

소듐냉각고속로용 금속핵연료 개발

이찬복, 이병운, 오석진, 김성호, 박근일, 송기찬, 한도희
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150
 cblee@kaeri.re.kr

1. 서론

제 4 세대 소듐냉각고속로(SFR)가 지속성, 경제성, 안전성 및 핵확산저항성 제고를 목표로 개발되고 있다[1]. 고속로에서 핵연료는 핵분열에 의한 에너지의 생산, 핵물질의 증식, 그리고 폐기물의 소멸 등이 진행되는 핵심 요소이다. 또한, 핵연료에는 방사성물질이 밀집되어 있기 때문에 핵연료의 건전성 유지는 원자로 안전성에 필수적이다. 지속성 제고를 위해 장수명핵종인 Np, Am, Cm 등의 마이너악티나이드(MA)를 핵연료에 포함시켜서 원자로에서 소멸시키며, 경제성을 높이기 위해 최대 200 MWD/kgHM 이상의 고연소도까지 연소시키는 것을 목표로 한다. 선행 및 후행핵연료 주기비용은 고속로에서의 전체 전기생산비의 1/3을 차지하기 때문에, 핵연료는 원자력 발전의 경제성과 안전성을 결정하는 가장 중요한 요소이다.

2. 소듐냉각고속로 핵연료

고속로 핵연료의 재료로는 금속, 산화물, 질화물 및 탄화물 등이 있다. 1950년대부터 운영된 초기의 고속로인 미국의 EBR-I 및 EBR-II는 금속핵연료를 사용하였으며, 1,200 MWe의 상용 발전로급 고속로인 프랑스의 Super-Phenix 원자로는 산화물핵연료를 사용하였다. 냉각재인 물과의 양립성이 매우 우수한 산화물핵연료가 독보적으로 사용되는 경수로와는 달리, 고속로의 경우는 아직 유력한 후보 핵연료가 확정되지 않은 상황이라 할 수 있다.

핵연료 재순환을 고려하는 고속로 핵연료의 경우 핵연료 선정에서는 핵연료의 연소 성능, 핵연료 재순환 공정 및 핵연료 제조 공정 등이 함께 고려되어야 한다. 핵연료의 연소성능에서는 핵연료의 최대 방출연소도가 높을수록 좋으며, 핵연료 및 원자로의 운전 온도가 높을수록 원자력 발전의 열효율이 높아서 경제적이다. 또한, 핵연료는 마이너악티나이드를 함유하여 연소시키는 효율이 높을수록 좋다. 원자로의 안전성을 위해 핵연료는 운전 중 건전성이 유지되어야 하며, 가상의 사고에서에서도 원자로의 안전성이 유지되어야 한다. 원자로는 일부 핵연료가 손상되어도 정화장치의 작동으로 원자로가 지속적으로 운전될 수 있는데 이를 위해서는 소듐 냉각재와의 양립성이 좋아야 한다.

핵연료 재순환 공정에서는 경제성과 공정 폐기물의 최소화가 필요하며, 핵확산 저항성이 요구된다. 핵연료 제조에서는 높은 신뢰성이 요구된다. 방사성의 핵연료가 차폐된 핫셀에서 원격으로 제조되어야 하기 때문에 제조공정이 단순하고, 제조기기의 신뢰성이 높고, 유지 보수성이 용이하여야 한다.

소듐냉각고속로용 핵연료의 주요 후보 핵연료 재료로는 금속과 산화물이 있다. 금속핵연료는 파이로프로세싱 핵연료재활용공정 주기와 연계되어 핵확산상 저항성이 높고, 냉각재인 소듐과의 양립성이 매우 좋다. 또한 금속핵연료는 열전도성이 좋아서, 노심내 냉각재의 입출구 온도가 각각 390 °C 및 545 °C 일때, 금속핵연료는 600 ~ 1,000 °C 범위로 온도가 낮게 유지 된다. 따라서 원자로의 사고 시에도 금속핵연료는 손상되지 않아서 원자로의 피동적인 안전성이 유지된다.

