

신형로개발동향과 경수로의 장래기술

핵분열연쇄반응이 CP-1으로 1942년 12월에 실증되고 인류가 새로운 에너지원의 이용원리를 파악하고 나서 반세기가 지났다. 원리실증후 미국은 곧 군사용플루토늄 생산용대형원자로건설을 시작했는데 한편에서는 각종 노형에 대한 구상이 제안되어 이에 대한 개발노력이 이루어졌다. 1940년대 후반에는 이미 시험연구로로서 고속로 Clementine(미국), 흑연감속로(영국, 소련), 중수감속로 NRX(캐나다) 등이 건설되었다.

미국에서는 경수로보다 고속증식로(FBR)를 먼저 개발하기 시작해 세계 최초의 원자력발전에 성공한 것이 EBR(100kW, 1951년 12월 완성)이다. 가압수형경수로(PWR)개발은 군사용잠수함을 위한 추진용원자로(STR)로부터 시작되어(원형로 STR-1, 1953년 완성), STR계획에서 얻은 기술을 이용해 민간용원자로인 Shippingport爐(60MWe)가 건설된 것이 1957년 12월이었다. 최초의 상업용원자로인 Yankee Rowe爐(185 MWe)가 1961년에 운전을 시작했다.

한편 비등수형경수로(BWR)의 개발은 조금 늦어 BORAX실험에서 우선 비등수형원자로의 가능성을 실증하고 대형로설계를 위한 실험으로 EBWR(60 / 100MWt, 5MWe), VBWR(1957년 10월 송전개시)이 건설되었다. 최초의 상업용 BWR(BWR-1 설계)은 2중사이클로 되어 있는 Dresden-1爐(210MWe, 1960년 운전개시)이지만 현행 BWR의 집적사이클의 기

본시스템이 채용된 것은 BWR-2 설계부터이고 그 대표적인 원자로가 Oyster Creek爐(650MWe, 1969년 운전개시)이다.

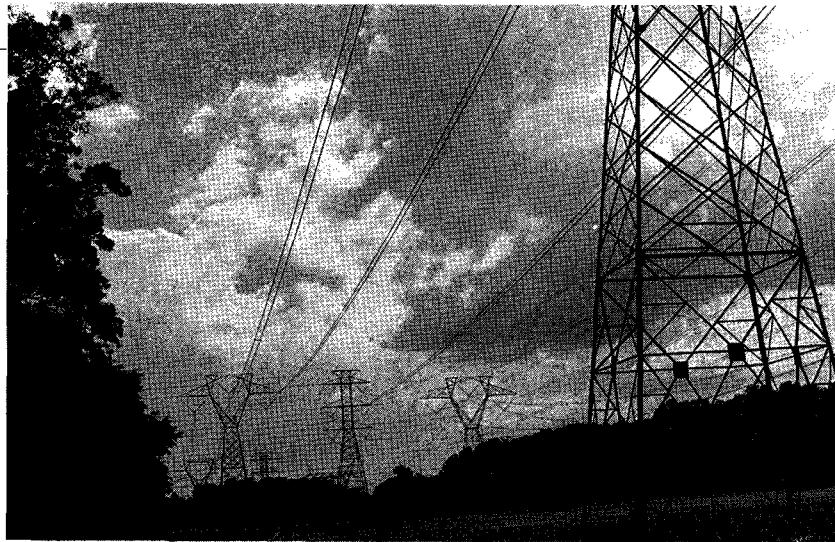
이와 같이 미국의 경수로기술개발의 역사를 되돌아 보면 1950년대에 플랜트시스템의 기본개념을 실증하고 1960년대에 현행 경수로의 기본시스템을 갖는 상업용원자로가 투입되었다고 할 수 있다. 일본, 서독, 프랑스에서의 경수로기술개발은 미국으로부터의 기술도입 또는 기술제휴로부터 시작되어 각국에서 개량·표준화의 노력이 이루어졌다. 그 결과 현재 이들 나라의 원자력발전의 거의 모두가 경수로에 의해 이루어지고 있다. 지금까지 각국에서 경수로 이외의 여러가지 노형이 개발되어 왔지만 기술적, 경제적, 정책적 요인 때문에 현재 세계적으로 경수로가 압도적으로 우세하여 경수로주류시대가 되어 있다.

그러나 원자력은 그 자원량이 지금까지의 역사보다는 훨씬 긴 세월동안 발전, 유지될 것으로 생각되므로 지금까지는 기술개발의 제1단계를 달성한데 지나지 않아 앞으로 장기간 다양한 개발이 이루어질 것으로 보인다.

다음에 경수로개발현황, 신형경수로의 동향 및 장기적인 전망에 따른 경수로기술개발에 대해 알아보기로 한다.

경수로개발현황

세계의 원자력발전설비용량을 노형별로 보면



경수로가 80% 이상을 차지하고 있다. 이 중 가압수형이 압도적으로 많아 1990년 6월말 현재 운전, 건설, 계획중인 설비용량이 각각 62.8%, 73.3%, 75.4%다. 또 비동수형은 각각 22.2%, 11.9%, 4.8%다. 원자력발전규모의 대형화도 많이 이루어지고 있어 100만kW 이상의 원자력발전소가 1990년 6월말 현재 132기 운전 중에 있다. 이 중 35기는 130만kW 이상의 것이다. 다음에 각국의 현황을 알아보기로 한다.

일본에서는 제3차 개량표준화계획에 따라 135만kW급의 개량형경수로 ALWR(APWR, ABWR)의 개발이 끝나고 비동수형로(ABWR)에 대해서는 이미 가시와자끼·가리와(柏崎·刈羽)발전소의 6, 7호기에 채용하기로 결정이나 있다. 또한 경수로에서의 플루토늄이용(플더멀)이 추진되고 있어 현재 MOX(우라늄·플루토늄 혼합산화물)연료집합체가 PWR과 BWR에 장전되어 조사시험중이다.

프랑스, 독일도 일본과 마찬가지로 점진적인 대형화노선을 취하고 있다.

프랑스에서는 당초부터 PWR에 한정해 개발을 추진하고 현재 150만kW급의 N4시리즈를 건설중이다. 독일은 당초부터 BWR개발도 병행해 왔는데 1985년 운전개시한 BWR 이후로는 BWR건설을 중지했다. 현재 130만kW급 PWR발전소를 투입하고 있다. 양국 모두 플더멀의 이용에서는 일본보다 상당히 앞서 있는데 1992년 이후는 연간 50톤 정도를 목표하고 있다.

