富士电机技术期刊

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2025
Vol.C17 No. 4

专辑：支撑未来事业的尖端技术与基础技术

富士电机
Fuji Electric

Innovating Energy Technology

富士电机技术期刊
FUJI ELECTRIC JOURNAL

2025
Vol.C17 No. 4

专辑：支撑未来事业的尖端技术与基础技术

近年来，与脱碳相关的环境对策需求日益高涨，向氢、氨的燃料转换，以及对 CO_2 回收、循环型经济等的应对已成为必然。为此，富士电机正在推进和实现与 GX（绿色转型）相关的未来事业所不可或缺的尖端技术开发。同时，通过充分运用 AI、机器学习、IoT 等技术，必须从根本上对提升开发效率和生产效率进行改革。

为此，富士电机也正积极致力于此类数字技术的研究开发。

本特集将介绍富士电机为实现未来事业而开展的尖端技术，以及支撑这些技术的共通基础技术的研究开发。

封面照片

①阴离子交换膜型水电解制氢技术
②氨泄漏检测技术
③蓄电交易运营系统
④噪声仿真技术

目录

专辑：支撑未来事业的尖端技术与基础技术

[专辑寄语] 对通过绿氢实现脱碳化的期待 121（3）
饭山　明裕

尖端技术与基础技术的现状与展望 122（4）
玉手　道雄　·　松井　哲郎

为海运碳中和做贡献的氨燃料船燃料补给中的泄漏检测技术 127（9）
武田　直希　·　寺冈　佑恭　·　小泉　和裕

基于阴离子交换膜水电解的制氢技术 132（14）
大神田 贵治　·　佐藤　圭　·　渡来 壮一朗

组合蓄电池与水电解装置的制氢系统控制技术 136（18）
纲分　智则　·　小藤 健太郎　·　神通川　亨

直流母线系统中的蓄电池控制技术 141（23）
佐藤　智希　·　神通川　亨

有助于电网系统用蓄电池电力交易的价格预测与交易计划优化技术 145（27）
石桥　直人　·　林　巨己　·　新井　馨

有助于产品降噪的噪声仿真技术 150（32）
大野　和彦　·　直岛　勇斗

利用骨架推测 AI 的作业识别技术 154（36）
石河　范明　·　野间　拓耶　·　铃木　崇大

回收树脂与植物源树脂的产品应用技术 159（41）
长谷川 知贵　·　西泽　祐里　·　山城　启辅

树脂部件耐紫外线、温度、湿度的加速试验技术 163（45）
柳濑　博雅　·　西泽　祐里　·　山城　启辅

新产品介绍

临界模式交错并联 PFC 控制 IC“FA1C20N” 167（49）

缩略语 169（51）

富士电机技术期刊
FUJI ELECTRIC JOURNAL
2025 Vol.C17 No. 4

Contents

Advanced and Fundamental Technologies to Support Future Business

[Preface] Expectations for Achieving Decarbonization Through Green Hydrogen 121 (3)
IIYAMA, Akihiro

Advanced and Fundamental Technologies 122 (4)
TAMATE, Michio　MATSUI, Tetsuro

Leak Detection Technique for Bunkering Ammonia-Fueled Ships Contributing to Carbon Neutrality in Shipping 127 (9)
TAKEDA, Naoki　TERAOKA, Yusuke　KOIZUMI, Kazuhiro

Water Electrolysis Technology for Producing Hydrogen with Anion Exchange Membrane 132 (14)
OKANDA, Takaharu　SATO, Kei　TORAI, Soichiro

Control Technology for Hydrogen Production Systems Using an Electrolyzer Combined with Battery Storage 136 (18)
TSUNAWAKI, Tomonori　KOFUJI, Kentaro　JINTSUGAWA, Toru

Battery Control Technologies for DC Bus Systems 141 (23)
SATO, Tomoki　JINTSUGAWA, Toru

Market Price Forecasting and Trading Plan Optimization Technology Contributing to Electric Power Trading Using Grid-Scale Batteries 145 (27)
ISHIBASHI, Naoto　HAYASHI, Naoki　ARAI, Kiyo

Acoustic Noise Simulation to Reduce Product Noise 150 (32)
ONO, Kazuhiko　NAOJIMA, Hayato

Task Recognition Technology Using Pose Estimation AI 154 (36)
ISHIKAWA, Noriaki　NOMA, Takuya　SUZUKI, Takahiro

Product Application Technologies for Recycled and Plant-Based Resins 159 (41)
HASEGAWA, Tomoki　NISHIZAWA, Yuri　YAMASHIRO, Keisuke

Accelerated Testing Technology for Evaluating the Effect of Ultraviolet Rays, Temperature and Humidity on Resin Parts 163 (45)
YANASE, Hironori　NISHIZAWA, Yuri　YAMASHIRO, Keisuke

New Products

“FA1C20N” Critical Mode Interleaved Power Factor Correction Control IC 167 (49)

Abbreviations 169 (51)

专辑寄语

对通过绿氢实现脱碳化的期待

Expectations for Achieving Decarbonization Through Green Hydrogen

饭山　明裕 IIYAMA, Akihiro

山梨大学 特聘教授
氢能和燃料电池纳米材料研究中心 主任
兼 氢能和燃料电池技术支持室 室长

2025 年的夏季异常炎热。据说虽然也有其他因素的叠加，但如果没有全球变暖，本来可能不会发生。为实现脱碳化并抑制全球变暖，必须最大限度地利用可再生能源。然而，太阳能和风力等可再生能源的输出功率并不稳定，且无法根据需求与供给情况进行调节。因此，在日本，因输出受限而被迫弃电的电量也在急剧增加。同时，还存在仅凭电力无法实现脱碳化的领域。在交通运输领域，大型卡车需要燃料电池。在产业领域，用于产生高温水蒸气的锅炉以及熔炼玻璃的高温炉等，仅靠电力无法满足需求。针对这些领域的脱碳化，目前受到关注的方法是：将可再生能源电力的剩余部分或波动部分通过水电解装置转化为氢气，并以该氢气（绿氢）作为燃料使用，从而实现脱碳化。此外，还有在实现脱碳化的同时，还能创造新附加价值的案例。由于氢气具有燃烧特性，能够应对微小的火力需求，在咖啡烘焙时，可以通过更精密的温度控制，激发出新的风味。此外，氢气还可以与大气中的二氧化碳（CO_2）反应，制造合成燃料。目前，甲烷以及用于飞机和汽车的液体燃料研发正在推进。由于这些脱碳燃料可以利用现有的基础设施，在进行推广普及时，所需的基础设施投资成本可控制在最低限度。这种利用可再生能源制造氢气的过程被称为 P2G（电力制气），而用于产生氢气的装置即为水电解装置。迄今为止，已实现实用化的水电解方式主要有两种，即碱性水电解（AWE）和固体高分子型水电解（PEMWE）。AWE 是在浓碱性溶液中使用非贵金属催化剂进行电解的方式。该方式能够控制装置成本，现已作为大容量水电解装置实现了实用化。然而，由于该方式在跟随太阳能、风能等可再生能源负载波动方面能力不足，通常需要在稳定的电力条件下运行。相比之下，由于 PEMWE 采用了质子交换膜，并直接将贵金属催化剂涂布于其两侧的结构，因此对波动负载的响应性优于 AWE。此外，使用纯水也是其易于操作的一个优点。然而，由于使用了 Ir（铱）、Pt（铂）等贵金属作为催化剂或部件保护材料，导致成本提高。同时，还存在 Ir 资源储量有限的问题。作为应对这些挑战的新型水电解方式，阴离子交换膜型水电解（AEMWE）正受到关注。通过在阴离子交换膜两侧直接涂布非贵金属催化剂，使其具有与 PEMWE 相同的结构。同时，其对负载波动的响应性可达到与 PEMWE 相当的水平。由于不使用贵金属催化剂，成本也有望降低。目前，其面临的课题包括：具有耐久性的阴离子交换膜以及高活性非贵金属催化剂的实用化。此外，目前虽然使用了稀释的碱性溶液，但将其浓度降低至纯水水平也是未来的课题之一。

如果能制造出低成本、高效率的水电解装置，便可以利用现有的太阳能或风力发电供电，实现基于“本地生产本地消费”的绿氢制造。使用时，可将约 500 kW 的水电解装置作为一个单元，通过多台组合，扩展至 10 MW 至 100 MW 级别。500 kW 级别有望应用于工厂及工业园区的脱碳化。对于 10 MW 以上级别，则有望成为向周边地区供应氢气的枢纽，用于合成燃料、氨气、塑料原料等化学品的制造工厂。电力成本作为水电解制氢成本中影响最大的因素，可通过接入电网，在现有太阳能、风力发电与电网系统电力之间选择成本较低的一方来加以降低。在电网系统中可再生能源电力过剩时，还可通过运行水电解装置吸收剩余电力，以负电价形式获得收入。为了降低水电解制氢成本，除了降低水电解装置本身的成本外，还需要降低包括变流器、变频器等电力设备在内的众多附属设备成本及其安装工程费用。此外，在运行方面，降低维护检修及修缮成本，以及建立能使氢气价格降至最低的系统控制和运行方法，也是极其重要的课题。

为了避免炎热的夏季进一步升温，我由衷希望，能够通过 P2G 低成本、大规模地制造绿氢，从而实现那些仅靠电力难以应对领域的脱碳化。

现状与展望

尖端技术与基础技术的现状与展望

Advanced and Fundamental Technologies

玉手　道雄　TAMATE, Michio　　松井　哲郎　MATSUI, Tetsuro

1　引言

近年来，社会环境的变迁尤为显著，例如：为阻止全球气候变暖而加速向脱碳社会转型、包括 AI（Artificial Intelligence）进步在内的数字技术飞速发展、新兴国家基础设施的扩张等。特别是，为实现“碳中和”这一国际性课题，在日本，依据第 7 次能源基本计划，也正在推进扩大可再生能源的引入，以及向氨、氢等新一代燃料进行能源转换的举措[1]。此外，循环型经济的概念获得广泛支持，需要建立一种重新审视产品及服务的整个生命周期、最大限度活用资源的机制[2]。伴随于此，企业正被迫摆脱传统的单向型经济，并向可持续的商业模式转型。

本文，将介绍富士电机为获取能成为其技术实力基础、以助力实现可持续发展社会的尖端技术与基础技术所开展的工作。

2　尖端技术与基础技术的目标

富士电机将“通过能源和环境技术的革新，为实现安全可靠且可持续发展的社会做贡献”作为经营方针，并以供应方的绿色能源创造、能源供应的稳定化与优化、以及用户方的节能、自动化与电气化为核心价值[3]，在众多领域开展事业。为助力解决新的社会课题，在推进于 2024 年度启动的 2026 年度中期经营计划过程中，正以核心价值为基础，力求扩展事业领域。该领域如**图 1** 所示，分为旨在 2026 年度前投入新产品以实现事业扩张的“成长领域”，以及为着眼于 2027 年度以后市场扩张而创造新产品与新事业的“新领域”。为了实现在各个领域所确定的新产品与新事业，正致力于各种尖端技术与基础技术的研究开发[4]。

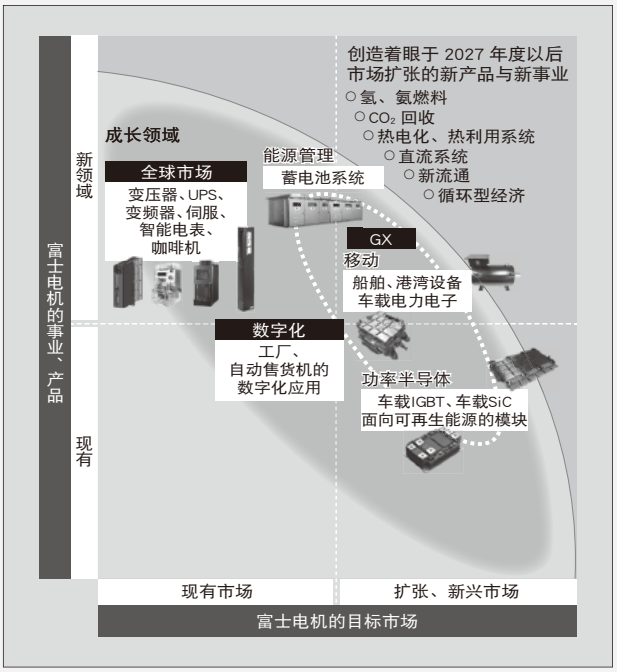


图 1　成长领域与新产品、新事业的目标

3　面向新领域的尖端技术

第3章将介绍为创造着眼于 2027 年度以后市场扩张的新产品与新事业所进行的技术开发。

3. 1　着眼于能源转换的举措

为实现整个社会的碳中和，在普及可再生能源的同时，从传统的化石燃料向燃烧时不产生 CO_2 的氢、氨等燃料转换，已成为一项重要课题。**3. 1 节**将作为针对这些课题的举措，介绍与蓄电池联动的制氢系统控制技术、基于阴离子交换膜（AEM：Anion Exchange Membrane）水电解的制氢技术、适应可再生能源及制氢装置的直流母线系统蓄电池控制技术、以及氨泄漏检测技术。

（1）　与蓄电池联动的制氢系统控制技术

氢作为新一代绿色燃料备受期待，但其普及面临着制氢成本降低的课题。制氢方法之一，是使用水电解装置电解水生成氢的技术。由于水电解装置的运行成本大部分是所用电力费用，因此确保廉价电力非常关键。2003 年开设的电力批发市场交易价格随供需平衡而波动，在太阳能发电等可再生能源产生剩余电力的时段价格会随之降低。通过采购此类廉价的剩余电力并储存至蓄电池，在市场交易价格高昂时使用蓄电池的电力制造氢，可以抑制制氢的电力成本。为实现此类运营，富士电机正在开发与蓄电池联动的制氢系统控制技术，详情如**图 2** 所示。该控制技术不仅实现了采购廉价电力以供后续利用的功能，还能积极利用蓄电池与水电解装置的功能进行电力市场交易，实现通过买卖价差获取收益的功能。此项控制技术不仅有助于降低制氢成本，同时还能促进可再生能源的有效利用，从而为通过氢的普及构建脱碳社会做出贡献。（参考第 136

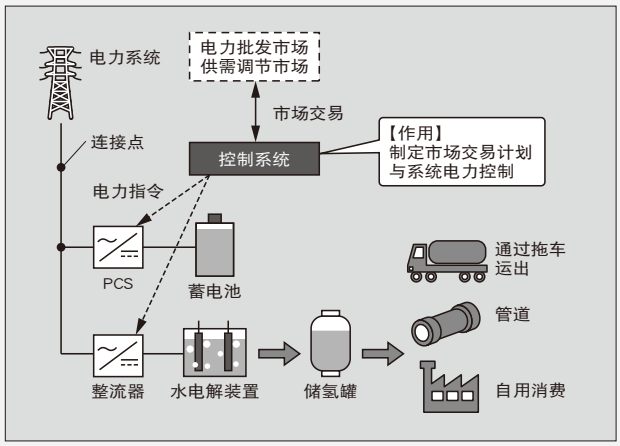


图 2　制氢系统

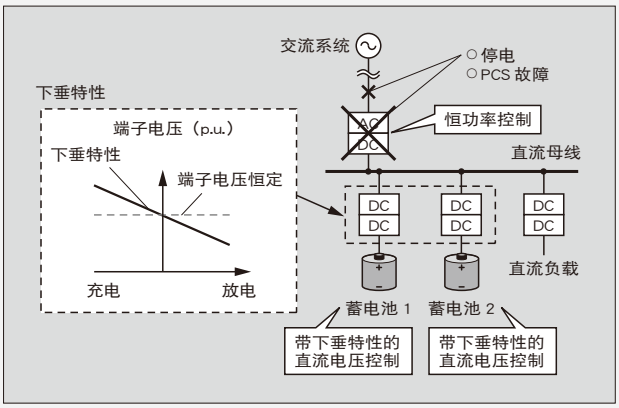


图 4　基于电压协调控制方式的电压控制示例

页，“组合蓄电池与水电解装置的制氢系统控制技术”）。

⑵　阴离子交换膜水电解制氢技术

要将氢作为能源真正加以利用，必须大幅降低制造装置成本。目前，通过电解水制氢的水电解方式中，有两种方式已处于商业化阶段。其中之一的质子交换膜（PEM：Proton Exchange Membrane）水电解，由于需要使用昂贵的贵金属催化剂，在降低成本方面存在困难。另一种碱性水电解，由于其对电力负载变化的跟随性低，不适于与太阳能发电、风力发电等可再生能源组合的系统。

富士电机正在应用在燃料电池开发中积累的技术，与国立大学法人山梨大学共同推进 AEM 水电解装置的开发，详情如**图 3** 所示。由于该技术无需贵金属催化剂、能耗低，AEM 水电解作为一种低成本、高效率的水电解方式而备受期待。AEM 及水电解用催化剂，采用了由国立大学法人山梨大学开发的烃类电解质膜及镍氧化物系催化剂，由富士电机形成电解质层及电极，试制并评估了 AEM 水电解电池。根据该结果，明确了通过将水电解反应所需的电解液（氢氧化钾水溶液）均匀分配至水电解电池内，在整个电池面促进水电解反应，可以实现电池体的大型化。今

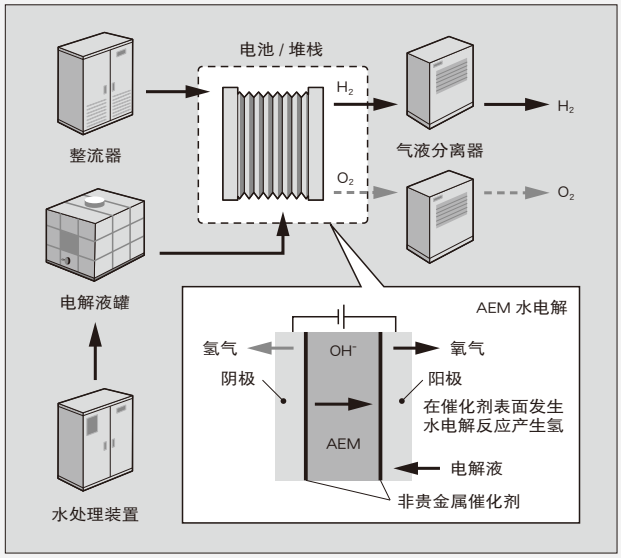


图 3　利用水电解的制氢系统

后，将进一步推进水电解电池的特性改善与大型化探讨，以社会实用化为目标（参考第 132 页，“基于阴离子交换膜水电解的制氢技术”）。

⑶　直流母线系统中的蓄电池控制技术

近年来，随着太阳能发电装置和蓄电池等直流设备的增加，作为一种能高效利用这些电力的机制，直流母线系统备受关注。迄今为止，直流设备需通过功率调节器（PCS：Power Conditioning System）与升压变压器连接到交流系统，因此会产生转换带来的能量损失。直流母线系统则无需升压变压器，既能削减能量损失，又能简化系统，但为实现此目标，需要让直流母线电压的控制实现稳定化。如**图 4** 所示，富士电机正在开发用于实现直流母线电压稳定化的电压协调控制技术。该方式利用了连接到直流母线的蓄电池的下垂特性。所谓下垂特性，即根据蓄电池充放电电流的大小，使其电压平缓变化的特性。具有此特性的各设备可以自主调整电压，从而使整体电压与电流达到均衡。通过多个设备协同工作，即使一个设备发生故障，也能避免停电，维持电压。此外，通过灵活调整各蓄电池的下垂特性，可控制各蓄电池的充电量不超出上下限，从而防止直流母线电压稳定化功能下降。

通过此项控制技术，将为直流母线系统的普及做出贡献（参考第 141 页“直流母线系统中的蓄电池控制技术”）。

⑷　氨泄漏检测技术

作为燃烧时不产生 CO_2 的燃料，氨与氢同样备受关注。长期以来，氨作为肥料及化学品的原料被大量生产。其液体运输与储存所需的基础设施已经完备，因此与氢相比，氨能更早投入实用备受期待。为助力以氨为燃料的船舶的普及，富士电机正致力于开发与向氨燃料船供应燃料相关的周边技术。其中之一，便是在氨燃料补给过程中，对万一发生的泄漏进行快速检测的微量泄漏检测技术。如**图 5** 所示，采用方式是使用红外线摄像机，对氨供应配管的连接部位进行远程监视。红外线摄像机检测被摄物体放射的红外线，当氨气发生泄漏时，穿透该氨气的红外线会略有衰减，通过高灵敏度地检测此衰减来发现泄漏。通过使用红外线摄像机，与利用化学反应的传感器相比，能够更迅速地检测到泄漏。

今后，将确立即使在实用运行环境中也能稳定检测的

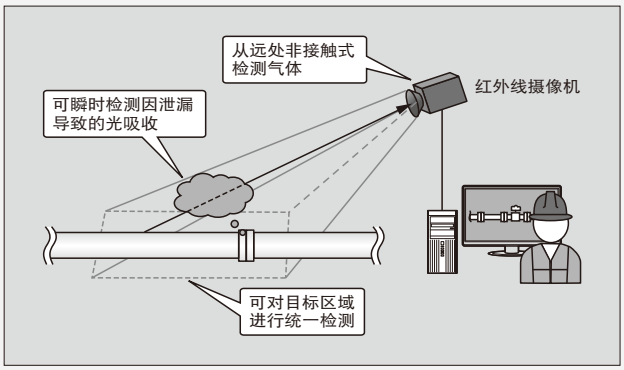


图 5　基于红外线摄像机泄漏检测的优点

技术，为实现面向船舶的氨供应网做出贡献（参考第 127 页，“为海运碳中和做贡献的氨燃料船燃料补给中的泄漏检测技术”）。

3. 2　旨在降低环境负荷的举措

富士电机将保护地球环境定位为经营重点课题，制定了“环境愿景 2050”，并于 2024 年度将推进循环型经济纳入 2030 年度目标。循环型经济旨在从产品设计阶段就采用易于回收的材料与结构，从而实现零废弃物产生。富士电机正在推进以本公司产品中大量采用的树脂材料为对象的相关举措。**3. 2 节**将介绍为在产品中采用回收树脂及植物源树脂所需的技术，以及对树脂材料寿命进行评估的加速试验技术。

⑴　回收树脂与植物源树脂的产品应用技术

为大力推进降低环境负荷，富士电机正致力于提升两种回收材料及植物源树脂的可靠性，详情如**图 6** 所示。回收树脂之一是将在成型工序内产生的边角料重新作为成型树脂利用的再生料；另一种是从使用后的产品中回收并再利用的消费后回收（PCR：Post-Consumer Recycled）料。研究结果表明，将电力电子设备机壳中广泛采用的改性聚苯醚作为再生料使用时，通过配合水分解稳定剂，可实现与原生料同等的耐热性。同时研究还确认，将用于各种电气设备机壳及绝缘部件的聚碳酸酯作为 PCR 料使用时，通过添加自由基捕捉剂和水解稳定剂，可减轻因回收原料中残留的溴系阻燃剂所导致的老化，从

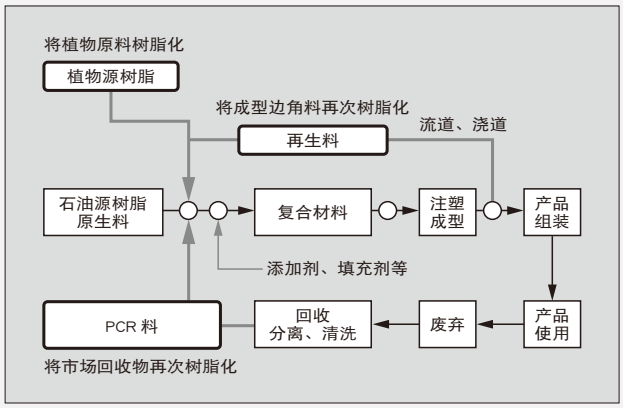


图 6　回收树脂和植物源树脂的采用流程

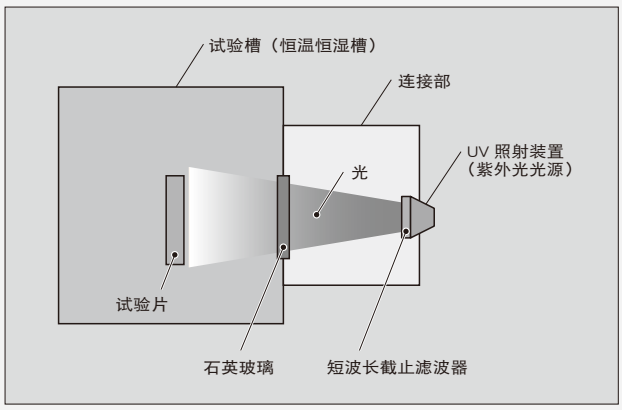


图 7　恒温恒湿紫外线照射试验机的构成

而抑制机械强度的下降。关于植物源树脂，由于原料原因，其化学结构与石油源树脂不同，因此难以将其均匀混合，存在强度与耐热性可能下降的担忧。为改善此问题，确立了通过添加基于相溶性指标——汉森溶解度参数选定的相溶剂，在提高植物源树脂配合率的同时，几乎可以维持其强度的配方技术。

今后，将继续通过利用这些技术，为降低树脂材料带来的环境负荷做出贡献（参考第 159 页，“回收树脂与植物源树脂的产品应用技术”）。

⑵　室外用树脂部件的加速试验技术

用于室外设备的树脂部件，在长期使用过程中，会因紫外线、温湿度、雨雪等作用而发生老化。作为评估此类老化可靠性的方法，相较于需实时评估的室外暴露试验，一种能够缩短试验周期的加速耐候性试验机已实现实用化，并被用于各种产品的评估。

相比现有加速耐候性试验机，富士电机开发了加速性得以提升的恒温恒湿紫外线照射装置（THC-UIE：Temperature Humidity Controlled Ultraviolet-Ray Irradiation Equipment）。其构成如**图 7** 所示。THC-UIE 采用将放置试验片的恒温恒湿槽与紫外线照射装置相连接的结构，并通过在紫外线照射装置的光源中使用超高压汞灯，实现了相比传统试验机 10 倍以上的紫外线照度。以聚碳酸酯为试验片，对其黄变度与弯曲强度实施了加速试验，确认与传统试验机相比，可将试验周期缩短至 1/10。

今后，将利用此试验装置推进室外用树脂的评估，致力于进一步提高产品的可靠性（参考第 163 页，“树脂部件耐紫外线、温度、湿度的加速试验技术”）。

4　有助于实现新产品的技术

第 4 章将介绍有助于实现承担着中期经营计划中声明的成长战略推进任务的新产品相关的技术。

4. 1　关于 GX（绿色转型）的举措

推进 GX 所需的核心技术，正是富士电机作为核心价值长期培育而成的、实现供应方创造绿色能源、能源供应的稳定化与优化，以及用户方节能、自动化与电气化的技

术。为持续强化与发展此项技术，富士电机正在致力于获取各种尖端技术与基础技术。其中，**4. 1 节**将介绍一种能够支持在电力市场进行交易的技术，该机制可以消除伴随可再生能源引入扩大而导致的电力系统不稳定化问题。

⑴ 有助于电网系统用蓄电池电力交易的价格预测与交易计划优化技术

对于能够为碳中和做出贡献而被寄予厚望的太阳能发电、风力发电等可再生能源，由于其发电量受气象条件影响很大，在将其接入电力系统时，存在维持电力的供需平衡的课题。作为其解决方案，一种通过电网系统连接蓄电池充放电进行供需调节的系统已实现实用化。同时，为买卖该调节能力而设置的电力交易市场也已完备。富士电机正在开发一种电力交易支援技术，该技术能够高效实施基于电网系统连接蓄电池的电力交易，并提高电力市场上的交易收益。其一是为判断市场投标条件所必需的对未来市场交易价格的预测技术；另一个则是在考虑上述市场价格的预测、蓄电池特性等复杂限制条件后，制定优化电力交易计划的技术。如**图 8** 所示，分别将机器学习方法应用于市场交易价格的预测，将数学规划法应用于交易计划的优化。使用市场交易的实际数据评估这些技术的结果表明，所开发的市场交易价格预测技术能够比传统方法更精确地进行预测，所开发的交易计划优化技术则能获得较高的收益。

这些技术计划应用于富士电机产品“EnergyGATE for Power Trading 蓄电交易运营系统”，并将有助于运营电网用蓄电池的电力公司提升业务效率及改善收益（参考第 145 页，“有助于电网系统用蓄电池电力交易的价格预测与交易计划优化技术”）。

4. 2 关于 DX（数字化转型）的举措

长期以来，富士电机为社会基础设施、制造业、食品流通等现场提供了众多推进 DX 的手段。其中，通过收集生产线制造设备的运行状况数据，并活用 AI 技术，创造出了能源优化、运营优化、设备管理优化、技术传承等附加价值。此外，不仅为客户的 DX 推进做出贡献，在富士电机内部，也正在实践利用数字技术革新业务流程的各种活动。

4. 2 节将介绍两种技术：一是用于在设计阶段推测电机、压缩机等产品产生的噪声，从而制定有效降噪措施的噪声仿真技术；二是通过分析制造生产线上作业人员的动作，以提升质量管理和作业效率的作业识别技术。

⑴ 有助于产品降噪的噪声仿真技术

随着产品安装环境的多样化，与以往相比，要求降噪的案例正在增加。在开发能够满足该要求的新产品时，以往是基于对现有产品噪声的实际测量数据来预估新设计产品的噪声，但这未必总能以足够的精度进行推测，有时需要反复进行样机评估，导致开发周期延长。针对这个问题，富士电机正在开发一种噪声仿真技术，旨在设计阶段即可精准推测产品产生的噪声。该技术由模拟声源产生噪声的技术，以及推测产生噪声传播至评估者所处位置的传播路径的技术构成。

如**图 9** 所示，在以感应电机为对象模拟声源的案例中，通过充分精确地建模构成感应电机定子的电磁钢板及线圈的特性，得到了相较于传统方法、与实测值偏差更小的推测结果。在以冷藏展示柜为对象推测噪声传播路径的案例中，通过分析多个传播路径对噪声的贡献度，并对贡献度大的路径采取措施，有望无需反复试错即可达成降噪目标。

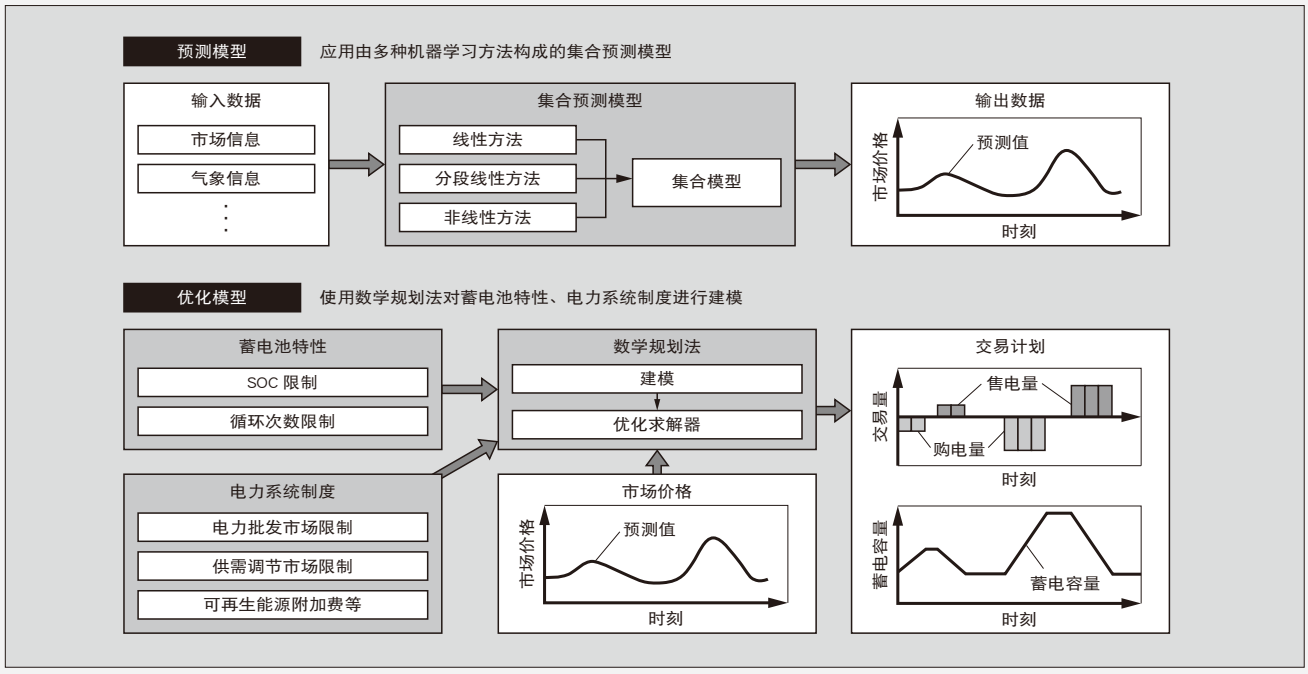


图 8 电力交易支援技术概要

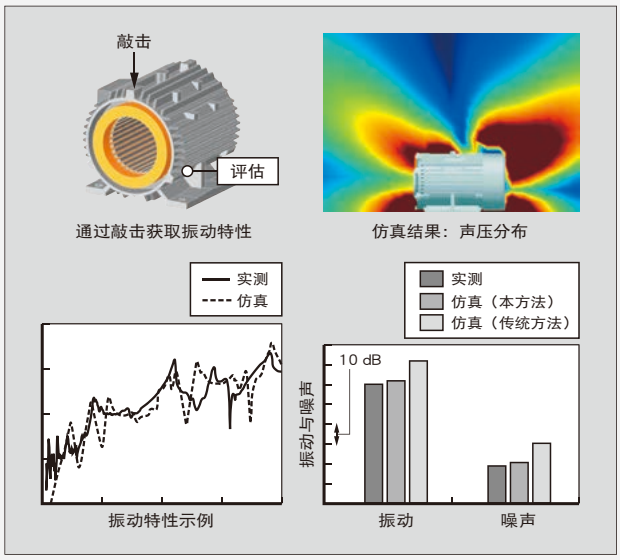


图 9　音源仿真结果与实测结果的比较

今后，富士电机将继续应用此项技术，以实现产品的高效降噪（参考第 150 页，“有助于产品降噪的噪声仿真技术”）。

⑵　基于骨架推测 AI 的作业识别技术

在以作业人员手工作业为中心的制造业制造现场，为应对日益严重的劳动力短缺，防止因作业失误导致的返工和质量下降，同时减少无效作业以提高制造作业效率，已成为重要课题。为找到其解决方案，有必要对现场作业人员的手工作业进行分析。对此，富士电机正在开发一种利用 AI 识别作业的技术。如**图 10** 所示，该技术从拍摄的作业视频中推测作业人员的骨架、识别关节位置，并基于所识别关节的动作，实时判定作业失误等。由于无需传统技术所必需的、需作业人员佩戴的标记物或传感器，因此对作业人员的负担较轻。同时，通过借助 AI，连手指的细微动作也能识别，因而检测作业失误的精度较高。目前，已在富士电机工厂的产品装配线上推进此项技术的实证评估，确认了作业失误的检测率与处理时间均达到了实用水平。现在，正以全面投入实用为目标推进改进工作，今后将扩大其应用对象，为提高生产率做出贡献（参考第 154 页“利用骨架推测 AI 的作业识别技术”）。

图 10　领域设置示例

5　后记

本文介绍了富士电机为获取支撑其事业的尖端技术与基础技术所开展的工作。今后，为了准确把握社会变化与需求，富士电机将通过在“成长领域”和“新领域”进行技术革新，不断创造新的价值，为客户和社会做出贡献。

参考文献

⑴　経済産業省.“エネルギー基本計画”. 2025-02. https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_01.pdf,（参照 2025-09-25）.

