

蘇聯의 高速増殖爐 開發現況

蘇聯에서는 현재 原子力에너지의 成長率이 둔화되고 있는 상황에서 商業用 LMFBR의 대규모 실용화가 늦어지고 있다. 그러나 기존 FBR의 運轉經驗과 研究開發의 成果에 의해 LMFBR 開發의 다음 단계 계획과 추진은 계속되고 있다. 다음은 蘇聯 高速増殖爐 開發計劃과 앞으로의 展望을 要約한 것이다.

1. 原子力과 高速増殖爐 開發

현재 소련의 원자력은 어려운 상황에 있다. 체르노빌사고는 많은 일반인에게 원자력의 포기와 안전에 대한 불신을 환기시켰다. 감정적이고 비과학적인 수많은 논의가 잡지와 TV 및 라디오에서 보도되어 전문가와 과학자에 대한 불신감이 고조되었다.

원자력개발을 급속히 추진해 온 지금까지의 상황에서 때때로 원자력발전소의 적절한 입지 선정에 있어서 중요한 요소를 불완전하게 설명한 예가 있음은 인정해야 한다. 원전입지에 관해 이전보다 규제를 강화했기 때문에 최근 몇 군데의 건설부지가 포기되었다.

대부분의 원자력 반대자는 에너지절약을 더 철저히 하면 원자력에너지 뿐 아니라 일반에너지원도 수요가 감소할 것이라고 주장하고 있다. 이와 같은 견해를 받아들이면 원자력개발은 어려워진다. 그러나 다른 견해에 의하면 원자력에너지의 개발이 더욱 필요하게 된다. 그리고 그

견해는 지금까지도 설득력이 있어 그 중요성을 잃지 않고 있다.

1차자원의 산출 및 에너지생산의 평가에 따르면 국민총생산에 대해 특정 에너지의 소비가 큰 감소(약 1/2)를 보인다고 하여도 1차에너지에서 원자력에너지가 차지하는 비율은 2010년까지 4%에서 16%로 증가할 것이라고 한다. 석유와 가스를 합한 점유율은 65%로 감소하고, 석탄의 점유율은 약간 증가(21%에서 24%)한다. 에너지절약프로그램을 실행에 옮기려고 했을때 부적절함이 있으면 소련의 1차에너지균형에서 원자력에너지의 점유율을 더욱 증가시킬 필요가 있다. 이 목적을 위해 원자력에너지의 개발속도를 늦추면 장래에 문제가 발생할 것이다.

1989년초에 원자력발전소의 설비용량은 3,470 만kWe에 달했다. 1988년의 발전전력량은 2,150 억kWh, 즉 국가 전체 발전전력량의 12.7%였다.

2000년의 설비용량에 대한 예측은 아직 확정적인 것은 아니지만, 원자력담당장관은 장래의

전력수요를 충족시키기 위해 실행가능하고 불가결한 수준으로 1억1천만~1억2천만kWe의 숫자를 제시하고 있다. 이 평가에서는 기존 화석연료 발전소의 高度化와 최산화, 에너지절약의 진전 등이 고려되고 있다.

한편 2000년에 원자력발전용량이 5,500만~8,000만kWe라는 상당히 낮은 수치에 그치지 않을가 하는 매우 보수적인 의견도 있다. 여하튼 가장 높은 평가를 보아도 '80년대 초기의 예측과는 크게 다르다. 당시는 2억kWe라든가, 더욱 큰 용량이 언급되고 있었다.

이 변화된 상황은 우리나라의 절약이 본격적으로 필요하게 되며, 또 광범위한 LMFBR의 건설이 필요불가결하게 될 시기가 늦어졌다는 것을 의미하고 있다. 한편 그것은 FBR을 연속해서 건설하기에 앞서 이미 얻어진 경험의 신중한 분석, 새로운 해결책의 철저한 선택 및 연구개발의 추가프로그램 수행을 위한 시간적 여유가 있음을 의미한다. 그렇지만 고속로 추진자의 입장에서 보면 가장 효율적인 개선대책은 실용적인 경험을 축적하기 위해 대규모 용량이 아니라 「紙上」이 아니라 실제로 움직이는 발전소를 건설하는 것이다.

