2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

HYPER 노심의 핵연료 조성 변화에 대한 핵특성 영향 평가

Fuel Composition Effects on HYPER Core Characteristics

한 치 영, 김 용 남, 김 종 경
한양대학교
서울 성동구 행당동 17

박 원 석, 김 용 희
한국원자력연구소
대전 유성구 덕진동 150

요 약

현재 한국원자력연구소에서 연구/개발 중에 있는 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor) 원자로는 미임계 핵변환로로서 재처리 과정에서 핵종별로 분리하지 않고 초우란 핵종(TRU)을 일괄적으로 회수하는 고온화학법(pyrochemical process)의 핵종분리 기술과 연계되는 시스템을 고려하고 있다. 고온화학법의 분리 공정 후 추출물에는 소멸 대상인 TRU 외에도 우라늄 핵종이나 희토류 원소 등의 불순물이 상당량 함께 포함되어 추출되며 이 불순물의 함량도 공정의 정제 효율(refining efficiency)에 따라 크게 달라진다. 그러므로 고온화학법의 핵종분리 방법과 연계하여 TRU를 효율적으로 핵변환 시키고자 하는 목적의 원자로는 다양한 조성비를 가지는 핵연료를 장전하여 안전하게 재순환(recycling)시킬 수 있는 핵연료 장전 탄력성이 요구된다. 이와 관련하여 본 연구에서는 장전핵연료 조성 변화가 HYPER 노심 특성에 미치는 영향과 그 민감도를 분석하였다. 중성자 에너지 스펙트럼과 reaction balance를 분석하였고 아울러 도플러 계수, 냉각재 밀도 계수, 유효 지발 중성자 생성 분율과 평균 중성자 세대 시간 등의 동특성 변수에 미치는 영향을 평가하였다.

ABSTRACT

At KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute), a subcritical transmutation reactor is under development, named HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor). For the HYPER system, a pyrochemical process is being considered for fuel reprocessing. Separated from the separation process, the fuel contains not only TRU but also the considerable percentages of impurity such as uranium nuclides and lanthanides. The amount of these impurities depends on strongly the refining efficiency of the reprocessing and may change the core characteristics. This paper has analyzed fuel composition effects on the HYPER core characteristics.

Assuming various recovery factors of uranium and lanthanides, some dynamic parameters have been evaluated which are the neutron spectrum, the neutron reaction balance, the reactivity coefficients, the effective delayed neutron fraction, and the effective neutron lifetime.

1. 연구목적 및 배경

현재 세계 각국에서 연구 또는 개발 중인 핵변환로 개념은 사용후핵연료에 포함된 장수명 핵종을 완전 소멸, 또는 가능한 한 그 절대량을 최소로 줄이고자 함이 그 궁극적인 목표이다. 따라서 이러한 목적에 부합하기 위해서는 핵변환로심 내에서 연소되고 방출된 장수명핵종을 재회수, 가공, 성형을 거쳐 노내에 재장전, 연소 시켜나가는 순환연료주기가 도입될 것이다. 소멸 대상 핵종을 순환, 연소시켜 나가는 동안 노내에 투입되는 핵연료는, 기존의 비순환주기 개념의 동력로에 비하여 훨씬 다양한 조성비로 장전될 것이다. 더욱이 재처리 과정에서 핵종별로 분리하지 않고 초우란 핵종(TRU)을 일괄적으로 회수함으로써 핵확산 저항성을 확보할 수 있는 고온화학법(pyrochemical process)의 핵종분리 기술과 연계되는 시스템을 고려한다면, 분리 공정 후 추출물에는 소멸 대상인 TRU 외에도 희토류 원소 등의 불순물이 상당량 함께 포함되어 추출되며, 이 불순물의 함량도 공정의 정제 효율(refining efficiency)에 따라 크게 달라진다. 아울러, 사용후핵연료로부터의 우라늄 핵종 분리 공정도 완전무결하지 못하여 달성가능한 회수율에 따라 TRU 연료 안에는 우라늄 핵종이 다소 포함될 것이다. 이들 란탄계열 핵종이나 U-238 과 같은 핵종 등은 TRU 연료와 함께 섞여 핵변환로에 장전 되었을 때 노심 내 중성자 스펙트럼이나 반응도 계수 등 제반 노심 특성에 적지 않은 영향을 초래할 수 있다. 그러므로 고온화학법의 핵종분리 방법과 연계하여 TRU를 효율적으로 핵변환시키고자 하는 목적의 원자로는 다양한 조성비를 가지는 핵연료를 장전하여 안전하게 재순환(recycling)시킬 수 있는 핵연료 장전 탄력성이 요구된다.

따라서 본 논문은 고온화학법의 핵종분리 방법과 연계하여 TRU를 효율적으로 소멸, 처리할 수 있는 핵변환로 개념을 정립하기 위한 사전연구로서 현재 한국원자력연구소에서 연구, 개발 중에 있는 미임계 핵변환로인 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor) 노심[1]에 대하여 장전핵연료 조성 변화가 노심 특성에 미치는 영향과 그 민감도를 분석하였다.

