

輕水爐開發現況과 將來展望



星野建樹

東京電力(株) 原子力建設部

서론

전세계의 에너지수요는 앞으로도 계속 증가할 것으로 보인다. 이같은 상황하에서 원자력 에너지는 배기가스에 의한 온실효과로 인한 지구온난화문제와 에너지안보문제에 대한 대응책이라는 차원을 넘어 훨씬 중요한 역할을 하게 되었다.

일본에서는 또 1990년 10월에 장기에너지수급계획이 발표되었는데 이 계획은 2010년까지 원자력발전설비용량을 72,500MWe로 확장하는 것을 목표로 하고 있다<표 1>.

현재의 경수로(LWR)는 많은 경험을 쌓은 것으로 앞으로도 전세계적으로 원자력발전의 주류를 이룰 것으로 예상된다. 이같은 전망에 따라 통산성내의 에너지자문위원회는 미래형경수로의 기술과 개발현황을 조사하고 지난 6월에 이에 관한 보고서를 마무리지었는데 여기서 그 내용을 소개하고자 한다.

배경

1. 외국의 LWR기술

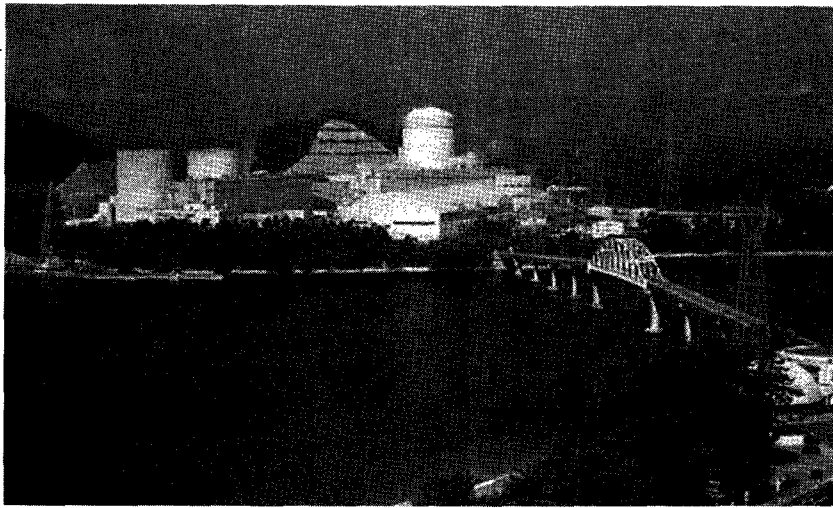
일본의 원자력발전시대는 영국계 가스냉각로인 도카이(東海) 1호기가 1966년에 상업운전을 개시함으로써 시작되었다. 그후 1970년에 미국계 경수로인 쓰루가(敦賀) 1호기(BWR)와 미하마(美浜) 1호기(PWR)가 계속해서 상업운전을 시작했다. 이때부터 경수호가 본격적으로 개발되기 시작했다.

1970년대에 처음 도입된 원자로는 많은 문제를 일으켰는데 BWR의 응력부식균열(SCC)과 PWR의 증기발생기튜브손상과 같은 것이다. 이로 인해 발전소가동률이 50% 정도로 낮아졌다.

2. 자체기술개발

이같은 사태를 극복하고 자체기술을 배양하기 위해 일본정부당국(통산성)과 산업계는 3단계의 설비개선·표준화계획을 시작했다. 이 계획에 따라 많은 기술개발이 이루어졌는데 여기에는 원자로의 용량증가, 설비의 신뢰성개선, 연료재장전작업기간의 단축, 직업적 피폭선량 감소, 방사성폐기물의 감소 등이 포함된다<그림 1>.

제3차 설비개선·표준화계획에서는 특히 1,



300MWe급의 개량형LWR(ABWR : 개량형 BWR, APWR : 개량형PWR)의 기술을 개발해 東京電力의 가시와자끼-가리와(柏崎·刈羽) 원전 6, 7호기에 이를 적용하고 있다. 건설공사가 이미 시작되었고 상업운전은 6호기가 1996년에, 7호기가 1997년에 시작되는 것으로 계획되어 있다.

