

## 技術解説

## Technical Review

## 近年のプラントエンジニアリングにおける進歩と展望

松井宏司\*<sup>1</sup>, 前田 淳\*<sup>1</sup>, 後藤 拓\*<sup>1</sup>, 山本孝幸\*<sup>2</sup>

## Recent Progression and Foresight on Plant Engineering

Hiroshi Matsui, Jun Maeda, Hiromu Goto, and Takayuki Yamamoto

## Synopsis

“Recycling” and “Reduction” of “CO<sub>2</sub> Emissions” are highly common key words and very critical challenges in the world. The Engineering Division of Daido Steel Co., Ltd., dealing with a wide range of engineering fields, is concerning strongly in environmental problems. In this review, we report some of our engineering works and results, which involve the key words such as recycling and reduction of CO<sub>2</sub> emissions.

Firstly, we mention two progressions on a steel making field. One is the introduction of the Inmetco® dust recycling plant, which was the first commercial plant for stainless steel production. In this plant, iron, nickel and chromium are recycled at a very high rate. The other is the new arc furnace control system, where we are trying to control electric power, fuel burners and the direct dust collecting fan using an exhaust gas analyzer. This new control system is expected to save a lot of energy for scrap melting.

Secondly, we introduce you to our new vacuum carburizing furnace. As this furnace (ModulTherm® Furnace) has excellent acetylene control system, CO<sub>2</sub> emissions from the carburizing system are greatly reduced by combining a carburizing simulation system.

Thirdly, we refer to our new heat treatment furnace that uses only nitrogen gas. This furnace does not use CO and CO<sub>2</sub> gases and helps to reduce CO<sub>2</sub> emissions directly.

Lastly, we state our process to carbonize sludge from sewage plant. This low-temperature carbonizing process can make good biomass fuel from sludge. The fuel has a high calorific value and is able to replace part of coals in coal power stations.

## 1. はじめに

大同特殊鋼(株)機械事業部は、製鋼設備におけるプラント設計・製造をはじめとして、金属熱処理設備、真空処理設備、そして環境関連設備など、さまざまな分野でのエンジニアリングを展開している。これらの多様な分野においても近年、共通に特徴的な技術動向があらわれてきている。それは、省資源・資源循環・CO<sub>2</sub>削減をキーワードとする技術動向である。これらのキーワードは、もちろん、世の中の普遍的なトレンドを示す言葉としてよく使われているが、機械事業部においてもいろいろな局面で「積極的に」あるいは「結果として」、省資源・資源循環・CO<sub>2</sub>削減を目的としたプラントの設計・製作が増加の傾向にある。以下の章において、それらの実績

を述べるとともに今後への展望を概説する。まず、第2章においては製鋼関連技術の動向を紹介する。製鋼分野における近年の大きな動きとしてはガス処理が挙げられ、われわれの取組としても、回転床炉(RHF)を用いた製鋼ガスからの還元鉄製造設備や回転床炉とサブマージアーク炉(SAF)を組み合わせたステンレス製鋼工場における鉄、ニッケル、クロムの回収設備などの実績をあげてきた。また、製鋼工場におけるCO<sub>2</sub>削減への取組としては、アーク炉排ガスのリアルタイム計測を武器にした助燃バーナ、電力投入、直接集じん制御が注目を浴びている。この技術は今後大きく発展・普及すると予想される技術であり、本解説においては、その概要を紹介する。

第3章では、真空炉および熱処理炉における近年の成

2008年11月4日受付

\*1 大同特殊鋼(株)機械事業部 (Machinery Engineering Div., Daido Steel Co., Ltd.)

\*2 大同特殊鋼(株)機械事業部, 工博 (Dr., Eng., Machinery Engineering Div., Daido Steel Co., Ltd.)

