

KALIMER에 대한 핵연료 주기 성능평가

Study on evaluation of nuclear fuel cycle performance for KALIMER core design

차동선, 김명현

경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리

요약

KALIMER의 3가지 설계안에 대해 개발된 핵연료 성능평가 지수를 활용하여 핵연료 증식성, 핵확산 저항성, 사용후 핵연료의 방사성 독성을 평가하였다. 각각 독립된 평가 항목의 우열이 상이하게 다르기 때문에 쉽게 최상의 성능을 갖는 핵연료를 판별할 수 없었다. 따라서 각 성능평가지수에 가중치를 적용한 종합성능평가 지수(G-value)를 도입하였다. 핵연료 증식성, 핵확산 저항성, 방사성 독성에 대한 시나리오별 가중치를 적용한 종합 성능평가 지수를 사용하여 KALIMER 설계안에 대해서 비교하였다.

Abstract

Three core design of KALIMER is evaluated by applying performance index about nuclear fuel breeding, non-proliferation resistance, radiotoxicity of spent fuel. It is difficult to select best nuclear fuel, because each evaluated items have different superiority. Therefore, in this study, G-value(Global efficient index) is introduced with weighting factor of each efficiency. 3-type of KALIMER core design is compared by G-value in the several cases.

1. 서론

최근에 미래형 신형원자로로서 새로운 개념들이 많이 소개되고 있다. 이런 새로운 개념의 원자로의 핵주기는 경제성과 핵확산 저항성, 핵변환의 극대화, 사용후 핵연료의 독성 저감등이 함께 최적화되어야 한다. 그럼에도 불구하고 정량화 기법 내지는 성능을 판별할 종합 설계성능 지수가 개발되어 있지 않다. 정량화 된 종합 성능평가 지수가 개발되면 노심설계 및 핵연료 설계가 최적화 될 수 있어서 경제적인 노심설계, 안전한 노심설계 및 핵연료 설계뿐만 아니라 신형 원자로의 연구, 개발에 있어 설계 방향을 설정할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 평가지수를 이용하여 현재 설계된 KALIMER 노심에 대하여 적용하여 보았다.

2. KALIMER 설계안

KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor)는 전기출력 150MWe, 금속연료, 소듐냉각

Pool형 원자로이며, 설계목표로 Enhanced Safety, Competitive Economics, Proliferation Resistance, Environmental Friendliness을 갖는 액체금속로이다. 그림 1은 KALIMER 노심 개요이다.

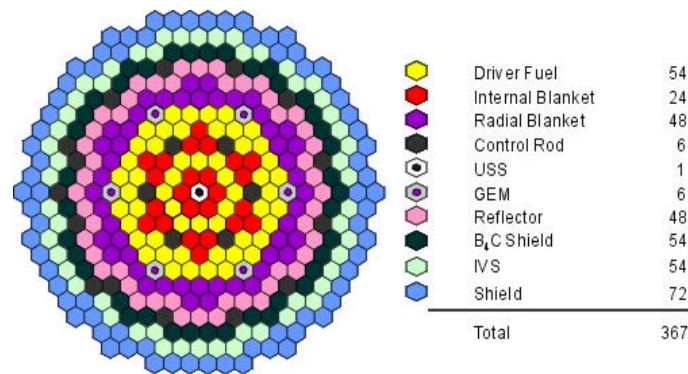


그림 1. KALIMER 노심개요

2.1 우라늄 금속연료 노심

노심설계 개선을 통하여 비순환 핵연료주기를 사용한 우라늄 금속연료 평형노심의 평균증식비는 0.67, 노심 평균 방출 연소도는 61.6 MWD/kg 이며, 노심영역에 대한 음의 소듐기화반응도가는 노심의 고유안전성 확보에 매우 양호함을 보이고 있다.

