



원자력발전소의 화재사례

화재사례

● 원자력발전소의
화재사례

출처

· 火災, 2008년 4월호

번역

· 이상호

한국화재보험협회
관재서무팀 차장

머리말

원자력시설의 안전설비에 있어서의 기본적인 생각은 '심층방호'의 개념을 적용하는 것이다. 즉 적절한 방호책을 강구하는 것에 따라 사고의 발생방지, 확대방지 및 영향 완화를 도모하는 것이다.

화재방호에 대해서도 이 개념을 적용하고, 화재의 발생방지, 화재검지(檢知)와 소화, 화재에 의한 영향의 경감이라는 3개의 방책을 적절하게 조합해서 화재에 의해 원자력시설의 안전성을 해치는 일이 없도록 설계하는 것이 요구되고 있다.

예를 들면, 원자력발전소에 있어서는 원자로를 안전하게 정지하고 그 상태를 유지하기 위한 설비가 필요하다. '안전기능을 지닌 설비'에 대해 발화성 또는 인화성 액체 혹은 기체의 누설방지조치, 지락(地絡)과 단락(短絡) 등에 기인하는 과전류 보호기능 등을 설치하는 것과, 불연성 혹은 난연성의 재료를 사용하는 등의 발생방지 대책이 요구된다. 또한 화재가 발생한 경우 그것을 신속하게 검지하고 소화하기 위해, 안전기능을 지닌 설비가 배치된 구획에 적절한 화재검지장치 및 소화설비를 설치하도록 요구하고 있다. 더욱이 화재가 발생하고 그 구획에 설치된 설비를 사용할 수 없게 된 경우에도, 다른 설비에 의한 안전기능이 수행될 수 있도록 설비에 다중성 혹은 다양성을 갖게 하는 것과 함께 타 구획으로의 연소를 방지하기 위한 내화벽과 격벽을 설치하거나, 혹은 이것들이 설치된 구획을 물리적으로 떨어진 장소에 설치하는 것을 요구하고 있다.

그러나 이런 화재방호 조치를 강구한 설계라 하더라도 실제로 이것들이 충분한 기능을 하기 위해서는 운전단계에 있어서 설비의 유지관리와 화재 시 신속한 대응이 필요하고, 이것들에 관해서도 규제가 요구된다. 이것들의 규제요구는 원자력발전소가 건설·운전된 초기의 단계부터 규정되어 있기 때문이 아니라, 몇 개의 중요한 화재현상을 경험한 후 요구의 개정 및 강화가 도모되어 왔다.

본 고에서는 미국 원자력발전소에서 발생한 화재사례의 분석결과와 과거 세계 각국의 원자력발전소에서 발생한 중요한 화재사례를 소개한다.

미국 원자력 발전소의 화재사례 분석

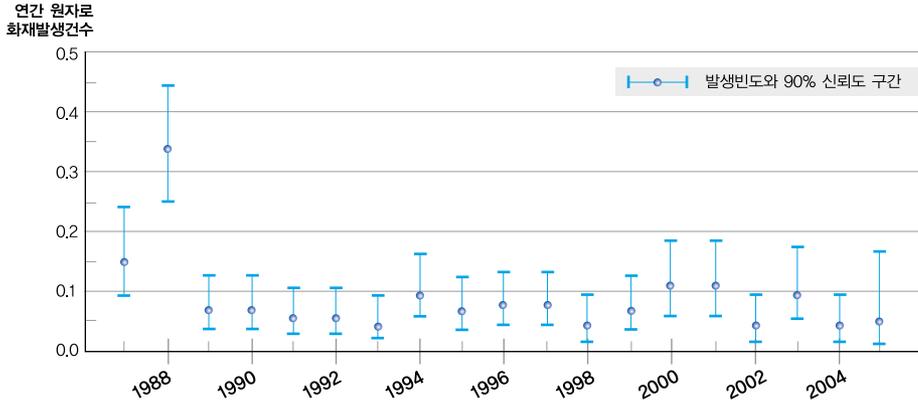
미국원자력규제위원회(NRC)에서는 원자력발전소에 있어서 화재방호 요구의 반영 및 원자력발전소의 확률론적 안전평가(PSA)에 사용하는 데이터의 정비를 목적으로, 1987년부터 2005년에 걸쳐서 미국 내의 원자력발전소에서 발생한 화재사례 약 450건을 대상으로 분석을 하고 있다. 이 분석에서는 실제사례를 기초로 해서 화재현상의 발생빈도를 추정하는 것 외에 화재의 검지방법, 원인, 연속시간을 화재장소별로 해당건수를 정리하고 있다.

