

使用固体氧化物电解池（SOEC）的制氢系统及蓄电系统

2015年7月发布的《长期能源供求预测》显示，2030年日本的能源自给率将提高到22-24%，同年12月召开的COP 21（联合国气候变化框架条约第21次缔约方会议）上，针对到2030年，日本国内的二氧化碳（CO₂）等温室效应气体排放量与2013年度相比削减26%这一计划，各缔约方表示同意。此外，在2016年3月修订的《氢燃料电池战略路线图》中，日本经济产业省制定了固定式燃料电池的价格目标、燃料电池汽车（FCV）和加氢站的引入数量目标，同时成立工作组，推进氢能无碳社会建设。为了这些目标，实现可再生能源的大规模引入和CO₂排放量的削减，日本正加速进行氢气的制造、储藏、运输技术的开发。

作为无碳制氢的关键技术，在水电解的研究上，东芝公司推进固体氧化物电解池（SOEC）的研发，其与传统固体高分子电解池相比效率提高了约30%，同时研究SOEC和固体氧化物燃料电池（SOFC）的结合，从而推进高效大型氢蓄电系统的开发。

01序言

为应对能源安全和地球环境问题，太阳能发电和风力发电等可再生能源发电设备的引进在世界范围内快速增加，日本也在加速氢气的制造、储藏、运输技术的研发。2015年7月经济产业省发布的“长期能源供求预测”中，表示将最大限度地推进可再生能源的引入，并制定了到2030年能源自给率提高到22~24%的方针。

另外，同年12月召开的COP 21上，针对到2030年，日本国内的CO₂等温室气体排放量与2013年度相比削减26%这一计划，各缔约方表示同意。此外，在2016年3月修订的《氢燃料电池战略路线图》中，日本经济产业省制定了固定式燃料电池的价格目标、FCV和加氢站的引入数量目标，同时成立工作组，推进氢能无碳社会建设。

利用可再生能源的氢气储存和供给系统，包括“制氢系统”和“氢蓄电系统”。由于使用可再生能源发电易受天气影响，要将其大量引入电力系统，并作为主要电力来源之一加以利用，需要强化输出稳定系统和电力系统，同时还需要加入蓄电系统，以应对输出变动和供需调整。

在利用氢能进行蓄电、发电的氢蓄电系统中，当可再生能源的输出发生变动而产生剩余电力时，利用该剩余电力进行水电解制造且储存氢气，并在需要时通过燃料电池发电（图1）。此系统不受抽水蓄能发电的场地限制，蓄电量也不依赖于活性物质的储量，适合大规模、长时间蓄电。

