

# 태울수록 더 많은 연료를 만든다

李 光 榮

(한국일보기획위원/본지편집위원)

연료를 태우면 태울수록 더 많은 연료가 생겨난다면 믿지 않을 사람이 있을 것이다. 그러나 이같은 일이 실제로 원자(原子)의 세계에서 일어난다. 꿈의 원자로라 불리는 고속증식로(高速增殖爐:FBR=Fast Breeder Reactor)가 이에 속한다.

자연에는 92가지의 원소가 있다. 이중 가장 무거운 것이 우라늄(U)이다. 우리는 이 우라늄을 원자로 속에서 태워 에너지를 얻고 있다. 하지만 원자로 속에서 태울 수 있는 우라늄은 아무 것이나 되는 것이 아니다. 중성자(中性子)를 받아 쪼개지는 U-235만 이 연료로 이용이 가능하다. 그러나 자연 가운데 있는 천연우라늄은 핵분열이 가능한 U-235가 0.72%에 지나지 않는다. 핵분열이 되지 않는 U-238(99.2%)과 U-236(0.04%)이 거의 대부분을 차지하고 있다.

따라서 원자력이 천연우라늄만을 이용한다면 전체우라늄의 99.2%는 쓸모가 없다. 하지만 원자력엔 마술이 있다. 연료로 사용할 수 없는 U-238이 원자로 속에서 중성자를 흡수해서 핵분열이 가능한 플루토늄(Pu)-239로 변신하기 때문이다. 즉 U-238은 중성자를 흡수하게 되면 U-239로 바뀌게 되는데 이는 자연 상태에서 있을 수 없는 불안정한 원소

이기 때문에 베타선을 내놓으며 붕괴되어 235분만에 넵트늄(Np)-239로 바뀌게 되는데 이 역시 불안정한 원소여서 한번 더 베타붕괴를 해서 235일 후 Pu-239로 탈바꿈한다.

Pu-239는 강력한 방사선을 띠고 있어 유독한 물질이긴 하나 중성자를 흡수하면 분열을 일으켜 U-235와 같이 단위질량당 석탄의 3백만배, 석유의 2백만배에 달하는 막대한 에너지를 낸다.

Pu-239가 U-235와 같이 핵폭탄의 폭약이 되는 까닭이 여기에 있다. 요즘 북한의 핵개발 의혹이 세계적으로 큰 문제가 되어 있는 것은 북한이 원자력 발전을 하고 있지 않으면서 핵재처리를 하고 있다는 데 있다. 다시 말해서 원자로를 가동하면 쓸모 없었던 U-238이 Pu-239로 바뀌게되어 이를 화학적인 방법으로 수월하게 분리해낼 수 있게 되기 때문이다.

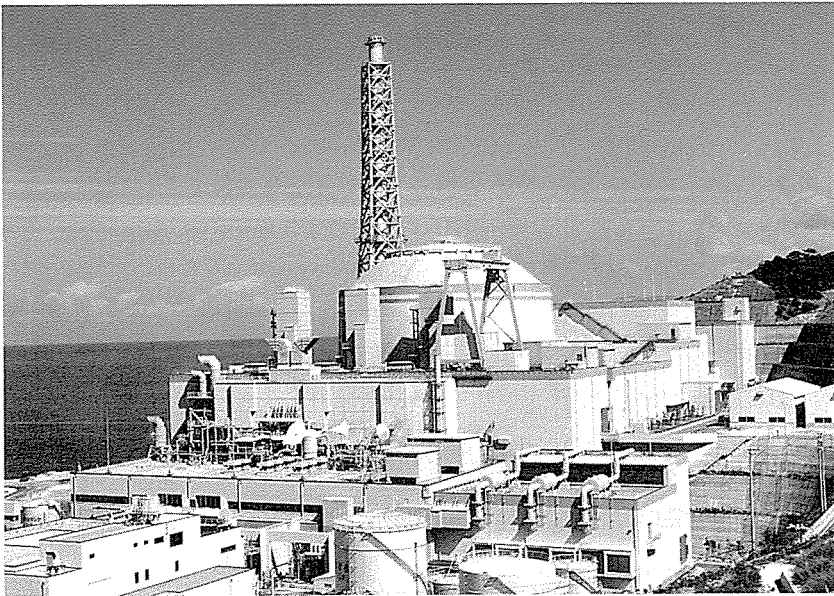
실제로 원자력발전소의 원자로에서 일어나는 핵분열 반응은 U-235뿐만이 아니라 새로 만들어진 Pu-239도 한몫하고 있다. 원자력발전소의 원자로 속에서 Pu-239가 중성자를 흡수해서 분열을 일으켜 열을 내고 있는 것이다. 고리에 있는 가압경수로(PWR)는 45%, 월성에 있는 가압중수로(CANDU)는 51%정도

가 Pu-239로부터 열을 얻고 있다.

우리나라 전력의 40%정도가 원자력 발전소에서 얻고 있다면 이중 절반에 가까운 전력은 원자로 속에서 만들어진 Pu-239가 분열해서 만들어낸 전력인 셈이다.

