

## Fission Moly 생산을 위한 HANARO의 적용 타당성 연구

조 동진, 김 명현  
경희대학교

손 동성  
한국원자력연구소

### 요 약

Fission Moly 생산을 위한 조사시설로 HANARO가 사용됨에 있어서 충분한 타당성을 갖는지에 대해 원자로 운전중 표적장전에 따른 노심반응도의 영향, 표적의 최대 표면 열출력밀도, Mo-99 생산능력 측면에서 평가하였다. 그 결과 운전중 표적 장전으로 인한 반응도가(reactivity worth)가 약 0.2 %  $\Delta \rho$  정도로 제한치인 1.25 %  $\Delta \rho$ 보다 현저히 작고, 최대 표면 열출력밀도 또한 2.76 MW/m<sup>2</sup>보다 현저히 작음을 볼 수 있었다. 또한 OR공 한 개만을 사용한다 할지라도 Mo-99의 상업생산 목표를 충분히 만족시킬 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 HANARO를 Fission Moly 생산을 위한 조사시설로 사용하는 것은 타당하다 할 수 있다.

### 1. 서 론

한국원자력연구소에서는 의학진단용 방사선원으로 사용되는 Tc-99m의 모핵종인 Mo-99의 생산 및 제조기술의 자립화를 위해 최근에 Mo-99의 생산 가능성에 관한 연구를 수행[1,2]하였으며 이를 바탕으로 일련의 Fission Moly 개발 프로그램에 관한 연구를 수행하고 있다. 외국의 Fission Moly 생산공정을 살펴보면 크게 표적 제조(target fabrication)공정, 표적 조사(target irradiation)공정, 화학처리(chemical process) 공정으로 구분할 수 있다. 세계적으로 생산량이 가장 큰 캐나다는 Nordion사가 AECL(Atomic Energy Commission of Canada Ltd.)의 NRU(National Research Universal) 원자로를 이용하여 Fission Moly를 생산하고 있으며, 새로 상업생산을 목표로 준비중인 미국은 SNL(Sandia National Laboratory)에서 ACRR(Annular Core Research Reactor) 원자로[3]를 Fission Moly 생산에 적합하도록 개조하여 조사시설로 이용하려 하고 있다. 미국은 표적의 제조,

조사 및 화학처리까지 SNL에서 모든 공정을 통합하여 운전하고 있으나, 유럽에서는 4개 국가의 5개 원자로에서 조사시킨 후 벨기에의 IRE가 화학처리를 수행하고 있다. 우리나라는 Fission Moly 생산에 있어서의 일련의 과정을 한국원자력연구소에서 수행할 예정이며 제작된 표적의 조사는 HANARO[4]를 이용하고자 한다. 본 논문에서는 열수력 조건, 핵적 조건, 생산량을 고려한 저농축 우라늄(Low Enriched Uranium; LEU) 및 고농축 우라늄(High Enriched Uranium; HEU) 표적을 설계하고 HANARO 원자로가 조사시설로서 타당한 지를 살펴 보았다. 하나로의 운전조건 및 표적 설계를 위한 계산 체계, 기초적인 표적의 핵특성에 대해서는 이미 발표한 자료[5]를 참조할 수 있으므로 본 논문에서는 생략하였다.

## 2. 표적 설계 제한요건

HANARO 운전상태에서 Fission Moly Target 설계에 적용한 설계요건은 다음과 같다.

- 1) Mo-99의 생성수율( $Ci^{99}Mo/gU$ )이 가능한 높게 설계되어 폐기물 발생량이 적도록 해야 한다.
- 2) Mo-99의 생산량은 60,000 Ci/year 이상이어야 한다.
- 3) 표적으로 인한 총 잉여반응도 삽입양이 1.25 %  $\Delta\rho$  보다 작아야 한다.
- 4) 표적에서 발생하는 표면 열출력밀도는 2.76 MW/m<sup>2</sup>이하이어야 한다.
- 5) 표적의 조사를 위해 사용되는 OR공의 수는 2개 이하이어야 한다.

