



국제경제정보

국제경제실 국제종합팀
노진영 과 장(4280)
이광원 조사역(5285)

세계 원자력 발전산업의 현황과 향후 전망

- ◆ 동일본 대지진의 여파로 발생한 후쿠시마 원전 사고를 계기로 원자력 발전에 대한 불안이 커지면서 원자력 발전산업의 현황과 향후 전망에 대한 관심이 증대
- ◆ 원자력 발전은 전세계 전력생산의 15% 정도를 차지하고 있으며 선진국에서 주로 활용되어 왔으나 최근에는 중국, 러시아, 인도 등 주요 신흥시장국으로 급속히 확산
- ◆ 일본 원전사고 이후 각국은 원전의 안전성 문제에 민감하게 반응하고 있는데 원전정책의 변화 움직임은 국별로 상이
- ◆ 향후 세계 원전산업은 안전성 우려에 따른 신규 원전건설 지연, 천연가스를 이용한 전력 대체생산 등으로 단기적으로 위축될 것으로 예상되나

중장기적으로는 ① 기후변화협약 이행을 위한 탄소배출 축소 필요성, ② 원전의 높은 가격경쟁력 등을 고려할 때 원전에 대한 의존도가 크게 낮아지지 않을 전망

I 개 요

□ 동일본 대지진(3.11일)으로 인한 후쿠시마 제1원자력발전소의 방사성 물질* 유출사고를 계기로 원자력 발전(이하 “원전”)의 안전성에 대한 우려가 크게 높아짐

* 세슘-137, 요오드-131 등 방사선을 방출하는 물질

- 지진의 여파로 현재 일본 원전용량*(48.8GW)의 25%(12.4GW)에 해당하는 원자력발전소가 가동 중단된 상태(가동 원자로** 55기중 14기)

* 일본은 전체 전력생산의 29%를 원자력에 의존(2009년)

** 원자력발전소는 통상 여러 개의 원자로(reactor)로 구성

동일본 대지진 이후 가동중단된 원전

발전소	원자로수(개)	발전용량(GW)
후쿠시마 제1원전	6	4.7
후쿠시마 제2원전	4	4.4
오나가와 원전	3	2.2
토카이 제2원전	1	1.1
총계 ¹⁾	14(55)	12.4(48.8)

주 : 1) ()내는 전체 원자로수 및 발전용량
 자료 : PIRA Energy Group

- 원전의 안전성에 대한 우려가 전세계로 확산되면서 원전의 연료인 우라늄의 국제가격이 큰 폭으로 하락한 반면 대체연료인 화력발전용 석탄 및 천연가스의 가격은 크게 상승

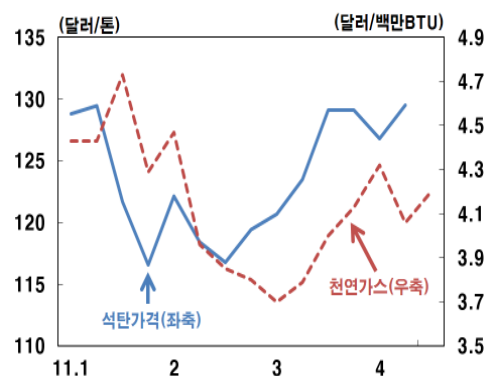
— 동일본 대지진 발생 이후 4.15일까지 천연가스 및 석탄 가격은 각각 7.3%, 13.5% 상승한 반면 우라늄가격은 15.6% 하락

우라늄 가격



주 : 1) Henry Hub 현물가격 기준
 자료 : Bloomberg

천연가스¹⁾ 및 석탄²⁾가격



주 : 1) Henry Hub 현물가격 기준
 2) 북서부유럽 CIF 가격 기준
 자료 : Bloomberg

□ 일본의 원전사고가 확대·장기화되고 있는 상황이어서 원전 관련 불안 및 불확실성이 조기에 진정되지 않을 가능성

- 4.12일 일본 원자력안전보안원은 이번 원전사고에 대한 평가를 당초 5등급에서 1986.4월 발생한 구소련 체르노빌 원전사고와 같은 최고 등급인 7등급으로 격상*

* 자세한 내용은 <참고1> 원전 사고등급별 주요 사례 참조

국제 원전 사고·고장의 등급(INES¹⁾)

등급	내용	주요 사례	
사고	7	방사성물질의 대량 외부 방출	구소련 체르노빌 원전(1986년)
	6	방사성물질의 상당량 외부 방출	구소련 키시팀 핵폐기물 저장 탱크 사고(1957년)
	5	방사성물질의 제한적 외부 방출 원자로 노심의 중대한 손상	미국 스리마일 아일랜드 원전 (1979년)
	4	방사성물질 소량 외부 방출(1mSv 이상 피폭). 원자로 노심 상당 수준 손상	일본 도카이부라(東海村)우라늄 가공공장 사고(1999년)
고장	3	방사성물질 극소량 방출(0.1mSv). 원전 내부 중대한 오염	영국 셀라필드 원전(2005년)
	2	방사성물질에 의해 원전 내부 상당 수준 오염	스웨덴 포스마크 원전(2006년)
	1	운전제한 범위 이탈	프랑스 그라블린 원전(2009년)
등급 이하	0	안전에는 문제가 없는 상황	