〈도표 1〉에서 보듯이, 미국 원자력발전소의 화재 발생빈도는 1987년과 1988년을 제외하고는 연간 0.1건/원자로 혹은 그 이하의 수치이다.

화재의 검지방법에 대해서는 〈도표 2〉에서 보듯이 어느 경우에 있어서도 눈으로 확인하는 것이 대부분을 차지하고 있고, 순회점검이 화재의 조기검지에 유효한 것이라는 것을 보여주고 있다. 원인에 대해서는 〈도표 3〉에서처럼 장소에 따라서 약간의 통계수치가 불규칙한 것은 있지만, 격납용기에 있어서는 용접에 의한 화재사례가 제일 많고, 터빈건물에 있어서는 전기적 고장, 물질의 과열 및 용접에 기인한 화재가 거의 같은 비율이다. 그 외의 경우에는 전기적 고장이 지배적인 원인이라고

할 수 있다.

화재의 연속시간에 관해서는 <도표 4>에서 보듯이, 5분 이내에 소화된 사례가 많지만, 개폐소에서 10분을 넘는 사례가 가장 많고 다른 장소와는 다른 경향을 보여주고 있다. 개폐소는 건물 밖에 있고 전기적 고장에 의한 것이 많기 때문에, 화재의 검지와 소화에 요하는 시간이 오래 걸리기 때문이라고 생각된다. 미국은 화재가 소정의 시간 내에 소화될 수 없었던 경우 사업자는 긴급사태 분류에 있어서 '이상현상(Unusual Event)'을 선언하고 NRC에 통보하며, 10분 혹은 15분이 그 기준이 되고 있다.



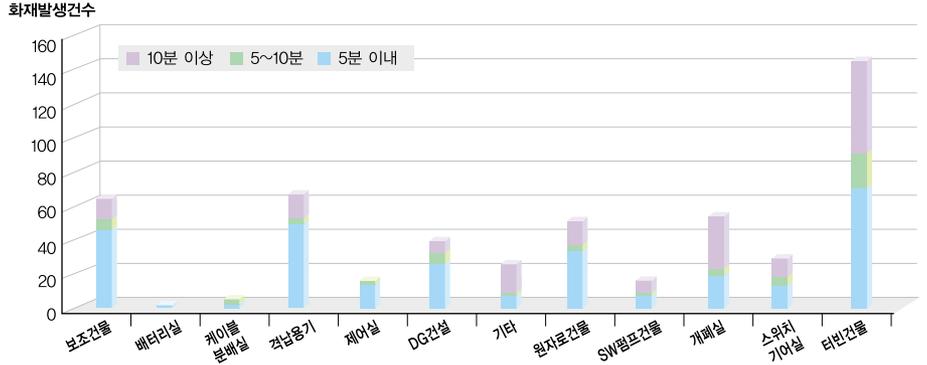
<도표 1> 미국 원자력발전소의 화재 발생빈도



<도표 2> 미국 사례의 화재 발생장소와 검지방범



<도표 3> 미국 사례의 화재 발생장소와 원인



〈도표 4〉 미국 사례의 화재 발생장소와 계속시간



앞장에서 보여주듯이, 원자력발전소의 화재사례는 그 규모를 따지지 않으면 발생건수는 상당한 숫자이다. 대부분은 원자로의 안전성에 큰 영향을 미치지 않고 사태가 수습되고 있지만, 그 중에는 설비의 광범위한 손상을 일으키기도 하고 원자로의 안전성에 위협을 준 사례도 있다. 특히, 케이블과 터빈에서 화재가 발생한 사례에서는 화재가 광범위하게 확대되기도 하고, 설비에 현저한 손상을 주고 있다. 이하에서는 그에 대한 대표적인 사례에 관해서 논한다.

