

‘95 추계 학술발표회 논문집
원자력학회

신뢰도 분석 방법을 이용한 사용후핵연료 중간저장시설
냉각계통의 최적설계에 관한 연구

고원일, 최종원, 박성원, 박현수
한국원자력연구소

요약

신뢰도 분석 방법을 이용하여 습식 사용후핵연료 중간저장시설의 냉각계통에 대한 최적 설계조건을 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 먼저 고장수목 분석을 통한 설계 취약점을 평가하여 21개의 설계대안을 도출하였고, 최종적으로 설계대안에 대한 건설비용, 계통신뢰도 분석 및 확률론적 안전기준을 고려한 비용효과 분석을 실시하였다. 설계대안들 중에서 100% 루프 다중설계, 루프당 한 개의 펌프 사용, 안전등급 부여 및 주 루프에서 정화계통이 분리된 경우가 최적설계안으로 나타났다. 여기서 적용된 방법론은 유사시설의 최적설계에 유용하게 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

1. 서론

습식 사용후핵연료 중간저장시설에서 안전성과 관련된 중요 계통인 냉각계통은 안전 등급 부여 여부, 다중설계(redundancy) 정도 등과 같은 설계요건이 정립되어 있지 않아 각 나라마다 다른 안전개념을 적용하고 있는 상태이며, 1990년도에 수행된 우리의 사용후핵연료 중간저장시설(ISFSF) 개념설계에서는 유사시설인 소내저장조 안전개념을 적용하여 수행된바 있으나 여전히 안전성 정도(특히 안전등급 부여 여부)에 대한 논란의 여지를 안고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 향후 사용후핵연료 중간저장시설 냉각계통의 설계요건을 정립하는데 일조하고자 신뢰도 분석 방법을 이용하여 확률론적 관점에서 안전성평가를 하였고, 비용효과 분석을 실시하여 우리의 습식 중간저장시설에 적용 가능한 최적 설계안을 추정하였다.

이를 위하여 그림 1 에 나타낸 바와 같이 먼저 기준설계안을 선정하여 이에 대한 고장수목 분석을 통하여 설계취약점을 평가하였으며, 계통 고장율을 계산하였다. 이 결과와 부품의 신뢰도, 다중설계 정도 등 일반적으로 계통 신뢰도에 영향을 미치는 기본요소들을 적절히 조합하여 설계대안을 선정하였으며, 최종적으로 설계대안에 대한 신뢰도 평가와 건설비용을 추정하여 추정된 건설비용, 계통신뢰도 및 확률론적 안전기준(PSC)

을 고려한 비용효과 분석을 실시하여 최적 설계안(신뢰도 기준치를 만족하면서 최소비용을 나타내는 설계대안)을 추정하였다.

2. 기준 설계안

기준설계안은 현재 국내에서 개념설계된 습식 중간저장시설[1,2]의 냉각계통을 기본으로 하여 고장모드 및 운전모드를 설정하여 재구성하였다. 기준설계안은 크게 저장조 냉각계통, 이차 냉각계통, 해수냉각계통 및 비상보충수 냉각계통으로 구성되어 있다[그림 2 참조]. 각 루프는 두개의 병렬 연결된 순환펌프(100% Redundancy), 한 개의 열교환기 및 각종 밸브들이 부착되어 있다. 특히, 저장조 냉각계통에는 냉각수 정화계통이 주루프와 병렬로 연결되어 있어 주루프를 흐르는 냉각수의 일부가 정화계통을 통과하도록 되어 있다. 또한 운전상태를 감시하고 운전모드를 조절하기 위하여 압력측정, 온도측정, 유량측정, 수위측정 장비들이 부착되어 운전실의 콘트롤계통과 연결되어 있다. 여기서 각 루프는 총 열부하의 50%를 담당하게 되는데, 정상운전시 두개의 루프가 작동되는 2/3 운전로직을 갖추고 있다. 개념설계시에는 비상보충수 냉각계통을 포함한 모든 냉각계통은 안전등급(Safety Class 3)으로 설계되어 있으며, 냉각수 정화계통은 비안전등급으로 설계되어 있다.

