

蘇聯의 原子力産業

— 現況과 將來展望 —

V. 코노와르프

〈蘇聯原子力發電·産業長官〉

현재 소련의 원자력발전은 그 비율이 상대적으로 낮기는 하지만 상당히 중요한 역할을 하고 있다. 이는 소련의 공업지대에 대한 전력공급에 크게 기여하고 있기 때문이다. 소련의 통합전력망에서의 원자력의 기여도는 서북부에서 33.1%, 우크라이나에서 22.7%, 중앙부에서 21.7%, 불가장 유역에서 16.7%로 되어있다.

또 소련은 현재 가동중인 원자력발전소에서 운전되고 있는 원자로 기수와 그 총출력은 미국, 프랑스에 이어 세계 제3위를 차지하고 있다.

가동중인 원자력발전소는 15개소

1991년1월1일 현재 소련에서는 15개소의 원자력발전소가 가동중인데 여기서 운전되고 있는 원자로는 46기, 그 총출력은 36,560MW(전기출력)다. 이들 원자력발전소의 발전량은 1990년 2,115억kWh에 달해 소련 전력생산량의 12.5%를 차지하고 있다. 소련 전력생산의 약 70%는 석탄, 석유, 가스에 의한 화력발전소에서, 약 18%는 수력발전소에서 이루어지고 있다.

앞으로 소련의 전력생산을 전망해볼 때 유럽지역에서의 석탄화력에 의한 전력증산은 거의 기대할 수 없다. 현재에도 이미 동부지역에서 중앙부 및 우랄지역으로의 연료수송 평균거리가 약 4,000km에 달하고 있고 화물수송량 전

체에서 차지하는 연료의 비율이 40%나 된다. 이외에도 석탄화력발전소의 공해와 인구가 많은 유럽지역의 공해대책에 필요한 자금을 생각하면 유럽지역에서의 석탄화력발전소의 경쟁력은 없다고 볼 수 있다.

한편 석유생산원가는 2000년에 1.5~1.8배, 2010년에는 2~2.5배 증가할 것으로 예측되고 있다. 따라서 가까운 장래에 석유를 보일러 연료로 사용하는 것은 경제적으로 어려워질 것으로 보인다.

소련에는 대규모의 천연가스전이 있다는 것이 큰 장점이다. 따라서 지금부터 30~40년간은 유럽지역의 원자력발전소와 화력발전소를 대신하는 것으로 천연가스발전소와 boiler station이 기능을 발휘하게 될 것이다. 그러나 이때에도 가스의 평균 수송거리가 1956~60년의 530km에서 현재는 2,400km로 길어져 그 증가경향은 앞으로도 계속될 것이라는 것을 염두에 둘 필요가 있다.

환경면에서 유리한 원자력발전

이와 같이 경제적인 차원에서 유럽지역에서 원자력발전을 우선적으로 발전시켜 나간다는 것은 합리적인 생각이다. 연료에너지정책을 고려할 때 중요한 것은 경제적인 이유뿐만 아니고 환경문제가 그 지역과 사회전체에 받아들여질 수 있을 것인지 여부이다.

有機質 연료를 사용하고 있는 발전소에서는 그 배출물이 단지 그 주변만이 아니고 지구차원으로 환경오염을 일으켜 탄산가스와 분진이 지구의 열균형을 변화시킬 수 있는 정도에 이르렀다.

원자력발전에서는 유기질연료에 의한發電의 결함이라고 할 수 있는 에어로졸 문제나 산소 소비문제가 없다. 유해한 화학물질을 방출하지 않을 뿐더러 우라늄의 분열반응에는 산소가 필요없다.

방사능에 의한 환경오염, 주민의 피폭가능성, 사고가 없는 한 위생기준 보다 훨씬 적다.

