

원자력 신기술 및 개발동향

김 철

아주대학교

전 세계적으로 사용되고 있는 에너지의 90% 정도가 화석 연료로서 현재의 에너지 사용추세로 보아 21세기 초에는 석유와 천연가스가 고갈되고 이후 예측되는 석탄의 가속적인 이용을 감안하면 석탄 에너지 자원도 21세기를 넘기기 어려울 것으로 전망된다. 이에 대처하기 위하여 화석연료 대체에너지 자원 및 기술개발이 활발히 진행되고는 있으나 핵연료비가 발전원가에 차지하는 비용이 낮고(15%, 석유 약 57%, 석탄 약 60%) 기술집약형으로 복합기술의 파급효과, 그리고 산성비 온실효과 등의 환경오염을 유발하지 않는 청정에너지라는 점에서 현재로는 원자력이 에너지 문제 해결을 위한 대안이라고 하겠다. 원자력 기술은 주로 원자로형 핵연료 주기 그리고 원전 고도화 및 원자력 기반 신기술 분야로 나누어 검토되고 개발전략이 수립되어야 하므로 이 글에서는 원자로형과 관련 신기술개발 동향을 개괄하기로 한다. 원자력 분야 기술개발에 안정성 및 경제성이 필수적으로 수반되는 문제이므로 이를 포함한 기술적 측면을 논의한다.

가. 신원전개발 동향

원자력 발전을 주도하고 있는 국가들은 건설비의



김 철

- 서울대 공대 화공과(1962)
- 서울대 대학원(1964, 공학석사)
- (미)Worcester Polytech. Inst.(1972, 공학박사)
- 한국원자력연구소 연구부장
- 아주대학교 공대학장
- 아주대학교 교무처장
- (미)MIT 방문교수
- 한국화학공학회 생물화학부분위원장, 편집이사
- 아주대학교 화공과/에너지학과 교수(현)

증가 및 반핵 운동으로 인한 대중의 원자력 발전에 대한 신뢰성 저하 등으로 기존 원전기술을 기반으로 보다 안전하고 경제적인 차세대 원전 설계에 주력하고 있다. 개량형 경수로, 신형안전로, 고속중식로의 개발현황을 간략히 검토하고 핵융합로에 대하여 좀 더 자세히 논의한다.

1) 개량형 경수로

경수로는 미국 등 선진국 원전의 주종으로 기술적인 입증으로 2000년대에도 계속하여 경수로는 주도를 유지할 것으로 전망된다. 각국마다 개량형 경수로 개발을 위하여 기존 경수로 기술을 바탕으로 보다 단순화된 계통 및 기기설계나 운전여유에서 보다 안전하고 경제성이 있을 뿐만 아니라 이용률 및 신뢰성이 높은 표준원전을 개발하는데 목표를 두고 있다. 미국의 ALWR 사업은 DOE와 EPRI의 주관아래 개량형 차세대 경수로 원전의 설계요건 및 설계 검증과 중소형 원전 개념설계를 목표로 추진되고 있다. 프랑스에서는 정부기관인 원자력청(CEA)과 국영기업 전력회사(Edf)가 중심이 되어 900 MWe급 CP1, CP2형, 1300 MWe급 P4형, 1500 MWe급 N4형 등을 단계적으로 개량하고 있으며 N4형 원전은 1990년대 프랑스의 표준원전이 될 것이다. 일본은 기존의 문제점을 해결하기 위한 단계적 개량 방식으로 노형별(PWR, BWR)로 구분하여 표준화가 시도되고 있다. 개량형 경수로의 설계개선 목표는 각국마다 조금씩 다르지만 안전성, 이용률, 건설성, 발전소 수명 및 방사성 폐기물 배출량 등의 개선을 위하여 기술개발에 박차를 가하고 있으며 2000년대에 실용화될 것으로 기대된다.

2) 신형 안전로

신형 안전로의 안전성은 사고 방지에 목표를 두고

있으며 이를 위하여 반응도계수, 도플러법칙 등의 노물리법칙 등 자연법칙에 의해 원자로의 이상상에 핵분열 반응이 정지한다는 특성이 요구된다. 안전성의 척도는 Walk-Away Safe Time이 되고 노심의 동특성으로 어떠한 가상사고에도 Scram하지 않고 원자로가 정지하게 되는 고유 안전성이 확보된다. 평상시나 사고시를 포함하여 공학적 수동적인 설비의 작동만으로 원자로의 잔열을 제거할 수 있어야 하고 사고시 주변환경에 방사능의 방출을 감소시킨다. 사고시 온도상승 억제작용으로 출력이 소규모가 되고 시스템의 간소화, 원자로 시스템의 모듈화로 건설기간의 단축, 투자 위험도의 경감 등으로 경제적인 측면에서 타 발전원에 대한 경쟁력 우위를 유지할 수 있을 것이다. 신형 안전로의 고유 안전성이 확보되면, 환경오염 문제가 제거되고 발전소와 사용간의 거리단축으로 전력이외의 폐열회수, 지역 난방에의 이용 등 원자력 발전사업의 다양화에 기여하게 되고 특히 원전에 대한 신뢰성 제고에 효과가 클 것이다. 현재 각국에서의 연구동향을 보면 미국의 Liquid Metal Reactor는 전력 생산용으로 2000년대 중반에 상용화 예정이며 독일의 전력생산/Process Heating 목적인 HTR-500은 현재 건설중에 있다. 스웨덴의 SECURE-PIUS는 개념설계 완성단계에 있고 일본의 ISER은 전력 생산용으로 실험로의 건설 타당성이 검토되고 있다. 신형 안전로는 Passive System의 도입정도에 따라 AP-600과 같은 수동 안전로와 MHTGR(독일), PIUS, ISER 등의 고유 안전로로 나누어지고 Passive System이 강조될 수록 규모가 작아진다.

