

# 미세먼지 저감을 위한 석탄화력발전소 대기오염방지시설 - 독일 사례



2018.02

고 정 희

**THIRDSPACE** BERLIN  
써드스페이스 베를린 환경 아카데미

## 목차

1. 서문	4
2. 독일의 석탄 화력발전의 현황과 미래 전망	4
2.1. 석탄 화력발전의 단계적 퇴출	6
2.2. 화력발전과 환경 배출	7
2.2.1. 일반 현황	7
2.2.2. 천연가스 화력발전소의 오염물질 배출	10
2.2.3. 석탄 화력발전의 대기 오염물질 배출	10
2.3. 수은	11
3. 화력발전소 배출 규제를 위한 법적 근거	12
3.1. 개요	12
3.2. 유럽연합 지침	12
3.2.1. 산업배출량 지침IED과 최적 가용 기술 BAT (Best available technology)	13
3.2.2. 최적가용기술에 대한 유럽연합 문헌(BREF)과 산업체별 최적가용 기술기준서 (BAT Conclusion)	14
3.3. 독일 법	15
3.4. 연방 오염물질 방지에 관한 법 Bundesimmissionsschutzgesetz(BImSchG)	15
3.4.1. 개요	15
3.4.2. 구조와 내용	16
4. 유럽연합의 대형 연소 시설에 대한 최적가용기술 및 배출기준	18
4.1. 구성과 내용	18
4.1.1. 석탄 화력발전소의 최적가용기술과 배출범위	22
4.1.2. 천연 가스	30
4.1.3. 기술에 대한 설명	37
5. 독일 연방 오염물질 방지에 관한 법규명령 제 13호(대형 연소시설)	42
5.1. 구조와 내용	42
5.2. 석탄 및 천연가스 화력발전소에 해당되는 항목 요약	43
6. 기술 적용의 사례	46
6.1. 석탄 화력발전 기술의 유형	46
6.1.1. 울트라 초 임계 증기 터빈 및 발전기	46
6.1.2. 700도 기술: IGCC 발전소(integrated gasification combined cycle, 석탄가스화 복합발전)	47
6.1.3. IGCC-CCS 발전소	47
6.1.4. 유동층 건조 설비 Wirbelschichttrocknung Fluidized bed drying	47
6.1.5. 초성능 정화기술REAprus(2014년에 첫 가동)	47
6.2. 적용 사례: 니더아우셈 발전소 “BoA”	48
7. 쟁점 기술: 이산화탄소 분리 및 저장 (CCS: carbon dioxide capture and storage)	49
7.1. 개요	49

7.2. 저장	50
7.3. 법적 근거	51
7.4. 평가	52
<b>참고문헌</b>	<b>58</b>

<표 차례>

표 1. 발전소의 일반적 환경기능을 개선하고 탄소화합물 및 비연소물질의 배출을 줄이기 위한 최적 가용 기술(BAT 6) 및 적용 범위	19
표 2. 에너지 효율 상상을 위한 최적 가용 기술(BAT 12) 및 적용범위	20
표 3. 석탄 화력발전소에 추가적으로 요구되는 환경 과제(BAT 18) 및 적용 범위	22
표 4. 석탄 화력발전소의 에너지 효율 상상을 위한 추가적 최적 가용 기술(BAT 19) 및 적용 범위	23
표 5. 연소 유닛 유형에 따른 에너지 효율 범위	23
표 6. NOx, CO 대기배출 저감을 위한 최적 가용 기술과 적용 범위(BAT 20) 및 적용 범위	23
표 7. 석탄(역청탄과 갈탄) 연소를 통한 NOx 대기 배출범위	24
표 8. 석탄(역청탄과 갈탄) 연소를 통한 CO- 대기 배출범위	25
표 9. SOx-, HCl, HF 대기 배출 저감을 위한 최적 가용 기술(BAT 21) 및 적용 범위	25
표 10. 최적 가용 기술 적용과 관련된 SO2 배출범위	26
표 11. 최적 가용 기술 적용과 관련된 HCl alc HF 배출범위	27
표 12. 먼지, 미세먼지 저감을 위한 최적 가용 기술(BAT 22) 및 적용범위	28
표 13. 먼지 배출범위	28
표 14. 수은 배출 저감을 위한 최적 가용 기술(BAT 23) 및 적용범위	29
표 15. 수은 배출 기준	30
표 16. 천연 가스 발전소의 에너지 효율을 높이기 위한 기술	30
표 17. 천연가스 발전소의 에너지 효율 범위	31
표 18. 천연가스 연소시설의 NOx 저감을 위한 기술(BAT 41) 및 적용범위	32
표 19. 천연가스 가스터빈 연소시설의 NOx 저감을 위한 기술(BAT 42) 및 적용범위	33
표 20. 천연가스 엔진의 NOx 배출을 방지하거나 저감하기 위한 최적 가용 기술(BAT 43) 및 적용범위	33
표 21. 천연가스 가스터빈 연소의 NOx 배출범위	34
표 22. 천연가스 보일러와 엔진의 BAT NOx 배출범위	36
표 23. 천연가스 연소로 인한 비 메탄 유기물 가스 및 메탄의 BAT 배출범위	37
표 24. 대기 배출 저감을 위한 일반 기술	37
표 25. 에너지 효율을 높이기 위한 기술	37
표 26. NOx, CO 배출 저감 기술	38
표 27. SOx-, HCl-, HF 대기 배출 저감 기술	40
표 28. 먼지, 금속(수은 포함), PCDD 대기 배출 저감 기술	41

<그림 차례>

	1
그림 1. 독일 전력생산원 1990-2017 변동 추세. 석탄(갈탄, 역청탄)이 미미하게 감소하고 있지만 아직은 가장 큰 에너지원이다. 출처: Tkarcher, AG Energiebilanzen.	5
그림 2. 1990/1995년을 기준으로 하여 2015년까지의 대표적 대기 오염물질 배출 변화 추이	8
그림 3. 에너지 이용으로 인한 대기오염물질 배출량 2015. 출처: Umweltbundesamt. Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 bis 2015.	

미세먼지 저감을 위한 석탄 화력발전소 대기오염방지시설 개선방안 독일 사례

01/2017	9
그림 4. 독일 미세먼지 (PM 2.5) 배출원에 따른 배출량 변화 추이. 출처: 독일 연방환경청. 2017.02.	11
그림 5. 유동층 건조Fluidized bed drying. 그래픽: Sharayanan	47
그림 6. 니더아우셈 발전소 전경. 사진: Stodtmeister CC BY 3.0	48

## 1. 서문

라인강의 기적을 일으킨 산업국가 독일에서는 석탄 화력발전이 에너지 생산의 가장 큰 비중을 차지해 왔으며 지금도 그 점에는 변함이 없다. 다만 그에 따른 환경문제를 일찍 인지하여 1990년대에 대기오염물질을 크게 저감하는데 성공했다. 현재는 기후변화를 초래하는 온실가스 저감에 주력하는 중이다. 원자력에너지 포기과 함께 석탄 화력발전소 역시 단계적으로 퇴출 하자는 요구가 날로 커지고 있으나 아직 정책적 결정은 내리지 못하고 있다. 그러나 국민 76% 이상이 퇴출을 요구하고 있고 정치가들 역시 75% 이상 이를 지지하고 있으므로 퇴출 결정은 시간문제인 것으로 보인다.

환경배출을 저감하고 에너지 효율을 높이는 최첨단의 발전 기술을 보유하고 있는 독일 산업의 일각에서는 이를 계속 이용하여 저비용으로 많은 전력을 생산, 수출하고자 하는 것도 사실이다. 그러나 날로 확장되고 있는 신재생에너지와의 균형을 맞추는 것 역시 큰 숙제로 남아 있다.

독일은 일련의 통합적 시스템을 운영하여 대기오염물질을 규제하고 있다. 유럽연합의 지침을 여러 국내법에 나누어 수렴하였으며 이들은 모두 <최적가용기술 Best available technology>의 원칙을 따른다. 즉, 현시점에서 적용 가능한 최적의 기술을 써서 오염물질의 배출을 최소화하자는 것이다. 지침이나 법령에서 제시하고 있지 않은 기술이라도 그것이 동일한 효과를 준다고 검증이 되면 적용해도 된다. 이때 각 물질별로 분리하여 따로 살피는 한 편, 여러 공정을 최적화하고 에너지 효율을 높이며 연료 소모를 줄이는 등 모든 가능한 방법을 총동원하여 복합적, 통합적 시스템을 구축함으로써 최대의 효과를 얻는 것이 관건이다.

본고에서는 이런 사항들을 구체적으로 서술하고 유럽연합에서 최근에 제정한 <화력발전소에 대한 최적가용기술 및 배출범위>의 내용을 가능한 충실히 전달하고자 한다. 독일 연방은 오염물질 방지에 대한 법규명령 제 13호에서 화력발전소 배출한계치를 정의했다. 이 한계치는 유럽 연합에서 제시한 배출 범위 내에 있거나 물질에 따라서 그보다 좀 더 엄격하다.

## 2. 독일의 석탄 화력발전의 현황과 미래 전망

현재 독일 석탄 화력발전에 대해 여러 이익과 패러다임이 서로 맞서 팽팽한 긴장관계를 이루고 있다. 비교적 쉬웠던 원자력 폐지 선언<sup>1)</sup> 때와는 다른 양상을 보인다.

신재생에너지의 비율이 날로 높아지고 있음에도 석탄 화력발전은 아직 독일 에너지 생산의 기저를 이룬다(그림1 참조). 통계에 따르면 2016년에 전력생산 40.3%를 책임졌으며 이로 인해

1) 2011년 일본 후쿠시마의 원전사고가 결정적 계기를 제공했다. 그때까지 원전에 대해 우호적이었던 메르켈 수상은 바로 그 다음 날 결국 원전포기를 선언했다. 이어 2011년 6월 6일 일차적으로 8개소의 원자력발전소를 정지시키고 2022년까지 원자력발전에서 완전히 발을 빼기로 결정했으며 이에 따라 원자력법을 개정하여 6월 30일 연방의회에서 절대 다수의 지지를 얻어 통과시켰다.

이산화탄소를 포함한 환경오염의 가장 큰 배출원으로서의 오명도 지켜냈다. 이 때문에 현재 여론의 강한 압박을 받고 있기도 하다.<sup>2)</sup>

2016년 말을 기준으로 독일에서 가동되고 있는 석탄 화력발전소는 역청탄과 갈탄을 합쳐 모두 167기, 총 전력생산량은 약 500 TW에 달했다.

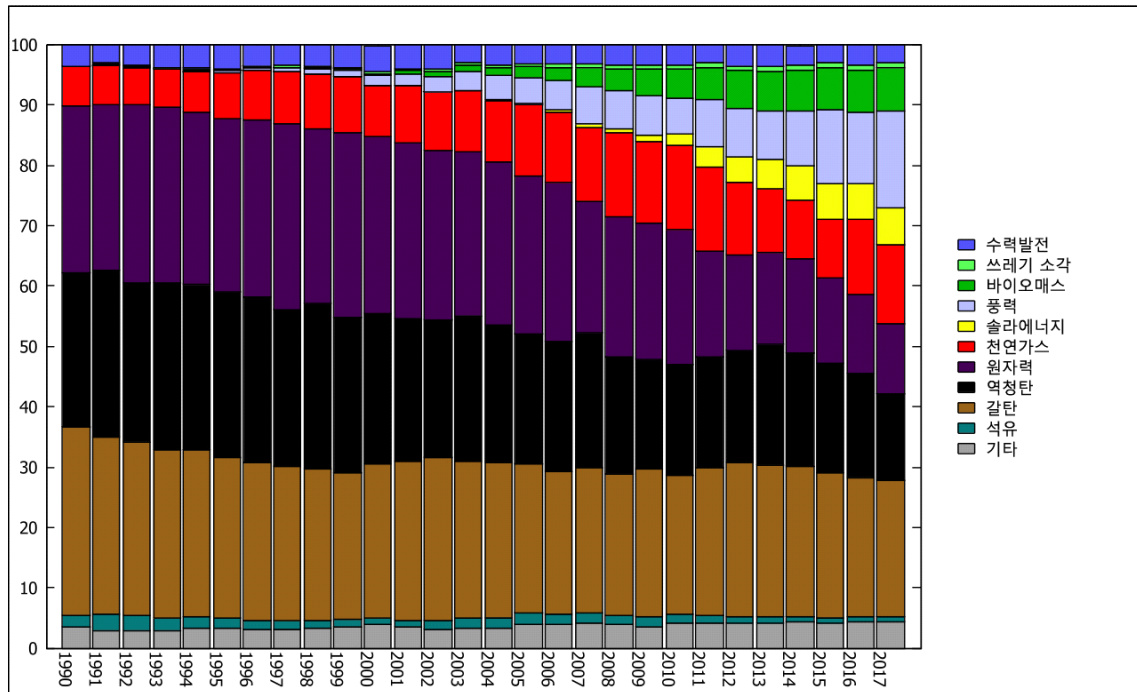


그림 1. 독일 전력생산원 1990-2017 변동 추세. 석탄(갈탄, 역청탄)이 미미하게 감소하고 있지만 아직은 가장 큰 에너지원이다. 출처: Tkarcher, AG Energiebilanzen.

독일에서 생산되고 있는 석탄의 종류는 갈탄 (Lignite)과 역청탄 (Hard Coal)이다. 그 중 갈탄은 백퍼센트 화력발전을 위한 연료로 이용되고 있다. 역청탄의 쓰임새는 좀 더 다양한 편이어서 발전연료 외에도 코크스로 가공되어 철강용광로의 연료로 쓰이며 그 밖에 화학 산업의 원료로도 쓰이고 있다. 갈탄 화력발전소는 기저부하Base load power를 담당하고, 중간부하 Middle load power를 담당하는 화력발전소에서는 갈탄을 연료로 쓰고 있다.<sup>3)</sup>

### 천연가스 화력발전

천연가스 화력발전소는 고체연료 발전소에 비해 시설 설치비가 적게 들고 환경오염물질의 배출량도 현저히 낮으나 연료가 비싸기 때문에 운영비가 높아 아직 석탄 화력발전을 능가하지 못하고 있다. 대규모의 천연가스 발전소는 모두 가스-증기 복합 발전소(GuD)로 건설되고 있으며 중간부하 또는 기저부하를 담당한다.<sup>4)</sup>

2) Umweltbundesamt(UBA), Daten und Fakten zu Braun- und Steinkohle, UBA Hintergrund 2017. p. 2.

3) 고정희, 독일의 화력발전 현황과 환경 모니터링, KEI 2014.10. p. 3.

4) Rüdiger Paschotta, Gaskraftwerk, Energie-lexikon. 온라인: <https://www.energie-lexikon.info/gaskraftwerk.html>

2011년 <에너지 전환> 선언<sup>5)</sup>과 함께 풍력, 태양 에너지 다음으로 천연가스 발전이 친환경 에너지의 자리를 차지하여 잠시 상승세를 보였다. 그러나 결국 경제성이 뒤떨어지는 관계로 크게 증축되지 않고 있으며 오히려 문을 닫는 경우도 있다. 예를 들어 2011/2012년 연이어 준공된 이르싱 가스-증기 복합발전소 4, 5 기의 경우 지멘스 사가 이를 위해 최첨단의 가스터빈을 설계하여 “세계에서 가장 모던한 가스 화력발전소”로 알려졌으며 인근의 원자력 발전소가 폐쇄된 후 바이에른 주의 전력공급의 큰 부분을 떠맡고 있다. 에너지 효율 60%로 세계에서 가장 효율이 큰 발전소에 속함에도 불구하고 적자를 보고 있어 2016년 운영사 측에서 폐지 신청서를 제출했다. 담당기관에서는 바이에른 주 전력공급 안정을 위해 기각했고 운영사는 현재 법원에 이의 신청을 제기한 상태다.

관계자들은 신재생에너지에 대한 강력한 정부지원으로 인해 종래의 발전소들은 전력 시장에서 난항을 겪어 적자를 내게 되었다고 설명했다. 연방 정부에서는 이와 같이 발전소들이 경제성을 이유로 문을 닫는 것을 방지하기 위해 2013년 에너지경제법을 개정하여 “공급안정을 위해 필요한 발전소”로 정의된 가스 발전소는 문을 닫을 수 없다고 규정했다.<sup>6)</sup> 이 경우 적자분은 정부에서 보상해 준다.

이런 사례들은 여러 에너지원사이에 밸런스를 지키는 것이 결코 쉽지 않음을 증명한다. 특히 에너지 민영화와 되어 있어 자유 시장경제에 내맡겨진 상태이기 때문에 주식시장의 상황에 따라서 에너지 믹스의 양상이 매일 달라지고 있으므로 상황은 더욱 복잡하다.

## 2.1. 석탄 화력발전의 단계적 퇴출

비록 2014년 독일 정부, 산업계, 노조가 한 자리에 모여 늦어도 2040년에 석탄이용을 제로화 하겠다는 목표를 설정하고 곧 전략을 수립할 것이라 천명했으나 아직은 신재생에너지의 공급이 불안정하고 생산비용이 높기 때문에 공급안정을 위해 당장은 석탄 화력 발전을 포기하기 어렵다는 정치적 견해가 지배적이다.

당시 연방정부에서 발표한 화력발전 관련 핵심전략을 살펴보면 아래와 같다<sup>7)</sup>:

- 전환기의 에너지공급수준을 보장하기 위해 현재 계획 중이거나 공사 중인 화력발전소를 서둘러 준공, 가동시키고 그에 더해 10 GW의 용량을 추가적으로 확보한다.
- 기술 혁신을 통해 에너지 효율을 최대한 높이고 환경영향을 최소화한다.
- 모든 건물을 2050년까지 저에너지 건물로 재생하여 재생에너지의 이용에 앞서 에너지 소비를 줄이는 전략을 병행해야 한다.

국민들의 76% 이상이 단계적인 석탄발전 퇴출을 지지하고 있고 그에 대한 여러 복안이 제시되고 있지만 정치적 결정을 미루고 있는 상황이다. 지난 해, 2017년 가을에 치러진 총선 이후

5) 2011년 6월 30일 연방 의회에서 핵에너지 퇴출법을 결의한 날을 기점으로 에너지 전환이 공식적으로 선언되었으나 실제 움직임은 이미 1970년대 시작되었다.

6) EnWG(에너지 경제법) 제 13c 조.

7) 독일연방정부, Der Weg zur Energie der Zukunft, 온라인 아카이브, 2011.11.16

수개월 동안 정부 결성에 난항을 겪어 어떤 정책적 결정도 내리지 못하고 있다. 2018년 2월 첫 주에 드디어 연합정부(사민당+기민당)가 결성되었으나 아직은 부서를 나누고 있는 중이므로 “기후목표 달성 및 석탄 퇴출”을 요구하는 여론의 압력을 곳곳하게 버텨내고 있다.

정당별로 보면 녹색당의 99%가 석탄 화력발전 포기를 지지하고 있고 사회민주당 81%, 기독교 민주당과 좌파당 75%가 지지하고 있다. 그뿐 아니라 석탄 화력 포기는 소위 기업가들의 정당이라고 일컫는 자유민주당과 극우파 정당 AfD 까지도 구성원의 70% 이상이 지지하고 있다.<sup>8)</sup> 이런 분위기로 미루어 보아 정부가 안정되는 대로 석탄 화력발전소의 미래에 대한 결정을 내려야 할 것으로 여겨진다.

공급안정성 뿐 아니라 지난 수 세기에 걸쳐 수많은 연구개발비를 투자하여 성취한 최첨단 기술의 향방도 문제가 된다. 반면 석탄 화력발전의 경제성이 점점 떨어지고 있으므로 어쩔 수 없이 폐지되는 발전소도 하나 둘 증가하고 있다. 시대의 흐름에 맞춰 신재생에너지로 전환하는 전력회사도 있지만(E.ON) 대개는 기술과 전력을 해외로 수출하는 추세이다.<sup>9)</sup>

2017년 7월 20일 현재까지 폐지된 석탄 화력발전소가 총 45기, 발전 용량 6,619 MW이며 신축 중인 발전소가 1개소(1,100 MW)다.<sup>10)</sup> 그 외 2기의 발전소 건설이 계획되어 허가 절차를 밟고 있지만 관에서 허가를 내 준다 하더라도 주민들과 환경단체의 맹렬한 반대에 부딪쳐 시공은 불가할 것으로 전망된다. 실제로 지난 수년 간 무산된 석탄발전소 건설 계획이 여러 건이다.

2017년 말 연방 환경청은 석탄 화력발전의 현황과 전망에 대한 보고서를 발표하면서 2016년 온실가스 배출량이 오히려 증가했다고 발표하고 지금의 상태가 지속된다면 2020년 기후보호 목표 달성이 불가능하다고 밝혔다. 그리고 그 원인으로 석탄 화력 발전을 들었으며 서둘러 석탄 화력 발전을 퇴출하는 것이 불가피하다고 권고했다.<sup>11)</sup>

## 2.2. 화력발전과 환경 배출

### 2.2.1. 일반 현황

전형적인 배출물질 즉 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, 비메탄 휘발성 유기화합물(NMVOC), 암모니아(NH<sub>3</sub>) 및 미세먼지 등의 배출량은 1990년대에 기술개발과 한계치 도입 등을 통해 현저하게 감소되었다. 그중 SO<sub>2</sub> 배출량은 약 95%를 저감했다. 2015년 이후 저감 속도가 느려져서 제자리걸음을 하고 있는 상태이다.<sup>12)</sup>

재생에너지 이용의 증가로 석탄 소비량이 줄어 배출량도 크게 저감될 것으로 기대했었다. 그

8) Petra Pinzler, “Selbst FDP-Wähler wollen Kohleausstieg”, *Die Zeit*, 2017.11.15.

