

초초임계압(USC) 화력발전기술 개발[§]

장성호^{*†} · 김범수^{*} · 민택기^{**}

* 한전 전력연구원, **충남대학교 기계공학과

Development of Ultra-Supercritical (USC) Power Plant

Sung Ho Chang^{*†}, Bum Soo Kim^{*} and Taek Ki Min^{**}

* Power Generation Laboratory, KEPCO Research Institute

** School of Mechanical Engineering, Chung Nam Nat'l Univ.

(Received June 7, 2011; Revised November 27, 2011; Accepted December 1, 2011)

Key Words: Ultra Super Critical(초초임계압), Thermal Power Generation(화력발전), Retrofit(성능개선), CO₂(이산화탄소), Generation Efficiency(발전효율)

초록: 화력발전은 지구온난화의 주범으로 인식되고 있지만, 산업화와 지속적인 국가경제성장에 의한 전력소요 증가는 에너지사용을 증대시켜 에너지 자원의 부족을 초래하고 환경오염물질의 과다배출로 지구환경문제를 유발하고 있다. 에너지원의 확보를 위한 국가와 지역간 경쟁이 심화되어 새로운 갈등의 원인이 되고 있으며, 지구온난화와 에너지 문제를 해결하기 위해 교토의정서 등 기후변화 협약이 체결되고 화석에너지에 재생에너지로의 에너지원의 전환과 다양화가 추진되고 있지만, 각국의 이해관계와 기술부족으로 완벽한 해결책을 제시하지 못하는 상황이다. 에너지 부족을 해소하고 CO₂ 배출량을 저감할 수 있는 가장 효과적인 방안으로 기존 화력발전 효율을 향상시킨 고효율 발전과 Near Zero Emission 수준의 저공해 기술이 결합된 고효율 석탄화력발전시스템을 개발현황을 논하고자 한다.

Abstract: For environmental reasons and because of our limited energy resources, high-efficiency power generation technology will be necessary in the future. Ultra-supercritical (USC) power generation technology is the key to managing the greenhouse gas problems and energy resource problems discussed in the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Other countries and manufacturers are trying to build commercial power plants. In this paper, an efficient method of achieving near-zero emission operation of a high-efficiency fossil power plant using USC power generation is discussed. Development of USC power generation in Korea has been supported by the Korean government in two phases: Phase I was USC key technology development from 2002 to 2008, and Phase II is USC development and technology optimization from 2010 to 2017.

1. 서론

석탄화력발전은 화석연료인 석탄을 주연료로 사용하기 때문에 지구온난화의 주범으로 인식되고 있지만, 산업화와 지속적인 국가경제성장에 의한 전력수요의 증가는 에너지 사용을 증대시켜 에너지 자원의 부족을 초래하고 환경오염물질의 과다

배출로 지구환경문제를 유발하는 주범으로 인식되고 있다. 국내의 경우 산업고도화와 소득증대에 의한 전력소비의 증가세로 발전분야에서 CO₂ 배출량은 현재의 29%에서 2020년에는 34%로 오히려 5%정도 증가할 것으로 전망되고 있다.

지구온난화와 에너지 부족자원의 한계로 인한 3E 정책 (Environment Protection, Energy Security, Economy Growth)의 강화는 에너지 가격의 폭등을 유발하고 에너지 강국의 자원무기화로 에너지원의 확보를 위한 국가간/지역간 경쟁이 심화되어 새로운 갈등의 원인이 되고 있다. 지구온난화와 에너지 문제를 해결하기 위해 교토의정서 등 기후변화 협약이 체결되고 화석에너지에서 재생에너지(풍력,

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 에너지 및 동력공학부분
춘계학술대회(2011. 6. 2., 한국발전교육원) 발표논문임

† Corresponding Author, jrchang@kepri.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

연료전지, 바이오매스 등)로의 에너지원의 전환과 다양화가 추진되고 있지만, 각국의 이해관계와 기술 부족으로 완벽한 해결책을 제시하지 못하는 상황이다.

에너지 부족을 해소하고 CO₂ 배출량을 저감할 수 있는 가장 효과적인 방안중 하나는 기존 석탄 화력발전의 효율을 향상시킨 고효율 발전과 Near Zero Emission 수준의 저공해 기술이 결합된 고효율 석탄화력발전시스템을 개발하는 것이다. 이를 위해 유럽과 일본 등 발전 선진국에서는 1980 년대 초부터 기술개발을 시작해 1990 년대에 대용량/ 고효율/친환경 발전시스템인 600℃급 초초임계압(USC : Ultra Super Critical, 이하 USC로 표기) 석탄 화력발전소를 건설해 상업운전하고 있다.