⑵　経済産業省.“成長志向型の資源自律経済戦略”. 2023-03-31. https://www.meti.go.jp/press/2022/03/20230331010/20230331010-2.pdf,（参照 2025-09-25）.

⑶　富士電機株式会社.“富士電機レポート 2024”. 2024-09. https://www.fujielectric.co.jp/common-resource/ir/data/ar2024all.pdf,（参照 2025-09-25）.

⑷　富士電機株式会社.“富士電機レポート 2025”. 2025-07. https://www.fujielectric.co.jp/common-resource/ir/data/ar2025_all.pdf,（参照 2025-09-25）.

玉手　道雄

从事电力电子设备的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部尖端技术研究所能源技术研究中心中心长。博士（工学）。电气学会会员。

松井　哲郎

从事用于各类产业系统的优化、预测、诊断技术的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所主席。电气学会会员。

为海运碳中和做贡献的氨燃料船燃料补给中的泄漏检测技术

Leak Detection Technique for Bunkering Ammonia-Fueled Ships Contributing to Carbon Neutrality in Shipping

武田　直希 TAKEDA, Naoki　　寺冈　佑恭 TERAOKA, Yusuke　　小泉　和裕 KOIZUMI, Kazuhiro

为普及不排放温室气体的氨燃料船舶，需要能够确保安全实施燃料补给的技术，其中之一便是检测燃料配管连接部位氨泄漏的技术。富士电机正与其他公司共同参与国立研究开发法人新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的资助项目，开发此项技术。该技术的目标，是使用提高了检测灵敏度的红外线摄像机，从最远 10 米的距离检测浓度在 25 ppm 以上的泄漏氨气体。目前，正致力于对气体浓度的检测灵敏度评估等工作。

To promote the wider adoption of ammonia-fueled ships, which do not emit greenhouse gases, safe bunkering techniques are required. One such technique is the detection of ammonia leakage at fuel pipe connections. Fuji Electric is working with other companies to develop this technique in a project supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). The goal is to detect leaking ammonia gas with concentrations of 25 ppm or higher from distances of up to 10 m using an infrared camera with improved detection sensitivity. Currently, we are evaluating the detection sensitivity with respect to gas concentration.

1　引言

在全球范围内环境保护重要性日益凸显的背景下，日本海运业界也在推进减轻环境负荷的举措。例如，日本的大型造船企业正率先于其他国家，推进零排放船舶的开发。这种船舶不使用石油系燃料，不会大量排放导致全球气候变暖的温室气体（GHG：Green House Gas）。引领 GHG 排放量的削减，也被视为日本海运业界夺回市场份额、提升国际竞争力的机遇。零排放船舶的代表性例子，便是使用氨作为燃料的氨燃料船。关于氨燃料船燃料补给所必需的周边技术，富士电机正与主导氨燃料船开发的伊藤忠商事株式会社共同协作，作为国立研究开发法人新能源产业技术综合开发机构（NEDO）“绿色创新基金项目 / 氨燃料船供应链构建中的周边设备开发”的一个环节，正在进行开发。本文，将介绍作为开发课题之一的氨泄漏检测技术。

2　海运业界面向温室气体（GHG）零排放的动向

日本国土交通省海事局于 2020 年 3 月制定的“国际海运温室气体零排放项目”[1]预测，为削减温室气体排放，今后将普及替代传统石油系燃料的新型燃料，具体包括：氢、氨、碳循环甲烷与生物甲烷和液化天然气。以其中的氢、氨燃料扩大情景为例，该项目预计，到 2050 年，氢、氨在国际海运船舶燃料消费总量中所占的比例将达到约 40%。

全球造船数据显示，2023 年度新船建造量达到 1647 艘[2]。据此，富士电机预估，如果今后新船建造数量保持相同的增长速度，到 2050 年度，每年新造的氨燃料船将达约 660 艘。显然，这将推高本文介绍的技术的市场需求。

3　氨燃料加注中氨泄漏检测的必要性

加注指对船舶进行燃料补给，本文中将氨燃料补给称为氨燃料加注。如**图 1** 所示，氨燃料加注的方式中，船对船（Ship to Ship）加注方式已广为人知[3]。这种方式是指：加注船并靠使用氨燃料的船舶，通过配管向其供应氨燃料。与岸对船（Shore to Ship）加注（即从专用码头向靠泊船舶供应燃料）方式相比，船对船方式在补给地点和燃料供应量上能灵活调整。因为无需铺设管道等，初始投资和设备投资较低，因而成为主流方式。

船对船氨燃料加注主要按以下五个步骤进行：

○ 将燃料配管从加注船连接至补给对象船
○ 通过配管输送液氨
○ 用氨气吹扫残留在配管内的液氨
○ 用氮气置换残留在配管内的氨气
○ 断开配管

因为氨对人体具有毒性，所以在加注时必须采取安全措施，防止其向周围环境泄漏。此外，在船舶甲板这种空间狭窄、易受风雨及波浪摇晃影响的作业环境下，用户强烈期望能够完全回收配管内的残留氨，并高灵敏度、即时地检测泄

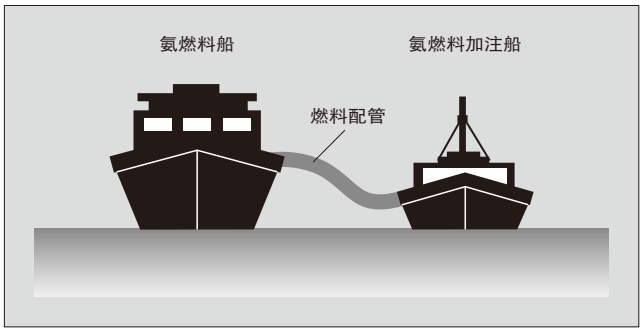


图 1　船对船（Ship to Ship）方式的氨燃料加注

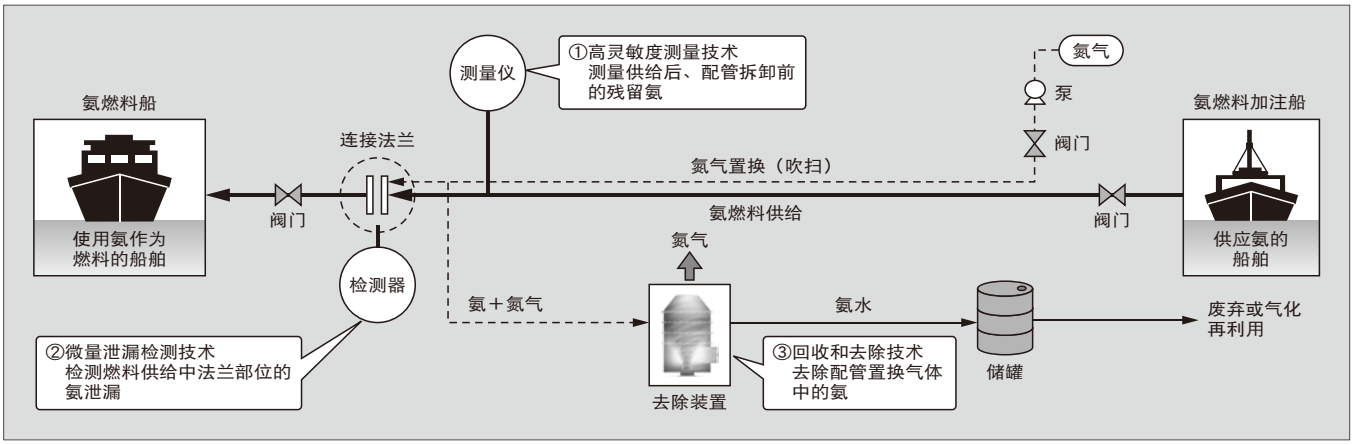


图 2　氨燃料加注中的安全对策技术

漏，以防止人员暴露。

为满足这些要求，需要**图 2** 所示的三项技术。

① 用于确认配管内无氨残留，即使微量也能检测的高灵敏度测量技术

② 用于在万一发生泄漏时，也能即时进行检测的微量泄漏检测技术

③ 在燃料补给后，对配管内残留的氨进行氮气吹扫时，能在此空间狭窄且不断摇晃的船上，高效地将吹扫用氮气与氨分离并回收的回收与去除技术

第4章及后续章节将介绍上述第②项中的技术，即微量泄漏检测技术。

4　氨泄漏检测的课题

长期以来，氨一直作为化肥的原料被广泛使用。作为原料的液氨通过船舶或槽罐车运往化肥制造工厂，并在目的地进行交接。这些作业受《高压气体安全法》监管，未经许可不得进行。对于强毒性氨，法规规定必须在可能发生泄漏或积聚的场所安装气体泄漏检测报警设备。这些作业通常在企业厂区等指定场所进行，参与人数有限，并由受过专业教育的作业负责人管理。此外，作业人员需要通过佩戴防护装备，来降低暴露风险。

相比之下，在进行氨燃料加注作业时，必须考虑到燃料补给作业点附近还有其他作业的船员。因此，万一发生泄漏事故，需要比以往更迅速、更可靠地进行氨检测。

为满足这些要求，设定了以下目标性能：泄漏检测范围设定为 1.5 m × 1 m，以覆盖氨燃料加注船上燃料配管的连接部位。为实现从加注船侧对该范围进行远程检测，检测距离设定为最大 10 米。检测灵敏度基于国际海事组织（IMO：International Maritime Organization）制定的《氨燃料船暂行指南》中规定的报警浓度，设定为 25 ppm。该浓度水平意味着即使人体意外暴露，其影响也是暂时且可恢复的。关于响应时间，为确保泄漏发生时能及时发出警报并引导人员疏散，设定在 4 秒以内。关于环境温度范围，则与富士电机其他室外用测量仪器保持一致，设定为 −20 ℃至 +50 ℃。

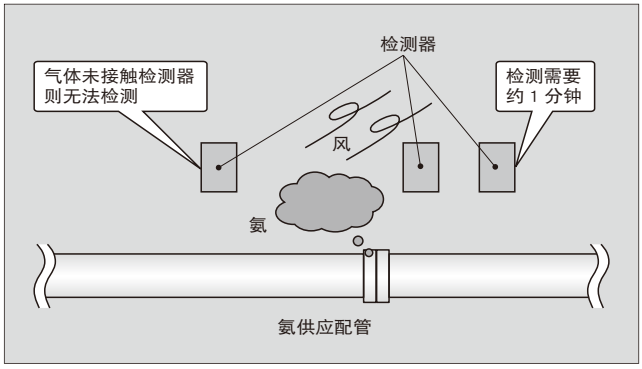


图 3　基于恒电位电解式的泄漏检测问题点

5　开发中的泄漏检测技术

5. 1　恒电位电解式的问题点

目前已知，能检测 25 ppm 氨气体的方式之一是恒电位电解式。恒电位电解式是一种基于化学反应的检测方式。如**图 3** 所示，气体必须到达检测器才能被检测到。因此，在室外有风环境中，风向可能会导致无法检测。因此，为了可靠地检测到配管连接部位的泄漏状况，需要部署多个传感器。此外，由于是基于化学反应进行检测，其响应时间约为 1 分钟，无法满足氨燃料加注作业的要求。

5. 2　基于红外线摄像机泄漏检测的原理

作为解决 **5. 1 节**所述恒电位电解式问题点的关键技术，红外线摄像机气体检测技术[4]备受瞩目。红外线摄像机方式利用了周围所有物质放射的红外线会被氨气体吸收的现象。其原理如下：

众所周知，我们周围所有物体都会放射红外线，其辐射强度与波长分布由物体的温度决定。这种辐射被称为热辐射。通过红外线摄像机检测热辐射中的红外成分，可以实现将被摄物体温度可视化的热成像。此外，根据其分子结构，气体分子具有吸收特定波长光的性质。已知氨分子会强烈吸收波长为 10 μm 的红外线。

如**图 4** 所示，使用红外线摄像机拍摄供应氨燃料的配管，可以测量包含配管在内的被拍摄区域的温度分布。当氨

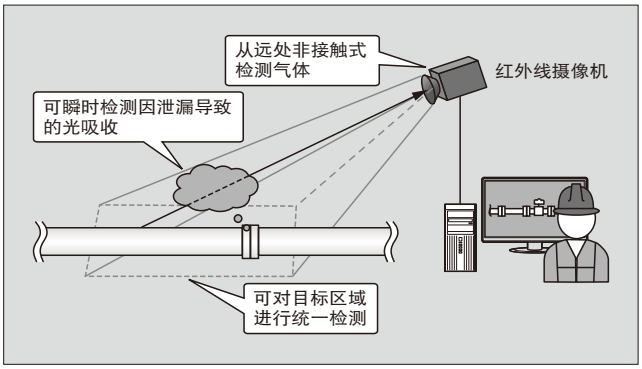


图 4　红外线摄像机泄漏检测的优点

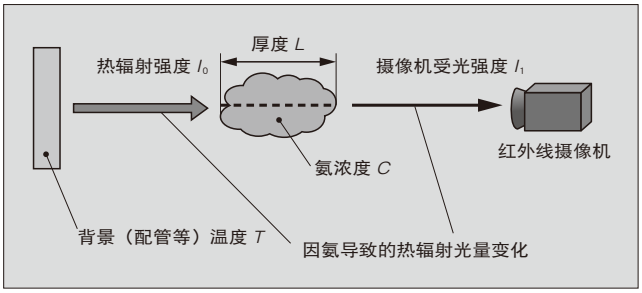


图 5　红外线摄像机检测氨的机制

气体在配管与红外线摄像机之间发生泄漏时，该氨气体会吸收 10 μm 波长的红外线，因此红外线摄像机检测到的该部分温度会低于实际温度。以上，为基于红外线摄像机方式的泄漏检测原理。

该方式的检测灵敏度可按以下方式进行估算。如**图 5** 所示，当来自某物体的热辐射被气体吸收时，其强度变化可由式(1)的朗伯 – 比尔定律表示。

$$A = \log_{10}\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = \varepsilon CL \quad \cdots\cdots(1)$$

A ：吸光度
I_0 ：气体通过前的光强度
I_1 ：气体通过后的光强度
ε ：摩尔吸光系数
C ：气体浓度
L ：检测光穿过气体的长度

在此，设红外线摄像机的检测波段为 7～15 μm，当浓度为 25 ppm 的氨气体存在于长度为 1 m 的范围内时，使用从气体吸收光谱特性数据库“HITRAN”中求得的氨气体摩尔吸光系数，通过由式 1 变形得到的式(2)计算，可得结果为 99.8%。

$$\frac{I_1}{I_0} = 10^{-\varepsilon CL} \quad \cdots\cdots(2)$$

另一方面，物体热辐射强度 I_1 与温度 T 的关系，可由式(3)的普朗克辐射定律推导得出。实际物体的热辐射强度 I_1，可通过将理想辐射体（黑体）的辐射强度 I 乘以该物体的发射率 a 来表示。

$$I = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{hc/kT\lambda}-1} \quad \cdots\cdots(3)$$

I ：黑体辐射强度
T ：辐射物体的绝对温度
h ：普朗克常数
k ：玻尔兹曼常数
c ：光速
λ ：辐射光波长

当使用红外线摄像机检测物体热辐射时，如果设红外线相机的检测波段为 7～15 μm，则检测到的强度 I_1' 可由式(4)表示。

$$I_1' = a\int_{7\mu m}^{15\mu m}\frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{hc/kT\lambda}-1}\,d\lambda \quad \cdots\cdots(4)$$

由式(4)可知，当物体温度变化 0.02 ℃时，检测到的热辐射强度将变化 0.2%。

5. 3　提升检测灵敏度的技术

近年来，可用于泄漏检测的红外线摄像机性能虽有所提升，但即使是最高性能的摄像机，其温度分辨率也仅为 20 mK (0.02 ℃)。此数值与 **5. 2 节**估算的 25 ppm 氨气体的温度变化程度相当，因此，如果仅依靠摄像机本身，很难实现稳定的检测。为解决此问题，富士电机正在开发可提升信号水平和抑制干扰水平的技术。

(1)　通过大口径镜头提升红外线摄像机的受光量

作为提升信号水平的手段，开发了专门设计的镜头，旨在增加红外线摄像机的受光量。如**图 6** 所示，新设计的镜头相较于传统红外线摄像机镜头扩大了口径。以衡量镜头通光量的指标 F 值来表示，常规镜头 F 值为 1.0，而新镜头实现了 F 值 0.7，这意味着通光量是原来的两倍。通常，增大镜头口径会导致像差增大，损害成像清晰度。为抑制此现象，新镜头采用了非球面设计。将基于此设计试制的镜头集成到红外线摄像机中并进行评估后，结果证实，与 F 值为 1.0 的镜头相比，可获得两倍的信号强度。

(2)　通过多摄像机技术实现低干扰化的开发

作为抑制干扰水平的手段，开发了叠加多台红外线摄像机图像信号的技术。如**图 7** 所示，使用多台摄像机拍摄同一物体，并将拍摄到同一目标点的各摄像机受光强度进行

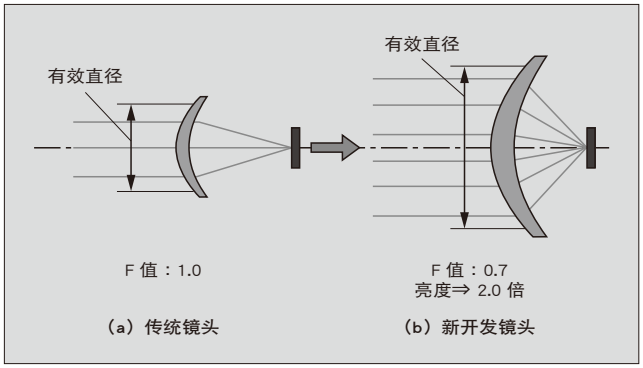


图 6　红外线摄像机镜头的大口径化

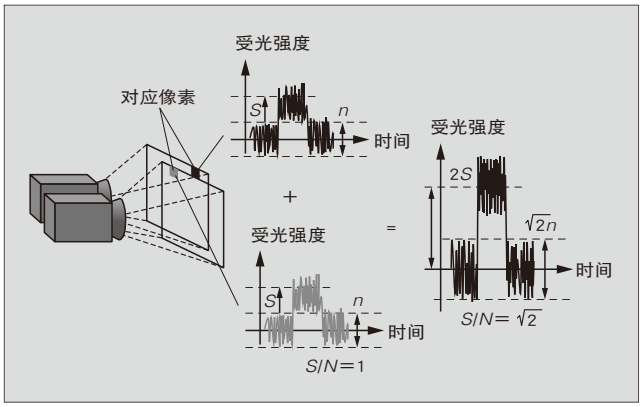


图 7　基于多摄像机技术的低干扰化技术

合成。此时，信号振幅 S 随摄像机台数 N 成比例增加，变为 $N \times S$；而干扰 n 是随机的，即使合成后也仅为 $\sqrt{N} \times n$。因此，信号相对于干扰的相对强度可提高 $\sqrt{N}$ 倍。基于此原理，富士电机开发了合成 4 台摄像机图像的技术。

5. 4　检测技术的评估

将 **5. 3 节**所述技术集成后，试制了由 4 台红外线摄像机构成的检测器，并使用实际氨气对其检测性能进行了评估。**图 8** 所示为开发出的试制机。

评估系统如**图 9** 所示。在恒温槽内设置气体腔室，并在其中放置试制机及一个表面均匀的靶标。评估方法是，在改变腔室内气体氛围的同时，使用试制机拍摄温度恒定的靶标。首先，用氮气置换腔室内气体，并将恒温槽温度控制在恒定值。随后，依次向腔室内导入氨浓度分别为 12.5 ppm、25 ppm、50 ppm、300 ppm 的气体。在各浓度环境下，

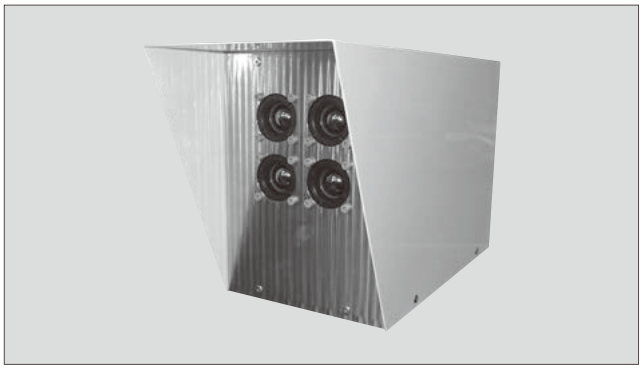


图 8　开发出的试制机

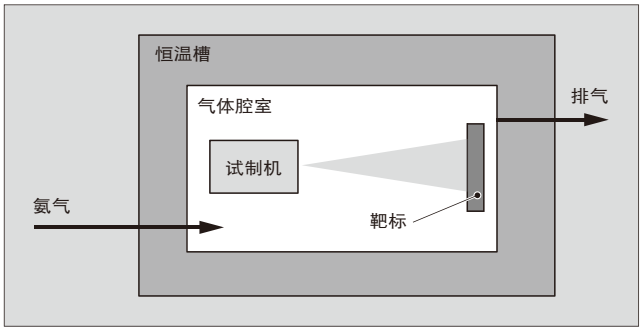


图 9　气体检测实验的评估系统

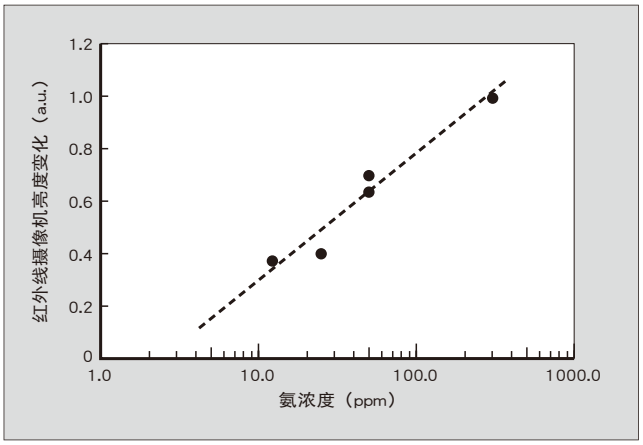


图 10　受光强度和氨浓度的关系

用试制机拍摄靶标，并评估其相对于氮气环境下红外线摄像机受光强度的变化量。

图 10 所示为试制机拍摄图像中某一目标点的受光强度与氨浓度之间的关系。根据**图 10**，确认了氨浓度的常用对数与红外线摄像机受光强度变化量之间存在线性关系。

5. 5　今后的课题

根据 **5. 4 节**的评估结果，已确认能够检测到目标值 25 ppm 的氨。对于检测范围和响应时间等剩余目标性能，计划今后委托拥有专业评估技术和设备的评估机构，通过实际泄漏氨气体来进行验证。如 **5. 2 节**所述，红外线摄像机方式主要是通过接收并检测被拍摄物体辐射的红外光来实现泄漏检测。因此，被测物体的温度变化会导致受光强度发生变化。因此，必须能够区分之前**图 5** 所示的因氨气体吸收导致的受光强度变化，以及被拍摄物体本身温度变化所产生的影响。目前，正着眼于作为背景的被拍摄物体与泄漏的氨气体之间的差异，开发相应的技术，以补偿此类背景温度变化所造成的影响。

6　后记

富士电机将协同相关机构与企业，致力于开发氨燃料加注中面临的氨泄漏检测技术，并承担氨供应链中的一环，为实现安全可靠且可持续社会做出贡献。

最后，衷心感谢在本研究实施过程中给予技术指导的国立研究开发法人物质与材料研究开发机构首席研究员宫崎英树先生。同时，也衷心感谢作为技术顾问为本研究提供建议的 Applied Infrared Technology 株式会社代表取缔役社长田村哲雄先生。

本项成果为国立研究开发法人新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的资助项目（JPNP21031）。

参考文献

(1)　国土交通省.“国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ”. 2020-03. https://www.mlit.go.jp/common/001354532.pdf,（参照 2025-07-31）.

⑵ 日本造船工業会.“造船関係資料”. https://sajn.or.jp/wp/wp-content/uploads/2025/03/ 造船関係資料 2025 年 3 月一般向け -1. pdf,（参照 2025-07-31）.
⑶ 一般財団法人日本海事協会.“アンモニア燃料オペレーションガイドライン（第 1.0 版）”. https://download.classnk.or.jp/guidelines/gl_ammonia_operation_j.pdf,（参照 2025-07-31）.
⑷ Nathan, Hagen. “Survey of autonomous gas leak detection and quantification with snapshot infrared spectral imaging”. Journal of Optics. 2020, vol. 22, no.10. 103001.

武田　直希
从事测量仪器的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部尖端技术研究所能源技术研究中心传感研究部经理。日本红外线学会会员。

寺冈　佑恭
从事测量仪器的研究开发。现就职于富士电机株式会社产业应用事业本部开发统括部测量控制开发中心测量仪器开发部。

小泉　和裕
从事测量仪器的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部尖端技术研究所能源技术研究中心传感研究部部长。日本颗粒物学会会员。

基于阴离子交换膜水电解的制氢技术

Water Electrolysis Technology for Producing Hydrogen with Anion Exchange Membrane

大神田 贵治 OKANDA, Takaharu　**佐藤　圭** SATO, Kei　**渡来 壮一朗** TORAI, Soichiro

富士电机正致力于开发低成本、高效率的阴离子交换膜（AEM）水电解装置。该装置可用来生产氢，即备受瞩目的新一代能源。本方式无需贵金属催化剂及氟树脂，具有低成本与高功率输出的特点。试制时，采用了产品机 1/30 尺寸的电池，通过使电解电池内的水分布均一化，提升了电解效率，在电流密度 2.0 A/cm^2 下实现了 1.71 V 的电解电压。此外，在启停模拟试验中，即使经过 40000 次循环，作为老化指标的水电解反应电解电压上升率也仅为约 4.5%，显示出良好的耐久性。

Fuji Electric is working to develop a technology for low-cost, high-efficiency anion exchange membrane (AEM) water electrolyzer to generate hydrogen, which is attracting attention as a next-generation energy source. This method features the availability of nonprecious metal catalysts and the disuse of fluoroplastic, offering low cost and high output. A prototype cell, which is 1/30-scale of the production, improved the electrolytic efficiency with equalized water distribution in the electrolysis cells and achieved an electrolysis voltage of 1.71 V at a current density of 2.0 A/cm^2. In addition, even after 40,000 cycles of simulated start-stop testing, the increase in electrolysis voltage at a water electrolytic reaction, a degradation index, remained at approximately 4.5%, demonstrating its excellent durability.

