

AHP기법을 적용한 원전 방사성폐기물 관리 연구개발 우선순위 평가

장한수, 신영균, 김상준, 임영규, 박찬국*, 홍정석, 최기련, 권종주**
아주대학교 에너지학과, 한국원자력연구소*, 한전 전력연구원**

A Study on the Evaluation of R&D Priority of Radioactive Wastes Management Applying Analytical Hierarchy Process

H. Chang, Y. Shin, S. Kim, Y. Im, C. Park*, J. Hong, K. Choi, J. Kwon
Dept. of Energy Studies, Graduate School of Ajou Univ., KAERI*, KEPRI**

1. 서론

전력산업구조 개편이 가속화되고 기후변화협약에 따른 이산화탄소 배출저감과 관련된 문제가 에너지 산업분야의 주된 논쟁거리 중 하나로 떠오름에 따라 원자력발전의 장기적 기여도 역시 증대할 것이라는 전망이 지배적이다. 그러나, 원전의 지속적 운영에 필수적인 방사성폐기물(이하 방폐물)처분 부지의 선정은 답보를 거듭하고 있으며, 발전소 내 임시 저장 용량에도 한계가 있다(아주대학교, 1999 ; 최광섭 등, 1995). 따라서, 원활한 원전 운영의 관점에서 방폐물관리 문제 해결은 필수불가결한 요소이며 이를 위해서는 해당 부문의 연구개발에 대한 치밀한 전략이 요구된다. 그러나, 전력산업구조 개편이 진행됨에 따라 민영 발전회사와 시장경쟁이 치열하게 전개되는 상황에서 구조개편 이전과 같은 공익적 차원의 연구개발에 대한 관심 저하가 예상된다. 이러한 양상은 앞서 구조개편을 단행한 선진국에서 이미 관찰되고 있는 상황이다(Dooley, 1998). 따라서, 한정된 연구개발 자원을 효율적으로 활용하기 위해서는 '선택과 집중'이라는 전략적 사고가 요구된다고 할 수 있다.

이에 본 논문에서는 원전의 시장 생존에 대한 장애요인 중 하나로 인식되고 있는 방폐물 관리 부문에 관한 기술 수요 측면에서 연구개발 우선순위를 평가하였다. 이를 위하여 계층적 분석과정(Analytical Hierarchy Process ; AHP)을 적용하였다. 즉, AHP기법을 적용하여 방폐물 관리 부문의 기술 구조를 계층화를 통한 평가기준과 연구개발 분야를 정의한 다음, 원전 종사자 및 해당 분야의 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하였다. 마지막으로 AHP 분석을 통하여 방폐물 관리 부문의 기술수요에 대한 연구개발 투자 우선순위를 도출하였다. 본 논문은 AHP의 제반 이론에 대한 고찰, 방폐물 관리 부문에 대한 평가기준 및 계층구조의 설정, 그에 따른 우선순위 평가, 평가결과 분석, 결론의 순서로 구성하였다.

2. AHP 이론고찰¹⁾

AHP기법은 객관적 평가요인 뿐만 아니라 주관적 평가요인도 수용하는 유연한 의사결정기법으로써 수학적 이론보다는 직관을 바탕으로 하기 때문에 그 논리가 매우 쉽다는 장점을 지닌다(윤재곤, 1996).

1) 본 논문에서는 지면관계상 AHP 이론에 대해 간략히 살펴보기로 하고 자세한 사항은 과학기술정책연구원(1997)을 참조

이와 같은 AHP의 적용절차는 크게 계층구조화작업과 쌍대비교 및 가중치 계산 작업, 대안 평가 및 일관성 검증작업으로 분류되며 그 내용은 다음과 같다(과학기술정책연구원, 1997)

2.1. 계층 구조화

계층구조화란 직접적으로 측정 혹은 평가하기 힘든 최종 목적을 보다 단순화하여 측정 또는 평가가 용이한 복수의 하위목적, 기준, 활동 등으로 분해하는 작업이다. 이를 위한 기계적인 방법론은 없으며 분해된 하위계층을 종합하면 상위계층의 윤곽을 형성하고 계층 내의 중복이 배제되지만 하연 된다. 이러한 문제구조의 계층화를 통하여 해당 시스템의 복잡한 관계를 파악하는데 도움이 되고 기준과 대안들이 적절하게 비교되고 있는가를 인식하는데 도움이 된다. 본 논문의 계층구조는 뒤에서 밝히기로 한다.

