

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol. 32(2000) No.4

川鉄サーモセレクト方式による廃棄物ガス化溶融プロセス

Kawasaki Steel Thermoselect Waste Gasification and Melting Process

三好 史洋(Fumihiko Miyoshi) 清水 益人(Masuto Shimizu) 丸島 弘也(Hironari Marushima)

要旨：

サーモセレクト方式は、ガス化溶融技術によって環境への影響を低減し、廃棄物の再資源化を目的とした新規な廃棄物処理プロセスであり、スイス・サーモセレクト社によって開発された。川崎製鉄は 1997 年にこの技術を導入して、千葉製鉄所内に 300 t/d (150 t/d 3 2 系列) 規模のプラントを建設した。この千葉プラントは 1999 年 9 月に稼働し、一般廃棄物の実証運転 (15 000 t) を終えた。2000 年 4 月からは産業廃棄物処理事業を開始している。

Synopsis：

The Thermoselect process, a completely new solid waste treatment process which achieves pollution-free recycling of municipal wastes by gasification melting technology, was developed by the Swiss company Thermoselect S. A. Kawasaki Steel introduced this world's leading technology in 1997, and built a 300 t/d (150 t/d 3 2 lines) plant in Chiba Works, Kawasaki Steel. The Chiba Plant was put into operation in September 1999 and has completed demonstration run and treated 15 000 t of municipal solid wastes. By using the plant, an industrial waste disposal business started in April 2000.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

川鉄サーモセレクト方式による 廃棄物ガス化溶融プロセス*

川崎製鉄技報
32 (2000) 4, 287-291

Kawasaki Steel Thermoselect Waste Gasification and Melting Process



三好 史洋

Fumihiko Miyoshi
環境事業部 ガス化溶
融技術部 主査(課長)



清水 益人

Masuto Shimizu
環境事業部 ガス化溶
融技術部 主査(部長
補)



丸島 弘也

Hironari Marushima
ジャパン・リサイクル
(株) 取締役社長

要旨

サーモセレクト方式は、ガス化溶融技術によって環境への影響を低減し、廃棄物の再資源化を目的とした新規な廃棄物処理プロセスであり、スイス・サーモセレクト社によって開発された。川崎製鉄は1997年にこの技術を導入して、千葉製鉄所内に300t/d(150t/d×2系列)規模のプラントを建設した。この千葉プラントは1999年9月に稼働し、一般廃棄物の実証運転(15000t)を終えた。2000年4月からは産業廃棄物処理事業を開始している。

Synopsis:

The Thermoselect process, a completely new solid waste treatment process which achieves pollution-free recycling of municipal wastes by gasification melting technology, was developed by the Swiss company Thermoselect S. A. Kawasaki Steel introduced this world's leading technology in 1997, and built a 300 t/d (150 t/d × 2 lines) plant in Chiba Works, Kawasaki Steel. The Chiba Plant was put into operation in September 1999 and has completed demonstration run and treated 15 000 t of municipal solid wastes. By using the plant, an industrial waste disposal business started in April 2000.

1 はじめに

サーモセレクト方式は、廃棄物処理にともなう環境への影響を極限まで低減し、リサイクルが困難とされてきた廃棄物をも再資源化できるシステムを構築することを目的として開発されたものである¹⁾。サーモセレクト社は1989年に開発を着手し、北イタリアのベルバーニャ州フォンドトーチェ行政地区において1992年に約100t/d・炉規模を有する実証プラントを建設し、公開運転を実施した。ドイツではカールスルーエプラント(240t/d・炉×3系列)が1999年3月から稼働している。

川崎製鉄は1997年11月に本技術に関しサーモセレクト社と技術供与契約を締結し、国内の実証設備兼産業廃棄物実用施設として、川崎製鉄千葉製鉄所構内に150t/d・炉×2系列の施設を建設した。1999年3月3日に定められた厚生省省令「廃棄物の処理および清掃に関する法律施行規則の一部を改正する省令(厚生14)²⁾」によると、本方式はその対象となるガス化改質方式の焼却施設に該当する。

