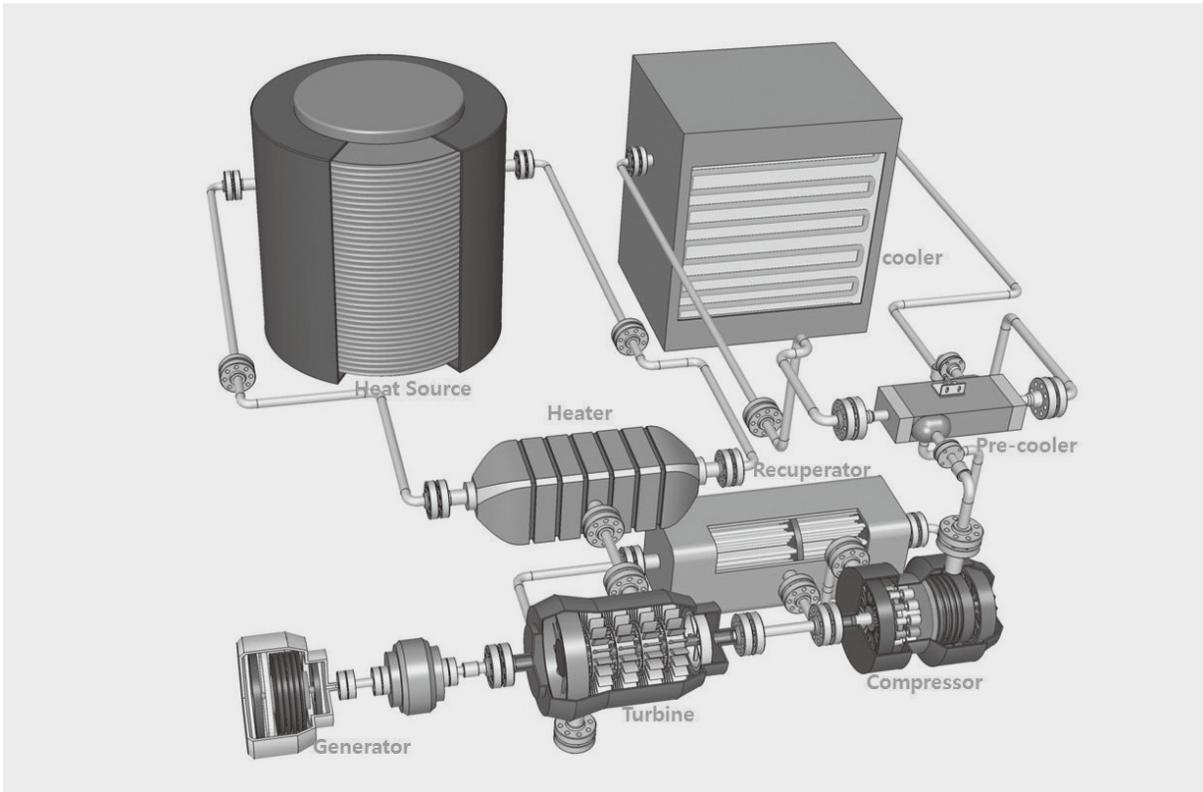


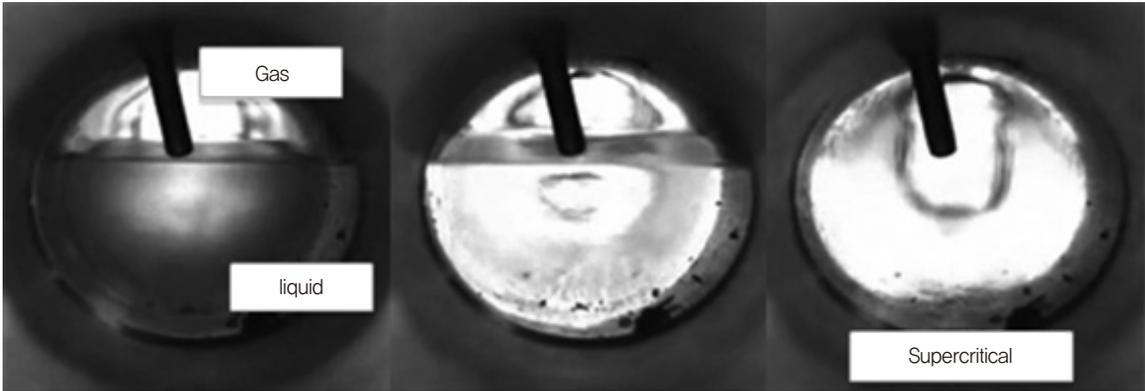
초임계 CO₂ 사이클을 이용한 발전기술 동향



염중섭
고등기술연구원 플랜트엔지니어링본부
수석연구원

1. 개황

초임계 CO₂를 이용한 발전기술은 임계조건 이상의 압력으로 압축된 이산화탄소(CO₂)를 고온으로 가열하여 터빈을 구동하는 가스 브레이튼 사이클 방식의 발전기술이다. 21세기 초반 미국 MIT는 차세대 원자력 발전기술을 개발하는 과정 중에 초임계 CO₂를 이용한 발전기술이 기존의 다른 원자력 발전 방식에 비해 효율이 높고 단순한 구성과 핵심기기의 소형화가 가능하다는 것을 이론적으로 증명하였다. 그 후 10여년이 지난 현재 미국을 중심으로 관련 기술의 실증연구가 진행되고 있다. 초임계 CO₂ 발전 사이클은 현재 사용되고 있는 대다수의 열원

[그림 1] CO₂의 상변화

(원자력, 화력, 태양열 등)에 적용할 수 있어 대형 발전플랜트는 물론 소규모 분산전원이나 해상 플랜트용 전원으로도 적용될 수 있다. 