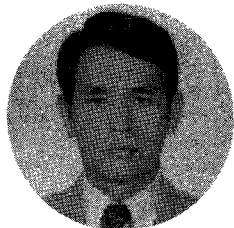


強國으로의 열쇠



趙 滿

(韓國에너지研·高速爐研究室長)

원자력의 위력

동북시베리아, 영하 60℃의 긴 겨울을 지내야 하는 추코토카 지역에는 비리비노·차운스크 광구에 전력을 공급하고, 비리비노 마을에 전력과 난방용, 농업용 열을 공급하고 있는 4만8천KW 열병급 원자력발전소가 있다. 년 23톤의 디젤 오일이 공급하고 있던 에너지를 년 40톤의 핵연료로 공급하고 있는 것이다.

이것을 고속증식로와 핵연료주기시설을 갖추어 우라늄-플루토늄 재순환을 실시하면 년 1톤 미만의 감손우라늄으로 공급할 수 있고, 또한 40톤의 감손우라늄을 한번 운반하여 가져가면 60년의 원자로수명기간 동안 연료의 공급없이 에너지를 공급할 수 있게 된다. 고립무원의 이 한촌을 생산성이 높은 광산촌으로 변모시킨 것이다.

에너지의 擴大·再生産으로 이룩되어진 고도 산업사회에서 광활한 대지는, 그 광활하다는 그것 자체로 에너지수송비용을 증대시켜 깊은 잠에서 깨어날래야 깨어날 수 없는 깊은 잠에 빠져 있었다. 그러나 원자력은 에너지 자원으로 부터 멀리 떨어진 공업지역, 永久凍土와 砂漠, 草原과 原始林이 덮혀있는 광활한 大地에 전력, 열, 담수를 수송망 없이 공급할 수 있게 하여

생산성을 비약적으로 증대시켜 주는 가능성을 약속한다. 광활한 대지 자체가 기지개를 펴면서 오랜 잠으로부터 깨어나게 된다. 소련의 지도자들이 이 강국으로의 열쇠를 갖고자 노력하는 것은 너무나 당연하다. 금상첨화로 깨끗하고 가장 경제적인 에너지인 것이다.

소련이 원자력개발에 쏟는 노력은 대단한 것이다.

세계 최초로 고속증식로를 개발한 나라는 미국이다. 이 고속증식로에서 액체금속나트륨을 冷却材로 처음 사용한 나라는 소련이고, 혼합산화물핵연료를 최초로 사용한 나라는 프랑스이다.

전월호에서는 미국에 있어서의 고속증식로개발을 다루는 한편 고속증식로의 노물리적 측면의 발달과정도 살펴보았다.

이번호에서는 소련에 있어서의 고속증식로개발을 개관하면서 액체금속나트륨의 냉각재로서의 기능도 살펴보도록 하겠다.

소련에 있어서의 고속증식로의 역할을 살펴보면, 1981~1985년을 대상기간으로 하는 제11차 5개년 계획에서는 열중성자로의 건설에 주력, 이것으로 기저부하를 담당토록 계획하고 또한 장차의 고속증식로용 핵연료인 플루토늄을

생산시켜 이것을 제 1 단계로 한다. 1986~1990년을 대상기간으로 하는 제12차 5개년 계획에서는 원자력발전 제 2 단계로 정의하고 고속증식로 건설에 주력하며, 2000년경에는 원자력발전에서의 열중성자로와 고속증식로의 역할이 같아지게 한다. 그 이후부터는 고속증식로의 건설에만 주력하여 우라늄자원의 고도활용을 이룩한다.

금년으로부터 시작된 제12차 5개년 계획에서는 고속증식로 실용로 BN800의 '베로알스크' 착공을 시작으로 하여 20기까지의 시리즈 건설을 개시하였다. 또 한편으로는 2000년 이후의 실용화를 대비한 160만KW급 대형로의 개발과 N_2O_4 등 解離가스를 이용한 가스냉각고속증식로의 개발도 착수하였다.

소련의 BN600은 오늘날 세계에서 가동되고 있는 고속증식로 가운데 시설용량면에서 제일 큰 원자로이다.