この千葉プラントを使用して、1999年9月～2000年3月に、川崎製鉄は千葉県・千葉市との共同研究として千葉市殿の一般廃棄物(可燃ごみ処理、破碎残渣物混合処理、焼却灰混合処理)の試験を行い、実規模で安定した処理が可能であることを実証した。この期間に、90日以上連続運転および延べ130日以上運転を終了

している。この可燃ごみ処理の実証運転結果に基づき(社)全国都市清掃会議より「技術検証・確認概要書」を取得している。

2000年度からは産業廃棄物を受託処理し、廃棄物から燃料ガスを製造し、製鉄所に供給している。

本報では、「川鉄サーモセレクト方式」³⁻⁵⁾の特徴と概要を述べる。

2 川鉄サーモセレクト方式のプロセスの特徴と概要

2.1 プロセスの特徴

「川鉄サーモセレクト方式」のプロセスフローをFig. 1に示すが、本方式の特徴を要約すると次のとおりである。

(1) ダイオキシンの発生抑制

従来の焼却方式では、廃棄物を燃焼し、熱回収後に排ガスに含まれるダイオキシン類を除去するのに対し、川鉄サーモセレクト方式では、廃棄物を熱分解し、高温溶融させ、有機物を十分に分解させると同時に、発生したガスを約1200℃の高温で2s以上保持し改質した後に、70℃まで急冷することで、ダイオキシン類の発生そのものを抑制してガスを燃料として回収する。その際に難処理廃棄物である飛灰も発生させず、金属水酸化物などの有用な副産物として回収することができる。回収された燃料ガス中のダイオキシン類濃度の値を極限まで低下でき、これを使用したガス発電後の排ガス濃度で、厚生省が定めた新ガイドライン 0.1ng-TEQ/m³Nを大きく下回り、基準値の

