2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 최적코드를 이용한 고리 2 호기 대형 냉각재 상실사고시 질량 및 에너지 방출량 평가

# Evaluation of LB-LOCA Mass and Energy Release Using Best-Estimate Computer Code for Kori Unit 2

이상일, 한기수, 최한림, 최철진, 서종태

한국전력기술㈜ 원자로설계개발단
대전광역시 유성구 덕진동 150

송동수

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

## 요약

본 논문에서는 최적해석 코드인 RELAP5/MOD3.1-K 를 이용하여 고리 2 호기 저온관 양단 파단 질량 및 에너지 방출량에 대한 예비 해석을 수행하였다. 해석 결과는 고리 2 호기 FSAR 질량 및 에너지 방출량 자료와 서로 비교하였다. 비교결과, 안전주입계통의 모델링 차이로 인해서 질량 방출량은 RELAP5/MOD3.1-K 의 해석 결과가 FSAR 자료보다 크게 예측하고 있다. 그러나 에너지 방출량 관점에서는 두 자료가 비슷한 경향을 보고 있다. 이러한 해석 결과는 최적해석 코드를 이용한 고리 2 호기 질량 및 에너지 방출 해석이 타당함을 보여주고 있으며, 기기 검증 측면에서 최적해석 코드를 이용한 질량 및 에너지 방출량 해석이 유용한 방법론이 될 수 있음을 보여 주고 있다. 추후 연구 과제로서는 질량 방출의 차이를 유발하는 안전 주입 계통의 모델을 수정, 보완하고 초기조건의 보수성을 고려 및 설계자료의 보강을 통해서 좀더 개선된 결과를 얻도록 하는 것이다.

## Abstract

The preliminary analysis of mass and energy release(M/E) for cold leg double-ended guillotine break in Kori unit 2 is performed using best-estimate code, RELAP5/MOD3.1-K. When compared with mass and energy release data of Kori 2 FSAR, those of RELAP5/MOD3.1-K are found to be larger than those of Kori 2 FSAR, which results from the different modeling of safety injection system. However, regarding to energy release data, the comparison results show good agreement. Therefore, it is concluded that the analysis method of mass and energy release using RELAP5/MOD3.1-K and is useful for the analysis of

mass and energy release for environmental equipment qualification. To improve the present method, the model of safety injection system need to be modified to overcome the difference between the present model and Kori 2 FSAR model.

## 1. 서론

기기 검증이란 발전소 전 수명기간 동안 정상운전중 또는 사고시 심각한 환경조건에 직면하게 되었을 때 기기가 고유기능을 수행할 수 있을지 여부를 확인하는 것이다. 가동중 원전 주기적 안전성 평가(Periodic Safety Review;PSR)를 위한 IAEA 의 11 개의 안전인자[1]에 "기기 검증" 수행의 적정성을 평가하도록 명시하고 있으며, 기기 검증 수행 및 유지관리는 PSR 평가후 계속 운전과 직결되는 중대한 사안이다. 따라서 격납건물의 기기 내환경 검증을 수행하기 위해 설계기준사고 발생시 질량 및 에너지 방출량을 이용하여 격납건물 압력 및 온도을 정량적으로 해석하는 방법론을 개발하고 적용할 필요가 있다.

미국 등 원전 선진국에서는 가동 중 원전에 대한 기기 검증을 규제요건 소급 적용등을 통해 수행 완료하였으나, 국내에서는 가동 중 원전에 대해서 별도의 소급적용을 시행하지 않고 신규 발전소의 경우만 기기 검증 규정을 적용하여 건설되고 있으며, 기기검증은 주기적 안전성 평가를 통한 평가 대상으로 규정하고 있으므로, PSR 법안이 입법되면 국내 원전에서도 가동 중 원전에 대한 기기 검증을 수행해야 한다.

