2.2.1-1所示。

为了降低制氢成本，在确保廉价电力的前提下，在尽可能提高设备利用率的同时，除了数量效应降低电解槽、附属设备的成本外，还需要降低包括安装成本和间接费用在内的系统总资本成本，但这并不是只靠电费和资本费用的降低来实现的，还需要长寿命化

实现目标的技术开发方案如图2.2.1-1所示。在进行利用系统电力的稳定运转的情况下，在氢制造成本中电费所占的比例较大，在为了大规模制造绿色氢而利用清洁电力的设想中，只要电费不大幅降低，就无法满足氢制造成本目标(图2.2.1-1的①-1)

如果设想为了绿色氢的制造而活用再生能源，则廉价的变动电力的活用变得重要，例如，如果是太阳光(PV)，则设备利用率为25%左右，但将来可以期待发电成本的降低(这次设定为2日元/kWh)，有助于电费的降低

-C再生能源:从再生能源采购的情况下，平均电价为2日元/kWh，设备利用率为26.5%时)。

**表2.2.1-1 PEMWE系统的技术目标值**  
(电力价格2.5日元/kWh设备利用率40%或电力价格3.0日元/kWh设备利用率70%时, 氢制造成本18日元/Nm<sup>3</sup>满足的水准)

项目	PEMWE	
	当前值	2040年左右
系统使用年限	20年	20年
系统总资本成本 (成本总额)	40.0万日元/kW※1 (430百万日元)	5.7万日元/kW (122百万日元)
每年的O&M成本率※1	系统总资本的2%	系统总资本的2%
更换时间(更换次数)	40,000 h (4次)※2	90,000 h (1次)※3
更换成本率※4	系统总资本的15%	系统总资本的15%
电解槽系统规格		
系统能耗(BOL)※5	4.68 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.62 kWh/Nm <sup>3</sup>
系统能耗(平均)※6	4.91 kWh/Nm <sup>3</sup>	4.85 kWh/Nm <sup>3</sup>
系统容量(BOL)	1.074 MW (AC)	2.123 MW (AC)
辅机能量损失※7	5%	5%
整流器转换效率	98%	98%
电解槽容量	1 MW (DC)	1.976 MW (DC)
电解槽工作点(BOL)	1.82 V at 2.0 A/cm <sup>2</sup>	1.8 V at 4.0 A/cm <sup>2</sup>
电解池反应面积	1500厘米 <sup>2</sup>	1500厘米 <sup>2</sup>
电解槽的单元数	183	183
制氢量	230纳米 <sup>3</sup> /h	459纳米 <sup>3</sup> /h
出口氢压力	常压(≈0.8MPa左右)	最大3 MPa

※1:European hydrogen observatory 2024 (<https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/prods>)

※2:Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems” 假设E(4.5-8年)、AWE(6.8-9.1年)最低值, 但注意是额定运行前提的耐久时间, 在本路线图中, 从电解槽的BOL到电压上升10%的更换时间(PEMWE为堆栈, AWE为部件(电极、隔膜等))

※3 :最多启动、停止(1次/天)左右, 以包含负荷变动的运行为前提

※4:Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems”

※5 :考虑了辅机能量损失及整流器转换效率的值

※6 :假设在电解槽更换时期之前平均以BOL的105%电压运行(电力成本的能耗)

※7; Fraunhofer ISE, “cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electer

在通过与系统电力并用等来提高设备利用率时，存在电费和权衡，例如在澳洲从PV及批发电力市场购买电力的例子中，将来有望在2.5日元/kWh的电费中确保设备利用率40%，从而降低氢制造成本(图2.2.1-1的①)

其中，降低资本费和并购费将成为今后的课题。根据以水电解系统的年产规模10MW/年/公司为基准设想为100倍左右(1GW/年/公司)的数量效果，氢制造成本有望降低到约47% (图2.2.1-1的②-D系统+再生能源+数量效果)<sup>2)</sup>的实现和90,000小时左右的长寿命化，约27日元/Nm<sup>3</sup>的水平(图2.2.1-1的⑤-D长寿命化+高电流密度化)。

而且目标为18日元/Nm<sup>3</sup>为了降低制氢成本，除了通过电解槽制造的高吞吐量化来降低成本(电解槽成本比现在减少70%，提高图2.2.1-1的⑥-D电解槽生产率)之外，还可以降低占系统成本大部分的附带设备的成本，并降低设置成本和间接费用

(将未安装成本从100%降低到40%)，需要在明确系统标准规格的基础上通过批量生产来降低成本(图2.2.1-1的⑦-D最终目标)。另外，本研究主要着眼于电解槽的技术开发，但为了降低制氢成本，通过数量效应降低成本所需的生产技术的详细情况、附带设备和整个系统的详细研究仍然是未来的课题。特别是，关于配套设备，我们沿用了2022财年课题提取的结果，本次讨论未能进行详细讨论，因此我们将仅将其作为未来的课题指出。这是与利用什么样的电力等上游问题和制造什么样性质的氢气等下游问题相关的要素，需要结合面向2030年左右的技术实证进行研究。

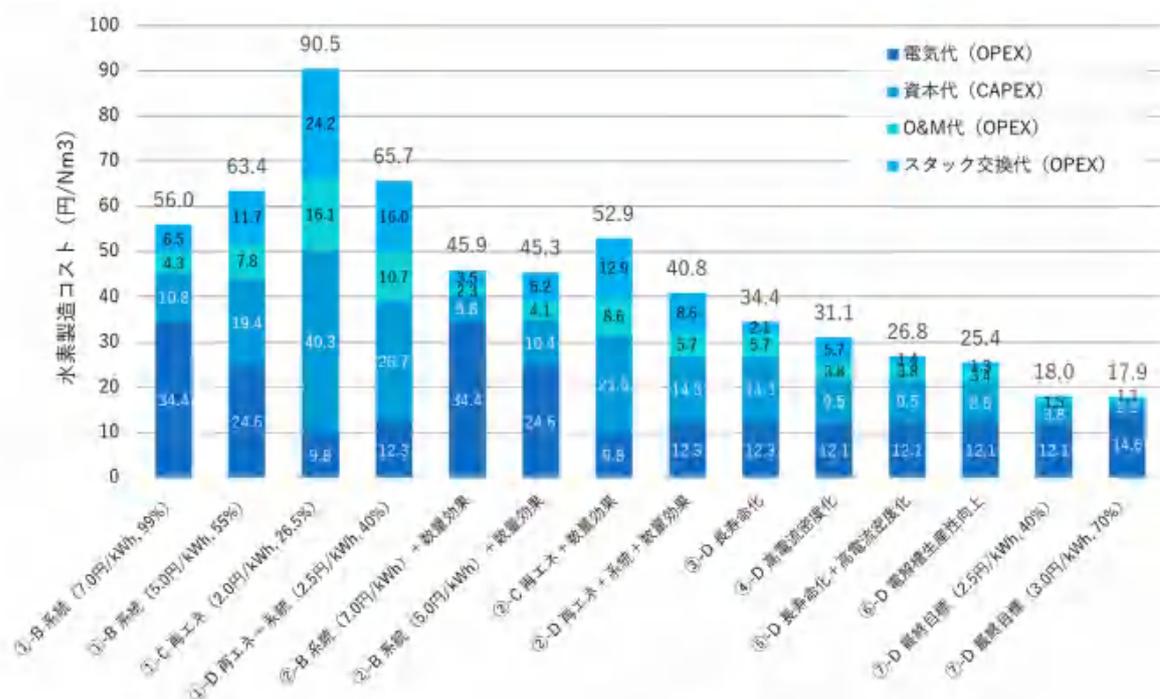


图2.2.1-1制氢成本降低情景\*转贴图1.5.3-4(a)

根据这些目标值的讨论，PEMWG对PEMWE需要更详细研究的项目进行了深入讨论，并进行了讨论，以将其纳入构件等技术开发课题。本章将对这些讨论进行解说。在接下来的2.2.2节中，分别讨论了高电流密度化和性能提高的关系，在2.2.3节中分别讨论了高温化和加压运转。2.2.4节总结了关于贵金属量降低目标的讨论。特别是，关于阳极催化剂中使用的Ir的重量，需要从资源限制的角度而不是从成本角度进行讨论。并且，在2.2.5节中，在更具体地讨论变动电源的活用带来的影响的同时，显示了为了讨论活性、电阻、耐久性等性能的影响而实施的系统模拟的结果，在2.2.6节中，将与部件性能等一起对一阶段详细化的目标值进行汇总。2.2.7节讨论了基于目标值的技术开发课题，并解说了路线图中的记载内容。2.2.8节以后，关于电池堆、MEA、电解质膜等构成要素和评价分析技术等各项目，解说路线图记载的内容。

另外，在水电解中，配合使用何种电源的开发是重要的，但这次假设通过充分廉价的再生能源(特别假设PV)和系统电力的并用以确保2.5日元/kWh左右的电力，进行再生能源、系统电力和水电解

此外，关于与电解槽性能相关的研究，作为水电解的研究开发状况，由于掌握劣化机理、评价高温化加压运转带来的影响、掌握阳极-阴极双方的催化剂特性、掌握交叉机理等不充分，因此也只是基于单纯的假设进行了研究。因此，对于本路线图中设定的目标值，也要结合今后评价分析方法的研究开发进度进行重新评估，这一点很重要。

## 2.2.2 关于高电流密度化和高效率化

关于高电流密度化为 $4.0\text{A}/\text{cm}^2$ 的水平，但关于何种程度的高电流密度化是合适的，从成本和能量效率两个方面进行了讨论。以下，将该讨论的内容作为对目标值设定的补充来表示。目标动作点 $1.8\text{V } 4.0\text{A}/\text{cm}^2$ 可再现的电流密度-电压

相对于(I-V)性能(图1.5.3-2的高性能I-V)，电流密度为 $4.0/\text{cm}^2$ 时的氢气制造成本，以及电费O&M代资本费用的贡献如图2.2.2-1所示。由该图可知， $4.0\text{A}/\text{cm}^2$ 这表明，即使超过，增大电流密度也可以降低制氢成本。由于高电流密度化，资本费用对氢制造成本的贡献减少，另一方面，在高电流密度下运转时，电解电位增加，能源效率降低，因此电费的贡献增大。因此，高电流密度化时的氢制造成本的降低，需要考虑降低资本成本贡献和增大电费贡献的平衡。

在此，除了假定能够筹措2.5日元/kWh的廉价电力的状况外，如图1.5.3-2的左图所示，还假定通过电阻降低来实现相当大的效率改善，由于高电流密度化导致的能量效率的降低缓慢，因此高电流密度化时的水

另一方面，如果使工作点高电流密度化，则单元电压会增大，从能源利用的观点来看，可能会产生效率降低、耐久性降低、整流器和流体设备等附属设备的负荷增大等问题。

实际以图1.5.3-2的基准I-V为 $4.0\text{A}/\text{cm}^2$ 确认的动点后，电压上升到 $2.1\text{V}$ 。作为高电流密度化时的单元电压的标准，如果以Hydrogen Council等讨论的LHV比70%的能量效率为目标，则需要将电压降低到 $1.8\text{V}$ 左右。

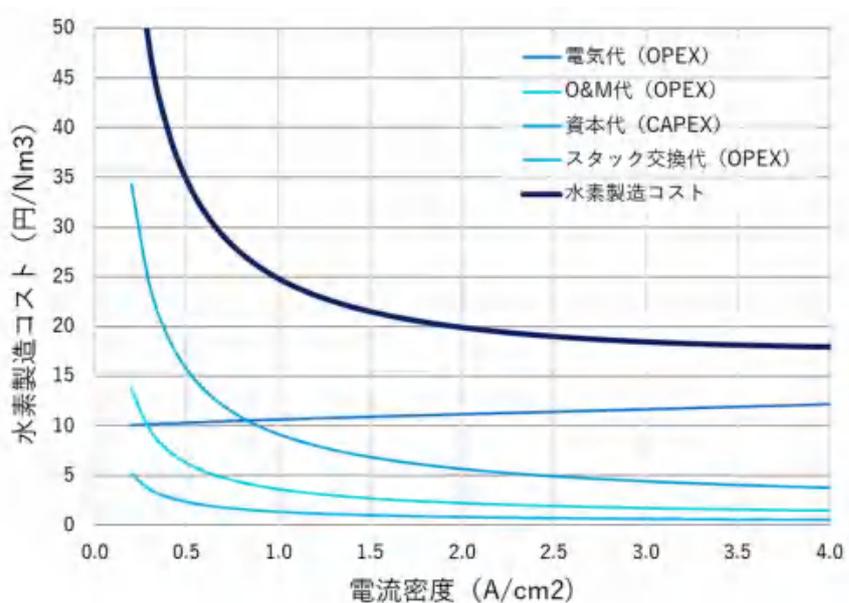


图2.2.2-1规格c (表1.5.3-2)的高电流密度化对降低制氢成本的效果  
(电力价格2.5日元/kWh、设备利用率40%时)

在后所示的系统模拟中，如图2.2.2-2那样确认了活性提高(与现行相比催化剂活性为10倍)及电阻降低(Nafion膜厚为 $76.2\mu\text{m}$ 水平，膜以外的电阻成分没有变更)时的IV性能，此时为图1.5.3-2<sup>74</sup>在这次的研究中，我认为很难通过进一步提高性能来实现高电流密度化，因此需要 $1.8\text{V}$   $4.0\text{A}/\text{cm}^2$ 决定将作为大致的性能目标进行讨论。关于提高性能的各部件的目标值，将活用系统模拟的灵敏度分析，进行更详细的讨论。设想高电流密度化时电解槽水平上的主要技术开发课题有确保耐久性、降低电阻和降低交叉两个。据报道，在高电流密度下会发生催化剂溶出的加速、电极的磨损、剥离等，由于担心催化剂老化的加速，耐久性的提高成为重要的课题。此外，在高电流密度下，质子输送阻力影响也

<sup>74</sup>在这里的估算中，使用了从S. M. Alia et. al., J. Electrochem Soc., 171 024505 (2024) Fig.1(b)读取的膜厚-电阻关系。在相同的数据下，在不提高活性的情况下制作了N212膜(膜厚 $50.8\mu\text{m}$ 使用 $m$ )时工作点 $1.8\text{V}$   $4.0\text{A}/\text{cm}^2$ 表示“活性等倍膜厚 $50.8\mu\text{m}$ 相当于 $m$ 的电阻降低”“活性10倍膜厚 $76.2\mu\text{m}$ 相当于 $m$ 的电阻降低\或它们中间为动点 $1.8\text{V}$   $4.0\text{A}/\text{cm}^2$ 作为可能达成的性能提高目标被暗示。具体的目标值需要考虑考虑到考虑了各种权衡的技术开发的难易度等来缩小范围。

变大，如果要通过薄膜化来抑制这一点，则担心会出现交叉问题，因此同时降低电阻和降低交叉也是一个课题。

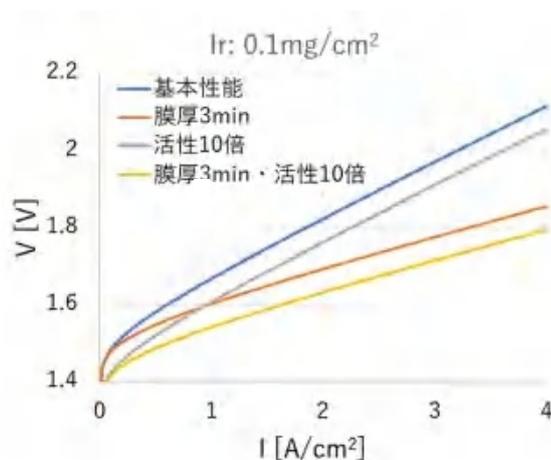


图2.2.2-2系统仿真研究性能改进(引用图A.4-1(b))

(针对基本性能，研究了同时考虑降低相当于橙色:膜厚 $25.4\ \mu\text{m}$ 的电阻、提高相当于灰色:活性10倍的活性、降低相当于黄色:膜厚 $76.2\ \mu\text{m}$ 的电阻和提高相当于活性10倍的活性这两个因素时的3个水平。另外，图表图例的3min指的是3毫米英寸= $76.2\ \mu\text{m}$ 。)

### 2.2.3 关于高温化及加压运转

在第1章中，为了确保与考虑到向输气管道注入等运输、储藏用途的海外产品的竞争力，加压运转对应也是课题之一，但在PEMFG中，也有讨论认为将来有必要实现 $80^\circ\text{C}$ 左右的高温化以及 $3\text{MPa}$ 左右的加压运转。

表2.2.2-1显示了PEMFG讨论中假设的高温化和加压操作的优点和缺点。关于高温化，考虑到将来在再能源适宜地等高温环境中导入水电解，这对于系统的冷却是很重要的，从提高活性的观点来看也是有效的。

关于加压运转，为了确保在设想向输油管道供给等的海外市场的竞争力，有重要的讨论。另一方面，它们都有不可忽视的缺点，如耐久性和跨界增加。本研究设想了面向2040年的技术开发，为了在技术方面设定较高的目标，决定将高温化和加压运转也包含在目标中。关于具体的温度和压力目标值，由于没有建立定量评价的指标，目前的目标是 $80^\circ\text{C}$ ，在耐久性等研究成果较多，以及国外产品等中经常被认为是上限压力的 $3\text{MPa}$ 。在部件的研究开发中，在以高目标为目标的同时，如何活用这样开发的部件，是应该与活用的电源、环境、制造氢的用途等一起探讨的课题。此外，高温和加压操作对堆的性能和耐久性、附属设备所需的性能和耐久性、系统成本等的影响无法定量评估，因此建立这些评估指标是2030年左右的一个重要问题。

表2. 2. 3-1高温加压操作优缺点整理

项目	优点	缺点
高温（80℃）	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 提高催化活性</li> <li>· 降低电解质电阻</li> <li>· 即使在高温环境下也有利于冷却</li> </ul>	加速恶化 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 交叉增加</li> </ul>
加压操作（3MPa）	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 减少气泡影响（减少气泡体积）</li> <li>· 有利于后期压缩干燥</li> </ul>	交叉的增加 电解槽效率降低 机械老化加速 与包括辅机在内的系统效率成本的平衡

#### 2.2.4 关于降低贵金属使用量的目标

在PEMWE的情况下，作为贵金属，Ir用于阳极催化剂，Pt用于阴极催化剂。另外，作为成为高电位的多孔传输层（PTL）和双极版（BPP）的涂布材料，主要使用Pt（有时也为Ir或Au等）。

其中，关于Ir是极其稀少的资源，为了避免Ir资源中有多少可以面向PEMWE使用的制约，需要降低Ir单位面积重量。另外，由于Ir和Pt都是昂贵的贵金属，因此也有必要讨论成本方面的限制。另外一方面，由于催化剂层贵金属单位面积重量降低存在与催化剂活性提高及耐久性提高的权衡，而PTL或BPP的贵金属涂层量降低存在与接触电阻降低及耐久性提高的权衡，因此使它们并存的研究开发成为课题。特别是考虑到2.2.2节中讨论的高电流密度化时，可以设想耐久性的课题可能会变得明显。

在本研究中，首先就Ir资源量对单位面积重量的制约，参考文献模型，对未来的Ir供求进行了研究。Clapp等人<sup>75</sup>以IEA NZE方案等氢需求量预测为基础，用时间序列数据给出假设氢需求量中PEMWE承担的份额以及系统能量效率时的PEMWE导入量目标，进行了计算对Ir的需求量的模型化。此时，关于PEMWE的Ir单位面积重量，我们编入了以mg/W为单位的使用量会因未来的技术革新而呈时间系列下降的预测，并进行了分析。作为Ir资源，假设相对于目前的开采量7.5t/yr，通过从现有利用地转换，相当于20%的1.5t/yr可用于PEMWE。再加上，假设PEMWE堆的寿命，假设从超过寿命的堆中以一定比例回收Ir用于新的PEMWE制造。关于Clapp等人的模型，表2.2.4-1总结了模型化的想法。

<sup>75</sup>Mark Clapp et. al, Catalysis Today 420 (2023) 114140

表2.2.4-1 Ir供需平衡建模的思考

项目	想法
PEMWE部署目标	基于IEA的氢需求量情景，计算每年的目标水电解容量。
新PEMWE容量	[PEMWE需求量] - 按[已部署PEMWE容量] + [更新部分PEMWE容量]计算。 作为上限，假设不能使用超过[年Ir供给量] + [年Ir回收量]的Ir
更新量PEMWE容量	每年新引进的PEMWE具有平均10年、标准偏差3年的服从正态分布的寿命假设为。 计算是否需要更新已部署的已使用寿命的PEMWE容量
年Ir供应量	按照Clapp等人的讨论，假设为1.5t/yr（每年7.5t/yr产量的20%）
年Ir回收量	假设在制造已使用寿命的已部署PEMWE时使用的Ir被回收利用 但是，关于再循环率假设了将来的推移

在这次的分析中，以Clapp等人的模型为基础，修正了对需求量的想法和前提的假设条件，结合本事业中讨论的路线图和前提进行了讨论。首先，关于Ir需求量，导入了仅满足各年所需氢需求量中充分份额的PEMWE。但是，假设每年只有PEMWE可利用的Ir产量（1.5t/yr）和回收利用部分合计的Ir资源是可利用的。因此，如果Ir资源不足，与PEMWE导入目标的背离就会扩大，需求量有可能进一步增大。此次分析中的假设条件和Clapp等人的模型的假设条件的比较总结在表2.2.4-2中。氢需求量预测除了使用从NZE2022更新为NZE2024的值外，作为设备利用率，假设了以PV为中心的再生能源可达到的水平为40%。特别是后者的假设，意味着对于相同的氢需求量，必须引入1.5倍的PEMWE。关于系统能源效率，如前节所述，从在此次路线图中将高电流密度化作为技术开发方向进行研究的方针出发，假设单元电位为1.8V，电流密度为1.8A/cm<sup>2</sup>至4.0A/cm<sup>2</sup>作为增大到现在的剧本。而且，关于再循环率，考虑到与洗脱的Ir回收相关的技术难度，以及将来单位面积重量较低时Ir的回收难度会上升，如Clapp等人那样，假设其上限为90%，而不是100%。关于将来Ir单位面积重量的降低，假设在2035年指数函数地降低到指定的水平，根据2035年的Ir单位面积重量（mg/cm<sup>2</sup>进行了有关单位)的参数研究。

