

# ECOARCにおける排ガス処理技術

## Off-gas Treatment Technology of ECOARC

水上 秀昭 エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部 主幹 工博  
山口 隆二 エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部 主任研究員  
中山 剛 エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部 主任研究員  
牧 敏道 プラントエンジニアリング本部 プラント技術部 主幹

Hideaki Mizukami  
Ryuji Yamaguchi  
Takashi Nakayama  
Toshimichi Maki

当社では、環境規制の強化に対応するとともに、大幅な電力原単位の削減を可能とした環境対応型高効率アーク炉 ECOARC の開発に成功した。この ECOARC では、シャフトからの排ガスを排ガスの潜熱により 850 以上に昇温した後、200 以下に急冷することにより、排ガス中のダイオキシン類濃度を 0.2ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> 以下に低減させることを目標としている。今回 5 トン規模の実証試験を行ったところ、上記目標を達成することができた。

*NKK has developed a new continuous melting furnace ECOARC (ecologically friendly and economical arc furnace) which answer to reinforcement of environmental restriction and can decrease electric consumption drastically. At ECOARC system, the target is that off-gas from shaft is heated up to 850 by using latent heat of off-gas, and cooled down below 200 in order to decrease dioxins in the off-gas below 0.2ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>. This time NKK has achieved the above mentioned target with 5 ton of test operation.*

### 1. はじめに

1997 年に施行された大気汚染防止法により、製鋼用電気炉の大気放散ガス中のダイオキシン類濃度は既存炉で 5ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> 以下、新設炉で 0.5ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> 以下にすることが定められている。当社では、上記環境規制に対応するとともに、電力原単位が 200kWh/t 以下であるような環境対応型高効率アーク炉 ECOARC<sup>1)</sup> の開発を行ってきた。今回 5 トン規模の実証試験により、ECOARC プロセスにおいて、排ガス中のダイオキシン類濃度を規制値以下の 0.2ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> 以下に低減することができた。本稿では ECOARC における排ガス処理技術の概要とその実証試験結果を述べる。

### 2. ECOARC プロセスの概要

本プロセスに使用する電気炉、排ガス処理系の模式図を Fig.1 に示す。

本プロセスは大きく分けて、溶解室に予熱シャフトが直結した半密閉型の電気炉と、シャフトから排出された排ガスを燃焼させ 850 以上に昇温するための燃焼室と、燃焼室からの排ガスを 200 程度まで急冷する急冷室と、排ガス中のダストを除去するバグフィルターから構成される。操業方法は、溶解室から予熱シャフトにスクラップが常に連続的に存在する状態を保つようにスクラップを連続的または準連続的に予熱シャフトに装入する。この状態を保ちながら酸素、コークスなどの補助燃料を溶解室に供給する。

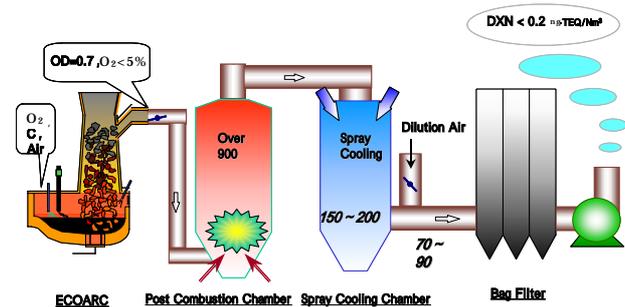


Fig.1 Schematic configuration of ECOARC

溶湯から発生する CO ガスは、炉を半密閉化して炉内供給空気量を制御することにより、酸素濃度が 5% 以下の条件下で、シャフト出口の酸化度 (Oxidation Degree = CO<sub>2</sub>/(CO+CO<sub>2</sub>); 以下、OD と略記する) を 0.7 程度になるように燃焼させる。その結果、シャフト出口の排ガス量は 300 ~ 400Nm<sup>3</sup>/min と、同程度の生産性を有する従来型の電気炉の 1/3 ~ 1/2 程度に抑えることができる。酸素濃度が 5% 以下では、スクラップが高温に予熱されても高温酸化が促進せず、シャフト内でスクラップの熔融、融着による棚吊りが発生しない。