1　引言

氢作为发电或热源燃料使用时不会排放 CO_2，因此被寄予厚望，成为实现 2050 年碳中和的核心手段。

目前，工业领域广泛利用从天然气等化石燃料通过重整来制氢的方式（重整方式）。另一方面，近年来，通过电解水制氢的“水电解方式”备受瞩目。水电解方式通过利用可再生能源产生的电力，在制氢过程中可抑制 CO_2 排放。目前，面对的课题是降低包括水电解制氢设备在内的整体制氢成本，日本国内外正在大力推进相关研发。

为促进氢技术的实际社会应用，富士电机正致力于开发阴离子交换膜（AEM：Anion Exchange Membrane）水电解装置，从而以低于传统制氢方式的成本生产氢。本文，将介绍 AEM 水电解中电解槽相关的研发状况。

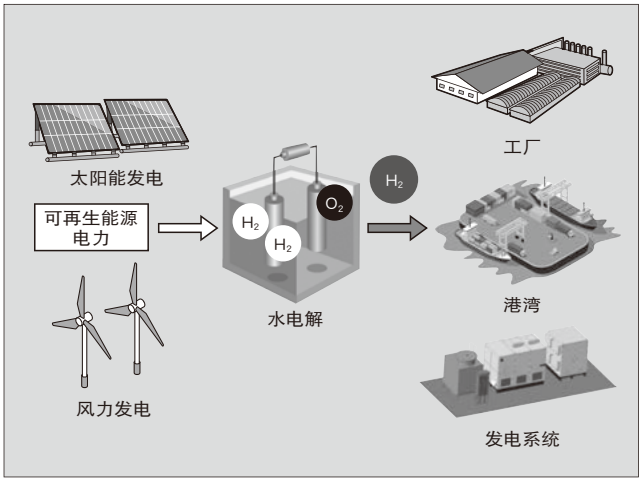


图 1　利用水电解的氢能应用场景

2　扩大氢能利用的动向

2.1　日本国内外氢能动向

图 1 所示为利用水电解的氢能应用场景。如前所述，水电解方式利用太阳能发电、风力发电等可再生能源产生的电力来电解水制氢。生成的氢不仅有望应用于能源领域（燃料电池、氢发电等），还能应用于工业领域（石油精炼、钢铁、化学产品制造等）。预计到 2050 年，全球的氢需求将达到 2022 年消费量的 4 ～ 5 倍，即 4.3 亿吨[(1)]。

第 7 次能源基本计划[(2)]中，将氢定位为氨、合成甲烷、合成燃料等的基础原料，并设定了氢导入量的目标：2030 年达到 300 万吨，2050 年达到 2000 万吨。

此外，针对目前日本国内氢成本（高于 100 日元 /Nm^3），计划将其降低至与液化天然气（LNG：Liquefied Natural Gas）发电燃料成本相当或更低的水平，具体目标为：2030 年降至 30 日元 /Nm^3，2050 年降至约 20 日元 /Nm^3。

图 2 所示为水电解式制氢系统的构成。该系统主要由整流器、电解槽（电池 / 堆栈）、气液分离器、水处理装置、电解液储罐等辅机构成。为实现日本国内氢价目标，国立研究开发法人新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的燃料电池与氢能技术开发进化图[(3)]设定了系统成本目标为 5.7 ～ 6.6 万日元 /kW。同时，在福岛氢能源研究基地，10 MW 级水电解装置的实证试验等正在推进。这些举措表明，面向扩大氢需求的努力正在加速。

2.2　水电解方式的种类和特点

水电解方式大致可分为碱性水电解、质子交换膜水电解、固体氧化物水电解以及 AEM 水电解这四种。**表 1** 所示为各水电解方式的构成和特点。

目前，处于商业化阶段的方式有碱性水电解方式与质子交换膜水电解方式。碱性水电解可在电极和催化剂材料中使

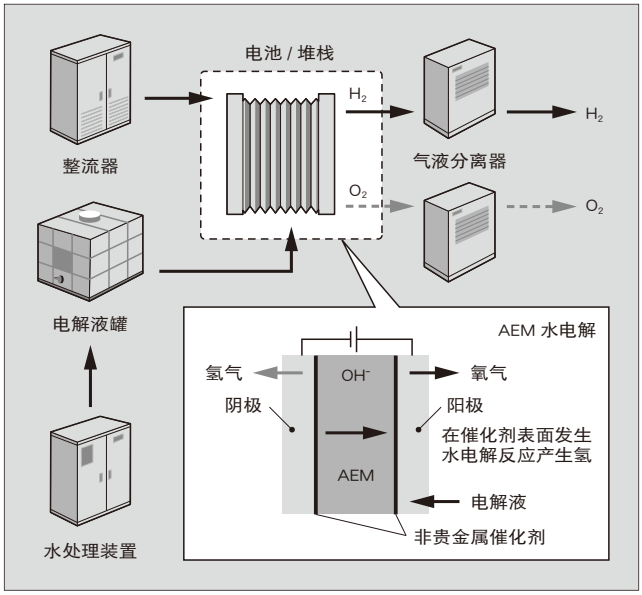


图 2　水电解式制氢系统的构成

用镍等非贵金属，有利于降低成本。质子交换膜水电解则功率密度高，可实现整体装置小型化。另一方面，这两种方式也存在需要在性能和成本层面克服的课题。碱性水电解方式对电力负载变化的跟随性低，抗输出波动能力弱；质子交换膜水电解则需要昂贵的氟树脂及贵金属催化剂作为电解槽部件。处于技术开发阶段的新一代水电解方式有固体氧化物水电解方式和 AEM 水电解方式。固体氧化物水电解是一种通过在 700 ℃以上的高温下运行来获得高电解效率的方式。这种方式实用化面临的课题在于防止因启停导致的老化以及缩短启停时间。

与此相对，AEM 水电解因在碱性水电解相同的碱性氛围下引发水电解反应，因此可使用廉价的镍系材料作为催化剂等。此外，由于其电解质与质子交换膜水电解类似，采用了离子透过性的固体高分子膜，因此容易通过电极一体化实现小型化与高功率密度化。近年来，高性能 AEM 及 AEM 专用催化剂不断被开发出来，使得以低成本材料构建系统、同时降低制氢时的电力消耗成为可能。因此，作为一种高效率、低成本的水电解方式，AEM 水电解备受瞩目。

3　富士电机在 AEM 水电解方面的举措

3.1　AEM 水电解电池 / 堆栈的构成

着眼于 AEM 水电解的特点，富士电机以在 2030 年代实现其实用化为目标，正致力于结合 AEM、催化剂与隔板的电池 / 堆栈的研发。

图 3 所示为 AEM 水电解电池 / 堆栈的构成。

如**图 3**(a)所示，AEM 水电解电池单元的结构为：在 AEM 的两面设有涂布催化剂的电极，在电极外侧配置了形成流体流路的隔板。在 AEM 水电解中，向氧极导入氢氧化

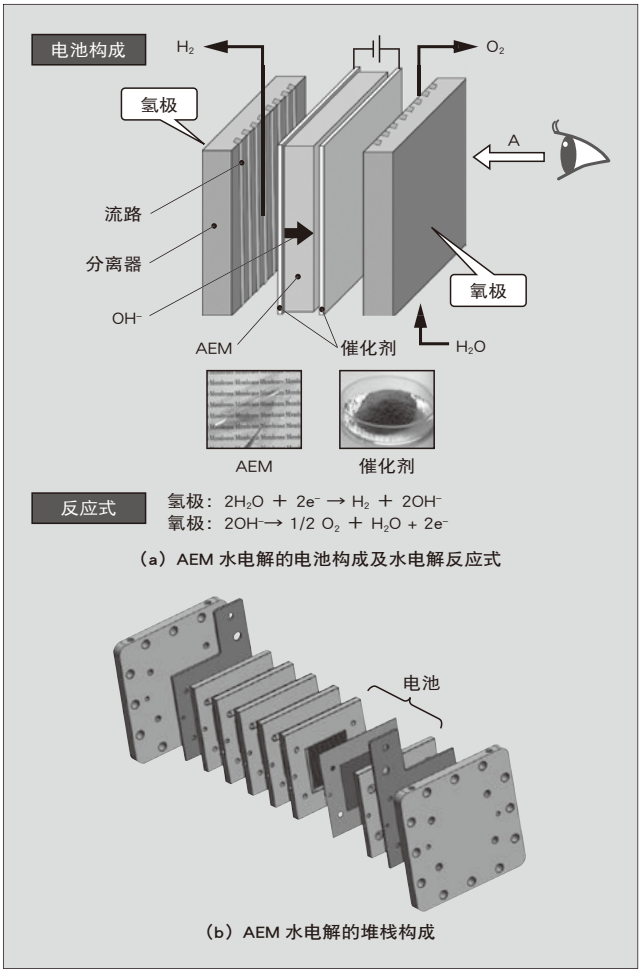


图 3　AEM 水电解电池 / 堆栈的构成

表 1　各种水电解方式的构成与特点

方式	碱性水电解	质子交换膜水电解	固体氧化物水电解	AEM 水电解
技术成熟度	商用阶段	商用阶段	技术开发阶段	技术开发阶段
电解质 / 膜	○氢氧化钾 ○氢氧化钠水溶液	高分子质子交换膜 （例：Nafion）	固体氧化物电解质 （例：YSZ）	高分子 AEM
主要电极 / 催化剂材料	镍系等非贵金属	阳极：二氧化铱等 阴极：Pt/C 等	阳极：LSM 等 阴极：Ni/YSZ 等	镍系等非贵金属
特点	○装置成本相对低廉 ○适合大规模、稳定运行	○采用一体化电极，体型小且功率密度高 ○对可再生能源的输出波动适应性强	○高效 ○可利用废热	○可使用廉价部件，贵金属用量少，成本低 ○因功率密度高，体型小
主要课题	○对可再生能源的输出波动适应性弱	○成本高 （贵金属催化剂、钛部件）	○因高温运行，在耐久性、启动时间方面存在课题	○目前在耐久性和大型化方面存在课题

钾水溶液或纯水，在氢极对水进行电解以产生氢。将此作为一个基本单元（电池），并以多片堆叠而成的堆栈形式用于水电解系统。

3．2　面向实用化的技术课题和改进措施

目前，正在制作产品机 1/30 尺寸的 AEM 水电解电池单元，并推进其实用化开发。电池单元的实用化面临以下技术课题：

○电解性能

为实现 30 日元 /Nm^3 的氢成本目标，需要将能源消耗量控制在 4.62 kWh/Nm^3 以下，电解效率达到 82.2% 以上。作为实现该效率的电池单元性能指标，需要在电流密度 2 A/cm^2 下，将电解槽电压控制在 1.7 V 以下。

○耐久性

假设设备寿命为 10～15 年，运行率为 70%，则要求具备 4～9 万小时的耐久性。此外，如果与太阳能发电、风力发电结合并用于电力供需调节时，则平均每天需启停 1.1 次[3]，十年间至少会发生约 4000 次启停。启停时，施加于水电解电池单元的电压波动剧烈，容易导致电极及催化剂老化。因此，需要至少 4000 次的启停耐久性。

为达成上述目标，目前正在实施的措施如下。

○ AEM 水电解电池的电解质膜及催化剂

为实现高电解性能与耐久性，需要具有高活性的催化剂，以及兼具高离子电导率和高耐久性的电解质膜。此次开发的水电解电池，采用了由国立大学法人山梨大学开发的 AEM（QPAF-4）[4]及水电解用催化剂（NiFeOx）[5][6]，形成了电解质层及电极催化剂层。

AEM（QPAF-4）由具有烃类高分子主链及带有阴离子交换基侧链的高分子结构构成，具备约 100 mS/cm 的高 OH^- 电导率。

此外，NiFeOx 催化剂是一种由约 20 nm 的 NiFeOx 粒子如念珠般连接而成的链状结构催化剂，具有高比表面积，容易形成三维立体结构。电解质膜与催化剂均具有化学稳定的结构，是具备高耐久性的材料。

○电池结构（隔板结构）

除了决定电解特性的电解质膜和催化剂外，还必须设计出能充分利用电解质膜和催化剂基础特性、使电极面发生均匀水电解反应的电池结构。在进行电池结构设计时，结合试制评估，推进了基于仿真分析的优化设计。

图 4 所示为通过电解仿真分析得出的、设计初期试制电池面内电解反应状况的结果（**图 4** 是从**图 3**(a)的 A 视角分析得出的图示）。**图 4** 所示为初期试制电池电极面内的氧气生成分布。在 AEM 水电解中，通常氧极侧的反应电阻较高，因此通过分析氧气生成分布，可以了解电解反应分布。分析结果表明，气体流路后端中央部分的氧气产生量较多，表明电极面内的反应不均匀。此外，通过热流体分析发现，电极面内水电解反应所需的水（氢氧化钾水溶液）流速存在差异，导致电池面内水电解反应不均匀，进而引起电池性能下降。

基于这些分析结果，对电池内部的流路分配结构及流路形状进行了改进设计。改进后的流路结构，能使水电解反应所需的水（氢氧化钾水溶液）在电池单元面内均匀分配。**图 5** 所示为改进后试制电池面内氧气生成分布的分析结果。在改进后的试制电池中，初期试制电池在电极中央集中的氧气生成分布得到改善，氧气能在面内均匀生成，整个电池面内都能参与反应。

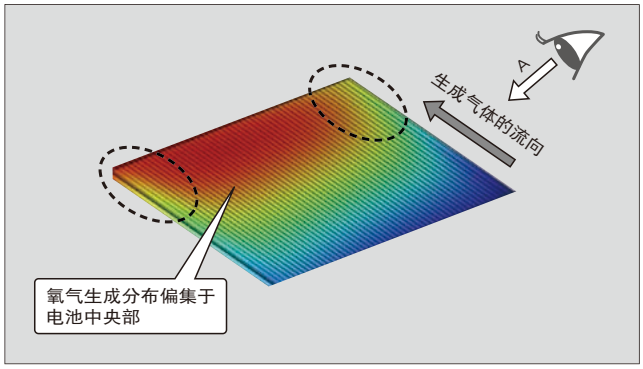


图 4　初期试制电池面内电解反应（生成氧气）分布

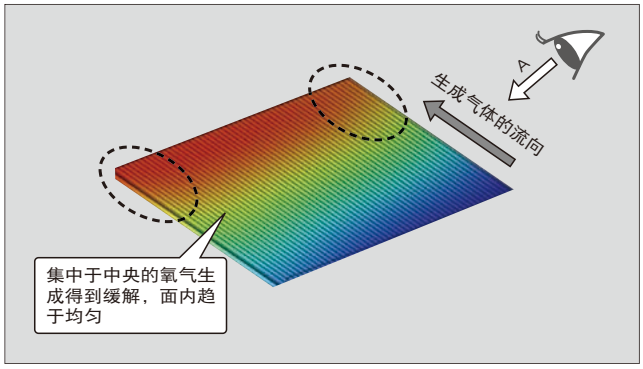


图 5　改进试制电池面内电解反应（生成氧气）分布

3．3　电池特性的改善效果

(1)　电解性能的评估结果

图 6 所示为初期试制电池与改进后试制电池在水电解时的电解特性（电流－电压特性）。通过此次对流路形状的改进，电池面内流动的水分布实现了均匀化，使得整个电池面内都能发生水电解反应。生成氢所需的单位电极面积功率可表示为电流密度 × 电解电压。因此，相同电流密度下的电

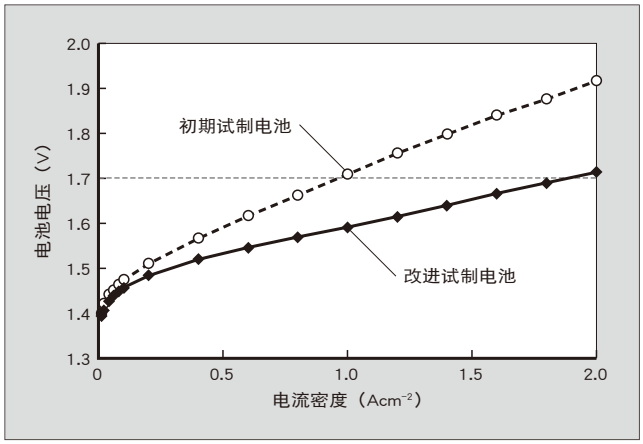


图 6　初期与改进试制电池水电解时的电解特性（电流－电压特性）

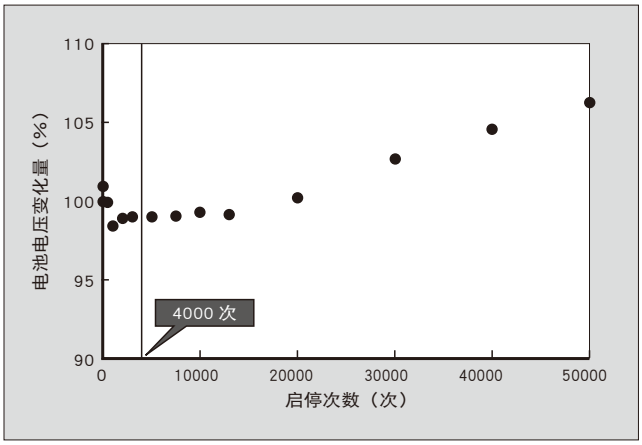


图 7　改进试制电池的耐久性（启停）评估结果

解电压越低，也就代表电解反应的效率越高。作为改进结果，在电流密度 2.0 A/cm^2 时，初期试制电池的电解电压约为 1.9 V，而改进后试制电池已确认可达到约 1.71 V，几乎达成了电解槽电压的目标值。水电解的电解效率相比初期试制电池改善了 6.7 个百分点，实现了以更低的消耗功率制氢。

⑵　耐久性（启停）评估结果

图 7 所示为改进后试制电池的耐久性（启停）评估结果。在 AEM 水电解电池中，启动和运行时每个电池施加的电压约为 1.7～2 V，停止时电压则降至接近 0 V。耐久性评估试验中，模拟了这些电压波动进行了测试。

电池老化后，其内部电阻值会上升，导致如**图 6** 所示的电流－电压特性向高电压侧偏移。

对改进后试制电池的评估结果表明，即使启停次数超过实机预期的 4000 次，也未观察到电池电压的显著上升。之后，直至 20000 次启停仍未观察到老化。即使在达到预期次数 10 倍的 40000 次启停后，电池电压上升量（≈老化量）也仅为约 4.5%。结果表明，改进后试制电池对启停表现出了良好的耐久性。

4　后记

本文介绍了阴离子交换膜（AEM）水电解相关的开发状况。AEM 水电解作为一种无需贵金属催化剂及氟树脂、且兼具低成本与高效率的水电解方式而备受期待。富士电机将应用在类似器件，即燃料电池开发中所积累的技术，为推进 AEM 水电解装置的社会实用化，致力于大型电池的开发和系统构建，为实现氢能社会做出贡献。

此项成果的部分内容，是在国立研究开发法人新能源产业技术综合开发机构（NEDO）委托项目（JPNP20003），“面向燃料电池等应用的飞跃性扩大的共同课题解决型产学研合作研发项目 / 氢利用等高端化尖端技术开发 / 阴离子膜型碱性水电解电池要素研究及其实用化技术确立”下取得的。在此，谨向相关各方致以谢意。

参考文献

⑴　IEA. “Global Hydrogen Review2025”. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025,（参照 2025-07-31）.

⑵　経済産業省.“エネルギー基本計画”. https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001-1.pdf,（参照 2025-07-31）.

⑶　国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構.“NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ”. https://www.nedo.go.jp/content/800021684.pdf,（参照 2025-07-31）.

⑷　Ono, H. et al. Robust anion conductive polymers containing perfluoroalkylene and pendant ammonium groups for high performance fuel cells. Journal of Materials Chemistry A. 2017, vol.5, pp.24804 - 24812.

⑸　Natori, S. et al. Performance and Durability of Membrane Electrode Assemblies Using Ni-Based OER Catalysts for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis. ACS Applied Energy Materials. 2025, vol.8, no.9, pp.5823 - 5834.

⑹　Shi, G. et al. NiFe Alloy Integrated with Amorphous/Crystalline NiFe Oxide as an Electrocatalyst for Alkaline Hydrogen and Oxygen Evolution Reactions. ACS Omega. 2023, vol.8, no.14, pp.13068-13077.

大神田 贵治

从事产业用燃料电池的开发和电气化学器件的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部材料基础技术研究中心尖端材料研究部部长。电气化学学会会员、化学工学会会员。

佐藤　　圭

从事水电解装置的研究开发。现就职于富士电机株式会社技术开发本部材料基础技术研究中心尖端材料研究部。

渡来 壮一朗

从事水电解装置的研究开发。现就职于富士电机株式会社技术开发本部材料基础技术研究中心尖端材料研究部。电气化学会会员。

组合蓄电池与水电解装置的制氢系统控制技术

Control Technology for Hydrogen Production Systems Using an Electrolyzer Combined with Battery Storage

纲分　智则 TSUNAWAKI, Tomonori　　**小藤　健太郎** KOFUJI, Kentaro　　**神通川　亨** JINTSUGAWA, Toru

氢作为实现脱碳社会的新一代燃料备受期待，但其普及则面临着如何降低制造成本的课题。针对此课题，富士电机正在开发一种将水电解装置与蓄电池联动的制氢系统控制技术。该控制技术不仅实现了采购廉价电力以供后续制氢利用的功能，还能通过灵活运用水电解装置与蓄电池的功能进行电力市场交易，实现通过买卖价差获取收益的功能。现已确认，通过利用电力交易收益来填补制氢成本，可以实现成本削减，并有可能建立一种在确保盈利的同时供应廉价氢的业务模式。

Hydrogen is seen as a promising next-generation fuel in efforts to decarbonize society, but to achieve widespread adoption, production costs need to be lowered. To address this challenge, Fuji Electric has developed a control technology for hydrogen production systems in which an electrolyzer is linked to battery storage. This control technology not only procures inexpensive electric power for subsequent hydrogen production, but also leverages the functions of the electrolyzer and batteries to enable transactions in the electricity market, generating profits from the difference between sale and purchase prices. We verified that compensating for hydrogen production costs using the profit from electric power trading had the potential to reduce costs, enabling the establishment of a business model in which hydrogen is supplied at low cost while maintaining profitability.

1　引言

为实现脱碳社会，氢作为替代化石燃料的新一代燃料备受关注。然而，其普及推广显然需要先降低成本[1]。日本政府已设定目标，即从目前的 100 日元 /Nm^3〈注〉降至 2030 年的 30 日元 /Nm^3[2]。目前，利用电力分解水的水电解制氢方法正受到关注。这是因为，通过化石燃料重整制氢会排放 CO_2，而水电解方式则不产生 CO_2。

控制使用电力成本，是降低水电解方式制氢成本的有效途径。由于日本国内电力市场的交易价格会随多种条件波动，如果能在电价低廉时段采购电力用于水电解，便可抑制电力成本。此外，如果利用与电力系统连接的蓄电池存储低价采购的电力，则即使在电价高昂时段，也能利用所存储的廉价电力继续水电解。富士电机正在开发能够运营此类制氢系统、实现低成本制氢的控制技术。

本文，将对此制氢系统的控制技术进行介绍。

2　制氢系统与电力市场概要

2.1　制氢系统概要

图 1 所示为应用了此次开发控制技术的制氢系统的构成。该系统由蓄电池、功率调节器（PCS：Power Conditioning System）、水电解装置以及整流器构成。通过 PCS，蓄电池可以和连接的电力系统进行电力充放电。水电解装置通过整流器，利用来自电力系统或蓄电池提供的电力来制造氢。制造的氢暂时储存在储氢罐中，随后通过各种方式提供给用户。蓄电池的充放电以及水电解装置的制氢，均由控制系统进行控制。供给制氢系统的电力，则需要通过电力市场交易进行采购。

〈注〉表示标准条件（0℃，1 个大气压）下气体体积的单位。

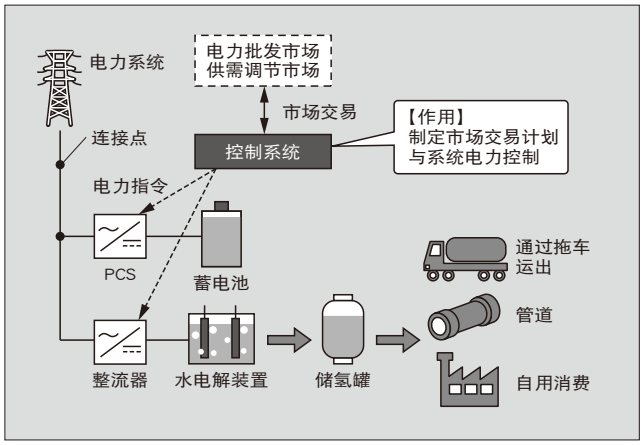


图 1　制氢系统的构成

2.2　电力市场概要

本节将介绍为水电解提供电力的采购来源，即电力市场中的交易情况。

截至 2025 年，日本国内主要电力市场大致分为两类：一是对日常消费的电力进行事前交易的电力批发市场；二是交易为消除短时间内电力供需不平衡所需调节能力的供需调节市场。

在电力批发市场[3]中，参与者为需求侧的零售电力企业与供给侧的发电企业。在有销售剩余电力意愿的参与者与因电力不足有购电意愿的参与者之间进行电力买卖。其交易价格由交易参与者的投标决定。交易的商品分为两种：一是在电力实际交割前一日上午 10 点前，以 30 分钟为单位交易次日 24 小时电力的次日市场；二是在交割当日 1 小时前，以 30 分钟为单位进行交易的即时市场。

近年来，太阳能、风力等可再生能源所发电力的交易量正在增加。由于这些发电量受气象条件影响很大，有时会出

现供给过剩的情况。在此类时间段内，电力批发市场的交易价格会显著下降。例如，根据 2024 年度的交易实绩，平均价格[4]为 12.24 日元 /kWh，而在供给过剩的时间段，曾以 0.01 日元 /kWh 的极低价格成交。

在供需调节市场[5]中，管理电力系统的一般输配电企业向运营发电手段的企业采购作为调节能力的电力。被交易的调节能力目前分为 5 种，其中包括：需在收到买方指令后 60 分钟内开始供给并持续 30 分钟的“三次调节能力②”，以及需在收到指令后 10 秒内开始供给并持续 5 分钟以上的“一次调节能力”等。无论哪种，交易均需在前一日等事前确定，卖方在当日的指定时间段内，根据买方发出的指令，供应约定范围内的电力。因此，实际必须作为调节能力供应的电量无法事先得知。

利用这些电力市场中交易价格的波动，产生了商业机会，即通过在低价时段购电为蓄电池充电，并在高价时段从蓄电池放电售电的交易来获取收益。目前，富士电机正在开发能够助力此类基于电网系统用蓄电池的电力交易业务实现高收益的支援技术。此项支援技术同样应用于制氢系统的控制技术中，其概述如下（**4. 2 节**中将进一步介绍）：

富士电机的电力交易支援技术，主要提供交易价格预测功能和交易计划优化功能。电力市场是在投标所需电量后才确定交易价格。为了确保采购到廉价电力，需要准确预测交易价格。为此，富士电机正在开发通过将机器学习应用于气象条件等变动因素的关系来预测交易价格的功能。此外，在电力市场中，如果未按计划执行事先买卖的电力供需，有时会受到处罚，因此需要规划能够切实执行的交易。为此，富士电机正在开发应用数学规划法，在综合考虑蓄电池充放电特性、电力系统限制等诸多条件的基础上，制定收益最大化交易计划的功能。

3　制氢系统中关于降低制氢成本的课题

对于此次介绍的制氢系统的控制技术，要求能降低制氢成本。由于成本中大部分是水电解时所用的电力费用，因此从电力市场廉价采购电力并有效利用，是第一个需要面对的课题。作为具体、有效的应用方法，除了将低价采购的电力直接用于水电解，同时还需要将其存储于蓄电池中，在电力价格高昂时段使用蓄电池存储的电力进行水电解。因此，需要以此为目标对系统进行控制。

然而目前，仅靠前述运营方式很难达到政府提出的目标。为解决此问题，第二个课题是，如何利用制氢系统的能力参与电力交易业务，并用其收益来填补制氢成本。此次开发的控制技术，即包含了以此种方式运营系统的功能。

作为开发目标，是在基于政府目标、以氢售价 30 日元 /Nm^3 为前提条件下，将衡量制氢系统投资回报效率的指标，即内部收益率（IRR：Internal Rate of Return）达到 10% 以上，作为制氢确保盈利的基准。

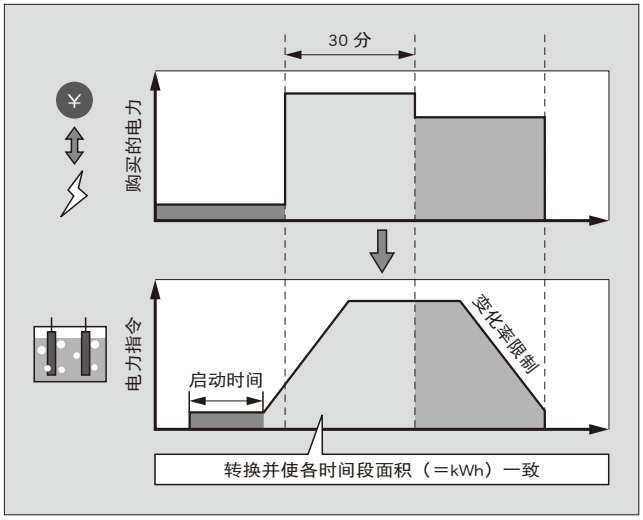


图 2　考虑到水电解装置运行限制的电力指令

4　制氢系统控制技术的特点

4. 1　活用廉价电力制氢的技术

在目前开发的控制技术中，首先需要针对制氢要求的交期与产量，计算出所需投入水电解装置的电力量。然后，利用交易价格预测技术预测电价低廉时段，并制定电力交易计划，以便在这些时段内采购所需的电力量。根据计划，将从电力市场采购的廉价电力投入水电解装置。这就是制氢控制的基础模式。

计划应用的水电解装置在运行时存在一些限制，例如需要启动时间、以及需平缓改变输入电力等。因此，如**图 2** 所示，不仅需要使电力批发市场采购的每 30 分钟电力量与水电解装置的投入电力量相匹配，还必须控制电力投入模式，以满足水电解装置的限制条件。此外，虽然可通过购买廉价电力为蓄电池充电，并在购电价格高昂时段利用蓄电池放电的电力继续制氢，但蓄电池的充放电过程会产生电力损耗。因此，在预测到计入该损失后的电力价格仍低于直接购买价格的时段，不通过蓄电池而优先直接向水电解装置供电，有时反而能更好地控制成本。为了在满足这些条件的同时实现收益最大化，正在开发应用数学规划法来控制电力交易与电力利用的技术。

4. 2　利用电力交易收益填补成本的技术

如 **2. 2 节**中所述，利用电网系统用蓄电池进行电力交易获取收益的环境正日趋完善。此类电力交易也可以利用制氢系统来执行，并可通过其所得收益来填补制氢成本。作为执行电力交易的具体方法，考虑有以下两种途径。

其一，是利用构成制氢系统的蓄电池的充放电功能，在电力市场进行交易。此时，从蓄电池放电的电力需根据情况分配给制氢用途和电力交易用途。其二，是通过组合蓄电池与水电解装置，对整个制氢系统进行控制，从而增加电力交易量。例如，单独凭借水电解装置难以实现快速电力调节，但与蓄电池组合后，即可实现兼具快速响应与大容量的电力调节能力。下文，将详细介绍这些技术。

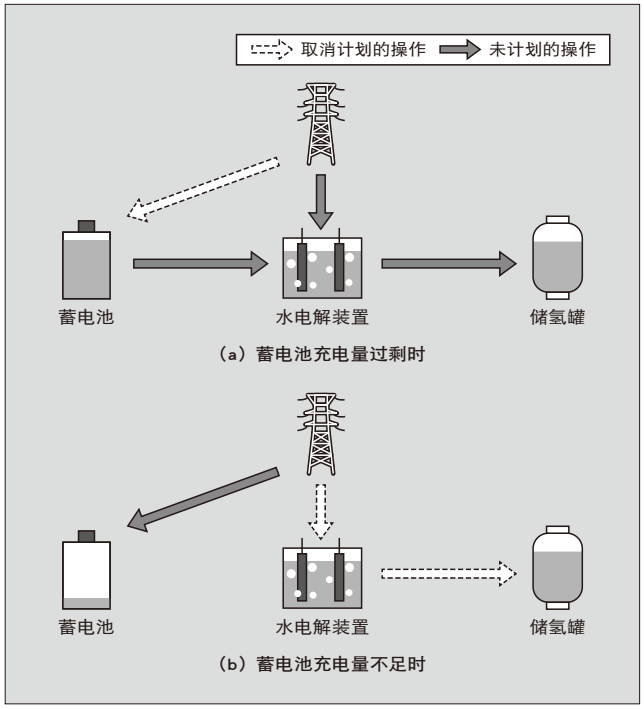


图 3　氢辅助控制功能的动作概要

首先，开发了氢辅助控制功能[6]，该功能可使整个制氢系统实现快速响应、大容量的调节能力。为切实执行针对在供需调节市场售出的调节能力所发出的指令，需要具备根据指令调节功率（kW）的能力，以及在约定时间内维持该调节能力所需的持续能量（kWh）。氢辅助控制功能通过控制电力，在确保蓄电池具备调节能力的同时，由包含蓄电池和水电解装置在内的整个系统来提供所需的能量。其动作概要如**图 3** 所示。如**图 3**（a）所示，当蓄电池充电量过剩时，将蓄电池的放电电力或为充电购入的电力转用于制氢，以消除充电量过剩的问题，从而确保蓄电池具备充电余力。如**图 3**（b）所示，当蓄电池充电量不足时，将制氢购入的电力调剂给蓄电池，以消除充电量不足，从而确保蓄电池具备放电余力。无论哪种情况，都是让储氢罐承担了蓄电池能量的过剩或不足部分。与蓄电池单独运行相比，这种方式使得通过充放电发挥快速调节能力的范围得以扩大。

此外，还开发了将蓄电池放电功能灵活分配于制氢与电力交易用途的技术[7]。由于也可选择在电力市场交易，因此可以制定计划，利用电力交易所得收益来填补制氢的电力成本，从而实现降低成本的目标。同时，此项技术也包含了利用氢辅助控制功能来运营调节能力的功能。该技术还包含管理氢辅助控制功能运行时的氢气储存量的功能。作为一项整体系统控制技术，能够确保即使在提供最大限度的辅助时，也不会发生氢气储存量饱和或氢气提取时短缺的问题。

5　基于仿真的评估

为验证所开发的控制技术能否实现**第4章**所述的控制功能，利用仿真评估了以下两项内容：一是根据计划制定功能生成的计划来控制制氢系统电力时的运行情况；二是长期运行该系统时的收益性。

表 1　设备条件

设备	参数	
蓄电池	容量	10 MWh
	PCS 容量	10 MW
	充电效率	90％
	放电效率	90％
	SOC* 运用范围	15～85％
	辅助设备电力	300 kW
水电解装置	整流器容量	10 MW
	储氢罐容量	8000 Nm^3
	转换效率	0.2 Nm^3/kWh
	辅助设备电力	200 kW

*SOC（State of Charge）：蓄电池充电量相对于充电量的比率。

作为制定计划前提的电力市场价格预测值，采用了 2024 年 4 月 1 日～9 月 30 日电力批发市场和供需调节市场的实际交易价格数据。设备条件设定如**表 1** 所示。此外，氢气提取设为每日一次 4500 Nm^3 的批量提取和每 30 分钟 300 Nm^3 的持续提取的组合方式。

首先，对依据制定计划进行电力控制时的运行情况进行仿真，以确认氢气提取及作为调节能力的电力供应能否按计划执行。从制定的半年期计划中，提取出 2024 年 4 月 1 日这一天的数据，对连接点电力变化进行仿真的结果如**图 4** 所示。**图 4**（a）为全天的变化情况，**图 4**（b）则是提供调节能力