국내 역시 유가 급등으로 인한 에너지 위기를

극복하고 선진국가로 도약하기 위해서는 안정적인 전력공급시스템의 구축과 국가 경제를 견인할 신 성장 동력의 창출이 반드시 필요하고, 국내 CO₂ 총배출량의 실질적 감소를 위해서는 화력발전에서 CO₂ 배출량을 저감할 수 있는 방안이 절실하게 요구되며, 현재의 기술력과 경제성을 감안할 때 가장 효율적인 대응수단은 기존 석탄화력 대비 석탄사용량을 줄일 수 있는 고효율 초초임계압(USC) 화력발전기술을 채택하는 것이다.

고효율 석탄화력기술의 발전용량을 비교하면, 2000 년 이후 신규로 건설된 초초임계압(USC) 화력발전소는 1000MW 급이 주종인데 반해, 가스화 복합발전(IGCC : Integrated Gas Combined Cycle)과 순환 유동층(CFB : Circulating Fluidized Bed) 발전의 경우 300MW 급의 중소형 용량으로 USC 가 경쟁 기술관계인 IGCC 와 CFB 에 비해 발전용량 측면에서 유리하다.

2002 년부터 2008 년 까지 6 년에 걸쳐 정부지원 하에 용량 1000MW, 증기온도 610/621℃급 USC 화력발전 기술개발이 수행되었으며, 후속 상용화를 통해 고부가가치의 중후장대한 발전플랜트설비 산업의 Leap Jump 를 통해 국가성장동력을 담당할 것으로 기대되고 있다.

2. 초초임계압 화력발전 개발현황

2.1 국내 초초임계압 화력발전 개발현황

일본과 유럽은 1980 년대부터 600℃급 USC 기술개발을 정부주도로 실시해 1990 년대 후반과 2000 년대 초반 상용화에 성공하였지만, 국내의 경우 2002 년부터 기술개발을 시작했고 2017 년에 실증사업을 완료할 예정이기 때문에 기술개발과 상용화 시기가 약 20 년 이상의 격차를 나타내고 있다. 상업운전중인 국내 화력발전소는 500MW, 538℃급 표준석탄화력 22 기와 566℃급 당진 5 호기를 포함한 후속 14 호기가 가동 중에 있지만, 외국의 가동 중인 발전소와 비교하면, 발전용량과 증기조건에서 모두 뒤쳐져 있으며, 일본은 1998 년에 Misumi 1 호기를 유럽은 2000 년대 초반, 중국은 2008 년부터 600℃급 USC 화력발전소를 운영하고 있지만, 국내의 경우 현재 600℃ USC 화력발전 가동실적은 없으며, 적용 시점은 2015 년 이후가 될 것으로 예상된다.

- 국내 : 당진 #5, 500MW, 246kg/cm², 566/593℃, 상업운전 2005 년

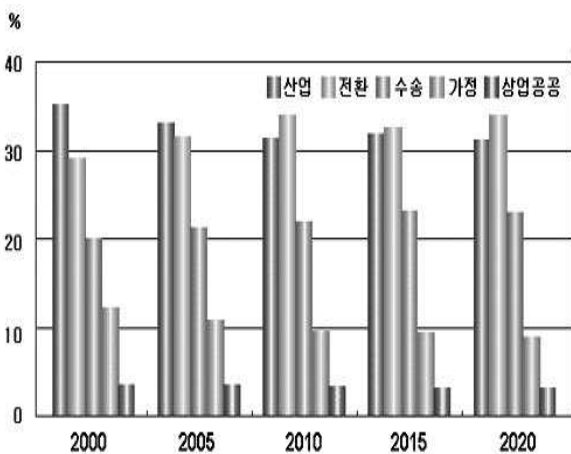


Fig. 1 Greenhouse gases emission at energy resources (KIEE)

