

2002 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

차세대관리 종합공정 실증시설의 개념설계 연구

**Study on Conceptual Design of Experimental facility of
Advanced Spent Fuel Conditioning Process**

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

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위하여 개발중인 차세대관리 종합공정의 실증을 위하여 기존 차폐시설을 공정 특성에 맞도록 개조하여 활용하기 위하여 차세대관리 종합공정 실증시설의 개념설계 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 차세대관리 종합공정 실증시설의 기본 개념을 정립하고, 차세대관리 종합공정의 특성을 이해할 수 있는 공정 자료와 차폐시설 및 부대시설의 개조 방안 및 분야별 설계기준을 제시하였으며, 시설의 안전성 확보를 위한 안전성분석 및 환경영향평가를 수행하기 위한 개념을 정립하였다. 본 연구결과는 차세대관리 종합공정 실증시설의 기본설계 및 상세설계 수행을 위한 기본 자료로 활용되며, 시설의 방사선 안전성 확보에 필수적인 안전성분석 및 환경영향평가를 위한 기초 자료로 활용된다.

Abstract

The advanced spent fuel conditioning process(ACP) was proposed and developed for effective management of the PWR spent fuel. An existing hot cell was selected for demonstration of this process. But this hot cell should be modified to satisfy the requirements of this process. In this study, the conceptual design for ACP facility was performed, and suggested basic concepts of hot cell facilities for demonstration of ACP, process descriptions, modification plan of the existing hot cell facilities, and design basis in various field of technical design. And then, this results will be utilized as basic concepts to perform the basic and detail design, and safety analysis & environmental evaluation of hot cell facilities for ACP.

1. 서론

현재 국내에서 운전되고 있는 원자력 발전소는 2001년 기준으로 16기가 설치되어 운영되고 있으며, 시설 발전용량은 13,716 MWe 이다. 그리고 장기 발전계획을 보면 2015년까지 10기의 원자력 발전소가 추가로 건설되고, 2기의 원자력 발전소가 폐기될 계획(2008년 고리 1호기, 2013년 월성 1호기)으로 되어 있다. 이 경우 원자력 발전소의 시설 발전용량이 26,050 MWe에 이르게 되어 원자력 발전이 국내 전력 공급의 중추적인 역할을 담당하게 된다.

원자력 발전소에서는 필수적으로 사용후핵연료가 발생하게 되며, 원자력 발전소의 증가는 사용후핵연료의 안전한 관리와 저장에 대한 관심과 우려를 증대시키고 있다. 현재 국내에서 각 원자력 발전소에서 보관 중에 있는 사용후핵연료의 누적량은 2000년 기준으로 경수로용 사용후핵연료의 경우는 2,451 Mt, 중수로용 사용후핵연료의 경우는 2,438 Mt이며, 2040년에는 사용후핵연료의 누적예상량이 경수로용 사용후핵연료가 19,344 Mt에 이르고, 중수로용 사용후핵연료는 14,758 Mt에 이를 것으로 예측하고 있다.

현재 사용후핵연료의 저장은 원자력 발전소 호기간 이송 저장 및 repacking 또는 발전소 내에 건식저장시설을 건설 운영하는 방법 등으로 해결하고 있으나 2010년 이후에는 사용후핵연료 저장 및 처분장의 확보가 지속적인 원자력 발전을 위하여 시급히 해결해야될 과제이다.

차세대관리 종합공정은 사용후핵연료의 안전하고 효율적인 관리를 위하여 제시된 공정으로 이 공정을 이용하여 사용후핵연료를 금속으로 전환하고, 고발열성 핵종(Cs, Sr)을 효율적으로 제거하여 사용후핵연료의 부피, 발열량 및 방사선의 세기를 최대 1/4까지 감소시키고, 처분용기의 소요량과 처분장의 소요면적을 1/2 이상으로 축소함으로써 처분 안전성과 경제성을 높일 뿐만 아니라, 처분장의 규모 축소로 인해 부지 선정을 용이하게 할 수 있다. 그리고 환경 친화적인 기술로서 핵확산 관련 저항성이 높으며, 미래 지향적인 건식 핵연료주기 시스템의 연구개발에 기여할 수 있는 기술적인 장점으로 인하여 현재 연구개발이 진행 중에 있다[1].

그러나 차세대관리 종합공정의 실증을 위해서는 공정특성을 고려한 차폐시설의 확보가 필요하나 신규로 시설을 확보하기 위해서는 많은 재원과 인력 및 시간이 소요되므로 기존 시설을 활용하기로 하였으며, 이를 위해서는 차세대관리 종합공정의 특성 및 용도에 맞게 개조되어야 한다.

특히, 차세대관리 종합공정의 경우는 방사선 준위가 매우 높은 사용후핵연료를 고온의 조건에서 LiCl 용융염 매질 하에서 취급하게되므로 기존의 다른 공정에 비해 강화된 기밀성이 요구될 뿐만 아니라 일부 공정은 엄격히 관리되는 불활성 분위기(Ar) 하에서 취급해야된다. 그러나 현재까지 국내에서 사용후핵연료의 연소후 조사특성을 분석하기 위한 소규모 시험들은 수행되었으나 차세대관리 종합공정과 유사한 고온의 용융염 매질 하에서의 화학처리 공정의 설계 또는 실증시험의 경험이 없는 형편이다.

