

《기술보고》

TRIGA원자로의 폐지 현황

서두환

한국원자력연구소

(1994. 1. 6 접수)

요 약

TRIGA원자로는 1993년 현재, 세계 13개국에서 52기가 가동중에 있으며, 그 70%가 20년 경과하였고, 이미 폐로된 것은 12기이다. 따라서, TRIGA원자로의 폐지(decommissioning)가 새로운 과제로 등장하고 있다. 본 보고는 TRIGA원자로의 폐지에 대한 특징과 문제점 등 그 현황을 조사한 결과가 기술되어 있다. 조사내용으로는 다음과 같은 항목이 검토되어 있다. 1) 폐로의 실시시기, 2) 폐로방법, 3) 폐기물 대책, 4) 사용후 연료 대책, 5) 비용.

머 리 말

TRIGA원자로는 1993년 현재, 세계 13개국에서 52기가 가동중이고, 건설중인 것은 3기, 폐로된 것은 12기이다(표 1 참조). 그러나, 그 70%가 이미 20년을 경과하였기 때문에, 앞으로 예상되는 폐로에 관한 대응이 새로운 과제로 등장하고 있다.

IAEA는 1986년에 「연구로의 폐지에 대한 안전」을 간행하였지만, 1991년에는 새롭게 기술위원회를 설치하여 「연구로 및 중소형 원자력시설의 폐지를 위한 계획 작성과 관리」¹⁾에 대하여 검토하고, 그 성과를 1993년에 발간하였다.

우리나라는 현재, 연구로 1호(TRIGA Mark - II, 250kW), 연구로 2호(TRIGA Mark - III, 2MW) 및

표 1. 폐로된 TRIGA 원자로

Country	Reactor Name	Thermal Power	First Crit.	Shut-down
Germany	FRF-2 (Conversion)	1 MW	1977	1983
	FRN TRIGA Mk - III	1 MW	1972	1982
USA	BRR UC Berkeley (Mk - III)	1 MW	1966	1987
	DORF TRIGA Mk - F	250 kW	1961	1970
	GA TRIGA Mk - III	1.5 MW	1966	1975
	TRIGA Columbia U (Mk - II)	250 kW	1977	1985
	TRIGA Mk - F, Northrop	1 MW	1963	1984
	TRIGA Mk - I, MI S U	250 kW	1969	1988
	TRIGA Puerto Rico U (Conv.)	2 MW	1960	1976
	UI TRIGA Mk - I	100 kW	1960	1968
Zaire	UT TRIGA U Texas	250 kW	1963	1988
	TRICO 1 (Mk - I)	50 kW	1959	1970

AGN-201(0.1W)의 3기가 가동중이고, 건설중인 것은 다목적 연구로 (KMRR, 30MW)의 1기이다. 그러나, 연구로 1호는 33년째, 2호는 23년째 운전하고 있으며, 일반적으로 연구로의 수명을 30여년으로 잡고 있기 때문에, 멀지 않아 폐로되어야 한다고 보고 있다. 연구로의 폐지는 시설에 내장된 방사능의 대책, 단기간에 발생하는 방사성폐기물의 대책 등, 앞일을 내다본 대응책을 충분히 검토해야 한다.

이와 같은 상황을 고려하여, 한국원자력연구소는 1987년 부터 연구로의 향후 관리방안의 일환으로 조금씩 연구로의 폐로에 관하여 연구하기 시작하였고^{2~7)}, 현재 그에 대한 예비조사를 하고 있다.^{8~9)} 연구로에는 여러가지 노형이 있지만, 조사는 연구로 1호 / 2호인 TRIGA원자로를 대상으로 하여, 다음 항목에 관하여 검토하였다.

- 1) 폐로의 실시시기
- 2) 폐로방법
- 3) 폐기물 대책
- 4) 사용후연료대책
- 5) 비용

1. TRIGA연구로의 특징

IAEA는 편의상, 연구로를 10종류의 노형으로 분류하고 있지만, 같은 노형일지라도 노구조는 많이 다르다. 본 보고에는 대표적인 노형(트리가로, 폴로, 중수로, 탱크로) 중에서 우리나라의 연구로인 TRIGA원자로를 조사대상으로 선정하였다.

TRIGA원자로는 미국의 GA(General Atomics)가 제조한 교육훈련용(Training), 연구(Research) 및 동위원소생산용(Isotope)에 이용되는 저출력의 소형원자로이다. 연료는 농축우라늄-수소화지르코늄합금이며, 수소가 감속재 역할을 하고 있는 고체균질로이다. 노심은 폴의 밑부분에 있고, 노본체의 사용재료는 알루미늄이 주체이다.