2.2. 쌍대비교 및 가중치 계산

쌍대비교는 각 계층의 요인들을 두 개씩 짝지어 상위 계층의 요인에 대한 상대 중요도를 판단하는 과정이다. 이때 이용되는 판단척도는 <표 1>과 같으며 쌍대비교의 과정은 해당 계층의 요인간 비교가 모두 끝날 때까지 반복 수행된다. 그 계층에서의 요인수가 N이라면 쌍대비교의 수는 $nC_2 = N \cdot (N-1)/2$ 가 된다.

<표 1> 쌍대비교를 위한 중요도 척도와 의미

척도	정의	설명
1	동급(equal importance)	두가지 요소가 인접한 상위목표의 기준에서 볼 때 똑같이 중요함
3	약간 중요(weak importance)	한 요소가 다른 요소에 비해 약간 중요함
5	매우 중요(strong importance)	한 요소가 다른 요소에 비해 훨씬 중요함
7	시사적 중요(demonstrated importance)	한 요소의 우위성이 실증되고 있음
9	절대적 중요(absolute importance)	한 요소의 우위성이 절대시 되고 있음
2, 4, 6, 8	위에서 정의된 척도들의 중간	위에서 정의된 척도들 사이의 값이 요구될 때
척도의 역수	요소 a가 요소 b의 중요도를 기준으로 할 때 위에서 주어진 척도로 표시하면 요소 b의 중요도는 요소 a를 기준으로 할 때 앞서 얻어진 척도의 역수로 표현됨	

자료 : Satty, 1986

상위계층의 측면에서 하위계층의 요인간 쌍대비교가 모두 끝나면(즉, nC_2 회의 비교가 이루어지면), 하위계층의 한 요인에 대한 차하위계층의 두 요인간 쌍대비교가 수행된다. 이러한 반복과정은 최하위 계층의 요인들까지 수행된다. 결과적으로 쌍대비교가 모두 이루어진 후, 아래의 행렬 A와 같은 쌍대비교 행렬이 만들어질 수 있으며, 이 행렬로부터 가중치벡터 $w^T = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 을 계산할 수 있다.

$$A = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix}$$

행렬 A에 w 를 곱하면 $Aw=nw$ 의 관계식을 얻을 수 있으며 여기서, n 은 행이나 열의 수이며 동시에 $w^T = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 의 최대 고유치(maximum eigenvalue)가 된다. 그리고 $(A-nI)w=0$ 을 만족시키는 w 를 구함으로써 가중치 벡터를 계산할 수 있다. 이를 위해서 고유벡터법(eigenvector method) 등이 알려져 있으며, Expert Choice와 같은 소프트웨어를 이용할 수도 있다.

2.3. 대안 평가 및 일관성 검증

각 평가기준에 대한 대안, 평가기준들 사이의 가중치 벡터가 각각 계산되면, 이들을 곱하여 합산함으로써 각 대안들의 상대적 종합중요도를 계산할 수 있으며 이를 기준으로 대안별 우선순위가 결정된다. AHP의 마지막 과정으로 일관성 검증을 통해 쌍대비교행렬 작성자의 판단에 대한 일관성 정도를 가늠할 수 있다. 일관성이 완벽하게 유지되는 경우, 가중치 벡터(w)의 최대고유값(λ_{max})은 n 이 되며, 행렬 A의 요소간 일관성이 깨지는 경우 λ_{max} 는 n 보다 커지게 된다. 이와 같은 성질을 이용하여 CI(Consistency Index)와 CR(Consistency Ratio)을 아래와 같이 정의한다.

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}, \quad CR = \frac{CI}{RI}$$

이때 RI(Random Index)는 행렬 A의 각 원소에 1~9의 정수중 난수를 부여했을 때의 CI값으로 이는 <표 2>와 같다. 즉, 일관성 비율 CR은 극도로 일관성이 깨졌을 경우의 RI 값에 대한 CI 값의 비율을 의미한다고 할 수 있다. 일반적으로 CR값이 0.1보다 작은 경우에는 우수한 일관성이 유지된 것으로 보며, 0.2까지는 수용할 만한 수준으로 인식하지만 그 이상인 경우는 AHP 계층구조 재설계 또는, 쌍대비교행렬을 다시 작성해야 한다.