따라서 차세대관리 종합공정의 실증을 위해서는 α - γ type의 hot cell이 필요하며, 공정장치 내부 및 주변에 고순도 아르곤을 이용한 불활성(Inert) 분위기의 유지가 필수적이나 현재 국내에는 α - γ type의 hot cell과 불활성 분위기를 제어하는 hot cell을 보유하고 있지 못하므로 기존의 γ type의 hot cell을 차세대관리 종합공정의 특성에 맞도록 개조하여야 활용이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 이미 발표된 차세대관리 종합공정의 실증시설 설계요건서[2]를 기준으로 실증시험을 수행할 차세대관리 종합공정의 공정기능 및 공정장치의 특성을 분석하고, 실증시설로 활용할 기존 차폐시설의 여건 등을 고려하여 시설의 안전성과 효율적인 공정의 조업성 등이 확보

되도록 차세대관리 종합공정 실증시설의 개념을 정립하여 제시하였다. 그리고 본 연구결과는 이어서 수행되는 실증시설의 기본설계 및 상세설계 수행을 위한 기본 자료로 활용되며, 인허가를 위해 필수적으로 수행하여야 하는 사고해석 등의 안전성분석과 환경영향평가를 수행하기 위한 기초 자료로서 활용될 예정이다.

2. 연구 내용 및 결과

2.1. 차세대관리 종합공정 특성 분석

차세대관리 종합공정은 Fig. 1의 공정개념도에 표기된 내용과 같이 주 공정은 우선 저장 중인 PWR 사용후핵연료 집합체를 해체하여 공정처리가 용이한 크기로 절단하는 해체 및 절단(Disassembling & Cutting) 공정을 거쳐 UO_2 pellet을 피복관인 Zircaloy tube로부터 분리하는 탈피복(Slitting) 과정과 UO_2 pellet을 고온의 공기 분위기 하에서 산화우라늄(U_3O_8) 분말로 전환하는 분말화(Vol-oxidation)공정을 거치게 된다. 산화우라늄(U_3O_8) 분말로 전환된 사용후핵연료는 차세대관리 종합공정의 핵심공정인 다음 단계의 금속전환(Metalization)공정 처리과정에서 고온의 용융염(LiCl) 매질 하에서 우라늄 산화물(UO_2 or U_3O_8)의 전도특성과 Li_2O 전해특성을 이용한 전기화학적 방법에 의해 환원되어 우라늄 금속으로 전환된다. 금속으로 전환된 사용후핵연료는 용융염과 분리되어 금속전환체는 다음 공정인 주조(Smelting & Casting)공정에서 저장용 Canister에 효율적으로 장입하기 위하여 일정 모양의 봉 형태를 갖는 금속 Ingot로 주조된다. 그러나 사용후핵연료의 해체 및 절단공정은 이미 타 용도로 시설을 확보하고 있어 차세대관리 종합공정의 연구개발 내용에서는 제외되어 있다.

주공정 외에 사용후핵연료의 금속전환 과정에서 배출되는 휘발성 핵분열생성물(fission gas)과 용융염 hume의 포집, 처리하여 배출하는 폐가스 처리공정과 공정처리 후 발생하는 폐용융염의 안정적 처분을 위하여 잔류하는 핵분열생성물(fission product) 중 고방열성, 고준위 방사선 물질인 Cs과 Sr을 분리, 제거하는 공정으로 구성된다. 여기서도 Cs과 Sr을 분리, 제거하는 공정은 현재 별도의 연구과제로 수행하고 있어 차세대관리 종합공정의 연구개발 내용에서는 제외되어 있다.

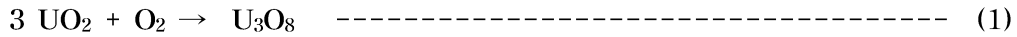
2.1.1. 탈피복(Slitting) 및 분말화(Vol-oxidation)공정

사용후핵연료 집합체가 해체되고, 운반 및 취급을 고려하여 길이 25 cm로 절단된 사용후핵연료는 탈피복 및 분말화공정으로 보내진다. 탈피복공정은 UO_2 pellets 외부 피복관인 Zircaloy tube를 cutter blade로 slitting하여 UO_2 pellets과 Zircaloy tube를 물리적으로 분리하는 과정이며, 분말화공정은 분리된 UO_2 pellets을 산화우라늄(U_3O_8) 분말로 전환하는 과정이다.

이는 다음 공정인 금속전환공정에서 우라늄 산화물을 우라늄 금속으로 전환할 때 금속 전환율과 반응속도를 높이기 위해서는 우라늄 산화물의 비표면적이 매우 주요한 인자로서 작용하게 되는데 UO_2 pellets을 분말형태로 전환함으로써 비표면적(Specific surface area)을 크게 높일 수 있기 때문이다.

UO_2 pellets은 고온(400~600 °C)의 air 분위기 하에서 공기 중 산소와 반응하여 반응식 (1)에 표기된 것과 같이 산화우라늄(U_3O_8) 형태의 분말로 전환된다. 이 반응은 밀도가 11.0 g/cc인 UO_2 가 8.3 g/cc의 밀도를 갖는 U_3O_8 로 전환되면서 상대적으로 30% 이상의 부피 팽창이 일어나

면서 UO_2 pellets이 분말형태로 전환되는 것으로 알려져 있다.



분말화 공정에서 산화속도는 500 °C에서 최대를 나타내는 것으로 보고되었으며, 600 °C 이상의 조건에서는 분말의 sintering 현상으로 인해 전환율과 반응속도가 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다[1, 2]. 따라서 분말화 공정에서의 조업을 위한 반응온도는 500 °C로 설정되어 제어되며, 이 온도에서 U_3O_8 분말의 평균 입도는 약 30 μm 이고, 비표면적은 약 0.28 m^2/g 이다.

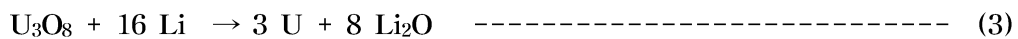
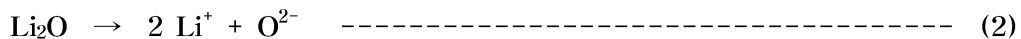
탈피복 공정장치는 사용후핵연료 cutting rod를 주입하는 feeder와 cutter, 그리고 slitting된 피복관과 UO_2 pellets을 수집하여 분리하는 hopper로 구성되며, 분말화 공정장치는 UO_2 pellets 공급장치, UO_2 pellets의 산화반응기, UO_2 pellets과 제조된 U_3O_8 분말 분리장치 및 U_3O_8 분말 hopper, 반응온도 유지를 위한 가열기 및 제어장치, 공기 주입 및 배기 장치 등으로 구성된다.

