

2003 추계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

**차세대관리 종합공정 실증시설 설계**

**Design of Demonstration Facility for  
Advanced Spent Fuel Conditioning Process**

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

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

**요 약**

사용후핵연료의 효율적인 관리를 위하여 현재 차세대관리공정이 개발되고 있으며, 개발된 공정의 실증시험이 계획되어 실증시험을 위한  $\alpha$ - $\gamma$  핫셀 및 부대시설의 설계가 현재 진행 중에 있다. 본 연구에서는 기존 핫셀을 개조하여 차세대관리공정의 실증시험에 활용하기 위하여 공정특성을 고려한 실증시설의 보수적 안전성 확보와 핫셀 내 효율적인 공정운전을 위한 설계를 수행하였다. 설정된 기준방사선원을 기준으로 차폐보강 및 이에 따른 구조해석을 수행하고, 차세대관리공정의 상세한 작업흐름을 분석하여 공정기기와 부대설비들의 구성과 배치를 최적화하도록 하였으며, 인허가에 필요한 환경영향평가 등 안전성분석을 수행하였다. 본 설계내용은 차세대관리 실증시설의 건설 및 인허가를 위한 자료로 활용될 예정이다.

**Abstract**

The advanced spent fuel conditioning process(ACP) was proposed and developed for effective management of the PWR spent fuel. The detail plan was established for demonstration and verification of the ACP, and an existing hot cell will be modified as  $\alpha$ - $\gamma$  type hot cell. In this study, the process mechanical flow was analysed for the optimum arrangement to ensure effective process operation in hot cell, and the detail design of hot cell including the auxiliary facility and safety analysis was performed to secure conservative safety of hot cell system. And then, this results will be utilized for hot cell refurbishment and license.

## 1. 서론

현재 국내 발전량의 약 40 % 이상을 원자력 발전으로 충당하고 있으며, 아직까지는 국내 여건상 원자력 발전을 대체할 수 있는 에너지원의 개발이 쉽지 않아 증가하는 에너지 수요증가에 대한 상당부분을 원자력 발전으로 충당하는 것이 불가피 하여 2015년까지 13기의 원자력 발전소 추가 건설 계획되고 있다. 이와 같은 원자력 발전소의 증가는 필연적으로 사용후핵연료의 발생량을 증가시키게 되며, 이는 사용후핵연료의 안전한 관리와 저장에 대한 관심과 우려를 증대시키고 있다.

그러나 최근의 폐기물 부지 선정에 따른 논란 등에서 볼수 있듯이 사용후핵연료 저장 및 처분장의 확보가 원자력 발전소의 추가 건설을 위해서 시급히 해결할 과제이나 현실적으로 국내 여건이 낙관적이지 않음을 고려할 때 사용후핵연료 저장 및 처분장의 규모를 최소화하는 것이 매우 중요한 과제이다.

차세대관리 종합공정은 사용후핵연료의 안전하고 효율적인 관리를 위하여 제시된 공정으로 이 공정을 이용하여 사용후핵연료를 금속으로 전환하고, 고발열성 핵종(Cs, Sr)을 효율적으로 제거할 경우 사용후핵연료의 부피, 발열량 및 방사선의 세기를 최대 1/4까지 감소시키고, 처분용기의 소요량과 처분장의 소요면적을 1/2 이상으로 축소함으로써 처분 안전성과 경제성을 높일 수 있다. 차세대관 종합공정은 용융염 매질에서 사용후핵연료를 처리하는 건식 핵연료주기 기술로서 환경 친화적이며, 핵확산 관련 저항성이 높아 세계 여러 나라들이 미래 지향적인 핵연료주기 기술로서 중점적으로 연구개발을 추진하고 있는 공정기술의 일부이다[1].

현재 국내에서는 차세대관리 종합공정에 대한 기초연구를 완료하고 실증시험을 위한 구체적인 계획을 수립하였으며, 실증시험을 수행하기 위해서 필수적인 핫셀 시스템의 확보를 위하여 재원의 효율적인 운영 등을 고려하여 기존 핫셀을 개조하여 활용하기로 하고 사용후핵연료를 사용한 실증시험을 수행하기 위한 핫셀 시스템의 설계를 수행하고 있다.

본 연구에서는 이미 발표된 차세대관리 종합공정 실증시설 설계요건과 기본설계[2,3] 자료들을 기준으로 차폐보강 및 이에 따른 구조설계를 수행하고, 차세대관리공정의 상세한 작업흐름을 분석하여 공정기기와 부대설비들의 구성과 배치를 최적화하도록 하였으며, 인허가에 필요한 환경영향평가 등 안전성분석을 수행하였다. 그리고 본 연구결과는 실증시설의 개조공사와 인허가 심사를 위한 자료로서 활용되고 있다.

