次世代 輕水爐

尾本 彰
東京電力(株) 原子力建設部

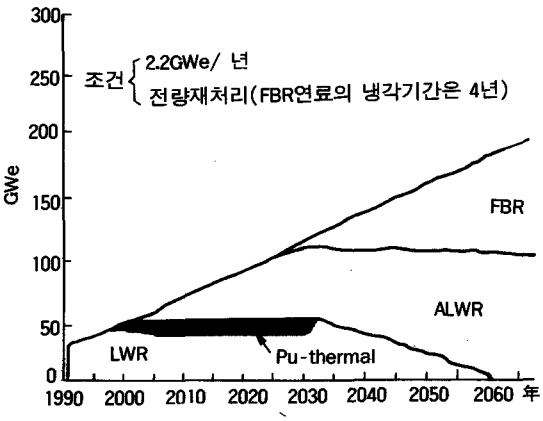
서 언

원자로의 신규발주가 중단된 나라에서는 원자력의 부활을 겨냥해 80년대부터 새로운 형의 경수로개발이 논의돼 왔다. 이러한 신규발주를 겨냥한 활성화와는 약간 성격이 다른 것이지만 고속증식로의 현재의 개발동향을 보면 2010년은 물론 그 이후에도 장기간에 걸쳐 지금까지 실적을 쌓아온 경수로가 세계의 원자력발전의 주류를 이룰 것으로 예상되므로 차세대 경수로 기술에 대한 논의가 계속되고 있다.

실제로 〈그림 1〉에서 보는바와 같이 원자력 발전개발량을 연간 2.2GWe로 가정한다면 2030년 이후에 점차적으로 FBR을 투입한다 해도 플루토늄收支에 의해 그 개발량이 제약을 받아 경수로의 존재기간이 상당히 장기화될 전망이다.

그러나 지금부터 50년전에는 세계최초의 원자로 CP-1(1942년 12월 임계)조차 존재하지 않았다는 것을 감안하면 21세기중반까지의 기술의 발전, 사회변화 그리고 이를 바탕으로 한 그 시점에서의 경수로기술을 전망한다는 것은 매우 대담한 시도라고 볼 수 있다.

1. ABWR 발전소개발에 착수해서 설계, 요소기술개발, 인허가, 건설, 시운전을 거쳐 상업운전개시에 이르기까지 약 20년이 걸리는 것을



〈그림 1〉 경수로의 역할추정

보아도 알 수 있듯이 원자력개발에는 매우 장기간의 리드타임이 필요하다는 것이다.

2. 원자로운전기간을 40년으로 잡으면 지금 우리들이 생각하고 있는 차세대 경수로는 앞서 말한 리드타임을 감안해 21세기중반까지 계속 가동될 것이므로 차세대 원자로의 개발은 시대적인 요구를 충분히 앞서 가는 것이어야 한다는 것을 알 수 있다.

차세대 경수로에 요구되는 것

세계에서 운전중인 경수로의 기본설계는 60

년대에 고정된 것으로 여기에 점차적인 개선이 이루어지고 최신기술이 도입되면서 발전돼 온 것이지만 (<그림 2>에 BWR의 예를 들었다) 세계수준의 운전경험이나 장래의 요구에 대응해 나간다는 점을 감안할 때 다음과 같은 일반적인 속성이 차세대 경수로에 요구된다고 볼 수 있다.

1. 사람과 설비장치의 관계 개선

TMI에서 水位計의 誤判, 체르노빌에서의 설계오류와 운전규칙위반(안전을 운전규제로 보장하려는 면이 강했음에도 불구하고) 또는 여러가지 말썽이 운전보수면의 인적과실과 관련이 있다는 것을 감안하면 사람과 설비의 접촉점에 관해 장래의 爐설계면에서 고쳐나가야 할 점이 몇가지 있다고 본다.

구체적인 설계로 생각할 수 있는 것은 다음과 같다.