3. LWR의 운전현황

현재 일본에서는 39기의 경수로가 상업운전 중인데 그 총설비용량은 31,893MWe로 전체발전설비용량의 18%, 전체발전량으로는 26%를 차지하고 있다. 이외에 13기의 경수로(총설비용량 13,849MWe)가 현재 건설중이거나 계획중에 있다. 이들 원전의 운전실적을 살펴보면 고장회수는 줄었고 설비개선을 통해 이용률도 점차 회복되어 1983년부터 계속 70% 수준을 유지하고 있다. 불시정지회수도 1984년부터 爐·年當 1회 이하로 낮아졌다<그림 2,3>.

직접적피폭선량도 피폭선량감소방안을 강구해 계속 줄어들었다. 이같은 방안으로는 점검·보수작업에 자동설비사용, 보수절차개정, 최소한의 코발트성분을 함유한 재료사용(코발트 60을 억제하기 위해서) 등을 들 수 있다<그림 4>.

연료사고율의 저하와 여과설비의 개선 등으로 원자력발전소에서 방출되는 기체 및 액체방사성폐기물은 상당히 줄어들었고 고체방사성폐기물 또한 소각로와 같은 설비를 사용함으로써 많이 감소되었다<그림 5,6>.

외국에서의 LWR 신기술 개발전망

1950년대에 LWR기술이 도입된후로 40여년이 지난 지금 전세계의 원자력발전소설비용량은 총 344,000MWe(1990년말 현재)에 이르고 있다. IAEA에 가입한 나라들의 원자력발전소에서 전체발전량의 약 17%를 공급하고 있다. 원자력발전소의 형식면에서는 LWR이 전체원자력발전용량의 85%를 차지하고 있다.

1. 유럽에서의 개발전망

유럽에서는 기존의 LWR기술을 개선하고 표준화하기 위한 작업이 추진되어 왔으며 그 결과 최신형LWR인 N-4(1,500MWe급)와 Konvoi(1,300MWe급)가 개발되었다. 이들 LWR은 자국에서 축적한 경험과 기술을 토대로 높은 경제성과 안전성 및 표준화를 위한 개선이 이루어진 다음에 개발된 것이다.

앞으로의 LWR개발은 EDF社에서 주도하는 NPI社의 활동과 REP-2000프로젝트를 통해 추진될 것이다. 이 개발활동에서는 사고관리와 운전·보수성개선을 위한 대책을 마련하는데 역점을 두게 될 것이다.

2. 미국에서의 개발전망

1987년 이후로 미국에서는 원자력발전소의 신규주문이 없었으나 연방정부, 전력회사와 제조업체들은 앞으로의 전력수요에 대비해 1990년대에 원자력발전의 재활성화가 불가피할 것으로 전망하고 ALWR개발계획을 추진하고 있

다.

이 계획에서는 두가지 형식의 원자로가 검토되고 있는데 하나는 기존의 원자로와 같은 개념의 대형의 개량형LWR(1,300MWe급의 SP-90, ABWR, System 80+ 등)이고 또 하나는 수동적이고 간소화된 안전시스템을 갖고 있는 소형의 개량형LWR(600MWe급의 AP-600, SBWR)이다.

이들 개량형LWR(ALWR)의 개발목적은 운전원의 안전도확보와 인적과실에 대한 개선책을 마련하는 동시에 표준화, 건설공기단축, 보수성개선 등을 목표하고 있는 것이다.

일본에서의 개발전망

1. 기본방침

일본의 LWR기술은 운전경험을 통해 축적된 기술과 20여년간에 걸쳐 경험한 사고·고장에 대한 대책 및 일반산업기술에 힘입어 현재 세계에서 가장 높은 수준을 유지하고 있다. 외국의 LWR개발노력을 감안할 때 일본의 LWR기술개선이 필요한 것으로 생각된다.

지금 일본은 신규발전소의 건설부지를 확보하는데 어려움을 겪고 있다. 이같은 사례는 더욱 심화되고 있는데 그 이유는 체르노빌사고후로 더욱 많은 국민들이 원자력발전소의 안전성에 관심을 갖게 되었고 이에 사회적인 가치관과 국민의식의 변화도 작용한 것으로 보인다. 이같은 사태를 감안할 때 원자력발전소에 대한 이해를 촉진시키고 원자력발전소의 개발과정에서 안전수준을 높이기 위한 지속적인 노력이 필요하다. 원자력발전은 그 기술을 개발하기 시작한 당초부터 안전성을 최우선적으로 고려해 개발되어 왔다. 개발과정에서는 20여년간에 걸친 많은 운전경험과 그동안에 마련한 사고·고장대책이 큰 도움이 되었다.

