

국내외 에너지정세와 석탄에너지

서울대 에너지시스템공학부

조희찬

에너지의 의미

ENERGEIA

- 그리스의 철학적 용어, 아리스토텔레스
- 사람의 마음을 감동시켜 심적 변화를 일으키게 하는 힘

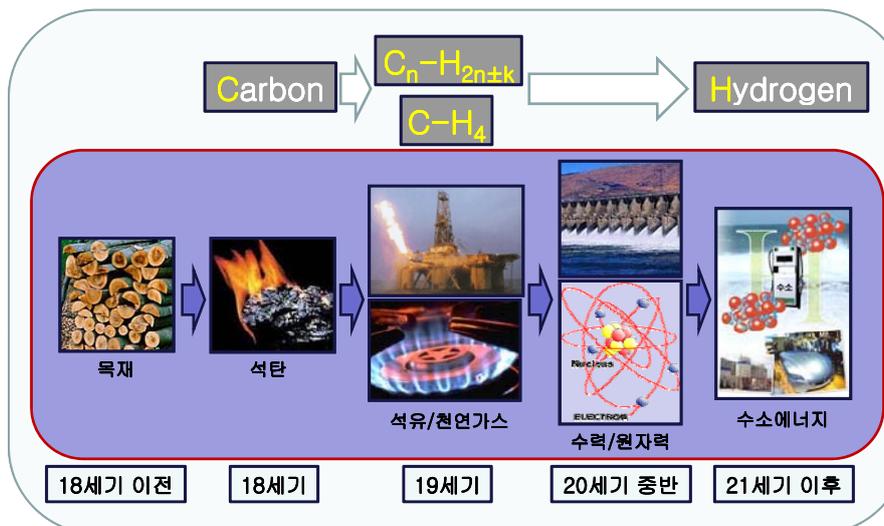
ENERGY

- 물체가 지니고 있는 물리적인 일을 할 수 있는 능력

에너지의 형태

- 물체가 가지고 있는 기계적 에너지
 - 운동에너지
 - 위치에너지
- 내부에너지 (온도, 압력)
- 화학에너지, 핵에너지
- 전, 자기에너지
- 에너지형태의 변환
화학에너지 → 열 → 기계 → 전기
- 에너지원
 - 고갈성: 화석연료(석유, 석탄, 천연가스), 우라늄
 - 비고갈성: 풍력, 태양력, 수력, 조력, Bio-Energy

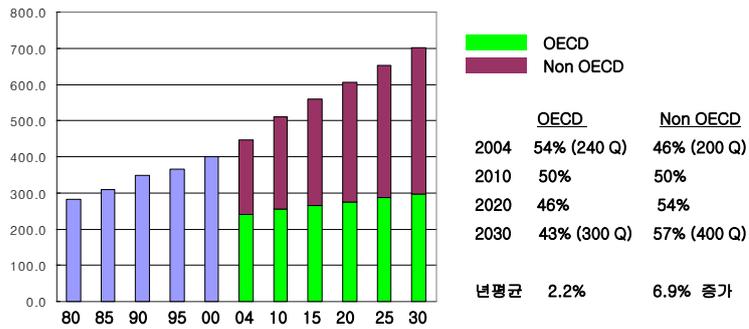
주에너지원의 변천



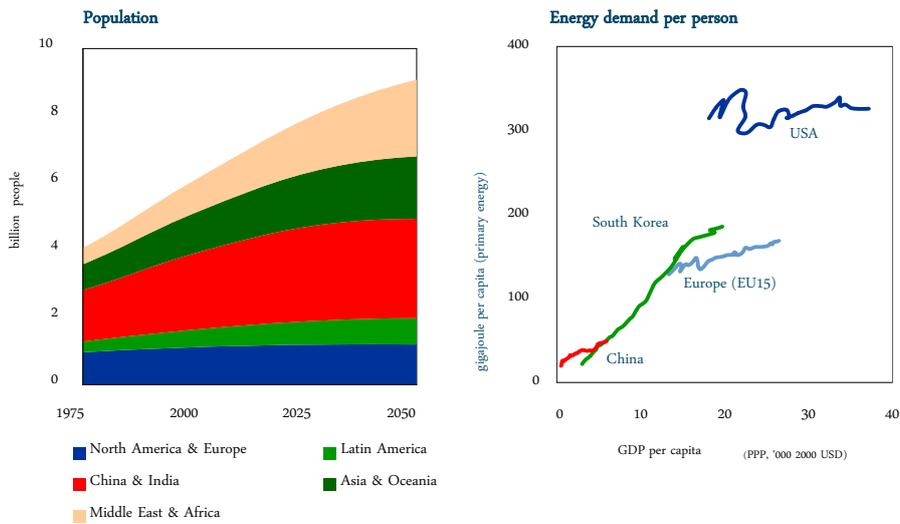
Global Energy Use and Supply

- Global Energy Consumption:

Quadrillion Btu



Growth in population and prosperity are key drivers of energy demand



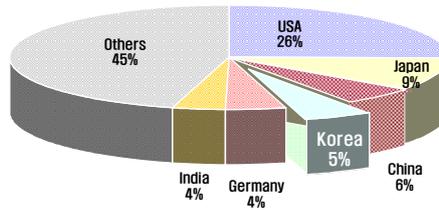
6 Source: Shell International BV, Oxford Economics and Energy Balances of OECD and Non-OECD Countries © OECD/IEA 2006

한국의 에너지부문 위상

순위	에너지소비량	석유소비량
1	USA	USA
2	China	China
3	Russia	Japan
4	Japan	Russia
5	India	Germany
6	Germany	India
7	Canada	Korea(2.8%)
8	France	Canada
9	UK	Mexico
10	Korea(2.1%)	France

• 2007년 원유수입량 :

873million barrels



7

에너지수입 현황



□ 에너지수입 현황 (2007)

- 수입의존도 : 96.7%
- 에너지수입액 : \$95.0 billion
- 원유 중등의존도 : 80.7%
- 에너지수입/총 수입 : 26.6%

