2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

순환 용융염 핵연료를 고려한 AMBIDEXTER 원자로 최적화 설계

Improvement of the Nuclear Self-sustainability Design Method for the Th-U-Pu Fuel AMBIDEXTER Core

이영준, 유영진, 김진성, 오세기
아주대학교
경기도 수원시 팔달구 원천동 산5번지

요 약

본 논문에서는 Th-^{233}U-^{239}Pu 핵연료주기를 이용하는 용융염 핵연료를 이용하며 열출력 생산 및 잉여 중성자 생성을 담당하는 씨드 격자와 잠재 핵분열성 물질과 중성자와의 포획 반응으로 핵분열성물질로 전환시키는 블랭킷 격자를 사용하여 중성자 유효 증배계수와 전환율이 임계치인 1.0에 만족하는 노심을 구성하였다. 순환하는 핵연료를 사용하는 AMBIDEXTER의 특성을 고려하기 위해 시간에 따른 핵종 농도 변화 추이를 계산하였고 노심 중앙에서의 과도 출력을 방지하며 용융염 핵연료의 최소 적재량을 이루기 위해 노심 영역을 세분화 하였다. 그 결과 반경 165.9cm, 높이 401.2 cm 크기의 원통형 구조이며 유효증배계수와 전환율은 각각 1.0002와 1.001로서 핵적 자활성을 만족하는 노심을 구성하였다.

Abstract

Objective of this study is aiming at optimal constitute of a self-sustainable core that consists two types of different lattices formed with a circular-type molten fuel salt channel centered at a hexagonal-type graphite block. It was assumed that, at equilibrium state, the AMBIDEXTER operated with a **Th-^{233}U-^{239}Pu fuel cycle strategy, but, it initially started with the reference compositions of** ^{7}LiF - $^{9}BeF_2$ - $^{232}ThF_4$ - $^{233}UF_4$ - $^{nat}UF_4$ of 69.94 - 15.99 - 10.99 - 0.3596 - 2.638 mole %. In order to optimize for neutron leakage loss and to secure the structural material integrity, the radial reflector thickness was determined to 80.0 cm. And, thus, the dimension of the cylindrical shape core was evaluated to 165.9 cm radius and 401.2 cm hight. The k_{eff} and C.R. of this 250MW$_{th}$ AMBIDEXTER reference core are 1.0002 and 1.001. The reactor would be steadily operable at 100 % full power only with supply of about 220.0 g/day of thorium and 64.0 g/day of natural uranium.

1.서론

기존의 상용 원자로가 안고 있는 고유 문제를 원천적으로 해소하기 위해 현재 아주대학교에서 개념 설계중인 AMBIDEXTER(**A**dvanced **M**olten-salt **B**reak-even **I**nherently-safe **D**ual-missioning **EX**perimental and **TE**st **R**eactor)는 1960년대 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)에서 개념설계가 이루어졌던 MSBR(Molten Salt Breeder Reactor)의 설계방법을

기본으로 현재까지 상용화 및 개발이 시도된 여러 원자력 시스템의 장점들을 종합하여 개념 설계중인 다목적 원자로이다.

AMBIDEXTER 원자로 시스템의 특징을 보면 중간 열교환기가 원자로 용기 안에 포함된 일체형 원자로로서 기기를 이어주는 배관망이 없으므로 주요 배관 파손으로 인한 냉각재 상실사고(LOCA ; Loss Of Coolant Accident)를 방지했으며 ^{7}LiF - $^{9}BeF_2$ - $^{232}ThF_4$ - $^{233}UF_4$의 핵연료에 천연 우라늄을 변성제로 사용하여 핵확산 저항성을 강화하였고 온라인 정화공정을 통한 핵연료의 연속적인 주입과 핵분열물질의 정화를 통해 핵연료 이용의 극대화와 폐기물의 감소 및 유용 동위원소를 이용할 수 있는 다목적 원자로이다. 또한 핵연료의 부(-)의 반응도 계수로 인하여 탈설계 조건 시에도 별도의 제어 장치 없이도 회복하는 고유 안전성을 지니고 있는 원자로이다.

AMBIDEXTER 원자로의 용융염 핵연료는 핵분열성 물질의 핵분열로 인해 열출력을 내는 씨드격자와 잠재 핵분열성 물질의 변환을 통해 핵분열성 물질을 생산하는 블랭킷 격자로 구성된 노심을 통과하여 중간열교환기를 거친 후 정화공정에 유입되어 핵연료 주입 및 핵분열 물질의 정화를 한 후 다시 노심에 주입된다. 이로 인해 평형상태에서의 핵종들의 농도 계산 시에 핵연료가 순환하는 특징과 성격이 다른 격자를 고려해야한다.

