



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

MELCOR를 이용한 공기에 완전
노출된 사용후연료 저장조에 대한
중대사고 해석

濟州大學校 大學院

에너지 공학 학과

吳 政 啟

2016 年 2 月

MELCOR를 이용한 공기에 완전 노출된 사용후연료 저장조에 대한 중대사고 해석

指導教授 李 演 鍵

吳 政 敗

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2015 年 12 月

吳政敗의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 李 演 鍵

委 員 朴 在 雨

委 員 朴 鍾 和



濟州大學校 大學院

2016 年 2 月



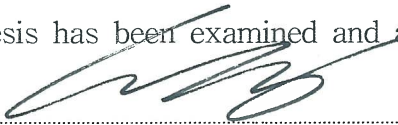
Analysis of Severe Accident for the SFP under
the Condition of Complete Drainage using
MELCOR

Jung-Min Oh
(Supervised by professor Jae Woo Pack)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Engineering

2015. 12

This thesis has been examined and approved.


.....
Thesis director, Yeon-Gun Lee, Prof. of Nuclear and Energy Engineering


.....
Jong-Hwa Park, Researcher of Korea Atomic Energy Research Institute


.....
Jae-Woo Pack, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

Date 2015. 12.

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iv
SUMMARY	v
I. 서론	1
II. SFP 내 공기 산화반응 모델	3
III. SFP 사고 모의용 MELCOR 입력 작성	7
1. SFP 완전 노출사고 모의 입력	7
2. 민감도 카드 및 입력 설명	25
IV. SFP 완전 노출 사고 모의 결과 및 민감도 분석	27
1. SFP 완전 노출 사고 모의 결과	27
2. 민감도 분석	45
V. 결론	50
REFERENCE	52
APPENDIX A. Input of the SFP under the Condition of Complete Drainage	55

감사의 글

LIST OF FIGURES

[Fig. 1] Reaction Rate Correlation For Air Oxidation of Zircaloy	4
[Fig. 2] Loading Pattern of Spent Fuel and Rack	7
[Fig. 3] Nodalization of SFP and Building	11
[Fig. 4] Modeling of SFP Loading Patten in MELCOR	14
[Fig. 5] Nodalization of Core in SFP	17
[Fig. 6] Water Level in SFP	33
[Fig. 7] Leakage Rate through SFP Bottom	33
[Fig. 8] Gas Average Velocity in Core	34
[Fig. 9] System Pressure in SFP	34
[Fig. 10] Cladding Temperature at Ring 1	35
[Fig. 11] Cladding Temperature at Ring 2	35
[Fig. 12] Cladding Temperature at Ring 3	36
[Fig. 13] Mass Density of Oxygen in Core	36
[Fig. 14] Total Heat Generation Rate in Core	37
[Fig. 15] Percentage of Cladding oxidized at Ring 1	37
[Fig. 16] Percentage of Cladding oxidized at Ring 2	38
[Fig. 17] Percentage of Cladding oxidized at Ring 3	38
[Fig. 18] Accumulated LF Values at Axial Level 15	39
[Fig. 19] Rack Temperature at Ring 1	39
[Fig. 20] Rack Temperature at Ring 2	40
[Fig. 21] Rack Temperature at Ring 3	40
[Fig. 22] Relocation of Ring 1	41
[Fig. 23] Relocation of Ring 2	41
[Fig. 24] Relocation of Ring 3	42
[Fig. 25] Structure Temperature in Pool (Bottom Wall)	42
[Fig. 26] Structure Temperature in Pool (Concrete Wall)	43
[Fig. 27] Structure Temperature in Pool (Core Support Plate)	43

[Fig. 28] Structure Temperature at the Top of the Pool (SFP Floor & Wall) ...	44
[Fig. 29] Structure Temperature at the Top of the Pool (SFP Ceil & Crane) ...	44
[Fig. 30] Change of the Maximum Core Temperature with Total Decay Heat ..	47
[Fig. 31] Change of the Maximum Core Temperature with Vent Capacity (7.6 Mwt)	47
[Fig. 32] Change of the Maximum Core Temperature with Vent Capacity (9.0 Mwt)	48
[Fig. 33] Minimum Vent Capacity for Suppressing Fuel Damage	48
[Fig. 34] Change of the Maximum Core Temperature with Rack Hole Size	49
[Fig. 35] Change of the Maximum Core Temperature with Open Door	49

LIST OF TABLES

<Table 1> Parameter of the SFP	8
<Table 2> Parameter of the Fuel Assemblies	8
<Table 3> Height and Flow Area of The Axial Level in Core	18
<Table 4> Mass Value of The Axial Level in Core	19
<Table 5> RN Class Compositions	22
<Table 6> Percentage of The radionuclide	32

SUMMARY

Following Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, spent fuel pool (SFP) accident studies have been undertaken to improve SFP safety even further. This study is provided of simulation result of severe accident for the SFP under the condition of complete drainage in typical PWR. We used the MECORE 1.8.6 code to compute the variation of the fuel cladding temperature after a complete loss of the cooling water in the spent fuel pool. Since we could not obtain detailed design data of the SFP for a domestic nuclear power plant, the SFP model and fuel assembly model used in this study were taken from a study conducted by Sandia National Laboratory(SNL). Important factors such as Zr oxidation by air, air natural circulation and thermal radiation were considered for complete drainage accidents without mitigation measures. The simulation result shows that the cladding temperature exceeds the rupture temperature in most of the fuel rods and some part of the fuel rods suffers melting of the cladding. Since the sudden rise and drop of the cladding temperature well coincides with those of the oxygen concentration, the oxidation of Zr seems to be a governing factor affecting the melting of cladding. For sensitivity analysis, the effects of emergency ventilation and decay heat, hole size, open door were analyzed. The analysis results, we have developed a minimum ventilation capacity table of suppressing fuel damage. Based on this Study, it was confirmed that needed additional models in the SFP modeling.

I. 서론

원자로에서 인출된 사용후핵연료는 방사능과 열량이 높아 일정기간 동안 발전소 내 위치한 사용후핵연료 저장조 (Spent Fuel Pool : SFP) 에 임시저장 된다. 저장 이후에도 재처리 또는 직접처분 전까지 30 ~ 50년 정도의 저장관리 기간이 필요하다. 사용후 핵연료는 소위 랙(Rack)이라 불리는 긴 사각형 박스에 저장되며, 일반적인 랙 모양은 발전소 유형에 따라서 다양하지만, 국내 경우 고밀도용 랙 형태를 채택하고 있다.

SFP 사고 연구는 원자력발전소 수명 연장 정책과 사용후 핵연료 저장시설 용량 초과문제로 인해 현재까지 많은 연구가 이루어지고 있으며, 이러한 시설에서 테러 발생시 취약점이 확인되면서 이 연구는 새롭게 떠오르고 있다. 실제로 이러한 시설에서 발생한 사고로는 헝가리 Paks 원전에서 냉각재 조절시스템 문제로 인해 사고가 발생하였고, 최근에는 일본의 후쿠시마 원전 사고로 인해 SFP 시설 내 안정성에 대해서 재검토 되고 있는 추세이다.

현재까지 SFP 시설 내 발생 가능한 사고로는 수증기와 공기가 공존하는 조건에서 산화반응이 진행되는 냉각재 부분배수사고(Partial Loss-of-Coolant Accident)와 공기만 공존하는 조건에서 진행되는 냉각재 완전배수사고(Complete Loss-of-Coolant Accident)가 있다. 냉각재 부분배수사고 연구에 대해서는 많이 이루어지고 있지만, 완전배수사고에 대한 연구는 미흡한 것으로 알고 있다. 냉각재 완전배수사고 가능성은 실제로 매우 희박하지만, 테러나 자연재해(지진, 해일)로 인해 발생할 수 있다.

SFP 냉각재 완전배수사고는 랙 바닥이 드러나도록 배수 되며 외부 공기가 SFP 사용후연료 하단으로 유입되는 공기순환 형태(Air circulation patterns)를 보일 것이다. 그리고 공기와 피복관의 산화반응으로 인해 후행폭주현상(Post-Breakaway)이 나타날 것으로 예측된다. 또한 사용후연료 부분노출사고와 달리 생성되는 수증기가 없기 때문에 수소폭발은 발생하지 않을 것이다[1].

본 연구는 MELCOR 1.8.6 SFP Version 모델을 사용하여 SFP 냉각재 완전배수사고 시 중대사고분석을 실시하였다. 기본입력 자료는 Sandia National Laboratory (SNL)에서 수행한 연구 자료를 참고하여 입력하였다[2].

모의에 적용한 대상 원전은 열 출력이 3,500 Mwt이면서 가동시간 2 년, 정지 후 시간은 1.2 년인 PWR 발전소를 가정하여 모의하였고, SFP 내 저장된 모든 핵연료 집합체는 웨스트하우스형 원전에서 사용되는 17×17 형태를 사용하였다. 이때, SFP 내 총 붕괴열은 9.0 Mwt로 가정하였고, 저장조 천장에 위치한 환기시스템은 가동되지 않는 조건으로 설정하였다.

중대사고 분석 이후 SFP 폭주 산화현상을 완화할 수 있도록 총 붕괴열 및 배기용량 효과, rack hole 사이즈 효과, 핵연료 출입문 개방효과 등 핵연료손상과 연관된 주요 인자를 사용하여 민감도 분석을 실시하였다.

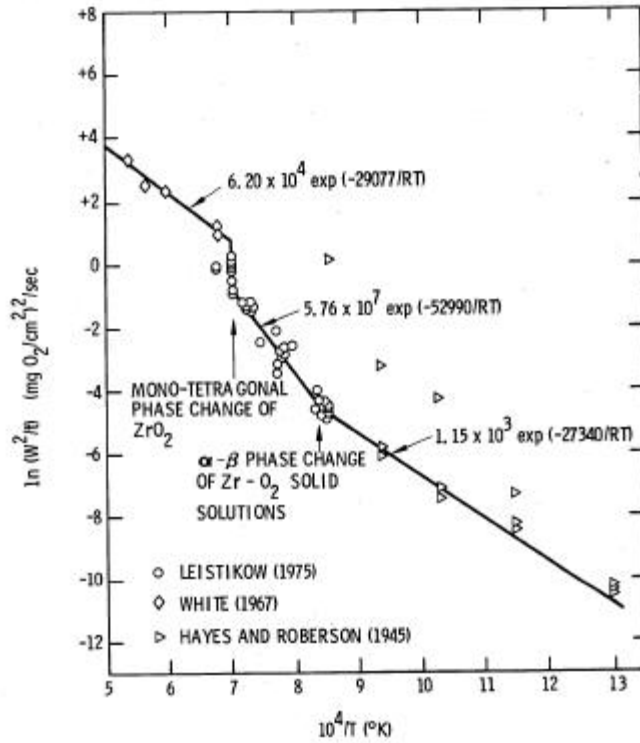
이 논문은 SFP 완전 노출사고 분석에 중요한 모델설명과 입력 작성 내용에 이어 사고 모의 결과 및 민감도 분석결과를 보여주며 마지막으로 결론 순으로 구성 되어 있다.

II. SFP 내 공기산화반응 모델

SFP에서 사고 시 대기는 수증기와 공기가 섞여있거나 완전한 공기 조건하에 있을 수 있다. 수증기와 지르칼로이 금속간에 산화 현상에 대해서는 이미 많은 자료와 상관식이 제시되고 있지만 공기에 관한 산화반응식은 자료가 부족한 상태이다.

먼저 Hayes 와 Roberson가 광역 온도 구간에 대해서 습한 공기 조건하에서 순수 지르코늄의 산화 두께를 측정하였다.[3] 그러나 이 측정치들은 온도 측정값에 불확실성이 큰 것으로 알려져 있다. 이후 White 가 건조 공기하에서 순수 지르코늄에 대한 정확한 자료를 측정하였다.[4] 그러나 고온 (1473.15 K 이상)에 대한서만 측정이 수행되었다.

가장 최근에 Leistikow 는 광역 온도 범위에서 공기 조건하에서 지르코늄-4 금속에 대한 산화 반응 자료를 측정하였다.[5] 순수 지르코늄과 지르코늄-4 간에 산화반응 특성차이는 거의 없는 것으로 판단된다. 또한 저온에서의 공기에서 지르칼로이 금속의 산화반응은 수증기에서의 산화반응과 유사하였다. [Fig. 1]는 온도에 따른 지르칼로이 금속의 산화반응 계수 값 변화를 보여준다.



[Fig. 1] Reaction Rate Correlation For Air Oxidation of Zircaloy

공기와 금속간의 산화반응시 금속이 접하고 있는 공간내 산소 농도의 정도에 따라서 반응이 진행되는 특성이 구분된다. 첫째 공간내 산소 농도가 충분한 경우, 산화 반응은 아래식과 같이 표현되는 포물선율 법칙(parabolic rate law)에 따라서 진행된다.

$$2W \frac{dW}{dt} = K_o \exp(-E_a/RT) \quad (1)$$

단 W = 무게증가 [mg O₂/cm²]

t = 시간 [초]

E_a = 활성화에너지 [cal]

R = 가스 상수 = 1.987 [cal/°K]

T = 온도 [°K]

두번째 공간내 산소 농도가 매우 낮은 경우시 산화 반응은 산화반응이 진행되는 금속 표면으로의 산소 분자 확산 크기에 관계된다. 질량 전달을 묘사하는 식은 열 전달과 질량전달간의 유사성을 고려하여 Pr 수 대신에 Sc 수를 대체하여 아래와 같이 표현된다.

$$N_m = N_h (Re, Gr, Sc) \quad (2)$$

단 Re= Reynolds 수

Gr= Grashoff 수

Sc= Schmit 수

$$\frac{dW}{dt} = \frac{\rho_a D_{on} N_m m_o}{x} \quad (3)$$

단 ρ_a = 공기 밀도

D_{on} = 질소내 산소 확산 계수

m_o = 수증기내 산소의 질량 분율

x = 경계층 두께

위식은 포물선율 법칙(parabolic rate law)으로부터 구한 값 크기가 위식, 즉 확산 현상으로부터 구한 값보다 작아지면 적용한다.

MELCOR 코드 경우 공기와 금속간 산화반응은 다음과 같이 모의한다. 저온에서의 산화 반응식은 (1)식을 적용한다.

$$K(T) = 50.4e^{-14630/T} \quad (3)$$

단, $K(T)$ = 산화반응을 상수 계수 값 $[\text{kg}^2(\text{zr})/\text{m}^4\text{-s}]$

T = 금속 온도 [K]

그러나 산화 반응이 급격하게 진행되는 시점은 수명 분율 규칙 (Life fraction Rule)을 적용한다. 식 (2, 3, 4)을 적용하여 수명 분율 Life Fraction(LF)값을 사용자가 지정한다. 지정한 값에 도달되면 급격한 산화반응을 모의하는 아래와 같은 소위 후행 폭주 반응식(5)을 적용하게 된다.

$$P_{LOX} = -12.528L \log_{10} T + 42.038 \quad (4)$$

$$\tau(T) = 10^{P_{LOX}} \quad (5)$$

$$LF = \int_0^t \frac{t'}{\tau(T)} dt' \quad (6)$$

$$K(T) = 2970 e^{-19680/T} \quad (7)$$

만일 부분 배수 사고와 같이 수증기와 공기가 혼재한 조건에서는 수증기 산화 모델과 공기 산화 모델이 모두 작동하여 두 현상 중 큰 현값을 보이는 현상으로 부터의 산화반응을 모의한다. 또한 수증기가 모두 소모될 때 까지 공기의 소모는 시작되지 않는다.

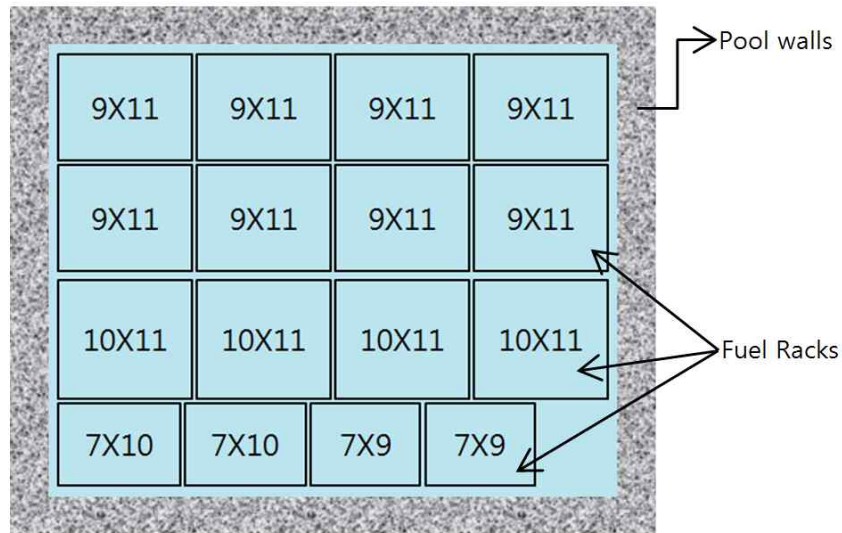
Ⅲ. PWR-SFP 사고 모의용 MELCOR 입력 작성

1. SFP 완전노출사고 모의 입력

일반적인 PWR-SFP 완전 노출 사고를 모의하기 위해 SNL에서 수행된 선행연구 자료 내 SFP 관련 제원과 핵연료집합체 제원을 참고하여, 이 연구에서 필요한 SFP 제원들을 입력하였다.

1.1 SFP 기본 입력 값

SFP Pool 가로, 세로, 높이길이는 각각 10.4394 m, 8.636 m, 12.6492 m이며 SFP Storage Rack 높이는 4.1884 m, SFP 수위는 7.6577 m이다. 총 붕괴열은 9.0 MWt 로 설정하였고, Pool 내부 총 Rack의 수는 1498개(Ring 1 : 792개 Ring 2 : 440개 Ring 3 : 266개), 총 Module의 수는 총 16개로 설정했다.[Fig. 2 참고] Pool의 총체 적 값은 1075.057 m³ 이며, 초기온도는 333.15 K로 설정하였다. <Table. 1 참고>



[Fig. 2] Loading Pattern of Spent Fuel and Rack

<Table. 1> Parameter of the SFP

Parameter	Value
Pool dimensions	10.4394×8.63×12.6492 (m ³)
Rack length	4.1884 (m)
Water Level	7.6577 (m)
Total decay heat	9.0 (Mwt)
Total number of racks	1498
Number of modules	16
Pool volume	1075.057 (m ³)
Pool temperature	333.15 (K)

1.2 핵연료집합체 기본 입력 값

이 연구에서 입력은 PWR형 원전에서 사용되는 17×17 형태 핵연료집합체를 적용하였다. 핵연료집합체당 연료봉을 289개 저장할 수 있으며, 264개의 핵연료봉이 있다. 피치(pitch)는 0.01256m 이고 피복재 두께는 0.00057 m, 핵연료 집합체당 UO_2 질량은 461 kg이다.

<Table. 2> Parameter of the Fuel Assemblies

Parameter	Value
Rod type	17 × 17
Number of fuel rods	264
Number of non-fuel rods	25
pitch	0.01256 (m)
Total number of assemblies in core	193

1.3 열 수력 공간 입력

SFP 시설 내 열 수력적 공간은 CVH(Control Volume Hydrodynamics) 패키지를 통해서 수행한다. 물, 수증기 및 비 응축성 기체와 같은 유체가 점유하고 이동할 수 있는 전체 공간을 열 수력적 조건들, 예를 들면, 공간 내 압력과 유체별 온도 그리고 공간별 특성(=핵연료 저장지역)을 고려하여 구분, 정의하였다. 이후 Flow Path (FL)패키지에서 정의하는 유로를 이용하여 개별 공간들을 서로 연결시켜서 유체를 이동하게 함으로서 전체 SFP 계통에 대한 열 수력적 공간 구조를 구성하였다.

구분한 개별 공간은 축 높이에 따라 세분한 각각의 해당 부피 값들을 지정하여, 개별 공간의 다양한 모양을 고려하였다. 또한 각 공간 내 수위 지정을 통해서 물, 수증기, 비 응축성 가스의 양을 지정하였고 초기 압력이나 유체 온도 등 개별 공간 내 열 수력적 초기 조건들을 지정하였다.

SFP 계통 모의를 위해서 총 10개의 열 수력 공간을 사용하였다. 그러나 이 같은 개별 공간 지정 시 SNL에서 수행한 SFP 전체 계통 내 유동 흐름을 예측한 CFD 해석 결과를 참조하여 개별 공간을 구성하였다.[6] 단 수조 상단에서 국부적으로 형성되는 열구름 (thermal plume)과 이 열구름의 배기장치를 통한 누설 현상은 고려에서 제외하였다. 전체 공간의 압력은 모두 동일하게 1.0 bar 로 가정하였다. 각 개별 공간의 열 수력적 조건과 기능은 다음과 같다.[Fig. 3 참고]

먼저, 축 방향으로 핵연료 저장조 바닥면부터 저장된 핵연료 집합체 와 랙 구조물을 지지하고 있는 지지 판 까지를 포함하는 공간을 130번으로 정의하였다. 이 공간에는 상부에 존재하는 핵연료 집합체 와 랙 구조물을 지지하고 있는 지지 관 (supporting pipe) 이 있다. 이 공간은 초기에는 냉각수로 덮여 있지만 완전 냉각재 상실 이후, 공기에 노출되어, 이후 외곽 캐스크 (cask) 공간을 통해서 아래쪽으로 유입되는 찬 공기가 이 공간 외곽에서부터 수평방향으로 유입된 후, 랙 하단 구멍을 통해서 수직 상부 방향으로 랙 내부에 담겨있는 상부 핵연료집합체로 공급되게 된다.

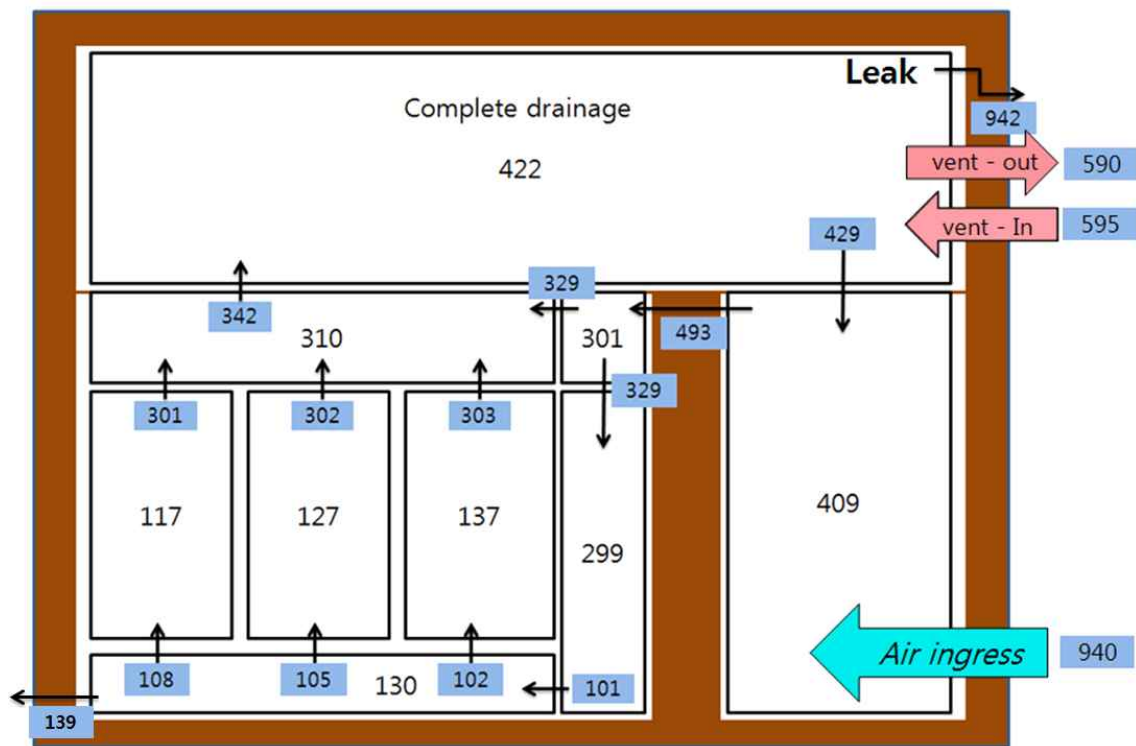
축 방향으로 130번 공간 위쪽은 지지 판 높이에서 부터 핵연료 집합체와 랙 구조물 상단 높이 까지를 포함하는 빈공간이다. 이 공간에는 랙 하단부에 유체가 유입될 수 있는 구멍들이 위치하고 있다. 랙 당 유체 통과를 위한 구멍은 2개씩이며, 각 구멍의 직경은 0.24 m 로 설정하였다. 특히 이 공간은 동심의 3개 영역으로 세분 각각을 중심부터 117, 127, 137 번의 3개 공간으로 지정하였다. 이 3개 공간에는 핵연료봉 및 집합체, 랙 구조물, 기기 봉 (instrument rod)등이 위치하는 공간으로 초기에는 냉각수에 모두 잠겨있지만 추후 냉각재 완전 상실시 공기와의 산화반응으로 대량의 열 발생과 핵연료 봉 손상이 예상되는 공간이다. 랙과 랙 사이 미세 공간은 랙 내부인 유로 공간에 포함 시켰다. 즉 우회 공간은 무시하였다.

310번 공간은 축 방향으로 핵연료 집합체와 랙 구조물의 상단 높이부터 수조 측면 캐스크 벽 상단 높이 까지를 포함하는 빈 공간이다. 이 공간은 핵연료 봉을 통과하면서 가열된 고온의 공기가 방출되어 모이는 공간이다. 사고 이전에는 이 공간 높이의 46% 수위, 7.6577 m 를 유지하고 나머지 공간은 대기가 존재하는 것으로 지정하고 초기 대기와 냉각수 온도는 모두 370 K 로 지정하였다.

422번 공간은 축 방향으로 수조 측면 캐스크 벽 상단 높이에서 부터 SFP 시설 최상단 (=천장) 높이 까지를 포함하는 매우 큰 공간이다. 이 공간에는 크레인을 비롯한 핵연료 이동을 위한 설비 그리고 공간 최상단부에 배기 장치관련 시설이 위치한다.

409번 공간은 SFP 수조와 인접해서 연결되어 있는 공간이다. 축 방향으로 SFP 바닥 면 과 같은 높이부터 수조의 측 벽면 캐스크 상단 높이 까지를 포함하는 공간이다, 이 공간 내 대기 온도는 상대적으로 저온 상태를 유지하고 있다. 이 공간에는 사용 후 핵연료 이송을 위한 차량 유입용 문이 존재하며 여러 계단과 SFP 수조 내 냉각수 수위 와 온도 조절을 위한 시설 공간이 존재한다. 이 공간에는 대기만 존재한다.

301번과 299번 공간은 수조 측면의 캐스크 내부 공간을 구성한다. 301번은 상단, 299번은 하단 공간을 각각 나타낸다. 이 공간을 통해서 사용 후 핵연료가 유입되게 되며 정상 운전 시 핵연료 집합체가 담겨있는 수조와 연결된 유로가 존재한다. 초기에는 냉각수에 잠겨있지만 냉각수 상실 이후 공기에 노출된다. 이 공간은 위에서 언급한 409 번 공간 내 저온 공기가 캐스크 상단 벽을 넘어 (carry-over) 캐스크 공간 내부를 연속적으로 하향, 통과하여 핵연료집합체 와 랙을 지지하고 있는 지지판 하부의 130번 공간으로 유입된다.



[Fig. 3] Nodalization of SFP and Building

1.4 연결유로 입력

개별 공간들을 연속적으로 유체가 이동할 수 있도록 하는 유로 입력은 FL 패키지에서 수행한다. 한 개의 유로는 두 개의 열 수력적 개별 공간을 연결한다. 유로 방향을 지정하기 위해서 연결된 유입 공간과 배출 공간을 지정하였다. 각 유로는 면적과 방향, 길이, 열수력적 직경, 형상 손실이나 유동 특성(층류, 난류)에 따른 마찰계수 값을 지정하여 유로를 통해서 개별 공간에서 발생된 압력 변화를 모의하도록 하였다. 또한 특정 유로에는 사용자가 밸브를 지정하여, 유로의 개폐와 유량을 조절하도록 하였다.

SFP 계통 전체 유동은 [Fig. 3]과 같이 동작하는 것을 가정으로 유로를 개별 공간들과 연결하였다.

먼저 냉각재 상실 사고 이전에는 SFP 시설 내 공기 유동이 무시할 만 할 것이다. 그러나 냉각재 상실 사고 이후는 핵연료 출입문이 있는 409 번 공간의 찬 공기가 캐스크 측벽의 상단 부를 넘어 캐스크 공간 내부를 통해서 수조 최하단부인 130번 공간으로 유입될 것이다. 유입된 찬 공기는 직경 0.127m 의 지지 관 구멍들을 통해서 하단부로 부터, 3개 링 내 랙 내부 공간에 존재하는 핵연료집합체들을 통과해서 붕괴열을 제거하여 핵연료집합체 상단 공간인 310 번 공간으로 방출될 것이다.

가열된 이 공기는 SFP 상단 공간인 402번 공간으로 상승한 후 벽면과의 열전달로 냉각되거나 누설 (leak) 되거나 배기 장치를 통해서 강제로 대기로 방출될 것이다. 누설이나 방출되지 않은 공기는 연속적으로 핵연료 출입문이 있는 409 번 공간으로 이동하여 앞에서 언급한 방식으로 계속적으로 계통을 순환할 것이다.

냉각재 상실 사고 모의는 수조 하단부에 대기 방출을 위한 유로와 밸브를 지정하여 시간에 따른 밸브 개폐로 냉각재 상실을 모의하도록 하였다. 이 연구 경우 500 초에 밸브가 개방되어 냉각재 상실이 시작되는 것으로 가정하였다.