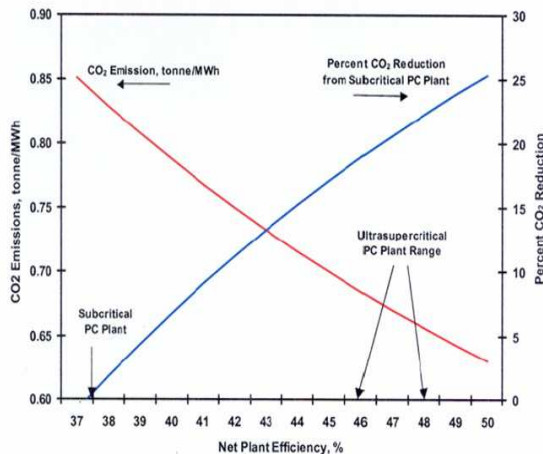


Fig. 2 CO₂ reduction effect by increasing generation efficiency (EPRI)

- 일본 : Tachibanawan #1, 1050MW, 256kg/cm², 600/610℃, 상업운전 2001년
- 유럽 : Niederaussem K, 1000MW, 278kg/cm², 580/600℃, 상업운전 2002년
- 중국 : Yuhuan, 1000MW, 268kg/cm², 600/600℃, 상업운전 2008년

1000MW USC 석탄화력의 선진국 기술수준을 100으로 볼 때 국내기술수준은 상용화 이전의 설계기술만 개발한 2010년 현재 약 87% 수준에 해당한다. 하지만 실증플랜트 건설 이후 2015년의 기술수준은 기자재 제작 및 설치기술이 100%로 선진국과 대등한 수준에 도달하게 되며, 최종적으로 2017년 실증플랜트의 시운전/운전과 1차 계획 예방정비 후 획득한 설비운영 data를 주기기 설계에 feed back 해서 설계기술을 최적화하면 설계기술 수준도 선진국 대비 약 96%수준에 도달할 수 있을 것으로 예상된다.

현재 상업운전 중인 선진국의 1000MW, 600℃급 USC 화력발전소의 발전효율이 43%정도 인데 반해, 국내 USC 실증플랜트의 발전효율은 선진국 수준을 능가하는 44%이상의 발전효율을 달성할 수 있기 때문에 설비 성능 측면에서도 한국형 1000MW USC 화력발전의 기술경쟁력은 높은 것으로 평가되고 있다.

Table 1 Technology level of 1000MW USC

분야		표준화력 (500MW)	USC 발전소	
			2010	2017
발전소 종합설계 (A/E)		100	90	99
보일러	설계	100	90	98
	제작	100	90	100
터빈	설계	98	85	95
	제작	100	85	100
발전기	설계	98	85	95
	제작	100	95	100
I & C	설계	95	82	90
	제작	100	90	100
부품.소재	터빈/발전기	97	90	100
	보일러	100	90	100

2.2 일본의 초초임계압 화력발전 개발현황

일본은 오일쇼크 이후 에너지 위기 관리를 위해 1980년부터 정부 통산성과 EPDC 주도로 600℃급 USC 기술개발을 Phase 1과 Phase 2로 구분해 1980년부터 2001년까지 수행했으며, 각 단계별 목표가 완료되는 시점에 개발기술을 검증하기 위해 대상발전소에 적용해 상용화하는 RD&D (Research, Development & Demonstration) 전략을 적용해, 성능과 신뢰성 입증에 성공함으로써 600℃급 USC 석탄화력발전 기술과 시장을 선도하는 리더가 되었다. 최초로 1000MW, 600/600℃의 증기조건을 가진 Misumi #1 호기를 1998년부터 세계 최고의 증기조건 (600MW, 277kg/cm², 605/623℃)이 적용된 Isogo New 2 호기를 2009년부터 상업운전하고 있다.

일본의 USC 플랜트 설치현황은 전체 석탄화력발전의 절반에 가까운 약 46%를 점하고 있으며, USC 기술 상용화 이후 800MW급 이상의 대용량 발전소가 대부분 신규 건설되고 있는 추세이며,

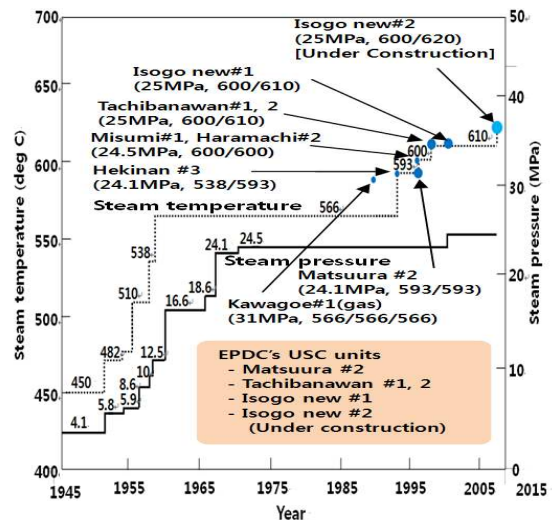


Fig. 3 Steam condition trends of USC in Japan (coal-fired power plants upgrades by EPDC)