주 : 1) International Nuclear Event Scale
 자료 : 한국원자력안전기술원

→ 세계 원전산업 현황, 일본 원전사고 이후 각국의 원전정책 변화 움직임 등을 살펴보고 향후 전망을 제시

(개황)

- 2008년 기준 전세계 전력생산(1만9,103TWh*)에서 원전이 차지하는 비중은 13.6%(2,602TWh)로 1980년 8.5%에 비해 크게 높아짐

* 1테라와트 시(Terawatt hours)=1조와트 시

- 석탄·석유·천연가스 등 화석연료를 이용한 생산비중은 67.4%(1만 2,872TWh), 수력과 태양열·풍력 등 재생에너지(renewable)의 비중은 각각 16.3%(3,119TWh) 및 2.7%(510TWh)

연료 종류별 전력 생산량

	(TWh)			
	1980년	1990년	2000~07년	2008년
화석연료	5,589 (69.7)	7,136 (63.2)	10,799 (65.7)	12,872 (67.4)
수 력	1,723 (21.5)	2,144 (19.0)	2,758 (16.8)	3,119 (16.3)
원자력	684 (8.5)	1,909 (16.9)	2,568 (15.6)	2,602 (13.6)
재 생	21 (0.3)	105 (0.9)	309 (1.9)	510 (2.7)
전세계	8,017 (100.0)	11,295 (100.0)	16,433 (100.0)	19,103 (100.0)

주 : 1) ()안은 전체 전력생산량 대비 비중(%)

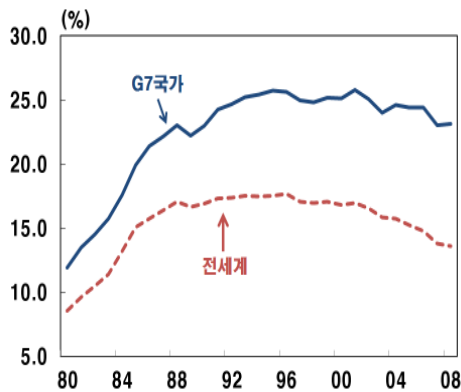
자료 : EIA

- 원전에 의한 전력생산은 수차례의 대형 사고에도 불구하고 전력수요 확대, 원유가격 상승 등 시장환경 변화, 안정적인 전력공급 필요성 증대, 기술발전 등으로 꾸준히 증가*

* 1996년에는 전세계 전력생산에서 차지하는 비중이 17.7%까지 상승

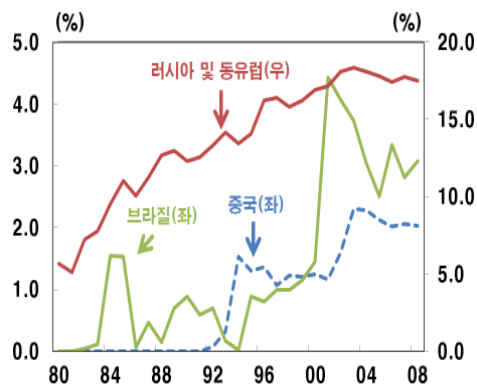
- 선진국(G7)에서는 원전 비중(자국 전력생산량 대비)이 1990년대 25%까지 상승한 이후 정체를 보였으나 러시아 및 동유럽, 브라질, 중국 등에서는 상승세를 지속

전세계 및 G7국가 원전비중



자료 : EIA

주요 신흥시장국 원전비중



자료 : EIA

(선진국이 원전을 주로 활용)

□ 원전기술이 선진국을 중심으로 발전해 오며 따라 OECD국가의 원전이 전세계 원전의 80%(원자로수 기준)에 달함

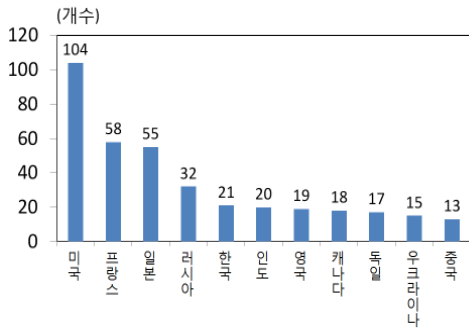
○ 2010년말 현재 가동중인 전세계 원자로 443기중 거의 절반이 미국 (104기, 23.5%), 프랑스(58기, 13.1%), 일본(55기, 12.4%) 3개국에 소재