여기서 초임계(Supercritical) 조건이라고 함은 그림 1에서 보는 바와 같이 액체-기체의 상변화를 하는 일반적인 물질상태에서 특이점인 임계점(Critical point)을 넘는 온도·압력 조건을 말하며, 초임계 CO₂ 발전 사이클은 저압부의 온도와 압력이 32℃, 74 기압 이상으로 사이클의 모든 부분이 임계조건 이상에서 유지된다.

2. 현황

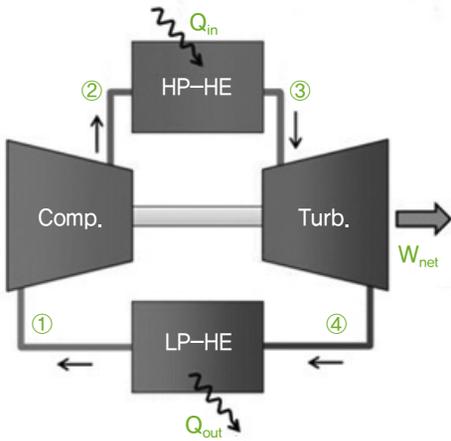
가. 기술개요

초임계 상태의 CO₂는 액체와 기체의 특성을 동시에 가지고 있으며 액체와 같은 작은 압축일과 기체와 같은 작은 유동저항이라는 장점을 모두 가지고 있다. 초임계 CO₂ 발전 사이클은 그림 2에 나타낸 것과 같이 기본적으로 4가지 핵심요소로 구성되며, 작동유체인 고압상태의 초임계 CO₂를 최고 온도까지 가열하는 히터(HP-HI), 고온 고압의 초임계 CO₂를 이용하여 발전기를 구동하기 위한 초임계 CO₂ 터빈(Turb), 저압의 초임계 CO₂ 온도를 32℃ 정도로 낮추는 쿨러(LP-HI), 저온 저압의 초임계 CO₂를 200 기압 이상으로 가압하는 초임계 CO₂ 압축기(Comp)로 구성된다. 초임계 CO₂ 발전