果を概説する。真空炉では、真空浸炭炉(MTF)の開発が大きな話題として紹介される。このMTFはアセチレンを用いた真空浸炭を行うことができ、従来型的气体浸炭炉と比較して浸炭処理プロセスにおける大幅なCO<sub>2</sub>削減が達成されている。また、雰囲気熱処理の分野では低露点熱処理炉が挙げられる。この炉では従来の窒素ベースの雰囲気吸熱形ガスを加えて雰囲気制御していたのに代えて窒素のみを用いており、直接的なCO<sub>2</sub>削減にくわえて、前後工程における前処理の省略が期待され、プラント全体としての簡素化、すなわち省資源化が可能となる。

ついで、第4章では環境設備である炭化炉を紹介する。この炭化炉は、下水道処理場で発生する汚泥を炭化処理して「炭」を生産する設備である。この炭化炉で生産される炭は、土壌改良材(建設部材や肥料)としての有効利用が可能である。さらに、低温炭化炉では、石炭火力発電所の燃料として使用できる「炭」が生産可能であり、資源循環にくわえて大幅なCO<sub>2</sub>削減が実現される。

## 2. 製鋼関連技術

### 2.1 ダスト処理

当社は1996年に米国INMETCO社から直接還元プロセスを技術導入し、INMETCOシステム<sup>リ</sup>という名称で、ステンレス製造工場における廃棄物の省資源化、再利用をおこなうプロセスとしてプラントを提供している。

INMETCOシステムは原料を還元材と混合・造粒し、RHFと呼ばれるドーナツ型の加熱炉で直接還元するプロセスで、SAFによる溶融還元プロセスも付随してい

る。そのシステムフローをFig.1に示す。

処理される原料は還元材と共に混練・造粒され、直径10mm程度のペレットとなる。これをRHFに連続投入し、炉内にて直接還元を行う。RHFでは1周15~20分という非常に短時間でニッケルおよび鉄が予備還元される。また原料中に含まれる亜鉛も炉内で還元されて亜鉛蒸気となり、排ガス中で再酸化し濃縮されて捕集される。これは非鉄業界へ亜鉛原料として供給される。RHFにて予備還元されたペレットは高温のまま、次工程のSAFに投入され、最終的にはメタルとスラグに分離された溶融状態で出鋼、出滓される。SAFでの溶融においては、亜鉛が事前に除去されているため、溶解炉の直接溶融還元で問題となる炉内の異常崩落や突沸などを起こしにくく、SAF操業が安定するという特長がある。溶製されたスラグは高温で処理されているため非常に安定で、路盤材などに再利用可能である。また本プロセスは、原料となる廃棄物の性状変化に対して非常にフレキシブルに対応が可能で、かつ性状変動に対する許容度が高いという利点がある。

Table 1は当社が納入したINMETCO法による商業プラントの稼働実績を示しており、年間5万トン以上の廃棄物を処理し、1100トンのニッケル、1800トンのクロムなどを回収し製鋼工場で再利用されている。このプラントにおける出鋼の様子をFig.2に示す。

Table 1. Operation records of Inmetco process system.

Treatment volume of waste	50000 t / year
Recovery rate of Fe	95 %
Recovery rate of Ni	95 %
Recovery rate of Cr	86 %
Recovery rate of Zn	90 %

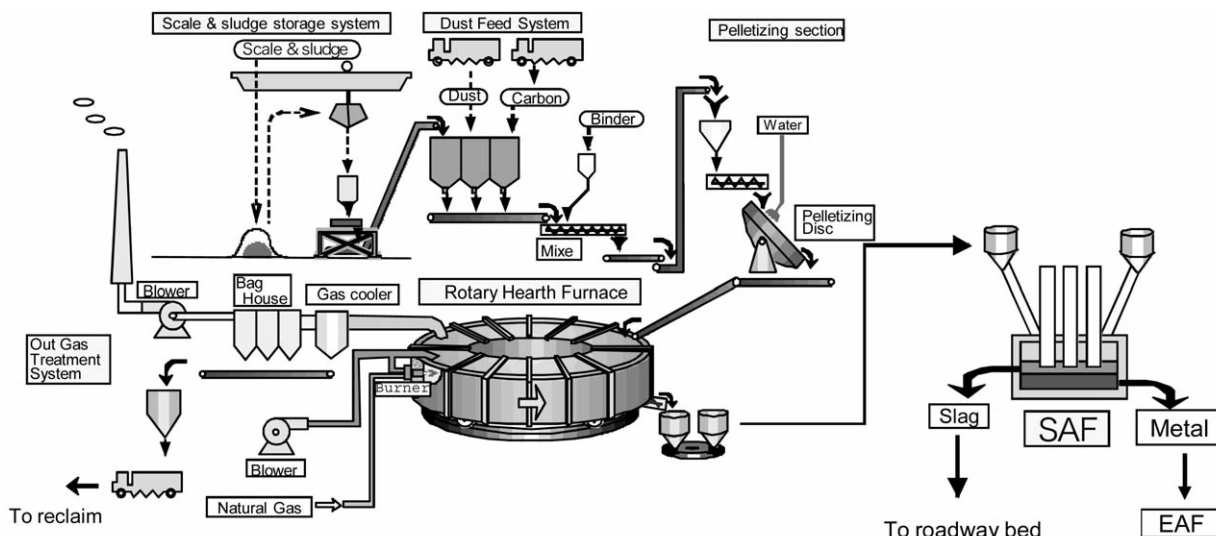


Fig.1. Inmetco process system flow diagram.



