

# 파이로 Mock-up 시설 소개 및 설계 특성

■ 정 원 명 / 한국원자력연구원, wmchoung@kaeri.re.kr

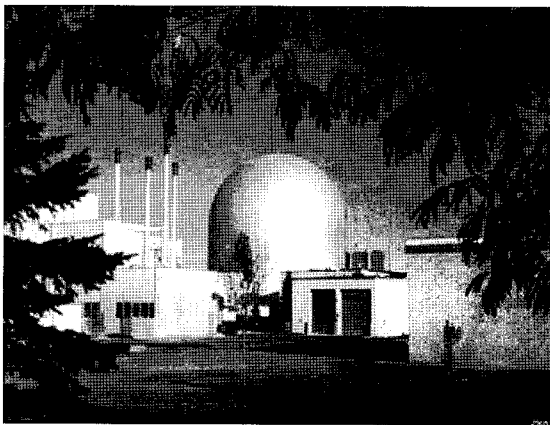
## 파이로 Mock-up 시설 개요

오늘날 세계는 에너지 자원의 고갈, 환경오염 및 급변하는 유가 등 에너지와 관련하여 많은 문제점을 안고 있으며, 각국에서는 이에 대한 대응으로 저탄소 그린에너지로서의 차세대 에너지원 개발에 몰두하고 있다. 차세대 에너지원 중 하나인 원자력 에너지는 현재까지 상용화된 에너지원 중 가장 효율적인 에너지원으로서 각국에서 추가적인 원전건설 혹은 원전개발을 추진하고 있다.

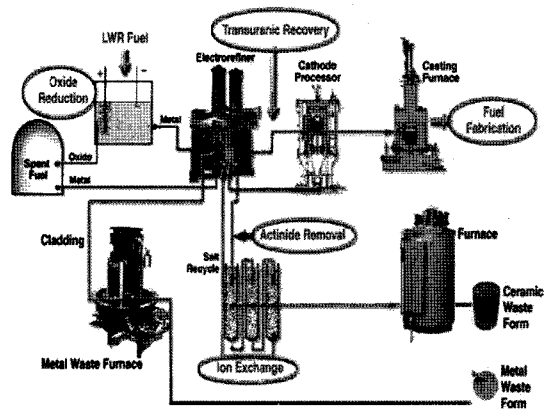
원자력 에너지를 이용함에 따라 원자력이 우리에게 필요한 에너지를 공급해 주지만 동시에 원치 않는 부산물인 사용후연료가 발생하게 된다. 국내에서 가동 중인 원자력발전소에서 발생하여 저장하고 있는 사용후연료는 2009년 6월말 기준으로 총 10,490 MTU에 이르며, 매년 경수로형 발전소(PWR) 호기당 약 19 MTU(100만 kW급 기준), 중수로형 발전소(PHWR)는 호기당 약 95 MTU가 발생하고 있어, 총 저장용량이 약 13,200 MTU인 점

을 고려할 때 2016년이면 기존 발전소 부지 내 사용후연료 저장용량이 포화에 이를 것으로 예측하고 있다. 현재 건설 중에 있거나 건설을 준비 중에 있는 원자력발전소가 8기에 이르고, 또한 최근 국가도 온실가스 감축과 석유의존도를 완화하려는 세계적인 추세에 대응하기 위하여 실질적인 에너지원으로서 원자력을 이용한 전력생산을 증대하는 정책을 추진하고 있으므로, 이를 지속적으로 보장하기 위해서는 원자력 발전에서 필연적으로 발생하는 사용후연료를 효율적으로 관리하는 구체적인 방안을 수립하는 것이 시급하다.

파이로 건식처리 기술은 사용후연료 처리를 위해 개발 중인 기술로서 미국, 프랑스, 일본 등의 원자력 선진국에서도 주목하는 기술이다. 미국은 GNEP(Global Nuclear Energy Partnership) 프로그램의 일환으로 고속로 및 핵연료주기에 대한 구상을 발표하였는데, 이 프로그램 중에는 우리나라 같은 에너지원을 분리 재생하여 에너지원으로 사용하고 장수명 핵종은 소멸시키는 과정이 포함되어



