

## AMBIDEXTER 원자력 에너지시스템 설계개념

오세기 · 정근모

아주대학교 에너지학과

### Attributes and Elements of the AMBIDEXTER Nuclear Energy System Design Concept

Se Kee Oh and KunMo Chung

Department of Energy Study, Ajou University

#### 요 약

원자력발전의 고유한 문제점을 해결할 수 있는 새로운 집적폐회로형 AMBIDEXTER 원자력시스템 개념을 제안하였다. 이 복합시스템은 일체형 원자로를 중심으로 열/에너지 변환회로와 방사선/물질 수송회로를 서로 독립적으로 구성하므로 최소 방사선 위험부담 아래서 원자력에너지의 잇점을 극대화하는 설계이다. 특히 방사선/물질 수송회로로부터 분리된 고준위 방사성 폐기물에서 고부가가치 동위원소나 방사선원을 선별적으로 용이하게 추출, 활용할 수 있다. 원자로 계통은 얇고 큰 Hastelloy 합금 원자로용기 내부를 노심, 침니, 열교환기, 다운컴머 및 입구플레넘 콤파트먼트로 분할하여 배관이나 벨브 없는 시스템으로써 전수명에 걸쳐 노내 핵분열생성물질 농도가 현저히 낮고 외부로 관통하는 계통 배관이 없으므로 기기파손으로 인한 방사성물질의 대량 외부 누출은 불가능하다. Th/<sup>233</sup>U 용융염핵연료의 핵물리 및 열수력학적 특성을 살려 AMBIDEXTER 노심의 핵적 자활성 설계에 융통성을 부여하는 변형핵연료주기를 도입하면 핵연료자원의 공급 안정화나 핵확산방지의 투명성 제고에 큰 효과가 있다. AMBIDEXTER 설계연구에 관련된 핵심기술들은 일찍이 미국 ORNL에서 시작한 MSR 프로그램을 통해 개발되어 이미 대부분 상용화하고 있기 때문에 현재 추진 중인 250 MW<sub>e</sub>급 원형로 모듈의 개념개발에서는 주로 시스템 통합에 관한 문제들이 중점적으로 다루어진다.

**Abstract**— Aiming at one of decisive alternatives for long term aspect of nuclear power concerns, an integral and closed nuclear system, AMBIDEXTER concept is proposed. The AMBIDEXTER complex essentially comprises two mutually independent loops of the radiation/material transport and the heat/energy conversion, centered at the integrated reactor assembly, which enables one to utilize maximum benefits of nuclear energy under minimum risks of nuclear radiation. And, from its waste stream of the radiation/material transport loop, precious radioisotopes and radiation sources can be selectively produced. The reactor system resides in a thin and large Hastelloy reactor vessel whose internal is divided into the core, chimney, heat exchangers, downcommer and inlet plenum compartments with neither pipe connections nor active valves in between. As the reactor operates at very low level of fission products inventory throughout its lifetime and there is no primary heat transport piping outside the reactor vessel, significant release of radioactive material due to any equipment failure should be incredible. The nuclear and thermalhydraulic properties of the molten Th/<sup>233</sup>U fluoride salt extend the capability of the self-sustaining AMBIDEXTER fuel cycle to enhance resource security and safeguard transparency. Whilst maintaining break-even conversion ratio, flexible fuel cycle management with introducing denaturants should help to upgrade its proliferation-resistance characteristics. Originated from early MSR programs at ORNL, U. S. A., the core technologies associated with designing and developing the AMBIDEXTER concept are mostly available in commercialized form. Demonstration of integral aspects of the concept, therefore, should be the prime research area in the 250 MW<sub>e</sub> prototype design study underway.

## 1. 서 론

경수로 일변도의 원자력발전 기술개발은 근본적으로 안전성·핵확산방지·방사성폐기물관리 문제에서 고유한 취약구조를 안고 있음은 세계 원자력전문가들의 공통된 견해이다. 결국 에너지 부존자원이 부족한 선진국들이 경수로 이외의 옵션에 대해 연구개발 투자를 계속하고 있는 배경은 장기적 안목에서 이와 같은 경수로기술의 한계에서 오는 문제점을 보완 또는 해결하기 위한 대안을 찾기 위한 노력으로 볼 수 있다<sup>1,2,3)</sup>.

1997년 11월 클린턴 대통령의 지시에 따라 미국 대통령 과학기술자문위원회가 발간한 보고서와 같은 시기에 미국 에너지성의 요청으로 작성된 산하 7개 국립연구소의 원자력 연구개발 주제정립 보고서가 공통적으로 다가오는 21세기 미국의 에너지·환경 분야에서 수요에 적절히 대처하기 위한 방안으로써 원자력의 중흥을 필연적으로 보고 있으며 이를 위해 우선적으로 다루어야 할 문제로서 방사성폐기물, 핵확산, 안전성 및 경제성으로 규정하고 있음은 이러한 우려가 현실적으로 확인된 사례이다.

이와 관련된 실질적인 후속 조치 중의 하나로 1998년 4월 미국 에너지성은 향후 10년간의 원자력 연구개발의 새로운 방향 도출을 지원하기 위해 비원자력계 전문가를 포함한 산·학·연 합동 워크숍을 개최하여 핵비확산 기술, 혁신적 원자로개념, 방사성폐기물 및 기타 원자력 관련 사항들에 대한 중요한 과학적, 공학적 문제점들을 주제로 하는 다양한 논의가 시도되었다<sup>4)</sup>.

