

생활폐기물 열분해용융시설 동부 R21

최 상 심, 김 석 환, 김 경 래

동부건설(주) 플랜트사업부

The MSW Pyrolysis & Melting Plant DONGBU R21

Sang Sim Choi, Seok Hwan Kim, Kyong Lae Kim

Plant Div., Dongbu Corporation

Tel : 02-3484-2282, Fax : 02-3484-2361, E-mail : kkl@dongbu.co.kr

Abstract

Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd. (MES) has completed Recycling 21 (R21) pyrolysis and melting technology for municipal solid wastes. The basic technology is licensed from Siemens, but MES has made major improvements to the design and operation of the R21 system

Consequently, up to now, MES has been completed six (6) R21 plants in Japan.

The following text will provide a brief overview of the design & operating features of R21 technology, focused on the reliability of system and low emission of hazardous material, which have been proved by the successful construction & operation experience of the plants.

Key Word : R21, Pyrolysis, Melting, Slag, Dioxin

1. 서론

1.1 동부 R21 현황

일본의 경우, 연간 발생하는 생활폐기물의 약 75%가 소각 처리되고 있는데 1999년에 발주된 소각시설의 약 80% 이상은 기존 기술을 이용한 스토커식 및 유동상식 소각로였

고 나머지는 열분해용융방식과 같은 새로운 소각기술이었다. 그러나 후생성의 강화된 다이옥신 배출허용 Guide Line(다이옥신 총 배출량 $4.25 \mu\text{g-TEQ/ton-waste}$ 등)에 적합한 신기술 적용이 대폭 확대되었고 이듬해인 2000년에는 50% 정도가 신기술로 발주되었다. 이러한 신기술은 특히 환경 측면에서 기존 기술에 비해 큰 이점을 보여주고 있으며 일본에서만 대략 17개 사에 달하는 많은 회사들이 신기술 개발을 위해 노력하고 있다.

미쓰이조선(Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.)은 2000년 3월에 열분해용융 신기술(Recycling 21)을 사용한 첫 번째 상용플랜트인 야메 서부 클린센터(八女 西部 Clean Center)를 준공하여 규슈지방의 후쿠오카현 3개시와 5개 지역의 생활폐기물을 처리하고 있으며, 2002년 3월에는 토요하시 자원화센터(豊橋 資源化 Center), 2002년 11월에는 북해도 에베츠시 신폐기물처리시설(江別市 新廢棄物處理施設)을 준공하였고 2003년 3월에는 3개소의 R21 열분해용융시설을 준공하여 총 6개 플랜트, 12기가 정상가동 중이다.

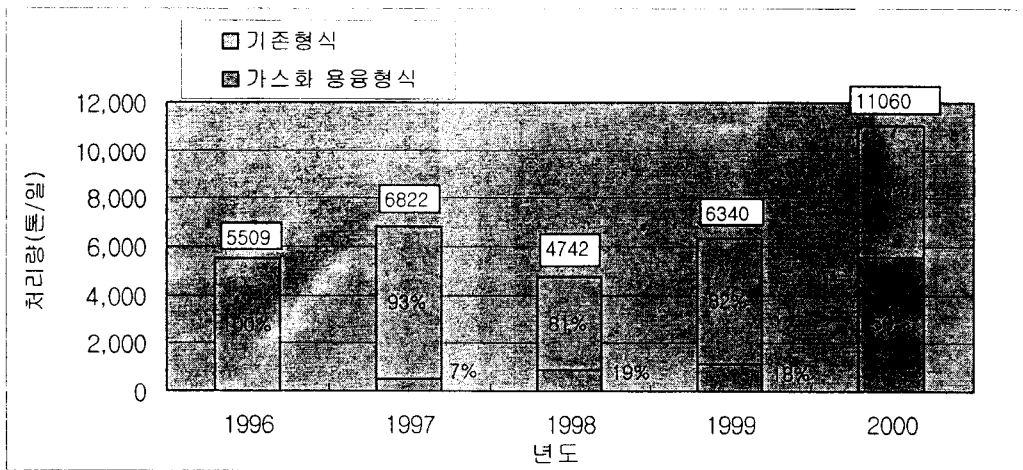


Fig. 1. Trend of Incineration Projects in Japan

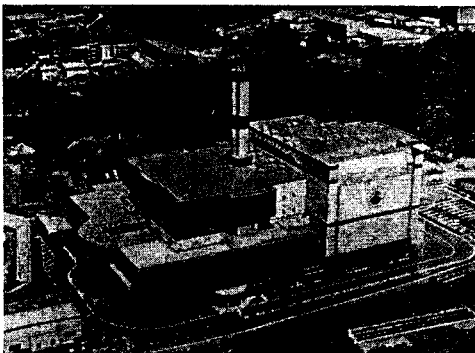


Fig. 2. Overview of Yame Plant



Fig. 3. Overview of Toyohashi Plant

미쓰이조선에서 수주한 총 6개 R21 시설의 개요는 Table 1에서 보는 바와 같다.

