利用芽孢杆菌的新污水处理解决方案

New Wastewater Treatment Solution Using Bacillus

田口　和之 TAGUCHI, Kazuyuki　　佐藤　匡则 SATO, Masanori　　花井　洋辅 HANAI, Yosuke

富士电机以食品、饮料、化学工厂等为对象，开发出了利用芽孢杆菌的新污水处理解决方案。我们从自然界中种类众多的芽孢杆菌中发现了适用于污水处理的品种，并用于该解决方案。这样，就无需对现有的污水处理设备进行大规模改造和增设，可削减曝气电费和污泥处理费。此外，无污泥污水处理系统还附有通过磁力分离污泥的磁气分离装置，可大幅节省空间，提高处理性能。在工厂污水处理的应用实例中，运营成本可分别减少 20% 和 25%。

Fuji Electric has developed a new wastewater treatment solution using Bacillus. This solution uses special Bacillus that we found suitable for wastewater treatment among a number of such species existing in nature. This allows existing wastewater treatment facilities to reduce the electric power cost for aeration and sludge disposal cost without the need for large-scale modification or extension of the facilities. The sludge-less wastewater treatment system has a magnetic separator that separates sludge by magnetic force, achieving significant space-saving and better treatment performance. In an application example for factory wastewater treatment, the new wastewater treatment solution reduced the running cost by 20%, and the sludge-less wastewater treatment, by 25%.

1　引言

工厂和事业所的污水基准受到“水质污浊防治法”和地区自治体条例“追加基准”的严格管制，且要求各公司必须严格处理。在污水处理中，虽然标准活性污泥法被广泛采用，但其电费和污泥处理费等运营成本较大。

富士电机为了降低食品、饮料、化学工厂等中的运营成本，开发出了利用芽孢杆菌的新污水处理解决方案。

2　污水处理和运营成本

在各种工厂的有机性污水处理中，为了实现简单的运行管理，生物处理，特别是标准活性污泥法被广泛采用。**图 1** 为污水处理的基本流程和设施示例。标准活性污泥法是让微生物悬浮在污水中，通过微生物吸收污水中的污浊成分，使污水得到净化，之后再沉淀并除去微生物的方法。微生物在分解所吸收的污浊物质时需要氧气，因此必须通过鼓风机（送风机）向污水中吹入空气进行曝气，使污水中的溶解氧浓度达到微生物的需要量。此外，微生物分解污浊物质后会繁殖、生长，需要将过度繁殖的微生物块（剩余污泥）排放到系统外，排放出的剩余污泥将作为工业废弃物处理。