TRIGA Mark - II / III의 특성을 표 2에, 각각의 구조를 그림 1과 2에 나타내었다.

2. 폐로의 실시시기

연구로는 원자로의 운전훈련, 각종 시료의 조사연구,

표 2. 연구로 1호 및 2호의 특성

원 자 로 명	TRIGA Mark - II	TRIGA Mark - III
원 자 로 형	수조형	수조형
정 상 출 력 (열 출 력)	250 kW	2 MW 2,000 MW / 2.8 msec 맥동
최대중성자속 (nv)	1×10^{13}	6.5×10^{13} (맥동시 2.0×10^{16})
핵 연 료		
U ²³⁵ 농축도	20%	20 및 70%
피복재	알루미늄	SUS-304
화학조성	U-ZrH _{1.0} 금속합금	Er-U-ZrH _{1.6} 금속합금
감 속 재	ZrH, H ₂ O	ZrH _{1.6} , H ₂ O
냉 각 재	H ₂ O	H ₂ O
제 어 봉	B ₄ C	B ₄ C
핵연료장전량 (U-235)	2.96 Kg	12.6 Kg

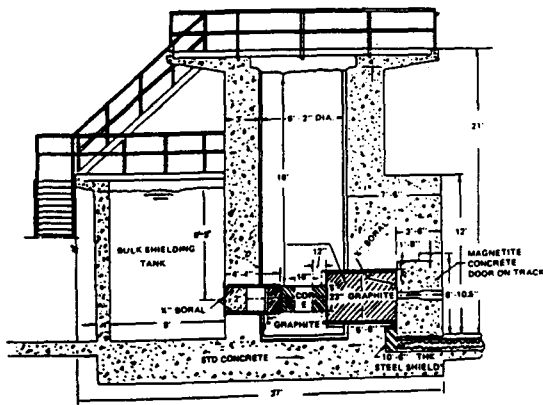


그림 1. TRIGA Mk - II 원자로의 단면도

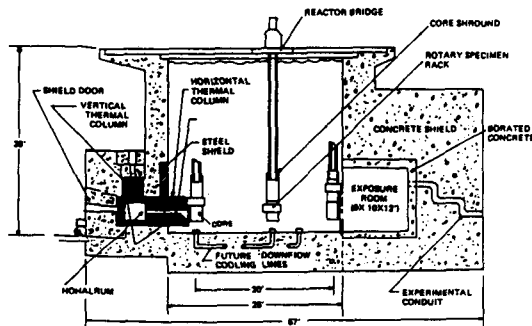


그림 2. TRIGA Mk - III 원자로의 단면도

방사성동위원소나 반도체 재료의 생산 등, 동시에 여러 가지 목적을 달성하기 위하여 운전하는 일이 많다. 즉, 연구로는 이용목적의 달성을 위하여 주로 운전하기 때문에, 발전로와는 달라서 반드시 구조재 등의 물리적 수명이 정지의 이유로는 되지 않는다. 연구로의 정지를 결정하는 요인으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- 1) 불경제적인 운전
- 2) 기술적 쇠퇴
- 3) 연구프로젝트의 종료
- 4) 안전상의 고려
- 5) 정부의 정책변경
- 6) 기타(시설의 사고, 고장 등)

실제로, 지금까지 정지(shutdown)한 연구로는 약 200기, TRIGA원자로는 12기인데, 약 65%가 15~20년간 운전한 후 정지하고 있다. 정지이유는 불명한 것이 많고, 발전로의 정지수에 비하면 매우 많은 연구로가 정

지하였으며, 가동기간도 발전로보다 짧기 때문에, 물리적인 수명보다 대부분이 운전목적의 종료에 기인하고 있다고 추정된다.

우리나라는 정지한 연구로는 아직 없지만, TRIGA Mark - II의 폐로가 거론되고 있다. 그 이유는 원자로가 노후하였다는 것, 새로운 대형연구로(KMRR)가 건조되면 그것을 이용하면 된다는 것, 지금 원자로가 있는 부지와 건물이 한전재산이라는 것 등이다.

3. 폐로방법

3.1. 방사능인벤토리

원자로의 방사능인벤토리(inventory)는 노심에서의 방사능과 방사성부식생성물의 오염에 의한 방사능이며, 노형의 재료 및 운전경력에 의존한다.

