



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2015년11월03일
(11) 등록번호 10-1565547
(24) 등록일자 2015년10월28일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G21D 3/04 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2014-0111189

(22) 출원일자 2014년08월26일

심사청구일자 2014년08월26일

(56) 선행기술조사문헌

KR1020130012310 A*

JP11094988 A

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

한국원자력연구원

대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111(덕진동)

(72) 발명자

김재환

대전광역시 유성구 문화원로37번길 16 (궁동)

진영호

대전광역시 유성구 어은로 57 (어은동, 한빛아파트) 113-201

(릿면에 계속)

(74) 대리인

특허법인 플러스

전체 청구항 수 : 총 4 항

심사관 : 윤연숙

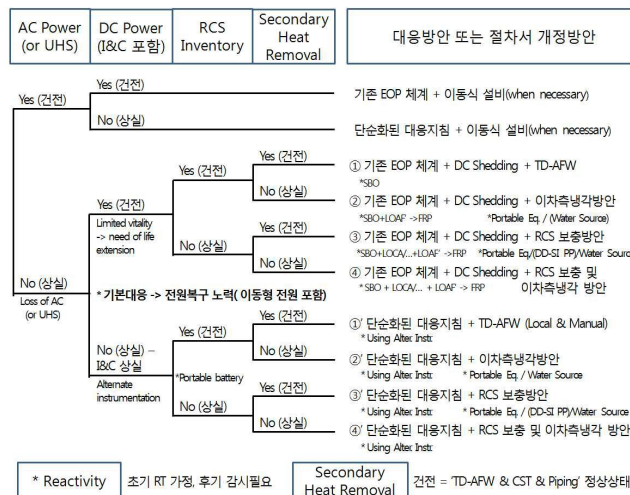
(54) 발명의 명칭 원자력발전소 극한재해사고 대응방법

(57) 요약

본 발명은 원자력발전소 극한재해사고 대응방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 원자력발전소에서 설계기준을 초과하는 극한재해사고가 발생했을 때, 원자력발전소 시스템에 영향을 미치는 손상상태인 'AC 전원 상실', 'DC 전원 상실', '원자로냉각재계통 재고량 상실' 및 '이차측 열제거 기능 상실'을 고려하여 각 손상상태의 조합 별로 노심손상 방지 및 원자로용기손상 방지를 위해 대응하는 방법에 관한 것이다.

또한, 본 발명은 노심손상 방지를 위한 방안뿐만 아니라 원자로용기손상 방지를 위한 방안까지 제시함으로써, 극한재해 발생 시에도 원자력발전소를 안전하게 정지하거나 관리 및 유지함으로써 외부환경으로의 방사능 누출을 방지할 수 있다.

대표도 - 도1



(72) 발명자

박수용

대전광역시 유성구 엑스포로 448 (전민동, 엑스포
아파트) 206-1507

안광일

대전광역시 서구 청사서로 11 (월평동) 105-806

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 53253-14

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 원자력연구개발사업

연구과제명 종합 중대사고관리 및 비상대응 기반기술 개발

기 여 율 1/1

주관기관 한국원자력연구원

연구기간 2012.03.01 ~ 2017.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

삭제

청구항 2

원자력발전소에서 설계기준을 초과하는 극한재해가 발생했을 때 노심손상 및 원자로용기손상을 방지하기 위한 대응방법에 있어서,

a) 상기 원자력발전소 설비를 동작시키는 AC 전원의 건전 여부를 확인하되(S01), 상기 AC 전원이 상실된 것으로 확인되면(S01-No), 이동형 전원 또는 임시 전원의 연결을 포함한 가용한 전원의 확보 단계(S02);

b) 상기 원자력발전소 설비를 감시 및 제어하는 제어실로 공급되는 DC 전원의 건전 여부를 확인하는 단계(S03);

c) 상기 DC 전원이 건전한 것으로 확인되면(S03-Yes), 미리 결정된 부하 이외의 부하로의 DC 전원 공급을 차단하여 DC 전원의 수명을 연장하는 단계(S04);

d) 냉각재가 순환하는 계통인 원자로냉각재계통의 재고량의 건전 여부 및 원자로냉각재계통의 열을 제거하는 이차측 열제거 기능의 건전 여부를 확인하는 단계(S05); 및

e1) 상기 원자로냉각재계통의 재고량이 건전하고 상기 이차측 열제거 기능이 건전한 것으로 확인되면(S05-case1), 터빈 구동 보조급수계통을 이용하여 상기 원자로냉각재계통을 냉각하는 단계(S061);

를 포함하여 이루어지되,

상기 e1)단계에서 상기 터빈 구동 보조급수계통을 이용한 원자로냉각재계통 냉각이 실패하면(S061-No),

f1) 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하여 증기발생기로의 급수가 이루어지도록 함으로써 이차측 열제거 기능을 회복하는 조치를 수행함과 동시에 중대사고관리지침서(이하, SAMG; Severe Accident Management Guidelines)의 진입조건 도달하지 않았다 하더라도, 이차측 열제거 기능의 상실 시점에 미리 SAMG에 따른 원자로냉각재계통 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결하는 단계(S071); 및

g1) SAMG 진입조건 도달 여부를 확인하되(S081), 상기 SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S081-Yes), 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되면 상기 AC 전원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 수행하고 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되지 않으면 상기 f1)단계에서 확보한 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입 등을 수행하며(S091), 상기 SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S081-No) 상기 f1)단계로 회귀하는 단계;

를 더 포함하고,

상기 d)단계에서 상기 원자로냉각재계통의 재고량이 건전하고 상기 이차측 열제거 기능이 상실된 것으로 확인되면(S05-case2),

e2) 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하여 증기발생기로의 급수가 이루어지도록 함으로써 이차측 열제거 기능을 회복하는 조치를 수행함과 동시에 SAMG의 진입조건 도달하지 않았다 하더라도, 이차측 열제거 기능의 상실 시점에 미리 SAMG에 따른 원자로냉각재계통 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결하는 단계 (S062); 및

g2) SAMG 진입조건 도달 여부를 확인하되(S082), 상기 SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S082-Yes), 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되면 상기 AC 전원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 수행하고, 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되지 않으면 상기 e2)단계에서 확보한 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 증기발생기

로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입 등을 수행하며(S092), 상기 SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S082-No) 상기 e2)단계로 회귀하는 단계;

를 더 포함하며,

상기 d)단계에서 상기 원자로냉각재계통 재고량이 상실되고 상기 이차측 열제거 기능이 건전한 것으로 확인되면(S05-case3),

e3) 이동형 펌프 또는 소방 펌프를 이용하여 원자로냉각재계통의 재고량을 복구하고 증기발생기로의 급수를 유지하며, 동시에 SAMG에 따른 원자로냉각재계통 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결하는 단계(S063); 및

g3) SAMG 진입조건 도달 여부를 확인하되(S083), 상기 SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S083-Yes), 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되면 상기 AC 전원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 수행하고, 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되지 않으면 상기 e3)단계에서 확보한 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입 등을 수행하며(S093), 상기 SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S083-No) 상기 e3)단계로 회귀하는 단계;

를 더 포함하고,

상기 d)단계에서 상기 원자로냉각재계통 재고량이 상실되고 상기 이차측 열제거 기능이 상실된 것으로 확인되면(S05-case4),

e4) 이동형 펌프 또는 소방 펌프를 이용하여 원자로냉각재계통의 재고량을 우선적으로 복구하고, 추가적인 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하여 증기발생기로의 급수가 이루어지도록 함으로써 이차측 열제거 기능을 회복하며, 동시에 SAMG에 따른 원자로냉각재계통 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결하는 단계(S064); 및

g4) SAMG 진입조건 도달 여부를 확인하되(S084), 상기 SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S084-Yes), 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되면 상기 AC 전원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 수행하고, 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되지 않으면 상기 e4)단계에서 확보한 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입 등을 수행하며(S094), 상기 SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S084-No) 상기 e4)단계로 회귀하는 단계;

를 더 포함하며,

상기 g1), g2), g3) 및 g4) 단계에서,

전원 복구가 실패했을 경우, 이동형 펌프를 이용하여 재장전수탱크의 봉산수를 원자로냉각재계통에 주입할 수 있도록, 재장전수탱크 하단부에 상기 이동형 펌프와 연결할 유출통로 설비 및 원자로냉각재계통 안전주입 배관으로의 주입유로 설비를 마련해 놓는 것을 특징으로 하는 원자력발전소 극한재해사고 대응방법.