2. 평가 노심 개요

HYPER 노심의 기하학적 데이타를 그대로 사용하였으며 여기서 자세한 설명은 생략하고 다만 결과 해석에 필요한 주요 사항만을 기술하겠다. HYPER 노심의 출력등급 1000MWth, 미임계도 0.97의 가속기 구동 미임계로로서 납-비스무트 냉각 방식을 취하고 있다. 노심 중앙에서부터 반경방향으로 순서대로 납-비스무트 표적, 활성노심, 납-비스무트 반사체, HT-9 차폐체 영역으로 구성되어 있으며, 활성 노심의 유효높이(active height)는 120cm이다. 핵연료집합체의 duct pitch는 19.96 cm, 핵연료봉의 P/D (Pitch -to- Diameter)는 1.5이다. 노심의 상, 하부에 위치하는 반사체의 두께는 본 논문에서 임의로 120cm로 가정하였다. HYPER 노심은 TRU 핵연료 집합체 이외에 핵분열 생성물 핵종을 연소 시키기

위한 핵분열생성물 집합체 6개를 별도로 구성하고 있는데 본 연구에서는 제외시키고 활성 노심 전영역에 모두 TRU 핵연료 집합체를 균일 장전하였다. 핵연료의 화학적 형태는 분산형과 금속 연료 두 가지가 고려 중에 있으나 본 연구에서는 TRU 와 Zr으로만 구성된 금속 연료형태를 취하였으며 Smeared Density는 75%로 계산하였다.

3. 평가 방법 및 사항

미임계 노심의 정상 상태를 유지하기 위한 외부중성자원은 블랑켓 영역에서의 핵분열 중성자의 스펙트럼을 간섭하여 제반 노심 특성에 영향을 미칠 수 있다[2]. 그 영향의 정도는 미임계도에 크게 상관하지만, 동일한 미임계도에 대해서도 외부선원의 공간 및 스펙트럼 분포나 블랑켓 설계 사양에 따라 커질 수도 작아질 수도 있으며 노심 설계 인자가 외부선원에 의해 영향을 받는 방향 또한 그러하다. 즉, 외부선원의 개입함으로써 반응도 계수 등이 부호가 역전될 수 도 있다는 것이다. 그러므로 HYPER 노심 특성 평가는 외부 선원을 고려한 고정선원항 모드로 계산되어야 할 것이나 현재 HYPER 노심의 표적 설계의 방향이 확정되지 않은 상태에서 임의 가정하는 것은 오히려 그 평가의 의미를 퇴색시킬 수 있다. 따라서 외부선원에 대한 간섭 영향 평가는 추후 연구사항으로 미루고 본 논문에서는 외부 선원을 배제하고 동시에 여타 기하학적 데이타 등의 설계 인자들을 고정한 상태로 다만 핵연료 조성만 변화 시키면서 노심 인자들을 고유치 모드로 계산하였다.

핵변환로에서 연소되고 방출된 후 다시 분리 수거된 감손 TRU는 가압경수로 사용후핵연료로부터 회수된 순수 TRU와 혼합 장전되는 재순환 주기 개념에서는 매주기 장전되는 TRU 연료 내 핵종 구성비가 달라질 것이다. 그러나 이는 핵변환로의 장전 방식이나 순환 연소 방안에 크게 종속되어 그 조성을 합리적으로 가정하기가 여의치 않으므로 본 연구에서는 일단 제외, 추후 연구 사항으로 남기고 다만 우라늄 핵종과 란탄 계열 정제 효율에 따른 연료 조성의 다양성 효과만을 평가하였다. 핵변환로심에 장전되는 가압경수로에서 연소도 35,000 MWD/MTU로 방출된 후 10년 냉각된 것으로 고려하였으며 이 때 핵연료 조성은 연소계산 코드 ORIGEN2.1을 사용하여 계산하였다. 표1에 계산된 핵연료 조성비를 수록하였다. 사용후 핵연료로부터의 우라늄 정제효율은 대략 99.9 % 전후일 것으로 예상하고있으며, 더욱이 TRU 핵변환 주 목적인 HYPER 노심에 우라늄 핵종이 다량 함유된 연료를 장전할 경우는 거의 전무하다고 보아진다. 그러나 우라늄 함유율이 높아지면 KALIMER와 같은 증식로 성격의 고속로의 노심 특성과 비슷해져 갈 것으로 예상하고 이를 확인하고자 하였다. 아울러 핵원료성 (fertile) 물질이 거의 없는 핵연료심의 경우 도플러효과나 유효지발 중성자분율이 너무 작고 평균중성자 세대시간이 너무 짧아 임계 개념의 핵변환 시스템의 경우 불가피하게 상당량의 핵원료성 물질을 첨가하는 안을 고려하고 있는 현재 연구/개발 상황에 부응하여 우라늄 회수율을 100%에서 95%에 이르기까지 그 함유율을 높힌 경우를 추가 계산하였다. 란탄나이드의 경우는 그 정제 효율이 20% 전후일 것으로 예상되나 핵주기 정책의 한계를 가지는 우리나라의 정치적 상황에서는 어쩌면 란탄계열 핵종들마저도 TRU 핵종들과 분리할 수 없는 경우를 고려하는 것이 필요하다고 판단하였다. 따라서 란탄나이드 정제효율은 0.0%에서 100%까지 광범위하게 고려하였다. 우라늄과 란탄나이드의 회수율을

