DC71 MW/AC51 MW 上北六所太阳能发电站

Kamikita Rokkasho Photovoltaic Power Plant with Capacity of 71 MW DC / 51 MW AC

尻无浜 立穗 SHIRINASHIHAMA, Ritsuho　　本田 大祐 HONDA, Daisuke　　久保薗 隆治 KUBOZONO, Takaharu

富士电机致力于开发高效功率调节器（PCS），拥有众多太阳能发电站的交付实绩。我们以工程总承包（EPC）形式承包下了 DC71 MW/AC51 MW 的上北六所太阳能发电站，并已于 2017 年 1 月交付使用。发电站利用 51 台 1000 kW PCS 转换成输出 AC51 MW，再通过受变电设备升压至 154 kV 后，与东北电力株式会社的送电线互联，并于 2016 年 11 月实施了综合功能试验，确认具备发电站所需的指定功能和性能。2017 年 2 月，面向东北电力株式会社的为期 20 年的售电事业正式启动。

Fuji Electric has developed high-efficiency power conditioning sub-systems (PCSs) and has a number of track records in delivering them to photovoltaic power plants. We won an engineering, procurement and construction (EPC) contract for Kamikita Rokkasho Photovoltaic Power Plant with a capacity of 71 MW DC / 51 MW AC and completed the delivery in January 2017. The output is converted to 51 MW AC with fifty-one 1,000-kW PCSs, boosted to 154 kV with an electric substation facility, and then transmitted to the power grid of Tohoku Electric Power Co., Inc. We conducted a general function test in November 2016 and verified that the plant has the specified functionality and performance required of a power plant. In February 2017, the plant started operations to sell electric power to Tohoku Electric Power Co., Inc. for 20 years.

1　引言

由双日株式会社出资的未来创电上北六所株式会社（特定目的公司）的上北六所太阳能发电站于 2017 年 2 月开始运行。该发电站使用了青森县上北郡六所村新 Mutsu 小川原株式会社所拥有的约 150ha 的土地，是一个由 263172 块发电容量为 DC71 MW 的太阳能电池模块排列而成的、总输出为 AC51 MW 的大规模太阳能发电站，由富士电机签订工程总承包（EPC）合同进行建造。建造工程从 2013 年 11 月动工到 2017 年 1 月末竣工交货为止，实现无事故、无灾害。2017 年 2 月正式启动了面向东北电力株式会社（以下称作东北电力）的为期 20 年的售电事业。本发电站运行开始时，按太阳能电池容量来看是排名日本第四的大规模太阳能发电站〈注 1〉。

本文将对上北六所太阳能发电站的建造工程和设备构建进行介绍。

图 1　上北六所太阳能发电站全貌
（照片提供：新 Mutsu 小川原株式会社）

2　上北六所太阳能发电站的概要

上北六所太阳能发电站在站内空地的中央部开通了一条东西方向的村道（**图 1**）。村道北侧约 50ha 的空地上排列了 19 台功率调节器（PCS），南侧约 100ha 的空地上排列了 32 台 PCS。太阳能电池的容量 DC71 MW 是利用富士电机所制的 51 台 1000 kW PCS 转换成输出 AC51 MW，并通过富士电机所制的受变电设备升压至 154 kV 后，与东北电力的送电线互联。整体系统构成如**图 2** 所示。

本发电站的全年售电电能预计为 65930 MWh。这相当于 18400 户普通家庭一年的电能消耗。此外，CO_2 削减量相当于 35200t-CO_2/ 年。

〈注 1〉日本国内排名第四的大规模太阳能发电站：富士电机调查（截至 2017 年 2 月）

3　发电站的建造工程

表 1 为发电站建造工程的主要工序。上北六所太阳能发电站工程自 2013 年 11 月动工，完成试运行调整后于 2017 年 1 月底交付使用，历时 3 年 3 个月。中途因冬季积雪停止施工 9 个月，实际上正式的工期为 2 年 6 个月。

发电站的工程从森林采伐、拔根开始着手，铺整工程用道路、用地后，实施安装太阳能电池的架台工程、PCS 等装置的基础工程、电气配线工程和试验调整后完成交货。

3.1　太阳能电池架台和 PCS 的设置工程

太阳能电池架台采用将 6 根 H 形钢埋入地中约 4.1 m 的桩基础，直接利用土地地形进行了设置。**图 3** 为太阳能电池架台的设置情况。太阳能电池架台〔W11540×D2616×