*平成12年6月28日原稿受付

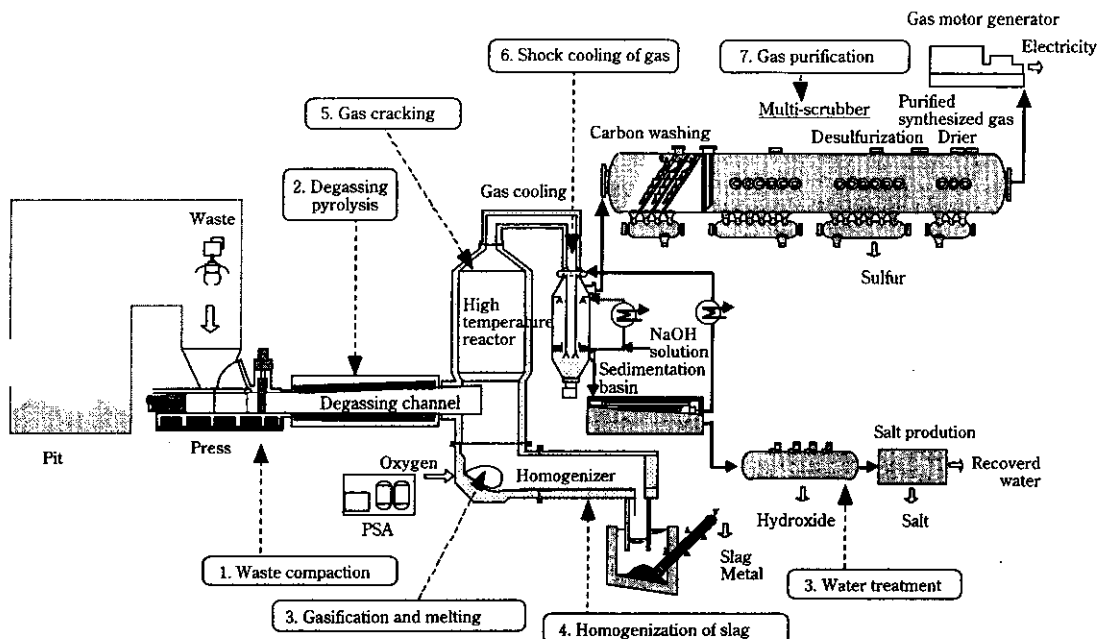


Fig. 1 Kawasaki Steel Thermoselect process

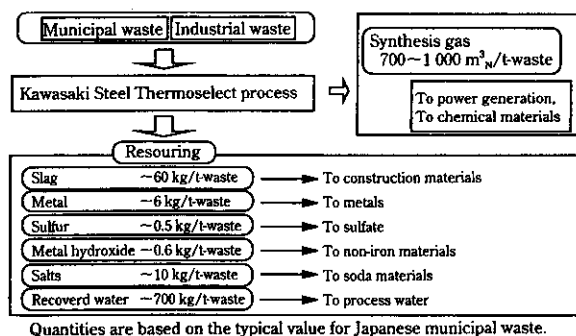


Fig. 2 Resourcing of by-products

1/100 以下となる⁶⁾。

(2) 廃棄物の完全な再資源化

本方式によって、廃棄物は、精製合成ガス、スラグ、メタル、金属水酸化物、いおう、混合塩、再利用水に変換され、ほぼ完全に再資源化される (Fig. 2)。スラグは、道路の路盤材などの建設資材として、メタルや金属水酸化物は、非鉄金属製錬の原料として、いおうや混合塩は化学原料として使用できる。また、再利用水はプロセスの冷却水として場内で使用される。

(3) ガス改質によるクリーンなガスの回収

本方式では、廃棄物をガス化し高温で改質することにより、廃棄物のエネルギーを天然ガスに匹敵する清浄度の高い可燃性ガスに変換し回収する (ガス化改質²⁾)。この合成ガスは H_2 と CO が主成分であり、高効率ガス発電や工業用の燃料として利用できるだけでなく、メタノール、酢酸、アンモニア合成などの化学原料として用いることもできる。

この合成ガスを燃料として利用した場合には、燃焼排ガス中に HCl 、 SO_x などの有害物質はほとんど生成せず、 NO_x の発生も抑制できる。そのため大型煙突は不要となる。合成ガスを発電用燃料として使用する場合、「ガスエンジンによる発電」、「燃料電池による発電」などの中から、設備規模や立地条件に適合した発電方式が選択できる。特に燃料電池を採用した場合

には環境への影響は極限まで低減できる。

(4) 省スペースとコストミニマム化

脱ガスチャンネルと高温反応炉が一体化していること、大型の煙突が不要なことなどの特徴の他に、ガス化に高濃度の酸素を使用し、燃焼利用する前にガス精製処理するために、ガス量が通常の焼却炉の排ガス処理量の約 1/6 以下になる。このことから、プラントはコンパクトになり、建設スペースを従来の焼却 + 灰溶融方式の約 70% にまで減らせる。さらに、ランニングコスト面でも、廃棄物の持つエネルギーで溶融処理を行うため、従来の焼却 + 灰溶融方式に比べて削減できる。

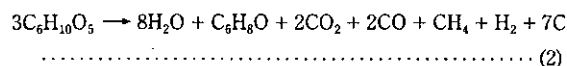
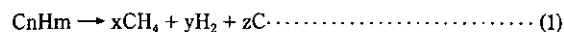
2.2 プロセスの概要

本プロセスは次の4ステップから構成されている。

- (1) プレス・脱ガスチャンネル (a)ごみの圧縮, (b)乾燥・熱分解)
- (2) 高温反応炉・均質化炉 ((c)ガス化溶融, (d)スラグ均質化, (e)ガス改質)
- (3) ガス精製 ((f)ガス急冷 (急冷・酸洗浄・アルカリ洗浄), (g)ガス精製 (除塵・脱硫・除湿))
- (4) 水処理 ((h)水処理・塩製造装置)