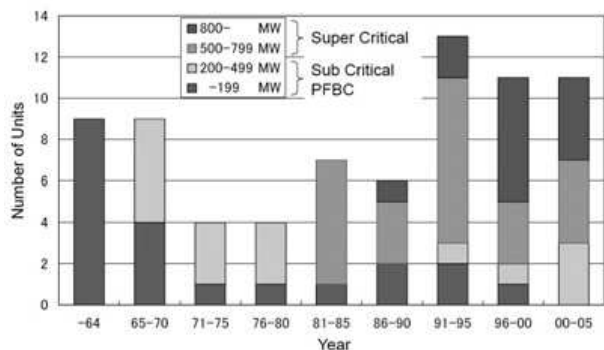


Fig. 4 USC power plants in Japan (clean coal & G8 cleaner fossil fuels workshop)

개발한 USC 기술을 기존 화력발전설비의 성능개선(Retrofit)에 적극 활용해 발전소의 녹색화율을 15%에서 20%로 증가시켰고 각종 공해방지 시설을 보강한 청정화력발전소로 재탄생시켜 에너지 효율 향상과 환경 개선의 두 가지 목적을 동시에 달성하였다.

2.3 유럽의 초초임계압 화력발전 개발현황

유럽은 34 개국이 공동 참여하는 과학기술연구에 관한 국제협력 프로그램인 COST 프로그램을 기반으로 1983년부터 각 Task 별로 Working group을 구성해 600℃급 USC 화력발전시스템 기술개발을 수행하였으며, 참여국들이 자유롭게 기술개발 결과물을 공동사용할 수 있도록 기술보호를 위한 별도의 지적재산권 출원은 하지 않았다.

유럽의 USC 기술개발 시작은 일본과 동일하게 고온용 페라이트계 내열재료의 개발을 목표로 COST 501 프로그램을 통해 개발한 내열재료를 1992년 Vestkraft 3 호기 등에 실증하였으며, COST 522 프로그램을 1997년부터 2003년까지 620℃용 터빈재료인 COST FB2 등을 개발해 2011년 준공을 목표로 독일에 건설 중인 620℃급 USC 화력발전소인 Datteln 4와 Karlsruhe 8 호기에 적용하였다.

후속으로 650℃급 플랜트에 적용 가능한 강재와 용접기술 등에 대한 장기간 검증시험을 목표로 COST 536 프로그램(Alloy Development for Critical Components of Environmentally Friendly Power Plant)과 고온 플랜트 수명연장을 위해 발전기기의 상태 모니터링 및 고정밀도의 수명 평가법 개발을 목표로 하는 COST 538 프로그램(High Temperature Plant Lifetime Extension)을 총개발비 1,300 만€와 1,000 만€를 투입해 계속해서 추진하고 있다.

2.4 미국의 초초임계압 화력발전 개발현황

1956년에 Philo No.6와 1962년에 Eddystone No.1이 600℃ 이상의 USC 조건으로 상업운전을 개시했지만, 고온고압부에 적용한 오스테나이트계 재료의 열피로특성 저하로 발전정지의 증가 등 운영상의 어려움을 겪었다.

미국 내 USC 기술개발은 EPRI의 주도로 진행되었으며, 1978년 이후 발전소 신뢰성 저하 없이 효율을 향상시킬 수 있는 2단재열방식의 증기조건 제안과 1986년부터 2단 재열방식의 터빈 설계 및 재료개발을 위하여 GE, Toshiba, GEC Alstom, MAN 컨소시엄과 EPRI 간의 연구계약(RP1403-15) 체결, 1991~1995년에 EPRI, Sargent & Lundy,

SEPRIL Service 공동 주관으로 발전효율 44%(LHV 기준)의 SOAPP (State of the Art Power Plant) 프로젝트를 수행했지만, 미국 내 USC 석탄화력기술을 적용한 화력발전플랜트의 건설 및 운전실적은 보유하고 있지 않다. 미국은 USC 석탄화력보다 DOE 주관으로 석탄화력발전보다 Gas Turbine 등 복합화력, IGCC 기술과 CCT 개발에 주력한 결과, 600℃급 USC 석탄화력발전분야의 기술수준은 일본과 유럽에 비해 뒤쳐져 있고 화력분야의 기술만회를 위해 UltraGen 프로그램을 추진하고 있다.

