

냉동기 고장경향분석을 통한 설비신뢰도향상 방안 제시

The Suggestion of Reliability Improvement Method based on Failure Trend Analysis of Chiller

이 상 대* · 염 동 운* · 현 진 우†
 (Sang Dae Lee · Dong Un Yeom · Jin Woo Hyun)

Abstract - Chiller system plays an important role of maintaining room temperature constantly by supplying chilled water to Heating, Ventilating and Air Conditioning(HVAC)or area room cooler equipment during plant normal operation or accident condition. Chiller failures are one of the most frequently occurring equipment failures. If the types of chiller failures are analyzed and grouped thoroughly, it would be helpful to make chiller maintenance strategy at the plants. That would enhance equipment reliability of chiller in the end. In this paper, chiller failure data during three years were analyzed and categorized by specific failure code. In addition, the various proposals to improve equipment reliability of chiller were suggested such as Preventive Maintenance Optimization(PMO) strategy and performance monitoring reinforcement and so on.

Key Words : Chiller, Equipment reliability, Performance improvement, Performance monitoring

1. 서 론

발전소에서 사용되는 냉동기(Chiller)는 발전소 설비가 설치된 룬의 온도를 일정하게 유지시키기 위해 공기조화설비(HVAC) 및 지역냉방기(Cooler)에 저온의 냉수를 제공하는 설비이다. 발전소는 고온, 고압의 유체를 다루는 수많은 회전기기로 구성되어 있어서, 정상운전시 혹은 사고시 일정시간 동안 공기조화설비를 가동하지 않을 경우 룬온도 상승으로 인해 중요 설비의 고장을 유발시킬 수 있으며, 설비를 운영하는 직원들의 거주성에도 영향을 미친다.

최근 미국전력연구소(EPRI) 주관으로 발전소 주요설비에 대한 수명관리(LTAM) 연구가 진행되었으며, 냉동기 수명관리를 위한 프로그램도 개발되었다. 미국 원전 냉동기 시스템엔지니어는 이 지침을 활용하여 설비 고장 관련데이터를 수집 및 분석함으로써 최적의 설비 관리 및 교체주기를 계획하고 있다[1].

국내에서는 EPRI 설비수명관리 프로그램 기준에 따른 냉동기 수명관리 방안이 개발되어 운영 중이나, 냉동기 설비의 실질적인 설비신뢰도향상을 달성하기 위해서는 설비감시 및 엔지니어링 신뢰도프로그램을 최적화 및 표준화하여 운영해야 할 것이다.

본 논문은 해외원전 냉동기 설비수명관리 사례를 검토하여, 국내원전 냉동기 성능감시 현황 분석 및 신뢰도개선방안

을 제시하고자 한다.

2. 냉동기 고장 발생 현황

2.1 냉동기 계통 개요 및 주요 고장 발생 설비

냉동기 계통은 100% 용량 2개의 다중 계열로 구성되어 있으며, 각 계열은 100% 용량 2대의 냉동기와 냉방수펌프, 관련 추가 설비, 배관 및 계측설비로 구성되어 있다. 냉동기 계통은 모든 발전소 운전조건하에서 안전성 공기조화기 및 지역냉방기의 냉각코일에 약 42°F(6°C)의 냉방수를 공급한다. 이러한 원자력발전소 냉동기 계통에 대한 개략도는 그림 1과 같다.

냉동기는 계통의 중요 기능을 일부 상실케 하는 고장을 발생시키는 주요 설비로써, 증발기, 압축기, 응축기 등의 기계설비와 및 냉동기 제어를 담당하는 계측설비 및 전원을 공급하는 전기설비 등 복잡한 부속 설비로 구성되어 있다.