본 논문은 이와 같은 세계 원자력 계의 변화에 때맞추어서 핵안전성, 핵확산방지 및 방사성폐기물관리 문제는 물론 핵연료자원의 안정적 공급과 원자력에 대한 대중이해 증진 등 앞으로 원자력에너지의 평화적 이용을 촉진함에 있어 필수적으로 고려해야할 사항들을 구비조건으로 하여 새로운 원자력 에너지시스템인 AMBIDEXTER (Advanced Molten-salt Break-even Inherently-safe Dual-missioning EXperimental and TEst Reactor) 개념<sup>5)</sup>을 개발함에 있어 기술적 타당성을 논의한다.

## 2. AMBIDEXTER 설계개념 속성

AMBIDEXTER는  $\text{Th}^{233}\text{U}$ 을 표준핵연료주기로 하는 불화용융염의 액상핵연료물질이 흑연감속재의 단순격자구조인 노심을 통과하면서 핵분열과 열수송반응이 동일한 매체에 의해 이루어지는 원자로 설계개념과 상호 독립된 경로를 통해 열/에너지 수송과 방사선/물질 조절이 동시에 온라인으로 이루어지는 시스템 설계개념을 합성한 복합원자력플랜트로서 핵적 자활성과 자정 능력

을 갖춘 혁신적인 원자로 시스템이다.

### 2-1. 핵안전성

금속 또는 산화우라늄과 같은 고체핵연료물질을 사용하는 기존의 발전로는 다중방호 및 침출방어 원리에 따라 우선적으로 방사성물질의 누출에 대해 일차방벽인 핵연료봉의 파손 가능성을 제거하고, 누출경로를 다중으로 차단하며, 궁극적으로 주민 및 종사자의 방사선 피폭 위험을 완화하는 전통적인 소극적 안전성설계방법에 의존하고 있다. 그러나 AMBIDEXTER 원자로는 액상의 용융염핵연료를 온라인으로 정화하는 장점을 이용하여 핵연료에 누적되는 핵분열생성물질을 운전 중에 연속적으로 제거하므로 사고시 누출가능 방사능과 비상냉각대상 잔여열의 근원물질이 노내 잔류하는 농도를 최소화하는 적극적 안전성설계방법이 강조되었다<sup>6)</sup>.

일반적으로 중대사고를 가정할 때, 누출이나 확산을 주도하는 방사성물질인 휘발성 핵종들은 온라인 정화공정을 거치면서 거의 완벽하게 제거되므로 상당량의 핵연료물질이 격납건물 내로 누출되는 사고가 발생하더라도 기체 또는 액체상태로 외부에 이탈가능한 방사성물질은 매우 적다.

AMBIDEXTER 설계의 중요한 고유안전특성으로는 용융염핵연료의 높은 열팽창계수 때문에 나타나는 매우 큰 부(-) 핵연료온도 반응도계수와 출력계수, 그리고 온라인 정화계통을 통해 핵연료물질의 연소보상량이 운전 중 연속적으로 공급됨에 따라 노내 최대 233U 장전량이 최소잉여반응도 요구량에 대응하는 수준을 넘지 않아서 어떠한 경우에도 반응도사고로 인한 출력폭주가 발생하지 않는다는 점을 들 수 있다.

저압고온 상태에서 원자로계통을 순환하는 용융염핵연료는 무시할 만큼 낮은 증기압 특성을 보유하고 있어 방열부(Heat sink) 상실사고와 같은 냉각기능 마비상태로 인하여 노내 온도가 비정상적으로 상승하여 대량 비등이 일어나도 원자로용기의 파손을 야기할 만큼 높은 침투압력으로 발전되지 않는다. 특히 일체형 원자로시스템 개념은 핵연료를 포함하는 원자로계통의 모든 기기들을 원자로용기 내에 배치하는 설계로서 원자로용기 외부에는 일차열전달계통 배관망이 없으므로 대형배관 파단사고로 인한 용융염핵연료물질의 대량누출이 일어날 수 없으며 소규모 국부 누설이 발생한다 하더라도 고온의 용융염은 누출과 동시에 외기 온도에 의해 냉각과 응고를 거치므로 유출된 방사성물질은 고화된 용융염 내에 포획, 감금된다.

기존 일체형 원자로의 설계집적화 개념은 원자로계통을 구성하는 기기들과 이를 연결하는 배관을 함께 원자로 압력용기 내에 배치하여 계통의 압력경계를 다중화

하는 소극적 설계지만 AMBIDEXTER는 원자로용기 내부공간을 배관이나 벨브없이 기기 콤팩트먼트들로 구분하여 용융염핵연료가 이를 순회하면서 소기의 기능을 수행하므로 계통 자체가 실질적으로 하나의 기기 구조물 형태를 이루는 가장 단순한 계통설계이다.

콤팩트먼트형 원자로계통 개념의 장점 중에 하나는 AMBIDEXTER 원자로심과 1차열교환기의 형상설계를 직관 유로 채널의 집합형으로 단순화하여 계통을 순환하는 유체의 총압력손실을 최소로 하므로 자연순환능력을 향상시키고 설계펌프용량을 줄이는 효과를 가져온다는 점이다.