2. BN-350爐와 BN-600爐

BN-350로는 현재까지 약 16년간 운영되고 있다. 오랫동안 이 시설은 이 지역의 중요한 에너지원이었으나, 현재는 Mangyshlak반도에서의 에너지공급이 증가되었기 때문에 이 시설은 에너지원으로서의 중요성이 저하되어 실험적인 활동과 조사가 주요한 역할이 되기 시작했다.

BN-350의 주요특징은 다음과 같다.

- 열출력 750MW
- 나트륨냉각재 온도
 - 1차루프 : 입구 280℃
출구 430℃
 - 2차루프 : 입구 256℃
출구 415℃
- 증기온도 410℃
- 증기압력 45기압

최근 수년간 원자로는 증기발생모드에서 약 90%의 고부하율로 운영되고 있었다. 원자로설비와 기기의 대부분은 당초 상정되고 있던 수명이 이미 초과되었다.

현재 주요 콤포넌트와 원자로 전체의 잔여수명평가작업이 진행되고 있는데, 원자로설계가 1960년의 공업기준과 오래된 원자력안전기준에 따라 수행된 점을 고려해야 한다.

최신의 엄격한 안전요건은 수많은 대책의 실시를 요구하고 있다. 현재의 기준을 만족시키기 위해 전면적인 설계검토가 실시되고 있으며, 이 해석에 근거하여 이 원자로의 장래 운전 전망에 대한 결정이 내려질 것이다.

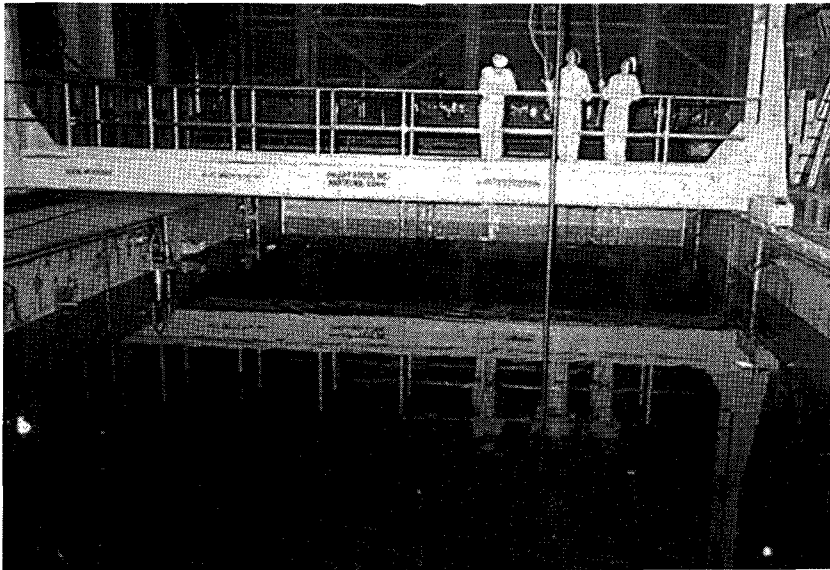
현재 44회째 운전사이클의 마지막 단계에 있다(각 운전사이클은 약 100일간). 로심의 피크 연소도는 약 9%원자이고, 연료요소s의 결합은 없다.

피크연소도 12%를 달성하기 위해 연료어셈블리 鋼을 페라이트멀텐사이트(1.3%Cr)製로 바꿀 것을 계획하고 있다. 이 鋼의 어셈블리는 이미 이 로에서의 실험에 성공했고, 이 鋼의 연료피복을 가진 2개의 어셈블리(254핀)도 실험을 거쳤다.

최신 기술로 제조된 MOX연료어셈블리의 실험이 현재 진행중에 있다.

최근 노의 증기발생부에서 트러블이 발생하고 있다. 1989년 1월에 체코에서 설계된 증기발생기에서 나트륨의 수중누출이 2회에 걸쳐 각각 4만6천시간과 6만3천시간 운전후에 발생하였으며, 당해 루프는 따로 분리하여 배수되었다. 그때 노는 520MW(th) 출력으로 4개 루프로 운전되고 있었다. 파손의 원인이 부식성에 있음은 확인하였으나, 사고의 원인과 인과관계에 대해서는 아직 충분히 해명되지 못하였으며, 또한 파손발생의 전체형상에 대해서도 아직 파악되지 못했다.

