

Mid-loop 운전중 RHR 기능 상실사고시 최대압력 및 보조급수 공급 여유시간 분석

김원석, 정영중, 장원표

한국원자력연구소

요약

영광 3/4호기 mid-loop 운전중 잔열제거(RHR) 기능 상실사고시 열수력적 현상을 최적 전산 코드인 CATHARE2를 이용하여 해석하였다. 이러한 사고시 열수력적 현상은 일차측 냉각재 방출유로와 계통내 비응축성 가스의 거동에 의해 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 2개의 경우를 모의하였는데, 하나는 계통내 방출유로가 있는 경우이며 다른 하나는 방출유로가 없는 경우를 계산하였다. 이 때 사용된 가정은 다음과 같다. (가) 계통은 부분충수 운전 상태로 상부에 비응축성 가스나 증기로 가득 차 있다. (나) 증기발생기는 1대만이 이용 가능하고 이차측은 습식보관 상태이며, 보조급수는 공급되지 않고 이차측 압력은 대기압 상태이다. (다) 사고는 원자로 정지후 2일후 발생한다. 이와같은 조건하에서 사고시 계통 최대압력은 방출유로가 있는 경우 사고후 6,000 초에 0.27 MPa이며, 방출유로를 통한 유량은 총 2.4 kg/s이다. 이 방출유량을 외삽하여 계통수위가 고온관 바닥까지 도달하는데 걸린 시간은 사고후 약 5.67 시간이다. 증기발생기 U-튜브를 통한 열전달에 의해 이차측 증기 발생으로 이차측 수위가 하락하면 증기발생기 reflux cooling은 제한을 받을 수 있다. 이 경우 이차측 수위가 U-튜브의 active 영역 상부까지 도달하는데 걸리는 시간은 사고후 약 10시간으로 계산되었다. 그러므로 이 경우 보조급수 공급 여유시간 보다 노심 노출시간이 더 빨리 도달하여 노심을 손상시킨다. 사고시 수위지시계는 계통감압에 큰 영향을 주지 못하기 때문에 가능한 빨리 닫아 계통 inventory를 유지하는 것이 이차측 보조급수 공급보다 우선한다.

1. 서론

핵연료 재장전 및 기타 보수 유지를 위해 필요시에는 일차냉각계통 냉각재수위를 고온관 중간까지 낮추고 잔열제거 계통을 운전하게 되는데 이러한 운전모드를 부분충수(mid-loop) 운전이라고 한다. 이 운전중 RHR 기능 상실사고가 발생하게 되면 원자로 냉각재 계통의 압력은 올라가게 되는데 이러한 압력상승은 설계압력이 낮은 임시 thimble seal이나 노즐댐 건전성에 영향을 줄 수 있다. 또한 계통내 방출유로를 통하여 빠져나가는 유량의 정확한 측정은 노심 노출시점을 예측할 수 있는 중요한 요소가 된다. 이러한 이유 때문에 mid-loop 운전중 잔열제거 기능 상실사고에 관한 열수력 현상 및 결과에 많은 관심이 집중되고 있다. 특히, 실험적으로는 Bethsy나 ROSA-IV와 같은 대형 실험장치가 활용되고 있으며, 해석차원에서는 최적계산을 위해 RELAP5/MOD3나

CATHARE2 코드가 주로 이러한 사고의 물리적 현상 분석에 사용되고 있다.

이러한 사고후 주된 계통의 열제거 수단은 증기발생기 U-튜브를 통한 reflux cooling과 계통내 방출유로를 통한 유량유출이 될 것이다. Reflux cooling은 노심에서 발생한 증기가 증기발생기 U-튜브내로 올라와 응축되어 내려오면서 일차측 열이 이차측에 전달되는 자연순환 현상이다. 이 때 이차측으로 열전달이 이루어지기 위해서는 수위가 충분한 높이에 존재하여야 하며 온도가 일차측 보다 낮아야 한다.

