船舶洗涤塔用激光式气体分析仪

Laser Gas Analyzer for Exhaust Gas Cleaning Systems

东　亮一 HIGASHI, Ryoichi　　田原　雅哉 TABARU, Masaya　　赤尾　幸造 AKAO, Kozo

目前，船舶废气排放管制日益严格。作为应对 SO_X 限制的废气净化系统（EGCS）中不可或缺的废气监控装置，富士电机开发了船舶洗涤塔用激光式气体分析仪。因使用了激光方式，不容易受到测量对象之外气体的影响。装置内部可自行对光源变动进行校正，无需使用校准气体频繁地进行校准，维护简单且维护频率降低。另外，在将光轴重叠的光学系统设计成紧凑型的同时，还内置了信号处理电路，实现小型化和轻量化，使检测部整体的搬运和安装变得简单。而且，本仪器还取得了一般财团法人日本海事协会和 DNV・GL 船级协会的认证。

In order to help meet the requirements of intensified marine vessel exhaust regulations, Fuji Electric has developed a laser gas analyzer for exhaust gas cleaning systems (EGCS) as an exhaust gas monitoring system indispensable to EGCS designed to comply with SOx regulations. By using a laser method, it is less susceptible to interference from undesired gases when performing measurement. It is capable of correcting light-source fluctuations by itself inside the system and does not require frequent calibration using calibration gas, achieving easy and less frequent maintenance. In addition, using a compact optical system with optical-axis superposition and a build-in signal processing circuit has made it small and lightweight, facilitating the transport and installation of the entire detector component. Furthermore, it has been certified by classification societies: ClassNK and DNV GL.

1　引言

为保护环境，全球范围内对大气的环境管制正在强化。海事领域基于《防止船舶污染国际公约》(MARPOL 公约)，在逐步推进船舶废气管制[1]。2020 年 1 月开始，作为柴油发动机的硫氧化物（SO_X）排放管制（SO_X 管制）规定，燃料油中的硫成分限值将硫含量浓度从低于 3.5% 调整至低于 0.5%（**图 1**）。通过执行该管制，大气环境有望得到改善。另一方面，使用者有义务使用符合限制的低硫燃料（A 重油）或安装废气净化系统。但是，使用低硫燃料意味着航运成本上升。

在 SO_X 管制中，作为与应用低硫燃料具有同等降低 SO_X 效果的等效性措施，允许安装向废气喷射清洗水来去除 SO_X 的废气净化系统（EGCS：Exhaust Gas Cleaning Systems）[1]，这样可在抑制环境负荷的同时，继续使用低成本的高硫燃料（C 重油）。因强化管制将导致供求平衡发生变化，低硫燃料的价格也会随之高涨，但即使考虑到 EGCS 的引进费用，预想也能有效抑制航行成本上升[2]。

富士电机开发了利用海水净化废气中 SO_X 的洗涤塔，于 2018 年 10 月开始发售[3]。此外，还开发了可在洗涤塔运行时连续监控二氧化硫（SO_2）及 CO_2 各气体浓度的气体分析仪，并于 2019 年 8 月开始发售。同时，富士电机还向客户提供将上述设备组合使用的 EGCS。

