

차세대관리 종합공정 실증시설의 구조해석

Structural Analysis of Advanced Spent Fuel Conditioning Process Facility

구정희, 정원명, 조일제, 국동학, 유길성
한국원자력연구소

요 약

원자력발전소 운전과 함께 국내 원전에서 계속 발생, 저장하고 있는 사용후핵연료를 안전하고도 효율적으로 관리하기 위하여 차세대관리 종합공정을 개발하고 있으며, 이를 실증하기 위한 시설을 설계 중에 있다. 이 실증시설은 조사재시험시설에 마련된 예비 핫셀을 차세대관리 종합공정의 특성을 고려하여 개조하여 사용할 예정이다. 이 연구에서는 실증시설에 대한 기존 시설 및 부대시설의 개조방안 등 기본 건축구조 설계에 대한 기준과 설계내용을 제시하였으며, 건축구조물의 안전성을 입증하기 위한 해석을 수행하고 그 결과를 제시하였다. 본 연구결과는 차세대관리 종합공정 실증시설의 상세설계를 위한 자료로 사용될 것이며, 시설의 인허가를 위한 자료로 활용될 것이다.

Abstract

An advanced spent fuel conditioning process (ACP) is developing for the safe and effective management of spent fuels which arising from the domestic nuclear power plants. And its demonstration facility is under design. This facility will be prepared by modifying IMEF's reserve hot cell facility which reserved for future usage by considering the characteristics of ACP. This study presents a basic structural architecture design and analysis results of ACP hot cell including modification of the IMEF. The results of this study will be used for the detail design of ACP demonstration facility, and utilized as basic data for the licensing of the ACP facility.

1. 서 론

고리 원자력발전소의 가동 이래 현재 국내에는 16기의 원자력발전소가 가동중에 있으며, 이들 원자력발전소에서는 사용후핵연료가 필수적으로 발생하게 된다. 현재 국내 원자력발전소에 있어서 발전용량문제뿐만 아니라 계속 발생되고 있는 사용후핵연료의 안전한 관리와 저장이 심각한 상태에 있다. 특히 아직까지 부지를 확보하지 못해 중저준위 폐기물을 비롯한 고준위 폐기물을 저장할 폐기물 처분장과 사용후핵연료를 저장할 수 있는 중간저장시설 등을 확보하지 못하고 있는 실정이다. 이에 따라 지금까지 사용후핵연료의 저장은 국내 원자력발전소의 호기간 이송·저장, 조밀저

장랙(high density rack) 설치, 또는 발전소 사이트 내에 콘크리트 사일로(concrete silo) 등 건식저장시설 건설 등의 임시적 방편으로 해결하고 있으나, 사용후핵연료의 저장 및 처분장의 확보는 시급히 해결되어야만 한다.

차세대관리 종합공정(ACP: Advanced spent fuel conditioning process)은 사용후핵연료를 안전하고도 효율적으로 관리하기 위하여 개발된 공정으로, 이 공정에서는 사용후핵연료를 금속전환체로 전환하고, Cs, Sr 등의 고발열성 핵종을 효율적으로 제거하여 사용후핵연료의 부피와 발열량 및 방사선량을 최대 1/4까지 감소시키고, 처분용기의 소요량과 처분장의 소요면적을 1/2 이상 축소함으로써 안전성과 경제성을 높이는 획기적인 방법이다. 또한, 핵확산 관련 저항성이 높은 환경친화적 기술로서 미래지향적인 건식 핵연료주기 기술에 중추적인 역할을 하는 기술로 관련된 많은 연구개발이 진행중이다[1,2].

차세대관리 종합공정의 실증을 위한 실증시설을 설계 중에 있다. 차세대관리 종합공정에서는 방사선준위가 매우 높은 사용후핵연료를 고온의 조건에서 LiCl 용융염 매질 하에서 취급하게 되므로, 실증시설은 기존의 핫셀 보다는 더욱 더 높은 기밀성을 유지하여야 하며, 일부 공정에는 Ar등 엄격한 불활성 분위기를 만족시켜야만 한다. 따라서 차세대관리 종합공정 실증 시설에는 α -v type의 핫셀이 필요하다. 그러나 신규 시설의 확보에는 많은 자원과 인력, 시간 등이 소요되므로 실증시설은 기존의 시설을 활용하여 공정의 특성 및 용도에 맞게 개조하는 방안을 선택하였다.