각 격자간의 특성을 고려하기 위해 격자의 구조를 결정하고 이로부터 계산된 특성은 다시 핵종 농도 계산에 사용될 것이다. 보정된 격자의 특성은 군정수의 핵적 특성을 계산하는데 이용되고 이는 다시 핵적 자활성을 이루는 노심을 구성하는데 사용될 것이다.

본 연구에서는 기존의 코드(ORIGEN2-HELIOS-SQUID)를 사용하여 핵연료 순환과 이종 격자의 특성을 반영할 수 있는 계산 방법을 고안하였다. 또한 이러한 코드체계를 통하여 평형 상태에서의 핵종 농도를 구하였으며 핵연료 용적량을 최적화하기 위해 격자의 배치와 반사체의 두께 조절 등을 통하여 핵적 자활성을 만족하는 최소 크기의 노심을 구성하고자 한다.

2. AMBIDEXTER의 핵적 자활성

2.1 핵연료 조성

AMBIDEXTER 핵연료의 조성 조건으로 운전상태에서는 핵연료가 항상 액체 상태를 유지하며 핵비확산성을 갖추도록 하였다. 이러한 기본 제한 조건을 구체적으로 보면 다음과 같다.

1. $^{232}ThF_4 + UF_4 \leq 14$ mole%
2. ^{233}U의 백분율은 전체 우라늄 양의 12%를 넘지 않는다.

첫 번째 조건은 용융염 핵연료의 융점이 약 500℃이므로 운전상태의 유체특성을 유지하기 위한 것이고 두 번째 조건은 금속 또는 산화 우라늄 상태에서 변성제인 ^{nat}U를 첨가함에 따라 ^{233}U에 의한 임계유지가 기술적으로 거의 불가능한 최대 농축도이다.

AMBIDEXTER는 노심을 통과하여 중간 열교환기 및 물질 재처리 장치를 순환하는 용융염 핵연료를 사용하며 상이한 특징을 지닌 두 종류의 격자로 노심이 구성되어져있다. 이종격자로 이루어진 AMBIDEXTER는 용융염 핵연료가 노심에 유입될 때 각 격자 영역으로 나누어져 들어간 후 두 격자간의 상이한 특성으로 노심을 지나면서 각 격자에서 다른 반응이 일어나므로 핵연료가 노심을 빠져 나올 때에는 다른 핵연료 조성을 가진다. 이는 다시 노심 상단에서 합쳐져 골고루 섞일 것이며 열교환 및 정화 공정을 거친 후 다시 노심 내에 주입된다. 이를 구현하기 위해 혼합된 노심을 구성하여 핵연료 양의 변화를 측정하는 것보다는 특성이 다른 씨드격자와 블랭킷 격자들만으로 이루어진 두 개의 노심을 구성하여 각 노심에 대해 핵종 농도의 변화를 ORIGEN2

를 사용하여 계산하였다. 이 결과 값을 더함으로서 노심 상부의 용융염 핵연료가 혼합됨을 모사하였고 주요 핵연료 원소들을 각 격자가 차지하고 있는 부피를 고려하여 나눔으로서 재입력되는 현상을 구현하였다. 여기까지가 한 주기이며 핵연료는 계속 순환하고 일정 시간 후 평형 상태에 도달하게 된다. 그러므로 이를 모사하기위해 한 주기를 비교적 짧은 시간인 하루로 설정하였으며 주요 핵종들의 두 노심에서 나온 양이 변화가 없을 때까지 반복 수행하였다.

핵물질 구성 순서는 일단 기본 물질인 ^{7}LiF와 $^{9}BeF_2$를 노심의 부피비와 각 질량수를 고려하여 계산한다. 기본 물질은 중성자 흡수율이 매우 작고 절대양이 많기 때문에 짧은 시간당 질량 변화량은 측정되지 않는다. 이는 기본 물질의 절대양은 항상 일정해야하는 개념에 적합하므로 시간에 따른 기본 물질의 양은 초기량과 같은 값으로 항상 일정하도록 설정하였다. ^{232}Th와 ^{238}U는 AMBIDEXTER에 주입되어 중성자와 반응 후 핵분열성 물질로 전환되는 핵연료 물질이며 평형상태에서는 항상 일정한 값을 가져야한다. 이와 같은 개념을 이루기 위해 ^{232}Th와 ^{238}U의 주입률을 변화시키면서 물질이 장시간 평형이 되는 상태를 계산하였고 그 결과 약 220.0 g/day의 ^{232}Th과 약 64.0 g/day의 ^{nat}U이 주입되었을 때 시간에 따라 변화가 없음을 계산하였다. 다음으로 핵분열성 물질인 ^{233}U와 ^{239}Pu의 주입량을 결정하는 물질인 ^{233}Pa와 ^{239}Np의 물질의 평형상태는 붕괴 고리(decay chain)에 의해 ^{233}Th와 ^{239}U의 양을 고려해주어 계산하였다. ^{233}Pa와 ^{239}Np의 물질량은 순환 원리에 맞춰 시간에 따른 변화를 계산해 변화가 없을 때의 양을 평형상태 값으로 결정하였다.

