

ISSN 0387-7906

# 川崎重工技報

プラント・環境特集号



TECHNICAL REVIEW



Copyright JX

# 快適に、豊かに、 環境にやさしく

プラント・環境カンパニーは、川崎重工の一員として、  
広汎な領域における高度な総合技術力によって、地球環  
境との調和を図りながら、豊かで美しい未来社会の形成  
に向けて、新たな価値を創造します。



■ 巻頭インタビュー	プラント・環境事業の近況と今後の展開	1
■ 総括説明	プラント・環境カンパニーにおける製品・技術展開	2

技術解説

■ LNG (液化天然ガス) 貯槽	—世界最大級LNG貯槽の自動化技術による高品質・低コスト化への取り組み—	6
Liquefied Natural Gas (LNG) Tank		
—Optimizing Quality and Cost with Automation Technology for the World's Largest Class LNG Tank		
■ 世界最大級オートクレーブ設備	—ボーイング787ドリームライナー向け高精度複合材熱処理炉—	10
One of the World Largest Autoclave Facility – High-precision Composite Curing Oven for Boeing 787 Dreamliner		
■ CKKシステム (新型ごみ処理システム)	—ごみの減量化・エネルギー利用・再資源化を同時達成—	14
CKK System – New Waste Treatment System that Achieves Waste Reduction, Energy Use and Recycling		
■ U-KACCボイラ	—革新的ボイラ構造により難燃性石油残渣を有効活用—	18
U-KACC Boiler – Technology to Effectively Utilize Residual Fuel from Oil Refinery		
■ RDF焼き内部循環流動床ボイラ	—構造改良・運転条件改善による長寿命化—	22
RDF-fired Internal Circulation Fluidized Bed Boiler		
—Longer Operating Life Achieved with Improved Structure and Operating Conditions		
■ ごみ焼却・バイオガス化複合施設	—固定買取制度に適合する新たなごみ処理システム—	26
Waste Treatment and Biogas Generation Complex		
—New Waste Treatment System Compatible with the Feed-in Tariff Scheme		
■ セルロース系バイオエタノール製造システム	—非食料系原料によるエネルギー創造—	30
Cellulosic Ethanol Production System – Energy Creation from Non-food Sources		
■ 水素液化・液化水素輸送貯蔵	—来るべき水素社会に向けて—	34
Technologies of Hydrogen Liquefaction, Transport and Storage – Paving the Way to a Hydrogen Fueled Future		

新製品紹介

■ KSV (低NOx型仮焼炉)	—厳しい環境規制のグローバル化に対応—	40
Kawasaki Spouted Bed and Vortex Chamber (DeNOx Pre-Calciner)		
—Addressing Global Trend of Strict Environmental Regulations		
■ フェロニッケル製錬プラント	—電気炉排ガスを利用して省エネルギー化を目指す—	42
Ferronickel Smelting Plant – Electric Furnace Off-Gas Utilization to Save Energy		
■ 石炭搬送用スタックリクレマ	—石炭ヤードの新設・更新需要に迅速に対応—	44
Stacker-Reclaimer for Conveying Coal		
—Enabling Rapid Response to Demand for Coal Yard Installation and Upgrades		
■ シンガポール電力庁向け岩盤泥水シールド掘進機	—長距離・高水圧・岩盤カーブ掘削の難条件に対応—	46
Slurry Shield Machine for Singapore Power – Handling Long Distance, High Water Pressure, and Curved Sections		
■ 乾式クリンカ処理システム	—メンテナンス性・経済性向上への取り組み—	48
Dry Bottom Ash Handling System – Improving Maintainability and Economic Efficiency		
■ Prelude FLNG用ボイラ	—世界最大の洋上用ボイラを納入—	50
Prelude FLNG Boiler – World's Largest Off-shore Boiler Delivered		
■ 一般廃棄物 (ごみ) 炭化処理施設	—“ごみ” から“炭” を製造・有効利用—	52
Municipal Waste Carbonization System – Making Effective Use of Carbonized Fuel Manufactured from Waste		
■ 高速レーザスキャニングシステム	—差別化技術でレーザプロセスの生産性・品質を向上—	54
Kawasaki High-speed Laser Scanning System		
—Using Differentiation Technology to Boost the Productivity and Quality of Laser Processes		
■ 空冷式熱交換器	—原子力発電所での耐震性向上に貢献—	56
Air Fin Cooler (AFC) – Excellent Earthquake Helps Make Nuclear Power Station Safer		
■ ファインセクターθ (シータ)	—超微粉分級への挑戦—	58
Fine Sector θ – Achieve Ultrafine Powder Classification		
■ 高圧水素ガストレーラ	—国内初の複合容器の採用—	60
High-pressure Hydrogen Gas Trailer – Japan's First Composite Vessel		

特許・実用新案紹介

■ 倒立形低NOxボイラ	62
—灰分の多い燃料でも、安定連続にクリーンな電力を供給「U-KACC」—	
■ 廃棄物処理設備	62
—ごみの無害化・減量化とセメント製造を同時に達成「CKKシステム」—	

— プラント・環境カンパニー  
— プレジデントに聞く —

## プラント・環境事業の 近況と今後の展開

### プラント・環境事業の近況は？

当カンパニーは、2014年度に「難燃性石油残渣を燃料として使用するボイラ発電設備（U-KACCボイラ、富士石油(株)向け）」、「天然ガスを原料とするガソリン製造プラント（GTG：Gas to Gasolineプラント、トルクメニスタン向け）」、「東京外かく環状道路φ16.1m超大型シールド掘進機（泥土圧式、鹿島建設(株)向け）」という新製品を相次いで受注しました。

このうち、U-KACCボイラは、バーナを燃焼室上部に設けるなど構造を工夫することにより、難燃性の石油固体残渣（オイルコークスなど）を効率良く燃焼可能なボイラで、燃焼試験およびシミュレーション解析を繰り返し実施するなど、技術開発本部との共同研究開発が受注につながりました。

また、豊富な天然ガス資源を有するトルクメニスタンでは、日本企業として初めての大型プロジェクトである、肥料プラントを2014年10月に完工し、トルクメニスタン大統領も出席の下で開所式を行いました。これは日本企業の同国進出の足掛かりとなるものです。当社は、この肥料プラント建設の実績を高く評価され、今回のGTGプラントの大型受注に成功しています。

さらに、大型シールド掘進機は2020年までに国内で多数の出件が予想され、東京外かく環状道路向けで開発する製造技術によって高品質のシールド掘進機を短納期で納入可能となります。

### 今後の展開は？

2015年4月に、約210名の東京技術部門が神戸に移動し、カンパニー技術部門の神戸集約が完了しました。2005年の分社以来、「4つの改革（組織改革、意識改革、業務改革、技術／製品改革）」を継続実施しており、今回の神戸集約は、組織改革の集大成と位置付けています。この神戸集約に伴い、カンパニーの技術力を結集・融合し、①ボイラBU、環境BU、産機BU、化学・低温貯槽BU、生産本部の連携強化による製品競争力の強化、②灰処理BU+搬送BUの協業による石炭火力発電IPP（独立系発電業者）案件の受注拡大、③原子力BU+開発BUの技術力融合による新規事業への展開、のシナジー効果の実現に期待しています。

最近の市場環境を見ると、景気の先行きに一部不透明感



井上 英二 代表取締役常務  
プラント・環境カンパニー プレジデント

はありますが、おおむね回復基調が見込まれており、資源国・新興国では、今後ともエネルギー・環境分野での発注が期待されています。

特に、石炭・石油の化石燃料と比較して、CO<sub>2</sub>排出量の小さい天然ガスの需要は大きく拡大しています。すでに、当社は世界初の海上天然ガス液化プラント「Prelude」に搭載される船用ボイラ（FLNG：Floating LNGボイラ）を顧客に納入していますが、FLNGの次案件や、豪州イクシスLNGプロジェクト・台湾CPC社に続く海外での大型LNGタンクの受注を目指しています。

また、中国・東南アジアでは、ごみ焼却炉などの廃棄物処理設備の受注拡大の可能性が大きく、他メーカーも積極的に進出しています。当社は、中国合弁会社と共に、エネルギーを大幅に削減できる廃棄物処理設備とセメント製造設備を融合した新型ごみ処理システム（CKKシステム）および既存のストーカ式焼却炉の受注拡大に取り組んでいます。

### 最後に

「技術部門の神戸集約によるシナジー効果発揮」以外に、「プロジェクト採算の向上および不具合の極小化」、「カンパニーのコア・コンピタンスである人財の維持・強化」、「非価格競争力の強化」を積極的に進めています。

このうち、「非価格競争力の強化」では、新製品群であるGTGプラント、U-KACCボイラ、FLNGボイラ、CKKシステムなどを高付加価値製品として育成してきました。

また、既存製品に関するテーマ以外に、川崎重工全体で取り組んでいる「水素エネルギーサプライチェーン構想」に協力し、新製品の足掛かりとしています。

これからも、既存製品と新製品をうまく組み合わせながら、持続的な企業価値の向上を目指していきます。

# プラント・環境カンパニーにおける 製品・技術展開

渡辺 達也

執行役員 プラント・環境カンパニー バイスプレジデント



## まえがき

当社は、昨年10月に中長期的に目指していくべき姿としてグループ経営モデル2018を発表した。その中で当プラント・環境カンパニーは、「エネルギー・環境分野を中心に、高い製品開発能力とエンジニアリング能力を基盤とした差別化技術と優れた品質による信頼性により、地球環境保全に貢献し、顧客満足度の高い製品・サービスを提供する、特色あるプラントメーカーに成長する」ことを目標としている。

本稿では、当カンパニーの保有する特色ある製品・技術の特長および今後の技術展開について紹介する。

## 1 カンパニーの特長

当カンパニーは、

- ① セメントプラント、搬送プラント、灰処理プラント、土木機械の産機プラント部門
- ② 化学プラント、LNGタンクなどの化学・低温貯槽プラント部門
- ③ 各種ボイラ、発電プラントなどのエネルギープラント部門

- ④ ごみ焼却設備、下水処理設備の環境プラント部門
- ⑤ マザーファクトリーとしての生産本部（播磨工場）の技術・事業を継承、統合してきた経緯を有しており、多くの製品を保有し広く国内外の産業基盤ならびに社会資本の整備に貢献してきた。

その技術展開の特長は、異なる分野の製品群を多種類有していることから、それぞれの分野の基盤技術を基に新たな技術を付加したり、他の分野の技術と組み合わせたりすることにより、新たな、より大きな付加価値を生み出すことにある。

本号の中で紹介しているが、ごみをガス化し、そのガスをセメントプラントの燃料として利用すると同時に、ごみ焼却によって生じる灰分をセメントの原料として利用する「CKKシステム（CONCH Kawasaki Kiln System）」は、まさしく産機プラント部門と環境プラント部門の融合により生まれたシステムである。これらの特色は、技術開発の手法にとどまらず業務や組織の改編でも異分野のより良いところを吸収し、違う価値を生み出す資質として継承されている。

現在の製品分野と担当部門は、図1のとおりである。

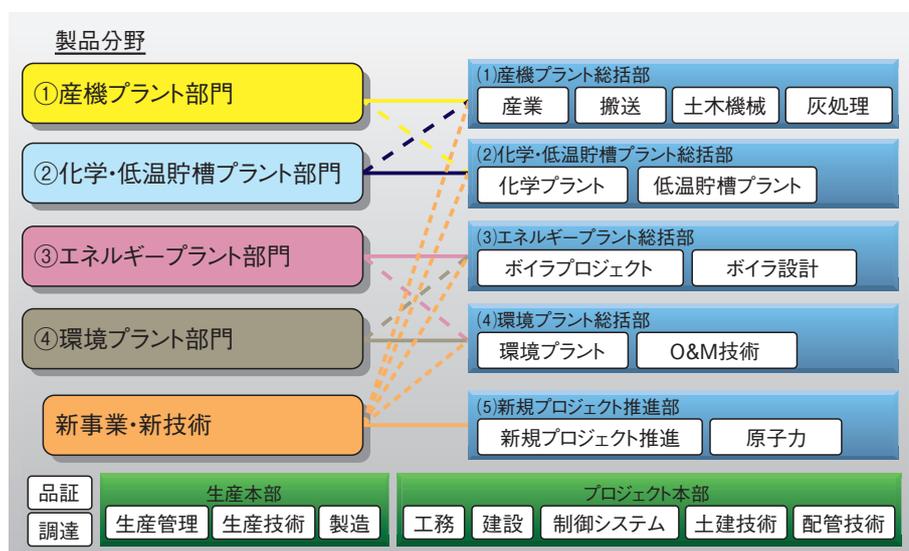


図1 製品分野と担当部門

## 2 各事業部門の主要製品と技術概要

各部門の主な製品と技術概要を以下に紹介する。

### (1) 産機プラント部門

#### (i) 産業プラント（セメントプラント）

当社は、昭和初期にセメント機械の製造を開始し、昭和30～40年代の高度経済成長による旺盛な需要のもと、同事業で質・量ともに業界における主導的地位を築きあげるとともに、セメントプラント製造技術の蓄積により、セメント原料である石灰石の採掘から製品出荷まで最新の一貫プロセス機器の供給と、総合プラントエンジニアリング能力を備えた、世界有数のセメントプラントメーカーに発展した。

日本のセメント業界は世界でトップクラスの省エネ対策を推進しており、それに呼応して当社においても燃料消費量の削減を目指して原料予熱装置付き仮焼炉を、また電力消費量の少ない堅型ミル「CKミル」および予粉碎システム用堅型ミル「CKPミル」を開発し、国内外に多数納入して稼動中である。セメントプラント事業は、当社のプラント輸出の先鞭をつけ、1961年以来、全世界に約90プラントの納入実績を有している。

さらに、セメントプラント技術の応用分野として、2007年にインドネシアのアンタム（PT ANTAM Tbk）社向けフェロニッケル製錬プラントを、2009年に韓国SNNC社向け世界最大級（年産3万トン）ニッケル製錬プラントを納入し、2015年には能力増産（年産5万4千トン）プラントを完成している。

#### (ii) 搬送プラント

搬送プラント部門は、石炭や鉄鉱石、土砂などの掘削・搬送・船積み設備、さらに、揚荷・搬送・貯蔵、出荷に至る一連のシステムを製鉄、電力、鉱山、セメント、化学メーカーなどに幅広く納入しており、その主要機器を設計・製作するとともに、ハンドリングシステムのトータルエンジニアリングを展開し、豊富な納入実績と技術力を有している。

また、従来型コンベヤに比べて、ローラレスのため低騒音・低振動で粉塵飛散がない、環境に配慮し省力化が図れるなど、優れた特長をもつ空気浮上式コンベヤ（Flow Dynamics Conveyor-FDC）を開発し、国内外に多数納入している。2015年には台湾林口発電所で石炭搬送として使用される全長4km、能力2,000t/h・2基、4,400t/h・4基を納入している。

#### (iii) 灰処理プラント

当社は、石炭火力用灰処理装置のメーカーとしてアメリカで圧倒的なシェアを持つUCC社（United Conveyor Corporation）と1963年に技術提携し、国内事業用石炭火力発電所の大部分に灰処理装置を納入してきた。さらに、

当社は1994年にイタリアのマガルディ社より乾式ボトムアッシュ処理システムの技術を導入した。この導入技術をベースとして装置の改良や周辺システムの開発を行い、顧客ニーズに適合した最新鋭灰処理装置を数多く納入しており、業界において高い評価とシェアを得ている。2016年の電力自由化をにらんだIPP発電事業の増加に伴い灰処理設備を多数受注している。

#### (iv) 土木機械（トンネル掘進機）

当社が手掛けている掘削機には、地下土木工事用のシールド掘進機、硬岩用トンネル掘削機（TBM：Tunnel Boring Machines）、堅形の掘削機がある。

シールド掘進機は、地盤の崩壊を防ぐため円筒状のシールドを組み立てながら掘削していくシールド工法に使用される掘削機である。当社は、泥水式、泥土圧式、機械式、セミ機械式、手掘式などあらゆる種類のシールド掘進機を製作しており、大口径では業界トップの地位にある。2012年には首都高速道路中央環状品川線用12.55m泥土圧シールドが掘削を完了（2015年3月供用開始）、また、2014年度には、シンガポール電力会社および地下鉄向けに泥水式シールド掘進機を35基納入した。

TBMは、硬い岩石の山をくりぬき、自動車道路、鉄道、導水路、上下水道などのトンネルを作る機械である。当社は、初の国産技術によるTBMを開発したパイオニアとして、中小水力開発や下水道工事向けをはじめ、英仏海峡（ドーバー海峡）海底トンネルなど自動車道路、鉄道トンネル向けに多くの実績を持つ。シールド掘進機、TBMを併せて日本国内外で約1,400基を納入している。

### (2) 化学・低温貯槽プラント部門

#### (i) 化学プラント

当社の化学プラント部門は、石炭化学関係、肥料・エチレン・メタノール、排煙脱硫のほか、各種石油化学、化学合繊関係などの各種プラントのエンジニアリングと、その中核機器である反応器・塔槽・熱交換器・分解炉などの製作に至るまで幅広い実績と技術力を有している。

肥料・エチレン・メタノール分野においては、1981年アメリカのM.Wケロッグ社（現 KBR社）とのコンソーシアムによるナイジェリア工業省向けアンモニアプラント納入をはじめとし、最近では2009年にトルクメニスタン国営化学公社トルクメンヒーミヤ社向けに同国最大の肥料プラントを納入するなど、これまでに7件の実績を有している。さらに2014年には、トルクメニスタン国向けに、天然ガスを原料とし高品質ガソリンを製造する世界最大（年産60万トン）のガソリン製造プラント（GTG：Gas to Gasolineプラント）を受注した（図2）。

排煙脱硫装置は、当社独自開発による大型火力に対応した川崎石灰石-石膏法を実用化するとともに、石炭火力を対象とした総合排煙処理システムを開発、さらに計算機制

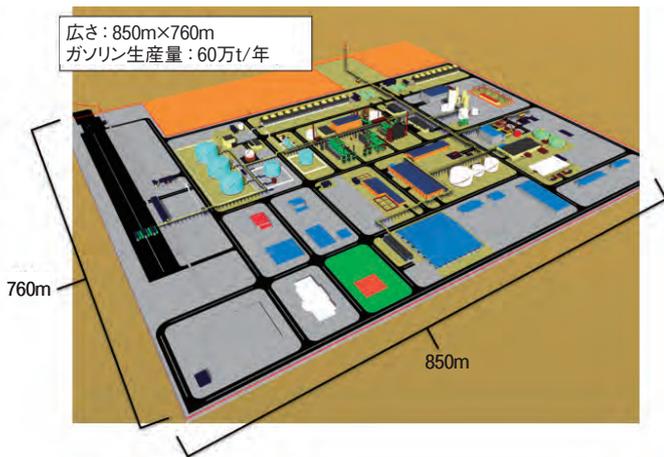


図2 トルクメニスタン国向けGTGプラント

御システムやノンリークガスヒータ、上部反転式新型吸収塔を独自開発し、中国、ベトナム、サウジアラビアなど国内外で97件の実績を有している。

技術開発では、食糧と競合しない未利用資源であるソフトセルロースを使用して、従来法である酵素や硫酸ではなく熱水を糖化に利用するバイオエタノール製造技術の開発に取り組んでいる。農林水産省の「ソフトセルロース利活用技術確立事業」において、(社)秋田県農業公社とともに、2013年3月まで稲わらなどを原料とするバイオエタノール製造実証事業を実施し、エタノールの製造効率153.5L/原料t (dry) を達成した。現在は商用化に向けてさらなるコスト低減を図るとともに、バイオケミカル分野も含めた商用プラントへの展開を図っている。

(ii) 低温貯槽プラント

当社は、円錐屋根、ドーム屋根、浮屋根などの各種地上式平底円筒タンクや、液化ガス・各種圧縮ガスなど高圧力のガスを貯蔵する球形タンクに多数の実績を有している。また、低温・極低温の分野にも早くから取り組み、LPGや液化アンモニアなどの平底円筒形低温タンク、陸上LNGタンクの研究開発を進め、低温靱性特性に優れた材料の溶接技術など、独自の設計、施工技術を確立している。

特にLNGタンクでは、内槽材料に9%Ni鋼やアルミ合金を使用した金属二重殻式タンクを地中内に配置したピットイン式、PC（プレストレスコンクリート）防液堤を一体化したPC外槽二重殻式LNGタンク、薄板ステンレス鋼を使用した地下式メンブレンタンクなど、大型LNGタンクで適用される全ての種類の納入実績を有している。最近では、国内における大型LNGタンクの50%以上のシェアを獲得し、海外では国際石油開発帝石社がオーストラリアで進めているイクシスプロジェクト向け低温タンク4基、台湾の国営石油ガス会社である台湾中油股份有限公司が台中港で建設するLNGタンク3基などの受注がある。

当社は、石油代替エネルギーとして世界的にLNGの需

要が増加する中、タンク単体のみならず基地建設など幅広い分野に積極的に取り組んでいる。

技術開発では、これまでに培われた高度な断熱技術を利用して液化水素輸送用コンテナや圧縮水素トレーラを開発し、将来の水素チェーンの実現に向け、水素大量輸送を可能にしている。今後、燃料電池を用いた自動車や水素発電設備の普及により「水素利用社会」の到来が予測されるが、当社はこれまでに培った水素製造から輸送、貯蔵、利用技術を応用し「水素エネルギーサプライチェーン」構想に積極的に注力していく。

(3) エネルギープラント部門

当社は創業以来、陸・船用ともに幅広い分野でさまざまな顧客ニーズに合わせた特長ある火力プラントを製品系列化し、国内外に多数納入してきた。燃料としては、重油、石炭、LNG、木質チップや黒液（製紙パルプ廃液）などのバイオマス、石油残渣や廃棄物燃料などの特殊燃料、といった多様な燃料に対応可能で、それぞれの特性に合わせた最適な燃焼方式を採用してニーズにマッチしたボイラを提供している。

(i) 一般燃料焚きボイラ

石炭・石油残渣などの燃料焚きボイラは、各種産業における電力および蒸気大量消費のための熱併給自家発電設備として根強い需要があり、これまでに化学や製紙をはじめとする幅広い産業分野に供給してきた。特に近年、本特集号で後ほど紹介する製油所で生産される固形のアスファルトピッチを利用する「U-KACCボイラ」設備（超低NOx、低ばいじんボイラ）などの普及に注力している。

(ii) 流動床ボイラ

当社は、木質バイオマスや廃棄物燃料を効率よく燃焼し、熱回収できる独自技術の流動床ボイラを開発してきた。特に内部循環流動床ボイラでは、発熱量の異なるさまざまな燃料や腐食性の高い燃料を混焼できる優れた燃焼技術を有している。特種東海製紙(株)島田工場のほか、3基の納入実績があり、最近では韓国国内でRPFを燃料とする2基の受注があり、温暖化ガス削減に貢献できる製品として今後の需要拡大が見込まれている。

(iii) 船用ボイラ

当社は、船舶に搭載する主機としての船用ボイラを長年供給している。この実績を踏まえ2013年には、オランダのシェル社がオーストラリアで建設する世界初の浮体式天然ガス液化プラント「Prelude FLNG」向けに新たにボイラを開発し、船用ボイラ7缶（1缶当たり蒸気量220t/h）を納入している（図3）。今後LNGの需要拡大に伴い、オーストラリア沖に新たなガス田開発も想定されており、さらなる受注が見込まれる。

(iv) 排熱ボイラ

排熱ボイラは、製鉄・非鉄金属・化学・セメント・ごみ



図3 シェル社 "Prelude FLNG" 220t/hボイラ7缶搭載

焼却炉などのプラントから排出される排ガスの熱を回収し、有効な熱エネルギーに変換する装置である。熱効率の改善・省エネルギー・公害防止に多大な効果をあげている。

特に、セメントの製造工程で排出される熱を排熱ボイラで回収して発電に利用するセメント排熱発電設備については、中国合弁会社を通して中国、ヨーロッパやトルコにおいても実績を有し総数1,041基を納入している。

#### (4) 環境プラント部門

近年は、ごみ処理（焼却）に伴って大気中に放出される恐れのあるダイオキシン類などの有害物質の低減・除去対策はもちろんのこと、地球温暖化対策や3R（リデュース、リユース、リサイクル）推進の観点からごみを資源とする高効率廃棄物発電への社会的要請が高まっている。

当社は、国内のごみ処理施設の大手メーカーとして、焼却炉を中心に排ガス・排水処理設備、発電設備などの周辺技術をプラントとして取りまとめて納入しており、2014年度末までのごみ処理プラント受注実績累計（建設中含む）は、国内外で175プラントである。

##### (i) 高効率発電設備

当社が納入した排熱発電設備付ごみ焼却施設は2014年度末までに43施設に達している。また、カワサキ・アドバンスト・ストーカシステムの技術を適用し、ボイラ蒸気条件を4MPa、400℃クラスまでの高温高压化した高効率発電施設は、2014年度末までに12施設を受注している。

##### (ii) ごみ焼却・バイオガス化複合設備

当社は、近年増加する再生可能エネルギー利用技術のニーズに応えるためごみ処理複合設備を開発した。このシステムは、バイオガス化施設・ごみ焼却施設を組み合わせ、高効率な廃棄物発電を実現し、温室効果ガス排出量削減に貢献するシステムである。本システムでは、可燃ごみからバイオガス化に適したごみを機械選別し、バイオガス化

設での高温乾式メタン発酵処理によりバイオガスを発生させる。バイオガスは排熱ボイラで得られた蒸気をさらに過熱する熱源として利用される。選別過程での除外物やメタン発酵残渣などについても、焼却施設のストーカ式並行流焼却炉において低空気比高温燃焼を行い、熱エネルギーとして回収する。2014年に山口県防府市に本施設の初号機を納入した。また、本システムは同年の日刊工業新聞社主催「十大新製品賞」を受賞した。

##### (iii) セメントキルンを活用した廃棄物処理システム

当社は、セメントキルンと廃棄物焼却施設を融合した新型の廃棄物処理システム「CKKシステム」を開発し、中国をはじめとする新興国で販売を開始した。本システムは、ごみを流動床式のごみ焼却炉でガス化し、発生した熱分解ガスとチャーを灰分とともにセメント製造設備に供給して、セメント製造工程で燃料および原料として利用する画期的なシステムであり、すでに19基を受注した。2010年に中国安徽省銅陵市にごみ処理能力300t/dプラントを納入し、現在200～400t/dで処理する5プラントが稼働中である。さらに、本システムに下水汚泥処理と下水再生処理の機能を付加・統合した「ZEET（Zero Emission Eco Town）システム」の事業化にも取り組んでいる。

#### (5) 生産本部（播磨工場）

マザーファクトリーとしての播磨工場は、大型ボイラ、地上／地下式LNGタンク、大口径シールド掘削機などカンパニーの主要機器を高品質・短納期で安定的に製造すること、先進的な生産技術の適用により製品の差別化を図り競争力を強化することを目標としている。このために生産技術力、生産管理力、グローバル力、現場力に注力し、総合的なものづくり力を強化している。特に生産技術力として、レーザー切断の高機能化や大型鏡曲げ加工技術の向上、高能率溶接の適用拡大、液化水素タンクに適用する真空技術の高度大容量化、3D検査・計測技術の実用化を目指している。

#### あ と が き

プラント・環境カンパニーは、さまざまな事業分野において多種類の製品を有し、その時代、ニーズに応じた多くの新製品を生み出してきた。多くの異分野の製品を有することは当カンパニーの強みであり、さまざまな技術を融合して新たな技術を生み出す、さらには異なる分野の良い点を取り入れ融合させるなどして成長を遂げてきた。

今後、国内の電力システムの改革や新興国を中心とした電力・エネルギー需要の高まりを背景に、多様な製品・技術とプラントエンジニアリング力により、世界の人々の豊かな生活と地球環境の未来に貢献する製品を生み出していく。

# LNG（液化天然ガス）貯槽 –世界最大級LNG貯槽の自動化技術による高品質・ 低コスト化への取り組み–

## Liquefied Natural Gas (LNG) Tank – Optimizing Quality and Cost with Automation Technology for the World’s Largest Class LNG Tank



中部電力向け 川越火力発電所LNG設備 No. 5, 6 LNGタンク

梅田 聡①*	Akira Umeda
宮崎 充弘②	Mitsuhiro Miyazaki
恒川 昌宏③*	Masahiro Tsunekawa
赤松 政彦④**	Masahiko Akamatsu
新見健一郎⑤	Kenichiro Niimi
青木 篤人⑥**	Atsuhito Aoki

LNG貯槽は、 $-164^{\circ}\text{C}$ の極低温の液体であるLNGを貯蔵することから、安全性すなわち高い品質が求められる。

当社では、品質の安定化が可能な溶接の自動化技術の開発を進めてきた。地上式LNG貯槽では、ナックルプレートの自動溶接ロボットを開発し、溶接品質の安定化と高能率化に寄与している。地下式LNG貯槽では、メンブレンパネルの溶接自動技術を開発して、工場でのブロック溶接へ適用し、優れた品質と自動化率95%を達成した。

LNG tanks require high standards of safety and quality as they store natural gas liquefied at a cryogenic temperature of  $-164^{\circ}\text{C}$ .

Kawasaki has been developing automated welding technology as part of an effort to ensure consistent quality. For aboveground LNG tanks, an automated welding robot was developed for the processing of knuckle plates to ensure consistent quality and high efficiency. For in-ground LNG tanks, a new automated welding technology was developed for membrane panels. By applying this technology to block welding in shop fabrication, Kawasaki has achieved both excellent quality and an automation rate of 95%.

### まえがき

LNGは、化石燃料のなかでも燃焼時の二酸化炭素の排出が少ないクリーンなエネルギーとして脚光を浴びている。特に、2011年の東日本大震災以降は火力発電燃料としての需要も高まり、国内での使用量は増加している。

そうした中で、LNGを安定的に確保・供給するために、LNG貯槽の建設が各地で進んでおり、当社でも新技術を取り入れながらさまざまな形式のLNG貯槽を社会に提供している。

### 1 地上式、地下式LNG貯槽の概要と当社の取り組み

#### (1) 地上式LNG貯槽の概要

地上式LNG貯槽の概要を図1に示す。貯槽は、液密性・気密性を保持し、地震などに対する耐荷性能が要求される内槽、必要な断熱性能が要求される保冷層、保冷層内の窒素ガスの気密性能が要求される外槽、内槽からのLNG漏

液時に液密性能が要求される防液堤などから構成される。内槽材には、低温における強度と靱性および溶接性から9% Ni鋼を使用している。

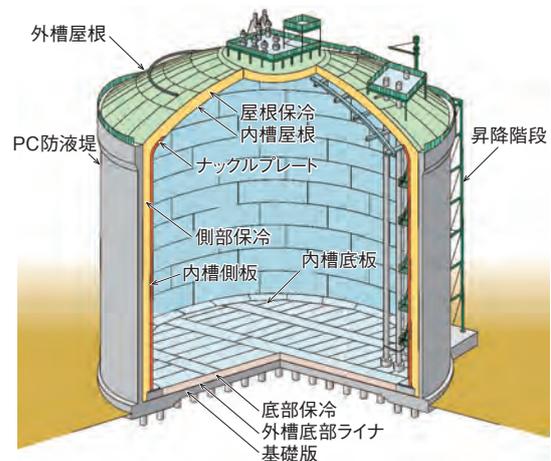


図1 地上式LNG貯槽構造概要  
 Fig.1 Aboveground LNG tank structure

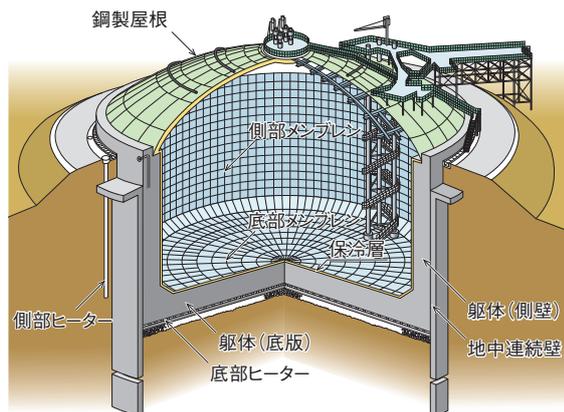


図2 地下式LNG貯槽構造概要  
Fig. 2 In-ground LNG tank structure

## (2) 地下式LNG貯槽の概要

地下式LNG貯槽の概要を図2に示す。貯槽は、液密性・気密性を保持するメンブレン、断熱性能を有しメンブレンから受ける荷重を躯体に伝える保冷層、貯蔵液圧や土圧に対する耐荷性能や地下水に対する止水性能が要求される躯体、気密性と耐荷性能が要求される鋼製屋根から構成される。メンブレン材には、低温収縮を吸収する波型（コルゲーション）を設けたステンレス製の薄板を使用している。

## (3) 当社の取り組み

当社は、これまでに国内外で地上式LNG貯槽32基（うち建設中7基）、地下式LNG貯槽12基（うち建設中1基）の実績を有している。この数年のLNG貯槽の大容量化、短工期での建設、建設コスト縮減などのニーズへの取り組みとして、溶接の自動化技術の開発を進めている。

## 2 工場製作における溶接自動化

当社のLNG貯槽は、その重要構造部である屋根部・側部・底部などを、複数の部材を組立・溶接して大ブロック化する工場ブロック工法を採用して製作している。工場ブロック工法では、品質を高めるための自動化を進めることができるので、作業者の技量依存性や作業環境の影響を受けやすい現地工法に比べ、品質・工程の変動要因を最小限として安定化できるメリットがある。加えて、現地施工での負荷低減、安全性向上につながり、建設工事の全体工期短縮や品質の安定化が可能となる。以下に当社工場製作での溶接自動化技術について紹介する。

### (1) 地上式LNG貯槽・ナックルプレートの溶接自動化技術

地上式LNG貯槽のナックルプレートは、図3に示すよ

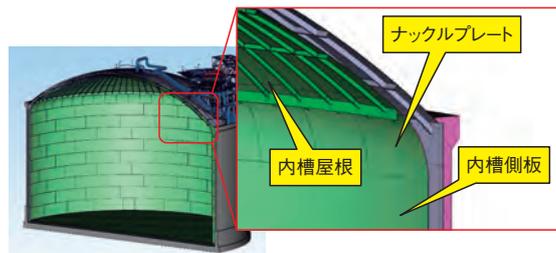


図3 ナックルプレート概要  
Fig. 3 Knuckle plate

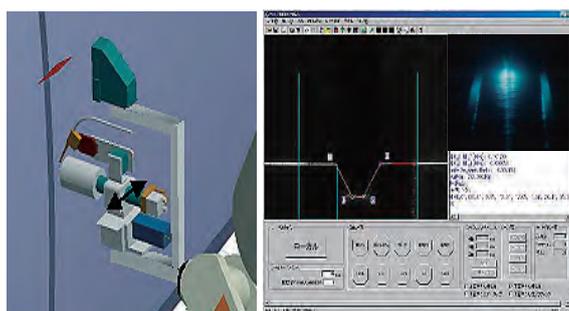


図4 高機能遠隔監視システム  
Fig. 4 High-functional remote monitoring system

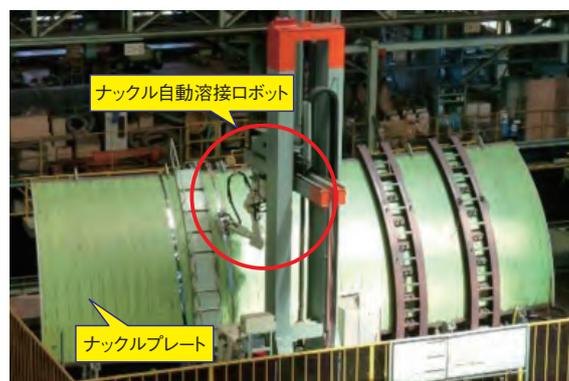


図5 ナックル溶接ロボットによる溶接施工状況  
Fig. 5 Welding with automated knuckle plate welding robot

うに内槽屋根と内槽側板とを接続する重要部位（厚板：最大50mm）であり、現地据付工事の板継溶接施工において工期短縮・品質安定化が必要である。そのため、自動溶接ロボットを適用して、2～3枚のナックルプレートを溶接する工場ブロック化を図り、全体工程短縮と溶接品質の安定化を実現した。

ナックルプレートの板継溶接は、9% Ni鋼板の3次元曲面形状の継手溶接線を、立向や上向姿勢で長時間連続溶接する必要があり、高難度な溶接施工となっていた。

これらの課題を解決するために開発したナックル自動溶接ロボットの概要を以下に示す。

(i) 高機能遠隔監視システム

ナックルプレート板継溶接において、安定した品質で連続施工を行うために開発した、高機能遠隔監視システムの概要を図4に示す。本システムの採用により、レーザセンサによる開先形状の自動認識、およびアークモニタカメラによるアーク状態確認を単独の溶接工が遠隔監視できるようになり、複数台の溶接ロボットを用いた同時施工を実現した。