**2-2. 핵확산 저항성**

원자력 발전기술과 핵확산 민감기술은 직접적 관계가 없으나 유사기술 또는 물질의 전용가능성에 대한 우려 때문에 농축기술과 농축시설이 핵연료 제조공정에 필수적이고, 사용 후 핵연료에 핵분열성 플루토늄 동위원소가 다량 잔류하는 우라늄/플루토늄 핵연료주기를 이용하는 기존의 발전용 원자로에서는 피할 수 없는 쟁점이다.

AMBIDEXTER는 이와 같이 핵확산우려의 근원이 되는 우라늄/플루토늄 핵연료주기 대신에 토륨/우라늄 핵연료주기를 채택하므로 자연에 100%의 존재비로 매장된 <sup>232</sup>Th을 순수한 일반산업기술에 의해 핵연료 원료로 제조할 수 있고 잠재핵분열성물질인 <sup>232</sup>Th은 원자로 내에서 중성자흡수반응에 의해 <sup>233</sup>Pa으로 변환되고다시 β붕괴를 거쳐 <sup>233</sup>U으로 변환되므로 비로소 연소 가능한 핵연료물질이 된다. 따라서 우라늄 농축공정과 플루토늄 재처리 공정이 근본적으로 불필요하다.

토륨/우라늄 핵주기에서는 <sup>233</sup>U의 η값이 유일하게 열중성자 증식으로 설계가 가능한 정도로 크기 때문에 AMBIDEXTER는 핵연료의 설계전환율을 수지균형(Break-even)점 부근에 고정시키는 노심격자 최적화설계를 통해 연소로 소모되는 <sup>233</sup>U양을 자급하면서 증식생산이 불가능하도록 설계하였다. 그러므로 AMBIDEXTER를 이용하여 핵무기용 <sup>233</sup>U을 생산하기 위해서는 고농축 우라늄이나 플루토늄을 주핵연료물질로 용융염핵연료에 혼합하는 혼성핵연료주기를 이용하여 <sup>233</sup>U을 증식해야 하는데 이는 경제성이나 원료확보 관점에서 모두 실현성이 희박하다.

<sup>233</sup>U(n, 2n)<sup>232</sup>U 반응으로 생성되는 <sup>232</sup>U은 반감기가 72년으로 긴 α-붕괴 핵종으로서 원자로계통 내 체류기간이 오래된 용융염핵연료로부터 <sup>233</sup>U을 분리·은닉할 경우, <sup>232</sup>U로 인해 탐지가 용이하며, 특히 보관기간이 증가할수록 <sup>232</sup>U의 다단계 α-붕괴로 생성되는 <sup>208</sup>Tl가 방출하는 고에너지(2.6 Mev) γ선 차폐를 위한 구조적 보강을 비롯하여 재처리 공정이 더욱 어려워진다. 그러나 이

론적으로 AMBIDEXTER는 무한순환주기가 가능하고 <sup>232</sup>U의 열중성자 반응 단면적이 141.5 barn으로 매우 크기 때문에 이로 인한 방사선 차폐설계는 심각한 문제가 되지 않는다<sup>7)</sup>.

한편 소량의 저농축우라늄을 용융염핵연료에 혼합한 변성핵연료(Denatured fuel)를 사용하는 혼성핵연료주기를 고려할 경우, <sup>235</sup>U을 분리하기 위한 재처리 및 추출공정이 더욱 기술적으로 복잡하게되므로 기존의 어떤 핵연료보다 핵확산 저항성이 강한 핵연료주기를 이용하는 원자로가 되어 설계의 융통성이 크고 핵투명성이 가장 완벽한 원자로 개념으로 발전할 수 있다.

**2-3. 방사성폐기를 관리개념**

원자력발전에서 발생하는 방사성 폐기물 중에서 가장 큰 문제가 되는 것은 사용후 핵연료를 포함한 고준위 폐기물로서, 특히 반감기가 5년 이상이며 원자번호가 92 보다 큰 α 방출 핵종으로 정의되는 초우란 동위원소들과 핵분열생성물질 중에 주로 반감기가 긴 <sup>99</sup>Tc, <sup>135</sup>Cs, <sup>129</sup>I 및 <sup>79</sup>Se와 같은 핵종들의 장기간 저장 시 동적 거동에 대한 불확실성이 크기 때문에 일어나는 엔지니어링 검증문제들이다.

<sup>232</sup>Th-<sup>233</sup>U의 핵적 특성과 <sup>7</sup>LiF-BeF<sub>2</sub> 용융염의 핵적 및 물리·화학적 특성에 따라 AMBIDEXTER에서는 토륨이 다단계 흡수반응을 거쳐 생성되는 초우란 계열 악티나이드의 동위원소 양이 기존 발전로에서 사용하는 우라늄/플루토늄 고체핵연료에 비해 무시할 정도로 적기 때문에 고준위 방사성 폐기물관리에서 절대적 비중을 차지하는 악티나이드 처분문제에 대한 중요성이 획기적으로 경감된다.