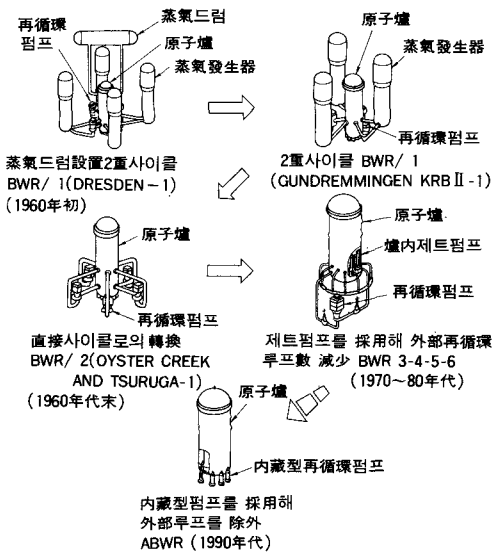
(1) 過渡변화 또는 사고시 원자로의 반응이 완만해 운전원의 대응을(이미 자동화돼 있는 부분이 많지만) 보다 쉽고 여유있게 할 수 있게 할 것

(2) 상황판단의 착오를 포함해 운전원 또는 보수원의 과실로 안전성이 위협받는 일이 없도록 할 것(인적 과실에 둔감)

(3) 원자로가 놓여져 있는 상태를 보다 정확하게 파악할 수 있을 것. 예를 들어 운전원에 대해 전문적인 시스템을 이용한 Guidance를 줄 수 있도록 정보화를 추진할 것(Man-machine interface의 개선)

더 나아가 원자로설계수준까지 세분해 보면 (1)의 예로서는 BWR의 過壓型 過渡변화에 대해 보이드계수의 절대치를 낮출 것 (2)의 예로는 사람이 개입할 여지있는 動的설비에 의하지 않고 가급적 자연의 원리에 따른 형태로 안전기능이 발휘되는 속성을 가진 것을 열제거분야에서도 적용할 것(蓄壓式 重力落下式의 ECCS나 자연순환능력의 강화 등) 등을 들 수 있다. 물론 경수로설계시에는 당초부터 저농축우라늄의 사용으로 인한 Doppler효과와 負의 보이드계수를 이용한 핵반응의 自己제어성을 갖게 하는 등 (2)의 속성이 추구돼 왔다.

이같은 사항 등은 다음의 2.항과 함께 운전보수를 사람들의 본성에 친절히 대하도록 하기 위한 조치라고도 볼 수 있다.



<그림 2> BWR의 發展過程

2. 단순한 설계

<그림 2>에서 보는바와 같이 BWR의 발전과정에서는 단순화를 추구해 왔다고 볼 수 있다. 원자로본체에 대해서는 그럴지 몰라도 부대설비에 대해서는 점차적으로 추가되고 복잡해진 면도 있다. 이같은 설계를 재수정해 단순한 설계로 하면 건설하기 쉽고 보수하기 쉽고 사람들의 조작실수도 줄일 수 있을 것으로 보인다. 잔류열제거계통과 같이 하나의 계통에서 밸브 전환으로 다목적 기능을 수행하는 것보다는 기능을 분리해서 단순한 시스템으로 하던가 발전된 기술을 도입해 단순화한 기기를 이용하는 것 등을 예로 들 수 있다.

3. 연료사이클동향에 탄력적

앞서 말한대로 차세대爐설계에서는 앞으로 20년후의 요구조건에 민감하지 않으면 안되지만 자칫하면 현재의 요구조건에 따라 설계를 하는 경우가 있을 것으로 보인다. 이를 피할 수

있는 효과적인 방법으로는 상황변화에 대응할 수 있는 탄력성을 지닌 원자로를 구상하는 것이다. 앞으로 불확실한 변수로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

(1) 플루토늄이용을 중심으로 한 연료사이클

(2) 입지가능성

(3) 인재확보 및 사람과 설비장치의 상호관계

프랑스의 EDF社는 90만kW급 PWR을 설계한 1970년중반에 이미 장래의 MOX노심을 예측해 제어봉효과의 감소대책으로 예비제어봉 노즐을 원자로에 추가설치하는 방법을 택했지만 이것은 연료사이클동향에 대처할 수 있는 탄력성을 경수로설계에 반영한 것이라고 볼 수 있다. 물론 노심설계에서 보이드계수를 낮추고 동시에 사이클에 대응할 수 있는 탄력성을 갖추도록 한다는 것은 어려운 일이다. 따라서 플루토늄을 이용하기 쉬운 경수로를 별도로 개발하는 방법도 생각할 수 있을 것이다.

또 입지상의 제약을 완화하고 가능성을 확대한다는 관점에서는 第4紀層立地, 地下입지 또는 해상입지를 추진하는 것도 거론되고 있어 이미 이러한 새로운 입지기술이 확립돼 가고 있다고 할 수 있다.