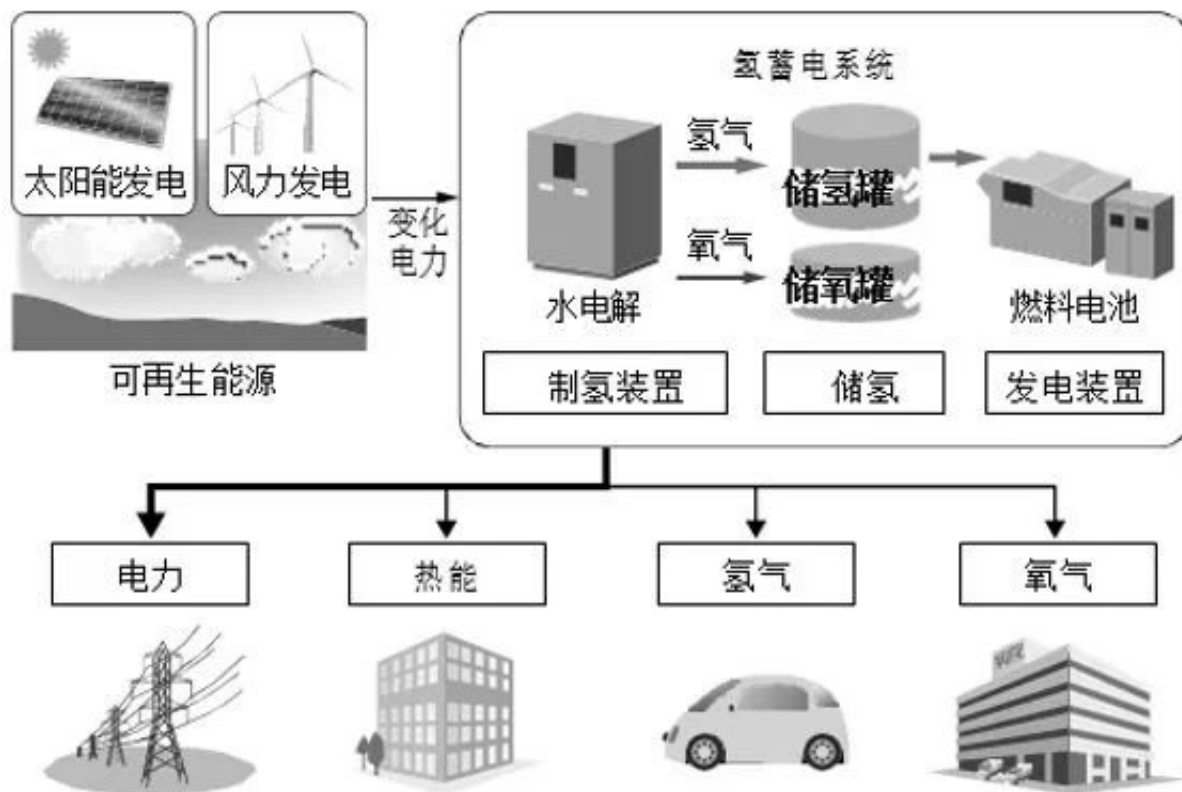


图1.氢蓄电系统的概念：利用剩余电力电解水制造并储藏氢气，在需要时通过燃料电池发电

Outline of hydrogen power storage system

Alpatent 前沿研发信息介绍平台

高效制氢对于实现此系统的实际运用必不可少。与以往低温下进行的电解方式相比，高温水蒸气电解方式采用固体氧化物电解质膜，有望提高电解效率。本文将介绍应用此电解方式的系统中的关键装置——固体氧化物电解池（SOEC）电池堆以及整体系统的开发。

02实现SOEC大型化

SOEC电池堆以使用固体氧化物作为电解质的固体氧化物燃料电池（SOFC）为基础，对其电解特性之一的电流电压（I-V）特性以及吸热和散热特性进行评估。图2是作为评估对象的管型平板电池堆的示意图。其具有可以同时多个单电池供应水蒸气和回收氢气的构造。