1981년12월이래 60만KWe의 전출력운전을 성공적으로 수행하고 있는 것이다. 프랑스의 Super Phenix가 120만KWe의 전출력운전을 개시할 금년 7월까지의 세계 최대의 실증로인 셈이다.

고온 고효율 증식로의 추구

우랄산맥 동쪽, 시베리아의 베로알스크(Beloyarsk)에 건조된 이 BN600은, 핵연료·로재료의 조사시험로 BOR-60과 열출력 70만KW로 13만KWe의 전력과 하루 8만톤의 담수(淡水)를 생산하고 있는 고속증식로 원형로 BN350의 성공적인 설계·건조와 운전의 경험을 살려 개발된 것이다.

바로 이 BN600이 위치한 베로알스크에 특이한 특성을 갖는 2기의 열중성자로가 있다. 소련 사람이 고온 고효율의 원자로 개발에 얼마나 집착하였는가를 단적으로 보여주는 원자로이다.

1764년 4월과 1967년 10월에 '스벨돌후스크'

電力網에 송전을 개시한 베로알스크 1호기와 2호기가 바로 그것이다.

상식적으로 널리 받아들여지고 있는 열중성자로의 정형은 미농축우라늄을 핵연료로 사용하는 경수감속·경수냉각의 PWR과 BWR, 흑연감속·가스냉각의 AGR, 천연우라늄핵연료를 사용하는 중수감속·중수냉각의 CANDU로이다. 이들은 한결같이 300℃ 내외의 포화증기를 생산하여 증기터빈을 이용하는 발전로이다. 이들의 열-전력 변환효율은 30%내외로서 신예 화력발전소의 40%내외의 효율에 훨씬 못되는 낮은 효율을 갖고 있다.

그러나 소련에서의 초기 열중성자로 개발에서는 40%정도의 열-전력 변환효율을 이룩한 신예 화력발전소의 터빈발전기를 돌릴 수 있는 핵과열증기를 직접 원자로에서 생산하는 원자로의 개발에 많은 힘을 기울였다.

원자로 설계자들에게 주어질 임무는 신예 화력발전소터빈에 필요한 90기압, 510~520℃의 과열수증기를 만들어 낼 수 있는 원자로를 만드는 일이다. 그들이 개발하여 낸 원자로가 바로 베로알스크 1호기와 2호기이다.

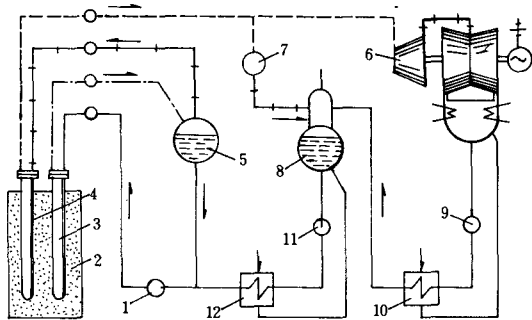
1호기의 개량형인 2호기를 살펴보면, 평균농축도 3%의 우라늄핵연료를 흑연감속재 속에 채널을 만들어 삽입하고, 스텐레스 스틸을 사용하는 이 핵연료는 압력관 속에서 경수와 과열증기로 냉각된다.

이 원자로에는 998개의 핵연료채널이 있고, 그 가운데 730개는 증발채널, 나머지 268개는 증기의 과열용이다. 냉각수는 150기압, 300℃로 증발채널로 들어가고 출구에서의 기·수혼합물의 온도는 340℃이다. 여기서 나온 증기는 압력 115기압, 320℃로 증기 과열채널로 들어가 90기압, 520℃의 과열증기로 나오게 된다. 이 핵과열증기(核過熱蒸氣)는 공장 제작된 20만K-We 화력발전소에서 쓰이던 열-전력 변환효율이 38%인 터빈-발전기에 보내진다. 여기서 쓰

인 동형의 터빈발전기가 훗날 고속증식으로 원형로 BN600에서도 쓰이게 된다.