영국은 가스냉각로에서 미국형PWR을 도입하는 정책전환을 보여 현재 1호기가 건설중이지만 발전원수가 상당히 높은 것으로 판명되어 2호기 이후의 계획은 1994년까지 동결해 재평가하기로 했다.

미국에서는 1979년 이후로 신규의 원자로발주가 없어 원자력발전개발이 정체되어 있지만 최근 원자력발전부활전망이 매우 밝아지고 있다. 이를 촉진하기 위해 건설·운전개시기간을 단축하는 규제면의 개선과 새로운 원자로개발이 진행되고 있다. 앞서 말한 일본의 ALWR은 미국과의 국제협력으로 개발된 것이지만 미국에서도 이 130만kW급 대형경수로가 신규투입할 노령의 유력한 후보 중의 하나가 되어 있다.

차세대 원자로·신형경수로의 동향

1. 일본

일본의 경수로기술은 미국의 GE社와 WH社의 경수로도입으로부터 시작해 1970년 3월에 쓰루가(敦賀) 1호기, 1970년 11월에 미하마(美浜) 1호기가 각각 BWR, PWR의 최초의 상업용원자로로 시작한 후로 20년이란 짧은 기간중에 많은 기술개발이 이루어졌다. 최근의 ALWR을 보면 선정된 노령의 기본시스템의 완성도는 상당히 높은 수준에 이른 것으로 판단된다. ALWR은 1990년대 후반부터 시작된 계획으로 ABWR은 현재 건설준비단계에 있다(첫 유니트는 1991년 착공, 1996년 운전개시 예정)

작년 6월에 일본종합에너지조사회에서 발표한 장기에너지수급전망을 보면 앞으로의 원자력개발규모는 2010년도 목표로 원자력발전설비용량을 7,250만kW까지 증가시키는 것으로 되어 있다. 이에 따라 2010년도의 총발전전력량에서 차지하는 원자력발전의 비율을 43%까지 높이는 것을 목표로 하고 있다. 이것을 개발속도면에서 보면 10년간에 2,100만kW의 규모로 최근 10년간(1980~1989년)의 실적 1,700만kW에 비하면 상당히 가속된 개발계획이다. 이 목표달성을 위해 개발되는 것이 경수로로서 ALWR이 그 전력공급의 큰 부분을 차지할 것으로 기대된다.

한편 ALWR는 그 이상의 개량, 새로운 노심기능, 새로운 爐시스템을 겨냥한 검토 및 연구개발도 이루어지고 있다. 개량형경수로 ALWR에 이어 차세대爐의 검토가 통산성의 자원에너지청과 전력사업자를 중심으로 행해지고 있다. 그 내용은 ALWR의 개량, 중소형 안전로, 高플루토늄이용로 등 폭넓게 거론되고 있지만 구체적인 爐개념과 기술적인 과제의 검토가 원자로메이커들에 의해 이루어지고 있다. 또 종합에너지조사회·원자력처의 「경수로기술고도화소위원회」에서 작년 12월부터 차세대경수로의 기술개발에 관한 기본방향을 검토하고 있다.

일본원자력연구소에서도 나중에 말하게 될 경수로주류시대가 장기화될 것을 예상해 경수로의 가능성을 추구하는 연구개발이 이루어지고 있다. 그 주된 목표는 노심기능의 고도화를 겨냥한 새로운 노심의 개념, 수동적 안전성을 높이면서 시스템의 간소화를 도모한 수동적 안전의 중소형로이다. 노심의 高기능화방안으로는 超高燃燒노심, 高轉換노심, 고준위폐기물 TRU(플루토늄 제외)消滅노심을 구상중이다. 高전환경수로에 대해서는 연구개발의 제1기 계획을 1990년도에 끝내고 1991년도부터 제2기 계획이 시작된다.

2. 미 국

미국에서는 원자력발전에 대한 투자를 촉구하고 원자력산업계를 부활시키기 위해 신규로

투입되는 신형로의 개발이 경수로와 非경수로에 대해 이루어지고 있다.

미국의 신형경수로는 ALWR(Advanced LWR)로 불리우고 있지만 일본의 ALWR과는 달라 그 개발에는 두가지 노선이 있다. 하나는 신형로라고 하기보다는 일본에서 개량형경수로라고 불리우는 것이다. 즉 현재 운전되고 있는 경수로의 개발과정의 연장선상에 있는 것으로 130만kW급 경수로이다. 이의 개발은 GE社(ABWR), WH社(APWR) 및 CE社(System 80+)에서 진행되고 있고 일본은 앞의 두 개사의 개발사업에 협력, 참여하고 있다.

또 하나의 노선은 수동적 안전성을 높이고 시스템을 간소화한 60만kW급의 중형경수로이다. 이 노형으로는 GE社의 SBWR(Simplified BWR)과 WH社의 AP-600이 개발되고 있으며 미에너지성(DOE)은 양사의 설계를 완성시키기 위해 1989년 9월에 각각 5,000만달러의 자금을 지원하고 있다. 이를 설계는 1995년경에 NRC의 설계인가를 받는 것을 목표를 진행되고 있다. 둘 다 실증이 끝난 경수로기술을 기본으로 하고 있기 때문에 지금으로 보아서는 인가에 앞서 실증로를 건설할 필요는 없는 것으로 보여지고 있다. 작년 10월에 일본의 전력회사는 이 중형경수로개발계획에 참여할 방침을 세웠다. 중소형로를 차세대로의 옵션으로 연구개발을 추진해 구체적으로 검토하고 있는 나라는 미국뿐이지만 이것이 차세대로로 채택되면 세계적으로 영향을 미칠 것으로 보인다.

경수로 이외의 신형로로는 module형 고온가스로(MHTGR)와 액체금속로(LMR)가 개발되고 있다. 이들의 爐개념의 공통적인 설계목표는 원자로사이즈의 소형화, module화, 운전의 간소화, 안전성의 대폭적인 개선 등이다. LMR의 구상에 GE社의 PRISM과 Argonne 국립연구소에서 개발중인 IFR(Integral Fast Reactor)계획에 의한 금속연료사이클이 포함되어 있다. 이 IFR계획에서는 사용후연료를 Pyroprocess(고온야금법)를 이용해 재순환시키고 TRU를 노내에서 연소시켜 消滅처분해 고준위폐기물을 대폭 감소시키도록 강조하고

있다. 이 IFR계획에는 일본전력중앙연구소도 참여하고 있다.