图 2 为工厂中污水处理的运营成本示例。在运营成本中，曝气电费和污泥处理费（工业废弃物处理费）所占比例较大，为污水处理运营成本的 40% 左右。

3　利用芽孢杆菌的污水处理

在自然界种类众多的芽孢杆菌〈注 1〉中，存在可以在短时间内分解高浓度有机物、具有较高污水处理净化能力，并能够分

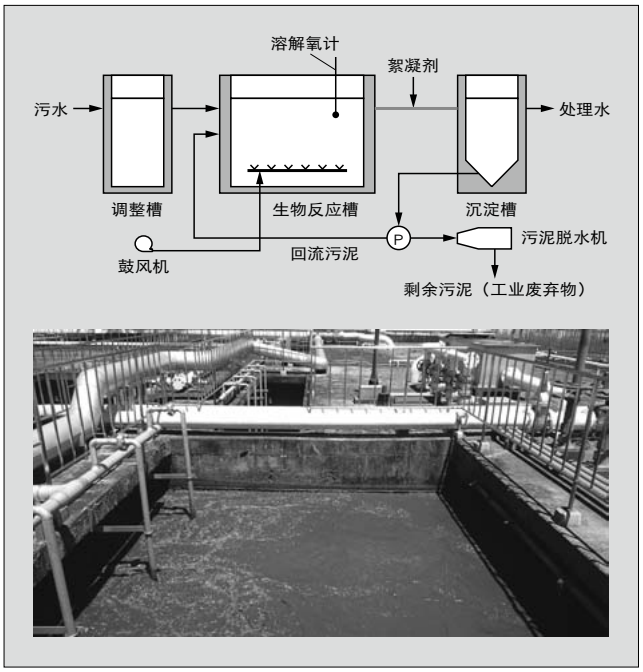

图 1　污水处理的基本流程和设施示例

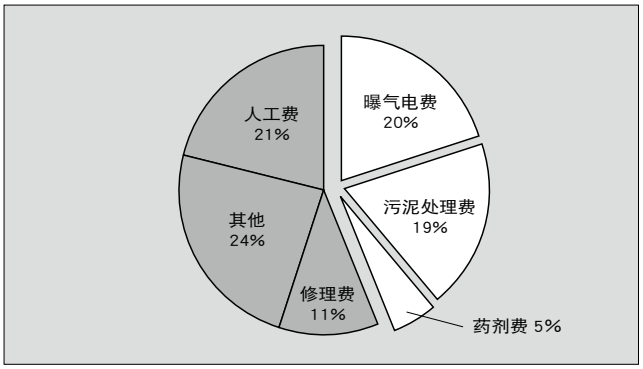

图 2　污水处理运营成本示例

〈注 1〉芽孢杆菌：参照第 115 页“解说 1”

泌出大量分解剩余污泥酶的芽孢杆菌。富士电机发现该芽孢杆菌后，将其作为污水处理用芽孢杆菌使用，从而削减了污水处理的运营成本，提高了处理性能。

3.1 特点

⑴ 削减运营成本效果

(a) 曝气电费可比原来减少 10 ～ 40%。

(b) 污泥处理费可比原来减少 20 ～ 40%。

(c) 药剂费可比原来减少 10 ～ 20%。

⑵ 提高处理性能

(a) 因为扩大了流入污水的水质变动应对范围，所以与原来相比其处理性能更佳，可改善水质。

(b) 可以抑制恶臭，改善周边环境和工作环境。

⑶ 能够轻松实现导入和维持管理

(a) 利用芽孢杆菌的污水处理无需对现有污水处理设施和设备进行改造和增设，就可削减污泥发生量和曝气量，因此不需要大规模的设备投资。

(b) 运用时，只需在现有的生物反应槽中投入芽孢杆菌一次即可。为了使芽孢杆菌成为优势菌并维持性能的药剂（活性剂），每天只需添加少量即可。

(c) 通过让芽孢杆菌数维持在初期约 100 倍的状态（芽孢杆菌为优势菌），可确保水质，达到维持削减剩余污泥和曝气量的效果。

(d) 调整期间为 2～3 个月，通过调整曝气量和污泥浓度，使芽孢杆菌成为优势菌。

图 3 为利用芽孢杆菌的污水处理概略流程。调整项目主要为曝气量和污泥回流量。

3.2 芽孢杆菌在污水处理中的作用

⑴ 污水处理用芽孢杆菌

芽孢杆菌是可以在溶解氧〈注 2〉较少的环境下繁殖的兼性厌氧性菌〈注 3〉。使用标准活性污泥法，虽然活性污泥中普遍存在芽孢杆菌，但是只有污水处理用芽孢杆菌才能够以更少的氧气量净化污浊成分，从而可降低鼓风机的运行风量，减少曝气电费。

⑵ 活性剂

污水处理用芽孢杆菌通过添加以硅、铁、镁等矿物质为主要成分的活性剂，可促进细菌繁殖、维持优势菌的地位，从而稳定净化性能[1]。污水处理用活性剂可以促进污水处理用芽孢杆菌增加酶的分泌量，以分解污泥成分的蛋白质和碳水化合物等。因此，能够促进剩余污泥分解，减少污泥发生量。