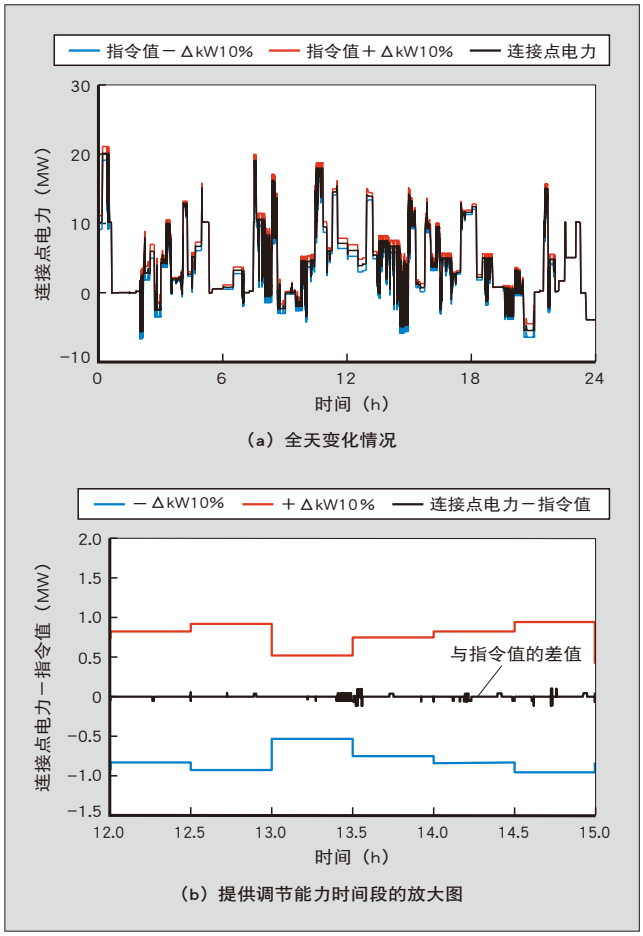


图 4　连接点电力变化的仿真结果

时间段的放大显示。如 **2. 2 节**所述，图中的指令值是指电力买方要求卖方提供的发电量。两个指令值中，蓝线表示的是以调节能力（Δ kW）指令值与基于电力批发市场交易计划的电力之和为基准，再减去 Δ kW 的 10% 所得；红线表示的是在同一基准上加上 Δ kW 的 10% 所得。此外，图中所示的连接点电力是蓄电池与水电解装置电力的合计值。由**图 4**(b)可知，连接点电力始终保持在允许范围内，且能正常响应指令值要求。此外，从**图 4**(a)的结果可确认，该系统全天均能作出正常响应。**图 5** 所示为在制氢的同时依据氢气提取计划进行提取时，储氢罐储存量的变化情况。储存量曲线中频繁出现的瞬时下降源自氢气提取，而 19 时左右的显著下降则源自批量提取。储存量既未降至 0% 导致无法提取，也未达到 100% 导致无法继续储存，从而按照计划量提取了氢气。通过以上结果可知，应用所开发的计划制定功能和氢辅助控制功能，能够按照制定的计划来运营制氢系统。

随后，基于所开发计划制定功能制定的半年期计划，对制氢系统的收益性进行了评估。应注意，在实际交易中预测值与实际值存在偏差，而在此并不验证价格预测的估计精度，而是评估在能够以预测价格进行交易情况下的收益性。此外，所制氢气的销售价格如前所述，设定为 30 日元 /Nm^3。

开发控制技术的目的，是最大限度地降低制氢系统的制氢成本。为展示其效果，对水电解装置与蓄电池各自独立运行的情况也进行了评估，并与所开发的控制技术进行了比较。其结果如**表 2** 所示。个别运行时的总收益为 8310 万日元，而采用所开发控制技术的总收益为 1 亿 3180 万日元，收益提升了 59%。

在交易明细中，供需调节市场的收益大幅提升。其主要

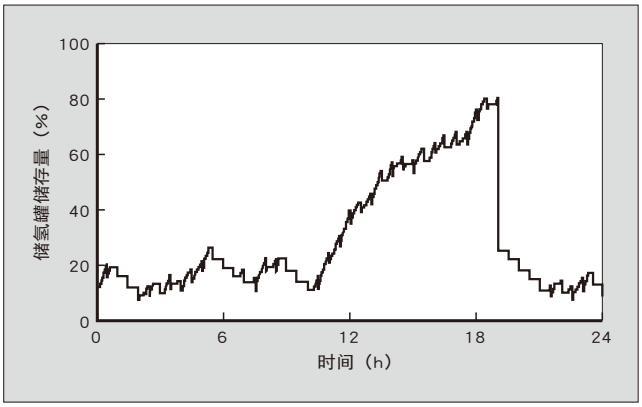


图 5　储氢罐储存量的变化

表 2　运营收益的仿真结果

应用的控制技术		开发的控制技术	个别运行
电力批发市场	购电	−121.9 百万日元（18.4 GWh）	−101.5 百万日元（18.6 GWh）
	售电	6.0 百万日元（0.5 GWh）	7.7 百万日元（0.7 GWh）
供需调节市场		146.7 百万日元（24.1 GWh）	75.9 百万日元（12.6 GWh）
氢气提取（售出）		101.0 百万日元（3.4 MNm^3）	
合计收益		131.8 百万日元	83.1 百万日元

表 3　用于内部收益率计算的成本

初始成本		
水电解装置	5.2 亿日元	应用氢能与燃料电池战略进化图[8]中 2030 年目标值 5.2 万日元 /kW
蓄电池	10.4 亿日元	○容量按叠加 20 年老化部分（30%）后的 14.3 MWh（＝10 MWh/0.7）计算 ○应用单价 7.3 万日元 /kWh[9]

运行成本		
维护保养	0.2 亿日元 / 年	根据氢能与燃料电池战略进化图[8]，应用 10 MW 水电解装置的运行成本（2030 年目标值）的两倍

原因是，与以往仅靠蓄电池单独运营调节能力的控制方式相比，氢辅助控制功能增加了可运营的调节能力。电力批发市场收益下降的原因，推测是由于执行了先前**图 3**(b)示例的控制所致。也就是说，推测其机制是：通过氢辅助控制功能，为预先确保蓄电池的调节能力而从电力批发市场采购了价格偏高的电力来运行水电解装置；之后，再利用已充分确保的蓄电池调节力，大幅提升在供需调节市场的收益，从而实现了整体收益的提高。

随后，基于**表 2** 所示应用所开发控制技术时的运营收益和**表 3** 的成本，试算了 20 年运营期的内部收益率。蓄电池的初始成本采用了当前的一般价格，水电解装置的初始成本和运行成本则采用了氢能与燃料电池战略进化图[8]中 2030 年的目标值进行试算。结果表明，内部收益率为 15%，大幅超过了 10% 的目标值。通过此次开发的控制技术，确认了在确保盈利的同时供应廉价氢气的业务模式的可行性。

6　后记

本文介绍了有助于降低制氢成本的制氢系统及其控制方法，并通过仿真验证了系统运营在收益性方面的效果。

今后，计划将此项控制技术应用于与可再生能源电源并设的离网型制氢系统等实际应用场景。

参考文献

(1)　内閣官房. “水素基本戦略”. 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議. 2023-06-06. p.11-12. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_2.pdf, (参照 2025-06-23).

(2)　経済産業省. 資源エネルギー庁. “水素を取り巻く国内外情勢と水素政策の現状について”. 2024-09-06. p.9. https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/024_04_00.pdf, (参照 2025-10-10).

(3)　一般社団法人日本卸電力取引所. “日本卸電力取引所取引ガイド”. 2019-01.

(4)　経済産業省. 資源エネルギー庁. “電力小売全面自由化の進捗状況について”. 2025-02-28. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/086_03_00.pdf, (参照 2025-06-23).

(5)　一般社団法人電力需給調整力取引所. “取引規定（需給調整

市場)". 2025-04-01.
⑹ 綱分智則ほか. "蓄電池と水電解装置の複合システムにおける需給調整市場に対応した制御手法の検討". 令和６年電気学会全国大会. 2024-06, 208, pp.363-364.
⑺ 綱分智則ほか. "蓄電池と水電解装置の複合システムの協調制御手法とのその最適運転計画". 電気学会論文誌B. 2025, vol.145, no.12, pp.644-652.
⑻ 経済産業省. "水素・燃料電池戦略協議会. 水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン～". 2019-03-12. p.12. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/roadmap_hyoka_wg/pdf/002_s05_00.pdf, (参照 2025-07-09) .
⑼ 株式会社三菱総合研究所. "系統用・再エネ併設蓄電システムのコスト面・収益面での課題整理". 2024-08-29. p.8-9. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/storage_system/pdf/2024_003_03.pdf, (参照 2025-07-09) .

纲分　智则

从事电力系统仿真、控制、分析相关的研究开发。现就职于富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所系统控制研究部。电气学会会员。

小藤 健太郎

从事电力系统仿真、控制、分析相关的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所系统控制研究部主查。电气学会会员。

神通川　亨

从事电力系统仿真、控制、分析相关的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所系统控制研究部部长。电气学会会员。

直流母线系统中的蓄电池控制技术

Battery Control Technologies for DC Bus Systems

佐藤　智希 SATO, Tomoki　　**神通川　亨** JINTSUGAWA, Toru

将太阳能发电装置、蓄电池、直流负载等设备连接，并以直流电形式进行电力交换的直流母线系统正备受关注。对该系统而言，如何维持稳定的直流母线电压非常关键。为解决这个问题，富士电机正在开发一项技术，该技术利用蓄电池的下垂特性（表示输出电流与电压关系的特性），协调多台蓄电池来控制直流母线电压。为了持续应用此电压协调控制，需要防止各蓄电池的过充电和过放电。为此，正在开发对应的控制技术，通过根据每台蓄电池的充电率调整其下垂特性，从而尽量保持各蓄电池充电率的均衡。

A DC bus system is attracting attention, which connects devices such as photovoltaics, storage batteries, and DC loads and transfers electricity between them in the form of DC. The challenge in this system is to maintain a stable DC bus voltage. To achieve this, Fuji Electric is developing a technology to control DC bus voltage by coordinating multiple storage batteries using the droop characteristics (the characteristics of the relationship between output current and voltage) of them. To apply this voltage coordination control continuously, each storage battery needs to prevent overcharging and over-discharging. We are thus developing a control technology that keeps the state of charge of each battery as even as possible by changing the droop characteristics of each battery according to its state of charge.

1　引言

为实现到 2050 年使温室气体排放总量实质上归零的碳中和（CN：Carbon Neutral）目标，使用直流电进行部分电力系统输配电的直流微电网备受关注。这种直流微电网由蓄电池、太阳能发电（PV：Photovoltaic）、直流负载等多个直流设备连接至直流母线（母线：bus）并构成系统。目前，富士电机正致力于开发能稳定维持此类直流母线系统电压的电压协调控制技术。本文，将对有助于直流母线系统电压稳定维持的蓄电池控制技术进行介绍。

2　直流母线系统的电压控制方法

2.1　直流母线系统的目标

如**图 1**(a)所示，以往，PV 及蓄电池等产生的直流电力，需通过交直流电力转换设备（PCS：Power Conditioning system）转换为交流电力。PCS 通过升压变压器连接到交流母线，与交流系统之间进行电力交换。此时，不仅会产生交直流转换损失，还会因升压变压器的电压转换产生能量损失。因此，降低转换损耗成为一项课题。

与之相对，如**图 1**(b)所示，直流母线系统以直流电力转换设备（DC/DC 转换器）取代 PCS 构成。由于无需用于电压转换的变压器，与交流母线系统相比，具有能降低变压器转换损耗的优点。此外，如**图 2** 所示，由于交流母线系统采用了三相交流，进行电力交换时，至少需要 3 根电力电缆。而直流母线系统只需正、负两极，2 根线即可进行电力交换。因此，可以减少电力电缆的数量，有望降低成本。

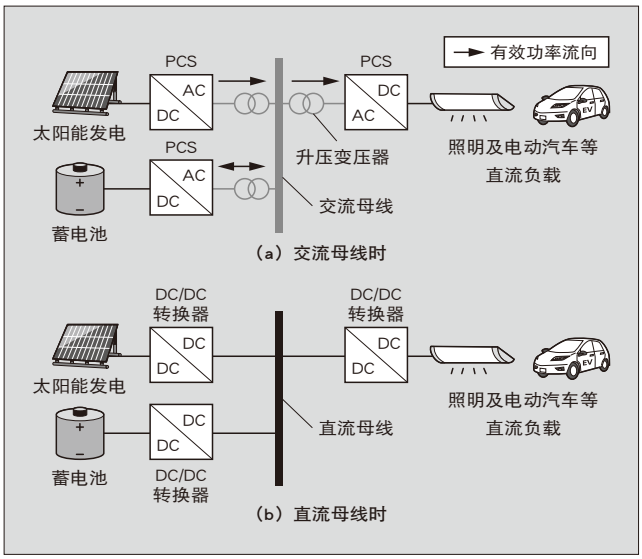


图 1　交流母线系统与直流母线系统的区别

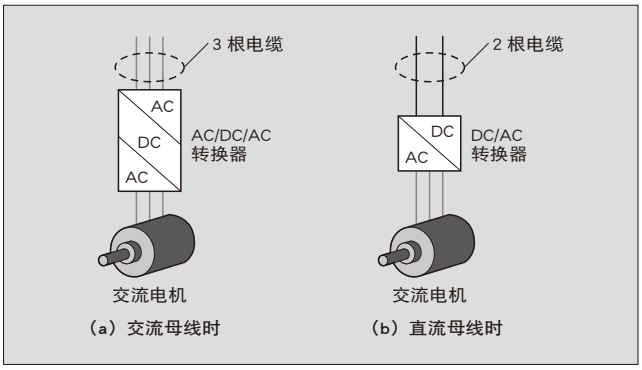


图 2　电缆数量的区别

2.2　直流母线系统的构成示例与电压控制

直流母线系统由 PV、风力发电等可再生能源，以及蓄电池、DC/DC 转换器、电动汽车快速充电器、LED 照明等直流负载组成。具体构成示例如**图 3** 所示。通过 PCS 与交流系统连接。蓄电池及直流负载通过 DC/DC 转换器连接至

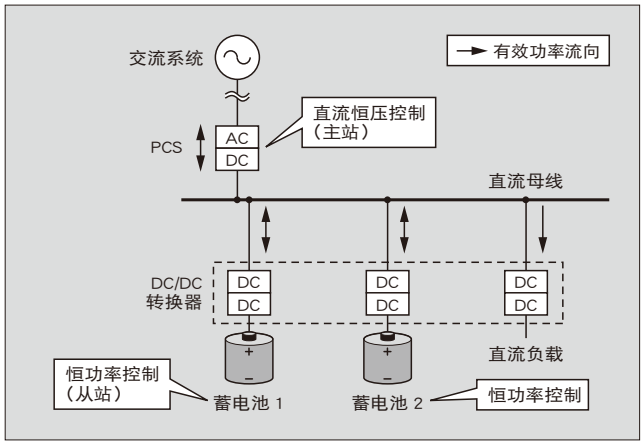


图 3　直流母线系统的具体构成示例

直流母线。为了维持电压，在直流母线系统中可采用主从控制方式或电压协调控制方式等。

在主从方式中，一台电力转换设备作为主站控制直流母线电压，其他电力转换设备作为从站，依据主站指令运行。**图 3** 中，PCS 为主站，蓄电池 1 用的 DC/DC 转换器为从站。此时，如**图 4**(a)所示，如果交流系统侧发生停电，或作为主站的 PCS 因故障等原因失效，则维持电压的职责将转移至一台从站，由其继续维持电压。此方式通过单台设备维持电压，因此控制逻辑简单，且与其他设备在电压控制上没有干扰，不易发生振荡或不稳定。但是，从交流系统停电或主站故障到切换至从站之间存在时间延迟，可能导致电压维持不及时，从而使直流母线完全停电。

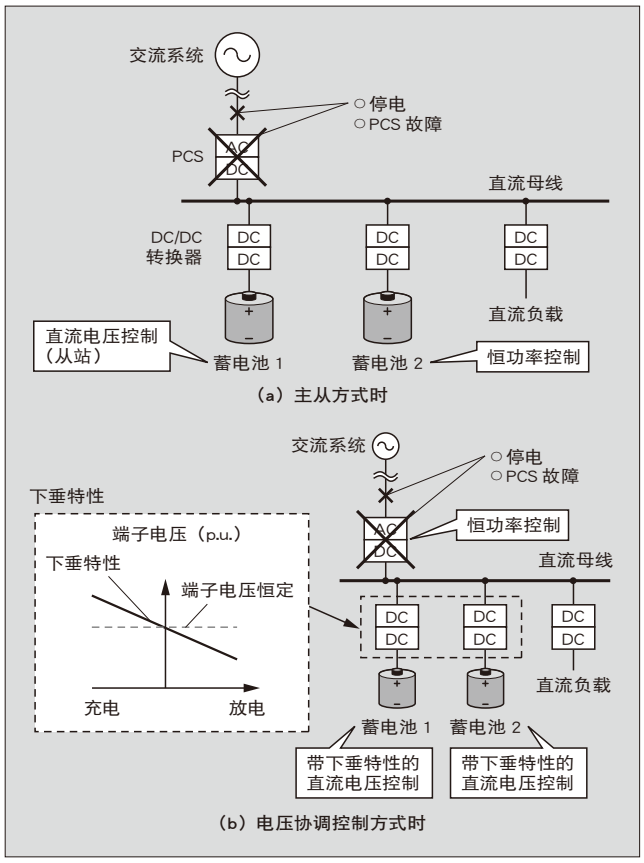


图 4　交流系统侧故障时电压控制方式的比较

在电压协调控制方式中，则可以多台电力转换设备协调进行电压控制。在这种方式中，各设备可根据输出电流或功率调整其端子电压，从而将直流母线电压保持在一定范围内。具体情况如**图 4**(b)所示，由承担电压维持职责的多台设备分别控制各自的端子电压。此外，通过多台设备同时维持电压，可降低因交流侧停电或单台设备故障等导致直流侧停电的可能性。然而，负责维持电压的设备的输出电流，是为维持各自端子电压而自动决定的。因此，当某台设备为保持端子电压恒定而增加输出电流时，其他设备会检测到此变化而减少输出电流。这种多设备相互干扰可能导致控制不稳定。**图 5** 所示为这个干扰问题的说明示例。在此示例中，假设有一个直流母线系统的典型应用场景，各蓄电池的配线电缆长度不同。当各蓄电池通过放电向负载供电时，为保持直流母线电压恒定，由于配线电缆长度不同导致阻抗各异，因此连接各蓄电池的 DC/DC 转换器的端子电压需要做出相应改变，以补偿配线电缆引起的电压降。此时，各点的电压如**图 6** 所示。针对此情况，蓄电池 1 的 DC/DC 转换器检测到自身端子电压，为将其保持在 100%，会向降低放电功率的方向动作。其结果，导致直流母线电压测量点与蓄电池 2 的 DC/DC 转换器的端子电压下降，分别变为 98% 和 99%。此时，蓄电池 2 的 DC/DC 转换器检测到电压下降的动态，为使自身端子电压达到 100%，会向增加放电功率的方向动作，导致蓄电池 1 的 DC/DC 转换器的端子电压上升 1% 至 101%。反复进行此动作，导致电压始终无法稳定在 100%，进而引发不稳定。

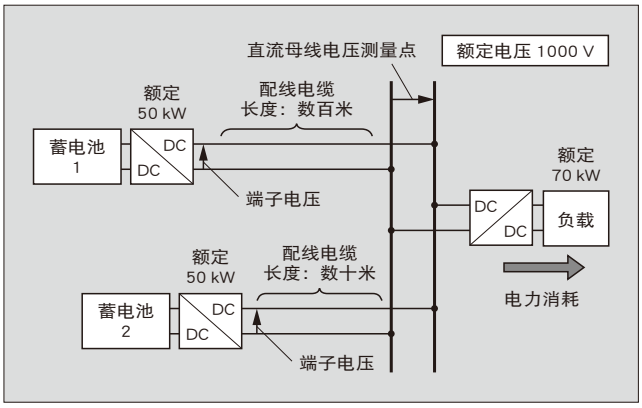


图 5　设备构成及配线示例

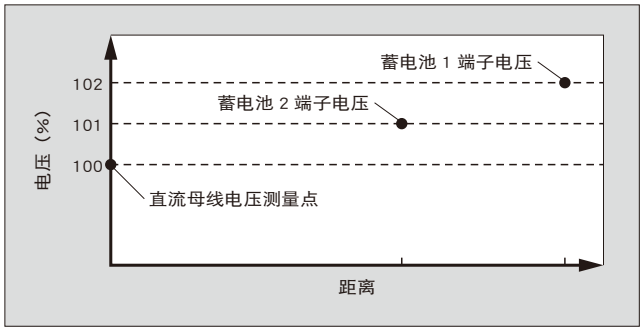


图 6　各点电压示例

3 直流母线系统中电压协调控制的课题

为解决 **2. 2 节**所述的电压不稳定性问题，需要使各端子电压根据输出电流或输出功率进行自行适应并随之变化，而非始终将其控制在恒定值。此类控制可通过利用蓄电池的下垂特性来实现。如**图 4**(b)所示，端子电压上升时充电电流增加，端子电压下降时放电电流增加的特性，称为电压型下垂特性。基于该特性进行控制时，当各电力转换设备的端子电压发生变化，各电力转换设备将自主调整其输出电流，最终收敛至各电力转换设备的端子电压和输出电流均不再变化的状态。各电力转换设备的端子电压稳定后，使直流母线保持在一定的电压范围内。

采用下垂特性的电压协调控制具有一个特点：即使各电力转换设备的端子电压存在些许偏差，通过各电力转换设备自主调整其端子电压，直流母线电压及各电力转换设备的端子电压最终都会收敛于平衡点。具体的电压调整动作示例如**图 7** 所示。设备构成与**图 5** 所示相同，假设处于**图 6** 所示的各电力转换设备端子电压存在差异的状态。在此状态下，如果因负载减少导致直流母线电压上升，如**图 7** 所示，各点电压将沿①方向上升。此时，根据下垂特性，各蓄电池的端子电压将上升至△点，同时各蓄电池的放电输出电流降低。与恒压控制式主动维持电压的方式不同，根据“电压上升则放电输出电流下降，电压下降则放电输出电流上升”的机制，最终使各点电压收敛。

如前所述，如果持续采用基于蓄电池下垂特性的电压协调控制，会因线路电阻、转换器损耗以及蓄电池个体差异等原因，在蓄电池反复充放电过程中，导致各蓄电池的充电率（SOC：State Of Charge）产生差异。例如，当由两台蓄电池用 DC/DC 转换器维持直流电压时，如**图 8** 所示，这两台之间的 SOC 偏差会变大，导致仅其中一台先达到 SOC 下限值或上限值，进而无法继续充电或放电。如果两台 SOC 均等，则可共同充放电以抑制直流母线电压波动；但如果仅由单台运行，则可能导致直流母线电压下降或无法提供所需输出。因此，为了持续运行电压协调控制，如何尽量保持承担电压维持任务的各蓄电池的 SOC 均衡非常重要。

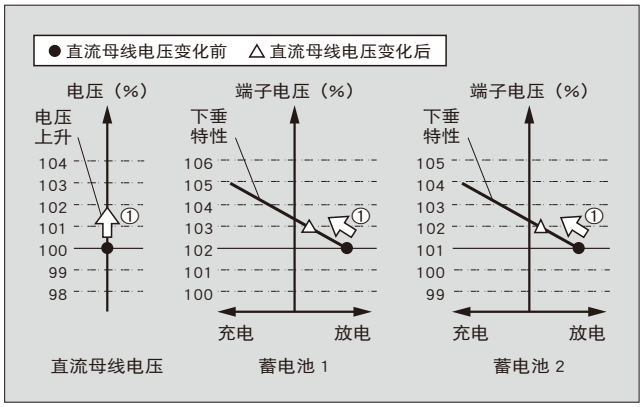


图 7　具体电压调整动作示例

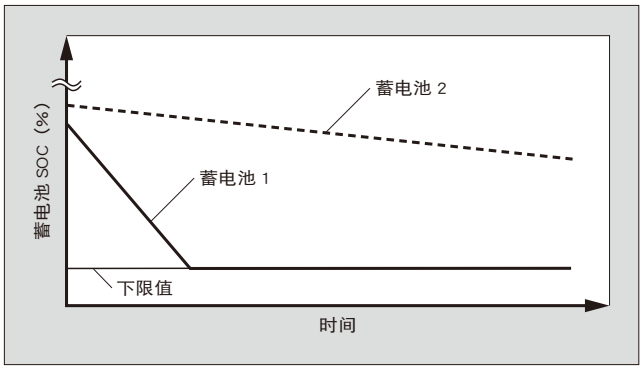


图 8　两台蓄电池用 DC/DC 转换器运行时的 SOC 示例

4 直流母线系统中蓄电池控制的特点

4. 1 均衡蓄电池充电率的控制方法

为均衡**第 3 章**所述各蓄电池的 SOC，可以采用调整各蓄电池在充放电时电流大小的方式。由于该电流大小由下垂特性决定，因此目前正在开发的控制技术通过改变各蓄电池的下垂特性，来实现 SOC 的均衡。

各蓄电池的下垂特性，通过连接各蓄电池的 DC/DC 转换器实现。在多个蓄电池连接至直流母线的构成中，各蓄电池应具备的下垂特性斜率（下垂增益）K_i，由式(1)计算得出。

$$K_i = K_{ini}\left(1 + \alpha \frac{SOC_i - SOC_{ave}}{SOC_{ave}}\right)^n \quad \cdots\cdots(1)$$

K_{ini}　：下垂增益的初始值
α　：充电电流为正时的电流值（p.u.）
SOC_i　：蓄电池的 SOC（%）
SOC_{ave}：时刻 t 时全部蓄电池的平均 SOC（%）
n　：大于等于 1 的整数

通过 K_i 值，参与电压协调控制的多台蓄电池的平均 SOC 与其自身 SOC 的差值将减小，使各蓄电池的 SOC 趋近于平均 SOC 值，实现均衡化。

此外，式(1)中指数 n 的值会影响各蓄电池 SOC 达到均等所需的时间。例如，当 SOC 高于平均值时，如指数 n 较大，则在充电时 K_i 会随 n 增大而增大。放电时，则 K_i 会变小。因此，当指数 n 较大时，充电电流会变小，放电电流会变大，从而使 SOC 更快地接近平均值。然而，如果指数 n 得过大，可能导致蓄电池端子电压超出规格所探讨的 ±10% 的适当范围。反之，如果指数 n 过小，则 SOC 的均衡过程会变慢。为解决此问题，开发了一种应对方法。如**图 10** 所示，在放电时，随着电压接近下限而减小指数 n；在充电时，随着电压接近上限而减小指数 n[(1)]。通过该方法，可在将端子电压维持在上述适当范围内的同时调节 SOC。

4. 2 仿真验证

在**图 9** 的系统构成示例中，通过仿真验证评估了将指数 n 设为固定值的传统方法，以及使指数 n 变化的适应性下垂控制在电压稳定化方面的效果。评估项目为向直流负载放电时，两台蓄电池的 SOC 差值以及电压。作为初始条件，蓄

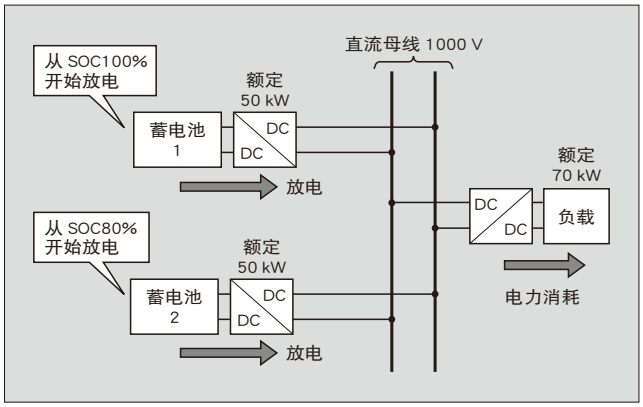


图 9　系统构成示例

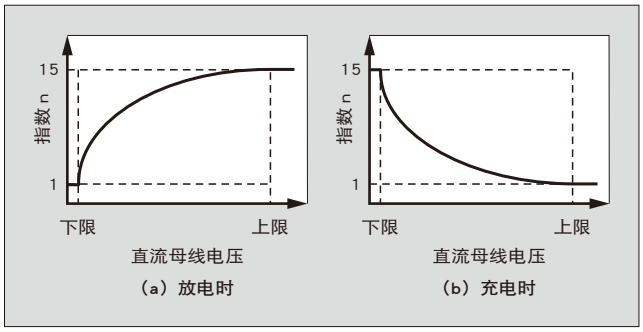


图 10　直流母线电压 – 指数 n 特性

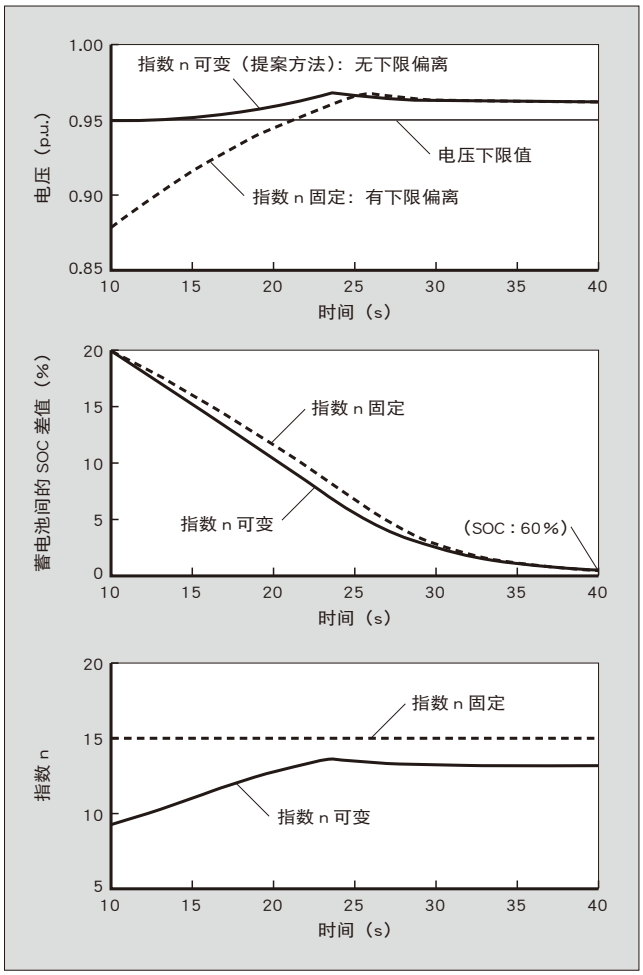


图 11　仿真结果

电池 1 的 SOC 为 100%，蓄电池 2 的 SOC 为 80%。同时，将蓄电池间的 SOC 目标误差设定为小于控制 SOC 检测分辨率 1% 的值。设定目标，为由负载输出波动引起的电压波动范围在 ±5% 以内。

基于上述条件的仿真结果如**图 11** 所示。指数 n 为固定值时，根据式 1 计算出的 K_i 斜率较大，导致电压大幅低于下限值 0.95 p.u.。采用基于**图 10** 特性使指数 n 可变的适应性下垂控制时，则可以看出电压未偏离下限值 0.95 p.u.，且保持在 ±5% 的范围内。这是因为，K_i 值能根据电压值计算出适当的维持电压的数值。

此外，关于蓄电池间的 SOC 均衡，即使指数 n 可变，最终蓄电池间的 SOC 误差也达到了 0.1% 以下，成功实现了低于 1% 的目标。

从上述结果可知，开发的控制技术能够在将直流母线电压维持在目标范围内的同时，均衡蓄电池间的 SOC。

5　后记

本文对为实现直流母线系统稳定运行而开发的蓄电池控制技术进行了介绍。今后，富士电机计划继续推进这些技术的实用化，并开展面向设备容量优化设计与低成本化的开发工作。同时，希望通过这些努力，促进直流母线系统的普及推广，为客户实现碳中和做出贡献。

参考文献

(1)　佐久間宏彬ほか. “直流バスシステムへの適応ドループ制御適用時の電圧逸脱防止手法”. 令和６年電気学会電力・エネルギー部門大会. 2024, no.196.

佐藤　智希
从事电力系统仿真、控制、分析相关的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所系统控制研究部经理。电气学会会员。

神通川　亨
从事电力系统仿真、控制、分析相关的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所系统控制研究部部长。电气学会会员。

有助于电网系统用蓄电池电力交易的价格预测与交易计划优化技术

Market Price Forecasting and Trading Plan Optimization Technology Contributing to Electric Power Trading Using Grid-Scale Batteries

石桥　直人 ISHIBASHI, Naoto　　林　巨己 HAYASHI, Naoki　　新井　馨 ARAI, Kiyo

近年来，对利用电网系统用蓄电池进行电力交易的需求日益增长。为此，富士电机开发了由市场价格预测和交易计划优化这两项技术构成的电力交易支援技术。市场价格预测技术采用了由多种机器学习方法构成的集合预测模型，能够对电力批发市场、供需调节市场等多种市场进行稳定且高精度的预测。交易计划优化技术则通过运用数学规划法，对蓄电池特性、电力系统制度进行建模，从而制定出严谨的交易计划。凭借上述电力交易支援技术，有助于提升利用电网系统用蓄电池进行电力交易的收益性。

In recent years, demand for electric power trading using grid-scale batteries has been increasing. To address this demand, Fuji Electric has developed an electric power trading support technology involving the use of two techniques: market price forecasting and trading plan optimization. An ensemble forecasting model involving multiple machine learning methods can be applied to enable stable and highly accurate predictions of market prices for Japan Electric Power eXchange (JEPX), Electric Power Reserve eXchange (EPRX), and other such electric power exchanges. Trading plan optimization involves modeling storage battery characteristics and electric power systems using mathematical programming, enabling the development of rigorous trading plans. This electric power trading support technology can contribute to enhanced profitability in electric power trading using grid-scale batteries.