## 2. 연구 내용 및 결과

### 2.1. 차세대관리 종합공정 실증시설 핫셀 시스템 규모 및 구성

차세대관리 종합공정 실증시설의 핫셀 시스템 규모는 당초 계획된 데로 신뢰성 있는 공학적 자료 확보에 필요한 최소 규모로서 공정처리량을 batch 당 20 kg-HM(사용후핵연료)로 설정하였다. 실증시험에 사용할 사용후핵연료 기준사양은 농축도 3.5 wt%, 연소도 43,000 MWD/MTU, 냉각기간 10년을 적용하였으며, 공정특성 및 운전여건을 고려하여 실증시설 핫셀의 기준방사선원은 총 37,430 Ci로 설정하였다.

실증시설은 Fig. 1에 표기된 것과 같이 핫셀은 공정장치가 설치되는 Process 핫셀(내부 크기 폭 2 m, 길이 11 m, 높이 4.5 m)과 Maintenance 핫셀(내부 크기 폭 2 m, 길이 2.2 m, 높이 4.5 m)로 구성되며, Process 핫셀의 rear door 주변에 오염확산을 예방하기 위한 Isolation room(내부 크기 폭 4.4 m, 길이 4.85 m, 높이 3.1 m)을 설치하여 Padirac adapter를 통한 방사성 물질의 출입을 위한 작업이 이 공간 내에서 수행될 수 있도록 하였다. 그리고 핫셀 전면 운전 구역에는 핫셀 내 공정에서 필요한 시약준비를 위한 Glove box, 공정운전에 필요한 조작 및 감시장비는 물론 유틸리티(전기, Ar, 압축공기 등) 공급설비, IAEA 사찰장비가 설치되어 작업자가

모든 것들을 확인할 수 있도록 배치하였다.

## 2.2. 차세대관리 종합공정 Mechanical work-flow 분석

공정의 기본설계에서 제시된 Process flow diagram and Work flow diagram(Fig. 2 참조)[3]을 기준으로 공정운전의 효율성과 보수적 방사선 안전성이 확보되도록 실증시설의 상세설계에 반영하기 위하여 공정작업 step별 Mechanical work-flow를 작성하여 분석하였다.

차세대관리 종합공정 실증시험을 수행하는 공정범위는 Fig. 2에 표기된 것과 같이 사용후핵연료 Rod-cut 제조 및 운반, 제조된 Rod-cut을 사용하여 우라늄 금속전환체 제조 및 폐용융염 처리, 폐용융염 운반/저장 및 공정시료 이송 등으로 구분된다.

사용후핵연료 Rod-cut 제조는 기존 조사후시험시설(PIEF) 내 핫셀과 장비들을 활용하여 수행하게 된다. 여기서 수행되는 공정작업은 사용후핵연료봉 선정 및  $\gamma$ -scanning에 의한 특성분석 → 연료봉을 25 cm로 절단하여 Rod-cut 제조 및 계량 → Rod-cut 포장 및 Padirac cask(RD-15) loading의 순서로 진행되며 이후 Padirac cask는 조사재시험시설(IMEF) 내에 설치되는 차세대관리 종합공정 실증시설 핫셀로 운반된다. 이곳에서 수행되는 상세한 공정작업의 내용은 Fig. 3에 Mechanical work-flow로 표기하였다.

실증시설 핫셀로 운반된 옮겨진 Padirac cask는 핫셀의 Rear door에 장착된 Padirac adapter에 접속되고 핫셀 내에서 원격조작기를 사용하여 Rod-cut을 인출하게 된다. 인출된 Rod-cut은 Neutron counter에 의한 분석, 계량을 거쳐 Slitting 및 건식분말화공정 → ER 금속전환공정 → 금속 Ingot 제조공정을 거쳐 산화물 형태의 사용후핵연료가 금속전환체로 제조된다. 대부분의 fission product들이 잔류하는 금속전환공정에서 사용된 폐용융염(LiCl-Li<sub>2</sub>O)은 운반 및 저장이용이한 형태로 제조되게 된다. 이와 같이 실증시설의 핫셀 내에서 수행되는 공정작업의 내용은 Fig. 4와 5에 Mechanical work-flow로 상세하게 표기하였다.