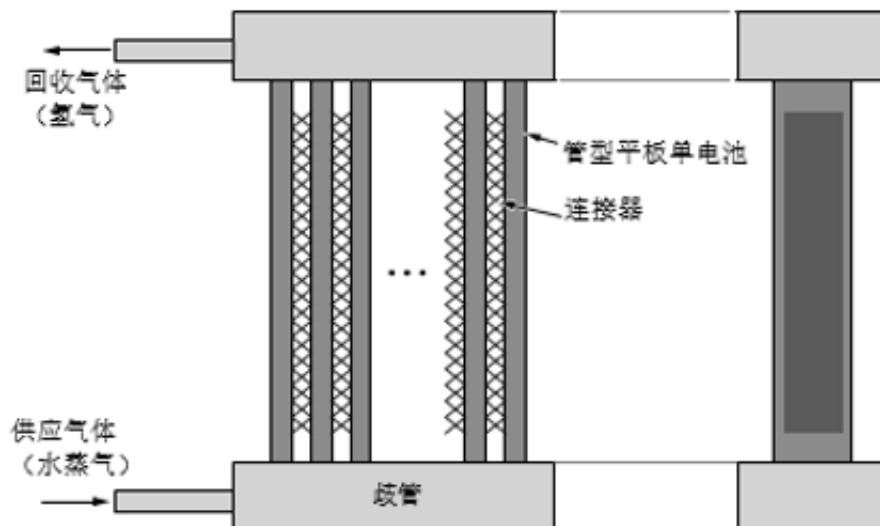
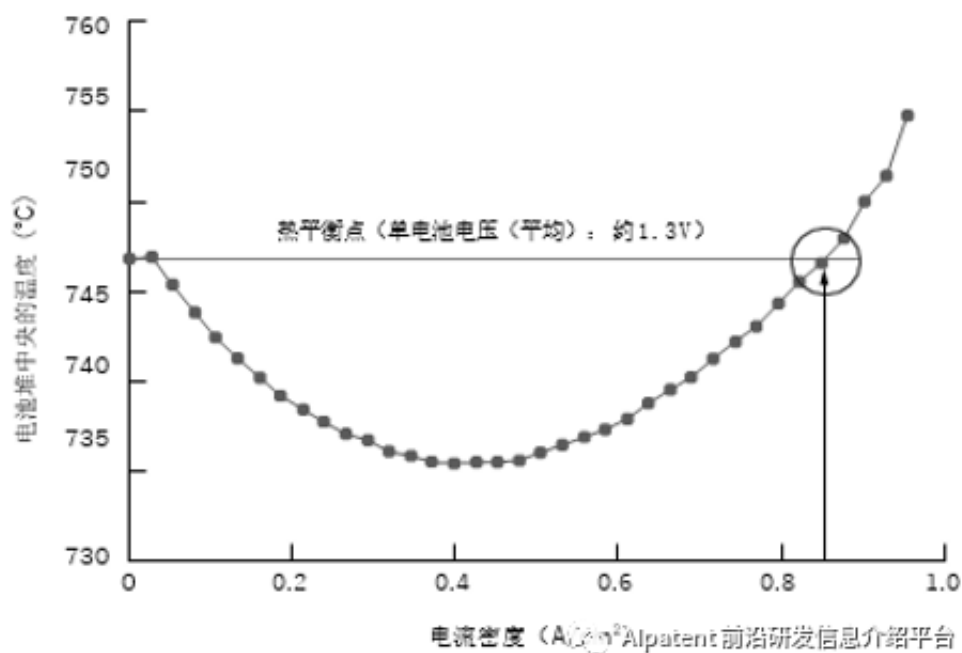


图2. 管型平板电池堆示意图：能够同时对多个单电池进行气体的供应和回收的结构

Structure of flat cylindrical type cell stack

Alpatent 前沿研发信息介绍平台

在水蒸气浓度为90%且温度为750 的运行条件下，通过设置在电池堆中央的温度计测量并观察其吸散热特性，结果如图3所示。



由于水电解是吸热反应，随着电流密度的增加，电池堆的温度下降，然而当电流密度进一步增加时，由电池堆欧姆损失产生的散热会超过吸热，温度转而上升。在本次测试条件下，最低温度比开路电压时的温度，即空载无电流状态下的温度低大约11 。另外，发现当电流密度约为0.85A/cm²时，吸热和散热相等。