[그림 1] 미국 EBR-II(Experimental Breeder Reactor-II) 전경



[그림 2] 미국 INL(Idaho National Laboratory) 파이로 공정 개념도



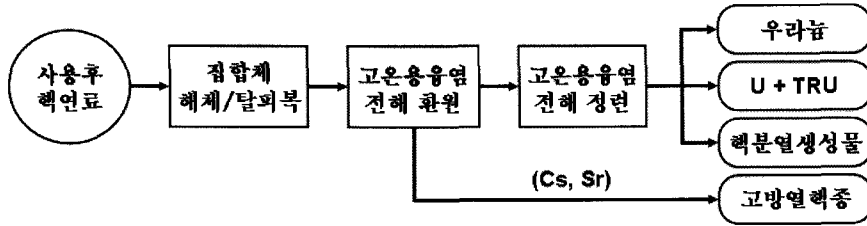
있다. 파이로 건식처리 기술은 기존 사용후연료 처리기술에 비하여 핵확산 금지 대상인 고순도 플루토늄의 추출을 원천적으로 배제할 수 있어 누적되는 사용후연료를 환경 친화적으로 감량하기에 적합한 기술로 인식되고 있다.

파이로 기술은 기존의 습식 처리기술인 PUREX (Plutonium Uranium Extraction)에 비해 핵확산저항성, 경제성, 환경친화성 및 자원 활용성 제고를 통한 원자력의 지속가능성 확보가 가능한 기술로 알려져 있다. 파이로 기술의 주요 특징으로는 첫째 고온(500 ~ 650℃) 용융염 매질을 사용하여 전기화학적 방법에 의해 핵물질을 분리하는 개념으로 고순도의 플루토늄 단독 회수가 불가능하고, 둘째 폐기물 발생량이 적으며 방사성 독성이 단기간에 감소하며, 셋째 공정이 단순하여 소규모 시설이 가능하고, 넷째 제 4세대 원자로(고속로) 핵연료물질 생산이 가능하다.

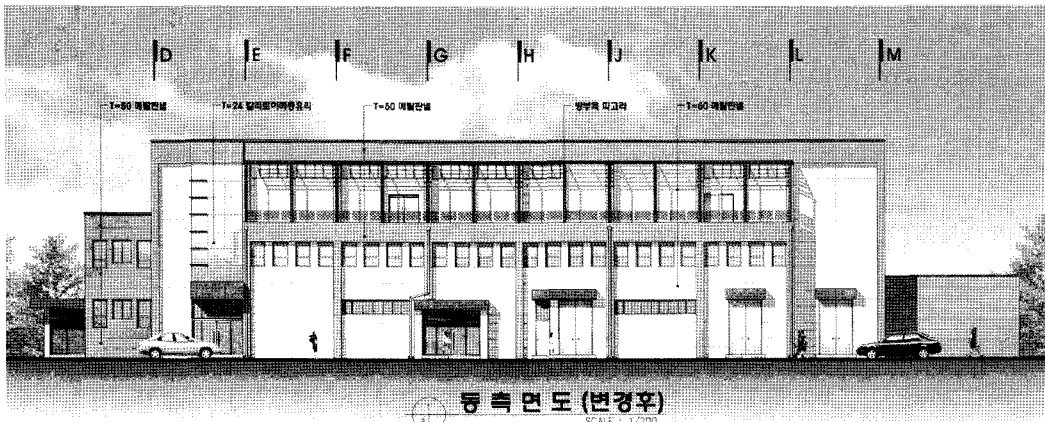
파이로 Mock-up 시설은 현재 단위공정별로 개발되는 파이로 공정 전체를 연계하여 파이로 일관공정시험을 시험하기 위한 공학규모 파이로 일관공정 inactive 시험시설이다. 파이로 Mock-up 시설에서는 조사되지 않은 천연우라늄 및 감손우라늄을 사용하여 파이로 공정의 Cold Test를 수행하게 되며, 시험을 통하여 개발된 단위공정간 연계성과 원격운전 및 유지보수의 효율성, 시설의 안전성을 분석, 평가를 수행할 예정이다. 현재 파이로 Mock-up 시설의 설계를 완료하고, 파이로 Mock-up 구축을 위한 건설공사가 진행 중에 있다.