シャフト出口から排出された排ガスは、シャフト出口以降に設けた燃焼室に供給される。ここで未燃分の CO ガスを、二次燃焼空気と着火源としての補助バーナにより燃焼させ、その燃焼熱により排ガスの温度を 850 以上としてダイオキシン類を分解する。すなわち、排ガスを昇温するための熱源として、電気炉から発生する未燃の CO ガスの

燃焼熱を用いるため、バーナなどの補助燃料をほとんど必要としない。850 以上に昇温された排ガスは、急冷室でミストスプレーにより 200 以下まで急冷されることにより、ダイオキシン類の再合成を防止し、急冷室出口でのダイオキシン類濃度を 0.2ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>以下とする。その後、建屋集じんと合流させることにより露点を回避し、排ガス温度を下げてからバグフィルターを通過させ大気放散するため、ここでの除じん効果も付加され、大気放散排ガス中のダイオキシン類濃度はさらに低い値となる。

### 3. 開発課題

以上のような ECOARC プロセスでの排ガス処理技術には、大きく分けて以下の 2 点の開発課題がある。

#### (1) 炉内二次燃焼コントロール技術の開発

炉を半密閉化し、炉内またはシャフト内へ二次燃焼空気を吹き込むことによって、シャフト出口のガス組成を、酸素濃度が 5%以下の条件下で、OD が 0.6 から 0.7 程度になるように制御できるか？

#### (2) ダイオキシン類排出濃度抑制技術の開発

燃焼室で二次燃焼空気を供給することにより、排ガス中の CO ガスを燃焼させて排ガスの昇温を行い、その後、急冷室でミストスプレーで急速冷却することにより、急冷室出口の排ガス中のダイオキシン類排出濃度を 0.2ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>以下に低減させることができるか？

### 4. 試験方法

本試験は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託業務としての 1999 年度の「ダイオキシン類排出削減促進技術の開発/製鋼工程におけるダイオキシン類排出削減技術開発」により行った。

#### 4.1 試験設備

全体のフロー図を Fig.2 に、全景写真を Photo 1 に示す。試験設備は大きく分けて、電気炉（シャフトを含む）、排ガスの燃焼室、排ガスの急冷室、バグフィルターの 4 部分から構成されている。

本プロセスではシャフト出口排ガスの OD を 0.6 ~ 0.7 に保ち、ダイオキシン類の分解のために排ガス中の CO ガスを燃焼させて、その燃焼熱により排ガス温度を 850 以上に昇温することを目標としている。しかし、本試験設備の燃焼室、急冷室は ECOARC 本体の性能試験の終了後に上記委託業務の中で設置したため、設備レイアウトの制約上、シャフト出口から燃焼室入口までのダクトが長く、この間の排ガスの温度降下が無視できない。そのため、それを補完するために、燃焼室でバーナを使用した。したがって、排ガスの処理については次の(1)、(2)を確認することを目的とした。

(1) 炉内への空気供給量を調整することにより、シャフト出口の排ガス組成を酸素濃度が 5%以下の条件下で、OD が 0.6 から 0.7 になるように制御することができて、その排ガス中の CO ガスを燃焼室で二次燃焼空気により燃焼させることができるか。

(2) ダイオキシン類低減確認のためには排ガス温度 850 以上で滞留時間 2 秒程度を確保する必要があるため、そのために燃焼室を設けるが、上述したように排ガスの温度降下が無視できないため、燃焼室でバーナ燃焼により排ガスを昇温し、その後急冷室でミストスプレーにより急冷することで、ダイオキシン類を低減させることができるか。