^{232}Th와 ^{238}U가 중성자를 포획하여 생성된 ^{233}Pa와 ^{239}Np는 각각 반감기가 26.9day와 2.4day가 지난 후 β붕괴를 통해 핵분열성 물질인 ^{233}U와 ^{239}Pu로 변한다. AMBIDEXTER 정화 공정에서 ^{233}Pa와 ^{239}Np의 제거 비율은 3일에 노심의 내 모든^{233}Pa와 ^{239}Np이 제거됨으로 가정하였고 이 양이 붕괴 고리에 의해 시간이 지난 후 핵물질인 ^{233}U와 ^{239}Pu로 변환되어 다시 노내로 주입되므로 ^{233}Pa와 ^{239}Np의 생성량의 1/3을 ^{233}U와 ^{239}Pu의 주입양/일로 정하였다. 그 결과 ^{233}U와 ^{239}Pu의 주입량은 약 154.8 g/day와 63 g/day로 계산되었다. Pu와 Am 동위 원소들의 평형상태를 계산하기 위해서 초기양을 0으로 놓고 ^{233}Pa와 ^{239}Np의 계산과 같은 방법으로 시간에 따른 농도를 추적하였다. 이는 Pu와 Am의 양은 정해진 중성자속과 ^{238}U의 포획반응율에 의해 Pu와 Am의 생성량은 일정하나 Pu와 Am의 양이 증가함에 Pu와 Am이 중성자와 반응하여 없어질 확률은 커짐에 따라 일정 양에 도달하면 수지 균형을 맞출 것을 예상하여 계산된 것이다.

참고로 핵분열 물질들은 핵물질의 양에 의존하지 않고 출력에 따라 결정되므로 각 노심에서 장시간 계산하였을 때 가장 큰 값을 가지는 양을 선택하였다. 핵분열 물질들을 핵물질과 같은 방법으로 계산하지 않은 이유는 붕괴 고리가 매우 복잡하여 위의 방법을 사용할 경우 모든 경우를 고려하지 못해 비효율적이기 때문이다. 본 논문에서는 핵분열 물질이 가장 많이 누적 되었을 때를 선택하여 보수성을 충분히 갖추었다.

평형 상태에서의 핵종농도를 구하기 위해 ORIGEN2의 계산 방법을 간략한 순서도로 보면 그림 1과 같다.

2.2 핵적 자활성을 만족하는 노심 구성

씨드 격자는 흑연 감속재와 용융염 핵연료로 구성되는데 용융염 핵연료의 반경이 변함에 따라 흑연 감속재가 차지하는 비율이 달라지며 이는 중성자 감속에 영향을 미쳐 핵적 특성이 달라진다. 반경의 변화는 흑연 구조체의 제조를 고려하여 0.5cm단위로 변화하였으며 두께가 최소한 0.5cm는 넘도록 하였다. 그 결과 씨드 격자의 핵연료의 반경이 1.5cm일 때 유효 증배 계수가 가장 좋은 결과를 나타내는 것으로 계산되어 본 연구에서는 1.5cm를 사용하였다. 씨드 격자에서는 핵분열에 의해 생성된 고속중성자가 흑연 감속재에 의해 감속되어 열중성자가 되고 블랭킷 격자에서는 흑연 감속재가 없으므로 씨드격자에 비해 중성자가 비교적 경화되어있으므로 씨드 격자와 블랭킷 격자의 분포에 따라 노심에서의 에너지 군에 따른 중성자 분포가 달라지며 이로 인해 핵적 자활성 계

수인 유효 증배 계수와 전환율에 영향을 미친다. 씨드 격자가 노심에서 차지하는 비율이 커질 경우 핵분열에 의한 잉여 중성자가 많아지고 이로 인해 유효 증배 계수가 커지며 블랭킷 격자가 노심에서 차지하는 비율이 커질수록 핵분열성 물질의 생성에 의한 전환율이 향상되는 효과가 있다. 또한 노심 중앙 일수록 중성자 분포 밀도가 높고 노심 외각 일수록 중성자 분포 밀도가 낮으므로 각 격자가 배치되는 노심 내 위치에 따라 핵적 자활성 계수들은 영향을 받는다. 따라서 씨드 격자와 블랭킷 격자의 노심 내 위치와 분포를 적절히 조화하여 핵적 자활성 지수를 최적화하였다. 노심 최외각에 위치하는 흑연으로 이뤄진 반사체는 노심 외각으로 나가는 중성자를 노심 안으로 되돌려 보내 중성자의 효율성을 향상시켜준다. 반사체의 두께가 두꺼울수록 중성자의 효율은 좋아지지만 노심의 크기가 커져 경제성은 나빠지므로 반사체의 두께를 적절하게 조절하였다. 노심이 커질수록 중성자 분포는 완만해지고 중성자의 누설률은 상대적으로 작아지나 핵연료 장전양은 반경의 제곱에 비례해 늘어나므로 경제성은 나빠진다. 그러므로 최적의 노심 크기를 계산해야한다. 이로부터 핵적 자활성에 영향을 줄 수 있는 변수로 다음과 같이 네 가지로 나누었다.