○ 원전 발전량은 2009년말 현재* 미국이 799TWh로 가장 많으며 미국내 발전량의 20%를 차지

* 전세계로는 2,560TWh

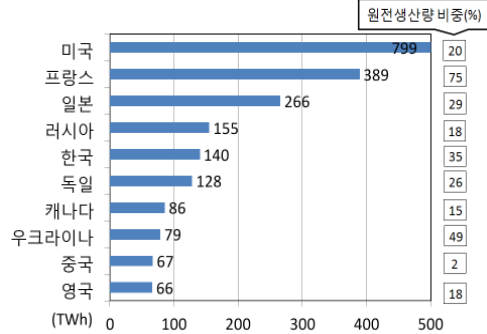
- 프랑스는 전체 발전량의 75%(389TWh)를 원전으로 생산하여 원전의존도가 가장 높으며 일본의 발전량(266TWh)이 세 번째

주요국 원자로수¹⁾



주 : 1) 2011.4.1일 현재
자료 : World Nuclear Association

주요국 원전생산량 및 비중¹⁾



주 : 1) 2009년 기준
자료 : EIA

□ 한편 현재 가동중인 원자로의 상당부분이 노후화된 상태

○ 가동후 30년 이상이 경과한 노후 원자로*가 전체의 약 40%

* 원자로의 수명은 대체로 40년. 가동연수 27~29년인 원자로비중도 14%에 달함

전세계 원자로의 노후화 현황¹⁾

	원자로수 기준		발전용량 기준 (%)	
	원자로수 기준	발전용량 기준	원자로수 기준	발전용량 기준
· 10년 미만	6.8	6.2	6.8	6.2
· 10~19년	11.3	11.7	11.3	11.7
· 20~29년	42.5	48.0	42.5	48.0
· 30~39년	33.5	30.8	33.5	30.8
· 40년 이상	5.9	3.2	5.9	3.2

주 : 1) 2011.4.1일 현재
자료 : 국제원자력기구(IAEA)

(주요 신흥시장국으로 확산중)

□ 체르노빌 원전사고(1986년)를 계기로 선진국의 원전 건설은 정체를 보이고 있으나 신흥시장국에서는 브릭스(BRICs)를 중심으로 크게 확대

○ 현재 가동중인 브릭스의 원자로는 총 67기*(전세계 가동원자로의 14.7%) 이나 건설중인 원자로**가 43기에 달함(전세계 건설중 원자로의 70.5%)

* 러시아 32기, 인도 20기, 중국 13기, 브라질 2기

** 선진 3대국은 4기에 불과

○ 계획중(planned)*인 원자로도 브릭스는 82기, 선진 3대국 22기이며 제안단계(proposed)**인 원자로는 각각 184기 및 26기

* 당국의 승인을 받은 상태로 향후 10년내에 건설이 완료(Approval, funding or commitment in place. Most expected to be operational within 10 years.)

** 계획 또는 부지선정이 완료된 상태로 향후 15년내에 건설이 완료(Program or site proposals in place. Operational mostly within 15 years.)

→ 원자로 건설이 예정대로 완료될 경우 15년 후에는 중국 200, 미국 137, 러시아 86, 인도 83, 일본 72, 프랑스 61기의 순이 되어 주요 신흥시장국의 원전 의존도가 선진국을 크게 넘어설 전망

주요국 원자로 현황 및 계획·제안¹⁾

	운전중	건설중	계획중	제안단계	합계
미 국	104	1	9	23	137
프랑스	58	1	1	1	61
일 본	55	2	12	3	72
독 일	17	-	-	-	17
중 국	13	27	50	110	200
인 도	20	5	18	40	83
러시아	32	10	14	30	86
브라질	2	1	0	4	7

주 : 1) 2011.4.1일 현재

자료 : World Nuclear Association

(일본 원전사고 이후 각국의 원전정책 변화 움직임은 다양)

□ 일본 원전사고 이후 각국은 원전의 안전성 문제와 관련하여 민감한 반응을 보이고 있는데 원전정책의 변화 움직임은 대체로 세 가지로 구분

① 원전에 대한 강한 거부감을 나타내는 국가 : 독일

— 독일은 지난해에 1980년 이전 건설된 노후 원자로 17기의 수명을 평균 12년 연장·승인하였으나 이중 가장 노후화된 7개 원자로로는 안전점검을 위해 3개월간 가동을 중단(3.15일)