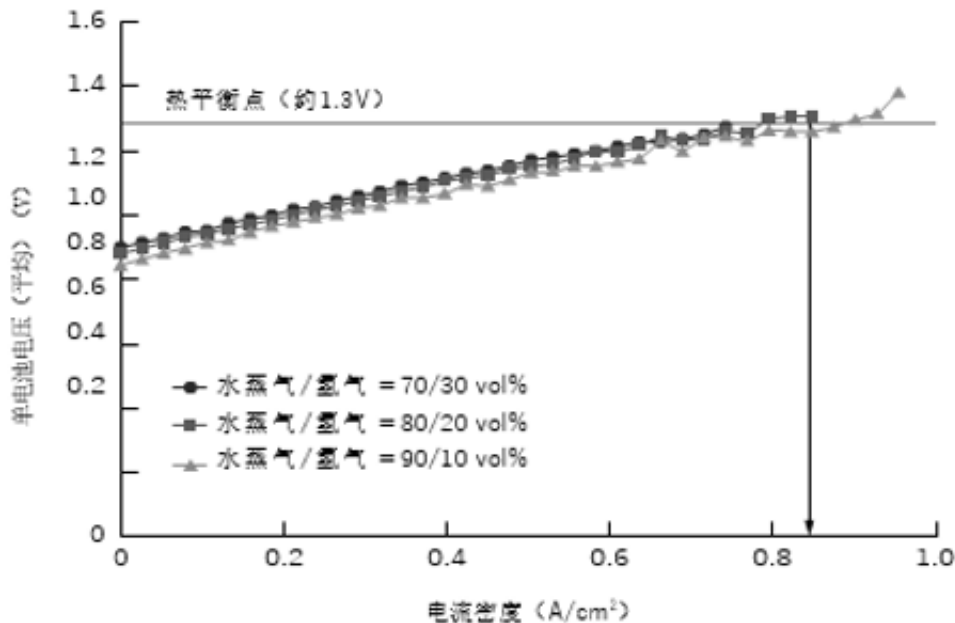


图4. 电解单电池的I-V特性和水蒸气温度：热平衡点处电池电压为1.3V时电流密度约为0.85A/cm²，与图3的测试结果保持了理论一致。

Dependence of I-V characteristics on steam supply ratio of SOEC stack

图4表示使水蒸气浓度在70~90vol%范围内变化时，各条件下的初始I-V特性。在电池堆中，使吸热和散热相等的反应条件称为热平衡点，理论上单电池电压为1.3V时成立。本测试中，1.3V的电压下，电流密度如图4所示约为0.85A/cm²

，与图3的测试结果保持了理论上的一致性。另外，为实现高效制氢，需要抑制电压随电解电流的上升。而本试验得到的热平衡点的电流密度值为0.85A/cm²，大于目标值（0.5A/cm²），暗示了反应单元可小型化。此外，在同时进行的有关水蒸气利用率的讨论中，确认了电解反应中供应的水蒸气的97%能够得到有效利用。

此外，还讨论了将多个电池堆组合成多重电池堆，扩大制氢规模的可能性。SOEC多重电池堆评测装置位于东芝府中事务所的氢能研究开发中心，能对10kW以上规模的SOEC的制氢过程进行评测（图5）。



图 5. SOEC 多重电池堆评测装置：位于氢能源研究开发中心，能对 10kW 以上规模的 SOEC 的特性进行评测

SOEC-multi-stack-evaluation-unit Alpatent 前沿研发信息介绍平台

在 SOEC 多重电池堆评测装置中，由电解电流计算出的理论氢产生量与实际的氢产生量的比较如图 6 所示，转换效率接近 100%。

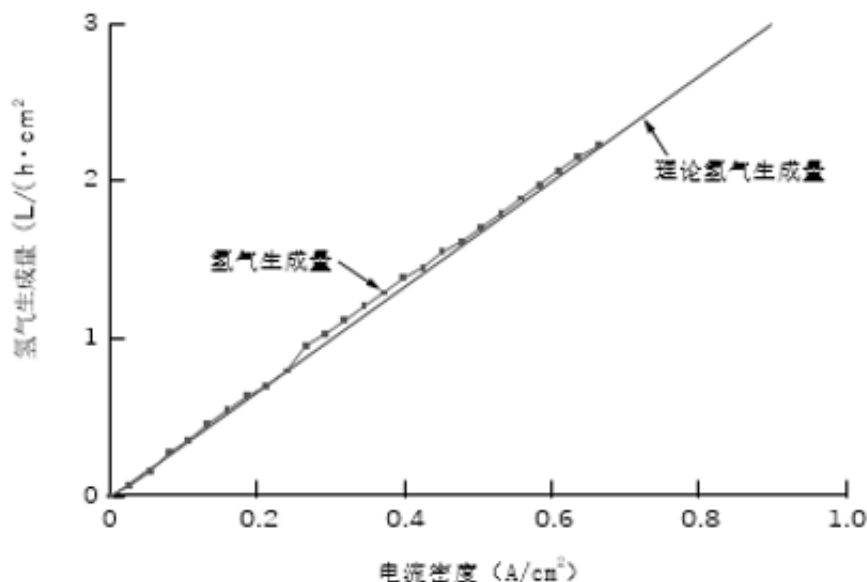


图 6. 电解电流与氢气生成量的比较：由电解电流计算出的理论氢产生量与实际的氢产生量的比较，转换效率接近 100%。

Relationship between electrolysis current and hydrogen production rate Alpatent 前沿研发信息介绍平台

