



본 '기획'은 미국원자력학회와 유럽원자력학회의 2000년도 공동 학술 대회에 맞춰 <Nuclear News>가 세계 원자력계의 중추적 지도자들의 기고를 모아 「21세기의 원자력 발전 전망」이라는 주제로 엮은 특집 (2000.11) 중 3편을 추려 번역·편집한 것이다. (편집자)

제2의 원자력 바람이 분다

Yevgeny Adamov*

원자력은 다른 기술처럼 에너지 부족을 극복하기 위해 탄생된 것은 아니었다. 오늘날에도 에너지 수요는 원자력에 의존하지 않고도 충족될 수 있다는 믿음은 계속되고 있다.

모든 국가의 핵무기 개발자들은, 전쟁에 사용된 것으로 처음 구체화되었고 아직도 최대의 파괴력을 가지고 있으며 또한 후에 평화적 목적으로 이용된 그들의 과학적 발견의 적용에 대해 틀림없이 책임을 느꼈을 것이다. 이러한 원자력의 기원은 초창기 원자로 기술 개발시 행해진 많은 방법으로 설명된다.

군사적 동위원소 제조를 위해 개발되었던 압력관 원자로는 원래 원자력 잠수함에 도입되었던 개조 압력 용기형과 함께 원자력발전소의 주류를 이루게 되었다. 그러한 원자로 설계는 군사적 목적에 잘 부합되었으나 결코 에너지 생산을 위한 특

정 조건에 맞는 적합성 시험은 한 적이 없다. 비록 1960년대의 원자력 요건들은 단순하였으나, 실제로 반영한 발전소는 러시아와 프랑스의 증식로 개념뿐일 것이다.

Windscale(1957)에서 Three Mile Island(1979), Chernobyl(1986)까지 심각성과 빈도가 증가한 원자로 사고는 그때까지는 당연히 가장 환경 친화적이며 안전한 에너지원이었던 원자력발전소 안전성 문제의 연구가 철저하게 부족했다는 사실을 세계에 일깨워 주었다. 이러한 식견은 고유 안전성이라는 새로운 개념의 Alvin Weinberg의 책 「제2의 원자력 시대」와 제3세대 원자력발전소 설계에 새로운 연구의 기초를 마련한 Norman Rasmussen의 확률론적 안전성 분석 연구에 의해 생생하게 증명되었다.

새로운 압력관형, 비등수형 및 가압수형 원자로의 개발은 계속되

고 있으나 신규 발주는 없었다. 원자력산업은 기반을 잃기 시작하였으며 처음 쇠퇴를 보인 국가는 원자력산업이 일찍부터 발달하였던 미국과 영국이었다.

아시아와 극동의 급성장 개발도상국의 원자력에 대한 지속적인 관심은 현재의 실질적인 에너지 수요에 의해 선택되고 있으며, 이는 미국이나 유럽의 원자력 이용 침체나 후퇴 원인에 대한 심층적인 분석에 따른 것이 아니라 단지 개발된 기술에 눈을 뜬 결과에 의한 것이다.

원자로 기술의 창조

에너지 생산에 필수적인 원자로 기술을 탄생시킨 기술 주체는 뛰어난 독일 기술자인 Rudolf Schulten 교수와 같은 몇몇 헌신자들의 노력에 의해 완전히 사라지지 않았다. Microfuel과 고온가스 냉각

* 전 러시아 원자력에너지부 장관

로 개념의 아버지인 그는 이러한 원자력발전소는 경제적으로 화력발전소에 비해 경쟁력이 없다는 것을 영리하게 알아차렸으며 그 발전소들을 화학과 금속의 고온 공정이나 이와 유사한 응용 분야의 에너지 요구 쪽으로 변경하였다. 그가 냉각재 상실 사고에 저항력이 있는 표준 원자로 개념에 대한 또 다른 팔목할만한 진전과 학설을 내놓은 것은 TMI 사고 이후였다.

그러나 새로운 원자로 개념의 최대의 움직임은 체르노빌 사고 이후에 나타났다. 가장 잘 알려진 예는 임계 복합체를 가속기에 결합시키는 방안을 제안한 노벨상 수상자 Carlo Rubbia(1984년 노벨 물리학상 수상)가 고안해낸 개념이다. 이러한 생각들은 전통적인 원자로 개념은 전성기를 지났으며 더 좋은 생각들이 있다는 사실을 뒷받침하는 것에 불과하다.

우리는 어려운 상황을 목격하고 있다. 원자력산업은 문제에 대응하여 이겨내기보다는 들리지 않는 귀를 모든 신호에 기울이고 서서히 침체하길 원하고 있다. 그러나 이 수수께끼는 깊이가 거의 없다. 그러한 포기 이유의 이유는 분명하다. 달성되지 않을 높은 이익을 바라고 현재의 기술에 투자를 많이 한 산업계로서는 새로운 기술 개발을 위해 자본 투자를 하지 않을 것이다.

