

2003 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

차세대관리 종합공정 실증을 위한 설계 연구

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

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

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

국내 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위하여 현재 차세대관리 종합공정이 개발되고 있으며, 개발된 공정의 실증시험이 계획되고, 이를 위한 설계연구가 현재 진행 중에 있다. 본 연구에서는 기존 차폐시설을 차세대관리 종합공정의 실증시험을 수행할 수 있도록 개조, 활용하기 위하여 차세대관리 종합공정 운전특성을 고려하여 공정설계 및 차폐셀 개조설계 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 차세대관리 종합공정의 실증범위를 확정하고, 확정된 실증공정의 기본설계를 수행하였으며, 실증공정의 기본설계 내용을 기준으로 차폐셀 및 부대시설의 개조설계를 수행하여 그 결과를 제시하였다.

Abstract

The advanced spent fuel conditioning process(ACP) was proposed for effective management of the PWR spent fuel. The ACP is under developing as R. & D. project, and this project includes detail plan for verification of the ACP. An existing hot cell was selected for demonstration of the ACP. But this hot cell should be modified to meet requirements for effective and safe operation of this process. In this study, the process and hot cell design were performed, and the results were suggested. And then, this results will be utilized for hot cell refurbishment and license.

1. 서 론

현재 국내 발전량의 약 40 % 이상이 원자력 발전으로 충당하고 있다. 장기발전 계획에 의하면 2015년까지 10기의 원자력 발전소의 추가 건설되고, 2기의 원자력 발전소가 폐기될 것으로 계획되고 있어 결과적으로 13기의 원자력 발전소가 추가될 것으로 예상된다. 이와 같은 원자력 발전소의 증가는 필연적으로 사용후핵연료의 발생량을 증가시키게되며, 이는 사용후핵연료의 안전한 관리와 저장에 대한 관심과 우려를 증대시키고 있다.

현재는 사용후핵연료의 저장을 원자력 발전소 호기간 이송에 의한 저장, repacking 또는 발전소 내 건식저장시설을 확보하는 방법 등으로 해결하고 있으나 2010년 이후에는 사용후핵연료 저장 및 처분장의 확보가 원자력 발전소의 추가 건설을 위해서 시급히 해결할 과제이나 현실적으로 주변 여건이 낙관적이지 않다.

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 축소에 의해 부지 선정을 용이하게 할 수 있다. 그리고 본 공정기술은 환경 친화적인 기술로서 핵확산 관련 저항성이 높고, 미래 지향적인 건식 핵연료주기 시스템의 연구개발에 기여할 수 있는 기술적인 장점으로 인하여 현재 연구개발이 진행 중에 있으며, 개발된 공정의 실증시험이 계획되어 있다[1].

차세대관리 종합공정의 실증시험은 방사선 준위가 매우 높은 사용후핵연료를 고온의 조건에서 LiCl-Li₂O 용융염 매질 하에서 취급하게되므로 기존의 다른 hot cell에 비해 강화된 기밀성이 요구되는 α -v type의 hot cell이 필요하며, 일부 공정은 엄격히 관리되는 불활성 분위기(Ar) 하에서 취급해야되나 현재까지 국내에서 차세대관리 종합공정과 유사한 고온의 용융염 매질 하에서의 화학처리 공정의 설계 또는 실증시험의 경험이 없는 형편이다.

따라서 본 연구에서는 이미 발표된 차세대관리 종합공정의 실증시설 설계요건[2]과 개념설계[3]를 기준으로 실증시설로 활용할 기존 차폐시설의 여건 등을 고려하여 실증시험을 수행할 차세대관리 종합공정의 공정범위를 확정하였으며, 실증공정의 안전하고 효율적인 운전이 가능하도록 공정의 기본설계와 차폐셀 개조설계를 수행하였다. 그리고 본 연구결과는 실증시설의 개조공사와 인허가를 위한 기본 자료로서 활용될 예정이다.

2. 연구 내용 및 결과

2.1. 차세대관리 종합공정 실증 규모 및 범위

차세대관리 종합공정의 규모는 당초 계획된 데로 신뢰성 있는 공학적 자료의 확보를 위한 최소 규모를 고려하여 20 kg-HM/batch로 설정하고, 실증시험에 현실적으로 사용 가능한 사용후핵연료를 기준으로 U-235 농축도 3.5 wt%, 연소도 43,000 MWD/MTU, 냉각기간 10년을 적용하였으며, 공정의 실증계획과 운전여건을 고려하여 실증시설 내 기준선원을 다음과 같이 설정하였으며, 이 경우 실증시설의 기준 방사선원은 총 37,430 Ci에 해당한다.

- 사용후핵연료 1 Batch (20kg-HM)
- 금속전환체 4 Batches
- 반감기가 긴 휘발성 핵분열생성물(H, I, Kr) 4 Batches
- 폐용융염 2 Batches

그리고 차세대관리 종합공정의 공정특성과 기존 차폐시설의 여건 등을 고려하여 실증공정의 범

위를 확정하였으며, 이를 기준으로 기 수행된 설계요건연구[4]와 개념설계연구[5]의 수정내용을 반영하여 실증공정의 기본설계와 차폐셀 개조설계를 수행하였다.

2.2. 실증공정 기본설계

실증공정 기본설계는 기 제시된 설계요건과 공정요건[2]을 기준으로 실증시설 내의 실증공정 범위, 물질수지와 온도조건을 고려한 공정흐름도를 Fig. 1과 같이 확정하였으며, 각 단위공정별 운전 순서를 고려하여 Work Flow Diagram을 Fig. 2와 같이 설정하고, 공정의 안전하고 효율적 운전을 위한 핫셀 내 공정장치의 배치도를 Fig. 3의 표기 내용과 같이 확정하였다.

그리고 각 단위공정별 공정원리와 공정특성, 조업 안전성 등을 분석하여 각 단위공정별 P. & I. Diagram을 작성하였다.