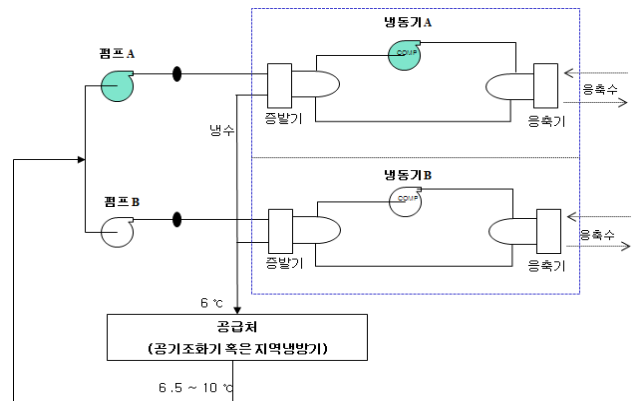


그림 1 발전소 냉동기 계통 개략도
 Fig. 1 Schematic diagram of plant chiller

† Corresponding Author : Dept. of System and Reliability engineering, KHNP, Korea
 E-mail : hjwvip22@khnp.co.kr

* Dept. of System and Reliability engineering, KHNP, Korea
 접수일자 : 2015년 7월 29일
 수정일자 : 2015년 11월 19일
 최종완료 : 2015년 11월 23일

그 외에 펌프 및 각종 공급처의 지역냉방기가 있으나, 냉동기 대비 고장이 극히 드물게 발생하고 있다[2].

2.2 해외원전 냉동기 고장발생 현황

미국전력연구소 설비고장정보 데이터(EPIX DB)에 등록되어 있는 미국원전의 냉동기 계통 기능고장은 과거 10년간 ('97~'06) 약 301건이다. 주요 고장 설비는 계측기, 압축기, 전기설비 순으로 고장이 발생하는 것으로 나타났으며, 계통 구성 설비 중 펌프/모터의 고장보다는 냉동기 부속설비인 계측기, 압축기, 전기설비에서 계통 기능을 저하시키는 고장이 다수 발생하였다. 미국 원전의 냉동기 구성품별 고장횟수는 그림 2와 같다[3].

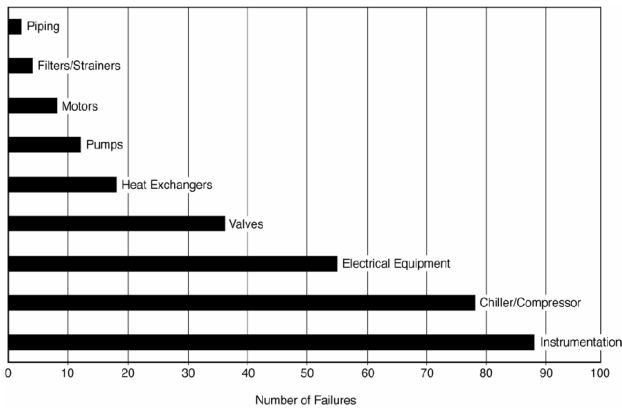


그림 2 미국 원전 냉동기 구성품별 고장발생 횟수
Fig. 2 The number of failure of chiller constituent part in USA NPPs

2.3 국내원전 냉동기 고장발생 현황

유사 냉동기 설비를 사용하고 있는 국내원전 11개 호기의 경우, 과거 3년('12~'14) 88건의 고장이 발생하였으며, 호기당 약 2.6회/년의 고장이 발생하였다. 냉동기 설비당 연간 고장률은 미국 원전의 경우 10년 평균 0.087/년 인데 반해 [1], 국내원전의 경우 3년 평균 0.65/년으로 약 6배 정도 고장이 더 발생했다. 냉동기 고장은 그림 3과 같이 기계 분야 34%, 계측분야 44%, 전기분야에서 22% 발생하였다.