9) 유럽 연합은 전력 생산 민영화제도를 실시하고 있으므로 유럽 전역에 수많은 전력회사가 있고 수출입 시장 규모도 만만치 않다.

10) Umweltbundesamt-Kraftwerk Datenbank 2017

11) Umweltbundesamt, *Braun- und Steinkohle: Verstromung schädlich für Klima und Umwelt*, 2017.12.12.

12) Umweltbundesamt, *Energibedingte Emissionen*, 2017.05.24.



러나 예상과는 달리 천연가스 가격이 비싸지고 유럽 시장의 탄소배출권이 인플레이션을 겪으며 가격이 크게 떨어져 갈탄 화력발전소가 다시 상승세를 타게 됐다. 이와 함께 전력 수출량도 증가했다. 독일은 전력 수출국이기 때문에 내수보다 많은 양을 생산하고 있다. 다시 말해서 전력생산량, 그것도 갈탄 화력발전소의 생산량이 증가했으므로 아무리 최신 기술을 적용한다고 해도 배출량이 저감될 수 없는 것이다. 그에 더해 에너지를 생산한 국가에 배출량이 할당되므로 독일은 수출한 전력에서 발생한 배출도 통계에 넣어야 한다. 2016년 기준으로 연료 가격을 비교해 보면 역청탄: 80 €/t, 갈탄: 40 €/t, 천연가스: 210 €/t 으로 현저한 가격차이가 나기 때문에 에너지 산업계에서 값싼 갈탄이나 역청탄 발전소의 가동량을 증가시킨 것이다.<sup>13)</sup> 독일 에너지 산업계는 한 가지 연료에 국한하지 않고 여러 유형의 발전소를 보유하고 시장 상황에 따라 가동량을 조절하고 있다.

아래 그래프에서 2010년을 기점으로 하여 배출량이 거의 정체되고 있음을 알 수 있으며 암모니아는 오히려 상승세를 보이고 있다. 암모니아는 물론 화력발전과는 관련이 없으며 주로 농업 배출에 근거한다.

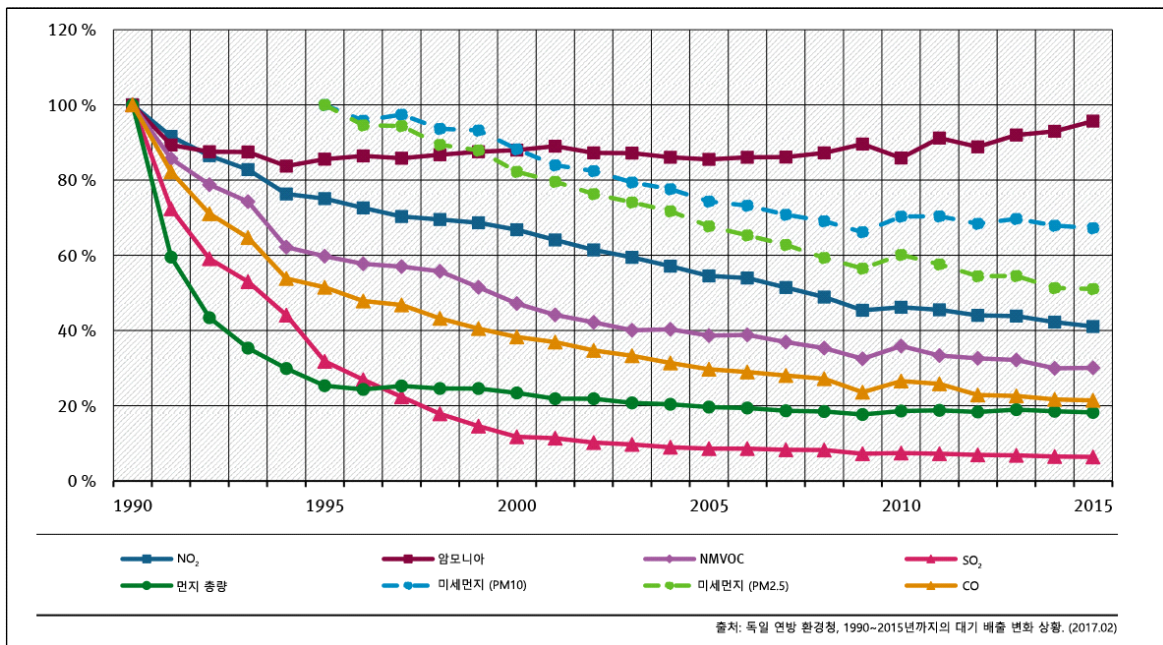


그림 2. 1990/1995 년을 기준으로 하여 2015 년까지의 대표적 대기 오염물질 배출 변화 추이

물질별 비율을 보면 일산화탄소가 차지하는 비율이 가장 크고 질소화합물, 이산화황, 비메탄 휘발성 유기탄소 화합물 그리고 미세먼지의 순이다.

13) George Milojic: Yvonne Dyllong, Vergleich der Flexibilität und der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kohlen- und Gaskraftwerken. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 66.Jg. (2016) Heft 7. p.29

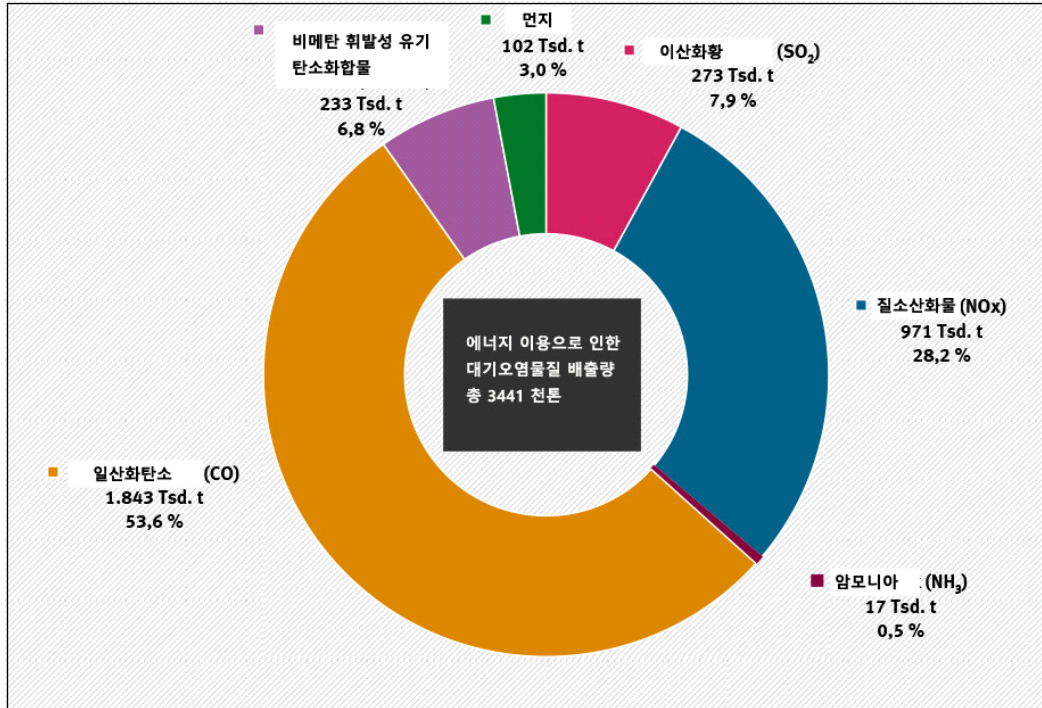


그림 3. 에너지 이용으로 인한 대기오염물질 배출량 2015. 출처: Umweltbundesamt. Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 bis 2015. 01/2017

## 온실가스

배출관련 독일의 관심사는 사실 온실가스에 집중되어 있다. 기후변화를 초래하는 원인이며 초 성능 필터나 촉매 기술 등으로도 잡을 수 없는 것이 온실가스이므로 가장 큰 관심을 받고 있는 것이다. 이는 또한 독일이 기후변화를 대단히 중대한 사안으로 여기고 민감하게 반응하는데에도 원인이 있다.

온실가스 98%는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)로 이루어지며 나머지는 메탄(CH<sub>4</sub>)과 이산화질소(N<sub>2</sub>O)가 차지한다. 대기 중 이산화탄소 비율을 더 이상 높이지 않기 위해 소위 말하는 이산화탄소 분리 및 저장 기술(CCS: carbon dioxide capture and storage)이 개발되었으나 기술 적용이 불가능하게 되었다. 국민의 대부분이 이산화탄소를 지층에 저장하는 것을 반대하기 때문이다. 이는 기후변화 대응과 관련하여 현재 가장 큰 쟁점이 되고 있는 사항이므로 뒤에서 [별도로](#) 고찰하고자 한다.

메탄은 주로 석탄을 채굴할 때 발생하며 이산화질소는 연소공정에 의해 발생한다. 독일의 경우 석탄 채굴량의 감소와 메탄가스를 다시금 연료로 이용하기 때문에 메탄가스 대기 배출량은 1990년을 기준으로 지속적으로 감소하고 있다.

온실가스는 기후변화의 원흉이기는 하지만 엄밀한 의미에서 오염물질이라 볼 수 없기 때문에 유럽연합의 최적가용기술 기준에서 감안하지 않고 있다.

## 2.2.2. 천연가스 화력발전소의 오염물질 배출

천연가스 발전소의 배출물질은 대부분 메탄이다. 이는 온실가스의 일부이므로 배기의 메탄 함량 뿐 아니라 가스 시추와 운송에 따른 누출분도 함께 감안된다.

천연가스의 온실가스 배출량은 일반적으로 다음의 범위 안에 있다.<sup>14)</sup>

- 가스-증기 복합발전: 420-480 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh(이산화탄소 상당값)
- 가스터빈 발전: 570-750 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh

[천연가스](#) 화력발전소의 배출에 대해서는 유럽연합의 최적가용기술 기준에서 별도로 다루고 있다.

## 2.2.3. 석탄 화력발전의 대기 오염물질 배출

석탄 화력발전소는 오염물질을 가장 많이 배출하는 시설로 비판의 대상이 되고 있다. 1980년대부터 석탄 화력발전소에 필터 및 배기 정화시설을 설치하여 먼지와 유황을 걸러냈음에도 지금도 미세먼지, 이산화황, NO<sub>x</sub>, PAK, 중금속 등을 배출한다. 중금속 중에서 수은은 가스의 형태로 배출되며 납, 카드뮴, 니켈 등의 발암물질 입자들은 미세먼지에 섞여서 나온다. 이에 대기질 기술 기준TA Luft에서 대기 오염 한계치를 정의하고 있으며 수질 오염에 대해서는 하수에 관한 법규명령에서 규정한다. 단, 용량 **50 MW**이상의 대형 연소시설의 배출은 별도의 법규명령을 만들어 규제하고 있다. (3. [법적 근거](#) 참조)

석탄 화력발전소에서 배출하는 대기 오염 물질에 대해서는 그 내용이 충분히 알려져 있으므로 신규로 추가되거나 하는 것은 없다. 다만 배출 한계에 대해서는 더욱 엄격하게 규제하도록 사회적 압박이 계속 가해지고 있다. 배출 한계를 엄격하게 하라는 요구에 그치는 것이 아니라 전술한 바와 같이 중장기적으로 석탄 화력발전을 폐지해야 한다는 것에 사회적 합의가 이루어졌다고 볼 수 있다.

배출 물질 중 온실가스 외에 관심의 대상이 되는 것은 **미세먼지**, 수은이다.

### 미세먼지

독일의 경우 미세먼지의 6~9%가 석탄 화력발전소에서 배출된다.<sup>15)</sup> 2013년 슈투트가르트 대학에서 연구결과를 발표하여 미세먼지로 인해 연간 총 수명 33,000 년이 단축되고 있다고 밝

14) Patrick R. O'Donoghue et al.: Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generated from Conventionally Produced Natural Gas. Systematic Review and Harmonization. In: Journal of Industrial Ecology. Band 18, Nr. 1, 2014, S. 125-144.

15) 미세먼지의 가장 큰 배출원은 교통, 공사업체의 연소시설, 상업, 서비스업, 가정 배출로써 이들이 모두 합쳐 57%를 이룬다.

혀 논란이 된 적이 있다.<sup>16)</sup> 이때 다텔른 발전소 4기를 분석 대상으로 삼았으며 그 결과 발전소에서 100~200 km 떨어진 곳에서 가장 높은 위험도를 보인다는 결론이 얻어졌다. 공기청정기는 유럽연합에서 매우 중요시 여기는 사안으로서 이를 위해 2008년 별도의 지침(2008/50/EC)<sup>17)</sup>을 만들었다. 독일의 경우 지역별로 공기청정 계획, 공기청정을 위한 액션플랜 등을 수립하여 대응하고 있다.

그러나 미세먼지의 가장 큰 배출원은 화력발전소가 아니라 자동차며 그중에서도 디젤엔진의 배기가스다. 도심에 환경존을 설치하여 환경인증을 받지 못한 자동차들의 도심 진입을 금지하고 있는 도시들이 증가하고 있다.

유럽연합에서는 2017년 7월에 발표한 석탄 화력발전소의 최적가용기술 기준에 **먼지 배출량**을 저감하는 기술과 그에 근거한 배출기준을 정의했다. 독일의 국내법도 이를 수렴하여 개정되었으나 미세먼지에 배출 한계는 새로 조정하지 않았다.

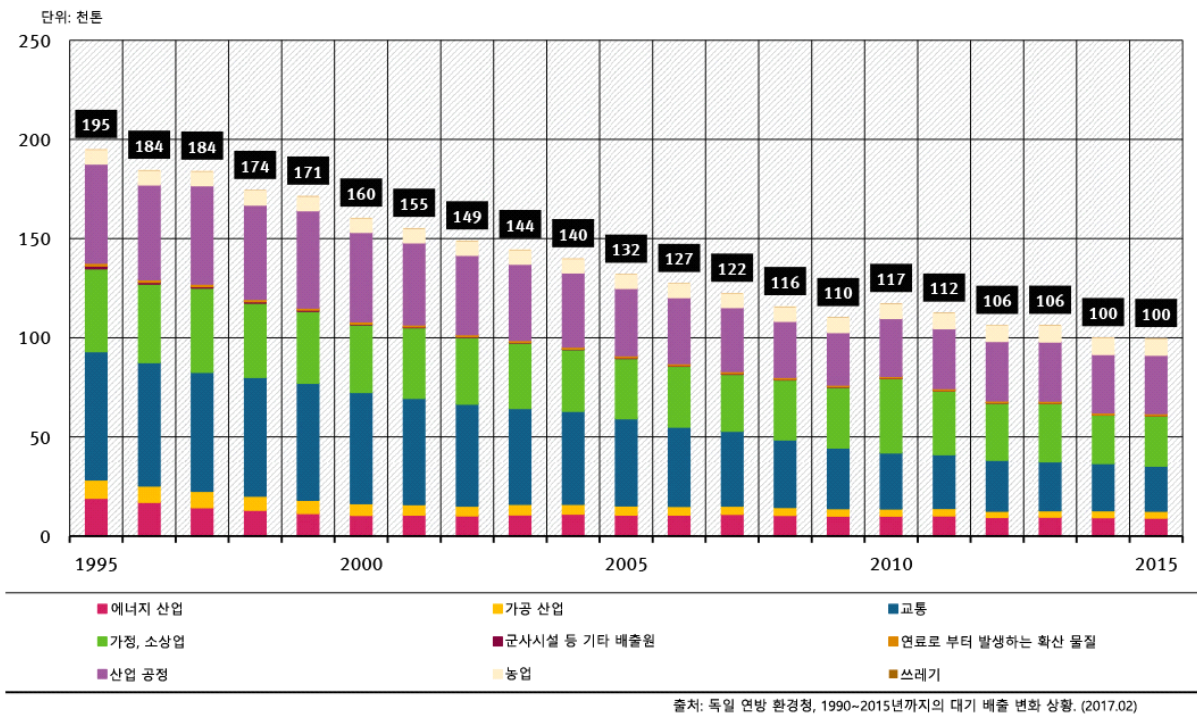


그림 4. 독일 미세먼지 (PM 2.5) 배출원에 따른 배출량 변화 추이. 출처: 독일 연방환경청. 2017.02.

### 2.3. 수은

석탄 화력발전소는 또한 가장 큰 수은 배출원이기도 하다. 수은은 분해가 되지 않고 메틸수은으로 변해 먹이사슬을 타고 인체에 흡수된다. 독일의 경우 지난 20년 동안 수은배출량이 저감되지 않고 연간 약 7톤의 배출량이 그대로 유지되고 있는 상황이다.

16) Philipp Preiss, Joachim Roos, Rainer Friedrich (IER/Universität Stuttgart), *Health Impacts of Coal Fired Power Stations in Germany*, Stuttgart, 2013.

17) Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe

지난 여러 해 동안 녹색당을 위시하여 연방환경청 등에서 수은 배출 한계치를 하향조정해야 한다는 제안을 여러 차례 해 왔다. 유럽연합에서도 수은 배출을 저감하는 방법에 대해 고심해 왔으며 회원국과 석탄 산업에서 공동으로 논의한 결과 새로운 수은 저감 기법을 적용하면 일 평균 0.1 mg/m<sup>3</sup>, 연평균 0.3 mg/m<sup>3</sup> 달성이 가능하다는 결론을 얻었다. 이에 2017년 여름 대형 연소시설을 위한 최적가용기술 기준서를 통해 하한선을 0.1 mg/m<sup>3</sup>으로 잡아 발표했다.

독일에서도 2017년 12월에 연방 오염물질 방지에 대한 법규명령 제13호: 화력발전 편을 개정하여 수은 배출 한계를 기존의 0.5 mg/m<sup>3</sup>에서 0.3 mg/m<sup>3</sup>로 낮춰 잡았다.

### 3. 화력발전소 배출 규제를 위한 법적 근거

#### 3.1. 개요

독일에는 화력발전소의 대기환경규제에 대해 별도의 법규가 존재하지 않는다. 모든 산업 배출량(화력발전 포함)은 연방 오염물질방지에 관한 법 Bundes Immissionsschutzgesetz (BImSchG)과 그에 따른 법규명령에서 규제한다. 연방 대기오염물질에 관한 법에서는 물론 산업배출량 뿐 아니라 모든 대기오염물질 및 그 배출원을 관리하고 규제하며 기술기준을 정의하고 있다.

한편 화력발전소의 배출량에 대한 별도의 규제는 일차적으로 유럽연합에서 발령한 산업배출 지침Industrial Emissions Directive “IED”을 따른다. 이 지침의 내용은 독일의 여러 관련법에 나누어 수렴되었다.

유럽연합의 산업배출량 지침은 다시금 소위 말하는 최적가용기술 BAT(Best available technology) 적용의 원칙에 근거를 두고 있다. 빠르게 진행되는 기술 발전 속도에 비해 이를 법에 수용하는 속도가 미처 따르지 못하므로 지침에서 규정하는 기준을 벗어나 더욱 새롭고 혁신적인 방법이 있으면 이를 적용하는 게 우선이라는 원칙이다.

이 원칙은 독일에서 이미 전통적으로 오래 전부터 적용하던 기본방침이기 때문에<sup>18)</sup> 독일의 기준은 매우 다양하다. 즉, 대기오염물질에 관한 법과 그에 속한 법규명령, 대기질 기술기준(TA Luft) 외에도 엔지니어링 협회 혹은 기타 연구기관에서 발행한 기준 중에 더욱 진보된 것이 있으면 그것을 적용하는 경우가 많다. 이런 접근법은 유럽연합에서도 인정하고 있다.<sup>19)</sup>

#### 3.2. 유럽연합 지침

18) 독일에서 오래전부터 적용하던 원리가 유럽연합의 원칙으로 수용되었음.

19) 최적가용기술도서에 그리 명시하고 있다. “이 기준은 절대적인 것이 아니며 환경기준을 지키는 전제 하에 이와 유사한 다른 기준을 적용해도 좋다.” (출처: Official Journal of the European Union, COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2017/1442, of 31 July 2017, establishing best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for large combustion plants, p. 9.

### 3.2.1. 산업배출량 지침 IED 과 최적 가용 기술 BAT (Best available technology)

#### 산업배출량 지침IED

유럽 연합에서는 기후온난화에 대응하기 위해 수년 전부터 수시로 산업배출량 지침 Industrial Emissions DirectiveIED을 갱신하여 기준을 강화하고 있다. 현재 유효한 지침은 2010년 통합 제정된 지침으로서 그때까지 유효했던 일곱 개의 기준을 통합하고 부분적으로 갱신한 것이다.

통합된 일곱 개의 지침은 아래와 같다.

