# 고속로 기술 개발 및 IAEA의 역할

전 풍 일
국제원자력기구(IAEA) 원자력발전국장

핵분열성 물질의 증식을 통한 에너지 생산은 장기 연료 공급을 확보하기 위한 고속로 개발의 주요 목표였다. 고속로의 개발은 1940년대 말에 시작되었으며, 높은 핵분열성 물질의 증식에 목적이 있었다.

그러나 1980년대부터 우라늄이 값싸게 공급됨으로써 고속로의 중점은 대부분의 국가에서 그리고 국제적으로 고속로 설계의 큰 탄력성을 이용한 재고 플루토늄의 소각, 악티니드 방사성 원소의 분할 및 변이, 핵폐기물의 연소를 위한 용도로 바뀌었다.

고속로 개발은 거의 300 Reactor · Year의 운영 경험을 갖고 있으며, 몇몇 나라에서 신뢰적이고 안전한 동력로 운영을 입증해 왔다. 점증하는 엄격한 안전 요건을 충족하고 혁신적 설계를 통한 경제성을 제고하도록 고속로 설계의 개선이 더한층 이루어질 것이다.

IAEA에서 고속로와 관련된 활동은 「고속로 기술 실무 그룹(TWG-FR)」의 체제하에 이루어지며, 이 그룹은 회원사간 고속로 프로그램의 검토와 토론을 위한 유일한 세계적인 포럼이다.

IAEA 활동은 기술 정보 교환 회의 개최, 연구 사업 조정(CRPs), 현황 보고서 준비 및 데이터 베이스 개발을 포함한다.

기술 정보 교환을 장려하고 고속로 기술의 지식 기반을 보존하기 위하여 웹 기반 고속로 데이터 베이스(FRDB)가 개발되었다. 같은 취지로 고속로 기술 지식 보존 활동이 OECD/NEA의 협력하에 시작되었다.

개발 노력의 중복을 피하기 위하여, 자원을 모으고 정보를 공유하며 협력적 연구 개발을 지원하는 국제적 조정과 협력이 중요하다. 이러한 관점에서 IAEA는 이러한 국제적 노력을 확립하고 조정하는 주요 역할을 수행할 수 있다.

## 고속로 기술 개발

### 1. 고속로 기술 개발 개요

고속로의 개발은 1940년대 말에 몇몇 나라, 특히 미국 · 구소련 · 영국 및 프랑스에서 시작되었으며, 높은 핵분열성 물질의 증식에 목적이 있었다. 높은 증식수율을 추구하는 이러한 개발과 더불어 FFTF(미국) 같은 몇몇 시험 및 실험 고속로가 1950년대부터 1970년대 초까지 건설 및 운영되었다.

전기 생산을 위한 개발 노력이 실증 및 원형 동력로의 건설 및 운영과 함께 몇몇 나라에서 이루어졌으며, 이것은 Phenix(프랑스), PFR(영국), BN-350(구소련, 카자흐스탄), BN-600(구소련, 러시아), Monju(일본), PFBR(인도) 및 Super-Phenix(프랑스)를 포함한다.

고속로의 궁극적인 역할은 지속가능한 형태의 에너지 생산인데, 지구상에서 이용 가능한 주요 우라늄

동위원소인 핵분열 가능 물질인 U-238로부터 Pu-239같은 핵분열성 물질을 증식 또는 변환하여 전기 생산을 위한 열을 만드는 원자로에서 그들을 분열시키는 것이다.

그러나 고속로의 증식 역할이 경제적으로 인식되기 전에, 1980년대부터 우라늄이 값싸게 공급됨으로써 고속로 개발의 중점은 재고 플루토늄의 소각과 핵폐기물의 분할 및 변이 (P&T)로 바뀌었다.

현재 고속로 기술 개발은 8개국에서 약 300 Reactor · Year의 운영 경험과 5개국에서 141 Reactor · Year의 동력 생산 경험을 갖고 있다. 고속로의 기술은 거의 완숙되었으며, 특히 나트륨 냉각 기술에서 그러하다.

그러나 원자력산업을 위하여 매력적인 원자력 선택으로서 개발 및 개선이 여전히 필요하다. 향후 개발과 개선의 요점은 개량형 경수로와 비교된 경쟁력을 갖춘 고속로의 경제적 개선과 미래 핵분열 물질의 수요를 충족시킬 고속로 성능의 최적화 및 핵폐기물 소각에서의 역할일 것이다.