가. 케이블 화재사례

(1) 미국 Browns Ferry-1호기의 화재

1975년 3월 22일 12시 20분, 기술보조원이 격납용기 관통부의 누설검사를 하고 있을 때 검사에 사용하고 있던 촛불이 관통부의 봉인재료(폴리우레탄)에 인화됐다. 그들은 CO₂ 소화기와 드라이 분말소화기를 사용해서 불을 끄려고 했으나 잘 되지 않았다. 그 결과 케이블 분배실에서 화재가 발생하고, 그 후 공기의 흐름에 의해 화재는 원자로 건물에 확산되어 갔다. 화재 발생 약 15분 후 케이블 분배실에서 화재경보가 울리고 직원들은 대피했다. 고정식 CO₂ 소화설비를 기동시켰으나 누설검사를 위한 전원스위치가 끊어져 있어 작동하지 않았다. 12시 40분경 스위치를 넣어서 소화설비가 작동했다. 13시 45분경 근처의 소방대가 현장에 도착하였다. 물을 사용한 소화활동을 하라는 권고가 있었으나, 전기회로의 단락에 의한 원자로의 정지, 냉각이 곤란하게 되는 등 사태의 악화를 염려했기 때문에 CO₂와 드라이분말에 의한 소화활동이 계속되었다. 결국 케이블 분배실에서의 화재는 16시 20분경에 진화되었다.

한편, 화재 발생 당시 케이블 분배실에 있던 2명의 건설작업원은 화재가 원자로 건물에 확대되고 있는 것을 확인하고, 또 다른 1명의 작업원과 함께 원자로 건물에서의 소화활동을 개시했다. 동 건물의 케이블 트레이 두 개가 타고 있었기 때문에 드라이분말소화기에 의한 소화를 시험해 보았으나 호흡 곤란 때문에 그 장소를 떠났다. 이 소화활동에 의해 일단은 화재가 잘 진압되었지만 온도의 상승에 의해 재차 화재가 났다. 그 후 당직보조원이 현장에 달려가 드라이분말과 CO₂에 의한 소화를 시험해 봤으나, 연기가 증만하고 호흡기구 장비가 필요했다. 작업원은 호흡기구를 갖추고 소화활동을 계속했으나 시야가 나빠 화원에 근접할 수 없었다. 당직보조원은 현장을 떠나 13시 9분경 근처의 소방서에 통보했다. 13시 30분경에 소방차가 도착하고 13시 45분까지 소방대에 의한 소화활동

체제가 정비되기 시작했으나, 12시 45분에 환기설비가 정지되고 연기가 층만해서 호흡기구가 필요한 상태였다. 또한 13시 30분경에 동 건물의 전등이 상실되었고 원자로의 정지, 냉각을 위해 작업원이 호흡기구를 사용하고 있어 소화활동을 위한 호흡기구가 부족했기 때문에 소화활동을 계속 할 수 없었다. 16시경 전기설비가 복구되고, 16시 30분경 당직기사가 원자로 건물에서의 소화활동 지휘를 개시했다. 원자로 건물 내외의 전등을 일시적으로 복구시키고, 소방대에 의한 드라이분말을 사용한 소화활동이 개시되었다. 18시경 소방대가 물에 의한 소화를 권고했지만, 전기계의 영향을 염려해서 물은 사용할 수 없었다. 19시경 원자로가 안정된 상태가 되었기 때문에 물에 의한 소화가 개시되고, 19시 45분경 원자로 건물의 화재는 진화되었다.