본 연구에서는 차세대관리 종합공정 실증시설의 용도에 맞도록 기존의 IMEF 시설에 마련된 예비핫셀을 개조하고, 보완하며, 시설의 안전성을 유지하면서도 효율적인 실증시험을 수행할 수 있도록 건축구조의 개념을 세운 후에 구체적 시공방안을 검토하고, 구조적 안전성을 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 자료는 실증시설의 상세설계를 위한 자료와 시설 및 공정의 인허가에 필수적인 안전성분석의 기초자료로 활용될 것이다. 본 연구에서는 차세대관리 종합공정의 기본개념만 제시하고 공정특성, 공정장치의 설치 및 구성 등 공정에 관련된 부분에 대해서는 취급하지 않았으며, 주로 실증시설의 건축구조의 설계개념과 구조적 건전성 평가부분에 대해서 다루었다.

2. 실증시설의 설계기준

2.1 실증시설의 설계기준 및 취급물질 규모

차세대관리 종합공정(ACP) 실증시설에서는 공정데이터의 신뢰성과 상용화 및 시설의 여건 등을 고려하여 사용후핵연료 20 kg-HM/batch를 처리하도록 취급물질 규모를 설정하였다. 따라서 공정장치 및 공정에 필요한 부대시설의 규모 또한 이 취급물질 규모를 기준으로 설계하였다. ACP 핫셀은 절단 핵연료를 반입하고, 공정을 수행하기 위한 공정셀(process cell)과 in-cell crane이나 공정기기 등의 유지보수에 사용하기 위한 유지보수셀(maintenance cell)로 구성되는데, Table 1과 같은 설계기준을 적용하였다.

실증시설에서는 1 batch에 10개의 핵연료봉을 사용하게 되는데 PWR 사용후핵연료봉 1개의 우라늄 질량이 1 kg이므로 연료봉을 25 cm 길이로 절단하여 Padirac 수송용기에 담아 취급하게 되므로 20 cm 길이의 절단 사용후핵연료 봉(rod cut) 160개를 1 batch에 사용하게 된다. 이 공정에서 사용할 기준 사용후핵연료는 연소도 43,000 MWD/MTU, U-235 농축도 3.5 wt%, 냉각기간 10년으로서 총방사능량이 9,950 Ci이다[2].

2.2 실증시설의 구조설계

차세대관리 종합공정 실증시설에서는 Fig. 1과 같이 기존 IMEF 시설의 예비 핫셀을 개조·보완하는 개념으로 설계를 하는 개념을 적용하였다. 따라서 IMEF 시설의 예비 핫셀의 기본구조 및

여건을 활용하고, 차세대관리 종합공정의 특성에 맞도록 방사선 차폐기능 등 성능을 보완하도록 하였으며, 기존의 IMEF 시설의 설계에 적용했던 설계기준을 그대로 적용하였다[3-5]. 또한 건축 구조의 설계에 있어서 기존 콘크리트 구조물의 구조적 강도가 약화되지 않도록 하여 기존 SAR의 내용을 유지토록 하였다.

IMEF 시설은 조사재시험을 수행하는 핫셀 구조물 및 주변 건축구조물로 이루어져 있으며, 핫셀구역은 서비스 구역과 운전구역으로 구분되어 있다. 이 건물은 내진범주 1급 콘크리트 구조물로서 구조물을 비롯하여 각종 계통 및 부품은 안전정지지진(SSE: safe shutdown earthquake), 설계 기준지진(DBE: design base earthquake) 및 부지설계지진(SDE: site design earthquake) 및 기타 부하에서도 그 기능이 손상되지 않도록 설계되었다. 이 건물의 구조물, 계통 및 부품은 안전등급, 내진등급 및 품질등급 등의 분류기준에 따라 Table 2와 같이 분류된다. 원자력시설의 안전등급은 SC(Safety Class), NNS(Non Nuclear Safety), NA(Non Application) 등으로 구분된다. SC는 원자로와 같이 어떠한 경우에도 설계된 개념 그대로의 안전성이 유지되어야만 하는 시설로 원자로 및 원자로 1차 계통 설비에만 적용되고 있으며, 핵주기 시설에는 사용후핵연료를 직접 취급하는 시설 외에는 적용되지 않는다. NNS는 ANSI 안전등급 분류기준에 의한 구조 및 설비로서 고장이 발생하더라도 규정된 사고시 작업 종사자 및 주민에 대한 최대허용피폭선량을 초과하지 않으나 방사성물질을 함유한 경우이며, NA는 안전등급 분류기준을 적용할 수 없는 대상으로 별도의 산업 규격 또는 표준을 적용한다.