表2.2.4-2 Ir供需平衡思路比较

项目	Clapp等人的假设*1	本路线图中的讨论
氢需求量	符合NZE2022标准	符合NZE2024标准
设备利用率	60%	40%（※相对于clapp等人为1.5倍的PEMWE需求量）
PEMWE分享	40%	40%
Ir单位面积重量	从2020年1mg/W开始，到2030年左右降低到0.04mg/W	从2025年0.123mg/W，以指数函数下降到2035年0.014mg/W（结合后述的动作点，为2025年0.4mg/cm <sup>2</sup> 2035年0.10mg/cm <sup>2</sup> 削减到的水平。并且，实施对2035年目标量的灵敏度分析）
工作点电压	从2020年1.8V下降到2040年1.7V	恒定为1.8V(70%LHV)
工作点电流	-(mg/cm <sup>2</sup> 不换算)	2025年2.0A/cm <sup>2</sup> 2035年4.0A/cm <sup>2</sup> 增加到
系统能量消耗率	到2050年降低到6.5%	到2050年降低到6.5% (※整流器转换效率98%，辅机损失率5%)
再利用率	从2020年70%上升到2035年100%	从2020年70%上升到2035年90%，之后保持一定

分析结果如图2.2.4-1所示。截至2035年为 $1.8\text{V} \cdot 4.0\text{a}/\text{cm}^2$ 假设为动作点，将此时的Ir单位面积重量设为 $0.10\text{mg}/\text{cm}^2$ 在降低Ir使用量( $0.014\text{mg}/\text{W}$ )的情况下，从2030年左右开始Ir的供需平衡趋于改善，2040年左右可以针对氢需求量导入足够量的PEMWE。另一方面， $0.12\text{mg}/\text{cm}^2$ 虽然在水平上供需平衡有所改善，但无法导入足够量的PEMWE。

在IEA NZE方案中，预计2030年左右会导入相当量的水电解，但在此次路线图的讨论中，根据最近世界绿色氢项目的开发动向，将2030年左右定位为正式普及前的“实证时期”。因此，（不是强加在整个期间平衡Ir供求的目标条件），而是将2040年左右的Ir供求平衡充分成立定为方案成立的条件，在假设NZE2024方案的氢需求量的情况下，导入充分的PEMWE所需的Ir目标量<sup>2</sup>能达到一定的水平。

得到的意见认为，该目标水平与产业界的现状把握也一致，在本路线图中，作为2040年的Ir单位面积重量目标值，为 $0.10\text{mg}/\text{cm}^2$ 录用。但是，在此实施的估算高度依赖于表2.2.4-1和表2.2.4-2所示的前提条件，例如由于水电解导入目标的增加、PEMWE份额的增加、Ir再循环率的降低等，Ir单位面积重量的降低目标成为更严格的值。因此为 $0.10\text{mg}/\text{cm}^2$ 有必要在研究技术开发的同时，考虑氢需求量的预测等，更新方案和目标值。

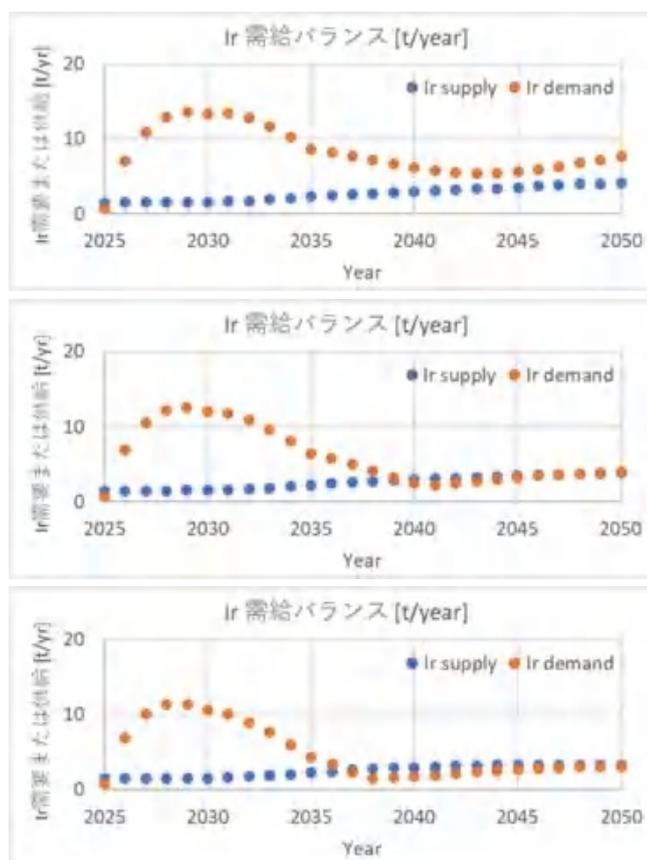


图2.2.4-1 Ir供需平衡模型研究结果

（2035年Ir单位面积重量目标以上： $0.12\text{mg}/\text{cm}^2$ 、中： $0.10\text{mg}/\text{cm}^2$ 、下： $0.08\text{mg}/\text{cm}^2$ 时）

关于Ir使用量，从成本的观点来看也可能会产生制约，但资源制约的限制为 $0.10\text{mg}/\text{cm}^2$ 以此为前提，预计在成本方面会充分降低。例如，在基于图2.2.4-2左上所示DOE的成本分析中，Ir单位面积重量为 $2.0\text{mg}/\text{cm}^2$ 以此为前提，估计约80美元/kW对堆叠制造成本有贡献。将其设为 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 降低到4美元/kW，相对于设想的堆栈成本(作为总资本成本目标的15%，为0.86万日元/kW)，比率非常低。

因此，对于Ir单位面积重量的不同，灵敏度为几百日元/kW左右，因此从成本的观点来看，Ir设想很难讨论目标单位面积重量的目标。

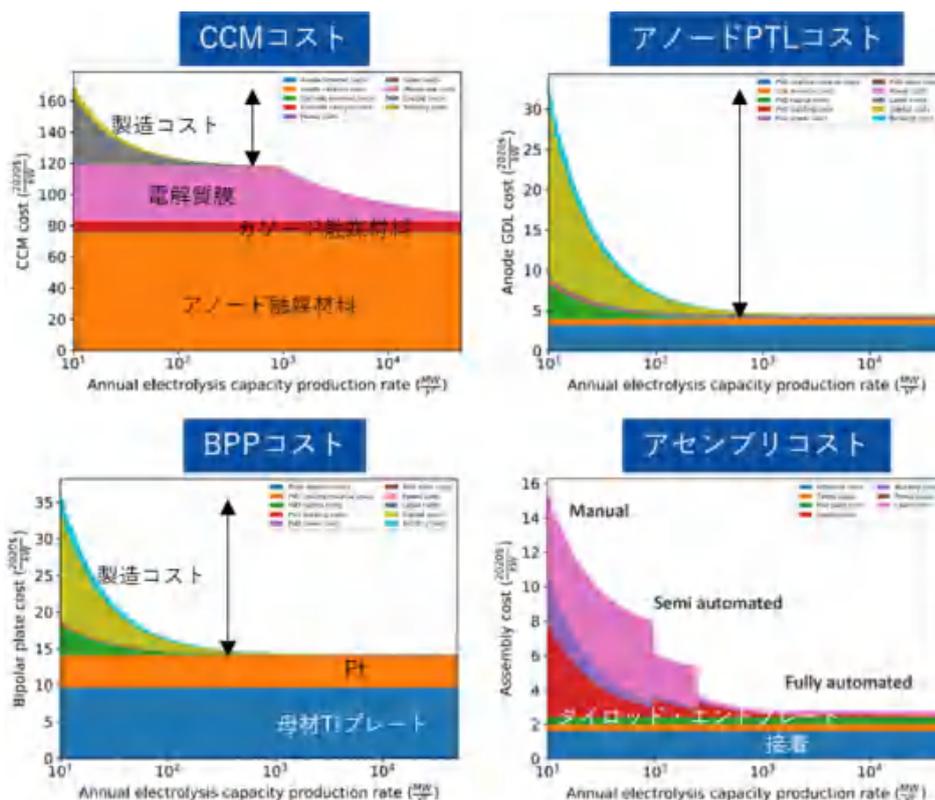


图2.2.4-2用doe分析PEMWE的成本

虽然关于Pt很少见，但是与Ir相比，资源量相对丰富，在技术上相近的PEM型燃料电池领域，使用量也已经在不断减少。特别是对于发生了与水电解中阴极反应(氢生成反应: HER)相反的反应(氢氧化反应: HOR)的燃料电池阳极，以Pt单位面积重量计为 $0.03\text{mg}/\text{cm}^2$ 达到了一定的水平。另一方面，铂催化剂对于HER的特性目前还不清楚，很难讨论详细的性能。在本RM中，与后述的PTL相同，作为比燃料电池所达到的水平稍有限制，为平缓的 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 将设定为目标值。从资源制约的观点来看，设想使用量大致与车载用燃料电池相同，但需要从现有的铂用途的替代技术中推测可转用的铂量等，面向未来进行详细的讨论。如果在成本方面也是这个水平的话

从图2.2.4-2的前提降低到1/10, 因为在1美元/kW以下, 所以认为成本灵敏度足够低。

关于PTL被复中使用的Pt量, 目前的标准使用量为 $1\text{mg}/\text{cm}^2$ 的量级, 在降低阴极催化剂层中的使用量的同时, 还需要降低PTL中的使用量。复盖量对性能的影响主要来自接触电阻和耐久性的观点, 目前知识有限, 很难使用模拟模型等进行研究, 但通过与Ir涂层的比较, 可以进行以下讨论。Carmo等人<sup>76</sup>根据, 用Ir涂布时, 虽然也依赖于PTL的结构等, 但为 $0.025\text{mg}/\text{cm}^2$ 的单位面积重量可以实现足够低的接触电阻, 在以上的单位面积重量量下性能没有提高(图2.2.4-3)。由于Ir如迄今为止所讨论那样存在严格的资源制约, 因此作为涂敷材料, 如果设置Pt比Ir在成本方面更有利的条件, 则Pt和Ir的价格比目前约为5倍, 因此Pt涂层的使用量限制为 $0.125\text{g}/\text{cm}^2$ 来定义自定义外观。在本路线图中, 作为Pt的单位面积重量的数量级为 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 决定采用。

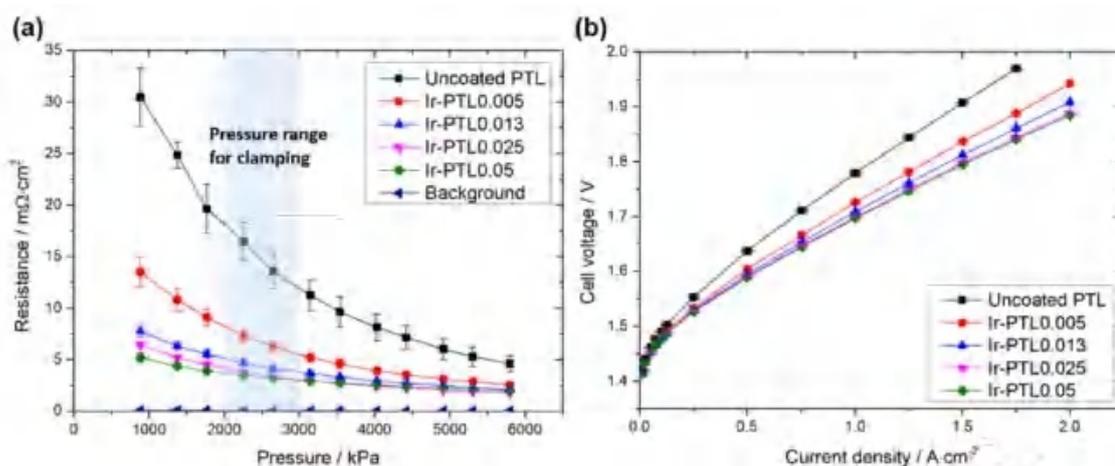


图2.2.4-3 Ir对PTL涂层性能的研究(Carmo等人)

(对于不同Ir单位面积重量的PTL涂层, 以横轴为紧固压时的接触电阻(左图)和I-V性能(右图)的曲线图)

### 2.2.5 基于系统仿真的灵敏度分析

在之前的讨论中, 基于假设了稳定的工作点的试算来讨论了目标值, 但是为了在将来设想的清洁氢的大量生产中使用廉价的电力, 需要直接使用变动的再能源, 或者在系统电力有剩余、市场价格低的时间段使用电力等运用

另外, 为了从I-V性能、动作点、耐久时间等目标出发讨论构件等技术开发目标, 需要分析构件特性对成本等的影响。因此, 在本研究中, 通过株式会社丰田中央研究所的协助, 模拟了再利用时的具体运转状况, 同时进行了氢气制造成本对构件特性的灵敏度分析, 并将其应用于电解槽的材料、构件目标的研究。这里只讨论目标值及技术开发项目讨论所需的事项, 有关模拟的详细内容请参考Appendix。

<sup>76</sup>Marcelo Carmo et.al., ACS appl.mater.interfaces 2021, 13, 16182-16196

在系统模拟中，设想了使用由ENEOS株式会社提供的澳大利亚昆士兰太阳能（PV）电力的时间序列数据以及该地区同一时期的电力市场价格，以PV电力和系统电力的混合动力为电源，通过PEMWE进行制氢的情况。对假设PEMWE的具体运行状况（系统寿命20年间水电解输出的时间序列变动）时的氢制造成本进行了模拟。

具体而言，以电力购买价格阈值为参数，输出多个如图1.5.3-2(a)所示的PV和系统混合动力的投入电力模式，累计氢制造量和电力成本而求出，并且求出假设总资本成本和更换成本时的资本费用模拟的特征是启动停止引起的劣化和变动运转的每单位时间的劣化的假设两种影响，可以计算为电解槽效率随着运行而每时每刻都在下降。这次，根据投入电力模式，从BOL开始性能下降10%的时间点作为堆栈交换时期，每次进行交换都会产生堆栈交换成本。此外，参考文献考虑了Ir基重对电解槽性能和耐久性的影响。

关于电力，与事先以电力成本和设备利用率为前提的目标值的考虑不同，模拟根据PV的设备成本和安装成本、实际购买的电力以及实际用于水电解的电力计算电价和设备利用率。这也取决于光伏和水电解的容量比，光伏容量比是优化的目标。

关于光伏设备成本和安装费，单独使用时电价为2.0日元/kWh。<sup>77</sup>正在进行调整。通过与系统的并用，确认了在最佳运用中PV和系统综合的电力成本及设备利用率达到相同程度的水平。

在这样的模拟中，对总资本成本、Ir基重、电堆的I-V性能、耐久性、PV与水电解装置的容量比等参数进行了多个水平的计算，通过进行制氢成本的灵敏度分析，得到了各种参数对制氢成本影响程度的定量指标。

模拟的前提假设了与1.5节中实施的目标值的讨论大致相同的前提条件。表2.2.5-1显示了目标值考虑和模拟假设条件的比较，如表2.2.5-1所示。另外，考虑目标值。

标准规范（见表1.5.3-2）与模拟假设的比较如表2.2.5-2所示。电价和设备利用率模拟重点考虑性能、材料和构件指标，考虑电解槽对启停和负荷波动的耐久性，因此系统总资本成本为制氢成本18日元/Nm<sup>3</sup>的达成为目标，相当于2040年左右的目标值（总额1.2亿日元）的1亿日元（目标动作点1.8V at 4.0A/cm<sup>2</sup>假设系统容量为2.123MW（AC）），则约为4.7万日元/kW。

模拟中研究的电解槽性能提高、高电流密度化及耐久性提高对降低制氢成本的效果如图2.2.5-1所示。在模拟中总资本成本足够高

---

<sup>77</sup>根据IRENA，“renewable power generation costs in 2023”，包括设备费和安装费在内的资本成本在2023年为758美元/kW，如果未来太阳能发电的引进容量扩大到5倍，则约为300美元/kW（4.5万日元/kW），运转维持费为资本成本的3%，使用年限20年，设备利用率20%，约为2日元/kWh。

假设在降低的状态下在节能变动电力下运行的情况，进行了( a )从设备利用率40%的基准条件开始，( b )高电流密度化以及相对于水电解装置容量的PV容量的优化，( c ) IV性能的提高，( d )耐久性提高的灵敏度分析。它们在与目标值的研究一并表示的技术开发方案图1.5.3-3(a)中，( b )及( c )对应于④-D高电流密度化，( d )对应于⑤-D长寿命化高电流密度化(总资本成本的降低与上述相同)

系统模拟的结果，根据投入电力的实际数据和与劣化相关的实际数据或文献数据，确认了通过系统电力的活用以及PV容量的优化，可以兼顾低成本和设备利用率，降低氢制造成本。另外，高电流密度化时的动作点1.8V 4.0A/cm<sup>2</sup>氢制造成本18日元/Nm<sup>3</sup>确认了可能实现，为了实现该动作点，相对于基准条件需要活性10倍电解质膜电阻3/7的水平。得到的结果是，对于启动停止的劣化率以及运转单位时间的劣化率，都需要降低基准数据的1/10左右。将此时I-V性能、及对应的催化剂活性及电阻、耐久性分别汇总于图2.2.5-2、表2.2.5-3。特别是关于耐久性，在本次作为参考文献中，Ir单位面积重量为0.1mg/cm<sup>2</sup>的情况下，确认了1年左右的堆叠更换时间(参照图A.7.4-2)，确认了存在必须从当前值大幅提高耐久性的课题。

表2.2.5-1目标值讨论与仿真中思路的比较

项目	目标值讨论中的想法	模拟的前提
电力成本设备利用率	2.5日元/kWh, 40%	假设PV的电力价格为2.0日元/kWh，使用PV电力时间序列数据以及电力现货价格时间序列数据，计算变更电力购买价格阈值时能够实现何种程度的电力成本设备利用率。 <sup>78</sup> 在与系统电力并用的模拟中，计算包括购买的系统电力在内的平均电费和设备利用率作为计算结果。变更动作点和性能等的情况下电费和设备利用率也会变更。模拟结果显示设备利用率为40%及80%点太好了。(见A.7节)
系统总资本成本	当前值为40.0万日元/kW(参照图1.5.5-1)，制氢成本18日元/Nm <sup>3</sup> 可以达到的总资本成本目标标准价格为5.7万日元/kW。	将系统总资本成本设定为1亿日元。(IV性能改善后的动作点1.8V at 4.0A/cm <sup>2</sup> 相对于4.7万日元/kW)
阳极催化剂 Ir单位面积重量	NREL的论文 <sup>79</sup> 请参考，0.4mg/cm <sup>2</sup>	0.4mg/cm <sup>2</sup> 从资源约束的讨论中得出0.1mg/cm <sup>2</sup> 到实施降低时的灵敏度分析。活性及耐久性的Ir单位面积重量量感度为文献错误：书签已定义不累。参考设定。

<sup>78</sup>太阳能发电的设备费安装费为4.5万日元/kW，运行维护费为资本成本的3%，使用年限20年，设备利用率假设为20%的情况下，太阳能发电的总资本成本除以电力消耗后的电费约为2日元/kWh。

<sup>79</sup>S. M. Alia et. al., J. Electrochem. Soc., 166 F1164 (2019)

表2. 2. 5-2目标值讨论中基准规格与模拟假设的比较

项目	目标值讨论中的基准规格 <sup>80</sup>	模拟的前提
系统总资本成本	40.0万日元/kW	将系统总资本成本设定为1亿日元(目标动作点1.8V at 4.0A/cm <sup>2</sup> 以此为前提, 约4.7万日元/kW)
每年的并购成本率	系统总资本的2%	系统总资本的2%
更换时间	40,000 h(4次)	假设以下两个劣化 · 启动停止:根据ENEOS株式会社的数据, 5,000次启动停止后性能下降10% <sup>81</sup> · 运行时间: NREL文献 <sup>82</sup> Ir单位面积重量0.1~0.4mg/cm <sup>2</sup> 获取的运行时间的活性降低率。 假设以10%的性能下降进行堆栈交换。 Ir单位面积重量0.4mg/cm <sup>2</sup> 那么大约需要33,000小时的交换时间。 此外, 对劣化率分别实施了1/10灵敏度分析
交换成本率	系统总资本的15%	系统总资本的15%
电解槽系统规格		
系统能量消费量( BOL )	4.68 kWh/Nm <sup>3</sup>	按时间顺序变动 <sup>83</sup>
系统能量消费量(平均)	4.91 kWh/Nm <sup>3</sup>	按时间顺序变动 <sup>83</sup>
系统容量( BOL )	1.074 MW (AC )	基准条件下1.074 MW (AC ) <sup>84</sup>
辅机能量损失	5%	5%
整流器转换效率	98%	98%
电解槽容量	1 MW (DC )	基准条件下1 MW (DC ) <sup>84</sup>
电解槽工作点( BOL )	1.82 V at 2.0 A/cm <sup>2</sup>	基准条件下1.82 V at 2.0 A/cm <sup>2</sup> 与目标值讨论相同的文献 <sup>85</sup> 中选择照明设备。通过拟合, 阳极催化剂活性为3,200 a/g, 电阻为0.137 Ω cm <sup>2</sup> 获得。最大工作点电流为4.0A/cm <sup>2</sup> 实施灵敏度分析至催化剂活性10倍及电解质膜电阻3/7 (电流密度最大、催化剂活性10倍、电阻3/7倍为1.8V at 4.0A/cm <sup>2</sup> )
电解池反应面积	1500厘米 <sup>2</sup>	1500厘米 <sup>2</sup>
电解槽的单元数	183	183
制氢量	230纳米 <sup>3</sup> /h	230纳米 <sup>3</sup> /h
出口氢压力	常压 (~0.8MPa左右)	常压 (~0.8MPa左右)

