

KAERI/TR-3943/2009

KALIMER-600 구조 설계 개념 형상화

Modeling of KALIMER-600 Structural Design Concept

KAERI

2009. 11.

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원 원장 귀하

본 보고서를 “KALIMER-600 구조 설계 개념 형상화”에 대한 기술보고서로 제출합니다.

2009년 11월 20일



KAERI

과 제 명 : 기계 핵심기반기술 개발

주 저 자 : 박 창 규

공동저자 : 이 재 한

요 약 문

본 연구에서는 소듐냉각 고속로 KALIMER-600의 개념 설계 연구를 통해 도출되었던 구조설계 개념에 대하여 설계해석 평가로 제시된 변경 사항들을 반영한 3차원 구조설계 모델링의 수정 작업을 I-DEAS 프로그램을 활용하여 수행하였다. 또한 3차원 형상화 자료를 바탕으로 각 구조물 및 기기에 대한 도면을 작성하여 실증로 개념 설계시 참고 자료로 활용할 수 있을 것이다. 기기 배치 및 구조 개념은 기존에 도출되었던 개념을 유지하지만 국부적인 사항들이 보완되면서 이를 반영하였다.

Summary

In this study, the modification work for a 3-D solid modeling of KALIMER-600(Korea Advanced Liquid Metal Reactor, 600MWe) conceptual design by using I-DEAS, a commercial solid modeling program, was carried out by reflecting the design change produced through the design feasibility study. Also, the structures and components are drafted based on the 3-Dimensional modeling data and it is expected to be utilized for the reference document of the demonstration sodium-cooled fast reactor. The component arrangement and structural concepts are maintained the established concepts but the locally modified design features of the structures are applied.

목 차

제출문	i
요약문	ii
Summary	ii
목차	iii
그림 목차	v
1. 서론	1
2. 원자로 구조물 개념 설계	3
2.1 기기 배치	3
2.2 원자로헤드 및 자폐절연체	9
2.3 원자로 지지구조물	12
2.4 원자로용기 및 격납용기	14
2.5 회전플러그 및 상부내부구조물	16
2.5.1 회전플러그	16
2.5.2 상부내부구조물	18
2.6 원자로 내부구조물	21
2.6.1 원자로베플	22
2.6.2 격리판	23
2.6.3 분리판	24
2.6.4 노심 차폐체	25
2.6.5 지지배럴	26
2.6.6 유입실	27
2.6.7 노심지지구조물	28
2.6.8 노심 캐처	29

3. 원자로 주요 내부기기 -----	31
3.1 중간열교환기 -----	31
3.2 일차펌프 -----	35
3.3 소듐-소듐 열교환기 -----	40
4. 결론 -----	43
감사의 글 -----	43
참고문헌 -----	43



그림 목 차

그림 1. KALIMER-600 계통 구성도 -----	1
그림 2. KALIMER-600 원자로 개념도 -----	2
그림 3. 원자로 내부 주요구조물의 명칭 -----	4
그림 4. KALIMER-600 원자로 내부 기기배치 단면도 -----	5~6
그림 5. 주요 기기 배치 단면의 설계 치수 -----	7~ 8
그림 6. 원자로헤드 조립도 -----	10
그림 7. 원자로헤드 설계 개념 -----	10
그림 8. 차폐절연체 설계 개념 -----	11
그림 9. 원자로 지지구조물 설계 개념 -----	13
그림 10. 원자로용기 설계 개념 -----	15
그림 11. 격납용기 설계 개념 -----	15
그림 12. 수직인출기 설계 개념 -----	16
그림 13. 이중 회전플러그 설계 개념 -----	17
그림 14. 상부내부구조물 설계 개념 -----	19~20
그림 15. 원자로 노내 구조물 조립도 -----	21
그림 16. 원자로배플 설계 도면 -----	22
그림 17. 격리판 설계 도면 -----	23
그림 18. 분리판 설계 도면 -----	24
그림 19. 노심 차폐체 설계 개념 -----	25
그림 20. 지지배럴 설계 개념 -----	26
그림 21. 유입실 설계 개념 -----	27
그림 22. 노심지지구조물 설계 개념 -----	28
그림 23. 노심 캐처 각 부분의 명칭 -----	29
그림 24. 노심 캐처 설계 개념 -----	30

그림 25. IHX 구조 개념 -----	32~34
그림 26. 일차펌프 구조 개념 -----	36~38
그림 27. 일차펌프 출구배관 설계 개념 -----	39
그림 28. DHX 구조 개념 -----	40~42



1. 서론

한국원자력연구원에서 개념 설계를 수행했던 KALIMER-600 (Korea Advanced LIquid MEtal Reactor, 600MWe)은 소듐을 냉각재로 사용하는 풀형 액체금속로이다. KALIMER-600 개념 설계 연구[1]를 통해 도출된 원자로 구조 개념은 3차원 모델링 프로그램인 I-DEAS[2]를 활용하여 형상화하였다[3]. 본 연구에서는 3차원 형상화 자료를 바탕으로 개념 설계된 일차계통의 주요 기기 및 구조물들의 변경 사항들을 적용하고 이를 도면화 함으로써 도출된 구조 개념에 대한 설계 자료를 구축할 뿐만 아니라 향후 설계 구체화 작업시 효율적으로 대처할 수 있을 것이다.

그림 1은 KALIMER-600의 계통구성도[1]를 나타낸 것으로서 개념 설계 단계에서의 설계 및 해석 평가를 통한 원자로의 기기배치 및 구조물 형상을 모델링하였다. 그림 2는 도출된 KALIMER-600 원자로 구조 개념을 원자로건물에 배치한 것인데, 원자로건물 하단부는 원자로건물 면진을 위한 면진베어링을 설치하였음을 알 수 있다.

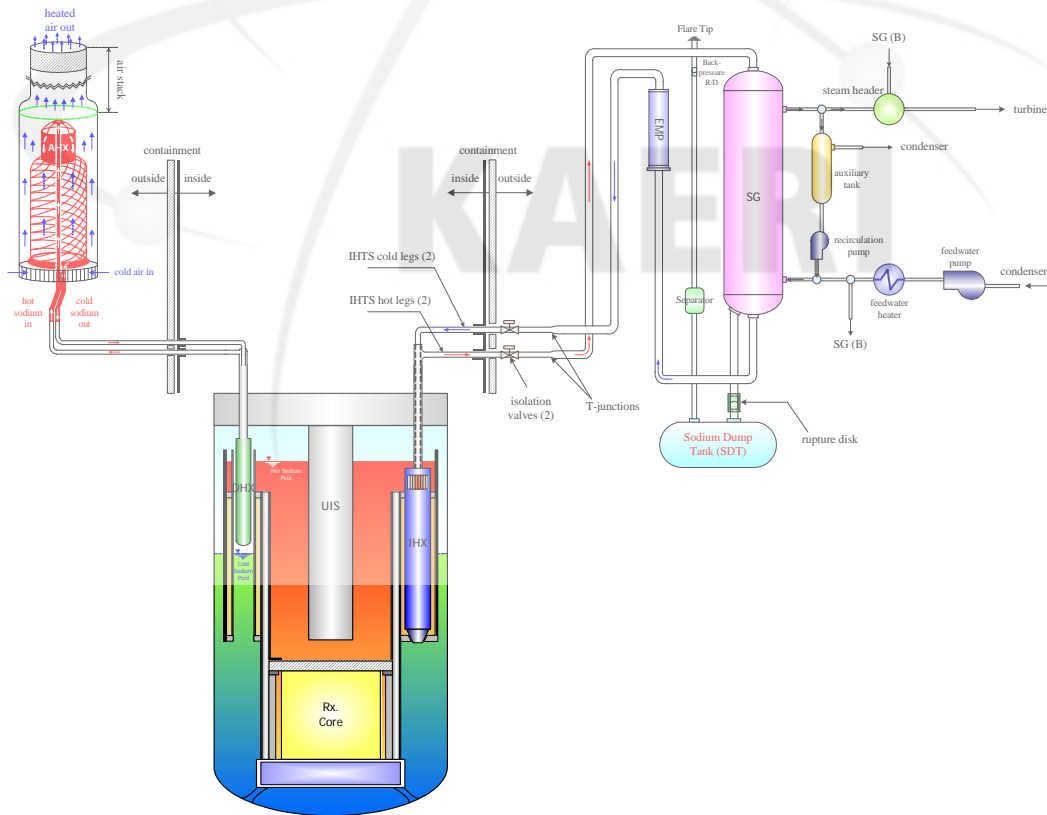


그림 1. KALIMER-600 계통 구성도

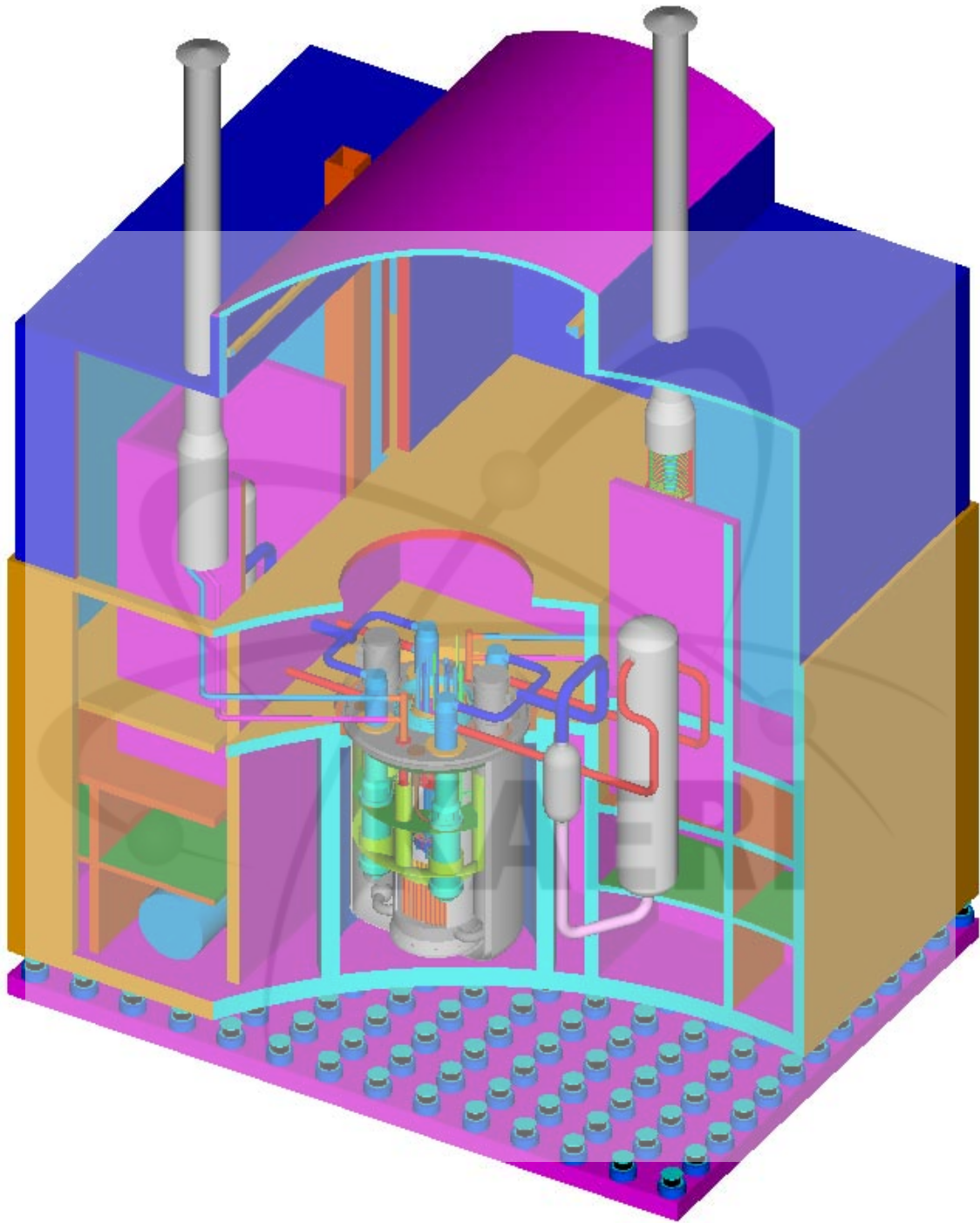


그림 2. KALIMER-600 원자로 개념도

2. 원자로 구조물 개념 설계

2.1 기기 배치

KALIMER-600은 일차 소듐과 원자로 노내 구조물이 원자로용기에 담겨서 원자로 헤드에서 지지된다. 원자로용기 내부에는 일차펌프, 중간열교환기(IHX), 소듐열교환기(DHX) 등이 각각 2EA, 4EA, 2EA씩 설치되어 원자로헤드에서 지지된다. 일차 펌프는 고온 소듐과의 직접 접촉을 방지하기 위하여 기기 보호 원통을 펌프 외부에 설치하였으며, DHX는 정상 운전시 고온 소듐이 DHX로 유입되지 않도록 기기 외부에 보호 원통을 설치한다. 이러한 기기 보호원통들은 격리판과 분리판에서 각각 지지된다. 하지만 IHX에는 고온의 일차 소듐이 직접 유입되므로 기기 보호원통을 설치하지 않는다. 원자로용기 상부의 고온풀과 하부의 저온풀 사이의 온도 구배를 완화시키기 위하여 환형의 격리 공간을 구성하였는데, 이 공간은 상단, 하단, 내부 및 외부가 각각 격리판, 분리판, 지지배럴, 원자로배플로 만들어진다. 그림 3은 KALIMER-600 원자로 내부 주요 구조물의 명칭을 나타낸 것이다.

그림 4는 KALIMER-600 원자로 내부 기기배치 단면도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 커버가스 영역의 높이는 2.85m이고 고온풀-저온풀 소듐의 액위차는 5.0m, 노심의 높이는 4.3m이다. 일차 펌프 회전축의 높이는 10.0m로 설정하였는데, 이는 현재까지 소듐냉각 고속로에 적용된 침지식 기계식 펌프(submerged mechanical pump)의 최대 축길이가 10m 가량임을 고려한 것이다. 그림 5는 KALIMER-600 개념도에 대한 설계 도면을 각 기기의 단면에 따라 절개하여 나타낸 것이다.

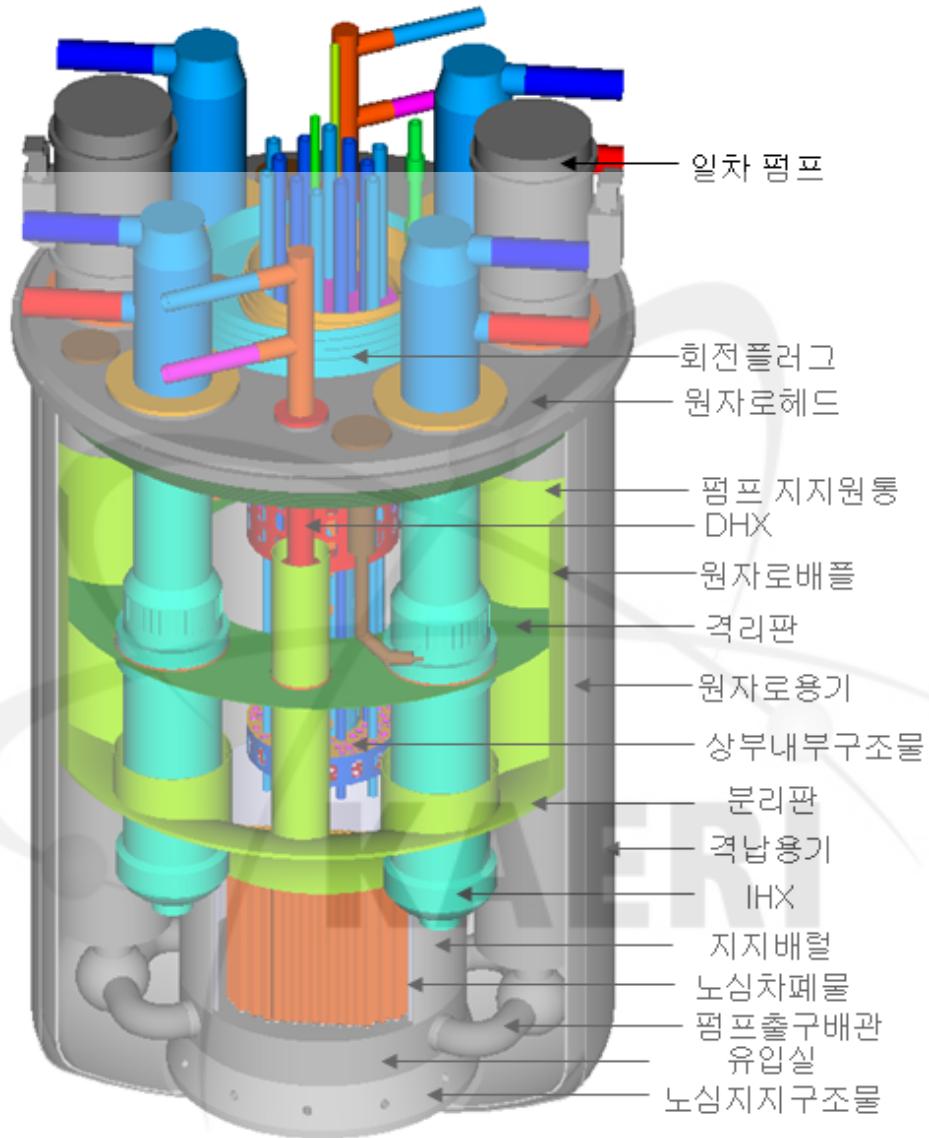
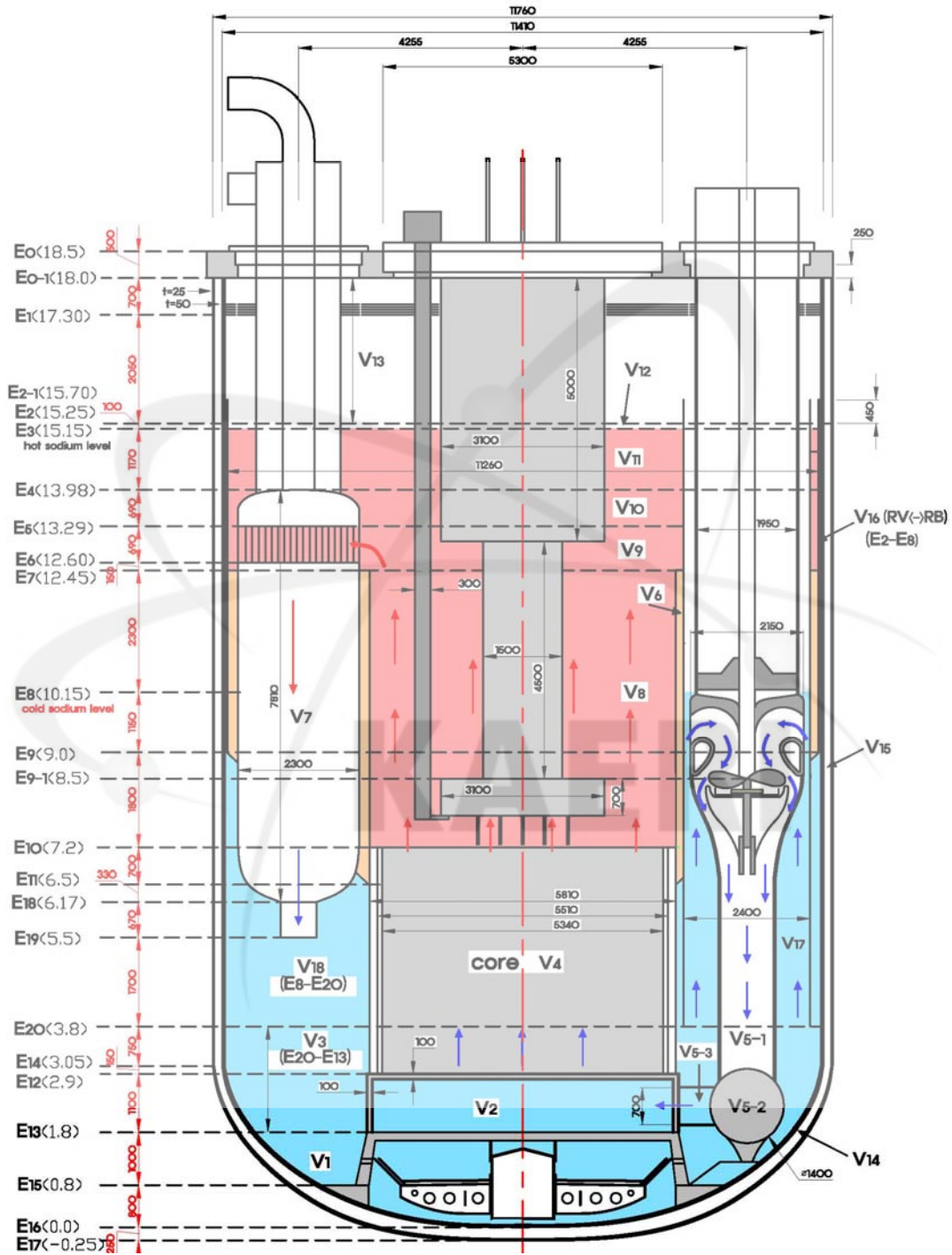
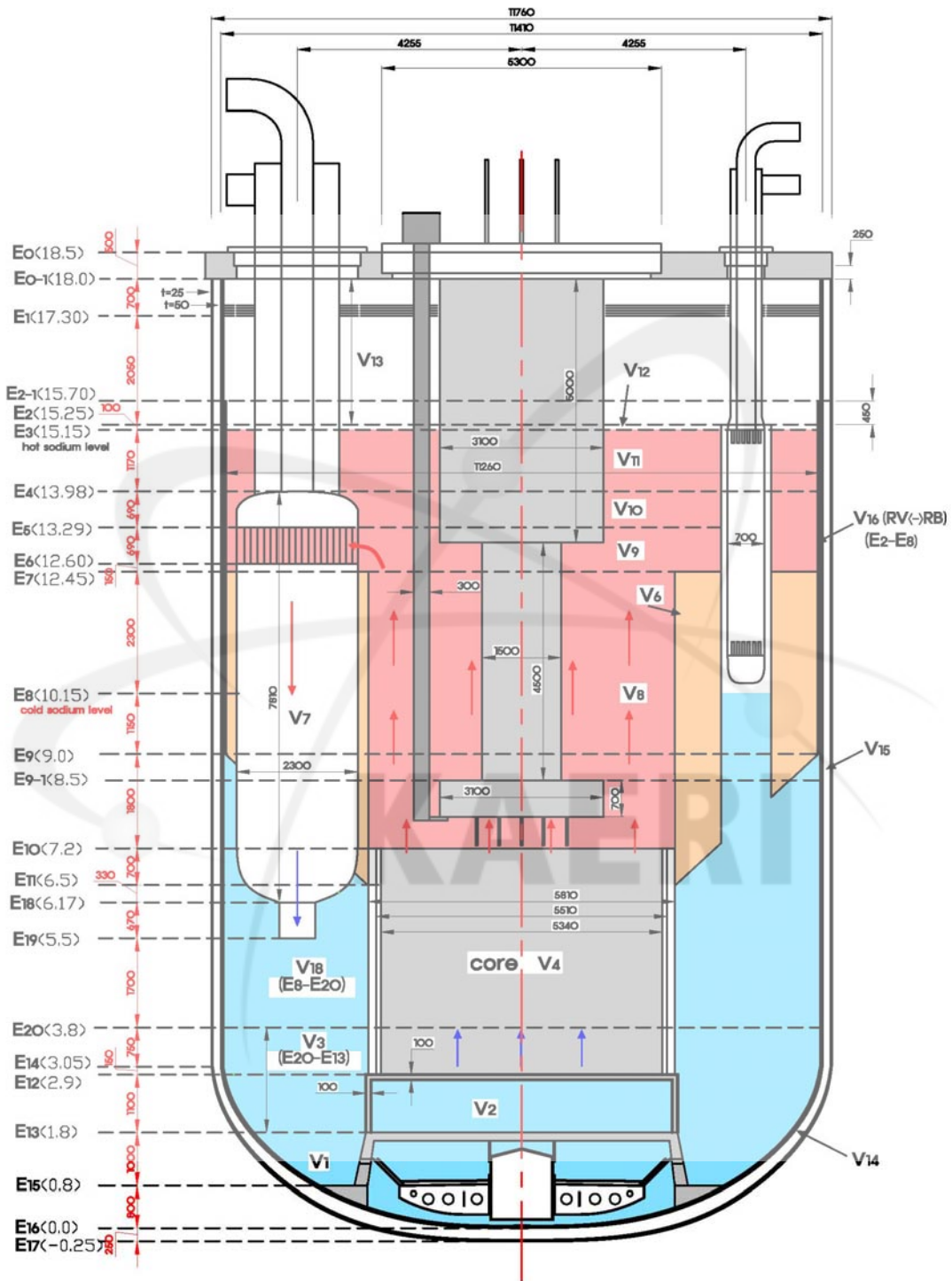