MHTGR, PRISM의 1 module당 전기출력은 13만kW 정도로 종래의 경수로와는 전혀 다른 설계개념에 따른 간소화와 높은 안전성을 특징으로 하고 있어 혁신적 非경수로라고 일컬어지고 있다. 고온가스로와 금속연료고속로는 지금까지의 장기간에 걸친 개발의 역사 중에서 각각 큰 성과를 올렸고 이들의 우수한 고유안전성은 그 실험로인 AVR(독일)과 EBR-II(미국)에 의해 확인되고 있다. 그러나 모두 NRC로부터 표준설계인가를 받기 위해서는 실증로가 필요한 것으로 되어 있다. MHTGR에 기대를 거는 이유는 개발이 상당히 진척된 단계에 있다는 것과, 1988년에 DOE중수로와 함께 군사용생산로로 선정됐다는 것, 고온熱源에 의한 프로세스熱이용의 가능성 등을 들 수 있다. 그 높은 안전성 때문에 민간용MHTGR과 PRISM 모두 격납용기는 필요없는 것으로 되어 있지만 NRC가 이것을 받아들일지는 앞으로 해결해야 할 문제인 것 같다.

3. 유 럭

프랑스에서는 N4시리즈의 차기PWR개발을 위해 REP2000계획을 1989년부터 시작했다. 次期爐의 선택으로 N4시리즈의 개량과 RCVS(프랑스의 Spectral Shift형 準稠密格子高轉換PWR)의 두가지를 들고 있다. 독일에서도 고전환경수로의 개발을 추진해 왔지만 프랑스와 마찬가지로 노심과 제어봉이 새로워졌다는 것 외는 기본적으로 현행 경수로시스템을 그대로 사용한다는 전제하에 이루어지고 있다. 독일에서는 신형로개발에서 고온가스로로 외국시장을 개척하고 있다. 또 MHTGR의 시장개척에 대해서는 미국과 협력협정을 맺고 있다. 영국에서는 영국원자력공사(UKAEA)가 미국의 CE社와 공동으로 1차계통기를 원자로용기에 수용한 소형一體型PWR(SIR)의 설계를 추진하고 있다. 이 爐의 안전계통의 특징은 기본적으로 능동적 기기에 의존하지 않고 수동적 안전을 높여 사고후 3일간은 운전원의 개입없이 붕

괴열제거기능과 격납용기의 건전성이 확보된다 고 한다.

스웨덴에서는 ASEA-ABB(현 ABB)社가 지금까지 없었던 설계개념으로 고유안전로라는 명칭의 시작이 되었던 PIUS(Process Inherent Ultimate Safety)의 爐개념을 제시하고 있다. 이것은 동사가 핀란드와 공동설계한 지역난방용의 SECURE의 爐개념을 발전용으로 한 것이다. 이 爐는 제어봉이 없고 노심은 Pre-stressed 콘크리트제용기의 대용량의 boron水 풀 중에 수용되어 있다. 이것의 안전 확보 특장은 노심부와 boron水 풀과의 사이에 설치된 密度lock이란 기구인데 사고나 이상이 생기면 양자간의 압력균형이 깨져 boron水가 노심으로 주입해 爐가 정지하도록 되어 있다. 이것을 PIUS원리라고 한다.

경수로의 장래기술

1. 장래방향

장기적인 전망을 할 때 경수로의 장래기술은 종래의 고속증식로(FBR)까지의 단기적인 교량역할로만 보아서는 안되며 원자력기술의 가능성, 원자력에 주요과제를 해결한다는 차원에서 보는 것이 중요하다. 즉 경수로기술의 가능성을 추구하는 방향은 다른 노형개발에서도 추구하고 있는 것으로 그 주요과제의 대체적인 공통항목을 들어보면 안전성, 신뢰성, 경제성, 자원의 효율적 이용 등의 개선이라고 할 수 있을 것이다. 여기에는 爐시스템만이 아니고 폐기물처리·처분을 포함한 연료주기기술도 당연히 다루어야 할 주요과제로 포함된다.

이들 주요과제를 다루는데 있어서는 당면한 문제해결 또는 현행기술의 부분적이고 점진적인 개량노력으로 긴 역사 중의 자연적인 결과로써 장래像을 기대하는 것이 아니고 기술개발의 발전가능성을 최대한 추구해서 목표를 달성하는 것이 바람직하다. 노형에 따라서는 증식성, 高溫熱源, 발전효율 등의 면에서 그 이점을 특징으로 하는 것도 있지만 어떤 특정한 특성이 유리하다고 해서 다른 선택을 배제할 수 있



는 것이 아니고 서로 상대적인 것에 지나지 않는다. 경수로의 이들 개개의 특성을 특히 우수하다고는 할 수 없지만 경수로의 성질과 인류의 오랜 경험과 친밀감 때문에 종합적으로 다루기 쉬운 기술체계인 것이다. 이보다는 오히려 각 노형의 우수한 특성은 장기적으로 볼 때 원자력이용기술의 다양화를 보여준다고 할 수 있다. 앞서 말한 바와 같이 고온가스로, 금속연료(고속)爐에서는 높은 안전성, 热源이용의 다양화, 혁신적인 고준위폐기물처리·처분기술 등을 추구해서 개발성과를 옮겨 바람직한 장래상을 강조하고 있다.

한편 원자력의 發展에 있어서는 기본적으로 고도화와 함께 기술의 보편화도 추구해야 한다. 솔직히 말해 현재의 130~150만kW급 원자로는 선진공업국만의 독점기술이다. 그러나 개발도상국을 포함해 앞으로 지금까지 없었던 규모로 원자로시스템이 세계적으로 확대되어 나갈 것을 생각하면 전력망의 규모, 입지조건, 산업 및 사회적 환경조건 등에 의해 그 필요성은 다양할 것으로 보인다. 따라서 안전성, 운전, 보수 등의 면에서 세계적으로 받아들이기 쉬운 원자력기술이 요구될 것이다. 현재 연구개발이 이루어지고 있는 중소형로는 경수로 이외의 것을 포함해 그 대부분이 爐시스템의 간소화와 고유안전성 또는 수동적 안전기능을 높인 설계를 추구하고 있어 세계적으로 널리 받아들이기 쉬운 爐개념이라고 할 수 있을 것이다.

