

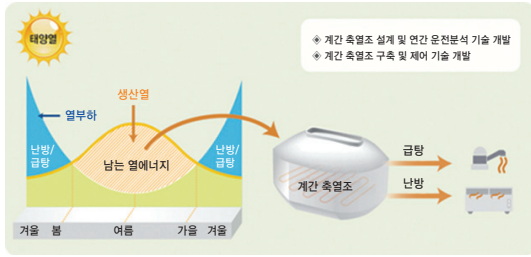
계간 축열시스템

열에너지를 장기적으로 저장하는 계간 축열(季間蓄熱, seasonal storage) 시스템에 대해 소개하고자 한다.

열에너지를 저장하는 축열시스템(thermal energy storage)은 열에너지의 수요와 공급 사이에 발생할 수 있는 시간적·양적 격차를 해소하는데 이용되며, 전기에너지 저장과 유사한 기능을 하므로 thermal battery라고 할 수 있다. 이러한 축열시스템은 열에너지를 저장하는 수단에 따라 현열, 잠열, 화학 축열로, 그리고 저장하는 기간에 따라 단기 및 장기 축열로 구분된다. 물의 현열을 이용해서 하루 또는 수일 단위로 열에너지를 저장하였다가 공급하는 단기 축열은, 태양열 설비, 심야전력 이용 공조 시스템, 지역난방 등에서 널리 이용되고 있다. 잠열 축열은 특수한 분야에서 활용되고 있으며, 냉장냉동식품을 수송하는 냉동탑차에 활용되고 있는 사례가 대표적이다. 반면, 이 외의 축열시스템은 기술적 문제나 경제적 이유 등으로 거의 이용되지 않고 있는데, 대표적 장기 축열시스템인 계간 축열시스템이 최근 국내에서 시도되고 있어 이에 대해 소개하고자 한다.

계간 축열시스템의 이용

계간 축열시스템은 주로 태양열 설비의 열에너지 저장 수단으로 이용



[그림 1] 계간 축열시스템의 개념

된다. 태양열 설비는 주야간 열에너지의 공급과 수요 사이에 시간적 격차가 존재하므로 축열시스템의 활용이 필수적이다. 일반적인 태양열 설비에서는 태양열 집열기의 면적과 부하 형태에 따라 산정된 소규모 축열조가 주간 시간대 생산되는 열에너지를 저장하였다가 기타 시간대에 공급하게 된다.

태양에너지는 이러한 주야간 수급격차 외에 계절간 수급격차도 존재한다. 즉, 열에너지 수요가 급격히 줄어드는 여름철에 태양에너지가 더 많이 생산되며, 겨울철에는 생산된 에너지가 수요량에 비해 많이 부족한 것이 일반적이다. 이 때문에 여름철에는 과열로 태양열 설비가 손상되는 경우가 빈번히 발생하며, 잉여 열원을 해소하기 위하여 흡수식 또는 흡착식 냉동기의 활용이 고려되기도 한다. 그러나 이러한 냉동기는 낮은 성능 및 유지관리의 어려움, 그리고 경제성 문제 등으로 효과적인 대응 방안이 되지 못하는 경우가 대부분이다. 이에 따라 그림 1과 같이 여름철 잉여 열원을 대용량 계간 축열조에 저장하였다가 겨울철에 이용하는 방안이 강구되기도 한다.

계간 축열조는 여름철 과열을 걱정하지 않아도

되며 겨울철 부족한 열원을 보완해 준다는 장점은 있지만, 장기간 많은 양의 열에너지를 저장하기 때문에 외부로의 열손실이 불가피하고 대용량에 따른 설치비용이 과다하다는 단점이 있는 것은 당연하다. 따라서 수 천 m³ 이상의 집열기를 갖는 중대 규모 이상의 태양열 설비를 설치하는 경우에만 고려될 수 있으며, 단열 및 설치비용 절감을 위한 노력 등이 수반되어야 한다.