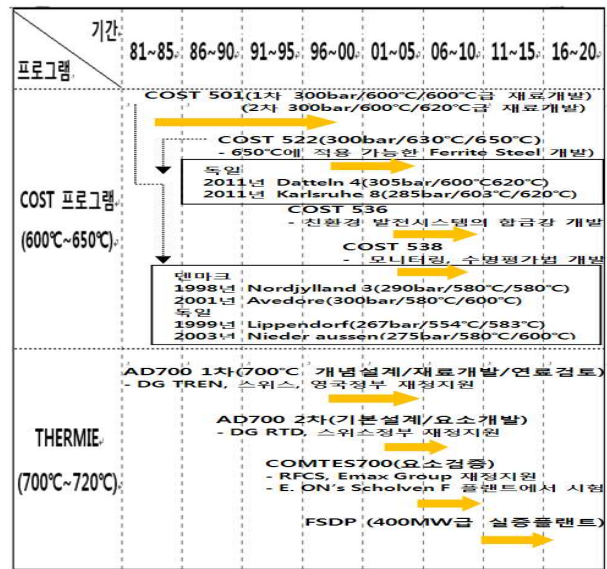


Fig. 5 USC power plants development program of EU

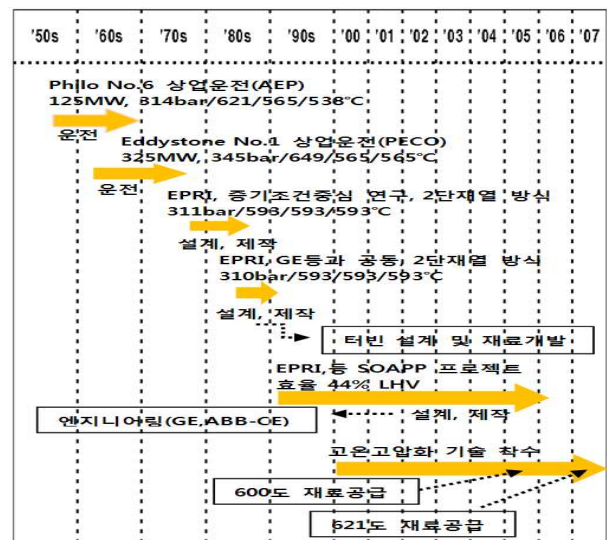


Fig. 6 History of USC development in USA(KISTI)

Table 2 UltraGen program of USA

Programs	UltraGen1	UltraGen2	UltraGen3
기간	현재~2015	2016~2020	2021~2025
주요 연구 사업 내용	- 605℃급 - Advanced Emission Control - 20~50% CO ₂ capture	- 700℃급 - Near Zero Emission Control - 90% CO ₂ capture - 760℃급 Test Facility 운전	- 760℃급 - Near Zero Emission Control - Integrated 90% CO ₂ capture

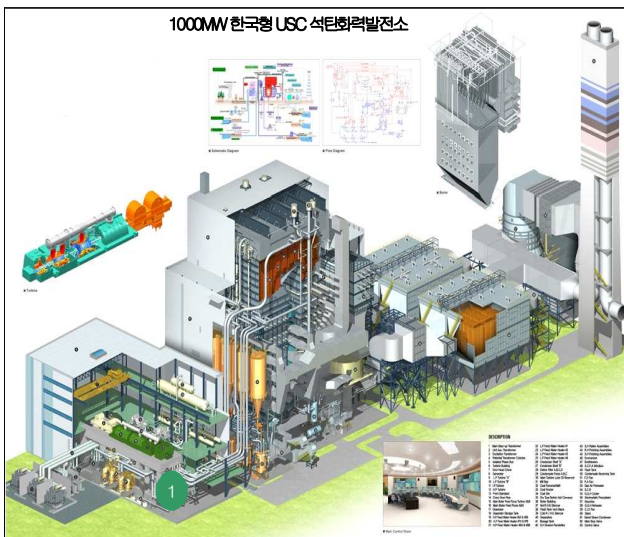


Fig. 7 Korea type USC power plant

3. 결론

실증사업을 통해 상용화하고자 하는 USC 화력 발전 플랜트는 1000MW, 265kg/cm², 610/621℃의 격상된 발전용량과 증기조건을 채택하여 기존 국내 주력기종인 초임계압 표준석탄화력 대비 발전용량은 100%, 발전효율은 5% 이상 개선함으로써 동일 석탄량에서 단위전력 생산량을 증대시키고, 발전소 건설 부지의 이용율을 극대화시킴으로써, 건설비 절감과 발전원가의 개선을 통한 경제성을 확보하고 CO₂ 배출 절감을 통해 지구온난화에 따른 기후변화 협약에 대응할 수 있는 차세대 화력

발전기술이다.