그리고 실증시설 핫셀에서 핫셀에서 실증시험 후 발생하는 폐용융염, 사용후핵연료 hulls 등의 공정폐기물은 방사성폐기물처리시설(RWTF)의 monolith에 보관, 저장이 가능한 형태로 포장되어 운반되며, 공정시료도 차폐 capsule에 포장하여 분석용 핫셀로 운반되어야 한다. 그러나 실증시설의 핫셀로부터 배출되는 방사성물질의 경우 Padirac cask를 이용하여 운반하도록 고려되어야 하며, monolith에 저장되는 방사성폐기물은 Solid waste cask를 통해서만 운반이 가능하다. 따라서 Solid waste cask에 loading하기 위해서는 조사재시험시설의 M4 핫셀을 활용하여야 한다. 이를 위한 작업의 상세내용은 Fig. 6에 Mechanical work-flow로 표기하였다.

이상에서 기술한 상세 Mechanical work-flow를 고려하여 실증시설의 핫셀 시스템 및 공정설비가 최적배치 되도록 설계에 반영하였다.

## 2.3. 차폐보강 및 구조설계

위에서 제시한 실증시설 핫셀의 기준방사선원(37,430 Ci)을 기준으로 차폐계산 결과 설계기준선량(0.1 mSv/hr)을 만족하는 차폐체 두께가 중콘크리트 90 cm에 해당한다. 실증시설로 개조할 기존 핫셀의 차폐설계가 중콘크리트 80 cm로 되어 있어 차폐보강이 불가피하다. 따라서 기존 핫셀의 구조와 차폐보강을 위한 시공성을 고려하여 Fig. 7에 표기된 것과 같이 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 수행하고 구조계획에 따라 구조설계를 수행하였다.

## 2.4. 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 환기회수 20회/시간, 부압 30 mmAq를 기준으로 설계되어 핫셀의 전체 급기량 1770 CMH, 배기량 2110 CMH이 되도록 설계하였으며 배기팬은 추가로 설치하지 않고 기존 장비를 사용하도록 하였다. 핫셀 환기설비는 급기는 핫셀 외부에 설치되는 filter unit를 거쳐 protection screw를 통해 핫셀 내부 닥트로 연결되며 핫셀 상부에서 4개의 grille(Process 핫셀 3개, Maintenance 핫셀 1개)을 통해 공급되고, 핫셀 working table 하부에 설치되는 3기의 배기 filter unit(Process 핫셀 3기, Maintenance 핫셀 1기)와 protection screw를 통해 핫셀 외부의 기존 배기닥트에 연결되도록 설계되었다.

실증시설 핫셀이 설치되는 조사재시험시설의 전력계통은 연구소 주변전소로부터 6.6kV 2회선을 수전하는 KMRR 전기실의 Class 4급 고압반(6.6kV Switchgear)에서 감압변압기(6.6kV/460V)에 의한 전원 1회선과 CLASS 3급 460V Emergency 배전반으로부터 1회선을 공급 받는 전력 계통으로 구성되어 있다. 본 차세대관리 종합공정 실증시설에 대한 전력 공급은 조사재시험 시설용 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, Li<sub>2</sub>O)의 준비를 위한 glove box로 공급되는 Ar 가스는 정제시스템에 거쳐 순환공급 되도록 설계하였다.

핫셀 운전을 위해 기밀성이 보장된 MSM(8 kg 용량) 및 차폐창이 각각 5조씩 설치되며, 방사성물질의 취급운반을 위한 설비로는 핫셀 외부에 Padirac cask 운반을 위한 rail 및 대차, Jib-crane(1톤 용량)이 설치되고, 핫셀 내부에 Over-head crane(0.5톤 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 1 set씩 설치되고, 핫셀 Door monitor가 Process 핫셀과 Maintenance 핫셀에 1 set씩 설치되어 핫셀 내부의 방사선을 감시하며, 방사선량 준위가 2.5 mSv/hr 이상이 되면 핫셀의 rear door가 열리지 않도록 연계되며, 실증시설 핫셀 배기닥트에 배기가스의 Monitor가 1 set 설치된다. 설치되는 모든 RMS 장비는 추가로 설치되는 RMS server에서 모든 상태를 감시 관리할 수 있도록 Fig. 8에 표기된 내용과 같이 구성되도록 설계하였다.

## 2.5. 실증시설의 안전성 분석

### 2.5.1 공정 안전성

차세대관리 종합공정 특성을 고려하여 공정의 효율적인 제어와 사고시에 대비한 fault tree analysis를 통하여 공정장치 및 감시, 제어시스템 설계에 반영하였다.

공정에서 취급되는 고온 용융염(LiCl-Li<sub>2</sub>O) 및 U 금속, 공정시약의 안전한 취급을 위하여 inert 분위기 유지와 고온으로 운전되는 반응기(금속 전환조, smelter, 폐용융염 처리장치)의 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 운전애 따른 보수적 안전성이 확보되도록 설계하였다.

