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——

First Inland GTCC Thermal Power Plant in Japan: Generator Onsite Manufacturing

谷藤　怜　TANIFUJI，Satoshi　　中山　大树　NAKAYAMA，Hiroki　　水本　贵之　MIZUMOTO，Takayuki

富士电机以工程总承包方式承接了整套联合循环发电设备订单，向日本初次内陆大型燃气火力发电设备工程——株式会社神钢电力真冈的真冈发电站交付了两台燃气轮机用发电机和两台蒸汽轮机用发电机。因是在内陆建设发电站，受到道路允许负荷量和运输尺寸限制，无法将发电机以成品状态运送。为了确保在内陆的运输，除采用定子分割等新结构外，还通过确立现场制作技术，成功地在现场制作出可设置于内陆地区的发电机。

Fuji Electric undertook an engineering procurement and construction contract to deliver gas turbine combined cycle powergeneration facilities to the Moka Power Plant operated by Kobelco Power Moka Inc. the first large-scale inland gas thermal powerplant in Japan. The facilities include two generators for the gas turbine and two generators for the steam turbine. Although the plantwas constructed inland we could not use inland transportation to deliver the main equipment especially the generators after completiondue to the regulations such as the dimensions and the load capacity. Therefore we adopted new structures such as block statorstructures to use inland transportation and established onsite manufacturing technology making it possible to locally manufacturegenerators for inland installation.

1　引言

由燃气轮机和蒸汽轮机组成的联合循环发电方式具有发电效率高、环境负荷低的优点，近年来被广泛使用，其重要性不断提高[1][2]。联合循环发电方式的大型火力发电站在进行蒸汽冷却时通常采用海水等的水冷式，因此适合选址于沿海地区。但是，沿海地区存在遭受地震和海啸袭击的风险。为了稳定地供应电力，这些大型发电设施如何应对自然灾害成为日本国内的特有课题。相对而言，内陆地区没有遭受地震引发的海啸袭击的风险。因此，在内陆设置大型火力发电设备，即使发生地震，也能稳定供给电力的可能性变高，对电力严重依赖于沿海地区电厂的整个首都圈而言，是极其重要的备用电源。通过分散选址，有助于确保电力的稳定供应。

此次，富士电机以工程总承包（EPC）的方式承接了全套 2×624 MW 联合循环发电设备订单，向日本国内初次内陆大型燃气火力发电设备工程——株式会社神钢电力真冈的真冈发电站交付了两台富士电机燃气轮机用和两台蒸汽轮机用，共计四台发电机。作为具有分散选址的大型电源[3]，该项目遭受地震和海啸等自然灾害侵袭的风险低，被内阁官房与经济产业省选为强化国土和能源基础的先导事例。

该成套设备由最新型开放循环单轴式燃气轮机和与燃气轮机不同轴系列的蒸汽轮机组成。在燃气轮机发电中使用间接氢气冷却发电机，在蒸汽轮机发电中使用间接空气冷却发电机。因为位于内陆，所以凝汽器为空冷式，采用了让水冷却循环的大型空冷式凝汽器。

另一方面，本工程是在内陆地区建设发电站，需要在现场制作各种大型设备。而内陆运输会受到道路允许负荷量和运输尺寸限制，无法将发电机以成品状态运送。为此，富士电机开发了可在内陆设置安装的新结构及适合在现场制作的发电机。燃气轮机发电机的主要规格如**表 1** 所示，截面图如**图 1** 所示。

表 1　成套设备规格

项目	规格
输出	470 MVA
电压	22 kV
功率因数	0.9
频率	50 Hz
冷却方式	○定子：　间接氢气 ○转子：　直接氢气
氢气压力	0.5 MPaG
转速	3000 min^{-1}
励磁方式	半导体闸流管直接
总长	13.9 m
重量	456 t