상기 범위 내에서 각각 독립적으로 임의 선정하여 TRU 핵연료와 혼합한 9가지 경우에 대하여 노심 특성 변화를 고찰하였다. 선정된 9가지 경우에 대한 연료 조성과 핵연료 장전량은 표2와 3에 정리하였다. 각 경우의 핵연료 조성은 TRU 그룹, 우라늄 핵종 그룹, 란탄나이드 그룹별로 각 그룹내 핵종의 조성비율을 일정하게 놓고 다만 우라늄 핵종이나 란탄 핵종의 함유율 변화에 따라 미임계도 0.97을 맞추기 위해 TRU를 첨가하는 방식으로 산정되었다. 이 때 우라늄이나 란탄핵종 함유율이 증가할수록 중성자포획(parasitic capture)이 증가하므로 이로 인한 반응도감손을 보상하기 위하여 TRU 장전량도 늘어나 핵연료 농축도는 증가함을 알 수 있다. 먼저 정상상태(normal operation condition)에서의 중성자 에너지 스펙트럼과 reaction balance를 분석하였고 아울러 도플러 계수, 냉각재 밀도 계수, 유효 지발 중성자 생성 분율과 평균 중성자 세대 시간 등의 동특성 변수에 미치는 영향을 평가하였다.

모든 계산은 KALIMER (Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 개발 팀에서 노심 설계용으로 개발, 사용 중인 K-CORE[3] 시스템을 이용하였다. K-CORE는 TRNASX/TWODANT/TRANSX/DIF3D /BETA-K의 순차적인 계산 절차를 따르고 있으며 이 때 적용된 중성자 에너지 그룹 수는 각각 80, 80, 9, 9, 9이다. 1997년 한국원자력연구소 핵자료평가팀에서 고속로 해석 목적으로 JEF-2.2에 기반을 두고 생산한 중성자 80군, 광자 24군 핵자료집, KAFAX/F22[4]를 이용하였으며 1997년 초판에 포함되지 않은 란탄 계열 핵종들에 대해서는 핵자료평가팀에 협조 의뢰하여 추가, 계산하였다. DIF3d 코드[5]를 이용한 노심 계산 시 노심 중앙 상부에 양성자 빔이 입사하는 진공영역 등의 특이 영역의 존재로 인한 확산 근사의 오차를 유발할 가능성[6]을 배제하기 위하여 대신 그 하부 표적 영역의 물질을 1/10 밀도로 추가로 삽입하여 계산하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 중성자 스펙트럼 및 Reaction Balance

범위 내에서 임의 선정된 우라늄 회수율에 따른 핵연료 조성 5가지 경우에 대한 중성자 스펙트럼과 reaction rates balance를 계산하여 그 결과를 표 4에 정리하였다. 중성자 에너지 스펙트럼을 상세히 그래프로 표시하지 않고 활성노심 내 그룹별 중성자 수밀도 가중한 평균에너지를 추산하여 표의 맨 마지막 줄에 간단히 표기하였다. 우라늄 함량이 증가할수록 스펙트럼은 경화되고 있음을 유추할 수 있다. 우라늄 함량의 증가에 따라 U^{238}핵종의 높은 열중성자 흡수 단면적에 의해 스펙트럼은 경화되고 있다. 0.97의 미임계도일지라도 우라늄 함량이 증가할수록 무한증배계수는 감소하고 비누설확율은 점차 증가하고 있음을 볼 수 있다. 표 2의 장전량 자료에서 보듯이 중성자 포획의 주범인 U^{238} 핵종의 함량이 증가함에 따라 동시에 핵분열성(fissionalble) 물질인 TRU 함량이 증가함에도 불구하고

무한증배계수(k_{inf}) 값이 감소하는 것은 우라늄 함량의 증가 비율이 TRU 함량의 증가 비율보다 높기 때문이다. 아울러 이 우라늄 함량의 증가는 곧 전체적으로 중성자 흡수율(포획+핵분열)을 높이게 된다. 즉, 우라늄 함량이 증가함에 따라 스펙트럼 경화로 인하여 평균자유행정이 길어져 중성자 누수율이 증가할 것이라는 기대와는 달리 그 경합에서 중성자 흡수율의 증가가 우위를 점하여 P_{NL} 값은

증가하게 된다.

란탄나이드 회수율(이하 LR; Lanthanides Recovery) 3가지 경우에 대해서도 동일한 형식으로 표 5에 그 결과를 보여주고 있다. 란탄 계열 핵종의 열중성자 포획이 산란 효과보다 우선하여 U^{238} 핵종과 같은 역할을 하고 있으므로 전체적인 경향은 UR(Uranium Recovery)의 경우와 비슷하다. 즉 란타나이드 함유율 증가에 따라 평균에너지는 증가하고 있고 무한증배계수는 감소 비누설 확률은 증가하고 있다.

