

특 집 2

원자력산업의 국제화

國際原子力界의 技術開發 및 産業化 動向



신 재 인

한국원자력연구소 소장

사 람들이 원자력을 이해하고 활용하기 시작한 것은 화석 연료처럼 자연스럽고 본능적인 에너지원으로 출발한 것이 아니고 신의 창조, 그 비밀스러운 메카니즘을 훑쳐보기 시작한 데서 기인하고 있다. 따라서 원자력은 인류문명의 발달사에서 고등문화형성에 필요한 에너지원으로 획기적인 공헌을 할 수 있는 여지가 많이 남아 있지만 그 배경에는 우

리가 신의 창조물로서 항상 그 근원으로 회귀하려는 인류의 자연 본성과 서로 거스르게 되어 있어서 원자력의 활용이 쉽게 이루어질 수만은 없게 되어 있다.

따라서 금세기에 들어와서부터 예측되었던 원자력문명시대는 거부적인 문화반발작용 때문에 주춤하고 있고, 핵분열에너지 활용에서 핵융합에너지 활용으로 천이되는 그 과정도 그 사이에 상온

핵융합반응실험에 대한 획기적인 단막극이 상연되었던 때를 제외하고는 별 커다란 진전과 희망을 던져주지 못하고 있다.

그러나 세계 각국은 각기 나름대로 그 처한 환경에서 새로운 원자력기술과 체계를 탄생시키기 위해서 많은 고심을 하고 있다. 자연적인 안전성을 보유한 원자력발전소의 설계, 건설에서부터 최근 프린스턴대학에서 4초동안 에너지 발생을 지속시켰던 고온 핵융합로의 개발 그리고 동위원소의 산업적, 의학적, 농학적 이용의 확대기술개발에 이르기까지 미래를 지향하고 지표하에서 움직이고 있는 원자력기술개발은 오히려 원자력 강대국들의 기술 독점 현상을 심화시키고 핵무기 기술개발에 대한 정치적인 상관 관계를 높이면서 원자력 기술개발의 후발주자들에게는 더욱 큰 명예를 씌워놓는 현상을 보여주고 있다.

특히 작년 말에 모습을 갖춘 우루과이 라운드 협정은 이제까지 각 국가가 국가적인 이해와 독점소유를 위해 취해왔던 폐쇄적인 국가 원자력기술개발정책을 대외에 개방하고 경쟁하고 그래서 원자력선진국들의 기술이 원자력시장을 모두 잠식하는 형태로 변모하도록 강요하고 있다. 특히 우리와 같은 중진적인 원자력 기술을 확보하고 있는 나라는 그러한 개발의 조치가 채 성숙하기도 전에 국제무대에 나서서 힘을

겨루도록 되어 있어서 우리 나라의 원자력기술의 국제화가 조만간에 이루어지지 않는다면 결국은 국내에서 새싹처럼 자란 원자력자립기술마저도 성장될수 없는 처지에 놓여있다. 현재 세계적으로 추진되고 있는 원자력의 기술개발형태는 1) 원전을 지속적으로 건설하고 있고 새로운 원전을 설계하고 있는 나라와 2) 현재는 원전을 새롭게 건설하지는 않지만 2000년대에는 지금과는 다른 새로운 형태의 원전을 건설하려는 나라들에서 추진되는 형태로 대별될수 있으며 핵연료주기 기술분야에서는 강도 높은 핵비확산조약의 이행문제 여부 때문에 플루토늄의 처리 처분기술개발에 관한 새로운 시도가 크게 돋보이고 있다.

이러한 와중에서 특히 동남아시아에서 부상되고 있는 신흥공업국들을 중심으로 새롭게 원자력 활용국으로 부상하고 있는 인도네시아, 태국, 말레이시아, 필리핀 등 여러나라들의 원자력 기술개발 형태는 우리가 숙명적으로 추진해야 하는 원자력의 국제화에 많은 영향을 줄 것으로 생각되어 주목을 아니할 수 없다.

이제 우리는 늦게 출발한 우리의 원자력기술개발이 그래도 국제무대에 나가서 당당히 다른 나라의 원자력 기술들과 경쟁하여 승리할 수 있는 그 모습을 보아야 한다. 늦게 출발하고 국내외의 여건이 좋지 않음에도 불구하고

국제 경쟁을 치루기 위해서는 외국이 과거 수십년 동안에 그 나라 안에 또는 나라 밖에 심어놓고 현재도 추진하고 있는 기술개발의 형태와 내용을 먼저 심도있게 살펴보아야 한다.

본고에서는 따라서 원자력발전(핵연료주기기술보유)기술, 원자력의 기존기반기술, 원자력의 산업적이용기술 등으로 대별하여 그 추세와 추이를 점검해 본다.

원자력발전

원자로 개발

원자력발전소의 안전성은 원자력발전이 시작된 이래로 충분히 입증되어 왔으나 미국의 TMI사고와 옛 소련의 체르노빌사고 이후 일반대중의 원자력발전에 대한 우려의 증대로 원전의 사회적 수용성 문제가 심각하게 대두되어 있었다. 이의 극복은 안전성이 보다 제고된 원자로 개발이 핵심적인 해결방법으로 인식되어 원자력 선진국들이 중심이 되어 차세대를 대비하여 안전성이 획기적으로 개선된 새로운 발전용 원자로 개발을 추진하고 있다. 차세대를 대비한 원자로 개발은 계통의 단순화, 자동화, 설계수명 증가, 첨단계측 제어계 도입, 인간공학의 최적화 등을 통한 안전성 제고와 더불어 타 발전원에 비하여 경제성을 향상시키는 것을 그 목표로 하고 있다. 이러한 원자로

개발은 미국의 ALWR(Advanced Light Water Reactor) 개발 프로그램으로 대표되고 있으며 일본, 프랑스, 캐나다 등이 매우 활발한 노력을 기울이고 있다.

상기와 같이 안전성 제고와 경제성 향상을 위한 새로운 원자로 개발 형태는 크게 두가지로 분류할 수 있는데, 첫째는 현재 건설 운전중인 원자력 발전소를 바탕으로 하여 기입증된 기술을 접목시켜 점진적으로 개량하여 표준형으로 개발하는 Evolutionary형 원자로를 개발하는 것이며, 둘째는 기존 운전중인 원자력발전소와 비교하여, pump, valve, piping 등 및 관련 기기들의 수량을 대폭 줄여서 원자로 계통을 단순화 하고 외부의 구동동력을 필요로 하지 않는 피동적 안전개념을 도입한 Revolutionary형 원자로를 개발하는 것이다. 이 두가지 형태의 원자로 개발은 그림 1에 도시되어 있다.