多重电池堆与单个电池堆的 I-V 特性的比较如图 7 所示。与单个电池堆相比，电阻（曲线的斜率）更大。今后，还将

讨论减小多重电池堆的电阻和优化气体流通。

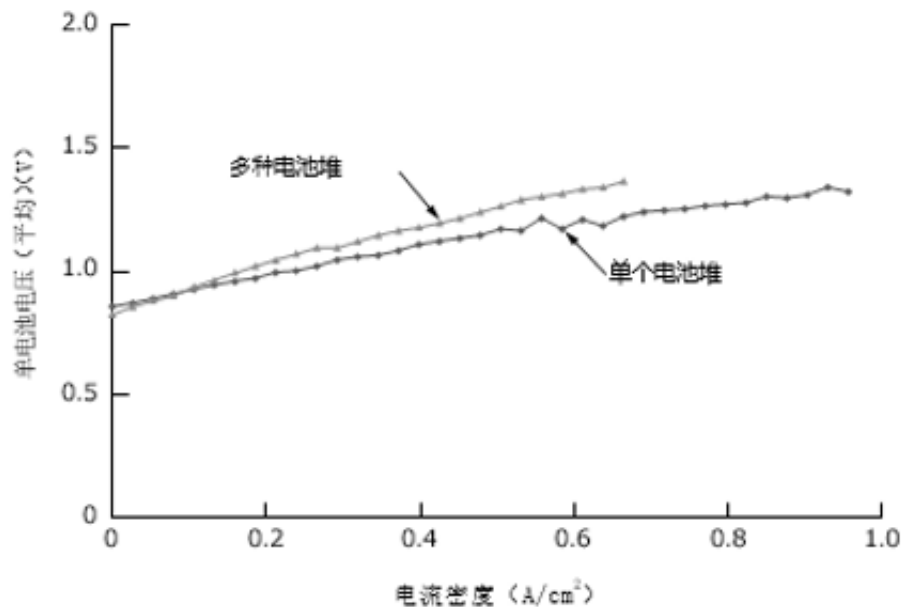


图7. 单个电池堆与多重电池堆的电解特性的比较：与单个电池堆的电解特性相比，多重电池堆的电阻（图表曲线的斜率）更大。

Comparison of I-V characteristics of short-stack and multi-stack

03SOEC制氢系统及蓄电系统的构建

作为传统低温型水电解方式，固体高分子电解池和碱性水电解的单个电池堆的单位制氢耗能约为 $4 \sim 5 \text{ kWh/Nm}^3$ （注1： Nm^3 指0℃、一个标准大气压下的体积）。与此相对，SOEC的单个电池堆的单位制氢耗能在热平衡点条件附近下约为 3.1 kWh/Nm^3 。如果从外部输入热能，单位制氢耗能还能更少。另外，在系统方面，以往系统的工作温度为室温至 100°C 左右，而使用SOEC的系统则是 $600 \sim 800^\circ\text{C}$ ，因此在热学方面的研究十分关键。

热质平衡分析中SOEC制氢系统的计算条件（额定运行条件）如表1，流程图如图8所示。

表 1. SOEC 制氢系统的额定运行条件

项 目		条 件
SOEC	电解功率	150kW
	单个电池堆的单位制氢耗能	3 kWh/Nm ³
	原料气成分	水蒸气/氢=95/5vol%
	水蒸气利用率	0.85
	运行温度	700℃
	运行压力	约150kPa
周边系统	原料气成分的调整	SOEC氢出口气体的约6%进入供气管道循环利用
	热交换器最小接近温度	20℃
	热交换器压力损失	Alpatent 前沿研发信息介绍平台