此外，污水处理用芽孢杆菌还具有添加活性剂后，蛋白质分解酶活性（酶的分泌量）能够增加到约 30 倍的性质。拥有约 10 倍于其他种类芽孢杆菌的活性（**图 4**）。同样，污水处理用芽孢杆菌也具有添加活性剂后，碳水化合物分解酶活性能够增加至约 25 倍的性质。拥有约 3 倍于其他种类芽孢杆菌的活性（**图 5**）。通过利用这些性质，分解污水中污浊成分的能力和净化污泥成分的能力比原来有了大幅提高。

⑶ 削减污泥

我们发现，利用污水处理用芽孢杆菌得以削减剩余污泥，是细菌分泌的酶发挥了作用。

图 6 为向正在实施标准活性污泥法的污水处理设施的剩

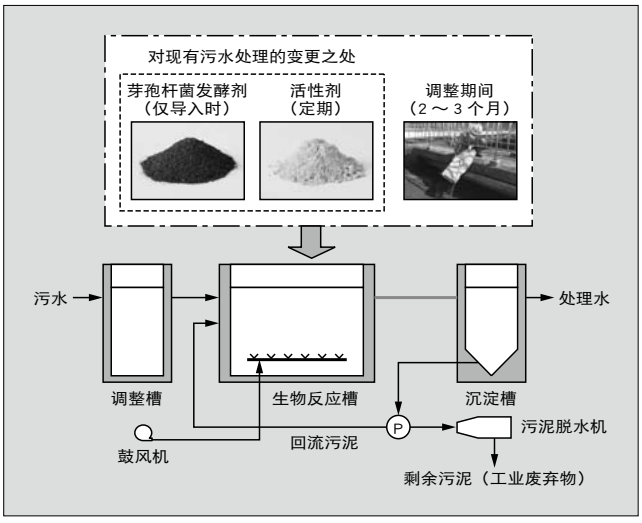

图 3　利用芽孢杆菌的污水处理概略流程

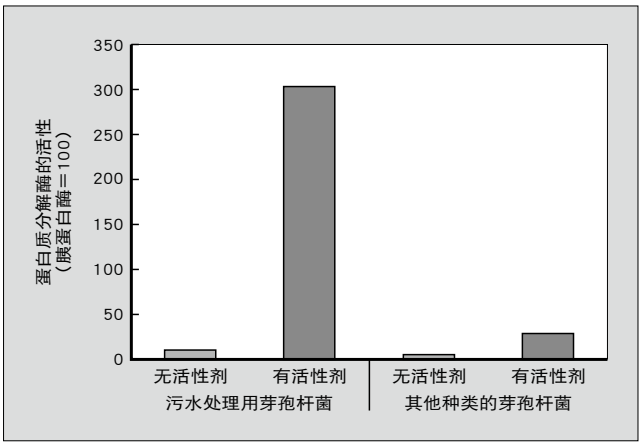

图 4　蛋白质分解酶的活性

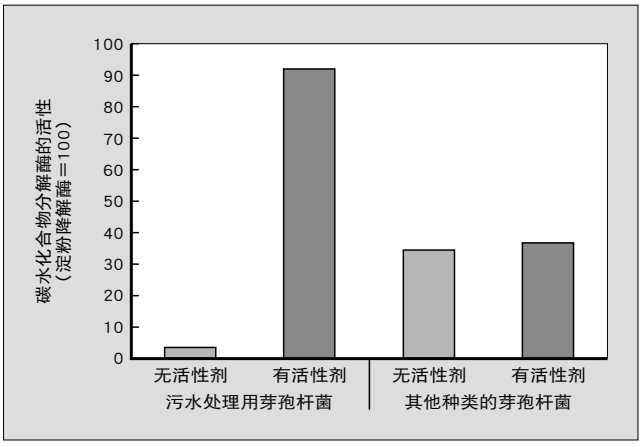

图 5　碳水化合物分解酶的活性

〈注 2〉溶解氧：溶解在水中的氧气

〈注 3〉兼性厌氧性菌：无论有无氧气均可繁殖，即可以在低氧气浓度下繁殖的菌的总称

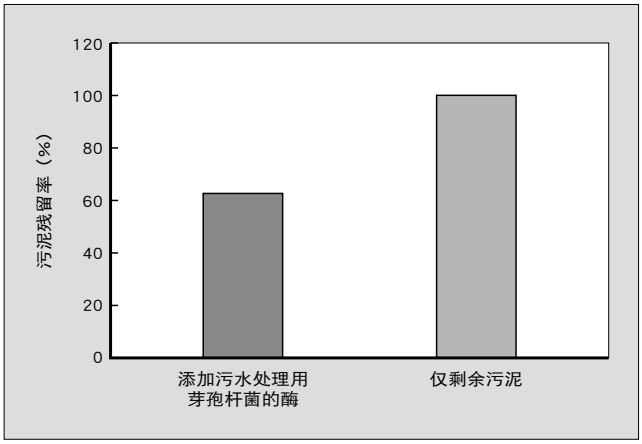

图 6　利用污水处理用芽孢杆菌的酶污泥分解