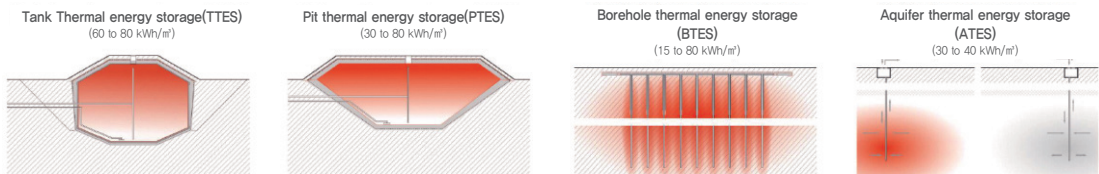
계간 축열 방식

전술한 바와 같이 계간 축열조는 외부로의 열손실이 가능한 적어야 하고 설치비용이 저렴해야 하므로, 1990년대부터 본격적으로 계간 축열시스템에 대한 실증연구를 추진해오고 있는 유럽에서는 여러 가지 축열 방식이 고려되어 왔다. 대표적인 계간 축열 방식으로는 그림 2와 같이 탱크 축열 방식(TTES), 피트 축열 방식(PTES), 보어홀 축열 방식(BTES), 대수층 축열 방식(ATES) 등이 있다.

탱크 축열 방식

(Tank thermal energy storage, TTES)

탱크 축열 방식은 지중 또는 지상에 설치되는 콘크리트(reinforced concrete) 축열조 방식이다. 뮌헨에 설치된 이 방식 축열조의 경우 집열기 면적 약 2,900 m²에 대응하는 5,700 m³ 규모로서, 약 30세대로 구성된 아파트 단지에서 필요로 하는 열에너지의 약 47%를 담당하고 있다. 축열조는 단열을 위한 foam glass 자갈층 상부에 콘크리트로 이루어졌으



[그림 2] 계간 축열시스템 방식

며 단열 두께는 바닥의 경우 30 cm, 그리고 상단 뚜껑 부위의 경우는 70 cm까지 증가하게 된다. 축열조 내부는 스테인리스 스틸 소재의 라이너(liner)가 있으며 이는 수증기 확산에 의한 외부 단열재 손상을 방지하기 위해서이다. 축열조 탱크 실린더 형상의 벽체 부위는 pre-stressed steel cable로 조립되어 있다.

탱크 내부 온수는 가압되지 않은 상태에서 약 98℃까지 가열될 수 있으며 내부가 가압이 이루어지고 스팀이 새지 않도록 하는 조건에서는 더 높은 온도까지 저장할 수 있다. 이러한 탱크 축열 방식의 축열 용량은 약 60~80 kWh/m³ 범위이고 다른 축열 방식에 비하여 가장 열손실이 적다. 체적 대비 표면적에 대한 기술적 최적화가 용이한 방식이라고 할 수 있으나, 지중수를 피해야 하고 설치비용이 상대적으로 높은 단점이 있다.

피트 축열 방식

(Pit thermal energy storage, PTES)

피트형 축열 방식은 인공 또는 자연의 웅덩이에 축열재를 채우고 뚜껑을 닫는 방식이라고 할 수 있다. 일반적으로 경사진 피트 벽체에 단열재가 설치되고 방수형 플라스틱 포일로 라이닝 처리가 이루어진다. 실제로는 지붕 설치가 곤란한 경우가 많은데, 덴마크의 사례에서처럼 지붕 덮개가 수면에 떨어진 상태로 스스로 지지하는 구조일 수도 있다. 피트형 축열조는 물을 사용하거나 자갈과 물의 혼합재로 채워지는 방식을 적용할 수 있다. 이때 자갈의 비율은 약 60% 내지 70% 정도이며 지붕의 설치가 용이하다는 장점은 있지만, 저장 열량이 약 30~50 kWh/m³ 정도로 탱크 방식에 비해서 적은 단점이 있다. 자갈을 이용하는 경우 축열조 상부의 공간을 다른 용도로 활용할 수도 있는데, 예를 들어 축열조 지상공간을 주차공간으로 이용할 수도 있다. 저장 가능한 최고 온도는 약 80℃이며, 역시

지중수가 없는 곳을 선택해야 한다.

보어홀 축열 방식

(Borehole thermal energy storage, BTES)

보어홀 축열 방식은 수분이 포화상태로 존재하는 토양에 열을 직접적으로 저장하는 방식이다. 지열원 히트펌프의 지열 열교환기와 같이 대용량 열교환기를 지중에 설치하기 위하여 U자형 튜브가 수직형 보어홀에 삽입된다. 축열 운전기간에는 유동 방향이 중앙부에서 축열 지점의 경계부위로 이루어져 높은 온도는 중앙부에서 나타나고 가장자리로 갈수록 온도는 낮아지도록 한다. 방열 운전기간에는 유동의 방향이 반대가 된다. 이 축열 방식에서는 가열된 지중의 체적이 축열 체적이 되며, 축열부의 상단부 표면은 단열되어야 한다.

