

## 대기오염방지

<KEITI 중국사무소 차목승 연구원>

### 생활 쓰레기 소각발전 연기 정화를 위한 결합 공정 소개

#### ▶ 개요

중국은 '12.5'규획(2010~2015년) 이후, 생활 쓰레기 소각관련 정책·법규가 지속적으로 제정되면서 쓰레기 소각발전 산업이 빠르게 발전하였다. 특히, 동 기간에는 1, 2선 도시(一、二线城市)<sup>1)</sup> 위주로 쓰레기 소각발전을 집중하였다면, '13.5'규획(2016~2020년) 기간에는 3, 4선 도시(三、四线城市)로 소각발전 산업에 대한 투자가 급속도로 확대되었다. [1·2·3·4선도시 각주 1 참고]

이는 중국정부의 오염물질 배출총량 통제를 강화되면서 각 지방정부 역시 생활 쓰레기 소각발전소에서 배출하는 오염물질 배출요구가 엄격해졌기 때문이다.

현재, 중국의 생활 쓰레기 소각발전소 연기배출은 <생활 쓰레기 소각 오염물질 통제표준(生活垃圾焚烧污染控制标准)>(GB18485-2014)(이하 '통제표준'으로 칭함)의 요구에 따라 적용하고 있으며, 일부 연안지역에 있는 일부 도시의 경우, 배출표준을 EU2010 수준(표 1. 참고)으로 더욱 엄격하게 요구하고 있는 곳도 있다.

따라서 본 기술동향은 최근 중국 생활 쓰레기 소각발전소 후단부에서 배출되는 연기 정화를 위해 적용되고 있는 5가지 결합 공정 알아보고자 한다.

#### ▶ 연기 정화시스템 운행조건

생활 쓰레기 소각발전소의 연기 정화시스템 운행조건은 다음과 같다.

표 1. 연기 정화시스템 운행조건

구분	배출농도		배출표준	
	보일러 유입구	설계값	중국(GB18485-2014)	유럽연합(EU 2010)
입자상물질(mg/m <sup>3</sup> )	3,000	5	20	10
염화수소(mg/m <sup>3</sup> )	1,000	5	50	10
이산화황(mg/m <sup>3</sup> )	650	30	80	50
질소산화물(mg/m <sup>3</sup> )	350	75	250	200
다이옥신(µgTEQ/m <sup>3</sup> )	-	0.08	1	0.1

자료출처 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

1) 2020년 기준, 중국의 총 338개 지급시(地级市, 중국의 행정구역 단위) 이상 도시 중 1선도시는 베이징(北京), 상하이(上海), 광저우(广州), 선전(深圳) 4개 지역이며, 新1선도시 성두(成都), 충칭(重庆), 항저우(杭州), 우한(武汉), 시안(西安), 텐진(天津), 수저우(苏州), 난징(南京), 정저우(郑州), 장사(长沙), 동관(东莞), 선양(沈阳), 칭다오(青岛), 허페이(合肥), 포산(佛山) 총 15개 지역이 추가되었다. 그 외 2선도시(각 성의 성도 등) 30개, 3선도시 70개, 4선도시 90개, 5선 도시 128개 지역으로 구성되어 있다. / 출처 : 바이두백과 번역(2021.2.2.검색)

▶ 연기 정화를 위한 주요 결합 공정 소개

최근 몇 년간 탈산(脱酸, deoxidation)<sup>2)</sup> 및 탈질 처리에 대한 결합 공정은 생활 쓰레기 소각발전소에도 광범위하게 적용되고 있다. 특히 연안 지역의 일부 1선 도시에서는 비교적 높은 수준의 배출표준을 요구하고 있어 이를 부합하기 위해 다양한 결합 공정을 적용하고 있다.

일반적인 탈산 처리는 건식, 반건식, 습식으로 나뉘며, 탈질은 SCR, SNCR으로 분류된다. 또한 연기재가열시스템(烟气再加热系统)은 스팀 열교환기(蒸汽换热器, Steam Gas Heater, 이하 'SGH'라 칭함)와 가스 열교환기(烟气换热器, Gas Gas Heater, 이하 'GGH'라 칭함)로 분류된다.