앞으로의 LWR개발에서도 과거와 운전경험과 새로운 기술을 바탕으로 한 기술을 개발하는 것이 발전형원자로개념을 채택하는 것보다 더 중요하고 효과적이라는 것을 경험을 통해 깨닫고 있다.

2. 앞으로의 LWR기술개발의 방향

(1) 안전성확보

① 고장예방대책의 개선

노후화되는 원자력발전소의 수가 늘어남에 따라 이 문제는 앞으로 일본에서 큰 문제가 될 것으로 보인다. 안전시스템의 고장을 예방하기 위해서는 국내외에서의 경험을 반영함은 물론 노후화문제를 감안한 설비의 감시, 점검, 성능, 보수면에서 개선된(선진적이고 발전된) 보수시스템과 설계가 필요하다. 이같은 대책은 기존 발전소에서 적용하는 것이 바람직하다.

② 인적과실예방대책의 개선

안전대책을 개선하기 위해서는 설계·제작단계에서 운전·보수에 이르기까지의 인적과실에 대한 예방대책 뿐만 아니라 정상운전상태에서 긴급사태에 이르기까지의 인적과실에 대한 예방대책도 개선할 필요가 있다. 이를 위해 원자력발전소안전성의 기본원칙으로 되어 있는 「철저한 방어조치」의 각 단계에서 운전·보수요원들의 인적과실을 방지 또는 수용할 수 있는 시스템, 즉 인적과실을 범하더라도 심각한 사태로 발전하지 않는 시스템을 추구할 필요가 있다. 이러한 관점에서 다음과 같은 Man-machine interface의 개선책이 요구된다.

㉠ 시스템의 간소화와 일상적인 운전조작과 작업의 자동화를 통해 사람들이 개입하게 될 기회를 줄인다.

㉡ 충분한 여유도를 가진 시스템을 채용한다.

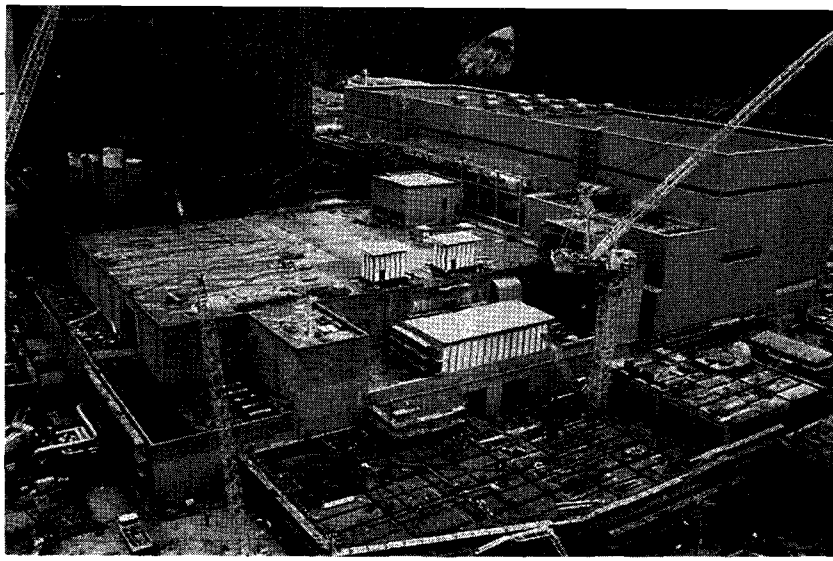
㉢ module방식을 통해 시스템들의 작업부담을 줄인다.

㉣ 데이터처리시스템을 개선함으로써 운전요원들에 대한 지원을 강화한다.

③ 안전성의 설계개선책

일본에서는 「철저한 방어」 원칙에 따른 대책을 강구하고 있기 때문에 실제로 설계기준사고 이상의 사고는 발생하지 않을 것 같다. 그러나 이같은 중대사고의 예방과 축소를 위한 연구는 계속해야 할 것이다.