1) 씨드 격자의 용융염 핵연료 반경
2) 씨드 격자와 블랭킷 격자의 배치
3) 반사체의 두께
4) 노심의 크기

위의 네 가지 변수들을 고려하여 핵적 자활성을 만족하는 노심을 설계하기 위해 격자 내 핵연료 반경이 정해진 씨드 격자와 핵연료로만 이루어진 블랭킷 격자를 적절히 배치·분포시키고 반사체의 두께와 노심 크기를 조절하였다.

3.결과

3.1 평형 상태에서의 핵연료 구성

본 연구를 통해 계산되어진 핵종과 선행 연구를 통해 계산된 핵종 양을 비교하면 기본 물질인 ^{7}Li, ^{9}Be와 ^{232}Th의 몰 비는 비슷하나 핵분열성 물질인 ^{233}U와 ^{239}Pu 및 ^{241}Pu의 몰 비는 증가했으며 ^{233}Pa와 ^{239}Np의 양은 줄어들었다. ^{233}U는 가장 중요한 핵분열성 물질로서 그 양이 시간에 관계없이 일정해야 한다. 그러나 선행 연구의 경우는 시간이 지날수록 ^{233}U의 양이 점차 줄어드는 현상이 있으나 본 연구의 방법으로 계산된 양은 시간에 무관하게 일정한 값을 가지므로 본 연구에 의한 계산이 더 적합함을 알 수 있다. Pu의 계열의 물질이 늘어난 이유는 변성제로 사용된 천연 우라늄의 양이 선행 연구보다 본 연구에서 더 많이 사용된 것이 주 원인이다. 그 외에도 기존의 방법으로 Pu 동위 원소들의 양을 계산하면 그 양이 늘어나다가 일정 시간이 지나면 줄어드는 현상과 ^{240}Pu와 ^{241}Pu의 양이 ^{239}Pu에 비해 지나치게 작게 계산되어진다. 이는 기존의 연구는 이종 격자를 고려하지 않고 노심 구성을 균일하게 계산하여 각 격자의 특성을 반영하지 못했기 때문이다. 씨드 격자의 경우 중성자의 연화로 인해 핵분열성 물질과 반응 확률이 커져 핵분열 물질의 양이 줄어드는 반면 블랭킷 격자의 경우 속중성자가 잠재 핵분열성물질과 반응하여 오히려 핵분열성 물질을 만들어낸다. 이러한 두 격자의 상호 작용으로 물질이 생성·소멸됨으로 각 격자의 특성을 고려하지 않는 선행 연구보다는 순환 및 이종 격자를 고려하여 물질 양을 계산한 본 연구가 AMBIDEXTER의 원리를 더 잘 구현했다고 사료된다. 선행 연구와 본 연구의 핵종 비교는 표 1과 같다.

3.2 최적화 노심 구성

앞서 구한 핵종들을 HELIOS의 입력으로 사용하여 씨드 격자와 블랭킷 격자의 핵적 특성을 계산하여 이를 SQUID를 통해 각 격자를 배치하여 노심을 구성하였다.

격자배치논리의 기준은 중성자밀도가 상대적으로 높은 중심부근에 씨드격자를 집중 배치하여 중성자 경제성을 효율화하였으며 상대적으로 중성자밀도가 낮지만 부피를 많이 차지하는 외각부분을 블랭킷격자로 감싸 전환률의 영향을 극대화하였다. 단, 노중심의 과도한 출력을 방지하고 출력 분호를 완만하게 하기 위하여 노심 중심에 하나의 블랭킷격자를 위치시켰고 블랭킷 영역 가운데 씨드 격자를 삽입하여 노심 외각에서의 중성자 이용 효율을 향상시켰다. 반사체로는 격자와 동일 구조를 갖고 흑연만으로 이루어진 격자를 최외각에 배치하였다. 또한 노심을 반경방향으로 각각 5 군의 격자 배치영역으로 분리하여 노심의 기하학적 구조 및 각 격자 핵특성 군정수로 모델링하였다. 각 영역의 분포는 노심 중심부는 중성자의 밀도가 높기 때문에 격자의 위치 변화에 따라 핵적 자활성 계수에 영향이 노심 외각에 격자 배치의 변화보다 상대적으로 크므로 노심 중앙의 격자 영역부터 결정한 후 외각에 위치한 격자의 영역 분포를 계산하였다. 그림 2는 최적화 되었을 때를 중심으로 각 영역의 경계를 변화 시켰을 때 유효 증배계수와 전환율의 합의 변화를 도시한 것이다. 노심 중심부에 가깝게 위치한 씨드 영역과 블랭킷 영역의 2번째 경계가 한 mesh당 변화할 때가 외각에 위치한 경계가 한 mesh당 변화할 때보다 핵적 자활성 지수인 유효 증배 계수화 전환율의 합이 더 급격하게 변함을 알 수 있다. 이때 세부적인 영역 선정은 핵적 자활성 요건에 부합되는 각 지수가 1.0 즉, 합이 2.0에 가장 근접한 때로 결정하였다. 참고로 노심 중심부에 가장 가까운 첫 번째 경계는 블랭킷 격자가 단 하나가 배치되는 것으로 정하였으므로 경계위치의 변화는 고려하지 않았다.