- 특히 4월초 치러진 바덴-뷔르템베르크(Baden-Württemberg) 주의회 선거에서는 집권당이 원전을 반대하는 정당에 패배*

* 현 집권당(Christian Democratic Union, CDU)은 동 지역에서 1953년 이후 직전 선거까지 계속 승리

② 원전확대 정책 지속 국가 : 주요 신흥시장국 및 프랑스

- 중국은 신규 원전건설 승인을 일단 보류(3.16일)하였으나 원전 확대정책을 지속적으로 추진할 계획이며

러시아도 원전에 대해 적극적인 자세*를 견지

* 러시아 원자력당국의 최고책임자인 Sergei Kiriyenko(전 총리)는 라디오 연설에서 “인간 지식과 전문기술에 관한한 미래 에너지의 개발은 원자력 개발과 관련될 것임이 절대적으로 확실하다”고 발언(Financial Times, 4.1일)

- 프랑스는 자국이 개발·가동하고 있는 원자로가 특별히 안전하다는 점을 내세우면서 원전을 적극 옹호하는 입장*

* The Economist는 프랑스가 일본의 원전사고를 자국에 유리한 기회로 삼으려 하고 있다고 평가(3.24일)

③ 제3의 입장 : 미국

- 미국 행정부는 원전의 안전성에 대한 포괄적 재점검에 착수하였으나(3.16일) 내년 재선에 도전하는 오바마 대통령은 값싼 에너지를 요구하는 유권자*를 고려하지 않을 수 없어 원전에 대해 모호한 입장

* 미국 가계의 높은 에너지 소비구조를 반영

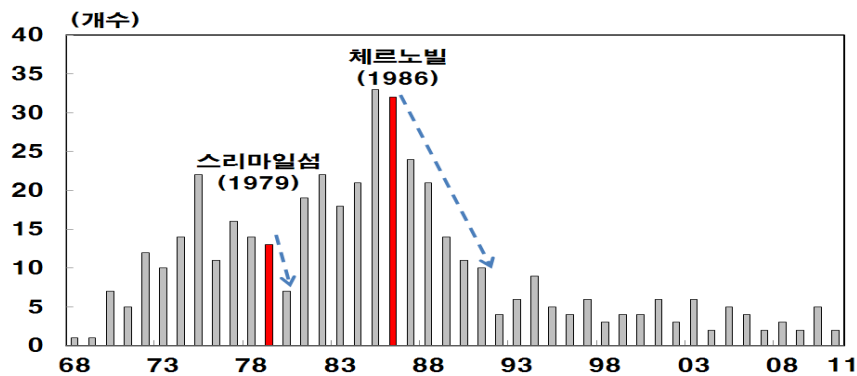
III

세계 원전산업의 향후 전망

(단기적으로는 원전산업의 위축이 불가피)

- 안전성에 대한 논란, 비용 증가 등으로 향후 신규원전 건설이 지연되는 등 원전산업은 당분간 위축될 것으로 예상
- 1979년 미국 스리마일 아일랜드 및 1986년 구소련 체르노빌 사고 이후에도 원전의 안전성에 대한 우려로 신규 원자로 건설건수가 급격히 축소

세계 신규 원자로수



자료 : IAEA

- 정보통신기술의 발달로 사고 발생시 원자로 폭발장면이 전세계로 생중계되는 점도 과거보다 원전에 대한 불안감을 증폭시키는 요인*으로 작용

* Nuclear power: Too hot to handle(Financial Times, 3.16일)

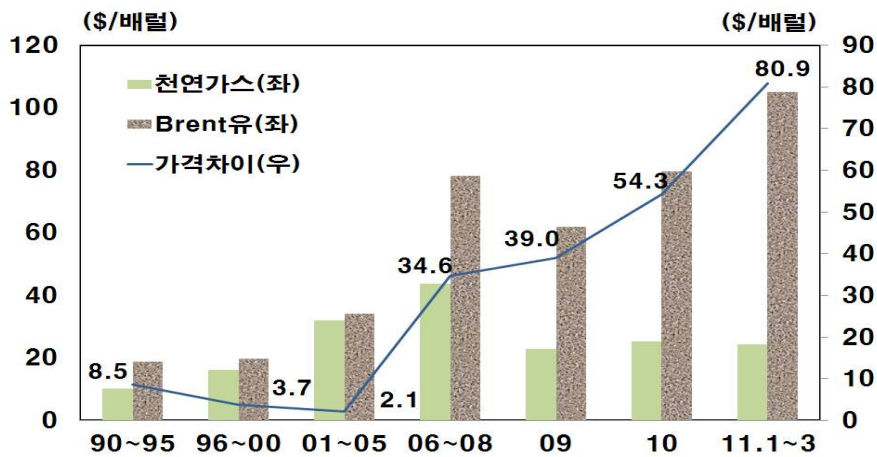
- 원전산업 위축에 따른 전력생산의 대안으로서 가격경쟁력이 상대적으로 높은 천연가스 등을 이용한 생산방식이 부상할 가능성
- 2000년대 들어 미국을 중심으로 셰일가스 채굴기술이 급속히 개발됨에 따라 천연가스 공급이 크게 확대되면서 천연가스의 가격경쟁력이 대폭 개선