지금까지 말한 1. 2. 3.의 일반적인 속성 외에도 안전성이 더 개선되고 이것이 일반에게 알기 쉬운 방법으로 전달되는 것과 최신기술이 적용되는 것은 「새로운 설계」에 대한 사회일반의 당연한 기대이고 이같은 기대에 부응하는 것이 된다. 일본에서는 이미 발전량의 4분의 1을 차지하고 자원론적으로나 경제성에 있어 확대할 필요가 있는 것으로 에너지정책에서 다루어져 왔던 원자력발전에 대한 국민의 공감대형성에 기술면에서도 기여해야 할 것으로 생각된다.

그러나 1. 2. 3.의 일반적인 속성을 충족시키기 위해서는 상호보완할 필요가 있다. 예를 들어 노심설계분야에서는 BWR노심에 Pu장전량을 증가시키면(연료사이클면에서의 탄력성) 제어봉효과의 감소와 負의 보이드계수의 절대치증가를 수반하는 過渡반응을 완만히 하기 위해(사람과 설비장치와의 상호관계개선) 보이드계수의 절대치를 낮추어도 그만큼이 Pu장전으로 소비되는 것을 들 수 있다. 물론 이것은 보이드계수절대치를 낮추어 놓으면 필요할 때 Pu를 쉽게 넣을 수 있다는 면도 있다.

또한 예로서 안전설계분야에서도 지금까지 운전경험을 쌓으면서 개선해온 소위 동적안전시스템을 포기하고 경험이 적고 구동력이 낮은 소위 수동안전시스템을 맹목적으로 추구한다는

〈그림 3〉 차세대로의 세대분류(EDF社)

바람직한 속성	개선점(BWR의 경우)
① 사람과 설비장비의 관계개선	· 자연순환능력개선
· 過渡, 사고시의 완만한 사태진전	· 보이드계수개선 및 保有水量증가
· 운전, 보수원의 과실에 鈍感	· 靜的安全시스템의 도입 및 動的시스템과의 複合化
· 보수가 용이할 것	· 기기시스템의 자기진단성능
· 적절한 상태파악을 할 수 있는 計裝과 적절한 Guidance시스템의 이용	· 新계측기술(光sensor 등), 新제어기술적용
② 단순한 설계	· 원자로압력용기주변의 구성, 기기의 단순화
· 건설, 보수성의 개선	· Package시스템이용에 의한 교체용이화
· 단순한 시스템과 기기이용	· (n+2)시스템구성에 의한 On-line보수
③ 연료사이클動向 등에 탄력적으로 대응	· Pre-fabrication 工法확대
· 연료사이클동향에 대응하기 쉽다	· 대형 연료집합체의 도입, 사용후연료발생량감소
· 입지가능성의 확대	· 플루토늄의 효과적인 이용
	· 海上立地, 地下立地대응
	· 待避 등의 긴급시계획 불필요

것은 오히려 신뢰성과 안전성을 낮추게 될지도 모른다는 우려도 있다. 즉 수동안전시스템은 인간의 과오에 둔감하기는 하지만 시스템의 물리적 상태(背壓이나 노심으로부터의 증기흐름의 有無)에 민감할 경우가 있다는 점도 심분 고려하지 않으면 안된다. 이같은 관점에서는 사용경험도 풍부하고 강력한 구동력을 가진 동적 시스템과의 적절한 결합을 지향하는 것이 필요하다고 생각된다.

차세대 경수로 개발동향

〈그림 3〉은 프랑스 EDF社의 최신형 원자로를 포함한 차세대 원자로의 세대별 분류다(여기서는 도입세대가 분류기준이 되고 설계개념에 의한 분류는 아니다). 또 일반적으로 미국에서는 차세대 경수로에 대해 발전형과 혁신형(SBWR, AP 600)으로 분류돼 혁신형은 21세기초 이후에 운전이 시작될 것으로 추정된다. 〈그림 4〉, 〈그림 5〉에 혁신형 경수로의 개요를 보였다.

혁신형에 속하는 경수로에 대해서는 일본의 전력회사들도 미국전력연구소(EPRI)의 개발사업에 참여하고 있다. 또 일본에서는 발전형 경수로 ABWR을 「차세대 경수로에서 요구되는 것」에서 밝힌 장래로가 갖춰야 할 속성을 감안하면서 발전시키려는 시도가 산업계에서 시작되고 있다.