베로알스크 2호기의 냉각수유로도를 그림 1에 나타내었다.

90기압, 520°C 양질의 과열증기를 원자로에
 〈그림 1〉 베로알스크 2호기의
 원자력증기공급계통의 유로도



- 水 ++ 飽和蒸氣
 — 氣水混合物 --- 過熱蒸氣
- 1 - 순환펌프 2 - 원자로 3 - 증발채널 4 - 증기 과열채널 5 - 드럼형분리기 6 - 터빈발전기 7 - 기화기 8 - 공기분리기 9 - 복수펌프 10 - 저압재생가열기 11 - 급수펌프 12 - 저압재생가열기

서 직접 생산하여 이미 최적화되어 공장제작되고 있는 터빈발전기를 개량없이 사용토록 한 점이 다른 나라의 열중성자로의 개발에서는 볼 수 없었던 시도인 것이다.

새로운 동력원인 원자력과 최신편 증기터빈을 결합시키고자 하는 개발정신이 발전하여 고속증식으로 이어지고, 액체금속나트륨의 冷却材 사용의 길을 찾아내게 된 원동력이 된 것이다.

15% 정도로 농축도를 높인 핵연료를 사용하는 원자로에서는 중수나 경수, 흑연과 같은 감속재를 필요로 하지 않는다는 것을 이미 전월호까지 두번에 걸쳐 기술한 바 있다.

물론 374°C의 임계점을 갖는 물을 냉각재로 사용할 필요가 없다. 더우기 물은 감속효과를 갖고 있어 원자로내에서 사용하는 것은 고속증식로는 바람직하지 못하다.

고속증식로의 냉각재로는 신예증기터빈의 최적증기온도인 500°C 내외에서 ±300°C의 온도 여유를 갖는 유체가 바람직할 것이다.

〈表 1〉 플랜트특성에 영향을 미치는 나트륨冷却材의 特徵

(表 1-1) 設計에 미치는 物理的 特性

項 目	特 性 值 比 較		영 향 을 주 는 현 상	參照
	물	Na		
용점(°C)	0(대기압)	97.8(대기압)	예열히터의 필요 (나트륨냉각계 전시스템을 로정지시에도 200°C 정도로 유지하고 있어야 함)	A
비등점(°C)	100(대기압) (284at 70atm)	881(대기압)	나트륨냉각계의 저압·고온특성 • 고온증기에 대한 고효율(신예화력에 준함) • 나트륨냉각계통의 저압화 • 크리프 발생 온도영역 → 고온구조 설계	B C D
비열 Cp (cal/g°C)	1.25(at 280°C)	0.304(물의 1/4) (at 370°C)	노심 입·출구 온도차가 큼. (경수로 PWR)의 4배 • 크나큰 열충격의 원인이 됨.	E
열전도율 λ (Kcal/mh°C)	0.49(at 280°C)	61.5(물의 100배) (at 370°C)	냉각재 경계에서의 열전달율이 큼. (h가 물의 2~3배로부터 몇 배 크기 때문에 유체벽면에서의 열이동특성이 큼)	F
동점성계수 ν × 10 ⁶ (m ² /S)	0.13(at 280°C)	0.33(물의 3배) (at 370°C)	유체저항은 커지나 난류상황에서는 마찰손실계수는 Re의 1/4승에 비례하는 함수가 되기 때문에 물과의 차가 별로 나타나지 않음.	
밀도 ρ (kg/m)	751(at 280°C)	85.6(물의 3배) 물과 비슷함		

나트륨의 채택

고속증식로의 개발이 진척됨에 따라 원자로에서 발생하는 높은 에너지를 전달하는 열매체로서 액체금속이 주목받기에 이르렀다. 액체금속 가운데에서도 특히 나트륨은

- 1) 열전달이 좋다
- 2) 금속재료와의 공존성이 좋다
- 3) 비등점이 높아 원자로의 운전온도에서도 대기압에서 액체상태로 유지할 수 있다
- 4) 나트륨은 화합물과 같이 분해되지 않기 때문에 열적 성질 등이 급변하는 일이 없다
- 5) 핵적으로 중성자의 흡수가 적다(리튬이 열적 특성은 우수하나, Li-6의 중성자 흡수가 커서 사용되지 않는다)

등의 이유로 고속증식로의 냉각재로 선택되게 되었다. 나트륨 이외에도 상온에서 액체상태인 Na-K나 수은도 이용될 수 있으나, 취급상의 어려움과 로재료와의 공존성, 생산비가 고가인 이유로 오늘날 나트륨이 고속증식로의 냉각재로서 거의 대부분의 설계에 채용되고 있다.