Table 1. Reference List of R21

플랜트 항목		야메서부	토요하시市	에베츠市	코가 서부	니시이부리	교호쿠 코우이키
위치		후쿠오카현	아이치현	북해도	후쿠오카현	북해도	야마나시 현
계약일		1997. 7	1998. 9	2000. 9	2000. 11	2001. 1	2001. 3
준공일		2000. 3	2002. 3	2002. 11	2003. 3	2003. 3	2003. 3
시설 용량	생활폐기물 열분해용융	110t/d×2	200t/d×2	70t/d×2	130t/d×2	105t/d×2	80t/d×2
	대형폐기물 파쇄설비	50 t/5h	70 t/5h	35 t/5h	-	57 t/6h	-
발주처		야메市	토요하시市	에베츠市	코가市	니시이부리 市	교호쿠市

1.2 동부 R21 개발사

1991년 미쓰이조선은 독일 지멘스사로부터 가스화용융기술을 도입했다. 1994년~1996년에 요코하마市와 공동으로 24 t/d의 실증 플랜트를 가동시켜 이 프로세스를 일본의 폐기물에 적용하면서 많은 부분을 개선하여 R21 기술을 탄생시켰다. 1996년 후생성의 산하단체인 폐기물연구재단에서 일본의 생활폐기물에 적용 가능한 중간처리기술이라는 것과 자체 보유 열량으로 용융가능, 다이옥신 억제효과, 철 및 알루미늄 회수 등의 특징을 인정받았다. 2003년 5월 현재, 6개 플랜트, 총 12기가 준공되어 정상운전 중이다.

- 1980년~1985년 독일에서 열분해가스를 가스엔진 연료로 하는 Process 개발
- 1988년 독일 SIEMENS社에서 상기 기술 도입하여 실증플랜트(4.8t/d) 운전개시
- 1991년 8월 미쓰이조선, SIEMENS社로부터 기술도입
- 1994년 9월 요코하마시와 공동으로 실증플랜트(24t/d) 운전개시
- 1996년 4월 일본 폐기물연구재단으로부터 신기술평가서 수령
- 1997년 7월 후쿠오카현 야메市 광역사무조합으로부터 1호 공사 수주
- 1998년 9월 아이찌현 도요하시市로부터 2호 공사 수주
- 2000년 3월 1호 공사(야메 서부 클린센터) 준공
- 2000년 9월이후 3~6호 공사 수주

- 2002년 3월 2호 공사(토요하시 자원화센터) 준공
- 2002년 11월 3호 공사(에베츠市 신폐기물처리시설) 준공
- 2003년 3월 4~6호 공사 준공

2. 동부 R21 공정 소개

2.1 공정 구성

R21 열분해용융 플랜트의 주요 공정은 Table 2의 설비들로 구성되어지며 공정흐름은 Fig. 4에서 보는 바와 같다.

주요 공정의 흐름은 아래와 같다.

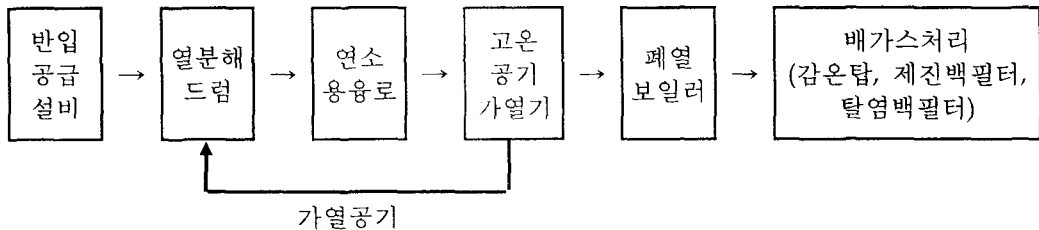


Table 2. Main Process of R21

공정구분	구성설비	비고
반입공급설비	폐기물 저장조, 크레인, 파쇄기	대형폐기물 파쇄설비 포함
열분해설비	회전식 열분해드럼	내부 온도 450 °C
고온연소용융설비	선회식 고온연소용융로	용융 온도 1,300 °C 열분해카본 공급량 조절
연소가스 냉각설비	고온공기 가열기, 폐열보일러	
배가스 처리설비	감온탑, 백필터, SCR*	*다이옥신 0.01ngTEQ/Nm ³ 보증시
여열이용설비	터빈 발전기, 온수열교환기	증기조건 : 400°C, 40기압
선별설비	유동분별탑, 진동콘베이어, 자력선별기	철, 비철금속 분리