1　引言

为实现到 2050 年将温室气体排放量实质上归零的碳中和目标，可再生能源的导入正在迅速扩大。但是，由于可再生能源发电量受气象条件影响很大，维持电力系统的供需平衡存在困难。作为解决方案，一种利用接入电力系统的蓄电池进行充放电以维持电力供需平衡的系统已实现实用化。此外，还创设了用于买卖供需调节电力的市场。如**图 1** 所示，在利用此类电网系统用蓄电池进行的电力交易中，通过在电力市场价格低廉时段购电、在价格高昂时段售电，产生了基于市场价差获取收益的商业模式。为推进此类电力交易运营业务的自动化，富士电机开发了电力交易支援技术。该技术能够高精度预测多个电力市场的交易价格，并基于价格预测值制定收益最大化的交易计划。本文，将介绍富士电机开发的电力交易支援技术的概要，以及通过仿真验证其收益性的结果。

2　电力市场概要

在日本，随着 2022 年《电气事业法》的修订，开始允许蓄电池独立向电力系统放电。同时，国家和自治体完善了蓄电池导入补贴制度，利用电网系统用蓄电池进行电力交易开始受到关注。为实现此类电力交易所需的蓄电系统市场规模，预计将从 2023 年度的 2300 亿日元扩大至 2030 年度的 4900 亿日元[1]。在利用电网系统用蓄电池的电力交易业务中，为获取更高收益，其交易对象不仅包括买卖用于供需调节电力的供需调节市场，也包括买卖基础电力的电力批发市场。电力批发市场与供需调节市场的概要将在 **2. 1 节**和 **2. 2 节**进行介绍。

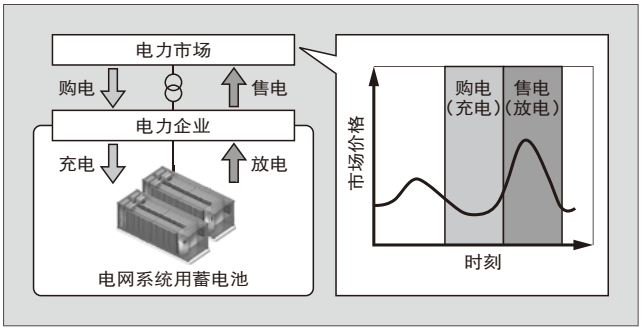


图 1　利用电网系统用蓄电池进行电力交易的概念图

2. 1　电力批发市场

电力批发市场是零售电力企业与发电企业参与并进行电力交易的市场。作为电力自由化的一环，一般社团法人日本电力批发交易所（JEPX：Japan Electric Power eXchange）于 2003 年成立，运营着**表 1** 所示种类的市场[2]。在 JEPX，根据交易参与者的投标结果所确定的 kWh 约定量和 kWh 约定价格进行电力交易。**表 1** 中的单一价格方式，代表约定价格对所有交易参与者为同一价格；而多重价格方式，代表约定价格因交易参与者而异。

表 1　电力批发市场中的主要市场

项目	现货市场	即时市场
约定方式	单一价格	多重价格
投标截止时间	前一日 10 点	实际供需开始前 1 小时
投标范围	次日全天	1 小时后 1 个时段
交易单位	30 分钟 1 个时段	
开设时期	2005 年度	2016 年度
备注	前日商品	当日商品

2.2 供需调节市场

供需调节市场是作为买方的电网系统运营者与作为卖方的发电企业之间，就维持电网系统稳定所需的调节能力进行交易的市场。在 2020 年度之前，调节能力通过公开征集方式从发电企业等处采购。但为了通过广域采购来高效确保调节能力并降低采购成本，已过渡至 2021 年度成立的一般社团法人电力供需调节能力交易所（EPRX：Electric Power Reserve eXchange）进行交易。EPRX 交易的主要商品如**表 2** 所示[3]。在 EPRX，调节能力基于 ΔkW 约定量和 ΔkW 约定价格，以及根据是否下达启用指令所对应的 kWh 约定量和 kWh 约定价格进行交易。

3 电力交易支援技术的特点

支援电力交易、帮助运营蓄电池的电力企业提升收益的技术，由预先计算未来市场价格的“市场价格预测”以及基于该预测计算优化交易计划的“交易计划优化”两项技术构成。富士电机开发的市场价格预测技术和交易计划优化技术的详情将在 **3.1 节**与 **3.2 节**中进行介绍。

3.1 市场价格预测技术

为了提高运营蓄电池的电力企业收益，前提条件是能够高精度地预测市场价格。电力的供需平衡受人类社会活动影响而波动，其趋势也随季节和时间不停变化。因此，如**第 2 章**所述，电力市场中交易的各类商品，其价格也会受各自特性的相应影响而发生波动。

如果将此类波动现象与波动因素之间的关系应用于机器学习，则可构建预测模型，对未来变化进行预测。关于机器学习，目前已知存在多种近似特性各异的方法。此次，作为可适用于各类特性商品的预测模型，开发了**图 2** 所示的集合预测模型[4]。在集合预测模型中，将多个预测模型的预测值整合为一个。首先，应用近似特性彼此不同的机器学习方法，即线性方法、分段线性方法、非线性方法；然后，基于近期的预测性能，采用多个预测模型的近邻加权平均进行整合。通过这种集合预测模型，可以对各商品的市场价格进行高精度预测。

3.2 交易计划优化技术

在电力市场中，如果未能执行已约定的交易计划，将被处以罚款，因此需要能够制定切实可行交易计划的技术。与此类电力交易一样，为了在多种限制条件下找出收益最大化的交易计划，已知主要有两种方法。一种是数学规划法，可求得数学上精确结果；另一种是元启发式方法，虽然精确性不足但可以解决大规模问题。在此次开发的交易计划优化技术中，由于涉及收益性问题，因此精确性非常重要。同时，考虑到问题规模不大，开发了**图 3** 所示的采用数学规划法的优化模型[5]。在优化模型中，根据输入的市场价格，在蓄电池特性与电力系统制度的限制条件下，通过数学规划法计算出能使电力交易收益最大化的交易量。作为限制条件，关于蓄电池特性的部分，对表示充电电力相对于蓄电池容量比例的充电率（SOC：State Of Charge）的上下限进行限制，以及将日放电电量控制在额定蓄电池容量内的循环限制等进行建模。关于交易市场的部分，则对规定了交易量最小投标单位的电力批发市场限制、供需调节市场限制，以及可再生能源附加费导致的费用限制等进行建模。由此，可制定出考虑了实际运行中所有限制条件的交易计划。

表 2 供需调节市场中的主要商品（2025 年度）

项目	一级调节能力	二级调节能力①	二级调节能力②	三级调节能力①	三级调节能力②
约定方式	多重价格				
投标截止时间	每周二 14 点 *				前一日 14 点
投标范围	下周 7 天（周六至周五）				次日全天
交易单位	3 小时 1 区块 *				30 分钟 1 区块
响应时间	10 秒以内	5 分以内		15 分以内	60 分以内
开设时期	2024 年度			2022 年度	2021 年度
备注	周度商品 *				当日商品

* 预计从 2026 年度起，制度将修订为前日商品

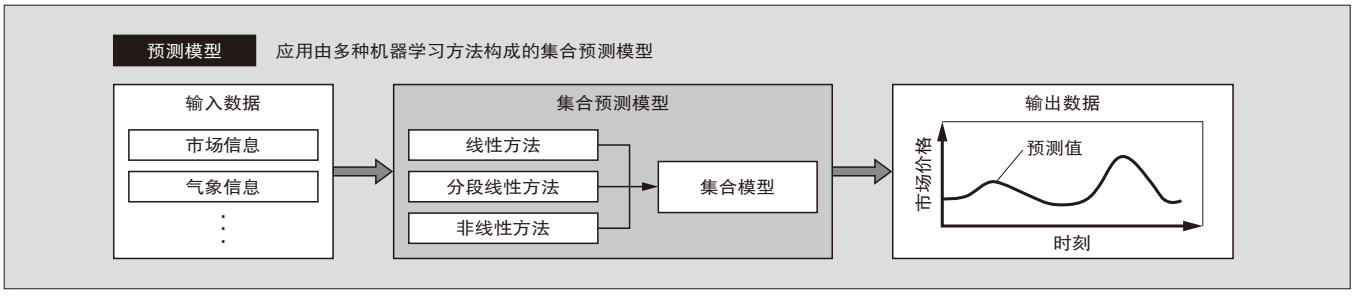


图 2 市场价格预测技术概念图

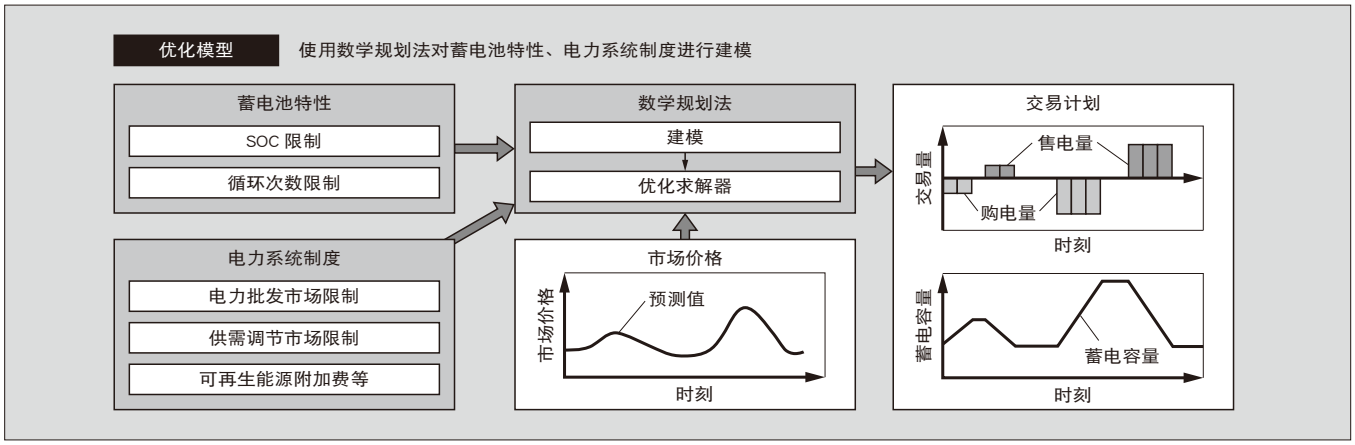


图 3　交易计划优化技术概念图

4　电力交易支援技术的评估

通过仿真对开发的电力交易支援技术的收益性进行了评估。仿真估算条件如**表 3** 所示。此处，假设使用电网系统蓄电池进行的电力交易在不久的将来会成为前一日交易，并采用了 2023 年度的现货市场与三级调节能力②的交易实绩作为条件。市场价格预测、交易计划优化的结果分别在 **4. 1 节**、**4. 2 节**中进行介绍。

表 3　仿真估算条件

项目	估算条件
评估期间	2023 年 4 月 1 日～2024 年 3 月 31 日
对象电力交易	现货市场、三级调节能力②
对象区域	九州区域
预测对象	现货市场：区域价格 三级调节能力②：平均中标价格
预测、计划时机	截至前一日 10:00 （预测中的气象信息等使用实际值）
三级调节能力②的约定条件	kWh 约定量：启用率 100% kWh 约定价格：10.71 日元 /kWh
蓄电池规模	输出 10 MW、容量 42 MWh
充放电效率	81%（充电 90%、放电 90%）
SOC 上下限	上限 90%、下限 10%
SOC 初始值	初始值 10%、最终值 10%
循环限制	1 天 1 个循环以内 （蓄电池 1 天使用量在 42 MWh 以内）
可再生能源附加费	单价：1.40 日元 /kWh （2023 年度实绩值）
输电费用	电量计费单价：3.09 日元 /kWh （2023 年度九州电力输配电株式会社特高压标准连接输电服务实绩值）

4. 1　市场价格预测

为了比较方法优劣，将以下 5 种方法作为评估对象：一般采用预测目标日前一日的实际值直接作为预测值的“持续模型”；近似特性不同的线性方法、分段线性方法、非线性方法这三种“单一预测模型”；以及本次开发的“集合预测模型”。各预测模型的预测精度如**表 4** 所示，开发的集合预测模型的预测结果见**图 4**。此外，预测精度的评估指标采用了表示真实值与预测值平均误差大小的平均绝对误差（MAE：Mean Absolute Error）。在两种交易中，集合预测模型的误差均最小。可以认为，集合预测模型表现出了随时整合适当预测模型的效果。

4. 2　交易计划优化

图 5 所示为应用优化技术得出的一日交易计划，**表 5** 所示为应用开发的市场价格预测技术与交易计划优化技术进行运营时的年度收益估算。

图 5 中，如关注市场价格走势与交易时机的关联，可见其在现货市场价格较低的午间时段买电，在三级调节能力②价格较高的傍晚时段卖电，形成了通过买卖价差提升收益的交易模式。此外，观察 SOC 的变化趋势可知，其满足 SOC 上下限限制及循环限制，遵守了设备限制条件。

为了评估运营时市场价格预测技术带来的收益性，**表 5** 中的预测模型采用了**4. 1 节**中的持续模型与集合预测模型这两种情况。三级调节能力②中的调节能力约定判定规则为：如果作为输入数据的市场价格低于或等于三级调节能力②的最高中标价实际值，则成交；如果超过，则视为未成交，并按当日即时市场的平均价格成交。开发的集合预测模型相比作为基准的“持续模型”取得了更好的结果，确认了应用本技术可提升收益性。

表 4　各预测模型的预测精度（MAE）

项目	持续模型	单一预测模型 （线性方法）	单一预测模型 （分段线性方法）	单一预测模型 （非线性方法）	集合预测模型
现货市场	2.03 日元 /kWh	1.91 日元 /kWh	1.88 日元 /kWh	2.13 日元 /kWh	1.69 日元 /kWh
三级调节能力②	1.02 日元 /kW・30 分	1.41 日元 /kW・30 分	1.07 日元 /kW・30 分	0.83 日元 /kW・30 分	0.83 日元 /kW・30 分

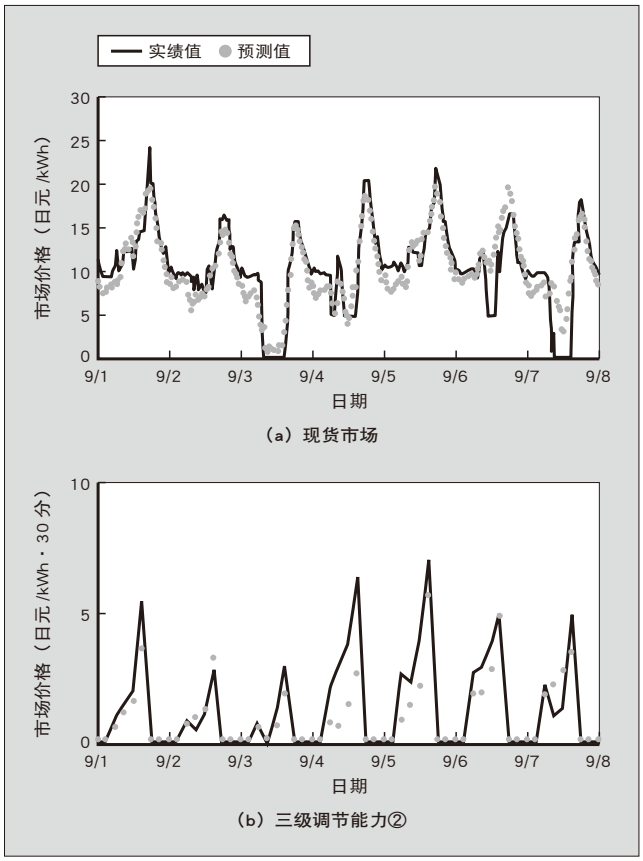


图 4　集合预测模型的预测结果

表 5　各预测模型的年度收益估算

项目	持续模型	集合预测模型
年度收益	97354476 日元	108184637 日元

*2023 年 12 月 1 日、12 月 22 日、2024 年 3 月 11 日这三天，因三级调节能力②的市场价格实绩值超过 100 日元 /kW・30 分钟，属于价格尖峰日，对年度收益影响较大，因此从评估期间中剔除。

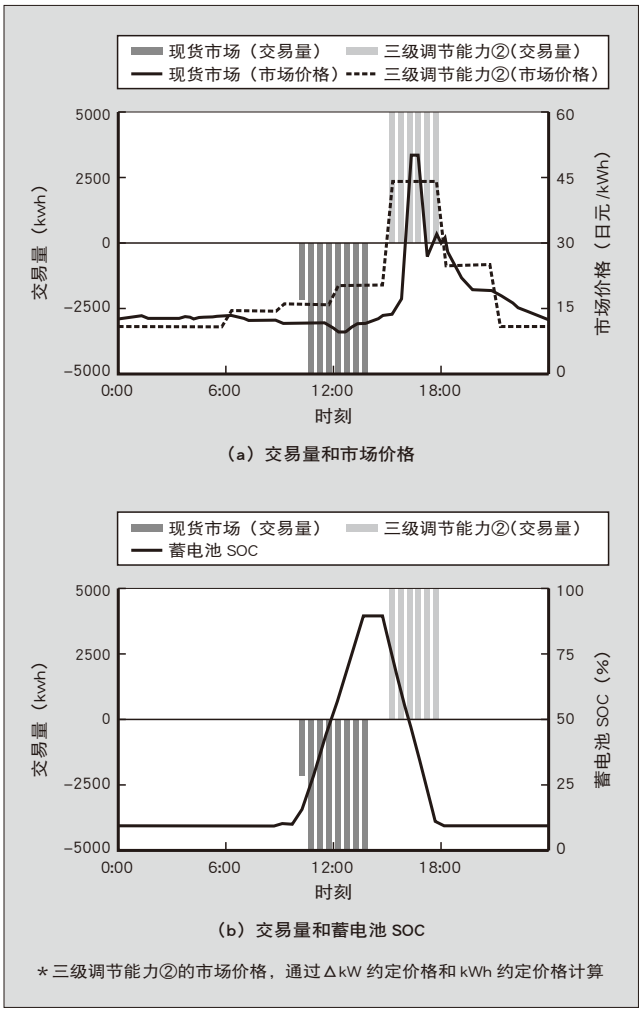
5　后记

本文对用于实现利用电网系统蓄电池进行电力交易业务中不可或缺的电力交易支援技术进行了介绍。

关于蓄电池的用途，除本文所述的形式外，还期待其在多种形式中得到应用。例如：为提升可再生能源收益而进行峰值移动的可再生能源并设型蓄电池，以及作为电力用户新收入来源、通过销售电力削减量进行负瓦特交易的电力用户并设型蓄电池等。

今后，富士电机计划针对这些形式的蓄电池开发电力交易支援技术。使用电网系统蓄电池的电力交易业务，要求具备复杂的运营能力与高度的专业性。今后，计划将此次开发的电力交易支援技术应用于本公司产品“EnergyGATE for Power Trading 蓄电交易运营系统”中，以期对运营蓄电池的电力企业的业务改善与收益改善做出贡献。

本研究是与国立大学法人东京大学能源综合学联合研究机构共同开设的社会联合研究部门“电力系统创新实现”的成果。



＊三级调节能力②的市场价格，通过 ΔkW 约定价格和 kWh 约定价格计算

图 5　应用了交易计划优化技术的计划

参考文献

⑴　株式会社富士経済. エネルギーマネージメント・パワーシステム関連市場実態調査2025.

⑵　一般社団法人日本卸電力取引所. 日本卸電力取引所取引ガイド. https://www.jepx.jp/electricpower/outline/pdf/Guide_2.00.pdf,（参照 2025-07-25）.

⑶　一般社団法人電力需給調整力取引所. 需給調整市場に係る取引規定等の公表. 2025-04-01. https://www.eprx.or.jp/outline/docs/kitei_323122_250401.pdf,（参照 2025-07-25）.

⑷　石橋直人ほか.“市場価格予測におけるアンサンブル学習に関する一検討”. 電気学会全国大会論文集. 2025, no.6-098.

⑸　林巨己ほか.“系統用蓄電池事業者の収益性に関する基礎検討”. 電気学会全国大会論文集. 2025, no.6-182.

石桥　直人

从事电力、能源领域的预测、优化技术的研究开发和产品开发。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所 AI 研究部经理。

林　　巨己

从事电力、能源领域的优化技术的研究开发和产品开发。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所 AI 研究部主任。电气学会会员。

新井　　馨

从事电力、能源领域的优化技术的研究开发和产品开发。现就职于富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所 AI 研究部。电气学会会员。人工智能学会会员。

有助于产品降噪的噪声仿真技术

Acoustic Noise Simulation to Reduce Product Noise

大野　和彦 ONO, Kazuhiko　　直岛　勇斗 NAOJIMA, Hayato

对于发电变电设备、电机等产品，常因其使用环境要求而需要降低运行声音。目前，富士电机正致力于开发有助于这些产品实现降噪的噪声仿真技术。该技术由模拟声源产生噪声的声源仿真，以及推测产生噪声传播对象者所处位置的传播路径仿真构成。以电机为对象进行声源模拟的结果表明，该技术能够高精度地进行噪声推测。对于冰柜，基于分析结果推测出对噪声影响较大的传播路径，为制定有效的降噪对策做出了贡献。

Power-generation and substation equipment, motors, and many other products need reducing acoustic noise to suit certain operating environments. Fuji Electric is working to develop an acoustic noise simulation technology to reduce noise generated by such products. This technology consists of sound source simulation, which simulates noise generated from a sound source, and operational transfer path analysis, which estimates the operational transfer path of the generated noise until it reaches a target person. By simulating the sound source of a motor, we estimated the noise with high precision. In addition, for freezer showcases, estimating the operational transfer paths with the largest effect on noise based on the analysis results has enabled the implementation of noise reduction measures.

1　引言

富士电机提供的众多产品中，有许多因其使用环境要求而需要降低运行声音。例如，安装在工厂等场所的发电设备、变电设备，以及以功率调节器为首的电力转换设备和电机等。此外，还包括搭载于电动汽车上的电气设备、店铺的冷冻、冷藏展示柜等，涉及范围广泛。特别是产生噪声较大的电机、压缩机等设备，属于《噪声规制法》管制对象，设有噪声限值。为满足此类法规要求，实现产品降噪，富士电机正致力于开发噪声仿真技术，其目的在于，在设计阶段就能推测产品产生的噪声，并采取有效的应对措施。本文，将以产品开发中的应用事例为中心，介绍噪声仿真技术。

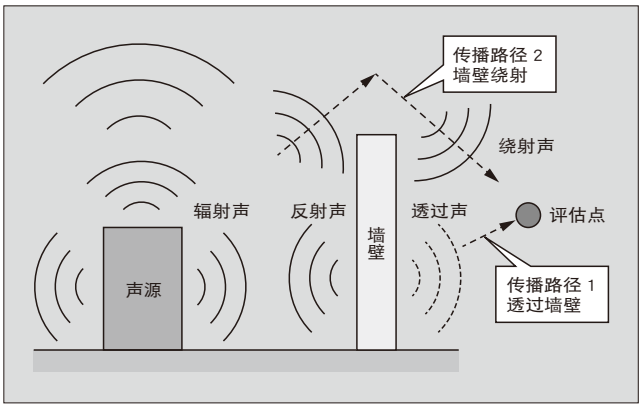


图 1　噪声的声源与传播路径

2　关于噪声仿真

2.1　关于噪声

机械设备在运行时，因电磁作用、流体压力波动等因素的影响，会产生振动。这些振动的振幅虽然很小，只是在微米级别，但正是这种微小的振动，会引起周围空气或水的压力变化，从而产生声波，形成声源。其中，这种对人而言不悦耳的声音便被定义为噪声。声音的传播方式，即传播路径，如**图 1** 所示，会受声源周围的气温、湿度、风向、风速以及建筑物状态等因素的影响而发生变化。由于会在周围的墙壁等表面发生反射、透射、绕射传播等现象，因此声音通常会经过多条路径传播。如果作为声源的机械装置被收纳在机壳内，声音还可能在机壳内部反射并放大。如上所述，噪声的产生与传播机理涉及多种现象。

2.2　噪声仿真概要

为了不依赖试制机进行试错，实现高效研讨降噪对策，必须分别把握声源和传播路径。作为具体方法，仿真技术的应用正在不断推进。在噪声仿真中，将仿真对象区分为声源本身和声音传播路径两部分进行处理。

在声源仿真中，首先，为了精确模拟作为噪声源振动能量源的电磁振动、流体压力波动等物理现象，需建立一个能够正确反映声源设备结构和物理特性的模型。同时，在计算机上再现这些现象。由于声源设备不同，其对应的物理现象也不同，因此需要应用与各自现象相对应的计算方法。通过建立能精确表现噪声产生机理的模型，可以轻松预见为降低噪声需采取对策的对象。

在传播路径仿真中，与为复杂交织的整个传播路径精确建模相比，分析其对传播中噪声影响的大小更为重要。原因在于，通过在影响大的部位重点实施对策，可以有效地降低噪声。

3　声源仿真的应用事例

以下内容，将介绍应用于日益重视降噪的感应电机开发中的声源仿真。

3.1　感应电机开发中的课题

近年来，为了抑制能耗、降低运营成本，感应电机被要求实现高效率化。其实现手段之一，是提高转速。通过提高转速有望提升输出功率，但也可能导致振动和噪声增加。因此，决定应用声源仿真，根据设计方案来推测噪声大小增减的情况。《噪声规制法》规定的限值，根据噪声源安装的环境和时段而不同，分别为 60 dB 以下或 65 dB 以下。因此，设定目标为声源仿真的推测值与实测值之差控制在 ±3 dB 以内。

感应电机的噪声源于运行时电磁力作用所引起的振动，因此在声源仿真时，遵循 **2. 2 节**所述的思路，对电磁力作用进行模拟。对于此电磁力，应用了富士电机拥有的仿真技术，并反映了构成感应电机定子的电磁钢板和线圈的特性。实测感应电机内部的电磁力极为困难，无法与仿真结果直接比较。但通过比较与电磁力相互作用较大的驱动电流，如**图 2** 所示，仿真结果与实测值大体一致，由此判断电磁力也得到了高精度再现。

为了基于该电磁力计算噪声源的振动，如何精确反映构成感应电机各部件的特性，是获得必要推测精度的关键课题。

3.2　提升推测精度的对策

为了提高感应电机中电磁力所致振动的仿真精度，针对以下 3 个项目改进了仿真用模型。

⑴　电磁钢板接触面压的再现

定子由数百片电磁钢板叠压，并在其中插入线圈而形成。此时，电磁钢板因相互接触而产生面压。面压越高，即使施加电磁力，叠层电磁钢板也越不易变形。以往，并未考虑此项影响。为了对该影响进行建模，如**图 3** 所示，首先通过结构仿真计算电磁钢板的接触面压，随后，通过垂直于板面方向及板面内方向这两个方向的弹簧来模拟接触面压。最后，通过计算建立了弹簧和电磁钢板一体化的等效模型。

⑵　浸渍绝缘漆的再现

定子线圈是将多股铜线束浸渍绝缘漆，使铜线之间或铜线与电磁钢板形成一体化。因此，浸渍并固化后，绝缘漆的状态会影响电磁力并导致的定子变形。以往并未考虑的此项

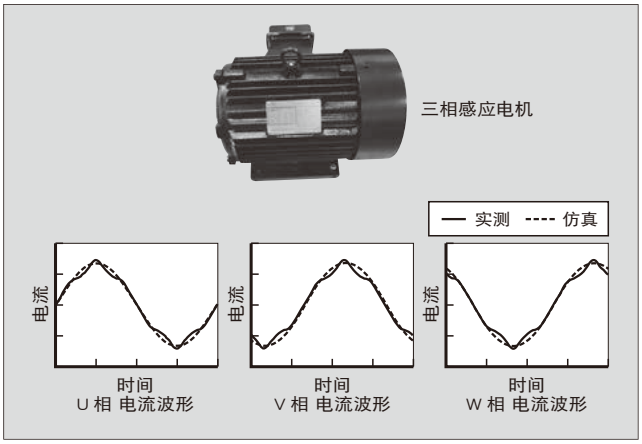


图 2　电磁场分析示例：三相感应电机的电流波形

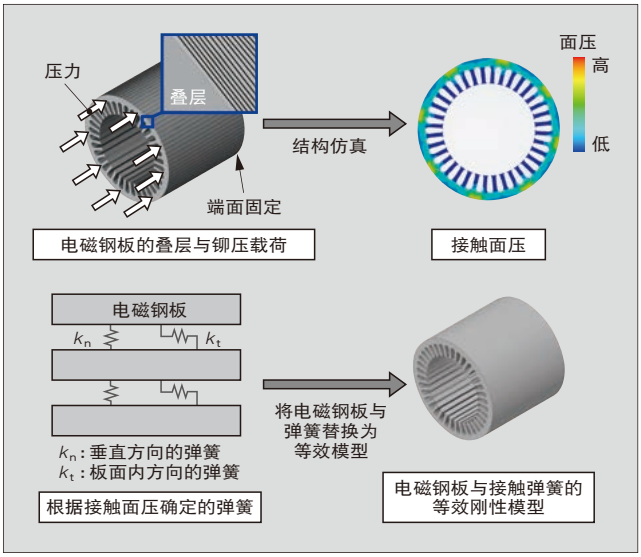


图 3　考虑电磁钢板接触状态的模拟

影响，按如下方式进行建模。

为把握浸渍绝缘漆的实际状况，对定子进行切割并观察其截面，详情如**图 4** 所示。结果，确认了铜线之间或铜线与收放线圈的部分（即线槽）之间存在空隙。为了将此种状态反映到模型中，使用图像处理求出铜线、绝缘漆、空隙的比例后，忽略不传递力的空隙，基于铜线和绝缘漆各自的比例及弹性特性计算弹簧常数，创建了将铜线与绝缘漆一体化的等效模型。

⑶　定子压装状态的再现

最终，定子会压装到被称为定子机座的外框中。定子与定子机座之间产生接触面压，接触面压越高，施加电磁力时定子也越不易变形。但以往将定子与定子机座作为一体处理。对此接触面压的影响，按如下方式进行建模。

与叠层电磁钢板接触状态的模型一样，通过结构仿真求

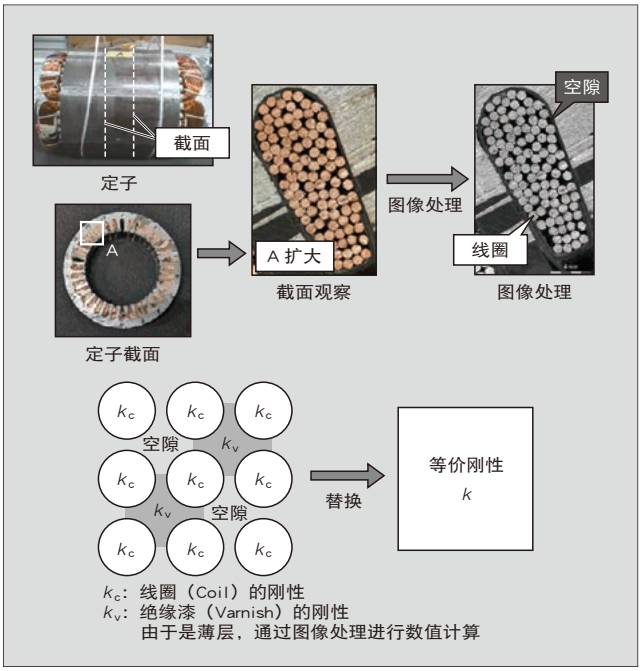


图 4　考虑浸渍绝缘漆的线圈建模

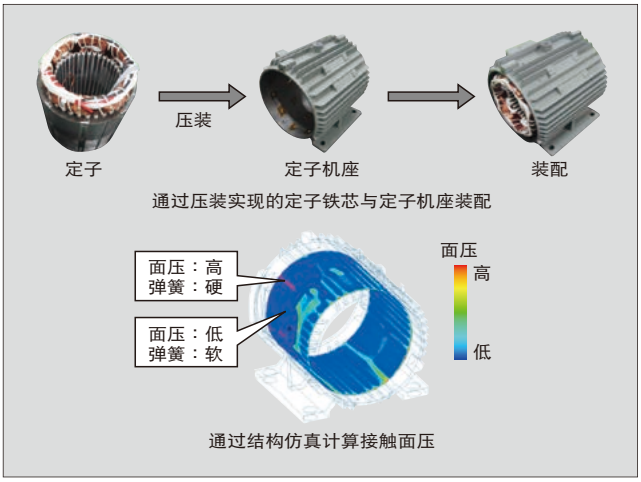


图 5　定子压装的模拟

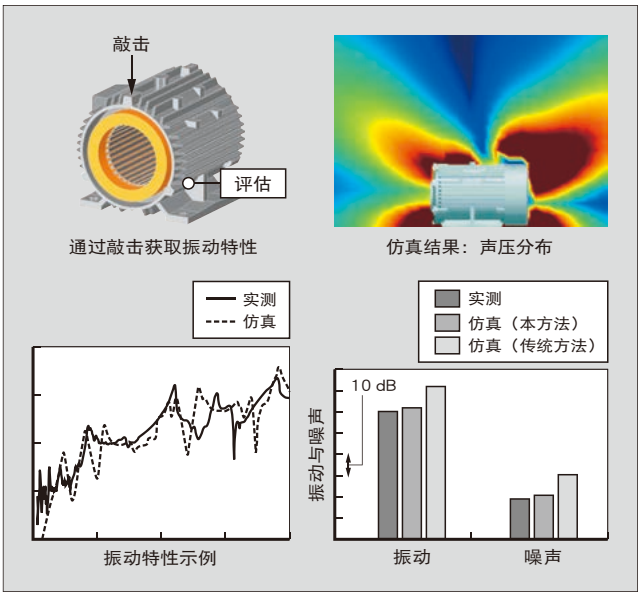


图 6　实测与仿真结果的比较

得压装定子处的接触面压。由**图 5** 所示的计算结果可知，能够再现与定子机座结构相对应的接触面压。通过弹簧模拟此接触面压，创建了定子与定子机座结合时的等效模型。