현재의 기기 검증을 위한 설계기준사고 질량 및 에너지 방출량 분석은 NUREG-0588[2]에 의거하여 수행하고 있다. NUREG-0588 에 의하면, 기기 검증을 위한 설계기준사고 질량 및 에너지 방출량 분석은 격납건물 안전성 분석을 위한 압력과 온도 해석 방법론을 사용할 수 잇도록 명시하고 있다. 기기 검증을 위한 설계 기준사고는 크게 냉각재 상실사고와 주증기관 파단사고로 나눌 수 있다. 고리 2 호기 최종안전성 분석 보고서[3]의 격납건물의 온도와 압력 결과에 의하면 냉각재 상실사고가 주증기관 상실사고에 비해서 압력과 온도가 높다. 따라서 본 논문에서는 격납건물 압력 및 온도 해석을 위한 냉각재 상실사고 질량 및 에너지 방출량 해석 방법에 대한 연구를 수행하였다.

격납건물 안전성 분석을 위한 냉각재 상실사고시 질량 및 에너지 방출량 해석은 SRP 6.2.1.3[4]에 의거하여 수행하게 된다. SRP 6.2.1.3 의 질량 및 에너지 방출량 해석 방법론은 질량과 에너지 방출량을 크게 하기 위해서 다음과 같은 보수적인 가정을 하도록 되어있다:

1) 원자로 출력의 102%를 초기 출력으로 가정,
2) ANS 1971 년도 표준 잔열 모델을 사용,
3) 초기 냉각재 온도를 불확실도를 포함하여 높게 가정,
4) 냉각재 체적에 대해서 제작 공차와 열팽창을 고려하여 3% 크게 가정,

5) 노심열전달은 핵비등 열전달을 가정,
6) 노심에서 발생된 증기는 응축되지 않고 격납건물로 방출.

PSR 수행을 위한 기기 검증시에 이러한 보수적인 가정은 과도한 질량 및 에너지 방출량을 야기하여, 기기 검증 압력 및 온도 제한치를 만족시키지 못할 수 있다. 또한 기기들의 경년열화로 인해서 초기 설치시의 시험된 기기 검증 압력 및 온도 제한치를 만족하지 못 할 가능성이 있다. 이것을 해결하기 위해서 새로 기기를 재구매하거나, 질량 및 에너지 방출량 해석 방법론을 개선하여 기기 검증 압력 및 온도 제한치를 완화하는 방법이 있다. 전자는 많은 비용을 수반하나, 후자의 경우에는 적은 비용으로 소기의 목적을 달성할 수 있다. 또한 IAEA 의 PSR 목적중에는 "최신의 안전해석 기법을 적용하였을 경우, 안전성 평가 결과는 어떠한가?"에 대한 평가를 하도록 규정하고 있다.

본 논문에서는 최적 안전 해석 코드인 RELAP5/MOD3.1-K[5]를 이용하여 고리 2 호기 원전에 대해서 대형냉각재 상실사고 질량 및 에너지 방출량에 대한 예비 해석을 수행하고, 고리 2 호기 FSAR 의 자료와 비교하였다. 이러한 비교를 통해서 기기 검증측면에서 최적 안전해석 코드를 이용한 질량 및 에너지 방출량 해석 방법의 고리 2 호기에의 적용성을 평가하였다.

## 2. 고리 2 호기 모델링 및 주요 가정

대형 냉각재 상실사고 질량 및 에너지 방출량 해석에는 최적코드인 RELAP5/MOD3.1-K 를 이용하였다. 이 코드는 NRC 의 RELAP5/MOD3.1[6] 의 재관수 모델을 개선한 것이고, 격납건물의 배압 분석을 위해서는 CONTEMP4/MOD5[7]를 사용하였으며, RELAP5/MOD3.1-K 코드와 통합시켜서 계산의 편의성과 정확성을 제고하였다. 해석은 고리 2 호기 저온관 양단 파단에 대해서 수행하였고, 발전소 모델링은 그림 1 과 같다. 고리 2 호기 안전주입 계통은 축압기와 고압 안전 주입관은 저온관에 연결되어 있고, 고압 안전 주입관과 저압 안전 주입관은 원자로 용기 강수관에 연결되어 있다.

원자로 냉각재 계통의 주요 변수에 대한 정상 상태 해석 결과는 표 1 에 나타나 있다. 이 결과에 의하면 RELAP5/MOD3.1-K 의 예측 결과가 고리 2 호기 FSAR 에 나와 있는 자료와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 코드 입력 자료와 모델링이 발전소의 정상 상태를 적절히 예측하고, 대형 냉각재 상실사고 해석의 초기값을 제공하는 데에 적합하다는 것을 의미한다. 격납건물 배압 해석을 위한 주요 조건은 표 2 와 같다. 보수적으로 격납건물 배압은 질량 및 에너지 방출량을 크게 하기 위해서 격납건물 온도나 압력 초기값을 낮게 가정하고, 격납건물 살수 유량이나 격납건물 팬 쿨러의 냉각능력을 주어진 범위에서 최대로 가정하였다. 수동 열제거 원에 대한 면적은 보수적으로 불확실도 10%를 추가로 고려하였다.