원자로계통 내에 장전, 유통되는 용융염 핵연료 재고량의 일정분율이 우회회로를 통해 온라인으로 다단계 정화공정을 거치는 과정에서 용융염에 포함된 주요 핵분열생성물질들이 분리 및 추출된 후에 고화 처리된다. 결국 순수하게 핵분열생성물질로 구성된 고준위 폐기물만을 밀봉하여 관리 또는 처분하므로 저장설비에 저장된 고준위 폐기물의 총량은 부피나 무게에 있어서 우라늄/플루토늄 핵주기에서 발생하는 사용후핵연료에 비교할 수 없을 만큼 작다.

한편으로 AMBIDEXTER 온라인 정화계통에서 추출된 핵분열생성물질에는 질량수 77~154 영역의 60여 핵종이 포함되므로 고준위 폐기물 저장설비를 방사화학공정설비나 대단위 방사선조사장치와 연계 설치하여 운영하면서 고부가가치 동위원소의 정제 생산과 강력한 밀봉 γ선원의 제조를 병행한다면 방사성 폐기물을 산업적 및 의학적 이용가치가 큰 자원으로 재활용하는 효과가 크다. 이는 폐기물 감량과 원자력 이용증대가 함께

이루어질 수 있고 대중이해 제고 관점에서도 획기적인 진전이 기대된다.

### 3. AMBIDEXTER 설계개념 요소

그림 1 및 2에 개략 도시된 AMBIDEXTER 원자력 에너지시스템 개념의 유일성은 일체형 원자로의 장점을 극대화하여 열에너지와 방사성 물질을 발생원으로부터 최단거리에서 서로 독립된 경로를 통해 분리·수송·변

환시키므로 각각 원자로 내에 잔류하는 양은 최소로 유지되어 원자로의 안전성을 높이는 반면, 이용시설에 포함되는 양을 최대로 공급되어 활용성을 극대화하는 설계특성이다.

복합플랜트 전체의 심장 역할을 하는 원자로 계통은 동적 기기나 부품의 필요성을 가능한 한 배제하는 피동형 원자로 설계개념과 주기기 및 연결 배관을 함께 원자로용기 내부에 배치하는 일체형 원자로 설계개념을 합성한 설계개념이다. 따라서 원자로 계통은 원자로용

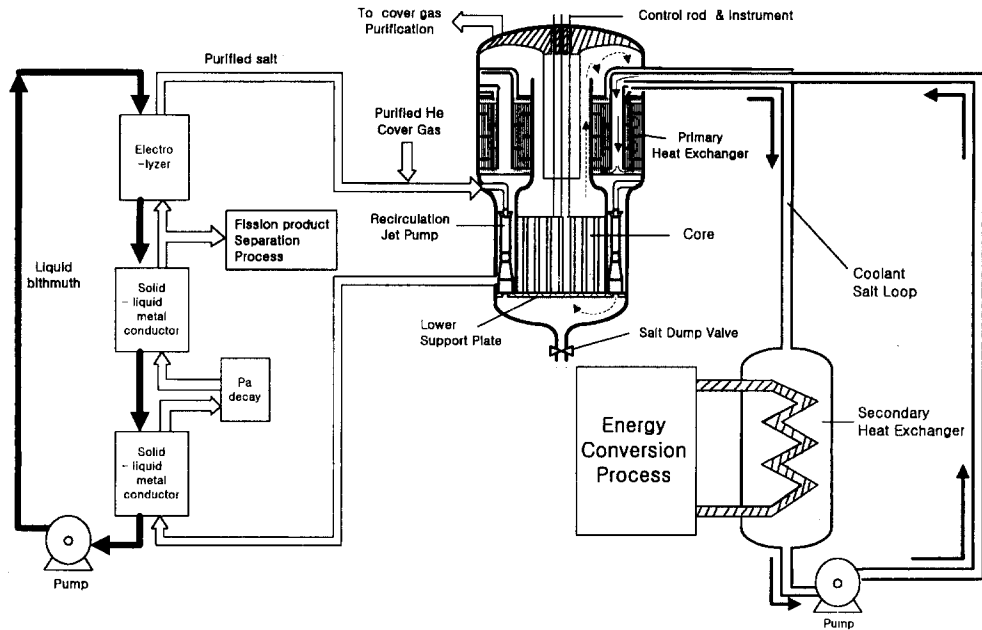
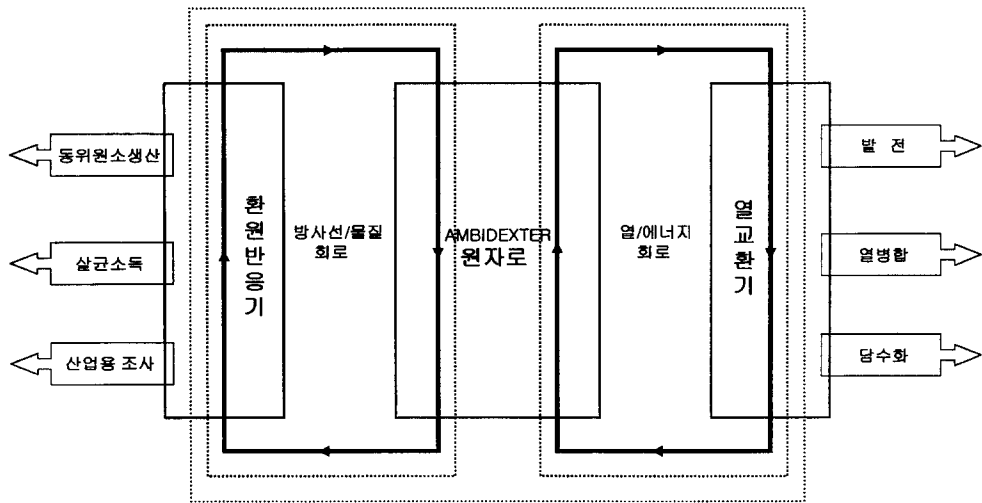


그림 1. AMBIDEXTER 원자력에너지센터 개념.