本文对作为废气监视装置的船舶洗涤塔用激光式气体分析仪进行论述。

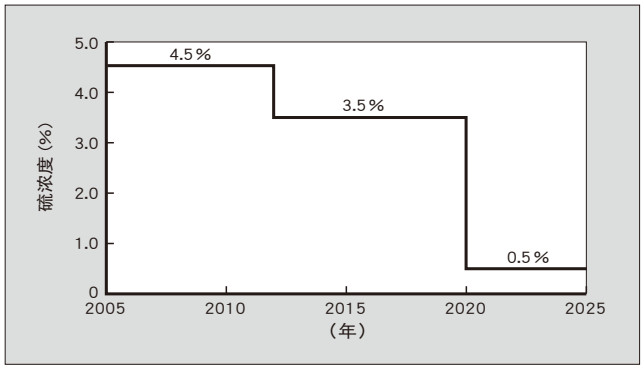

图 1　一般海域船舶燃料油中硫浓度限值的变化

2　废气净化系统（EGCS）

EGCS 的整体构成如**图 2** 所示。EGCS 由包括 SO_X 洗涤塔、气体分析仪及监控清洗水水质的水质仪等在内的各种测量、控制、驱动设备构成。

EGCS对气体分析仪的要求记载于国际海事组织(IMO：International Maritime Organization）发行的 EGCS 指南[4]中。测量通过 SO_X 洗涤塔处理过的废气中所含的 SO_2 和 CO_2，获得其气体浓度比（SO_2/CO_2 比率），该比率作为废气净化性能结果，须小于限值。该废气净化性能以燃料油中的硫成分浓度（质量浓度）和废气中的 SO_2/CO_2 比率（体积浓度比）成比例关系为依据（**图 3**）。例如，MALPOL 公约规定燃料中硫成分浓度的限值为 0.50%，所以废气中 SO_2（ppm）/CO_2（%）比率的限值为 21.7。如果 CO_2 浓度为 5.00%，则即使使用硫成分高的燃料，经洗涤塔净化后的 SO_2 浓度只需小于 108 ppm（小数点以下舍去）即可。但是，受发动机负荷和洗涤塔清洗性能等影响，SO_2 洗涤塔处理过的废气的 SO_2/CO_2 比率会不断变化。为此，要求气体分析仪可实时、准确地测量流经洗涤塔出口烟道的废气。

根据相关规定，当利用安装在 EGCS 中的气体分析仪等仪器进行测量发生异常时，如果 1 小时内无法恢复，则必须停止 EGCS，切换成符合管制的油[5]。因此，测量的长期稳定性是 EGCS 最重要的条件。