미국의 PNL이 NRC의 요청에 따라 작성한 보고서 「시험·연구로의 폐지에 대한 기술, 안전 및 비용」¹⁰⁾에, TRIGA원자로의 방사능인벤토리를 검토한 결과를 다음과 같이 제시하고 있다.

• 연구로명 : OSTR

출력 : 1 MW

누적출력 : 740 MWD

전출력환산일수 : 740 EFPD

방사능인벤토리 : 5.55×10^{13} Bq

원자로폐지의 특징은 운전에 따른 방사화된 재료의 처리·처분이 수반된다는 것이며, 그 방사능량은 재료의 노심에서의 상대적 위치관계, 환경, 중성자속, 조사 시간 및 냉각시간에 의존한다. 이 중에서 상대적 위치관계, 환경은 구조에 의존하며, 중성자속은 방사화되기 쉬운 재료에 대해서는 중요하지만, 그 대표값은 원자로의 평균출력에 비례한다. 평균출력과 운전시간을 곱한 것이 누적출력으로 된다. 방사능인벤토리는 노형, 누적출력, 중성자속 및 이용방법에 따라 다르며, 그 편차는 매우 크다.

방사능인벤토리의 평가는 폐로계획에 있어서 중요한 것이므로, 어떠한 연구로도 가동중에서 폐로시의 방사능인벤토리의 상황을 파악해 두는 것이 필요하다. 다음 항목은 가동중의 원자로상황을 정확하게 파악하기 위해서도, 또 정지시의 폐로 관점에서도 필요한 측정요소이다.

- 1) 조사장외의 중성자속준위 측정
- 2) 주요구조재의 중성자방사화분석
 - 노심주변의 부품
 - Al이나 SUS제 탱크
 - 콘크리트 등의 차폐벽

3.2. 제염의 범위

제염은 폐로와 밀접한 관계에 있으며, 폐로작업시 작업자의 피폭저감화에 있어서 중요하다. 또 제염으로 금속류의 재이용 가능성을 포함하여 방사성폐기물 발생량의 저감화를 위하여 필요하다.

그러나, 제염으로 방사능의 총량은 변하지 않기 때문에, 종합적으로 제염을 평가하여 제염의 효과를 판단하여야 한다.

원자로의 가동기간중, 보수작업의 일환으로서 제염을 하고 있다. 그와 같은 제염경험을 바탕으로 TRIGA 원자로에 대하여 폐로시 제염이 필요한 범위는 다음과 같다.

풀(수로)이 크고 노본체는 방사화되기 어렵기 때문에, 제염해야 할 범위는 매우 적다고 생각되지만, 제염 경력의 유무에 따라 냉각기계의 제염이 필요로 하는 경우도 있다.

폐로를 위하여 제염을 계획할 경우, 원자로가동중의 제염작업에 비하면 대규모로 되기 때문에, 제염시설이나 제염작업자 등 지원시스템의 정비상황을 검토하여, 불충분한 경우에는 그 대응책을 강구해야 한다.

3.3. 폐로방식

부지의 유효이용, 환경안전상의 관점, 지역사회로부터의 잠재적 요망의 측면에서도, 원자로 정지후는 되도록이면 빨리 해체철거하는 것이 바람직 하다.

원자로의 폐지는 크게 3가지 방식으로 나눌 수 있다. 대표적인 것으로 IAEA, NRC, 일본원자력위원회가 분류한 것이 있는데, 이들 내용은 거의 같으며 표 3에 폐로방식의 분류를 나타내었다.

TRIGA원자로는 다음과 같은 이유로, 원자로 정지후는 해체철거가 가능하다.

- 1) TRIGA로는 출력이 작고, 방사화된 재료가 적기 때문에, 장기간의 냉각은 필요치 않으며 작업자의 접근이 가능하다.

표 3. 폐로 방식의 분류

IAEA	NRC	일 본
Stage 1	SAFSTOR	밀폐관리
Stage 2	ENTOMB	차폐격리
Stage 3	DECON	해체철거

- 2) 정지후, 방사능인벤토리의 대부분을 차지하는 단반감기핵종은 수년 동안에 감쇠한다.

- 3) 원자로의 운전관리에 종사한 인력의 활용.

폐로활동을 안전하게 효과적으로, 또 경제적으로 추진하기 위해서는 노운전관리에 참여한 직원이, 조직을 떠나기 전에 폐로작업에 참가하는 것이 바람직 하다. 원자로 정지후의 장기보관은 요원확보, 시설의 유지관리 및 PA 등의 관점에서 별로 바람직 하지 못하다.