## 3. 주요 해석 결과

고리 2 호기 저온관 양단 파단 사고시 주요 질량 및 에너지 방출량 해석 결과는 그림 2 에서 5 에 나타나 있다. 그림 2 는 취출기간중 질량 방출량과 적산 방출 질량에 대해서 고리 2 호기 FSAR 자료와 RELAP5/MOD3.1-K 의 해석 결과를 비교한 것이다. 취출기간중 질량 방출량은 비슷한 결과를 보이나, 적산 결과는 고리 2 호기 FSAR 자료가 큰 경향을 보이고 있다.

그림 3 은 취출기간후에 질량 방출량과 적산 방출 질량에 대해서 고리 2 호기 FSAR 자료와 RELAP5/MOD3.1-K 의 해석 결과를 비교한 것이다. 그림 3 에서 고리 2 호기 FSAR 데이타에서 370 초에서 질량 방출량이 급격히 감소하는 것을 알 수 있는데, 이 시점은 재관수가 끝나고, 재관수후 기간이 시작하는 시점인데, 수분 동반율(Liquid carryover rate fraction)의 모델이 서로 다르기 때문이다. 고리 2 호기 FSAR 질량 및 에너지 방출 해석 방법론 [8]에 의하면 재관수 기간동안에는 0.8 정도에 해당되는 값을 사용하다가, 재관수가 끝나면 0.05 에 해당되는 값을 사용한다. RELAP5/MOD3.1-K 에 의해 계산된 질량 방출량이 고리 2 호기 FSAR 자료보다 400 초까지는 3 배, 400 초이후에는 6 배가량 큰 결과를 보이고 있다. 이러한 결과를 보이는 이유는 크게 두 가지로 생각해 볼 수 있다. 첫번째는 RELAP5/MOD3.1-K 의 모델에서는 파단된 저온관에 연결된 안전주입 유량이 격납건물로 유출되는 반면에 고리 2 호기 FSAR 자료를 해석할 때에는 이것을 고려하지 않았기 때문이다. 두 번째로는 고리 2 호기 FSAR 해석시에는 배압을 59.5 psia 로 가정한 반면에, RELAP5/MOD3.1-K 에서는 CONTEMP4 가 배압을 보수적으로 낮게 계산하기 때문에 질량 방출량이 많은 것으로 추정된다.

그림 4 는 취출기간중의 에너지 방출량과 적산 방출 에너지에 대해서 고리 2 호기 FSAR 자료와 RELAP5/MOD3.1-K 의 해석 결과를 비교한 것이다. 그림 2 의 질량 방출량의 결과와 비슷하게 경향을 보이고 있다. 그림 5 는 취출기간후에 에너지 방출량과 적산 방출 에너지에 대해서 고리 2 호기 FSAR 자료와 RELAP5/MOD3.1-K 의 해석 결과를 비교한 것이다. 그림 3 의 질량 방출량과는 달리 두 자료가 비슷한 경향을 보이고 있다. RELAP5/MOD3.1-K 의 질량 방출량 계산이 큰 이유는 RELAP5/MOD3.1-K 의 계산된 물 방출량이 FSAR 자료보다 크기 때문인데, 물의 엔탈피는 크지 않기 때문에 에너지 방출량에 기여하는 바가 크지 않다. 에너지 방출량에 기여하는 것은 주로 과열 증기인데, 370 초에 FSAR 자료가 급격히 감소하는 이유는 그림 3 에서 논의한 것과 같이 습분 동반율의 모델이 다르기 때문이다. 이것은 FSAR 자료는 재관수이후에 수분 동반율이 0.05 로 감소로 인해서 과열 증기의 방출량이 급격히 감소하기 때문이다.