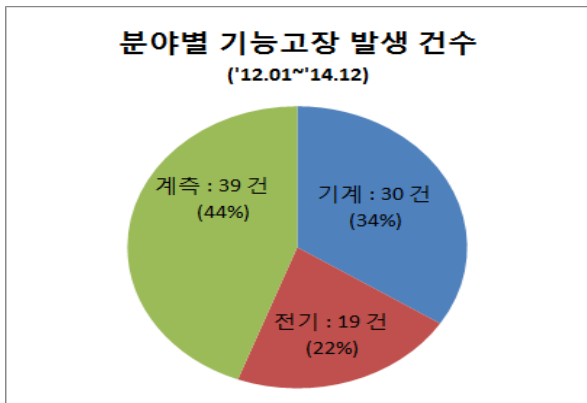


그림 3 냉동기 분야별 기능고장 발생 건수
Fig. 3 The portion of chiller failure by maintenance ownership

3. 냉동기 고장 유형 분석

3.1 고장유발 인자 파악

원자력 발전소에서 사용되고 있는 냉동기는 일반 냉동기와 달리 정상운전시 뿐만 아니라 사고시 냉동용량을 고려하여 설계되어서, 정상운전시에는 정격용량의 일부분만 사용하고 있으며, 발전소 운전기간 내내 교대로 상시 운전이 되고 있다. 이러한 설계 및 운전 특성을 가진 대형 냉동기의 장시간 운전 혹은 냉동부하가 거의 없는 겨울철 계속운전은 일반 산업용 냉동기에 비해 구조적으로 많은 고장을 발생시킨다. 또한, 냉동기 설비보호를 위해 설치된 각종 정지관련 제어설비는 설비운전상태가 정상상태 대비 악화될 경우 그것을 감지하여 기설정된 트립로직을 작동시켜 냉동기를 안전하게 정지시킨다.

설비를 정지시키는 트립로직 작동을 유발하는 주요인자는 아래 그림 4와 같다. 냉매누설, 냉매필터 불량, 오일펌프 고장, 불응축가스 유입, 용량제어모듈 오작동, 베인모터 손상 등의 고장 유발인자로 인해 설비의 상태가 일정수준으로 악화되면 냉동기 설비보호를 위해 냉동기를 자동정지시킨다.

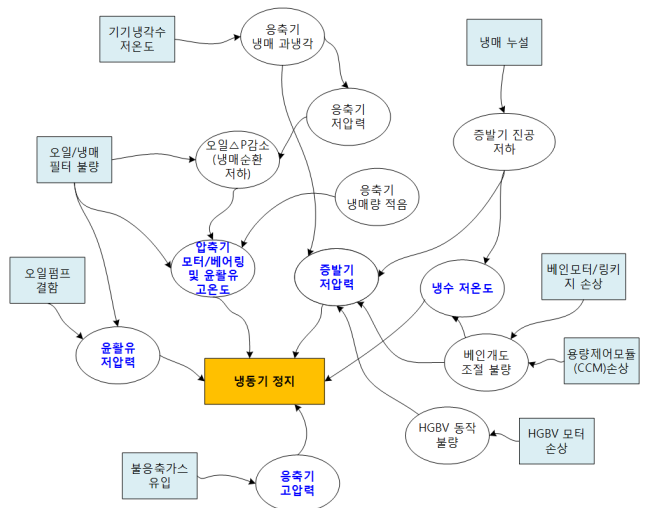


그림 4 냉동기 고장 유발 인자 분석표
Fig. 4 Diagram of chiller failure trigger factor

3.2 고장유형 분석

발전소별 냉동기 고장을 유발시킨 부위를 중요설비별로 분류하기 위해 냉동기 고장인자를 활용하여 고장유형 분류기준을 마련하였다. 고장유형 기준은 향후 설비 성능저하를 방지하기 위한 예방정비전략 수립시 유용하게 활용될 것이다.

고장 유형 분류기준은 냉동기 부속 설비 중 교체가 가능한 일정한 규모의 단위 설비를 기준으로 하였으며, 단위 설비의 하부 부품 고장은 해당 단위 설비(예, 제어 및 전기회로: 릴레이, 퓨즈, 계측기 포함)에 포함하였다. 고장 유형은 특정 설비가 대부분이지만, 누설(냉매보충) 및 원인불명과 같이 설비가 아닌 경우도 분류기준에 포함하였다[3]

선정된 주요 고장 유형으로는 압축기(모터/임펠러), 제어모듈 및 응축기(조절밸브), 베인 및 베인모터, Hot Gas Bypass Valve(HGVB), 파열판, 냉매필터, 오일필터, Purge

Unit 등으로 설비를 분류하였다.