본 연구의 주된 목적은 mid-loop 운전중 잔열제거 기능 상실사고시 계통현상을 이해하고 증기발생기의 냉각능력을 파악하는데 있다. 특히, 증기발생기를 통한 잔열제거는 주로 U-튜브내의 reflux 응축에 기인하게 되며, 이는 계통압력을 결정하는데 주요한 요소가 된다. 따라서 상당히 긴 계산시간을 요하는 이런 사고에서 사고후 계통 최대압력은 reflux 응축을 보다 정확히 살펴봄으로써 계산초기에 최대압력을 예측할 수 있게 된다. 이와 함께 계산결과를 이용하여 일차측 vent를 통한 유량의 유출로 발생하게 될 노심 노출시점을 예측하였다. 열전달로 인해 이차측 비등으로 증기발생기 수위가 하락하여 증기발생기 열제거 능력이 제한받게 되는데, 이 때 reflux cooling의 형성이 가능한 최소수위 도달시점도 예측하였다.

## II. 발전소 개요 및 CATHARE2 입력 모델

영광 3/4호기는 2815 MWt의 가압경수로로 두개의 loop으로 구성되어 있다. 현재의 모의에서는 1 대의 증기발생기만 이용 가능한 것으로 가정하였다. 사고전 초기 RHR 입,출구의 온도차는 10 ℃로 가정하여 계산한 초기조건을 표 1에 정리하였다.

CATHARE2 코드의 입력모델은 소형 냉각재 상실사고시 사용된 입력을 기본으로 수정하여 본 계산에 사용하였다. 이는 100% 출력시 검증된 계통 유동량 등 계통조건을 이용하여 mid-loop시 사고를 수행하기 위함이었다. 영광 3/4호기 계산을 위하여 일차측은 250개, 이차계통은 76개의 node로 총 326개의 node를 사용하였다(그림 1). 원자로용기 상부와 가압기 상부에 설치된 방출유로는 대기압 상태로 압력경계를 이루고 있으며, RHR 방출밸브에 연결된 수위지시계는 보다 정확한 방출유량을 계산하기 위하여 입구 및 출구의 node를 세분화 하였다.

## III. 계산결과

계산은 고온관과 저온관에 설치된 RHR 계통 입구와 출구를 닫으므로써 시작되며, 사고후 3시간 동안 모의하였다. 그림 2는 일차 및 이차측 압력을 나타낸 것이다. 일차계통 압력중 초기 500 초까지는 계통내 물이 포화상태로 가열되는 단계로 계통압력에는 영향을 미치지 않으며, 이후 노심내 발생된 증기의 영향으로 계통의 압력은 급격한 상승을 이루고 있다. 1,000 초 이후부터 증기발생기를 통한 reflux cooling의 영향으로 압력은 일시적으로 추축하나, 다시 상승하기 시작하여 이차측 온도가 포화온도에 도달할 때까지 계속 증가한 다음 약 6,000 초 이후에는 최대압력에 도달한 후 안정화 된다. 이 때 수위지시계를 통한 유량유출을 막아 노심 노출시점을 늦추기 위해 수위지시계를 닫은 경우에도 압력은 기본경우에 비해 크게 상승하지 않았다. 이 이유는 수위지시계를 통한 액체의 방출은 압력감압에는 충분하지 못하기 때문이다. 반면 계통내 방출유로가 없는 경

우는 3시간 모의 끝까지 계통압력이 계속 상승하고 있음을 볼 수 있다. Vent가 없는 경우에서 7,500 초에서의 감압현상은 증기발생기 U-튜브내에서의 N<sub>2</sub> 가스가 일시적으로 U-튜브를 빠져나가기 때문이다. 이차측 압력은 ADV가 항상 열려 있기 때문에 이차측에 증기가 발생하여도 압력은 대기압상태를 유지한다.

그림 3은 방출유로를 통한 유량을 나타낸 것이다. 두 상부 방출유로를 통한 증기량은 계통압력이 최대점에 도달되면 각각 0.1 kg/s, 수위지시계 배관으로의 유량은 6,000 초 이후 빠져나가기 시작한다. 이 때의 유량은 약 2.2 kg/s이다. 이와같은 결과에 의해 총 방출유량은 2.4 kg/s가 된다. 이를 외삽하여 계통수위가 고온관 바닥에 도달하는 시간은 사고후 약 5.67시간이며, 노심노출시점은 이 시간 이후일 것으로 판단된다. 그림 4는 증기발생기를 통한 열제거를 보여주고 있다. 6,000 초 이후 증기발생기의 열제거율은 약 94 %로 일정해지며, 나머지는 방출유로를 통한 유량에 의해 제거됨을 알 수 있다.