청구항 3

삭제

청구항 4

삭제

청구항 5

삭제

청구항 6

삭제

청구항 7

제 2항에 있어서, 상기 b)단계에서,

상기 DC 전원이 상실된 것으로 확인되면(S03-No),

상기 DC 전원의 복구 및 임시 DC 전원을 연결하되(S041), DC 전원 이용이 불가하면(S041-No), 별도의 대체 설비를 이용하여 발전소 설비의 상태 정보를 취득하거나, 별도로 구비된 단순화된 대응지침방안을 이용하는 것을 특징으로 하는 원자력발전소 극한재해사고 대응방법.

청구항 8

제 2항에 있어서, 상기 e1)단계에서,

상기 터빈 구동 보조급수계통을 이용한 원자로냉각재계통 냉각이 성공적으로 이루어지면(S061-Yes),

f2) 추가적인 DC 배터리의 공급이 이루어지는 단계(S072);

f3) 증기발생기의 급수원인 복수저장탱크(CST; Condensate Storage Tank)로의 급수원이 보충되거나, 증기발생기로 직접 급수가 이루어지는 단계(S073);

f4) 소방차 또는 이동형 펌프를 이용하여 원자로냉각재계통의 재고량이 보충되는 단계(S074); 및

f5) 상기 e1)단계로 회귀하는 단계;

를 더 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 원자력발전소 극한재해사고 대응방법.

청구항 9

제 1항에 있어서,

상기 대응방법은,

상기 이동형 설비 대신 미리 설치된 디젤 구동 안전주입펌프를 이용하는 것을 특징으로 하는 원자력발전소 극한재해사고 대응방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 원자력발전소 극한재해사고 대응방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 원자력발전소에서 설계기준을 초과하는 극한재해사고가 발생했을 때, 원자력발전소 시스템에 영향을 미치는 손상상태인 'AC 전원 상실', 'DC 전원 상실', '원자로냉각재계통 재고량 상실' 및 '이차측 열제거 기능 상실'을 고려하여 각 손상상태의 조합 별로 노심손상 방지 및 원자로용기손상 방지를 위해 대응하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002]

지난 2011년에 발생한 후쿠시마 원전 사고는 규모 9.0의 대지진 및 해발 15m에 이르는 쓰나미와 같은 설계기준 초과 극한외부사건에 의해 발생되었다. 이러한 대지진 및 쓰나미로 인해 AC 전원이 상실됨에 따라 노심의 냉각 제어 기능을 상실하게 될 뿐만 아니라, 제어실 지시기 및 제어기의 모든 구동전원인 DC 전원이 상실됨에 따라 노심을 포함한 모든 설비의 상태 정보를 파악할 수 없게 되었으며, 주요 능동기기의 최종열제거원(UHS; Ultimate Heat Sink) 또한 완전 상실되었다. 상기와 같은 AC 전원 및 DC 전원의 상실과 최종열제거원 상실이 장기화되면 노심이 용융되고 결국 대량의 방사능 물질이 누출되는 중대사고로 이어지게 된다.

- [0003] 이러한 설계기준초과 극한재해 사고에 대비한 이전의 기술로, 미국은 9·11 항공기테러 이후 대형 폭발 및 화재와 같은 광역손상으로부터 발전소의 안전기능을 회복/유지하기 위한 광역손상완화지침서(이하, EDMG; Extensive Damage Mitigation Guideline)를 개발하였으며(비특허문헌 1 참고), 3·11 후쿠시마사고 이후 설계기준을 초과하는 극한 자연재해에 대비한 FLEX 전략 또한 제시되었다(비특허문헌 2 참고).
- [0004] 상기, EDMG와 FLEX 전략은 각각 극한재해로 인한 발전소 손상상태를 AC 전원 및 DC 전원 상실 상황과 AC 전원 상실 및 최종열제거원 상실 상황으로 정의하고 각각에 대해 노심손상 방지를 위한 방안을 제시하고 있다. 그러나 이들 두 전략은 설계기준초과 극한재해로 인한 다른 안전기능에의 영향은 고려하지 않고 있다. 예를 들어, 극한 지진으로 인한 원자로냉각재계통(이하, RCS; Reactor Coolant System) 건전성 상실 사고 가능성은 무시하고 있다. 그러나 극한 지진으로 인한 RCS 건전성 상실 가능성은 RCS 배관 구조 상의 취약 부분(예, SIT(Safety Injection Tank) 주입라인)의 파단, 증기발생기 튜브손상, 원자로냉각재펌프(RCP) 밀봉냉각 상실, 가압기 안전밸브(PSV)의 개방고착 가능성 등 여러 가지 원인에 의하여 발생할 수 있다.
- [0005] 따라서, 상기 EDMG 및 FLEX 체계의 취약점을 검토하고 이를 개선, 보완하여 보다 확장된 개념의 통합적인 대응방안체계가 필요한 실정이다.

선행기술문헌

비특허문헌

- [0006] (비특허문헌 0001) 1. NEI, B.5.b Phase 2&3 Submittal Guideline, NEI 06-12, Dec. 2006.
- (비특허문헌 0002) 2. NEI, Diverse and Flexible Coping Strategies (FLEX) Implementation Guide, NEI 12-06, May 2012.
- (비특허문헌 0003) 3. 한석중, 김태운, 안광일. MELCOR 코드를 이용한 원자력발전소 중대사고 방사선원항 평가 방법. KAERI/TR-4994/2013, 2013.
- (비특허문헌 0004) 4. 박수용, 송용만. 중대사고해석 데이터베이스를 위한 대형냉각재상실 사고경위 분석. KAERI/TR-3501/2007.
- (비특허문헌 0005) 5. 박수용, 송용만. 중대사고해석 데이터베이스를 위한 소형냉각재상실 사고경위 분석. KAERI/TR-3507/2007.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0007] 본 발명은 상기한 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로, 본 발명의 목적은 원자력발전소 시스템에 영향을 미치는 손상상태인 'AC 전원 상실', 'DC 전원 상실', '원자로냉각재계통 재고량 상실' 및 '이차측 열제거 기능 상실'의 각 조합 별로 원자력발전소 극한재해사고 발생 시 적절한 대응방법을 제공하는 것이다.
- [0008] 또한, 본 발명의 목적은 노심손상 방지를 위한 방안뿐만 아니라 원자로용기손상 방지를 위한 방안까지 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0009] 본 발명은 원자력발전소에서 설계기준을 초과하는 극한재해가 발생했을 때 노심손상 및 원자로용기손상을 방지하기 위한 대응방법에 있어서, AC 전원의 상실, DC 전원의 상실, 원자로냉각재계통(RCS; Reactor Coolant System) 재고량의 상실 및 이차측 열제거 기능의 상실을 포함한 원자력발전소 시스템에 영향을 미치는 손상상태를 파악하는 단계; 및 상기 파악된 각각의 손상상태를 고려하여 이동형 전원 또는 임시 전원의 연결을 포함한 가용한 전원의 확보, DC 전원의 수명 연장, 터빈 구동 보조급수계통(TD-AFW; Turbine Driven - Auxiliary Feed Water)을 이용한 원자로냉각재계통 냉각, 이동형 설비 및 대체 수원 확보를 통한 원자로냉각재계통 재고량 복구

및 이차측 열제거 기능 회복 중 선택되는 어느 하나 이상의 노심 손상 방지를 위한 전략을 실시하며, 상기 노심 손상 방지 전략 실패 시에도 원자로용기 손상 방지를 위해 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 포함한 전략을 실시하는 단계;를 포함하여 이루어질 수 있다.