냉동기 고장을 분석하기 위해 냉동기 고장유형 분류기준에 따라 발전소별 과거 3년 발전소별 냉동기 고장을 분류하였으며, 그 결과는 그림 5와 같다.

전체 발전소 냉동기 주요 고장유형은 제어모듈(계측설비 및 전기회로 포함)에서 약 40%, 핫가스바이패스밸브(HGVB), 베인/베인모터, 냉매필터, 누설 등에서 약 10% 정도의 고장이 발생되었다. 전체적으로 이런 부위의 고장이 74% 정도를 발생하였고, 응축기, 퍼지유닛, 압축기 모터 등 고장 등이 26% 발생하였다. 이는 냉동기 설비신뢰도를 높이기 위해서 우선적으로 제어모듈설비, HGVB, 베인, 필터 등의 순으로 고장 정비활동을 수행할 필요가 있을 것이다.

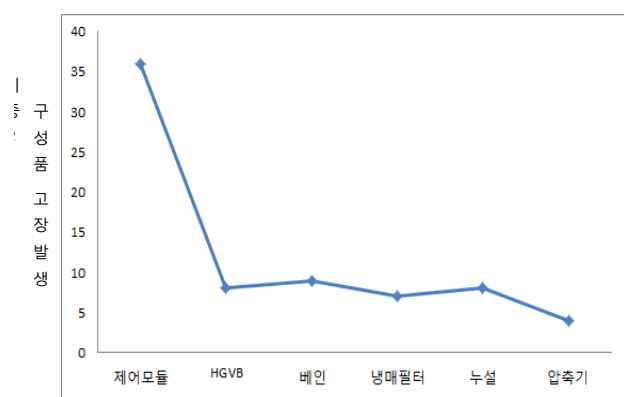


그림 5 냉동기 구성품별 '12~'14년 고장발생 분석 결과
 Fig. 5 The number of failure of chiller constituent part in the domestic Nuclear Power Plants during '12~'14 year

냉동기 주요 고장유형에 대한 고장 원인 및 조치내역은 다음과 같다.

- 다수의 고장이 발생된 제어모듈 고장의 주요 조치 내역은 계측기 센서, 타이머, 릴레이 및 저항 교체, 단자대 조임, 청소 등 이었다.
- 베인/베인모터는 고장발생시 주로 “CHILLED WATER TEMP LOW” TRIP 정보가 발생하였으며, 이는 냉수 출구 온도에 따라 개도를 조절하는 베인의 기능이 상실되어 냉수 출구온도를 정지 설정치까지 떨어뜨렸기 때문이며, 조치내역으로 고장난 베인 및 베인모터를 신품으로 교체하였다.
- 핫가스바이패스밸브(HGBV) 고장은, 동절기 무부하시 연속운전과 용량 10% 이하로 안전 운전시 HGBV 열림 및 닫힘의 잦은 반복 동작으로 모터기어, 권선 및 링키지 고장 등이 발생하였다.
- 냉매필터 막힘 고장발생시 주로 Lube Oil Temp High 경보를 발생시켰는데, 이는 냉매필터 막힘 현상 발생시 압축기 모터 발생 열을 직접 냉각시키는 냉매 흐름이 차단됨에 따라 모터의 온도가 상승하기 때문이다. 필터 오염의 주요 원인은 냉동기 내부의 불순물 때문인데, 증발기 튜브, 증발기 및 응축기 내벽에 부착된 불순물을 제거하기 위해 주기적으로 계획예방정비(O/H)시 세정작업을 수행해야 할 것이다.

- 냉매 누설 관련 고장은 8건 발생하였으며, 냉동기 정지시 주로 “EVA PRESS LO” 정보가 발생하였다. 냉매 누설이 반복하여 발생하는 냉동기는 냉동기 정비작업 수행시 정비품질 및 정비원 자재관리에 힘써야 할 것이며, 분해정비 작업후 냉동기 진공시험을 수행하여 누설여부를 철저히 점검해야 할 것이다.