Fig.2. Metal tapping at SAF of Inmetco process.

## 2. 2 アーク炉制御

これまでもアーク炉排ガスを集塵ダクトから導き（サンプリング）、分析を行うことが試みられてきた。これは、排ガスが炉内状況そのものを示しており、排ガスの成分や温度を把握することで、電力投入や補助熱源投入を最適化できるという目論見によるものである。しかし、アーク炉排ガス中のダスト濃度は  $50 \text{ g/m}^3$  (Normal) と非常に高くサンプリング系の閉塞が避けられず、分析装置の安定的な稼動が困難であった。またサンプリングのために要する時間や排ガス分析計自体の測定遅れ時間が長いという欠点もあった。

しかし近年、集塵ダクトに半導体赤外レーザを装置し、サンプリングなしに直接排ガス分析を行う技術が実用化されたことで、状況は変わりつつある。レーザによる方式は高いダスト濃度にも耐えられる、分析遅れ時間が非常に短い（3秒前後）などのメリットがあり、アーク炉排ガスのリアルタイム計測が安定して可能になった。海外では、すでにその分析結果を利用したアーク炉の制御も行われつつあり<sup>2),3)</sup>、国内のユーザにおいてもその信頼性および有効性が確認された時点で急速に普及が進むと考えられる。

当社においても、レーザ式排ガス計測を用いた従来技術を超えるアーク炉制御の開発にとりくんでいる。当社の方式（ARMS-IV）ではアーク炉排ガス中の各種ガスの濃度をリアルタイムに計測し、炉内の状況や排ガス温度、炉内圧力なども考慮した上で、直接集塵装置、電極昇降装置、バーナあるいはカーボン吹き込み装置の制御を行うことを特長としている。制御システム概念図を Fig.3 に示す。この制御方式では、アーク炉の突発的な反応に十分追従できる応答性を持たせることが可能で、

(1) 直接集塵風量の最小化、(2) 過剰空気または過剰酸素の抑制、(3) 未燃ガスの炉内での燃焼、(4) アーク炉と補助熱源のバランスの最適化、(5) 排ガス系での CO 爆発の防止などのメリットをもたらすものと考えている。

## 3. 真空炉および熱処理炉技術

### 3. 1 真空浸炭炉

当社は 2005 年よりモジュール式真空浸炭炉（MTF；ModulTherm<sup>®</sup> Furnace）を販売している。モジュール式とは、Fig.4 に示すように、一連の熱処理工程が、複数のモジュール（処理室）をまたがって行われるコンセプトをさしている。

歯車など動力伝達系部品の表面硬化方法として広く行われているガス浸炭法に対して、真空浸炭法はまだ普及の緒に就いた段階であるが、その優位性は Table 2 に示すように大別される。MTF はこの優位性を最大限引き出すことを目標に開発された。

中でも CO<sub>2</sub> 原単位低減においては、以下の項目に配慮して設計した結果、ガス浸炭対比、おおむね 5～50% の CO<sub>2</sub> 原単位低減に成功した。

- (1) アセチレンを適時適量供給する浸炭制御方法
- (2) 各モジュールの炉温変動を最小限に抑える等温度操業
- (3) 高断熱構造による浸炭モジュールの放熱損失低減
- (4) 対流加熱機能による昇温時間短縮
- (5) 生産量変動時の部分（間引き）操業

上記 (1) は、当社が解明した真空浸炭機構<sup>4)</sup>に基づくシミュレーションソフト<sup>5)</sup>と組み合わせることで、処理品の品質と余剰ガス、すなわち煤・タールの発生量の最小化を両立させ、結果として設備のメンテナンス性、耐久性を向上させることにも成功し、MTF の優位性を決定付ける特長となっている。