### 파이로 Mock-up 시설 특성

파이로 Mock-up 시설은 파이로공정에서 취급하는 고온의 공정물질의 특성을 고려하여 엄격한 불활성 분위기가 유지되는 글로브 박스 형태의 대형



[그림 3] 파이로 기술 공정 개념도



[그림 4] 파이로 Mock-up 시설 건물 외부 입면도

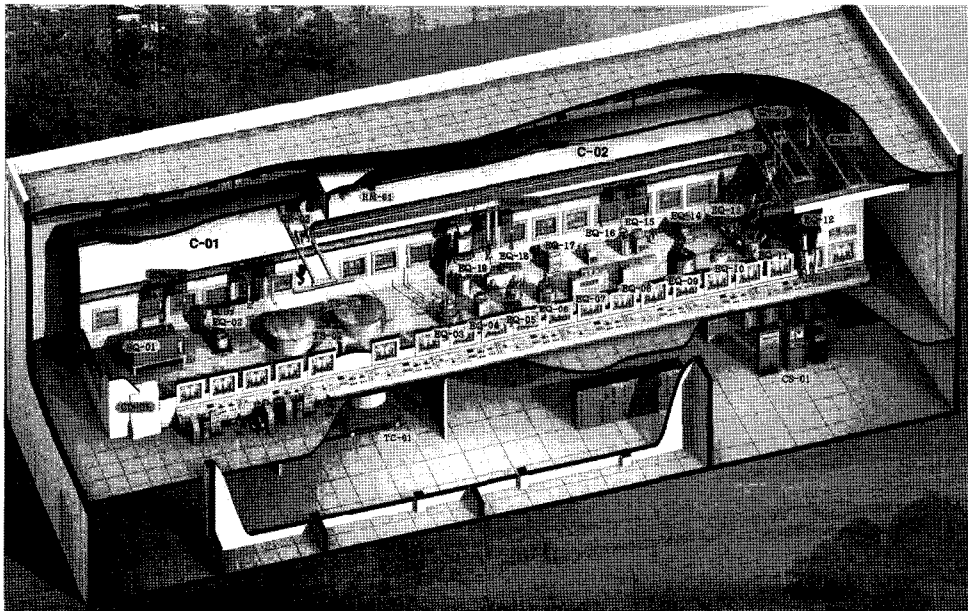
모의셀과 원격운전개념과 기밀성이 유지되는 셀 장비와 건물 부대설비 등으로 구성되어 있다. 파이로 Mock-up 시설 내에서 비록 조사되지 않은 핵연료 물질만을 취급하지만, 원자력법상에서 규정하는 방사성물질을 안전하게 취급하고 방사성물질의 외부 누출을 최소화 할 수 있는 시설로서 구축될 예정이다.

파이로 Mock-up 시설은 그림 4의 건물 입면도와 같이 지상 3층 철근 콘크리트 구조물로서 폭 18 m, 길이 43.2 m, 높이 12 m이며, 연면적은 2,283 m<sup>2</sup>이다. 각 층의 높이는 1층 4 m, 2층 3.4 m, 3층 4.6 m이고, 2층과 3층은 설치되는 설비의 규모를 고려하여 일부분을 제외하고, 대부분이 개방된 형태의 구조물로 설치된다.

파이로 Mock-up 시설 내부 배치는 그림 5의 조감도에서와 같이 1층에는 일부 공정장치와 아르곤 가스 계통설비와 유틸리티 공급설비가 설치되며, 2층과 3층이 개방된 대부분의 공간은 아르곤 분위기 모의셀이 설치되고, 파이로 공정장치의 대부분은 모의셀 내에 설치되어 모든 공정시험이 원격으로 운전될 수 있도록 부대장비 등이 설치된다. 설

치되는 모의셀의 규모는 길이 40 m, 폭 4.8 m, 높이 6.4 m이며, 모의셀 구조물 내부는 stainless steel 강판으로 lining되어 엄격한 기밀성이 확보되도록 설치된다.