차세대관리 종합공정 실증시설의 차폐설계에는 1 batch의 사용후핵연료(20 kg-HM)의 방사능량 9,930 Ci외에도 핵분열생성물 5 batch와 폐용융염 2 batch를 함께 고려하여 총 방사능량을 22,830 Ci로 가정하였다. 따라서 새로 신설되는 전면 차폐벽은 900 mm의 두께를 갖는 중콘크리트(heavy concrete)로 차폐벽을 구성하였으며, 후면에는 기존에 설치된 800 mm 두께의 일반콘크리트 벽에 두께 300 mm의 중콘크리트로 차폐를 보강하였으며, 기타 부분에는 내부에 80 mm 두께의 납차폐체로 차폐를 보강하였다.

ACP 핫셀에서는 차폐 및 구조적 강도를 유지하도록 기존의 콘크리트 벽에 anchor bolt를 시공한 후 중콘크리트(heavy concrete)를 시공하여 기존의 벽과 보강되는 차폐벽간의 결합성을 높였다. 또한 내부에 보강되는 납 차폐블럭을 고정하는 라이닝의 고정부도 차폐효율이 떨어지지 않고 지진하중 등에서도 구조적 건전성을 유지할 수 있도록 설계하였다.

ACP 핫셀은 Fig. 1과 같이 공정셀과 유지보수셀의 두 개의 셀로 나뉘어지는데 공정셀에는 4개의 납유리(lead glass)와 4조의 원격조종기(manipulator)가 설치되며, 유지보수셀에는 1개의 납유리와 1조의 원격조종기가 설치된다. Fig. 2는 ACP 핫셀의 차폐보강부의 접측면의 차폐 및 구조적 강도의 효율을 높이기 위해 chipping 및 anchoring 처리한 설계를 나타내며, Fig. 3에는 이들 중량 콘크리트 차폐보강벽의 철근 배근계획을 나타내고 있다.

3. 실증시설의 구조해석

본 연구에서 수행한 구조해석은 Fig. 1과 같이 상자형골조 전단벽 시스템(box frame shear wall system) 구조물인 IMEF 건물의 핫셀 구조물 가운데 일부 변경된 부분의 차폐벽 보강 설치에 따른 구조물의 건전성 평가를 위한 구조해석이다. 따라서, 구조해석시 각 기준은 기 적용된 기준으로 구조해석 하여 구조물의 건전성을 평가하였다[3-5].

3.1 설계하중

차세대관리 종합공정 실증시설의 구조해석에서는 시설의 정상가동 및 사고시 구조물에 작용하

는 자중 등의 고정하중(D: dead load), 활하중(L: live load), 풍하중(W: wind load) 및 지진하중(E&E': seismic load) 등을 적용한다.

고정하중(D)은 구조물 및 기기, 배관, 케이블 선반(cable tray)등의 자중을 포함하는 것으로 구조물에 장착된 기기에 대하여 기본적으로 배관이나 케이블 선반의 고정하중 $0.8t/m^2$ 을 가산하여 고려하였으며 Table 3과 같이 공정장치의 자중을 고려하였다. 활하중(L)은 사용후핵연료를 운반하는 Padirac cask 등 기타 이동 가능한 기기 및 구조물에 대한 하중을 해당 층에 대하여 적용하였다. 설계에 적용한 최소 활하중으로는 레일하중을 $0.01 t/m^2$ 으로 가정하였으며, 핫셀 작업구역은 $5.0 t/m^2$, 핫셀 서비스 구역은 $2.0 t/m^2$ 으로 가정하였다. 풍하중(W)은 실증시설이 IMEF 시설의 지하에 추가로 보완되는 것이기 때문에 바람의 영향이 전혀 없으므로 고려하지 않았다.

