

차세대 원자로 「몬주」의 실체

도 유 봉
에너지관리공단 과장

1. 머리말

일본의 “동력로·핵연료개발사업단”이 국가적인 프로젝트로서 추진해 온 고속 증식로 「몬주」(전기 출력 28만kW)는 '94년4월5일 오전10시1분, 처음으로 핵분열의 연쇄반응이 연속적으로 계속되는 “臨界”에 도달하였다. 이것은 계획에서 개발까지 약 30년, 6000억엔을 투입한 「몬주」의 운전이 개시된 것으로, 일본의 원자력개발은 21세기를 맞이하여 플루토늄을 연료로 하는 새로운 시대로 접어들었다.

「몬주」의 로심에는 '93년 10월부터 연료의 裝荷가 행해져 '94.4.5일까지 168본의 연료집합체가 수납되었고 여기에 제어봉을 引拔하면 핵분열의 연쇄반응이 계속되어 “임계”로 된다. 4월5일 오전 9시가 지나서 제어봉 인발작업을 4단계로 나누어 실시하였고, 각 단계마다 과학기술청의 검사관이 입회하여 중앙제어실에 있는 중성자계측 데이터를 확인하는 작업을 하여 10시 1분에 계측데이터가 “임계”로 된 것을 검사관이 확인하였다. 앞으로 로심의 플루토늄 연료는 5월말까지 30분을 추가 장입하여 모두 198본으로서, 내년 4월부터 발전을 개시하여 12월 중순부터는 본격운전에 돌입할 예정이다.

2. 고속증식로의 개요

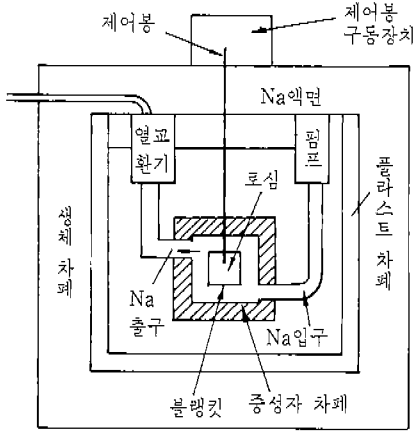
현재 실용화되고 있는 열중성자로는 천연우라늄 ${}_{92}\text{U}^{235}$ (농축포함)을 연료로 하는 원자로이다.

중성자가 ${}_{92}\text{U}^{235}$ 에 충돌하면 핵분열을 일으켜 연료로서 소비되지만 중성자가 ${}_{92}\text{U}^{238}$ 이나 토륨 ${}_{90}\text{Th}^{232}$ 에 충돌하면 ${}_{92}\text{U}^{238}$ 은 ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ 로, ${}_{90}\text{Th}^{232}$ 는 ${}_{92}\text{U}^{233}$ 으로 바뀐다. 이들은 어느 것이나 핵분열을 일으키는 연료로서 사용할 수 있기 때문에 원래는 핵분열하지 않은 것으로부터 연료로 전환된 셈이 된다. 여기서 소비된 양과 그 결과 새로 만들어진 연료의 양과의 비율 전환비라 부르며, 이것을 원자로의 연료 경제성을 나타내는 수치로서 사용하고 있다. 곧 전환비는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{전환비}(R) = \frac{\text{생산된 새로운 연료의 수(양)}}{\text{소비된 연료}({}_{92}\text{U}^{235})\text{의 수(양)}}$$

일반적으로 전환비(R)가 1보다 커지는 것을 증식이라 하고 R를 증식비라고 부르기도 한다. 로의 호칭도 $R \leq 1$ 일 경우에는 전환로, $R > 1$ 의 것은 증식로라 부르고 있다. 실제로 R의 값은 경수로에서 0.5 정도, 고온가스로에서는 0.6~0.8 정도이고 고속증식로에서는 1.2~2.0 정도이다.