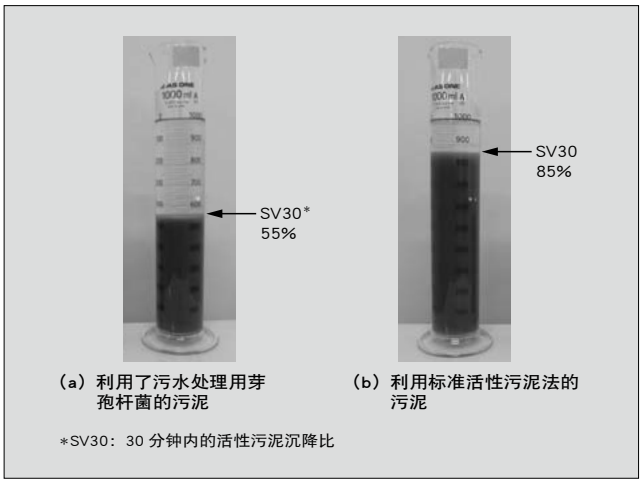

图 7　利用污水处理用芽孢杆菌的污泥沉淀性改善

余污泥中，添加污水处理用芽孢杆菌的酶（将培养液除菌后的液体）后，污泥残留量的比较图表。添加酶后分解去除了约 40% 的污泥。从中可以看出，污泥削减的效果因酶而异。

⑷　改善污泥的沉淀性和无臭化

污水处理用芽孢杆菌具有较高的凝集性和粘附性，可以改善污泥的沉淀性。

图 7 为针对使用了污水处理用芽孢杆菌的污泥和标准活性污泥法的污泥，比较 30 分钟内 SV（Sludge Volume：活性污泥沉降比）的结果。使用了污水处理用芽孢杆菌的污泥沉淀时间比标准活性污泥法的污泥更短，因此容易进行固液分离，可以降低污泥的流出。

此外，污水处理用芽孢杆菌还可以分解硫化氢和氨气等恶臭成分，实现无臭化。

3. 3　应用实例

在导入了标准活性污泥法、污水量 1500 m^3/ 天的 A 公司工厂中，应用了利用污水处理用芽孢杆菌的污水处理。目的为削减污水处理运营成本中的污泥处理费。

⑴　导入形态

导入时，没有对现有污水设备进行改造和增设，只是投入了污水处理用芽孢杆菌发酵剂。之后每天向生物反应槽中投入了规定量的活性剂。在为时 3 个月的调整期，我们进行了曝气量的调整和回流污泥量、抽取污泥量的调整。在此期间，污水处理用芽孢杆菌的比例是初期的约 100 倍，成为了优势菌。