8

에너지문제: 초고유가시대 및 화석연료 고갈

■ 한정된 화석에너지

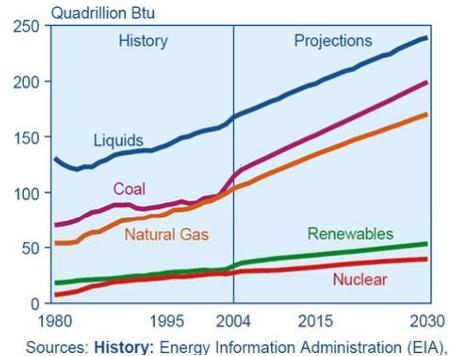
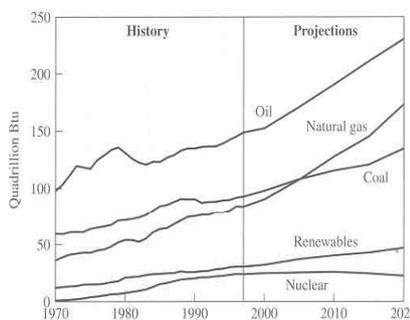


■ 주요 에너지원인 석유가격 급상승



석탄의 재조명

- 최근 유가의 급격한 상승
- 에너지의 안정적인 확보문제가 국가지상과제로 부각
- 현실적으로 대량의 에너지의 공급원은 세계적으로 풍부한 석탄
- 최근 발표된 녹색성장과 일자리 창출로 우리 경제를 이끌 6대 분야 신성장동력 22개 중 무공해 석탄에너지가 포함됨

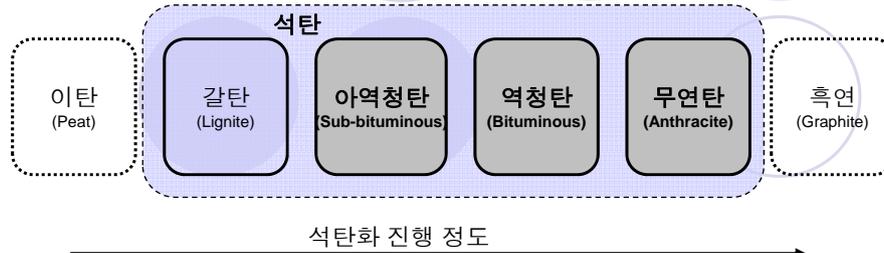


석탄이란

1. 석탄의 정의

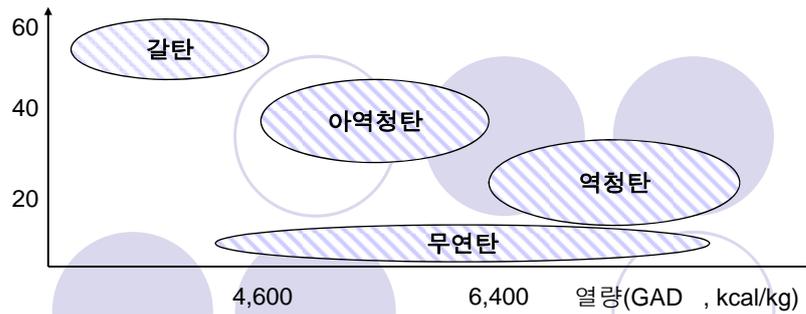
고생대 식물이 매몰된 후 지열, 지압에 의한 화학변화로 화석화된 가연성 고체물질

2. 석탄화에 따른 석탄의 분류



* 석탄화(Coalification) : 고온, 고압에 의해 탄산가스, 산소, 수분, 탄화수소 등을 방출하고, 탄소가 풍부한 물질로 변화하는 과정

휘발분(%)



3. 용도에 따른 분류

- 가. 제철용 석탄 (Coking Coal) : 철광석에서 산소 제거 및 철 분리 용도
- 나. 발전용 석탄 (Thermal Coal) : 열원으로 발전 및 증기 생산 용도

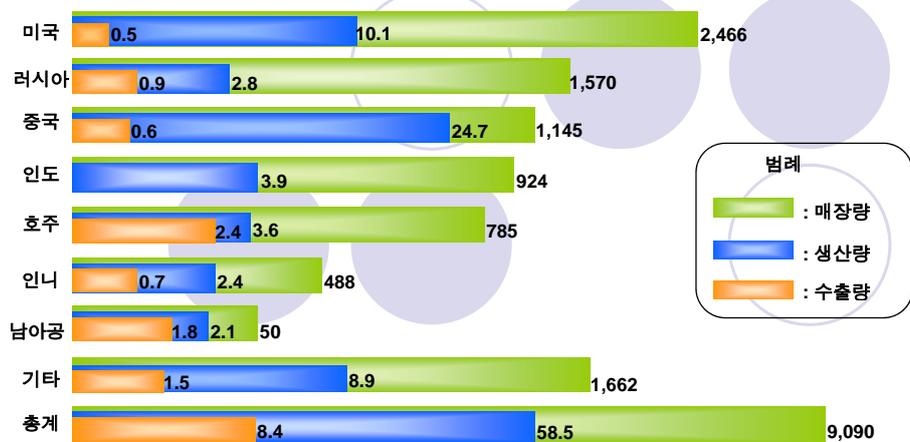
세계 석탄 매장량

- Coal is found practically on every continent.
- Characteristics vary widely according to its origin, geological history.
- World total coal reserves: 1.0371E(12) tons -> 24000 Q
- 1995 consumption rate: 93Q/y → 250-300 years
- increasing rate of 0.8%/y → 140 years
- Major reserves: USA, Russia, China, Australia, Germany, South Africa, Poland
- Unproven Resource: 140,000 Q → 1500 years

세계 석탄 수급 현황

1. 국가별 공급 현황

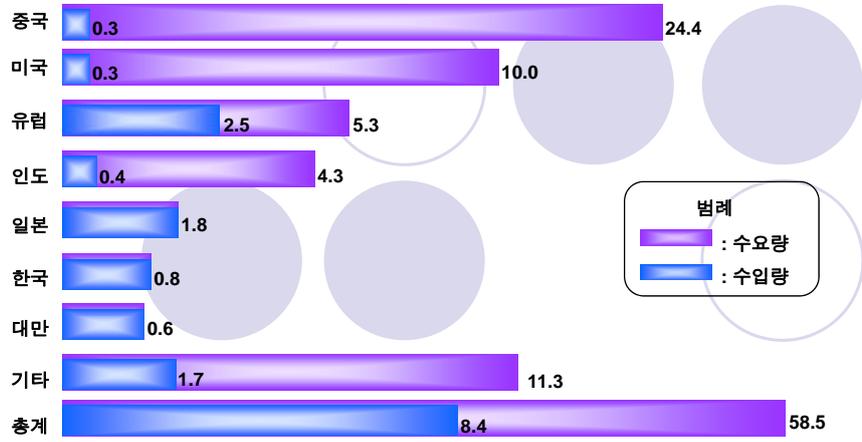
(단위 : 억톤, 년)