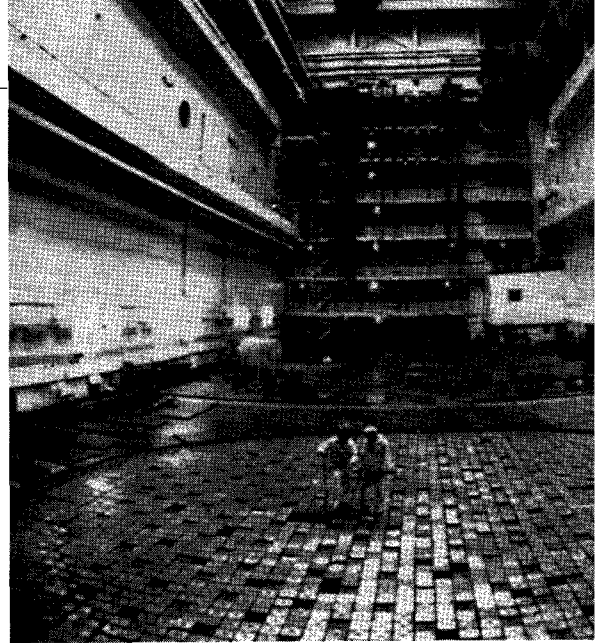
이렇게 경제적으로나 환경적으로나 소련 특히 유럽지역에서는 원자력발전이 필연적이며 앞으로 더욱 발전시켜 나가야 한다는 결론에 도달한다.

원자력산업의 지금까지의 발전과정

현재 소련의 원자력발전 및 이를 지탱하고 있는 원자력산업과 그 장래의 발전가능성을 올바르게 이해하기 위해서는 지금까지의 발전과정을 알아둘 필요가 있다.

잘 알려져 있는 대로 소련에서는 1960년대말까지 공업규모로 전력을 생산하는데 가장 적합한 발전용 원자로의 검토작업이 이루어졌다. 소련 원자력발전의 토대가 된 것은 2가지 형의 원자로다. 그 하나는 현재 세계에서 가장 많이 사용되고 있는 가압수형의 원자로로 원자력 강대국에서 처음으로 원자력잠수함에 사용된 것이다. 또 하나는 많은 나라에서 플루토늄 생산에 사용된 공업용 원자로와 같은 형의 水·黑燃爐다. 이 노개념이 선택된 것은 대형 에너지 설비, 특히 水·水爐의 압력용기의 양산이 어려웠기 때문이다.

원자력발전의 연료주기를 담당하고 있는 소련의 공업부문은 국방부문에 형성돼 발전해 왔다. 현재 이 부문은 천연 우라늄의 채굴과 생산, 6불화 우라늄 생산과 동위원소의 분리, 연료집합체 생산, 사용후핵연료의 방사선화학처리를 담당하고 있다.



체르노빌사고 이전까지는 원자력발전의 필요성이 의문시된 일은 거의 없었다. 이와 관련해 1980년대초에 발표된 소련의 에너지계획을 살펴보면 다음과 같다.

- 2000년에 원자력발전소의 출력을 19만kW로 확대, 발전량을 1조1천억kWh로 한다. 소련의 전체발전량을 2조7천억kWh로 한다.

- 원자력발전의 이용분야를 대폭 확장해 공업용 및 가정용 열공급에 이용한다.

- 고속중성자에 의한 증식로를 발전시켜 원자력발전용 연료를 장기적으로 보장한다.

- 원격지 및 벽지용 소형 원자력발전설비의 개발과 원자력선 건조를 촉진시킨다.

이 계획에 따라 소련에서는 관련부문의 공장 개조와 신설이 추진되었다. 소련 최대의 중기 공장인 “Atomash”가 불가톤스크시에서 조업을 시작한 것이 그 성과중의 하나다. 이 공장에서는 무게 600톤까지의 설비장치를 제작할 수 있다.

이 계획에 따라 연료주기의 공장설비도 보완되었다.

이와 같이 1980년대 중반까지 원자력발전 및 그 관련산업의 기반이 마련되었다. 1981~1985년에 운전을 시작한 발전 유닛은 17기, 총출력 15,800MW로 이 기간중에 소련에서는 세계 최대의 1,500MW급 RBMK-1500爐가 개발돼 실용화되었다. 원자력 heat station용 에너지 유닛의 건설작업도 이루어졌다.

체르노빌사고로 발전계획 대폭 수정

체르노빌사고로 소련 원자력발전계획은 대폭 수정되었다. 원자력발전의 개발만이 아니고 가동중인 원자력발전소의 운전에도 반대하는 기운이 높아졌다. 그 결과 원자력발전소의 신설 계획이 대폭 삭감되고 설계단계 또는 건설도중에 작업이 중단된 설비의 총용량은 10만kW 이상에 달했다. 지진후에 아르메니아 원자력발전소도 폐쇄되었다.

