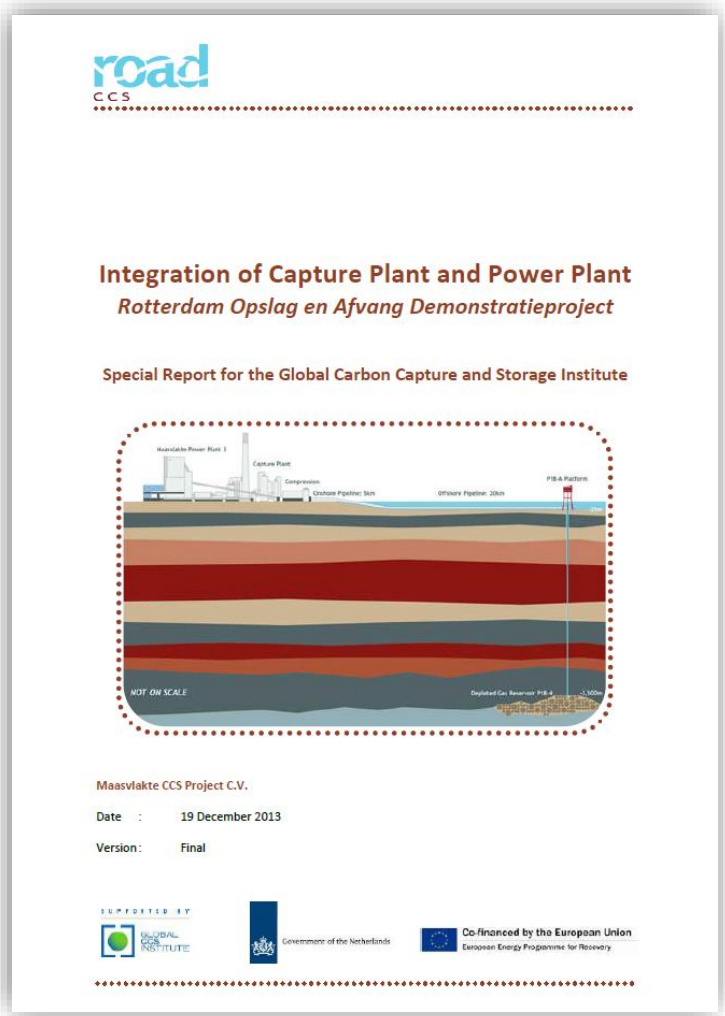
포집 플랜트와 발전소의 통합
로테르담 포집 및 저장 실증 프로젝트

글로벌 이산화탄소포집 및 저장 연구소(Global Carbon Capture and Storage Institute: 이하 글로벌 CCS 연구소)용 특별 보고서


road CCS

Integration of Capture Plant and Power Plant

Rotterdam Opslag en Afvang Demonstratieproject

Special Report for the Global Carbon Capture and Storage Institute

Maasvlakte CCS Project C.V.

Date : 19 December 2013

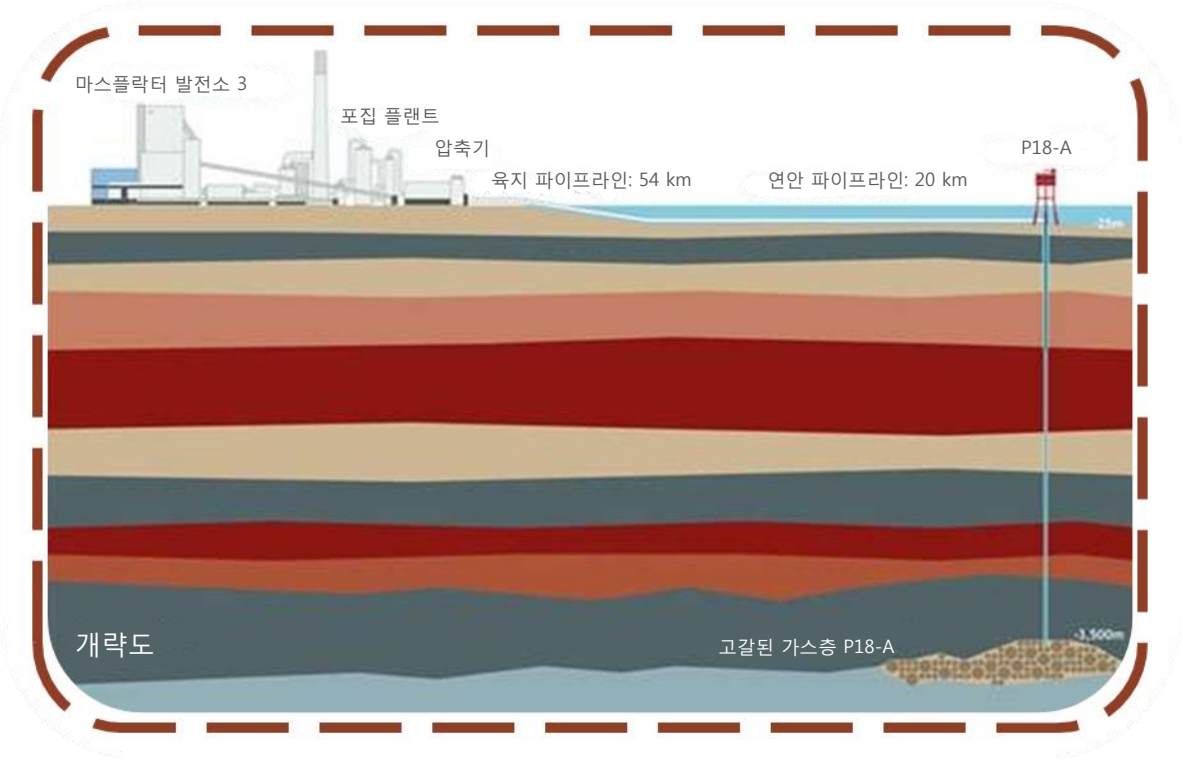
Version: Final

Co-financed by the European Union

• TRANSLATED BY THE GLOBAL CCS INSTITUTE

포집 플랜트와 발전소의 통합
로테르담 포집 및 저장 실증 프로젝트

글로벌 이산화탄소포집 및 저장 연구소(Global Carbon Capture and Storage Institute: 이하 글로벌 CCS 연구소)용 특별 보고서



마스플락터 CCS 프로젝트 C.V.

날짜 : 2013년 12월 19일

버전: 최종 버전

SUPPORTED BY GLOBAL CCS INSTITUTE
Government of the Netherlands
Co-financed by the European Union
European Energy Programme for Recovery

제목

포집 플랜트 및 발전소 통합 ROAD(Rotterdam Opslag en Afvang Demonstratieproject, 로테르담 저장 및 실증 프로젝트)
글로벌 이산화탄소포집 및 저장 연구소용 특별 보고서

작성자

Hette Hylkema Andy
Read Marc Kombrink

날짜

2013년 12월 19일

ROAD | 마스플락터 CCS 프로젝트 C.V.

Parallelweg 1 P.O. Box 133
3112 NA Schiedam 3100 AC Schiedam
The Netherlands The Netherlands

전화: +31 10 75 34 000
팩스: +31 10 75 34 040
이메일: info@road2020.nl
웹사이트: www.road2020.nl

면책

ROAD 프로젝트는 유럽 에너지 회수 프로그램(European Energy Programme for Recovery, EEPR) 하에 네덜란드 정부와 유럽연합 집행위원회가 협조융자하고 있다. 또한, 글로벌 CCS 연구소는 ROAD의 지식 공유 파트너이며 본 프로젝트에 대한 재정 지원을 해왔다. 본 간행물 내용에 대한 단독 책임은 마스플락터 CCS 프로젝트 C.V.에 있다.

ROAD 프로젝트에 대한 본 보고서는 글로벌 이산화탄소포집 및 저장 연구소와 마스플락터 CCS 프로젝트 C.V.의 재정 합의에 따라 제공된다. 해당 재정 협약서의 조항은 달리 서면으로 합의되지 않는 한, 협약서에 명시된 당사자의 단독 보호와 법적 혜택을 위하여 제정되었다. 기타 다른 개인이나 독립체는 본 보고서의 발행, 유출, 배포 혹은/그리고 본 보고서 내용을 활용하거나 이에 의존하는 것으로 인해 발생하는 해당 재정지원 협약서에 해당하는 모든 당사자에 반하는 행위나 클레임의 직접적 원인을 제기할 수 없다.

본 문서는 정보 교환을 위해 글로벌 CCS 연구소의 웹사이트에 공개되어 있다. 글로벌 CCS 연구소는 정보의 신뢰성, 정확성, 완성도와 관련하여 이를 대표하거나 보증하지 않으며, 정보상의 오류나 정보 누락에 대하여 어떠한 형태로든(부주의에 의한 것도 포함) 발생하는 책임을 지지 않는다.

© Global Carbon Capture and Storage Institute Limited 2015 Melbourne. 크리에이티브 커먼즈 저작자표시 3.0 호주 라이선스(Creative Commons Attribution 3.0 Australia License)에 따라 본 문서의 사용은 허용된다.

본 보고서는 지식공유의 목적으로 글로벌CCS협회에서 발행되었습니다. 원문과 번역본의 상이한 부분이 있다면, 모두 원문이 기준입니다.

목차

운영 소개 및 요약 8

1. 소개 10

2. 프로젝트 자료표 11

2.1 프로젝트 개요 11

2.2 실태 & 그림 11

2.3 계획 14

3. ROAD의 통합 CCS 체인 15

3.1 연소후 포집 기술의 선택 15

3.2 CCS 발전 단계 16

3.3 ROAD의 통합 CCS 체인 17

3.3.1 포집 18

3.3.2 CO_2 압축 20

3.3.3 수송 20

3.3.4 저장 20

3.3.5 포집 플랜트 및 발전소의 통합 20

4. 포집 플랜트와 발전소의 ROAD 통합 23

4.1 소개 23

4.2 '포집 가능(capture ready)' 상태에 대한 특정 고려사항 23

4.3 포집 플랜트의 설계요건 및 발전소에 미치는 영향 23

4.4 현장 배치 25

4.5 연도가스 25

4.5.1 연도가스 삽입부 28

4.6 증기 및 응축물 32

4.6.1 저압 증기 32

4.6.2 포집 플랜트 리클레이머용 중간 증기 37

4.6.3 냉각을 위한 응축물 37

4.6.4 전력 손실 MPP3 40

4.7 전기 전력 40

4.8 냉각수 42

4.9 탈염수 47
4.10 폐수 48
4.10.1 DCC 응축물 48
4.10.2 해연 FGD로부터의 블로 다운 48
4.10.3 기타 폐수 흐름 48
4.10.4 스택 MPP3로부터의 응축물 49
4.11 제어장치 하드웨어 49
4.12 기타 유틸리티 49
4.13 포집 플랜트의 유연성 50
4.14 제어 원리 51
4.14.1 제어실 및 제어 하드웨어 51
4.14.2 시작/중지 절차 인터페이스 52
4.14.3 기능창 53
4.15 특정 배출 레벨 53
4.16 오염 관리 시스템 54
5. 미래 CCS 프로젝트 교훈 56

그림표

그림 1: ROAD CCS 체인의 위치: 로테르담항 및 북해 4
그림 2: MPP3의 3D 시각화 5
그림 3: ROAD의 통합 CCS 체인 9
그림 4: 포집 장치의 위치: 마스플락터 발전소 3(남쪽으로부터의 시점, 2013) 10
그림 5: MPP3에서 포집 플랜트에 이용 가능한 배출량(북쪽으로부터의 시점, 2009) ... 10
그림 6: 포집 플랜트와 MPP3 호스트 사이의 상호작용 요약 12
그림 7: 블록 선도 통합 체인(MMP3, 포집 플랜트, 수송 및 저장) 13
그림 8: 250 MWe에 상당하는 연소후 포집 플랜트의 기술 설계(Fluor) 16
그림 9: 연도가스 삽입부의 위치 17
그림 10: 포집 플랜트 입구에서의 연도가스 사양 17
그림 11: 포집 플랜트 출구에서의 연도가스 사양 18
그림 12: 마스플락터 유닛 3 CCS 실증 물리적 흐름 모델 19
그림 13: MPP3의 연도가스 연도 개관 (FGD 상단부터 스택 상단까지) 20
그림 14: MPP3의 스택 내에서 연도가스 삽입부
그림 15: 연도가스 삽입부, 스택 외부로부터 및 스택 내부로부터의 시점 (설치 중) .. 21
그림 16: 단순화된 추기 장치 계획 24
그림 17: 증기 및 응축물 통합의 PFD 25
그림 18: MPP3에서 증기 및 응축물 파이프 라우팅의 부분도 26
그림 19: T이음이 탑재된 저압 삽입부 그림 (2013년 4월) 26
그림 20: T이음이 탑재된 중간 압력 삽입부 그림 (2013년 4월) 27
그림 21: ROAD에 적용된 폐열 통합에 관한 개념도식 28
그림 22: 단순화된 MPP3 전기 선도 및 포집 플랜트로의 연결 30
그림 23: 좌측 상단의 격납고로부터의 냉각수 흡입 MPP3, 우측 하단 폰드에서의 배출 31
그림 24: 냉각수 공급채널의 횡단로 33
그림 25: 냉각수 공급 채널 및 가압펌프로의 연결 상면도 34
그림 26: 냉각수 공급 채널 및 가압펌프로의 연결 횡단도 35
그림 27: 포집 플랜트 기능창 42
그림 28: ROAD 및/혹은 바이오매스의 이산화탄소 배출 43

약어 리스트

bara	바 앱솔루트(bar absolute): 1다인/1cm^{2}인 절대 압력단위
barg	봉 게이지(bar gauge)
cm	센티미터(centimetre)
CAPEX	설비 투자(Capital Expenditures)
CCS	이산화탄소포집저장(Carbon Capture and Storage)
CO_2	이산화탄소(Carbon dioxide)
DCC	직접 접촉식 쿨러(Direct Contact Cooler)
EEPR	유럽 에너지 재생 프로그램(European Energy Programme for Recovery)
ESP	전기집진기(Electrostatic Precipitator)
FGD	배연탈황(Flue Gas Desulphurization)
FID	최종 투자 결정(Final Investment Decision)
Global CCS Institute	글로벌 이산화탄소포집저장 연구소. 이하 글로벌 CCS 연구소 (Global Carbon Capture and Storage Institute, 이하 Institute)
GRP	유리강화플라스틱(Glass Reinforced Plastic)
ha	헥타르(Hectare) (100 m X 100 m)
HAZOP	위험 및 조작성(HAZard and OPerability)
km	킬로미터(kilometre)
LP	저압(Low Pressure)
MCP	마스플락터 CCS 프로젝트 C.V.(Maasvlakte CCS Project C.V.)
m	미터(metre)
mm	밀리미터(millimetre)
MP	중간 압력(Medium Pressure)
MPP3	마스플락터 발전소 3(Maasvlakte Power Plant 3)
Mt	메가톤(megatonne)
Mt/a	메가톤/1년(megatonne per annum)
MWe	전기출력 단위 메가와트(megawatt electrical)
Nm^3/hr	노멀 큐빅 미터/1시간(Normal Metres Cubed per Hour)
OCC	오버헤드 이산화탄소 콘덴서(overhead CO_2 condenser)
ppmv	부피 기준 백만분률(parts per million by volume)
RCI	로테르담 기후 계획(Rotterdam Climate Initiative)
ROAD Demonstratieproject)	로테르담 포집 및 저장 실증 프로젝트(Rotterdam Opslag en Afvang
t/h	톤/1시간(ton per hour)

운영 소개 및 요약

본 보고서는 마스플락터 발전소(MPP3)에 현재 존재하는 화력 1,070 MW 3기와 Rotterdam Opslag en Afvang Demonstratieproject(ROAD)의 새롭게 제안된 250 MW 등급 탄소 포집을 통합시키는 데 중점을 두고 있다. 탄소 포집 기술은 이산화탄소 포집 및 저장(CCS) 비용을 절감하기 위한 방대한 연구 주제와 다양한 간행물의 주제가 되어왔다. 그러나 주요 발전소와의 통합은 또한 CCS 체인의 효율성 및 조작성에 중요한 영향을 미치며 본질적으로 상당한 프로젝트 비용을 차지하게 된다

발전소에 연계된 기타 대규모 연소후 포집 프로젝트에서 발간된 정보에는 현재 직면하고 있는 문제점의 범위와 가능한 해결책의 범위가 제시되어 있다. 현재까지 각 프로젝트는 적어도 일부 몇몇 측면에서 고유한 성격을 띤다. 예:

- E.ON에서 발간한 킹스노스 FEED(Kingsnorth FEED)는 신축 발전소를 고려하여, 증기를 가장 효율적으로 포집 플랜트에 공급하기 위한 발전소 내 공급 히터 트레인/변형 증기 터빈을 구상하였다. 전기 시스템 또한 발전소 발전기 변압기에서 제공되는 포집 플랜트 압축기와 함께 완전히 통합되었다.

- Scottish Power의 롱아넷 FEED(Longannet FEED)는 좀 더 오래된 기존 유닛으로의 성능개선을 고려하였는데, 기존 증기 시스템에 대한 상당 부분의 개조는 비현실적인 것으로 간주되었다. 가스 연료를 사용하는 새로운 CHP 유닛은 새로운 포집 플랜트에 증기와 전기 모두를 공급할 것으로 예상된다.

- 이러한 프로젝트 중 유일하게 현재 건설 중인 사스크파워의 바운더리 댐(Boundary Dam) 프로젝트에서, 기존의 증기 시스템은 주요 유닛 쇄신의 일환으로 새로운 포집 장치를 공급하기 위해 개조되었다. 단일 결합 보강장치의 황 포집과 탄소 포집을 결합하기 위한 기회 또한 포착되었다.

이러한 보고서 초안은 글로벌 CCS 연구소를 위해 ROAD에 의해 마련되었으며, ROAD에 의해 발전소가 통합되는 방식이 본 보고서에 설명되어 있다. 전술된 프로젝트처럼 ROAD 또한 고유한 특징을 지닌다. 이는 매우 현대적인 고효율 장치로의 성능 개선이다(더 낮은 발열량을 기준으로 46% 이상의 효율성이 유지되는). 포집 플랜트는 단지 1/4 연도가스 이하의 반류를 취하는데, 이로 인해 호스트 장치에 미치는 영향이 비율적으로 전술된 다른 예제에서보다 훨씬 적어지며, 그렇기 때문에 증기 및 냉각수 접속 부위에 특히 중요하다.

접속 부위 각각은 차례로 설명된다. 주요 설계 선택사항이 설명되어 있으며, 채택된 해결책은 다소 상세하게 묘사되어 있다. 일부 해결책은 매우 혁신적이며, 일부 해결책은 다소 더욱 보수적이다. 강조할만한 점에는 다음이 있다.

- MPP3는 습식 스택이기 때문에, 배연탈황(FGD) 옆에 가스-가스 히터가 없다. 이는 연도가스 반류가 FGD와 스택 상부 사이의 어느 지점에서든 추출될 수 있다는 것을 의미한다. ROAD는 스택 자체 내에서 연도가스를 추출하고 다시 회수하는 방식을 채택하였는데, 새로운 접속 부위의

무게가 스택에서 감소되도록 한다. 이로 인해 토목공학 비용 절감이 이루어졌으며, 현장 설계는 압축된 상태를 유지하였다.

- 중간 압력(MP)/저압(LP) 크로스오버로부터의 증기 공급(증기가 저압 터빈에 들어가기 직전)은 관례적이다. 그러나, 특히 ROAD는 본 시나리오에서 전부하(full-load)로 포집 플랜트를 유지하고자 하기 때문에, 본 압력은 MPP3가 부분 부하일 경우 포집 플랜트에 불충분하다. ROAD는 증기 공급을 본래의 전부하 압력으로 올리기 위해 MP 증기에 의해 동력을 얻는 증기 제트 승압기(증기 이젝터로도 불림)를 제안하였는데, 배열 ROAD는 탄소 포집 응용에 있어 완전히 새로운 것으로 여겨진다. 이를 통해 MPP3의 전부하에서 40%까지 증기 압력의 정확한 통제가 가능해진다.