이같은 생각을 하면 자칫 원자력발전이 원폭과 연관이 있는 것같은 오해를 불러일으킬 수 있다. 그러나 분명한 사실은 원자력발전소에서 나온 사용후핵연료로서는 원폭을 만들 수 없다. 사용후핵연료 속에 포함된 플루토늄은 핵분열이 가능한 Pu-239가 60~70%선에 머물러 있기 때문이다. 나머지는 핵분열이 되지 않는 Pu-240 같은 것들로 이루어져 있다. 원폭의 폭약이 되려면 핵분열이 가능한 U-235나 Pu-239의 순도가 적어도 90%는 넘어서야 한다. 이를 위해서는 농축을 하지 않으면 안된다. 농축은 질량차가 적을수록 어렵기 마련이다.

U-235와 U-238이 섞여 있는 천연우라늄 속에서 U-235의 함량을 높이는 농축은 높은 수준의 기술이 필요할 뿐 아니라 방대한 시설과 에너지가 필요하다. 우라늄 농축시설을 선진 몇몇 나라만이 갖고 있는 것은 이 때문이다. 그런데 Pu-239와 Pu-240을 분리하는 일은 U-235와 U-240을 분리하는 일보다 훨씬



◇94년 가동에 들어갈 일본의 원형 고속증식로 몬주발전소

어렵다. U-235와 U-238의 질량차가 3인데 비해 Pu-239와 Pu-240은 질량차가 1에 불과하기 때문이다. 또한 플루토늄은 강한 방사선을 띠고 있다.

그렇다면 북한의 핵탄개발을 걱정하는 이유는 무엇일까. 이는 전혀 다른 차원의 문제이다. 원자력발전은 전력을 얻기 위해 만들어졌기 때문에 연료를 집어넣으면 상당기간을 원자로 속에 태우게 된다. Pu-239의 생성이 전체 플루토늄중 60~70%에 머무는 것은 원자로 속에서 오래 태우기 때문에 일어난다. 그러나 천연우라늄을 원자로 속에서 1~3달 이내로 태워 꺼내면 생성된 플루토늄중 핵분열이 가능한 Pu-239의 함량이 90%선을 넘어서게 된다. 따라서 이렇게 해서 꺼낸 사용후핵연료는 원폭을 만들 수 있는 폭약이 될 수 있다. 지금 북한은 바로 이같은 방법으로 핵재처리를 하고 있기 때문에 핵탄제조의 의혹을 받고 있는 것이다.

아무튼 고속증식로는 바로 이에 초점이 맞춰져 있다. 99.2%의 U-238을 Pu-239로 전환해서 사용하게 되면 우라늄

의 이용효율을 현재보다 60~1백배(이론치 1백38배) 높일 수 있게 되기 때문이다.

고속증식로의 장점은 무척 많다. 지금 널리 쓰이고 있는 경수로나 중수로는 아무리 압력을 높인다 해도 온도를 물이 끓는 임계치인 섭씨 3백74도 이상으로 올릴 수 없다. 따라서 전기를 만드는 열효율이 33%정도에 머물러 있다. 그러나 고속증식로는 나트륨(비등점 섭씨8백80도) 같은 금속을 냉각제로 사용하기 때문에 온도를 5백~7백도까지 높일 수 있어 열효율을 45%정도로 끌어올릴 수 있다. 열전도도가 물의 1백배에 달하며 열전달계수도 물의 2배에 이른다. 이 때문에 원자로의 열을 밖으로 뽑아내는데 유리하다. 냉각제가 단일 원소로 된 물질이어서 화학적인 분해가 일어나지 않아 안전하고 값이 싸게 먹힌다. 뿐만 아니라 고속증식로가 되면 토륨(Th-232)을 핵분열물질인 U-233으로 변환할 수 있어 핵연료를 보다 많이 확보할 수 있는 길이 열린다. 그러나 아직은 토륨을 고속증식로의 핵연료로 사용

하는데는 해결해야 할 기술적인 문제가 많다. 어떻게 선진 여러 나라가 일찍부터 고속증식로개발에 관심을 쏟고 있는 까닭은 여기에 있다. 현재 고속증식로 분야에서 앞서가고 있는 나라는 미국과 러시아, 프랑스, 일본, 영국, 독일 등이다.

고속증식로의 가능성은 1945년 E. 페르미와 WH진, E. 윙거에 의해 제시된 후 40년대말 클레멘타인이라는 첫 실험로를 미국 로스 알라모스에 만들어 시운전에 성공했다. 뒤를 이어 1951년 나트륨과 칼륨합금을 냉각제로 사용한 최초의 발전로(2백kw)인 EBR-I을 가동, 사용한 연료보다 많은 연료를 실제로 얻어내는데 성공했다. 미국은 이를 바탕으로 1963년 EBR-II(2만kw)와 FERMI(6만1천kw)를 가동했고 SEFOR(2만kw)를 69년, FFTF(40만kw)를 81년 각각 가동에 들어갔다. 미국은 15만5천kw급의 실증용 고속증식로 PRISM을 2천년대초 가동할 계획이다.