3. 계통신뢰도 분석

저장조 냉각계통이 고장을 일으키고 비상보충수 냉각계통을 포함한 모든 냉각계통이 고장을 일으켜 냉각기능을 수행할 수 없을 경우에도 저장조 냉각수가 비등점에 도달하는데 수일이 걸리며, 비등점을 지나 저장핵연료가 공기중에 노출되기까지는 10일 이상이 걸리는 것으로 알려져 있다[2]. 따라서 저장조 냉각수가 비등점에 도달하는 경우를 정점사상(Top Event)으로 선정하였을 경우에는 모든 냉각계통이 고장나고 충분한시간(비등점에 도달하는 시간) 동안 고장계통을 회복할 수 없는 조건함수가 따르게 된다. 본 연구에서는 저장냉각수가 비등점에 도달하는 사건을 정점사상으로 잡고 컴퓨터코드에 의해 분석된 저장조냉각계통의 기능 상실사건과 지수함수분포로 가정한 조건함수를 연결하여 최종 정점사상에 대한 사고확률을 계산하였다.

계통신뢰도 분석을 위하여 FTAP 코드[3]를 이용하여 최소단절집합을, IMPORTANCE 코드[4]를 이용하여 고장율, 이용불능도 및 확률론적 중요도 값을 각각 계산하였다. 한편 고장수목 분석에 사용된 부품 고장자료는 안전등급계통의 부품고장자료는 원전의 일반적인 고장자료[5]를 이용하였으며, 비안전등급으로 분류된 고장자료는 영국의 THORP 수납/저장시설에서 분석한 자료[6]를 이용하였다.

4. 비용효과 분석

안전성이 중시되는 원자력 관련 시설에서 최적 설계개념을 정의하기는 매우 어려우나 여기서는 엔지니어링 관점을 중시하여 계통의 신뢰도 기준을 만족하면서 최소비용을 나타내는 것이 최적대안으로 보았으며, 고장률과 비용과의 상관관계를 도식화하여 비용효과 분석을 하였다. 그러나 이러한 분석을 위해서는 확률론적 안전기준을 결정하는 것이 매우 중요하나 현재 중간저장시설에 대한 확률론적 안전기준이 없기 때문에 소내 저장 냉각계통의 PSA 자료를 분석하여 소내저장조 냉각계통 고장으로 인하여 저장조 핵연료의 손상이 일어날 확률을 유추하여 보고한 외국자료(NUREG-1353[7])를 적용하였다. 또한 비용추정을 위해서 일반적인 화학플랜트에서의 각종 장비 및 기기들에 대한 가격을 추정하여 정리한 자료[8]를 이용하였다. 이때 안전등급으로 분류된 장비 및 기기에 대해서는 그 구성재질에 따라 2~3배 정도의 가중치를 부여하였다.

5. 결과 및 검토

가. 설계 대안 도출

기준설계안에 대한 고장수목 분석결과 냉각계통이 고장이후 냉각수가 비등점에 도달할 확률은 1.5×10^{-9} /년으로 나타났다. 이는 일반적인 원전의 Core Melting사고의 경우에 비해 매우 신뢰도가 높다고 할 수 있다. 또한 확률론적인 중요도는 비안전등급으로 설계된 냉각수 정화계통을 구성하는 부품들에서 높은 중요도 값을 보이는 것으로 나타났다. 이는 정화계통을 안전등급인 주 루프에서 독립시킬 경우 계통이 단순화 되고 안전등급기기와 비안전등급기기가 서로 분리되므로서 상당히 신뢰도가 증가될 것임을 예측할 수 있다. 따라서 설계대안으로 사용될 기본요소로서 주 루프에서의 정화계통 분리여부를 우선 선정하고, 일반적으로 신뢰도에 영향을 크게 미치는 루프의 다중설계 정도, 펌프의 다중설계 정도, 그리고 계통의 안전등급 부여 여부를 선정하였다. 이러한 기본요소들을 적절히 조합하여 표 1에 나타난 바와 같이 21개의 설계대안을 선정하였다.