<표 2> RI값

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

자료 : 아주대학교, 2000

3. 방폐성폐기물 관리 부문의 기술 개발 분야 평가

3.1. 평가기준 선정

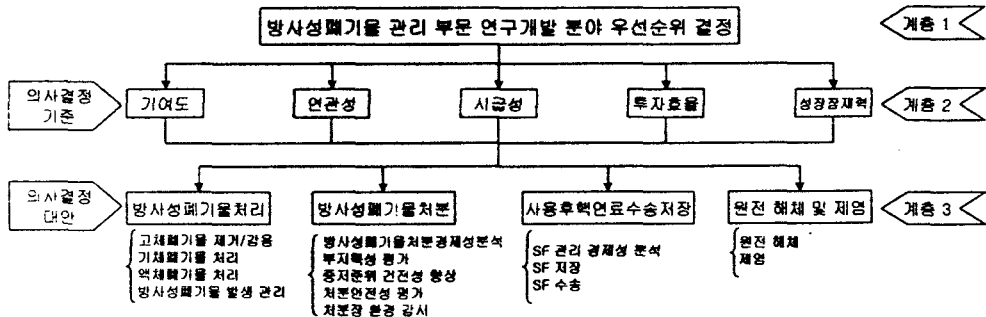
방폐물관리 부문의 연구개발 분야 평가를 위한 평가기준 및 그에 대한 정의는 <표 3>과 같다. 각각의 기준은 경쟁적 시장 환경 하에서 방폐물 관리 부문의 연구개발 분야 평가 시 감안하여야 할 조건으로써 도출되었으며, 원전 종사자 및 해당분야 전문인력의 자문을 거쳤다. 따라서, 방폐물관리 부문의 연구개발 대안 평가 기준으로써 일정 수준의 신뢰성과 타당성을 유지한다고 볼 수 있다.

<표 3> 방폐물관리 부문에 대한 AHP 평가기준 및 정의

평가 기준	정 의
기여도	방폐물관리 분야에 대한 해당 연구개발 대안의 기여 정도
연관성	방폐물관리 분야의 여타 연구개발 대안과의 연관 정도
시급성	연구개발이 시급한 정도
투자효율	연구개발 시 투자 대비 이득의 정도
성장잠재력	연구개발 후 해당 대안의 성장 가능성

3.2. 계층구조의 설정

위에서 설정된 평가기준과 방폐물 관리 부문의 연구개발 분야로 구성된 계층구조는 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 방사성폐기물 관리 부문의 AHP 계층구조

[그림 1]에 나타난 바와 같이 각각의 평가기준에 대한 쌍대비교의 대상이 되는 연구개발 분야는 4가지로 분류되며(방폐물 처리, 방폐물 처분, 사용후핵연료수송저장, 원전 해체 및 제염) 각 분야별 하위기술군은 2~6개로 분류하였다. 이러한 분류 역시 앞선 평가기준 도출과정과 마찬가지로 전력산업 구조개편에 따른 경제적 시장환경 조성을 전제로 하고, 원전 종사자 및 해당분야 연구 전문인력의 자문을 거쳐 도출하였다. 따라서, [그림 1]과 같은 방폐물관리 부문의 AHP 계층구조는 설문 의의성을 일정 수준 유지시킬 수 있는 타당성과 신뢰성을 가지고 있다고 볼 수 있다. 여기서, 고준위 폐기물 관리의 원전 운영과 직접 연관되는 분야가 아니므로 본 논문의 계층구조에서는 제외하였다.

3.3. 기술 개발 분야의 평가

3.3.1. 우선순위의 평가

상위계층의 평가기준을 바탕으로 하위계층 요소들의 상대적인 중요도 평가를 위하여 쌍대비교를 실시하였다. 쌍대비교의 척도는 9점척도를 이용하였으며(<표 1> 참조), 이는 AHP에서 통상적으로 이용되는 척도법이다(이병욱, 1998). 한편, 우선순위 결정을 위한 의사결정 그룹은 한국수력원자력(주)에 근무하는 원전 현장 종사자로 설정하고 평가를 의뢰하였다. 평가그룹을 자세히 살펴보면 <표 4>와 같다.