IMEF 시설은 내진 1등급 구조물로서 지진하중은 안전정지 지진하중(E')과 운전기준 지진하중(E)의 두 가지에 대하여 고려하였는데, 안전정지 지진하중(E')은 안전정지 지진(SSE: safe shutdown earthquake)에 의해서 발생하는 최대부지 가속도(maximum ground acceleration)를 의미하며 수평 방향으로 $0.2g$, 수직 방향으로 $0.13g$ 이다. 운전기준 지진하중(E)은 운전기준 지진(OBE: operation base earthquake)에 의해서 발생하는 최대부지 가속도를 의미하며 수평 방향으로 $0.1g$, 수직 방향으로 $0.067g$ 이다.

철근 콘크리트 구조물의 구조설계에서는 탄성설계시 요구되는 철구조물의 단면 강성 S를 사용하는 강도설계와 극한강 설계시 요구되는 철근 콘크리트 단면 강성 U를 사용하는 탄성설계로 구분하는데 이들은 Table 4와 같은 하중조합을 적용하며, 이들 하중조합 가운데 가장 큰 값을 사용한다. 여기서 E는 OBE에 의한 하중을 나타내며, E'는 SSE에 의한 하중을 나타낸다[6].

3.2 구조해석

차세대관리 종합공정 실증시설의 구조해석에서는 SAP2000 코드를 사용한 3차원 해석을 수행하였다. 구조해석모델은 Fig. 4와 같이 1,754개의 삼각형 및 사각형의 plate element, 9개의 beam element를 가지며, 총 1,629개의 절점(node)으로 구성하였다. Fig. 4는 ACP 핫셀을 포함한 IMEF 시설 전체에 대한 해석모델로서 그 내부에는 Fig. 5와 같이 ACP 핫셀을 부분적으로 모델링한 부분이 기존의 IMEF 모델에 추가로 삽입되어 있다.

시설의 출입문, 원격조정기나 납유리 등을 설치하는 벽면의 관통부 등의 벽면에 있는 관통부는 모델링에서 무시하고 모델을 단순화하였다. 그 대신에 벽면의 강도가 등가의 강도를 갖도록 요소의 두께를 조정하였으며, 벽면의 요소에 납유리와 원격조정기 등의 무게를 더하여 등가의 하중이 벽체에 전달되도록 하였다.

해석에 사용된 재료의 물성치로는 일반콘크리트는 $f_c = 240 \text{ kg/m}^2$, 중콘크리트는 $f_c = 350 \text{ kg/m}^2$ 로 하였고, 철근 가운데 주근과 배근 모두 $f_y = 4,000 \text{ kg/m}^2$ 를 고려하였고, 구조용 강재의 경우 일반콘크리트는 $f_y = 2,400 \text{ kg/m}^2$ 으로 고려하였다. 내진해석 방법은 응답 스펙트라해석(response spectra stress analysis)을 사용하였다.

구조해석결과 최대 벽체전단력 $V_{yy} = 39.1 \text{ ton/m}$ 로 계산되었으며, 최대 벽체 축력 $F_{yy} = 431.4 \text{ ton/m}$ 로 계산되어 벽체 전단력에 의한 영향보다는 벽체 축력이 훨씬 크게 발생함을 알 수 있으며, 최대 벽체 모멘트 $M_{yy} = 29.5 \text{ ton} \cdot \text{m/m}$ 로 계산되었으며, 슬라브의 최대 모멘트 $M_{yy} = 22.6 \text{ ton} \cdot \text{m/m}$ 로 계산되어 모멘트에 의한 영향을 거의 없는 것으로 판단되었다. Fig. 6~9는 각각 차세대 종합공정 실증시설 핫셀의 벽과 슬라브에 작용하는 전단력, 모멘트, 축력 등의 분포를 나타내고 있다.

Fig. 10은 내진해석 결과 ACP 핫셀을 포함한 IMEF 시설 전체에 발생하는 x-방향으로의 변위를 나타내는데 시설의 x-방향 최대변위는 $1.634e-1$ mm로 나타났으며, Fig. 11은 y-방향의 최대변위로서 최대값이 $6.97e-2$ mm으로 변위가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 12, 13은 mode shape 해석 결과에서 mode-1과 mode-5의 결과를 보여주고 있다. Mode-1의 경우 $f_n = 5.318$ cycle/s로 계산되었고, 주기는 $T=0.1880$ s로 계산되었으며, Mode-5의 경우 $f_n = 9.618$ cycle/s로 계산되었고, 주기는 $T=0.10397$ s로 계산되었다. 변위해석 결과에서 보듯이 최대변위량이 0.16 mm로 거의 변형이 발생하지 않는 것을 알 수 있으며, Mode 해석결과 최대주기가 0.188 s로 강체구조물(rigid structure)의 기준인 $T \leq 0.3$ s로 IMEF 시설이 지진에 강한 구조물임을 알 수 있다[7].