나. 최적 설계안 추정

그림 3은 계통 고장률과 지수함수 분포로 가정한 조건함수를 연결하여 계산된 냉각수가 비등점에 도달할 확률을 나타낸 것이다. 비안전등급으로 분류된 3개의 대안을 제외한 대부분의 설계대안들이 원전의 Large Core melting 사고에 대한 PSC(그림에서 PSC-CM)를 만족하는 것으로 나타났다. 또한 확률론적 안전기준을 소내저장조의 경우로 가정하였을 경우(그림에서 PSC-FS) 기준설계안을 포함하여 6개의 설계대안이 안전기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그림 4는 건설비용과 냉각수가 비등점에 도달할 확률을 고려한 비용효과 분석을 나타낸 것으로서, PSC-FS를 만족하면서 최소비용을 보이는 Case S5(100% 루프 다중설계, 루프당 한개의 펌프 사용, 안전등급 부여 및 주 루프에서 정화계통이 분리된 경우)가 최적 설계안으로 나타났다. 본 연구에서 추정된 최적 설계안에 대한 냉각계통 건설비용은 기준설계안의 건설비용과 비교할 때 약 40% 정도가 절감되는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 향후 사용후핵연료 중간저장시설의 설

계요건을 결정하는 decision making 자료로 유용하게 활용될 수 있을 것이나, 정밀한 고장자료의 확보와 정확한 Vendor의 비용자료의 확보를 통해서 분석 결과의 정밀도를 높이는 연구가 추가 되어져야 할 것이다. 또한 여기서 적용된 방법론은 향후 원자력관련 유사시설에 대한 최적설계를 하는데 유용하게 응용될 수 있을 것으로 생각된다.