세계 원자력산업계에는 Enrico

Fermi나 Igor Kurchatov와 같이 진정으로 총명한 과학 지도자가 더 이상 없다는 사실을 인정할 수밖에 없다. 그러므로 일부 국가에서 1960~1970년대에 보류되었던 개발 아이템들을 만병 통치약으로 내놓고 있는 것이 현실이다.

오늘날 매우 중요한 또 하나의 사실을 외면할 수 없다. 모든 국가에서 원자력은 처음 단계에서는 정부의 지원을 받았으나 제1차 석유파동(1973) 때 프랑스를 제외한 다른 국가에서는 국가 지원 우선 순위에 들지 못하였다.

원자력의 개발이 국가의 태도에 영향을 받게된 데에는 미국의 영향이 가장 크다. 1977년 카터 대통령은 핵연료 주기 개발과 방사선에 조사된 연료의 재처리를 제외한 미국 내의 민간 차원의 핵연료 재처리를 무기한 연기한 바 있다. 카터의 의도는 핵무기 확산에 대한 기술적 장벽을 치자는 것이었다(1981년도에 레이건 대통령은 상업용 재처리 금지를 해제하였으나 민간 업체에서는 별다른 반응을 보이지 않았다).

사실상 이 결정은 원자력 산업계에 대한 사형 선고와 같았으며, 환경에 대한 해해를 가져왔다. 실제로 그 결정은 핵무기 보유국의 증가를 막지 못하였다. 나중에 미국은 원자력이 순수한 상업적 사업이어야 한다고 천명하였으며, 기본적으로 핵

확산 금지 문제에 대한 국제원자력기구(IAEA)의 프로그램에 상당한 관심을 기울이고 있다.

회원국들의 계속되는 제의에도 불구하고 IAEA는 현재 구상하고 있는 것처럼 원자력 기술 개발을 위한 최선의 국제 협력 기구를 아직 조직하지 못하고 있는데 이와 관련하여 러시아는 1998년에 가칭 '고유적으로 안전한 원자력 기술' 프로젝트와 같은 국제 협력을 제안한 바 있다.

러시아의 전략

현재 러시아는 21세기 중반을 목표로 원자력 기술 개발을 위한 확실한 국가 전략을 독자적으로 수립하고 있다. 이와 관련된 전략의 기본적인 사항뿐만 아니라 이에 대한 배경 설명도 가치 있는 일일 것이다.

러시아 원자력계는 TMI 사고가 보내온 신호를 놓치지 않았다. 러시아는 종래의 기술에 기초한 운전중인 원자력발전소와 새로운 발전소 설계에 대한 안전성 증진을 위한 IAEA의 많은 과제에서 적극적인 역할을 수행하였다. 우선적으로 제1세대 설비 개선에 중점을 두고 지속적으로 노력을 기울였으며, VVER, BN과 Channel형 원자로의 새로운 설계가 진행되었다.

1980년대 초에 Kurchatov 원자력연구소의 V. Orlov 교수가 이끌

고 있던 과학자 선두 그룹에서 중수를 사용하는 고속로를 이용하여 원자력산업의 안전성 문제를 극복하는 새로운 연구가 제기되었다. 이는 체르노빌 사고 훨씬 이전의 일이었다. 당시 그 연구소의 재료 시험 원자로(Material Reactor : 현재 폐쇄됨)는 한 개의 중금속 냉각재 Loop를 가지고 있었으며 처음 시험이 시작될 단계였다(Loop는 납 또는 납-비스무스를 사용하는 것으로 설계되었으나 실제로 사용된 것은 후자였다).

체르노빌 재앙은 많은 계획을 강행하였으며 처음 모든 RBMK 원자로의 안전성을 공학적 행위의 초점으로 밀어 부쳤다. 1991년도까지 1986~87년도의 목표는 성공적으로 달성하였으므로 소련 연방이 붕괴하였을 때 우크라이나와 리투아니아 소유의 Channel형 원자로에서는 체르노빌 사고에 의해 드러난 중요 문제점은 이미 개선이 되었다. 이후 1990년대에 수행된 국제 프로젝트에서 소련 연방 설계 원자력발전소는 전세계 유사 발전소와 비교해 볼 때 대등한 안전성을 갖추었음이 증명되었다.