2.2 증식특성 노심

증식특성 노심은 반경방향 비균질 노심의 형태로서, 앞서 개발된 우라늄 금속연료노심과 비슷한 크기와 핵열수력 설계조건 하에서 경제성과 안전성을 확보하도록 개발되었다. 증식특성 노심의 평균 증식비는 1.18, 최대 핵연료 방출연소도는 116.9 MWD/kg이다. 평형주기 분석을 통한 노심 핵적성능 분석 결과는 증식특성 노심이 설계조건을 만족하면서 고증식비의 설계목표를 달성하고 있으며, 경제적이고 안전한 운전이 가능함을 보이고 있다.

2.3 Breakeven 노심

증식특성을 보유하는 다양한 노심 설계개념을 개발하려는 요구에 의하여, 재순환 평형핵연료주기에서 fissile 핵연료 물질의 외부공급이 필요 없이 자급자족할 수 있는 기능의 breakeven 노심 개념설계가 수행되었다. 먼저 수행된 증식비 1.18의 증식특성 노심 개념설계에서 적용된 설계기준이 동일하게 적용되었으며, 증식비는 현재의 건식 재처리를 사용하는 후행 핵연료주기에서의 기술 수준을 적용하여 자급자족할 수 있도록 1.05 정도가 목표로 설정되었다.

표 1. KALIMER 노심 특성

	우라늄금속연료노심	증식특성노심	Breakeven 노심
핵연료	U-Zr 금속연료.	U-Pu(TRU)-Zr 금속연료	U-Pu(TRU)-Zr 금속연료
농축도(%)	15.4/20	26.3	30
핵연료주기	비순환 핵연료주기	TRU 재순환주기	TRU 재순환주기
증식비(BR)	0.67	1.18	1.05

3. 핵연료 성능 평가

3.1 핵연료 증식 특성 성능 평가 지수

원자로에서 U-233, Pu-239, Pu-241 등의 핵분열성 물질은 TH-232, U-238, Pu-240 등과 같은 핵연료성 물질이 중성자를 포획함으로써 생성된다. 핵연료성 물질의 양을 증가시키는 순수 핵연료 증식성으로서, 초기 장전된 핵분열성 물질량보다 연소 후 방출되는 핵분열성 물질량이 많은 것을 뜻한다. 핵분열성 물질의 생성과 소멸을 나타내는 척도로서 아래와 같은 증식율(Breeding Ratio, BR) 혹은 전환율(Conversion ratio, CR)을 주로 사용한다.

$$BR \equiv \frac{\text{Rate at which fissile isotope is produced}}{\text{Rate at which fissile isotope is destroyed}} \quad (1)$$

$$CR \equiv \frac{\text{Total fissile material production rate}}{\text{Total fissile material consumption rate}} \quad (2)$$

그러나 BR과 CR은 시간에 따라 변하기 때문에 경우에 따라서 증식 혹은 전환시키는 원자로의 설계특성을 대변할 수 없기 때문에 일정기간 동안의 원자로 특성을 보여주기 위해 핵분열성 물질 총량 변화 비율(Overall Fissile Inventory Ratio, FIR)과 핵분열성 물질 이득(Fissile Gain, FG)을 사용하여 핵연료 증식특성을 평가하였다.

$$FIR \equiv \frac{\text{Fissile fuel amount at the end of a refueling period}}{\text{Initial fissile amount}} \quad (3)$$

$$FG \equiv \frac{\text{Discharged fissile amount} - \text{Feed fissile amount}}{\text{Feed fissile amount}} \quad (4)$$

표 2. KALIMER 로심 특성별 핵분열성 물질 장전량과 방출량

		우라늄 금속연료 노심	증식특성 노심	Breakeven 노심
Burnup(EFPD)		320	465	465
Feed fissile amount (kg)	U-235	2.774E+2	5.081E+0	7.008E+0
	Pu-239	1.982E+1	2.001E+2	4.386E+2
	Pu-241	5.993E-3	3.799E+0	1.422E+1
Discharged fissile amount (kg)	U-235	2.570E+2	4.605E+0	6.582E+0
	Pu-239	3.306E+1	2.061E+2	4.400E+2
	Pu-241	1.387E-2	4.164E+0	1.408E+1