(ii) 施工状況

複数台のナックル自動溶接ロボットにより、高能率溶接施工を実現し、LNG貯槽建設工事の全体工期短縮、品質安定化を図った。本システムを搭載したナックル自動溶接ロボットによる溶接施工状況を図5に示す。

(2) 地下式LNG貯槽メンブレンパネルの自動溶接技術

現在、当社では国内22万kL地下式LNG貯槽を2016年完成予定に向けて建設中である。地上式と同様に品質・工期安定化のため工場ブロック工法を採用している。プレスによりコルゲーション加工したステンレス薄板（SUS304、厚さ2mm）のメンブレンパネルを、当社専用工場で複数枚組み合わせる工場ブロックに仕上げている（図6）。

従来、地下式LNG貯槽のメンブレンパネル溶接工程については、熟練溶接工が自動TIG溶接装置を用いて、溶接による部材変形に対し、溶接トーチ位置の補正や溶接条件の微調整を行いながら施工していた。

そこで今回、オペレータの技量に依存せず、無監視で溶接可能なメンブレンパネル自動溶接装置を開発し、溶接施工の信頼性向上を図った。

(i) 自動溶接技術

メンブレンパネルの溶接において、従来の専用機による施工では、主に以下の課題があった。

- ① 溶接中の歪み変形の影響により溶接トーチ（電極）の狙い位置が変動するため、オペレータが常時アーク状態を監視して溶接トーチ位置を微調整していた。

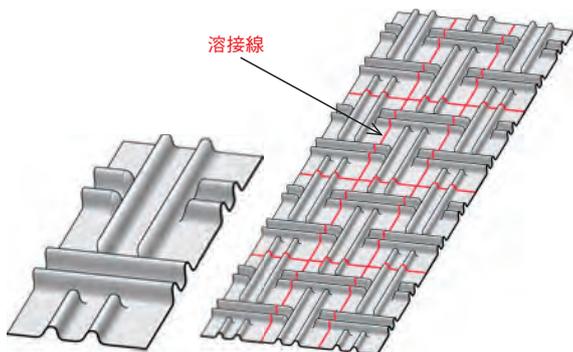


図6 地下式LNG貯槽・メンブレンパネル概要図  
Fig.6 Membrane panel of in-ground LNG tank

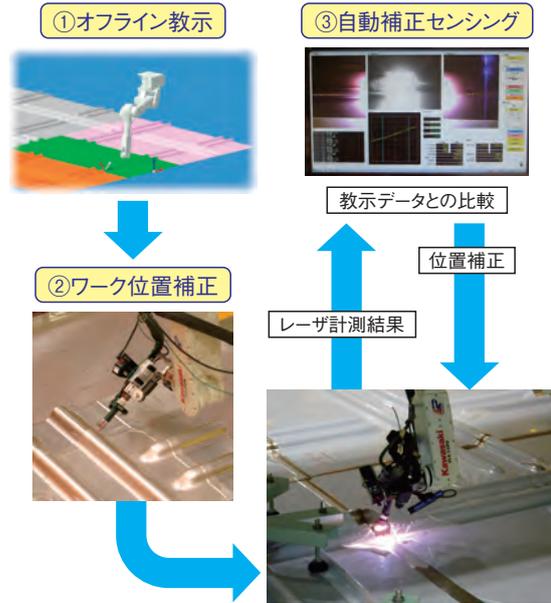


図7 溶接線自動検出システム  
Fig.7 Automated weld seam tracking system

- ② 薄板ステンレスの溶接施工であるため、大きな溶接歪みが発生して溶接装置が停止して、溶接欠陥が発生する場合があります。補修溶接が必要であった。

上記の課題を解決するため、当社の自動化・ロボット化技術を適用し、オペレータの監視運転が不要で、かつ安定した品質で施工可能なメンブレンパネル自動溶接装置を開発した。主な開発項目の詳細を以下に示す。

(ii) 溶接線自動検出システム

メンブレンパネルの溶接施工において、高品質な溶接施工を実現するために、溶接歪みに対して溶接トーチの狙い位置を適宜、位置補正する必要があった。そのため、レーザセンサにより、溶接線の位置・ギャップ量（溶接部の部材同士の隙間）をリアルタイムに計測し、溶接トーチ狙い位置を自動補正するセンシングシステムを開発した。溶接線自動検出システムの概要を図7に示す。

- ① オフライン教示  
溶接ロボットに対し、オフライン教示（ロボットの機体を使用せずPC上のCAD情報から溶接線情報を教示する）を行う。
- ② ワーク位置補正  
溶接ロボットのタッチセンシング機能により、メンブレンパネル溶接部の位置補正を行う。
- ③ 自動補正センシング  
溶接施工中、レーザセンサにより、重ね継ぎ手の位置・高さ、およびギャップ量をリアルタイムに計測する。教示データ情報との差異から補正量を算出し、溶接狙い位置を0.1mm精度で自動補正する。



図8 メンブレンパネル自動溶接施工状況  
Fig.8 Automated welding of membrane panels

### (iii) 溶接歪み変形予測技術

メンブレンパネルの工場ブロック製作は、18枚の単体パネルを組み合わせ、約5×11mに大ブロック化する。工場ブロックの品質確保および現地施工時の据え付け作業の時間短縮のため、工場ブロック全体の溶接歪みを低減することが重要である。しかしながら、複数の溶接線を施工する場合、オペレータが最終出来形の溶接歪みの発生量を正しく予測することは困難であった。そのため、薄板のメンブレンパネルに対して、溶接変形シミュレーションを適用し、歪み量を低減する最適な溶接施工順序を決定した。

このシミュレーション結果を反映させた施工手順でモックアップによる施工確認を行い、熟練溶接工による従来の施工と比較して、溶接歪み量を半減できることを検証した。さらに、実際の工場ブロック製作へ適用し、溶接歪みの最小化を達成した。

### (iv) 施工状況

工場ブロック製作に、溶接線自動おいシステム、溶接条件データベースなどを搭載したメンブレンパネル自動溶接装置を適用し、良好な溶接品質を確保できた。また無監視化を実現し、工場ブロックの溶接自動化率は約95%となった。メンブレンパネル自動溶接装置の施工状況を図8に示す。

## 3 現地施工における合理化溶接技術の開発

海外での地上式LNG貯槽の建設現地における溶接施工は、ニッケル銅溶接の施工技量を持つ熟練溶接工の確保が著しく困難であったり、専用の自動溶接設備が建設現場の設備や環境面で適用困難な場合がある。この解決策として、技量依存性が低く、高能率溶接による工期短縮も期待でき

るフラックス入りワイヤでの溶接法（FCAW）を、内槽耐圧部に適用することが求められている。当社でも、10年程前から非耐圧部材に限定して国内貯槽へFCAWを適用してきたが、耐圧部内槽への適用を実現するために、各種FCAW溶接材に関する溶接性や継手性能の評価を実施した。この結果、LNG貯槽の要求性能を十分に満足しかつ従来の被覆アーク溶接法と同等以上の継手強度・靱性や優れた破壊靱性が確認でき、また、耐割れ性が確保できる適正溶接条件を確立できた。このため、現在建設中の海外LNG貯槽において、内槽耐圧部への適用を開始している。今後、技術データと実績を積み上げることで、将来的には国内LNG貯槽でも耐圧部材への適用拡大を進めていきたい。

## あとがき

LNGは環境に優しいクリーンエネルギーとして、日本のみならず世界的にも高需要が継続している。当社は本稿にて紹介した研究や取り組みを通じ、さらなる製品の低コスト化、高品質化、工程短縮を実現させ、今後もエネルギーの安定供給という社会的貢献を果たしていく所存である。

## 参考文献

- 1) 山川, 千田, 新見, 石山, 岩上, 中山: “大容量LNG地上式貯槽の溶接施工”, 川崎重工技報, No.130, pp.33-38 (1996)
- 2) 赤松: “大型地下式LNG貯槽の溶接技術”, 月刊溶接技術, 2015年1月号, pp.50-53 (2015)
- 3) 新見, 土田: “LNG貯槽の溶接施工と日本におけるものづくり力”, 溶接学会誌, Vol.82, pp.46-50 (2013)



梅田 聡



宮崎 充弘



恒川 昌宏



赤松 政彦



新見健一郎



青木 篤人

# 世界最大級オートクレーブ設備 –ボーイング787ドリームライナー向け高精度複合材熱処理炉– One of the World Largest Autoclave Facility – High-precision Composite Curing Oven for Boeing 787 Dreamliner



前川 完二① Kanji Maekawa  
 清水 昌之② Masayuki Shimizu  
 穴見 哲③ Satoru Anami

2015年5月に、名古屋東工場に「ボーイング787-10」対応のオートクレーブ設備を設置した。この設備は、2007年に名古屋北工場に設置した設備（ボーイング787-8、787-9対応）と、炉の径方向の大きさは同一である。しかしながら、機長が長くなったことにより、焼成する複合材は長さだけでなく、補強などの構造変更がされており、炉内の温度分布性能をさらに向上させる必要があった。これに対して熱流動解析などを用いて、設備仕様や運転条件の最適化を図ることにより、世界最大級のオートクレーブの温度分布の均一化を達成できた。

In May 2015, Kawasaki installed an autoclave facility designed to meet the specification requirements of the Boeing 787-10 at Nagoya East Plant. This facility is identical in diameter to the autoclave (designed for the Boeing 787-8 and 787-9) installed at Nagoya North Plant in 2007. The increased length of the 787-10, however, requires some related structural changes such as strengthening in some areas. This called for further performance improvement in terms of temperature distribution inside the oven. Kawasaki used thermohydraulic analysis and other approaches to optimize the specifications and operating conditions, and achieved uniform temperature distribution with the world's largest-class autoclave.

## まえがき

現在、宇宙・航空・自動車などの分野では、さらなる軽量化のニーズを受け、複合材構造部品の導入が進んでおり、より高品質な部品やプロセスが求められている。複合材の製造には焼成プロセスが必要であるが、航空機のように大型の複合材製構造物を高品質に焼成するためには、高精度な圧力制御と均一な温度分布が達成できるオートクレーブが必須である。

## 1 背景

当社グループは、図1に示す「ボーイング787」型旅客機の国際共同開発に、パートナー企業として開発当初から参画し、重要な部位である前部胴体、主翼固定後縁および主脚格納部の開発・製造を担当している（図2）。特に前部胴体は、複合材による一体成形が採用され、2007年、名古屋北工場に、ボーイング787-8、787-9用オートクレーブ設備が設置された。今回、さらなる増産および787-10の生産開始を控え、生産能力の増強のため、名古屋東工場に世界最大級の大型オートクレーブ設備を設置することになっ

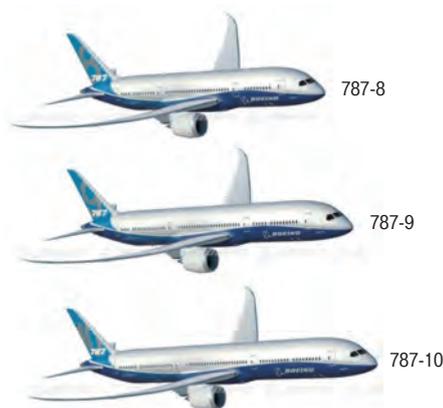


図1 ボーイング787ドリームライナーファミリー  
 Fig. 1 The Boeing 787 Dreamliner family



図2 ボーイング787ファミリー川崎重工の担当部位（赤色部分）  
 Fig. 2 Sections of the Boeing 787 family supplied by Kawasaki (sections in red)

た。機長の長い派生型機用として、長さだけでなく厚みも増加している複合材を成形する必要があり、より厳しい条件を克服する必要があった。

## 2 前部胴体製造プロセス

前部胴体は、以下の手順で一体成形複合材部品として製造される。

### ① プリプレグ積層

自動積層機で硬化前の柔軟な状態の一定幅の炭素繊維の素材（プリプレグ）を機体直径と同じ大きな芯（胴体成型型）に巻き重ねて積層する。

### ② 硬化

オートクレーブに入れ、高温高压下での化学反応により、硬化させる。硬化後、前部胴体がオートクレーブから引き出される状況を図3に示す。

### ③ 外周切削と孔あけ

専用の装置で、端部や窓部などを切削し、ボルト孔などの孔あけを行う。



図3 オートクレーブで焼き固められた前部胴体  
Fig.3 Forward fuselage cured in an autoclave

## 3 オートクレーブ設備

### (1) オートクレーブの要求仕様

内径、長さともに世界最大級のワークサイズを対象に、高品質な製品を安定的に生産する必要がある。このため、強度にムラができず均一に硬化できるように所定の温度・圧力パターンに精度よく従う性能と、2回/日の生産が可能な処理能力が要求された。

### (2) オートクレーブの設備仕様

要求仕様を満足するため、表1に示す設備仕様とした。耐圧容器として設計したオートクレーブ本体の中で、充填空気をヒータで加熱あるいは冷却水で冷却し、そのガスをファンで循環させることにより、マッフル（内筒）に収納したワークを焼成する。全体フローを図4に示す。循環フ

表1 設備仕様

Table 1 Equipment specifications

オートクレーブ 容器	外径 (m)	9
	全長 (m)	30
	重量 (t)	920
	材質	SFVC2A, SB480
	適用法規	第二種圧力容器

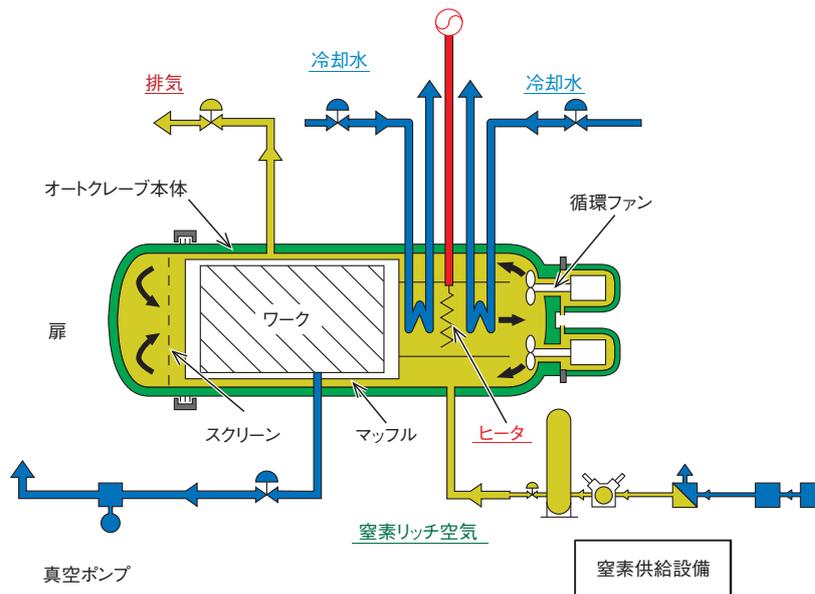


図4 全体フロー  
Fig.4 Overall flow

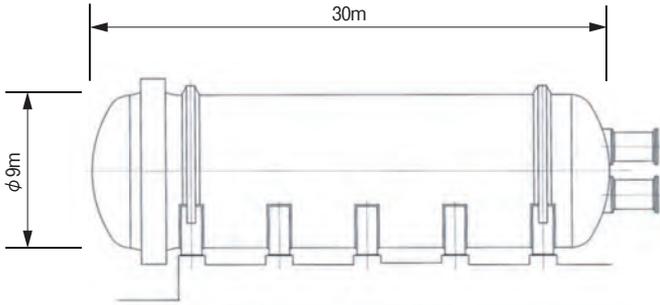


図5 オートクレープ本体図  
Fig. 5 Main unit of autoclave

ファンから吐出させたガスが、マッフルの外側を通り、扉の外壁で反射してマッフル内筒に設けられたスクリーンで整流されてマッフル内に導かれ、ワーク、クーラ、ヒータを通過した後、ファンに吸い込まれ循環する。

充填空気は、成形プロセスの安定と安全性のため、窒素リッチとした。そのため、膜分離方式の窒素生成プロセスを導入した。

オートクレープ本体図を図5に示す。

(3) オートクレープの運転パターン

以下のような工程でオートクレープを運転する。温度および圧力の制御パターン例を図6に示す。

(i) 加圧工程

まず、オートクレープ内にワークを挿入し、扉を閉めて密閉した後、循環ファンを起動し、内部ガスを循環させる。

次に、オートクレープ内に加圧窒素ガスを調節弁で所定の加圧率になるように供給し、所定の圧力に到達するまで加圧する。

(ii) 加熱工程

ヒータを起動し、出力調整してオートクレープ内の循環ガスを所定の昇温率で加熱する。この時、中央頂部に配置

された制御用熱電対によって、ワーク各所に取り付けられた熱電対が所定の温度範囲内になり、その状態を所定の時間以上保持するように制御する。

(iii) 保持工程・冷却工程

温度を保持したまま所定時間経過後、冷却水を導いて所定の降温率になるように冷却水量を調節し、缶内雰囲気温度を所定温度まで冷却する。

(iv) 減圧工程・排気工程

所定温度以下になると、缶内の圧力を排気調節弁により所定の減圧率で大気圧まで減圧する。循環ファンを停止し、作業員の安全のため、缶内の酸素濃度が所定の濃度以上であることを確認後、扉を解放しワークを搬出する。

4 炉内温度の均一性の向上

航空機に使用する炭素繊維複合材は、強度のムラがないよう均一に硬化させる必要がある。その成形硬化に用いるオートクレープには、定常状態における温度均一性だけでなく、定常状態でない昇温中の温度分布や、規定温度への到達時間にも均一性が求められる。その性能を実現する成形条件を決定するため、熱流動解析を行い最適な運転方法を検討した。

(1) 検討用解析モデルの作成と妥当性の検証

オートクレープ内の構造を図7のようにモデル化し、既設炉の運転条件でシミュレートして炉内温度分布を求めた。この結果をオートクレープ内の代表的な計測位置で実測値と比較すると、図8に示すように一致した。

このように、本解析モデルを用いた解析により、運転方法の最適化を検討するために十分な、炉内温度分布の再現ができることを確認した。

(2) 均熱化のための課題

オートクレープの床下に設置するワークの搬入出用レー

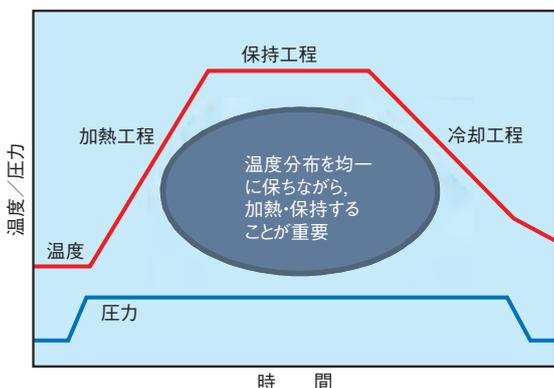


図6 制御パターン例  
Fig. 6 Control pattern

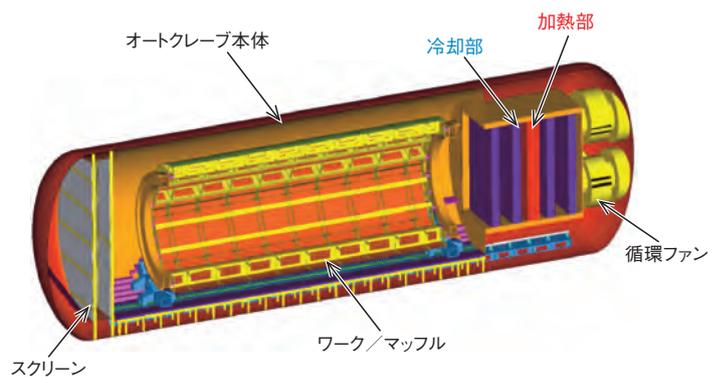
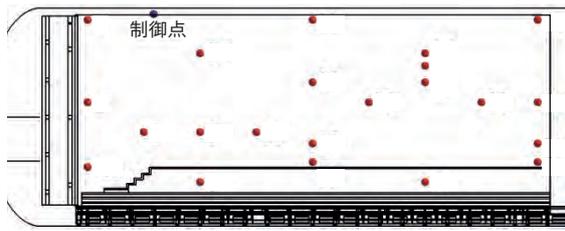
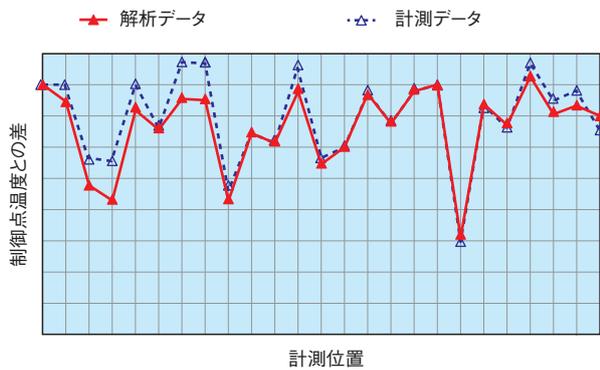


図7 解析モデル  
Fig. 7 Analytical model



(a) 温度計測位置



(b) 各計測位置での温度

図8 解析モデルの検証  
Fig. 8 Validation of analytical model

ルの構造材（熱容量が大きい）の影響で、床下部の温度が上がりにくく、また作業のための床面に熱伸びを考慮して取られた隙間から比較的低温の低い空気が流出するため、下側に設置されている計測位置で温度が低くなる可能性がある。今回は、この点を改善し、さらなる温度分布の均一性の実現を目指した。

### (3) 対策

- (i) 熱容量の大きい床下の加熱の対策
  - ① 温風を缶内導入する際の整流板（スクリーン）構造の見直し
  - ② 補助温風ダクトの追加
- (ii) 床面の隙間からの空気流出低減
  - ③ 床板隙間の低減

### (4) 改善効果の確認

上記の3項目について解析検討を行い、効果を確認した。図9に加熱工程中の温度分布を示す、対策なしの場合には上下で温度分布の勾配が見られるが、対策ありの場合には勾配が無く、十分な均熱化が達成できている。このように、設定した設備仕様で、適切な運転条件を設定することにより、均一な温度分布を維持しながら、設定した昇温率で加熱できることが確認できた。

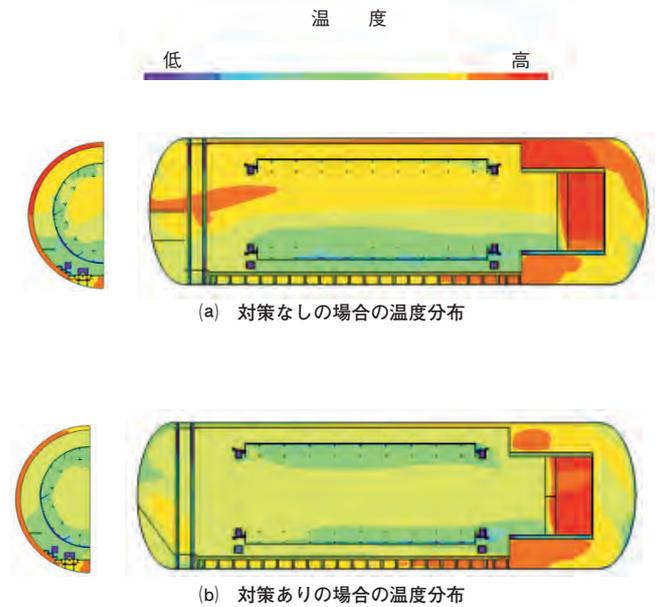


図9 温度分布比較解析結果  
Fig. 9 Comparison of temperature distribution

以上の検討により、要求仕様を満足する焼成条件で、高品質な製品を製造できる見通しを得た。

### あ と が き

本オートクレーブ設備を、2015年3月に、名古屋東工場に設置し、複合材部品の製造に向けて、試作、工程確認を進めている。設備仕様、運転条件の検討において、熱流動解析などを活用した事前検討により、世界最大級のオートクレーブの炉内温度の均熱性の達成という厳しい要求条件に応えることができた。今後も、川崎重工グループの航空機生産に大いに貢献していく所存である。

### 参 考 文 献

- 1) 浅見, 新玉, 真鍋, 山内, 天見, 松本, 二井: “最新鋭中型旅客機「ボーイング787」”, 川崎重工技報, No.158, pp.8-11 (2011)



前川 完二



清水 昌之



穴見 哲

# CKKシステム（新型ごみ処理システム）

## —ごみの減量化・エネルギー利用・再資源化を同時達成—

CKK System

— New Waste Treatment System that Achieves Waste Reduction, Energy Use and Recycling



片畑	正①*	Tadashi Katahata
大澤	弘明②	Hiroaki Osawa
加藤	定史③	Sadafumi Katoh
吉川	充④	Mitsuru Kikkawa
橋元	篤志⑤*	Atsushi Hashimoto
利弘	淳⑥	Jun Toshihiro

当社は中国合弁パートナーである安徽海螺集団と共同で新型ごみ焼却システム（CKKシステム）を開発した。このシステムは、低コストで衛生的なごみ処理を実現できるとともに、「廃棄物が保有するエネルギーおよび灰分をセメント製造設備の燃料および原料として有効利用できる」画期的なものであり、中国国内で順調に受注を拡大している。

The CKK System is a new waste incineration system jointly developed by Kawasaki and the Anhui Conch Group, its joint venture partner in China. This innovative system achieves hygienic waste treatment at low cost, and also makes effective use of the energy and ash content of waste as fuel and raw material for cement production. Orders for the CKK System are steadily increasing in China.

### まえがき

中国では急速な経済発展に伴い、深刻な環境汚染およびごみ処理の問題が顕在化している。中国政府は国策として「衛生的なごみ処理を低コストで実現できるシステム」を最優先で構築しようとしているが、当社の新型ごみ処理システムは、この国策に対応する製品である。

### 1 背景

当社は、中国合弁パートナーである安徽海螺集団（CONCHグループ）と共同で、衛生的なごみ処理を低コストで実現できる「セメント製造設備と廃棄物焼却設備を融合した新型ごみ焼却システム」（CKKシステム：CONCH Kawasaki Kiln System）を開発し、中国安徽省銅陵市の銅陵海螺水泥股份有限公司のセメント製造設備に隣接して初号機（300t/d・炉×1炉）を建設した（以下、本プラントと称す）。本プラントは2010年4月より、ごみ処理を開始し、現在も順調に稼働している。

### 2 CKKシステムの特徴

CKKシステム（図1）は、流動床式のガス化炉で廃棄

物をガス化し、発生した熱分解ガス、未燃チャーを灰分とともにセメント製造設備側の分解炉に供給して、廃棄物が保有するエネルギーおよび灰分をセメント製造設備の燃料および原料として有効利用するものである。CKKシステムの特徴を以下に示す。

#### ① 燃料使用量の削減

廃棄物が保有するエネルギーをセメント製造設備側で有効利用することにより、セメント焼成のための燃料使用量が削減できる。

#### ② クリンカ品質の確保

廃棄物に含まれる重金属類は、セメント焼成反応の過程で塩化物としてクリンカから分離されるので、廃棄物を混焼しても、クリンカ中の重金属類濃度はほとんど増加しない。

#### ③ 燃焼ガス中の有害物質の低減

廃棄物の燃焼ガスは、セメント製造設備側で十分な高温滞留時間が確保できるので、ダイオキシン類などの有害物質の発生を極小化できる。燃焼ガス中のHCl、SO<sub>x</sub>はセメント原料中のCa分と反応して分離できる。

#### ④ 初期投資費用の抑制

セメント製造設備の構成機器を有効活用することにより、新規に廃棄物焼却設備を建設する場合と比較して、初期投資費用を大幅に抑制することができる。

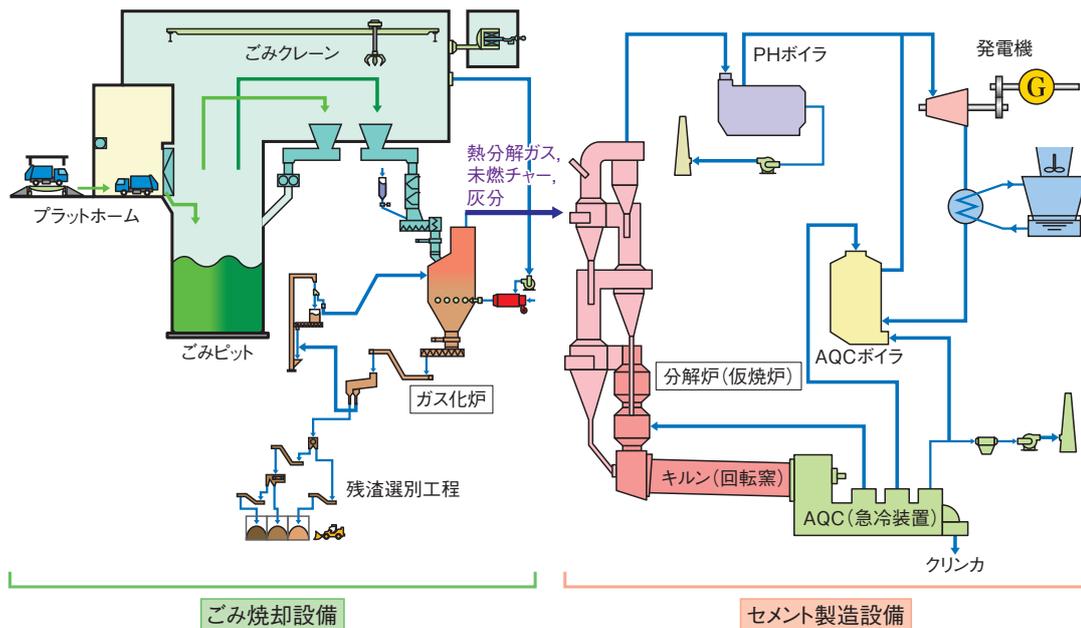


図1 CKKシステムフロー  
Fig.1 CKK system flow

### 3 CKKシステムの開発

#### (1) 基本コンセプト

- ・セメント製造設備に併設してごみ焼却設備を建設するが、セメント（クリンカ）の製造は継続
- ・ごみ焼却設備の建設にあたってはセメント製造設備の構成機器を最大限に有効活用
- ・ごみ焼却設備を併設することによるセメント（クリンカ）品質への影響の極小化

#### (2) ごみ焼却処理技術の選定

ごみ焼却処理技術の選定にあたっては、当社の保有技術を踏まえて焼却炉形式を検討した。

その結果、焼却炉出口ガス量が少なく、かつ、炉出口温度も低いために炉のコンパクト化が図れる流動床式ガス化炉を焼却炉形式として採用した（表1）。

#### (3) 熱分解ガス投入位置の決定

流動床式ガス化炉で発生する熱分解ガスのセメント製造設備への投入箇所としては、分解炉（仮焼炉）とキルン（回

転窯）の二つが候補となる。表2に示すように、分解炉の炉内負圧度が大きく熱分解ガスの誘引に有利であることや、ごみ中水分がクリンカ性状に影響しない分解炉を投入箇所として選択した。

また、セメントキルンからの排ガスは、キルン入口部で水平方向から垂直方向上向きにガス流れを変えて分解炉へ流入している。このガス流れに熱分解ガスを供給して分解炉内で十分に燃焼させるための最適投入位置および投入角度をシミュレーションにより検証した。

具体的には、分解炉の上向きのガス流れに熱分解ガスを水平方向から供給する解析モデルを作成し、熱分解ガスの投入位置・角度を数条件変化させて、ガス温度、酸素濃度、ガス流速がどのようなパターンとなるかを検討した。

解析形状モデルを図2に、ガス温度分布と酸素濃度分布のシミュレーション結果の例を図3にそれぞれ示す。図3の①～④は次の各領域を示している。

- ① ごみ熱分解ガスの燃焼によって発生する高温領域
- ② 微粉炭の燃焼によって発生する高温領域
- ③ 燃焼用空気通過による酸素濃度の高い領域
- ④ キルンガス通過による酸素濃度の低い領域

表1 ごみ焼却処理技術の比較  
Table 1 Comparison of waste incineration system

焼却炉形式	流動床式 ガス化炉	流動床式 焼却炉	ストーカ式 焼却炉
焼却炉出口 ガス量	小	大	大
焼却炉出口 ガス温度	低	高	高
焼却灰取扱	容易	容易	複雑（乾灰取出）
評価	◎	○	△

表2 熱分解ガス投入箇所の比較  
Table 2 Comparison of pyrolysis gas injection positions

熱分解ガス 投入位置	分解炉	キルン本体
ガス温度 (最高温度)	約900℃	約1,800℃
炉内圧力	-0.8~-0.9kPa	約-0.2kPa
クリンカ性状への ごみ中水分の影響	影響なし	影響あり
評価	◎	△

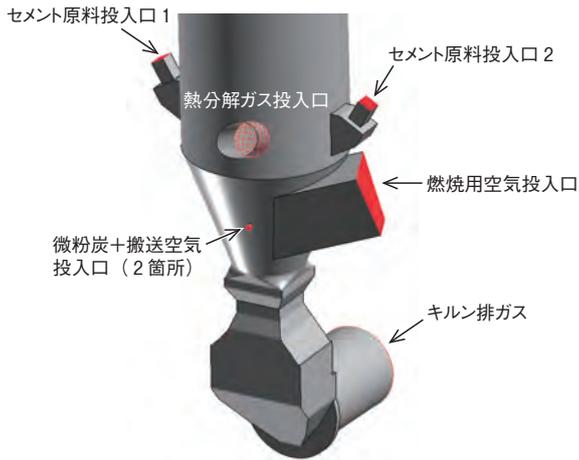


図2 解析形状モデル  
Fig. 2 Geometric model for analysis

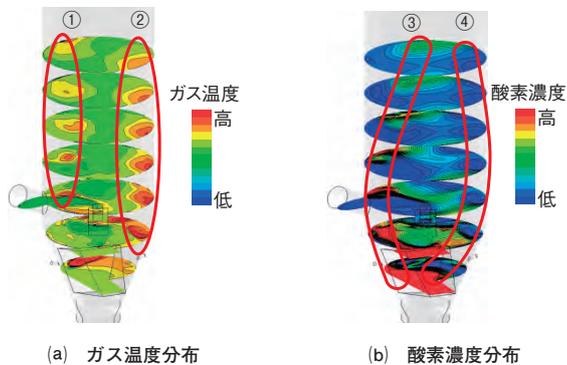


図3 シミュレーション結果  
Fig. 3 Simulation results

このようなシミュレーションにより、次の二点がわかった。

- ・分解炉内には燃焼用空気による旋回流と酸素濃度の分布があり、熱分解ガスの燃焼に最適な高酸素濃度域が存在する。
- ・旋回流の効果により、熱分解ガスが分解炉内で攪拌／混合されるため、分解炉頂部断面でのガス温度と酸素濃度の分布が、おおむね均一になる。

以上を踏まえて、分解炉内の高酸素濃度領域へ熱分解ガスを供給でき、かつ分解炉内での熱分解ガスの混合が促進できるように、熱分解ガスの投入位置および投入角度を決定した。

#### (4) セメント製造設備の安定操業とクリンカ品質の確保

セメント製造設備の安定操業とクリンカ品質の確保のためには、「塩素（およびアルカリ）濃縮によるコーティング（固着層形成）発生を抑制すること」が重要である。

そこで、既設セメント製造設備のクリンカ中塩素濃度、および、ごみ中塩素濃度に基づき、クリンカ焼成系統における塩素濃縮の抑制策について検討を行った。その結果、コストおよびコーティング発生とクリンカ中塩素濃縮の抑制効果を考慮して、CKKシステムでは塩素濃縮対策設備と

して、塩素バイパス設備を採用することとした（塩素バイパス設備の特許は太平洋セメント(株)が保有）。

#### (5) ごみ処理に伴う臭気とごみ污水対策

ごみ処理に伴い、ごみからの臭気対策およびごみ污水处理が必要となるので、それぞれについて対応を検討した。

##### (i) 臭気対策

- ・密閉式のごみピットを採用し、流動用空気をピットから吸引してピット内を負圧にすることにより外部への漏洩を防止する。なお、流動化空気中の臭気は分解炉で燃焼、分解する。
- ・ガス化炉停止時の対策としては、脱臭装置を設置する、あるいはごみピットから吸引した空気をAQC（急冷装置）のクリンカ高温部に吹き込んで分解・脱臭する。