우리 나라는 외국의 완제기술을 도입하여 원전을 건설 운영하는 단계를 지나고 그동안 축적된 기술과 외국과의 공동노력으로 원전을 설계 건설하는 단계를 경유하여 현재 자력으로 원전을 설계 건설하는 단계로 접어들고 있으며, 한국형 원자로의 자력 연구개발 노력에 심혈을 기울여 오고 있다. 이에 부응하여 2007년부터 상업가동할 차세대원자로 개발을 목표로 하여 이미 축적된 국내 기술을 활용하여 1994년 말까지

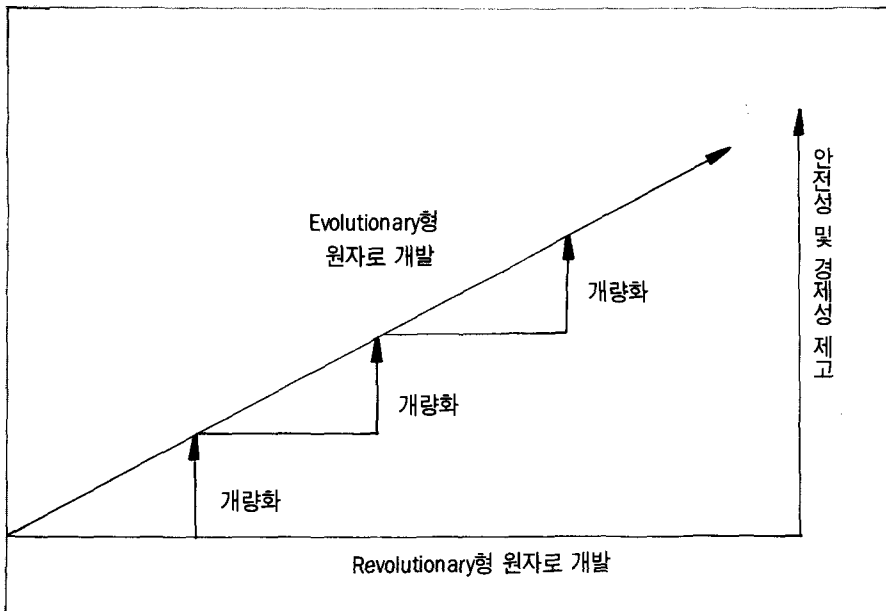
차세대원자로의 노형 및 설계개념을 선정하고(1단계), 개념 및 기본설계를 완료하여 표준설계에 대한 설계인증을 1998년까지 획득할 예정이며(2단계), 2001년까지는 상세설계를 수행하여 (3단계), 2006년까지 건설을 완료할(4단계) 일정으로 현재 설계개념 선정을 위한 다각도의 연구가 정부 산 학 연의 협동으로 추진되고 있다.

Evolutionary형 원자로 개발

Evolutionary형 원자로란 현재 건설되어 운전중인 기존원자로의 안전성 개념(사고방지 및 사고대처시 외부동력공급을 요구하는 능동형 기기 사용개념)을 크게 변경시키지는 않으나 계통의 단순화, 계통신뢰도 향상을 도모하여 안전성을 기존원자로에 비해 10~100배정도 제고시키고자 하는 목적의 원자로이다.

일반적으로 개량형 원자로로 불릴 수 있는 Evolutionary형 원자로는 2000년대 초반 상업운전을 목표로 미국을 위시하여 일본, 프랑스 등지에서 매우 활발히 개발되고 있으며 우리나라도 1983년 착수하여 3단계에 걸친 원전표준화 계획을 통하여 1991년 후속원전에 적용할 설계개념을 선정하고 표준설계요건 및 안전성 분석보고서를 작성하여 한국형표준원전으로 개량형 경수로를

그림 1. Evolutionary 및 Revolutionary형 원자로 개발



- *A, B, C, D.....Evolutionary형으로 개발 건설되는 원자로
- *A' : Revolutionary형 원자로 개발의 기본 Model
- *N' : Revolutionary형으로 개발 건설되는 원자로

표 1. 국가별 Evolutionary형 원자로 개발 현황

국 가	개발기관	개발원자로명	개발현황
미 국	ABB-CE	System 80+	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1986년부터 NRC중대사고 정책 및 표준화 정책에 부응하기 위하여 기존의 System 80 개량화 착수 ○ NSSS, 격납용기, 제어실, 비상급수계통 등 개량화 ○ 노심용융빈도 감소, 건설단가 절감, 이용률 향상, 발전소 수명연장 등에 주력 ○ 주요 인허가 일정 <ul style="list-style-type: none"> - NRC 1차 CESSAR-DC 제출: 87. 11 - NRC Draft SER Issue: 92. 3 - NRC Final SER Issue: 94. 6 예정 - NRC Final Design Approval: 94. 8 예정 - Disign Certification: 95. 12 예정 ○ 1994년 1월부터 First-of-a-Kind-Engineering(FOAKE) 착수
	W	APWR	<ul style="list-style-type: none"> ○ 영국과 공동으로 영국에 Sizewell B 건설 <ul style="list-style-type: none"> - 미국의 Callaway 발전소의 개량형 - W-Bechtel의 표준형 원자력발전소 - 94년말 준공 예정 ○ 일본의 4개 전력회사, Mitsubishi 및 JAPC(Japan Atomic Power Corporation)와 공동 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 87년 개념설계 완료 - 91년 5월 NRC로부터 예비설계 인가 획득 - 일본의 JAPC는 2000년대 초 상업운전을 목표로 2기의 APWR(1,420MW급) 주문 예정 ○ 1990년대부터 스페인의 원자력 기관과 공동으로 1,000MW급 APWR개발 추진
	GE	ABWR	<ul style="list-style-type: none"> ○ 일본의 동경전력, Hitachi, Toshiba사 등과 공동으로 1,300MW급 ABWR 개발 중 ○ 1992년 12월 미국 DOE 및 주요 전력회사들의 개발 지원을 받는 FOAKE 대상 원자로로 선정됨 ○ 주요일정 <ul style="list-style-type: none"> - 95년 11월 Design Certification 획득 예정 - 96년 9월 FOAKE완료 예정
일 본	Mitsubishi JAPC Kansai전력 Kyushi전력 Shikoku전력 Hokkaido전력	APWR	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미국의 W사와 공동으로 1,350MW급 APWR 개발중(미국 W개발 현황 참조)
	동경전력 Hitachi Toshiba	ABWR	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미국의 GE사와 공동으로 1,300MW급 ABWR 개발중 ○ 1991년 5월 일본 상무성으로부터 미국의 DC(설계 인증)에 해당하는 인가 획득 ○ 현재 동경전력이 Kashiwazaki Kariwa 부지에 2기의 ABWR 건설중이며 2000년 이전 상업운전 예상