표 3. KALIMER 특성 로심별 FIR, FG 지수치

	우라늄 금속연료 노심	증식특성 노심	Breakeven 노심
평균 증식비	0.67	1.05	1.03
FIR	0.98	1.03	1.00
FG	-0.024	0.028	0.00

KALIMER 노심의 1/6노심에 대해 핵연료 증식성 지수 FIR, FG를 계산하였다. FIR 값은 낮게 계산되었으나, 평균 증식비에서 보여주는 것과 같이 우라늄 금속연료 노심은 증식이 안일어났고 증식특성 노심과 Breakeven 노심은 $FG \geq 0$ 임을 볼 수 있었다.

3.2 핵확산 저항성 특성 성능 평가 지수

핵확산 저항성 문제에 있어서 사용후 핵연료에서 추출되는 핵분열성 물질이 핵무기로의 전환 또는 이용 가능하다는 것이 위협성으로 간주되고 있다. 사용후 핵연료에 있는 플루토늄으로 얼마나 효과적으로 또는 효율적으로 핵무기를 만들 수 있는지가 문제이다. 핵분열성 물질의 질은 아래의 세가지 특성에 대해 평가될 수 있다.

① 임계질량

임계질량을 평가하는 지수로써 Bare Critical Mass(BCM)를 활용하였다. BCM는 사용후 핵연료에서 추출된 플루토늄의 조성비로 무반사체 임계 체적구형 제조에 필요한 플루토늄의 최소질량이다. Critical Mass Value는 Vacuum Reflector를 가진 플루토늄 금속구에 대해 MCNP로 계산하였다

표 4. 각 노심별 플루토늄 조성과 BCM 지수치

Nuclide	Weapon-Grade	우라늄 금속연료 노심	증식특성 노심	Breakeven 노심
Pu-238 조성비율	0.00012	0.00001	0.0062	0.011
Pu-239 조성비율	0.94	0.98	0.79	0.71
Pu-240 조성비율	0.058	0.019	0.18	0.24
Pu-241 조성비율	0.0035	0.00041	0.016	0.023
Pu-242 조성비율	0.00022	0.00001	0.0072	0.018
BCM (kg)	10.51	10.26	12.78	10.93
Ratio to WG	1	0.98	1.22	1.04

우라늄 금속연료 노심은 BCM에 가장 영향을 주는 Pu-239의 조성비율이 98%이라, W-G보다 더 적은 양의 BCM를 갖는다. 증식특성 노심과 Breakeven 노심은 Pu-239의 조성비율이 W-G보다 낮아서 더 많은 BCM를 갖는다.

② 자발 핵분열 중성자원

자발 핵분열 중성자원을 평가하는 지수로써 Spontaneous Fission Neutron Source(SNS)를 활용하였다. SNS는 사용후 핵연료에서 추출된 플루토늄의 조성비에서 플루토늄 단위질량당 방출되는 중성자 방출율이다. SNS에 의해 생성된 중성자는 핵무기물질의 효율을 저하시키는 요소이며, 핵무기 제조 후 순도를 유지시키기 위해서는 SNS의 값이 작아야 유리하다.

