

## AMBIDEXTER 원자력 복합체 - 신뢰성 있는 미래 원자력에너지 이용 방안

오 세 기, 정 근 모  
에너지시스템연구센터  
아주 대학교

## AMBIDEXTER Nuclear Complex - A Credible Option for Future Nuclear Energy Applications

Se Kee Oh and KunMo Chung  
Energy System Research Center  
Ajou University, Suwon

### Abstract

Aiming at one of decisive alternatives for long term aspect of nuclear power concerns, an integral and closed nuclear system, AMBIDEXTER (Advanced Molten-salt Break-even Inherently-safe Dual-mission EXperimental and TEST Reactor) concept is under development.

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 it provides precious radioisotopes and radiation sources from its waste stream. Also the reactor operates at very low level of fission products inventory throughout its lifetime.

The nuclear and thermalhydraulic characteristics of the molten  $\text{Th}/^{233}\text{U}$  fuel salt extend the capability of the self-sustaining AMBIDEXTER fuel cycle to enhance resource security and safeguard transparency. The reactor system is consisted of a single component module of the core, heat exchangers and recirculation pumps with neither pipe connections nor active valves in

between, which will significantly improve inherent features of nuclear safety.

States of the core technologies associated with designing and developing the AMBIDEXTER concept are mostly available in commercialized form and thus demonstration of integral aspects of the concept should be the prime area in future R&D programs.

## 1. 서 론

1957년 세계 최초의 경수형발전로인 Shippingport가 상용가동을 시작한 후부터 지금까지 원자력발전설비의 85% 이상이  $UO_2$  세라믹연료와 고압경수 냉각재를 결합하는 콤팩트형 경수로로 구성되어왔다. 그러나 이러한 경수로 개념은 근본적으로 핵안전성, 핵확산방지, 핵폐기물관리문제에서 고유한 취약구조를 안고 있기 때문에 지난 반세기에 걸친 집중적 기술개발 노력에도 불구하고 아직도 원자력발전의 장래에 대한 확신을 주지 못하는 주요 원인을 제공하고 있음은 세계 원자력전문가들의 공통된 견해이다.<sup>1), 2)</sup> 따라서 에너지 부존자원이 부족한 선진국들이 경수로 외의 옵션에 대해 연구, 개발을 계속하고 있는 배경은 장기적인 안목에서 경수로기술의 한계에서 오는 문제점을 보완 또는 해결하기 위한 대안을 찾는 노력으로 평가할 수 있다. 그럼에도 불구하고 선진국의 민간산업체들이 주체적으로 계획, 추진하여온 상용경수로기술 개발목표에만 국내 원자력 능력과 재원을 집중시키는 것은 좁게는 국가 원자력기술의 종속성을 심화시키고, 넓게는 원자력 자원활용의 융통성을 구속하는 결과를 초래할 위험이 높다는 점에서 바람직하지 않다.

이와 같은 배경에서 핵안전성, 핵확산방지 및 핵폐기물관리 문제는 물론 더 나아가 핵연료자원의 안정적 공급과 원자력에 대한 국민적 신뢰성 회복과 같은 원자력의 평화적 이용확대를 위해 필수적인 고려사항들을 반영하는 새로운 원자로개념을 개발하고 기술적 타당성을 검증하는 노력이 필요하다. 원자로 기술개발 역사를 통해 검토되어온 각 종의 동력로개념을 구성하는 기술적 요소들을 옵션공간의 데이터베이스로 하여 기술현황분석에 의거한 선별기준을 정립하고, 목표지향적 설계개념의 요구조건과 구속조건을 종합 평가하므로 주어진 개념공간에서 최적화된 원자로시스템을 재구성하는 시스템 공학적 연구방법이 효과적이다.

본 논문은 미래의 원자력발전 문제를 해결하는 신뢰성 있는 대안으로써 예비 개념설계단계에 있는 AMBIDEXTER 원자로시스템의 개념적 특성을 요약한다. 먼저 앞서 논의한 문제점들을 정의하고, 해결방안의 구성인자로서 선택된 기술적 요소들의 특성과 그 타당성을 정리하고, 원자로시스템에 포함된 주요 계통의 개념을 소개한다.