2.2.1. Vol-oxidation 공정

Vol-oxidation 공정은 사용후핵연료를 분말화하는 공정으로 P. & I. Diagram은 Fig. 4에 표기된 내용과 같으며, 반응 Air 공급 장치와 Vol-oxidation 반응기, 배기 장치 등으로 구성된다. 공급되는 반응 air는 유량과 압력을 연동하여 제어되도록 하였으며, 반응기로 공급되기 전에 예열하여 공급되도록 구성하였다. 반응기는 반응온도(500 ℃) 유지를 위하여 2개의 heater unit가 설치되고, 온도제어는 반응기 내부 온도와 외부 heater 온도 모두 제어되도록 하였다. 반응기 배기는 약한 진공 시스템에 의해 배기되며, 반응기 내부와 배기 배관에 sintered metal filter가 장착되어 반응기 내부의 분말의 배출을 방지하며, 배기 line의 막힘에 의한 반응기 내부 압력 상승을 방지하기 위하여 반응기 및 배기 line의 압력 및 차압을 측정하여 경보되도록 하였으며, 압력이 기준치 이상으로 상승하면 공급되는 air를 차단하는 interlock system을 구성하였다.

2.2.2. Metalization 공정

Metalization 공정은 산화우라늄 분말 형태의 사용후핵연료를 우라늄 금속으로 전환하는 공정으로 P. & I. Diagram은 Fig. 5에 표기된 내용과 같으며, 반응기 내부의 불활성 분위기 유지와 반응기 상부 냉각을 위한 Ar 공급 system과 Metalization 반응기, 배기 장치 등으로 구성된다. Ar 공급 system은 고순도(99.9999 %)와 저순도 Ar으로(99.999 %) 구분하여 공급되며, 고순도 Ar은 반응기 내부로 공급되고, 저순도 Ar은 반응기 외부 jacket에 냉각용으로 공급된다. 공급되는 Ar은 유량과 압력을 연동하여 제어하도록 구성하였다. 금속전환 반응기는 반응온도(650 ℃)의 유지와 효율적인 제어를 위하여 3개의 heater unit로 구성되며, 각 heater unit는 반응기 내부 온도 및 외부 heater 온도와 같이 연동하여 제어되도록 구성하였다. 그리고 반응기 내부의 전해 전극의 current 및 voltage 제어는 hot cell 밖에 설치되는 Potentiostat에 의해 제어된다. 반응기 배기는 반응기 상부에 설치되는 cold trap(용융염 fume 제거)을 거쳐 약한 진공 system에 의해 배기체 처리장치로 보내지며, 배기 line에는 반응 후 생성되는 산소측정, 감시장치와 압력 감시, 제어 장치가 설치된다.

2.2.3. Smelting 공정

Smelting 공정은 알맹이 형태의 우라늄 금속을 ingot로 제조하는 공정으로 P. & I. Diagram은 Fig. 6에 표기된 내용과 같으며, 금속전환 반응기와 같이 내부의 불활성 분위기 유지와 반응기 상부 냉각을 위한 Ar 공급 system과 Smelting 반응기, 배기 장치 등으로 구성된다. 단지 Smelting 반응기의 경우는 반응기 내부가 매우 엄격한 불활성 분위기의 유지가 요구되므로 반응기 내부로의 산소 유입을 철저히 차단하기 위한 장치 구조와 높은 반응온도(1400 ℃) 유지를 위한 heating system의 설계가 매우 중요하며, 다른 부분은 앞에서 기술한 금속전환 공정과 동일하다.

2.2.4. 폐용융염 처리공정

금속전환 공정에서 사용된 LiCl-Li₂O를 저장에 용이한 형태로 성형하는 공정으로서 P. & I. Diagram은 Fig. 7에 표기된 내용과 같으며, 반응기 내부의 불활성 분위기 유지와 Cooler 냉각을 위한 Ar 공급 system과 반응기, 용융염 이송 line과 배기 장치 등으로 구성된다. 금속전환 반응기에서 우라늄 금속이 분리된 후 용융염은 진공 system에 의해 일정온도(450 ℃) 이상으로 가열되는 이송관을 통해 반응기로 이송되며, 여기서 Ar에 의해 냉각되어 고화된다.

2.2.5. 폐가스 처리공정

폐가스 처리공정은 차세대관리 종합공정의 각 반응기에서 발생하는 배기체에서 휘발성 기체를 처리하는 공정으로서 P. & I. Diagram은 Fig. 8에 표기된 내용과 같으며, Molecular sieve column과 Ag zeolite column으로 구성되는 흡착 column과 진공 system으로 구성된다. 차세대관리 종합공정의 경우 각 단위 공정이 batch type으로 step-by-step으로 운전되므로 폐가스 처리공정은 공동으로 연결 사용되며, 진공도는 각 단위공정에서의 friction loss 등을 고려하여 설정치를 조정하여 제어가 가능하도록 구성되어 있다.

2.2.6. 공정특성에 따른 safety 고려

차세대관리 종합공정에서 취급되는 고온 용융염(LiCl-Li₂O) 및 U 금속의 안전한 취급을 위하여 금속전환 반응기와 Smelter 내부 및 주변에는 inert 분위기 유지를 위한 Ar 가스를 공급되도록 하였다.(수분 및 산소농도는 반응기 내부는 5 ppm, 반응기 주변은 50~100 ppm으로 제어) 그리고 고온에서 취급되는 반응기의 외부 jacket의 냉각 매체는 핵임계, leak, 공정효율 등을 고려하여 Ar 가스가 사용되도록 설계되었다.(금속전환조, smelter, 폐용융염 처리장치)

우라늄 산화물 분말을 취급하게되는 분말화 공정장치는 분말의 누출 및 비산을 방지하기 위하여 장치 내부와 외부 배기관에 이중으로 sintered metal filter가 장착되도록 하였으며, 반응기 내부 압력이 기준치 이상으로 상승하는 경우 경보와 함께 공급되는 air가 즉시 차단되도록 설계에 반영하였다.

각 공정장치의 배기 line에 설치되는 sintered metal filter는 이중으로 압력 및 차압이 감시되며, 기준치를 초과하는 경우 경보와 함께 공급되는 Ar 가스의 공급 및 가열로 작동을 차단하도록 설계하였다.

고온에서 운전되는 반응기는 온도 및 압력이 서로 연계되어 작동되도록 sequence를 구성하였으며, 감시 장비는 이중으로 설치하여 안전성에 대한 신뢰도를 확보하도록 설계에 반영하였다.

고온에서 LiCl 용융염을 취급하는 금속전환조, smelter, 폐용융염 처리장치 배기구에는 cold trap을 설치하여 LiCl fume은 물론 미량 배출이 예상되는 Cs, Sr, Ru 등이 포집되도록 장치를 설계에 반영하였으며, 폐가스 처리장치는 각 반응기에서 발생하는 사용후핵연료에 포함되었던 fission gas(H³, I, Xe)를 제거할 수 있도록 구성되었다.

