

## 미입계 핵변환로 최적 냉각재 선정

한석중, 김도형, 유동한, 신운철, 박원석

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

원자력시설에서 배출되는 고준위 방사선 폐기물이나 TRU 등의 심지층처분의 보완책으로서 핵변환 (Transmutation) 처리방안이 연구되고 있다. 이 핵변환시스템의 냉각재로서 액체금속류가 고려되고 있다. 본 연구에서는 핵변환로에 적합한 냉각물질을 도출하기 위해서 보다 합리적인 선정방법으로서 의사결정방법을 이용하여 중점비교 대상인 나트륨(Na), 나트륨-칼륨 합금(Na-K alloy), 납(Pb), 납-비스무스 합금(Pb-Bi alloy)에 대한 정량적 평가를 시도하였다. 아울러 이 냉각재 후보물질에 대한 냉각재로서의 적합성 여부를 비교 검토하였다. 본 방법을 이용한 결과 핵변환로의 냉각재로서는 납-비스무스 합금이 가장 적합한 것으로 평가되었다.

### 1. 서 론

원자력시설에서 배출되는 고준위 방사선 폐기물이나 TRU 등의 심지층처분의 보완책으로서 핵변환 (Transmutation) 처리방안이 연구되고 있다. 핵변환로는 기존 원자로와 다른 특징을 지니고 있어서 핵변환로에 적합한 냉각재 및 냉각방안에 대한 연구가 필요하다. 핵변환로에 대한 연구를 수행하고 있는 CERN, LANL, ORNL 등에서는 기존에 사용되지 않던 납이나 납-비스무스 합금을 냉각재로서 이용하는 냉각방안을 고려하고 있다. 그러나 납이나 납합금에 대한 연구 및 이용이 미미한 실정에서 핵변환로의 냉각재 및 냉각방안으로서 본격적으로 연구하기에 앞서서 이용 가능한 냉각 물질들의 특성 및 적합성에 대한 기초적인 조사 검토의 필요성이 제기되었다. 본 논문에서는 핵변환로에 적합한 최적의 냉각물질을 도출하기 위한 보다 합리적인 선정방법으로서 의사결정방법의 하나인 SMART (Simple MultiAttribute Rating Technique) 방법을 이용하여 나트륨(Na), 나트륨-칼륨 합금(Na-K alloy), 납(Pb), 납-비스무스 합금(Pb-Bi alloy)에 대한 정량적 평가를 시도하였다. 아울러 이 냉각재 후보물질에 대한 냉각재로서의 적합성 여부를 비교 검토하였다.

### 2. 최적 냉각재 선정 방법론

핵변환로에 적합한 냉각물질을 비교 검토하기 위해서는 냉각재가 갖추어야 할 최적이란 기준이 무엇인가를 도출하여야 한다. 그리고 이러한 기준에 적합한 평가 항목 및 정량적 평가 방법을 도출하여야 한다. 그리고 최종적으로 이러한 각 항목을 적절하게 총합하는 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 핵변환로의 최적 냉각재 선정 방법을 다음의 3 단계의 과정으로 구성하였다.

- 제 1 단계 : 선정기준의 도출 (핵변환로의 냉각재로서 갖추어야 할 기준들을 도출한다.)
- 제 2 단계 : 선정 요인 도출 및 정량화 (선정된 최적 냉각재 기준을 바탕으로 보다 구체적인 선정 요인들을 도출한다. 그리고 각 선정 요인에 대한 상세한 비교 검토 및 정량적 평가 방안을 도출한다.)
- 제 3 단계 : 의사결정법을 이용한 평가 (전 단계에서 도출된 기준과 요인을 근거로 의사결정방법을 이용하여 정량적 평가를 수행한다. 본 논문에서는 의사결정법으로서 SMART 방법을 사용하였다.)

### 3. 최적 냉각재 선정

#### 3.1 최적 냉각재 선정 기준

핵변환로에 적합한 냉각재의 선정 기준은 두 가지 방향에서 도출할 수 있다. 먼저 첫번째 선정 기준은 핵변환로의 개발 목적에서 유도되는 기준들이다. 핵변환로에 적합한 냉각재를 선정하는 것이 최우선 고려사항이기 때문이다. 둘째는 선정기준은 일반적으로 냉각재가 갖추어야 할 특성들에 대한 기준들이다.