그러나 최근에 소련 각지에서 인민대의원을 비롯한 유덕인사들간에 원자력발전이 필요하다는 생각이 강해지고 있다. 즉 본래의 방식으로 되돌아가고 있다고 보아도 된다. 그 예로 보르네지, 크르스크, 무르만스크, 체리아빈스크, 세미파라틴스크, 동카자프스탄, 팀켄트 각지에서 총 12,000MW 이상의 신규원자력발전소 건설이 결정되었다.

이러한 정세변화에 따라 에너지계획이 변경돼 1991~1995년 기간중에 7,000MW, 다음 5개년간에는 12,600MW가 운전이 시작될 전망이다.

따라서 2000년에는 소련의 원자력발전소 총 출력은 폐쇄분을 고려하지 않는다면 57,000MW에 달할 예정이다. 2000년 이후에도 수명이 끝나는 발전소의 폐쇄를 고려해 2010년에는 총 출력을 10~15만MW로 증가시킬 방침이며 원자력발전소의 건설 템포가 더 높아질 전망이다.

그러나 이에 대해서는 아직 최종적인 결정이 내려진 것은 아니다. 앞으로 여러가지 사정을 감안하면서 국가에너지계획으로 책정하게 되어 있다.

앞으로 10년간은 안전성을 높인 VVER-1000의 발전설비를 중심으로 원자력발전소 건설이 이루어질 것이다. 기존 및 건설중의 원자력발전소에도 이같이 안전성을 높인 설계내용이 최대한 도입되고 있다.

2000년 이후의 원자력발전소 건설은 안전성을 높인 신세대형의 VVER-92, VVER-500, VPBER-600 및 고속로 BN을 양산해서 추진

할 예정이다.

30년 이상에 걸친 소련의 원자력발전의 성과를 토대로 2000년까지 이들 노형의 개발이 완료될 예정이다.

이와 같이 수용가능한 리스크요건을 만족시킬 수 있는 원자력발전의 발전전략은 2단계로 구분해 볼 수 있다.

• 1990~2000년 제1단계(쇄신단계)

전체용량의 증산은 적게 하고 안전성 향상에 중점을 두고 발전설비의 쇄신을 도모한다. 그 사이에 장래의 원자력발전 개발을 위해 필요한 과학기술 및 설계면의 작업을 추진한다.

• 2000~2010년 제2단계(증설단계)

안전성이 높고 경제성도 높은 신세대의 원자료를 증설해 대폭 용량을 늘린다.

제1단계에서는 총용량은 그렇게 늘지 않는 것으로 되어있어 소련의 원자력산업은 당분간 상당한 여력을 갖게 된다. 따라서 핵연료주기 설비의 근대화를 도모하고 환경보전과 우라늄 광석의 효율적인 이용을 가능케 하는 새로운 process의 개발을 추진할 수 있게 된다.

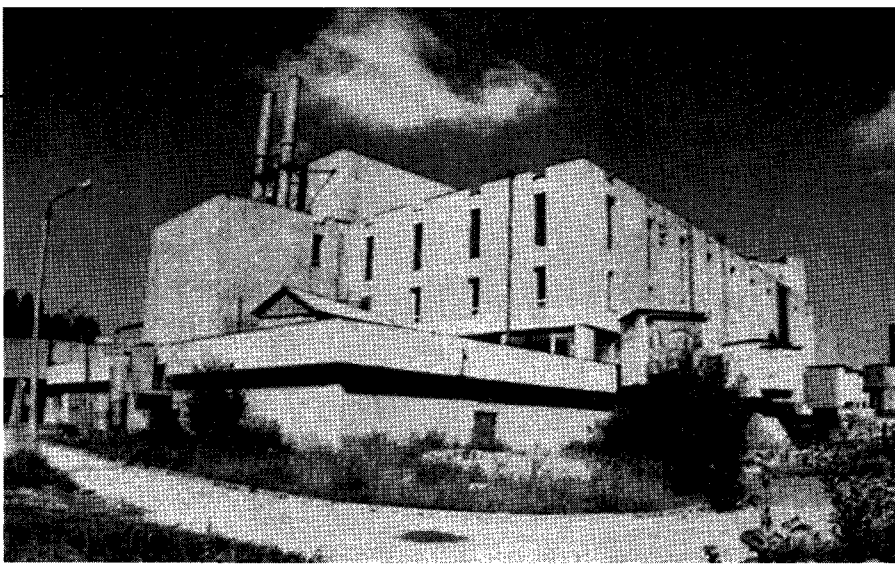
현재 소련에서는 水冶金공장에서 몰리브덴, 레늄, 스칸듐, 바나듐, 금, 稀土類원소, 기타 유용원소가 부차적으로 추출이 가능하다.