## 2. AMBIDEXTER 개념요소 특성

원자력발전시스템의 안전성설계는 핵분열과정에서 생성된 방사성물질의 노내 누적량을 가능한 한 최소로 유지하므로 원자로사고 시의 누출잠재력을 약화시키는 개념이 가장 바람직하지만 현재 대부분의 발전로에서 사용하는  $UO_2$  고체 핵연료설계에는 기술적으로 적용이 매우 어렵다. 따라서 물리적 다중방호장벽을 형성하여, 일차적으로 정상 또는 비정상 상태에서 핵연료봉의 파손위험성을 억제하되, 상당량의 핵연료가 파손되더라도 누출경로를 다중으로 차단하므로 궁극적으로 주민이나 발전소종사자의 방사선 피해를 방지하도록 설계되어있다.<sup>3)</sup> 그러나 AMBIDEXTER 원자로시스템의 안전성설계는,

- 액상의 용융염핵연료 특성을 살려 온라인 정화공정개념을 연계하므로 노내 핵분열생성물질을 운전 중 연속적으로 추출, 제거하여 방사성물질의 노내 누적을 제한하고<sup>4)</sup>,
- 노물리적으로는 액상 핵연료의 열팽창계수 및 기포생성으로 인한 부반응도 계수가 상대적으로 크기 때문에 높은 고유안전특성을 보유하게 되고,
- 온라인 정화공정계통이 운전 중 핵연료물질의 연속장전과 추출기능을 수행하므로 핵분열성물질,  $^{233}U$ 의 노내 재고량은 최소 잉여반응도 유지에 필요한 범위 내로 조절이 가능하고,
- 저압고온의 용융염이 원자로용기에 내장된 열교환기 경로를 거치면서 내부 순환으로 열전달하므로 일차냉각계통의 노외배관이 없고 따라서 배관파단과 같은 대형누출사고의 가능성은 원천적으로 허용하지 않고,
- 정화계통 배관파손과 같은 소규모 누설을 가정하여도 용융염의 높은 융점으로 인해 외부 누출과 동시에 냉각, 응고되므로 누설점을 자동 폐쇄시키고 내재된 방사성물질을 포획, 감금하게 되며,
- 용융염핵연료의 저증기압 특성은 냉각기능상실사고 시 비정상적 온도상승으로 인해 비등이 발생하더라도 원자로용기의 파손을 우려할 수준의 높은 침투압력으로 증가하지 않는 등  
고유안전 원자로가 갖추어야 할 핵심적이고 근본적인 특성요건들을 대부분 충족시킬 수 있다.

원자력발전기술과 핵확산문제는 직접적인 관계는 없으나 유사기술이나 핵물질의 전용가능성에 대한 우려가 끊이지 않고 있다. 이는 우라늄농축 기술과 시설이 핵연료집합체 생산의 중요한 공정으로 이용되며, 또 사용후핵연료에는 추출 가능한 핵분열성 플루토늄동위원소가 대량 잔류하는 우라늄/플루토늄 핵연료주기의 고유 특성에 기인한다. 그러나 AMBIDEXTER 원자로시스템은 핵확산 우려의

- 근원이 되는 우라늄/플루토늄 대신에 토륨/우라늄 핵연료주기<sup>5)</sup>에 의존하므로,
- 천연에 100%의 존재비로 매장된 잠재핵분열성물질  $^{232}\text{Th}$ 를 순수 산업기술에 의해 핵연료 원료로 제조하여 노내에서  $^{233}\text{U}$ 으로 변환시키므로 우라늄 농축공정과 플루토늄 재처리공정이 원천적으로 불필요하며,
  - 토륨/우라늄 핵연료주기의 열 및 열외중성자에 의한 고전환율 특성을 이용하여 핵분열성물질  $^{233}\text{U}$ 의 증식능력이 시스템 내 총물질수지가 균형을 이루는 핵적 자활성 요건범위를 초과하지 않도록 설계할 수 있으며,
  - $^{232}\text{U}$ 의 고비방사능으로 인해 핵연료로부터  $^{233}\text{U}$ 을 분리, 은닉할 경우 탐지가 용이하며, 특히 장기간 저장 경우  $^{232}\text{U}$ 의 다단계 붕괴로 생성되는  $^{208}\text{Tl}$ 에서 방출되는 고에너지  $\gamma$  (2.6 Mev)선으로부터 차폐를 고려해야하므로 재처리공정이 더욱 복잡하게 되며,
  - 소량의  $^{238}\text{U}$ 을 변성체로 핵연료물질에 혼합하면 기술적으로 재처리가 더욱 어려운 변성핵연료를 이용하는 핵주기개념을 응용할 수 있으므로 핵확산 문제와 관련된 국제적 요구조건 변화에 능동적으로 부응하는 핵투명성이 가장 완벽한 원자로 개념으로 발전할 수 있다.