공정의 온도 및 압력의 제어는 제어 기준치의 최대 5 % 이내로 관리할 수 있도록 신뢰도를 갖는 계측기기를 선정하여 설치토록 하였으며, 핫셀 전면의 운전 구역에 조작 및 제어반을 설치하여 공정장치의 운전 감시는 물론 실증시설의 핫셀 설비의 운전상태를 감시할 수 system을 갖추도록 설계하였다.

2.3. 차폐시설 설계

2.3.1. 핫셀 설계

차세대관리 종합공정의 실증시험을 위해 개조되는 핫셀은 당초 차폐능이 Fe-59 35 Ci를 기준선원으로 하고 β-γ type의 핫셀로 설계되고 건설되었다. 그러나 핫셀은 α-γ type의 air

분위기에 일부 inert(Ar) 분위기 유지가 가능하고, 차폐능도 실증시험 기준선원에 맞도록 구조적 차폐보강이 되도록 설계에 반영되었다.

핫셀은 Table 1과 같이 공정용 핫셀과 유지보수용 핫셀의 2개로 구분되며, 서로 독립된 핫셀로서의 기능을 갖도록 차폐능 및 핫셀 장비를 구성하였다. 차폐체 설계는 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 설정하여 현재 일반콘크리트 기준 80 cm인 핫셀의 차폐체를 중콘크리트 기준 90 cm에 해당하는 차폐능을 갖도록 설계하였다.

핫셀의 Rear Door는 공정용 핫셀과 유지보수용 핫셀의 용도 및 기능을 고려하여 구분되도록 설계하였다. 공정용 핫셀의 Rear Door에는 사용후핵연료 절단 연료봉의 반입, 공정생성물 및 고체폐기물의 반출을 위해 Fig. 9와 같이 Padirac Cask를 접속할 수 있는 장치를 가지며, 외부에는 Padirac Shielded Cell Door의 장착이 가능하고, 내부에는 Padirac Cask Container를 개폐할 수 있도록 Padirac Cell Door 장치가 설계되었다. 핫셀의 Rear Door는 바닥에 설치된 레일 위를 전동구동장치에 의해 전·후진 하면서 개폐되며, Padirac cask가 1층으로부터 운반되는 천장 개폐구의 중심위치와 연계하여 설계하였고, Padirac Cask와 중량물 장비의 취급을 위하여 Zip crane이 Rear Door 뒤편에 설치되도록 설계에 반영하였다. 그리고 기밀성 유지를 위하여 투명하고 내구성이 강한 재질의 Dust Barrier가 Rear Door 내부에 설치되도록 설계에 반영하였다. 또한 핫셀 내의 방사선 준위가 2.5 mSv/hr 이상일 경우에는 Rear Door가 열리지 않도록 Interlock 장치를 설치되도록 하였다.

2.3.2 핫셀 장비

핫셀 내 공정운전 및 유지보수를 위해 필요한 주요장비로는 공정운전을 위한 MSM(Master Slave Manipulator)과 차폐창, 중량물의 취급 및 이동과 유지, 보수를 위해 In-cell crane과 Power manipulator와 In-cell crane, 그리고 차폐창이 고려되어야 한다.

실증시설의 핫셀이 α -v type으로 개조되므로 원적조정기는 Gas tight seal type MSM으로서 X, Y, Z motion 모두 9~12 kg 취급용량을 가지며, Safety class는 NA, Quality class는 T를 적용하고 재질은 300계열 S/S, ANSI H38.24/38.3 Aluminum으로 선정하였다.

차폐창은 Gas tight seal(최대 -200 mmAq) 구조를 갖는 Dry type으로 Safety class NNS, Quality class Q를 적용하였으며, Density는 2.2~2.52 g/cm³, Index of refraction range는 1.47~1.54, Transmission factor와 Loss는 각각 50 %와 20 %(20년 기준) 적용하여 선정하였고, Cold side 외부 표면선량이 10 μ Sv/hr 이하가 되도록 설계에 반영하였다.

MSM과 차폐창의 배치는 Fig. 10과 Fig. 11에 표기된 핫셀 내 전지역 coverage와 시야각 확보를 고려하여 설계되었다.

공정 특성상 공정작업에서 취급하게되는 중량물의 무게를 고려하여 power manipulator 취급용량은 최대 50 kg, In-cell crane의 취급용량은 최대 1 ton으로 설정하였다.

2.3.3. 환기 및 Ar 공급설비

핫셀 환기설비의 설계기준은 부압조건은 최대 -30 mmAq, 환기회수는 20회, leakage rate는 -30 mmAq 조건에서 4 vol. %/day로 설정하였으며[5]. 배기는 핫셀 내 working table 밑에 추가로 설치되는 1차 filter bank(PRE+HEPA+Charcoal)를 거쳐 조사제시험시설의 기준 배기 duct에 연결되어 2차 filter bank(HEPA+ Charcoal+HEPA)를 거친 후 배기되며, 급기는 핫셀 외부에 추가로 설치되는 filter bank(PRE+HEPA)를 거쳐 급기구를 통해 핫셀의 부압에 의해 인입되며, 급기 및 배기를 위한 핫셀 차폐벽 관통부위는 차폐능의 손상을 막기 위하여 screw vault 형태로 설계되었다.

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 공급하게 되며, Ar 공급 및 순환계통의 용도별 기준사양을 Table 2에 표기된 내용과 같이 확정하였다. 공정 반응기 내부의 cover gas와 LiCl, Li₂O 시약을 준비하여 공급하게 되는 glove box 내에 공급되는 Ar 가스는 고순도(99.9999%)를 사용하고, 이 중 glove box에 공급되는 것은 양이 많으므로 정제하여 순환 사용하도록 하였으며, 반응기 냉각용 Ar 가스는 순도가 낮은 것(99.999%)을 one-through로 사용하도록 하였다. 그리고 반응기 내에 공급되는 Ar 가스는 반드시 폐가스 처리장치를 거쳐 배기되도록 하였으며, 그 이외의 Ar 가스는 바로 핫셀 내 배기 filter를 거쳐 배기되도록 설계에 반영하였다. Ar 공급 및 순환계통의 용도별 기준사양을 Table 2에 표기된 내용과 같이 확정하였으며,

3. 결론

본 연구에서는 현재 개발중인 차세대관리 종합공정의 실증시험을 위한 실증시설 설계를 수행하여 실증공정의 기본설계 및 핫셀 설계 결과를 제시하였으며, 본 연구결과는 기존 핫셀을 실증시설로 개조하는 설계자료와 인허가를 위한 기본자료로서 활용된다.