이러한 냉동기 고장분석을 통해 냉동기 설비의 고장 경향 및 고장률을 파악할 수 있을 것이며, 냉동기 고장 유형은 냉동기 예방정비활동 최적화에, 고장률은 정비비용 산정에 근거가 될 것이다. 이러한 설비 고장 데이터는 수평관리 측면에서 정비비용 산정 및 설비교체 시점을 결정하는 중요자료로 활용될 것이다.

4. 냉동기 설비 신뢰도 향상 방안 제시

냉동기 설비가 고장이 발생되었을 때 정비를 수행하는 것(CM : Corrective Maintenance)은 고장이 발생되기 전에 설비를 예방정비하는 것(PM : Preventive Maintenance)에 비해 비용측면에서 효과적이지 않다[4]. 한수원은 2.3항에서 언급한 것과 같이 미국 원전에 비해 냉동기 고장이 7배 정도 더 발생하고 있다. 이러한 냉동기 고장 저감을 위해 기존의 고장정비(CM) 중심의 정비전략 보다는 그림 6과 같은 고장정비(CM)와 예방정비(PM)를 동시에 수행하는 정비전략을 취하여 정비비용 뿐만 아니라 냉동기 설비 고장 저감을 달성해야 할 것이다.

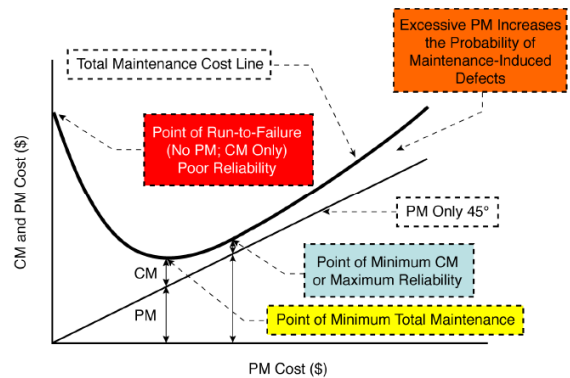


그림 6 고장정비(CM)과 예방정비(PM) 비용곡선
 Fig. 6 CM and PM cost curve

냉동기 설비신뢰도를 향상시키기 위한 미국 원전은 그림 7과 같이 설계변경, 예방정비 강화, 정비활동 기술교류 등의 설비신뢰도 강화 활동을 수행하고 있으며, 중장기적으로 설비수명관리 평가를 통해 설비교체를 추진하고 있다[1].

국내원전에서도 발전소별 냉동기 관리를 위해 고장 및 분해정비활동을 수행 중이나, 체계적인 냉동기 정비 활동을 확립 및 이행하지 못하고 있는 실정이다. 이에 위 2절에서 분석한 냉동기 다빈도 고장 부위를 중심으로 아래와 같은 정비 엔지니어링 프로그램을 통해 냉동기 설비신뢰도 향상을 추진해야 할 것이다.

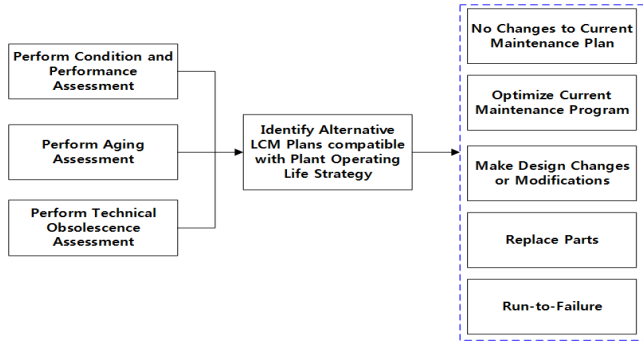


그림 7 냉동기 설비수명관리 흐름도
Fig. 7 Chiller life cycle management(LCM) Flowchart

첫째 : 설비기준정보 관리

설비기준정보는 냉동기 설비에 대한 기본정보(일반정보, 정비책임 등) 및 규격정보(품질등급, 형상 정보, 성능정보, 설치정보 등)를 기록한 데이터베이스 정보이다. 이 정보는 구매 및 정비활동을 위한 기본 데이터로, 각 발전소는 설비기준정보를 재정비하여 정확한 구매정보, 예방정비활동 주기 및 정비활동 일반 정보가 적절히 제공되도록 해야 할 것이다.