##### (ii) 污水対策

- ・ごみから発生する污水については、ガス化炉空塔部へ噴霧供給して、蒸発処理する。

#### (6) ごみ混焼による環境影響の極小化

セメント製造設備でごみを混焼することによる、環境影響の主なものとして、以下の二つがある。

- ① 排ガス中のCOおよびダイオキシン類濃度の増加
  - ② ごみ中重金属類によるクリンカ中重金属類濃度の増加
- 上述した二点について、理論的検討により、いずれも問題のないことを確認できた。

- ・ガス化炉で発生した熱分解ガスおよび未燃チャーはセメント製造設備の分解炉で燃焼するが、分解炉ではセメント原料の脱炭酸反応（吸熱反応）を行うため、ガス温度は約900℃ではほぼ一定であり、かつガス滞留時間が4秒以上確保できるので、COおよびダイオキシン類濃度の増加は極小化できる。
- ・ごみに含まれる重金属類の大半が焼成工程で塩化物の形でクリンカから分離するので、クリンカ中の重金属濃度はほとんど増加しない。

## 4 銅陵CKKプラント運転結果

銅陵CKKプラントの運転結果<sup>1)</sup>の概要を以下に示す。

##### (i) ごみ実態調査

銅陵市のごみ分析結果を表3に示す。低位発熱量は約5,900kJ/kgで、計画時の基準ごみ相当であった。なお、元素組成の硫黄分濃度が基準ごみに比べて大幅に高いが、これは中国において家庭の燃料として、石炭を原料とした練炭が多量に使われていることが主因であると推定している。

##### (ii) ごみ処理量

運転開始後約1年間経過した2011年3月のごみ処理量の推移を図4に示す。ごみ処理量は300t/d前後で推移しており、安定したごみ処理が達成できていることがわかる。

表3 銅陵市のごみ分析結果  
Table 3 Analysis results of waste in Tongling city

項目	夏ごみ	冬ごみ	基準ごみ	
低位発熱量 (kJ/kg)	5,760	5,920	5,900	
三成分	水分 (%)	56.34	57.11	60.18
	可燃分 (%)	30.93	34.18	34.30
	灰分 (%)	12.73	8.71	5.51
可燃分 元素組成	炭素 (%)	60.88	57.85	52.94
	水素 (%)	8.52	8.08	7.82
	酸素 (%)	25.49	30.72	37.62
	硫黄 (%)	2.97	1.68	0.08
	塩素 (%)	1.08	0.84	0.70
	窒素 (%)	1.06	0.84	0.85

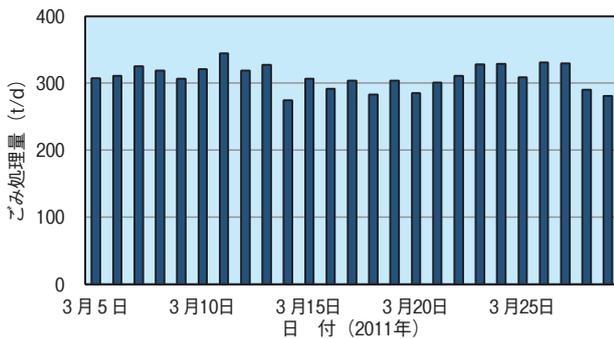


図4 ごみ処理量の推移  
Fig 4 Amount of waste treated

表4 ダイオキシン類の測定結果  
Table 4 Analysis results of dioxins

測定結果 (煙突入口)		規制値
1回目	2回目	
0.008	0.033	0.1

単位: ng-TEQ/m<sup>3</sup>N: O<sub>2</sub>11%換算値

(iii) 排ガス中ダイオキシン類濃度

表4に示すセメント製造設備の煙突入口におけるダイオキシン類濃度の測定結果より、規制値を十分満足していることがわかる。なお、本プラントでは排ガス中ダイオキシン類を低減するための活性炭噴霧は行っていない。

(iv) ガス化炉下部排出物

図5(a)に示すガス化炉底部から排出された不燃物は、セメント原料として利用可能であること、および鉄分は図5(b)のように未酸化の状態では回収できることが確認できた。

(v) クリнка品質

本プラントでは、ごみの混合焼却処理開始以降、クリンカの品質悪化を原因とするセメント製造設備の休止といった事態は発生しておらず、ごみの混焼がクリнка品質に悪影響を及ぼさないことが確認できた。

(vi) 脱水汚泥混焼

中国では下水処理設備の普及に伴い、大量に発生する下水汚泥(脱水汚泥)の無害化処理も重要な課題となっている。そこで、CKKシステムでの脱水汚泥混焼の可能性を確認するために、本プラントでは、2011年11月より、脱水



(a) 不燃物 (b) 磁選機回収品

図5 ガス化炉下部排出物  
Fig. 5 Non-combustibles discharged from gasification furnace

汚泥の混焼運転を行った。その結果、脱水汚泥のごみに対する混焼率が10~20%程度であれば、問題なく運転できることを確認できた。

あとがき

CKKシステムは、中国国内で順調に受注を拡大しており、2015年6月末現在で、稼働中5プラント、建設中14プラントとなっている。

さらに、東南アジア、インド、ブラジルなどの新興国では、人口増加および経済発展に伴う生活レベルの向上に伴い、都市ごみの衛生処理に対する要求が高まってきている。CKKシステムは低コストで本要求に対応できるため、これら新興国にも適合したシステムである。

また、CKKシステムは世界的に喫緊の課題となっている地球温暖化ガス排出量の削減に対しても有効なシステムである。地球環境保全への貢献という観点からも、CKKシステムのさらなるブラッシュアップを図っていく所存である。

参考文献

1) 橋元, 村田, 白井, 吉川, 片畑: “既存セメント製造設備と一般廃棄物焼却設備を融合した新型ごみ焼却システムの開発”, 第25回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, pp.303-304 (2014)



片畑 正



大澤 弘明



加藤 定史



吉川 充



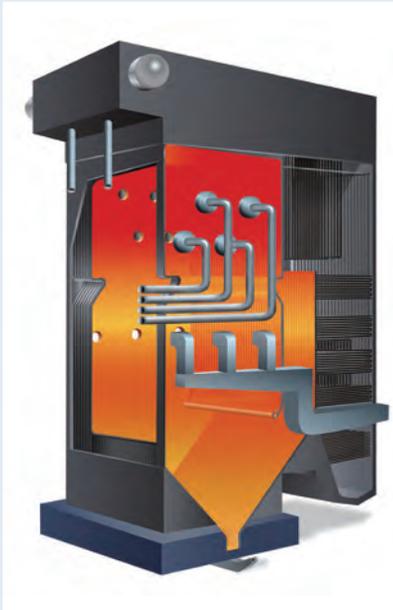
橋元 篤志



利弘 淳

# U-KACCボイラ — 革新的ボイラ構造により難燃性石油残渣を有効活用 — U-KACC Boiler — Technology to Effectively Utilize Residual Fuel from Oil Refinery

森 宏之① Hiroyuki Mori  
戸田 信一② Shin-ichi Toda  
荻野 智行③ Tomoyuki Ogino



オイルコークスなどの難燃性石油残渣を燃料として有効活用でき、超低NOx・低ばいじんでクリーンな燃焼を可能としたU-KACC (Upgraded Kawasaki Advanced Clean Combustion) ボイラを開発した。富士石油(株)／袖ヶ浦製油所向けのアスファルトピッチ焼きU-KACCボイラでは、新規バーナ開発も含めて新たな技術課題を克服した設計・製作を進めている。今後も当社の技術力を生かして省エネ・省資源化に貢献できるボイラ供給に努めていく。

Kawasaki has developed the Upgraded Kawasaki Advanced Clean Combustion (U-KACC) boiler, which achieves ultra-low-NOx, low-dust combustion by effectively utilizing petroleum coke and other residues from refinery as fuel. The asphalt pitch-fired U-KACC boiler that Kawasaki is currently designing for Fuji Oil Company, Ltd.'s Sodegaura Refinery will feature a new burner and other improvements, developed to overcome some new technological issues. Kawasaki will continue to improve its expertise and develop boilers that consume less energy and resources.

## まえがき

近年、エネルギーの有効利用が促進されており、従来では取り扱いが難しかった石油コークスやアスファルトピッチ (ASP) といった石油精製過程で発生する固体残渣をボイラ燃料として活用するニーズが高まっている。一方、こうした石油残渣は揮発分が少ないことから安定した専焼運転が難しく、バナジウムを含んだ灰分も多いことから灰付着、灰溶解によるトラブルが多発し、従来タイプのボイラでは長期連続操作が困難であった。

本稿では、このような残渣を燃料として有効活用すべく開発したU-KACCボイラの特長を説明するとともに、2014年10月に受注した富士石油(株)袖ヶ浦製油所向けのASP焼きボイラの計画概要、ASP専用バーナ開発、プラント計画上の配慮点などについて紹介する。

## 1 U-KACCボイラの特長

当社は既存技術としてアスファルトなどの液体残渣をクリーンに燃焼可能なKACC (Kawasaki Advanced Clean Combustion) ボイラを保有している。このボイラをベースにさらに改良を加え、石油コークスなどの灰分を含んだ固体残渣にも適用できるように新規開発したものがU-KACC (Upgraded-KACC) ボイラである。

KACCボイラとU-KACCボイラの構造・機能の比較を図1に示す。KACCボイラは燃焼室中間部に大きな絞りを設けて、燃焼室を上下に分割した特殊な構造としている。耐火材で覆われた下部燃焼室では、バーナに供給する空気を大幅に絞ることで高温還元燃焼によるNOx低減を図り、水冷壁構造の上部燃焼室では2段階燃焼空気投入による低温酸化雰囲気により燃焼完結性を向上させている。この2つの燃焼室の組み合わせにより、アスファルトなどの液体石油残渣燃料であっても低NOx、低ばいじん燃焼を可能としている<sup>1)</sup>。

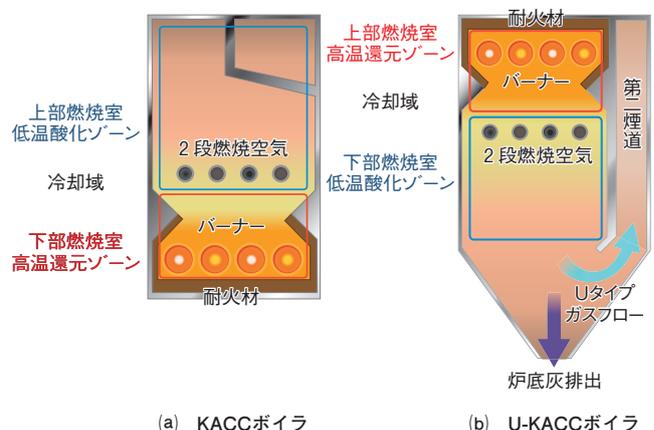


図1 KACCボイラとU-KACCボイラの構造・機能の比較  
Fig. 1 Comparison between KACC boiler and U-KACC boiler

しかしながら、KACCボイラは灰分を含まない燃料においては長期連続運転が可能であるが、石油コークスやASPなどの灰分を含む燃料に対しては、炉底部に灰が堆積し長期連続運転には適さないという課題がある。

この課題を克服し固形の石油残渣燃料にも適用できるようにKACCボイラの燃焼室部分を倒立形とし、KACCボイラの特長を生かしつつ、炉底にホoppaを設置し、灰の連続排出を可能にしたのがU-KACCボイラである。

U-KACCボイラの基本的な燃焼システムはKACCボイラと同等であり、低NO<sub>x</sub>、低ばいじん燃焼を達成するとともに、燃焼室下部に灰出し用のホoppaを設置し、燃焼ガスを反転させることで、炉底部での灰の分離を促進して、後流側の伝熱面におけるダスト負荷低減と灰付着によるドラフトロス増大、ダスト閉塞などの発生を抑制している<sup>2)</sup>。

## 2 性能確認

U-KACCボイラの有効性を確認するために、まず本社・技術開発本部の小型試験炉を用いて基本的な燃焼特性を確認し、次に得られたデータを基に実機サイズのモデルによるシミュレーション解析を実施した。

### (i) 燃焼試験

燃焼試験は揮発分10%以下の難燃性の石油コークスを使用して実施した、図2(a)に示すように着火・燃焼は良好であり、火炎輝度も高く、バーナ空気比0.7前後の高温還元雰囲気での低NO<sub>x</sub>化も確認した(図3)。

図2(b)に示すように長時間試験運転を終了した後の炉内においても、炉壁への灰付着が見られずクリーンな状態であった。これは上部燃焼室での還元雰囲気下においては、バナジウム灰が高融点な状態(例えばV<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の融点は1,970℃、V<sub>2</sub>O<sub>4</sub>は1,640℃)であるため、灰が溶融せずに燃焼室下部に導かれ、低温酸化燃焼により冷却されながら徐々に酸化していくU-KACC独自の燃焼方式による効果であると推定される。さらに、図2(c)では炉底捕集灰はポーラス状の様相を示しており、未燃カーボンがほとんど無い良好な燃焼状態であることが確認できる。バグフィルタ捕集灰についても、図2(d)のように灰の粒子同士の結合は見られず、付着性の低い灰であることが確認された<sup>3)</sup>。

### (ii) 燃焼シミュレーション解析

燃焼試験で取得したデータをベースに、実機サイズのU-KACCボイラのモデルを作成してシミュレーション解析を実施した。バーナの燃焼空気旋回方向や燃料粒子サイズなどの条件を変えた上で、燃焼ガス温度、ガス流れおよび滞留時間、燃料粒子から灰へ移行する燃焼反応挙動などを解析し、最適な設計条件を確認した<sup>4)</sup>。

以上の結果、U-KACCボイラが所定の性能を発揮し、難燃性石油残渣も燃料として有効活用できることが検証された。

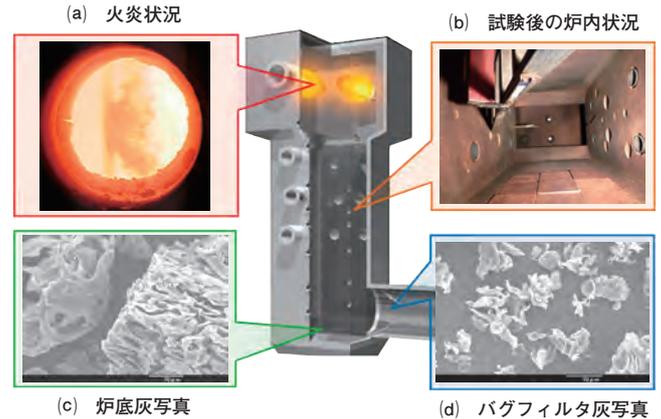


図2 燃焼試験炉での燃焼状況、炉内状況、灰写真  
Fig. 2 Combustion state and internal conditions of a test furnace and ash photographs

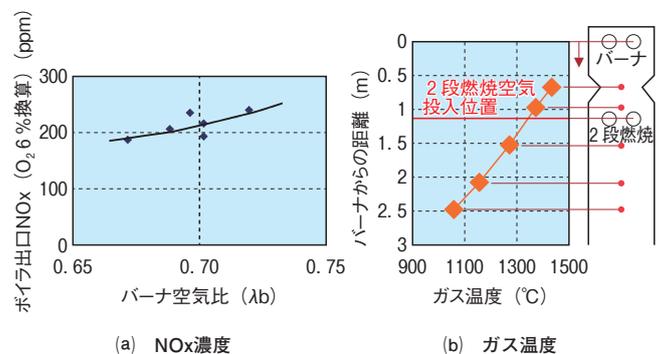


図3 燃焼試験炉でのNO<sub>x</sub>濃度、ガス温度  
Fig. 3 NO<sub>x</sub> concentration and flue gas temperature of a U-KACC test furnace

## 3 富士石油(株)袖ヶ浦製油所向けU-KACCボイラ

### (1) 計画概要

今回の新設ボイラ・タービン発電設備は、袖ヶ浦製油所で生産される固形のASPを主燃料としたもので、電力供給源の転換を図りエネルギーコスト低減に大きく寄与するものと期待されている。ボイラ主要目を表1に示す。

一方で、燃料としてのASPの取り扱いの難しさから、さまざまな配慮を施した設計が必要となる。

アスファルトピッチ(ASP)と石油コークス、石炭(れき青炭)およびVR(減圧蒸留残渣)との燃料性状比較を表2に示す。

ASPの特徴は次の通りである。

表1 ボイラ主要目  
Table 1 Boiler specifications

ボイラ形式	U-KACC式 単胴放射形自然循環ボイラ
蒸発量(t/h)	295
蒸気圧力(過熱器出口)(MPaG)	10.3
蒸気温度(過熱器出口)(°C)	503
通風方式	平衡通風
主燃料	アスファルトピッチ(ASP)

表2 ASPと他の燃料との性状比較  
Table 2 Comparison between ASP and other fuels

項目	ASP	石油コークス	石炭 (れき青炭)	VR
高位発熱量 (MJ/kg)	7,960	8,300~8,500	4,000~6,000	9,500~10,000
揮発分 (wt%)	40.6	10~13	30~40	-
固定炭素 (wt%)	59.1	87~90	45~55	20~30
窒素分 (wt%)	1.4	1~3	2	~1
硫黄分 (wt%)	6 (最大8)	4~7	1以下	4~6
バナジウム (ppm)	600~900	<1,500	-	<250
灰分 (wt%)	0.3	0.2~1.0	10程度	0.03

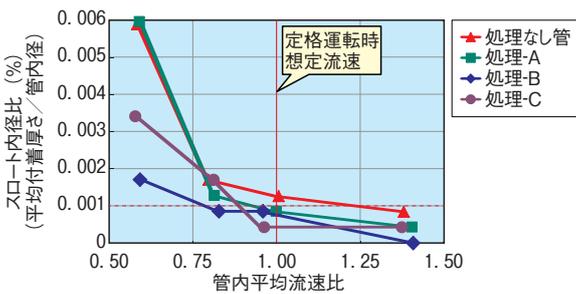
- ・高硫黄分であり、耐腐食対策、SO<sub>x</sub>対策が必要
  - ・高濃度のバナジウムを含有しており、伝熱管への灰付着、高温腐食対策に配慮が必要
  - ・VRの10倍程度の灰分を有しており、炉底での燃焼灰堆積を防ぐための灰出し機能が必要
  - ・軟化点が180℃と低く付着性が高いため、燃料搬送系統およびバーナにおける付着・閉塞対策が必要
- これらの特徴を考慮して最適な設計・計画を行っている。

(2) 設計上の特徴

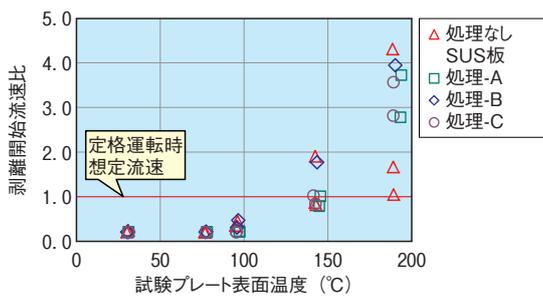
(i) ASPバーナ，ボイラ内燃焼性

今回燃料とするASPは、常温では固体であり微粉状に粉砕し輸送可能であるが、約180℃から軟化し始め、付着しやすい性質がある。このため、バーナ構造物への付着・流路閉塞を防止するための冷却構造が必要になる。

そこで、まずバーナ構造物材へのASP付着性を評価することを目的として基礎試験を実施し、各種の表面処理や流



(a) 表面処理，流速が及ぼす付着量への影響



(b) 表面処理，温度が及ぼす剥離流速への影響

図4 ASP付着性基礎試験結果  
Fig. 4 Results of ASP adhesion test

速，温度に対する付着特性を確認した。その結果，図4に示すように，付着厚さは定格運転時想定流速下では表面処理によりスロート内径比0.001%以下に抑制できること，および表面温度を100℃以下とすることで付着成長の無いことが確認できた。

次に，この結果を踏まえて冷却構造を備えた付着対策バーナを検討し，前述の燃焼試験炉を改造してバーナ単体による燃焼試験を実施した。燃焼試験時のASP燃焼状況を図5に示す。冷却構造がない場合は30分程度で図5(a)のように流路閉塞して燃焼継続が困難となるが，適切な冷却構造を設けることにより，バーナ表面への付着を抑えて流路閉塞なく連続運転が可能となり，図5(b)のように良好なASPの燃焼性を確認できた。また，付着対策バーナによる燃焼試験時の運転データを図6に示す。ガス温度，O<sub>2</sub>濃度共に長時間にわたり安定しており，今回開発した付着対策バーナであれば付着性の高いASPでも長時間の連続安定運転が可能であることを確認した。

ASPの燃焼が適切に行われ，U-KACCとしての高温還元ゾーン，および低温酸化ゾーンが形成されている状況をシミュレーション解析により確認した。

図7(a)に示すU-KACC火炉内のガス温度分布図をみると，上部の還元ゾーンで1,500℃以上の高温域が形成されており，下部の酸化ゾーンでは徐々に冷却されていく様子が分かる。

図7(b)は，バーナから出た燃料粒子の軌跡を示してお

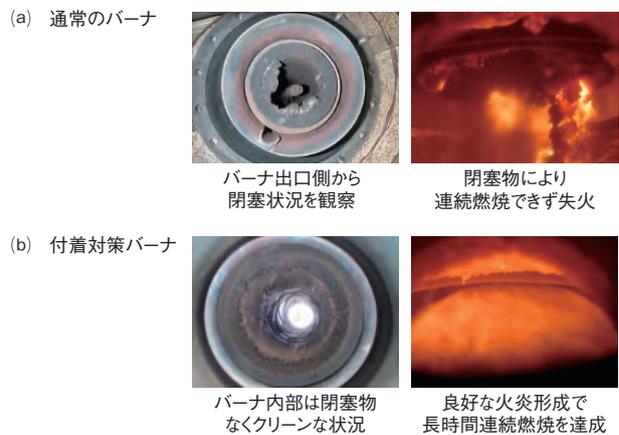


図5 ASPバーナ試験結果 (ASP燃焼状況の比較)  
Fig. 5 Results of ASP burner test (comparison of combustion states)

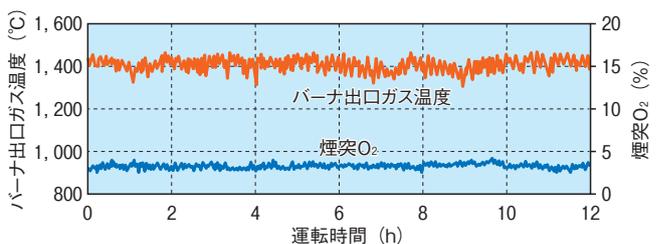


図6 ASP燃焼試験結果 (ガス温度およびO<sub>2</sub>濃度)  
Fig. 6 Results of ASP combustion test (gas temperature and O<sub>2</sub> concentration)

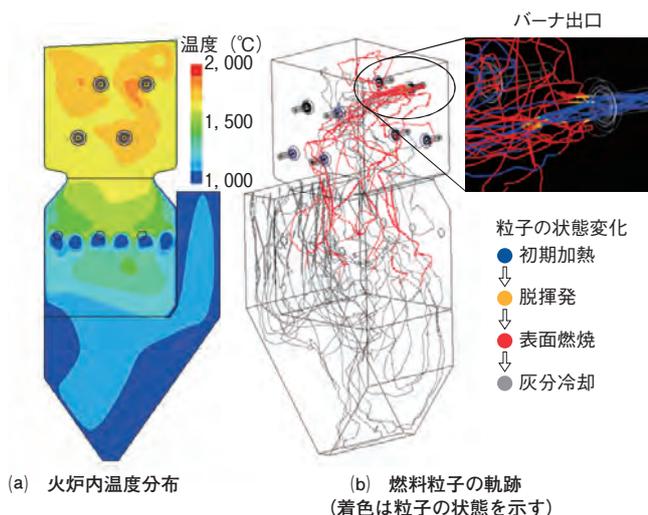


図7 ASP焼きU-KACCボイラ燃焼シミュレーション  
Fig.7 ASP combustion simulation analysis of U-KACC

り、粒子の状態変化を着色している。バーナ出口で急激に加熱され揮発分を放出して燃焼開始し、チャーとなった後は表面燃焼状態となり、やがて燃え尽きるまでの軌跡が分かる。同図から、上部の燃焼ゾーンでチャーとなった粒子は、下部燃焼ゾーンでおおむね燃え尽きている状況が分かる。したがって、反転したガスに搬送される粒子は燃え残った灰分が主成分となる。

(ii) 燃料の粉碎・供給設備

ASPはHGI（ハードグロブ指数）が158と硬度が低く付着性があることから、燃焼粉碎機は石炭焼きで一般的に使われているローラミルではなく、衝撃式ミルを採用した。また、ASPの粉碎試験を実施した上で、最適なハンマー数、ミルの回転数を選定している。

微粉碎したASPは空気搬送にてバーナに供給するが、搬送管内部での付着・閉塞が発生しないように、適切な固気比、搬送管ルート、バンド管形状を選定している。

(iii) 火炉の腐食対策

U-KACCでは上部燃焼室における高温還元燃焼を行っており、二段燃焼空気を投入して酸化燃焼が完結するまでのゾーンにおいては、燃料中の高硫黄分による硫化還元腐食が懸念される。このため、腐食対策として還元部燃焼室パネルには、外層がステンレスの密着二重管を使用している。

(iv) 伝熱管への灰付着対策

従来形のボイラにおける高温酸化燃焼では、バナジウムを含んだ燃焼灰が低融点化し、燃焼室水管、過熱器管などへの灰付着によるスラッシング、ファウリング、腐食増大などの弊害が発生する。そのため燃料中にマグネシウム系添加剤を混入して対応している場合が多いが、U-KACCの燃焼方式では未燃が少ないことと、高温還元雰囲気下におけるバナジウム灰の高融点化の効果もあり、燃焼室水管への灰付着が少ない。

また、炉底から大半の灰を分離排出してガス中の灰濃度

を低下させ、第二煙道で十分にガス温度を低下させることにより、その後流側の対流伝熱面における灰付着も大幅に低減させている。このため灰の融点を上げるための燃料添加剤を使う必要がなく、運転費用の低減に貢献している。

(v) 環境対策（排ガス処理設備）

袖ヶ浦地区の厳しい環境規制に対応するため、最新鋭の排ガス処理設備を設置する計画である。

- ① NO<sub>x</sub>対策として、U-KACCの超低NO<sub>x</sub>性能に加えアンモニア注入による選択接触還元方式の排煙脱硝装置を設置する。U-KACCでは灰中未燃分が少なく、灰の付着性が低いため、脱硝触媒の目詰まりが起りにくいという特長も持っている。
- ② SO<sub>2</sub>対策として、高効率の湿式脱硫装置（水酸化マグネシウム法）を設置し、吸収塔は詰まりが発生しづらい多段トレイ方式を採用した。薬剤は経済性の高い山マグをスラリー化して使用する。
- ③ 集塵装置は乾式の電気集塵機を採用する。
- ④ SO<sub>3</sub>ミストによる紫煙対策として脱硫装置の後流側に湿式の電気集塵機を設置する。

あ と が き

富士石油(株)袖ヶ浦製油所向けのASP焼きU-KACCボイラは予定通り設計、工事が進んでおり、2017年に実施される試運転、性能試験において良好な燃焼性能を実機で確認できるものと期待される。

今後もU-KACCボイラをはじめとしたエネルギーの有効利用および環境負荷低減に寄与するボイラ設備の開発・拡販を進め、さまざまな顧客ニーズに応えていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 大村, 谷口, 吉山, 田部, 西村: “ボイラ極低NO<sub>x</sub>燃焼技術”, 川崎重工技報, No.153, pp.14-17 (2003)
- 2) 末光: “オイルコークス専焼 超低NO<sub>x</sub>・低ばいじんボイラ (U-KACCボイラ)”, 日本機械学会 動力エネルギーシステム部門ニューズレター第43号 (2011)
- 3) 特許 第P5496862号, “石油残渣焼きボイラの燃焼室汚れ防止燃焼方法”
- 4) 特許 第P5501198号, “低NO<sub>x</sub>・低煤塵燃焼方法およびボイラ燃焼室”



森 宏之



戸田 信一



荻野 智行

# RDF焚き内部循環流動床ボイラ —構造改良・運転条件改善による長寿命化—

RDF-fired Internal Circulation Fluidized Bed Boiler  
— Longer Operating Life Achieved with Improved Structure and Operating Conditions



武藤 貞行① Sadayuki Mutoh  
森 宏之② Hiroyuki Mori  
清水 敬哲③ Hironori Shimizu  
竹田 航哉④ Koya Takeda

当社が開発した廃棄物固形燃料（RDF）対応の流動床ボイラ（内部循環流動床ボイラ）は、高効率を実現するため収熱セルに高温高圧蒸気を生み出す層内管構造を採用している。層内管の腐食摩耗が寿命に大きく影響するが、今回2012年に韓国に納入したボイラにおいて層内管の配置変更による摩耗環境の改善と、燃料の改善による腐食環境の緩和を図ることで、層内管寿命を大幅に改善することができた。

Kawasaki's Internal Circulation Fluidized Bed Boiler that runs on refuse-derived fuel (RDF) has achieved high efficiency by adopting an embedded tube structure, which generates high-temperature, high-pressure steam in heat-recovering cells. The operating life of this boiler is largely affected by the corrosive abrasion of embedded tubes. In the boiler delivered to South Korea in 2012, Kawasaki significantly improved the operating life of embedded tubes by rearranging their layout to minimize abrasion, and optimizing the fuel to alleviate its corrosive properties.

## まえがき

韓国国内においては、日本国内におけるRPS法（新エネルギー利用特別措置法）に準じて、リサイクル燃料による発電が国策として進められており、2012年より法律が施行された。また、化石燃料によるCO<sub>2</sub>の排出量増加など、産業活動の結果が社会に与える影響が大きな問題となっており、安定化燃焼のためのごみの固形燃料化（RDF化）設備およびそれを燃料とした熱電併給設備の建設が進んでいる。

本ボイラでは、主燃料であるRDFを215t/d、従燃料として、石炭を65.5t/d（熱量比率で80：20）使用して、75t/h×6.37MPa×450℃の蒸気を発生し、発電端出力6.0MWの発電および隣接工場への蒸気を供給している。

本ボイラは、流動媒体と呼ばれる加熱された砂の中で燃料を燃焼させる方式により、同時に流動床の内部に熱交換器を設置して効率良く熱回収することが可能である。流動

表1 主要仕様  
Table 1 Main specifications

	項目	計画値
燃料	RDF (t/d)	215 <sup>*1</sup>
	石炭 (t/d)	65.5 <sup>*1</sup>
ボイラ	形式	川崎-FB75U形 内部循環流動床ボイラ
	蒸発量 (t/h)	75
	蒸気条件	6.37MPa×450℃
環境規制値	NOx (ppm)	<70 <sup>*2</sup>
	SOx (ppm)	<30 <sup>*2</sup>
	HCl (ppm)	<20 <sup>*2</sup>
	ばいじん (g/Nm <sup>3</sup> )	<0.02 <sup>*2</sup>
	ダイオキシン (ng-TEQ/Nm <sup>3</sup> )	<0.1 <sup>*2</sup>
	CO (ppm)	<50 <sup>*2</sup>

\*1) RDF, 石炭混焼時  
\*2) O<sub>2</sub>=12% 乾きガス換算

## 1 目的

当社が2012年に内部循環流動床ボイラを納入した韓国益山熱電併給公社は、韓国中部電力とエンジニアリングメーカーのHalla E&Eと産業銀行が出資して設立した「産業エネルギー(株)」という特別供給会社である。

本稿では、このRDF専焼ならびに石炭混焼可能な内部循環流動床ボイラの改良内容とその減肉抑制技術を紹介する。

## 2 ボイラ仕様

ボイラの主要仕様を表1に示す。

①③ プラント・環境カンパニー エネルギープラント総括部 ボイラ設計部  
② プラント・環境カンパニー エネルギープラント総括部 ボイラプロジェクト部  
④ プラント・環境カンパニー 環境プラント総括部 環境プラント部

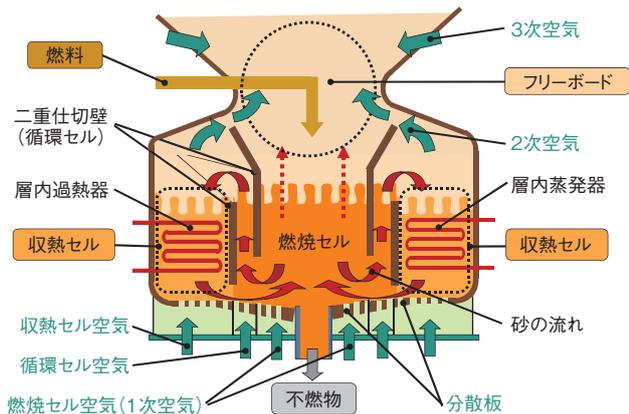


図1 内部循環流動床概念図  
Fig. 1 Conceptual diagram of Internal Circulation Fluidized Bed Boiler

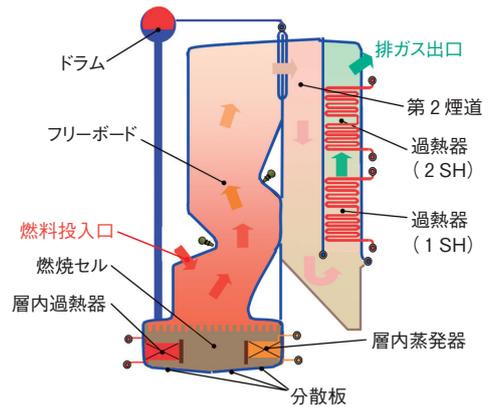


図2 内部循環流動床ボイラ全体図  
Fig. 2 Overall view of Internal Circulation Fluidized Bed Boiler

床炉は、図1のように燃料が燃焼するゾーンと熱回収するゾーンを二重仕切壁で仕切り、収熱セルへのHClなど腐食性ガスの侵入を抑制することにより、熱交換器にかかる負荷を低減させる構造になっている。この流動床炉内の燃焼ゾーン（燃焼セル）と熱回収ゾーン（収熱セル）との間で砂の循環（熱の移動）が行われるため「内部循環流動床ボイラ」と呼んでいる。

内部循環流動床ボイラ全体図を図2に示す。

### 3 層内管の減肉対策

本ボイラは、通常ごみに由来するRDFと石炭とを混焼する運転を行っているが、RDFを専焼することも可能である。このため、当社が大牟田リサイクル発電所に納入したRDF専焼流動床ボイラの実績を生かした腐食対策を実施している。しかし、ごみ焼却特有の腐食環境は厳しく、さらなるボイラ水管の減肉抑制対策が必要である。そこで、今回ボイラ水管の内、特に延命化要求の高い層内管について、さらなる研究開発と試験により減肉抑制対策を検討した。図3は炉底の流動床内の収熱セルに配置した層内管を見たものである。

#### (1) 層内管の管群ピッチ

従来から、摩耗量は管群中のガス流速に比例するものとして考えており、層内管の摩耗減肉対策としては、伝熱効率にも配慮した管群ピッチを採用してきた。内部循環流動床ボイラの層内管は、本来流動層としての熱伝達が可能な範囲でガス流速を極力低くした設計であり（空塔速度比\*： $Ut/U_{mf}=2.0\sim 3.0$ ）、摩耗に対する減肉速度を従来の流動床ボイラより低減する思想となっている。

しかし、新たな摩耗試験および管群中の気泡挙動の解析（図4）の結果、層内管群中の流速よりも、気泡の上昇速度と強い相関があること、さらに気泡の上昇速度が気泡粒径に比例して増加することがわかった。このように摩擦減



図3 層内管  
Fig. 3 Embedded tubes

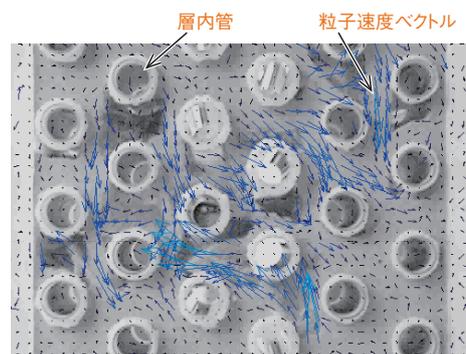


図4 管群中気泡速度解析  
Fig. 4 Velocity analysis of bubbles inside the tube bank

肉速度は、管群中の気泡粒径の影響を大きく受ける。ここで、気泡粒径を大きくしないための対策として、次の手法が有効と考えた。

- ① 気泡を分断しやすい構造…気泡を細分する
- ② 気泡を合体しにくくする構造…気泡を細分する
- ③ 気泡を成長しにくくする構造…ピッチを狭くする
- ④ 供給空気量を減らす…空塔速度を低下させる