- 기 수행된 차세대관리 종합공정 실증시설의 설계요건과 개념설계 결과를 기준으로 실증시설 내에 설치되는 공정의 범위를 확정하고 및 공정의 기본설계를 수행하여 각 단위공정별 P. & I. Diagram을 제시하였다.

- 실증시설 핫셀의 기준 방사선원을 37,430 Ci로 확정하고 중콘크리트 90 cm에 해당하는 차폐능을 갖춘 공정용 핫셀과 유지보수용 핫셀로 구성되는 실증시험용 핫셀의 설계를 완료하고 그 결과를 제시하였다.

- 핫셀 운전장비(Rear door, MSM, 차폐창, In-cell crane 등) 및 부대설비(환기, Ar 공급설비)의 설계를 완료하였다.

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. KAERI/TR-2092/2002, 차세대관리 종합공정 실증시설 개념설계보고서, 2002.
4. 박 성원 외, '차세대관리 종합공정 실증시설의 공정기준요건 연구', 원자력학회 2002 춘계학술 발표회 논문
5. 박 성원 외, '차세대관리 종합공정 실증시설의 개념설계 연구', 원자력학회 2002 추계학술발표회 논문

Table 1. The division and service of hot cell for ACP

핫셀 구분	Type	공정 및 기능
Hot Cell for Process	α-γ	<ul style="list-style-type: none"> 절단핵연료봉 반입 공정생성물 / 방사성폐기물 반출 차세대관리 종합공정 공정기기 In-Situ 유지 보수
Hot Cell for Maintenance	α-γ	<ul style="list-style-type: none"> Incell Crane 유지 보수 공정기기 유지 보수 반출 기기 제염

Table 2. The design specification of Ar supply and circulation system

소요처	계통구성	수분/산소 농도	공급 Ar 순도	공급 압력	비고
Glove Box (시약 준비)	순환 / 정제	50 ppm	99.9999 %	0.2 kg/cm ²	시간당 5회 이상
공정기기 Cover Gas	One Through (Off-gas 처리)	5 ppm	99.9999 %	0.2 kg/cm ²	0.5 m/s 이하
공정기기 냉각 Gas	One Through (핫셀 배기)	NG.	99.999 %	0.5 kg/cm ²	5 m/s 이하
공정기기 Air Curtain	One Through (핫셀 배기)	NG.	99.999 %	0.5 kg/cm ²	0.5 m/s 이하

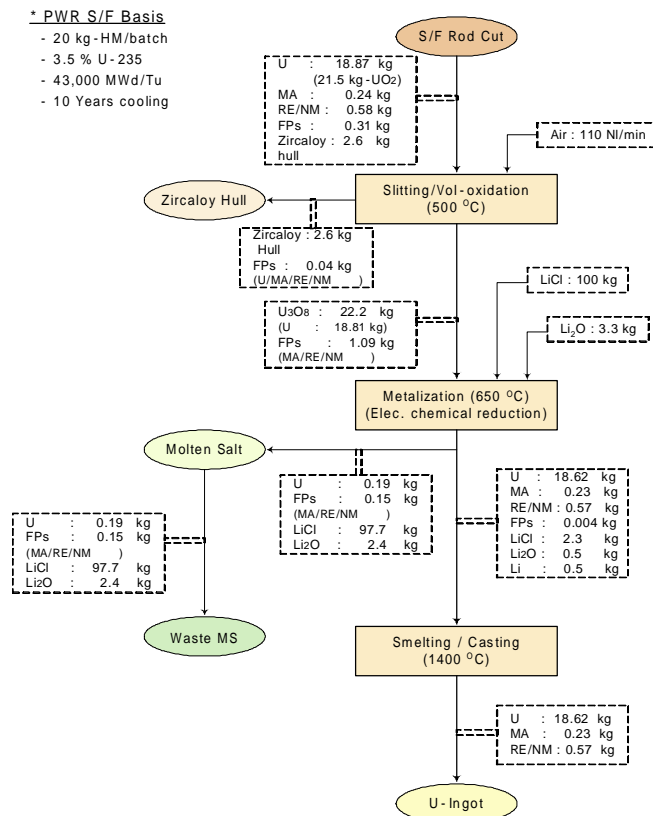


Fig 1. Process mass balance diagram for ACP

Work Flow Diagram

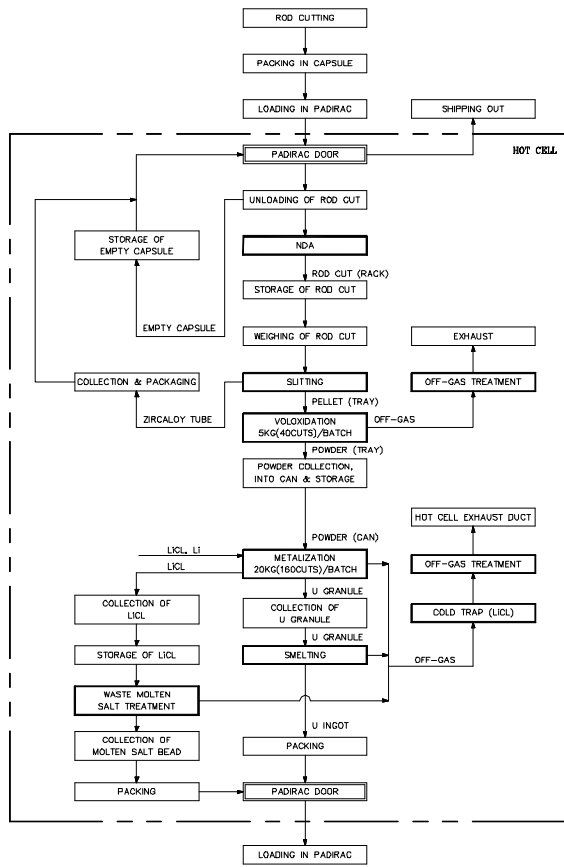


Fig. 2. Process work flow Diagram for ACP.