원자로는 12시 51분에 긴급 정지시켰으나 이 2개소에서의 화재로 인해 많은 케이블이 소손되고 안전 설비와 기능이 영향을 받았다. 특히 전기/제어기기를 이용할 수 없었기 때문에 로심(爐心) 냉각이 불충분한 상태가 되는 등 매우 심각한 상황이었으나, 운전원의 적절한 대응조치에 의해 더 큰 피해는 발생하지 않았다.



이 화재사례를 계기로 기기의 물리적 분리 및 격리에 관한 설계기준을 재검토하는 것의 필요성 등이 인식되었고, 일본에서도 화재에 대한 설계상의 문제점을 재검토하여 1980년 11월 '발전용경수형 원자로 시설의 화재방호에 관한 심사지침'을 마련하였다.

(2) 구 동독 Greifswald-1호기의 화재

1975년 12월 7일 11시 8분, 스위치 기어실에서 회로단락으로 인한 화재가 발생했다. 약 2시간 30분 후 진화되었지만 다수의 케이블이 소손되었다. 원자로는 긴급 정지시켰으나 6대의 주 냉각펌프의 전원이 영향을 받았기 때문에 긴급 정지 후 로심의 냉각은 증기발생기(SG)를 이용한 자연순환에 의해 가동되었다. 그러나 케이블의 소손으로 보조급수계가 작동하지 않음으로써 화재 발생부터 5시간 후에는 증기발생기가 고갈되어 1차계의 냉각이 불가능하게 되었다. 그 결과 1차 냉각재 온도와 1차계 압력이 상승하고 가압기 안전판이 자동으로 열렸다. 더욱이 이 안전판은 완전히 닫히지

않고 1차 냉각재가 유출되어 압력이 저하되었기 때문에 비상용 로심냉각계가 작동되었다. 인접한 2호기로부터의 전기공급에 의해 보조 급수계를 가동시켜 로심을 냉각하였다. 이 사고는 1990년 2월에 국제원자력기관(IAEA)의 중요현상평가팀에 의해 명백하게 되었다.

(3) 구 소련 Armenia-1호의 화재

1982년 10월 15일 9시 55분 서비스수(SW)펌프를 가동시키려고 할 무렵 과부하 전류에 의해 펌프 전력 케이블의 단자판에서 단락이 일어나고, 1개 전력 케이블의 여러 군데에서 화재가 발생했다. 화재는 다른 케이블에 퍼져 2개의 케이블 구획에서 화재가 났다. 이들의 케이블 구획에서는 발화 후 1분 이내에 화재 검지기가 작동되었고, 제어실의 화재경보가 울기 시작했다. 케이블 구획에는

이 화재사례를 계기로 기기의 물리적 분리 및 격리에 관한 설계기준을 재검토하는 필요성 등이 인식되었고, 일본에서도 화재에 대한 설계상의 문제점을 재검토하고 1980년 11월

‘발전용경수형 원자로시설의 화재방호에 관한 심사지침’을 마련하였다.

자동식 포소화설비가 설치되어 있었지만, 수동모터에 세팅되어 있었기 때문에 작동되지 않았다. 그 때문에 제어 케이블이 손상되었다. 소방대는 화재 발생부터 5분 이내에 소집되었지만 전기화재 소화 순서에 있어서 전기설비와 케이블을 수납하는 구획 내에서는 전원을 끊기까지 소화활동을 하지 않도록 규정되어 있기 때문에, 화재 발생부터 20분간 소화활동이 행하여지지 않다가 그 후 물에 의한 소화활동이 개시되었다. 화재 발생 약 10분 후 주 순환펌프가 기능을 상실하고, 긴급 보호 신호가 발신되었다. 또 직류의 안전모선(安全母線)도 상실되었다. 터빈의 정지밸브가 닫혀 정지되고, 발전기가 그리드로부터 잘려 나갔다. 그 외에도 다수 수의 기기가 사용할 수 없게 되었다.

