

2002 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

차세대관리 종합공정 실증시설의 공정 기준요건 연구

Study on Process Basic Requirements of Experimental facility of
Advanced Spent Fuel Management Process

정원명, 구정희, 조일제, 이은표, 백상열, 안상복, 유길성, 박성원

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

사용후핵연료의 효율적인 관리를 위하여 연구개발중인 차세대관리 종합공정의 실증을 위해서는 $\alpha-\gamma$ type hot cell과 Inert hot cell의 확보가 필수적이다. 본 연구에서는 차세대관리 종합공정 실증을 위한 hot cell 시설의 설계를 수행하는데 필요한 시설의 기본적인 설계 기준요건들을 정립하기 위하여 현재까지 개발되어 제시된 차세대관리 종합공정의 자료를 기준으로 기준공정, 기준공정 흐름도, 공정조건 및 단위공정의 수율, hot cell 내 취급기준 방사선원 등을 설정하였다. 이러한 자료들은 차세대관리 종합공정의 특성과 시설 여건 등을 고려하여 시설의 보수적 안전성과 공정 운전의 효율성이 확보된 실증시설의 설계를 위한 기본 자료로 활용될 예정이다.

Abstract

The advanced spent fuel management process, which was proposed to reduce the overall volume of the PWR spent fuel and improve safety and economy of the long-term storage of spent fuel, is under research and development. Hot cell facilities of $\alpha-\gamma$ type and inert atmosphere are required essentially for safe hot test and verification of this process. In this study, Design basic data are established, and these data include process flow, process condition and yields, mass and radioactivity balance of radionuclides, process safety considerations, etc. And also, these data will be utilized for basic and detail design of hot cell facility, secured conservative safety and effective operability.

1. 서론

국내에서 공급되는 발전량의 약 40 % 이상이 원자력 발전에 의해 충당되고 있으며, 현재 국내에서 운전되고 있는 원자력 발전소는 16기이다(2001년 기준). 그리고 가동 중인 원자력 발전소 외에 4기가 추가 건설 중에 있으며, 2006년까지는 8기가 더 건설될 계획으로 있다.

이와 같이 국내 전력 공급의 중추적인 역할을 원자력 발전을 이용하게 되고, 원자력 발전에 대한 관심과 기대가 높아지면서 원자력에 대한 일반 국민들이 가지고 있는 막연한 우려들 가운데에는 원자력 발전소의 운영으로 원자로에서 연소 후 필연적으로 발생하는 사용후핵연료의 관리와 관련한 사항들이 많으며, 이를 불식시키기 위한 관련 분야의 기술 개발에 대한 요구가 점차 증대되고 있다.

원자력 발전소에서 발생하는 사용후핵연료는 직접처분을 위한 대상으로 보면 고준위 폐기물이지만 유용한 원소의 재활용 측면에서 보면 소중한 에너지 자원으로 관리해야 하는 필요성이 점차 강조되고 있다. 특히 우리나라처럼 후행핵연료주기에 대한 정책 방향이 정립되어 있지 않고, 폐기물 영구 처분장을 확보하는 것이 어려운 여건에서는 장기적으로 안전하면서도 효율적인 사용후핵연료 관리기술의 개발을 통하여 원자력 발전의 경제성을 높이며, 유용 자원의 활용을 극대화하면서도 환경 친화적인 기술 환경을 조성하는 것이 매우 중요하다.

이와 같은 필요성에 따라서 한국원자력연구소에서는 사용후핵연료의 관리방안의 하나로 사용후핵연료를 용융염 매질에서 Lithium을 환원제로 사용하여 금속으로 전환하여 부피를 1/4 정도로 감용할 수 있으며, 고발열성 핵종인 Cs과 Sr 원소를 효율적으로 제거함으로써 처분 안전성과 경제성을 높일 수 있는 방안을 제시하고, 정부가 주관하는 원자력연구개발 중장기사업으로 차세대관리공정에 대한 기술개발을 1997년부터 1단계 4년 동안 수행하여 왔다.

현재까지는 차세대관리공정의 개념을 정립하고, 공정의 기초실험 및 장치실험을 수행하여 반응 조건 및 장치개발을 통해 기초적인 공정자료들을 확보하였다. 그러나 현재까지 수행된 공정개발은 비방사능 물질이나 천연우라늄을 사용하였으나, 실제 고준위 방사능 물질을 이용한 실증실험을 통하여 방사능 물질이 공정의 수율 및 공정장치 등에 미치는 영향을 확인, 분석하여 공정설계에 반영하여야 하며, 차세대관리공정과 같은 화학공정의 개발은 관련 주변장치의 개발이 수반될 때 비로서 공정개발이 완료되는 것이다.

특히 사용후핵연료와 같은 고준위 방사성물질을 고온의 용융염 조건에서 Lithium과 같은 반응도가 매우 높은 물질과 같이 취급해야하는 차세대관리공정의 특성 상 inert 분위기가 유지되는 α - γ type의 hot cell 시설과 기밀성이 유지되는 차폐조건에서의 공정 운전 및 감시를 효율적으로 수행해야 하는 관련 기술의 확보가 필수적이다. 그러나 현재까지 국내에는 inert 분위기가 유지되는 α - γ type의 hot cell 시설이 확보되어 있지 않으며, 설계 경험도 없는 실정이다.

차세대관리공정의 실증을 위한 시설을 신규로 확보하는데는 많은 자원과 인력, 기간이 소요되므로 기존 hot cell 시설을 활용하는 것을 전제로 2001년도부터 시작된 2단계 연구에서 시설의 안전성과 공정 운전의 효율성이 확보된 실증시설의 설계 연구를 수행하고 있다.