이와 같이 해설결과 변위나 응력값이 작게 발생하는 이유는 Fig. 1에서 제시된 바와 같이 IMEF 시설 자체가 지진하중 등에 잘 견딜 수 있는 상자형골조 전단벽 시스템(box frame shear wall system) 구조물인데다가 차세대 종합공정 실증시설인 ACP 핫셀 자체가 IMEF 시설의 무게 중심의 하단부에 위치한 지하에 설치되기 때문에 전도모멘트나 지진하중 등에 안정성을 오히려 증가시키므로 건물의 구조적 안전성을 향상시키는 역할을 한다. 또한 압축강도가 240 kg/cm^2 인 일반콘크리트보다 압축강도가 350 kg/cm^2 으로 약 46%의 높은 압축강도를 갖는 중콘크리트 차폐벽이 기존의 IMEF 예비핫셀에 더해지게 되므로 구조적 강도는 더욱 증가하게 되는 것이다.

또한 IMEF 예비핫셀의 기본 콘크리트 벽면에 함께 설치되는 T-형 모양을 가진 중콘크리트 구조물은 anchored stud bolt를 설치하고 시공하여 anchor bolt의 전단강도를 이용하며, T-형 자체가 갖는 굽힘강성을 함께 이용하기 때문에 시설의 구조적 건전성 확보에 큰 도움이 되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

차세대관리 종합공정 실증시설에 대한 설계요건을 확인하고, 기존의 IMEF 시설에 적용된 기술 기준과 규정에 따라 실시한 구조해석 결과 기존 벽체에 중콘크리트 구조물로 차폐를 보장하는 ACP 핫셀의 구조적 건전성이 유지됨을 알 수 있다. 특히, 원자력 관련 내진 1등급의 지진해석 결과 ACP 핫셀의 벽체 및 슬라브에 대한 부재의 구조적 안전성뿐만 아니라 기존 시설 전체에도 구조적 안전성을 함께 유지함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 주관으로 추진중인 원자력중장기사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] KAERI/RR-2128/2000, 사용후핵연료 차세대관리 공정개발, 2000.
- [2] KAERI/TR-2004/2002, 유길성의 8인, 차세대관리종합공정실증시설 설계요건서, 2002.
- [3] Dynamic and Static Analysis for IMEF Building (Doc. No. EF-E-2420-DC-H101, H102)
- [4] KAERI/TR-710/96, 하나로 안전성분석보고서, 제11장 조사재시험시설, 2000.
- [5] "Building code Requirements for Reinforced Concrete", ACI1318-83, 1983.
- [6] "Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structure", ACI349-80

[7] J. Ambrose and D. Vergun, "Simplified Building Design For Wind and Earthquake Forces", 2nd Ed, John Wiley & Sons.

Table 1. Design Requirements of ACP Hot Cell.

Item	Design Requirements
Hot Cell Type	α -v Cell, Sealing, Inner lining
Radiation Shielding	<ul style="list-style-type: none"> · 0.01 mSv/hr(1 mrem/hr) · 0.15 mSv/hr(15 mrem/hr)
Seismic Design	안전정지지진(SSE)에 대한 안전성 확보
Operation Condition	<ul style="list-style-type: none"> · Temperature: 25~35°C · Pressure: -27~30 mmAq
In-Cell Circumstance	<ul style="list-style-type: none"> · Air in Cell, Ar in some Equipments · One-through ventilation
Radiation Monitoring	Automatic door-lock of rear door if dose exceeds 2.5 mSv/hr
Process Material&Waste Handling	RD-15 Padirac transfer system