[0010] 상기 대응방법은, a) 상기 원자력발전소 설비를 동작시키는 AC 전원의 건전 여부를 확인하되(S01), 상기 AC 전원이 상실된 것으로 확인되면(S01-No), 이동형 전원 또는 임시 전원의 연결을 포함한 가용한 전원의 확보 단계(S02); b) 상기 원자력발전소 설비를 감시 및 제어하는 제어실로 공급되는 DC 전원의 건전 여부를 확인하는 단계(S03); c) 상기 DC 전원이 건전한 것으로 확인되면(S03-Yes), 미리 결정된 부하 이외의 부하로의 DC 전원 공급을 차단하여 DC 전원의 수명을 연장하는 단계(S04); d) 냉각재가 순환하는 계통인 원자로냉각재계통의 재고량의 건전 여부 및 원자로냉각재계통의 열을 제거하는 이차측 열제거 기능의 건전 여부를 확인하는 단계(S05); 및 e1) 상기 원자로냉각재계통의 재고량이 건전하고 상기 이차측 열제거 기능이 건전한 것으로 확인되면(S05-case1), 터빈 구동 보조급수계통을 이용하여 상기 원자로냉각재계통을 냉각하는 단계(S061);를 포함하여 이루어질 수 있다.

[0011] 이 때, 상기 e1)단계에서 상기 터빈 구동 보조급수계통을 이용한 원자로냉각재계통 냉각이 실패하면(S061-No), f1) 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하여 증기발생기로의 급수가 이루어지도록 함으로써 이차측 열제거 기능을 회복하는 조치를 수행함과 동시에 중대사고관리지침서(이하, SAMG; Severe Accident Management Guidelines)에 따른 원자로냉각재계통 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결하는 단계(S071); 및 g1) SAMG 진입조건 도달 여부를 확인하되(S081), 상기 SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S081-Yes), 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되면 상기 AC 전원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 수행하고 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되지 않으면 상기 f1)단계에서 확보한 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입 등을 수행하며(S091), 상기 SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S081-No) 상기 f1)단계로 회귀하는 단계;를 더 포함할 수 있다.

[0012] 또한 상기 e1)단계에서 상기 터빈 구동 보조급수계통을 이용한 원자로냉각재계통 냉각이 성공적으로 이루어지면(S061-Yes), f2) 추가적인 DC 배터리의 공급이 이루어지는 단계(S072); f3) 증기발생기의 급수원인 복수저장탱크(CST; Condensate Storage Tank)로의 급수원이 보충되거나, 증기발생기로 직접 급수가 이루어지는 단계(S073); f4) 소방차 또는 이동형 펌프를 이용하여 원자로냉각재계통의 재고량이 보충되는 단계(S074); 및 f5) 상기 e1)단계로 회귀하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0013] 만약, 상기 d)단계에서 상기 원자로냉각재계통의 재고량이 건전하고 상기 이차측 열제거 기능이 상실된 것으로 확인되면(S05-case2), e2) 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하여 증기발생기로의 급수가 이루어지도록 함으로써 이차측 열제거 기능을 회복하는 조치를 수행함과 동시에 SAMG에 따른 원자로냉각재계통 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결하는 단계(S062); 및 g2) SAMG 진입조건 도달 여부를 확인하되(S082), 상기 SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S082-Yes), 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되면 상기 AC 전원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 수행하고, 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되지 않으면 상기 e2)단계에서 확보한 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입 등을 수행하며(S092), 상기 SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S082-No) 상기 e2)단계로 회귀하는 단계;를 더 포함할 수 있다.

[0014] 또, 상기 d)단계에서 상기 원자로냉각재계통 재고량이 상실되고 상기 이차측 열제거 기능이 건전한 것으로 확인되면(S05-case3), e3) 이동형 펌프 또는 소방 펌프를 이용하여 원자로냉각재계통의 재고량을 복구하고 증기발생기로의 급수를 유지하며, 동시에 SAMG에 따른 원자로냉각재계통 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결하는 단계(S063); 및 g3) SAMG 진입조건 도달 여부를 확인하되(S083), 상기 SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S083-Yes), 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되면 상기 AC 전원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 수행하고, 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되지 않으면 상기 e3)단계에서 확보한 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입 등을 수행하며(S093),

상기 SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S083-No) 상기 e3)단계로 회귀하는 단계;를 더 포함할 수 있다.

[0015] 아울러, 상기 d)단계에서 상기 원자로냉각재계통 재고량이 상실되고 상기 이차측 열제거 기능이 상실된 것으로 확인되면(S05-case4), e4) 이동형 펌프 또는 소방 펌프를 이용하여 원자로냉각재계통의 재고량을 우선적으로 복구하고, 추가적인 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하여 증기발생기로의 급수가 이루어지도록 함으로써 이차측 열제거 기능을 회복하며, 동시에 SAMG에 따른 원자로냉각재계통 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결하는 단계 (S064); 및 g4) SAMG 진입조건 도달 여부를 확인하되(S084), 상기 SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S084-Yes), 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되면 상기 AC 전원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 수행하고, 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되지 않으면 상기 e4)단계에서 확보한 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 증기발생기로의 급수, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입 등을 수행하며(S094), 상기 SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S084-No) 상기 e4)단계로 회귀하는 단계;를 더 포함할 수 있다.

[0016] 만약 상기 b)단계에서 상기 DC 전원이 상실된 것으로 확인되면(S03-No), 상기 DC 전원의 복구 및 임시 DC 전원을 연결하되(S041), DC 전원 이용이 불가하면(S041-No), 별도의 대체 설비를 이용하여 발전소 설비의 상태 정보를 취득하거나, 별도로 구비된 단순화된 대응지침방안을 이용할 수 있다.

[0017] 마지막으로 상기 대응방법은 상기 이동형 설비 대신 미리 설치된 디젤 구동 안전주입펌프를 이용할 수 있다.

발명의 효과

[0018] 본 발명은 기존 EOP 및 SAMG와의 연계체계를 제시함으로써, 노심손상 방지 관점에서의 사고초기 대응 방안과, 이러한 방안이 실패하였을 경우의 대체 대응 방안, 그리고 노심손상 이후의 중대사고관리 관점에서의 대응 방안을 통합적으로 제시하고 있으며, AC 전원상실, DC 전원상실, 최종열제거원 상실에 추가하여, 극한 외부사건 및 사고 진행 중에 발생할 수 있는 RCS 건전성 상실(RCP Seal LOCA, PSV 개방고착 포함) 상황에 대한 고려를 포함하고 있다.