이상과 같이 원자력이 지향해야 할 방향을 설정하고 이에 따라 경수로의 장래기술을 개괄하면 우라늄자원을 효과적으로 이용하려는 노심개념과 연료주기와 관련된 기술과, 원자로시

스템과 관련된 기술로 나눌 수 있을 것이다. 이들에 대응하는 경수로의 장래기술의 목표가 될 개념의 내용은 新爐개념을 포함해 여러가지로 구상할 수 있겠지만 그 구체적인 예로서 일본원자력연구소에서 현재 검토중인 것을 다음에 소개하기로 한다.

2. 일본원자력연구소에서의 검토

원자력이 超장기적으로 일본의 기본적인 에너지원으로서 그 역할을 다하기 위해서는 핵융합로와 같은 혁신적 에너지원의 기술개발이 진척되어 실용화되지 않는 한 자원면에서 FBR의 도입을 할 필요가 있다. 그러나 FBR의 실용화가 늦어지고 있는 현재의 전망으로는 경수로주류시대가 상당히 장기화될 것으로 예상된다. 또 FBR이 상업적으로 투입될 시점에서는 이미 경수로가 대규모로 발전되어 있어 연료주기면에서 FBR이 자립할 때까지는 상당히 장기간에 걸쳐 경수로는 플로토늄고급爐로서의 역할을 맡으면서 공존해 갈 것으로 보인다. 이 같은 전망은 우선 경수로가 우라늄자원을 가능한 효과적으로 이용하고 이에 대응해서 신형연료개발을 포함한 본격적인 플루토늄이용기술과 back-end기술(재처리, 고준위폐기물처리·처분)에 관한 시나리오를 가질 필요가 있다. 즉 경수로에서 플루토늄의 생산·연소가 뛰어난 노심기술과 함께 자체에서 생산한 플루토늄을 자체에서 재순환시키기 위해서는 고준위폐기물처분을 포함해 폐쇄된 연료주기시스템에 관한 기술개발이 목표가 될 것이다.

일본원자력연구소에서는 자원과 연료주기의 차원에서 앞서 말한 바와 같이 세가지의 爐개

념을 검토하고 있다. 그 하나는 플루토늄을 유용한 자원으로 보고 가급적 많이 생산해 이용하기 위한 高轉換爐인데 이에는 準稠密格子의 轉換比가 0.8 정도의 爐에서 高稠密格子의 轉換比가 1.0 정도의 增倍型경수로까지를 대상으로 하고 있다. 그 다음에 플루토늄의 효과적인 이용을 도모하는 동시에 연료주기코스트도 대폭 낮추기 위한 超高燃燒爐(~100GWd/t 이상)다. 그 다음으로는 경수로에서의 TRU의 핵변환특성을 이용해서 이를 消滅시켜 고준위 폐기물처분에도 대응할 수 있는 爐다. 이 노심에서 TRU는 연료자원으로도 효과적으로 이용할 수 있는 동시에 연소반응을 특성의 최적화에도 이용할 수 있다. TRU消滅노심의 개발을 위해서는 재처리기술의 단순화와 고도화(低除染사이클, 部分離)가 필요할 것이다.

또한 원자로시스템의 고도화에 관해서는 일본원자력연구소에서 수동적 안정 중소형로, SPWR(System integrated PWR)을 검토하고 있다. 이 爐의 특징은 一體型으로 제어봉이 없고 모든 爐정지에 boron水를 사용하는 것이다. 따라서 1차계통의 大口徑배관파열사고가 없고 또 小口徑배관파열사고시에도 이에 대처할 수 있는 시간여유가 많고 또한 급격한 반응도가 가해질 가능성도 없다. 수동적 안전기능으로는 노심하부에 PIUS원리에 의한 密度lock을 사용하고 있지만 노심상부에는 수동식 水壓動作밸브를 채용해 운전의 안전성을 높이고 있다.

일반적으로 중소형로의 설계에서는 수동적 안전성과 함께 시스템의 간소화와 module화에 의한 경제성이 강조되고 있지만 앞으로의 연구 개발에 의해 그 전망이 설 필요가 있다.

3. 장기적 전망

지금까지 「長期」라는 말을 자주 사용했지만 어느 정도까지의 시점을 기준으로 하고 있느냐하면 2050년경이 우선 구획점이라고 보고 있다. 실제 60년후의 에너지정세와 기술혁신(新에너지원의 개발상황, 각 에너지원의 受容환경 조건, 입지문제 등)의 예측에는 매우 불확실성

이 있지만 이같은 장기적 관점에서 볼 때 경수로기술의 가능성을 추구해 나갈 수 있을 것이다.

지금까지 資源論의으로 경수로의 역할에 대해 강조한 느낌이 있지만 FBR이 상당히 늦어도 경수로가 50~100년 정도 우라늄수요량에 큰 부담을 주지 않도록 계획을 짜면 된다. 나중에도 밝히겠지만 高전환경수로는 전환비와 爐內 플루토늄inventory를 잘 감안하면 단기적, 또는 장기적으로 효과를 노린 여러가지 계획을 짜는데 기여할 수 있다. 또 천연우라늄자원의 장기적인 추정량에는 불확실성이 뒤따르지만 탐색노력과 기술혁신을 통해 채굴가능자원량은 시간과 함께 상향조정될 것이 기대된다. 참고로 최근의 OECD/NEA보고(1989년)에 의하면 非공산권의 천연우라늄의 확인매장량은 약 340만톤(U 1kg당 130달러)이고 추정매장량은 약 1,000만톤이다.

FBR을 도입하면 천연우라늄이용률을 이론적으로는 현행의 우라늄연료경수로의 100배정도 높일 수 있지만 이것은 아주 여러차례 연료를 재순환시켰을 때의 얘기다. 장기적인 장래의 천연우라늄수요량의 예측은 에너지성장률, 노형투입전략 등의 전제조건에 의해 좌우되지만 지금 가령 원자력발전설비용량이 앞으로도 증가한다고 보고 2100년경의 설비규모를 상정한다면(단, 투입속도는 현재의 2GWe/년을 단계적으로 1GWe/년으로 떨어뜨린다), 현재 규모(30GWe)의 5~6배가 된다. 이러한 전제 조건으로 2100년까지 현행의 경수로를 계속 투입해가면 2001년까지의 천연우라늄의 누적수요량은 약 160~200만톤이 된다. 만약 FBR(증식비 1.2)이 2030년에 투입된다고 하면 그 양은 40% 정도로 감소한다. 이 100%와 40%의 차를 자원론적인 결정적인 요인으로 보는데 대해서는 논의의 여지가 있지만 이 숫자 사이에 FBR이 더욱 늦어지는 경우나 천연우라늄이용률이 높은 경수로를 투입하는 경우 또는 이 양자를 배합한 경우의 결과가 들어가게 된다. 이 숫자의 폭은 2100년까지의 노형전략에서 천연우라늄의 효과적인 이용이 이루어지는 정도를

나타낸다.