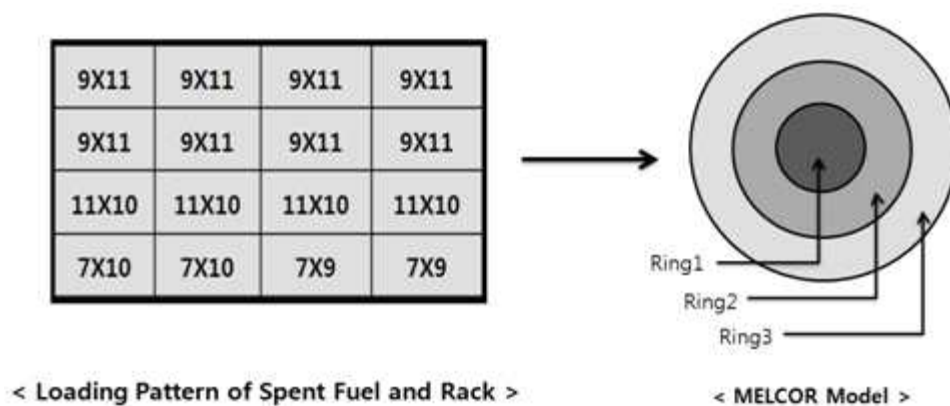
누설 위치는 임의로 2곳을 지정하였다. 첫째는 핵연료 출입 시 출입문이 설치되어 있는 409번 공간이다. 출입문 완전 개방 면적 37.0 m^2 의 약 0.2%가 상시 열려 있다고 가정하였다. 두 번째는 SFP 시설 최상부 공간인 천장에 대기 누설을 가정하였다. 누설 구멍 면적은 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 으로 가정하였다.

배기 작업은 SFP 최상단 공간인 409 공간의 최대 높이에서 가동된다고 가정하였고, 용량은 일반적인 PWR SFP 시설에서 정상 운전 배기량인 $84,950.539 \text{ m}^3/\text{hr}$ 를 기본으로 결정하였다. 입력한 배기 유로 면적과 정상 운전 배기량을 고려하여 약 13 m/s 속도로 배기하도록 입력하였다. 배기 용량에 따른 사용후연료 최대 온도 값에 미치는 효과를 평가하기 위해서 민감도 분석을 수행하였다.

1.5 붕괴열 입력

붕괴열 입력은 Core(COR), Decay Heat(DCH) 그리고 Radionuclide(RN) 패키지에서 수행한다. SFP 내 시간에 따른 전체 붕괴열 준위 값 입력을 결정하기 위해서는 저장조 내 전체 핵연료 다발들에 대한 노심 인출 이전 운전 정보와 인출 시점들에 관한 정보가 필요하며 이후 ORIGEN코드를 통한 붕괴열 산출 작업이 요구된다. 그러나 이 연구에서는 ANSI/ANS5.1 모델에서 사용된 붕괴열 계산식을 이용하여 총 붕괴열을 계산하였다.[7]

저장조 내 있는 전체 핵연료 집합체들이 붕괴열 관점에서 영역별로 좌우 대칭형이 아니고 비대칭 형태일 것으로 예상된다. 그러나 현재 MELCOR 코드의 비대칭 저장 형태에 대한 모의 능력 제한점을 고려하여 붕괴열 관점에서 저장된 핵연료는 [Fig. 4]와 같이 반경방향으로 대칭 형태인 것으로 가정하였다. 모의 대상 원자로는 일반적인 PWR 발전소를 가정(UO₂ 총 질량 = 104.735 t, 열출력 = 3,500 Mwt, 가동시간 = 2 년, 정지 후 시간 = 1.2 년)하였고, 이때 총 UO₂ 질량당 붕괴열 값을 계산하였다. 이후 저장조 각 링에 저장된 UO₂ 질량 (Ring 1 = 418.283 t, Ring 2 = 232.379 t, Ring 3 = 140.483 t)만큼 곱하여 총 붕괴열 크기(9.0 Mwt)를 추정하였다. 다시 이를 링 별로 반경 및 축 방향 출력 침투 계수(peaking factor)를 적용하여 배분하였다. 사용후연료의 축과 반경 방향 침투 계수 값은 사용 후 핵연료인 점을 고려하여 축과 반경방향으로 균일한 계수 값을 가정하였다.



[Fig. 4] Modeling of SFP Loading Patten in MELCOR

1.6 구조물 입력

사용후연료 공간물질을 제외한 열 수력적 공간 내 포함된 모든 구조물, 예를 들면, 벽이나 천장 또는 바닥면, 공간 내 설치된 구조물과 공간 내 유체와의 열전달을 HS (Heat Structures) 패키지에서 모의한다. 필요한 입력은 구조물의 열수력 공간 내 위치, 열전달 방향 (수평, 수직), 기하학적 형태(판, 원통, 구형, 반구형) 과 기하학적 형태 (두께, 축 길이), 구성 물질에 관한 정보를 입력해야 한다.

SFP 수조와 관련하여 수조와 접한 바닥면, 벽면 그리고 캐스크 벽면을 열구조물로 고려하였다. 축 방향으로 수조 상단부 높이 부터 SFP 건물 천장 높이와 관련하여서는 건물 측벽면, 천장 그리고 바닥면을 고려하였다. 특히 이 바닥면 높이 (캐스크 상단 수평 높이) 상에 존재하는 구조물은 비대칭적이며 높낮이의 변화가 많은 구조물들로 구성되어 있기 때문에 모의 시 편의를 위해서 대표적인 바닥면들만을 고려해서 입력을 단순화하였다. 이 부분에 관한 정확한 구조물 입력 작성을 위해서는 실제 이 부분에 관한 SFP 시설에 자료가 필요하다.

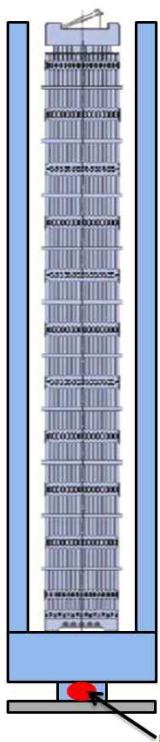
핵연료가 출입하는 공간은 실제로 수조 냉각수의 수위나 온도 제어를 위한 시설들을 포함하고 있고 여러 방과 시설들로 구성되어있다. 그러나 모의 단순화를 위해서 공간 내 바닥면과 벽면측만을 고려하였다.

1.7 COR 입력

COR 패키지는 기본적으로 PWR 이나 BWR 노심에서 진행되는 중대사고 현상을 모의하기 위해서 개발되었다. 따라서 SFP 시설 내 수조에 담겨있는 핵연료 집합체와 랙을 포함한 공간을 모의하기 위해서는 기존 발전소 노심 모의용 모델이외에 SFP 시설을 고려한 새로운 모델의 보완이 필요하다.[8]

PWR 노심과 SFP 시설의 사용후연료 부분 모의 시 예상되는 기하학적, 현상학적 주요 차이점은 다음과 같다. 첫째 SFP 경우 노심 내 핵연료 집합체 간에 랙 구조물이 존재한다. 두 번째는 노심이 원통의 원자로 용기 대신 사각의 콘크리트 구조물에 둘러 쌓여있다. 세 번째는 하부 반구가 존재하지 않는다. 네 번째 핵연료 저장 형태가 연소도나 인출시점 관점에서 축대칭 형태가 아니며 이에 따른 복사열 전달 현상도 비대칭적이다. 다섯째 완전 냉각재 상실 이후, 대기 조건하에서 매우 유동 속도가 낮은 자연대류 현상과 산화반응이 예상된다.

COR 패키지 입력은 SFP 시설중 수조의 바닥부터 핵연료집합체와 랙 구조물 상단 높이 까지를 노심 영역으로 포함한다. 이 노심 영역은 다시 2개의 공간으로 세분된다. 즉 수조 바닥부터 지지 판 까지 높이 공간을 하부 플리넘 공간, 이후 지지판에서 부터 핵연료집합체와 랙 상단 높이 까지를 유효 노심 (active core)공간으로 각각 구분하였다. 원자로 용기는 사각 콘크리트 길이를 고려한 유효 반경의 콘크리트로 대체하였다. 하부 플리넘 내 하부 반구 벽은 수조 단면적을 고려한 반경의 콘크리트 반구로 가정하였다. 아래 [Fig. 5]는 핵연료 재장전수 노심 노드모델을 나타낸다.[9]



Axial Level		Ring 1		Ring 2		Ring 3	
		Core Cell #	CV	Core Cell #	CV	Core Cell #	CV
17	Top nozzle and top of racks	COR117	CV117	COR217	CV127	COR317	CV137
16	unheated plenum region, to exit nozzle	COR116		COR216		COR316	
15	heated fuel 12	COR115		COR215		COR315	
14	heated fuel 11	COR114		COR214		COR314	
13	heated fuel 10	COR113		COR213		COR313	
12	heated fuel 9	COR112		COR212		COR312	
11	heated fuel 8	COR111		COR211		COR311	
10	heated fuel 7	COR110		COR210		COR310	
9	heated fuel 6	COR109		COR209		COR309	
8	heated fuel 5	COR108		COR208		COR308	
7	heated fuel 4	COR107		COR207		COR307	
6	heated fuel 3	COR106		COR206		COR306	
5	heated fuel 2	COR105		COR205		COR305	
4	heated fuel 1	COR104		COR204		COR304	
3	lower nozzle, debris grid	COR103		COR203		COR303	
2	baseplate, lower nozzle	COR102		COR202		COR302	
1	pipe, below baseplate	COR101		COR201		COR301	

[Fig. 5] Nodalization of Core in SFP

COR 패키지는 노심 영역을 축과 반경 방향(=링) 으로 구분되는 셀(cell)이란 기본 구조(사각형)로 나누어 셀별, 존재하는 부품별, 물질별 각각의 질량, 표면적을 입력한다. 이 연구에서는 축 방향으로 17개 반경 방향으로 3개로 구분하였다. <Table 3>은 노심 내 셀별 높이 값과 유동 면적을 보여준다.

<Table 3> Height and Flow Area of The Axial Level in Core

Axial Level	height (m)	Ring 1	Ring 2	Ring 3
		Flow Area (m ²)	Flow Area (m ²)	Flow Area (m ²)
17	4.1884	20.0	21.86	13.56552
16	4.0463	20.0	21.86	13.56552
15	3.9346	19.69273	10.94041	6.61397
14	3.6335	19.69273	10.94041	6.61397
13	3.3324	19.69273	10.94041	6.61397
12	3.0313	19.69273	10.94041	6.61397
11	2.7302	19.69273	10.94041	6.61397
10	2.4291	19.69273	10.94041	6.61397
9	2.128	19.69273	10.94041	6.61397
8	1.8269	19.69273	10.94041	6.61397
7	1.5258	19.69273	10.94041	6.61397
6	1.2247	19.69273	10.94041	6.61397
5	0.9236	19.69273	10.94041	6.61397
4	0.6225	19.69273	10.94041	6.61397
3	0.3214	19.69273	10.94041	6.61397
2	0.1651	23.832	13.24	8.0043
1	0.1524	47.665	26.481	16.008

또한, 셀별로 전도, 대류 복사의 중요 열전달을 모의한다. 셀 내부와 셀 간의 여러 부품들 사이에 열전달뿐만 아니라 셀 경계 구조물과 열전달도 포함한다. <Table 4>는 노심 내 위치별(셀) 물질별 질량 분포를 보여준다.

<Table 4> Mass Value of The Axial Level in Core

Axial Level	Ring 1			Ring 2			Ring 3		
	UO ₂ (kg)	Zr (kg)	Steal (kg)	UO ₂ (kg)	Zr (kg)	Steal (kg)	UO ₂ (kg)	Zr (kg)	Steal (kg)
17	0	0	4331.93	0	0	2439.96	0	0	1454.15
16	0	0	3369.36	0	0	1960.75	0	0	1264.45
15	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
14	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
13	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
12	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
11	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
10	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
9	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
8	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
7	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
6	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
5	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
4	34856.9	7069.71	8551.92	19364.9	3927.61	4751.07	11706.9	2374.42	2872.23
3	0	0	230	0	0	120	0	0	80
2	0	0	1440.12	0	0	800.066	0	0	483.675
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	418283.06	84836.56	111994.54	232379.48	47131.42	62333.63	140483.95	28493.08	37749.15

복사 열전달관련 복사 열전달하는 쌍(pair)별 5종류의 형상 계수(view factor) 값을 입력한다. 첫째 BWR 조건 시 카니스터(canister)와 핵연료봉, 두 번째 핵연료봉과 파쇄층, 세 번째 셀 경계면 상에서 반경방향, 네 번째 셀 경계면 상에서 축 방향, 다섯 번째는 수면과 기타 부품간의 형상 계수 값 들이다. 현재 순서대로 0.25, 0.25, 0.1, 0.1, 0.25 의 값을 입력하였다. 그러나 현재 코드의 복사 모델은 대칭성 구조 해석을 기본으로 개발되어 있다. 이 같은 형상계수 값은 과도기간 동안 변화하지 않지만 부품의 면적은 노심 손상에 따라서 변화된다.

노심의 축과 반경 방향 침투 계수 값은 사용 후 핵연료인 점을 고려하여 축과 반경방향으로 균일한 침투 계수 값을 가정하였다. 노심 내 링별 면적(유로+구조물)은 사각형의 수조 단면적을 기본으로 한 개의 핵연료집합체와 랙이 차지하는 단면적을 산출한 이후, 이 단면적 값을 링별로 존재하는 해당 랙 개수를 고려하여 분배, 산출하였다. 또한 셀별(=링별) 유로 점유 단면적은 해당 셀의 총 단면적에서 셀 내 존재하는 총 핵연료와 랙의 단면적을 산출해서 이를 감하여 구하였다.

셀은 용융 물질이 재배치(촛농흐름=candling)되어 유입하여 응고되거나 핵연료봉이나 기타 손상된 고체의 노심 물질 (파쇄물질, particulate debris)이 유입될 수 있다.

노심 용융 시 공융 (Eutectic)현상은 고려하지 않았다. 촛농 흐를 시 물질별 핵연료봉과의 열전달계수 값은 UO_2 , Zr, ZrO_2 경우는 $7500 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 기타 물질은 $2500 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 로 가정하였다. 고체 물질이 유입되는 경우, 일반적인 파쇄층의 내재된 다공성을 고려하여, 셀에 유입되는 파쇄층 양에 대해서 해당 다공성 값을 입력 시 지정하여 제한한다. 현재 생성되는 노심 내 모든 파쇄층은 총 부피의 40%를 다공 (porosity)으로 포함한다고 가정하였다.

지지와 비지지 구조물 부품은 다른 노심 부품을 지지할 수 있거나(노심 지지구조물) 지지할 수 없는 (제어봉 또는 제어봉 날개) 능력에 주요 차이점이 있다.

비지지 구조물(NS) 은 PWR 경우, 제어봉 그리고 자신 이외에는 어떤 것도 지지할 수 없는 구조 물질을 나타내기 위한 것이다. 이 연구에서는 모든 위치의 랙 구조물을 비지지 구조물로 정의하였고, 랙 손상은 구성하고 있는 스테인레스 스틸의 용융 온도 (1700 K)에 도달되면 손상되는 것으로 모의하였다.

한편, 다른 노심 부품들을 지지할 수 있는 능력을 가진 핵연료집합체와 랙을 지지하고 있는 지지 관과 지지 판을 노심 내 지지 구조물(SS)로 지정하였다. 지지 구조물의 손상은 지지 구조물, 즉 지지관이 위치한 높이와 지지판이 위치한 높이에 대하여 각각 다르게 지정하였다. 지지관의 경우는 1700 K 에 도달되면 손상되며, 지지 판의 경우는 상부에 존재하는 구조물과 파쇄층 질량 그리고 지지 판 온도를 이용하여 예측된 부하가 손상 부하 값에 도달되면 해당 링 상부 물질이 모두 재배치되는 것으로 모의하였다.

1.8 RN 입력 설명

손상 핵연료로부터 핵분열생성물의 방출, 발생된 에어로졸의 입자 크기별 거동, 공간 간 이송, 공간 내 제거 그리고 증기 핵분열 생성물의 응축, 재 증발, 또한 핵연료봉의 파열과 총 붕괴열을 노심 내 위치별로 분배하는 모든 기능을 RN에서 수행한다.

모의한 핵종은 총 17개 클래스 (class) 로서 <Table 5>와 같다. MELCOR_1.8.6 코드는 Cs_2MoO_4 의 거동을 모의할 수 없다. 그러나 이 연구에서는 모의가 가능하도록 CSARP 발표 자료를 참고하여 입력을 구성하였다.

<Table 5> RN Class Compositions

Class Name	Representative	Member Elements
1. Noble Gases	Xe	He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, H, N
2. Alkali Metals	Cs	Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, Cu
3. Alkaline Earths	Ba	Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Es, Fm
4. Halogens	I	F, Cl, Br, I, At
5. Chalcogens	Te	O, S, Se, Te, Po
6. Platinoids	Ru	Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt, Au, Ni
7. Early Transition Elements	Mo	V, Cr, Fe, Co, Mn, Nb, Mo, Tc, Ta, W
8. Tetravalent	Ce	Ti, Zr, Hf, Ce, Th, Pa, Np, Pu, C
9. Trivalent	La	Al, Sc, Y, La, Ac, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Am, Cm, Bk, Cf
10. Uranium	U	U
11. More Volatile Main Group	Cd	Cd, Hg, Zn, As, Sb, Pb, Tl, Bi
12. Less Volatile Main Group	Sn	Ga, Ge, In, Sn, Ag
13. Boron	B	B, Si, P
14. Water	H ₂ O	H ₂ O
15. Concrete	--	--
16. Cesium Iodide	CsI	Classes 2 and 4
17. Cesium Molybdate	Cs ₂ MoO ₄	Cs ₂ MoO ₄

CsI 와 Cs_2MoO_4 핵종을 각각 16번과 17번 클래스로 포함하였다. CsI 와 Cs_2MoO_4 모의 시 문제점은 독립적인 클래스인 Cs 가 독립적인 클래스인 I 나 Mo 과 동시에 방출되고 결합되어 생성될 때 얼마만큼의 Cs가 I 나 Mo 과 결합할 수 있는지를 모른다는 점이다. 따라서 방출후 결합되는 방식보다는 방출전 CsI 와 Cs_2MoO_4 형태로 미리 핵연료내 존재한다고 가정하였다. 이때 CsI 와 Cs_2MoO_4 존재 양을 사용자가 계산 전 지정하는 작업을 소위 사전정지 (pre-populate) 작업이라 한다.

또한 Cs_2MoO_4 핵종 추가로 인한 물성치인 분자량 (425.75)과 해당 증기압 자료를 입력하였다. 600 K 이하에서는 고체 (에어로졸), 1229.5 K 이상에서는 마지막 값을 외삽, 사용한다.

$$\text{Log}_{10}(\text{증기압} = p[\text{mmhg}]) = -A/T + C \times \text{Log}_{10} T \quad (8)$$

T [K]	600.0	1229.5
A	13600.0	12100.0
B	8.895	7.675
C	0.0	0.0

핵분열 생성물 방출은 MELCOR가 내장한 8개 모델 중 1985년 개발된 핵연료 손상 에 따른 형태 변형 (표면적/부피)이 핵분열 생성물 방출에 미치는 효과를 고려한 CORSOR-M 모델을 선택하였다.

핵연료 피복관이 파열 (rupture) 되기 전 간극 내 존재하는 핵분열 생성물 양은 Cs 경우 초기 재고량의 0.5할, CsI 경우는 초기재고량의 0.5할이 존재하는 것으로 가정하였다. 이때 피복관 파열 온도는 1173 K 로 가정하였다.

에어로졸 거동 모델은 MAEROS 코드와 동일하며, 에어로졸은 물과 핵분열생성물 2개 콤포넌트로 구성된 것으로 가정하였다. 최소 에어로졸 크기 직경과 최대 에어로졸 직경 크기는 각각 $1.0E-6$ m, $5.0E-5$ m 로 가정하였고 에어로졸밀도는 1000

[kg/m³] 로 가정하였다.

핵연료 재배치에 따른 붕괴열의 이동 그리고 핵분열 생성물 방출, 이송에 따른 붕괴열 추적을 위해서 총 붕괴열을 노심 내 링별, 위치별로 분배하도록 입력을 구성하였다. 총 붕괴열 분배는 노심 내 위치별 축과 반경 방향 침투 계수와 해당 위치 내 핵연료 질량(=UO₂)을 이용하였다.

개별 공간 내 부유된 에어로졸은 최대 입자 크기로 성장되면 바닥면으로 낙하되어 부착한다. 그러나 바닥면에 부착 구조물이 존재하지 않을 경우 (예: 여러 개별 공간으로 나뉜 긴 수직 관), 낙하한 에어로졸이 인접 하부 개별 공간으로 이송될 수 있기 위한 낙하 허용 면적과 높이를 지정해 주어야한다. 따라서 SFP 최상단 공간인 422번 공간에서 인접한 하단 공간인 310번, 310번 공간에서 핵연료다발이 저장되어 있는 117, 127, 137 번 공간, 핵연료 다발이 저장된 117, 127, 137 번 공간에서 SFP 최하단 공간인 130 번 공간 그리고 마지막으로 SFP 최상단 공간 422번 공간에서 핵연료 출입문 공간인 409번 공간으로의 에어로졸 낙하가 가능하도록 입력을 구성하였다.

2. 민감도 카드 및 입력 설명

민감도 카드는 MELCOR에서 사용되는 함수식이나 현상 시작 및 발생 시점 값을 사용자가 변경할 수 있도록 해준다. SFP 완전 노출 사고를 모의하기 위해 아래와 같은 변수들을 이 연구 목적에 맞게 변경하였다.

- SC1001

공기와 지르칼로이 (Zr)의 선행 폭주(Pre-breakaway) 산화 계수는 모든 온도에서 아래 식을 사용하도록 설정 하였다.

$$K(T) = 50.4 e^{-14630/T} \quad (9)$$

- SC1004

공기 산화 반응을 시작 하기위한 최소 온도를 600K로 설정 하였다.

- SC1016

공기와 지르칼로이의 후행 폭주 (Post-Breakaway) 시 산화 계수는 아래 식을 사용하도록 설정 하였다.

$$K(T) = 2970 e^{-19680/T} \quad (10)$$

- SC1017

이 계수는 선행 폭주 산화반응 시 피복관 손상 예상 시간 예측을 위한 P_{LOX} 값을 구하기 위해 사용한다. 이후 P_{LOX} 값은 손상 예상 시간 $\tau = 10^{P_{LOX}}$ 를 구하게 된다.

- SC1018

기본적으로 이 값이 1 에 도달될 때 후행 폭주 산화반응이 시작 되도록 설정 되었지만 이 연구 에서는 1.25값으로 설정하였다. 이 값은 계산 미세 시간동안의 $\left(\frac{dt}{\tau}\right)$ 값들을 합하여 축적한 값 이다.

- SC1132

완전 산화 핵연료봉의 붕괴 온도를 설정하는 입력이며, 완전히 산화된 연료봉의 붕괴 온도를 2575K 로 설정하였다.

- SC1250

용융풀이 아닌 국부적으로 용융된 구조물의 열전도 증가를 모의 하기위한 카드이다. 2700K이상이면 열전도를 증가시키도록 설정하였다.

$$\text{증배인자} = 0.01 \times (T - 2700) \quad (11)$$

- SC1603

원자로용기 항복 응력 매개변수를 설정하는 입력카드이며, 이 연구에서는 하부반구 대신에 콘크리트 바닥면을 모의하였다. 따라서 콘크리트 바닥면이 손상되는 것을 억제하기 위해서 임의로 높은 응력 손상 온도(9999K)으로 설정하였다.

- SC4413

다공정 마찰계수 적용조건은 다공정 값이 최소 0.05는 되어야 파쇄층으로 간주하여 다공정 마찰계수 식을 적용한다.

- SC4414

재배치 양에 관계없이 공간의 최소 10%는 항상 유체에 가용한 부피로 가정하였다.

IV. SFP 완전 노출 사고 모의결과 및 민감도 분석

1. SFP 완전 노출사고 모의 결과

다음은 이 연구에서 총 붕괴열이 9.0 Mwt인 일반적인 PWR 핵연료 저장조에서 사용후연료가 완전 노출 시, 환기가 가동되지 않는 조건을 기본으로 100,000 초까지 사고 진행을 모의한 결과이다.

- 수위

[Fig. 6]은 사고 발생 후 시간에 따른 핵연료 저장조 내 냉각수 수위를 나타낸다. 사고 이전의 냉각수 수위는 노심 상단 약 3 m 위인 7.657 m 를 유지하고 있다. 약 500 초부터 수조 하단부로 부터 외부로 냉각수를 상실한다. 냉각수는 약 12 m/s 속도로 외부로 빠져나가게 되며 약 600 초부터는 냉각수를 완전히 상실 한다. [Fig. 7]은 수조 하단부로 부터 외부로 방출되는 냉각수 유량을 나타낸다. 약 500초 이후 방출 유량은 급격하게 증가하다가, 600 초 이후부터는 냉각수가 모두 상실되어 방출 유량이 나타나지 않았다. 그러므로 약 600 초부터는 연구에서 필수조건인 냉각수 완전상실 조건을 만족하게 된다. 총 방출된 유량은 약 1,034.71 t이다.

- 공간 내 공기 유동 속도 및 압력

[Fig. 8, 9]는 핵연료집합체와 랙이 있는 노심 공간 (3개 링)의 공기 평균 속도(=(입구속도+출구속도)/2)와 전체 공간 내 압력 변화를 보여준다. 수조 하단 부 초기 압력은 170,000 Pa(=1.7 bar), 각 링 초기 압력은 약 130,000 Pa(=1.3 bar), 기타 공간 압력은 100,000 Pa(=1.0 bar) 였다. 냉각수 상실 시점 이후 공간 내 압력은 1.0 bar로 유지되었다. 공기 유동은 핵연료 출입문 누설 부를 통한 공기 유입과 노심에서 발생하는 붕괴열로 인한 공간 내 압력 차이로 발생된다. 과도 기간, 각 공간 내 공기 유동 속도는 일정하였다. 각 공간 내 공기 유동 속도는 다음과 같다. 과도 기간 중 노심 내 공기 평균 유속은 링1 경우 약 0.5 m/s (유량=3.3866 kg/s), 링2 경우 약 0.24 m/s(=0.9885 kg/s), 링3 는 약 0.06 m/s(=0.1311 kg/s) 로 예측되었다.

기타 사용후 핵연료 저장조 시설의 상단 공간(422번) 내 평균 유속은 약 0.04 m/s 로 가장 낮은 유속 지역으로 예측되었다. 가장 빠른 유속을 보인 공간은 노심 출구 부 상단 공간 (310) 으로 약 1.8 m/s 로 예측되었다.

- 핵연료 봉 온도

[Fig. 10, 11, 12]는 시간에 따른 노심 내 링 1,2,3 의 핵연료봉 피복관 온도 거동을 보여준다. 링1 은 다른 링2, 3보다 봉피열 밀도 (링1= 151.46 kw/m³, 링2=84.182 kw/m³, 링3=50.951 kw/m³) 가 높기 때문에 링2 와 링3에 비하여 상대적으로 높은 온도를 보여주었다.

축 방향 피복관 온도 거동은 핵연료봉 하단부가 가장 낮고, 상부로 갈수록 점진적으로 높아지는 경향을 보여주었다. 이는 노심 하단부에 유입된 찬 공기가 상부로 진행할수록 피복관으로 부터 전달된 열로 인해서 점진적으로 가열되기 때문이다. 따라서 산화반응의 시작도 핵연료봉 최상단 높이에서 시작되는 경향을 보여주었다. 이는 사용후 핵연료가 축 방향으로 비교적 균일하게 연소 되었다고 가정하여, 입력 시 축 방향 열 침투 계수 값을 모든 축 높이에서 동일하게 지정했기 때문이다.

가장 높은 온도를 보여준 링1 의 피복관은 냉각재 상실 이후 공기에 의한 낮은 열 제거 능력과 계속적으로 발생하는 봉피열에 의해서 가열된다. 이후 약 33,340 초에 링1 (= 노심 중앙부)의 축 높이 15번, 3.6336~3.9346 m (핵연료 영역= 0.3214 m ~ 4.0463 m)에서 최초로 사용자 지정 피복관 파열 온도 값인 1173 K 에 도달하여, 핵연료 피복관 손상이 예측되었다. 이후 링2 (=노심 중간부) 는 42,030 초, 링3 (=노심 외곽부) 는 약 51,470 초에 핵연료 피복관 손상이 예측되었다.

링1 최상단 피복관 온도는 후행 폭주 산화 반응이 시작되는 약 34,000 초 부터 급격히 상승하여 최대 온도 2360 K 에 도달되었다. 이때 피복관이 Zr 용융 온도 (2180 K)에 도달되었으나 재배치는 발생되지 않았다. 이는 재배치가 발생되기에는 산화층이 두껍고, 산화층 온도도 사용자가 입력(민감도가드 1131)에서 지정한 산화층 파열 온도 값 (2400 K) 보다 낮았기 때문이다.

그러나 이 같은 후행 폭주 산화 반응은 최상단부로 부터 하부 방향으로 점진적으로 진행되어, 각 높이에 해당되는 공간 내 산소를 완전히 소모 시켰다. 이 같은 연이은 산소 고갈 현상으로 링1 축 높이 15번, 3.6336~3.9346 m 에 해당하는 공간 내에 35,000 초 이후 추가적으로 피복관 온도 증가에 가장 중요한 인자인 산화 열이 더 이상 발생할 수 없었다. 따라서 산소 완전 소모 이후 축 높이 15번 의 피복관 온도는 급감하면서, 45,000초에 붕괴열과 대류 열손실간의 열 균형 상태에 도달하였다. [Fig. 13]은 시간에 따른 노심 내 산소 밀도 변화를 나타낸다.

링1 축 높이 15번 의 평형 피복관 온도는 1850 K로 예측되었다. 45,000 초 이후의 상단 피복관 (12~15번 : 2.7302 m ~ 3.9346 m) 의 온도 재상승은 상대적으로 저온 상태에 있던 하단 피복관이 점차 가열되면서 상부로 고온 공기를 전달하여 상부 피복관이 재가열 되었기 때문이다. 또한 60,000초 이후의 모든 높이의 피복관 온도 감소는 링1 내 산화반응이 모두 종료되었기 때문이다. 다른 링의 피복관 온도 거동도 링1 과 유사한 거동을 보여주었다. [Fig. 14]는 산화반응에 의해 발생한 열에너지를 나타낸다.