다음 그림 5은 계통내 N<sub>2</sub> 가스량을 나타낸 것으로 초기 일차측 전체에 존재하는 가스량은 135 kg 으로 사고후 초기에 바로 상부 방출유로를 통해 빠져나가고 일부는 증기발생기 U-튜브에 축적된다. 1 시간 이후부터는 증기발생기 A 측, 열전달이 이루어지는 U-튜브안 N<sub>2</sub> 량은 일정해지나 증기발생기 B의 N<sub>2</sub> 량은 유량유동에 의해서 빠져나가 방출통로를 통해 계속 유출된다.

#### IV. 최대압력 예측

기본계산 결과에서 보듯이 계통압력이 최대점에 이르러 안정된 상태에 도달하는 것을 확인하기 위해서는 최소한 3 시간의 모의가 필요하였다. 즉, 이는 표 2에서 보듯이 Cray-YMP로 1 일이 소요되는 계산이다. 이와같이 엄청난 계산시간의 소요는 상당한 전산비 지출 뿐만아니라 사고시 안전성 분석 차원에서도 그 신속성이 결여되어 많은 문제를 야기시킬 수 있다. 이러한 사고시 계통압력은 달톤과 이상기체 방정식을 적용하여 이에 필요한 parameter들의 값을 얻을수만 있다면 긴 계산시간을 소비하지 않고도 계통 최대압력을 예측해 볼 수가 있다. 다시 말하자면 계통압력은 달톤의 법칙에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{total} = P_{sat}(T_{sec}) + P_{nc}$$

여기서 P<sub>sat</sub>는 증기 부분압, T<sub>sec</sub>는 이차측 냉각수 온도, 그리고 P<sub>nc</sub>는 질소의 부분압을 나타낸다. 이 때 질소의 부분압은 이상기체 방정식을 적용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{nc} = \frac{M_{n2} R T_{sec}}{V_{nc}}$$

여기서 M<sub>n2</sub>는 U-튜브내 질소의 양, R은 질소에 대한 기체상수, 그리고 V<sub>nc</sub>는 U-튜브내 passive 영역의 부피를 나타낸다. 그러므로 이 식들에 의해서 계산되는 계통 최대압력은 T<sub>sec</sub>, M<sub>n2</sub>, V<sub>nc</sub> 들에 의해서 결정될 수가 있는 것이다. 따라서 이러한 값들이 일정하게 되는 시점에서 그 값들을 취하여 최대압력을 예측해 볼 수 있다.

#### IV.1. 이차측 온도 ( $T_{sec}$ )

이차측 냉각수 온도는 일차측으로 부터의 열전달에 의해 계속 상승하여 이차측 압력에 상응하는 포화온도에서 안정되어 일정한 값을 갖게 된다. 즉, 계통압력이 일정해졌을 때 계산에서 최종 이차측 압력은 0.101 MPa이며, 그 포화온도는 373 K로 가정할 수가 있는 것이다.

#### IV.2. U-튜브내 $N_2$ 질량 ( $M_{n_2}$ )

$N_2$  가스의 부분압을 결정하는데 있어서 U-튜브내에 존재하는  $N_2$ 의 양은 상당히 중요하다. Vent가 있는 경우 그림 5에서 보듯이 약 1 시간 이후부터는 U-튜브내에 존재하는  $N_2$ 의 양이 일정해 짐을 볼 수 있다. 이것은 곧 1 시간 정도의 계산 만으로도 일정한  $N_2$ 의 양을 얻을 수가 있음을 보여주는 것이다.