- 통합 오염물질 방지 및 관리에 대한 지침(2008/1/EC, IPPC)
- 폐기물 소각 지침 (2000/76/EC)
- 발전소 지침 (2001/80/EC)
- 용매에 대한 지침 (1999/12/EC)
- 이산화 타이타늄 생산에 대한 세 개의 지침 (78/176/EC, 82/883/EC, 92/112/EC)

강화 내지는 갱신된 점은,

- 대형 연소시설, 즉 발전소 등의 배출 기준이 강화되고
- 산업 시설 허가 시에 **최적가용기술 기준서(BAT Conclusion) 적용이 의무화** 되었으며
- 산업 시설 신규 설치 시 토양과 물에 대한 현황 보고서 제출이 의무화 되고
- 산업 시설에 대한 체계적, 정기적 모니터링 및 모니터링 보고서 제출이 의무화 되었다.

유럽 산업배출 지침에 저촉되는 산업 유형은 아래와 같다.

1. 에너지산업(50 MW 이상의 연소시설, 정유시설, 가스정제시설 등)
2. 금속, 비철 금속 생산 및 가공 산업
3. 미네랄 가공 산업(시멘트 500 t/d 이상, 고로 50 t/d 이상, 유리생산 20 t/d 이상)
4. 화학 산업
5. 폐기물산업
6. 셀룰로오스 산업
7. 제지 산업
8. 목재 가공 산업(600 m<sup>3</sup>/d 이상)\*
9. 섬유 산업
10. 피혁 가공 산업
11. 식품업(도축업 50 t/d 이상, 유제품 가공업 200 t/d 이상.)
12. 도축 폐기물 업(10 t/d 이상)
13. 집약적 축산업(조류 4만 이상, 돈사 2000 이상)
14. 유기물 용매에 의한 코팅산업 150 kg/h 또는 200 t/y 이상)

15. 탄소 물질 생산
16. 이산화탄소 분리시설\*
17. 목재 방부산업(75 m<sup>3</sup>/d 이상)\*
18. 특정 산업폐수처리시설\*

위의 산업 분야 중 \*로 표시된 것은 2010년 신규 도입되었다.

### 3.2.2. 최적가용기술에 대한 유럽연합 문헌(BREF)과 산업체별 최적가용 기술 기준서 (BAT Conclusion)

유럽 연합의 산업 배출 지침은 일반적인 사항을 규정하고 있는 기본 틀에 해당하며 산업분야 별로 최적가용기술에 대한 문헌과 기준서를 각각 발행하고 있다. 최적가용기술 문헌은 BREF 라고 하는데 수백에서 수천 페이지에 달하는 방대한 분량으로서 기술 및 기준 선정 과정과 근거에 대해 매우 상세히 설명한 문헌이다. 이중에서 기술과 기준만 별도로 추려서 발행한 것이 기준서 BATC(BAT conclusion)다.

이 기준서는 구속력을 가지는 지침으로서 산업 분야나 사업허가기관에서 직접 참고할 수 있게 구성되었다.

#### 최적가용기술에 대한 유럽연합 문헌(BREF)

유럽연합 사무국 산하의 technical working group (TWG)을 구성하여 배출량에 대한 개별목표는 개발하고 해당 문헌을 작성한다. 이 문헌을 BREF (Best Available Technique Reference Documents)라고 한다. BAT 사무국이 스페인의 세빌랴에 위치하고 있기 때문에 문헌이나 기준서 발행 과정을 “세빌랴 프로시스”라고도 부른다. 빠른 속도로 발전하는 기술수준에 맞춰 BREF 역시 정기적으로 갱신된다. 일단 BREF를 만들고 다시 이에 근거하여 BAT 기준서를 만든다.

#### 산업체별 최적 가용 기술 기준서BAT Conclusion

산업유형별로 만든다. 기준서는 아래와 같은 조건을 만족시키는 분야에 대해서만 만든다.

- 비용과 효율 분석 결과에 의거 경제적, 기술적으로 적용이 가능하며 시설운영자들이 접근 가능한 기술이나 기법.
- 환경보호목표에 도달하기 위해 가장 효율적인 최적의 기술과 기법. 예를 들어 배기정화기술의 경우 배출량을 줄여 환경영향 저감만 고려할 것이 아니라 이 시설을 가동하는데 소요되는 에너지와 부속 시설 및 사후 폐기물 등을 모두 감안.

위의 [18 종의 산업 유형](#)에 대해 기준서를 발행했거나 준비 중이다. 이들은 구속력을 가진 배출기준을 포함한다. 2018년 1월 말 현재까지 완성된 산업체별 최적가용기술기준서 (BAT Conclusion)는 아래의 12종이다.

1. 쇠와 철강제조 (2012년 3월 8일 발행)
2. 유리제조 (2012년 3월 8일 발행)
3. 피혁 및 모피가공 (2013년 2월 16일 발행)
4. 시멘트, 칼크, 마그네슘산화물 제조 (2012년 4월 9일 발행)
5. 클로르-알칼리 산업 (2013년 12월 11일 발행)
6. 셀룰로오스와 제지 산업 (2014년 9월 30일 발행)
7. 정유산업, 가스정제산업 (2014년 10월 28일 발행)
8. 목재 소재 패널 생산 (2015년 11월 20일 발행)
9. 폐수, 폐가스 처리 기준 (2016년 5월 30일 발행)
10. 비철 금속산업 기준 (2016년 6월 13일 발행)
11. 집약적 축산업 (2017년 2월 21일 발행)
12. 대형 연소시설 (2017년 8월 17일 발행)

화력발전소 포함 대형연소시설에 대한 기준은 지난 해, 즉 2017년 8월 17일에야 비로소 발행되었으며 2017년 말에 독일법에 수렴되었다. 회원국들은 유럽 기준 발행 이후 늦어도 4년 내에 국내법에 수렴하도록 규정되어 있는데 그 기간 동안에는 유럽 기준이 직접적으로 효력을 가진다.

### 3.3. 독일 법

독일은 별도의 산업배출량에 관한 법이 존재하지 않으며 유럽연합의 산업배출지침과 최적가용 기술기준을 기존하는 여러 관련법에 나누어 수렴했다. 2010년에 갱신된 IED 지침은 2013년 아래와 같은 관련법에 수렴되었다.

- 연방 오염물질 방지에 관한 법 Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)
- 수자원경제법 Wasserhaushaltsgesetz
- 순환경제법 Kreislaufwirtschaftsgesetz

그 외

- 환경소송법
- 비이온화방사선법 역시 이에 부합되게 갱신되었다.

### 3.4. 연방 오염물질 방지에 관한 법 Bundesimmissionsschutzgesetz(BImSchG)

#### 3.4.1. 개요

세계굴지의 산업국가로서 독일은 발전소 약 1800 개소, 폐기물 소각시설 130 개소 등 모두 9천 여개소의 산업시설을 관리해야 한다. 이들의 공통점은 결국 유해물질을 배출하는 것이므로



오염물질 방지에 관한 법(BImSchG<sup>20</sup>)을 통해 모든 시설을 규제하고 있다.

1974년 처음 제정된 이후 여러 차례 갱신되었으며 최적가용기술기준을 수렴하여 최종적으로는 2017년 7월 18일 개정되었다.<sup>21)</sup>

독일연방 오염물질방지에 관한 법은 사람, 동식물, 토양, 물, 대기와 문화유산을 유해한 물질로부터 보호하기 위해 제정된 법이다. 2017년 1월 1일자로 시행된 한국의 <환경오염시설의 통합관리에 관한 법률>에 준한다. 법의 구성과 내용으로 보아 양국의 법에 일치하는 점이 많다.<sup>22)</sup>

독일 연방의 오염물질방지에 관한 법은 환경법 중에서 가장 핵심이 되는 법이다. 사업과 시설 허가에 대한 법적 근거를 이루기 때문에 실무에서 가장 널리 적용되고 있어 실질적으로 환경법을 대표한다.

1960년대부터 산업지대로 유명한 루르 지방의 스모그 등 환경문제가 심각히 여론화되었고 그 결과로 유해물질 내지는 오염물질 방지에 관한 법을 제정하기에 이른 것이다. 구조와 성격으로 보아 1918년에 제정된 <공사업시설 허가규정>에 기초하고 있다. 시설허가에 대한 전반적인 사항, 사후 감독, 장애 및 재난 대책, 시설 중지 및 폐지 등을 세부적으로 조절하고 있어 실질적으로는 **시설허가에 관한 법**과 다름이 없다. 따라서 법의 행사는 **산업감독기관**에서 한다. 각 연방주의 차원에서는 환경부가, 지자체 차원에서는 산업 감독부 혹은 지자체정부에서 직접 관장하며 각 행정 단위별로 오염물질방지 부서를 두고 있다. 이 부서가 바로 시설허가 담당부서이다.<sup>23)</sup>

### 3.4.2. 구조와 내용

모두 8부 73조로 이루어져 있으며 부속서 1종을 포함한다.<sup>24)</sup>

1부(1~3조): 개요

2부(4~31조): 시설의 설치와 운영

4~21조: 허가의무가 있는 시설

22~25a조: 허가의무가 없는 시설

26~31조: 배출과 오염의 조사, 기술안전 점검

3부(32~37g조): 시설, 설비의 특성, 재료, 생산물, 연료, 운할제, 온실가스 저감

32~37조: 시설, 설비의 특성, 재료, 생산물, 연료, 운할제

37a~37g조: 온실가스 저감(2011년 “에너지 전환”선언과 함께 설치된 신규 조항들)

20) Bundesimmissionsschutzgesetz(BImSchG) 줄여서 속칭 “뵘슈법”이라고 함.

21) 독일연방 법률 관보 2017년 제1부 No 52: 개정된 내용은 매우 근소함. 몇 가지 용어 새로 첨가한 수준.

22) 환경부, 환경오염시설의 통합관리에 관한 법률. [시행 2017.1.1.] [법률 제13603호, 2015.12.22., 제정]

23) 씨드스페이스 환경백과, [온라인](#)

24) Bundesrecht 온라인 연방법/오염물질 방지에 관한 법: <https://www.buzer.de/gesetz/6306/index.htm>

4부(38~43조): 자동차 특성과 운영, 도로 및 철도의 건설과 보수

5부(44~47조): 대기질 감시와 개선, 대기청정 계획, 소음 저감 계획

6부(47a~47f): 소음 저감 계획

7부(48~65): 일반 수칙

8부(66~73): 최종 수칙(이행 규정, 행정절차 등)

**부속서(제3조 6항 관련): 최적가용기술에 대한 기준<sup>25)</sup>**

1. 폐기물 최소화 기술 적용
2. 위험이 적은 물질 적용
3. 물질 순환 원칙 적용
4. 유사한 기술이 존재할 경우 검증된 기술 적용
5. 과학적 지식과 테크놀로지의 발전 현황 감안
6. 각 배출물의 유형, 영향 및 배출량 감안
7. 새로운 기술 혹은 기존 기술의 적용 시점 감안
8. 최적 가용 기술의 적용에 필요한 시간 감안
9. 원료 소모, 각 공정 과정에 소요되는 원료, 재료의 유형(물 포함) 및 에너지 효율
10. 배출물의 총체적 영향과 이들이 사람과 환경에 미치는 위험의 최대한 방지 내지는 저감의 필요성 감안
11. 사고 방지, 사고로 인해 사람과 환경에 미치는 영향 최대한 방지 내지는 저감의 필요성 감안
12. 국제기구에서 발행하는 정보 감안
13. 유럽 연합의 최적 가용 기술 도서 감안

**부속 법규명령Verordnung**

연방 오염물질방지법에는 두 가지 유형의 규칙이 부속되어 있다.

- 오염물질 방지에 관한 법규명령 (BlmSchV)
- 오염물질 방지법 행정업무 관리규정 (BlmSchVwV)

연방 오염물질방지법의 각 항목을 구체화한 것이 연방 오염물질에 대한 법규명령BlmSchV들이다. 시행령에 해당하며 모두 39개의 명령이 발령되었으나 갱신 될 때마다 새로운 번호를 주고 지난 것은 폐지되기 때문에 현재 유효한 것은 모두 19개다. 그중 제13호가 **대형 연소기관**, 즉 발전소, 가스터빈 등에 관한 법규명령이다. 여기서 화력발전소의 오염물질 배출 **한계치**

25) 유럽연합의 최적가용기술에서 정의하고 있는 ‘통합적 배출관리’ 개념으로 배출기준 외에도 목표에 도달하기 위한 여러 조치들을 종합했다.

를 정의하고 있다.

그에 반해 유럽연합의 BAT 기술기준은 “배출범위(상한선, 하한선)”을 정의하고 있다.

법규명령의 한계치에 대해서는 5. 장에서 상세히 살펴보고자 한다(43쪽 이하).

## 4. 유럽연합의 대형 연소 시설에 대한 최적가용기술 및 배출기준<sup>26)</sup>

### 4.1. 구성과 내용

배출 물질별로 이의 저감을 위해 적용이 가능한 최적 기술을 모두 제시하고 그 내용과 장단점, 적용성 등을 설명한다. 이어 이와 관련된 배출 범위를 정의하고 있다. 최적가용기술이 하나가 아니라 여러 개 있으므로 그중 하나 또는 여러 개를 복합적으로 사용할 것을 권하고 있다.

중요한 것은 단순히 적용 가능한 기술만 나열한 것이 아니라 “통합적” 콘셉트의 이념 하에 환경수준을 높이고 배출을 최소화할 수 있는 다른 방법론들을 함께 제시하고 있다는 점이다. 아래와 같은 세 가지 항목에 중점을 두고 있다.

- 일반적 환경과제에 대한 요구사항
- 에너지 효율 상승
- 모니터링

### 최적 가용 기술과 관련된 배출량

여기서 정의한 배출 기준은 연간 가동시간이 500 미만인 시설, 임시 가동 시설 등 BAT 배출량 기준을 준수할 수 없는 경우에는 적용되지 않는다.<sup>27)</sup>

각 기술 및 배출기준 앞에는 BAT 번호를 붙여 서로 구분한다. BAT 75번까지 있으나 그중 석탄 화력발전소와 천연가스 화력발전소에 관련된 항목만 정리해 보면 다음과 같다.

### BAT 4: 대기 배출량 모니터링

석탄 화력발전소의 경우 아래의 배출 물질에 대해 상시 또는 연 1회 모니터링 한다.

- NH<sub>3</sub>: [SCR/SNCR](#) 기법을 적용하는 경우에 한해서 **항시** 모니터링
- NO<sub>x</sub>: 발전 용량이나 기술에 상관없이 **항시** 모니터링
- N<sub>2</sub>O: 유동층 연소시설이 장착된 보일러를 쓰는 경우 **연 1회** 모니터링

26) 2017년 7월 31일 공표

27) 이 경우 각 회원국에서 별도의 기준을 제시하고 있다. 독일의 경우 TA Luft(대기질 기술 수준 지침)에서 규정한다.

- CO / SO<sub>2</sub> : 발전 용량이나 기술에 상관없이 **항시** 모니터링
- SO<sub>3</sub> : [SCR](#)기법을 적용하는 경우에 한해서 **연 1회** 모니터링
- HCl: 발전 용량이나 기술에 상관없이 **연 1회** 모니터링
- HF: 발전 용량이나 기술에 상관없이 **연 1회** 모니터링
- 먼지: 발전 용량이나 기술에 상관없이 **항시** 모니터링
- 수은을 제외한 모든 **금속** 성분(As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V, Zn): 발전 용량이나 기술에 상관없이 **연 1회** 모니터링(먼지 속에 포함)
- Hg:
  - 300 MW 미만: **연 1회** 모니터링
  - 300 MW 이상: **항시** 모니터링
- TVOC<sup>28)</sup>: 쓰레기를 함께 소각하는 경우에 한 해서 **항시** 모니터링

### 천연가스 발전소

- **포름알데히드**: 스파크 점화 시설 및 2종 희박 연료 연소 기관에 한해서 **연 1회** 모니터링
- CH<sub>4</sub>: 모든 천연 가스 발전소 **연 1회** 모니터링

### BAT 6: 일반적 환경과제 및 연소 역량

화력발전소 및 기타 연소시설의 일반적인 환경기능을 개선하고 탄소화합물 및 비연소물질의 배출을 줄이기 위한 최적가용기술이란 우선 **연소의 최적화** 및 아래 열거한 기술 중 하나 또는 여러 개를 복합적으로 적용하는 것을 말한다.

표 1. 발전소의 일반적 환경기능을 개선하고 탄소화합물 및 비연소물질의 배출을 줄이기 위한 최적 가용 기술(BAT 6) 및 적용 범위

기술		설명	적용 범위
a.	연료 혼합	동일한 종류의 연료의 서로 다른 등급을 혼합하여 안정적 연소 조건을 유지하고 오염물질 배출을 줄인다.	일반적으로 적용 가능
b.	유지보수	제조업체의 권장 사항을 준수하여 정기적으로 유지보수한다.	
c.	모던한 제어시스템	<a href="#">별도 항목</a> 참조	구형 발전소의 경우 제어시스템을 업그레이드 해야 하므로 적용성이 제한될 수 있다.
d.	최적의 시설	보일러, 버너 등 공정 및 시설 최적화	신축 발전소에 적용

28) Total Volatile Organic Compounds

e.	연료 선발	환경 프로파일이 우수한 연료 (저유황, 저수은 함량) 선정. 부분적으로 교체하거나 완전 교체.	연료 공급상황에 달려 있으므로 각 회원국에서 에너지 정책 또는 산업공정 정책을 통해 연료 균형을 맞추면 가능하다.  구형 플랜트의 경우 구성 및 디자인에 따라 적용이 가능하지 않을 수 있다.
----	-------	--	--

### BAT 9: 최적 연료 선발 기준

일반적 환경기능을 개선하고 배출을 저감하기 위해서는 환경메니지먼트 시스템을 구축하여 그 일환으로 아래의 기준에 맞춰 적정 연료를 선정하는 것이 중요하다. 선정된 연료는 정기적으로 성능을 점검하는 것이 바람직하며 이때 다음과 같은 연료의 성질이나 함유 물질에 대한 점검이 필요하다.

▪ **석탄(갈탄, 역청탄):**

- 최저 발열량
- 습기
- 휘발성 성분, 재, 탄소화합물, C, H, N, O, S.
- Br, Cl, F
- 금속 및 메탈로이드: As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V, Zn

▪ **천연가스:**

- 최저 발열량
- CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>+, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, 웨버 지수(가스 호환성 지표)

### BAT 12: 에너지 효율 상승을 위한 최적 가용 기술

에너지 효율 상승은 배출 저감을 위해 매우 중요한 기본 조건이다. 아래와 같은 에너지 효율 상승 기술 중 하나 또는 여럿을 복합적으로 적용하는 것이 최적 가용 기술에 부합된다.

표 2. 에너지 효율 상승을 위한 최적 가용 기술(BAT 12) 및 적용범위

	기술	설명	적용성
a.	연소 최적화	<p><a href="#">별도 설명</a> 참조.</p> <p>연소 최적화를 통해 비연소 물질이 배기가스에 포함되거나 고체물질이</p>	일반적으로 적용가능

		배출되는 것을 최소화할 수 있다.	
b.	매체 조건 최적화	가스 또는 증기의 온도와 압력을 말한다. NO <sub>x</sub> 배출 한계선 내에서 최고 온도 최고 압력 조건을 갖추는 것이 중요하다.	
c.	증기순환 시스템 최적화	응축기 냉각수 온도를 가능한 한도 내에서 최저로 조절하여 터빈 배기의 증기함량을 감축한다.	
d.	에너지 소모 최소화	예를 들어 급수펌프 효율 향상 등을 통해 시설 내 에너지 소비를 최소화한다.	
e.	연소 공기 예열	배기가스로부터 회수된 열의 일부를 재사용하여 연소공기를 미리 가열.	NO <sub>x</sub> 배출을 저감하기 위한 한계 내에서 적용
f.	연료 예열	위와 같은 원리로 연소공기뿐 아니라 연료도 미리 가열한다.	
g.	모던한 제어시스템	<a href="#">별도 설명</a> 참조	신규 설치하는 시설에 적용. 구형 시설의 경우 제어시스템을 업그레이드해야 하므로 적용이 제한적일 수 있다.
h.	급수 예열	증기 냉각기에서 나오는 물을 회수된 열로 재가열하여 다시 냉각기에 유입.	증기순환시스템에만 적용. 온수보일러에는 적용하지 않음.  구형 발전소의 경우 시설의 사양과 회수된 열의 크기에 따라 적용이 제한적일 수 있다.
i.	열병합 발전에 의한 열 회수	산업용 공정 또는 지역 난방용 네트워크에서 사용하기 위한 온수/증기 생산을 위한 열회수 (주로 증기시스템에서 발생). 다음과 같은 방법으로 추가적 열회수 가능. <ul style="list-style-type: none"><li>▪ 배기</li><li>▪ 화격자 냉각</li><li>▪ 순환 유동층</li></ul>	지역의 난방 및 전기 수요에 따른 범위 내에서 적용 가능.  작동이 불안정한 가스압축기에는 적용이 제한적일 수 있다.
j.	열병합 준비	<a href="#">별도 설명</a> 참조	발전소 인근에 열 재사용 가능성이 있는 경우에만 적용가능.  열병합발전소에 일반적으로 적용가능. 단 수요가 충분해야 한다.
k.	배기 냉각기		
l.	열저장	열병합 모듈에서 열저장	열병합발전소에만 적용가능. 열 수요가 낮은 경우 제한적.
m.	습식 굴뚝	<a href="#">별도 설명</a> 참조	습식 정화시스템이 설치된 신규 내지는 기존 시설에 적용가능.

n.	냉각타워 배기	굴뚝이 아닌 냉각타워로 배기가스를 내보낸다.	습식 정화시스템이 설치된 시설에서만 적용가능. 이때 배기를 내보내기 전에 재가열해야 하며 냉각타워가 있어야 한다.
o.	연료 예비 건조	연소 전에 연료의 수분함량을 줄여 연소 조건을 개선한다.	바이오매스에만 적용가능.
p.	열 손실 최소화	잔여 열 손실을 최소화한다. 예를 들어 슬러그나 방사선 절연장치를 통해 연손실이 발생할 수 있다.	고체연료 연소 시설 및 가스화 / IGCC 복합발전소에만 적용 가능
q.	모던한 소재 적용	고열과 고압을 견디는 소재 사용. 증기 생성 / 연소 공정의 높은 효율을 달성 할 수 있다.	신형 발전소에만 적용가능.
r.	증기터빈 업그레이드	이에 속하는 것은 중간압력증기의 온도와 증기압 증가, 저압터빈 추가 및 터빈의 블레이드 방향 조정 등이다.	증기 상태, 수요 및 시설의 수명에 의해 적용이 제한될 수 있다.
s.	초임계 및 울트라 임계 증기값	증기압 220.6 bar, 374°C 이상에 도달할 수 있는 증기 재열시스템, 250~300 bar, 580~600°C 이상의 증기순환시스템 등. <sup>29)</sup>	연간 용량 600 MW, 4000 시간 이상 가동되는 신규 시설에만 적용 가능.  열병합 모드의 가스터빈, 증기엔진에는 적용할 수 없음.  바이오 매스 연소시설에도 고온으로 인해 적용 제한.