표 5. Plutonium Grade에 따른 SNS 지수치

Nuclide		spontaneous fission rate (#/g-sec)	Weapon-Grade	우라늄 금속 연료노심	증식특성 노심	Breakeven 노심
Pu-238		2600	0.31	0.026	16.12	28.60
Pu-239		0.022	0.021	0.022	0.017	0.016
Pu-240		910	52.78	17.29	163.80	218.40
Pu-241		0.049	0.00017	0.000020	0.00078	0.0011
Pu-242		1700	0.37	0.017	12.24	30.60
SNS (Bq/g)	수계산 (Bq/g)	-	53.48	17.36	192.18	277.62
	ORIGEN-2 (Bq/g)	-	52.86	17.24	182.9	250.2
	ERRER(%)	-	- 1.16	- 0.69	-4.83	-9.88
Ratio to WG		-	1	0.32	3.59	5.19

또한 SNS 값에서도 우라늄 금속연료 노심의 조성비율이 Pu-239에 98%이나 Spontaneous fission rate가 매우 낮은 값으로 설정되었기에 결과의 SNS값은 낮게 나타났다.

③ 열량방출

열량방출을 평가하는 지수로써 Thermal Generation(TG)를 활용하였다. TG는 사용후 핵연료에서 추출된 플루토늄의 조성비에서 단위질량당 발생하는 알파붕괴열을 나타낸 지수로 물질 내에서 플루토늄 단위질량당 발생하는 열량을 표시한다. TG가 높은 물질로 만약 폭탄을 제조할 경우 제조공정에서 잔열처리공정이 필요하므로 제조상 어려움을 가중시킨다.

표 6. Plutonium Grade에 따른 TG 지수치

Nuclide		Specific decay heat (watts/kg)	Weapon-Grade	우라늄금속 연료노심	증식특성 노심	Breakeven 노심
Pu-238		560	0.07	0.0074	3.48	6.43
Pu-239		1.9	1.78	1.86	1.49	1.34
Pu-240		6.8	0.39	0.128	1.24	1.64
Pu-241		4.2	0.01	0.0017	0.067	0.095
Pu-242		0.1	0.0	6.06E-7	0.0071	0.0018
TG (W/kg)	수계산 (watts/kg)	-	2.25	2.01	6.29	9.51
	ORIGEN-2 (watts/kg)	-	2.22	2.02	6.34	9.58
	ERRER(%)	-	-1.33	0.498	0.795	0.736
Ratio to WG		-	1	0.893	2.795	4.227

표 6을 보면 specific decay heat이 Pu-238에서 매우 높고 KALIMER 노심 중 Pu-238 조성비율이 Breakeven 노심이 가장 높다. 따라서 Breakeven 노심의 경우 핵확산 저항성 측면에 가장 유리함을 알 수 있다.

3.3 방사성 독성 평가

시간에 대한 적분은 시간 종속적인 변수로부터 시간 독립적인 지수를 유도할 수 있는 한가지 방법이다. 여기서 시간 적분값 또는 시간 평균값을 얻기 위해 무한 시간 간격(0년에서 ∞ 까지) 또는 부분 시간 간격(0년에서 1×10^4 년까지 또는 1×10^4 년에서 1×10^8 년까지)에 대해 $R_j(t)$ 를 적분하였다. 무한 시간 간격에 대한 시간 적분 $R_j(t)$ 값은 모핵종 j 로부터 발생하여 인간에 끼치는 전체 방사성독성과 동일하다. 부분 시간 간격에 대한 시간 적분 $R_j(t)$ 값은 인류의 생존 기간동안에 영향을 줄 수 있는 방사성독성을 표현한 것이다.

무한 시간 간격 0년에서 ∞ 년까지 $R_j(t)$ 의 시간 적분값은 Ultimate Radio-toxicity Index, I_{Uj} 라 한다.

$$I_{Uj} = \int_0^{\infty} R_j(t) dt$$

방사성독성 연구에 있어서 유리화 폐기물의 수명은 중요하다. 몇 천년이 수명으로 제안되지만 시간에 대한 관점을 만년으로 고려하는 것이 적절하다. 그래서 단기간 위험도 평가를 위해서 0년에서 1×10^3 년으로 시간 간격을 정하였다. 이 시간 간격동안 적분된 총 방사성독성 지수를 Short-term Radio-toxicity Index, I_{Sj} 라 한다.

$$I_{Sj} = \int_0^{1 \times 10^3 y} R_j(t) dt$$

I_{Sj} 는 방사성 핵종이 유리화 폐기물에 있는 동안의 총 방사능을 나타낸다. 또 다른, 시간에 대한 관점으로서 $Np-237$ 과 모든 딸핵종이 안정 핵종으로 될 때까지의 시간과 동일한 천만년(1×10^6)을 선정하였다.