[0019] 따라서, 본 발명은 극한재해 발생 시에도 원자력발전소를 안전하게 정지하거나 관리 및 유지함으로써 외부환경으로의 방사능 누출을 방지할 수 있는 효과가 있다.

[0020] 또, 극한자연재해뿐만 아니라 항공기테러 등과 같은 보안사고 발생 시에도 원자력발전소를 안전하게 보호할 수 있는 방안 개발에 기본 전략으로 활용될 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0021] 도 1은 본 발명에 따른 대응방법의 개략도

도 2는 본 발명에 따른 대응방법의 순서도

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0022] 이하, 본 발명의 기술적 사상을 첨부된 도면을 사용하여 더욱 구체적으로 설명한다.

[0023] 첨부된 도면은 본 발명의 기술적 사상을 더욱 구체적으로 설명하기 위하여 도시한 일예에 불과하므로 본 발명의 기술적 사상이 첨부된 도면의 형태에 한정되는 것은 아니다.

[0024] 도 1은 본 발명에 따른 대응방법의 개략도, 도 2는 본 발명에 따른 대응방법의 순서도를 나타낸 도면이다.

[0025] 도 1은 설계기준을 초과하는 극한재해가 원자력발전소 시스템에 미칠 수 있는 영향을 주요 안전기능의 손상으로 표현하고, 각각의 손상상태에 대하여 개략적인 노심손상 방지 방안을 개략적으로 제시하고 있다. 본 발명에 있어서, 상기 주요 안전기능 손상상태로 크게 'AC 전원 상실 (또는 최종열제거원(Ultimate Heat Sink; UHS) 상실)', 'DC 전원 상실(즉, 계측제어(I&C) 상실)', 'RCS 재고량 상실', '이차측 열제거 기능 상실'을 고려하였다.

[0026] 여기서, AC 전원은 원자력발전소의 펌프 등 각종 설비를 동작시키는 전원으로, AC 전원이 상실되면 노심을 냉각

시키는 최종열제거원이 상실되는 것이므로, AC 전원 상실은 상기 손상상태 중 가장 큰 문제를 야기한다. 또한, DC 전원은 원자력발전소의 설비들을 감시하고 제어하는 주제어실(MCR; Main Control Room) 및 현장제어실에 공급되는 전원으로, DC 전원이 상실되면 발전소 감시 및 제어기능을 상실하게 된다. 또, RCS 재고량은 RCP Seal LOCA 및 가압기안전밸브(PBV) 개방고착 등으로 인해 냉각재가 순환하는 계통인 RCS(원자로냉각재계통)의 냉각재가 상실되는 상태이며, 이차측 열제거 기능 상실은 증기발생기를 통해 노심의 열을 제거하는 기능(즉, RCS 열제거 기능)이 상실되는 상태를 말한다.

[0027] 본 발명은 원자력발전소에서 설계기준을 초과하는 극한재해가 발생했을 때 노심손상 및 원자로용기손상을 방지하기 위한 대응방법에 관한 것으로,

[0028] AC 전원의 상실, DC 전원의 상실, RCS 재고량의 상실 및 이차측 열제거 기능의 상실을 포함한 원자력발전소 시스템에 영향을 미치는 손상상태를 파악하는 단계; 및 상기 파악된 각각의 손상상태를 고려하여 이동형 전원 또는 임시 전원의 연결을 포함한 가용한 전원의 확보, DC 전원의 수명 연장, 터빈 구동 보조급수계통(이하, TD-AFW; Turbine Driven - Auxiliary Feed Water)을 이용한 RCS 냉각, 이동형 설비 및 대체 수원 확보를 통한 RCS 재고량 복구 및 이차측 열제거 기능 회복 중 선택되는 어느 하나 이상의 노심 손상 방지를 위한 전략을 실시하며, 상기 노심 손상 방지 전략 실패 시에도 원자로용기 손상 방지를 위해 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 SG로의 급수, RCS 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 포함한 전략을 실시하는 단계;를 포함하여 이루어진다.

[0029] 이하, 보다 구체적으로 본 발명에 따른 각각의 손상상태의 조합 별 노심손상 및 원자로용기손상을 방지하기 위한 대응방법을 도 1 및 도 2를 참고하여 단계별로 설명한다.

[0030] **실시예 1. AC 전원 상실 & DC 전원 건전 & RCS 재고량 건전 & 이차측 열제거기능 건전**

[0031] 가장 먼저, a)단계는 원자력발전소 설비를 동작시키는 AC 전원의 건전 여부를 확인하되(S01), 상기 AC 전원이 상실된 것으로 확인되면(S01-No), 이동형 전원 또는 임시 전원의 연결을 포함한 가용한 전원을 확보함으로써 전원을 복구를 위한 조치를 취하는(S02) 단계이다.

[0032] 이어서, b)단계에서 상기 원자력발전소 설비를 감시 및 제어하는 제어실로 공급되는 DC 전원의 건전 여부를 확인하며(S03) 이를 통해 c)단계인 상기 DC 전원이 건전한 것으로 확인되면(S03-Yes), 미리 결정된 발전소 상태 파악을 위해 필수적으로 요구되는 정보를 제공하는 장비(부하)를 제외한 나머지 부하로의 DC 전원 공급을 차단하여 DC 전원의 수명을 연장하는 단계(S04)를 수행한다. 이렇게 DC 전원의 생존성을 연장시키는 작업을 DC Shedding이라고 하며, DC Shedding 조치가 성공적으로 달성될 경우, DC 전원을 약 10 ~ 20시간 정도 연장 사용할 수 있다.

[0033] 이 때, AC 전원이 상실되었지만 DC 전원은 가용한 상태이므로 주제어실 정보를 활용할 수 있다. 그러므로 운전조는 제어실에서 제공되는 기존의 노심손상 방지를 위한 절차서인 EOP 체계(Emergency Operating Procedures)를 활용하여 발전소 상태에 대한 진단을 수행할 수 있다.

[0034] 이어지는 d)단계에서 상기 EOP 체계를 이용하여 RCS의 재고량의 건전 여부 및 RCS의 열을 제거하는 이차측 열제거 기능의 건전 여부를 확인하며(S05), 다음 e1)단계에서 상기 RCS의 재고량이 건전하고 상기 이차측 열제거 기능이 건전한 것으로 확인되면(S05-case1), TD-AFW를 이용하여 상기 RCS를 냉각한다(S061). TD-AFW는 전기를 이용하는 것이 아니라 증기를 이용하는 방식이므로 AC 전원 없이도 사용이 가능한 시스템이다. DC 전원이 건전하므로 급수조절은 제어실에서 가능하며, RCS를 냉각하기 위해 먼저 RCS를 감압해야 하는데, 이 때 ADV(Atmospheric Dump Valve)를 현장에서 수동으로 개방하는 작업이 필요하다. 앞서, c)단계에서 DC Shedding 조치가 성공했을 경우 전술한 바와 같이 10 ~ 20 시간까지는 TD-AFW를 이용하여 냉각 및 감압 조치를 수행할 수 있다.