#### 4.1.1. 석탄 화력발전소의 최적가용기술과 배출범위

##### BAT 18: 석탄 (갈탄과 역청탄) 화력발전소의 일반적 환경 과제

위의 BAT 6의 일반적 환경과제에 더해 석탄 화력발전소에는 다음의 기술적 과제가 추가적으로 적용된다.

표 3. 석탄 화력발전소에 추가적으로 요구되는 환경 과제(BAT 18) 및 적용 범위

기술		설명	적용 범위
a.	통합적 연소공정: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 보일러 효율 보장</li> <li>▪ NOx 저감을 위한 일차 기술 (공기 다단화, 연료 다단화, 저 NOx 버너(LNB), 배기 환원시스템)</li> </ul>	분진 연소, 유동층 연소 등의 연소 공정은 통합을 가능하게 한다.	일반적으로 적용 가능

29) 독일의 여러 기업에서 700°C를 목표로 연구 중. 출처: [RWE/modern power plant engineering](http://www.rwe.com/modern-power-plant-engineering)

### BAT 19: 석탄 화력발전소 에너지 효율 상상을 위한 추가 최적가용기술

표 4. 석탄 화력발전소의 에너지 효율 상상을 위한 추가적 최적 가용 기술(BAT 19) 및 적용 범위

기술		설명	적용 범위
a.	통합적 연소공정: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 보일러 효율 보장</li> <li>▪ NOx 저감을 위한 일차 기술 (공기 다단화, 연료다단화, 저 NOx 버너(LNB), 연도 가스 순환시스템)</li> </ul>	분진 연소, 유동층 연소 등의 연소 공정은 통합을 가능하게 한다.	일반적으로 적용 가능

이때 연소 유닛의 유형에 따른 에너지 효율 범위는 아래와 같다:

표 5. 연소 유닛 유형에 따른 에너지 효율 범위

연소 유닛의 유형	에너지 효율		
	전기 실효율 (%)		총 연료 이용율 (%)
	신규 시설단위	기존 시설단위	
역청탄 $\geq 1000 \text{ MW}_{\text{th}}$	45-46	33.5-44	75-97
갈탄 $\geq 1000 \text{ MW}_{\text{th}}$	42-44	33.5-42.5	75-97
역청탄 $< 1000 \text{ MW}_{\text{th}}$	36.5-41.5	32.5-41.5	75-97
갈탄 $< 1000 \text{ MW}_{\text{th}}$	36.5-40	31.5-39.5	75-97

### BAT 20: NOx, N2O- & CO 대기 배출을 제한하기 위한 최적가용기술

NOx 대기 배출을 방지 또는 저감함과 동시에 CO- alc N2O- 대기 배출을 제한하기 위한 최적가용기술이란 아래 표의 기술 중 한 가지 또는 모두를 복합적으로 적용하는 것을 말한다.

표 6. NOx, CO 대기배출 저감을 위한 최적 가용 기술과 적용 범위(BAT 20) 및 적용 범위

기술		설명	적용 범위
a.	최대 연소율 달성	아래 <a href="#">세부 설명</a> 참조	일반적으로 적용 가능
b.	NOx 저감을 위해 다른 기술과 병합 (공기 다단화, 연료다단화, 저 NOx 버너(LNB), 연도 가스 순환시스템)	위와 동일.	



c.	선택적 비촉매 환원(SNCR)	위와 동일	NH <sub>3</sub> 과 NO <sub>x</sub> 가 섞이는 것을 방지할 수 있는 큰 단면의 보일러에서만 적용 가능.  연간 가동 시간 1500 미만의 시설에서는 적용이 제한적일 수 있다.
d.	선택적 촉매 환원(SCR)	위와 동일	용량 300 MW <sub>th</sub> 미만이며 연간 가동시간 500 이하의 시설에는 해당되지 않는다.  용량 1000 MW <sub>th</sub> 미만의 시설에도 일반적인 적용이 어렵다.  연간 가동 시간 500-1500 및 용량 300 MW <sub>th</sub> 이상이며 가동시간 500 시간 이하인 시설에 이 기술을 적용하기 위한 시설 설치는 제한적일 수 있다.
e.	NO <sub>x</sub> 와 SO <sub>x</sub> 의 저감을 위한 복합 기술	위와 동일	연료의 특성과 연소 공정에 따라 적용이 가능하다.

석탄(역청탄과 갈탄) 연소를 통한 NO<sub>x</sub> 대기 배출량에 대한 BAT 기준은 아래와 같다:

표 7. 석탄(역청탄과 갈탄) 연소를 통한 NO<sub>x</sub> 대기 배출범위

연소기관별 용량 (단위: MW <sub>th</sub> )	배출범위 (mg/Nm <sup>3</sup> )			
	연평균		일평균 또는 실증 기간 중의 평균	
	신형 시설	기존 시설 <sup>30)</sup>	신규 시설	기존 시설 <sup>31)</sup>
< 100	100-150	100-270	155-200	165-330
100-300	50-100	100-180	80-130	155-210
≥ 300 갈탄, 역청탄 유동층 연소 및 갈탄 분진연소	50-85	< 85-150 <sup>32)</sup>	80-125	140-165 <sup>33)</sup>
≥ 300, 역청탄 분진연소	65-85	65-150	80-125	< 85-165 <sup>34)</sup>

30) 연간 연소시간 1500 시간 미만의 시설에는 본 기준이 적용되지 않음.

31) 1987년 7월 1일 이전에 가동을 시작한 역청탄 분진연소 시설 중 연간 가동시간이 1500 시간 미만이며 선택적 촉매 환원시설이 없거나 또는 선택적 비촉매 환원시설을 적용하는 경우 상한선은 340 mg/Nm<sup>3</sup>으로 정한다.

32) 선택적 촉매 환원 기법을 적용하면 하한선(85) 달성 가능. 2014년 1월 7일 이후에 가동을 시작한 유동층 보일러 및 갈탄 분진 연소의 경우 상한선은 175 mg/Nm<sup>3</sup>으로 정한다.

33) 2014년 1월 7일 이전에 가동된 갈탄 분진 유동층 보일러의 경우 상한선은 200 mg/Nm<sup>3</sup>으로 정한다.

34) 2014년 1월 7일 이전에 가동된 시설 중 연간 가동 시간이 1500시간 이상인 경우 상한선을 200 mg/Nm<sup>3</sup>으로 정하고 1500 시간 미만인 경우 220 mg/Nm<sup>3</sup>으로 정한다.

연간 가동시간 1500 이상의 시설 또는 신규 설치하는 시설에서의 CO의 연평균 배출범위는 다음과 같다.

표 8. 석탄(역청탄과 갈탄) 연소를 통한 CO- 대기 배출범위

연소기관 용량 (단위: MW <sub>th</sub> )	CO-배출범위 (mg/Nm <sup>3</sup> )
< 300	< 30-140
≥ 300 갈탄, 역청탄 유동층 연소 및 갈탄 분진연소	< 30-100 <sup>35)</sup>
≥ 300, SKS-보일러 <sup>36)</sup> 사용	< 5-100 <sup>37)</sup>

### BAT 21: SO<sub>x</sub>-, HCl- & HF 대기 배출 저감을 위한 최적가용기술

SO<sub>x</sub>-, HCl, HF 대기 배출을 방지 또는 저감함과 동시에 CO- 및 N<sub>2</sub>O- 대기 배출을 제한하기 위한 최적가용기술이란 아래 표의 기술 중 한 가지 또는 모두를 복합적으로 적용하는 것을 말한다.

표 9. SO<sub>x</sub>-, HCl, HF 대기 배출 저감을 위한 최적 가용 기술(BAT 21) 및 적용 범위

기술		설명	적용 범위
a.	보일러로의 흡착제 주입 (퍼니스 또는 유동층 내부로)	<a href="#">별도 설명</a> 참조	일반적으로 적용 가능
b.	채널을 통한 흡착제 주입(DSI)	<a href="#">별도 설명</a> 참조  별도의 배기정화시설이 없는 경우 HCl, HF 분리에 이 기법을 적용할 수 있다.	
c.	건식 스프레이로 흡착제 분사(SDA)	<a href="#">별도 설명</a> 참조	
d.	순환 유동층이 있는 건식 분리기(ZWA)		
e.	습식 분리	<a href="#">별도 설명</a> 참조  별도의 배기정화시설이 없는	

35) 보일러의 구조로 인해 제한이 있거나 또는 NO<sub>x</sub> 저감을 위한 연도가스 정화 장치가 없는 유동층 연소 보일러일 경우 상한선을 140mg/Nm<sup>3</sup> 까지 상향 조절할 수 있다.

36) Schmidt Kompakt Station: 신형의 고성능, 고효율 펌프로서 보일러의 온도를 상시 측정하여 조절하는 기능을 갖추고 있음. Schmid Feuerungstechnik GmbH & Co.KG에서 개발. (출처: SHK journal/Die [SKS Schmid Kompakt-Station](#) 2017.05.26.)

37) 보일러의 구조로 인해 제한이 있거나 또는 NO<sub>x</sub> 저감을 위한 연도가스 정화 장치가 없는 유동층 연소 보일러일 경우 상한선을 140mg/Nm<sup>3</sup> 까지 상향 조절할 수 있다.

		경우 HCl, HF 분리에 이 기법을 적용할 수 있다.	
f.	습식 탈황	별도 설명 참조	연간 가동시간 500 이하의 시설에서는 적용이 가능하지 않다.  용량 300 MW <sub>th</sub> 미만이며 연간 가동시간 500-1500 범위의 시설을 개선하려는 경우 기술적, 경제적 제한이 올 수 있다.
g.	해수를 이용한 탈황		
h.	NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> 분리를 위한 복합 기법		
i.	습식 분리 다음 공정인 가스 간의 열교환기의 교체 내지는 제거	습식 분리 다음 공정인 가스 간의 열교환기를 다관 열추출 시스템으로 교체하거나 냉각탑, 습식 굴뚝을 통해 배기가스 흡입 또는 배출	습식 분리기와 가스 간의 열교환기가 설치되어 있는 시설에서 열교환기가 교체되어야 할 경우에만 적용 가능.
j.	연료 선택	별도 설명 참조  황 함량이 낮고(예: 건조 함량 0.1% 이하), 염소, 플루오르 함량이 낮은 연료,	해당 물질의 공급 가능성 내에서 적용가능. 각 회원국에서 적절한 에너지 정책을 통해 도달할 수 있다. 자국에서 생산되는 특수한 석탄을 태우는 경우 연소 구조로 인해 적용이 제한적일 수 있다.

위의 최적 기술 적용과 관련된 SO<sub>2</sub> 배출범위는 아래와 같다:

표 10. 최적 가용 기술 적용과 관련된 SO<sub>2</sub> 배출범위

연소기관별 용량 (단위: MW <sub>th</sub> )	배출기준 (mg/Nm <sup>3</sup> )			
	연평균		일평균 또는 실증 기간 중의 평균	
	신규 시설	기존 시설 <sup>38)</sup>	신규 시설	기존 시설 <sup>39)</sup>
< 100	150-200	150-360	170-220	170-400
100-300	80-150	95-200	135-200	135-220 <sup>40)</sup>
≥ 300 분진연소	10-75	10-130 <sup>41)</sup>	25-110	25-165 <sup>42)</sup>
≥ 300, 유동층 연소 보일러 <sup>43)</sup>	20-75	20-180	25-110	50-220

38) 연간 연소시간 1500 시간 미만의 시설에는 본 기준이 적용되지 않음.

39) 연간 가동시간이 500 시간 미만인 시설에는 지표로 적용한다.

위의 표에 명시된 일간 평균치는 용량 300 MW 이상이며 특수한 국내 생산의 갈탄을 쓰도록 설계되어 있는 시설의 경우 적용할 수 없다. 기술적, 경제적 특수 조건에 의해 일평균 한계치를 준수할 수 없음이 증명되었기 때문이다. 이 경우 연평균 상한치를 아래와 같이 산출한다.

- 1) REA 정화 시스템을 신규 설치한 경우: 원 배기가스 농도  $ROC^{44)} \times 0.01$ 로 계산하며 최대치는  $200 \text{ mg/Nm}^3$ 로 잡는다.
- 2) 기존의 REA 정화 시스템: 원 배기가스 농도  $ROC \times 0.03$ 로 계산하며 최대치는  $320 \text{ mg/Nm}^3$ 로 잡는다.
- 3) REA 정화 시스템의 과정 중 흡착제를 보일러에 분사하는 장치가 있는 경우 원 배기가스의 농도는 효율을 감안하여  $ROC/(1-\eta_{BSI})$ 로 산출한다.

위의 최적 가용 기술의 적용과 관련된 HCl 및 HF 배출 기준은 아래와 같다:

표 11. 최적 가용 기술 적용과 관련된 HCl alc HF 배출범위

오염물질	연소기관별 용량 (단위: $MW_{th}$ )	배출범위 ( $\text{mg/Nm}^3$ )	
		연평균 또는 연간 실증 기간의 평균	
		신규 시설	기존 시설 <sup>45)</sup>
HCl	< 100	1-6	2-10 <sup>46)</sup>
	$\geq 100$	1-3	1-5 <sup>47)48)</sup>
HF	< 100	< 1-3	< 1-6 <sup>49)</sup>
	$\geq 100$	< 1-2	< 1-3 <sup>50)</sup>

40) 2014년 1월 7일 이전에 가동된 시설의 상한선은  $250 \text{ mg/Nm}^3$ 으로 정한다.  
 41) 황 함유량이 적은 연료를 쓰고 습식 배기가스 정화시스템 등 초현대적 장치를 적용하면 최저한계에 도달할 수 있다.  
 42) 2014년 1월 7일 이전에 가동되고 연간 가동시간 1500 미만의 시설의 경우 상한선을  $220 \text{ mg/Nm}^3$ 으로 정한다. 기타 2014년 1월 7일 이전에 가동을 시작한 시설의 경우 상한선을  $205 \text{ mg/Nm}^3$ 에 해당한다.  
 43) 순환형 유동층 연소시설을 쓰고 초성능의 습식 배기가스 정화장치를 쓰면 최저 한계에 도달할 수 있다. 유동층 연소실에 흡착제를 분사 주입하면 상한선을 지킬 수 있다.  
 44) 거르지 않은 배기가스의 농도. SOx 배출을 저감하기 시작한 출발 지점의 연평균 농도를 말하며 산소 함량 6 % 기준이다.  
 45) 습식 배기가스 정화 장치와 그에 이은 가스관 열교환 장치를 설치한 시설에서는 하한선에 도달하기 어려울 것이다.  
 46) 다음과 같은 경우는 상한선을  $20 \text{ mg/Nm}^3$ 로 잡는다: 함유된 염소의 건조량이  $1000\text{mg/kg}$  이상의 연료를 태울 때. 연간 가동시간 1500 미만일 때. 유동층 연소시설을 갖췄을 때. 연간 가동시간이 500 미만일 경우 위의 기준은 지표가 될 수 있다.  
 47) 습식 정화시스템과 그에 이은 가스관 열교환기를 갖춘 시설에 대해서는 상한선을  $20 \text{ mg/Nm}^3$ 로 잡는다.  
 48) 다음과 같은 경우는 상한선을  $7 \text{ mg/Nm}^3$ 로 잡는다: 습식 정화시스템과 그에 이은 가스관 열교환기를 갖춘 시설. 연간 가동시간 1500 미만일 때. 유동층 연소시설을 갖췄을 때. 연간 가동시간이 500 미만일 경우 위의 기준은 지표가 될 수 있다.  
 49) 연간 가동시간 1500 미만일 때 적용되지 않는다.  
 50) 연간 가동시간이 500 미만일 경우 위의 기준은 지표가 될 수 있다.

## BAT 22: 먼지 및 먼지 입자와 결합된 금속 배출을 저감하기 위한 최적가용기술

먼지 및 먼지 입자와 결합된 금속배출을 방지하거나 저감하기 위한 최적가용기술이란 아래 표의 기술 중 한 가지 또는 모두를 복합적으로 적용하는 것을 말한다.

표 12. 먼지, 미세먼지 저감을 위한 최적 가용 기술(BAT 22) 및 적용범위

기술		설명	적용범위
a.	정전기 분리기(ESP)	<a href="#">별도 설명</a> 참조	일반적으로 적용 가능
b.	직물 필터		
c.	보일러에 흡착제 주입(퍼니스 또는 유동층 내에)	<a href="#">별도 설명</a> 참조  이 기술은 주로 SO <sub>x</sub> , HCl 또는 HF 저감을 위해 적용.	<a href="#">BAT 21</a> 참조
d.	건식 또는 반건식 배기가스 정화시스템		
e.	습식 배기가스 정화시스템		

위의 최적 가용 기술 적용과 관련 된 BAT 먼지 배출범위는 다음과 같다:

표 13. 먼지 배출범위

연소기관별 용량 (단위: MW <sub>th</sub> )	배출범위 (mg/Nm <sup>3</sup> )			
	연평균		일평균 또는 실증 기간 중의 평균	
	신규 시설	기존 시설 <sup>51)</sup>	신규 시설	기존 시설 <sup>52)</sup>
< 100	2-5	2-18	4-16	4-22 <sup>53)</sup>
100-300	2-5	2-14	3-15	4-22 <sup>54)</sup>
300-1000 분진연소	2-5	2-10 <sup>55)</sup>	3-10	3-11 <sup>56)</sup>
≥ 1000, 유동층 연소 보일러 <sup>57)</sup>	2-5	2-8	3-10	3-11 <sup>58)</sup>

51) 연간 가동시간 1500 시간 미만의 시설에는 본 기준이 적용되지 않음.

52) 연간 가동시간이 500 시간 미만인 시설에는 지표로 적용한다.

53) 2014년 1월 7일 이전에 가동을 시작한 시설에 대해서는 상한선을 28 mg/Nm<sup>3</sup>로 잡는다.

54) 2014년 1월 7일 이전에 가동을 시작한 시설에 대해서는 상한선을 25 mg/Nm<sup>3</sup>로 잡는다.

55) 2014년 1월 7일 이전에 가동을 시작한 시설에 대해서는 상한선을 12 mg/Nm<sup>3</sup>로 잡는다.

56) 2014년 1월 7일 이전에 가동을 시작한 시설에 대해서는 상한선을 20 mg/Nm<sup>3</sup>로 잡는다.

57) 2014년 1월 7일 이전에 가동을 시작한 시설에 대해서는 상한선을 14 mg/Nm<sup>3</sup>로 잡는다.

58) 수은 저감을 위한 특수 기술을 적용하면 하한선 도달이 가능하다.

### BAT 23: 수은 배출량 감소를 위한 최적가용기술

수은 배출을 방지하거나 저감하기 위한 최적가용기술이란 아래 표의 기술 중 한 가지 또는 모두를 복합적으로 적용하는 것을 말한다.

표 14. 수은 배출 저감을 위한 최적 가용 기술(BAT 23) 및 적용범위

기술	설명	적용범위
<b>다른 유해물질 배출을 방지 또는 저감하기 위한 기법을 간접적으로 적용.</b>		
a.	정전기 분리기(ESP)  수은 분리는 배기가스 온도 130oC 이하에서 가능.  이 기법은 주로 먼지 저감을 위해 쓰인다.	일반적으로 적용 가능
b.	직물 필터  이 기법은 주로 먼지 저감을 위해 쓰인다.	
c.	건식 또는 반건식 배기가스 정화시스템	
d.	습식 탈황(습식 REA)  이 기술은 주로 SOx, HCl 또는 HF 저감을 위해 적용.	
e.	선택적 촉매 환원(SCR)  수은이 정화기로 유입되기 전에 수은산화물을 분리해 내거나 또는 먼지 분리시스템과 병행해야만 효과가 있다.  이 기법은 주로 NOx 를 저감하기 위해 이용된다.	BAT 20 참조
<b>수은 배출을 저감하기 위한 특수 기술</b>		
f.	배기가스에 탄소 흡착제 (예 : 활성탄 또는 할로겐화 활성탄) 주입  일반적으로 정전기/직물 필터 분리와 병행하여 적용. 이 기법의 적용을 통해 추가적으로 수은이 함유된 탄소물질을 분리할 수 있다. 이는 플라이 애쉬 재활용을 위해 중요하다.	일반적으로 적용 가능
g.	할로겐 첨가제를 연료와 섞거나 퍼니스에 주입하는  연료의 할로겐 함량이 낮은 경우 일반적으로	

	방법		적용이 가능하다.
h.	연료 사전 처리	연료의 수은 함량을 줄이기 위해 세척 또는 혼합. 배기가스 정화 시설을 통해 수은 분리를 용이하게 하는 방법	사전에 연료 성질을 분석하고 기술의 적용가능성, 효율 등을 판단해야 함.
i.	연료 선발	<a href="#">별도 설명</a> 참조	해당 물질의 공급 가능성 내에서 적용 가능. 이는 각 회원국에서 적절한 에너지 정책을 통해 도달할 수 있다.

