

バイオマス資源の高度回収・再利用技術

Advanced Collection and Reuse Technologies for Biomass Resources

今井 正 山本 勝也 小峰 英明

■ IMAI Tadashi

■ YAMAMOTO Katsuya

■ KOMINE Hideaki

再生可能な資源として各種バイオマスの利活用が社会的要請となっており、これを受けて様々なバイオマス利用技術が研究開発されている。

東芝は、下水汚泥燃料化技術、下水処理場排水からのリン回収技術、及び木質の高機能炭素素材化技術を開発している。下水汚泥燃料化技術では、下水汚泥を可燃性ガスと輸送が容易な固体燃料（炭化汚泥）にし、可燃性ガスは高温燃焼させて処理に必要な熱エネルギーとして利用するとともに温室効果ガス生成も抑制する。リン回収技術では、機能性粒子により下水処理場排水から選択的に高純度でリンを回収し、実験室レベルではあるが回収率95%以上を達成している。また、木質の高機能炭素素材化技術では、比較的簡素なシステム構成により、木質を熱分解して液状物質を生成し、高機能な炭素素材“バイオマスカーボン™”を合成できる。

Demand is growing in society for the effective utilization of various types of biomass. In order to maintain a sustainable society, Toshiba has been researching and developing a variety of biomass utilization technologies.

In the field of energy applications, we have been developing a conversion technology for the degradation of sewage sludge into combustible gas and solid fuel that can be easily transported, with high-temperature burning of the gas providing thermal energy for the process and serving as a means of reducing greenhouse gases. We are now evaluating the thermal decomposition performance of this technology using a demonstration plant.

In the field of material applications, we have been researching both separation and recovery technologies for phosphorus from the wastewater of sewage plants, as well as a technology with a simple system configuration for the conversion of wood into high-performance carbon material.

1 まえがき

バイオマス (Biomass) とは生物資源 (bio) の量 (mass) を表す概念で、ここでは「再生可能な生物由来の有機性資源で、化石資源を除いたもの」を言う⁽¹⁾。これまで大量消費されてきた化石資源の代替として未利用バイオマスを有効活用するための技術開発は、資源枯渇や地球温暖化防止の観点から、循環型社会を目指すわが国にとって重要な施策として位置づけられている。

バイオマスの利活用はエネルギー利用とマテリアル利用に分類され、エネルギー利用については、建築廃材や樹皮などを直接燃焼させる実用例が、また、マテリアル利用については、食品廃棄物や下水汚泥などのたい肥化や建設資材化などの実用例がある。

一方で、バイオマスの利活用は、輸送・製造コストの問題や得られる製造物の価格が安いなどの問題で経済性がなかなか確保できず、現状は必ずしも十分に進んでいるとは言えない。このため、製造物の高付加価値化が大きな課題となっている。

ここでは、資源循環と環境負荷の低減を目的に東芝が取り組んでいるバイオマス資源の高度回収・再利用技術として、バイオマスのエネルギー利用では下水汚泥燃料化技術、マテリアル

利用では下水処理場排水からのリン回収技術と木質の高機能炭素素材化技術について述べる。

2 下水汚泥燃料化技術

ここでは、下水処理場から残渣（ざんさ）として排出される下水汚泥を燃料化し、エネルギー収支が高く温室効果ガス生成も抑制する下水汚泥炭化システムについて述べる。

2.1 下水汚泥燃料化の現状

下水汚泥は13～17 MJ/kg-DS (Dry Sludge: 乾燥固形物量)⁽²⁾の発熱量を持っているが、焼却又は熔融処理で回収できるエネルギーは蒸気や温水に限られる。近年、より高度なエネルギー活用を主眼とした下水汚泥の燃料化の研究や実用化が進んでいる。

2.2 下水汚泥燃料化の課題

下水汚泥から作られる燃料は、有機物のメタン発酵により得られる消化ガスなどの気体燃料と、乾燥汚泥や炭化汚泥などの固体燃料に大別される。気体燃料は輸送が困難なため、需要場所が製造場所に隣接している必要があるが、固体燃料は輸送が容易であり、製造場所に隣接していなくても、発電用又は蒸気利用など既存の石炭ボイラで燃料の一部として混焼

