

## SFR 금속핵연료의 원격제조 공정 현안 분석

류호진, 이도연, 조광훈, 오석진, 이종탁, 박장진, 박근일, 이찬복  
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045  
[hiryu@kaeri.re.kr](mailto:hiryu@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

GEN-IV 고속로의 금속핵연료는 U-Pu-Zr 삼원계 합금을 기본 조성으로 하여 장수명 핵종인 Am, Np 등 마이너악티나이드를 함유하고 있다. 이는 핵분열을 통하여 장수명 핵종인 마이너악티나이드를 반감기가 짧은 핵분열 생성물로 변환하면 사용후핵연료 처분 부담을 크게 경감할 수 있기 때문이다. 그러나 마이너악티나이드를 함유한 금속핵연료의 원격 제조 공정에는 다음과 같은 문제들이 시급히 해결되어야 할 현안으로 대두되고 있다. 첫째로 용탕에서 Am의 증기압이 매우 높아 Am의 휘발을 억제할 수 있는 용해 주조 방법의 개발이 필요한 실정이다. 또한 Am은 산화성이 U이나 Zr, Pu보다 높아 용해 중 슬래그로 떠올라 핵연료심 성분에는 포함되지 않을 수도 있다. 또한 기존 금속 핵연료 제조 방법은 원료 금속을 유도용해로에서 도가니 속에서 용해한 후 석영관 몰드를 이용하여 감압 사출 주조를 하는 것으로 알려져 있다. 따라서 도가니 및 석영관에 잔류하는 장수명 핵종 폐기물의 발생을 최소화하는 것이 필요하다. 마지막으로 마이너악티나이드를 함유하는 금속핵연료의 원격제조에 대한 경험이 부족하여 제조 공정 및 시설의 원격 운영성에 대한 자료가 부족하다. 본 연구에서는 위와 같은 원격제조 공정의 현안들에 대한 기술 현황을 분석하고 그동안 도출된 방안들을 참고로 제시하고자 하였다.

### 2. Am 휘발 및 산화 분석

아메리슘은 악티나이드 원소중에서 가장 높은 평형 증기압을 가지고 있으며 휘발성이 비슷한 원소로는 Mn 등이 있다. 이렇게 휘발된 아메리슘은 핵연료 성분에서 빠져나와 제조 시설을 장수명 핵종으로 오염시키는 문제를 초래하게 된다. 통상적인 TRU 함유 금속핵연료의 용해 주조 온도에서 시스템 압력에 따른 U, Pu, Zr, Np, Am의 성분비 변화를 계산한 결과, 압력이 낮아질수록 Am의 증발이 더욱 활성화되어 Am 성분의 비율이 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 진공을 활용하는 기존의 감압 사출주조를 적용하기 위해서는 Am의 증발을 억제할 수 있도록 진공도 조건을 최적화해야 할 것으로 판단된다. 또한 중력 주조, 원심 주조, 연속 주조와 같은 새로운 주조 방법을 도입하거나 분말 야금법에 의한 금속 핵연료 소결체 제조 방법도 고려할 필요가 있다. 만일 용탕 위에 얇은 슬래그 막을 형성한다면 휘발성이 높은 아메리슘이 포화 증기압에 도달하는 것을 억제하여 아메리슘의 휘발을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

또한 아메리슘은 열역학적으로 산화성이 높아 제조 분위기에 미량 존재하는 산화성 기체 또는 수증기와 반응하여 산화물을 형성하고 슬래그로 용탕위에 떠올라 주조된 금속핵연료에 포함되지 않을 가능성이 있다. Am의 산화성을 비교해보면 Np이나 Cm은 산화성이 그리 높지 않은 반면 Am은 Nd, Ce, Y와 같은 희토류와 유사한 산화 경향을 나타내고 있다. EBR-II 금속핵연료 제조 공정에서 Y 및 희토류 원소들은 용해주조 후 금속핵연료에 포함되지 않고 skull에 95% 이상 포함되어 있는 것으로 분석된 바 있다. Am도 희토류와 동일한 산화거동을 나타낼 수 있기 때문에 TRU 함유 금속핵연료의 제조공정에서 Am의 산화 거동도 휘발 거동 못지 않게 중요하게 고려되어야 할 것으로 판단된다. 또한 용해될 금속 핵연료 성분에 아메리슘 보다 열역학적으로 산화성이 높은 희토류 원소를 첨가한다면 제조 분위기 기체에 미량 존재하는 산화성 기체 또는 수증기와