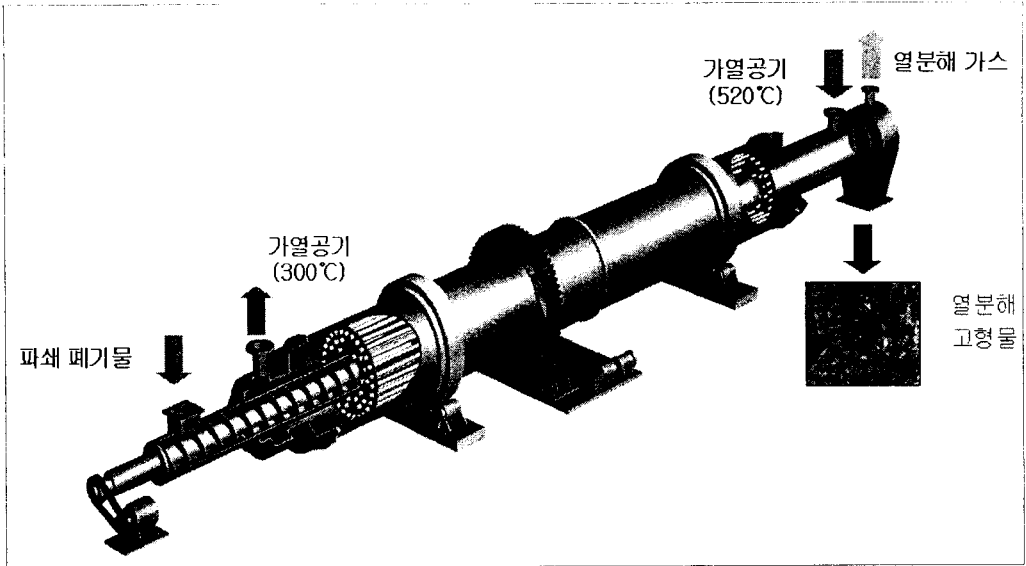


Fig. 5. Pyrolysis Drum

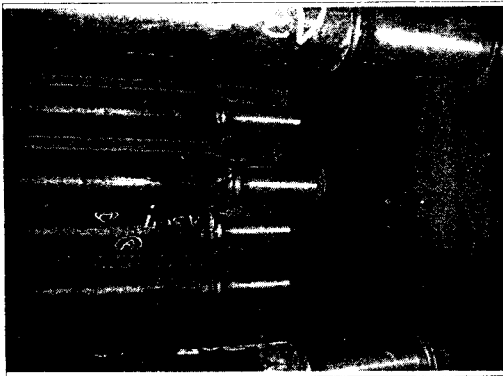


Fig. 6. Heating Tubes of Pyrolysis Drum

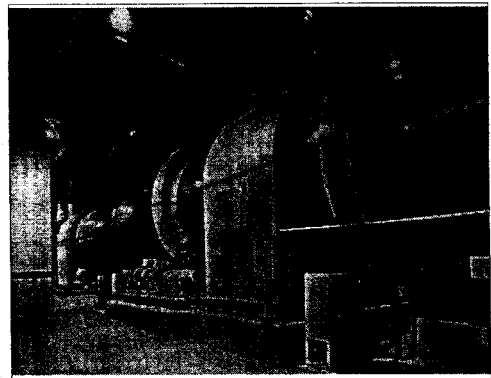


Fig. 7. Outside of Pyrolysis Drum

3) 열분해고형물 분별

열분해고형물 분별시스템은 열분해고형물을 철금속, 비철금속, 굵은 입자성분의 무기물질 (유리, 석질, 세라믹 등)과 열분해카본으로 분리한다. 열분해카본은 입자 직경 1mm로 분쇄된 후 공기를 이용하여 연소용융로 중앙 상부로 이송되며 폐열보일러와 백필터에 포집된 비산재는 분별시스템으로 순환되어 재차 연소용융로로 투입된다.