분말화 공정에서 UO_2 분말이 공급되는 공기에 의해 비말동반되는 것을 최소화하고, 반응기 내부 압력 제어를 용이하게 하기 위해서는 공급되는 공기의 반응기 내에서의 속도가 매우 중요하며, 이를 위해 반응기 내에서 공기의 유속이 가능한 20 cm/sec를 초과하지 않는 것이 바람직하다[3].

그리고 분말화 공정의 반응과정에서 UO_2 pellets의 내부에 함유된 핵분열생성물 중 fission gas인 H_2 는 전량, Kr, Xe, I는 일부가 과량으로 공급된 air와 함께 방출되며, 이들은 별도로 설치되는 off-gas 처리공정에서 처리 후 배기된다.

2.1.2. 금속전환(Metallization) 공정

금속전환 공정은 차세대관리 종합공정의 핵심 공정으로서 $LiCl-Li_2O$ 용융염 계에서 우라늄 산화물의 전도 특성과 Li_2O 의 전해 분리특성을 이용하여 우라늄 금속으로 환원하는 공정으로 magnesia filter를 양극(cathode)으로 사용하고 고순도 백금(Pt)을 음극(anode)으로 사용하는 전해반응조에서 아래 반응식 (2)와 (3)에 표기된 반응에 의해 우라늄 산화물이 우라늄 금속으로 전환되고 cathode 표면에 전착되어 분리된다.



금속전환 공정장치는 potentiostat, 전해반응기, 교반기, 가열장치 및 냉각장치, inert cover gas 공급장치 등으로 구성되며, 금속전환 공정에서 발생하는 off-gas로는 잔류 fission gas, $LiCl$ 이 증발하면서 발생하는 용융염 fume, inert cover gas로 공급되는 Ar 등이 고려되어야 하며, cold trap과 off-gas 처리장치를 거쳐 배기된다.

2.1.3. 주조(Smelting & Casting)공정

주조공정은 금속전환공정에서 제조된 금속전환체를 고온에서 용해하고, 제조된 금속 용탕을 주조장치로 공급하여 저장하기 용이한 형태인 round bar나 괴 형태의 금속으로 성형, 주조하는 공정이다. 금속전환체의 대부분이 우라늄 금속이므로 우라늄 금속의 용융점이 1133 °C인 점을 고려하여 주조를 위한 용해로의 조업 온도조건은 1400 °C로 설정하였으며, 우라늄 금속은 강한 산화성 물질이므로 용해 및 주조 과정에서 산소와의 접촉이 엄격히 제한되는 불활성 분위기에서 수행되어야 하기 때문에 일반적으로 고진공 분위기에서 공정이 처리되며, 제조된 우라늄 ingot는 용기에 담겨 capsuling되어 저장 장소로 운반된다.

주조 공정장치는 용해 chamber, 도가니 및 가열로로 구성되는 용해장치와 용탕 주입장치, 주조로, 진공장치 및 냉각장치로 구성되는 주조장치로 구성된다.

그리고 주조공정에서 발생하는 off-gas로는 금속전환체 표면에 붙어 있던 LiCl이 증발하면서 발생하는 용융염 fume과 잔류하는 Cs, Sr 화합물, 극히 일부 fission gas 등이 고려되어야 하며, 이들은 cold trap과 Cs, Sr trap을 거친 후 off-gas 처리장치를 거쳐 배기된다.

2.2. 공정 실증 범위 및 규모 설정

차세대관리 종합공정의 실증시험을 위한 적정 공정규모를 결정하는 것은 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. 실증공정의 규모는 실증시험에서 얻는 공정 data의 공학적 측면에서의 신뢰성과 상용화를 위한 기초 설계자료 확보, 기존시설 여건 등을 고려하여 사용후핵연료 20 kg-HM/batch를 처리하는 규모로 설정되었으며, 설정된 공정 규모와 공정자료를 기준으로 보수적 시설의 안전성을 고려하여 공정흐름도, 물질수지, 공정장치의 배치 등을 정립하였다.

2.2.1. 사용후핵연료 기준 사양

차세대관리 종합공정의 실증시험에 사용될 핵물질의 취급 기준량이나 기준 방사능을 설정하기 위해서는 사용할 사용후핵연료의 기준 사양의 결정이 선행되어야 한다. 따라서 차세대관리 종합공정에서 처리 대상으로 삼고 있는 PWR 사용후핵연료의 농축도, 원자로 조사조건 및 현실적으로 사용이 가능한 사용후핵연료 여건 등을 고려하여 차세대관리 종합공정 실증시설에서 취급할 사용후핵연료의 기준 사양을 아래와 같이 설정하였다.

- 사용후핵연료 취급량 : 20 kg-HM/batch
- U-235 농축도 : 3.5 wt%
- 연소도 : 43,000 MWD/MTU
- 냉각기간 : 10 년

PWR 사용후핵연료 1 rod의 우라늄 질량이 2 kg이므로 차세대관리 종합공정의 실증을 위한 1 batch 처리를 위해서는 10개 rod를 사용하게 된다. 현재 사용후핵연료의 운반을 위해 사용할 수 있는 Padirac cask의 내부 container의 크기를 고려하면, 사용후핵연료 rod는 25 cm 길이로 절단되어야 하며, 이 경우 사용후핵연료 rod의 길이가 4 m이므로 160개의 rod cut을 1 batch 공정처리에서 취급하게 된다.

2.2.2. 공정흐름도 및 물질수지

차세대관리 종합공정의 실증을 위한 공정흐름도는 공정특성과 실증시설로 활용 예정인 기존시설의 hot cell 여건 등을 고려하여 Fig. 2의 process flow diagram에 표기된 내용의 범위로 설정하였다.