최근에 고속로의 개발 활동이 러시아를 제외하고 미국과 유럽에서 침체되어 왔다. 이것은 상대적으로 낮은 이 지역의 경제 성장, 상대적으로 싸고 안정된 핵연료 공급과 민영화에 따른 구조적 변화 때문으로 분석될 수 있다.

서방 국가와 대조적으로, 핵연료 확보량이 풍부하지 않고 경제 상황이 안정된 나라에서 고속로 개발 활동이 계속하여 진전되고 있으며, 몇몇 아시아 국가에서는 더욱 활발해지고 있다. 이러한 의미에서 아시아 국가의 점증하는 역할은 고속로 개발에서 주목을 끈다.

## 2. 기술 개발 경향

고속로의 뛰어난 중성자 성능 특징은 고속로를 설계하는 데 있어서 큰 탄력성을 부여하며, 고속로는 '연소로' 로서 플루토늄을 소비하거나 '증식로' 로서 플루토늄을 생산하는 데 이용될 수 있다. 최근에 수요가 크게 늘어나고 있는 고속로의 또 다른 역할은 '폐기물 소각로' 로서 핵폐기물을 연소시키는 것이다.

독성이 강한 핵폐기물의 주요 성분은 소(小) 악티니드 방사성 원소(MAs)이며 장수명 분열생성물이다. MAs와 장수명 분열 생성물이 중 · 단수명 동위원소로 연소되거나 변이되면, 핵폐기물의 취급과 처분은 훨씬 쉽고 안전하다. MAs는 원자로에서 조사에 의해 변이될 수 있는데, 조사는 열중성자로에서보다 속중성자의 낮은 분열 포획률 때문에 고속 중성자로에서 더욱 효율적으로 이루어질 수 있다.

또한 I-129, Cs-135, Kr-93 및 Tc-99와 같은 장수명 분열 생성물의 양이 고속로에서의 조사에 의해 크게 감소될 수 있다.

이들 두 가지 측면에서 고속로는 분할 및 변이 (P&T)를 통한 MAs 및 장수명 분열 생성물의 감축에 선호되고 있다.

플루토늄 '연소로' 및 '폐기물 소각로' 로서 고속로의 성능을 최적화하기 위한 추가 연구 개발이 향후 수요를 충족시키도록 계속될 것이다.

개발 초기에 대부분의 고속로는 주요 순환 계통이 'pool' 형태로 단일 설계의 대규모 산화 연료 원자로 모양이었다. 전형적인 예는 러시아의 BN-600 및 프랑스의 Super-Phenix이다.

그러나 지난 20년간 대체 형태, 특히 새로운 중금속(lead, lead-bismuth)과 결합된 금속/질화 연료 또는 냉각재로서 기체의 사용이 안전성 제고를 위하여 개발되었다. 중 · 소형 모듈 원자로도 제안되었다.

아마도 한 형태로 수렴되지는 않을 것이며, 사업자별 특정 상황 및 목적에 따라 형태별로 상대적인 이점을 이용하도록 몇몇 설계들이 선택될 것으로 보인다.

다른 원자로에서처럼 고속로의 안전성을 개선하기 위한 추세가 항상 이루어져 왔으며, 이러한 추세는 체르노빌 사고 후 더욱 강화되었다.

고속로의 안전성을 제고하기 위한 계속적인 노력이 이루어져 왔다. 고속로에는 두 가지 특정한 기본적인

안전 주의 사항이 있다. 노심 붕괴 사고(CDAs) 같은 양반응도 유입 사고와 냉각재로서 나트륨이 사용될 경우나트륨 화재의 예방이 그것이다.

CDAs의 양(+) 냉각재 기포 반응도 효과는 반응도 변화 메커니즘 해석상 여전히 문제의 대상이다. 나트륨 기포 반응도가 매우 낮거나 음으로 되는 식으로 고속로의 노심을 설계하기 위한 많은 시도가 있었다. 이러한 방법은 BN-600M과 BN-1600M의 개량형 고속로의 설계에 적용되었다.

