现状与展望

# 以实现低碳社会为目标的富士电机发电成套设备事业的现状与展望

Fuji Electric's Power Generation Business to Realize a Low-Carbon Society: Current Status and Future Outlook

堀江　理夫 HORIE, Tadao　　上野　康夫 UENO, Yasuo　　北西　启一 KITANISHI, Hirokazu



## 1　引言

富士电机提出“致力于丰富多彩的社会”、“挑战创造的极限”、“与自然环境协调发展”等经营理念，经营方针的支柱之一就是通过能源和环境事业为实现社会的可持续发展做出贡献。在这一方针指导下，富士电机的发电成套设备业务领域始终致力于实现能源组合(*1)，提高能源基础设施韧性，从而为实现无碳社会做出贡献。此外，根据社会环境变化，将关注领域聚焦于可再生能源领域（地热发电、水力发电、生物质发电(*2)、太阳能发电、风力发电），除了提高传统的运行效率和维护性等之外，还通过提高调整能力，提出输出稳定化技术方案等来推进技术开发和产品化，从而应对因时间段和气象影响导致的电力需求波动。

本文以能源领域为中心，介绍富士电机为实现低碳社会所作出努力，并列举典型的贡献事例，讲述了现状和前景。

## 2　日本国内外的电力状况

全球电力需求，预计在 2040 年前，将以经济合作与发展组织（OECD：Organisation for Economic COS-operation and development）非成员国为主体，以每年 1% 左右的速度持续增加。

作为全球气候变暖对策，太阳能发电和风力发电等可再生能源电源的开发正在迅速增长。

此外，为了实现作为“可持续发展方案”在联合国气候变化框架公约第 21 次缔约方大会（COP21）上达成的“巴黎协定”所定的共同目标（温度上升 2℃以下），各国纷纷出台了新的政策和措施。

日本国内自 2016 年 4 月电力零售全面自由化和 2017 年 4 月燃气自由化以后，新电力等销售电力的份额呈现增加趋势，截至 2019 年 12 月占 16.2%（2019 年 12 月）。

“可再生能源定价收购制度”（FIT）于 2012 年 7 月开始导入，为提高可再生能源在发电量中的比率（从 2011 年的 10.8% 提高至 2017 年的 16.0% 以上）做出了贡献。为了实现“最大限度地导入可再生能源，同时确保不加重国民负担”在 2016 年，重新对制度进行了修订。此外，《关于电力运营商采购可再生能源电力的特别措施法》将于 2022 年 4 月 1 日进行修订，法律名称也将修改为《关于促进可再生能源电力利用的特别措施法》。再生能源利用促进法修改的四个要点如下所示[1]。

① 在 FIT 制度(*3)的基础上导入 FIP 制度(*4)
② 充分利用再生能源潜力完善电网
③ 妥善处置再生能源发电设备的废弃工作
④ 撤销长期未运行设备的认证

## 3　地热发电领域

包括温泉发电在内的地热发电，不受天气等自然条件左右，作为稳定的可再生能源再次受到了国内外的关注。

虽然可采用闪蒸循环发电(*5)的地热源有限，但包括大型设备在内，闪蒸循环发电设备呈增加趋势。目前有很多正在开发的生产井项目，预计发电设备仍会增加。**图 1** 所示为拥有地热汽轮机世界最大单机容量（140 MW）的新西兰 Nga Awa Purua 地热发电站的外观[2]。该设备是世界最大级别的三级闪蒸方式(*6)地热成套设备。

**（* 1）能源组合**

能源组合是指“组合各种发电方法，为整个社会供应电力”。按照 2018 年 7 月日本内阁会议决定的第 5 次能源基本计划，2030 年的发电方法组合为自然能源 22 ～ 24%、核能 20 ～ 22%、火力发电 56%。在实现 2015 年决定的“2030 年发电方法组合（能源组合）”目标的同时，也在考虑与 2013 年相比，“削减温室气体 26%（含 CO2 排放）”的目标。

**（* 2）生物质发电**

生物质是指源自动物、植物等的有机性资源。生物质发电是指将其作为火力发电的燃料进行利用来发电。生物质分为废弃物类和栽培作物类两种，作为燃料使用时，可以干燥后使用，也可以加工成片状、粒状后使用。