3.4. 해체기술

TRIGA원자로는 풀이 있고 노실내의 방사량이 적기 때문에, 작업자의 근접작업이 가능하다. 따라서, 폐로에 적용되는 기술로서는, 이미 사용실적이 있는 절단·제염·검출 등의 기술을 충분히 적용할 수 있다고 본다. 특히, 연구로의 폐로에서는 풀의 활용이 특징이기 때문에, 제한된 장소와 수중에 적합한 휴대형 절단기·해체부재반출기·모니터장치·매니퓰레이터 등 원격기술의 개발이 폐로작업의 작업성·안전성 향상에 도움이 될 것이다.

3.5. 해체순서

해체순서는 연구로의 설치환경, 부지이용에 따라 다르겠지만, TRIGA원자로에 대하여 생각할 수 있는 해체순서는 다음과 같다.

- 1) 연료인출, 반출
- 2) 노심구조물의 해체, 철거
- 3) 노풀의 해체
- 4) 냉각계의 철거
- 5) 시험·실험장치의 철거
- 6) 노건물의 해체

4. 폐기물의 처리·처분

4.1. 방사성폐기물의 발생량 예측

폐로에 따라 발생하는 방사성폐기물은 핵연료물질로 오염된 것이나 중성자에 의하여 방사화된 것이며 원자로용기, 용기내의 구조물(노심), 1차계 및 조사장치의 기기·배관 등이다. 그리고, 원자로 용기 바깥 쪽에 있는 차폐물, 실험설비의 도관 등은 방사화의 영향 정도, 오염의 유무 등에 따라 그 발생량은 달라진다. 따라서, 노형이나 운전경력에 따라 방사성폐기물의 발생량은 두드러지게 달라지는 것이다. 폐기물의 발생량을 줄이기 위해서는 노가동기간중에 오염발생의 방지에 노력해야 할 것이며, 폐로후는 장치·기기 또는 건물의 전용도 연구해야 할 것이다.

TRIGA원자로의 폐기물 발생량은 약 20톤으로 추정되고 있다. 이것은 다른 연구로의 발생량에 비하면 매우 적은데, TRIGA원자로는 사용재료와 누적출력의 관계에서 방사화생성물이 매우 적어서, 폐로시의 방사성폐기물이 적기 때문이다.

4.2. 폐기물 발생량의 저감화

1) 해체폐기물의 처리

규모가 큰 원자력연구소일지라도, 소내의 폐기물처리장은, 통상의 연구활동에서 나오는 폐기물을 받고 처리하는 능력뿐이다. 따라서, 폐기물의 수용가능한 용적, 수용할 폐기물용기 크기의 제한, 폐기물 내용상의 제한 등은, 폐로계획을 수립하는데 있어서 가장 중요한 사항이다.

기존시설의 폐기물처리가 갖는 이와 같은 제한에 대응하기 위해서는, 다음과 같은 대응책을 생각할 수 있다.

- (1) 원자로부지 내에 해체 폐기물의 처리기능을 보유한다.
- (2) 해체현장에서 철거부품을 재제염, 재절단, 압축한다.
- (3) 대형철거물을 수용할 수 있는 용기를 제작하여 수납한다.
- (4) 원자로부지 내에 해체폐기물의 보관시설을 확보한다.

2) 저감화 및 재이용기술의 개발

해체폐기물발생량의 저감화는 필요조건인데, 연구로의 규모, 구조, 운전실적 등은 다종다양하기 때문에, 이들에 공통된 제염, 해체, 용융기술의 개발이 진행되고 있다. 한편, 각 시설에 대해서도 현유 기술을 한층 더 개선함으로써 해체폐기물발생량의 저감화가 기대된다.

해체폐기물의 재이용기술개발은 저감화 기술개발중에서도 가장 효과적인 것으로 생각된다. 해체폐기물은 가능한 한 재이용하는 것이 자원활용면에서 뿐만 아니라, 처분폐기물의 감소로 폐기물관리를 위한 처분시설의 건설비나 운영비용의 대폭적인 비용저감화에 연계되기 때문에 매우 유용할 것이다.

해체폐기물중에서 금속폐기물로 방사능준위가 낮은 것은 제염, 용융 등의 처리후, 방사능을 측정하여 무구속한계의 이하임을 확인하여, 재이용하는 것이 바람직하다.