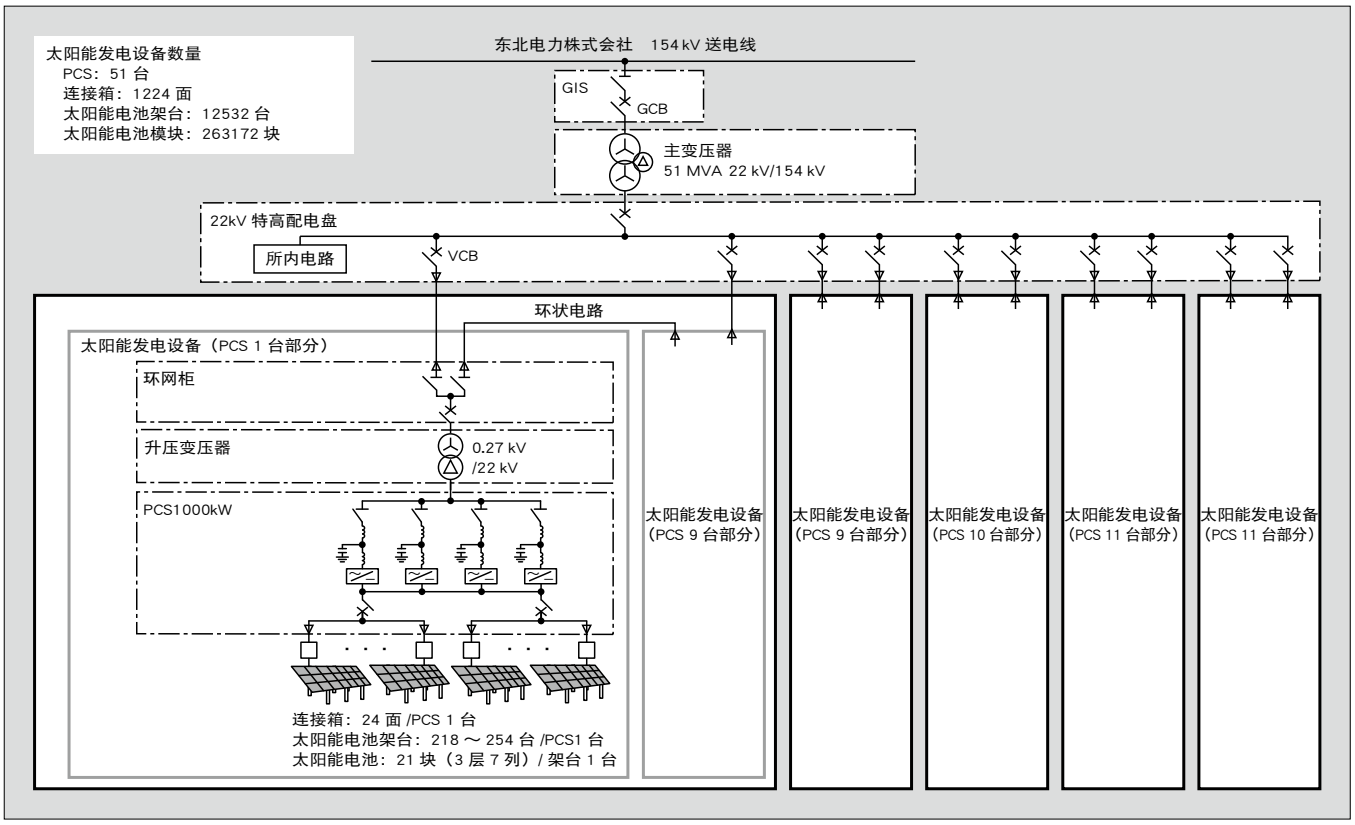

图 2　整体系统构成图

表 1　上北六所太阳能发电站工程的主要工序

No.	工种 \ 年、月	2013			2014												2015												2016												2017		
		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
Ⅰ	土木工程	▼动工																																		★受电			★并网（所有PCS）		▼运行开始		
（1）	采伐、除根、平整地基工程																																										
（2）	阵列基础工程																																										
（3）	架台、模块装配工程																																										
（4）	内部道路、防护网工程																																										
（5）	设备基础工程																																										
Ⅱ	电气工程																																										
（1）	太阳能电池阵列周边工程																																										
（2）	PV 站点装置安装工程																																										
（3）	特高干线工程																																										
（4）	互联变电设备工程																																										
Ⅲ	154 kV 电路工程																																										
Ⅳ	现场试验调整																																										
Ⅴ	综合试验调整																																										
					冬季休工												冬季休工												冬季休工														