<sup>80</sup>见表1.5.3-2。各项备注见原表。

<sup>81</sup>对于假设PV和系统混合的电解槽输出时间序列, 假设每次输出降至0时停止启动, 假设每次性能降低0.002%。

<sup>82</sup>S. M. Alia et. al., J. Electrochem. Soc., 166 F1164 (2019)

<sup>83</sup>在模拟中, 根据可利用的电力, 按时间顺序变动动作点。PV输出充分时, 或者可以购买系统电力时, 在最大动作点动作。基准条件下最大动作点1.82V at 2.0A/cm<sup>2</sup>其中, 系统能耗( BOL和平均)分别为4.68 kWh/Nm<sup>3</sup>和4.91 kWh/Nm<sup>3</sup>。在灵敏度分析中高电流密度化IV性能改善后的情况下, 为最大动作点1.8V at 4.0A/cm<sup>2</sup>此时, 系统能耗( BOL和平均)分别为4.62 kWh/Nm<sup>3</sup>和4.85 kWh/Nm<sup>3</sup>。

<sup>84</sup>容量固定电池反应面积、电池数量、辅机能量损失、整流器转换效率, 系统容量及电解槽容量按最大工作点计算。基准条件下最大动作点1.82V at 2.0A/cm<sup>2</sup>系统容量( BOL ) 1.074MW(AC)、电解槽容量1MW(DC)。灵敏度分析中高电流密度化IV性能改善后的情况下为最大动作点1.8V at 4.0A/cm<sup>2</sup>系统容量( BOL ) 2.123MW(AC)、电解槽容量1.976MW(DC)。

<sup>85</sup>S. M. Alia et. al., J. Electrochem Soc., 171 024505 (2024)

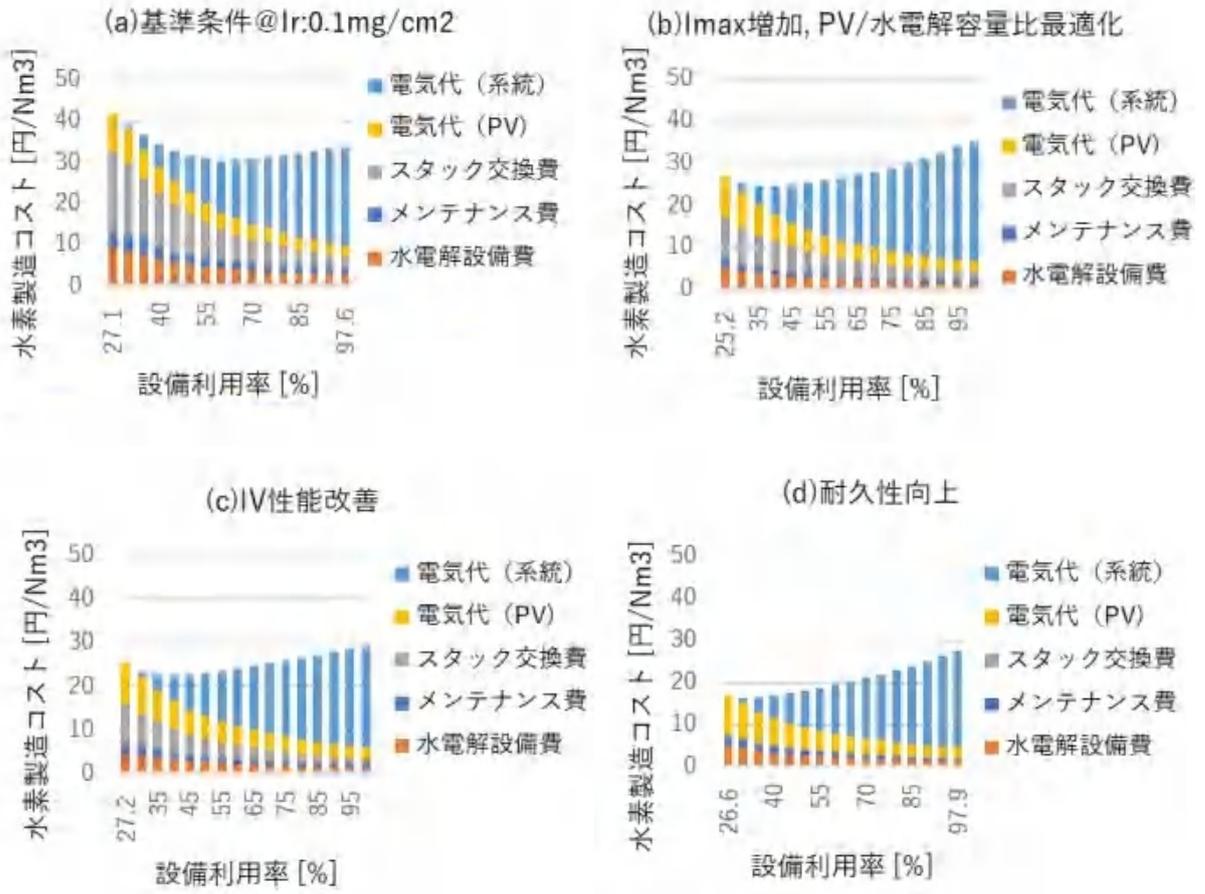


图2.2.5-1各灵敏度分析参数降低1coh ( IR:0.1 mg/cm<sup>2</sup>)

引用Appendix的图A.7.4-1

表2.2.5-3材料物性值

(对应图2.2.5-2的I-V性能

引用Appendix的表A.7.5-1 )

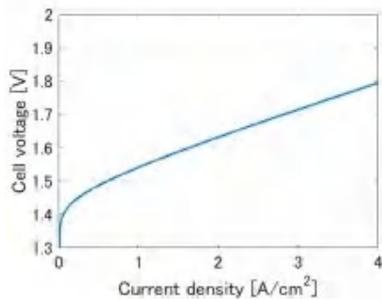


图2.2.5-2通过各项实现的I-V性能 ( Ir0.1mg/ cm<sup>2</sup>) 引用Appendix的图 A.7.5-1

An催化剂Ir单位面积重量		0.1	mg/cm <sup>2</sup>
An催化剂质量活性 ( @1.5V )		10倍	32000 A/g
欧姆电阻 (电子电阻+质子电阻)		(膜厚3/7)	0.0723 Ω cm <sup>2</sup>
劣化速度	起动停止	1月10日	—
	电解时	1月10日	—

※活性倍率为相对于图A.4-1的I-V性能基准值的值,劣化速度为文献值<sup>86</sup>表示以1为1时的倍率。

<sup>86</sup>s.m.alia et al . “electrolyzer durability at low catalyst loading and with dynamic operation .” j.electro chem.SOC ., 166 f 1164

## 2.2.6 技术发展方案和技术发展挑战

结合第1章中讨论的目标设定和到上一节为止所示的PEMWG中的讨论，将关于PEMWE的目标值整理为表2.2.6-1。在此，除了第1章的目标值设定(表1.5.4-1)之外，还反映了PEMWG中关于贵金属单位面积重量的讨论、PEMWG中关于通过系统模拟的灵敏度分析显示的质量活性电阻及劣化率的水平、高温化及加压运转的讨论

表2.2.6-1当前值与目标值的比较

	【当前值 <sup>87</sup> 】	【2040年目标值 <sup>88</sup> 】
总资本成本	40.0万日元/kW <sup>89</sup>	5.7万日元/kW <sup>90</sup>
能源消耗量	4.66kWh/Nm <sup>3</sup>	4.63kWh/Nm <sup>3</sup>
系统使用年限	20年	20年
堆栈性能	1.82V @ 2.0A/cm <sup>2</sup>	1.8V @ 4.0A/cm <sup>2</sup>
堆栈交换时间 <sup>91</sup>	40,000 h (稳定运行)	90,000 h (含, 变动运行) <sup>92</sup>
国际空间站单位面积重量(催化剂层)	0.4mg/cm <sup>2</sup>	0.10mg/cm <sup>2</sup>
电脑单位面积重量(催化剂层)	0.4-1.0mg/cm <sup>2</sup>	0.1mg/cm <sup>2</sup>
电脑单位面积重量(PTL)	1.0-2.0mg/cm <sup>2</sup>	0.1mg/cm <sup>2</sup>
质量活性(阳极催化剂)	1,350A/g @ 1.5V <sup>93</sup>	32,000a/g @ 1.5V <sup>94</sup>
抵抗	0.137 Ω cm <sup>2</sup> <sup>93</sup>	0.07 ω 厘米 <sup>2</sup> <sup>94</sup>
运转温度	50℃ <sup>95</sup>	80℃ <sup>96</sup>
运行压力	~0.8MPa	最大3MPa

从第1章和到目前为止的讨论中，PEMWE的技术开发方案总结在图2.2.6-1中。基于第1章的讨论以及获得水电解装置竞争力的方案(图1.4-1)，到2030年左右为止的重要课题是“通过技术验证的与上游侧电源的关系(再利用能源电力和系统电力的连接)、以及

<sup>87</sup>设想在正常运转下运转的系统。

<sup>88</sup>作为2040年目标值的前提，在可以使用电力成本：PV+系统2.5日元/kWh(变动运转)、设备利用率：40%的电力的情况下，氢制造成本18日元/Nm<sup>3</sup>记载了为了达成的目标值。作为前提的运转条件如下。系统出口氢压：3MPa，电解槽运行压力：常压~3MPa，电解槽运行温度：80℃，波动运行(包括启停每日1次左右)。

<sup>89</sup>考虑到加价、安装和间接成本的总资本成本，以及欧洲欧洲海洋观测局2024年最新信息和Fraunhofer ISE成本分析结果。(见解说书1.5节)

<sup>90</sup>每千瓦的总资本成本为反应面积1500厘米<sup>2</sup>、以单元数183的电解槽为前提，以电解槽容量、整流器转换效率98%、附属设备的损失5%为前提的系统容量标准化后的值、(从当前值以能够实现氢制造量增加和堆更换次数减少的电解槽及附属设备为前提，包括了电解槽成本、附属设备成本及安装成本)

<sup>91</sup>定义为IV性能相对于BOL降低10%的平均实际时间。

<sup>92</sup>作为标准，以起动停止引起的劣化10%/5,000次以及运行时间引起的劣化1/10(S. M. Alia et al., J. Electrochem. Soc., 166 F1164 (2019))的结果为基准

<sup>93</sup>Ir单位面积重量0.4mg/cm<sup>2</sup>采用80℃下拟合基准IV(S. M. Alia et al., J. Electrochem. Soc., 166 f 1164, 2019)获得的质量活性和电阻值作为基准性能进行记载。

<sup>94</sup>工作点1.8V 4.0a/cm<sup>2</sup>的性能水平的代表值为Ir单位面积重量0.1mg/cm<sup>2</sup>的基准IV，假设质量活性提高(10倍)及电阻降低(相当于膜厚3/7)而得到的性能指标。另外，在质量活性等倍及电阻降低(相当于膜厚2/7)下，动作点也为1.8 v 4.0a/cm<sup>2</sup>有必要继续探讨根据技术开发方针缩小目标值的问题。

<sup>95</sup>记载为当前标准电解槽的运行温度。

<sup>96</sup>记载了将来应该兼顾80℃左右的高温化和性能、耐久性等指标。

掌握了与下游氢利用的关系的技术规格及量产化方针的确立”“评价分析平台”基于欧姆的构筑和运用”，关于评价分析技术开发以及要素技术开发，作为PEMWE中需要研究的项目记载了以下要点。从时间序列的观点来看，与图1.5.3-3(a)所示的氢制造成本降低方案的推进方法一致。

- 从评价分析技术的观点来看，以变动运转及高温化加压运转等为前提的性能提高和耐久性提高将成为将来技术开发的课题，因此，要求制定考虑了这些条件的耐久评价协议，并应用于技术规格的讨论。
- 关于劣化机理的阐明，特别是兼顾催化剂层、PTL和BPP被复的耐久性和贵金属单位面积重量的降低，以及电解质膜的耐久性和薄膜化等引起的电阻的降低成为主要课题，因此，需要有助于开发这样的技术的分析技术。
- 为了研究通过电解质膜的薄膜化等降低电阻和针对加压运行的权衡增大的对策，还将跨界机理的阐明和影响评价方法的确立作为重要事项列举出来。
- 在要素技术开发中，首先以提高对变动运转的耐久性为课题，推进材料部件开发和电池组系统的技术开发。
- Ir资源制约也是PEMWE普及的重要课题，由于与提高变动运行的耐久性存在权衡关系，所以是应该并行研究的课题。此外，还需要推进Ir资源回收利用技术的开发。
- 推进以通过高效率化实现高电流密度化、耐久性及降低交叉为目标的材料部件开发和电池组系统的技术开发。
- 高温化是提高效率的手段之一，但加压运行需要更高的性能化，两者都需要耐久性、降低交叉和权衡，因此是需要并行解决的课题。
- 通过提高电解槽制造的吞吐量来提高生产率。电池和堆叠组装的自动化、质量控制和制造工序数量的减少非常重要，机器人、自动和自主系统、利用人工智能分析图像和数据的质量控制、过程信息学等需要结合各种工具进行技术开发，例如优化适合材料和构件的制造工艺。降低附属设施的成本也是一个重要的点，不仅要实现数量效应，而且要通过降低电源设备的成本、流体设备等的通用化和模块化来实现成本的降低。另一方面，关于降低附属设备成本的具体技术问题，在本研究中没有进行详细的讨论，将其作为未来的课题，需要结合未来的实证进行研究。
- 降低安装成本和间接费用也很重要。关于安装成本，通过模块化最大限度地降低安装复杂性的系统优化设计；关于安装成本，电解槽  
-还需要标准化系统规格，以最大限度地减少安装复杂性，包括电源设备的组合和流体设备的模块化，并在明确系统的标准规格后进行单一封装和批量生产来降低成本。

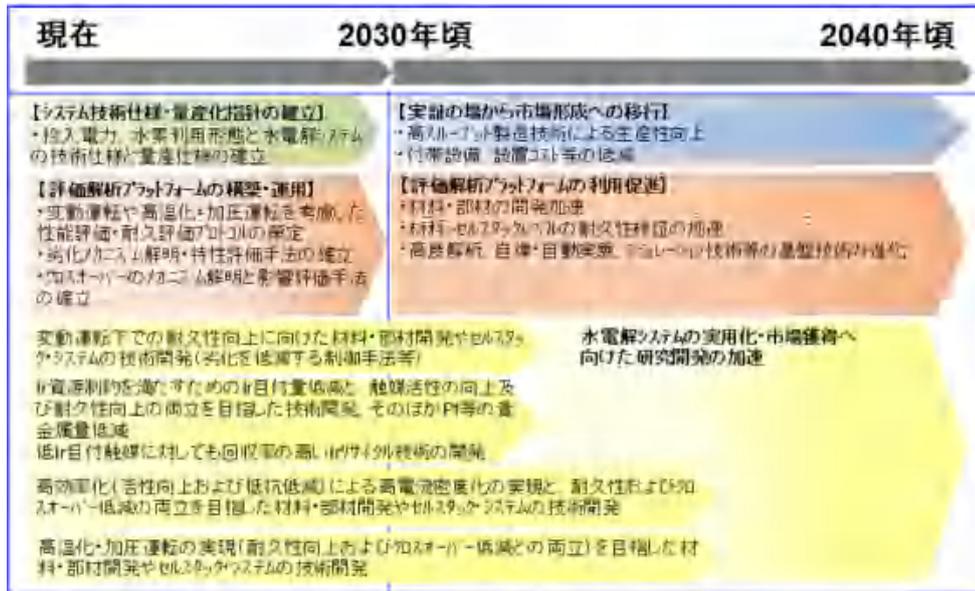


图2. 2. 6-1 PEMWE技术发展场景

表2. 2. 6-2显示了PEMWE的技术开发课题和目标值，以及目标和设想的方针示例。在此，根据图2. 2. 6-1的场景，我们将讨论到2030年的技术开发问题和到2040年的技术开发问题（①确保启动、停止和波动的耐久性，应按时间顺序优先考虑）和减少贵金属量，

②提高效率、实现高温、加压运行，需要长期努力）分为三类。在技术开发课题中，关于技术规格制定和评价分析，由于很难设定定量的目标值，所以定性地记载了内容。

将得到的技术开发课题按各部件整理的结果汇总于表2. 2. 6-3。在这里，以对比的形式明示了每个部件相反的技术课题。另外，关于成为特别重要课题的耐久性，表2. 2. 6-4总结了设想的运转模式和目前认为的劣化机理和应对方针等。关于老化，需要推进机理的阐明、评价分析方法的开发、评价方法的标准化等，并制定技术开发方针，因此，在本路线图中将这些课题作为根本的同时，将记载基于当前设想的技术开发项目。

另外，关于活性的提高和阻力的降低，达到动作点性能很重要，也可以根据技术开发的难易度设定不同的值。与今后的实证和技术开发的进展一起，更新路线图也是重要的课题。此外，工作点电流、性能和耐久性、总资本成本之间也存在权衡关系，例如可以考虑用更低的工作点电流和性能重视耐久性，降低氢制造成本等战略。关于这些，与今后的实证和技术开发一起反复研究，将目标值具体化也是很重要的。

表2.2.6-2 PEMWE的技术开发项目和目标值

	技术开发课题	目标值	目标	设想的方针的例子
到2030年左右的技术开发	技术规格制定	以将来的再生能源系统电力的活用为前提,考虑了耐久性提高、高性能化、高温化、加压运转等 为了确立PEMWE的技术规格,根据实证的技术开发状况持续更新。		
	评价分析	制定用于变动运行下的性能评价和耐久评价的协议,并应用于技术开发。另外,将推进劣化机制、物质运输机制、跨界机制的阐明等。(特别是阳极催化剂层和 PTL包复,电荷质膜。)还实现了基于DX的材料开发加速等。		
	降低总资本成本	假设通过比现在大100倍的数量效果降低成本 额定(22万日元/kW)	为降低成本确立批量生产规格	电解槽及配套设备批量化指南的探讨
到2040年左右的技术开发①	提高耐久性	变动运转下堆栈更换时间90,000小时	降低制氢成本	在确立耐久评价协议的基础上,进行各种部件的耐久性提高对策的研究和系统控制方法的开发等
	降低Ir单位面积重量	0.10mg/cm <sup>2</sup> 水准(1.8V 4.0A/cm <sup>2</sup> )	避免Ir资源约束 降低电解槽成本	催化剂载体和纳米结构的改进和非PGM催化剂的讨论等
	阴极催化剂 降低Pt单位面积重量	0.1mg/cm <sup>2</sup> 水准	避免Pt资源约束 降低电解槽成本	燃料电池催化技术的应用及水电解适宜规格的探讨
	PTL/BPP的Pt科 减少绕线量	0.1mg/cm <sup>2</sup> 水准	避免Pt资源约束 降低电解槽成本	实现接触电阻降低和耐久性提高的涂层 摇摆材料的探讨
到2040年左右的技术开发②	高电流密度化	1.8v 4.0a/cm <sup>2</sup> 拉上	降低资本费用对制氢成本的贡献	结合耐久性提高的权衡解决、性能提高来进行
	电阻的降低	1.8v 4.0a/cm <sup>2</sup> 的水准 (作为标准,电阻值 0.07Ω·cm <sup>2</sup> (基准IV 相当于膜厚76.2μm))	实现高电流密度化	薄膜化和耐久性确保(增强材料和猝灭剂的导入)、烃系电解质膜等的活用、电解质材料的研究开发、接触电阻等的膜以外的电阻成分的减少
	活性提高	1.8v 4.0a/cm <sup>2</sup> 的水平 (作为标准,质量活性为 32,000a/g @ 1.5V)	实现高电流密度化	催化剂载体和纳米结构的改进等
	加压运转	堆叠动作压力上升到 3MPa	提高海外市场的竞争力 减少气泡影响	降低交叉、确保各部件耐久性、降低效率的对策
	高温运转	使运转温度上升到80℃ 左右	性能提高 冷却性能的提高	确保耐久性
	降低总资本成本	5.7万日元/kW (工作点1.8V at	降低制氢成本	实现高吞吐量的工艺技术 开发、附属设备的制造成本、安装成本和间

表2. 2. 6-3各部件的技术开发课题

部件	挑战与权衡	技术开发方向的例子	目标值等
电池组	支持启动、停止、变动运行 ↕ 耐久性的提高	降低部件间接触电阻，保证部件均匀性 减少伴随起动停止和变动运转的劣化的控制技术的开发 讨论合适的运行范围 量产性的提高	变动运转下的堆栈交换时间 90,000小时
MEA	高电流密度化 ↕ 耐久性的提高	可高电流密度化部件的开发和MEA的构成 MEA中优化运输的结构探讨	最大工作点1.8V 4.0a/cm <sup>2</sup> 实现 变动运转下的堆栈交换时间 90,000小时
阳极催化层	降低Ir单位面积重量 ↕ 提高活性提高 耐久性	载体和纳米结构等以低单位面积重量即可提高活性耐久性的催化剂的开发 Ir催化剂老化机理阐明及评价 价格分析方法的研究开发 (回收利用效率化实证、激励的强化)	最大工作点1.8V 4.0a/cm <sup>2</sup> 实现 作为Ir单位面积重量为0.10mg/cm <sup>2</sup> 提高活性(作为标准, Ir单位面积重量0.10mg/cm <sup>2</sup> 相对于此, 作为基准IV的10倍为32,000a/g @ 1.5v ) 变动运转下的堆栈交换时间 90,000小时
阴极催化层	降低Pt单位面积重量 ↕ 活性的提高 耐久性的提高	技术在燃料电池中的运用 (适合作为水电解用催化层活性或耐研究耐久性、物质输送性等)	变动运转下的堆栈交换时间 90,000小时 作为Pt单位面积重量为0.1mg/cm <sup>2</sup> 以下水准
电解质膜	电阻的降低 ↕ 减少交叉 耐久性的提高 支持PFAS	烃类膜和新型离子交换树脂等的开发 跨界原理阐明和评价方法的开发 GRC (地理信息分类目录)的开发 劣化机理的阐明及评价分析方法的研究开发	最大工作点1.8V 4.0a/cm <sup>2</sup> 实现 降低电阻(大致为电阻值0.07Ω·cm <sup>2</sup> ) 跨界为25.4μm水 研究了相对于准3MPa可以充分降低阳极氢氧比率的水平 变动运转下的堆栈交换时间 90,000小时
ptl bpp	减少贵金属涂层 ↕ 接触电阻的降低 耐久性的提高	可避免接触电阻增加的涂层材料研究 合理贵金属单位面积重量的探讨 PTL/BPP劣化机理阐明及评价方法的研究开发	变动运转下的堆栈交换时间 90,000小时 作为Pt单位面积重量为0.1mg/cm <sup>2</sup> 程度以下的目标