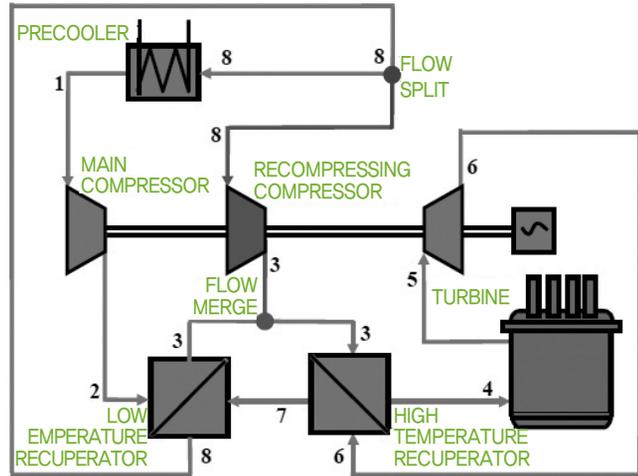
사이클의 히터(HP-HI)는 원자력발전에서 적용할 경우에는 1차 열교환기, 가스 복합발전의 경우에는 가스터빈 후단에 위치하는 배열회수증기발생기가 될 수 있으며, 석탄 화력발전에서 적용할 경우에는 보일러의 과열기나 재열기가 될 수 있다. 그림 3은 초임계 CO₂ 발전 사이클 중에서 대표적인 사이클인 재압축 초임계 CO₂ 사이클을 나타내고 있는데, 터빈에서 배출되는 초임계 CO₂의 약 60%의 초임계 CO₂는 쿨러에서 냉각된 후 주압축기에서 가압이 되지만 나머지 초임계 CO₂는 쿨러를 거치지 않고 재압축용 압축기에서 압축되어 고압부로 이송되며 이는 최대의 발전효율을 얻기 위하여 제안된 것이다. 그림 4는 액체금속을 1차 냉각재로 사용하는 원자로를 열원으로 하여 구성된 초임계 CO₂ 사이클 적용한 신개념 원자력 발전소를 나타내고 있다.

초임계 상태의 CO₂는 액체와 유사한 높은 밀도에 기체와 비슷한 점성을 나타내고 있어 초임계 CO₂ 사이클의 터빈과 압축기 및 열교환기의 크기를 소형화할 수 있으며 이로 인하여 초임계 CO₂ 발전플랜트의 건설공기 및 제작단가를 낮춰 높은 경제성을 확보할 수 있다.

미국 MIT의 연구결과를 보면 초임계 CO₂ 발전 사이클을 원자력 발전에 적용하여 최고온도 550℃에서 운전할 경우, 약 44% 수준의 순 발전효율을 보이는데 이는 유사한 조건의 기존 화력발전플랜트의 초임계 증기



[그림 2] 초임계 CO₂ 사이클 개략도



[그림 3] 재압축 초임계 CO₂ 사이클

사이클과 대비하여 13% 이상의 발전효율 향상을 나타내는 것이다. 또한 고온 고압조건에서 초임계 CO₂는 수증기에 비해서 기존 재료와의 양립성이 우수하므로 증기사이클 보다 더 높은 온도에서 터빈으로 공급될 수 있으며 이로부터 추가적인 발전 효율의 증가도 가능하다.

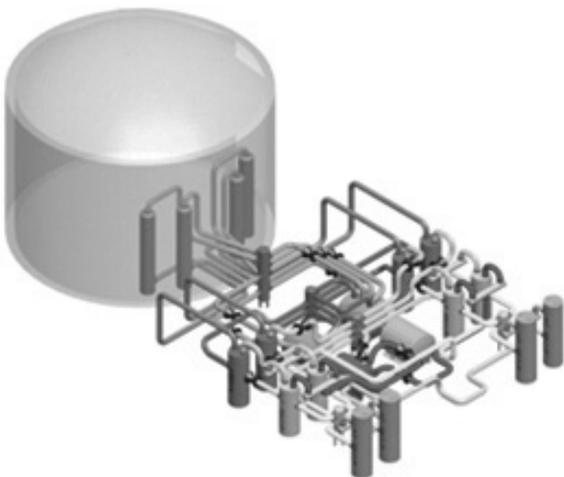
한편 초임계 CO₂ 발전 사이클은 전 발전 계통이 고온 고압으로 유지되어도 높은 에너지밀도로 인하여 향상된 열효율을 나타내므로 기존의 수냉식 쿨러는 물론이고 이와 더불어 공냉식 쿨러 방식의 적용도

가능하다는 장점이 있다. 즉, 초임계 CO₂ 발전 사이클은 CO₂의 임계점 근처에서의 물성 변화를 최대한 이용하여 △ 높은 열효율 △ 고출력 소형 시스템 구성 △ 복잡하지 않은 시스템 구성 △ 발전플랜트의 부지제한성 극복과 같은 특성을 가지고 있다.