보어홀 축열 방식에 적합한 지중 특성으로는 바위 또는 수분이 포화상태인 토양이 적합하며 지중수가 존재하지 않거나 거의 없는 상태여야 한다. 지중은 80℃ 정도까지 가열이 가능하지만 동일한 축열 열량 조건에서 탱크 축열 방식에 비하여 약 3배 내지 5배 정도 더 큰 체적을 필요로 하여, 보어홀 방식의 축열 용량은 15~30 kWh/m³ 범위라고 할 수 있다. 보어홀 방식이 에너지 및 경제적인 측면에서 유효하기 위해서는 최소한 20,000 m³ 이상의 체적을 갖는 경우여야 한다. 또한 축열을 시작한 후 약 3년 내지 5년 후부터 정상상태의 축열 및 방열이 가능하다는 점도 유의해야 한다.

대수층 축열 방식

(Aquifer thermal energy storage, ATES)

자연적으로 생성되어 있는 대수층(aquifer)을 이용하여 축열하는 방식이다. 축열 기간에는 차가운 지중수를 냉수층에서 뽑은 후에 가열시켜 온수층에 집어넣고, 방열 기간에는 유동 방향을 반대로 하여 온수층에서 온수를 뽑아내어 사용 후 온도가

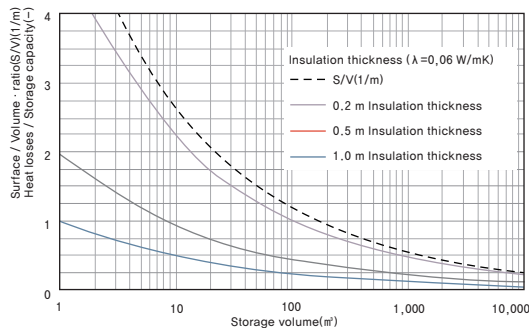
낮아지면 냉수층에 보내는 방식이다. 이와 같이 서로 다른 유동 방향으로 인해 냉수층과 온수층에는 펌프가 연결되어야 하고 배관망이 필요하게 된다.

이 축열 방식의 적용을 위한 적절한 조건으로는 기공성이 좋고 수력 전도성이 우수하며 지중수 유량이 적어야 하고, 상부와 하부가 방수성이 좋아야 한다는 점 등이다. 대수층이 아무 곳이나 존재하지는 않기 때문에 대수층 축열 방식을 적용하기 위해서는 사전에 광범위한 지중 조사가 필수적이다. 대수층 축열 방식은 보어홀 방식에 비하여 실현하기가 더 어려운 방식이며 유지관리와 사전조사에 세심한 주의가 필요하다. 그렇지만 조건이 잘 맞는 경우에는 투자회수기간이 짧은 장점이 있다.

계간 축열조의 용량

계간 축열을 적용하는 데 있어서 에너지나 비용 측면에서 의미가 있기 위해서는 필요한 최소한의 용량이 선정되어야 한다. 축열조에 저장되는 에너지는 축열조의 표면을 통하여 열손실이 발생하므로, 저장 열에너지에 대한 열손실의 비율을 변수로 하여 축열조 체적에 대한 표면적의 비를 정의할 수 있다. 그림 3에 축열조 용량에 따른 열손실 비율을 나타내었다.

그림에서 보면, 예를 들어 20 m³의 체적을 갖는



[그림 3] 계간 축열조 용량 대비 열손실 비율

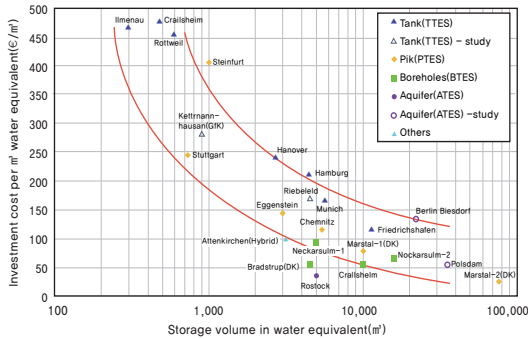
소규모 축열조의 체적에 대한 표면적의 비는 10,000 m³의 축열조에 비하면 8배 정도 크게 나타난다. 즉 열손실이 8배 더 크다는 의미가 된다. 그러므로 현열을 이용하는 계간 축열에 있어서 최소한 1,000 m³ 이상의 축열조가 되어야 에너지 측면에서 더 효율적이라고 할 수 있다.

