

사용후핵연료 차세대관리 종합공정 실증시설

Hot Cell Facility for Demonstration of Advanced Spent Fuel Conditioning Process

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

요 약

국내 경수로형 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위하여 현재 건식처리공정으로 개발 중에 있는 차세대관리 종합공정의 실증시험이 계획되어 있다. 실증시험의 수행을 위해서는 기밀성이 유지되는 α - γ type 핫셀시설과 시설의 안전성 확보가 필수적이다. 핫셀시설 확보에 필요한 재원을 최소화하기 위하여 기존 β - γ type 핫셀을 개조하여 활용하기로 하였으며, 차세대관리 종합공정의 특성을 고려하여 실증시설의 보수적 안전성 확보와 핫셀 내 효율적인 공정운전을 위한 분야별 설계요건을 확립하였다. 또한 이를 기준으로 실증공정의 공정조건과 상세한 작업흐름을 분석하여 핫셀 및 부대설비와 공정기기들의 구성과 배치를 최적화하였으며, 실증공정 및 핫셀 개조를 위한 기본설계와 상세설계, 안전성분석과 환경영향평가를 완료하였다.

Abstract

The advanced spent fuel conditioning process(ACP) was proposed to reduce considerably the overall volume and radioactivity for effective management of the PWR spent fuel in respects on safety and economy. The ACP is under research and development, and have scheduled to perform hot test for demonstration of the ACP after several years. For hot test, hot cell facility of α - γ type possess conservative safety is required essentially. A existing hot cell of β - γ type will be refurbished to minimize construction expenditures of hot cell facility. In this study, the design requirements are established, and the process detail work flow was analysed for the optimum arrangement to ensure effective process operation in hot cell. And also, the basic and detail design of hot cell facility and process and safety analysis was performed to secure conservative safety of hot cell facility and process.

1. 서 론

현재 국내에서 원자력에 의한 월간 발전실적이 112,133 백만kWh로서 전체 발전실적의 약 40%를 차지하고 있으며, 장기 발전계획에 의하면 2015년까지는 원자력에 의한 발전실적이 약 45%에 이르게 됨으로 원자력 발전이 국내 전력 공급의 가장 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나 원자

력 발전소에서는 필수적으로 사용후핵연료가 발생하게 되며, 현재 국내 각 원자력 발전소에서 보관 중에 있는 사용후핵연료의 누적량은 2000년 기준으로 경수로용 사용후핵연료의 경우는 2,376 MtU, 중수로용 사용후핵연료의 경우는 2,256 MtU이며, 2020년에는 사용후핵연료의 누적예상량이 경수로용 사용후핵연료가 9,497 MtU에 이르고, 중수로용 사용후핵연료는 9,118 MtU에 이를 것으로 예측하고 있다[1]. 따라서 2010년 이후에는 사용후핵연료 저장 및 처분장의 확보가 지속적인 원자력 발전을 위하여 시급히 해결해야 될 과제이나 현실적으로 처분장의 확보에 어려움을 겪고 있다.

차세대관리 종합공정(ACP)은 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 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 있으며, 수년 내로 공정의 실증시험을 계획하고 있다.

그러나 ACP 공정 실증을 위해서는 공정특성을 고려한 α -v type의 핫셀시설이 필요하나 신규로 핫셀시설 확보하기 위해서는 많은 재원과 인력 및 시간이 소요되므로 기존 β -v type 핫셀을 공정의 특성 및 용도에 맞게 개조하여 활용되어야 한다. 특히, ACP 공정의 경우는 방사선 준위가 매우 높은 사용후핵연료를 고온의 조건에서 LiCl-Li₂O 용융염 매질 하에서 취급하게 되므로 일반 핫셀에 비해 강화된 기밀성이 요구될 뿐 아니라 일부 공정은 엄격히 관리되는 불활성 분위기(Ar) 하에서 취급해야 된다. 그러나 현재까지 국내에서 사용후핵연료의 연소후 조사특성을 분석하기 위한 소규모 시험들은 수행되었으나 ACP 공정과 유사한 고온의 용융염 매질 하에서의 화학처리 공정의 설계 또는 실증시험의 경험이 없는 형편이다.

따라서 실증을 위한 핫셀시설의 확보를 위하여 ACP 공정의 기능 및 특성을 고려하여 실증시설 설계요건을 확립하고, 이를 기준으로 실증시험을 수행할 공정조건, 공정장치별 특성, work flow를 상세히 분석하여 핫셀 및 부대설비와 공정기기들의 구성과 배치를 최적화하였으며, 실증공정 및 핫셀 개조를 위해 분야별로 기본설계와 상세설계, 안전성분석과 환경영향평가를 완료하였다.