**（* 3）FIT 制度**

FIT 是 Feed-in Tariff 的缩写。为扩大可再生能源的普及，该制度规定电力运营商有义务以国家规定价格，在一定期间内购买利用太阳能、风力、水力、地热、生物质等可再生能源发电的电力。

**（* 4）FIP 制度**

FIP 是 Feed-in Premium 的缩写。该制度在使用可再生能源发电的电力销售价格上追加优惠，目的在于使再生能源成为独立的能源，从而进一步推广。

**（* 5）闪蒸循环发电**

从坑口喷出的蒸汽含有大量热水时，利用汽水分离器提取蒸汽，直接旋转蒸汽轮机的发电方式。

**（* 6）三级闪蒸方式**

在只利用汽水分离后的蒸汽闪蒸方式中，过去，“汽水分离”为一级或最多为二级，但这样未能有效地利用难得的蒸汽压，效率不高。为解决这一课题，富士电机开发了三级闪蒸方式。如名称所示，该方式分为三级，可提取更多的蒸汽。该发电方式可高效利用地球热能，减少浪费。经汽水分离器分离的热水通过回灌井再次返回地下。

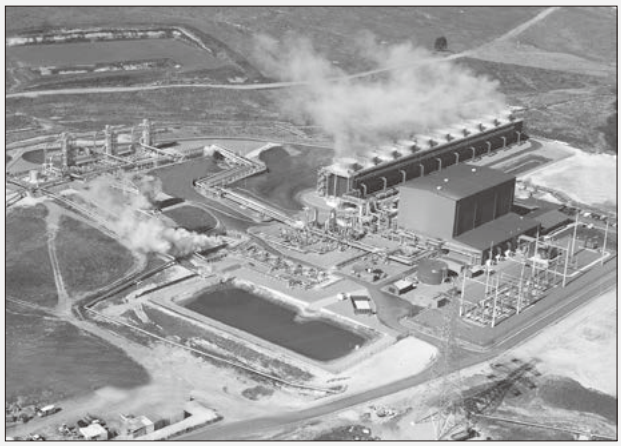


图 1　Nga Awa Purua 的地热发电站全景

另一方面，可利用低位(＊7)热源的双循环发电(＊8)因为能利用的地热源广泛，所以具有很大潜力，预计其年度新建规模超过闪蒸循环发电也只是时间问题。

印度尼西亚、菲律宾、墨西哥、冰岛、肯尼亚、新西兰等地热发电盛行的国家，仍然制定有地热发电站的开发和建设计划。日本因为维持了 FIT 的收购价格，在可再生能源方面，地热发电表现出扩大的趋势（参照 195 页，“印度尼西亚穆瓦拉拉坡（Muara Laboh）地热发电站”）。此外，对于有投资风险的地热源探查和地热井挖掘，基于国家的制度支撑，现在多个计划和开发项目正在推进。

作为地热发电领域的世界顶级制造商，富士电机正在持续开展技术开发，以改善成套设备的经济性和运行效率，提高设备的耐腐蚀性、阻垢性、可靠性和维护性等。此外，在售后服务方面，与火力发电领域一样扩充服务据点和服务项目，为保证顾客成套设备安全、稳定、经济实惠的运用，积极加强服务、提供解决方案。

在闪蒸循环发电方面，面向印度尼西亚、肯尼亚的成套设备正在建造之中。在双循环发电方面，完成了工作介质分别为替代氟利昂类和正戊烷的两套 5 MW 日本国内最大规模成套设备。此外，还在开发小容量的日本国内用双循环系统。

## 4　水力发电领域

日本的水力发电已有一百多年的历史，因为通常是从经济性好的地点开始依次开发，所以新项目地理位置偏僻、规模小，初始投资负担较重。另外，从计划到开发交付时间长，容易受到社会、经济环境变化的影响。

富士电机于 1936 年交付了水力发电设备 1 号机。此后，从高落差的佩尔顿式水轮机到低落差的球壳式水轮机，富士电机进行了各种水轮机的开发、设计、制作和交付工作。1997 年，富士电机与从 1938 年开始就有技术合作关系的德国福伊特公司共同出资成立了富士福伊特液压株式会社，充分利用福伊特集团的最新技术和全球采购网，追求持续扩大水力事业。