## 4. 결론

본 논문에서는 최적해석 코드인 RELAP5/MOD3.1-K 를 이용하여 고리 2 호기 저온관 양단 파단 질량 및 에너지 방출량에 대한 예비 해석을 수행하였다. 해석 결과는 고리 2 호기 FSAR 질량 및 에너지 방출량 자료와 서로 비교하였다. 비교결과에 의하면, 안전주입계통의 모델링 차이로 인해서 질량 방출량은 RELAP5/MOD3.1-K 의 해석 결과가 FSAR 자료보다 크게 예측하고 있다. 그러나 에너지 방출량 관점에서는 두 경우가 비슷한 경향을 보이고 있다. 이러한 해석 결과를 바탕으로 최적해석 코드를 이용한 고리 2 호기 질량 및 에너지 방출 해석이 타당함을 보여주고 있으며, 기기 검증 측면에서 최적해석 코드를 이용한 질량 및 에너지 방출량 해석이 유용한 방법론이 될 수 있음을 보여 주고 있다. 추후 연구 과제로서는 질량 방출의 차이를 유발하는 안전 주입 계통의 모델을 수정, 보완하고 초기조건의 보수성 고려 및 설계자료 보강을 통해서 좀더 개선된 결과를 얻도록 하는 것이다.

## 5. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 한국전력공사 전력연구원의 주관으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다. 또한 고리 2 호기 발전소 설계 자료 수집에 많은 도움을 주신 강동식 발전운영부장님과 노기경 효율과장님께 감사를 드립니다.

## 6. 참고문헌

[1] International Atomic Energy Agency, General Design Safety Principles for Nuclear Power Plants: A Safety Guide, Safety Series No., 50-SG-D11, IAEA, Vienna.

[2] A.J. Szukiewicz, Interim Staff Position on Environmental Qualification of Safety-Related Electrical Equipment, NUREG-0588, Rev.1, July 1981.

[3] 고리 2 호기 최종안전성 분석보고서, 제 6 장

[4] NRC, Standard Review Plan, NUREG-0800, Rev.2, April 1996.

[5] Topical Report for Best Estimate Methodology for Evaluation of Emergency Core Cooling System, 한국전력공사, 1997 년 4 월.

[6] K. E. Carlson et al., RELAP5/MOD3 Code Manual, Volume I, II, III, IV and V", NUREG/CR-5535, EGG-2596, 1990.

[7] C. C. Lin, et al., CONTEMPT4/MOD4: A Multicompartent Containment System Analysis Program, NUREG/CR-3716, BNL-NUREG-51754, March 1984.

[8] R. M. Shepard, Topical Report for Westinghouse Mass and Energy Release for Containment Design, WCAP-8314-A, Rev.2, August, 1975.

**표 1 정상 상태 해석 주요 결과**

| 주요 변수 | 기준값 (FSAR) | 계산값 |
|---|---|---|
| 원자로 출력 (MWt) | 1876 | 1876 |
| 평균노심 온도 (K) | 579.25 | 579.24 |
| 원자로 냉각재 유량 (kg/sec) | 8952.15 | 8952.2 |
| 가압기 압력 (MPa) | 15.51 | 15.51 |
| 가압기 체적 ($m^3$) | 16.99 | 16.99 |
| 원자로 냉각재 펌프 유량 ($m^3$/sec) | 6.44 (Design Flow) | 5.97 (Nominal Flow) |
| 증기발생기 이차측 압력 (MPa) | 6.343 | 6.335 |
| 증기발생기 수위 (m) | 12.75 | 12.74 |
| 증기 유량 (kg/s) | 514.7 | 514.19 |

**표 2 고리 2 호기 격납건물 배압 해석 주요 초기 조건**

| 격납건물 주요 변수 | 초기값 |
|---|---|
| 격납건물 부피 (x $10^6$ $ft^3$) | 1.44 |
| 격납건물 초기 압력 (psia) | 14.7 |
| 격납건물 초기 온도 ($^oF$) | 50 |
| 상대 습도 (%) | 100 |
| 격납건물 살수 펌프 (gpm) | 1185 |
| Fan Cooler 냉각능력 | 고리 2 호기 FSAR Data x 2.2 |
| Passive Heat Sink 면적 | 고리 2 호기 FSAR Data x 1.1 |