그런데 이같은 차세대 경수로를 볼 때 원자로출력규모에 따라 2가지 노선이 있다. 하나는 미국이나 이탈리아에서 정력적으로 다루고 있는 수동안전형 중소출력로이고 또 하나는 일본, 독일, 프랑스에서 주로 다루고 있는 대형 출력로를 기본으로 한 형식의 발전형로이다.

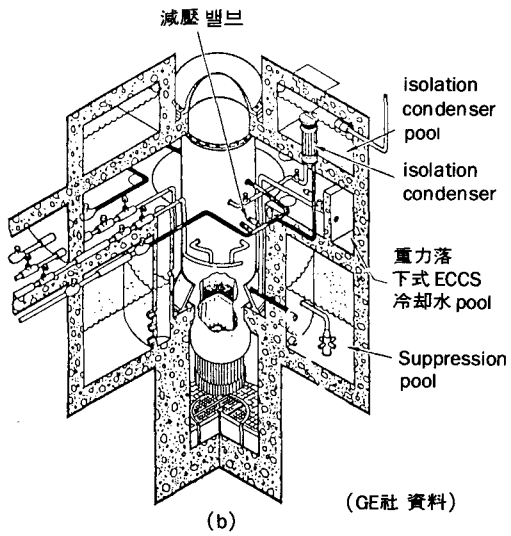
그 배경을 보면 수동안전형 중소출력로의 개발을 정력적으로 하고 있는 나라에서 원자력의 신규발주가 중단된지 오래 되었기 때문에 차세대로에서 근본적으로 새로운 설비가 필요하고 가능하다는 점(특히 미국이 그렇다) 및 전력회사가 발전소건설에 뒤따르는 경제적인 리스크를 경감시키기 위해 화력, 원자력을 불문하고 출력이 큰 것을 회피하는 경향이 있다는 점이 중요하다고 생각된다. 미국에서는 1980년대에 리드타임이 길고 자본비가 높은 대용량 원자력발전소건설을 시작했어도 오일쇼크 이후의 수요감소에 의한 화력과 원자력건설계획의 취소〈그림 6〉, 또 건설중에도 州공익사업위원회의 요청으로 건설을 일시 중단한다던지, 긴급시계획관계로 운전개시까지 장시간이 걸린다던지, 규제강화로 설계변경이나 이에 따른 개조를 한다던지 해서 최근에 운전개시한 발전소는 평균 10년 이상이 걸려 일본의 倍이상의 건설공기가 걸리고 있기 때문에 규모가 작은 전력회사에서는 건설비차입금으로 인한 금리부담이나 인건

〈그림 4〉 (a) SBWR (Simplified BWR) (b) SBWR 靜的安全시스템

	現在의 BWR	ABWR	SBWR
制 御 棒	水壓式	水壓－電動式	左 同
計裝制御	Analog	Digital	左 同
Cable	Hard wire	Multi-flex	左 同
原 子 爐 再循環系	外部루프	原 子 爐 內藏펌프	自然循環
安全시스템	動 的	單純化動的	靜的重力落下注水 減壓밸브 Steam injector
出 力	100万kWe	135.6万kWe	60万kWe

(DOE 및 GE社 資料)

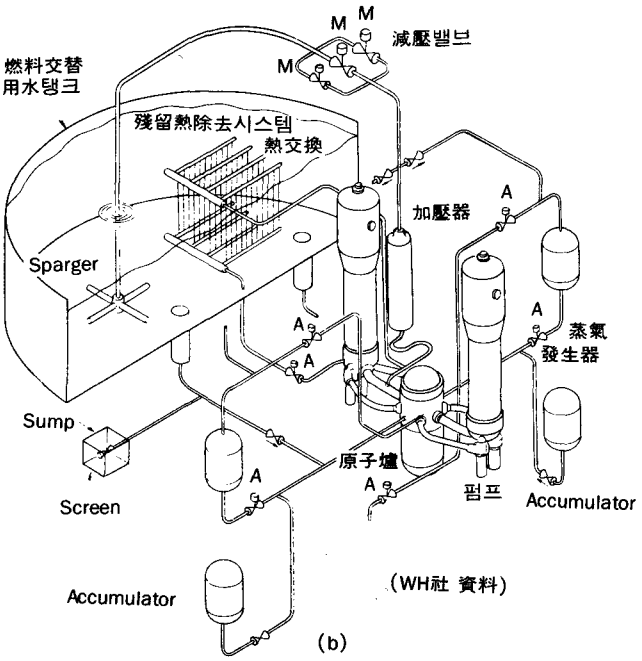
(a)