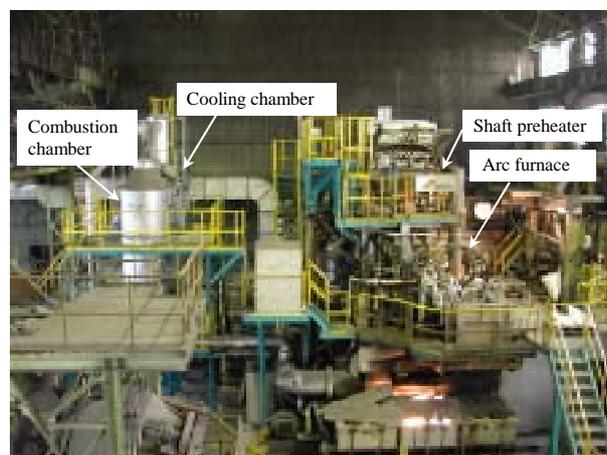


Photo 1 Test facility

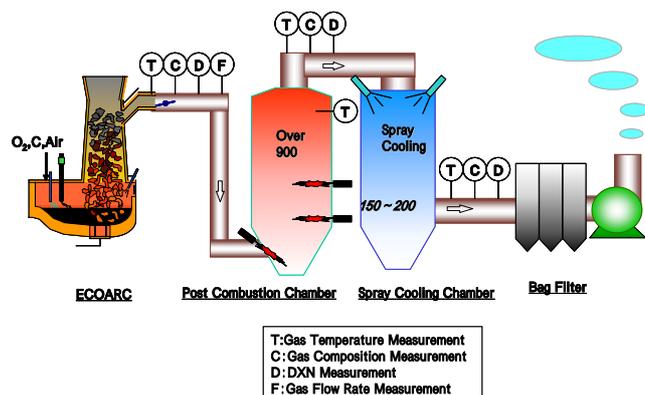


Fig.2 Flow sheet of test facility

#### 4.1.1 燃焼室

上述したように、本試験設備では排ガスの温度降下が無視できないため、燃焼室はダイオキシン類が分解できる 850 程度にバーナにより昇温し、滞留時間を 2 秒以上得る目的で設置した。燃焼室の有効体積は 3.31m<sup>3</sup>で灯油/空気バーナが 3 本備わっている。バーナの灯油、空気供給量は、燃焼室出口の排ガス温度を設定して、ここでの排ガス温度測定値が設定温度になるように自動的に調整するように制御されている。

#### 4.1.2 急冷室

急冷室の有効体積は 6.4m<sup>3</sup>で、ミストスプレーが 3 本備

わっている。ミストスプレーの空気量は一定であるが、水量は、急冷室出口の排ガス温度を設定して、ここでの排ガス温度測定値が設定温度になるように自動的に調整するように制御されている。

#### 4.1.3 排ガス組成分析装置

排ガスの組成はシャフト出口、燃焼室入口、燃焼室出口、急冷室出口の4点で連続測定している。測定成分は  $O_2$ 、 $CO$ 、 $CO_2$  の3成分である。

### 4.2 試験方法

#### 4.2.1 試験概要

初装としては溶解室に種湯用のスクラップ 2.4 トン、シャフト内に連続溶解用のスクラップ 1.6 トンを装入した。シャフト内のスクラップにはダイオキシン類の発生源となる塩化ビニル管を 1.0kg/t-スクラップ添加した。スクラップは市中スクラップを試験設備のサイズに合うように切断したものを使用した。ここで使用した塩化ビニル管の写真を Photo 2 に示す。



Photo 2 Vinyl chloride tube

塩化ビニル管の添加量 1.0kg/t-スクラップは、以下のよう  
に決定した。従来電気炉での排ガス計測結果から、ダイ  
オキシン類の前駆体と考えられる塩化水素濃度は、多いと  
ころで 800~1000ppm と報告されている。そのため、塩化  
ビニル管に含まれる塩素量のみで、1000ppm 分以上の塩化  
水素中の塩素量となるようにした。つまり、従来電気炉と  
比較して、ダイオキシン類の発生量が多い条件を作るよう  
にした。

通電を開始すると初めに、溶解室の初装スクラップが溶  
解して溶解室内に溶湯ができる。その後、溶湯とシャフト  
内のスクラップが接触することにより、このスクラップの  
溶解が始まる。このタイミングで溶鋼への送酸、コークス  
の供給、炉内への二次燃焼空気の吹き込みを開始し、シャ  
フト内のスクラップレベルが低下するとスクラップを追装  
するということを繰り返した。この間に各部で、排ガス中  
のダイオキシン類濃度の測定を行った。

#### (1) 炉内・シャフト内での排ガスの二次燃焼試験方法

本プロセスではシャフト出口排ガスの OD を 0.6~0.7 以

制御することを目的としており、溶鋼から発生する  $CO$  ガ  
スを上記 OD まで二次燃焼させるために、炉内に二次燃焼  
空気を吹き込んだ。

代表的な酸素、コークス、二次燃焼空気の吹き込み量を  
Fig.3 に示す。コークスは 2.1kg/min 程度、酸素は  
2.0Nm<sup>3</sup>/min、空気は 7.0Nm<sup>3</sup>/min とした。