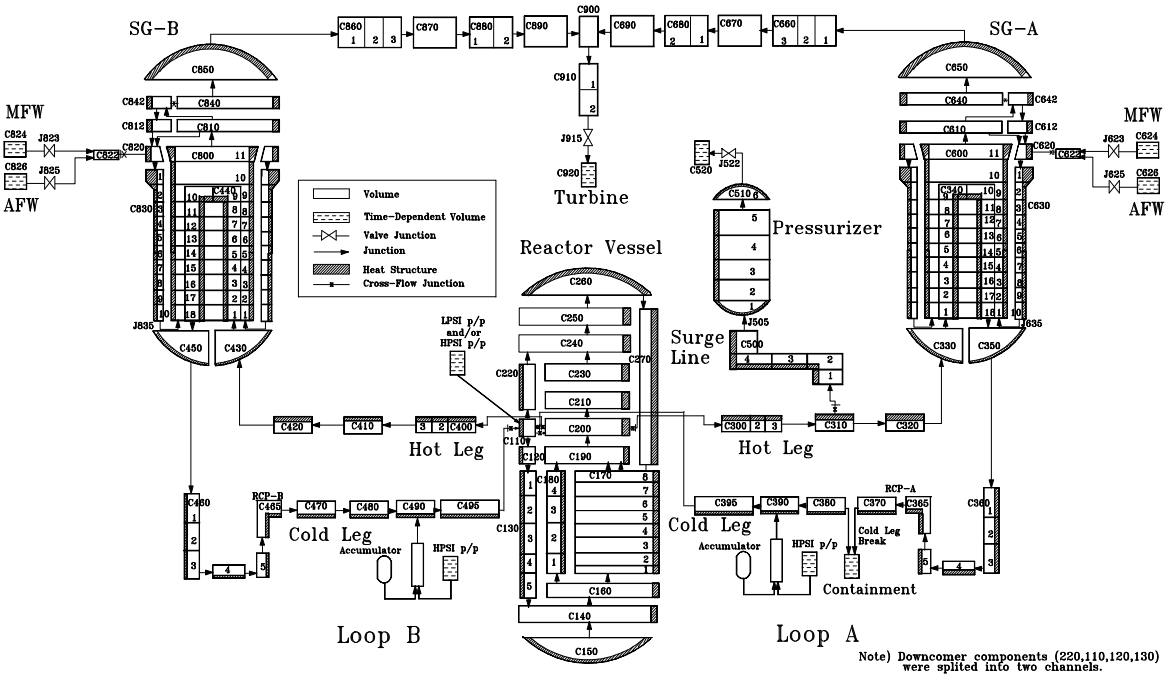



그림 1. 고리 2 호기 RELAP5/MOD3.1-K 모델링

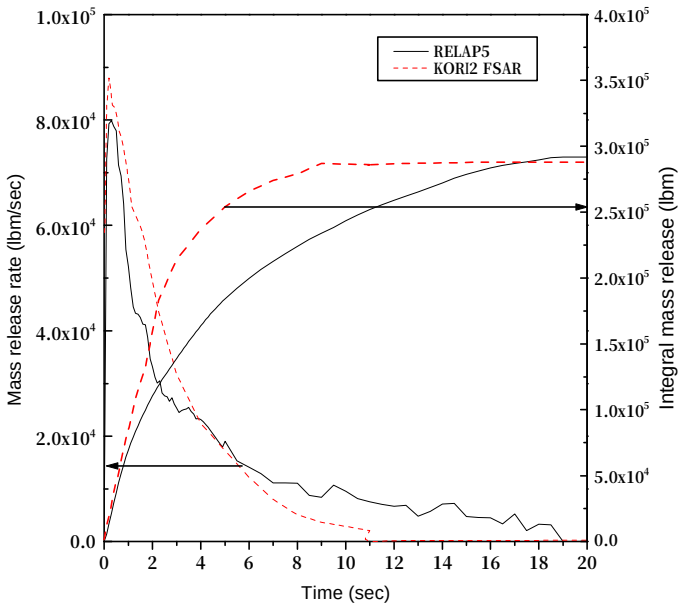



그림 2. 고리 2 호기 취출기간중 질량 방출량 및 적산 방출 질량

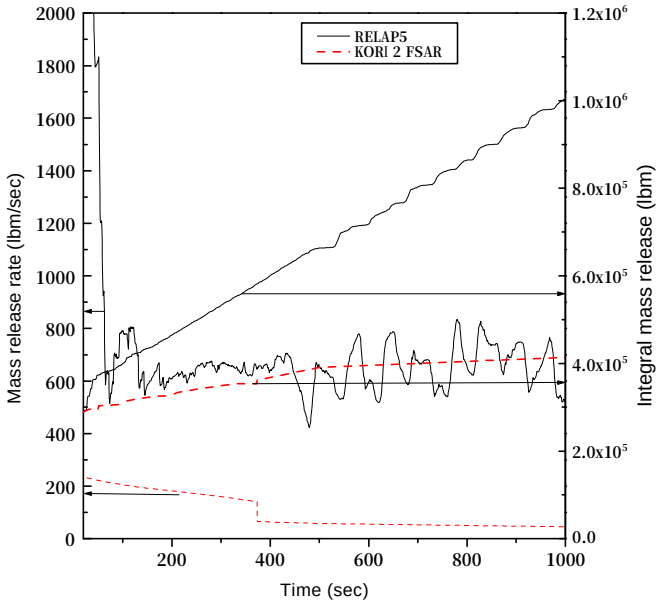