이같은 관점에서 설비의 안전여유도를 분명히 밝히고 설계를 최적화시키기 위해 PSA(확



를론적 안전성평가)방법을 효과적으로 적용해야 한다. 또한 이 PSA방법을 효과적으로 구사해 사고관리에 대한 대책을 설계에 반영시켜야 할 것이다.

④ 수동적 안전성 추구

안전성을 개선하기 위한 방법으로 주로 안전에 관련된 시스템에 수동적시스템을 사용하는 문제가 국내외적으로 검토되고 있다. 수동적시스템을 더 많이 사용한다는 것은 신뢰성면에서의 기술적인 문제와 발전소설계면에서의 제약을 가져오는 결점도 있지만 그 반면에 운전·보수가 용이하고 시스템의 간소화로 안전성의 실패확률이 줄어든다는 이점이 있는 것 같다. 이같은 사실을 인정해서 수동적시스템을 더 많이 사용하는 것이 바람직하다.

⑤ 원자로폐쇄방법의 개선

원자력발전소의 수명차원에서 볼 때 개선된 폐쇄방법을 적용함으로써 직업적피폭선량과 방사성폐기물을 줄이는 것이 매우 중요하다. 현행방법으로도 폐쇄작업이 가능하지만 원격조종, 자동화, 작업량축소 등의 보다 개선된 방법으로 하는 것이 바람직하다. 이같은 대책은 신형 LWR의 설계단계에서부터 설계에 반영해야 할 것이다.

(2) 우라늄자원의 효과적인 사용

세계적으로 우라늄의 수급균형은 중장기적으로는 부족한 쪽으로 기울어질 것으로 보인다. 에너지안보차원에서는 천연우라늄의 소비를 줄이고 LWR에서도 우라늄자원을 효과적으로 사용하는 것이 가장 중요하다(그림 7).

이같은 전망은 우라늄의 효과적인 사용을 위한 기준을 마련하는 것이 얼마나 중요한 것인가를 우리에게 일깨워준다.

(3) 장기전망에서 본 신축성

원자력발전소를 둘러싼 핵연료주기, 입지조건, 전력수급에 관한 장래전망은 장기적으로 볼 때 많은 가능성을 띠고 있어 한가지 시나리오만으로는 요약할 수 없다.

이같은 상황에서 원자력에너지를 효과적으로 개발, 사용하기 위해서는 복수선택 또는 변경가능한 시스템을 추구하는 동시에 원자력발전의 기본적인 역할을 포함한 폭넓은 시각에서 장래의 추세에 탄력적으로 대응할 수 있는 기술을 개발할 필요가 있다.

① 연료와 노심의 성능개선

연료주기와 전력수요간의 탄력성있는 조화를 이룩하기 위해 연료와 노심의 성능을 다음과 같이 개선해야 한다.

㉠ 연소도가 높은 연료사용

㉡ 플루토늄과 같은 많은 종류의 연료사용

㉢ 탄력적인 연료관리

㉣ 부하추종운전성능 개선

㉤ 장시간의 주기운전

② 입지선정기술의 개발

입지선정범위를 넓히기 위해 다음과 같은 개선된 입지선정기술을 개발해야 한다.