4.2 도플러 효과

활성노심 영역의 온도를 980K에서 1280K로 상승시켜 우라늄과 란탄나이드의 함량 변화에 대한 노심 계산을 수행하였으며, 도플러 효과에 의한 반응도 변화 고찰 결과를 표 6과 7에 각각 수록하였다. 우라늄 함량이 증가함에 따라 음의 값을 갖는 도플러 계수 절대값은 기대와는 달리 감소하고 있다. 이는 우라늄 함량의 증가에 대해서 온도 상승으로 인한 Doppler Broadening 중성자 흡수율 증가 정도가 감소하는 반면에 핵분열에 의한 중성자 생성율 감소 정도가 둔화되고 누수율 증가 정도 또한 감소하기 때문으로 해석된다. 다시 말하면 온도 상승으로 인한 도플러 효과 정도는 우라늄 함량이 증가할수록 상대적으로 적음을 나타내고 있는 것으로 무한증배계수의 감소 정도가 이를 잘 설명하고 있다.

란탄나이드 함량 변화에 대한 도플러 효과는 우라늄 함량 변화의 경우와 같은 경향을 나타내고 있다. 따라서 우라늄 및 란탄나이드 정제 효율이 떨어질 경우 도플러 효과에 의한 고유 음의 반응도 정도는 목표로 하는 값보다 양화될 수 있음에 주목해야 한다.

4.3 냉각재 온도 효과

우라늄 회수율과 란탄나이드 회수율의 변화에 따른 냉각재 밀도 계수의 계산 결과를 표 8과 9에 각각 나타내었다. 표시된 계산 수치는 냉각수 온도 상승효과를 평가하기 위하여 전 노심 영역의 냉각재 밀도를 균일하게 5% 감소시켜 계산한 반응도 변화량을 밀도 감소분에 해당하는 온도 변화량으로 나눈 결과이다. 표의 결과를 보면 우선, 우라늄과 란탄나이드가 100% 회수되는 경우를 가정한 reference 노심의 경우 냉각재 밀도 계수는 음의 값을 보이고 있음을 알 수 있으며 이는 냉각수 온도 상승에 대한 반응도 궤환에 관한 한 HYPER 기준 노심은 안정성을 확보하고 있다고 판단할 수 있다. 냉각재 물질이 줄어듦에 따라 감속효과가 감소하여 스펙트럼이 경화 되는 데 그 주요 원인이 있다. 스펙트럼 경화에 기인하여 중성자 누수 현상이 증가함에도 불구하고 경화된 스펙트럼의 단위 핵분열당 생성 중성자 수 증가에 의한 핵분열 중성자 생성율 증가 효과가 상대적으로 커서 무한 증배계수는 증가하고 있다. 그러나 중성자 누수율 증가와 흡수율 감소에 의한 비누설확률 감소 효과에 비기지 못하여 전체적으로 reference 노심은 음의 냉각재 밀도를 보이고 있는 것이다. 전 절의 핵연료 온도 계수와 비교해보면, 경우 우라늄 함량 증가에 따른 핵연료 온도계수의 양화 원인은 핵분열 중성자 생성율의 감소에 의한 것이나 냉각재 온도 효과의 양화 원인은 흡수율 감소가 그 주범인 것이다.

우라늄 회수율에 따른 밀도 계수 변화 경향을 보면 우라늄 함량이 증가함에 따라 냉각재 밀도계수는 양화 되고 있으며 특히 우라늄 회수율 99.9 ~ 100.0%에서는 그 변화 정도가 매우 큰 것으로 나타났다.

또한 우라늄 회수율이 약 98.0 정도에 이르면 양의 값으로 전환되는 것을 알 수 있다. 좀 더 살펴보면, 우라늄 함량이 증가함에 따라 노심 내 냉각재 밀도 감소로 인한 중성자 누수율 증가 정도는 감소하는 반면, 중성자 흡수율 감소 정도는 증가하면서 핵분열 중성자 생성율의 증가폭 또한 증가하는 것을 알 수 있다. U^{238} 핵종의 열중성자 흡수단면적이 그 원인이다. 중성자 흡수와 경합하는 누수현상이 상대적으로 감소하여 비누설확률 감소 정도는 감소시키고 있다. U^{238} 핵종의 높은 열중성자 흡수 단면적에 의해 스펙트럼 경화가 가속되어 단위 흡수 중성자 당 핵분열 생성 중성자 수의 증가, 무한증배계수 증가 정도를 증가시킴으로써, 우라늄 회수율이 98.0%까지 증가하면 냉각재 밀도 계수는 급기야 양의 값에 이르고 있다.