表2. 2. 6-4各运行模式和部件设想的老化机理和应对措施

运行模式	阳极催化剂层	阴极催化剂层	电解质膜	ptl bpp
正常运转引起的劣化	高电位下溶解 高电流密度下劣化	— <sup>97</sup>	持续交叉泄漏 (由过氧化氢生成引起的自由基的产生) 连接压力引起的蠕变	高电位下溶解 阴极面电子传导性降低 阴极面上的氢影响(脆化等)
由变动运行引起劣化	Ir催化剂电位变动引起的溶解和催化剂剥离	Pt催化剂电位变动引起的溶解	恒流时产生的交叉泄漏(由过氧化氢的生成引起的自由基的产生) 压差变动引起的机械的劣化	— <sup>98</sup>
起动停止引起的劣化	对于停止时的交叉泄漏更极端的电位变动 ( Ir催化剂的还原)	停止时的交叉泄漏引起的极端电位变动	停止时产生的交叉枸杞(由过氧化氢的生成产生自由基)	停止时的交叉泄漏引起的极端电位变动
应对措施 研究开发方针	Ir单位面积重量的增加 提高Ir催化剂的耐久性 (在载体和纳米结构上下功夫) 变动运转和起动停止的控制 (电位窗、清除、关闭电压等) 抑制热点等高电流密度条件变动运行下的偏差 减少交叉泄漏 劣化机理阐明, 评价分析方法开发	Pt单位面积重量的增加 提高Pt催化剂的耐久性 (载体或纳米结构的改进) 变动运转和起动停止的控制 (电位窗、清除、关闭电压等) 抑制热点等高电流密度条件变动运行下的偏差 减少交叉泄漏 劣化机理阐明, 评价分析方法开发 燃料电池中的技术和知识意见的活用	开发对减少交叉泄漏、提高耐久性有效的素材 GRC的引进( GRC的耐久性也很重要) 猝灭剂的引进 抑制热点等高电流密度条件变动运行下的偏差 电解质膜的清洁 劣化机理阐明, 评价分析方法开发	耐久性优异、接触电阻低的涂层材料的开发 贵金属单位面积重量的优化 劣化机理阐明, 评价分析方法开发

<sup>97</sup>虽然设想阴极为还原气氛, 因此难以劣化, 但有必要明确有无与耐久性相关的课题。

<sup>98</sup>虽然设想电位变动对直接老化的影响很小, 但是有必要明确有无耐久性方面的课题。

### 2.2.7 电池组

- 在电池组水平上，需要设想启动·停止·高密度运转·再能源直接连接运转·高温加压运转等运转条件，在弄清楚劣化机理的同时，构筑与实机运转相对应的评价协议。
- 为了降低部件间的接触阻力，有必要进行与接触对象部件合作的开发，而不是关于单独部件的开发。例如，如果是PTL的话，就需要与电解质膜和催化剂层等合作进行开发。为了有效地推进这些的机制的完善也很重要。关于减少接触，将在2030年左右开发基础性技术，并面向2040年推进实现。
- 关于各部件产生的劣化，实现不产生劣化的控制也是有效的对策。考虑到启动停止和变动运转等条件，开发合适的电池组控制技术是重要的技术开发课题，要求在2030年左右之前开发基础性技术，并在2040年实现实用化。
- 从电力成本、降低劣化、确保安全性等观点出发，对于在什么样的运行范围下进行控制(特别是停机电流的设定和低电流时的控制)也需要确立想法。
- 为了支持电解槽设计，有必要确立二相流模拟技术。具体来说，就是支持双极板、PTL等的设计，实现水的均匀供应、高效的气体排放等。与模拟的活用一起，进行可视化单元的设定，进而与包含评价条件·材料的标准单元的设定、电解槽的各种功能确认用尺寸的单元的设定等相关联，继续进行电解槽设计的更高水平的工作也很重要。
- 从电池堆结构的角度来看，实现高可靠性密封件的实用化也是一个重要的问题。在国外，出口压力约为3MPa的水电解装置是主流，而在日本，《高压气体安全法》对在常用温度下表压为1MPa或更高的压缩气体的制造有规定，目前主要的例子是水电解装置的出口压力小于1MPa。设想未来我国水电解装置走向海外，为了提高国际竞争力，加快研发具有与海外兼容的规则和规范的水电解装置成为必不可少的。特别是车载燃料电池的密封没有设想3兆帕的高压，燃料电池的技术不能直接转用。因此，为了开发能够承受PEMWE高压运行的密封技术，有必要从种子探索和基础研究阶段开始，即在加压条件下长时间耐久运行和开发不溶于纯水的材料。
- 从生产技术的角度来看，有必要通过电解槽制造的高吞吐量来实现生产率的提高。电池和堆叠组装的自动化、质量控制和制造工序数量的减少非常重要，机器人、自动和自主系统、利用人工智能的图像和数据分析的质量控制、过程信息学等制造工序的优化等，需要结合各种工具进行技术开发。
- 考虑到将来随着水电解装置的大量引进而导致Ir资源枯竭的可能性，不仅要减少Ir的使用量，还要开发从电解槽中回收和再利用Ir的再循环技术。回收就是拆解电解槽、拆解电堆，它由分离CCM和回收贵金属的漫长过程组成。特别是，考虑到降低Ir的重量也是一个重要问题，因此贵金属含量较低

由于回收难度增加，盈利能力下降，因此贵金属使用量的目标需要考虑性能、耐用性和可回收性来确定。

### 2.2.8 膜电极组件(MEA)

- 在MEA水平上，需要设想启动、停止、高密度运转、再能源直接连接运转、高温加压运转等运转条件，在阐明劣化机理的同时，构建与实机运转相对应的评价协议。另外，推进催化剂层及电解质膜中水、各气体、质子等的输送现象的阐明也很重要。
- 为了有效地向催化剂层供水，促进气相排出很重要。与AWE相比，在PEMWE中能够实现大电流密度化的原因在于，电解质膜的电阻小，并且与在PEFC的催化剂层中实现溶解有反应气体的界面和反应界面的分离，实现反应界面的飞跃性增大的情况相同，实现了PEMWE的催化剂表面的反应界面和气泡发生界面的分离，向反应界面的 但是，PEMWE对催化剂层内电子、质子、气相、液相运输机制的阐明还不充分，在借鉴PEFC机理阐明的基础上，基于运输机制优化了催化剂层、MEA的结构，同时给出了优化结构MEA的制备方法 有必要以到2030年左右为目标，以各部件的研究开发成果为基础，有效利用基础技术开发和机理阐明的成果，以使用降低Ir单位面积重量的催化剂为前提，进行提高耐久性、实现高电流密度对应的MEA的开发。
- 有必要以2035年左右为目标，确保在设想了启动停止和再节能直接连接运转等的变动运转下的充分的耐久性，以及应对高温化加压运转。
- PFAS对应的观点也很重要，有必要推进从PFAS对应离聚物的技术开发到实用化的措施。
- 从MEA生产技术的高吞吐量的观点来看，在2030年之前开发RtR和两面连续涂布等低成本连续生产技术和质量偏差的抑制技术，面向2040年推进实用化·高度化也是重要的。

### 2.2.9 电解质膜

- 对于电解质膜，也需要设想启动·停止·高密度运转·再能源直接连接运转·高温加压运转等运转条件，在阐明劣化机理的同时，构筑与实机运转相对应的评价协议。特别是推进实机环境的再现、跨界原理的阐明、对运转条件的依赖性的把握和评价方法的确立、启动·停止·负荷变动引起的机械化学劣化机理的阐明。
- 特别是，为了高电流密度化的电阻降低和交叉的并存，即使在不考虑加压运转的阶段，从安全性的观点来看也是课题。例如，Phan等人文献<sup>99</sup>中示出了关于N117（膜厚183 μm）、N115（膜厚127 μm）和N212（膜厚50 μm）的情况的交叉系数，在使用该交叉系数而使膜厚为3/7(76.2 μm)的情况下，在常压运转时的阳极侧的 常压

---

<sup>99</sup>T. Phan et.al ., Int. J. Hydro. Eng ., 49 (2024 ) 875-885

即使是驾驶也大概是 $0.1\text{A}/\text{cm}^2$ 以下( N212时约为 $0.2\text{A}/\text{cm}^2$ 以下)的低电流密度下, 有爆炸危险性的氢-氧比率为2%, 因此如果通过薄膜化实现电阻降低, 则必须采取应对措施。当然, 电阻降低不仅要通过薄膜化来实现, 还需要改善电解质膜材料, 以及同时实现接触电阻等其他电阻降低。

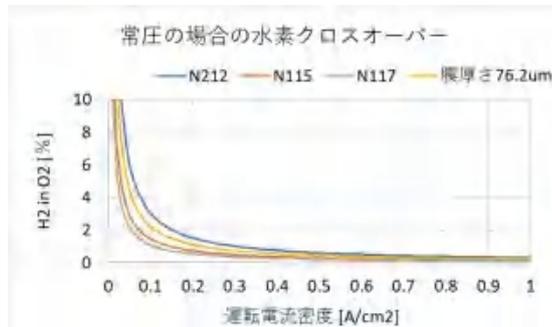


图2. 2. 9-1常压情况下氢交叉估算阳极侧氢氧比率

- 作为降低跨界的技术, 有在电解质膜内或阳极装入促进氢和氧再结合成水的反应的催化剂即GRC(Gas Recombination Catalyst ), 防止氢和氧混合的技术、跨界量少的烃系的膜等 例如, 关于GRC, 有在DOE AMR2023中发表的事例, 如图2. 2. 9-2所示, 有报告称通过引入GRC, 可以大幅降低交叉引起的阳极侧氢浓度。另外, 对于电解质膜材料也采取了各种各样的措施, 例如在图2. 2. 9-3所示的东丽的事例中, 得到的结果是, 通过改善电导率, 与现有的氟类膜相比实现了2倍左右的高电流密度化, 同时将交叉降低到了1/3。此外, 在作为文献报道的例子中, 存在通过使用PEEK (poly- ether-ether-ketone )类的膜能够兼顾相当于N212的电阻和相当于N115的交叉的结果(图2. 2. 9-4 )

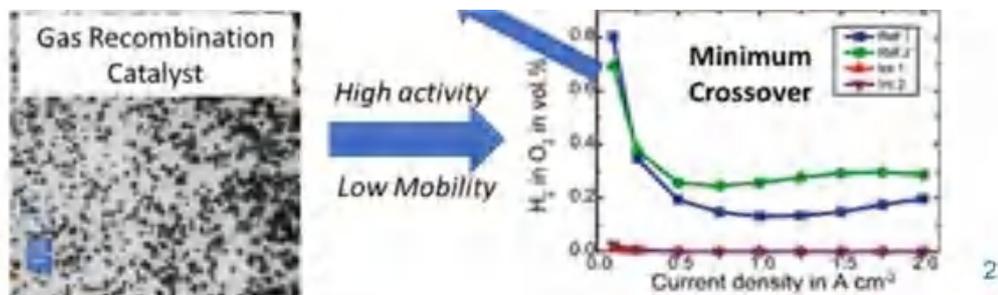


图2. 2. 9-2 GRC研究前期案例( DOE AMR 2023 )<sup>100</sup>

<sup>100</sup>DOE AMR 2023, “performance and durability investigation of thin, low crossover proton exchange membranes for water electrolyzers”

## 水電解装置における東レHC膜の付加価値

TORAY  
Innovation by Chemistry

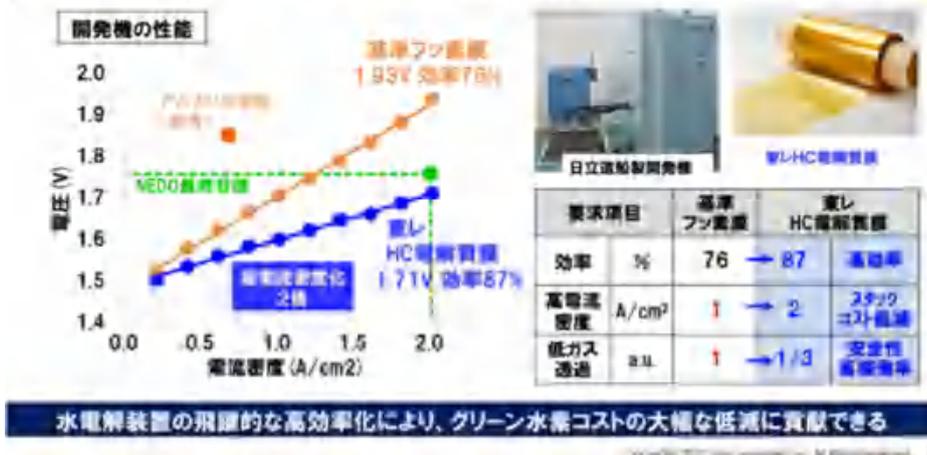


图2. 2. 9-3烃类膜提高性能的前期案例(东丽)<sup>101</sup>

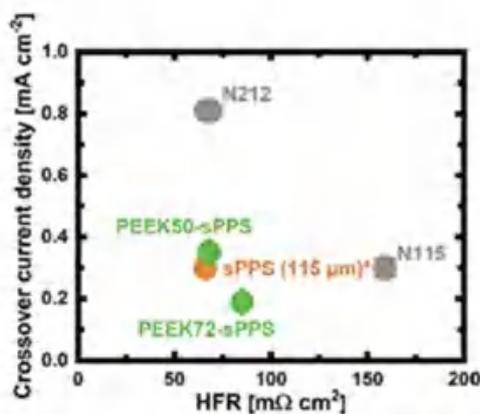


Figure 6. Crossover current density plotted over HFR for PEEK72-sPPS and PEEK50-sPPS (green), sPPS (orange, thickness: 115 μm<sup>102</sup>), and Nafion 212 as well as Nafion 115 (grey). Error bars are present but confined to a minor region. <sup>102</sup>Data obtained by Elise et al., measured at oversaturated condition and ambient pressure.<sup>101</sup>

图2. 2. 9-4使用peek类膜提高性能的措施示例<sup>102</sup>

- 有报告称，在阳极侧，电极催化剂的Ir因高电位而溶解的现象。如果溶解的Ir侵入电解质膜或离聚物而形成自由基，则有可能加剧化学劣化。例如引入参考燃料电池的猝灭剂等，需要确保阳极电位下的自由基耐受性。
- 在设想将来的加压运转和差压运转的情况下，对电解质膜所要求的性能的要求水平会变高。在加压条件下，维持机械特性是重要的课题之一。另外，还需要开发一种既能通过降低过电压实现高电流密度运行，又能通过抑制交叉泄漏实现高安全性·高运转率的电解质膜。
- 以2030年左右为目标，推进兼顾电阻降低、低交叉、高耐久性的电解质材料的研究开发，进而到2035年左右发展该研究开发，在80℃的高温运转下达到3MPa

<sup>101</sup>东丽为实现氢社会的努力( METI第28届氢燃料电池战略协议会( 2023 ) )

<sup>102</sup>R. Qelibari et, al ., adv.energy mater.2024, 14, 2303271

的加压运转，在变动运转下实现高耐久性的电解质材料的开发、并，面向2040年的实用化。

- 可以设想，将来与现状的电解槽相比，将引进更高性能的新一代电解槽。因此，除了设想搭载于现有电解槽的电解质膜的\机械特性和耐久性的提高\之外，还需要开发实现设想搭载于下一代电解槽的\高耐久、高安全性、高运转率\的下一代电解膜的技术。
- 现在成为主流的Nafion将来有可能成为PFAS限制的对象，所以PFAS限制对应也是课题之一。关于这一点，也有可能援引燃料电池方面的研究成果。
- 从生产技术的观点来看，要求开发以低成本连续生产具有低电阻、高传导率、低透过、高耐久等性能的电解质膜的技术，并将其实用化。
- 为了加速部件的开发，有必要进行大学和企业的无缝合作，以便企业可以马上对在大学研究的材料进行试验，作为应该联合努力的课题之一，有面向大型化的面稳定化技术的开发。

#### 2.2.10 阳极

- 关于阳极，还需要假设启动/停止、高电密运行、可再生能源直接连接运行、高温和加压运行等运行条件，阐明劣化机制，并构建与实际设备运行相对应的评估协议。特别是，有必要再现真实的机器环境，阐明由启动/停止/负载变化引起的机械/化学劣化机制，并对劣化机制进行建模，如燃料电池催化剂中所讨论的。
- 需要开发一种在减少极其稀有金属Ir的使用量的同时确保耐久性的方法。此外，当负载波动或启动停止时，阳极催化剂报道了Ir的溶解现象等，需要提高波动操作时的耐久性。
- 就目前阳极催化剂中的Ir用量而言，对于将来GW规模的PEMWE的导入，资源量可能会不足。因此，大大减少阳极催化剂中Ir用量的技术对于PEMWE的推广是必不可少的。为了开发既能减少Ir用量又能兼顾性能和耐久性的催化剂，迫切需要制定能够再现长时间运转下劣化模式的耐久性评价协议。人们正在研究各种方法，例如使用合金催化剂和设计催化剂纳米结构，但初始性能相当低。虽然有些产品通过Ir重量实现了高性能，并且在耐用性方面也可以期待一定程度的提高，但到2024年，我们正处于应该考虑各种选择的阶段。
- 2030年左右为目标，催化剂的纳米结构和载体的功夫等，实现Ir基重的降低和活性提高、耐久性提高的技术开发和设想高电流密度运转和波动运转确保耐久性的技术开发等，2035年左右为目标，电阻降低、低交叉、高温运转、加压运转，波动运转下实现高耐久性的阳极催化剂的开发连接到2040年的努力要求实用化。
- 关于Ir的洗脱，有报道称，在同一催化剂中，每催化剂表面积的Ir洗脱速率与氧生成电流成正比。即改进催化剂以实现大电流操作以降低制氢成本。

如果不这样做，就有可能以抵消高电流化带来的成本降低效果的形式缩短堆叠寿命。因此，提高Ir催化剂的耐久性是很重要的，为了确定催化剂的发展方向，有必要进一步验证催化剂洗脱速率对产氧电流的依赖性。

- 关于无贵金属催化剂的开发，即使仅在有限操作条件下可用的第一代（Gen1）无贵金属催化剂已经从种子探索进入研究开发阶段，也有必要继续种子探索，以实现具有更低成本和更高耐久性的第二代（Gen2）无贵金属催化剂。
- 从生产技术的观点来看，当使用低Ir基催化剂时，催化剂的均匀分散变得困难，因此需要开发和实际应用稳定地生产低Ir基催化剂层的技术。

#### 2.2.11 阴极

- 对于阴极，还需要假设启动/停止、高电密运行、可再生能源直接连接运行、高温和加压运行等运行条件，阐明劣化机理，并构建与实际设备运行相对应的评估协议。特别是，有必要再现真实的机器环境，阐明由启动/停止/负载变化引起的机械/化学劣化机制，并对劣化机制进行建模，如燃料电池催化剂中所讨论的那样。
- 假设将来在全球引入GW规模的PEMWE装置，减少阳极催化剂中的Ir使用量是一个紧迫的问题。另一方面，由于以下原因，假设阴极催化剂中使用的贵金属（Pt）的还原/释放不如阳极优先。
  - 在燃料电池电极的开发中，已经在努力减少Pt的使用，在燃料电池中培养的还原技术可以用于PEMWE的阴极催化剂。
  - PEMWE还使用Pt作为PTL和BPP的涂层材料，从减少电解槽总Pt使用量的观点来看，减少涂层中的Pt使用量的贡献更大。

由于这些原因，在阴极催化剂中无贵金属的努力相对较低。

但是，将来在燃料电池、PEMWE都以GW规模导入的情况下，Pt有可能会不足，而且PEMWE还需要更低的成本，从中长期的观点来看，PEMWE也有必要致力于阴极催化剂的无贵金属化。

- 关于阴极催化剂，可以以燃料电池催化剂为基础进行研究，但要求开发低Pt单位面积重量且具有与变动运转等水电解相符的性能和耐久性的催化剂，以2030年左右为目标进行催化剂的开发，设想面向2040年推进实用化的措施。

#### 2.2.12 多孔传输层（PTL）

- 关于PTL及BPP的技术课题具有一定程度上相似的方向性。关于PTL及BPP，也设想了启动·停止·高密度运转·再生能源直接连接运转·高温加压运转等运转条件，在阐明劣化机理的同时，构筑了与实机运转对应的评价协议

有必要。特别是，需要弄清接触电阻增大的过程和开发耐久性预测方法。

- 与电解质膜的电阻降低一起，接触电阻等的降低也是实现高电流密度化的重要课题。
- 需要通过基于模拟技术设计PTL结构来提高气泡排放性能等。
- 为了抑制在来自催化剂层集电面形成钝化所引起的电子传导性降低、酸性高电位环境引起的腐蚀，需要在PTL表面涂敷贵金属，但由于是酸性高电位下，因此需要利用Ir和Pt，成为高成本的主要原因。因此，需要开发通过减少贵金属使用量来实现低成本化，且维持耐久性
- 作为阳极PTL的材料，目前主流的Ti成本较高，需要开发降低Ti使用量的技术，以及开发替代Ti的材料。
- 关于兼顾无贵金属和耐久性的涂层技术的开发，即使仅在有限运行条件下可用的第一代（Gen1）涂层技术已经从种子探索进入研究开发阶段，为了实现具有更高耐久性的第二代（Gen2）无贵金属涂层技术，也有必要继续种子探索。
- 目前，PTL材料的润湿性、孔的结构和尺寸分布对气泡排出的影响尚未得到充分阐明。因此，有必要阐明PTL中气泡的排出机理，根据排出机理优化结构，并研究最佳结构PTL的生产方法。