고속증식로(Fast Breeder Reactor:FBR)는 감



〈그림 1〉 고속 증식자로의 일례

속재를 사용하지 않고 고속증식자로 연쇄반응을 일으켜서 핵분열로 방출되는 중성자를 유효하게 이용함으로써 열의 발생이용과 함께 ${}_{92}\text{U}^{238}$ (천연우라늄의 99.3%나 차지함)에 중성자를 흡수시켜 ${}_{92}\text{U}^{239}$ 를 거쳐 ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ 를 만들어 낸다. 곧 고속 증식로는 핵분열로 발전하면서 새로운 연료를 만들어 나가는 방식의 원자로로서 ${}_{92}\text{U}^{235}$ 나 ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ 의 원자 1개가 핵분열하였을 때 1개 이상의 ${}_{92}\text{U}^{238}$ 이 ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ 로 바뀌어 상술한 전환비 R가 1보다 큰 원자로이다. 로이다.

꿈의 원자로라고 불리는 고속증식로는 이처럼 타지 않는 우라늄 238을 새로운 연료인 플루토늄으로 바꾸고 다시 원자로 내에서 소비된 것 이상의 플루토늄을 만들어내기 때문에 고속증식로가 실용화되면 현재의 우라늄량이 70배로 증가되는 결과가 될 것이다. 그림 1은 고속증식자로의 일례로서 구성요소는 다음과 같다.

(1) 핵연료

소형의 고속로에서는 핵연료로서 농축도가 약 20% 정도로부터 90% 정도의 금속우라늄이나 우라늄의 몰리브덴합금이 사용된다. 대형의 동력용 고속로에서는 세라믹연료, 그중에서도 특히 산화물 연료가 유망해서 PuO_2 와 UO_2 의 혼합체 등이 사용되고 있다. 이밖에 카바이드 연료도 고속로

연료로서 우수한 특성을 지니고 있어 현재 이에 대한 연구가 추진되고 있다. 보통의 고속로에서는 로심의 출력밀도가 극히 높아지므로 열제거를 쉽게 하기 위해서 연료를 가늘게 가공할 필요가 있기 때문에 일반적으로는 핀형(Pin type)의 연료체가 많이 사용되고 있다.

(2) 냉각재

고속로의 로심은 출력밀도가 높으므로 로심의 냉각기술은 아주 중요하다. 현재 냉각재로서 가장 널리 사용되고 있는 것은 금속나트륨이다. 이밖에도 증기나 가스를 냉각재로서 사용하는 예도 없지 않으나 특히 이 경우에는 열제거 효율을 높이기 위해서 냉각재를 고압으로 할 필요가 있다.

(3) 블랭킷(Blanket)

블랭킷은 고속로 특유의 것으로서 로심의 주위를 둘러싼 연료 親物質로 만들어지고 있으며 로심으로부터 누출된 중성자를 연료친물질에 흡수시켜서 핵분열성 핵종을 얻기 위한 설비이다.

(4) 반사체

고속로의 반사체로서는 스테인레스 강이나 납이 사용된다.

(5) 제어봉

소형의 에너지 스펙트럼이 큰 고속로에서는 연료요소자체 또는 탄탈을 제어봉으로 사용한다. 대형의 에너지 스펙트럼이 낮은(연한) 고속로에서는 보통 B_4C 가 사용된다.

(6) 차폐

방사선 차폐에 관해서는 열중성자로의 경우와 거의 같으며 일부 고속로에서는 노심의 바로 옆에 강재(鋼製)의 플라스틱 차폐라고 불리는 차폐재를 두어 사고가 일어났을 때 발생하는 에너지를 흡수하도록 하고 있다.

고속증식로는 천연에 존재하는 ${}_{92}\text{U}^{238}$ 을 가장 유효하게 이용할 수 있는 원자로로서 경수로에서는 천연우라늄이 갖는 에너지의 0.7% 정도밖에 이용

할 수 없는데 비하여 이 고속증식로에서는 원리적으로 100%까지도 이용이 가능한 것이다.

3. 열중성자로와의 차이점

열중성자로 중에서 경수감속냉각로는 주로 미국에서 개발된 것으로서 가압수형 원자로(Pressurized Water Reactor:PWR)와 비등수형 원자로(Boiling Water Reactor:BWR)의 2가지가 현재 실용화되어 있으며, PWR은 미국의 웨스팅하우스사에 의해 개발된 것으로서 세계적으로 가장 많이 보급되어 있으며 우리나라에서도 고리원자력을 비롯하여 영광, 울진 등 여러곳에서 운전중에 있는 로형으로서 개념도는 그림 2와 같다.