이에 동 기술동향은 현재 생활 쓰레기 소각발전소에서 주로 적용되고 있는 5가지 연기 정화처리의 결합 공정을 알아보려고 한다.

표 2. 쓰레기 소각발전소에서 연기 정화처리를 위한 각 결합 공정별 특징

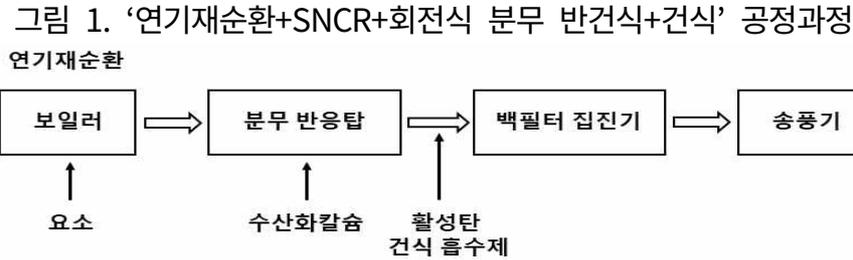
구분	오염물질 제거(%)	배출표준 적용조건	장점	단점
연기재순환+SNCR+회전식 분무 반건식+건식	<ul style="list-style-type: none"> <li>· HCl 96~98</li> <li>· SO2 90~92</li> <li>· NOx 53</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· GB18485-2014, EU2010</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 응용범위 넓음</li> <li>· 사용부지 적음</li> <li>· 간단한 공정</li> <li>· 투자비용 적음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 무설비 시스템</li> <li>· 유지보수 작업량 많음</li> </ul>
연기재순환+SNCR+건식+습식	<ul style="list-style-type: none"> <li>· HCl 99</li> <li>· SO2 95</li> <li>· NOx 53</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· EU2010</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 응용범위 넓음</li> <li>· 안정성 높음</li> <li>· 오염물질 제거율 높음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 복잡한 공정</li> <li>· 사용부지 큼</li> <li>· 투자비용 높음</li> </ul>
SNCR+회전식 분무 반건식+건식+SCR	<ul style="list-style-type: none"> <li>· HCl 96~98</li> <li>· SO2 90~92</li> <li>· NOx 75 이상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· EU2010</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 기술수준이 높음</li> <li>· 간단한 공정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 투자비용 높음</li> <li>· 유지보수 작업량 많음</li> </ul>
SNCR+건식+습식+SCR	<ul style="list-style-type: none"> <li>· HCl 99</li> <li>· SO2 95</li> <li>· NOx 75 이상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· EU2010</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 안정성 높음</li> <li>· 오염물질 제거율 비교적 높음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 복잡한 공정</li> <li>· 사용부지 큼</li> <li>· 에너지소모량 많음</li> <li>· 투자비용 비교적 높음</li> </ul>
SNCR+회전식 분무 반건식+건식+습식+SCR	<ul style="list-style-type: none"> <li>· HCl 99</li> <li>· SO2 99</li> <li>· NOx 75 이상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· EU2010 배출표준 보다 높음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 오염물질 제거율 매우 높음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 공정이 매우 복잡함</li> <li>· 사용부지 큼</li> <li>· 에너지소모량 많음</li> <li>· 투자비용 매우 높음</li> </ul>

자료 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

1) '연기재순환+SNCR+회전식 분무 반건식(旋转喷雾半干法)+건식' 결합 공정(이하 '1번 공정'이라 칭함)

현재 쓰레기 소각발전소에서 가장 광범위하게 적용되고 있는 '1번 공정'은 경제성이 우수한 연기 정화 방식으로, 그 과정은 다음(p.3, 그림 1. 참고)과 같다. 특히 건식 흡수제를 사용할 경우, 배출 농도가 <생활 쓰레기 소각 오염물질 배출표준>뿐 아니라 EU2010 배출표준 수준까지 도달한다.

2) 탈산(脱酸, deoxidation) : 금속의 정련에 있어서 금속 중에 남아 있는 산소를 산화하기 쉽게, 재료의 해가 되지 않는 규소(Si)나 망간(Mn)등의 탈산제를 가하여 산소를 제거하는 것이다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.2.1.검색)



자료 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

SNCR 공정의 화학반응 과정은 소각로 내 적합한 온도 구간에 환원제를 분사하여 질소산화물을 질소와 물로 환원시켜 고온 영역에서 환원반응을 일으킨다. 일반적인 SNCR의 처리효율은 33% 정도이지만, 연기재순환을 통해 최종적으로 제거율은 53%까지 향상시킬 수 있다.