* 자료원 : BP, Statistical review of world energy 2007, AME Outlook (2007. 3), IEA Statistics(2006)

2. 국가별 수요 현황

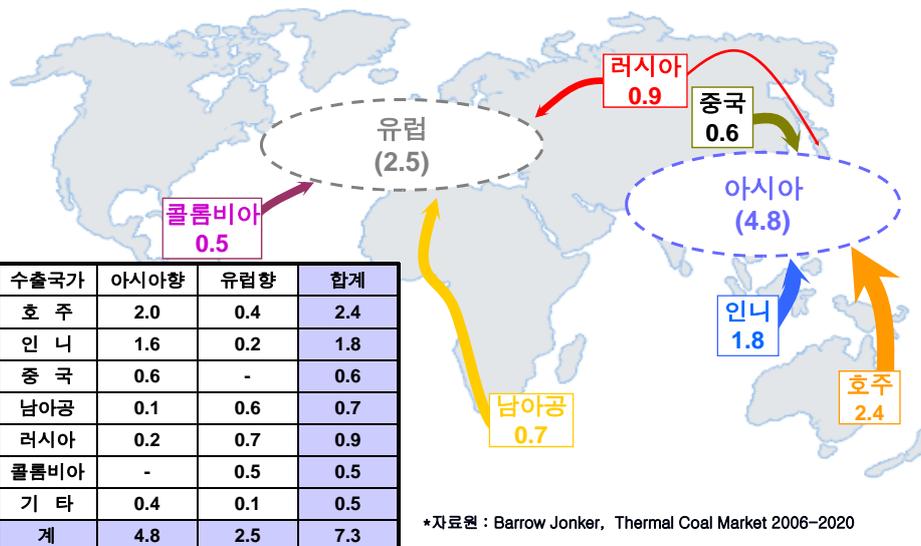
(단위 : 억톤, 년)



* 자료원 : IEA Statistics(2006), Barrow Jonker, Thermal Coal Market 2006-2020

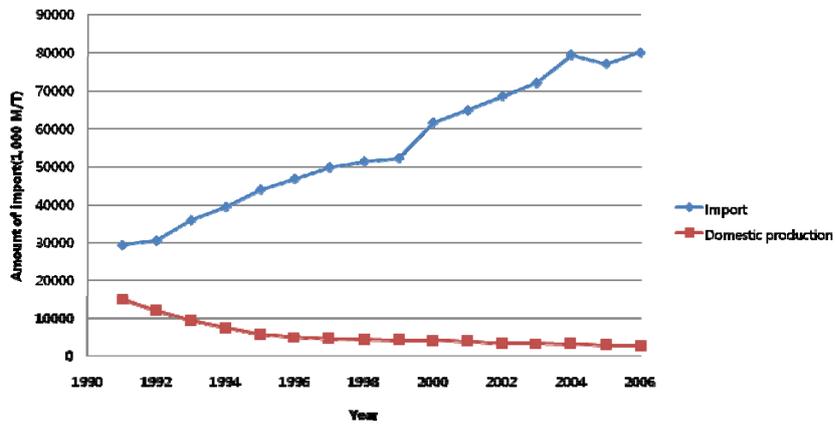
3. 국가별 공급 경로

(단위 : 억톤)



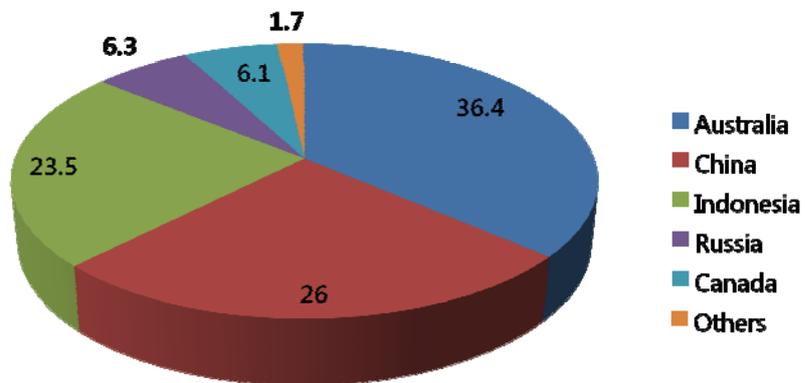
*자료원 : Barrow Jonker, Thermal Coal Market 2006-2020

Coal Production and Import in Korea

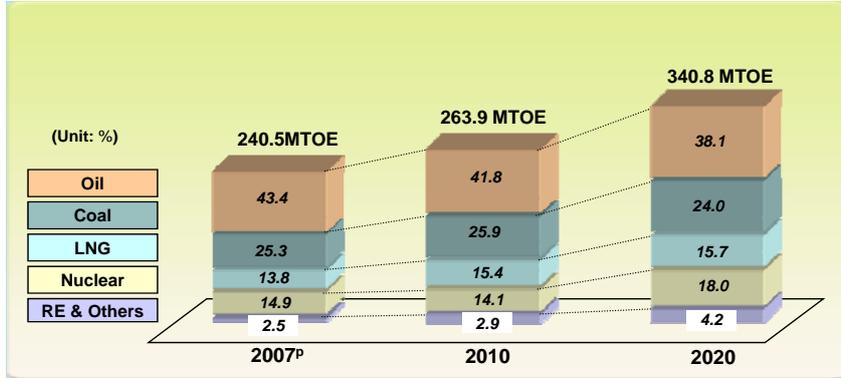


Coal Import in Korea(2006)

Coal Import (Total : 80.1 million Ton)



에너지 수요 전망



□ 에너지 비중 전망 (2007^P → 2020, %)

- 석유 ↓ : 43.4 → 38.1
- 석탄 ↓ : 25.3 → 24.0
- 가스 ↑ : 13.8 → 15.7
- 원자력 ↑ : 14.9 → 18.0

19

중장기 에너지정책 방향

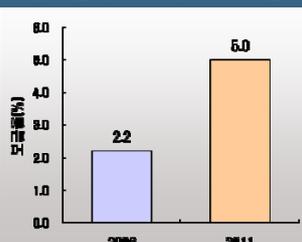
경제·환경·에너지의 조화

3대 에너지정책

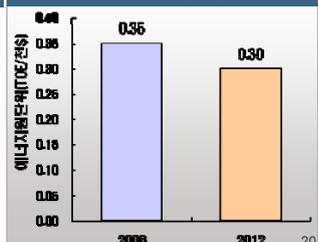
공급안정성 확보 해외자원개발 확충



지속가능 에너지확대 신재생에너지 개발 및 이용



에너지 저소비형 사회 에너지 효율 제고



해외 자원개발 인프라 강화

● 투자재원확충

- 자원개발 관련예산을 확대하여 매년 1조원 이상 10년간 10조원을 투자
 - 자원개발 예산 : ('05) 3,776억원 → ('06) 5,350억원 → ('07) 9,213억원
- 자원개발펀드를 활성화(연평균 5,000억원 규모로 출시)
- 수출입은행의 해외자원개발 금융을 확충
 - 수출입은행의 자원개발금융(억원) : ('07) 4,500→('09) 9,500→('11) 17,000