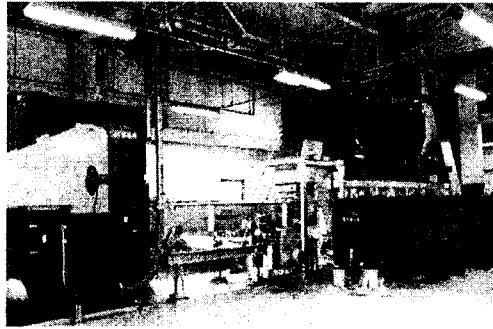


Fig. 8. Pyrolysis Residue Sorting System

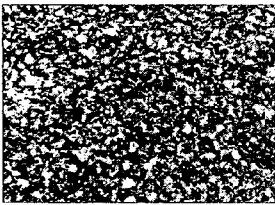


Fig. 9. Pyrolysis Carbon



Fig. 10. Iron

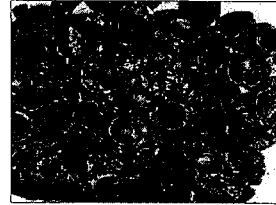


Fig. 11. Aluminum



연소용융로



재활용



재활용

4) 고온 연소용융

열분해가스과 열분해카본, 비산재 등을 포함한 미세한 고상 잔재물은 연소용융로에서 모든 유기물의 완전연소에 의한 분해가 가능하도록 약 1,300℃에서 과잉공기 1.2의 비로 연소된다. 1,300℃의 온도는 연소용융로에서 Ash를 용융슬래그로 분리하기 위해 Ash의 용해온도보다 약 100~150℃이상의 높은 온도를 선정한 것이다.

용융된 슬래그는 내화벽의 표면을 따라 아래로 흘러내려 연소로 하부에 있는 슬래그 Port에 도달하여, 냉각수조에서 급랭되어 유리질의 Granule 형태의 슬래그로서 응고된다. 이 Granule 형태의 슬래그는 도로포장용 골재, 보도블럭 등 토목, 건축용 재료로 이용할 수 있다.

배가스는 연소용융로를 거쳐 고온공기 가열기로 유입되는데 이곳에서 열교환이 이루어지면서 열분해를 위한 에너지를 얻게되며 배가스는 약 750℃ 정도로 냉각된다. 배가스는 폐열보일러로 투입되고, 여기에서 열에너지를 이용 400℃, 40기압의 스팀을 발생시키게 되며, 아울러 배가스는 약 250℃ 정도로 냉각된다.

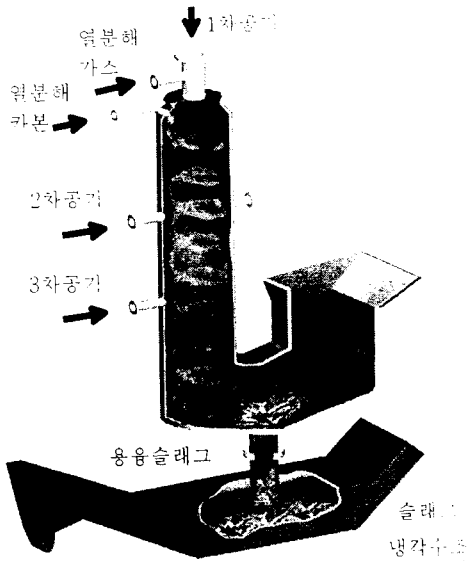


Fig. 12. Combustion & Melting Chamber



Fig. 13. Molten Slag

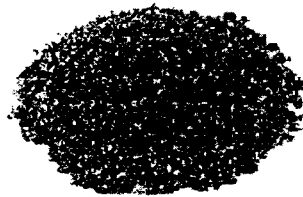


Fig. 14. Water Cooled Slag

5) 배가스 처리

배가스는 Economizer를 거쳐 감온탑으로 투입되며, 여기서 약 170℃까지 냉각된 후 백필터로 보내진다. 백필터는 2단이며 제진 백필터와 탈염 백필터로 구성된다. 170℃의 운전조건은 백필터에서 다이옥신 및 퓨란의 형성이 억제되며, 전단에서 발생한 미량의 다이옥신 및 퓨란은 Bag에 축적된 분진과 함께 포집된다. 배가스 중에 포함되어 있는 대부분의 입자성분은 제진 백필터에서 포집된 후 열분해고형물 분별시스템으로 재순환하게 된다.

제진 백필터에서 제진과정을 거친 후 배출된 배가스는 산성 오염물질을 제거하기 위하여 Lime을 사용하며 이들과의 반응을 통해 발생된 염성분은 후단의 탈염 백필터에서 포집되어 제거된다. 이때 배출되는 탈염잔사는 고형화 처리되어 매립되며 투입된 폐기물 대비 감용화율은 1% (1/100) 이하가 되어 기존의 소각로에 비해 높은 감용화율을 달성함으로써 최종 배출물의 감소로 매립지의 수명을 연장시킬 수 있다.

탈염 백필터를 거친 배가스는 백연방지설비를 거쳐 굴뚝을 통하여 대기로 배출된다.