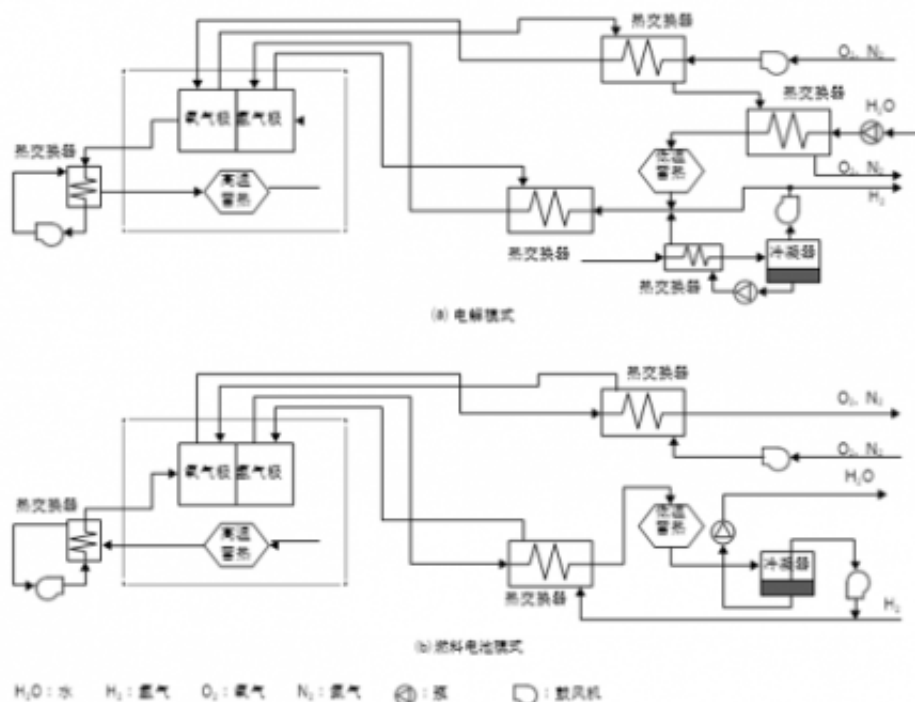
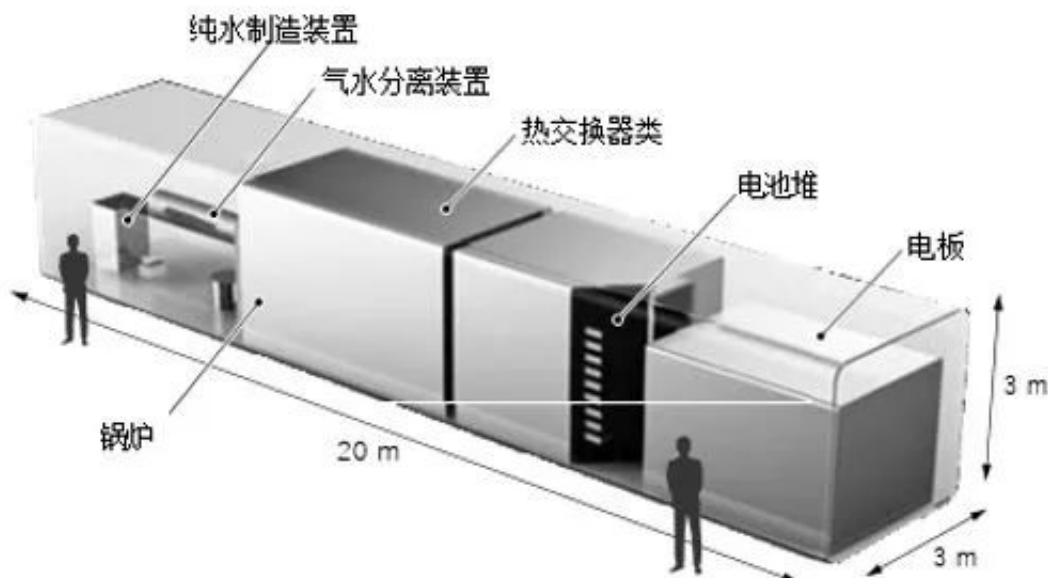


图 8. 热质平衡分析中 SOEC 制氢系统的流程图：由 SOEC 模块和低温、高温再生热交换器构成，其中低温、高温再生热交换器利用 SOEC 制造氢气和氧气过程中产生的废热