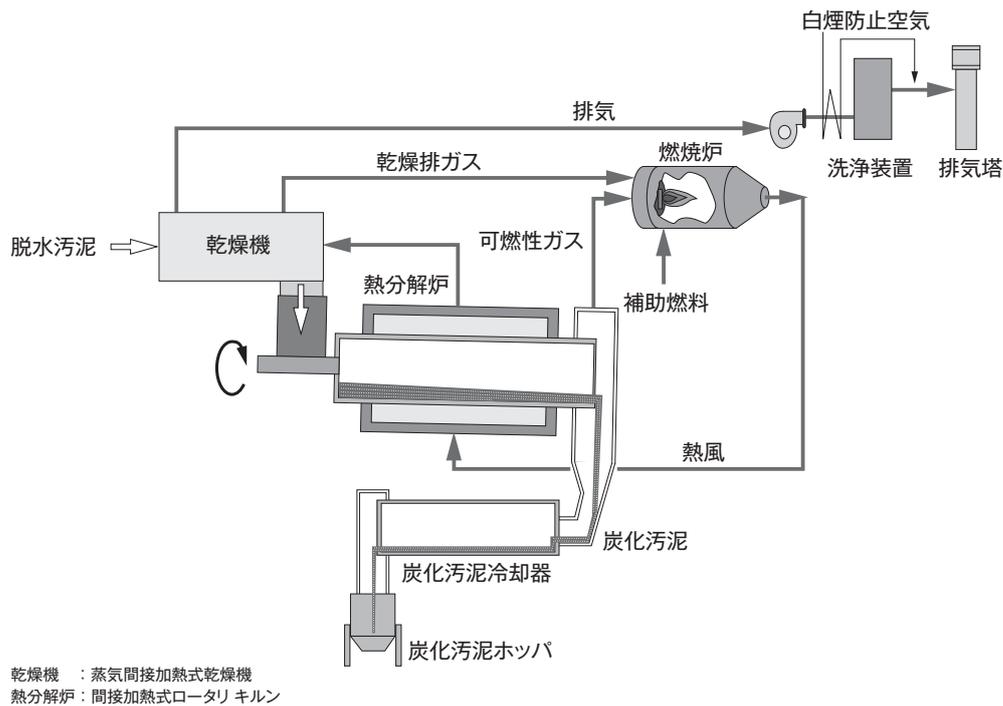


図1. 下水汚泥炭化システムのプロセスフロー — 下水汚泥の熱分解により可燃性ガスと炭化汚泥にし、この可燃性ガスを燃焼させてプロセスに必要な熱エネルギーを供給するとともに、炭化汚泥を固形燃料として回収する。

Process flow of sewage sludge carbonization system

できる点が有利である。ただし、輸送や保管時の分解反応や臭気の発生を防止する必要がある、また、汚泥の保有エネルギーを有効利用するためには、補助燃料など外部からのエネルギー投入を極力抑える必要がある。

また、下水汚泥は大気中の二酸化炭素 (CO₂) 量を増加させないカーボンニュートラルなエネルギー源であるが、焼却すると温室効果ガスである亜酸化窒素 (N₂O) が焼却炉から外気に放出されるため、環境負荷低減という付加価値のためには、このN₂Oの抑制も大きな課題となっている。

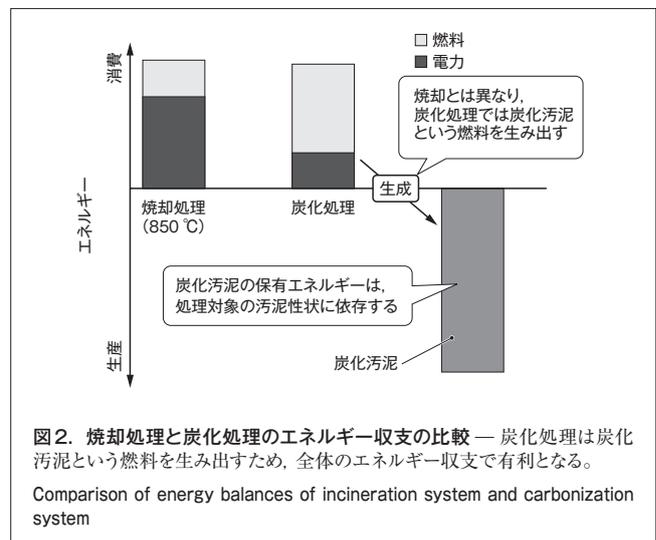
2.3 下水汚泥炭化システム

下水汚泥の燃料化におけるこれらの課題を解決するため、当社は下水汚泥炭化システムを提案している。下水汚泥を低酸素状態のもとに約550～600℃で熱分解することで可燃性ガスと炭化汚泥にし、可燃性ガスの燃焼で処理に必要な熱エネルギーを賄うとともに、炭化汚泥を固体燃料として回収するシステムである。