USC 화력발전플랜트기술을 RAM과 실적을 확보하면 시장요구의 맞춤형용량과 증기조건에 첨단 발전소를 공급할 수 있기 때문에, 화력발전기술의 기술자립을 이룰 뿐만 아니라 세계 최고의 경쟁력을 확보하고 있는 건설과 제작, 설치 및 운영기술과 결합할 경우 [소재공급-설계-제작-설치-운영]까지 일관공급체제가 완성됨으로써 해외 발전시장을 선도할 수 있는 계기가 될 수 있다.

화력발전플랜트기술은 전방산업인 대형터빈부품 제작과 에너지 소재의 국산화와 동반성장으로, 소재산업을 세계 최고 수준으로 육성하고자 하는 정부의 WPM 프로그램 활성화에도 기여하며, 후방산업인 전력/발전회사에 대용량 고효율 설비의 설치, 설비운영과 관리기술 등 직접적인 기술 향상효과가 있다. 또한, 기술집적도가 높고 전기/전자와 제어기술을 기반으로 한 IT 기술, 탈황, 탈질, 전기집진기와 같은 환경설비, 재처리 설비 등 다양한 산업군의 기술과 융복합성을 지니고 있기 때문에 관련산업간의 연계 성장과 동시에 기술 파급효과가 매우 큰 산업 분야이다.

USC 발전플랜트 관련 기술을 국내에서 확보할 경우 외국 선진사의 플랜트 공급가격 담합을 방지할 수 있어 초기 건설 투자비와 플랜트 운영 유지/보수비용을 경감해 발전단가가 절감으로 제조업 전반의 경쟁력 향상에 기여하게 된다.

해외수출과 관련해 플랜트 산업은 2009년 400억불 수주를 달성해 세계 7위의 규모이지만, 핵심 기자재의 국산화율이 낮고 인력의 해외 의존도가 높아 외화가득율은 선진국의 40~45%에 비해 현저하게 낮은 30%대에 불과한 실정이다. 하지만 본 기술개발을 통해 원천기술을 확보하고 부품소재의 국산화를 통해 기자재의 국산화율을 높이면, 플랜트 수주증가에 따른 국내 플랜트 설비 제작사의 실질이익 확대를 통해 플랜트 산업의 안정적인 고용을 유지하고 나아가 신규 일자리 창출 등으로 국익에 기여할 수 있다.

석유, LNG, 석탄 및 우라늄 등 주요 1차에너지원의 수입의존도가 2007년의 경우 96.5%, 수입금액으로는 약 950억\$로 급증하고 있어, 향후에도 국내산업이 선진국처럼 서비스업 중심의 산업구조로 중심축이 재편하지 않는 이상 에너지원의 해외 수입의존도는 개선되지 않을 전망이다.

따라서 풍부한 매장량, 지정학적으로 넓은 매장 분포, 타에너지원에 비해 상대적으로 저렴한 가격으로 안정적이고 수급이 용이한 에너지원으로 현

재 전세계 발전량의 40% 이상을 담당하며 연간 5% 이상의 시장성장율을 보이고 있는 석탄화력발전플랜트 기술의 확보는 국가 에너지 정책목표와 지속성장을 달성하기 위해 역점을 들여 확보해야 할 필수기술이다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제 성과입니다.

참고문헌

- (1) Matsuka, F., 2008, "Coal-Fired Power Plants Upgrades by EPDC," Electric Power Development Co., Japan
- (2) Hashimoto, T., et al, 2008, "Latest Technology of Highly Efficient Coal-Fired Thermal Power Plants and Future Prospects," *MHI Technical Review*, Vol.45 No.1, Japan
- (3) Viswanathan, R., 2007, "Steam Turbine Materials for Ultra Super Critical Coal Power Plants," *EPRI*, USA