[0035] 만약, 상기 e1)단계에서 TD-AFW를 이용한 RCS 냉각이 도중에 실패하게 될 수도 있으며(S061-No), 이 경우, 손상상태의 조합 중 '실시예 2. AC 전원 상실 & DC 전원 건전 & RCS 재고량 건전 & 이차측 열제거 기능 상실'과 동일하므로 간단히 설명하며 자세한 내용은 후술하도록 한다. RCS 냉각이 실패할 경우(S061-No), 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 이를 이용하여 증기발생기(이하, SG; Steam Generator)로의 급수가 이루어지도록 함으로

써 이차측 열제거 기능을 회복하는 조치를 수행함과 동시에 중대사고관리지침서(이하, SAMG; Severe Accident Management Guidelines)에 따른 RCS 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, RCS 냉각수 주입 및 격납건물(CTMT; Containment) 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결하는(S071) f1) 단계를 수행하며, 다음 g1)단계에서 SAMG 진입조건(CET 온도 > 650℃)에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S081-Yes), 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되면 상기 AC 전원을 이용하여 SG로의 급수, RCS 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 수행하고 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되지 않으면 상기 f1)단계에서 확보한 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 SG로의 급수, RCS 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입 등을 수행하며(S091), 상기 SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S081-No) 상기 f1)단계로 회귀한다.

[0036] 한편, 상기 e1)단계에서 상기 TD-AFW를 이용한 RCS 냉각이 성공적으로 이루어지고 있지만(S061-Yes) 장기화될 경우, 다음과 같은 과정이 수행되어야 한다.

[0037] 먼저, 추가적인 DC 배터리의 공급(S072)이 이루어져야 하며(f2 단계), SG의 급수원인 복수저장탱크(이하, CST; Condensate Storage Tank)의 용량이 고갈되기 전에 상기 CST로의 급수원이 보충되거나, CST로의 급수가 어렵거나 비효율적인 경우, SG로 직접 급수가 이루어지도록(S073) 할 수 있다(f3 단계). 이 때, 급수원으로는 순수, 원수, 또는 소방수 등이 가능하며, 소내 수원의 확보가 어려울 경우 외부로부터의 공급 또는 바지선을 이용하여 해수의 공급이 필요하다. 필요한 시점에 적절한 수원을 공급하기 위해서는 사전에 수원의 상태를 파악하고, 필요한 수원 공급 설비의 연결 작업이 이루어져야 한다.

[0038] 한편, RCP Seal LOCA(Loss-of-coolant accident)와 같은 RCS 재고량 상실은 일어나지 않았지만, RCS Seal 누설 가능성은 존재하므로, RCP 냉각 및 감압 조치 이후 수 시간이 지난 시점에서 RCS로의 적절한 재고량 보충(Inventory Makeup) 작업이 필요하다. AC 전원이 장기 상실된 상황이므로 충전펌프 및 고압안전주입(HPSI) 펌프는 활용할 수 없는 상태이다.

[0039] 따라서, 이어지는 f4)단계에서 소방차 또는 이동형 고압디젤 펌프를 이용하여 고농도 봉산수를 저장하고 있는 재장전수탱크(RWST; Refueling Water Storage Tank)의 수원 또는 해수를 RCS으로 공급하여 RCS의 재고량이 보충(S074)될 필요가 있다. 이어서, 상기 e1)단계로 회귀함으로써, AC 전원의 복구가 이루어질 때까지 상기 과정을 반복하도록 한다.

[0040] **실시에 2. AC 전원 상실 & DC 전원 건전 & RCS 재고량 건전 & 이차측 열제거기능 상실**

[0041] 두번째 손상상태는 AC 전원 상실에 추가하여 '이차측 열제거 기능의 상실이 발생한 상황이다. 여기서 의미하는 '이차측 열제거 기능의 상실은 CST의 구조적 파손, 증기 또는 급수 배관의 파손, 또는 TD-AFW 계통의 손상 등과 같이 외부사건으로 인하여 사고초기 시점부터 시스템적으로 RCS 열제거 기능을 수행할 수 없는 상황이 발생한 것을 말한다.

[0042] 이러한 손상상태에서 요구되는 기본 조치는 전술한 첫번째 손상상태와 마찬가지로 다양한 AC 전원의 복구 노력 및 DC 수명 연장을 위한 DC Shedding 조치가 필요하다(즉, a ~ d 단계 동일). 상기 d)단계에서, RCS의 재고량이 건전하고 이차측 열제거 기능이 상실된 것으로 확인되면(S05-case2), 이차측 열제거 기능의 상실 원인에 따라 열제거 기능을 회복하기 위한 조치를 수행한다. 즉, 이어지는 e2)단계에서 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하여 SG로의 급수가 이루어지도록 함으로써 이차측 열제거 기능을 회복하는 조치를 수행함과 동시에 SAMG에 따른 RCS 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, RCS 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결한다(S062). 다시 말해, TD-AFW 계통 자체의 상실과 배관 파단이 발생한 경우는 TD-AFW 계통을 이용한 급수가 어려우므로 이동형 설비를 이용하여 급수를 해야 하며, CST를 포함한 순수 또는 원수 등이 파손으로 인해 SG 급수 공급이 어려운 경우에는 발전소 소방수 또는 해수 등과 같은 다른 가용한 대체 수원을 이용하여 SG로의 급수가 이루어지도록 하는 것이다.

[0043] 이차측 열제거 기능의 복구가 조기에 달성되기 어려운 경우, 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하는 데 소요되는 시간은 극한재해로 인한 발전소 부지 손상 등의 상황을 고려하면 대략 2시간 내외 또는 상황에 따라 그 이상의 시간이 소요될 수 있다. AC 전원 상실 상황에서 사고초기에 이차측 열제거 기능 또한 상실되는 상황이 발생한다면, 노심손상에 이르는 시간은 대략 2시간 내외로 알려져 있다. 이러한 상황을 고려한다면, 사고초기에 이차측 열제거 기능의 상실이 발생하였을 때, 현장의 비상대응팀이 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하여 이차측 냉각을 달성하고자 노력하는 과정 중에 중대사고관리지침서(SAMG) 진입조건(CET>650℃)에 도달할 수 있다. 참고로,

SAMG는 중대 사고 관리 방안을 제시한 것으로, CET(Core Exit Temperature)의 온도가 650℃를 초과하면 EOP 체계를 이용한 노심손상 방지가 실패했다고 판단하여 SAMG 진입조건에 도달한 것이며, SAMG에 따라 원자로용기 손상 방지를 포함한 중대 사고 관리 전략을 실시한다.

[0044]

즉, 극한재해 상황 시, 이차측 열제거 기능의 상실이 사고초기에 발생할 경우, 비록 SAMG 진입조건(CET 온도 > 650℃)에 도달하지 않았다 하더라도, SAMG의 원자로용기 손상 방지 목적을 달성하기 위해서는, 전술한 이차측 열제거 기능의 회복 조치를 수행함과 동시에 SAMG에 따른 RCS 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, RCS 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원의 확보 및 연결 조치를 SAMG 진입조건 달성 전, 즉 이차측 열제거 기능의 상실 시점에서 미리 준비할 필요가 있다. 즉, SAMG 진입조건에 도달했을 때 곧바로 대응할 수 있도록 하는 것이다.

[0045]

이어지는 g2)단계에서 SAMG 진입조건 도달 여부를 확인하며(S082), 상기 SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S082-Yes), 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되면 상기 AC 전원을 이용하여 SG로의 급수, RCS 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 수행하고, 기존 전력공급 설비로부터 AC 전원이 복구되지 않으면 상기 e2)단계에서 확보한 이동형 전원 또는 임시 전원, 이동형 설비 및 대체 수원을 이용하여 SG의 급수, RCS 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입 등을 수행하며(S092), 상기 SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S082-No) 상기 e2)단계로 회귀한다.