그림 3. 원자로 내부 주요구조물의 명칭

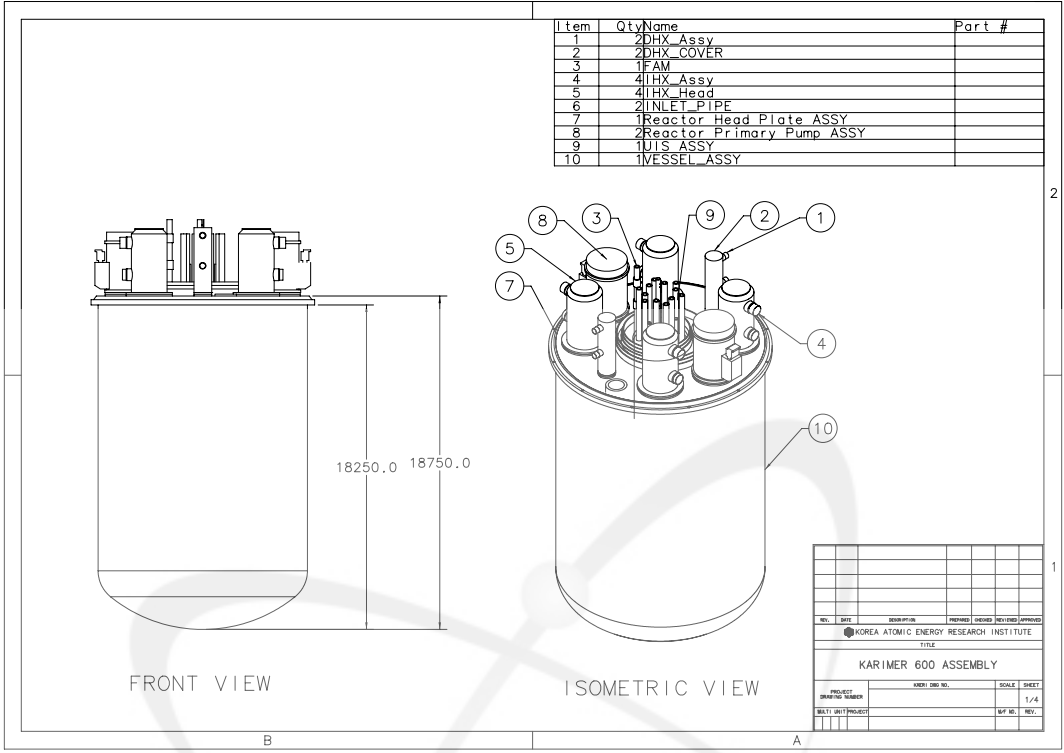


(a) IHX-Pump 단면

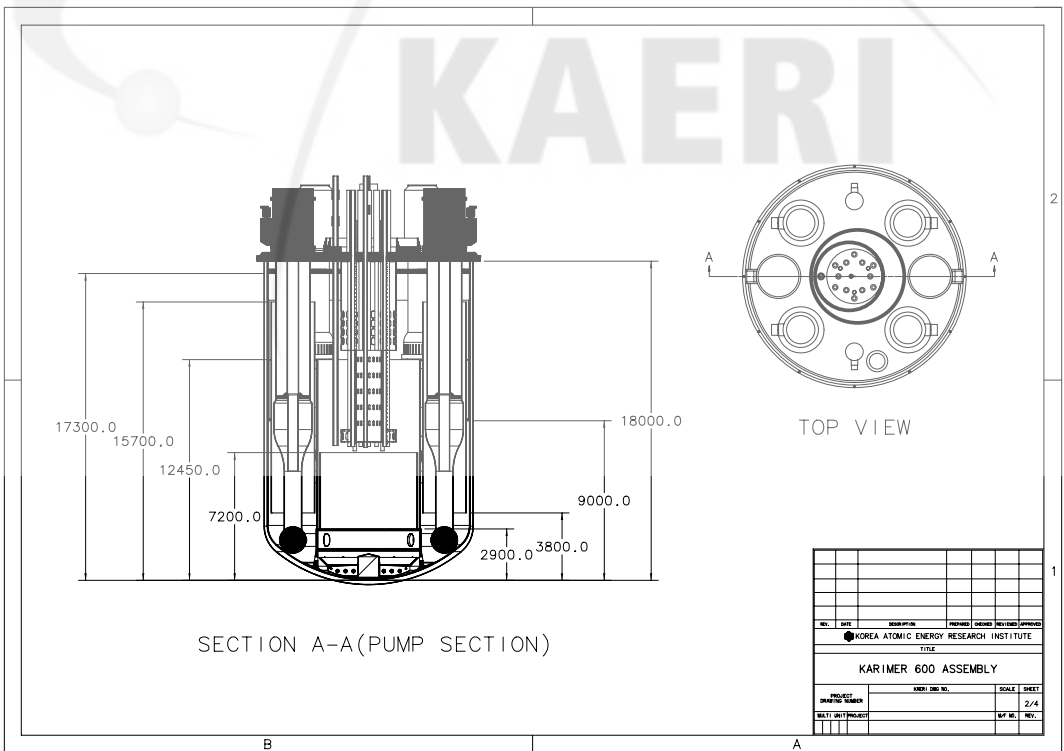


(b) IHX-DHX 단면

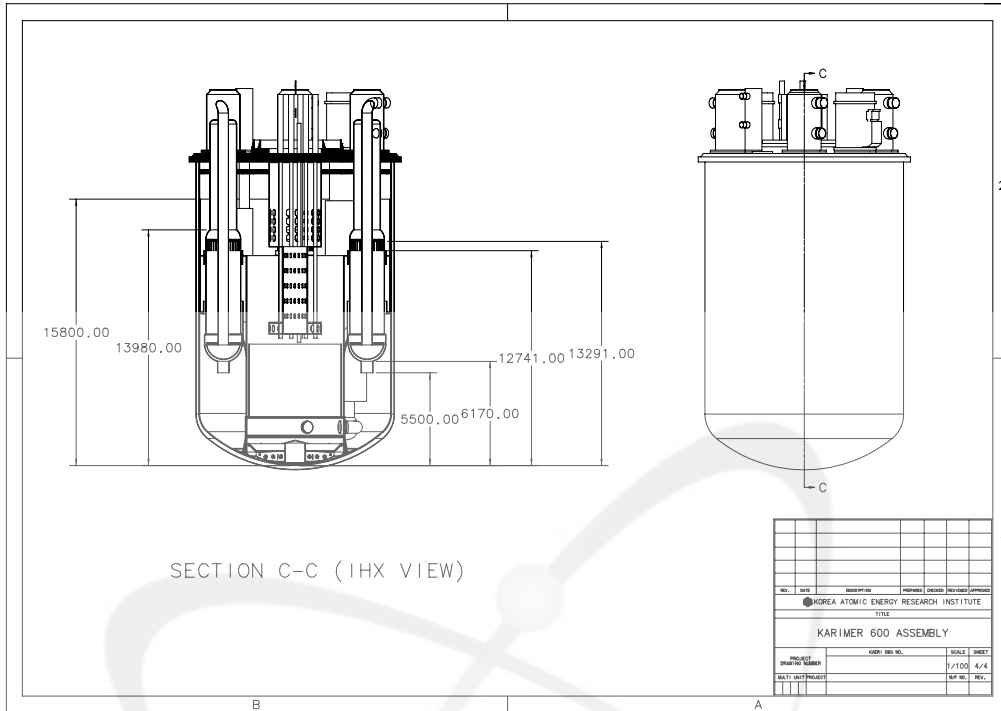
그림 4. KALIMER-600 원자로 내부 기기배치 단면도



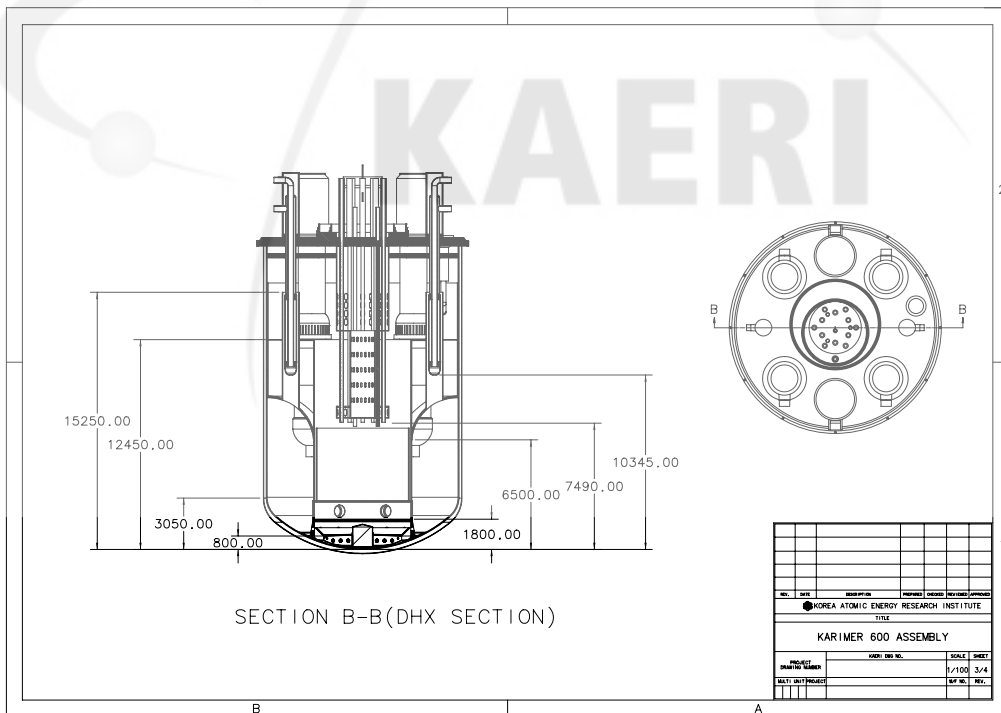
(a) 주요기기 배치도



(b) 펌프 단면의 주요 설계 치수



(c) IHX 단면 설계 치수



(d) DHX 단면 설계 치수

그림 5. 주요 기기 배치 단면의 설계 치수

2.2 원자로헤드 및 차폐절연체

KALIMER-600의 원자로헤드는 그림 6에 나타난 바와 같이 IHX, 일차펌프, DHX, 회전플러그 등 주요 기기와 원자로용기, 격납용기 등을 지지한다. 원자로헤드에서 지지되는 부분은 원자로기기가 통과하는 여유공간과 방사선 차폐를 위해 단층 구조 및 원자로헤드 상부로 돌출되는 기기밀봉구조로 되어 있다. 원자로헤드에는 플랜지를 사용한 볼트 체결로 위치를 고정시키고 볼팅부에는 밀봉을 위한 *sealing* 작업을 한다. 그림 7은 원자로헤드의 설계 개념에 대한 도면 자료를 나타낸다. 원자로헤드는 상단면에 회전플러그가 설치되고 하단면에 원자로용기 및 격납용기가 용접된다. 이들의 용접 부착을 용이하게 하기 위해서 *build-up*을 원자로헤드에 직접 용접 부착하면 ISI가 매우 불리하고 결함이 발생할 가능성이 커지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 원자로헤드 상/하부의 기기 연결부는 *extension ring* 개념이 필요하지만 구체적인 설계 치수는 결정되지 않았다.

원자로헤드 중심에는 회전플러그가 설치되는데 이중 회전플러그는 대형 회전플러그(LRP)와 소형 회전플러그(SRP)로 구성된다. 또한 회전플러그 중심부에는 상부내부구조물(Upper Internal Structure, UIS)이 위치하는데 회전플러그와 상부내부구조물에 대한 자세한 내용은 2.5절에 설명한다.

원자로헤드 하부에는 단열 및 방사선 차폐를 위한 차폐절연체가 설치된다. 차폐절연체는 두께 3.0cm의 절연판 5개를 2.5cm 간격으로 설치하여 차폐를 위한 강판 두께의 합은 65cm를 유지하도록 하였고, 차폐절연체와 원자로헤드 하부면과의 거리는 45cm를 유지하였다. 그림 8은 차폐절연체의 설계 도면을 나타낸 것이다.

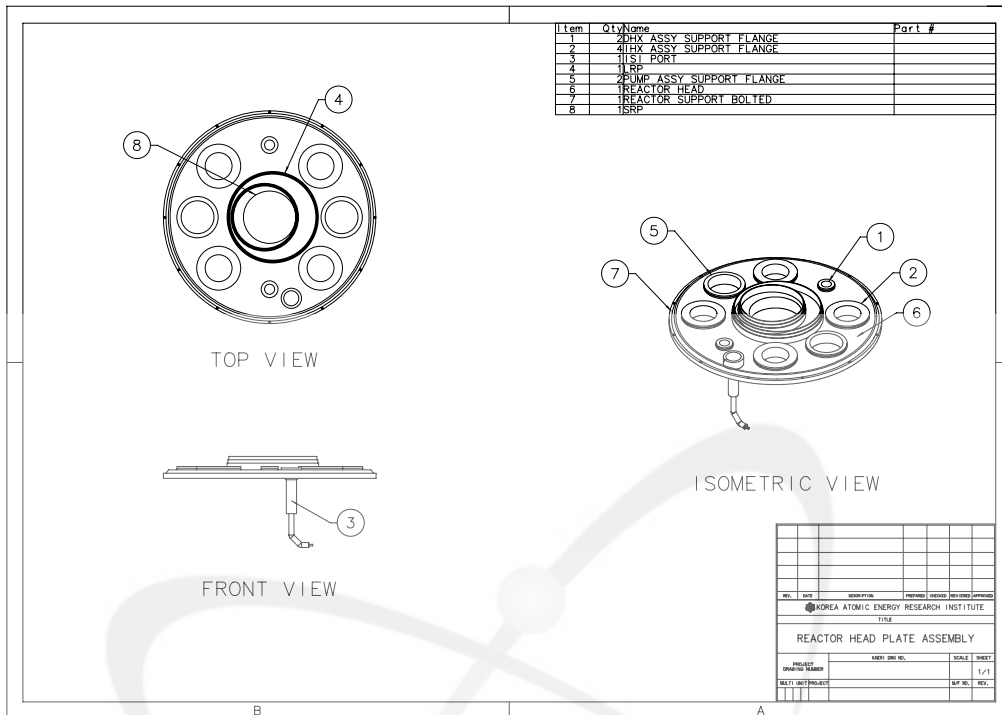


그림 6. 원자로헤드 조립도

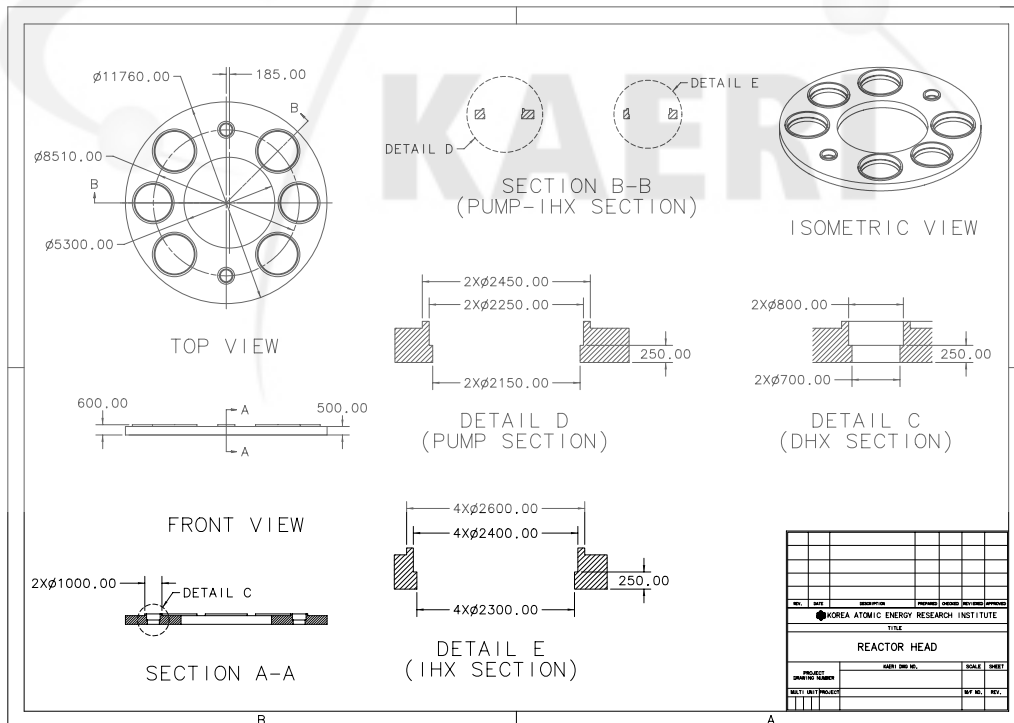


그림 7. 원자로헤드 설계 개념

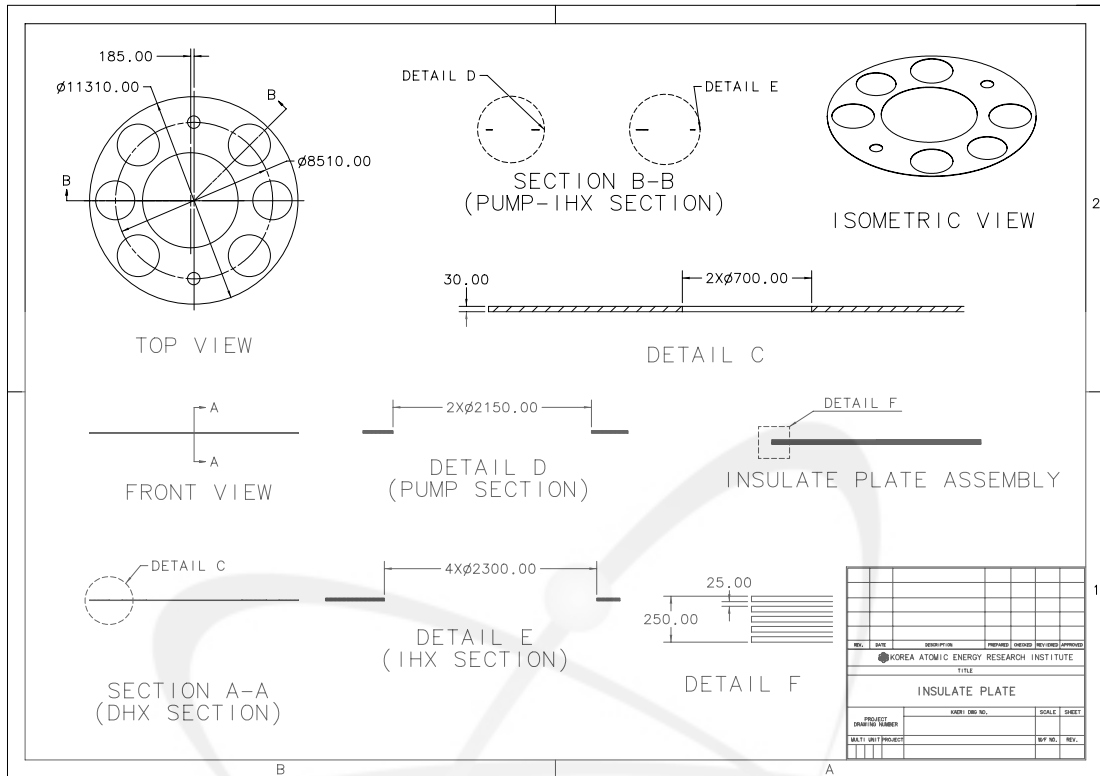


그림 8. 차폐절연체 설계 개념

KAERI

2.3 원자로 지지구조물

원자로 지지구조물은 면진설계의 채택유무, 원자로헤드 설계와의 상관관계, 격납경계와의 연계사항, 헤드접근구역에서의 작업성 및 가동중검사 요건 등을 고려하여 설계되어야 하고 또한 설계 하중에 대해서는 구조건전성이 확보되어야 한다[4].