고온에서 LiCl를 취급하는 금속 전환조, smelter, 폐용융염 처리장치 배기구에 cold trap을 설치하여 LiCl fume은 물론 미량 배출이 예상되는 Cs, Sr 등 fission product을 포집하며, 폐가스 처리장치(Molecular sieve/Silver zeolite)를 설치하여 각 반응기에서 발생하는 배기체들이 모두 폐가스 처리장치를 거쳐 핫셀 배기구를 통해 배출되도록 하였다.

공정에 사용되는 온도, 압력 등의 계측/제어 장비는 제어 기준치의 최대 2 % 내 오차범위 제어 신뢰도를 가진 계측기기를 선정하여 설치되도록 설계에 반영하였다.

#### 2.5.2 구조물 안전성

실증시설 핫셀의 차폐보강을 위한 구조물의 중량 증가 및 개구부 추가에 따라서 기존 조사제시험시설의 구조설계기준인 내진 1등급 기준을 적용하여 구조물의 안전성 확보여부를 확인하였다. 구조해석 결과 각 부재의 배근량에 대해서는 슬래브와 벽체에 대해서는 50 % 이상의 여유치를 가지고 있었고, 기초판에서도 15 % 정도의 여유치를 보여주었다. 또한 절점의 변위에 대해서는 주변 건물과의 이격거리 제한치인 50 mm에 대해 충분한 여유치를 갖는 2.94 mm의 변위가 발생하는 것으로 나타났고 OBE 하중에 대해서는 무시할 만한 미세한 변위만이 발생하는 것으로 나타나 설계된 구조물이 안전한 것으로 확인되었다.

#### 2.5.3 차폐안전성

기준방사선원을 기준으로 수행된 핫셀의 차폐설계 내용을 적용하여 차폐해석결과 Table 1에 표기된 것과 같이 선량율이 설계기준 선량의 20~65 % 정도인 것으로 나타났으며, 계산의 보수성 등을 고려하면, 실제 선량율은 이 보다 훨씬 낮을 것으로 예상되며, 이로부터 설계된 실증시설의 핫셀은 충분한 차폐안전성을 확보하고 있는 것으로 확인되었다.

#### 2.5.4 환경영향평가

실증시설의 가동으로 인한 주변 환경에 대한 영향평가를 수행하였으며, 이는 정상운전시와 사고시로 구분하여 수행되었다. 환경영향평가를 위해 적용된 대기확산인자와 침적인자 등의 기상자료는 연구소 부지에서 운영되고 있는 기상탑 운영 최근자료를 최근자료(2002년)를 적용하였으며, 계산 결과는 Table 2, 3에 표기된 내용과 같다. 환경영향평가 결과는 표에 나타난 것과 같이 정상운전시 선량평가 결과가 기준선량의 0.8~25 %, 사고시 피폭선량 평가결과는 설계기준치의 1/10 이하인 것으로 나타나 본 시설의 가동으로 인한 환경영향평가 결과도 충분한 안전성이 확보되도록 설계되었음을 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 개발된 차세대관리 종합공정의 실증시험을 수행하기 위한 핫셀 시스템이 공정의 효율적인 운전과 보수적 안전성이 확보되도록 설계를 수행하고, 설계결과에 대한 공정안전, 구조물 안전, 차폐 안전, 환경에 대한 안전 등의 측면에서 안전성 분석을 통하여 설계된 차세대관리 종합공정 실증시설이 운전의 효율성과 보수적 안전성을 확보하고 있음을 확인하였다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부 주관으로 추진중인 원자력증장기사업의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

## 참고문헌

1. KAERI/RR-2128/2000, 사용후핵연료 차세대관리 공정개발, 2000.
2. KAERI/TR-2004/2002, 차세대관리 종합공정 실증시설 설계요건서, 2002.
2. KAERI/TR-2092/2002, 차세대관리 종합공정 실증시설 개념설계 보고서, 2002.

Table 1. The results of shield evaluation

Case	계산결과 (cm)	적용두께 (cm)	선량률 (mSv/hr)	기준선량 (mSv/hr)
1.중콘크리트 외벽	83	90	$2.10 \times 10^{-3}$	0.01
2.중콘크리트 셀간벽	69	70	$1.01 \times 10^{-1}$	0.15
3.중콘크리트 80cm+스틸보강	1	4	$2.97 \times 10^{-3}$	0.01

Table 2. The results of dose evaluation in normal operation.