3) 고속증식로

원자로에서 증식비가 1 이상되는 증식로의 증식 반응에는 U^{238} 을 친물질로 하는 우라늄사이클과 th^{232} 를 친물질로 하는 토륨 사이클이 있고 냉각제의 종류에 따라 용융염로, 가스 냉각로, 경수 냉각로 등으로 구분된다.

30여년 전 이미 전력생산 실증이 있는 기술이지만 높은 건설비와 경제성 제고를 위한 기술개발 지연으로 상용화가 어두워지고 있다. 고속 증식로는 경수로와 비교하여 원자로 투자비와 핵연료 비용에서 경쟁력이 뒤지고 있으며 건설비용은 가압 경수로의 1.8-2.5 정도로 고가이고 핵연료 비용을 감소시키기

위해서는 재처리가 필요하다. 고속 증식로는 핵무기에서 사용되는 고속 증성자를 이용하며 핵연료 주기에 플루토늄 생산이 수반된다는 점으로 반핵, 반전 운동의 목표가 되어 왔으나 많은 국가가 에너지의 대외적 독립성을 목적으로 고속 증식로 개발을 추구하고 있으며 특히 우라늄 생산이 작은 나라에서 필요한 기술중의 하나이다. 현재 프랑스 등에서 건설비용 감소방안, 나트륨의 열수력학적 특징 및 안전성 확보, 그리고 재처리 산업과의 연계문제 등에 기술개발이 수행되고 있다.

4) 핵융합로

태양이 우주공간에 방출하는 에너지는 매초 30억Q(1Q는 10^{18} Btu로서 석유예상 약 226 k/에 상당함)에 달하는 막대한 양이며, 이 에너지원은 태양에서의 핵융합반응에 기인하는 것이다.

원자로에 이용되는 핵분열 에너지가 우라늄, 플루토늄 등의 무거운 원자핵의 분열반응에 의한 것임에 대하여, 핵융합 에너지는 중수소, 삼중수소 등 가벼운 원소의 원자핵 융합반응에 의해 방출되는 에너지이다. 핵융합반응을 지속시키기 위해서는 1억도 정도의 초고온이 필요하다. 핵융합반응 에너지는 현재 지상에서는 수소폭탄의 형태로만 실현되고 있다.

핵융합반응에는 중수소·삼중수소반응(D-T반응)과 중수소·중수소반응(D-D반응)의 두 종류가 생각되고 있으나, 로심의 온도조건 등으로 조기에 실용화될리라고 생각되는 것은 D-T 반응에 의한 핵융합이다. 핵융합 반응을 조금씩 제어된 상태로 지속시켜 전력 등의 에너지를 취득하는 장치가 핵융합로이다.

핵융합로의 연료로서는 중수소 및 삼중수소가 필요하다. 중수소는 해수중의 중수로서, 약 160 ppm이 함유되어 있다. 또한 삼중수소는 천연에는 존재하지 않으나 핵융합로의 운전에 수반하여 생성되는 것이다. 석탄, 석유 등의 화석연료 자원이나 우라늄, 토륨 등의 핵연료자원과 같은 자원의 지역적 편재성이 없다. 또한 이론적으로 볼 때 중수소 및 삼중수소 1g은 약 10만 kwh의 에너지에 상당하여, 연료는 무진장이라 할 수 있다. 따라서 핵융합로가 실현되면 인류는 에너지 자원의 제약에서 해방될 수 있는 것이다.

핵융합로의 실현을 위해서는

· 핵융합반응을 제어된 상태에서 지속시키기 위하여 주로 플라스마를 대상으로 하는 로심 플라스마 기술

· 실용규모의 핵융합로의 핵심이 되는 대용적의 플라스마 발생 및 제어를 위한 로심공학기술

· 발생한 에너지를 전기 또는 열에너지로서 전환하는 시스템을 포함한 핵융합 플랜트로서의 로공학기술 등을 확립해야 한다.