본 연구에서는 차세대관리 종합공정 실증을 위한 hot cell 시설의 설계를 위하여 기본적으로 필요한 공정에 대한 기준자료를 현재까지 개발된 공정자료를 기준으로 시설의 보수적 안전성 확보 측면에서 설정하여 제시함으로써 차세대관리공정 실증시설의 설계를 위한 기초자료로서 활용하게 되었다.

2. 연구 내용 및 결과

2.1. 공정 기준요건

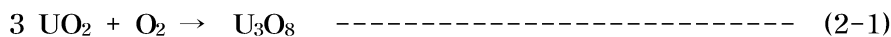
차세대관리 종합공정의 실증시험은 실제 고준위 방사성 분위기에서 개발된 공정의 수율 및 공정장치 등에 미치는 영향을 확인, 분석함은 물론 공정의 상용화에 필요한 공학적 설계자료를 확보하기 위하여 수행된다. 따라서 실증을 위한 적정 공정규모를 결정하는 것이 매우 중요하며, 공정조건 및 수율은 물론 공정 장치별 특성에 대한 영향이 실제 공정 규모에 따라 결과가 차이를 나타낼 수 있고, 또한 공정규모에 따라서 주변 부대시설의 규모도 결정되게 된다. 차세대관리 종합공정 실증시설의 규모는 실증시험에서 얻는 공정 data의 신뢰성, 공학적 공정 data 및 상용화 시설의 설계자료 확보, 실증시설로 활용예정인 기존시설(조사재시험시설의 예비 hot cell)의 여건 등을 고려하여 사용후핵연료 20 kg-HM/batch를 처리하는 규모로 설정되었으며, 설정된 공정 규모와 공정자료를 기준으로 보수적 시설의 안전성 측면에서의 기준공정, 기준공정 흐름도, 공정조건 및 단위공정의 수율 등을 정립하였다.

2.1.1. 기준공정 및 공정흐름도

실증시설 내에 설치될 차세대관리 종합공정은 차세대관리공정 내용[1]과 실증시설로 활용 예정인 조사재시험시설의 예비 hot cell의 여건 등을 고려하여 Fig. 1의 process block diagram 과 Fig. 2의 process flow diagram에 표기된 내용과 같이 설정하였다.

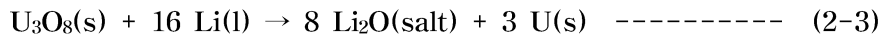
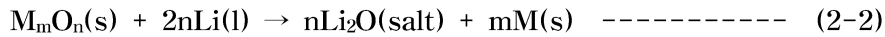
먼저 조사후시험시설의 pool에 저장된 사용후핵연료는 현재 사용 중인 사용후핵연료 해체 및 절단 장치를 이용하여 해체되어 25 cm 길이로 절단되어지며, 절단된 사용후핵연료는 절단된 핵연료의 인입 및 인출을 고려하여 설계되는 basket 내에 담겨져 Padirac Cask를 이용하여 조사후시험시설로부터 조사재시험시설의 예비 hot cell 내에 설치되는 $\alpha-\gamma$ type의 일반 air 분위기 hot cell 내로 운반되어 우선 Vol-oxidation 공정에서 처리된다.

Vol-oxidation 공정에서는 절단되어 운반된 사용후핵연료를 먼저 slitting하여 Zircaloy tube와 사용후핵연료 pellets을 분리하게 되는데 사용후핵연료 pellets의 대부분은 UO_2 이며(무게기준 94.4 % 이상), 나머지는 대부분 원자로에서 생성되는 핵분열생성물의 산화물이다. 분리된 UO_2 pellets은 500 °C에서 air와 반응하여 반응식 (2-1)에 표기된 것과 같이 산화되어 평균 입도가 약 30 μm 인 U_3O_8 분말로 제조되며, 다른 핵분열생성물들도 주로 산화물 형태의 분말로 제조된다.



이때 반응과정에서 UO_2 pellets의 내부에 함유된 휘발성 핵분열생성물 중 휘발성 물질(H_3 전량과 Kr, Xe, I의 상당량)과 과량으로 공급된 air가 방출되게 되는데 이들은 off-gas 처리공정을 거쳐 배기된다.

U_3O_8 분말과 산화물 형태의 분말로 변환된 사용후핵연료 분말은 inert hot cell로 보내져 금속 전환(Metalization)공정에서 처리된다. 금속전환공정에서 사용후핵연료 분말은 650 °C의 LiCl 용융염 매질에서 Lithium(Li) 금속을 환원제로 사용하여 granule 형태의 금속으로 전환되며, Li의 산소와의 높은 반응 특성 때문에 inert 분위기 하에서 반응이 수행되어야 한다. 반응식은 (2-2)의 일반식으로 표기되고, U_3O_8 분말의 금속전환 반응식은 (2-3)로 표기된다.



사용후핵연료 분말 내의 각 원소들은 LiCl 용융염 내에서 Lithium 금속과 반응하여 생성되는 각 화합물의 특성에 따라 금속 또는 염화물 등으로 전환된다. 우라늄과 핵분열생성물 중 TRU 원소, 귀금속 원소, 전이금속 등은 금속으로 전환되며, 금속전환반응에 의해 생성되는 Li₂O는 LiCl 용융염에 용해된다. 그밖에 Cesium(Cs), Strontium(Sr), Barium(Ba)과 같이 화학적 반응성이 강한 핵분열생성물들은 염화물로 전환되거나 Li와 화합물을 형성하여 LiCl 용융염에 용해된다. 그리고 금속전환공정에서 발생하는 off-gas로는 LiCl 용융염 fume과 잔존하는 휘발성 핵분열생성물(잔존 fission gas, Cs 등) 등이 있으며, LiCl 용융염 fume은 반응기 상부의 cold trap에서 제거되고, 휘발성 핵분열생성물은 off-gas 처리장치에서 처리 후 배기된다.