나. 기술개발 동향

스위스 Sulzer Bros가 1948년 초임계 CO₂ 사이클의 우수성을 처음 제안한 후, 1967년 미국 Ernest G. Feher가 최초의 초임계 CO₂ 발전 사이클을 제안하고 150kWe급 발전시스템의 개념설계를 수행하였다. 이후 1970년대 초까지 소련의 Gokhstein와 Verhivker, 이탈리아의 Angelino 등에 의해 초임계 CO₂ 사이클에 대한 이론적인 열역학 성능이 정립되었다. 특히 1968년 Van Dievoet는 액체소든펙속로의 2차 계통 발전시스템으로 초임계 CO₂ 발전시스템을 제안하였으며, 이는 소듐이 가지는 산소 및 습기에 대한 높은 반응성을 제어하기 위해 기존 증기시스템 대신 초임계 CO₂ 발전시스템을 제안한 것이다.

이와 같은 다양한 선행 연구에도 불구하고 초임계 CO₂ 사이클은 장기간 연구개발이 중단되는 암흑기를 거친 후 21세기에 들어서면서 기적적으로 부활하여



[그림 4] 초임계 CO₂ 사이클을 적용한 신개념 원자력 발전소

주목을 받기 시작하였는데, 이에 따른 주요 기술적 원인으로서는 다음의 세 가지 요인이 조로 제시되고 있다.

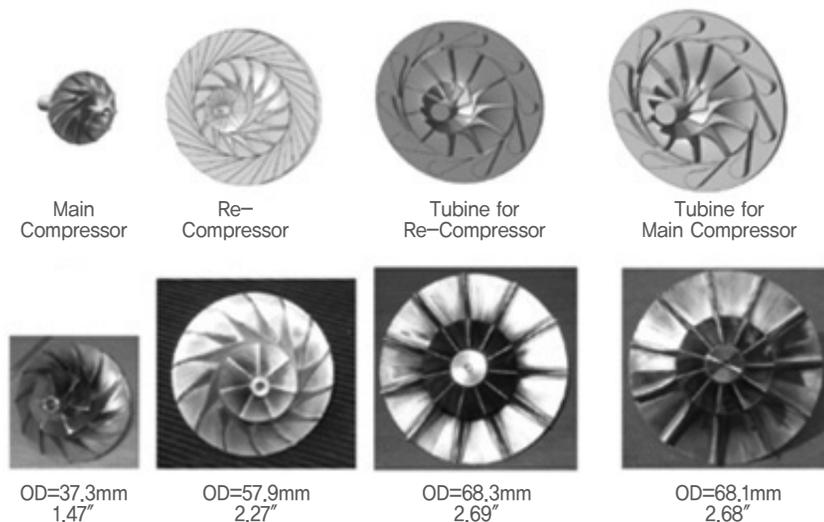
첫째, 고온 고압에 적합한 집적된 열교환기 제작기술이 확보되었다는 점이다. 초임계 CO₂ 사이클은 초임계 CO₂ 터빈 출구의 배기 열을 회수하기 위한 열교환기가 필수적인데, 기존의 Shell & Tube 혹은 Plate-fin형의 열교환기는 극한환경 및 터보기기 소형화에 적합한 집적화를 달성할 수가 없었다. 1990년대 후반 HEATRIC사의 확산접합을 이용한 인쇄기판형 열교환기(PCHE)가 상용화됨에 따라 초임계 CO₂ 사이클에 적합한 시스템 설계가 가능해졌다.

둘째, 고효율 발전 사이클의 필요성 때문이다. 현재 운전 중인 발전 사이클은 20세기 후반의 증기터빈 및 연소기를 포함한 형태의 가스터빈 분야에 대한 대규모의 투자와 기술개발이 집중된 결과이다. 이 분야의 기술발전은 이미 성숙단계에 들어섰으며, 증기터빈의 경우 증기온도 제한에 따른 열효율 한계를 극복하기 위한 기술개발이, 가스터빈의 경우 블레이드 재질에 따른 터빈입구 연소가스 온도 제한 등의 문제점을 극복하기 위한 연구개발이 진행 중이다. 초임계 CO₂ 발전 사이클은 원자력 발전의 헬륨 사이클이나

화력발전의 초초임계압 증기사이클(USC) 등과 같이 고효율 발전 사이클을 확보하기 위한 시도로서 다시 주목을 받고 있는 것이다.