1×10^3 년에서 1×10^6 년까지의 장기간동안 적분된 총 방사성독성 지수를 Long-term Radio-toxicity Index, I_{Lj} 라 하고 정의는 다음과 같다.

$$I_{Lj} = \int_{1 \times 10^3 y}^{1 \times 10^6 y} R_j(t) dt$$

I_{Lj} 는 유리화 폐기물이 파괴된 후 인간에게 영향을 미칠 수 있는 총 방사성독성을 나타낸다.

그림 2와 같이 KALIMER 세가지 노심에 대해 각각 사용후 핵연료의 핵종마다 큰 방사성 특성을 평가하는 것은 어렵다. 그래서 연구관점과 다음 조건을 만족하는 핵종을 선정하고, KALIMER 각 로심의 사용후 핵연료에 핵종들에 대하여 단주기 및 장주기의 방사능을 계산하였다.

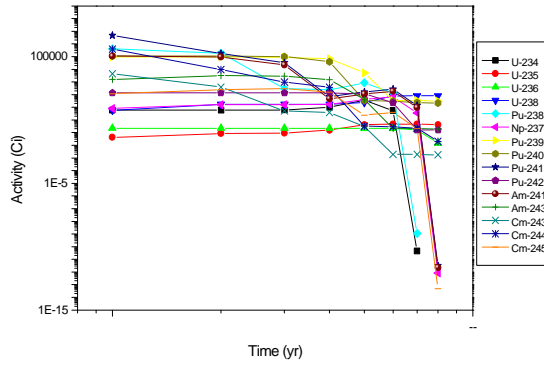


그림 2. Breakeven 로심의 핵종별 Activity

원자번호 92이상의 Actinide 계열 중 KALIMER의 연소 코드인 REBUS code의 연소 사슬에 있는 핵종, 방사능이 강하고, 반감기(Half-life time)가 1년이상인 핵종에 대해 계산을 하였다.

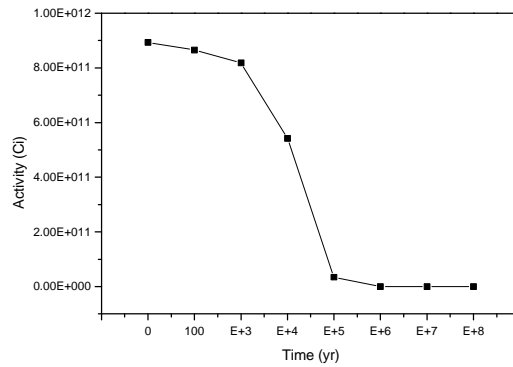


그림 3. Breakeven 로심의 방사성 독성

그림 3는 모든 핵종의 방사능을 합산한 그래프로서 10^4 년을 기준으로 단주기와 장주기로 나누어 적분함으로써 시간에 따른 방사성 독성 평가를 단순화 시켰고 그 결과를 표 7와 그림 4에 나타내었다.