[0046]

SAMG 진입 후 SAMG에서 요구하는 절차에 따라 수행되는 전략을 좀 더 상세히 설명한다.

[0047]

먼저, SG 급수 주입은 전술한 '이차측 열제거 기능'의 상실로 인한 대체 방안의 구현과 동일한 연장 상황에서 달성될 수 있는 전략이다. 다음으로, RCS 감압이 수행되어야 하며, 이때, RCS 계통 내의 밸브(즉, 안전감압밸브, 가압기 배기밸브, 원자로용기 배기밸브)가 모두 AC 또는 DC 전원을 필요로 하므로 이들 밸브들을 구동하기 위해서는 이동형 전원을 포함한 전원 복구 및 모션에의 전원 공급이 달성되어야만 한다. 다른 대안으로 휴대용 DC 전원 공급을 통해 전원 가압이 이루어질 수 있도록 설비를 개선할 수 있으며, AC 전원이 필요한 밸브인 경우 DC-AC 인버터 설치를 통해 AC 전원을 공급하도록 할 수도 있다. 이어지는 RCS 냉각수 주입을 달성하기 위해서는 상기 RCS 감압을 성공적으로 완료한 후, 전원이 복구되면 기존 주입시스템인 고압 및 저압 안전주입계통 또는 충전계통을 이용하여 냉각수를 주입하며, 전원 복구가 실패하면 충분한 용량의 이동형 펌프를 이용하여 재장전수 탱크(RWST)의 봉산수를 안전주입 배관으로 주입하도록 한다. 이동형 펌프를 이용한 RWST 봉산수의 RCS 주입 방안을 구현하기 위해서는 RWST 하단부에 이동형 펌프와 연결할 유출통로 설비가 필요하며 RCS 안전주입 배관으로의 주입유로 설비가 마련되어야 한다. RWST 계통이 파손 또는 고갈 등으로 인하여 사용할 수 없을 경우에는 바지선과 대용량 펌프를 이용한 해수와 같은 대체 수원을 이용하여 RCS 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 수행할 수 있다.

[0048]

한편, 비특허문헌 3 내지 5에 기재된 MELCOR 및 MAAP 등의 사고해석 전산코드를 이용한 사고해석 결과에 의하면, 노심노출 시점부터 원자로용기파손 시점까지의 시간이 약 2.4 시간 또는 1.7 시간으로 평가된다(하기의 표 1 참조). 극한재해 상황에서 현 SAMG 체계를 준용할 경우, 즉, SAMG 진입조건인 CET 온도 650℃ 시점에서 SAMG로 진입하고 SAMG에 제시된 RCS 감압 및 주입 전략을 실행할 경우, 극한재해 상황에서 이동형 설비를 이용한 대처(즉, RCS 주입)에 소요되는 시간이 2시간 내외 또는 그 이상일 수 있으므로, 원자로용기 파손 방지를 위한 RCS 감압 및 주입 전략을 주어진 여유시간 내에 성공적으로 완료할 수 있을 지는 불확실하다. 그러므로 극한재해 상황 시, 이차측 열제거 기능의 상실이 사고초기에 발생할 경우, 비록 SAMG 진입조건(CET 온도 > 650℃)에 도달하지 않았다하더라도 SAMG의 RCS 감압 및 주입 전략을 위한 대체 설비 및 이동형 설비의 설치 작업이 진행되어, SAMG 진입 시에는 적절한 시점에 원자로용기손상 방지를 위한 RCS 주입이 성공적으로 달성될 수 있도록 해야 할 것이다.

표 1

[0049]

	MELCOR	MAAP
Rx Trip	0	0
Core Uncovery (CU)	6,556 sec (1.8 hr)	6,870 sec (1.9 hr)
Rx Vessel Failure (RVF)	15,237 sec (4.2 hr)	13,300 sec (3.6 hr)

Time from CU to RVF	2.4 hr	1.7 hr
---------------------	--------	--------

- [0050] **실시예 3. AC 전원 상실 & DC 전원 건전 & RCS 재고량 상실 & 이차측 열제거기능 건전**
- [0051] 세번째 손상상태는 AC 전원 상실에 추가하여 이차측 열제거 기능은 건전한 상태이나 RCS 재고량 상실이 발생한 상황이다.
- [0052] RCS 재고량 상실이 발생할 수 있는 사건은 LOCA(냉각재상실사고), SGTR (SG 세관 파열)등을 포함한다. LOCA 사건에는 잘 알려져 있는 바와 같이, 소형/중형/대형 냉각재상실사건을 포함하며, 배관파단 가능성과 함께 RCP Seal LOCA (중형 LOCA) 가능성과 가압기 안전밸브(PSV) 개방고착 가능성(소형 또는 중형 LOCA) 등을 포함할 수 있다. 일반적으로 배관 구조는 지진 등의 외부사건에 대해 내구성이 강한 것으로 알려져 있으나, 안전주입탱크(SIT)의 주입부분과 같이 취약한 부분의 파손, RCP 밀봉냉각 상실로 인한 Seal LOCA, PSV 개방고착 가능성 등은 무시할 수 없는 RCS 재고량 상실 사건 유형이므로 이에 대한 사고관리 대비가 필요하다.
- [0053] 이때에도 전술한 바와 마찬가지로 a ~ d 단계와 동일하게 기본적인 조치를 수행하며, 상기 d)단계에서 RCS 재고량이 상실되고 이차측 열제거 기능이 건전한 것으로 확인되면(S05-case3), 이동형 펌프 또는 소방펌프를 이용하여 냉각수를 상기 RCS으로 주입하여 RCS의 재고량을 복구하고 SG의 수위 확보를 위해 SG로의 급수를 유지하며, 동시에 SAMG에 따른 원자로냉각재계통 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, 원자로냉각재계통 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결하는(S063) e3)단계를 수행한다.
- [0054] 구체적으로, RCS 재고량 복구를 위해서 필요한 조치는 고압 및 저압 이동형 펌프 또는 소방펌프를 이용한 냉각수(또는 대체 수원)의 RCS로의 주입이다. RCS 재고량 상실 상황에서 이차측 열제거 기능의 지속은 작은 파단인 경우에는 재고량 복구와 동시에 이차측 열제거 기능이 이루어져야 하지만, 소형냉각재상실사건 이상의 파단에 대해서는 노심손상 방지 측면에서는 효과가 없다. 그러나 SG 크립파손 방지 등을 위해서 SG 수위 확보는 중요하므로 SG로의 급수를 유지하기 위한 노력이 지속되어야 한다.
- [0055] 이동형 펌프 또는 소방펌프를 이용한 RCS 주입에 소요되는 시간은 2시간 내외이거나 그 이상이 소요될 수 있다. 아주 작은 파단(누설)의 경우를 제외하고 대부분의 냉각재상실사고에서, 이 정도의 소요시간이 경과되면 SAMG 진입조건(CET > 650℃)에 충분히 도달하게 된다.
- [0056] 따라서 g3)단계에서 SAMG 진입조건 도달 여부를 확인하며(S083), SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S083-Yes) 대응 방안은 전술한 실시예들과 동일하며, SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S083-No) e3)단계로 회귀한다.
- [0057] 이 때, SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S083-Yes), SG 급수 주입은 이전 단계부터 지속되어 온 조치이므로 만족할 가능성이 높고, RCS 감압은 냉각재 상실 상황이므로 RCS 주입이 이루어질 만큼 충분히 낮아져 있을 것으로 예상된다. 한편, RCS 주입 조치가 성공하려면 원자로용기손상 이전 시점까지 RCS 재고량이 복구되어야 한다. MAAP을 이용한 다양한 냉각재파단사고에 대한 사고해석에 의하면(비특허문헌 4, 5 참고), 소형 냉각재상실사건 시 원자로정지(RT) 후 약 3.8 시간 정도의 시점에서 원자로용기 파손 가능성이 있는 것으로 분석되었으며, 대형냉각재상실사건의 경우에는 원자로정지 후 약 2.6 시간 시점에서 원자로용기 파손 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 그러므로 전원 상실 및 냉각재상실사고 동시 발생 시, 이동형 설비를 이용한 RCS 주입 조치가 성공적으로 완료되려면 사고 초기부터 신속한 대응 조치가 이루어져야 한다. 초기부터 신속한 대응을 하기 위해서 이동형 설비를 RCS 주입 라인에 근접한 위치에 사전 배치해 두는 전략도 고려할 수 있다.
- [0058] 또한 (신규 원전 등에서는) 상기 이동형 설비 대신 전원에 의존하지 않는 디젤 구동 안전주입펌프를 추가로 미리 설치해두는 전략도 중요한 방안이 된다. 즉, 이동형 설비를 이용할 경우, 설비의 이동 및 설치에 소요시간이 많이 들기 때문에 극한재해 사고 시 대응이 허용 시간 내에 이루어지지 않을 수 있다. 이러한 문제를 보완하기 위하여 전원에 의존하지 않는 디젤 동 안전주입펌프를 추가적으로 미리 설치해놓고 이를 이동형 설비 대신 이용하는 것이다.