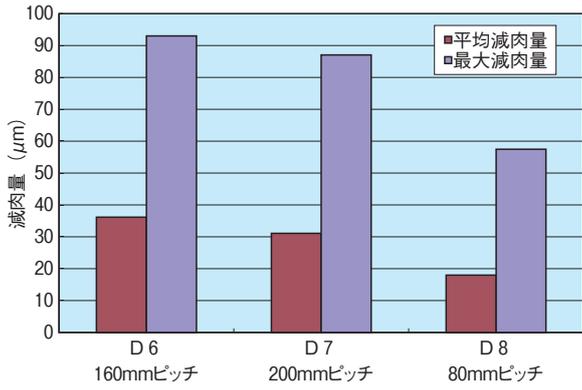


図5 層内管幅寸法と減肉量の関係  
Fig. 5 Relationship between furnace width pitch of embedded tubes and tube wall thinning

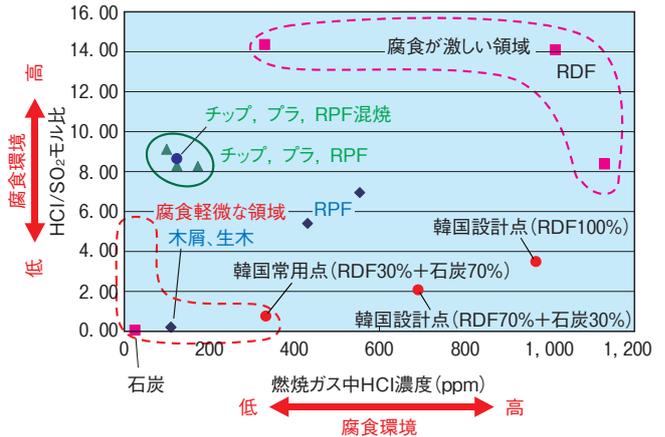


図7 燃焼ガス中HCl/SO<sub>2</sub>ガス比の腐食に対する影響  
Fig. 7 Impact of HCl/SO<sub>2</sub> ratio in combustion gas on corrosion

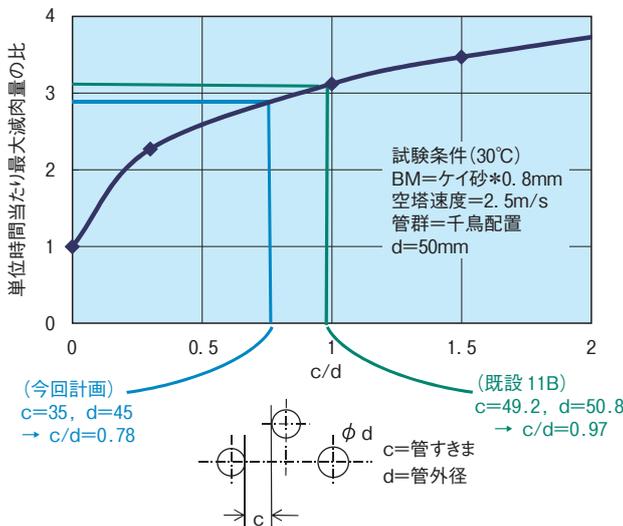


図6 層内管水平方向幅寸法と摩耗による減肉量の関係  
Fig. 6 Relationship between horizontal embedded tubes and thinning due to abrasion

一方、層内管幅寸法と摩耗減肉量の関係（図5）により、従来の缶の管ピッチよりさらに小さくすること、また分散板\*\*から噴出される気泡の集合による大型化を抑制することで、摩耗が低減することがわかった。さらに、層内管水平方向幅寸法と摩耗減肉量の関係を調べた結果（図6）、管すきま（c）と管外径（φd）の比（c/d）を小さくすることで摩耗減肉量が小さくなることがわかったため、管群中の水平ピッチを小さくし、そのすきまを約70%に低減する構造を採用した。

\* 空塔速度比：流動砂が最初に流動し始める流動速度（Umf）と実際の運転中の流動砂の流動速度（Ut）の比  
\*\* 分散板：流動砂を流動させるための空気を流動床内に均一に供給する装置

焚き流動床ボイラに対してRDF\*やRPF\*\*といった腐食性燃料焚き流動床ボイラとでは腐食環境が大きく異なる。減肉に対する影響は、圧倒的に腐食性燃料焚きボイラの方が減肉傾向が大きく、これは腐食と摩耗の相乗効果によるものである。流動床燃焼であるため、ある程度の摩耗減肉は発生するが、腐食による影響を抑制するためには、腐食環境を緩和させる必要がある。

そこで、過去の文献から、二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）が塩基物を腐食に関して安定的な硫酸塩に変化させる現象、例えば  $2(K, Na)Cl + SO_2 + O_2 \rightarrow (K, Na)_2SO_4 + Cl_2$  という現象があり、ボイラ炉内における腐食性ガスである塩化水素（HCl）とSO<sub>2</sub>についても、SO<sub>2</sub>の濃度が、HClの濃度の同等あるいは倍以上存在すると、塩化物が安定的な硫酸塩に変化し、腐食環境が緩和されることがわかった。

また、HClとSO<sub>2</sub>のモル比と、過去の流動床ボイラの燃料と排ガス性状との関係を図7に示す。HCl/SO<sub>2</sub>モル比の小さいグラフ左下においては腐食が軽微な領域であり、逆にHCl/SO<sub>2</sub>モル比の大きい右上の辺りは腐食が大きいという傾向があることがわかる。このことは、通常のボイラと同様に流動床ボイラにおいても、硫酸塩と塩化物塩では硫酸塩による腐食の方が腐食速度を抑制できることを示している。

これより、腐食性燃料に対して、硫黄分を含む燃料を混合させることにより、減肉量を低減させることが可能であり、中でも燃料としては一般的な石炭を混焼することが有効であると捉えた。

\* RDF：Refuse Derived Fuel  
\*\* RPF：Refuse Paper and Plastic Fuel

(2) 腐食環境の影響調査

腐食環境は、燃料の種類、管の蒸気温度・圧力、燃焼状態に影響を受けるため、過去の実績を基に流動層内環境と減肉の関係を調査した。燃料による環境については、石炭

4 RDF石炭混焼ボイラの層内管減肉実績

今回、前項の対策を実施して、韓国益山向けボイラの層内管減肉量について調査した（図8）。

2012年1月から商用運転を開始し、2013年9月末および

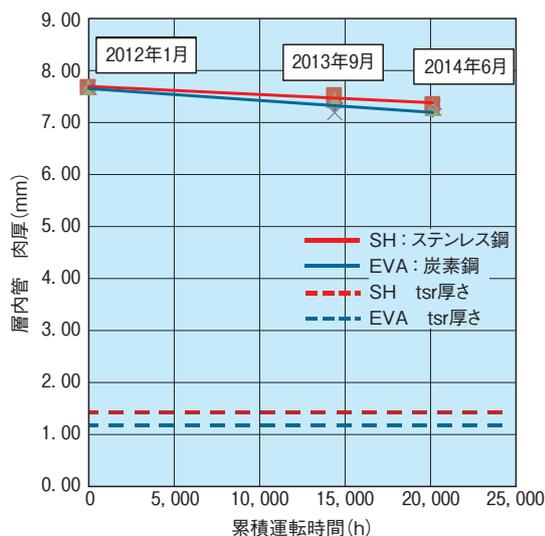


図8 韓国向け累積運転時間と層内管減肉量実績  
Fig. 8 Cumulative operating time and embedded tube thinning in Internal Circulation Fluidized Bed Boiler for South Korea

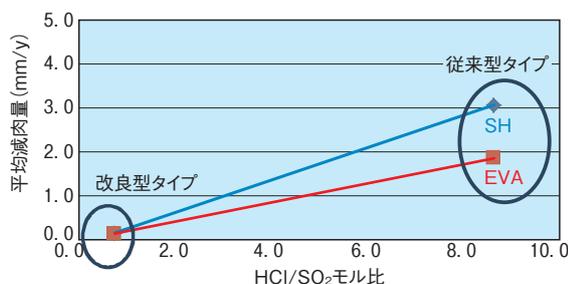


図9 HCl/SO<sub>2</sub>ガス比と層内管年間腐食量の実績比較  
Fig. 9 Comparison between HCl/SO<sub>2</sub> gas ratio and annual embedded tube corrosion amount

2014年6月初めに層内管の肉厚測定を実施した。それぞれの計測時点での累積運転時間は2013年9月末で約14,400時間、2014年6月初めで約20,160時間であった。同一箇所での減肉量を見ると、層内過熱器管（SH：ステンレス鋼）の平均減肉量は、0.42mm/20,160時間となり、年間8,000時間で0.17mm/8,000時間となった。最大減肉量では、2.4mm/20,160時間であった。また、最大減肉箇所は常に同一箇所が発生していることはなく、分散していた。

一方、層内蒸発器管（EVA：炭素鋼）については、0.40mm/20,160時間となり、平均減肉量0.16mm/8,000時間、最大減肉量2.9mm/20,160時間となった。これを従来の実績値における平均減肉量とあわせてHCl/SO<sub>2</sub>ガスモル比で整理すると図9に示す数値となり、従来タイプである某社向けの層内過熱器管（SH：ステンレス鋼）および層内蒸発器管（EVA：炭素鋼）の年間平均減肉量の実績と、改良型タイプである今回の実績値を比較すると、環境条件を改善することで、平均減肉量がおおよそ90%低減した。

なお、既設ボイラと今回納入したボイラでは、層内管の表面温度の違いがあり、特に層内蒸発器管については、約

30℃低く、これも今回の減肉速度の低減に影響を与えている。

## 5 まとめ

今回の実績データから、層内管の減肉抑制には3つの方法が有効であることを実機にて確認することができた。

- ① 管群ピッチの狭小化
  - ② SO<sub>2</sub>ガスによる塩化物塩の硫酸塩化の促進
    - ・ HCl/SO<sub>2</sub>モル比率を下げる。内部循環流動床ボイラにおいては石炭を一時的に混焼することでも効果がある。
  - ③ メタル温度の低減
    - また、今回実施した抑制技術で、延命化を図ることができたが、他条件（燃料循環や蒸気条件）にも対応するためには、さらに次の内容について検討する必要がある。
- ① 腐食環境を緩和するため、石炭の代替となる硫黄（S）分を含む補助燃料（製紙スラッジなど）あるいは混合する添加材の使用
  - ② さらに気泡の細分化方法
    - ・ 分散板空気ノズルの噴射状態の改善
    - ・ 流動化空気層内でのさらなる分散化
  - ③ 流動速度の低減化
    - ・ さらに空塔速度比を低減した場合の熱伝達への影響

## あとがき

今回のボイラのようなRDFまたはバイオマス+石炭混焼ボイラの需要は、新興国においても都市化によるごみの増加、あるいは各種植物系プラントからの余剰バイオマスと安価な石炭を混焼した発電プラントの増加とともにますます採用されていくと予想される。今後も、今回の実績を利用して上記需要を狙い、さらなる寿命の延命化、コスト低減化を継続していく所存である。

なお、韓国向けRDF焚き内部循環流動床ボイラは、益山向けの実績が評価され、別プロジェクト2件を受注、建設中である。

## 参考文献

- 1) 末光, 武藤, 田端, 原田: “バイオマス焚き内部循環流動床ボイラ”, 川崎重工技報, No. 149, pp. 30-33 (2007)



武藤 貞行 森 宏之 清水 敬哲 竹田 航哉

# ごみ焼却・バイオガス化複合施設 — 固定買取制度に適合する新たなごみ処理システム — Waste Treatment and Biogas Generation Complex — New Waste Treatment System Compatible with the Feed-in Tariff Scheme



内田 博之①	Hiroyuki Uchida
村田 英彰②*	Hideaki Murata
臼井 勝久③	Katsuhisa Usui
上原 伸基④	Nobuki Uehara
杉原 英雄⑤	Hideo Sugihara
谷口 暢子⑥*	Nobuko Taniguchi

当社は、2014年3月に国内初のごみ焼却・バイオガス化複合施設である防府市クリーンセンターを納入した。一般廃棄物をメタン発酵原料としてバイオガスを発生させ、ボイラ主蒸気を過熱する熱源として使用し、高効率発電を行うものである。また、本施設の焼却炉は当社独自設計の並行流炉を採用しており、低空気比・低公害の燃焼が可能で、エネルギー・地球環境保全の両面で貢献できるシステムである。

In March 2014, Kawasaki completed the construction of Japan's first waste treatment and biogas generation complex called Hofu City Clean Center. The facility converts municipal waste into biogas via a methane fermentation process. The biogas is used to superheat main boiler steam for high-efficiency power generation. Kawasaki has adopted the proprietary Parallel Flow Type Incinerator for this facility, enabling low-emission combustion with a low excess air ratio. This resulted in a system that is both energy efficient and environmentally friendly.

## まえがき

近年、地球環境保全・エネルギー問題の観点から、エネルギー資源としての「ごみ」への期待がますます大きくなっており、ごみ焼却発電・バイオガス発電が注目されている。

## 1 施設概要

当社は、ごみの衛生的な処理の観点から開発した焼却施設の初号機を皮切りに、時代のニーズに応じて数々のごみ焼却発電施設を納入してきた。1990年代からは発電の高効率化にも取り組んできた。

このような中、今回国内初となるごみ焼却・バイオガス化複合化システムを採用した防府市クリーンセンターを納入した。可燃ごみ処理施設は、当社独自のごみ焼却技術と、一般廃棄物をメタン発酵してバイオガスを発生させるバイオガス化技術を組み合わせた複合化システムで、発電効率23.5%と、同処理規模で最高レベルを実現している。また、リサイクル施設も併設している。

施設の処理規模は以下の通りであり、可燃ごみ処理施設は、ごみ焼却設備とバイオガス化設備を組み合わせた複合化施設である。

### ① 可燃ごみ処理施設

- ・ごみ焼却設備 150t/24h (75t/24h × 2 炉)
- ・バイオガス化設備 51.5t/24h (25.75t/24h × 2 系列)

### ② リサイクル施設 23t/5h

複合化施設の処理フローを図1に示す。一般家庭から排出される可燃ごみをこのフローに従い、処理を行う。

#### (1) ごみ焼却設備

- ① 一般家庭などから収集されたごみは、ごみピットに貯留され、その一部は焼却炉に供給され処理される。焼却により発生する燃焼排ガスは、排熱ボイラにて熱回収される。
- ② 燃焼排ガスに含まれる有害物質は、無触媒脱硝装置および、ろ過式集じん器にて、分解・除去を行う。
- ③ 焼却炉および排熱ボイラから発生する焼却灰および集じん灰は、セメント原料として利用する。

#### (2) バイオガス化設備

- ① ごみピットに貯留したごみの一部は、選別設備に供給され、破碎・磁選・機械式選別などの前処理が施される。バイオガス化の原料に適したごみは選別ごみピットに貯留され、不適ごみはごみピットに返送される。
- ② 選別ごみピットのごみは、さらに破碎処理によって細か

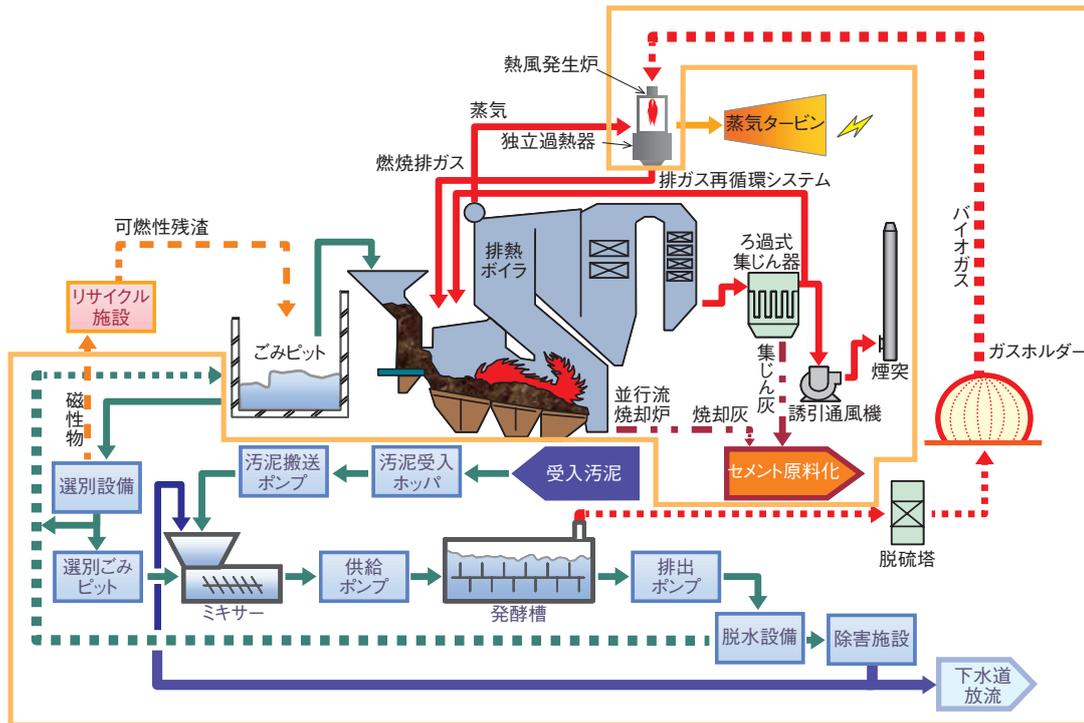


図1 複合化施設の処理フロー  
Fig. 1 Complex facility treatment flow

くされ、ミキサーで希釈水および受入汚泥（隣接施設の下水・し尿汚泥）と共に混練、バイオガス化に適した固形物濃度に調整後、供給ポンプにて発酵槽に投入される。

- ③ 発酵槽では原料中の有機物を分解することで、メタンを含有するバイオガスを発生させる。発生したバイオガスは、脱硫塔で硫化水素を除去後、ガスホルダーに貯留される。

### (3) 複合化

- ① バイオガス化設備の発酵槽で発生する発酵残渣は、脱水処理後、ごみピットに返送され、ごみと共に焼却される。
- ② バイオガス化設備で発生したバイオガスは、熱風発生炉で燃焼され、排熱ボイラで発生した蒸気をさらに過熱する独立過熱器の熱源として利用される。
- ③ 独立過熱器で熱回収されたバイオガス燃焼排ガスは、熱回収率を最大限に向上させるため、焼却炉内に投入され、保有する熱は排熱ボイラで利用される。

## 2 各要素設計および運転実績

### (1) 並行流焼却炉

焼却炉には、当社独自技術の「並行流焼却炉」を採用し、低空気比燃焼により、高いエネルギー回収率と低エミッションを実現している。以下に特徴を述べる。

- ① 並行流形状により、焼却炉出口でガスが反転し、空

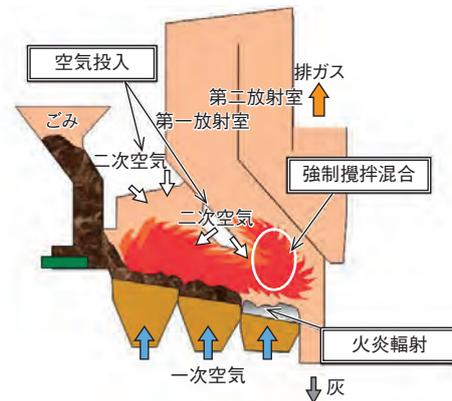


図2 並行流焼却炉  
Fig. 2 Parallel Flow Type Incinerator

気が強制混合攪拌されるため、効率の良い燃焼が図れ、低空気比燃焼が可能。

- ② 二次空気の投入箇所を複数設置することにより、最適な箇所に最適な空気量を投入できるので、投入空気量を低減でき、低空気比燃焼が可能。
- ③ 二次空気による多段燃焼により、炉内温度を均一化して局部高温域を無くすことで、サーマルNOxの発生を抑制し、低NOx燃焼が可能。
- ④ 火炎が灰の上部を通過する構造となっているため、輻射熱により未燃が残らない燃焼が可能。

上記の設計により実現した防府市クリーンセンターでの排ガストレンドを図3に示す。これより、O<sub>2</sub>平均5.6%発生、NOx平均32ppmと、低空気比・低エミッションで運転できている<sup>1)</sup>ことが分かる。

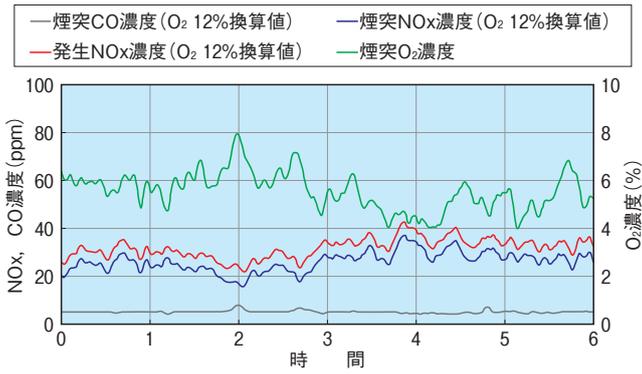


図3 排ガストレンド  
 Fig.3 Trends in exhaust gas emissions

(2) 選別設備

受け入れたごみを、バイオガス化に適するものと不適なものに分別する必要がある。これは、分別が適切でないと、発酵過程で効率の良い発酵が行えないほか、発酵槽周りの配管での詰まりの原因となるからである。

分別の方法としては、収集段階で行う方法や、受け入れてから機械選別を行う方法があるが、本施設では、細分化した収集が不要である後者を採用している。機械選別のフローを図4に示す。

受入ごみの大きさは500mm程度であるが、一次破碎機により150mm程度まで粗破碎し、機械選別して選別ごみとする。これにより、メタン発酵に対して不適な大型ビニール類・布類を減量し、厨芥類・紙類を選別して良好な発酵原料にすることができる<sup>2)</sup>。

(3) メタン発酵設備

メタン発酵は、発酵槽内部を約55℃に加温して、有機物を分解する高温メタン発酵を採用している。発酵槽内での滞留時間は20日間程度である。

(i) 強度評価

発酵槽は直径6.8m、長さ34m、容量約1,000m<sup>3</sup>の円筒横型で鋼板製である。内部で発生するガスを効率良く排出す

るため、パドルを設置し常時攪拌を行っている。

本発酵槽には内容物やバイオガスを保持するため、地震時においても十分な強度を有する必要がある。このため、地震時における応力解析(図5)を行うとともに、運転時の変形状態についても解析を行い、強度設計に反映した。また、通常運転時の変形状態についても同様に解析を行い、設計に問題ないことを確認した。

(ii) 運転状況

選別されたごみは二次破碎機にて50mm以下まで破碎され、ミキサーにて調整水および汚泥と混合後、発酵槽へ投入される。これまで安定運転を継続できており、本発酵技術は異物混入に対して許容範囲が広いことが分かる。また、一般廃棄物をバイオガス化する際に、分別収集しなくても安定運転が可能であることを示している。

バイオガスの発生状況を図6に示す。バイオガス発生率としては、250m<sup>3</sup>N/ごみt超となっており、高効率原燃料回収施設の1/2交付率の要件であった150m<sup>3</sup>N/ごみtを大きく上回る性能を発揮している。また、メタンガス濃度も平均で約58%と計画の54%よりも高い。

(4) ごみ焼却とバイオガスの複合化<sup>3)</sup>

本施設では、排熱ボイラの蒸気条件は4MPa×365℃であるが、バイオガスを熱風発生炉で燃焼させ、得られた高温ガスにより排熱ボイラで得られた蒸気を独立過熱器により415℃までさらに過熱する(図7)。

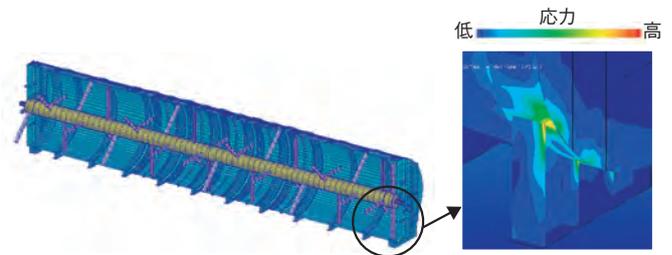


図5 発酵槽の構造および応力解析結果  
 Fig.5 Structure and stress analysis results of fermentation tank

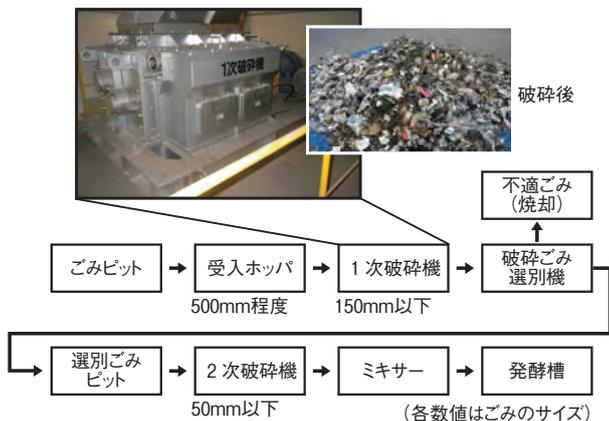


図4 機械選別フロー  
 Fig.4 Mechanical sorting flow

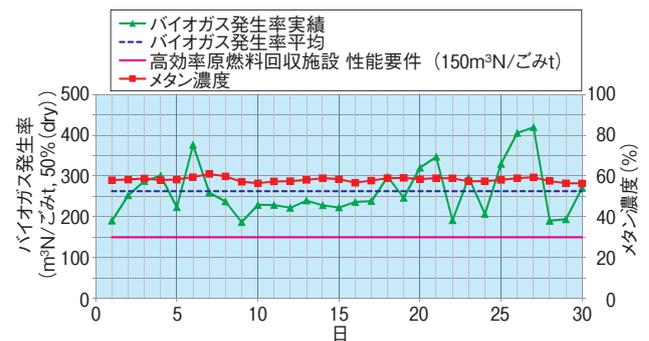


図6 バイオガス発生状況 (2014年12月)  
 Fig.6 Biogas generation status (December 2014)

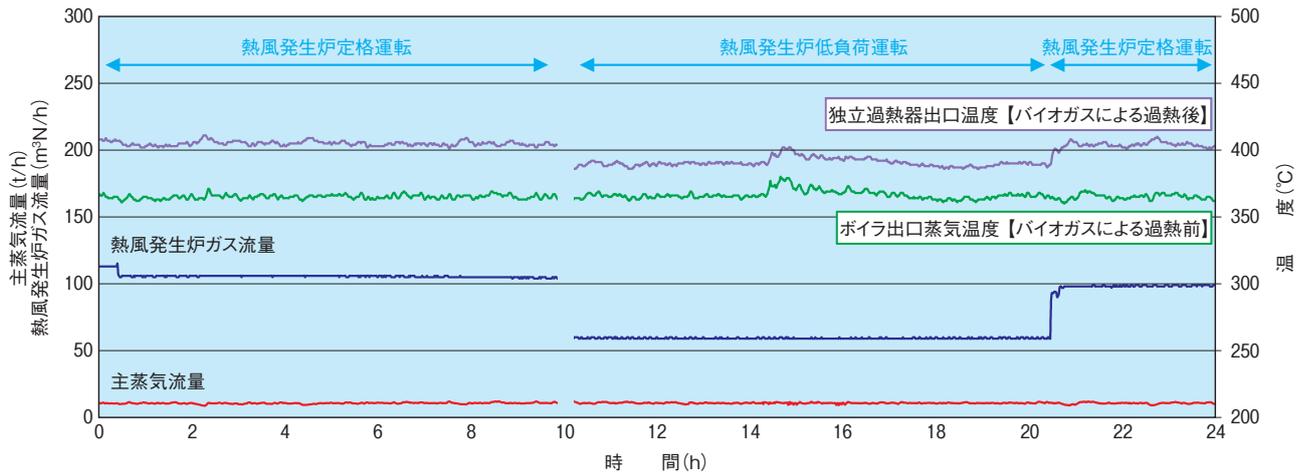


図8 熱風発生炉および独立過熱器の運転状況  
Fig. 8 Operating status of biogas burner and independent superheater

(i) 独立過熱器の運転

熱風発生炉および独立過熱器の運転状況を図8に示す。図中の「バイオガスによる過熱前」がボイラ出口、「過熱後」が独立過熱器出口の主蒸気温度を示す。

熱風発生炉の負荷を定格、低負荷（50%）とも、主蒸気を安定して過熱することが可能であった。また、20時間付近で、ステップ変化を実施したが、負荷追従性も非常に早く運転調整が容易であることを確認した。

(ii) 発電効率の向上

熱風発生炉停止時と運転時の発電効率について比較した結果、2%超の効率向上が達成された（表1）。

あとがき

バイオガスによる独立過熱器を備える本システムは、同規模のごみ焼却発電施設に比べて発電効率の向上に寄与できる。また、固定価格買取制度における認定設備であり、引き続き、運転調整の容易性・メンテナンスの簡便性を兼ね備えシンプルなシステムである独立過熱器を用いた複合化施設の普及に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 内田, 谷口, 白井, 上原: “防府市クリーンセンター低空気比燃焼運転の報告”, 第36回全国都市清掃会議 (2015)
- 2) 村田, 内田, 白井, 服部, 杉原, 上原: “可燃ごみによるバイオガス化施設の運転について”, 第36回全国都市清掃会議 (2015)
- 3) 内田, 白井, 竹田, 服部, 杉原, 上原: “防府市クリーンセンター バイオガスを用いた独立過熱器の運転報告”, 第36回全国都市清掃会議 (2015)

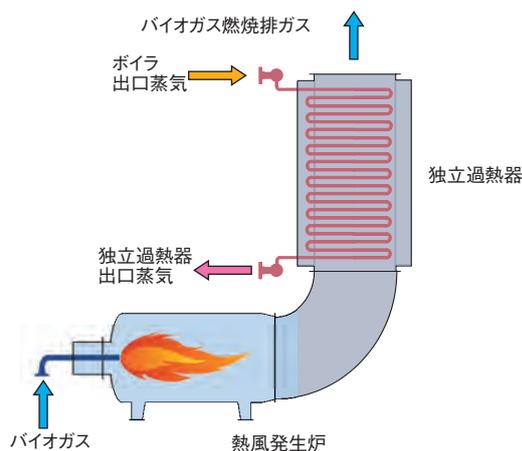


図7 独立過熱器  
Fig. 7 Independent superheater

表1 発電効率  
Table 1 Power generation efficiency

独立過熱器	運転時	停止時
発電出力 (KWh)	3,545	3,584
ごみ入熱 (MJ/h)	62,429	63,202
バイオガス入熱 (MJ/h)	3,885	0
発電効率 (%)	23.6	21.0



内田 博之



村田 英彰



白井 勝久



上原 伸基



杉原 英雄



谷口 暢子

# セルロース系バイオエタノール製造システム —非食料系原料によるエネルギー創造—

## Cellulosic Ethanol Production System — Energy Creation from Non-food Sources



辻田 章次① Shoji Tsujita  
和泉 憲明② Noriaki Izumi  
田尻 浩範③ Hironori Tajiri  
西野 毅④ Takashi Nishino  
政本 学⑤ Manabu Masamoto  
津澤 正樹⑥ Masaki Tsuzawa

当社では、2008年度から2012年度まで実施した農林水産省の助成事業である秋田でのバイオエタノール製造実証をもとに、商用化に向けた取り組みとして熱水糖化の高濃度化対策を行った。そして、糖化収率を低下させることなく設備をコンパクト化するとともに、必要な熱量の低減を実現した。

Kawasaki constructed a demonstration plant of bioethanol production in Akita Prefecture in FY 2008 and demonstrated its operation until FY2012 under a subsidized project of the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries. With a view to commercialization, we developed our technologies based on demonstration to produce the bioethanol more economically and make our process compact by increasing the concentration of raw material in hot-water saccharification.