반사체의 두께가 두꺼워질수록 중성자의 이용 효율이 향상되나 노심의 크기가 커지므로 경제성이 저하된다. 반사체 두께를 최적하기 위해 그림 3, 그림 4와 같이 반사체의 두께에 따른 유효 증배계수와 전환율의 변화와 중성자속의 변화를 계산하였다. 전환율의 경우 반사체의 두께에 비례해 선형적으로 증가했으나 유효 증배 계수와 반사체 주위에서의 중성자속은 반사체 두께가 증가함에 따라 증가율이 일정 두께 이후 급격히 줄어듦을 알 수 있고 이를 근거로 반사체의 두께를 80cm로 정하였다.

노심의 크기가 커질수록 중성자 분포가 완만해지고 상대적으로 노외로 빠져나가는 중성자의 양이 줄어들어 중성자의 효율이 좋아지나 노내에 장전되는 핵연료의 양이 많아지며 공간을 많이 차지하는 단점이 있다. 그러므로 본 논문에서는 노심의 크기는 앞선 세 가지 변수들을 모두 최적화한 후에도 핵적 자활성을 만족하지 못할 경우에만 증가시켜 유효증배계수를 향상시켰다. 노심의 크기가 변경된 후에 다시 격자들을 배치와 반사체 두께 등을 최적화해 핵적 자활성의 만족 여부를 계산하였고 이를 통해 노심의 크기를 최적화 하였다. 그림 5, 그림 6는 trial & error 기법을 이용하여 SQUID 시험을 수행하여서 최종 선정한 반경 165.9cm(흑연반사체, hastelloy 구조재 제외), 높이 401.2cm의 표준 노심 단면도와 1/8 입체도이다.

3.3 출력 분포 및 중성자 분포

원자로 노심의 정특성 해석을 위하여 위에서 결정한 250MW_{th} AMBIDEXTER 표준 노심의 100% 출력상태에서 노심의 중앙선을 따라 반경 및 Z-축방향의 중성자속 분포와 단위 용융염 체적당 출력밀도 분포를 SQUID 코드로 계산하였다. 그림 7과 그림 8은 반경방향의 에너지군별 중성자속 분포와 출력 밀도를 나타낸다. 그림 7과 그림 8에서 씨드격자의 경우 흑연감속재에 의해 중성자가 연화되어 핵분열에 의해 열을 내며 블랭킷격자의 경우 씨드격자에 비해 경화가 됨을 확인할 수 있다.

그림 9에서는 Z-축 방향의 노심 중앙에서의 체적당 출력밀도 분포를 도시하였다. Z-축 방향으로는 구조적인 변화가 없기 때문에 코사인(cosine)형태의 분포를 나타낸다. Z-축 방향 중성자속분포는 출력밀도 분포와 동일한 모양으로 그림 10과 같다.

4. 결론

본 논문의 연구를 통하여 핵연료 순환 및 이종 격자의 특성을 고려하는 핵연료량 계산 방법을 도출하였으며 이를 바탕으로 핵적자활성 노심 설계요건을 만족하는 AMBIDEXTER 원자로 노심의 핵설계 최적화 모델을 도출하였다. 그 결과 80cm 두께의 흑연 반사체를 제외한 노심의 크기가 반경 165.9cm , 높이 401.2cm의 원통형 구조이며 733개의 씨드 격자가, 266개의 블랭킷 격자가 5개의 영역으로 나뉘어 배치되었다. 이때 유효 증배 계수와 전환율은 각각 1.0002와 1.001로 핵적자활성을 만족하였다. 이러한 노심에서 핵연료의 주입률은 ^{232}Th와 ^{nat}U의 양이 각각 220.0g/day와 64.0g/day이었고 총 핵연료 장전량은 37455471.4 g이다.(표 2)

5. 감사의 글

본 연구는 2002년도 과학기술부 주관 원자력 기초연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고서적