H2710（mm））上可以安装 3 层 7 列共 21 块太阳能电池模块。用地内设置了 12532 台该太阳能电池架台。考虑到冬季的积雪问题，太阳能电池架台上太阳能电池模块的安装角度设为 30 度，最低地上高度设为 1.2 m。此外，考虑到冬季太阳高度低的影响，南北方向的太阳能电池架台间隔确保为按平地换算 5.0 m。我们利用地形进行排列，因此南斜面上排列间隔较小，北斜面上排列间隔较大。

PCS 及其附带的升压变压器和周边装置（环网柜）排列在场地内的 51 处，考虑到积雪，基础高度确保为距离地面 1.0 m 的高度。**图 4** 为 PCS、升压变压器、环网柜的设置情况。

3.2　电气工程

9 台到 11 台 PCS 形成一个环状连接的电路，用埋设管敷设了共 5 个电路的 22 kV 电缆。埋设管的总长度达约 20 km，仅电缆敷设就用了 12 个月。北用地和南用地之间利用推进工法挖掘村道的地下后，设置埋设管，完成了电缆敷设。

3.3　154 kV 电路工程、变电设备工程

154 kV 电路考虑到对设置在发电站周围风车的影响，采用了埋设电缆方式，而非铁塔方式。从东北电力的 154 kV 铁塔利用架空线引入铁塔附近的门式钢结构中，用

（a）正面

（b）背面

图 3　太阳能电池架台的设置情况

图 4　PCS、升压变压器、环网柜的设置情况

埋设管敷设至发电站的变电设备。该电路开垦、挖掘了长度约 500 m 的相邻地的斜面，设置埋设管并完成了电缆敷设。

作为 154 kV 变电设备的主要设备，气体绝缘开关装置（GIS）、主变压器和 22 kV 特高配电盘的总重量高达约 140t。为了保证能承受这一负荷，我们在改良地质、实施基础工程后，设置了各个装置。

4　太阳能发电设备

太阳能发电设备由太阳能电池模块、连接箱、PCS、升压变压器、环网柜构成，是一种将太阳能电池模块中产生的直流电力集中到 PCS 中，转换成交流输出后进行输送的设备。

4.1　太阳能电池模块、连接箱

表 2 为太阳能电池模块和连接箱的主要规格。太阳能电池模块中采用了每块最大输出为 270 W 的单结晶硅。太阳能电池模块对应 PCS 的 1000 V 输入，由 3 层、7 列共 21 块构成一个阵列 / 架台，1 阵列为 DC5.67 kW 的输

表 2　太阳能电池模块和连接箱的主要规格

（a）太阳能电池模块

项目		规格、特性
基本规格	电池类型	单结晶硅
	电池使用数量	60 块
	模块尺寸	长边 1640× 短边 1000× 厚度 35（mm）
	最大耐负荷	5400Pa（正负荷）*1、 2400Pa（负负荷）*2
	重量	16.8 kg
	前盖材质	钢化玻璃
	后盖材质	背膜
	框架材质	阳极氧化铝合金
	框架颜色	铝合金本色
	模块交付数量	263172 块
	制造商	LG 电子集团（韩国）
电气特性	最大输出（P_{max}）	270 W
	模块效率	16.50%
	最大输出动作电压（V_{pm}）	31.50 V
	最大输出动作电流（I_{pm}）	8.58 A
	开放电压（V_{oc}）	38.50 V
	短路电流（I_{sc}）	9.17 A
	P_{max} 温度系数	−0.430%/℃
	V_{oc} 温度系数	−0.310%/℃
	I_{sc} 温度系数	0.040%/℃
	系统最大电压	1000（V）
	试验条件（STC）	电池温度 25 ℃、AM1.5 *3、 照射量 1000 W/m2