그림 3 고리 2 호기 취출기간후 질량 방출량 및 적산 방출 질량

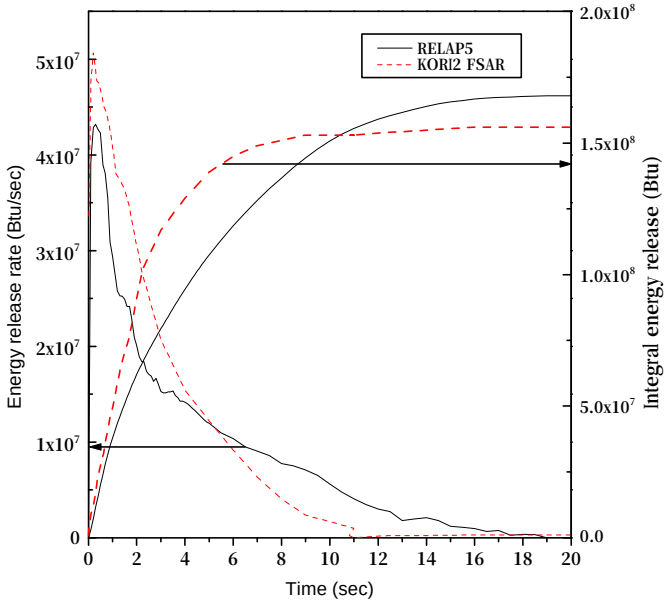
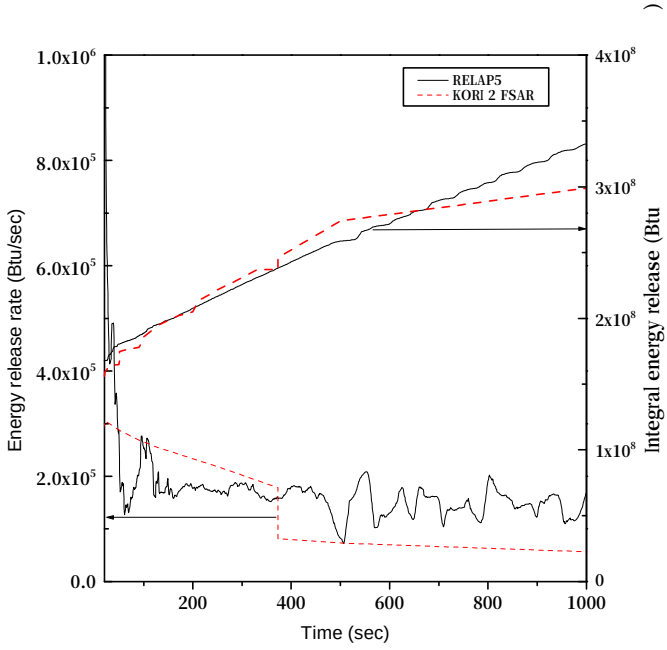



그림 4 고리 2 호기 취출기간중 에너지 방출량 및 적산 방출 에너지




Post blowdown period

그림 5 고리 2 호기 취출기간후 에너지 방출량 및 적산 방출 에너지