국제원자력계의 기술개발 및 산업화 동향

국 가	개발기관	개발원자로명	개발현황
프랑스	Framatome	N4	<ul style="list-style-type: none"> 유럽의 원자로 개발의 중심인 프랑스는 지속적인 개량화 및 표준화를 추진하고 있음 P4형 원자로를 참조발전소하여 원자로 용기 재질개선, 증기발생기 튜브 재질개선, 냉각재 Pump Case설계 변경, BOP분야 개선 등을 추진하여 개량 표준형인 1,400MW급 N4형 원자로 개발 첫 N4형 발전소를 Chooz B에 건설중이며 1995년 경 상업운전 예상
독 일	Siemens	Convoy	<ul style="list-style-type: none"> 독일은 경제성 향상 측면에서 건설 공기 단축, 발전소 비용절감 및 운전 자동화를 통한 개량화 안전개념 실험 표준형인 1,500MW급(4 loop) 또는 1,300MW급(3 loop)의 Convoy원전을 개발 운전 중이나 추가적인 개발 노력 미흡
프랑스/ 독일	NPI (Nuclear Power International)	EPR	<ul style="list-style-type: none"> 프랑스의 Framatome사와 독일의 Siemens사는 PWR시장의 공동 전략 목적으로 1989년 NPI사를 설립 프랑스의 N4와 독일의 Convoy원자로의 개념을 혼합 채택하는 1,450MW급 원자로의 개발 중 추진일정 <ul style="list-style-type: none"> -91년 공동 원자로인 EPR(European PWR)의 기본개념 정립 -93년 개념 설계 완료 -95년 중순 기본 설계 완료 -98년 중순 상세 설계 완료
한 국	한전 KAERI KOPEC	한국형 표준원전	<ul style="list-style-type: none"> 1983년부터 3단계에 걸친 원전 표준화계획 수행하여 1991년 후속 원전에 적용할 설계 개념을 선정하고 표준설계 요건 및 안전성 분석 보고서를 작성하여 한국형 표준원전으로 개량형 경수로 개발 첫 한국형 표준원전은 울진 3, 4호기이며 이를 기준으로 개량화된 후속원전을 2006년 이전까지 건설할 예정임

표 2. Evolutionary형 원자로의

설계특성	System 80 ⁺	APWR1300	APWR1000	ABWR	EPR
원자로 형태	가압경수로	가압경수로	가압경수로	비등형경수로	가압경수로
개발기관	ABB-CE	Westinghouse	Westinghouse	GE	NPI
전기출력(MWe)	1300	1300	1050	1300	1450
Loop 수	2	4	3	-	4
핵연료집합체수	241	193	193	872	205
평균출력밀도(kw/l)	95.5	80.0	96.2	50.6	~107
노심출구온도(°F)	615	621	616	550	~617
격납용기	Dual: Spherical Steel w. Concrete Shield Building	Cylindrical Steel	Cylindrical Steel	Pressure Suppression/ Reinforced concrete	불명
잔열제거능력	4×100%	안전등급: 4×50% 비안전등급: 2×50%	최동	3×50%	4×50%
노심용융빈도	<10 ⁻⁶ /로·년	<10 ⁻⁶ /로·년		<10 ⁻⁶ /로·년	<10 ⁻⁶ /로·년

개념적으로 개발하였다.

현재 개발되고 있는 Evolutionary형 원자로는 대표적으로 미국의 System 80+, APWR, 미국과 일본의 ABWR, 유럽의 EPR(European PWR) 등을 들수 있으며 이들의 용량은 전기출력 1000MW급 이상의 대용량이다. 이들 원자로의 개발 현황은 표 1에 요약되어 있으며 각 원자로형의 특성은 표 2에 기술되어 있다.

Revolutionary형 원자로 개발

기존 원자로의 경우 사고대비

및 사고시 안전성 확보를 위하여 외부동력공급으로 구동되는 능동기기 사용의 능동안전개념을 사용하고 있으나 Revolutionary형 원자로는 능동안전개념을 탈피하여 중력 및 자연 현상을 이용한 이상노심 냉각수의 주입, 냉각수 자연 순환에 의한 원자로의 잔열 제거 등 혁신적인 피동 안전개념을 도입하여 운전원 의존도를 줄이고 계통의 신뢰도를 향상시켜 원전의 안전성을 제고하는 것을 목적으로 한다. 동형의 원자로는 특히 미국을 중심으로 개발되고 있으며 일본에서는 자체적인 기

술로 연구개발하고 있다.

여러 나라들의 Revolutionary형 원자로 개발현황은 표 3에 요약되어 있고, 각 원자로의 특성은 표 4에서 보는 바와 같다.

핵연료 주기

핵무기폐기 플루토늄 이용

소련의 붕괴는 옛 소련 내에 있는 핵무기 관리 및 감시기능을 저하시켰으며, 전략핵무기 폐기로 고농축 우라늄 및 플루토늄의 안전관리가 중요한 문제다.

표 3. 국가별 Revolutionary형 원자로 개발 현황

국 가	개발기관	개발원자로명	개발현황
미 국	W	AP-600	<ul style="list-style-type: none"> DOE 및 EPRI의 지원으로 W사가 개발중 피동안전개념의 실증을 위해 미국, 일본, 이탈리아 등이 AP-600 실증실험에 참여 추진중 표준 설계에 대한 설계 인증(DC)은 1997년 5월 경으로 예상되고 현재는 FOAKE가 진행중임
	GE	SBWR	<ul style="list-style-type: none"> 640 MW급으로 1982년부터 연구개발 착수 표준설계에 대한 설계인증을 1997년 8월 경으로 예상
	GA	MHTGR	<ul style="list-style-type: none"> GA사는 30년 이상의 가스냉각로의 경험에 근거하여 Modulane 형의 고온 가스 냉각로를 개발중에 있음 사고시 피동개념의 잔열제거 계통(RHRS) 채택 NRC는 MHTGR에 대한 예비설계인가를 1996년 경으로 예정하고 있으며 최종설계인증을 2003년 경으로 예상하고 있음
일 본			<ul style="list-style-type: none"> 미국의 EPRI가 추진중인 ALWR Program에 참여하고 있으며, W사의 AP-600을 용량 격상한 900MW급 피동형 경우로 SPWR 개발을 추진중임 Mitsubishi를 주축으로 소·중형(300~600MW급) 피동형 원자로인 MS300/600을 연구개발 중에 있음
중 국		AC600	<ul style="list-style-type: none"> W사의 AP-600과 유사한 설계개념을 도입한 AC600에 대한 개념설계를 1988년 완료하고 현재 예비설계 진행중임. AP-600이 채택하고 있는 일부 피동안전개념을 자국내 기술여건과 실정 등을 고려하여 능동기기 활용개념으로 변경 개발중 최초 사업운전은 2005년경으로 예상

이러한 여건하에 미국의 GA사는 1993년 4월 러시아의 원자력 에너지부(MINATOM)와 핵무기 폐기에 발생하는 고농도의 플루토늄을 원료로 이용하는 신형 고온가스로인 GT-MHR을 개발하기 위한 합작회사를 설립하기로 합의하였는데 이는 플루토늄의 제3국 수출을 방지하는 동시에 에너지로도 이용하는 효과가 있기 때문에 일본기업에도 참여를 요청하고 있다.

GH-MHR은 플루토늄을 연소시켜 발생하는 열을 He 가스로 냉각하는 방식인데, 이는 고농도 플루토늄을 95%이상 연소시킬 수 있고, 열효율이 50%로서 일반 원전보다 훨씬 높은 장점이 있다. GA사와 MINATOM은 5년 내

에 설계를 마치고 10년안에 1호기를 개발할 계획으로 있다.

농축 및 재처리기술

세계 원자력발전소의 대부분을 차지하고 있는 경수로용 원전연료는 농축단계를 거쳐 제작되어야 하며, 사용후연료의 재활용을 위하여는 재처리라는 과정을 거쳐야 한다. 이렇게 농축과 재처리 기술은 원전연료주기에서 중요한 위치를 차지하고 있고 원자력기술 선진국들은 대부분 이들 기술을 보유하고 있으며 더 좋은 기술을 개발하려 노력하고 있다.