원자력발전에서 생산되는 방사성폐기물 중에서 가장 큰 문제가 되고 있는 것은 사용후핵연료를 포함한 고준위폐기물로서 특히 반감기가 10만년 이상이 되는 Pu를 비롯한 악티나이드와 Tc, Cs, I와 같은 장반감기 핵분열생성물질의 장기동적 거동에 대한 불확실성이다. AMBIDEXTER 원자로 핵주기는 토륨과 용융염의 핵적, 물리·화학적 특성으로부터,

- 토륨이 다단계 핵반응으로 생성 가능한 장반감기 초우라늄동위원소의 양은 우라늄/플루토늄 핵주기에 비해 무시할 수 있는 수준으로 낮아서 고준위 방사성폐기물관리에서 악티나이드 처분문제의 중요성이 획기적으로 경감되며,
- 용융염핵연료물질의 온라인 정화처리를 거쳐 분리된 고준위방사성폐기물의 주종인 핵분열생성물질의 총량은 부피나 무게에 있어서 우라늄/플루토늄 핵주기의 사용후핵연료량과 비교할 수 없을 만큼 작기 때문에 저장과 관리의 안전성 및 경제성 부담이 작고,
- 분리된 고준위 방사성폐기물의 저장·관리공정과 방사화학공정을 연계시키므로 방사성동위원소 생산시설, 대형감마조사시설 등 방사성물질의 산업적 이용을 위한 복합시설이 가능하다. 이는 부지내 방사성폐기물의 감량관리와 함께 원자력의 평화적 이용 증대를 의미하고 따라서 대중이해 제고 관점에서 획기적인 진전이 있게 될 것이다.

### 3. AMBIDEXTER 원자로시스템 개요

그림 1은 앞 절에서 평가한 시스템 개념요소의 특성을 만족하도록 설계된 AMBIDEXTER 원자력 복합체와 원자로시스템의 개념을 나타내는 개략도이다. 시스템 개념의 유일성은 일체형 원자로의 장점을 극대화하여 열에너지와 방사성 물질을 발생원에서부터 최단거리에서 서로 독립된 경로를 통해 분리, 수송, 변환 시키므로 발생원인 원자로 내 잔류하는 양은 최소로 유지하고, 반면에 이용시설에 포함되는 양은 최대로 공급하도록 설계되어 있다는 점이다.