고속증식로는 핵분열 연쇄반응이 주로 고속중성자에서 일어나므로 여러 가지 면에서 열중성자로와 다른점이 많다. 그 중에서도 가장 큰 차이점은 표 1과 같이 로내에 감속재가 없다는 것과 연료로서 핵분열성 핵종의 농도가 높은 연료가 사용되고 있다는 것을 들 수 있으며, 개념도는 그림 3과 같다.

고속증식로는 우라늄이 가진 에너지를 최대한으로 인출할 수 있는 원자로로서 미국이 1946년에

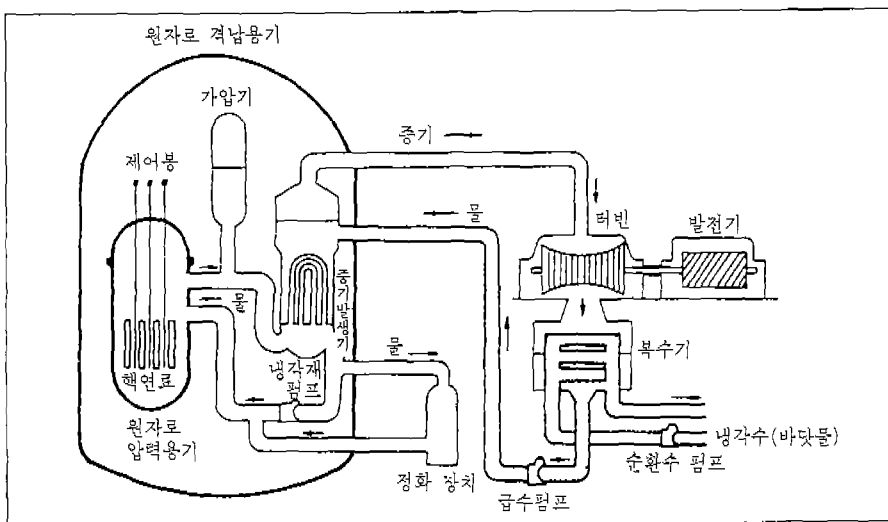
세계 처음으로 실험로 「Clementine(열출력 25kW)」을 개발하였고, 1951년에는 실험로 「EBR-I(전기출력 200kW)」를 개발하였으며, 뒤를 이어 구소련, 영국, 프랑스도 고속증식로를 개발하여 왔다. 특히 프랑스에서는 이미 「피닉스(전기출력 25만kW)」라 불리는 고속증식로가 운전중이며 보다 규모가 큰 「슈퍼피닉스(전기출력 124kW)」로 건설, 시험·운전단계에 있다.

4. 「몬주」의 개발동향

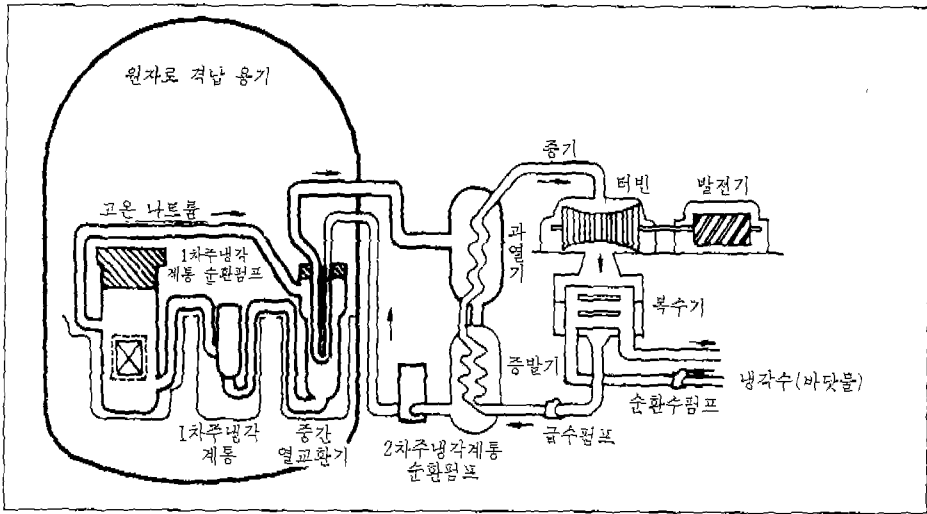
일본에서는 1956년에 원자력위원회가 책정한 「원자력개발 장기계획」을 근간으로 하여 고속증식로의 개발이 개시되었다. 1966년에 고속증식로 개