2. 연구 내용 및 결과

2.1. 실증시설 설계요건

2.1.1. 실증공정 기준요건

ACP 공정의 실증시험을 위한 적정 공정규모를 결정하는 것은 매우 중요하며, 공정장치의 구조 및 공정성능이 실제 공정규모에 따라 상이한 결과를 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 규모를 기준으로 핫셀 내에서 실증공정의 범위를 Fig. 1에 표기된 공정의 Block Diagram 내용으로 설정하고, 실증시험에 사용할 PWR 사용후핵연료의 기준사양을 원자로 조사조건 및 현실적으로 사용이 가능한 사용후핵연료 여건 등을 고려하여 아래와 같이 설정하였다.

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

- 냉각기간 : 10 년

2.1.2. 기준방사선원

ACP 공정 실증시험을 위한 핫셀시설의 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 실증시설 핫셀에서 수행될 차세대관리 종합공정의 실증시험의 횟수를 공정 data의 검증을 위한 최소 횟수로 제한하여 5 batch를 수행하는 것을 기준하였으며, 폐 LiCl 용융염을 저장용 용이하도록 bead 형태로 성형하는 공정은 그 타당성을 확인하기 위하여 실증시험을 2회 수행하는 것을 기준하였다. 따라서 실증시설 hot cell 내 기준 방사선원은 앞에서 제시된 사용후핵연료 조사 조건을 기준으로 ORIGEN-2 전산프로그램으로 계산하여 Table 1에 표기된 내용과 같이 기준 방사선원을 설정하였다. 그리고 제조된 금속전환체와 폐용융염을 차폐셀 내에 별도의 차폐공간(storage vault) 내에 임시보관 할 수 있도록 하였다.

2.1.3. 핫셀 설계요건

ACP 공정의 실증시설로 활용 예정인 기존 핫셀은 당초 β -v type 핫셀로 설계되었으나 ACP 공정의 경우 사용후핵연료 분말을 취급하게되고, 고온의 용융염 매질에서 반응을 수행하므로 α -v type의 air 분위기에 반응기 내부는 inert(Ar) 분위기 유지가 가능하여야 한다.

차폐셀 설계를 위한 원자력법 상에 제시된 설계기준은 주당 1 mSv이며[2], 이 경우 주당 작업 시간을 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.

그리고 핫셀의 기밀성 유지를 위한 leakage rate는 외국의 사례들을 조사하여 -30 mmAq 조건에서 4 vol. %/day로 설정하였다[3].

2.1.4. 핫셀 부대설비 요건

차폐셀 내 공정운전 및 유지보수를 위해 필요한 주요 장비로는 공정운전을 위한 MSM 과 차폐창, 중량물 취급을 위한 Power manipulator와 In-cell crane, Rear door, Padirac cask 운반 및 접속장치 등이 고려되어야 한다. 실증시설 핫셀이 α -v type이므로 핫셀에 부착되는 부대설비들은 이중 sealing 구조를 가지며, MSM의 취급용량은 9 kg, Crane은 1 ton 용량을 기준으로 설정하였다. 그리고 핫셀의 핵물질 반입, 반출은 취급용량, 차폐능, 안전성 등을 고려하여 Padirac RD-15 type으로 단일화하여 단순화함으로써 시설 운영의 효율성을 높일 수 있도록 설계요건을 설정하였다.

핫셀의 환기설비의 설계요건은 기존 시설여건과 외국 시설의 설계기준을 고려하여 부압조건은 최대 -25~-35 mmAq, 환기회수는 20회를 기준으로 하고 핫셀 내에 추가로 설치되는 1차 filter bank(PRE+ HEPA)를 거쳐 조사재시험시설의 기준 배기 duct에 연결되어 2차 filter bank(MOD+HEPA)를 거친 후 배기되도록 하였다.

2.2. 핫셀 및 공정설비 배치

ACP 공정 실증시험을 위한 핫셀 활용 예정인 기존 차폐시설의 내부 크기는 길이 11 m, 폭 2 m, 높이 4.5 m이며, 실증공정의 효율적이고 안전한 운전 및 유지, 보수를 고려하여 공정용과 유지 보수용의 2개의 차폐셀로 분리하여 설치되도록 하였다. 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 확산을 방지하는데 용이하도록 하였다.