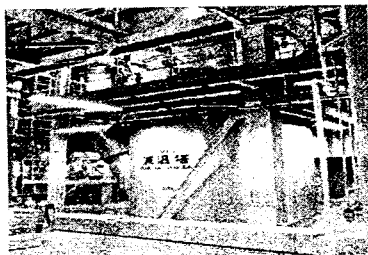


Fig. 15. Flue Gas Cooler



Fig. 16. Bag Filter

3. 공정의 특징

미쓰이조선은 요코하마市와 공동으로 24 t/d 규모의 실증플랜트를 건설하여 1994년 9월부터 1996년 11월까지 약 9,300시간의 운전을 행하여 일본 폐기물연구재단으로부터 기술을 인증 받았다. 이후 치바현에 동일 규모의 실증플랜트를 설치하여 1998년부터 2001년까지 약 15,100시간 운전하면서 각종 연구를 진행하였다.

R21의 상용플랜트 1호기인 야메 서부 클린센터는 2000년 3월 준공이후 현재까지 안정적으로 정상 운전중이며 2002년 2월까지의 폐기물 처리량은 약 84,500톤이다.

다음 자료는 실증플랜트와 야메 서부 클린센터에서의 운전결과를 바탕으로 한 R21 공정의 특징에 대한 소개이다.

3.1. 저공기비

실증 플랜트를 가동시켜 얻은 공기비, CO농도, 로내 온도의 상관관계를 Fig. 17에 나타내었다. 여기서 연소상황의 지표를 나타내는 CO농도가 설계 공기비 1.2~1.3 사이에서 10ppm 이하로 유지되며 로내 온도 또한 1,300℃로 유지되는 것을 알 수 있다. CO농도의 변화는 Fig. 18에 나타난 것처럼 0 에서 수 ppm 이하로 유지하는 것이 가능하며, 아주 안정된 연소상태의 유지가 가능하다. 이 온도 하에서 안정연소를 하는 것이 다이옥신류와 전구물질의 발생을 억제한다. 이러한 저 공기비운전이 가능할 수 있도록 된 이유는 다음의 2가지이다.

- ① 폐기물은 열분해드럼내에서 약 1시간동안 천천히 열분해 되어 폐기물의 질적, 열량적 변동에 대한 대처가 가능하다.
- ② 폐기물을 1 mm 이하의 미세한 열분해카본 상태로 연소용융시킴으로서 공기와의 혼합성을 좋게 하였고, 열분해카본의 공급량을 제어하여 연료의 질을 개선하는 것이 가능했다.

이러한 저공기비로 높은 연소온도(1,300℃)를 유지함으로써 폐기물 발열량(1,500 kcal/kg 정도)으로도 외부 열원 없이 운전이 가능하게 되었다.

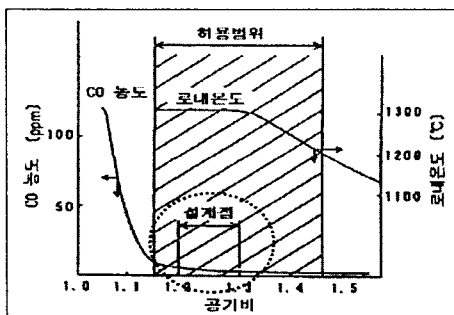


Fig. 17. Design Range of Air Ratio

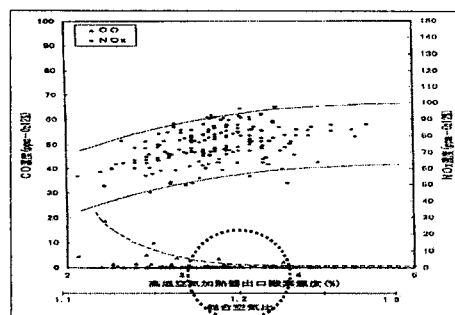


Fig. 18. Air Ratio and CO, NOx

3.2. 배가스중 다이옥신 저감

실증플랜트에서 얻어진 다이옥신류에 대한 대표적인 데이터들을 Fig. 20, Fig. 21에 표시하였다. 이 그림들은 굴뚝입구에서 배가스중의 클로로벤젠류와 PCDD, PCDF류의 총량을 일반 소각로 데이터와 비교한 것이다. 다이옥신류와 전구물질이 종래에 비하여 1/50~1/100 정도로 확실히 감소하는 것을 알 수 있다.

이 결과, R21에서는 Fig. 19와 같이 백필터의 운전온도를 170℃ 이하로 유지하면 추가의 설비 없이 다이옥신을 0.1 ng-TEQ/Nm³ 이하로 관리하는 것이 가능하다.