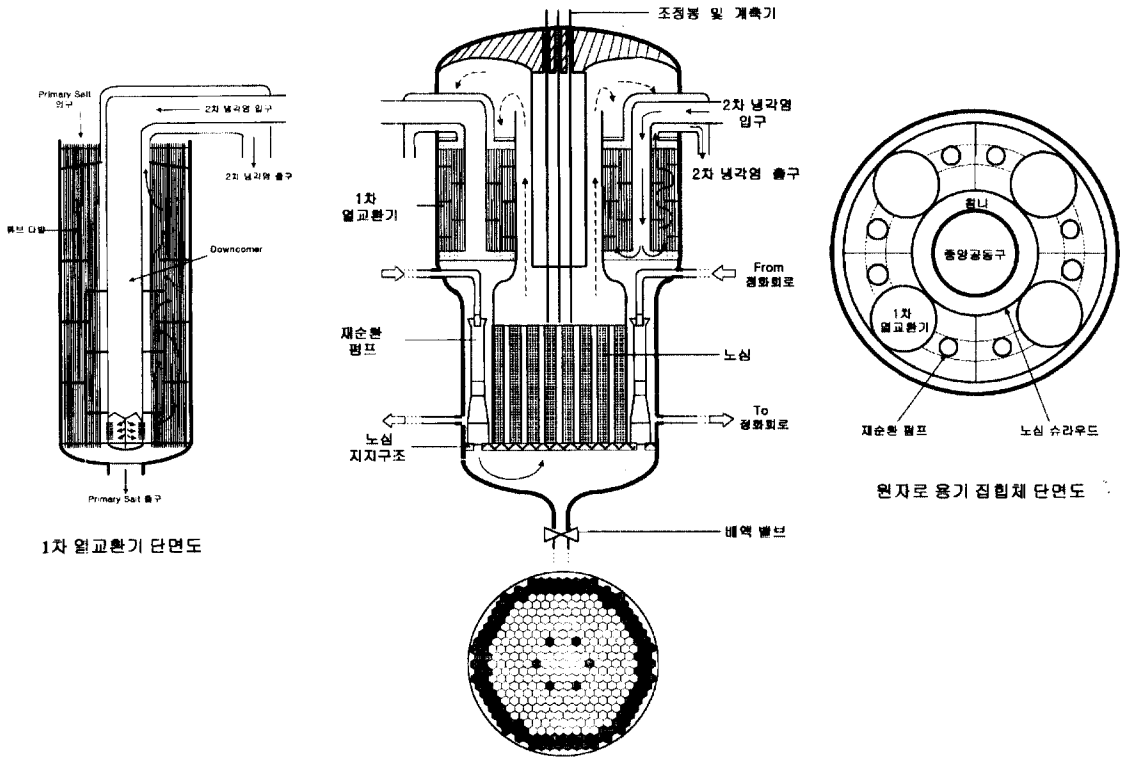


그림 2. AMBIDEXTER 일체형 원자로 계통.

기를 노심, 침니, 1차 열교환기, 다운컴어 및 입구플레넘 구조의 콤팩트먼트로 분할하여 무배관으로 계통을 구성하므로 고온저압의 용융염핵연료가 계통을 순환하면서 발생하는 열 및 압력손실을 최소화 하는 단순한

기능형 정적구조물에 불과하다.

표 1에 현재까지 연구한 결과로서 250 MW<sub>th</sub> 표준 AMBIDEXTER 원형로 모듈의 주요 설계 파라미터들을 요약, 정리하여 수록하였으며 DSNP를 이용한 종합적인

표 1. 250 MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER 원형로 설계특성.

설계변수	설계치	설계변수	설계치
-총 열출력, MW <sub>th</sub>	250.0	-노물리 특성	
-원자로 용기		· 유효증배계수(HFP)	1.007
· 재질/형상	Hastelloy/원통형	· 평균 전환율	0.997
· 내경, cm	420.0	· 최대중성자속, × 10 <sup>14</sup> nv	
· 전장, cm	650.0	· 열중성자(E ≤ 1.0 ev)	1.06
-원자로심격자		· 속중성자	7.14
· 재질/형상	Graphite/육각주형	· 연료온도계수, Δk/k/°C	-4.62 × 10 <sup>-5</sup>
· 격자간거리, cm	16.0	-열수력 특성	
· 길이, cm	250.0	· 최대 출력밀도, w/cc	127.9
· 연료채널 내경, cm	10.24	· 노심 입구/출구온도, °C	621.0/704.0
-용융염핵연료		· 평균 유속, cm/sec	31.9
· 표준성분비, mole%		· 출력첨두인자	2.17
· <sup>7</sup> LiF	71.625	· 반경방향	1.34
· BeF <sub>2</sub>	16.0	· 축방향	1.62
· ThF <sub>4</sub>	12.0	-1차 열교환기 특성	
· <sup>233</sup> UF <sub>4</sub>	0.375	· 종류/형상	Shell&Tube/직관
· 평균밀도, gr/cc	3.309	· 재질/수량	Hastelloy/4기
· 노내 총장전량, ton	17.6	· 직경/길이, cm	82.2/231.6

시스템 시뮬레이션 모델이 개발 중이다.