공정설비의 배치는 차폐셀 내 핵물질 및 폐기물의 flow-path, 시약류의 투입, 운전 및 유지보수, safe guard 측면 등을 고려하여 one-through flow가 유지되도록 개념을 정립하였다. 그리고 공정 설비에 공급되는 LiCl, Li₂O 등 시료의 경우는 inert 분위기에서 준비되고 공급되어야 하므로 Ar 분위기 glove box와 운전 및 감시를 위한 control panel과 MCC 및 전원공급 panel을 핫셀 전면의 조업지역에 설치하여 운전자가 항상 확인할 수 있도록 하였다.

핫셀 및 공정설비의 배치도는 Fig.2에 표기된 내용과 같다.

2.3. 공정 및 핫셀시설 설계

2.3.1. 공정설계

공정설계를 통하여 ACP 실증공정의 process flow diagram, P.& I. diagram, mass & heat balance를 확정 작성하고, 공정작업 step별 mechanical work-flow 분석과 공정운전 중 예상되는 fault에 대한 상세분석을 수행하여 이를 공정의 상세설계에 반영되도록 하였다. 그리고 공정에서 취급되는 고온 용융염(LiCl-Li₂O) 및 U 금속, 공정시약의 안전한 취급을 위하여 inert 분위기 유지와 고온으로 운전되는 반응기의 외부 jacket의 냉각을 Ar 가스를 적정 조건으로 제어하여 공급되도록 설계하였다. 우라늄 산화물 분말취급장치는 분말 누출 및 비산 방지를 위해 장치 내, 외부에 이중 sintered metal filter 장착하고 반응기 내부 압력이 기준치 이상 상승하는 경우 경보와 함께 공급되는 air 즉시 차단함으로써 더 이상 압력이 상승되지 않아 사고로의 진전을 예방하도록 설계에 반영하였다. 각 공정장치의 배기 line에 filter를 이중 설치하고, 압력 및 차압이 감시되며, 기준치 초과시 경보와 함께 공급되는 Ar 가스의 공급 및 가열로의 전원이 차단되도록 하였으며, 고온에서 운전되는 반응기는 온도 및 압력이 서로 연계되어 작동하도록 sequence를 구성하고, 감시 및 제어 장비는 서로 다른 type으로 이중 설치하여 공정 운전에 따른 보수적 안전성이 확보되도록 설계하였다.

2.3.2. 차폐보강 및 구조설계

실증시설 핫셀의 기준방사선원을 기준으로 차폐계산 결과 기준선량(0.1 mSv/hr)을 만족하는 차폐체 두께가 중콘크리트 90 cm에 해당하며, 개조할 기존 핫셀의 차폐설계가 중콘크리트 80 cm로 되어 있어 차폐보강이 불가피하다. 따라서 기존 핫셀의 구조와 차폐보강을 위한 시공성을 고려하여 현재 개방된 형태로 되어 있는 전면(차폐창과 MSM이 설치되는 면)은 중콘크리트 90 cm, 기존의 차폐벽이 설치된 측면과 뒷면은 steel 4 cm 두께로 차폐를 보강하는 것으로 설계하였다.

이와 같이 차폐 보강체와 차폐창 등의 중량물 추가와 핫셀의 rear door 및 각종 penetration을 위한 개구부들이 추가로 설치되어야 하므로 이에 따른 구조해석(내진 1등급 기준)을 수행하였으며, SAP 2000 프로그램을 이용한 3D dynamic analysis 결과 절점의 변위가 2.94 mm로서 현재 확보된 seismic gap 50 mm 보다 적어 구조적 안전성이 입증되었으며, 구조계획에 따른 구조설계를 수행하였다.

2.3.3. 핫셀 부대설비 설계

실증시설에 설치되는 부대설비로는 환기설비, 유틸리티(전기, 압축공기, Ar) 공급설비, 방사성물질의 취급/운반설비, 화재감시 및 방호설비, 방사선 안전관리장비 등이 설치되도록 설계에 반영하였다.

핫셀 환기설비는 핫셀 전체 급기량 1770 CMH, 배기량 2110 CMH이 되도록 설계하였으며, 배기 팬은 추가로 설치하지 않고 기존장비를 사용하도록 하였다. 핫셀 환기설비는 급기는 핫셀 외부에 설치되는 filter unit를 거쳐 차폐능 확보를 위한 protection screw를 통해 핫셀 내부 닥트로 연결되며, 핫셀 상부에서 공급되고, 핫셀 working table 하부에 배기 filter unit를 거쳐 protection

screw를 통해 핫셀 외부의 기존 배기덕트에 연결되도록 설계되었다.