## 3. 표적 핵설계 및 HANARO의 적용 타당성 검토

위의 표적 설계요건에 따라 LEU 및 HEU를 표적 연료 물질로 사용하여 표적 핵설계를 수행하였다. 표적 설계변수에 관한 연구내용은 참고문헌 [6]에 간략히 설명되어 있다. 이 논문에서는 제어봉의 삽입, 인출에 따른 한 주기 내에서의 Mo-99 생산량의 영향에 대한 분석도 수행되어 제어봉으로 인한 Mo-99의 생산량 및 최대 표면 열출력밀도는 문제점이 없음을 나타냈다. 또한 표적물질의 농축도 및 기하학적 형태가 같고 같은양의 우라늄이 장전되면 표적 물질로 어떤 물질을 선택하든 핵적으로는 같은 성능을 나타낸다는 결론을 도출해 모든 연료물질에 대해 HANARO의 적용이 가능함을 밝힌 바 있다.

### 3.1 LEU 표적 핵설계

HANARO는 설계시에 Fission Moly 생산을 고려하지 않았으므로 현재 운전중 표적 장전, 인출방안이 없는 상태이며 운전중 표적 장전, 인출방안을 모색하기 위해 연구중이다. 본 논문에서는 운전중 표적의 장전, 인출방안이 마련된다는 가정하에 타당성을 평가하였다. 또한 Fission Moly의 생산을 위해 사용될 수 있는 조사공으로는 4개(OR3, 4, 5, 6)를 고려할 수 있는데 Fission Moly의

생산을 위해 모두 사용할 수 있는 것은 아니다. 따라서 OR공의 사용개수를 2개 이하로 제한한다는 전제하에 적용 가능성을 평가하였다. Mo-99의 생산량 산출에 있어서, 7일의 조사시간, 1일의 냉각시간, 1일의 화학처리시간, 보급시간 6일을 고려한 6 day reference로 계산하였으며, 원자로에 표적은 연간 40번 장전된다고 가정하였다. 설계되는 모든 표적의 축방향 길이는 40 cm를 사용하였다. 표적의 피복재로는 현재 상용화되어 쉽게 제작이 가능한 지르칼로이 튜브를 사용하였다. LEU의 모든 표적은 환형타입으로 양쪽면에서 냉각이 이루어진다. 표 1 및 2는 HANARO에서 OR공 2개를 모두 사용하여 연간 6만 Ci를 생산하기 위한 표적 설계안을 나타낸다. Case 1은 서로 다른 두 개의 관 사이에 우라늄 금속박막(metal foil)이 끼워진 형태의 표적이다. Case 2~4는 작은관의 바깥쪽면과 큰관의 안쪽면에  $UO_2$ 를 전기화학적 방법으로 도포하고 작은관을 큰관의 안쪽면에 넣고 양쪽끝을 밀봉한 형태의 환형타입 표적이다. Case 5는 현재 KAERI가 개념설계한 표적을 약간 변형한 설계안이며, 이 표적은 직경이 서로 다른 두 개의 관 사이에  $UO_2$  분말을 넣고 Vibro-compaction한 형태의 표적으로 표적의 성능을 증가시키기 위해 30% T.D.로 표적을 제작하였다. 표에서 보는 바와 같이 설계된 모든 표적은 표적 집합체 삽입으로 인한 총 잉여반응도가 제한치인 1.25 % $\Delta\rho$ 에 비해 현저히 작은 것을 볼 수 있다. 또한 모든 표적은 원자로 운전중에 장전하므로 표적을 OR공 2개에 3~4일을 주기로 한곳씩 번갈아 장전한다면 운전중 표적 장전에 따른 잉여반응도의 양은 반으로 줄어들게 된다. 따라서 6만 Ci를 생산하는 Case 2~4는 총 잉여반응도가 0.15 % $\Delta\rho$  정도로 설계제한치에 비해 매우 작으므로 장전시 잉여반응도 삽입에 의한 제어는 가능할 것으로 판단된다. 최대 표면 열출력 밀도 또한 운전중에 삽입한다 할지라도 모든 표적 설계안이 제한치인 2.76 MW/m<sup>2</sup>보다 현저히 작으므로 충분히 수용할 수 있음을 볼 수 있다. 특히 Case 5는 OR공 2개를 사용할 경우 13만 Ci를 생산할 수 있으므로 OR공 한 개만을 사용해도 모든 설계요건을 만족할 수 있음을 볼 수 있다. 이로부터 조사공의 사용개수, 생산량 측면에서도 HANARO는 자유도가 많음을 볼 수 있다. 따라서 표적 물질로 저농축 우라늄을 사용할 경우 표적의 조사시설로서 HANARO의 사용은 충분한 타당성을 갖는다고 할 수 있다.