*1：正负荷：指从模块正面承受的负荷。
*2：负负荷：指从模块背面承受的负荷。
*3：AM（Air Mass）1.5：表示日本附近纬度地上的平均太阳能光谱，穿过大气的距离是垂直射入时的 1.5 倍。

（b）连接箱

项目		规格、特性
基本规格	设置场所	室外
	环境温度	−25～+40 ℃
	外形尺寸	W800×D300×H900（m）
	外壳保护结构	IP44
	主电路导电部件	1500 V 电线 WL2
	外线连接	端子台方式
	交付数量	1224 面
电气规格	额定工作电压	DC1000 V
	额定绝缘电压	DC1200 V
	输入电池串电路	11 个电路
	额定母线电流	110 A
	电池串电路保护	熔断器保护（15 A）
	主开关	MCCB
	耐雷保护	SPD

出。汇总 8 阵列至 11 阵列的电力集中到连接箱中，连接箱每面则为 45.4 kW 至 62.4 kW 的输出，集中 24 面后作为 PCS 的直流输入。PCS 的输入阵列数与传统的低压 750 V 输入 PCS 相比减少了 30% 以上，因此有助于削减施工成本。

4. 2　PCS、升压变压器、环网柜

PCS 将从 24 面连接箱输入的 DC1000 V 转换成 AC270 V，最大可输出 1000 kW 的交流电力。该 PCS 是日本国内最大的单机 1000 kW 机，采用了三电平变频器方式，转换效率达到了行业最高级别的 98.5%（欧洲效率 98.2%）。此外，采用室外型外气冷却方式，就不需要集装箱收纳型 PCS 时所需的空调设备，削减了运行中的辅机动力功耗[(1)]。

PCS 的直流输入部采用了 24 分支型。因此，不需要传统 4 分支型的集电箱。此外，直流输入每隔 24 分支设置一个电流检测器（DCCT），实现了对直流输入电流的测量监控。

PCS 的运行数据通过多重传输系统（RS-485，光通信），利用设置在变电设备附近的上层监视系统监视运行数据。此外，PCS 还可以通过该监视系统的远程操作进行启动、停止。

PCS 的输出利用升压变压器（容量 1000 kVA）升压至 22 kV 后，经环网柜集中到变电设备的 22 kV 特高配电盘中。**表 3** 为 PCS 的主要规格。

表 3　PCS 的主要规格

项目		规格
系列名称		PVI1000-3/1000
额定输出		1000 kW
绝缘方式		无变压器方式
电气规格（DC 输入）	直流输入电压范围	0～1000 V
	运行电压范围	450～950 V
	MPPT 范围	460～850 V
	直流输入分支数 *1	24
电气规格（AC 输出）	额定输出容量	1000 kW
	额定输出电压	270 V　−10～＋12%
	额定频率	50/60 Hz±5%
	输出相数	3φ3W　支持非接地系统
	额定输出电流	2138 A
	输出功率因数 *2	＞0.99（额定输出时）
	输出电流失真率（総合）*3	＜5%（额定输出时）
	输出电流失真率（各次）	＜3%（额定输出时）
	装置最高效率	98.5%
	装置效率（EURO 效率）	98.2%
	过负载耐量	100% 连续
	噪音	70 dB 以下
并网	系统保护	OV、UV、OF、UF
	单独运行检测方式(从动)*4	电压相位跳跃检测
	单独运行检测方式(主动)*4	无功功率变动方式
	电压上升、抑制功能	无效电流补偿、有效电流输出抑制
	FRT	依据 JEAC 9701
盘结构	设置方式 *5	室外独立型
	符合 IP *6	IP54
	系统方式	变电站方式
	电缆引入	下部
	冷却方式	強制空冷
尺寸	PCS 单体	W3500×D2300×H2800（mm）
	变电站	W6050×D2400×H2800（mm）
重量	PCS 单体	7000 kg
	变电站	12500 kg
环境条件	保存温度	−20～＋50 ℃
	运行温度 *7	−20～＋40 ℃
	相对湿度 *8	15～95%
	海拔	2000 m 以下
适用标准		IEC 62109-1、JIS、JEM、JEC
通信方式		RS-485、MODBUS*9、TCP