- 성능개선장치임에도 불구하고, ROAD에는 추가 열 집적화가 포함된다. 분리기 출구에서 이산화탄소 열은 MPP3 보일러 급수에 열을 공급하는데, 사이클 효율을 향상시키고 포집 플랜트의 냉각 부하를 감소시킨다. 냉각수(로테르담항으로부터의 해수)가 MPP3에서 취해진 반류이고, 따라서 제한적이기 때문에, 냉각 부하 감소는 ROAD에 특히 가치가 있다. ROAD에서 취한 냉각수는 MPP3로의 공급을 감소시키기 때문에 MPP3 유닛의 효율성에도 영향을 미친다.

- 포집 플랜트로부터의 가장 큰 폐수원은 직접 접촉식 냉각기로부터이고, 이는 단순히 MPP3 연도가스로부터 응축된 물이다. 따라서, MPP3 FGD 장치에서 재사용하기에 적합한 품질이다. 이는 탄소 포집의 추가가 MPP3의 담수 소비를 상당히 줄인다는 것을 의미한다.

추가 CCS 프로젝트가 프로젝트만의 고유한 문제를 지니고 있고 모든 ROAD의 교훈이 전달 가능한 것이 아닌 반면, 본 특별 보고서에 제시된 아이디어와 경험은 프로젝트 엔지니어가 차세대 프로젝트의 포집 장치와 발전소를 더욱 바람직하게 통합하고 최적화할 수 있도록 할 것으로 기대된다.

1. 소개

ROAD는 Rotterdam Opslag and Afvang Demonstratie 프로젝트(로테르담 포집 및 저장 실증 프로젝트)이며, 발전에 있어 세계 최초의 대규모 통합 이산화탄소포집저장(CCS) 실증 프로젝트 중 하나이다. ROAD의 주요 목표는 발전에서의 대규모 통합 CCS 체인의 기술적, 경제적 타당성을 입증하는 것이다.

ROAD는 E.ON Benelux N.V.와 GDF SUEZ Energie Nederland N.V.에서 착수하였다. 이들은 본 CCS 시연 프로젝트를 실현하기 위해 공동기업체 마스플락터 CCS 프로젝트 C.V.를 설립하였다. 마스플락터 발전소 3(MPP3) 옆에 위치한 ROAD 포집 플랜트의 용량은 250 MWe에 상당할 것이다. ROAD는 산업 규모에서 완전한 CCS 공정 체인의 타당성을 입증하고 화력 발전소의 요건에 맞추어 조정될 수 있음을 보여주기 위한 것이다. 포집 플랜트를 위해 선택된 기술은 '연소후' 포집이다. 특정 포집 공정은 아민 기반 용제나 아미노산 염, 혹은 암모늄과 함께 포집하는 것을 기반으로 한다. 포집된 이산화탄소는 영구적 보관을 위해 포집 플랜트에서 가스전까지 걸친 25 km 파이프라인에 의해 TAQA Energie B.V.의 연안 가스전으로 GDF SUEZ E&P Nederland B.V.에 의해 수송된다.

유럽 에너지 재생 프로그램(EEPR, 2009년 7월)의 입찰을 기반으로, ROAD는 포집 플랜트와 MPP3의 통합 공학과 함께 2010년에 시작되었다. MPP3 설계는 다소 확립되었고, 이미 공사 중에 있지만, 일부 서브시스템은 여전히 세부 공학기술을 요하고 있다. ROAD는 에너지 및 수명 비용을 최소화하고 공간 제한에 의한 제약을 고려하고 MPP3의 건설 지연을 피하고 기술 제약을 허용하면서 효율적 통합을 할 수 있는 방법을 조사하였다. 프로젝트의 실증 기간이 5년이어야 하는 반면, 기술 설계의 수명은 20년이 기준이었다. 실증 기간 이후 운영을 지속할지 여부는 상당 부분 해당 시점에 기대되는 경제적 변수에 따라 달라질 것이다. 외부 재정 지원 없이 포집 플랜트를 운영하기 위해 모든 운영 및 유지보수 비용을 충당할 수 있도록 충분한 이산화탄소 가격이 준비되어 있어야 한다.

본 특별 보고서 이전에, ROAD 프로젝트는 다음에 관하여 글로벌 CCS 연구소를 위한 특별 보고서를 발행했다.

- 획득한 교훈.
- 비즈니스 위험의 처리 및 배정.
- 프로젝트 실행 전략.
- 이해 당사자 관리.
- 허가 과정.
- 프로젝트 위험 완화.
- 공개 FEED 연구.
- 이산화탄소 기술 선택 방법론.
- 유동안정성 & 제어 원리.

본 특별 보고서의 주요 초점은 포집 플랜트 자체보다는 포집 플랜트와 MPP3를 통합하는 데 맞추어져 있다. 주요 통합 문제는 제4장에 설명되어 있으며, 연도가스 삽입부, 증기 공급, 전력 공급, 냉각수, 일부 소형 연결부가 포함된다.

2. 프로젝트 자료표

2.1 프로젝트 개요

ROAD는 Rotterdam Opslag and Afvang Demonstratie 프로젝트(로테르담 포집 및 저장 실증 프로젝트)이며, 발전에 있어 세계 최초의 대규모 통합 탄소 포집 및 저장(CCS) 실증 프로젝트 중 하나이다.

ROAD는 E.ON Benelux N.V.와 GDF SUEZ Energie Nederland N.V.에 의해 시작된 공동 프로젝트이다. 이는 또한 마스플락터 CCS 프로젝트 C.V. 합자회사를 구성한다. ROAD의 목표 파트너는 이산화탄소 수송을 위한 GDF SUEZ E&P Nederland B.V.와 이산화탄소 주입 및 영구적 보관을 위한 TAQA Energy B.V.이다. ROAD 프로젝트는 유럽 에너지 재생 프로그램(European Energy Programme for Recovery, EEPR)의 틀 안에서 네덜란드 정부와 유럽연합 집행위원회가 협조융자하고 있다. 또한, 글로벌 CCS 연구소는 ROAD의 지식 공유 파트너이며 프로젝트에 재정 지원을 하였다.

2.2 실태 & 그림

ROAD는 로테르담항과 산업 지역에 위치한 새로운 1100 MWe 화력 발전소(마스플락터 발전소 3)의 연도가스로부터 이산화탄소를 포집하기 위해 연소후 기술을 적용한다. 포집 장치는 250 MWe에 상당하는 용량을 갖고 있으며, 매년 백십만 톤을 포집할 것을 목표로 하고 있다. 포집 랜트는 2017년에 가동될 계획에 있다.

그림 1: ROAD CCS 체인의 위치: 로테르담항 및 북해

ROAD는 북해 해저 아래에 있는 고갈된 가스층에 포집된 이산화탄소를 저장할 계획에 있다. 이러한 가스층은 연안에서 20 km 떨어진 네덜란드 대륙붕의 블록 부분 P18(P18-6, P18-4 and P18-2)에 위치한다. 고갈된 가스층은 북해 해저

아래 3.5 km 깊이에 있다. 이산화탄소는 플랫폼에서 고갈된 가스층으로 주입된다. 예상 저장 용량은 35 Mt이다.

기본 설비: E.ON 마스플락터 발전소 3(로테르담, 네덜란드)

- 출력 : 1 070 MWe, 단일 트레인 장치 (예, 단일 보일러, 단일 증기 터빈 발전기 세트)
- 연소 공정 : 미분탄 보일러
- 연료 : 전세계 다양한 국가로부터의 무연탄 조합
- 효율 : 46%
- 가동 : 2013
- 포집 가능

그림 2: MPP3의 3D 시각화

포집 플랜트

- 기술 : 연소후
- 기술 제공사 : 플루어(Fluor)
- 용량 : 250 MWe에 상응하는 용량 (MPP3로부터의 연도가스 중 23.4%가 처리됨)
- 포집률 : 90%
- 포집된 CO_2 : ~ 1.1 Mt/a
- 가동 : 2017

수송

- 절연 파이프라인
- 지름 : 16 인치

- 거리 : 육지에서 5 km, 연안에서 20 km
- 용량 : 기체상 : 1.5 Mt/
  (고밀도 상에서 5 Mt/a에 상응)
- 설계 사양 : 압력 140 bar
  온도 80° C

저장

- 고갈된 가스층 : P18-4
- 운영기관 : TAQA
- 깊이 : 3.5 km
- 예상 용량 : ~ 8 Mt (P18-4 전용)
- 이용 가능 : 2014

2.3 계획

ROAD 프로젝트의 고수준 일정은 다음과 같다.

2009년 7월 14일	: 유럽 에너지 재생 프로그램 하에 재정지원을 받기 위한 신청서 제출
2009년 9월	: 유럽연합 집행위원회의 재정지원을 위한 프로젝트 선정
2010년 5월	: 각료급 명령의 네덜란드 재정 지원 발표
	: 유럽연합 집행위원회와 ROAD 프로젝트에 의해 보조금 협약서 체결
2010년 9월	: 기본구조설계(FEED) 포집 플랜트 완료
	환경 영향 평가 발행
2011년 6월	: 환경 영향 평가 제출, 허가 신청
2012년 5월	: 취소불능의 확정 포집 허가
2013년 9월	: 취소불능의 확정 저장 허가
2013년 3/4분기	: 최종 투자 결정
2017	: CCS 체인 운전 착수
2017~2020	: 실증 단계 CCS 체인

3. ROAD의 통합 CCS 체인

본 장에서는 어떠한 개발이 ROAD 프로젝트 설계에 영향을 미쳤는지와 MPP3와 포집 장치 사이의 접속을 포함하여 프로젝트의 통합 체인이 어떻게 현재의 상태에 이르게 되었는지를 설명한다.

3.1 연소후 포집 기술의 선택

가장 진보된 연소후 포집 공정은 예를 들어, 아민, 아미노 염, 암모니아와 같은 이산화탄소 포집 용량이 큰 알칼리성 용제를 이용한 화학적 스크러빙(scrubbing)에 의존한다. 연소후 포집 공정은 보통 주기적 흡수/탈착 공정을 거치는 수용매 용액과 함께 작용한다. 연도가스로부터의 이산화탄소는 소위 "흡수기(absorber)"라 불리는 기둥에 있는 용제에 의해 흡수되며 "분리기(stripper)"라 불리는 기둥에서 부하 용제로부터 탈착되는데, 고도로 농축된 이산화탄소 흐름이 발생한다. 흡수 과정은 발열성이기 때문에, 냉각을 위해서는 우수한 성능이 요구된다. 용제의 액상 상태에서 이산화탄소를 추출하는 데 열이 요구되기 때문에, 발열성 스트리핑 공정에는 전체 포집 공정의 주요 에너지 요구가 발생한다.

본 기술 분야에서의 E.ON과 GDF SUEZ의 활동에는 3.2항에 기술된 야심찬 시험 플랜트 플리트와 CASTOR, CESAR, OCTAVIUS를 포함한 유럽골격법 프로젝트(European Framework Project) 내에서의 연소후 포집의 공동 R&D가 포함된다. 또한, E.ON는 CAPRICE에 참여하고 있으며, 리자이나 대학교의 국제시험센터(International Test Center)와 오스틴에 있는 텍사스대학의 선두적 국제 '클럽 기금 후원의' R&D 프로그램 회원권과 대학에서의 다양한 연구 활동 기금을 추가로 보유하고 있으며, GDF SUEZ는 또한 화학적 용제를 이용한 포집 공정의 비용 절감과 새로운 물리화학 진보 공정의 개발을 목표로 하면서 ACACCIA에 참여하고 있다.

E.ON과 GDF SUEZ는 다음 이유로 MPP3에서의 본 CCS 프로젝트를 위해 화학적 스크러빙을 결합한 연소후 포집 기술을 선택했다.

- MPP3를 위한 건설 사업은 이미 이산화탄소 포집 기술과 관련한 결정이 내려진 순간 시작되었다. 예연과 산소 연료 연소가 MPP3 설계에 적용 불가능하기 때문에 연소후만이 실현 가능한 이산화탄소 포집 기술(성능을 개선하는)이다.

- 화학적 스크러빙을 통한 연소후 포집은 산업 규모에서의 탄소 포집을 보여주는 가장 진보된 형태의 기술(최소의 기술적 위험)인 것으로 간주된다.

- 소규모이긴 하지만 기술이 이미 입증되었기 때문에, 화학적 스크러빙 공정을 위한 기술 제공업체는 현재 좀 더 확실한 공정을 제공하는 기타 기술 제공업체보다는 원숙한 업체인 것으로 간주된다.

- 현재, E.ON 과 GDF SUEZ에 의한 기타 여러 발전소 중에서 다수의 초현대적 미분탄 연소 발전소가 세계적으로 설립 및 계획되고 있다. 연소후 포집 기술은 기타 CCS 기술에 비해 성능개선 시나리오에 좀 더 적합하며, 이산화탄소 배출이 상당히 증가할 수 있기 때문에 이러한 발전소의 향후 운전에 매우 중요할 수 있다.

3.2 CCS 발전 단계

R&D 노력의 초석은 산업 규모에서 시험될 유망 기술을 위한 길을 여는 능력이다. 이는 연소후 포집 기술의 더 많은 발전을 위한 다음과 같은 단계별 접근법을 수반한다. 2020년까지 산업 규모로 CCS를 개발하는 과정에서 두 단계를 차별화하였다.

1. 'I 단계'는 화력 발전소로부터의 실제 연도가스를 이용한 포집 과정의 실용적 실행가능성을 검증하는 것과 이러한 과정의 효율성을 향상시키는 것이다. 다양한 부품의 혁신적 무형 디자인과 혁신적 용제를 이용하는, 최대 10 MW까지의 범위에 있는 소규모 파일럿 플랜트에서 합리적 비용으로만 시험될 수 있다. 따라서, E.ON과 GDF SUEZ는 Alstom, Hitachi Power Europe, Siemens, Cansolv, Mitsubishi, Fluor, TNO와 같은 국제 협력사와 협력하였다. 예를 들어, 네덜란드 CATO 프로그램 내에서, E.ON은 TNO 파일럿 플랜트용 발전소 부지(마스플락터)를 도입하였는데, 이는 3,000 시험 시간 이상 동안 MPP1/2에서의 실제 연도가스에서 이미 운전되어 왔고(추가 정보는 www.co2- cato.nl 참조), 앞으로도 계속 운전될 것이다. 본 파일럿 플랜트는 용제로 아미노산 염(TNO에 의해 개발됨)을 적용하기 위해 고안되었다. 2009년 5월, Alstom의 시범파일럿 플랜트는 E.ON의 발전소인 칼스함(Karlshamn)(스웨덴) 운전을 시작하였다. 본 플랜트는 '냉각 암모니아 공정'을 이용하여, 암모니아를 용제로 활용하기 위해 고안되었다. Siemens 시범 플랜트는 수년 동안 E.ON의 발전소 슈타우딩거(독일)에서 운영되어 왔다. 본 시범 플랜트는 용제로 아미노산 염(Siemens에 의해 개발됨)을 이용한 고등 공정을 적용하기 위해 고안되었다. 또한, E.ON의 빌헬름스하펜(독일) 발전소에 있는 최대 규모의 파일럿 플랜트는 이제까지 1년 이상 가동되어 왔으며, ROAD 포집 플랜트와 직접 관련 있는 플루어 기술을 증축하는 데 일조를 한다.

2. 'II 단계'는 산업 규모의 완전한 CCS 체인을 성공적으로 실증하여 화력 발전소의 요건에 맞추어 조정될 수 있음을 밝히고 안전하게 운영될 수 있음을 증명하는 것을 목표로 한다. 다른 단계와 달리, II 단계는 포집 플랜트와 발전소의 통합, CCS 체인 내 단일 부품 사이(발전소, 포집 플랜트, 수송, 저장)의 상호작용의 최적화와 이에 대한 이해에 중점을 두고 있다. 수백 MW 범위에 있는 실증 플랜트는 추가적으로 CCS 체인의 단일 부품 사이의 상호작용과 통합 문제에 반영될 수 있다.

마스플락터 현장에 있는 포집 플랜트는 파일럿 플랜트와 CCS의 대규모 상업적 상용화 사이의 가치 있는 중간 단계이기 때문에 E.ON과 GDF SUEZ의 개발 전략에 적절할 것이다.

3.3 ROAD의 통합 CCS 체인

ROAD는 발전분야 세계 최초의 대규모 통합 CCS 실증 프로젝트이다. ROAD의 주요 목표는 발전분야에서 대규모 통합 CCS 체인의 기술적, 경제적 타당성을 입증하는 것이다. 현재까지 전력 산업에서 CCS는 주로 소규모 시험 시설에 적용되어 왔다. 5~10년 이내에 CCS가 효율적이고 효과적인 CO_2 감소 기술이 될 것이라는 것을 입증하기 위해 대규모 실증 프로젝트가 필요하다.

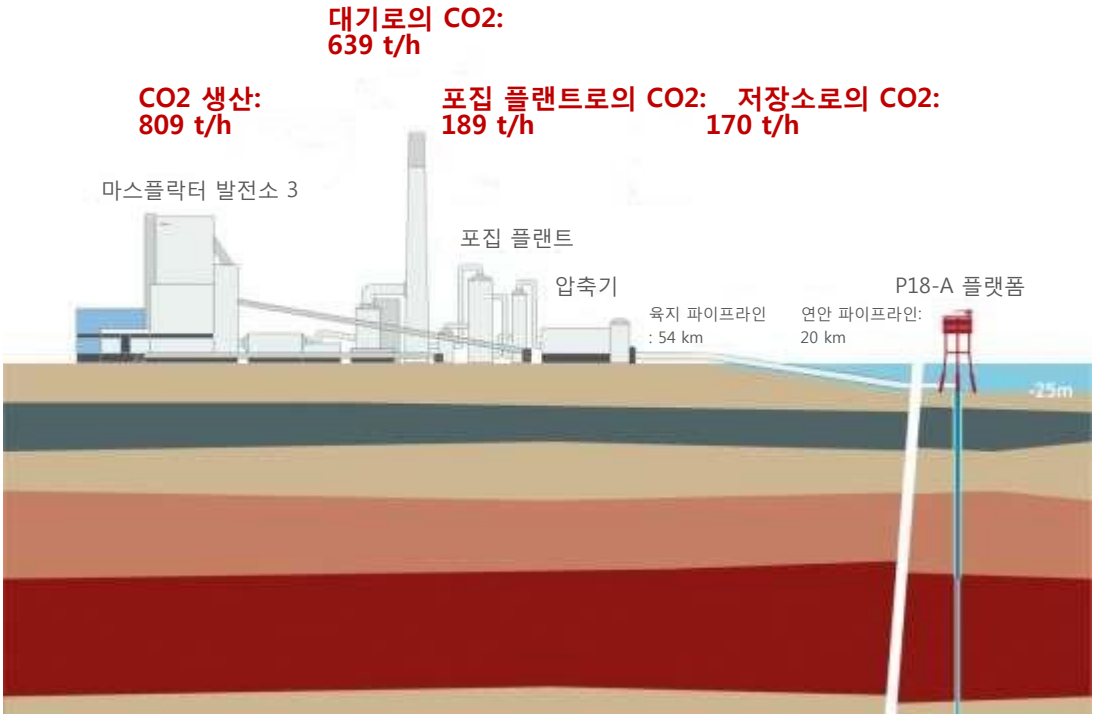


그림 3: ROAD의 통합 CCS 체인

MPP3는 현재(2013년 후반) 후기 단계 시운전에 있으며, 최첨단 초임계 증기 조건과 배기 가스 감소를 위한 최상의 이용 가능한 기술을 특장점으로 하고 있다. 포집 전 755 g CO_2/kWh의 탄소 배출과 46% 이상의 열효율로, MPP3는 이미 세계에서 선두적인 환경 성능을 자랑하고 있다. 바이오매스 혼소(co-firing)는 추가로 배기 가스를 감소시키도록 계획되었다.