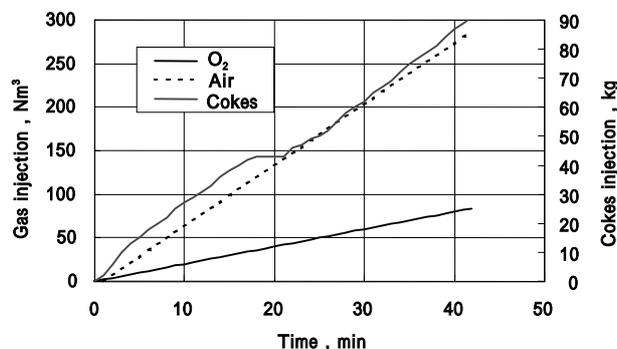


Fig.3 Oxygen, Air, Cokes injection rate

#### (2) 燃焼室での二次燃焼試験方法

炉内での二次燃焼が目標どおり達成できれば、シャフト  
出口の排ガス OD は 0.6~0.7 となる。燃焼室ではこの排ガ  
ス中の  $CO$  ガスを二次燃焼空気とバーナにより燃焼させる  
ことを目的とした。

試験方法は、上記(1)の試験を行いながら、燃焼室でバー  
ナを燃焼し、 $CO$  ガス燃焼用の二次燃焼空気の供給を行っ  
た。 $CO$  ガスが燃焼したかどうかについては、シャフト出  
口と燃焼室出口の排ガス組成分析値から判断した。ただし、  
4.1 節の試験設備で説明したように、本試験設備では排ガ  
スの温度降下が無視できないため、バーナにより排ガスの  
昇温も行っている。したがって、 $CO$  ガスの燃焼のみによ  
り排ガス温度が何度に達したかは、上記シャフト出口と燃  
焼室出口の排ガス中の  $CO$  濃度から燃焼室内で燃焼した  
 $CO$  量を求め、それから燃焼熱を計算して評価することと  
した。

#### (3) ダイオキシン類排出抑制技術開発の試験方法

ダイオキシン類の濃度測定は、シャフト出口(燃焼室入  
口)、燃焼室出口(急冷室入口)、急冷室出口の3個所  
で行った。このときの燃焼室出口の排ガス温度は 850 に設  
定した。また、急冷室出口の排ガス温度の設定は、ダイオ  
キシン類の再合成の温度依存性を調べるために、200、  
280 の2水準とした。

ダイオキシン類の測定方法は JIS K 0311「排ガス中のダ  
イオキシン類及びポリブレン-PCB の測定方法」にしたがっ  
た。

### 5. 試験結果

#### 5.1 炉内二次燃焼試験結果

代表的なシャフト出口のガス組成分析結果を Fig.4 に示

す。炉を半密閉化して炉内への侵入空気量を抑え、炉内に制御された二次燃焼空気を吹き込むことにより、ばらつきはあるもののシャフト出口の酸素濃度が5%以下で、ODを0.6~0.7に制御することができた。

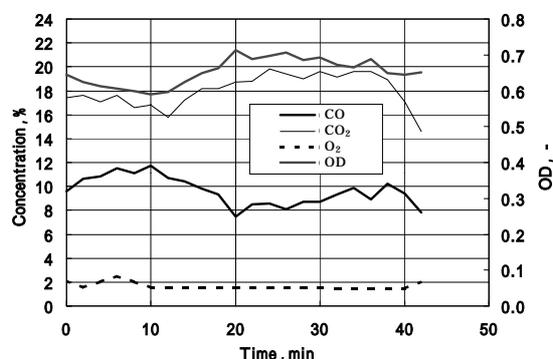


Fig.4 Off-gas composition at shaft outlet

### 5.2 燃焼室での二次燃焼試験結果

炉内への二次燃焼空気吹き込みによりODが0.6~0.7程度となった排ガスがシャフト出口から排出される。燃焼室には排ガス中のCOガスを燃焼させるために、酸素源として二次燃焼空気を、温度降下補償用にバーナ火炎を吹き込んでいる。シャフトからの排ガス中のCOガスが燃焼したかどうかの評価はシャフト出口と燃焼室出口のガス組成分析値を比較することにより行った。

燃焼室出口の排ガス分析結果の一例をFig.5に示す。これはFig.4と同じときの結果である。これをFig.4に示したシャフト出口のガス組成と比較すると、シャフト出口で10%程度存在したCOガスが完全に燃焼して、燃焼室出口ではCOガスが存在していないのがわかる。

