

영광원자력 3,4호기 1차기기 냉각해수계통 1계열  
완전상실시 열제거방안에 대한 연구  
A Study on The Heat Removal Method  
at Loss of ESWS 1 Train in YGN-3,4

최영준  
한국전력공사  
서울특별시 강남구 삼성동 167  
이경진  
조선대학교  
광주광역시 동구 서석동 375

요약

영광원자력 3,4호기는 탁도가 높은 해수의 영향으로 1차기기 냉각해수펌프 진동이 증가하여 펌프 가동중 정비가 자주 이루어지는데, 정비도중 같은 계열의 나머지 펌프가 불시정지되어 1차기기 냉각해수계통 1계열이 완전상실될 가능성이 있다. 이에 대비하여 현재 비정상 절차서로 작성하여 사용하고 있는 사용후 연료저장조를 이용한 열제거 방법을 수행할 경우, 1차기기 냉각해수 완전상실 계열의 1차기기 냉각수 온도가 제한치 이내로 유지되는지 분석하였다. 분석결과 최근 3년 동안의 최고 해수온도인 30.2℃에서 1차기기 냉각해수 상실시 1차기기 냉각수 온도는 'A'계열은 22분, 'B'계열은 30분만에 제한치 35℃<sup>[3]</sup> 까지 상승되는 것을 확인하였다. 따라서 현재의 비정상 절차서는 실효성이 없으며, 1차기기 냉각해수 열교환기 전단에 'A', 'B'계열을 서로 연결하는 공통배관 설치를 포함한 별도의 열제거 방안이 강구되어야 하는 것으로 평가되었다.

Abstract

On-Line Maintenance of the Essential Service Water Pump(ESWP) of Yonggwang Nuclear Power Plant 3&4 is frequently made to fix vibration problems caused by the high turbidity of sea water. If the other ESWP in the same train is stop unexpectedly while the other is under repair, loss of ESWS function of that train can occur. In this paper, the temperature variation of CCW(Primary side Component Cooling Water) is analyzed when the heat of CCW is removed via Spent Fuel Pool according to the Abnormal Operation Procedure prepared for the case of loss of ESWS function. The analytic results show that CCW temperature of 'A' and 'B' train reaches 35℃(the upper limit value) in 22 and 30 minutes respectively after the loss of ESWS function of 'A' train, with the sea water temperature of 30.2℃ which is the recorded maximum in recent 3 years. Accordingly, the Abnormal Operation Procedure of Loss of ESWS of YGN 3&4 is evaluated to be unpractical and other heat removal tools must be prepared, such as adding a tie line between 'A' and 'B' train at upstream of ESW heat exchangers.

## 1. 서론

원자력발전소는 원자로냉각재펌프 등 1차계통의 각종 기기에서 발생하는 열을 제거하기 위하여 순수인 1차기기 냉각수(CCW)를 이용하고 있고, 1차기기 냉각수의 열은 최종적으로 1차기기 냉각해수계통(ESWS)을 이용하여 바다로 방출된다.<sup>[2]</sup> 그런데 영광원자력 3,4호기는 탁도가 높은 해수의 영향으로 1차기기 냉각해수펌프 진동이 증가하여, 상업운전 이후 98년 8월까지 발전소 출력운전 중에 모두 20회의 펌프 분해정비(가동중 정비)가 이루어진 바 있다. 만약 발전소 출력운전중 1차기기 냉각해수펌프 1대가 분해된 상태에서 같은 계열의 나머지 펌프가 불시정지되었을 경우, 1차기기 냉각수의 열제거원 상실로 원자로냉각재펌프와 화학 및 체적제어계통의 유출수 등 관련 기기 및 계통의 온도 상승으로 발전소 출력운전이 불가능하게 된다. 이에 대비하여 현재 영광원자력 3,4호기의 비정상 절차서는 1차기기 냉각해수 완전상실 계열의 1차기기 냉각수 온도를 유지하기 위한 방안으로 사용후 연료저장조와 다른 계열의 1차기기 냉각해수계통 및 1차기기 냉각수계통으로 열을 제거하도록 하고있다.<sup>[4]</sup>