위의 최적 가용 기술 적용과 관련 된 BAT 수은 배출범위는 다음과 같다:

표 15. 수은 배출 기준

연소기관별 용량 (단위: MW <sub>th</sub> )	배출범위 (mg/Nm <sup>3</sup> )			
	연평균 또는 실증 기간 중의 평균			
	신규 시설		기존 시설 <sup>59)</sup>	
	역청탄	갈탄	역청탄	갈탄
< 300	< 1-3	< 1-5	< 1-9	< 1-10
≥ 300	< 1-2	< 1-4	< 1-4	< 1-7

#### 4.1.2. 천연 가스

##### BAT 40: 천연가스 연소시설의 에너지 효율 상승을 위한 최적가용기술

천연가스 연소의 에너지 효율을 높이기 위한 최적가용기술이란 아래 표의 기술 중 적절한 기술을 복합적으로 적용하는 것을 말한다.

표 16. 천연 가스 발전소의 에너지 효율을 높이기 위한 기술

기술		설명	적용 범위
a.	가스 증기 복합 발전	<a href="#">별도 설명</a> 참조	<p>신형의 가스터빈이나 엔진에 적용 가능. 단 연간 가동시간 1500 이 넘는 경우.</p> <p>기존의 가스터빈의 경우 구조적으로 허용하는 한도 내에서 효율 상승이 가능하다.</p> <p>연간 가동시간 1500 이하의</p>

59) 수은배출 저감을 위한 특수 기술을 적용하면 배출 기준의 하한선에 도달하는 것도 가능하다.

			<p>시설에서는 적절하지 않는다.</p> <p>간헐적으로 부하 변동이 크거나 자주 정지되는 기계식 가스 터빈에는 적절하지 않는다.</p> <p>보일러에는 적절하지 않다.</p>
--	--	--	--

천연가스 발전소의 에너지 효율에 대한 BAT 기준은 다음과 같다:

표 17. 천연가스 발전소의 에너지 효율 범위

연소 기관의 유형	에너지 효율 <sup>60) 61)</sup>				
	순 전기효율 (%)		순 연료효율 계 (%) <sup>62) 63)</sup>	기계적 순 에너지효율 (%) <sup>64) 65)</sup>	
	신규 시설	기존 시설		신규 시설	기존 시설
가스엔진	39.5-44 <sup>66)</sup>	35-44 <sup>67)</sup>	56-85 <sup>68)</sup>	없음	
가스보일러	39-42.5	38-40	78-95	없음	
개방회로 가스터빈 ≥ 50 MW <sub>th</sub>	36-41.5	33-41.5	없음	36.5-41	33.5-41
복합 발전소					
복합발전소 50-600 MW <sub>th</sub>	53-58.5	46-54	없음	없음	
복합발전소 ≥ 600 MW <sub>th</sub>	57-60.5	50-60	없음	없음	
열병합 복합발전소 600 MW <sub>th</sub>	53-58.5	46-54	65-95	없음	
열병합 복합발전소 ≥ 600 MW <sub>th</sub>	57-60.5	50-60	65-95	없음	

### BAT 41: 천연가스 보일러 연소 시설의 NOx 배출 저감을 위한 최적가용기술

- 60) 연간 가동시간 1500 미만의 시설에는 적용되지 않는다.
- 61) 열병합 발전소는 구조에 따라(전력생산 또는 난방) 전기 실효율, 연소실효율 중 하나만 적용가능하다.
- 62) 총 연소효율은 열 수요가 너무 낮으면 도달하기 어렵다.
- 63) 이 효율은 전력만 생산하는 시설에 적용되지 않는다.
- 64) 이 값은 기계적으로 가동되는 시설에 적용되지 않는다.
- 65) NOx 값 190mg/Nm3 이하로 맞춰진 엔진으로는 이 값에 도달하기 어렵다.
- 66) 이 값은 2종 연료 연소 터빈에 천연가스를 태우는 데에도 적용된다.
- 67) 이 값은 2종 연료 연소 터빈에 천연가스를 태우는 데에도 적용된다.
- DNL(Dry low emission)가스 터빈이 장착된 경우 DNL을 실제로 가동할 경우에만 이 값이 적용된다.
- 68) 이 값은 2종 연료 연소 터빈에 천연가스를 태우는 데에도 적용된다.
- 이 값은 연간 가동시간 1500 미만의 기존 시설에는 적용되지 않는다.



천연가스 보일러 연소 시설의 NO<sub>x</sub> 배출을 방지하거나 저감하기 위한 최적가용기술이란 아래 표의 기술 중 하나 또는 여러 개를 복합적으로 적용하는 것을 말한다.

표 18. 천연가스 연소시설의 NO<sub>x</sub> 저감을 위한 기술(BAT 41) 및 적용범위

기술		설명	적용범위
a.	공기, 연료 주입	<a href="#">별도 설명</a> 참조 다단계 공기 주입은 흔히 저 NO <sub>x</sub> 버너와 연계되어 있다.	일반적으로 적용 가능
b.	배기가스 재순환	<a href="#">별도 설명</a> 참조	
c.	저 NO <sub>x</sub> 버너(LNB)		
d.	모던한 제어시스템	<a href="#">별도 설명</a> 참조. 다른 기법과 병행하여 적용된다. 다만 연간 500 시간 이하 가동되는 발전소에서는 단일 적용이 가능하다.	구식 발전소에 적용하려면 연소시스템, 제어시스템 등을 개량해야 하므로 적용이 제한적일 수 있다.
e.	연소 기체 온도를 낮춘다.	<a href="#">별도 설명</a> 참조.	일반적으로 적용 가능
f.	선택적 비촉매 환원(SNCR)		연간 500 시간 이하 가동되는 발전소 또는 보일러 용량의 변동이 큰 발전소에서는 적용하지 못한다.  연간 500~1500 시간 가동되고 보일러 용량의 변동이 큰 발전소에서는 적용이 제한적일 수 있다.
g.	선택적 촉매 환원(SCR)		연간 500 시간 이하 가동되는 발전소에서는 적용할 수 없다.  용량 100 MW <sub>th</sub> 이하의 시설에서는 일반적으로 적용할 수 없다.  연간 가동시간 500~1500 의 발전소에서 개량하려면 기술적 경제적 제한이 있을 수 있다.

### BAT 42: 천연가스 가스터빈의 NO<sub>x</sub> 배출 저감을 위한 최적가용기술

천연가스 가스터빈의 NO<sub>x</sub> 배출을 방지하거나 저감하기 위한 최적가용기술이란 아래 표의 기술 중 하나 또는 여러 개를 복합적으로 적용하는 것을 말한다.

표 19. 천연가스 가스터빈 연소시설의 NOx 저감을 위한 기술(BAT 42) 및 적용범위

기술		설명	적용범위
a.	모던한 제어시스템	<a href="#">별도 설명</a> 참조.  다른 기법과 병행하여 적용된다. 다만 연간 500 시간 이하 가동되는 발전소에서는 단일 적용이 가능하다.	구식 발전소에 적용하려면 연소시스템, 제어시스템 등을 개량해야 하므로 적용이 제한적일 수 있다.
b.	물/증기 첨가	<a href="#">별도 설명</a> 참조	물 공급 여부에 따라 적용이 제한적일 수 있다.
c.	저 NOx 건조버너(DLN)		개량이 불가한 터빈이나 물/증기 첨가 시스템이 장착된 경우 적용이 제한적일 수 있다.
d.	저부하기를 위한 구조 콘셉트	에너지 수요의 변동이 심할 때 프로세스 조절을 위한 기기. 예를 들어 공기 주입 조절기능 개선, 또는 연소공정을 다단계로 조절.	가스터빈의 구조에 따라 적용이 제한적일 수 있다.
e.	저 NOx 버너(LNB)	<a href="#">별도 설명</a> 참조	복합발전소의 열 회수 증기 발생기(HRSG)를 추가적으로 가동하기 위해 일반적으로 적용 가능.
f.	선택적 촉매 환원(SCR)		연간 500 시간 이하 가동되는 발전소에서는 일반적 적용이 어렵다.  용량 100 MW <sub>th</sub> 이하의 시설에서는 일반적 적용이 어렵다.  공간이 충분치 못하면 기존 설비의 개량이 제한적일 수 있다.  연간 500~1500 시간 가동되는 기존 발전소에서는 기술적, 경제적으로 업그레이드가 어려울 수 있다.

### BAT 43: 천연가스로 가동되는 엔진의 NOx 배출 저감을 위한 최적가용기술

천연가스로 가동되는 엔진의 NOx 배출을 방지하거나 저감하기 위한 최적가용기술이란 아래 표의 기술 중 하나 또는 여러 개를 복합적으로 적용하는 것을 말한다.

표 20. 천연가스 엔진의 NOx 배출을 방지하거나 저감하기 위한 최적 가용 기술(BAT 43) 및 적용범위

기술		설명	적용 범위
a.	모던한 제어시스템	<a href="#">별도 설명</a> 참조. 다른 기법과 병행하여 적용된다. 다만 연간 500 시간 이하 가동되는 발전소에서는 단일 적용이 가능하다.	구식 발전소에 적용하려면 연소시스템, 제어시스템 등을 개량해야 하므로 적용이 제한적일 수 있다.
b.	린번(Lean burn) 콘셉트	<a href="#">별도 설명</a> 참조 일반적으로 선택적 촉매 환원(SCR)과 병행하여 적용	신형 엔진에만 적용 가능
c.	모던한 린번(Lean burn) 콘셉트	<a href="#">별도 설명</a> 참조	신형 점화플러그가 있는 엔진에만 적용 가능
d.	선택적 촉매 환원(SCR)		공간이 충분치 못하면 기존 설비의 개량이 제한적일 수 있다.  연간 500 시간 이하 가동되는 발전소에서는 적용이 안 된다.  연간 500~1500 시간 가동되는 기존 발전소에서는 기술적, 경제적으로 개량이 어려울 수 있다.

**BAT 44: 천연가스 연소로 인한 CO 배출 저감을 위한 최적가용기술**

천연가스 연소로 인한 CO 배출을 방지하거나 저감하기 위한 최적가용기술은 연소 효율 최적화/산화 촉매의 적용이다. ([별도 설명](#) 참조.)

(별도의 기술목록 없음)

천연가스 가스터빈 연소시설의 BAT NOx 배출범위는 아래와 같다.

표 21. 천연가스 가스터빈 연소의 NOx 배출범위

연소 시설의 유형	연소시설의 열용량 MW <sub>th</sub>	배출범위 (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>69) 70)</sup>	
		연평균 <sup>71) 72)</sup>	일평균 또는 실증 기간 중의 평균
<b>개방회로 가스터빈(OCGT) <sup>73) 74)</sup></b>			
신규 OCGT	≥ 50	15-35	25-50

기존 OCGT(기계식 가동 터빈 제외) - 연간 가동시간 500 미만 제외.	≥ 50	15-50	25-55 <sup>75)</sup>
<b>복합 발전소(GuD) <sup>76) 77)</sup></b>			
신규 GuD	≥ 50	10-30	15-40
기존 GuD(기계식 가동 터빈 제외) - 연간 가동시간 500 미만 제외.	≥ 600	10-40	18-50
기존 GuD 실 연료이용률 75% 미만	≥ 600	10-50	18-55 <sup>78)</sup>
기존 GuD 실 연료이용률 75% 이상	50-600	10-45	35-55
기존 GuD 실 연료이용률 75% 미만	50-600	25-50 <sup>79)</sup>	35-55 <sup>80)</sup>
<b>개방회로 가스터빈과 가스 증기 터빈</b>			
2003년 11월 27일 이전에 가동 시작된 가스터빈 또는 보조 가동을 위한 기존 가스터빈, 가동 시간 연간 500 미만.	≥ 50	없음	60-140 <sup>81) 82)</sup>
기계적 가동에 이용되는 기존 터빈은 제외. - 연간 가동 시간 500 미만의 시설을 제외한 나머지 기존 시설	≥ 50	10-50 <sup>83)</sup>	25-55 <sup>84)</sup>

연 가동시간 1500 이상인 시설 및 신규 시설에서의 CO-의 연평균 배출범위는 아래와 같다:

- 신규 개방회로 가스터빈(OCGT) 용량 50 MW 이상: < 5-40 mg/Nm<sup>3</sup>. 전기 실효율

69) 2종의 연료를 주입하는 터빈에도 해당됨.  
 70) DNL을 장착한 가스터빈의 경우 DNL이 실제 가동되는 경우에만 기준이 적용된다.  
 71) 연 가동시간 1500 미만의 발전소에는 이 기준이 적용되지 않는다.  
 72) NOx 배출을 저감하기 위해 기존 시설 기술의 기능을 최적화하면 CO 배출 기준의 상한선이 변동될 수 있다.  
 73) 기존의 기계적으로 가동되는 터빈 또는 연간 500 시간 이하 가동되는 터빈에는 이 기준이 적용되지 않는다.  
 74) 전기 실효율(EE) 39% 이상이 되는 시설에서는 이 기준 상한선에 보정 지수를 적용할 수 있다: 상한선 x EE/39.  
 75) 2003년 11월 27일 이전에 가동이 시작된 시설과 연 가동시간이 500~1500인 시설의 경우 기준의 상한선을 80 mg/Nm<sup>3</sup>로 정한다.  
 76) 기존의 기계적으로 가동되는 터빈 또는 연간 500 시간 이하 가동되는 터빈에는 이 기준이 적용되지 않는다.  
 77) 전기 실효율이 55% 이상인 시설은 이 기준 상한선에 보정 지수를 적용할 수 있다: 상한선 x EE/55.  
 78) 2014년 1월 7일 이전에 가동을 시작한 시설의 경우 이 기준의 상한선을 65 mg/Nm<sup>3</sup>로 정한다.  
 79) 2014년 1월 7일 이전에 가동을 시작한 시설의 경우 이 기준의 상한선을 55 mg/Nm<sup>3</sup>로 정한다.  
 80) 2014년 1월 7일 이전에 가동을 시작한 시설의 경우 이 기준의 상한선을 80 mg/Nm<sup>3</sup>로 정한다.  
 81) DNL 버너를 이용하면 이 기준의 하한선 도달이 가능하다.  
 82) 이 기준은 일종의 사례로 이해해야 한다.  
 83) 2014년 1월 7일 이전에 가동을 시작한 시설의 경우 이 기준의 상한선을 60 mg/Nm<sup>3</sup>로 정한다.  
 84) 2014년 1월 7일 이전에 가동을 시작한 시설의 경우 이 기준의 상한선을 65 mg/Nm<sup>3</sup>로 정한다.

(EE) 39% 이상이 되는 시설에서는 이 기준 상한선에 보정 지수를 적용할 수 있다: 보정지수 = 상한선 x EE/39.

- 기존 개방회로 가스터빈(OCGT) 용량 50 MW 이상(기계적으로 작동되는 터빈 제외): < 5-40 mg/Nm<sup>3</sup>. NOx 저감을 위한 건식기술을 장착할 수 없는 시설의 기준 상한선은 대개 80 mg/Nm<sup>3</sup> 수준이며 용량이 적은 시설에 대해서는 상한선 80 mg/Nm<sup>3</sup>을 적용한다.
- 신규 복합발전소(GuD) 용량 50 MW 이상: < 5-30 mg/Nm<sup>3</sup>. 전기 실효율(EE) 55% 이상이 되는 시설에서는 이 기준 상한선에 보정 지수를 적용할 수 있다: 보정지수 = 상한선 x EE/55.
- 기존 복합발전소(GuD) 용량 50 MW: < 5-30 mg/Nm<sup>3</sup>. 용량이 적은 시설에 대해서는 상한선 50 mg/Nm<sup>3</sup>을 적용한다.
- 기존 가스터빈 용량 50 MW 이상(기계적 작동): < 5-40 mg/Nm<sup>3</sup>. 용량이 적은 시설에 대해서는 상한선 50 mg/Nm<sup>3</sup>을 적용한다.

저 NOx 건조버너(DLN)가 장착된 가스터빈의 경우 건조버너가 실제로 작동됨을 전제로 하여 기준이 적용된다.

BAT 천연가스 보일러와 엔진의 NOx 배출범위는 아래와 같다 :

표 22. 천연가스 보일러와 엔진의 BAT NOx 배출범위

연소 설비의 유형	BAT 배출범위 (mg/Nm <sup>3</sup> )			
	연평균 <sup>85)</sup>		일평균 또는 실증 기간 평균	
	신규 설비	기존 설비 <sup>86)</sup>	신규 설비	기존 설비 <sup>87)</sup>
보일러	10-60	50-100	30-85	85-110
엔진 <sup>88)</sup>	20-75	20-100	55-85	55-110 <sup>89)</sup>

CO-의 연평균 배출기준은 아래와 같다:

- 연 가동시간 1500 이상의 기존 보일러: < 5-40 mg/Nm<sup>3</sup>.
- 신규 보일러: < 5-15 mg/Nm<sup>3</sup>.
- 연 가동시간 1500 이상의 신규 엔진: 30-100 mg/Nm<sup>3</sup>.

### BAT 45: 천연가스 연소로 인한 비 메탄 유기물가스 및 메탄CH<sub>4</sub> 배출 저감을 위한 최적가용기술

85) NOx 배출을 저감하기 위해 기존 시설 기술의 기능을 최적화하면 CO 배출 기준의 상한선이 변동될 수 있다.

86) 연 가동시간 1500 미만의 시설에는 이 기준이 적용되지 않는다.

87) 연 가동시간 500 미만의 시설에서는 이 기준을 지표로 작용한다.

88) 이 기준은 외부점화 2종 연료 엔진에만 해당된다. 가스-디젤 엔진에는 적용하지 않는다.

89) 연 가동시간 500 미만으로서 임시 가동되며 린버너콘셉트도 촉매기법도 적용할 수 없는 설비에는 기준 상한선을 175 mg/Nm<sup>3</sup>로 잡는다.

천연가스 연소로 인한 비 메탄 유기물가스 및 메탄CH<sub>4</sub> 대기 배출을 방지하거나 저감하기 위한 최적 가용 기술은 연소 효율 최적화/산화 촉매의 적용이다. (별도 설명 참조.) 단, 산화촉매는 탄소원자 수가 4 개 미만인 포화 탄화수소의 배출 저감을 위해 효과적이지 않다.

표 23. 천연가스 연소로 인한 비 메탄 유기물 가스 및 메탄의 BAT 배출범위

연소 용량 MW <sub>th</sub>	BAT 배출범위 (mg/Nm <sup>3</sup> )		
	포름 알데히드	CH <sub>4</sub>	
	실증 기간 중의 평균		
	신규 또는 기존 설비	신규설비	기존 설비
50 이상	5-15 <sup>90)</sup>	215-500 <sup>91)</sup>	215-560 <sup>92)</sup> 93)

### 4.1.3. 기술에 대한 설명

#### 일반 기술

표 24. 대기 배출 저감을 위한 일반 기술

기술	설명
모던한 제어 시스템	컴퓨터로 에너지 효율 및 배출량 저감을 자동으로 조절하는 시스템 적용. 최고 효율의 모니터링 포함.
연소 최적화	에너지 전환 효율을 최적화 할 수 있는 방법. 예를 들어 보일러나 연소실에서 효율을 최적화하고 동시에 CO 배출량을 최소화한다. 이는 여러 기법을 혼용함으로써 가능하다. 모던한 제어 시스템, 연소실의 구조개선, 온도 최적화, 연소시간 감축 등의 통합적 콘셉트.

#### 에너지 효율을 높이기 위한 기술

표 25. 에너지 효율을 높이기 위한 기술

기술	설명
모던한 제어 시스템	위의 표 참조
열병합	전력과 열을 분리하여 생산하는 것보다 일차에너지 소모를 최소 10% 저감할 수 있도록 열을 내 보내 발전소 외부에서도 쓸 수 있게 한다. 이를 위해 증기시스템에서 증기가 발생하는 위치를 파악하고 이를 보유, 추출하는 조치도 포함된다. 더 나아가서 향후 관로나 열교환시설, 추가적인 물 연화 시설, 스탠바이 고로 및 배압터빈 <sup>94)</sup> 등을 설치할 수

90) 연 가동시간 500 미만의 시설에서는 이 기준을 지표로 삼는다.

91) 이 기준은 풀가동되는 시설의 탄소 배출값이다.

92) 연 가동시간 500 미만의 시설에서는 이 기준을 지표로 삼는다.

