世界最小的船舶用旋风式 SO_X 洗涤器

World's Smallest SO_X Removal Cyclone Scrubber for Marine Vessels

青木　幸男 AOKI, Yukio　　**丰角　浩之** TOYOZUMI, Hiroyuki　　**高桥　邦幸** TAKAHASHI, Kuniyuki

船舶废气中含有大量硫氧化物（SO_X），从保护大气环境的观点出发已成为国际性问题。SO_X 洗涤器作为一种废气脱硫技术多为大型设备，目前已出现小型化的要求。旋风方式虽然是一种有利于小型化的脱硫方法，但与其他方式相比脱硫性能通常不佳。富士电机开发出体积较小且脱硫性能优秀的世界最小旋风式 SO_X 洗涤器，并通过实船试验实际证明在指定海域中也能够使用。SO_X 洗涤器的小型化使其普及速度加快，从而能够继续使用廉价的高硫燃料油，有助于降低为国际物流提供支持的海运公司的事业成本。

The exhaust gas of marine vessels contains a high concentration of sulfur oxide (SO_X), which from the viewpoint of protecting the environment, has become a worldwide problem. Most SO_X scrubbers that desulfurize exhaust gas are large in size, and there has been increasing demand for more compact ones. In this respect, cyclone types have the advantage of being smaller in size, but their desulfurization performance in general is inferior to other types of scrubbers. Fuji Electric has developed the world's smallest cyclone SO_X scrubber with high level desulfurization performance and has demonstrated that the scrubber is capable of being used in emission control areas through field tests on ships. Downsizing a SO_X scrubber will facilitate its prevalence, allowing low-priced high-sulfur fuel oil to be used continuously. This could contribute to reducing the operating cost of shipping companies that support international logistics.

1　引言

作为船舶主发动机和辅助发动机使用的柴油发动机的废气中含有大量硫氧化物（SO_X）、氮氧化物（NO_X）和悬浮颗粒物（PM：Particulate Matter），从保护大气环境的观点出发已成为国际性问题。国际海事组织（IMO：International Maritime Organization）于 2008 年颁布了《MARPOL73/78 公约》新附则Ⅵ[1]，为减少废气中的 SO_X 和 PM，规定使用低硫燃料油，或者采取具有同等效果的措施，并实装船旗国主管部门认可的废气净化系统（EGCS：Exhaust Gas Cleaning Systems）[2]。**图 1** 是废弃管制的日程安排。过去，仅在北美沿岸、北海等指定海域（ECA）设定了燃料所含硫分浓度的上限，但从 2020 年开始将对普通海域也加强管制。因此，2020 年以后所有船只必须使用符合规定的燃料油或者实装 EGCS。

EGCS 在紧邻指定海域的欧美诸国的主导下得以实用化，其主要设备是使用碱性水对废气中 SO_X 进行吸收并中和的湿式洗涤器（通称：SO_X 洗涤器）。但是，现有 SO_X 洗涤器多为大型设备，如果设备布置限制较为严苛，则存在难以实装的课题。本文将对世界最小船舶用旋风式 SO_X 洗涤器的特点和性能进行介绍。

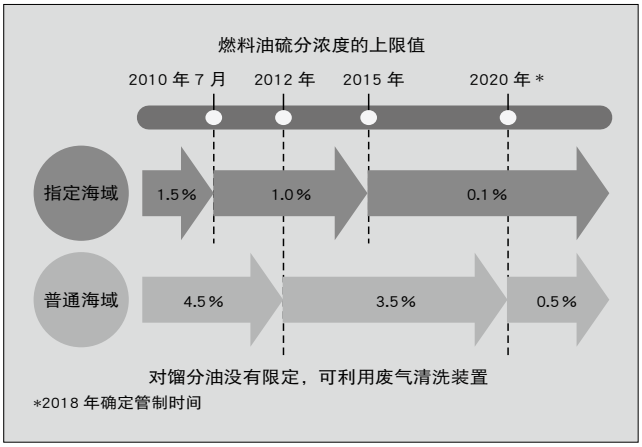

图 1　SO_X、PM 管制的施行日程安排

2　废气净化系统（EGCS）的结构

富士电机开发的 EGCS 包含：SO_X 洗涤器，用于除去废气中的硫成分；气体分析仪，用于在 EGCS 运行时连续监视 SO_2 和 CO_2 的排放量；以及水质监测仪，用于监视洗涤器水的水质。