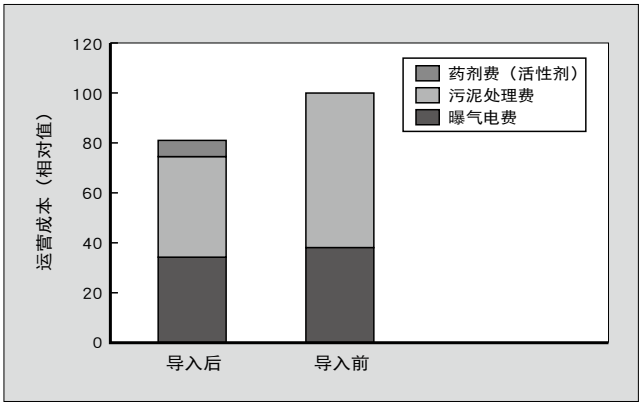

图 8　污水处理用芽孢杆菌的导入示例

⑵　导入效果

使用污水处理用芽孢杆菌后，曝气电费比导入前减少了 10%，污泥处理费减少了 35%。如果除去每天投入的活性剂的增加部分，整个污水处理的运营成本可削减约 20%（**图 8**）。

4　无污泥污水处理系统

如果在使用污水处理用芽孢杆菌的同时加上磁气分离装置，就可以建立几乎不会产生剩余污泥的无污泥污水处理系统。**图 9** 为本系统的流程。如**图 3** 所示，在利用芽孢杆菌的污水处理中加上磁气分离装置，既可以消除沉淀槽和回流污泥，也不再需要污泥脱水机。

4. 1　特点

本系统以工厂增产和整合后污水量和污浊物质量都会增加，必须更新、新设或者增设污水处理设施的工作场所为主要对象。还可满足在极狭小空间内的建设需求，和抑制不断增加的污水处理运营成本的需求。与利用标准活性污泥法的传统系统相比，本系统具有如下所示特点。

⑴　运营成本效果

⑻　污泥处理费可削减 90% 以上。有机性污泥的发生量为零，无机物的堆积物每年只需抽取几次。

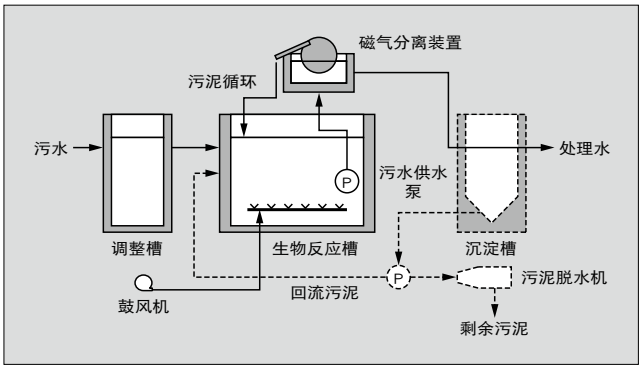

图 9　无污泥污水处理系统的流程

(b) 不再派生污泥处理所需的曝气电费。

(c) 不再派生污泥处理所需的药剂费。

(2) 提高污浊成分净化能力

可对应的污浊物质浓度是传统系统的 3 倍。

(3) 降低初期投资

(a) 不需要沉淀槽。

(b) 生物反应槽容积为原来的 1/2～1/3。

(c) 不需要污泥脱水机。

由于利用磁气分离装置进行固液分离，因此不再需要传统的沉淀槽。此外，由于不会产生有机性污泥，因此也不需要污泥脱水机。但是对于无机性污泥，每年需要除去几次。

(4) 省空间化

污水处理占用空间可减少到传统系统的一半。

(5) 提高处理性能

(a) 氮去除率为 90% 以上。

(b) 可以通过抑制恶臭，改善周边环境和工作环境。

4.2 建立系统

(1) 计算污泥发生量

污水处理中的污泥发生量如公式 1 所示，用 BOD (Biochemical Oxygen Demand：生化需氧量）和 SS (Suspended Solid：悬浮物）分别乘以污水量和污泥的转换率后，从计算出的污泥增加量（微生物繁殖部分）中减去通过污泥自溶和酶的污泥分解作用减少的污泥量后得出[2]。