水力发电作为 $CO_2$ 排放量少的绿色纯国产能源，具有不受天气影响、可稳定使用的特点，因此被定位为承担电力供应基础的基本负载电源。

作为支持扩大可再生能源导入的措施，通过实施 FIT，市场景象良好，除了中小型水电新开发之外，50～60 年前日本水力开发期所建设的发电站更新项目也非常多，全国呈现出空前盛况。

通过运用三维流动分析技术，使各个发电站均达到最佳状态，不仅增大了输出功率，还大幅提高了年发电量。今后，将开发不使用液压的环保型无油技术和提高了维护性和寿命的下一代水力发电设备，为降低环境负荷做贡献。

## 5　太阳能发电领域

为了通过可再生能源的普及实现低碳社会，自 2012 年导入 FIT 以后，日本以超出当初政府预想的速度普及了大规模的太阳能发电（百万瓦级太阳能发电），截至 2020 年 3 月，所用设备达到了 40 GW。此外，按照政府的主力电源化方针，预计百万瓦级太阳能发电市场今后仍将进一步扩大。

为达到这一目标，必须解决以下技术课题。第一，系统稳定化。富士电机从 2016 年开始致力于开发用于百万瓦级太阳能发电的系统稳定化系统。具体而言，是实现北海道电力株式会社要求的输出波动缓和基准“连接点电力的变化率在 1% 以下 / 分”的技术开发。后续论文介绍的“日本国内最大规模蓄电池附设型百万瓦级太阳能发电站”，是配置了 DC 容量 92.2 MW、锂离子电池容量 25.3 MWh 总输出功率为 AC59.4 MW 的发电站。该发电站从 2020 年 2 月 1 日开始 FIT 售电，运行正常（参照 199 页、“日本国内最大规模蓄电池附设型百万瓦级太阳能发电站”）。

另一个课题是实现既能抑制成本，又能抑制输出波动带来的电网电压波动的系统。为此，富士电机开发了相应装置。使用该装置，即使不增建特别的静止型无功功率补偿装置（SVC：Static Var Compensator）等，也可使用功率调节器（PCS：Power Conditioning System）具有的无功功率补偿功能，将系统电压的电压波动率抑制在规定值以内。

以上述日本国内业绩为基础，富士电机也从全球视角

**（＊ 7）低位**

指迄今为止未被有效利用的低温区域，如 100℃左右的热水、工厂等所用的工艺蒸汽、排热的热水等。

**（＊ 8）双循环发电**

使用温度较低的蒸汽和热水等热源时，热会传向正戊烷等低沸点的介质，产生高压蒸汽，从而旋转涡轮发电，是一种适用于闪蒸循环发电方式无法使用的低位（低温）热源的发电方式。

强化实现了低碳社会的举措。特别是东南亚，今后也有望实现较快的经济增长，电力需求不断提高。同时，因为东南亚地区原本就日照量充足，人们对百万瓦级太阳能发电这一可再生能源寄予厚望。但是，无论在哪个国家，电网线路都处于扩充中，因此峰值削减和波动抑制技术必不可少。

针对该市场，富士电机开发了支持 DC1500 V 的大容量 2500 KVA 新型 PCS，将过载率(*9)提高至 200%、大幅提高了百万瓦级太阳能发电站发电量。

富士电机立足于全球视角，以实现低碳社会为目标，充分利用系统限制应对设备和蓄电池控制技术，考虑各国和地区的特性，希望为低成本且稳定的百万瓦级太阳能发电的普及做出贡献。

## 6 风力发电领域

在欧美各国，百万瓦级太阳能发电和风力发电，特别是海上风力发电正在推动低碳化进程。在日本，FIT 也适用于作为可再生能源的重要组成部分的风力发电。为了进一步扩大风力发电规模，2018 年 12 月颁布了《关于建设海洋可再生能源发电设备的相关海域利用法》(再生能源海域利用法)，相关需求有望长期增长。

具体而言，对于北海道、东北地区的陆上和海上项目，从系统限制的观点出发，安装设置一直以来都受到了严格的制约。但在导入该促进政策后，这些地区启动了多项计划。富士电机以本公司擅长的系统并网和电力稳定化等设备和成套设备工程设计能力为中心，参与了数十 MW 级风力发电站的 EPC 项目。