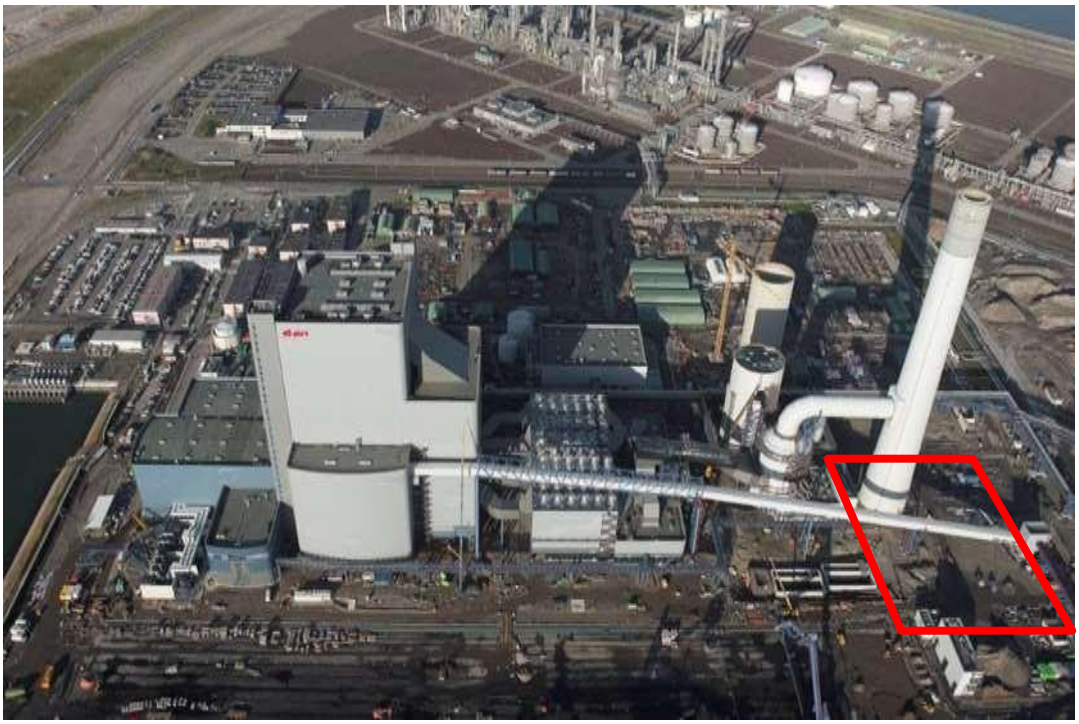


그림 4: 포집 장치의 위치: 마스플락터 발전소 3(남쪽으로부터의 시점, 2013년)

ROAD의 포집 플랜트는 연도가스 연결과 더불어 증기용 삽입부, 다양한 수류(냉각, 광물수, 점화, 식수, 폐수), 전기, 통신, 제어 시스템과 함께, 발전소와 긴밀하게 통합되었다. 이러한 시스템은 세심하게 최적화되었다. 발전소에서 장기 정전할 필요 없이 포집 장치가 건설, 연결, 시운전될 수 있도록, 연도가스와 증기의 주요 삽입부가 이미 설치되었다.

3.3.1 포집

ROAD는 로테르담항과 산업 지역에 위치한 현대식 1,070 MWe 화력 발전소(마스플락터 발전소 3)의 연도가스로부터 이산화탄소를 포집하기 위해 연소후 기술을 적용한다. 포집 장치는 250 MWe에 상당하는 용량을 갖고 있으며, 매년 1.1 Mt의 CO_2를 포집할 것을 목표로 하고 있다.

그림 5: MPP3에서 포집 플랜트에 이용 가능한 공간(북쪽으로부터의 시점, 2009년)

이용된 포집 공정은 플루어의 Econamine FG+ 공정이 되는데, 두 가지의 경쟁력 있는 FEED 연구를 포함하여 철저한 경쟁 입찰 과정 후에 선택되었다. 연소후 포집에 이용 가능한 최상의 입증된 기술이며, 응용 분야에서 28개의 산업 플랜트에 라이선스를 허가하였다.

MPP3 연돌(chimney)의 연도가스가 냉각되고 세척되어 모든 황을 제거한 후, 90%의 CO_2가 아민 용제를 이용하여 포집된 "흡수기" 용기로 들어간다. 잔류 연도가스(대부분 불활성 질소 가스)가 연돌로 되돌아간다. CO_2는 "분리기" 용기에 있는 용제에서 제거된다. 발전소로부터의 증기를 이용한 용제를 가열하면 CO_2와 용제가 분리된다. 이러한 "재생" 용제는 이후 재활용되어 더 많은 CO_2를 포집할 수 있는 반면, 배출된 CO_2는 냉각되어 압축 시스템으로 이동한다.

3.3.2 CO_2 압축

포집 장치 내에서 압축과 건조가 진행되어 전기, 냉각수, 제어 시스템의 비용 효율적 통합이 가능해진다. CO_2는 완전 설계된 다단계 압축기를 이용하여 압축된다. 단간(interstage) 냉각은 수송에 필요한 건조율에 도달하기 위해 대략 20 bar에서 설치된 건조 장치(분자 여과기 기술)와 함께, 높은 효율성과 점진적 수준 제거를 보장한다. 압축기 배출 이후 최종 이산화탄소 냉각기는 40-80° C의 범위에서 수송 파이프로 들어가는 이산화탄소 온도를 조절한다. 이러한 이산화탄소 흐름은 <50 ppmv인 99.9% 이상의 순수(pure water)이고 최대 129 bara의 압력에 도달할 수 있다.

3.3.3 수송

ROAD의 수송 시스템은 로테르담 마스플락터로부터 대략 25 km거리에 있는 북해 TAQA의 P18-A 플랫폼까지, E.ON 현장에서 시작하는 16인치 절연 파이프라인으로 구성된다. 포집 장치로부터 이산화탄소가 압축되고 파이프라인을 통해 수송된다. P18-A 플랫폼까지 해저에 20 km, 육지에 5 km가 걸쳐있다. 파이프라인은 매년 기체 상태의 이산화탄소 1.5 Mt(밀도가 높은 상태에서 매년 5 Mt 이산화탄소에 상응하는)를 수송하는 계획된 수송 용량을 보유한다. 이는 140 barg의 압력과 80° C의 온도에 적합하도록 고안되었다.

3.3.4 저장

ROAD는 포집된 이산화탄소를 P18-4에 저장한다. 본 저장 블록에는 단 하나의 정(well)인 P18-4/A2 정이 포함된다. 기존의 P18-4/A2 가스 생산 정은 통합 주입 모니터링 정으로 변환된다. 원칙적으로, P18-4 저장고는 안전한 장기 보관을 보장하는 이산화탄소의 저장에 적합한 것으로 분류되었다(EC 의견, 2012년). 이러한 결론은 현장 운영 및 생산 동안 획득한 저장고에 대한 지식, 이산화탄소 주입을 마친 후 가장 안전한 상태의 정수압으로 되돌아간 저장고의 저압, 덮개암(cap rock)의 밀봉력, 천연 가스가 수백 만년 동안 이러한 저장고에 보관되었다는 사실을 기반으로 한다.

3.3.5 포집 플랜트 및 발전소의 통합

아래 그림에서 도식으로 보여주는 대로, 포집 플랜트와 호스트 발전소 MPP3 사이에 방대한 상호작용이 있다.

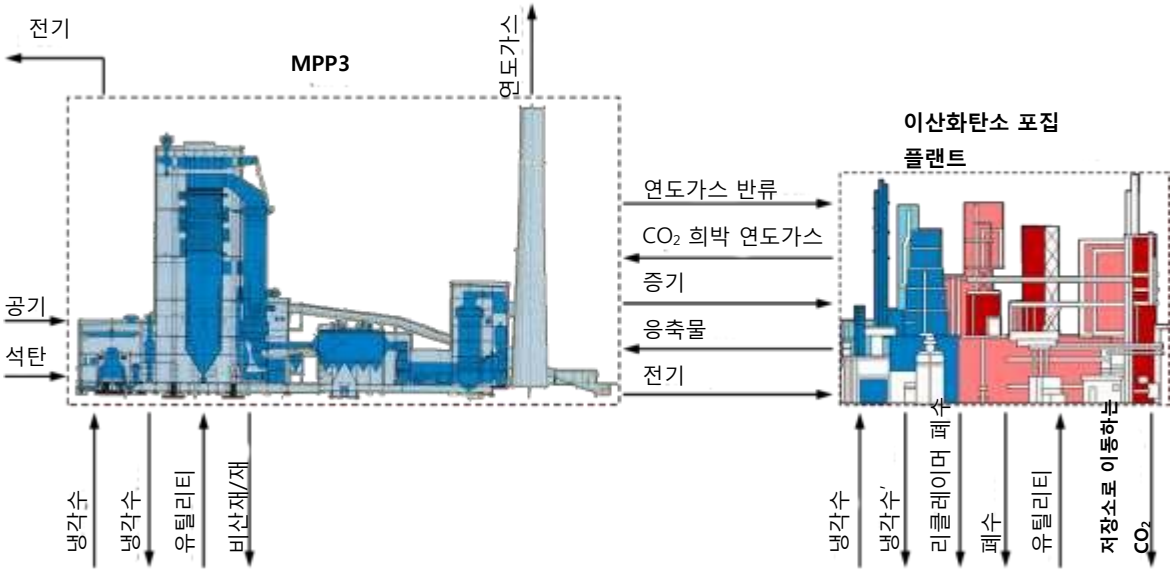


그림 6: 포집 플랜트와 MPP3 호스트 사이의 상호작용 요약

발전소, 포집, 수송, 저장의 통합은 EU에게는 새로운 것이다. 유일하게 존재하는 참조문서는 규모가 좀 더 작고(대략 100 MW 규모) 다른 포집 및 저장 기술(바운더리 댐 저장은 추가로 시험-규모의 대수층 주입부가 있는 내륙 EOR 필드에 있다)을 이용하는 캐나다의 바운더리 댐 프로젝트이다. 따라서, 포집 플랜트를 발전소, 압축, 파이프라인, 고갈된 가스전 저장소와 통합한 것은 이러한 종류의 설비 중 최초의 것이다. ROAD 디자인에는 중간 저장이 포함되지 않기 때문에(파리프라인 라인 팩에 의해 제공되는 것을 제외하고), 전체 체인은 단일 통합 시스템으로 운영된다.

또한, 포집 플랜트 공정은 프로젝트 스폰서의 모회사가 관여하는 선행 연구에 의해 뒷받침되는, 플루어에서 현재 진행 중인 지속적 개선을 받게 된다. 따라서, 플랜트 설계에는 기존의 소규모 장치에서 볼 수 없는 다수의 최적화와 개선이 포함된다. 이러한 사항에는 다음이 포함된다.

- 분리기 배출구에서의 따뜻한 이산화탄소에 의한 열 집적화는 발전소의 급수 가열을 위해 이용된다.
- 증기 이젝터는 발전소로부터의 증기 압력을 조절하는 데 이용되는데, 발전소가 부분 부하상태일 경우 포집 플랜트의 지속적이고 효율적인 운영이 가능해진다.
- 공정 성능을 최적화하기 위한(필요한 에너지를 최소화하면서) 용제 주기의 중간 흡수기 냉각 및 진공 플래시 콘덴서(vacuum flash condenser).
- 최적화된 열적 및 환경 성능을 위한 세척/스크러빙 설계 및 최신 포장 설계의 이용.

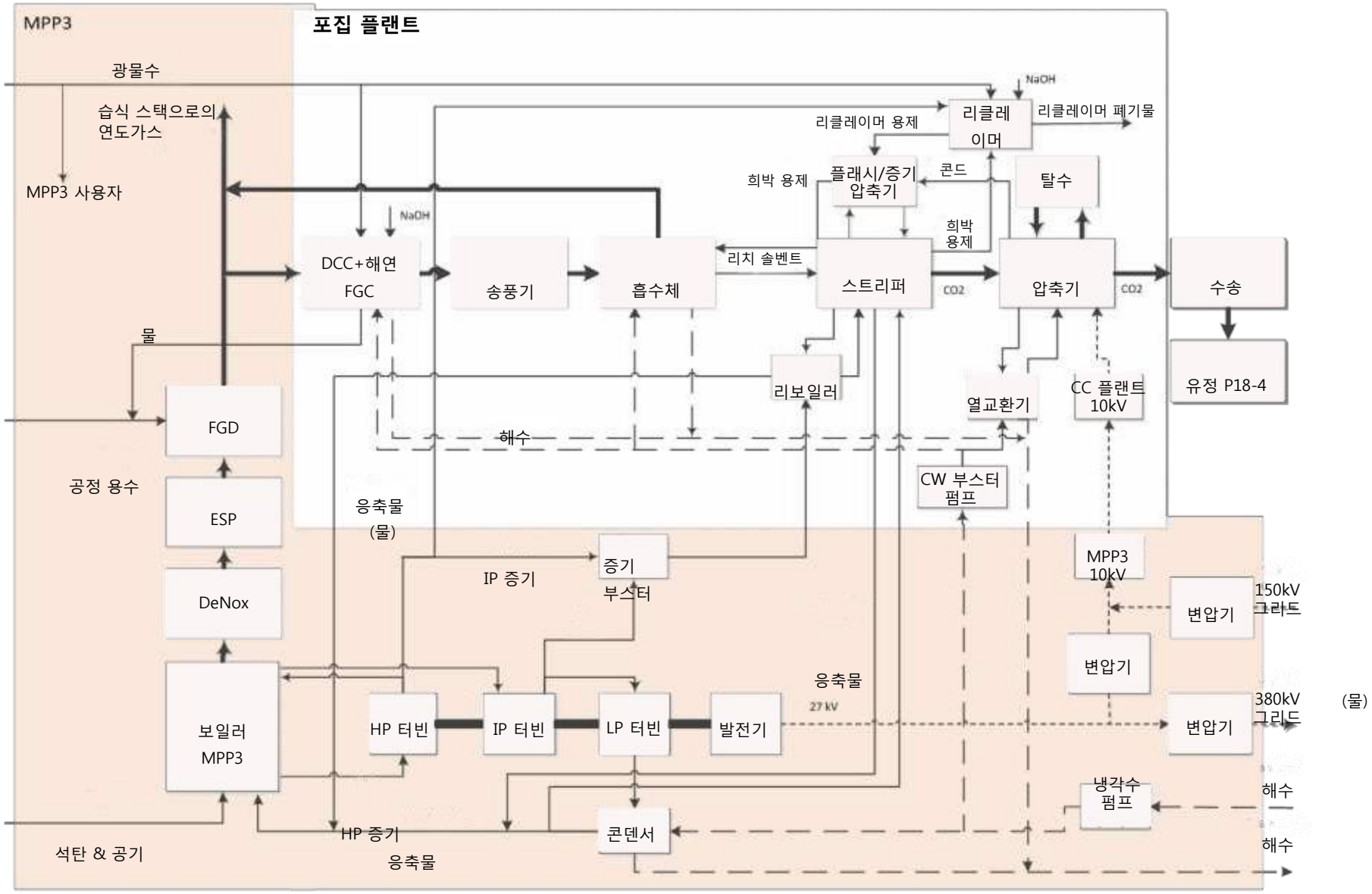


그림 7:-통합 체인의 블록 다이어그램(MMP3, 포집 플랜트, 수송 및 저장)

이전의 블록 다이어그램에서, 포집 플랜트와 MPP3의 통합과 더불어 주요 설비, 수송, 저장 블록이 제시되어 있다.

- 연도가스 경로(전부하 상태에서 MPP3의 연도가스 중 단지 23.4% 반류만이 포집 플랜트에서 처리된다),
- 증기/응축물 시스템,
- 고압 전기 시스템,
- 해수 냉각 시스템,
- 탈염수 공급,
- 공정 용수 공급.

4. 포집 플랜트와 발전소의 ROAD 통합

4.1 소개

본 장에서는 네 개의 대형 접속 증기/응축물, 연도가스, 냉각수, 전기 시스템을 가장 강조하면서, 좀 더 자세하게 발전소와 포집 플랜트의 다양한 시스템 통합에 대해 설명한다.

4.2 '포집 가능 (capture ready)' 상태에 대한 특정 고려사항

포집 플랜트 통합의 설계는 E.ON New Build & Technology BV에 의해 이루어진다. 화력 장치 MPP3는 수년 전에 건설을 시작했기 때문에, 포집 플랜트의 통합은 성능을 개선하는 것이다. MPP3는 공간 및 자원(예, 구획, 냉각수, 유틸리티, 증기 터빈 설계, 이산화탄소 저장 사이트)의 관점에서 실제 크기의 연소후 이산화탄소 포집을 설치하는 능력 때문에 "포집 가능"으로 인증된다.

MPP3는 TÜV NORD Climate Change Standard TN-CC 006를 기반으로 포집 가능(capture-ready) 인증서를 획득했다. 표준에는 특히 발전소 위치에 있는 실물 크기의 연소후 이산화탄소 포집 플랜트의 성능을 개선하는 것에 대한 기술적 및 현장 특정적(예, 냉각수, 유틸리티, 증기 터빈 설계)인 실현가능성, 포집 플랜트에 필요하게 될 공간의 이용가능성, 발전소 현장의 이산화탄소를 이산화탄소 저장 사이트로 수송할 수 있는 가능성, 플랜트 안전 및 환경에 미치는 가능한 영향에 관한 요건이 포함된다. 2009년 5월 19일에 TÜV 인증서를 획득하였다.

250 MWe에 상응하는 ROAD 규모에서부터 전체 MPP3 장치에 이르는 포집 플랜트의 연장을 위해서는 유틸리티와 통합을 위한 기타 솔루션이 있는 추가로 800 MWe에 상응하는 포집 플랜트(혹은 새로운 실물 크기 장치)가 필요하다. 이들은 본 보고서에서는 다루고 있지 않다.

4.3 포집 플랜트의 설계요건 및 발전소에 미치는 영향

화력 발전소에서의 연소후 포집 이행을 위해 다음과 같은 내용이 통합되어야 한다.

- 스택 하단에서의 주요 연도가스 연도로부터의 연도가스 추출,
- 포집 플랜트로부터 주요 발전소 스택으로의 처리된 연도가스 회수,
- 포집 플랜트 리보일러용 증기 터빈으로부터의 저압 증기 추출,
- 포집 플랜트 리보일러부터 증기 사이클로의 증기 응축물 회수,
- 주요 냉각 시스템 유입구로부터의 포집소 냉각기용 냉각수,
- 폐열 회수를 위한 예열 트레인으로부터 포집 플랜트 냉각기로의 저온 응축물,
- 예열 트레인으로의 가열된 응축물 회수,
- 발전소의 보조 시스템을 통한 포집 플랜트로의 전원 공급,

- 제어 시스템,
- 다수의 소형 유틸리티(예, 탈염수).

4.4 현장 배치

포집 설비는 MPP3의 스택 옆 구획 공간에 설치된다. MPP3 설치물이 설계되어 이미 프로젝트 시작점에 건설되고 있기 때문에, 구획 공간은 건설용 미개발지 상황과 비교하여 포집 설비와 관련하여 일부 문제점이 있다. 대부분의 부지가 그 높이에 있어 제약이 없는 반면, 석탄 수송 컨베이어 벨트 때문에 높이 제한이 있는 존이 있다. 지하 냉각수 배관과 10.5 kV 매몰 케이블 또한 부지를 가로질러 추가 제약을 유발한다. 마스플락터 현장에 있는 파이프 걸이(rack)는 그 관(passage) 길이가 5 m이며 일부 구역에서는 8 m이다.

공급업체는 모든 제약사항을 해결하기 위해 포집 및 압축 설비 설계를 개발했다. 그 결과 도출된 설계의 3D 그림은 다음과 같다. 본 실례를 위해 이용 가능한 총 면적은 대략 1.2 ha이다.