*1：选配件　*2：单独运行 Q 输出除外　*3：输出 1/8 ～额定时
*4：不使用　*5：耐盐害规格　*6：防粉末状雪规格
*7：寒冷地带规格　*8：无结露
*9：Schneider Automation, Inc. 的商标或注册商标

5　特高压变电设备、并网设备

图 5 为 154 kV 门式钢结构和变电设备的外观。将 PCS 输出的电力集中到 22 kV 特高配电盘中，利用主变压器从 22 kV 升压至并网电压 154 kV，经 GIS 与东北电力的送电线互联。

22 kV 特高配电盘对应环网柜的电路，由 10 台真空断路器（VCB）构成，具有内部电路异常时切断对应电路的功能。

（a）154 kV 门式钢结构

（b）变电设备（GIS、主变压器）

图 5　154 kV 门式钢结构和变电设备

主变压器中采用油浸自冷式变压器，与 51 台 PCS 的 100% 输出容量一样，为 51 MVA。

并网用的断路器采用了 154 kV 气体断路器（GCB）。特高变电设备或送电线发生事故时会从系统中分离并切断。GCB 的切断能力为 25 kA、5 循环。与东北电力的责任分界点设定在互联铁塔的跨接线连接部。

6 保护装置、监控控制设备、附带设备

特高压变电设备、154 kV 互联线的保护装置和发电站监控装置设置在变电设备附近的集装箱型封装内。

与上北六所太阳能发电站互联的东北电力送电线还与其他公司的风力发电站互联，并设置东北电力指定的 PCM 保护装置作为送电线保护装置。利用该保护装置，可以检测各变电站间、风力发电站间的送电线事故，进行本发电站的解列〈注 2〉。

发电站监控装置可以收集 PCS 的主要数据，并具备系统监控画面显示、测量值显示、趋势显示、日报 / 月报显示功能。装置采用了可测量 PCS 直流侧 24 支线电流的系统，具备根据电流值的趋势数据自动判断各分支电流的差异并进行偏差显示的功能。24 支线的 1 电路对应 1 面连接箱，利用该功能可以尽早发现连接箱内电池串熔断器的熔断部位。

图 6 为监控装置的系统图监控画面，**图 7** 为 PCS24 支线的电流值趋势画面。

发电站为了防止太阳能电池和电缆等失窃，通过保安公司专用装置，对周围防护网和发电站门进行了 24 小时安全监控。

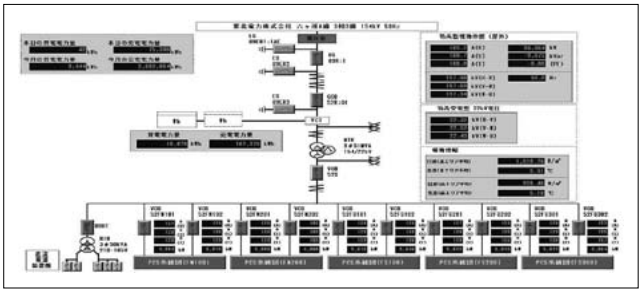

图 6　监控装置的系统图监控画面

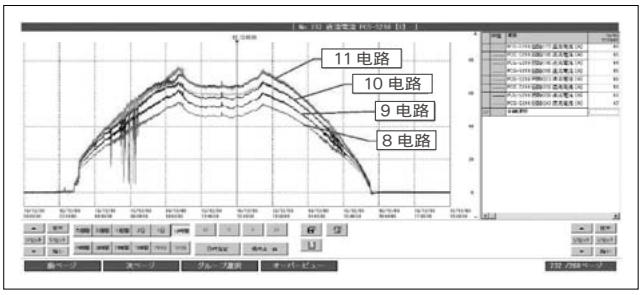

图 7　PCS 24 支线的电流值趋势画面

〈注 2〉解列：将发电设备等从电力系统中分离

7 综合功能试验、性能认定试验

于 2016 年 11 月实施了综合互锁试验、控制电源丧失试验、负荷切断试验和负荷试验等综合功能试验，确认具备发电站所需的指定功能和性能。确认 PCS 最大可输出 51 MW，可向 154 kV 系统送电。