파이로 Mock-up 시설에는 셀 내에 설치되는 공정장치의 효율적이며, 안전한 운전과 유지보수를 원격으로 수행할 수 있도록 여러 종류의 셀장비들이 부착된다. 셀에 부착되는 셀장비로는 셀 내 장비의 반입, 반출을 위한 대형 및 소형장비 이송시스템, 셀 내부 투시를 위한 윈도우, 원격조작기인 MSM(Master Slave Manipulator), 양팔형조작기, 인셀 크레인 및 호이스트, 셀조명, 터보간 및 배관과 배선 연결을 위한 Feedthrough 등이 부착되어 있다. 파이로 Mock-up 시설은 방사성물질을 취급할 뿐만 아니라 불활성분위기로 운영되기 때문에 셀에 설치되는 모든 장비는 원격 유지 보수 기능과 엄격한 기밀성이 보장되도록 설계되어야 한다. 이를 위하여 셀에 부착되는 모든 장비는 셀 내부의 불활성 분위기 유지를 위하여 기밀성이 철저하게 유지되도록 이중 seal 형태의 특수 구조로 제작되어 설치된다. 또한 셀 구조물은 파이로 공정특성과



[그림 5] 파이로 Mock-up 시설 내부 조감도

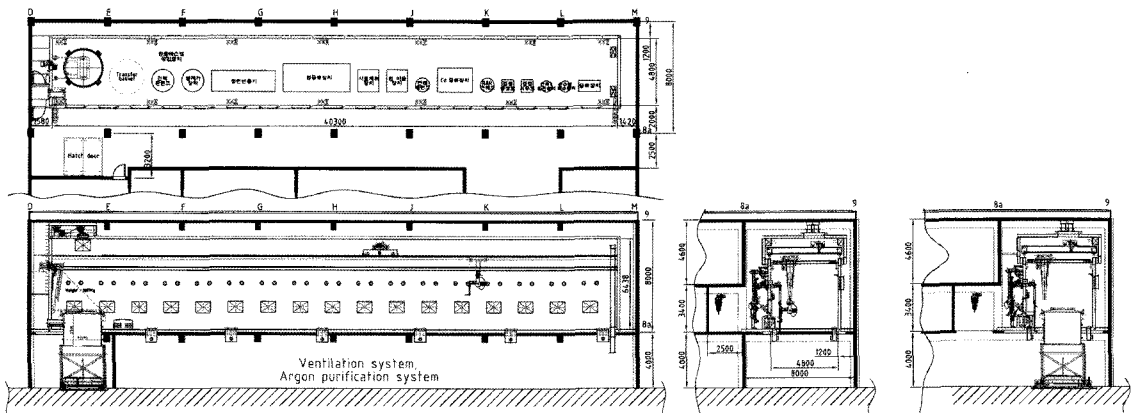
셀 내 아르곤 분위기 제어 기능을 고려하여 최대 -305(12 inch) mmAq의 부압조건에서 견디도록 제작되어 설치된다.

파이로 Mock-up 시설은 방사선관리구역과 비관리구역으로 구분되며, 1층은 옥외에 아르곤 가스 공급설비와 파이로 Mock-up 시설 내에서 사용되는 열원을 제거하기 위한 냉각설비가 설치되며, 1층 내부에는 셀 아르곤 분위기 제어를 위한 아르곤 가스 계통설비와 유틸리티 공급설비 등이 설치된

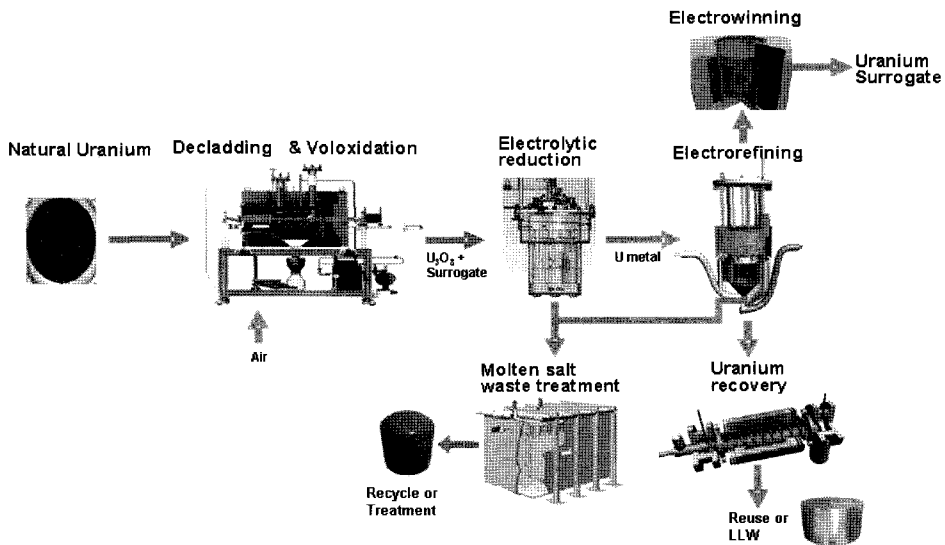
다. 파이로 Mock-up 시설 2층은 프라이드 공정시험이 수행되는 주 공간으로서 그림 6의 배치도와 같이 대부분의 공정장치가 설치되는 공정셀, 작업구역 및 출입관리시설 등으로 구성된다.