공정의 물질수지 및 radioactivity 수지는 공정시험 결과로 확인되어 제시된 공정별 수율과 ORIGEN code를 이용하여 계산된 결과를 이용하여 시설의 보수적 안전성을 확보하기 위하여 공정수율의 최대치와 최소치를 설정하고, 이를 기준으로 물질수지는 Fig. 3, radioactivity 수지는 Fig.4에 표기된 내용과 같이 제시하였다.

2.2.3. 기준 방사선원

차세대관리 종합공정 실증시설의 기준 방사선원을 결정하기 위해서 먼저 실증시설 내 공정의 운전개념을 설정하는 것이 중요하다. 가능한 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, 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 Li를 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 1에 표기된 내용과 같이 기준 방사선원을 설정하였다. 그러나 상세설계 과정에서 폐용융염을 차폐셀 내에 별도의 차폐공간 내에 보관함으로써 기준 방사선원을 1/2로 줄이는 방안도 검토될 수 있다.

2.3. 차폐시설 및 공정설비 배치

2.3.1. 차폐시설 배치

실증시설로 활용 예정인 기존 차폐시설의 내부 크기는 길이 11 m, 폭 2 m, 높이 4.5 m이며, 실증공정의 효율적이고 안전한 운전 및 유지, 보수를 고려하여 Fig. 4에 표기된 내용과 같이 2개의 차폐셀로 분리하여 설치되도록 하였으며, 공정설비가 설치되는 차폐셀은 오염의 잠재성이 상대적으로 높은 분말을 취급하게되는 탈피복 및 분말화 공정설비와 금속전환 공정설비가 분리되도록 차폐 기능이 없는 barrier를 설치하는 방안이 고려되었다.

각 차폐셀에는 rear door가 설치되며, 공정용 차폐셀의 rear door에는 padirac adapter가 설치되어 사용후핵연료 rod cut, 우라늄 ingot는 물론 폐용융염 등 모든 방사성 물질을 동일한 padirac cask를 이용하여 운반하게 된다. 그리고 rear door 주변에는 isolation room을 설치하여 오염지역의 확산 방지와 Ar 공급설비의 누출로 인한 위험성을 차단하는데 용이하도록 하였다.

2.3.2. 공정설비 배치

공정설비의 배치는 차폐셀 내 핵물질 및 폐기물의 flow-path, 시약류의 투입, 운전 및 유지보수, safe guard 측면 등을 고려하여 Fig. 5에 표기된 내용과 같이 설정하였으며, 특히 flow-path 측면에서 간섭 없이 one-through flow가 유지되도록 개념을 정립하였다. 그리고 공

정설비에 공급되는 LiCl, Li₂O 등 시료의 경우는 inert 분위기에서 준비되고 공급되어야 하므로 Ar 분위기 glove box를 isolation room에 설치하도록 하였다.

2.4. 실증시설 분야별 설계기준 및 개념

2.4.1. 안전등급(Safety class)

차폐셀 설비의 안전등급은 SC(Safety Class), NNS(Non Nuclear Safety), NA(Non Application)로 구분된다. 여기서 SC는 원자로와 같이 어떠한 경우에도 설계된 개념 그대로의 안전성이 유지되어야 하는 시설로서 일반적으로 원자로 및 원자로 1차 계통설비에만 적용되고 있으며, 핵주기 시설에서는 사용후핵연료를 직접 취급하게되는 시설 이외에는 적용되지 않는다. NNS는 ANSI 안전등급 분류기준에 의한 구조 및 설비로서 고장이 발생하더라도 규정된 사고시 작업 종사자 및 주민에 대한 최대허용피폭선량을 초과하지 않으나 방사성 물질을 함유하는 경우이며, NA는 안전등급 분류기준을 적용할 수 없는 대상으로 별도의 산업 규격 또는 표준을 적용하는 경우이다.

그리고 품질등급은 Q, T, S로 분류되며, Q 등급은 safety class 1,2,3로 분류되는 시설 또는 기기이고, T 등급은 safety class 1,2,3로 분류되지 않는 기기로서 방사성 물질을 포함하고 있는 시설 및 기기로 10 CFR50 Appendix B의 품질요건을 선별적으로 적용하며, S 등급은 NNS 또는 NA로 분류되면서 품질등급 Q나 T로 분류되지 않는 시설 및 설비로서 제작자의 품질보증요건이나 산업규격을 선별적으로 적용한다[3].

차세대관리 종합공정 실증시설로 사용되는 hot cell 및 부대설비의 안전등급, 지진등급 및 품질등급을 기존 시설의 분류 등급과 공정 특성을 고려하여 Table 2의 표기된 내용과 같이 개념을 설정하였다.

2.4.2. 차폐셀 설계기준

차세대관리 종합공정의 실증시설로 활용 예정인 기존 차폐셀은 당초 설계 시 β - γ type의 hot cell로 설계되었으나 차세대관리 종합공정의 경우 사용후핵연료 분말을 취급하게 되고, 고온의 용융염 매질 하에서 산소나 수분의 농도가 매우 낮게 제어되는 분위기에서 공정운전이 수행되므로 α - γ type의 air 분위기에 일부 inert(Ar) 분위기 유지가 가능하여야 한다.

차폐체 설계를 위한 원자력법 상에 제시된 설계기준은 주당 1 mSv이며[4], 이 경우 주당 작업시간을 40시간으로 가정할 경우 0.025 mSv/hr이나 실증시설의 보수적 안전성 확보를 위하여 상시 운전구역(7000 zone)에서는 선량기준을 0.01 mSv/hr를 기준으로 하고, 유지·보수 수행을 위한 일시 출입구역인 작업구역(8000 zone)에서의 선량기준은 0.15 mSv/hr를 기준으로 설정하였다.