Table 2. Load Combinations of Steel Concrete Structure

Required Strength	Elastic Design
$U = 1.4D + 1.7L$	$S = D + L$
$U = 1.4D + 1.7L + 1.9E$	$S = D + L + W$
$U = 1.4D + 1.7L + 1.7W$	$S = D + L + E$
$U = D + L + E'$	$1.6S = D + L + E'$
$U = 1.4D + 1.7L + T$	$S = D + L + T$
$U = 1.4D + 1.7L + 1.9E + T$	$S = D + L + E + T$
$U = D + L + E' + T$	$1.6S = D + L + E' + T$

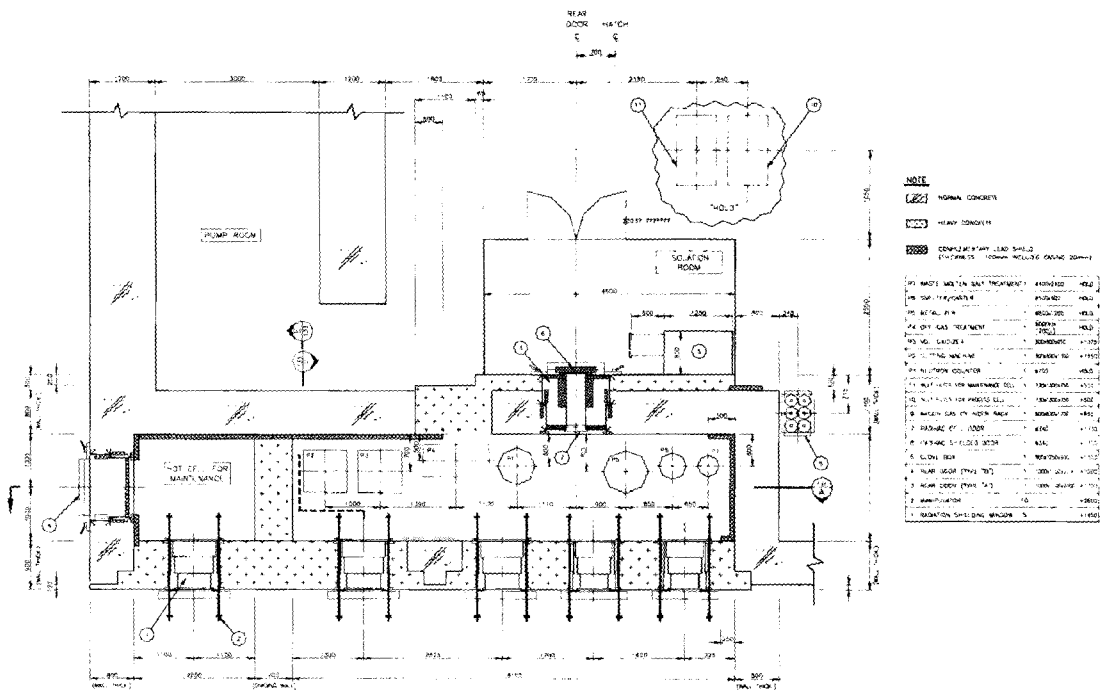


Fig. 1 Plan View and General Lay-out of Process Equipments of ACP Hot Cell.

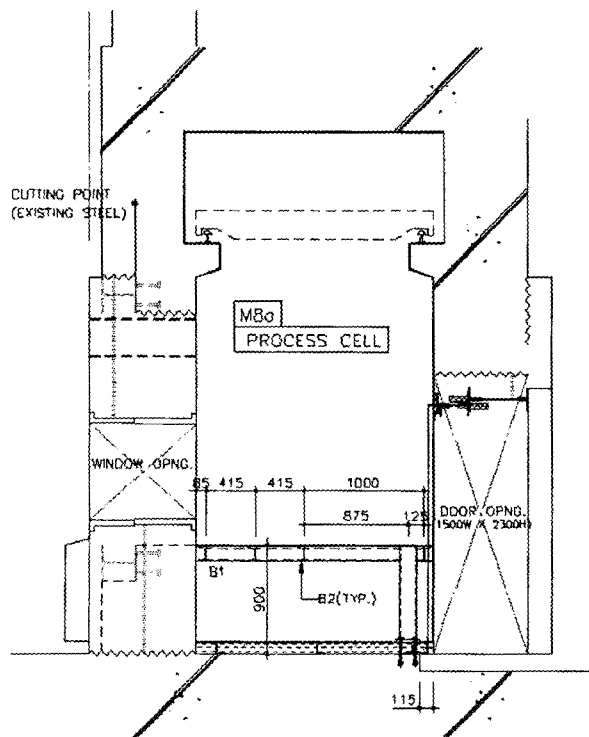


Fig. 2. Reinforcement of radiation shielding.