금속전환공정에서 granule 형태의 금속으로 전환된 사용후핵연료는 금속전환로 하부에 설치되는 sintered metal filter를 이용하여 액상의 LiCl 용융염과 고체인 금속 granule이 분리된다. 분리된 granule 형태의 금속 사용후핵연료(대부분 우라늄)는 다음 공정인 Smelting & Casting 공정으로 보내진다.

Smelting & Casting 공정은 금속으로 전환된 우라늄을 용해하여 저장하기 용이한 봉 형태로 성형하여 주조하는 공정으로 canister 저장 및 사용후핵연료로부터 전환된 금속전환체의 열적 산화 안정성 등 관리 안정성 등을 고려하여 주조하게 된다. 그러나 실증시설에서는 임시 저장이 용이하도록 round 혹은 square bar 모양의 형태로 제조될 예정이다. 우라늄 금속의 주조 온도는 우라늄 금속의 용융온도를 고려하여 1400 °C에서 수행되며, 우라늄 금속의 경우도 공기 중 산소와 접촉하는 경우 산화 반응성이 매우 높으므로 진공 또는 inert 분위기에서 우라늄 금속의 용해 및 주조 공정이 수행된다. 그리고 Smelting & Casting 공정에서 발생하는 off-gas로는 금속전환공정과 같이 LiCl 용융염 fume과 잔존하는 휘발성 핵분열생성물(잔존 fission gas, Sr 등)이 있으며, 금속전환공정과 같이 LiCl 용융염 fume은 cold trap에서 제거되고, 휘발성 핵분열생성물은 off-gas 처리장치에서 처리 후 배기된다. 이렇게 제조된 우라늄 ingot는 인출되어 Padirac Cask를 이용하여 저장 장소로 옮겨지게 된다.

한편 금속전환공정 처리 후 금속으로 전환된 사용후핵연료를 분리한 LiCl 용융염에는 많은 양의 핵분열생성물이 용해되어 있으며, 금속전환공정에서 환원제로 사용된 Li도 반응후 Li₂O로 산화되어 용해되어 있게 된다. 따라서 LiCl 용융염은 정제하여 순환 사용하고, Li₂O는 전기화학적 환원방법에 의해 Li 금속으로 회수하여 재사용하는 것이 바람직하다. 그러나 실증시설에서는 시설 여건을 고려하여 Li₂O를 전기화학적 환원공정을 이용하여 Li 금속으로 회수하는 공정만을 실증공정에 포함하였다.

용융염 내에 용해되어 있는 Li₂O는 고순도 흑연을 전극으로 사용하며, inert 분위기가 유지되고 700 °C로 가열되는 전기분해조에서 식 (2-4)의 전지반응식에 의해 Li 금속이 회수된다.



회수된 Li 금속은 용융 상태로 비중차에 의해 LiCl 용융염 상부로 모이게되며, 이를 진공에 의한 suction 방법으로 포집하여 회수하게 된다. 그리고 Li 회수공정에서 발생하는 off-gas로는 LiCl 용융염 fume과 휘발성 핵분열생성물(Cs, Sr, 미량의 fission gas 등), 반응에 의해 발생하는 CO₂ 가스가 있으며, LiCl 용융염 fume은 cold trap에서 제거되고, 휘발성 핵분열생성물은

off-gas 처리장치에서 처리 후 배기된다.

Li을 회수한 후 폐용융염은 약 550 °C에서 일정량의 zeolite, glass frit과 혼합하여 inert 분위기에서 대기 온도로 냉각하여 bead 형태로 인출, 성형되며, 용기에 담겨 Padirac Cask를 이용하여 저장 장소로 옮겨지게 된다.

2.1.2. 공정 조건 및 수율

현재까지 수행된 차세대관리공정의 연구개발 결과를 기준으로 각 단위공정별 공정 처리조건 및 장치규모 및 공정 처리시간을 간략하게 Table 1의 내용과 같이 정리하였다.

그리고 차세대관리 종합공정 실증시설에서 각 공정별로 방사성물질의 량과 radioactivity를 추정하기 위하여 현재까지의 차세대관리공정의 실험결과를 기준하여 단위공정별 예상 수율을 최대치와 최소치로 구분하여 Table 2의 내용과 같이 설정하였다.

2.1.3. 핵물질 물질수지

Table 2에서 제시된 공정별 수율을 기준으로 각 단위공정별로 핵물질의 원소별 물질수지를 작성하여 Fig. 3에 표기된 내용과 같이 제시하였다. 핵물질의 원소별 물질수지는 취급하게되는 사용후핵연료 기준조건을 기준으로 ORIGEN code를 이용하여 계산된 사용후핵연료 내 원소별 물질량을 기준으로 계산되었으며, 설계 과정에서 시설의 보수적 안전성을 확보하기 위하여 공정 수율의 최대치와 최소치를 설정하여 각 단위공정에서의 원소별 물질량이 최대가 되는 조건을 기준으로 작성하였다.