- 산화반응 폭주 및 산화막 형성 비율

피복재의 공기 산화반응은 피복재 온도가 600K에 도달 했을 때 산화반응이 시작 되도록 설정하였다. [Fig. 15, 16, 17]와 [Fig. 18]을 통해서 선행 폭주 산화반응 (pre-breakaway oxidation) 이 시작되는 시점을 확인할 수 있다. 피복재 온도가 600K에 도달한 시점은 링 1, 2, 3 각각 약 8,310 초, 14,140 초, 21,980 초 이다. [Fig. 15, 16, 17]은 축 높이에 따른 노심의 산화막 형성 비율을 나타낸다. [Fig. 18]은 각 링의 축 높이 15번에서의 수명 분율 값을 보여준다. 수명 분율 값이 1.25에 도달한 시점에서 후행 산화 폭주 (post-breakaway oxidation) 반응이 시작되었다. 링1의 후행 산화 폭주 시점은 약 34,000 초, 링2는 41,000 초, 링3는 51,000 초에 시작 되었다.

- 재배치

이 연구에서는 핵연료 피복관 외면 ZrO_2 층내에 형성된 용융 혼합물 (= 용융 $Zr + ZrO_2, UO_2$ 용해) 이 ZrO_2 층 두께가 $1.0E-5$ m 보다 얇고 ZrO_2 층 온도가 2400 K 이상일 경우, ZrO_2 층 파열에 의해서 촛농(candling) 흐름 재배치가 발생되도록 하였다. 그러나 이 연구에서는 예측한 모든 핵연료봉 피복관이 위에서 언급한 두께와 온도에 의한 촛농 흐름 재배치 조건을 만족하지 않았다. 따라서 피복관내 형성된 용융물의 촛농 흐름 재배치는 발생하지 않았다.

핵연료봉 집합체를 둘러싸고 있는 랙 구조물의 재배치는 랙을 구성하고 있는 스테인레스 스틸 물질의 용융점인 1700 K 에 도달되면 하부로 재배치되는 것으로 모의하고 있다. 링1 랙 경우 축 높이 6번, 0.9236 m 부터 랙의 최상단 높이인 4.1884 m 까지의 랙이 모두 용융되어 재배치되는 것으로 예측되었다. 링1에서 43000초에 재배치된 스테인레스 스틸은 하부 축 높이 5번과 6번 (0.6225~1.2247 m) 으로 재배치되어 응고되었다. 이후 51,000초에 6번에 재배치된 랙 물질이 5번으로 재배치되었다. 링 2경우는 하단부인 4,5,6 번 (0.3214 m ~ 1.2247 m) 을 제외한 상단 랙 구조물이 모두 58,000 초에 용융되어 6번 높이(0.9236 m ~ 1.2247 m)로 재배치되었다. 링3 경우, 용융에 의한 랙 구조물의 재배치 현상은 발생되지 않는 것으로 예측되었다. [Fig. 19, 20, 21]은 각 링의 랙 구조물 온도와 용융에 의한 재배치 발생을 보여준다.

그러나 MELCOR 코드 내 재배치 물질의 노심 내 높이를 같게 하는 모델에 의해서 링1 에 재배치된 랙 물질을 노심 내 반경 방향으로 재배치 시켜서 전체 높이를 일정하게 하였다. 따라서 노심 내 랙 물질이 재배치되어 축적된 위치는 5번과 6번 (0.6225 m ~ 1.2247 m) 에 위치하였다. 총 재배치된 랙 질량은 94,922 kg 이었다.

[Fig. 22, 23, 24]는 저장조 내 노심의 산화도 분포와 용융에 의한 재배치 과정을 통해 초기, 50,000 초, 최종상태 (100,000 초) 에서 변화된 노심의 기하학적 형태를 구분하여 보여준다. 핵연료 용융 온도는 3020 K이며, 최대온도는 용융 온도까지 도달하지 않았다. 핵연료는 용융되지 않았다.

- 공간 내 구조물 온도

[Fig. 25, 26, 27]은 사용후 핵연료 저장조 바닥부터 수조 수위 까지를 포함한 수조 공간 내 구조물들의 온도를 보여준다. 수조 공간 내 열 구조물은, 수조 바닥면, 수조와 접한 측 벽면, 핵연료 하단 및 상단 지지판(supporting plate)들로 구성되어 있다. 수조와 접한 바닥면은 스틸로 덮여있고 안쪽은 모두 콘크리트로 구성되어 있다. 바닥 내벽면의 최고 도달 온도는 약 700K 로 예측되었다. 수조 내 측면 구조물은 핵과 마주보고 있으며, 축 방향 높이(0 m ~ 4.1884 m)에 위치하고 있다. 수조와 접한 내벽 면은 스틸, 안쪽은 모두 콘크리트로 구성되어 있다. 55,000 초에 축 방향 1.2247 m에서 최대온도 1680 K 에 도달되었다.

핵연료집합체를 지지하고 있는 하부 지지판은 축 높이(0.1524m ~ 0.1651 m) 에 위치하며 모두 스틸로 구성되어 있다. 하부 지지판의 링별 최대 온도는 모두 820 K 로 예측되었다. 핵연료 상단 지지판은 각 링의 최상단, 축 높이(4.18839 m ~ 4.1884 m)에 위치하며, 스틸로 구성되어 있다. 링1의 상단 지지판은 55,000 초에 스틸의 용융 온도인 (1700K)에 도달하여 하부로 재배치되었다. 링2와 링3 경우 최대 지지판 온도가 약 1420K이며, 용융 온도에는 도달하지 못한 것으로 예측되었다.

[Fig. 28, 29]는 수조 상단 부 공간 내 구조물들의 온도를 보여준다. 수조 상단부 공간의 구조물은, 상단 부 바닥면, 측벽 면, 천장 그리고 크레인 설비로 구성되어 있다. 상단 바닥 구조물은 모두 콘크리트로 구성되었고, 축 높이 11.8 m 상에 위치하며 바닥 총면적은 1,660 m² 로 가정하였다. 바닥면의 최대 도달 온도는 485 K 로 예측되었다. 수조 상단 부 측벽 면 구조물은 스틸로 구성 되었고, 축 높이 (11.8 m ~ 30.661 m)에 수직 방향으로 위치한다. 측 내벽 면 최대 도달 온도는 460 K 로 예측되었다. 수조 상단 크레인 설비는 모두 스틸로 구성 되었고, 축 높이 (11.8 m ~ 14.8 m)에 위치하는 것으로 가정하였다.

크레인 설비의 예측된 최대 도달 온도는 1050 K 였다. 사용후 핵연료 저장조 시설의 최 상단부인 천장 구조물은 내 벽면이 스틸로 덮여 있으며, 높이 30.861 m에 위치한다. 천장 총 표면적은 1820 m²이며, 최대 도달 천장 온도는 455 K 였다.

- 핵분열 생성물 모의 결과

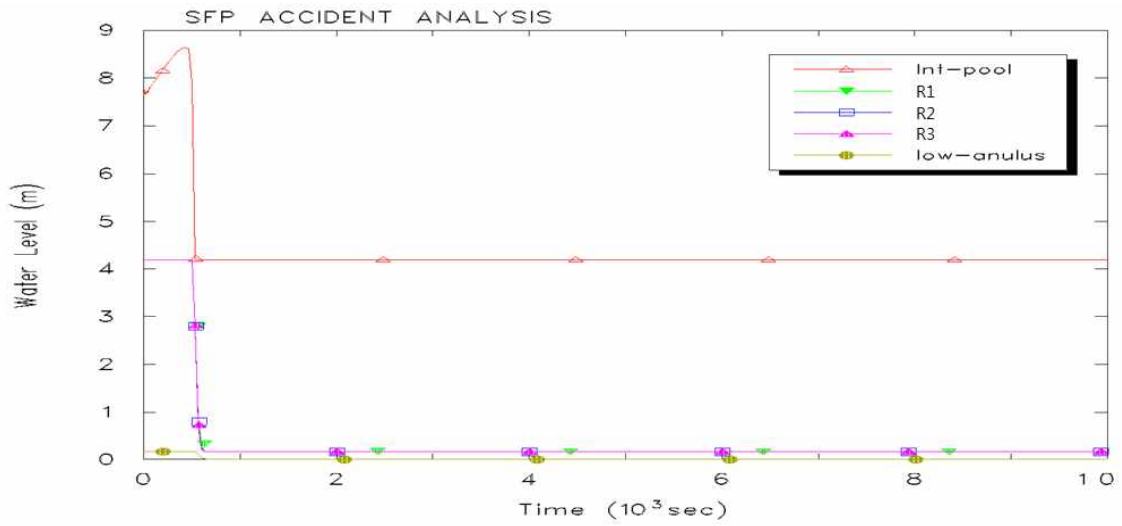
냉각재가 완전 상실된 SFP 시설에서의 핵분열 생성물 거동을 모의하였다. 모의시 iodine 은 단독으로 존재할 수 없으며 모두 CsI 형태로 존재한다고 가정한다. Cs 경우는 간극을 제외한 공간에서는 CsI 나 Cs_2MoO_4 형태로 존재하며, 여분의 Cs 은 그대로 방출된다고 가정하였다. 초기 간극에 Cs 은 초기 재고량의 5% , CsI 경우 초기 재고량의 5% 가 존재하는 것으로 가정하였다. 모의 결과 주요 핵종별 방출, 부착, 부유 그리고 궁극적인 대기 방출 백분율 (초기재고량 기준)은 <Table 6>과 같다.

<Table 6> Percentage of The radionuclide

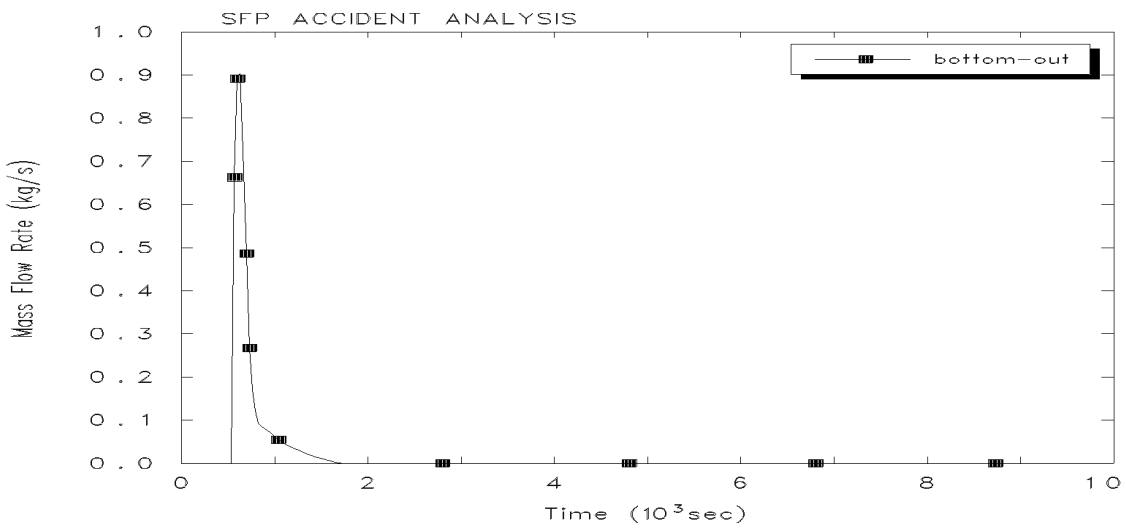
	release [%]	deposit [%]	suspended [%]	air release [%]
Xe	71.3	0	70.75	0.624
Cs	78.7	41.04	37.42	2.4×10^{-4}
Ba	0.55	0.365	0.185	0
Ru	1.97×10^{-5}	1.0×10^{-5}	9.6×10^{-6}	2.3×10^{-9}
CsI	4.58	3.11	1.47	3.16×10^{-6}
Cs_2MoO_4	0.182	0.119	0.062	3.2×10^{-4}

핵분열 생성물의 방출은 노심 내 최대 온도가 피복관 파열 온도로 지정된 1173 K 에 도달된 33,375 초부터 방출되기 시작하여 최대 노심 온도가 약 2370 K 도달된 36,380 초 까지 대부분이 방출된다. 이 기간 동안 피복관의 용융과 공기와의 산화반응이 후 폭주 (post breakaway) 단계에 이미 도달되었고, 해당 랙은 용융(용융온도 =1700 K) 되어 하부로 재배치되었다. Ru 경우 약 320 초 지연된 33,695 초에 노심 최대온도가 1500 K에 도달된 시점부터 방출되기 시작하였다. 방출된 핵분열 생성물의 대부분이 계통 내 부착되는 것으로 예측되었고, 환경으로의 방출 백분율은 무시할 만하였다.

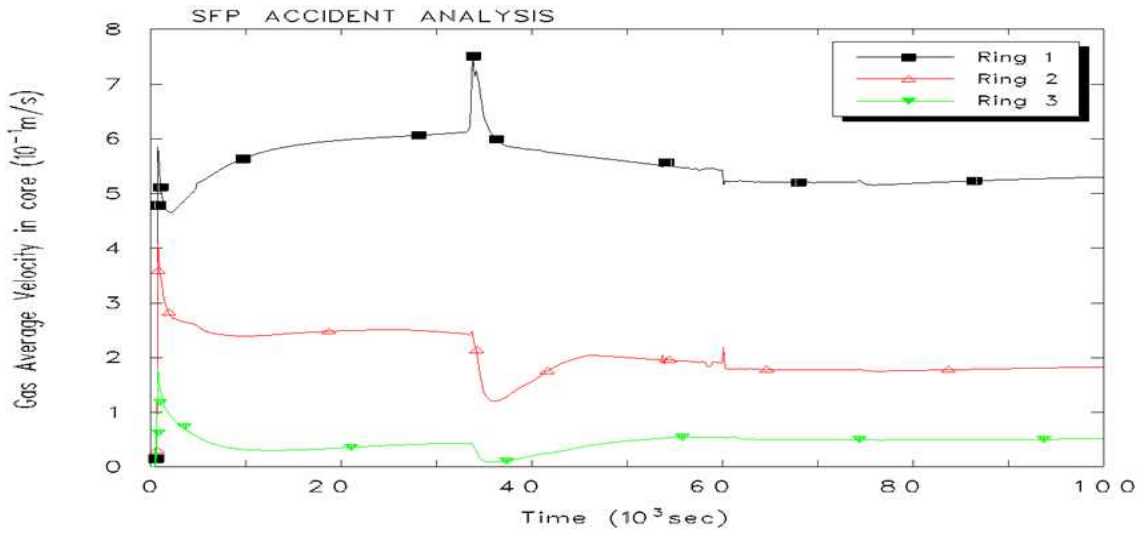
그러나 현재의 연구 결과는 핵분열 생성물 거동에 영향을 미칠 수 있는 특정 SFP 시설의 계통들에 대한 기하학적 형태와 누설 크기 및 위치 그리고 배기 용량에 관해서 정확한 실제 자료를 반영하지 못하였다. 따라서 이 연구 결과는 일반적인 PWR-SFP 시설에서의 경향만을 제시한 것이다.



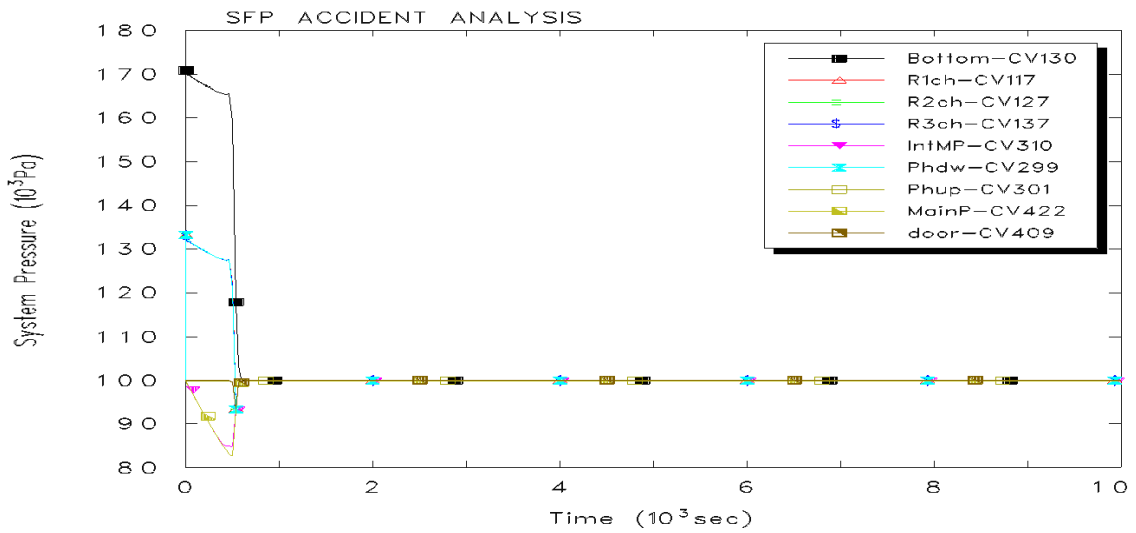
[Fig. 6] Water Level in SFP



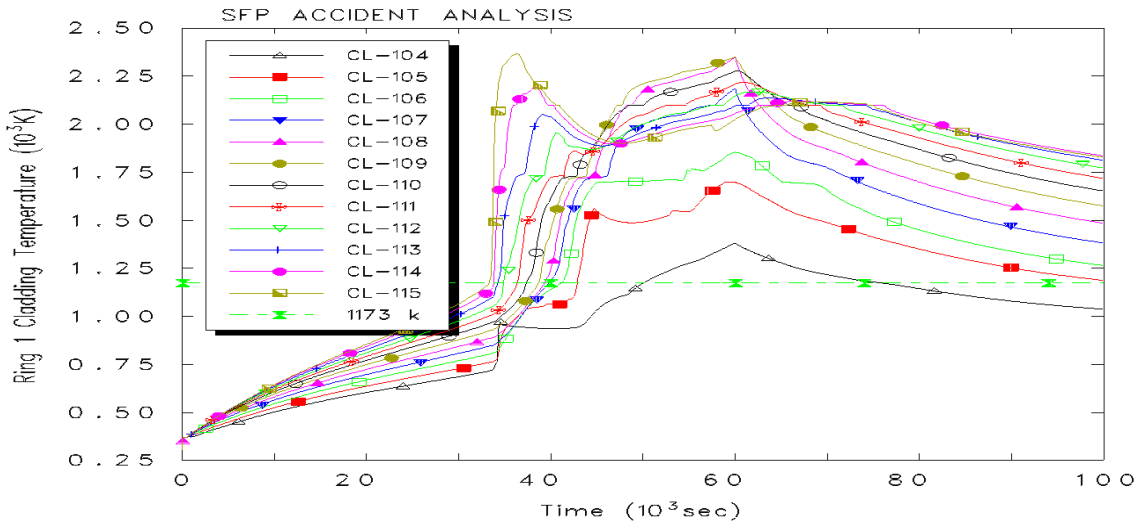
[Fig. 7] Leakage Rate through SFP Bottom



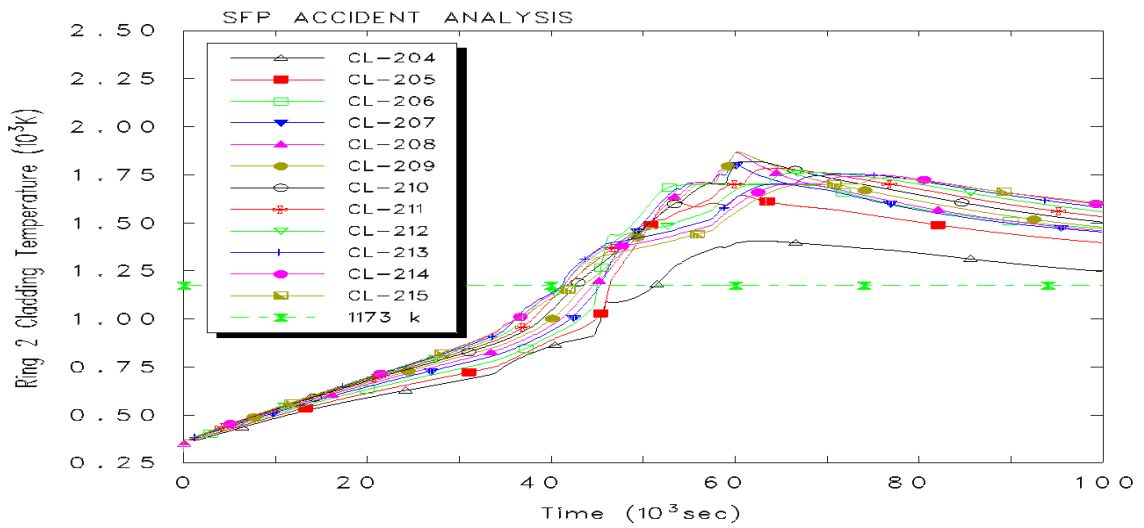
[Fig. 8] Gas Average Velocity in Core



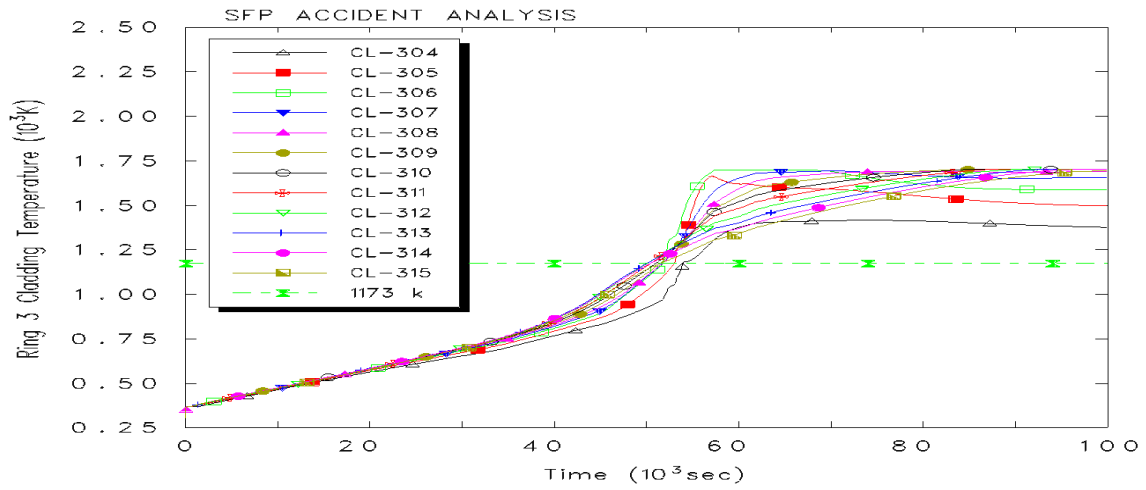
[Fig. 9] System Pressure in SFP



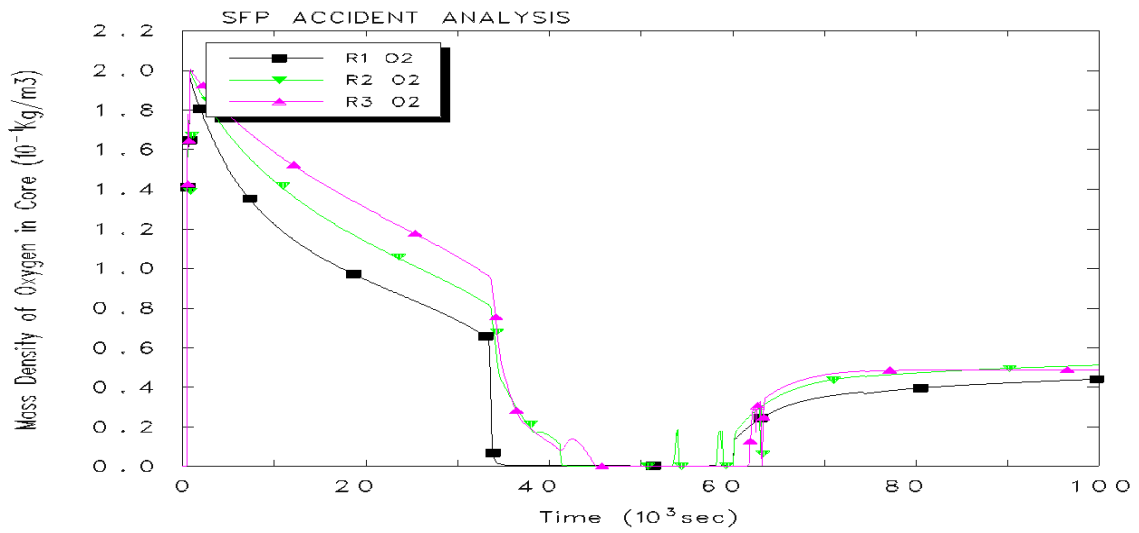
[Fig. 10] Cladding Temperature at Ring 1



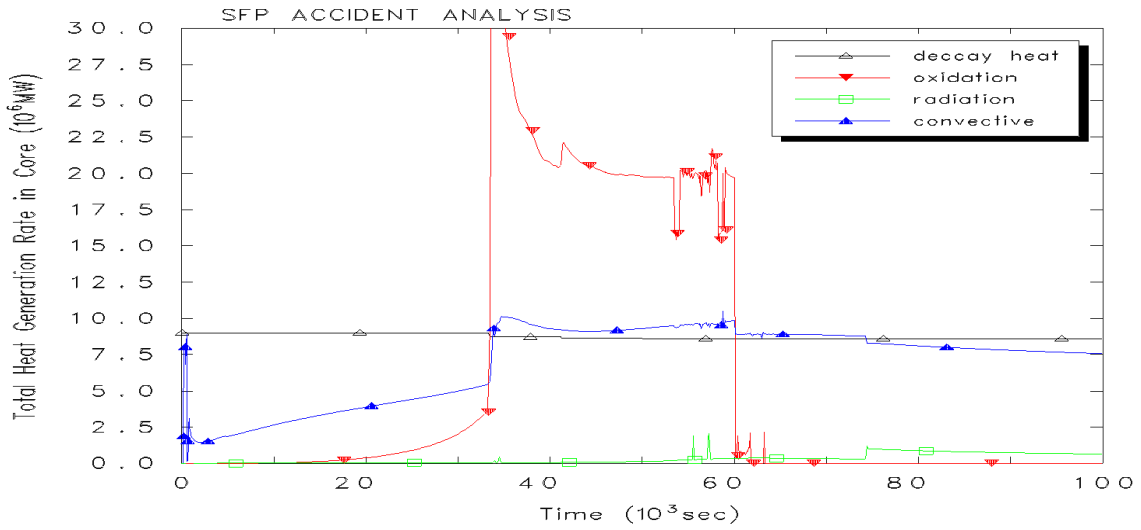
[Fig. 11] Cladding Temperature at Ring 2



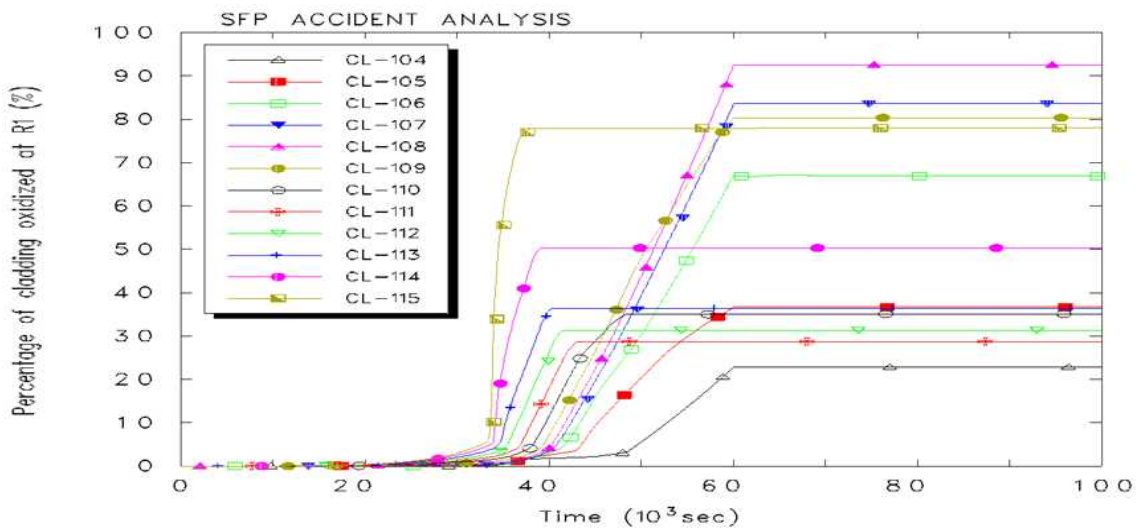
[Fig. 12] Cladding Temperature at Ring 3



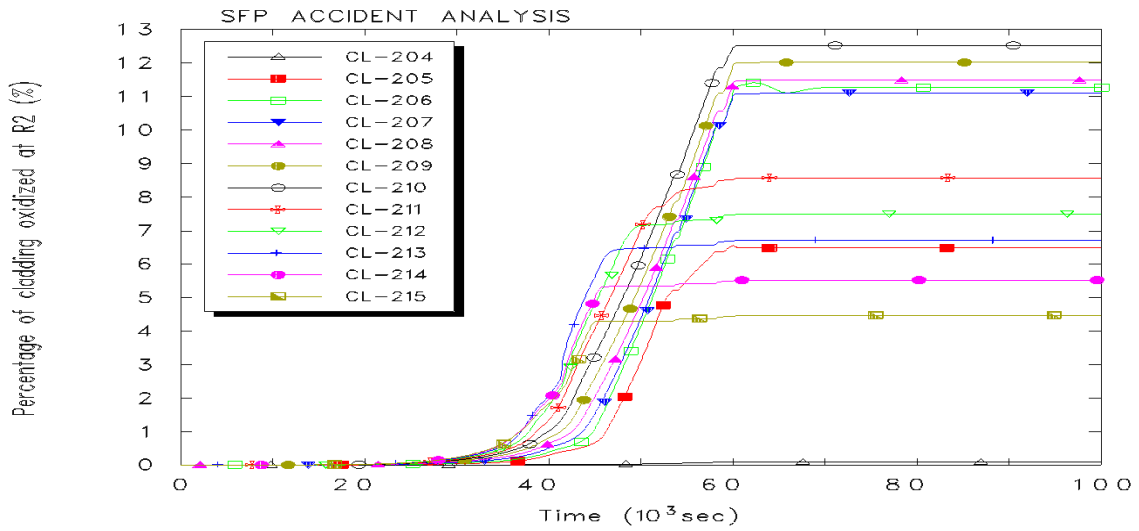
[Fig. 13] Mass Density of Oxygen in Core