* 미국의 천연가스 확인매장량은 1998년 7.2tcm(Trillion cubic meter)에서 2008년 9.2tcm으로 급증하여 1990년대 초반수준(약 9.0tcm)에 도달하였으며 천연가스 생산량은 2006년부터 연평균 3% 증가

— 천연가스 가격은 1990~2005년까지 원유에 비해* 배럴당 2~9달러 낮은 데 불과하였으나 2011년 들어서는 격차가 81달러 정도로 확대됨으로써 높은 가격경쟁력을 확보

* 에너지 효율기준으로 1배럴=5.8mmBtu(million metric British thermal unit)

천연가스와 원유 가격 비교¹⁾



주 : 1) 1배럴=5.8mmBtu 기준으로 천연가스 가격을 전환
자료 : Bloomberg

— 또한 원전 가동 중단으로 일본에서만 연간 7백만톤의 액화천연가스(LNG) 수요가 추가로 발생할 것으로 예상되어 국제적으로 LNG 장기계약수요가 늘어날 것이라는 분석도 제기

동일본 대지진 전후 일본의 LNG 도입량¹⁾ 전망 변화

	2011	2013	2015	2017	2019
지진 전(A)	-0.3	3.3	5.0	4.3	19.8
지진 이후(B)	3.5	7.1	12~13	11~12	26~27
A-B	3.8	3.8	7.0~8.0	6.7~7.7	6.2~7.2

주 : 1) 기존 장기계약분에서 추가 발생할 것으로 예상되는 도입량
자료 : 에너지경제연구원, 2011.4.

(중장기적으로는 원전에 대한 의존도가 크게 낮아지지 않을 전망)

□ 다음과 같은 점을 고려할 때 중장기적으로는 원전에 대한 의존도가 크게 낮아지지 않을 것으로 예상

① 기후변화협약에 의한 탄소배출 감축 문제를 해결하는 데 원전이 필수적

— 2005년 발효된 교토의정서에 따라 참가국은 2012년까지 탄소배출량을 1995년대비 연평균 5.2%씩 줄여야 하나 원전을 다른 연료로 대체할 경우 동 목표치 달성이 거의 불가능

- 전세계 탄소배출량(2008년 기준 294억톤)은 대부분 화석연료에서 배출되고 있으며 원전의 탄소배출량은 미미
- 전세계 원전 생산량(2,560TWh, 2009년기준)을 화석연료로 대체할 경우* 탄소배출량은 약 20억톤** 증가(2009년 배출량 대비 7% 증가)할 것으로 추정되는데 이는 앞으로의 탄소배출량 감축 필요규모***에 비해 매우 중요하면서도 많은 양

* 석탄, 원유, 천연가스 등은 원자력에 비해 50~100배 많은 탄소를 배출

** 「780g/KWh(2009년 석탄, 천연가스, 원유의 탄소배출량의 가중평균) × 2009년 원전생산량」 이며 이는 독일과 일본의 탄소배출량을 합한 것과 비슷한 규모

*** UN산하 환경관련 종합조정기관인 UNEP(United Nations Environment Programme)는 2020년까지 전세계 탄소배출량을 미규제시에 비해 최소 50억톤 감축할 것을 제시

전력생산 에너지원별 탄소배출량

(g/kWh)

원자력	석탄	천연가스	원유	풍력	수력	태양광
10	991	549	782	14	8	57

자료 : A guide to life-cycle greenhouse gas(GHG) emissions from electric supply technologies, IAEA(2007)

2009년 및 2020년 전세계 탄소배출량¹⁾

2009년 300억톤	→	2020년(예상)	
		미규제시 340~400억톤	UN제시안 이행시 ²⁾ 290억톤

- 주 : 1) 산림벌채(deforestation)에 의한 탄소배출량 추정치 200억톤 제외
 2) 각국이 UN에 제시한 실행가능한 수치의 합계이며 UN의 당초 목표치는 240억톤

자료 : The Economist(3.26)를 재정리

— 더욱이 현재 논의중인 “포스트 교토체제”(2013년 이후)에는 중국, 미국, 주요 신흥시장국 등 탄소배출량이 많은 국가들도 참가할 예정이어서 원전에 대한 의존은 불가피

- 미국, 중국 등 교토협약 미참가국의 2008년 탄소배출량은 1990년 대비 76%나 증가하여 참가국의 2.5배에 달하는 실정

국가별 탄소배출량 규모

	1990	2008	(억톤) 증가율(%)
교토협약 참가국	87.9	79.8	-9.2
(캐나다)	4.3	5.5	27.4
(유럽선진국)	31.5	32.2	2.2
(일본)	10.6	11.5	8.1
(동유럽)	38.5	26.2	-31.9
미참가국	115.7	203.7	76.1
(미국)	48.7	56.0	14.9
(중국)	22.4	65.5	191.9
(중국제외 아시아)	15.1	35.2	133.4
(남미)	8.7	14.8	69.8
(중동)	5.9	14.9	151.9