세계에서 가장 중대한 원자력 사고의 원인과 결과 완화 분석에 참여하였고, 불운의 원자로 RBMK의 개선을 주도하였으며, 최근 3년간 러시아 원자력 분야 책임자인 본인은 TMI와 체르노빌 사고 이후 전세

계에서 시행된 대책은 불행하게도 원자력 산업계에서 발생할 수 있는 모든 중대 사고를 제압하기에는 실패하였다는 점을 지적하지 않을 수 없다.

비원자력산업 설비에 비해 엄청난 게 낮게 설계된 원자력발전소의 중대 사고 발생 확률은 원자력발전소를 대중에 더욱 잘 반이들이게 하였다. 그러나 중대 사고의 발생 확률이 거의 없으며 실제 제한된 영향에도 불구하고 정치적·정신적인 원인으로 어이없이 과장되므로 주민 대피나 환경에 심각한 피해를 주는 사고로부터 완전히 자유로워질 수 있는 길을 원자력계는 찾아야 한다.

앞에서 언급한 것과 같이, 1986년도 이전에 시작된 실험적 과제에서 1980년 후반의 국가 상황을 알게 되었다. 당시 국가과학기술위원회·원자력산업부 및 과학교육원의 공개 논의에서 다른 원자로 개념보다는 중냉각재(납과 납-비스무스)를 사용한 속중성자 원자로의 장점이 부각되었다.

논의의 상황에 비추어 볼 때 발전소 설계 연구는 원자력발전소의 신뢰할 만한 사고·목적·경제적 경쟁력 등 전분야에 걸쳐 최적화되었다. 기존 원자로에 대한 효율적인 안전성 개선에는 불가피하게 에너지 생산 단가가 크게 추가된다는 사실이 당시에는 지금처럼 명백하지 않았다. 육지 화석 연료 자원의

개발과 더불어 이것은 서구 여러 나라에서 원자력 경쟁력의 기초를 위태롭게 하는 요인이 되었다.

1990년대에 러시아 연방에서 발행한 프로그램 서류는 '고유 안전성 원자로'로 알려진 설비에 대한 지원을 보여주고 있으며 대규모 원자력 배치의 초석으로 간주되었다.

가용한 자원을 주로 운전중 발전소의 안전성 개선 및 수명 연장 준비와 VVER-1000, VVER-640 및 BN-800 신세대 발전소 설계의 완성을 위한 노력으로 자연스럽게 방향을 돌리게 하였다.

장기 전략

1998년도는 러시아의 장기 원자력 개발 정책에 역동적인 작업이 시작된 해였다. 에너지 부문 전체와 특히 원자력 분야의 매우 느린 진행을 감안하여 전망하였다. 장기 예측과 결코 궁극적인 진실로 밝혀지지 않는 발전물의 본질적인 불확실성을 충분히 인식함으로써 현재의 계획뿐만 아니라 발생될 수 있는 심각한 이유마다 즉시 수정할 수 있는 틀을 짜는 데 성공하였다.

이 정책은 최근 에너지 생산 목적의 기름과 가스 소비를 제한해야 한다는 필요성을 인식하면서 진행하게 되었는데 이는 주로 그러한 자원의 수출 중요성과 국제적으로 환경에 대한 고려, 화학 산업 및 수송

등에 바람직한 효율적 적용 등에 대해 러시아 내에서 거론하게 되었다.

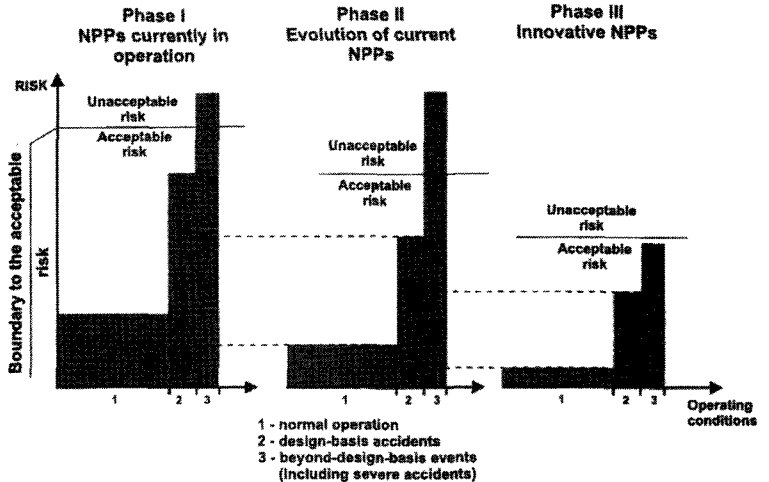
단기적인 계획은 오래된 발전소를 용량이 크고 현대 기술로 입증된 신규 발전소로 단계적으로 교체해 가는 것이다. 최근 VVER-1000·VVER-640 및 BN-800 발전소의 설계 변경은 세계적으로 잘 알려져 있으며 더 이상의 논란이 필요 없다. 대규모 원전 개발에 대한 러시아의 과학적 연구는 많은 간행물을 비롯한 최근 열린 IAEA 일반 회의의 과학 세션을 포함하는 각종 국제 포럼에서 광범위하게 논의되었다.