### 2.2.13 双极板(BPP)

- 如关于PTL所述，对于BPP，还需要假设启动/停止、高电密操作、可再生能源直接连接操作、高温和加压操作等操作条件，以阐明劣化机制，并构建与实际机器上的操作相对应的评估协议。特别是，需要阐明导致接触电阻增加的过程，并开发耐久性预测方法。
- 与PTL类似，需要在表面涂覆贵金属，以抑制由于PTL和BPP界面钝化而导致的电子电导率下降、酸性/高电位环境引起的腐蚀以及酸性/低电位环境引起的洗脱，但用于涂覆的贵金属是高成本的因素之一。因此，需要在减少使用量的同时保持耐久性的开发。
- 作为阳极BPP材料的主流Ti成本高。因此，有必要开发减少Ti使用量的技术，并开发替代Ti的材料。在PEMWE中，也希望能够像燃料电池的BPP那样冲压成型或模压成型的金属材料。
- 关于无贵金属表面涂层技术的开发，即使仅在有限操作条件下可用的第一代（Gen1）涂层技术已经从种子探索进入研究开发阶段，也有必要继续种子探索，以实现具有更低成本和更高耐久性的第二代（Gen2）无贵金属表面涂层技术。

#### 2.2.14 评估分析/标准化

- 在推进到2040年左右为止的技术开发时，与到2030年为止的“实证场”的措施一起，推进评价分析的技术开发以及评价协议的开发和加速耐久试验法的确立、评价的标准化等，活用于要素技术开发是最重要的。
- 配合评价分析技术的开发，在对材料开发和电池组开发应用评价分析的同时，要求将实际的评价结果和见解反馈给评价分析技术开发。另外，对于系统层面的技术实证，在从实证项目接收数据并推进评价分析方法验证的同时，进行对实证事业的反馈也是很重要的。
- 材料水平
  - 有必要完善用于评价各个材料的评价协议，以及评价方法的标准化。由于水电解的运行条件中假定了以变动运行等为首的具有一定幅度的条件，因此需要开发能够简洁地评价这种广泛条件的材料评价协议。
  - 开发出能再现在实际机器中使用材料的环境和条件的评价协议，通过确立加速耐久试验法，可以进行在实际机器中使用材料时的性能评价和耐久性预测。
  - 从材料开发的观点来看，需要开发支持MI（材料信息学）等材料探索的分析分析技术。
  - 为了进行电极催化剂的开发，开发与电子状态相关的高度操作数测量技术是有效的。
- 单元格堆栈级别
  - 作为开发的电极催化剂和电解质膜的MEA，有必要完善能够评价性能和耐久性的技术和研究开发机制。
  - 为了实现PEMWE的要求寿命（10年=约9万小时运转），开发能够在短时间内再现9万小时运转下的劣化模式的加速劣化协议是必须的。具体而言，期望能够在9万小时的百分之一时间即900小时以下再现。
  - 在加速老化协议的开发中，从材料开发效率化的观点出发，需要从早期可确立的范围随时公布成果，为了加速材料开发，与材料开发的研究者进行密切的合作。另外，从国际竞争力的角度来看，评价方法的标准化也很重要。
  - 活用经时劣化时的过电压分离和劣化机理阐明带来的见解，还需要开发耐久性能模拟技术和当场劣化诊断技术。
  - 为了将来实现高温化和加压运转，在评价这些参数对性能影响的同时，有望通过模型化推测影响。
- 系统级<sup>103</sup>
  - 作为电解装置有必要对以下内容进行标准化。

---

<sup>103</sup>关于系统层面的评价分析，为了明确表示与包括附属设备在内的技术实证的关联，在路线图中记载在了评价分析项目的下方。

- ◇ 作为电解装置(也包括电池以外)原单位( kWh/Nm<sup>3</sup>)的测定方法(动作模式、环境条件等)的标准化
- ◇ Beginning of Life(BOL )结束生命( eol )定义的标准化
- ◇ 作为电解装置(也包括电池以外)劣化性能的测定方法(工作模式、环境条件等)的标准化
- ◇ 作为电解装置(也包括电池以外)的各种性能(变动速率等)的测定方法(工作模式、环境条件等)的标准化
- ◇ 作为电解装置(也包括电池以外)的LCA的标准化
- 在将来实现高温化和加压运转时, 在评价这些参数对性能影响的同时, 评价系统整体的效率和成本, 使系统制造商能够研究基于设计思想的优化是很重要的。
- 数值分析
  - 需要开发通过气液两相流分析技术等使单元内流体可视化的技术。
  - 通过开发不仅可以分析恒负荷运转时, 而且可以分析变动运转时的气液两相流分析技术的模型, 可以支持电解槽设计。 详情请参照AWE的记载。
  - 电极反应产生的氢和氧被认为溶解在离聚物中一次后变成气泡。气泡产生的机制尚不清楚, 例如溶解的物质在催化剂层和PTL的哪个位置产生气泡。通过应用数值分析阐明气泡产生的机理, 可以支持电极设计。
  - 在研究水电解装置的系统性能(原始单位、波动跟随性等)时, 有必要明确水电解装置的系统性能, 以达到使用水电解装置的最终用户对水电解装置所要求的操作条件和输出。需要开发用于根据运行条件等确定系统性能的系统仿真模型、单元劣化模型和性能评价模型等。
- 先进操作数测量技术的发展
  - 通过将基于高级操作数测量技术的气泡运动和气液两相流行为可视化技术与气液两相流数值分析技术相结合, 可以加速机理阐明和分析技术精度的提高。欲了解更多信息, 请参阅AWE的描述。
- 关于压力测试指南的创建, 请参考AWE的描述。

### 2.2.15 配套设施

- 关于配套设备, 沿用了2022年度课题提取的结果, 无法进行详细的讨论。为了将总资本成本降低到目标水平, 需要进行相应的技术开发, 包括量产化等, 这些将作为未来的课题加以指出。这是一个与上游问题(例如使用什么样的电力)和下游问题(例如生产什么样的氢气)相关的因素, 需要结合未来2030年至2035年左右的技术验证进行深入研究。

- 在配套设备中，整流器对水电解系统的成本贡献仅次于电解槽，转换效率的提高有助于降低电费，因此降低整流器的成本和提高转换效率是一个重要的课题。本次研究并未详细讨论与整流器相关的技术问题，需要结合2030年至2035年左右的技术示范来深化研究。
- 关于附带设备，认为撬装设计等对于降低设置成本是有效的。为此，电解槽的节省空间化也很重要，高电流密度化也有望有助于节省空间化。
- 对于高温和加压操作，需要压力/压差控制和温度控制。
- 在进行变动运行时，最优运行和预知维护的自动化被认为是重要的技术。需要针对功率波动优化BOP、保持氢气和压力的停止方案等。
- 为了在有效利用波动功率的同时减少劣化，将系统设计为多模块并最佳地运行每个模块的技术是有效的。
- 在PEMWE中，假设高电流密度操作和波动操作，因此需要整流器的高电流密度响应和低电流时的效率提高。

#### 2.2.16 技术验证

- 从技术实证的观点来看，有必要推进电解槽的启停耐久性的实证、能够评价大型装置的实证设备的构筑、实证机的增强、现场导入的结果的还原、系统连接时的调整力等的影响评价等。

#### 2.2.17 其他

另外，为了确保PEMWE的竞争力，需要讨论的重要项目如下所示。

- 发展方针
  - 为了理清上游电力采购和下游氢气利用之间的关系，制定明确的水电解系统技术规范和量产指南，包括温度和压力等运行条件，并将其推向市场，有必要研究和阐明日本未来如何找到PEMWE市场并创造竞争力的愿景。
- 材料开发系统
  - 为了支持材料开发，有必要建立一个机制，使学术界能够获得最新材料，并设定标准材料作为基准。
- 供应链
  - 目前，由于难以获得作为材料的氟本身，氟基膜的供应受到限制，成本很高。促进碳氢化合物膜的开发和氟的增产等，需要超越行业框架的供应链整体的支持。
  - 最近迫切需要确保辅机的电子部件的供应链，是迫切且不停留在水电解领域的课题。
- 完善法律

- 为了达到高再利用率，关于贵金属再利用和Ti零件的再利用，有必要完善防止作为工业废弃物废弃的法律，以及能够容易地从海外再进口堆的制度。
- 欧洲的PEM水电解制造商大多将3~5 MPa作为标准规格，可以设想这是出于向输气管道注入等运输、储藏用途的考虑。日本的堆栈、外围设备不致力于对应其规格的开发的情况下，在全球市场的份额上有可能会下降，但在现在的高压气体保安法的限制下，在1MPa以上的压力下进行的实验受到严格的限制，因此从加速研究开发的观点来看，讨论了某种限制的缓和等
- 管制对应
  - 有必要在掌握今后对PFAS法规的动向的同时，研究对电解质膜、离聚物等氟的法规的应对措施。

### 2.2.18 面向今后路线图讨论的课题

本研究探讨了面向2040年左右的PEMWE的技术开发目标，但根据今后的技术实证和技术开发，或者评价分析方法的开发和标准化等进行再研究也很重要。在此总结现状中设想的课题。

- 本研究主要关注电解槽的技术开发，但无法通过电解槽的技术进展和制造成本的降低来降低氢制造成本，需要在附带设备的成本降低、安装成本、间接费用等与总资本成本相关的系统整体上进行研究。关于这一点没有实施详细的讨论，所以是今后的课题。
- 在水电解中，根据利用什么样的电源的使用情况进行开发是很重要的，但这次假设通过充分廉价的再生能源（特别是假设PV）和系统电力的并用，可以以2.5日元/kWh左右的价格采购电力。正如总体方案（图1.4-1）所指出的那样，上游侧与电力的关系以及下游侧与氢利用的关系需要通过今后的技术实证进行讨论，但这种讨论也应该反映在路线图的修改和更新中。
- 关于电解槽性能的相关研究，在劣化机理的把握和定量预测方面仍处于研究开发阶段。在本研究中实施的模拟中，使用了ENEOS株式会社提供的“5000次启动停止时IV性能降低10%”的知识，以及参考文献中Ir基重量不同的劣化速度数据，假设这些劣化的影响是独立产生的。在考虑耐久性目标和提高耐久性的技术开发项目时，必须反映这些劣化机制和评价指标的研究和开发结果。
- 同样，由于没有关于高温化、加压运转的影响的评价指标，加上对配套设备也没有进行详细的讨论，因此无法讨论高温化、加压运转对系统效率和成本的影响，因此，基于这种讨论的性能评价、耐久性评价协议的制定也是今后要解决的课题。

- 关于交叉的机理把握也不充分，另外，特别是关于应该以到什么程度的运转范围作为下限来设想水电解的控制的想法也没有规定，因此不能设定关于减少交叉的定量目标。阐明交叉的机制和开发影响评价方法也是重要的课题。
- 与阴极催化剂的Pt基重相关的目标（水电解中阴极反应的催化特性的把握）、与PTL等耐久性相关的目标（因劣化而增加接触电阻的机理的把握）等，由于没有得到适当的评价指标而难以定量研究的项目也很多，因此有必要根据今后评价分析技术的开发进行更新和反映。

### 2.3 阴离子交换膜水电解的技术开发课题

由于AEMWE在碱性环境下具有不利用高成本贵金属的潜力，并且能够以与PEMWE类似的电池组结构实现高电流密度为目标，因此AEMWE受到关注。另一方面，目前其技术成熟度还不高，从世界范围来看，AEMWE的产品化状况也非常有限。特别是在小型系统方面，意大利的Enapter公司领先于世界

2.4 正在将kW的装置商业化。该公司通过大量生产该小型模块来降低成本，大功率应对是通过排列小型模块来进行的战略。另一方面，最近，美国的Verdagy公司的单元面积为2.85 m<sup>2</sup>的大型AEMWE的开发被发表了致力于此，今后的动向备受瞩目。两者中，小型AEMWE被设想为PEMWE的进化系统，Enapter公司商用化的系统采用了像PEMWE那样只向阳极侧供给电解液，阴极侧不供水的系统。另一方面，Verdagy公司致力于的大型AEMWE被设想为AWE的进化系统。由于小型、大型的AEMWE分别存在特有的技术课题，因此在《面向水电解技术开发路线图制定的课题整理》中将各自特有的技术课题明确记载为【小型】、【大型】。

另外，在AEMWE中，使用浓度1 M左右的碱性溶液作为电解液是主流。虽然这与AWE的电解液相比浓度较低，但进一步降低碱浓度具有抑制堆内单元间短路、减少配管中的Ni使用量从而降低附带设备的成本等优点，因此，最终也有望用于只供给纯水的AEMWE。

在上述背景下，AEMWE大致有两个方向，预计将来会得到有效利用。

①利用碱性溶液代替零间隙AWE的隔膜。通过相对于AWE降低碱浓度，也可以使用低成本的辅机，另外通过提高电流密度，以进一步降低成本为目标。

②供应比①更稀的碱性溶液或纯水，阴极侧为无供水运转，作为PEMWE的低成本电解装置型使用。通过与PEMWE类似的电池组结构，可以期待大电流化。另外，通过阶段性地实现无贵金属催化剂，以及在纯水供给运转的情况下不需要耐碱性部件，可以期待更低的成本。

另一方面，据报道，目前在纯水运行时电解性能和耐久性会明显降低，因此需要注意的是，实现纯水运行需要即使在纯水条件下也能够发挥高性能、高耐久性的部件。在世界上已经在进行使用碱性电解液的AEMWE的开发的情况下，为了实现最终的纯水运行，开发需要在关注世界动向的同时进行。可以说是对材料开发的进展带来的突破期待较大的领域。虽然采用纯水型具有不需要耐碱部件的优点，但是担心阴离子交换等会导致离子导电降低，作为应对，也有提高纯水纯度要求等缺点。需要验证采用纯水型的总效率、低成本效果，比较与稀碱型的优缺点，验证优越性。

为了实现AEMWE的社会安装，首先要在2030年之前制定技术开发目标，实施~1MW级的技术实证。之后，目标是到2035年左右确立实用化，实现社会。在那之后的五年多

以内为目标②推进稀碱溶液及纯水供给类型的技术开发。AEMWE需要满足低成本和高性能·高耐久性的材料设计，特别是在催化剂的情况下，需要在非贵金属类中实现高性能。另外，有必要开发着眼于海外使用的加压对应。为了能够应对各种各样的环境、使用条件，需要在各个部位降低设计论。

另外，为了在今后的变动·再生能源导入扩大下的活用，认为有必要提高耐久性和柔软性，因此，与AWE、PEMWE一样，强烈要求阐明劣化机理。以阴离子交换膜为首，需要开发能够有助于提高耐久性、安全性、开工率的材料。明确协调领域，通过性能评价·加速·劣化协议的构筑，加强国内的开发力。此外，AEMWE和PEMWE的结构相似，通过致力于开展在PEMWE中积累的生产技术开发等，可以高效地进行技术开发。另外，目标值在活用AEMWE型特征的同时，根据今后的动向进行设定。因为也可以看到电流密度提高的研究结果，所以在发挥AEMWE的优点的同时，也以高性能为目标。

### 2.3.1 膜电极接合体

- AEMWE也有望实现与PEMWE相媲美的高电流密度下的运行。与PEMWE的记载相同，作为高电流密度化的开发方针，有必要通过阐明电子、阴离子、气相、液相的输送机理，形成适当的三相界面，在谋求增大反应面积的同时，确保电子和阴离子的传导通路，降低传导电阻。
- 通过改变催化剂层结构，气泡排出性能、离聚物的供水性能等会受到影响，因此需要在考虑上述各种因素的基础上，对催化剂层进行优化。特别是，作为反应物种的氢氧根离子的浓度随着pH而变化，因此需要考虑pH变化时氢氧根离子向反应面的输送等，优化催化剂层的结构。
- 作为阴极侧无供水运转中的阳极催化剂层/PTL界面设计，气液分离设计对于伴随高电流密度化的泡沫发生对策很重要。
- 进行加压时的现象、劣化机理的阐明(性能提高主要原因和性能降低主要原因两个方面)，需要设计MEA构成部件。(预计将来最多3MPa左右)
- 作为MEA制造的方法，目前是在电解质膜上涂布催化剂的阴极射线管(CCM)和在PTL基板上涂布催化剂的阴极射线管(CCS)两者的开发正在进行的阶段。分别需要降低接触电阻和开发生产技术。
- 关于“MEA中的水气氢氧根离子输送现象的解释”，请参照PEMWE的记载。

### 2.3.2 电解质材料

- 阴离子交换膜与水接触时，膜的尺寸会发生变化，但这种尺寸变化在组装时会成为问题。为了提高生产率，从膜的基础设计阶段就需要确保供水时膜的尺寸稳定性。

- 在考虑电解质材料的耐久性时，对自由基的稳定性，也就是对化学劣化的耐性也是重要的因素。另外，由于在AEMWE中运行条件没有明确确定，也可以设想在高温下运行，因此耐热性的提高也很重要。
- AEMWE也和PEMWE一样，正在讨论只向阳极供给电解液的阴极侧无供水运转。但是，在阴极侧无供水运转时，由于不向阴极侧供给电解液，所以阴极侧的电解质膜、离聚物析出现象、阴离子交换膜的阴极侧的含水量降低导致膜内的碱浓度增加，膜劣化的现象等有可能发生。因此，有必要开发不仅能增大电解质材料的阴离子传导性，还能增大耐酸碱性和透水性。
- 在阴极侧无供水运转中，提高膜的液水透过能力很重要。另外，在薄膜化的情况下，抑制气体透过(交叉)和加强的技术很重要。对于催化剂层中的电解质材料(离聚物)，提高高氧透过能力(阳极)、高氢透过能力(阴极)是重要的，需要分析和抑制氢电位下的吸附结构。
- 将来，为了实现高活性、高耐久的电解质材料的实用化，从现在开始，有必要致力于基于新概念的好材料开发。作为材料开发的方针，例如，着眼于离子传导机制的电解质材料的开发等。
- 支持PFAS的开发是必须的。关注规定的动向，推进开发，以便在2030年左右能够应对。
- 有伴随阴极侧无供水运转时的水透过的钾移动、浓缩的危险。需要掌握现象和确认影响，明确抑制对策。
- 不仅是上述①和②的方式不同，根据开发厂商的电解池组的特点，对电解质膜的要求特性也不同。现状不清楚哪种形式能获胜。因此，为了满足具有主要特征的电解池组制造商的要求，提供具有特性的电解质膜，并在社会上进行努力，作为部件取得胜利，被认为是必要的。

### 2.3.3 电极催化剂

- 大气中的CO<sub>2</sub>混入碱性电解液的现象和AWE一样是个课题。特别是如AEM那样，使用稀碱溶液作为电解液时，由于CO<sub>2</sub>混入引起的电解液的pH变化更加明显。像这样，即使在电解液的pH随时间变化的情况下，也需要确保催化剂活性的对策。
- 由于AEMWE处于碱性环境下，因此具有不使用高成本贵金属的潜力，开发无贵金属催化剂是重要的技术开发项目。目前，关于阳极电极催化剂的无贵金属化还处于研究的阶段。阳极催化剂想在2030年前制定无贵金属技术开发的目标。另一方面，阴极电极催化剂的无贵金属化与阳极相比难度较大，需要进行包括无贵金属化验证在内的中长期研究。以兼顾性能和耐久性为目标，到2030年左右，低铂族化。为了在2040年前实现无贵金属化，需要推进技术开发。
- 阴极侧的低铂族化和无贵金属化，性能降低的影响很大。另外，与PEFC的阳极相比，其低铂族化影响更大。有阴极供液时的液/液界面设计、供液

也考虑了无时的气/液界面设计，低铂族化和无贵金属化的措施很重要。载体改良(碳和陶瓷)也是必要的。

- 阴极侧无供水运转、低pH、高电流密度、温度上升时离聚物的性能劣化很可能成为课题，需要开发。
- 离聚物的溶解度低会对MEA的油墨产生制约(离聚物相对于催化剂的比率无法列举)，难以找到催化剂层设计的最佳条件。

#### 2.3.4 多孔传输层( PTL )

- 在阴极侧无供水运转中，特别是通过PTL形成MPL来提高催化剂层的水保持能力是重要的。
- Ni作为PTL的候选材料正在被研究，但由于Ni的成本很高，因此有必要探索具有耐碱性的廉价替代材料，并开发廉价材料的涂层技术。此外，不仅为了降低成本，而且为了提高PTL的电子导电性和耐久性，新材料的应用是必不可少的。有必要寻找一种在提高性能和耐久性的同时降低成本的材料。
- 关于“气泡排出机制的阐明”，请参考PEMWE的描述。
- 在加压操作中，当产生压差时，支撑膜的是阳极侧的PTL，因此有必要开发PTL。
- 在Ni基材料中，当AEMWE启动和停止时，在电位范围内的氧化还原可能导致劣化。有必要推进PTL劣化因素的分析，看清有无影响并进行开发。此外，还需要制定腐蚀性评估协议。

#### 2.3.5 双极板(BPP)

- Ni被认为是BPP的候选材料，但由于Ni的成本很高，因此需要研究具有耐碱性的廉价替代材料。BPP的材料目前并不收敛，为了AEMWE的实用化，致力于寻找替代材料也很重要。此外，由于可以设想在廉价材料上涂覆贵金属，因此有必要开发涂覆技术。
- 与PTL一样，有必要对BPP的腐蚀和劣化因素进行分析，并制定腐蚀性评估方案。