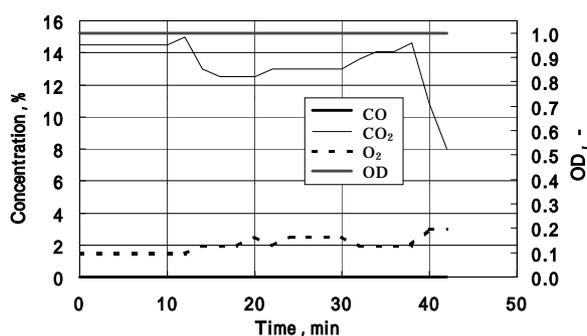


Fig.5 Off-gas composition at post combustion chamber outlet

次に、燃焼室内でのCOガスの燃焼量について検討した。シャフト出口の排ガス流量、温度、組成、燃焼室のバーナの燃料、二次燃焼空気量を測定しているため、これらが混合したガスの流量、組成、温度は計算できる。また、燃焼室出口での排ガス組成を使用し、ここでのCOガスの燃焼量を計算した。

その結果、このときの二次燃焼後の排ガス温度計算値は907となり、シャフト出口から排出される排ガス中のCOガスの燃焼熱を利用して、排ガスの温度をダイオキシン類の分解に必要な850以上にできることを推定できた。

### 5.3 ダイオキシン類の排出抑制試験結果

シャフト出口ダイオキシン類分析値は200ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>以上で、従来の電気炉よりはるかに多いダイオキシン類を発生させることができた。

ダイオキシン類測定の際の燃焼室出口の設定ガス温度は850、急冷室出口の設定ガス温度は200、280とした。

#### 5.3.1 測定結果

燃焼室、急冷室出口排ガス温度の設定値がそれぞれ、850、200のときの各部のガス温度変化の一例をFig.6に示す。これからわかるように燃焼室、急冷室とも温度制御はうまく行われており、設定値とかなり近い値で推移している。

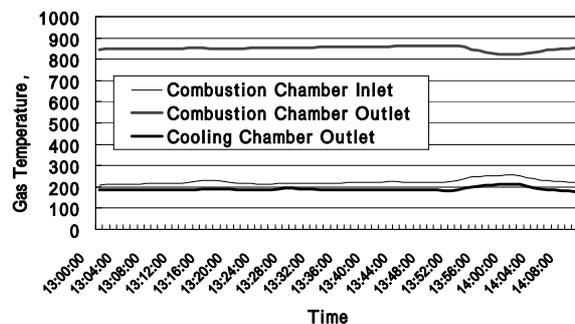


Fig.6 Off-gas temperature

上記と同じ運転条件のもとで2回のダイオキシン類測定を行った結果と、急冷室出口の排ガス温度を280に設定したときのダイオキシン類の測定結果をまとめてFig.7に示す。

急冷室出口の排ガス温度が200のときは、2回の試験とも、燃焼室入口で240、400ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>と現状の電気炉と比較して多量のダイオキシン類を発生させているにもかかわらず、急冷室出口では0.04、0.12ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>となり、目標の0.2ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>以下に抑えることができた。

しかし、急冷室の出口温度を280に設定した場合は、燃焼室出口で0.1ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>に低減しているが、急冷室内でダイオキシン類が再合成して、急冷室出口では、1ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>程度まで増加している。

以上のように、燃焼室、急冷室の温度管理を適正に行えば、急冷室出口のダイオキシン類濃度は0.2ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>以下に抑えることができた。実機では急冷室出口からの排ガスを露点回避のために建屋集じんと合流させ、合流ガスをバグフィルターを通過させて除じんを行った後大気放散するため、ここでの希釈、除じん効果により大気放散する排ガス中のダイオキシン類濃度はさらに低い値となる。