따라서 본 연구에서는 영광원자력 3,4호기 100% 출력운전 상태에서 1차기기 냉각해수계통 1계열 완전 상실시에, 사용후 연료저장조를 이용하여 1차기기 냉각수계통을 냉각할 경우에 1차기기 냉각수의 운전제한치인 35℃(열교환기 후단온도) 유지여부를 계산하고, 온도유지가 불가능하면 제한치가 초과되는 시간을 산출하여 절차서의 유용성을 평가하고자 한다. 계산을 위해서 열수력학적 모델을 세웠으며 수치해석을 통해 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

## 2. 분석방법

### 2.1 열수력학적 모델링

영광원자력 3,4호기 계통도(P&ID)를 기준으로 Fig.1과 같이 ESWS/CCWS(1차기기 냉각해수계통 / 1차기기 냉각수계통) 제어체적을 구성하였다. 'A'계열의 해수가 상실되면 'A'계열 CCWS의 열제거원이 상실되므로 열원  $q_i$ 들에 의해 'A'계열의 온도는 상승한다. 이때 대체 열제거원으로 SFP(사용후 연료저장조)를 사용하기 위해 'A'계열과 'B'계열의 사용후 연료저장조 냉각펌프를 기동하면, SFP Hx 'A'와 SFP를 통하여 'B'계열의 ESWS/CCWS로 'A'계열의 발생열( $q_i$ )이 방출된다. SFP Hx 'A'에서 SFP로 전달된 열량은 SFP에서 100% 혼합되어 전달되는 것으로 가정하였다. 'B'계열의 해수가 상실된 경우에는 반대의 경로를 통하여 열제거가 이루어진다.

이와 같은 일련의 과정에 대해서 Fig.1과 같이 우리가 예측해야할 온도변수  $T_1$ 에서  $T_{11}$  까지 모두 11개를 선정하고, 열교환기의 에너지 방정식과 CCWS의 질량보존식 및 에너지보존식, SFP의 에너지보존식에서 연립방정식을 세워 시간에 따른 각 지점의 온도변화를 분석하였다.

### 2.2 열교환기의 에너지 방정식

열교환기의 에너지 방정식을 설명하기 위해서 'A'계열의 CCW 열교환기를 보기로 들면 다음과 같다.

에너지 방정식

$$\dot{q} = \epsilon C_{\min} (T_{sea} - T_2) \quad (1)$$

$$\dot{q} = C_H (T_{sea} - T_1) \quad (2)$$

$$\dot{q} = C_C (T_3 - T_2) \quad (3)$$

위 식을 결합하여 재정리하면

$$T_1^{n+1} - \frac{\varepsilon C_{\min}}{C_H} T_2^{n+1} = (1 - \frac{\varepsilon C_{\min}}{C_H}) T_{sea} \quad (4)$$

$$(1 - \frac{\varepsilon C_{\min}}{C_C}) T_2^{n+1} - T_3^{n+1} = - \frac{\varepsilon C_{\min}}{C_C} T_{sea} \quad (5)$$

여기서  $\varepsilon$  은 열교환기 Effectiveness<sup>[1]</sup>,  $C_{\min}$  은 열교환기의 Tube 또는 Shell Side를 흐르는  $\dot{m} C_p$  중 적은 값,  $C_H$  와  $C_C$  는 각각 저온유체와 고온유체의  $\dot{m} C_p$  를 나타낸다.

'B'계열의 CCW 열교환기와 SFP 'A', 'B'계열의 열교환기에 대해서도 같은 방식으로 식이 이루어진다.

### 2.3. CCWS의 질량보존식 및 에너지보존식

CCWS의 질량보존식 및 에너지보존식을 설명하기 위해서 'A'계열의 CCWS를 예로 들면 다음과 같다.

$$\dot{m}_i C_p (T_i - T_3) = \dot{q}_i \quad (6)$$

$$T_i - T_3 = \Delta T_i = \frac{\dot{q}_i}{\dot{m}_i} \quad (7)$$

질량보존식

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_4 + \sum_i \dot{m}_i \quad (8)$$

에너지보존식

$$\begin{aligned} \frac{\partial (M_2 u_2)}{\partial t} &= \sum_i \dot{m}_i h_i + \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_2 h_2 \\ &= \sum_i \dot{m}_i (h_i - h_2) + \dot{m}_4 (h_4 - h_2) \end{aligned} \quad (9)$$