- (1) 핵변환로에서 특히 강조되는 개발 방향은 (1) 핵변환, (2) 안전성, (3) 경제성, (4) 대중수용성 등의 문제이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 개발방향에 적합한 선정 기준을 도출하였다 [1].
- (2) 냉각재의 일반적인 특징은 냉각물질의 물리 화학적 특성이나 열수력 특성을 말한다. 특히, 냉각재 선정 시 고려해야 할 특성은 (1) 핵특성, (2) 물리적 특성, (3) 화학 특성, (4) 부식 특성, (5) 열수력 특성, (6) 독성 등이 있다 [2,3].

이상의 기준을 근거로 각 기준에 적합한 선정 요인을 도출하였다. 선정 요인은 구체적이고 상세한 비교 검토가 가능한 항목으로 구성하였다. 본 논문에서 채택한 선정 기준 및 요인은 표 1에서 확인할 수 있다.

#### 3.2 냉각재 후보물질

최적 냉각재를 선정할 때 모든 냉각재 물질을 검토하는 것보다 냉각재로서 사용 가능한 물질을 몇 가지 선정하여 집중적으로 비교 검토하는 것이 효과적이다. 따라서 비교검토하기 전에 냉각재 후보물질을 선정하였다.

현재 세계적으로 핵변환로에 대한 연구 방향은 고속중성자를 이용하는 시스템 개념이 주류를 이루고 있다. 따라서 냉각재가 갖추어야 할 핵특성은 기본적으로 고속중성자스펙트럼에 부합해야 한다. 일반적으로 고속중성자에 적합한 냉각물질은 가스종류와 액체금속류가 있다. 가스종류는 노심의 열출력밀도가 낮은 경우만 사용가능하기 때문에 본 논문에서는 기본적으로 액체금속류만을 냉각재 후보물질로서 고려하였다. 그리고 액체금속류 중에서도 핵특성이 적합하지 않고 사용에 제약 요인이 있는 물질은 고려대상에서 제외하였다. 이러한 요인을 제외하고 냉각재로서 고려할 수 있는 액체금속은 알카리금속류인 나트륨(Na), 나트륨-칼륨 합금(Na-K alloy)과 중금속류인 납(Pb)과 납-비스무스 합금(Pb-Bi alloy) 등이 있다. 본 논문에서는 이들 4 종류의 냉각물질을 핵변환로 냉각재 후보물질로서 정하고 상세한 비교 검토를 수행하였다.

#### 3.3 냉각재 후보 물질 간의 비교 및 정량화

각 요인에 대한 비교 방법은 정량적 비교를 기본으로 하였으나 정량적 비교가 어려운 항목에서는 정성적 비교 방법을 활용하였다.

- (1) 정량적 비교 : 평가항목에 적합한 정량적 평가방법을 도출하여 비교하였다. 정량적 평가는 단일값의 경우 수치를 바로 평가에 사용하였으며 연속적인 값의 경우 그래프를 활용하였다.
- (2) 정성적 비교 : 정량적 비교가 어려운 요인은 정성적 방법을 사용하였다. 정성적 비교란 비교 대상간의 평가를 상대적인 좋음/나쁨, 양수/음수, 큼/작음 등으로 비교하는 것을 말한다.

#### 평가항목에 대한 비교 및 정량화

##### • 기본 요건

- (1) 핵변환 : 기본적으로 핵변환력을 최대한 발휘할 수 있는 물질을 우선적으로 고려하여야 한다. 핵변환력에 냉각재가 미치는 영향은 각 냉각재를 사용하였을 때의 노심특성을 해석하여 얻을 수 있다. 그리고 미입계 핵변환로는 외부중성자원을 필요로 한다. 외부중성자원은 고에너지 양성자빔을 중금속표적에 조사하여 얻는 데 액체중금속이 가장 우수한 중성자표적이기 때문에 이점도 고려하였다.
- (2) 안전성 : 핵변환로의 개발에서 고유안전성의 확보는 중요한 고려 요인이다. 따라서 냉각재의 선정도 최대한 고유안전성을 확보할 수 있는 물질을 우선적으로 고려하고 있다.
  - 냉각재 화재 및 폭발 가능성 : 액체금속은 특성상 급속한 산화반응이나 기타 화학적 반응에

대한 활성이 매우 강하다. 고유안전성 확보를 위해서 화학적 반응 중에서 폭발 및 발화가능성이 낮은 물질을 우선적으로 고려하였다.