란탄나이드 회수율의 경우도 우라늄 회수율의 경우와 유사한 경향을 띠고 있다. 다만 우라늄보다 중성자 포획 단면적이 작음으로써, 같은 양의 TRU 장전량 증가에 비교해 볼 때 (예를 들면 UR-99.0%와 LR-0.0%) 그 전체적인 냉각재 밀도 계수 양화 정도의 폭이 우라늄의 경우보다 작을 뿐이다.

.

4.4 유효지발중성자 생성분율 및 평균중성 세대시간

기타 동특성 인자로서 유효지발중성자분율(effective delayed neutron fraction, b_{eff})과 유효중성자수명 (effective neutron lifetime, l_{eff}), 의 값을 표 10과 11에 수록하였다.

지발중성자는 스펙트럼이 경화될수록 그 생성 분율이 감소한다. 그러므로 란탄나이드 함량의 증가에 따라 유효지발중성자분율은 스펙트럼 경화 효과로 감소한다. 그러나 UR의 경우, 유효 지발중성자 분율이 큰 U-238 함량의 증가 효과 영향이 크므로 그 값은 오히려 증가하고 있다.

평균중성자수명은 우라늄 또는 란탄나이드 함량이 증가함에 따라 중성자 흡수율이 증가한데다 스펙트럼이 경화되어 평균 속도까지 증가하여 그 수명은 점차 감소한다. 게다가 전 절의 결과 표에서 보듯이 유라늄이나 란탄나이드 함량 증가에 따라 중성자 누수율이 줄어드는 현상도 유효중성자 수명을 더욱 감소시킨다. 여기서도 란탄나이드의 경우가 우라늄의 경우보다는 수명 감소 효과가 약간 작다. 따라서 란탄나이드 함량이 증가하면 앞 절에서 언급한 도플러 계수, 냉각재 밀도계수의 음화 정도가 감소할 뿐만 아니라 유효지발중성자분율이 감소하게 되므로 안전성 측면에서 미임계 노심의 반응도 여유는 다소 감소한다고 할 수 있다.

5. 결론 및 제언

미임계 TRU 핵변환로인 HYPER 노심에 대하여 장전 핵연료 조성 변화에 따른 동특성 인자의 민감도 분석을 수행하였다. 얻어진 결과들로부터 내릴 수 있는 결론은 다음과 같다.

- HYPER 노심은 기본적으로 핵연료 온도나 냉각재 온도에 따른 반응도 궤환이 음의 효과를 가진다.
- 우라늄이나 란탄나이드 등의 불순물 함량이 증가하게 되면 상기 온도 효과에 대한 반응도 계수가 양화되어 시스템의 안정성이 줄어든다. 특히 우라늄의 함량이 어느 이상 증가하게 되면 냉각재 밀도 계수는 양의 값을 가질 수 있다.

- 유효중성자수명이나 유효지발중성자분율 또한 불순물 증가에 따라 감소함으로써 안전성 측면에서의 반응도 여유를 감소시킨다. 그러나 우라늄 함량이 증가할 경우, 전체적인 유효지발 중성자 분율의 값은 증가하여 출력 제어의 여유를 증가시킬 수 있다.

본 연구는 외부 중성자원의 스펙트럼 간섭을 배제한 고유치 모드 해석이다. 따라서 미임계 노심인 HYPER 노심 특성에 대한 의미있는 정보를 얻기 위해서는 외부선원에 대한 민감도 분석을 수행하면서 동시에 고정선원항 모드 계산으로 모든 평가가 재해석 되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발중장기계획사업의 일환으로 한국원자력연구소의 지원에 의해서 수행되었으며 일부는 한국과학재단 지정 방사선안전신기술연구센터의 지원을 받았음.

참고 문헌

1. 박원석 외, "HYPER 시스템 설계연구," KAERI/TR-1316/99, KAERI, 1999.
2. 김용남 외, "임계 및 미임계 TRU 핵변환 노심의 핵특성 비교 평가," *2001 춘계 학술논문발표집*, 한국원자력학회, 2001.
3. 김영철 외, "액체금속로 요소기술 개발," KAERI/RR-17173/96, KAERI, 1997.
4. 김정도 외, "KAFAX-F22: JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증," KAERI/TR/97, KAERI, 1997
5. R. D. Lawrence, "The DIF3D Nodal Neutronics Option for Two-, and Three-Dimensional Diffusion Theory Calculations in Hexagonal Geometry," ANL-83-1, ANL, 1983.
6. 김용남 외, "가속기 구동 미임계 핵변환 노심 계산에 대한 중성자 확산 근사의 타당성 평가," *2000 춘계 학술논문발표집*, 한국원자력학회, 2000.