### まえがき

近年、化石燃料使用のリスクとして資源の枯渇や二酸化炭素排出による温室効果が指摘されており、化石燃料の使用量低減が求められている。一方、植物の世界では炭素が増減せずに循環する「カーボンニュートラル」が形成されている。このような特性を持つ植物資源を石油代替エネルギーとして活用することで、二酸化炭素の発生を抑えることができる。化石燃料の代替品の一つとしてエタノールが注目されており、中でも食料と競合しない非食料系原料から作られるバイオエタノールへの期待が高まっている。

### 1 目的

非食料用のバイオマス資源を取り扱いの容易な液体燃料へ転換する方法として、植物に含まれるセルロースからエタノールを製造する方法があり、この中で要となるセルロースの糖化手法については、硫酸を使用する方法（硫酸法）および酵素を使用する方法（酵素法）などが開発されている。

当社では、化石燃料と競争可能な価格を達成できるセルロース由来のエタノール製造プロセスの確立を目的として、硫酸を使用しない熱水による糖化技術とこれによって得られた糖化液の高効率発酵技術の開発を進めてきた。この方式の採用は、反応時間を厳密に設定することで、生成した

糖の過分解を防ぎ、糖収率の向上・過分解物による発酵阻害の低減を狙ったものである。この方式は硫酸法や酵素法に比べ糖化率は低くなるが、ランニングコストを含めたエタノール製造のトータルコストを抑えることが可能となる。

具体的には、2006年度から2008年度まで新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）との共同研究として、サトウキビの絞り粕であるバガスからエタノールを製造する技術開発を行い、2008年度後半から2012年度まで、農林水産省の助成事業として秋田県の支援の下、(社)秋田県農業公社とともに、稲わらからエタノールを製造する技術実証を行った。

### 2 稲わらからのエタノール製造技術実証の概要

本技術実証事業で、当社はバイオ燃料（エタノール）製造実証および走行実証を担当した。バイオ燃料製造設備は、原料となる稲わらの受け入れから無水エタノール製造までの全工程を対象としており、当社は設計・製作および運転を担当することで、エタノール製造技術を実証するとともに商用化における課題の抽出を進めた。

#### (1) 実証設備

口絵写真に示すバイオ燃料製造実証設備を、2009年度に秋田県潟上市の工業団地内に建設した。

本設備におけるエタノール製造フローを図1に示す。ロー

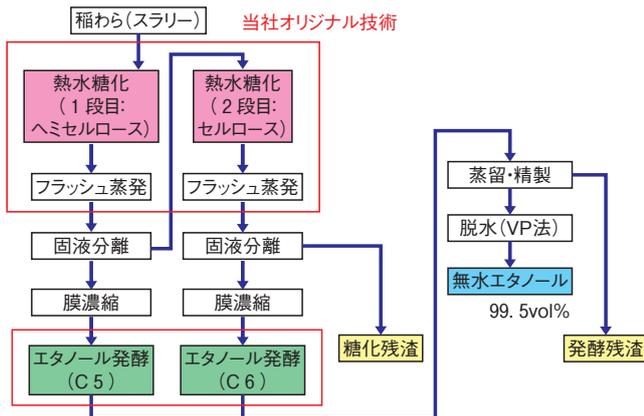


図1 概略システムフロー  
Fig.1 System flow overview



図2 各工程生産物  
Fig.2 Products of each process

ル状で保管されている稲わらを受け入れ、粉碎、スラリー化を経て、糖化、濃縮、発酵、蒸留、無水化の手順で製品エタノールを製造する。

本設備のプロセスの特徴は、糖化工程で熱水条件を変えて稲わらの主成分であるヘミセルロース、セルロースを、別々に糖化することである。得られた2種の糖化液は、非遺伝子組み換え酵母を使用して発酵後、発酵液を合一して蒸留、ゼオライト膜を用いた蒸気透過(VP)法により脱水して、エタノール濃度99.5vol%の無水エタノールとする。各工程で得られる生産物を図2に示す。

## (2) 熱水糖化技術

本設備で採用した熱水糖化技術は、高温・高圧条件下では、水分子が有機系高分子の結合部位に入り込み、高分子を分解する反応(加水分解反応)を利用した技術である。

本システムでは、図3に示すように、1段階目の熱水糖化

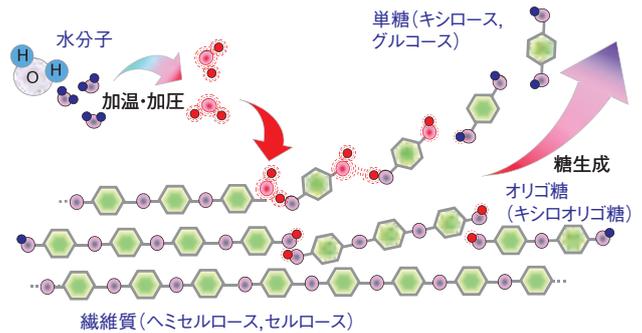


図3 熱水糖化プロセスの概念  
Fig.3 Concept of saccharification process

(150~200℃, 0.5~1.2MPa)で、ヘミセルロースをキシロースとキシロオリゴ糖に分解、2段階目の熱水糖化(220~260℃, 2~5MPa)でセルロースをグルコースに分解する。実証設備の糖化反応器は、管内をスラリー化した粉碎稲わらを通して、外側から蒸気で所定の温度条件まで加熱するシェルアンドチューブ形式とし、加熱部位通過後にフラッシュ蒸発にて急冷させる。

## (3) 発酵プロセス

本技術実証事業に先立つNEDOとの共同研究では、神戸大学と共同開発した特殊な酵母を用いて発酵を行った。この微生物は、バガスを糖化して得られる2種の糖質、キシロースとグルコースを同時にエタノールへ変換させる能力を遺伝子組み換え技術により賦与したものであった。

今回の実証事業では、上記の遺伝子組み換え酵母は使用できなかったため、通常のアアルコール製造用酵母で発酵できないヘミセルロース糖化液に対しては、当社独自に非遺伝子組み換え酵母の改良を行った。

基となる酵母には、キシロースの資化能力を有する *Pichia Segobiensis* (JCM No. 10740)を採用、独自の変異選抜による改良を行い、エタノール発酵能向上を図った。

その結果、図4の変異株K5-611Δが得られた。図5では、変異選抜前の酵母(野生株)に比べ、変異株K5-611Δはエタノール収率が20ポイント以上向上したことを示している。

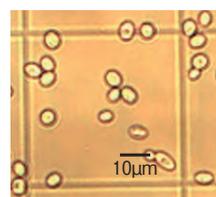


図4 変異株K5-611Δ  
Fig.4 Mutant strain K5-611Δ

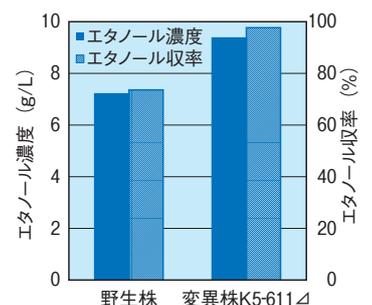


図5 発酵能力比較試験結果  
Fig.5 Fermentation test results

表1 糖化率および発酵効率（原料：稲わら）  
Table 1 Saccharification rate and fermentation efficiency  
(raw material: rice straw)

項目	目標値	2012年度結果
ヘミセルロース糖化率 (%)	70	70
セルロース糖化率 (%)	50	46
C5発酵効率 (%)	70	88
C6発酵効率 (%)	80	91
製造効率 (L/t-dry)	150	153

※ 製造効率に蒸留，無水化のロス含まず

表2 エタノール品質分析結果  
Table 2 Ethanol quality analysis results

項目	結果	JIS規格
外観	無色	無色透明
エタノール分 (vol%)	99.8	≥99.5
メタノール (g/L)	1.0	≤4.0
水分 (Wt%)	0.35	≤0.70
有機不純物 (g/L)	5.6	≤10
電気伝導度 (μS/m)	10	≤500
蒸留残分 (mg/100mL)	0.2	≤5.0
銅 (mg/kg)	<0.10	≤0.10
酸度 (wt%)	0.0031	≤0.0070
pHe (参考)	5.2	(※)
硫黄分 (mg/kg)	<1	≤10

※ 受け渡し当事者間の合意による

表3 糖化反応器の変遷  
Table 3 Transition of saccharification reactor

項目	NEDO共同研究	秋田農水実証設備	秋田要素試験実証設備
開発年度	2006~2008	2008~2012	2011~2015
方式	中濃度バッチ式	低濃度連続式	高濃度連続式
機器型式	縦型容器	シェル&チューブ	二軸パドル
濃度	5~10%	2~5%	25~30%

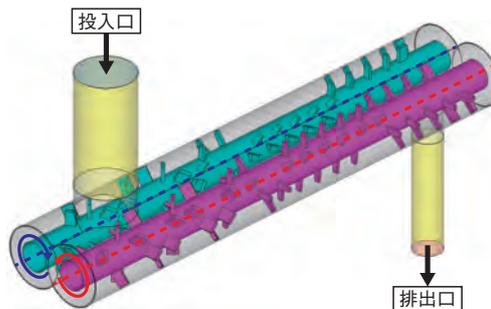


図6 高濃度連続式2軸パドル式糖化反応器模式図  
Fig. 6 Schematic diagram of a high-concentration continuous two-axis paddle-type saccharification reactor

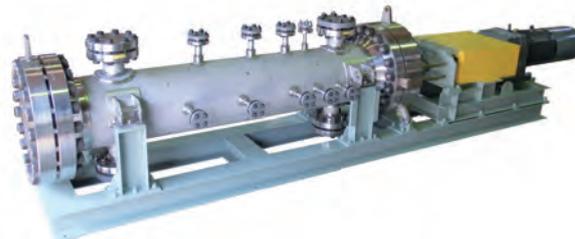


図7 秋田要素試験実証設備の糖化反応器  
Fig. 7 Saccharification reactor used for the demonstration test in Akita

(4) バイオ燃料製造実証結果

最終年度で得られた糖化率，発酵効率，製造効率を表1に示す。ここで，C5，C6はそれぞれヘミセルロース，セルロースからの糖化液のことである。セルロースの糖化率は目標値に対して若干低い値となったが，全体として稲わら1 dry-tonから150L以上のエタノールが製造され，当社技術の有効性を実証できた。

製造したエタノールの品質分析結果を表2に示す。自動車燃料用として使用するエタノールの品質に関しては，JIS規格で規定されている。製造したエタノールは，JIS規格を満足するものとなっている。

3 商用化に向けた技術改良状況

秋田農水実証事業では，技術の実証と合わせてスケールアップにおける課題の抽出を行った。最大の課題は，設備・ランニングコストの低減で，処理原料を高濃度化することで設備のコンパクト化を目指した。秋田農水実証事業では熱水糖化工程のスラリー濃度が5%であったが，秋田要素試験実証設備では糖化反応器を2軸パドルを用いた高濃度連続式とすることで，スラリー濃度を30%まで高濃度化した(表3)。これにより設備容量および加熱に必要な熱量を1/6まで低減した。次にセルロースの糖化率向上のため，酵素の費用が高価でコストアップの要因となっている

酵素法について，酵素コストを低減する手法の一つとして酵素オンサイト生産技術の検討を行っている。

(1) 熱水糖化における高濃度処理

処理原料を高濃度化すると原料と熱水との接触頻度が低下し，加水分解反応が停滞する。この対策として，反応時間を一定に維持するためのプラグフロー（前後の混合がない押し出し流れ）を形成しつつ，熱水と原料とを均一接触させるための軸垂直断面方向の攪拌が同時にでき，かつセルフクリーニングが可能な2軸パドル式の糖化反応器を採用した(図6)。秋田要素試験実証設備の糖化反応器を図7に示す。

また，高圧系である糖化反応器への原料供給は，図8に示すプラグスクリーンプンプを採用した。供給する原料は固液分離性が高く，従来から高濃度原料の供給に用いていたモノポンプやニーダーといった機器では供給できなかったことが分かった。そのため，本来は食品用に用いられてきた非接触の容積式ポンプである二軸スクリーンプンプを改

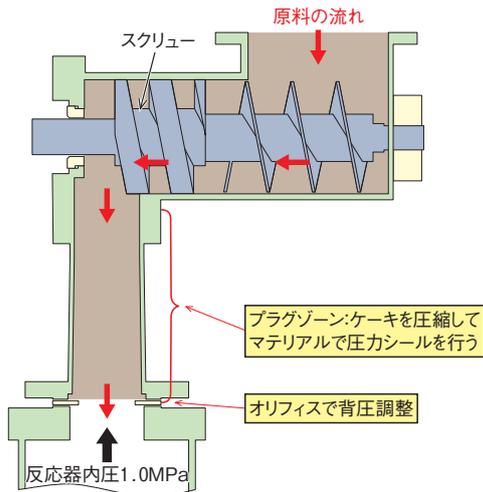


図8 1段階ヘミセルロース用プラグスクリーポンプの例  
Fig.8 First-stage plug screw pump for hemicellulose

表4 糖化効率および発酵効率 (原料: バガス)

Table 4 Saccharification and fermentation efficiency (raw material: bagasse)

項目	目標値	C5熱水糖化 +C6熱水糖化	C5熱水糖化 +C6酵素糖化
エタノール収率 (L/ton-dry)	206	151	242
糖化効率 (%)			
全体	65	60	72
ヘミセルロース	80	80	80
セルロース	55	50	70
発酵効率 (%)			
全体	78	60	80
キシロース (C5)	75	60	80
グルコース (C6)	80	60	80

良することで、固液分離しながらも原料を圧送することに成功した。圧送時に固液分離されるため、液は先に反応器に入り固形分は遅れて送られる。含水率が下がることで反応器入口の原料はさらに圧密され、反応器内からの高圧蒸気の逆流を防ぐプラグ（栓）の役割を果たしながら連続供給を行っている。

## (2) 酵素糖化における高濃度処理

セルロース糖化については、表4に示す通り、原料あたりのエタノール収量を高くできる酵素糖化に対するユーザー要望も多く、当社では前述のヘミセルロース高濃度糖化に対応した酵素糖化プロセスの改良を進めている。

また、酵素法の課題である酵素製剤コストについては、酵素糖化効率を向上できる同時糖化発酵法を採用するとともに、エタノール製造プラント内に酵素生産設備を設け、酵素を含む溶液を精製することなく直接糖化プロセスに供給する酵素オンサイト生産設備を導入することにより、酵素コストの低減を図っている（図9）。

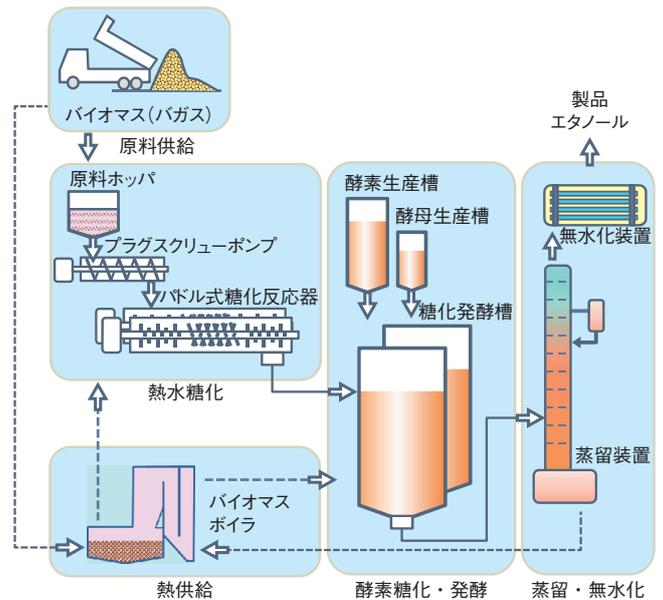


図9 セルロース由来エタノール製造商用プロセス概略

Fig.9 Outline of cellulosic ethanol production commercial process

## あとがき

秋田の実証設備を利用した試験で、高濃度での糖化技術は完成した。現在、商用化に向けて酵素オンサイト生産と同時糖化発酵のシステムを検証中である。これらの検証を早期に完了し、商用機の受注を達成したい。

なお本研究の一部は、農林水産省の「ソフトセルロース利活用技術確立事業」の一環として実施した成果である。

## 参考文献

- 1) 和泉, 長浜, 田尻, 五十嵐, 熊谷, 谷山: “繊維状農業残さから自動車用バイオマス—カワサキ熱水式バイオエタノール製造技術”, 川崎重工技報, No.165, pp.58-61 (2007)
- 2) 五十嵐, 和泉: “非食用バイオマスからのバイオマス製造技術”, 公益社団法人日本伝熱学会, 伝熱 Vol.53, No.224, pp.34-37 (2014)



辻田 章次



和泉 憲明



田尻 浩範



西野 毅



政本 学



津澤 正樹

# 水素液化・液化水素輸送貯蔵 — 来るべき水素社会に向けて —

## Technologies of Hydrogen Liquefaction, Transport and Storage — Paving the Way to a Hydrogen Fueled Future



神谷 祥二①※*	Shoji Kamiya
砂野 耕三②	Kozo Isano
飯屋 大祐③	Daisuke Kariya
小宮 俊博④	Toshihiro Komiya
山口 哲⑤	Akira Yamaguchi
孝岡 祐吉⑥※	Yukichi Takaoka

将来の水素社会に向け水素需要拡大が予想される中で、豪州で製造した水素を輸入する「水素エネルギーサプライチェーン」構想の実現を目指して、当社は関連機器の開発に取り組んでいる。チェーン商業化までに、2020年頃の小規模パイロットチェーン、2025～2030年大規模実証チェーンを計画している。水素ガスは大規模輸送貯蔵に適した液化水素に変換されて輸入されるが、その液化、輸送貯蔵技術は当社のロケット射点設備、LNG船などで蓄積されてきた極低温技術が活用される。

チェーン構築に向け液化技術では国産初の大型液化機での水素液化に成功し、また輸送技術では世界初となる液化水素運搬船の貨物格納設備の基本認証を得るなど、技術開発が着実に進行している。

Demand for hydrogen is expected to increase as we head toward becoming a hydrogen economy. With a view to realizing the Hydrogen Energy Supply Chain Initiative, which envisions importing hydrogen produced in Australia, Kawasaki is developing related equipment. Before commercial operation of the hydrogen energy chain, Kawasaki is planning to implement a small-scale pilot chain around 2020, and a large-scale demonstration chain between 2025 and 2030. When importing hydrogen gas, it will be converted into liquefied hydrogen suitable for large-scale transport and storage. The technology used for liquefaction, transport, and storage is derived from the cryogenic technology Kawasaki has built up through the development of rocket launch complexes and LNG carries.

Technological development to realize the chain concept is steadily progressing. In terms of liquefaction technology, Kawasaki has succeeded in hydrogen liquefaction using Japan's first large-scale hydrogen liquefier. In terms of transport technology, Kawasaki has obtained approval in principle for the cargo containment system to be installed on the world's first liquefied hydrogen carrier.

### まえがき

地球温暖化の環境問題、資源枯渇問題を解決する水素社会の実現に向けた水素利用系の商業化、インフラ関連の技術開発が国内外で加速されている。当社は「水素エネルギーサプライチェーン」構想を2010年に提案し、その実現に取り組んできた。本稿では、当社のチェーン構想の背景、将来の水素需要量の拡大予想、およびチェーンを構成する水素液化、液化水素（LH<sub>2</sub>）輸送貯蔵技術に関連する当社実績と技術開発の状況について述べる。

### 1 背景

我が国では2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」<sup>1)</sup>の中で「水素社会」の実現に向けた取り組みが明記された。水素ビジネスとして燃料電池自動車（FCV）が1年前倒しの2014年末に販売された。さらに、欧州連合（EU）は、今年末のCOP21（気候変動枠組条約締結国会議）に向けて、2050年までに世界全体の温室効果ガスの排出量を2010年に比べて60%以上削減する長期目標を2015年2月に掲げた。このような状況から水素社会への期待はますます高まっている。

水素社会は、1874年フランスSF作家ジュール・ベルヌが、「ミステリアス・アイランド」で予言したことが始まりと

される。その100年後、第1回 世界水素エネルギー会議 (WHEC: World Hydrogen Energy Conference) が1976年に開催され、科学的検討が本格的に行われるようになり、電力システムと相互に補完するエネルギーシステムとして国内外で提唱されてきた。

当社は、来るべき水素社会での水素需要増大に備えて、豪州で褐炭から水素を製造し、発生するCO<sub>2</sub>を豪州で回収貯留してわが国にCO<sub>2</sub>フリーの水素を輸入する「水素エネルギーサプライチェーン」構想を提案して、その実現に取り組んでいる。

## 2 将来の水素需要の拡大

水素社会においては、水素の利用が、すでに商用段階にある定置式燃料電池や燃料電池自動車から、水素エンジンおよび発電用水素ガスタービンなどに拡大するため、水素需要は急激に増大していく。国内の研究機関<sup>2), 3)</sup>が、各CO<sub>2</sub>制約条件とエネルギー技術評価モデルで水素需要を予測している。例えばエネルギー総合工学研究所は、2020年、2050年のCO<sub>2</sub>削減排出量をそれぞれ1990年比の5%、80%削減として、また海外の褐炭、天然ガス、風力由来水素を想定した水素需要量を予想した<sup>2)</sup>。その予想需要量は、2030年で2.5 MTOE (石油換算百万トン) (水素量 約97億Nm<sup>3</sup>/y)、2050年で57 MTOE (水素量 約2,198億Nm<sup>3</sup>/y)に達する。

## 3 海外からの水素輸入

海外から水素を輸入する構想は、国内外で20年以上前から検討されている<sup>4)</sup>。各プロジェクトの水素の輸送区間、水素源、および水素の輸送形態を表1に示す。表に示すように水素輸送形態はほとんどがLH<sub>2</sub>である。その代表プロジェクトは、水素源を再生可能エネルギーとした欧州のEQHHP (ユーロケベックプロジェクト、1986~1998年)と日本のWE-NET (水素利用国際クリーンエネルギーシステム、1993~2003年)である。EQHHPは、カナダケベックの水力発電 (100MW) で水分解して、製造液化したLH<sub>2</sub>をドイツのハンブルクまで海上輸送し、その水素輸送量は1.5×10<sup>4</sup>t/y (1.67億Nm<sup>3</sup>/y)である。WE-NETは、水素は媒体にEQHHPと同じLH<sub>2</sub>を採用し、その規模は、約10倍程度である。

表1 海外水素輸入のプロジェクト

Table 1 Overseas hydrogen import projects

プロジェクト	輸送区間	水素源	水素輸送形態
EQHHP	カナダ→欧州	水力	LH <sub>2</sub> , MCH, NH <sub>3</sub>
NHGE	ノルウェー→欧州	水力	LH <sub>2</sub>
EURO-HYPORT	アイスランド→欧州	水力地熱	LH <sub>2</sub>
HYSOLAR	独→サウジアラビア	太陽光	LH <sub>2</sub>
HIHEPP	ハワイ→他国	潮流	-
風力利用	アルゼンチン→他国	風力	LH <sub>2</sub>
氷河利用	グリーンランド	水力, 氷河	LH <sub>2</sub>
WE-NET	カナダ→日本	水力	LH <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> OH

備考: LH<sub>2</sub>: 液化水素, MCH: 有機ヒドライド, NH<sub>3</sub>: アンモニア  
CH<sub>3</sub>OH: メタノール

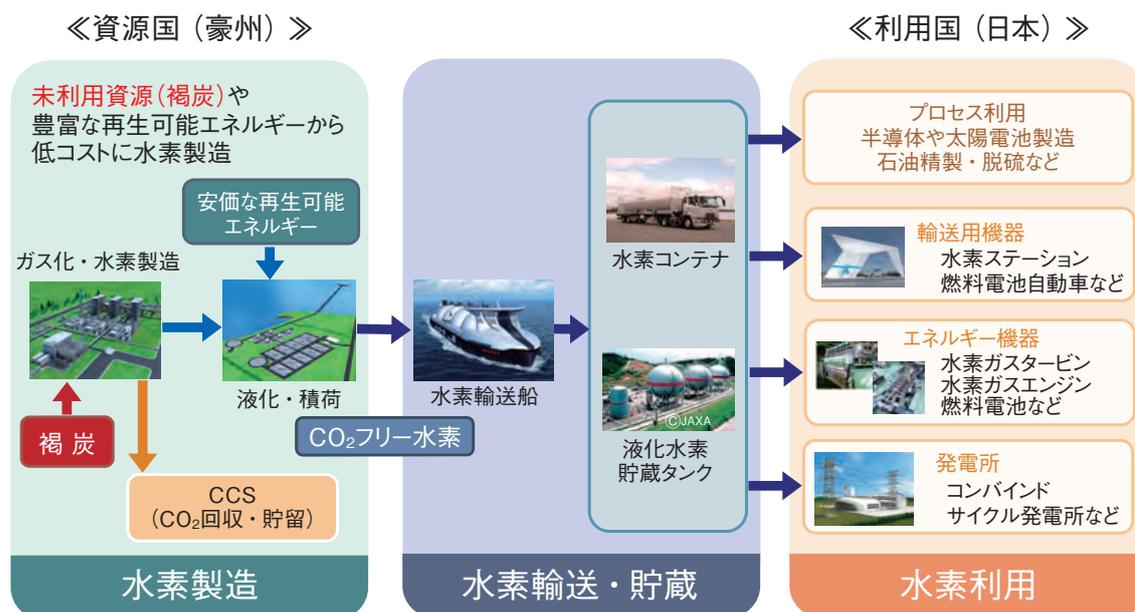


図1 水素エネルギーサプライチェーン構想<sup>5)</sup>

Fig. 1 Hydrogen Energy Supply Chain Initiative<sup>5)</sup>

#### 4 当社の「水素エネルギーサプライチェーン」構想

当社は豪州（ビクトリア州）で褐炭から安価な水素を製造し、その水素を日本に輸送して利用するCO<sub>2</sub>フリー「水素エネルギーサプライチェーン」構想を2010年に発表した。本構想は、2014年6月に公開された経済産業省の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」でも将来の水素エネルギーチェーンとして明記されている。そのシステム概念図を図1に示す。豪州の褐炭からガス化・精製し水素を製造、液化した水素を運搬船で日本に海上輸送する。ガス化過程で発生するCO<sub>2</sub>（炭酸ガス）は、豪州でCCS（CO<sub>2</sub> Capture and Storage, CO<sub>2</sub>回収貯留）処理するため、CO<sub>2</sub>の排出を伴わない安価なCO<sub>2</sub>フリーの水素が輸入される。輸入されたLH<sub>2</sub>は受入基地近隣の水素発電所の燃料として、また各地域の燃料電池車用水素ステーションや水素エンジンなどのエネルギー機器に輸送される。

褐炭は、一般のれき青炭に比較して水分が多く（約60%）輸送効率が低い、また乾燥すると自然発火しやすいなどの理由から、採掘地近傍での発電利用に限定される未利用炭である。豪州のビクトリア州には莫大な量が存在しており、非常に安価な水素製造が可能となる。

#### 5 水素インフラ設備

当社は、水素社会の実現に向けた水素インフラ設備の開発を進めている。具体的には、気体の水素を液体に変換する水素液化システム、液化水素を貯蓄するタンク、液化水素を輸送するためのコンテナや輸送船などである。

これらのインフラ設備は、LNG船やJAXA（航空宇宙研究開発機構）種子島宇宙センターの液化水素タンクなど、これまで当社が培ってきたLNG技術・極低温技術・大型構造物建造技術などを発展させることにより実現できるものであり、当社の現ビジネスとの親和性の高いものである。

これらの中でも、産業用では初となる純国産独自技術の水素液化システムを中心に述べる。

#### 6 水素液化システム

褐炭から製造した水素ガスは高純度に精製されパイプラインで水素液化システムに圧送供給される。水素液化機で水素ガスは、約20K（-253℃）まで冷却液化される。LH<sub>2</sub>は、断熱タンクを搭載したローリ、コンテナに充填されて港の出荷基地まで輸送される。大規模チェーンでは、水素ガスをパイプラインで出荷基地まで圧送し、出荷基地に建設された水素液化機で液化する。出荷基地では、LH<sub>2</sub>は一時的にLH<sub>2</sub>タンクに貯蔵し、液ポンプにてタンクからLH<sub>2</sub>運搬船に積荷され、日本まで海上輸送される。日本到着後、受入基地のLH<sub>2</sub>タンクに貯蔵され、タンクから各地の水素

利用系に配送・供給される。液化から貯蔵輸送までの水素液化システムの規模は、水素需要・供給量、海上輸送日数などにより決まる。以下にLH<sub>2</sub>の特徴、水素液化システム中の水素ガス液化、LH<sub>2</sub>の貯蔵輸送機器について述べる。

##### (1) LH<sub>2</sub>の特徴

水素の輸送貯蔵媒体として、LH<sub>2</sub>、圧縮水素ガス、水素吸蔵合金、化学媒体などがあるが、商用化レベルにある媒体は圧縮水素ガスとLH<sub>2</sub>のみである。水素吸蔵合金、化学媒体は水素を取り出す脱水素プロセスにおいて外部からエネルギーを必要とするが、LH<sub>2</sub>は液化時のエネルギー投入のみで、水素利用系においてガス化に新たなエネルギーを必要としない。

LH<sub>2</sub>の技術開発は、1950年代の高エネルギー物理分野の泡箱実験から始まり、米国NASAのロケット燃料技術開発で飛躍的に進展し、1950年後期に約30t/dの水素液化機が、1960年代には、世界最大の約60t/dの水素液化機と貯蔵容量3,200m<sup>3</sup>のLH<sub>2</sub>貯蔵タンクが建設された。国内では1980年代頃から、主にロケット燃料に使用され始め、現在は半導体などの産業分野に拡大している。

水素社会においては大規模にLH<sub>2</sub>が導入されることから、同じ可燃性液化ガスで1960年代から商業化レベルにあるLNG（液化天然ガス、主成分メタン）技術が活用される。LH<sub>2</sub>とLNGの物性比較を表2に示す。LH<sub>2</sub>の飽和液密度（70.8kg/m<sup>3</sup>）は、大気圧、温度0℃でのガス密度（0.0899kg/Nm<sup>3</sup>）の約790倍、70MPa、温度0℃での圧縮ガス密度（42.1kg/m<sup>3</sup>）の約1.7倍であり、LH<sub>2</sub>は非常に容積効率が高い。また、LH<sub>2</sub>の沸点（20.3K）はLNG（112K）より約90℃低く、体積当りの潜熱が小さくなり、LNGよりさらに高度な断熱技術と液化動力を小さくする液化技術が必要となる。

水素の大きな特徴として、核スピンの方向によりエネルギー準位の高いオルソ水素と低いパラ水素がある。室温状態の水素ガスは25%パラ水素と75%オルソ水素から成るノーマル水素、LH<sub>2</sub>では99.8%パラ水素となる。ノーマル水

表2 LH<sub>2</sub>とLNGの物性比較  
Table 2 Comparison of LH<sub>2</sub> and LNG

		LH <sub>2</sub>	LNG (CH <sub>4</sub> )
沸点 (K)		20.3 (-253℃)	112 (-162℃)
ガス密度 (kg/Nm <sup>3</sup> )		0.0899	0.717
飽和液密度 (kg/m <sup>3</sup> )		70.8	442.5
飽和ガス密度 (kg/m <sup>3</sup> )		1.34	1.82
臨界温度 (K)		32.9	190
臨界圧力 (MPa)		1.26	4.6
潜熱	体積当たり (kJ/L)	31.4	226
	重量当たり (kJ/kg)	444	510
低位発熱量	体積当たり (MJ/L)	8.5	22.1
	重量当たり (MJ/kg)	120	50

備考：・天然ガスはメタン物性値を採用  
・飽和液、飽和ガスは大気圧における物性値

素からLH<sub>2</sub>までの液化プロセスでは、予冷過程で温度と平衡状態にあるオルソ・パラ組成比に維持することが重要となる。また、LH<sub>2</sub>の臨界圧(1.28MPa)はLNG臨界圧(4.6MPa)より小さく、機器設計では温度、圧力に対する大きな物性変化を考慮することも重要である。

## (2) 水素ガスの液化

水素ガスの液化に要する最小液化仕事(エクセルギ)は、液化プロセスの始点と終点の状態量から熱力学的に決まり、始点を大気圧、300K、終点を大気圧の飽和LH<sub>2</sub>に仮定すると最小液化仕事は約3.90kWh/kg(0.35kWh/Nm<sup>3</sup>)で、LNG(メタン)液化仕事より約10倍大きい。

水素ガスの最小液化仕事の内訳は、以下の通りである。

- ① 常温水素ガス(300K)を飽和水素ガス(20K)に予冷するための仕事
- ② 飽和ガスを飽和液に凝縮するための仕事
- ③ 室温ノーマル水素をLH<sub>2</sub>(パラ水素99.8%)に変換するためのオルソ/パラ変換のための仕事

その内訳は、予冷仕事が41%、凝縮仕事が44%、オルソ/パラ変換仕事が15%<sup>7)</sup>である。LNGの液化仕事に比較して予冷仕事の割合が大きく、オルソ/パラ変換仕事が余分となる。

液化機の液化システム構成例(クロードサイクル)を図2に示す。プロセスは、冷熱を発生する冷凍サイクルと冷熱により常温水素ガスを冷却液化する水素ガス供給系から構成される。冷凍サイクルの冷熱は、圧縮機で圧縮された高圧冷媒ガス(水素、ヘリウムなど)が膨張タービンで膨張(等エントロピ膨張)することで発生する。

水素ガス供給系では、高純度に精製された製品水素ガスは圧縮機で圧縮され、熱交換器を介して冷凍サイクルの冷熱により常温から徐々に液化水素温度近くまで冷却される。冷却された圧縮ガスは、膨張弁でほぼ大気圧状態まで

膨張(等エントロピ膨張)し液化する。熱交換器、膨張弁、膨張タービンなどは外部からの入熱を遮断するためコールドボックス(真空容器)内に収納されている。

実際の液化仕事は、約1kWh/Nm<sup>3</sup>程度で、その液化効率(最小液化仕事/実際の液化仕事)は約30%程度ある。この場合、原料水素状態が大気圧、300Kをベースとしているが、高い圧力の原料水素ガスが供給されると最小液化仕事も小さくなり、実際の液化仕事も小さくなる。

当社が開発した国産初の大型5t/dクラスの水素液化機の外観を図3に示す。本液化機は、膨張機にガス軸受膨張タービンを採用し、当社が1980年代に開発したヘリウム(沸点4.3K)液化機の技術を活用した。ガス軸受膨張タービンの採用により、高速回転、高膨張比が達成できるため高液化効率が可能となり、また油軸受膨張タービンで問題と

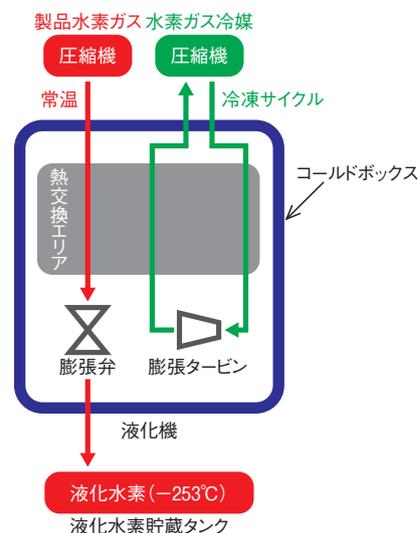


図2 水素液化システムの構成  
Fig. 2 Composition of hydrogen liquefaction system



図3 国産初の大型水素液化機  
Fig. 3 Japan's first-large scale hydrogen liquefier



図4 国内最大のLH<sub>2</sub>タンクの外観  
Fig. 4 Japan's largest LH<sub>2</sub> tank

なる系内の汚染，再起動の煩雑さが無い。現在，試運転を行いながら構成機器の評価試験を行っている。

### (3) LH<sub>2</sub>の貯蔵

低沸点・低潜熱のLH<sub>2</sub>貯蔵輸送において，蒸発を低減する断熱技術は特に重要である。LNGタンクの断熱は常圧の固体断熱構造（ウレタンフォームなど）を適用するが，LH<sub>2</sub>タンクでは，侵入熱を大幅に低減するために，小・中型タンク（例 容積20～300m<sup>3</sup>）向けに高真空断熱（真空度10<sup>-2</sup>Pa以下），大型タンク向けに低真空断熱（真空度1 Pa以下）を採用するケースが多い。その侵入熱流束は約1 W/m<sup>2</sup>であるが，同じ侵入熱流束でもタンクが大型化すると体積に対する表面積の割合が小さくなり液の蒸発率（%/d）は低減する。当社が建設した JAXA（宇宙航空研

究開発機構）種子島宇宙センター向けの国内最大LH<sub>2</sub>タンク（容積600m<sup>3</sup>）の外観を図4に示す。本LH<sub>2</sub>タンクは低真空断熱のパーライト真空断熱を採用した二重殻式球形タンク形式で，蒸発率は0.18%/d以下である。米国NASAの世界最大3,200m<sup>3</sup>のLH<sub>2</sub>タンクも同断熱方法を採用した二重殻式球形タンクである。

CO<sub>2</sub>フリー水素チェーンのパイロット，実証チェーンでの陸上LH<sub>2</sub>タンクの容積はそれぞれ，約3,400m<sup>3</sup>，約5万m<sup>3</sup>クラスを計画しており，当社が建設したLH<sub>2</sub>タンク技術が活用される。

現在，播磨工場にて図5のような陸上用のLH<sub>2</sub>タンクを試作しており，当社がこれまで蓄積してきた極低温技術とものづくり力を結集し，早期の実用化を目指している。

### (4) LH<sub>2</sub>の輸送

LH<sub>2</sub>の輸送は陸上と海上輸送に分類され，陸上輸送では，トラックとタンクが一体になったローリ，またはトラックとタンクが分離するコンテナで輸送するのが一般的である。輸送用のLH<sub>2</sub>タンクは，定置式と異なり容積効率を最大限に上げるため内槽と外槽間の断熱層を薄くし，かつ大きな負荷荷重に耐え侵入熱を低減する特殊な支持構造が必要となる。

#### (i) 陸上輸送

当社が開発した40フィートコンテナの外観を図6に示す。本コンテナはコンテナ枠（幅2.4m×高さ2.6m×長さ12m）に内槽（容積46m<sup>3</sup>）と外槽から構成されるタンクが収納され，積層断熱材を使用した高真空断熱が採用されている。蒸発率は1.0%/d以下である。コンテナは国内液化基地から半導体工場，JAXA種子島宇宙センターなどまでのLH<sub>2</sub>陸上輸送に使用されている。



図5 試作中の陸上用LH<sub>2</sub>タンク  
Fig. 5 Trial manufacture of aboveground LH<sub>2</sub> tank



図6 LH<sub>2</sub>コンテナ  
Fig. 6 LH<sub>2</sub> container

## (ii) 海上輸送

LH<sub>2</sub>の海上輸送の実績例は少ない。欧州では大型コンテナを使用して米国ルイジアナから南米ギアナのロケット射点基地まで海上輸送された。また米国NASAでは、LH<sub>2</sub>バージン船（容積約1,000m<sup>3</sup>）でルイジアナからロケットエンジン試験場まで輸送されている<sup>6)</sup>。将来必要となる豪州からLH<sub>2</sub>を大量でかつ長距離海上輸送できるLH<sub>2</sub>運搬船の建造実績は世界にない。

当社は、「水素エネルギーサプライチェーン」構築に向けてパイロットチェーン用小型LH<sub>2</sub>運搬船と実証チェーン用大型LH<sub>2</sub>運搬船（容積16万m<sup>3</sup>）の開発を進めている。

## あとがき

水素社会の実現に向けて、燃料電池自動車用水素ステーションのインフラ整備と規制見直し、短中期の水素ロードマップ策定を目的とした「水素・燃料電池戦略協議会」の設立などによる官民の取り組みが加速されている。将来の大量水素の導入に対応した当社の「水素エネルギーサプライチェーン」構想の根幹をなす水素液化、LH<sub>2</sub>輸送貯蔵技術は、来るべき水素社会の実現に大きく貢献する。経済性と安全性の高い水素液化システム、輸送貯蔵システムの実現に向けて、当社が長年蓄積したLNG技術、LH<sub>2</sub>技術を活用しながら、関連機器の技術開発を推進していく。

## 参考文献

- 1) 経済産業省，“エネルギー基本計画”（2014）
- 2) 石本，黒沢，笹倉，坂田：“世界及び日本におけるCO<sub>2</sub>フリー水素の導入量の検討”，日本エネルギー学会誌，Vol. 92, No. 2（2015）
- 3) 山地，笹倉：“将来エネルギーとしての水素の可能性”，エネルギー・資源，Vol. 35, No.1（2014）
- 4) Ball & Wietschel：“The Hydrogen Economy Opportunities and Challenges”，Cambridge Univ. press（2011）
- 5) 洲河，神谷：“CO<sub>2</sub>フリー水素チェーン～褐炭から始まる水素エネルギーチェーン～”，OHM，8月号（2013）
- 6) Karl Verfondern：“Safety Consideration on Liquid hydrogen”，Forschungszentrum Jülich（2008）