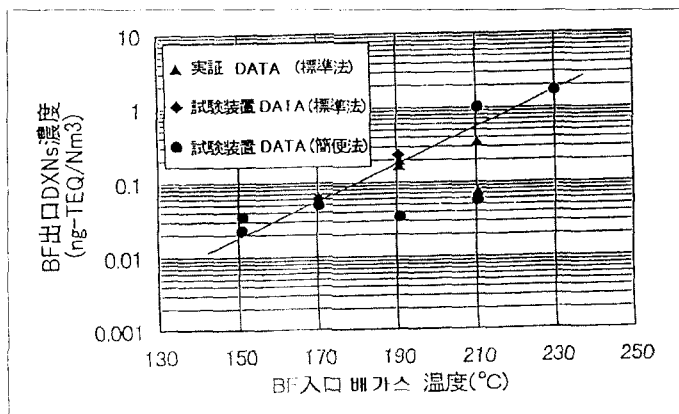


Fig. 19. Bag Filter Inlet Temp. and Outlet Dioxin Emission

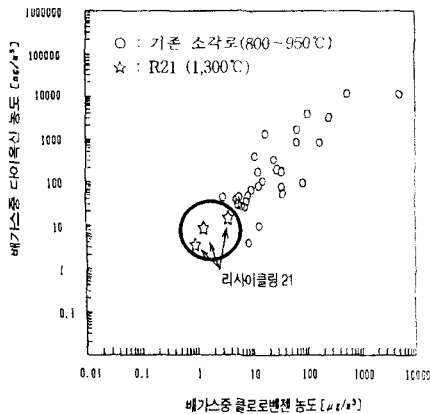


Fig. 20. Dioxin and CBZ

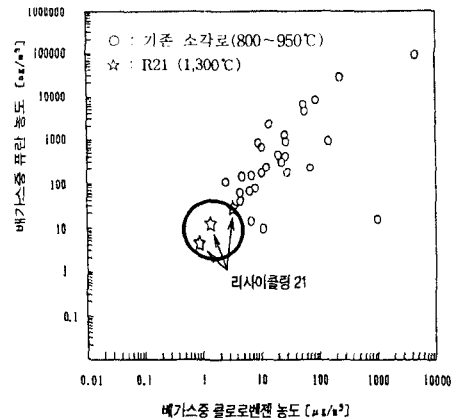


Fig. 21. Furan and CBZ

한편 상업 운전중인 2개 R21 플랜트에서 측정된 다이옥신 배출치는 다음 Table 3과 같다.

Table 3. Flue Gas Analysis

오염물질 (표준 O ₂ 농도 12% 기준)	야마 세부 클린센터		토요하시 자원화센터		일본 배출기준	국 내 배출기준
	설계기준	운전결과	설계기준	운전결과		
Dust (mg/Nm ³)	< 10	< 1	< 20	< 1	< 40	< 80
SO _x (ppm)	< 50	< 2	< 25	< 1	< 1,029	< 300
HCl (ppm)	< 50	< 40	< 40	< 25	< 430	< 50
NO _x (ppm)	< 100	< 80	< 50	< 24	< 250	< 200
CO (ppm)	< 10	< 1	< 30	< 1	< 100	< 600
Dioxin (ng-TEQ/Nm ³)	< 0.1	< 0.016	< 0.01	< 0.002	< 0.1	< 0.1

* Note : Dioxin 배출기준이 0.01 ng-TEQ/Nm³ 이하인 경우, SCR 설치

3.3. 다이옥신 총 배출량 감소

R21에서는 포집된 비산재를 연소용융로에 되돌려 재용융시켜 99%를 슬래그화 하고 있다. 배가스 이외에 유일하게 시스템 외부로 배출되는 다이옥신류는 탈염잔사에 포함되어 있으며 0.01ng-TEQ/g 이하로서 아주 낮은 농도이다. 따라서 비산재에 포함되어 시스템 외부로 배출되는 다이옥신류가 억제되기 때문에 총 배출량도 종래의 설비에 비교해서 크게 줄어들게 되었다. (Fig. 22)

현재 일본의 생활폐기물 중에는 다이옥신류가 50μg-TEQ/ton-waste 정도 포함되어 있는 것으로 알려져 있는데 강화된 일본내 다이옥신 총 배출량 규제치(4.25μg-TEQ/ton-waste)에 대하여 R21에서는 총 배출량 1μg-TEQ/ton-waste 이하의 성능이 얻어질 수가 있다.

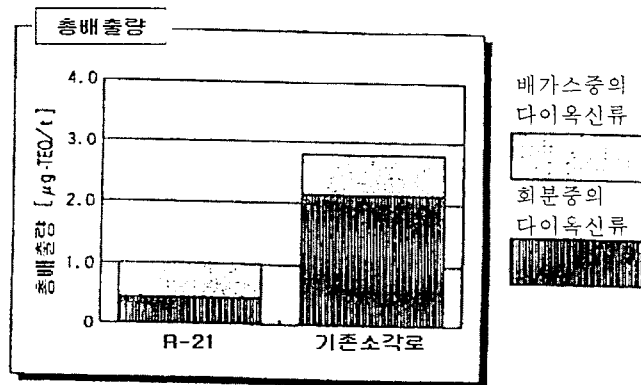


Fig. 22. Total Dioxin Emission of R21

야메 서부 클린센터에서 얻어진 실측치는 Table 4와 같으며 규제치보다도 매우 낮은 다 이옥신 총 배출량을 보여주고 있다.