利用这些等效模型计算振动，并基于该结果通过仿真求得产生的噪声，与实测结果进行比较后，即验证了仿真精度。如**图 6** 所示，在未使用此次等效模型的传统仿真中，振动和噪声的实测值与仿真结果的差异均为 10 dB。与此相比，应用新创建的等效模型的仿真结果，与实测值的差异在 2 dB 以内，实现了预计目标。

4　传播路径仿真的应用事例

以下内容，将介绍在冰柜开发中，为实施有效的降噪对策而应用的传播路径仿真。

4．1　冰柜开发中的课题

用于陈列和销售冰淇淋的冰柜，不仅设置在店铺和设施中，也越来越多地安装在医院、图书馆小卖部等安静场所。因此，对冰柜的降噪要求比以往更高。在冰柜中，内部搭载的冷却单元风扇、压缩机等多个部件都会产生声音。当这些振动传递至机壳时，也可能引发声音。因此，在这种情况下，冰柜的噪声会成为多个声音叠加而成的合成音。此外，根据冰柜的设置环境，不仅存在通过机壳的内部声音、由搭载设备直接辐射的声音，还包括经周围墙壁和地板反射传播的声音等多种传播路径。如果将所有这些影响都反映到模型中，模型的规模会变得非常庞大且难以处理。因此，为实现冰柜降噪，关键课题在于如何确认对噪声影响较大的传播路径。

4．2　为确认影响较大的传播路径而采取的对策

为了确认对噪声影响较大的部位，首先需要把握从声源发出的声音，经由作为噪声对策部位候选的参考点，到达用于评估噪声的评估点的传播路径。具体实现方法，采用了主要成分分析与多元回归分析。主要成分分析是指从大量数据中区分出具有相似特征数据的方法；而多元回归分析则是考察各个特征影响程度的方法。实际测量的噪声数据中，有时会包含非研究对象设备产生的干扰，但使用主要成分分析可以去除干扰特征。通过对该数据应用多元回归分析，开发出了计算各参考点对评估点影响的方法。

使用冰柜的噪声测量数据，验证了此方法的有效性。其评估体系如**图 7** 所示。如**图 7** 所示，冰柜中存在变频器、压缩机、风扇三个声源。因此，在冰柜周围设置了 10 个能检测声源辐射声和绕射的最小限度参考点，分析了声音如何传播至评估点（相当于能听到噪声的人所在位置）。在这种情况下，测量目的为：在参考点①～④可测量到设备直接辐射的声音；在⑤和⑩可测量到侧面绕射的声音（绕射声）；在⑥～⑨则可测量到背面绕射的声音。

使用开发的分析方法评估各参考点影响度的结果如**图 8** 所示。由于参考点②的影响度最大，因此推测出从压缩机发出的辐射声经由参考点②到达评估点点的路径。同样，也推测出从风扇经由参考点④的路径、从风扇经由参考点⑦的绕射声到达评价点的路径，以及从压缩机经由参考点⑧的绕射

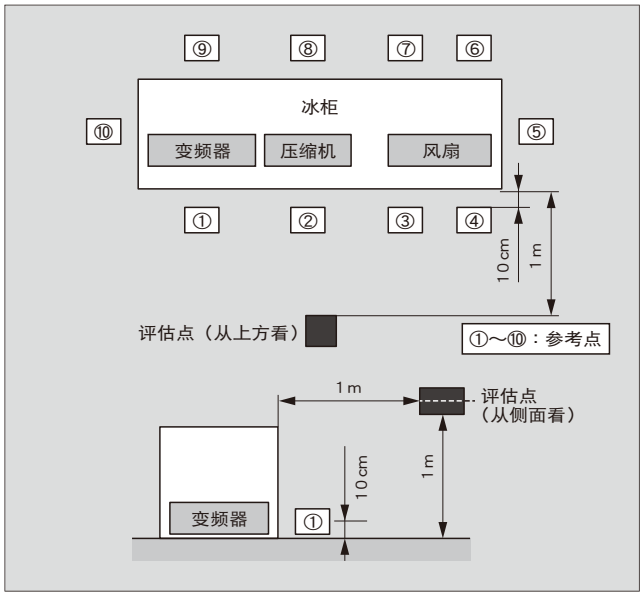


图 7　冰柜的噪声评估点与参考点

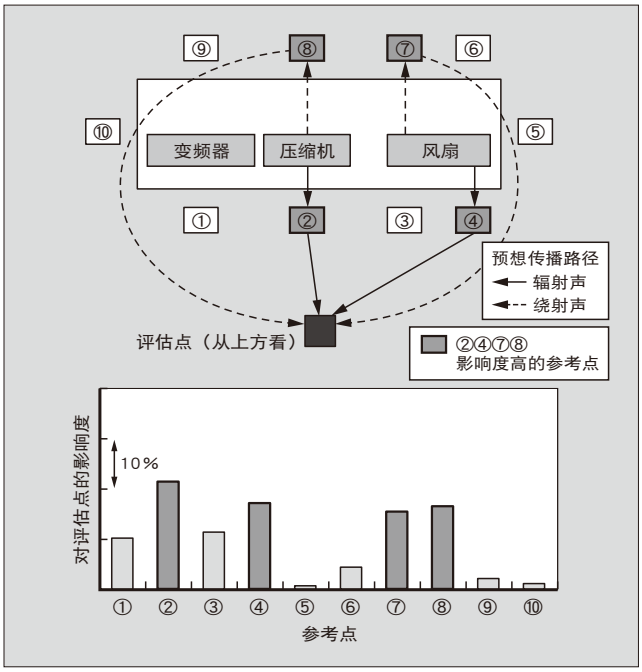


图 8　各参考点影响度的评估结果

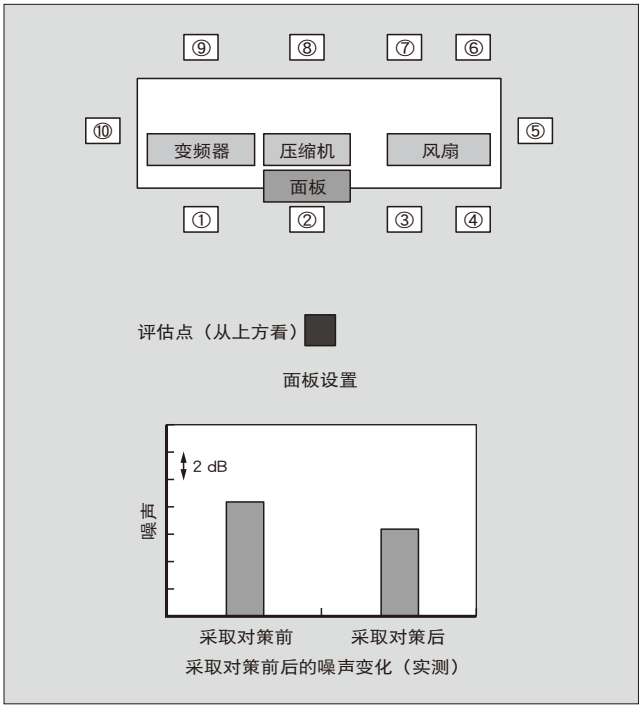


图 9　通过在参考点②设置面板实现的评估点降噪

声到达评估点的路径。

此外，为了确认推测结果的合理性，对参考点②的对策进行了评估。其结果如**图 9** 所示。通过在参考点②前添加面板进行测量，噪声相比未添加面板时降低了 2 dB。由此可知，需实施对策的部位得以确认，并且满足了本次开发所要求的噪声降低效果。

5　后记

为保护生活环境、维持健康，噪声已成为被管制对象。响应客户要求，实现产品降噪，有助于实现可持续发展社会。今后，在推进噪声仿真的同时，将加强用于降噪对策的吸音、隔音、消音等方面的研究，为环境保护做出贡献。

大野　和彦

从事重型电气设备相关的强度、振动分析技术工作。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所数字工程部小组经理。日本振动技术协会会员。

直岛　勇斗

从事变电设备和旋转机相关的电磁场、振动噪声分析技术工作。现就职于富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所数字工程部。

利用骨架推测 AI 的作业识别技术

Task Recognition Technology Using Pose Estimation AI

石河　范明 ISHIKAWA, Noriaki　　**野间　拓耶** NOMA, Takuya　　**铃木　崇大** SUZUKI, Takahiro

在劳动力不足日益严峻的制造现场，要求提升质量管理水平和作业效率。为此，利用 AI 的解决方案正在迅速普及。为应对这一需求，富士电机正在开发一种利用骨架推测 AI 的作业识别技术，旨在提高良品率、改善工艺流程。该技术可通过摄像机拍摄的视频自动识别作业人员的关节位置（关节点），并通过关节点位置与动作进行时序分析，判定作业人员的动作与作业内容。此外，由于能够实时检测作业失误并发出通知，因此可防患于未然，防止产生不良品。

At manufacturing sites facing worsening labor shortages, there is an increasing demand to enhance quality control and improve work efficiency. To address these challenges, AI-based initiatives are rapidly being adopted. In response to this trend, Fuji Electric is developing a task recognition technology that utilizes pose estimation AI to improve yield rates and optimize production processes. This technology automatically detects workers' joint positions from video footage captured by cameras and analyzes the positions and movements of these joint points over time to identify workers' motions and tasks being performed. Furthermore, work errors can be detected and notified in real time, preventing defective products from occurring.

1　引言

在制造现场，劳动力不足日益严峻，要求提升质量管理水平与作业效率。为此，利用人工智能（AI：Artificial Intelligence）实现自动化、提高效率的相关举措正在迅速普及。在以手工作业为主的制造生产线中，富士电机正致力于开发利用骨架推测 AI 的作业识别技术[1]，旨在通过防止作业失误提升良品率。同时，通过识别瓶颈作业与冗余作业来改善工艺流程。本文，将介绍正在开发中的作业识别技术，以及在自有工厂推进该技术应用的举措。

2　作业识别技术概述

作业识别技术，指捕捉作业人员的动作，并从其动作中识别当前正在进行何种作业的技术，在制造生产线上可考虑以下应用。

⑴　应用于提高良品率

实时识别作业，当检测到与预设动作不同的动作时，立即发出通知并敦促修正，从而防患于未然，防止产生不良品。

⑵　应用于提高生产率

通过测量各作业所需时间，识别瓶颈作业与冗余作业，从而改善工艺流程与作业内容。

作业识别技术的代表性方式有两种：一是利用动作捕捉技术识别作业的方式，二是通过分析摄像机拍摄的视频识别作业的方式。

前者，指在作业人员身体上佩戴标记点或传感器，利用红外传感器等捕捉标记点或传感器的动作，并通过分析该动作来识别作业的方式。后者，指使用 AI 技术等分析拍摄的视频或图像，从而判定作业人员动作与作业的方式，其代表性手法为视频分类 AI。在视频分类 AI 中，基于预先学习的作业类别数据，分析作业视频数据的整体内容，从而判定正在进行何种作业。

3　传统作业识别技术中存在的问题

将作业识别技术应用于制造生产线时，存在以下要求。

⑴　实时性

在通过防止作业失误提升良品率时，如果出现与预设动作不同的动作，需要立即通知，因此需要具备实时性。

⑵　识别精度

由于制造生产线中的作业种类多样，因此需要具备高精度、能够准确捕捉复杂动作和细微动作，并对作业加以区分识别。如果识别精度低，则会发生误检，反而可能对作业效率产生负面影响。

⑶　减轻作业人员负担

作业时，需要以不给作业人员造成过度负担的方式运行。

利用动作捕捉技术的方式具有可在三维空间中精准、瞬时追踪作业人员动作的优点。由于实时性高，适用于准确识别动作的细微差异和复杂的作业内容。但同时，其在识别精度与作业人员负担方面存在以下问题。

- 为准确识别动作，必须正确佩戴标记点或传感器。、如果佩戴状态不佳，动作识别精度就会下降。此外，作业过程中如果传感器脱落或偏移，则需要重新佩戴，这会导致作业中断。
- 由于需在身体上佩戴标记点或传感器，因此会给作业人员带来生理和心理负担。

另一方面，利用视频分类 AI 的方式基于摄像机拍摄的视频判定作业内容，无需佩戴标记点或传感器，可以有效解决利用动作捕捉技术方式时存在的问题。但是，视频分类 AI 方式也存在以下问题。

⑷　发生延迟

由于需要收集一定时间的数据后才能通过 AI 判定动

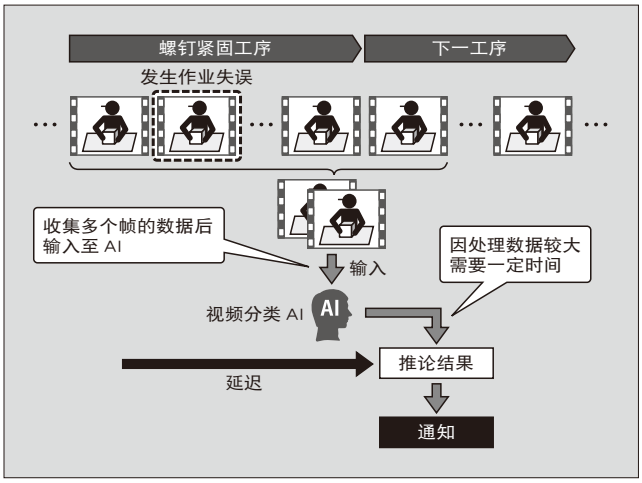


图 1　螺钉紧固工序中应用视频分类 AI 时的延迟

作，因此从作业发生失误的时刻到输入视频分类 AI 存在延迟。此外，由于处理数据量大，输出推理结果耗时，会进一步产生延迟，因此其实时性存在极限。例如，**图 1** 中展示了在螺钉紧固工序中应用视频分类 AI 时的延迟情况。在螺钉紧固工序中，作业人员需要进行一系列操作：准备螺丝刀、从零件箱等中取出指定螺钉、拧紧螺钉，然后才能进入下一工序。在利用视频分类 AI 的方式中，需要将螺钉从开始拧紧到结束的整段视频输入视频分类 AI。因此，需要等到螺钉紧固作业完成后才能输入视频并进行作业推理，推理结果的输出时间将推迟到螺钉紧固工序的下一工序之后。

(b)　识别精度下降

为实现高精度识别，需要数千至数万场景的大量学习数据，数据的收集和准备需要耗费大量时间。此外，如果制造生产线布局发生变更或追加了目标机型，则每次都需要重新收集学习数据，并让视频分类 AI 重新学习。如果在学习时无法获取足够数据，则识别精度会下降，可能发生误检或漏检。此外，如果因布局变更等原因导致拍摄方式发生变化，则需再次收集数据并重新学习。

综上所述，视频分类 AI 方式虽具备解决利用动作捕捉技术方式所存在问题的潜力，但也存在实时性不足以及学习数据准备等新问题。

4　基于骨架推测 AI 的作业识别技术的特点

4.1　开发方式的整体构成

作为解决传统方式问题的技术，富士电机正在开发一种利用骨架推测 AI 的作业识别技术。**图 2** 所示为利用骨架推测 AI 的作业识别技术的处理流程。骨架推测 AI 是一种从摄像机拍摄的输入图像中自动识别作业人员身体关节位置（关节点）的方法，通过对识别出的关节点位置与动作进行时序分析，可判定作业人员的动作与作业内容。

4.2　骨架推测 AI

骨架推测 AI 通过输入摄像机拍摄的视频，推测作业人员的关节点。关节点的推测通过构成视频的每一幅静止画面

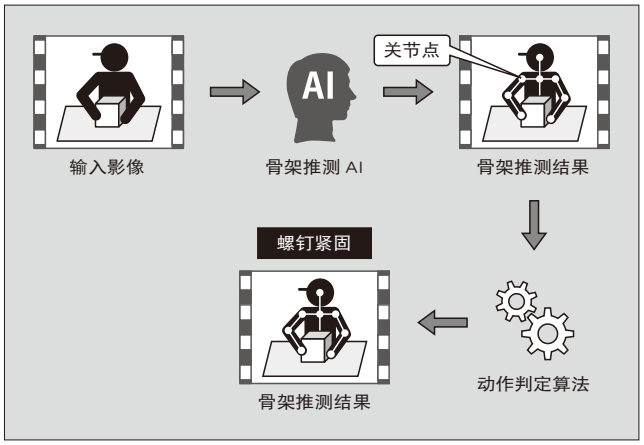


图 2　利用骨架推测 AI 的作业识别技术的处理

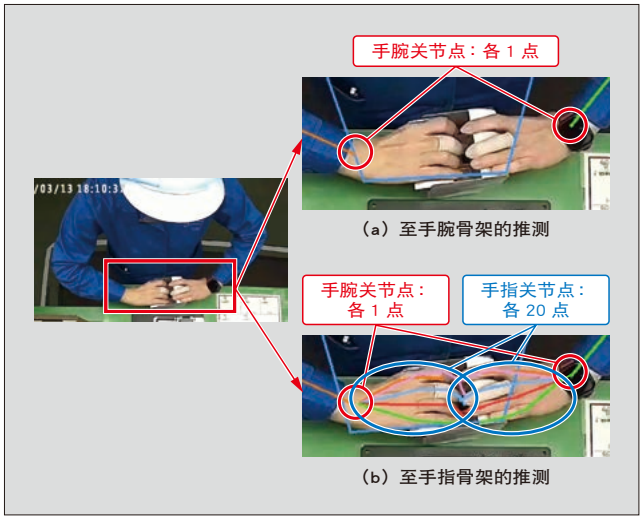


图 3　骨架推测 AI 识别关节点的示例

(帧) 进行，因此可在短时间内完成推测处理。

图 3 所示为骨架推测 AI 识别关节点的示例。如**图 3** (a) 所示，以往多采用仅能识别至手腕关节点的骨架推测 AI；但此次处理的手工组装制造生产线需识别细微的手指动作，因此采用了可检测至手指关节点的骨架推测 AI，详情如**图 3** (b)所示。

此外，骨架推测 AI 基于大量数据对一般人的外观进行骨架结构和动作模式的预学习，因此基本上不需要用于骨架推测的学习数据。即使发生制造生产线布局变更或追加目标机型，由于作业人员外观并无变化，因此无需让骨架推测 AI 进行再学习。但是，如果佩戴头盔、穿着工作服或手套等，会使外观不同于骨架推测 AI 预先学习过的外观，可能导致识别精度下降。但即使在上述情况下，也可使用包含作业人员动作的数百帧左右的数据对骨架推测 AI 进行调整，改善识别精度。

4.3　动作判定算法

动作判定算法利用骨架推测 AI 的信息，判定作业人员当前正在执行的动作。如**图 4** 所示，在该算法中，预先设置存放部件的部件放置区域以及进行组装等作业的作业区域。基于设定的区域与识别出的关节点之间的位置关系、关节点

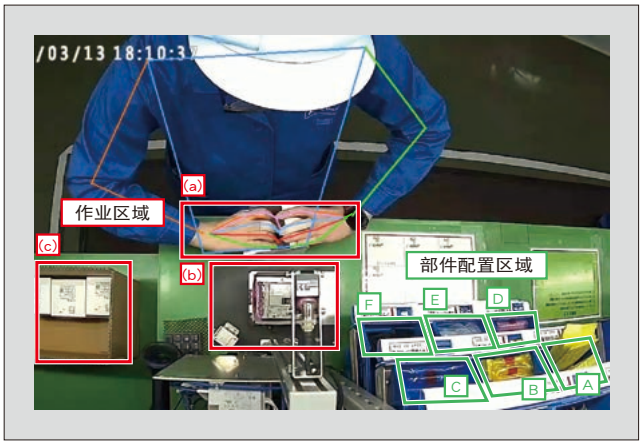


图 4　领域设置示例

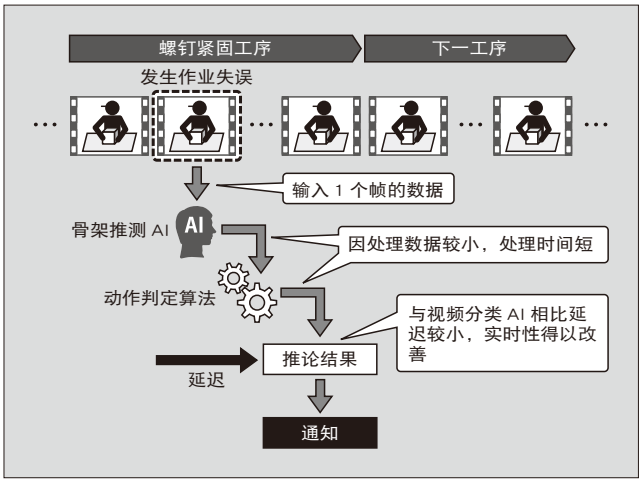


图 5　通过骨架推测 AI 进行作业识别的延迟时间

在各区域间的移动、在区域内的停留时间以及在区域内的关节点的动作，来判定当前进行的作业。

此处，以获取存放在部件放置区域 (A) 中的部件 A，并将其移至作业区域(a)为例，说明作业判定及作业失误的检测。

在获取部件 A 之前，因正在作业区域(a)进行作业，手指的关节点位于作业区域(a)。去取部件 A 时，手指关节点从作业区域(a)移动至部件放置区域(A)。获取部件 A 后，为了在作业区域(a)进行作业，手指关节点再次移动到作业区域(a)。如上所述，手指关节点按作业区域(a)、部件放置区域 (A)、作业区域(a)的顺序移动。当特定关节点按此方式移动时，则判定为已获取部件 A。另一方面，如果错误地从部件放置区域 (B) 获取了部件 B，则手指关节点按作业区域(a)、部件放置区域 (B)、作业区域(a)的顺序移动。发生这种情况时，判定为获取了不同部件，即发生了作业失误。此时，会向作业人员发出通知。

此外，当存在多个作业区域和部件放置区域时，在去取指定部件的过程中，手指关节点有时会经过其他区域。因此，需要判定是在该区域进行了作业，还是仅仅是经过该区域。为此，进行了时间设定。如果手指关节点在区域内停留超过预先设定的时间（例如 5 帧，以 15 fps 采集图像时约为 0.33 秒），则判定为在该区域进行了作业。通过这种方式，可避免将仅通过区域的情况误判。由于动作判定算法是基于规则的处理方式，因此可针对作业时间瞬间完成判定处理。

4. 4　开发方式的效果

图 5 所示为采用所开发的骨架推测 AI 进行作业识别的延迟时间。由于骨架推测 AI 可针对每一帧推测关节点，因此能将视频分类 AI 中从作业失误发生到输入用于判定的视频数据之间的延迟缩至最短。此外，由于动作判定算法基于规则进行处理，因此可针对作业时间瞬间完成判定处理。其结果，与视频分类 AI 相比，从作业失误发生到发出通知的时间可大幅缩短，能够实现实时通知和修正。

另外，由于骨架推测 AI 已学习了基本的骨架结构与动作模式，因此在通常运行中无需追加学习。因此，即使发生制造生产线布局变更或追加目标机型，只要作业人员外观没有变化，仅通过改进动作判定算法即可应对。另外，如果因视角变化等原因导致作业人员外观发生变化、识别精度下降时，通过追加少量数据进行学习，即可维持识别精度。

所以，通过利用骨架推测 AI，可解决传统作业识别技术所存在的问题。同时，还能满足应用于制造生产线时所要求的“实时性”、“识别精度”和“减轻作业人员负担”。

5　应用于提高良品率的作业识别技术

5. 1　应用方法

图 6 所示为将作业识别技术应用于提高良品率的示例。在组装工序、包装工序等由人工完成的作业中，实时检测并通知发生的作业失误，现场修正作业失误，可防患于未然，防止不良品产生。

以往，如**图 6** (a)所示，因作业失误产生的不良品会直接流入下一工序。不良品在后续的外观检查工序、电气特性测试工序等检查工序中被作为不良品检测后，通过从制造现场剔除或返回前序工序进行修正来进行应对。但是，对于在检查工序中难以检测的不良品（例如，外观检查中无法拍摄到的内部缺陷、包装失误等），可能因漏检导致不良品流出。另外，即使是可在检查工序检测出的不良品，在到达检查工序之前无法检测，也会导致返工。

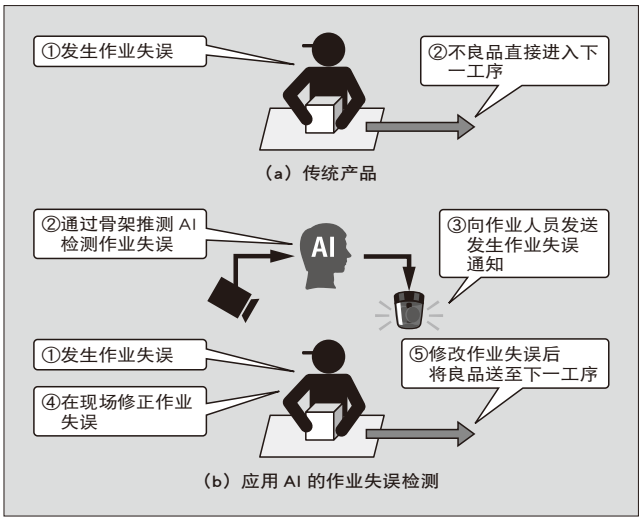


图 6　将作业识别技术应用于提高良品率的示例

然而，通过引入采用骨架推测 AI 的作业识别技术，如**图 6**(b)所示，可在作业失误发生时实时通知作业人员，并能够现场修正作业失误，因此，可以防止不良品流入下一工序。

将作业识别技术应用于提高良品率的效果如下所示。

(1) 防止不良品流出

通过实时检测作业失误并进行现场修正，可防止不良品流入下一工序，从而改善良品率。

(2) 提高作业效率

通过实时失误检测，可将返工作业控制在最小限度，从而缩短产生不良品时的应对时间，降低不良品的报废成本。此外，还可获得下述 3 和 4 的附带效果。

(3) 强化可追溯性

通过保存作业记录，可从问题发生时的作业履历中查明原因，从而改善作业。

(4) 支持教育培训

通过分析作业人员的动作，可改善作业步骤，提高新员工培训效率。

5.2 在组件手工组装线的验证

(1) 系统构成和验证结果

在自有工厂，正以提升良品率为目的，在组件手工组装线推进采用骨架推测 AI 的作业识别技术的应用。**图 7** 所示为在手工组装线的应用概念图。使用多台摄像机拍摄有多名作业人员操作的制造生产线，并将拍摄的视频采集至 AI 服务器。AI 服务器将识别视频中作业人员的作业。当检测到作业失误时，向作业人员实时发出通知。随后，将进行现场修正，从而防止返工及不良品流出。由于需要在同一工序内通知作业失误，因此对作业识别处理时间（AI 服务器上的处理时间）设定了 1 秒以内的目标值。

在手工组装线设置 4 台摄像机收集数据，并使用其录像视频，对能否检测作业失误进行了验证。检测对象从发生次数和重要性的角度出发，选取了“漏拧螺丝”、“漏测试”、“漏装盖”、“漏拆部件”、“错取部件袋”这五种作业失误。此外，还将 20 个作业失误场景和 52 个正常作业场景作为评估对象。**表 1** 所示为手工组装线作业失误检测的评估结果。正常作业的正确率（将未发生作业失误的场景正确判定为无失误）为 92.3%，作业失误的正确率（将发生了作业失误的场景正确判定为有失误）为 95.0%。在与制造现场负责人对该结果进行了讨论后，获得了“有望在制造生产线上应用”的评价。此外，作业识别的处理时间为 0.2 秒，达到了处理时间的目标值。

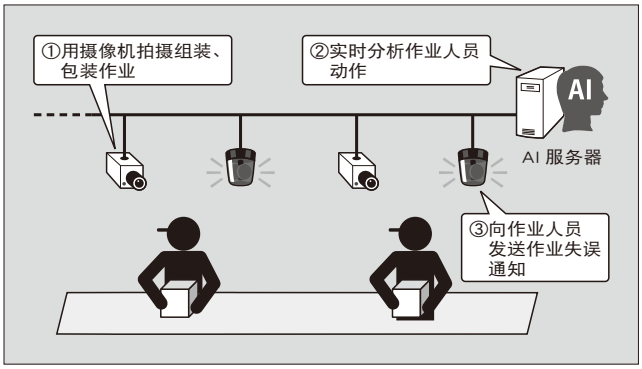


图 7 应用于手工组装线的概念图

表 1 手工组装线作业失误检测的评估结果

作业	内容	正确率（正确数 / 评估数）
正常场景	正常作业	92.3 %（48/52）
异常场景	漏拧螺丝	100.0 %（5/5）
	漏测试	100.0 %（3/3）
	漏装盖	83.3 %（5/6）
	漏拆部件	100.0 %（3/3）
	错取部件袋	100.0 %（3/3）
异常场景合计		95.0 %（19/20）

(2) 今后的验证

今后，计划推进以下验证。

(a) 在线评估

此次，采用了录像视频评估。今后，计划将**图 7** 所示的系统应用于现场，推进在线评估，并针对延迟时间等在运行化过程中出现的课题进行识别与改善。

(b) 追加目标作业与目标机型

本次录像视频验证针对特定机型的五种作业失误进行了评估。手工组装线中存在多种机型流动的情况，且作业内容因机型而异。因此，计划扩充需进行作业识别的作业以及适用的目标机型。

(c) 应用于工序改进

目前的使用目的，是通过作业失误检测提升良品率。但今后计划通过可视化各项作业所需时间，探讨将其应用于**第6章**介绍的工序改善。

6 作业识别技术应用于工序改善

图 8 所示为工序改善的流程。在作业分析中，通过测量各项作业所需时间，分析瓶颈作业与冗余作业（**图 8** ①）。随后，在工序设计时，设计已改善上述内容的工序流程（**图 8** ②）。最后，将改善后的工序流程应用于现场（**图 8** ③）。通过反复执行作业分析、工序设计、现场应用的循环，推进改善改善。

图 9 所示为作业识别技术在作业分析中的应用方法。以往，如**图 9**(a)所示，由工艺设计人员通过目视确认作业人员的作业情况并进行测量，完成作业分析。该方法需要持续进行确认，对工序设计人员而言负担较重。此外，由于工艺

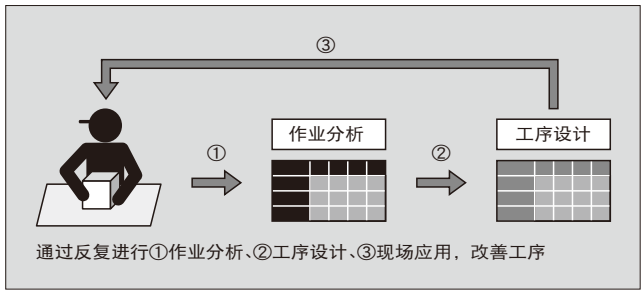


图 8 工序改善流程

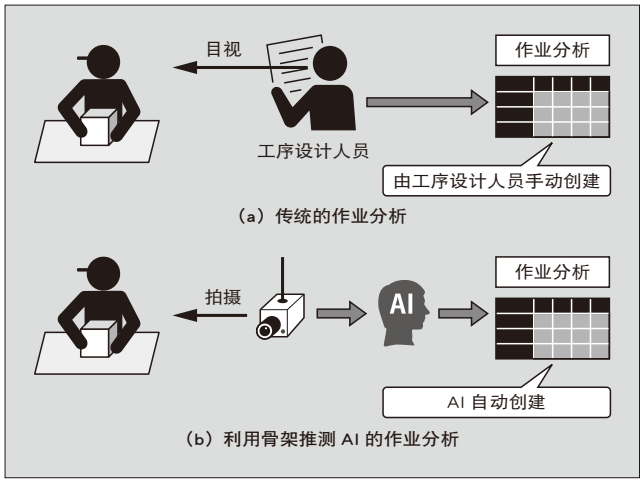


图 9　用于作业分析的作业识别技术应用方法

设计人员一次只能观察一名作业人员，可收集的数据量有限。而且，由于不同的工序设计人员对作业开始和结束的判断时机存在差异，导致作业时间的测量结果出现偏差，会出现无法进行准确作业分析的情况。另一方面，在**图 9**(b)所示的采用骨架推测 AI 的方法中，通过摄像机拍摄作业人员的作业，由骨架推测 AI 推断姿势与动作，从而自动计算各项作业所需时间并进行作业分析。由于可以设置多台摄像机，并基于统一标准获取大量数据，因此能够更快、更准的完成作业分析。将作业识别技术应用于改善工序的效果如下所示。

⑴　提高数据收集效率

通过设置多台摄像机，可同时记录、分析多名作业人员的动作，因此能在更短时间内收集大量数据

⑵　提高分析精度

由于 AI 基于固定标准判定作业开始与结束，测量结果无偏差，且可分析多名作业人员的数据，因此能进行正确的作业分析

⑶　确认瓶颈

基于作业时间数据，可明确确认工序中耗时作业与冗余动作

⑷　改善工序设计

利用收集数据，可进行高效的工序设计，并优化作业流程

⑸　减轻作业负担

无需传统的目视观察，可大幅减轻工序设计人员的负担

⑹　持续改善

可随时收集数据并进行作业分析，因此能够持续实施工序改善

7　后记

本文介绍了面向制造现场、实时进行作业监视与作业分析自动化、利用骨架推测 AI 的作业识别技术。目前，正在自有工厂推进概念实证（PoC：Proof of Concept），并对其效果进行验证。该技术目前面向公司内部，但今后也在考虑向公司外部拓展其应用。

今后，富士电机将加速 AI 基础技术的开发与应用，为解决劳动力不足、提升质量管理水平、提高作业效率做出贡献。

参考文献

⑴　野間拓耶ほか. “製造現場における骨格推定を用いた作業ミス検知技術の検討”. 電気学会全国大会, 2025, 4-148.