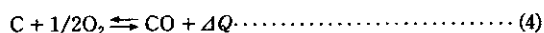
(1) プレス・脱ガスチャンネル

- (a) まず廃棄物をプレスで最初の容積の約 1/5 に圧縮する。これにより廃棄物中の水分の分布は均一化され、空気は排除されて脱ガス効率が向上する。
- (b) 次に圧縮された廃棄物は間接式加熱炉である脱ガスチャンネルで脱ガス (水分の蒸発、熱分解による揮発分の発生) され、続いて高温反応炉からの放射熱などによりさらに熱分解される。廃棄物中に含まれる炭化水素、セルロースの熱分解反応として次のような反応例があり、これらの反応により熱分解カーボンが得られる。



(2) 高温反応炉・均質化炉

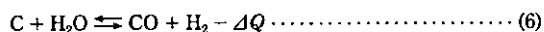
(c) 脱ガスチャンネルで発生したガスは高温反応炉に流入し、熱分解物は新たな圧縮廃棄物の装入により押し出されて高温反応炉下部に堆積する。高温反応炉下部に酸素を吹き込み、熱分解物中の炭素と酸素の反応により下部の温度は中心部で最高約 2000°C になり、廃棄物中の金属や無機質の成分は溶融する。



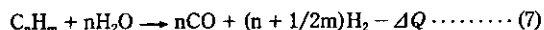
高温反応炉下部に残存する炭素成分と O_2 が発熱反応し CO_2 になる。発生した CO_2 は C を含有する熱分解物中を貫通すると CO に還元される。



過剰の高温水蒸気分子が存在する場合は水性ガス化反応が生ずる。この場合、炭素と水蒸気が CO と H_2 に転換する。



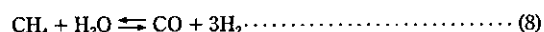
有機化合物は CO と H_2 などに熱分解される。



(d) 溶融物は高温反応炉から約 1600°C に保持された均質化炉へ流れ、微量の炭素などはガス化される。均質化炉において金属溶融物（メタル）は密度が大きいため、無機質溶融物（スラグ）の下部に溜まる。連続的に溢流堰を通り水砕システムへ流れ落ちて冷却固化される。回収混合物は磁選によりスラグ、メタルに分離される。

(e) 高温反応炉下部で発生したガスと脱ガスチャンネルで発生した熱分解ガスは合流し、高温反応炉上部の改質部において約 1200°C で 2s 以上滞留する。

この条件で、ガス中のタール分やダイオキシン類およびその前駆体は完全に分解され、 H_2 、 CO 、 CO_2 、 H_2O を主成分とする粗合成ガスに改質される。約 1200°C の温度では (8) 式の平衡が右辺に移動し、メタンガスの量は極微量となる。

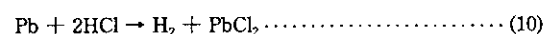
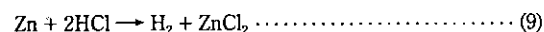


(3) ガス精製

(f) 高温反応炉で改質された粗合成ガスを、急冷装置で約 1200°C から約 70°C まで急水冷し、*de novo* 合成によるダイオキシン類の再合成を阻止した後に、酸洗浄することにより重金属を除去し、アルカリ洗浄では酸性ガスを除去する。

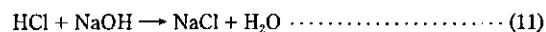
沸点の低い Zn 、 Pb などの重金属成分は主として高温反応炉からガス状の状態で移送される。また、廃棄物に含まれる塩素は、主として HCl として合成ガス中に存在し、 HCl は冷却・洗浄液に溶け込む。 HCl を含む酸性水 ($pH2\sim3$) によって、粗合成ガスは洗浄され、重金属成分が取り除かれる。このシステムでは廃棄物中の塩素分を有効に利用している。