$\Delta u = C_v \Delta T$ ,  $\Delta h = C_p \Delta T$  를 이용하면,

$$\begin{aligned} &\frac{M_2 C_v (T_2^{n+1} - T_2^n)}{\Delta t} \\ &= \sum_i \dot{m}_i (h_i - h_2) + \dot{m}_4 (h_4 - h_2) \\ &= \sum_i \dot{m}_i C_p (T_i - T_2) + \dot{m}_4 C_p (T_4 - T_2) \\ &= \sum_i \dot{m}_i C_p \Delta T_i + \sum_i \dot{m}_i C_p (T_3 - T_2) + \dot{m}_4 C_p (T_4 - T_2) \end{aligned} \quad (10)$$

Crank-Nicolson 방법을 사용하여 차분화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{M_2 [T_2^{n+1} - T_2^n]}{\Delta t} &= \sum_i \dot{m}_i \Delta T_i \\ &+ \frac{\sum_i \dot{m}_i}{2} [(T_3^{n+1} - T_2^{n+1}) + (T_3^n - T_2^n)] \\ &+ \frac{\dot{m}_4}{2} [(T_4^{n+1} - T_2^{n+1}) + (T_4^n - T_2^n)] \end{aligned} \quad (11)$$

재정리하면,

$$\begin{aligned} & \left( \frac{M_2}{\Delta t} + \frac{\sum_i \dot{m}_i}{2} + \frac{\dot{m}_4}{2} \right) T_2^{n+1} - \frac{\sum_i \dot{m}_i}{2} T_3^{n+1} - \frac{\dot{m}_4}{2} T_4^{n+1} \\ & = \frac{M_2}{\Delta t} T_2^n + \sum_i \dot{m}_i \Delta T_i + \frac{\sum_i \dot{m}_i}{2} (T_3^n - T_2^n) + \frac{\dot{m}_4}{2} (T_4^n - T_2^n) \end{aligned} \quad (12)$$

'B'계열의 CCWS 대해서도 같은 방식으로 식을 유도할 수 있다.

## 2.4 SFP의 에너지보존식

Spent Fuel Pool을 제어체적으로 하여 에너지보존식을 세우면 다음과 같다.

$$\frac{\partial(M_{SFP} u_5)}{\partial t} = \dot{m}_6 (h_6 - h_5) + \dot{m}_7 (h_7 - h_5) + \dot{q}_{SFP} \quad (13)$$

$\Delta u = C_v \Delta T$ ,  $\Delta h = C_p \Delta T$ 를 이용하면,

$$\begin{aligned} & \frac{M_{SFP} C_v (T_5^{n+1} - T_5^n)}{\Delta t} \\ & = \dot{m}_6 C_p (T_6 - T_5) + \dot{m}_7 C_p (T_7 - T_5) + \dot{q}_{SFP} \end{aligned} \quad (14)$$

Crank-Nicolson Scheme을 사용하여 다음의 차분화식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left( \frac{M_{SFP}}{\Delta t} + \frac{\dot{m}_6}{2} + \frac{\dot{m}_7}{2} \right) T_5^{n+1} - \frac{\dot{m}_6}{2} T_6^{n+1} - \frac{\dot{m}_7}{2} T_7^{n+1} \\ & = \frac{M_{SFP}}{\Delta t} T_5^n + \frac{\dot{m}_6}{2} (T_6^n - T_5^n) + \frac{\dot{m}_7}{2} (T_7^n - T_5^n) + \frac{\dot{q}_{SFP}}{C_p} \end{aligned} \quad (15)$$

위에서 유도한 식들을 대수방정식으로 구성하여 컴퓨터 프로그램을 작성하였다.

## 3. 결과

### 3.1 각종 입력자료 습득

1차기 냉각해수 상실시에 1차기 냉각수의 온도상승 속도는 CCWS에 연결되어 있는 각종 기기의 발생열량에 따라 다르므로 영광원자력 3,4호기 100% 출력운전을 기준으로 계열별 실제 열량을 산출하였다. 또한 주 제어실 공기조화설비와 원자로건물 팬쿨러 설비 등 기기 교체를 통하여 다른 계열로 전환이 가능한 부하는 이미 다른 계열에서 운전중이고, SFP는 냉각펌프에 의해서 이미 냉각중인 것으로 가정하였다.

각종 기기의 CCW 출구온도 및 유량은 3,4호기 주 제어실과 현장에 설치되어 있는 온도계와 유량계를 수 회 판독하여 평균값을 취하였으며, 오차가 크다고 판단되는 계기는 교정을 수행하였다. 특히 CCW 열교환기와 SFP 열교환기의 Effectiveness( $\epsilon$ )값을 계산하는데 필요한 열교환기 입, 출구의 온도차는 접촉식 온도계로 현장 실측하여 취득하였다.