EGCS 的运行方法有以下两种，一种是汲取海水清洗废气的运行模式（Open loop），另一种是在海水或精制水中添加碱剂循环使用的运行模式（Closed loop），通常海域中使用 Open loop。如**图 2** 的 Open loop 系统结构示例所示，系统结构简单，可抑制投资负担和设置空间。

如果要应对清洗水禁排海域，就必须采用 Closed loop。Closed loop 模式又分为以下两种，一种是完全不排放清洗水的 Full-Closed loop，另一种是经过除浊等净化处理后再排放清洗水的 Semi-Closed loop。**图 3** 是 Closed loop 的系统结构示例。Closed loop 与 Open loop 相比，热交换器和水处理装置等系统构成设备较多，需要较大的船内空间。在 EGCS 中，主要构成设备 SO_X 洗涤器的尺寸最大。为最大限度地确保船内空间，SO_X 洗涤器被强烈要求实现小型化。

3　旋风式 SO_X 洗涤器

3．1　传统 SO_X 洗涤器

表 1 是在陆上设施使用的传统 SO_X 洗涤器的处理方式。通常，废气的空塔速度越快，越有可能实现小型化，然而空

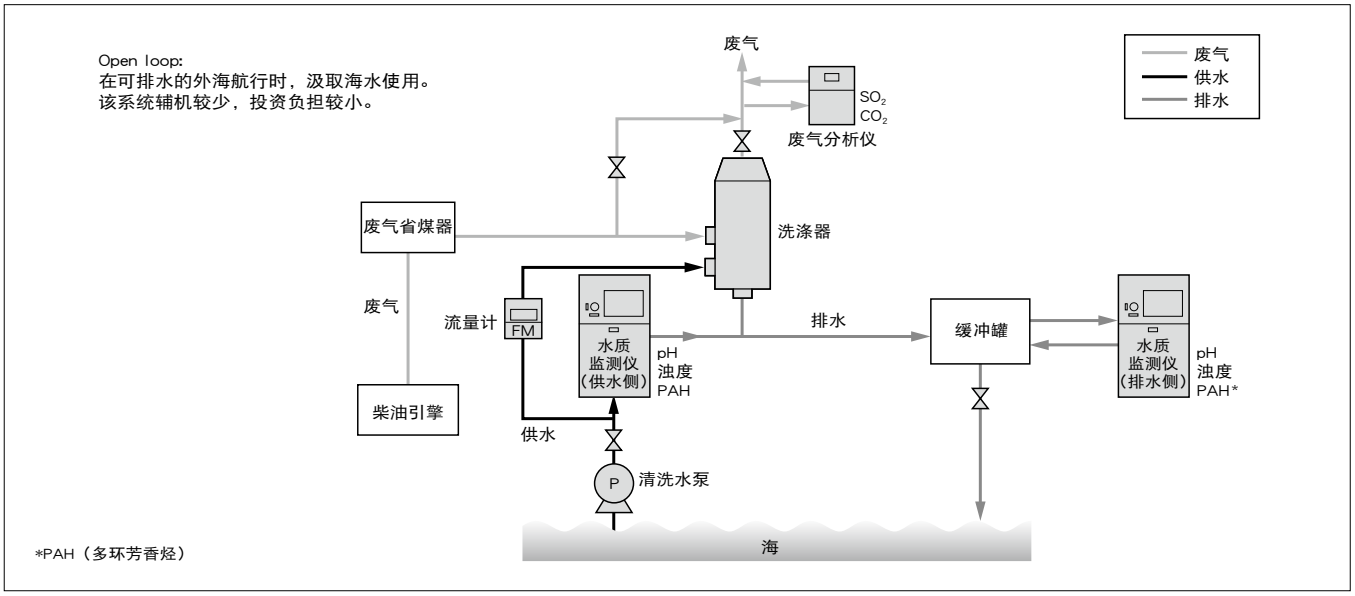

图 2　Open loop 的系统结构示例

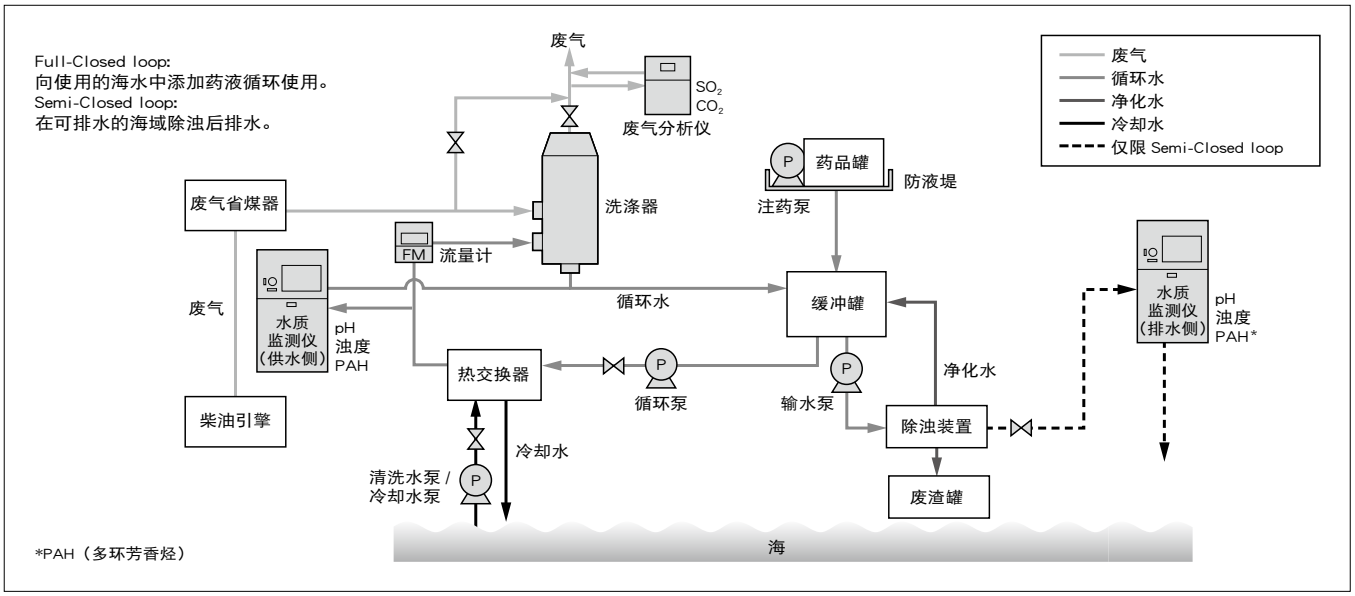

图 3　Closed loop 的系统结构示例

表 1　SO_X 洗涤器的处理方式

规格与方式	旋风	喷雾塔	填充塔	架板 / 填充剂＋喷雾