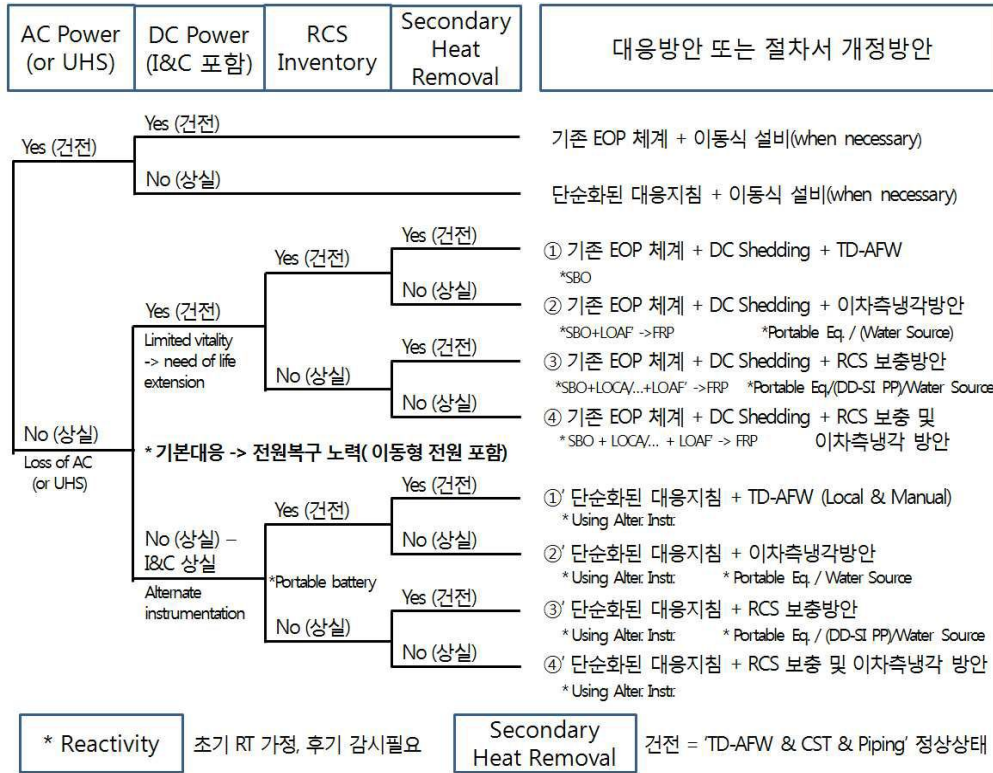
- [0059] **실시예 4. AC 전원 상실 & DC 전원 건전 & RCS 재고량 상실 & 이차측 열제거기능 상실**
- [0060] 네번째 손상상태는 AC 전원 상실 상황에 추가하여, RCS 재고량 상실과 이차측 열제거 기능 상실이 모두 발생한 상황이다.
- [0061] 마찬가지로, 기본적인 조치(a ~ d 단계)를 수행하며, 상기 d)단계에서 RCS 재고량이 상실되고 상기 이차측 열제거 기능이 상실된 것으로 확인되면(S05-case4), 이어지는 e4)단계에서 이동형 펌프 또는 소방 펌프를 이용하여 RCS의 재고량을 우선적으로 복구하고, 추가적인 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하여 SG로의 급수가 이루어지도록 함으로써 이차측 열제거 기능을 회복하며, 동시에 SAMG에 따른 RCS 감압을 위한 이동형 또는 임시 AC 및 DC 전원의 연결, RCS 냉각수 주입 및 격납건물 냉각수 주입을 위한 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하고 연결한다(S064).
- [0062] 일반적으로 RCS 재고량과 이차측 열제거 기능이 동시에 상실될 경우, RCS 재고량의 확보 노력이 우선적으로 요구된다. 그러나 이차측 급수확보는 RCS 열제거 기능 확보 및 SG 크립파손 방지를 위해서 중요한 기능이므로 RCS 재고량 확보를 우선적으로 수행하되 이차측 열제거 기능의 복구에도 노력을 기울여야 한다.
- [0063] 이어지는 g4)단계에서 SAMG 진입조건 도달 여부를 확인하며(S084), SAMG 진입조건에 도달(노심손상 방지 실패)할 경우(S084-Yes) 대응 방안은 전술한 실시예들과 동일하며, SAMG 진입조건에 도달하지 않으면(S084-No) 상기 e4)단계로 회귀한다.
- [0064] 이 때, 전술한 바와 같이 이동형 설비 또는 대체 수원을 이용하여 RCS 주입을 시도하거나 이차측 열제거 기능을 회복하는 데에는 2시간 내외 또는 그 이상의 시간이 소요될 수 있다. 주어진 사고상황을 고려할 때, 이 정도의 소요시간이 경과되면, 이동형 설비 및 대체 수원을 확보하는 중에 SAMG 진입조건(CET > 650℃)에 도달할 가능성이 크다.
- [0065] 원자로정지 후 원자로용기 파손까지의 시간 여유가 매우 짧으므로, 앞서 언급한 바와 같이 원자로용기 파손시점 이전까지 RCS 재고량 복구가 이루어지려면 사고 초기부터 신속한 대응 조치가 이루어져야 한다. 대응 시간을 단축시키기 위한 방안이 필요하며, 이동형 설비 및 관련 도구들을 RCS 주입 라인과 근접한 위치에 사전 배치해 두거나, 디젤구동 안전주입펌프의 추가 설치 전략도 중요한 방안일 것이다.
- [0066] **실시예 5. AC 전원 상실 & DC 전원 상실 & RCS 재고량 건전/상실 & 이차측 열제거기능 건전/상실**
- [0067] 마지막으로 설명할 손상상태는 AC 전원 상실 상황에서 DC 전원까지 상실되는 상황이다. DC 전원이 상실된 상황이므로 주제어실(MCR) 및 현장제어실(RSP)에서의 발전소 감시 및 제어 기능을 이용할 수 없다.
- [0068] AC 및 DC 전원이 모두 상실된 상황에서 요구되는 상위 조치(High-Level Actions)는 앞에서 다룬 AC 전원 상실 & DC 전원 건전 상황에서 요구되는 상위 조치와 유사하지만, DC 전원 수명 연장을 위해 요구되었던 DC Shedding (불필요한 DC 부하 차단) 조치는 불필요하며, 세부조치의 필요성과 상태판단을 위한 대체 정보가 제공되어야 하며, 또한 모든 조치는 현장에서 수동으로 취해져야 한다.
- [0069] 즉, 상기 a)단계를 수행한 후 이어지는 상기 b)단계에서 상기 DC 전원이 상실된 것으로 확인되면(S03-No), 가장 우선적으로 상기 DC 전원의 복구 및 임시 DC 전원(Portable DC Battery)을 연결해야 한다(S041). 그러나, DC 전원 이용이 불가하면(S041-No), 별도의 대체 설비를 이용하여 발전소 설비의 상태 정보를 취득하거나, 별도로 구비된 단순화된 대응지침방안을 마련하여 이를 이용해야 한다. 미국의 EDMG의 경우, 격납건물 관통부에서 제어실로 연결되는 계측제어 채널의 연결선을 변경하여 DC 전원 공급과 포터블 측정기로 직접 측정할 수 있는 별도의 배선을 Penetration Room 등에서 제공하고 있다.
- [0070] 손상상태 판단은 현재의 EOP 진단절차를 그대로 사용하거나 단순화하여 사용할 수 있다. 현재 EOP 진단절차를 그대로 사용한다면 진단절차에 사용되는 관련 정보를 현장에서 직접 취득할 수 있는 방안을 제공해 주어야 한다.
- [0071] 한편, DC 전원이 상실되어 작업자를 통해 현장에서 직접 정보를 취득해야 하는 경우에는 상황판단에 많은 시간이 소요될 수 있으므로 초기 대응이 지연될 수도 있다. 그러므로 이어지는 d)단계에서 RCS 재고량 상실 여부 및 이차측 열제거 기능의 상실 여부를 우선적으로 확인(S05)하여 필요한 선행 조치를 즉각적으로 취하고, 추가적인