2.4.3. 차폐셀 운전설비

차폐셀 내 공정운전 및 유지보수를 위해 필요한 주요 장비로는 공정운전을 위한 MSM(Master Slave Manipulator), 중량물의 취급 및 이동과 유지, 보수를 위한 power manipulator와 In-cell crane, 그리고 차폐창이 고려되어야 한다.

실증시설의 hot cell은 α - γ type이므로 원격조정기는 sealed type MSM이 설치되어야 한

다. 특히 master와 slave를 연결하는 shaft 경계에 이중 seal 구조(주로 oil lubricated lip seals)를 가지며, seal을 요하는 부분의 packing은 기밀성과 내구성이 좋은 quadruple, nitrile rubber가 사용되어야 하고, MSM의 취급용량은 작업자의 작업성을 고려하여 9~12 kg 범위로 선정하는 것이 바람직하다.

Power manipulator와 In-cell crane은 hot cell 내부에 설치되며, MSM 취급용량을 초과하는 무거운 작업의 수행을 위하여 설치된다. 주로 pardirac cask에 의해 운반된 사용후핵연료 container의 인입, Vol-oxidation공정 처리 후 zircaloy tube container의 인출, Vol-oxidation 공정 처리 후 U_3O_8 분말 container의 금속전환공정으로의 이동, 금속전환공정 처리 후 금속우라늄의 Smelting공정으로의 이동, 최종 우라늄 Ingot의 이동 및 인출, 용융염 bead의 저장 및 인출을 위한 이동과 공정장치의 유지보수에 활용된다. 공정 특성상 공정작업에서 취급하게되는 중량물의 무게를 고려하여 power manipulator 취급용량은 최대 100 kg, In-cell crane의 취급용량은 최대 1 ton으로 설정하였다.

2.4.4. 핵물질 및 폐기물 운반설비

차세대관리 종합공정 실증시험의 수행을 위해 실증시설 내에서 취급하게되는 핵물질 및 방사성 폐기물과 관련하여 핵물질 및 고준위 폐기물을 시설간 상호 운반이 필요한 시설로는 현재 사용후핵연료를 저장하고 있고, 또한 사용후핵연료를 해체 및 절단하는 공정설비를 갖추고 있는 조사후시험시설과 고준위 방사성 폐기물을 보관, 저장하는 폐기물처리시설, 그리고 본 실증시설이 위치한 조사재시험시설을 예상할 수 있다.

시설 상호간 또는 차폐셀 내에서 핵물질이나 고준위 방사성 폐기물을 이동하게되는 경우의 핵물질이나 고준위 방사성 폐기물 형태 및 취급량을 공정에서 1 batch 처리를 기준으로 정리하여 Table 3의 내용과 같이 설정하였으며, 실증시설의 hot cell에서 모든 방사성물질의 인입과 인출은 취급용량, 차폐능, 안전성 등을 고려하여 Fig. 6과 Table 4에 표기된 padirac RD-15 type으로 단일화하여 단순화함으로써 시설 운영의 효율성을 높일 수 있도록 개념을 설정하였다.

2.4.5. 환기설비

실증시설 차폐셀의 환기설비의 설계기준은 기존 시설여건과 외국 시설의 설계기준을 고려하여 부압조건은 최대 -30 mmAq, 환기회수는 20회, leakage rate는 -30 mmAq 조건에서 4 vol. %/day로 설정하였다[5]. 배기는 차폐셀 내에 추가로 설치되는 1차 filter bank(PRE+HEPA+Charcoal)를 거쳐 조사재시험시설의 기존 배기 duct에 연결되어 2차 filter bank(HEPA+Charcoal+HEPA)를 거친 후 배기된다. 차폐셀 내에 추가되는 filter bank의 정압 손실로 인하여 기존 배기 fan의 용량이 설정된 설계기준을 충족시키지 못할 경우는 boosting fan을 추가로 배기구에 설치하는 방안도 고려되어야 한다.

2.4.6. Ar 공급설비

차세대 관리공정의 특성상 inert 분위기 유지를 위하여 공급되는 Ar 가스는 허용 산소 및 수분의 농도 요건에 따라 2가지 종류 순도(99.999%, 99.9999%)의 Ar 가스를 공급하게된다. 따라서 공정 반응기 내부의 cover gas와 LiCl, Li_2O 시약을 준비하여 공급하게되는 glove box 내에 공급되는 Ar 가스는 고순도(99.9999%)를 사용하고, 이 중 glove box에 공급되는 것은 양

이 많으므로 정제하여 순환 사용하도록 하였다. 그리고 반응기의 공기 혼입을 방지하기 위하여 공급되는 Ar 가스와 반응기 냉각용 Ar 가스는 순도가 낮은 것(99.999%)을 사용하며, one-through로 사용하게 된다. 이와 같은 개념을 정립하여 Ar 공급, 정제설비의 개념도를 Fig. 7의 표기된 내용과 같이 설정하였다.

3. 결론

본 연구에서는 현재 개발중인 차세대관리 종합공정의 실증을 위하여 기존 차폐시설을 개조, 활용하기 위하여 공정 특성을 분석하여 실증시험에 적합한 차폐시설의 개념을 정립하여 제시하였으며, 본 연구결과는 실증시설의 기본설계와 상세설계, 안전성 분석을 위한 기본자료로 활용된다.

- 차폐셀은 α - γ type의 process용 hot cell과 maintenance hot cell로 분리하고 isolation room 설치
- 기준 방사선원을 22,800 Ci로 설정하고 차폐셀 내 별도 차폐공간을 활용 기준방사선원을 줄일 수 있도록 제시
- 차폐셀 운전장비(원격조작기, 차폐창 등) 및 penetration 이중 seal 구조로 설계
- 차폐셀 부압기준 -30 mmAq, leakrate 4 vol.%/day(at -30 mmAq), 환기회수 20회/hr
- Ar 공급설비는 용도별로 2가지 순도로 구분하여 공급방법을 분리

감사의 글

이 연구는 과학기술부 주관으로 추진중인 원자력중장기사업의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. KAERI/RR-2128/2000, 사용후핵연료 차세대관리 공정개발, 2000.
2. KAERI/TR-2004/2002, 차세대관리 종합공정 실증시설 설계요건서, 2002.
3. Nuclear Regulation Reports, 10 CFR 50, Commerce Clearing House Inc., 1986.
4. 한국방사성동위원소협회, 원자력관련고시집, 2001.
5. ANS, Design Guides for Radioactive Material Handling Facilities and Equipment, 1988.