- 자연대류 : 비상시의 잔열의 안전한 제거를 위해서 자연대류 특성을 고려한다. 따라서 물질의 특성을 자연대류시의 열전달 특성을 기초로 평가하였다. 자연대류에 의한 열전달 특성은 Grashof 수와 Nusselt 수의 실험적 결과를 활용하였다.
  - 냉각재 누출 : 냉각재 누출이 발생했을 때의 안전특성도 중요하게 고려되어야 할 요소이다. 냉각재 누출 특성은 냉각재의 추가 누출이나 안전상의 문제점을 정성적으로 평가하였다.
- (3) 대중수용성 : 냉각물질의 연구 및 적용 시 예상되는 일반 사회의 반발 가능성을 고려하였다.
- (4) 경제성 : 냉각재에 대한 경제적 특성은 냉각물질의 확보 및 가공의 용이성, 비용 등을 종합적으로 고려하였다. 그리고 냉각재로 채택할 때 앞으로의 기술개발에 대한 문제점등을 검토하였다.
- 냉각재 비용 : 냉각재의 비용으로는 냉각물질의 비용 및 확보가능성에 비중을 두었다. 특히, 냉각물질의 가격을 주 평가자료로 활용하였다.
  - 기술개발 가능성 : 현재의 물질에 대한 연구정도, 이용, 개발해야 할 과제 등에 대한 난이도 등을 고려하였다.

• 일반 요건

- (1) 열수력 : 일반적으로 냉각능력을 결정하는 주요변수는 (1) 냉각재 유동량, (2) 펌프의 양수력, (3) 노심에서의 온도 상승정도, (4) 노심냉각재 부피 등이다. (1) & (2)는 펌프의 용량에 의해서 결정되고 (3) & (4)는 설계시 고려할 수 있는 변수이다. 따라서 냉각물질의 열전달 능력의 차이는 이 변수들의 조정에 의해서 가능하므로 각 물질의 열전달 특성의 차이는 어느 정도 보상할 수 있다.
- 비등점 및 용융점 : 일반적으로 낮은 용융점과 높은 비등점을 갖는 물질이 좋은 냉각재이다.
  - 열전달 특성 : 열전달 특성은 열전달 계수 및 열용량을 주로 고려하였다.
  - 양수력 : 냉각재를 순환하는 데 들어가는 양수력은 열전달 특성뿐만 아니라 시스템의 효율에도 많은 영향을 미친다.
- (2) 핵특성 :
- 중성자 감속 및 중성자 흡수 특성은 핵자료표를 이용하였다.
- (3) 화학반응특성 :
- 화학반응 : 냉각재의 화학특성은 화학적 활성, 구조물에 주는 안전상의 제한요인 및 불순물의 용해도 등이 평가대상으로 하였다.
  - 불순물제거 : 액체금속을 냉각재로 사용하기 위해서는 액체금속내의 불순물을 적절하게 제거 내지는 제어할 수 있어야 한다.
- (4) 부식 : 액체금속과 구조재료 및 용기의 부식 특성은 냉각물질의 선정 및 운전조건의 결정에 가장 중요한 제한 요소이다. 부식의 억제를 고려사항으로 불순물의 용해도 특성과 불순물의 제거내지 제어 특성이 반영되었다.
- (5) 독성 : 독성은 물질의 취급 및 보수의 용이성, 접근성 등의 측면에서 고려되었다.
- 생화학적 독성 : 물질자체의 인체 및 환경에 미치는 독성
  - 방사능 : 냉각재에 의한 방사능

각 항목에 대한 평가결과는 표 1에 간략하게 정리하였다. 평가결과는 단일값인 경우 정량적 비교를 하였으며 연속적 값인 경우는 그래프를 활용하였다. 그리고 정량적 비교가 어려운 항목은 정성적 평가를 활용하였다.