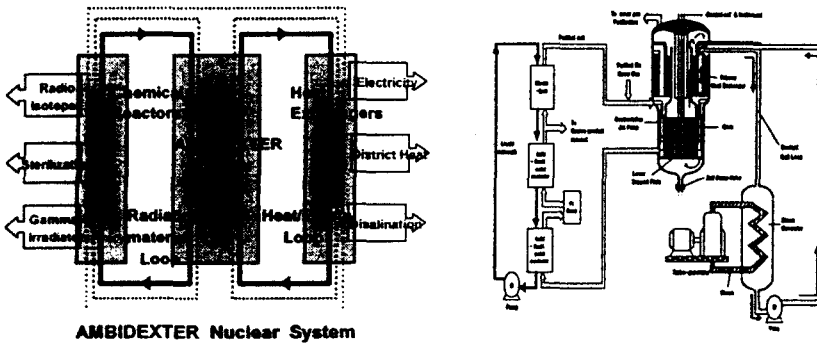


그림 1. AMBIDEXTER 원자로시스템 개념도

원자로집합체는 용융염의 화학적 활성에 대해 부식저항성이 강한 니켈합금, Hastelloy N 재질의 원통형 압력용기 내에 일차냉각계통의 주기기를 장착, 배열한 일체형 구조를 갖는다. 압력용기의 두께는 응력해중 해석결과에 따라 결정되겠지만 계통의 최대압력이 재순환펌프수두의 총화에 대응하므로 최대 10 cm를 넘지 않는다. 노심은 용기의 하단 중앙부분에 육각주형 흑연 감속재 격자구조의 집합체로서 상하노심지지구조물에 의해 고정되며, 용기의 상단부분 원주방향으로 동심원 상에 일차 열교환기군, 그리고 중단부분 용기 벽과 노심 shroud 사이의 환형 공간에 일정한 간격으로 재순환펌프군을 배치하여 열역학적 사이폰 효과와 유체역학적 압력손실 요소를 고려하고 있다. 압력용기 중앙의 원통형 공동구는 제어봉 및 제촉기 구동공간으로서 보수유지 시 노심접근통로로 이용된다

용융염의 기저물질은 중성자 경제성, 화학적 안정성, 열유동학적 효율성, 핵연료물질의 용해도 및 생산·재생·처리기술의 경제성에서 우수성이 검증되어 널리 사용하는 LiF-BeF<sub>2</sub> 혼합물이다. 첨가된 핵연료물질 ThF<sub>4</sub>과 UF<sub>4</sub>의 Mole 분율은 AMBIDEXTER 원자로의 핵적 자활성 요건으로서 연속적인 연료충전에

의해 운전에 필수적인 최소잉여반응도를 유지하고, 전환율로 정의되는  $^{233}\text{U}(n,f)$ 와  $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$ 반응율비가 수지균형점에 근접하도록 노심 구성이 가능한 범위에서 핵주기비 및 운전경비 등 경제성을 감안하여 결정한다.

액상 용융염핵연료에 포함된  $^{233}\text{U}$ 가 노심을 통과하면서 핵분열반응을 일으켜 가열된 후에 침니를 따라 상승하여 일차 열교환기 튜브 측에 유입된다. 핵분열로 생성된 불활성원소 중에 기체상태의 Xe, Kr은 대부분 용융염에 주입, 용해되어 있는 미세한 헬륨기포에 의해, 또 금속류인 In, Ag 등은 용기 벽에 부착되면서 곧 바로 제거된다. 일차 열교환기의 튜브 측을 통과하면서 냉각된 용융염핵연료량의 약 10% 정도를 방사선/물질수송회로인 정화계통으로 우회시켜 핵분열생성물질과  $^{233}\text{Pa}$ 을 분리·저장·처리하고 나머지 90%는 downcomer를 거쳐 재순환 펌프에 의해 노심으로 강제 재순환된다. 분리된  $^{233}\text{Pa}$ 는 붕괴조에서 충분한 붕괴기간을 거치면서  $^{233}\text{U}$ 로 전환된 후 정화계통을 따라 downcomer에 합류한다. 열/에너지수송회로는 일차 열교환기의 튜브 벽을 경계면으로하여 셀 측에 유통하는 냉각용융염에 전달된 열을 증기터빈회로에 공급하는 중간냉각계통이 방사성물질의 누설에 대한 다중방호벽 기능을 수행한다.

원자로 제어 및 보호계통은 원자로의 출력조절과 관련된 반응도요건과 운전정지를 확인하는 정지여유도요건의 정적 및 동적 거동에 절대적으로 종속되거나 AMBIDEXTER 원자로는 운전 필수적인 최소잉여반응도를 온라인 정화계통이 제공할 수 있고, 액체핵연료의 높은 온도팽창계수가 고유안전성을 향상시키는 방향으로 작용하고, 기생포획에 의한 불필요한 중성자손실을 막도록 중성자흡수체의 노내 거주를 될 수 있는 데로 배제하는 설계제약조건에 따라 상대적 의존도가 낮은 제어설계개념의 개발이 요구된다.