우라늄 농축기술의 개발 방향은 대체로 과거의 비평형분리법인 가스확산법에서 현재는 평형분리법인 원심분리기술로 이행하

고 있고 더 나아가 앞으로는 개별분리법인 레이저농축법으로 진행될 것이 분명해지고 있다. 현재 가동중인 우라늄 농축시설의 대부분은 가스확산법을 적용하고 있는데 가스확산법에 의한 농축시설을 가동하고 있는 미국의 우라늄농축공사와 유럽의 UROD IF가 세계 농축서비스 수요의 대부분을 공급하고 있다. 이후 가스확산법에 비해 경제성과 분리효율이 높은 원심분리법이 일본과 유럽의 URENCO에 의하여 개발 상용화되고 있다(표 5 참조).

농축기술은 기술개발과 혁신가능성의 여지가 많아서 현시점에서는 농축의 기본원리의 변형을 포함하여 성능향상을 비약적으로 이룰 수 있을 것으로 여겨

표 4. Revolutionary형 원자로의 특성

설계특성	AP600	SBWR	MS300/ 600	CANDU-3	AC600	MHTGR
원자로형태	가압경수로	비등형경수로	가압경수로	가압경수로	가압경수로	가스냉각로
개발기관	Westinghouse	GE	Mitsubishi	AECL-CANDU	NPIC	GA
전기출력(MWe)	600	640	300~600	450	600	538
Loop 수	2	-	2	-	2	-
핵연료집합체수	145	732	121~157	232	145	660
평균출력밀도 (kw/ l)	78.8	41.0	34.2	12.8	78.7	5.9
노심출구온도(°F)	599.2	550	617	590	621	1268
냉각재/ 감속재	경수/경수	경수/경수	경수/경수	중수/중수	경수/경수	He/Graphite
격납용기	Steel	Pressure Suppression/ Reinforced concrete	Steel/Concrete filled Steel		Steel	None
잔열제거능력	2×100% (Passive)	3×50%		2×100%	2차비상급수 (passive) 자연순환	3×100% (2 active, 1 passive)
노심용융빈도	<10 ⁻⁶ /로·년	<10 ⁻⁶ /로·년	<10 ⁻⁶ /로·년		<10 ⁻⁶ /로·년	

지고 있다. 이에 미국, 프랑스, 독일, 일본 등의 원자력기술 선진국에서는 우수한 경제성을 가지고 있고, 회수우라늄과 열화우라늄에서 저농축우라늄을 생산할 수 있어 우라늄의 이용효율을 크게 향상시킬 수 있는 레이저농축기술의 개발을 실시하고 있다. 미국에서는 1985년 미래의 농축기술로서 원자증기농축법(AVLIS)을 채택한 이후 이의 개발에 박차를 가하여 현재 실용화 준비단계에 들어서고 있고, 일본 등에서는 실증단계에 들어서고 있다.

재처리기술은 연료자원의 유효이용을 최대화할 수 있는 주요 기술로서 원자력기술 선진국에서는 원자력이용 초기부터 그 개발을 실시하여 왔다. 재처리기술은 크게 습식법과 건식법으로 구분될 수 있는데 습식법의 대표적인 공정으로서 Purex법을 들 수 있고 건식법으로는 불화물 휘발 공정, 고온화학 및 고온 야금공정이 있다. 현재 세계에서 가장 많이 적용하고 있는 재처리기술은 Purex법으로서 1949년 미국 GE사의 연구소에서 개발한 이래 프랑스, 영국 등 세계 각국에서 이용하고 있다. 최근에는 일본에서 Purex공정에 균분리공정을 첨가한 새로운 습식법 공정개발을 실시하고 있는데 이는 고준위 폐액 중 초우라늄원소의 회수와 소멸처리를 위하여 단반감기화를 목적으로 하고 있다.

또한 미국의 ANL에서는 핵확

표 5. 각종 우라늄 농축법의 비용비교

비용\분리법	기체확산법	원심분리법	AVLIS법
자본비(\$ / kg.SWU)	~600	~800	~80
전력소비량(kWh/ kg.SWU)	~2,400	~100	~100
운전비[\$ / (kg.SWU/ y)]	~5	~50	~20

산저항성이 큰 IFR연료주기와 양립시켜 금속핵연료의 초우라늄 원소 회수를 위하여 과거 고온야금공정을 개량한 새로운 건식공정(Pyro-process)을 개발하고 있는데, 이는 폐기물발생량이 적고 공정이 단순하며 초우라늄원소의 원자로내 연소를 위한 공정이라는 등의 여러 특성을 가지고 있으며 현재는 경수로용핵연료의 초우라늄원소 회수를 포함한 취급분야의 확장을 위하여 연구개발이 진행되고 있다.

플루토늄 연소(Pu Burning)

1980년대 이후 사용후연료의 저장 문제 특히, 장수명 핵종의 소멸처리 문제가 관심사로 대두되면서 금속핵연료를 사용하는 액체금속로에서 고속중성자에 의한 초장수명 핵종의 소멸처리 능력이 재인식되기 시작하였다. 미국은 1984년부터 ANL에서 개발하여온 Pyro-processing의 원전 연료주기를 사용하는 IFR(Integral Fast Reactor)원자로 개념의 ALMR(Advanced Liquid Metal-cooled Reactor) 개발을 추진하였으며, DOE는 1988년 8월에 GE사의 액체금속로 PRISM(P-

ower Reactor Innovative Small Module)을 개발대상노형으로 선정하였다.

그러나 클린턴 정부에 의해, 이제까지 설계 연구된 액체금속로에 대한 경제성을 인식받지 못함으로써 잠정적으로 원자로 부문의 설계 활동이 중지 될 상태에 이르게 되었지만, 1984년부터 ANL에서 개발하여온 IFR개념에 의한 금속핵연료의 Pyro-processing재처리법으로 액티나이드 계열의 핵종을 소멸처리하는 연구개발을 새로 시작하고 있다.

IFR의 설계 개념은 원자로, 원전연료주기 및 방사성폐기물관리를 한꺼번에 묶어서 처리하는 Integral 방식의 액체금속로개념으로서, 연료로는 금속플루토늄을 사용하고, 사용후연료는 Electro-refining 방법에 의해 용융하여 플루토늄을 계통내에서 재회수하여 사용함으로써, 외부로의 핵물질이 유출되지 않는, 핵확산우려가 없는 개념으로 평가되고 있다.

고준위방사성폐기물처분

고준위폐기물을 지층처분하는 이유는 심부지층구조내에 고화된

폐기물을 생태계로부터 장기간 격리하는 데 용이하기 때문이다. 처분의 심도는 경우에 따라 달라질 수 있으나 일반적으로 수백미터 이상의 깊이를 뜻한다. 심지층 처분장이 갖추어야 할 기본적인 조건은 다음과 같다.

첫째, 불의의 인간침투를 방지할 수 있고 제한적으로는 고의적 침투 또한 방지하도록 충분한 심도를 갖추어야 한다.

둘째, 건조하거나 지하수의 흐름이 매우 느린 낮은 투수율의 암반에 위치하여야 한다.