神谷 祥二



砂野 耕三



飯屋 大祐



小宮 俊博



山口 哲

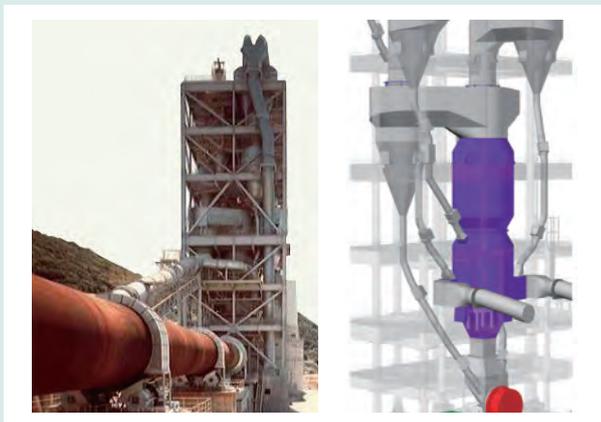


孝岡 祐吉

# KSV (低NO<sub>x</sub>型仮焼炉)

## — 厳しい環境規制のグローバル化に対応 —

Kawasaki Spouted Bed and Vortex Chamber (DeNO<sub>x</sub> Pre-Calcliner)  
— Addressing Global Trend of Strict Environmental Regulations



近年、世界各国で産業プラントのNO<sub>x</sub>排出量規制の導入や規制値の強化が進んでおり、セメント焼成炉においても例外ではない。日本ではNO<sub>x</sub>排出量が250ppm (O<sub>2</sub> 10%換算) 以下に規制されており、その対策として、特にロータリーキルン排ガス中NO<sub>x</sub>を低減させることが有効である。当社では、燃焼状態と燃料の混合状態を最適化することで、NO<sub>x</sub>の還元を促進することが可能な「KSV (低NO<sub>x</sub>型仮焼炉)」を開発し、その優れた脱硝性能により、排ガス中NO<sub>x</sub>濃度を約70%低減させた。

### まえがき

日本では高度経済成長を背景として、環境汚染問題に直面し、1975年にセメント焼成炉のNO<sub>x</sub>排出量規制が250ppm (O<sub>2</sub> 10%換算) 以下に設定された。これを受けて、セメント焼成炉におけるNO<sub>x</sub>排出量の低減対策が進められてきた。

### 1 背景

当社は1976年に、セメント焼成炉であるロータリーキルンから排出されるNO<sub>x</sub>の脱硝を目的とした「KSV (低NO<sub>x</sub>型仮焼炉)」を開発し、実機でその優れた脱硝性能を確認している。

その後、KSVの脱硝効果をさらに向上するため、種々の改良を加えて、2000年代以降中国を中心にKSVを用いたサスペンションプレヒータを52基受注し、NO<sub>x</sub>排出低減に貢献している。

### 2 脱硝のメカニズム

NO<sub>x</sub>は800~1,000℃の温度領域で、燃焼過程で発生する活性の高いHC (炭化水素ガス) などにより還元・無害化される。また、セメント原料が触媒となり、燃料未燃分に含まれるCO、Hなどの還元性ガスによっても分解される。

従って、ロータリーキルン排ガス中のNO<sub>x</sub>を効果的に脱硝するためには、セメント原料が存在し、KSVに吹き

込んだ燃料が過剰な状態で燃焼すると同時に、ロータリーキルン排ガスと十分に混合することが第一の要点である。

このとき、HCなどの還元性ガスが多いほど (燃焼場での空気比が小さいほど) 脱硝効率が向上するが、未燃分が燃焼する際にNO<sub>x</sub>が再生成されるので、最適の空気比に設定することと、KSV炉内で極力少ない空気により未燃分を完全燃焼させること、すなわち、脱硝後の未燃分と余剰空気との混合を良好にすることが第二の要点である。

### 3 KSVの構造・機能・特長

#### (1) 構造・機能

KSVの構造を図1に示す。

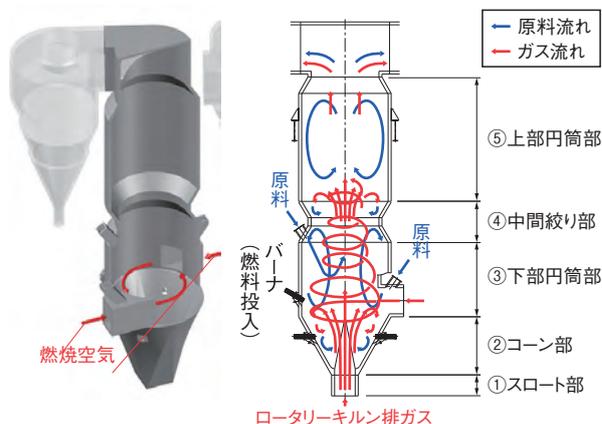


図1 KSVの構造  
Fig.1 Structure of KSV

KSVの各部位は、以下の機能を有する。

- ① スロート部  
ロータリーキルン排ガスを整流させ、KSVの主燃焼室であるコーン部に直接導入する。
- ② コーン部  
導入されたロータリーキルン排ガスは噴流となり、投入された一部の原料と共に噴流層を形成する。  
その低酸素濃度の噴流層に一部の燃料を吹き込み、燃料過剰の状態での燃焼することにより、発生する還元性ガスを効率よく攪拌・混合する。
- ③ 下部円筒部  
水平方向に導入する燃焼空気が旋回流を形成し、コーン部における還元性ガスの攪拌・混合を促進するとともにロータリーキルン排ガスと効率よく混合し、燃料未燃分を燃焼させる。  
また、残りの燃料を吹き込み、上記の混合効果により燃焼が均一化されながら、原料と効率よく熱交換する。
- ④ 中間絞り部  
中間部に絞りを設け、下部円筒部内の燃焼・混合性を良好にし、炉内ガスの吹き抜けを減少させることで原料滞留時間を増加させる。  
残りの原料を中間絞り部直下に投入することで炉内ガスの吹き抜けを防止するとともに、中間絞り上部に補助噴流層が形成され、原料滞留時間をさらに増加させる。
- ⑤ 上部円筒部  
中間絞りからの炉内ガス流れと旋回流が完全に混合する部位で、極力少ない空気により脱硝後の未燃分を完全燃焼させる場であり、十分な内容積を確保する。

## (2) 特 長

### (i) 低 燃 費

噴流層と旋回流の相乗効果により、燃料の燃焼効率よく、原料と熱ガスとの熱交換効率もよいため、燃料消費を抑えられる。

### (ii) 安定運転

燃料を分散燃焼とすることで、炉内温度分布が均一化される。また、炉内壁は旋回流により原料で覆われるため、ホットスポットが発生せず、コーティング（固着）がほとんどつかない安定運転ができる。

### (iii) 低NO<sub>x</sub>排出

還元雰囲気内において、燃料過剰の状態での燃焼することで、HCなどの還元性ガスの発生を促進させ、ロータリーキルン排ガスとの攪拌・混合により排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度を低減させる。

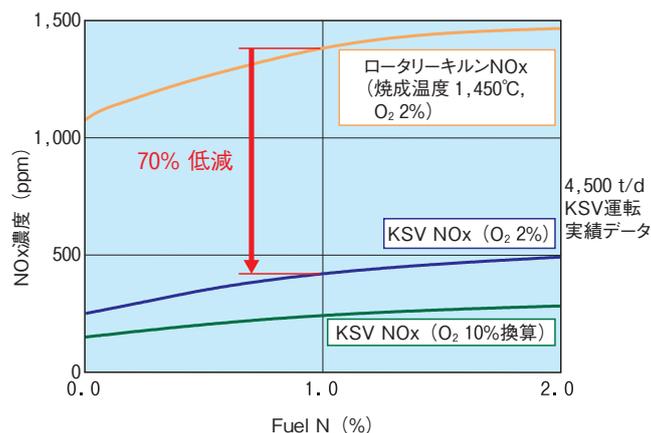


図2 KSVの脱硝効果  
Fig.2 Denitration effect of KSV

## 4 KSVによる大幅な脱硝効果

ロータリーキルンで発生するNO<sub>x</sub>はFuel N（燃料中のN分）の割合に影響し、その大半は、高温で窒素と酸素が反応するThermal NO<sub>x</sub>である。ロータリーキルンでは通常、焼成温度を1,450℃程度に維持するため、ロータリーキルン排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度は図2に示すように1,000～1,500ppmと高い値になる。

一方、サスペンションプレヒータの仮焼炉では燃焼ガス温度が900℃程度と低いいためThermal NO<sub>x</sub>の発生は少なく、脱硝効果がない場合でも、ロータリーキルン排ガス中のNO<sub>x</sub>は希釈され、NO<sub>x</sub>濃度は40～50%に低減される。さらに、KSVの場合は燃料の一部を低酸素濃度のロータリーキルン排ガス中で燃焼させ、積極的に還元性ガスを発生させるため、ロータリーキルン排ガス中のNO<sub>x</sub>を40～45%脱硝することができる。

このように、KSVによる総合効果としてはロータリーキルン排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度に対して、KSV排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度は約70%低減（O<sub>2</sub> 2%）でき、図中の緑線で示すように排出量規制250ppm（O<sub>2</sub> 10%換算）を達成した。

## あ と が き

今後も世界各国でNO<sub>x</sub>排出量規制の導入や規制値の強化が進むと予想されるため、KSV脱硝性能の優位性を活かして、さらなる海外展開をしていく所存である。

〔文責 プラント・環境カンパニー 産機プラント総括部 産業プラント部 吉永 昭宏／松岡 拓也〕

〔問い合わせ先〕 プラント・環境カンパニー  
産機プラント総括部 産業プラント部  
Tel. (078) 682-5216, Fax. (078) 682-5539

# フェロニッケル製錬プラント —電気炉排ガスを利用して省エネルギー化を目指す—

## Ferronickel Smelting Plant — Electric Furnace Off-Gas Utilization to Save Energy



従来、電気炉でフェロニッケル鉱石を熔融・還元する際に発生する電気炉排ガスは大気中へ放出していた。今回、電気炉排ガスをロータリードライヤに乾燥熱源として導入することにより、生産効率の向上、周囲環境保全とともに、高効率の再生熱回収を実現した。

### まえがき

フェロニッケルは、鉄とニッケルの合金で主にステンレス鋼の原料として用いられる製品である。近年、世界のステンレス市場の成長は、牽引役である中国のステンレス市場の成熟とともに鈍化しているが、鉱石産出国であるインドネシアでは原料鉱石の禁輸出政策により同国内での新規案件が数多く顕在化するなど、依然フェロニッケル製錬プラントの需要が多い。

本稿では、2009年9月に韓国のSNNC社に引き渡し、順調に稼働中のフェロニッケル一貫製造・精錬プラントに続き、2012年11月に受注した2期増設設備、および本設備の特徴の一つであるロータリードライヤにおける電気炉排ガスの熱源再利用について述べる。

### 1 フェロニッケル製錬プラントおよびプロセス

当社のフェロニッケル製錬プラントは、図1に示すプロセスを経る。1.8~2.2%程度のニッケルを含有するフェロニッケル鉱石を、ドライヤで乾燥、キルンで還元、電気炉で熔融し、不要なスラグとメタル（フェロニッケル）に分離してニッケル成分20%程度のメタルを抽出する。さらに、脱硫装置で精錬後、ショット製造設備で製品として造粒する。本プロセスは当社が長年にわたる設計・製作により培ってきたセメント製造用キルンおよびドライヤの設計技術・経験を存分に発揮・応用できるプロセスである。

### 2 電気炉排ガスのロータリードライヤへの導入

#### (1) 原料乾燥設備（ロータリードライヤ）

フェロニッケル原料鉱石は水分が25~30%と非常に多く、付着性が非常に高いため、ハンドリング性が良くない。そのため、原料乾燥設備では並流式熱風乾燥方式のロータ

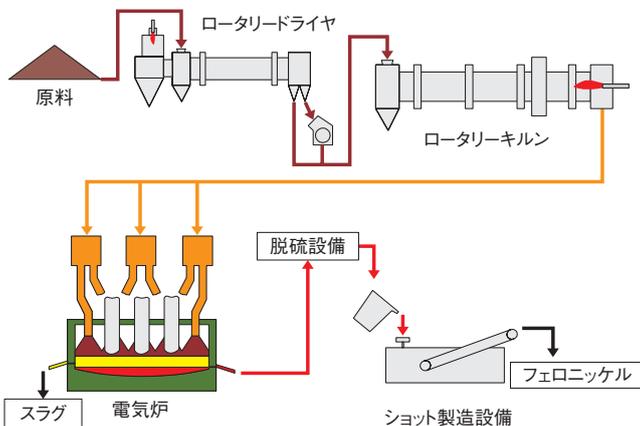


図1 フェロニッケル製錬プラントフロー  
Fig. 1 Flow of ferronickel smelting plant

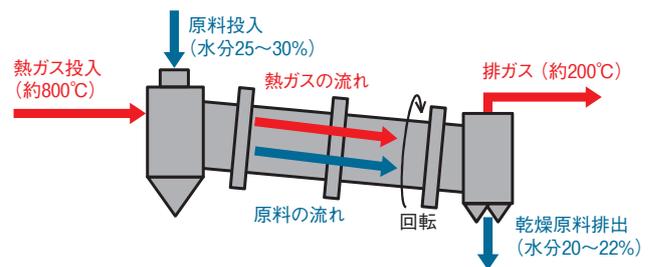


図2 並流式熱風乾燥方式のロータリードライヤ  
Fig. 2 Parallel flow type rotary dryer

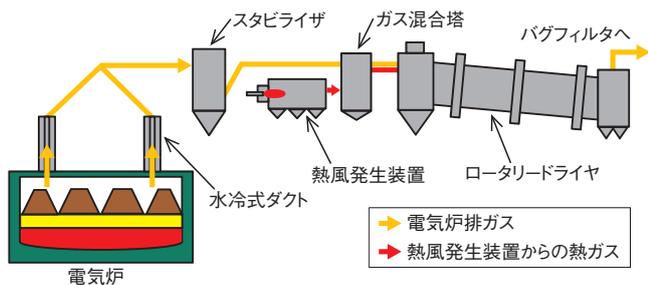


図3 電気炉排ガスの熱源再利用フロー  
Fig. 3 Flow of electric furnace off-gas utilization

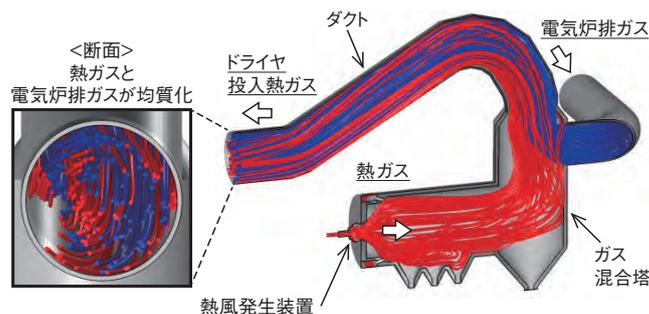


図4 熱風発生装置と電気炉排ガスの混合 (SNNC社・2期プロジェクト)  
Fig. 4 Mixture of hot air from hot-air generator with electric furnace off-gas (SNNC Capacity Expansion Project)

リードライヤ (図2) を使用し、原料鉱石の付着水分を20～22%に低下・乾燥させハンドリング性を向上させている。

## (2) 電気炉排ガスのロータリードライヤ導入のねらい

従来、電気炉でフェロニッケル鉱石を熔融・還元する際に発生する電気炉排ガスに対しては、周囲空気を投入して排ガス中の一酸化炭素を完全燃焼させた上で大気中へ放出していた。

しかし、SNNC社・1期プロジェクトにおいては、以下を目的として電気炉排ガスをロータリードライヤへ導入することにした。

### (i) 省エネルギー化

電気炉排気熱ガスを、ロータリードライヤの乾燥熱源として再利用することで、熱源である熱風発生装置での燃料消費量を低減し、省エネルギー化を図る。

### (ii) 周囲環境保全

従来飛散していたダストを、電気炉からドライヤへ続く一連のガス流路終端に設置されたバグフィルタで捕集することで、周囲環境を保全する。

### (iii) 生産効率の向上

電気炉排ガスとともに放出されていたダストをプロセスに戻し、ダスト中のニッケルを回収、生産効率を高める。

## (3) 電気炉排ガスの熱源再利用フロー

電気炉排ガスは、水冷式ダクト内で周囲空気と混合され未燃の一酸化炭素を燃焼、スタビライザにてダストを回収、ガス混合塔にて熱風発生装置からの熱ガスと合流後、ロータリードライヤで熱源として利用される。ドライヤ通過後のガスは、バグフィルタにより集塵され煙突から大気中へ放出される (図3)。

## (4) 熱流動解析利用によるドライヤでの燃費改善

熱風発生装置からの熱ガスと電気炉排ガスとの混合・均質化向上を目的とし、SNNC社・2期プロジェクトにおいては、1期プロジェクトでの操業結果を基に熱流動解析 (CFD解析) を行った (図4)。

解析結果を基に、熱風発生装置、ガス混合塔およびダク

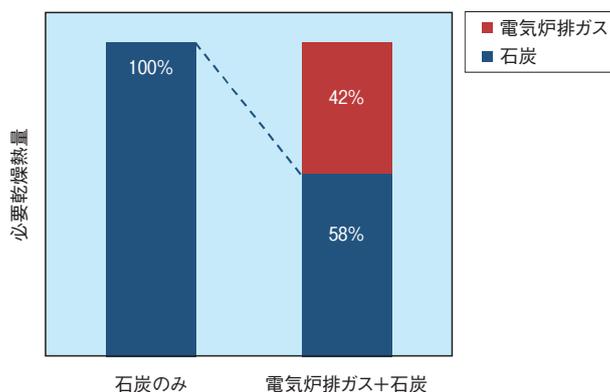


図5 電気炉排ガスの熱源利用による燃料消費量の低減  
Fig. 5 Reduction of fuel consumption by electric furnace off-gas utilization

トの最適な配置を行い、熱風発生装置からの熱ガスと電気炉排ガスの均質化を促進させることで、ロータリードライヤでの乾燥効率の向上を図った。その結果、排気熱ガスを再利用しない場合と比べ、熱風発生装置における石炭消費量を約40%削減することができた (図5)。

## あ と が き

SNNC社・プロジェクトにおいて、電気炉排ガスをロータリードライヤにて乾燥熱源として利用することで、熱風発生装置における燃料消費量を削減し、大幅な省エネルギー化を達成することができた。

今後も、高性能化・高効率化されたプラント設計を行うことで、新たなフェロニッケル製錬プラントプロジェクトの受注に結び付けていきたい。

[文責 プラント・環境カンパニー 産機プラント総括部 産業プラント部 重永 尚稔/高田 祥嗣]

[問い合わせ先] プラント・環境カンパニー  
産機プラント総括部 産業プラント部  
Tel. (078) 682-5216, Fax. (078) 682-5539

# 石炭搬送用スタッカリクレーマ —石炭ヤードの新設・更新需要に迅速に対応—

## Stacker-Reclaimer for Conveying Coal

### — Enabling Rapid Response to Demand for Coal Yard Installation and Upgrades



近年、火力発電用燃料として石炭が見直されており、石炭などのばら物原料搬送設備の新設・更新需要が増加している。当社はこれまで石炭・鉱石・土砂などのばら物原料の掘削・貯蔵・船積など搬送設備を国内・海外に多数納入している。このたび新日鐵住金(株)広畑製鐵所へ石炭搬送設備の一種であるスタッカリクレーマを納入した。

本設備では、最新の機構やシステムの導入などにより、既設機との同時運転、広い動作範囲の確保、メンテナンス性の向上、省エネルギー化、製造トータルコストの削減を達成した。

#### まえがき

発電用燃料や製鉄原料となる石炭や鉱石などのばら物原料は、海外から大型輸送船で輸入された後、使用までの一定期間はヤードと呼ばれる貯蔵場に一時保管される。そして、このヤードへの原料受入・払出を行う搬送設備としてスタッカリクレーマが使用される。ヤードは、原料受入港やプラント設備の配置によりさまざまな形状となるが、限られた敷地の有効活用、および、新設機の導入では既設機との協調を図った設備仕様が要求される。

#### 1 設備概要

今回、新日鐵住金(株)広畑製鐵所へ納入したスタッカリクレーマの主要諸元を表1に、概要を図1に、石炭の搬送の流れを図2に、それぞれ示す。本機は石炭ヤードに隣接している受入ベルトコンベヤから供給される石炭をトリッパ

で持ち上げ、ブームコンベヤを経由してヤードに積み付ける機能(図2青線)と、ヤードからスタッカリクレーマ先端のバケットホイールで切り出した石炭をブームコンベヤを逆転させて、受入ベルトコンベヤに並走した払出ベルトコンベヤへ払い出す機能(図2赤線)を同一機で行うものである。

既設機が稼働している敷地に新設機を追加・導入することになるので、仕様の設定にあたり、以下のことに配慮した。

- ・使用する受入・払出コンベヤが石炭ヤード中央にある1組だけであり、複数のスタッカリクレーマが同一の走行レール軌道上で稼働するので、既設機と協調させる必要がある。
- ・石炭ヤード敷地下面が既設の走行レール面から5m下方と、一般的なヤードよりも深くなっており、積付時・払出時の動作範囲を広くしておく必要がある。

表1 スタッカリクレーマ主要諸元  
Table 1 Main specifications

最大積付能力 (t/h)	2,000
最大払出能力 (t/h)	700
旋回中心からブーム先端までの水平長さ (m)	約42
走行速度 (m/min)	最大30
ブーム俯仰角度 (°)	-17~+17
ブーム旋回角度 (°)	-136~+132 (積付時) -148~+143 (払出時)
受電電源	AC440V, φ3, 60Hz
運転方式	機上手動運転

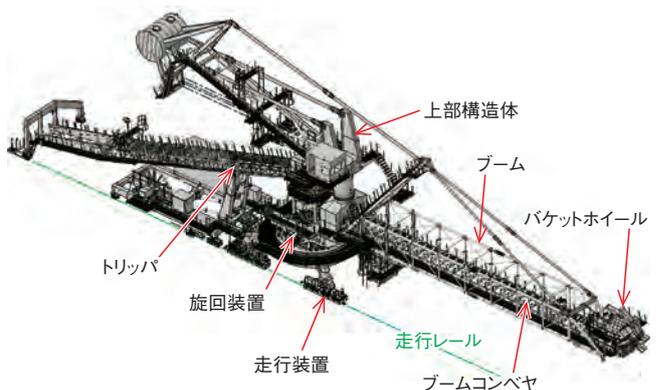
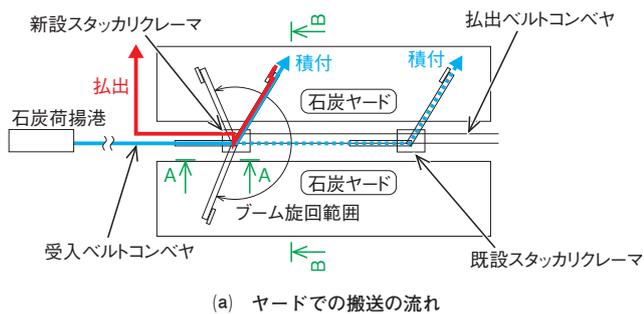
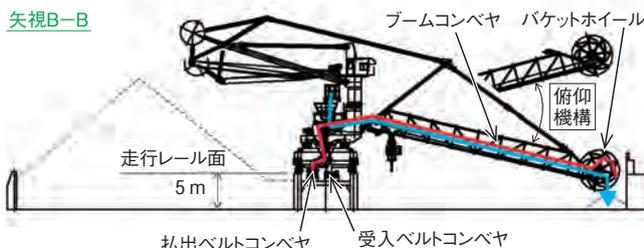
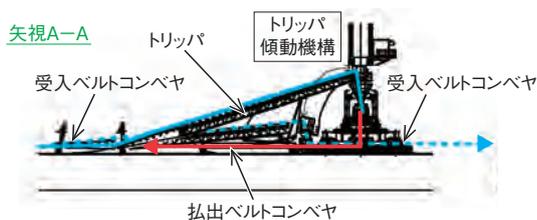


図1 スタッカリクレーマ概要  
Fig. 1 Stacker reclaimer overview



(a) ヤードでの搬送の流れ



(b) スタッカリクレーマでの搬送の流れ

図2 搬送の流れ  
Fig. 2 Flow of conveyance

## 2 構造および特徴

### (1) 既設機との同時運転を可能とする

#### トリッパ傾動機構

受入ベルトコンベヤを既設機と新設機が共通使用するので、既設機が積付する石炭は新設機上を通過する必要がある。このため、トリッパの傾斜角度を変更することで、直接、既設機に搬送する機能を有している（図2青破線）。この傾動機構により、払出運転時にはトリッパとブーム旋回時の干渉を回避させ、トリッパを切り離すことなく機体後方への旋回作業を十分な範囲で行えるようにしている。

### (2) 広い旋回動作範囲を確保する上部構造体

トリッパ傾動により干渉回避ができない積付運転時においても機体後方への旋回作業範囲を確保するため、上部構造体中心部には円形単支柱構造を採用した。これによりトリッパ、ブームコンベヤ沿いの歩廊を確保したまま、広い旋回動作範囲を確保できる。

### (3) 駆動装置の電動化によるメンテナンス性向上

従来、油圧駆動方式が主流であったバケットホイール駆動装置に電動駆動方式を採用することで、作動油および油圧機器などメンテナンス作業の低減を図った。また、インバータからの電流計測値を基に、瞬時の過負荷検出、自動停止による保護機能を設けている。ブームコンベヤ駆動装置についても、インバータ駆動とすることで、起動・停止・逆回転動作時のスムーズな運転を確保するとともに、クッションスタート用として設置していた流体継手を省略することで保守性の向上を図り、受入・払出運転切替による電動機の起動発停許容回数を高めている。

### (4) コンベヤ駆動電源の回生による省エネルギー化

石炭ヤード敷地下面が低いという配置上の特性に合わせ、積付運転時にブームコンベヤの石炭搬送が下り方向で使用される場合を考慮して、ブームコンベヤ駆動装置には電源回生コンバータを採用し、下り搬送で発生する回生電流を電源に戻し、運転消費電力を削減している。

### (5) 海外製作によるトータルコストの削減

スタッカリクレーマ構造体は、当社と中国企業の合弁会社である上海中遠川崎重工鋼結構有限公司にて製作・組立を行い、ユニット化した状態で海上輸送により現地へ搬入した。製作工場での組立の割合を増やすことにより、現地工事作業の低減、品質向上を図り、トータルコストを低減させた。

## あとがき

現在、国内の製鉄所や石炭火力発電所では、ばら物原料搬送設備の更新・新設が多数計画されており、今回納入した屋外用スタッカリクレーマだけでなく、屋内用スクレーパ式リクレーマなど、お客様のさまざまなニーズに応える製品の提案・納入を行っていく予定である。

なお、本設備の納入にあたり、さまざまな協力を頂いた新日鐵住金㈱をはじめ、関係各位に深く感謝の意を表す。

〔文責 プラント・環境カンパニー 産機プラント総括部  
搬送プラント部 森 史生〕

【問い合わせ先】 プラント・環境カンパニー  
産機プラント総括部 搬送プラント部  
Tel. (078) 682-5266, Fax. (078) 682-5585

# シンガポール電力庁向け岩盤泥水シールド掘進機 —長距離・高水圧・岩盤カーブ掘削の難条件に対応— Slurry Shield Machine for Singapore Power — Handling Long Distance, High Water Pressure, and Curved Sections



2014年に、シールド掘進機と岩盤トンネルボーリングマシンの技術を併せ持ったφ6.9m岩盤泥水シールド掘進機を設計・製作し、シンガポール現地に納入した。本シールド掘進機は、長距離、高水圧、カーブ掘削などの難条件に対応するため、大径ローラーカッターやオーバーカット装置などを装備している。

## まえがき

近年のシンガポール案件では、従来からの岩盤掘削に加え、長距離、高水圧、岩盤カーブ掘削といった従来にはなかった機能を有するマシン需要が生じている。当社としては2005年から岩盤掘削対応シールド掘進機の納入を行っているが、今回これらに対応したシールド掘進機を開発・納入したので、その概要について述べる。

## 1 当社シールド掘進機の歴史

当社は、1957年にシールド掘進機初号機を営団地下鉄（当時）向けに納入して以来、58年間にわたって1,400台以上のシールド掘進機を納入してきた。当初は、周囲から土砂が崩れてこないように円筒状の鉄板があるだけのもので、水密構造もない原始的な機械であった。ちなみにこの筒状鉄板で土砂から内部を保護（シールド）することから、現在

の機械名となっている。その後、省力化や安全性確保のため、圧力隔壁を持った全断面掘削密閉型シールド掘進機や、カーブトンネル掘削対応の中折れ型シールド掘進機などが、トンネル工事需要に応じる形で発展してきた。

一方、岩盤を掘削するためには特殊な掘削カッターや掘削反力を受ける構造が必要となるので、岩盤掘削向け掘進機は主に掘削機能に重点を置いて開発され、シールド掘進機とは別に開放型トンネルボーリングマシンとして発展してきた。

今回の設備は、両者の長を併せ持つ仕様となっている。

表1 主要諸元  
Table 1 Main specifications

型 式	後胴押し中折れ型	
マシン外径 (m)	6.9	
マシン機長 (m)	11.65	
カッターヘッド	装備動力 (kW)	1,680
	回 転 数 (min <sup>-1</sup> )	最大 6
	トルク (kN・m)	最大 6,250
シールドジャッキ推力 (kN)	60,000	
装備ローラーカッター数	46 + 2	

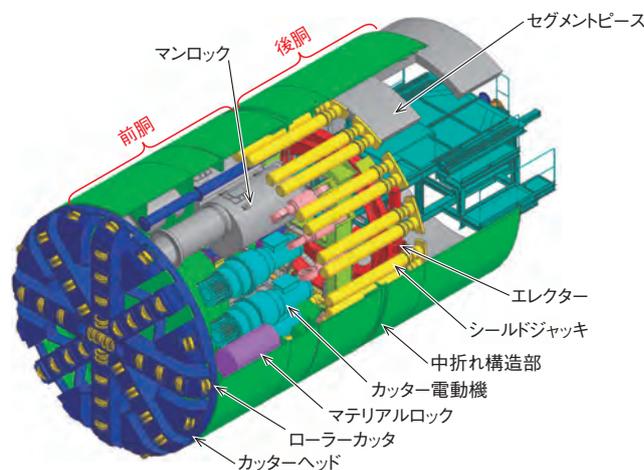


図1 シールド掘進機の構造  
Fig. 1 Shield machine structure

## 2 シールド掘進機の主要諸元と構造

本機の主要諸元を表1に示す。岩盤掘削、高水圧対応のため、カッターヘッドは高速回転仕様とし、シールドジャッキは高推力仕様とした。

シールド掘進機の構造を図1に示す。本体の先端には円盤状のカッターヘッドが取り付けられており、インバータ電動機によって駆動される。岩盤掘削用として最大 $6 \text{ min}^{-1}$ の高速回転仕様としている(土砂山用では通常 $1 \sim 2 \text{ min}^{-1}$ )。カッターヘッドには、そろばん玉状のローラーカッタが多数取り付けられており、それらをシールドジャッキによって本体とカッターヘッドを介して岩盤に押し付けながら回転させることにより、岩盤を割りながら前方に進む。

本体は、カーブ掘削を行うために前胴と後胴の二分割構造とし、分割部で屈折できる中折れ構造を採用している。

後胴には、トンネル坑壁となるセグメントピースを組み立てるためのエレクターを装備している。

## 3 主な特長

### (1) 長距離掘削対応

#### (i) 19インチローラーカッタの採用

マシン径が6mのクラスでは、通常17インチローラーカッタが採用されるが、本機では19インチローラーカッタを採用し、掘削速度の向上とローラーカッタ交換回数の低減による工事の進捗向上を図った。

19インチローラーカッタの外観およびカッターヘッドに装着した状態を図2に示す。19インチローラーカッタの採用によりベアリングサイズを大きくし、岩盤への押し付け荷重を増加させることができるため、掘進速度の向上を図ることが可能となっている。

また、カッターリングサイズも大きくすることで許容摩耗量を増加させることができ、ローラーカッタ交換回数の低減が可能である。

#### (ii) ツインマンロックとマテリアルロックの採用

今回は長距離掘削であるため、ローラーカッタの交換回

数が多くなることが想定される。交換作業時には、出水を抑えるため、気圧を高めて行う圧気作業となる場合がある。この交換作業の前後で、マンロックという圧力室で作業者の体をその圧力に“慣らす”必要がある。その時間の短縮を図るため、ツインマンロック化(2基装備)し、さらにマンロックとは独立したルートでローラーカッタを搬入できるように、マテリアルロックを装備している。

### (2) 高水圧対応

本機は密閉型のため、想定土水圧に応じてシール部の耐圧性能を確保する必要がある。特にセグメントと本体の間をシールしているテールシールの耐圧性能に配慮する必要がある。今回はテールシール段数を通常より1段増やして4段とし、さらに最終段にはウレタン注入型を採用しシール性の向上と耐摩耗性の向上を図った。

### (3) カーブ掘削対応

#### (i) オーバーカット装置の採用

岩盤におけるカーブ掘削に対応するため、ローラーカッタによる油圧操作式オーバーカット装置をカッターヘッドに2基装備している。直線掘削時にはカッターヘッド内に格納されていて、カーブ掘削時には油圧ジャッキを伸長させて、その先端に設置しているローラーカッタにてオーバーカット部の掘削を行うものである。

長距離掘削対策として、オーバーカット装置のローラーカッタも後方より交換可能な構造としている。

#### (ii) 中折れ機構

120mRの曲線掘削対応のため、最大3.5度屈折できる中折れ機構を採用している。

## あ と が き

国内外を問わず、シールド掘進機は、社会基盤の整備になくはならないものになってきている。設計条件はますます厳しくなる傾向にあり、設計の難易度も増してきているが、今後も需要に応じた機能を持つシールド掘進機を開発していきたい。加えて、過去の稼働実績を設計にフィードバックすることにより、より使いやすく高性能なシールド掘進機を設計・納入することで、社会に貢献していきたい。

〔文責 プラント・環境カンパニー〕

産機プラント総括部 土木機械部 酒井 義雄

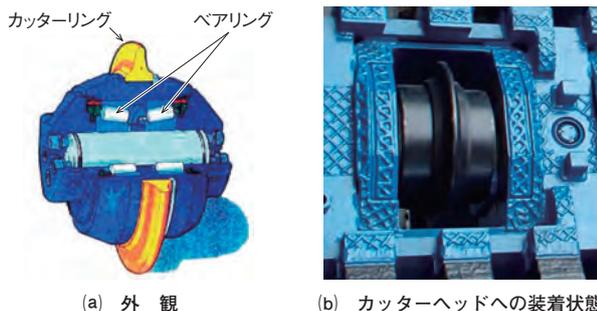


図2 19インチローラーカッタ  
Fig.2 19"roller cutter

〔問い合わせ先〕 プラント・環境カンパニー  
産機プラント総括部 土木機械部  
Tel. (078) 682-5448, Fax. (078) 682-5096

# 乾式クリンカ処理システム ーメンテナンス性・経済性向上への取り組みー

## Dry Bottom Ash Handling System ー Improving Maintainability and Economic Efficiency



当社では2002年より、石炭火力発電所のボイラ炉底灰（クリンカ）処理の新方式として、乾式クリンカ処理システムを納入しており、国内外で納入実績を増やしている。

また、納入後にシールのメンテナンスフリー化など本システムの改良を行い、メンテナンス性・経済性をさらに向上させた。

### まえがき

石炭火力発電所のボイラ炉底灰「クリンカ」の処理設備としては、従来は大量の水を使用した湿式処理方式が主流であったが、近年の環境負荷低減要請の高まりもあり、乾式処理方式「乾式クリンカ処理システム」へのシフトが進んでいる。

本システムは、クリンカの処理に水を使用することなく、クリンカを空気により冷却しながらボイラ炉底より抜き出し、搬送する方式である。当社は、本システムを開発したマガルディ社（イタリア）と1994年に技術提携を行い、2002年に国内発電所向けに初号機を納入して以来、実績を増やしている。