더 시야를 넓혀서 토륨연료사이클도 포함시키면 자원량확대만이 아니고 전환비가 1.0을 충분히 웃도는 높은 중식성과 TRU발생량이 훨씬 감소한 경수로를 입수할 수 있다(앞서 말한 Shippingport爐에서 중식성실증). 또 21세기중반에는 핵융합로가 상업적으로 자립하지 못할 망정, 기술적으로 확립되어 있으면 매우 높은 연료(Pu, U233) 생산능력을 이용한 경수로와의 共生(Symbiosis)시스템의 구상도 가능할 것이다.

이렇게 생각해보면 장래의 에너지원의 선택을 현시점에서 단순한 자원론으로 양자택일적으로 선택해 기술개발노력을 자체적으로 제한하는 것은 약간 시기상조인 것 같이 생각된다. 플루토늄이용기술체계의 확립은 FBR의 목표가 되어 있는데 이것이 늦어지고 있다고 해서 플로토늄이용과 재처리기술개발이 정체된다고 하면 어차피 필요로 하는 근간이 되는 원자력기술개발을 겨냥한 계획적인 발전이 손상될 우려가 있다. 경수로가 장기적으로 정착될 수 있다면 경수로에서 그 가능성을 최대한 추구하는 노력이 필요하다. 이러한 노력은 FBR투입을

위한 기반기술확립과도 연관되는 것이다. 또 高전환로는 재순환해도 플로토늄의 질(핵분열성)이 떨어지지 않는 특성을 갖고 있기 때문에 FBR투입시에 대비한 플로토늄의 爐內저장역 할도 효과적으로 수행된다. 특히 增倍型경수로는 플루토늄inventory가 크기 때문에 폐로시에 FBR투입확대를 가속화시킬 수 있는 플루토늄양을 배출할 수 있다. 즉 高전환로는 장기적인 플루토늄수요에 유연하게 대응할 수 있는 개념이다.

이상과 같은 논의는 경수로가 장기적으로 보아 선택되어야 할 최선의 선택이라고 단정하는 것은 아니다. 어느 특성면에서는 경수로보다 더 나은 선택에 대해서도 개발노력이 필요하다. 보다 더 우수한 것과 이용기술의 다양화를 추구하는 것이 超장기적으로 전망한 원자력의 유지, 확대에 필요하고 이것이 원자력기술의 기반확보에도 중요하다고 생각된다. 이 원자력기술을 추구함에 있어 公的인 자원을 투입할 경우에는 개발의 위험부담과 함께 尖端性, 혁신성을 추구한 기초·기반의 先行的인 연구개발이 요구될 것이다.

원자로시스템의 고도화

수동안전형 중소형로 개발의 의의

21세기를 전망해 보면 선진제국에서는 전력 수요증가가 계속되고 또한 개발도상국에서의 에너지수요의 급격한 증가도 예상된다. 이와 함께 에너지원의 확보 및 대량소비되는 화석연료에서 배출되는 이산화탄소로 인한 지구온난화문제도 심각해지고 있어 현재의 생활수준을 유지, 향상시키기 위해서 안전성 및 경제성이 높은 원자력발전에 대한 기대가 높아지고 있다.

원자력에너지이용방식 중 앞으로 상당히 장기간에 걸쳐 원자력발전의 주류를 이를 것으로 기대되는 경수로에 대해서는 현행 경수로기술을 바탕으로 신뢰성, 안전성 및 경제성을 한층 향상시킨 개량형대형경수로(APWR 및 ABWR)의 개발이 끝난 상태다. 원자력이용을 앞으로 더이상 추진하기 위해서는 현행 경수로기술을 더욱 발전시키는 한편 안전성 및 경제성을 한층 높인 혁신적인 노형의 개발이 요망된다.

이러한 인식을 바탕으로 원자로의 기본적인 안전확보기능을 달성하는 수단으로 動的機器나

인간의 판단에 의존하는 비율을 극력 억제해 반응도계수, 重力, 热容量 등의 자연법칙에 따른 静的수단, 즉 수동안전기능에 주로 의존하는 방향으로 기술개발이 이루어지고 있다.

수동안전로는 안전확보를 静的수단에 의존하고 있는 특성으로 볼 때 원자로압력용기나 격납용기의 크기에 한계가 있어 대출력화가 어렵기 때문에 주로 중소형로를 대상으로 개발이 이루어져 왔다. 한편 일본에서는 원자력공학시험센터를 중심으로 1,350MWe급의 대형 PWR 및 BWR에 대해서는 重力注入식 ECCS나 外周풀형 자연방열형 격납용기 같은 수동안전기기를 긴급냉각계통이나 잔류열제거계통에 적용해 안전시스템의 고도화를 모색하기 위한 검토가 이루어지고 있다. 그러나 기존의 대형로를 바탕으로 하는 개선계획에서는 爐정지계통의 수동화 등을 포함한 혁신적인 원자로시스템의 채용은 곤란하다.

여기서는 원자로시스템의 고도화에 대해서 수동안전기능의 특성을 최대한 발휘할 수 있는 수동안전형 중소형로에 초점을 맞춰, 개발현황 및 개발과제에 관해 말하고자 한다.

수동안전형 중소형로에서 기대할 수 있는 특성을 들어보면 다음과 같다.

1. 爐시스템의 단순화와 module화에 의한 量產효과에 의해 현재의 爐와 동등 이상의 경제성을 달성해 규모상의 단점을 극복할 수 있다.

2. 전력공급망규모에 맞는 적정한 수준의 발전설비용량에 적합한 爐를 도입하려는 需要에도 응하기 쉽다.

3. 爐시스템의 간소화에 의해 운전 및 보수의 관리운영상의 경제적 및 인적 부담의 경감을 모색할 수 있다.

4. 수동안전로는 원자로의 안전성확보개념을 종래의 원자로에 비해 일반대중이 이해하기 쉬운 원리에 바탕을 두고 있기 때문에 일반대중의 수용성(PA)의 차원에서도 효과적인 것으로 생각된다.