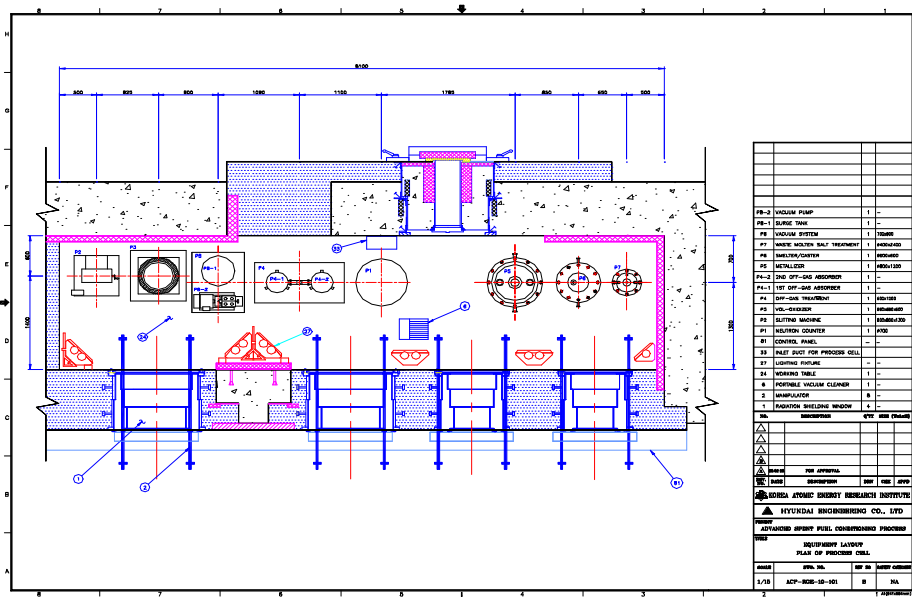


Fig. 3. Process equipments lay-out in hot cell.

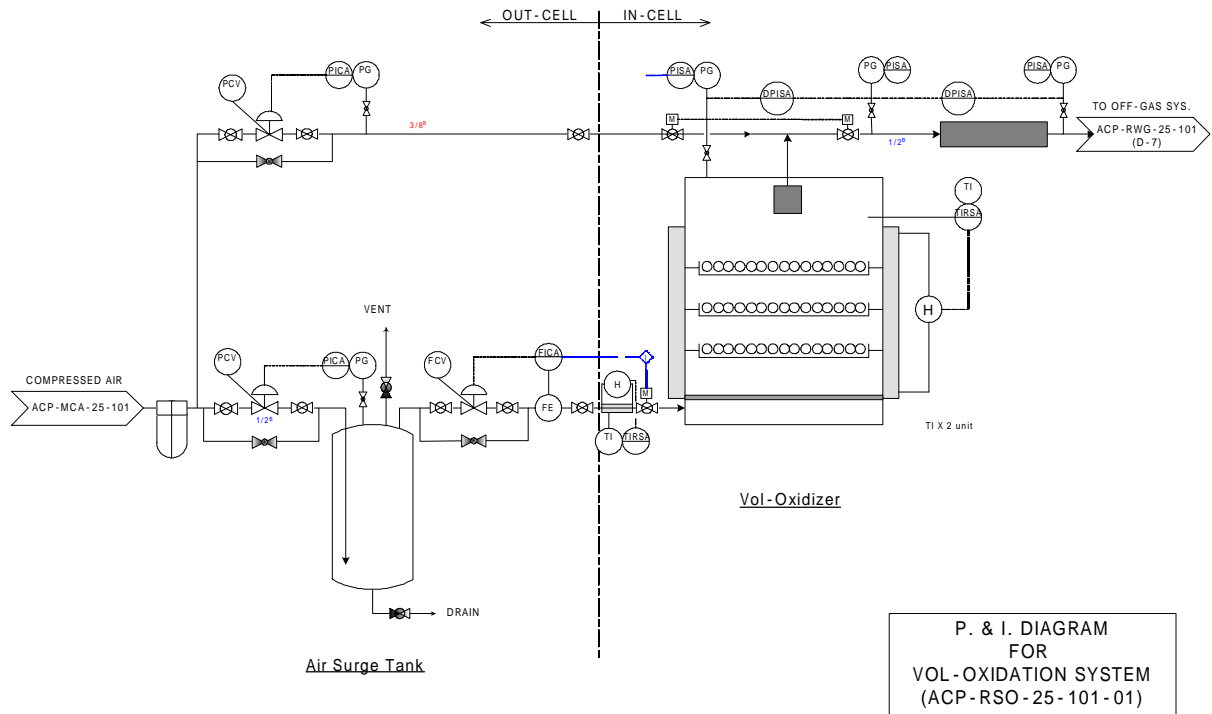


Fig. 4. P. & I. Diagram for Vol-oxidation system.