평가 구분	기준선량	선량 평가 결과	비율(%)
감마선에 의한 공기흡수선량(mGy)	1.0E-1	5.0E-2	25.1
베타선에 의한 공기흡수선량(mGy)	2.0E-1	4.4E-4	0.5
외부피폭에 의한 유효선량(mSv)	5.0E-2	5.4E-4	1.1
외부피폭에 의한 피부등가선량(mSv)	1.5E-1	3.5E-2	23.2
내부피폭에 의한 장기등가선량(mSv)	1.5E-1	1.3E-2	8.3 (소아, 갑상선)

Table 3. The results of dose evaluation in accident case.

구 분		피폭선량 (Sv)		
		유효선량 (외부)	유효선량 (내부)	장기등가선량 (감상선)
피 폭 선 량 기 준	원자력법	0.25	0.25	3.0
	IMEF 설계기준	2.5E-3	2.5E-3	3.0E-2
핫셀 내 화재 사고시 평가 결과		3.77E-5	4.76E-4	1.65E-3

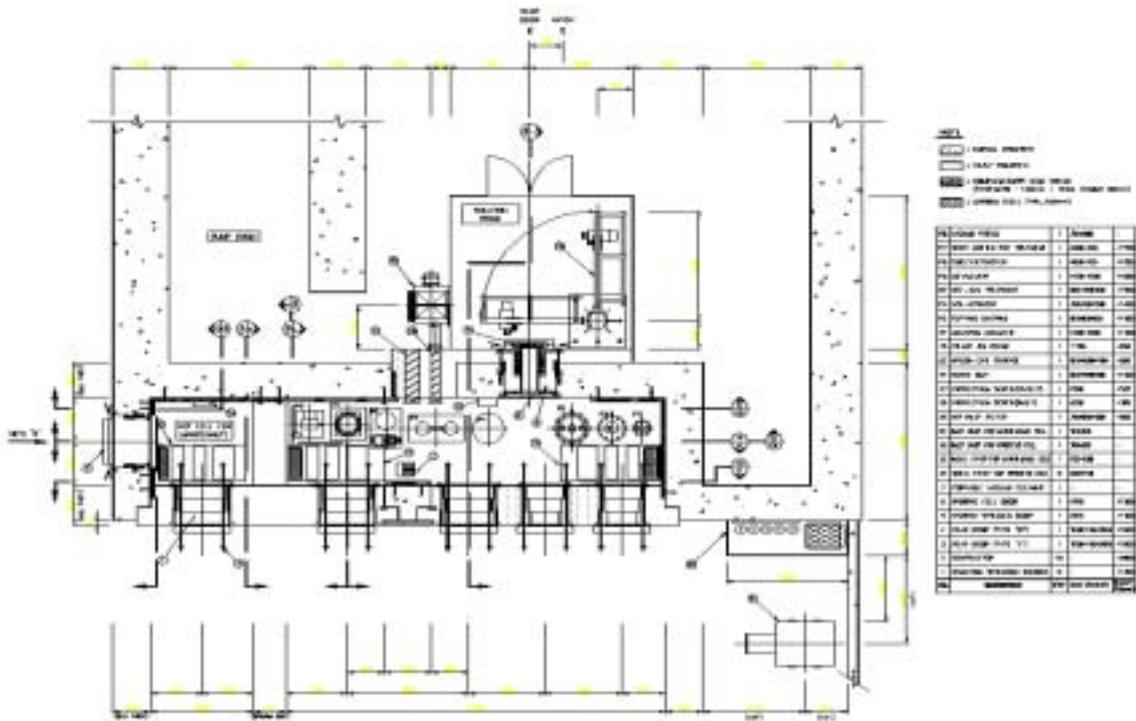


Fig. 1. General lay-out in hot cell.