〈표 1〉 FBR/PWR의 주요특성비교

구 분	고속증식로	열중성자 경수로
핵 연 료	고농축 우라늄(20~90%) 플루토늄	천연 우라늄
감 속 재	없 음	저농축 우라늄(2~4%) 경 수
냉 각 제	나트륨, 나트륨·칼륨합금	경 수
연료이용율	100%	0.7%
증기조건	증기온도 : 540℃ 증기압력 : 170kg/cm ²	270~280℃ 60~70kg/cm ²
연료전환율	1.2~2.0	0.5



〈그림 2〉 가압수형 원자로(PWR)의 개념도



〈그림 3〉 고속증식로(FBR)의 개념도

발을 국가프로젝트로서 총력을 기울였으며, 1967년에 설립된 "동력로·핵연료개발사업단"이 그 추진을 담당하게 되었다. 1970년에 「몬주」의 건설에 정지로서 福井縣敦賀市白木이 선정되었다. '85년 10월부터 본격적인 공사가 시작되어, '87년 4월에는 원자로 격납용이 완료, '88년 10월에 원자로용기 설치완료후, '91년 4월에는 전체적인 기기의 설치가 완료되어 5월부터 시운전을 개시하였다. 또 본체의 로심연료를 장입하기 전에 모의연료를 넣고, 상온공기중/아르곤가스중/나트륨중의 각각 시험환경에서 기기나 설비가 플랜트로서 종합적으로 충분히 기능을 발휘하는가를 확인하는 「종합기능시험」이 '92년 12월까지 행해졌다. 계속하여 「성능시험」에 들어가 플랜트특성 예비시험을 '93년 6월

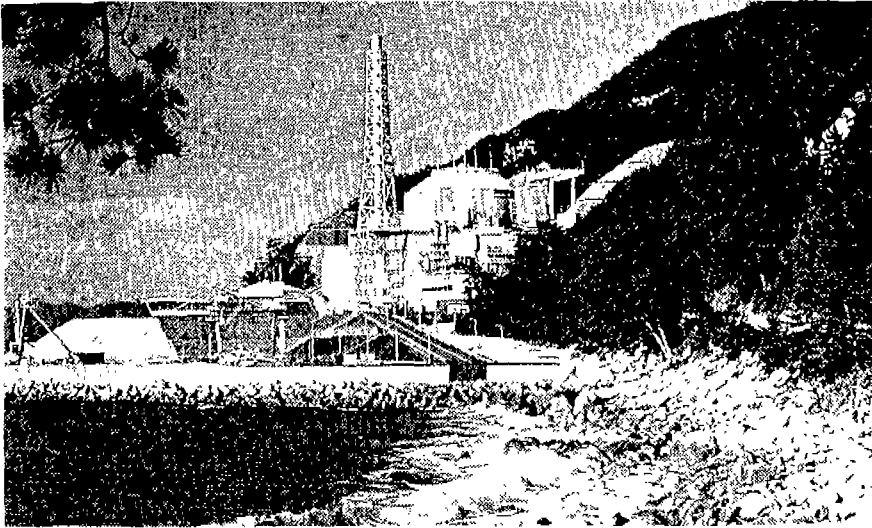
임계** : 핵분열의 연쇄반응이 계속되는 상태를 말하며, 이 조건일 때 원자로는 일정한 출력으로 운전을 계속할 수 있다. 「몬주」에서는 로심연료집합체의 장입을 중간에서 중단하고 제어봉을 인발하여 중성자수를 확인하는 작업을 반복하여 최소 연료집합체수로 핵분열 연쇄반응을 유지하는 상태인 최소임계(이렇게 처음으로 임계하는 것을 초임계라고 한다)에 도달하는 것은 약 170분 정도였다고 한다.