### 3. 2 低露点炉における熱処理技術

多くの雰囲気ガス炉では被熱物の加熱用としてバーナを用い、また被熱物の酸化・脱炭保護のため雰囲気ガスとして CO、CO<sub>2</sub> を含んだ変成ガスを使用している。それぞれの燃料として天然ガス、プロパンガスなどの化石燃料を消費し、その排気ガスとして CO<sub>2</sub> を排出している。

さらなる省エネルギー・低 CO<sub>2</sub> 排出の設備を提供すべく従来までの変成ガスを使用した雰囲気ガス炉（CO-CO<sub>2</sub> 制御）では無く、環境に優しい窒素ガスのみの雰囲気（NOA;N<sub>2</sub> Only Atmosphere）による熱処理に注目し

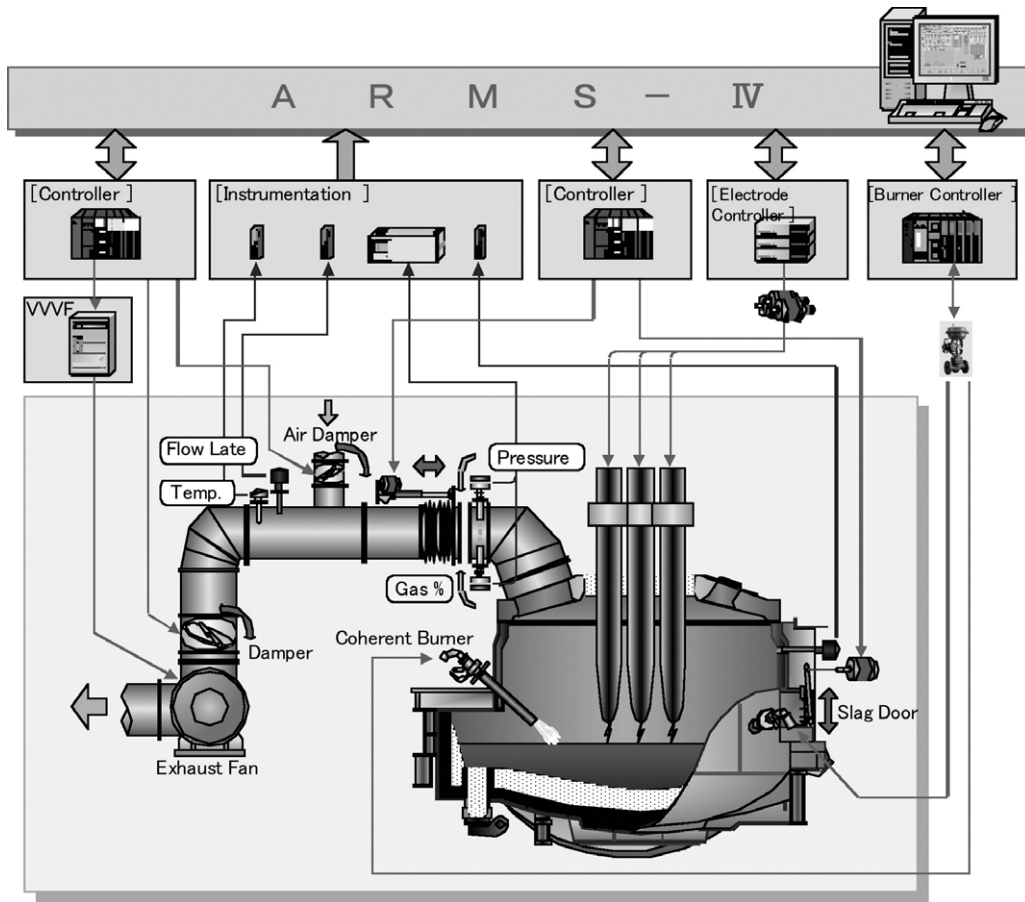


Fig.3. Control system with laser gas analyzer for arc furnace.