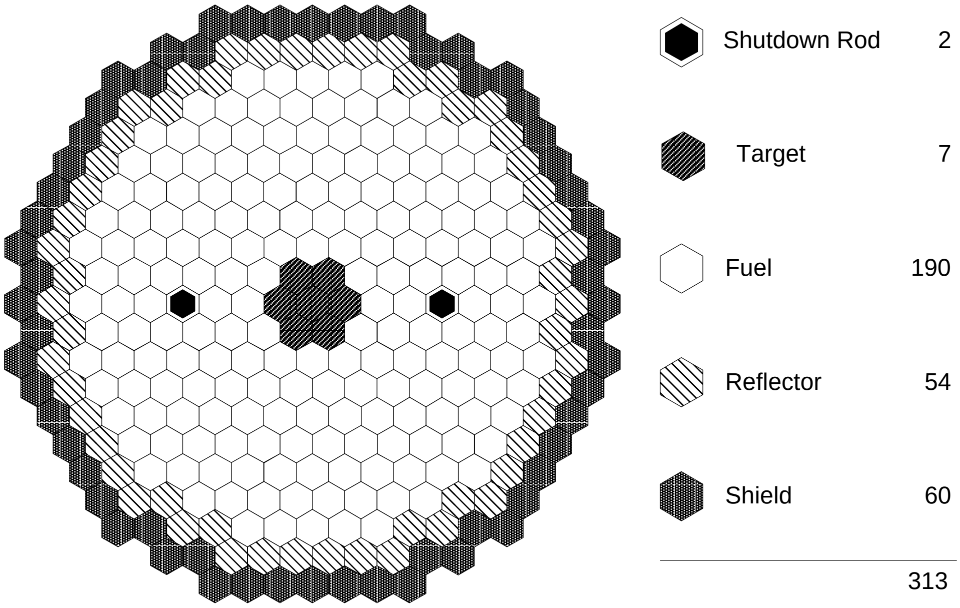

그림 1. 평가 노심의 Layout

표 1. 사용후핵연료 내 주요 핵종의 존재량

	Nuclides	Weight (g) [a)]	w/o [b)]
Uranium	U-238	941,400.0	97.89%
TRU	Np-237	524.3	0.05%
	Pu-238	145.1	0.02%
	Pu-239	5,353.0	0.56%
	Pu-240	2,213.0	0.23%
	Pu-241	755.9	0.08%
	Pu-242	462.3	0.05%
	Am-241	488.0	0.05%
	Am-243	91.9	0.01%
	Cm-244	18.8	0.00%
	La-139	1,295.0	0.13%
	Ce-140	1,326.0	0.14%
	Ce-142	1,202.0	0.12%
	Pr-141	1,188.0	0.12%
Lanthanides	Nd-143	835.0	0.09%
	Nd-144	1,408.0	0.15%
	Nd-145	714.9	0.07%
	Nd-146	731.1	0.08%
	Nd-148	392.4	0.04%
	Nd-150	184.5	0.02%
	Sm-147	194.7	0.02%
	Sm-148	167.7	0.02%
	Sm-150	344.8	0.04%
	Sm-152	137.5	0.01%
	Eu-153	126.8	0.01%

a) 3.5w/o인 PWR 핵연료를 35 GWD/MTU까지 연소시킨 후 10년을 냉각하였을 때 핵연료 1 MT에 함유된 핵종들의 무게
b) 주요 핵종들의 총 무게에 대한 w/o

표 2. 우라늄 회수율에 따른 HYPER 노심의 핵연료 조성 및 장전량

Uranium Recovery [a)]	Fuel Composition	Fuel Loadings (kg)	
		TRU	Uranium
Reference	16.5%TRU – 83.5%Zr	1876.6	0.0
UR [b)] – 99.9%	17.9%(TRU+U) – 82.1%Zr	1909.9	178.9
UR – 99.8%	19.4%(TRU+U) – 80.6%Zr	1939.8	363.3
UR – 99.0%	30.4%(TRU+U) – 69.6%Zr	2158.0	2021.0
UR – 97.0%	56.0%(TRU+U) – 44.0%Zr	2644.6	7429.9
UR – 95.0%	80.0%(TRU+U) – 20.0%Zr	3099.5	14513.2

a) 사용후핵연료의 핵종분리 방법에 의한 우라늄 회수율
b) Uranium Recovery Rate

표 3. **란탄나이드 회수율에 따른** HYPER **노심의 핵연료 조성 및 장전량**

Lanthanides Recovery [a]	Fuel Composition	Fuel Loadings (kg)	
		TRU	Lanthanides
Reference	16.5%TRU – 83.5%Zr	1876.6	0.0
LR [b] – 80.0%	20.3%(TRU+LA[c]) – 79.7%Zr	1939.1	395.4
LR – 50.0%	26.4%(TRU+LA) – 73.6%Zr	2022.6	1031.1
LR – 0.0%	37.2%(TRU+LA) – 62.8%Zr	2147.5	2189.5