#### IV.3. U-튜브내 passive 영역의 부피 ( $V_{nc}$ )

마지막으로 계통압력을 예측하는데 필요한 값은 U-튜브내 passive 영역의 부피이다. 대부분의 열전달은 U-튜브 상승부 초반에서 이루어지며 나머지는 passive 영역으로  $N_2$  가스가 차 있게 된다. 계통내에서  $V_{nc}$  는 다음과 같은 식에서 구할 수가 있다.

$$V_{nc} = \frac{V_t (L_t - L_c)}{L_t}$$

여기서  $V_t$ 는 U-튜브 총 부피(36.2 m<sup>3</sup>),  $L_t$ 는 U-튜브 총 길이(19.6 m), 그리고  $L_c$ 는 active 길이(2.30 m)를 나타낸다. 증기발생기 U-튜브내 대부분의 열전달은 U-튜브 상승부 처음과 두번째 및 세번째 volume에서 대부분 일어나고 있다. 그러므로 active 길이는 세번째와 네번째 volume 사이라고 가정하여  $V_{nc}$ 를 구하였다.

#### IV.4. 최대압력 예측 : vent 가 있는 경우

RHR 상실사고 발생 1 시간을 모의하면 계통 최대압력 결정에 영향을 주는  $T_{sec}$ ,  $M_{n_2}$ , 그리고  $V_{nc}$ 와 같은 주요변수가 결정된다. 이 값 즉,  $M_{n_2}$ (47.0 kg),  $R$ (297 J/kg.K),  $T_{sec}$ (373 K), 그리고  $V_{nc}$ (32.9 m<sup>3</sup>)을 이용하여 질소의 분압을 구하면 약 0.163 MPa이다. 그러므로 계통의 총 압력은 증기분압(0.101 MPa)과 질소분압(0.163 MPa)의 합이므로 최대압력은 0.264 MPa로 예측된다. 3 시간 계산하여 얻어진 값(0.265 MPa)과 비교하여도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이것은 결국 이런 종류의 계산시 이와 같은 예측 방법은 계산시간을 줄이는 데 유효할 수 있음을 보여 준다.

#### IV.5. Active 길이에 대한 민감도 분석

최대압력을 계산하는데 필요한 active 길이를 정확히 얻기는 어렵다. 왜냐하면 U-튜브에 유입하는 증기의 속도가 약간씩 진동을 하기 때문이다. 하지만 계산에서도 보듯이 그 길이가 전체 U-튜브 길이에 비하여 상대적으로 짧기 때문에 최대압력을 예측하는데 큰 영향을 주지는 못한다.

그림 6은 증기발생기 상승부의 두번째 부터 네번째 volume 까지의 active 길이에 따른 최대압력을 비교한것으로 이 중 어느 길이를 선택하여도 실제 계산과 큰 차이가 없음을 확인하였다.

#### IV. 6. Vent가 없는 경우의 최대압력 예측

이 경우는 그림 2에서 보았듯이 계통내  $N_2$  가스의 유동으로 3 시간 모의 계산에서 0.430 MPa를 이루면서 계속 상승하고 있는 추세였으나, 이를 위에 언급된 식에 의해서 예측하여 보면 최대압력은 약 5.59 MPa에서 이루어질 것으로 판단된다. 이와같은 판단의 근거는 계통내 모든  $N_2$  가스가 유체유동에 의해 열전달이 생기는 증기발생기 A의 U-튜브안으로 들어온다고 가정하여  $N_2$  의 양을 계산하였던 것이다. 즉, 초기 계통내에 존재하였던  $N_2$ 의 양 모두 증기발생기 A U-튜브내에 축적된다고 본 것으로 이는 약간 보수적인 값으로 실제는 이보다 낮을 것으로 판단된다. 이와 같은 결과에 비추어 볼 때 최대압력 측면에서 계통내 방출유로는 그 유.무에 따라 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

#### V. 이차측 수위 예측

앞에서도 언급하였듯이 RHR 기능 상실사고후 계통의 주요 열제거원은 증기발생기이다. 일차측열이 이차측으로 전달되면서 이차측 냉각수의 온도도 점차 상승하기 시작한다. 이 때 이차측에도 증기가 발생하기 시작하여 발생된 증기가 ADV를 통해 빠져나간다. 그림 7에서 보듯이 그 양은 약 4.48 kg/s으로 일정한 량이 약 5,000초에서 부터 빠져나가기 시작한다. 이 결과를 이용하여 보수적으로 앞에서 언급한 active 영역보다 약간 높은 3.35 m까지 이차측 수위가 낮아져도 증기발생기의 열제거능력에는 변화가 없다고 가정하여 그 시간을 외삽하여 보면 사고후 약 9.91 시간으로 최소한 이시간 까지는 계통압력의 변화없이 증기발생기로의 열제거가 유지된다.