洗浄液は沈降槽に送られ炭素微粒子は取り除かれる。熱交換器で間接冷却後、再びガスの急冷に循環使用される。ごみ由来の水は沈降槽で余剰水となり、水処理プロセスへ送られて処理される。酸洗浄システムでの反応例を次に示す。



この酸洗浄によってこのプロセスでは飛灰が発生しない。

酸洗浄された合成ガスは、アルカリ洗浄され、塩化水素ガスなどの酸性ガスが中和除去される。



生成された $NaCl$ は最終的には、塩製造装置で混合塩として回収される。

(g) さらに、ガスは除塵、脱硫洗浄、乾燥され、有害物質が除去されたクリーンな燃料ガス（精製合成ガス）が得られる。

(4) 水処理・塩製造装置

(h) ガス改質工程までに生成した H_2O がガス急冷・精製工程で凝縮し、従来の焼却方式では飛灰となって排ガス中に含まれていた重金属や塩類はすべて洗浄水中に移行する。そのため、飛灰は発生せず、 Fe 、 Zn 、 Pb 、 Na 、 K などの金属を含む水が発生するが、水処理装置により、金属は水酸化物や混合塩などの有用物として回収される。千葉プラントでは臨海部にあるため塩製造装置は設置していないが、イオン交換処理下水道に放流できる水質にしている。標準的な設備（フオントトチェ、カールスルーエ）では塩製造装置によりプロセス冷却水としての再利用が可能な水質の水と混合塩が得られ、クロード化されている。

2.3 ダイオキシン類発生抑制のメカニズム

従来型の焼却・灰溶融の設備でも、燃焼部分の改良、3つのTの改良（燃焼温度：temperature、被燃焼物質の滞留時間：time、空気と被燃焼物質の混合状態：turbulence）などにより、焼却炉の出口でのダイオキシン類濃度の低減が図られてきている⁹⁾。

しかしながら、従来のシステムでは蒸気ボイラで熱を回収し、急冷できないなどのために、ダイオキシン類が再合成するという問題は不可避である。再合成されたダイオキシン類はさらなる発生を抑えるために、低温のバグフィルターで除去し、排ガスを再加熱して触媒で分解し、ダイオキシン類を低減した後に大気へ放散している。バグフィルターで捕捉された飛灰は蒸気ボイラで再合成されたダイオキシン類を多量に含んでいる。この飛灰は溶融処理などによって分解する必要があるが、灰溶融設備でも溶融飛灰が発生し、この中にダイオキシン類が含まれている。

一般にダイオキシンの再合成は下記の項目などによって影響されると言われている。

- (1) ダイオキシン前駆体の存在（例、ベンゼンなどの芳香族化合物）
- (2) *de novo* 合成温度（例、200~500°C）での滞留時間
- (3) *de novo* 合成触媒（ Cu 化合物）の存在
- (4) 酸素ガスの存在
- (5) 塩素を含むガスの存在

サーモセレクト方式では、(1)~(4)の再合成条件を回避している。すなわち、

- (1) 高温反応炉でダイオキシン前駆体がほとんど分解されている。
 - (2) 急冷されることにより *de novo* 合成温度での滞留時間（0.1s 以下）が短い。
 - (3) *de novo* 合成触媒となる Cu 化合物などは高温反応炉で還元雰囲気中で溶融し、系外へ排出されており、冷却過程ではほとんど含まれない。
 - (4) 粗合成ガスには酸素が含まれない。
- により、ダイオキシンの再合成が阻止される。

Table 1 Characteristics of combustible waste

		Minimum	Maximum	Average
3 components	Moisture content (%)	37.8	55.5	47.7
	Ash content (%)	4.2	9.2	6.7
	Volatile solid content (%)	38.4	57.2	45.6
Measured lower heat value (kJ/kg)		6 400	12 500	8 500