또 하나 주목을 끄는 안전 문제는 나트륨 화재이다. 일부 나라에서의 나트륨 화재 사고는 비록 인명 피해는 없었지만 원자로 운영에 심각한 영향을 미쳤고 일반 국민에게 나쁜 인상을 주었다. 이와 관련하여 나트륨 누설의 가능성을 줄이거나 제거하고, 화재 결과에 대한 방호 메커니즘을 개선하기 위한 많은 노력들이 이루어졌다.

고속로의 안전성을 제고하기 위한 설계 개선 노력은 비록 사고 상황이 발생하더라도 결과를 완화하기 위한 운전원의 조치를 요하지 않는 수동적 안전 특징의 채택으로까지 확대되었다.

금속 연료 노심 설계의 안전 후비 메커니즘을 가진 설계 개선은 일련의 EBR-Ⅱ 실험을 통하여 성공적으로 실증되었는데 원자로는 연료 집합체나 노심 구조물의 어떤 손상도 없는 매우 이로운 결과를 갖고 정지없이 심각한 사고를 수용할 수 있었다.

이러한 원자로 설계 방법은 더욱 엄격한 안전 요건을 만족시키기 위한 큰 진전이다. 유사하지만 더욱 개량된 안전 설계 방법이 BREST 설계에서 개발되고 있다.

의심할 여지없이, 고속로 기술 및 설계의 추가적인 개선이 비용 저감, 효율 향상, 안전성 및 확산 저항의 제고, 그리고 단순화된 핵연료 주기를 목표로 이루어질 것이다.

### 3. 국가별 개발 프로그램

중국에서는 25MWe의 중국 실험 고속로(CEFR)가 건설중에 있으며, 초임계가 2005년 말로 예정되어 있다. 프랑스에서는 고속로의 상업적 도입이 연기되고 있다. 1200MWe의 Super-Phenix 폐로의 일단계 사업이 1999년 시작되었다. 250MWe Phenix의 수명은 장수명 핵폐기물의 변이에 관한 추가적인 연구를 위하여 연장되었다.

1580MWe 유럽형 고속로(EFR)의 설계 연구가 EC 국가들의 협력 속에 완료되었다. EFR 설계는 대규모 pool형 산화 연료 고속로의 프랑스·독일 및 영국에서의 광범위한 경험을 통합하고 있다.

프랑스 CEA는 현장 밀폐형 연료 주기를 가진 기체 냉각 고속로의 참조 개념으로 이용할 미래의 기술을 연구하기 위한 장기 연구 개발 프로그램을 착수했다.

영국의 250MWe 원형고속로(PFR) 및 독일의 327MWe 원형로인 SNR-300이 각각 폐로되고 있다. 양 국가는 현재 EC와의 협력 속에 P&T 활동에 참여하고 있다.

인도는 500MWe 원형 고속증식로(PFBR)의 세부 설계, 연구 개발, 제작 기술 개발 및 안전성 검토를 수행하고 있다. 소형 고속증식시험로(FBTR)가 현재 운전중이며, 여러 가지 시험 및 조사에 이용되고 있다.

일본은 1995년 나트륨 누설 사고로 인한 장기 정지 후 연구 개발 활동을 위한 토대로서 280MWe 원형 고속로인 Monju를 고려하고 있으며, 주로 국제 협력 및 종합적 연구 개발 활동을 위하여 운전을 재개할 노력을 하고 있다.

일본 JNC는 경제적인 고속 증식 주기 기술을 개발할 목적으로 상업적인 고속로 주기 시스템에 관한 타당성 연구와 포괄적인 연구 개발 프로그램을 수행하고 있다.

660MWe 실증 고속증식로(DFBR)의 설계가 진행되고 있다. 실험고속로인 Joyo의 성공적인 운전은 연료 및 기타 물질의 조사 시험을 위하여 계속되고 있으며, 성능 개선을 위한 최종 재건 작업이 35주기 종료 후 시작되었다.

한국은 첫 번째 고속로인 KALIM

ER를 개발하고 있다. 150MWe KALIMER의 개념 설계는 2002년 3월에 완료되었다. 2004년까지 완료될 다음 단계는 진전된 개념과 주요 기술의 개발로 이끌 것이다.

러시아에서는 BR-10, BOR-60 및 BN-600같은 고속로의 성공적인 경험에 기초하여 2010년까지 운전 개시를 목표로 이미 인가된 800 MWe BN-800의 개발을 지속하고 있다.