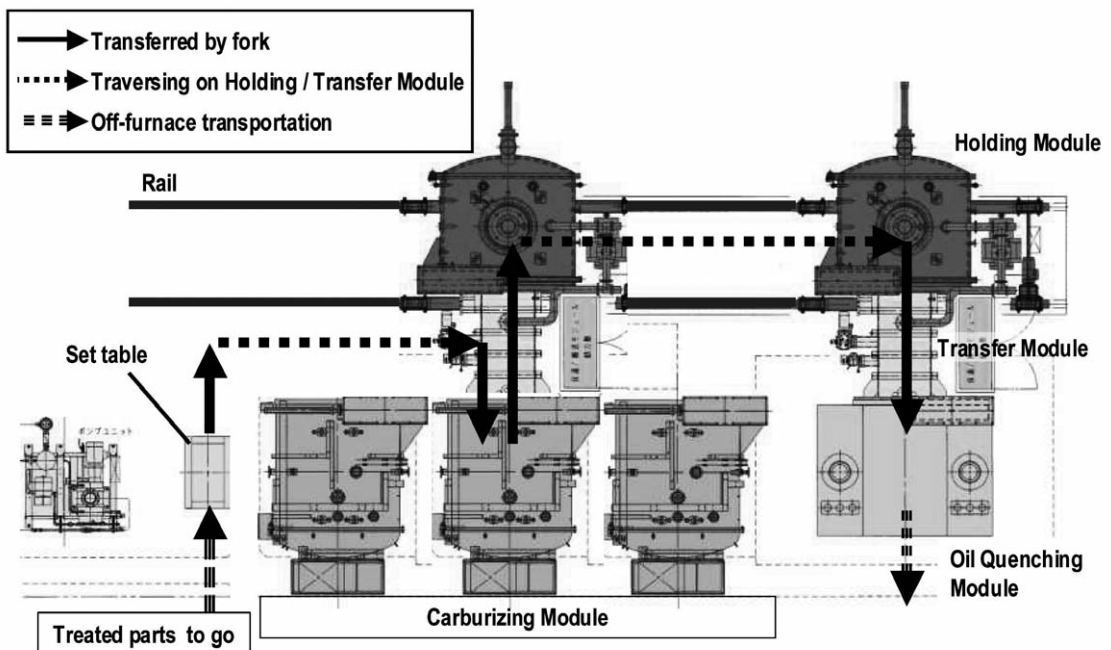


Fig.4. ModulTherm Furnace.



Table 2. Effects and advantage in vacuum carburizing process.

1. Less environmental damage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub> emission reduction</li> <li>• Low heat radiation to ambient air to keep workshop comfortable</li> </ul>
2. Innovation in production system	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In-line layout and synchronous production with machining and assembly line</li> <li>• Quick start up and shut down to solve irregular job shift</li> <li>• Smaller lot production to keep quality trace ability</li> <li>• Computer control free from matured technician</li> </ul>
3. Material and process development	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surface oxidation free</li> <li>• Steel contents design to add elements to create oxide</li> <li>• Carbide dispersion process and material to strengthen tooth face wear resistance</li> </ul>

た。今までも幾多の炉メーカーが NOA 炉にチャレンジしているが、変成ガスを使用した従来炉で実施しているため、結果的に材料の酸化・脱炭を起こし実用化は困難とされてきた。

われわれはこの困難を解決するため基本的な炉構成・炉構造のレベルまで設計を見直し、こうした酸化・脱炭を起こさない極低露点・低酸素濃度の炉を開発した。以下に NOA 炉の主な特長<sup>6)</sup>について紹介する。

### 3. 2. 1 特 長

#### 1) 品質の安定

従来、変成ガスを使用した雰囲気ガス中での熱処理は、炉内の CO および CO<sub>2</sub> 濃度をカーボンポテンシャル（平衡炭素濃度）によって制御する方法を行ってきた。ところが、鋼材の炭素濃度は、CO と CO<sub>2</sub> の比、および温度の関数として推移し、さらに処理材温度には表面と中心部との差異が必ず存在するため、炭素濃度のバラツキが避けられなかった。

NOA 炉の場合、不活性ガスを使用するので鋼中の炭素と平衡状態を保つ必要がある CO と CO<sub>2</sub> の雰囲気ガスがなく、炭素濃度のバラツキの問題は解消される。

#### 2) 熱処理時間の短縮・鋼材表面性状の影響が無い

従来の CO-CO<sub>2</sub> 雰囲気は還元性雰囲気であり、鋼材表面の酸化スケールは熱処理中に還元され CO<sub>2</sub> を発生する。従って酸化スケールの多い製品処理の場合、炉内の CO<sub>2</sub> を増加させるので所定のカーボンポテンシャル値になるまで待つ必要があった。