Table 2 Characteristics of synthesis gas (at Chiba Plant)

Component	Concentration
CO (%)	32.5
H ₂ (%)	30.7
CO ₂ (%)	33.8
N ₂ (%)	2.3
Dioxins (ng-TEQ/m ³)	0.000 39
Dioxins (O ₂ :12%) (ng-TEQ/m ³)	0.000 09

Table 3 Leaching test of slag (at Chiba Plant)

Items	Slag (ℓ)	Soil standard (mg/ℓ)
Total-Hg	<0.000 5	≦0.000 5
Cd	<0.01	≦0.01
Pb	<0.01	≦0.01
Cr ⁶⁺	<0.05	≦0.05
As	<0.01	≦0.01
Se	<0.01	≦0.01

3 千葉プラントでの実証試験結果

3.1 処理実績

1999年9月9日～2000年3月7日まで、千葉製鉄所内に建設した処理能力 150 t/d・炉×2 系列のプラントで千葉市の一般廃棄物約 15 000 t をガス化溶融処理した。この期間の中で 1 炉に関して、30 d の定格連続運転および延べ 130 d 以上の運転を終了した。90 d 以上の連続運転も行っており、実用規模で安定的に運転できることが実証された⁹⁾。Table 1 に一般廃棄物（可燃ごみ）の組成を示す。

回収された燃料ガス（精製合成ガス）の分析結果例を Table 2 に示す。H₂、CO を主体とする燃料ガスは、施設のある製鉄所内の製鉄所副生ガス配管に導かれ、最終的に製鉄所内の発電設備などで工業用燃料として利用された。燃料ガス中ダイオキシン類濃度は、0.000 39 ng-TEQ/m³_N (0.000 09 ng-TEQ/m³_N, O₂:12% 換算値¹⁰⁾) であり、厚生省基準 0.1 ng-TEQ/m³_N (O₂:12% 換算値¹⁰⁾) の 1/1000 未満であった。

3.2 回収物性状の実例

Table 3 に示すように、スラグは厚生省の定める「一般廃棄物の溶融固化物の再生利用に関する指針」の溶出基準¹¹⁾を満足している。スラグについては、一次製品としてアスファルトコンクリートの骨材、路盤材料などに利用し、また、二次製品として側溝の骨材、断熱材、壁材として活用しており、現在経年変化の追跡調査中である。

金属の主成分は鉄であり、高濃度の銅を含有している。銅の含有量によっては非鉄金属製錬の原料とすることができる。千葉市の可燃ごみの実証運転においては、金属に銅が平均 17.5% 含まれていることから、回収した金属を銅製錬の原料として活用した。

金属水酸化物は乾ベースで 30～40% 以上の亜鉛（平均 39.6%）を含有しており、非鉄金属製錬の原料としての有効利用が可能である。また、いおう分中に S（いおう）が平均 67.8% 含まれていることから、回収したいおう分を硫酸の原料として活用した。

Table 4 に、千葉プラントにおける回収物のダイオキシン類濃度と、その総排出量を示す。処理水のダイオキシン濃度は 0.01 pg-TEQ/ℓ であり、ダイオキシン類水質環境基準の 1 pg-TEQ/ℓ より低い。精製ガスのダイオキシン濃度も大気環境基準の 0.6 pg-TEQ/m³ より低い。また、スラグ、硫黄、金属水酸化物のいずれもダイオキシン類土壌環境基準値¹²⁾の 1 000 pg-TEQ/g より低い。

既存の焼却技術で達成可能と推定される 5 μg-TEQ/t-ごみ¹³⁾ よりもはるかに低い値の 0.000 69 μg-TEQ/t-ごみの結果が得られた。現在、投入廃棄物に含まれるダイオキシン類は 10 μg-TEQ/t-ごみ程度と言われており¹⁴⁾、本プロセスはダイオキシン類を強力に分解する性能を持つことが実証された (Fig. 3)。