먼저 반응하여 산화되어 아메리슘의 산화를 최소화 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 금속핵연료 제조 공정폐기물 처리 기술 분석

금속핵연료 제조공정 중 발생하는 공정폐기물은 연료심 제조공정에서 발생하는 폐 석영몰드 (quartz mold), 불순물 함유 핵연료 잉곳, 핀, 연료봉, 용해 주조로 도가니, 용해 주조로 배기체 처리장치, 소듐 함유 액체폐기물 등이 있다. 몰드 재질로 석영을 사용할 경우 용해 주조 공정에서 폐 석영몰드 폐기물 발생량이 가장 많고 금속 핵물질이 혼입되어 있어 반드시 처리해야 할 폐기물이다. 일반적으로 흑연에 지르코니아가 코팅된 용해주조로 도가니에는 핵연료물질(우라늄, TRU, 지르코늄)이 함유되어 있어 핵연료 물질은 약 500°C에서 산화시켜 우라늄, TRU, 지르코늄의 회수가 가능하다. 개발 우선 분야는 폐기물 양과 중요성으로 볼 때 폐석영 몰드 처리로 판단되며 각 폐기물 공히 처리 및 처분 절차의 개발이 필요하다. 폐 석영 몰드로부터 금속 핵연료 물질을 건식으로 회수하는 공정은 매우 중요하다. 우라늄, 지르코늄 금속이 약 500°C에서  $U_3O_8$ ,  $ZrO_2$ 로 산화된다는데 착안하여 그림 1과 같은 건식 처리공정을 제안할 수 있다.

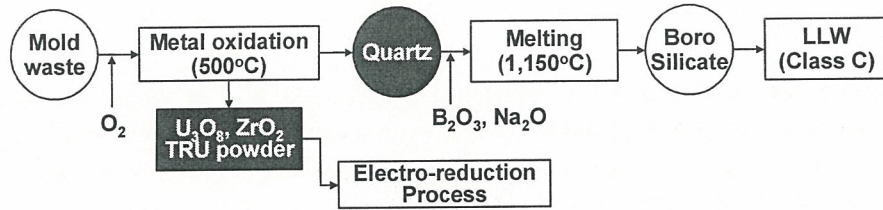
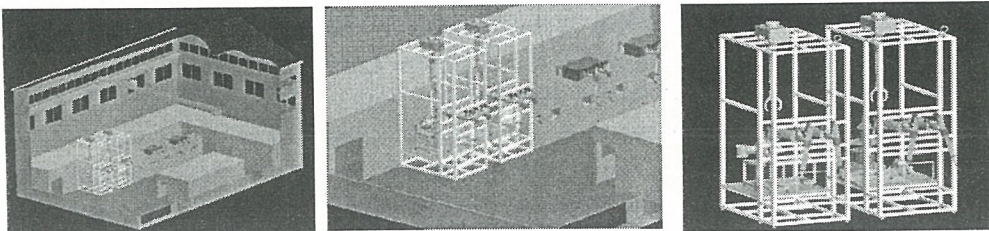


그림 1. 폐 석영 몰드의 처리 공정도

### 4. MA 함유 금속핵연료 원격 제조 기술 분석

TRU 함유 금속핵연료 원격제조 기술은 기존 미국 INL에서 개발한 EBR-II의 제조경험을 참고할 수 있지만, IFR 주기에서 사용한 금속 핵연료에는 Pu 만이 포함되어 있어 MA 원소들을 함유한 연료심 제조장치는 새롭게 개발하여야 한다. 따라서 현재 개발 중인 SFR 금속 핵연료 원격 제조 공정 흐름도를 바탕으로 연료심 및 연료봉 제조 단계별로 원격 운영기술을 평가하고 주요 평가항목을 도출하였다. 원격 연료심 제조 mock-up 시험 시설 구축의 목적은 설계/제작한 진공 감압주조로를 대상으로 주조 공정개발과 연계하여 장치의 원격 운영성을 평가하는 것이다. 용해주조 장치 설계자료를 바탕으로 핫셀에 설치할 경우를 대비해서 원격 운영성을 평가하기 위하여 그림 2와 같은 시험 시설을 설계하여 구축 중에 있으며, 본 시설을 이용하여 원격 조작을 위한 작업시야 확보성, 핫셀내 장치 설치 위치 적정성, 운전방식에 따른 원격 운영성 등에 대한 자료를 확보할 수 있다.



(1) 시설 배치도

(2) 차폐창 배치

(3) 가변형 이동식 핫셀창

그림 2. SFR 핵연료 원격 제조 mock-up 시험 시설 개요도.