一方 NOA 炉の場合、表面の酸化スケールは熱処理中に性状は変化せず、CO<sub>2</sub> を発生させないため、処理する鋼材の表面性状に制約はない。

なお、Fig.5 に示すように、NOA 炉では、炉内を極低露点・低酸素濃度の不活性ガスで満たすため、加熱室入側に真空パーズ室を設置する必要がある。

#### 3) 酸洗負荷の低減

鋼材表面性状に制約がないため、前酸洗処理は必ずしも必要とは限らない。

#### 4) 雰囲気ガス費用の削減

変成ガスを使用した雰囲気ガスが不要になり、CO<sub>2</sub> 排出量低減ができる。同時にガス発生装置自体不要となるのでイニシャルコストの低減が図れる。

#### 5) 鋼種による雰囲気の変更不要

鋼種によるカーボンポテンシャルを制御する必要がないため、同一雰囲気条件で異なる鋼種の熱処理が可能となり、炉の稼働率が向上する。

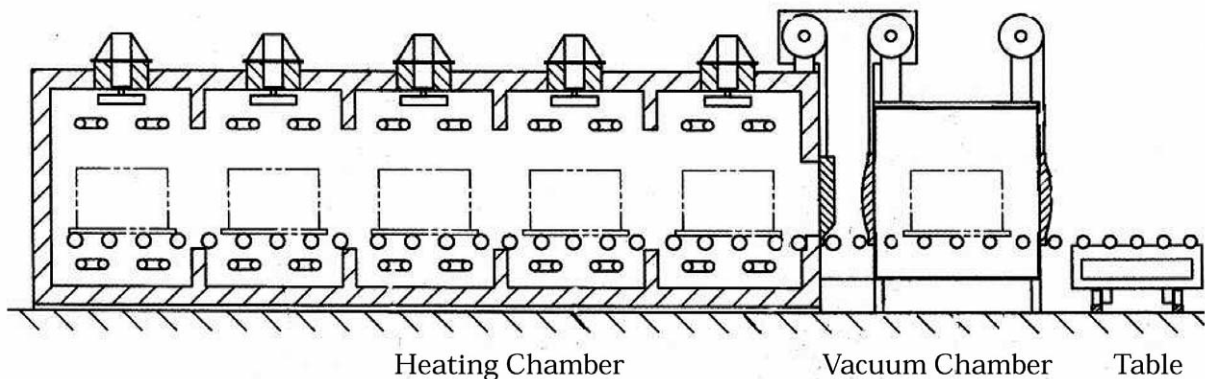


Fig.5. NOA Furnace.

## 4. 環境設備技術

下水道の普及に伴って下水汚泥の発生は増加の一途をたどっており、年間2百万tにもおよんでいる。膨大な量の下水汚泥のほとんどは焼却または直接埋め立て処分されており、一部が建設資材や緑農地還元などとしてマテリアルリサイクルされてきた。近年、温室効果ガス削減の必要性とあいまって、バイオマスとしての性質が注目されつつあり、当社においても当初、土壌改良利用を想定した炭化システムの開発・実機化（高温炭化）を推進してきたが、汚泥の燃料化を目的とする低温炭化システムをラインナップに追加した。

下水処理プロセスにおいて発生した下水汚泥は、通常含水率80～85 mass%程度の脱水ケーキとして炭化設備に供給される。脱水ケーキは乾燥機により40 mass%程度の水分に調整された炭化炉で高温処理されて有効利用が可能な炭化製品として回収される。土壌還元利用を目的とする高温炭化では炭化処理温度が700～800℃であるのに比べ、燃料炭化（低温炭化）では400℃程度で処理を行うため炭化製品の保有熱量が高く、石炭にはおよばないが、燃料としての価値を十分に保有している。Table 3に高温炭化と低温炭化の主な仕様を石炭の発熱量と合わせて示す。

実証設備（処理能力：3 t/日）を用いた試験炭化処理にて生産した炭化製品の外観を Fig.6 に示す。大きさが数 mm 程度の粒状で臭気はない。

Table 4 に処理に要する用役量と温室効果ガス（CO<sub>2</sub>）換算値を100 t/日の規模で各処理方式別に試算した例を示す。従来から広く行われてきた焼却処理に比べて低温炭化処理では、温室効果ガス排出量を1/3～1/2程度に抑えることが可能である。

また処理によって生成した炭化物を燃料として利用するとその分の化石燃焼の使用量を節約できることになる。汚泥自体はバイオマスとしての扱いであり、汚泥由来の炭化物が燃焼して発生するCO<sub>2</sub>は温室ガス排出量としてカウントされないので、この面からも大きな温室効果ガス排出削減が実現できることになる。