3.4 SMART 방법의 적용

의사결정법의 일종인 SMART는 단일 인자에 대한 평가방법으로서 SAUT (Single Attribute Utility theory)를 이용하는 방법이다[4]. SAUT란 단일인자의 평가를 자연적스케일을 가치스케일로 치환한 후 효용스케일로 치환하는 방법으로서 주관적이거나 정성적인 값을 정량적인 값으로 환산하는데 유용하다. 단일 인자에 대한 평가결과를 종합화 하는 MAUT(Multi Attribute Utility Theory)의 다양한 방법중의 하나가 바로 SMART이다. SMART에서는 각 인자를 적절히 계층화하고 각 인자에 대한 상대적 중요도를 가중치로서 부여하여 단일인자에 대한 평가 결과를 합산한다. 이 방법에서는 상대적 가중치에 대한 통일성을 부여하기 위해서 각 가중치를 정규화 한다.

본 논문에서는 위의 개별적 평가 결과를 SMART에 적합하게 전환하기 위해서 다음과 같은 방법을 사용하였다.

- (1) 각 개별인자의 평가결과는 단일 값이나 그래프적 표현, 정성적 평가 등 다양한 자연적 스케일로 되어 있기 때문에 각 평가결과를 가치스케일로서 표에 나타난 방법으로 치환하였다. 그리고 가치스케일인 각 후보물질별 평가순위를 기초로 효용스케일로 치환하였다. 가치스케일인 순위를 효용스케일로 치환하는 방법은 다음 방법을 따랐다.

양순위스케일 *	음순위스케일 **	가치스케일				효용스케일 (정규화, %)
		양수/음수	있음/없음	좋음/나쁨	강함/약함	
1	4	양수	없음	좋음	강함 (약함)	100
2	3	-	-	-	-	66.6
3	2	-	-	-	-	33.3
4	1	음수	있음	나쁨	약함 (강함)	0

\* 양 스케일 : 순서가 높을수록 가치가 높다.

\*\* 음 스케일 : 순서가 낮을수록 가치가 높다

(2) 각 항목에 대한 가중치의 결정도 평가의 통일성을 유지하기 위해서 순위로서 정하였다. 각 순위에 대한 가중치의 부여는 역수  $w_i = (1/R_i) / [\sum_j (1/R_j)]$  을 이용하였다. 상위항목에 대한 가중

치의 결정도 각 항목의 우선 순위를 결정하고 순위별 가중치를 사용하였다.

평가결과에 대한 가치스케일 값을 표 1에 실었다. 그리고 SMART 법에 의한 계산은 Microsoft 사의 Window 95 운영체제에서 실행되는 'Criterium Decision Plus'라는 프로그램을 사용하여 계산하였다[5]. 표 1의 각 평가 항목에 대한 구조적 묘사는 그림 1에 나타내었다. 본 방법을 사용한 평가결과는 표 2와 그림 2에 나타내었다. 평가결과는 Pb-Bi 합금, Pb, Na, Na-K 가 각각 0.75, 0.70, 0.31, 0.30 을 기록하였다. 따라서 본 방법으로 평가한 결과 Pb-Bi 합금, Pb 이 핵변환로의 냉각재 물질로서 적합한 것으로 나타났다. 각 상위 항목별 결과는 다음과 같다(표 2).

1) 기본 요건 :

1. 핵변환력 항목에서는 Pb, Pb-Bi 합금이 우수한 것으로 평가되었다.
2. 안전성 항목에서는 Pb, Pb-Bi 합금 순서로 유리한 것으로 평가되었다.
3. 대중수용성 항목에서는 Pb, Pb-Bi 합금이 유리한 것으로 평가되었다.
4. 경제성 항목에서는 Na, Na-K 합금 순서로 우수한 것으로 평가되었다.

2) 일반요건 :

1. 열수력 항목에서는 Pb-Bi 합금, Pb 순서로 우수한 것으로 평가되었다.
2. 핵특성 항목에서는 Pb, Pb-Bi 합금 순서로 우수한 것으로 평가되었다.
3. 화학적 특성 항목에서는 Pb, Pb-Bi 합금이 유리한 것으로 평가되었다.
4. 부식 항목에서는 Na, Na-K 합금이 유리한 것으로 평가되었다.
5. 독성 항목에서는 Pb, Pb-Bi 합금 순서로 유리한 것으로 평가되었다.