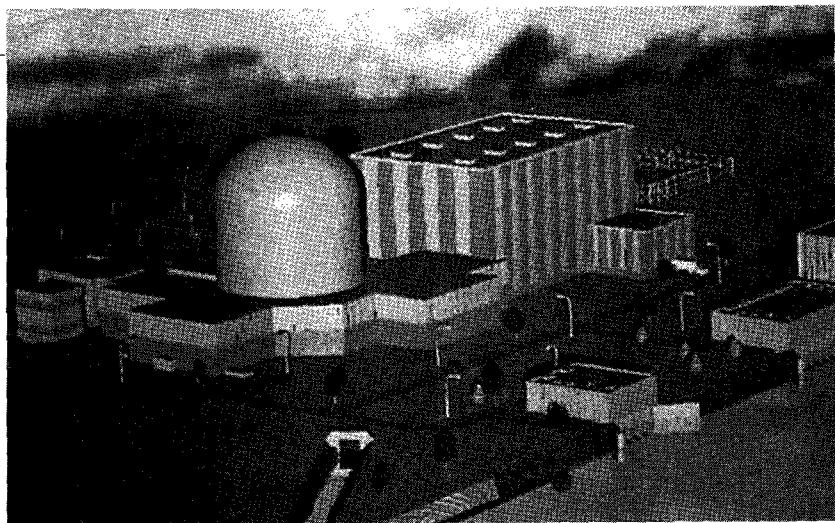
이상과 같은 관점에서 수동적 안전기능을 갖춘 혁신적인 원자로시스템개발을 선진국뿐만 아니라 개발도상국에서의 원자력發電의 대대적

인 보급에도 기여할 것으로 보인다. 따라서 수동안전형 중소형로개발은 장래의 경수로기술개발에서 중요한 위치를 차지할 것으로 기대된다.

수동적안전경수로의 개념과 개발현황

원자로의 수동적 안전기능으로는 核의 안전성 즉 爐출력상승에 따른 負의 반응도feedback기능, 원자로이상시의 爐정지기능, 냉각재상실사고시의 긴급냉각재주입기능 및 붕괴열의 장기적인 제거기능이다. 이중 負의 반응도 feedback기능에 대해서는 원자로의 成立性 자체에 영향을 주는 기본적인 물리현상이기 때문에 원자력개발 초기단계에서부터 의식적으로 설계에 도입해 왔다. 한편 대형화에 의한 규모상의 이점을 추구하는 과정에서 원자로용기 및 격납용기의 대형화를 피하기 위해 사고시 긴급냉각 및 붕괴열제거계통에 대해서는 주로 능동적 기기를 사용해서 각 기기의 신뢰성을 높이고 多重性을 갖게 함으로써 안전성의 향상을 모색해 왔다. 이에 따라 원자력발전기술의 고도화는 달성되었지만 한편으로는 원자로시스템이 복잡해져 품질관리, 운전, 보수, 점검 등에 고도의 인적 및 경제적 부담을 안는 결과가 되었다.

한편 TMI 2호기 및 체르노빌에서의 원자로의 중대사고경험을 통해 원자로안전성에 미치는 인적 요인을 될수록 줄이고 사고시에도 운전원의 개입이 불필요한 이른바 Walk-away period(放置가능시간)를 길게 잡을 수 있는 원자로에 대한 욕망이 높아져 수동안전로개념이 주목받게 되었다. 그래서 종래의 경수로의 고도의 기술축적을 이용하면서 시스템의 간소화 및 단순화를 겨냥한 수동안전경수로개발이 적극적으로 이루어지고 있다. 수동안전경수로는 많은 개념이 제안되고 있지만 그 중 대표적인 노형의 특성을 <표 1>에 나타냈다. 현재 제안되고 있는 수동안전경수로개념은 현행 원자로의 개량정도에 따라 다음의 3가지로 분류된다.



〈표 1〉 주요한 수동적 안전경수로의 특성비교

원자로	AP-600	SBWR	SIR	PIUS	SPWR
개발업체	WH	GE	UKAEA,CE	ABB-ATOM	일본원자력연구소
노형	PWR	BWR	PWR	PWR	PWR
기본사양 :					
열출력(MWt)	1,812	1,800	1,000	2,000	$1,100 \times 2$
전기출력(MWe)	630	600	320	640	350×2
운전압력(MPa)	15.5	7	15.5	9	13
출력밀도(kW/t)	73.9	36.6	54.6	72.3	85
노심等價직경(m)		5.2		3.76	2.89
노심유효길이(m)	3.66	2.7		2.5	2
연료집합체	17×17	8×8	22×22	18×18	6각형(331개)
RPV内徑(m)	3.99	5.9	5.8	13	6.6
RPV높이(m)	11.05	22	19.2	34	24
특징	<ul style="list-style-type: none"> • SG 직결 canned motor • pump cross-over 부분없음 	<ul style="list-style-type: none"> • 저 출력밀도축소 노심 • 자연순환냉각방식 	<ul style="list-style-type: none"> • 반응도재어용 boron은 사용하지 않음 • 관류식 SG 12대 内藏 • 주순환펌프 6대 内藏 	<ul style="list-style-type: none"> • 대용량 PCRV • 低温 풀 중에 1차계통 수용 	<ul style="list-style-type: none"> • poison 맹크內藏 • 관류식 SG內藏 • twin reactor system
안전기능	<ul style="list-style-type: none"> • 重力구동긴급급수탱크 • 蓄壓주입식ECCS • 공기자연순환·중력낙하식스프레이에 의한 격납용기냉각 	<ul style="list-style-type: none"> • 중력낙하식ECCS • 자동감압밸브 • Isolation condenser 방식 	<ul style="list-style-type: none"> • 자연순환2차용축계통 • 증기injector에 의한 긴급냉각 재주입계통 • 안전감압밸브(수동) 	<ul style="list-style-type: none"> • honey-comb密度差lock장치 	<ul style="list-style-type: none"> • 하부 honey comb, 상부 수압동작밸브에 의한 lock장치 • 긴급정지계통(能動밸브)
放置가능시간	3일	3일	3일	7일	20시간

1. 개량형 중소형경수로

이것은 현행 경수로의 기본시스템은 변경하지 않고 노심의 重心化(사고시 冠水유지), 안전계통의 수동화(ECCS주입펌프의 제거, 重力注入, 蓄壓주입 등의 채용), 봉괴열제거의 수

동화(자연순환냉각겸용기) 등의 기능을 부가한 노형이다. 이 노형의 대표적인 예로는 미국에서 개발중인 AP-600 및 SBWR 등의 600 MWe급 중형로가 있고 1990년대 중반에 미국 NRC의 설계증명취득이 예정되어 있다. 이 종

류의 노형은 현행 기술의 개량이라고 간주되어 실증로건설은 필요없는 것으로 되어 있다. 또 비상용 디젤발전기 제외 및 펌프, 밸브, 제어용 기기의 대폭적인 감소로 경제성의 향상도 모색하고 있다.