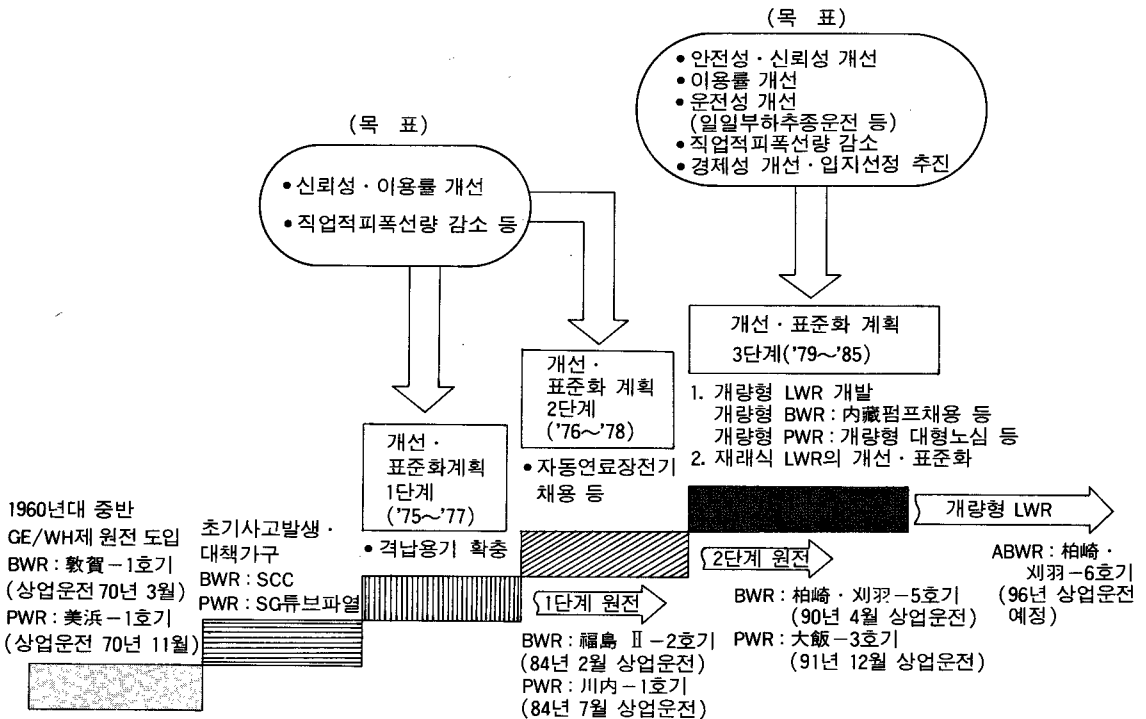
㉠ 제4기 퇴적층, 해안, 지하 등의 각종 입지에 대한 선정기술개발

㉡ 개선된 耐震설계

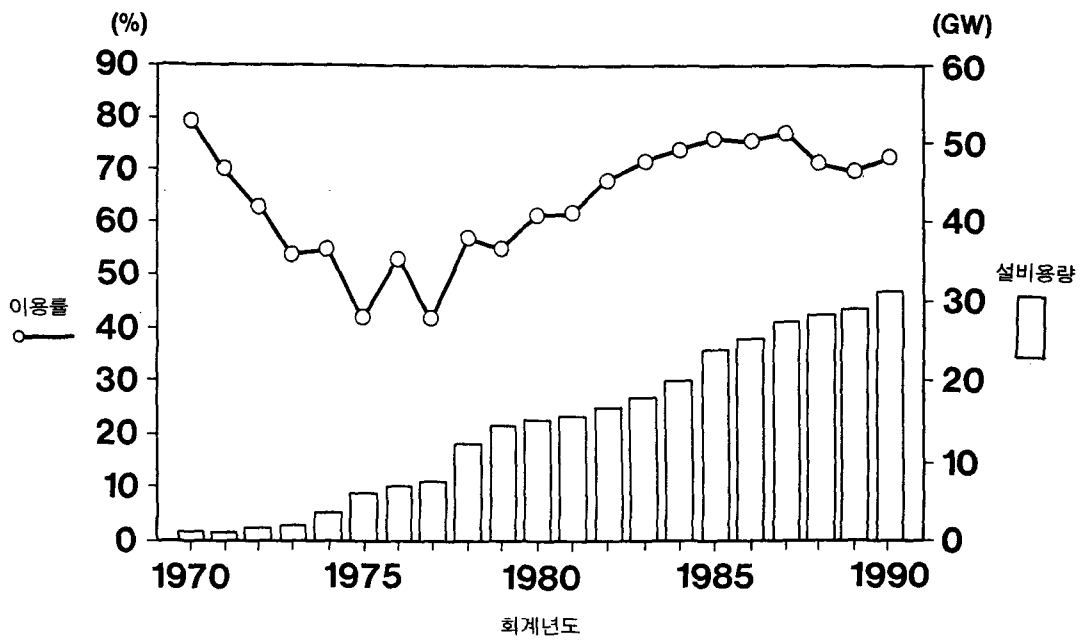
〈표 1〉 장기에너지 수급전망(석유대체에너지 공급목표)