#### VI. 결론

최적 열수력 전산코드인 CATHARE2를 이용하여 영광 3/4호기 부분충수 운전중 RHR 기능 상실사고시에 대한 해석 및 증기발생기 열제거 능력을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 영광 3/4호기 계산결과 최초 노심비등은 사고후 300 초 후이다.
- (2) Vent가 있는 경우인 기본계산에서 계통 최대압력은 0.265 MPa 이다.
- (3) 증기발생기로의 열제거율은 약 94% 이다
- (4) Vent가 있는 경우 계통수위가 고온관 바닥까지 떨어지는데 걸리는 시간은 사고후 약 5.67시간으로 노심노출 시점은 이 후에 발생할 것으로 판단된다.
- (5) 계통 최대압력을 결정짓는 주요 parameter를 알면 계산초기에 최대압력을 예측할 수 있어 계산시간을 절약할 수 있다. 이 방법에 의하여 vent가 없는 경우 최대압력은 5.59 MPa이다.
- (6) 이차측 증기방출로 인해 증기발생기 수위가 active 영역까지 내려오는 시간은 사고후 약 10시간으로 나타나 그 이후 증기발생기의 reflux cooling은 제한받게 된다.
- (7) 이와같은 부분충수 운전중 사고계산은 상당한 계산시간(CPU/real=1일/3시간)을 요하여 이러한 Mid-loop 사고해석시 CATHARE2 코드의 적용에 문제점으로 남아있다.

## VII. 참고문헌

1. Naff, S.A. et al, " Thermal-Hydraulic Processes during Reduced Inventory Operation with Loss of Residual Heat Removal", NUREG/CR-5855, U.S. Nuclear Regulatory, 1992
2. Chataing, T., "Code Analysis of Multidimensional Phenomena in a ROSA-IV/LSTF Experiment Simulation a Loss of Residual Heat Removal Event During PWR Midloop Operation", ASME/JSME Nucl. Eng. Conference, vol. 1, 1993
3. Hassan, Y.A. and Raja, L.L., "Analysis of Experiments for Steam Generator in the Presence of Noncondensable Gases Using the RELAP5/MOD3 Code", Nucl. Tech. 104, pp 76-88, 1993
4. F. Barre and M. Bernard, "CATHARE Code Strategy and Assessment", Nucl. Eng. Des. 124, pp. 257-284, 1990
5. Noel, B. and Deruaz, R., "Reflux Condensation with Nitrogen in Steam Generator U-tube: Analysis of BETHSY Test 7.2c Using CATHARE2 Code", Proc. Intl. Symp. on Multiphase Flow and Heat Transfer, Sep. 19-21, 1994, Xi'an, China
6. J.J. Jeong et al., "Investigation of Steam Generator Cooling Capability under the Loss-of-RHR Accident during the Midloop Operation of Yonggwang Nuclear Units 3/4", March 1996, ICONE-4 U.S.A

**Table 1. Initial conditions of YGN 3/4 calculation**

Parameter	Condition	Calculation
<b>Primary side</b>		
Pressure	0.101 MPa	0.103 MPa
Temperature		
Hot /Cold leg	333 /323 K	334 /323 K
Void fraction in hot leg	0.50	0.48
Decay heat	11.6 MW	11.6 MW
Nitrogen humidity	100 %	100%
Number of RCS vents	3	3
Size of RCS vents	0.0191 m (dia.)	0.0191 m (dia.)
<b>Secondary side</b>		
Pressure	0.101 MPa	0.101 MPa
Temperature in SG dome	333 K	332 K
Number of ADV in SG	2/SG	2/SG
Area of ADV	0.0790 m <sup>2</sup>	0.0790 m <sup>2</sup>