Table 4. Total Dioxin Emission(Yame Plant, Co-PCBs Included)

시료채취일		2000. 1. 29	일본 법적 규제치
배가스	ng-TEQ/Nm ³	0.016	<0.1 (대기오염방지법)
슬래그	ng-TEQ/g	0 (<0.0018 ng-TEQ/g)	<1 (토양환경기준)
탈염잔사	ng-TEQ/g	0.0053	<1 (토양환경기준)
총 배출량	μg-TEQ/ton-waste	0.26	<4.25 (후생성 목표치)

3.4. 자기열 용융

외부 열원 없이 폐기물이 가진 자체 에너지로 폐기물을 용융시켜 슬래그로 배출하는 것이 R21의 특징 중 하나이다. 이것이 가능한 이유는

첫째, 저공기비 연소로도 고온의 연소온도를 안정적으로 유지하는 것이 가능하고

둘째, 고온공기 가열기의 개발에 의해 연소용융로 출구 배가스에서 열을 회수하여 고온의 공기를 얻어 이를 열분해 드림의 열원으로 사용할 수 있도록 된 것이다.

특히 이 고온공기 가열기는 900~1100℃의 고온 배가스에서 500~550℃의 고온공기를 얻 으며, 고온 염소부식 분위기에도 불구하고 장기간 사용이 가능한 구조와 재질을 갖고 있 다.

상업운전중인 야메 서부 클린센터에서의 주요 공정에 대한 에너지수지는 Table 5와 같다. 에너지수지가 작성된 기간중의 폐기물의 NCV는 1,640 kcal/kg이고 가열공기 대기방출분 을 고려하면 외부열원 없이 자기열 용융이 가능한 폐기물의 최소 발열량은 약 1,500 kcal/kg 정도이다.

이는 R21이 가지는 가장 중요한 장점중의 하나로서, 산소나 LNG 혹은 코우크스 등 연소 /용융을 위해 외부로부터 연료나 첨가물 등을 공급받지 않고도 폐기물 자체의 발열량만 으로도 안정적 운전이 가능하다는 점은 운영비 절감 등 경제적 측면뿐 아니라 안전성 측 면에서도 매우 유리하다.

Table 5. Heat Balance (Yame Plant)

Heat input			Heat output		
	Mcal/h	%		Mcal/h	%
폐기물 투입	7,519.2	100.00	배가스	740.3	9.85
보일러 급수	1,232.7	16.39	순환 배가스	215.6	2.87
순환 배가스	158.3	2.11	회분	14.9	0.20
순환회	4.0	0.05	회수증기	6,647.4	88.40
냉각수	142.8	1.90	블로우 다운	18.8	0.25
연소공기	10.8	0.14	슬래그	85.9	1.14
용융로 하단 버너	65.0	0.86	철/알루미늄	0.3	0
			냉각수	261.8	3.48
			방열/열손실	683.9	9.09
			가열공기대기방출	463.9	6.17
Total	9,132.8	121.45	Total	9,132.8	121.45

3.5. 철, 비철의 회수

철, 비철금속은 열분해드럼 내에서 저산소 상태로 450℃까지 가열되므로 각종 금속 성분은 산화되지 않고, 특히 알루미늄도 용융되지 않은 상태이며 고온에서 이물질이 제거된 상태로 고품질을 유지한 채 회수된다. 따라서 회수된 철, 비철은 고가의 유상판매가 가능하다.

3.6. 슬래그의 품질

R21 연소용융로에서 나온 슬래그의 특징은 금속성분이 용출되지 않는다. 이는 전처리 과정에서 이미 금속 성분을 선별하여 용융하기 때문에 슬래그 중에 금속성분이 포함되어 있지 않다. 따라서 슬래그를 재활용후 장기간 외부에 노출시켜도 색깔 변화를 일으키지 않는다. 또한 연소용융로에 공급되는 무기물과 탄소 성분은 1 mm 이하의 크기로 공급되어 용융되므로 균질한 슬래그가 생성된다. 이러한 사항들은 슬래그를 도로포장재, 건축자재 등으로 유효하게 재활용하는데 대단히 유리한 요인이 된다. Table 6은 야메 서부 클린 센터의 슬래그 용출시험 결과이다.