### 3-1. AMBIDEXTER 원자로

용융염의 표준 기준물질은 고온상태에서 중성자 경제성, 화학적 안정성, 열유동학적 효율성, 핵연료물질의 용해도, 생산·재생·처리공정의 기술성 및 경제성 관점에서 지금까지 알려진 가장 우수한 물질이며 또한 풍부한 노내 운영경험을 근거로 성능이 입증된  ${}^7\text{LiF}\text{-BeF}_2$  을 선정하였다. AMBIDEXTER 핵연료용융염의  ${}^7\text{LiF}\text{-BeF}_2$  평균함유량을 ~87 mole%로 제한하므로 액체핵연료의 계통 내 순환에 요구되는 유체특성을 만족하면서  $\text{ThF}_4$  및  ${}^{235}\text{UF}_6$ 의 농도를 최대한 높히도록 하였다. 용융염핵연료는 고체핵연료와 달리 성형공이 불필요하므로 핵연료제조의 비용 절감이 매우 크다.

용융염핵연료의  $\text{ThF}_4$  및  ${}^{235}\text{UF}_6$  구성비는 핵적 자활성 조건, 즉 운전 중 온라인 연료충전에 의해 필요한 핵분열성물질  ${}^{235}\text{U}$ 의 양을 공급할 수 있으므로 노심은 출력 운전에서 필수적인 최소 잉여반응도를 유지시키는 임계도 조건과,  ${}^{235}\text{U}(n, f)$  반응으로 연소되는  ${}^{235}\text{U}$ 의 감소율과  ${}^{232}\text{Th}(n, \gamma)$ 반응에 의해 전환되는  ${}^{233}\text{Pa}$ 의 생성율이 평형 상태를 이루기 위한 전환율요건을 동시에 만족하면서 경제성을 고려하여 결정되어야 한다. 현재 250 MW급 표준 AMBIDEXTER에 대한 설계 값으로 12.0 mole%의  $\text{ThF}_4$ , 0.375 mole%의  ${}^{235}\text{UF}_6$ 가 사용되고 있다.

AMBIDEXTER 노심은 원자로용기 중심하부에 배치되어 있으며 균일하게 면간 거리 16 cm, 전장 250 cm 혹은 연육각주 모듈로 이루어진 격자구조를 갖는다. 각 격자 모듈의 중앙에는 반경 5.01 cm의 핵연료채널이 형성되어 있어 하부의 입구플레넘으로부터 유입된 저온의 용융염핵연료가 느리게 이를 통과하면서 자체의  ${}^{235}\text{U}$  핵분열반응에 의해 가열되면서 상부침니로 유출한다. 노심의 형상은 중앙에 동일한 크기의 핵연료채널을 갖는 노심격자 모듈 영역과 외곽에 같은 크기의 흑연반사체 모듈 영역의 단순 원통형 구조로서 내경 315 cm Hastelloy 재질의 원자로 배럴과 내접하여 고정된 설계개념으로서 기계적 안정성에 영향을 미치는 요소가 획기적으로 경감되었다.

흑연은 핵적, 화학적으로 매우 안정된 물질이지만 고온에서 고속중성자 조사량 누적으로 인한 취화가 AMBIDEXTER 설계수명에 주요 제약조건으로 작용할 수 있으므로 노심상부구조는 노심격자 모듈의 교체나 보수가 가능하도록 구조적 배려가 고려되었다.

### 3-2. 열/에너지 수송계통

노심을 떠난 고온(704°C)의 핵연료용융염은 노심과 1차 열교환기 간의 밀도 차에 의해 나타나는 자연대류

효과와 재순환펌프의 구동으로 노심 상부의 출구 침니를 따라 상승하여 1차 열교환기에서 621°C로 냉각된 후 원자로용기와 원자로 배럴 사이의 다운컴어를 거쳐 약 90%의 유량이 노심 하부의 입구플레넘을 통해 노심에 재유입되고 잔여 10%의 유량은 물질/방사선 수송계통에서 정화되어 재순환펌프에서 분류와 합류한다. 원자로용기를 비롯하여 용융염을 수용하는 모든 원자로계통 기기 구조물은 불화용융염에 대해 내부식성이 우수한 Hastelloy 합금을 재질로 사용한다.

250 MW급 표준 AMBIDEXTER에서는 침니 주변 동심원 상에 외경 40 cm, 전장 230 cm인 Shell & Tube 직관류형 1차 열교환기 4기가 대칭적으로 배치되어 있으며 각 열교환기의 튜브 벽면을 경계로 내부에는 침니 상부로부터 범람한 핵연료용융염이 하강하면서 외부 표면을 역류하는 냉각용융염으로 열전달이 이루어진다. 이는 방사성물질을 포함하는 핵연료용융염과 비방사성 물질인 냉각용융염이 원자로용기 내에서 상호 격리시켜 원자로용기를 관통하여 외부로 고방사능의 핵연료용융염을 수송하는 대구경 배관이 없고 따라서 대형 배관파단사고의 가능성을 완전하게 배제하는 고유안전 설계개념이다.