北海道和东北地区风况良好，适合风力发电，但是送电网的容量比较小，风况变化导致的输出波动对电力质量有影响。例如，北海道电力株式会社于 2016 年发布了“关于风力发电设备输出波动缓和措施的技术条件”，要求在新建的风力发电站中设置蓄电池等，将输出波动抑制在不受影响电力系统频率调整的范围内。

富士电机在该地区内交付了多套太阳能发电波动抑制系统，具有可充分满足以上要件的技术能力和系统供给能力。另外，还开发了这些系统优化，即全面降低成套设备成本的新型蓄电池 PCS (“PVI1400CJ-3/2600”、DC1400 V、2600 kVA)，预计 2021 年开始销售并推向市场。

此外，考虑到今后海上风力发电的普及，需要解决 275 kV 受变电设备的设计、供应和长距离输电中存在的问题，即电压波动对策和高次谐波共振对策等。同时，还需满足客户的各种要求。为了解决这些课题、满足客户要求，在模拟技术和电缆杂散电容的影响对策方面，富士电机也积累了相关技术。

## 7 燃料电池领域

氢的有效利用有助于实现低碳社会。作为其代表形式的燃料电池，近年来在家庭用燃料电池热电联产(*10)系统(ENE FARM(注))、燃料电池汽车 (FCV)、室内用叉车、便携式基站用应急电源、欧美和韩国的发电事业等各种用途中得到了快速普及。

因为发电需要氢气，所以通过使用化学反应中被称为水蒸气重整的氢气制造方法，也可使用城市燃气、LPG、下水分解气体等生物气。另外，如果今后氢气社会到来，则直接使用氢气的机会将会增加。

燃料电池不燃烧燃料，而是通过电化学反应发电，所以不受发电装置大小影响，即使发电输出功率小也可得到高发电效率。另外，因为无需燃烧燃料，废气中几乎不含大气污染物质，噪音低、振动低。此外，通过使用与发电一起排出的热量，可提供高达 90% 的综合效率。

如**表 1** 所示，根据所用的电解质种类，燃料电池可分为磷酸型燃料电池 (PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell)、固体高分子型燃料电池 (PEFC : Polymer Electrolyte Fuel Cell)、熔融碳酸盐型燃料电池 (MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell)、固体氧化物型燃料电池 (SOFC : Solid Oxide Fuel Cell) 等，其运行温度、发电效率和主要用途等不同 (**表 1**)。

富士电机着眼于排热温度和电解质稳定性优异的磷酸型燃料电池，于 1973 年开始着手开发。在得到国家支持、燃气公司和电力公司的协助下，对 90 余台 50 kW ～ 5 MW 的各种容量进行了现场测试。1998 年开始销售采用了这些经验和技术诀窍的 100 KW 商用机型，截

**表 1　燃料电池的种类和发电效率、用途**

| 类型 | 磷酸型 (PAFC) | 固体高分子型 (PEFC) | 熔融碳酸盐型 (MCFC) | 固体氧化物型 (SOFC) |
|---|---|---|---|---|
| 运行温度 | 190 ～ 200 ℃ | 70 ～ 90 ℃ | 600 ～ 700 ℃ | 700 ～ 1,000 ℃ |
| 发电效率 | 40 ～ 45% | 35 ～ 40% | 45 ～ 50% | 45 ～ 60% |
| 主要用途 | 业务用 | 家庭用<br>汽车用 | 业务用 | 业务用<br>家庭用 |

〈注 1〉ENE FARM：东京煤气株式会社 、大阪煤气株式会社、JXTG 能源株式会社的商标或注册商标

**(* 9) 过载率**

因为太阳能发电在阴天时发电量会下降，所以采取了设置能保有余量的太阳能面板的对策。另一方面，将发电电力连接至电力公司的系统时，通过并网协议决定容量，选定合适的 PCS。过载率是指相对于额定容量设置了多少太阳能板，通常为 120 ～ 170%。如果该数值较大，则可较快回收投资。经济产业省的主页也进行了说明：“过载也有好处，所以不禁止”。