핵융합반응을 일으키기 위해서는 중수소, 삼중수소 등의 원자를 수천만도 이상으로 가열하여 고온 플라스마를 보지시킬 필요가 있다. 이와 같이 핵융합반응을 일으키려면 플라스마중의 이온의 온도, 밀도, 밀폐시간 사이에 일정조건이 충족될 필요가 있다. 핵융합반응에서 발생하는 에너지의 3분의 1로 핵융합반응을 지속시킬 수 있는 핵융합로의 조건을 로슨(Lawson) 조건이라 하며, D-T 반응의 경우에는 이온온도 1-2억도, 이온밀도 10^{14} 개/cm³이며 1초 이상의 밀폐시간이 필요할 것으로 보인다.

현재 이러한 초고온에서 견딜 수 있는 재료는 개발의 대상이며, 그 실현은 시간을 요할 것으로 생각된다. 따라서 플라스마를 진공중에서 밀폐용기 벽으로부터 분리시켜 보지할 필요가 있다. 이를 위한 방식으로서는 자장에 의한 자장밀폐방식, 레이저에 의한 관성밀폐방식 등이 생각되고 있다.

자장밀폐방식에 대해서는 소련, 미국, 프랑스, 일본 등에서 각종의 장치에 대해 연구개발이 진행되고 있으며, 현재 가장 좋은 성능을 나타내고 있는 것이 토카막(Tokamak)형이다.

관성밀폐방식의 대표적인 것은 페레트상의 중수소 혹은 삼중수소에 레이저(laser)광을 여러 방향에서 조사시켜 그 에너지를 흡수시킴과 동시에 폭축에 의해 핵융합 플라스마구를 압축시켜 핵융합을 일으키는 방식이 있다.

핵융합반응을 지속시키기 위해 필요한 투입 에너지와 핵융합반응에 의해 발생하는 에너지가 같은 조건하에 있는 플라스마를 임계플라스마라고 하는데 로심플라스마 기술의 연구 개발에 관해서는 각국 모두가 임계플라스마의 달성을 당면목표로 하여 연구개발을 진행하고 있다.

로심공학 기술은 로심플라스마가 핵융합으로서의 기능을 발휘하기 위해 필요한 공학기술이며, 초전도자석, 동적 진동제어기술 등의 개발이 중요하다.

핵융합반응에 의한 에너지의 대부분은 고에너지 중성자의 운동에너지 형태로 발생하고 이 에너지를 이용가능한 형태로 취출하는 기술이 핵융합로 공학기술의 주요한 부분으로 되고 있다.

로공학기술로서는 로벽재료, 리튬, 헬륨, 나트륨 등에 의해 열출력을 취출하는 기술과 에너지 변환 기술 등의 개발이 중요하다. 주요국에서는 로공학기술에 관한 연구가 착실하게 진행되고 있다.

현재 구상되고 있는 핵융합로를 대별하면 도우넛형 STARFIRE(상업용 TOKAMAK 핵융합로), MARS(TANDEM-MIRRO 핵융합로)와 toroidal 형태의 UWTOR-M(Stellarator 핵융합로) 등과 Laser fusion이라고 불리는 관성 confinement 핵융합로가 있으며 연구용 장치로 실험되고 있다.

앞에서 지적되었듯이 핵융합로에서는 고온의 플라스마를 가두는 confinement 개념의 확립이 필요한데 이의 성공여부가 핵융합로의 가능성을 좌우할 것이다.

핵융합 기술개발은 에너지 문제 해결이라는 면에서 큰 의의가 있고 기술상의 문제, 규모의 방대함 등 실현에 많은 난관이 있다.

선진국에서는 플라스마 분리에 막대한 R/D 투자와 노력을 경주하고 있으며, MHD Technology, Laser Technology, Tritium Technology, 초전도체 기술 등 핵융합 발전설비의 기술발전도 수반되어야 한다.

나. 원자력 기반 신기술

원자력 발전소 설계기술과 더불어 원자력 산업의 기반 기술의 개발도 필요하다.

1) 재료개발

원자력용 재료기술은 내방사성, 고성능 차폐, 고온 초전도체 재료 등 신소재 개발과 재료의 해석기술이 필요한데 선진국에서도 많은 연구개발 노력을 경주하고 있다.

2) 인공지능 기술

원자력 산업설비의 복잡성, 대규모, 방사능의 노출 가능성으로 로봇기술 등의 인공지능기술이 요구된다. 인공지능 기술은 원자력시설의 운전 및 보수,

사고유형 판단, 플랜트정보 관리에 적용되며 다양한 소프트웨어 및 하드웨어의 지원을 받아야 한다. 이미 국제적으로 상당한 기술수준에 이르고 있다.

3) 레이저 기술

원자법과 분자법으로 나눌 수 있는 레이저 기술은

핵주기 중 우라늄 농축의 가격을 현저히 경감시킬 전망이고 타 기술개발에도 큰 파급 효과 또는 상호 보완 효과를 줄 것이 틀림없다. 미국, 일본에서 원자법이 우라늄 농축에 적용되고 있고 미국, 프랑스, 독일 및 일본에서는 LANL, IRMPO법 등이 개발되었거나 개발단계에 있다.