### 3.2 계산결과

개발된 프로그램을 사용하여 여러 가지 운전변수에 대해서 평형상태(Steady State)와 과도상태(Transient State) 계산을 수행하였다. 'A' 또는 'B'계열 1차기 냉각해수 완전상실시 해수온도에 따른 CCW 열교환기 후단의 CCW 온도가 제한치 35°C에 도달되는 시간은

다음의 표1 및 표2와 같이 계산되었다.

표1 A계열 상실시 해수온도에 따른 CCW 온도변화

해수온도(℃)	30.2	28.0	26.0	24.0	22.0	20.0	18.0	16.0	14.0	12.0	10.0
제한치(35℃) 도달시간	00:22	00:43	01:06	01:34	02:07	02:47	03:35	04:40	05:46	07:19	09:32
평형온도(℃)	59.2	57.0	55.0	53.0	51.0	49.0	47.0	45.0	43.0	41.0	39.0

표2 B계열 상실시 해수온도에 따른 CCW 온도변화

해수온도(℃)	30.2	28.0	26.0	24.0	22.0	20.0	18.0	16.0	14.0	12.0	10.0
제한치(35℃) 도달시간	00:30	01:00	01:34	02:18	03:14	04:24	05:57	08:08	11:54	46:07	-
평형온도(℃)	53.2	51.0	49.0	47.0	45.0	43.0	41.0	39.0	37.0	35.0	33.0

### 3.3 결과분석

표1, 2 및 Fig.2, 3에 나타난 바와 같이, 최근 3년 동안 영광원자력 3,4호기로 유입된 해수의 최고온도인 30.2℃에서 1차기 냉각해수 1계열 상실시 'A'계열은 22분, 'B'계열은 30분 만에 1차기 냉각수 제한치인 35℃에 도달하는 것으로 계산되었다. 1차기 냉각수펌프가 전기적, 또는 계측기적인 원인으로 불시정지 되었을 경우 긴급복구를 통하여 펌프 재기동이 3시간 이내에 가능하다고 가정하면, 해수온도가 'A'계열은 19℃, 'B'계열은 22℃ 이하에서 사용후 연료저장조를 이용한 냉각방법이 효과가 있는 것으로 분석되었다.

그리고 Fig.4와 같이 영광원자력 3호기 제4주기 운전을 기준으로 해수 30.2℃에서 'A'계열 상실시 SFP 온도는 46℃에서 평형에 도달하여 제한치 60℃<sup>[3]</sup> 이하로 유지되고, 'B'계열의 CCW 온도는 'A'계열 상실의 영향을 받지 않음을 확인하였다.

## 4. 결론

1차기 냉각해수 1계열 완전상실시 사용후 연료저장조를 이용한 1차기 냉각수 열제거 방안은 해수가 가장 높은 조건에서도 펌프 긴급복구가 가능한 최소한의 시간(정비요원 출동 및 원인파악, 정비시간 등을 고려하여 3시간으로 가정하였음)을 확보할 수 있어야 한다. 그러나 'A'계열과 'B'계열은 해수온도가 각각 19℃와 22℃ 이하인 경우에만 그 조건이 만족되는 것으로 예측되었다. 따라서 현재의 영광원자력 3,4호기 비정상 절차서(비정상-74)는 실효성이 없으며, 1차기 냉각해수 열교환기 전단에 'A', 'B'계열을 서로 연결하는 공통배관 추가설치를 포함한 별도의 열제거 방안이 강구되어야 하는 것으로 평가되었다.