표 7. KALIMER의 방사성 독성 지수치

	우라늄 금속연료 노심	증식특성 노심	Breakeven 노심
Short-term	1.012E+11	6.69E+12	6.96E+12
Long-term	7.70E+11	5.91E+13	3.68E+13

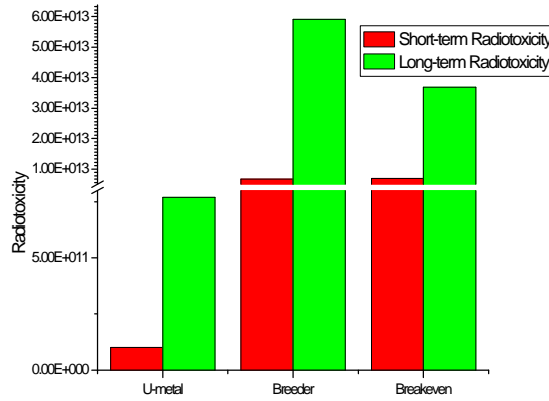


그림 4. KALIMER 특성 로심별 방사성 독성

4. 종합 성능평가 지수

가중치를 적용한 종합평가지수(G-value)의 정의 및 식은 식 (5)과 같다. G-value는 각 평가 항목의 지수 값을 기준이 되는 특정 핵연료의 지수 값과 비교한 상대값에 가중치를 곱함으로써 얻는다. 가중치는 각 평가 항목에 따라 다르다. 또한 가중치는 평가자의 평가 방향에 따라 조절할 수 있다. 예를 들어, 핵연료의 증식성, 핵확산저항성, 핵변환 가능성, 방사성 위해도에 각각 0.6, 0.2, 0.1, 0.1을 적용할 수 있다. 이는 평가자의 평가 의도 및 사회적 여건에 따라서 변경 조절할 수 있다.

$$G\text{-value} = \sum_i W_i \left[\frac{f_i - f_{i0}}{f_{i0}} \right] \quad (5)$$

where W_i = weighting factor of index type i ,

f_i = value of index type i ,

f_{i0} = base value of index type i

G-value는 각 평가 항목에 적용되는 가중치의 객관성 및 타당성을 유지하기 위해서는 합리적인 가중치 평가가 필수적으로 필요하다. 본 논문에서는 G-value 평가관점을 경제성, 핵확산 저항성, 방사성 독성의 관점으로 제한하고 평가하였다.

4.1 경제성에 대한 G-value 평가

원자력 발전의 연료로 사용되는 우라늄의 경우 매장량이 한정되어 있지만 우라늄의 사용기술에 따라 생산가능 에너지량이 크게 증가될 수 있다. 즉, 원자로형의 한가지인 액체금속로는 에너지 생산과 동시에 소비된 핵연료보다 더 많은 양의 새로운 핵연료를 생산할 수 있으므로, 기존의 경우로에 비해 핵연료 이용률이 60배 이상에 달하여 유한한 우라늄 매장량으로 생산할 수 있는 에너지량은 거의 무한대이며 부존자원이 없는 우리나라에서는 매우 중요하다. 경제성에 대한 G-value 평가의 가중치는 경제성(FIR), 핵확산 저항성(BCM, SNS, TG), 방사성 독성(I_L , I_S)에 대해서 0.6, 0.2, 0.2으로 적용하여 평가하였다. 그 결과는 아래 표 8에 나타내었다.

4.2 핵확산 저항성에 대한 G-value 평가

원자력 에너지는 아직도 최선의 선택이 아닌 차선 선택에 의한 에너지원으로 취급받고 있다. 그 내면에는 가장 큰 이유중의 하나가 사용후 핵연료 문제이다. 이런 사용후 핵연료에 포함된 우라늄과 플루토늄을 이용하기 위한 재처리기술은 농축기술과 함께 군사적으로 매우 민감한 기술로서, 일부 선진국에서만 독점하고 있다. 핵확산 저항성에 대한 G-value 평가의 가중치는 경제성(FIR), 핵확산 저항성(BCM, SNS, TG), 방사성 독성(I_L , I_S)에 대해서 0.2, 0.6, 0.2으로 적용하여 평가하였다. 그 결과는 아래 표 8에 나타내었다.