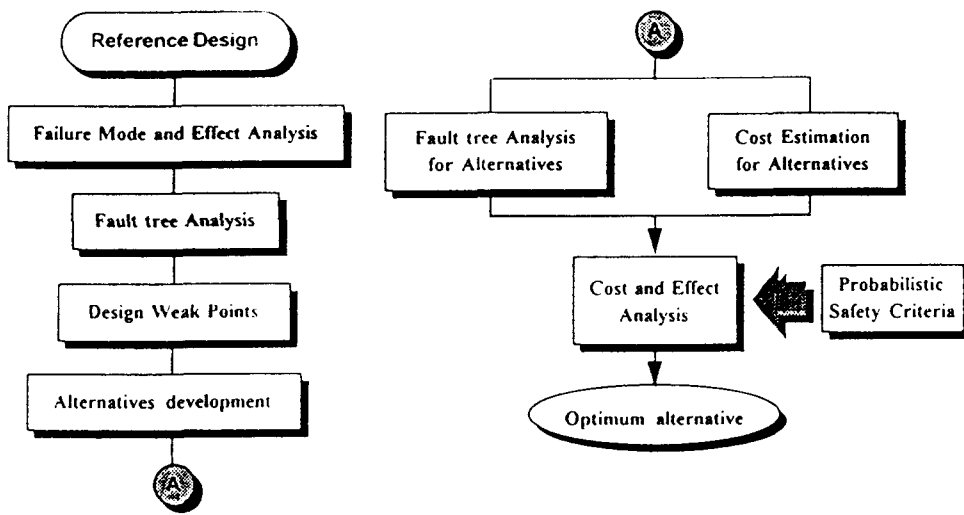


Figure 1. Calculation Procedure to Obtain the Optimun Alternative

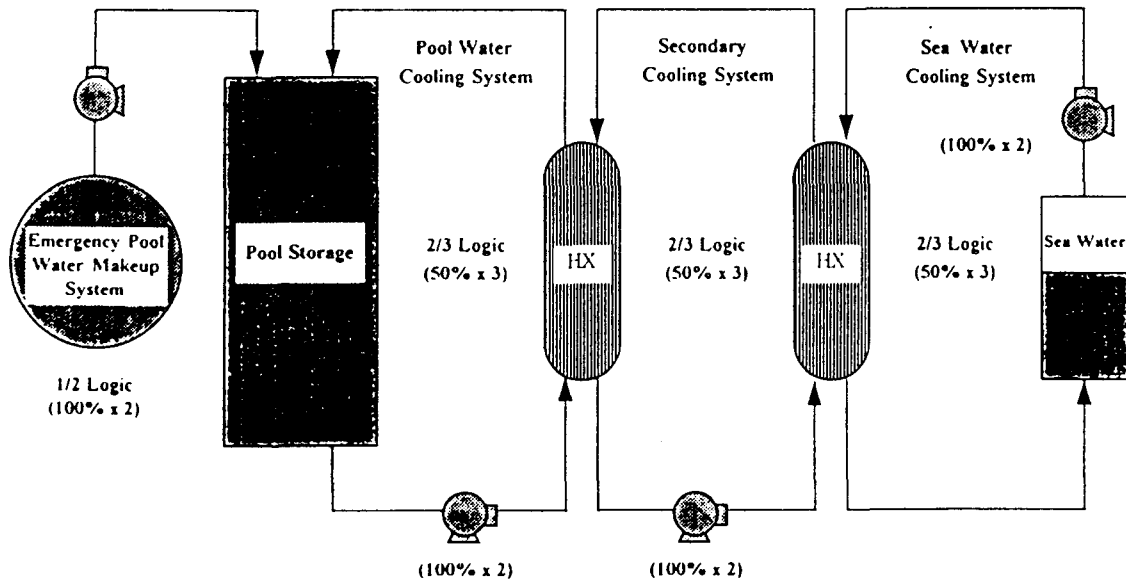


Figure 2. Flow Diagram for the Cooling System of Reference ISFSF

Table 1. Design Alternatives for the Cooling System of ISFSF

Alternatives	Loop Logic	Pump Redundancy	Separation of Cleanup System	Safety Class
Case S1	1/1	X	X	O
Case S2	1/1	O	X	O
Case S3	1/1	O	O	O
Case S4	1/2	X	X	O
Case S5	1/2	X	O	O
Case S6	1/2	O	X	O
Case S7	1/2	O	O	O
Case S8	2/3	X	X	O
Case S9	2/3	X	O	O
Case S10	2/3	O	O	O
Case SB*	2/3	O	X	O
Case N1	1/1	X	X	X
Case N2	1/1	O	X	X
Case N3	1/1	O	O	X
Case N4	1/2	X	X	X
Case N5	1/2	X	O	X
Case N6	1/2	O	X	X
Case N7	1/2	O	O	X
Case N8	2/3	X	X	X
Case N9	2/3	X	O	X
Case N10	2/3	O	O	X
Case NB	2/3	O	X	X