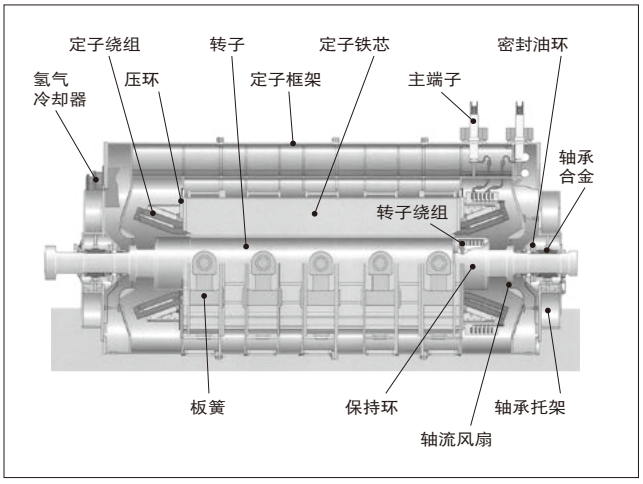


图 1　燃气轮机发电机截面图

本文将对可设置安装于内陆的燃气轮机用氢气冷却发电机的特点和适用技术进行介绍[4]。

2 内陆设置安装发电机面临的课题

发电机运往内陆属于特殊情况，运输部门需要制定运输路线计划，调查道路宽度和路线限制高度等实际状况，并与道路管理方和警察进行协商。调查结果表明，道路对运输物品的限制为：长 26 m、宽 3.5 m、高 4.68 m、重量 164 t 以下。受这一限制影响，发电机的固定部分（即定子框架和定子）无法在完工状态下运输。需要分割、运输后在现场进行制作和装配。发电机固定部分的常见制作工序如**图 2** 所示。制作工序由定子框架制作、定子芯制作（铁芯堆叠及装线圈）、定子框架和定子芯的装配作业组成，各作业均需使用到大型专用设备。为了进行现场制作和装配，不仅需要开发符合运输限制的新结构，还需导入新的专用设备。此外，还要确保作业场所和完善作业设备，确立环保型制作方法。这些与现场制作相关的课题如**表 2** 所示。

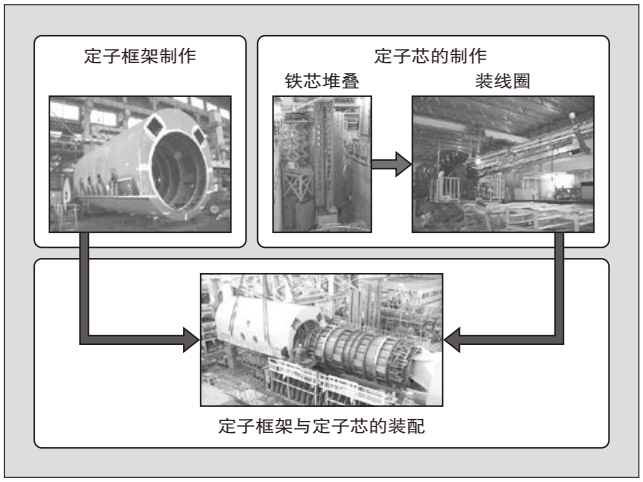
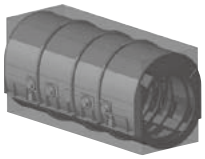
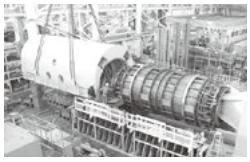
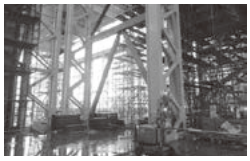


图 2　发电机的制作工序

表 2　现场制作的课题

问题	课题
运输限制 ○ 定子框架超过运输限制。 ○ 定子铁芯超过运输限制。 	制定可运输至现场的措施 < 设计项目 > ○ 可运输定子框架结构的开发：定子框架的分割结构 制定可现场制作定子铁芯的措施 < 设计项目 > ○ 开发提高定子铁芯强度的技术
有关现场制作的课题 < 设备 > ○ 无专用设备。 ○ 桥式起重机的能力、容量不足。 	制定可现场制作的措施 < 现场制作项目 > ○ 定子框架： 确立新结构的现场装配技术 ○ 铁芯堆叠作业： 开发现场专用设备 ○ 定子绕组的装配： 开发现场专用设备 ○ 定子的装配： 确立定子框架和定子芯装配作业方法
< 环境 > ○ 厂房正在建设中，作业环境差。 	< 现场制作项目 > ○ 铁芯堆叠作业： 雨水对策、粉尘对策、 防锈对策 ○ 定子绕组的装配： 雨水对策、粉尘对策、 防锈对策