## 5. まとめ

地球温暖化の防止、CO<sub>2</sub>削減、資源循環、このような言葉やフレーズはかなり以前から、いろいろな場面で唱えられてきた。しかも、ますます重要度を持って、真剣に語られるようになってきた。その中で、われわれのプラントエンジニアリング業務においても、あらゆる分野で資源循環やCO<sub>2</sub>削減をキーワードとした技術開発や商品開発が行われてきた。今回は、INMETCO法による資源循環システム、真空浸炭プロセスでのCO<sub>2</sub>発生抑制、さらには炭化炉による下水汚泥の燃料化など、直接、資源循環やCO<sub>2</sub>削減が、目標や効果になっている。

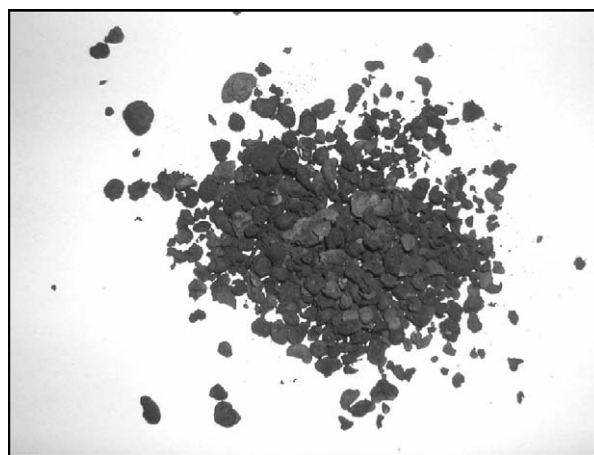


Fig.6. Appearance of product of carbonization (low-temp.).

Table 3. Specifications of high-temperature carbonization and low-temperature carbonization.

	Temperature of treatment (°C)	Time of treatment (min)	Net calorific value (MJ/kg)	Principal uses
High-temperature carbonization	700 ~ 800	15	12.5	Soil conditioner or fertilizer
Low-temperature carbonization	400	15	17.6	Substitute fuel use for coal
Coal (for reference)	—	—	27.9	Fuel

Table 4. Comparison of GHG(Greenhouse Gas) Emission between incineration, high-temperature carbonization and low-temperature carbonization. GHG emission is equivalent value converted CO<sub>2</sub> gas. Unit is kg.

Utilities per sludge ton	Unit	Incineration		High-temperature carbonization		Low-temperature carbonization	
		Consumption	(GHG)	Consumption	(GHG)	Consumption	(GHG)
Electricity	kWh/t	—	(76)	45.6	(17.5)	49.1	(18.9)
Fuel (heavy oil)	L/t			57.3	(155.3)	35.0	(94.85)
Fuel (LPG)	kg/t			0.5	(1)	0.5	(1)
Formation of N <sub>2</sub> O	kg/t	0.903	(280)	0.146	(45.3)	0.012	(3.72)
GHG Emission	kg-CO <sub>2</sub> /t		(356)		(219.1)		(118.5)

プラントや設備について論じてきた。

しかしながら、資源循環やCO<sub>2</sub>削減はこれらのプラントや設備のみ問題ではなく、他の設備においても燃料転換、省エネルギー化など地道な改良のなかで、資源循環やCO<sub>2</sub>削減への取組が求められている。さらには、工場における設備の製作やサイトへの運搬、そして現地での組立て・試運転においてさえも資源循環やCO<sub>2</sub>削減を意識した工程の改善や改良が求められており、われわれも取組を強化している。

今後もさらに、プラントエンジニアリングを通じ、いままで以上に資源循環、CO<sub>2</sub>削減を推進するための設備を社会に提供し、社会に貢献しようと考えているしだいである。

(文献)

- 1) R. Bleakney, R. H. Hanewald, and G. C. Cingle III: Carbon steel waste recycling experience using the INMETCO process, Steelmaking Conference proceedings, 1998, 405.
- 2) P. Clerici, F. Dell'Acqua, J. Maiolo, S. Vittorio: Steel Times International, May/June (2008), 19.
- 3) B. Kleimt, S. Kohle, R. Kuhn, S. Zisser: European Electric Steelmaking Conference, 8<sup>th</sup> (2005), 183.
- 4) 森田敏之, 羽生田智紀: 電気製鋼, 77 (2006), 5.

5) 電気製鋼, 79 (2008), 91.

6) 石本崇: 鋳鍛造と熱処理, 1987, 7.