12시 10분경 소화수에 의해 터빈 발전기의 제어 케이블에서 단락이 일어나 차단기가 오동작으로 단락했기 때문에 발전기가 그리드에 접속되었다. 그리하여 여러 곳에서 회로 단락이 일어났고 터빈 발전기가 고장났다.

발전기의 고장과 출력회로 단락에 의해, 수소가 누출되고 폭발을 일으켜 오일 화재가 났다. 또한 터빈 발전기가 실수로 그리드에 접속되어 주 변압기가 부하과대가 되고, 그 결과 변압기가 폭발하고 화재가 났다.

12시 45분, 제어실의 계측제어계로의 전원이 전부 상실되었다. 15시 13분까지 예비 케이블을 사용하여 디젤발전기(DG)부터 고압주입펌프로의 전원을 복구할 수 있었고, 이에 따라서 로심냉각장치가 확보되었다. 16시경 화재는 불기운이 약해져서 16시 58분에 진화가 확인되었다.

나. 터빈 화재

(1) 스페인 Vandellos-1호기의 화재

1989년 10월 19일 21시 39분, 약 80% 출력 운전 중 터빈 날개가 파손되어(원인 : 응력 부식 깨짐), 축의 진동이 심해져서 터빈이 정지되었다. 그 직후, 축의 진동에 의해 발전기의 여자기로부터 수소가 누출되고 축의 고온표면에서 인화되었다. 또한 파손되어 튀어나온 날개에 의해 터빈 윤활유 배관이 절단되고, 누출된 윤활유에 의해 화재가 났다. 화재는 터빈 건물 하부의 케이블에 전파되었다. 터빈 건물의 스프링클러는 설계대로 동작되었지만, 발화원 근처에 스프링클러가 없었기 때문에 소화할 수 없었다. 제어실의 운전원은 날개의 파손에 동반한 굉음에 의해 바로 현상의 발생을 알아차리고, 제어실의 창으로부터 터빈 건물에서의 수소 연소를 확인하고 곧바로 원자로를 수동으로 정지시켰다. 날개의 파손으로부터 1분 후 소방서에 통보하고, 그 14분 후에는 소방대가 장소에 도착했다. 소방대의 소화 작업에 의해 화재는 약 4시간 후(10월 20일 1시 30분)에 불기운이 약해지고, 그로부터 2시간 30분 후에 완전히 진화되었다.

이 화재에 의해서 다수의 케이블이 손상되고 4개의 탄산가스 송풍장치(냉각재 공급설비) 중 2대를 사용할 수 없게 되었다. 또한 정지 시 열 교환기도 사용이 불가능하게 되었지만, 로심의 냉각은 증기발생기와 급수펌프 및 남아있는 탄산가스 송풍장치에 의해 작동되었다. 그 외에도 터빈 발전기와

그 보조설비, 주복수기(主復水器)와 순환수계 등이 손상되었다. 특히, 순환수계의 배관이 파손되고 대량의 해수가 터빈 건물과 원자로 건물에 유입, 소화수가 살수됨에 따라 건물 하부에 고인 물은 깊이가 약 81cm에 달했다. 또한 제어실에는 연기가 밀치고 들어갔기 때문에 환기시설을 정지시키고, 가판식 팬이 들어가서 연기의 배출과 공기가 유입되었다. Vandellos-1호기는 이 화재 이후 재기동할 수 없어 폐기 조치가 취해졌다.