② 원전의 높은 가격경쟁력

— 전력생산 비용면에서 원전은 생산단가가 가장 낮으며 최근 고유가 지속으로 가격경쟁력이 더욱 높아지고 있는 상황

- 2009년 기준 원전의 전력생산단가는 MWh당 29~82달러*로 다른 에너지원의 1/6~1/2에 불과

* IEA추정. 석탄 및 천연가스를 연료로 한 발전은 탄소배출량 1톤당 30 달러의 탄소거래비용이 추가로 소요되는 것으로 가정

에너지원별 전력생산 단가¹⁾

(USD/MWh)				
원자력	석탄	천연가스	풍력	태양광
29~82	54~120	67~105	48~163(내륙) 101~188(해안)	215~600

주 : 1) 건설 및 연료투입비용, 탄소거래비용, 시설 운영·보수 및 폐쇄 비용 등을 모두 포함하였으며 사용기간중 5% 할인율(discount rate) 적용

자료 : IEA, Projected Costs of Generation Electricity(2010)

- 재생에너지는 설치장소의 제약*, 높은 건설비용 등으로 경제성이 매우 낮은 데다 일부 부작용**도 수반

* 태양광, 풍력, 조력 등은 설치장소의 제약이 큰데 독일의 경우 풍력은 북부, 태양광은 남부가 적합하나 산업단지는 중부내륙에 집중되어 있어 동 재생에너지 활용설비를 설치하더라도 고압송전(약 4,500km)에 소요되는 추가 비용이 110억유로에 달하는 것으로 추정(The Economist, 4.9일)

** 풍력의 경우 소음, 조류이동 방해, 대규모 구조물로 인한 미관상 문제 등

- 특히 2013년부터 기후변화협약의 적용을 받게 되는 신흥시장국*은 향후 원전을 적극 활용할 수밖에 없는 상황

* 중국은 2020년까지 탄소배출량을 2005년 대비 40~45% 감축하려는 목표를 공식 발표

- 이 같은 상황을 고려하여 중국, 러시아, 인도 등이 향후 대규모 원전 건설 계획을 마련하여 추진중

⇒ 향후 세계 원전산업은 안전성 우려에 따른 신규 원전건설 지연, 천연가스 등을 이용한 전력 대체생산 등으로 단기적으로 위축될 것으로 예상되나

중장기적으로는 기후변화협약 이행 필요성, 높은 경제적 효율성 등을 고려할 때 원전에 대한 의존도가 크게 낮아지지는 않을 것으로 전망

o 다만 전문가들은 원전의 안전성 제고를 위한 국제적인 협조체제 구축이 긴요하다고 지적

— 특히 다수의 원전 건설을 계획하고 있는 신흥시장국에서 안전성이 높은 3세대 형태*나 가압경수로**방식 등으로 원전이 건설될 수 있도록 주변국과의 긴밀한 협조체제를 강화할 필요

* 1960~90년대 건설된 2세대 원자로에 비해 안전성을 향상시킨 형태로 사고시 노심용융 확률이 2세대에 비해 1/100로 낮아지고 진도 7.3의 지진(2세대는 6.5)을 견디도록 설계

** 과거 체르노빌 원자로는 흑연경수로형, 이번 후쿠시마 원자로는 비등경수로형으로 효율성은 높지만 안전성은 가압경수로형 등에 비해 떨어지는 것으로 평가. 원자로 형태에 대한 자세한 내용은 <참고2> 원자로의 종류와 특징 참조