AMBIDEXTER 콤팩트먼트형 원자로계통에서 핵연료용융염이 순환하면서 발생하는 총압력손실은 대략 1차 열교환기 튜브 표면에서의 저항압력강화와 대등하여 약 2.5 기압으로 계산되고 계통 내 최대 설계압력은 이와 유사한 범위에서 용융염의 증기압 및 He cover gas 압력 등을 종합하여 결정될 것이다.

1차 열교환기의 shell 측을 통과하면서 565°C로 가열된 냉각용융염이 2차 열교환기에서 455°C로 냉각된 후 펌프에 의해 다시 1차 열교환기로 순환하는 중간열/에너지 수송회로개념은 방사성물질의 외부유출경로를 다중으로 차단하는 심층방어원리의 안전성설계를 따르고 있다. 이러한 고온의 냉각순환하는 2차 열/에너지수송회로의 구성은 연결되는 에너지 변환계통으로써 초임계 Rankine 사이클과 Brayton 사이클을 도입할 경우 복합발전 또는 열병합발전을 포함하는 다목적 에너지시스템 설계가 가능하고 45% 이상의 높은 열효율을 얻을 수 있다.

### 3-3. 출력제어 및 안전계통 개념

온라인으로 연속적 핵연료물질 장전과 핵분열생성물질 추출이 이루어지므로  ${}^{235}\text{U}$ 의 노내 재고량은 운전에서 필요한 최소 잉여반응도를 공급할 수 있는 수준으로 유지되기 때문에 실질적으로 AMBIDEXTER 원자로 안전계통의 총반응도가 크지 않아도 충분한 정지여유도를 확보할 수 있다. 또 급격한 출력변동을 일으키는 사고를

가정할 경우 액체 핵연료는 온도의 부(-) 반응도계수가 크기 때문에 즉각적인 반응도쇄환효과의 작용으로 출력 이탈을 스스로 완화시킴에 따라 안전계통의 반응도삽입 속도가 엄격한 설계요건으로 남지 않는다.

능동적 운전정지방법으로는  $^{235}\text{U}$ 의 공급을 중단하거나 정화공정의 가동을 정지시킴으로 비교적 빠른 속도로 원자로의 출력감발을 구현할 수 있으며 장기 운전정지상태를 유지할 필요가 있을 때는 핵연료용융염을 덤프저장조로 배액하여 노내 잔류량을 미입계수준 이하로 조절하는 방법도 효과적이다. 별도로 250 MW급 표준 AMBIDEXTER 노심은 신속한 운전정지를 위해 노심 내에 6개의 운전정지봉을 배치하는 설계를 채택하여 안전정지계통의 다중화 및 다양화를 달성하였다.

AMBIDEXTER 출력제어는 용융염핵연료의 큰 부(-) 반응도온도계수 특성 때문에 용융염의 온도제어만으로도 전출력구간 범위에서 출력조절이 가능하므로 필수적인 측정 및 제어 파라미터의 종류가 많을 필요가 없고 따라서 원자로 제어계통을 구성하는 알고리즘이나 회로는 매우 단순한 구조로 이루어진다.

뿐만 아니라 2차 열/에너지수송계통인 냉각염회로의 온도는 터빈부하상태의 변동에 직접 영향을 받기 때문에 기존 원자력발전과 달리 원자로추중제어가 아닌 터빈추중제어논리를 따르게 되므로 결국 뛰어난 부하추중 운전 능력을 갖게 된다.

### 3-4. 물질/방사선 수송계통

1차 열교환기를 통과하여 냉각된 핵연료용융염의 ~10% 유량은 다운컴어 하단부에 연결된 소구경 우회류회로의 출력배관을 따라 정화계통에 유입된다. 핵분열 생성물질로 오염된 우회류를 붕괴탱크에서 충분히 냉각시킨 후, 잔류 Th 및  $^{235}\text{U}$ 를 분리하는 불화 반응공정;  $^{235}\text{Pa}$ 의 격리 및 희토류 핵분열생성물질을 분리하는 환원추출반응공정; 그리고 핵분열생성 불활성기체(Xe, Kr)를 안정화시키는 흡착반응공정을 거치면서 정화되는 종합공정개념은 1970년대 미국 ORNL에서 개발한 단일열 MSBR(Molten Salt Breeder Reactor)을 참조설계로 채택하였다.

각 정화공정의 용량 및 반응율은 AMBIDEXTER의 핵적자활성 제약조건에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 시스템 전체의 효율, 경제성, 신뢰성 등에도 중요한 역할을 하므로 앞으로 많은 연구개발이 요구되는 분야이다. 또한 잔여 핵종을 제거하기 위한 여러 가지 전기화학공정을 설계에 고려할 수 있으나 경제적 이득이 가장 중요한 결정요인이 될 것이며 필요한 핵적 및 화학적 성분을 유지하기 위해 오염된 핵연료용융염을 일정분율로 폐기, 교환할 필요가 있을 것이다. 추출된 핵분열생성물

질은 고준위 방사성폐기물 저장설비로 보내기 전에 각 핵종의 용도에 따라 별도의 방사화학공정에 의해 분리, 정제 또는 합성하여 재활용할 수 있다.