Flows of processes of SOEC system for heat-mass balance analysis

系统主要由 SOEC 模块和高低温再生热交换器构成，其中高低温再生热交换器利用 SOEC 制造氢气和氧气过程中产生的废热。生成氢气的一部分以及分离出的未反应的原料水循环利用，被再次提供给 SOEC 模块。在输入功率为 150kW 的条件下，在 SOEC 电池堆的热平衡条件下的单位制氢耗能的基础上，考虑蒸气的产生、氢气加温以及 SOEC 前段加热等所需的热量输入，同时将泵动力、散热损耗、除湿动力等因素考虑在内，分析系统的热质平衡。结果显示，系统的单位制氢耗能约为 4.1 ~ 4.2 kWh/Nm³。根据此结果可知，与以往系统相比，本系统可节省 20 ~ 30% 左右的电能。



项目	开发目标
制氢量	50 Nm ³ /h
功率	200 kW
单位制氢所需能量	4.0 kWh/Nm ³
设备尺寸（长×宽×高）	20×3×3m
维护区域（长×宽）	30×10m
设备重量	15 t

图9. 200kW（50Nm³/h）级SOEC制氢系统：每个单元可以由车辆单独运输

200 kW (50 Nm³/h)-class SOEC hydrogen production unit Alpatent 前沿研发信息介绍平台

图9是200kW（50Nm³/h）级SOEC制氢系统的效果图。

每个单元可以由车辆单独运输，通过将热交换器横放等设计，减小运输尺寸。另外，通过应力分析等评估管道路线，进行可行性验证。

此外，同时探讨了由SOEC制氢系统和SOFC组合而成的氢蓄电系统H2OmegaTM。在氢蓄电系统中，通过将电池反应产生的热用于电解反应，系统整体有望实现高充放电效率（图10）。