실증시설의 전력공급은 기존시설의 460V Load Center spare feeder에 기존 설비와 호환 가능한 차단기를 설치하여 주전원으로 하는 계통으로 구성하며, 전체 기준용량을 400 A를 기준으로 460V MCC 20 KVA, 220V MCC 150 KVA 용량으로, 비상전원은 220V 30A, 120V UPS 50A 용량으로 설계되었다.

유틸리티 공급설비 중 압축공기는 기존배관으로부터 분기하여 실증시설의 요건에 맞도록 압력 및 유량을 조절하여 핫셀 차폐벽 penetration을 통해 공급되며, Ar 가스 공급설비는 고순도 Ar (99.9999 %)과 저순도 Ar(99.999 %)로 구분하여 공급되며, 핫셀 내 공정장치로 공급되는 Ar 가스는 one-through로 공급되고, 반응기 내부로 공급되는 Ar 가스는 공정 폐가스 처리장치를 거쳐 핫셀 배기구로 배출되도록 설계하였다. 그리고 핫셀 외부에 설치되는 공정에서 사용하는 시약(LiCl, Li₂O)의 준비를 위한 glove box로 공급되는 Ar 가스는 정제시스템에 거쳐 순환공급 되도록 설계하였다.

핫셀 운전을 위해 기밀성이 보장된 MSM(9 kg 용량) 및 차폐창이 각각 5조씩 설치되며, 방사성 물질의 취급운반을 위한 설비로는 핫셀 외부에 Padirac cask 운반을 위한 rail 및 대차, Jib-crane(1톤 용량)이 설치되고, 핫셀 내부에 Over-head crane(1.0톤 용량)과 고하중조작기(50 kg 용량)가 설치되도록 설계하였다.

핫셀 내의 화재감지설비는 thermal detector와 smoke detector가 설치되어 기존의 경보설비 및 Halon 1301 소화설비와 연계하여 작동되도록 설계되었다.

그리고 실증시설에 설치되는 방사선 안전관리 장비로는 area monitor 및 room air monitor가 핫셀 인접 작업구역과 서비스 구역에 설치되고, rear door monitor가 설치되어 핫셀 내부의 방사선량 준위가 2.5 mSv/hr 이상이 되면 핫셀의 rear door가 열리지 않도록 연계되며, 실증시설 핫셀 배기덕트에 배기가스의 monitoring 장비가 설치된다. 설치되는 모든 RMS 장비는 추가로 설치되는 RMS server에서 모든 상태를 감시 관리할 수 있도록 설계하였다.

2.4. 핫셀시설 안전성분석

핫셀의 차폐해석결과 선량율이 설계기준 선량의 20~65 % 정도인 것으로 나타났으며, 계산의 보수성 등을 고려하면, 실제 선량율은 이 보다 훨씬 낮을 것으로 예상된다.

실증시설의 가동으로 인한 주변 환경에 대한 영향평가를 정상운전시와 사고시로 구분하여 수행되었으며, 평가 결과는 정상운전시 선량평가 결과가 기준선량의 0.8~25 %, 사고시 피폭선량 평가 결과는 설계기준치의 1/10 이하인 것으로 나타나 본 시설의 가동으로 인한 환경영향평가 결과도 충분한 안전성이 확보되도록 설계되었음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 주관으로 추진중인 원자력중장기사업의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

1. 2002 전력분야 통계, 산업자원부, 2003.
2. 한국방사성동위원소협회, 원자력관련고시집, 2001.
3. ANS, Design Guides for Radioactive Material Handling Facilities and Equipment,1988.

Table 1. Inventory Basis of Radioactivity

구 분	Activity (Ci)
PWR 사용후핵연료 1회분(20kg-HM)	9,930
금속전환체 4회분(임시저장)	14,737
장반감기 Volatile FP(³ H, ⁸⁵ Kr) 4회분	543
폐용융염 2회분(임시저장)	12,220
계	37,430