산화물 핵연료는 습식의 핵연료 재활용공정주기와 연계되는데, 습식의 핵연료재활용시설이 완비된 국가들에서 적극적으로 연구가 진행되고 있다. 산화물 핵연료는 경수로 핵연료 등을 통해 많은 경험이 축적되어 있으나, 소듐냉각재와의 양립성이 좋지 않는 단점이 있다.

3. 금속핵연료 개발

제 4 세대 소듐냉각고속로용 핵연료로 금속핵연료가 선정되어 2007년 개발이 착수되었다. 금속핵연료의 장점으로는 파이로프로세싱 핵연료재순환공정과 연계된 높은 핵확산저항성, 높은 열전도도 및 소듐냉각재와의 우수한 양립성 등이 있다[2]. 파이로프로세싱 공정에서는 마이너악티나이드와 플루토늄을 항상 함께 취급한다. 금속핵연료의 설계는 그림 1과 같은데, 기술개발을 위한 주요 연구 내용은 다음과 같다.

금속핵연료는 그림 2와 같은 공정을 통해 제조되는데, 실용적으로 금속핵연료를 제조하는 기술

이 개발되고 있다. Minor Actinide가 함유된 금속핵연료는 방사능이 있기 때문에 Glove 박스 혹은 핫셀 등의 차폐된 환경에서 핵연료가 제조되어야 한다. 이를 위해서는 신뢰성이 높고, 단순하고, 보수 유지가 용이한 핵연료 제조기술이 필요하다. MA가 함유된 SFR 금속핵연료는 용해 제조시 휘발성 원소들이 이동하게 되는데, 이들을 회수하고 제어하여야 한다. 또한 다양한 핵연료 구성원소들이 핵연료 내에서 균일하게 분포하고, 연소시 핵연료 건전성을 유지하도록 핵연료의 미세구조가 유지되어야 한다.

피복관은 핵연료심을 밀봉하여 방사성물질의 외부 유출을 방지하는 역할을 하기 때문에, 핵연료 및 원자로의 안전성과 직결되는 가장 중요한 핵연료 부품이다. SFR 핵연료 피복관은 고온에서 고속의 중성자가 조사되는 가혹한 조건에서 사용된다. 따라서 고온에서 기계적 강도가 우수하고, 높은 고속중성자 조사량까지 팽윤이 낮고, 연성이 유지되는 피복관이 요구된다. 이를 위해 합금의 조성, 첨가물, 미세조직 및 제조공정 등의 최적화를 통해 성능이 우수한 페라이트-마르텐사이트(FMS) 합금강 피복관이 개발되고 있다.

핵연료 설계, 제조 및 핵연료 부품의 개발은 성능시험을 통해 검증되며, 시험 결과의 평가를 통해 설계, 제조 및 부품의 개량이 진행된다. 핵연료 조사시험을 통해 목표연소도까지 핵연료의 건전성이 유지됨을 입증하여야 하며, 핵연료 조사거동 모델링을 통해 모든 가상의 연소 조건에서도 핵연료의 조사거동을 예측할 수 있어야 한다. 국내에서는 고속로 연구로가 없기 때문에, 낮은 조사량시험은 고속로 중성자조건을 모사한 시험 장치를 사용하여 하나로 연구로에서 일차적으로 수행하고, 고속로 조건에서의 조사시험은 GIF(Generation IV International Forum) 국제공동연구 등을 통해 외국의 고속연구로에서 수행할 계획이다.

3. 결론

핵확산저항성이 높은 파이로프로세싱 핵연료재활용공정과 연계된 금속핵연료가 소듐냉각고속로의 핵연료로 결정되어 개발되고 있다. 실용적인 금속핵연료 제조기술 및 고연소도 핵연료 개발을 통해 경제성을 향상시키고, 금속핵연료 고유의 원자로 피동안전성 유지 특성을 활용하여 안전성을 향상시켜서, 제 4 세대 소듐냉각고속로의 목표인 지속성, 경제성, 안전성 및 핵확산저항성 제고를 달성할 계획이다.