셋째, 폐기물 및 용기의 물리화학적 특성과 양립할 수 있어야 한다.

넷째, 지진학적으로나 지질학적으로 안정한 지역에 위치하여야 한다.

다섯째, 방사성핵종의 이동을 억제하도록 물리적 또는 화학적 방벽을 제공하여야 한다.

고준위 폐기물 처분을 계획하고 있거나 저준위 폐기물 지층처분을 시도하고 있는 국가들이 최근에 공통적으로 당면하고 있는 문제는, 부지의 적합성과 처분후 안전성 보장에 대한 요구가 더욱 까다로워지면서 이에 따른 처분 실증시험의 필요성이 대두되고 있다는 점이다.

이미 저준위방사성폐기물 처분 시설을 건설한 경험이 있는 스웨

덴의 경우도 고준위방사성폐기물의 심지층처분을 위하여 종합적인 연구개발계획을 수립하여 진행중에 있는데, 이는 처분방식과 특정부지의 결정근거를 확보하는데 주목적이 있다. 특히 주목할만한 점은 처분실증시험시설을 Aspo에 건설하여 실증 및 평가 완료에 15에서 20년 정도 예상하고 있다는 사실이다.

캐나다에서는 고준위 폐기물을 지표하 500~1000m깊이의 지하 매질 내에 처분하는 심층처분장을 2015년에 운영할 예정이다. 이와 관련 AECL의 Whiteshell 연구소(WNRE)에서는 고준위 폐기물의 지층처분에 관한 기초연구,

표 6. 심지층처분을 계획하고 있는 각국의 고준위폐기물, 사용후연료 처분정책

국명	처분지질	고화체	처분개시
아르헨티나	화강암	유리화	
벨기에	점토	유리화	2035
브라질	미정	미정	
캐나다	심성암	사용후연료	2015
핀란드	화강암	사용후연료	2020
프랑스	점토, 암염, 화강암, 편암	유리화	2010
독일	암염	유리화, 사용후연료	2008
인도	화강암	유리화	
이탈리아	점토 또는 결정질암	유리화	
일본	화강암, 편암, 응회암	유리화	2030
네덜란드	암염, 점토	유리화	
파키스탄	미정	유리화	
남아공화국	미정	미정	
스페인	암염, 점토, 결정질암	사용후연료	2020
스웨덴	화강암	사용후연료	2020
스위스	화강암, 퇴적암	유리화, 사용후연료	2025
러시아	암염, 결정질암	유리화	
영국	미정	유리화	2040
미국	응회암	사용후연료	2010

환경영향평가 코드개발 이외에, 지하연구시설인 URL을 건설 운영하고 있다. URL은 1980년에 현지 조사가 시작되어 온타리오 주의 다른 심성암지역과 비교 검토 후 1983년부터 굴착이 시작되어 지하 130m 및 250m를 중심으로 시험시설이 만들어지고 각종 원위치시험이 실시되고 있다.

고준위 방사성폐기물의 해저처분의 개념은 처리된 고준위 폐기물 또는 사용후연료를 담은 처분용기를 해저의 침적층 내에 처분하는 방법을 지칭하는데, 대륙내 심지층처분의 주요 장점에 추가하여 다음의 두가지 장점을 더 가지고 있다.

첫째, 관심이 있는 여러 국가가 공동으로 공해상에서 운영할 수 있는 이론상으로는 가장 국제적인 처분장이다. 둘째, 만약의 경우 핵중누출이 발생하더라도 대량으로 희석되어 버린다.

이러한 해저처분은 여러가지 장점이 있지만, 이런 형태의 처분장의 건설과 운영은 강력한 국제협약이 필요로할 것이다.

인허가제도

전세계적으로 볼 때 일부지역을 제외하고 원전사업은 전반적으로 침체국면에 빠져 있다. 특히 미국은 전반적인 경제성장의 저

조로 인한 전력수요의 감소와 TMI사고의 영향으로 1978년 이후 후속기의 건설이 완전히 중단되었다.

그동안 미국의 전력회사들이 원전의 신규발주를 망설인 배경은 주민의 원전건설 반대 및 전력수요의 증가율이 당초의 예상보다 감소한 이외에, 복잡한 규제체계에 따른 원전건설기간의 지연이 가장 주된 이유였다.

미국의 원전규제의 기본구조는 10 CFR 50에 따라 건설허가(Construction Permit)와 운전인가(Operating License)를 분리하여 심사하는 2단계 절차였으나 원전의 건설, 운전에 관한 경험이 축

표 7. 미국의 인허가 제도 비교

구 분	10 CFR 50	10 CFR 52
부 지	-주정부의 부지사용 허가 -NRC, CP 일환 ER 심사 -CP관련 공청회	-조기 부지허가(ESP) -ER 심사 -공청회(ESP는 CP의 일부임)
설 계	-PSAR 심사(CP) -FSAR 심사(OL)	-표준설계 인증(SDS) -FDA 선행되어야 -안전성 완전검사 -PRA 등 자료 제출(중대사고 정책반영) -공청회 -ACRS
건 설	-PSAR, ER -ACRS -공청회(ASLB, ASLAB)	-통합허가(CL) -ESP/SDC 참조가능 -OL 신청시의 기술관련자료 (10 CFR 50.34*)
운 영	-FSAR, ER 심사 -ACRS -공청회	-공청회 -ACRS에의 조회
특 기 사 항	-폐기된 것이 아님(양립성)	-Part 50의 재편집 (부지, 설계부분 분리) -공청회 매단계 도입 -일련의 과정이 아니라 독립적 -중대사고정책 반영(PRA, TMI, USI&GSI 등)

적되어 감에 따라 이러한 규제절차에 관한 유효성 및 효율성이 문제되기에 이르렀다.

미국 원자력규제위원회(NRC)는 원전 인허가절차에 통일적 기준을 마련함으로써 절차의 간소화를 도모하고, 기존 인허가제도(10 CFR 50)가 가지고 있던 불확실성 및 건설지연의 문제를 근본적으로 제거하기 위하여 새로운 규칙(10 CFR 52)을 제정하였는데 그 중요한 내용은 ①사전부지허가(Sub Part A: Early Site Permit) ②표준설계인증(Sub Part B: Standard Design Certification) ③통합인허가(Sub Part C: Combined Licenses for Construction and Operation)이다.

통합인허가는 종전의 2단계 인허가절차를 하나로 통합한 것이다. 원전사업자가 통합인허가를 신청할 때에는 보통 건설허가 및 운전인가 신청에서 요구되는 모든 자료를 제출하여야 하며, NRC는 이들 자료를 건설초기에 완벽하게 심사함으로써 인허가기간을 대폭 단축하도록 한 것이다.

이와같이 NRC가 10 CFR 52를 채택함으로써, 미국은 그동안 침체에 빠져 있던 원자력산업에 새로운 활력을 불어 넣을 수 있는 기틀을 마련하였다. NRC로부터 표준설계인증을 얻기 위한 활동은 이미 추진되고 있는데 그 1차 대상은 개량형 경수로인 GE사의 ABWR과 ABB-CE사의 System 80+ 이다. 특히 WH사

의 AP-600과 GE사의 SBWR은 이미 심사단계에 들어가 있다. 미국 전력업계가 예측하는 표준설계인증의 취득시기는 대체로 ABWR과 System 80는 1994년, AP-600은 1995년이 될 것으로 예상되고 있다.