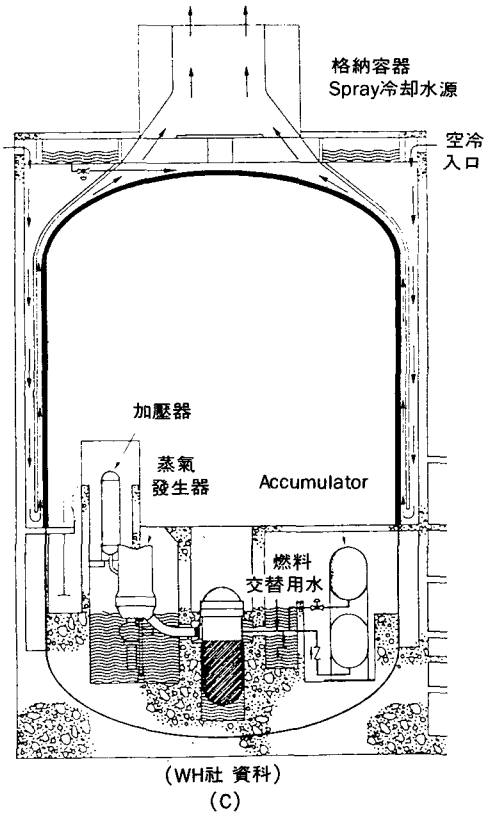


(GE社 資料)

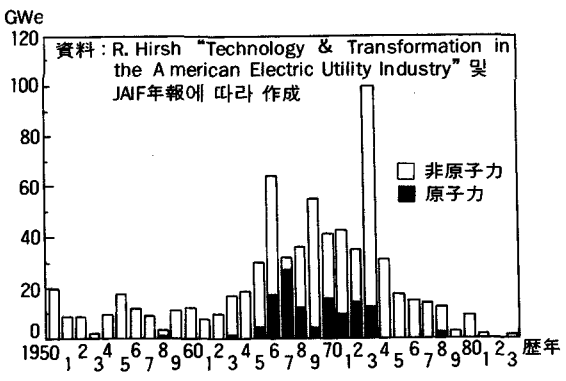
(b)

① 출력밀도감소
② 動的기기의 대폭 제외(60%제외안)와 시스템개량
③ 靜的安全시스템
자연순환 RHR 열교환
蓄壓式/ 重力落下式 ECCS
外部자연냉각격납용기냉각
④ 內裝型 1차냉각펌프채용 등 기기개량
(DOE 및 WH社 자료에 의해 작성)
(a)

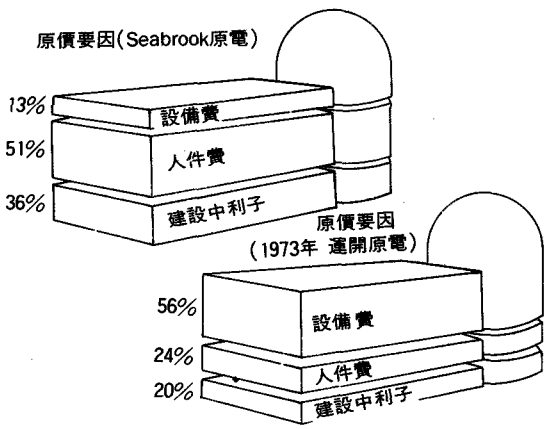




〈그림 5〉 (a) AP 600의 特徵, (b) AP 600 靜的安全시스템, (c) AP 600 靜的安全시스템에 의한 爐心注水와 LOCA 後長期冷却



〈그림 6〉 美國에서의 新規發電源發注取消 (1950－83)