4.3. 폐기물의 보관, 저장, 처분

해체폐기물의 특징은 단기간에 대량으로 발생한다는 것이며, 가장 큰 문제점은 처리·처분의 경로가 아직 확립되어 있지 않다는 것이며, 또 적용기준이나 경제성 등으로 검토해야 할 의제가 많다. 예를 들면, 폐기물을 재이용할 경우의 경제성과 적용기준, 소규모 원자력 시설 부지내에 콘크리트 매설하는 간이처분, 또는 해체 폐기물을 포함한 방사성 폐기물의 최종처분장이나 수용기준 등이다.

1) 당면과제

우리나라는 연구로의 폐로를 실시한 예는 없다. 따라서, 실시예를 근거로 폐로에 관한 광범한 자료를 수집하고 축적할 필요가 있다.

해체폐기물의 발생에 대해서는, 일시적으로 대량의 폐기물이 발생하는 것이 특징이기 때문에, 폐로계획시에는 방사능인벤토리, 운전경력에서 폐기물의 발생량을 예측하여 그것에 대응한 보관·저장 계획을 수립하지 않으면 안된다. 기존시설의 폐기물시설은 해체폐기물까지 고려하고 있지 않은 경우가 많다.

2) 앞으로의 대책

폐로에 있어서 폐기물의 처분경로의 확립은 필수적인 것이다. 따라서, 폐기물의 처리·처분에 요구되는 사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 폐기물발생량을 가능한 한 줄인다.
- (2) 비방사성폐기물과 방사성폐기물의 구분을 정확하게 한다.
- (3) 보관시설을 정비한다.
- (4) 적극적으로 재이용한다.
- (5) 최종처분에 관한 대책을 세운다.
- (6) 처분형태에 적합한 모양으로 처분장에 반출한다.

5. 사용후 연료

연구로연료는 국제적인 관계, 국내의 원자로연료처리, 처분시설의 관계로, 현재 이것을 처리·처분하는데 있어서 제약이 많다. 따라서, 사용후 연료의 재처리 방식이나 저장방식에 대해서도 실시체제가 있어야 하기 때문에, 이에 대한 검토가 있어야 할 것이다.

6. 폐로 비용

폐로에 소요되는 비용은, 현재로서는 불확정적인 요소가 많아서, 대략적인 값 또는 추정치가 알려져 있을 뿐이다.

앞으로 국내외에서 폐로되는 연구로가 많아지면, 그것으로 얻어지는 정보를 축적하고, 아울러 평가방법을 모델화하면 소요비용을 추정할 수 있을 것이다.

참고로, 1987년 한국원자력연구소와 미국의 Bechtel사와 공동으로 연구한 결과⁶⁾에 의하면, TRIGA Mark-II의 해체철거 비용은 약 240만불로 산출하고 있다.

맺 음 말

우리나라는 3기의 연구로가 가동중에 있지만, 앞으로 연구로 1호(TRIGA Mark-II)는 기념관화 하기 위하

여 폐로할 계획으로 있다. 그리고, 계획이 예상되는 연구로 (TRIGA Mark-III)나 발전로(고리 1호)의 폐로에 대비하여, 그것을 입안하고 활동이 원활히 이를 수 있도록 관련법규·기준 등의 제정 및 정비가 필요하며, 이들에 대한 국가적인 적절한 향후 대책이 있어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Planning and Management for the Decommissioning of Research Reactors and Other Small Nuclear Facilities ; Technical Reports Series No. 351, IAEA ('93)
2. 서두환 ; 원자로의 폐지와 현황, KAERI 회보, Vol. 11, No. 2 ('91).
3. 이창건, 서두환 외 ; TRIGA Mark-II / III 관리방안 수립연구, KAERI / RR-904 / 90.
4. 김병도 외 ; 연구용 원자로시설의 폐지에 관한 인허가 절차 및 기술기준, KAERI / NSC-315 / 88.
5. 서인석, 오원진 외 ; 원자로시설 제염·해체기술, KAERI / AR-277 / 87.
6. Decommissioning Study for KAERI TRIGA Mk-II Reactor ; Bechtel ('87) .
7. 서인석, 서두환 외 ; 원자로 제염·해체기술, KAERI / RR-575 / 86.
8. 서두환 ; 연구용원자로 폐로연구 출장보고서, KAERI / OR-160 / 93.
9. 서두환 외 ; 연구용원자로 폐로연구, KAERI / RR-1286 / 93.
10. Technology, Safety and Costs of Decommissioning Reference Nuclear Research and Test Reactors ; NUREG / CR-1756 ('82) .