KALIMER-600 원자로 지지구조물의 초기 개념으로는 원자로헤드를 원자로 지지벽의 헤드접근구역(HAA)까지 연장한 일체형 링구조이다. 링구조 지지구조물은 헤드접근구역 바닥과 볼트 체결하여 지진에 의해 발생할 수 있는 원주방향 및 수직방향으로의 움직임을 구속하였다. 하지만 온도에 의해서 반경방향으로의 열팽창이 발생하므로 이를 수용할 수 있는 구조가 되어야 하므로 지지구조물의 볼트 체결부 구멍을 반경방향으로의 길이를 길게 하여 열변형이 발생하여도 구속이 발생하지 않도록 하였다.

정상운전시의 원자로헤드 온도는 130℃에 이르는데 이때 원자로헤드는 반경방향으로 열팽창 변위가 발생한다. 이러한 열팽창을 강제로 구속하면 원자로헤드에 큰 응력이 발생하게 되므로 이를 방지하기 위해서 지지구조물과 헤드접근구역 사이에는 판형 무급유베어링을 설치하여 운전 중 발생하는 반경방향 열변형을 수용할 수 있도록 하였다.

KALIMER-600의 원자로헤드 두께는 50cm로 설정하였다[5]. 원자로의 수직방향 움직임을 고정시키기 위하여 볼트 체결을 하는데 원자로헤드의 두께가 두껍기 때문에 볼트의 제작과 강성 확보가 쉽지 않다. 따라서 지지구조물 형상을 원자로헤드와 연결되는 부분의 두께는 50cm로 하고 헤드접근구역에서 볼트가 체결되는 부분의 두께는 30cm가 되도록 두께가 점차 감소하는 가변 링구조 지지구조물을 대안으로 제시하였는데 열변형 수용 방법은 링구조와 동일하다. 그림 5는 일체형 가변 링구조로 설계된 원자로 지지구조물의 설계 도면을 나타낸 것이다.

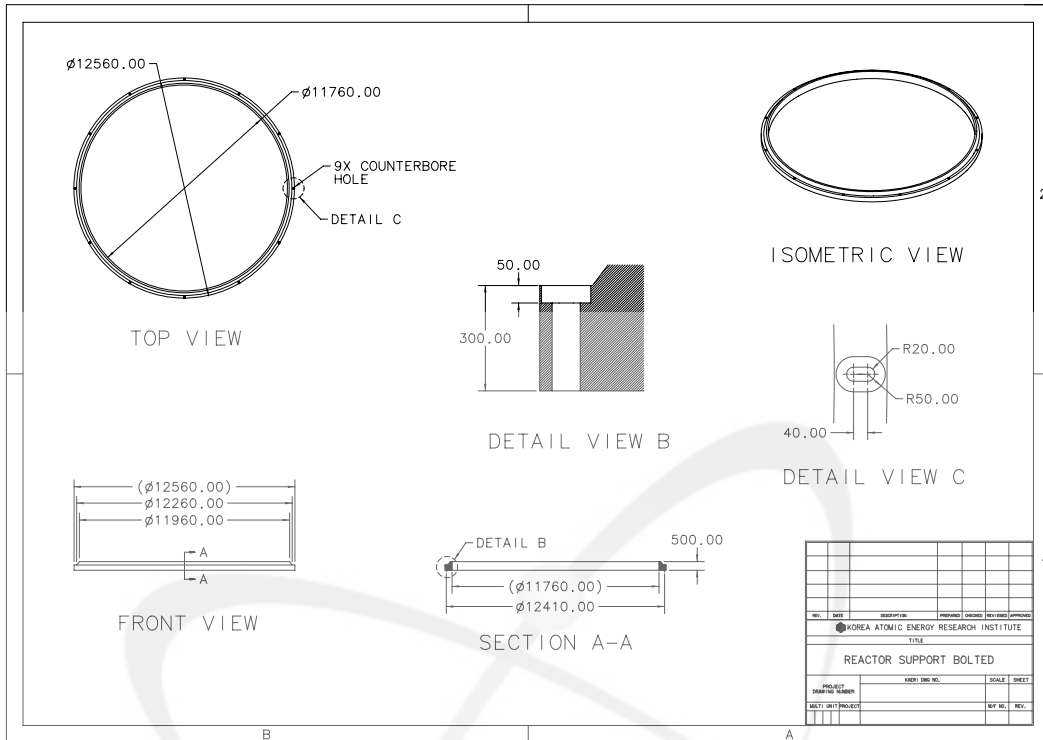


그림 9. 원자로 지지구조물 설계 개념

KAERI

2.4 원자로용기 및 격납용기

플형 액체금속로는 원자로 노내 구조물들이 원자로용기(reactor vessel)에 담겨 있다. 원자로용기 내부에는 노심캐처, 노심지지물, 유입실, 지지배럴, 노심차폐체, 분리판, 격리판, 원자로배플 등의 구조물들이 설치된다. 또한 원자로용기 외부에는 원자로용기와 동일한 형상의 격납용기가 설치된다. 여기서는 원자로용기 및 격납 용기에 대한 설계 자료를 제공하며, 원자로용기 내부에 설치되는 노내 구조물들에 대한 자료는 2.5장에서 상세히 기술하였다.

원자로용기의 구조 형상은 원통의 side-cylinder와 하부의 bottom head로 나눌 수 있다. 액체금속로는 고온, 대기압에서 운전되므로 용기의 두께가 얇은 것이 열응력 관점에서의 구조건전성에 유리하여 side cylinder 두께를 5.0cm로 설정하였다. Bottom head 부는 두개의 곡면이 연결되어 완만한 면을 이루는 torispherical 형상이다. 또한 bottom head에는 노심지지구조물이 얹혀지고 또한 central pivot과 core catcher의 설치를 고려한 설계가 이루어져야 하므로 구조물을 지지하는 부분의 두께는 상대적으로 두껍게 보강되도록 설계되었다. 현재 설정된 bottom head의 높이는 1.5m이며, 두께는 통상 5.0cm이지만 국부적으로는 더 두꺼운 부분들도 있다. 그림 10은 원자로용기의 설계 도면을 나타낸 것이다. 도면에서 side cylinder의 길이는 14.906m로 나타났지만 이는 bottom head와 cylinder가 만나는 부분을 fillet 가공시 생기는 오차이며, 실제 설정된 값은 14.95m이다.

격납용기(containment vessel)는 원자로헤드 하부에서 용접되어 원자로용기와 2중 용기 구조를 갖게 된다. 원자로용기의 하부가 노내 구조물들을 지지하기 위하여 복잡한 bottom head의 단면을 갖는데 비하여 격납용기는 side cylinder와 bottom head의 두께가 일정하게 유지된다. 그림 11은 격납용기의 설계 도면을 나타낸 것이다. Bottom head는 두 곡면이 이어지면서 만들어지는데, 그림에서 보인 바와 같이 격납용기 외면의 곡률반경이 각각 8.22m, 1.875m이다.

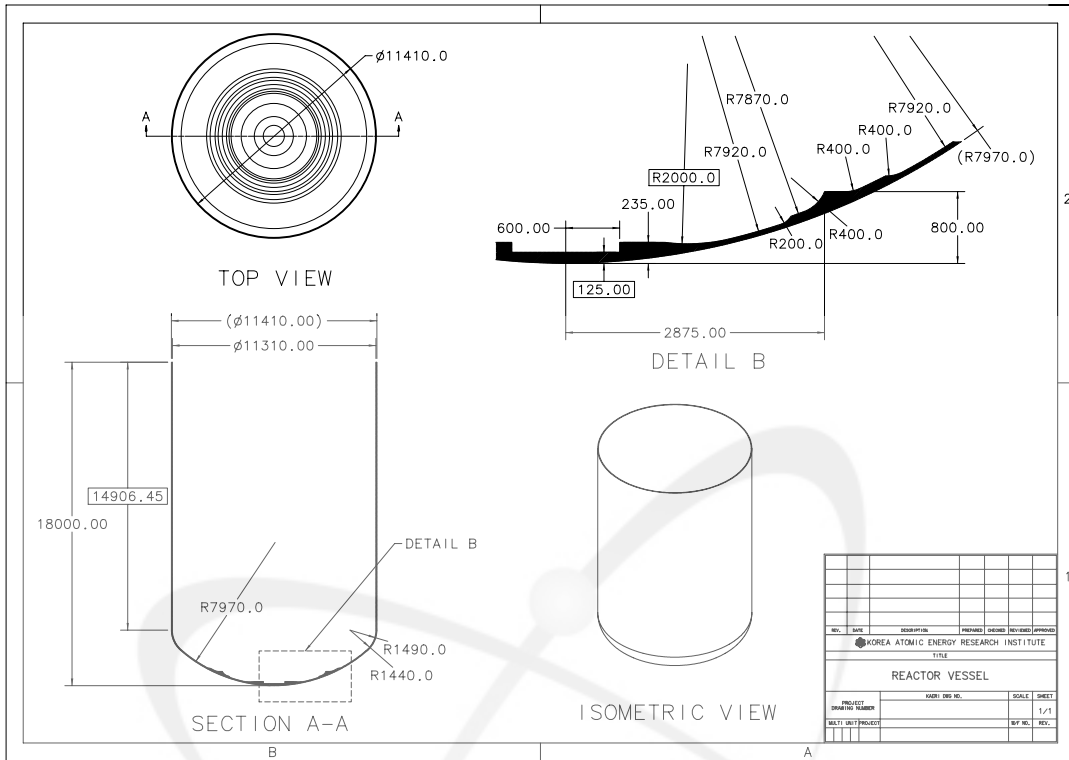


그림 10. 원자로용기 설계 개념

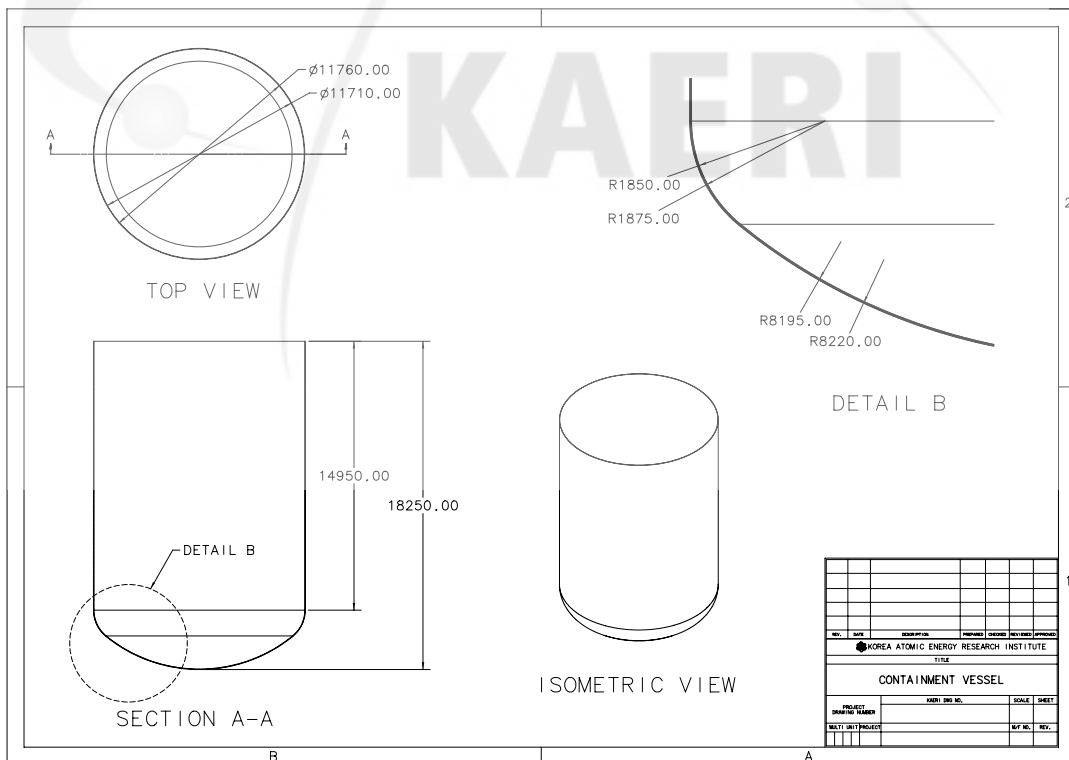


그림 11. 격납용기 설계 개념

2.5 회전플러그 및 상부내부구조물

2.5.1 회전플러그

회전플러그는 원자로헤드 중앙에 위치하며 핵연료 재장전시에 회전운동을 통하여 노심의 핵연료 집합체를 이동시키는 역할을 한다. KALIMER의 핵연료 교환방식은 이중 회전플러그 방식인데, 크기가 다른 두개의 회전플러그(대형 회전플러그, 소형 회전플러그)가 각각 편심되어 위치하여 노심 전영역의 핵연료를 취급하는 기기 개념이다.

이중 회전플러그 방식은 핵연료 인/입출을 위한 핵연료 교환장치가 두개 설치된다. 하나는 소형 회전플러그에 위치하여 외부노심 영역을 담당하는 고정팔인출기(FACM : Fixed Arm Change Machine)이고, 다른 하나는 대형 회전플러그 중앙의 상부 내부구조물에 설치되어 내부노심 영역을 담당하는 수직인출기(DLCM, Direct Lift Change Machine)이다. 그림 12와 13은 각각 고정팔인출기와 이중 회전플러그의 설계도면을 나타낸 것이다. 수직인출기에 대한 자료는 상부내부구조물과 함께 나타내었다.

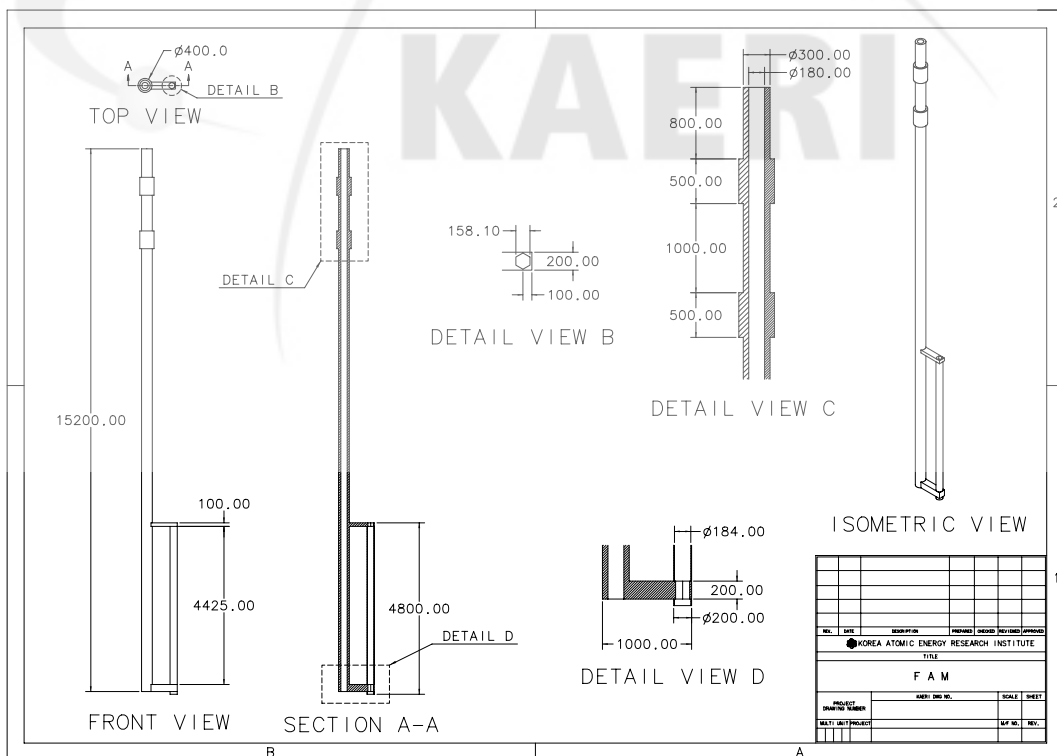
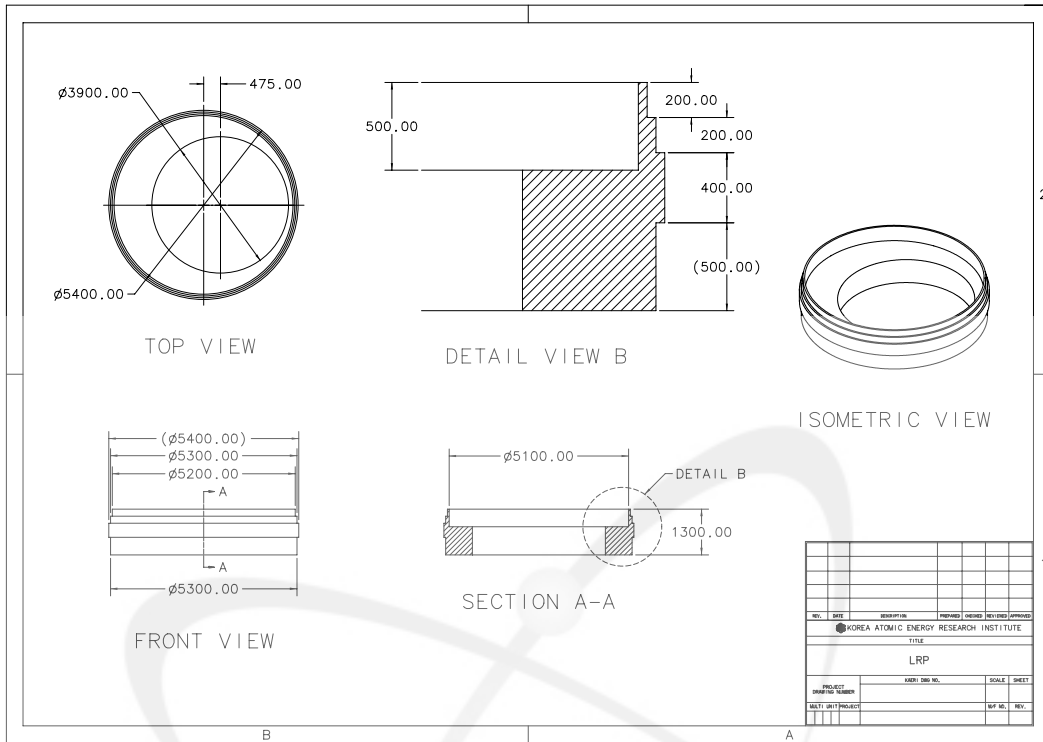
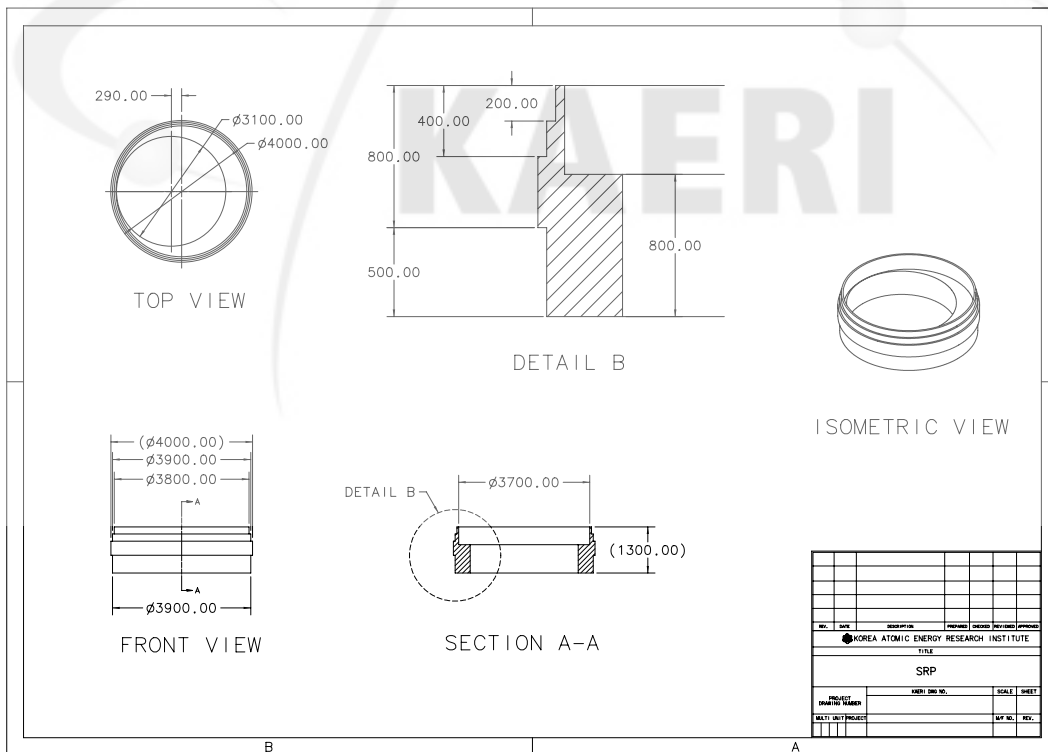