a) 사용후핵연료의 핵종분리 방법에 의한 란탄나이드 회수율
b) Lanthanides Recovery Rate
c) Lanthanides

표 4. **우라늄 회수율에 따른** HYPER **노심의 핵특성 변화**

Uranium Recovery	k_{eff}	Leakage Rate	Absorption Rate	(n, 2n) Prod. Rate	Fission Prod. Rate	k_{inf} (=hf)	P_{NL} [a]	Mean E. (keV)
Reference	0.96998	1.76013E+18	1.34495E+19	3.66667E+16	1.47175E+19	1.09727	0.88400	75.07
UR– 99.9%	0.97002	1.74007E+18	1.34667E+19	3.66667E+16	1.47153E+19	1.09570	0.88530	76.56
UR– 99.8%	0.97006	1.72320E+18	1.34833E+19	3.66667E+16	1.47155E+19	1.09437	0.88641	77.87
UR– 99.0%	0.97002	1.60518E+18	1.36014E+19	3.71667E+16	1.47145E+19	1.08481	0.89418	87.66
UR– 97.0%	0.97000	1.38329E+18	1.38149E+19	3.93333E+16	1.47040E+19	1.06740	0.90875	110.08
UR– 95.0%	0.97003	1.22492E+18	1.39612E+19	4.28333E+16	1.46895E+19	1.05540	0.91911	132.16

a) Non-Leakage Probability

표 5. **란탄나이드 회수율에 따른** HYPER **노심의 핵특성 변화**

Lanthanides Recovery	k_{eff}	Leakage Rate	Absorption Rate	(n, 2n) Prod. Rate	Fission Prod. Rate	k_{inf} (=hf)	P_{NL}	Mean E. (keV)
Reference	0.96998	1.76013E+18	1.34495E+19	3.66667E+16	1.47175E+19	1.09727	0.88400	75.07
LR– 80.0%	0.97002	1.74953E+18	1.34884E+19	3.70000E+16	1.47452E+19	1.09618	0.88491	78.71
LR– 50.0%	0.97004	1.73958E+18	1.35408E+19	3.76667E+16	1.47861E+19	1.09501	0.88587	83.79
LR– 0.0%	0.97005	1.72770E+18	1.36153E+19	3.86667E+16	1.48459E+19	1.09349	0.88711	91.88

표 6. 우라늄 회수율에 따른 HYPER 노심의 핵연료 온도계수 변화

	k_{eff}	*FTC* [a] (pcm/K)	Leakage Rate	Absorption Rate	(n, 2n) Prod. Rate	Fission Prod. Rate	k_{inf} (=*hf*)	P_{NL}
Reference [b]	0.96863	-0.47912	1.76165E+18	1.34651E+19	3.68333E+16	1.47135E+19	1.09571	0.88402
Difference [c]	-0.00135		1.51667E+15	1.55333E+16	1.66667E+14	-4.00772E+15	-0.00155	0.00003
UR– 99.9%	0.96888	-0.40551	1.74148E+18	1.34818E+19	3.68333E+16	1.47139E+19	1.09438	0.88533
Difference	-0.00114		1.41667E+15	1.50667E+16	1.66667E+14	-1.40644E+15	-0.00132	0.00003
UR– 99.8%	0.96893	-0.39848	1.72453E+18	1.34982E+19	3.66667E+16	1.47142E+19	1.09306	0.88644
Difference	-0.00112		1.33333E+15	1.48667E+16	8.19200E+03	-1.36427E+15	-0.00131	0.00003
UR– 99.0%	0.96895	-0.37919	1.60640E+18	1.36156E+19	3.71667E+16	1.47133E+19	1.08357	0.89421
Difference	-0.00107		1.22500E+15	1.42500E+16	8.19200E+03	-1.26485E+15	-0.00123	0.00003
UR– 97.0%	0.96896	-0.36868	1.38419E+18	1.38291E+19	3.95000E+16	1.47029E+19	1.06623	0.90878
Difference	-0.00104		9.01667E+14	1.42500E+16	1.66667E+14	-1.12732E+15	-0.00117	0.00003
UR– 95.0%	0.96907	-0.34173	1.22556E+18	1.39746E+19	4.28333E+16	1.46885E+19	1.05432	0.91914
Difference	-0.00096		6.41667E+14	1.34000E+16	-8.19200E+03	-1.01042E+15	-0.00109	0.00003

a) Fuel Temperature Coefficient ($d\rho/dT$)
b) 1280K for Active Core
c) Difference from Reference (980K for Active Core)

표 7. 란탄나이드 회수율에 따른 HYPER 노심의 핵연료 온도계수 변화

	k_{eff}	*FTC* (pcm/K)	Leakage Rate	Absorption Rate	(n, 2n) Prod. Rate	Fission Prod. Rate	k_{inf} (=*hf*)	P_{NL}
Reference	0.96863	-0.47912	1.76165E+18	1.34651E+19	3.68333E+16	1.47135E+19	1.09571	0.88402
Difference	-0.00135		1.51667E+15	1.55333E+16	1.66667E+14	-4.00772E+15	-0.00155	0.00003
LR– 80.0%	0.96896	-0.37373	1.75085E+18	1.35023E+19	3.70000E+16	1.47438E+19	1.09495	0.88493
Difference	-0.00105		1.31667E+15	1.38667E+16	0.00000E+00	-1.35521E+15	-0.00123	0.00003
LR– 50.0%	0.96912	-0.32589	1.74068E+18	1.35529E+19	3.76667E+16	1.47849E+19	1.09394	0.88590
Difference	-0.00092		1.10000E+15	1.21333E+16	0.00000E+00	-1.20104E+15	-0.00107	0.00003
LR– 0.0%	0.96927	-0.27420	1.72860E+18	1.36256E+19	3.88333E+16	1.48449E+19	1.09260	0.88713
Difference	-0.00077		9.00000E+14	1.03000E+16	1.66667E+14	-9.97100E+14	-0.00089	0.00002