표 1에 100 MWe급 prototype AMBIDEXTER 원자로시스템의 개략적 사양을 정리하였다.

#### 4. 결 론

에너지 부존자원의 한계성 때문에 원자력발전의 중요성은 지속적으로 강조될 것으로 예상하지만, 기존의 원자력발전기술이 안고 있는 근본적인 문제인 핵안전성, 핵확산방지 및 핵폐기물관리에 대한 기술적 불완전성과 정책적 불확실성이 소멸되지 않는 한, 국민적 합의에 의한 원자력발전 기술개발의 활성화는 기대하기가 어려울 것이다.

토륨/우라늄 핵주기, 액상 핵연료, 온라인 정화 및 일체형 시스템의 시스템속성요소와 핵적자활성, 고유안전성 및 利用兩全性의 설계요건을 합성한 새로운

개념의 AMBIDEXTER 원자로시스템에 상호 독립적으로 연계된 열/에너지 수송 회로와 방사선/물질 수송회로로 구성된 AMBIDEXTER 원자력 복합체의 개발이 타당성분석연구를 통해 원자력발전의 근원적 문제점을 해결할 수 있는 대안으로 제시하고 있다.

기술적 타당성을 검증하는 연구, 개발노력으로써 250 MW<sub>th</sub>급 prototype AMBIDEXTER 원자로시스템의 예비개념설계가 진행 중이며 개략적 설계사양을 도출하였다. 자료분석을 통해 얻은 종합결론은 AMBIDEXTER 원자로의 설계에 필요한 핵심요소기술은 대부분 이미 실증을 거쳐 산업기술에 활용되고 있으므로 앞으로는 설계최적화와 같은 시스템 엔지니어링기술이 중점적으로 개발되어야 할 것이다.

표 1. 250MW<sub>th</sub>급 AMBIDEXTER 원자로시스템개요

파라미터	값
- 열 출력	250 Math
- 원자로 압력용기 재질 및 구조	Hastefully N, 원통형
- 원자로 압력용기 크기	전장 ~6 M, 내경 ~3.5 M, 두께 ~10cm
- 노심 재질 및 구조	Graphite, 원통형
- 노심 크기	전장 250 cm, 직경 270 cm
- 노심 격자 재질 및 구조	8~14 cm 정육각주 Graphite, 중앙에 원통형 채널공동
- Graphite 감속재 밀도	1.9 g/cm <sup>3</sup>
- 핵연료용융염성분비(Mole %) LiF, BeF <sub>2</sub> , ThF <sub>4</sub> , UF <sub>4</sub>	71.70±0.05, 16.0, 12.0, 0.30±0.05
- 핵연료용융염 밀도	3.3093 g/cc
- 핵연료용융염 열용량	1.34 W · sec/g · °C
- 노심 입구 용융염 온도	621 °C
- 노심 출구 용융염 온도	704 °C
- 노심내 용융염 유량	6.525×10 <sup>5</sup> cm <sup>3</sup> /sec
- 용융염 침투출력밀도	500 W/cc
- 일차 열교환기 수	4 기
- 일차 열교환기 재질 및 구조	Hastefully N, 원통형 Shell-and-Tube
- 일차 열교환기 크기	전장 256 cm, 내경 34.2 cm

#### 참고문헌

1. A.A. Harms, Civilian Nuclear Energy: Wherefrom? Whereto?, McMaster University, 1995.

2. D. Easterling and H. Kunreuther, The Dilemma of Siting a High-Level Nuclear Waste Repository, Kluwer Academic Pub. 1995.
3. M.M. El-Wakil, Nuclear Energy Conversion, ANS, 1992.
4. R.C. Robertson, Conceptual Design Study of a Single Fluid Molten Salt Breeder Reactor, ORNL-4541, June 1971.
5. C. Sege, D.E. Bartine and I. Spiewak, Interim Assessment of the Denatured <sup>233</sup>U Fuel Cycle: Feasibility and Nonproliferation Characteristics, ORNL-5388, Dec. 1978.