회전분무건식법은 주로 수산화나트륨 제조, 흡수제 액체 분무화(吸收剂浆液雾化), 분무 장액(雾化浆液)과 연기 혼합(烟气混合) 등 부분으로 구성되어 있다.

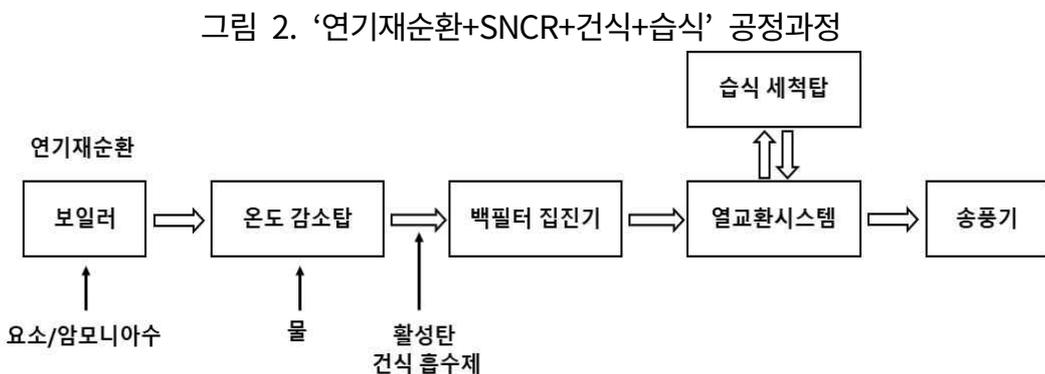
회전분부기를 거쳐 연기 속의 산성 gas와 함께 분무탑에서 충분히 반응하도록 수산화나트륨을 분무한다. 이 과정을 거친 후 건식 탈산법으로 유입되며, 흡수제는 백필터 집진기로 유입되기 전에 분사되어 산성 gas를 더욱 흡착시킨다. 따라서 '반건식+건식' 결합 공정을 통해 연기 중의 산성을 제거에 용이하다.

건식 분사에서 사용되는 흡수제는 수산화칼슘이나 탄산수소나트륨을 이용할 경우 산성 gas를 더욱 효과적으로 흡착시킬 수 있다.

수산화칼슘은 탄산수소나트륨보다 비용은 훨씬 저렴하지만 사용량이 탄산수소나트륨 대비 2배 가까이 많기 때문에 수산화칼슘을 이용할 경우, 중국 배출표준인 <생활 쓰레기 소각 오염 통제 표준>에는 부합할 수 있지만, EU2010 수준의 요구조건에는 부합하기 쉽지 않다. 하지만 요구 수준이 아주 높지 않은 지역에서는 수산화칼슘을 우선적으로 고려하고 있는 상황이다.

2) '연기재순환+SNCR+건식+습식(湿法)' 결합 공정(이하 '2번 공정'이라 칭함)

'2번 공정'의 과정은 다음과 같다.



자료 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

현재 생활 쓰레기 소각발전소에서 적용되고 있는 상황을 보면, 습식 공정은 탈산 효율이 반건조 공정보다 훨씬 높고, 배출 요구사항 또한 EU2010 수준보다 낮게 배출된다. 하지만 습식 공정은 반건식 공정에 비해 과정이 복잡하고, 생성되는 폐수량이 많기 때문에 투자규모가 비교적 크다.

이때 연기는 절탄기(省煤器, Economizer)<sup>3)</sup>를 거쳐 나와 온도감소탑(减温塔)으로 들어간다. 냉각수는 공급펌프를 통해 탑 꼭대기의 노즐로 보내어 진다. 냉각수는 압축 공기에 의해 분무가 가능한 형태로 전환되고, 탑 안에서 분사되어 연기와 직접 접촉하게 된다.