[1] 오세기, 정근모 외, “핵적 자정, 자활 능력을 갖춘 용융염 원자력 보일러 시스템의 개념 설계에 관한 연구”, 97원자력 기초 연구 과제, 과학 기술부, 1998
[2] 오세기, 정근모 외, “AMBIDEXTER 원자력 보일러 시스템의 노심 관리 및 반응도 효과 연구”, 98 원자력 기초 연구 과제, 과학기술부, 1999
[3] 조재국 외, “등가연소도 근사법을 이용한 AMBIDEXTER 노심격자의 핵적 자활성에 관한 연구”, 한국 에너지 공학회, 춘계 학술 발표 논문집, 1998
[4] 조재국 외, “AMBIDEXTER 원자로 노심의 핵적자활성 최적화 설계 연구”, 공학석사 학위 논문, 아주대학교, 1999
[5] 유영진 외, “MULTISAMS-HELIOS-SQUID 코드 체계를 이용한 AMBIDEXTER 노심의 물리적 모델링”, 한국 에너지 공학회 추계 학술 발표 논문집, 2000
[6] 윤용구, 신영화, 황선근, 손동성, “핵 재료 공학”, 한국 원자력공학회,1989
[7] 원성희 외, “SAMS : 가변 재처리 시간상수를 고려한 용융염핵연료dnjswkfh 평형핵종농도분석 코드”, 공학석사 학위 논문, 아주대학교, 1999
[8] 이영준 외, “핵비확산성이 개선된 AMBIDEXTER 변성노심의 핵적 자활성 평가 연구”, 한국 에너지 공학회 추계 학술 발표 논문집, 2001
[9] 이영준 외, “Th-U-Pu 혼합 용융염핵연료 AMBIDEXTER 원자로 시스템의 온라인 핵연료 용량 최적화 설계에 관한 연구”, 한국 에너지 공학회 추계 학술 발표 논문집, 2002
[10] User Manual HELIOS, Scandpower, 1995
[11] A. Daneri et al, SQUID-360, Sezione Energia Nuclear, 1967
[12] Samuel Glasstone, Alexander Sesonske, "Nuclaer Reactor Engineering", Chapman & Hall, 1994
[13] John R. Lamarsh, “Introduction to Nuclear Engineering", Addison Wesley, 1983
[14] Karl O. Ott, Robert J. Neuhold, “Nuclear Reactor Dynamics", American Nuclear

표 1 선행 연구와 본 연구 핵종 농도 비교

		present	previous	difference
Activation	^{6}Li	2.321E-02	2.379E-03	2.083E-02
	^{7}Li	6.994E+01	6.999E+01	-5.112E-02
	^{9}Be	1.599E+01	1.600E+01	-5.820E-03
Actinide	^{232}Th	1.099E+01	1.186E+01	-8.740E-01
	^{233}Pa	3.095E-04	1.753E-03	-1.444E-03
	^{239}Np	6.770E-05	2.920E-04	-2.243E-04
	^{233}U	3.596E-01	2.409E-01	1.187E-01
	^{234}U	2.100E-02	1.048E-02	1.052E-02
	^{235}U	1.888E-02	1.016E-02	8.724E-03
	^{238}U	2.619E+00	1.857E+00	7.619E-01
	^{239}Pu	3.165E-02	1.312E-02	1.854E-02
	^{240}Pu	7.435E-03	2.044E-03	5.391E-03
	^{241}Pu	6.027E-03	8.940E-04	5.133E-03
Fission Products	^{143}Nd	2.756E-04	1.291E-03	-1.015E-03
	^{145}Nd	2.668E-04	1.354E-03	-1.087E-03
	^{147}Pm	6.021E-05	3.810E-04	-3.208E-04
	^{149}Sm	3.442E-05	1.310E-05	2.132E-05
	^{151}Sm	1.835E-05	4.300E-05	-2.465E-05
	^{152}Sm	3.136E-05	1.640E-04	-1.326E-04
	^{155}Eu	2.994E-07	2.780E-06	-2.481E-06
	^{165}Ho	1.359E-04	7.440E-04	-6.081E-04

표 2 핵연료 최적화 연구 결과 요약

씨드 격자의 핵연료 반경		1.5cm	
노심 구조	모양	원통형	
	크기	반경	165.909cm
		높이	401.19cm
	영역(격자종류)	격자 개수 [개]	반경 [cm]
격자 배치	1영역(블랭킷)	1	5
	2영역(씨드)	217	77.5
	3영역(블랭킷)	110	95
	4영역(씨드)	516	152.5
	5영역(블랭킷)	155	165.9
	6영역(반사체)	-	245.9
반사체의 두께		80 cm	
k_{eff}		1.0001810	
C.R		1.001	
용융염 핵연료 용적량		37455471.4 g	