空塔速度（m/s）	～10	～10	1.0～1.5	1.6～3.5
吸收材料液量	中	多	少	少
脱硫率（%）	～95	～90	95～98	95～98
特点	○从塔中心喷射吸收液 ○简单结构 ⇒可小型化	○简单结构 ○有气体偏流风险 ⇒脱硫率降低	○脱硫率高 ○压损高 ○维护性差	喷雾塔与填充塔的中间特性

塔速度越慢，SO_X 洗涤器的 SO_X 除去率（脱硫性能）越好。因此，富士电机开始着眼于可兼顾小型化和高脱硫性能，并且可将对内燃机允许背压造成的影响控制在最小限度的旋风式 SO_X 洗涤器。旋风方式采用在装置内产生涡流来进行气液分离的结构，与逆流型等传统方法相比，压损大幅降低。而且，空塔速度是其他方式的 2 ～ 5 倍，可大幅实现小型化。

图 4 是旋风式 SO_X 洗涤器的结构示例[3]。从塔内喷雾嘴沿塔内半径方向喷雾，使喷出的液滴与从圆柱塔底部螺旋上升的废气接触，吸收并中和 SO_X。船舶用柴油发动机排放的 SO_X 基本上是 SO_2，利用碱性海水按反应式(1)和反应式(2)进行吸收和中和。另外，反应式(2)中的 A 是碱金属。

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3 \cdots\cdots (1)$$

$$H_2SO_3 + 2\,AOH \rightarrow A_2SO_3 + 2H_2O \cdots\cdots (2)$$

通常，喷雾嘴与支管呈垂直设置。如果此时喷雾嘴的喷雾方式呈扇形，那么喷射角度最大为 120 度，且至少在中心方向 30 度范围内不会喷射液滴。而且，支管延伸方向一侧四周墙壁与喷雾嘴喷口之间的距离较短，向该部分喷射的