그림 12. 수직인출기 설계 개념



(a) 대형 회전플러그



(b) 소형 회전플러그

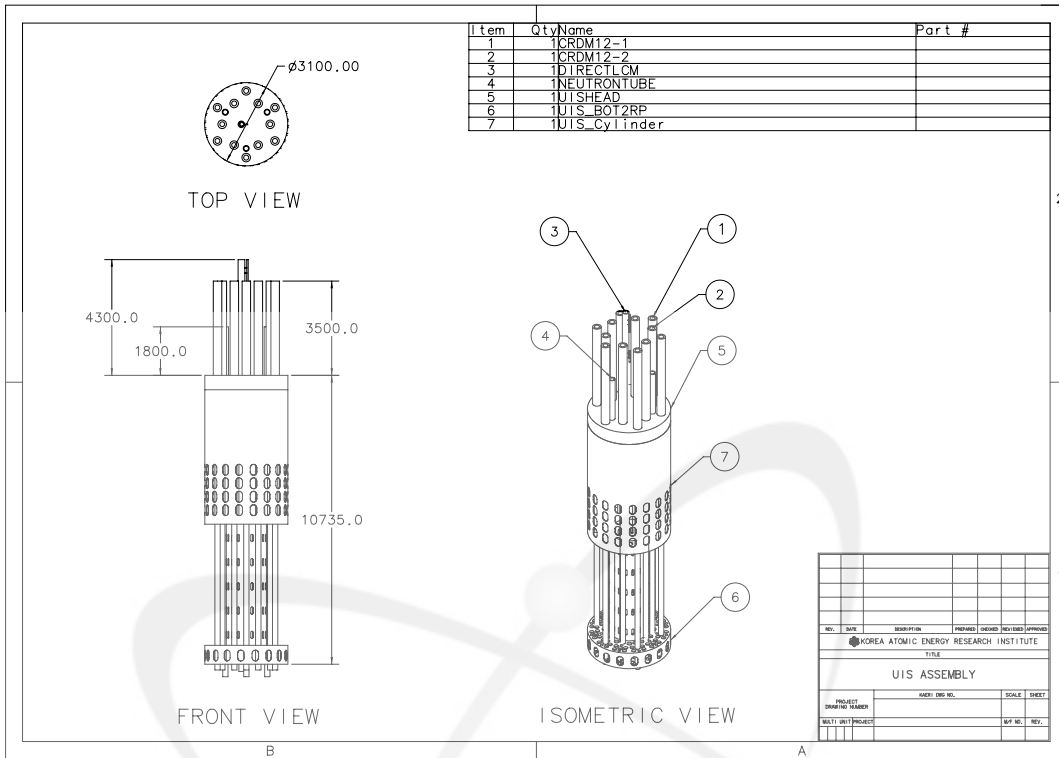
그림 13. 이중 회전플러그 설계 개념

2.5.2 상부내부구조물

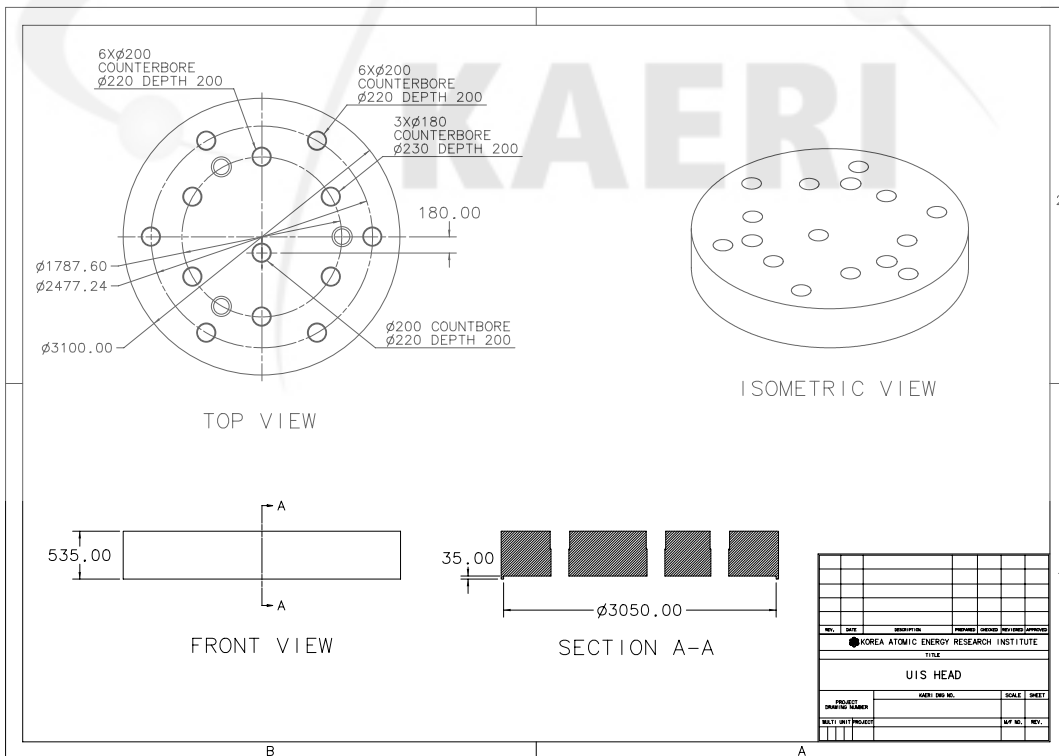
회전플러그의 중심에는 상부내부구조물(UIS, Upper Internal Structure)이 설치된다. 상부내부구조물은 원자로 노심을 제어하는 제어봉의 지지와 측정센서의 안내를 수행하는 구조물로서 제어봉 구동축의 수평지지, 소듐 유체기인진동으로부터 제어봉 구동축 보호, 노심 상부에 위치한 계측기지지, 노심에서 방출되는 소듐의 혼합축진, 노내 핵연료교환기지지 등의 기능을 한다.

상부내부구조물은 직경에 비해 길이가 길고 직경이 작은 원통 실린더 형태이다. 상부내부구조물의 지지는 상단부의 원자로헤드에서만 지지되고 측면 지지장치가 없는 단순외팔보 형태이므로 수평하중에 취약한 구조이다. 상부내부구조물은 상부/중간/하부의 원통 실린더로 이루어지는데 상/하부는 노심에서의 고온 소듐이 통과하기 위한 구멍이 존재하고 중간부는 상/하부를 연결하는 원통 실린더이다. KALIMER-600 상부내부구조물은 노심 직경 내에 있는 12개의 제어봉 안내관이 설치된다. 그림 14는 KALIMER-600 상부내부구조물의 조립도와 각 부분별 설계 치수를 나타낸 것이다. 그림에 표시된 핵연료 수직인출기에 대한 상세 구조 설계는 이루어지지 않았다.

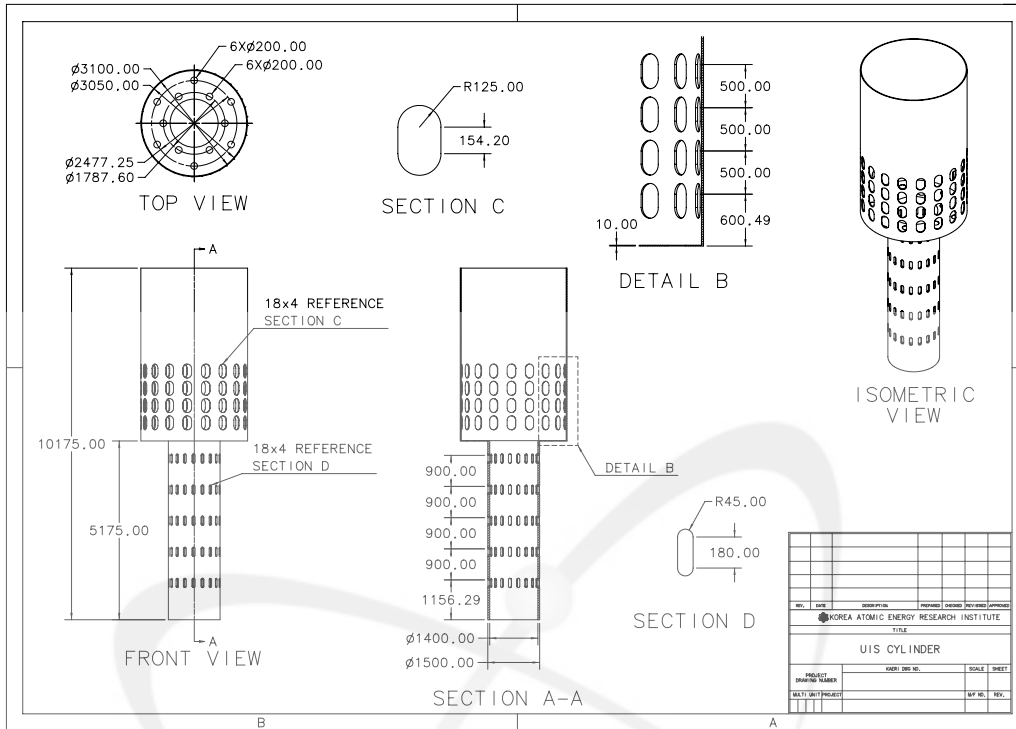
The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features the word "KAERI" in a bold, sans-serif font. Above the text is a stylized graphic consisting of two curved lines that sweep upwards and outwards, resembling a partial orbit or a dynamic path. Two small circles are positioned at the ends of these curves, one on the left and one on the right, suggesting a path or a specific point of interest.



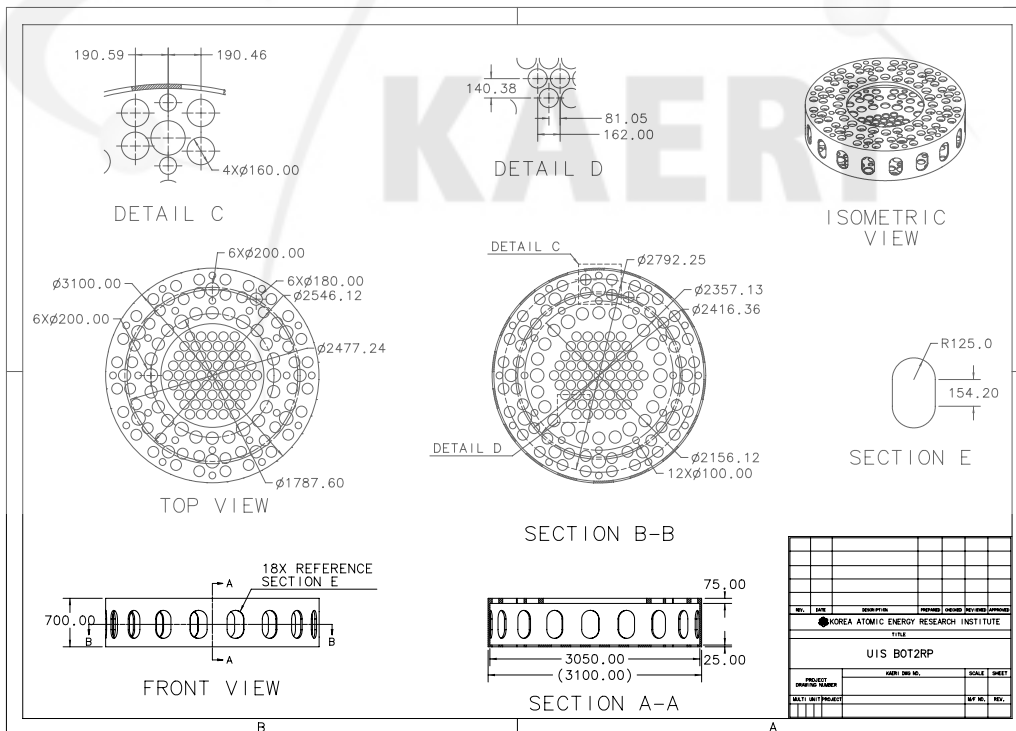
(a) 조립도 및 각 부분의 명칭



(b) UIS 헤드



(c) 상부/중부 원통구조물



(d) 하부 원통구조물

그림 14. 상부내부구조물 설계 개념

2.6 원자로 내부구조물

KALIMER-600 원자로용기 내부에는 액체 소듐 뿐만 아니라 노심지지구조물을 비롯한 여러가지 구조물이 있다. 여기서는 현재까지 설정된 설계 개념을 바탕으로 각 구조물들에 대한 구조 개념에 대한 설계 자료를 제공한다. 그림 15는 원자로용기 내부에 설치되는 노내 구조물들의 조립도를 나타낸 것이다.

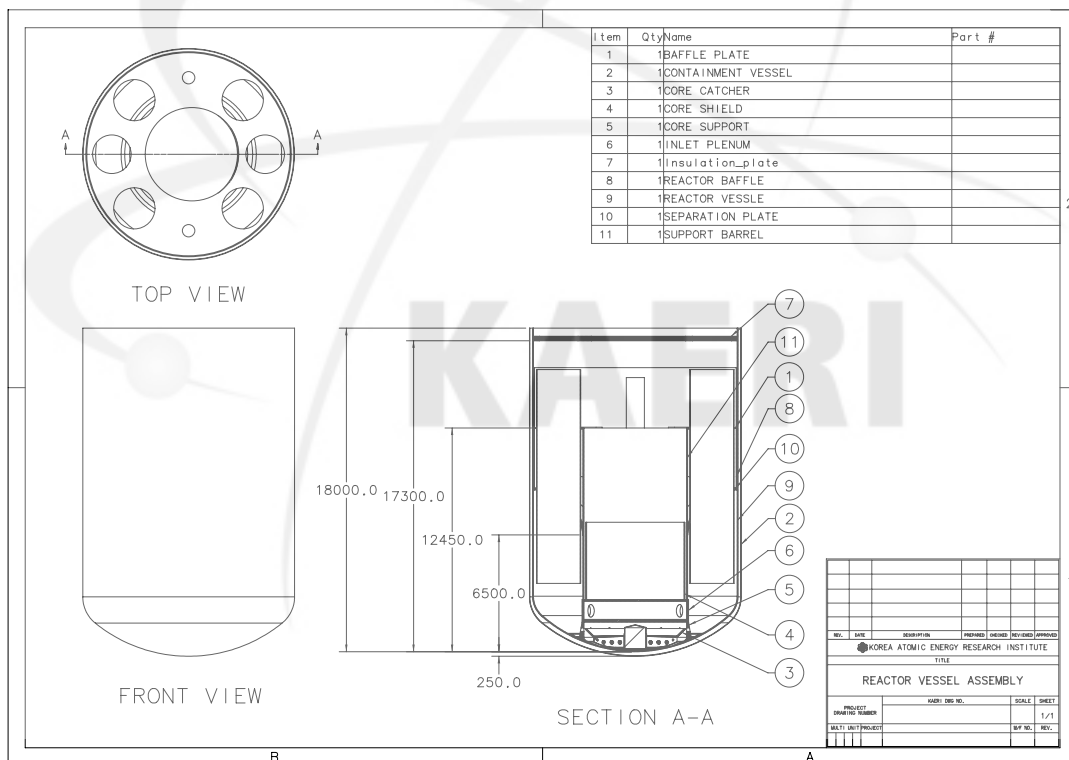


그림 15. 원자로 노내 구조물 조립도

2.6.1 원자로배플

원자로배플구조물은 고온 소듐이 원자로용기와 직접 접촉하는 것을 방지하고 고온소듐을 중간열교환기로 보내기 위해 고온 소듐을 담고 있는 단순 원통형 구조물로서 하부의 지지배럴에 용접되는 분리판(separation plate)에서 지지된다. 그림 16은 원자로배플의 설계 도면을 나타낸 것이다.

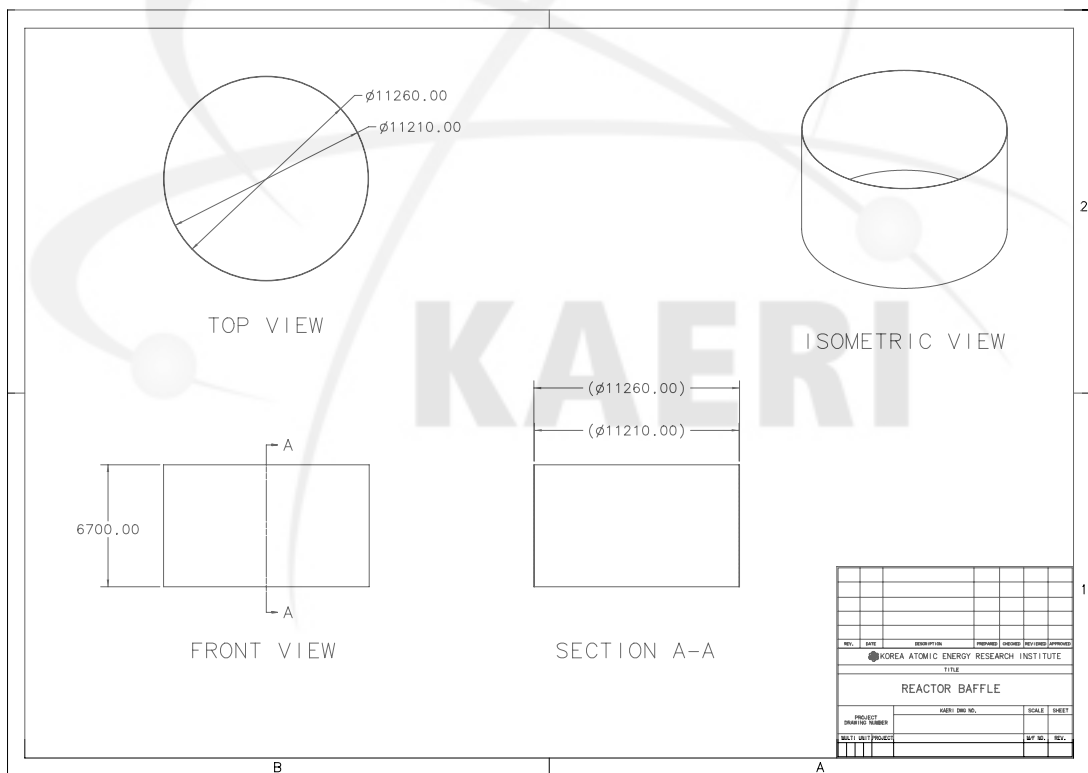


그림 16. 원자로배플 설계 개념

2.6.2 격리판

격리판은 지지배럴의 최상단 외부에 위치하는 환형 구조물로서 원자로배플 및 분리판과 환형 공간을 형성하여 고온 소듐과 저온 소듐의 직접 접촉을 방지하는 공간을 제공한다. 즉, 분리판의 하부는 환형 격리 공간이다. 분리판의 형상은 중앙부가 지지배럴에 연결되고 원주 방향으로 내부기기 관통을 위한 구멍들이 존재하며 원자로배플과는 일정한 간격을 유지하며 격리 설치된다. KALIMER-600의 격리판은 직경이 11.11m이고 두께가 2.5cm로 설정되었다. 기기 관통부 중에서 IHX 관통부는 기기의 수평 지지와 누설 밀봉을 위하여 관통부에 슬리브 설치 개념을 도입하였다. 그림 17은 격리판의 설계 도면을 나타낸 것이다.