우라늄 채굴에서는 지하알카리화라는 발전된 방법이 널리 사용되고 있다. 이 방법에 따르면 빈약한 鑛이나 복잡한 지질조건에 있는 우라늄 광석을 개발할 수가 있다. 소련에서는 이 방법에 의한 우라늄채굴이 1995년에는 40~50%로 될 것이다.

원자로의 안전성 향상

소련의 원자력발전 개발의 제2단계는 신세대 원자로와 발전소 건설의 시기다. 이 신세대 원자로에서는 "사고의 제어"를 위한 기술수단이 실용화될 것이다.

노심의 중대한 파손 확률은 현재의 안전원칙이 시행된다면 유니트당 연간 10^{-6} 을 초과하지



않는다.

소련 전문가들은 원자로의 안전성을 향상시키기 위해서는 다음 사항이 실행돼야 한다고 보고 있다.

- 원자로의 내적인 자기방어성능(노심의 마이너스의 내적 역관계에 의해 실현)

- 외부로부터의 에너지나 운전원의 개입을 필요로 하지 않는 수동적인 방어장치와 긴급장치를 최대한 이용하는 것.

- 방어 및 냉각장치의 예비를 갖추는 것.

- 설계최대사고 및 가상(물리적으로 가능한) 사고시의 방사능생성물의 예상통로에 충분한 방어 barrier 시스템을 설치하는 것.

- 충분한 정보가 제공되어 운전원의 실수를 예방할 수 있는 대책이 마련되어야 한다는 것.

위의 원칙들은 AST-500형의 원자로를 사용한 원자력 heat station의 설계에서 실현돼 니지니·노브고로드(이전의 고리키)와 보로네지의 두 시 근처에 설치할 수 있게 되었다. 니지니·노브고로드의 원자력 heat station 설계와 건설공사 현장을 시찰한 IAEA의 전문위원회는 이 AST-300의 안전성이 높고 기술적인 뒷받침이 돼있어 새로운 방식이 적용되고 있다는 것을 확인했다.

방사성폐기물 처리문제

원자력발전 개발의 제2단계에서 또하나의 중요한 일은 방사성폐기물 처리문제를 해결하는 일이다. 이 분야에 대한 소련의 기술정책은 이

미 입안돼 현재 검토중이지만 기존의 공장앞으로 건설될 공장에서의 방사성폐기물 처리 문제를 종합적으로 해결하도록 돼있다. 즉 폐기물의 형성기준, 그 수집, 등록과 계량, 수송, 임시보관, 장기저장 및 최종적인 매장을 위한 기술적인 준비, 생물계에서 방사성폐기물을 충분히 격리시키는 것 등이다.

가장 문제가 되는 것은 저/중준위의 방사성 폐기물이다. 그러나 이것에 대해서는 기술적으로나 경제적으로 기본적인 문제는 없다고 할 수 있다.

소련에서도 다른 나라와 같이 각종 폐기물을 증발시켜 콤팩트하게 만들어 조각시켜서 부피를 작게 하는 process가 개발되었고 또 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{g/cm}^2 \cdot \text{日}$ 이하라는 약간의 알카리화로 이것을 고화(시멘트, bitumen화)시키는 방법도 개발되었다. 이들 폐기물을 지표에 가까운 격리소, 또는 지중의 저장소에 매장하는 기술도 개발돼있어 방사능을 생물계로부터 격리할 수가 있다.

방사성폐기물처리에서 중요하면서도 가장 까다로운 것이 고준위 방사성폐기물이다. 그 처리방법은 나라마다 조금씩 다르다. 소련에서는 고준위 방사성폐기물을 유리고화시키는 process가 개발돼있어 방사선화학처리한 생성물에서 우라늄과 플루토늄을 추출한 다음, 고준위 방사성폐기물을 다른 母材(mineral 또는 인공 mineral)속에 넣는 방법이 검토되고 있다. 이 유리고화과정은 시험공장에서 검증이 끝나 금년부터 실용화하도록 계획돼있다.