3.3 収支例

実証実験で得られた熱損失から 150 t/d・炉×2 系列の標準的施設の収支を推算した。ごみの低位発熱量は 2 200 kcal/kg (9.2 MJ/kg) とし、ガスエンジンで発電しこの電力で酸素製造およびプラントの電力を賄うとした。Fig. 4 に熱収支例を示す。300 t/d 規模程度だと余剰電力が発生するとともに、大量の余熱が発生する。

4 まとめ

川崎製鉄千葉製鉄所構内に建設した処理能力 150 t/d・炉×2 系列からなる設備を用いて、1999 年度には「ごみ処理性能指針」の定める実証のために、千葉県殿、千葉市殿のご協力を得て、90 d 以上の連続運転および延べ 130 d 以上の運転を終了している。ガス化

Table 4 Total dioxins emitted (at Chiba Plant)

By-products	Dioxins contents	Recovered quantities	Dioxins output (μg-TEQ/t-waste)
Synthesis gas	0.000 39 ng-TEQ/m ³ _N	722 m ³ _N /t-waste	0.000 28
Slag	0.000 7 ng-TEQ/kg _{-dry}	62.5 kg/t-waste	0.000 04
Sulfur	0.35 ng-TEQ/kg _{-dry}	0.52 kg/t-waste	0.000 18
Metal hydroxide	0.29 ng-TEQ/kg _{-dry}	0.63 kg/t-waste	0.000 18
Recovered water	0.000 01 ng-TEQ/ℓ	680 ℓ/t-waste	0.000 01
Total dioxins emitted			0.000 69