〈그림 7〉 原子力發電建設費(美國)比較

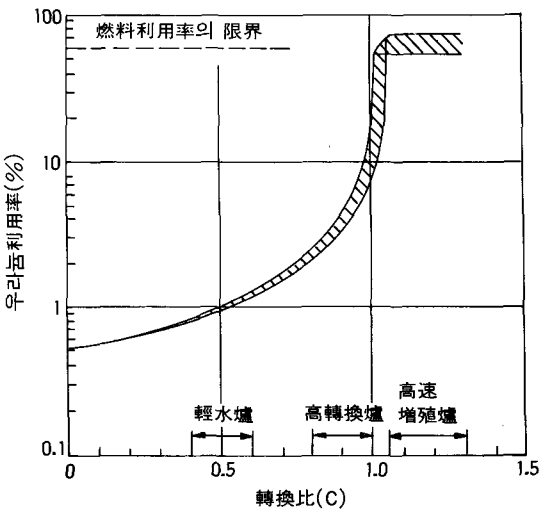
비증가를 감당하기 어렵게 되었다 (〈그림 7〉은 1973년 운전개시한 발전소와 최근에 운전개시한 Seabrook 원전의 자본비구성을 비교한 것). 여기에 표준화되고 인허가취득이 용이하고 공정이 짧은 중소출력로를 추구하는 이유가 있다.

이에 비해 감소하고 있다고는 하지만 일본이나 프랑스에서는 대형로에서 얻은 경험축적을 바탕으로 앞서 말한 속성을 인정하면서 발전시켜 나간다는 생각이 강하다고 할 수 있다.

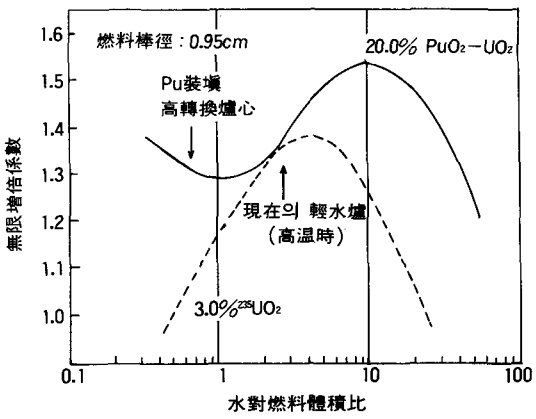
차세대 경수로의 개발은 ABWR 개량발전로나 AP 600, SBWR 뿐만 아니라 그외에도 보다 더 참신한 고유안전중소형로 PIUS(ABB 社)나 高전환로의 개발도 진전되고 있다.

고전환로는 水 對 우라늄비율이 지금보다 훨씬 작은 조밀한 노심으로 현재의 경수로轉換比 0.5~0.6을 0.8~1.0로 높여 우라늄자원을 절약하고 또 플루토늄이용전략의 일환으로도 볼 수 있는 것이다〈그림 8〉. 이 경우에는 노심이 水對 우라늄비율의 변경에 따라 보이드계수가 正으로 바뀌는 경우도 있을 수 있을 것이다 〈그림 9〉. 또 BWR의 노심특성을 살린 증기냉각 노심(日立)에 의해 전환비를 1.0이 되게 하는 검토도 이루어지고 있다.

PIUS에 대해서는 고유안전성의 項에서 언급했기 때문에 여기서는 생략한다. 또 이외에



〈그림 8〉 轉換比와 우라늄利用率의 關係



〈그림 9〉 k∞ 對 V_M/V_F

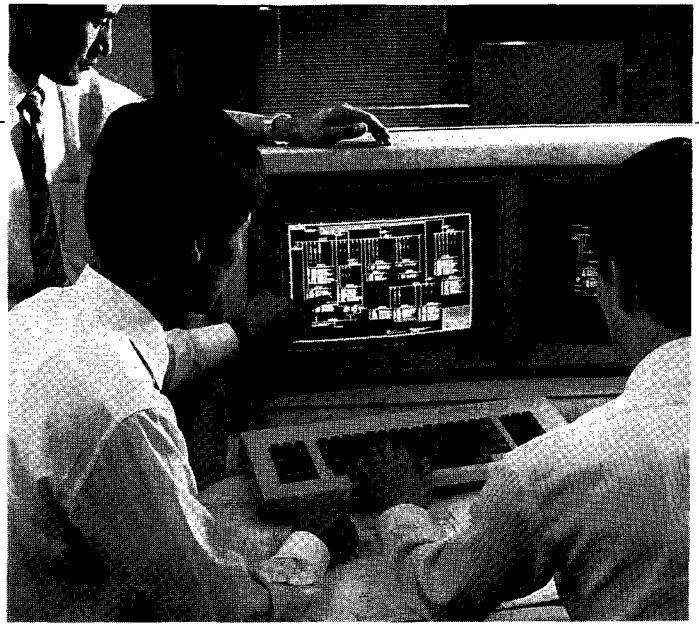
도 지역난방용 소형로(SLOWPOKE 등)의 개발 등 목적별 노형개발도 있다는 것을 부언해 둔다.