표 8. 우라늄 회수율에 따른 HYPER 노심의 냉각재 밀도계수 변화

	k_{eff}	*CDC* [a] (pcm/K)	Leakage Rate	Absorption Rate	(n, 2n) Prod. Rate	Fission Prod. Rate	k_{inf} (=*hf*)	P_{NL}
Reference [b]	0.96771	-0.70498	1.87583E+18	1.33724E+19	3.63333E+16	1.47207E+19	1.10383	0.87669
Difference [c]	-0.00227		1.15700E+17	-7.71667E+16	-3.33333E+14	3.20507E+15	0.00656	-0.00731
UR– 99.9%	0.96810	-0.59817	1.85398E+18	1.33887E+19	3.63333E+16	1.47212E+19	1.10252	0.87808
Difference	-0.00193		1.13917E+17	-7.80333E+16	-3.33333E+14	5.86499E+15	0.00682	-0.00722
UR– 99.8%	0.96828	-0.55308	1.83555E+18	1.34046E+19	3.63333E+16	1.47215E+19	1.10123	0.87927
Difference	-0.00178		1.12350E+17	-7.86833E+16	-3.33333E+14	5.93911E+15	0.00686	-0.00714
UR– 99.0%	0.96915	-0.26847	1.70728E+18	1.35190E+19	3.68333E+16	1.47208E+19	1.09188	0.88760
Difference	-0.00087		1.02105E+17	-8.24000E+16	-3.33333E+14	6.31551E+15	0.00707	-0.00658
UR– 97.0%	0.97044	0.13546	1.46747E+18	1.37304E+19	3.90000E+16	1.47107E+19	1.07445	0.90319
Difference	0.00044		8.41817E+16	-8.44833E+16	-3.33333E+14	6.63016E+15	0.00704	-0.00555
UR– 95.0%	0.97121	0.36690	1.29723E+18	1.38771E+19	4.25000E+16	1.46963E+19	1.06228	0.91427
Difference	0.00119		7.23117E+16	-8.40833E+16	-3.33333E+14	6.75258E+15	0.00688	-0.00484

a) Coolant Temperature Coefficient ($d\rho/dT$, dT = 343K)
b) 5% Voided System
c) Difference from Reference (Flooded System)

표 9. 란탄나이드 회수율에 따른 HYPER 노심의 냉각재 밀도계수 변화

	k_{eff}	*CDC* (pcm/K)	Leakage Rate	Absorption Rate	(n, 2n) Prod. Rate	Fission Prod. Rate	k_{inf} (=*hf*)	P_{NL}
Reference	0.96771	-0.70498	1.87583E+18	1.33724E+19	3.63333E+16	1.47207E+19	1.10383	0.87669
Difference	-0.00227		1.15700E+17	-7.71667E+16	-3.33333E+14	3.20507E+15	0.00656	-0.00731
LR– 80.0%	0.96816	-0.57837	1.86402E+18	1.34088E+19	3.66667E+16	1.47510E+19	1.10311	0.87766
Difference	-0.00186		1.14483E+17	-7.96000E+16	-3.33333E+14	5.80722E+15	0.00693	-0.00725
LR– 50.0%	0.96845	-0.49320	1.85270E+18	1.34583E+19	3.73333E+16	1.47919E+19	1.10215	0.87870
Difference	-0.00159		1.13117E+17	-8.24833E+16	-3.33333E+14	5.79776E+15	0.00713	-0.00717
LR– 0.0%	0.96880	-0.38855	1.83933E+18	1.35291E+19	3.83333E+16	1.48517E+19	1.10088	0.88002
Difference	-0.00125		1.11633E+17	-8.62500E+16	-3.33333E+14	5.77825E+15	0.00739	-0.00709

표 10. **우라늄 회수율에 따른** HYPER **노심의 유효지발중성자분율 및 유효중성자수명 변화**

Uranium Recovery	b_{eff}	l_{eff} (m sec)
Reference	0.0027986	11.5802
UR – 99.9%	0.0028144	11.2729
UR – 99.8%	0.0028308	11.0132
UR – 99.0%	0.0029731	9.4050
UR – 97.0%	0.0033899	6.9144
UR – 95.0%	0.0038612	5.4296

표 11. **란탄나이드 회수율에 따른** HYPER **노심의 유효지발중성자분율 및 유효중성자수명 변화**

Uranium Recovery	b_{eff}	l_{eff} (m sec)
Reference	0.0027986	11.5802
LR – 80.0%	0.0027953	11.0600
LR – 50.0%	0.0027906	10.4278
LR – 0.0%	0.0027839	9.6046