#### 2.3.6 电池堆栈

- AEMWE仍处于材料开发阶段，堆叠结构也需要基础研究。例如，由于在AEMWE中使用碱性溶液，因此堆叠中的电池之间的液体干扰是一个问题。对于使用的材料、电解液的碱浓度等，适当的堆的构成还没有被阐明，基础研究是必要的。
- 在PEMWE中，只向阳极侧供给纯水的系统已经实用化。同样，在AEMWE中，也研究了仅向阳极侧供应电解液的阴极侧无供水操作。然而，在阴极侧无供水操作期间，电解液不供应到阴极侧，因此阴极侧

由于阴离子交换膜阴极侧的电解质膜和离聚物干燥的现象和阴离子交换膜的阴极侧的含水量的降低，膜中的碱浓度增加，膜劣化的现象等有可能发生。因此，需要通过适当控制电池中的水分来解决这些问题。

- 当面积变大时，需要提高流路后级侧的反应性。在高电流密度和大面积化的情况下，在流路后段，特别是在阴极侧，由于无供水而导致的干燥的影响可能会变大。分析面内分布的技术也很重要。
- 与PEMWE一样，除了需要致力于开发能够承受高压运行的密封技术外，还需要探索在碱性环境下适用的材料。
- 为了保持KOH浓度，假设进行适当补充纯水的操作，杂质在电解液中浓缩。由于对影响的杂质种类和影响程度的掌握是不够的，因此有必要掌握电解液中污染物的影响。

### 2.3.7 配套设施

- 关于“通过减少管道构件Ni的使用量来降低成本”，请参考AWE的描述。即使在不向阴极侧供应碱性溶液的阴极侧无供水操作的情况下，通过电解产生的氢也可能含有氢氧化钾。为了生产高纯度的氢气，有必要致力于提纯装置的开发。

### 2.3.8 评估分析/标准化

- 材料水平
  - 有必要利用DX进行进一步的高性能化开发。利用计算科学和信息学技术构建新材料探索基础，并将其用于开发是非常重要的。
  - 有必要制定评估方案来评估单个材料，并使评估方法标准化。从劣化机理的阐明出发，进行加速劣化协议的整备，开发的加速化是必要的。
  - 在评价阴离子交换膜的性能时，存在着由于膜吸收大气中存在的二氧化碳而改变膜的阴离子电导率的问题。有必要建立考虑大气中存在的二氧化碳影响的标准性能评价方法，使性能能够横向比较。
- 单元堆栈级
  - 作为开发的电极催化剂和电解质膜的MEA，有必要开发能够评价性能和耐久性的技术和研究开发机制。
  - 为了达到水电解槽的要求寿命（10年=约9万小时运转），必须开发能够在短时间内再现9万小时运转下的劣化模式的加速劣化协议。具体地，希望能够在900小时或更短的时间内再现，即90,000小时的百分之一。
  - 在加速劣化协议的开发中，从材料开发效率化的观点出发，有必要在早期确立的范围内随时公布成果，为了加速材料开发，与材料开发的研究人员进行密切的合作。此外，从国际竞争力的角度来看，评估方法的标准化也很重要。

- 系统级
  - 为了评价系统的性能，有必要制定评价协议，并对评价方法进行标准化。
- 数值分析
  - 关于“气泡排出机制的阐明”，请参考PEMWE的描述。
  - 在研究水电解装置的系统性能（原始单位、波动跟随性等）时，有必要明确水电解装置的系统性能，以达到使用水电解装置的最终用户对水电解装置所要求的操作条件和输出。需要开发用于根据运行条件等确定系统性能的系统仿真模型、单元劣化模型和性能评价模型等。

- 先进操作数测量技术的发展

关于通过高级操作数测量技术实现气泡运动和气液两相流行为的可视化技术与气液两相流数值分析技术的合作，请参考PEMWE的描述。

## 2.4 固体氧化物电解的技术开发课题

在2022财年实施的《水电解技术发展路线图制定问题整理》中，SOEC部分列出了材料层面的技术开发问题（电极、电解质），以便与其他电解路线图保持一致。分为四个部分：电池堆级技术开发问题、系统及配套设施（SOEC特有）技术开发问题、评价分析技术开发问题。此外，《固定式燃料电池路线图》中与SOFC和rSOC（可逆固体氧化物燃料电池-水蒸气电解电池）相关的部分存在共同问题。<sup>104)</sup>等共同的项目等，这一点是固有的。

另外，根据四个分类补充技术开发课题如下。另外，作为当时的回顾

●定量目标的设定、●用例的分类具体化、●投入的电力的变动和伴随的启动・停止的特征作为之后的工作的课题。为了应对错误的这些课题，有必要从后向视角进行适当的目标设定。要发挥SOEC的高效率特性，不仅是电力供给条件，热利用条件也是运转条件的重要条件，对电池组及其要素技术有很大影响。因此，与其他电解方式相比，有必要进行高级别研究。因此，在这次的讨论中，设想了2040年的“应有状态”，为了实现社会实施，只停留在以加速和应该强化的技术开发课题为开头的讨论上，个别的技术开发课题的重新审视包括目标设定的讨论在内，在持续的讨论中实施。

另外，以下是面向今后讨论的现状的课题认识。继续基于这些观点的讨论和讨论，推进对个别技术开发课题及其达成目标的设定和更新，同时，对于可以着手的课题，通过尽早着手，提高达成目标的准确度的措施也是必要的。

### ○SOEC的市场需求(路线图:转载于“SOEC系统状态”)

鉴于2040年后氢气市场的扩大，需要满足大量氢气需求的制氢设备，SOEC也需要扩大规模。作为SOEC的一个特性，在未来的放大过程中，假设由多个以数十kW至为单位的堆叠或电池组件（例如圆柱形）组合而成的模块（100kW至）或由多个电池组或电池组件组合而成的MW级集装箱大小级别的模块（与其他电解方法一样）将成为系统化时的基本配置，并且可以灵活地应对从大规模到小规模分布式类型。此外，根据热力学原理，SOEC可以用比其他电解方法更少的电力生产氢气，但需要水蒸气的汽化热，特别是通过与使用氢气的燃料合成（碳氢化合物、氨）的反应热的组合，以及与低温和高温热的组合，效率上升幅度扩大，因此预计将有利用SOEC的高效率特性实现高效P2G系统的利用和选址条件。在日本2050年碳中和的供需分析中，有分析显示了海外进口氢气的重要性，因此在海外可再生能源适宜地区的大规模制氢市场上的竞争力也很重要，因此降低SOEC系统的成本也至关重要。

### ○运行条件/热利用条件

---

<sup>104)</sup>以下，有时缩写为“rSOC”。

在SOEC中，考虑了各种运用条件及热利用条件的开发构想。这些都是以具有变动性的可再生能源的利用和SOEC的特性（与热的组合特别具有优势，另一方面不适合伴随冷启动和停止的运用）为前提的。下面分类整理。

#### 操作条件

- 1) 额定值恒定
- 2) 尽量避免在大的周转比下运行/停止。
- 3) 还伴随着大的周转比的运用/冷启动停止。
- 4) 可逆操作（在高温条件下切换EC/FC）

#### 热利用条件和电堆工作电压

- 1) 不接受水蒸气的供应，利用堆叠焦耳热生成水蒸气。堆叠电压为1.4 V 超过。
- 2) 利用SOEC自身的低温排热、外部低温排热，由热泵等生成水蒸气。
- 3) 水蒸气(的生成热)由外部或组合的反应器(甲烷化、FT )供给。
- 2)、3)的堆叠电压为1.3V左右。
- 4)除水蒸气外，还从外部通过高温气体循环等提供给堆。设想为1.2V以下。

1)作为堆的热平衡为发热动作，2)3)基本上为热中立动作，4)为吸热动作。直接关系到效率的工作电压为4) \u003C3)、2) \u003C1)。

虽然有各种各样的想法，但在今后的讨论中，有必要在一定的制约下分别比较参照，对所要求的性能目标也采用模拟的方法进行探索，降低对要素技术的要求。

#### ○为大量生产做准备

从市场需求来看，“规模感的差异”是认为EC与FC有很大不同的一点。在再能源适宜地进行大型集中制氢需要应用于GW级别，需要考虑应对大规模化・大量生产。与其他电解方式可媲美的低成本设计的电池组、适合批量生产的制造方法、检查方法等应对大量生产也成为降低成本的原动力，对从小规模分散型到大规模集中的所有目标都是有效且必要的措施。

鉴于将来对GW级制氢设备的应对，实现SOEC堆的多供应商采购和混装多厂家产品的大型电解装置的构成是重要的，有必要意识到开放区域的规格标准化进行讨论，包括模拟技术的活用在内的电力供给条件、电解条件和热的

#### ○为了大规模化

在SOFC中发热较大，随着电池组的大型化，热笼一直是一个课题。在SOEC中，电解反应吸热和焦耳发热相互抵消，因此大型化本身比SOFC容易

虽然很容易，但发吸热平衡的分布却很复杂。，基于SOEC特有的电池电化学劣化来考虑性能和耐久性非常重要。另外，有人指出，为了确保以堆栈的多层积化（单位堆栈的高容量化）和多数构成为前提的统计可靠性，提高机械可靠性变得很重要。在我国，关于伴随SOEC大型化的课题的知识很难说是充分的，与单元的大积化、堆栈的多级化、多数堆栈的模块化、多数模块的容器封装化相关的课题随着社会安装的努力的推进而重要性提高，有必要进行应对。

#### ○走向社会实施

随着作为面向社会实装的氢制造设备的研究进展，关于安全对策和BOP的课题认识逐渐提高。随着安全性评价、风险对策、对构成BOP的各种设备的条件等的具体化，也有必要探讨相应的制度和技术开发要求。

#### ○标准评价技术的构建及其应用

共同的标准评价技术的构筑和活用和SOFC一样，在SOEC中也是重要的努力。特别是在EC中，从社会需求和需求出发，通过标准评价方法掌握每个驾驶条件的特征，也有助于协调领域和有助于标准化的规格的讨论。需要在利用通过标准评价方法获得的数据的基础上采取措施。另外，在安全对策和BOP中，也有很多可以与其他电解方式共同讨论的内容，因此需要超越电解方式进行讨论。

#### ○其他

也有人指出，对于投入电解的水，杂质允许范围可能比其他电解方式更广。我们还需要比较研究过去不太受关注的要求，例如对随着社会实施的进展而出现的现实问题的适用性，并努力使SOEC为社会做出更大的贡献。

### 2.4.1 电极

- 特别是在电极中，需要提高电池性能的技术开发和提高耐久性的技术开发。在前者中，水蒸气利用率的提高被列为课题，但在设想实际尺寸电池的情况下，制造过程的观点变得重要，也是各公司开发领域，因此在推进技术开发时，关键是提取设计方针制定等协调领域。
- 提高耐久性是重要的课题，在实用技术开发阶段，要求电池耐久性达到10年以上的水平。由于可以认为Ni的移动和凝聚对劣化起着很大的作用，所以对其机理的理解很重要。特别是需要阐明SOEC特有的气氛电场下的机理。其他，对于杂质气体中毒等技术课题，有可能活用SOFC的知识，因此如果有SOEC固有的课题的话，应该致力于此。
- 其他，作为中长期的课题，有必要开发用于高效制造还原气氛的高活性催化剂，在考虑纯氧利用的情况下提高高浓度氧和水蒸气下的材料耐久性，提高加压时的耐久性。

#### 2.4.2 电解质

- 电解质的技术课题，特别是为了提高电池耐久性，ZrO<sub>2</sub>抑制体系的相变和应力分布变得重要。
- 另外，被期待用于超高效率水电解装置的质子导电性陶瓷电解单元<sup>105</sup>的材料开发，特别是可以抑制电子泄漏的材料开发是必要的。

#### 2.4.3 电池组

- 在电池组方面，特别是有必要推进面向提高电池组性能、提高耐久性、低成本化的技术开发。内部连接器需要廉价的涂层技术和利用通用材料来降低成本。另外，还要求提高水蒸气氧气氛下的配管耐久性。密封技术在SOEC技术开发中很重要，需要开发高温、无泄漏的材料。在
- 面向高效率化的加压堆中，也需要能够应对加压的密封技术。还需要耐电池组热应力、抑制高水蒸气条件下杂质引起的电极中毒等。
- 在生产技术方面，需要进行电池大型化、低成本化的技术开发。另一方面，需要注意的是，从耐久性的观点来看，陶瓷单元的尺寸被认为是大型化的最佳尺寸。此外，各公司可以进一步利用现有技术（陶瓷片成型、电池制造技术）。因此，作为合作领域的技术课题，路线图中记载了面向单元大型化、低成本化的革新性技术的努力。作为SOFC共同的技术问题，进行了以下描述。
- - 关于具有低温化和高耐久性等优点的金属支撑型SOEC，虽然现状是基础研究的水平，但对今后的技术开发进行了记载。
  - 对未来超高效水蒸气电解所期待的PCEC的开发进行了记载。
  - 关于可逆型固体氧化物燃料电池-水蒸气电解电池（rSOC），从实证提取课题到进一步提高性能，记载了致力于技术开发的方向性。

#### 2.4.4 系统/配套设备

- 作为系统的技术课题，着眼于将来在产业用途中的利用等面向大型化的基础技术开发、其他系统高效率化、高耐久性化是主要的技术课题。
- 关于附带设备，这里记载了SOEC特有的项目。氢气精制也是电解种共同的课题，但SOEC制造的氢气中含有的水蒸气量与其他电解相比较多，需要开发高效氢气精制（水分分离）技术，因此特别记载。
- 另外，SOEC特有的附带设备（热交换器、绝热材料、水蒸发器）的技术课题在此进行了总结记载。为了普及，除了电池堆之外，还需要降低这些配套设备的成本。

---

<sup>105</sup>以下，有时缩写为“PCEC”。

#### 2.4.5 评估分析/标准化

- 关于评价分析技术，与技术课题一样，在材料级、电池堆级、系统级三个层次进行整理。
- 作为材料层面的问题，这里有新的材料搜索技术（材料信息学）。  
记载了（MI）、工艺信息学（PI）、界面处的元素扩散-耐久性相关评价分析、PCEC用电解质的导电种类评价技术、密封材料、互联材料稳定评价技术。其他，作为中长期的课题，记载了迅速材料稳定性评价分析方法，对于提高开发效率很重要。
- 作为电池组水平的课题，需要包括水蒸气发生法在内的性能·耐久性评价技术、加速劣化试验协议开发、其他明确电池组的热和电流密度分布的模拟技术、耐久性·寿命预测模拟技术、电池组结构·可靠性评价、界面附近的反应·当场观察技术
- 在系统层面，需要SOEC系统评价标准化的必要性、耐久性和寿命预测仿真技术。

#### 2.4.6 金属支承模

- 与SOFC相同，通过采用金属支撑型单元结构，可以期待在工作温度的低温化和耐久性方面具有优势。在“面向水电解技术开发路线图制定的课题整理”中，记载了与“固定用燃料电池路线图”没有冲突。
- 关于rSOC，进行了与定置用燃料电池没有冲突的记载。

#### 2.4.7 质子导电陶瓷电解池

- 与SOFC一样，作为面向超高效水电解的新一代技术，期待使用质子导电性陶瓷的电解单元（PCEC）。PCEC特别是在可以制造干氢这一点上也是特长。关于PCEC的技术开发，在“面向水电解技术开发路线图的制定的课题整理”中，记载了与“定置用燃料电池路线图”没有冲突。

#### 2.4.8 可逆转固体氧化物型燃料电池-水蒸气电解单元

- 关于rSOC，进行了与定置用燃料电池没有冲突的记载。

## 2.5 技术开发课题(系统控制附属设备)

在考虑作为使用水电解装置的Power to Gas系统的成立性方面，本节记载了必要的课题。特别重要的一点是系统的控制技术。从伴随水电解系统大型化的包含多个模块和辅机的系统控制、应对输入电力的变动和氢需求的变动、通过最佳控制提高水电解槽的耐久性、系统维护的高效率化等观点出发，整理了重要且必要的技术。

另外，为了实现系统整体的低成本化和应对负荷变动，水电解槽及附属设备也需要技术开发。关于各种电解装置共通的设备和与之相关的技术开发课题也在本节中进行了整理。

### 2.5.1 系统控制

- 关于控制的对象，为了根据对象和现象分层次进行模拟的多域(电力、气体、液体等)的建模和要素技术开发是重要的。对象不限于电解槽，需要对电力设备、储氢、调整力的利用等电解槽外部的影响效果，中长期需要包括氢供应链在内的建模和模拟，对基础技术开发的必要性很高。
- 在控制技术的开发中，特别是在工厂水平上需要的为了实现长寿命化的控制技术的开发之前进行，与面向低成本化的控制技术的开发相关联，需要相互协作进行。
- 作为与长寿命化相关的个别要素技术，可以列举出伴随系统大型化的多个模块和堆栈的协调控制、由此引起的起动停止次数的抑制和偏差的抑制、电解槽的压力差控制、温度控制、附带设备的高度化、氢氧浓度高精度化、附带设备的负荷变动应对等。
- 作为与低成本化相关的个别要素技术，列举了设备容量优化、基于并行化的辅机简单化、无人最佳运转、故障检测·预测·维护、排热和氧气的利用等。

### 2.5.2 整流器

- 目前，整流器主要用于晶闸管和有两种类型：IGBT斩波器。晶闸管相对容易处理大电流，但谐波和无功功率的抑制是一个主要问题。系统连接需要滤波器等来抑制谐波泄漏到系统中，但这会增加成本。IGBT斩波器可以抑制谐波和无功功率，但在处理大电流方面存在限制。对于特征不同的这两种技术课题，在发展蓝图中进行了区分的记载。
- 近年来有报道称，从整流器施加到电解槽的电流中包含的纹波会影响电解槽的劣化。据预测，为了抑制由纹波引起的电解槽劣化，需要进一步降低纹波，但纹波的降低导致整流器的高成本。由于波纹引起的电解槽劣化的机理仍有许多未阐明的部分，因此作为基础技术，通过致力于机理的阐明，有可能实现抑制波纹引起的电解槽劣化和整流器低成本化的兼顾。

- 当作为系统调节力提供电源时，需要验证电源装置对上游系统的影响。虽然希望在将电源装置连接到系统和电解槽双方的基础上进行验证，但为了进行有效的验证，需要利用模拟，建立能够仅通过电源进行影响评价的环境。

### 2.5.3 氢气压缩机

- 由于传统的水电解装置设想在额定条件下运行，因此配套设备也设想在额定条件下运行。今后，随着可再生能源导入量的增加，水电解也需要灵活的运行，不仅电解槽，氢压缩机也需要能够应对输入电力波动的灵活性。
- 为了降低成本，需要通过标准化、模块化进行批量生产。

### 2.5.4 纯水生产

- 有必要通过提高离子交换树脂的寿命来降低维护成本，并开发面向大型化的实用技术。

### 2.5.5 氢气提纯

- 传统的水电解装置假定额定运行，配套设备也假定额定运行而设计。今后，随着可再生能源导入量的增加，水电解也需要灵活的操作，净化装置也需要能够应对输入电力波动的灵活性。

### 2.5.6 仪表设备

- 为了降低系统的成本，还需要降低作为辅助设备的氧浓度计、氢浓度计、流量计、调节阀等的成本。
- 氢气中的氧很难准确测量，需要技术开发。在实施安全措施时，需要能够准确测量氢气中氧浓度的技术，希望将其开发为安全仪表技术。

### 2.5.7 安全措施

- 关于阳极氢浓度和氧压力相关的安全技术开发、电解槽堆叠的电池片数增加等对高电压化的绝缘设计，认为是电解种类共同的课题，作为安全对策进行了总结。
- 此外，今后很有可能出现将大规模的水电解装置连接起来作为调节力提供的水电解系统的使用情况。这是过去没有先例的利用情况，大规模水电解装置发生故障时，会对系统产生怎样的影响，以及有较大影响时的故障时的对策，有必要进行验证。

## A. 系统仿真灵敏度分析

### A.1 目的

在制定水电解技术发展路线图时，电解槽各元件技术制氢成本有必要定量地掌握（LCOH: Levelized Cost of Hydrogen）的降低效果。因此，在本章中，通过模拟进行成本灵敏度分析。定量地表示实现目标成本的技术措施，并从成本敏感性高的因素中提取未来应该关注的技术。

### A.2 方法

利用基于公知信息构建的模型，对影响CAPEX和OPEX的各种因素进行敏感性分析。在这里，我们将重点关注与水电解研究开发直接相关的技术因素，包括设备单价和电力价格等与技术没有直接关系的外部因素。特别是，关于构成MEA（Membrane Electrode Assembly）的催化剂的活性、电解质膜的规格、耐久性，在材料研究目标的同时，还将根据再能源和水电解的容量比，以及使用再能源和系统电力的水电解的使用方法进行探讨。另外，本研究以使用质子交换膜（PEM: Proton Exchange Membrane）的水电解为对象。

### A.3 计算模型

活用模型的构成为：①输入各种容量设定、单价、水电解性能等前提条件；②根据简易的电力模型计算出的水电解电力的时间序列数据；③灵敏度分析参数，通过模拟水电解动作和劣化导致的性能下降的水电解性能模型/劣化模型计算出LCOH。这里，LCOH的计算公式由下式表示。

$$\text{LCOH} = \frac{\text{系统电力成本} + \text{PV成本} + \text{资本成本} + \text{O\&M成本} + \text{交换成本}}{\text{制氢量}} \quad [\text{円Nm}^3] \quad (a-1)$$

另外，除了LCOH之外，还输出其详细内容、水电解运转率、I-V性能的经时下降等中间变量。其中，水电解性能模型及劣化模型尽量利用了现状的公知信息。另一方面，关于水电解，目前尚不清楚的现象也很多，作为目标值也有不充分和缺乏正确性的地方，在此进行附记。这些也包括研究课题，今后在解决课题的同时需要更新。

灵敏度分析参数包括汇总了各种设备成本的总资本成本、决定系统电力使用量的电力购买价格阈值、规定水电解效率的I-V性能、以及劣化性能和最大电流密度等。这些将在下一节详细叙述。

### A.4 讨论前提

表A. 4-1给出了与水电解系统及水电解堆、I-V性能相关的计算前提。如这里所示，I-V性能是公开的文献数据<sup>106</sup>以为基准值。然后，Ir单位面积重量、触