(表 1-2) 設計에 미치는 化學的 特性

項 目	比 例	較 Na	영 향 을 주 는 현 상 직 접 적 영 향	參 照
化學的 特性		특히 물, 산소에 대하여 격렬한 화학적 활성을 나타냄.	물(콘크리트)과는 炸烈的으로 반응하며 또한 공기중에 새어나온 고온나트륨은 흰 연기를 뿜으면서 연소한다. • 나트륨 액면위의 Cover gas는 아르곤 등의 휘가스를 필요로 함.	G
			• 연료교환은 모두 회전프러그 등에 의한 밀폐, 원격·자동에 의하여야 하며, 가스공간은 휘가스 충전이 필요함.	H
			• 냉각재의 누설은 나트륨화재의 위험이 있기 때문에 일차계 기기실은 질소가스분위기로 유지가 필요함.	I
			• 누설 나트륨에 대한 콘크리트 방호에 배려가 필요함.	J
			• 사용후 핵연료에는 나트륨이 부착, 저장저장장을 포함하여 특별 취급이 필요함.	K
			• 일차계 나트륨과 수증기계통의 사이(열교환기)에서의 누수가 있을 경우, Na-물의 격렬한 반응에 의하여 로심에 지장을 초래하지 않도록 하여야 함.	L

이 나트륨을 냉각재로 채택할 경우, 주목하여야 할 설계상의 특징과 발전단가에 미치는 영향을 요약하면 표 1 과 표 2 와 같이 된다.

나트륨의 제조법은 전기분해법과 열화학법 두 가지로 나눌 수 있다. 전기분해법으로는 용융 가성소오다를 분해하는 Castner법, 용융식염을 전기분해하는 Downs법, 전해식염으로 부터 생겨난 납과 아말감에서 이 아말감을 전기분해하는 아말감법이 있다.

Castner법은 분해시 발생하는 수분을 제거하여야 하기 때문에 전기효율이 악화되나 가성소오다의 용점이 식염보다 낮아 조작이 용이하기 때문에 일본을 위시한 여러곳에서 쓰이고 있다.

Downs법은 식염의 용점이 높아 고온의 시설을 필요로 하나 전기효율이 좋기 때문에 미국의 대부분의 회사에서 이 방법을 채택하고 있다.

열화학적 방법으로는 탄산나트륨 또는 가성소오다를 탄소와 혼합하여 가열하는 방법과 식염을 탄산나트륨과 반응시키는 방법 등이 있으나 대규모 생산에는 쓰여지고 있지 않다.

원자로급의 나트륨은 42%의 NaCl과 58%의 CaCl₂를 혼합, 용점을 900°C에서 600°C로 낮춘 뒤 전기분해로 얻어내어 이를 다시 100°C에서 칼슘을 400ppm까지 석출시킨다. 이를 다시 350°C에서 산화조절법과 정화법을 이용하여 NaCl의 양을 10ppm이하로 낮추어 고속증식로의 냉각재로 공급한다.

고속증식로에 쓰이는 원자로급 나트륨의 불순물 허용도는 표.3 과 같다.

원자로재료의 부식은 나트륨 속의 불순물, 온도 등에 의하여 영향을 받게된다. 가장 나쁜 영향을 미치는 것은 나트륨 속의 산소농도이다.

산화나트륨에 의하여 산화철이 생겨 부식되

고 이 산화철이 나트륨 속에 녹아 나오는 것이다. 이와같이 녹아나온 산화철은 계통내의 온도가 높은 곳으로부터 온도가 낮은 곳으로 이동, 침전하게 되며 질량이행현상이 생기게 한다.