모든 항목을 종합할 때 핵변환로 냉각재로서의 적합성은 Pb-Bi 합금, Pb, Na, Na-K 합금 순으로 평가되었다.

#### 4. 결론 및 논의 사항

본 논문에서는 핵변환로의 냉각물질로서 논의되고 있는 액체금속류 중에서 가장 선정가능성이 높은 물질인 Na, Na-K 합금, Pb, Pb-Bi 합금 등에 대한 상세한 비교 검토 및 의사결정법을 이용한 평가를 수행하였다. 특히 의사결정법을 이용하여 정량적이고 종합적인 비교 평가를 수행하였다.

본 연구에서는 Pb-Bi 합금과 Pb 간의 차이는 작지만 핵변환로의 Pb-Bi 합금이 최적 냉각재로서 평가 판단된다. 본 결과에서는 잘 드러나지는 않지만 Pb를 냉각재로 사용하기 위해서는 기본적으로 시스템의 운전온도를 650°F 이상의 높은 온도를 유지해야만 하기 때문에 운전온도를 300°F 이상에서 운전할 수 있는 Pb-Bi 합금이 냉각재로 활용하기에 적합하다. 그러나 여러 가지 측면에서 성질이 다른 물질을 동일한 평가기준을 적용하는 것은 한계를 지니고 있다.

#### 참고문헌

1. 박원석 외, 장수명핵종소멸처리 기술개발: 핵변환로 기술개발, KAERI/RR-1702/96, 한국원자력연구소, 1996
2. R. N. Lyon, Liquid-Metals Handbook, Oak Ridge National Laboratory, 1952
3. J. G. Yevick & A. Amorosi, Fast Reactor Technology: Plant Design, the M.I.T. Press, 1966
4. D. von Winterfeldt & W. Edwards, Decision Analysis and Behavioral Research, Cambridge University Press, 1986
5. Criterium Decision Plus: User's Guide, InfoHavest Inc., 1995