2. 一體型 소형경수로

이것은 현행 경수로의 기본시스템을 따르고 있지만 순환펌프, 증기발생기 등을 포함한 1차 계통배관을 원자로용기내에 내藏한 소형 일체형원자로로 원자로의 제어 및 정지기능을 제어봉에 의존하는 노형이다. 이 노형의 대표적인 예가 미국 CE社와 영국이 공동으로 개발하고 있는 300MWe급의 SIR(소형 일체형 PWR)이다.

3. 혁신적 수동안전경수로

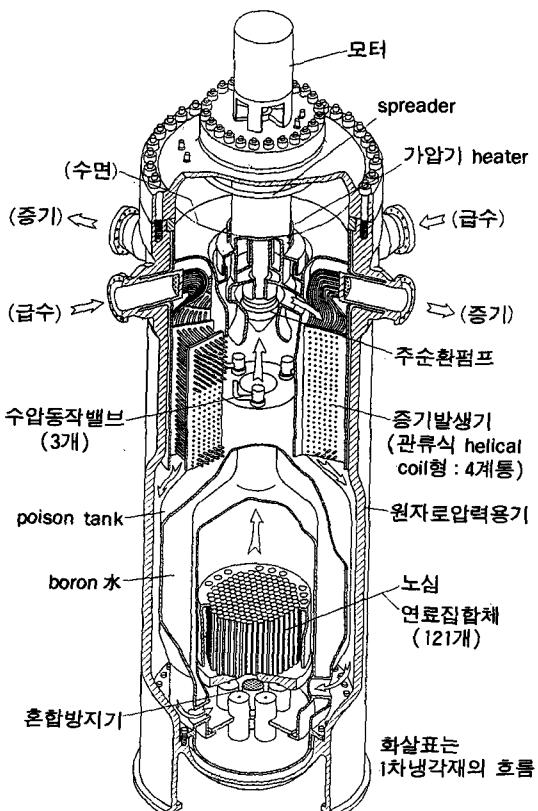
이것은 현행 경수로와 다른 원자로시스템을 갖고 안전기능의 수동화를 추구한 노형이다. 이 爐는 1차계통배관의 전부 또는 대부분을 압력용기내에 내藏한 一體型으로 안전기능으로서의 제어봉을 갖고 있지 않는 것이 특징이다. 이 노형의 대표적인 예가 스웨덴에서 개발중인 PIUS 및 일본원자력연구소에서 개발중인 SPWR이다. 이것들은 모두 사고시의 爐정지기능으로 자연순환에 의한 高濃度 boron水의 노심으로의 주입방식을 채택하고 있다.

혁신적 수동안전경수로 SPWR의 개발

일본원자력연구소에서는 장기적인 원자력기반기술연구개발계획의 일환으로 혁신적인 爐개념의 하나인 SPWR의 실현가능성을 조사하기 위한 연구개발이 이루어지고 있다(그림 1). SPWR의 개념을 나타냈는데 여기서 이 爐의 주요한 특징에 대해 알아보기로 한다.

1. 一體型 PWR

1차냉각계통(순환펌프, 증기발생기, 가압기 등)을 모두 원자로압력용기 내에 내藏하고 있다. 따라서 大口徑배관의 파열사고대책이 불필



〈그림 1〉 SPWR 개념도

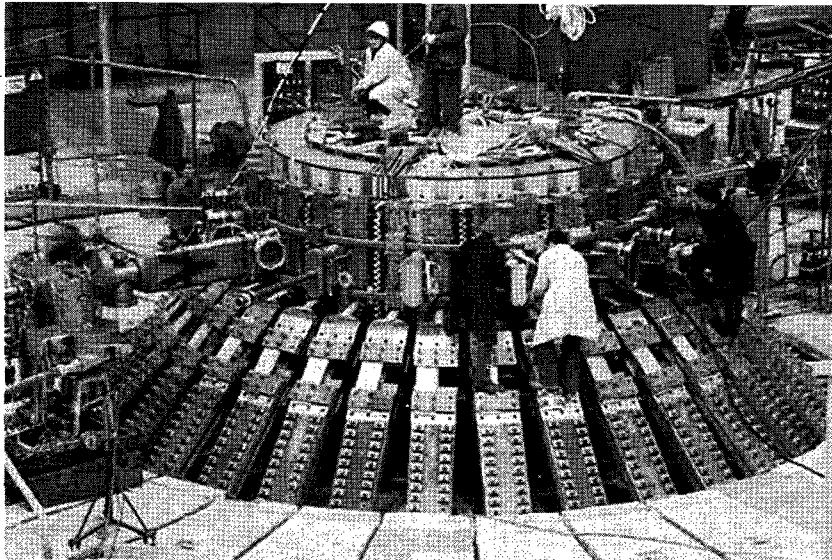
요하다.

2. 제어봉이 없는 爐시스템

爐의 기동·정지, 정상운전, 부하추종운전 등은 노심의 반응도온도계수 및 1차계통 boron濃度조절에 의해 이루어진다. 연소에 뒤따르는 반응도보상은 boron濃度회석 및 可燃性毒物을 병용한다. 제어봉을 갖고 있지 않기 때문에 급격한 반응도사고의 가능성을 배제할 수 있다.

3. 긴급爐정지계통의 수동화

고농도boron水를 갖고 있는 poison 탱크를 원자로압력용기내에 내藏하고 아래부분에 honeycomb密度差lock장치, 윗부분에는 수압동작밸브를 갖고 있어 爐 이상시에는 毒物이 자동적으로 주입되어 爐가 정지된다. 수압동작밸브는 주순환펌프의 토출압력으로 유지되고 있



어 순환펌프이상시에는 피스톤부분의 重力낙하로 poison 탱크와 1차냉각계통의 流路를 개방한다. 윗부분의 interface로 수압동작밸브를 사용함으로써 노심差壓이 poison온도 등의 parameter와는 독립적으로 설정할 수 있어 운전의 유연성 및 안전성의 향상을 기대할 수 있다.

4. 운전특성

SPWR에는 제어봉이 없기 때문에 운전방법은 현행의 원자로와는 다르나 기동·정지는 특히 문제가 없고 노심의 負의 냉각재온도계수 및 boron농도조절에 의해 부하추종운전 역시 가능한 것으로 나타나 있다.