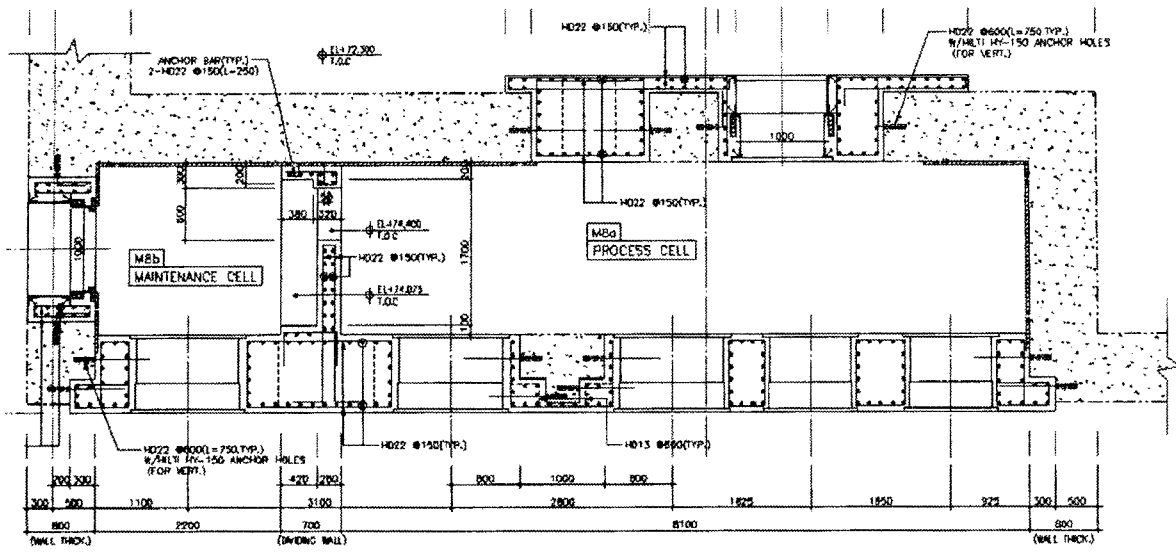


Fig. 3. Reinforcement of radiation shielding wall.

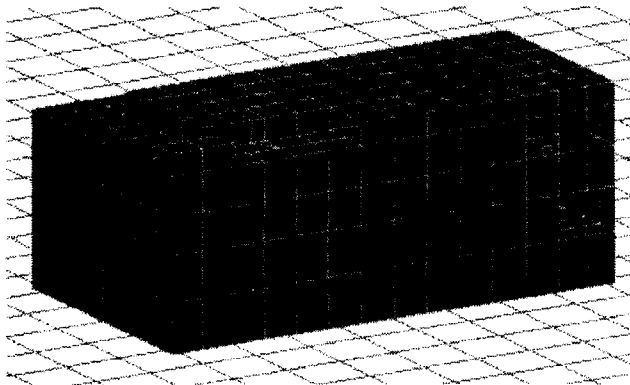


Fig. 4. Iso-View of IMEF 3D Model.

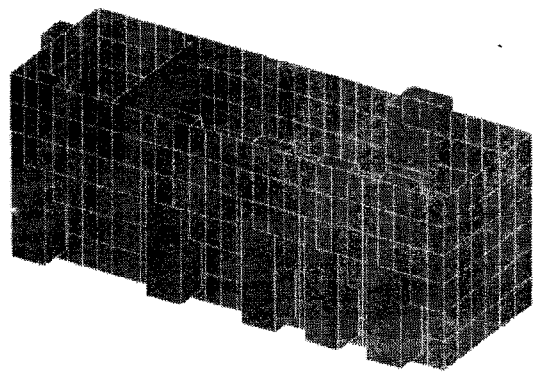


Fig. 5. Additional Model for ACP Hot Cell.

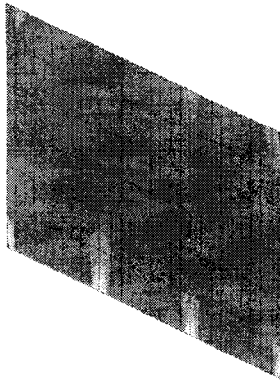


Fig. 6. Shear Force of ACP hot Cell Wall.