<표 4> AHP 설문항목별 평가그룹

설문항목	평가기준	방폐물관리 부문 연구개발 분야
평가그룹	각 발전소 임원급 10인	각 발전소 해당분야 간부급 9인

<표 4>에 나타난 바와 같이 평가기준은 임원급으로, 연구개발 분야는 간부급으로 각각의 평가그룹을 달리하였다. 즉, 상위계층은 임원급, 하위 계층은 현장과 근접한 근무자에게 평가하도록 함으로써 경영진과 현장의 의견을 동시에 반영하여 평가에 대한 편향을 줄이면서 시스템 차원의 접근을 시도하였다.

3.3.2. 복수평가자 자료의 결합

위에서 밝힌 바와 같이 평가기준에 대해서는 10인, 연구개발 분야에 대해서는 9인을 평가그룹으로 선정하였으므로 각각의 쌍대비교 행렬은 평가기준에 대해서는 10개, 연구개발 분야는 9개가 된다. 이러한 경우, 각 쌍대비교 행렬의 성분에 대한 기하평균으로 결합하여 하나의 행렬을 만든다. 즉, k번째 평가자의 판단행렬이 $A_k = (a_{ijk})$ 라면 판단자 n명이 결합된 판단행렬은 다음과 같다(이병욱, 1998).

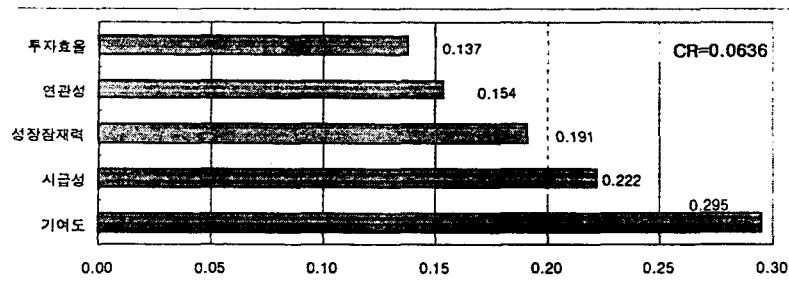
$$\bar{A} = (\bar{a}_{ij}) \quad \text{단, } \bar{a}_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n a_{ijk} \right)^{1/n}$$

4. 평가결과 및 분석

다음은 설문결과 나타난 평가기준 및 각 평가기준에 따른 연구개발 분야의 상대적 중요도이다.

4.1. 평가기준의 상대 중요도

방폐물 관리 부문 연구개발 분야의 상대적 중요도 평가를 위한 5개 기준간 상대적 중요도는 [그림 2]와 같다.



[그림 2] 평가기준의 상대적 중요도

[그림 2]에 나타나는 바와 같이 기여도를 가장 중요한 기준으로 평가하였으며 시급성, 성장잠재력, 연

관성, 투자효율 순서의 결과를 보이며 CR은 0.0636으로 평가의 신뢰도를 확보하고 있다.

4.2. 기술 개발 분야별 상대 중요도

각 평가기준에 따른 4개의 기술 개발 분야별 중요도와 종합중요도는 다음과 같다.