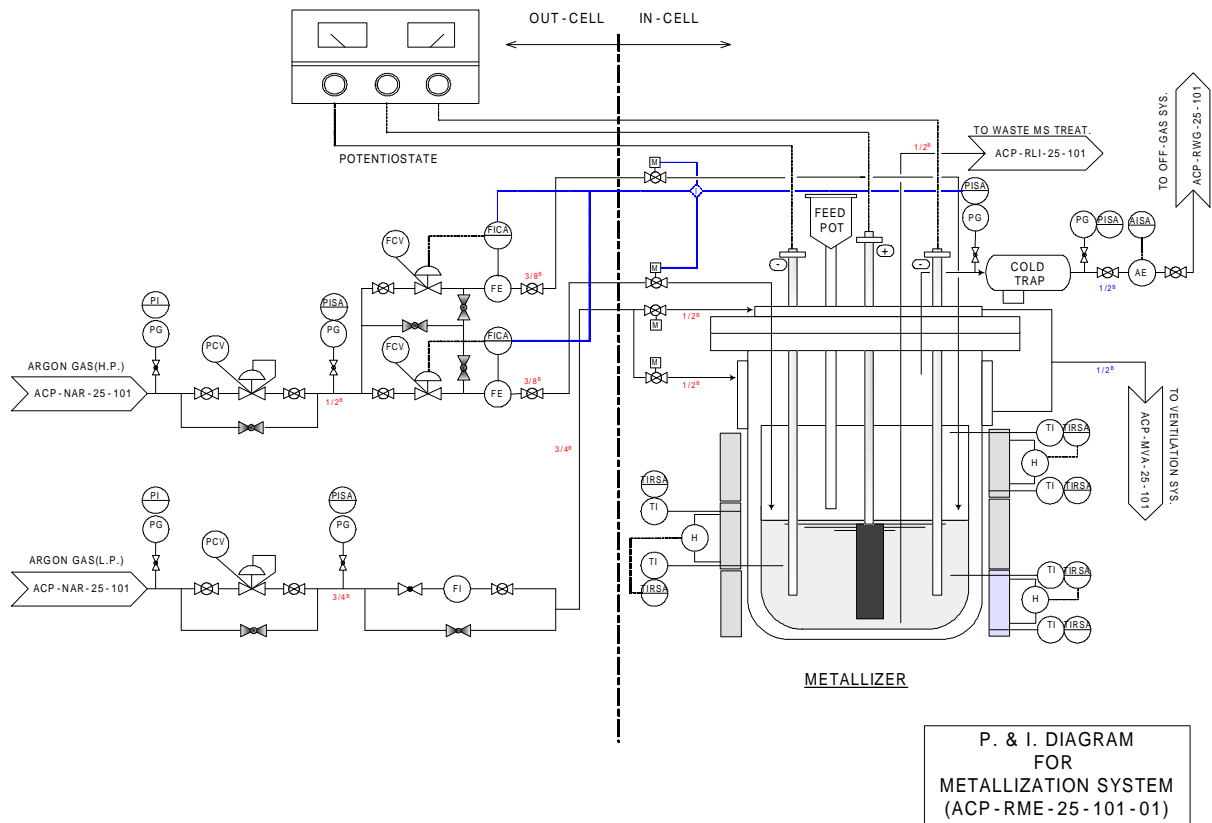


Fig. 5. P. & I. Diagram for Metallization system.

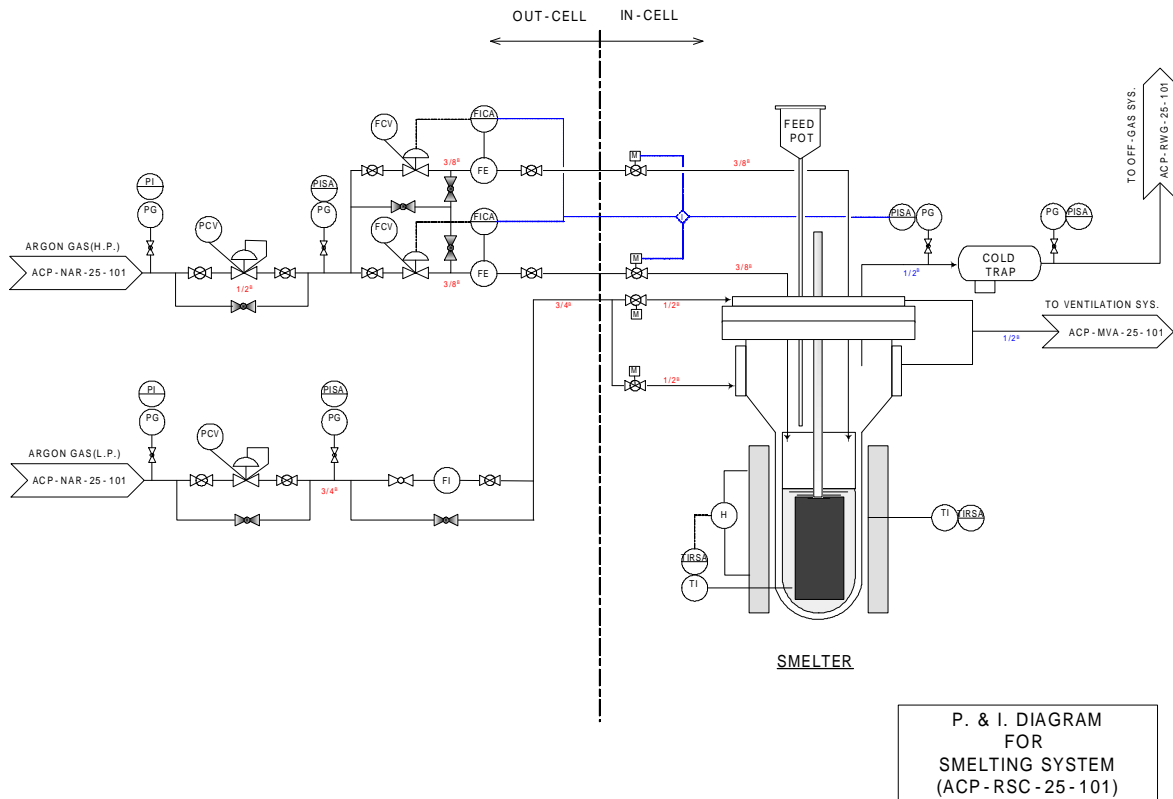


Fig. 6. P. & I. Diagram for Smelting system.