고속증식로의 로재료와 핵연료피복재로 널리 쓰이고 있는 스텐레스 스틸에서는 크롬과 니켈이 용출하여 초기의 부식은 크나 용출 후에는

(表 3) 原子爐級 나트륨불순물 허용도

원 소	허용도 (ppm)	원 소	허용도 (ppm)
Calcium	10	Lithium	20
Barium	5	Silver	20
Carbon	50	Chlorine + Bromine	20
Sulphur	30	Oxygen	3
Boron	5		

(表 2) 設計와 發電單價에 미치는 영향(輕水型爐 比較)

관련항목	설계에 미치는 영향	발전단가에 미치는 영향
1 E, F	원자로용기, 배관은 가혹한 열충격 때문에 얇아야 한다(薄肉構造의 必要性). (2)(3)과 관련하여 내진설계상의 곤란이 증대됨.	물량감소의 이점이 있으나, 설계의 어려움으로부터 제작비의 양등효과도 큼.
2 H	회전프러그, 斜傾引出機構 등 構造上の 요구 및 사용 후 핵연료의 로내 나트륨 이동 등으로 로용기는 경수로에 비하여 상대적으로 커지고 또한 복잡하다.	로본체의 대형화, 복잡한 설비의 증대→물량증대
3 E, F, D	고온에 의한 열팽창을 흡수하여야 함. 얇은 배관이어서 하기 때문에 강배관시스템 채용 불능. 따라서 배관을 길게, 멀리 돌림으로써 L자 부분의 응력을 완화한다(루프형의 경우 경수로의 10배의 길이에 이른다). 배관길이의 증대→내전스너버수의 증대. 배관보온예열히터의 증대. 배관을 수용할 격납용기의 크기가 커짐. 환기 공조계의 용량이 증대됨.	배관을 길게 돌림으로서 직접, 간접적인 물량의 증가를 가져와 건설단가를 높인다.
4 K	사용후 연료도 나트륨이 부착되어 있어 저장저, 부저 밖으로의 방출을 위하여 나트륨세척 등 배려가 필요하다.	복잡한 설비가 증가하여 건설비의 상승요인이 됨.
5 L	나트륨-물 반응사고의 영향이 로심에 미치지 않도록 중간열교환계가 필요(나트륨계, 이차나트륨계, 수증기계는 삼차계가 됨). 이들 모두를 수용할 건물이 커짐.	경수로부터 계통이 하나더 증가→원자로건물 용적 증대-물량 증대-건설비 증대
6 A, G, I, J	○ 그밖의 발전단가 증대 요인 예열계의 추가 → 소내 전원설비용량, 환기 용량의 증가 아르곤가스계 추가 나트륨화재에 대한 방호콘크리트 방호 조치	설비의 종류, 양의 증가에 따르는 건설비 증가. 설비의 용량증가에 따르는 건설 증가.
7 B, C	○ 발전단가를 내리는 효과 요인 고온증기에 의한 고효율 저압에 의한 재료물량의 저감	고효율에 따르는 발전단가 감축. 물량감소에 따르는 발전단가 감축 (단, 효과가 적음)

페라이트층이 형성되어 점차 부식율이 감소된다고 한다.

이 밖에 중요한 불순물은 탄소이다. 나트륨속에 담겨진 금속재료는 조직내의 탄소가 선택적으로 나트륨속에 녹아나가는 탈탄(脫炭)현상과 나트륨속의 탄소가 금속내에 스며 들어가는 침탄(浸炭)현상이 있다. 스텐레스스틸은 탄소농도가 낮기 때문에 침탄현상이 주로 발생하게 되며, 재료의 강도와脆性에 영향을 미치게 된다. 따라서 소정의 플랜트수명을 지키기 위하여는 나트륨속의 불순물제거는 중요하여진다.