Vol-oxidation 공정의 경우 최대 수율이 99.8 %이므로 공정처리 후 다음공정인 금속전환(Metalization)공정으로 공급되는 산화분말의 량과 Zircaloy tube hull 내에 잔류하게되는 량을 계산할 때 금속전환공정으로 공급되는 산화분말의 량은 최대 수율 99.8 %을 적용하고, Zircaloy tube hull 내에 잔류하게되는 량은 최소 수율인 99 %를 적용하여 1 %가 잔류할 수 있다는 보수적인 가정 하에 계산되었다. 또한 fission gas의 방출량은 현재 설정된 반응온도(약 500 °C)에서 ³H는 전량 방출되나 Kr, Xe, I의 경우는 상당량(약 50 % 이상)이 산화우라늄(U₃O₈) 분말에 잔류하는 것으로 보고되고 있으나[2] 가능한 Vol-oxidation 공정에서 fission gas의 대부분을 방출하는 것이 공정 및 시설의 안전성 확보 측면에서 바람직하며, 이를 위해 공정의 반응온도 변경에 대한 가능성(750 °C에서는 약 99 %까지 방출 가능)을 고려하고, 보수적 가정을 위하여 99 %가 방출되는 것을 기준으로 계산하였다.

다음 공정인 Metalization 공정에서 금속으로 전환되는 원소별 물질량의 계산은 우라늄, TRU, 귀금속(Noble Metal)과 Nd, Sm, Ce을 제외한 희토류(Rare Earth) 금속은 최대 수율인 98 %를 적용하였으며, Cs, Sr, Ba 등과 같이 대부분 LiCl 용융염에 용해되는 fission products는 전환된 금속에 잔류하는 LiCl 용융염의 량으로 제시된 2.3 %(실험 결과치) 내에 함유되는 량을 기준으로 계산하였다.

그리고 전환된 금속이 분리된 용융염 내의 원소별 물질량은 Metalization 공정의 최소 수율인 95 %를 적용하여 우라늄, TRU, 귀금속(Noble Metal)과 Nd, Sm, Ce을 제외한 희토류(Rare Earth) 금속은 5 %가 용융염 내에 잔류하는 것으로 가정하였으며, 그 밖에 원소들은 금속전환체에 남아 있는 량을 제외한 잔여량을 기준으로 계산하였다.

2.2. 취급 기준 방사선원

2.2.1. 취급 기준 사용후핵연료

차세대관리 종합공정의 실증을 위한 hot cell의 설계를 위해서는 hot cell 내에서 취급하게 되는 기준 방사선원이 우선 결정되어야 한다. 그러나 기준 방사선원의 결정을 위해서는 공정의 실증을 위해 사용될 사용후핵연료를 선정하는 것이 선행되어야 한다. 따라서 차세대관리 종합공정에서 처리 대상으로 삼고 있는 PWR 사용후핵연료의 원자로 조사 조건 및 현실적으로 취급이 가능한 사용후핵연료 여건 등을 고려하여 차세대관리 종합공정 실증시설에서 취급할 기준 사용후핵연료 조사조건을 다음과 같이 설정하였다.

- U-235 농축도 : 3.5 w%
- 연소도 : 43,000 MWD/MTU
- 냉각기간 : 10 년

2.2.2. 기준 방사선원

차세대관리 종합공정 실증시설의 기준 방사선원을 결정하기 위해서 먼저 실증시설 내 공정의 운전개념을 설정하는 것이 중요하다. 가능한한 실증시설 내 기준 방사선원을 최소화하는 것이 시설의 건설비용 절감 측면과 안전성 확보 측면에서 유리하다.

먼저 실증시설의 hot cell에서 수행될 차세대관리 종합공정의 실증시험의 횟수를 공정 data의 검증에 위한 최소 횟수로 제한하여 사용후핵연료의 Vol-oxidation 공정으로부터 우라늄 금속 ingot를 주조하기까지의 주공정에 대한 실증시험은 5회를 수행하는 것을 기준하였으며, 사용후 LiCl 용융염으로부터 Li을 회수하고, 폐 LiCl 용융염을 저장에 용이하도록 bead 형태로 성형하는 공정은 그 타당성을 확인하기 위하여 실증시험을 2회 수행하는 것을 기준하였다.

그리고 차세대관리 종합공정의 운전개념을 hot cell 내 방사선원을 최소화하기 위하여 1 batch 공정 운전 후 다음 batch 공정 운전이 시작되기 전에 불가피한 경우를 제외하고는 이전 batch에서 사용한 방사선원을 다른 지역으로 운반하여 저장하는 것으로 설정하였다. 그러나 fission gas 중 반감기가 비교적 긴 H-3와 Kr-85의 경우 포집 후 이동 보관이 어려우므로 hot cell 내에서 감쇄 후 방출하는 것을 전제로 5 batch 분 전량을 기준 방사선원에 포함하였으며, 폐용융염에서 Li을 회수하는 실증시험은 주공정에 대한 실증시험 후 수행 예정으로 주공정의 실증시험이 가장 잘 수행된 2 batch 분을 hot cell 내에 보관하는 것으로 하였다.

따라서 실증시설 hot cell 내 기준 방사선원은 앞에서 제시된 사용후핵연료 조사조건을 기준으로 ORIGEN-2 전산프로그램으로 계산하여 Table 3에 표기된 내용과 같이 기준 방사선원을 설정하였다.

2.2.3. 단위공정별 기준 방사선원

단위공정별 기준 방사선원은 앞에서 제시된 단위공정별 수율을 기준으로 작성된 Fig. 3의 핵물질의 원소별 물질수지를 작성한 기준과 동일한 방법으로 단위공정별 원소별 radioactivity를 계산하여 Fig. 4에 표기된 내용과 같이 제시하였으며, 단위공정별 및 실증시설 내 총 기준 방사선원을 정리하면 Table 4에 표기된 내용과 같다.