계간 축열조는 대부분 지중에 건설되어 축열조에 접하는 지중은 단열의 역할을 할 수 있으며, 축열 방식에 따라서는 지중 축열효과도 가져올 수 있다. 또한 지중 압력이 축열조의 외면에 작용하여 축열조 내부의 수압을 지탱할 수 있는 효과도 있어 지상에 축열조를 설치하는 경우에 비하여 축열조 벽체의 두께를 더 얇게 할 수 있다. 그러므로 각 방식의 계간 축열시스템을 적용함에 있어서 지층 분석, 지중수의 위치, 지중의 전도 계수, 지중수의 유량과 방향 등에 대한 분석이 반드시 포함되어야 한다.

계간 축열조 설치비용

계간 축열시스템의 초기 설치비용은 방식에 따라 매우 다르게 나타난다. 또한 모든 경우에 가장 적합한 최적의 축열 방식이 존재한다고 할 수 없으며 모든 축열 방식이 모든 경우에 적용 가능한 것도 아니다. 그림 4는 유럽의 다년간 실증연구를 통하여 조사된 계간 축열시스템의 단위체적당 초기 설치비용을 나타낸 것이다. 축열조 체적이 증가할수록 초기 설치비용은 낮게 나타남을 알 수 있으며 최소 1,000 m³ 이상의 체적을 갖는 계간 축열조가 적절한 크기라고 할 수 있다. 이 범위 내에서 초기 설치비용은 단위체적당 40~250 유로로 나타나고 있다.

일반적으로 탱크 축열 방식의 비용이 가장 높게 나타나지만, 열역학적인 거동 특성이 우수하고 임의의 위치에 설치가 가능한 장점도 고려되어야 한다. 가장 적은 비용은 대수층 축열 방식과 보어홀 축



[그림 4] 계간 축열시스템의 단위체적당 설치비용

열 방식으로 나타났다. 그렇지만 이들 방식은 설치할 수 있는 지형적 여건이 까다롭고 추가적인 비용이 발생할 수 있는데, 예를 들면 버퍼 축열조가 설치될 수도 있으며 수처리 비용이 감안되어야 할 수도 있다. 계간 축열시스템의 경제성은 축열조 설치비용에 영향을 받을 뿐만 아니라 축열 방식과 연계된 전체 시스템의 열적 성능과도 깊은 관계가 있다. 따라서 적용하고자 하는 각각의 시스템은 개별적으로 분석이 이루어져야 한다.

계간 축열시스템에 대한 국외 연구

계간 축열시스템은 중대형 규모이기 때문에 건물군 또는 소규모 지역난방(구역 난방)과 연계되는 것이 일반적이다. 독일에서는 1990년대 중반부터 Solarthermie 2000, Solarthermie 2000 plus 등의

연속적인 태양열 기반 구역 난방 실증연구 사업을 진행했으며, 이를 통한 축적된 기술을 토대로 현재 다양한 유럽 다국가 실증연구 프로젝트에 참여하거나 주도적으로 추진하고 있다. 한편, 덴마크에서는 대규모 지역난방에 피트 방식의 계간 축열조를 연계하거나, 태양열 집열기를 직접 연계하는 방식의 지역난방이 대규모로 보급 중에 있다. 유럽에서는 현재 태양열 기반 계간 축열식 구역 난방 시스템 실증연구를 다수 수행하고 있으며, 대부분 여러 나라가 공동으로 참여하는 방식으로 진행되고 있다. 유럽에서 진행했던(또는 진행 중인) 대표적인 계간 축열식 태양열 시스템 프로젝트로는 다음과 같은 사례가 있다.