### 파이로 Mock-up 시설 공정 특성

현재 건설 중에 있는 파이로 Mock-up 시설에서 수행하게 되는 파이로 일관공정은 그림 7에 표기된



[그림 6] 파이로 Mock-up 시설 셀 구조물 개념도



[그림 7] 파이로 Mock-up 시설 파이로 공정 흐름도

공정흐름도와 같이 모의핵연료 탈피복(Chopping and Decladding) 및 분말화(Voloxidation), 전해환원(Electro-Reduction), 전해정련(Electro-Refining), 전해제련(Electro-Winning), 염폐기물 정제/회수(Salt Purification and Recovery) 및 고화처리(Waste Form Fabrication) 등의 단위공정으로 구성된다. 이 중 탈피복 및 분말화공정은 Air 분위기 하에서 처리되며, 대부분의 공정은 산소나 수분이 거의 없는( $\leq 50$  ppm 이하) 불활성 분위기 하에서 처리되어야 하므로 대형 아르곤(Ar) 가스 분위기 셀 내에서 수행하게 된다.

파이로 Mock-up 시설 내에 설치되는 파이로 일관공정의 단위공정별 공정특성 및 공정장치 구성 등 공정설명은 다음과 같다.

**탈피복 및 분말화(Vol-oxidation)공정**

기존의 탈피복 및 분말화공정은 탈피복공정과 분말화공정이 별개로 분리되어 처리되도록 구성되었다. 기존의 탈피복공정은 핵연료 다발이 해체되고, 일정 길이의 Rod-cut 형태로 절단되어 운반되어 온 핵연료를 피복관(Zircaloy tube)과 핵연료  $UO_2$  펠렛을 Slitting 방법을 사용하여 분리하였다. 분말화공정에서는 분리된  $UO_2$  펠렛을 반응온도  $500^\circ C$ 에서 공기와 반응하여  $U_3O_8$  분말로 제조하였다. 이때 반응과정에서  $UO_2$  펠렛의 내부에 함유된 휘발성 핵분열생성물 중 상당량과 과량으로 공급된 공기가 방출되게 되는데 이들은 off-gas 처리공정을 거쳐 배기되도록 하였다.

그러나 파이로 Mock-up 시설에 설치되는 탈피복 및 분말화공정은 기존의 2개의 분리된 기존의 공정개념과는 달리 하나의 반응기 내에서 공정조건을 달리하는 공정단계를 거쳐 처리되도록 단순화하였으며, 가능한 휘발성 핵분열생성물 원소들을 대부분 제거할 수 있도록 공정조건을 설정하였다.

여기서 제조된  $U_3O_8$  분말은 용기에 담긴 채로 불활성 분위기 셀 내에 설치되는 전해환원공정으로 운반된다.

**전해환원(Electro-Reduction)공정**

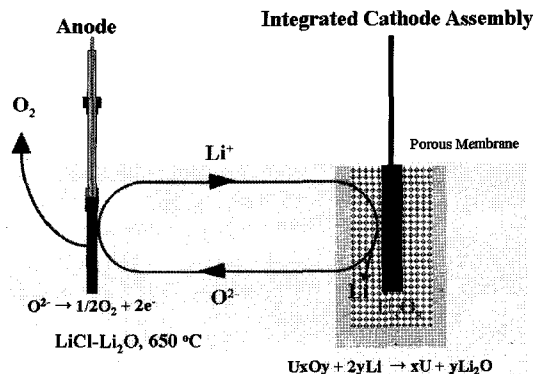
전해환원공정은 분말화공정에서 제조된  $U_3O_8$  분말을 전기화학적인 방법을 이용하여 U 금속으로