93) 이 기준은 풀가동되는 시설의 탄소 배출값이다.

	있도록 공간 확보해 둔다. "Balance of Plant" 시스템(BoP) 및 제어 시스템 역시 적절하다. 배압터빈을 향후 연결하는 것도 가능하다.
가스 및 증기터빈의 복합 공정	두 종류 이상의 열역학 순환 시스템을 병합. 예를 들어 브레이톤 사이클 Brayton cycle(가스터빈/연소엔진)을 랭킨 사이클 rankine cycle <sup>95)</sup> (증기터빈/고로)을 병합하여 일차 사이클의 배기에서 유실되는 열을 다음 사이클을 위한 에너지로 변환하는 방법.
연소 최적화	일반 기술 참조
연도가스 냉각기	연도가스의 열을 이용하여 물을 가열하는 열교환기 Heat exchanger. 연도가스에 포함된 증기가 냉각된다. 냉각기는 열 연소 효율을 높일 뿐 아니라 연도가스 내의 먼지, SOx, HCl 및 HF 등의 유해물질을 분리하는데 이용한다.
프로시스 가스의 운영시스템	철강산업에서 발생한 프로시스 가스를 연료로 이용할 수 있도록 연결하는 시스템. 이때 연소시설의 유형과 공급 정도 및 철강 산업이 발전소와 함께 운영된다는 것을 전제로 한다.
초 임계 증기	증기압 220.6 bar 이상, 온도 540 °C 이상의 상태에 도달할 수 있는 증기 재열 시스템을 포함한 증기사이클 이용.
최대 임계 증기	증기압 250-300 bar 이상, 온도 580-600 °C 이상에 도달할 수 있는 증기 재열 시스템을 포함한 증기 사이클의 활용.
습한 연도	연도 구조개선. 포화상태의 연도가스에서 나온 증기가 냉각되어 연도가스의 중간 재연소가 불필요하게 해야 함.

## NOx,- & CO 배출 (대기) 저감 기술

표 26. NOx, CO 배출 저감 기술

기술	설명
모던한 제어 시스템	일반 기술 참조
공기 다단화 기술 Air staging	연소실을 여러 개의 존으로 나누어 각 존별로 산소 함량이 서로 다르게 한다. 목적은 NOx 배출량을 저감하는 것 <sup>96)</sup> 과 연소 최적화. 일차 연소 존(무산 연소), 이차 연소 존(산소 과포화), 연소율을 높이기 위한 재연소 등이다. 구식의 작은 보일러의 경우 연소율을 좋게 하기 위해 용량을 줄이는 것이 필요할 수 있다.

94) Back pressure turbine. 대기압 이상의 압력에서 증기를 배출하는 터빈을 말한다. 보일러에서 발생하는 고압 증기를 배압 터빈으로 팽창시켜 동력을 발생시키고 그 배기 증기를 사용하는 것으로서, 연료를 절약하고 전체의 열효율을 높일 수 있다(환경공학용어사전)

95) 열을 일로 변환하는 사이클. 열은 외부의 닫힌 루프에서 공급된다. 일반적으로 물이 사용된다. 세계에서 생산되는 전력 중 90%가 랭킨 사이클을 이용한다. 이 사이클은 모든 전력 생산에 이용되는데 일반적인 화력발전소를 포함하여 태양열 발전, 바이오매스 발전, 원자력 발전소에서도 적용된다. 스코트랜드의 윌리엄 존 매퀸 랭킨 William John Macquorn Rankine이 고안했다. 증기기관의 기본적 열역학이기도 하다.

연소 최적화	일반 기술 참조
저 NOx 건식버너(DLN)	가스터빈 버너, 공기와 연료가 버너에 유입되기 전에 혼합되는 것을 말한다. 연소 전에 공기와 연료를 섞음으로서 온도 분포가 일정해져 낮은 연소점을 얻을 수 있다. 이로써 NOx 배출이 감소된다.
배기 재순환(AGR)	배기의 일부를 버너에 재유입시켜 신선한 연소 공기를 대체한다. 이는 이중의 효과를 준다. 온도를 낮추고 질소 결합에 필요한 산소의 양을 줄인다. 이로써 NOx 생성이 저감된다. 배기가스를 다시 버너에 유입시킬 수 있는 특수 버너가 필요하다. 화염 뿌리의 온도를 내리고 가장 뜨거운 부분의 산소비율을 낮춘다.
연료 선발	질소 함량이 낮은 연료를 이용한다.
연료 다단화 Fuel staging	연소 온도를 낮추거나 또는 보일러에 여러 연소 존을 둠으로써 국부적으로 뜨거운 곳을 제한하는 기법이다. 농도를 서로 다르게 조절한 연료와 공기를 보일러에 투입. 소규모 시설보다는 대규모 시설에 효율적으로 적용할 수 있다.
희박 연소 lean burn concept, 모던한 modern lean burn concept	희박한 조건 하에서 화염의 피크 온도를 제어하여 가스 엔진의 NOx 형성을 제한하는 방법. NOx가 형성되는 구역에서 연료 대 공기 비율을 감소시켜 화염의 최고 온도를 낮추는 것이다. 단열 화염 온도보다 낮기 때문에 열로 인한 NOx 생성이 감소된다. 이 개념이 최적화된 것을 <b>모던 희박연소 concept</b> 라 한다.
저 NOx 버너(Low NOx Burners)	현대식 또는 초현대식 저 NOx 버너를 포함하는 이 기술은 화염의 피크 온도를 낮추는 것이 원리이다. 버너에서 연소를 지연시키는 한편 열 전달은 증가시킨다. 공기와 연료의 혼합을 통해 산소의 가용성을 감소시키고 화염의 피크 온도는 낮추는 것이다. 이런 방식으로 높은 연소 효율을 유지하면서 연료 결합된 질소가 NOx로 변환하는 것과 열 NOx의 형성을 지연시킨다. 이 기술은 연소실 설계를 변형을 동반한다. 초저 NOx 버너(ULNB)는 연소 준비 (공기 연료 혼합) 및 배기가스 재순환 방식으로 설계되어 있다. 구식 발전소를 리모델링할 경우 보일러를 재설계를 해야 할 것이다.  (한국에서 이미 적용하고 있음. <a href="#">이투데이 2016년 3월 28일 기사</a> )  독일: <a href="#">Mehldau &amp; Steinfarth Feuerungstechnik GmbH</a>
가스 오일 엔진의 저 NOx 연소 concept	엔진 업그레이드 및 연소와 연료 주입 최적화(공기 주입구를 일찍 닫고 연료 주입은 가능한 늦게). 소위 말하는 밀러 사이클
산화 촉매	귀금속, 플라틴 팔라듐 등의 촉매를 이용하여 일산화탄소를 산화, 이산화탄소와 증기를 얻는다.
연소 온도 하강	상온의 공기를 이용하여 연소. 이때 연소공기를 재생 공기 예열기에서 미리 가열하지 않는다.



선택적 촉매 환원법(SCR)	<p>촉매를 써서 암모니아 또는 우레아로 질소화합물을 선택적으로 환원한다. 이 기술은 최저 작동온도 약 300~450°C 에서 촉매의 도움으로 암모니아와 반응하여 NOx 를 질소로 환원시키는 원리를 이용한 것이다. 여러 개의 촉매를 사용할 수 있다. 다수의 촉매를 단계별로 사용함으로써 NOx 저감효과를 최대화한다. 모듈 방식이 가능하며 특수 촉매 및 예열 공정을 사용하여 저부하 또는 배기온도를 넓게 처리할 수 있다.</p> <p>“Induct” 또는 “slip”SCR 은 SNCR 과 암모니아 누출을 줄이는 촉매 선택적 환원법을 결합한 기술이다.</p>
선택적 비촉매 환원법(SNCR)	<p>촉매 없이 암모니아로 질소 산화물을 선택적으로 환원. 이 공정은 고온에서 암모니아 또는 우레아와 반응해 NOx 가 질소로 환원되는 원리를 이용한 것이다. 최적의 반응을 얻기 위해서는 온도를 800~1000°C 로 유지해야 한다.</p>
물/증기 첨가	<p>보일러의 연소 온도를 낮추고 열에 의한 NOx 생성률을 저감하기 위해 물 또는 증기를 주입하는 방법. 연소 전에 연료와 혼합하거나 연소실로 직접 분사한다.</p>

## SOx-, HCl-, HF 대기 배출 저감 기술

표 27. SOx-, HCl-, HF 대기 배출 저감 기술

기술	설명
흡착제 보일러 주입(퍼니스 또는 유동층 내부에)	<p>건조한 흡착제를 연소기에 직접 분사하거나 또는 마그네슘, 칼슘 계 흡착제를 유동층 보일러에 첨가하는 방법. 흡착제 입자가 표면이 배기가스 또는 유동층 연소보일러의 SO2 와 화학적으로 반응한다. 이 기술은 일반적으로 먼지 제거 기술과 병행하여 이용된다.</p>
순환 유동층 건식 분리장치(ZWS)	<p>보일러 공기에열기의 배기가스를 건식분리기 하단으로 주입, 벤츄리 라인을 통해 수직으로 상승. 고체 흡착제와 물을 배기에 별도 주입하는 기술. 일반적으로 먼지 제거 기술과 병행하여 이용된다.</p>
NOx 와 SOx 저감을 위한 복합적 기술	<p>NOx,- &amp; CO 배출 (대기) 저감 기술 참조</p>
흡착제를 체널에 주입(DSI)	<p>배기흐름에 건조한 분말형 흡착제를 분사 주입하는 방법.</p>

96) NOx 저감법은 두 가지 유형으로 구분된다. 일차적 방법은 NO의 생성 자체를 저하시키는 방법이다. 즉 산소유입, 불꽃 내지는 연소 온도 및 고열 연소 시간 등을 단계적 조절하는 방법이 있다. 실무에서는 산화 매체의 다단화, 연료 주입 다단화 또는 배기가스 재순환 등의 방법을 적용한다. 이차 방법은 분리방법으로서 이미 생성되어 연도 가스에 포함된 NO 화합물을 저감시키거나 무해하게 만드는 방법이다. 산화 방법과 환원의 두 가지 방법이 있다. 적절한 세척 물질을 주입하여 흡수하는 방법이 있다. 환원 기법은 다시금 촉매를 쓰는 방법과 촉매를 쓰지 않고 질소를 분리해 내는 방법이 있다. 환원법은 일차 이차 정화 과정에서 모두 쓰인다. 산화과정은 이차 정화에서만 쓸 수 있다. 실제로 적용할 수 있는 방법이 수없이 많다.

	이때 흡착제로는 탄산나트륨, 중탄산 나트륨, 수화 석회 등을 쓰거나 산성가스(기체 황화합물, HCl)등을 쓴다. 직물 필터, 전기 집진기 등의 먼지제거설비를 통해 고체형성. DSI 는 주로 직물 필터와 함께 사용된다.
배기가스 냉각기	NO <sub>x</sub> - & CO 배출 (대기) 저감 기술 참조
적절한 연료 선택	S, Cl, F의 함량이 적은 연료 이용.
프로시스 가스 제어 시스템	NO <sub>x</sub> - & CO 배출 (대기) 저감 기술 참조
해수를 이용한 배기가스 정화시스템(해수-REA)	습식 정화의 특별한 케이스로서 바닷물의 천연 알칼리성을 이용 배기에서 산성화합물을 흡수. 이 경우 일반적으로 상향식 먼지제거 시설이 필요하다.
건식 분무 흡수 장치(SDA)	알칼리성 용액을 배기가스 시설에 주입 분사한다. 가스형태의 황화합물과 반응한 뒤 먼지제거필터(직조 필터 및 전기 집진기)에 고착시킨다. 주로 직조 필터와 함께 사용한다.
습식 배기가스 탈황(습식-REA)	스크러빙 공정, 내지는 여러 스크러빙 공정의 혼합. 황산화물을 이용 기체 타입의 SO <sub>2</sub> 를 포집하고 이를 고체로 전환하기 위해 알칼리성 흡수제를 이용한다. 이 공정은 수용성 또는 알칼리성 용액에 녹는 기체화합물의 원리를 이용한 것이다. 이를 통해 기체화합물과 고체를 모두 분리할 수 있다. 습식 세척(스크러빙)으로 인해 배기가스가 물로 포화되므로 가스 배출 이전에 물을 빼내야 한다. 이 물은 폐수처리 플랜트로 보내져 여기서 불용성 성분이 침전 또는 여과처리 된다.
스크러빙	액체(물 또는 수용액)를 사용하여 배기 내의 흡착된 산성 산화물을 분리해 내는 방법.

## 먼지, 금속(수은 포함), PCDD 대기 배출 저감 기술

표 28. 먼지, 금속(수은 포함), PCDD 대기 배출 저감 기술

기술	설명
직물 필터(패브릭 필터)	가스 투과성의 직물로 만든 필터로서 입자를 여과한다. 배기가스의 특성과 가동 최대 온도에 견딜 수 있는 직물을 이용한다.
흡착제 보일러 주입	위의 8.4. 참조. 먼지와 중금속 배출물이 함께 걸러지는 간접 효과.
탄소 흡착제 주입(활성탄 또는 할로겐 활성탄)	화학적 처리가 되어 있지 않은 (할로겐)활성탄을 이용하여 수인, PCDD, F 를 흡수한다. 흡착제 분사법은 패브릭 필터를 추가로 설치하여 개선할 수 있다.

건식, 반 건식 REA 시스템	SOx-, HCl-, HF 배출 (대기) 저감 기술 참조. 건식 분무 흡수 장치(SDA), 순환 유동층 건식 분리장치(ZWS) 등. 이 장치들은 먼지와 금속 배출을 저감시키는 간접 효과를 낸다.
정전기 분리기 (ESP)	정전기를 이용한 침전기. 입자를 충전하여 분리하는 원리. 정전기 침전조는 여러 조건 하에 이용될 수 있다. 이때 효율은 장의 수, 체류시간, 촉매의 특성 및 입자 분리의 성능 등에 달려있다. 일반적으로 2~5 개의 필드로 구성되지만 최첨단 고성능 ESP 는 7 개의 필드로 구성되어 있다.
적절한 연료 선택	수은이나 재의 성분이 적게 섞여 있는 연료 사용.
다중 사이클론	원심력을 이용하여 입자를 붙어 날리는 원리. 이때 여러 개의 사이클론 함을 장착할 수 있다.
할로겐 연료첨가 또는 연소로에 주입	할로겐 화합물을 버너에 주입하여 원소 수은을 용해하거나 미립자 화합물로 산화시키는 방법. 그 다음 배출시스템에서 분리된 수은을 제거한다.
습식 배기가스 탈황기법 (습식 REA)	SOx-, HCl-, HF 배출 (대기) 저감 기술 참조. 이를 통해 먼지와 금속 배출량을 함께 저감할 수 있다.

## 5. 독일 연방 오염물질 방지에 관한 법규명령 제 13 호(대형 연소시설)

오염물질 방지에 대한 법규명령 제13호에서 대형 연소시설(50MW 이상)에 대한 사항을 구체적으로 규정하며 배출 한계치를 정의하고 있다. 다만 열병합 발전은 이 규정에서 제외되며 별도로 대기질 기술기준(TA Luft)이 적용된다.

위에서 살펴 본 최적가용기술의 배출범위 내에서 한계치를 정의했다.

2017년 8월에 발령된 유럽연합의 최적가용기술 기준서에 의거하여 개정된 뒤 2017년 12월 23일에 공표했다. 여러 항목이 갱신되었으나 화력발전소에 대한 항목은 변하지 않았다.<sup>97)</sup>

### 5.1. 구조와 내용

97) Bundesrecht 온라인 연방법/오염물질 방지에 관한 법규명령 13호:  
<https://www.buzer.de/gesetz/10623/v210766-2017-12-23.htm>

1부: 일반 수칙

2부: 시설과 운영에 대한 조건

3부: 측정과 모니터링

4부: 공동 수칙

5부: 최종 수칙

- 부속서 1: 발암물질 배출 한계치
- 부속서 2: 발암물질 중 다이옥신 및 퓨란의 총량을 산출하기 위한 등식
- 부속서 3: 상시 측정장소 조건과 측정 결과 검증법
- 부속서 4: 배기 내 산소량에 근거한 질량 산출 공식

## 5.2. 석탄 및 천연가스 화력발전소에 해당되는 항목 요약

해당 항목은 주로 제4조(고체연료), 제7조(기체연료)이며 부속서 1의 발암물질 목록이다.

### 제4조: 대형 연소시설(고체 연료) 배출 한계치

1. 일평균 배출한계치는 초과되어서는 안 되며 탈황률도 준수되어야 한다. 또한 반시간당 평균치가 한계치의 배를 넘으면 안 된다.

- a) 미세먼지      10 mg/m<sup>3</sup>
- b) 수은과 수은화합물      0.03 mg/m<sup>3</sup>
- c) 일산화탄소
  - aa) 용량 50-100 MW      150 mg/m<sup>3</sup>
  - bb) 용량 100 MW 이상      200 mg/m<sup>3</sup>
- d) NO, NO<sub>2</sub>
  - aa) 용량 50-100 MW
    - aaa) 갈탄 화력발전소 400 mg/m<sup>3</sup>
    - bbb) 기타 연소시설      300 mg/m<sup>3</sup>
  - bb) 용량 100-300 MW      200 mg/m<sup>3</sup>
  - cc) 용량 300 MW 이상

미세먼지 저감을 위한 석탄 화력발전소 대기오염방지시설 개선방안 독일 사례

aaa) 갈탄 화력발전소 400 mg/m<sup>3</sup>

bbb) 기타 연소시설 300 mg/m<sup>3</sup>

e) SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>

aa) 용량 50-100 MW

aaa) 순환유동층 연소 및 탈황률 75% 이상 350 mg/m<sup>3</sup>

bbb) 기타 연소시설 400 mg/m<sup>3</sup>

bb) 용량 100-300 MW 및 탈황률 85% 이상 200 mg/m<sup>3</sup>

cc) 용량 300 MW 이상

aaa) 순환유동층 및 압력충전 유동층 연소, 탈황률 85% 이상: 400 mg/m<sup>3</sup>

bbb) 기타 연소시설, 탈황률 85% 이상: 300 mg/m<sup>3</sup>

탈황에 의거하여 배출량이 50 mg/m<sup>3</sup> 이 넘지 않는 경우 바로 이 탈황비율을 기준으로 삼는다.

2. 반시간 측정분이 한계치의 배를 넘으면 안 된다.

3. 표본 채취기간의 평균치가 한계치를 넘으면 안 된다.

#### 예외 조항들

(2) 부속서 1에 명시된 **발암물질**에 대한 한계치 중 a~c의 채취기간의 평균치가 한계치를 넘으면 안 된다는 항목은 석탄 화력발전소에는 적용되지 않는다.

(3) 수은 배출량은 반시간 평균치가 0.05 mg/m<sup>3</sup>을 넘으면 안 된다.

(4) SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> 배출량: 국내 생산의 석탄을 적용했을 때 석탄의 성질에 근거하여 한계치를 준수하기 어려운 경우 아래와 같은 기준이 적용된다.

1. 50 MW~100 MW: 탈황률 93%를 초과하면 안 된다.

2. 100 MW~300 MW: 일평균 300 mg/m<sup>3</sup> 반시간 평균 600 mg/m<sup>3</sup>을 초과하면 안 된다.

3. 300 MW 이상: 일평균 400 mg/m<sup>3</sup> 반시간 평균 800 mg/m<sup>3</sup>을 초과하면 안 되며 일평균 탈황률 97%를 넘으면 안 된다.

(5) 해당 사항 없음.

(6) 먼지 총량: 2014년 이전에 가동이 시작된 시설에서는 일평균 20 mg/m<sup>3</sup> 반시간 평균 40 mg/m<sup>3</sup>을 초과하면 안 된다.

(7) 일산화탄소의 한계치: 용량 100 MW 이상의 구형 발전소의 경우 일평균 250 mg/m<sup>3</sup> 반

시간 평균 500 mg/m<sup>3</sup>을 초과하면 안 된다.

(8) NO, NO<sub>2</sub>:

1. 구형 발전소 용량 50~100 MW: 갈탄분진을 때는 경우, 일평균 450 mg/m<sup>3</sup> 반시간 평균 900 mg/m<sup>3</sup>을 초과하면 안 된다.
2. 구형 발전소 용량 50~100 MW: 지난 5년간 연간 최대 1500시간 가동된 경우 일평균 450 mg/m<sup>3</sup> 반시간 평균 900 mg/m<sup>3</sup>을 초과하면 안 된다.
3. 구형 발전소 용량 100~300 MW: 지난 5년간 연간 최대 1500시간 가동된 경우 일평균 400 mg/m<sup>3</sup> 반시간 평균 800 mg/m<sup>3</sup>을 초과하면 안 된다.
4. 2014년 이전에 가동이 시작된 300 MW 이상의 시설은 일평균 200 mg/m<sup>3</sup> 반시간 평균 400 mg/m<sup>3</sup>을 초과하면 안 된다.

### 제7조: 대형 연소시설(가스 연료) 배출 한계치

천연 가스에 대해서는 아래와 같은 일평균 배출한계가 적용된다. 이 값은 어떤 경우에도 준수해야 하며 반시간당 평균치가 이 값의 배를 넘으면 안 된다. 천연가스 발전소에 대해서는 예외 조항이 없다.