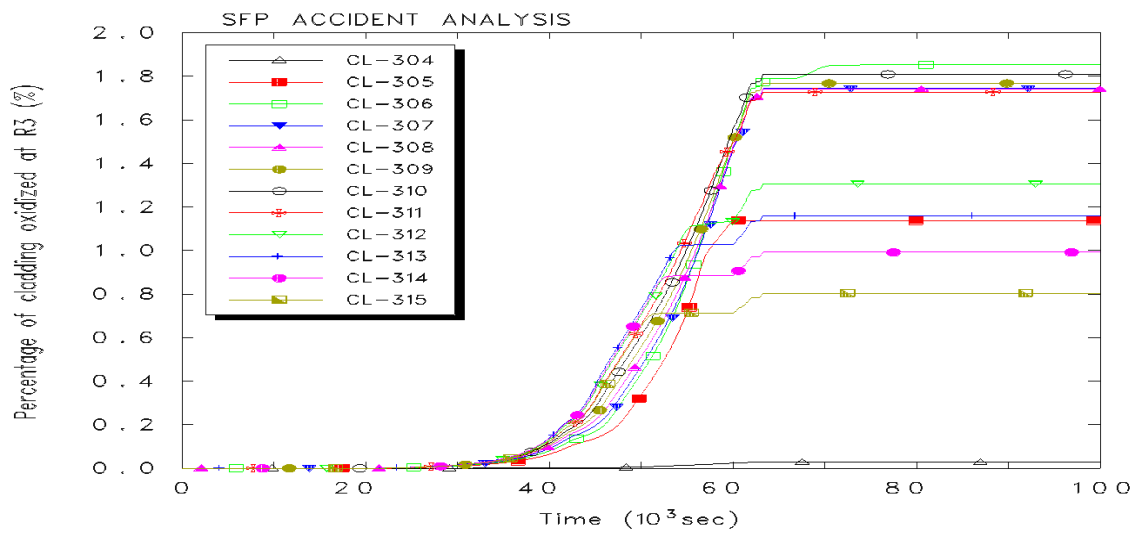
[Fig. 14] Total Heat Generation Rate in Core



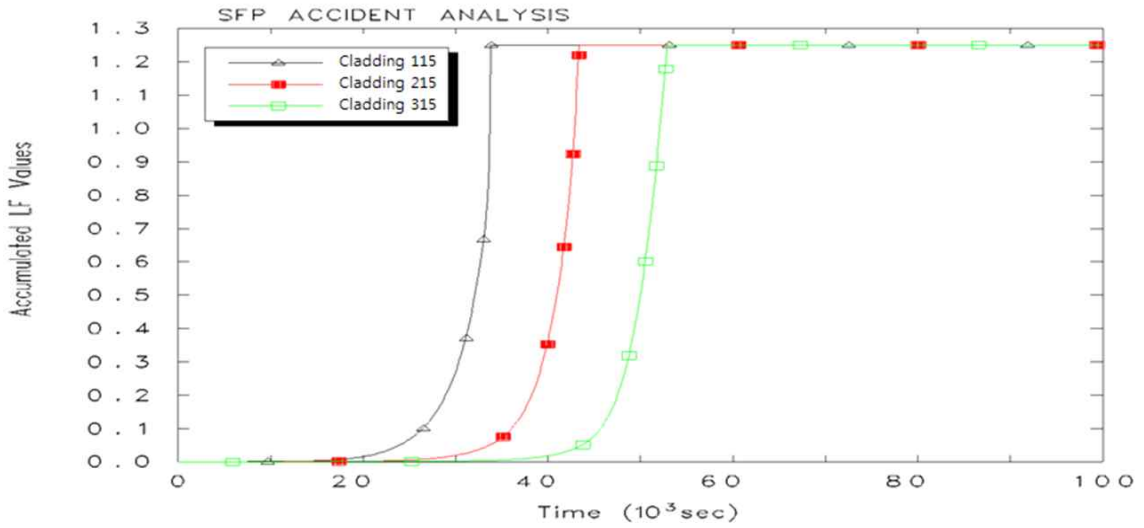
[Fig. 15] Percentage of Cladding oxidized at Ring 1



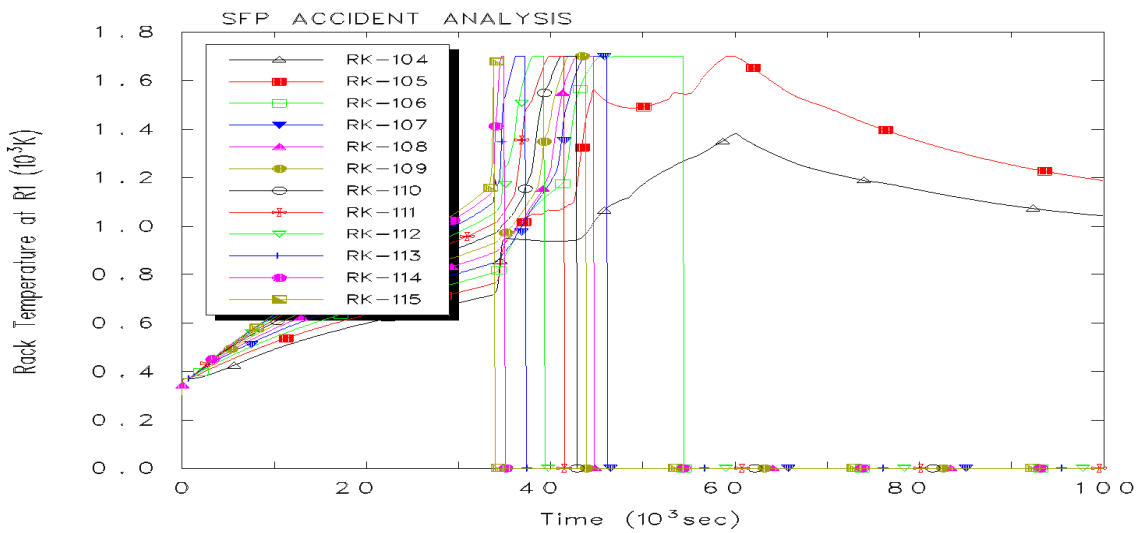
[Fig. 16] Percentage of Cladding oxidized at Ring 2



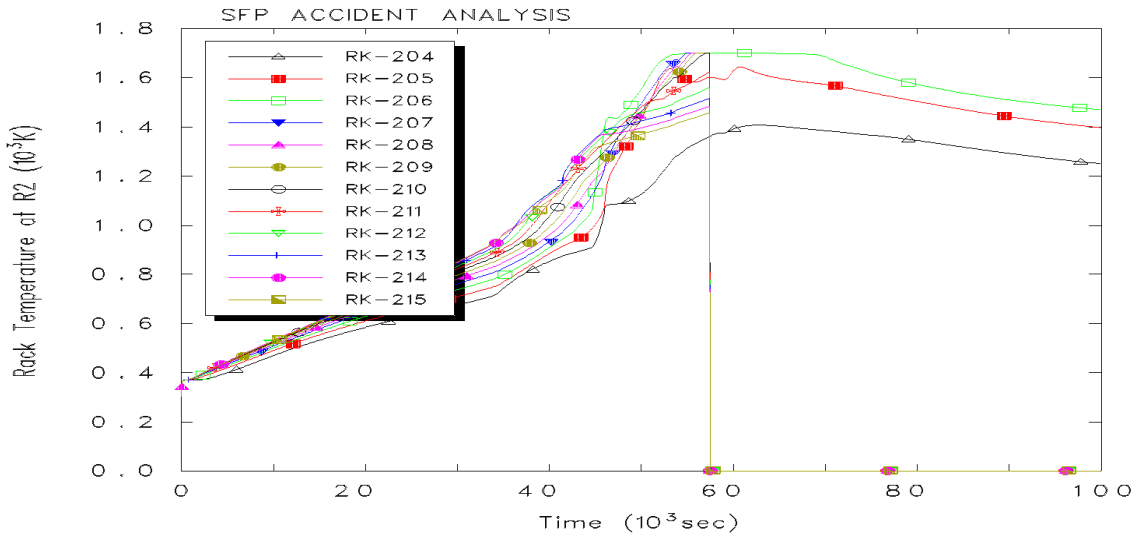
[Fig. 17] Percentage of Cladding oxidized at Ring 3



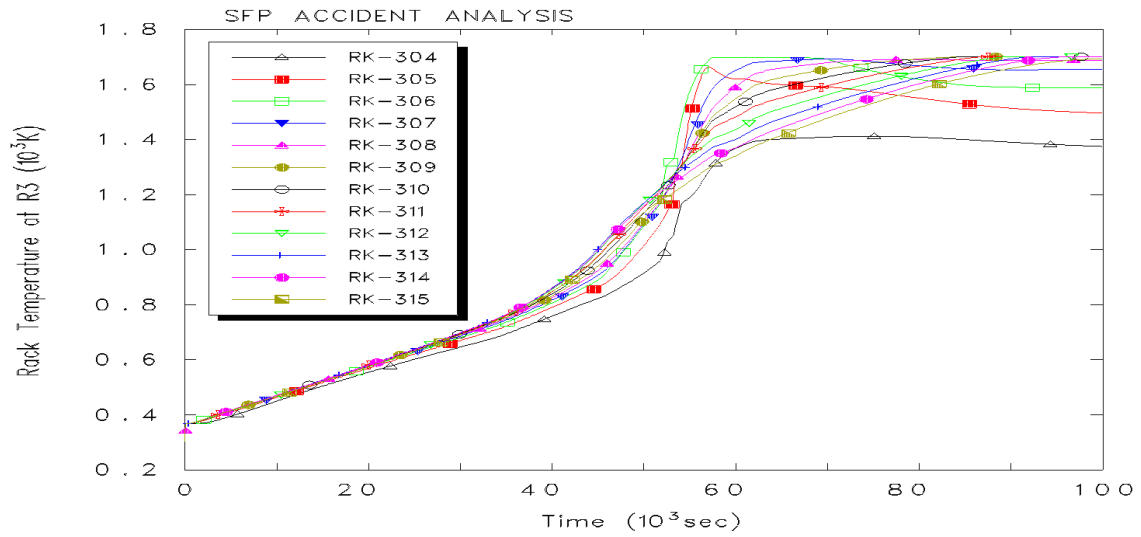
[Fig. 18] Accumulated LF Values at Axial Level 15



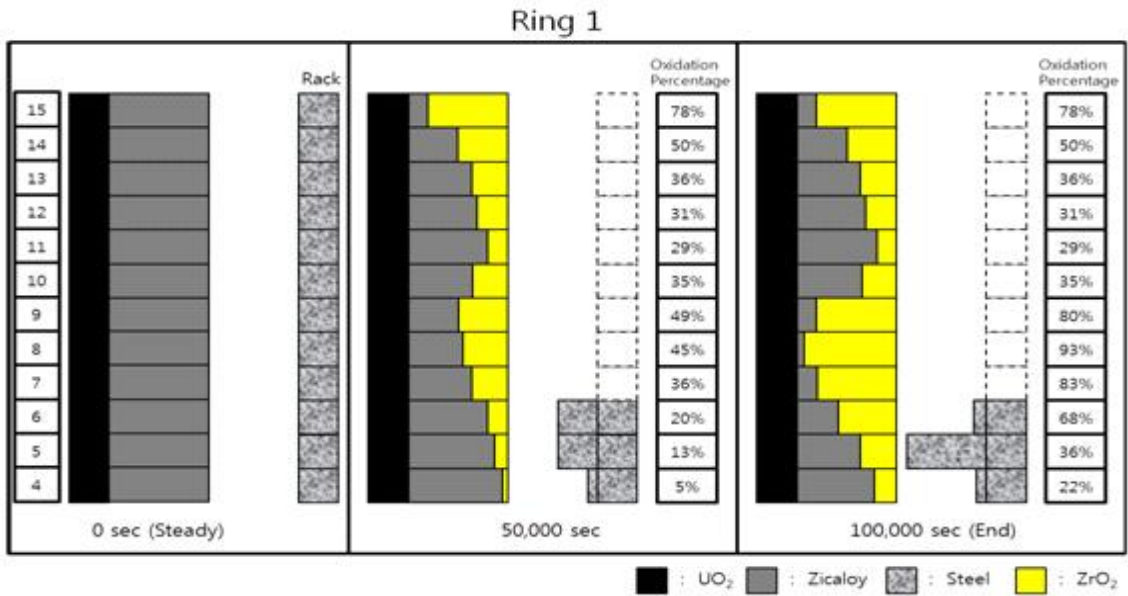
[Fig. 19] Rack Temperature at Ring 1



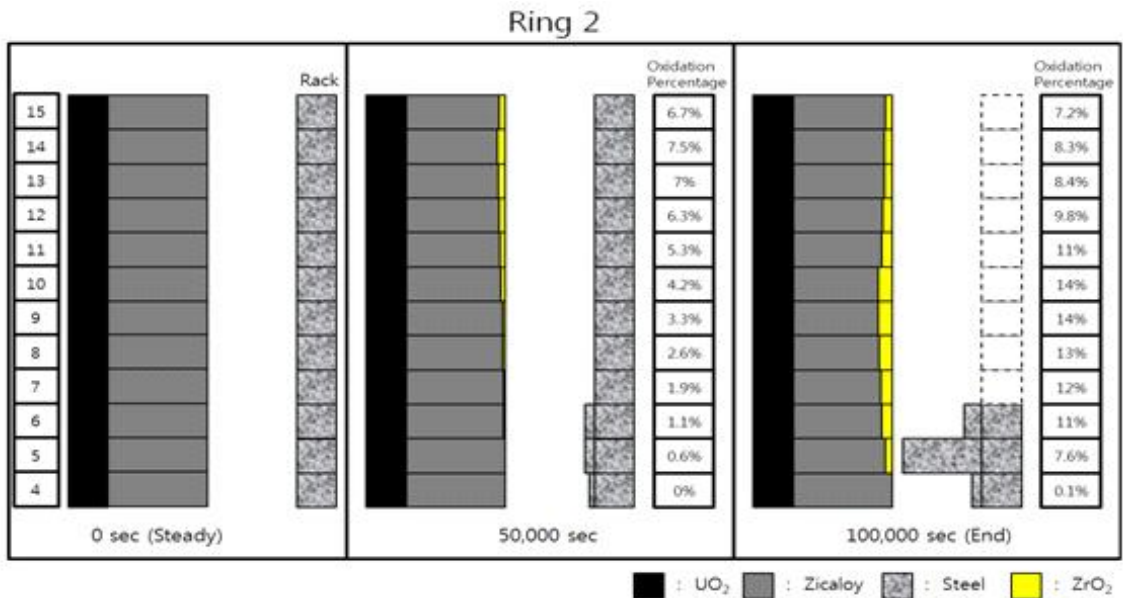
[Fig. 20] Rack Temperature at Ring 2



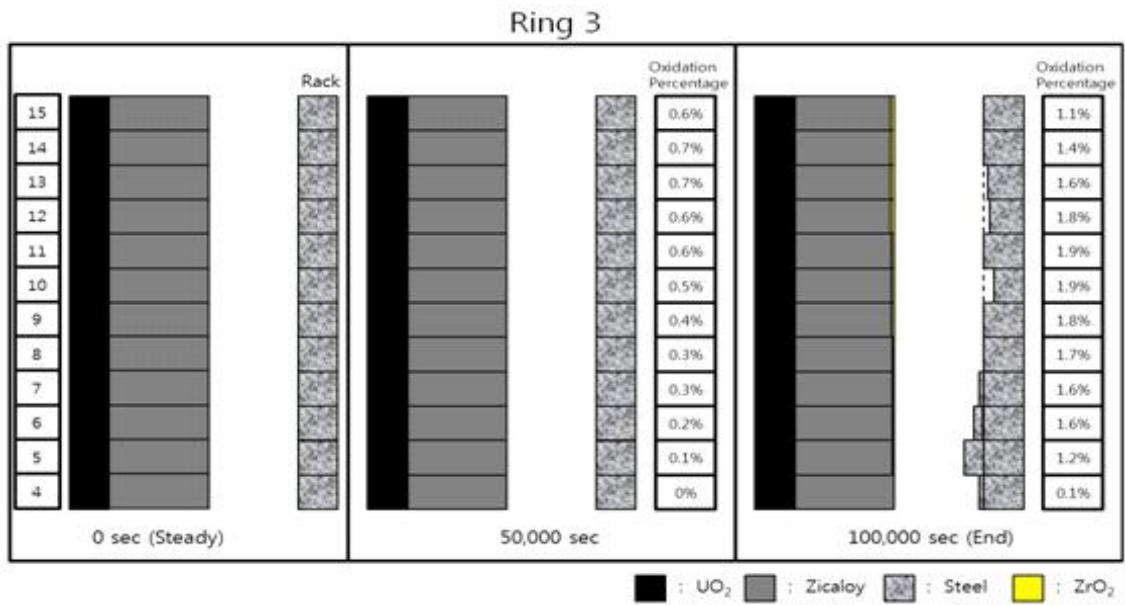
[Fig. 21] Rack Temperature at Ring 3



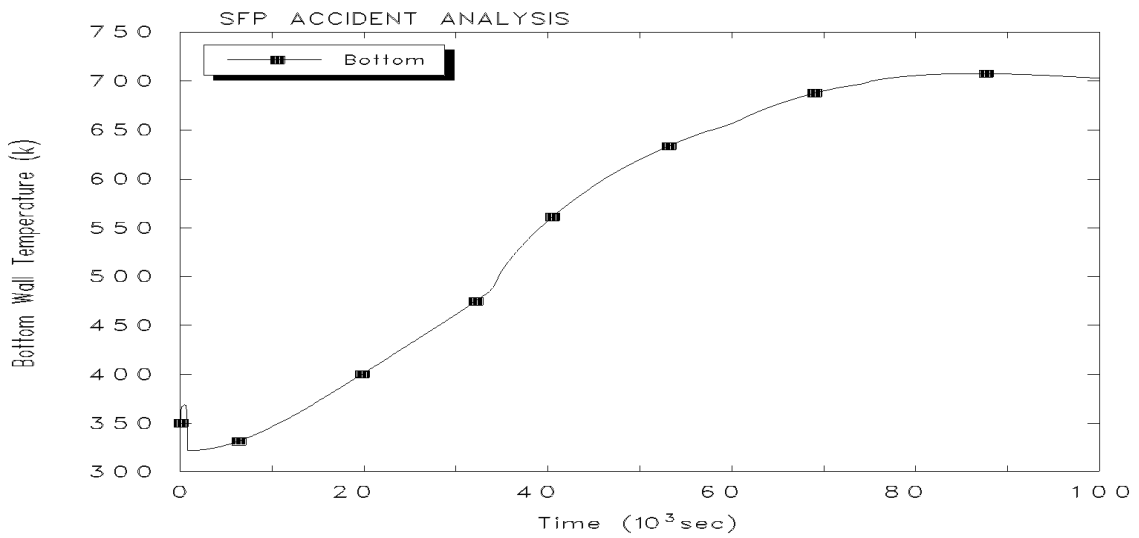
[Fig. 22] Relocation of Ring 1



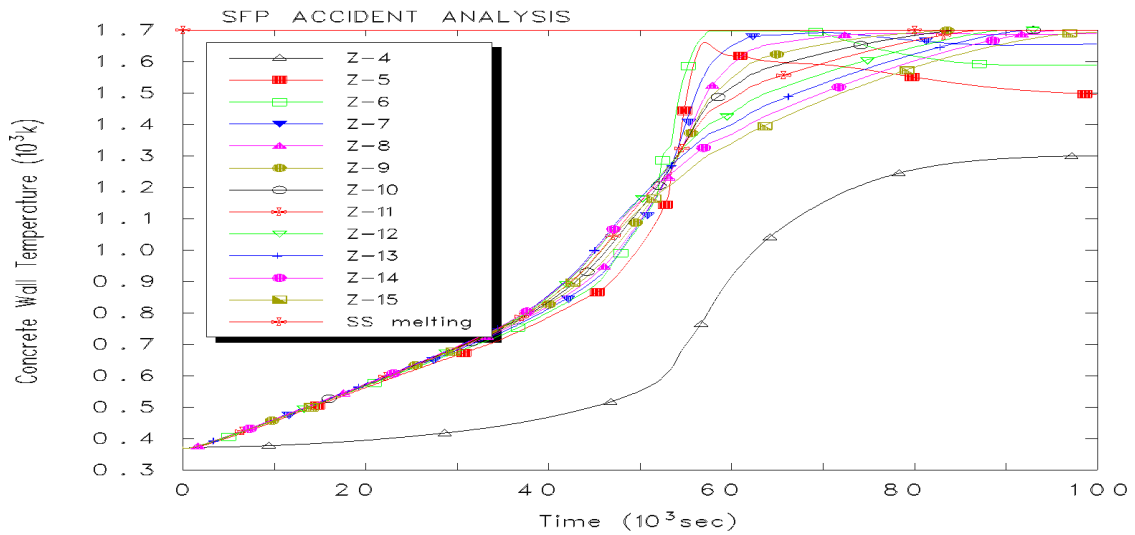
[Fig. 23] Relocation of Ring 2



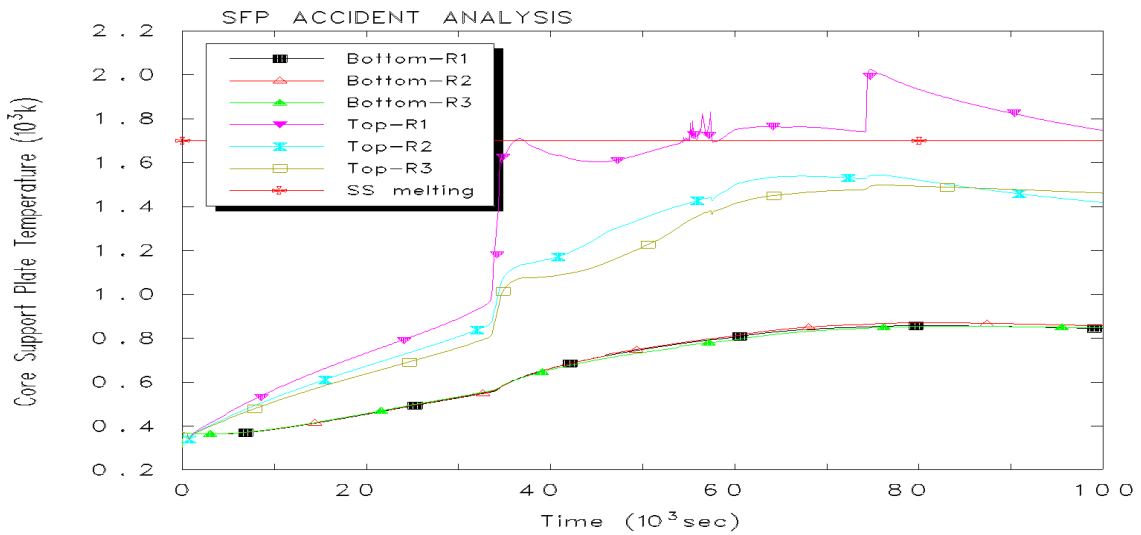
[Fig. 24] Relocation of Ring 3



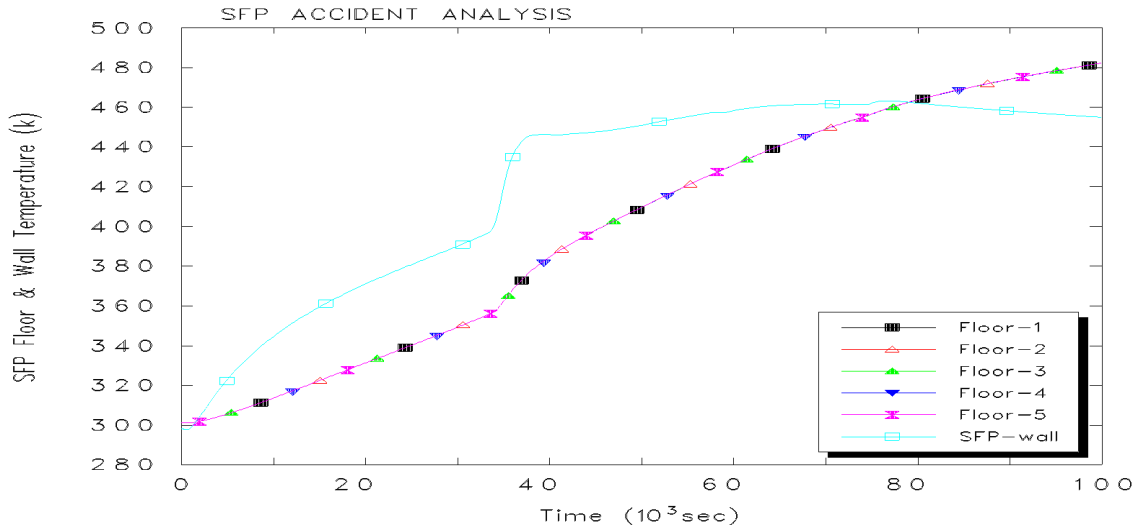
[Fig. 25] Structure Temperature in Pool (Bottom Wall)



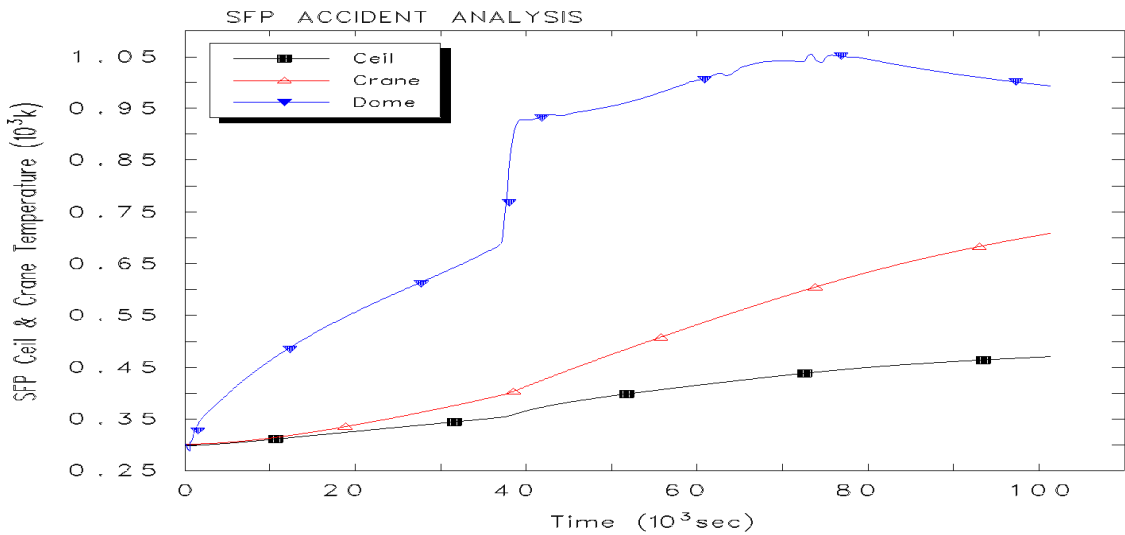
[Fig. 26] Structure Temperature in Pool (Concrete Wall)



[Fig. 27] Structure Temperature in Pool (Core Support Plate)



[Fig. 28] Structure Temperature at the Top of the Pool (SFP Floor & Wall)



[Fig. 29] Structure Temperature at the Top of the Pool (SFP Ceil & Crane)

2. 민감도 분석

다음은 사용후핵연료 저장조 내 노심 완전 노출사고에서 핵연료손상에 연관된 주요 인자 사용하여 민감도 분석을 실시하였다.

- 붕괴열 효과

[Fig. 30]은 붕괴열크기에 따른 노심 최대온도를 나타낸다. 최대 온도변화를 확인하기 위해 총 붕괴열 3.5 Mwt, 6.2 Mwt, 7.6 Mwt, 9.0 Mwt로 설정하여 모의하였다. 단, 배기구는 29769.48 m³/hr 용량으로 가동 중인 조건에서 모의를 진행하였다. 붕괴열 효과를 확인한 결과, 총 붕괴열의 크기가 클수록 노심 폭주가 빠르게 나타나는 것으로 확인 하였다. 그리고 총 붕괴열이 3.5 Mwt일 경우 노심 폭주가 발생되지 않은 것으로 예측되었다.

- 배기용량 효과

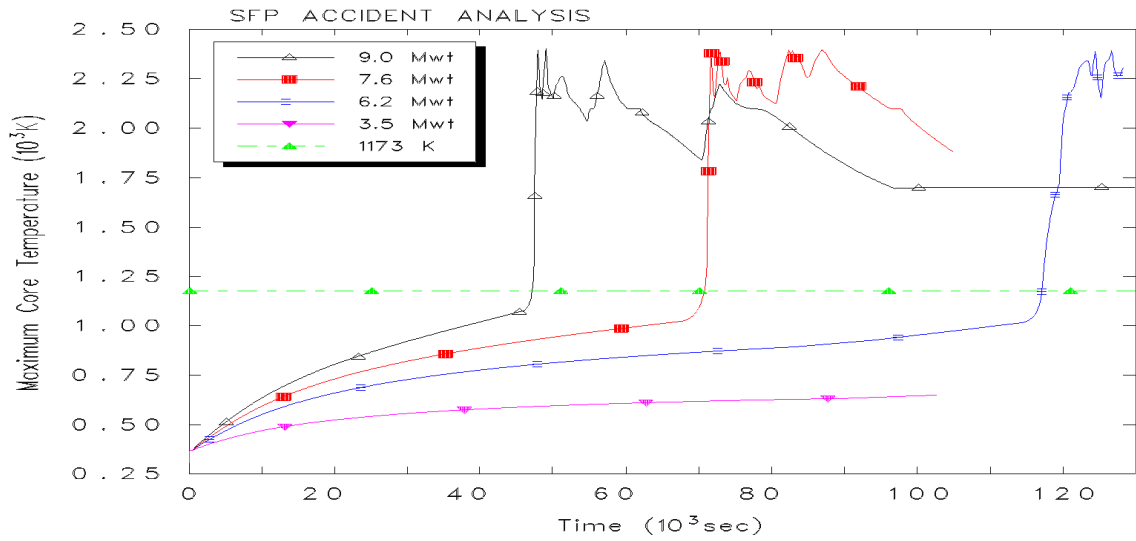
[Fig. 31, 32]는 배기용량에 따른 노심 최대 온도를 나타낸다. 모의 결과 전반적으로 배기용량이 증가 할수록 사고 진행이 지연되는 것으로 예측되었다. 그리고 붕괴열 7.6 MWt 인 경우, 배기용량 약 12만 m³/hr 조건에서 핵연료 손상이 발생 되지 않았고, 붕괴열 9.0 MWt 인 경우는 배기용량 약 18만 m³/hr 조건에서 핵연료 손상이 발생 되지 않았다. 두 자료를 토대로 붕괴열에 따른 핵연료봉 손상 억제를 위한 최소 요구 배기용량 예측 표를 [Fig. 33]를 통해 제시하였다. 일반적인 PWR 배기용량은 약 85,000 m³/hr 이다.