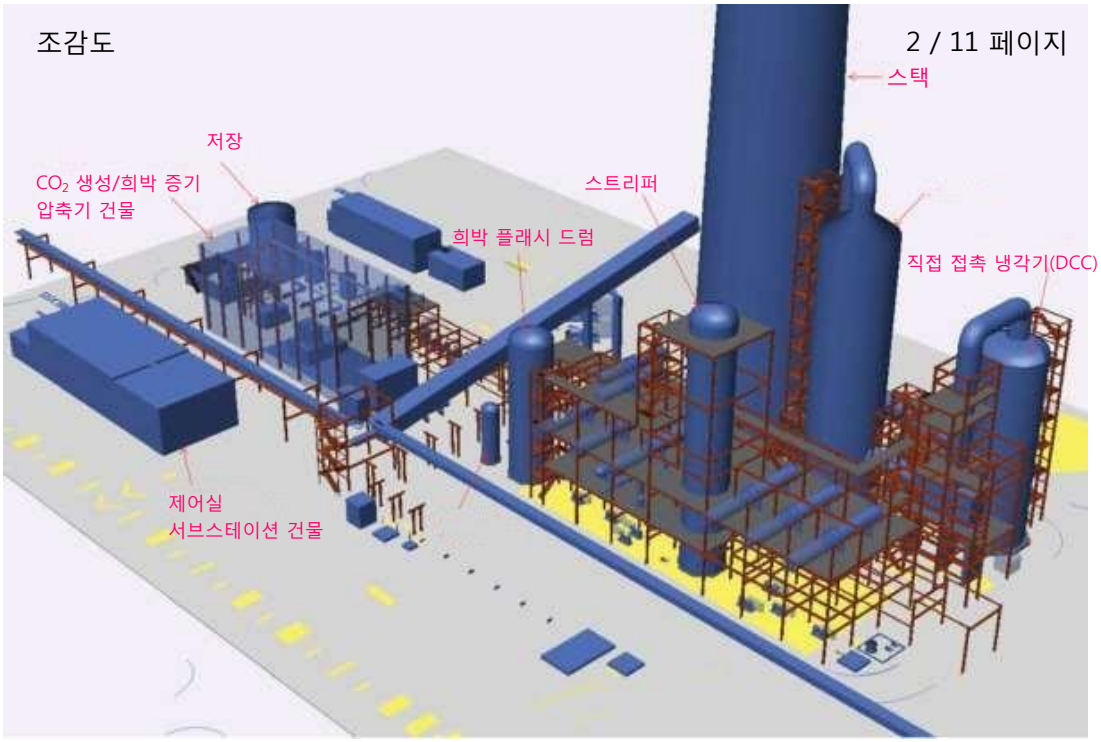


그림 8: 250 MWe에 상당하는 연소후 포집 플랜트의 기술 설계(플루어)

4.5 연도가스

포집 플랜트는 250 MW급 전기 출력이 가능하게 설계되었으며, 따라서 MPP3에 의해 생성된 약간의 연도가스만을 처리할 필요가 있다. 설계 조건에서, 포집 플랜트는 MPP3의 FGD로부터의 연도가스의 23.4%를 처리해야 한다. 연도가스 반류는 포집 플랜트에 최대 최적 유량으로 간주되는, 48° C에서 대략 698 000 Nm^3/hr인 최적 유량을 갖는다.

다량의 MPP3 연도가스가 추출되어 포집 플랜트로 이동한다. 연도가스는 MPP3의 FGD 장치의 하향 흐름으로 추출된다. FGD는 DeNOx 설비와 전기 집진기(Electrostatic Precipitator, ESP)의 하류부이다.

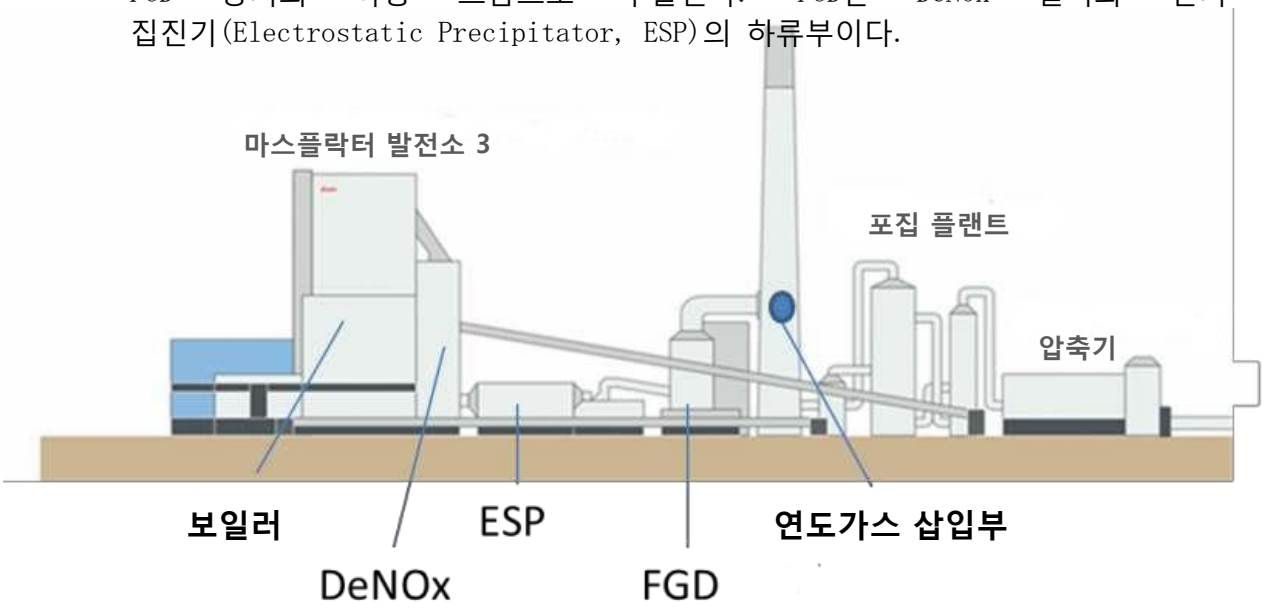


그림 9: 연도가스 삽입부 MPP3의 위치

DeNOx는 대략 90%의 NOx가 촉매 변환 장치의 연도가스 업스트림에서 암모니아(NH3)를 주입함으로써 감소된다. ESP에서 연도가스 중 대략 99.95%의 비산재와 분진이 제거된다.

MPP3가 새로운 장치이기 때문에, 그 모든 환경 시스템은 배기 가스 감소를 위한 최상의 이용 가능한 기술(Best Available Technology, BAT)을 도입하였다. 플랜트의 높은 기준 효율과 결합되어, 이들은 연소후 포집을 증명할 매우 적합한 조건을 의미하는데, 산성 가스 성분에 민감하고 상당한 에너지 투입을 요하는 것으로 알려졌다.

변수	단위	값
MPP3로부터의 연도가스 최적 유량(STP, 습식) (FGD 이후)	m³/hr	3 006 580
CC 플랜트로의 연도가스 최적 유량(STP, 습식)	m³/hr	700 000
연도가스 온도	°C	48.2
FDG 배출구에서의 연도가스 게이지 압력	mbar	+ 2.0
구성 요소 (습식)		
H_2O	Vol.-%	11.2
CO_2	Vol.-%	13.7
N_2	Vol.-%	70.9
O_2	Vol.-%	3.4

STP = 0°C 및 1.01325 bar에서의 표준 온도 및 압력

그림 10: 포집 플랜트 입구에서의 연도가스 사양

변수	단위	값
연도가스 온도	° C	34.9
FDG 배출구에서의 연도가스 게이지 압력	mbar	+2.0
구성 요소 (습식)		
H_2O	Vol.-%	5.7
CO_2	Vol.-%	1.7
N_2	Vol.-%	87.4
O_2	Vol.-%	4.2

STP = 0°C 및 1.01325 bar에서의 표준 온도 및 압력

그림 11: 포집 플랜트 출구에서의 연도가스 사양

4.5.1 연도가스 삽입부

MPP3에는 가스재열기(gas-gas heater)가 없는 습식 스택이 있다. 즉, 연도가스 추출 및 회수가 FGD 이후 어느 곳에서나 일어날 수 있다는 것을 의미한다(일반적으로 FGD와 가스재열기 사이에 있어야 한다).

MPP3로부터 포집 플랜트로 연도가스를 추출하기 위해 다음과 같은 세 가지 부분이 평가되었다.

1. MPP3의 FGD 상단
2. FGD부터 MPP3의 스택까지 수평 유리강화플라스틱(GRP) 배관 안
3. GRP 배관이 상향으로 흐르게 되는 MPP3 스택 내부

MPP3의 최초 구획 계획 변경을 피하고 삽입부 포인트로부터 포집 플랜트까지의 배관을 위한 비계와 지지 구조를 최소화하기 위해 스택 내 위치가 선택되었다. 스택은 새로운 삽입부 구조를 지지하는 데 이용될 수 있고, 장애물이 없는 작업공정 다운스트림은 콘크리트 스택 내부에서 이용 가능하다.

35° C에서 대략 566 000 Nm^3/hr의 최적 흐름을 갖는 처리된 연도가스의 배출은 MPP3의 습식 스택으로 다시 경로 지정된다.

2개의 다른 배출 옵션(이산화탄소 흡수제 상단의 스택을 통해서나 전용 스택을 통해서)이 고려되었지만, NOx 확산 및 허가 사유로 인해 실행 불가능한 것으로 나타났다. 따라서, 연도가스를 MPP3 스택으로 되돌리는 것은 유일한 옵션이다.

연도가스 삽입부를 제작하는 동안, 개조된 스택에 관한 전산유동해석(CFD) 연구와 물리적 흐름모형(PFM) 연구가 복합적으로 2010년에 수행되었다.

물리적 모형 연구의 목적은 새로운 CCS 공급을 추가하는 효과를 평가하고 습식 스택에서 형성되는 응축물을 위한 기존의 액상류 회수 시스템에 관한 기체 흐름과 도관 조직을 되돌리고, 새로운 구성을 위한 효과적인 액상류 회수 시스템을 설계하고, 스택 내 온도 분배에 미치는 CCS 의 효과를 평가하는 것이다. 이러한 목적으로 이미 존재하는 14.69:1 규모의 물리적 흐름 모형이 제안된 CCS 배관 배열로 개조된 후 평가되었다.

CCS 없음, CCS로 전부하, CCS로 부분 부하에 상응하는 3개의 흐름 조건에 대하여 제안된 시스템이 평가되었다.

기존의 액상류 회수 시스템 성능이 새로운 흐름 조건에서 허용 가능하다는 결과가 도출되었다. 본 연구를 통해 회수 및 추출 사이에 연도가스 재순환이 발생하지 않으며, 본 항목 내에서 압력 하강에 매우 소소한 영향만(영향은 포집 플랜트가 성능 개선되었지만 운영되지 않는 상태에서 노즐에 의해 발생하는 1 mbar 미만의 추가 압력 하강이다)을 끼친다는 점이 확인되었다.

그림 12: 마스플락터 제 3발전소의CCS 실증 물리적 유동 모델

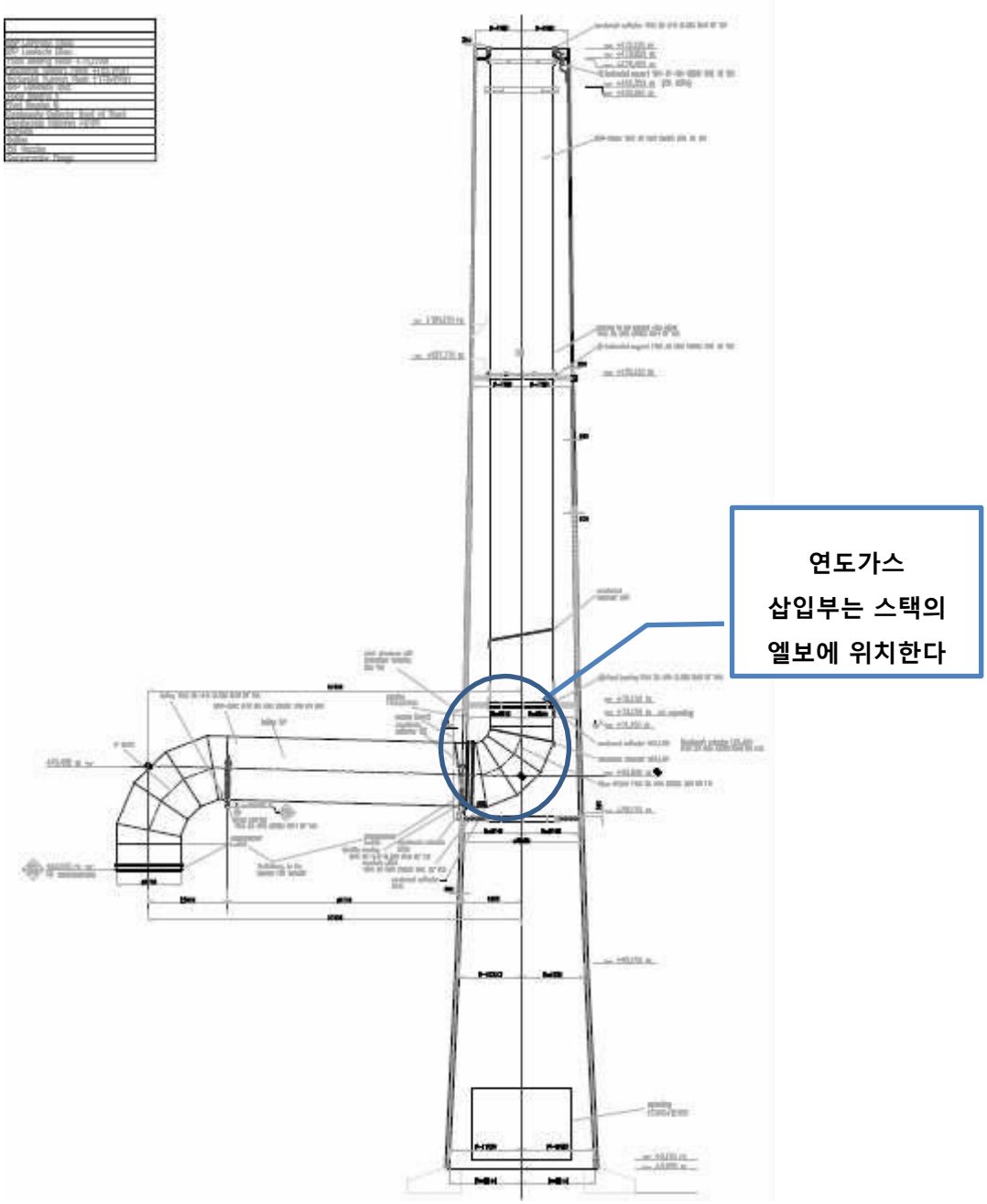
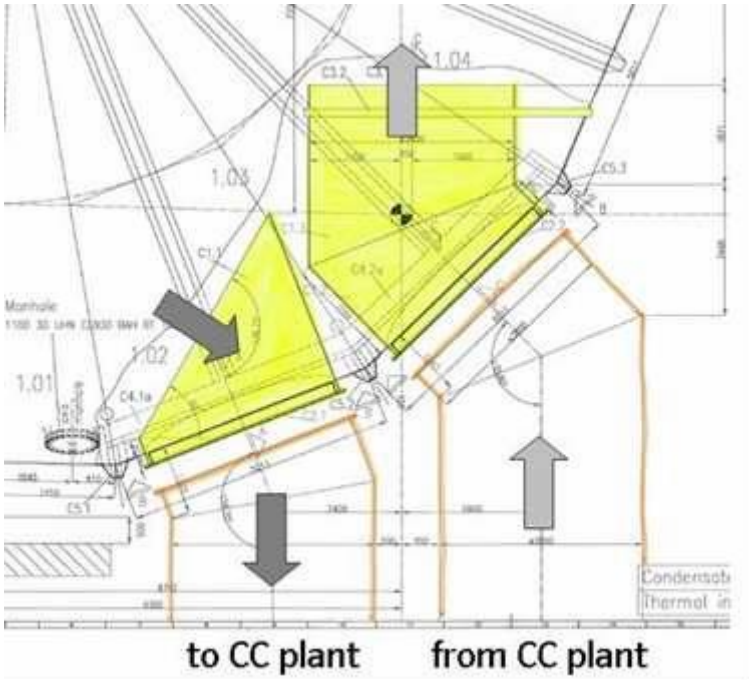


그림 13: MPP3의 연도가스 연도 개관 (FGD 상단부터 스택 상단까지)

전술된 흐름 연구 결과 MPP3의 스택 내 노즐과 2개 삽입부에 대한 세부 설계가 작성되었다. 스택 내부에서 연도가스 연도가 90° 회전한다. 현 위치에서, 2개 노즐은 이미 설치되어 90° 회전부에 이어진다(위 그림 참조). 노즐은 발전소의 연장 정전을 요하지 않으면서 포집 플랜트까지의 발전소 연결(그리고, 처리된 가스의 후속 회수)을 가능케 한다. 포집 플랜트로의 최종 연결이 될 때까지 이들은 캡이 씌워져 있는 상태를 유지한다.

포집 플랜트에 맞추어 연결되는 빠른 접속을 가능케 하기 위해 이미 MPP3의 증기 사이클에 맞추어진 유사한 삽입부와 결합하여 이러한 설비는 이산화탄소 포집 기술의 성능개선을 가능케 하는 발전소의 고유한 투자를 의미한다.



CC 플랜트로 **CC 플랜트로부터**

그림 14: MPP3의 스택 내에서 연도가스 삽입부

그림 15: 연도가스 삽입부, 스택 외부로부터 및 스택 내부로부터의 시점 (설치 중)

4.6 증기 및 응축물

포집 플랜트 운전에는 2가지 압력 수준에서의 증기[IP권한으로 인해 정확한 증기 변수를 언급할 수 없음]가 필요하다.

1. 저압(lP) 증기는 재생기 칼럼(desorber column)의 리보일러를 공급하는 데 필요하다.

2. 열안정성염과 용제로부터의 열화물을 제거함으로써 용제 품질을 유지하는 데 간헐적으로 이용되는 리클레이머 운영을 위한 중간 압력(IP) 증기. IP 증기의 양은 LP 증기의 1% 미만이다.

전술된 증기 전달에서 발생한 응축물이 MPP3 플랜트로 회수된다. 또한, 증기 사이클로부터의 응축물은 포집 플랜트에서 냉각용으로 이용된다.

4.6.1 저압 증기

120-140° C 사이의 온도 범위에서 포집 플랜트 내 재생기 칼럼의 리보일러에 열을 공급하기 위해 저압 증기가 필요하다. 리보일러(>100 MWth)의 대규모 가열부하 때문에 저압 증기를 응축하는 것은 필요한 열을 공급하기 위한 가장 적절한 솔루션이다.

1. 저압 증기는 다수의 방식으로 공급될 수 있는데, ROAD에서 고려한 것은 다음과 같이 요약될 수 있다.

2. 참고로서 CCS가 없는 MPP3,

3. 오일이나 가스로 점화되는 부속 증기 보일러에 의해 제공되는 포집 플랜트용 증기를 이용하는 CCS가 있는 MPP3,

4. 오일이나 가스로 점화되는 부속 증기 보일러에 의해 가동되는 포집 플랜트용으로 제공되는 증기를 이용하는 CCS가 있는 MPP3와 포집 플랜트용 전력을 생성하는 배압 증기 터빈,

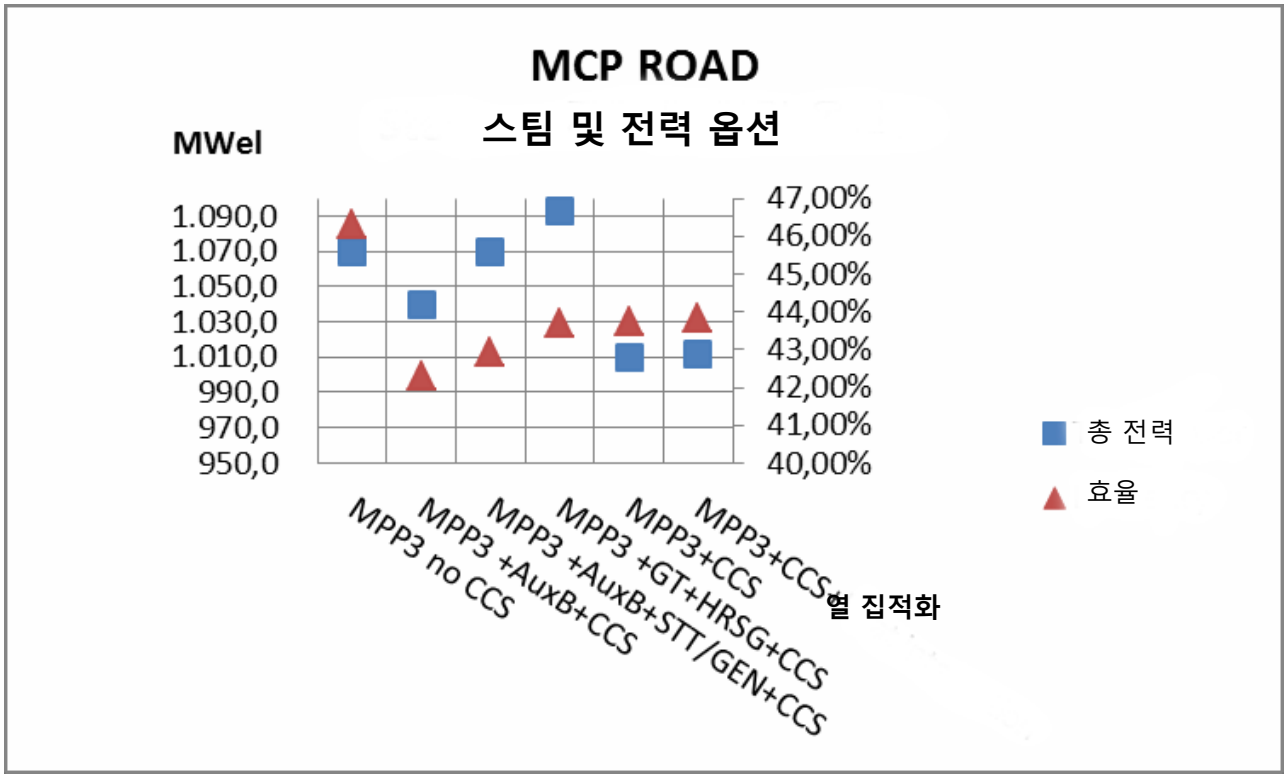
5. 포집 플랜트용 전력과 잉여 전력을 그리드에 제공하는 발전기에 연결된 가스 터빈 뒤에 있는 열회수 증기에 의해 가동되는 포집 플랜트용으로 제공되는 증기를 이용하는 CCS가 있는 MPP3,

6. MPP3 10kV 시스템으로부터의 전력과 기존 증기 사이클에 의해 가동되는 포집 플랜트용으로 제공되는 증기를 이용하는 CCS가 있는 MPP3,

7. MPP3 10kV 시스템으로부터의 전력과 최적의 열 집적화를 하는 기존 증기 사이클에 의해 가동되는 포집 플랜트용으로 제공되는 증기를 이용하는 CCS가 있는 MPP3,

아래 표와 그래프는 부속 보일러 효율이 90%이고 가스 터빈 효율이 35%인 전형적 조건 하에서 전기 효율과 총 네트 파워 출력 계산치를 나타낸다.