BN-600로는 9년간 운영되고 있는데, 이 발전소는 오직 발전목적으로 운전되고 있다. 1989년 1월 1일까지 누계 299.5억kWh를 발전했고, 1988년 1년간에는 40.4억kWh를 발전했다(76.5%의 부하).



BN-600로의 주요특징은 다음과 같다.

- 열출력 1,470MW
- 전기출력 600MW
- 나트륨온도
 - 1차루프 : 입구 355℃
출구 550℃
 - 2차루프 : 입구 320℃
출구 520℃
- 증기파라미터 :
 - 온도 505℃
 - 압력 140기압

1989년 1월 1일까지 노의 평균부하율은 약 66.5%이고, 1988년 1년간에는 76.5%였으며, 1988년의 평균 전환율은 41.6%였다.

1989년 2월까지 21사이클의 운전이 이뤄졌다 (각 운전사이클은 165플과워일이다). 최신설계의 노심운전은 양호한 결과를 보이고 있다. 피복관은 冷間加工의 오스테나이트鋼을 사용하고 있으며, 달성한 피크연소도는 8.3% (67,250 MWd/t)인데 연료파손은 발생하지 않았다.

다음 단계에서는 연소도를 10~12%로 하기 위해 재질을 페라이트멸텐사이트鋼으로 바꾸게 될 것이다. 이 재질과 개량 오스테나이트鋼 피복을 가진 실험적 연료어셈블리가 이 노에서 11%(90dpa)의 연소도까지 실험되었으며, 똑같이 이 노에서 진동충전제 MOX의 실험도 실시되었다.

1988년 여름의 정기점검을 위한 운전정지기간

에 기계설비의 정비 및 기타 콤포넌트와 설비검사 등이 실시되었다. 증기발생기의 증발관에서 시료를 채취하였다. 孔蝕과 같은 부식손상이 발견되었으나 전반적으로 그 결함의 깊이는 0.3 mm 이하였다. 검사결과 당초에 생각되고 있던 증기발생기의 운전수명을 5만시간에서 7만5천시간으로 연장할 수 있었다. 콤포넌트 운전수명의 한계를 확립하기 위해 샘플링과 검사프로그램이 검토되고 있는 중이다.

1989년의 운전정지동안 하나의 루프에 정례적인 세정을 실시했다. 각 운전정지시마다 하나의 루프가 정례적으로 세정된다. 경험적으로 보아 이 세정의 간격은 1만4천시간이다. BN-600이 운전에 들어간 이래 모두 10회의 세정을 실시했다. 이 세정작업은 구리의 침적물과 용해액의 제거 및 철산화물의 제거 등 두 단계로 구성되어 있다. 작업은 나트륨의 배출없이 실시되었다.

BN-600에서는 적절한 방사선상태가 영속적으로 유지되고 있다. 1988년 1년 평균의 개인피폭은 약 0.2렘의 수준이었다. 대기중의 핵분열생성물의 방출은 하루에 1.5Ci를 초과하지 않았다. 대부분의 방출은 하루에 몇분의 1Ci 이하였다. 공기열교환기를 가진 예비 비상용 열제거시스템에 대한 지진해석과 개발이 현재 실시중이다.

BN-600로는 국제적 보장조치의 적용을 위해 IAEA에 제안된 시설의 리스트에 포함되어 있다. IAEA에서는 이미 BN-600을 보장조치의 대상으로 하고 싶다는 의향이 전해졌다. 이 보장

조치 적용의 여러 면에 관해 예비적 논의가 이미 이루어졌다.

FBR 보장조치방법의 개발을 촉진시킨 소련은 IAEA 보장조치를 위한 많은 지원프로그램을 실시중이다. BOR-60 연구로도 그 리스트에 들어 있고, IAEA 사찰국의 훈련을 위해 사용되고 있다(IAEA 사찰관의 훈련코스가 정례적으로 이 시설에서 실시되고 있고, 아울러 핵물질의 사찰에 적용되는 비파괴분석법의 연구도 실시되고 있다).