Table 6. Leaching Test of Slag(Yame Plant)

시료채취일		'00. 7. 13	'00. 9. 15	일본 토양기준 (환경고시 46호)	국내 지정폐기물 기준
pH	-	9.0	6.8	-	-
Pb 및 그 화합물	mg/ ℓ	<0.005	<0.005	<0.01	<3
Cr(VI) 및 그 화합물	mg/ ℓ	<0.01	<0.01	<0.05	<1.5
As 및 그 화합물	mg/ ℓ	<0.005	<0.005	<0.01	<1.5
Se 및 그 화합물	mg/ ℓ	<0.002	<0.002	<0.01	-
Cd 및 그 화합물	mg/ ℓ	<0.001	<0.001	<0.01	<0.3
총 Hg 및 그 화합물	mg/ ℓ	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.005

3.7. 감용율

현재 R21 Process에는 돌과 유리도 분쇄하여 슬래그화하고 있다. 따라서 매립이 필요한 것은 탈염잔사 뿐으로 이 경우 감용율은 1% 이하이다.

야메 서부 클린센터에서 1999년 12월 21일부터 2000년 7월 31일까지의 시운전 기간 및 상업운전 기간에 처리된 생활폐기물에 대한 물질수지는 Table 7과 같다. 반입된 생활폐기물에 대한 잔재물의 배출비율은 11.76%이며 이중 슬래그, 철/비철 금속은 재활용 가능품목이므로 탈염 백필터에서 배출된 탈염잔사만이 매립되어 감용율 0.99%(1/101)의 달성 가능하다.

Table 7. Mass Balance(Yame Plant, 1999. 12. 21~2000. 7. 31)

구분	발생량	Mass flow rate	감량화율	감용화율	겉보기비중
	ton	%	-	-	ton/ m ³
생활폐기물 처리량	20,477	100	-	-	0.25
탈염잔사(고형화후)	728	3.56	1/28	1/101	0.9
슬래그	1,568	7.66	유상판매		1.2
철	80.0	0.39	유상판매		2.5
비철	31.7	0.15	유상판매		0.6

3.8. 발전효율

R21 시스템은 이하의 두가지 이유에서 종래의 스토커식 소각로보다 발전효율이 높다.

- ① 저공기비 연소로 보일러 출구 배가스량이 적다.
- ② 증기조건을 400℃, 40 기압으로 하고있기 때문에 터어빈 효율이 높다.

4. 결론

현재 일본내에서 추진되고 있는 폐기물 정책은 크게 4가지 추세를 반영하고 있으며 그 내용은 다음과 같다.

- 다이옥신 배출총량 규제 : 4.25 $\mu\text{g-TEQ/ton-waste}$ (배가스 및 Ash)
- 배가스 다이옥신 배출허용기준 강화 : 0.1 ng-TEQ/Nm^3
- 매립장 수명연장을 위해 소각재 용융에 의한 감용화율 증가
- 금속류 및 슬래그 회수로 자원 재활용

미쓰이조선의 R21 기술은 이 같은 일본 정부의 강화된 환경정책에 힘입어 개발되고 상용화된 폐기물 소각분야의 신기술로서 다음과 같은 특징 및 장점을 가지고 있다.

- 외부 열원이 필요 없는 자기열용융 가능 : 폐기물 발열량 1,500 kcal/kg 이상
- 산소를 사용하지 않는 안전하고 경제적인 공정
- 다이옥신 저감 : 총량 4.25 $\mu\text{g-TEQ/ton-waste}$ 및 배가스 0.01 ng-TEQ/Nm^3

이하 보증

- 높은 감용화율 달성 : 폐기물 처리량 대비 1% 이하
- 고품질의 철 및 알루미늄 회수 : 유상판매 가능
- 안정적이고 고품질의 슬래그 생산 : 도로포장재 등 사용

5. 참고 문헌

- 1) 平岡 正勝 : 廢棄物 處理와 Dioxin 對策, 環境公害新聞社
- 2) 原田 裕昭 : 熱分解, 熔融 Process(R21)와 Dioxin, 制 6回 廢棄物學會 研究發表會 講演 論文集
- 3) Y. Harada : The Operational Status of the Yame Seibu Clean Center, International Directory of Solid Waste Management, 2000/2001.
- 4) 原田 裕昭 : 八女西部 Clean Center 運轉結果報告, 2001.
- 5) 이재섭 : 생활폐기물 가스화용융설비 R21 소개, 추계 학술발표회 및 특별 심포지움, 한국열분해용융공학회, 순천대학교, 2001.
- 6) 山岡 玄博 : Kiln式 Gas化 熔融施設의 運轉實績と 今後 展開課題, 2002.