このシステムのプロセスフローを図1に示す。

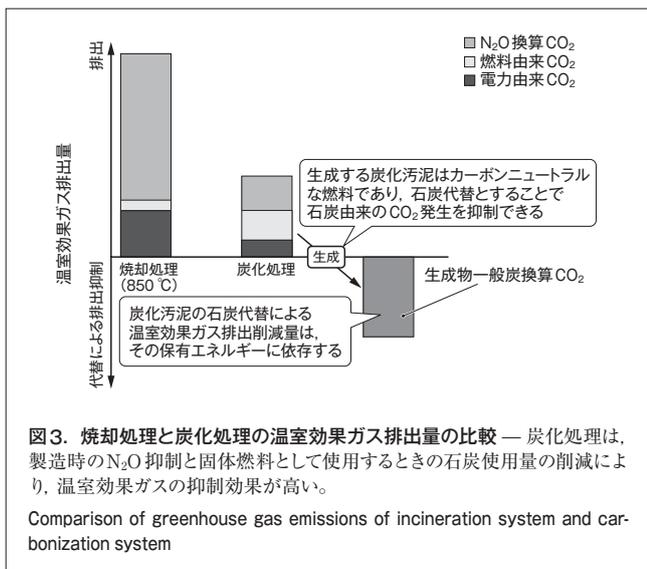
炭化汚泥は、熱分解処理により臭気などの揮発成分が除去されており、臭気防止のうえで有利であるとともに、固体燃料のため気体燃料と比べて輸送が容易で、ほかの需要場所での利用にも適している。

炭化の前処理では、蒸気加熱式乾燥機を使用して廃熱を有効利用することで、必要な投入エネルギーの最小化を図っている。



焼却処理と炭化処理のエネルギー収支の比較を図2に示す。炭化処理は炭化汚泥という燃料を生み出すことから、全体のエネルギー収支が焼却処理に比べて有利になる。

また、このシステムでは可燃性ガス成分だけを燃焼処理させるため、燃焼温度を950℃以上の高温に維持できることから、N₂Oの生成を抑制できる。炭化処理は、製造時のN₂O抑制と、固体燃料として使用する際の石炭使用量の削減により、温室効果ガスの抑制効果が高い。焼却処理と炭化処理の温



室効果ガス排出量の比較を図3に示す。

なお、下水処理場近隣に炭化汚泥の燃料需要がない場合には、炭化汚泥焼却器を組み合わせることで、温室効果ガス排出量の削減を重視したシステムの構築も可能である。

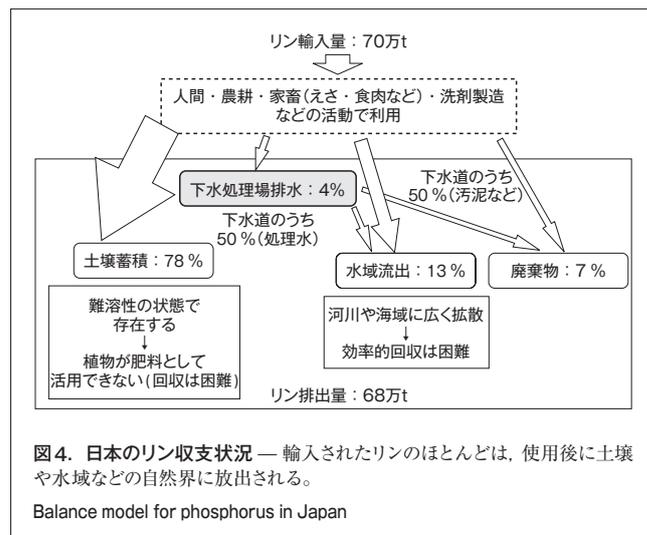
現在、北九州市エコタウン内の実証試験施設で、下水汚泥を用いた熱分解試験を実施中である。

3 下水処理場排水からのリン回収技術

ここでは、下水処理場排水からの資源回収技術として、高選択性のリン吸着剤を用いたリン回収技術について述べる。

3.1 下水処理場排水からのリン回収技術の現状

リンは生物の成長に欠くことのできない元素であるが、日本はリンを輸入に100%依存している。欧米などのリン資源保



有国は、今後のリン資源の枯渇を視野に入れリン鉱石の輸出を大幅に規制する動きを見せ始めており、今後、食物生産などに必要なリン資源を十分に確保するために、リン回収技術の構築が重要になってくる。