고속로 분야의 추가적인 활동은 다음과 같다. 핵무기급 플루토늄을 연소시킬 BN-600의 혼합 노심 설계, BR-10, BOR-60 및 BN-600의 수명연장, 건설비 절감을 위한 BN-800 설계 검토, 실험 지원 연구를 포함하는 안전성 제고를 위한 개량형 고속로 설계의 개발 등이다.

개량형 고속로의 설계가 대용량(약 1600MWe) 나트륨 냉각 혼합 산화 연료 고속로와 납 냉각 질화 연료 고속로인 BREST 개념(BREST-300, BREST-1200)에 대하여 수행되고 있다.

카자흐스탄에서는 BN-350 고속로가 25년이상의 성공적인 운전과 세계 최초로 해수 담수화를 위한 전기 및 열 생산의 실증 후에 현재 폐로되고 있다.

미국에서는 통합 건식 야금 처리 및 폐기물 취급 기술의 이용과 결합된 금속 연료 모듈 고속로 개념을 실증한 통합고속로(ALMR/IFR) 프로그램이 정치 사회적인, 그리고 경제적인 이유로 종료되었다.

20MWe 실험고속로(EBR-Ⅱ)가 폐로를 위하여 정지되었고, 고속 중성자속 시험 설비(FFTF)가 또한 최근에 폐쇄하기로 결정되었다. 15년 노심 수명 및 lead-bismuth 냉각 모듈화된 50MWe '밀봉 핵 열원'(ENHS)이 원자력에너지 연구 제안 프로그램(NERI)하에 개발되고 있다.

## IAEA의 고속로 기술 개발 활동

### 1. 고속로 기술 실무 그룹 (TWG-FR)

모든 고속로 관련 활동들은 과거 1967년에 설립된 「국제 고속로 실무 그룹(IWG-FR)」으로부터 변경된 「고속로 기술 실무 그룹(TWG-FR)」의 토대하에 이루어진다.

2000년도에 설립된 TWG-FR은 가속기 추진 계통(ADS) 같이 고속로 기술에 기초한 새로운 혼합 개념을 포함하도록 업무 범위가 확대되었다. TWG-FR의 현재 회원사는 벨로루시 · 브라질 · 중국 · 프랑스 · 독일 · 인도 · 이탈리아 · 일본 · 카자흐스탄 · 한국 · 러시아 · 스위스 · 영국 및 미국이다. EC 및 OECD/NEA가 또한 국제 기구를 대표하여 참여하고 있다.

TWG-FR은 고속로에 대한 활동의 진전 검토, 주요 현안 토의 및 미래 활동의 제안을 위한 유일하고 세계적인 포럼의 장이다. TWG-FR은 회원사의 수요를 전달하고 IAEA의 활동 계획을 지원한다. 몇몇 경우에 이들 프로그램은 또한 실험로의 개발 · 설계 및 운전을 포함한다.

TWG-FR 활동 참여는 국제적인 안전성 기준이 고속로의 설계 및 운전 중에 고려되고, 고속로 프로그램을 가진 어떤 나라도 고속로 기술 개발시 정보를 공유하는 데 있어서 격리되지 않음을 보장한다.

TWG-FR 체제하에 수행되는 활동은 다음과 같다.

① 상호 이익을 위하여 선별된 기술 분야에 관한 진전 검토를 위한 기술회의. 더욱 광범위한 주제를 위한 심포지엄 및 회의가 개최된다.

② 종종 실험적 활동을 수반하는 전형적으로 3~5년간 수행되는 연구 사업 조정(CRPs)

-회원국의 기술 개발 프로그램에 있어서 최신 정보, 최근의 입수 결과 및 추이를 제공하는 주기적으로 발간되는 현황 보고서. 이들 보고서들은 회원국으로 하여금 전세계적으로 고속로 기술 개발의 현 진도를 인식토록 하기 위하여 기존 프로그램 뿐만 아니라 고속로 프로그램의 시행을 고려하도록 지원한다.