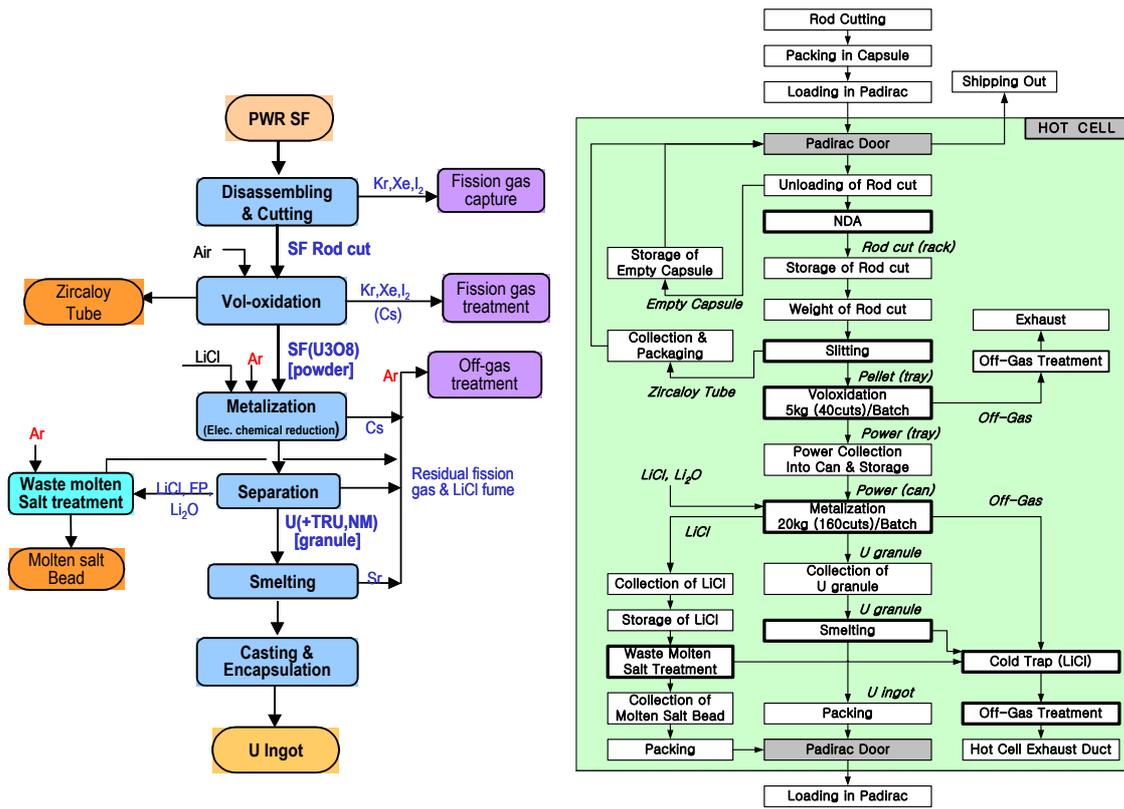


Fig. 2. Process flow diagram and work flow diagram.

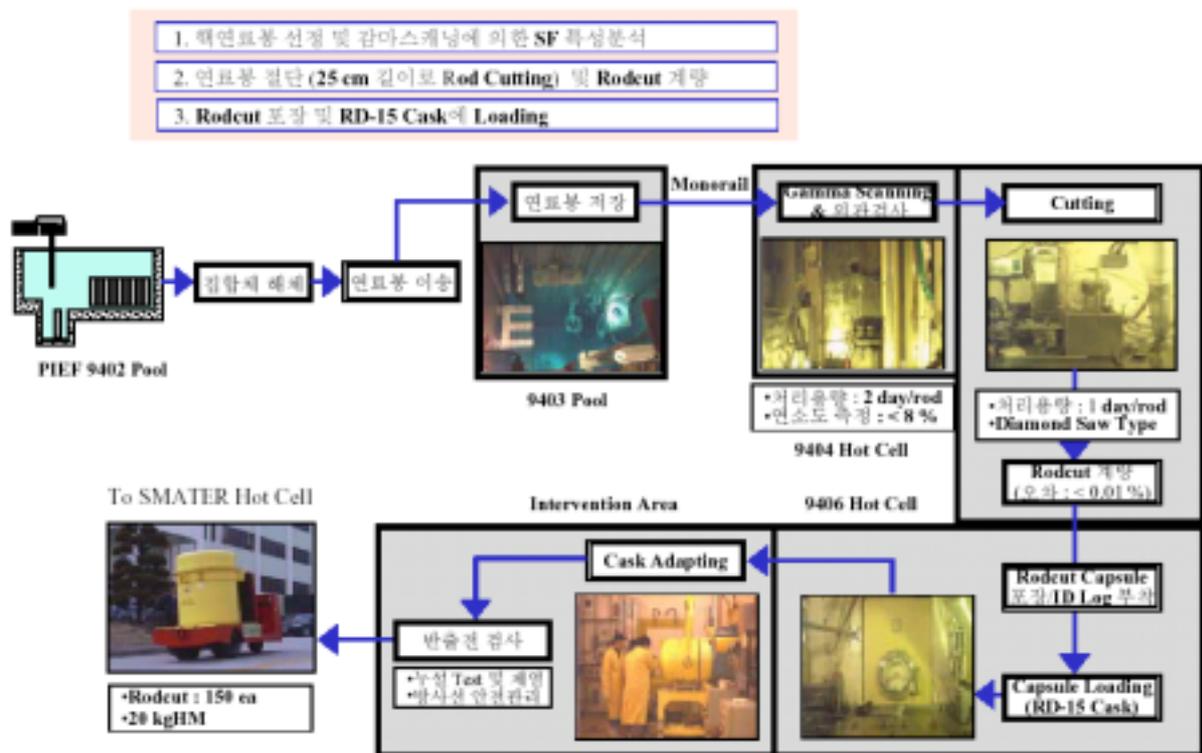


Fig. 3. Mechanical flow sheet in PIEF.