한편 미국 전력업계는 차세대 원자력발전소 제1호기를 2000년까지 운전을 개시하고자 하는 목표를 설정하고 있다. NRC가 새롭게 채택한 10 CFR 52는 미국 전력업계의 이러한 목표를 달성하는 데 결정적인 기여를 할 것으로 판단된다.

미래형 원자로

액체금속로

최근의 액체금속로(Liquid Metal-cooled Reactor, LMR) 개발동향은 다음의 세가지로 요약될 수 있다.

첫째로, 미국, 영국 등과 같은 국가들은 액체금속로 기술개발에 대한 경제적인 부담으로 이의 개발을 잠정 중지하려는 경향을 보이고 있으며, 반면에 국가에너지 자원의 전략적 확보 차원에서 액체금속로를 개발하고 있는 프랑스, 일본과 같은 국가들은 21세기 주도기술의 하나로서 액체금속로 개발에 박차를 가하려는 움직임을 보이고 있다.

둘째로, 「핵연료의 증식을 통하여 핵연료자원의 한계성을 극복한다」라는 종래의 액체금속로

역할은, 우라늄 가격의 안정과 플루토늄핵연료의 공급 과잉 현상으로 약간 퇴색되어있는 상황이며, 반면에 고속 증성자를 이용한 액티나이드계열 핵종의 소멸처리 원자로로서의 새로운 역할이 부각되고 있다.

셋째로, 21세기를 대비하는 원자로로서의 액체금속로는 실용화가 이루어지는 그시대의 이용요건에 맞도록 개발되어야 하며, 따라서 액체금속로의 개발에는 고유안전특성의 향상, 핵확산저항성의 핵연료주기기술 개발에 의한 사용후핵연료 저장용량의 한계 극복, 핵연료의 고속증식성 실현, 경수로형 대비 경제성 경쟁 등을 요구받고 있다는 점이다.

각국이 개발중인 액체금속로 설계의 현재까지의 개발 추진방향을 분석해 보면, 산화물핵연료를 사용하는 액체금속로에서 기본적인 주요 선택사항의 연구개발과 접근방법이 매우 유사하다. 냉각재로서의 액체금속 나트륨 사용, 높은 효율의 전기 출력, 신형핵연료 개발시까지 기존에 개발된 산화물핵연료 사용, 연소도를 현재의 120,000MWD/T 수준에서 150,000MWD/T 이상으로 높이기 위한 지속적인 노력, 풀(pool)형 또는 더욱 콤팩트한 원자로 시스템의 채택, 붕괴열 제거를 위한 능동 및 수동 안전시스템을 포함한 안전성에 관한 연구등이 지금까지의 액체금속로 연구개발 추진방향의 공통점이라

할 수 있다.

핵융합

핵융합은 인류가 항구적 에너지원을 획득 가능하게 하는 중요한 개발과제이고 핵분열을 이어가는 차세대 에너지원으로서 고도의 과학기술 연구개발을 필요로 한다.

핵융합로개발은 크게 3단계로 나누는데 핵융합 출력치 달성의 과학적 타당성을 달성하는 1단계가 있고, 동력로서 필요한 제반 핵융합 고유기술들을 시험하는 공학적 타당성 입증 단계, 마지막으로 경제 및 사회적 평가를 시험하는 원형로 건설 단계로 분류할 수 있다.

제1단계 목표인 임계상태(핵융합 출력이 가열 입력과 동등한 상태)달성에 대해 세계 4대 토카막 장치로 불리는 일본의 JT-60, 미국의 TFTR, 유럽의 JET, 러시아의 T15에서 시험되고 있다. 이들 시험로들의 임무는 금세기 내에 끝날 것으로 예상되고 2단계 목표인 공학적 타당성 시험은 공학로 또는 실험로에서 실시할 예정인데, 미국의 BPX(Burning Plasma Experiment), 유럽의 NET(Next European Torus), 일본의 FER(Fusion Experiment Reactor)와 IEA후원하에 일본, 미국, EC, 러시아가 참여하는 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor) 등이며 대부분 개념설계가 끝나

공학적 설계 또는 건설 중에 있다.

기초 기반 연구 기술 개발

연구로 이용 기술 개발

현재 세계에는 임계 실험장치를 합하여 약 330기의 연구로가 가동되고 있고, 9기가 건설중이며 계획중인 것이 14기가 있다. 현재 건설 계획중인 대표적 연구로는 우리 나라의 다목적연구로 KMRR(30MW)을 비롯하여 캐나다 AECL이 RI제조를 주목적으로 MAPLE-X10 (10MW, 기존 MRX를 대체)을, 독일의 뮌헨공대는 중성자빔 실험을 목적으로 FRM-II(20MW, 기존 FRM을 대체)를 건설하고 있고 미국의 ORNL이 중성자빔 실험과 TRU 원소 생산 및 재료 조사시험을 목적으로 ANS계획(330MW, 기존 HFIR 대체)을 추진하고 있다.

현재 연구로를 이용하는 주요 기술개발로는 중성자빔을 이용하는 연구로서 원자력발전용 재료와 연료 및 핵융합로 재료의 조사 연구와 물성연구가 있고, 또한 미량원소 분석, 방사선 생물학적 효과 등 일반과학 분야의 기초 연구가 있으며, 의료용 및 공업용 등의 RI생산, 비파괴검사, 반도체 실리콘 제조 등과 같은 산업분야에의 이용이 있다. 그리고 대학 중심의 원자로와 방사선에 관한 연구 및 교육 훈련에도 이용되고

있는 등 일반 과학과 산업분야에 걸쳐 폭넓게 이용되고 있다.

최근에는 환경과학, 재료과학, 생명과학 및 의학 등 일반과학 분야를 중심으로 그 이용분야가 확대되어 가고 있는데 특히, 냉중성자(cold neutron)빔을 이용한 고분자 생체물질, 고온 전도체물질 등의 구조 연구가 확대되고 있고 고속중성자로 핵융합로 등의 재료 개발을 위하여 초고중성자속(1016n/cm²sec 이상)을 이용할 수 있는 연구로에 대한 수요가 증대하고 있다.

신소재 개발

원전재료는 원자로 압력용기와 노내부품, 증기발생기, 터빈발전기, 배관, 펌프재료 등으로 구분된다. 대부분이 저합금강, 스테인레스강, 니켈합금, 지르코늄 합금 및 기타 재료로 구성되어 있다. 이들 구조재료는 내부식성, 내방사선 특성과 고온, 고압, 진동에 견디어야 하는 다른 산업구조물보다 엄격한 조건이 요구된다.

경수로 재료는 미국(BNL, ANL, PLN), 일본(JAERI, ANE RI), 독일(SIEMENS, KFK)등이 중심으로 개발하고 있다. 최근에는 재료의 표면제질과 내구성을 향상시킨 수명연장을 위한 연구가 주로 진행되고 있다. 이와 함께 구조 재료를 대형 일체화하고 청정화하여 가동중 검사를 간소화하고, 재료의 균질성을 기하여

재료의 수명과 건전성을 향상하고자 노력하고 있다.