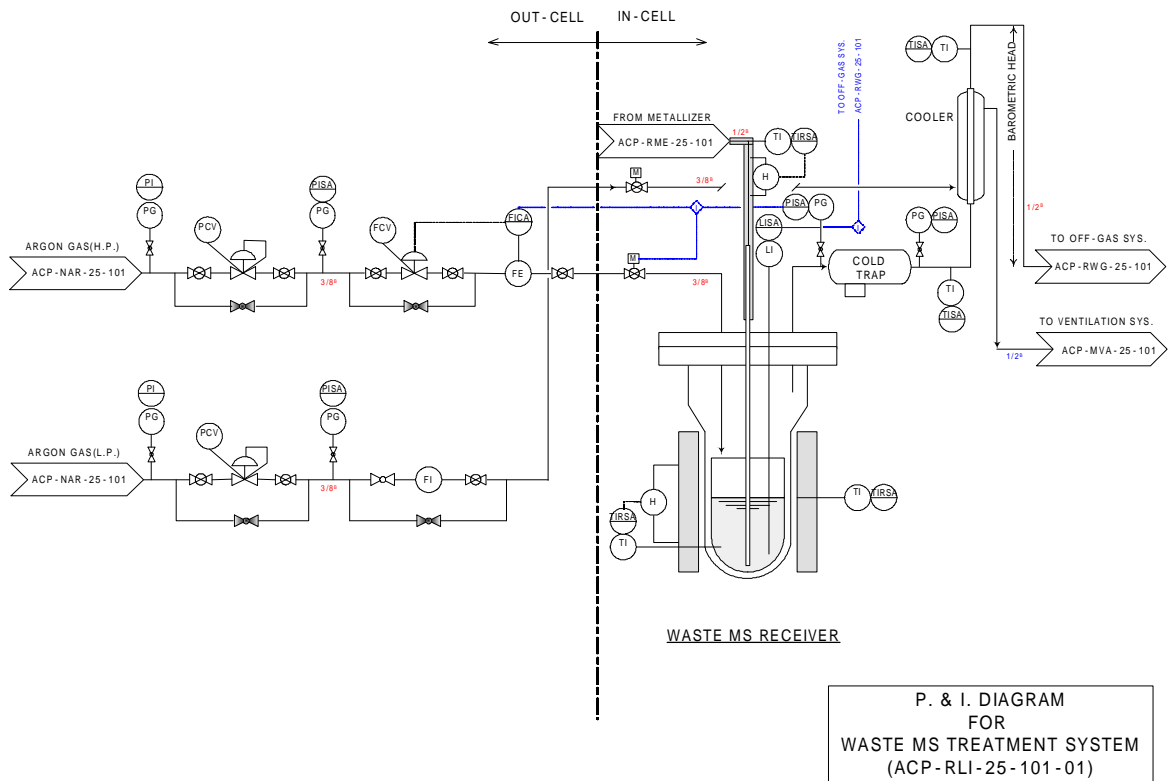


Fig. 7. P. & I. Diagram for Waste MS treatment system.

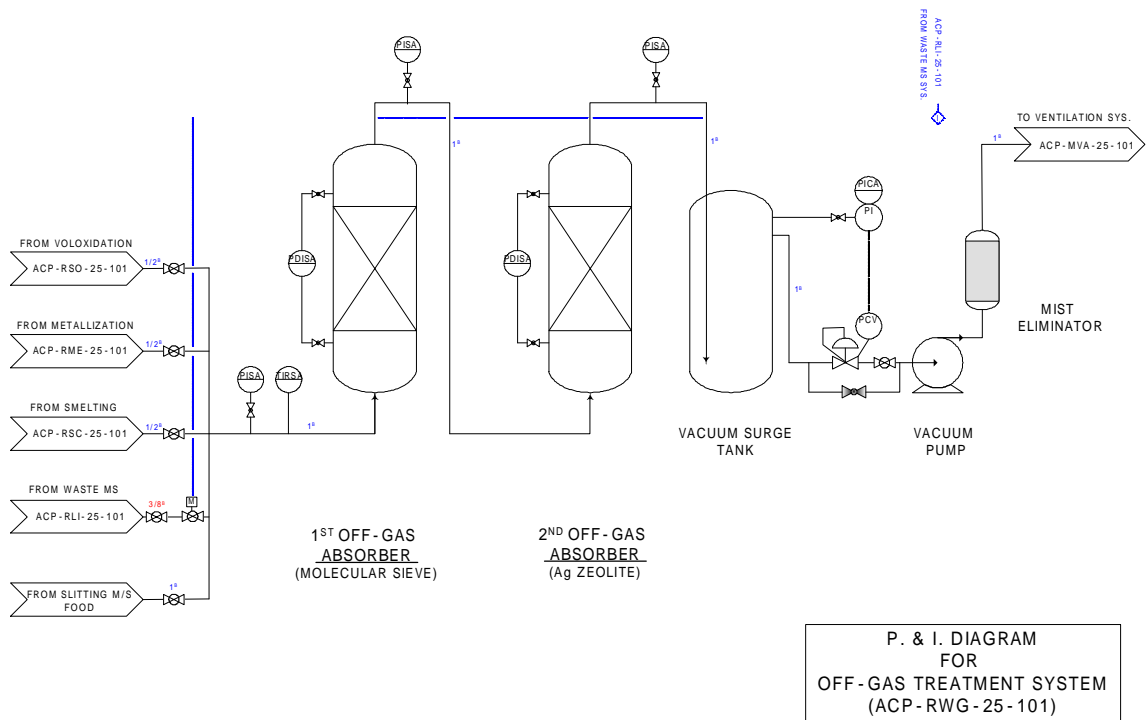


Fig. 8. P. & I. Diagram for Off-gas treatment system.

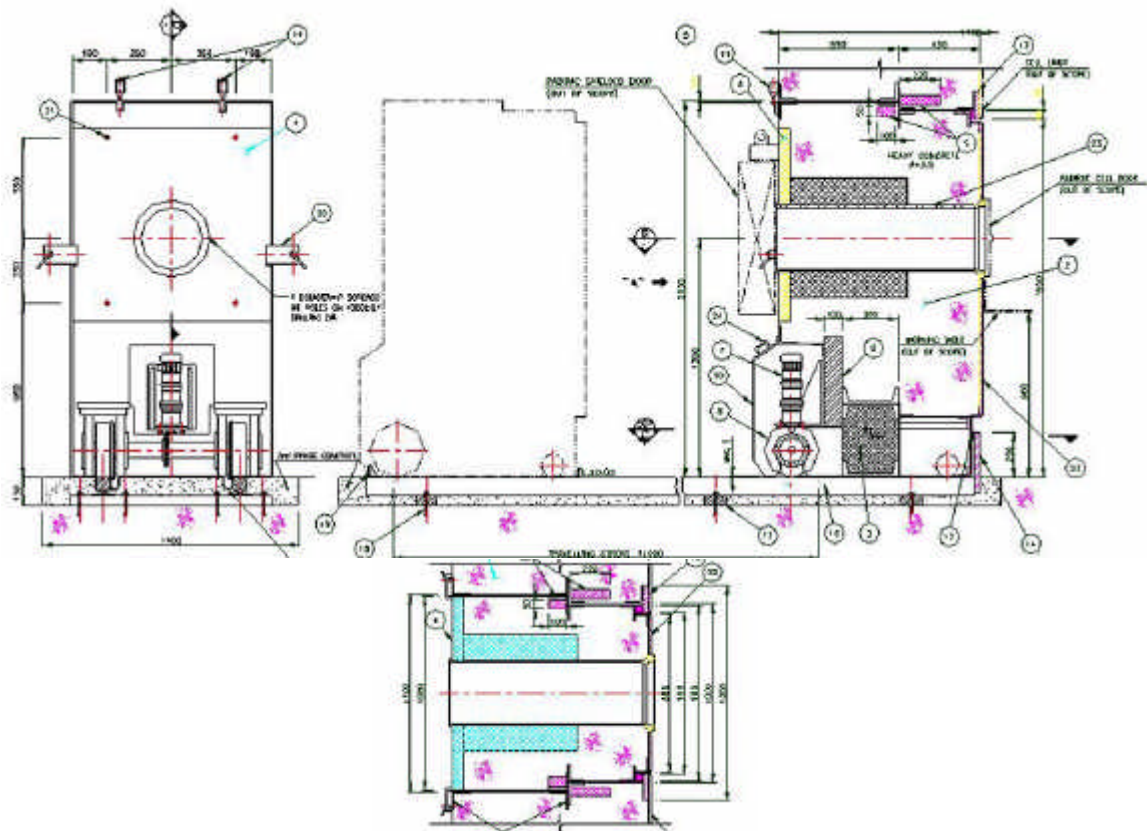


Fig. 9. The drawing of rear door for process hot cell.