本系统的芽孢杆菌可以大量分泌上述分解污泥的酶。分解该污泥的酶量会随着芽孢杆菌浓度的增加而增加。因此，如果提高生物反应槽内的污泥浓度 (MLSS：Mixed Liquor Suspended Solids)，并提高本系统的芽孢杆菌浓度，本系统芽孢杆菌分泌的污泥分解酶的量就会随着污浊物质生物处理后增加的污泥量而增加。这样就能够促进污泥分解，实现污泥发生量为零的运行[3]。

$$W=A\times BOD\times Q+B\times SS\times Q-C\times MLSS\times V \quad \cdots\cdots(1)$$

W：污泥发生量 (kg/d)

BOD：生化需氧量 (kg/m^3)

SS：悬浮物 (kg/m^3)

$MLSS$：活性污泥悬浮物浓度 (kg/m^3)

Q：污水量 (m^3/d)

V：生物反应槽容积 (m^3)

A：BOD 污泥转换率 (%)

B：SS 污泥转换率 (%)

C：自溶率 (%)

(2) 污泥的固液分离

活性污泥中的菌体表面带有负电荷，磁性粉末（磁铁矿，Fe_3O_4）带有正电荷。因此，将两者混合后会相互吸附，使活性污泥带有磁性。

如**图 10** 所示，只要在活性污泥中添加磁性粉末后搅拌，就能够快速地互相吸附。因此，活性污泥就会变为磁化活性污泥，利用磁力高速高效地进行固液分离[3],[4]。

(3) 磁气分离装置

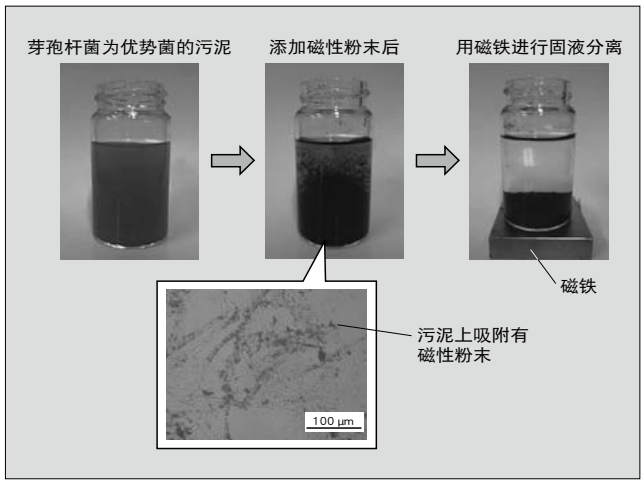

图 10 磁化活性污泥

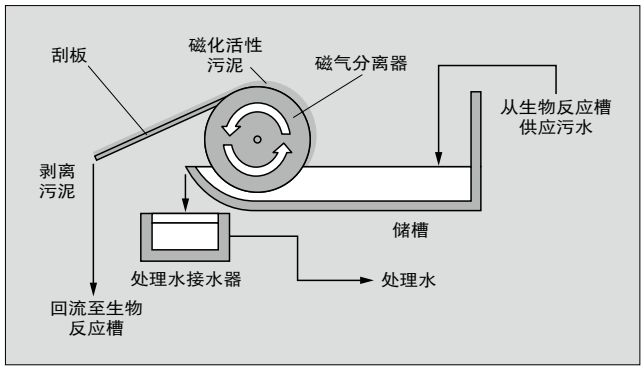

图 11 磁气分离装置模式图

利用磁力，开发出了连续对磁化活性污泥进行固液分离的磁气分离装置，建立了无需进行最终沉淀的污水处理流程。与传统利用重力沉淀的固液分离相比，它可以强制浓缩污泥，使生物反应槽内的污泥维持在高浓度。这样，污泥增加和自溶就可以维持平衡，实现污泥发生量为零的运行。