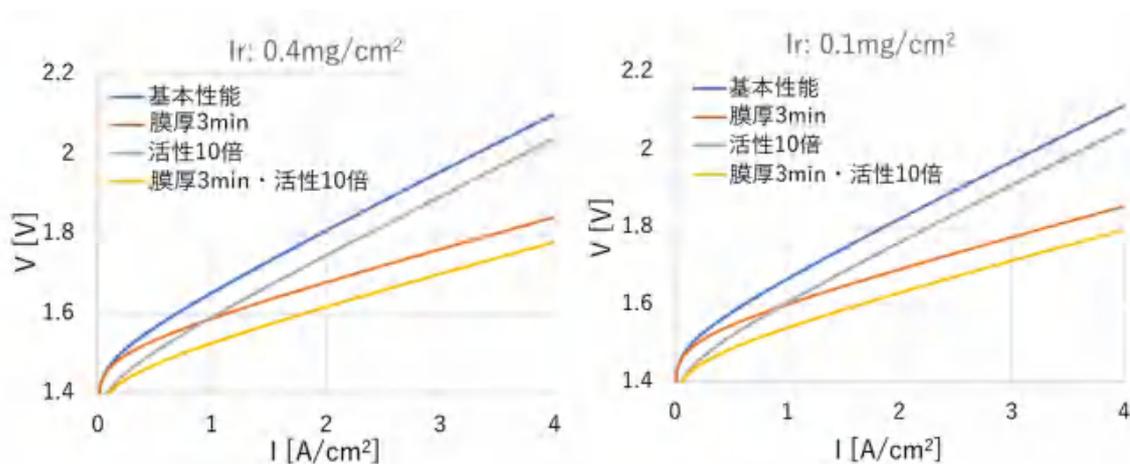
<sup>106</sup>S. m. alia et al . “catalyst-specific accelerated stress tests in proton exchange membrane low-temperature electrolysis for intermits

为了以介质活性和电解质膜的膜厚为参数分析从基准值的变化对LCOH的影响，设定了多个水平值(参数范围)。 同样，如表A. 4-1所示，对于电解单元的最大电流密度、耐久性(劣化速度)也设定灵敏度分析参数的范围，分析对LCOH的影响。 另外， 在此设定的基准条件及参数的范围为 使用了2024年度举行的NEDO水电解技术开发路线图讨论委员会以及WG中规定的值。 关于Ir单位面积重量，需要从资源量限制中削减，灵敏度分析参数下限值0.1mg/cm<sup>2</sup>是根据设想将来(2040年左右)普及的估算而设定的。 另外，假设系统总资本成本1亿日元为1MW的水电解系统，则约为10万日元/kW，相对于第1章所述的现状值，设想了未来的目标值。

表A. 4-1计算前提

		基準条件・計算前提	感度解析パラメータ
水电解システム	電解槽容量	1MW(DC) ※基準IV性能で最大電流密度2A/cm <sup>2</sup> 相当	最大電流密度に依存
	AC/DC変換効率	98%	-
	補機消費電力割合	5%	-
	水电解システム容量	1.07MW(AC)	最大電流密度に依存
水素製造コスト(LCOH)内訳(円/Nm <sup>3</sup> )	システム総資本コスト	1億円 ※電解出力は最大電流密度と性能に依存するが、今回の容量決定範囲での総資本は1億円内を固定。	-
	D&Mコスト	総資本コストの2%/年	-
	スタック交換コスト	総資本コストの15%×交換回数	-
	電力コスト(円/kWh)	電力(PV+系統電力)分のコスト PV電力: 4万円/kWh (2円/kWh@電力PV, 20年期)	-
	セル仕様	電解槽セル面積	1500cm <sup>2</sup>
	最大電流密度	3.0A/cm <sup>2</sup>	2.0~4.0A/cm <sup>2</sup>
	セル数	183枚	-
	An-Ir目付	0.4mg/cm <sup>2</sup>	0.4~0.3mg/cm <sup>2</sup>
	Cs-Pt目付	0.1mg/cm <sup>2</sup>	-
	電解槽膜厚	7min	7~3min
セルI-V特性値	An電極活性面積1.5V	3200A/g	3200~32000A/g (活性効率1~10)
	セル面積前膜厚	0.137Ωcm <sup>2</sup>	0.137~0.0723Ωcm <sup>2</sup> (膜厚7~3minに対応)
I-V劣化性能	劣化速度	電解槽・前文参照 始動停止回: 5000回で10%性能低下	劣化速度1~1/10 (基準条件を1とした場合)
耐久性	スタック交換	セル単位10%上昇毎に交換	-
	システム耐用年数	20年 (LCOH算出の耐用年数)	-

注1) 膜厚単位min表示毫米英寸(1min=25.4 μm)



( a ) IR 0.4毫米/厘米<sup>2</sup> ( b ) IR 0.1毫米/厘米<sup>2</sup>

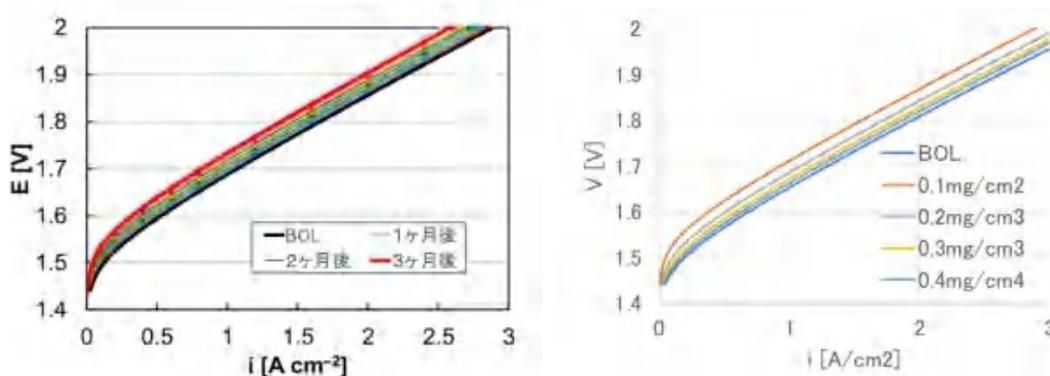
图A. 4-1 I-V性能(包括通过灵敏度分析参数预计提高性能)假设温度: 80℃

图A. 4-1显示了在参数设定范围内描绘的I-V性能。 这里的基本性能对应于基准条件的参数，表示与文献数据所示的性能相同的性能。 基本性能气味  
 所有An催化剂的质量活性为3, 200 a/g ( IR 0.1 mg/cm<sup>2</sup>, 1.5V ), 欧姆电阻为0.137 Ω cm (膜厚7min )  
 推定为。 然后，为了提高将来的性能，将质量活性10倍、电解质膜3/7倍(降低质子电阻)设定为灵敏度分析参数的上限。

#### A.5 退化预测模型与堆栈交换

关于水电解的劣化现象，目前还有很多尚不清楚的部分，在要得到充分的预测精度还存在很多课题的情况下，以目前公开的信息等为基础，构建了初步的劣化模型。 本劣化模型采用以下两种模式进行预测:①因起动停止引起的劣化;②因电解及电解时的变动引起的劣化。 特别是关于②的文献<sup>107</sup>参照的数据，建模成可再现。 图A. 5-1 (a)中，相对于文献记载的劣化引起的I-V性能推移，改写了劣化模拟引起的I-V性能推移的结果。 可以看出，随着时间的推移，来自BOL的电解导致的性能降低得到了再现。 另外，如图A. 5-1 (b)所示，劣化速度相对于Ir单位面积重量的差异也与文献数据同样地再现。 另外，这里还表现了初始I-V性能的Ir单位面积重量灵敏度，但可知在参数设定范围内的变化很小。

在这样构筑的劣化模型中，根据与按时间顺序变化的水电解电力相应的水电解的I-V工作点，计算劣化引起的经时I-V性能下降。 然后，在I-V性能下降从初期开始达到10%的时候，决定进行堆栈交换。



(a) Ir0.1 mg/cm<sup>2</sup>的I-V性能随时间的变化 (b) 基于Ir单位面积重量的耐久后的I-V性能  
 ※初期( BOL )及耐久3个月后图A. 5-1再能源PV电力使用条件下的I-V性能劣化

#### A.6 利用再生能源和系统电力的水电解电力模型

水电解中使用的电力数据是设想在海外的再生能源基地进行大量氢的制造和进口而设定的。 具体地说，是澳大利亚太阳能发电( PV )数据<sup>108</sup>同时，还设想了系统电力的活用，使用了与PV数据在地理和时间上同步的电力现货价格数据(期间为2019年1月开始约1年的量)

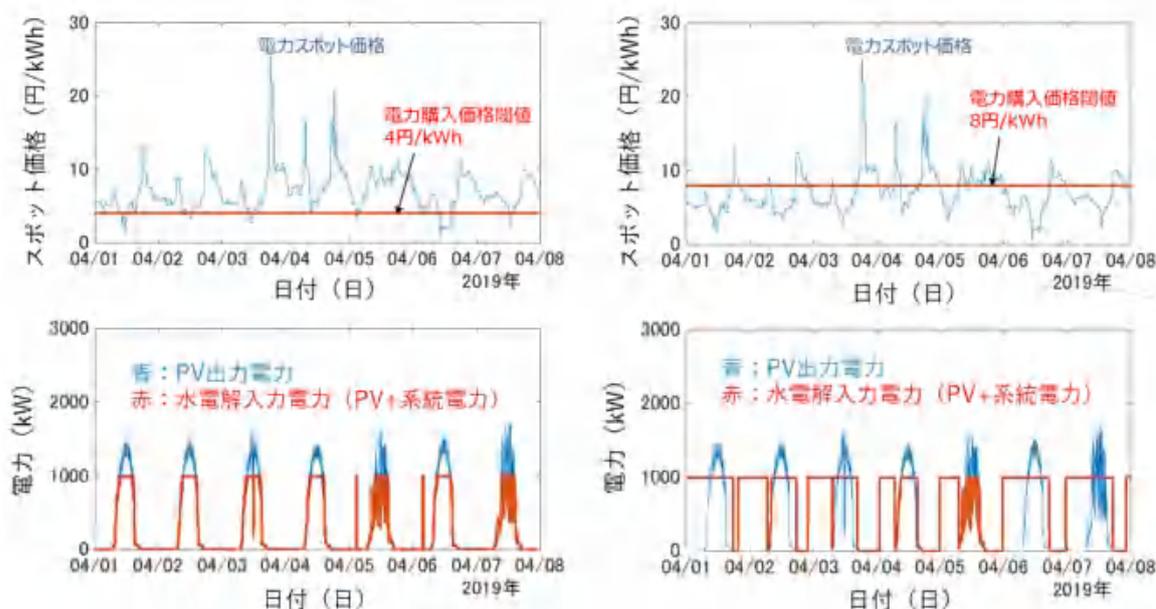
<sup>107</sup>s.m.alia et al . “electrolyzer durability at low catalyst loading and with dynamic operation .” j.electro chem.SOC ., 166 f 1164

<sup>108</sup> 基于ENEOS株式会社提供的澳洲昆士兰太阳能发电的实际数据。

太好了。关于系统电力利用方法，在相对于随时间变化的电力现货价格，降至一定价格(电力购买价格阈值)以下的时候，在只靠PV电力水电解电力有富余的情况下，只利用不足的部分系统电力。图A. 6-1表示基于阈值的水电解中使用的电力波形的差异。上段的时间序列波形为电力现货价格，下段为PV电力数据(蓝)和水电解所消耗的电力(红)。当阈值为4日元/kWh时( a )，系统几乎没有电力购买，水电解电力的波形是用水电解电力的最大值限制PV电力。在这种情况下，水电解系统的设备利用率平均为36.2%，比只有PV电力时的26.5%略有增加。在此，设备利用率(水电解运转率)如下式

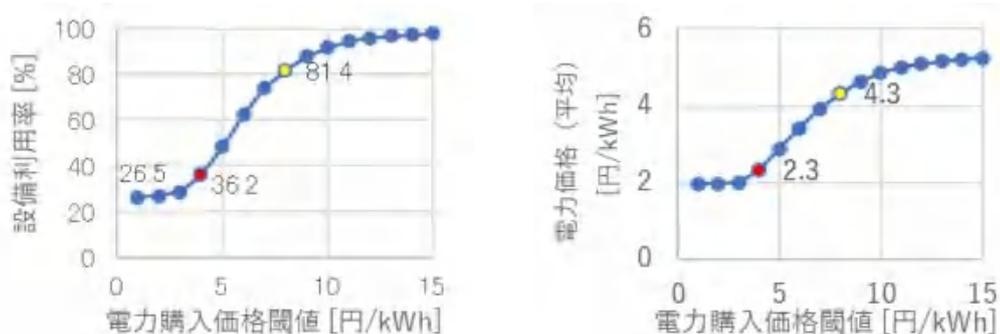
$$\text{设备利用率} = \frac{\sum \text{水电解电力} \times t}{\text{水电解最大电力} \times \text{工作时间}} \times 100 [\%] \quad (\text{A-2})$$

中定义和使用的。接下来，在阈值为8日元/kWh的情况下( b )，除了PV电力之外，还有效利用了系统电力，水电解消耗电力增加，波形接近矩形波，设备利用率为81.4%。另外，在利用本模型的模拟中，电力波形的时间序列数据在作为设备利用率进行整理的同时，作为停止起动的电流电位，用于水电解性能劣化的计算。这样，针对现货价格和阈值确定了设备利用率，可以如图A. 6-2(a)所示进行整理。另外，通过增加阈值，高价电力的购买量增加，因此电力价格的平均值也如该图( b )所示增加。后来进行灵敏度分析的LCOH受电价增加和氢制造量增加所带来的相反两者的影响，整理电价及氢制造量对设备利用率的关系，如图A. 6-3所示。该结果基于2019年澳大利亚的再能源( PV )数据和现货价格，可以认为根据时间和场所、再能源的种类和电力系统的构成，价格会有差异。但是，我认为在通过这次的灵敏度分析抓住倾向的目的上是有用的。



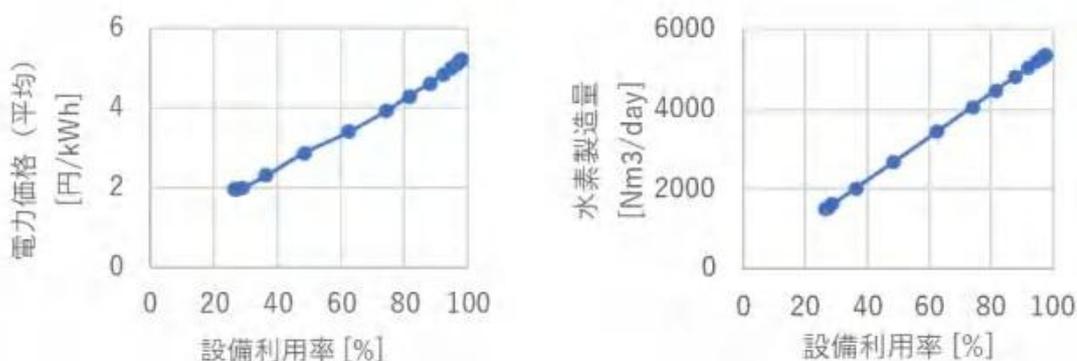
(a) 阈值4日元/kWh时 ( b) 阈值8日元/kWh时图A. 6-1电解功耗波形随电力购买价格阈值的不同而不同

(计算前提:参数基准值(表A. 4-1) , 澳大利亚2019年约1年的节能和现货价格)



(a) 阈值和设备利用率 (b) 阈值和电价图A.6-2按电力购买价格阈值计算的设备利用率和平均电价

(计算前提:参数标准值(表A.4-1)、澳洲新能源(PV)和现货价格)



(a) 平均电价对设备利用率; (b) 制氢量图A.6-3系统电价阈值对水电解运行率和LCOH的影响

(计算前提:参数标准值(表A.4-1)、澳洲新能源(PV)和现货价格)

## A.7 灵敏度分析

### A.7.1 参数基准值下的LCOH

图A.7.1-1显示了参数基准值(表A.4-1)下相对于设备运转率的LCOH及其明细。使用年限为20年。根据图A.6-3(a)可以推测,随着设备利用率的增加,电费(系统)的比例也会增加。另一方面,水电解设备费、维护费、堆交换费、电费(PV)随着设备利用率的增加而下降。这些都是依赖于设备费用的固定费用除以氢制造量得到的值,这是因为随着设备利用率的增加,氢制造量的增加,固定费用的比例被压缩。这里,堆栈交换费还依赖于设备利用率变化引起的启动·停止次数没有大的变化,交换次数没有变化。像这样随着设备利用率呈现增加趋势的电费和减少趋势的固定费用依存成本之和的LCOH,如图A.7.1-1所示,由于它们的平衡而具有极小点。另外,设备利用率低的情况下电费的比例低,依赖于设备费的成本的比例变多。另一方面,设备利用率高的情况下电费的比例会变多。设备利用率虽然在计算上出现了极小点,但并不一定能够在极小点上运用。这是因为受到水电解的种类、设置环境和电力情况、以及必要的氢制造量等的限制

接受。无论如何，第一章所示的氢制造成本的目标值18日元/Nm<sup>3</sup>与相比，显然存在较大的差距，为了实现目标值，在降低电费的同时，还需要通过降低设备费用和提高水电解性能来降低成本。在下一节中，将定量地明确通过提高水电解的性能和耐久性来降低成本的灵敏度。

### A.7.2 基于灵敏度分析参数的LCOH降低

如表 A.4-1 所示，当各敏感性分析参数与参考条件不同时，分析了对 LCOH 的影响。图 A.7.2-1 显示了阳极 (An) 催化剂的 Ir 厚度为 0.4 mg/cm<sup>2</sup> 的阳极 (An) 催化剂。在 (a) 的参考条件下，(b) 的最大电流密度 I<sub>max</sub> 增加到 2 A/cm<sup>2</sup> 到 4 A/cm<sup>2</sup> 水电解能力也相应提高。随着水电解能力从 1 兆瓦增至约 2.3 兆瓦，光伏发电能力也同时得到优化。光伏发电量的设定要与水电解量相适应，因为如果光伏发电量与水电解量相比过小或过大，都会导致 LCOH 偏高。设定的光伏发电量分别为 2.5 兆瓦和 5 兆瓦。上述方法提高了氢气产量，降低了所有类别的成本，但在设施利用率较低的情况下效果尤为显著。另一方面，降低成本的效果会随着利用率的提高而减弱，超过 80% 时，效果会更加明显。

这是由于在高电流密度范围内使用频率较高，水电解 I-V 性能过电压较高。接下来，从 (b) 到 (c)，假定水电解的 I-V 性能有所改善。具体来说，An 催化剂的质量活性从 3200 A/g 提高到 32000 A/g 的十倍，整个 MEA 的欧姆电阻提高到 0.137 Ω cm<sup>2</sup> 增至 0.0723 Ω cm<sup>2</sup> (相当于电解质膜厚度的 3/7)。这提高了水的电解效率，减少了用电量，从而降低了 LCOH。在设备利用率较高的情况下，这种效果尤为明显。这是因为设备利用率越高，I-V 性能在高电流密度范围内的使用频率就越高，而在高电流密度范围内，过电压降低余量就越大。

在(c)至(d)项中，设备利用率越高，I-V 性能在高电流密度范围内的使用频率就越高，而在高电流密度范围内，过电压降低允许值就越大。

在(c)至(d)中，假定水电解的耐久性得到改善。具体来说，启动、关闭和电解过程中的降解率分别为

假定启动、关闭和电解过程中的降解率 (包括波动) 为参考值的 1/10。这导致 An 催化剂的 Ir 含量降至 0.4 mg/cm<sup>2</sup>。就 LCOH 而言，性能下降 10% 之前的耐用时间从 3.8 年增加到 20 年，20 年使用寿命内烟囱更换次数从 5 次增加到 0 次。烟囱更换费用减少，从而降低了 LCOH。

### A.7.3 各成本降低项目对 LCOH 降低的敏感性

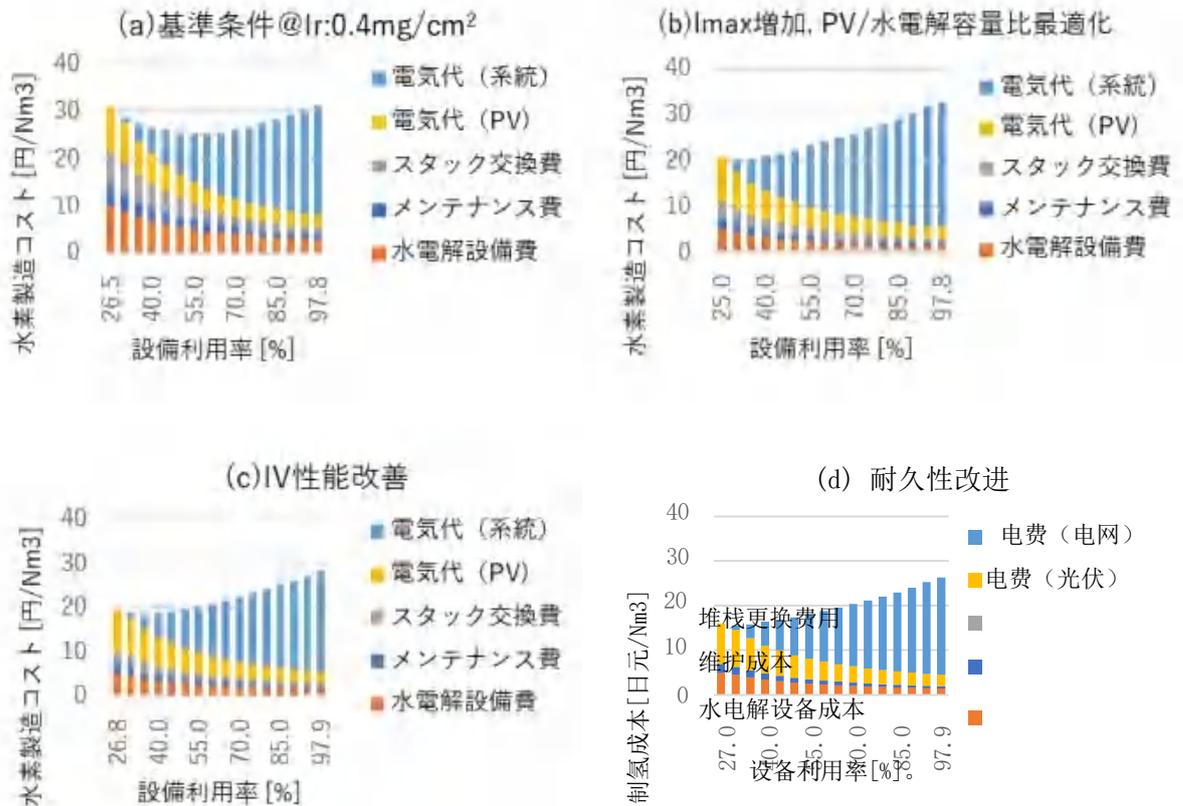
图 A.7.3-1 显示了当 Ir 厚度为 0.4 mg/cm 时，各成本降低项目对 LCOH 降低的敏感性。<sup>2</sup>图 A.7.3-1 显示了在 0.4 mg/cm 的 Ir 厚度和 40% 的设备利用率条件下，各成本降低项目对改善水电解性能的 LCOH 降低敏感度。<sup>3</sup>无催化剂成本 2.3 日元/Nm (由于改善了 I-V 性能)，2.5 日元/Nm (由于改善了耐用性<sup>3</sup>) 结果表明，当设施利用率较低时，提高 I<sub>max</sub> 的效果最为显著。改善 I-V 性能和耐用性的效果也类似，这证实了改善水电解性能的重要性。