고준위 방사성폐기물을 취급할 때 반감기가 몇만년이나 되는 방사성 핵종이 문제가 된다. 소련에서는 이들 핵종을 반감기가 수십년되는 분열생성물의 기본 부분으로 부터 硬化하기 전에 분리시키는 분류법이 연구되고 있다. 이렇게 함으로써 고준위 방사성폐기물중에 함유되어 있는 많은 동위원소를 산업분야에서 이용할 수 있고 아울러 각각의 分留分을 따로따로 저장할 수가 있다. 또 Sr-90, Cs-137이나 稀土類 원소, 반감기가 30년되는 그외의 분열생성물을 함유한 고화된 폐기물의 分留分을 확실하게 매장할 수가 있다. 완전히 붕괴될 때까지 몇만년 내지 몇십만년이나 걸리는 장수명의 방사성원소를 함유하는 分留分에서 필요할 때 이를 끄집어낼 수 있도록 한 저장소에 보관한다.

고준위 방사성폐기물의 처리법으로는 transmutation(交換核反應)을 들 수 있는데 소련에서도 이에 대한 연구가 진행되고 있다. 고속로가 보급돼 이들 로에서 actinide가 소각되면 폐기물처리와 함께 에너지계획에서도 유용한 것이 될 것이다.

廢爐문제

방사성폐기물처리와 관련해 원자력발전소의 사용정지(廢爐)문제가 있다. 소련에서의 기본적인 연구방향은 특정한 몇기의 원자력발전소를 사용정지하는데 필요한 기술의 개발과 작업 절차의 작성 및 그 작업의 기술적, 경제적 성과의 종합적인 평가 등이다. 이 문제에서는 건물의 재이용 가능성에 대한 검토도 필요하다. 원자력발전소는 그 기본설비의 수명이 다 할 때까지 사용해야 하며 이를 위해 안전성을 높일 필요가 있다. 원자로나 발전소는 단순히 사용정지시키는 것이 아니고 그 기반시설을 재이용할 수 있도록 개조하지 않으면 안된다.

원자로용기의 annealing에 의한 장수명화

원자력발전소는 해체기술이 개발되지 않은

채 설계되고 있다. 이때문에 소련에서도 이 해체기술에 대한 연구개발이 진행되고 있다. 이 문제해결을 위해 충분한 시간여유를 갖기 위해 원자력발전소의 기본적인 설비의 수명연장대책이 강구되고 있다. 예를 들어 Beloyarsk 원전의 2기를 비롯해 가압수형의 원자로용기의 annealing처리가 효과적으로 이루어져 원자로 수명이 10년 정도 연장된다고 해서 세계적으로 주목을 받고 있다.

이와 같이 소련에서도 다른 나라와 같은 정도로 원자력발전을 더욱 발전시키기 위해 몇가지 기술문제가 해결되지 않으면 안된다. 따라서 실무적인 국제협력이 매우 중요하다. 대형 프로젝트나 문제해결에서는 이미 이러한 공동작업이 시도되고 있다. 그 한 예로 중요하고 권위있는 조직인 IAEA를 들 수 있다. IAEA는 원자력의 평화적 이용을 위해 과학기술분야의 연구활동을 촉진하고 정책적인 문제해결에 임하고 있다.

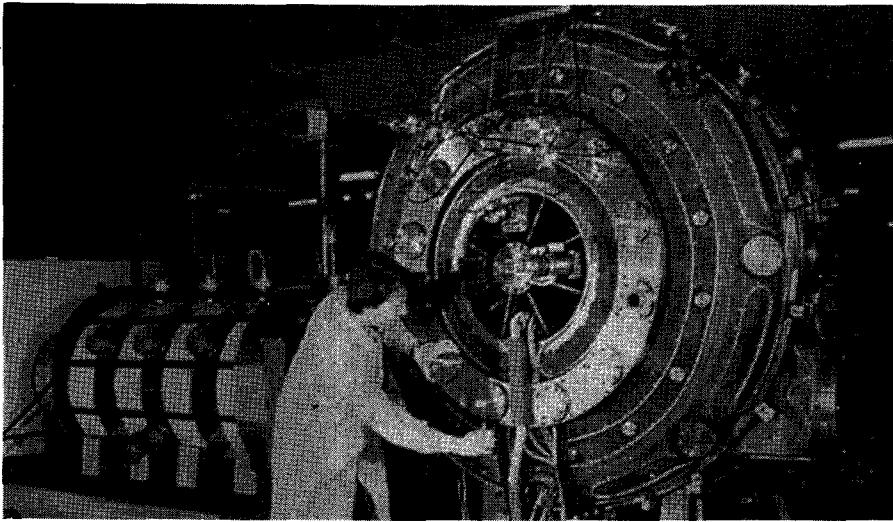
소련의 관계자들도 많은 프로젝트에 참여하고 있다. 예를 들어 원자로의 부품과 시스템, 핵연료기술, 사용후연료의 처리, 원자력발전에서의 인간과 기기와의 상호관계, 리스크의 확률론적인 평가방법, PA대책 등의 문제에 관여하고 있다.