결 언

산업계에서는 소위 發展型 경수로(ALWR) 중 ABWR을 柏崎刈羽원전 6호기로 1991년 9월에 착공했지만 한편으로 「차세대 경수로 개발동향」, 「차세대 경수로에서 요구되는 것」에서 밝힌 속성을 충족시킬 수 있는 改良發展爐 개발에 착수했고 이와 함께 혁신형로(AP 600, SBWR)의 연구개발에도 참여하고 있다. 이 개량발전형 중에서는 〈그림 10〉에 표시한 노형이 후보로 유력시되고 있고 이것을 실현시키기 위한 기술이 개발되고 있다. 1970년대초에 운전을 개시한 초기의 원자로가 교체될 시기에 이러한 개량발전로를 사용할 수 있을 것으로 보인다.

그러나 세계의 원자력이용의 현황을 보면 원자력의 發展은 기술적인 문제라기 보다 정치, 사회, 경제면의 여러가지 조건 및 일반국민의 수용태세에 의해 크게 좌우되고 있다는 것을 알 수 있다. 차세대 경수로에서도 기술적인 발전이 기대되지만 이것을 이용하는데 있어서의 국민적인 공감대 등 사회여건이 중요하다.

이 점에서는 사회속의 원자력 특히 지역사회 내에서의 원자력은 지역사회의 발전, 생활의



〈그림 10〉 ABWR 改良發展의 方向

	輕水爐	高速爐, 가스爐
第1世代 (現在의 最新型爐)	REP1300(N4-N4') (Framatome/ EDF) KONVOI(KWU) Tinge3(Framatome / 벨기에) 大飯3,4(三菱) South Texas 1,2(WH) NMP2(GE) Palo Verde 1,2,3 (ABB)	SPX-1(NERSA/ 노바돔) THIR-300(HRB/ BBC)
第2世代 (2000年頃)	REP N4(Framatome / EDF) Sizewill B(NNC/ NE) SP90(APWR) (WA/ 三菱) ABWR(GE/ 東芝/ 日立) System 80+(ABB) BWR90(ABB) KONVOI-B(KWU) REPN4+,Prototype RCVS (Framatome/ EDF)	EFR(EFRUG/ EFR Assoc.)
第3世代 (2005年頃)	發展型爐 REP2000 單純化爐 AP600 (WH/ 三菱) SBWR(GE/ 東芝/ 日立)	EFR-1500(EFRUG/ EFR Assoc.) HTR 500(ABB)
第4世代 (2010年頃)	PIUS(ABB) SIR(UKAEA, ABB) ISER(日)	IFR(美) PRISM(美) MHTGR

〈그림 11〉 輕水爐에 의한 熱利用事例와 可能性

	ΔT	實施例와 可能性檢討
低温蒸氣	250℃～	地域煖房(蘇連.東歐, 스위스)
또는	130℃	ethanal生産工場 (카나다)
温水		生活쓰레기再生處理工場(카나다, 檢討中)
		海水淡水化
		各種 Process heat의 利用
排熱	130℃以下	地域煖房(蘇連, 東歐)
(温排水)	30～7℃	温室(카나다, 東歐)
		温室(프랑스)
		栽培漁業(프랑스, 카나다)

질의 개선에 기여하고 지역과의 공존공영을 더욱 촉진시키는 자세가 더욱 중요하다고 생각된다. 발전소의 물적, 인적자원을 이용한 지역사회의 문화적 발전에의 기여 및 열이나 温排水의 생활, 산업에서의 이용확대 등이 앞으로의 방향이라고 생각된다. 열이나 온배수를 어느 정도 이상의 규모로 이용한다는 것은 지역사회에 기여한다는 것 외에도 아직 이용되지 않고 있는 에너지를 이용한다던가 환경문제에 기여한다는 등의 측면이 있어 본래 發電에만 국한되지 않은 원자력의 이용범위를 확대하는 것이라고 할 수 있다.

본격적인 프로세스열이용은 고온가스로를 이용하면 되지만 경수로로부터의 비교적 저온의 열이용은 이미 외국에 많은 실례가 있어 〈그림 11〉 차세대 경수로의 출현을 기다림이 없이 이 분야의 이용을 확대할 필요가 있다(原子力工業 92年 1月號).