日本国内におけるリンの収支状況⁽³⁾を図4に示す。輸入されるリンのほとんどは土壌や水域に排出され、回収が非常に困難である。そのため、リン資源が比較的集中している下水処理場排水をリン回収対象として積極的に位置づけ、水環境を向上させると同時に、資源循環による持続可能な社会の構築を目指す取組みが始まっている。

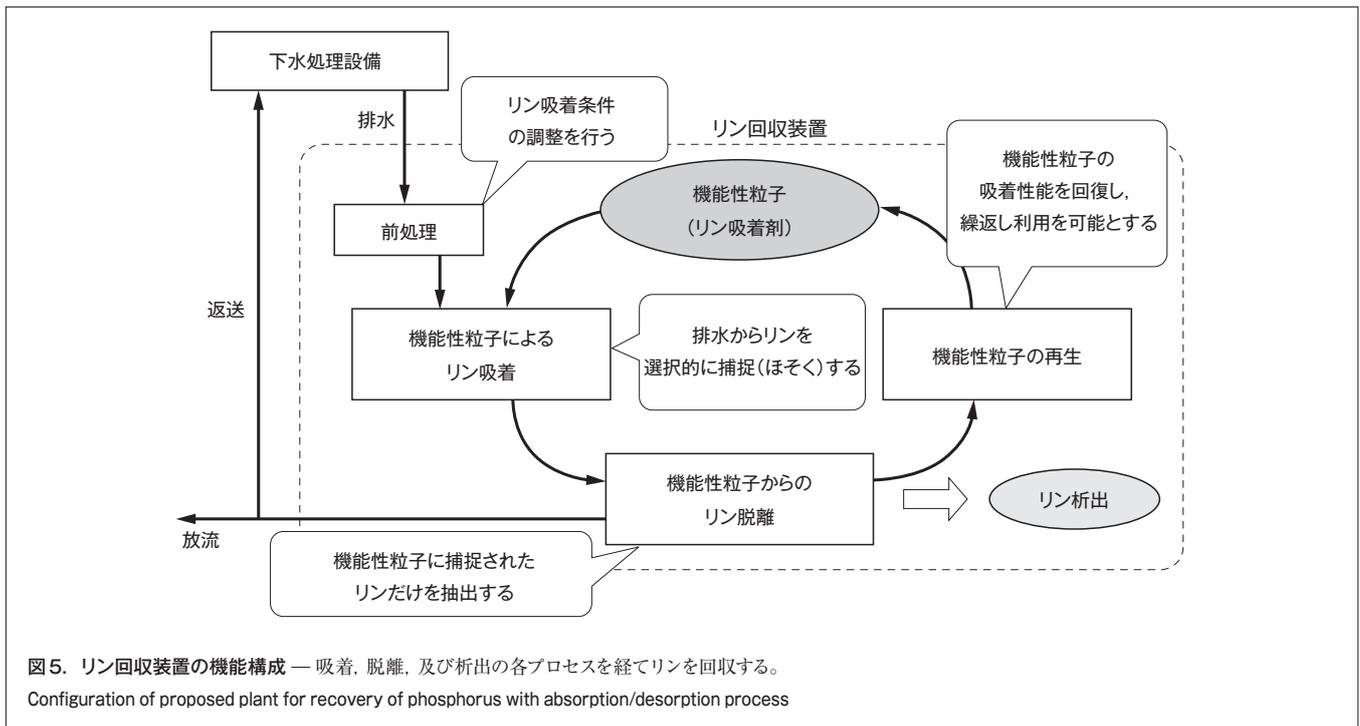
3.2 従来提案されているリン回収技術と課題

近年、下水処理場排水から、肥料などの資源として活用可能な形態でリンを回収する方法が提案又は実用化されている。主なリン回収技術の概要を表1に示す。

しかしこれらの技術は、リン回収に要するコストや回収物に含

回収方法	技術概要	実現レベル	リン回収形態とリン回収率	長所	短所
MAP法	・ 化学反応による凝集沈殿 弱アルカリ性条件下でアンモニウムイオン、マグネシウムイオン、リン酸イオンが難溶性結晶であるMAPを作ることを利用	実用化	MAP: 50～80%程度	・ 排水中のアンモニウムイオンも除去できる	・ 使用する薬品量が多い(ランニングコストがかかる) ・ 不純物の混在により回収物の用途が制限される場合がある(肥料利用の場合、天然肥料よりも不純物の割合が多くなる) ・ 回収にあたっての条件調整(溶液濃度の調整)がやや複雑
HAP法	・ 化学反応による凝集沈殿 リン酸イオンがカルシウムイオンと難溶性結晶であるHAPを作ることを利用		HAP: 70～85%程度	・ 回収物の用途が広い	
鉄電解法	・ 電解反応の利用 鉄電極を用い、リン酸イオンをリン酸鉄として回収		リン酸鉄: 50%程度	・ 薬品が不要(比較的 低ランニングコスト)	
ジルコニウム系吸着剤による吸着法	・ 吸着/脱離反応の利用 リン吸着能力を持つ吸着剤をカラムなどに充てんし、その中に下水を通過することでリンを回収	研究段階	リン酸カルシウムなど: 80～90%程度	・ 高純度のリンを回収できる	・ 非常に高価 ・ 阻害物質除去のための前処理を必要とする場合がある
還元溶融法	・ 下水汚泥焼却灰の完全溶融還元 焼却灰中のリンを黄リンとして揮発させ、液体黄リンとして回収		黄リン : 70%程度 リン酸鉄 : 15%程度	・ 非常に高純度のリンを回収できる ・ 回収物の用途が広い	

MAP : Magnesium Ammonium Phosphate
HAP : Hydroxy Apatite



まれる不純物などの問題から、広範に普及するに至っていない。

3.3 高選択性リン吸着剤を用いたリン回収技術