石河　范明

从事图像识别技术的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所 AI 研究所经理。博士（工学），电气学会会员。

野间　拓耶

从事图像识别技术的研究开发。现就职于富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所 AI 研究部。

铃木　崇大

从事图像识别技术的研究开发。现就职于富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所 AI 研究部。

回收树脂与植物源树脂的产品应用技术

Product Application Technologies for Recycled and Plant-Based Resins

长谷川 知贵 HASEGAWA, Tomoki　　西泽 祐里 NISHIZAWA, Yuri　　山城 启辅 YAMASHIRO, Keisuke

为实现碳中和与循环型经济，产业电气设备也需要采用回收树脂或植物源树脂。但是，这些环保树脂在物性和长期可靠性方面劣于石油源树脂。为解决这个问题，针对回收树脂，通过阐明其老化原因，并添加用于抑制老化的水分解稳定剂和自由基捕获剂，实现了超过产品寿命目标（10 年）的约 15 年寿命。此外，针对植物源树脂，通过使用相溶剂提升其与原生料的相容性，确认其可维持与原生料同等的机械强度。

To realize carbon neutrality and a circular economy, recycled resins and plant-based resins must also be adopted for industrial electric equipment. However, in terms of their physical properties and long-term reliability, these eco-friendly resins are inferior to petroleum-based resins. To address this problem, Fuji Electric identified the degradation factors in recycled resin and added hydrolysis stabilizers and radical scavengers to inhibit degradation, resulting in a product lifetime of approximately 15 years, surpassing the target of 10 years. As for plant-based resins, we confirmed that using compatibilizers to improve compatibility with virgin materials enables mechanical strength equivalent to that of virgin materials to be maintained.

1 引言

近年来，在全球范围内，面向碳中和与循环型经济的举措正在加速。以发达国家为中心，政策的参与与法律法规的完善正在快速推进。对产品而言，除了降低制造、使用和废弃过程中的 CO_2 排放量外，还被要求通过采用可持续材料来减少废弃物。就具体材料而言，必须采用将废弃物或已使用产品进行资源循环的回收树脂，以及以植物等可再生有机资源为原料的植物源树脂。本文中，将旨在减轻地球环境负荷的这些树脂统称为“环保树脂”。

在日本国内，以容器包装和家电为对象，一直在促进环保树脂的采用。截至 2030 年，日本设定了将温室气体在 2013 年度基础上减排 46% 的目标。为实现该目标，预计在产业电气设备领域也将要求采用环保树脂。产业电气设备对动作条件苛刻、长期耐久性有相应要求，因此仅采用通用树脂可能还不够充分。由熟悉动作条件、环境等产品特有要求的设备制造商来推进材料性能改进、开发应用技术至关重要。

本文，将对环保树脂在产业电气设备应用中的课题与解决方案进行介绍。

2 与资源循环相关的政策动向

在积极开展先进举措的欧洲，已于 2024 年 7 月施行了产品的环境可持续性要求的生态设计法规。该法规适用于除汽车外的所有产品。除了能源性能，还规定了耐久性、回收树脂使用量以及全生命周期碳足迹的削减。作为数字信息，这些内容必须向客户强制披露，以支持其做出环保选择。到 2030 年，变压器、电机及可变速装置将被纳入适用范围，向欧洲市场投放产品时必须对此采取应对措施。受此国际动向影响，日本也于 2025 年 2 月在内阁会议上通过了《资源有效利用促进法》的修订案，其中加入了强制使用回收材料的规定。伴随这些政策的推进，在产业电气设备领域，采用环保树脂也变得不可或缺。

3 环保树脂采用中存在的课题

富士电机制造的产业电气设备通常在高温、多湿、紫外线、高电压等严苛环境中使用。为了在上述环境下也能确保安全使用，材料方面一直采用兼具强度、耐热性、绝缘性以及长期可靠性的石油源树脂。相比之下，环保树脂由于杂质混入、再生时的热、机械应力、原料化学结构不均匀等原因，在物性和长期可靠性方面劣于石油源树脂。

图 1 所示为环保树脂的采用流程。回收材料大致可分为再生料和消费后回收（PCR：Post-Consumer Recycled）材料。以下内容，将介绍这些材料的缺点以及在产业电气设备中采用时存在的课题。

再生料是指将成型工序中产生的浇口料、流道料等边角料粉碎后，作为成型树脂与未使用材料（原生料）混合并再利用的材料。由于是边角料，供应量有限，但再生料与原生

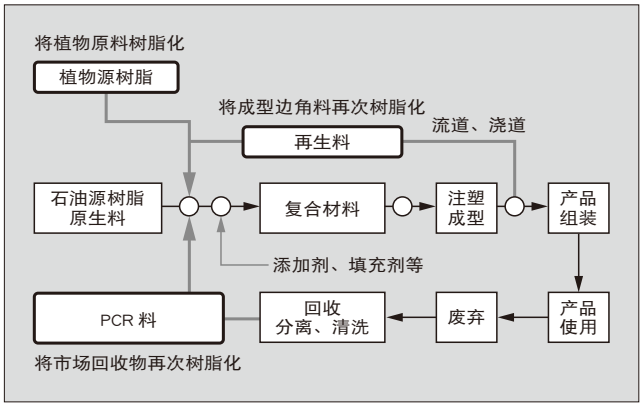


图 1　环保树脂的采用流程

料组成相同，因此可相对容易地再生利用。然而，因反复承受粉碎时的剪切力和成型时的热历程，材料会发生老化，初始耐热性可能低于原生料。特别是玻璃化转变温度 T_g 的降低，会影响产品在使用环境下的性能和可靠性。因此，为了在产业电气设备中采用再生料，需配比原生料至即使反复承受再生过程中的剪切力和热历程，T_g 也不降低的水平。

另一方面，PCR 材是指回收消费者使用后的产品并加以再利用的材料。为了提高回收树脂的配比率，更有效地降低环境负荷，需要使用 PCR 材。PCR 材与再生料类似，除了受粉碎时剪切力和热历程的影响外，还存在分离回收时混入金属异物的风险，以及原产品中所含添加剂成分残留等杂质混入的可能性。其结果，在高温高湿等严苛环境下，与原生料相比，机械强度下降更快，容易导致产品故障。为了在产业电气设备中采用 PCR 材，需要设计出能够抑制机械强度可靠性下降、维持与原生料同等寿命的材料配比方案。

植物源树脂由于原料与石油源树脂不同，化学结构也存在很大差异。由于化学结构不同，两种材料间的相容性也可能会降低。所谓相容性，指不同材料之间混合均匀并一体化的程度。与石油源树脂混合使用时，由于无法均匀混合，可能导致强度和耐热性低于原生料。为此，需要进行材料配比设计，从而实现均匀混合。

4　面向提升环保树脂物性、可靠性的配比设计

4.1　针对再生料耐热性下降的对策

富士电机在低压变频器等电力电子设备的机壳中，大量采用了对耐热性、绝缘性、阻燃性要求较高的改性聚苯醚树脂。以将该树脂的再生料 T_g 提升至与原生料同等水平为目标，进行了配比设计。

首先，调查了将材料作为再生料再利用时 T_g 下降的原因。再生料试样通过以下方式制备：使用原生料经注塑成型制成哑铃型试验片，随后用粉碎机将其精细粉碎。将再生料按既定配比率与原生料混合，对重新成型后的试验片通过热机械分析法评估 T_g，结果确认：T_g 随再生料配比率升高而下降，当配比率为 33 wt% 时，T_g 下降 16 ℃。为调查下降原因，假定化学结构发生变化，通过凝胶渗透色谱法测定了重均分子量。结果如**表 1** 所示。再生料的配比率越高，重均分子量越低，推测是由于作为基材树脂的改性聚苯醚发生分子链断裂这一老化现象，导致了耐热性下降。

为确定发生分子链断裂的原因，通过傅里叶变换红外光谱法分析了化学键的变化。分子链产生断裂的机理如**图 2** 所示。经确认可知，在再生料中，作为阻燃剂添加的有机磷酸酯化合物发生了水解。有机磷酸酯化合物水解后会生成有机磷酸，树脂将暴露于酸性环境。同时，由于成型时环境温度

表 1　再生料的 T_g 和重均分子量

再生料配比率	T_g	相对于原生料的重均分子量减少率
0wt%（原生料）	128 ℃	0%
18wt%	118 ℃	−7%
33wt%	112 ℃	−12%

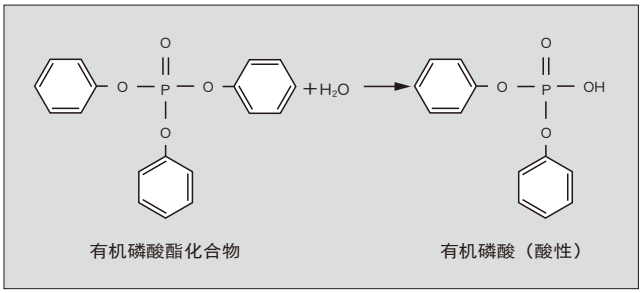


图 2　分子链产生断裂的机理

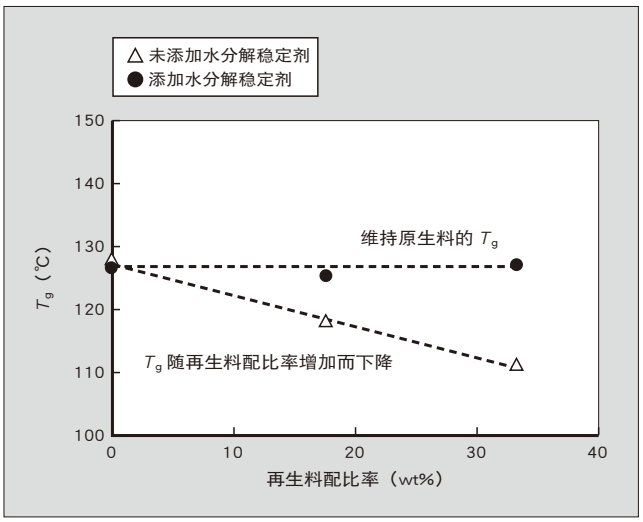


图 3　添加水分解稳定剂的再生料的 T_g 测量结果

高达约 250 ℃，促进了聚苯醚分子的分解，推测其会发生低分子化。

基于上述发现，作为面向防止 T_g 下降的配比设计，探讨了通过添加剂配比进行改善的方案。具体而言，配比了具有抑制有机磷酸酯化合物水解效果的水分解稳定剂，并验证了其效果。

图 3 所示为添加水分解稳定剂的再生料的 T_g 测量结果。T_g 的下降得到抑制，实现了与原生料同等的 T_g。今后，富士电机将推进在模拟产品使用环境条件下，对所开发配比能否长期维持耐热性进行可靠性评估。

4.2　提升 PCR 材的可靠性

聚碳酸酯是一种非晶态通用工程塑料，广泛应用于富士电机的产品。例如，要求具有良好的耐冲击性、透明性、耐热性的智能电表机壳、自动售货机显示屏、折页门等。以该聚碳酸酯为对象，为提升 PCR 材在高温高湿环境下机械强度的可靠性，进行了配比设计。配比设计目标为达到与原生料同等的 10 年以上寿命，并以在 25 ℃、50%RH 温湿度环境下，机械强度降至初始值 50% 以下的时间作为寿命定义。

作为试样，从市售的聚碳酸酯 PCR 材中，选取了初始弯曲强度、夏比冲击强度、T_g 与原生料同等的材料。为把握强度的可靠性，评估了暴露于温湿度环境时弯曲强度经时变化的情况。通过注塑成型制作哑铃型试验片，在 55 ℃、90%RH（相对湿度）环境下进行了加速试验，将试样暴露 1500 小时后测量其弯曲强度。经过结果确认，与原生料相

比，PCR 材的弯曲强度下降至一半以下。

进行寿命预测时，采用了可数值化表达温度与湿度影响的绝对水蒸气压力模型[1]。该模型将温度与湿度对材料老化速度的影响，量化为空气中的水蒸气含量。基于加速试验数据，推测在 25℃、50%RH 的产品运行环境条件下，原生料寿命约为 22 年，而 PCR 材寿命约为 7 年。显然，未达到 10 年的目标寿命。

为了从化学结构变化角度了解寿命缩短的原因，使用液相高速色谱法分离树脂成分后，通过傅里叶变换红外光谱法分析了各成分的化学键变化。根据分析结果得出的 PCR 材老化机理概要如**图 4** 所示。结果显示，PCR 材中含有溴系阻燃剂的残留物，可能来源于再生前的回收原料。据推测，因成型时的加热导致溴系阻燃剂分解，生成高反应活性的自由基分子，进而引发了聚碳酸酯的分子链断裂。

基于 PCR 材的老化因素，探讨了在高温高湿环境下实现强度长寿命化的方案。具体而言，考虑通过在 PCR 材中配比具有抗氧化作用的自由基捕获剂，来捕获溴系阻燃剂产生的自由基成分，从而阻止聚碳酸酯的分解进程。为验证其效果，进行了加速试验：将添加了自由基捕获剂的 PCR 材试验片置于 55℃、90%RH 的温湿度环境中暴露 1500 小时，测量其弯曲强度相对于初始值的保持率。**图 5** 所示为温湿度加速环境下弯曲强度保持率的经时变化情况。通过配比自由基捕获剂，有效抑制了暴露时间引起的弯曲强度保持率下降。基于加速试验数据，利用绝对水蒸气压力模型推测在 25℃、50%RH 条件下的寿命，确认通过添加自由基捕获剂，寿命可达约 15 年，满足了产品的寿命目标（10 年以上）。今后，为了应用于实机，将对开发的配比方案推进采用实际产品形状（如机壳）的试制以及长期可靠性评估。

4.3　植物源树脂与原生料的混合技术

图 6 所示为聚碳酸酯中传统石油源树脂与植物源树脂的化学结构。由于原料不同，两者的化学结构存在很大差异。植物源树脂的机械强度和耐热性较差，因此在产品应用时需要与原生料混合使用。然而，由于植物源树脂的分子骨架中

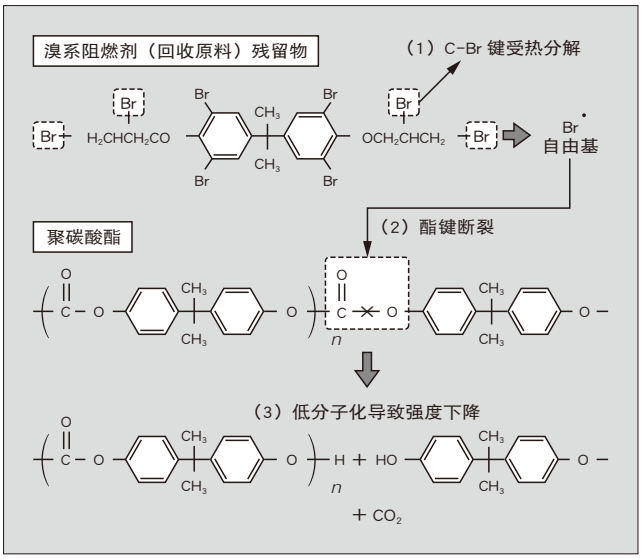


图 4　PCR 材老化机理概要

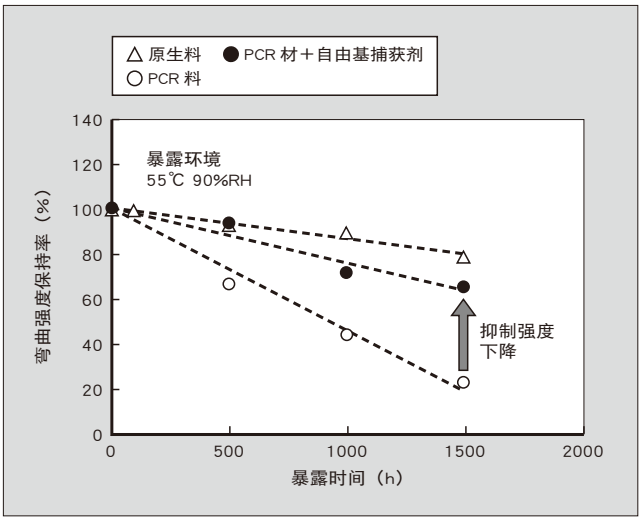


图 5　温湿度加速环境下弯曲强度保持率的经时变化情况

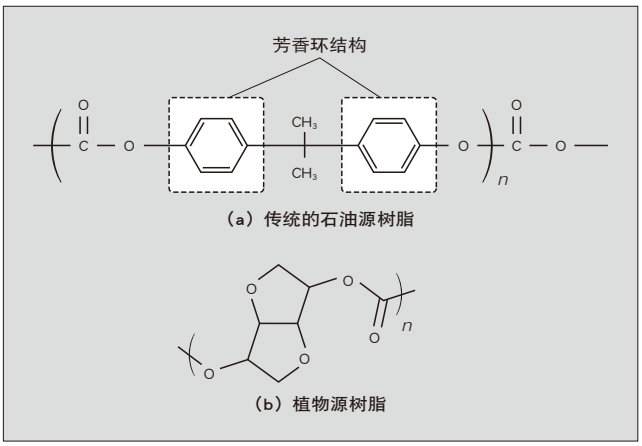


图 6　聚碳酸酯中传统石油源树脂与植物源树脂的化学结构

不含石油源树脂化学结构中含有的“芳香环结构”，在与石油源树脂混合使用时，可能无法均匀混合，进而导致强度和耐热性低于原生料。

在此，以聚碳酸酯为对象，为了使植物源树脂与传统石油源树脂的原生料均匀混合，并维持与纯原生树脂同等的机械强度，进行了配比设计。首先，为把握两种树脂混合成型时强度下降的程度，改变植物源树脂的配比率进行混合成型，并测量其初始弯曲强度。其结果显示，与原生料单体的强度相比，当植物源树脂配比率为 50 wt% 时，强度下降约 12%；70 wt% 时，下降约 23%，由此推测两种树脂未能均匀混合。为了使两种材料实现均匀混合，需要提升两种材料间的相容性。具体提升方式为，添加调节相容性的相溶剂。在选定相溶剂时，采用了汉森溶解度参数（HSP：Hansen Solubility Parameters）作为指标[2]。HSP 是一种定量评估特定物质在其他物质中溶解难易度的指标，广泛应用于材料科学与化学工程领域。HSP 将溶剂与溶质间的相互作用分解为三个不同要素来表示：非极性分子间的伦敦色散力、极性分子间的偶极 – 偶极相互作用以及氢键相互作用。特别是在涂料、粘合剂、油漆等领域，可用于预测溶解性与相容性。HSP 的定义如**图 7** 所示。

对于原生料、植物源树脂和相溶剂，通过测量与分析

$$\delta t = \left(\frac{\Delta E^V}{V}\right) = \left(\frac{\Delta E_d{}^V}{V} + \frac{\Delta E_p{}^V}{V} + \frac{\Delta E_h{}^V}{V}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

（a）HSP

$$\Delta \mathrm{HSP}\left[(\mathrm{J/cm^3})^{1/2}\right] = \left\{4(\delta_{d1}-\delta_{d2})^2 + (\delta_{p1}-\delta_{p2})^2 + (\delta_{h1}-\delta_{h2})^2\right\}^{\frac{1}{2}}$$

ΔHSP 值越低，两种材料的相容性越高。

（b）两种材料间的 HSP 差值（ΔHSP）

δ：溶解度参数 [(J/cm³)$^{1/2}$]
ΔEv：摩尔蒸发能 [J/mol]
V：摩尔体积 [cm³/mol]
t：总和
d：London 分散力
p：偶极间力
h：氢键力

图 7　HSP 的定义

求得各自的 HSP 值，并导出了**表 2** 所示的各材料间的 HSP 差值 ΔHSP。从图中可知，ΔHSP 越小，两种材料的相容性越高。选定的相溶剂与原生料、植物源树脂之间的 ΔHSP，相比原生料与植物源材料之间的 ΔHSP 降低了约 1/2。由此确认，通过添加相溶剂，可以提升原生料与植物源树脂之间的相容性。

表 2　材料间 HSP 值的差

材料 A	材料 B	A-B 材料间 ΔHSP
原生料	植物源材料	6.9
	相溶剂	3.1
植物源材料		3.9

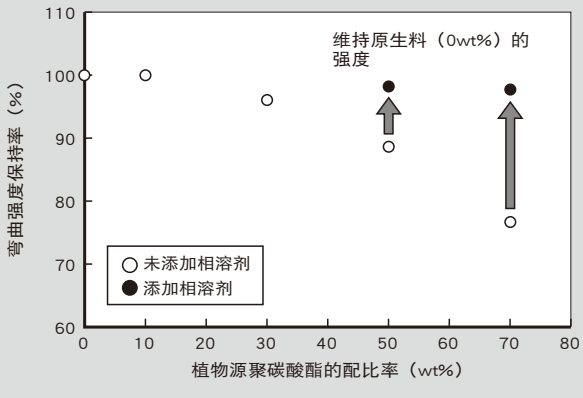


图 8　植物源树脂配比率与弯曲强度保持率的关系

为了验证相溶剂配比的效果，在原生料与植物源材料的混合物中配比选定的相溶剂，并评估其弯曲强度保持率。其结果如**图 8** 所示，即使植物源树脂配比达到 50、70 wt%，其强度保持率仍约为 98%，基本维持了与原生料同等的强度。

对于耐热性下降问题，也认为其原因是未能均匀混合。预计通过此次选定的相溶剂配比，有望改善此问题，目前正在推进耐热性评估。

5　后记

本文聚焦于回收树脂及植物源树脂在产业电气设备中的应用技术，介绍了为提升上述树脂相比于原生料较差的耐热性与机械强度可靠性而进行的配比设计。今后，在推进将这些树脂材料应用于实际产品的同时，也将拓展其在其他产品中的应用，以期持续为环境保护做出贡献。

参考文献

⑴　大日方浩二. 半導体デバイスの信頼性基礎講座（6）：半導体デバイスの信頼性試験（信頼性基礎講座）. 日本信頼性学会誌 信頼性. 2008, vol.30, no.1, pp.77-80.

⑵　Charles M, Hansen. The three dimensional solubility parameter and solvent diffusion coefficient: Their importance in surface coating formulation. Danish Technical Press, 1967, 104p.

长谷川 知贵
从事产业电气设备树脂材料技术的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部尖端技术研究所基础技术研究中心绝缘基础研究部经理。

西泽　祐里
从事产业电气设备树脂材料技术的研究开发。现就职于富士电机株式会社技术开发本部尖端技术研究所基础技术研究中心绝缘基础研究部。高分子学会会员、电气学会会员。

山城　启辅
从事功率半导体、变电设备的电气绝缘和材料技术、放电应用技术的开发。现为富士电机株式会社技术开发本部尖端技术研究所基础技术研究中心绝缘基础研究部部长。电气学会会员。

树脂部件耐紫外线、温度、湿度的加速试验技术

Accelerated Testing Technology for Evaluating the Effect of Ultraviolet Rays, Temperature and Humidity on Resin Parts

柳瀬　博雅 YANASE, Hironori　　**西泽　祐里** NISHIZAWA, Yuri　　**山城　启辅** YAMASHIRO, Keisuke

室外型设备的树脂部件，会因紫外线、温度、湿度等老化因素而发生老化。因此，要确保其可靠性，耐候性评估至关重要。为了解决传统加速耐候试验（SWOM、XWOM）中存在的课题，富士电机开发了可分别控制紫外线、温度、湿度的恒温恒湿紫外线照射试验机。以聚碳酸酯为对象，对其黄变度、傅里叶变换红外吸收光谱、弯曲强度进行了比较。结果证实，相较于SWOM 试验和 XWOM 试验，可大幅缩短试验时间。同时确认，其黄变、分子量降低、强度保持率变化等结构变化也能得到再现。

Since resin parts used in outdoor equipment degrade due to factors such as ultraviolet rays, temperature and humidity, it is important to evaluate their weather resistance to ensure their reliability. To solve the problems associated with conventional accelerated weathering tests (SWOM, XWOM), Fuji Electric has developed a constant temperature and humidity ultraviolet irradiation tester capable of controlling ultraviolet rays, temperature and humidity separately. By comparing changes in the yellow index, Fourier transform infrared absorption spectroscopy and flexural strength in polycarbonate, we verified that testing times can be drastically reduced for SWOM tests and XWOM tests. We also confirmed the reproducibility of the same structural changes, such as yellowing, reductions in molecular weight and changes in the strength retention rate.

1　引言

用于室外设备的树脂部件，主要因日光（紫外线）、空气中的氧气、温度、湿度、雨雪等室外环境因素的作用而发生变色、强度下降。因此，在产品开发阶段，基于室外使用条件评估树脂部件的耐候性、验证产品的可靠性至关重要。此类树脂部件耐候性的评估，以往需要几个月的时间，导致开发周期延长。因此，需要缩短试验时间。为此，富士电机开发了一种可加快树脂部件耐候性评估、缩短产品开发周期的加速试验技术。

本文，将对传统加速试验机的现状与课题、所开发加速试验机的概要以及加速验证结果进行介绍。

2　加速试验机的现状与课题

传统的耐候性评估采用加速耐候试验机，该设备在通过模拟太阳光光谱分布的人工光源进行照射的同时，还能调节温度与水分。最初，采用了将产品直接置于室外环境评估其老化状况的室外暴露试验。然而，除了暴露时期和地区差异外，近年来因全球变暖与气候变化的加剧，试验难以获得理想的再现性[1]。因此，可统一确保再现性与加速性的加速耐候试验机得以普及。目前，作为室外环境设置设备及材料耐候性评估的方法被广泛应用。此类加速耐候试验机，根据光源的不同，分为日光型碳弧灯加速耐候性（SWOM）试验机与氙弧灯加速耐候性（XWOM）试验机。一直以来，SWOM 试验机用于汽车、涂料等领域，积累了丰富的数据。具体而言，与室外暴露相比，从紫外线强度判断，可获得约 1.3 倍的加速性。与之相比，XWOM 试验机可具备约 3 倍的加速性，并且能在紫外线波段照射更接近太阳光光谱分布的光，因此目前 XWOM 试验机已成为主流[2]。

图 1 所示为 SWOM 试验机试验槽的示例[3]。试验槽的构成是：中央部分为采用日光型碳弧灯的光源部，发光部周边设有可旋转的样品架，样品架上放置了试验片和用于喷洒水雾的喷射喷嘴。试验槽内部的温湿度可进行调节，通过监视带有传感器的黑色不锈钢板（黑板：BP）的温度来控制试验片温度。通过运行该试验槽，进行加速耐候试验。XWOM 试验机的试验槽与 SWOM 试验机大致结构相同。

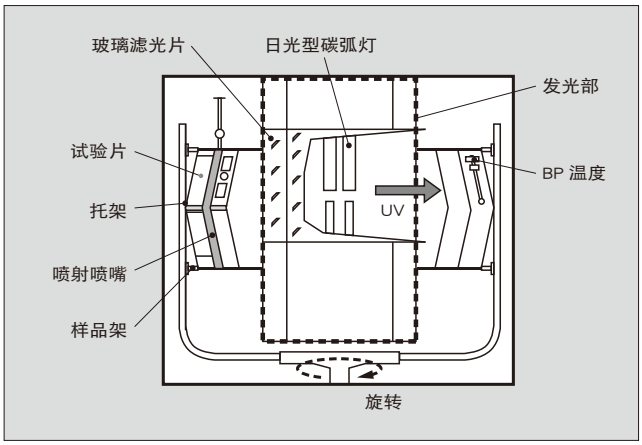


图 1　SWOM 试验机的试验槽示例

此类传统型加速耐候试验机如果要进一步提升加速性，存在以下课题[4][5]。

⑴　紫外线照度课题

在室外环境，对树脂材料而言，最大的老化因素是紫外线（波长 300～400 nm）。根据光源特性，SWOM 试验的照度仅能提升至太阳光紫外线强度（60 W/m^2）的约 1.3 倍（78.5 W/m^2），XWOM 试验也仅能提升至太阳光的 3 倍（180 W/m^2）。因此，传统型加速耐候试验机存在照度极限。要提高加速性，需要能照射更高强度紫外线的光源。

⑵　试验片温度课题

通常，受紫外线或太阳光照射的试验片表面温度与周围

环境温度不同。目前，已知试验片表面温度与环境温度的差异受光的照度、试验片颜色等因素影响。传统的加速耐候试验机虽然可以通过黑板温度控制试验片温度，但在 XWOM 试验中，以 60 W/m^2（波长 300～400 nm）照射白色试验片时，黑板温度与白色试验片表面温度之差约为 15 ℃。此外，当以 180 W/m^2（波长 300～400 nm）照射时，黑板温度与试验槽内温度会产生 30 ℃的差异。其原因在于，因温度上升引起的红外线吸收难易度会因黑板与试验片颜色的不同而出现差异。为避免老化加速程度受光源强度或试验片颜色影响，需要将试验片调节至恒定温度。

3　解决上述课题的新型加速试验机

针对能够以高再现性实施耐候性评估的传统方法，此次开发了一种加速性得以提升的加速试验机，恒温恒湿紫外线照射试验机（THC-UIE：Temperature Humidity Controlled Ultraviolet-Ray Irradiation Equipment）。为解决**第2章**中提及的提升加速性的课题，本试验机采用了可分别控制紫外线照度与试验片表面温度的方式。

图 2 所示为 THC-UIE 的构成。本试验机采用在放置试验片的试验槽外部设置 UV 照射装置的结构。

光源采用了超高压汞灯，可照射出传统加速耐候试验机所用氙灯 10 倍以上紫外线。此外，该灯几乎不产生红外线。因此，即使提高照度，由红外线引起的试验片表面温度上升也微乎其微。但是，由于该灯会发出太阳光无法到达地面的短波紫外线，因此采用了光学滤镜（短波截止滤镜）将其滤除，并最终获得了**图 3** 所示的光谱分布，使试验片表面免受短波紫外线的影响。

试验片温度控制利用了恒温恒湿槽，实现对温度与湿度的控制。为保持光源的光谱分布不变，安装了石英玻璃制成的窗口，光线通过该窗口照射试验片。**图 4** 所示为白色试验片在 XWOM（60 W/m^2、300～400 nm）与 THC-UIE（1800 W/m^2、300～400 nm）光照下黑板温度与试验片表面温度之差。XWOM 试验中，试验片表面温差约为 15 ℃[6]，而 THC-UIE 可将温差降至 4～5 ℃范围。

表 1 所示为本试验机与传统加速试验机（XWOM・SWOM 试验机）在照度与温度方面的范围与特点。通过上述改进可知，本加速试验机与传统试验机相比，可实现 10 倍以上的照度提升。同时，还能控制试验条件，使光照度与试验片表面温度不受颜色影响，能够解决前述课题。

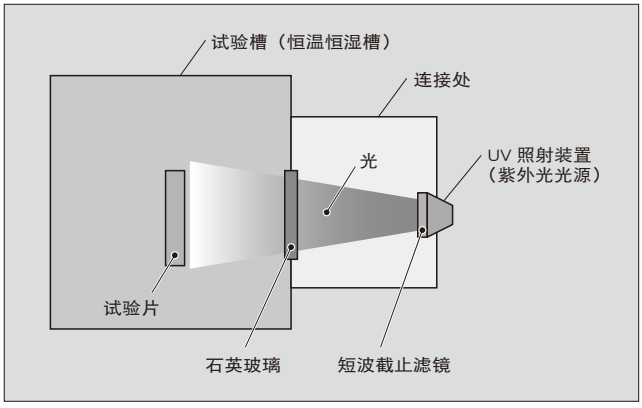


图 2　THC-UIE 的构成

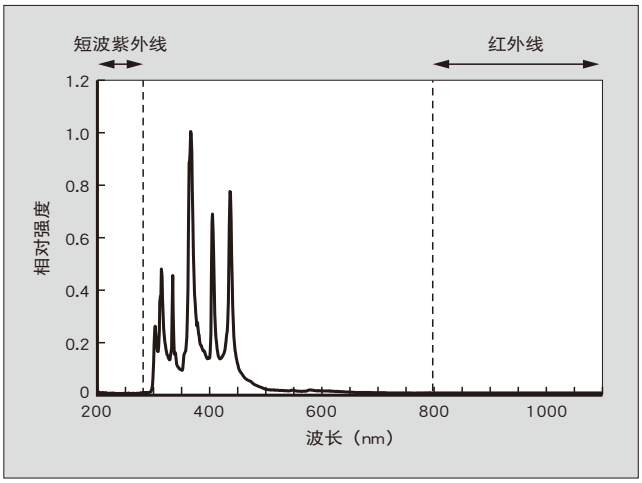


图 3　THC-UIE 的光源光谱分布

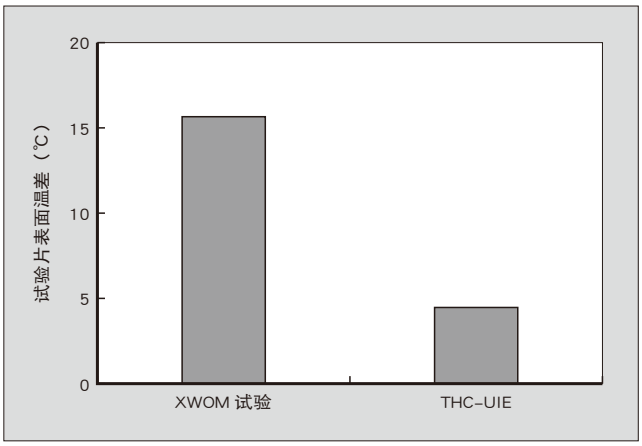


图 4　光照时黑板温度与试验片表面温度之差

表 1　各种加速试验机中照度与温度的范围及特点

试验机	THC-UIE	XWOM	SWOM
照射照度（波长 300～400 nm）	60～1800 W/m^2	60～180 W/m^2	78.5 W/m^2
设定温度	～150 ℃	～95 ℃	～95 ℃
特点（因材料颜色导致的温度上升）	几乎没有	有	有