3 适用于内陆设置型间接氢气冷却发电机技术

3.1 定子分割结构

定子框架是用来覆盖定子芯的大型部件（长约 10 m、宽约 5 m、高约 5 m、重量约 85t），在容纳作为制冷剂的增压氢气的同时，还具备冷却通路，内部结构复杂。氢气具有良好的冷却性能，但一旦与氧气混合，则容易发生爆炸。因此，定子框架要求针对氢气具有充分的密封性，并具有足够的强度，以应对爆炸压力。

定子框架的制作由制罐（焊接）、机械加工和装配这三个作业工序组成。如果可在现场进行与工厂相同的作业，产品质量则不会出现问题。但是，在产品计划阶段，就已经预想到在现场作业环境不明确的情况下，可能出现产品质量下降以及出现问题时现场工序难以恢复等难题，存在很大风险。因此，为确保产品质量，在产品设计中将现场作业控制在必要最小限度至关重要。**图 3** 所示，为定子框架的分割结构。本结构中，定子框架在纵向上分为四部分，通过螺栓紧固实现一体化。现场只需装配定子框架、对定子框架内部的部分部件进行焊接即可完成制作，最大限度的削减了现场作业量。

3.2 定子铁芯端部块加固结构

定子铁芯用 0.5 mm 厚的电磁钢板冲裁成扇形，涂上绝缘漆，层叠在数十毫米的铁芯块上。在层叠方向的各铁芯块（**图 4** ⑥）上配备管片（**图 4** ⑦），形成冷却用通风路径。通过层叠这些铁芯块，定子铁芯总长可达约为 6 m。这些多达数万片的电磁钢板的层叠物，通过安装在铁芯两端的压环和安装在圆周上的紧固螺柱及铁芯安装梁进行紧固，再通过外圆周用支撑环进行固定（**图 4**）。