当社は、リン回収コストの低減と回収したリンの付加価値を向上させることを目指し、下水処理場排水から機能性粒子により選択的に高純度でリンを回収する技術を研究中である。機能性粒子を用いたリン回収装置の概略フローを図5に示す。機能性粒子は吸着、脱離、及び析出のプロセスを経てリンを回収する。

この機能性粒子は、有機と無機を材料を組み合わせたハイブリッド型のリン吸着剤であり、表1に示すジルコニウム系吸着剤に比べて、低コストで高いリン選択性を見込める。機能性粒子のリン吸着性能は、現在実験室レベルではあるが、排水中のリンの95%以上を回収できるレベルに達している。

3.4 今後の展開

リン回収コストを更に低減させるためには、機能性粒子の繰返し利用回数を向上させることが必要となる。コスト低減と同時にリン回収時に生じる廃棄物量も低減できる、環境配慮型リン回収装置を実現するために、機能性粒子の再生方法の確立と、リン脱離・析出プロセスの最適条件の確定を目標に開発を進めている。

4 木質の高機能炭素素材化技術

ここでは、木質バイオマス資源の高付加価値化として、木質の高機能炭素素材化技術について述べる。

4.1 木質マテリアル利用技術の課題

日本の山林などに広く、また薄く存在する間伐材などの未利用木質系バイオマスの利用方法としては、収集・運搬コストを考慮すると、小規模で、分散型のシステムが望ましい。このため、比較的小規模なシステムでも適用できるマテリアル利用の開発が進められている。しかし、下記のような問題点があり、現実に普及は進んでいない。

もともと木質バイオマスは、リグニン、セルロース、及びヘミセルロースなどの成分から構成された複雑な固形物であり、従来のマテリアル利用技術では、構成成分ごとの利用にとどまっている。例えば、リグニン又はその誘導体のプラスチックとしての利用、あるいはセルロースやヘミセルロースについては、繊維としての利用のほかにはエタノール化やポリ乳酸化などがある。しかし、これらの利用方法では、対象成分以外は利用しにくいとため利用効率が低下したり、複数の利用方法を組み合わせる場合には工程が非常に複雑化し、経済的に成り立たないという問題がある。

4.2 熱分解技術適用による高機能炭素素材化

当社は、未利用の木質系バイオマスを構成成分ごとにマテリアル利用するのではなく、熱分解により木質を液状の生成物(バイオオイル)とし、バイオオイルから高機能な炭素素材“バイオマスカーボン™”を製造する、木質のマテリアル利用技術を提案している。比較的簡素なシステム構成ながら、高い利用効率と付加価値を実現できる。