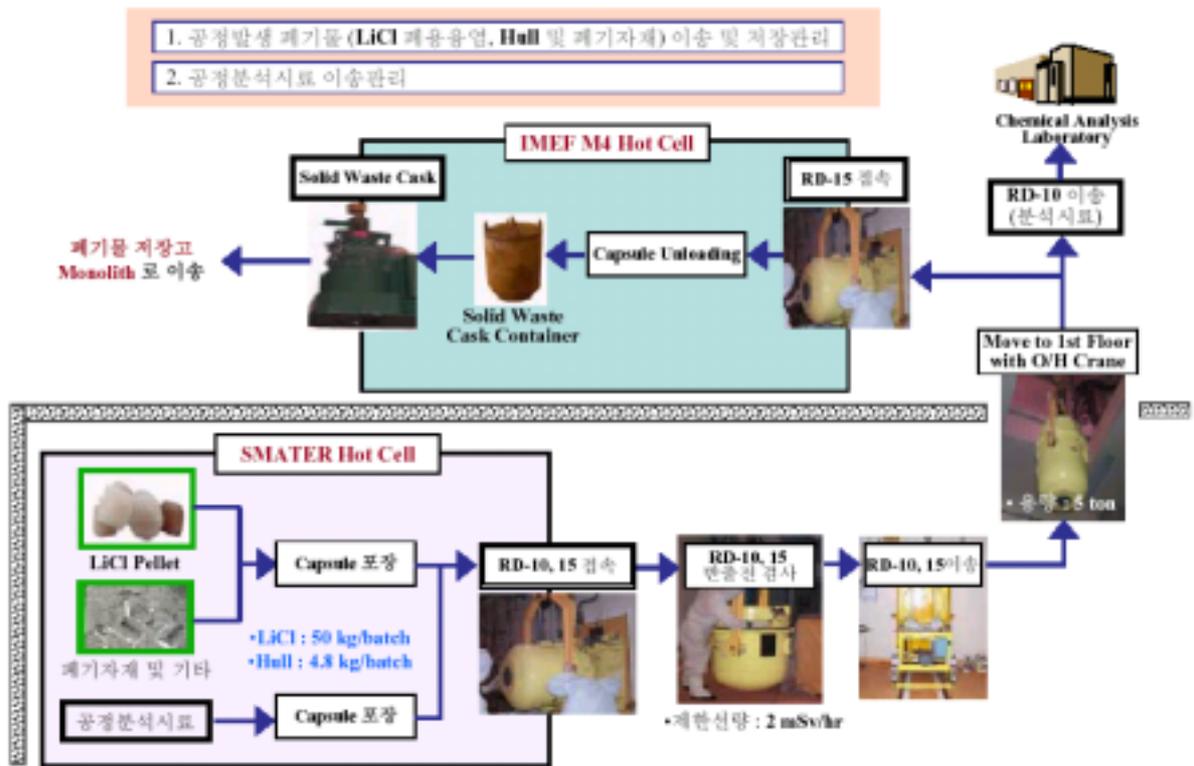


Fig. 6. Mechanical flowsheet for waste transfer.