2.3. 공정 특성에 따른 safety 요건

차세대관리 종합공정과 같이 공정의 운전 경험이 없는 고온의 용융염 매질에서 반응성이 매우 높은 화학물질들을 취급하게 되는 공정의 실증을 위해서는 공정 및 시설의 안전성을 확보에 매우 유의하여야 한다.[3]

2.3.1 Vol-oxidation 공정

Vol-oxidation 공정은 사용후핵연료 pellets을 고온에서 산화하여 미세한 크기(평균입도 : 약 30 μm)의 분말로 제조하는 공정으로 특히 장치에서 분말의 누출로 인한 hot cell 내 비산으로 인한 오염시 제염이 매우 어려우므로 분말의 누출을 방지하기 위한 고려가 설계에 반영되어야 한다. 따라서 가능한한 누출 가능성을 최소화하기 위하여 공정장치 내부를 외부보다 약간의 부압이 유지되도록 하는 것이 바람직하며, 정상적인 운전시 미세 분말이 off-gas 계통으로 빠져나가지 않도록 공정장치 내부와 외부 off-gas line에 sintered metal filter를 이중으로 설치하는 것이 바람직하다. 그리고 공정장치 외부로부터 산화반응을 위하여 air를 주입하게되므로 off-gas line 이 막힐 경우 공정장치 내부의 압력이 상승하여 사용후핵연료 분말이 누출될 수 있으므로 공급 air의 압력 및 공정장치 내부 압력을 제어하고 감시하는 것에 특히 유의하여 설계하여야 한다.

또한 Vol-oxidation 공정에서 배기되는 off-gas에는 많은 량의 fission gas가 함유되어 있으므로 off-gas line의 누출 방지 및 누출에 대비한 설계가 고려되어야 한다.

2.3.2. 금속전환(Metalization) 공정

금속전환 공정에서 safety와 관련하여 고려되어야 하는 사항으로는 온도 제어시스템의 고장으로 온도의 급격한 상승으로 인해 LiCl 용융염의 증기압이 상승하고 이로 인해 과량의 LiCl fume이 off-gas line으로 방출되어 침적됨으로서 off-gas line이 막히고, 다시 이로 인해 반응기 내부 압력이 증가하여 LiCl fume이 반응기 밖으로 누출될 수 있다[4]. 따라서 반응기 온도, 압력 및 Ar 공급 등이 서로 연동할 수 있도록 설계되어야 한다.

또한 온도 제어시스템의 고장 또는 heater의 고장으로 인하여 LiCl 용융염의 용융온도 이하로 온도가 떨어질 경우에 대비하여 온도 제어장비 또는 heater의 교체는 반드시 원격조작에 의해 가능하도록 설계되어야 한다.

금속전환공정의 경우도 배기되는 off-gas에는 많은 량의 fission gas가 함유되어 있으므로 off-gas line의 누출 방지 및 누출에 대비한 설계가 고려되어야 한다. 특히 금속전환공정에서 사용하게되는 LiCl와 Li시료는 hot cell 외부에 glove box를 부착하여 inert 분위기 하에서 준비하여 hot cell 내의 반응기로 inert 분위기가 유지된 상태로 공급되도록 고려되어야 한다.

2.3.3. Off-gas 처리공정

Air 분위기 hot cell에 설치되는 off-gas 처리공정은 fission gas 처리를 주요 목적으로 설치되며, 공정장치 및 배관에서의 fission gas 누출 방지 및 누출에 대비한 설계가 고려되어야 한다.

Inert 분위기 hot cell에 설치되는 off-gas 처리공정은 고온의 반응온도로 인해 반응기에서 발생하는 LiCl 용융염 fume의 침적 포집, 그리고 잔류 fission gas, Cs(금속전환공정), 잔류 Sr(Smelting 공정) 등에 대한 안전한 처리를 주요 목적으로 설치되며, 공정장치 및 배관에서의

fission gas 누출 방지 및 누출에 대비한 설계가 고려되어야 한다.

특히 off-gas 처리공정에서는 off-gas의 흐름과 압력을 연동하여 감시하고 제어하는 설계가 고려되어야 한다.

3. 결 론

본 연구결과로 차세대관리 종합공정 실증시설의 설계 및 안전성해석 수행에 필요한 공정의 기준자료와 공정특성에 따른 안전성 요건을 설정, 제시하였다.

3.1. 차세대관리 종합공정 실증시설 기준공정 및 공정조건 설정

- 실증공정 범위 설정

Slitting/Vol-oxidation 공정 - Metalization 공정 - Smelting/Casting 공정

Li 회수공정, Fission gas 처리공정(Air 분위기 hot cell과 Inert 분위기 hot cell 분리)

- 공정수율(Max./Min.) 및 핵물질수지 설정

Vol-oxidation 공정 : 99.8 / 99 %, Metalization 공정 : 98 / 95 %

Smelting/Casting 공정 : 100 %, Li 회수공정 : 95 %

3.2. 실증시설 기준방사선원 설정

실증시설 내 기준방사선원 : 22,800 Ci

- SF 1 batch(20 kg-HM) : 9,950 Ci

- 반감기가 긴 fission gas 5 batches : 680 Ci

- 폐용융염 2 batches : 12,170 Ci

3.3. 공정 특성별 safety 요건

- Vol-oxidation 공정 : 내부압력 상승으로 인한 U_3O_8 분말의 비산 대비

- Metalization 공정 : 온도제어 이상으로 LiCl 용융염 증기압 상승으로 fume 누출 대비

- Off-gas 처리공정 : 장치 및 배관에서의 fission gas 누출 대비

감사의 글

이 연구는 과학기술부 주관으로 추진중인 원자력중장기사업의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. KAERI/RR-2128/2000, 사용후핵연료 차세대관리 공정개발, 2000.
2. ORNL-TM-3723, Voloxidation-Removal of Volatile Fission Products from Spent LMFBR Fuels, 1973.
3. NUREG-1601, Chemical Process Safety at Fuel Cycle Facilities, 1997.
4. Canada CHEMTREC, Material Safety Data Sheet, 2001.