● 기술역량확충

- 자원개발 핵심기술에 10년간 5,000억원을 투입

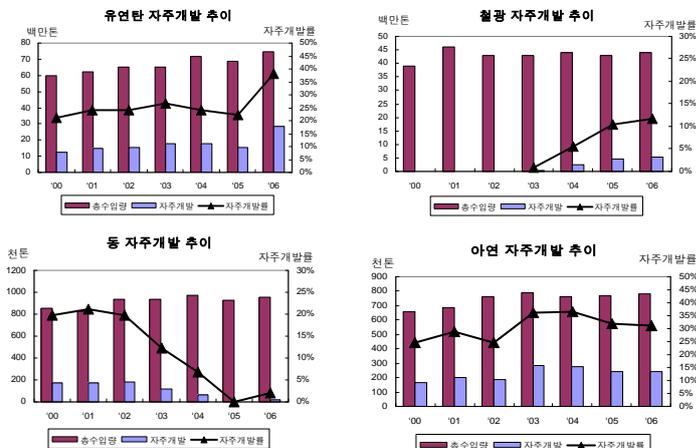
● 인력양성

- 자원개발 인력의 체계적 양성을 위해 자원개발 특성화 대학을 '09년부터 지정하여 운영
- 연구위주 보다는 실무역량 중심의 “자원개발 전문대학원”을 설치하여 자원개발 산업을 이끌어 나갈 차세대 인재 양성
- 자원개발아카데미: 자원개발을 위해 기업들이 겪고 있는 심각한 인력확보난을 해결하기 위해 마련된 단기교육프로그램

해외 자원개발 현황

● 3차 해외자원개발 기본계획 - 자주개발을 목표

목표년도	유연탄	우라늄	철	동	아연	니켈
2016	50%	15%	30%	35%	40%	30%



해외자원개발 투자 현황

○ 2006년 말까지 203개 사업 진출

구 분	진행사업				종료사업	계
	조사	개발	생산	소계		
사업수	55	49	31	135	68	203

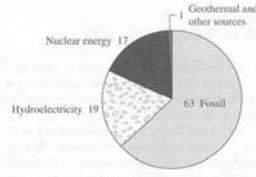
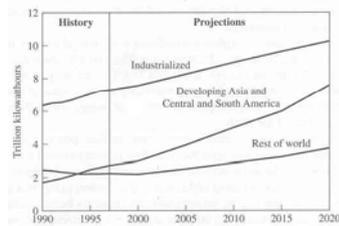
○ 국별 진행사업 현황

호주	인니	중국	캐나다	미국	페루	필리핀	기타
21	11	21	8	3	9	7	55

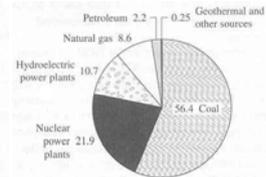
광종별 진행사업 현황

광 종	조 사	개 발	생 산	진출국 (회사)
유연탄	7	4	18	• 캐나다, 호주, 중국, 러시아, 인니, 몽골 (LG, SK, 광진, 포스코, 쌍용, 현대, 경동, 삼탄)
우라늄	1	-	-	• 캐나다 (대우인터네셔널)
철	-	1	1	• 호주, 중국 (포스코 등)
동	3	1	2	• 필리핀, 페루, 캐나다, 몽골, 잠비아 (광진, LS니꼬, 한미자원개발, 대진자원, 삼성, 고려아연 등)
아 연	2	-	2	• 호주, 캐나다, 중국 (고려아연, 현대, 광진, SK)
니 켈	-	2	-	• 마다가스카르, 뉴칼레도니아 (포스코, 광진 등)
계	13	8	23	58

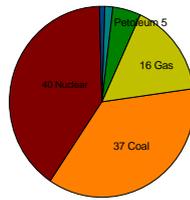
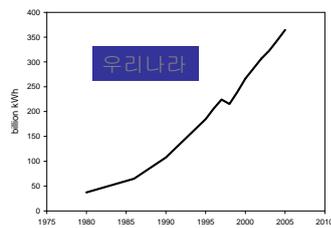
Global Electricity Consumption



세계: 12조 kWh: 1997



미국: 3조 kWh

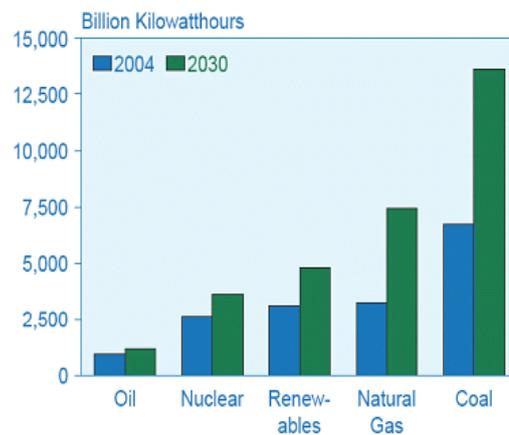


Hydro: Norway(100%), Brazil(93.5), New Zealand(74), Austria(70), Switzerland(61), China and India(19)

Geothermal: El Salvador(28.5), Nicaragua(18.5), New Zealand (5.7), Iceland (5.3), Mexico, Brazil, Indonesia, Italy (5% 이하)

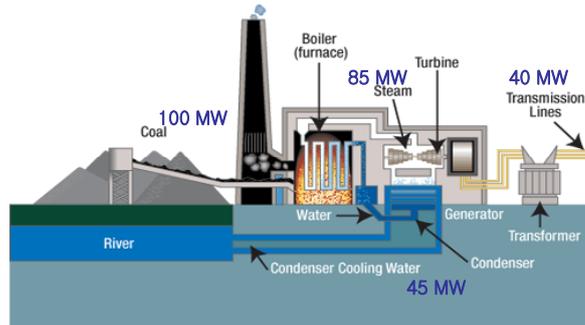
Nuclear: France(76%), Korea(36), Germany(29), Taiwan(27), Japan(26)