在工厂制作定子铁芯时，通常采用将层叠的定子铁芯和定子绕组一体浸渍绝缘树脂的全浸渍绝缘系统。全浸渍可在铁芯、绕组和楔子间填充树脂，通过强力固定防止松动。

但此次现场并没有配备全浸渍设备。因此，如**图 5** 所示，

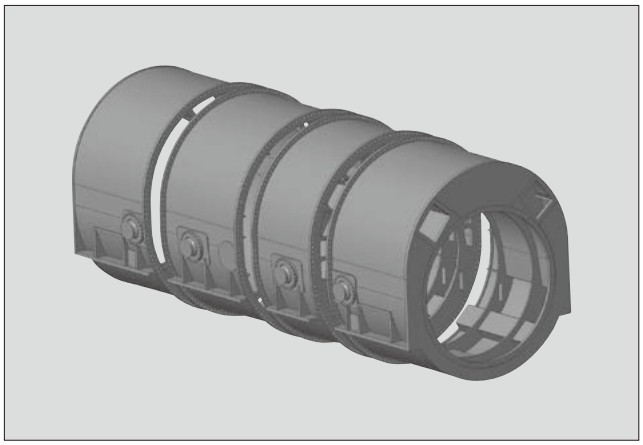


图 3　分割定子框架

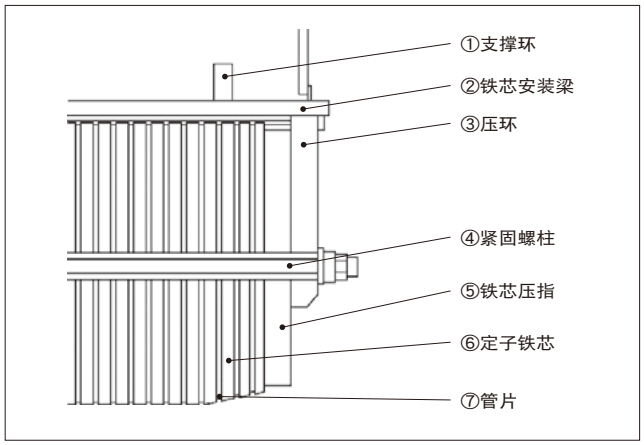


图 4　定子铁芯端部结构

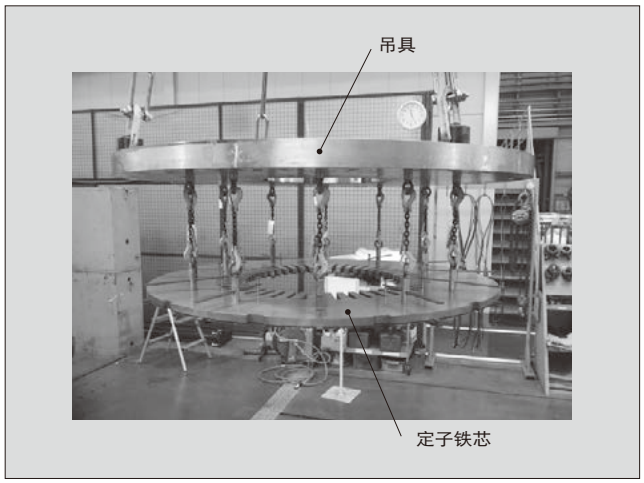


图 5　定子铁芯块加固

将铁芯两端部的数个铁芯块在工厂进行层叠，开发了真空浸渍的环状块加固铁芯。本结构可获得与通常所用的全浸渍绝缘系统同等的树脂加固效果。由此，可防止铁芯在长时间使用过程中产生的松动，实现了可承受漏磁通施加在铁芯端部的电磁力的结构。另外，通过在工厂制作这些环状块加固铁芯后再交付给现场，可缩短现场铁芯堆叠制作工期，也保证了交货期。

3.3　现场制作的制造技术

除了质量、成本和交货期之外，重要的是现场制作需要构建与工厂同等或更好的工作环境，并采取安全措施。这次为了缩短工期，在现场制作发电机时，必须同时准备定子框架主体的和现场制作用设备。因此，对土木建筑方面和现场的作业区域进行调整，搬入了发电机定子的专用设备。搬入前，作为管理对象项目，详细调查了现场的温度、湿度和粉尘量等作业环境。同时，对安全问题的考虑也很重要。

⑴　将专用设备搬入现场并设置安装

搬入并设置安装发电机定子制作所需的大型专用设备时，首先要根据土木建筑方面和成套设备整体的施工计划进行调整，确保制作发电机的作业区域。其次，计算出作业区域的最大负荷，对各作业区域提出承重要求，并与土木建筑方面进行了调整。

⑵　现场作业时的粉尘对策

制作发电机定子时，为防止异物混入绝缘材料中，粉尘对策很重要。因此，为铁芯堆叠和定子绕组（线圈）装配的各项作业，分别设置了养护室。特别是铁芯堆叠作业，因在高达 10 m 的高空作业，考虑到抗震强度，设置了大型养护室。为方便部件的搬入搬出，养护室采用了作业性良好的结构，上部和侧面均可开关。养护室中设有空调设备，通过日常的温度与湿度控制来防止结露。此外，作为作业前检查，定期测量粉尘，遵守工厂的环境等级，控制现场质量。