Table 1. Process conditions of advanced spent fuel management process.

구 분	공정 조건	취급물질	장치 크기 (예상치, cm)	공정 처리시간
Disassembling & Cutting		UO ₂ pellet	PIE 시설의 기존장치 활용	
Vol-oxidation	500 °C Air atmosphere	U ₃ O ₈ powder	15(D)x120(L) *5 kgHM/batch *가열로: 10 kw	4 hrs
Metalization (Li reduction)	650 °C Inert atmosphere	LiCl(용융염) U metal	76(D)x130(L) *폐용융염저장조 (100 ℓ) 포함 *20 kgHM/batch *가열로: 50 kw	8 hrs
Smelting & Casting	1400 °C Inert atmosphere	U metal ingot	25(D)x30(L) *가열로: 10 kw	2 hrs
Li recovery (Elec. reduction)	700 °C Inert atmosphere	LiCl+Li ₂ O (용융염), Li(용융)	70(D)x100(L) 15(D)x100(L)[Li 회수용기, 10 ℓ] *가열로: 50 kw	80 hrs
Waste molten salt treatment	550 °C→AMB Inert atmosphere	LiCl(용융염) [+zeolite/glass frit] bead	40(D)x70(L) *가열로: 20 kw	

Table 2. Process yields in unit process of advanced spent fuel management process.

단위공정	수율(Max./Min.)	비 고
Vol-oxidation	99.8 / 99 %	모든 물질
Metalization	98 / 95 %	U/NM/RE 기준 (FPs, Sm, Ce ; 2.3 %)
Smelting & Casting	100 %	“
Li recovery	95 %	Li 기준

Table 3. Inventory basis of radioactivities in hot cell.

구 분	Radioactivities (Ci)
기준 SF 1 batch(20 kg-HM)	9,950
반감기가 긴 Volatile FP(H, Kr) 5 Batches	680 (136 x 5)
폐용융염 2 batches	12,170 (6,085 x 2)
Total	22,800

Table 4. Radioactivity basis on unit process in hot cell.

구 분	Radioactivities (Ci)
Vol-oxidation	9,950
Fission gas treatment	136
Metalization (Li reduction)	9,773
Smelting & Casting	3,801
Li Recovery	6,083
Zircaloy tube hull	196

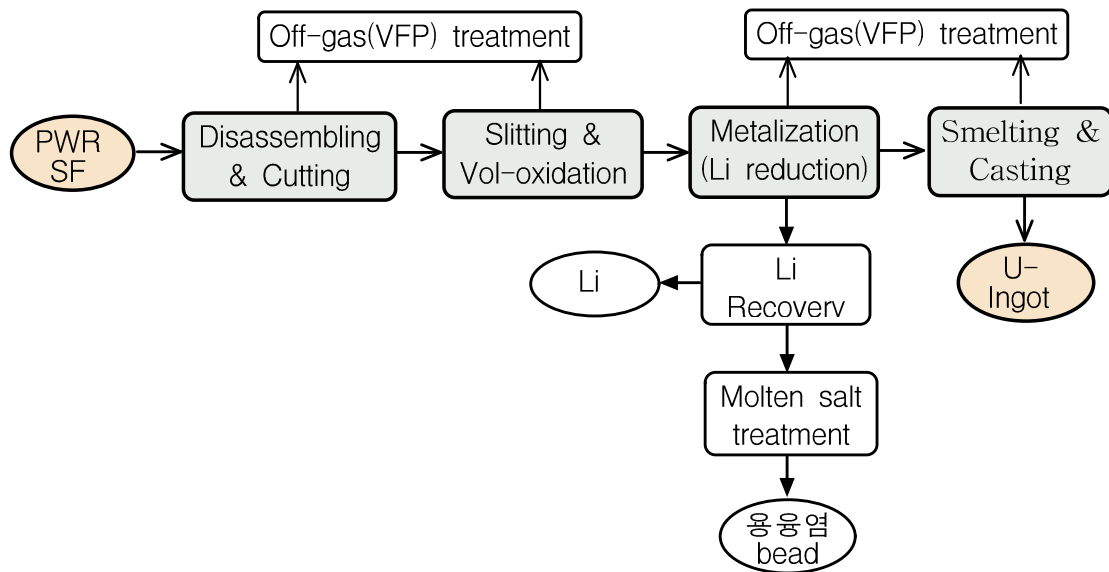


Fig. 1. Process block diagram of advanced spent fuel management process.