연료별 발전량 실적 및 전망



석탄발전

- 화력발전: 55% 화석연료 (80%가 석탄) 소비
- 화력발전소는 주요 대기오염원:
 - 분진, SO₂, NO, CO₂
- 열효율: 35% 수준
- 따라서 환경오염물질 제어 및 열효율제고를 위한 노력이 계속되고 있음
 - Clean Coal Technology



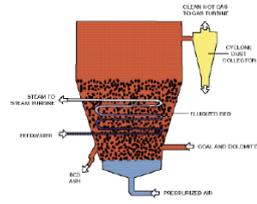
Clean Coal Technology-USA

- 미국의 석탄청정사업은 에너지생산하 National Energy Technology Laboratory의 주관하에 1986년에 시작되었으며 석탄은 국내생산 에너지 공급의 증대, 에너지 안정성의 확대 차원에서 중요한 에너지공급원이 될 것이기 때문에 보다 친환경적인 석탄이용을 위하여 최근다음 4가지의 정책에 의거 석탄청정프로그램이 운영되고 있다.
 1. Clear Skies: 황, 질소 수은 배출량을 2018년까지 1990년 의 70%로 수준으로 감량
 2. Climate Change: CO₂ 저감, 포획, 저장기술 개발
 3. Clean Coal Power: Near-zero emission technology 개발
 4. Homeland Security: 국내 풍부한 석탄자원을 미래 경쟁성 있는 에너지로 지속 유지

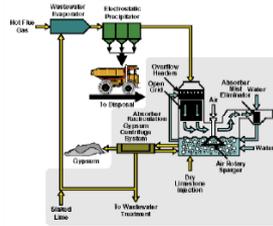
What are clean coal technologies?

- ◆ **Combustion**
연소기술향상을 통하여 효율과 오염물질의 제거율을 향상시킴
- ◆ **Post-Combustion**
다량의 황산화물, 오염물, 입자오염물을 제거하기 위하여 스크러버이용, 화학적 세정 혹은 집진
- ◆ **Conversion**
고열, 고압을 석탄을 가스나 액화시킴.

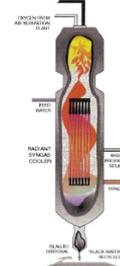
Basic Fluidized-Bed Combustion



Flue Gas Desulfurization



Integrated Gasification Combined Cycle



Illustrations: U.S. Department of Energy, Clean Coal Technology Compendium, www.lanl.gov/projects/cctc

Emission Control

- 1000 MW
 - Coal: 10% 회분, 1% 황
 - 입자상 물질: 32만 t/year
 - SO₂: 6만5천 t/year
 - Nox: 2만4천 t/year
 - 세계적으로 위 오염물질 배출에 대한 규제가 점점 강화

우리나라 규제현황 (석탄발전소, 500 MW)

	1999년 이전	1999. 1. 1	2005. 1. 1
먼지	150 mg/m ³	50 mg/m ³	40 mg/m ³
SO ₂	500 ppm	150 ppm	100 ppm
NO	350 ppm	350 ppm	150 ppm

집진 (Electrostatic Precipitator)

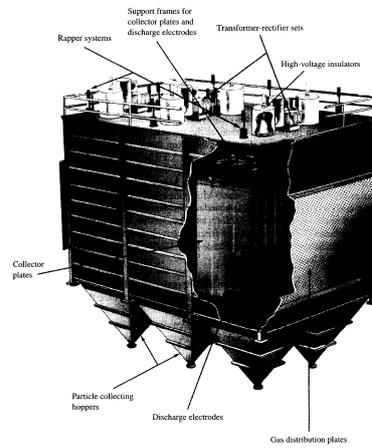
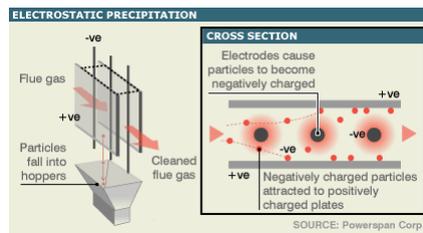


FIGURE 9.8
Cutaway view of a large, modern ESP showing the various parts. In this design the wire discharge electrodes have been replaced by rigid frames with many short, pointed stubs. (Courtesy of The Babcock and Wilcox Company, Baberton, Ohio.)

Sulfur Control

- 황 함유량
 - 석탄: 0.7 ~ 3 %
 - Oil: 0.2 ~ 2%
- $S + O_2 \rightarrow SO_2 \rightarrow$ 산성비, 대기중 황화물 미세입자형성
- Sulfur Control Methods
 - Before combustion
 - During combustion
 - After combustion

Sulfur Control: Before Combustion

- Coal Washing (선탄)
 - 석탄에 함유되어 있는 불순광물 및 황화철(Pyrite)등을 비중 분리 방법 등을 이용하여 제거
 - 우리나라에는 전무하나 미국에서는 발전용 석탄의 50%가 선탄과정을 거침
- Oil Desulfurization
 - Catalytic reduction-oxidation process (Claus process)

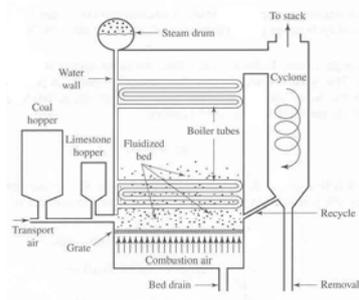
$$RS + H_2 \rightarrow H_2S + R$$

$$H_2S + O_2 \rightarrow H_2O + SO_2$$

$$H_2S + SO_2 \rightarrow H_2O + 3S$$

Sulfur Control: During Combustion

- Fluidized Combustion (유동층연소)
- $CaO + SO_2 \rightarrow CaSO_3, CaSO_4$



장점:

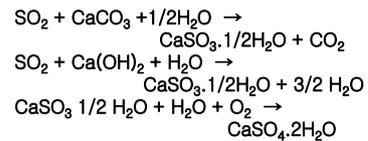
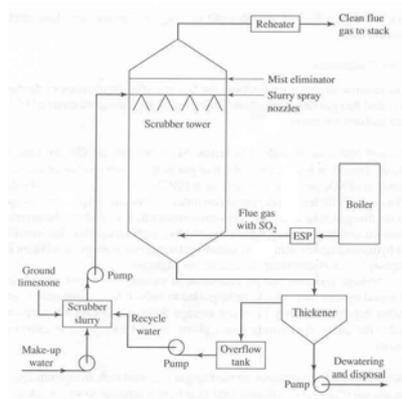
- 저질탄 연소가능,
- 연소온도가 미분탄연소에 비하여 낮음
→ NOx 생성저감