另外，在应用方面，客户有以下要求：

(a) 可在狭小空间安装。
(b) 维护简单且频率低。

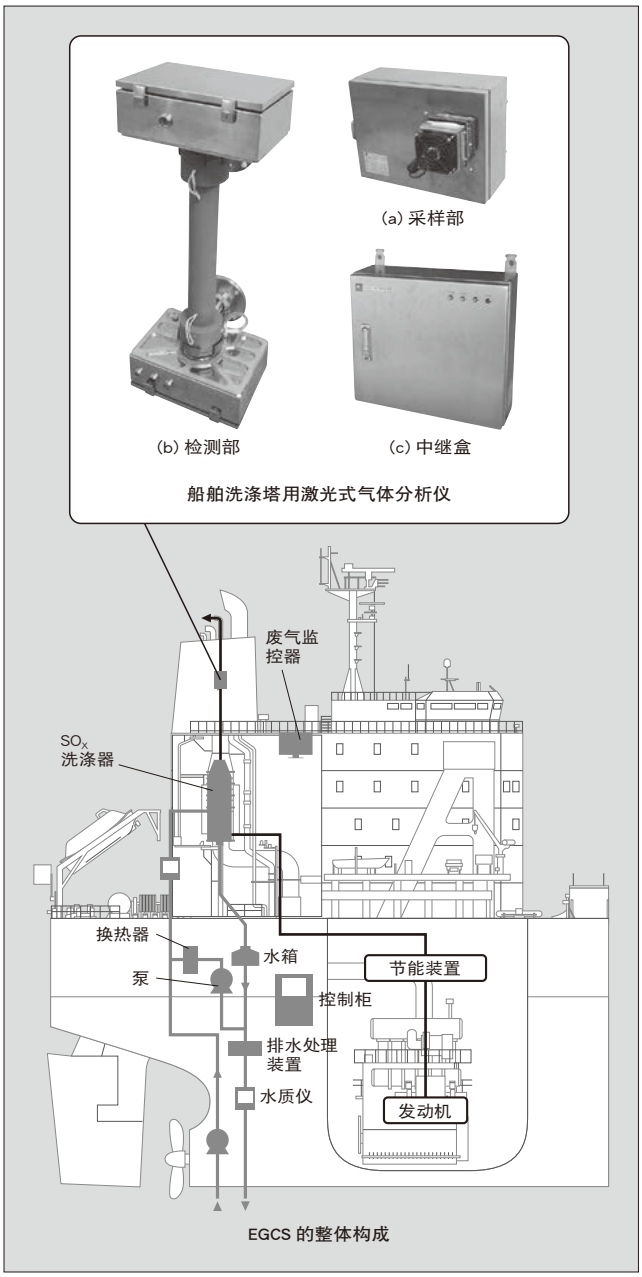

图 2 EGCS 的整体构成

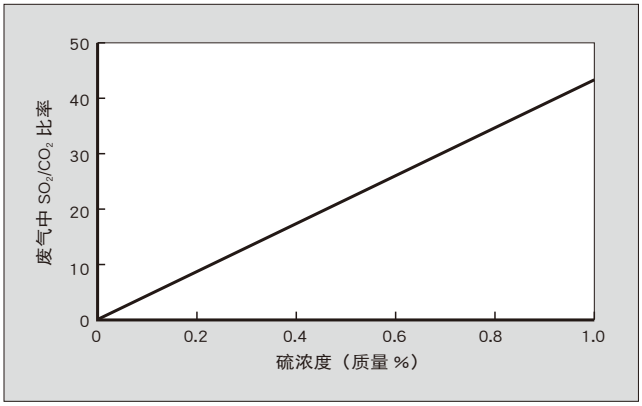

图 3 燃料油中的硫浓度与废气中 SO_2/CO_2 比率的关系

3 激光式气体分析仪的特点

为满足**第2章**所述的实用要求，开发了船舶洗涤塔用激光式气体分析仪。下面，分别阐述一般激光分析仪的测量原理和本文船舶洗涤塔专用激光式气体分析仪的特点。

3.1 一般激光式气体分析仪的特点

(1) 装置构成

如**图 4** 所示[6]，激光式废气分析仪由发光部、受光部、数据处理部等构成。发光部的激光元件使用了振荡波长单一且波长谱线宽度狭窄的分布反馈激光器（DFB：Distibuted Feedback Laser）等。内置于受光部的受光元件使用了对光源的波长具有灵敏度的光电二极管和光导电元件等。

吹扫气体用于保护发光部及受光部，以使其免受废气中的灰尘和雾等污染物的影响。数据处理部具有通过激光的吸光计算并输出气体浓度的功能。

(2) 测量原理

SO_2、CO_2 等各种气体分子，因构成分子的原子种类和结合能不同，所以有其固有吸收光谱。红外线的吸收光谱由大量离散吸收线构成，这些吸收线与量化分子的振动能级和旋转能级间的迁移相对应。激光方式可选择与其他气体（测量对象以外的气体）的吸收线不重叠的测量对象气体的吸收线，使用与该吸收线相同波长的激光光源进行测量，从而在测量时可以不受其他气体干涉影响。

在**图 4** 中，从发光部发射出的激光透过位于测量光路上的废气，在受光部进行检测。此时，根据朗伯比尔定律，激光按照烟道内废气中所含的测量对象气体浓度被吸收，到达受光部的受光元件。通过检测受光量，测量废气中的测量对象气体浓度。朗伯比尔定律如以下公式(1)所示。

$$I(L)=I_0\exp(-knL) \quad \cdots\cdots(1)$$

$I(L)$：受光强度
I_0：照射强度
k：比例系数
n：测量气体的浓度（密度）
L：测量光路长度

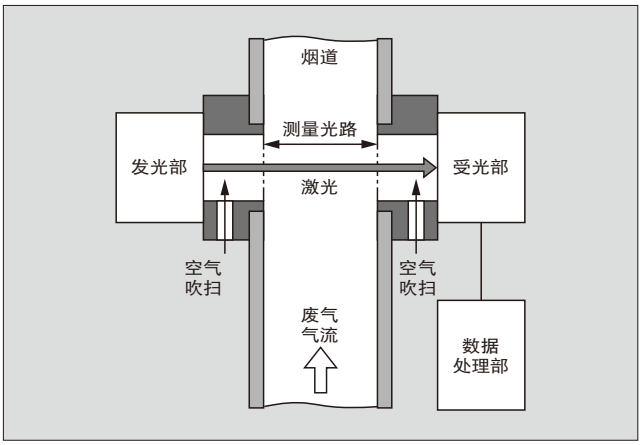

图 4 一般激光式气体分析仪的构成示例

激光方式的优点在于，不易受到其他气体的影响，而且还能在装置内部自行校正光源波动，无需使用校准气体进行频繁校准。光源所用的 DFB 激光器不仅发光波长单一，而且具有可以根据驱动电流和驱动温度改变波长的特点。因此，对于测量对象气体的吸收光谱，可交替测量以吸收强度极大的波长和吸收强度极小的波长。这样，即使受光强度因光学系统的污染或光轴偏移而多少有些波动，也能稳定地提取被吸收的气体。

激光方式和一直以来所用的非分散型红外线（NDIR：Non-Dispersive Infrared）方式的比较如**表 1** 所示。如果使用不易受到其他气体的干涉、光源输出和受光量波动影响的激光方式，即可进行高精度且稳定的测量。