## 5. 참고문헌

- [1] J. P. Holman : "Heat Transfer", Sixth Edition
- [2] YGN 3&4 : "System Description V. I "
- [3] KEPCO : "Final Safety Analysis Report 9.1-9.3"
- [4] 영광원자력 3,4호기 : "비정상-74 1차기 냉각해수 상실", Rev.1

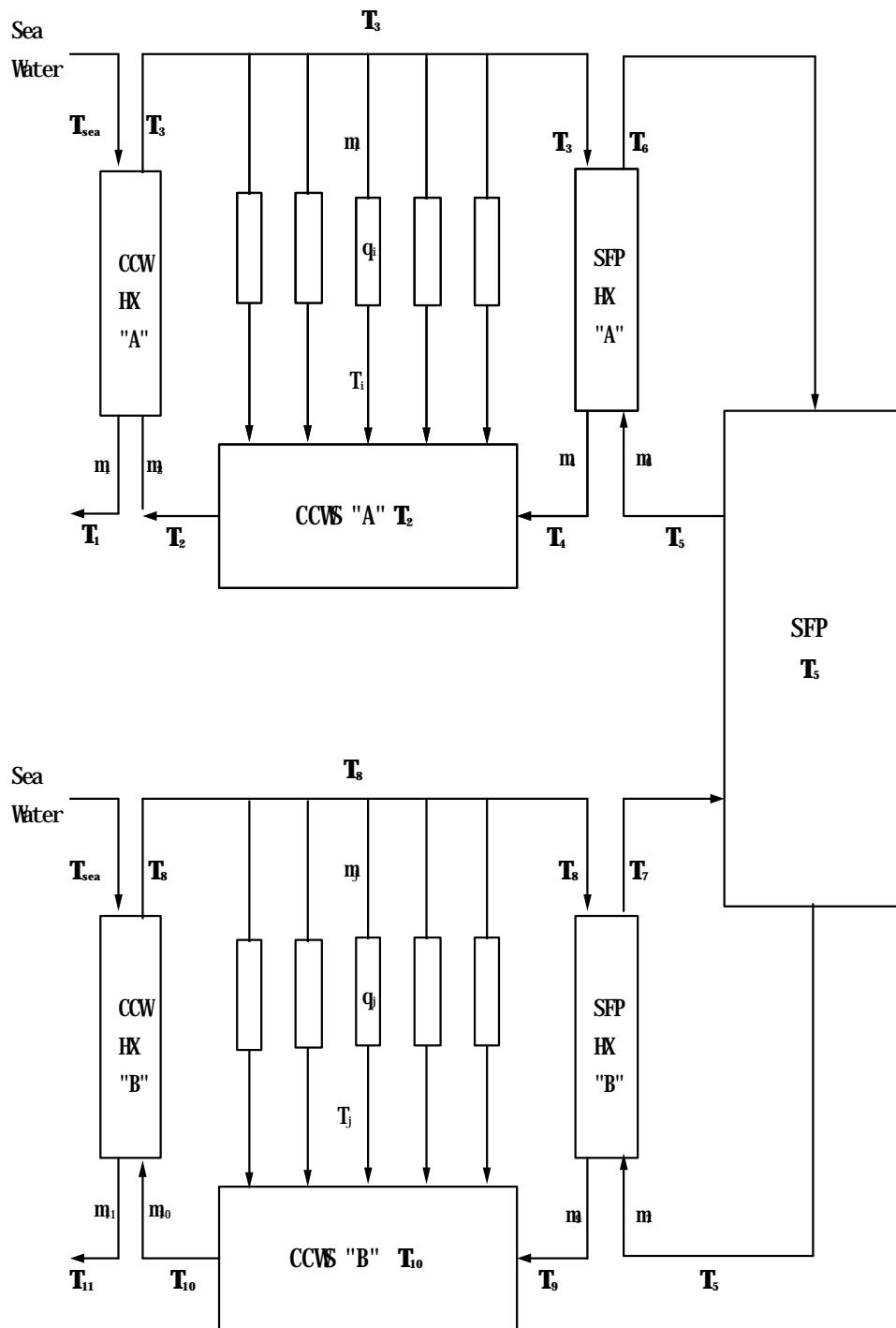


Fig.1 Schematic of ESWS/CCWS Control Volume