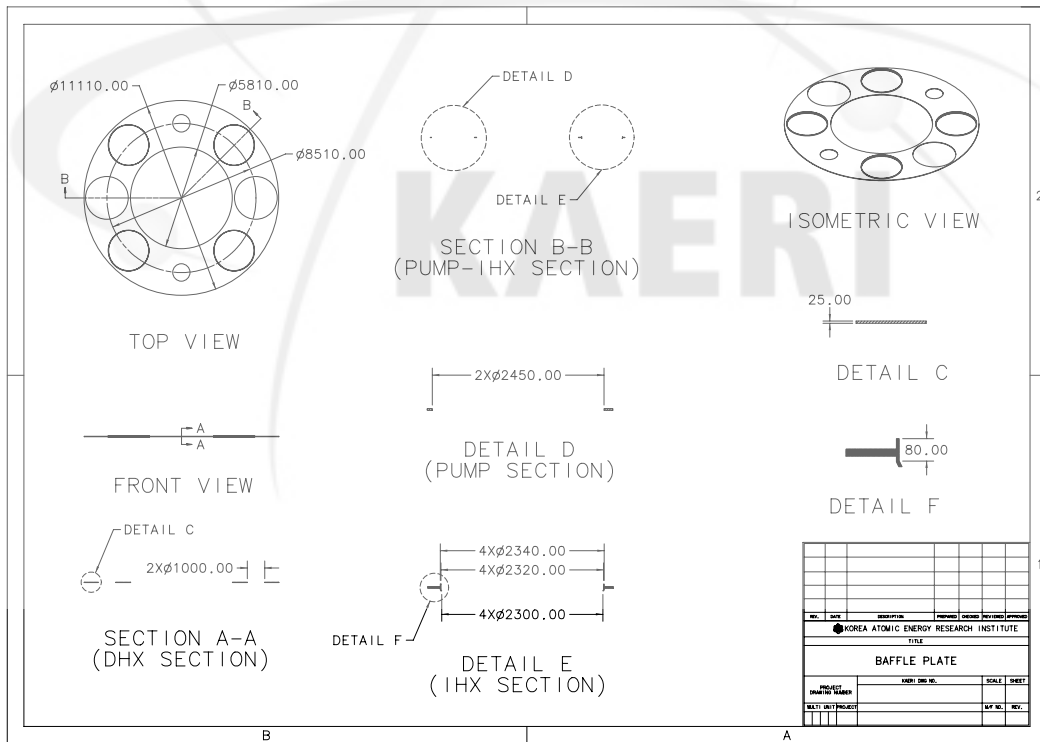


그림 17. 격리판 설계 개념

2.6.3 분리판

분리판은 환형 격리공간의 하부구조물로서 원자로배플을 지지한다. 이를 위해 분리판은 경사진 형상으로 설계하는데, 경사각은 약 42°로 설정하였다. 원자로배플은 두께가 2.5cm이고 외경이 11.26m로 설정되어 원자로용기와의 간격은 2.5cm이다.

분리판에는 중간열교환기와 같은 원자로 내부기기들을 설치하기 위한 관통부가 존재한다. 일차펌프와 DHX 외부는 고온 소듐으로부터 기기를 격리하기 위한 보호 원통이 설치되는데, 보호 원통은 격리판 및 분리판에서 각각 지지된다. 또한 IHX 관통부는 기기를 고정시키고 저온소듐을 환형 공간과 밀봉 격리시키기 위한 구조 개념이 필요하다. 이를 위해서 배플지지구조물의 기기 관통부에 수평방향을 지지하는 실린더를 설치하고 실린더의 내부에는 O-ring을 설치하도록 하였다. 그림 18은 기기 보호 원통을 포함한 분리판의 설계 도면을 나타낸 것이다.

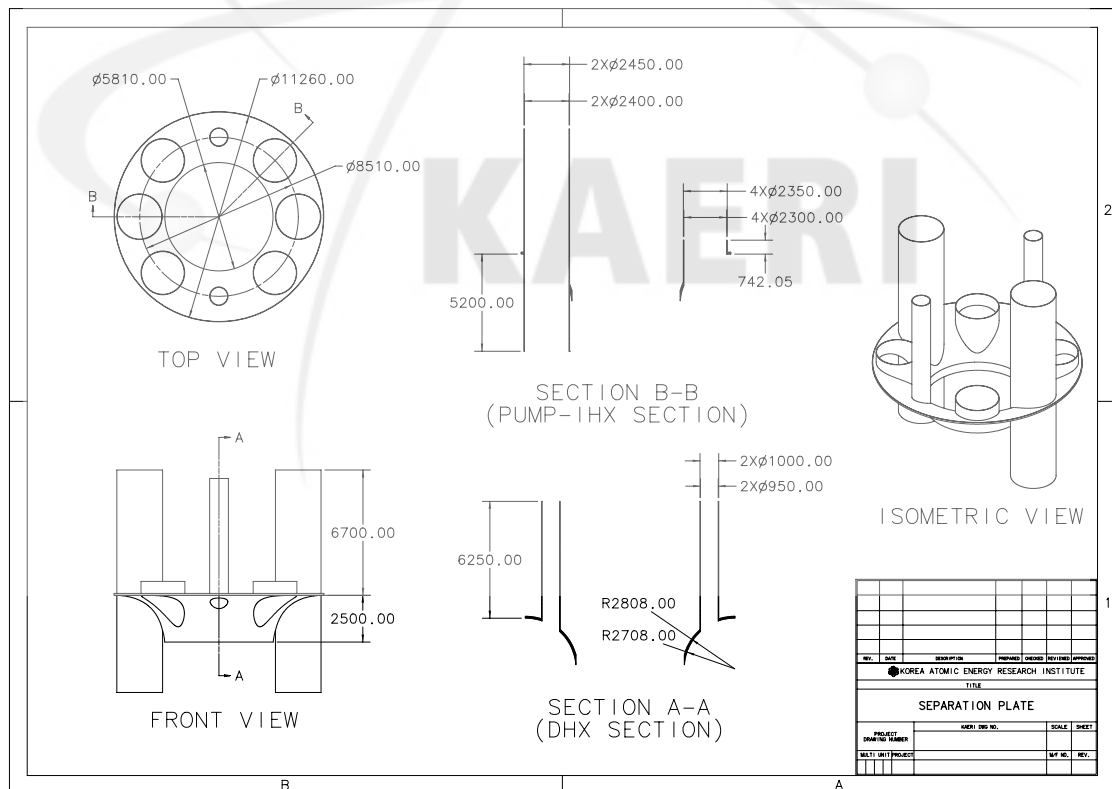


그림 18. 분리판 설계 개념

2.6.4 노심 차폐체

노심 차폐체는 노심에서 방출되는 방사선으로부터 압력 경계인 원자로용기를 보호하기 위해 노심 외부에 설치하는 원통 구조물이다. KALIMER-600 원자로 수명이 60년으로 설정되었는데, 원자로 수명기간 동안 원자로용기는 교체할 수 없는 구조물이므로 중성자 조사취화에 따른 원자로용기의 손상 발생 확률을 줄이기 위해 노심 외부에 차폐체를 설치한다. 그림 19는 노심 차폐체의 설계 도면을 나타낸 것이다.

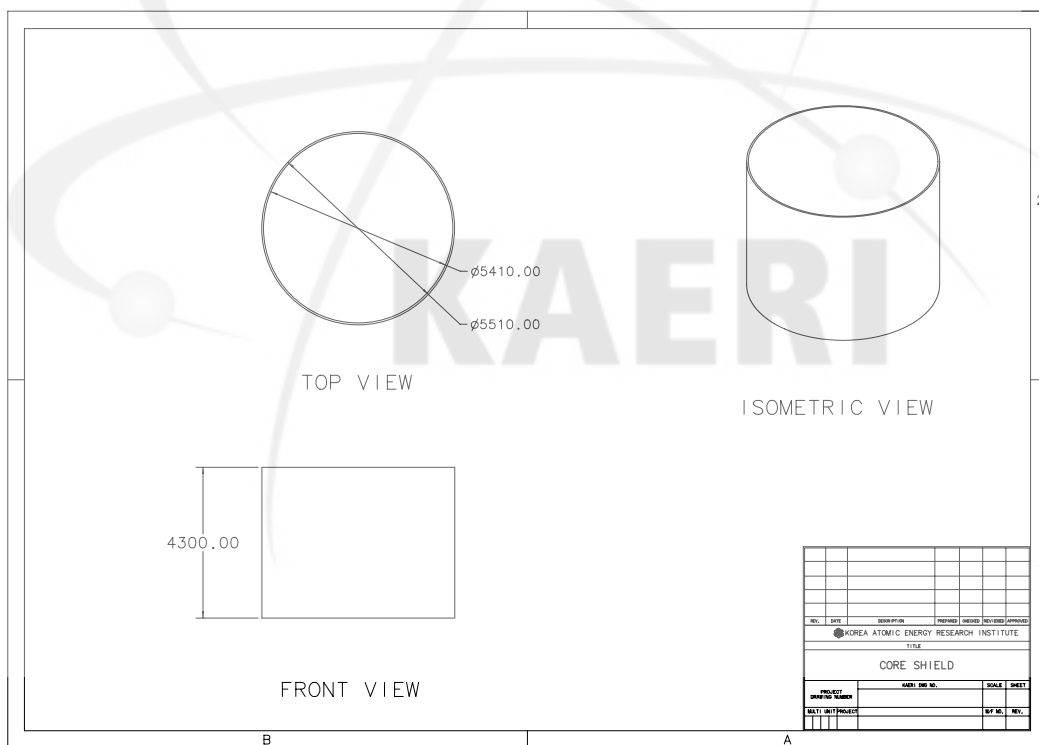


그림 19. 노심 차폐체 설계 개념

2.6.5 지지배럴

지지배럴(support barrel)은 유입실 상부격자판 위에 설치되어 노심 및 노심 차폐체를 둘러싸는 원통 구조물로서 고온소듐을 상부내부구조물로 안내하여 고온소듐이 저온소듐과 혼합되지 않고 중간열교환기로 이동시키는 역할을 한다. 그림 20은 유입실의 설계 도면을 나타낸 것이다.

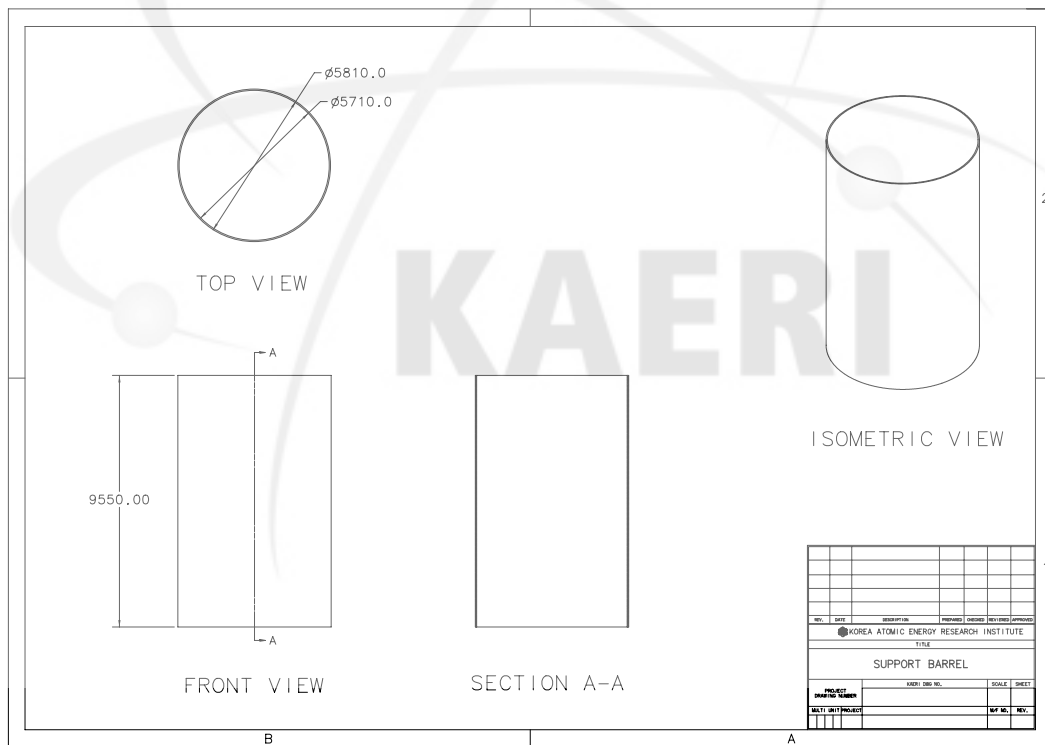


그림 20. 지지배럴 설계 개념

2.6.6 유입실

유입실(inlet plenum)은 노심이 장착되는 구조물로서 일차 순환펌프의 출구배관을 통과한 일차소듐을 노심으로 고르게 분산시키는 역할을 한다. 유입실은 side cylinder와 상/하부 격자판으로 이루어진다. 상/하부 격자판 사이에는 핵연료를 장착하기 위한 receptacle이 설치되고, 노심의 수직하중은 receptacle을 통하여 하부 격자판에서 지지된다. 상부 격자판은 receptacle의 위치를 결정하고 receptacle에는 핵연료의 nosepiece가 장착된다. 유입실의 side cylinder에는 일차펌프의 출구 배관이 연결되어 펌프를 통해 유입되는 저온 소듐을 유입실을 거쳐서 노심으로 안내한다. 그림 21은 유입실의 설계 도면을 나타낸 것으로, receptacle에 대한 설계 자료는 타분야와의 연계 검토가 이루어지지 않아 아직 제공하지 않는다.

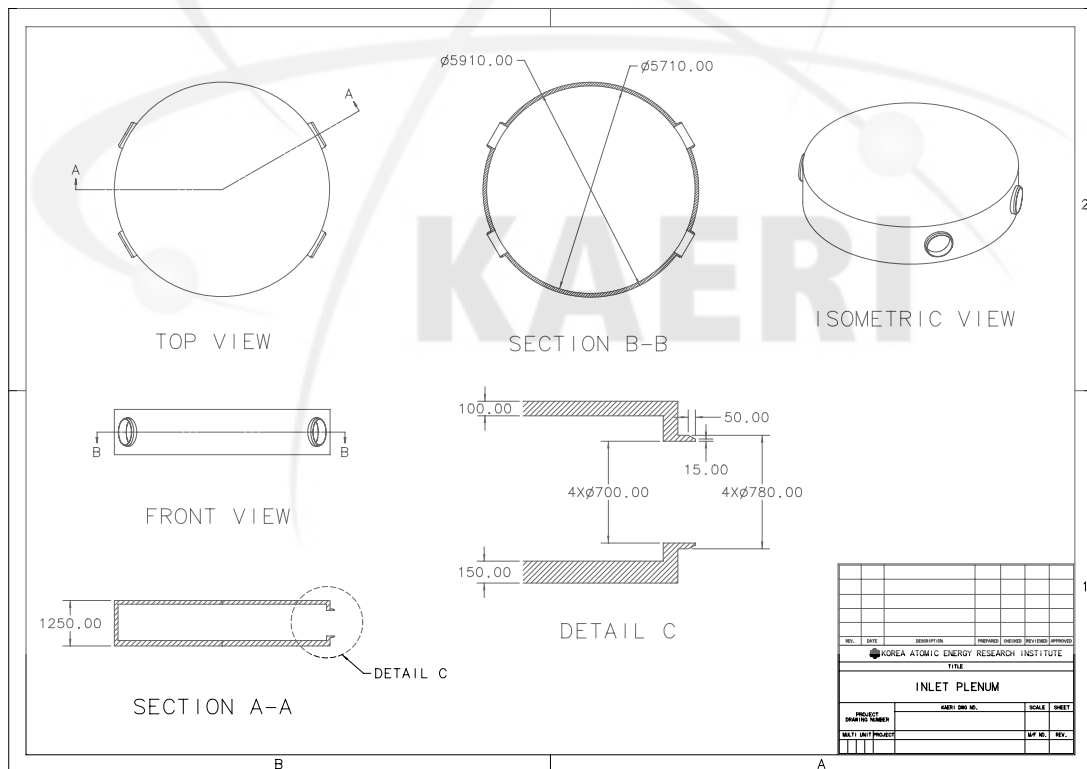


그림 21. 유입실 설계 개념

2.6.7 노심지지구조물

KALIMER-600의 노심지지구조물 개념은 원자로용기와 용접되지 않고 노심을 지지하지만 반경방향 열팽창을 허용하는 분리형 개념이며, 형상은 제작이 용이한 단순치마형이다. 노심지지구조물은 원자로용기 bottom head의 노심지지물 패드 위에 설치된다. 노심지지물과 지지받침대의 접촉면에는 특수 윤활재료가 사용되며 유입실과 원자로용기 bottom head의 반경방향 열팽창 거동이 상호 독립적으로 이루어지게 하여 구조물들간의 반경방향 열팽창 차이에 의해 야기되는 응력발생가능성을 배제하였다. 유입실 하부판과 원자로용기 bottom head 중심부에는 내부구조물과 원자로용기의 중심축을 안내하는 central pivot이 있다. 그리고 노심지지물의 실제 제작은 유입실하부판과 일체형으로 단조 제작함으로써 가동중검사가 불리한 원자로 노심지지물의 용접부위를 제거할 수 있다[5]. 그림 22는 단순치마형 노심지지구조물의 설계 도면을 나타낸 것이다.

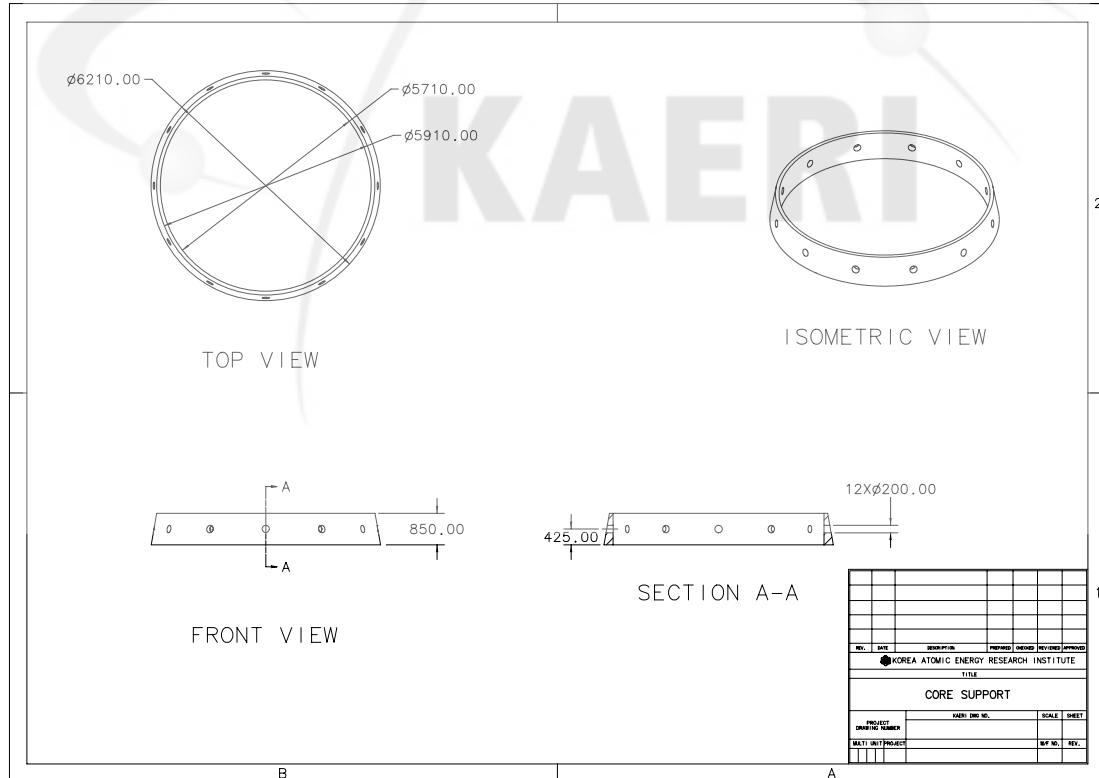


그림 22. 노심지지구조물 설계 개념

2.6.8 노심 캐처

노심 캐처는 핵연료 노심 용융 사고시 방사성 물질의 환경 유출 방지를 위하여 원자로용기 내부 하단에 설치하는 구조물이다. 노심 캐처는 원자로 유형 및 내부구조 형상에 따라 여러가지 개념이 있지만 풀형 액체금속로인 KALIMER-600에는 tray 형 노심 캐처를 적용한다. 노심 캐처는 요건으로 설정된 용융 노심의 양을 모두 담을 수 있도록 평판의 직경 및 높이를 결정한다.