회계년도	F.Y.1989(실 적)		F.Y.2000		F.Y.2010	
항 목	499백만 kℓ		594백만 kℓ		657백만 kℓ	
구 분	실 적	구 성 비(%)	실 적	구 성 비(%)	실 적	구 성 비(%)
1차에너지 공급	499백만 kℓ		594백만 kℓ		657백만 kℓ	
에너지종류						
신에너지원	6.5백만 kℓ	1.3	17.4백만 kℓ	3.0	34.6백만 kℓ	5.3
수 력	880억 kWh (20.5백만 kW)	4.6	910억 kWh (22.7백만 kW)	3.7	1,050억 kWh (26.2백만 kW)	3.7
지 열	0.4백만 kℓ	0.1	1.8백만 kℓ	0.3	6백만 kℓ	0.9
원 자 력	1,830억 kℓ (29.4백만 kℓ)	8.9	3,300억 kℓ (50.5백만 kℓ)	13.3	4,740억 kℓ (72.5백만 kℓ)	16.9
L N G	49.9백만 kℓ	10.0	65백만 kℓ	10.9	80백만 kℓ	12.2
석 탄	113.6백만 t	17.2	142백만 t	17.5	142백만 t	15.7
석 유	289백만 kℓ	57.9	305백만 kℓ	51.3	298백만 kℓ	45.3
합 계	499백만 kℓ	100.0	594백만 kℓ	100.0	857백만 kℓ	100.0

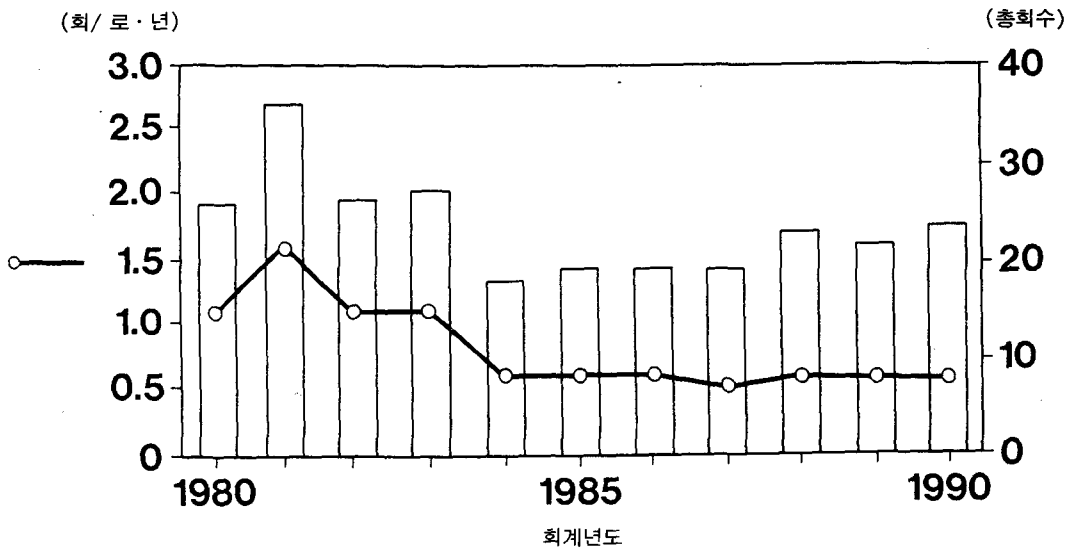
- 주) 1. 석유환산기준 9,250kcal / ℓ, 6,29배럴 / kℓ
 2. 신에너지에는 태양에너지, 알콜연료, 증유, 나무 등이 포함된다
 3. 수력발전에는 재래식만 포함시켰다
 4. LNG 환산기준 0.712 t / kℓ
 5. 석유에는 oil sand도 포함시켰다
 6. 구성비합계가 100%가 안되는 것은 사사오입 때문이다