本稿では、本システムの概要を紹介するとともに、導入後に実施した、メンテナンス性・経済性向上を目的とした取り組み（改良）について紹介する。

### 1 乾式クリンカ処理システムの概要

本システムは、クリンカの処理に水を使用しないため、従来の水流輸送方式に比べ、

- ・ 環境への負荷が少ない
- ・ 乾燥状態のクリンカは広く有効利用ができる
- ・ 設備コスト、運転コストが低減できる

などの利点を有している。

本システムの系統概要を図1に示す。火炉から落下したクリンカは、乾式クリンカコンベヤにより冷却されながら下流側へと搬送される。下流側の系統はユーザーニーズによ

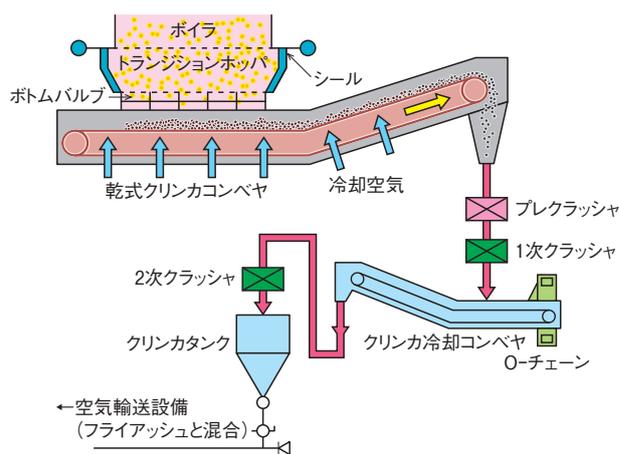


図1 乾式クリンカ処理設備の系統概要  
Fig. 1 Overview of dry bottom ash handling system

りさまざまだが、国内では下流側の1次クラッシャ、クリンカ冷却コンベヤ、2次クラッシャを経由して空気輸送され、フライアッシュ（飛灰）へ混合される系統が主流である。

### 2 メンテナンス性、経済性向上への取り組み

本システムの導入後、メンテナンス性や経済性の向上を目的としてシステムの改良を行ってきた。その中の主要な改良点について3点紹介する。

#### (1) シールのメンテナンスフリー化

本システムはボイラ下部に設置されるため、ボイラとの接続にはボイラ内圧と熱伸びに対応したシールを設置する

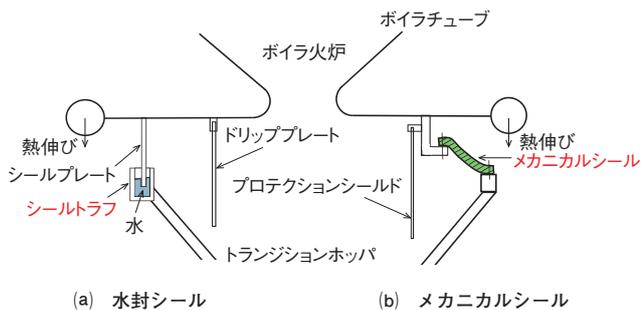


図2 ボイラとの接続構造比較 (水封式・メカニカル式)  
Fig. 2 Boiler interface overview (water/mechanical seal)

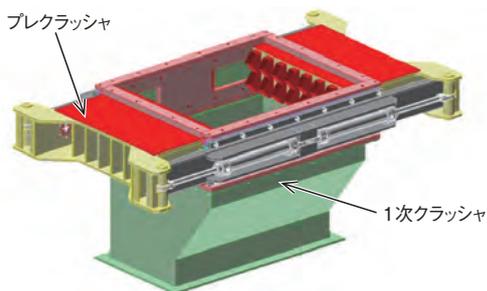


図3 油圧式プレクラッシャ模式図  
Fig. 3 Hydraulic pre-crusher

必要がある。本システムが導入された当初、ボイラ側との接続は図2(a)のように、従来の湿式と同様な水封式であり、完全に水フリーの設備とはなっていない。このシール方式を改良したのが、メカニカルシールである。

メカニカルシールの構造を図2(b)に示す。ボイラ下端側と本システムを多層の金属織物などで接続した構造であり、ボイラの熱伸びによる移動量を吸収可能となっている。メカニカルシールは基本的にメンテナンスフリーであるため、従来必要であった循環水設備のメンテナンスや運転コストの削減に寄与するものとなり、2000年後半からは水封式シールに代わり標準シール方式となっている。

### (2) クリンカ詰まりの防止対策

本システムでは、乾式クリンカコンベヤの下流域に1次クラッシャを設置してクリンカの粗粉砕を行うが、クリンカのサイズ・形状によっては1次クラッシャ上で粉砕物が滞留して流路をふさぎ、系統が閉塞してしまうことがあった。この点を解消するために開発されたのが油圧式プレクラッシャである。油圧式プレクラッシャの模式図を図3に示す。

本設備は、対向する2個の歯(図3の赤色部)が往復してクリンカを破碎するジョークラッシャであり、乾式クリンカコンベヤの排出口下に設置し、1次クラッシャ上に滞留したクリンカを粉砕する。これまでコンベヤ出口でクリンカが詰まった際、運転要員による除去作業が必要であったが、本設備の設置により運転要員の作業負担が大幅に軽減し、お客様からも好評を得ている。

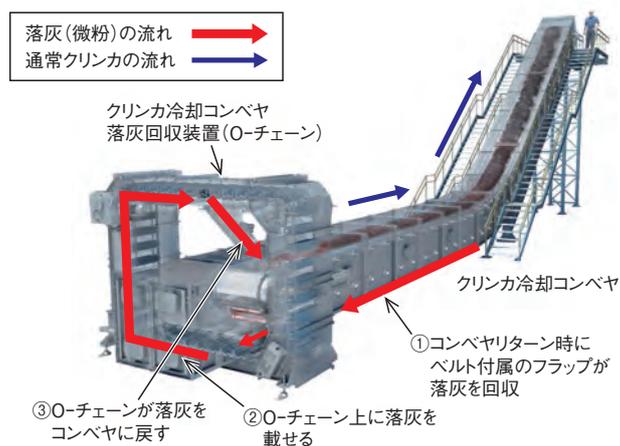


図4 クリンカ冷却コンベヤ落灰回収装置  
Fig. 4 Clinker cooling conveyor ash collector

### (3) クリンカ冷却コンベヤ落灰回収装置のメンテナンスコスト低減

本システムの構成要素である、クリンカ冷却コンベヤには従来、落灰回収用のスクレーパコンベヤが主コンベヤの下側に設置されていたが、スクレーパの摩耗が比較的早く長寿命化には課題となっていた。そこで、このスクレーパコンベヤに代わる新たな落灰回収装置(O-チェーン)が開発された。

本設備は図4のように、冷却コンベヤのテール側に設置され、コンベヤベルトに取り付けられたフラップがコンベヤ底面に溜まった微粉を回収して本設備に載せ、本設備が再度冷却コンベヤのベルト上に戻す構造となっている。本設備の設置により摺動摩擦部が少なくなるため、メンテナンス費用の低減に寄与するものと考えている。

### あとがき

本システムは、(株)神戸製鋼所 神鋼神戸発電所1号機へ国内初号機が導入されて以降、国内事業用・IPP用を含め幅広く導入され、クリンカ用灰処理設備の主流として位置づけられるようになった。2015年4月現在、当社納入分で国内7件、海外8件(韓国・フィリピン)の実績がある(マガルディ社製品全体では、世界で150件以上)。

また、湿式に対する優位性からお客様のニーズも多く、今後も石炭灰処理設備の主力設備になり続けると考えられる。引き続き、これまでの経験やお客様の要求を反映し、最適化を図った設備を提案していきたい。

[文責 プラント・環境カンパニー 産機プラント総括部 灰処理プロジェクト室 雄関 康隆/竹村 嘉彦]

【問い合わせ先】 プラント・環境カンパニー  
産機プラント総括部 灰処理プロジェクト室  
Tel. (078) 682-5057, Fax. (078) 682-5058

# Prelude FLNG用ボイラ –世界最大の洋上用ボイラを納入–

## Prelude FLNG Boiler – World’s Largest Off-shore Boiler Delivered



世界初のFLNG（洋上液化・貯蔵・出荷設備）として開発された豪州Prelude FLNGプロジェクト（事業推進者：シェル）に対してボイラを7缶納入した。ボイラは、1缶当たり毎時220トンの高温・高圧蒸気を発生し、洋上用では世界最大容量である。本ボイラは最適化した燃焼室および堅牢な構造を有し、洋上環境で要求される特殊、かつ、レベルの高い仕様をクリアしている。当社播磨工場で総組立を行い、2013年8月に4缶、10月に3缶の合計7缶を納期通り客先へ納めた。

### まえがき

世界には、中小規模を含めた未開発の海洋ガス田が数多く存在する。近年のエネルギー需要の変化などを背景に、今後さらにLNGの需給逼迫が懸念され、海洋ガス田開発の期待が高まっている。FLNG（洋上液化・貯蔵・出荷設備）は、従来開発が困難とされてきた、沖合のガス田開発に道を開く画期的な技術として注目されている。

### 1 背景

Preludeガス田は、オーストラリア北西部から約200km離れた沖合の水深250mの海底に位置する。FLNGはその洋上に係留され、約25年間にわたって定置操業する。Prelude FLNGでは、発電とプロセス蒸気発生にボイラ方式が採用され、大型台風などによる厳しい洋上環境に耐え得るボイラが求められる。

これまで当社では、電力会社向けおよび産業用自家発電向けの陸用ボイラを1,000缶以上（最大蒸発量：1,200t/h）、またLNG船向けなどの船用ボイラを200缶以上（最大蒸発量：140t/h）納入してきた。今回、フランスのエンジニアリング会社テクニップ社から受注したPrelude FLNG用ボイラは、過去に培った経験を活かし実績のある船用ボイラをベ

ースに陸用ボイラの技術を融合させて大型化に対応した。

本ボイラは、洋上用では世界最大の1缶当たり220t/hの高温・高圧蒸気を発生するボイラであり、当社船用ボイラ最大実績蒸発量の1.6倍もの規模となる。

### 2 製品の設計・開発・検証

Prelude FLNG用ボイラの主要諸元を表1に、ボイラの組立構造を図1にそれぞれ示す。空気・ガス系統の流れは、燃焼室では下降流、第二煙道では上昇流として、大きくU字を描くシンプルな流れとしている。水蒸気系統では、ボイラ給水は節炭器を通過して加熱され蒸気ドラムへ給水される。ボイラ給水は、蒸気ドラム・水ドラム・蒸発器で自然循環しながら熱交換を行い、その後飽和蒸気となる。飽和

表1 Prelude FLNG用ボイラの主要諸元  
Table 1 Main Specifications

最大蒸発量 (t/h)	220
蒸気圧力 (barG)	69
蒸気温度 (°C)	480
燃料	Fuel Gas または Diesel Oil
高さ×横幅×奥行き (m)	約 20×13×11
重量 (ton)	約 500

※数値はボイラ1缶当たりを示す。

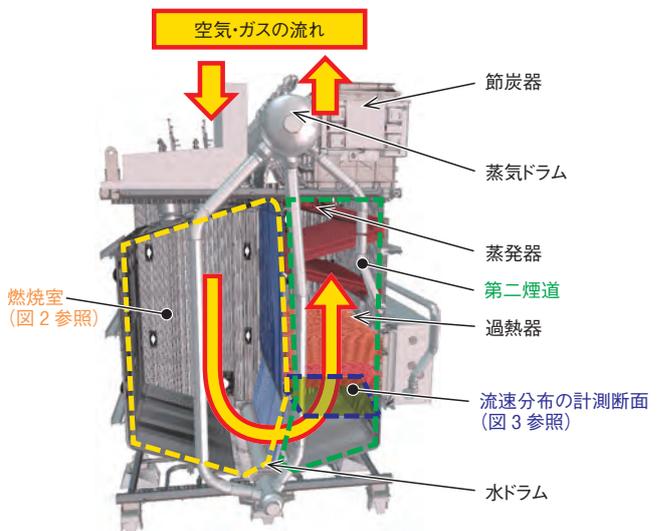


図1 Prelude FLNG用ボイラの組立構造図

Fig. 1 General arrangement structure of Prelude FLNG boiler

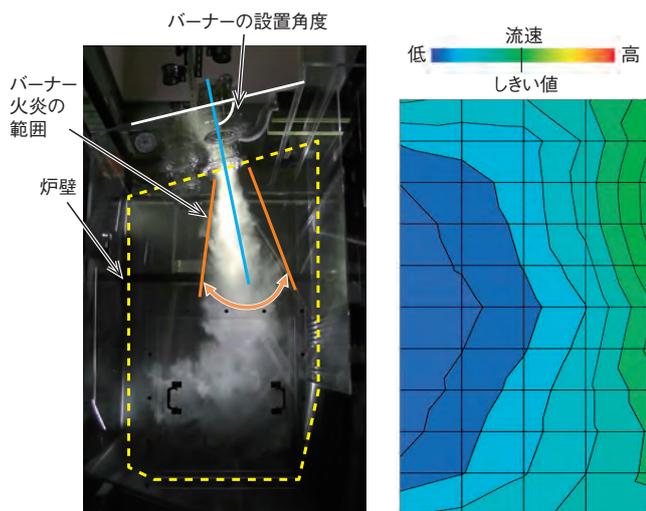


図2 バーナーの設置角度の評価 Fig.2 Evaluation of burner installation angle  
 図3 第二煙道断面のガス流速分布 Fig.3 Distribution of gas flow rate through the 2nd pass of boiler

蒸気は、過熱器を通り要求の圧力・温度の過熱蒸気に制御されて、客先設備へ供給される。

本ボイラは、高温・高圧かつ大量の蒸気を発生させるため、従来の船用ボイラの標準サイズ（高さ約13m×横幅約7m×奥行約4m）から、おおよそ倍の大きさにまで大型化している。本ボイラの開発にあたっては、以下の2点に特に配慮して設計を進めた。

### (1) 燃焼室の最適化

燃焼室の最適化を実現するため、実機の1/5スケールモデルによる風洞試験を実施した。試験では、バーナーの設置角度およびボイラ第二煙道のガス流速分布の検証を行った。

一例として、バーナーの設置角度の評価を図2に、第二煙道断面のガス流速分布を図3に、それぞれ示す。

以上の結果から、バーナー火炎が炉壁に接触しないこと、および第二煙道内の流速が、しきい値以内に分布していることを確認し、実機での最適設計に役立てた。

### (2) 堅牢な構造

FLNG用ボイラは船体揺動に対する強度だけでなく、船上の居住区の盾としての役割を果たすため、非常時での耐爆風性能も求められる。このため、爆風を受ける方向を全方向考慮した応力解析を行い、顧客からの要求値を十分に満足した堅牢な構造となるように設計した。

## 3 特長

本ボイラの特長を以下に示す。

### (1) 短納期化

基本計画の段階から、製作の短納期化への対策を織り込

んだ設計を実施し、当社播磨工場にFLNG用ボイラ総組立のための専用工場を建設した。これらの計画・過程において設計・製作と連携することで、ボトルネック工程の解消や各ステージで決められた作業をする「一個流し生産」のラインを確立した。このようにして、各ステージでの品質を安定させるとともに短納期化を達成した。

### (2) 高品質

本プロジェクトでは、設計から検査に至るまでLRS規格（ロイド船級協会が発行）による厳格な「設備認証(Certificate)」を適用している。その対応の一環として当社播磨工場で約40名のLRS有資格の高技能溶接士を育成し、溶接の高品質化を果たした。

### (3) 耐環境性能

今回の客先仕様では、厳しい洋上環境での使用に配慮したレベルの高い塗装・密閉性の高い保温が求められた。そのため、塗装作業者はNACE（国際的な防食技術者協会）検査官立ち会いの技量試験に合格・認定を得た者に限定され、厳しい塗装管理を実施した。さらに、保温ではシェル社要求によるCINI規格（オランダの保温規格）に従い施工し、テクニップ社やシェル社検査官の厳正な検査を受けて、工事を完遂した。

### (4) メンテナンス性

船上設置の制約からコンパクトな配置とともに、メンテナンスの容易性が求められた。このため、レイアウトを決める段階から各耐圧部、バーナーなどのメンテナンスエリアを計画して、恒久的に管理・維持できるよう配慮している。

## あとがき

2011年に本案件受注後、当社播磨工場にて総組立を行い、2013年に合計7缶を納期通り客先へ納めた。シェル社は今回の一隻目のPrelude FLNGに続き、二隻目以降の継続的な建造を計画している。さらに、他社でもFLNGの建造が計画中であり、将来的に拡大する市場と見込まれている。

当社は、今後も本事業を継続発展させ、信頼性の高いカワサキFLNG用ボイラを提供することで、エネルギー生産の担い手として社会へ貢献していく。

〔文責 プラント・環境カンパニー〕

エネルギープラント総括部 ボイラ設計部  
 田端 誠司／黒川 桂介〕

〔問い合わせ先〕 プラント・環境カンパニー  
 エネルギープラント総括部 ボイラ設計部  
 Tel. (078) 682-5039, Fax. (078) 682-5041

# 一般廃棄物（ごみ）炭化処理施設 — “ごみ” から “炭” を製造・有効利用 —

## Municipal Waste Carbonization System

### — Making Effective Use of Carbonized Fuel Manufactured from Waste



当社は2015年6月末、長崎県西海市に「一般廃棄物（ごみ）炭化処理施設」を納入した。本施設は同市内で発生する一般廃棄物・汚泥などを、低い環境負荷で炭化燃料に加工する施設である。製造する炭化燃料は、民間の施設で石炭混焼燃料として有効利用する。コンパクトな炭化炉、高性能な排ガス処理設備、脱塩・造粒処理により、処理規模が小さい場合でも高効率な処理設備を提供することができた。

#### まえがき

炭化方式は、処理量が100t/d未満の比較的小規模の可燃ごみ処理施設において「“ごみ”から効率的に熱エネルギーを回収する方法」として優れており、ごみの持つバイオマス資源を有効に活用可能な処理方式である。

#### 1 背景

当社は、電源開発株（代表企業）と共同で、長崎県西海市より「エネルギー回収推進施設整備・運営事業」を2012年11月に受注し、2015年6月に「一般廃棄物（ごみ）炭化処理設備」を納入した。本事業は、西海市内で発生する一般廃棄物・汚泥などを炭化燃料（炭）に加工する施設の設計、建設および運営を実施する事業である。これは製造さ

れた炭化燃料を民間の施設で石炭混焼燃料として有効利用することで、循環型社会・低炭素社会を目指すものである。

#### 2 概要

本施設の処理規模は30t/d（15t/d×2系列）である。本施設は、耐用年数に近づいていた西彼クリーンセンター、西海クリーンセンターの2施設の代替施設として建設され、西海市内のごみ処理の集約化に加え、下水汚泥・し尿汚泥・し渣の処理も集約することで、下水道事業における終末処理場の汚泥処理施設としての機能も有している。概略施設フローを図1に示す。

“ごみ”はプラットホームからごみピットに、下水汚泥は汚泥受入ホッパに持ち込まれる。ごみは破碎機にて細かく砕かれて、給じん機を介して炭化炉に投入され炭化処理

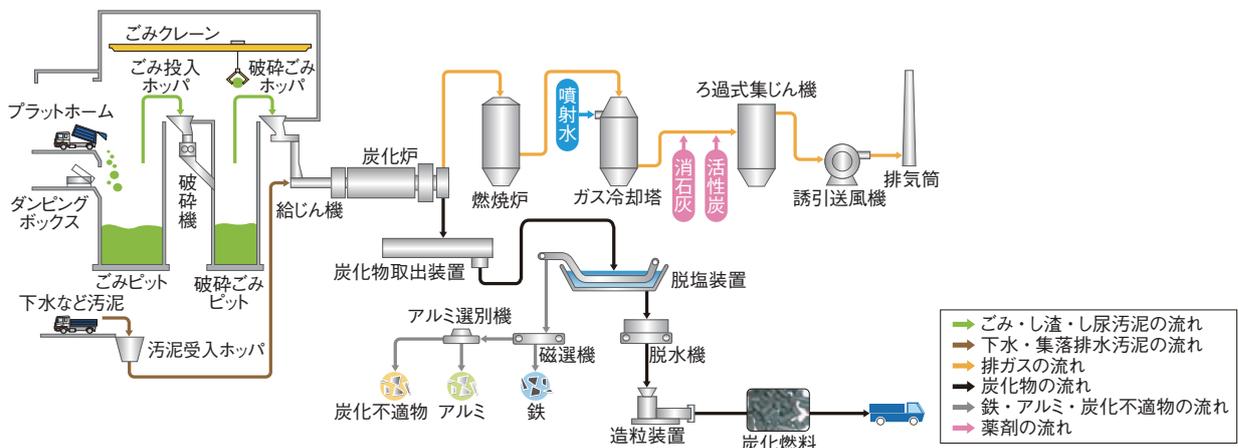


図1 一般廃棄物（ごみ）炭化処理施設／概略施設フロー  
Fig. 1 Flow of municipal waste carbonization system

される。炭化する際に発生する熱分解ガスは燃焼炉で燃やし、ガス冷却塔、ろ過式集じん機などの排ガス処理設備で適切に処理、排気される。一方、炭化炉から排出される炭化物は脱塩・造粒処理設備で処理され、炭化燃料として他の施設へと搬送、有効利用される。

### 3 特 長

#### (1) コンパクトな炭化炉

炭化炉の外観を図2に示す。また、図3に示すように、炭化炉は、高い気密性を有する「間接外熱キルン式」を採用して安全を確保するとともに、炭化物の品質を確保している。二重の筒により構成される回転式の炉で、内筒の中にゴミ、内筒と外筒の間に加熱ガスが通る構造で、ゴミは間接的に熱を受け、炭化物と熱分解ガスを排出する。炭化炉の内部は、円筒を四分分割した四分円構造となっており、効率的に炭化できるため、内部を分割しない単純な円筒型式に比べてコンパクトなものになっている。

#### (2) 環境にやさしい処理設備

炭化時に発生する熱分解ガスは燃焼炉で燃やして炭化炉の加熱源としている。ガスを排出する際は、ガス冷却塔・ろ過式集じん機・有害ガス除去装置などにより万全な大気汚染防止対策を施しており、運転実績においても排ガス中のCO、NO<sub>x</sub>が極めて低い安定運転ができています。

また、炭化方式は一般廃棄物（ゴミ）の全てを燃やさず



図2 炭化炉  
Fig. 2 Carbonization kiln

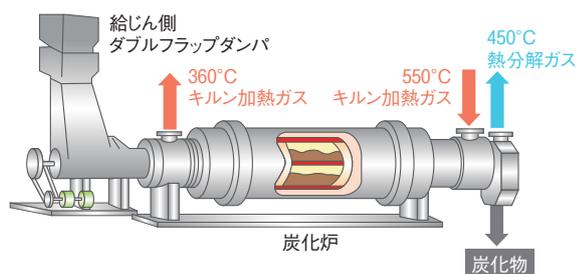


図3 炭化炉概略図  
Fig. 3 Schematic view of carbonization kiln



図4 炭化燃料の外観  
Fig. 4 Carbonized fuel

表1 炭化燃料の品質基準  
Table 1 Quality specification of carbonized fuel

品質項目	基準値
低位発熱量* (kJ/kg)	13,000程度
塩素濃度 (ppm)	3,000程度
形状	ペレット状

\*無水ベース

炭化燃料（資源）として回収するため、炭化処理施設で発生する排ガス量、ばいじん量が少なく、灰の発生量を従来方式比で20%以下に抑えられるため、最終処分量を削減できるなど、環境負荷を低減できる。

#### (3) 民間施設での燃料利用を可能にする

##### 脱塩・造粒処理設備

民間施設の石炭混焼燃料として有効利用できる低塩素の炭化燃料を製造するため、脱塩装置、脱水機、造粒装置により構成される高水準の脱塩技術を採用している。炭化燃料の外観を図4に、本設備における炭化燃料の品質基準を表1に示すが、十分に満足する実績をあげている。

#### (4) 炭化燃料の特徴

炭化燃料の製造から利用までの一連のシステム全体で評価した場合、炭化燃料を石炭の一部と置き換えて利用することで、利用先での石炭使用量を削減でき、発生する温室効果ガス（CO<sub>2</sub>）を低減できる。

ゴミを燃料化する技術として、当社は、RDF（ゴミ固形燃料）の製造技術を有しているが、本施設の炭化処理はRDF製造と違い、ゴミの持つエネルギーを利用して炭化するため、ゴミの燃料化に必要な外部エネルギー（化石燃料）の使用も少ない。また、炭化燃料の利用先を広げる脱塩処理システムを採用することで、低塩素の炭化燃料が製造できるため、利用先も幅広く確保できるという特長がある。

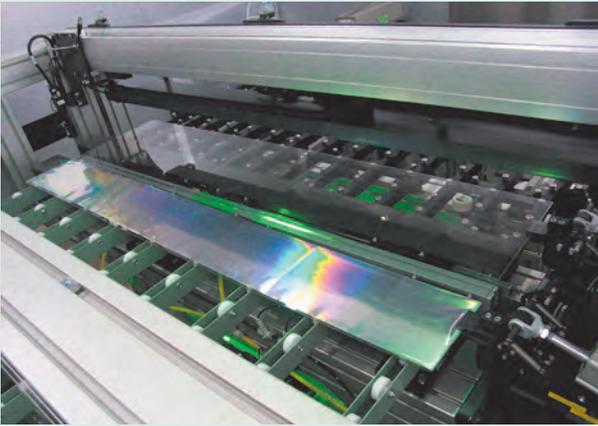
### あ と が き

当社は、廃棄物処理技術において、今回紹介した間接外熱キルン炭化方式をはじめ、各種焼却技術を有しており、深刻化する環境問題や多様化するニーズに応えるため、積極的な技術開発と販売活動に取り組んでいく。

〔文責 プラント・環境カンパニー 環境プラント総括部  
環境プラント部 小竹 正人／鈴木 資朗〕

〔問い合わせ先〕 プラント・環境カンパニー  
環境プラント総括部 環境プラント部  
Tel. (078) 682-5082, Fax. (078) 682-5433

# 高速レーザスキャニングシステム – 差別化技術でレーザプロセスの生産性・品質を向上 – Kawasaki High-speed Laser Scanning System – Using Differentiation Technology to Boost the Productivity and Quality of Laser Processes



カワサキ高速レーザスキャニングシステムは、他社製品と比較して圧倒的に生産能力の高いシステムである。当初は、薄膜太陽電池の発電層の切断加工（パターニング）向けとして開発したが、他社製品にない特長を活かし、さまざまなレーザプロセスへの適用拡大を狙っている。

例えば、ワークを搬送しながら、レーザを超高速で広範囲に同品質で照射できる。また、レーザ照射ユニットは、いろいろな種類のレーザ用にカスタマイズでき、ワーク通過型のシステムとして構築することで、ユーザーのニーズに応じた、さまざまなレーザプロセスの品質や生産性向上に貢献できる。

## まえがき

近年、薄膜太陽電池やタッチパネルなどの薄膜に回路形成する技術として、レーザスキャニングシステムが用いられるようになり、さらなる生産性向上が求められている。

また、3Dプリンターやレーザコーティングにもレーザスキャニングが適用され始めており、今後さらにさまざまな用途拡大が期待されている。

## 1 システム構成

システム構成イメージを図1に示す。ワーク搬入部、レーザ照射部、ワーク搬出部で構成されている。図1では、レーザ照射部をワークの下側に配置しているが、ワーク上側に配置することも可能である。

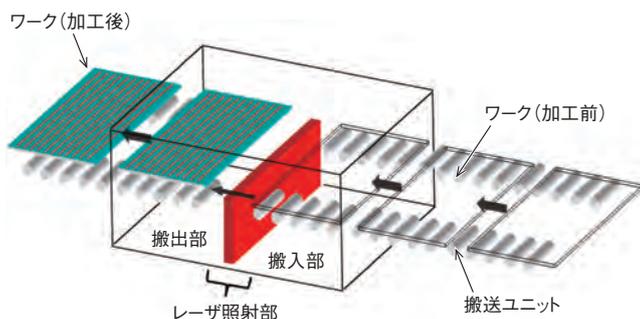


図1 レーザスキャニングシステムの構成イメージ  
 Fig. 1 System configuration

## 2 特長

本システムの特長を以下に示す。これらの特長により、高品質なレーザ加工を広範囲に実現でき、生産性の向上につながる。

### (1) ワーク通過型システム／超高速走査

超高速でのレーザ走査（10,000～20,000mm/s）を実現したことで、ワークを連続的に通過させながら加工が可能である。システムの設置面積も非常にコンパクトであり、生産ラインにも組み込みやすい。

### (2) 広い走査域と垂直なレーザ照射

一般的なガルバノスキャナと本システムとの比較を図2

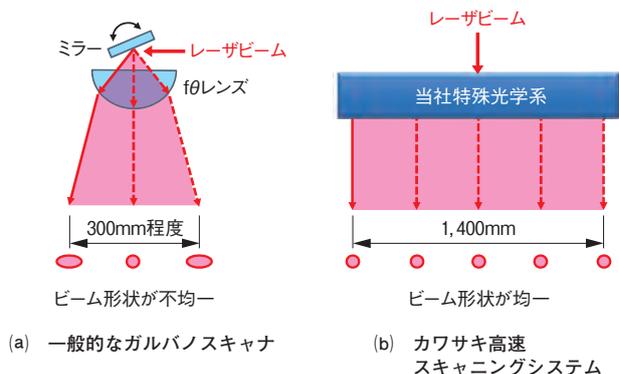


図2 ガルバノスキャナとの比較  
 Fig. 2 Comparison with galvanometer scanner

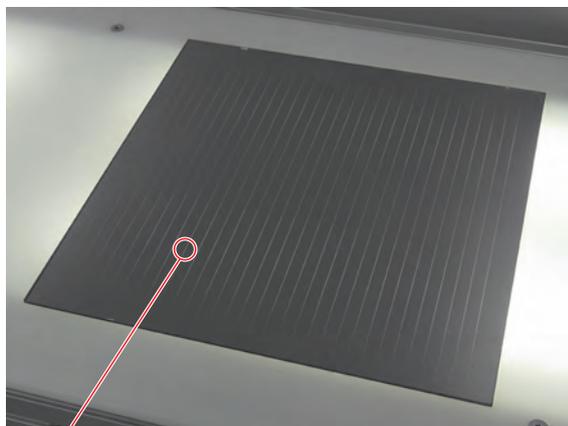
に示す。ガルバノスキャナは、走査域が狭く、その上、走査域の端になるほどビーム形状も歪んで不均一になり、広範囲の均一加工は難しい。対して、本システムは、広い走査域（最大1,400mm）でも、レーザは常にワークに垂直に照射されるので、レーザ品質が均一であり安定した加工が可能である。

今まで小さなワーク（局所部の処理）に限定されていたレーザプロセスを、本システムを用いることで、大きなワーク（広範囲の処理）に適用できる。

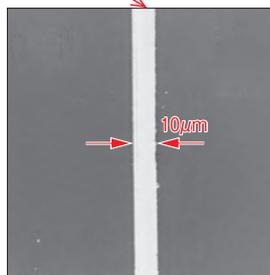
### (3) 幅が均一な加工線

加工例を図3(a)に示す。ワークは薄膜太陽電池用の基板で、ガラス板上に成膜したMo膜を9mmピッチでレーザ切断したものである。加工部の拡大写真を図3(b)に、比較用として他社製品による加工例を図3(c)に示す。他社製品の不均一な加工に対し、本システムは、加工幅が均一で安定している上に、加工速度が50倍と超高速である。

ワーク種類：薄膜太陽電池用基板  
 (ガラス基板上にMo膜を成膜したもの)  
 ワークサイズ：縦300×横300×板厚3mm  
 Mo膜厚：400nm

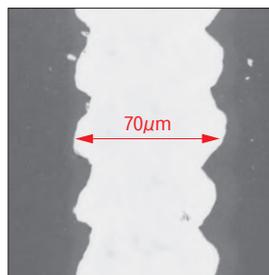


(a) 加工例…ワーク (加工後)



走査速度：15,000mm/s  
 加工幅均一：10 μm

(b) 当社



走査速度：300mm/s  
 加工幅不均一：50~70 μm

(c) 他社

図3 加工例 (他社との加工サンプル比較)  
 Fig.3 Processing example (sample comparison)

表1 デモ機の主要諸元  
 Table 1 Main specifications

装置外形	外形寸法 (mm)	L3,500×W2,300×H1,500
	重量 (t)	約4
対象ワーク	寸法 (mm)	300×300~1,400×1,100
	板厚 (mm)	1~5
	その他	上記サイズ以外の加工については別途相談にて対応
搭載レーザ	タイプ	YVO4 THG, SHGパルスレーザ
	出力/波長 (W/nm)	14/355, 14/532
	照射方向	搬送面下から上
装置仕様	走査速度 (mm/s)	MAX 20,000
	走査範囲 (mm)	MAX 1,400
	ワーク送り速度 (mm/s)	MAX 400
	送りストローク (mm)	MAX 2,000

## 3 デモ機

社内にデモ機を有しており、サンプル加工テストに対応可能である。デモ機の主要諸元を表1に示す。

## 4 さまざまな適用分野

ユーザーのニーズに応じて、搭載レーザや光学部品をカスタマイズでき、次のようなさまざまなプロセスに適用できる可能性を有している。

- ① パターニング（薄膜太陽電池基板やタッチパネルの薄膜切断による回路形成）
- ② 表面改質（レーザ焼入れ・レーザアニーリング）  
 例えば、アモルファスSi薄膜の熔融結晶化、方向性電磁鋼板の結晶粒界形成（高品質化）など
- ③ 3Dプリンター・UV硬化樹脂の光造形
- ④ レーザコーティング・レーザクラディング（肉盛り）
- ⑤ レーザ洗浄・膜剥がし
- ⑥ レーザ露光
- ⑦ レーザ成膜
- ⑧ レーザ切断・レーザ溶接
- ⑨ 検査・計測・測定

## あ と が き

今後も、ユーザーのサンプル加工に対応して適用分野の開拓を進め、さまざまなレーザプロセスの品質向上や生産性向上、さらには新製品開発に役立てていきたい。

〔文責〕 プラント・環境カンパニー  
 新規プロジェクト推進部 大串 修己

〔問い合わせ先〕 プラント・環境カンパニー  
 新規プロジェクト推進部  
 Tel. (078) 682-5411, Fax. (078) 682-5586

# 空冷式熱交換器 — 原子力発電所での耐震性向上に貢献 —

Air Fin Cooler (AFC)

— Excellent Earthquake Helps Make Nuclear Power Station Safer



東日本大震災以降、より高まった原子力発電所内設備の耐震性向上の要求に応えるため、空冷式熱交換器の機器に対する補強部材の追加や構造の改良を実施した。耐震解析の結果、この改良により主要な構成機器の固有値が向上し、剛構造とすることができた。

これにより、今後の原子力発電所の安全対策に向けて高い耐震性を有する空冷式熱交換器の提供が可能となった。

## まえがき

2011年の東日本大震災を契機に、原子力発電所内設備の冷却方法の多様化が求められるようになり、海水による冷却に代わり、空気による冷却方法を採用する例が増えつつある。

## 1 目的

原子力発電所では、事故時などに電力供給が途絶えた場合を想定し、非常用のディーゼル発電設備が備えられており、その冷却水は海水によって冷却される設計となっている。

しかし、安全性のより一層の向上を目的として、冷却方法にも多様化が求められ、空冷式熱交換器（AFC：Air Fin Cooler）を採用する例が増えつつある。こうした設備には地震時でも損傷することなく、その機能を維持することが求められる。

これらの状況を考慮して、当社では空冷式熱交換器の耐震性を向上させた。

## 2 空冷式熱交換器の構造と仕様

### (1) 構造

空冷式熱交換器の外形を図1に示す。空冷式熱交換器は主に以下に示す機器で構成される。

- ① 管束（チューブバンドル）
- ② ファン

- ③ 電動機、減速機
- ④ ファンリング
- ⑤ 架構
- ⑥ ルーバ（上部、側部）

冷却水は伝熱管である管束内を流れ、ファンによる風で冷却される。各機器は高い耐震性を備えた架構により支持され、地震時でもその機能を維持する設計となっている。また、冬期は上部ルーバを閉止して側部ルーバから排気することにより積雪時の運転を可能としている。

なお、図1は“2ベイ”の場合を示したものである。当

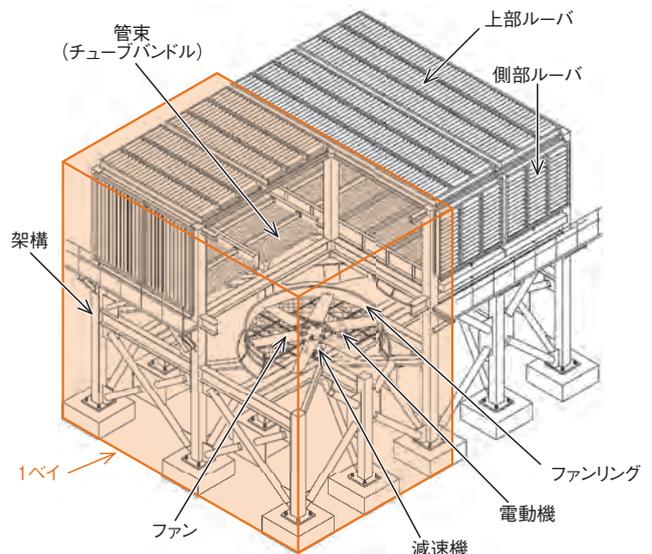


図1 空冷式熱交換器 外形図（2ベイ）  
Fig.1 Air fin cooler outline（2 bays）

表1 空冷式熱交換仕様  
Table 1 Air fin cooler specifications

種類	押込通風型
耐震クラス	S*
機器区分	JSME クラス3 容器
交換熱量	約1.3MW / ベイ (温度条件により異なる)