표 1. LEU 표적 설계안의 집합체 제원

Case #	Rod #/Ass.	% T.D.	Fuel Mat.	Outer Clad.		Fuel	Inner Clad.	
				O.R.(mm)	I.R.(mm)	Thickness( $\mu$ m)	O.R.(mm)	I.R.(mm)
1	3	100	U metal	11.33	10.9	125	10.77	10.42
2	3	100	$UO_2$ electrodeposited	11.33	10.9	140	10.75	10.41
3	3	100	"	11.33	10.9	150	10.74	10.40
4	3	100	"	11.33	10.9	160	10.73	10.39
5	3	30	$UO_2$ Powder	11.33	10.9	1,400	9.50	9.15

표 2. LEU 설계안의 반응도가 및 열출력밀도

Case #	Total U-235 Loading (g)	Reactivity Worth ( $\% \Delta \rho$ )	Avg. LHR (Kw/m)	Max. SHF (MW/m <sup>2</sup> )	생산수율 (Ci <sup>99</sup> Mo/gU)	생산량 (Ci/year)
1	77.87	0.4223 ± 0.0684	182.6	1.775	6.149	96,960
2	43.62	0.2352 ± 0.0692	124.6	1.208	7.487	66,130
3	46.70	0.2573 ± 0.0616	130.8	1.253	7.342	69,455
4	49.80	0.3820 ± 0.0676	134.9	1.317	7.103	71,598
5	123.2	0.4253 ± 0.0710	244.6	2.451	5.205	129,700

### 3.2 HEU 표적 핵설계

Fission Moly 표적으로 HEU를 사용하였을 때도 생산목표를 만족시키면서 원자로에 안전성이 보장되는 지를 알아보기 위해 HEU를 이용하여 표적 설계변수에 대한 연구를 수행한 후, 표적 집합체 설계를 통하여 이를 HANARO에 적용하였을 때 만족할 만한 결과를 얻는지에 대해 살펴 보았다.

표적은 환형타입과 튜브타입 2가지를 고려하였다. 민감도 분석 수행결과, HEU의 표적 연료 두께는 수십  $\mu\text{m}$  단위로 얇게 제작해야 경쟁성을 가지므로 전기화학적 방법으로 도포한 표적만을 대상으로 하였다. 환형타입은 LEU 설계안의 Case2~4번에 적용된 제작방법과 같은 방법으로 제조된다고 가정하였으며 튜브타입은 얼마전까지 미국의 Cintichem사에서 사용했던 표적과 같이 한 개의 튜브 안쪽에 우라늄이 전기 화학적 도포방법에 의해 집적된 형태의 표적이라 가정하였다. 따라서 환형타입 표적은 양쪽면에서 냉각이 이루어지지만 튜브타입은 한쪽면에서만 냉각이 이루어진다. 표 3은 표적 집합체 설계에 따른 계산결과를 나타낸다. 표적 집합체당 표적의 개수는 3개를 사용하였으며 길이 40 cm, 직경 22.4 mm, 두께 0.2 mm를 갖는 스테인레스스틸을 피복재로 사용하였다. 그리고 환형타입의 안쪽 피복재의 두께는 0.2 mm의 스테인레스스틸 튜브를 사용하였다. 계산결과, 설계된 표적 집합체는 운전중 표적 장전으로 인한 반응도가가 0.2  $\% \Delta \rho$ 로서 제한치인 1.25  $\% \Delta \rho$ 에 비해 현저히 작으므로 문제가 되지 않음을 볼 수 있다. 그리고 환형타입으로 제작한 Case 4는 OR공 한 개만을 사용해도 충분히 상업생산 목표를 만족함을 볼 수 있다. 열수력학 측면에서도 제한치를 넘지 않음을 볼 수 있으며 환형타입으로 제작된 표적이 튜브타입에 비해 상대적으로 표면 열출력 밀도가 현저히 낮아 유리함을 볼 수 있다. 따라서 HEU를 이용하여 Fission Moly를 생산한다 할지라도 표적 장전으로 인한 잉여반응도, 표면 열출력 밀도, OR공 사용개수, Mo-99 생산량 측면에서 HANARO는 많은 자유도를 갖음을 볼 수 있다.