둘째 : 표준 예방정비기준 적용

주기적으로 수행되고 있는 냉동기 정비활동을 표준화 할 필요가 있다. 고장이 자주 발생하는 부위에 대한 정비활동의 부재로 고장을 사전에 방지하지 못하고 있다. 정비활동을 표준화 및 최적화하기 위해 미국원전에서 수행되고 있는 그림 8과 같은 예방정비기준을 참조하여 정상 및 계획예방정비활동을 수행해야 할 것이다[5].

PM Task	Critical	Duty Cycle							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Refrigerant analysis	Yes	X	X	X	X				
Glycol analysis	No					X	X	X	X
Oil analysis	High	X		X		X		X	
Vibration analysis	Low		X		X		X		X
Calibration	Severe	X	X			X	X		
	Mild			X	X			X	X

PM Task	1	2	3	4	5	6	7	8
External visual inspection	3M	3M	3M	3M	6M	6M	6M	6M
Internal inspection: Heat exchangers	2Y	2Y	2Y	2Y	2Y	2Y	2Y	2Y
Internal inspection: Compressors	10Y	10Y	10Y	10Y	10Y	10Y	10Y	10Y
System testing: Performance tests	2Y	2Y	2Y	2Y	AR	AR	AR	AR
System Testing: Functional tests	2Y	2Y	2Y	2Y	AR	AR	AR	AR

그림 8 미국 원전 냉동기 예방정비기준
Fig. 8 Preventive maintenance template of chiller using in USA Nuclear Power Plant

위와 같은 예방정비기준을 참조하여 현행 발전소에서 수행중인 예방정비활동을 최적화 하였고, 아래 표 1의 FID결과(Critical-Low-Severe)에 따라 일정한 주기로 예방정비작무를 수행해야 할 것이다.

그림 9는 예방정비기준 설정 이후 예방정비 활동 프로세스를 제시한 것으로 일련의 표준화된 정비활동 프로세스를 통해 냉동기 설비신뢰도를 지속적으로 최적화시킬 수 있을 것이다.

표 1 한수원 정비활동을 반영한 예방정비기준 개발

Table 1 Preventive maintenance template development reflecting KHNP maintenance activities

기능적중요도 결정 (FID)	중요도	Critical			
	운전빈도	High	Low	High	Low
	운전환경	Severe		Low	
예방정비 직무		CHS	CLS	CHM	CLM
상태감시 직무(Condition Monitoring Task)					
냉매 분석		1F	1F	1F	1F
윤활유 점검		3M	6M	3M	3M
진동 분석		3M	6M	3M	3M
엔지니어 현장 점검		3M	3M	1M	1M
주기정비 직무(Time Directed Task)					
교정		2Y	2Y	2Y	2Y
윤활유 및 냉매필터 교체		1F	1F	1F	1F
내부점검 - 냉동기, 압축기, 응축기 등		3Y	3Y	3Y	3Y
내부점검 - 증발기		AR	AR	AR	AR
내부점검 - 주전동기 절연 측정		1F	1F	1F	1F
고장발견 직무(Failure Finding Task)					
계통시험 - 성능시험		2Y	2Y	2Y	2Y



그림 9 예방정비 프로세스 최적화
Fig. 9 The process of preventive maintenance optimization (PMO)

셋째 : 성능감시 활동 수행 및 정비경험 전파

현행 냉동기의 성능감시는 정비규정 프로그램을 활용하고 있다. 정비규정 프로그램에서 냉동기는 기능고장정의 “각각의 냉동기 설비 고장을 초래하는 경우가 기능고장이다.”에 따라 기설정된 성능기준을 만족하는지에 대해 설비이상통지를 활용하여 성능감시를 수행하고 있다[6]. 하지만, 지나치게 높게 설정된 성능기준은 냉동기 성능저하를 적절히 감시하지 못하게 하는 요인으로 작용하므로, 주기적으로 성능대비 성능기준을 최적화하여 냉동기의 성능저하를 적절한 시점에 파악할 수 있도록 해야 할 것이다