나트륨속의 불순물제거법으로는 여과법, 확산침전법, 콜드트랩법, 원심분리법, 진공증류법, 고온트랩법, 화학적트랩법 등이 있다. 오늘날 널리 채용되고 있는 불순물제거법은 불순물속에서의 불순물의 용해도가 차이나는 점을 이용하는 콜드트랩(Cold Trap)법으로서 나트륨의 온도를 불순물의 포화온도보다 낮게 유지하여 불순물이 석출되도록 하는 물리적방법이다. 산소제거를 주로 하나 수소, 탄소, 금속불순물, 고체성 핵분열 생성물의 제거에도 쓰여질 수 있다.

Super-Phenix와 같은 최근의 고속증식로에는 집적화(集積化)되어 있는 콜드트랩형 불순물제거장치가 일차냉각계통인 원자로용기에 직접 설치되어 있다.

고속증식로 개발

소련에 있어서의 고속증식로의 연구는 열중성자로에 의한 원자력발전소가 건설되고 있던 '오브닌스크'에서 1949~1950년에 시작되었다. 로물리의 기초연구로부터 시작된 연구는 1955년 오브닌스크 물리연구소에서 BR-1이 건설되고 중성자물리연구에 이용되기 시작하면서 BR-2, BR-5들이 연이어 건설, 운전되어 나갔다. 특히 세계 최초의 나트륨 냉각재 이용로가 된 BR-5는 산화플루토늄을 핵연료로 사용한 원자로로

서도 유명하다. 또한 BR-5의 장기운전으로부터, 원형로 BN-350, 실증로 BN-600의 기술적 가능성을 예견하여 주는 결과들을 얻어내었다. 이밖에도 BFS-1, BFS-2, Kobra 임계실험장치들을 건설하여, 로물리, 로공학, 로재료의 연구와 운전경험을 토대로 1969년에는 60MW 열출력의 본격적 실험로 BOR-60이 '도미트로보그라도' 원자로연구소에서 가동되기 시작하였다. 나트륨냉각로의 여러가지 설비와 계측제어계통 등 원자력발전소에 쓰이는 여러 기계설비들의 성능을 고출력밀도, 고연소도, 고온출구온도 특성을 갖는 이 BOR-60의 건설 및 운전을 통하여 실험적으로 확인하여 나갔다.

카스피海 東岸 카자후공화국 쉘브렌코에 건설된 고속증식로 원형로 BN350은 1972년 11월 29일 초임계에 이르고 1973년 7월 16일에는 영업운전을 개시하였다. 이로서 새로운 원자력발전시대의 개막을 알리는 것이라고 널리 선전되었다. 열출력 100만KW로 설계된 이 BN350은 애초에는 이 열출력 전부를 35만KWe의 전력생산에 쓰기로 예정되어 있었으나 전력생산을 15만KW로 낮추고, 쉘브렌코에 이미 설치되고 있었던 일일생산량 12만톤의 해수담수화공장에서 필요로 하는 열을 공급하는 2중목적 원자로로 용도변경을 하게 되었다.

1973년 영업개시 이래 1976년 초까지 증기발생기에서 여러번의 나트륨냉각재 누설사고가 발생하여 이의 보수와 개량을 거듭하였다.

이때 이후로는 오늘날까지 열출력을 30% 축소시킨 70만KW로 운전하면서 13만KWe의 전력생산과 일일생산량 8만톤의 해수담수화에 필요한 열을 공급하고 있다.

이 BN350의 운전경험과 BOR-60의 공학적 재료연구의 경험을 살리면서 건설된 것이 고속증식로 실증로 BN600이다. 1980년 2월에 초임계에 도달한 이 원자로는 경수로와의 경제성 경험에 필요한 기술자료를 제공하여 주고 있