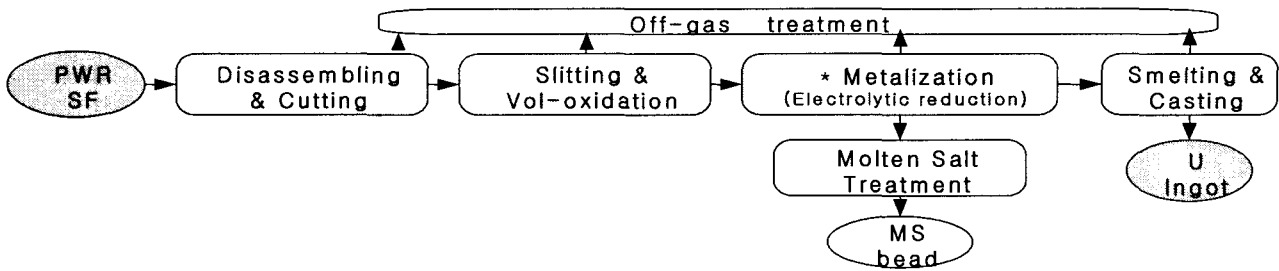


Fig.1. Process Block Diagram for ACP.

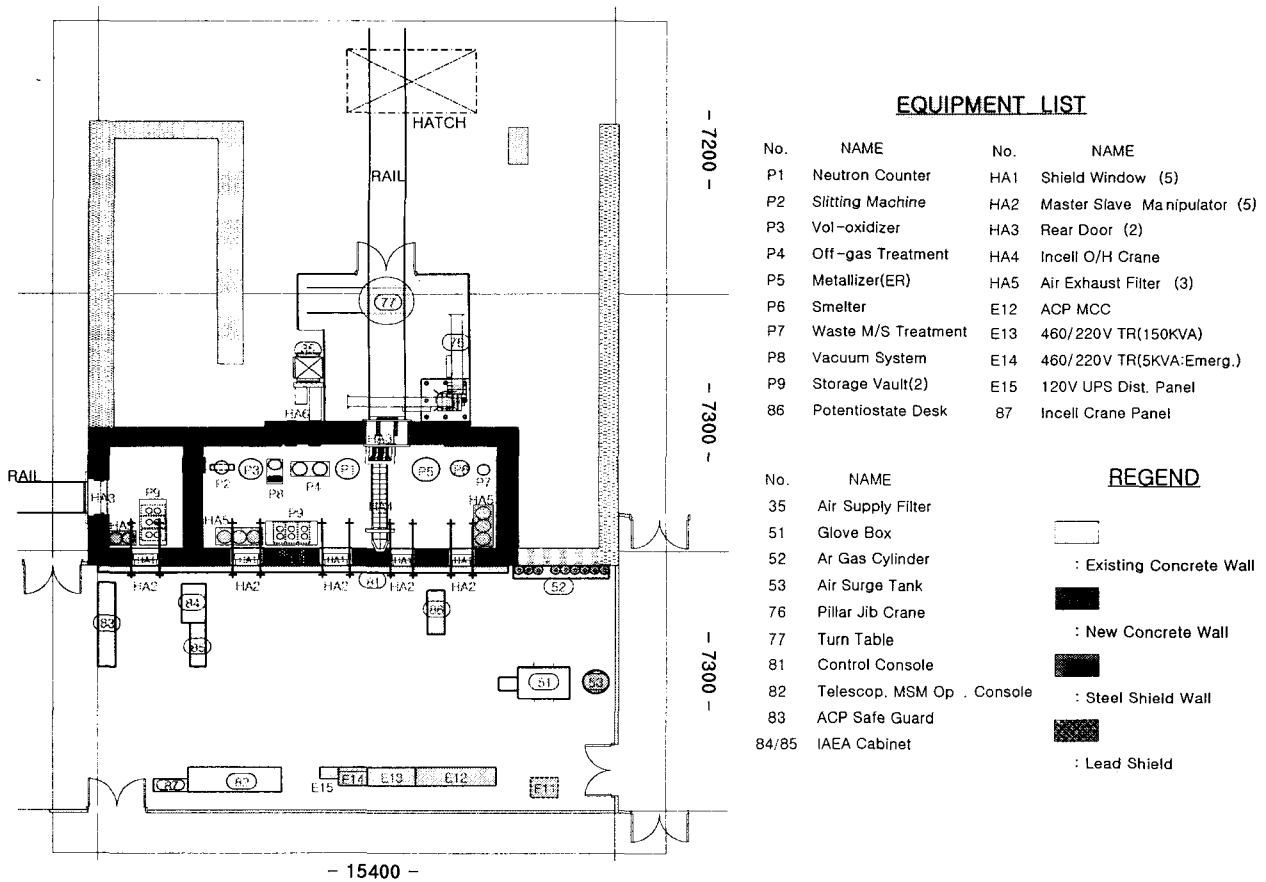


Fig. 2. Overall Lay-out of Hot Cell Facility and Process Equipments.