发电性能在比较推测电能和实际输出后进行了评价。推测电能利用从设置在发电站内的 10 台日照计和气温计中取得的日照量和气温数据，用依据 JIS C 8907 的发电电能推测法进行计算，实际输出则使用售电用电度表的输出值。而且还在日照量稳定状态下每小时 300 W/m^2 以上、气温 30 ℃以下且模块面无积雪和污垢的状态下进行了性能认定试验。结果，确认了相对于推测发电量，售电电能为 101.6% 至最大 113.2%，满足规定的发电性能。**图 8** 为性能认定试验的结果。

本发电站的使用前自主检查和安全管理审查均合格，于 2017 年 1 月底完成了向发电站的交货。

认定试验数据

12月3日	发电站整体				
时间	日照量 (Wh/m²)	气温 (℃)	售电电能 (MWh)	推测发电电能 (MWh)	比率 (售电 / 推测)
0:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
1:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
2:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
3:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
4:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
5:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
6:00	4.8	5.2	0.0	0.3	0.0%
7:00	203.7	5.5	7.8	12.0	65.1%
8:00	457.5	6.3	28.3	26.5	106.8%
9:00	661.0	7.2	42.0	37.2	113.2%
10:00	782.1	8.1	49.2	43.5	113.1%
11:00	820.3	8.7	50.0	45.2	110.6%
12:00	776.3	9.0	48.0	42.8	112.1%
13:00	643.0	8.8	39.6	36.1	109.5%
14:00	440.9	8.1	25.7	25.3	101.6%
15:00	146.3	7.2	4.5	8.7	51.7%
16:00	0.2	5.9	0.0	0.0	0.0%
17:00	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0%
18:00	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0%
19:00	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0%
20:00	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0%
21:00	0.0	-2.3	0.0	0.0	0.0%
22:00	0.0	-2.7	0.0	0.0	0.0%
23:00	0.0	-1.7	0.0	0.0	0.0%
1 天的合计发生电能（MWh）			295.1	277.6	106.3%

认定试验结果

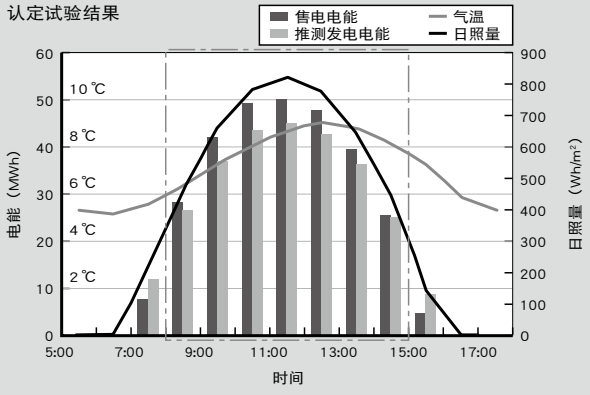

图 8　性能认定试验结果

8 后记

本文针对 DC71 MW/AC51 MW 上北六所太阳能发电站的建造工程和设备构建进行了介绍。

虽然太阳能发电站的建造随着“可再生能源定价收购制度”(FIT) 修改而呈现出减少趋势，但是预计今后要求采取输出变动缓和对策和系统电压变动对策的大规模太阳能发电站将不断增加。我们将最大限度运用蓄电池同时设置型 PCS、系统变动抑制型 PCS 等富士电机的 PCS 技术，为进一步扩大可再生能源做贡献。

参考文献

(1) 藤井干介等. 面向百万瓦级太阳能发电站的户外设置型高效率功率调节器 “PVI1000”. 富士时报. 2013, vol.C5, no.1, p.51-54.

尻无滨 立穗

从事太阳能发电站 EPC 建设工程的工程设计业务。现就职于富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部新能源成套设备事业部太阳能和风力发电技术部。

本田 大祐

从事太阳能发电站 EPC 建设工程的工程设计业务。现就职于富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部新能源成套设备事业部太阳能和风力发电技术部。

久保薗 隆治

从事太阳能发电站 EPC 建设工程的站点工程设计业务。现就职于富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部成套设备建设部。

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。