	옵션	총 전력 MWe	전기 효율
1	CCS 없는 MPP3	1 070	46.3%
2	MPP3 +AuxB+CCS	1 040	42.4%
3	MPP3	1 070	43.0%
4	MPP3 +GT+HRSG+CCS	1 091	43.7%
5	MPP3+CCS	1 010	43.7%
6	MPP3+CCS+열 집적화	1 012	43.8%



2, 3, 4 옵션은 높은 자본비를 요구하고 있고, 또한 이들은 발전소 운영과 설계의 복잡도 증가와 추가 기능 시스템을 수반하는데, 전반적 공정 효율에 이점이 없다. 이러한 옵션은 추가 연료 주입의 도입을 통해 더 높은 총 전력 출력을 보이지만, MPP3의 증기 추출 옵션보다 전반적 효율이 좋지 않다.

발전소의 수정을 최소화하는 통합 원리에 따라, MPP3 증기 시스템으로부터의 저압 증기 추출이 있는 옵션만이 추가적으로 고려되었다.

MPP3의 전부하 상태에서, 저압 증기는 중간 압력(MP) 터빈 이후 얻게 되는 저압 증기를 이용하는 5번째 예열량을 공급하는 증기 파이프의 분기로부터 직접 추출될 수 있다. 아래 그림은 증기 추출 시스템이다. 본 분기선은 본래 지역 난방 시스템의 난방기를 제공하기 위해 설계되었지만, 현 시점에는 이러한 목적으로 아직 도입되지 않았다.

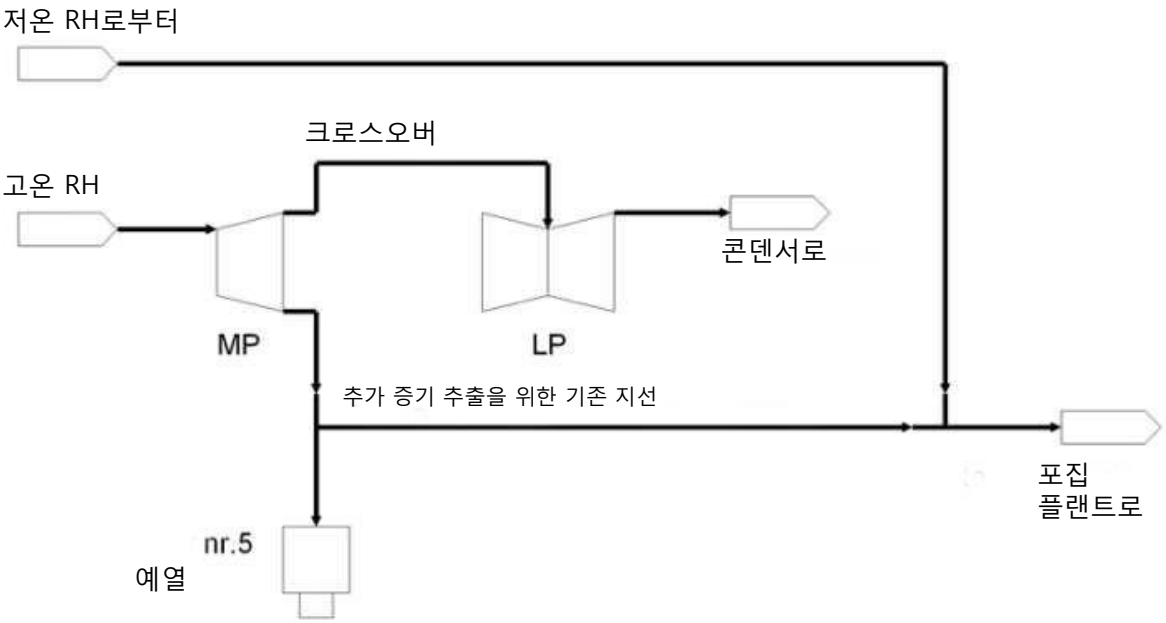


그림 16: 단순화된 추가 장치 계획

MPP3가 전부하에서 운영될 경우, 포집 플랜트의 재생기(stripper)에 이용되는 증기가 2~4 bar의 압력에서 중간 압력 터빈의 증기 터빈 다운스트림에서 추출된다. MPP3의 부분 부하에서, 이러한 압력은 충분히 높지 않고, 또 다른(더 높은 압력) 추출점에서 증기를 제공해야 한다.

이러한 추출 시스템의 설계는 관련된 높은 운전 비용 때문에 매우 중요하다. 부분 부하에서 증기 압력을 증가시키기 위해 3개의 옵션이 평가되었다.

1. 크로스오버 파이프 중간 압력을 저압 터빈으로 개조하고, 부분 부하 중 충분한 압력을 유지하기 위해 밸브 설치.

2. 더 높은 압력 소스로부터의 추출(MPP3의 낮은 부분 부하 효율로 유도).

3. 주요 추출점에서 추출한 압력을 증가시키기 위한 증기 제트 부스터 설치(더욱 복잡한 추가 투자).

옵션 1은 MPP3의 증기 터빈 제조회사에서 초기에 조사했지만 개조를 위한 MPP3의 장기 정전, 운전 위험, 고투자로 인해 배제되었다.

옵션 2의 경우, 단 하나의 적절한 추출점은 저온재열(cold reheat)이다. 그러나, MPP3의 일부 부분 부하 상황에서, 추출될 수 있는 증기량은 충분히 많지 않기 때문에, 포집 플랜트의 부분 부하 또한 필요하다. 또한, 높은 품질의 증기가

이용되기 때문에 전기 손실이 크다. 더 나아가, 본 옵션의 약점은 다소 난해한 운전 동안 증기 추출을 저온재열로 전환하는 것이다.

옵션 3은 가장 경제적인 것으로 밝혀졌다. 증기 제트 부스터용 고온 증기가 MPP3의 저온재열 증기 파이프로부터 추출된다. MPP3와 포집 플랜트의 증기 및 응축물을 위한 통합 공정 흐름도는 아래 그림과 같다.

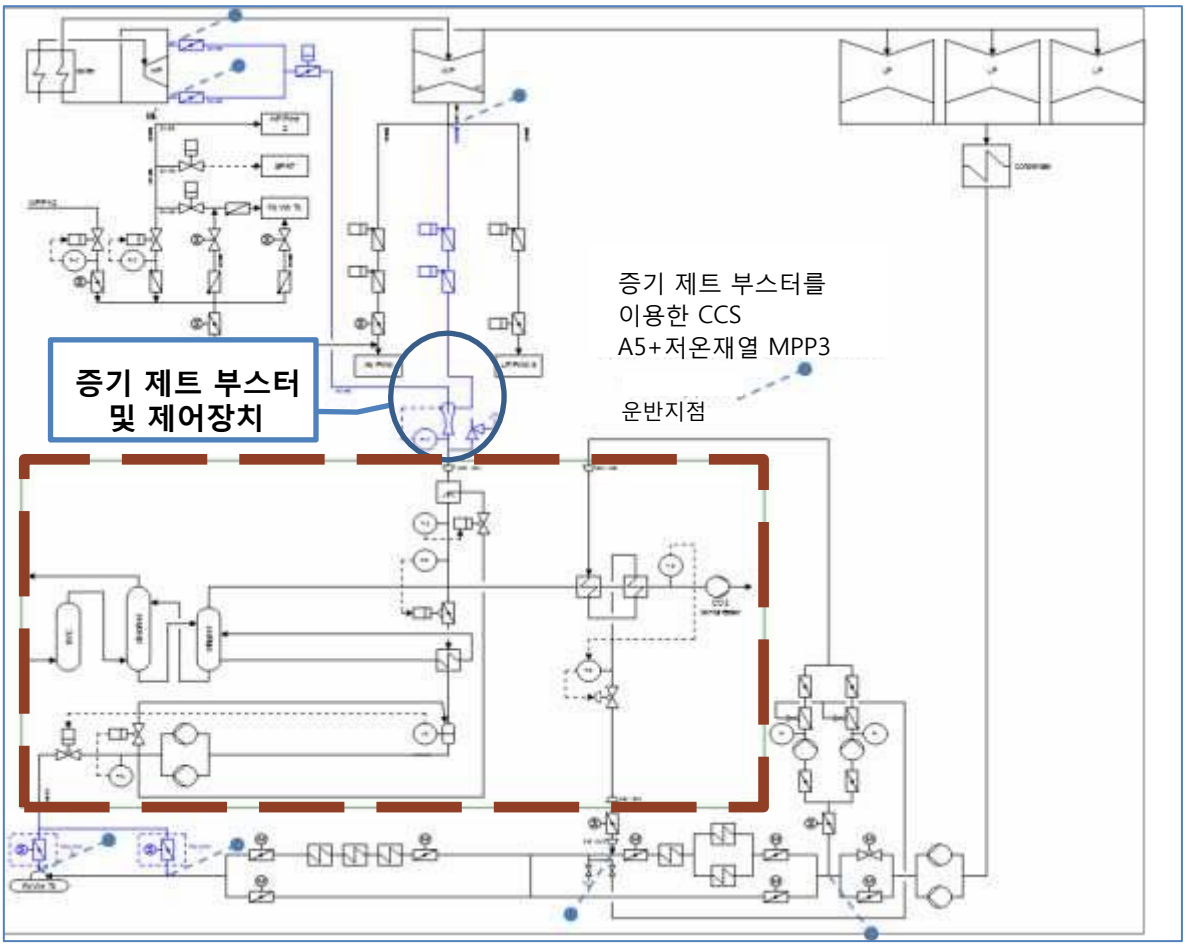


그림 17: 증기 및 응축물 통합의 PFD

증기 제트 부스터의 예상 솔루션에 대해 예산 견적과 예상 성과를 받았다. 본 솔루션은 아직 그 세부사항이 정해지지 않았지만, 증기 제트 부스터가 예상대로 기능하지 않을 경우 위험은 제한적이다. MPP3가 부분 부하에서 장기적으로 운전될 것으로 기대되지 않고, 재열 증기가 필요한 경우 일부 증기를 제공할 수 있기 때문에 위험은 제한적이다.

대략 1,200 mm의 증기 라인이 포집 플랜트 유틸리티를 위하여 요구되는 다른 배관과 함께 450 m 길이의 전용 관교(pipe bridge)에 설치된다. 경로 지시가 발견되었지만, 세부사항은 FID까지 보류될 것이다. 본 옵션은 설계 및 시공 공정을 지나치게 방해할 평행 MPP3 관교를 확대하는 옵션 대신에 선택되었다. 증기로부터의 응축물은 동일한 관교를 통해 MPP3의 응축물 시스템으로 다시 공급된다.

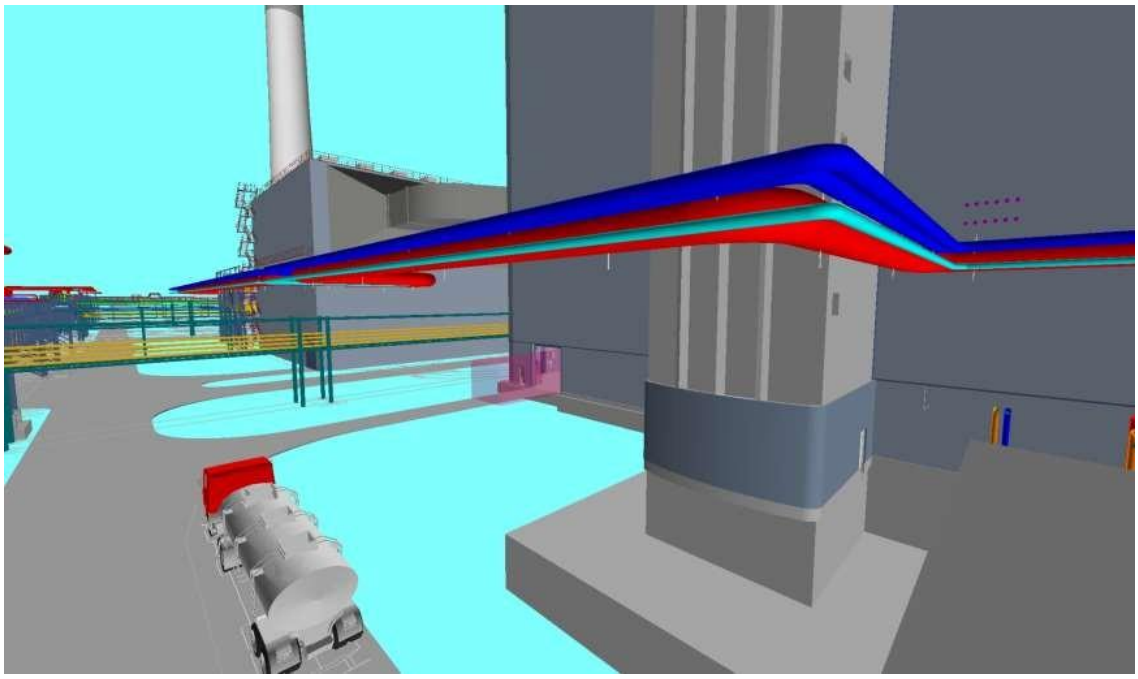


그림 18: MPP3에서 증기 및 응축물 파이프 작업공정의 부분도

LP 증기와 저온재열의 추출을 위한 삽입 피스(tie-in pieces)는 이미 ROAD 프로젝트의 FID 이전에, 그리고 MPP3의 건설 동안 건설되었다. 상업용 운전 후 실행은 장기 정전 이후 진행되기 때문에 높은 비용을 유발했을 것이다.

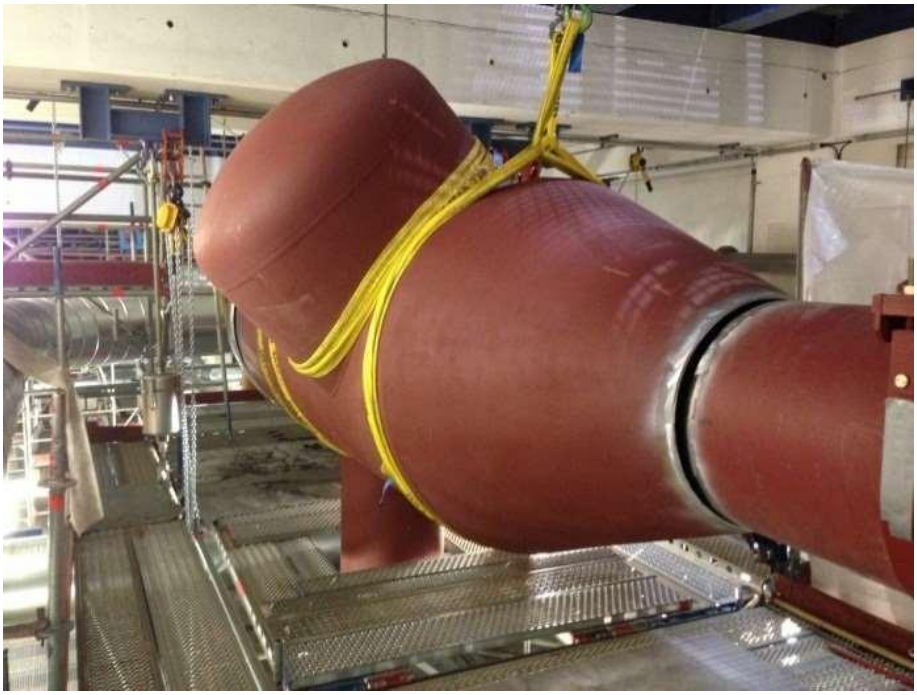


그림 19: T이음이 탑재된 저압 삽입부 그림 (2013년 4월)

그림 20: T이음이 탑재된 중간 압력 삽입부 그림 (2013년 4월)

4.6.2 포집 플랜트 리클레이머용 중간 증기

중간 압력(IP) 증기는 리클레이머 운영을 위해 이용된다. FEED 단계 이후 가치 공학(Value Engineering)의 결과로, 전기 가열기 대신에 IP-증기를 이용하자는 결정이 내려졌다. 이러한 작은 흐름은 증기 제트 부스터로 흐르는 MP 증기 공급이나 MPP3의 부속 증기 가열기에서 추출될 수 있다. 50 mm 증기 라인은 LP 증기 및 응축물 파이프와 동일한 관교를 이용하여 계획되었다.

4.6.3 냉각을 위한 응축물

포집 플랜트로부터의 폐열은 응축물 예열 트레인에 통합될 수 있는데, 전반적 플랜트 효율의 증가를 목표로 한다. 포집 플랜트에는 폐열이 냉각수로 방출되어 그 결과 환경으로 흩어지는 여러 냉각기가 포함된다. 저온에서의 응축물은 주요 콘덴서에서 나오는 응축물을 예열하기 위한 열을 회수하면서, 냉각수를 대체하여 이용될 수 있다.

포집 플랜트에서 다음 열 교환기는 폐열 집적화를 위한 잠재 소스이다.

- 직접 접촉실 냉각기: 흡수기의 유입구 연도가스 업스트림을 중지하는 데 이용되는 수류를 냉각한다.
- 희박 용제(lean solvent) 냉각기: 흡수 칼럼으로 들어가기 전에 희박 용제를 냉각한다.

- 워셔(washer) 냉각기: 흡수체 상단의 워싱 루프(washing loop)의 용제/수류를 냉각한다.

- 오버헤드 CO_2 콘덴서(OCC): 분리기 상단에서 압축 전에 습식 CO_2를 냉각한다.
- CO_2 압축기 인터쿨러: 순차적 압축 단계 사이에서 CO_2를 냉각한다.

실제로, 주요 콘덴서에서 유출되는 약간의 응축물이 정상적 예열기 경로를 통해 흐르는 대신에 포집 플랜트 냉각기에 이용되는 경우 폐열 집적이 발생한다. 이는 LP 예열기의 열 부하를 감소시키는 영향이 있는데, 발생기에서의 전원 출력이 향상되어 플랜트 효율이 증가한다. 냉각기로 흘러 들어가는 응축물의 비율은 냉각기의 열 부하에 비례한다.

냉각기 내부의 응축물에 의해 도달하는 최종 온도에 따라, 응축물이 유사한 온도가 되는 지점에서 예열기 트레인에 다시 유입된다. 냉각기 내부의 온도가 올라갈수록 효율 이득이 커진다.