소련의 국제협력

소련은 핀란드, 스웨덴과 공동으로 발트해 오염의 모니터링을 하고 있다.

체르노빌과 키슈뎀 사고, 또는 핵활동에서 오염된 지역을 복원하는 문제도 국제협력의 대상이다. 이들 사고의 뒷처리에 관한 경험을 교환하는 것만으로도 상당히 유익한 것이다. IAEA의 노력으로 체르노빌 국제센터가 설치된 것도 중요한 일이다.

또 이탈리아와의 협력을 통해 체르노빌사고의 원인규명을 더욱 진전시켜 원자력발전 전체의 안전성향상에도 도움이 되는 원자로의 복잡한 역학계산 프로그램의 개발이 이루어지고 있다. 캐나다와는 채널방식의 원자로와의 협력,



스웨덴과는 비등수형 원자로와의 협력이 이루어지고 있다. 이외에 미·소대통령의 합의에 따라 강력한 사이벨형 컴퓨터가 소련에 도입돼 소련과 외국의 안전성 확인 결과를 직접 비교할 수 있게 되었다.

일본과의 협력에서는 이미 다년간에 걸쳐 동력으로, 원자력발전소의 안전성분야에서 유익한 협력활동이 이루어지고 있다. 또 동력로의 구조재료, 연료의 수명과 신뢰성의 향상, 방사성 폐기물의 처리 등의 문제에 관해 양국간에 세미나가 계속 열리고 있다.

소련은 일본과의 경제협력도 희망하고 있다. 국제적인 전문화와 생산협력은 최신기술을 도입하는데는 효과적인 방법으로 한 나라만으로는 부담하기 어려운 자금면의 문제를 쉽게 해결해준다.

예를 들어 유럽 고속로프로젝트, 국제 핵융합실험로 프로젝트가 실시되고 있어 소련전문가들은 이같은 협력활동에 응분의 기여를 할 수 있다. 원자력 heat station용의 출력 500 MW, 600MW의 중형로에 대해서는 앞서 언급한바 있지만 이 개발계획은 몇나라에서는 관심을 끌 것으로 보인다.

우라늄으로 산업협력이 가능하다

국제협력분야에서 소련이 참가할 수 있는 중요한 부분으로는 핵연료주기에서의 용역제공이 있다. 극히 최근까지 이 용역범위는 우라늄농축에 관한 용역과 소련의 협력으로 건설된 원

자력발전소용의 연료생산에 한정돼있었다. 소련은 현재 천연우라늄과 농축우라늄을 국제시장에서 판매할 수 있게 되었다.

소련의 생산능력이 남아있기 때문에 장기적인 대량판매가 가능하다. 소련에는 우라늄 가공추출기술과 생산능력이 있고 이것을 국제시장에서 제공할 수 있다.

1991~95년에는 亞酸化物·酸化物의 형태로 연간 5,000톤 이상의 천연우라늄을 수출할 수 있다. 국제시장에서의 우라늄수요가 증가하면 그 공급량을 느낄 수도 있다.

소련의 우라늄매장량은 지질조사자료에 의하면 현재 200만톤으로 추정된다. 이중 73.5만톤은 우라늄 1kg당 60달러 미만의 원가로 채굴되고 있다.

우라늄의 동위원소를 원심법에 의해 분리하는 기술이 있기 때문에 소련은 외국 파트너와의 장기계약, 단기계약 또는 현물계약에 응할 수 있다.

지금까지 시험해본 결과 원심분리법은 재생 우라늄의 농축과 연료생산에 필요한 생성물을 생산하는데 적합하다는 것이 확인되었다.

소련은 원자력의 평화이용분야에서 세계의 어느 나라 또는 어느 국제기관과도 실무적인 협력을 할 용의가 있다. 우리는 산업협력, 합작사업, 2국간 협력과 같은 상호호혜의 협력을 추진해 나가는 것이 앞으로 핵물리와 그 이용분야에서의 지식을 더욱 풍부하게 할 수 있을 것이라는 것을 확신하고 있다.