4.2.1. 평가기준별 상대 중요도

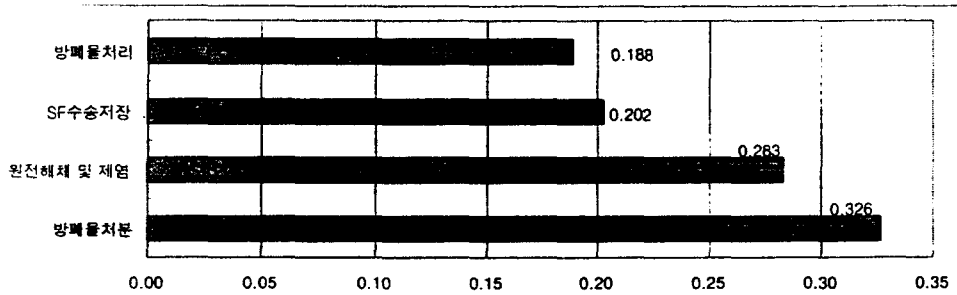
방폐물 관리 부문의 연구개발 분야의 평가기준별 상대적 중요도는 <표 5>와 같다. 하위 기술 개발 분야를 기준으로 각각의 상대적 중요도 평가결과를 살펴보면 방폐물처분이 기여도, 연관성, 시급성, 투자효율 측면에서 가장 중요한 것으로 나타났으며 성장잠재력 측면에서는 두 번째로 중요한 것으로 인식되었다. 원전해체 및 제염은 기여도, 연관성, 투자효율 측면에서 두 번째로 중요한 것으로 나타났으며 성장잠재력 측면에서는 가장 중요한 것으로, 시급성 측면에서는 중요도가 가장 낮은 것으로 평가되었다. 방폐물처리와 사용후핵연료수송저장 분야는 전체적으로 상대적 중요도가 낮은 것으로 인식되었으나, 시급성 측면에서 사용후핵연료수송저장 분야는 두 번째로 중요한 것으로 평가되었다. 한편, 평가의 일관성을 나타내는 CR은 모두 0.1 이하로 나타나 평가그룹의 일관된 설문 응답 성향을 보여주고 있다.

<표 5> 평가기준별 상대적 중요도

연구개발 분야	평가 기준				
	기여도	연관성	시급성	투자효율	성장잠재력
방폐물처리	0.2010(③)	0.1720(③)	0.2164(③)	0.1712(④)	0.1612(④)
방폐물처분	0.3000(①)	0.3743(①)	0.3553(①)	0.3237(①)	0.2973(②)
사용후핵연료수송저장	0.1993(④)	0.1569(④)	0.2355(②)	0.2084(③)	0.2013(③)
원전해체 및 제염	0.2997(②)	0.2968(②)	0.1928(④)	0.2968(②)	0.3402(①)
CR	0.0308	0.0128	0.0238	0.0219	0.0126

4.2.2. 종합 상대적 중요도

최종적으로 평가기준 전체적 측면에서 고려한 기술 개발 분야의 상대적 중요도는 [그림 3]과 같다.



[그림 3] 평가기준 전체를 고려한 상대적 중요도

[그림 3]에 나타나듯이 평가기준 전체를 고려하였을 때 방폐물 처분이 가장 중요한 기술분야로 인식

되었으며, 다음으로 원전해체 및 제염, 사용후핵연료수송저장, 방폐물처리 의 순서로 중요도를 인식하는 것으로 나타났다. 그리고, [그림 3]에 명확히 구분되어 나타나듯이 4개의 분야 중 상위 두 개의 분야가 하위 분야보다 중요하게 인식되는 정도가 현저하였다.

5. 결론

전력산업 구조 개편, 기후변화협약 등으로 인하여 에너지시장에 대한 원자력발전의 장기적 기여도 증대라는 긍정적 전망이 가능하다는 것은 주지의 사실이다. 그러나, 이러한 전망을 어둡게 하는 요소 중 하나인 방폐물 관리의 문제는 경쟁적 시장환경에 대비한 원자력발전의 돌파구(breakthrough) 마련을 위해서도 극복하여야 할 문제이다. 이에 따라 방폐물 관리 부문의 '선택과 집중'을 통한 비용효과적(cost-effective) 연구개발 전략은 필수적이다.

이러한 문제의식을 바탕으로 본 논문에서는 방폐물 관리 부문에 대한 연구개발 우선순위를 평가하기 위하여 AHP기법을 적용하였다. 즉, 방폐물 관리 부문에 대한 평가기준과 하위 기술 개발 분야의 계층구조를 설정하고 설문조사를 시행하였다. 계층구조는 원전 종사자 및 해당분야 전문인력의 자문을 바탕으로 설정하여 설문 의의성과 결과의 신뢰도를 높일 수 있도록 하였다. 설문 조사 대상은 평가기준은 원전의 임원급, 연구개발 분야는 원전의 간부급으로 선정하여 편향을 줄이는 동시에 시스템 차원의 접근을 시도하였다. 여기서 원전 종사자를 주된 대상으로 설문조사를 실시하여 그 실용성을 향상시키는 작업을 병행하였다. 이러한 과정을 거쳐 도출된 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 방폐물 관리 부문의 연구개발 분야에 대한 평가기준의 상대적 중요도는 기여도, 시급성, 성장잠재력, 연관성, 투자효율의 순서로 나타났다. 이는 전력시장 환경이 점차 경쟁적으로 바뀔 것이라는 점을 감안하여 투자효율이라는 기준이 일정 수준 이상의 중요도를 나타낼 것이라는 예상과는 정반대의 결과였다. 그러나, 방폐물 관리 부문에 대한 연구개발은 이윤 획득 차원의 문제가 아닌 원전의 지속적 운영을 위해서 반드시 해결하여야 하는 문제라는 점을 인식한다면 수용 가능한 결과로 보여진다.