Sunstore4 프로젝트

100% 재생에너지로 지역난방을 공급하기 위한 실증연구 프로젝트로서 피트방식 계간 축열조를 이용하고 있으며, 덴마크 Marstal에서 수행하고 있다 (그림 5). 주요 구성요소는 15,000 m²의 태양열 집열시스템, 4 MW의 우드칩 보일러, 75,000 m³의 피트 방식 계간 축열조, 1.5 MW급 이산화탄소 냉매 히트 펌프, 750 kW급 ORC 발전플랜트 등이며 연간 열 생산량은 약 32,000 MWh로 추산되고 있다. 2011년부터 2012년 사이 기간에 대한 시스템 주요 구성요소별 성과치는 태양열 집열시스템의 효율 10% 향상, 태양열 집열기 설치비용의 11.7% 절감, 이산화



[그림 5] Marstal 태양열 시스템 실증단지

〈표 1〉 Sunstore4 프로젝트의 구성요소별 에너지생산량 추정 값

구성요소	에너지생산량 추정
태양열 집열시스템	13,400 MWh
히트펌프	1,300 MWh
우드칩 보일러	19,500 MWh
기존 기름 보일러	1,000 MWh
축열조 열손실	-3,200 MWh
전력 생산	3,250 MWh

탄소 냉매 히트펌프의 출구 온수 온도 78℃ 및 COP 3.1, ORC사이클 효율 19.5%(0.75 MW) 달성 등이다. 구성요소별 에너지 생산량은 표 1과 같다.

Einstein 프로젝트

프로젝트명은 Effective INtegration of Seasonal Thermal Energy storage systems IN existing buildings이다. 계간 축열시스템을 기존 건물에 효율적으로 연계하기 위한 실증연구 프로젝트로서 유럽 FP7지원 프로젝트이며, 스페인과 폴란드의 2 곳에 실증을 추진하고 있다.

SDHPlus 프로젝트

프로젝트명은 SDHplus-New business opportunities for solar district heating and cooling이며, 2012년 7월부터 2015년 6월까지 총예산 188만 유로로 수행하였다. 태양열을 이용한 지역 냉난방 시스템 기술의 비즈니스 기회 창출을 위한 연구과제로 추진되고 있다. SDHplus 프로젝트에서 조사한 유럽에 설치된 계간 축열식 열공급시스템은 2014년 기준 총 24곳으로 발표되어 있다.

Pitagoras 프로젝트

프로젝트명은 Sustainable urban Planning with Innovative and low energy Thermal And power Generation frOm Residual And renewable Sources이다. 산업공정에서의 미활용 열에너지와 태양열

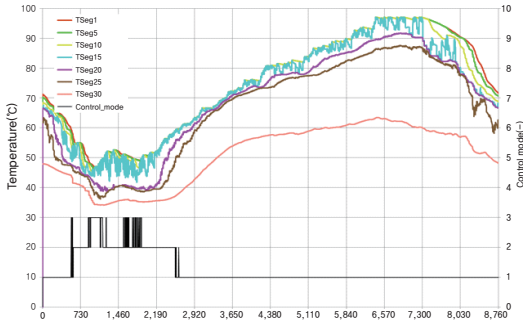
의 여름철 잉여 열을 계간 축열조에 저장하였다가 기존 지역난방에 연계하여 열에너지를 공급하는 방식에 대한 실증연구 프로젝트로서, 이탈리아와 오스트리아의 2곳에 실증을 추진하고 있다.

국내 관련 연구

계간 축열시스템에 대한 국내에서의 실증연구로는 1990년대 말 제주도에서 온실을 대상으로 약 600 m² 규모의 축열조를 이용한 사례가 있다. 그러나 계간 축열시스템이라고 하기에는 지나치게 작은 규모였고, 특히 부하 예측이 곤란한 온실을 대상으로 했기 때문에 유의미한 기술적 결과를 기대하기는 어려웠다.

2014년 범부처 사업으로 추진되기 시작한 친환경 에너지타운 사업의 일환으로 미래부에서는 충북혁신도시 내 진천 수질복원센터를 중심으로 시범사업을 진행하고 있는데, 이곳에서 태양열 기반 계간 축열식 구역 난방 시스템이 구축되고 있다. 약 1,600 m²의 태양열 집열시스템과 약 4,000 m³의 탱크방식 계간 축열조가 설치되는데, 이러한 설비와 히트펌프 등을 이용하여 인근 공공건물에 열에너지를 공급하려는 계획이다. 약 525 kW급의 히트펌프 열원으로는 지열원과 하수열원 또는 계간 축열조 내 저온 열원을 이용하게 된다.