단점:

- SO₂ 제거율이 다소 낮음 (40-60%)
- 대규모화가 어려우며 100 MW가 최대

Sulfur Control: After Combustion

- Flue Gas Desulfurization (FGD)

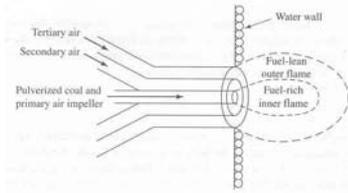
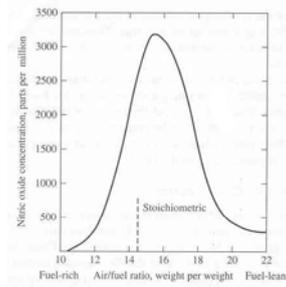


NOx Control

- NOx 생성
 - Fuel NOx: 석탄중에 포함되어 있는 질소가 산화
 - Thermal NOx: 연소기내에 투입되는 공기에 포함되어 있는 질소가 산화
 - 연소온도가 높을 때 형성
$$\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$$
- 제어방법
 - During combustion
 - After combustion

NOx Control: During Combustion

- Low-NOx Burner
공기/연료 비를 조정하여 NOx 생성을 저감



NOx Control: After Combustion

- Selective Catalytic Reduction (SCR)

$$4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$$
 촉매: TiO_2 , V_2O_5

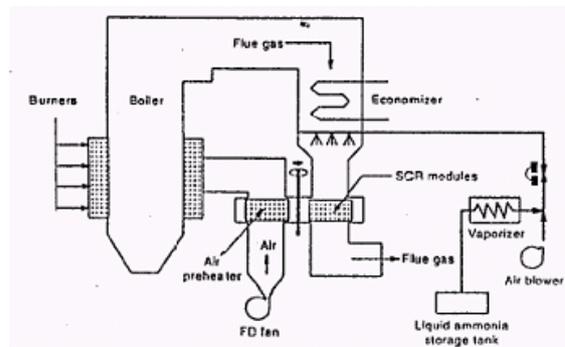
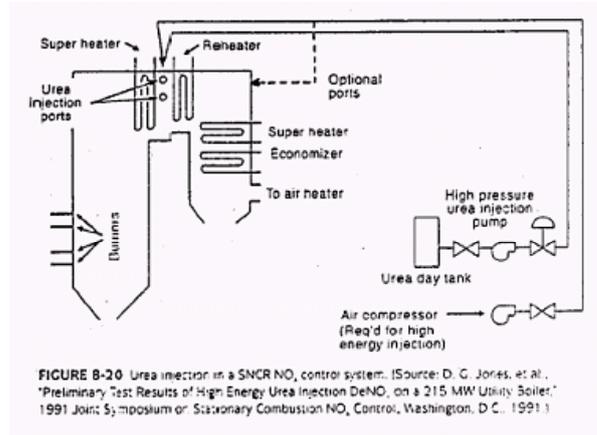


FIGURE 8-19 Ljungstrom air heater with catalyst coated elements. (Source: Taken from

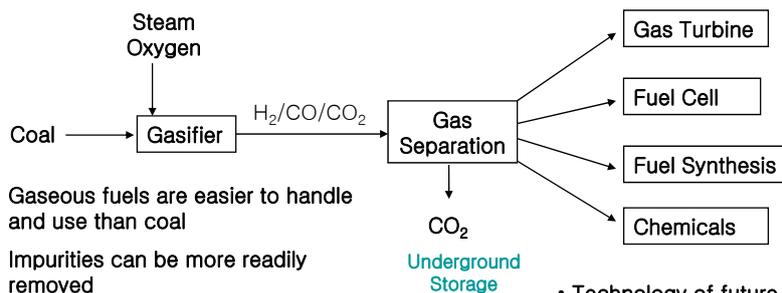
NOx Control: After Combustion

- Selective Noncatalytic Reduction (SNCR)

$$4\text{NO} + 4\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 4\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$$



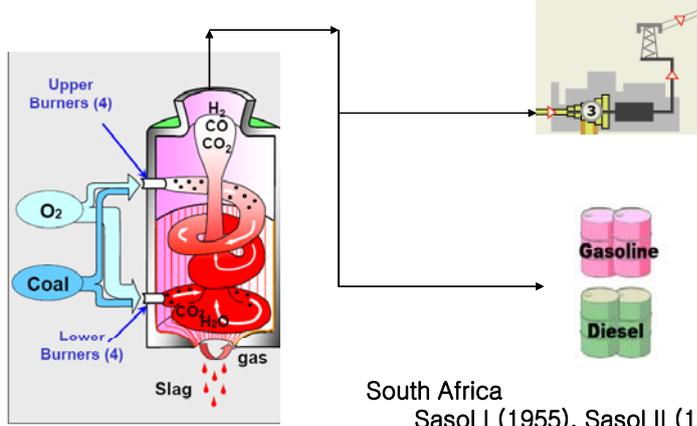
Coal Gasification



1. Gaseous fuels are easier to handle and use than coal
2. Impurities can be more readily removed
3. Synthetic fuels burn more cleanly
4. Carbon capture and sequestration is easier
5. Gasification becomes more attractive due to concern over depleting oil or gas

- Technology of future for the production of
 - electricity
 - steam
 - Chemicals
 - hydrogen

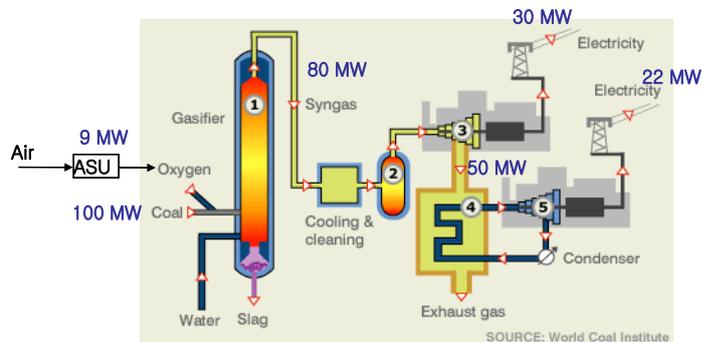
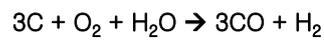
Coal Gasification



South Africa
 Sasol I (1955), Sasol II (1980), Sasol III (1982)
 150,000 barrels/day of fuels and petrochemicals