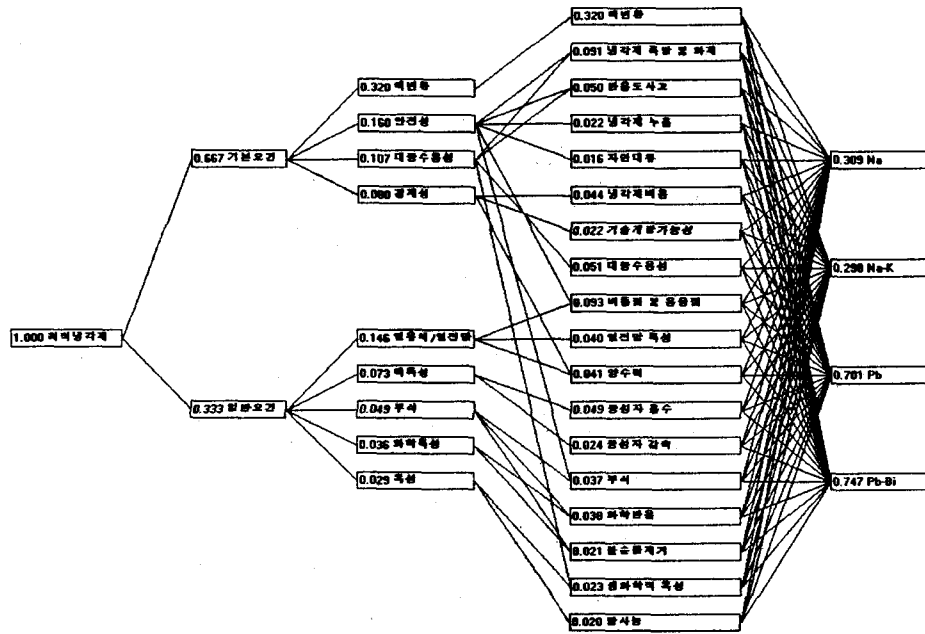


그림 1 최적냉각재 선정을 위한 의사결정구조도

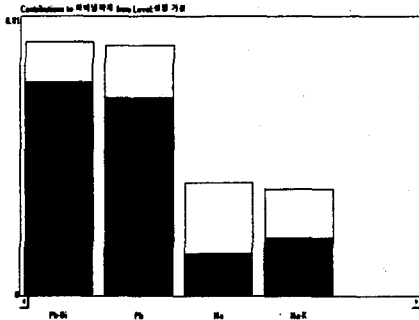


그림 2 각 선정기준의 최적 냉각재 평가 결과에 대한 기여도

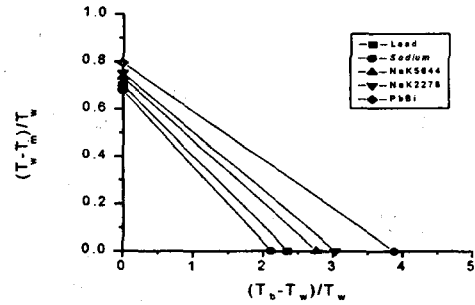


그림 3 각 후보냉각재 물질의 운전온도 특성

표 2 각 선정기준에 대한 평가 결과

Attribute	Pb-Bi	Pb	Na	Na-K
해변환	0.3200	0.3200	0.1066	0.1066
안전성	0.1528	0.1349	0.0145	0.0287
대중수용성	0.0427	0.0427	0.0000	0.0000
경제성	0.0073	0.0290	0.0752	0.0388
열유체/열전달	0.0928	0.0530	0.0576	0.0707
핵특성	0.0649	0.0568	0.0163	0.0081
부식	0.0251	0.0162	0.0265	0.0265
화학특성	0.0283	0.0283	0.0121	0.0121
독성	0.0130	0.0196	0.0000	0.0065
총합	0.7469	0.7005	0.3088	0.298

표 1. 선정 기준 및 요인, 항목별 평가 결과

요건	순위	선정 기준	순위	선정 요인	순위	정량화 방법	Na	Na-K	Pb	Pb-Bi	
기본 요건	1	해변환	1.1	해변환력	1.1.1	노심해석결과[1], 중성자표적 [1]	3	3	1	1	
					1.2	냉각재 폭발 및 화재	없음	없음	없음		
					1.3.2	반응도사고	양수	음수	음수		
					1.2.2	Temp. Coeff. [1]	나쁨	나쁨	좋음		
					1.3.3	Void Coeff. [1]	4	3	2	1	
					1.2.3	정성적 비교 [1]	4	4	4	4	
					1.2.4	Grvs Nu [2]	1	3	2	4	
					1.3.1	정성적 비교 [1]	1	3	2	4	
					1.4.1	냉각물질가격 [3]	1	2	4	3	
					1.4.2	기술개발 가능성	4	2	3	1	
					2.1.1	vs 운전온도 (그림 3)	3	4	1	2	
					2.1.2	열제거량, 열용량, $\rho_c$ [2] (열전달 계수, h [2])	3	(1)	(4)	(2)	(3)
					2.1.3	양수력 [2]	3	3	1	1	
					1.4.3	양수력	2	1	3	4	
					2.2.1	핵특성표 [3]	4	3	1	2	
2.2.2	핵특성표 [3]	1	2	4	3						
2.3.1	부식특성 조사검토 [2,3]	강함	강함	약함	약함						
1.2.5	화학적활성 [2,3]	1	1	3	3						
2.4.1	불순물용해도 [2,3]	강함	강함	강함	강함						
2.4.2	불순물 제거의 용이성 [2,3]	1	1	3	3						
2.3.3	미량원소의 제어 [1-3]	강함	강함	강함	강함						
2.5.1	인체에 대한 독성 [2,3]	1	2	4	3						
1.3.4	방사능 발생량 [3]	1	2	4	3						
2.5.2	방사능 발생량 [3]	1	2	4	3						
일반 요건	2	열수력	2.1	비등점 및 용융점	2.1.1	vs 운전온도 (그림 3)	4	2	3	1	
					2.1.2	열전달 특성	3	4	1	2	
					2.1.3	양수력	3	(4)	(2)	(3)	
					1.4.3	양수력	3	3	1	1	
					2.2.1	중성자 흡수	2	1	3	4	
					2.2.2	중성자 감속	4	3	1	2	
					2.3	부식	1	2	4	3	
					2.4	화학반응	강함	강함	약함	약함	
					2.5	생화학적 특성	강함	강함	강함	강함	
					1.3.4	방사능	1	2	4	3	
					2.5.2	방사능 발생량 [3]	1	2	4	3	