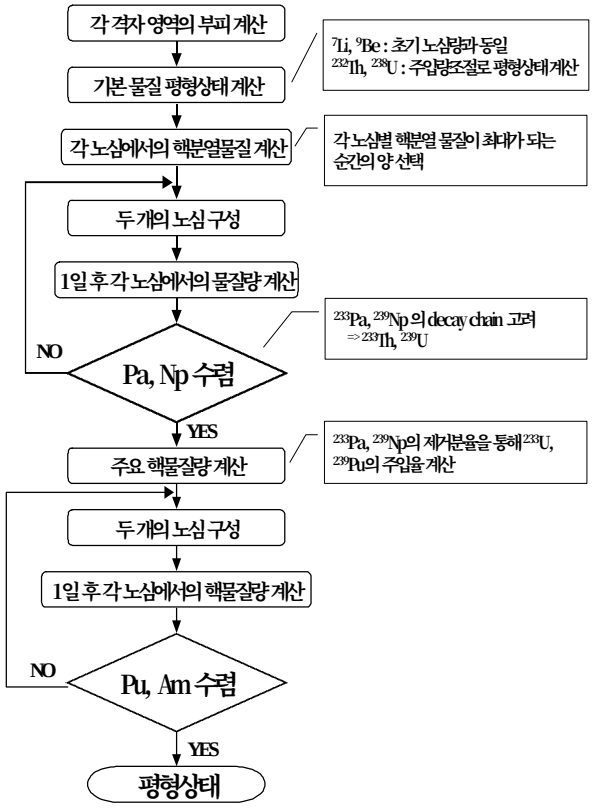

그림 1 평형상태에서의 핵종농도 도출 순서도

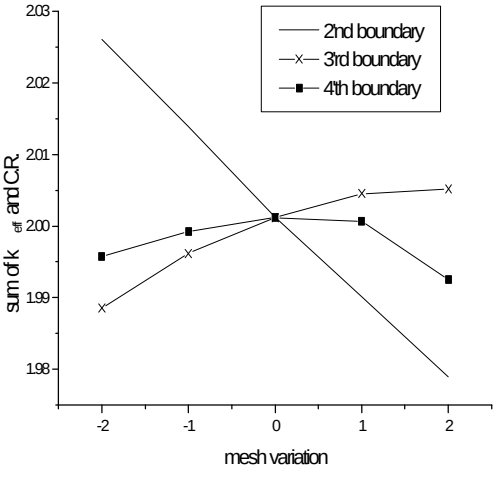

그림 2 격자 영역 변화에 따른 자활성 변수의 변화

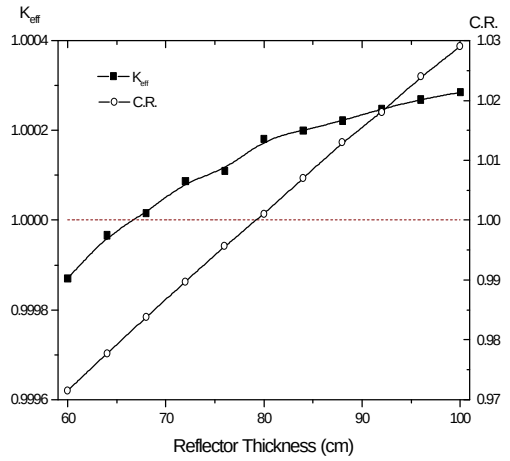

그림 3 반사체의 두께 변화에 따른 유효 증배계수와 전환율의 변화

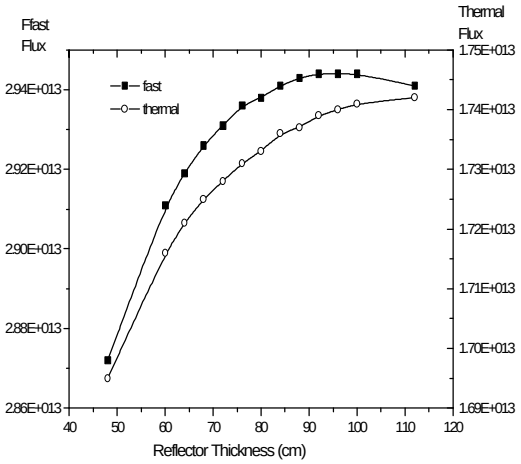

그림 4 반사체 두께에 따른 중성자속 변화

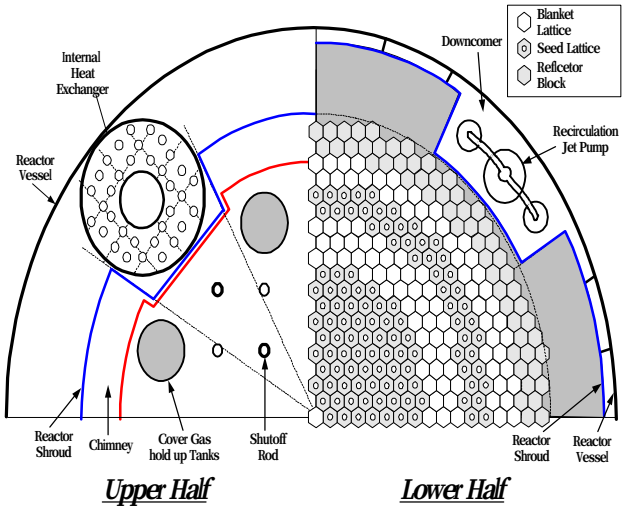