그림 23은 노심 캐처의 각 구조 형상 및 명칭을 나타낸 것이다. 용융된 노심이 유입실 하부판을 관통하면 core catcher plate(recovery tray)로 떨어지는데 고온의 노심 용융물과의 직접 접촉을 방지하기 위하여 heat shield plate가 추가로 설치된다. Recovery tray와 heat shield plate는 반경 방향으로 각각 0.5°, 1.0° 기울여지도록 설계하여 용융물이 평판위에 고르게 분산시켜서 노심용융물의 재임계 가능성을 배제하고자 하였다. 두 평판의 원주에는 conical edge가 설치되어 용융물이 원자로용기로 흘러내리지 않도록 한다. Core catcher plate는 support structure에 의해 지지되는데 이는 원주방향으로 10도 간격으로 설치된다. Support structure는 circumferential rib에 의해 원주방향 움직임을 제한한다. Core catcher 전체 하중은 bottom shell에 의해 지지된다. 그림 24는 개념 설계된 노심 캐처의 3차원 형상 및 설계 도면을 나타낸 것이다.

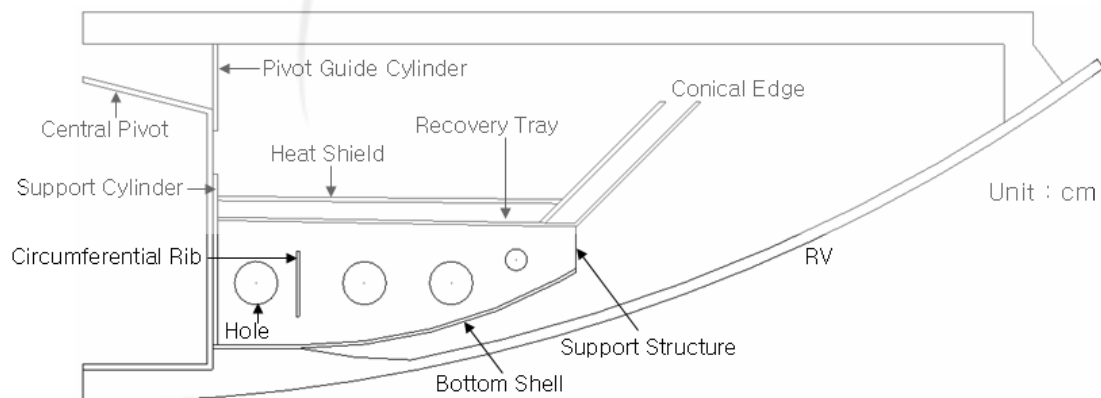
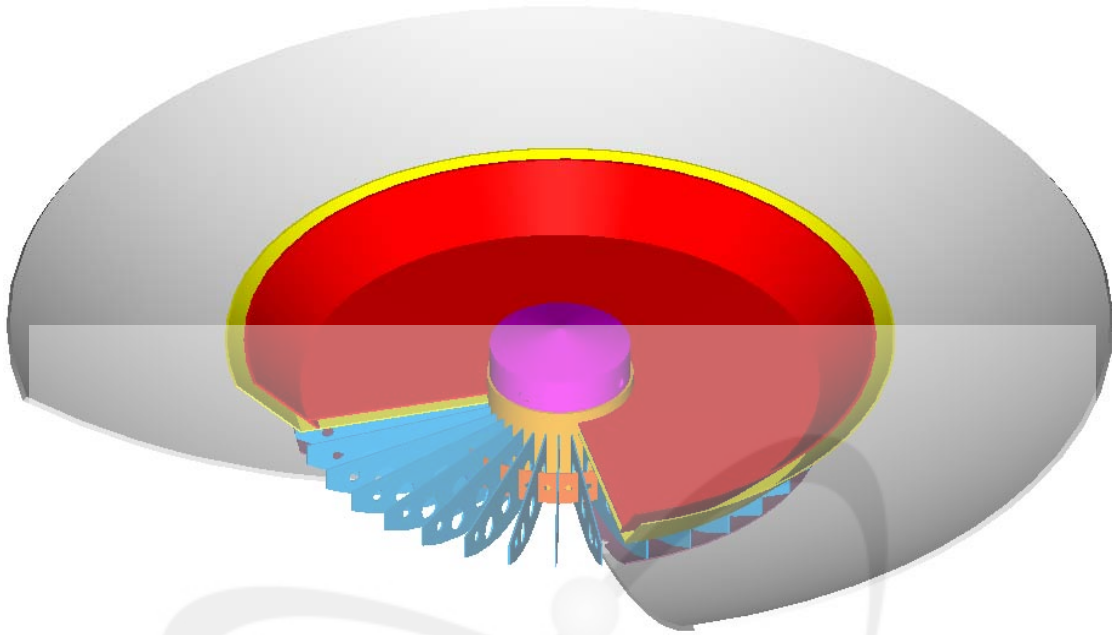
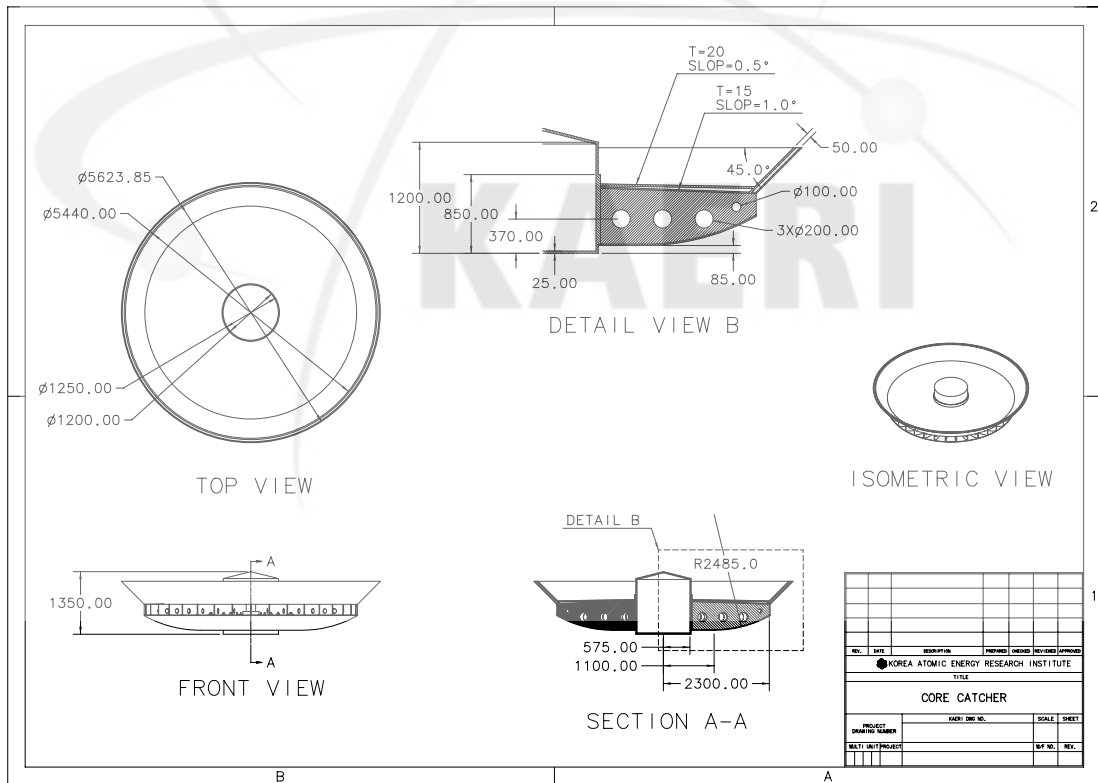


그림 23. 노심 캐처 각 부분의 명칭



(a) 3차원 구조 형상



(b) 설계 도면

그림 24. 노심 캐처 설계 개념

3. 원자로 주요 내부기기

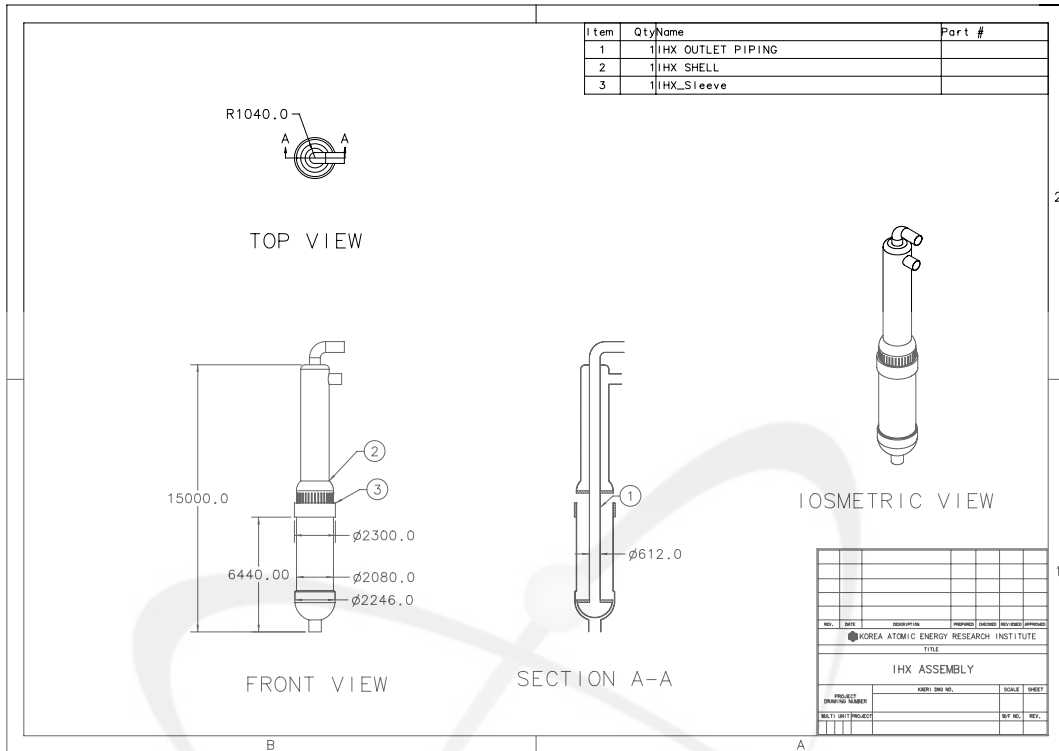
KALIMER-600 원자로헤드에 설치하는 주요 내부기기로는 중간열교환기(IHX, Intermediate Heat eXchanger), 일차계통 순환펌프(Primary Pump), 소듐-소듐 열교환기(DHX, Decay Heat eXchanger) 등이 있다. 현재 개념 설계 단계에서 주요 기기에 대한 상세 설계 자료를 제공하긴 어려운 상태이며, 여기서는 외형을 기준으로 주요 부위의 형태와 설계 치수를 제공한다.

3.1 중간열교환기

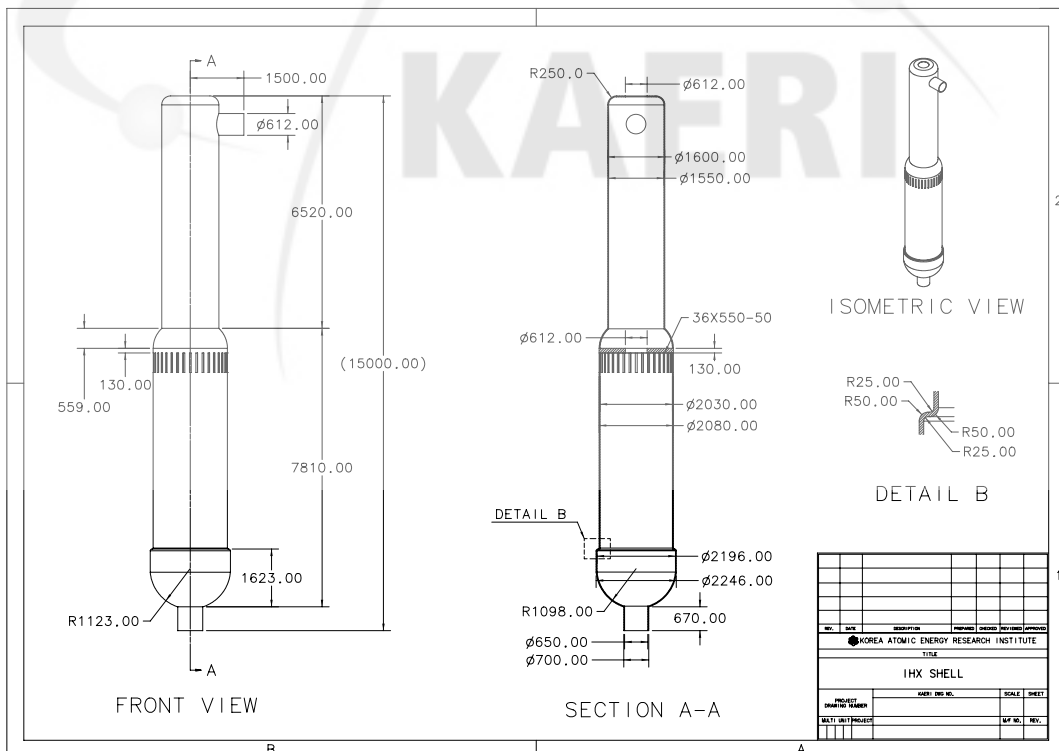
중간열교환기(IHX)에 대한 설계 자료는 유체계통분야에서 제공[5]하지만 이에 대한 설계 구체화는 이루어지지 않은 상태이며, 주로 외형과 구조 개념을 바탕으로 도면을 작성하였다. IHX는 루프당 2개씩 배치되므로 총 4개가 노내에 배치된다.

기기들의 직경이 높이에 따른 모든 부위에서 동일하지 않기 때문에 내부구조물 관통부와 기기 사이의 간격이 큰 경우에는 기기들의 외부에 sleeve를 설치하여 기기 고정 및 누설 밀봉 기능을 할 수 있게 한다.

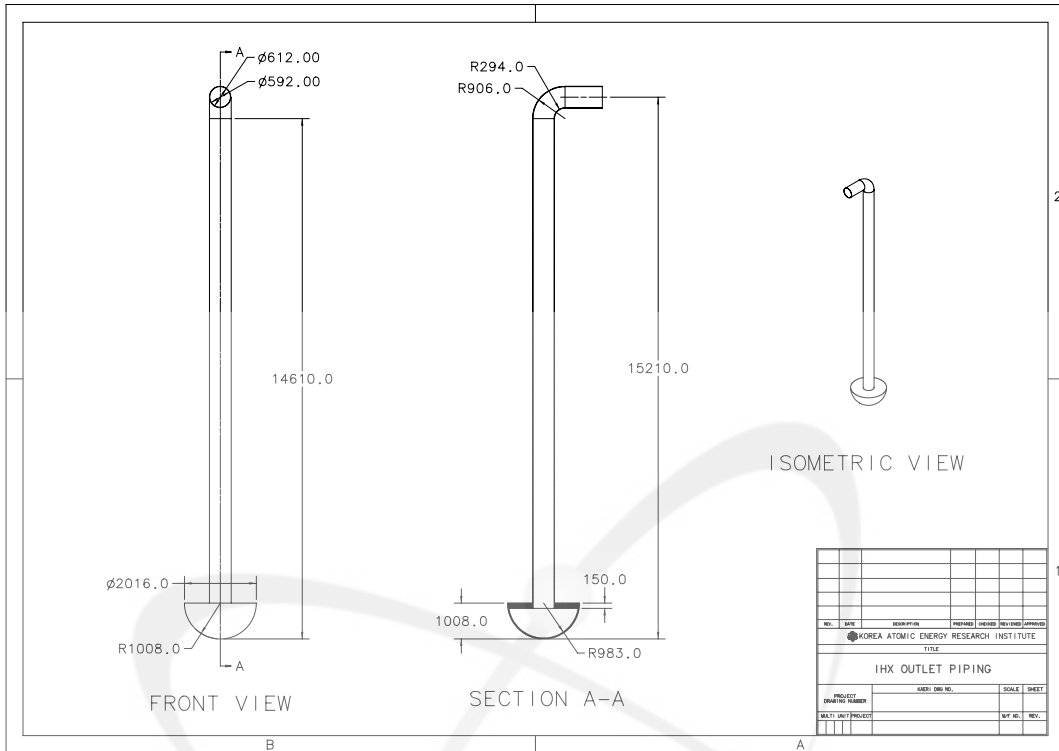
IHX 상단에는 IHTS 배관과 연결되는 동축 구조물이 필요하며, 동축 구조물의 외부에는 소듐 누출 사고시 소듐이 원자로헤드로 누출되지 않도록 가드배관이 설치된다. IHX의 수직 하중은 원자로헤드에서 IHX 플랜지로 지지한다. IHX 플랜지는 하중 지지뿐만 아니라 밀봉 기능도 제공해야 하므로 이에 적합한 슬리브가 필요하다. 플랜지와 슬리브의 부착 방법은 별도 제작하여 이를 기기에 용접하는 방식보다는 기기 제작시 기기와 일체형으로 제작해야 할 것이다. 그림 25는 IHX의 구조 개념에 대한 설계 치수를 나타낸 것이다.