3. 研究所와 實驗爐의 研究活動

(1) 高速物理爐

노구조재와 중성자와의 상호작용의 기본적인 프로세스는 현재 비교적 잘 파악되어 있다. 이에 반해 정상적이 아닌 가설적 상태와 몇몇 동위원소교환의 계산에서 核係數의 지식은 비교적 신뢰성이 부족하다. 평가된 핵데이터파일과 여러가지 데이터의 群係數와 비교검토를 앞으로 계속할 필요가 있다.

비확산 2-D, 3-D 해석방법에 따르면 정적 및 동적 상태에 대해 고속로로심 계산의 정밀도 향상이 필요하다.

임계실험장치는 몇가지 효과와 계수를 보다 정확히 정하기 위해 유용하다. 예컨대 나트륨과 크롬의 중성자흡수 조사결과 이들 물질의 중성자흡수는 이전에 생각되고 있던 수치와 비교하여 과대평가되고 있었음이 밝혀졌다. 정상적인 핵분열생성물의 흡수에 대해서 조사한 결과 똑같은 상태가 발견되었다.

측정방법론에 대해서는 어떤 종류의 기본적인 공간효과영향하에서 반응도 측정방법의 비교연구가 ANL(USA)과 Cadarache(프랑스)의 전문가와 공동작업에 의해 "Mazurka"에서 반응물의 비교측정과 함께 실시되었다. 또 프랑스와 동독의 전문가와 공동으로 BFS에서 Beff측정의 공동연구가 계획되어 있다.

大型 不均質爐心の 연구는 BFS에서 계속되고 있다. 가까운 장래에 연구활동의 대부분은 안전 문제에 집중될 것이며, 또한 금속연료로심의 모

델화에 대해서도 시간과 비용의 일부가 할애될 것이다.

(2) 熱物理와 流動

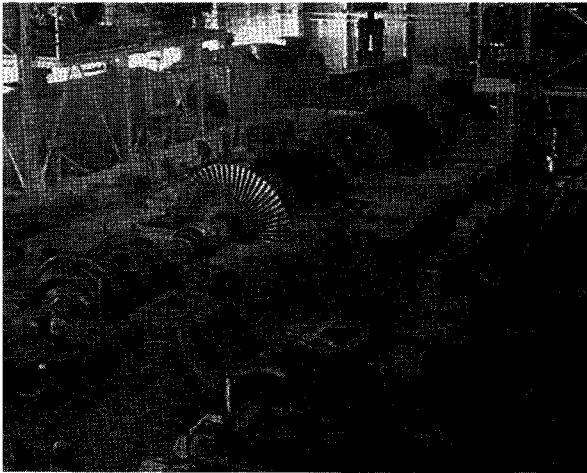
정상적인 형태 및 변형된 편변들에서의 열교환현상에 대해 장기간에 걸친 실험 및 이론의 연구결과 연료집합체의 열유동상태에 관한 유효한 계산방법과 코드가 개발되었고, 이어서 방사선에 의해 변형된 연료집합체에 대한 계산의 열기체학적인 계산방법이 개발되었다. 1988년에는 "고속로로심의 열유동계산에 대한 안전규제를 위한 방법론적 지침과 권고"가 작성되었으며, 열교환 장치의 熱水行動에 대한 계산방법도 개발되고 있다. 그밖에 Diagrid압력용기유량에 대한 조사도 진행되고 있다.

이와 같은 문제는 非静止系에 대해서도 해결되어야 할 것이다. 특히, 나트륨의 비등을 수반하는 긴급운전정지의 경우에 遷移系에 대한 연구활동이 진행중이다. 현재 나트륨의 비등에 이르는 프로세스에 관해 몇가지 새로운 연구활동이 계획되어 있다. 스페이싱와이어 자신이 심한 증발중심이 될 수 있는 상태에 있는 한 와이어의 역할이 매우 중요한 것임을 알 수 있다. 그와 같은 중심의 존재는 나트륨이 과열될 경우 초기여유도에 영향을 미치는 일이 있을 수 있다. 이 연구활동은 몇가지 중요한 실험상 및 계산상의 문제를 밝히고 있는중이다.

(3) 나트륨技術

나트륨기술분야에서 모든 원리적 문제점은 해결되고 있는 것처럼 보인다. 나트륨불순물의 감시를 위해 개발된 장치와 증기발생기의 누출검출장치는 모두 잘 작동하고 있으며, 나트륨의 여과장치도 순조롭게 작동하고 있고, 1차계통기기의 제염을 위한 잔존나트륨의 세정장치취급방법도 확립되어 있다.