그림 5 AMBIDEXTER 표준 노심 1/2 단면도

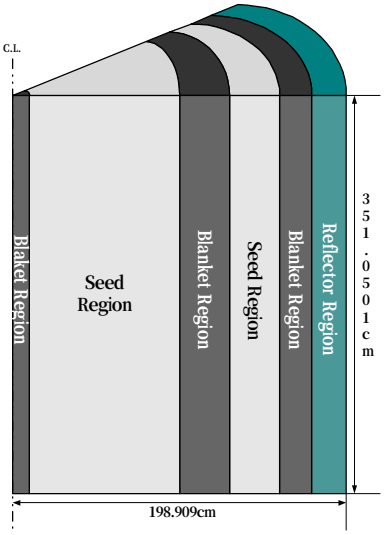

그림 6 AMBIDEXTER 원자로 1/8 입체도

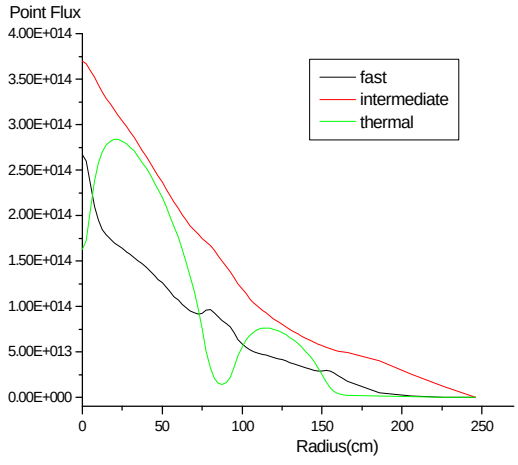

그림 7 반경반향 중성자속 분포

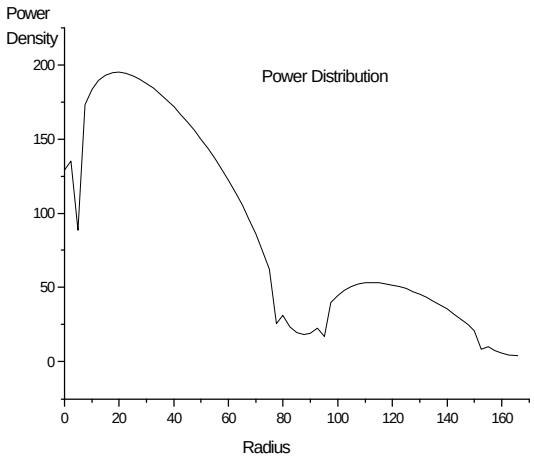

그림 8 반경방향 출력밀도 분포

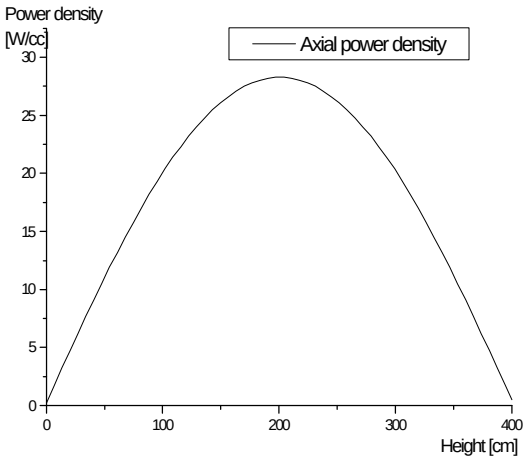

그림 9 Z-축 방향 체적당 출력분포

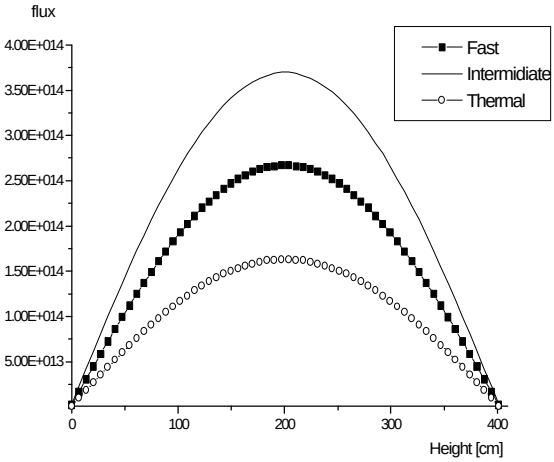

그림 10 Z-축 중성자 속 분포