〈그림 1〉 LWR 개선 · 표준화 계획

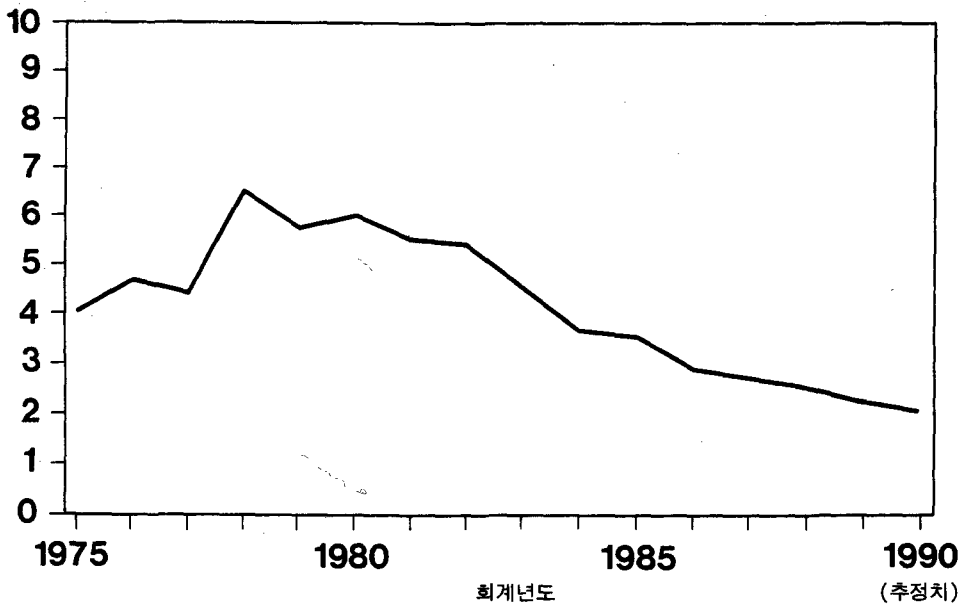


<그림 2> LWR 이용률



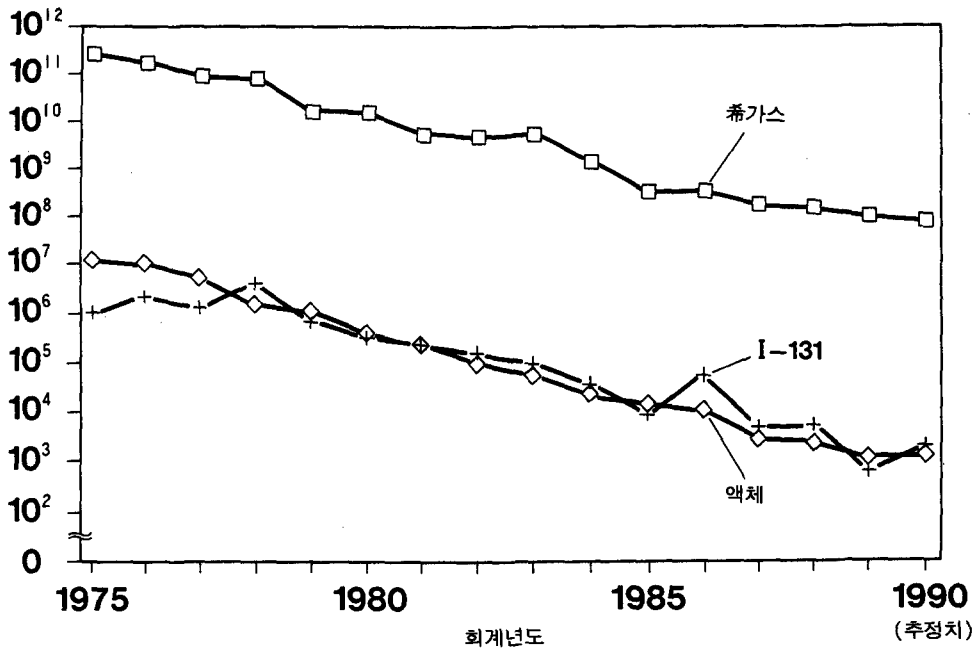
<그림 3> LWR 사고·고장 발생률

(Man·Sv/Reactor)