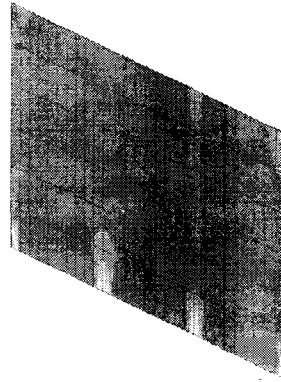
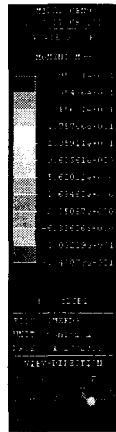


Fig. 7. Moment of ACP Hot Cell Wall.

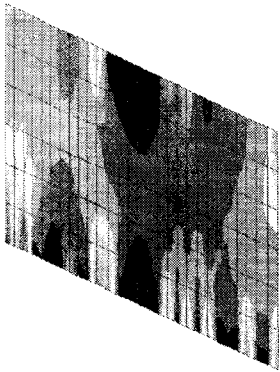
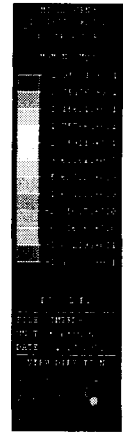


Fig. 8. Axial Force of ACP Hot Cell Wall.

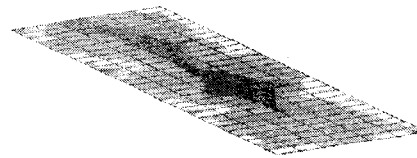
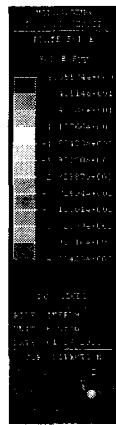
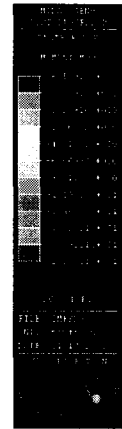


Fig. 9. Moment of ACP Hot Cell Slab.



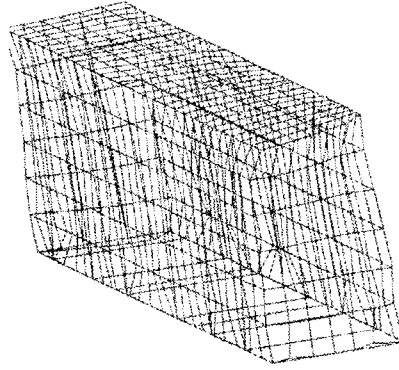
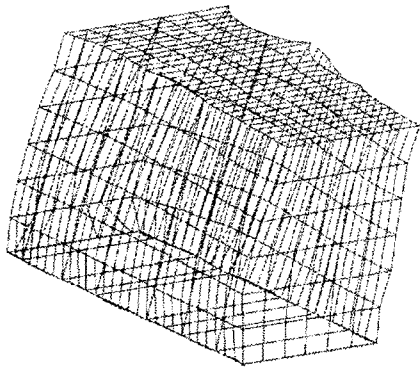


Fig. 10. Max. Disp. of ACP Hot Cell(x-dir). Fig. 11. Max. Disp. of ACP Hot Cell(y-dir).

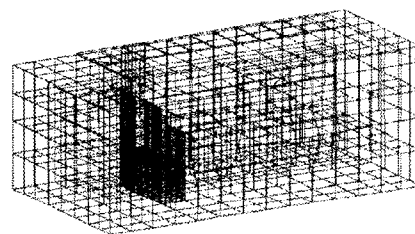
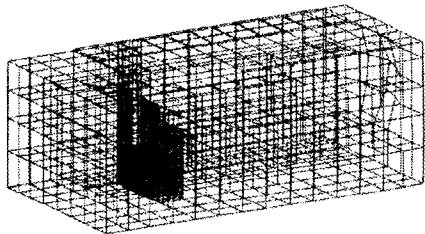


Fig. 12. Mode-1 Shape of ACP Hot Cell.

Fig. 13. Mode-5 Shape of ACP Hot Cell.