- Rack Hole 크기에 따른 효과

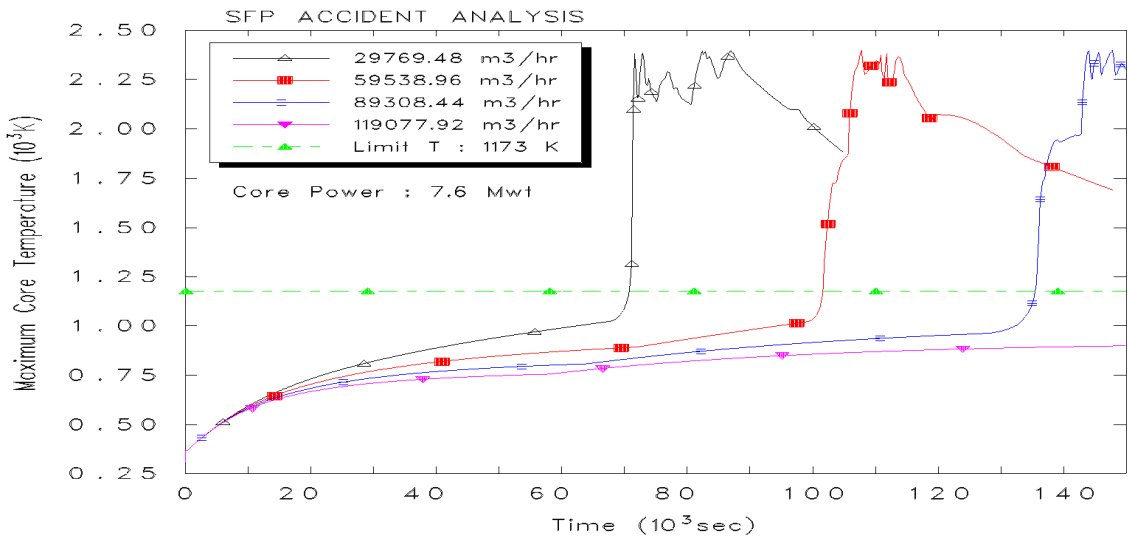
[Fig. 34]는 Rack Hole 크기에 따른 노심 최대 온도를 나타낸다. 단, 배기구는 가동 중이지 않는 조건에서 모의를 진행하였다. 큰 Hole의 사이즈는 0.078 m^2 이며, 작은 Hole 사이즈는 0.039 m^2 로 설정하였다. 각각 사고 초반부에서는 Hole 크기가 클수록 사고 진행을 지연 시킬 수 있었으나, 급격한 산화 반응 이후 공간 내 산소 유입이 많은, 큰 hole 경우 최대 온도가 더 높게 예측되었다. 산화 반응이 종료된 약 60,000 초 이후 Hole 크기가 큰 경우 좀 더 냉각 효과를 보였다.

- 핵연료 출입문 개방 효과

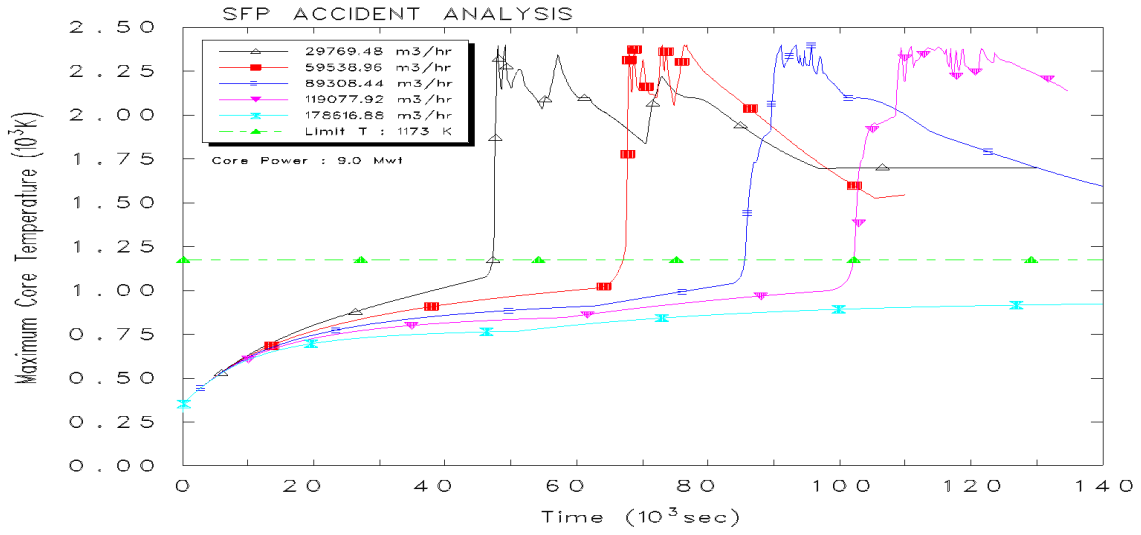
[Fig. 35]는 핵연료 출입문 개방에 따른 노심 최대 온도를 나타낸다. 단, 배기구는 $29769.48 \text{ m}^3/\text{hr}$ 용량으로 가동 중인 조건에서 모의를 진행하였다. 출입문 개방 시점은 사고 시작 시점 개방(open door)과 사고 발생 이후 30,000 초경과(open door T) 후 개방하였다. 출입문을 개방하지 않았을 때 보다, 출입문 개방했을 시 더 높은 냉각 효과를 보였으며, 출입문 개방 시점이 빠를수록 노심 폭주시점을 늦출 수 있었다.



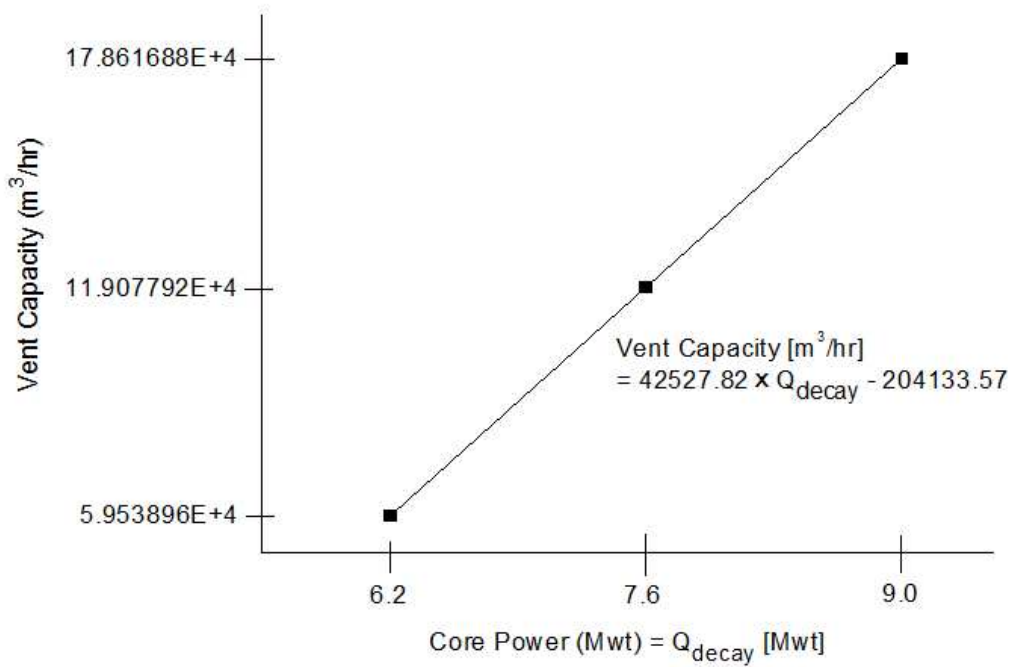
[Fig. 30] Change of the Maximum Core Temperature with Total Decay Heat



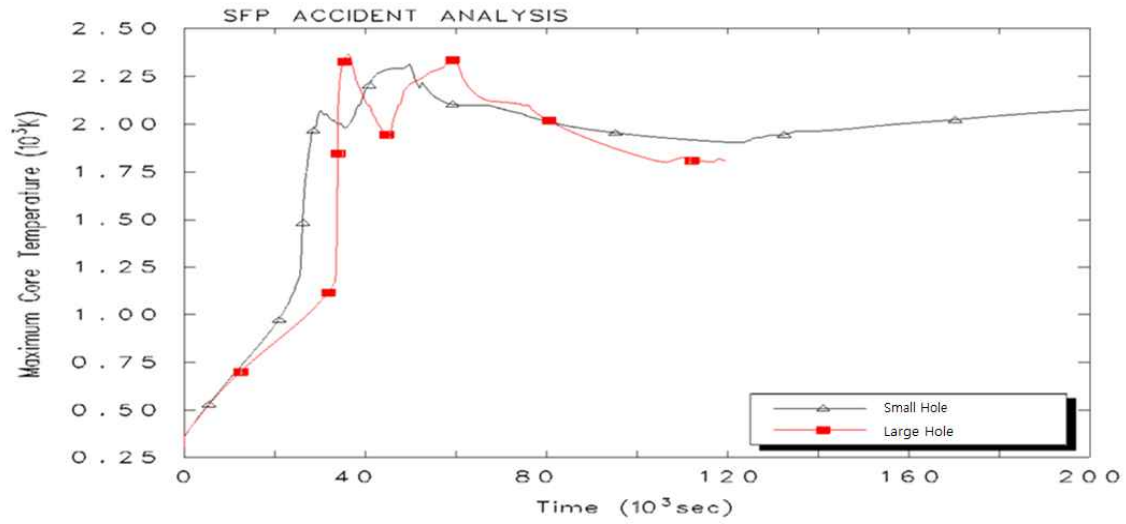
[Fig. 31] Change of the Maximum Core Temperature with Vent Capacity (7.6 Mwt)



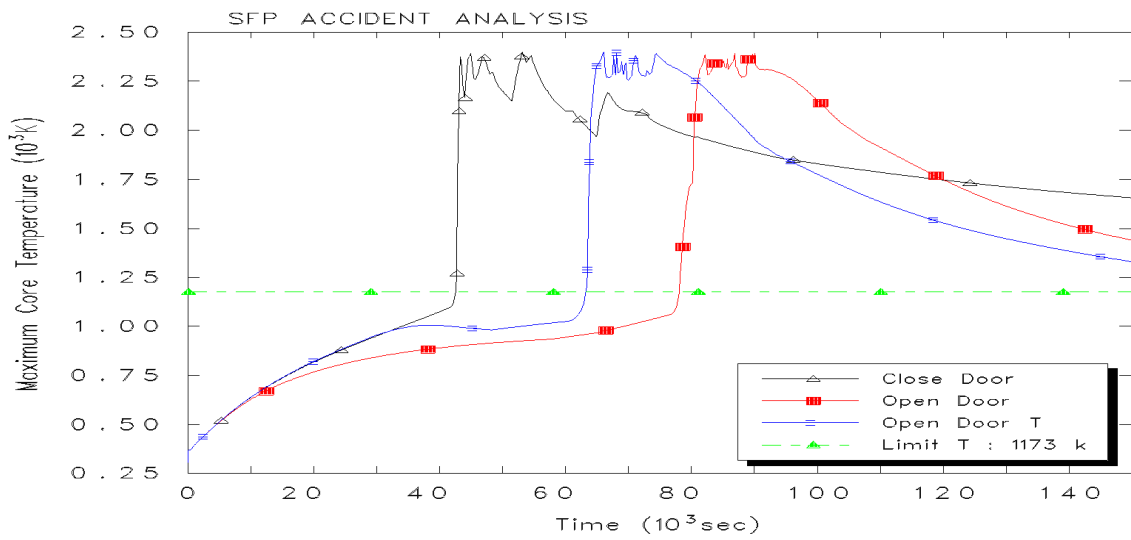
[Fig. 32] Change of the Maximum Core Temperature with Vent Capacity (9.0 Mwt)



[Fig. 33] Minimum Vent Capacity for Suppressing Fuel Damage



[Fig. 34] Change of the Maximum Core Temperature with Rack Hole Size



[Fig. 35] Change of the Maximum Core Temperature with Open Door

V. 결론

후쿠시마 사고 이후, 사용후핵연료 저장조의 안전성에 대한 의구심이 확산되면서 사용후핵연료 저장조 안전성 재평가의 필요성이 확대되고 있는 상황이며, 정확한 입력 자료를 바탕으로 사고분석이 필요하다. 이 연구에서는 MELCOR 1.8.6 SFP Version을 사용하여 완전냉각 상실조건일 때, PWR SFP에서의 중대사고 진행을 해석하였다.

축 방향 피복관 온도 거동은 하부가 가장 낮게 나타났으며, 상부로 갈수록 점진적으로 온도가 증가하는 것으로 확인하였다. 이는 노심 하단부에 유입된 찬 공기가 상부로 진행할수록 피복관으로부터 전달된 열로 인해서 점진적으로 가열되기 때문이다. 후행 폭주 산화 반응 시 노심 내 일시적인 산소 고갈 현상이 나타났으며 이에 따른 피복관 온도 증가에 가장 중요한 인자인 산화열은 더 이상 발생할 수 없었다. 핵연료 집합체는 용융온도에 도달하였으나 산화층이 두껍고, 사용자가 지정한 산화층 파열온도 값 보다 낮았기 때문에 재배치 현상이 발생되지 않았다. 그러나 노심 중앙(Ring 1)인 경우 하단부를 제외한 대부분의 랙이 용융 재배치되었다.

수조 상단 부 대기온도는 크레인 건전성을 위협할 정도로 높게 (1050 K) 예측되어 화재 및 2차 피해가 예상된다. SFP 측벽면 구조물 내벽의 Liner 는 모두 용융 되었다. 냉각재가 완전 상실된 SFP 시설에서의 핵분열 생성물 거동을 모의결과, 방출 핵분열 생성물의 대부분이 계통 내 부착되어 대기로의 방출량은 무시할 만한 것으로 예측되었다.

다음은 핵연료 손상에 연관된 주요 인자 붕괴열, 배기용량, Rack Hole 크기에 따른 효과와 핵연료 출입문 개방에 따른 효과를 확인하기 위해 민감도 분석을 실시한 결과이다.

붕괴열에 따른 효과는 총 붕괴열이 3.5 Mwt 일 때, 노심 폭주 현상이 발생되지 않는 것으로 예측되었다. 그 이상의 총 붕괴열 6.2 Mwt와 7.6 Mwt, 9.0 Mwt는 노심 폭주현상이 확인되었고, 노심의 건전성을 위협하였다.

배기 용량에 따른 효과는, 붕괴열이 7.6 Mwt와 9.0 Mwt 인 경우, 배기용량이 각각 약 12만, 18만 m^3/hr 조건에서 핵연료 손상이 발생 되지 않는 것으로 예측되었다. 예측된 자료를 토대로 붕괴열에 따른 핵연료봉 손상 억제를 위한 최소 요구 배기 용량 예측 표를 개발하였다.

Rack Hole 크기에 따른 효과는, 사고 초반 Hole 크기가 클수록 사고 진행을 지연시킬 수 있었으나, 급격한 산화 반응 이후 공간 내 산소 유입이 많은, 큰 hole 경우 최대 온도가 더 높게 예측되었다. 핵연료 출입문 개방에 따른 효과는, 출입문을 개방하지 않았을 때 보다, 출입문 개방했을 시 더 높은 냉각 효과를 보였으며, 출입문 개방 시점이 빠를수록 노심폭주 시점을 늦출 수 있었다.

이 연구를 통해 사용후 핵연료 저장조 내 배열 형태에 따른 위치별 붕괴열 분포의 비 균질성과 이로 인한 노심 온도의 비대칭성에 의한 열전달 현상을 현재 MELCOR 코드가 다룰 수 없는 한계점을 확인하였고, 자연대류 현상으로 인한 노심 내 공기고갈 현상 이후 발생하는 현상에 관한 모델이 없는 것으로 확인하였다. 또한 SFP 사고로 인한 선원향 평가 시 RuO_x 핵종의 방출, 이송, 부착 거동에 관한 모델이 없어 추후연구를 통해 포함되어야 할 것이다.

이 연구는 사용후핵연료 저장조 내 냉각수 상실 조건시 사고 경향을 파악하기 위한 기초연구이며, 실제 사용후 핵연료 저장조는 발전소마다 기본 기하학적 형태, 핵연료 저장 형태 및 양, 각 핵연료 다발들의 연소도 및 붕괴열 크기가 다양하기 때문에 모의 대상을 일반적인 사용후 핵연료 저장조 조건을 가정하였다. 따라서 유도된 계산 결과는 일반적인 PWR 사용후 핵연료의 저장조에 관한 것이며 만일 저장조의 조건이 다를 경우 모의 결과는 차이를 보일 수 있다.

REFERENCE

- [1] Hossein Esmaili, 2013, Spent Fuel Pool Modeling and Analysis with MELCOR, Office of Nuclear Regulatory Research

- [2] Benjamin, A.S, et al, 1979. Spent Fuel Heatup Following Loss of Water during Storage. NUREG/CR-0649

- [3] Hayes, E.T., and Roberson, 1949, A. H. Some Effects of Heating Zirconium in Air, Oxygen, and Nitrogen. J. Electrochem. Soc. Vol. 96

- [4] J. H. White, 1967, AEC Fuels and Materials Development Program, Progress Report No.67 , GEMP-67, General Electric Co., 151

- [5] Leistikow, S., et al, 1975, Studies on high temperature steam oxidation of Zircaloy-4 cladding tubes

- [6] Larry Humphries, 2014, Asian MELCOR Users's Group Workshop

- [7] American National Standards Institute, 1979, American National Standard for Decay Heat Power in Light Water Reactors, ANSI/ANS5.1

- [8] NUREG/CR-6119, MELCOR 1.86 Core Package User's Guide, Revision 3

- [9] Jeffrey Cardoni, 2010, MELCOR Model for an Experimental 17×17 Spent Fuel PWR Assembly, SAND2010-8249

- [10] MELCOR Computer Code Manuals. Primer and User's Guide, Version 1.8.6

- [11] D. L. Hagrman, G. A. Reymann, and R. E. Mason, 1980, MATPRO-VERSION 11(Revision 1) A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior, NUREG/CR-0497 and TREE-1280 Rev. 1
- [12] F. Kreith, 1973, Principles of Heat Transfer, 3rd Edition, Intext Educational Publishers, New York, NY, pp. 251-273
- [13] Theofanous T.G., Angelini S., 1997, "Natural Convection for In-Vessel Retention at Prototypic Rayleigh Numbers", Eighth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Kyoto, Japan
- [14] L. J. Ott, 1982, Thermal-Hydraulic Test Facility Bundle 3 In-Core Instrumentation and Operating History, NUREG/CR-2609, Chapter 8
- [15] C. B. Ludwig and C. C. Ferriso, 1982, "Prediction of Total Emissivity of Nitrogen Broadened and Self-Broadened Hot Water Vapor," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 7, pp. 7-26
- [16] J. P. Holman, 1976, Heat Transfer, McGraw-Hill, Inc., New York, NY, pp. 305-307
- [17] NUREG/CR-6119, MELCOR Computer Code Manuals, Reference Manuals, Version 1.8.6
- [18] Jun Heo et al, 2014, Study on MELCOR modeling for Plant-level SFP Severe Accident Analysis, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea

[19] Guanghui Su et al, 2014, Analysis of the loss of pool cooling accident in a PWR spent fuel pool with MAAP5, Annals of Nuclear Energy Volume 72, pp. 198 - 213

[20] 김한철, 2011, OECD-SFP PWR 사용후연료저장조 냉각상실사고 실험 평가, KINS/RR-864

[21] 박성용, 1999, MELCOR 코드를 이용한 TMI-2 중대사고 해석, 석사학위 논문, 한양대학교

[22] 김시환, 2010, “알기쉬운 핵연료 관리”, 형설출판사, pp. 263-265

APPENDIX A. Input of the SFP under the Condition of Complete Drainage

```

*eor* melgen
title 'SFP'
jobid 'SFP SIM MASTER DEGREE'
*
restartf 'sfp.rst'
outputf 'sfp.out'
diagf 'sfp.dia'
stopf 'sfp.stp'
*
DTTIME 0.0001
TSTART 0.0
*
ALLOWREPLACE
*
-----
*
*           S P E N T   F U E L   P O O L   A C C I D E N T
*           =====
*
*           I N P U T   D E C K
*
*                                           Jaeju university, ojm4754@naver.com
*                                           Jaeju university jwpark@jejunu.ac.kr
*                                           Kaeri, jhpark3@kaeri.re.kr
*                                           11/August/2014
*
-----
*
* This input deck is prepared to simulate the accident progression of SFP
* under the condition of complete drainage of the pool.
*
*
*****
****                                     ****
****   SFP noncondensable gas input   ****
****                                     ****
*****
*
NCG000   O2       4
NCG001   N2       5
NCG002   H2       6
NCG003   CO       7
NCG004   CO2      8
NCG005   CH4      9
*
*
*****
*****                                     *****
*****   C V H   Input   *****
*****                                     *****
*****
*
-----
*
*   SFP Bottom Space : Axial level 1, 2
*
*                               It includes the supporting pipe + assembly support plate
*
-----
*
*
*           Neq      Hz      typ
CV13000 'POOL-BOTTM'  2      1      1
CV13003 80.0
CV130A0 3
CV130A1 PVOL 1.0E+5
CV130A3 ZPOL 0.1651
CV130B1 0.0      0.0
CV130B2 0.1651  14.313
*
* dummy HS for RN settling
HS49003000 2 1 0 0

```



```

HS49003001 'dum-dc'
HS49003002 0.0001 1.0E-7
HS49003100 -1 1 0.0
HS49003101 0.005 2
HS49003201 'STAINLESS STEEL' 1
HS49003300 -1
HS49003400 1 130 'INT' 0.9 0.9
HS49003500 0.1 1.0 0.05
HS49003600 0
*
*
*
*-----*
**** Active Fuel Zone ***
*-----*
*
* Ring-1
*
*-----*
* active fuel1 (cell 16-17)
*-----*
*
* Ne vertic typ
CV11700 'R1_ch' 2 2 1
CV117A0 3
CV117A1 PVOL 1.0E+5
CV117A3 ZPOL 4.1884
CV117B1 0.1651 0.0
CV117B2 4.1884 157.958
*
* Ring-2
*
*-----*
* active fuel2 (cell 16-17)
*-----*
CV12700 'R2_ch' 2 2 1
CV127A0 3
CV127A1 PVOL 1.0e5
CV127A3 ZPOL 4.1884
CV127B1 0.1651 0.0
CV127B2 4.1884 87.726 * original 45.81
*
* Ring-3
*
*-----*
* active fuel3 (cell 16-17)
*-----*
CV13700 'R3_ch' 2 2 1
CV137A0 3
CV137A1 PVOL 1.0e5
CV137A3 ZPOL 4.1884
CV137B1 0.1651 0.0
CV137B2 4.1884 53.124 * original 27.47
*
*-----*
* Upper Intermediate Pool *
*-----*
*
CV31000 'INTM-POOL' 2 2 2
CV310A0 3
CV310A1 PVOL 1.0e5
CV310A3 ZPOL 7.6577
CV310B1 4.1884 0.0
CV310B2 4.6577 25.0
CV310B3 11.8 297.221
*
*-----*
* Pool Periphery *
*-----*
*
* NEQ vertic
CV29900 'PERIPHERY-dw' 2 2 3

```

```

CV29903 10.0
CV299A0 3
CV299A1 PVOL 1.0E+5
CV299A3 ZPOL 4.1884
CV299B1 0.0 0.0
CV299B2 4.1884 359.1525
*
* dummy HS for RN settling
HS49004000 2 1 0 0
HS49004001 'dum-dc'
HS49004002 0.0 -1.0E-7 *2.091
HS49004100 -1 1 0.0
HS49004101 0.05 2
HS49004201 'STAINLESS STEEL' 1
HS49004300 -1
HS49004400 1 299 'INT' 0.9 0.9
HS49004500 0.1 1.0 0.1
HS49004600 0
*
CV30100 'PERIPHERY-up' 2 2 3
CV301A0 3
CV301A1 PVOL 1.0e5
CV301A3 ZPOL 7.6577
CV301B1 4.1884 0.0
CV301B2 11.8 589.228
*
*
*-----*
* Auxilliary Building Atmosp Space *
*-----*
*
*
* Neq vertic Typ
CV42200 'MAIN-Pool' 2 2 4
CV422A0 3
CV422A1 PVOL 1.0e5 PH2O 0. TATM 301. MLFR.5 0.8 MLFR.4 0.2
CV422B1 11.8 0.0
CV422B2 30.861 27000.0
*
*
*-----*
* Door Building Space *
*-----*
*
* Neq vertic Typ
CV40900 'DOOR' 2 2 4
CV409A0 3
CV409A1 PVOL 1.0e5 PH2O 0. TATM 301. MLFR.5 0.8 MLFR.4 0.2
CV409B1 0.0 0.0
CV409B2 11.8 2700.0
*
*
*-----*
* Environment Space *
*-----*
*
* not-defined
CV90000 'Environment' 2 0 5
CV90001 0 -1
CV900A0 3
CV900A1 PVOL 1.0E+05 PH2O 0.00 TATM 296.15 MLFR.5 0.80 MLFR.4 0.20
*
CV900B1 -10.0 0.0
CV900B2 100.000000 800000.0
*
*
*****
*****
***** Flow Path Input *****
*****
*****
*****
*

```

```

* START LOCA from normal operation to LOCA
* break bottom wall to cause LOCA !!!
*
FL13900 'DischargeWT' 130 900 0.0 -0.001
FL13901 1.9 3.0 1.0
FL13902 0 0 0 0
FL13903 1.0 1.0
FL139S1 1.9 3.0 5.64 1.0E-5
*
*
-----
FL139V0 -1 539 539
-----
*
CF53900 'LOCA-chk' L-A-IFTE 3 1.0 0.0
CF53910 1.0 0.0 CFVALU.503 * start-time > 100 sec
CF53911 0.0 1.0 TIME * open vv (loca)
CF53912 0.0 0.0 TIME * close vv (stable state)
*
*
CF50300 'LOCA_time' L-GT 2 1.0 0.0
CF50301 .FALSE.
CF50310 1.0 0.0 TIME
CF50311 0.0 500.0 TIME * LOCA starting time is set by user
*
*
*-----well described fl standard input set-----
* name FMcv# TOcv# Alt-FM Alt-TO
FL10100 'Phdw_BOT' 299 130 0.01651 0.0
* A L fopn FMJ-opn-height TOJ-opn-height
FL10101 40.9088 7.4197 1.0
* 0=vert FM TO
* 3=Hz activ no-buble no-bubble
FL10102 3 0 0 0
* Fwd-lossCoef Rev-lossCoef
FL10103 1.0 1.0
* A L Dh rough SLAM filter
FL101S1 40.9088 7.4197 0.1524 1.0E-5
*
*
-----
*
*
FL10200 'BOT-ch3' 130 137 0.1651 0.1651
* A L fopn
*hole FL10201 0.013962 2.0232 1.0
FL10201 3.15 2.0232 1.0
FL10202 0 0 0 0
FL10203 1.0 1.0 * 15.0 15.0
* A L Dh
*hole FL102S1 0.013962 2.0232 0.024 1.0E-5 -600.0
FL102S1 3.15 2.0232 1.6 1.0E-5 -600.0
*
*
-----
*
*
FL10500 'BOT-ch2' 130 127 0.1651 0.1651
*hole FL10501 0.022854 2.0232 1.0
FL10501 5.096 2.0232 1.0
FL10502 0 0 0 0
FL10503 1.0 1.0
*hole FL105S1 0.022854 2.0232 0.024 1.0E-5 -600.0
FL105S1 5.096 2.0232 2.05 1.0E-5 -600.0
*
*
-----
*
*
R1
FL10800 'BOT-ch1' 130 117 0.1651 0.1651
FL10801 9.1 2.0232 1.0
FL10802 0 0 0 0
FL10803 1.0 1.0
FL108S1 9.1 2.0232 2.6 1.0E-5 -600.0
*
*
-----channel-1-----
*

```

```

* For cell flow, SLAM should be modified for SFP
*
cf60000 Slam equals 1 1.0 0.0
cf60001 4.0
cf60010 0.0 31.5 Time * 64.0 = 31.5 Time
*-----
*****
* CR-1
FL30100 'ch1-INTMp' 117 310 4.1884 4.1884
FL30101 19.69 1.5 1.0
FL30102 0 0 0 0 * 10 0 0 0
FL30103 5.0 5.0
FL301S1 19.69 1.5 0.04 1.0E-5 -600.0
FL301S2 19.69 0.03 0.04 1.0E-5 -600.0
*
*****
* CR-2
FL30200 'ch2-INTMp' 127 310 4.1884 4.1884
FL30201 10.54 1.5 1.0
FL30202 0 0 0 0 * 10 0 0 0
FL30203 5.0 5.0
FL302S1 10.54 1.5 0.02 1.0E-5 -600.0
FL302S2 10.54 0.03 0.02 1.0E-5 -600.0
*
*****
* CR-3
FL30300 'ch3-INTMp' 137 310 4.1884 4.1884
FL30301 6.614 1.5 1.0
FL30302 0 0 0 0 * 10 0 0 0
FL30303 5.0 5.0
FL303S1 6.614 1.5 0.01 1.0E-5 -600.0
FL303S2 6.614 0.03 0.01 1.0E-5 -600.0
*
*-----
*-----Mainpool-Aux Atmos-----
*-----
*
FL34200 'INTMp-MAINp' 310 422 11.8 11.8
FL34201 52.156 13.00165 1.0
FL34202 0 0 0 0
FL34203 1.0 1.0
FL342S1 52.156 13.00165 13.0 1.0E-5
*
*-----
*-----CeilHz2-Env (Ventilation)-----
*-----
*
FL59000 'VENT-FAN' 422 900 30.861 30.861
FL59001 0.6361 0.35 1.0
FL59002 3 0 0 0
FL59003 1.0 1.0
FL590S1 0.6361 0.35 0.9 1.0E-5
*
* Assume Target ventilation capacity 84950.539 [m3/hr]
*
* use-TF TF-num (time vs velocity)
FL590T0 1 213
*
TF21300 'VENT-RATE' 8 1.0 0.0
*
* [m/s] * [m2] = target venting capacity [m3/hr] /3600
*
* where Target venting capacity[m3/hr]=VOL_target
* ex: 84950.539 [m3/hr]
* venting area= FL_area = 0.6361 [m2]
* venting velocity = V_vent [m/s]
* hr = 3600 sec
*
* Consequently, for Y in the following table
* Y [m/s] => V_vent= VOL_target /[(FL_area)*(3600)]
*-----
* time[s] Y [m/s]