각 공공건물로의 열공급은 계간 축열조로부터 직접 공급하는 운전, 그리고 계간 축열조 내 온수를 열원으로 보조 축열조 내 온수를 승온시켜 공급하는 운전, 그리고 저장된 열량이 모두 소진되는 경우 지열원 또는 하수 열원 히트펌프를 통해 열을 공급하는 운전방식 등이 고려되고 있다. 독일 Solites사의 도움을 받아 구성 시스템에 대한 상세 TRNSYS 시뮬레이션을 수행하였는데, 그림 6은 그 결과 중 하나로 계간 축열조 내 연간 온도 분포를 나타내고 있다.



[그림 6] 계간 축열조 내 연간 온도분포 시뮬레이션 결과

앞으로의 과제

중대규모 태양열 시스템과 연계되는 계간 축열조는 여름철 태양열 설비의 과열방지와 겨울철 열에너지 부족에 대응할 수 있는 효과적인 수단이다. 그러나 설치비용이 과다하며 열손실 방지를 위한 단열과 고온(~100°C) 축열에 따른 축열조의 구조적 안전성 등 고려되어야 할 사항이 많은 것이 사실이다. 또한 축열조 전부 또는 일부를 지중에 매설하는 경우가 대부분인데, 이때 발생할 수 있는 지중수에 의한 열손실 방지 등도 매우 중요한 사항이다. 국내 대부분의 지중에서는 항상 지하수가 존재하기 때문이다.

국내에서는 아직 본격적으로 계간 축열시스템 운전사례가 없다는 점은 보급에 큰 걸림돌인데, 다행히 미래부의 진천 친환경에너지타운 사업에서 관련된 실증연구를 추진 중에 있다. 이 사업의 주관기관인 한국에너지기술연구원에서 수행하는 태양열 기반 계간 축열식 구역 난방 시스템 실증연구는, 국내 계간 축열시스템과 관련된 매우 중요한 기술적 경험이라고 할 수 있을 것이다. 따라서 향후 이러한 실증연구 결과를 바탕으로 관련된 기술개발 및 실증연구를 지속한다면, 국내에서도 유럽에서와 마찬가지로 신재생에너지를 이용한 지역에너지 공급 사례가 점차 증가할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

우리나라가 COP21에서 제시한 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해서는 신재생에너지의 이용이 획기적으로 증가해야 한다는 점은 당연하다. 그러나 기존과 같이 개별 건물에 단일 신재생에너지 설비를 설치하는 것만으로는 이러한 목표를 달성하기 어렵다고 판단된다. 건물군 또는 소규모 지역 단위 에너지 수요를 바탕으로 다양한 신재생에너지 설비를 융복합 이용하는 것이 신재생에너지 이용률을 높이는 가장 유력한 방법일 것이며, 이 경우 계간 축열시스템의 이용이 불가피한 경우가 많을 것으로 짐작된다.

중대규모 신재생에너지 융복합 설비를 설치하는 경우 유지관리 체계를 갖출 수 있어 수요자의 불만을 해소할 수 있다. 각 신재생에너지 설비의 단점을 보완하고 시너지 효과를 나타낼 수 있는 기술적 노력이 결부된다면 실질적인 신재생에너지 이용률 향상도 기대할 수 있을 것이다.

계간 축열시스템의 효과적인 운용을 위한 설치 비용 절감, 안정성 향상, 효율적 운전방식 강구 등 다양한 분야에서의 노력이 필요한 시점이다.

참고문헌

1. 이동원 외, 2015, 친환경에너지타운 조성사업 마스터플랜 및 신재생에너지 하이브리드 최적화 시스템 구축 기본설계 연구, 보고서.
2. 허재혁, 2015, Overview of jincheon Eco-Friendly energy town project in korea, ISES Solar World Congress.
3. 유럽 도심재생 대체에너지 시스템 웹사이트, <http://www.resurgence.info/public/resurgence.asp/>.
4. 콘체르토 친환경 신재생도시 웹사이트, <http://concertoplus.eu/>.
5. Mangold, D., 2003, SOLARTHERMIE-2000 : 10 Years of research and development in large solar

- heating systems in germany.
6. Mangold, D., 2009, The next generations of seasonal thermal energy storage in Germany.
 7. Ochs, F., 2009, Modelling large-scale thermal energy stores, Thesis for Doctor of Engineering, Institute for thermodynamics and thermal engineering(ITW).
 8. Schmidt, T. et al., 2004, Central solar heating plants with seasonal storage in Germany, Solar Energy 76, pp. 165-174. 