Table 1. 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

* 폐용융염은 차폐셀 내 별도의 차폐공간에 보관하여 제외 방안 검토

Table 2. Classification of hot cell facilities for safe design.

주요 기기 및 계통	안전등급	내진등급	품질등급	비고
1. Hot cell structure	SC-3	I	Q	
2. Hot cell liner	NA	Non	S	
3. Shielding window	SC-3 (NNS)	I	Q (T)	
4. Manipulator	NA	Non	T	
5. Rear door	SC-3 (NNS)	I (Non)	Q (T)	
6. In-cell crane	NA	Non	T	
7. Inter door between cells	NA	Non	T	
8. Padirac adapter	NA	Non	T	
9. Fire protection system in hot cell	NA	Non	S	
10. Process equipments in hot cell	NA	Non	T	
11. Electrical system in hot cell	NA	Non	S	
12. In-cell filter bank	SC-3	I	Q	
13. Ar supply & purification system	NNS	Non	T	
14. Air ventilation system	NA	Non	S	

Table 3. Transfer of nuclear materials to be handled in ACPF.

구분	물질 형태	취급량	시설간 이동
핵물질	SF cutting rod (UO ₂ pellet)	20 kg-HM (21.69 kg-UO ₂)	PIE 9405 hot cell → 실증시설 hot cell
	U ₃ O ₈ powder	23.59 kg-U ₃ O ₈	실증시설 hot cell 내 이동
	U Ingot	19.15 kg-HM	실증시설 hot cell → PIE 9405 hot cell
폐기물	폐용융염 bead	188 kg-LiCl/batch	실증시설 hot cell → PIE 9405 hot cell → 폐기물처리시설 monolith

Table 4. Specification of RD-15 Padirac cask.

Item	Description
Package type	A/B type
Weight	2,700 kg
Dimension	- Diameter : 1,098 mm - Length : 1,314 mm
Materials	- Shells : cast iron - Gamma shield : lead - Impact limiter : balsa wood & limenstone
Cooling type	Dry type (air)
Content	- Chopped PWR fuel rod (250mm x 56 ea) - Burn-up : 45,000 MWD/MTU - Cooling time : 5 years - Decay heat : 20 W

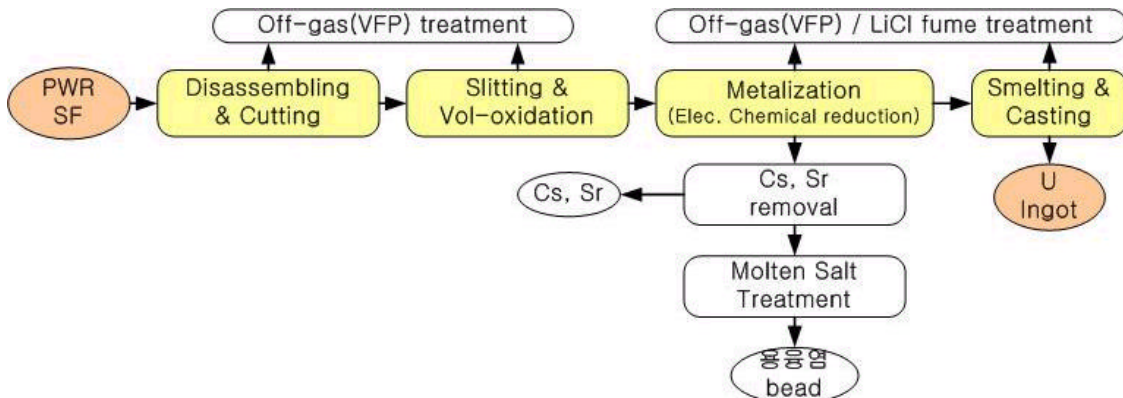


Fig. 1. Process block diagram for ACP.

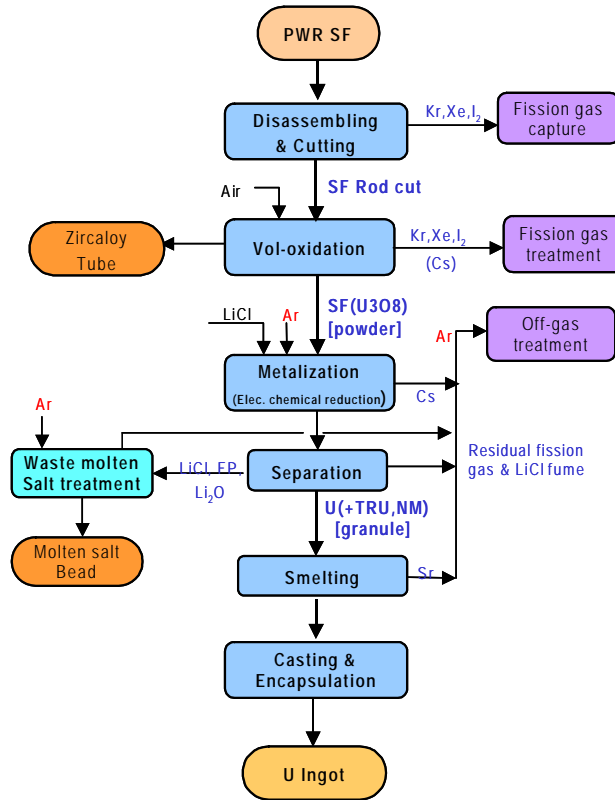


Fig. 2. Process flow diagram for ACP.