大型非等方性 나트륨회로의 기술에 관해서는 "背水"구역, 회로의 찬 부분, 그리고 커버그스에서의 불순물 析出과 축적프로세스 및 그 축적물의 상태에 대해 더 많은 관심이 기울어져야 한다. 불순물의 동적상태는 이상상태에서 그들 거



등을 알기 위해서 운전온도보다 높은 온도영역에 대해 더 깊이 연구되어야 한다.

리얼타임의 in-situ 방식 냉각재모니터링기술은 개발·개량할 가치가 있다. 환경에 대한 나트륨누출과 나트륨화재의 방지는 그 해결을 위해 설계자와 기술자에게 한층 창의적인 연구를 기대해야 할 문제중의 하나다.

원자로시설의 폐기와 관련하여 FBR에 대해서는 특수한 문제, 즉 1차계통 나트륨위 재이용 또는 안전한 폐기라는 고유문제를 제기할 것이며, 따라서 이에 관한 것도 계획에 포함되어 있다.

(4) BR-10, BOR-60 原子爐에서의 活動

1989년 1월에 BR-10 원자로는 30주년을 맞았다. 이 원자로를 지금까지 두번의 최신화 공사를 했다. 두번째의 개조에서는 원자로 격납용기와 몇가지 1차계통기기의 교환이 이루어졌다.

BR-10 원자로를 제어하중하에서 노내재료시험을 위한 좋은 설비임을 실증하고 있다. BR-10 원자로 연구계획의 전통적인 주제는 1차계통내에서 방사성 불순물의 이행에 관한 연구다. 오브닌스크의료방사선학연구소에서 생물학자가 파견나와서 이 원자로에서 몇년동안 연구하고 있다. 작년부턴 암환자에 대한 방사선치료가 고속중성자선에 의해 실시되고 있다. 130명 이상의 환자가 중성자치료를 받고 있다.

이 원자로를 1983년 이래 窒化物燃料를 사용

해 운전되고 있다. 계획연소도(8.0%)는 이미 달성되었고, 지금은 8.3%에 달하고 있다.

최근에는 인공의 결합을 가진 여러가지 연료에서의 핵분열생성물의 방출프로세스와 그 생성물의 계통내에서의 이전이 연구되고 있다. MOX연료, 혼합탄화물연료, 窒化우라늄, 금속우라늄 등으로 제조된 결합이 있는 연료봉을 가진 전부 12개의 실험용 연료집합체가 연구되고 있다. 연료요소에 여러 종류의 결합(구멍, 균열)을 만들어 실험이 실시되었다.

1988년부터 1차계통내에서 특수실험루프가 운영되고 있다. 이 루프에는 트리튬검출기와 부식생성물의 상태를 연구하는 계측기가 설치되어 있다.

BR-10 원자로를 이외에 재료의 조사, 여러가지 측정기의 시험, 방사화분석에 이용되고 있다.

BOR-60 원자로를 주로 재료조사의 기초연구에 이용되고 있다. 즉, 새로운 재료는 BN-350 또는 BN-600에서의 실험에 앞서 이 원자로에서 예비실험을 받기로 결정되어 있다.

BOR-60 원자로에서는 진동충전법으로 제작한 MOX연료가 폴스코프의 실험을 받았다. 이 연료는 펠릿식의 연료와 함께 BN-600 원자로에서 더 세밀하게 연구될 것이다.

원자로구조재, 특히 스웨링의 Ferritic鋼에 대한 대규모 실험계획이 실시되었다.

또 나트륨淨化를 위한 그레파이트·솔벤트를 지닌 세슘·트랩이 실험되었다. 이 실험결과에 의거 실용트랩이 개발되어 BN-350과 BN-600 원자로에서 사용되었다.

BOR-60 원자로를 이미 약 20년간 운전하고 있어서 이 로를 최신의 설비로 개조하자는 제안이 현재 검토되고 있다.

4. BN-800, BN-1600 原子爐의 開發

BN-800 원자로를 BN-600에 채택된 많은 해결책에 근거하여 설계되고 있다. 설계의 계승과 변경에서 채택된 방법은 여러 회의에서 논의·발전된 것이다.