- CO: 50 mg/m<sup>3</sup>
- SO, SO<sub>2</sub>: 100 mg/m<sup>3</sup>
- SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>: 35 mg/m<sup>3</sup>

### 부속서 1: 발암물질

- |  |                           |
|--|---------------------------|
| a) 카드뮴, 카드뮴 화합물<br>탈륨, 탈륨 화합물  | 총량 0.05 mg/m <sup>3</sup> |
| b) 안티몬과 안티몬 화합물<br>비소, 비소화합물<br>납과 납화합물<br>크롬과 크롬화합물<br>코발트와 코발트화합물<br>구리와 구리화합물<br>망간과 망간화합물<br>니켈과 니켈화합물<br>바나듐과 바나듐화합물<br>주석과 주석화합물 | 총량 0.5 mg/m <sup>3</sup>  |
| c) 비소와 비소화합물(아르신AsH <sub>3</sub> 제외)<br>벤조(a)피렌<br>카드뮴과 카드뮴화합물<br>수용성 코발트화합물<br>크롬IV화합물 (바륨 크로메이트와 크롬산납 제외)                            | 총량 0.05 mg/m <sup>3</sup> |

d) 다이옥신 및 퓨란(부속서 2 참조)

총량 0.05 ng/m<sup>3</sup>

## 6. 기술 적용의 사례

전술한 바와 같이 독일 화력발전 기술은 최첨단이라고 자칭하고 있으나 정작 기술에 대한 정확한 정보는 쉽게 얻을 수 없다. 다음의 서술 내용은 지멘스사와 알슈트롬사의 홈페이지에서 자사 기술에 대해 소개한 것을 요약한 것이다. 이들 기술이 실제로 최첨단인지의 여부는 필자가 판단할 수 없으나 유럽연합의 최적가용기술 목록에 열거된 것 또는 그보다 조금 더 업그레이드된 것을 실제로 적용하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 이에 대해 간략히 정리해 보고자 한다.

### 6.1. 석탄 화력발전 기술의 유형

#### 6.1.1. 울트라 초 임계 증기 터빈 및 발전기

##### ultra-supercritical steam turbine plants and generators

효율을 45%까지 상승시킬 수 있는 기술로서 이는 최적가용기술에서 말하고 있는 초임계 터빈보다 앞선 것이며 평균치보다 효율 15%를 상승시킬 수 있다.<sup>98)</sup> Siemens사에서 개발했으며 그 외에 알슈트롬Alstrom사, 일본의 도시바사 등에서도 같은 기술을 보유하고 있다. 그중 알슈트롬사의 움직임이 가장 활발한 것으로 보인다.

- 2015.05.: 만하임 발전소GKM에 9기, 초임계 증기터빈 발전소 건설. 용량 911MW, 효율 46%, 온실가스 저감분 연간 1.3백만 톤이며 열병합으로 연료 이용률 70% 도달이 가능하다고 한다. 알슈트롬에서 핵심 기술, 보일러, 탈질소 설비, 발전기, 냉각기, 고압, 중압, 저압 터빈 등을 설치했다.<sup>99)</sup>
- 2015.08: Alstom사에서 슬로베니아 최초의 울트라 초임계증기터빈 발전소 리모델링 공사. 구형의 갈탄 화력발전소에 증기터빈, 발전기, 물-증기-순환 설비, 증기보일러, 제어시설 등을 설치하여 업그레이드했으며 슬로베니아 전력 3분의 1을 공급하고 있다. 사양을 보면 초임계 증기터빈 용량이 600MW, 보일러 600°C, 270 bar 이상의 고온 고압으로 에너지 효율을 43%로 증대했다. 온실가스 배출량 20%를 추가로 저감한 외에 SOx 배출량 55%, NOx 배출량은 53%를 저감했다. 2008년도에 수주하여 2015년에 준공, 가동을 시작했다.
- 2015: Alstrom사에서 타일랜드 Mae Mohn Plant(아시아 최초의 초임계 증기터빈 발전소) 건설. 사양은 위와 유사하다.<sup>100)</sup>

98) 지멘스사 화력발전 기술연구부

<http://w1.siemens.ch/home/ch/de/cc/siemens/energieeffizienz/energie/pages/effizientere-technologien-f%C3%BCr-kohlekraftwerke.aspx>

99) 알슈트롬사 홈페이지:

<http://www.alstom.com/de/press-centre/2015/7/alstom-ubergibt-kohlefeuert-ersten-block-9-an-das-grosskraftwerk-mannheim/>

100) Alstrom 홈페이지:

<http://www.alstom.com/de/press-centre/2015/3/alstom-baut-asiens-erstes-ultra-superkritisches-braun>

### 6.1.2. 700 도 기술:

#### IGCC 발전소(integrated gasification combined cycle, 석탄가스화 복합발전)

연소 온도를 700°C 까지 올리고 압력은 350 bar로 올리는 것을 목표로 삼은 기술로 아직 상용화되지 않았으며 실험연구 중이다. 현재 기술보다 증기 온도를 100도, 증기압 65bar를 더 상승시킨다고 한다.<sup>101)</sup> 이때 석탄뿐 아니라 기름과 아스팔트도 가스화시켜 이를 가스 증기복합 터빈 발전소에 이용하는 통합적 기술이다. 독일 회사 지멘스에서는 이를 통해 2020년까지 51% 효율 상승이 가능하다고 보고 있다. 이미 실증가동하고 있는 IGCC 시설들이 존재하지만 아직은 경제성이 낮아 탄소세 등이 도입된다면 정식 도입이 가능할 것으로 보고 있다.

### 6.1.3. IGCC-CCS 발전소

위의 IGCC 기술로 전력을 생산하고 이어 이산화탄소를 분리하여 저장하는 콤비 기술을 말한다. 독일 전력회사 RWE에서 뢰르트Hürth에 실증 플랜트를 계획하고 추진 중이었으나 이산화탄소 저장이 독일에서 불가능해지자 결국 계획을 포기하고 그 대신 석탄 가스(가스화 된 석탄)를 다른 용도로 이용할 수 있는 방법을 모색하고 있으며 해외로 기술 수출 중이다.<sup>102)</sup>

### 6.1.4. 유동층 건조 설비 Wirbelschichttrocknung Fluidized bed drying

최신 석탄 건조기법으로 석탄 알갱이를 부유하게 만들고 하부에서 건조한 공기를 불어 넣어 건조시키는 방법이다. 강제 대류 현상으로 인해 열교환 지수가 매우 높아지므로 비교적 낮은 온도에서 매우 빠른 속도로 건조시킬 수 있다. 유동층 형성에 소모되는 에너지가 많다는 것이 단점이다. 기술 자체는 이미 상당히 진척되어 있으며 RWE가 2006년 BoA에 최초로 설치했을 시점의 초기 투자비는 4천만 유로에 달했다.<sup>103)</sup>

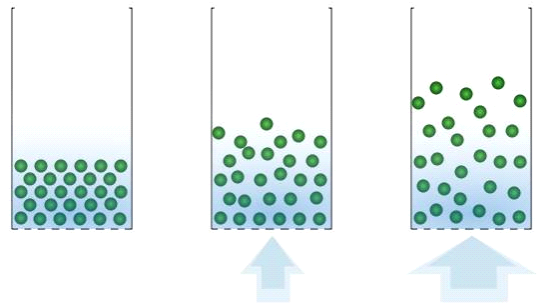


그림 5. 유동층 건조 Fluidized bed drying. 하부에서 건조한 공기를 불어 넣는다. 그래픽: Sharayanan

### 6.1.5. 초성능 정화기술 REAplus(2014 년에 첫 가동)

SO<sub>2</sub>를 석회석 용액을 촉매로 이용하여 배기로부터 분리해 내는 정화 기술(탈황)을 말한다. 기술 자체는 80년 된 것이지만 효율이 부쩍 상승하여 현재 96% 이상 걸러낸다. 종래의 REA보다 한 단계 업그레이드 된 것으로 원리는 같지만 탈황과정의 화학반응을 최적화하여 분리율을 극대화하는 것이다. 기존의 방법과 다른 점은

kohlekraftwerk/

101) 위키백과에 따르면 2011년 말 두산중공업이 국내 첫 석탄 가스화 실증 플랜트 수주. 지식경제부는 2012년 이후 수명이 다하는 기존 화력발전소를 모두 IGCC로 대체할 계획.

102) RWE/발전기술/IGCC-CCS-발전소:

<http://www.rwe.com/web/cms/de/2688/rwe/innovation/kraftwerke/fossil-gefeuerte-kraftwerke/igcc-ccs-kraftwerk/>

103) RWE/발전기술/IGCC-CCS-발전소:

<http://www.rwe.com/web/cms/de/2688/rwe/innovation/kraftwerke/fossil-gefeuerte-kraftwerke/igcc-ccs-kraftwerk/>



정화프로시스를 다단계로 진행시켜 석회용액과 배기 내 황산의 결합을 최적화하는 것이다. 시간 당 5만 입방 미터의 배기를 정화할 수 있다. 실험의 목표는 최대 분리 달성 및 시설의 내구성이다. 시설이 지속적으로 가동될 때 얼마나 견딜 수 있는지 관찰하고 있다.

2011년 말 습식전기필터를 추가로 설치하여 황산과 함께 미세먼지도 걸러냈다. 2012년 성공적인 테스트를 마치고 2013년 말까지 장기 관찰했다.

이 신기술의 특별한 점은 전기집진기에 강철관 전극 대신 수지관을 쓰는 것이다. 이로써 정전기에 의해 분리된 물질들이 부식현상 없이 물에 씻겨가게 설계되었다.<sup>104)</sup>

2014년 7월 니더아우셈 발전소G1에 대규모로 설치되었다. 기존의 탈황설비 시설도 함께 가동함으로써 성능의 비교가 가능하다. 이 설비는 이산화탄소 정화기를 불필요하게 만든다. 니더아우셈 발전소는 REAplus와 Post Combustion Capture<sup>105)</sup>기법을 병용함으로써 현재로서는 가장 모던한 기술을 적용하고 있는 발전소 중 하나다.

## 6.2. 적용 사례: 니더아우셈 발전소 “BoA”

니더아우셈 갈탄 화력발전소는 4000 MW의 전력을 생산하여 약 4백만 가구에 전력을 공급하는 대형 발전소로서 현재 평균 에너지 효율 43%를 보인다.

그중 K기 BoA<sup>106)</sup>는 1997~2002년에 시공되었으며 당시 세계에서 가장 모던한 발전소였다. BoA의 발전용량만 1,027 MW에 달하며 냉각타워가 굴뚝을 겸하는(통합 굴뚝) 콘셉트로서 건조 당시 200 미터로 세계 최고 높이였다.<sup>107)</sup> 그 외에 설치된 시설을 보면 다음과 같다.

### 석탄 건조시설

2006년 4천만 유로 투자하여 BoA에 최초로 유동층 건조 설비 설치하여 향후 수세기동안 지속적으로 효율을 높여 48~50%에 도달할 목표를 설정했다. 그러나 지금과 같은 사회 분위기로 보아 과연 목표달성이 가능할 지는 지켜볼 일이다.

### 탄소 분리 실증 시설

Linde와 BASF와 공조하여 탄소분리 장치를 설치했다. 2009년 당시 경제부 장관과 NRW 주 수상 입회하에 가동을 시작했다. 아민 가



그림 6. 니더아우셈 발전소 전경. 사진: Stodtmeister CC BY 3.0

104) 두산중공업도 이를 차세대 기술로 내다보고 있다. [이투뉴스 2016.10.10.](http://www.itnews.com.kr/news/article.php?aid=2016101001)

105) 연소 후에 연도 가스에서 이산화탄소를 분리해 내는 방법. 이는 구식 발전소를 리모델링하기에 적절한 방법.

106) Braunkohlekraftwerk mit optimierter Anlagentechnik(최적화된 갈탄발전 기술)

107) 지금은 인도 칼리신드 발전소 굴뚝이 2미터 더 높음.

스처리 기법을 적용하여 굴뚝 연기에서 90%까지 이산화탄소분리가 가능하다.

## 에너지 효율

각 공정을 서로 조화시켜 에너지 손실을 최소화한다. 이때 경제성과 기술을 함께 감안한다. 석탄이용 효율을 높이고 이산화탄소 배출을 저감시킨다. 총체적으로 연간 8백만 톤의 이산화탄소를 저감했다.

2012년에 BoA 2와 3 건설했다. 효율 43%로서재래식 발전소에 비해 효율이 30% 상승한 셈이다. 최고의 철강을 써서 고압과 고온에 견디게 했고 터빈의 날개는 티탄을 썼다. 필요에 따라 BoA 2와 3은 15분 만에 500 MW 규모의 용량을 조절하는 게 가능하다.

천연가스를 이용하는 모던한 가스-증기 복합발전소 (Combined Cycle Power Plants)는 효율 80%까지 상승이 가능하다. 전력생산과 열 생산을 최적으로 병합하여 효율을 높일 수 있다.

## 미래 전망

700도 발전소를 내다보고 있다. 증기압과 온도를 높여서 증기파라미터를 높이는 것이다. 신규 기술에 수십억 유로 투자하여 자체의 실험실에서 재료 실험과정을 거쳤으며 한 단계 업그레이드 된 **BoAplus**를 준비했다. 2017년부터 가동을 목표로 계획하여 허가 직전까지 갔으나 긴 계획 및 허가 기간 동안 시민과 환경단체의 극심한 반대에 부딪쳐 더 이상 진척되지 않고 있다.<sup>108)109)</sup>

## 7. 쟁점 기술:

### 이산화탄소 분리 및 저장 (CCS: carbon dioxide capture and storage)

#### 7.1. 개요

이산화탄소 분리 및 저장(CCS: carbon dioxide capture and storage) 이란 대기 중 이산화탄소 배출량을 줄이기 위해 발전소에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 지하에 영구적으로 저장하는 기술을 말한다. 이 기술을 적용하는 발전소를 CCS 발전소라고 한다.

CCS 발전 기법을 적용하면 화석연료로 인한 이산화탄소 배출량이 현저히 저감되지만 그렇다고 문제가 완전히 해소되는 것은 아니다. 구식 화력발전소의 이산화탄소 배출량은 790-1020 g/kWh에 달하는 데 반해 CCS 발전소의 배출량은 255-440 g/kWh의 범위로 떨어진다. 그러나 신재생에너지 발전소의 배출량에 비해서는 현저히 높다. 뿐만 아니라 발전효율이 떨어지는

108) Kurth, Norbert, Regionalrat, Weg für neues Kohle-Kraftwerk ist frei, Kölner Stadt-Anzeiger, 2013.07.05.

109) RWE Meldung, <http://www.rwe.com/web/cms/de/1101768/boaplus/aktuelles/>

것이 가장 큰 문제다. CCS 기술을 적용하는 경우 연료 소비량은 오히려 24~40% 증가한다. 이산화탄소 포집을 위해 별도로 에너지가 소모되며 저감되는 효율을 보충하기 위해 연료를 추가적으로 투입하기 때문이다.

저장 공간으로는 염수 대수층 또는 구 석유, 천연가스 지하저장소, 석탄층 등이 후보로 거론되고 있는 데 석탄층의 경우 접근이 쉽지 않다.

지난 두 세기에 걸친 집중적 연구와 테스트에도 불구하고 이산화탄소 분리 및 저장 기술은 아직 개발 단계에 있다. 2016년 현재 기술적, 경제적 상용화는 내다보기 어려운 상황이다. 우선 경제성이 문제이며 2020년에는 재생에너지 생산효율이 기존 발전시설과 비등하거나 그 보다 낮아질 것으로 예측되기 때문이다. 재생에너지 시스템 구축과 CCS 발전소 설치 사이의 균형을 아직 잡지 못하고 있다.

2015년 파리 기후 협정에서 기온 상승폭을 1.5°C로 제한할 것을 결의했다. 세계기후이사회 IPCC에 따르면 마이너스 배출, 즉 대기 중 이산화탄소를 흡수해야 목표달성이 가능하다고 한다. 또한 이산화탄소 저장에 적합한 지질층이 한정되어 있으며 저장 기간 역시 수 세기 내지는 영구적이어야 하므로 저장 지층에 대한 이용경쟁이 벌어질 것으로 내다보인다. 예를 들어 적절한 저장층을 일단 이산화탄소로 채운 뒤에는 더 이상의 이용이 불가능하기 때문에 이들이 완전히 채워진 후의 탄소 향방이 우려된다. 또한 지열 이용이나 기타 지층이용에 제한이 온다는 점도 감안해야 한다.

## CCS -ready: 시설 설치를 위한 준비

석탄화력발전소를 신규 설립할 때 쓰는 용어로서 후일 CCS 기술을 설치할 수 있도록 미리 준비해 두는 것을 말한다. 이산화탄소 분리 공정은 많은 면적을 요한다. 일반적인 발전소 면적의 절반 이상에 상당하는 공간을 추가로 마련해 두어야 한다. 또한 지하층 저장공간으로의 접근 내지는 수송 가능성 역시 갖추고 있음을 증명해야 한다. CCS-ready는 독일에서 아직 법적으로 요구하고 있는 사항이 아니다. 다만 독일 기술인증기관 튀프 TÜV 북부 지구에서 이에 상응하는 표준을 개발하고 해당 발전소에 인증서를 발부하고 있다.

## 7.2. 저장

대다수의 전문가들은 염수 대수층에 저장하는 것을 선호한다. 지하 800미터 층에서는 압력으로 인해 이산화탄소의 밀도가 높아져 초임계상태로 존재한다. 이산화탄소가 다시 유출되는 것을 방지하기 위해 상부에 밀폐층이 존재하거나 인위적으로 봉해야 한다. 이때 이산화탄소의 농도는 약 700 kg/m<sup>3</sup> 로서 염수보다 밀도가 낮아 염수 상부에 부유하게 된다. 문제는 이로 인해 염수가 서서히 밀려 토양층을 통해 빠져나갈 수 있다는 점이다. 측면으로 지층을 따라 빠져나가 지하수 층이나 바다로 유입될 가능성이 있다. 또한 이산화탄소를 유입하기 위해 가해지는 압력이 지층에 가해지는 자체 압력보다 클 경우 인공적인 지진이나 진동이 발생할 수 있다.

대수층에 이산화탄소를 대량으로 저장할 때 발생할 수 있는 환경영향은 아직 조사되지 않았다. 뿐만 아니라 대수층의 저장용량이 제한되어 있어 예를 들어 독일의 경우 약 2백억 톤의 이산화탄소를 30-60년간 채워 넣을 수 있을 것으로 내다보고 있으나 테스트 결과에 따르면 이보다 실 용량은 이에 현저히 미치지 못할 것으로 보인다.<sup>110)</sup> 연합 내에서는 대수층에 대한 자유로운 접근이 허용되어 있으므로 독일 뿐 아니라 다른 회원국에서도 독일의 대수층을 저장 공간으로 쓸 권리가 있다. 다만 독일법에서 폐기물 저장을 원칙적으로 불허하고 있으므로 법적 문제가 해결되어야 한다.

수년 전만 해도 이산화탄소가 염수에 용해되거나 결정체로 변할 것으로 여겼으나 최근 실험결과에 따르면 초임계상태로 부유한다는 결론이 얻어졌다.<sup>111)</sup> 아무 위험요소가 없는 탄산염의 형태로도 저장이 가능하다. 말하자면 미네랄 성분과 결합시켜 돌로 만드는 방법이다. 아이슬란드에서 2016년 이산화탄소를 해수와 반응시켜 현무암으로 전환하는 실험을 성공적으로 마쳤다. 220 톤 분량의 이산화탄소를 해저 200-400 미터의 물에 고정시켜 관찰한 결과 일 년 반 뒤 그중 95% 이상이 방해석 등으로 변했다고 보고했다.<sup>112)</sup>

채굴이 불가능한 해저 석탄층에 저장하는 것도 가능하다. 장점은 석탄이 이산화탄소를 흡수한다는 것이다. 이로 인해 메탄이 밀려나게 되는데 이는 에너지원으로 이용할 수 있다.<sup>113)</sup> 2008년부터 해저 침전층의 메탄을 이산화탄소와 교환하는 방법이 연구되고 있다(일명 SUGAR 프로젝트).<sup>114)</sup>

## 리스크

지하층에 저장된 이산화탄소가 염수를 몰아내 지하수를 염화시키는 외에도 중금속이 빠져나가 지하수에 유입될 위험성이 있다. 또한 가해지는 압력으로 인해 미약한 지진을 유발할 수 있다. 지진 자체는 미미하여 피해를 주지 않지만 이로 인해 지층과 밀폐층에 균열이 생겨 이산화탄소가 다시 대기로 빠져나갈 위험이 있다. 결론적으로 지하 대수층에 이산화탄소를 저장하는 방법은 리스크가 너무 크기 때문에 비효과적인 전략으로 여기는 추세이다.<sup>115)</sup> 스텐포드 대학의 연구팀은 이산화탄소 분리, 이송 및 저장에 소요되는 에너지 소모를 통해 새롭게 이산화탄소가 배출되므로 연간 지하저장량 1%가 유출되면 백 년 뒤에 대기의 이산화탄소 비율이 현저히 증가할 것이라 경고했다.

## 7.3. 법적 근거

오염물질 방지에 관한 법외에도 일반적으로 재해방지법, 광산법, 수자원법 등 여러 법에 저촉되나 아직 어디에서도 충분히 규정하지 못하고 있다.