4　采用 THC-UIE 进行加速试验的验证结果

验证了本试验机相对于各种传统加速试验机的加速效果。在验证中，分析了 THC-UIE 的老化机理，确认其老化机理与传统加速试验机相同。验证结果如下。

4.1　试验条件

树脂材料采用了聚碳酸酯（PC：polycarbonate），该材料为用于室外设备机壳等的代表性材料。试验片通过注塑成型，将不含紫外线吸收剂的通用级透明 PC 加工成厚度为 4 mm 的条形试验片（依据 JIS K 7171 标准）。如**表 2**

表 2　各种加速试验机的试验条件

试验机	THC-UIE	XWOM	SWOM
照射照度（波长 300~400 nm）	1800 W/m²	180 W/m²	78.5 W/m²
温度	样品 60 ℃	黑板 63±3 ℃	黑板 63±3 ℃
湿度	50%RH	50±5%RH	50±5%RH

所示，XWOM 试验和 SWOM 试验在标准试验条件下实施。THC-UIE 为了缩短试验时间，设定了 XWOM 试验 10 倍的紫外线照度。在进行了规定时间的加速试验后，分别进行了黄变度测量（评估试验片变色程度）、傅里叶变换红外吸收光谱测定（FT-IR，评估化学结构变化）以及弯曲强度测量（评估机械强度）。

4. 2　黄变度的评估结果

根据 XYZ 表色系统测量并量化黄色度（YI），依据 JIS K 7373 标准计算出黄变度（ΔYI）。**图 5** 所示为各种加速试验中黄变度与暴露时间的关系。黄变度取决于暴露时间，暴露时间越长，黄变度越高。单位暴露时间的黄变度变化量依次为：THC-UIE>XWOM>SWOM。由测量结果可知，相对于 SWOM 试验 2000 小时达到黄变度 25 所需的暴露时间，THC-UIE 可在约 SWOM 试验 1/20 的时间、约 XWOM 试验 1/5 的时间内实现加速。

PC 黄变的机理如**图 6** 所示，黄边原因是由于“光弗里斯重排”的化学结构变化产生了黄变物质（二羟基二苯甲酮）。此外，PC 在水分子存在时，会因紫外线导致主链断裂，从而引发因水解导致的分子量下降[7][8]。

为评估 XWOM 试验后的化学结构变化，测量了试验片表面的 FT-IR 光谱。**图 7** 所示为暴露前后的测量结果。与暴露前（0h）相比，暴露后（XWOM 试验 500h），在 1770 cm^{-1} 处观测到的吸光度下降，光谱向低波数侧扩展。同时，在 1730 cm^{-1} 及 1680 cm^{-1} 处观测到的峰值强度增加。这表明伴随 PC 黄变，含碳酸酯键的碳酸酯基（1770 cm^{-1}）减少，而羰基（1730 cm^{-1}）与酮基（1680 cm^{-1}）增加。因此，由于光弗里斯重排的化学结构变化产生了黄变物质（二羟基二苯甲酮），导致 PC 发生黄变。

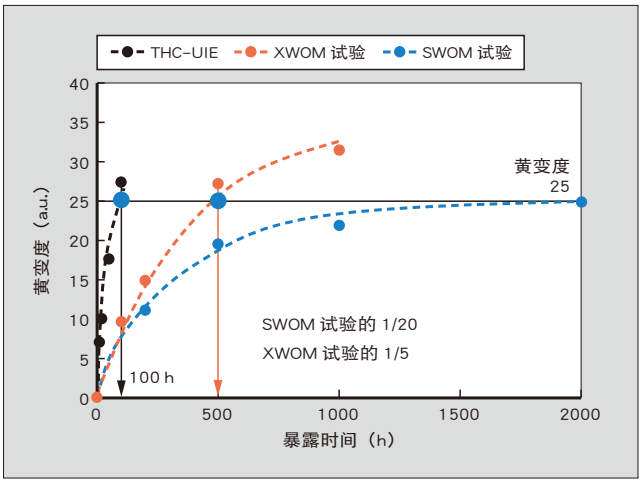


图 5　各种加速试验的黄变度与暴露时间的关系

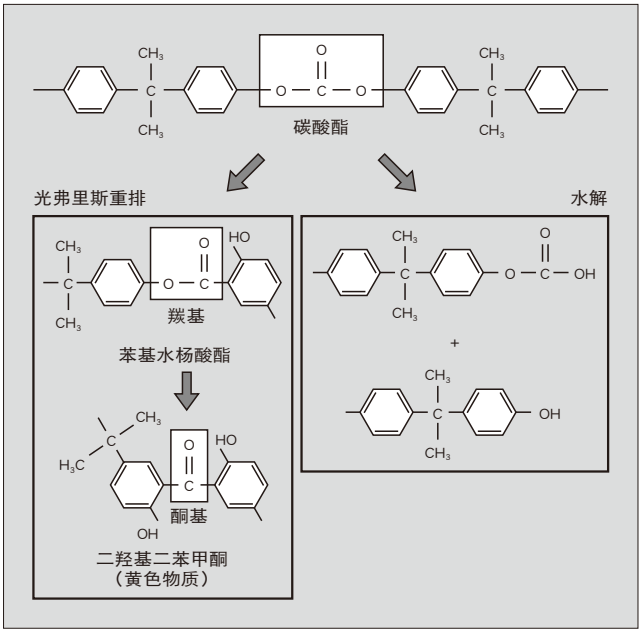


图 6　PC 发生黄变的机理

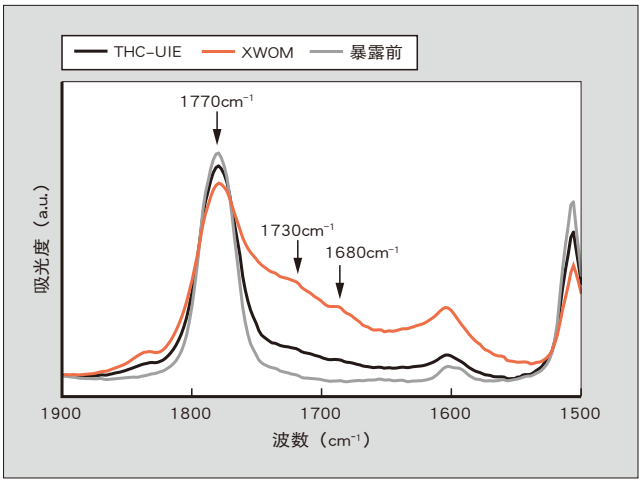


图 7　XWOM 试验前后试验片表面的 IR 光谱测量结果

此外，为了进一步验证因光老化导致 PC 主链断裂，测量了各种加速试验后 PC 表面（数十μm 部分）的分子量（重均分子量）变化率。其结果如**图 8** 所示。在 THC-UIE 中，

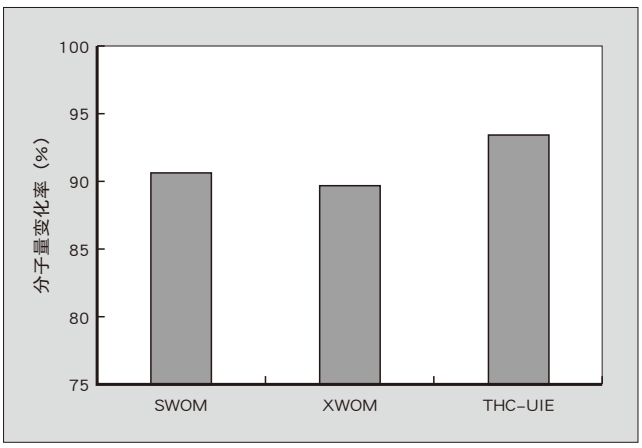


图 8　各种加速试验后 PC 表面的分子量变化率

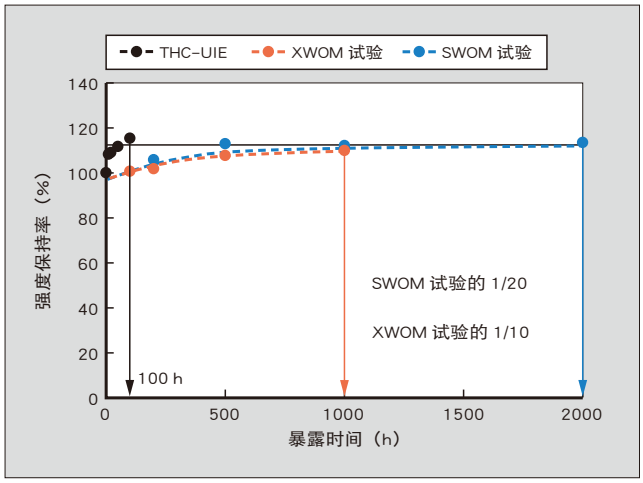


图 9　各加速老化试验的暴露时间与弯曲强度保持率的关系

也确认了与其他加速试验同样的分子量下降现象。综上可知，THC-UIE 可通过与 SWOM 试验、XWOM 试验相同的机理来促进表面黄变。

4. 3　弯曲强度的评估结果

图 9 所示为以试验前弯曲强度为 100% 时，暴露时间与弯曲强度保持率的关系。在各种加速试验机中，强度保持率随时间的推移上升至 110%。THC-UIE 的结果同样显示其强度保持率上升至 110%，并确认其到达该值的时间分别为 SWOM 试验的 1/20、XWOM 试验的 1/10。此外，强度保持率因暴露而增至约 110% 的原因，并非由于 PC 分子间发生了化学键合的交联反应，而是可能源于分子间相互作用、缠结等物理结构变化[9]。同时，THC-UIE 能够再现包括此现象在内的结构变化。

如前所述，由弯曲强度结果可知，已确认 THC-UIE 可在 SWOM 试验 1/20 的时间、XWOM 试验 1/10 的时间内实现加速，能够缩短试验时间。

5　后记

此次，构建了一种与传统的加速试验机相比，可实现紫外线、温度、湿度独立控制，并能够缩短树脂部件耐候性评估时间的加速试验技术。今后，将通过此次开发的 THC-UIE，缩短室外用设备开发周期、使其合理化。同时，致力于提供有助于进一步提升可靠性的数据。

最后，本文介绍的新型加速试验机，即恒温恒湿紫外线照射试验机（THC-UIE），承蒙国立大学法人北海道大学北垣亮马教授给予技术指导与帮助，在此深表感谢。

参考文献

⑴　高根由充. “プラスチックの各種耐候性試験の特徴と相互の関係”. ウエザリング技術研究成果発表会. 2003, pp.17-26.
⑵　一般財団法人日本ウエザリングテストセンター. “促進暴露試験ハンドブック”. https://www.jwtc.or.jp/info/docs/handbook_sokushin-bakuro-shiken.pdf, (参照 2025-10-20).
⑶　JIS B 7753：2007 サンシャインカーボンアーク灯式の耐光性試験機及び耐候性試験機.
⑷　石田崇人、北垣亮馬. “低湿度環境下における建築材料用ウレタン塗膜の光劣化メカニズムの温度依存性”. 高分子論文集. 2018, vol.75, no.3, pp.265-274.
⑸　伊藤幹彌ほか. 樹脂製ガラスの色変化測定による劣化評価. ネットワークポリマー. 2012, vol.33, no.2, pp.89-96.
⑹　高根由充. “プラスチック材料の促進耐候性試験方法とその評価”. Polyfile：高分子関連技術情報誌. 2008, vol.45, no.4, pp.30-35.
⑺　木嶋芳雄. 耐候性試験技術の課題と今後の動向. 塗装技術. 2018, vol.53, no.11, pp.57-64.
⑻　村上小枝子ほか. “透明樹脂材料の劣化に関する総合的解析”. 神奈川県立産業技術総合研究所研究報告. 2021, pp.57-61.
⑼　柳瀬博雅ほか. ポリカーボネートの各種耐候性試験の機械特性評価. プラスチック成形加工学会第34 回年次大会予稿集. 2025, P-024.

柳瀬　博雅
从事产业电气设备树脂材料技术的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部尖端技术研究所基础技术研究中心绝缘基础研究部主查。

西泽　祐里
从事产业电气设备树脂材料技术的研究开发。现就职于富士电机株式会社技术开发本部尖端技术研究所基础技术研究中心绝缘基础研究部。高分子学会会员、电气学会会员。

山城　启辅
从事功率半导体、变电设备的电气绝缘和材料技术、放电应用技术的开发。现为富士电机株式会社技术开发本部尖端技术研究所基础技术研究中心绝缘基础研究部部长。电气学会会员。

临界模式交错并联 PFC 控制 IC “FA1C20N”

“FA1C20N” Critical Mode Interleaved Power Factor Correction Control IC

藪崎　纯 * YABUZAKI, Jun　　矢口　幸宏 * YAGUCHI, Yukihiro　　鎌仓　龙马 * KAMAKURA, Ryoma

为了实现脱碳社会，对提升电力利用效率和质量，以及电源装置小型化的要求日益提高。功率因数是代表交流电力利用效率和质量的指标之一，表示有效功率在作为总量的表观功率中所占的比例。功率因数改善（PFC：Power Factor Correction）电路通过控制输入电流波形，使其趋近与输入电压波形同相的正弦波，从而提高功率因数。近年来，其需求不断增加。

此前，富士电机已为 200 W 以下低负载功率的开关电源，推出了开关干扰较小的临界模式 PFC 控制 IC。此次，针对 200 W 以上较高负载功率的开关电源，开发了适用于具备易获得高输出等优点的交错并联电路的临界模式交错并联 PFC 控制 IC “FA1C20N”。

1　临界模式交错并联 PFC 电路的特点

开发的 FA1C20N 外观如**图 1** 所示。临界模式交错并联 PFC 电路，在具备临界模式开关干扰小的优点的同时，使由开关元件、电感器、二极管等组成的两组升压电路交替动作（交错并联动作）。在降低交流输入电流纹波分量的同时，可获得高功率和高输出。同时，通过倍增整体有效开关频率，可实现电感器的小型化。此外，还具有分散干扰峰值，抑制电磁干扰（EMI：Electromagnetic Interference）的效果。由于流经输出电容器的电流减小，电容器可实现小型化和长寿命化，电流路径的分散还提升了电路的可靠性与耐久性。基于上述优点，本产品在要求高功率、高输出、低干扰、小型化等的高要求电源装置中的应用正在增加。

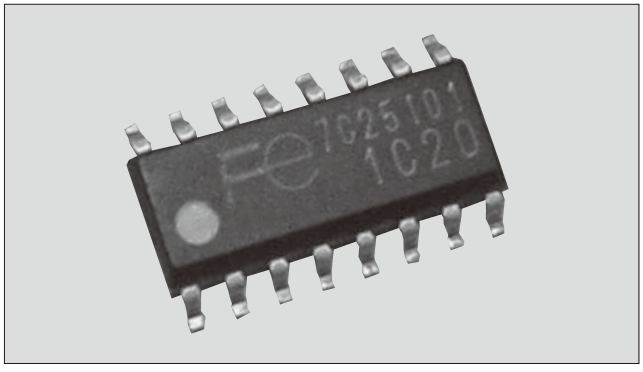


图 1　“FA1C20N”

2　为实现高效率化的动作模式切换

当电源的输出功率（负载功率）降低时，相对于导通损耗，开关损耗将占据主导地位，因此交错并联动作的效率也会下降。因此，为了提升交错并联 PFC 电路效率，FA1C20N 搭载了根据负载功率切换动作模式的功能。在重负载时，采用使两个开关元件动作以降低导通损耗的交错并联动作；在轻负载时，采用停止一侧开关元件以降低开关损耗的单路动作；当负载更轻时，则切换为在一定期间内停止开关动作的突发模式动作。

3　动作模式切换的课题与对策

图 2 所示为临界模式交错并联 PFC 控制 IC 在动作模式切换时的电感电流波形。动作模式切换功能虽在以往的同类控制 IC 中亦有搭载，但如**图 2**(a)所示，在从单路动作切

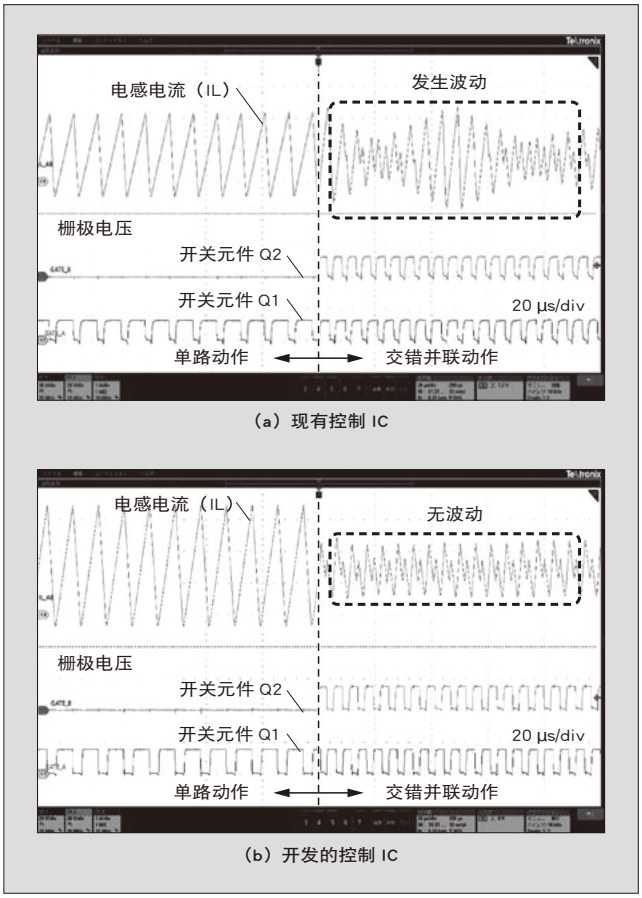


图 2　动作模式切换时的电感电流波形

* 富士电机株式会社半导体事业本部产业事业部产业设计第二部

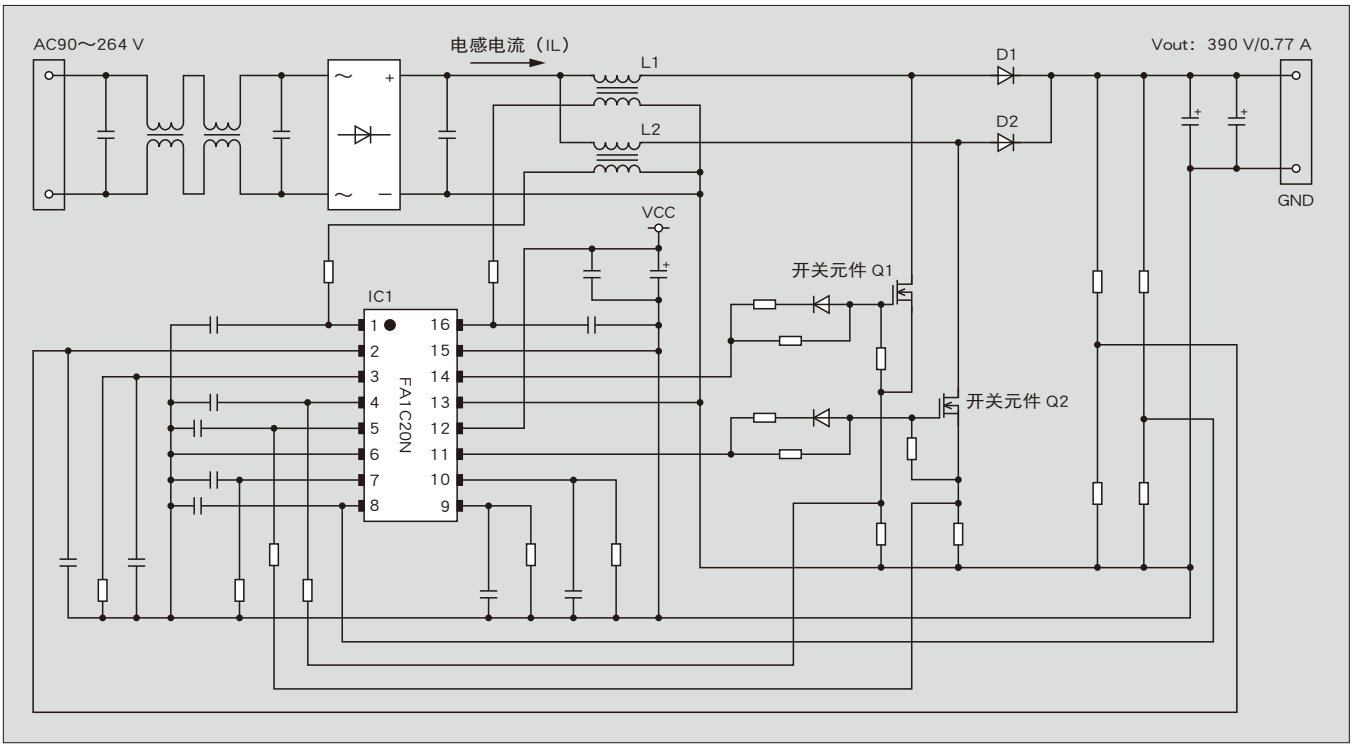


图 3　使用“FA1C20N”的开关电源典型电路

换至交错并联动作时，一直存在因电感电流（IL）振幅大幅紊乱而产生噪声的问题。

FA1C20N 通过独有的控制技术，根据切换前开关元件的导通期间（导通宽度）等，在 IC 内部计算出切换后的导通宽度等参数，从而如**图 2**(b)所示，抑制了切换时电感电流振幅的波动，实现了无噪声的动作模式切换。

4　应用事例

图 3 所示为使用 FA1C20N 的开关电源典型电路（输入 90～264 V，输出 390 V，300 W）。FA1C20N 通过控制开关元件 Q1 及 Q2，使电源电路的输入电流波形接近与输入电压同相的正弦波，从而提高功率因数。**图 4** 所示为该电源的效率实测示例。尽管效率随输出功率降低而下降，但通过在约 120 W 以下切换至单路动作，效率提升了约两个百分点。

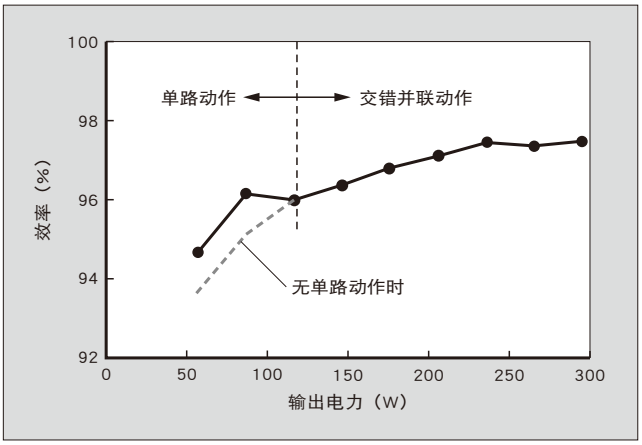


图 4　效率的实测示例

发售时间

2025 年 7 月

垂询

富士电机株式会社
半导体事业本部营业统括部营业第一部
电话：+81-3-5435-7018

缩略语（本期所使用的主要缩略语）

AEM	Anion Exchange Membrane	阴离子交换膜
AEMWE	Anion Exchange Membrane Water Electrolysis	阴离子交换膜型水电解
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AWE	Alkaline Water Electrolysis	碱性水电解
BP	Black Panel	黑板
CN	Carbon Neutral	碳中和
EMI	Electromagnetic Interference	电磁干扰
EPRX	Electric Power Reserve eXchange	一般社团法人电力供需调节能力交易所
GHG	Green House Gas	温室气体
HSP	Hansen Solubility Parameters	汉森溶解度参数
IMO	International Maritime Organization	国际海事组织
IRR	Internal Rate of Return	内部收益率
JEPX	Electric Power Reserve eXchange	一般社团法人日本电力批发交易所
LNG	Liquefied Natural Gas	液化天然气
MAE	Mean Absolute Error	平均绝对误差
P2G	Power to Gas	电转气
PCR	Post-Consumer Recycled	消费后回收
PCS	Power Conditioning System	功率调节器
PEM	Proton Exchange Membrane	质子交换膜
PEMWE	Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis	固体高分子膜型水电解
PFC	Power Factor Correction	功率因数校正
PLC	Programmable Logic Controller	可编程控制器
PoC	Proof of Concept	概念实证
PV	Photovoltaic	太阳能发电
SOC	State Of Charge	充电率
THC-UIE	Temperature Humidity Controlled Ultraviolet-Ray Irradiation Equipment	恒温恒湿紫外线照射试验机

富士电机
Fuji Electric

http://www.fujielectric.com.cn/

＊包括本期刊物在内，从创刊至今的论文档案可通过以下 URL 查阅。

富士电机技术期刊（中文）
http://www.fujielectric.com.cn/jtkw.html

富士电机技报（日文）　https://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html
FUJI ELECTRIC REVIEW（英文）　https://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html

富士电机技术期刊　第 17 卷　第 4 号

2025 年 12 月 20 日　印刷
2025 年 12 月 30 日　发行

编辑兼发行人　中 山 和 哉

发 行 处　富士电机株式会社
技术开发本部
邮 编 141-0032
日本东京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号
Gate City 大崎东楼

（联系地址）　富士电机（中国）有限公司
邮 编 200062
上海市普陀区凯旋北路 1188 号环球港 B 座 26 楼
电 话 021-5496-1177

编 辑 室　Fuji Office & Life Service Co., Ltd. 内
“富士电机技报”编辑室
邮 编 191-8502
日本东京都日野市富士町 1 番地
电 话 +81-42-585-6965
传 真 +81-42-585-6539

印 刷 处　Fuji Office & Life Service Co., Ltd.
邮 编 141-0032
日本东京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号
Gate City 大崎东楼
电 话 +81-3-5435-7311

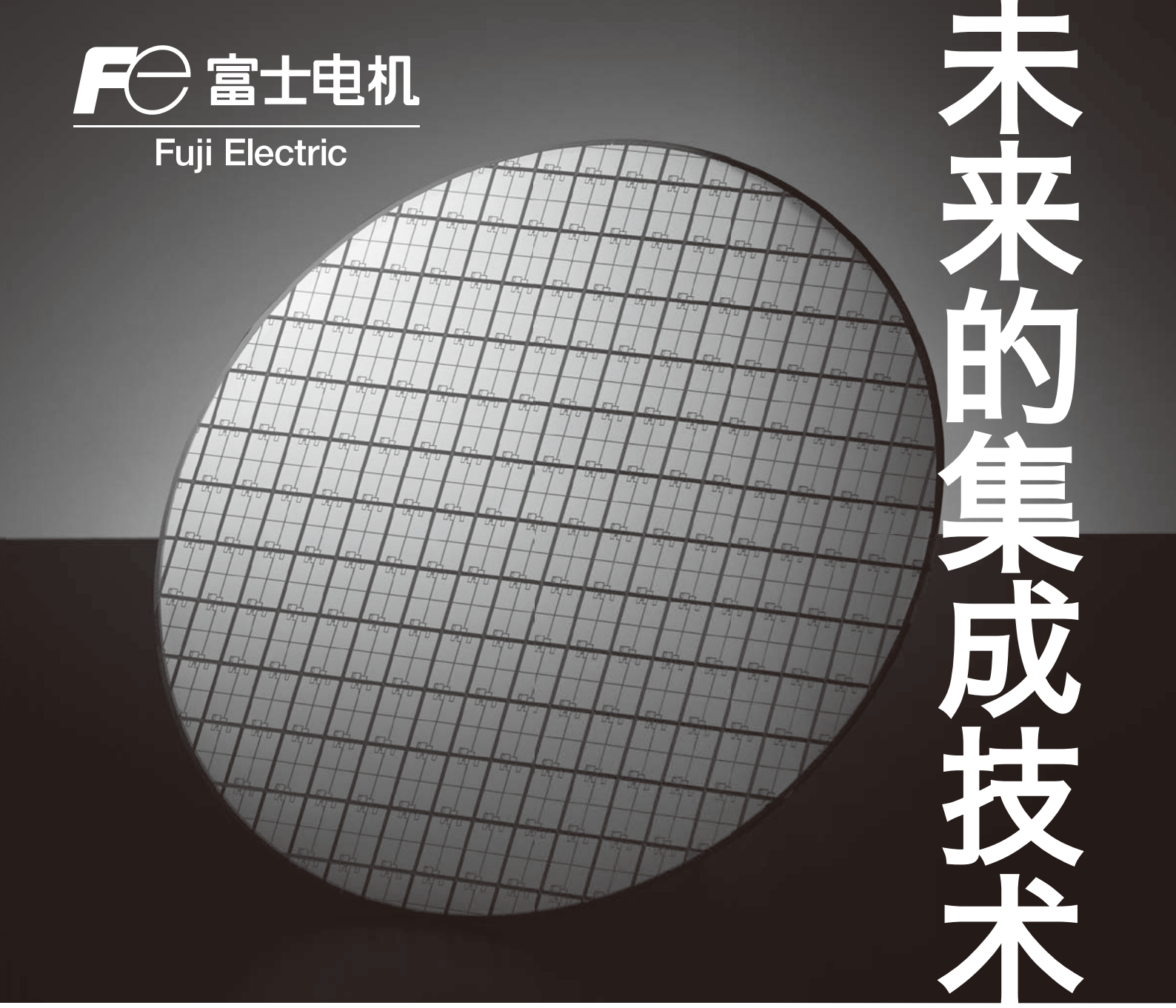
＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。

本刊所载论文是在日本发行的富士电机技报 98 卷 4 号“支撑未来事业的尖端技术与基础技术”的翻译版本。

©2025 Fuji Electric Co., Ltd.（版权所有，侵权必究）

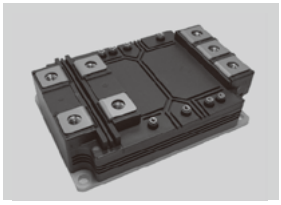
富士电机

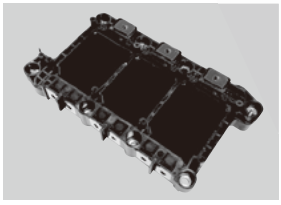
Fuji Electric

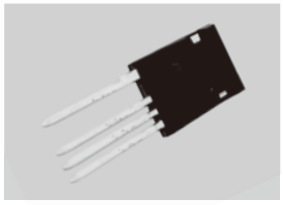


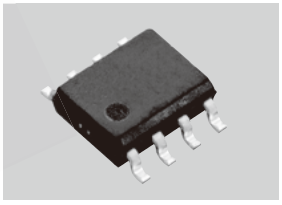
未来的集成技术

凝聚了独有电力电子技术及无限应用可能的富士电机功率半导体。本重要元件在高耐压、大容量化、低电力损失化、小型轻量封装化方面不断改善，正在太阳能发电、风力发电等清洁能源领域，产业和家庭用户所期待的节能领域以及混合动力车、电动汽车类交通领域等诸多方面发挥着重要作用。此外，通过采用 SiC 新材料，富士电机还开发出性能更高的次世代功率半导体。今后，富士电机将继续在能源与环境技术领域不断创新，为创建安全、安心、可持续发展的社会作贡献。



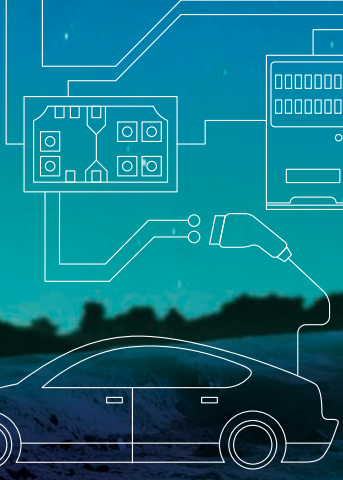






富士电机的功率半导体

Power Electronics as a force for social good.


Geothermal Power Plants

Power Conditioning Systems

Uninterruptible Power Systems

Power Semiconductors

Inverters

Vending Machines

Contributing to the creation of a sustainable society

Fuji Electric
Innovating Energy Technology

本刊使用了环保型 FSC® 认证纸张和植物油油墨。

FSC www.fsc.org 混合产品 纸张 | 支持负责任林业 FSC® C017911

VEGETABLE OIL INK