```

```

TF21310  -1000.0    13.0
TF21311   500.0    13.0
TF21312   500.5    13.0 * 13.0 venting start time (ON)
TF21313   10000.0  13.0
TF21314   50000.0  13.0
TF21315   100000.0 13.0 * venting end time (OFF)
TF21316   200000.0 13.0
TF21317
*
-----
* Open-DOOR
*
*
* check Chimney effect !
*
FL94000 'AIR-DOOR-INGRES' 900 409 0.0 0.0
FL94001 37.0 2.5 1.0
FL94002 3 0 0 0
FL94003 1.0 1.0
FL940S1 37.0 2.5 5.25 1.0E-5
*
-----
FL940V0 -1 949 949
*
*
CF94900 'DOOR-chk' L-A-IFTE 3 1.0 0.0
CF94910 1.0 0.0 CFVALU.409 * t>99999 s
CF94911 0.0 0.02 TIME * Open : door open , Chimney
CF94912 0.0 0.0 TIME * Close : door close
*
*
CF40900 'DOOR_time' L-GT 2 1.0 0.0
CF40901 .FALSE.
CF40910 1.0 0.0 TIME
CF40911 0.0 0.0 TIME * door open time set by user
*
-----
* AuxBD Leak
*
*
FL94200 'MAINp-LEAK' 422 900 30.861 30.861
FL94201 2.0E-3 1.0 0.0 0.01 0.01 * <==== Leak off !!!
FL94202 3 0 0 0
FL94203 1.0 10.0
FL942S1 2.0E-3 1.0 1.127 1.0E-4
*
-----
* Mainatm - Door BD
*
*
FL42900 'MAINp-Door' 422 409 11.8 11.8
FL42901 40.5 15.0 1.0
FL42902 10 0 0 0 * free 0
FL42903 1.0 1000.0
FL429S1 40.5 15.0 8.0 1.0E-5
*
-----
* Carry-over to POOL/down from Door_BD
*
*
FL49300 'Door_PherUP' 409 301 11.8 11.8
FL49301 26.9088 2.4 1.0
FL49302 3 0 0 0
FL49303 1.0 100.0
FL493S1 26.9088 2.4 2.4543 0.1E-5
*
-----
* Pheriperal Flow down
*
*
FL32900 'PherUp-Dw' 301 299 4.1884 4.1884

```

```

FL32901 26.9088 5.9 1.0
FL32902 0 0 0 0
FL32903 1.0 1.0
FL329S1 26.9088 5.9 1.4543 1.0E-5
*
FL33900 'PherUp-Dw' 301 310 4.2 4.2
FL33901 10.9088 5.9 1.0
FL33902 3 0 0 0
FL33903 1.0 1.0
FL339S1 10.9088 5.9 1.4 1.0E-5
*
* - End of FL Input -
*
*****
***** SFP CORE Input *****
*****
*****
*
* General =====
CORDEFAULT 1.86
* NRAD NAXL NTLN NCVOL NLH NLHTA NPNTOT NINSLH NNHTR
COR00000 3 17 1 4 11 3 0 0 0
*
COR00004 0
* -----
* core geometry
* RFUEL RCLAD DRGAP PITCH DXCAN DXSS
COR00001 0.00401 0.00475 1.7E-4 0.0125984 0.0 0.0
* -----
* vessel parameters
* -----
* ILHTYP = 1 = flat lower head
* RCOR RVLH RVESS ILHTYP ILHTRN DZRV DZLH
COR00001A 5.35697 5.35697 5.35697 1 1 2.0 2.0
* HLST HCSP
COR00001B 0.1524 0.1524
* -----
* core type/poison
* -----
COR00002 'SFP-PWR' 'B4C'
* -----
* radiative exchange factors
* -----
* FCNCL FSSCN FCELR FCELA FLPUP
COR00003 0.25 0.25 0.10 0.10 0.25
* -----
* transfer process, fission power, gap conductance
* -----
* NTPCOR ICFFIS ICFGAP
COR00004 0 0 0
* -----
* candling heat transfer coefficients (W/m^2-k)
* -----
* UO2 Zirc SS ZrO2 SS ox poison
* HFRZUO HFRZZR HFRZSS HFRZZX HFRZSC HFRZCP
COR00005 7500.0 7500.0 2500.0 7500.0 2500.0 2500.0
* eutectic=0 off
COR00006 0 0 0 0 0
* -----
* in-vessel falling debris quench model
* -----
* HDBH2O PPFALL IAXSUP VFALL
COR00012 100.0 2.00E+07 2 1.0
*
* ISSMOD THICK AKM0 AKM1
CORZ02SS PLATEG 0.0127 0.07 0.576 * Baseplate

```

```

CORZ03SS PLATEG  TSFAIL  1700.0      * Lower nozzle (fails when melts)
*
* -----
* control structures, support
* -----
COR000NS ROD  STEEL
*
* -----
* axial core geometry
* -----
*          z      dz      dummy pordv
* -----
*          4.1884 m (top of the racks)
* Active fuel = 142.25", dz = 142.25/12 = 11.8541667"
CORZ1701 4.0463 0.1421 0.0 0.4 * Top nozzle and top of racks
CORZ1601 3.9346 0.1117 0.0 0.4 * Rods to exit nozzle
CORZ1501 3.6335 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 12
CORZ1401 3.3324 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 11
CORZ1301 3.0313 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 10
CORZ1201 2.7302 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 9
CORZ1101 2.4291 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 8
CORZ1001 2.1280 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 7
CORZ0901 1.8269 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 6
CORZ0801 1.5258 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 5
CORZ0701 1.2247 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 4
CORZ0601 0.9236 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 3
CORZ0501 0.6225 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 2
CORZ0401 0.3214 0.3011 0.0 0.4 * Fuel level 1
CORZ0301 0.1651 0.1563 0.0 0.4 * lower nozzle
CORZ0201 0.1524 0.0127 0.0 0.4 * 0.50" baseplate + lower nozzle CSP
CORZ0101 0.0000 0.1524 0.0 0.4 * 6" - top of liner to bot of baseplate
*
*
* Uniform Axial power density profile =====
*
*          fzpow
*          -----
CORZ1703 0.0
CORZ1603 0.0
CORZ1503 1.0
CORZ1403 1.0
CORZ1303 1.0
CORZ1203 1.0
CORZ1103 1.0
CORZ1003 1.0
CORZ0903 1.0
CORZ0803 1.0
CORZ0703 1.0
CORZ0603 1.0
CORZ0503 1.0
CORZ0403 1.0
CORZ0303 0.0
CORZ0203 0.0
CORZ0103 0.0
*
* =====
*
*          Outer radius of ring ii
*
*          [m]
CORR0100 3.89516
CORR0200 4.85812
CORR0300 5.35697
*
*
* =====
*
* Indicate Upper boundary heat structures
* =====

```

CORR0102 11210 0
 CORR0202 11220 0
 CORR0302 11230 0

*

=====

* Relative Power Density in this ring

=====

* based on UO2 mass in cor in each ring

CORR0103 0.5287

CORR0203 0.2937

CORR0303 0.1776

*

=====

* CVH/COR Channel/Bpass Connections

=====

*

* Ring-1

* -----

	Ch	By	
COR11701 -1	117	117 * 217	* Top nozzle and top of racks
COR11601 -1	117	117 * 217	* Unheated rods
COR11501 -1	117	117 * 217	* 12th Fuel level
COR11401 -1	117	117 * 217	* 11th Fuel level
COR11301 -1	117	117 * 217	* 10th Fuel level
COR11201 -1	117	117 * 217	* 9th Fuel level
COR11101 -1	117	117 * 217	* 8th Fuel level
COR11001 -1	117	117 * 217	* 7th Fuel level
COR10901 -1	117	117 * 217	* 6th Fuel level
COR10801 -1	117	117 * 217	* 5th Fuel level
COR10701 -1	117	117 * 217	* 4th Fuel level
COR10601 -1	117	117 * 217	* 3rd Fuel level
COR10501 -1	117	117 * 217	* 2nd Fuel level
COR10401 -1	117	117 * 217	* 1st Fuel level
COR10301 -1	117	117 * 217	* Bottom nozzle
COR10201 -1	130	130	* Fuel plate
COR10101 -1	130	130	* Beneath the base plate

*

* Ring-2

* -----

COR21701 -1	127	127 * 227	* Top nozzle and top of racks
COR21601 -1	127	127 * 227	* Unheated rods
COR21501 -1	127	127 * 227	* 12th Fuel level
COR21401 -1	127	127 * 227	* 11th Fuel level
COR21301 -1	127	127 * 227	* 10th Fuel level
COR21201 -1	127	127 * 227	* 9th Fuel level
COR21101 -1	127	127 * 227	* 8th Fuel level
COR21001 -1	127	127 * 227	* 7th Fuel level
COR20901 -1	127	127 * 227	* 6th Fuel level
COR20801 -1	127	127 * 227	* 5th Fuel level
COR20701 -1	127	127 * 227	* 4th Fuel level
COR20601 -1	127	127 * 227	* 3rd Fuel level
COR20501 -1	127	127 * 227	* 2nd Fuel level
COR20401 -1	127	127 * 227	* 1st Fuel level
COR20301 -1	127	127 * 227	* Bottom nozzle
COR20201 -1	130	130	* Fuel plate
COR20101 -1	130	130	* Beneath the base plate

*

*

*

* Ring-3


```

* -----
COR31701 -1      137      137 * 237 * Top nozzle and top of racks
COR31601 -1      137      137 * 237 * Unheated rods
*
COR31501 -1      137      137 * 237 * 12th Fuel level
COR31401 -1      137      137 * 237 * 11th Fuel level
COR31301 -1      137      137 * 237 * 10th Fuel level
COR31201 -1      137      137 * 237 * 9th Fuel level
*
COR31101 -1      137      137 * 237 * 8th Fuel level
COR31001 -1      137      137 * 237 * 7th Fuel level
COR30901 -1      137      137 * 237 * 6th Fuel level
COR30801 -1      137      137 * 237 * 5th Fuel level
*
COR30701 -1      137      137 * 237 * 4th Fuel level
COR30601 -1      137      137 * 237 * 3rd Fuel level
COR30501 -1      137      137 * 237 * 2nd Fuel level
COR30401 -1      137      137 * 237 * 1st Fuel level
*
COR30301 -1      137      137 * 237 * Bottom nozzle
COR30201 -1      130      130      * Fuel plate
COR30101 -1      130      130      * Beneath the base plate
*

```

```

*****
***** Mass input *****
*****

```

```

*****
* L E V E L 1 : 0.0 ~ 0.1524 m
*****

```

```

* Ring-1

```

```

* -----
*          MUO2  MHT   MADD  MUOX
COR101KFU 0.0  0.0  0.0  0.0
*          MZr   MInc  Mzro2
COR101KCL 0.0  0.0  0.0
*
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR101KRK 0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS    Zr   SSOX  ZrO2
COR101KSS 0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR101KNS 0.0  0.0  0.0  0.0  0.0

```

```

* Ring-2

```

```

* -----
*          MUO2  MHT   MADD  MUOX
COR201KFU 0.0  0.0  0.0  0.0
*          MZr   MInc  Mzro2
COR201KCL 0.0  0.0  0.0
*
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR201KRK 0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS    Zr   SSOX  ZrO2
COR201KSS 0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR201KNS 0.0  0.0  0.0  0.0  0.0

```

```

* Ring-3

```

```

* -----
*          MUO2  MHT   MADD  MUOX
COR301KFU 0.0  0.0  0.0  0.0
*          MZr   MInc  Mzro2
COR301KCL 0.0  0.0  0.0
*
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR301KRK 0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS    Zr   SSOX  ZrO2
COR301KSS 0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2

```

```

COR301KNS 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*
*
*****
* L E V E L 2 : 0.1524 ~0.1651 m
*****
*
* Ring-1
* -----
*          MUO2  MHT   MADD  MUOX
COR102KFU 0.0 0.0 0.0 0.0
*          MZr   MInc  Mzro2
COR102KCL 0.0 0.0 0.0
*
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR102KRRK 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      Zr   SSOX  ZrO2
COR102KSS 1440.12 0.0 0.0 0.0
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR102KNS 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*
* Ring-2
* -----
*          MUO2  MHT   MADD  MUOX
COR202KFU 0.0 0.0 0.0 0.0
*          MZr   MInc  Mzro2
COR202KCL 0.0 0.0 0.0
*
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR202KRRK 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      Zr   SSOX  ZrO2
COR202KSS 800.066 0.0 0.0 0.0
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR202KNS 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*
* Ring-3
* -----
*          MUO2  MHT   MADD  MUOX
COR302KFU 0.0 0.0 0.0 0.0
*          MZr   MInc  Mzro2
COR302KCL 0.0 0.0 0.0
*
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR302KRRK 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      Zr   SSOX  ZrO2
COR302KSS 483.6756 0.0 0.0 0.0
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR302KNS 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*
*****
* L E V E L 3 : 0.1651 ~ 0.3214 m
*****
*
* Ring-1
* -----
*          MUO2  MHT   MADD  MUOX
COR103KFU 0.0 0.0 0.0 0.0
*          MZr   MInc  Mzro2
COR103KCL 0.0 0.0 0.0
*
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR103KRRK 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      Zr   SSOX  ZrO2
COR103KSS 30.0 0.0 0.0 0.0
*          SS    CP    Zr   SSOX  ZrO2
COR103KNS 200.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*
* Ring-2
* -----
*          MUO2  MHT   MADD  MUOX
COR203KFU 0.0 0.0 0.0 0.0
*          MZr   MInc  Mzro2

```

```

COR203KCL  0.0  0.0  0.0
*
*          SS   CP   Zr  SSOX  ZrO2
COR203KCRK 0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS   Zr  SSOX  ZrO2
COR203KSS  20.0  0.0  0.0  0.0
*          SS   CP   Zr  SSOX  ZrO2
COR203KNS 100.0 0.0  0.0  0.0  0.0
*
*   Ring-3
*   -----
*          MUO2  MHT   MADD  MUOX
COR303KCFU 0.0  0.0  0.0  0.0
*          MZr   MInc  Mzro2
COR303KCL  0.0  0.0  0.0
*
*          SS   CP   Zr  SSOX  ZrO2
COR303KCRK 0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS   Zr  SSOX  ZrO2
COR303KSS  10.0  0.0  0.0  0.0
*          SS   CP   Zr  SSOX  ZrO2
COR303KNS  70.0  0.0  0.0  0.0  0.0
*
*
*-----
*  A C T I V E   F U E L   Z O N E
*
*           level 4 ~ level 15  same !
*
*****
*  L E V E L   4 : 0.3214 ~ 0.6225 m / dz=0.3011
*****
*
*   Ring-1
*   -----
*          MUO2      MHT   MADD  MUOX
COR104KCFU 34856.92211  0.0  0.0  0.0
*          MZr      MInc  Mzro2
COR104KCL  6543.790817  0.0  0.0
*
*          SS      CP   Zr  SSOX  ZrO2
COR104KCRK 8543.379045  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS      Zr  SSOX  ZrO2
COR104KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS      CP   Zr      SSOX  ZrO2
COR104KNS  8.548744388  0.0  525.9228661  0.0  0.0
*
*   Ring-2
*   -----
*          MUO2      MHT   MADD  MUOX
COR204KCFU 19364.95673  0.0  0.0  0.0
*          MZr      MInc  Mzro2
COR204KCL  3635.439343  0.0  0.0
*
*          SS      CP   Zr  SSOX  ZrO2
COR204KCRK 4746.321691  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS      Zr  SSOX  ZrO2
COR204KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS      CP   Zr      SSOX  ZrO2
COR204KNS  4.749302438  0.0  292.1793701  0.0  0.0
*
*   Ring-3
*   -----
*          MUO2      MHT   MADD  MUOX
COR304KCFU 11706.99657  0.0  0.0  0.0
*          MZr      MInc  Mzro2
COR304KCL  2197.78833  0.0  0.0
*
*          SS      CP   Zr  SSOX  ZrO2
COR304KCRK 2869.367204  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS      Zr  SSOX  ZrO2
COR304KSS  0.0  0.0  0.0  0.0

```

```

*          SS      CP      Zr      SSOX  ZrO2
COR304KNS 2.871169201 0.0 176.6357101 0.0 0.0
*
*****
*   L E V E L   05 : 0.6225 ~ 0.9236 m / dz=0.3011
*****
*
*   Ring-1
*   -----
*          MUO2      MHT      MADD  MUOX
COR105KFU 34856.92211 0.0 0.0 0.0
*          MZr      MInc  Mzro2
COR105KCL 6543.790817 0.0 0.0
*
*          SS      CP      Zr      SSOX  ZrO2
COR105KRK 8543.379045 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      Zr      SSOX  ZrO2
COR105KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      CP      Zr      SSOX  ZrO2
COR105KNS 8.548744388 0.0 525.9228661 0.0 0.0
*
*   Ring-2
*   -----
*          MUO2      MHT      MADD  MUOX
COR205KFU 19364.95673 0.0 0.0 0.0
*          MZr      MInc  Mzro2
COR205KCL 3635.439343 0.0 0.0
*
*          SS      CP      Zr      SSOX  ZrO2
COR205KRK 4746.321691 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      Zr      SSOX  ZrO2
COR205KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      CP      Zr      SSOX  ZrO2
COR205KNS 4.749302438 0.0 292.1793701 0.0 0.0
*
*   Ring-3
*   -----
*          MUO2      MHT      MADD  MUOX
COR305KFU 11706.99657 0.0 0.0 0.0
*          MZr      MInc  Mzro2
COR305KCL 2197.78833 0.0 0.0
*
*          SS      CP      Zr      SSOX  ZrO2
COR305KRK 2869.367204 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      Zr      SSOX  ZrO2
COR305KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      CP      Zr      SSOX  ZrO2
COR305KNS 2.871169201 0.0 176.6357101 0.0 0.0
*
*****
*   L E V E L   06 : 0.6225 ~ 0.9236 m / dz=0.3011
*****
*
*   Ring-1
*   -----
*          MUO2      MHT      MADD  MUOX
COR106KFU 34856.92211 0.0 0.0 0.0
*          MZr      MInc  Mzro2
COR106KCL 6543.790817 0.0 0.0
*
*          SS      CP      Zr      SSOX  ZrO2
COR106KRK 8543.379045 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      Zr      SSOX  ZrO2
COR106KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS      CP      Zr      SSOX  ZrO2
COR106KNS 8.548744388 0.0 525.9228661 0.0 0.0
*
*   Ring-2
*   -----
*          MUO2      MHT      MADD  MUOX
COR206KFU 19364.95673 0.0 0.0 0.0
*          MZr      MInc  Mzro2
COR206KCL 3635.439343 0.0 0.0

```

```

*
*      SS      CP      Zr  SSOX  ZrO2
COR206KRRK 4746.321691 0.0 0.0 0.0 0.0
*      SS  Zr  SSOX  ZrO2
COR206KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
*      SS      CP      Zr  SSOX  ZrO2
COR206KNS  4.749302438 0.0 292.1793701 0.0 0.0
*
* Ring-3
* -----
*      MUO2      MHT      MADD  MUOX
COR306KFU  11706.99657 0.0 0.0 0.0
*      MZr      MInc  Mzro2
COR306KCL  2197.78833 0.0 0.0
*
*      SS      CP      Zr  SSOX  ZrO2
COR306KRRK 2869.367204 0.0 0.0 0.0 0.0
*      SS  Zr  SSOX  ZrO2
COR306KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
*      SS      CP      Zr  SSOX  ZrO2
COR306KNS  2.871169201 0.0 176.6357101 0.0 0.0
*
*
*****
* L E V E L 07 : 0.6225 ~ 0.9236 m / dz=0.3011
*****
*
* Ring-1
* -----
COR107KFU  34856.92211 0.0 0.0 0.0
COR107KCL  6543.790817 0.0 0.0
COR107KRRK 8543.379045 0.0 0.0 0.0 0.0
COR107KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
COR107KNS  8.548744388 0.0 525.9228661 0.0 0.0
*
* Ring-2
* -----
COR207KFU  19364.95673 0.0 0.0 0.0
COR207KCL  3635.439343 0.0 0.0
COR207KRRK 4746.321691 0.0 0.0 0.0 0.0
COR207KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
COR207KNS  4.749302438 0.0 292.1793701 0.0 0.0
*
* Ring-3
* -----
COR307KFU  11706.99657 0.0 0.0 0.0
COR307KCL  2197.78833 0.0 0.0
COR307KRRK 2869.367204 0.0 0.0 0.0 0.0
COR307KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
COR307KNS  2.871169201 0.0 176.6357101 0.0 0.0
*
*****
* L E V E L 08 : 0.6225 ~ 0.9236 m / dz=0.3011
*****
*
* Ring-1
* -----
COR108KFU  34856.92211 0.0 0.0 0.0
COR108KCL  6543.790817 0.0 0.0
COR108KRRK 8543.379045 0.0 0.0 0.0 0.0
COR108KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
COR108KNS  8.548744388 0.0 525.9228661 0.0 0.0
*
* Ring-2
* -----
COR208KFU  19364.95673 0.0 0.0 0.0
COR208KCL  3635.439343 0.0 0.0
COR208KRRK 4746.321691 0.0 0.0 0.0 0.0
COR208KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
COR208KNS  4.749302438 0.0 292.1793701 0.0 0.0
*
* Ring-3

```

```

* -----
COR308KFU 11706.99657 0.0 0.0 0.0
COR308KCL 2197.78833 0.0 0.0
COR308KRK 2869.367204 0.0 0.0 0.0 0.0
COR308KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
COR308KNS 2.871169201 0.0 176.6357101 0.0 0.0
*
*****
* L E V E L 09 : 0.6225 ~ 0.9236 m / dz=0.3011
*****
*
* Ring-1
* -----
COR109KFU 34856.92211 0.0 0.0 0.0
COR109KCL 6543.790817 0.0 0.0
COR109KRK 8543.379045 0.0 0.0 0.0 0.0
COR109KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
COR109KNS 8.548744388 0.0 525.9228661 0.0 0.0
*
* Ring-2
* -----
COR209KFU 19364.95673 0.0 0.0 0.0
COR209KCL 3635.439343 0.0 0.0
COR209KRK 4746.321691 0.0 0.0 0.0 0.0
COR209KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
COR209KNS 4.749302438 0.0 292.1793701 0.0 0.0
*
* Ring-3
* -----
COR309KFU 11706.99657 0.0 0.0 0.0
COR309KCL 2197.78833 0.0 0.0
COR309KRK 2869.367204 0.0 0.0 0.0 0.0
COR309KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
COR309KNS 2.871169201 0.0 176.6357101 0.0 0.0
*
*****
* L E V E L 10 : 0.6225 ~ 0.9236 m / dz=0.3011
*****
*
* Ring-1
* -----
COR110KFU 34856.92211 0.0 0.0 0.0
COR110KCL 6543.790817 0.0 0.0
COR110KRK 8543.379045 0.0 0.0 0.0 0.0
COR110KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
COR110KNS 8.548744388 0.0 525.9228661 0.0 0.0
*
* Ring-2
* -----
COR210KFU 19364.95673 0.0 0.0 0.0
COR210KCL 3635.439343 0.0 0.0
COR210KRK 4746.321691 0.0 0.0 0.0 0.0
COR210KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
COR210KNS 4.749302438 0.0 292.1793701 0.0 0.0
*
* Ring-3
* -----
COR310KFU 11706.99657 0.0 0.0 0.0
COR310KCL 2197.78833 0.0 0.0
COR310KRK 2869.367204 0.0 0.0 0.0 0.0
COR310KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
COR310KNS 2.871169201 0.0 176.6357101 0.0 0.0
*
*****
* L E V E L 11 : 0.6225 ~ 0.9236 m / dz=0.3011
*****
*
* Ring-1
* -----
COR111KFU 34856.92211 0.0 0.0 0.0
COR111KCL 6543.790817 0.0 0.0
COR111KRK 8543.379045 0.0 0.0 0.0 0.0

```

```

COR111KSS  0.0    0.0  0.0  0.0
COR111KNS  8.548744388  0.0  525.9228661  0.0  0.0
*
*   Ring-2
*   -----
COR211KFU  19364.95673  0.0  0.0  0.0
COR211KCL  3635.439343  0.0  0.0
COR211KRK  4746.321691  0.0  0.0  0.0  0.0
COR211KSS  0.0    0.0  0.0  0.0
COR211KNS  4.749302438  0.0  292.1793701  0.0  0.0
*
*   Ring-3
*   -----
COR311KFU  11706.99657  0.0  0.0  0.0
COR311KCL  2197.78833  0.0  0.0
COR311KRK  2869.367204  0.0  0.0  0.0  0.0
COR311KSS  0.0    0.0  0.0  0.0
COR311KNS  2.871169201  0.0  176.6357101  0.0  0.0
*
*****
*   L E V E L  12 : 0.6225 ~ 0.9236 m / dz=0.3011
*****
*
*   Ring-1
*   -----
COR112KFU  34856.92211  0.0  0.0  0.0
COR112KCL  6543.790817  0.0  0.0
COR112KRK  8543.379045  0.0  0.0  0.0  0.0
COR112KSS  0.0    0.0  0.0  0.0
COR112KNS  8.548744388  0.0  525.9228661  0.0  0.0
*
*   Ring-2
*   -----
COR212KFU  19364.95673  0.0  0.0  0.0
COR212KCL  3635.439343  0.0  0.0
COR212KRK  4746.321691  0.0  0.0  0.0  0.0
COR212KSS  0.0    0.0  0.0  0.0
COR212KNS  4.749302438  0.0  292.1793701  0.0  0.0
*
*   Ring-3
*   -----
COR312KFU  11706.99657  0.0  0.0  0.0
COR312KCL  2197.78833  0.0  0.0
COR312KRK  2869.367204  0.0  0.0  0.0  0.0
COR312KSS  0.0    0.0  0.0  0.0
COR312KNS  2.871169201  0.0  176.6357101  0.0  0.0
*
*****
*   L E V E L  13 : 0.6225 ~ 0.9236 m / dz=0.3011
*****
*
*   Ring-1
*   -----
COR113KFU  34856.92211  0.0  0.0  0.0
COR113KCL  6543.790817  0.0  0.0
COR113KRK  8543.379045  0.0  0.0  0.0  0.0
COR113KSS  0.0    0.0  0.0  0.0
COR113KNS  8.548744388  0.0  525.9228661  0.0  0.0
*
*   Ring-2
*   -----
COR213KFU  19364.95673  0.0  0.0  0.0
COR213KCL  3635.439343  0.0  0.0
COR213KRK  4746.321691  0.0  0.0  0.0  0.0
COR213KSS  0.0    0.0  0.0  0.0
COR213KNS  4.749302438  0.0  292.1793701  0.0  0.0
*
*   Ring-3
*   -----
COR313KFU  11706.99657  0.0  0.0  0.0
COR313KCL  2197.78833  0.0  0.0
COR313KRK  2869.367204  0.0  0.0  0.0  0.0

```

```

COR313KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
COR313KNS  2.871169201  0.0  176.6357101  0.0  0.0
*
*****
*   L E V E L  14 : 0.6225 ~ 0.9236 m / dz=0.3011
*****
*
*   Ring-1
*   -----
COR114KFU  34856.92211  0.0  0.0  0.0
COR114KCL  6543.790817  0.0  0.0
COR114KRK  8543.379045  0.0  0.0  0.0  0.0
COR114KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
COR114KNS  8.548744388  0.0  525.9228661  0.0  0.0
*
*   Ring-2
*   -----
COR214KFU  19364.95673  0.0  0.0  0.0
COR214KCL  3635.439343  0.0  0.0
COR214KRK  4746.321691  0.0  0.0  0.0  0.0
COR214KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
COR214KNS  4.749302438  0.0  292.1793701  0.0  0.0
*
*   Ring-3
*   -----
COR314KFU  11706.99657  0.0  0.0  0.0
COR314KCL  2197.78833  0.0  0.0
COR314KRK  2869.367204  0.0  0.0  0.0  0.0
COR314KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
COR314KNS  2.871169201  0.0  176.6357101  0.0  0.0
*
*****
*   L E V E L  15 : 0.6225 ~ 0.9236 m / dz=0.3011
*****
*
*
*   Ring-1
*   -----
*           MUO2      MHT      MADD  MUOX
COR115KFU  34856.92211  0.0  0.0  0.0
*           MZr      MInc     Mzro2
COR115KCL  6543.790817  0.0  0.0
*
*           SS          CP          Zr   SSOX  ZrO2
COR115KRK  8543.379045  0.0  0.0  0.0  0.0
*           SS      Zr   SSOX  ZrO2
COR115KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
*           SS      CP      Zr   SSOX  ZrO2
COR115KNS  8.548744388  0.0  525.9228661  0.0  0.0
*
*   Ring-2
*   -----
*           MUO2      MHT      MADD  MUOX
COR215KFU  19364.95673  0.0  0.0  0.0
*           MZr      MInc     Mzro2
COR215KCL  3635.439343  0.0  0.0
*
*           SS          CP          Zr   SSOX  ZrO2
COR215KRK  4746.321691  0.0  0.0  0.0  0.0
*           SS      Zr   SSOX  ZrO2
COR215KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
*           SS      CP      Zr   SSOX  ZrO2
COR215KNS  4.749302438  0.0  292.1793701  0.0  0.0
*
*   Ring-3
*   -----
*           MUO2      MHT      MADD  MUOX
COR315KFU  11706.99657  0.0  0.0  0.0
*           MZr      MInc     Mzro2
COR315KCL  2197.78833  0.0  0.0
*

```



```

*          SS          CP          Zr  SSOX  ZrO2
COR315KRK 2869.367204 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS          Zr  SSOX  ZrO2
COR315KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS          CP          Zr  SSOX  ZrO2
COR315KNS 2.871169201 0.0 176.6357101 0.0 0.0
*
*****
*  L E V E L 16 : 3.9346 ~ 4.0463 m / dz=0.1117
*****
*
*  Ring-1
*  -----
*          MUO2          MHT  MADD  MUOX
COR116KFU 0.0 0.0 0.0 0.0
*          MZr          MInc  Mzro2
COR116KCL 0.0 0.0 0.0
*
*          SS          CP          Zr  SSOX  ZrO2
COR116KRK 3169.363797 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS          Zr  SSOX  ZrO2
COR116KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS          CP          Zr  SSOX  ZrO2
COR116KNS 200.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*
*  Ring-2
*  -----
*          MUO2          MHT  MADD  MUOX
COR216KFU 0.0 0.0 0.0 0.0
*          MZr          MInc  Mzro2
COR216KCL 0.0 0.0 0.0
*
*          SS          CP          Zr  SSOX  ZrO2
COR216KRK 1760.757665 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS          Zr  SSOX  ZrO2
COR216KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS          CP          Zr  SSOX  ZrO2
COR216KNS 200.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*
*  Ring-3
*  -----
*          MUO2          MHT  MADD  MUOX
COR316KFU 0.0 0.0 0.0 0.0
*          MZr          MInc  Mzro2
COR316KCL 0.0 0.0 0.0
*
*          SS          CP          Zr  SSOX  ZrO2
COR316KRK 1064.458043 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS          Zr  SSOX  ZrO2
COR316KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS          CP          Zr  SSOX  ZrO2
COR316KNS 200.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*
*****
*  L E V E L 17 : 4.0463 ~ 4.1884 m / dz=0.1421
*****
*
*  Ring-1
*  -----
*          MUO2          MHT  MADD  MUOX
COR117KFU 0.0 0.0 0.0 0.0
*          MZr          MInc  Mzro2
COR117KCL 0.0 0.0 0.0
*
*          SS          CP          Zr  SSOX  ZrO2
COR117KRK 4031.930131 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS          Zr  SSOX  ZrO2
COR117KSS 0.0 0.0 0.0 0.0
*          SS          CP          Zr  SSOX  ZrO2
COR117KNS 300.0 0.0 0.0 0.0 0.0
*

```

```

* Ring-2
* -----
*          MUO2      MHT      MADD  MUOX
COR217KFU    0.0      0.0    0.0  0.0
*          MZr       MInc     Mzro2
COR217KCL    0.0      0.0    0.0
*
*          SS        CP        Zr    SSOX  ZrO2
COR217KRK 2239.961183  0.0    0.0  0.0  0.0
*          SS      Zr    SSOX  ZrO2
COR217KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS      CP      Zr    SSOX  ZrO2
COR217KNS  200.0  0.0    0.0  0.0  0.0
*
* Ring-3
* -----
*          MUO2      MHT      MADD  MUOX
COR317KFU    0.0      0.0    0.0  0.0
*          MZr       MInc     Mzro2
COR317KCL    0.0      0.0    0.0
*
*          SS        CP        Zr    SSOX  ZrO2
COR317KRK 1354.158352  0.0    0.0  0.0  0.0
*          SS      Zr    SSOX  ZrO2
COR317KSS  0.0  0.0  0.0  0.0
*          SS      CP      Zr    SSOX  ZrO2
COR317KNS  100.0  0.0    0.0  0.0  0.0
*
*
* ////////////////////////////////////////////////////////////////////
* Initial Temperature Distribution //
* ////////////////////////////////////////////////////////////////////
*
*          TFU      TCL      TOS      TCN      TCB      TPD      TSS      TNS
COR11703    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR11603    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR11503    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR11403    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR11303    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR11203    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR11103    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR11003    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR10903    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR10803    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR10703    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR10603    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR10503    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR10403    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR10303    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR10203    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR10103    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
*
COR21703    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR21603    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR21503    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR21403    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR21303    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR21203    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR21103    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR21003    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR20903    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR20803    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR20703    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR20603    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR20503    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR20403    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR20303    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR20203    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
COR20103    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.
*
COR31703    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.    300.