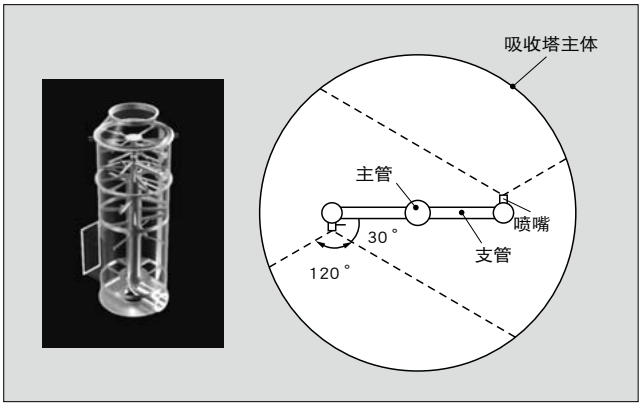

图 4　旋风式 SO_X 洗涤器的结构示例

表 2　燃料油中相对于硫浓度的 SO_2/CO_2 比

Fuel Oil Sulphur Content 〔% 质量（mass）〕	Ratio Emission SO_2/CO_2 〔ppm/% 体积（volume）〕
4.50	195.0
3.50	151.7
1.50	65.0
1.00	43.3
0.50	21.7（Global）
0.10	4.3（ECA 标准）

液滴的飞行距离较短。SO_X 洗涤器的脱硫性能由废气与液滴的接触面积和接触时间而定。如果从喷雾嘴喷出液滴的扩散范围不大，可能无法得到足够的接触面积。而且，如果飞行距离较短，可能无法得到足够的接触时间。综上所述，若要提高性能，就必须增加喷雾嘴数量，确保气液接触性，洗涤器会变得较大。普通实用尺寸旋风洗涤器的 SO_X 除去率约为 90 ～ 95%，这种程度的性能不符合指定海域的规定[4]。

3. 2　船舶用旋风式 SO_X 洗涤器的开发

EGCS 指南关于 SO_X 洗涤器的废气净化性能，要求将废气中的成分浓度比（Ratio Emission：SO_2/CO_2）作为指标进行连续监视[2]。**表 2** 是燃料油中相对于硫浓度的 SO_2/CO_2 比。为了满足 ECA 标准（与使用 0.1% 硫燃料油等同），上述 Ratio Emission 必须在 4.3 以下。船舶上实装的脱硫装置要求具有最大 98%（3.5% 硫⇒ 0.1% 硫）的脱硫性能，传统旋风式 SO_X 洗涤器无法满足。因此，我们发挥旋风式高风速处理和低压损的特点进行开发，以达到 98% 以上的脱硫效率。

富士电机为增加废气与液滴的接触面积和接触时间，对 SO_X 洗涤器的内部机构进行了精心设计[5]~[7]。通过优化内部结构，使液滴与废气高效地接触，从而提高脱硫效率。

4　船上的 EGCS 性能实证试验

我们将上述设计技术作为基础，通过陆上试验开展了分阶段放大验证[5]。再将根据其成果设计制造而成的旋风式 SO_X 洗涤器安装到实船上，进行了船上试验。**图 5** 是实证船 NADESHIKO 的外观，**图 6** 是旋风式 SO_X 洗涤器。在装有 9 MW 引擎的船上实装富士电机的 SO_X 洗涤器〔ϕ2000×H6000（mm）〕，进行了性能试验。性能目标将可满足 ECA 标准的 Ratio Emission 定为 4.3 以下。

【对象船舶信息】
船主：SHOEI KISEN KAISHA
造船厂：IMABARI SHIPBUILDING
船型：Bulk carrier
载货重量：84000 M.T. D/W
引擎输出：9 MW
燃料油中的最大硫分浓度：3.5%