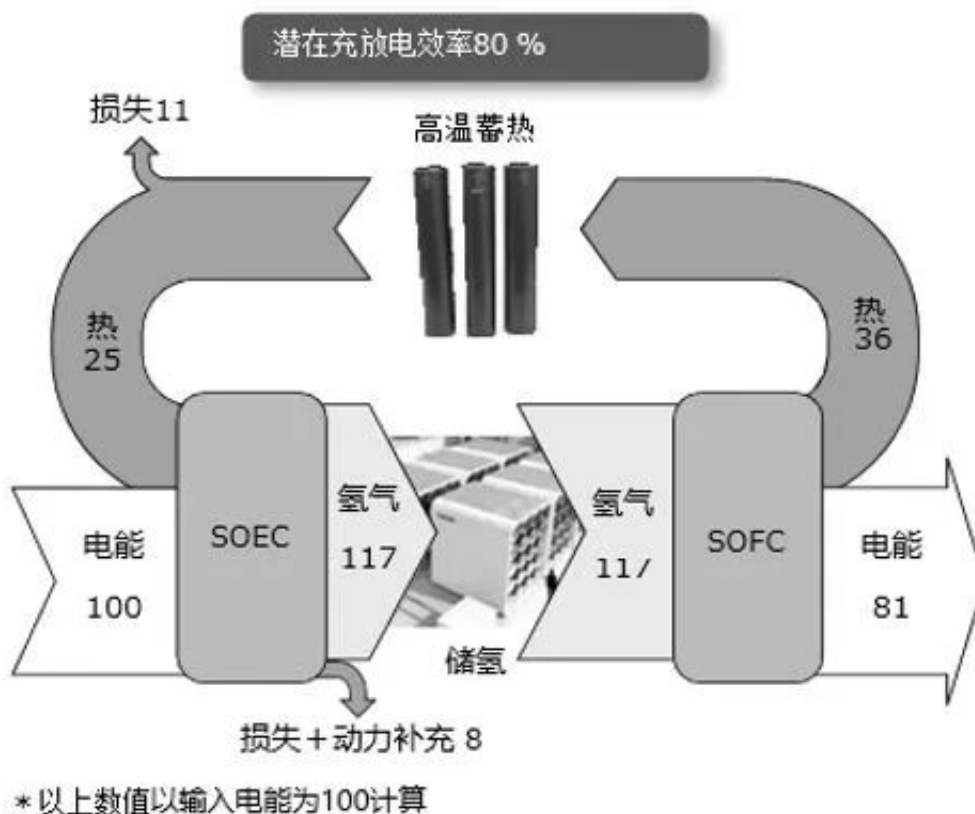


图10. 氢蓄电系统的充放电效率：通过将电池反应生成的热量用于电解反应，实现高充放电效率

Hydrogen power storage system with high charge-discharge efficiency

Alpatent 前沿研发信息介绍平台

当前正在推进MW级氢蓄电系统中的高温蓄热装置的概念设计，目前为止，已经进行了蓄热容器候选材料的选定、蓄热材料（熔融盐）的选定、泄漏检测方法的研究以及构成材料的抗腐蚀性评价等。此外，还收集了高温蓄热装置中的辐射传热等实际设备中可能出现的热传递的基础数据。

图11是讨论中的5MWe级氢蓄电装置的效果图。设想的蓄电容量为32MWh，可提供1万户家庭8小时所需电力。

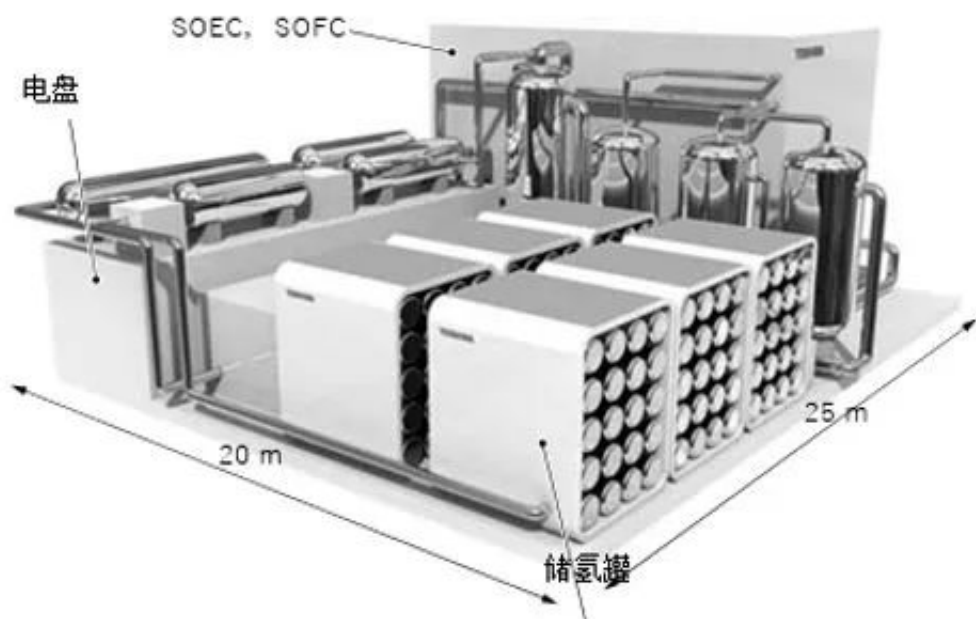


图11. 5MWe级氢蓄电装置：设想的蓄电容量32MWh，可提供1万户家庭8h所需电力。

5 MWe-class hydrogen power storage system



Alpatent 前沿研发信息介绍平台

04后记

氢气作为能量媒介，今后对于高效制氢方法以及氢气与电力高效转化方法的需求会越来越多。东芝公司将继续推进各项研发，为构建可持续、安心、安全、舒适的社会提供可再生能源和氢能利用的解决方案。其中，随着SOEC容量的增大和效率的提高，对其进行系统使用将是一个重要的技术课题。为了构建更高效的制氢和蓄电系统，东芝公司今后也将继续进行相关研究。

本研究成果的一部分由日本经济产业省和日本国立研究开发法人新能源产业技术综合开发机构（NEDO）委托进行。

原作者：松永 健太郎（MATSUNAGA Kentaro）；吉野 正人（YOSHINO Masato）；渡边 久夫（WATANABE Hisao）

（翻译：金滢洁 审校：李涵、贾陆叶 统稿：Susan）

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/153147.html>