* Reference Design

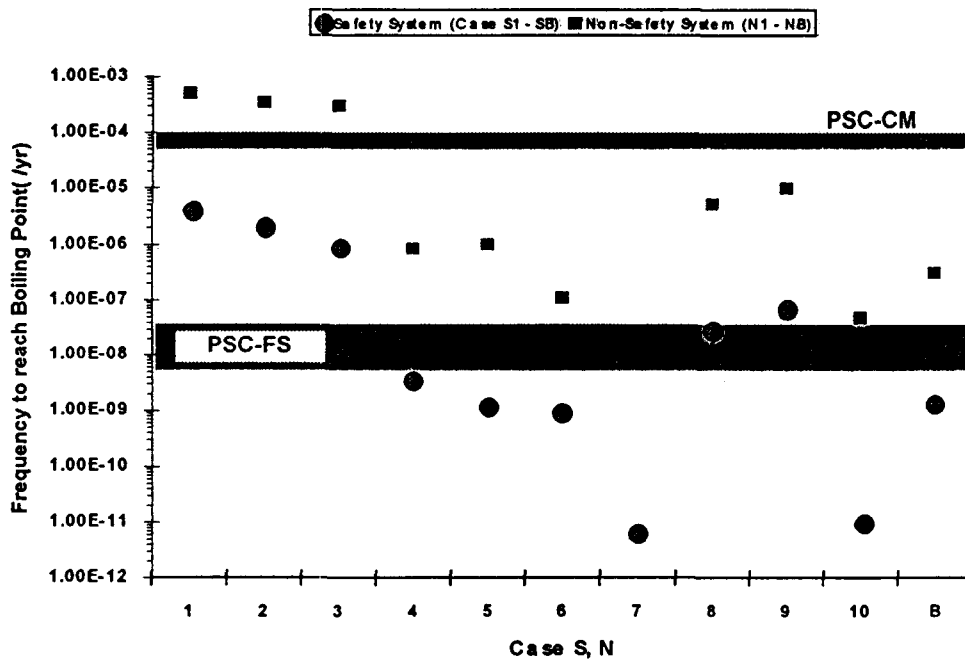


Figure 3. Probability to Reach Boiling Point of the Storage Pool of ISFSF

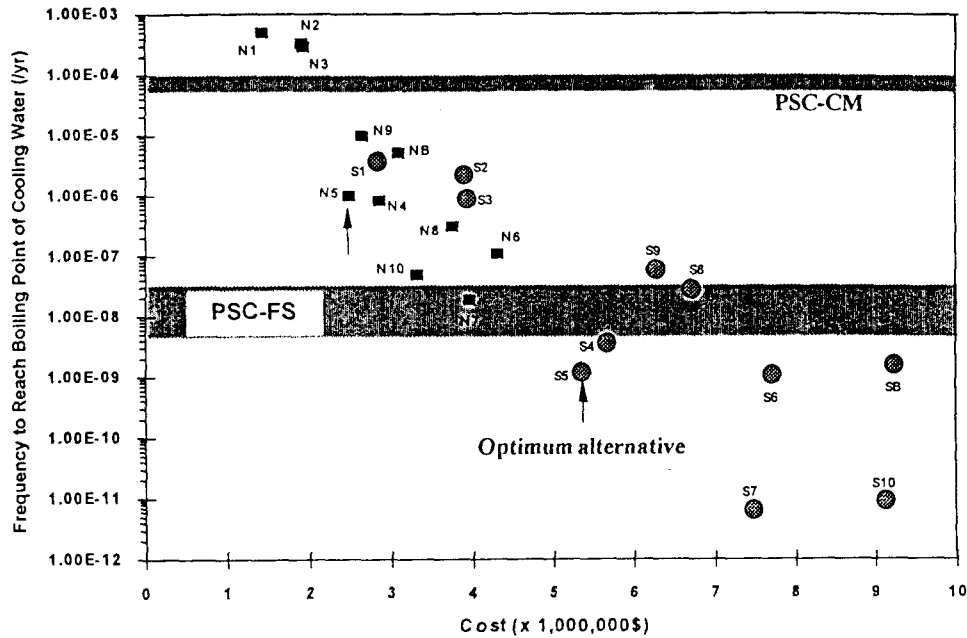


Figure 4. Cost and Effect Analysis for Design Alternatives

참고문헌

- [1] 박현수 외, 사용후핵연료 중간저장시설 건설사업 보고서, KAERI II/PR-1/90, 한국 원자력연구소, (1990).
- [2] Storage Pool Cooling and Cleanup System in ISFSF Conceptual Design, SF-453-DIR-P001, KAERI's ISFSF Conceptual Design Report, Section 4.2.1, (1990).
- [3] R.R.Willie, FTAP : Computer Aided Fault Tree Analysis, ORC-78-14, University of California, Berkeley, (1978).
- [4] 장순홍 외, 원자력발전소의 확률론적 위험도 평가 전산코드 개발, KRC-85N-J05, 한국전력공사 기술연구원, (1987)
- [5] Final Level I PRA for YGN Unit 3-4, CE-NPSD-742, Document No. Z-015-CA-349-00, KAERI's Project Report, (1992)
- [6] R.W.White, Assessment of the Failure Rate and Unavailability of THORP Receipt and Storage Pond Water Cooling System, Doc. No. TRSPSWP/25(BNFL), British
- [7] Regulatory Analysis for the Resolution of Generic Issue 82, NUREG-1353, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., (1989).
- [8] M.S. Peters and K.D.Timmerhaus, Plant Design and Economics for Chemical Engineers, McGraw-Hill Kogakusha Ltd. Tokyo, (1980).