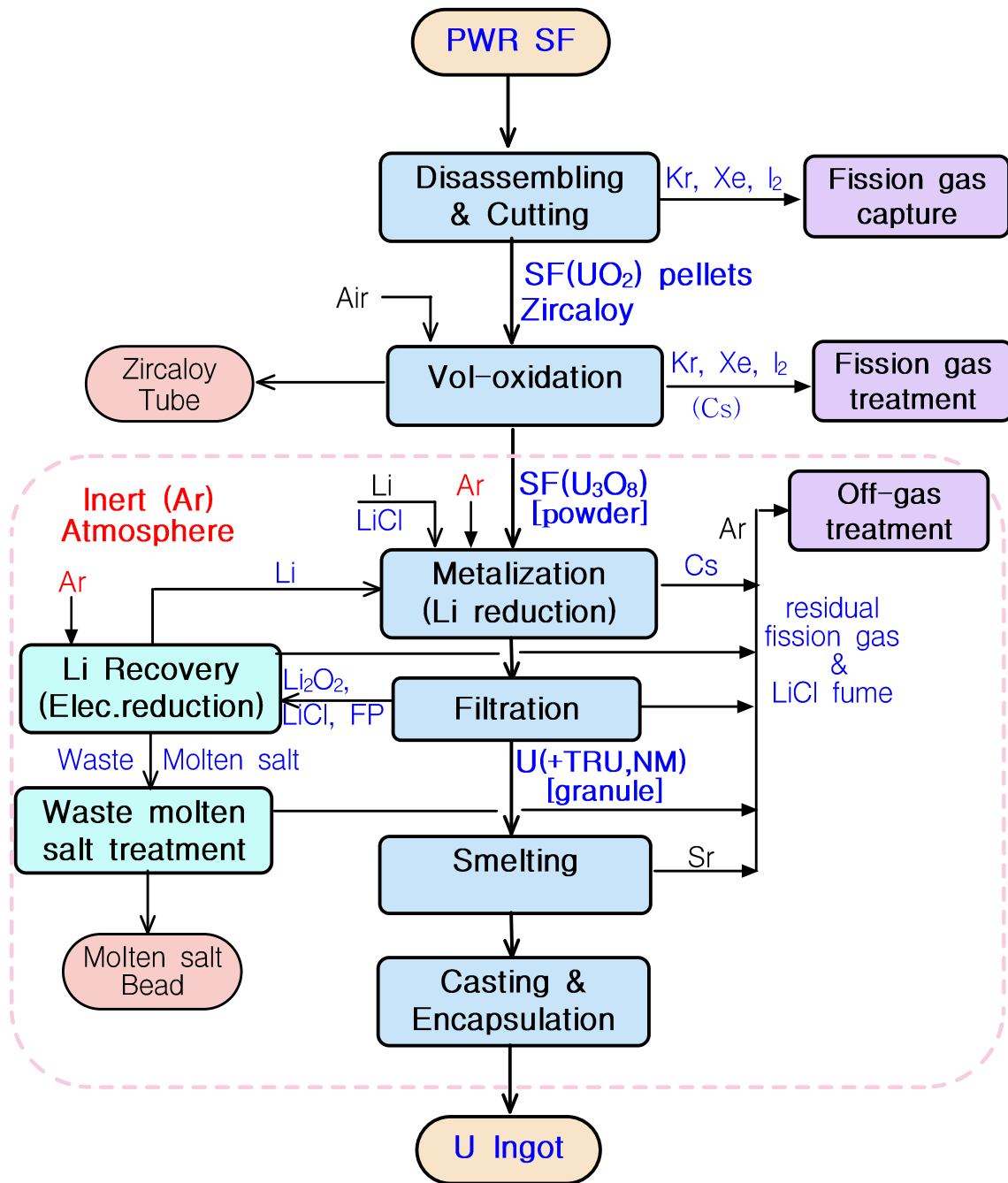


Fig. 2. Basic Process Flow Diagram for advanced spent fuel management process.

Mass Balance

*** Basis ;**

- PWR Spent Fuel 20kg HM/batch, - Burn-up : 43,000 MWd/tU
- Enrichment : U-235 3.5%, - Cooling : 10 Years