**(* 10) 热电联产**

热电联产 (cogeneration) 也叫汽电共生，是通过在发电的同时提供热量，有效利用能源的高效系统。燃料电池在这一特性上表现优异，磷酸型燃料电池发电效率为 42%，排热效率为 49%，最大可将能源利用效率提高至 91%。

至 2020 年 3 月在全球范围交付了 100 台，82 台正在运行之中。其中，33 台销往了包括德国和韩国在内的海外市场。另外，32 台使用可再生能源分解气体作为燃料。富士电机燃料电池发电装置的最长累计运行时间高达 13 万小时（15 年），证实了其高耐久性和可靠性。

为了实现低碳社会，富士电机正在致力于提高磷酸型燃料电池的设置安装便利性、功能高级化、用途扩大化及低价格化。目前，正在德国和韩国等推进燃料电池普及政策的国家推广。另外，作为可再生能源，也正在日本国内推进适用于 FIT 的分解气体应用。为了迎接上述氢气社会的到来，富士电机开发了氢燃料专用磷酸型燃料电池，该电池优化了将直接氢气作为燃料使用的工艺，实现了节省空间和低成本，对实现低碳社会起到了积极作用（参照 205 页、“面向韩国的磷酸型燃料电池”）。

## 8 火力发电领域

以 COP21 为首的国际会议上明确了 $CO_2$ 削减目标，在全球能源供应正在向低碳化发展的潮流下，化石燃料发电设备的使用呈现缩小趋势。

根据 2020 年 7 月公布的缩小煤炭火力发电方针，日本正在研究具体的新限制措施，让低效率煤炭火力发电逐渐缩小规模。

但是，从目前的高依赖度和能源稳定供应的观点来看，预计化石燃料发电将会减少，但也不会完全消失。伴随着可再生能源比例增加，电力系统的稳定性会受到影响，从这一观点出发，高效且环境负荷低的燃气轮机联合循环（GTCC）发电的需求预计将继续增加。

针对这一动向，富士电机在火力发电中通过提高效率，提高了经济效益、降低了环境负荷，为火力发电设备在生命周期中创造客户价值做出了贡献。具体而言，就是通过实现蒸汽条件的高温、高压化、采用中小容量涡轮的再热循环(*11)、蒸汽轮机的小型化和削减壳体数量等，提供了确实且可靠性高的技术。

运用这些迄今为止积累起来的技术和诀窍，富士电机于 2019 年交付了内陆型大型 GTCC 发电站，为提高系统整体的复原能力做出了贡献（参照 210 页、“日本初次内陆型大型 GTCC（燃气轮机联合循环发电）项目 – 发电机现场制作技术”），同时，现在还拥有超超临界压力火力发电(*12)、生物质发电等项目，正在推进设计、制作、建设，确保按期竣工。

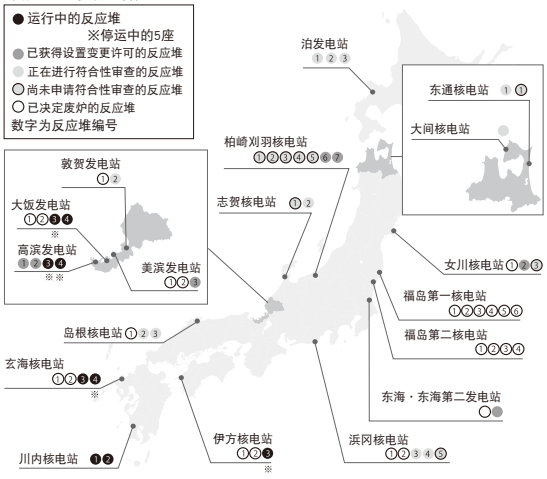
在售后服务方面，不仅进行定期维修和延长使用寿命，还积极使用最新技术，通过提高效率、改善运行和应用各种诊断技术的预防性维护，大幅提高运转率等（参照 215 页、“基于在线气体分析的旋转机定子绕组劣化诊断”）。另外，在美国、台湾、韩国、东南亚、中东等地区增加服务网点的同时，富士电机还开发了可在现场进行的维修技术，为缩短发电站的停工时间做出了贡献。此外，通过积极开发利用机器人技术的诊断系统等，大幅缩短了因诊断导致的设备停工时间。