(2) 미국 Selem-2호기의 터빈 미사일과 화재

1991년 11월 9일 11시 22분경 정격출력 운전 중 터빈 보안장치의 성능확인 시험을 하고 있던 중, 축수유압이 낮아 원자로를 긴급 정지시켰다. 주증기 정지밸브와 속도조절밸브 등은 정지됐지만 곧바로 축수유압이 정상적으로 환원되었고, 주증기 정지밸브 등 20개의 밸브가 다시 열렸다. 원자로 정지로부터 27초 후 주 발전기 차단기가 열리고 부하가 차단되었다. 그러나 터빈 트립 전자밸브와 과속도 보호장치가 시험을 위해 바이 패스되어 있고 터빈 보호장치의 압력보호 스위치가 고장났기 때문에, 터빈 트립신호가 발신되지 않고 터빈은 무부하 상태인 채로 과속도 운전상태가 되었다. 그 결과 터빈의 회전수가 통상의 1.5배 이상이 되고 터빈 축이 심하게 진동하였으며 터빈 날개가 파손되었다. 파손된 날개는 미사일이 되어 터빈 포장을 관통하고, 주복수기세관을 절단했다. 또한 터빈 축의 심한 진동에 의해 발전기 냉각용 수소와 축수오일의 봉인이 손상되었으며, 수소가 누출되어 발화되고 오일에 인화되어 화재가 났다. 소화설비의 자동 작동과 구내 소방대의 소화활동에 의해 약 20분만에 화재는 진화되었다. 그러나 이 화재로 인해 다수의 설비가 손상되었고, 수리를 위해 이 발전소는 6개월간 정지되었다.

(3) 우크라이나 Chernobyl-2호기의 화재

1991년 10월 11일 70% 출력 운전 중, 터빈 발전기 1기에서 누설이 발견되어 수리를 할 필요성이 생겼다. 이에 순서에 따라 원자로 출력을 내림과 동시에, 발전기를 공용에서 떼어내기 위해 차단기 3대를 열었다. 터빈 발전기기가 거의 정지상태가 됐을 때, 1대의 차단기가 돌연 닫혀 터빈 발전기는 송전계에 재접속되었다. 이 때문에 터빈 발전기가 발전기화된 상태가 되어 회전하기 시작하고, rotor(발전기의 회전자) 접속부와 여자기 권선부, 발전기 축수부가 파손되었다. 축수(軸受)의 파손에 의해 냉각용 수소가 누설되어 발화하고, 보인용 오일 및 윤활유에 인화되어 화재가 났다. 소화계가 자동적으로 작동하였고 5분 이내에 소방대가 들어가서 소화작업을 벌였으나, 터빈 건물에는 연기가 충만하고 완전히 진화하기까지는 3시간 이상을 필요로 했다. 이 화재에 의해 터빈 건물의 지붕 일부가 붕괴되어 떨어지고, 보조급수펌프 5대의 이용이 불가능하게 되었으나, 운전원은 화재의 발생을 재빨리 감지하고 곧바로 원자로를 수동으로 정지했다. 로심의 냉각은 주 냉각펌프에 의해 이루어졌다. 또한 차단기 닫힘의 원인은 제어회로의 단락에 의한 것이다.

화재사례 가운데는 발생한 연기가 제어실에 들어와서 제어실의 거주성을

위협받은 사례도 있다. 제어실로의 연기 침입은 터빈과 케이블 화재에 특유한 것은 아니고 다른 곳에서의 화재에서도 충분히 일어나기 때문에,

적절한 대응책을 강구하는 것이 중요하다.

(4) 인도 Narora-1호기의 화재와 정전

1993년 3월 31일 3시 32분, 80% 출력 운전 중 터빈 발전기의 날개가 파손되어 심하게 진동을 해서 오일배관의 파손과 발전기 냉각용 수소의 방출이 일어났다. 그 결과 수소가 연소되고 전력 케이블과 오일에 인화되어 터빈 건물에서의 화재가 났다. 터빈이 정지됐기 때문에, 운전원은 즉시 주 정지계와 2차 정지계를 작동시켰다. 운전원은 연기가 충만한 중앙제어실로부터 피난하고 긴급 시 제어실에 이동해서 시설 감시를 했다. 약 10분 후, 전력 케이블의 소손에 의해 발전소는 정전상태가 되었다. 이 정전에 의해 포산수 주입계가 작동하지 않았기 때문에 운전원은 수동으로 포산 주입을 했다. 증기 발생기(SG)로의 급수도 정지되었기 때문에 운전원은 디젤 구동의 소화펌프에 의해 급수를 하고 자연순환에 의한 로심 냉각을 확보했다. 소화활동은 날개의 파손으로부터 약 20분 후에 개시되고, 약 1시간 30분 후 화재는 기세가 약해졌다. 그러나 터빈 건물부위의 연기 제거를 위해 추가로 4시간, 완전한 진화에는 7시간 30분을 요했다. 역시 비상용 디젤발전기(DG)는 기동했으나, 전력 케이블이 소손됐기 때문에 전력을 공급할 수가 없었다. 결국 약 17시간에 걸쳐서 내부의 전원이 완전히 상실되었다.