<참고1>

원전 사고등급별 주요 사례

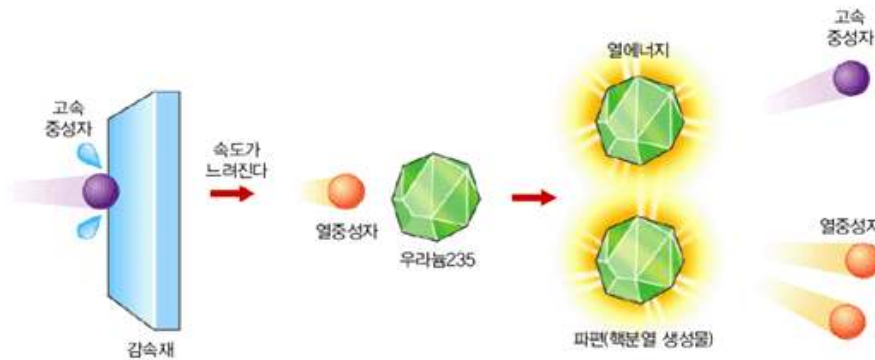
등급	지역	연도	내용
7	구소련 체르노빌	1986	체르노빌 원전 노심(reactor core)에서의 화재·폭발에 따른 방사성 구름(radioactive plume) 확산으로 유럽전역에서 피해 발생, 사상 최악의 원전사고
	일본 후쿠시마	2011	지진과 쓰나미로 인해 후쿠시마 제1원전에서 노심용해, 연료 저장소(fuel pond) 화재가 발생하면서 주변지역 및 바다에 방사성물질 유출
6	구소련 키시탐	1957	핵폐기물 재처리 시설의 냉각시스템 오작동으로 폭발이 발생하여 70~80톤의 액체 핵폐기물이 유출, 통계에 따르면 1만명 이상이 심각한 방사성물질에 노출
5	영국 윈드스케일	1957	윈드스케일 원전 노심에서 화재 발생, 방사능을 포함한 연기가 영국 전역과 유럽 일부 지역으로 확산
	미국 스리마일 아일랜드	1979	펜실베이니아 원전에서 밸브 이상으로 노심이 부분적으로 용해, 사고의 심각성에도 불구하고 상대적으로 소량의 방사성물질 유출이 발생
	브라질 고이아니아	1987	폐쇄 병원에서 도난당한 고농도의 염화세슘 보관용기가 폐품처리장에서 해체되면서 많은 사람들이 높은 수준의 방사성물질에 노출, 네 명이 사망
4	일본 도카이무라	1999	도카이무라의 한 실험 원자로에서 임계량 이상의 원료 투입으로 핵분열이 발생하면서 직원 두 명이 방사성물질에 노출되어 사망
3	영국 셀라필드	2005	핵폐기물 재처리시설에서 질산에 녹아 있던 20톤이 넘는 원료가 파이프에서 유출, 1957년 윈드스케일 사고지역과 같은 지역으로 외부로 확산되지는 않음
2	스웨덴 포스마크	2006	냉각시스템의 전력 공급을 위한 네 개의 디젤발전기 중 두 개가 제대로 작동되지 않으면서 원자로가 폐쇄
1	프랑스 그라블린	2009	노심의 핵연료 교체 과정에서 문제가 발생하여 원전 직원들이 대피하였으며 방사성물질 유출은 일어나지 않음

자료: The Economist(4.15)

<참고2>

원자로의 종류와 특징

- 원자로는 우라늄 핵분열로 생긴 중성자가 다른 우라늄과 충돌하여 핵분열 연쇄반응을 일으키는 공간
- 핵분열을 일으키는 연료(우라늄), 핵분열 연쇄반응을 도와주는 감속재*, 열을 전달하는 냉각재, 연쇄반응 속도를 조절하는 제어봉** 등으로 구성
 - * 핵분열에 의해 생성된 고속중성자를 속도가 느린 열중성자로 바꾸어 핵분열을 용이하게 하는 역할을 하며 보통 경수(H₂O)와 중수(D₂O), 흑연 등이 쓰임
 - ** 중성자를 흡수할 수 있는 재질로 구성되어 있어 핵분열 정도를 조절



자료: 한국원자력문화재단

- 원자로는 감속재 종류에 따라서 경수로, 가압중수로, 흑연감속로 및 고속증식로 등으로 구분되며 방식에 따라 연료*, 냉각재 등이 다양
 - * 우라늄 235 비율이 높은 농축우라늄이 천연 우라늄에 비해 가격이 높으나 보통 물인 경수를 감속재로 사용할 수 있음

감속재 및 냉각재 종류에 따른 분류

	경수로		가압중수로	흑연감속로		고속증식로
	가압경수로	비등경수로		가스냉각로	흑연경수로	
냉각재	경수(H ₂ O)	경수	중수(D ₂ O)	이산화탄소 또는 헬륨	경수	용융 나트륨 ¹⁾
감속재	경수	경수	중수	흑연	흑연	필요없음
연료	농축우라늄	농축우라늄	천연 우라늄	농축우라늄, 천연우라늄	농축우라늄	플루토늄과 우라늄의 혼합

주 : 1) 고속증식로 중 가장 일반적인 모델인 LMFBR(Liquid Metal Fast Breed Reactor)
 자료 : Institute for Energy and Environmental Research

○ **(경수로)** 가압 여부에 따라 가압경수로와 비등경수로로 구분되며 플루토늄 생산이 불가능

— 비등경수로는 냉각재 자체가 증발하여 발전기를 돌리는 형태로 증기발생기는 필요 없으나 방사성물질 유출을 막기 위해 복잡한 차폐 및 안전 설비 등이 필요

— 가압경수로는 냉각재에 압력을 가해 열전달력을 높인 형태로 냉각재와 증기발생용 냉각수가 분리되어 **가장 안전한 원자로로 인식**

○ **(가압중수로)** 천연우라늄과 중수(D₂O)를 사용하고 가동 중에 연료를 교체할 수 있는 것이 특징이나 플루토늄 생산이 가능해 IAEA의 강도 높은 규제 및 감시를 받음