接下来，图 A.7.3-2 显示了 Ir 厚度为 0.4 mg/cm<sup>2</sup> 和设备利用率为 80% 时的结果。随着设备利用率的提高，电力成本 (从电网购买) 在整个 LCOH 中的比例会增加，而固定成本和取决于水电解性能的成本比例会降低。因此，尽管水电解性能提高带来的 LCOH 减少额度相对较低，但它仍然是技术创新带来的可靠而重要的额度。就击穿而言，I<sub>max</sub> 的改善和光伏发电能力的优化会导致成本增加，但这是由于如前所述，在高电流密度范围内，过电压在 I-V 性能中处于高频率运行状态。事实上，I-V 性能的改善

事实上，从提高 I-V 性能所达到的降低成本效果可以看出，提高  $I_{max}$  和 I-V 性能被认为是应该作为一组指标来考虑的。



图 A.7.1-1 参数参考值下的 LCOH ( $I_r$ : 0.4 毫克/厘米)<sup>2)</sup>



医

( $I_r$ : 0.4 mg/cm) 图 A.7.3-1 各项敏感性分析参数的 LCOH 减少量 ( $I_r$ : 0.4 mg/cm<sup>2</sup>)

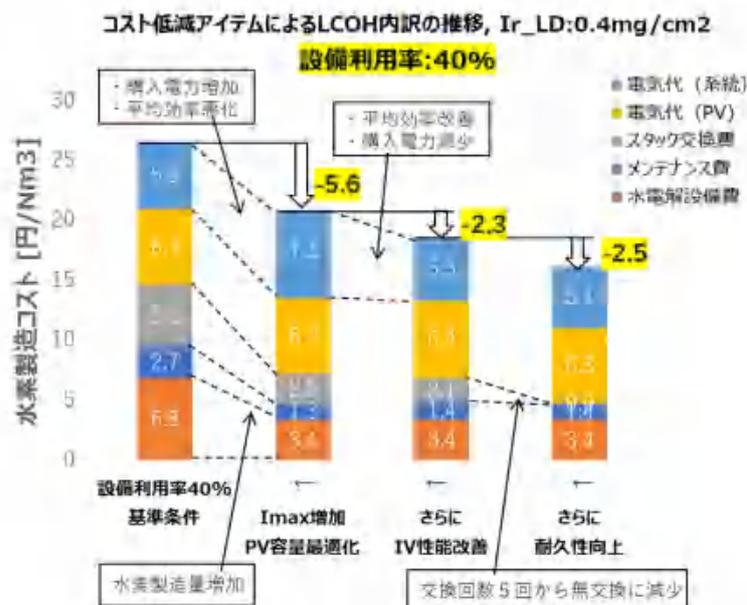


图 A.7.3-1 各项目 LCOH 减少量的灵敏度 (Ir: 0.4 mg/cm)<sup>2</sup>(40%)、设备利用率 (40)

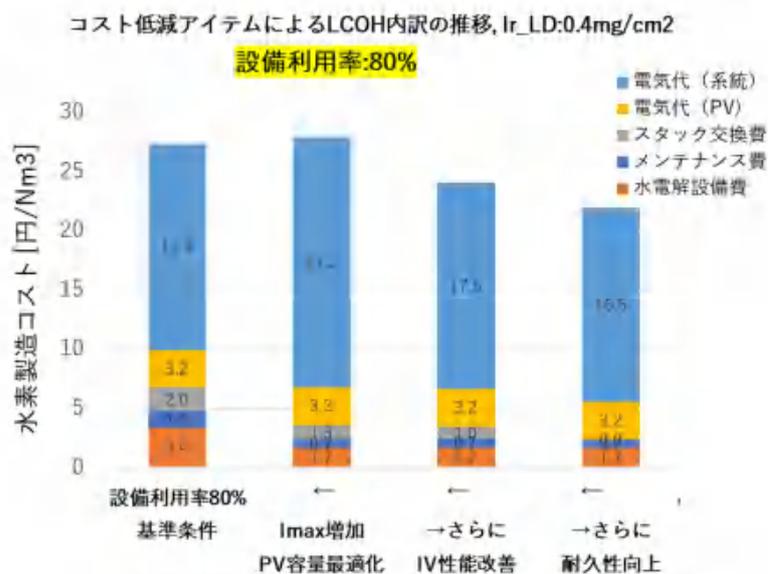


图 A.7.3-2 各项目对降低 LCOH 的灵敏度 (Ir: 0.4 mg/cm)<sup>2</sup>(辐照度: 0.4 毫克/厘米, 设备利用率 80%)

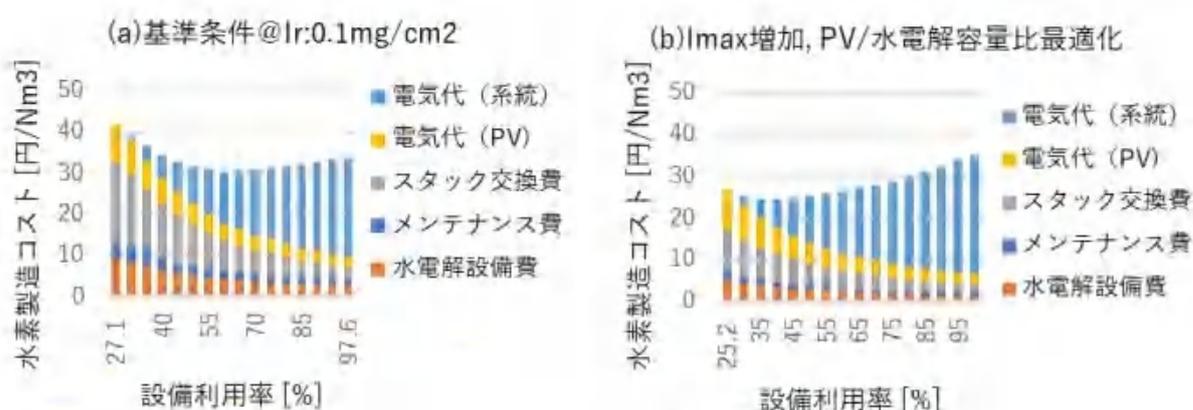
#### A.7.4 低 Ir 眼重 0.1 mg/cm<sup>2</sup> LCOH 在

到目前为止的讨论是以 Ir 厚度为 0.4 mg/cm 的 An 催化剂为基础的。<sup>2</sup> 考虑到 PEM 水电解的广泛使用, 有必要考虑到 Ir 用量的限制。因此, 决定使用厚度为 0.1 毫克/厘米<sup>2</sup> 的铱催化剂。<sup>2</sup> 在此基础上, 对 LCOH 进行了类似的敏感性分析。减少 Ir 厚度对成本和性能的影响在这里得到了证实: 虽然由于减少了 Ir 用量, 水电解的设备成本降低了, 但与约 1 亿日元的整体设备成本相比, 减少 Ir 用量的成本要高出几百万日元。另一方面, 水电解槽的耐用性降低。如图 A.5-1 (b) 所示, 这可以从 I-V 性能衰减率随着厚度的减少而增加这一事实中得到证实。可能的原因包括催化剂表面积减小、比活度降低和催化剂利用率降低。

需要更详细地了解这一现象。 计算表明，由于耐用性降低，更换次数会增加，每次更换会增加15%的设备成本。

根据这些计算，图 A. 7. 4-1 显示了厚度为 0.1mg/cm<sup>2</sup> 和 0.1mg/cm<sup>2</sup> 的 Ir 的耐久性比较。<sup>2</sup> 图 A. 7. 4-1 显示了熨斗厚度为 0.1 毫克/平方厘米时的 LCOH 及其按成本降低项目 (a) 至 (d) 的细分。 图 A. 7. 2-1 镍细度为 0.4 毫克/厘米时的 LCOH<sup>2</sup> 可以看出，与 (b) 和 (c) 的情况相比，参考条件 (a) 的 LCOH 增加了。 这是因为晶粒尺寸减小导致耐久性降低和堆垛更换成本增加，在 (b) 和 (c) 中同样可以看到 LCOH 增加的趋势，这也是由于更换次数增加所致。 而 (d) 由于耐久性提高，LCOH 一下子就降低了。 事实上，图 A. 7. 4-2 中基于本降解模型的模拟结果显示，厚度为 0.1 mg/cm<sup>2</sup> 的熨斗的 LCOH 为 0.1 mg/cm<sup>2</sup>。<sup>2</sup> 的耐用性提高了 1/10 的降解率，使用寿命 (I-V 性能下降 10% 之前的时间) 从 1.1 年延长到 11.4 年。 在 20 年的使用寿命内，堆栈的更换次数从 18 次减少到 1 次。 0.1 mg/cm Ir 厚度<sup>2</sup>与 0.4 毫克/厘米的 Ir 厚度相比，0.1 毫克/厘米的 Ir 厚度可提高耐久性。<sup>2</sup> 与 0.4 毫克/厘米的 Ir 厚度相比，提高 Ir 耐久性的技术门槛更高，但我们认为分阶段减少厚度、提高性能和耐久性是值得的。

上述各项降低成本措施对 0.1 毫克/厘米镍厚度的影响<sup>2</sup>镍厚度 0.1 毫克/厘米<sup>2</sup> 当 Ir 厚度为 0.1 mg/cm<sup>2</sup> 时，由于提高了 I<sub>max</sub> 和优化了 PV 容量，成本为 9.6 日元/Nm；由于改善了 I-V 性能，成本为 2.5 日元/Nm。<sup>3</sup>9.6 日元/Nm (通过提高 I<sub>max</sub> 和优化 PV 容量)，2.2 日元/Nm (通过提高 I-V 性能)，5.6 日元/Nm (通过提高耐用性)。<sup>3</sup>和 5.6 日元/Nm (由于耐用性提高)。<sup>3</sup> 镍厚度 0.4 毫克/厘米<sup>2</sup> 与 0.4 mg/cm<sup>2</sup> Ir 的情况一样，可以确认当设备利用率较低时，I<sub>max</sub> 的改善效果最大。 如前所述，在晶粒度较低的情况下，由于耐久性提高而减少 LCOH 的效果更大。 此外，当 Ir 厚度为 0.1 mg/cm<sup>2</sup>从设备利用率为 80% 时的结果 (图 A. 7. 4-4) 可以看出，在设备利用率较高时，即使设备利用率较低，电费 (从电网购买) 在整个 LCOH 中也占较大比例，因此降低电费对实现目标值至关重要。 另一方面，改善水电解性能和耐久性的技术，包括提高 I<sub>max</sub>，无论设备利用率如何，都是有效的，尽管降低成本的余量相对较低，但应稳步实施，以降低 LCOH。



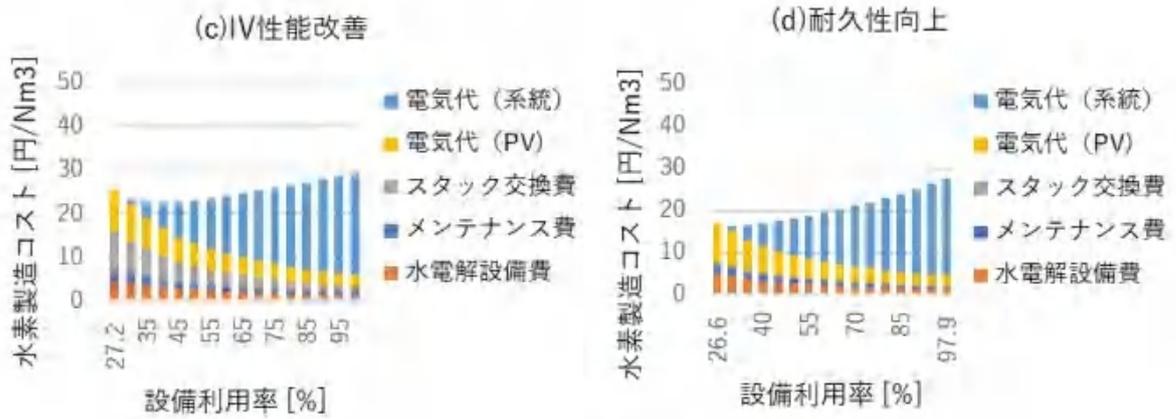


图 A.7.4-1 各敏感性分析参数的 LCOH 降低率 (%) 梃斗: 0.1 毫克/厘米<sup>2</sup>)

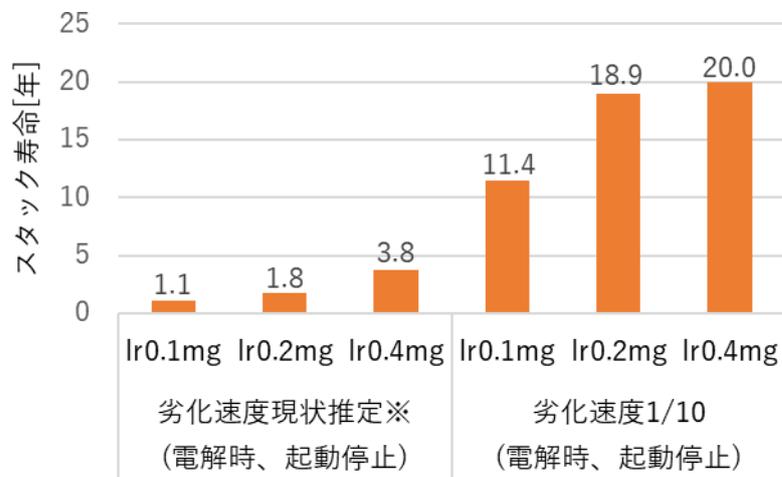


图 A.7.4-2 烟囪寿命的模拟估计值

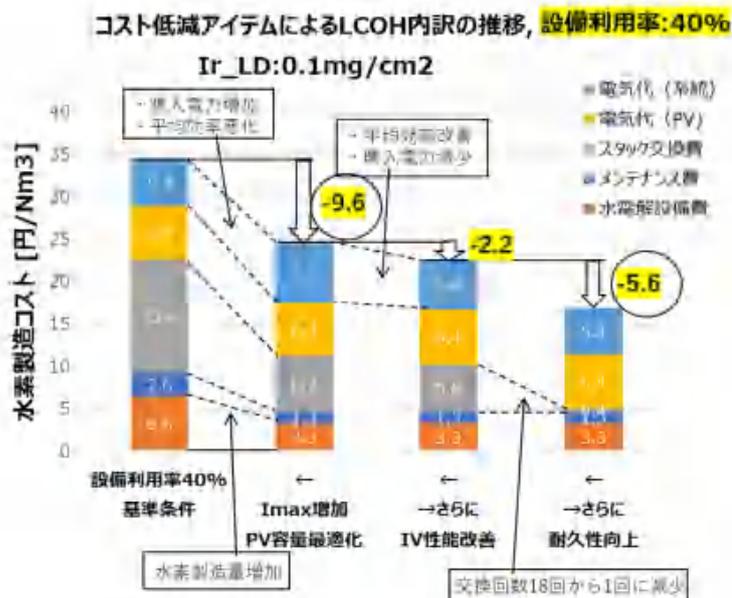


图 A.7.4-3 各项 LCOH 减少量的灵敏度 (Ir: 0.1 mg/cm<sup>2</sup>和设备利用率 40%)

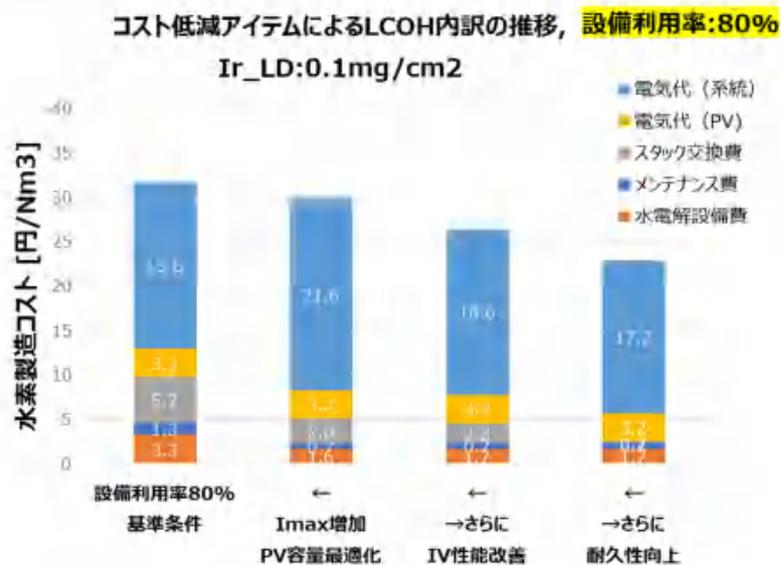


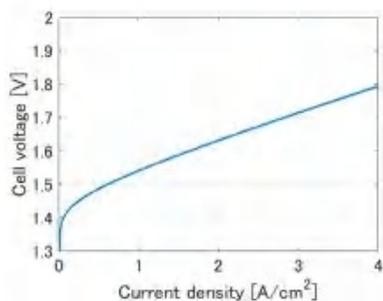
图 A. 7. 4-4 各项目减少 LCOH 的灵敏度 (Ir: 0.1 mg/cm<sup>2</sup>设备利用率 80%)

#### A.7.5 性能改进后的 I-V 性能和物理性质

图 A. 7. 5-1 和表 A. 7. 5-1 分别概括了上述性能改进项目达到的 I-V 性能和相应的材料属性值。在 I-V 性能衰减 10% 的情况下，耐用性估计为 11.4 年，但这只是一个预测值。

表 A. 7. 5-1 材料特性

(与图 A. 7. 5-1 中的 I-V 性能相对应)



催化剂 Ir 厚度		0.1	毫克/厘米 <sup>2</sup>
催化剂质量活度 (@1.5 V)	10 倍	32000	A/g
欧姆电阻 (电子电阻 + 质子电阻)	(薄膜厚度 3/7)	0.0723	Ω cm <sup>2</sup>
降解率	开始-停止	1/10	—
	电解期间	1/10	—

图 A. 7. 5-1 各项目达到的 I-V 性能

各项目达到的 I-V 性能 (Ir0.1 mg/cm<sup>2</sup>厘米<sup>2</sup>)

\*活性系数为图 A. 4-1 中的 I-V 性能参考值；降解率为文献值。<sup>109</sup> 降解率是将文献值 109 设为 1 时的系数。

#### A.8 结论。

对减少 LCOH 的敏感性进行了分析，并实现了 18 日元 /Nm 的目标值 (如果包括国际运输成本，则为 30 日元 /Nm)。<sup>3</sup>

相当于<sup>110</sup>结果定量显示了技术项目对实现 18 日元/Nm 目标值的影响 (如果包括国际运输成本，则相当于 30 日元/Nm)。成本敏感性高

---

<sup>109</sup> S. M. Alia 等人, “低催化剂负载和动态操作下的电解槽耐久性”, 《电化学学会杂志》, 166 F 1164, 2019.

<sup>110</sup> 关于达到目标可能性的绝对值的讨论需要继续仔细研究。

对新技术的 I-V 性能最有希望的技术是改进耐用性和提高电流密度。同样明显的是，I-V 性能的提高单独使用效果相对较差，但应与这些成本敏感型技术结合使用。这些影响和问题总结如下。

- 由于资源限制而设定的较低 Ir 厚度规格（约 0.1 mg/cm<sup>2</sup>）对高耐久性（降解率为 1/10）有显著影响，但另一方面，技术障碍也很高。总的来说，催化剂活性和耐久性之间需要权衡。还应注意的是，减小 Ir 厚度会增加催化剂层的面内电子电阻。不过，应继续努力减少 Ir 厚度，提高耐用性。较高的电流密度有望在不改变设备本身的情况下提高制氢能力，从而达到降低 LCOH 的效果。然而，可能会出现新的问题，例如在高电流密度范围内运行会导致电池过压增加，这也可能会影响整流器的规格。因此，有必要对挑战进行评估，并采取必要的解决方案。
- 除了降低 LCOH 外，改善 I-V 性能还能有效降低高电流密度下的过压。从这个意义上说，同时提高活性和降低欧姆电阻也很重要。因此，在本研究中，除了提高活性之外，还采取了减薄电解质膜的措施。不过，还应继续考虑其他措施。例如，模拟结果表明，提高耐久性的效果显著，因此值得验证在保持活性的同时提高耐久性的效果。