러시아는 1940년대말 국립아카데미가 고속증식로를 소개한 후 50년대 들어와 다양한 금속냉각제를 사용한 실험용 고속증식로를 개발했다. 러시아는 세계 최초로 나트륨을 냉각제로 사용한 고속증식로(BR-5:열출력 5천kw)를 1958년에 개발했다. 1969년엔 연구목적의 BOR-600(6만kw)을 운전해 들어갔다.

그리고 이를 바탕으로 4기의 고속증식로를 운전중인데 80년초 가동에 들어간 BN-600은 60만kw급의 대형이다. 러시아는 현재 2천년초 80만kw급 실증로를 가동할 예정이었으나 악화된 경제사정으로 계획이 유동적이다.

프랑스는 실험로인 랍소디(4만kw)를 60년대말 가동에 들어간 후 원형로인 페닉스(25만kw)와 실증로인 수퍼페닉스(1백20만kw)를 80년대초 운전해 들어갔다. 랍소디는 세계최초의 혼합산화물

(MOX)연료를 사용한 고속증식로이다.

영국은 1954년 영 출력 원자로(ZEPHYR)를 건설한 후 곧이어 1956년 같은 형의 원자로(BR-2)가 가동했고 이를 바탕으로 1959년 실험용 던레이 고속증식로(DFR 6만2천kw)가 운전에 들어갔다. 그리고 원형로(PFR 25만kw)는 1970년대 중반 운전에 들어갔다.

독일은 70년초 실험용 KNK-II(2만kw)에 이어 80년대 중반 원형로인 SNR-300(30만kw)을 운전중이다. 일본은 고속증

식로 분야에서 비교적 늦은 70년에 실험로 조요(10만kw)를 가동했으나 이어 원형로인 몬주(28만kw)를 94년 가동을 목표로 짓고 있다. 이밖에 인도가 실험로(1만3천kw)를 가동한 후 원형로(50만kw)를, 중국이 연구용을 각각 설계중이다.

우리나라는 한국원자력연구소 조만(趙滿)박사(액체금속로개발부장)를 비롯해서 서울대 원자력공학과 등에서 고속증식로 기초연구를 하고 있다.

하지만 고속증식로 개발은 기술적인 어려움에 안전성과 경제성 등의 문제로 해서 일본을 제외한 나라들이 주춤한 상태이다. 아직은 고속증식로가 일반원자로에 비해 건설비가 5~6배정도 비싸게 먹히기 때문이다. 그러나 이는 원자력기술의 발달로 2천년대초 12배정도로 떨어져 고속증식로가 인류의 에너지 문제를 해결해주는 꿈의 원자로로 널리 쓰이게 될 것으로 보인다.

세계 각국의 고속증식로

국가	원자로	열출력	전기출력	냉각재	노형	연료	현황
미국	Clementine	0.025	-	Hg		Pu metal	1946. D
	LAMPRE-I	1	-	Na		Molten Pu	D
	EBR-I	1.4	0.2	NaK		U metal	1951. D
	EBR-II	62.5	16.0	Na	Pool	U metal	1963. O
	Enrico Fermi	200	62	Na	Loop	U metal	1966. D
	SEFOR	20	-	Na	Loop	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	D
	FFTF	400	-	Na	Loop	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1980. O
	CRBR	975	350	Na	Loop	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	C
	CDS	2,550	1,000	Na	Loop	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1992. P
소련	BR-1	0	-			Pu-U metal	D
	BR-2	0.1	-	Hg		Pu metal	D
	BR-5/10	10	-	Na	Loop	Pu metal	1959. O
	BOR-60	60	12	Na	Loop	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1969. O
	BN-350	1,000	350	Na	Loop	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1972. O
	BN-600	1,470	600	Na	Pool	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1980. O
BN-1600-1	4,200	1,600		Pool		1990. P	
프랑스	Rapsodie	40	-	Na	Loop	U metal	1967. O
	Phenix	563	250	Na	Pool	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1973. O
	Super Phenix I	3,000	1,200	Na	Pool	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1986. C
	Super Phenix 2&3	3,750	1,500	Na	Pool	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1992-91. P
	Super Phenix 3&4	3,750	1,500	Na	Pool	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1992-93. P
영국	Dounreay	60	13.5	NaK	Pool	U metal	1977. O
	PFR	600	250	Na	Pool	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1974. O
	CDFR-1	3,250	1,300	Na	Pool	Pu-U metal	1992. P
서독	KNK-2	58	20	Na	Loop	UO	1962. O
	SNR-300	762	327	Na	Loop	Pu-U metal	1985. C
	SNR-2	3,250	1,300	Na	Loop	Pu-U metal	1993. P
일본	JOYO	75-100	-	Na	Loop	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1977. O
	MONJU	714	300	Na	Loop	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1987. C
	DFBR	2,800	1,000	Na		PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1993. P
이탈리아	PEC	135	-	Na	Loop	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1983. C
인도	Madras FBTR	42	17	Na	Loop	PuO <sub>2</sub> /UO <sub>2</sub>	1983. C

[註] 현황의 연도는 운전시작 또는 운전예상 연도임  
O: 운전중 D: 폐쇄 C: 건설중 P: 계획중