```


COR10204	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR10304	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR10404	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR10504	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR10604	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR10704	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR10804	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR10904	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR11004	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR11104	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR11204	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR11304	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR11404	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR11504	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR11604	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR11704	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06

*

COR20104	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR20204	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR20304	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR20404	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR20504	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR20604	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR20704	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR20804	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR20904	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR21004	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR21104	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR21204	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR21304	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR21404	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR21504	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR21604	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR21704	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06

*

COR30104	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR30204	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR30304	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR30404	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR30504	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR30604	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR30704	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR30804	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR30904	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR31004	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR31104	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR31204	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR31304	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR31404	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR31504	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR31604	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
COR31704	0.0117	0.0	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06

* RK = SFP rack component equiv. diameter
 * DHYRK

COR10304C	0.06
COR10404C	0.06
COR10504C	0.06
COR10604C	0.06
COR10704C	0.06
COR10804C	0.06
COR10904C	0.06
COR11004C	0.06
COR11104C	0.06
COR11204C	0.06
COR11304C	0.06
COR11404C	0.06
COR11504C	0.06
COR11604C	0.06
COR11704C	0.06

*
 COR20304C 0.06

```

COR20404C 0.06
COR20504C 0.06
COR20604C 0.06
COR20704C 0.06
COR20804C 0.06
COR20904C 0.06
COR21004C 0.06
COR21104C 0.06
COR21204C 0.06
COR21304C 0.06
COR21404C 0.06
COR21504C 0.06
COR21604C 0.06
COR21704C 0.06
*
COR30304C 0.06
COR30404C 0.06
COR30504C 0.06
COR30604C 0.06
COR30704C 0.06
COR30804C 0.06
COR30904C 0.06
COR31004C 0.06
COR31104C 0.06
COR31204C 0.06
COR31304C 0.06
COR31404C 0.06
COR31504C 0.06
COR31604C 0.06
COR31704C 0.06
*
*
*////////////////////
*
* Cell Boundary and Flow Area  ///
*
*////////////////////
*
* Ring-1
* -----
* ASCELR AFLOWC AFLOWB
COR10105 3.729686232 47.66521325 0.0
COR10205 0.310807186 23.8326 0.0
COR10305 3.825130958 19.69273888 0.0
COR10405 7.368822338 19.69273888 0.0
COR10505 7.368822338 19.69273888 0.0
COR10605 7.368822338 19.69273888 0.0
COR10705 7.368822338 19.69273888 0.0
COR10805 7.368822338 19.69273888 0.0
COR10905 7.368822338 19.69273888 0.0
COR11005 7.368822338 19.69273888 0.0
COR11105 7.368822338 19.69273888 0.0
COR11205 7.368822338 19.69273888 0.0
COR11305 7.368822338 19.69273888 0.0
COR11405 7.368822338 19.69273888 0.0
COR11505 7.368822338 19.69273888 0.0
COR11605 2.733634856 20.0 0.0
COR11705 3.477614262 20.0 0.0
*
* Ring-2
* -----
* ASCELR AFLOWC AFLOWB
COR20105 4.651814047 26.48067403 0.0
COR20205 0.3876511706 13.24033702 0.0
COR20305 4.770856533 10.94041049 0.0
COR20405 9.190690352 10.94041049 0.0
COR20505 9.190690352 10.94041049 0.0
COR20605 9.190690352 10.94041049 0.0
COR20705 9.190690352 10.94041049 0.0
COR20805 9.190690352 10.94041049 0.0
COR20905 9.190690352 10.94041049 0.0
COR21005 9.190690352 10.94041049 0.0

```

COR21105	9.190690352	10.94041049	0.0
COR21205	9.190690352	10.94041049	0.0
COR21305	9.190690352	10.94041049	0.0
COR21405	9.190690352	10.94041049	0.0
COR21505	9.190690352	10.94041049	0.0
COR21605	3.409498878	11.0	0.0
COR21705	4.337419791	11.0	0.0

*
* Ring-3

	ASCELR	AFLOWC	AFLOWB
COR30105	5.12963521	16.00877112	0.0
COR30205	0.4274696009	8.00438556	0.0
COR30305	5.260905403	6.613975431	0.0
COR30405	10.13473203	6.613975431	0.0
COR30505	10.13473203	6.613975431	0.0
COR30605	10.13473203	6.613975431	0.0
COR30705	10.13473203	6.613975431	0.0
COR30805	10.13473203	6.613975431	0.0
COR30905	10.13473203	6.613975431	0.0
COR31005	10.13473203	6.613975431	0.0
COR31105	10.13473203	6.613975431	0.0
COR31205	10.13473203	6.613975431	0.0
COR31305	10.13473203	6.613975431	0.0
COR31405	10.13473203	6.613975431	0.0
COR31505	10.13473203	6.613975431	0.0
COR31605	3.759712946	7.0	0.0
COR31705	4.782947266	7.0	0.0

*
*
* ///
*
* Surface Area for components ////

*
* ///
*

* -----
* 06 - surface area
* -----

	ASFU	ASCL	ASOS	ASCN (ignored)	ASSS	ASNS
COR10106	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
COR10206	0.0	0.0	0.0	0.0	23.0	0.0
COR10306	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.5
COR10406	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.3880801
COR10506	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.3880801
COR10606	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.388
COR10706	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.3880801
COR10806	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.3880801
COR10906	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.3880801
COR11006	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.3880801
COR11106	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.3880801
COR11206	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.3880801
COR11306	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.3880801
COR11406	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.3880801
COR11506	1586.222497	1878.94186	0.0	0.0	0.0	228.3880801
COR11606	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
COR11706	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
COR20106	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
COR20206	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0
COR20306	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.1
COR20406	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226
COR20506	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226
COR20606	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226
COR20706	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226
COR20806	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226
COR20906	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226
COR21006	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226
COR21106	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226
COR21206	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226
COR21306	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226

COR21406	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226
COR21506	881.2347	1043.8565	0.0	0.0	0.0	126.88226
COR21606	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0
COR21706	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.0
*						
COR30106	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
COR30206	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0
COR30306	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0
COR30406	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR30506	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR30606	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR30706	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR30806	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR30906	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR31006	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR31106	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR31206	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR31306	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR31406	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR31506	532.7464	631.0587	0.0	0.0	0.0	76.7060
COR31606	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0
COR31706	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0

*

*

* ASRK -> rack surface area (both sides)

COR10106C	0.0
COR10206C	0.0
COR10306C	0.0
COR10406C	434.1778366
COR10506C	434.1778366
COR10606C	434.1778366
COR10706C	434.1778366
COR10806C	434.1778366
COR10906C	434.1778366
COR11006C	434.1778366
COR11106C	434.1778366
COR11206C	434.1778366
COR11306C	434.1778366
COR11406C	434.1778366
COR11506C	434.1778366
COR11606C	161.0682974
COR11706C	204.904253

*

COR20106C	0.0
COR20206C	0.0
COR20306C	0.0
COR20406C	241.2099
COR20506C	241.2099
COR20606C	241.2099
COR20706C	241.2099
COR20806C	241.2099
COR20906C	241.2099
COR21006C	241.2099
COR21106C	241.2099
COR21206C	241.2099
COR21306C	241.2099
COR21406C	241.2099
COR21506C	241.2099
COR21606C	89.4823
COR21706C	113.83569

*

COR30106C	0.0
COR30206C	0.0
COR30306C	0.0
COR30406C	145.8223
COR30506C	145.8223
COR30606C	145.8223
COR30706C	145.8223
COR30806C	145.8223
COR30906C	145.8223
COR31006C	145.8223
COR31106C	145.8223

COR31206C 145.8223
 COR31306C 145.8223
 COR31406C 145.8223
 COR31506C 145.8223
 COR31606C 54.0961
 COR31706C 68.8188

*

* SFP FLOOR INPUT

IS	TLH	RADLH	ICVCAV	
seg#	Tinit	Ro_at_seg#	CAV_cvh# (atmosphere)	
CORLHD01	1	301.0	3.895	900
CORLHD02	2	301.0	4.858	900
CORLHD03	3	301.0	5.35697	900
CORLHD04	4	301.0	5.35697	900

*
 *
 CORLHN01 'STAINLESS STEEL' 0.00635 'STAINLESS STEEL' 0.00635 * liner
 CORLHN02 'CONCRETE' 0.01635 'CONCRETE' 0.01635
 CORLHN03 'CONCRETE' 0.05635 'CONCRETE' 0.05635
 CORLHN04 'CONCRETE' 0.10635 'CONCRETE' 0.10635
 CORLHN05 'CONCRETE' 0.25635 'CONCRETE' 0.25635
 CORLHN06 'CONCRETE' 0.50635 'CONCRETE' 0.50635
 CORLHN07 'CONCRETE' 0.75635 'CONCRETE' 0.75635
 CORLHN08 'CONCRETE' 1.00635 'CONCRETE' 1.00635
 CORLHN09 'CONCRETE' 1.50635 'CONCRETE' 1.50635
 CORLHN10 'CONCRETE' 2.00000 'CONCRETE' 2.00000

*
 *
 * Level core Radial boundary heat structure specification =====

* ihsa
 * ----

corz1702 11170
 corz1602 11160
 corz1502 11150
 corz1402 11140
 corz1302 11130
 corz1202 11120
 corz1102 11110
 corz1002 11100
 corz0902 11090
 corz0802 11080
 corz0702 11070
 corz0602 11060
 corz0502 11050
 corz0402 11040
 corz0302 11030
 corz0202 11020
 corz0102 0

*
 *-----

* Other sensitivity coefficients
 * =====

* UO2 relocation with completely oxidized rod
 SC11321 1132 2575.0 1
 * Enhance conduction of debris as it becomes molten
 SC12501 1250 2700.0 1

* Sensitivity Coefficients for zircaloy air oxidation
 *
 SC10041 1004 600.0 1 * Set minimum temperature for oxidation to 600 K

*
 *-----

 ***** SFP DECAY Input *****

```

*****
*
*****
*   SFP Decay heat input
*****
*
*
DCHOPERPOW 0.35E+7
DCHREACTOR PWR
DCHSHUT -1 0.0 * trip at 0 s
DCHDECPOW TF.77
DCHFPOW 0.2265501E+7 0.1087177E+7 0.0147315E+7
*
      [W]
TF07700 'elect-power' 5 1.0 0.0
TF07711 0.0 0.35E+7
TF07712 29999.5 0.35E+7
TF07713 30000.0 0.35E+7
TF07714 50000.0 0.35E+7
TF07715 100000.0 0.35E+7
*
DCHDEFCLS1 ALL
DCHDEFCLS0 1 3 5 6 8 9
DCHDEFCLS1 10 11 12 13 14 15
*
=====
*   Update for simulating Cs2MoO4 *
=====
*
*   Element Data
*   =====
*
*           Name   Mass [kg]
DCHNEM0100 'CSX' 7.6626
*           Time [s]   Decay-heat [W/kg]
DCHNEM0101 0.0 1.1182E+05
DCHNEM0102 6.12 8.1327E+04
DCHNEM0103 1.1880E+01 7.9324E+04
DCHNEM0104 1.8000E+01 7.2200E+04
DCHNEM0105 2.9880E+01 6.8656E+04
*
*           Name   Mass [kg]
DCHNEM0200 'I' 1.0E-25
*           Time [s]   Decay-heat [W/kg]
DCHNEM0201 0.0 1.0E-20
DCHNEM0202 1.0E+01 1.0E-20
DCHNEM0203 1.0E+7 1.0E-20
*
*           Name   Mass [kg]
DCHNEM0300 'Mo' 146.9
*           Time [s]   Decay-heat [W/kg]
DCHNEM0301 0.0 1.0E-20
DCHNEM0302 1.0E+01 1.0E-20
DCHNEM0303 1.0E+7 1.0E-20
*
*           Name   Mass [kg]
DCHNEM0400 'CI' 25.881
*           Time [s]   Decay-heat [W/kg]
DCHNEM0401 0.0 6.3451E+05
DCHNEM0402 6.1200E+00 5.4676E+05
DCHNEM0403 1.1880E+01 5.4676E+05
*
*           Name   Mass [kg]
DCHNEM0500 'CZ' 198.14
*           Time [s]   Decay-heat [W/kg]
DCHNEM0501 0.0 7.4824E+04
DCHNEM0502 6.1200E+00 5.7759E+04
*
*   Class Def
*   =====
*
DCHCLS0020 'CS'
DCHCLS0021 CSX
*

```

```

DCHCLS0040 'I2'
DCHCLS0041 I
*
DCHCLS0070 'MO'
DCHCLS0071 Mo
*
DCHCLS0160 'CSI'
DCHCLS0161 CI
*
DCHCLS0170 'CSM'
DCHCLS0171 CZ
*
DCHCLSNORM YES
*
*****
***** S F P HS input *****
*****
*
*          l=rect
*          np      igeom      iss
hs11020000  10          1          0
*
*          hsname
hs11020001  'SFP_WALL Lev 2'
*
*          hsalt      alpha l=vertic
hs11020002  0.1524          1.0
hs11020003  1.0
hs11020004  302
*
*          nodloc      ifmmat      xi
hs11020100  -1          1          0.0
hs11020101  6.4E-3          2
hs11020102  0.0156          3
hs11020103  0.0313          4
hs11020104  2.0          10
*
*          matnam      mshnum
hs11020201  'stainless steel' 1
hs11020202  'CONCRETE'      2
hs11020203  'CONCRETE'      8
hs11020204  'CONCRETE'      9
*
hs11020300  -1
hs11020400  1          130      'INT'      0.5      0.5
*
*          A          Lch          Lax
hs11020500  0.48451          0.127          0.0127
hs11020600  0          * insulated
*
-----
*
*          l=rect
*          np      igeom      iss
hs11030000  10          1          0
*
*          hsname
hs11030001  'SFP_WALL Lev 3'
*
*          hsalt      alpha l=vertic
hs11030002  0.1651          1.0
hs11030003  1.0
hs11030004  303
*
*          nodloc      ifmmat      xi
hs11030100  -1          1          0.0
hs11030101  6.4E-3          2
hs11030102  0.0156          3
hs11030103  0.0313          4
hs11030104  2.0          10
*
*          matnam      mshnum
hs11030201  'stainless steel' 1
hs11030202  'CONCRETE'      2
hs11030203  'CONCRETE'      8
hs11030204  'CONCRETE'      9
*
hs11030300  -1
hs11030400  1          137      'INT'      0.5      0.5

```

```

*           A           Lch           Lax
hs11030500 5.963       0.127       0.1563
hs11030600 0           * insulated
*
-----
*
*           l=rect
*           np           igeom           iss
hs11040000 10          1           0
*           hsname
hs11040001 'SFP_WALL Lev 4'
*           hsalt       alpha l=vertic
hs11040002 0.3214     1.0
hs11040003 1.0
hs11040004 304
*           nodloc     ifmmat           xi
hs11040100 -1          1           0.0
hs11040101 6.4E-3     2
hs11040102 0.0156     3
hs11040103 0.0313     4
hs11040104 2.0        10
*           matnam     mshnum
hs11040201 'stainless steel' 1
hs11040202 'CONCRETE'       2
hs11040203 'CONCRETE'       8
hs11040204 'CONCRETE'       9
*
hs11040300 -1
hs11040400 1          137       'INT'       0.5       0.5
*           A           Lch           Lax
hs11040500 11.4872    0.127     0.3011
hs11040600 0           * insulated
*
-----
*
*           l=rect
*           np           igeom           iss
hs11050000 10          1           0
*           hsname
hs11050001 'SFP_WALL Lev 5'
*           hsalt       alpha l=vertic
hs11050002 0.6225     1.0
hs11050003 1.0
hs11050004 305
*           nodloc     ifmmat           xi
hs11050100 -1          1           0.0
hs11050101 6.4E-3     2
hs11050102 0.0156     3
hs11050103 0.0313     4
hs11050104 2.0        10
*           matnam     mshnum
hs11050201 'stainless steel' 1
hs11050202 'CONCRETE'       2
hs11050203 'CONCRETE'       8
hs11050204 'CONCRETE'       9
*
hs11050300 -1
hs11050400 1          137       'INT'       0.5       0.5
*           A           Lch           Lax
hs11050500 0.0608     0.127     0.3011
hs11050600 0           * insulated
*
-----
*
*           l=rect
*           np           igeom           iss
hs11060000 10          1           0
*           hsname
hs11060001 'SFP_WALL Lev 6'
*           hsalt       alpha l=vertic
hs11060002 0.9236     1.0
hs11060003 1.0
hs11060004 306

```

```

*          nodloc      ifmmat      xi
hs11060100      -1          1          0.0
hs11060101      6.4E-3      2
hs11060102      0.0156      3
hs11060103      0.0313      4
hs11060104      2.0          10
*          matnam      mshnum
hs11060201      'stainless steel' 1
hs11060202      'CONCRETE'      2
hs11060203      'CONCRETE'      8
hs11060204      'CONCRETE'      9
*
hs11060300      -1
hs11060400      1          137      'INT'      0.5      0.5
*          A          Lch          Lax
hs11060500      0.0608      0.127      0.3011
hs11060600      0          * insulated
*
-----
*          l=rect
*          np          igeom      iss
hs11070000      10          1          0
*          hsname
hs11070001      'SFP_WALL Lev 7'
*          hsalt      alpha l=vertic
hs11070002      1.2247      1.0
hs11070003      1.0
hs11070004      307
*          nodloc      ifmmat      xi
hs11070100      -1          1          0.0
hs11070101      6.4E-3      2
hs11070102      0.0156      3
hs11070103      0.0313      4
hs11070104      2.0          10
*          matnam      mshnum
hs11070201      'stainless steel' 1
hs11070202      'CONCRETE'      2
hs11070203      'CONCRETE'      8
hs11070204      'CONCRETE'      9
*
hs11070300      -1
hs11070400      1          137      'INT'      0.5      0.5
*          A          Lch          Lax
hs11070500      0.0608      0.127      0.3011
hs11070600      0          * insulated
*
-----
*          np          igeom      iss
hs11080000      10          1          0
*          hsname
hs11080001      'SFP_WALL Lev 8'
*          hsalt      alpha l=vertic
hs11080002      1.5258      1.0
hs11080003      1.0
hs11080004      308
*          nodloc      ifmmat      xi
hs11080100      -1          1          0.0
hs11080101      6.4E-3      2
hs11080102      0.0156      3
hs11080103      0.0313      4
hs11080104      2.0          10
*          matnam      mshnum
hs11080201      'stainless steel' 1
hs11080202      'CONCRETE'      2
hs11080203      'CONCRETE'      8
hs11080204      'CONCRETE'      9
*
hs11080300      -1
hs11080400      1          137      'INT'      0.5      0.5
*          A          Lch          Lax
hs11080500      0.0608      0.127      0.3011

```

```

hs11080600      0      * insulated
*
-----
*
*              l=rect
*              np      igeom      iss
hs11090000      10      1      0
*
*              hsname
hs11090001      'SFP_WALL Lev 9'
*              hsalt      alpha l=vertic
hs11090002      1.8269      1.0
hs11090003      1.0
hs11090004      309
*              nodloc      ifmmat      xi
hs11090100      -1      1      0.0
hs11090101      6.4E-3      2
hs11090102      0.0156      3
hs11090103      0.0313      4
hs11090104      2.0      10
*              matnam      mshnum
hs11090201      'stainless steel' 1
hs11090202      'CONCRETE'      2
hs11090203      'CONCRETE'      8
hs11090204      'CONCRETE'      9
*
hs11090300      -1
hs11090400      1      137      'INT'      0.5      0.5
*              A      Lch      Lax
hs11090500      0.0608      0.127      0.3011
hs11090600      0      * insulated
*
-----
*
*              l=rect
*              np      igeom      iss
hs11100000      10      1      0
*
*              hsname
hs11100001      'SFP_WALL Lev 10'
*              hsalt      alpha l=vertic
hs11100002      2.1280      1.0
hs11100003      1.0
hs11100004      310
*              nodloc      ifmmat      xi
hs11100100      -1      1      0.0
hs11100101      6.4E-3      2
hs11100102      0.0156      3
hs11100103      0.0313      4
hs11100104      2.0      10
*              matnam      mshnum
hs11100201      'stainless steel' 1
hs11100202      'CONCRETE'      2
hs11100203      'CONCRETE'      8
hs11100204      'CONCRETE'      9
*
hs11100300      -1
hs11100400      1      137      'INT'      0.5      0.5
*              A      Lch      Lax
hs11100500      0.0608      0.127      0.3011
hs11100600      0      * insulated
*
-----
*
*              l=rect
*              np      igeom      iss
hs11110000      10      1      0
*
*              hsname
hs11110001      'SFP_WALL Lev 11'
*              hsalt      alpha l=vertic
hs11110002      2.4291      1.0
hs11110003      1.0
hs11110004      311
*              nodloc      ifmmat      xi
hs11110100      -1      1      0.0
hs11110101      6.4E-3      2
hs11110102      0.0156      3

```

```

hs11110103      0.0313      4
hs11110104      2.0          10
*
*      matnam      mshnum
hs11110201      'stainless steel' 1
hs11110202      'CONCRETE'      2
hs11110203      'CONCRETE'      8
hs11110204      'CONCRETE'      9
*
hs11110300      -1
hs11110400      1          137      'INT'      0.5      0.5
*
*      A          Lch          Lax
hs11110500      0.0608      0.127      0.3011
hs11110600      0          * insulated
*

```

```

*-----*
*
*      1=rect
*      np      igeom      iss
hs11120000      10          1          0
*
*      hsname
hs11120001      'SFP_WALL Lev 12'
*
*      hsalt      alpha 1=vertic
hs11120002      2.7302      1.0
hs11120003      1.0
hs11120004      312
*
*      nodloc      ifmmat      xi
hs11120100      -1          1          0.0
hs11120101      6.4E-3      2
hs11120102      0.0156      3
hs11120103      0.0313      4
hs11120104      2.0          10
*
*      matnam      mshnum
hs11120201      'stainless steel' 1
hs11120202      'CONCRETE'      2
hs11120203      'CONCRETE'      8
hs11120204      'CONCRETE'      9
*
hs11120300      -1
hs11120400      1          137      'INT'      0.5      0.5
*
*      A          Lch          Lax
hs11120500      0.0608      0.127      0.3011
hs11120600      0          * insulated
*

```

```

*-----*
*
*      1=rect
*      np      igeom      iss
hs11130000      10          1          0
*
*      hsname
hs11130001      'SFP_WALL Lev 13'
*
*      hsalt      alpha 1=vertic
hs11130002      3.0313      1.0
hs11130003      1.0
hs11130004      313
*
*      nodloc      ifmmat      xi
hs11130100      -1          1          0.0
hs11130101      6.4E-3      2
hs11130102      0.0156      3
hs11130103      0.0313      4
hs11130104      2.0          10
*
*      matnam      mshnum
hs11130201      'stainless steel' 1
hs11130202      'CONCRETE'      2
hs11130203      'CONCRETE'      8
hs11130204      'CONCRETE'      9
*
hs11130300      -1
hs11130400      1          137      'INT'      0.5      0.5
*
*      A          Lch          Lax
hs11130500      0.0608      0.127      0.3011
hs11130600      0          * insulated
*

```

```

*-----*
*
*      1=rect

```

```

*          np      igeom      iss
hs11140000 10      1      0
*
*          hsname
hs11140001 'SFP_WALL Lev 14'
*          hsalt      alpha 1=vertic
hs11140002 3.3324      1.0
hs11140003 1.0
hs11140004 314
*          nodloc      ifmmat      xi
hs11140100 -1      1      0.0
hs11140101 6.4E-3      2
hs11140102 0.0156      3
hs11140103 0.0313      4
hs11140104 2.0      10
*          matnam      mshnum
hs11140201 'stainless steel' 1
hs11140202 'CONCRETE'      2
hs11140203 'CONCRETE'      8
hs11140204 'CONCRETE'      9
*
hs11140300 -1
hs11140400 1      137      'INT'      0.5      0.5
*          A      Lch      Lax
hs11140500 0.0608      0.127      0.3011
hs11140600 0      * insulated
*
-----
*          l=rect
*          np      igeom      iss
hs11150000 10      1      0
*
*          hsname
hs11150001 'SFP_WALL Lev 15'
*          hsalt      alpha 1=vertic
hs11150002 3.6335      1.0
hs11150003 1.0
hs11150004 315
*          nodloc      ifmmat      xi
hs11150100 -1      1      0.0
hs11150101 6.4E-3      2
hs11150102 0.0156      3
hs11150103 0.0313      4
hs11150104 2.0      10
*          matnam      mshnum
hs11150201 'stainless steel' 1
hs11150202 'CONCRETE'      2
hs11150203 'CONCRETE'      8
hs11150204 'CONCRETE'      9
*
hs11150300 -1
hs11150400 1      137      'INT'      0.5      0.5
*          A      Lch      Lax
hs11150500 0.0608      0.127      0.3011
hs11150600 0      * insulated
*
-----
*          l=rect
*          np      igeom      iss
hs11160000 10      1      0
*
*          hsname
hs11160001 'SFP_WALL Lev 16'
*          hsalt      alpha 1=vertic
hs11160002 3.9346      1.0
hs11160003 1.0
hs11160004 316
*          nodloc      ifmmat      xi
hs11160100 -1      1      0.0
hs11160101 6.4E-3      2
hs11160102 0.0156      3
hs11160103 0.0313      4
hs11160104 2.0      10
*          matnam      mshnum
hs11160201 'stainless steel' 1

```

```

hs11160202 'CONCRETE'      2
hs11160203 'CONCRETE'      8
hs11160204 'CONCRETE'      9
*
hs11160300      -1
hs11160400      1      137      'INT'      0.5      0.5
*
hs11160500      A      Lch      Lax
hs11160500      4.2614      0.127      0.1117
hs11160600      0      * insulated
*