또한, 동일 유형 냉동기를 운영하고 있는 발전소에서 유사 고장이 발생되지 않도록 하기 위해 성능감시 활동에 따른 고장설비의 정비활동 후 타발전소 전파가 적절히 이루어지도록 해야 할 것이다.

넷째 : 냉동기 적기 교체

다수 발전소 냉동기에 사용되고 있는 냉매 R-123는 오존

층 파괴물질에 관한 몬트리올 의정서"에 따라 오존층을 파괴하는 특정물질로 우리나라에서는 환경부 고시 제2012-518, "특정물질(HCFC류)의 생산량 및 소비량 기준년도 공고"에 따라 2013년부터 감축을 시작하여 2030년에 전폐할 예정이다[7].

이에 따라, 냉동기 관리부서는 냉동기가 발전소 안전운전에 영향을 주지 않을 적절한 시기에 교체될 수 있도록, 중장기설비개선계획을 수립 및 추진해야 할 것이다.

5. 결 론

냉동기는 발전소 안전운전을 위해 정상운전 및 사고시 사용되는 중요기기이다. 냉동기 과거 3년 고장 분석결과 전체적으로 제어관련 설비, 베인모터 및 누설 등의 원인으로 냉동기 고장이 자주 발생하였는데, 이러한 냉동기 고장을 저감하기 위해서는 전사적인 냉동기 관련 정비엔지니어링 활동의 표준화 및 최적화가 추진되어야 한다.

냉동기의 설비신뢰도를 향상을 위해서는 냉동기 고장 사례 분석을 통한 냉동기 취약분야를 도출하여, 반복고장이 발생되지 않도록 정비엔지니어링 활동을 수립하여야 할 것이며, 그러한 활동으로는 설비기준정보 관리, 예방정비활동 표준화, 성능감시활동 강화 및 규제환경 변화에 따른 냉동기 적기교체가 있다.

이러한 체계적인 정비엔지니어링 활동을 통해 냉동기 설비 신뢰성 향상 및 정비비용 절감을 달성할 수 있을 것이다.

References

- [1] G. Toman, "Life Cycle Management Planning Sourcebooks - Chiller", EPRI TR-1015075. pp25, pp51-53, pp91, Dec 2012.
- [2] KHNP, "System Description of Standard Nuclear Plants", 2003-단009, P658, May 2003.
- [3] M. Pugh, "Chiller Performance Monitoring and Troubleshooting Guideline", EPRI TR-1007361, pp75, pp91-102. Nov 2002.
- [4] L. Rogers, "Maintenance Engineering Fundamentals", EPRI TR-1016307, pp82, Dec 2007
- [5] M. Bridges, "Equipment Condition Monitoring", EPRI TR-106857, pp43, Sep 2000
- [6] Leonard Lofin, "SysMon 2.0 User's Guide: System Monitoring by System Engineers", EPRI TR-107668, pp65, March 1997.
- [7] Myung-hwan Boo, The Development of Long Term Asset Management Strategy for Operating Nuclear Power Plants, KHNP report, pp46, Dec 2012

저 자 소 개



이 상 대 (李 相 大)

한수원 중앙연구원 근무
2009 정비규정 개발
2015 APR1400 원전 정비프로세스 개발



염 동 운 (廉 東 云)

한수원 중앙연구원 근무
2009 정비규정 개발
2011 발전정지유발기기 선정
2015 APR1400 원전 정비프로세스 개발



현 진 우 (玄 振 宇)

한수원 중앙연구원 근무
2001 차세대원전 정보시스템 개발
2005 I&C Upgrade 설계
2009 정비규정 개발
2015 APR1400 원전 정비프로세스 개발