-정보 교환 및 연구 개발 협력을 용이하게 하도록 설립된 데이터 베이스

### 3. 고속로 기술 개발 주요 활동

TWG-FR은 고속로 기술 및 안전성의 실험적이고 이론적인 측면에 주로 중점을 둔다. 최근에 수행된 CRPs는 ① 노심의 내진 해석에 사용된 코드를 검증하고 개선하기 위한 실험적 자료의 벤치마킹 시험 ② 원자로 구조물의 내진 해석에 사용된 자료 및 코드를 검증하고 개선하기 위한 분석적 및 실험적 벤치마킹 ③ IAEA와 EC간 공동 사업의 일환으로 BN-800의 사고 행태 분석 및 설계 개선 벤치마킹이 있다. 이들 CRPs의 결과는 기술 자료로 이미 발간되었거나 곧 발간될 예정이다.

액체금속냉각 고속로(LMFR)의 반응도 효과의 계산상 불확실성을 줄이기 위한 한 CRP 사업이 BN-600 혼합 노심 벤치마킹 분석에 시행되고 있다. BN-600 벤치마킹은 BN-600의 혼합 UOX/MOX 노심의 에너지 생산을 위한 핵무기급 플루토늄 이용 문제를 다루고 있다.

기술 정보 교환을 장려하고 LMFR 기술 지식 기반의 보존을 위하여 최신 LMFR 데이터 베이스(FRDB)가 개발되어 지금 인터넷에서 이용 가능하다. FRDB는 35개 실험, 원형 및 상업 LMFR의 세부 자료를 포함하고 있다. 각 고속로는 약 400개의 변수, 설계 자료 및 관련 그래픽 자료별로 특징지워진다.

FRDB는 '악티나이드 동위원소 및 장수명 분열 생성물 변이를 위한 고속로 및 가속도 추진 계통의 기술 진전'에 관한 IAEA 사업의 웹사이트(http://www.iaea.org/inis/aws/fnss)에서 이용 가능하다.

고속로 및 가속기 추진 계통은 핵폐기물 소각 및 MAs의 변이를 위한 장기 해결 방안의 모색을 위한 가능한 대응으로서 일부 회원국에서 개발되고 있다.

이 사업을 통하여 IAEA는 자원 및 전문 지식의 통합을 촉진하여 정보 교환 및 공동 연구 개발을 용이하게 한다.

동 사업의 주요 목적은 새롭고 개량된 고속로 설계의 기술적 · 경제적 타당성을 확립하고, 회원사의 혼합 계통 기술 개발 활동을 위한 토대를 공급하는 것이다. 고속로와 관련하여 수행되었거나 수행중인 IAEA 활동의 대부분의 정보가 상기 웹사이트에서 이용 가능하다.

같은 취지로, IAEA의 고속로 지식 보존 활동이 OECD/NEA의 「실험적 종합 노물리 자료 보존(IRPhE)」 사업과 공동으로 2002년 4월 자문회의를 개최함으로써 시작되었다. 자문회의에서 데이터 베이스를 구축하기 위한 방향이 토의되었으며, 자료 우선 순위가 확인되었다.

고속로 지식 보존 사업의 목적은 진행중인 국가적 및 국제적 고속로 지식 보존 활동을 확인하고 회원국의 참여와 OECD/NEA와의 협력속에 특정 고속로 지식 보존 사업을 수행하는 것이다.

향후 IAEA의 활동은 고유 안전 특징, 대체 냉각재, 신/대체 적용 또는 사용자 요건(낮은 재정적 자원을 갖는 시장의 요구 등), 그리고 비용 감소에 의해 특징지워질 수 있는 개량된 혁신적 개념을 지지하는 연구 개발에 중점을 둘 것이다.

## 결 론

고속로 기술 개발은 원자력이 지속 가능한 에너지 정책의 일환으로서 오염없는 풍부한 에너지를 공급하는 데 필수적이다. 증식로의 개발은 침체되어 있지만, 경제적으로 필요하게 될 때 고속로는 확실히 세계 에너지 공급에 크게 기여하게 될 것이다.

의심할 여지없이 더욱 엄격해진 안전 요건을 만족하고 나트륨냉각 고속로 개발의 지속적인 설계 노력과 혁신적인 설계 노력을 통하여 경제성을 개선하기 위하여 기술 및 설계의 가일층 개선이 추진될 것이다.

개발 노력의 중복을 피하기 위하여, 자원을 모으고 정보를 공유하며 공동 연구 개발을 지원하기 위한 국제적 조정과 협력이 중요하다.

이러한 관점에서 IAEA는 국제적 노력을 확립하고 조정하는 주요 역할을 수행해 왔으며 향후에도 계속할 것이다.