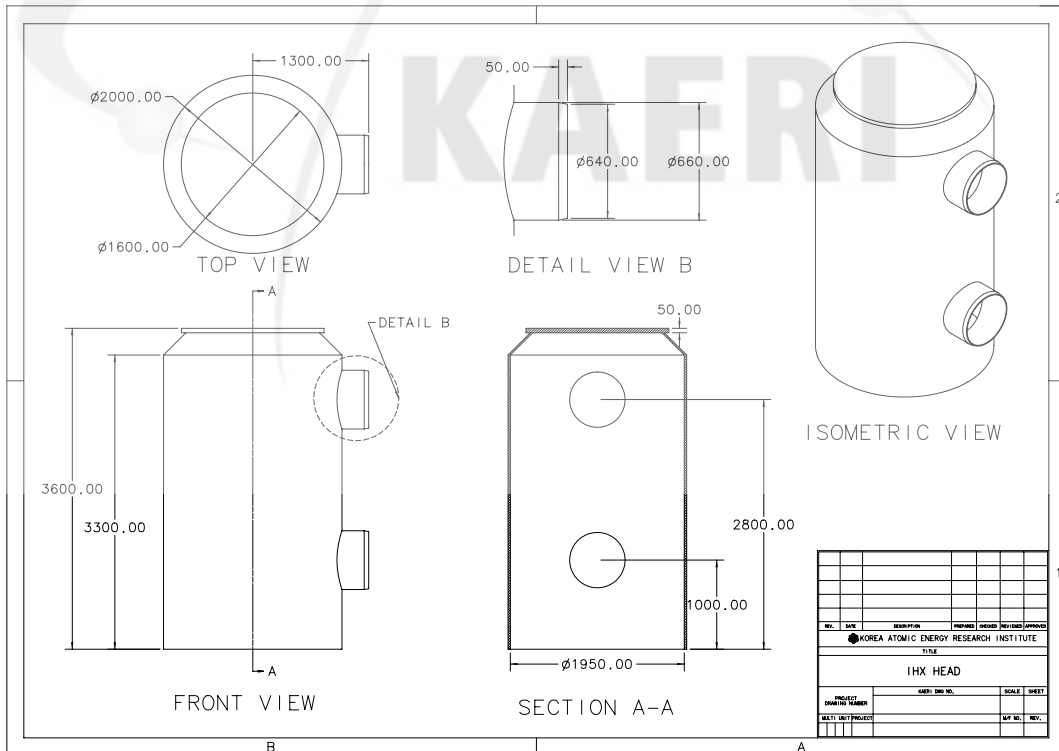
(a) IHX 전체 조립도



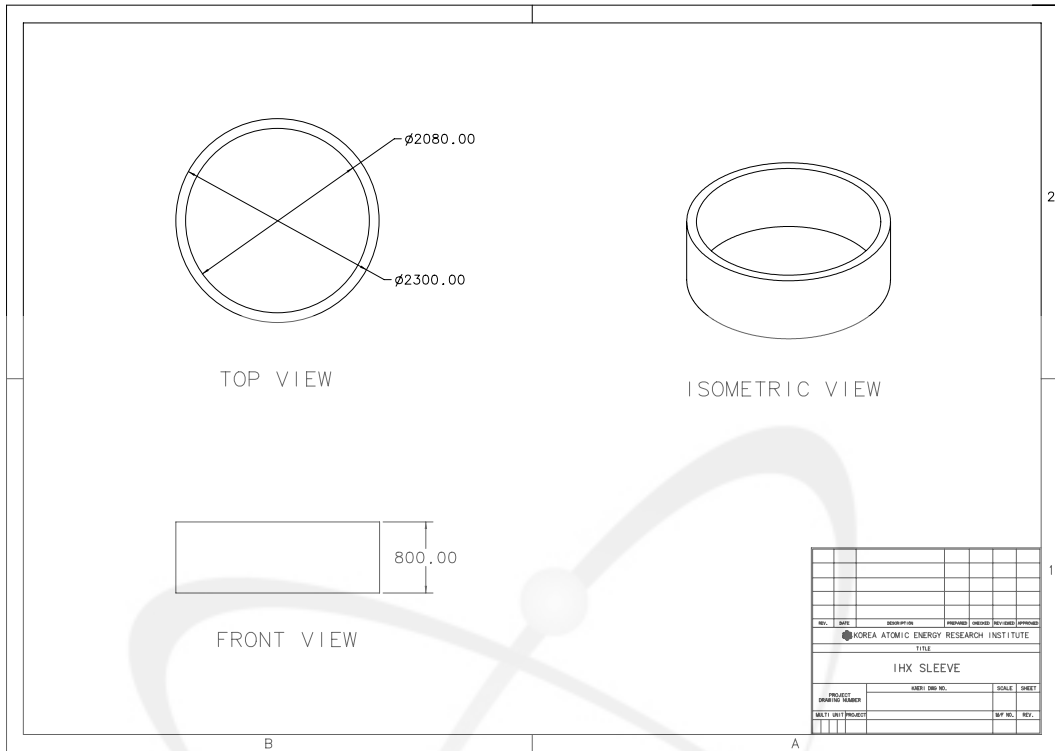
(b) IHX shell



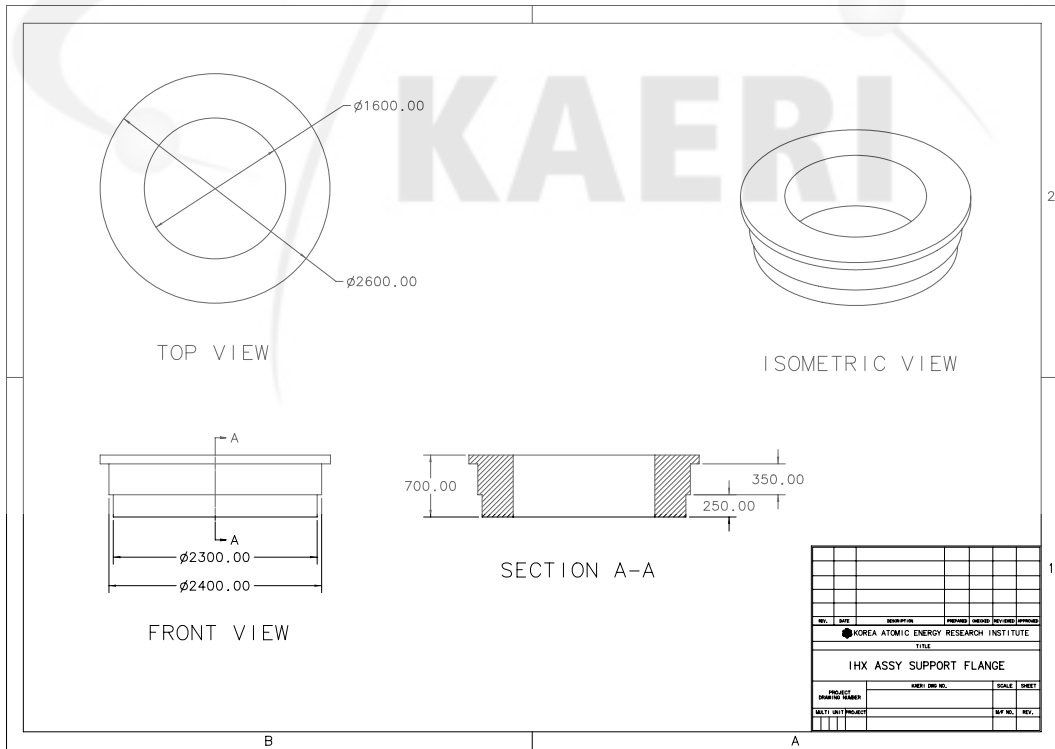
(c) IHX downcomer



(d) IHX guard pipe



(e) 기기관통부 슬리브



(f) IHX support flange

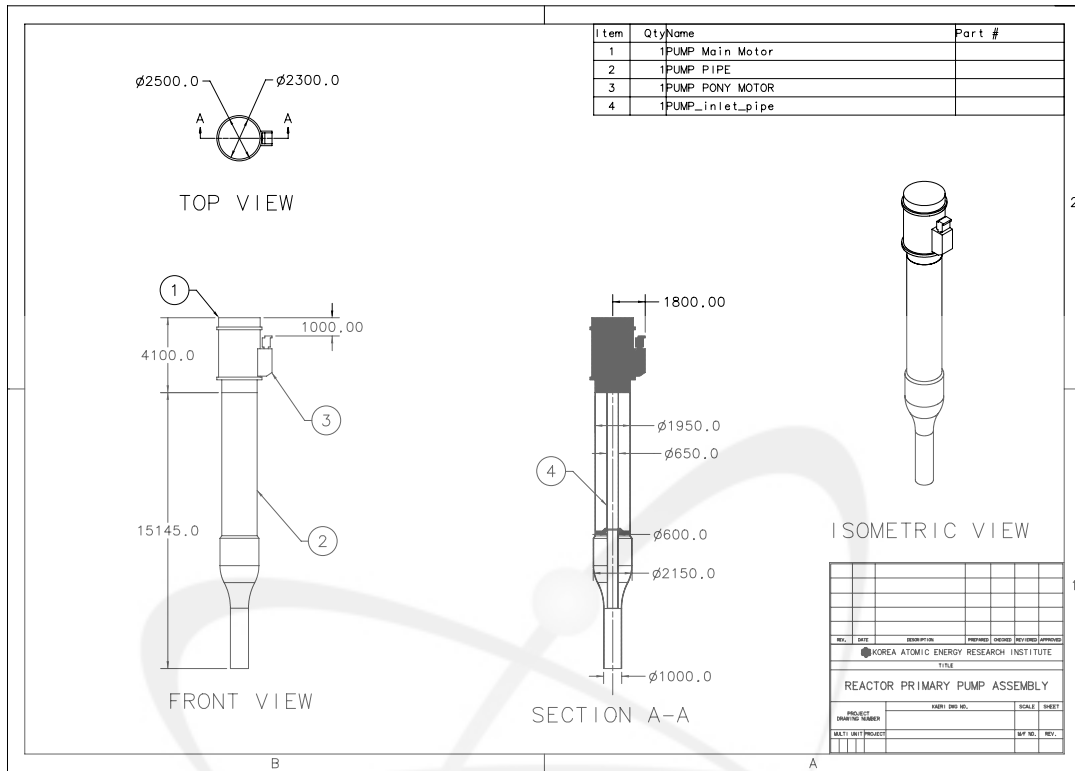
그림 25. IHX 구조 개념

3.2 일차펌프

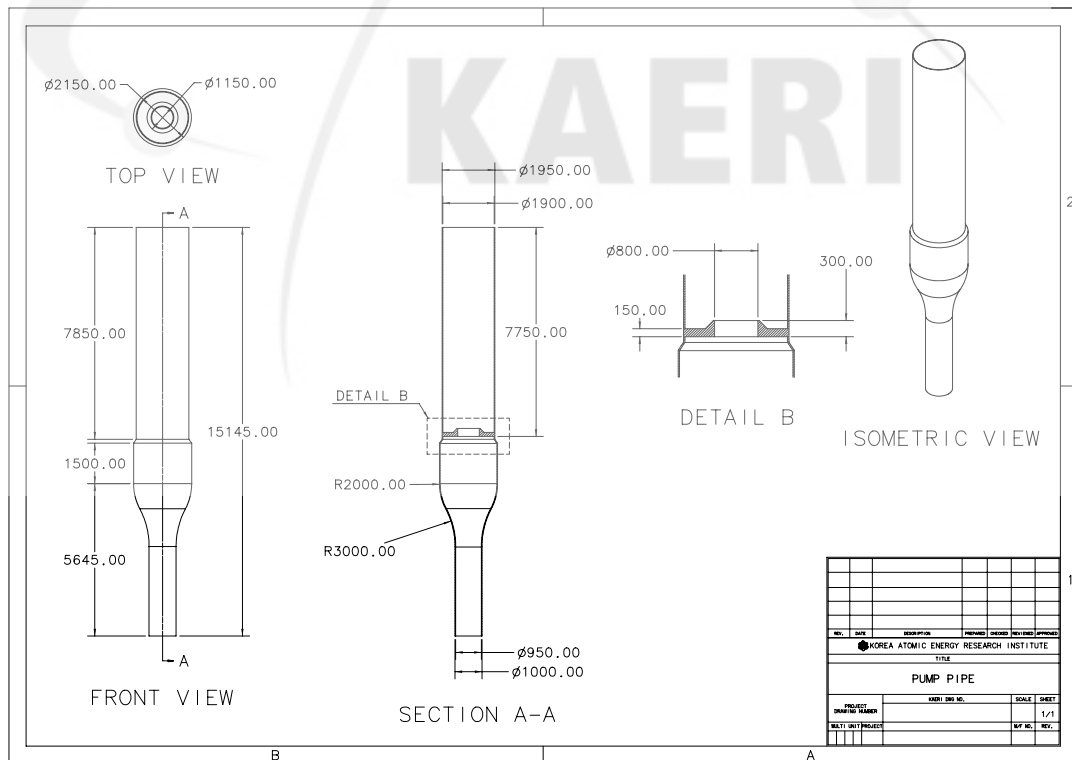
KALIMER-600에서는 일차계통 순환펌프(primary pump)로 기계식 펌프를 채용한다. 현재의 개념 설계 단계에서는 펌프의 상세 설계는 이루어지지 않았고 다만 펌프의 성능 구현을 위한 조건들과 외형 크기를 결정하는 수준의 연구가 진행되었다. 일차 펌프의 초기 개념에서는 유체를 안내하는 원통이 펌프에 부착되었으나 이는 펌프의 직경이 커질 뿐만 아니라 펌프가 고온 소듐에 직접 노출되는 단점이 있다. 그래서 펌프 셸을 기기 보호원통으로 별도 분리시켜서 분리판과 격리판에서 지지되도록 하여 펌프의 직경을 줄이고 펌프를 고온 소듐과의 접촉을 배제할 수 있었다. 펌프의 길이는 임펠러 회전축의 길이로부터 결정되는데, 전 세계적으로 소듐냉각 고속로에 적용된 침지형 기계식 펌프의 최대 축길이가 10m 정도이다. 이로부터 일차 펌프의 회전축 길이를 10m로 설정하고 이를 적용하였다.

펌프의 수직 하중은 원자로헤드에서 지지되는데, IHX와 마찬가지로 기기의 하중 지지 및 밀봉을 위한 슬리브와 플랜지 설계가 필요하다. 펌프 상단에는 회전축 구동을 위한 주 모터와 보조 모터가 설치되는데, 여기에 대해서는 아직 어떤 요건도 설정되지 않아 개략적인 설치 개념만 제시하고자 한다. 그림 26은 일차펌프에 대한 설계 자료를 나타낸 것이다.

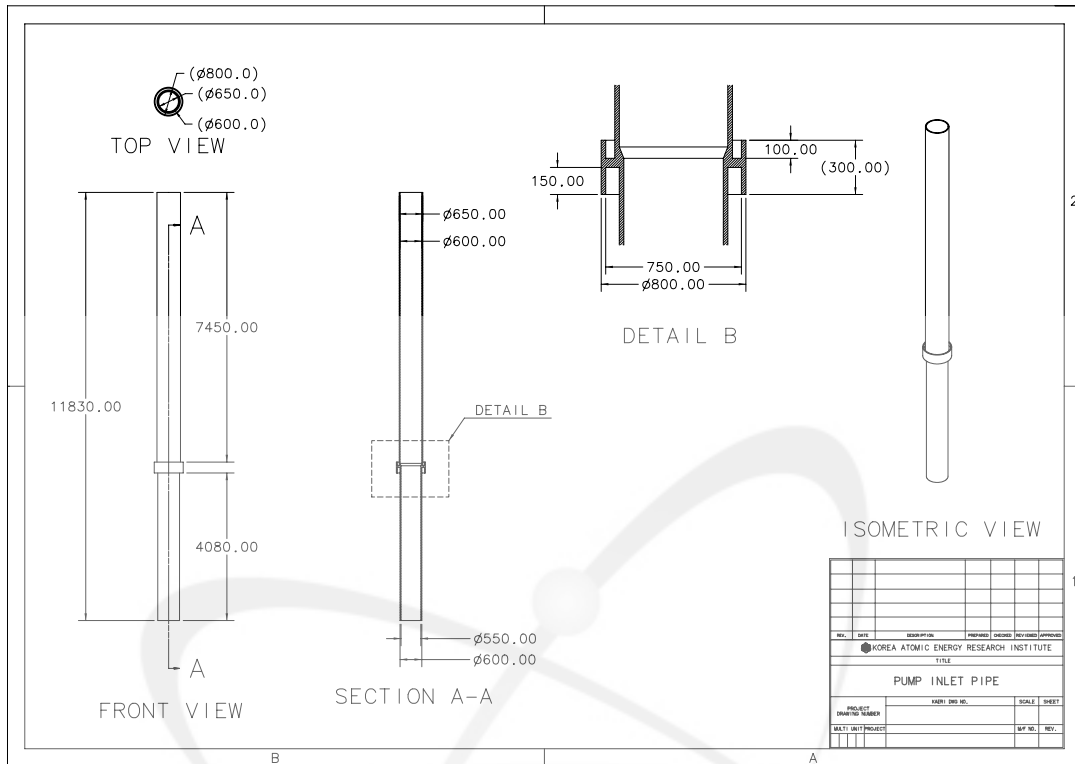
유입실과 연결되는 펌프 출구배관은 펌프당 2개씩 설치하여 유량이 유입실 내부에서 고르게 분포하도록 하였다. 출구 배관의 직경은 계통 설계요건을 만족시킬 수 있도록 설계되어야 한다. 그림 27은 일차펌프 출구배관의 도면을 나타낸 것이다.