今后，富士电机将继续致力于满足客户的各种需求，积极提出服务方案，创造客户价值。

## 9 核能领域

根据第 5 次能源基本计划中的电力供需预测，2030 年核能发电将占据电源的 20～22%。与 2013 年相比，该能源组合比例与温室气体（含来自能源的 $CO_2$ 排放）削减 26% 这一目标一致。但是，确保安全是大前提，从福岛第一核电站事故中吸取教训、满足新管制基准是重新运转和继续建设的必要条件。因此，目前有 24 座反应堆决定废炉，到 2019 年底，9 座已重启，另有 27 座也准备重启。日本国内的核电站运行情况如**图 2** 所示。

目前，为实现反应堆废炉计划，以原子力损害赔偿与废炉支援机构（NDF）为中心，日本举国锐意推进治理污染水和用以取出燃料碎片的技术开发和装置设计。同时，还在努力推进核燃料的循环利用，如对已使用燃料进行再




出处：日本经济产业省 资源能源厅 关于核能政策（大元）
根据一般财团法人 日本原子力文化财团 能源百科、核能和能源图纸集内部整理。

图 2 日本国内核电站的运转情况

**（* 11）再热循环**

将涡轮处于膨胀过程中的蒸汽部分取出，送到锅炉再次加热并提高过热度后，再次送至涡轮使其膨胀到最终压力的循环称为再热循环。

通过采用再热循环，与普通循环相比热效率得到提高，可增加同一蒸汽流量的涡轮输出。

**（* 12）超超临界压火力发电**

超临界压发电是指通过在超过水临界压力的高温、高压条件下，削减将水蒸发所需的热能源，实现高效发电的方式。为了提高发电效率而逐步实现高温高压化，压力在 24.1 MPa 以上且温度超过 566℃时，就属于超超临界压火力发电。

处理，然后和平、有效地利用回收的铀钚混合物。在接下来的一段时间，核能领域将被要求核电站重新运转和废炉两个方面的持续性的解决方案技术。

在核电站的报废处理方面，除高速增殖原型反应堆“文殊”的燃料取出和燃料清洗之外，富士电机还正在设计处理拆卸废弃物的水泥固化设备（参照 219 页、“高速增殖原型反应堆“文殊”的燃料体取出技术”）。

另外，为了能够安全地处理、处置和保管核能设施运行和废炉过程中产生的放射性废弃物，富士电机与美国 Jacobs 公司共同进行了活用具有各种优异特性的地聚合物材料的固化技术的研究开发（参照 224 页、“基于先进固化技术“SIAL®”的放射性废弃物处理”）。

同时，为了对核燃料回收利用做出贡献，富士电机还提供符合新限制标准，在铀钚混合氧化物（MOX：Mixed Oxide）燃料的制造设备、远程操作装置、抗震配电柜、防火灭火等技术和产品。

## 10 后记

作为能源系统的一部分，发电，即创造能源的作用不仅仅是有效地制造电力，还应扩展到电力和热的有效利用上。今后，富士电机也将继续把目光投向客户，倾听客户的心声，与客户合作，为了帮助客户创造价值，坚持不懈地努力开展技术革新、提高服务水平。

同时，还将通过提供安全、安心且环保的能源创造和社会基础设施解决方案，不断为实现可持续发展的社会做出巨大贡献。

**参考文献**

⑴ 経済産業省 資源エネルギー庁 スペシャルコンテンツ．“「法制度」の観点から考える、電力のレジリエンス ⑤再エネの利用促進にむけた新たな制度とは？”．https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/denjihokaisei_05.html,（参照 2020-10-08）．

⑵ 山田茂登．“富士電機の地熱発電所建設事例”．2019 年度 第 5 回研究会 2020.1.16. 一般財団法人 エンジニアリング協会．地熱発電・熱水活用研究会 資料 5-3.https://www.enaa.or.jp/gec/project_info,（参照 2020-09-23）．

**堀江 理夫**
富士电机株式会社执行役员、发电成套设备事业本部长。

**上野 康夫**
从事火力、地热成套设备事业运营。现为富士电机株式会社发电成套设备事业本部发电事业部长。

**北西 启一**
从事太阳能、风力等可再生能源事业运营。现为富士电机株式会社发电成套设备事业本部工程统括部长。Fuji Green Power Co., Ltd 代表取缔役社长。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。