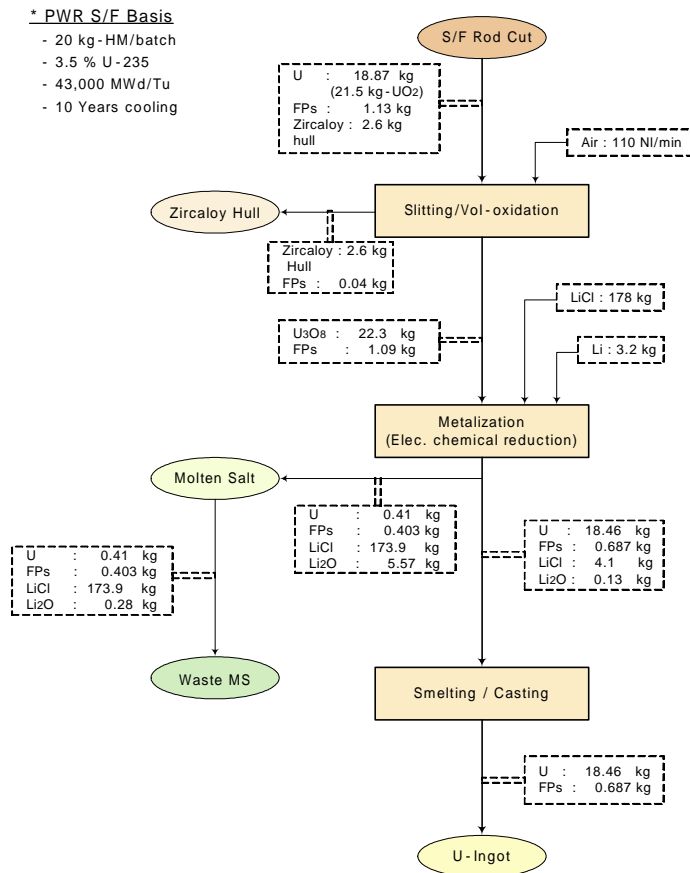


Fig. 3. Material balance diagram for ACP.

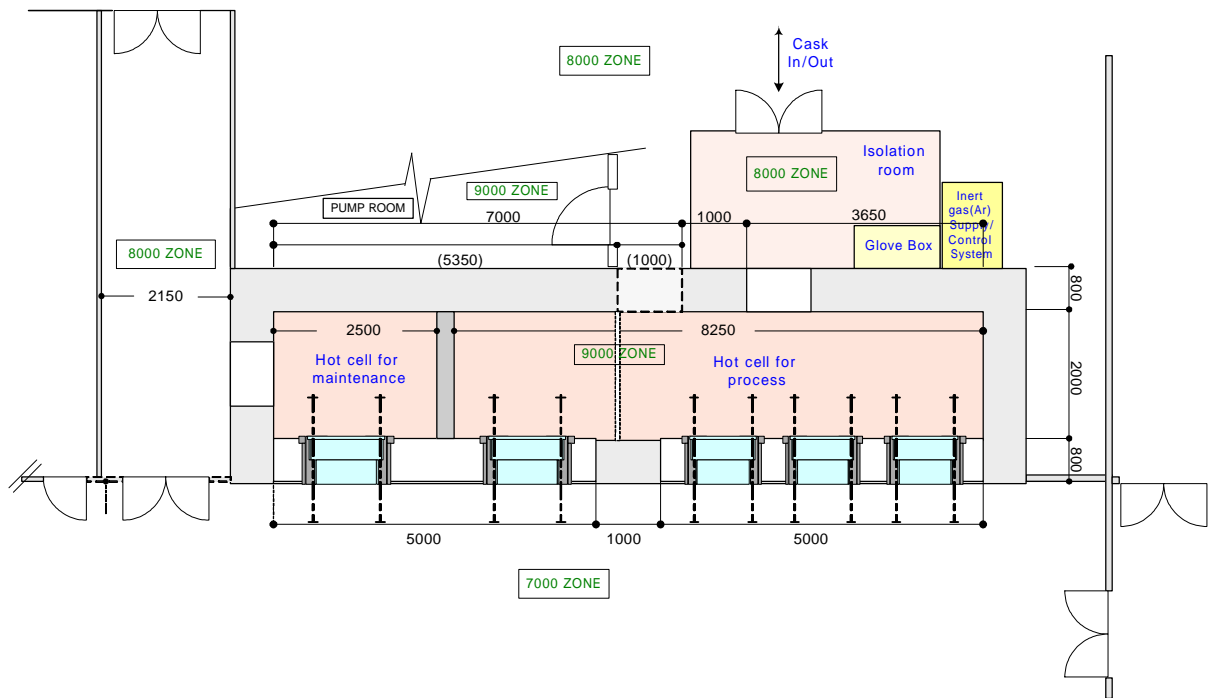


Fig. 4. General lay-out of hot cell for ACP.