5. 보수·점검특성

一體型爐에서는 원자로용기내의 주요기기의 보수점검작업이나 연료교환작업의 복잡성이 문제되지만 예비검토결과 현행 원자로에 비해 특히 불리한 점은 발견되지 않았다. 특히 SPWR에서는 독물탱크가 노심을 둘러싸고 있기 때문에 압력용기의 방사선량률이 작아짐으로써 현행 원자로보다 보수점검작업이 용이해지는 면도 있다. 또한 제어봉구동기구, 1차냉각계통의 큰 파열사고에 대비한 긴급냉각용기기 등을 제외시킴으로써 안전관련기기를 줄여 보수점검작업량이 감소될 것으로 예상된다.

6. 경제성

제어봉구동기구 등의 주요기기류의 제외 및

1차계통배관의 제외 등에 의한 爐시스템의 간소화, 운전보수의 용이화, 건설비 경감 및 건설기간 단축 등에 의해 경제성향상이 기대된다. 또 대형로에 비해 유니트당 전기출력이 저하(SPWR은 350MWe)하는 점은 module화하여 예컨대 2기의 爐를 원자로건물에 설치한 twin reactor system 채용 등에 의해 경제성개선이 가능하다. 이상과 같은 평가작업결과 SPWR은 매력적인 미래형 경수로로서 기술개발의 검토대상으로 하는데 적합하다는 결론을 얻었다.

혁신적 수동안전로의 개발과제

SPWR로 대표되는 혁신적 수동안전경수로의 기술 및 경제적 成立性을 평가하기 위해서는 앞으로 10년 이상의 연구개발이 필요하다. 주요한 연구개발과제를 <표 2>에 표시했다.

개발순서는 우선 제1단계에서 개발상의 문제점을 명확히 하고 연구개발계획을 작성한다. 이를 위해 여러가지 이상과도시 및 사고시의 안전분석을 실시하고 수동안전로가 현행 경수로의 안전심사기준에 비추어 보아 실현가능한 것인지 여부를 조사한다. 또 기동, 정지, 부하추종 등의 운전제어성을 검토한다. 또한 예상되는 사고sequence를 조사, 분류해서 리스트를 작성, 확률론적 안전평가(PSA)를 실시한다.

제2단계에서는 기본구성요소 및 기본개념의 기술적인 성립성을 확인한다. 이를 위해 운전

〈표 2〉 혁신적 수동안전경수로의 기술적 성립성평가를 위한 개발과제

단계	개발항목	내용
제1단계	1. 안전평가분석	각종 異常過渡시 및 사고시의 안전분석을 실시해 수동안전경수로가 현행 원자로의 안전심사기준에 비추어 실현가능한지 여부를 조사한다. 재래형 경수로의 코드체계를 새로운 개념의 원자로시스템에 적용할 때 문제가 있으며 개량한다
	2. 動特性분석	기동, 정지, 부하추종 등 운전제어성검토
	3. 활률론적 안전 평가(PSA)	수동안전로의 기술적 성립성의 평가와 설계개선을 위해 사고 sequence의 분류, event tree의 작성, PSA분석을 실시한다
제2단계	4. 열수력모형시험	수동안전경수로의 주요기기를 포함, 원자로시스템을 模擬한 모형시험장치로 核熱 coupling 기능을 갖는다 이 장치의 시험항목: 1) 운전특성에 관한 과제 2) 過渡 특성에 관한 과제 3) 사고시의 應答에 관한 과제
	5. 주요기기실증시험	안전상 중요한 기기(예컨대 SPWR에서의 수압동작밸브)에 대해서는 實物爐조건 하에서의 기능시험 및 내구·신뢰성실증시험을 한다
	6. 限界熱流速시험	긴급시의 爐정지기구로서 밀도차에 의한 boron水의 자연유입에 의존하는 경우 냉각불충분할 때의 爐출력의 저하속도는 현행 爐보다 늦어질 가능성이 있기 때문에 非定常DNB특성시험을 한다.
	7. Boron輸送모델시험	사고시 자연순환에 의해 고농도의 boron水를 노심에 공급해 爐를 정지시키는 개념의 爐에서는 사고시의 過渡熱流動분석을 하는 경우 계통내의 boron농도분포를 정밀하게 예측하는 것이 중요한 과제가 된다. 이를 위해 boron輸送모델평가시험을 한다
제3단계	8. 임계시험	수동안전경수로의 노심특성이 현행 경수로와 다른 경우에는 임계시험을 실시해 노심특성데이터를 수집한다
	9. 시험로에 의한시험	제어봉을 사용하지 않는 등 종래의 안전계통과는 다른 새로운 방식에 따른 원자로 개념을 채택하는 경우에는 실제의 원자로를 사용해 안전기능의 실증시험을 할 필요가 있다 시험과목: 1) 정상운전의 안정성 2) 과도시의 운전성능(異常過渡 포함) 3) 원자로정지시험

특성, 過渡특성, 사고시의 應答 등을 조사하기 위한 열수력모형시험, 안전관련기기·원자로구성기기의 실증을 위한 각종 爐外시험, 그리고 과도시의 限界熱流速의 예측과 boron輸送모델의 평가를 위한 열수력시험 및 노심특성이 현행 원자로와 다른 경우에는 임계시험을 실시해 이들 실험데이터의 분석에 의해 설계용 계산코드의 검증 및 개선을 한다.

제3단계에서는 수동안전로가 원자로시스템으로 실현가능한지를 실증한다. 이를 위해 수동안전기능의 실증시험이 가능한 시험로를 사용해서 통상운전시의 안전성, 過渡時의 應答특성 및 수동적 안전기능의 실증을 시행한다. 이

시험으로 수동안전경수로의 안전심사에 필요한 기초데이터수집이 끝난다.

이상과 같이 기초적인 연구개발이 끝난 단계에서 商用化를 염두에 둔 실증로건설로 나갈 것이냐 하는 것은 그 시점에서의 사회상황, 경제상황에 따라 결정될 문제다.

에너지환경을 둘러싼 상황으로 보아 수동안전로의 개발은 爐개념의 창출단계로부터 실용화를 겨냥한 개념의 실증단계로 이행해야 할 시기가 되었다고 할 수 있다. 21세기의 빠른 단계에서의 실용화를 모색하기 위해서는 빠른 시일내에 개발해야 할 노령을 선택해 구체적인 R&D를 시작하는 것이 바람직하다.