⑶　质量控制

要消除现场返工作业，降低研究阶段的风险和确立现场质量控制就变得很重要。就降低风险，编制了考虑到现场作业环境的作业程序，剔除可预想的风险，并根据需要在设计规划中导入考虑到现场制作因素的结构。另外，尽可能在工厂修改完善产品。此外，通过在工厂确认装配，事先找出问题点，并采取了相应的对策。另一方面，在质量控制方面，与现场客户审查和产品审核负责人完善了步骤，在各项工作开始前，由相关人员进行审查，建立了与工厂同等或更好的管理体制。另外，不仅与客户共同确认，还对每个细致作业步骤设置确认质量的客户监督措施，构建了质量确认机制。在采取这些对策的基础上，为了让现场与工厂之间能够进行密切的信息交换，使用 IT 设备通过网络会议确认进度和质量，同时实时共享了产品状态相关信息。

4　发电机的现场制作

⑴　定子框架装配

工厂的定子框架直接采用卧式装配，但此次现场作业，因空间受限而采用纵向放置。作业时，必须对准各分割定子框架位置，进行高精度装配。为了提高精度，不仅要管理建筑地面水平度，还需要对各分割定子框架的上下左右位置和各自的圆周方向位置进行细致调整。通过开发各种调节夹具并采取安全对策，制作机内外脚手架，最终完成了该项目作业。分割定子框架装配后，进行了整体定子框架的翻转作业。工厂的翻转作业通常使用两台桥式起重机，但现场现有建筑起重机的能力不足。因此，规划了室外翻转作业，与物流公司一起使用两台液压起重机共同进行了翻转作业。当时实际

图 6　分割定子框架的翻转

的翻转作业如**图 6** 所示。

⑵ 定子铁芯堆叠

铁芯堆叠作业时的场景如**图 7** 所示。为了进行面板的水平度调节和垂直型面板的位置调节，开发了微调装置。这样，调节不仅充分满足了工厂控制值，同时也简化了调节作业。

⑶ 定子绕组的装配

定子绕组的装配作业场景如**图 8** 所示。本作业超出了现场现有建筑内桥式起重机的可动范围，起重机无法使用，所以特开发了移动式设备装配用夹具和部件移送夹具，最终完成了作业。在安全方面，通过导入符合本成套设备尺寸的升降脚手架，设置安装带扶手的滑动脚手架等，强化了安全措施。另外，在养护室内进行溶剂涂抹作业时，还设置了简易室，从而改善了作业环境。同时，还导入排气装置和供气式面具，采取了相应的安全措施。

⑷ 定子框架和定子芯的装配

将定子框架插入圆筒型定子芯中，则插入作业即告完成。通常使用桥式起重机，但定子完成后的重量超过了现场现有建筑起重机的容量。因此，导入了替代桥式起重机的动力千斤顶系统（PJS）。PJS 是将大型千斤顶安装在龙门上，通过在导轨上移动来吊起大件物品，并限定在行走方向上进行移动的装置，但无法使其在横行方向上以细微的精度移动。为了克服 PJS 无法调节横行方向的问题，此次通过开发用于微调临时设置夹具和定子芯的装置，实现了装配作业时的位置调节。使用 PJS 的装配作业照片如**图 9** 所示。关于定子芯在圆周方向上的位置调节，通过改变 PJS 的单侧顶起量，使定子芯在圆周方向上转动，进行了调整。另外，在将定子芯插入定子框架的作业中，通过改变 PJS 单侧行进方向的速度来调节定子芯和定子框架之间的平行度。通过这些微调夹具和 PJS 的微调，完成了装配工作。