표면개질로는 PACVD, 레이저법, 세라믹 도포법이 대표적이고, 대형 일체화는 용접과 접합부위를 없애는 공법이 도입되고 있다. 니켈기 합금을 인코넬 600 대신 690 또는 780과 열처리법이 검토되며, 저방사화 목적으로 코발트-free 또는 니켈을 망간으로 교체하는 등의 예가 주목할 만하다.

중수로 재료는 캐나다 AECL을 중심으로 압력관로 쓰이는 Zr-Nb 합금 개선연구가 진행되고 있으나 현재로서는 성능과 제조경제면에서 의문이 제기되어 다소 연구가 소강 상태에 있다.

이러한 재료개발 및 개발은 현재 평가를 통해 인허가 준비단계의 수준으로 판단되며 2000년경에 실용화 될 것으로 보인다.

여러 원전보유국에서는 개발된 재료나 사용중인 재료를 건전성, 내구성을 평가하고 수명을 예측하기 위해 각종 시험평가를 수행하고 있다. 시험평가는 높은 중성자속을 가진 연구용 원자로를 이용하여 노내 Capsule 장치 in-situ 시험: 상용원자로 시편을 위한 조사취화 감시시험: 방사선 조사를 받은 시편을 조사재 시험시설에서 구성합금 성분, 미세조직, 기계적 성질변화를 평가하는 조사후 시험: 방사선 영향과 무관하게 인성, 강도, 연성, 크립, 피로, 부식, 입계부식, 응력부식 등 노외시험을 포함한다. 많은 연구로

보유국들은 대형 data base를 구축하고 이러한 시험평가 결과를 원전의 설계, 구조 및 재료의 개선, 내구성 평가와 수명연장에 사용하고 있다.

재료의 개발은 잉여전력의 저장 및 활용, 고속증식로, 핵융합로의 실현과 새로운 개혁을 예고하고 있다.

1989년 미국에서 풀추가 과거 4K에서만 가능하던 초전도성을 Y-Ba-Cu-O계 재료를 개발하여 107K에서 초전도성을 갖게 하고, 다시 최근에는 불란서 국립과학연구소 연구팀이 Bi-Sr-Ca-Cu-O를 원자 적층법으로 만들어 0-23℃에서 초전도성을 갖도록 하여 상온에 육박하는 전기 저항 없는 초전도재료가 개발되고 있다. 이들이 전성 및 성형성을 갖게하여 선재화가 된다면 전력저장, 직접발전 뿐만 아니라 정보산업 및 일반산업까지 그 개발 파급효과는 엄청날 것으로 본다. 또한 이로 인한 과거 Pulse형 토카막을 연속 플라즈마 토카막으로 전환도 기대된다. 새로운 정밀요업재료의 경우 1000% 전성, 온도별 결정구조변화, 유전성의 변화를 가능케하여 다양한 재료를 개발하고 있다. 이들 초전도재료나 정밀요업재료는 미국에서는 ANL, 독일에서는 KFK, 일본에서는 JAERI와 ISTEK가 불란서에서는 국립과학 연구소가 센터를 구성하고, 산 학 연이 협동하여 콘소시움 형태로 개발을 추진

하고 있다.

산업응용

원자력의 평화이용에는 에너지 이용과 방사선 이용이 있으며, 이 두 분야는 차의 양바퀴로 자주 거론되어 왔다. 실제로는 많은 인력과 자금이 에너지 이용을 위한 연구개발에 투입되어 방사선 이용은 그다지 주목을 받지 못해온 것이 사실이다. 그러나 방사선 이용에 대한 관심과 연구가 진행되어 산업, 의학, 농학 등 여러분야에서 인류의 복지 증진에 크게 기여하여 왔으며 향후도 그 이용분야가 더욱 넓어질 전망이다.

방사선 조사에 의한 화학효과를 이용하는 프로세스는 고분자 재료에 대한 응용이 압도적으로 많다. 고분자에 방사선을 조사하면 생성과 붕괴 또는 붕괴만이 일어난다. 폴리에틸렌 등의 재료에서는 생성이 붕괴에 우선하기 때문에 조사에 의해 그내열이 향상되고 기계적 강도가 커져 응용점이 증대한다. 이와 같은 특징을 응용한 응용으로서 전선 피복재의 조사, 타이어용 고무의 생성 등이 각국에서 실용화 되었고, 방사선 중합반응에 의한 고분자합성 프로세스의 실용화가 진행중에 있으며, 최근에는 플로피디스크, 점착테이프, 감열지 등 새로운 프로세스의 개발이 진행되고 있다. 또한 환경보전을 위하여 사용되고 있는데 이는 화력발전소

나 쓰레기 소각로 등의 연소배연 중의 NOx와 SOx를 암모니아 공존하에 전자선으로 조사하여 동시에 제거하는 기술로서 유럽 등에서 연구개발이 진행중에 있다.

농업분야 이용

농업분야에서의 방사선과 RI의 이용으로서는 밀봉RI나 방사선 발생장치를 이용해 유전질의 개량, 해충이나 유해 미생물의 살균을 꾀하는 방사선 조사기술과 비밀봉 RI에 의해 생체의 움직임을 조사하는 추적자 기술이 있다. 방사선을 조사하여 돌연변이에 의한 품종개량의 경우에는 이미 많은 분야에서 이용되고 있지만 향후에는 한냉 및 더위나 병충해 등의 환경스트레스에 대한 내성의 획득, 단백질, 탄수화물, 지질 등의 함유성분에 관한 품질개선이 육종목표로서 대두될 것이다. 식품조사는 많은 분야에서 이미 실용적으로 이용되고 있고 최근에는 조사식품의 검지법 개발이 진행되고 있다.

방사화분석 이용의 경우 검사 시료에 중성자를 쬐이면 방사능을 갖게 되는데 이것을 방사화라 하고 방사화한 시료에서 나오는 베타선이나 감마선을 측정하면 시료중에 포함된 원소를 신속하게 분석할 수 있다. 이와 같은 방법을 이용하여 식품, 환경시료에 포함된 초미량 원소의 분석에 이용하고 있다, 최근에는 농약의 산

포상황의 조사, 땅속에서의 작물의 뿌리 활력의 측정에도 그 응용의 범위확대를 꾀하고 있다.

의학분야 이용

의학분야에서 RI이용은 현재 가장 왕성한 분야이다. ^{99m}Tc 등의 RI로 표시되는 방사성의약품에 의한 핵의학 진단은 특히 폭넓게 이용되고 있다. 또한 암치료에 방사선조사 이용은 외과 수술과 함께 중요한 치료법으로 되어 있다. 10-20 mCi정도의 밀봉소선원을 직접 환부에 삽입하여 치료하는 데에는 ^{192}Ir , ^{198}Au 등의 선원이 사용되고 있으며 자궁암 치료 등에는 ^{60}Co 또는 ^{192}Ir 이 이용되고 있다.