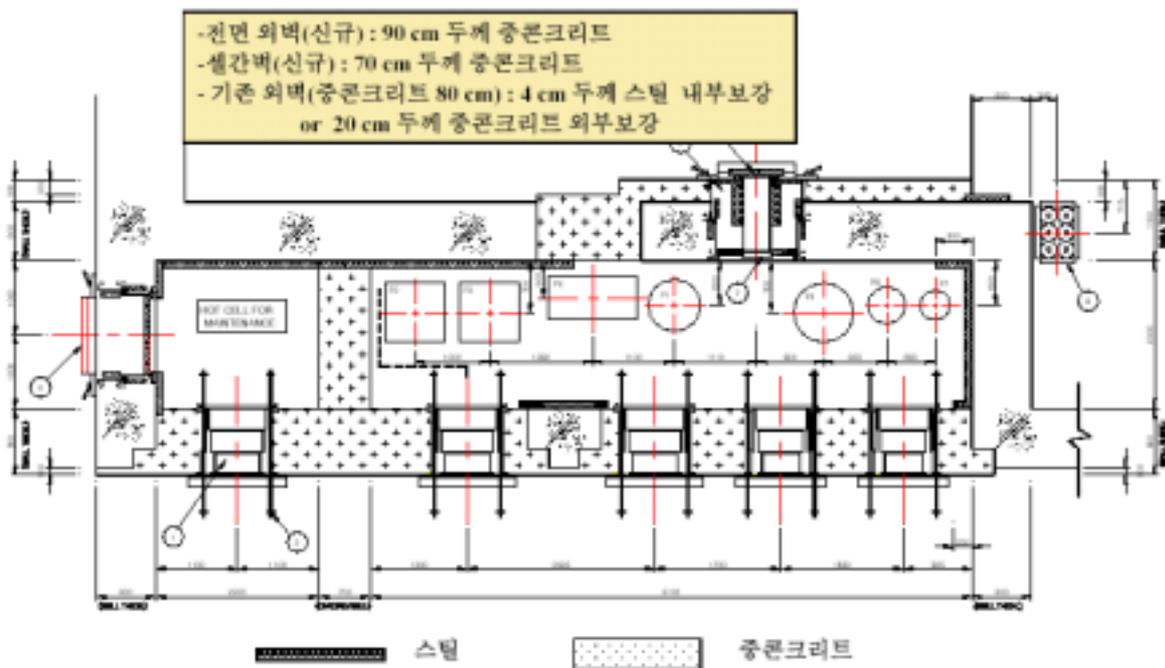


Fig. 7. Plan drawing for reinforcement of shield wall.

## RMS Communication Loop Configuration

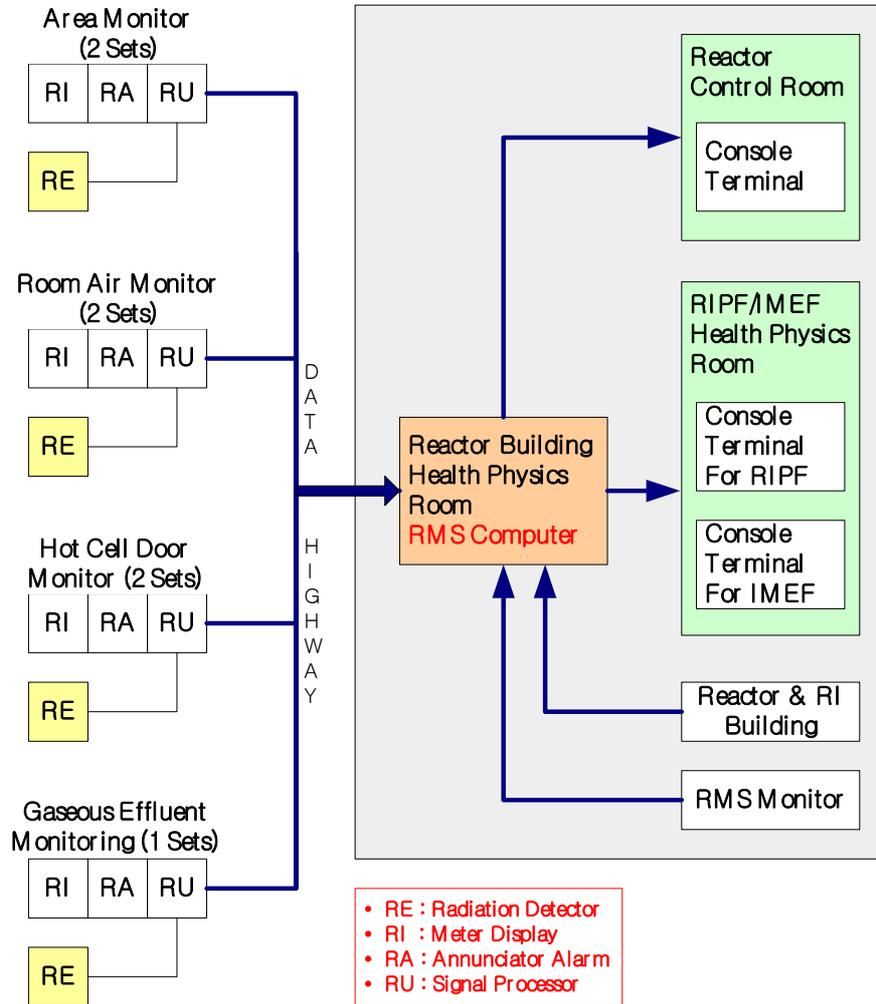


Fig. 8. RMS communication loop configuration diagram.