3．2　船舶洗涤塔用激光式气体分析仪的特点

船舶洗涤塔用激光式气体分析仪的装置构成如**图 2** 所示。本产品由以下三个单元及连接它们的配线、配管构成。

(a)　从烟道吸引废气，去除灰尘和水蒸气的采样部

(b)　通过激光测量从采样部流入的测量气体中 SO_2 与 CO_2 气体浓度的检测部

(c)　给采样部和检测部供应电源、进行通信及与外部接口进行通信的中继盒。

(1)　测量方式

应用于船舶时，考虑到温度和振动等环境，对测量方式进行了比较和探讨，采用了采样式。直接插入式和采样式的比较如**表 2** 所示。如**图 4** 所示，直接插入式可现场测量废气，所以能进行快速响应（1 ～ 5 秒）[6]。利用该特点，直接插入式不仅可用于废气监视，还可用于废气的无害化和燃烧气体的控制。另一方面，因为安装时需要调整光轴，存在烟道振动和变形引起的光轴偏移风险以及校正时需拆卸等实用上的缺点。因此，用于船舶时，如**图 5** 所示，通过对气体流通单元采用发光部与受光部融为一体的检测部，克服了上述缺点。另外，在废气采样部的内部利用过滤器，可去除妨碍测量的灰尘，保护光学系统，进一步提高了测量的稳定性。

表 1　激光方式与 NDIR 方式的比较

测量原理	激光方式	NDIR 方式
波长范围	特定的吸收线	多个吸收线（吸收带）
其他气体的干扰	受吸收线选定的影响少	测量成分有影响
接收光功率变更的影响	受校正处理的影响少 ⇒校正间隔长	不可校正，影响大 ⇒校正间隔短

表 2　直接插入式与采样式的比较

测量方式	直接插入式	采样式
光轴调整	安装时需要调整	与气体流通单元是一体的，所以只需在出厂时调整
耐振动、耐冲击	因烟道的振动，光轴可能偏移	壁挂式检测部，减轻光轴偏移
光学系保护	利用空气吹扫进行保护	无法进行空气吹扫，需要进行废气预处理
现场校正	发光部和受光部需要拆卸	气体流通单元兼用作校正单元，所以无需拆卸

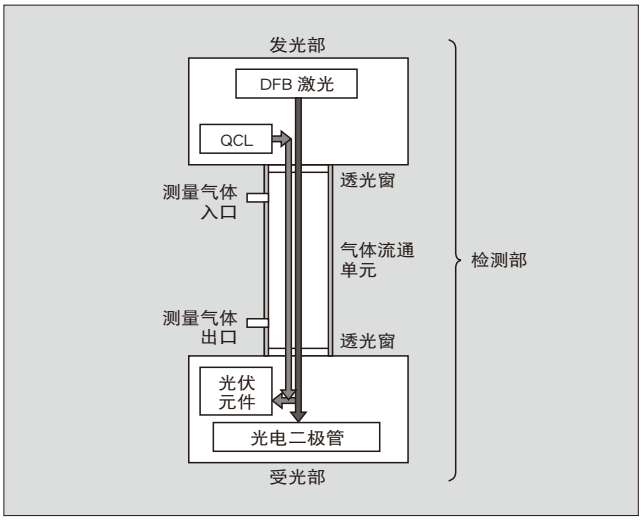

图 5　检测部的光学系

(2)　检测 SO_2 气体的新型激光元件和受光元件

在 ppm 级别检测 SO_2 气体，需要较高的检测灵敏度。本产品新采用了可在 SO_2 气体吸收强度最大波长 7 μm 频带发光的量子级联激光器（QCL：Quantum Cascade Laser）。通过设计、制造和评估，该 QCL 可在高温环境（如机房内部）下以稳定的波长和输出发光，约 10 年无需交换。另外，波长 7 μm 频带的受光元件采用了环保型高灵敏度光伏元件。

利用这些元件，在 0 ～ 300 ppm 的测量范围内，以小于 ±1% 满刻度的测量精度成功测量了 SO_2 气体。

(3)　可同时检测 SO_2 气体与 CO_2 气体的光学系统

为了准确地测量 SO_2 和 CO_2 的气体浓度比率，需同时分析一个气体样品的 SO_2 浓度和 CO_2 浓度。另一方面，因各气体的吸收波长不同，所以各气体需要专用的激光元件和受光元件。因此，检测部设计成内置了光轴重叠的两组激光元件和受光元件的光学系统（**图 5**）。另外，在将光轴重叠的光学系统设计成紧凑型的同时，还内置了信号处理电路，实现了小型化和轻量化，使检测部整体的搬运和安装变得简单。

(4)　SO_2 气体损失的采样部的温度控制和除湿

EGCS 指南规定，需防止采集的废气中所含 SO_2 气体的溶解损失[4]。溶解损失是指，如果采集的废气所经过的配管中存在液态水，则废气中的 SO_2 会溶解于水中，检测出的 SO_2 浓度将变低的现象。