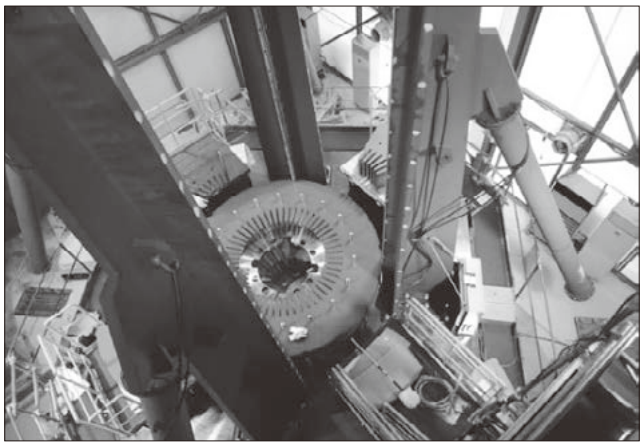


图 7　定子铁芯的装配

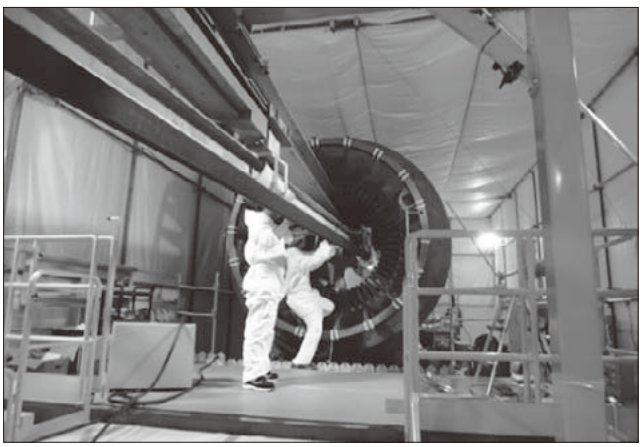


图 8　定子线圈的装配

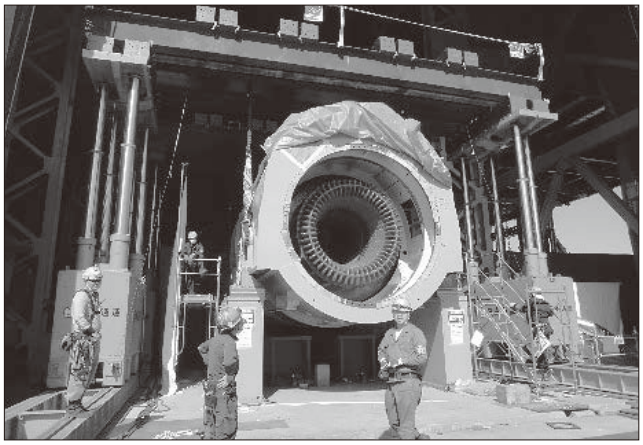


图 9　定子芯和分割定子框架的装配作业

5　后记

本文对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进行了介绍。在设计方面，针对运输限制开发了定子框架分割方式，阐述了有关铁芯堆叠端部技术改进例。在现场制作的制造技术方面，对各种导入设备例和作业环境对策进行了介绍。通过上述努力，富士电机确立了可在内陆设置、导入发电机的技术，在遵守现场工序规定的同时完成了发电机的交接。

今后，富士电机仍将继续研发新技术，提供可满足客户需求的产品，为社会做出贡献。

参考文献

⑴ 池田忠司ほか . コンバインドサイクル発電設備 . 富士時報 . 2005, vol.78, no.2, p.116-120.

⑵ 山﨑胜等. 单轴式联合循环发电设备用浸渍绝缘氢间接冷却汽轮发电机. 富士电机技报. 2013, vol.C5, no.3, p.171-174.

⑶ 内閣官房 . 電力インフラの強靱化に資する日本初の本格的な（120 万 kW 級）内陸型火力発電所の建設 . 国土強靭化 民間の取組事例集, 2015, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/minkan_torikumi/,（参照 2020-07-08）.

⑷ 中山大樹ほか . 内陸火力発電所に適した発電機の納入事例 . 日本ガスタービン学会誌 . vol.48, no.1, p.26.

谷藤　怜

从事大型旋转机械的设计与开发。现为富士电机株式会社发电成套设备事业本部川崎工厂旋转机械部课长助理。

中山 大树

从事大型旋转机械的制造技术研发。现为富士电机株式会社发电成套设备事业本部川崎工厂旋转机械部课长助理。

水本 贵之

从事大型旋转机械的设计与开发。现就职于富士电机株式会社发电成套设备事业本部川崎工厂旋转机械部。电气学会会员。

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。