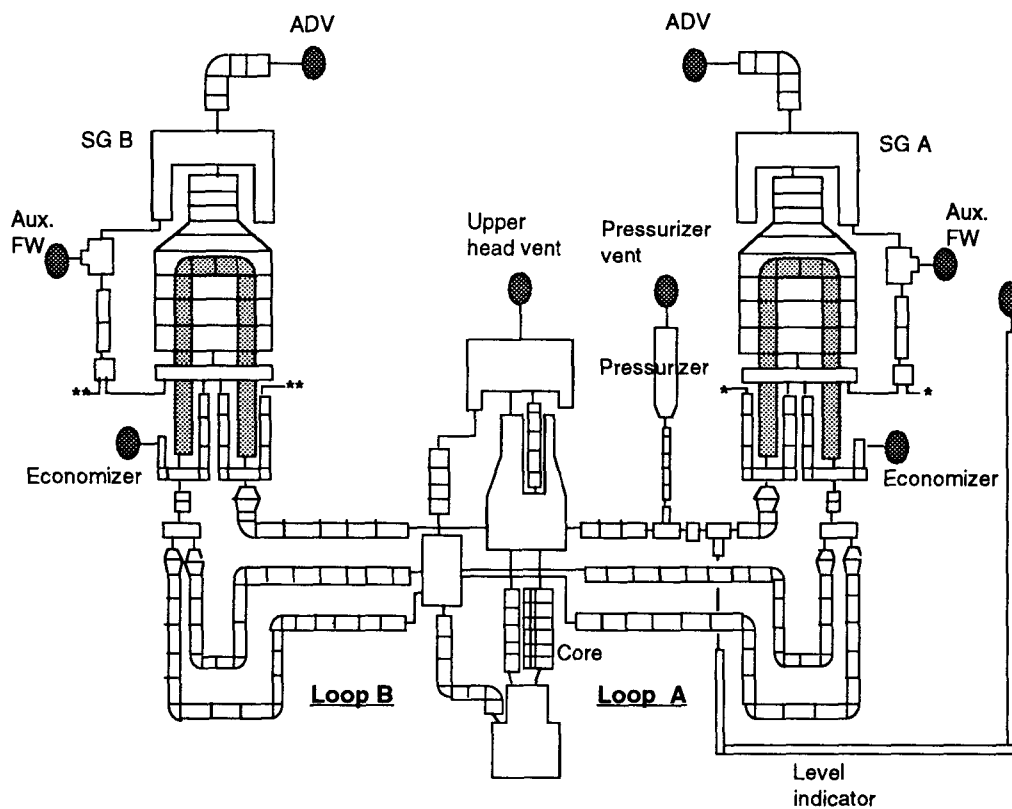
**Table 2. Comparison of the computation times**

Case	Time step (s) <sup>a</sup>	Problem time (h)	CPU time (h) <sup>b</sup>
1. Case 1	0.1450	3.0	23.5
2. Case 2	0.1500	3.0	21.5