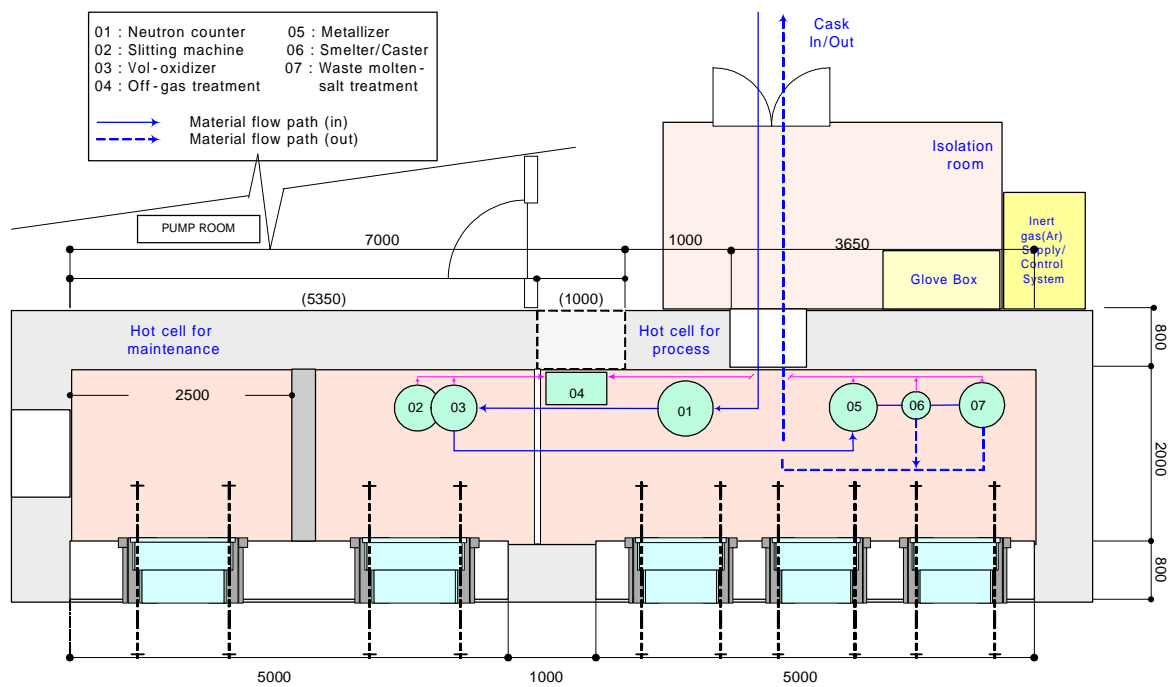
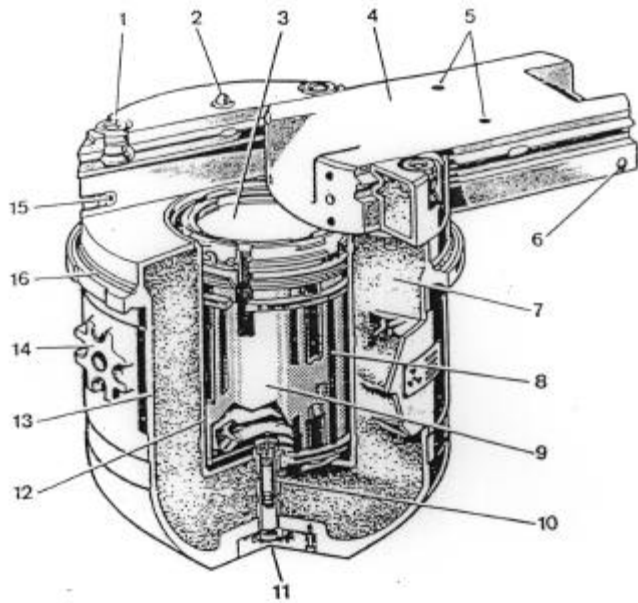


Fig. 5. General lay-out of process equipments and flow path for ACP.



1. Roller
2. Safety latch
3. Transfer container
4. Shielded sliding door,
5. Drilled hole
6. Ball locking system
7. Lead shield,
8. Telescopic guiding system
9. Container basket
10. Spigot of basket,
11. Bottom plug
12. Internal shell
13. External shell,
14. Bosses for lifting fork
15. Stop door close
16. O-ring

Fig. 6. Typical fixture of RD-15 Padirac cask.

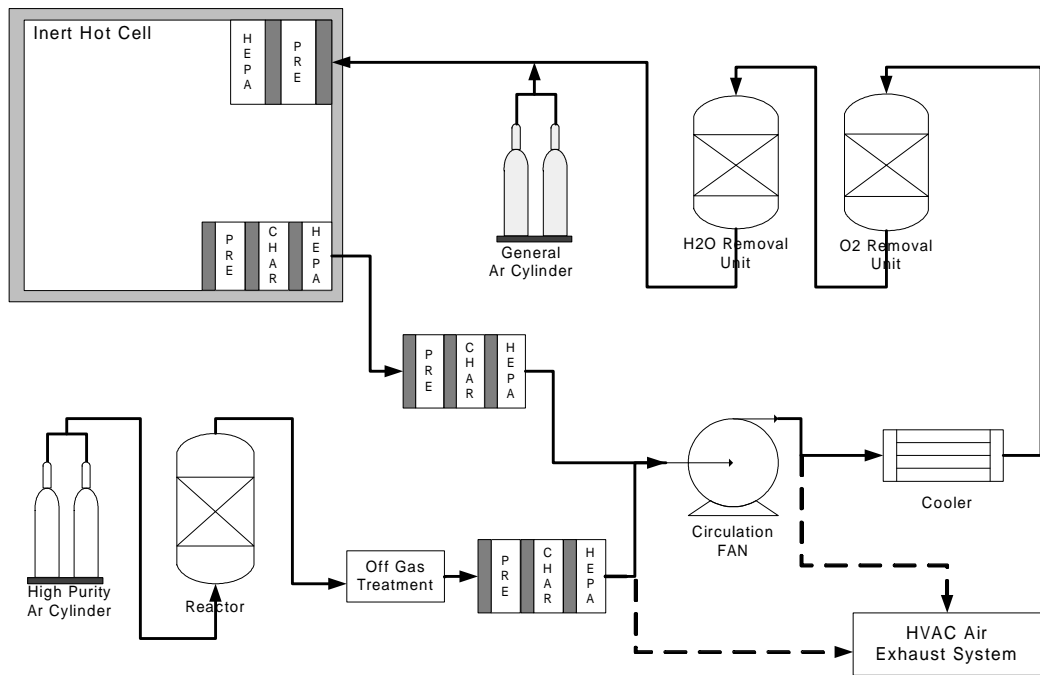


Fig. 7. Conceptual flow diagram of Ar supply and purification system.