

다요소효용함수이론과 계층화분석법을 이용한 핵연료주기 시스템분석

권은하, 고원일

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

kwoneh@kaeri.re.kr

지난 1979년 고리 1호기의 상업운전을 시작으로 우리나라에서 원자력산업계는 급격히 성장하여 현재 20기의 원자력발전소를 운영 중에 있으며, 우리나라 전력생산의 약 40%를 차지하고 있다. 이러한 원자력에 대한 의존도는 최근 고유가시대가 도래하고 지구온난화현상이 지속되면서 계속 확대될 것으로 보인다. 그러나, 원자력발전의 확대는 필수불가결하게 사용후핵연료의 발생량을 증가시킨다. 현재 우리나라에서는 연간 750 여톤의 사용후핵연료가 발생하며, 이미 누적되어 있는 사용후핵연료만도 약 8,700 여톤에 이르고 있다.

그럼에도 불구하고, 현재까지 사용후핵연료의 관리에 대한 정책방향이 설정되어 있지 않으며, 다만 지난 2004년 원자력위원회에서는 국민적 공감을 얻기 위한 방안으로 공론화과정을 거쳐 사용후핵연료의 관리정책을 수립하기로 결정한 바 있을 뿐이다. 소내 저장용량의 한계(2016년에 포화 예정)를 고려할 때 사용후핵연료 관리정책의 수립이 시급히 요청되고 있다.

사용후핵연료에 관한 국가의 관리정책을 수립하기 위해서는 향후 우리나라에 적용가능한 핵연료주기 시나리오를 설정하고, 이를 평가하는 작업이 선행되어야 한다. 이 과정에서 지속가능성, 환경친화성, 핵확산저항성, 경제성, 그리고 기술성 등 여러 측면을 고려하여야 한다. 그러나, 모든 정책결정이 그러하듯이 하나의 특정 핵연료주기가 모든 측면에서 우수할 수는 없으며, 다만 최소의 비용으로 그 편익을 최대화할 수 있는 핵연료주기를 추구하는 것이 이상적이다. 이러한 점을 감안하여, 본 연구에서는 의사결정의 목표, 또는 평가기준이 다수이며 복합적인 경우 상호 배반적인 대안들의 체계적인 평가를 지원하는 의사결정기법의 하나인 다요소효용함수이론(MAUT: Multi-Attribute Utility Theory)과 계층화분석법(AHP: Analytic Hierarchy Process)을 이용하여 향후 우리나라에 적용가능한 네 가지의 핵연료주기 시나리오, 즉 첫째 PWR 사용후핵연료를 중간 저장한 후 재활용하지 않고 영구처분하는 '직접처분주기', 둘째 PWR 사용후핵연료를 DUPIC 핵연료로 가공하여 CANDU에서 재사용하고 DUPIC 사용후핵연료는 영구처분하는 'DUPIC 핵연료주기', 셋째 PWR 사용후핵연료를 습식재처리(PUREX)한 후 분리된 플루토늄은 MOX 핵연료로 가공하여 PWR에 재사용하고 MOX 사용후핵연료는 영구처분하는 '열중성자 재활용주기', 넷째 고온 전해분리(pyroprocessing)를 통하여 금속핵연료를 만들어 고속로(SFR)에서 재사용하면서 고독성 핵종을 소멸시키는 'GEN-IV 핵연료주기'를 종합적으로 분석하였다.

각각의 시나리오를 분석하여 우리나라에 적용하기 위한 최적의 핵연료주기를 도출하기 위하여 지속가능성·환경친화성·핵확산저항성·경제성 및 기술성의 다섯 가지 요소를 고려하였으며, 각 요소는 다시 천연우라늄 소요량(지속가능성), 처분대상 사용후핵연료, 처분대상 마이너 악티나이드, 고준위폐기물 지하굴도량(환경친화성), 사용후핵연료 조성, 플루토늄 재고량(핵확산저항성), 핵연료주기 비용(경제성), 기술개발 가능성, 인허가 난이도(기술성) 등 1 내지 3개의 세부요소로 나누었다 (그림 1 참조).

이들 요소는 서로에 대하여 상호효용독립이며, 덧셈독립의 성질을 가진다. 따라서, 본 연구에서의 다요소효용함수는 다음과 같이 표현된다.