このシステムの概要を図6に示す。第1工程として木質を熱分解し、可燃ガス(気体)、炭化物(固体)、及びバイオオイル

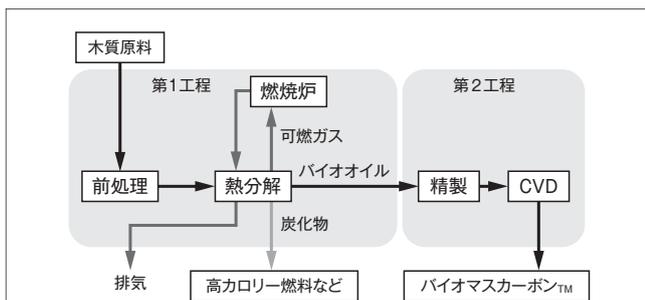


図6. バイオマスカーボン™製造システムの概要 — 第1工程で木質を熱分解し、可燃ガス、炭化物、及びバイオオイルを得る。可燃ガスは燃料として利用され、炭化物は高カロリー燃料などに加工される。バイオオイルは精製後、第2工程でCVD法によりバイオマスカーボン™に合成される。

Outline of biomass carbon™ production system



図7. 熱分解試験炉 — 熱分解試験炉を北九州市エコタウン内に建設した。
Thermolysis test furnace

(液体)を得る。可燃ガスは熱分解のための加熱用燃料として利用し、炭化物は高カロリー燃料などに加工される。バイオオイルは精製後、第2工程としてCVD (Chemical Vapor Deposition: 気相成長) 法によりバイオマスカーボン™に合成される。

第1工程の木質のバイオオイル化については、北九州市エコタウン内に建設した連続式熱分解試験炉で、バイオオイル収率向上の研究を進めている(図7)。バイオマスからのバイオオイル収率は、通常の熱分解法で20~30%, 急速熱分解法で70%前後⁽⁴⁾であり、この試験炉では、簡素な機器構成でバイオオイル収率を向上させる、最適な生成条件を確立するための研究を行っている。第2工程のバイオマスカーボン™については、現在、小規模な回分式の試作機を用いてカーボンナノチューブの合成を行っている。カーボンナノチューブは、炭素原子が結びついた直径がナノメートルオーダーの筒状物質であり、高強度、高導電性、及び高熱伝導率といった特長を持ち、構造材料や電気素子といった先端材料への応用が期待されている。

4.3 今後の展開

今後、市場化にあたっては、第2工程のバイオマスカーボン™大量合成法を確立するとともに、用途開拓が必要である。このため2008年度には、連続式の合成装置を用いて、大量合成に向けた最適な合成条件の研究を行う予定である。また、合成したバイオマスカーボン™については、複合材などへの応用研究を進めている。

5 あとがき

当社が取り組んでいる、下水汚泥や木質などの未利用バイオマス資源の高度回収・再利用技術について述べた。

今後、資源循環と環境負荷低減が可能なシステムを早期に実用化するため、更なるコスト低減及び実機検証を進めることにより、資源枯渇や地球温暖化の問題に対応した循環型社会の実現に貢献していきたい。

なお、木質の高機能炭素素材化技術の研究は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成により、「次世代戦略技術実用化開発助成事業」プロジェクトで実施したものである。

文 献

- (1) 農林水産省. “バイオマス・ニッポン総合戦略”. <http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf>. (参照2008-02-18).
- (2) 日本下水道協会. 下水道施設計画・設計指針と解説(後編)-2001年版-. 東京, 日本下水道協会, 2001. 482p.
- (3) 資源のみち委員会. “資源のみちの実現に向けて-報告書(案)-”. <<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/gyosei/sigen7th/02.pdf>>. (参照2008-01-08).
- (4) 飯塚亮介, ほか. ウッドケミカルの新展開. 東京, シーエムシー出版, 2007. 281p.



今井 正 IMAI Tadashi

社会システム社 水・環境システム事業部 環境システム技術部 主務。環境システムのエンジニアリング業務に従事。化学工学会, 日本エネルギー学会会員。
Environmental Systems Div.



山本 勝也 YAMAMOTO Katsuya

社会システム社 水・環境システム事業部 公共ソリューション 技術部主務。下水道システムの商品企画, 研究・開発に従事。環境システム計測制御学会会員。技術士(上下水道部門)。
Environmental Systems Div.



小峰 英明 KOMINE Hideaki

社会システム社 水・環境システム事業部 環境システム技術部 主務。環境システムのエンジニアリング業務に従事。
Environmental Systems Div.