\*設備の耐震性区分の一つでSが最も厳しい

社の空冷式熱交換器は、必要な交換熱量に応じ、“ベイ”と呼称するユニットを連ねる。“ベイ”の基本構造は標準化しており、設計や解析に要する期間を短縮し、コスト削減を実現している。

## (2) 仕様

当社標準の空冷式熱交換の仕様を表1に示す。

## 3 耐震性の向上

空冷式熱交換器には高い耐震性が要求される。以前から支持架構やファン部分については、想定される地震に対して健全性が保たれることを、解析により確認していた。最近では、想定される地震力の条件がより厳しくなっており、ファンやファンリング(図2)、管束といった個別の機器

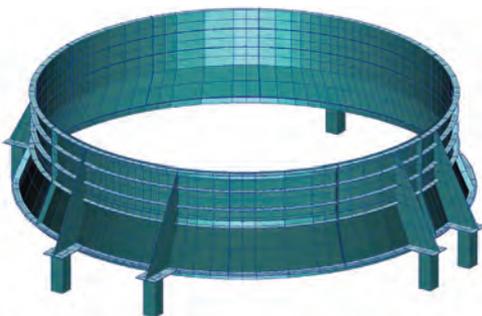


図2 ファンリングの耐震解析モデル  
Fig. 2 Seismic analysis model of fan ring

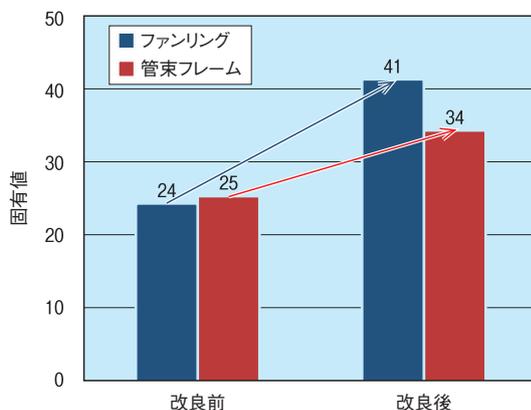


図3 改良による固有値の向上  
Fig. 3 Rise in eigenvalues after improvement

表2 納入実績  
Table 2 Completed deliveries

納入先	納入年	交換熱量	基数
東京電力(株) 福島第一原子力発電所 第4号機	1996年	5.27MW	3ベイ×1基
日本原子力研究開発機構 高温工学試験研究炉	1996年	3.5MW	4ベイ×1基
日本原燃(株) 下北再処理事業所	2002年	11.6MW	9ベイ×2基
		4.45MW	4ベイ×2基

に対しても改良を行った。変形を抑制するためにリブやブレスといった補強部材を追加したほか、応力が集中する接続部については形状やボルト本数の見直しを行った。

剛構造であるか否かは固有値により判定され、最近では33Hzを超える固有値が要求されているが、これらの改良により、ファンリングと管束フレームの固有値は図3の通り、要求を満足する剛構造とすることができた。

## 4 積雪対策

当社の空冷式熱交換器は積雪対策としてルーバを備えている。空冷式熱交換器は熱交換した空気を大気に排気するため、積雪が懸念される冬期は上部ルーバを閉じ、側部ルーバから排気することで運転を可能としている。ヒータによる融雪装置を設けて積雪を防止することも可能であるが、溶けた水の再凍結による障害や、地震時に供給が途絶える可能性のあるスチームやヒータ電源といったユーティリティが必要という点で、地震時の安全対策設備としてはルーバを備えた方が適切である。

## 5 納入実績

原子力関連施設向けとして各施設への納入実績(表2)を有するほか、電源開発(株)大間原子力発電所用として現在設計作業中である。

## あ と が き

東日本大震災により、原子力発電所の安全性向上が強く求められている。当社としては、その安全対策の一端を担うことにより、原子力発電所の安全運転に寄与していきたい。

[文責 プラント・環境カンパニー

新規プロジェクト推進部 原子力プロジェクト室  
小澤 達也/佐藤 康士]

[問い合わせ先] プラント・環境カンパニー  
新規プロジェクト推進部 原子力プロジェクト室  
Tel. (078) 682-5054, Fax. (078) 682-5055

# ファインセクターθ (シータ) – 超微粉分級への挑戦 –

## Fine Sector θ – Achieve Ultrafine Powder Classification



(株)アーステクニカは、長年のトナー製造機器開発で培った技術を活用して、微粉分級機「ファインセクターθ」を開発した。当製品は、優れた分級性能を有する分級ロータと分散エアの効果により、粉碎トナー中の約4 μm以下、とりわけ超微粉と呼ばれる約2 μm以下の微粉を高精度に除去することが可能である。

### まえがき

レーザープリンタやコピー機において、印刷画質の高品位化ニーズが年々高まっている。これに対応するためには、トナー製造ラインの分級工程において、約4 μm以下、とりわけ超微粉と呼ばれる、粒子径が約2 μm以下の粒子量を低減する必要がある。

### 1 背景

(株)アーステクニカは、破碎・粉碎・分級をキーテクノロジーとした総合破碎粉碎機器メーカーである。取り扱い製品は破碎機・粉碎機、環境関連機器、微粉碎機器があり、数メートルの大塊から数μmの微粉まで対応可能である。微粉碎機器は、医薬・化学工業・食品など、粉体を取り扱う製造プロセスで広く用いる機器を数多くラインアップしている。中でも機械式粉碎機「クリプトロンシリーズ」はトナー製造に適した粉碎機として、長年にわたり高い評価を頂いている。

粉碎トナーの一般的な製造工程を図1に示す。粉碎後のトナーは最大粒子径が約10 μm以下、平均粒子径が約6～7 μmの粒子群である。これを分級工程で約4 μm以下の微粉を除去し、外添（表面コーティング）工程を経て製品となる。このとき、超微粉と呼ばれる約2 μm以下の微粉

は、分級工程で十分な分散状態が得られず、必要な製品粒子中に混入する問題がある。この超微粉が多く混入していると印刷画質が低下するため、超微粉を確実に除去するニーズが高まっている。このニーズに応えるべく微粉分級機「ファインセクターθ」を開発した。

### 2 ラインアップ

ファインセクターθの型式一覧を表1に示す。市場ニーズを加味し、最大処理能力200kg/hまでの3シリーズを生産機として、また、粉体製品開発に用いるラボ機としてEFS0Q型をラインアップしている。

### 3 構造

ファインセクターθの断面図を図2に示す。装置全体を構成するケーシングと、装置内の上部に位置して高速回転する分級ロータ、および装置下部で外気を取り込むためのルーバで構成されている。原料は装置上方から分級ロータ外周部に供給され、分級ロータにおいて粗粉と微粉に1次分級される。1次分級で十分な分散状態が得られず製品側に落下した粒子は、ルーバから取り入れた分散エアによって再分散され、超微粉が分離・回収される。



図1 粉碎トナー製造工程  
Fig. 1 Manufacturing process of pulverized toner

表1 ファインセクターθ型式一覧  
Table 1 Fine Sector θ models

型式	EFS0Q (ラボ機)	EFS00	EFS10	EFS20
全风量 (m³/min)	1.5~2.0	6.0~8.0	15~20	30~40
処理能力 (kg/h)	~10	~40	~100	~200

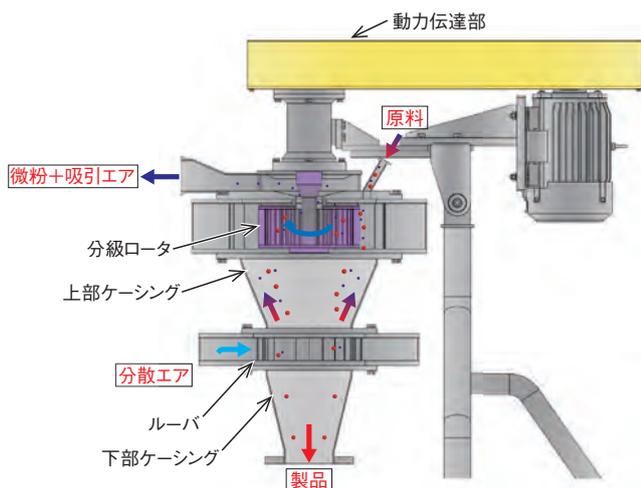


図2 ファインセクターθ断面図  
Fig.2 Cross-section view of Fine Sector θ

#### 4 特 長

ファインセクターθは、トナー製造機器開発で長年にわたり培った技術をベースに、最新のCFD解析技術の活用によって以下の特長を得ている。

##### (i) 超微粉の除去

分級ロータは分級性能を決定する重要な要素である。超微粉の分級に適した気流状態となるよう、ロータ形状を最適化し、優れた分級性能の達成と、これまで困難であった超微粉除去性能を実現している。

##### (ii) 再分散による高い分級性能

十分に分散されず製品側に落下した粒子に対して、装置下部のルーバから分散エアを導入することで機内に旋回流を形成し、十分な再分散状態を得ている。この再分散・分級の効果によって、より高い品質を達成している。

##### (iii) 容易な分級粒子径調整

分級ロータの回転数制御により、粒子に働く遠心力を調整し、容易に分級粒子径をコントロール可能である。

##### (iv) 高い機内清掃性

EFS10型以上の大型機はケーシング開閉装置を搭載し、ワンボタンで操作を可能とした。また機内アクセス性を確保し、品種替え時などに求められる機内清掃性を確保している。

#### 5 分 級 例

図3(a)はトナー粉碎品、図3(b)はファインセクターθによる分級品の個数分布測定結果(マルバーン製FPIA2100にて測定)の一例である。分級前の粉碎品中には4μm以下の微粉が63.9%、2μm以下の超微粉が30.2%含有されていた。これをファインセクターθで分

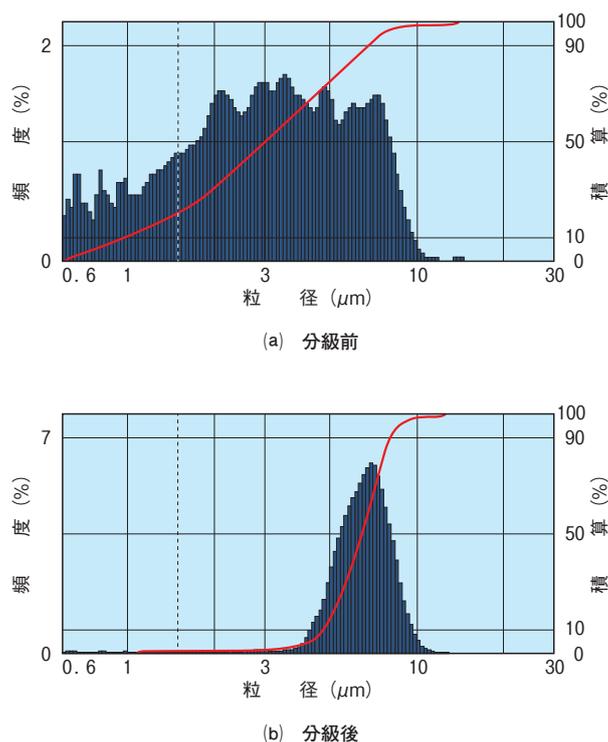


図3 分級品粒度分布(個数基準)  
Fig.3 Particle size distribution of classified toner material (based on the number of particles)

級した結果、4μm以下の微粉を3.5%、2μm以下の超微粉を1.7%まで減少させることができた。分級機内へ投入した原料に対する回収した製品(分級品)の割合(収率)は77%であり、高い分級性能を保ちつつ、微粉のみを効率的に除去することができている。

#### あ と が き

ファインセクターθの開発により、これまで実現できなかった高い超微粉分級性能を達成できた。本機によるトナー製品は、トナーメーカーの要求品質を満足し、新規のトナー製造設備に導入されて、お客様にご好評を頂いている。今後も、さらなる分級性能向上を進め、お客様のニーズに応えていく所存である。

[文責 (株)アーステクニカ 技術・品証総括部  
技術部 坂口 優子]

【問い合わせ先】 株式会社アーステクニカ  
技術・品証総括部 技術部  
Tel. (047) 483-5817, Fax. (047) 483-3733

# 高压水素ガストレーラ – 国内初の複合容器の採用 –

## High-pressure Hydrogen Gas Trailer – Japan's First Composite Vessel



究極のエコカーとして販売が開始された燃料電池自動車 (FCV) に高压水素ガスを充填するための水素ステーションへ、製油所などの水素製造所で製造した水素ガスを輸送、留置貯蔵・供給するための高压水素ガストレーラを開発した。

本トレーラは、軽量で高压対応が容易な複合容器を搭載した日本初の水素トレーラである。特に、非常時のシナリオを想定して、安全対策を最大限付与している。

### まえがき

燃料電池自動車の普及に備えて、各地で水素ステーションが整備されつつあり、現在、製油所などで製造されている水素ガスを経済的に水素ステーションへ輸送および留置・貯蔵する方法が求められている。

### 1 目的

水素を純粋なH<sub>2</sub>のまま運ぶ形態としては、液化水素もしくは高压水素の2種類があり、大量の水素の輸送には液化水素が、少量の水素の輸送には高压水素が、それぞれ適している。水素社会の黎明期には、それほど大量の水素流通は見込まれておらず、まずは高压水素による輸送が主流

となると考えられる。

従来、高压水素ガス輸送には鋼製容器搭載トレーラが使用されてきたが、水素社会実現のためには輸送コストの削減が必要であり、容器をさらに軽量化して輸送効率を高める必要があった。

当社グループは、複合容器を採用することで、まず2011年度当時の法規で定められた最高圧力35MPaに準じ、「35MPa級複合容器搭載水素トレーラ」を開発した。その後、最高圧力が45MPaに高められる動向を受け、さらに高压化して搭載量を2.5倍に高めた「45MPa級複合容器搭載水素トレーラ」を開発した。

### 2 主要仕様と運用

「45MPa級複合容器搭載水素トレーラ」の主要仕様を表1に示す。

水素ステーションのタイプには、ステーション内に水素ガス、または水素ガスの原料を蓄え、40MPa/80MPaの高压水素ガスを製造、貯蔵、充填が行えるオンサイト型と、水素製造設備をもたないオフサイト型の2種類がある。オフサイト型水素ステーションにおいて、「45MPa級複合容器搭載水素トレーラ」は、図1に示すフローで運用される。

表1 45MPa級複合容器搭載水素トレーラ主要仕様

Table 1 Main specifications of a hydrogen trailer equipped with a 45 MPa class composite vessel

項目	仕様
トレーラ型式	平床セミトレーラ
車軸・懸架装置	2軸エアサスペンション
車長・全幅 (mm)	9,670×2,490
水素搭載量 (kg)	260
留置方法	フェリーフック固定
常用圧力 (MPa)	45
ガスの種類	圧縮水素
容器種類	複合容器 タイプ3
容器容量 (L)	300
容器本数 (本)	24
容器元弁	溶栓式安全弁付手動弁
天井	幌カバー開閉式
側面	パンチングメタル製扉
前面	容器室用ドアタイプ扉
後面	操作室用ドアタイプ扉
附属品	消火器、ガス検知器



図1 オフサイト型水素ステーションによる運用  
Fig. 1 Application in an offsite hydrogen station

- ① 水素製造設備で製造した水素を、圧縮機で45MPaの高圧にし、複合容器に充填
- ② 水素トレーラは、水素ステーションへ高圧水素ガスを運び、そのまま留置き貯蔵容器として使用
- ③ 水素圧力が下がると水素製造設備に戻り水素を充填

### 3 特 徴

#### (1) 大量輸送を実現する複合容器

軽量素材であるアルミニウム合金製容器に、高い引張強度をもつCFRP（炭素繊維強化プラスチック）を巻きつけることで、軽量かつ耐超高压を実現している（図2）。複合容器を利用することで、従来の鋼製容器に比べて約2倍以上の高圧水素を運ぶことができる。

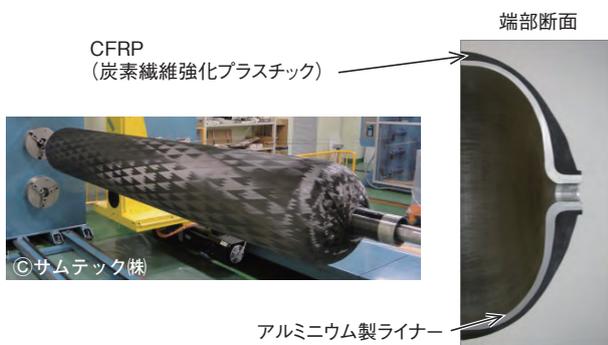


図2 複合容器の一例  
Fig.2 Composite vessel

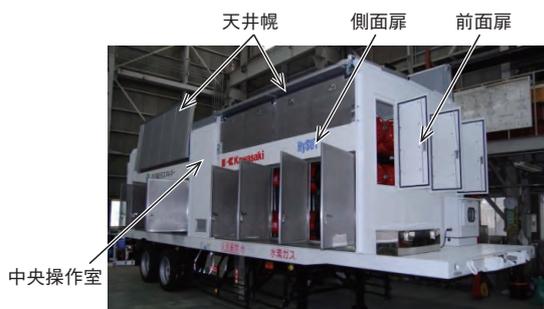


図3 天井幌, 側面扉  
Fig.3 Overhead canopies, side doors

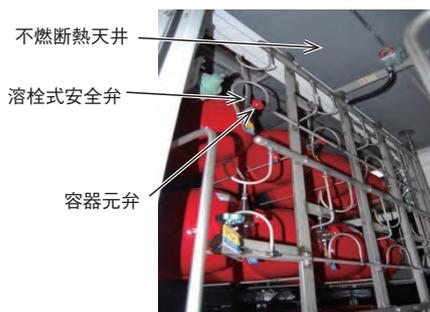


図4 中央部容器元弁操作室  
Fig.4 Central vessel master valve control room

#### (2) トレーラの走行安定性を保証する装置・機能

走行安定性のため、電子制御ブレーキ（EBS）とエアサスペンションを懸架装置に採用している。さらに、ABS（アンチロックブレーキシステム）と次の機能を備える。

- ① 横転の危険を察知して、自動的にブレーキを動作させ危険を減少させる横転抑制装置（RSS）
- ② 積載量に応じブレーキ力を調整、さらに、空車時のブレーキ力過多を防ぐロードセンシング機能
- ③ 走行距離、トレーラ軸重表示などの車両情報を記録し、スマートボードに表示する機能

#### (3) 安全性、操作性を向上させる構造（図3、図4）

- ① 高温検知した際、散水できるように、ハンドル操作で開閉可能な天井幌を設置
- ② 容器などの点検作業を容易に行えるよう、側面にパンチングメタル製開閉式扉を設置
- ③ 容器室内部に入るための前面扉構造
- ④ 移動時やステーション留置き時に24本の容器元弁開閉操作が容易にできるよう、中央に操作室を設置
- ⑤ 容器元弁として、複合容器が高温になった場合に水素を安全に放出するための溶栓式安全弁を設置
- ⑥ 天井部は不燃断熱材を貼り、内部の温度上昇を抑制
- ⑦ 100℃以上の高温時に自動でバルブが閉まる緊急遮断弁を後部操作室に設置
- ⑧ ワンタッチで水素ステーションの配管に接続できるホース、カプラを後部操作室に設置

### 4 商用車の製作

現在、当「45MPa級複合容器搭載水素トレーラ」の1.4倍の容量（容器34本）を搭載できる商用機水素トレーラを開発中である。この水素トレーラは、本トレーラより長さが短く、より多くの水素ステーションに留置できる。

### あ と が き

本製品は、NEDOの委託研究事業を川崎重工業が受託し、川崎エンジニアリング株が協力して開発した。

今後、燃料電池自動車の増加に伴い需要が高まることが予想される。大量の水素ガスを安全に、効率よく輸送するニーズに対して、本製品の操作性の向上、およびコスト削減を進めていく予定である。

〔文責 川崎エンジニアリング株 産業プラント部 前川 完二〕

〔問い合わせ先〕 川崎エンジニアリング株  
産業プラント部  
Tel. (078) 612-8585, Fax. (078) 642-3654

特許 第5340716号

発明の名称：倒立形低NOxボイラ

発明者：末光 信夫，武藤 貞行，戸田 信一，五十嵐 実

—灰分の多い燃料でも，安定連続にクリーンな電力を供給  
「U-KACC」—

火力発電所では，燃料コストの削減要求から，アスファルトなどの窒素分や残留炭素分を多量に含む燃料や，オイルコークスなどの灰分を多量に発生する燃料の利用が増えており，これらをクリーンに燃焼させるボイラが求められている。

当社では，還元雰囲気（空気比<1）で高温燃焼するゾーン，酸化雰囲気（空気比>1）で低温燃焼するゾーンを設けて窒素酸化物の生成を少なくしたクリーンボイラ技術（KACC：Kawasaki Advanced Clean Combustion／図1）を有している。しかしながら，KACCでは，灰分が多量に発生する燃料を用いると，焼却灰が炉底に蓄積したり，炉底に灰排出口を設けることで還元雰囲気が破壊されたりするため，安定連続な燃焼ができなくなることがあった。

そこで，KACCを上下反転（倒立）させ，炉上部から高温還元燃焼ゾーンと低温酸化燃焼ゾーンを配置し，炉下部の灰排出口から焼却灰を排出するU-KACC（Upgraded-KACC／図2）を開発した。上部の高温還元燃焼ゾーンで燃料をガス化した後に，下部の低温酸化燃焼ゾーンで未燃分を完全燃焼させるので，

灰排出口付近の燃焼ガスは一酸化炭素や硫化物などの有害物質が少なく有毒性が低い。また，灰排出口が燃焼ゾーンから離れているため，灰排出口から大気が流入しても，燃焼が阻害されたり空気比に影響を与えたりする可能性が減り，焼却灰の排出が安定連続して行えるようになった。

このように，KACCを倒立させて下部に灰排出口を設けることで，環境負荷低減性を保ちながら炉の連続運転が可能になり，灰分を多く含む燃料も使用できるようになった。

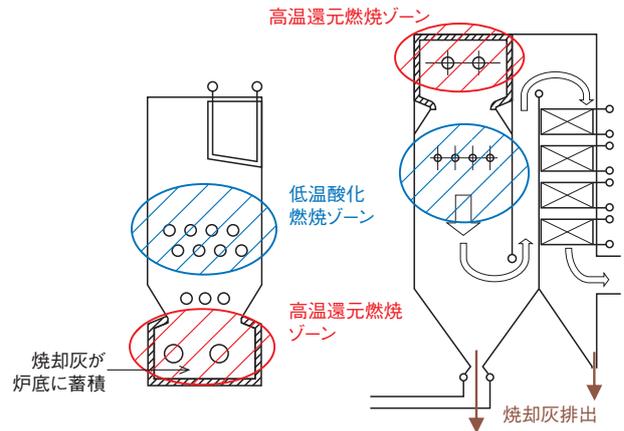


図1 KACC

図2 U-KACC

中国特許 ZL201010514607.3

発明の名称：廃棄物処理設備

発明者：林 敏和，井上 英二，片畑 正，加藤 定史，市谷 昇

—ごみの無害化・減量化とセメント製造を同時に達成  
「CKKシステム」—

中国や東南アジアなどの新興国では，生活レベルの向上に伴って，ごみの衛生処理に対するニーズが高まっているが，ごみ焼却設備の建設コストが高く，また焼却灰の処理設備を設置する必要がある。一方，これらの国では積極的に進められているインフラ整備のためにセメントの需要が伸びており，セメント製造コスト低減のために，燃料の代替として可燃性廃棄物を利

用している。

そこで本発明では，既存のセメント製造設備にごみ焼却設備を併設し，ごみ焼却設備でごみをガス化して発生する熱分解ガスと熱分解ガス中の未燃チャーや灰分，ごみ焼却処理時に分離・選別される不燃物をセメントの原料および燃料に利用できるようにした。この際，熱分解ガスの燃焼による発熱量がごみの種類により変動すること，およびごみ焼却設備の運転トラブルにより熱分解ガスの供給停止の可能性を考慮した制御を行うことで，セメント製造に影響が出ないよう工夫している。

ごみが保有するエネルギーおよび灰分を，セメント製造設備の燃料や原料として有効利用するという本技術は，地球環境に配慮した優れた技術として，すでに中国各地で採用されるとともに，東南アジアでも関心が寄せられている。

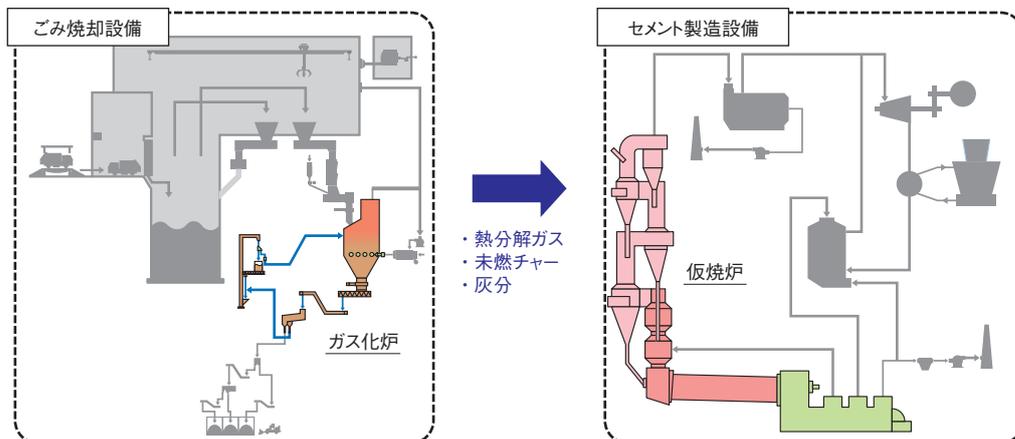


図1 CKKシステムフロー

## 事業セグメント別主要製品／生産拠点

事業セグメント	主 要 製 品	主要生産拠点
船 舶 海 洋	<ul style="list-style-type: none"> <li>・LNG運搬船, LPG運搬船, 油槽船, ばら積み船, コンテナ船, 自動車運搬船, 超高速船, 艦艇, 官公庁船, 海洋構造物</li> </ul>	神戸工場 坂出工場 Enseada Indústria Naval S.A. (ブラジル) 南通中遠川崎船舶工程有限公司 (中国) 大連中遠川崎船舶工程有限公司 (中国)
車 両	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉄道車両, 新交通システム, 貨車</li> <li>・ニッケル水素電池「ギガセル®」</li> </ul>	兵庫工場 播磨工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp, U.S.A. (アメリカ) Kawasaki Rail Car, Inc. (アメリカ)
航 空 宇 宙	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ロータリー除雪車, 凍結防止剤散布車</li> <li>・軌道モーターカー, 重量物運搬車</li> </ul>	(株)日本除雪機製作所・本社工場 (株)日本除雪機製作所・曙工場
航 空 宇 宙	<ul style="list-style-type: none"> <li>・航空機 (固定翼機/ヘリコプター), 誘導機器, 電子機器, 宇宙関連機器, シミュレータ</li> </ul>	岐阜工場 名古屋第一工場 名古屋第二工場
航 空 宇 宙	<ul style="list-style-type: none"> <li>・航空機 (部分品など), ロケット部分品, 宇宙機器, 標的システム, 海洋機器の製造</li> <li>・航空機整備・改造</li> </ul>	日本飛行機(株)・航空宇宙機器事業部 日本飛行機(株)・航空機整備事業部
ガスタービン・機 械	<ul style="list-style-type: none"> <li>・航空機用エンジン, 船用ガスタービンエンジン</li> <li>・ガスタービン発電設備, コージェネレーションシステム, 他</li> </ul>	明石工場 西神戸工場
ガスタービン・機 械	<ul style="list-style-type: none"> <li>・陸用蒸気タービン, ディーゼル機関, ガスエンジン, 大型減速装置</li> <li>・船用推進装置 (サイドスラスト, 旋回式スラストなど)</li> <li>・各種空力機械 (天然ガス圧送設備, 送風機など)</li> </ul>	神戸工場 播磨工場 武漢川崎船用機械有限公司 (中国)
ガスタービン・機 械	<ul style="list-style-type: none"> <li>・空調機器, 汎用ボイラ</li> </ul>	川重冷熱工業(株)・滋賀工場 同方川崎節能設備有限公司 (中国)
プ ラ ン ト ・ 環 境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各種産業用プラント (セメント, 化学, 搬送プラント)</li> <li>・各種陸船用ボイラ (発電事業用ボイラ, 産業用ボイラなど)</li> <li>・ごみ処理設備</li> <li>・各種低温貯蔵設備 (LNGタンク)</li> <li>・シールド掘進機, トンネル掘削機</li> </ul>	播磨工場 上海中遠川崎重工鋼結構有限公司 (中国) 安徽海螺川崎節能設備製造有限公司 (中国) 安徽海螺川崎裝備製造有限公司 (中国)
プ ラ ン ト ・ 環 境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・破碎機, リサイクル用機器, 他</li> </ul>	(株)アーステクニカ・八千代工場
モ ー タ ー サ イ ク ル & エ ン ジ ン	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モーターサイクル, ATV (四輪バギー車), レクリエーションユティリティビークル, 多用途四輪車, パーソナルウォーターcraft「ジェットスキー®」</li> <li>・汎用ガソリンエンジン</li> </ul>	明石工場 加古川工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp, U.S.A. (アメリカ) Kawasaki Motores do Brasil Ltda. (ブラジル) India Kawasaki Motors Pvt. Ltd. (インド) Kawasaki Motors Enterprise (Thailand) Co, Ltd. (タイ) P.T. Kawasaki Motor Indonesia (インドネシア) Kawasaki Motors (Phils.) Corporation (フィリピン) 常州川崎光陽發動機有限公司 (中国)
精 密 機 械	<ul style="list-style-type: none"> <li>・建設機械用油圧機器, 産業機械用油圧機器・装置</li> <li>・船用舵取機, 船用各種甲板機械</li> <li>・産業用ロボット</li> <li>・医薬・医療ロボット</li> </ul>	明石工場 西神戸工場 Kawasaki Precision Machinery(U.K.)Ltd. (イギリス) Wipro Kawasaki Precision Machinery Private Limited (インド) 川崎精密機械(蘇州)有限公司 (中国) 川崎春暉精密機械(浙江)有限公司 (中国) Flutek, Ltd. (韓国)

## 川崎重工技報 第176号

2015年10月1日

**編集・発行** 兵庫県明石市川崎町1番1号  
川崎重工業株式会社 技術開発本部

**発行責任者** 技術開発本部長 門田浩次

**発行人** 技術開発本部 技術企画推進センター長  
原田英一

**印刷** 広島県広島市中区中島町9番6号  
株式会社 秀巧堂クリエイト

禁無断転載

## 事業所・生産拠点・研究開発拠点

東京本社 (〒105-8315)	東京都港区海岸1丁目14番5号	☎(03)3435-2111 Fax. (03)3436-3037
神戸本社 (〒650-8680)	兵庫県神戸市中央区東川崎町1丁目1番3号 (神戸クリスタルタワー)	☎(078)371-9530 Fax. (078)371-9568
技術開発本部 (〒673-8666)	兵庫県明石市川崎町1番1号 (明石工場内)	☎(078)921-1611 Fax. (078)921-1867
北海道支社 (〒060-0005)	北海道札幌市中央区北5条西2丁目5番 (JRタワーオフィスプラザさっぽろ14階)	☎(011)281-3500 Fax. (011)281-3507
東北支社 (〒980-0021)	宮城県仙台市青葉区中央1丁目6番35号 (東京建物仙台ビル16階)	☎(022)261-3611 Fax. (022)265-2736
中部支社 (〒450-6041)	愛知県名古屋市中村区名駅1丁目1番4号 (JRセントラルタワーズ)	☎(052)388-2211 Fax. (052)388-2210
関西支社 (〒530-0004)	大阪府大阪市北区堂島浜2丁目1番29号 (古河大阪ビル)	☎(06)6344-1271 Fax. (06)6348-8289
中国支社 (〒730-0013)	広島県広島市中区八丁堀3番33号 (広島ビジネスタワービル12階)	☎(082)222-3668 Fax. (082)222-2229
九州支社 (〒812-0011)	福岡県福岡市博多区博多駅前1丁目4番1号 (博多駅前第一生命ビル)	☎(092)432-9550 Fax. (092)432-9566
沖縄支社 (〒900-0015)	沖縄県那覇市久茂地3丁目21番1号 (國場ビル)	☎(098)867-0252 Fax. (098)864-2606
岐阜工場 (〒504-8710)	岐阜県各務原市川崎町1番地	☎(058)382-5712 Fax. (058)382-2981
名古屋第一工場 (〒498-0066)	愛知県弥富市楠3丁目20番地3	☎(0567)68-5117 Fax. (0567)68-5161
名古屋第二工場 (〒490-1445)	愛知県海部郡飛鳥村金岡7番地4	☎(0567)68-5117 Fax. (0567)68-5161
神戸工場 (〒650-8670)	兵庫県神戸市中央区東川崎町3丁目1番1号	☎(078)682-5001 Fax. (078)682-5503
兵庫工場 (〒652-0884)	兵庫県神戸市兵庫区和田山通2丁目1番18号	☎(078)682-3111 Fax. (078)671-5784
西神工場 (〒651-2271)	兵庫県神戸市西区高塚台2丁目8番1号	☎(078)992-1911 Fax. (078)992-1910
西神戸工場 (〒651-2239)	兵庫県神戸市西区榎谷町松本234番地	☎(078)991-1133 Fax. (078)991-3186
明石工場 (〒673-8666)	兵庫県明石市川崎町1番1号	☎(078)921-1301 Fax. (078)924-8654
加古川工場 (〒675-0112)	兵庫県加古川市平岡町山之上向原170番地	☎(079)427-0292 Fax. (079)427-0556
播磨工場 (〒675-0180)	兵庫県加古郡播磨町新島8番地	☎(079)435-2131 Fax. (079)435-2132
坂出工場 (〒762-8507)	香川県坂出市川崎町1番地	☎(0877)46-1111 Fax. (0877)46-7006

## 海外事務所

北京事務所	100004 中華人民共和国 北京市建国門外大街1号 国贸写字楼1座2602室	☎ 86-10-6505-1350 Fax. 86-10-6505-1351
台北事務所	台湾 台北市仁爱路二段99号 福記大樓15樓	☎ 886-2-2322-1752 Fax. 886-2-2322-5009
バンコク事務所	28th FL, Sathorn Square Office Tower, 98 North Sathorn Road Silom, Bangrak, Bangkok 10500	☎ 66-2-163-2839 Fax. 66-2-163-2841
モスクワ事務所	Office 1206 (12th floor), Entrance 3, Krasnopresnenskaya nab. 12, 123610, Moscow, Russian Federation	☎ 7-495-258-2115 Fax. 7-495-258-2116

## 現地法人事務所

Kawasaki Heavy Industries (U.S.A.), Inc.	60 East 42nd Street, Suite 2561 New York, NY 10165, U.S.A.	☎ 1-917-475-1195 Fax. 1-917-475-1392
Kawasaki Heavy Industries (U.S.A.), Inc. Houston Branch	333 Clay Street, Suite 4310, Houston, TX 77002-4109, U.S.A.	☎ 1-713-654-8981 Fax. 1-713-654-8187
Kawasaki do Brasil Indústria e Comércio Ltda.	Avenida Paulista, 542-6 Andar, Bela Vista, 01310-000, São Paulo, S.P., Brazil	☎ 55-11-3289-2388 Fax. 55-11-3289-2788
Kawasaki Heavy Industries (U.K.) Ltd.	4th Floor, 3 St. Helen's Place, London EC3A 6AB, U.K.	☎ 44-20-7588-5222 Fax. 44-20-7588-5333
川崎重工管理(上海)有限公司	中華人民共和国 上海市黄浦区南京西路288号 創興金融中心10樓	☎ 86-21-3366-3100 Fax. 86-21-3366-3108
Kawasaki Heavy Industries (Singapore) Pte. Ltd.	6 Battery Road, #23-01, Singapore 049909	☎ 65-6225-5133 Fax. 65-6224-9029
Kawasaki Heavy Industries Middle East FZE	Dubai Airport Free Zone, Bldg. 6W, Block-A, Office No. 709, P.O. Box 54878, Dubai, U.A.E.	☎ 971-4-214-6730 Fax. 971-4-214-6729