4.3 방사성 독성에 대한 G-value 평가

고준위 폐기물에서 군분리 과정을 통하여 장수명 핵종을 99% 회수한 경우에는 약 300년이상 지나야만 천연 우라늄의 독성이하로 감소한다. 이와 같은 회수율이 성취될 경우에는 고준위 폐기물의 독성을 저준위 폐기물의 제도적 관리기간인 300년 이내에 천연우라늄의 독성이하로 감소시킬 수 있음을 의미한다. 환경 친화성에 대한 G-value 평가의 가중치는 경제성(FIR), 핵확산 저항성(BCM, SNS, TG), 방사성 독성(I_L , I_S)에 대해서 0.2, 0.2, 0.6으로 적용하여 평가하였다. 그 결과는 아래 표 8에 나타내었다.

5. 결론

표 8을 보고 각 노심별 비교하였을 때에는 증식성측면에서는 증식특성 노심이 우수하고 핵확산 저항성측면에는 Breakeven 노심이 우수하며, 방사성 독성측면에서는 우라늄 금속연료 노심이 우수하였다. 그러나 각각의 특성에서는 우수하게 평가되었지만 종합적인 측면에서는 평가하기가 어렵다. 핵연료 주기 성능평가 지수(핵연료 증식성, 핵확산 저항성, 방사성 독성)을 KALIMER에 적용함으로써 KALIMER 설계안 별 결과를 비교하여, 설계안의 각 핵연료 성능평가 지수의 우수성을 비교할 수 있었다. 핵연료 주기 특성인 핵연료 증식성, 핵확산 저항성, 방사선 독성에 대하여 평가한 결과는 다음과 같은 결과를 나타냈다. 경제성 측면에서는 FIR의 지수에 0.6의 가중치를 적용하여 Breakeven 노심을 기준으로 비교하였다. 증식특성 노심이 0.045의 값으로 경제성측면에서는 증식특성 노심이 높게 나타났다. 핵확산 저항성(BCM, SNS, TG)에서는 0.6의 가중치를 적용한 결과 Breakeven 노심이 0.0으로 다른 노심보다 높게 나타났다. 방사성 독성측면에는 0.47로 우라늄 금속연료 노심이 높게 나타났다.

표 8. G-value 평가

Index	Breakeven 노심	우라늄 금속 연료노심	증식특성 노심
FIR	1.00	0.98	1.03
BCM (kg)	10.93	10.26	12.78
SNS (Bq/g)	250.2	17.24	182.9
TG (W/kg)	9.58	2.02	6.34
I_S	6.96E+12	1.012E+11	6.69E+12
I_L	3.68E+13	7.70E+11	5.91E+13
G-value	경제성	0.0	-0.33
	핵확산 저항성	0.0	-0.56
	방사성 독성	0.0	0.47

평가자의 관점으로 경제성, 핵확산 저항성, 방사성 독성에 가중치를 주었을 때, 표 8과 같이 가중치의 영향으로 노심별 특성을 나타내었다. 종합 성능평가 지수는 각 핵연료 성능평가 지수의 경

향을 반영하고 있는 것으로 보이나, 추후 종합 성능평가 지수에 대한 연구가 지속적으로 필요하다.

6. 참고문헌

1. Beller, D.E., et al., "A Closed, Proliferation-Resistant Fuel Cycle with Th-U-O₂-Fueled LWRs, Th, U and Np Recycle, and Accelerator-Driven Transmutation of Waste (ATW)," Proc. Int. Conf. on Future Nuclear Systems, Jackson Hole, WY, USA, #158, 1-9, (1999)
2. Iwasaki, T. et al, "Time-integrated Radiotoxicity Index for Study of Transmutation of Long-lived Nuclides," Progress in Nuclear Energy, Vol. 32, #3/4, 449-456, (1998)
3. 박창규 외, "KALIMER Design Conceptual Report," KAERI/TR-888, (1997)
4. 한도희 외, "KALIMER 예비 개념설계 보고서," KAERI/TR-1636, (2000)