SO_X 洗涤塔因需向废气中喷射水进行清洗，所以废气为潮湿状态。采集的废气（样品气体）易发生结露。如果结露，则会发生溶解损失，因此需采取应对措施。

传统的气体分析仪，使用了加热导管，该导管因使用了对从采样部到检测部的导管进行加热的加热器和用来保温的隔热材料，所以存在需要较大安装空间的缺点。用于船舶时，在机房等有限的狭小空间内很难安装需要使用大功率加热至高温（约 180 ℃）、占用空间的加热配管。

本产品的采样部以高于清洗过的废气温度状态进行保温，可防止结露。而且，采样部内利用膜式空气干燥器将样品气体中的水蒸气移动至干燥空气一侧，从而使样品气体干燥。通过这些措施，可防止溶解损失。如上所述，因在采样部内

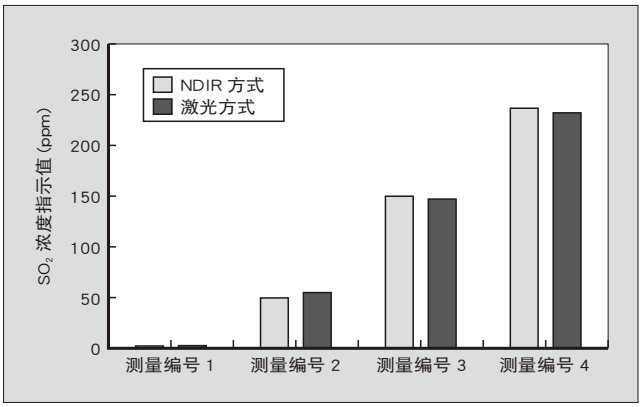

图 6　等效性试验废气中 SO_2 浓度的测量结果示例

对气体进行干燥，所以连接检测部的导管无需加热导管，配管设计更加灵活。

4　EGCS 合格认证

要将船舶洗涤塔用激光式气体分析仪用于船舶中，需要船旗国的批准。因此，我们接受了船级协会的型式试验（环境试验）和 EGCS 合格评定。在型式试验方面，通过了船舶用设备的特有温度试验、振动试验、EMC（Electromagnetic Compatibility）试验。在性能试验方面，除 EGCS 指南规定的精确度、精度、漂移、干扰之外，还通过了基于实际柴油机废气测量的 NDIR 方式的等效性试验（**图 6**），并取得了一般财团法人日本海事协会和 DNV・GL 船级协会的认证。

5　后记

以上对船舶洗涤塔用激光式气体分析仪进行了论述。通过使用激光方式，实现了长期的稳定性。另外，通过针对船舶用途的特有设计，实现了小型化、轻量化和易维护性。通过本分析仪的应用，我们希望实现 EGCS 的自动化和稳定的运转。

参考文献

⑴　联合国. 关于 1973 年防止船舶污染国际公约之 1978 年议定书（MARPOL73/78）附则Ⅵ：防止船舶造成大气污染规则.

⑵　春海一佳ほか . 船舶の省エネ・環境技術の評価に関する研究 . 海上技術安全研究所報告 . 第 15 巻第 1 号（平成 27 年度）総合報告 , p.35-86.

⑶　青木幸男等. 世界最小的船舶用旋风式 SO_X 洗涤器. 富士电机技术期刊. 2018, vol.C10, no.2, p.83-87.

⑷　“2015 GUIDELINES FOR EXHAUST GAS CLEANING SYSTEMS”. http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/MEPC.259%2868%29.pdf,（accessed 2019/11/28）.

⑸　“Guidance on indication of ongoing compliance in the case of the failure of a single monitoring instrument, and recommended actions to take if the exhaust gas cleaning system（EGCS）fails to meet the provisions of the 2015 EGCS guidelines（resolution MEPC.259（68））”. IMO MEPC. 1/Circ.883. http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/Documents/MEPC.1-Circ.883.pdf,（accessed 2020-02-26）.

⑹　小西英之等. 可为节能做出贡献的直接插入式激光气体分析仪 “ZSS”. 富士电机技报. 2014, vol.C6, no.2, p.74-77.

东　　亮一

从事激光式气体分析仪的开发。现为富士电机株式会社电力电子系统工业事业本部开发统括部测量仪器开发部主任。博士（工学）。应用物理学会会员。

田原　雅哉

从事船舶用废气净化装置的工程工作。现为富士电机株式会社电力电子系统工业事业本部自动化事业部 FA 系统技术第三部主任。应用物理学会会员。

赤尾　幸造

从事气体分析仪的开发。现为富士电机株式会社电力电子系统工业事业本部开发统括部测量仪器开发部经理。

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。