(表 4) 소련高速增殖爐 施設現況

項目 \ 施設名	BR-2	BR5/BR10	BOR 60	BN 350	BN 600	
소재지	Obrinsk, USSR	Obrinsk, USSR	Melekes, USSR	Shevchenko, Caspian Sea, USSR	Beloyarsk, USSR	
설계 / 건설	원자력이용에 관한 소련국가위원회	원자력이용에 관한 소련국가위원회	원자력이용에 관한 소련국가위원회	원자력이용에 관한 소련국가위원회	원자력이용에 관한 소련 국가위원회, 에너지 및 발전소省	
소유주 / 운전자	"	"	"	"	에너지 및 발전소省	
목적	재료 및 공학적 시험	공학, 핵연료 및 재료의 조사시험, 운전경험	핵연료 및 재료조사시험, 시험, 운전경험	원형로규모의 완전한(병합) LMFBR발전소의 운전경험	중상업용 발전소로서, 대형 LMFBR발전소의 운전경험	
출력	열출력	100KW (th)	BR 5 : 5MW (th) (원자로심) BR10 : +0.9MW (th) (반사체) 10MW (th)	60MW (th)	700MW (th)	1470MW (th)
	전기출력	0	0	12MW (e)	130MW (e) +80,000m ³ /d의 염분계 거한 물	600MW (e)
열전달 계통	1 차 Hg 2 차 H ₂ O 3 차 -	Na - 2loops NaK - 2loops Air/steam	Na - 2loops Na Air/steam	Na - 6loops Na H ₂ O steam 4MPa ,385℃	Na - 냉각 일차계통 pool형, 3 병렬회로 Steam : 14MPa ,505℃	
원자로심	²³⁹ Pu 금속연료	BR 5 : PuO ₂ , U 일산화연료 BR10 : Pu/U 혼합산화연료	U 및 Pu/U 혼합산화연료	UO ₂ +실험용	UO ₂ (21% 및 33% 농축)	
로심의모부	결손 U 및 구리반사체	BR 5 : U 합금	"	혼합산화연료	미래에는 : MOX/UO ₂	
현상태	철거	운전중	운전중	운전중	운전중	
略史	1956 건설 초기임계 총출력운전 1957 가동중지 및 철거	1957/58 건설 Jun. 1958 초기임계 Jul. 1959 BR5 총출력 1959~1964 PuO ₂ 연료운전 (BR5) 1965~1971 탄화연료운전 (BR5) 1971~1972 개량 및 증량 (BR10) Mar. 1973~Sep. 1979 MOX 연료운전 (BR10) 1980~1983 발전소 증설 Nov. 1983 8MW (th)로 운전 시작	1963~1965 설계 Jul. 1965 건설시작 Dec. 1968 초기임계 (dry) Dec. 1969 초기임계 (wet) 1970 air-cooler 가동운전 1971~ 증기발생기 및 터빈발생기 가동 운전	1965~1971 건설기간 1972 초기임계 1973 시운전 End of 1973 두개의 증기 발생기 결합사고 Feb. 1975 또 다른 증기발생기 누출사고 1973~1975 300MW (th) 까지 운전 1975 37에서 50%로 출력 증강 Mar. 1976~ 운전 및 해수 염분 분리	1971~1979 건설기간 26 Feb. 1980 초기임계 8 Apr. ~13 May 1980 500 MW (th) Jun. ~Aug. 1980 600MW (th) Until Oct. 1981 48-MW (e) 2Oct. ~18Dec. 1981 540 MW (e) 18~22Dec. 1981 600MW (e) 1982~ 570~600MW (e)	

다. 열출력 147만KW, 130기압 500℃의 과열증기를 공급하는 이 원자로는 공장건설된 3개의 20만KW터빈발전기에 연결되어 있다. 이 BN 600의 발전단가는 소련형 경수형로의 그것에 1.6배가 된다고 한다. 발전단가 산출방법이 나라마다 다르고, 특히 공산국가에서의 계산법은 자유세계의 그것과 차이가 많기 때문에 직접적인 비교는 의미를 가질 수 없으나 같은 경수형로와 고속증식로의 비교라는 점을 감안, 프랑스

Super Phenix의 2.2배와 비교하여 보면, 소련에서의 고속증식로는 꽤 유망한 개발가능성을 보이는 지표라고 생각할 수 있다.

이 BN600의 성공적인 개발이 약간의 개량으로 출력증강시킨 BN800의 도입으로 이어지고 이의 20기 연속건조를 통한 본격적인 고속증식로 발전시대로의 첫발을 소련은 내디딘 것이 되었다.