표 3. HEU 표적 설계안의 반응도가 및 열출력 밀도

Case #	Type	Fuel Film Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Total U Loading (g)	Reactivity Worth ( $\% \Delta \rho$ )	Avg. LHR (kW/m)	Max. SHF (MW/m <sup>2</sup> )	생성수율 (Ci <sup>99</sup> Mo/gU)	생산량 (Ci/year)
6	Tube	50	58.7	0.324±0.0638	130.3	2.356	29.45	69,230
7	"	60	70.5	0.407±0.0732	146.1	2.672	27.52	77,600
8	Ring	50 (25+25)	58.7	0.298±0.0573	135.5	1.267	30.63	71,900
9	"	60 (30+30)	70.5	0.302±0.0638	153.2	1.552	28.87	81,400
10	"	120 (60+60)	238.9	0.457±0.0601	238.9	2.200	22.57	125,680

#### 4. 결론 및 토의

표적 설계요건을 설정하고 이를 바탕으로 설계된 표적 집합체를 장전하여 원자로의 관점에서 HANARO가 Fission Moly의 조사시설로 사용될 수 있는가에 대한 타당성을 원자로 제어측면인 운전중 표적 장전에 따른 반응도가 및 제어봉 삽입, 인출에 따른 주기내의 Mo-99 생성량 변화, 열수력학측면인 최대 표면 열출력 밀도, 원자로의 운용방안 측면인 OR공의 사용개수, 원자로의 상업생산능력인 생산량측면에서 살펴보았다. 그 결과 운전중 표적 장전으로 인한 반응도가가 약 0.2 %  $\Delta \rho$  정도로 제한치인 1.25 %  $\Delta \rho$  보다 현저히 작고, 최대표면 열출력밀도 또한 2.76 MW/m<sup>2</sup>보다 현저히 작아서 안전함을 볼 수 있었다. 또한 OR공을 한 개 사용한다 할지라도 충분히 상업생산 목표를 만족할 수 있었다. 따라서 표적 물질로 LEU 및 HEU 어떤 물질을 사용하더라도 Fission Moly의 조사시설로 HANARO를 사용하는 것은 충분히 타당하다 할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 표적 설계시 표적 장전으로 인한 핵연료 채널의 유체유동 영향에 대해서는 심도있는 평가가 이루어지지 않았으므로 향후 이에 대한 고려가 이루어져야 할 것이며, 이를 고려한 표적의 최적 핵설계가 계속 수행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. 김병구 외, "Feasibility Study on Fission Moly Target Development," KAERI/RR-1595/95, 1996.
2. 윤병목 외, "Fission Mo 제조 기술개발," KAERI/RR-1752/96, 한국원자력연구소, 1996.

3. Richard L. Coats and Edward J. Parma, "Medical Isotope Production: A New Research Initiative for the Annular Core Research Reactor," Proceedings of the 1994 Topical Meeting on Advances in Reactor Physics, Knoxville, Tennessee, April 11-15, 1994
4. "하나로 안전성분석 보고서," KAERI/TR-710/96, 한국원자력연구소, 1996.
5. 조동건, 김명현, "HANARO Fission Moly Target으로서의 LEU와 HEU의 특성 비교," 97춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1997.
6. 조동건, 김명현, "Mo-99 생산용 LEU 표적 핵설계," 97추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1997.