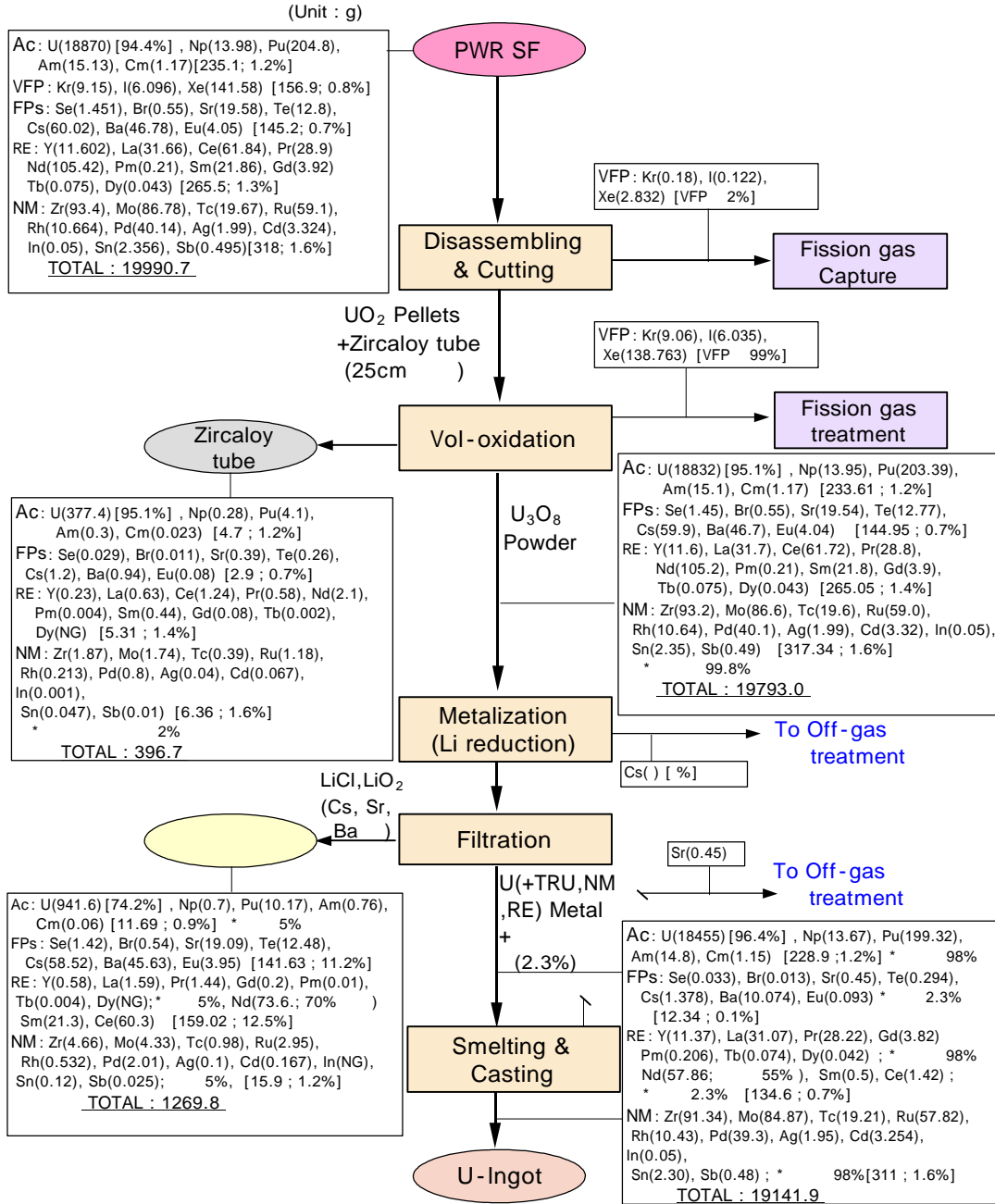


Fig. 3. Mass balance of elements in unit process of advanced spent fuel management process.

Radioactivity Balance

* Basis ;

- PWR Spent Fuel 20kg HM/batch, - Burn-up : 43,000 MWd/tU
- Enrichment : U-235 3.5%, - Cooling : 10 Years

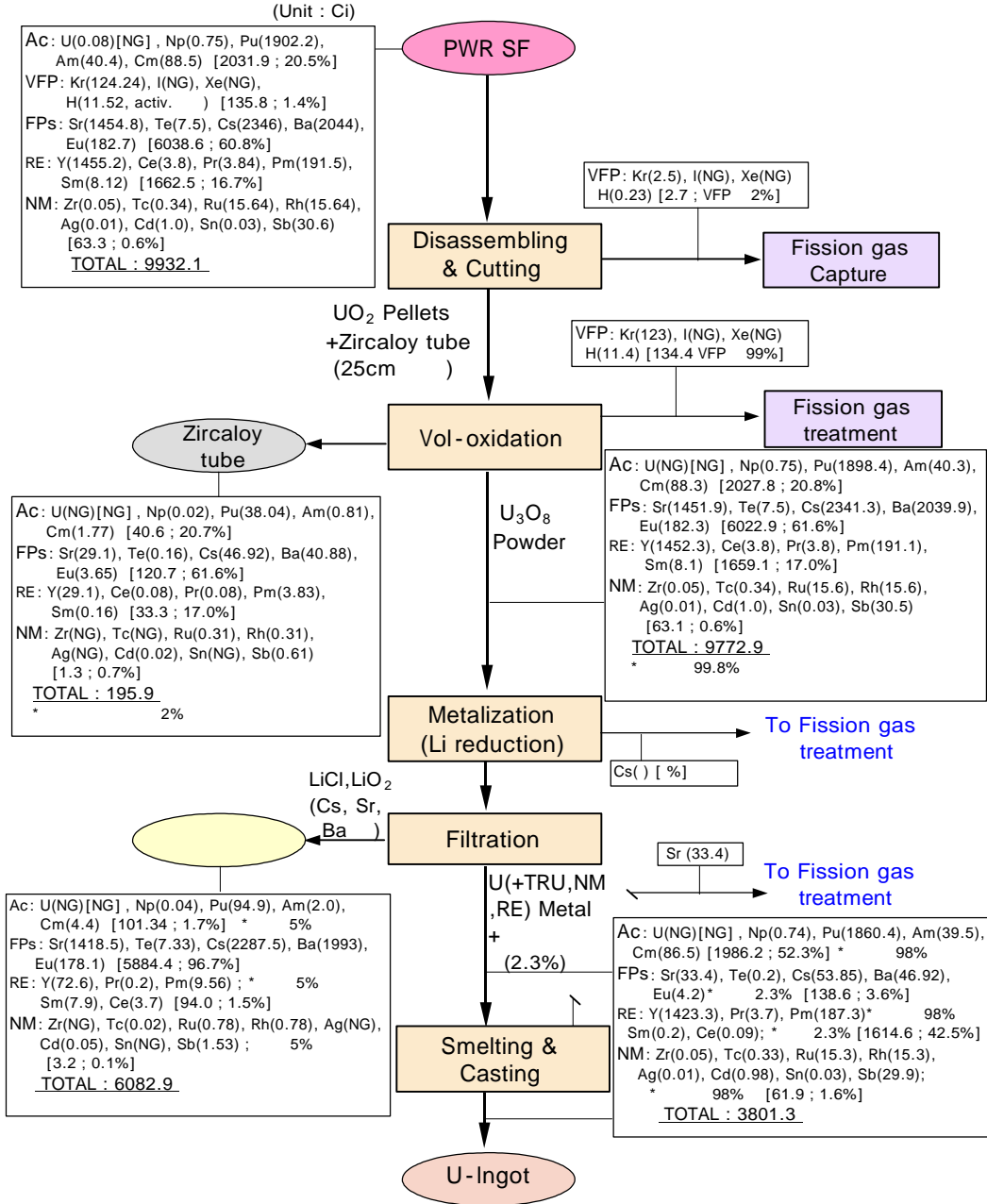


Fig. 4. Radioactivity balance of elements in unit process of advanced spent fuel management process.