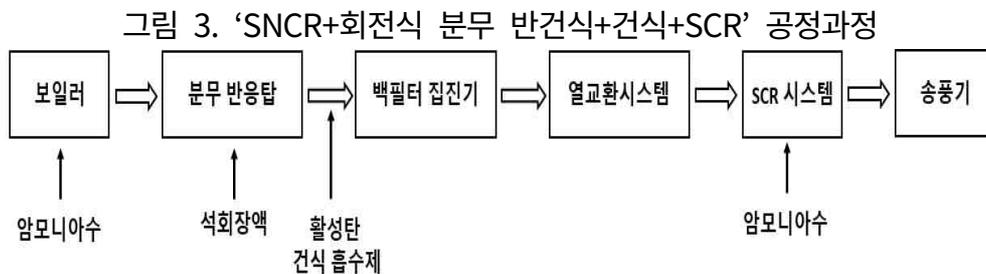
온도감소탑의 온도를 낮추게 되면 연기가 탑의 하단 부분으로 빠져나가 백필터 집진기로 유입된다. 건식분사 흡수제는 온도감소탑과 백필터 집진기 사이 연기 통로에서 분사되어 연기 속의 산성 가스와 반응하게 한다.

여기서 반응에 참여하지 않은 분말과 반응 후 생성된 염화 알갱이는 백필터 집진기로 유입되지 않도록 연기 통로에서 차단된다. 이는 반응에 참여하지 않는 일부 분말이 백필터 집진기로 들어가 연기 속의 산성 가스를 중화시킬 수 있기 때문이다.

백필터 집진기에서 나온 연기가 습식 세척탑으로 들어가 다시 탈산 처리된 후 송풍기를 통해 대기 중으로 배출된다. 하지만 ‘2번 공정’의 문제점은 탈산 처리 후 연기는 대부분 습식 형태이기 때문에 백연현상(白烟现象)<sup>4)</sup>이 자주 발생한다. 따라서 열교환기를 추가로 설치하여 습식 세척탑 입구 온도를 낮춰 백연현상 문제를 해결해야 한다.

### 3) ‘SNCR+회전식 분무 반건식+건식+SCR’ 결합 공정(이하 ‘3번 공정’이라 칭함)

‘3번 공정’은 상위 ‘1번 공정’에 SCR 시스템을 추가하였다. 이는 질소산화물 제거에 대한 요구가 높은 프로젝트에 적용된다. 따라서 SCR 시스템을 추가한 후 배출농도는 EU2010 수준에 부합하여 배출할 수 있으며, 그 과정은 다음과 같다.



자료 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

SCR 시스템의 원리는 촉매제를 통해 연기 속의 질소산화물이 환원제와 만나면서 탈질 반응한다. 이때 암모니아는 질소산화물을 질소와 수증기로 분해하며, SCR 시스템의 탈질효율은 70% 이상으로 비교적 높은 특징이 있다.

3) 절탄기(省煤器, Economizer) : 보일러 전열면(传热面)을 가열하고 난 연도(烟道) 가스에 의하여 보일러 급수를 가열하는 장치. 이것의 장점은 열 이용률의 증가로 인한 연료 소비량의 감소, 증발량의 증가, 보일러 몸체에 일어나는 열응력(热应力)의 경감, 스케일의 감소 등이 있다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.2.1.)

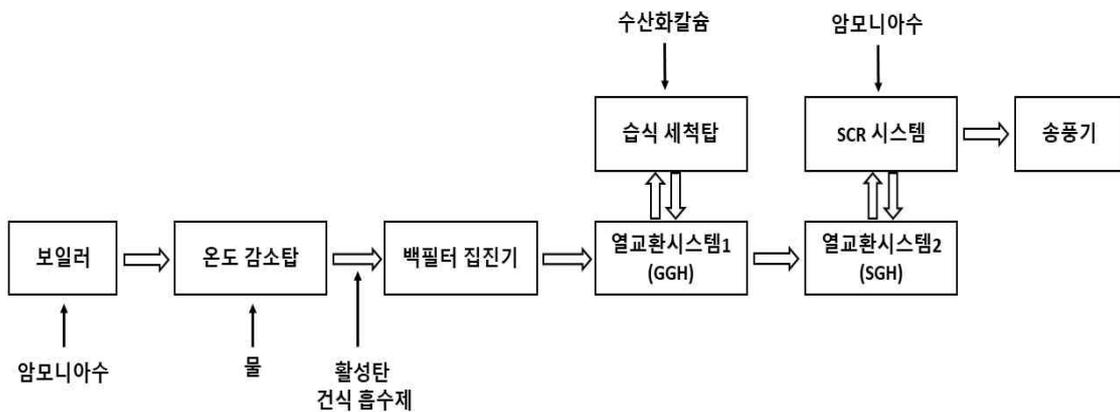
4) 백연현상(白烟现象) : 고온 다습한 공기가 외부의 차가운 공기와 충돌하였을 때 그 온도의 최대 포화 수증기압을 넘어서면서 수증기가 마치 연기처럼 보이는 현상이다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.2.1.검색)