图 5　NADESHIKO 的外观

【SO_X 洗涤器规格】
洗涤器尺寸：ϕ2000×H6000（mm）
洗涤器重量：4.5 t

图 6　旋风式 SO_X 洗涤器

4. 1　Open loop 运行的性能试验结果

图 7 是以 50% 引擎负荷航行时 Open loop 运行的脱硫性能。实际证明连续运行大约 6 小时，可稳定满足 ECA 标准。

图 8 是以 85% 引擎负荷航行时 Open loop 运行的脱硫性能。实际证明连续运行大约 1 小时，在 SO_X 洗涤器的设计点（最大废气量）上可稳定满足 ECA 标准。

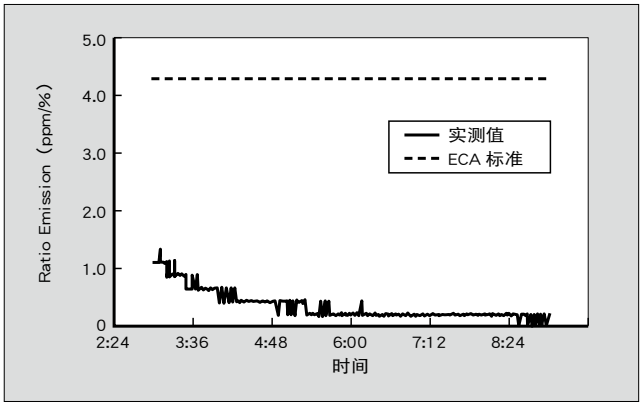

图 7　50% 引擎负荷时的 Open loop 脱硫性能

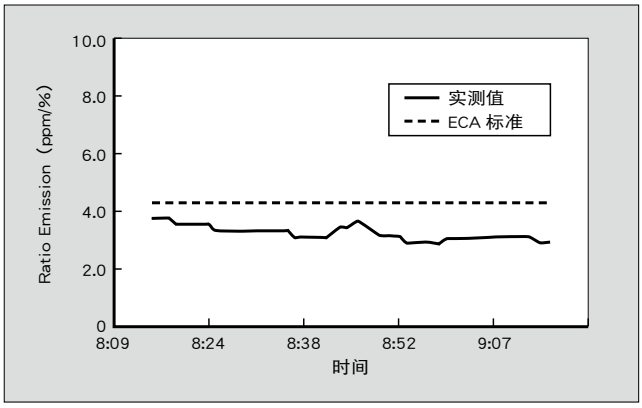

图 8　85% 引擎负荷时的 Open loop 脱硫性能

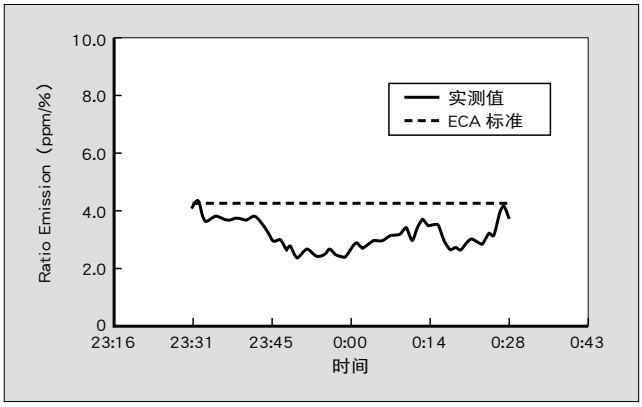

图 9　50% 引擎负荷时的 Semi-Closed loop 脱硫性能

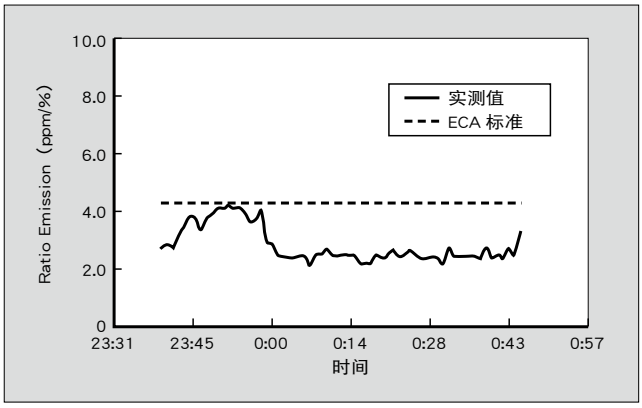

图 10　50% 引擎负荷时的 Full-Closed loop 脱硫性能

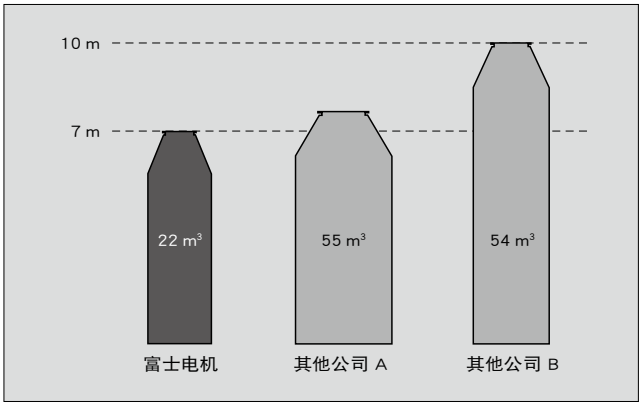

图 11　SO_X 洗涤器的体积比较（10 MW 级）

4. 2　Closed loop 的性能试验结果

图 9 是以 50% 引擎负荷航行时 Semi-Closed loop 运行的脱硫性能，**图 10** 是以 50% 引擎负荷航行时 Full-Closed loop 运行的脱硫性能。实际证明连续运行大约 1 小时，在任何情况下都可稳定满足 ECA 标准。

5　实证试验的成果

根据 EGCS 性能实证试验结果可以确认富士电机的 SO_X 洗涤器在各运行模式下均能发挥充分的脱硫性能。

图 11 是适用于船上试验用试制机的旋风式 SO_X 洗涤器与传统 SO_X 洗涤器的体积比较。富士电机的旋风式 SO_X 洗涤器与过去相比，体积为 50% 以下，但却满足 ECA 标准的废气净化性能。而且，低压损和小型化带来的轻量化使船内的安装性明显提高。

6　后记

本文对世界最小的船舶用旋风式 SO_X 洗涤器进行了介绍。

本次船上试验证明装在实船上的 EGCS 在船舶 SO_X、PM 管制最为严格的指定海域中也可以使用。SO_X 洗涤器的小型化使其普及加快，从而能够与过去一样使用廉价高硫燃料油，有助于降低支撑国际物流的海运公司的事业成本。