환원시키는 공정으로서 우라늄산화물( $U_3O_8$ )을 금속(U)으로 환원시키는 단계(Oxide Reduction)와 환원된 금속전환체 중에 잔존하는 잔류염을 제거하는 잔류염 제거단계(Cathode Consolidation)의 2단계 공정을 거치게 된다. 전해환원공정의 공정 원리는 그림 8의 반응기구 개념도에 표기된 내용과 같이  $Li_2O$ 가 용해( $Li_2O$  농도 1 ~ 3 wt%)된 LiCl 용융염 매질의 고온( $650^\circ C$ ), 상압 조건에서 우라늄산화물의 전도특성과  $Li_2O$ 의 전해분리특성을 이용하여  $Li^+$ 의 용융염 계 내에서의 close cycle에 의해 우라늄 금속으로 환원하는 공정으로서 전기화학적 분해반응에 의해 생성된  $Li^+$  이온이 다공성 필터와 우라늄 산화물로 구성된 일체형 cathode 전극에 전착과 동시에 우라늄 산화물과 반응하여 우라늄 금속으로 전환되며, 생성된 우라늄 금속은 cathode 표면에 전착되어 분리된다. Anode 전극에서는 전해과정에서 발생하는 산소이온이 산소가스로 방출된다.

그리고 전해환원공정 단계에서 생성된 금속전환체에는 많은 양의 잔류염( $LiCl-Li_2O$ )이 포함되어 있어 다음 단계인 잔류염 제거단계에서 진공의 고온 조건(약  $700^\circ C$ ) 하에서 잔류염을 제거하여 순수한 금속전환체를 제조하여 후속공정인 전해정련공정으로 운반하게 된다.

**전해정련(Electro-Refining)공정**

전해정련공정은 우라늄 금속만을 선택적으로 고체음극에 전해, 석출하여 분리하는 전해정련 단계



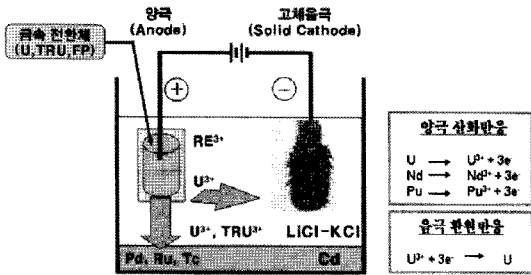
[그림 8] 전해환원 반응기구 개념도



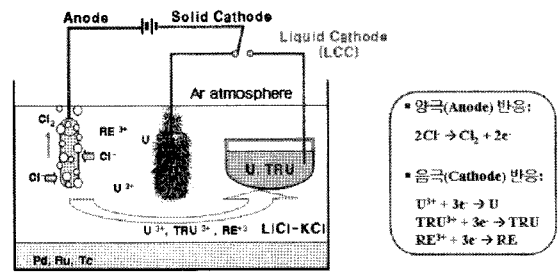
와 이들 우라늄 금속 석출물에 함유된 잔류염을 증발시켜 회수하는 잔류염 증류(Salt Distillation) 단계, 우라늄 석출물을 Ingot으로 제조하는 우라늄 Ingot 제조단계의 3단계 공정을 거치게 되며, 전해정련공정은 반연속식(Semi-continuous) 공정으로 구성된다.

전해정련공정의 공정원리는 그림 9의 반응기구 개념도에 표기된 내용과 같이  $UCl_3$ 가 용해( $UCl_3$  농도 9 wt%)된  $LiCl+KCl$ (59 : 41 mol%, 45 : 55 wt%) 공용염 매질 하의 고온(500°C), 상압 조건에서 일단 전이원소를 제외한 모든 금속은 Anode basket에서 산화되어 공용염 내에 용해된다. 이 중에 설