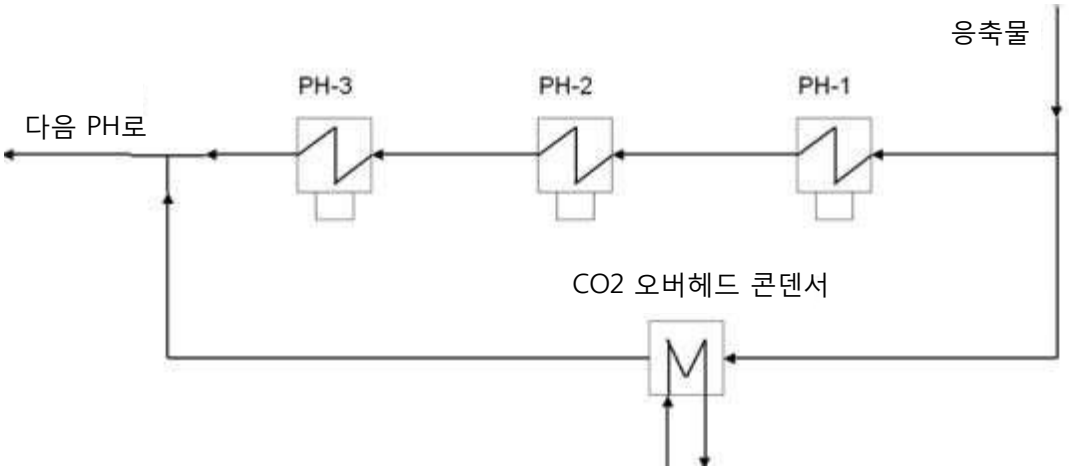


그림 21: ROAD에 적용된 폐열 집적화에 관한 개념도식

OCC의 CO_2 측면에서, 유입 및 유출 온도는 각각 89° C와 40° C이다. 즉, 콘덴서(28.8 MWth)의 열 전부하가 응축물 예열에 이용될 수 있다는 것을 의미한다. 응축물은 메인 ST 콘덴서에서 빠져나오면서 19 bar(a), 26° C에서 공급되며, 16-18 bar(a), 70-80° C 사이의 온도로 돌아간 후 온도가 대략 90° C인 3차 예열기 이후 응축물의 주요 흐름에 추가된다. 포집에 대한 전반적 플랜트 효율과 관련하여, 이러한 집적화는 대략 0.2% 포인트의 효율 증가를 가져온다.

폐열 집적화는 증가한 전력 출력과 상당히 관련 있는 수익 보상이 커질수록 투자 비용에 대한 요구가 높아지기 때문에 선택되었다. 이러한 결정에 영향을 미친 또 다른 이유에는 포집 플랜트의 냉각수 요건 감소이다. 실제로, OCC를 통합함으로써 포집 플랜트 내 총 냉각수 흐름상에 상당한 절약분을 보유하고 있는 해당 냉각기에 더 이상 냉각수가 필요하지 않다. 3 000 m^3/h 적은 냉각수가 이용될 것으로 추산되는데, 전체 포집 플랜트 냉각수의 대략 20%를 차지한다. 따라서, 폐열 집적화에 요구되는 추가 투자는 더 높은 수익뿐 아니라 포집 플랜트의 냉각수 시스템을 위해 감소된 투자에 의해서 보상된다.

열 집적화를 위해 선택된 방법 또한 KEMA와 공동으로 평가되었고, 쾰른에서의 2012년 Power-Gen 컨퍼런스에서 발표하였다.(*Integration of the 250 MWe demo post-combustion CO_2 capture plant at MPP3, ROAD/DNV KEMA, 2012 참조*).

4.6.4 전력 손실 MPP3

MPP3 펌프 전력 소모 변화와 증기 흐름과 냉각수 흐름 변화가 MPP3 콘덴서 성능에 미치는 영향을 포함하여, 이전 장(chapter)에서 언급된 증기 및 응축물 흐름의 MPP3 전력 출력에 미치는 영향에 대한 계산을 E.ON에서 하였다. MPP3의 전부하에서, 이러한 변화의 전반적 영향은 28.1 MW의 MPP3 순전력(net electricity) 발생 감소이다. 아래에서 설명하는 것처럼, 이는 포집 플랜트 자체의 전기 부하에 추가되는 사항이다. MPP3의 부분 부하에서(대략 90% 부하 미만), 증기 제트 부스터용 MP 증기의 사용 증가로 인해 이는 상당히 증가한다. MPP3의 70% 부하에서는 39.0 MWe로, 그리고 40% 부하에서는 39.3 MWe로 산출되었다. 일반적으로 MPP3는 전부하에서 운전되지만, 재정 모델링에서 58.0 MWe의 MPP3 평균 전력 손실(포집 플랜트의 전기 부하 포함)이 MPP3의 부분 부하 운전 기간을 고려하는 데 이용되었다.

4.7 전기 전력

최대 대략 30 MW의 포집 플랜트용 전력 공급을 위하여 MPP3 플랜트와의 10kV 접속이 예상된다. 이러한 공급 중 대략 절반은 CO_2 압축기에 필요하다. 일반적으로 MPP3의 부속 10 kV 시스템은 MPP3 발전기나 380 kV 스텝업 접속에 의해 전력을 공급받는 부속 변압기를 통해 동력을 공급받는다. 비상 상황에서 MPP3의 10 kV 시스템은 150 kV 그리드 접속으로부터도 공급받을 수 있다.

포집 플랜트용 전력은 외부 150 kV 그리드에 연결된 150/10 kV 변압기에 연결된, 그리고 MPP3 발전소의 제어 건물에 설치될 10 kV 개폐기를 통해 제공된다.

외부 150 kV 그리드로부터의 MPP3 10kV 시스템으로의 공급이 비상 사태(예, 부속 전원 변압기의 운영상 고장)에만 필요하기 때문에, 포집 플랜트는 외부 그리드 변압기를 통해 전기 에너지로 공급받을 수 있다.

추가 변압기나 고압 그리드 접속이 필요하지 않고, 포집 플랜트용 전기 공급의 예상되는 이용 가능성이 충분히 높기 때문에, 본 해결책은 가장 낮은 CAPEX(설비투자비용)이다. 단점으로는 전력이 직접 MPP3에서 공급될 수 없기 때문에 추가 그리드 비용이 든다는 점이다. 그러나 제한된 수의 CCS 데모 운전 시간을 고려하면, 이는 더 낮은 CAPEX보다 더 중요하지 않다.

현재 CCS 시스템 설계는 2개의 10kV 부품이 있는 CCS 시스템을 공급하는데, 각각에는 8~9개의 개폐기가 있다.

28-39 MW의 감소된 MPP3 출력과 결합한 평균 전력 소모로 평균 58 MW의 평균 총 전력 소모를 예측할 수 있다.

E.ON과의 협의에 따라, 해당 일자의 도매 전기로 산출하여 E.ON에 의해 원가로

ROAD 프로젝트에 청구된다. 이는 이것이 E.ON가 CCS 플랜트 운영 때문에 판매할 수 없는 전기이거나(MPP3로부터의 생산 차질의 경우), 그리드를 사야 하는(포집 플랜트 전력 소비의 경우) 전기이기 때문이다.

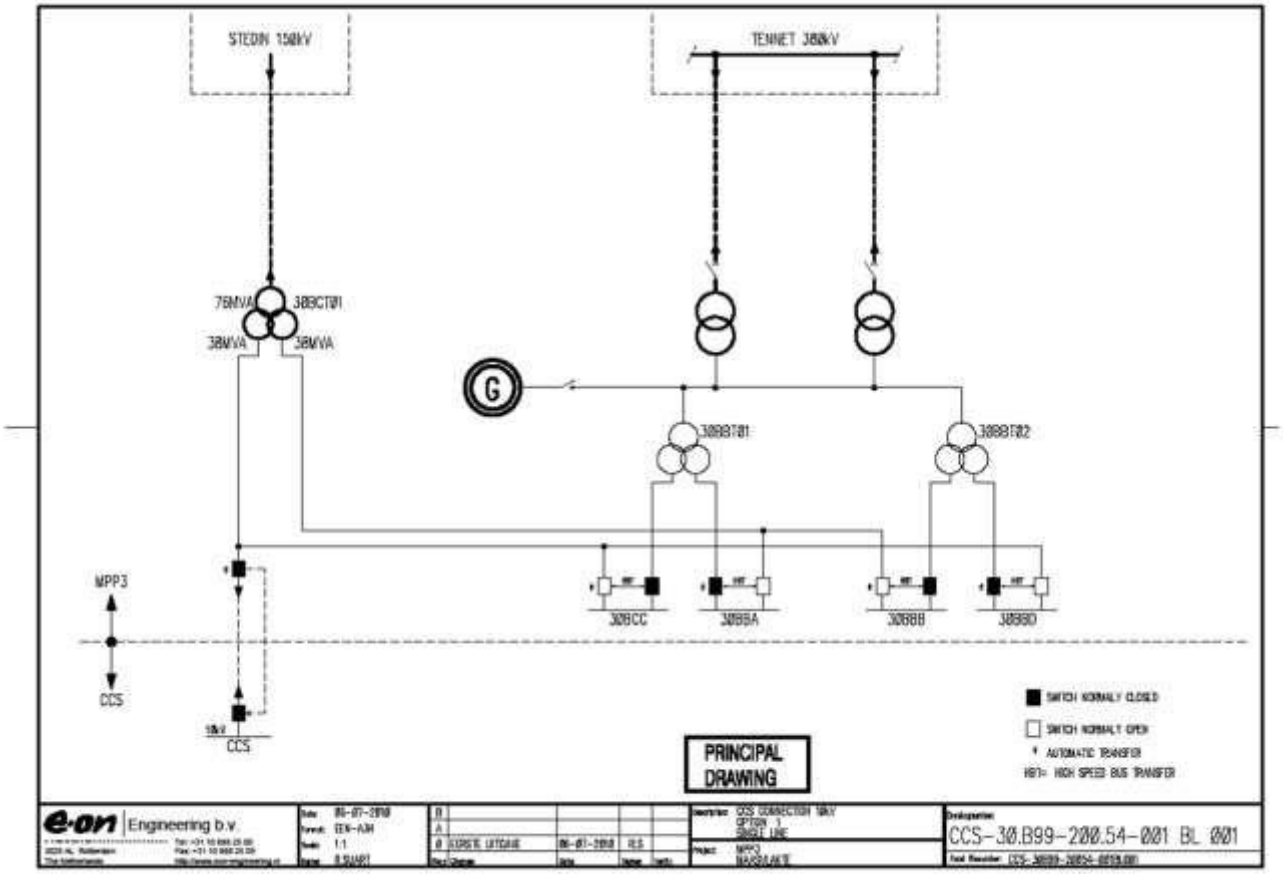


그림 22: 단순화된 MPP3 전기 다이어그램 및 포집 플랜트로의 연결

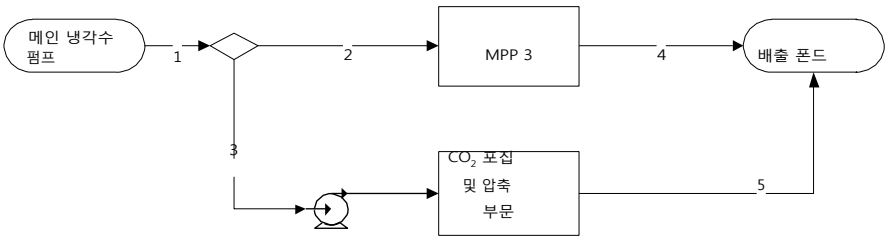
4.8 냉각수

MPP3는 냉각을 위해 해수를 이용한다. 냉각수는 항구에서 펌프로 퍼내지고, 포집 플랜트 아래로 흘러 채널을 통해 MPP3 장치로 이동한다. 가열된 냉각수는 발전소의 다른 편에 있는 냉각수 폰드(pond)를 통해 배출된다.

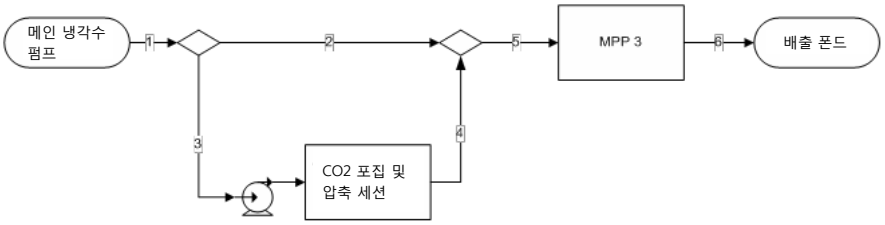
그림 23: 좌측 상단의 항구로부터의 냉각수 흡입 MPP3, 우측 하단 폰드로 배출

통합에 대한 개념 설계를 하는 동안, 포집 플랜트를 냉각수(CW) 시스템으로 연결하기 위해 세 가지 옵션이 평가되었다.

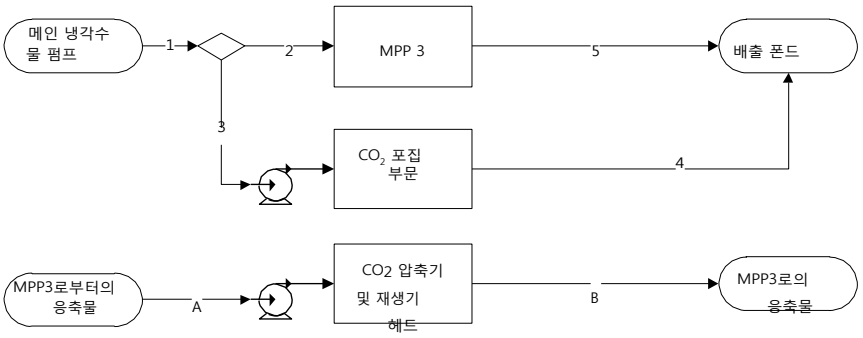
CW-옵션 1



CW-옵션 2



CW-옵션 3



포집 플랜트와 MPP3의 통합에 있어 효율 손실을 산출하기 위해, 세 가지 옵션에 대한 주기 모형이 개발되었다.

옵션 2는 짧은 냉각수 연결이라는 이점이 있지만, 옵션 1과 비교하여 MPP3의 효율 손실은 온도가 더 높은 MPP3용 냉각수 때문에 0.11% 더 나쁘다.

옵션 3은 MPP3의 응축물을 가열하기 위해 포집 플랜트의 폐열을 이용하는데, 그 결과 옵션 1에 비해 1.12%로 산출되는 효율 이득이 생긴다. 더욱이 본 옵션에는 포집 플랜트용 해수 냉각수를 감소시킨다는 이점이 있다. 실행 가능성을 보여주는 경제적 계산을 한 후, 본 옵션이 선택되었다.

MPP3의 메인 냉각 시스템 중 현재 존재하는 세 가지 해수 냉각 펌프의 용량은 MPP3와 포집 플랜트를 위한 냉각을 하기에 충분하다. 포집플랜트가 가동 중일 경우, 재생기(stripper)용으로 추출된 증기는 MPP3의 메인 콘덴서에 배출되지 않기 때문에, 냉각수 요구는 MPP3에서 포집 플랜트로 이동된다. 포집 플랜트를 위해, 하나의 전용 부스터 펌프가 설치되어 필요한 해수량을 추출한다.

포집 구획을 지나가는 냉각수 채널은 직사각형의 콘크리트 구조이며, 나란히 놓여 있는 두 개의 평행 사각형 채널로 구성되어 있고, 그 크기는 2.55 m X 2.55 m이다. 채널에는 세척 및 검사 목적으로 접근할 수 있다. 이러한 이유로 접근 해치(맨홀)가 일정한 간격을 두고 채널에 배치되어 있다.

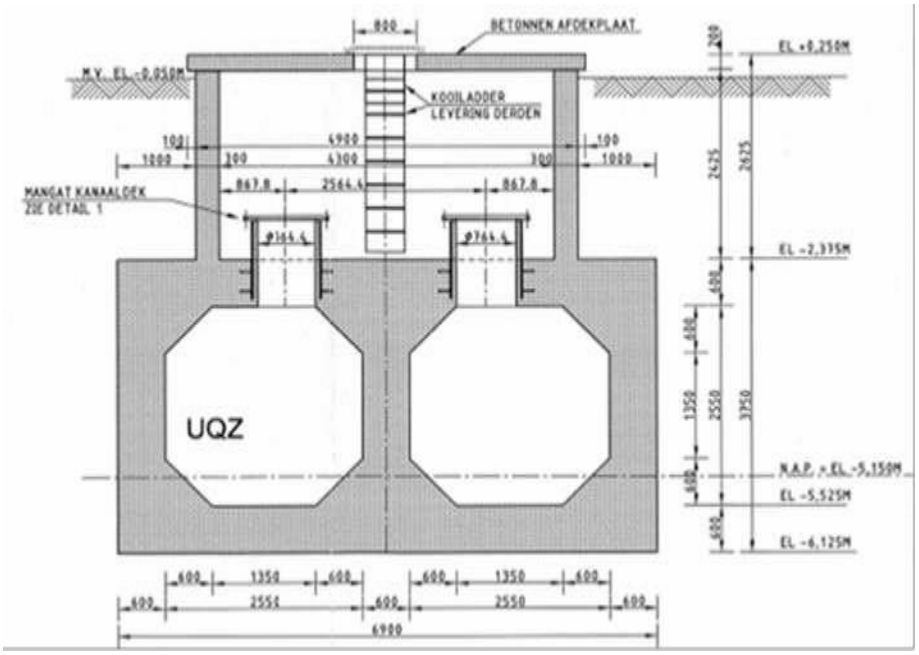


그림 24: 냉각수 공급채널의 횡단도

포집 플랜트로 최대 13 000 m³/h의 냉각 (해)수를 공급하기 위해, 메인 냉각수 펌프와 MPP3의 기계 하우스 사이에, 콘크리트 냉각수 채널에 있는 검사 유정의 두 맨홀(ID 800 mm)에 포집 플랜트 부스터 펌프의 흡입관을 연결하는 것이 예측되었다.

2개의 맨홀 커버는 흡입 헤더로 흐르는 (플랜지가 있는 GRP) DN800 파이프 스풀(spool)로 대체되는데, 포집 플랜트 냉각수 부스터 펌프를 공급한다. DN800 스풀 피스는 제거 가능한 방식으로 설계되는데, 필요한 경우 맨홀에 접근할 수 있다.