<sup>a</sup> : average time step size, <sup>b</sup> : executed on Cray-YMP

Case 1 : 1 SG, 2 vents, and level indicator

Case 2 : 1 SG, no vent, and no level indicator



**Fig. 1 CATHARE2 nodalization of YGN 3&4 under mid-loop operation condition**

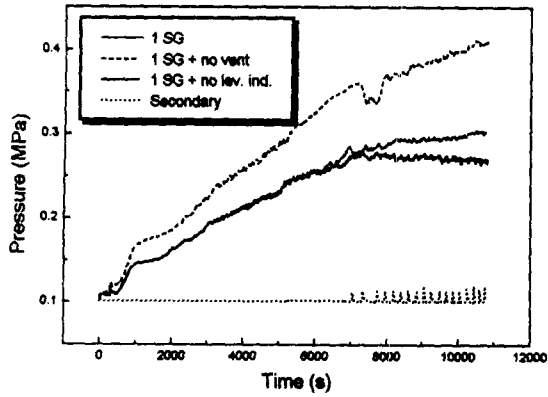


Fig. 2. System pressure

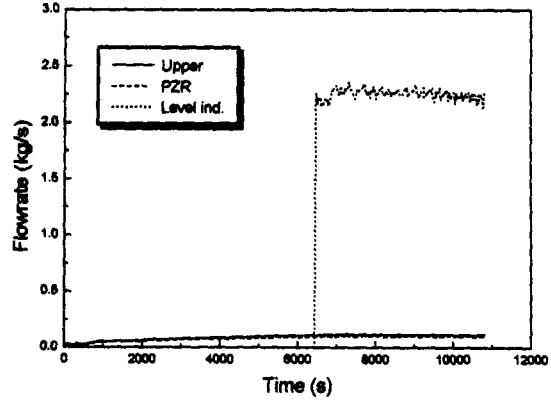


Fig. 3. Flowrate in vents and level indicator

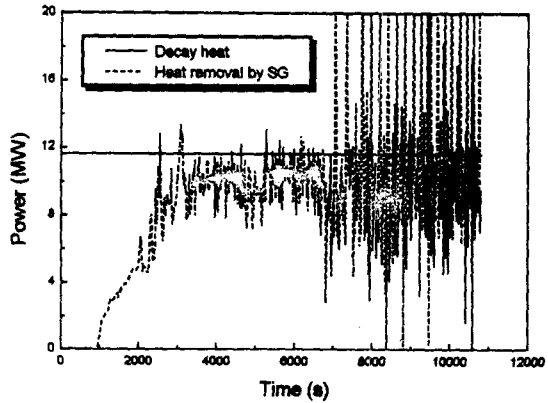


Fig. 4. Decay heat and heat removal by SG

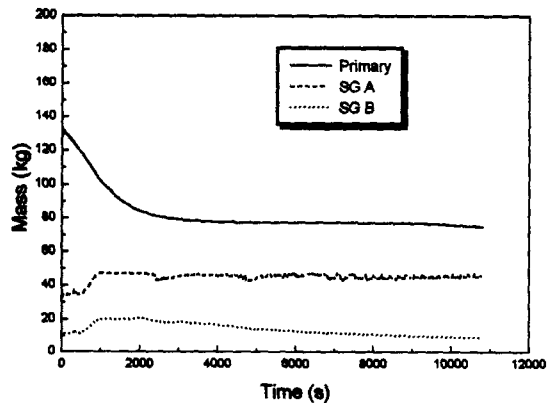


Fig. 5. Mass of nitrogen gas

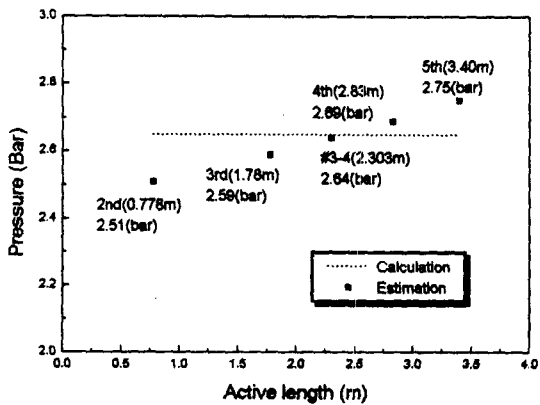


Fig. 6. Pressure vs. active length

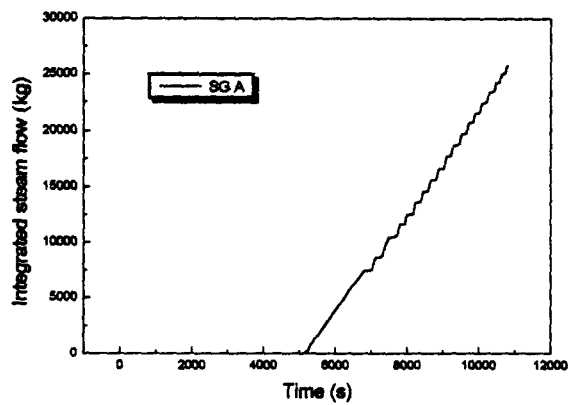


Fig. 7. Integrated steam flow in SG