소련에 있어서의 고속증식로 시설현황을 표 4로 만들어 보았다.

실용로 BN800 설계경향

실용로 BN800의 설계경향을 살피기 위하여 그의 전신인 BN600과 풀형 고속증식로의 고전인 Phenix와의 차이점을 추출하여 본 것이 표 5로서 원자로용기의 높이는 같고 직경이 1m커져 있다. 평균출력밀도를 36% 증강시키고 노심용적을 2배로 늘려 열출력을 2.6배, 전기출력 2.4배를 달성하고 있는 것이다. 따라서 당연히 냉각재유량도 증가하고 있다. 또한 고증식성을 추구하고 있음도 알 수 있고 이는 연료체적비의 증가로 달성하고 있음도 아울러 읽을 수 있

(表 5) Phenix와 BN 600의 特性 比較

항 목	Phenix	BN 600
전기출력(MW)	250	600
열 출 력(MW)	568	1,470
노심용적(ℓ)	1,227	2,500
노심높이(m)	0.85	0.75
노심직경(m)	1.35	2.06
노심체적비(%)		
연 료	36	45
냉각재	36	33
기 타	28	22
평균선출력(KW/m)	27	36
평균출력밀도(KW/e)	406	550
증 식 비	1.16	1.3
증배시간(yrr)	40	10
핵연료펠릿	원통형	中空円筒형
집합체당 연료봉수	217	127
연료집합체수	103	371
핵연료교체기간(일)	65	150
최대연소도(MWd/kg)	72	100
저장위치수	41	124
반경방향 블랑켈 집합체수	90	380
블랑켈봉수	61	37
원자로용기 높이(m)	12.0	12.6
원자로용기 직경(m)	11.8	12.8
루 프 수	3	3
일차계 냉각유량(kg/s)	2,760	6,050
노심 입구 온도(℃)	440	337
노심 출구 온도(℃)	560	550
핵연료 최대온도(℃)	2,300	2,500
피복재 최대온도(℃)	700	710
이차계 냉각유량(kg/s)	2,280	5,310
터 빈 수	1	3

다.

따라서 원자로용기의 용적당 출력은 커지게 되어 상대적으로 일차냉각재 총량은 감소하게 된다. 따라서 Phenix보다 큰 열충격을 감당해야 하는 기계적 설계를 소련은 개발하였음을 아울러 시사하고 있다. 또한 공장제작되어진 표준화된 고효율의 발전기를 3기 연결사용하고 있는 것이 특징적이다.

최근 발표된 BN800이 Phenix와 같은 전형적인 탱크형 고속증식로와 비교하여 두드러지게 차이가 나는 것은

1) 원자로용기의 자리가 하부지지형이며 중간열교환기, 일차펌프, 회전플러그의 하중을 받을 수 있는 구조설계를 개발중에 있다

2) 원자로 상부의 고온원자로 용기부분이 원추형으로 좁아지다가 그위에 회전플러그를 올려 놓고 있다

3) 중간열교환기, 일차펌프를 중성자로부터 보호하기 위한 차폐체가 원자로 용기 상단부까지 이루고 있다

는 점을 들 수 있다.

역시 원자로 상부덮개에 원자로의 전중량이 걸려 있으면서도 회전플러그 등 가동부분이 있고 기밀이어야 하며, 500℃의 원자로내 온도와 상부덮개 위에 있는 기기설비를 상온으로 유지하여야 하는 열차폐도 갖추어야 한다. 또한 방사선차폐를 통한 생체차폐기능도 구비하여야 하는 등 기술적 문제들을 회피하기 위하여 취하여진 설계라고 한다.

또한 이 BN800개발에는 COMECON국가들의 참여를 적극 유도하여 체코는 증기발전기, 헝가리·동독은 계측제어계통기기 등의 연구개발 협력을 추진하고 있다.

원자력의 적극적인 도입과 고속증식로와 핵연료주기의 설치는 광활한 대지에 전력과 열과 담수를 공급하게 되며, 생산성을 비약적으로 증대시켜주는 강국의 열쇠로 알고 있다.