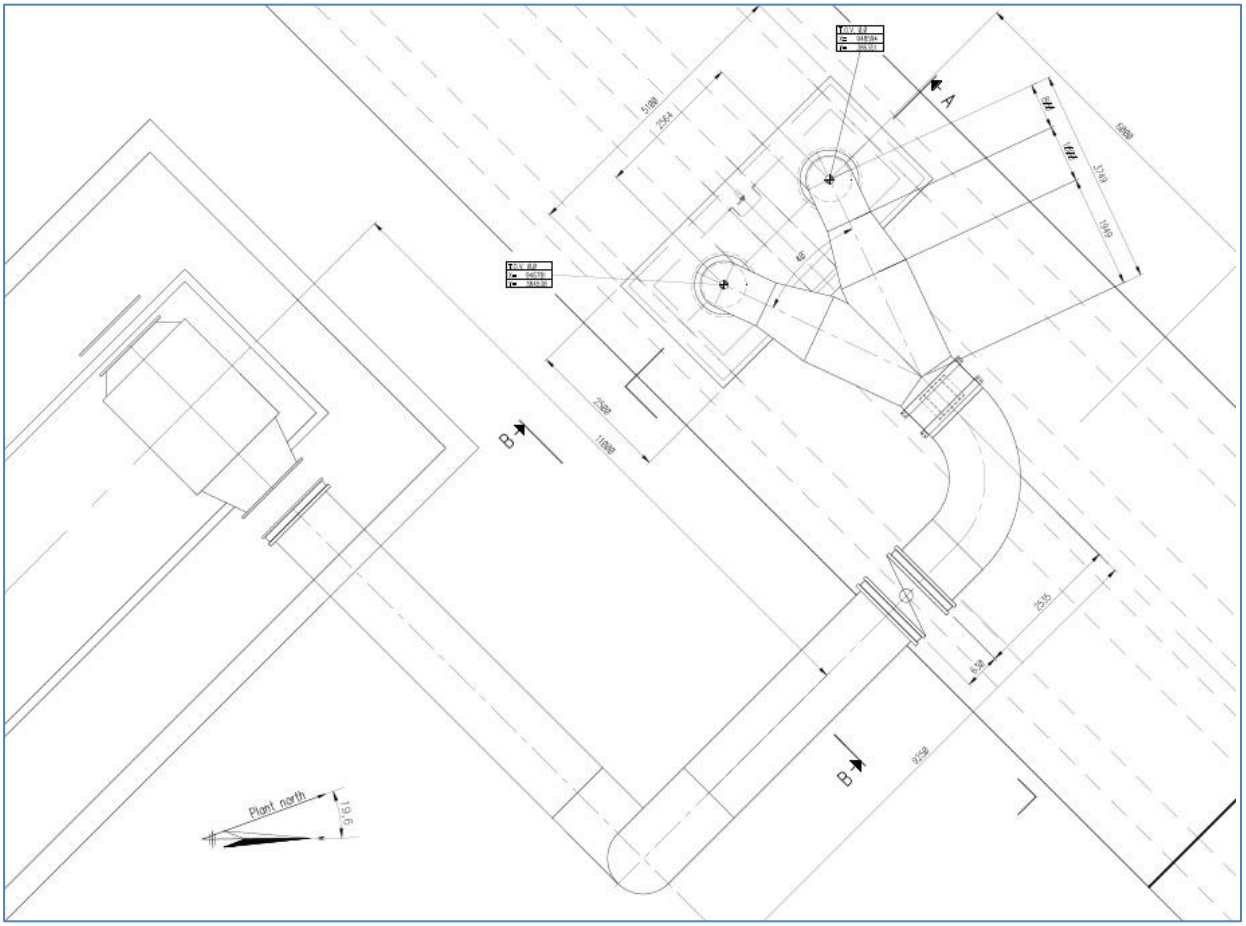


그림 25: 냉각수 공급 채널 및 가압펌프로의 연결 평면도

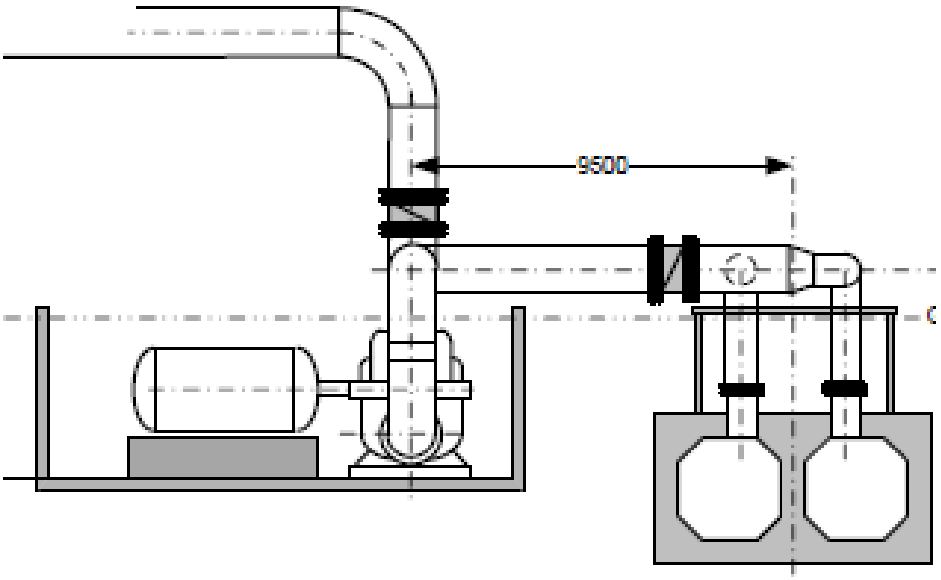


그림 26: 냉각수 공급 채널 및 가압펌프로의 연결 횡단도

콘크리트 상부구조는 작동 결과 없이 개조될 수 있다. 모든 최종 연결 동안 요구되는 MPP3 정지 동안 맨홀에 대한 최종 연결만을 하여, MPP3가 운영되는 동안 맨홀로부터 포집 플랜트로의 배관 또한 설치될 수 있다.

포집 플랜트로부터의 냉각수는 새로운 DN 1200 GRP 파이프를 통해 유출 폰드로 배출된다.

4.9 탈염수

탈염수는 다음 목적으로 포집 플랜트에서 소비된다.

- 흡수체 상단에서 보충 세척수.
- NaOH를 50%에서 20%로 희석.
- 폐쇄형 냉각수 시스템을 위한 보충.
- 용제 여과 플러싱.
- 기타 여러 사용자.

MPP3에서 2개의 서로 다른 품질의 탈염수를 이용할 수 있다. 더 낮은 품질의 탈염수가 DN 200 파이프라인을 통해 지역 상수도회사 EVIDES에서 외부적으로 사전에 탈염수화된 MPP3로 유입된다. 이러한 물은 이후 MPP3 내에서 처리되어, VGB R 450에 따라 보일러 공급수 품질을 만들어낸다.

EVIDES의 물 품질은 다음과 같다.

	보통	최대
전도율	< 0,2 µS/cm	< 0,5
SiO_2	< 25 ppb	< 50 ppb
Fe	< 20 ppb	
Cu	< 5 ppb	< 50
TOC	< 50 ppb	< 100
Na	< 5 ppb	< 10

온도 범위 : 3 ~ 30°C 공급

압력 : 대략 2-3 bara

유량 비율 : 최대 200 m^3/h

포집 플랜트 공급업체는 EVIDES 수질이 그 용도로 사용하기에 충분하다는 것을 확인했다. 따라서, 품질 이외에 다른 이유로 요구되는 것이 아니라면, 고품질 탈염수를 이용하지 않도록 고안되었다.

두 개의 펌프가 설치되고 대략 250 m의 DN 80 수송 라인은 MPP3 탈염수 시스템으로부터 포집 플랜트까지 최대 15 m^3/h를 수송하기 위해 건설된다.

4.10 폐수

대부분의 폐수는 포집 플랜트의 프리스크러버(pre-scrubber) 부문에 의해 생성된다. 프리스크러버는 냉각 부문, 직접 접촉 냉각기(DCC), 황이탈 장치(해연 연도가스 황이탈 장치 - 해연 FGD)를 결합시킨다. 두 부문은 모두 폐수를 생성하지만, 두 개의 흐름은 수량과 품질이 상당히 다르다.

파악된 폐기물과 기타 수류에 대한 표가 유량 비율과 함께 아래 열거되어 있다. 폐수 흐름은 아래 항목에서 개별적으로 논의한다.

포집 플랜트로/로부터의 수류 (전형적 조건 하에서)	m^3/h
LP 및 IP 응축물 회수	205
냉각을 위한 응축물	562
냉각수	12 290
광물수	8
응축물 DCC	44
음료수	1
리클레이머 폐수	-
소방용수	-
하수	-
빗물	-

4.10.1 DCC 응축물

DCC 초과 수류는 44 t/hr에 달하고 연도가스로부터 응축된 물로 구성된다. 본 흐름은 MPP3의 FGD 흡수기에 공급하는 공정 용수와 혼합될 수 있기 때문에, 1/3 이상만큼 근처 호수로부터의 담수 취수를 감소시킨다. 대략 250 m의 DN100 수송 라인은 MPP3의 공정 용수 탱크에서 본 흐름을 배출시키기 위해 건설되었다.

4.10.2 해연 FGD로부터의 블로 다운(blow down)

SO_2 스크러빙 루프(scrubbing loop)는 흡수기에 들어가기 전에 연도가스로부터 추가적으로 SO_2를 제거하기 위해 수산화나트륨 용액을 이용한다. SO_2가 내열성 염을 형성하는 용제와 화학적으로 결합하기 때문에, 이는 용제 소모를 최소화한다. 알칼리 용액은 또한 SO_2에서 형성되는 나트륨 아황산염 및 황산 소다와 더불어 중탄산나트륨의 형성을 초래하는 일부 CO_2를 스크러빙한다. DCC 스크러빙 루프로부터의 블로 다운은 0.3 t/h로 그 폐기물 흐름이 상대적으로 적고, 포함된 염은 환경에서 흔히 존재한다. 허가 하에, 이러한 폐기물은 포집 플랜트(유량 비율 12 200 t/h)에서 이용된 후 바다로 배출된 냉각수와 안전하게 혼합될 수 있다.

4.10.3 기타 폐수 흐름

리클레이머 폐수는 지속적으로 발생하는 리클레이머 운영 폐수를 30일 동안 보관할 수 있는 규모의 리클레이머 폐수 오수통(Reclaimer Waste Sump)에 보관된다. 폐수는 제3의 폐수 처리 계약업체를 통해 정기적으로 처리된다. 빗물 배수관은 MPP3로 다시 연결되고

기존의 빗물 회수 시스템과 통합되는데, 빗물을 공정 용수로 이용하는 것을 극대화하는 것을 목적으로 한다. 포집 플랜트 제어실 블록으로부터의 오수 또한 MPP3 하수관으로 연결된다.

4.10.4 스택 MPP3로부터의 응축물

MPP3의 스택으로 회수되는 포집 플랜트의 흡수기로부터의 연도가스는 MEA로 오염될 수 있다. 이러한 MEA의 일부는 MPP3의 스택에서 형성되는 응축물에 의해 흡수될 수 있다. 이러한 응축물은 MPP3의 FGD에서 보통 재사용된다. 본 응축물로 흐르는 MEA의 예상 캐리오버(carryover)량은 100 g/hr 미만이다. 빌헬름스하펜(Wilhelmshaven)에서의 포집 파일럿 계획에서의 연구 작업으로 좀 더 정확한 수치를 얻을 수 있을 것이다. MPP3/ROAD 상황에 대한 이러한 수치에 많은 불확실성이 있기 때문에, 프로젝트의 본 단계에서 완화 조치를 만드는 것은 적절하지 않다.

응축물의 MEA 내용물이 지나치게 많은 경우 가능한 완화 조치에는 다음이 있을 수 있다.

1. MPP3의 폐수 설비에 응축물을 버리거나 냉각수 배출기로 배출하고, 이러한 방식의 배출에 대한 추가 허가를 신청한다.
2. 저장 탱크에 있는 응축물을 수집하고 이를 폐수 처리시설로 수송한다.
3. 예를 들어, 흡수체, 에어로솔 제거, 온도 조절 등에서의 2차 워싱 단계와 같은 곳에서의 MEA 캐리오버를 최소화하기 위한 포집 플랜트의 조치.

이러한 조치를 위한 비용은 필요한 경우 ROAD가 부담한다.

4.11 제어장치 하드웨어

포집 플랜트의 제어장치는 완전히 MPP3의 제어 시스템과 통합되어야 한다. 제어 시스템 ABB 800xA는 발전소의 지역 제어실과 메인 제어실로 상이한 제어 기능을 할당할 수 있도록 한다. 따라서, 플랜트와 발전소의 인터페이스와 포집 플랜트가 메인 제어실에서 조절될지 여부나 포집 플랜트의 다양한 부분의 제어가 지역 제어실로 할당될 것인지 여부는 완전히 유연하다. 어떠한 경우에도, 각 제어실에서 모든 공정 자료를 시각화하고/하거나 이에 접근하는 것이 가능하다.

MPP3 발전소의 메인 제어 시스템과 포집 플랜트의 지역 제어 시스템 사이에서의 과잉 광섬유 케이블을 이용하여 통합한다.

4.12 기타 유틸리티

- 통신 연결
- 소방용수: MPP3의 소방용수 시스템과 포집 플랜트는 완전히 통합된다. MPP3의 소방용수 펌프와 라인은 포집 영역에서의 추가 급수전과 포집 플랜트 내 소방용수 시스템으로의 연결을 가능케 할 수 있는 충분한 용량을 보유한다.
- 음료수: MPP3 시스템과의 연결은 포집 플랜트의 안전 샤워 영역과 지역 제어실을 공급할 것으로 예측된다.

기기와 플랜트 에어는 포집 플랜트 전용 패키지로 공급된다. MPP3 에어 시스템과의 연결은 예상되지 않는다.

4.13 포집 플랜트의 유연성

포집 체인을 위한 기본 발전소, 즉 MPP3는 매우 경쟁력 있는 발전 시장에서 운전될 것이다. 때때로, 수요가 적고 다른 발전기가 더 적은 비용으로 발전을 할 수 있는 경우에는, 기본 발전소 운전을 중지하며 포집 체인도 확실히 운영될 수 없다. 기타 일부 상황에서, 전력이 희박하게 공급되고 전력 가격이 높은 경우, 포집 체인을 운영하는 것은 상업적으로 이치에 맞지 않을 것이며, 시스템은 다시 정지할 것이다.

이러한 환경에서, 전체 체인은 확실히 제어된 정지, 그리고 몇 시간이나 며칠 이내에 조치되었을 수 있는 정지 이후 제어된 서비스를 복귀시킬 수 있어야 한다.

MPP3는 최소 안정 발전부터 전부하까지의 범위, 혹은 그 사이의 특정 시점에서 있을 수 있는 단기 지역 시장 조건에 의해 정해지는 부하에서 발전을 한다. 최소 안정 부하 이상에서 발전을 한다는 조건 하에, 포집 플랜트의 규모는 MPP3로부터의 연도가스의 전체 설계 흐름을 공급할 수 있는 연도가스가 충분하도록 정해진다. 그러나 포집 플랜트에서의 재생에 이용 가능한 증기 흐름은 전체 부하 중 대략 40% 이하로(즉, 대략 430MWe) 제한되며, 포집 플랜트는 해당 부하[1] 아래로 감소될 것이다.

포집 플랜트 다이나믹은 체인의 제한 요인이 될 것으로 예상되지 않는다. ROAD 프로젝트의 혁신적 성질로 인해, 동특성(dynamic behavior)과 포집 플랜트의 성능에 접근하기 위해 일부 시험이 수행되도록 고안되었다. 현재까지의 연구를 보면, 완전 자동화된 포집 플랜트는 적어도 포집 플랜트가 부착된 발전소만큼 유연하기 때문에, 이것이 문제가 되지 않을 것으로 예상된다는 점이 나타난다. 이에 대한 추가 시험이 빌헬름스하펜에서의 E.ON / Fluor 시범을 위해 계획되었다. 어떠한 경우이든, 대부분 적소에 있는 상업용 드라이버가 가능한 경우 전용량으로나 전용량에 가깝게 운영되는 포집 플랜트로 유도된다는 점을 예상할 수 있다.

그러나 전력 시장의 특성상 CO2 압축, 파이프라인 수송, 주입, 저장을 위한 ROAD 솔루션이 시작과 중지를 할 수 있어야 하고, 이러한 트랜션트(transient) 중 흐름 보장이 이제까지 진행된 설계작업에 있어 중요한 요소라는 점이 나타난다.

포집 플랜트용 설계 사양은 40% 부하까지로 감소하여 운영될 수 있도록 하는 것이었다. 사실, 주요 기술적 제한이 파악되지 않았고, 포집 플랜트는 원칙적으로 매우 낮은 부하를 지탱할 수 있다. 그러나 압축기는 낮은 흐름을 제공하도록 고안되지 않았고, 재순환 [2]에서 운영되어야 할 것이다. 이로 인해 포집 플랜트에서의 낮은 부하가 에너지가 된다.

[1] 램핑 운영에 대한 다음 최소 램프 레이트(Ramp rate: 발전소 출력 증감발율)가 정의된다. 40-60 % 부하: 3-4 % MCR/분, 60- 95 % 부하: 4-6 % MCR/분. "MCR"은 공칭하중에서의 연도가스 흐름과 관련이 있고 연도가스 조건을 설계해야 하며, 1%의 MCR은 7,000 m³/h STP 습식과 동일하다.

[2] 압축기는 CO_2 풀 플로우에서의 최대 효율에 맞도록 최적화되었다. 유입 안내 날개 제어를 통해 턴다운이 얻어지고, 100%의 재순환 흐름이 "습식" 및 "건식" 항목에서 고리 모양으로 이동한다. 이를 통해 모든 부하에서 운영할 수 있는 완전한 유연성이 갖추어지지만, 전부하의 70-80% 아래에서의 CO_2 흐름에서는 상대적으로 비효율적이다.

전부하에서 요구되는 대부분의 전기 부하가 낮은 부하 운전을 위해 여전히 필요하기 때문에 비효율적이다. 따라서, 40% 부하 아래의 운전은 경제적으로 실행 가능하며, 따라서 시험이나 일시적(시작이나 중지) 조건에서가 아니라면 발생하지 않는다고 추정된다. 40%의 최소 흐름, 최대 흐름, 시작 및 중지 조건을 기반으로 한 유동안정성 평가 연구가 훌륭한 조작성을 보장하기 위해 수행되었다.

4.14 제어 원리

포집 플랜트는 모든 필요한 운전 및 모니터링 활동을 조정하면서 독립적 제어 시스템을 갖는다. 아래 묘사된 이러한 모드 사이의 운전 모드와 전이는 필요한 최소 운전원 조치와 함께 완전 자동으로 실행된다.

포집 플랜트는 다음 모드에서 운전될 수 있는 기능이 있다.

- 모든 부하에서 이미 작동 중인 MPP3가 있는 포집 플랜트 착수(*).
- 동일한 램프 레이트(Ramp rate: 발전소 출력 증감발율) 에서 포집 플랜트와 MPP3가 병행으로 램프업 및 램프다운(*).
- 상이한 램프 레이트(Ramp rate: 발전소 출력 증감발율)에서 포집 플랜트와 MPP3가 병행하여 램프업 및 램프다운.
- 모든 부하에서 MPP3가 안정적으로 작동하도록 한 포집 플랜트 램프업 및 램프다운.
- MPP3가 램프업 및 램프다운하는 포집 플랜트의 안정적 운영(*).

(*) 표시가 된 모드는 가장 많이 이용될 것으로 예측된다. 포집 플랜트는 이러한 모드에 최적화되어야 하는데, 언급된 다른 모드에서의 운전을 제한해야 한다.

포집 플랜트의 안정적 운전은 설계 범위의 40-100% 이내에서 가능하다. 포집 플랜트는 선택된 목표 부하로 자동 조정된다. 목표 부하는 고정된 운전자 선택값이 되거나, MPP3 보일러 부하처럼 유동적 설정값이 될 수 있다. 첫 번째 경우, 포집 플랜트는 MPP3 운영과 독립적으로 일정 부하에서 운전된다. 그렇지 않은 경우, 이는 MPP3 보일러 부하를 준수하게 되어 고정된 비율의 연도가스를 취급하게 된다. 포집 플랜트에서 주요 순환방식 유량 비율의 균형은 "부하에 따른 제어"에 의해 자동적으로 조정된다. 포집 플랜트 제어 기능에 의해 제어되는 MPP3로부터의 유틸리티 흐름에도 동일하게 적용된다. 이러한 제어를 수행하기 위해, 운전자는 제어 모드 중 하나를 수동으로 선택한다.

4.14.1 제어실 및 제어 하드웨어

초기에 적어도 CCS 제어가 별도의 제어실에서 수행되지만, 포집 플랜트의 제어는 MPP3의 제어 시스템에 완전히 통합된다. 제어 시스템 ABB 800xA는 발전소의 지역 제어실과 메인 제어실로 상이한 제어 기능을 할당할 수 있도록 한다.

포집 플랜트와 MPP3의 화재 및 가스 탐지 알람은 두 개의 알람 시스템 모두에 전달된다. 이러한 시스템 사이의 인터페이스는 중복되며 유선 연결된다.

4.14.2 시작/중지 절차 인터페이스

운전 착수 – 포집 운전을 실제 시작하기 전에, 포집 플랜트는 필요하다면 파이프 및 설비 예열과 같은 모든 필요한 준비를 해야 한다. 중지 기간의 길이에 따라 몇 시간이 걸릴 수 있다. 준비는 운전자 요청에 따라 완전 자동으로 수행되어야 한다. 포집 플랜트 운전이 준비되면, DCS로부터의 시작 신호를 기다려야 한다. 이후 정식 복구(RELEASE)를 기다려야 하는데, MPP3 플랜트(MPP3로부터의 신호)의 준비도 및 포집 플랜트와 MPP3(포집 플랜트에 의해 내부에서 모니터링될) 사이의 인터페이스에 관하여 이행된 최소 조건이 반영된다. RELEASE 기능을 보유한 포집 플랜트는 최대 속도에서 자동으로 램프업되어 선택된 목표 부하로 증가한다.