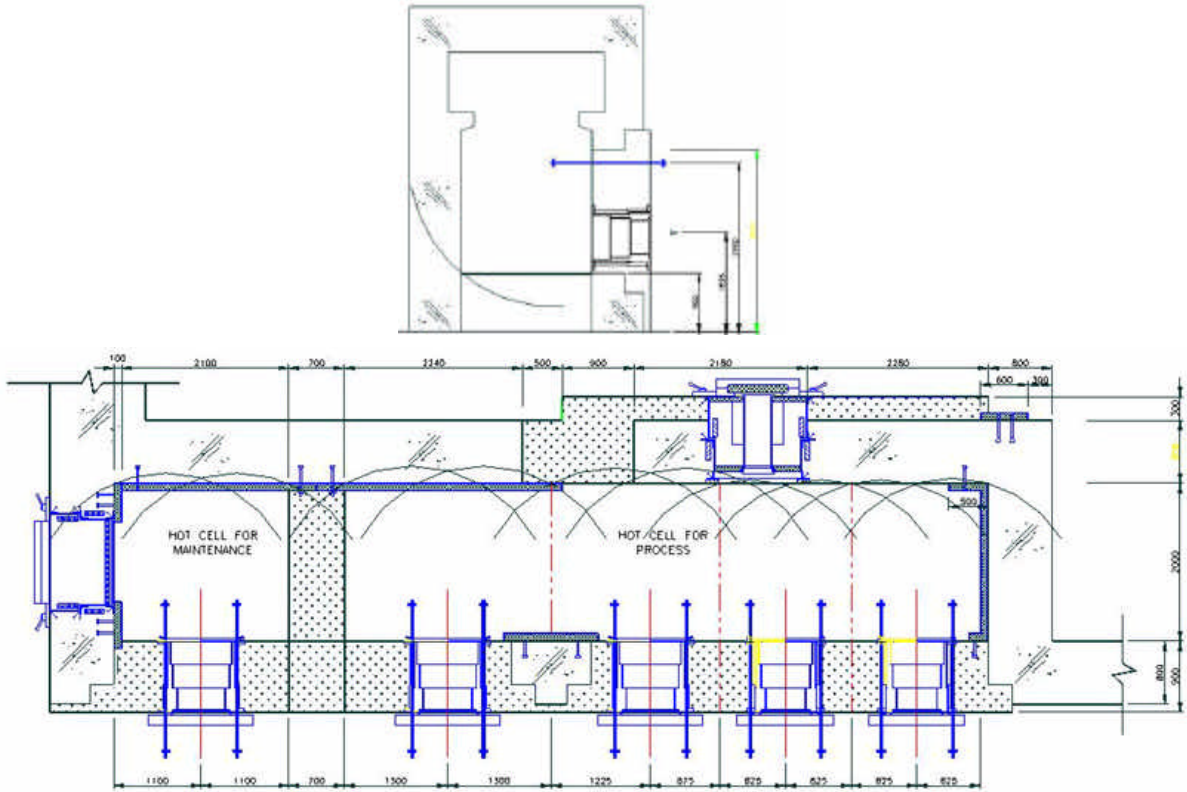


Fig. 10. Coverage drawing of MSM in hot cell.

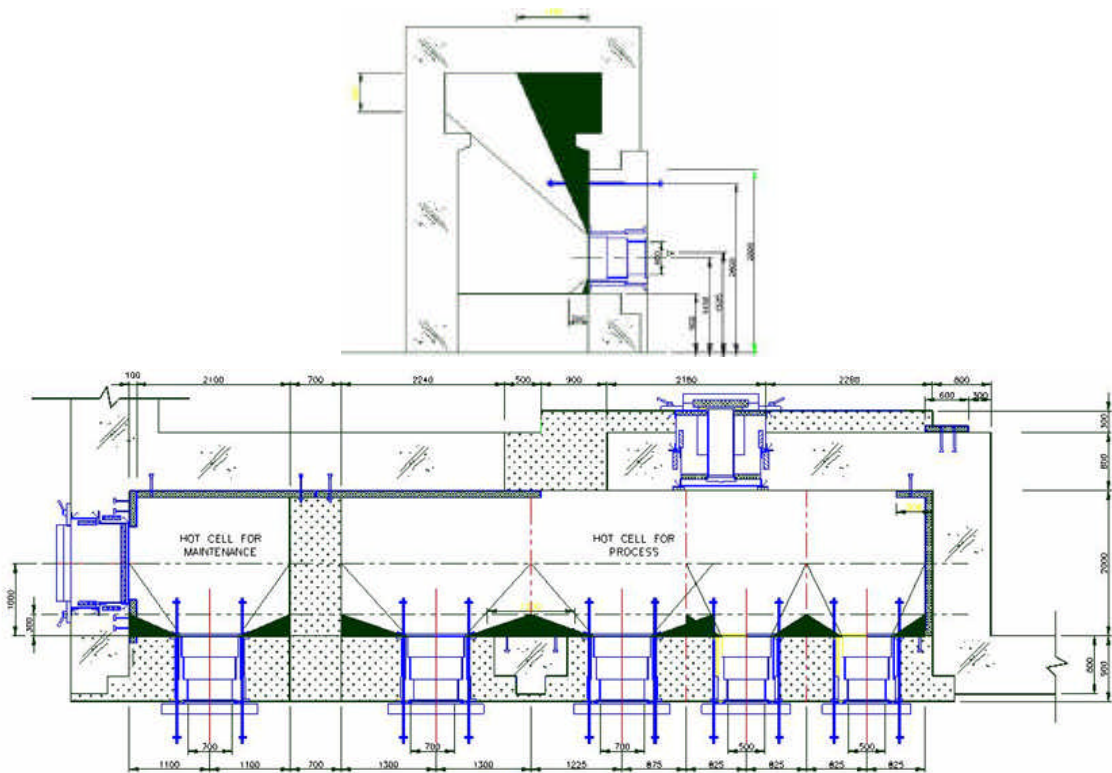


Fig. 11. View angle drawing of shielding windows in hot cell.