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i)$$

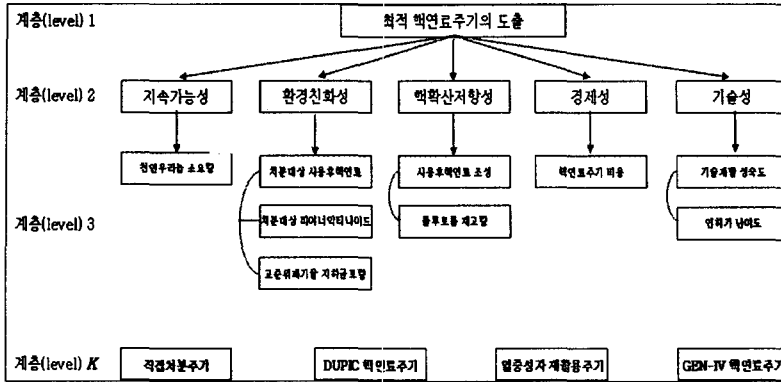


그림 1 핵연료주기 평가를 위한 요소계층구조

50-50 로터리 방법을 이용하여 각 요소에 대한 효용함수를 다음과 같이 부과하였다. 또한, 계층분석과정에서의 가중치 산정방법(고유벡터법)을 사용하여 각 요소의 상대적 중요도를 계산하여 $k1 = 0.4162$, $k2 = 0.1611$, $k3 = 0.0986$, $k4 = 0.2618$, $k5 = 0.0624$ 을 구하였다. 이 때, 각 요소에 대한 세부요소의 경우, 상대적 중요도는 서로 동일하다고 가정하였다.

표 1 요소별 효용함수

평가항목	중요도	평가지표	중요도	범위	목표	기호	효용함수
지속가능성	0.416	천연우라늄 소요량 (tU/TWh)	1	13~21	minimize	U1	$u1(x) = 0.0017x^2 - 0.0826x + 1.0157$
환경친화성	0.161	저분대상 사용후핵연료 (m3/TWh)	0.33	0~3.8	minimize	U2	$u2(x) = 1.028e^{-x/0.6148} - 0.0118$
		저분대상 고준위폐기물 (m3/TWh)	0.33	0~2.6	minimize	U3	$u3(x) = -2.2546x + 0.8021$
		고준위폐기물 지하감포량 (m3/TWh)	0.33	0.4~44.9	minimize	U4	$u4(x) = -0.0003x^2 - 0.0074x + 1.0109$
경제성	0.099	핵연료주기 비용 (mills/kWh)	1	6.45~7.35	minimize	U5	$u5(x) = 31.412e^{-x/0.64} - 0.325$
핵확산저항성	0.262	사용후핵연료 조성	0.5	0.5~1	maximize	U6	$u6(x) = -4.6086x^2 + 8.8029x - 3.2047$
		플루트륨 재고량 (kgHM/TWh)	0.5	0.08~17	minimize	U7	$u7(x) = -0.1956 \ln(x) + 0.5579$
기술성	0.062	기술개발 성숙도	0.5	0.4~1	maximize	U8	$u8(x) = 1.5592x^2 - 0.5557x - 0.0149$
		인허가 난이도	0.5	0.5~1	minimize	U9	$u9(x) = -3.8143x^2 + 3.7742x + 0.0653$

위의 결과를 바탕으로 직접처분주기, DUPIC 핵연료주기, 열중성자 재활용주기, GEN-IV 핵연료주기 등 네 가지의 핵연료주기 시나리오를 종합적으로 평가한 결과, $u(\text{직접처분주기}) = 0.199$, $u(\text{DUPIC 핵연료주기}) = 0.254$, $u(\text{열중성자 재활용주기}) = 0.261$, $u(\text{GEN-IV 핵연료주기}) = 0.471$ 로 GEN-IV 핵연료주기가 가장 우수한 것으로 나타났다.

참고자료

[1] T. L. Saaty, *Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process*, Vol. 1, AHP Series (extended edition), RWS Publications, 1990.
 [2] R.L. Keeney and H. Raiffa. *Decision with Multiple Objectives: Preference and Value Tradeoffs*. Cambridge University Press, New York, 1993.