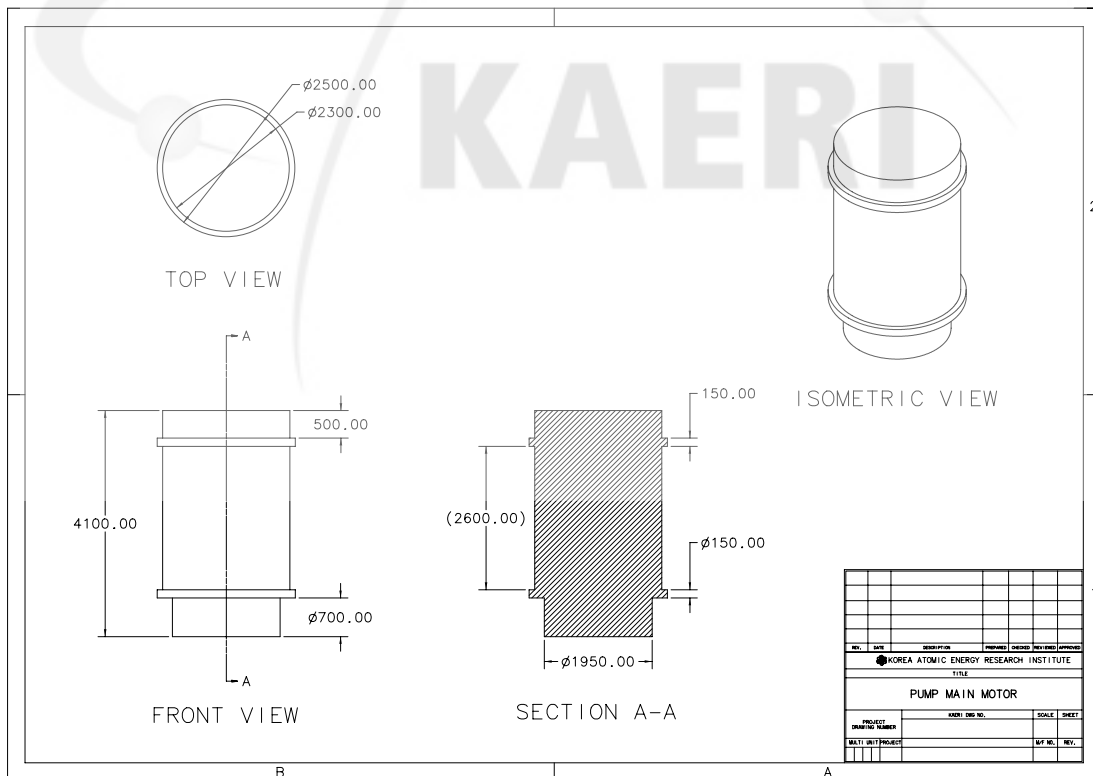
(a) 펌프 조립도



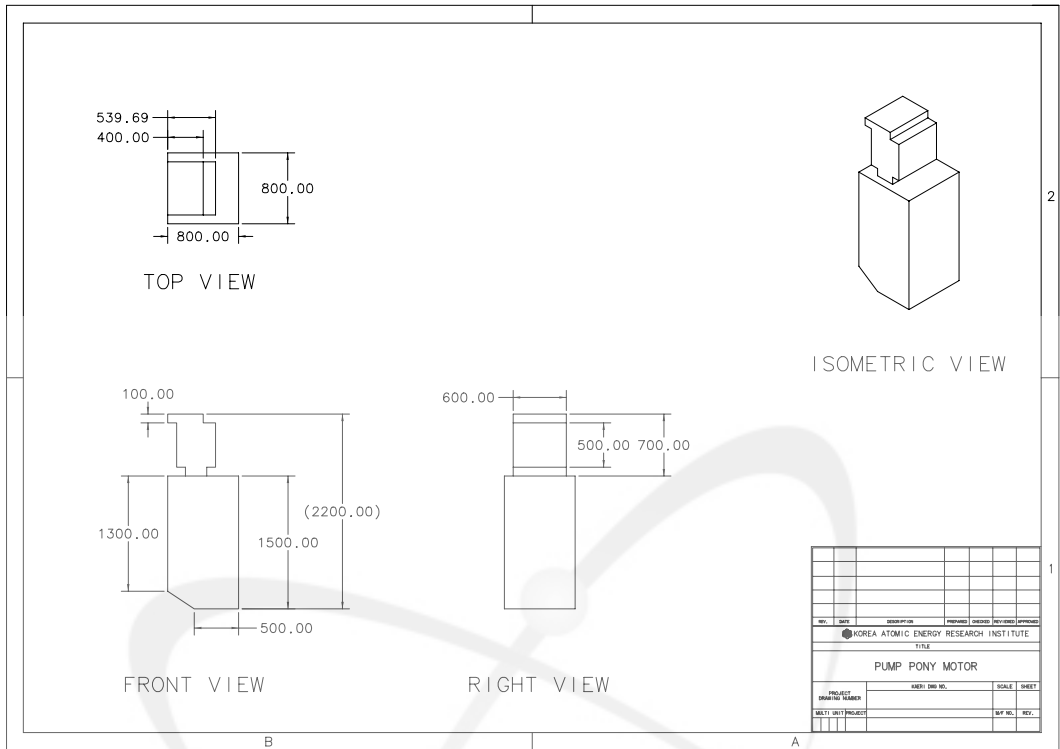
(b) 펌프 몸체



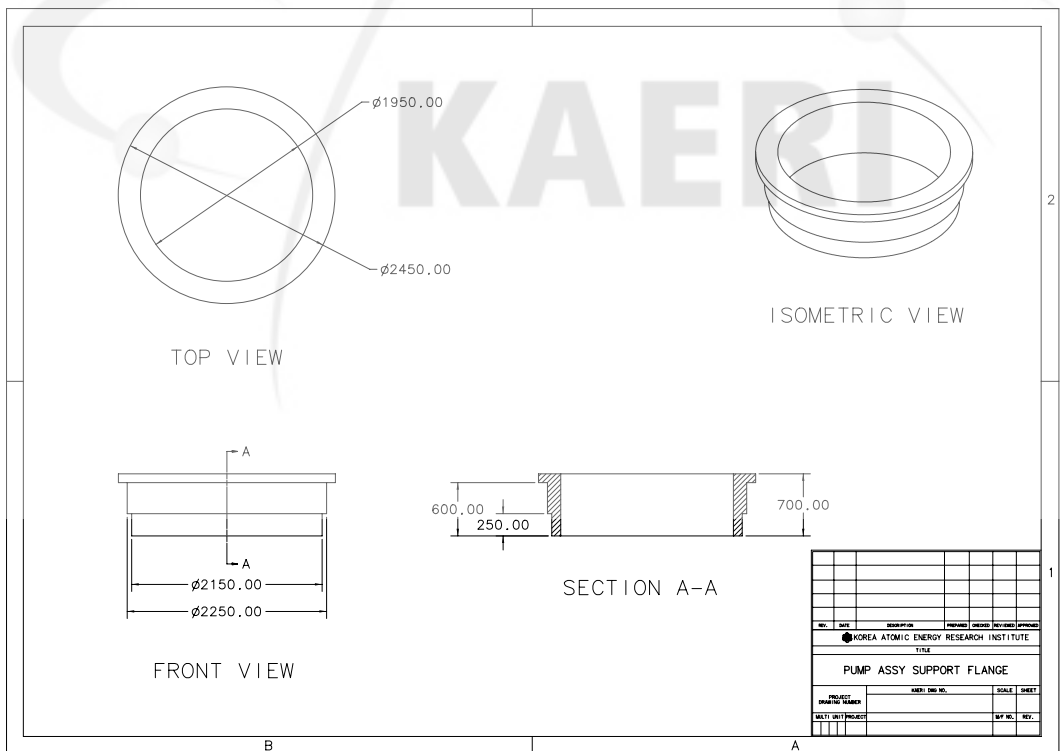
(c) 펌프 회전축



(d) 펌프 구동 모터



(e) 펌프 구동 보조모터



(f) 펌프 지지 플랜지

그림 26. 일차펌프 구조 개념

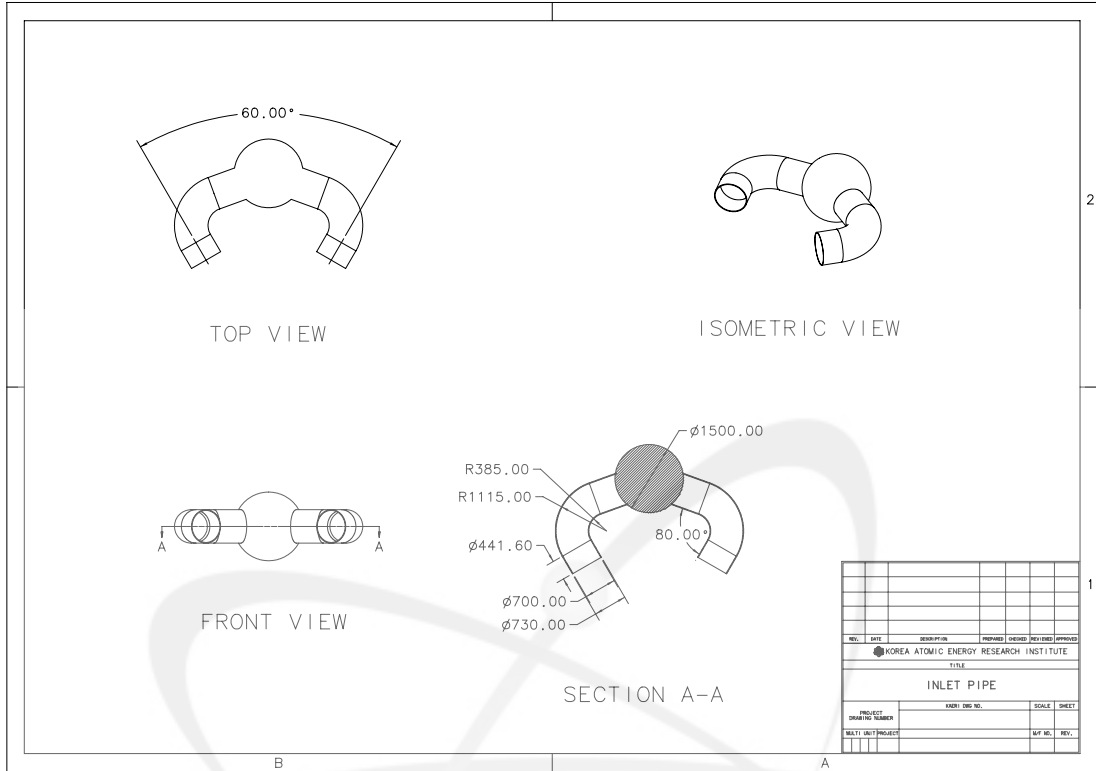
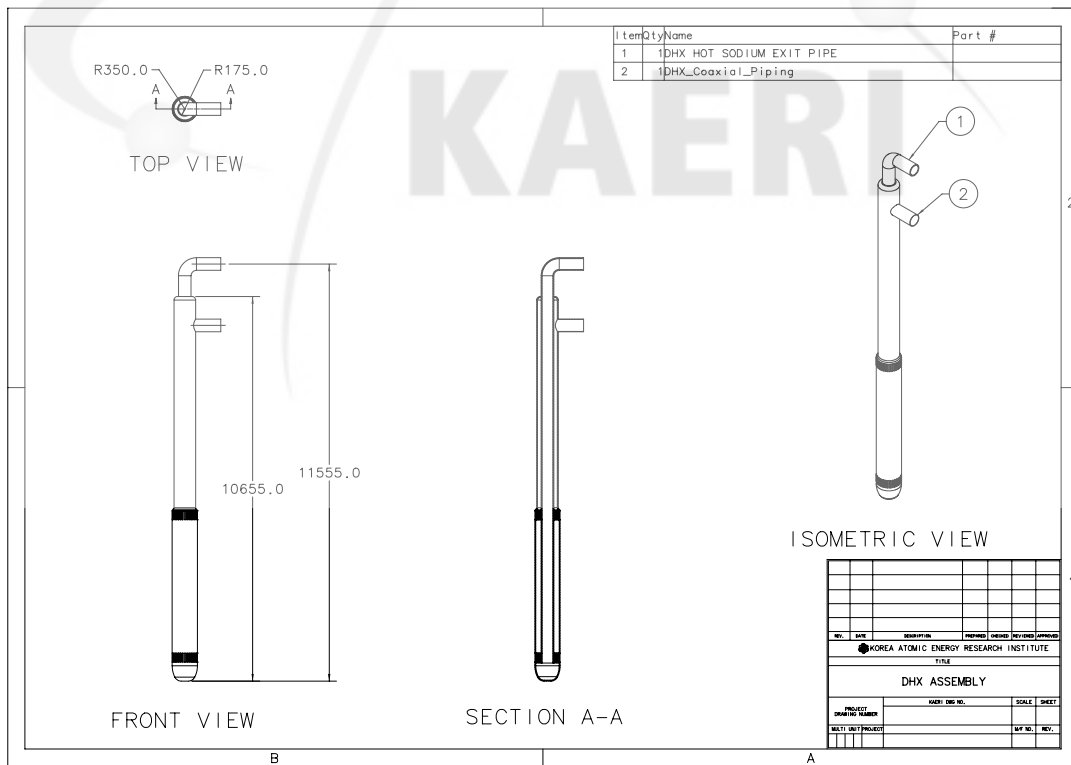


그림 27. 일차펌프 출구배관 설계 개념

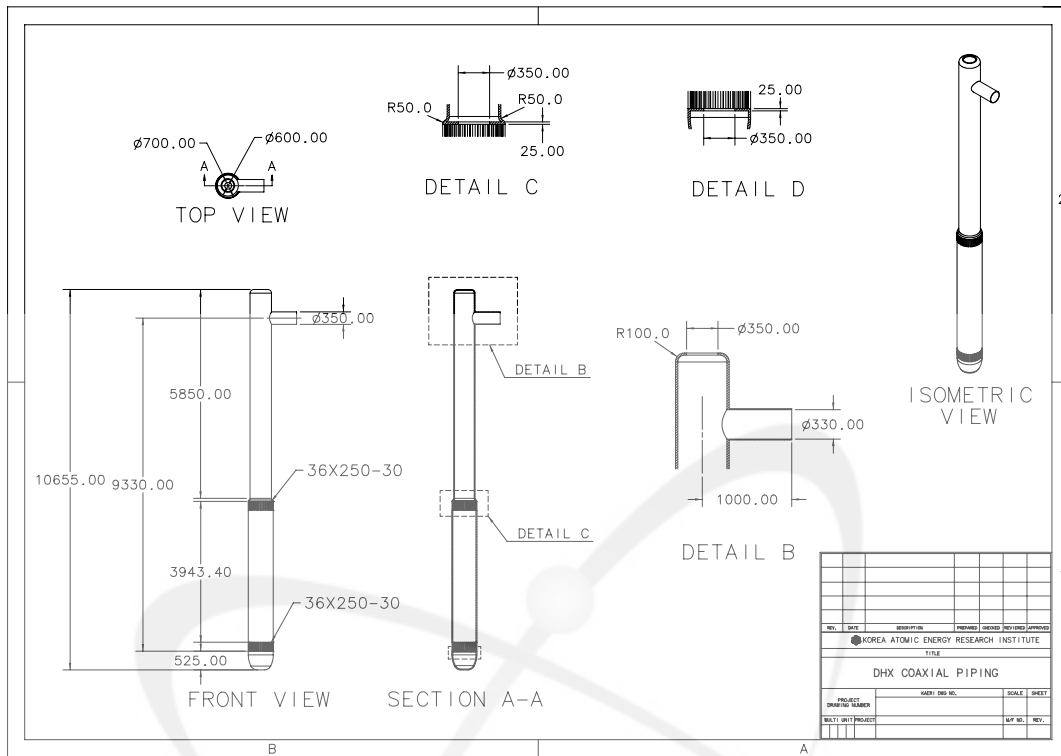
KAERI

3.3 소듐-소듐 열교환기

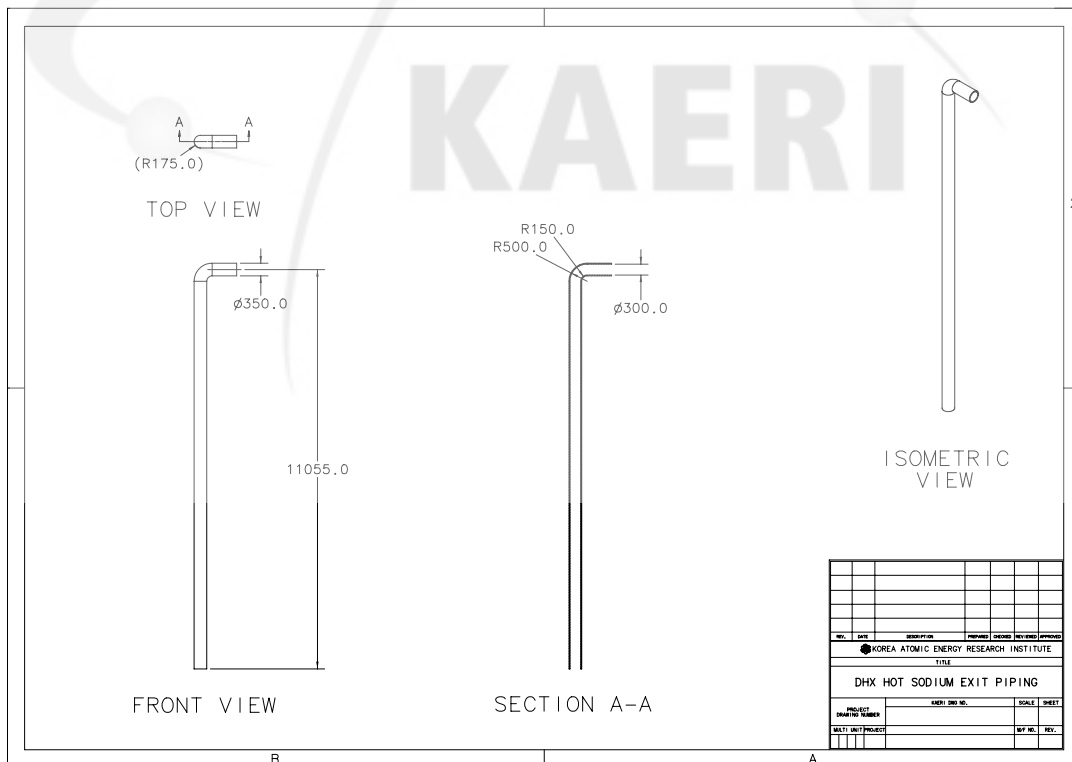
소듐-소듐 열교환기(DHX, Decay Heat eXchanger)는 일차 계통의 잔열 제거를 목적으로 노내에 설치하는 열교환기로서 일차 소듐과 PDRC(Passive Decay heat Removal Circuit) 소듐 사이에 열교환이 이루어진다. DHX는 크게 두 부분으로 구분되는데 실제 열교환기 역할을 하는 열교환부와 열교환부 외부에 있는 지지배럴(DHX support barrel)로 나눌 수 있다. DHX 지지배럴은 분리판과 격리판에서 지지되는 내부구조물로서 DHX와는 일정 간격을 두고 격리된다. DHX의 수직 하중을 지지하기 위하여 IHX와 마찬가지로 기기의 하중지지 및 밀봉을 위한 슬리브와 플랜지 설계가 필요하다. 그림 28은 DHX의 구조 개념을 부품별로 나타낸 것이다.



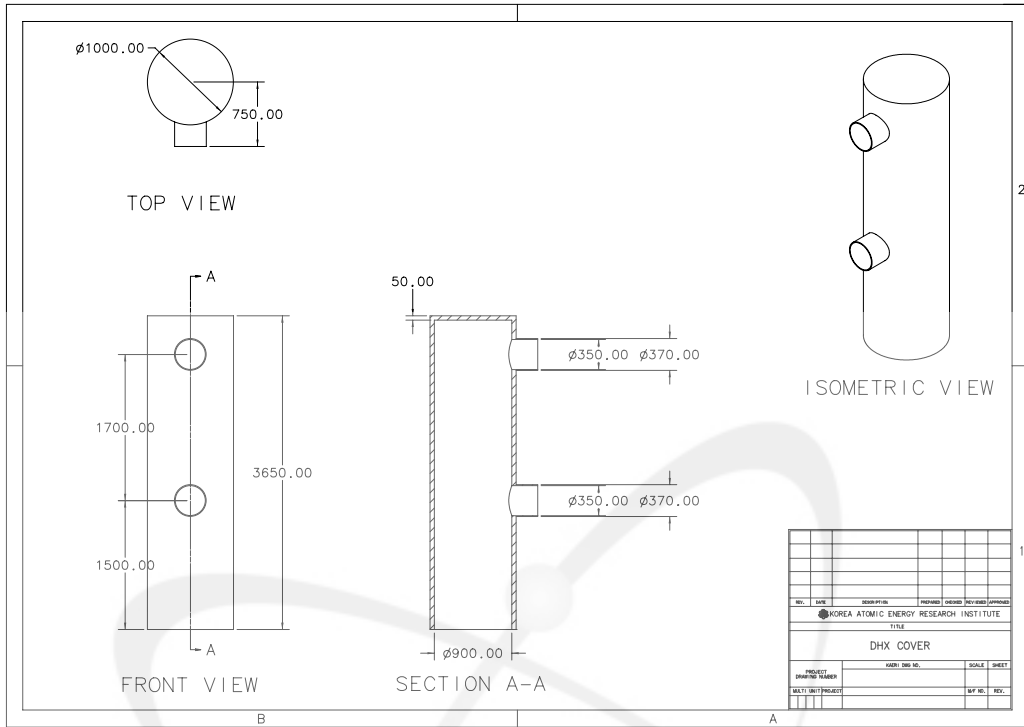
(a) 조립도



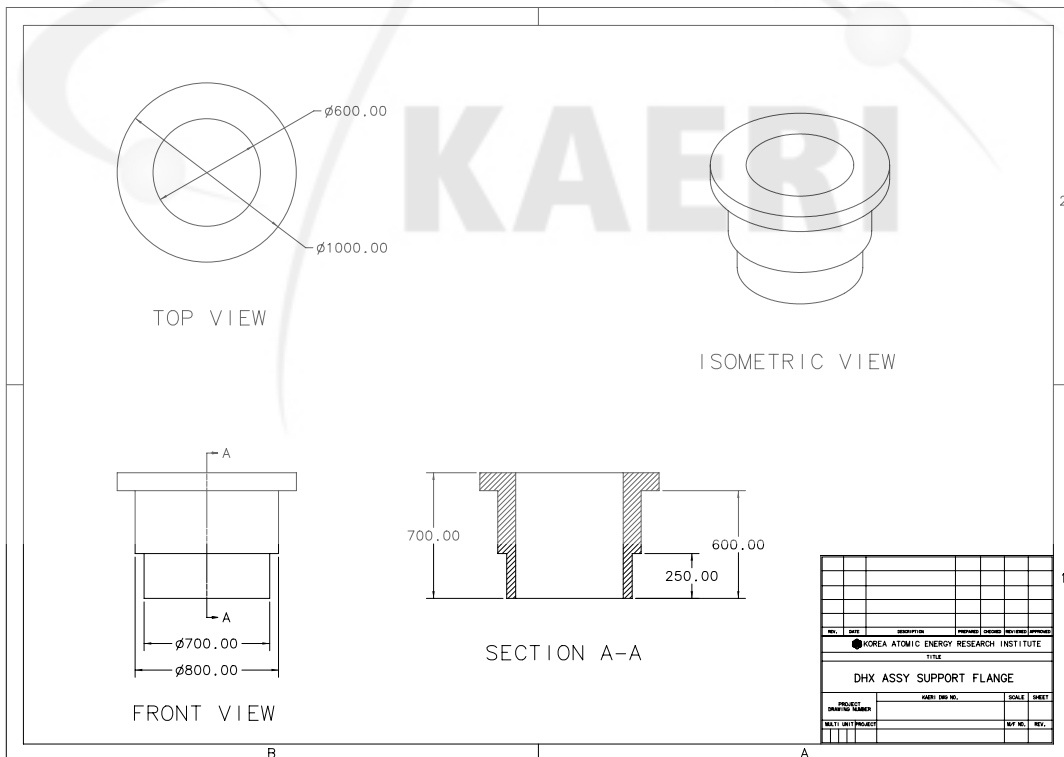
(b) DHX shell



(c) DHX downcomer



(e) DHX guid pipe



(f) DHX sleeve

그림 28. DHX 구조 개념

4. 결론

본 연구에서는 개념 설계된 KALIMER-600의 노내 주요 기기와 주요 구조물들의 설계 보완 사항들을 3차원 모델링 프로그램인 I-DEAS를 활용하여 수정하였으며, 또한 형상화된 각 구조물들의 도면을 작성하여 개념 설계 자료로 활용하고자 하였다.

KALIMER-600에 대한 개념 설계가 2006년 과제 종료와 함께 마무리되었으나 각 구조물은 설계 타당성 검토를 거치면서 국부적인 사항들이 지속적으로 변경되었다. 하지만 기존의 모델링 파일에는 이를 반영하지 못한 부분들이 있어 본 연구를 통해 이를 반영한 모델링 보완 작업과 모델링 파일을 문서화하기 위한 도면화 작업이 이루어졌다. 현재까지 작성된 개념 설계 자료 중에서 내부기기의 경우는 구조 형상에 대한 검토 작업이 필요할 뿐만 아니라 기기 가동에 필요한 부가 장치들에 대한 자료가 전혀 고려되지 않은 상태이므로 이것들에 대한 자료 조사가 반드시 필요하다. 또한 본 연구에서는 원자로용기 내부에 설치되는 기기 및 구조물들이 주 대상이었지만 중간열전달계통과 원자로건물 그리고 PDRC와 같은 안전계통들에 대한 추가 작업도 필요하다. 본 연구를 통해 작성된 개념 설계 자료들은 소듐냉각 고속로의 장기 로드맵의 목표 중의 하나인 실증로 건설을 위한 개념 설계의 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 지원을 받아 2004년도 원자력 연구개발 사업을 통해 수행되었음.

참고문헌

- [1] 한도희 외, KALIMER 개념설계보고서, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2204/ 2002, 2002.
- [2] I-DEAS NX Release 10, UGS, 2003.
- [3] 박창규, 이재한, I-DEAS를 활용한 KALIMER-600 개념 설계 형상 모델링, KAERI/TR-2883/2004, 한국원자력연구소, 2004.
- [4] 김종범, 이형연, 유봉, "KALIMER 원자로지지구조물 설계특성 및 사례해석", '99 추계학술발표회 논문집, 한국원자력연구소, 1999.

[5] 이재한 외, 액체금속로 설계기술개발-기계설계기술개발, KAERI/RR-2215/ 2001, 한국원자력연구소, 2001.

[6] 위명환, KALIMER-600 NSSS 주요기기 크기, IOC-FS-007-2004, 한국원자력연구소, 2004.



서 지 정보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-3943/2009					
제목/부제	KALIMER-600 구조 설계 개념 형상화				
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	박창규 / 고속로기술개발부 기계핵심기반기술개발				
연구자 및 부서명	이재한 / 고속로기술개발부 기계핵심기반기술개발				
출판지	한국, 대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2009.11
페이지	p.44	도표	있음(V), 없음()	크기	A4
참고사항					
비밀여부	공개(V), 대외비(), _ 급비밀	보고서종류	기술보고서		
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄 내외)	<p>본 연구에서는 소듐냉각 고속로 KALIMER-600의 개념 설계 연구를 통해 도출되었던 구조설계 개념에 대하여 설계해석 평가로 제시된 변경 사항들을 반영한 3차원 구조설계 모델링의 수정 작업을 I-DEAS 프로그램을 활용하여 수행하였다. 또한 3차원 형상화 자료를 바탕으로 각 구조물 및 기기에 대한 도면을 작성하여 실증로 개념 설계시 참고 자료로 활용할 수 있을 것이다. 기기 배치 및 구조 개념은 기존에 도출되었던 개념을 유지하지만 국부적인 사항들이 보완되면서 이를 반영하였다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	액체금속로, 칼리머, 기기배치, 내부기기, 원자로 구조물, 모델링, 아이디어스				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-3943/2009					
Title/ Subtitle	Modeling of KALIMER-600 Structural Design Concept				
Project Manager and Department		Chang-Gyu Park / Fast Reactor Development Division			
Researcher and Department (or Main Author)		Jae-Han Lee / Fast Reactor Development Division			
Publication Place	Taejon, Korea	Publisher	KAERI	Publication Date	2009.11
Page	p.44	Fig. & Tab.	Yes(V), No ()	Size	A4
Note					
Classified	Open(V), Restricted(), ___ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)	<p>In this study, the modification work for a 3-D solid modeling of KALIMER-600(Korea Advanced Liquid Metal Reactor, 600MWe) conceptual design by using I-DEAS, a commercial solid modeling program, was carried out by reflecting the design change produced through the design feasibility study. Also, the structures and components are drafted based on the 3-Dimensional modeling data and it is expected to be utilized for the reference document of the demonstration sodium-cooled fast reactor. The component arrangement and structural concepts are maintained the established concepts but the locally modified design features of the structures are applied.</p>				
Subject Keywords (About 10 words)		Liquid Metal Reactor, KALIMER, Component Arrangement, Internal Component, Reactor Structure, Modeling, I-DEAS			