셋째, 터보기기 및 플랜트 요소설비 분야의 기술발전이 이루어졌다는 점이다. 초임계 CO₂ 터빈은 200기압, 600℃(화력발전의 초임계 증기사이클 수준) 내외의 극한조건에서 200MWe급 용량의 초임계 CO₂ 터빈의 블레이드 직경이 1m 내외일 정도로 소형화가 가능하다. 그러나 그림 5에 나타낸 바와 같이 1MWe급 이하의 소규모 초임계 CO₂ 발전 플랜트의 실증을 위해서는 약 70,000rpm의 고속회전과 수 cm 수준의 터빈 블레이드 직경 및 수백 μm의 틱 간극 등 매우 가혹한 운전 및 설계조건이 요구된다. 즉 초정밀 가공기술 및 플랜트 운전 및 제어기술의 발전에 의해 21세기에 들어서 초임계 CO₂ 발전 사이클의 개념설계 및 실증이 가능해진 것이다.

특히 1997년 체코기술대학교의 재압축사이클 연구, 2001년 일본 동경공업대의 부분 응축사이클 및 부식성 재료 연구, 2001년 미국 아이다호 및 아르곤 국립연구소의 액체금속고속로에 적합한 사이클 연구 등 일련의 연구로부터 초임계 CO₂ 사이클에 대한 관

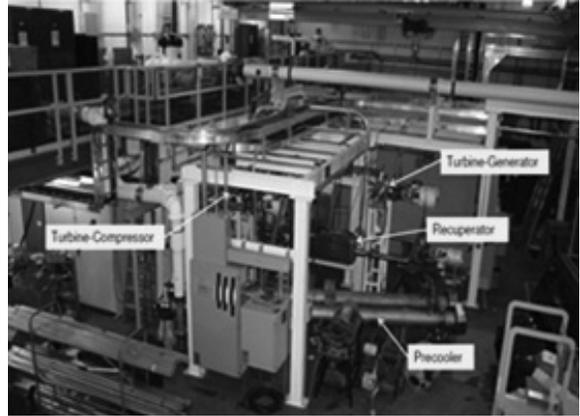


[그림 5] 1MWe급 초임계 CO₂용 소형 터빈 및 압축기

심이 재점화 되었다. 결정적인 초임계 CO₂ 사이클의 부활은 2004년 미국 MIT의 Dostal 박사가 학위논문으로 초임계 CO₂ 사이클의 무한한 가능성을 발표한 것이 계기가 되었다. 이후 급속히 미국 내에 초임계 CO₂ 발전 사이클 전문가 집단이 형성되었고, 미국 에너지성(DOE)의 전폭적인 연구개발에 대한 지원이 이루어졌다.

미국의 샌디아 국가연구소는 세계 최초로 초임계 CO₂ 발전 사이클의 핵심 요소기인 터보기계와 열교환기를 결합하고 300kWe급 실험 장치를 구성하여 전력생산 시험을 진행하였다. 이와 함께 Echogen사와 10MWe급 실증 설비를 만드는 사업을 진행하고 있다.

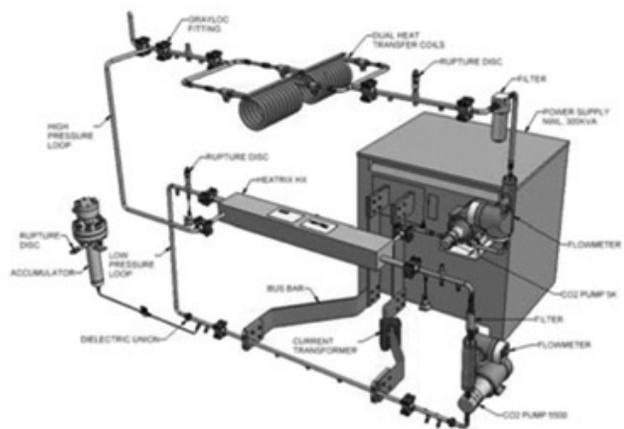
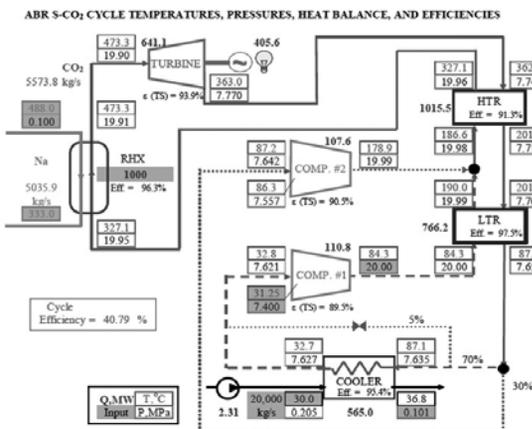
샌디아 국가연구소는 Barber & Nichols 사와 함께 세계 최초로 임계점 근처에서의 압축에 대한 실험을 하였다. 한편 미 해군 원자력연구소(KAPL)는 샌디아 국가연구소에서 개발한 초임계 CO₂ 발전사이클의 소형 경수로 적용성을 실험할 수 있는 장치를 그림 6과 같이 제작하여 선박추진용 원자로에 초점을 맞춰 연구를 진행하고 있다. KAPL은 경수로 노심 출구 온도에 근접한 열원을 확보하기 위해 유기용매를 가열하여 중간 열교환기를 통해 열교환을 하는 간접 가열 발전방식을 채택하였다.