정화공정을 거친 용융염은 노내 연소과정에서 소모된  $\text{ThF}_4$  및  $^{235}\text{UF}_4$  양을 첨가하여 혼합하는 과정을 지나 원자로용기 내의 다운컴어로 송환되어 재순환펌프에서 정화되지 않은 90%의 핵연료용융염 본류와 합류하여 노내에 재유입된다.

## 4. 결론 및 토의

경수로 일변도의 원자력발전 기술개발이 안고 있는 고유문제로서 핵안전성, 핵확산방지 및 방사성폐기물 관리가 완벽하게 극복할 수 없다는 점은 세계 원자력전문가들의 공통된 견해이다. AMBIDEXTER 원자력 에너지시스템 연구는 장기적으로 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존의 원자력 기술개발 파라다임에 작은 변화를 시도한 것이다.

AMBIDEXTER는  $\text{Th}^{232}\text{U}$ 를 표준 핵연료물질로 하는 불화용융염 액상핵연료를 사용하고, 노심을 흑연감속재의 균일한 육각격자 배열인 단순구조로 고정하였으며, Hastelloy 합금의 얇은 원자로용기가 원자로 계통 전체를 격납하는 일체형 원자로를 중심으로 노심을 통과하면서 핵분열반응에 의해 발생된 열에너지와 핵분열생성물질을 상호 독립된 열/에너지 변환회로와 방사선/물질 수송회로에서 온라인으로 처리, 이용하는 복합 원자력 에너지시스템이다.

AMBIDEXTER 설계개념의 주요 속성 중에 핵안전성 설계는 연소에 따라 핵연료에 누적되는 핵분열생성물질을 운전 중에 연속적으로 제거하므로 사고시 누출가능 방사능과 비상냉각대상 잔여열 근원물질의 노내 잔류량을 최소화하는 적극적 안전성설계, 미소한 잉여반응도 및 큰 부(-) 핵연료온도 반응도계수와 같은 핵적 고유안전성, 그리고 무시할 정도의 증기압 및 무배관/무밸브 계통설계와 같은 열수력학적 고유안전성이 종합적으로 반영된 설계이다.

용융염  $\text{Th}^{232}\text{U}$  핵연료주기의 장점을 살려 농축공정과 재처리공정을 배제하고  $^{233}\text{U}$  전환율을 수지균형점에 맞춘 노물리 설계에 국한하지않고 더 나아가 저농축우라늄을 변성핵연료물질로 사용하는 혼성핵연료주기를 도입한다면 AMBIDEXTER의 핵확산방지 특성은 더욱 투명해질 것이다. 또  $\text{Th}^{232}\text{U}$  핵연료주기에서는 초우란 악티나이드가 거의 생성되지 않고, 용융염핵연료의 정화공정으로 핵연료에 포함된 핵분열생성물질을 분리, 추출하므로 방사성 폐기물 관리에서 주요한 현안이 되고 있는 사용 후 핵연료 처리, 처분문제 해결에 큰 진보

를 가져올 것이다.

핵분열성물질의 외부 공급원이 없는 핵적 자활 및 자정 능력을 갖춘 표준 250 MW<sub>th</sub> 원형로 모델을 개발함으로 AMBIDEXTER 원자력 에너지시스템 개념의 타당성 검증과 설계해석 방법 개발에 관한 연구가 진행되고 있다. 이 노력은 경수기술의 한계에서 오는 문제점을 보완 또는 해결할 수 있는 바람직한 대안 중의 하나가 될 것으로 기대한다.

### 참고문헌

1. Beynon, T.D., Dudziak, D.J. and Hannum, W.H.: Special Issue. The Technology of the Integral Fast Reactor and its Associated Fuel Cycle, Progress in Nuclear Energy, Vol. 31, No. 1/2, (1997).
2. Gazuo Furukawa and Alfred Lecocq: New Safe Nuclear Energy for the Next Generation, - Thorium Molten-salt Nuclear Energy Synergetics -, Proc. of the Florence World Energy Research Symposium, FLOWERS '90, Firenze, Italy, 22 May- 1 June (1990).
3. Bultman, J.H.: Actinide Transmutation in Nuclear Reactors, ECN-R-004, January (1995).
4. Summary Report on the Nuclear Energy Research Initiative Workshop, held at the American Association for the Advancement of Science, Washington, D.C., April 23, 24, (1998).
5. 오세기, 정근모, 원성희, 임현진, 조재국: 핵적 자정 · 자활 능력을 갖춘 용융염 원자력 보일러 시스템의 개념 설계에 관한 연구, '97 원자력 기초연구과제 최종보고서, (1998).
6. Uri Gat and Dodds, H.L.: The Source Term and Waste Optimization of Molten Salt Reactors with Processing, GLOBAL '93, September, 12-17 1993, Seattle, Washington.
7. Robertson, R.C.: Conceptual Design Study of a Single Fluid Molten Salt Breeder Reactor, ORNL-4541, (1970).