둘째, 각각의 평가기준에 따른 연구개발 분야의 상대적 중요도를 도출하였으며 그에 따른 종합적 중요도는 방폐물 처분, 원전해체 및 제염, 사용후핵연료수송저장, 방폐물 처리의 순서로 나타났다. 이는 방폐물 처분 분야의 기술이 방폐물 관리 부문에서 최상위의 전략적 개발 대상이라는 점을 의미하며, 원전해체 및 제염 분야도 수위를 차지하는 점은 향후 폐로 등에 대비한 연구개발 필요성을 나타낸다고 보여진다.

셋째, AHP 평가의 일관성 정도를 나타내는 CR값은 모두 0.1 이하로 나타나 신뢰할 만한 수준임을 알 수 있었다. 또한, 가장 큰 CR 값이 0.0636으로써 전문가 집단에 대한 AHP는 보다 엄격한 CR값을 적용하여야 한다는 주장(이경진, 2001)을 감안하여도 상당수준의 신뢰성을 확보하였음을 알 수 있었다.

마지막으로, AHP 분석에 있어서 평가기준 또는 계층구조 설정의 객관성에 대한 논란은 상존하는 것으로서 본 논문에서는 해당 분야 종사자에게 자문을 거친 후 계층구조를 도출하여 객관성을 확보하려는 시도를 하였다. 그러나, 향후 에너지시장 환경이 새롭게 변한다면 본 논문에서 제시된 계층구조에도 결함이 발생할 소지가 있다. 따라서, 미래에 새로운 에너지시장 환경이 조성에 따른 적절한 방폐물 관리 부문의 연구개발 전략 도출을 위해서는 해당 분야에 대한 예의 주시가 요구될 것이다.

참고문헌

- 과학기술정책연구원, 국가연구개발사업의 연구기획체계 및 방법에 관한 조사연구 (1997).
- 아주대학교 · 한전 전력연구원, 원자력발전사업의 기술개발정책 수립을 위한 수요조사 연구, (주)한국수력원자력 위탁과제 연구보고서 (2002).
- _____, 에너지기술개발의 전략적 접근방법론 개발에 관한 연구, 산업자원부 학술진흥과제 연구보고서 (2000).
- _____, 방사성폐기물 처분부지선정의 이론적 기반조성에 관한 고찰, 기초전력공학공동연구소 위탁과제 연구보고서 (1999).
- 윤재곤, AHP 기법의 적용효과 및 한계점에 관한 연구, 한국경영과학회지, 21(3), pp. 109~125 (1996).
- 이경전 · 고길곤, AHP에서의 응답일관성 모수의 통계적 특성과 활용 방안, 한국경영과학회지, 26(4), pp. 71~82 (2001).
- 이병욱 · 임채영, AHP를 이용한 원자력 연구개발 대안평가, 공업경영학회지, 21(48), pp. 291~297 (1998).
- 최광섭 · 김창락 · 이명찬 · 김진웅 · 이지훈, 국내원전의 방사성폐기물 발생량 예측과 폐기물 종류별 동굴내 배치계획, 원자력학회지, 27(2), pp. 260~268 (1995).
- Dooley, J.J, Unintended Consequences : Energy R&D in a Deregulated Energy Market, Energy Policy, 26(7), pp. 547-555 (1998).
- Satty, T.L., Axiomatic Foundation of the Analytical Hierarchy Process, Management Science, 32(7), p. 843, (1986).