Advanced Cycle

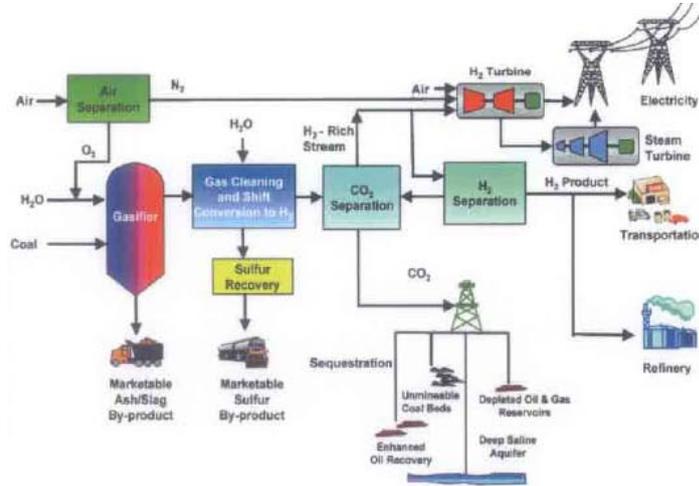
- Coal Gasification Combined cycle



- 열효율: $30+22-9=43$

FutureGen Project

A near zero-emissions coal-fueled power plant (275 MW) to produce hydrogen and electricity while using carbon capture and storage

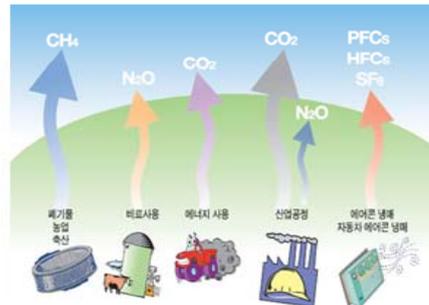


지구 온난화 현상

온실 효과



온실가스의 종류



- 우리나라 온실가스 발생실태
 CO_2 (88.6%) > CH_4 (4.8%) > $프렌온가스류$ (3.8%) > N_2O (2.8%)

CO_2 : 이산화탄소, CH_4 : 메탄,
 N_2O : 아산화질소, $HFCs$: 수소불화탄소,
 $PFCs$: 과불화탄소, SF_6 : 육불화이황

에너지사용과 지구온난화현상

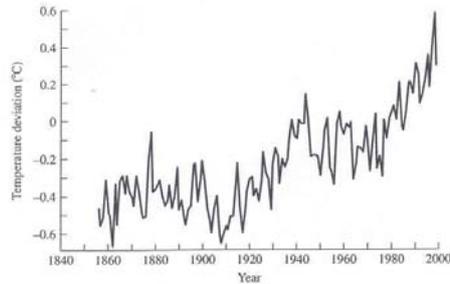


Figure 10.6 Observed average global surface temperature deviation 1855–1999. (Data from Carbon Dioxide Information Analysis Center, 2000, *Trends Online: A Compendium of Data on Global Change*. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory.)

- CO₂ 농도: 280 ppm (산업혁명전) → 370 ppm (현재)
- 지구평균기온상승 : 0.5 – 1°C

지구온난화현상

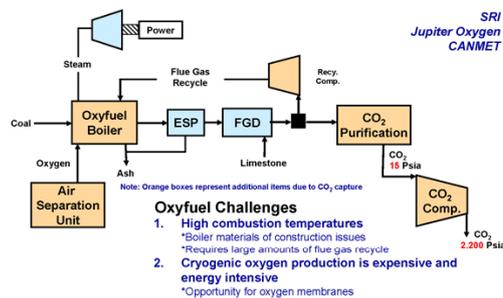
- 교토의정서(1997)
 - 선진국 : 2012년까지 CO₂ 발생량을 1990년 발생량을 기준으로 5-8% 감소 합의
 - 개발도상국 : 중국·인도·브라질·남아공·멕시코 등이 대표하는 개발도상국의 입장에서 보면 산업혁명 이후 공업화에 앞서간 선진국들이 대기오염과 지구온난화의 주범이며 따라서 선진국들은 이산화탄소 배출량을 획기적으로 감축하는 데 앞장서야 하고 환경기술개발과 개발도상국의 노력을 지원하는 비용의 대부분을 감당할 의무가 있다는 주장
 - 교토의정서가 체결될 시 한국은 다행히 감축의무 미부담국으로 분류
 - 그러나 즉 교토의정서 이후의 기후변화에 관한 새 국제체제 구축 과정에서 우리도 선진국 대열에 서서 응분의 책임과 의무를 감당하겠다는 입장을 일찍부터 확정지어야 할 입장이다

Controlling CO₂ Emission

- End–Use efficiency improvements and conservation
 - The simplest and most cost–effective approach
 - In the residential–commercial sector
 - Less heating in winter
 - Less air conditioning in summer
 - Better insulation
 - In the industrial sector
 - Reduction in direct use of fossil fuel
 - Energy–efficient motors
 - In the transportation sector
 - Efficiency improvements of vehicle
- Supply–side efficiency improvements
 - Electricity supply improvement
 - Shift coal to natural gas
 - Single–cycle gas–fired steam power plant
 - combined cycle gas turbine (CCGT)
 - Single–cycle coal–fired power plant → Gas fired combined CCGT

CO₂ Capture

- Oxy–combustion
 - Fossil fuel combustion with pure oxygen instead of air
 - Air Separation Unit (ASU): Separate O₂ from air



- Beneficial effect
 - Combustion Product: CO₂, H₂O (CO₂ captured by condensing the water)
 - 60~70% reduction in NO_x emissions

CO₂ Capture – Post Combustion

- Solvent absorption
 - CO₂ soluble solvent : Monoethanolamine (MEA)

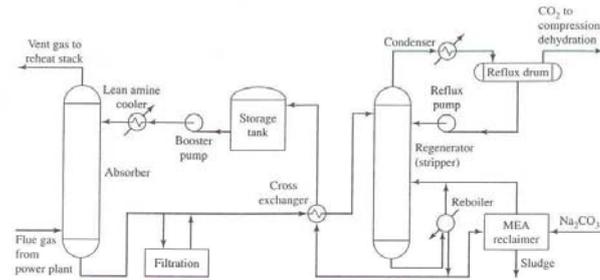
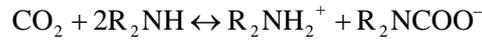


Figure 10.10 Flowsheet of the monoethanolamine (MEA) process for CO₂ capture.