그 방법과 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

BN-600과 같은 크기의 원자로용기에서는 1,470MW(th)가 아니라 2,100MW(th)의 출력을 낼 수 있다. 원자로용기의 설계는 다소 세련되어 있다. 용기내의 차폐는 BN-600의 연구와 운전결과를 반영시켜 중량을 감소시킬 수 있었다. 또 노심의 크기는 BN-600에 비해 커졌다(369개에서 516개로).

동력상실시의 비상노심냉각재와 물의 공급은 공기열교환기에 의해 보장되고 있다. 이와 같은 개선책은 BN-600의 개량에서도 실현되고 있다. 열추출계통에서는 고온의 나트륨에 의한 증기과열이 채택되지 않았다. 그 대신 터빈에서 습기분리재가열기로 2차적인 증기과열을 하고 있다.

각각의 증기발생기는 2개 모듈의 증기발생기와 과열기에 의해 구성되고, 파라이트鋼이 증기발생기와 과열기에 사용되고 있다. 파라이트강제 증기발생기의 성능을 보장하기 위해 2차나트륨의 온도는 BN-600과 비교해 약간 낮춰져 있다(520℃에서 505℃로). 또 증기의 온도도 약간 낮춰져 있다(505℃에서 490℃로).

BN-800에서 터빈은 1기로 되어 있다.

BN-800의 제작용 도면은 "Atomash" 제 조가공공장에 이미 보내져 있다.

건설공사는 Beloyarsk와 남우랄의 사이트에서 시작되었다. 현재 작업은 아직 시작 단계이다.

BN-1600원자로는 장래 상업용 원자로의 원형이다. 1988년에 그 개발결과가 나왔고, 안전성과 경제성을 높이기 위해, 그리고 해결책을 도출할 목적으로 설계작업의 연장이 결정되었다. 고려되어야 할 문제점은 특히 다음 항목을 포함하고 있다.

○ 원자로용기의 경계밖에 방사성나트륨의 배관이 완전히 나오지 않도록 한다.

○ 비상시에 공기열교환기에 의해서 원자로용기에서 직접 열제거를 하기 위해 특별한 열교환기를 채택한다.

○ (수동적 원리에 근거한) 독립된 비상시정지

제어봉을 추가한다.

○ 나트륨의 보이드반응도효과와 플러스성분을 최소화한다.

○ 붕괴열제거를 위해서 신뢰성이 높은 자연순환을 확립한다.

○ 노심의 연소도를 12%~15%로 증가시킨다.

○ 재래형 및 非均質型 노심설계를 양쪽 모두 사용가능하도록 한다.

○ 원자로용기내 차폐비용을 경감시킨다.

○ 單殼型의 증기발생기를 사용한다.

○ 원자로 및 그 주변 회로의 철저한 경제성을 추구하여 비용효과적인 배치조정과 건설 및 구성 재료를 삭감한다.

이 분석의 출발점으로는 현재의 원자로설계가 사용될 것이며, BN-1600 원자로의 연구개발은 계속되고 있다.

일부 전문가들은 현재 SAFR과 PRISM과 같은 모듈형 고속로의 개념개발에서 미국의 특수한 조건에 적합한 이와 같은 개념을 소련에서도 채택할 수 있을 것인가에 대해 관심을 나타내고 있다.

5. 結 論

나트륨냉각형 고속로의 개발에서 얻어진 과학적, 기술적인 경험은 만족할 수 있는 것으로서 평가받을 수 있을 것이다. 신뢰할 수 있고 안전하게 작용하는 이들 원자로의 능력은 현장에서 입증되어 왔고, 기기, 제어계통, 감시시스템의 양호한 성능도 실증되어 왔다. 적절하고 안전한 원자로의 운전을 위해서는 고도로 훈련된 요원이 필요하다.

자본비과 발전비 양면에서 고속로를 보다 저렴하게 하기 위한 새로운 방법을 강구하는 것이 필요하다. 그리고 고유의 안전성과 자기제어성에 근거하여 보다 발전된 해결책의 개발도 필요한데 이것은 고속로물리의 본질적인 특성이며, 또 이보다 고도의 안전성이 보장될 수 있도록도 할 수 있다.

이들 목적을 달성하기 위한 최선의 방법은 경험과 실적을 통한 끊임없는 개발이다.