상황판단을 수행하여 후행 조치를 취하는 전략이 필요하다.

- [0072] 이어지는 e1)단계에서는 RCS 재고량과 이차측 열제거 기능이 건전한 상태인 기본 조건(즉, AC 및 DC 전원만 상실된 상황(S05-case1)) 하에서 요구되는 기본 조치는 TD-AFW의 현장 수동운전을 이용한 RCS 냉각이 이루어진다.
- [0073] 이 때, 보조급수구동을 위한 터빈계통으로 공급되는 증기라인의 모든 밸브들은 전원상실 시 Fail Open 상태로 유지될 것으로 예상되며, 급수라인의 급수조절밸브는 DC 전원 상실로 조절이 불가능하나, 모터구동 차단밸브는 현장에서 수동으로 운전할 경우 개도조절이 가능하므로 이 밸브를 이용한 SG 급수량 조절이 필요하다. SG 수위와 RCS 온도 및 과냉각도 등에 대한 정보 확인 방안이 제공되어야 하며, 급수 조절 작업자, ADV 현장 조절 작업자, 및 대체 정보 확인자 간에 무전기 또는 위성폰 등을 이용한 적절한 의사소통이 뒷받침되어야 한다. TD-AFW 계통의 장기 운전을 위한 CST 보충 또는 대체 수원의 확보, RCS 누설에 대한 보충 작업 등과 같은 기본 조치는 전술한 방법들과 동일하나, 모든 조치가 현장에서 수행되어야 하며, 또한 이를 위한 대체 정보의 확인 방법 및 작업자간 의사소통 등이 적절히 제공 및 수행되어야 한다.
- [0074] 기본 조건(즉, AC 및 DC 전원만 상실된 상황) 하에서 TD-AFW 계통을 이용한 운전이 실패하거나 이차측 열제거 기능이 가용(건전)하지 않은 상태에서의 대응 방안 및 SAMG에서의 원자로용기손상 방지를 위한 기본 전략, RCS 재고량 상실 상황에서의 사고관리 전략 등은 적절한 대체 정보와 전략수행을 위한 적절한 수단 제공, 현장 작업으로 인한 의사소통 방안 제시 등을 제외하고는 앞의 DC 전원이 건전한 상태에서의 대응 전략과 근본적으로 동일하므로 자세한 기술은 생략한다.
- [0075] 이상으로, 도 1에 도시된 손상상태 중, ① ~ ④, ①' ~ ④' 총 8가지 경우에 대해 설명하였다. 본 명세서에 기재하지 않은 AC 전원이 건전한 상태에 대해서는 원자력발전소의 펌프 등 각종 설비의 동작에는 문제가 없는 상황이므로 별도의 자세한 설명은 생략한다.
- [0076] 종래기술인 미국의 EDMG와 FLEX는 별도의 체계로 존재하고 있으며, EDMG는 노심손상 방지 및 중대사고 관리를 모두 포함하는 포괄적인 Approach를 제시하고 있으나, 다양한 사고상황에서의 구체적인 사고해석에 기반한 Timeline과 전략의 구체적인 수행시점 및 우선순위 제시가 결여되어 있고, FLEX는 노심손상 방지를 목표로 한 전략까지만을 제시하고 있어 노심손상 이후의 원자로용기 및 격납건물 파손 방지를 위한 방안은 생략되어 있다.
- [0077] 또, EDMG 및 FLEX 모두 RCS는 건전하다는 가정에서 기본 대응 전략을 제시하고 있다. 즉, RCP Seal LOCA 및 가압기안전밸브(PSV) 개방고착과 같은 냉각재상실 상황은 기본 발전소 손상 조건에서 배제하고 있다.
- [0078] 본 발명은 상기와 같은 문제점들을 해결하기 위해 고안된 것으로 전술한 바와 같이 FLEX와 EDMG를 바탕으로 보다 확장된 대응 전략 및 체계를 제시하고 있다.
- [0079] 즉, 본 발명은 기존 EOP 및 SAMG와의 연계체계를 제시함으로써, 노심손상 방지 관점에서의 사고초기 대응 방안과, 이러한 방안이 실패하였을 경우의 대체 대응 방안, 그리고 노심손상 이후의 중대사고관리 관점에서의 대응 방안을 통합적으로 제시하고 있으며, AC 전원상실, DC 전원상실, 최종열제거원 상실에 추가하여, 극한 외부사건 및 사고 진행 중에 발생할 수 있는 RCS 건전성 상실(RCP Seal LOCA, PSV 개방고착 포함) 상황에 대한 고려를 포함하고 있다.
- [0080] 따라서, 본 발명은 극한재해 발생 시에도 원자력발전소를 안전하게 정지하거나 관리 및 유지함으로써 외부환경으로의 방사능 누출을 방지할 수 있는 효과가 있다.
- [0081] 또, 극한자연재해뿐만 아니라 항공기테러 등과 같은 보안사고 발생 시에도 원자력발전소를 안전하게 보호할 수 있는 방안 개발에 기본 전략으로 활용될 수 있는 효과가 있다.
- [0082] 본 발명은 상기한 실시예에 한정되지 아니하며, 적용범위가 다양함은 물론이고, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 다양한 변형 실시가 가능한 것은 물론이다.

도면

도면1



도면2