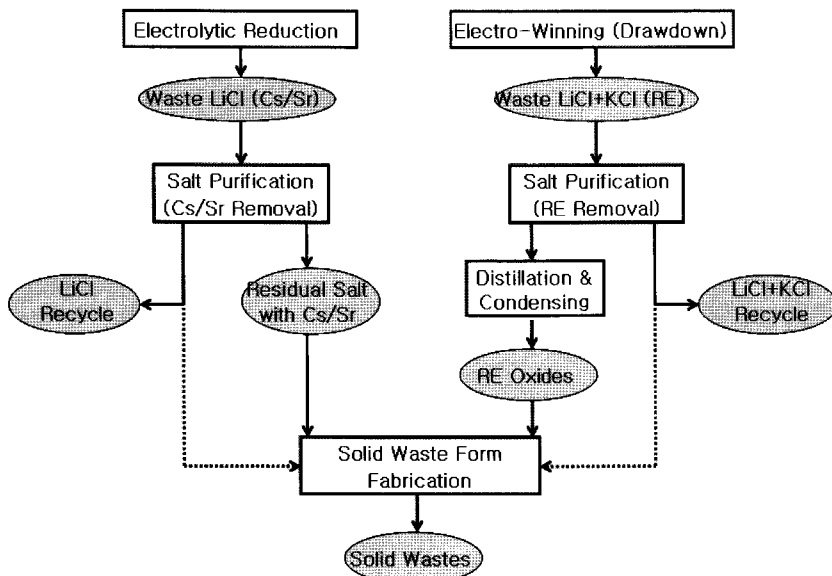
정된 반응조건에서 순수 우라늄 금속은 고체음극(Solid Cathode)에 전해반응에 의해 전착되어 석출되며, 희토류금속 핵분열생성물과 TRU는  $TRUCl_3$ 와  $RECl_3$  화합물 형태로 공용염 매질에 용해되고, 전이금속 핵분열생성물은 녹지 않아 Anode basket에 금속형태로 남아 있게 된다. 고체음극에 전착된 우라늄 금속 Dendrite 형태의 석출물은 scraping 또는 자중에 의해 분리되어 Conveyer에 의해 염 증류장치로 보내지며, 800 ~ 1000°C의 진공조건(500 mTorr 이하)에서 잔류염을 제거한 후 Melting furnace로 보내져 1300°C의 고진공 하에서 우라늄 잉곳으로 제조된다.



[그림 9] 전해정련공정 반응기구 개념도



[그림 10] 전해제련공정 반응기구 개념도



[그림 11] 폐용융염 처리공정 흐름도

### 전해제련(Electro-Winning)공정

전해제련공정은 Liquid Cadmium Cathode(LCC: Cd 용해온도 321℃)에 TRU, RE 및 잔류 우라늄을 석출 회수하는 단계와 회수된 금속에서 Cadmium을 증류하는 단계, 그리고 사용한 공용염에 잔류하는 핵분열생성물을 제거하는 Drawdown 단계의 3 단계로 구성된다.

전해제련공정의 공정원리는 그림 10의 반응기 구 개념도에 표기된 내용과 같이 전해정련공정에서 사용한 LiCl+KCl 공용염 매질의 고온(500℃), 상압 조건에서 전해제련 반응기 내부에 부유되어 있는 LCC에 전해반응에 의해 TRU, RE 및 잔류 우라늄 염화물이 금속으로 환원되어 Cd-Metal(TRU, RE, U) alloy 형태로 전착되어 분리되며, 다음 단계인 Cd Distiller로 보내진다.

Cd Distiller에서는 첫 단계로 고온(1100℃), 고진공 조건에서 Cd를 증류(Cd 기화온도 767℃)하게 되며, 다음 단계는 같은 반응기를 이용하여 고온

(1400℃), 상압 조건에서 회수된 TRU, RE, U를 Consolidation 시키게 된다.

### 염폐기물 처리공정

염폐기물 처리공정은 LiCl을 용융한 후 결정형태로 회수하여 Cs/Sr을 제거하는 정제공정 단계와 분리된 Cs/Sr을 처분하기 위하여 고화체로 제조하는 고화체 제조단계의 2단계로 구성되며, LiCl+KCl 공용염폐기물 처리공정은 Oxidation 방법에 의해 RE를 산화물로 침전시켜, 공용염과 분리하는 정제공정 단계와 분리된 RE에 잔류하는 공용염을 증류, 응축시켜 제거하는 단계, 분리된 RE를 처분하기 위한 고화체로 제조하는 고화체 제조단계의 3단계로 구성된다. 염폐기물의 고화체 제조공정은 Ingot 상태의 염을 분말로 제조하여 제조된 무기물질과 Cone type 반응기에서 반응시킨 후 유리분말을 투입하여 혼합한 분말을 내열성 용기에서 고온(950℃)조건에서 고화체로 제조하게 된다. (※)