모든 유틸리티를 위한 시작 절차는 본 단계의 프로젝트에서 아직 상세하게 정의되지 않았지만, 일부 특정 시작 문제가 인터페이스에 대하여 파악되었다.

냉각수: 포집 플랜트의 해수 냉각 시스템의 착수는 시작 절차의 첫 번째 단계에 있다. MPP3가 (거의) 전부하에 있고 거의 모든 이용 가능한 냉각수를 요하는 경우, 시작 동안 포집 플랜트용으로 필요한 냉각수 채널로부터 추출된 해수량에 대한 제한이 있을 수 있다. 따라서, 포집 플랜트의 해수 냉각 펌프는 포집 플랜트가 LP 증기를 흡입하기 시작할 때까지 시작 동안 6 000 m^3/h로 제한된다.

증기: 450m LP 및 IP 증기 라인은 과열된 상태까지 배출 및 가열되어야 한다.

냉각을 위한 응축물: 시작 시, MPP의 응축물을 위한 수송 펌프의 스위치가 켜지지만, MPP3에서의 회수온도가 최소값에 도달할 때까지 응축물이 공급 및 회수 라인에 걸쳐 순환된다. 이를 통해 MPP3의 예열 #3 이후 지나치게 차가운 응축물이 중간 온도의 응축물 흐름과 혼합되는 것이 방지되고, 불필요한 전력 손실을 감소시킨다.

모든 유틸리티의 스위치가 켜져 있고 메인 포집 플랜트 시스템이 준비된 경우, 연도가스 댐퍼(damper)가 열리고 블로어(blower)가 시작되어 MPP3로부터 연도가스를 흡입하고 CO_2 포집을 시작할 수 있다.

포집 플랜트가 단기간(즉, 24시간 미만) 동안 중지될 것으로 예상되는 경우, 최대 생산으로의 더욱 빠른 시작을 허용하기 위해 플랜트가 "대기" 상태 모드로 전환된다. "대기" 모드의 목적은 MPP3로부터 전력과 최소 증기를 받아들이는 동안 포집 플랜트를 준비 상태로 유지하기 위함이다. 이는 40%의 정상 용량(선택된 펌프 최소 흐름 요건을 기반으로 확인될)으로 주요 계산 프로세스 펌프 유량 비율을 감소시킴으로써 얻어진다. 또한, 해수 시스템 유량 비율은 해수의 MPP3 진공 콘덴서를 차단하는 것을 방지하기 위해 6 000 m^3/h로 감소되어야 한다. 최종적으로, 증기 시스템은 기밀 구조를 유지한다.

포집 플랜트가 장기간(24시간 이상)동안 중지되어야 하는 경우, 모든 회전 설비를 중지시키고, 증기 시스템이 감압되어야 하며, 용제가 냉각될 수 있도록 해야 한다. 단기 및 장기 중지 사이에서의 중단점으로서 24시간은 단지 지침일 뿐이라는 점에 유의한다. 포집 플랜트는 원하는 경우 더욱 오랜 기간 동안 "대기" 모드를 유지할 수 있다.

4.14.3 기능창

안정적 운영이 다음 범위에서 가능해야 한다.

명목 부하 (MCR[1]) :100%

명목 부하에서 연도가스 흐름 : 700 000 m³/h STP 습식

부하 범위 포집 플랜트 : 40-100%

포집 플랜트 부하 범위에 걸친 연도가스 흐름 : 280 000-700 000

m³/h STP 습식 부하 범위 MPP3 : 25-100%

1 최대 연속 등급

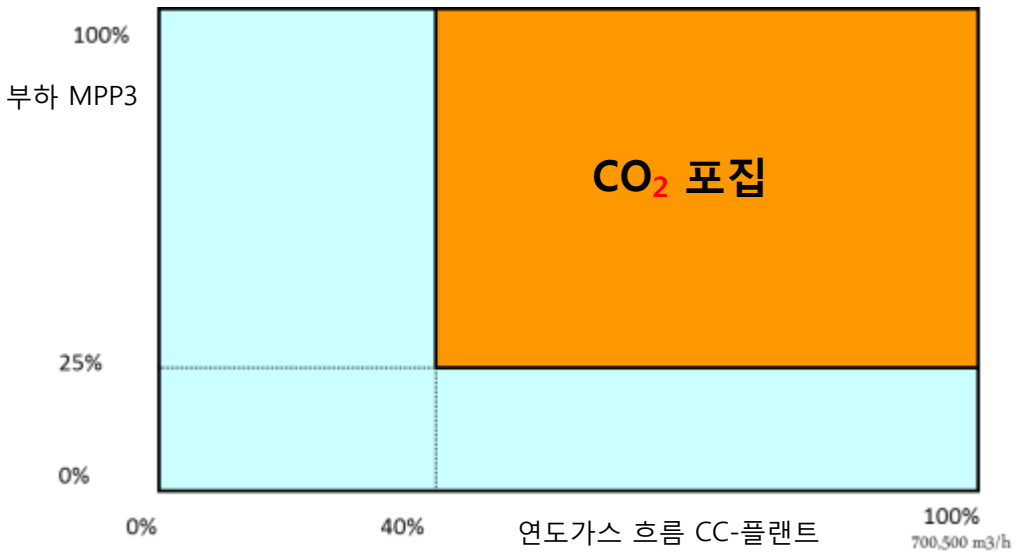


그림 27: 기능창 포집 플랜트

MPP3는 전부하에 근접한 부하에서 대부분 운전될 것으로 예상되지만, 전력 발생 자산이 변경될 경우 향후 변화될 것이다. MPP3가 부분 부하인 상태에서 전부하로 포집 플랜트를 가동하려고 하는 경우, MPP3의 최소 부하는 증가하여 포집 플랜트로의 증기 공급을 위한 충분한 증기량과 압력을 얻을 수 있도록 해야 할 것이다. MPP3에서의 중요한 제한 파라미터는 보일러 재가열기를 통한 최소 흐름이다.

4.15 특정 배출 레벨

설계 조건에서 운전되는 경우, MPP3는 대략 15 Vol.-%(건식) CO_2를 포함하는 대략 1 084 kg/s의 연도가스 흐름을 방출한다. 신축 플랜트는 따라서 대략 755 그램 CO_2/kWh를 생성하는데, 연간 대략 570만 톤의 CO_2를 배출한다. 플랜트의 순수 특정 CO_2 배출량이 낮을수록, E.ON Beneluxㅡ 목재펠릿(wood pellets)과 같은 바이오매스 혼소(co-firing)의 기회를 얻을 수 있다. 현재 E.ON Beneluxㅡ 동시에 만들어질 수 있는 바이오매스의 최대 비율을 연구하고 있다. 20 wt-% 바이오매스의 혼소가 현실성이 있는 것으로 기대된다.

아래 그림은 포집 플랜트와 바이오매스 혼소 모두가 특정 CO_2에 미치는 영향에 대한 느낌을 나타내고 있다. 또한, CO_2 배출을 줄이기 위한 두 조치의 조합이 제시되어 있다. 특히 MPP3의 특정 부분 부하 배출은 포집 플랜트를 전부하로 유지함으로써 상당히 감소될 수 있다. MPP3+ROAD의 부분 부하에서의 낮은 배출은 이러한 환경에서 MPP3에 의해 생성된 더 높은 비율의 CO_2는 포집 플랜트가 전부하 상태를 유지할 때 포집된다는 사실에 의해 발생된다.

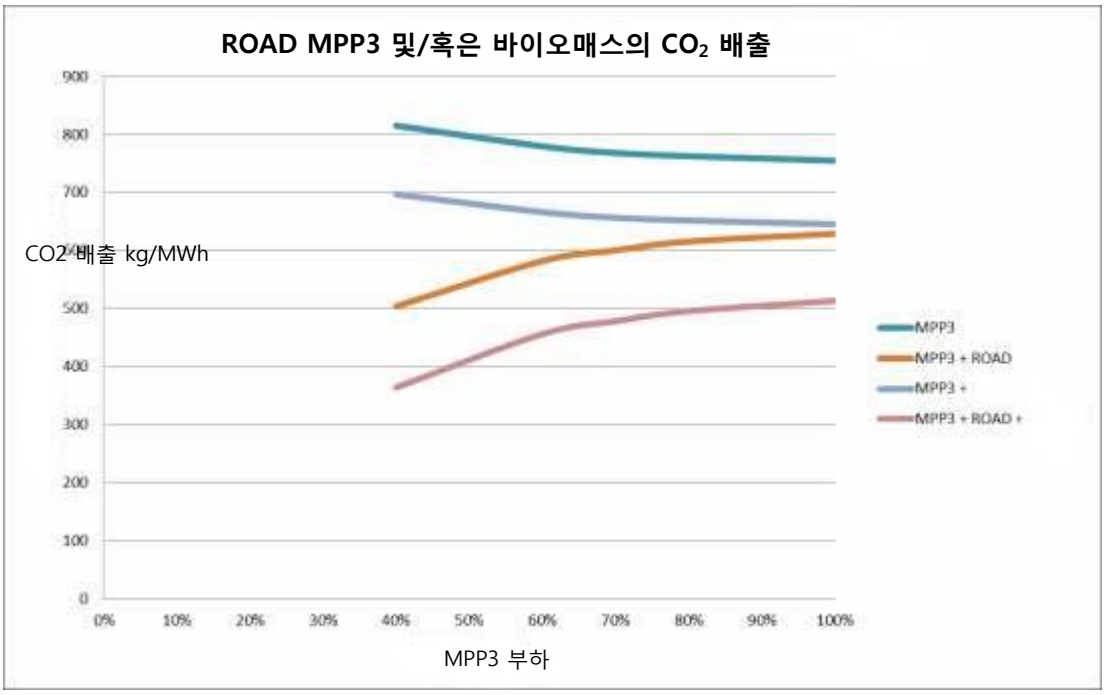


그림 28: ROAD 및/혹은 바이오매스의 이산화탄소 배출

흡수체로부터의 연도가스는 발전소 스택으로 회수되고 MPP3로부터의 남아있는 처리되지 않은 연도가스와 함께 대기로 배출된다. 본 가스 흐름은 대부분 질소(87.4%)이지만, 설계 조건 하에 5.7% 용수, 4.2% 산소, 1.7% CO_2, 1% 아르곤을 포함한다.

MPP3에 대한 허가서는 포집 를 포함하는 것으로 수정되었다. 이러한 허가 하에, 포집 플랜트와 관련한 주요 배출 한도는 암모니아(5 mg/Nm^3 한도)와 불꽃 이온화 검출기에 의해 측정된 총 유기 탄소에 관한 것인데, 허용 한도는 23 mg/Nm^{3}이다. 총 유기 탄소에는 아민과 퇴화물(원칙적으로 아세트알데히드인 것으로 예상됨)이 포함된다. 플루어가 보장하는 배출은 이러한 한도를 넘지 않는다.

4.16 오염 관리 시스템

MPP3 시스템의 오염을 예방하고 환경 허가를 위반하지 않도록 하기 위해, 포집 플랜트로부터 MPP3까지의 흐름을 수용하는 연결은 온라인상으로 모니터링된다. 좀 덜 중요한 연결에서 표본점을 이용할 수 있다. HAZOP(위험 및 조작성, HAZard and OPerability) 항목은 현재 설계를 검증하도록 유지되지만, 세부 공학은 아직 완료되지 않았으며, 인터페이스상의 추가 HAZOP 항목은 추가 모니터링 설비로 연결될 수 있다.

연도가스 회수는 VOC, NH_3, SO_2, NO_x를 측정하는 분석기를 갖추고 있다.

MPP3로 회수되는 증기 응축물의 품질을 보장하기 위해, 리보일러 응축물 펌프(Reboiler Condensate Pump)의 배출에서 전도성과 pH가 측정된다.

냉각을 위한 응축물은 응축물의 압력이 항상 오버헤드 CO_2 콘덴서의 가스 측면에서의 압력보다 높다는 사실 때문에 오염될 가능성이 높지 않다. 그러나 이를 확인하기 위해 표본점을 이용할 수 있다.

냉각 시스템의 해수 측면으로의 배출은 중간 담수 냉각 루프가 있는 간접 냉각 시스템을 부분적으로 적용함으로써 예방된다. 해수에 의해 직접 냉각되는 공정 흐름에는 해수 측으로의 누출 기회를 최소화하는 평판형 열 교환기가 장착되어 있다.

유해물질을 함유하고 있는 포집 플랜트 설비는 탱크 방벽으로 둘러싸인 포장된(paved) 영역에 위치한다. 잠재적 유출물은 포장을 함으로써 지하 누출이 예방되고, 빗물은 MPP3 빗물 시스템으로 펌프에 의해 주입되기 전에 모니터링될 수 있는 섬프(sump)에 모인다.

개별 설비 배출구는 포집 플랜트 내 전용 섬프에 직접 연결된다.

5. 미래 CCS 프로젝트 교훈

ROAD 프로젝트가 상당한 자본 보조금으로 기금을 마련하였지만, 운전에 대한 낮은 보상은 훨씬 더 낮게 신뢰성에 초점을 맞추면서 자본 비용을 최소화하는 강한 인센티브를 창출하였다. 통계적 요소 신뢰도 데이터를 기반으로, 포집 플랜트는 그 이용 가능성이 95%이어야 한다(계획된 유지보수 배제). 그러나 CO_2에 요구되는 수준이 재정 요건을 준수할 만큼 포집될 때까지 단순히 낮은 신뢰도로의 운전 기간이 연장될 것이다. 발전소가 CCS 플랜트와 독립적으로 운전될 수 있기 때문에, ROAD의 신뢰성이 없는 경우 발전소로부터의 전기 발전 손실의 영향을 완전히 피하게 된다.

이는 일부 주요 설계 선택사항에 높은 영향을 미친다. 포집 플랜트는 단일 트레인(단일 압축기를 포함하여)이다. MPP3와의 인터페이스를 위하여, MPP3 설계에서의 용량 예비분은 대부분 이용 가능한 포집 플랜트용으로 이용된다. 예를 들어, 냉각수 시스템에서 보조펌프와 주변 흐름은 포집 플랜트 냉각수를 공급하는 데 이용된다. 따라서, 예를 들어 MPP3의 냉각수 펌프 중 하나가 서비스 불능인 경우, MPP3 부하를 감소시키거나 포집 플랜트의 부하를 감소시키기 위한 선택을 할 수 있다. 또한, 발전소의 비설계 운영을 포함하도록 주변부가 포함되지 않는다. 포집 플랜트는 단순히 MPP3 설계 조건에서 250 MW 상당의 연도가스를 취급하도록 설계되었다. 예를 들어, 발전소가 어떠한 이유에서든 낮은 효율로 운영된다면, 250 MW를 발전하면서 생성되는 연도가스의 부피가 증가할 것이다. 포집 플랜트는 이러한 유량 증가를 수용하도록 고안되지 않았는데, 즉 ROAD의 기술 실증 목표를 달성하는 데 필수적이지 않다. 이와 유사하게, 냉각수 온도가 여름에 높다면, 이산화탄소 포집은 제한될 확률이 높다.

긍정적 측면에서, 포집 플랜트에서 MPP3의 연도가스 중 23%만을 처리하는 것은 더 높은 처리 비율로 존재하지 않았을 고유한 기회를 제공한다. 상대적으로 작은 포집 플랜트 크기 때문에, 포집 플랜트는 MPP3의 전기 부속 시스템, MPP3의 냉각수 시스템, MPP3의 기존 증기 사이클로부터의 증기 추출을 이용할 수 있다. MPP3에서 차용된 증기 추출 솔루션은 본래 지역 난방용으로 설계된 기존의 예비 증기 추출 지선 덕분에 다소 고유한데, 해당 용도로 현재에는 이용되지 않고 있다. 이로 인해 기존의 화력 발전소에서의 추가 증기 추출을 위해 전형적으로 고려된 크로스오버의 개조에 대한 필요성이 사라졌다. 효율의 최적화, 즉 냉각 부분을 위한 MPP3 응축물을 이용하는 방식을 통한 열 집적화가 고려 및 적용되었으며, 이는 ~~운영~~운전 비용에 긍정적 효과를 보여준 기술 솔루션으로 국한된다.

기회 인터페이스 설계 접근법은 ROAD 프로젝트의 유틸리티 인터페이스를 위한 상대적으로 낮은 투자(€30-35 mln.)를 이끈다. 모든 연도가스가 동일한 포집 비율로 처리되어야 하는 경우, 이렇게 할 수 없을 것이다.

인터페이스 설계에 있어 또 다른 고려사항은 포집 플랜트와 그 인터페이스의 제작 시점에서 MMP3 발전소는 이미 건설 중에 있었다는 사실이다. 발전소와 함께 포집 플랜트를 제작하였다면 좀 더 최적화된 설계 및 결합 유틸리티 시스템과 같은 더 낮은 CAPEX가 있는 다른 해결책이 도출되었을 것이다. 더욱이, 포집 플랜트의 최종 투자 결정(Final Investment Decision, FID)이 아직 이루어지지 않은 경우, 인터페이스의 설계에 관한 합의를 해야 한다. 이는 또한 본래의 MPP3 설계에 대한 최소 변경을 하는 해결책을 선호한다. 향후에 지나친 정전을 해야 할 수 있는 (따라서, 정전 비용을 감수해야 하는) 유일한 개조는 FID 이전에

실행되었다. 이는 증기와 연도가스 인터페이스 공사에 적용 가능한데, MPP3의 상용 운영일 이후 8주 이상의 시간을 요하고, 상당한 정전 비용을 발생시킨다. 현재 2~3주의 MPP3 정전은 모든 인터페이서의 최종 접속에 대하여 예상되며, 정기 유지보수 정전 동안 실행될 수 있다.

MPP3 연도가스의 더 높은 처리(예를 들어 40-100%)는 현재 인터페이스 솔루션으로 가능하지 않았을 것이다. 포집 플랜트용 증기, 냉각수, 전기는 다른 소스를 요하는데(혹은 MPP3로의 상당한 개조) 매우 높은 투자를 이끈다. 새로운 발전소용으로 ROAD 프로젝트의 설계로 얻은 경험으로 상당히 많이 통합된 포집 플랜트를 위한 다음 사항을 권장한다.

1. 전기 공급을 위해, 발전소의 부속 전기 시스템은 포집 및 압축 설비의 고성능 요구에 부합할 수 있도록 확대되어야 한다. 훨씬 더 큰 부속 전기 시스템을 피하기 위해, 직접적 증기 구동형 압축기를 고려할 수 있다.

2. 냉각 해수 시스템은 포집 플랜트에 의해 발생된 훨씬 더 높은 냉각 요구를 공급하기 위해 그 수치를 더욱 늘려야(20%) 할 것이다(동일한 보일러 사이즈가 이용되는 경우).

3. 증기 공급을 위해, 여러 옵션이 있을 수 있으며, 설계의 시작점과 함께 경제적으로 평가되어야 한다. 전력 블록의 증기 사이클과의 완전한 통합은 현재의 MPP3 설계와 비교하여 증기 사이클에 있는 주요 변화를 의미할 가능성이 높은데, 예를 들어, 발전소의 부분 부하에서 탄소 포집 플랜트로 추출하기 위한 충분한 압력을 보장하기 위해 MP와 LP 터빈 사이에 어쩌면 스로틀(throttle) 밸브와 함께 소형 LP 증기 터빈을 구성하는 것이 있다. 이러한 경우에도, 증기 제트 부스터를 고려해볼 수 있고/있거나 MP 터빈에서의 더 많은 추출점을 고려할 수 있다.

4. 추가 열 집적화는 포집 플랜트에 있는 저급 폐열의 잉여분과 예비가열 트레인에서 이용 가능한 제한된 양의 응축물에 의해 제한되지만, 원칙적으로 이러한 잉여분은 지역 난방 그리드를 공급하는 데 이용될 수 있다. 특히, 70°C 아래의 공급 온도와 30°C 아래의 회수 온도를 이용하는 소위 4세대 지역 난방 그리드는 탄소 포집플랜트를 위한 냉각을 제공하여 CO_2 배출을 감소시키는 데 이용될 수 있다.

5. 직접 접촉 냉각기(DCC)에 배출되는 거의 순수한 응축물은 외부 담수 공급을 거의 제거하는 전력 장치에 있는 공정 용수로 이용될 수 있다.