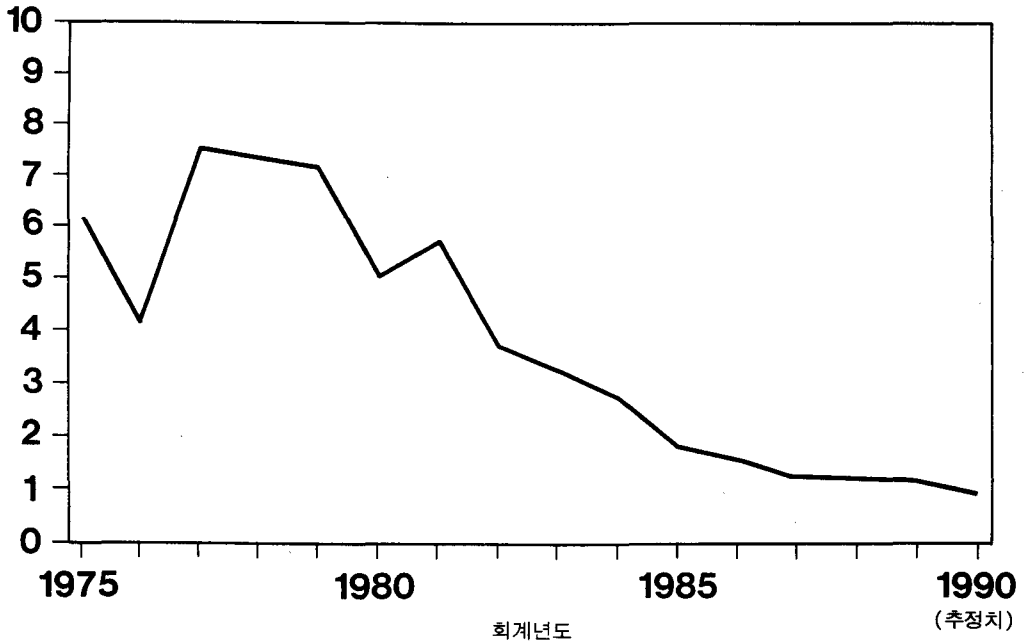
〈그림 4〉 직업적 피폭선량(LWR)

(Bq/MW/Year)



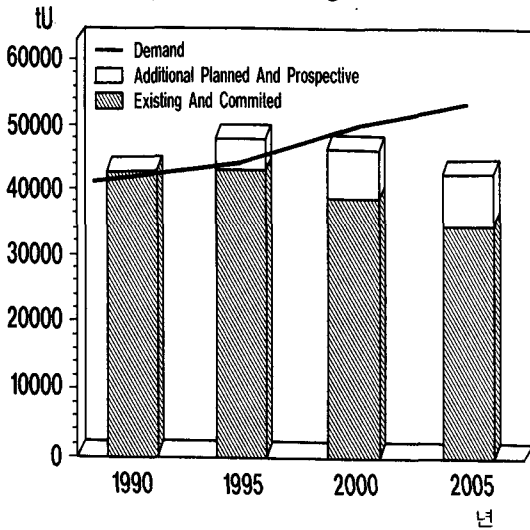
〈그림 5〉 방사성 기체·액체폐기물 방출량(LWR)

(No. of Drums/MW Year)

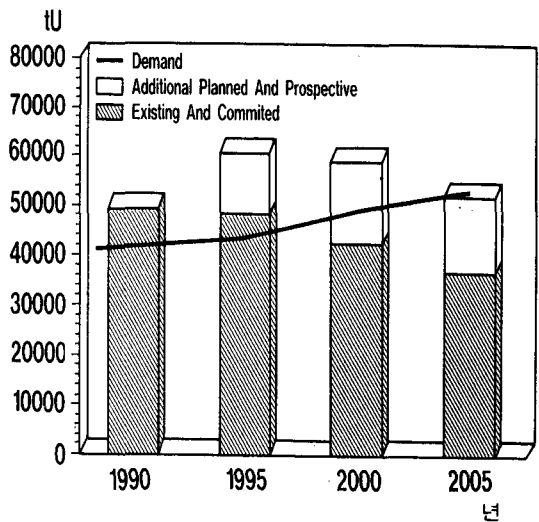


<그림 6> 방사성 고체폐기물 방출량(LWR)

A) 생산원가 \$ 80/ kgU 이하의 경우



B) 생산원가 \$ 130/ kgU 이하의 경우



주) WOCA : 중앙계획경제권 이외의 지역

<그림 7> WOCA 단기 연간우라늄생산용량