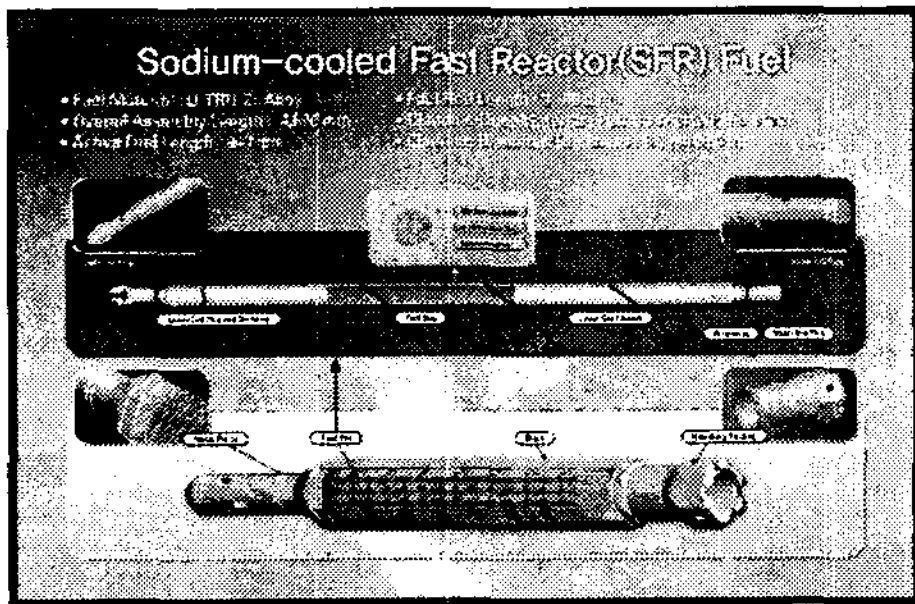


그림 1. 소듐냉각고속로 금속핵연료

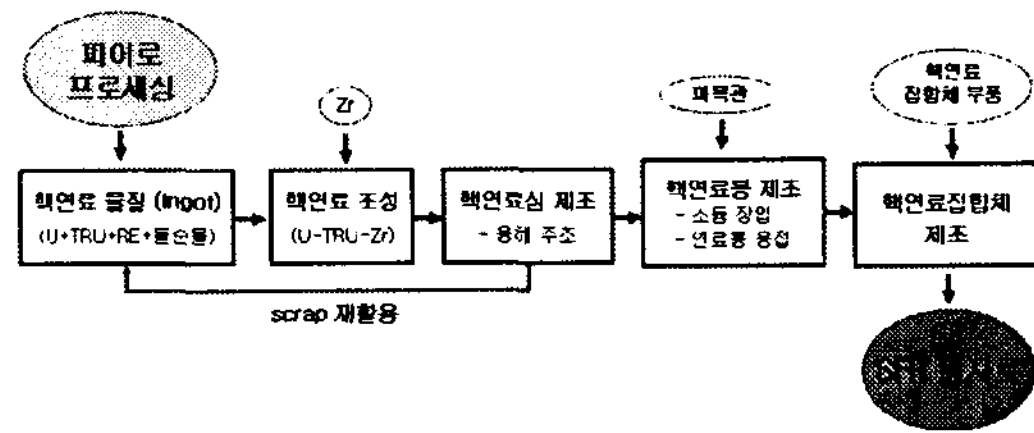


그림 2. 금속핵연료 제조 공정

참고문헌

- (1) "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems", Issued by the U.S. DOE
Nuclear Energy Research Advisory Committee and Generation IV International Forum, 2002.
- (2) Y.I. Chang, "Technical Rationale for Metal Fuel in Fast Reactors", Nucl. Eng. and Tech., Vol. 39,
No. 3, 2007.