‘3번 공정’은 생활 쓰레기 소각발전소 등 여러 산업에서 사용하는 SCR 시스템으로 촉매제를 사용해야 한다. 촉매제는 보통 저온(180°C)과 중온(200°C)으로 사용된다. 보통 저온 촉매제는 중온 촉매제에 비해 사용 온도가 낮아 증기 소모량이 적은 장점이 있지만, 반면에 단가가 높고, 이산화황 농도에 대한 민감도가 높은 단점을 지닌다. 따라서 촉매제의 재생주기, 경제성 등을 고려하여 합리적으로 촉매제를 선택해야 한다.

4) ‘SNCR+건식+습식+SCR’ 결합 공정(이하 ‘4번 공정’이라 칭함)

‘4번 공정’은 탈산, 탈질 효율이 높은 특징이 있으며, 그 과정은 다음과 같다.

그림 4. ‘SNCR+건식+습식+SCR’ 공정과정



자료 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

쓰레기가 연소된 후 발생한 연기가 여열보일러로 들어가며, 850~1,050°C의 고온지역에서 환원제를 분사하여 연기 중의 질소산화물을 제거하고 난 뒤 연기가 여열보일러에서 나와 온도감소탑으로 들어간다. 온도감소탑에서 냉각시킨 후 연기 통로를 통해 백필터 집진기로 들어가며, 집진기 앞 연기 통로에서 건식 흡수제와 활성탄이 분사된다.

연기는 백필터 집진기에서 나온 후 열교환시스템1(‘GGH’ 형태)을 통해 습식 세척탑으로 들어가 탈산 처리되어 저온 형태의 연기로 변한다. 또한 열교환시스템2(‘SGH’ 형태)에서 가열된 후 SCR 시스템으로 들어가 질소산화물을 추가적으로 제거하게 된다. 최종적으로 SCR 시스템에서 배출되는 연기는 송풍기를 통해 가압된 후 굴뚝을 통해 대기 중으로 배출된다.

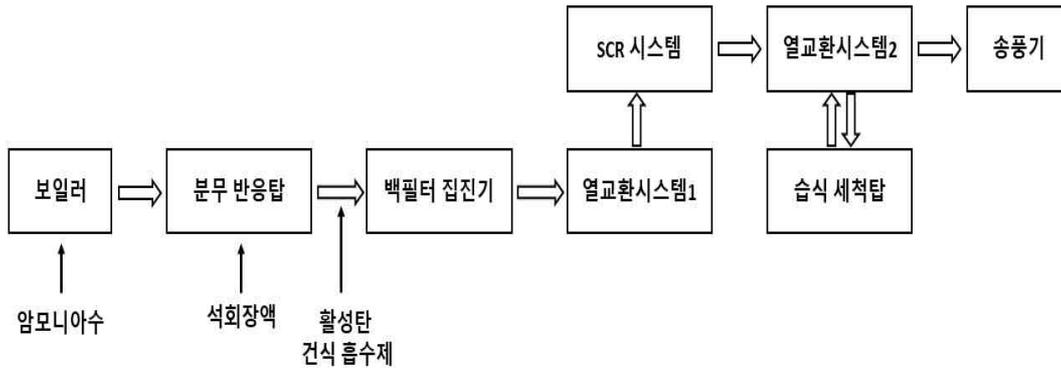
‘4번 공정’은 연기가열시스템이 비교적 복잡하다. 우선적으로 두 대의 ‘GGH’ 형태와 한 대의 ‘SGH’ 형태의 열교환기를 사용해야 한다. 특히 ‘GGH’ 형태의 경우, 습식 세척탑 전에 사용되기 때문에 연기 중 부식을 유발하는 성분 기체가 많아 보통 PTFE(Polytetrafluoroethylene)<sup>5)</sup> 소재로 된 설비를 사용하여 부식을 방지할 수 있지만 비용이 증가하게 된다.