图 11 为本系统磁气分离装置的模式图。抽出生物反应槽内的磁化活性污泥，将其送到磁气分离装置的储槽中。储槽内有磁力的磁气分离器在旋转，通过磁气分离器时磁化活性污泥会吸附到磁气分离器上。之后用刮板刮落，返回生物反应槽中。

(4) 提高净化能力

通过将生物反应槽内的活性污泥维持在高浓度，使生物反应槽单位容积的污浊物质净化能力提高至约 3 倍。

4.3 应用实例[5]

在导入了标准活性污泥法、污水量 2000 m^3/ 天的食品制造 B 公司工厂中应用了本系统。目的是通过削减污泥处理费和增产来应对污水负荷的增加。

(1) 导入形态

导入时，新设了磁气分离装置和向之供应磁化活性污泥的泵。在本系统的生物反应槽中投入了芽孢杆菌发酵剂和磁性粉末。之后每天向生物反应槽中投入了规定量的活性剂。

(2) 导入效果

利用本系统后，生物处理中产生的污泥比原来减少了

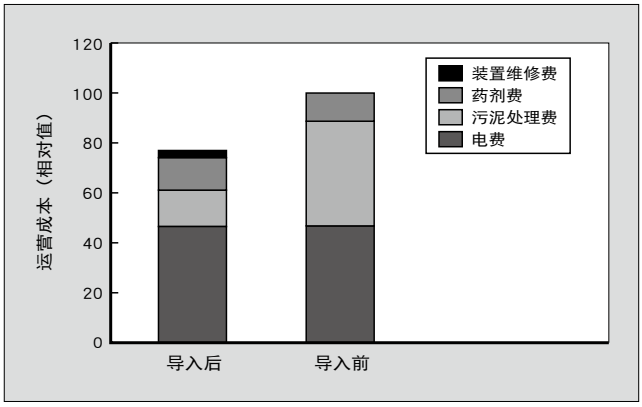

图 12　无污泥污水处理系统的导入效果

90%，包括前处理的污泥在内，总污泥发生量减少了约 66%。可处理的污水的污浊物质量是传统系统的 3 倍。如果除去每天投入药剂（活性剂）的增加部分、磁性粉末补充和磁气分离装置的维修费，整个污水处理的运营成本可削减约 25%（**图 12**）。

5　后记

本文针对以食品、饮料、化学工厂等的污水处理设备为对象，利用芽孢杆菌的新污水处理解决方案进行了介绍。我们将通过扩大本解决方案的运用范围，为削减污水处理的运营管理成本和降低环境负担做贡献。

参考文献

⑴　田口和之ほか. バチルス属細菌を優占種とする活性汚泥法の処理性能と汚泥削減の検討. 第 49 回日本水環境学会講演集. 2015, p.213.
⑵　日本下水道協会編. 下水道施設計画・設計指針と解説 2009 年版 .
⑶　花井洋輔ほか. 高濃度有機性排水処理に向けた磁化活性汚泥法の汚泥削減性能の向上. 第 48 回日本水環境学会講演集. 2014, p.391.
⑷　花井洋輔ほか. 磁化活性汚泥法における汚泥削減性能の検討. 第 49 回日本水環境学会講演集. 2015, p.495.
⑸　花井洋輔ほか. 余剰汚泥の大幅減量可能な磁化活性汚泥法による食品排水処理の実用化検討. 第 50 回日本水環境学会講演集. 2016, p.224.

田口　和之
从事污水处理系统的开发、工程设计业务。现为富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部社会系统事业部水环境项目部主任。日本生物工学会会员。

佐藤　匡则
从事污水处理系统的电气、仪表设计、开发。现为富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部社会系统事业部水环境项目部长。

花井　洋辅
从事污水处理系统的开发、工程设计业务。现就职于富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部社会系统事业部水环境项目部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。