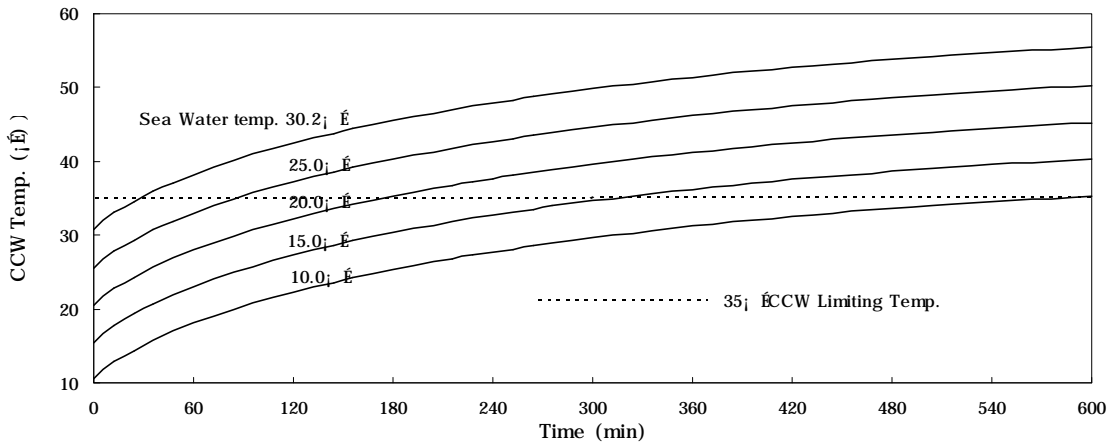


Fig.2 CCW Temperature Changes at Loss of Train 'A'

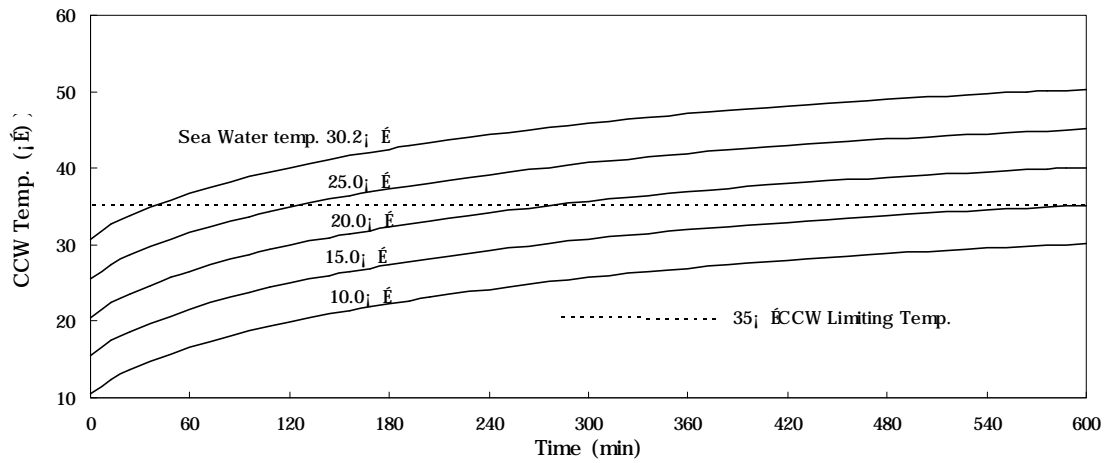


Fig.3 CCW Temperature Changes at Loss of Train 'B'

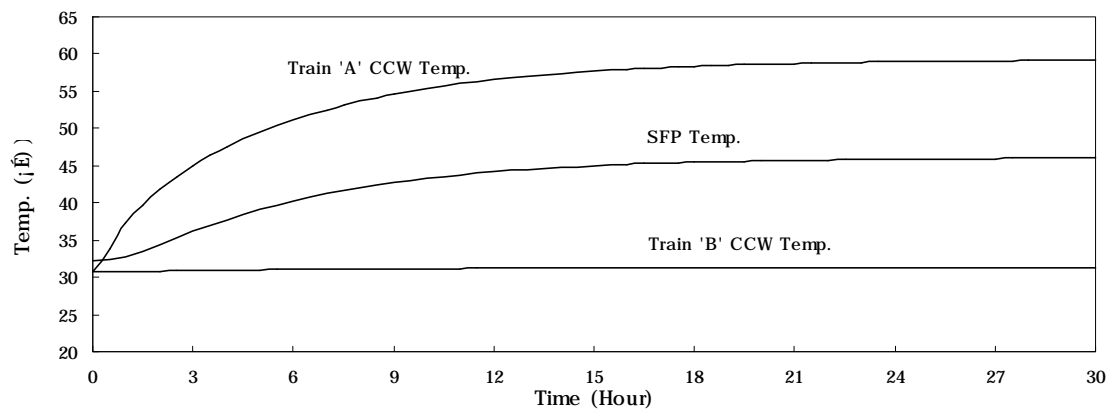


Fig.4 Temperature Changes with Sea Temperature 30.2°C at Loss of Train 'A'