[그림 6] KAPL 실험장치

미국 아르곤 국립연구소는 초임계 CO₂ 발전기술 중에서도 특히 소듐냉각고속로에 대한 적용성을 주로 연구하고 있으며, 그림 7과 같이 소듐냉각고속로에 적합한 초임계 CO₂ 발전 사이클의 레이아웃에 대한 연구와 소듐냉각고속로와 초임계 CO₂ 발전 사이클의 연계에 대한 연구, 그리고 초임계 CO₂ 발전 사이클에 적합한 열교환기에 대한 연구 등을 진행하고 있다.

한편 미국 DOE의 국가신재생에너지연구소는 10MWe급 태양열 발전용 초임계 CO₂ 발전 사이클의 실증을 위한 Sunshot 프로그램을 진행하고 있다.



[그림 7] 미국 아르곤 국립연구소의 시스템 설계 및 실험장치

미국 NetPower사는 Shaw group, Exelon사, 일본 Toshiba사 등에서 투자를 받아 25MWe급 천연가스 발전시스템을 위해 초임계 CO₂ 발전 사이클 기술을 적용하고 있으며, 후속으로 250MWe급 초임계 CO₂ 발전 플랜트를 구축하는 프로젝트도 준비 중에 있다. 미국 Pratt & Whitney Rocketdyne사는 초임계 CO₂ 사이클을 이용한 CO₂ 무배출형 석탄화력 발전플랜트의 개념설계를 진행하였다. 한편 미국 GE사는 초임계 CO₂ 발전 사이클을 적용한 소형 가스터빈 시스템을 개발하고 있으며, Echogen사와 함께 폐열회수용 초임계 CO₂ 발전 모듈 제품을 시장에 내놓았다.

한국원자력연구원은 원자력 관련 국제협력프로그램의 일환으로 차세대 원자로 적용을 위한 초임계 CO₂ 발전시스템 연구에 참여하고 있다. 소듐냉각고속로와 연계하여 에너지전환계통으로서 초임계 CO₂ 발전 사이클의 계통을 구성하였고, 주요 기기의 크기 및 형태 등의 선정을 위한 성능분석 및 설계를 위한 코드 개발과 유동해석을 실시하였다. 그리고 한국원자력연구원은 300kWe급 소용량 초임계 CO₂ 발전시스템 실험설비를 구축 중에 있으며 올해 안에 전력생산 실험을 실시할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 전망

초임계 CO₂ 발전 사이클은 기존 발전방식의 주류를 이루는 증기사이클을 대체할 수 있고 화력과 원자력은 물론 신재생에너지 등 다양한 고온 열원에 적용이 가능한 범용적인 사이클로 인식되고 있어 발전기술의 패러다임을 바꿀 수 있는 잠재력과 파괴력이 큰 기술이다. 초임계 증기사이클 조건의 온도와 압력에서 석탄 화력 발전플랜트의 발전효율 향상이 가능하며 원자력 발전소의 지리적 한계를 공랭식 쿨러 적용으로 극복할 수도 있고, 폐열회수를 통해 기존 가스복합발전시스템의 효율을 향상시킬 수도 있다. 또한 태양열 발전단가를 기저부하 수준으로 낮출 수 있을 것으로 기대된다.

국내외의 기술현황을 분석해 보면 초임계 CO₂ 발전 사이클은 기술개발 및 시장 진입기로 분류할 수 있다. 지금까지 전 세계 발전플랜트 시장은 발전 기술의 보수성으로 인하여 승자독식의 논리가 지배하고 있으므로 시장 진입기 상태인 초임계 CO₂ 발전 사이클에 대한 신속한 국내 기술개발 및 대용량 실증시험을 통하여 시장 선점에 필수적인 실적(Track record)을 확보하는 것이 반드시 필요하다. 