```

```

-----
*
*      l=rect
*      np      igeom      iss
hs11170000      10      1      0
*
*      hsname
hs11170001      'SFP_WALL Lev 17'
*
*      hsalt      alpha 1=vertic
hs11170002      4.0463      1.0
hs11170003      1.0
hs11170004      317
*
*      nodloc      ifmmat      xi
hs11170100      -1      1      0.0
hs11170101      6.4E-3      2
hs11170102      0.0156      3
hs11170103      0.0313      4
hs11170104      2.0      10
*
*      matnam      mshnum
hs11170201      'stainless steel' 1
hs11170202      'CONCRETE'      2
hs11170203      'CONCRETE'      8
hs11170204      'CONCRETE'      9
*
hs11170300      -1
hs11170400      1      137      'INT'      0.5      0.5
*
hs11170500      A      Lch      Lax
hs11170500      5.4212      0.127      0.1421
hs11170600      0      * insulated
*

```

```

-----
*
*      l=rect
*      np      igeom      iss
hs11210000      2      1      0
*
*      hsname
hs11210001      'SFP_RAD-1'
*
*      hsalt      alpha 0=Hz
hs11210002      4.18839      0.0
hs11210003      1.0
hs11210004      0 0
*
*      nodloc      ifmmat      xi
hs11210100      -1      1      0.0
hs11210101      1.0E-3      2
*
*      matnam      mshnum
hs11210201      'STAINLESS STEEL 304' 1
*
hs11210300      -1
hs11210400      1      117      'INT'      0.5      0.5
*
hs11210500      A      Lch      Lax
hs11210500      27.97      0.014      0.014
hs11210600      1      310      'EXT'      0.5      0.5
hs11210700      27.97      0.014      0.014
*

```

```

*****
*
*      l=rect
*      np      igeom      iss
hs11220000      2      1      0
*
*      hsname
hs11220001      'SFP_RAD-2'
*
*      hsalt      alpha 0=Hz
hs11220002      4.18839      0.0
hs11220003      1.0
hs11220004      0 0

```



```

*          nodloc      ifmmat      xi
hs11220100      -1          1          0.0
hs11220101          1.0E-3      2
*          matnam      mshnum
hs11220201      'STAINLESS STEEL 304'  1
*
hs11220300      -1
hs11220400      1      127      'INT'      0.5      0.5
*          A          Lch          Lax
hs11220500      26.48      0.014      0.014
hs11220600      1      310      'EXT'      0.5      0.5
hs11220700      26.48      0.014      0.014
*
*****
*          1=rect
*          np          igeom      iss
hs11230000      2          1          0
*          hsname
hs11230001      'SFP_RAD-3'
*          hsalt      alpha 0=Hz
hs11230002      4.18839      0.0
hs11230003      1.0
hs11230004      0      0
*          nodloc      ifmmat      xi
hs11230100      -1          1          0.0
hs11230101          1.0E-3      2
*          matnam      mshnum
hs11230201      'STAINLESS STEEL 304'  1
*
hs11230300      -1
hs11230400      1      137      'INT'      0.5      0.5
*          A          Lch          Lax
hs11230500      16.0      0.014      0.014
hs11230600      1      310      'EXT'      0.5      0.5
hs11230700      16.0      0.014      0.014
*
*****
*          HS regarding SFP pool
*
*          1=rect
*          np          igeom      iss
hs14210000      9          1          0
*          hsname
hs14210001      'RFBAY-NE-FLOOR'
*          hsalt      alpha 0=Hz
hs14210002      11.8      -1.0E-7
hs14210003      1.0
*          nodloc      ifmmat      xi
hs14210100      -1          1          0.0
hs14210101          0.5          9
*          matnam      mshnum
hs14210201      'CONCRETE'  8
*
hs14210300      -1
hs14210400      1      422      'INT'      0.5      0.5
*          A          Lch          Lax
hs14210500      460.0      24.0      24.0
hs14210600      0
*
-----
*          1=rect
*          np          igeom      iss
hs14220000      9          1          0
*          hsname
hs14220001      'RFBAY-NW-FLOOR'
*          hsalt      alpha 0=Hz
hs14220002      25.64      -1.0E-7
hs14220003      1.0
*          nodloc      ifmmat      xi
hs14220100      -1          1          0.0
hs14220101          0.5          9
*          matnam      mshnum

```

```

hs14220201 'CONCRETE' 8
*
hs14220300 -1
hs14220400 1 422 'INT' 0.5 0.5
*
hs14220500 250.0 18.0 18.0
hs14220600 0
*
-----
*
* l=rect
* np igeom iss
hs14230000 9 1 0
*
hsname
hs14230001 'RFBAY-SE-FLOOR'
*
hsalt alpha 0=Hz
hs14230002 11.8 -1.0E-7
hs14230003 1.0
*
nodloc ifmmat xi
hs14230100 -1 1 0.0
hs14230101 0.5 9
*
matnam mshnum
hs14230201 'CONCRETE' 8
*
hs14230300 -1
hs14230400 1 422 'INT' 0.5 0.5
*
hs14230500 530.0 26.0 26.0
hs14230600 0
*
-----
*
* l=rect
* np igeom iss
hs14240000 9 1 0
*
hsname
hs14240001 'RFBAY-SW-FLOOR'
*
hsalt alpha 0=Hz
hs14240002 11.8 -1.0E-7
hs14240003 1.0
*
nodloc ifmmat xi
hs14240100 -1 1 0.0
hs14240101 0.5 9
*
matnam mshnum
hs14240201 'CONCRETE' 8
*
hs14240300 -1
hs14240400 1 422 'INT' 0.5 0.5
*
hs14240500 320.0 20.0 20.0
hs14240600 0
*
-----
*
* l=rect
* np igeom iss
hs14250000 9 1 0
*
hsname
hs14250001 'RFBAD-DW-FLOOR'
*
hsalt alpha 0=Hz
hs14250002 11.8 -1.0E-7
hs14250003 1.0
*
nodloc ifmmat xi
hs14250100 -1 1 0.0
hs14250101 0.5 9
*
matnam mshnum
hs14250201 'CONCRETE' 8
*
hs14250300 -1
hs14250400 1 422 'INT' 0.5 0.5
*
hs14250500 100.0 12.0 12.0
hs14250600 0
*
-----

```

```

*          l=rect
*          np      igeom      iss
hs14260000 6          1          0
*          hsname
hs14260001 'RFBAY-EXT-WALLS'
*          hsalt    alpha 0=Hz
hs14260002 11.8      1.0
hs14260003 1.0
*          nodloc   ifmmat      xi
hs14260100 -1          1          0.0
hs14260101          2.54E-3      6
*          matnam   mshnum
hs14260201 'CARBON STEEL' 5
*
hs14260300 -1
hs14260400 1          422 'INT' 0.5 0.5
*          A          Lch          Lax
hs14260500 3070.0      19.0      18.861
hs14260600 1          900 'EXT' 0.5 0.5
hs14260700 3070.0      19.0      18.861
*
-----
*          l=rect
*          np      igeom      iss
hs14270000 6          1          0
*          hsname
hs14270001 'RFBAY-CEILING'
*          hsalt    alpha 0=Hz
hs14270002 30.861      0.0
hs14270003 1.0
*          nodloc   ifmmat      xi
hs14270100 -1          1          0.0
hs14270101          0.0254      6
*          matnam   mshnum
hs14270201 'CARBON STEEL' 5
*
hs14270300 -1
hs14270400 1          422 'INT' 0.5 0.5
*          A          Lch          Lax
hs14270500 1820.0      20.0      0.0254
hs14270600 1          900 'EXT' 0.5 0.5
hs14270700 1820.0      20.0      0.0254
*
-----
*          l=rect
*          np      igeom      iss
hs14280000 2          1          0
*          hsname
hs14280001 'RFBAY-MISC-STEEL'
*          hsalt    alpha 0=Hz
hs14280002 11.8      1.0
hs14280003 1.0
*          nodloc   ifmmat      xi
hs14280100 -1          1          0.0
hs14280101          6.35E-3      2
*          matnam   mshnum
hs14280201 'CARBON STEEL' 1
*
hs14280300 -1
hs14280400 1          422 'INT' 0.5 0.5
*          A          Lch          Lax
hs14280500 710.0      3.0      3.0
hs14280600 0
*
*
*//////////
*
*          COR Sensitivity Coefficients
*
*//////////
*
*

```

```

* turn on lifetime model
*
*          IOXB
COROXB      1
*
* Set up for lifetime model - pre-breakaway in SC-1001
*
SC10011    1001    26.7    1    2
SC10012    1001   17490.    2    2
SC10013    1001    26.7    3    2
SC10014    1001   17490.    4    2
SC10015    1001   9998.0    5    2
SC10016    1001   9999.0    6    2
*
*
* Enter ANL post-breakaway for Zr-2 in 1016
*
SC10161    1016    2970.0    1    2
SC10162    1016   19680.0    2    2
*
* Transition coefficient for pre- to post-breakaway
*
SC10181    1018     1.25     1
*
sc10041    1004     600.0     1 * SET MINIMUM T FOR OXIDATION
*          MINIMUM POROSITY FOR FLOW RESISTANCE
*
SC15051    1505     0.05     1
*
*          MINIMUM POROSITY FOR CALCULATING HEAT TRANSFER TO FLUID
*
SC15052    1505     0.05     2
*
*          USE 0-D LOWER HEAD STRESS/STRAIN DISTRIBUTION
*
SC16001    1600     0.0      1
*
*          TEMPERATURE WHEN LOWER HEAD YIELD STRESS VANISHES
*
SC16031    1603    9999.0    2
*
*          ERGUN EQUATION, MINIMUM POROSITY (CVH Package)
*
SC44131    4413     0.05     5
*
*          MINIMUM HYDRO VOLUME FRACTION
*
SC44141    4414     0.01     1
*
sc10171    1017   -12.58    1
*
*
* 1212 Laminar Nusselt Numbers
*
sc12121    1212    4.36     1
sc12122    1212    4.36     2
*
* 1213 Laminar Nusselt Numbers
*
sc12131    1213    0.0      1
*
* 1214 Turbulent Forced Convective Flow in Tubes
*
sc12141    1214    0.0      1
*
* 1221 Laminar Free Convection between Parallel Vertical Surfaces
*
sc12211    1221    0.0      1
*
* 1222 Turbulent Free Convection between Parallel Vertical Surfaces

```

```

sc12221 1222 0.0 1
*
* 4404 Friction Factor Parameters
*
* sc4404a 4404 1.e+20 14
* sc4404b 4404 1.e+21 15
*
* 4060 Atmosphere Natural and Forced Convection Ranges
*
sc40601 4060 0.0 1
sc40602 4060 0.0 2
*
* 4061-4063 Atmosphere Laminar and Turbulent Natural Convection Ranges
*
sc40621 4062 1.e+20 1
sc40622 4062 1.e+21 2
*
* 4064-4066 Atmosphere Laminar and Turbulent Forced Convection Ranges
*
sc40651 4065 1.e+20 1
sc40652 4065 1.e+21 2
*
* 4101-4112 Atmosphere Natural Convection
*
sc41021 4102 1.e-20 1
sc41052 4105 1.e-20 1
*
* 4113-4124 Atmosphere Forced Convection
*
sc41141 4114 0.0 1
sc41142 4114 0.0 2
sc41143 4114 0.0 3
sc41144 4114 4.36 4
*
sc41171 4117 0.0 1
sc41172 4117 0.0 2
sc41173 4117 0.0 3
sc41174 4117 4.36 4
*
*****
*****
***** Radio Nuclides Input *****
*****
*****
*****
*
* 0=RN active 1=RN inactive
RN1000 0
*
* sect comp numcls cls-wt cls-sbx a-src v-src csl cls-chemsorp
RN1001 10 2 17 14 13 0 0 16
*
RN1100 1.0E-6 50.E-6 1000. * Dlow Dupper [m] rho-aero [kg.m3]
*
RNACOEFF 1
*
* Ring-1
* FM TO ELEV AREA
RNSET001 310 117 4.1884 17.0
RNSET002 117 130 0.1651 17.0
*
* Ring-2
RNSET003 310 127 4.1884 12.0
RNSET004 127 130 0.1651 12.0
*
* Ring-3
RNSET005 310 137 4.1884 8.0
RNSET006 137 130 0.1651 8.0
*
* Aux-BD flows
RNSET007 422 310 11.8 100.9278
RNSET008 301 299 4.1884 26.9088
RNSET009 422 409 11.8 80.5

```

```

*
* self settling
*
RNSET016 409 409 0.0 80.5
RNSET017 900 900 0.0 100.00
RNSET018 299 299 0.0 26.9088
RNSET019 130 130 0.0 80.0
*
=====
* FP Release Model from Core
* ICRLSE
RNFP000 -2 * CORSOR-M W S/V RATIO
*
=====
* All FP release model from MELCOR_2.0
*
* CORSOR-BT class scaling factor
* -----
SC41000 7103 4.0E-04 3 * Ba
SC41001 7103 6.4E-1 4 * I2
SC41002 7103 6.4E-1 5 * Te
SC41003 7103 2.5E-3 6 * Ru
SC41004 7103 4.0E-8 8 * Ce
SC41005 7103 4.0E-8 9 * La
SC41006 7103 3.2E-4 10 * UO2
SC41007 7103 2.5E-1 11 * Cd
SC41008 7103 1.6E-1 12 * Ag
SC41009 7103 6.4E-1 16 * CsI
SC41010 7103 1.0E+0 17 * Cs2MoO4
*
* CORSOR-BT transient release parameter for Cs
* -----
SC42000 7106 2.3E-09 1 1
SC42001 7106 2.3E-09 2 1
SC42002 7106 2.411E+05 4 1
SC42003 7106 6.0E-06 5 1
*
* CORSOR-BT class scaling factor (Oxidation modify)
* -----
SC43000 7107 5.0E-01 6 3 * Ba
SC43001 7107 2.0E-03 7 3
SC43002 7107 6.4E-01 7 5 * Te

SC43003 7107 2.5E-03 3 6 * Ru
SC43004 7107 0.0E-00 4 6
SC43005 7107 4.0E-08 7 9 * La
SC43006 7107 2.5E-01 3 11 * Cd
SC43007 7107 0.0E-00 4 11
SC43008 7107 1.6E-01 3 12 * Ag
SC43009 7107 0.0E-00 4 12
*
*** FUEL INVENTORIES ***
*
* RING 1: 52.87 %
*
* RING 1
* -----
* faxj/sum(faxj) Mi*fradi /sum(Mi * fradi)
RNFPN11701 0 0.0 0.0
RNFPN11601 0 0.0 0.0
RNFPN11501 0 0.083333 0.7035120968
RNFPN11401 0 0.083333 0.7035120968
RNFPN11301 0 0.083333 0.7035120968
RNFPN11201 0 0.083333 0.7035120968
RNFPN11101 0 0.083333 0.7035120968
RNFPN11001 0 0.083333 0.7035120968
RNFPN10901 0 0.083333 0.7035120968
RNFPN10801 0 0.083333 0.7035120968
RNFPN10701 0 0.083333 0.7035120968

```

RNFPN10601	0	0.083333	0.7035120968
RNFPN10501	0	0.083333	0.7035120968
RNFPN10401	0	0.083333	0.7035120968
RNFPN10301	0	0.0	0.0
RNFPN10201	0	0.0	0.0
RNFPN10101	0	0.0	0.0

*
* RING 2 : 29.37 %

* -----			
	faxj/sum(faxj)	Mi*fradi	/sum(Mi * fradi)
RNFPN21701	0	0.0	0.0
RNFPN21601	0	0.0	0.0
RNFPN21501	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN21401	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN21301	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN21201	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN21101	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN21001	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN20901	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN20801	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN20701	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN20601	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN20501	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN20401	0	0.083333	0.2171169355
RNFPN20301	0	0.0	0.0
RNFPN20201	0	0.0	0.0
RNFPN20101	0	0.0	0.0

*
* RING 3 : 17.76 %

* -----			
	faxj/sum(faxj)	Mi*fradi	/sum(Mi * fradi)
RNFPN31701	0	0.0	0.0
RNFPN31601	0	0.0	0.0
RNFPN31501	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN31401	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN31301	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN31201	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN31101	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN31001	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN30901	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN30801	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN30701	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN30601	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN30501	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN30401	0	0.083333	0.07937096776
RNFPN30301	0	0.0	0.0
RNFPN30201	0	0.0	0.0
RNFPN30101	0	0.0	0.0

*
* *** GAP RADIONUCLIDES ***

* -----			
	Trup		
RNGAP10300	1173.0	* 1701.	USE default cladding rupture tempertaure of 1173 K
RNGAP10400	1173.0	* 1701.	
RNGAP10500	1173.0	* 1701.	
RNGAP10600	1173.0	* 1701.	
RNGAP10700	1173.0	* 1701.	
RNGAP10800	1173.0	* 1701.	
RNGAP10900	1173.0	* 1701.	
RNGAP11000	1173.0	* 1701.	
RNGAP11100	1173.0	* 1701.	
RNGAP11200	1173.0	* 1701.	
RNGAP11300	1173.0	* 1701.	
RNGAP11400	1173.0	* 1701.	
* -----			
	Trup		
RNGAP20300	1173.0	* 1701.	USE default cladding rupture tempertaure of 1173 K
RNGAP20400	1173.0	* 1701.	
RNGAP20500	1173.0	* 1701.	
RNGAP20600	1173.0	* 1701.	

```

RNGAP20700 1173.0 * 1701.
RNGAP20800 1173.0 * 1701.
RNGAP20900 1173.0 * 1701.
RNGAP21000 1173.0 * 1701.
RNGAP21100 1173.0 * 1701.
RNGAP21200 1173.0 * 1701.
RNGAP21300 1173.0 * 1701.
RNGAP21400 1173.0 * 1701.
*
*   RING 3   Trup
*   -----
RNGAP30300 1173.0 * 1701. USE default cladding rupture tempertaure of 1173 K
RNGAP30400 1173.0 * 1701.
RNGAP30500 1173.0 * 1701.
RNGAP30600 1173.0 * 1701.
RNGAP30700 1173.0 * 1701.
RNGAP30800 1173.0 * 1701.
RNGAP30900 1173.0 * 1701.
RNGAP31000 1173.0 * 1701.
RNGAP31100 1173.0 * 1701.
RNGAP31200 1173.0 * 1701.
RNGAP31300 1173.0 * 1701.
RNGAP31400 1173.0 * 1701.
*
*-----*
*
*   Ring-1
*   -----
*       NINP  RINP1  RINP2
RNGAP10301 1  0.0  1.0
RNGAP10302 2  0.0  1.0
RNGAP10303 3  0.0  1.0
RNGAP10304 4  0.0  1.0
RNGAP10305 5  0.0  1.0
*
RNGAP10400 1173.
RNGAP10401 2  0.049953  1.0  * CS
RNGAP10402 4  0.0  1.0  * I
RNGAP10403 7  0.0  1.0  * Mo
RNGAP10404 16  0.05  1.0  * CsI
RNGAP10405 17  0.0  1.0  * Cs2MoO4
*
RNGAP10500 1173.
RNGAP10501 -104  1.0  1.0
RNGAP10600 1173.
RNGAP10601 -104  1.0  1.0
RNGAP10700 1173.
RNGAP10701 -104  1.0  1.0
RNGAP10800 1173.
RNGAP10801 -104  1.0  1.0
RNGAP10900 1173.
RNGAP10901 -104  1.0  1.0
RNGAP11000 1173.
RNGAP11001 -104  1.0  1.0
RNGAP11100 1173.
RNGAP11101 -104  1.0  1.0
RNGAP11200 1173.
RNGAP11201 -104  1.0  1.0
RNGAP11300 1173.
RNGAP11301 -104  1.0  1.0
RNGAP11400 1173.
RNGAP11401 -104  1.0  1.0
*
*   Ring-2
*   -----
*       NINP  RINP1  RINP2
RNGAP20301 1  0.0  1.0
RNGAP20302 2  0.0  1.0
RNGAP20303 3  0.0  1.0
RNGAP20304 4  0.0  1.0
RNGAP20305 5  0.0  1.0
*

```



```

*          ref-node
RNGAP20400 1173.
RNGAP20401 -104 1.0 1.0
RNGAP20500 1173.
RNGAP20501 -104 1.0 1.0
RNGAP20600 1173.
RNGAP20601 -104 1.0 1.0
RNGAP20700 1173.
RNGAP20701 -104 1.0 1.0
RNGAP20800 1173.
RNGAP20801 -104 1.0 1.0
RNGAP20900 1173.
RNGAP20901 -104 1.0 1.0
RNGAP21000 1173.
RNGAP21001 -104 1.0 1.0
RNGAP21100 1173.
RNGAP21101 -104 1.0 1.0
RNGAP21200 1173.
RNGAP21201 -104 1.0 1.0
RNGAP21300 1173.
RNGAP21301 -104 1.0 1.0
RNGAP21400 1173.
RNGAP21401 -104 1.0 1.0
*
*      Ring-3
*      -----
*      NINP  RINP1  RINP2
RNGAP30301 1  0.0  1.0
RNGAP30302 2  0.0  1.0
RNGAP30303 3  0.0  1.0
RNGAP30304 4  0.0  1.0
RNGAP30305 5  0.0  1.0
*
*          ref-node
RNGAP30400 1173.
RNGAP30401 -104 1.0 1.0
RNGAP30500 1173.
RNGAP30501 -104 1.0 1.0
RNGAP30600 1173.
RNGAP30601 -104 1.0 1.0
RNGAP30700 1173.
RNGAP30701 -104 1.0 1.0
RNGAP30800 1173.
RNGAP30801 -104 1.0 1.0
RNGAP30900 1173.
RNGAP30901 -104 1.0 1.0
RNGAP31000 1173.
RNGAP31001 -104 1.0 1.0
RNGAP31100 1173.
RNGAP31101 -104 1.0 1.0
RNGAP31200 1173.
RNGAP31201 -104 1.0 1.0
RNGAP31300 1173.
RNGAP31301 -104 1.0 1.0
RNGAP31400 1173.
RNGAP31401 -104 1.0 1.0
*
*****
*****
*          Update for Cs2MoO4          *
*****
*****
*
*   Define molecular weight !
*   -----
SC37000 7120 361.75 1 17
SC37001 7120 425.75 2 17
*
*   Define Hygroscopic
*   -----
*
SC38000 7170 4030.0 9 17 * compound density [kg/m3]

```

```

SC38001  7170    0.67    3  17  * sat-solubility at Tlow [kg/kg-H2O]
SC38002  7170    0.67    4  17  * sat-solubility at Thigh
SC38003  7170    2.0     7  17  * ionization factor
*
*   CSM  Vapour Pressure
*   -----
*   SC-num  value    i    j    k
SC39000  7110    600.0    1    1   17  * i=1=column j=1=T k=17fix
SC39001  7110   13600.0    1    2   17  * i=1=column j=2=A k=17fix
SC39002  7110    8.895    1    3   17  * i=1=column j=3=B k=17fix
SC39003  7110     0.0     1    4   17  * i=1=column j=4=C k=17fix
*
SC39004  7110   1229.5    2    1   17  * i=2=column j=1=T k=17fix
SC39005  7110   12100.0    2    2   17  * i=2=column j=2=A k=17fix
SC39006  7110    7.675    2    3   17  * i=2=column j=3=B k=17fix
SC39007  7110     0.0     2    4   17  * i=2=column j=4=C k=17fix
*
*   Cs Vapor pressure
*   -----
*   SC-num  value    i    j    k
SC32000  7110    600.0    1    1    2  * i=1=column j=1=T k=2fix
SC32001  7110   1.36E+04    1    2    2  * i=1=column j=2=A k=2fix
SC32002  7110    8.895    1    3    2  * i=1=column j=3=B k=2fix
SC32003  7110     0.0     1    4    2  * i=1=column j=4=C k=2fix
*
SC32004  7110   1229.5    2    1    2  * i=2=column j=1=T k=2fix
SC32005  7110   12100.0    2    2    2  * i=2=column j=2=A k=2fix
SC32006  7110    7.675    2    3    2  * i=2=column j=3=B k=2fix
SC32007  7110     0.0     2    4    2  * i=2=column j=4=C k=2fix
*
*   Ba Vapor pressure
*   -----
*   SC-num  value    i    j    k
SC33001  7110   1.10E+04    1    2    3  * i=1=column j=2=A k=3fix
SC33002  7110     8.4     1    3    3  * i=1=column j=3=B k=3fix
SC33003  7110   1.0E+04    2    1    3  * i=2=column j=1=T k=3fix
*
*   Ru Vapor pressure
*   -----
*   SC-num  value    i    j    k
SC36001  7110   1.16088E+01    1    3    6  * i=1=column j=3=B k=6fix
SC36002  7110   1.0E+04    2    1    6  * i=2=column j=1=T k=6fix
*
*=====
*
*   Define Class Combination
*   -----
*
*   Cs2MoO4
RNCLS0700  17  * acceptor class number
RNCLS0701   2  2.0 * two moles Cs / mole Cs2Mo
RNCLS0702   7  1.0 * one mole Mo / mole Cs2Mo
*
*
*===== end of RN input =====
*
*
*****
***** MATERIAL PROPERTIES Input *****
*****
*****
***          Property          Units
***          Temperature       K
***          density            kg/m*3
***          heat capacity      J/kg-K
***          thermal conductivity W/m-K
***
*-----
***          Material 1 is concrete
*-----

```

```

mpmat00100 'CONCRETE'
***
***          PROPERTY   TAB FUNC
***
mpmat00101   RHO         1
mpmat00102   ENH         2
mpmat00103   TMP         3
mpmat00104   CPS         4
mpmat00105   THC         5
mpmat00151   DEN        2533.2
mpmat00152   MLT        5000.0
mpmat00153   LHF         1.0
***
***          Density of concrete
***
tf00100 'RHO CONCRETE'  2  1.0  0.0
***
***          TEMPERATURE   RHO
***
tf00112      200.0      2533.2
tf00113      5000.0     2533.2
***
***          Enthalpy of concrete
***
tf00200 'ENH CONCRETE'  2  1.0  0.0
***
***          ENTHALPY     TEMPERATURE
***
tf00212      0.0        200.0
tf00213     4224000.0   5000.0
***
***          Enthalpy of concrete
***
tf00300 'TMP CONCRETE'  2  1.0  0.0
***
***          TEMPERATURE   ENTHALPY
***
tf00312      200.0      0.0
tf00313      5000.0     4224000.0
***
***          Heat capacity of concrete
***
tf00400 'CPS CONCRETE'  2  1.0  0.0
***
***          TEMPERATURE   CPS
***
tf00412      200.0      880.0
tf00413      5000.0     880.0
***
***          Thermal conductivity of concrete
***
tf00500 'THC CONCRETE'  2  1.0  0.0
***
***          TEMPERATURE   THC
***
tf00512      200.0      1.524
tf00513      5000.0     1.524
***
*
*-----*
***          Material 2 is carbon steel
*-----*
***
***
mpmat00200 'CARBON STEEL'
***
***          PROPERTY   TAB FUNC
***
mpmat00201   RHO        21
mpmat00202   CPS        22
mpmat00203   THC        23
***

```

```

***      Density of carbon steel
***
tf02100  'RHO CARBON STEEL'  2  1.00  0.0
***
***      TEMPERATURE      RHO
tf02112      273.15      7833.0
tf02113      5000.00      7833.0
***
***      Heat capacity of carbon steel
***
tf02200  'CPS CARBON STEEL'  2  1.00  0.0
***
***      TEMPERATURE      CPS
tf02212      273.15      465.0
tf02213      5000.00      465.0
***
***      Thermal conductivity of carbon steel
***
tf02300  'THC CARBON STEEL'  10  1.00  0.0
***
***      TEMPERATURE      THC
tf02310      273.15      55.0
tf02311      373.15      52.0
tf02312      473.15      48.0
tf02313      573.15      45.0
tf02314      673.15      42.0
tf02315      873.15      35.0
tf02316      1073.15     31.0
tf02317      1273.15     29.0
tf02318      1473.15     31.0
tf02319      5000.15     31.0

```

```

*
*****
*****
**      BURN PACKAGE INPUT      *****
*****
BUR000  1  *  0= active  1=inactive
*
*      CVNUM  IGNTR  CDIM  TFRAC
BUR101  310    0    -1.0  .25
BUR102  422    0    -1.0  .25
BUR103  301    0    -1.0  .25
BUR104  299    0    -1.0  .25
BUR105  409    0    -1.0  .25
BUR106  117    86    -1.0  .25
BUR107  127    86    -1.0  .25
BUR108  137    86    -1.0  .25
BUR109  130    86    -1.0  .25

```

```

*
*-----*
*      E N D      O F      S F P      I N P U T      *
*-----*

```

감사의 글

어느덧 2년이라는 시간이 지났습니다. 지난 2년 동안의 시간을 돌이켜 보면 좋은 일도 있었고, 힘든 점도 많이 있었습니다. 많이 부족한 저를 지지와 격려를 아끼지 않고 응원해 주신 여러 지인들과 더불어 감사에 마음을 전하고자 합니다.

먼저 이 논문이 완성하기까지 아낌없는 격려와 지도를 해주신 박재우 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 이 논문의 주제와 관련된 많은 지식정보를 제공해 주셨으며, 논문심사도 맡아주신 한국원자력연구원의 박종화 박사님께 이 자리를 빌려 감사드립니다. 또한, 저의 논문심사위원장을 맡아주시고, 소중한 충고와 조언을 해주신 이연건 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

항상 내 옆에서 같이 일하고 서로의 고민이나 무슨 일이 있으면 도와주었던 실험실 동기 영규와 연현이, 내말 잘 따르고 어떤 일이든 열심히 하려고하는 우석이에게 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 RI실험실을 위해 열심히 일하는 학부생 민경이, 호진이, 주현이 에게도 고마움을 전합니다.

이 외에도 제가 졸업을 하기 위해 도움을 주신 에너지공학과 모용현, 박경호 조교형들, 제주지방측정소에 김덕우형, 열수력 실험실에 이바로형, 같이 졸업하는 우중이형, 우연이형 그리고 대학원 14학번 동기들 모두 감사합니다.

부족한 자식을 사랑으로 감싸주시고 끊임없는 응원을 해주신 우리 아버지, 어머니께 감사의 말씀 전해드립니다. 그리고 인생 선배이자 힘들 때 많은 조언을 해준 우리 친형 정말로 감사하고 앞으로도 형을 본받아 열심히 살아가겠습니다. 이 외에 제가 미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너무나 많습니다. 그 분들의 이름을 모두 새기지 못함을 죄송하게 생각하며, 앞으로도 끊임없이 성장하고 노력하는 모습을 보여드리겠습니다. 끝으로 감사하다는 말씀 전해드리고 이 글을 마칠까 합니다. “진심으로 감사합니다.”