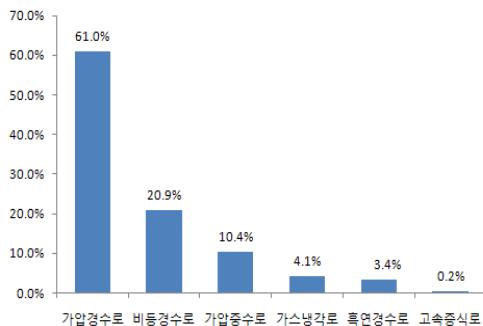
○ **(흑연감속로)** 값이 싼 흑연을 감속재로 사용하고 플루토늄 생산에 유리하지만 상대적으로 큰 부피의 원자로를 필요로 하며 체르노빌 원전 사고 이후에는 채택되지 않는 방식

○ **(고속중식로)** 우라늄을 플루토늄으로 변환시킴으로써 소모되는 핵연료에 비해 더 많은 연료를 만들어내기 때문에 효율성이 매우 높으나 플루토늄 생성에 대한 정치적 부담*으로 발전이 더딘 상황

* 미 카터 대통령은 플루토늄 유출과 연계된 테러 발생을 우려해 개발중단을 지시

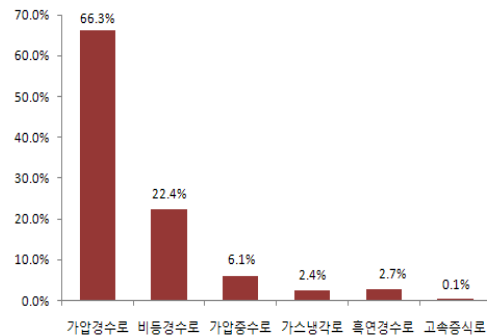
□ 현재 가동 원자로 수 및 발전량 면에서 가압경수로는 가장 큰 비중을 차지

가동 원자로 수 기준



자료 : IAEA

발전량 기준



자료 : IAEA

□ 일본의 후쿠시마 원전은 비등경수로를 사용하고 있는데 사고 발생시 방사성물질 누출 가능성이 가압경수로에 비해 큰 것으로 평가

○ 비등경수로로는 냉각수 자체가 원자로에 주입되어 증기로 바뀐 뒤 터빈을 통해 전기가 생성되는데 이때 증기를 통한 방사성물질 유출 위험이 존재

— 또한 이번 후쿠시마원전은 전력공급이 끊긴 후 냉각수 공급이 중단되어 원자로의 노심이 용융되었으며 건물파손으로 내부의 방사성물질이 그대로 노출

○ 가압경수로에서는 1차회로의 냉각수가 원자로에서 발생한 열을 2차회로의 냉각수에 전달*하고 열을 얻은 2차회로 냉각수가 증기로 변해 터빈을 통과하면서 전기를 발생

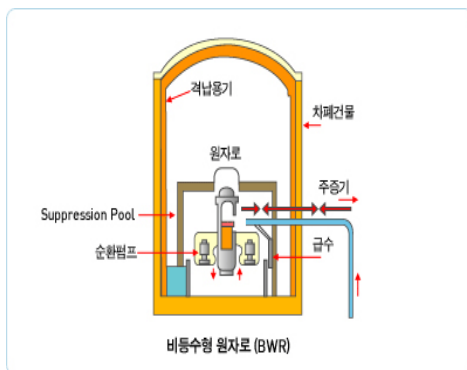
* 이때 가압기는 냉각수의 끓는점을 높여 열전도율을 높임

— 비등경수로와는 달리 전력공급이 끊겨도 1차회로 내에 냉각수가 계속 존재하여 원자로의 핵반응을 서서히 억제하는 효과가 있고

1차 및 2차 회로의 냉각수가 완전 분리되어 있어 원자로 용기가 파손되지 않는 한 방사성물질 누출 가능성이 상대적으로 낮은 편*

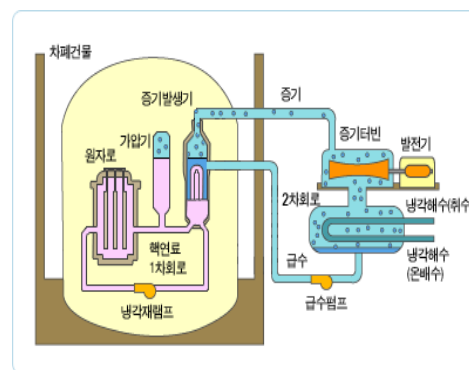
* 1979년 사고가 발생한 미국 스리마일 아일랜드 원자로는 가압경수로 방식이었는데 방사성물질이 거의 누출되지 않았음

비등경수로



자료 : 한국전력공사

가압경수로



자료 : 한국전력공사