외부로부터의 방사선 beam에 의한 조사에는 수천 Ci정도의 선원이 필요한데 이전에는 ^{137}Cs 도 사용되었지만 최근에는 단지 ^{60}Co 선원이 사용되고 있다. 감마 칼이라고 불리는 장치는 다수의 ^{60}Co 선원을 원주상에 놓고 그들 선원으로부터 감마선 beam을 한점에 맞추도록 되어있어 환부만을 집중적으로 조사하도록 하는 것으로서 뇌종양의 치료 등을 위하여 개발되었다.

이러한 의학분야의 RI이용을 확대시키기 위하여 선진국들은 다양한 신기술의 연구, 개발을 추진하고 있는데 주요한 분야는 cycrotron positron computed tomography, 면역핵의학, 핵산

탐침법이 있다. 특히, 미국, 유럽 각국 및 일본에서는 인체에서 세포와 분자와의 대사상태를 직접 영상화 할 수 있는 PET(Positron Emission Tomography)를 이용한 연구 및 진료가 활발히 이용되고 있다.

국제화 기술개발의 구조적 개편

세계는 21세기로 접어들면서 지구화(globalization) 및 지역 블록화 현상을 두드러지게 나타내고 있다. 이에 따라 각국은 냉전체제의 붕괴, 지구환경문제의 정치외교적 대두 등 급변하는 세계정세에 대응하고 고도 과학기술 시대로 전망되고 있는 21세기에 대비하기 위하여 나름대로 국제협력을 강화하고 있다. 원자력계에 있어서도 각국은 원자력 선진국들을 중심으로 차세대원자로, 고전환로, 액체금속로, 핵융합로 개발 등에서 기술 우위를 확보하기 위해서 치열한 국제화 전쟁을 치르고 있다.

2000년대 원자력 선진국 진입을 목표로 하고 있는 우리나라도 여기에서 예외일 수는 없다. 국제화의 문턱을 얼마큼 빨리 넘느냐에 따라 우리가 원자력 기술에 있어서 경쟁력을 확보할 수 있느냐가 결정된다 해도 과언이 아니다. 이러한 국제화를 달성하기 위해서는 우리나라의 원자력 기술개발에 있어서 근본적인 구조적 개편이 불가피하다고 본다.

우리 원자력계도 개혁의 시대를 맞아 다시 태어날 수 있도록 다음과 같은 선결과제의 해결에 총력을 기울여야 할 것이다.

첫째, 우리 나라에 꼭 필요하고 중점적으로 추진해야 할 기술을 도출해 내고 이를 적극 지원해야 한다. 인력과 재원이 한정된 우리나라가 모든 원자력 기술에 있어서 기술우위를 확보할 수는 없다. 인력과 재원이 한정된 나라들 중 선진국이 된 나라들은 하나같이 중점 추진기술을 갖고 있다.

우리 나라는 모든 자원과 노력을 어느 한 곳에 집중 투자하여 우리의 기술 고유영역(niche)을 구축하여야만 국제화 및 개방의 시대에 살아 남을 수 있다. 현재 우리의 원자력 기술자립 추진 실태를 보면 각 분야에서 2-3등 정도만 하면 된다는 전략으로 밖에 보이지 않는다. 하루 빨리 원자력계가 합심하여 우리의 특성화 방향을 잡아나가야 한다.

둘째, 모든 원자력계는 이제까지의 관료적이고 수직적인 조직 운영에서 유연하고 수평적인 조직 운영으로 조직 및 문화를 바꾸어야만 한다. 원자력계는 그 기술과 규모의 특성상 폐쇄적이고 시대변화에 둔감한 일면을 지녀온 것이 사실이다. 수차례의 결재 단계를 거치는 이제까지의 명령하달식 조직으로는 유연성이 없어 급변하는 국제정세에 제대로 대응할 수가 없다. 수직적 서열을 과감히 해체하거나 줄이고, 조직의 목표에 따

라 필요 없는 업무는 없애며, 실무진들의 의견을 소중히 여기고, 모든 일에 팀 단위를 활용하고, 수평적인 의사 소통이 원활히 되도록 하는 등 경영 측면에서의 혁신이 절실하다.

셋째, 원자력 기술개발을 위한 법적, 제도적 재원 확보 방안이 마련되어야 한다. 국제화란 총탄 없는 전쟁일뿐 사실 치열한 전쟁터와 다를 바 없다. 전쟁터에 싸우러 나가는 사람을 총탄을 주지 않고 내 볼 수는 없는 일이다. 이와 같이 원자력 기술개발이 실질적으로 국제화의 문턱을 넘기 위해서는 재원이 마련되어야만 한다. 치열하게 모든 것을 개방할 수 밖에 없는 현실 앞에서 이제 더 이상 나 대신 싸워 줄 사람이 있다고 안심하고 있을 수는 없다. 이 소리 없는 전쟁을 이기기 위해서는 국가 안위를 위해서 국민들이 한푼 두푼 모아 성금하듯이 모든 원자력계가 내 자신이 전쟁을 하고 있다는 생각으로 아낌없는 지원을 해야 한다. 즉, 법적 제도적으로 원자력 기술개발 재원 확보 방안이 조속히 마련되어야 할 것이다.

넷째, 국민과 함께 하는 원자력이 되기 위해서는 효과적인 PA 방법론을 개발하여야 한다. 국민이 해는 원자력에 있어 물이나 공기와 같은 것이다. 물이나 공기의 중요성은 그것이 없어진 뒤에야 뼈저리게 느끼는 법이다. 깨끗한 물과 공기는 한번 더럽히기는 쉬워도 다시 회복하기란 좀처럼 쉽지

않다. 원자력에 대한 국민이해는 우리가 신경 쓰지 못하는 사이에 상당히 좋지 않은 상태로 갔다고 본다. 이 시점에서 우리가 지양해야 할 시각은 물이나 공기가 혼자 더러워졌다거나 제3자가 더럽혔다고 보는 것이다. 물이나 공기는 자의든 아니든 그것을 쓰고 있는 사람이 더럽힌 것이다. 이를 인정하고 시정하려는 노력만이 효과적인 PA의 시발점이 되리라 본다. 깨끗한 물과 공기를 되찾을 때 우리는 국제화의 문턱에 한층 다가설 수 있을 것이다.

다섯째, 국제 진출을 위한 원자력계 통합창구가 필요하다. 내부적으로는 다양한 의견과 정책이 존재한다 할지라도 대외적으로는 한 목소리를 내야 한다. 우리는 그동안 민간부문에서 국제 진출을 위해 제 살 뜯어 먹기식의 과도한 경쟁을 수없이 보아 왔다. 이는 국가의 힘을 분산시키고, 국가 전략을 쉽게 노출시키는 등 많은 폐해가 있었다. 인력이나 재원 면에서 열악한 사정에 있는 우리 원자력계는 이런 전철을 밟지 말아야 할 것이다. 통합창구의 형태는 상호협의회, 또는 상설기구 등 어떤 형태로든, 모든 국제 진출에 대해서 대외적으로 한 목소리를 낼 수 있도록 협의 조정 단계를 의무화하여야 한다. 이를 위해서 정부는 국제 진출에 있어서 뚜렷한 청사진을 만들고 이를 조직적으로 실천할 수 있는 계획과 능력을 확보하여야 할 것이다.