110) Gabriela von Goerne 2009

111) Yossi Cohen 2015

112) 이산화탄소를 돌로 만드는 지질학자들, Science@ORF

113) CO2SINUS, *CO2 Speicherung in vor Ort umgewandelten Kohleflözen*. Forschungsprojekt an der RWTH Aachen

114) Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, [SUGAR-Projekt \(Submarine Gashydrat-Lagerstätten\)](#)

115) Christopher Schrader 2012

## 국제 해사법

폐기물 해양 유입 금지 조약에 이산화탄소 해저 저장 역시 저촉되었다. 특히 노르웨이 해상의 시추지역 슬라이프너(Sleipner)에 1996년부터 이산화탄소 해저 저장이 진행되고 있으므로 법적인 조정이 시급한 상황이었다. 이에 2008년 런던 조약을 통해 이산화탄소를 지하 암석층에 저장하는 것이 허용되었다.

## 유럽연합 법

유럽연합에서는 2009년 <이산화탄소 지층 저장에 대한 지침 2009/31/EC>을 통해 이산화탄소 저장을 위한 조사, 저장소 운영 관리에 대한 허가 조건을 규정했다. 신규 조성되는 발전소에 CCS 기술 적용을 의무화하는 것과 기존 발전소에 추가적으로 설치하는 것을 의무화하는 데 대해 논란이 있었으나 지침에 수렴되지 않았다.

## 독일의 CCS 법

독일에서는 2012년 8월 24일 <이산화탄소 영구 저장에 대한 법>을 제정 발표했다. 속칭 이산화탄소 저장법이 제정되기 이전에는 광산법에 의거하여 여러 테스트 프로젝트가 허가되었다. 이 법을 통해 독일은 연간 이산화탄소 저장 목표를 4백만 톤으로 잡았으며 각 연방주 별로 이산화탄소 저장을 금지할 수 있도록 허용했다. 이 법이 통과되기 이전에 이미 2회에 걸쳐 법안을 발의했으나 국민들의 심한 반대에 부딪쳐 성사시키지 못했다. 슐레스비히 홀슈타인 주 등에서 격렬한 반대 데모가 열렸으므로 법안을 수정, 각 연방주 별로 자유롭게 결정할 수 있다는 조항을 첨가해야 했다. 슐레스비히 홀슈타인 주, 안할트 주 등은 금지법 제정을 결의하고 준비 중이다.

2012년 전력회사 EnBW<sup>116)</sup>는 공개서한을 통해 CCS 기술을 비판했다. 아직 독일 대중들이 지층 저장소를 수용하지 못하고 있음을 근거로 들었으며 그 외에도 CCS 기술이 높은 비용을 초래하므로 그 보다는 신재생 에너지를 지원하는 것이 바람직하다는 입장을 밝혔다.

## 7.4. 평가

### 장점과 기회

신재생에너지 생산 및 에너지 효율의 증가를 통해 중장기 적으로 화석연료를 대체할 수 있을 것으로 본다. 다만 중국이나 인도 같은 성장 국가들이나 개발도상국들이 언제 에너지를 맞게 될지는 요원한 문제이다. 이에 많은 전문가들이 온실가스를 저감하기 위한 방법으로 이산화탄소의 분리 저장을 추천하고 있다.

116) 바덴 뷔르템 베르크 주 전력회사. 독일 3위 규모

## 기술의 이용성

CCS 기법을 적용하면 발전 효율이 약 10% 떨어진다. 이는 자원소모 30% 증가분과 맞먹는다.<sup>117)</sup> 높은 비용, 빠른 자원 소모, 풍경 파괴, 운송 및 여열의 증가, 기타 오염물질의 배출(미세먼지, 중금속 등)로 인한 추가적 환경영향 등의 효과도 간과할 수 없다. 이 영향들은 아직 정량적으로 조사되지 않았으나 어떤 경우에라도 이산화탄소 저장기법으로 인해 석탄 화력발전소에서 생산되는 전력이 현저하게 비싸질 것으로 내다보인다.

전송 파이프라인이 500 킬로미터 이상이 되면 상실분이 높아진다. 유럽의 경우 이산화탄소 파이프라인 네트워크 총연장 22,000~37,000 킬로미터가 계획되어 있다. 미국에서의 경험을 토대로 한다면 25,000 킬로미터 당 연간 평균 6일 동안 손실분이 생길 것으로 내다본다. 이에 더해 저장소에 향후 수천 년 동안 모니터링이 진행되어야 하므로 장기적인 에너지소모가 불가피하다. 이 기법으로 이산화탄소 배출을 완전히 없애지는 못하더라도 70% 정도 저감이 가능하다. 그렇다고 해도 과연 CCS 발전소의 에너지 균형이 맞는 것인지의 문제가 제기될 수밖에 없다.

## 저장 용량

독일 지질학 연구청에 따르면 지하 염수대수층에 약 2조 톤, 구 시추구역에 약 2천 750만 톤을 저장할 수 있다고 한다. 이는 독일의 모든 발전소에서 배출하는 이산화탄소를 30~60년간 저장할 수 있는 용량이다. 이 시기가 지나면 더 이상 저장이 불가능해진다. 중단기 목표 달성은 가능할 것이다.

해저에 저장하는 경우 100~200년 뒤 다시 대기 중으로 유출될 것으로 예상하고 있다. 이는 배출을 방지하는 것이 아니라 늦추는 것에 불과하며 정확히 보자면 기술 적용으로 인해 오히려 배출량이 증가하는 결과를 초래한다. 지하 저장과 마찬가지로 과연 영구적 밀폐가 가능한지 역시 장담할 수 없다. 그러므로 저장소의 모니터링이 관건이 된다. 기체가 어떤 방식으로 어떻게 서서히 유출될 지 분석이 어렵기 때문에 적절한 저장 공간을 찾는 것 역시 매우 어렵다. 최소한 2백년에서 길면 일만 년까지 저장이 보장되어야만 진정한 효과를 볼 수 있기 때문이다. 연간 0.01%가 유실되는 경우 일천년 뒤에도 90%는 남아 있다는 결과가 나오므로 독일 정부에서는 이를 적정 유실율로 보고 있다.<sup>118)</sup>

현재 16,000 회에 걸쳐 진행된 테스트 시추의 결과 애초에 예측했던 것 보다 저장에 적절한 지층 공간이 현저히 적다는 결론이 내려졌다. 또한 카메룬의 니오스 호 재앙에서 보았던 것과 같이 갑자기 대량의 이산화탄소가 방출되어 큰 피해를 초래할 가능성도 배제하기 어렵다. 독일 국민들이 가장 우려하는 것도 바로 이 점이다. 또한 해저에 저장하는 경우 심각한 생태적 문제를 야기할 수 있다. 해저에 이산화탄소의 호수가 형성되므로 수많은 해저 생물체가 사라질 것이기 때문이다.

117) Hans Werner Sinn 2008

118) 독일 연방 의회 2007

유럽 탄소 배출 거래권의 목적은 이산화탄소 저감 기법의 권장이다. 그 중에는 CCS 기법도 포함되어 있다. 신재생에너지 생산비용이 나날이 줄어들고 있으므로 화석연료를 쓰는 발전소는 연료비와 배출거래권 비용을 벌기 어렵게 된다. 더욱이 CCS 기술 비용이 현저히 크기 때문에 경제성 측면에서는 상용화가 요원할 것으로 내다보인다.

## 대안

탄소 저장 기술을 비판하는 사람들의 논지에 따르면 재생에너지 생산과 석탄 화력발전의 포기 로 인해 발생하는 문제가 탄소 저장기술에 따른 리스크보다 훨씬 적고 앞으로의 발전가능성이 크며 비용도 훨씬 저렴해 질 것이라고 한다. 이들은 아래와 같은 대안을 제시하고 있다.

- 에너지 절약과 효율의 증가
- 신재생에너지 시스템의 구축
- 생체 저장
- 메탄화를 통한 리사이클링

## 생체 저장

지금까지의 이산화탄소 저장 연구는 액체 형태, 가스 형태 내지는 드라이아이스 형태에 국한 되었다. 그 외에 이산화탄소를 바이오매스의 형태로 전환시켜 여기서 얻어지는 탄소를 저장하는 방법이 있다. 예를 들면 바이오 코크스나 체르노젠펜, 활성 탄소 등을 말한다. 이 방법을 적용하는 경우 위에서 언급한 여러 쟁점들은 해당사항이 없게 된다. 물론 지하에 묻힌 화석연료 들을 그대로 두는 것이 이를 파헤쳐서 쓰고 나서 다시 재생하는 것보다 좋은 방법인 것은 사실이다.

또 하나의 저장 방법은 조림방법이다. 독일 화학자 협회에서는 숲을 조성하여 이산화탄소를 흡수하는 것이 배기가스에서 이산화탄소를 분리해 내는 것 보다 훨씬 효율적이고 저렴하다고 밝혔다. 단, 이때 나무를 연료로 태우거나 또는 부패하게 방치하는 대신 목재로 이용하여 탄소를 봉인해야 한다고 주장한다. 목재는 탄소 저장의 또 다른 형태이기 때문이다. 늪지에 다시 물을 대어 재생하거나 이탄의 형성 촉진 등도 대안이 될 수 있다. 늪지에 물을 대면 밀폐 층이 형성되어 이산화탄소 배출을 방지하기 때문이다. 종종 이런 방법들이 오히려 효과적일 수 있다.

## 비용

이산화탄소 저장 비용은 다음과 같은 요소로 구성된다.

- 시설 투자금
- 운영 관리비
- 발전 효율의 저감으로 인한 추가 에너지 소모
- 저장소까지의 운송비

- 저장 공정비용 및 모니터링 비용
- 재해방지 비용

총 비용은 아직 정확히 알려지지 않았으나 글로벌 CCS 연구원에 따르면 1톤 당 23~92 달러 선일 것으로 추정되며 향후 기술발전으로 인해 비용이 줄어들 것으로 전망하고 있다. 유럽의 배출 거래권이 장기적으로 20유로 선에 놓인다면 CCS의 경제성이 보장될 것이다. 다만 이는 신재생에너지 등 다른 대안들의 경제성이 이에 미치지 못할 것을 전제한 것이므로 역시 신재생에너지와의 균형을 함께 살펴야 한다.

### 환경 전문가 위원회의 비판

2009년 독일의 환경 전문가 위원회SRU는 CCS 법안에 대한 의견서를 제출하여 강하게 비판했다. 위원회는 CCS의 리스크와 높은 비용에 대해 경고했으며 아래와 같은 논지를 펼쳤다.

- 리스크에 대한 연구가 부족함에도 불구하고 CCS 법안은 대규모 시설을 가능케 한다. 일단 지층에 저장되면 되돌이킬 수 없다.
- 아직은 산성에 영원히 저항하는 콘크리트가 없으므로 완벽한 밀폐층 형성이 불가능하다. 완전한 콘트롤이 불가능한 저장소를 만들어서는 안 된다.
- 일천 년 이상의 영구 저장 비용을 세금으로 충당해야 한다. 발전소가 폐지되면 저장소를 연방 정부에 넘기게 되어 있기 때문이다. 모니터링 비용과 보험료 등 역시 공공이 부담해야 한다.
- 지열과 풍력에너지 압축공기 저장과 이용 갈등이 생긴다. CCS 법이 제정되면 이를 근거로 우선권이 생겨 지열이용, 압축공기 저장이 불리해 진다.
- 2020년까지 CCS의 효과를 크게 기대할 수 없는 상황에서 법 제정은 시기상조다.
- 저장 공간에 무상으로 접근하는 것을 허용하고 있으므로 이는 석탄 화력발전소를 간접적으로 지원하는 것과 다름이 없다.
- 구식 에너지 산업을 지원함으로써 신재생에너지 분야에 간접적으로 손해를 야기한다.
- 공간계획이 아직 결여되어 있으며 대상지가 위치한 지역 사회에서 영향권을 행사할 수 없다.
- 그 외에도 세부 사항이 아직 조절되지 않았다.
- 대중들의 수용문제를 과소평가했다.

### 저장소의 이용

환경 전문가 위원회는 CCS를 원칙적으로 배제하는 것이 아니다. 한정된 저장 공간을 석탄 화력발전소의 이산화탄소로 채우는 것에 반대할 뿐이다. 그 보다는 미래에 바이오매스를 이용하여 대기 중 이산화탄소를 추출할 것을 제안했다. 기후변화를 제어하기 위해 21세기 후반부에 필요해 질 기술이라고 보고 있다.



## 재정 지원

- 현재 유럽 연합에서 지원하고 있는 CCS 연구지원비가 7억 4천 5백만 유로에 달하며 앞으로 지원금을 확대할 예정이다.
- CCS를 위한 배출권 거래금 예산 9천만 유로 잡혀 있다(2015년 현재).
- 국가 환경보조금 역시 CCS프로젝트에 투입될 수 있다
- 유럽 투자 은행 역시 CCS 지원을 위해 1천만 유로의 신용대출금을 준비해 두어야 한다.

결론적으로 위원회는 "기업이 투자해야 하는 추가비용은 유럽 연합의 지원금으로 모두 충당될 것이다. 이런 막대한 지원금이 다른 기후보호 테크놀로지와의 경쟁률에 어떤 영향을 미치는지 조사되어야 한다."고 역설했다.

## 연구 현황

한동안 여러 연구 프로그램이 진행되었으나 국민들의 반대에 부딪쳐 연구 지원이 중단된 상태이다. 예를 들어 2009년 9월 연방 교육연구부는 킬Kiel대학에서 진행 중이던 적정 저장공간 탐색 프로젝트의 재정 지원을 중단했다. 킬 대학이 속해있는 쉘레스비히-홀슈타인 주 주민들이 탄소 저장을 반대하고 있고 주 정부 역시 이에 동조하여 CCS 법안 통과를 저지한 것이 그 배경이다.<sup>119)</sup>

## 저장 공간, 프로젝트, 시민 반대

전술한 바와 같이 독일 내 저장 용량은 총 12억 톤 정도로 추정되었으나 ((Knopf et al. 2010)) 추정치에 불과하여 지속적으로 하향 조정되고 있다. 현재 연방 지질학 연구청(BSR)에서 관리하고 있다.

독일 국민들은 대부분 탄소 지하 저장에 반대하는 입장을 취하고 있다. 16개 연방주 중 어느 곳에서도 찬성하는 곳이 없어 실제로 저장소 설치하는 어느 곳에서도 구현되지 않고 있다. 리스크와 비용도 너무 크지만 안전에 대한 확신이 없고 지하층 저장에 의한 자연과 환경파괴가 우려되기 때문이다. 쉘레스비히 홀슈타인 주, 브란덴부르크 주, 니더작센 주, 작센 안할트 주 등 네 연방주는 2012/2013년을 기해 모두 이산화탄소 지하층 저장 금지법 제정을 결의하기에 이르렀으나 아직 법 제정의 소식은 들려오지 않고 있다.

## 실증 시설

그럼에도 현재 여러 발전소에서 시범적으로 실험하고 있다.

- 헤센 주, 슈타우딩거Staudinger 발전소 (석탄 화력발전소. Siemens Energy에서 시공,

119) 킬 대학 언론부 2009

전력회사 E.ON이 운영)

- 노르트라인 베스트팔렌 주, 니더아우셴 Niederaußem 발전소 (석탄 화력발전소 Linde & BASF 시공, RWE 운영 )
- 바덴 뷁르템베르크 주, 하일브론Heilbronn 발전소 (EnBW)

브란덴부르크 주의 슈바르츠 품페 Schwarze Pumpe 발전소에서는 이산화탄소 없는 발전소라는 타이틀로 CCS 테크놀로지를 분리막을 짓고 실험했으나 2014년 4월 9일 해당 전력회사 바텐팔은 정치적 여건이 맞지 않는다는 것을 이유로 시설을 중지하고 철거했다. 이 역시 주민들의 반대로 저장 공간 탐사가 불가해 졌기 때문이다.<sup>120)</sup>

결론적으로 볼 때 석탄 화력발전을 단계적으로 퇴출하고 신재생에너지에 주력하는 것이 독일의 유일한 해법인 것으로 보인다.

---

2018년 2월 13일

써드스페이스 베를린 환경아카데미

고 정 희

---

120) kst/dapad/dpa 2011

## 참고문헌

- boj/dpa/dapd (2012), "Debatte um CCS-Technologie, Altmaier gegen CO2-Speicherung", Der Tagesspiegel, 23.07.2012.
- Bundesimmissionsschutzgesetz(BImSchG)
- Bundesimmissionsschutz Verordnung 13
- Bundesregierung (2007), *CO2-Abscheidung und -Lagerung. Antwort auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Reinhard Loske, Hans-Josef Fell, Sylvia Kotting-Uhl, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN.* Hg. v. Deutscher Bundestag (Drucksache 16/5059).
- Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (16.09.2009), "Schwerer Schlag für die Grundlagenforschung in Schleswig-Holstein. Kiel. Online: <http://www.uni-kiel.de/aktuell/pm/2009/2009-092-ccs.shtml>.
- CO2GeoNet (2010), "Geologische CO2-Speicherung - was ist das eigentlich?", *Europ. Exzellenznetzwerk CO2GeoNet*.
- European Commission (17.08.2017), COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2017/1442 of 31 July 2017 establishing best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for large combustion plants
- EnBW Energie Baden-Württemberg AG (November 2015): *Ziel einhalten - Klimaschutz marktorientiert fördern.* EnBW Position.
- European Union, Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006 (Text with EEA relevance)
- kst/dapad/dpa (2011): "Vattenfall stoppt CO2-freies Kraftwerk. Aus für neue Technologie", *Manager Magazin*, 05.12.2011.
- Gabriela von Goerne (2009), "CO2-Abscheidung und -Lagerung (CCS) in Deutschland", *Germanwatch Hintergrundpapier*.
- Knopf et al.(2010), "Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO2-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen", *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 2010
- Kurth, Norbert, Regionalrat, "Weg für neues Kohle-Kraftwerk ist frei", *Kölner Stadt-Anzeiger*, 2013.07.05.
- Milojic, George: Dyllong, Yvonne (2016), "Vergleich der Flexibilität und der CO2-Emissionen von Kohlen- und Gaskraftwerken", *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 66.Jg. (2016) Heft 7. p.29

- Patrick R. O'Donoghue et al.: *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generated from Conventionally Produced Natural Gas. Systematic Review and Harmonization. Journal of Industrial Ecology*. Band 18, Nr. 1, 2014, S. 125–144.
- Paschotta, Rüdiger, *Gaskraftwerk*, Energie-lexikon
- Pinzler, Petra, "Selbst FDP-Wähler wollen Kohleausstieg", *Die Zeit*, 2017.11.15.
- Schönberger, H.; Tebert, Ch.; Lahl, U.: Expertenanhörung im Umweltausschuss. Fachleute nahmen Stellung zum Regierungsentwurf zur Umsetzung der EU-Industrieemissionsrichtlinie in deutsches Recht. In: *ReSource* 4/2012, S. 4–1, zuletzt geprüft am 08.02.2018.
- Schrader, Christopher (2012): Wissenschaftler warnen vor Erdbeben durch CO<sub>2</sub>-Speicherung. In: *Süddeutsche Zeitung*, 19.12.2012. Online: <http://www.sueddeutsche.de/wissen/kohlendioxid-und-klimawandel-wissenschaftler-warnen-vor-erdbeben-durch-co-speicherung-1.1386723>, 2018.02.07 최종 확인.
- Sinn, Han-Werner (2008): Das grüne Paradoxon: Warum man das Angebot bei der Klimapolitik nicht vergessen darf. Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München. München (Ifo Working Paper No. 54).
- TA Luft, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft.
- Titz, Sven (2016): "CCS-Technik, Endlager für Kohlendioxid. Das Abscheiden und Speichern von CO<sub>2</sub> gilt als letzte Chance für den Klimaschutz. Doch der Ausbau der Technik kommt kaum voran." *Der Tagesspiegel*, 17.02.2016.
- Umweltbundesamt (2017.12.12.), *Braun- und Steinkohle: Verstromung schädlich für Klima und Umwelt*.
- Umweltbundesamt (2017), Daten und Fakten zu Braun- und Steinkohle, UBA Hintergrund.
- Umweltbundesamt (2017.05.24.), *Energibedingte Emissionen..*
- Umweltbundesamt(UBA), *Uebersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinstze in Deutschland 1990-2015*, UBA
- Vorholz, Fritz (2011), "Umweltpolitik, Schwarz-Gelb will Umweltrat auf Linie bringen", *Die Zeit*, 12.12.2011.
- Wöckel, Holger (2008), *Grundzüge des Immissionsschutzrechts*. Skript. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Öffentliches Recht.
- Yossi Cohen, Daniel H. Rothman: Mechanisms for mechanical trapping of geologically sequestered carbon dioxide.

## 외부 고리

- 유럽위원회/법령정보:<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2017:212:FULL&fro>

m=DE

- 연방환경청/최적가용기술/  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/beste-verfuegbare-techniken/sevilla-prozess/bvt-merkblaetter-durchfuehrungsbeschluesse>
- 연방환경청/산업분야/대규모 발전시설:  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebereiche/feuerungsanlagen/grossfeuerungsanlagen#textpart-2>
- 온라인 에너지 백과: <https://www.energie-lexikon.info/gaskraftwerk.html>
- 써드스페이스 베를린 환경백과: <https://thirdspace-berlin.com/>