에 종료하고, 총점검 및 연료장입을 준비하여 10월 13일부터 11월 3일까지 198본이 들어가는 「몬주」로심 연료집합체중, 본체 내측로심 연료집합체 108본이 장입되었다. 나머지 외측로심 연료집합체는 금년 1월부터 장입이 시작되어 4월에 처음 임계**에 도달하였다.

5. 「몬주」의 전모

고속증식로 「몬주」는 현재 원자력발전의 주역으로서 활약하고 있는 경수로를 대체할 수 있는 차세대 원자로이다. 「몬주」는 경수로에 비해 연료연소 효율이 좋고 고속중성자의 충돌에 의하여 연소하지 않은 우라늄을 연소할 수 있는 플루토늄으로 변화시키는 연료증식 기능을 가지는 고속증식발전로이다.

경수로가 원자로의 열을 물로 빼내지만 「몬주」에서는 중성자를 감속시키지 않고 열전도성이 우수한 액체나트륨이 냉각재로서 사용된다. 「몬주」는 원자로에서 열을 빼내기 위해 1차계, 2차계에서 약 1,500톤의 나트륨이 사용된다. 이 나트륨은 대기압하에서 비등점이 약 880℃로 높기 때문에 대기압에 가까운 압력에 있어서도 높은 온도조건



〈사진〉 고속증식로 「몬주」의 전경

을 얻기 쉬우므로 전기로의 변화효율이 좋아지게 된다.

또한 원자로 사고로서 문제시되는 냉각재 누출에 대해서도 나트륨이 급속히 감압비등해서 분출할 수가 없기 때문에 냉각재를 받는 접시와 같은 용기에 수납하여 로심에 냉각시키므로, 경수로와 같이 고압의 냉각재를 로심에 주입하는 비상용 로심냉각계(ECCS)와 같은 특별한 장치를 필요로 하지 않는다. 한편 나트륨은 화학적 활성이 높기 때문에 플랜트설계상 배려가 필요하다.

연료로서는 우라늄과 플루토늄의 산화물혼합연료를 로심 중앙에 배치하고 주위를 블랭킷연료(열화우라늄산화물)로 둘러싸 중성자가 효율적으로 사용되도록 고안되어 있다.

고속증식로 「몬주」의 주요사항

- 원자로 형식-나트륨냉각 고속중성자·루프형
- 출력-열출력 74.4만kW, 전기출력 28만kW
- 연료-플루토늄·우라늄혼합산화물
- 증식비-1:2

「몬주」는 원형로인 만큼 발전플랜트로서는 중간 규모로 플랜트로서의 기능이나 대형화로의 기술적인 가능성이 확인되었다. 「몬주」의 다음 단계는 實證爐로서 상업규모인 대형 발전을 램트로서의 경제적이상 등을 중점적으로 확인할 것이다. 일본

의 실증로는 전력회사가 주체로 되어 현재 설계단계에 있으며, 그 성과를 기초로 하여 실용로(상업로)가 건설될 예정으로 있어 고속증식로의 실용화는 21세기 전반경으로 보고 있다.

6. 맺음말

천연우라늄에는 핵분열하는 우라늄235가 0.7%밖에 포함되어 있지 않고, 경수로는 이 우라늄을 2~4%로 농축한 연료를 사용하고 있다. 우라늄자원의 가채매장량은 현재 소비패턴으로 보면 74년 정도로 우라늄235 이용만으로는 한계가 있다고 말할 수 있다. 그러므로 천연우라늄의 대부분(99.3%)을 차지하고 있는 우라늄238은 원자로내에서 연소하여 플루토늄으로 변하기 때문에 경수로 등에서 사용되지 않았던 연료를 재처리하여, 회수한 플루토늄을 이용하면 현재의 가채매장량으로도 수천년분에 상당하게 된다. 우라늄뿐만은 아니지만 우리나라는 특히 천연자원이 부족한 나라로서 원자력발전 이용에서도 그 초기단계부터 사용된 연료를 재처리하여 회수된 플루토늄이나 우라늄을 리사이클하여 핵연료로서 재이용하는 「핵연료리사이클정책」을 에너지 안정공급 차원에서 추진할 필요가 있다고 사료된다.