(5) 미국 Fermi-2호기의 터빈 파손과 화재

1993년 12월 25일 13시 15분, 93% 출력 운전 중, 터빈이 정지되고 원자로가 긴급 정지되었다. 정지 원인은 고압 터빈 입구에서의 압력 충격에 기인한 진동에 의해 오동작된 터빈 과속도 신호에 의한 것이었다. 거의 동시에 터빈 진동 알람, 지진 알람 및 화재경보가 울리기 시작했다. 더욱이 제어실과 터빈 건물에서는 굉음과 상당한 진동이 느껴졌다. 이것들의 원인은 터빈의 진동에 의해 누설된 수소가 폭발하고 발전기 및 여자기 주변에서 화재가 발생했기 때문이었다. 그 후 조사를 통해 저압 터빈 포장의 관통과 날아온 파손 날개가 발견되었다. 날개의 파손과 포장의 관통에 의해 주복수기 세관, 보기냉각계배관 및 보급수계배관이 손상되었다. 소화설비의 작동과 소화활동으로 약 20분만에 진화했으나 파손 배관으로부터의 물 유입에 의해 터빈 건물에 약 1,900m³의 물이 고였다. 이 물은 이온 교환수지에서 처리된 후 이리호(미국과 캐나다 국경에 있는 호수, 5대 호의 하나)에 방출되었으나 이 방출에 의한 공중의 방사선량은 제한치를 충분히 하회하는 것이라고 평가되었다.

맺음말

본 고에서는 NRC에 의한 화재사례의 분석결과와 해외 원자력발전소에서 발생했던 몇 가지의 케이블 화재 및 터빈 화재에 관해서 그 개요를 소개했다.

NRC에 의한 분석결과로부터 화재사례 중 다수가 터빈 건물에서 일어난 것을 알 수 있다. 또한 과거 사례를 통해 터빈 건물에서의 화재는 발전기에 사용된 수소가 누출되고 그것에 인화되어 폭발이 일어나기도 하고, 터빈 미사일과 화재에 의하여 터빈 건물에 설치된 설비가 손상되고 소화수와 함께 물이 넘치는 등 상태가 복잡화된다는 특징을 파악할 수 있었다.

더욱이 터빈 건물의 화재에서는 복잡화에 동반된 피해가 크게 확대되는 경향이 있다. 한편, 케이블 화재에 대해서는 전기기기에로의 영향을 염려해서 물에 의한 소화를 신속하게 할 수 없고, 연소에 의한 다수의 구획에 화재가 번져간다는 특징을 알 수 있다.

큰 피해를 입은 사례 후 케이블의 물리적 분리와 불연성·난연성 재료의 사용 등 화재의 발생 방지와 확대 방지의 대책이 취해지고 발생건수가 약간 감소하며, 큰 피해를 당하는 일도 없어지고 있다. 또한 이 화재사례 가운데는 발생한 연기가 제어실에 들어와서 제어실의 거주성을 위협받은 사례도 있다. 제어실로의 연기 침입은 터빈과 케이블 화재에 특유한 것은 아니고 다른 곳에서의 화재에서도 충분히 일어나기 때문에, 적절한 대응책을 강구하는 것이 중요하다. ㉞