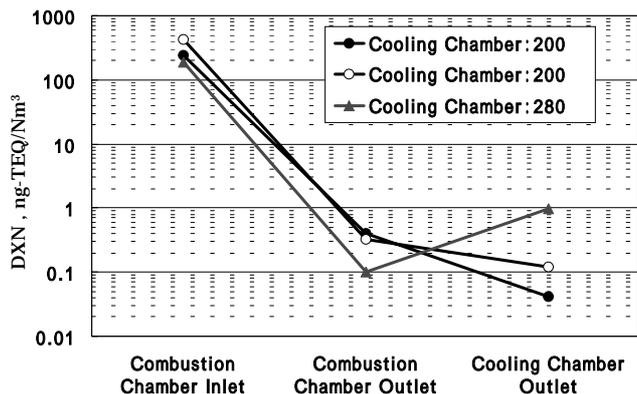


Fig.7 DXN concentration

## 6. 実機試算

次に、本プロセスを実機にスケールアップした際のシャフト出口、燃焼室出口、急冷室出口、バグフィルター出口における排ガスの温度、流量、組成をシミュレーション計算により求めた。この計算は電気炉の生産性を 100t/45min、送酸量を 33Nm<sup>3</sup>/t としたときのガス発生量を基準として、Table 1 に示す前提条件のもとで、燃焼室で必要になるバーナの燃料、空気量、急冷室で必要になるミストプレーの水量を計算し、その結果発生する排ガス温度、流量、組成を各部で計算したものである。上記 5.3 節で述べたように、燃焼室出口の排ガス温度が 850 以上で、急冷室出口の排ガス温度が 200 以下であれば、急冷室出口のダイオキシン類の濃度を 0.2ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> 以下にすることができているが、ここでの計算条件としては余裕をみて燃焼室出口の排ガス温度を 900、急冷室出口の排ガス温度を 180 とした。計算結果を Table 2 に示す。これからわかるように、シャフト出口の OD を 0.7 に制御して、燃焼室で排ガス中の CO ガスを二次燃焼空気により燃焼させ、その際の燃焼熱を排ガスの昇温に用いていることにより、バーナ燃料はほとんど使用することなく(LNG で 17.4Nm<sup>3</sup>/h = 0.13Nm<sup>3</sup>/t)、燃焼室出口の排ガス温度をダイオキシン類の分解に必要な 850 以上に昇温することができる結果となった。

また、シャフト出口のガス流量が従来炉と比較して圧倒的に少ないこと、燃焼室で補助燃料がほとんど必要なくなることから、バグフィルター出口の排ガス量も 1800Nm<sup>3</sup>/min 程度と、従来の同様の生産性を有する電気炉の 1/3 程度に抑えることができる結果となった。

Table 1 Calculation condition

Combustion chamber inlet gas	Temperature	100
	Flow rate	360Nm <sup>3</sup> /min
	CO conc.	10.4%
	CO <sub>2</sub> conc.	22.2%
	O <sub>2</sub> conc.	5.0%
	H <sub>2</sub> O conc.	6.4%
Combustion chamber outlet gas	Temperature	900
Cooling chamber outlet gas	Temperature	180

Table 2 Calculation result of commercial plant

	Combustion chamber inlet	Combustion chamber outlet	Cooling chamber outlet	Bag filter outlet
Temperature	100	900	180	80
Flow rate	360 Nm <sup>3</sup> /min	358 Nm <sup>3</sup> /min	556 Nm <sup>3</sup> /min	1829 Nm <sup>3</sup> /min
Concentration	CO	10.4 %	0.0 %	0.0 %
	CO <sub>2</sub>	22.4 %	32.9 %	20.3 %
	O <sub>2</sub>	5.0 %	0.5 %	0.3 %
	N <sub>2</sub>	55.9 %	59.8 %	36.8 %
	H <sub>2</sub> O	6.4 %	6.7 %	42.6 %

Combustion chamber operating condition		Cooling chamber operating condition	
Fuel (LNG)	17.4 Nm <sup>3</sup> /h	Water	9.5 t/h
Air	3.2 Nm <sup>3</sup> /min		

## 7. おわりに

本 ECOARC プロセスにより、排ガス中のダイオキシン類の分解のための補助燃料をほとんど使用することなく、電気炉から発生し大気放散する排ガス中のダイオキシン類濃度を 0.2ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> 以下に抑制することが可能となった。これは、現状の規制値（新設炉で 0.5ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> 以下）と比較しても少ない値で、今後の環境規制にも十分対応できるものと考えている。

### 参考文献

- 1) 水上秀昭ほか。“環境対応型高効率アーク溶解炉(ECOARC)”。NKK 技報. No.170, pp.1-7(2000).

<問い合わせ先>

エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部

Tel. 044 (322) 6248 水上 秀昭

E-mail address : hmizukam@lab.keihin.nkk.co.jp