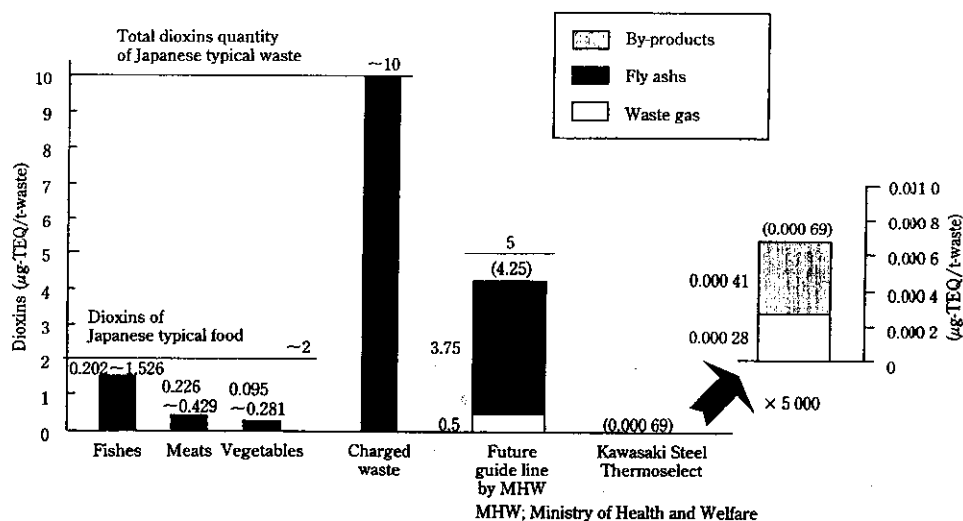


Fig. 3 Resolution property for dioxins by Kawasaki Steel Thermoselect process

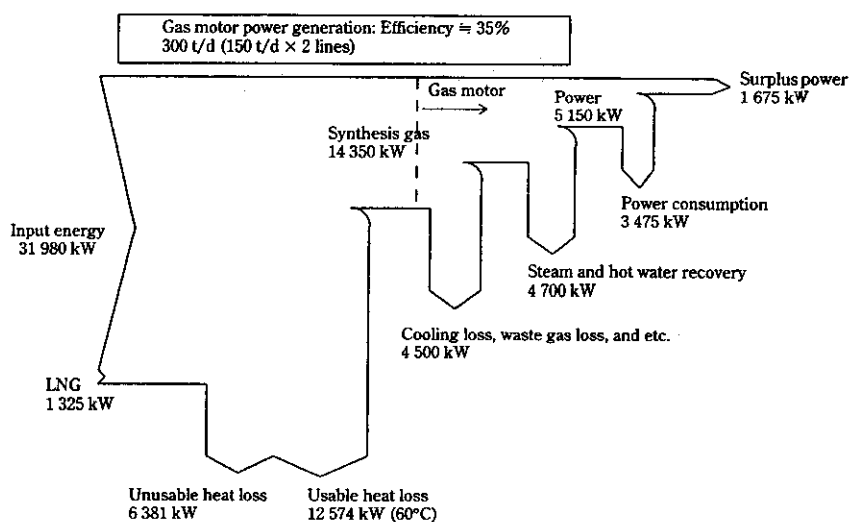


Fig. 4 Energy balance (waste calorific value 9.2 MJ/kg (2 000 kcal/kg))

改質溶融設備の実機規模 (150 t/d・炉) での一般廃棄物処理としては日本で初めての実証となった。本方式が、ダイオキシン類の系外への排出量を極小にでき、廃棄物からほぼ完全に再資源化できる技術であることを実証した。

千葉製鉄所構内のこの設備では、2000 年度からは産業廃棄物を受託処理して燃料ガスを製造し、千葉製鉄所の発電燃料などに利用する廃棄物燃料製造事業を開始している (新エネルギー利用の促進

に関する特別措置法第 8 条第 1 項の規定に基づく大臣認定を取得)。本方式の技術は最終処分場に依存しない循環型社会構築において重要な役割を果たすことができると考えている。

川鉄サーモセレクト方式ガス化溶融炉の実証実験を遂行するに当たり、千葉県殿、千葉市殿に多大なご支援をいただいた。ここに記して深謝する。

参考文献

- 1) R. Stahlberg: "Thermoselect-A Process for Recovering Energy and Raw Materials by Thermal-Chemical Material Conversion of Waste", IFAT, Technical Directive on Waste in Settled Areas and Their Technical Convertibility, Munich, (1993) May 12-13
- 2) 厚生省: 厚生省令第 14 号, 1999 年 3 月 3 日「ガス化改質方式」
- 3) 三好史洋: 化学装置, 40(1998)7, 38-41
- 4) 三好史洋: 新政策別冊, 1(1998)9, 14-17
- 5) 三好史洋: 資源環境対策, 34(1998)14, 100-101
- 6) 松添 剛: 「ごみ処理とバイロメタラジー」, 高温プロセス部会編, 日本鉄鋼協会, (1999), 61-65
- 7) 福井雅康: 環境技術, 28(1999)12, 35-41
- 8) 平岡正勝: 「廃棄物処理とダイオキシン対策」, (1993)35, [環境公害新聞社]
- 9) 岩淵丈郎: 平成 12 年度ごみ焼却余熱有効利用促進, 市町村等連絡協議会, (2000), 82-94
- 10) 厚生省: 厚生省告示第 7 号, 2000 年 1 月 14 日 (ダイオキシン類の濃度の算出方法)
- 11) 厚生省: 生衛発第 508 号, 1998 年 3 月 26 日 (溶融固化物の利用に係わる目標基準)
- 12) 環境庁: 環境庁告示第 68 号, 1999 年 12 月 27 日 (ダイオキシン類環境基準)
- 13) 社団法人・全国都市清掃会議: 「ごみ処理に係わるダイオキシン類削減対策」, (1997), 111
- 14) 酒井伸一: 「ごみと化学物質」, 岩波新書 (1998), 107