今后，我们将开发可实现 SO_X 洗涤器进一步小型化并降低 EGCS 运用成本的技术，向市场提供可适用于更多船型的 EGCS，为降低全球性环境负担做出贡献。

船上试验在正荣汽船株式会社、今治造船株式会社和一般财团法人日本海事协会三方构建的共同研究体制下，依据日本海事协会《基于行业需要的共同研究》纲要计划提供的研究支持来实施。富士电机受今治造船株式会社委托，在本研究开发中对一套 EGCS 设备进行了设计、制造和试验。在此我们谨对各相关单位表示诚挚谢意。

参考文献

(1)　“Prevention of Air Pollution from Ships”.

http：//www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx,（accessed 2018-02-01）.
⑵ “2015 GUIDELINES FOR EXHAUST GAS CLEANING SYSTEMS”. http：//www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/MEPC.259%2868%29.pdf,（accessed 2017-12-07）.
⑶ 株式会社 NE プロジェクト. NE サイクロンラバー. http：//neproject.eco.coocan.jp/yunittokiki.html,（参照 2018-02-01）.
⑷ 乾貴誌ほか. 排ガス浄化システム（SO_X スクラバ）の小型化技術. 日マリ学誌 , 2015, vol.50, no.3, p.324-331.
⑸ 乾貴誌ほか. IMO の国際的規制に対応した小型化を可能とする排ガス浄化システムの技術開発. 日本船舶用工業会.
⑹ 富士電機株式会社. 排ガス処理装置. 特許第 5998915 号. 2012-12-19（出願日）.
⑺ 富士電機株式会社. 排ガス処理装置. 特許第 5983802 号. 2015-02-24（出願日）.

青木　幸男
从事船舶用废气净化装置等铁路隧道用除尘系统的工程工作。现为富士电机株式会社电力电子系统事业部工厂自动化事业部 FA 系统技术部课长。

丰角　浩之
从事船舶用废气净化装置的工程工作。现就职于富士电机株式会社电力电子系统事业部 FA 系统技术部。

高桥　邦幸
从事船舶用脱硫装置等业务用 SOFC 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能源技术研究中心热能技术研究部主任。技术士（机械部门）。日本技术士会会员、电气学会会员。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。