5) PTFE(Polytetrafluoroethylene) : 폴리테트라플루오로에틸렌, 4불화(弗化) 에틸렌 수지(樹脂): 화학식(-CF<sub>2</sub> -CF<sub>2</sub> -)<sub>n</sub>으로 표시되는 중합체. 가소제(可塑劑)-수지의 총칭; 4불화 에틸렌(tetrafluoroethylene)으로부터 만들어진다; 매끄럽고 끈적거리지 않는 성질로, 가스켓(gasket)-전기 절연체-관류(管類)-캔디의 틀-용기의 안감-프라이팬의 겹칠 재료의 제조에 사용된다. / 출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.2.1.검색)

5) ‘SNCR+회전식 분무 반건식+건식+습식+SCR’ 결합 공정(이하 ‘5번 공정’이라 칭함)

‘5번 공정’은 현재 쓰레기 소각발전소에서 연기 정화를 위한 가장 완전한 공정으로 Ningbo(宁波), Shenzhen(深圳), Guangzhou(广州) 등 여러 지역에서 응용한 사례 또한 많다.

그림 5. ‘SNCR+회전식 분무 반건식+건식+습식+SCR’ 공정과정



자료 : 북극성대기망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

특히 ‘5번 공정’을 사용할 경우, 배출농도가 EU2010 배출표준보다 훨씬 낮게 측정되어 이에 따른 설계요구 등이 높아 경제적 부담이 크기 때문에 배출 총량 제어 및 환경보호 요구가 엄격한 지역이나 프로젝트에 주로 적용하게 된다.

일반적으로 연기 정화를 위해 ‘반건식+건식’ 공정 또는 ‘건식+습식’ 공정을 선택한다. 하지만 건식, 반건식, 습식 공정을 동시에 사용하여도 오염물질 배출을 감소시키는 것은 한계가 있어, 이를 해결하기 위해 열교환기를 이용한다.

특히 공정 과정 중 열교환시스템1에서 고장이 발생할 경우, 후속 공정을 통해 오염물질 배출을 제어할 수 있으며, 아울러 SCR 시스템과 습식 세척탑의 설치 위치를 다르게 하여, SCR 촉매제의 사용시간을 늘리고 송풍기의 압력손실을 낮출 수 있다.

▶ 시사점

현재 중국 대부분의 연안지역 도시에서는 연기 정화 효율이 높고 안정성이 뛰어난 다양한 형태의 복잡한 결합 공정을 적극 활용하여 사용하고 있다. 그중, 장쑤성(江苏省), 저장성(浙江省) 등 지역에서 신규 진행하는 소각발전 프로젝트는 위와 같이 여러 결합된 공정을 이용하여 오염물질 배출을 제어하고 있기 때문에 향후 환경보호산업은 오염물질 제로배출의 목표와 더불어 환경 설비의 국산화 추진으로 인한 투자절감 등이 주요 관심사로 급부상 될 것으로 전망된다.

출처 : 북극성대기망(2020.12.9.발표), <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20201209/1121002.shtml>, 2021.2.2.접속

※ 기술용어 번역·해석이 일부 상이할 수 있으니 반드시 중문본을 확인하시기 바랍니다.



## 중국환경산업 주간기술동향

발행

2021년 2월 2일 KEITI 중국사무소

기획총괄

▶ 박재현 소장(korea@keiti.re.kr)

주저자

▷ 차목승 연구원(cms0522@keiti.re.kr)

공동저자

▷ 윤영근 연구원(ygyin0919@keiti.re.kr)

▷ 김종균 연구원(jaykim@keiti.re.kr)

▷ 임승택 연구원(stlim@keiti.re.kr)

▷ 성소묘 연구원(miao2013@keiti.re.kr)

국민과 함께  
미래를 여는  
글로벌 환경전문기관

중국환경산업 주간기술동향은 매주 화요일 발행됩니다.

문의 : +86-10-8591-0997~8