- Absorption tower (40–65°C) and regeneration tower(100–120°C)

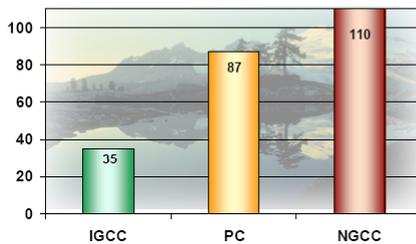
CO₂ Capture Is Expensive !

- 5–30% parasitic energy loss
- 35–110% increase in capital cost
- 30–80% increase in cost of electricity

Currently refining cost target for PC plants considering potential improvements in:

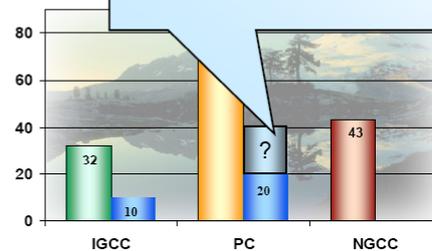
- Capital cost
- Fixed operating cost
- Variable operating cost
- Energy cost
- Transport, storage & monitoring costs

Effect of CO₂ Capture on Capital Cost
(% Increase Resulting From CO₂ Capture)



Note: CO₂ capture costs based on use of Selexol process for IGCC and MEA for PC and NGCC.

Effect of CO₂ Capture on Electricity Cost
(% Increase in Electricity Cost)



Source: Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Power Plants study, Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity; NETL, May 2007.



CO₂ Sequestration

- Depleted Oil and Gas Reservoirs
 - Reservoirs is covered by a impermeable layer
 - 불투수층 하부에 CO₂ 를 투입하는 방법
 - Gas reservoirs : 모든 gas를 채취한 후에 CO₂ 주입
 - CO₂ 와 메탄의 혼합 방지
 - Oil reservoirs : Oil 채취 중에 CO₂ 주입 가능
 - Enhanced Oil Recovery (EOR)
- CO₂ – EOR
 - 세계적으로 71개 지역에서 사용됨 (Texas and Colorado)
 - 대부분 자연에서 얻어지는 CO₂를 이용하나 연소에서 방출되는 CO₂를 이용하는 유전은 Texas에 유일 (350 km 관수송)
 - 문제점
 - 포집된 CO₂ 를 EOR로 사용하기 위해서는 경제성 문제가 해결되어야 함 (CO₂ 의 수송, 주입 등): 관수송비 - \$2~\$7/t per 250 km
 - 한정된 reservoirs: 용량 (40 Gt)

CO₂ Sequestration

- Deep Ocean
 - Ocean is net absorber of carbon
 - Carbon exchange : surface area of ocean, about 100m
 - 1000m 이하의 안정된 바다에 직접 CO₂ 를 주입하는 방법
 - 주입가능 추정량: 1×10^{19} ton of carbon
 - 문제점
 - 해안 근접성과 CO₂ 수송의 경제성
 - CO₂ 주입 시 국지적인 carbonic acid 농도 상승으로 인한 생태계 파괴

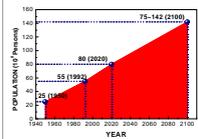
CO₂ Sequestration

- Deep Aquifers
 - Consist of permeable and porous rock
 - 800m이상 깊이를 갖는 aquifer에 주입하는 방법
 - 주입가능 추정량: 5~500 Gt
 - 문제점
 - Aquifer의 용량
 - Aquifer까지의 수송, drilling 및 주입의 경제성 문제
- Terrestrial sequestration
 - Reclamation and reforestation

21 세기 지구문제

인구문제

- 중국인구의 급증
- 산악제한정책 및 인간수명연장 (2020년, 65세 이상이 약 20%)



식량문제

- 육류섭취량 증가 (인도, 3000cal/일, 선진국, 15000cal/일)
- 곡물재배지확대 및 농업기술발달 (9000cal/일, 75억)
- 변수: 인구증가, 환경오염, 산업발달, 재생에너지, 기후변화
- ❖극심한 지역적 차이는 해소 불능



물의 전쟁

- 담수의 75%: 극지의 빙상/ 빙하
- 이용되는 물의 70%: 관개용수
- 농민은 효율적 물 사용에 제한
- 21세기: 식수 및 산업용수난 (인구 1100만 이상 도시 25개 예상)
- 댐건설로 인한 환경피해 (Hoover 댐, Aral 해, Chad 해의 고갈)
- 2025년 인구의 2/3가 water stress에 직면
- 2020년에 세계가 당할 가장 심각한 자원 문제
- ❖지역분쟁의 요소 내재



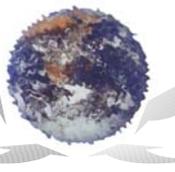
에너지문제

- 화석연료의 유한성, 지역적 편재
- 21세기 대부분의 화석연료 고갈
- 대체 동력원 불확실
- ➔ 2020년경 제3의 석유파동예상



환경문제

- 지역적오염: 산업발달, 인구집중
- 지구온난화
- 서식지의 손실: 인구증가에 따른 농지 확대 및 산림 훼손



The Energy Challenge

More energy

Secure energy

Responsible energy

The world wants to know:

- Is there enough to meet growing demand?
- Can our industry bring it to market in time?
- Will supplies be safe from disruption?
- Can the planet take it?



The world in 2050

9 billion people

2.5 billion more than today

4-5 times richer

With most extra wealth coming from developing countries

Double the energy

Using twice as much energy as now

Twice as efficient

Using half the energy as now to produce each dollar of wealth

6-10 times more energy

from renewable sources

55

21세기 준비된 공학도

- 변화된 세계
 - 인구증가문제, 환경문제, 에너지문제, 글로벌화
- Professionalism: 기본적인 과학 및 전문공학지식 뿐만 아니라 기업경영 관련 지식을 배양.
- Globalization: 기업의 국제화에 걸맞도록 글로벌 경제능력 및 세계인으로서의 소양을 갖추도록 함 (언어, 교양, 정치, 경제적 감각 배양).
- Communication: 의사소통능력 및 에너지자원의 국제적 무역 협상능력배양.
- Leadership: 비전을 갖고 원하는 방향으로 조직을 이끌어 갈 수 있는 능력.
- 환경경제: 환경문제는 국제적이기 때문에 국내 뿐만 아니라 대상국가 현지사정에 밝아야 하고 사회적으로도 환경인식이 고조됨에 따라 친환경적 기업이미지가 요구되고 있음.
- 공공정책수립에 참여: 무지한 사람이 엉뚱한 방향으로 정책을 수립할 수 없도록 적극적인 공학도의 참여가 요구됨.