그러나 이 연구가 2000년 5월 러시아 정부의 승인을 받은 국가 전략의 현황을 요구하고 있으므로 그 핵심을 반복하는 것이 불합리하다고 할 수는 없다. 최근 원자력 기술의 적용을 방해하고 있는 다음의 문제점들을 해결하지 않는 한 원자력은 기본 에너지원의 역할을 다한다고 볼 수는 없다.

① 단순히 사고 확률을 낮추는 것보다는 중대 사고를 결정적으로 배제할 수 있는 정도로 안전성이 제고되어야 한다.

② 그러나 고준위 폐기물의 매립이 매력적이고 안전해야 한다.

③ 정치적 도구 및 감독에 의해서만이 아니라 기술적 수단에 의해서



〈그림 1〉 Nuclear power safety evolution

도 핵무기의 확산 금지가 보장되어야 한다.

④ 원자력의 대규모 배치에 있어서 먼 미래가 아니라 가까운 장래에 경제적 경쟁력이 복구되어야 한다.

첫 번째 요건은 납 냉각재를 사용하는 고속로의 물리적 특성 및 설계 기능에 의해 만족되었다. 원자로 냉각재 상실 사고는 수조 형상의 장점에 의해 배제되는데, 이는 노심의 임계 여유가 즉발 임계를 유발하지 않는 수준까지 감소되기 때문이다.

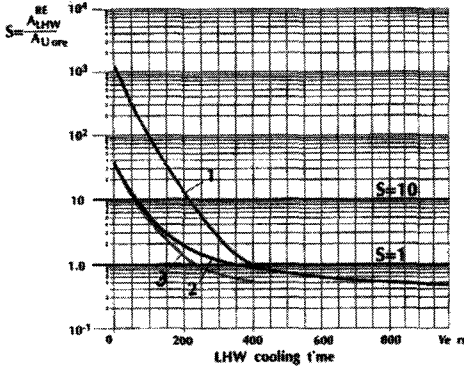
원자 고비등 냉각재는 열 또는 방사성 분해에 영향을 받지 않아 물에서와 같은 수소가 방출되지 않으므로 수소 또는 증기 폭발의 위험은 없다. 재료의 선택은 소듐 사용시

같이 발생할 수 있는 화재의 위험을 배제한다. 원자력 발전의 안전성 확보를 위한 연구의 진보는 〈그림 1〉에 정량적으로 표시되어 있다.

역청화·유리화·광물화 등 폐기물 격리 기술의 인상적인 발달과 상대적으로 폐기물이 소량이라는 점에도 불구하고 의심할 여지없이 강력한 사회적 호소가 I. Ganey 교수팀과 전문가들에 의해 개발된 핵연료 주기에서 수립되고 유지된 방사선 평형¹⁾ 이론에서 발견되었다.

방사성 폐기물의 이동을 고려한 폐기물의 방사선 평형 관리에 대한 유효성 연구의 결과는 최근 논문을 포함하여 많은 논문으로 간행되었으며 〈그림 2〉에 개요가 설명되어

1) 방사성 폐기물의 방사선 평형 관리란 본질적으로 채광된 우라늄의 방사능과 매립되는 폐기물의 방사능의 평형을 의미하는 것으로, 매립되는 폐기물은 채광된 우라늄 광석의 방사능과 동일하므로 지구의 자연 방사능을 방해하지 않으면서 폐기물을 처리하도록 해주는 것이다.



Radiation balance, without (S=1) and with allowance for migration (S=10), $S=A_{LHW}^{RE}/A_{U_{ore}}$ as a function of the time of long-term monitored cooling of LHW, with contribution to waste, %:

Curve	Contribution to radwaste, %				
	Sr	Cs	U	Pu	MA (Np+Am+Cm)
1	10	15	0,05	0,1	0,1
2	0,1	1	0,05	0,1	0,1
3	0,1	1	0,01	0,01	0,1

Note: S is the ratio between the radiation-equivalent (RE) activity (A) of long-lived high-level waste (LHW) and the activity of uranium ore. MA stands for minor actinides.

(그림 2) Radiation equivalence in the fuel cycle of large-scale nuclear power

있다. 대규모 원자력 발전을 하면서 자연 방사능을 지구상에 그대로 보존할 수 있다는 것은 분명히 폐기물 문제를 해결하는 좋은 방법이다.

새로운 발의

러시아는 통합 핵비확산 제도의 적극적인 역할을 변함없이 수행하고 있다. 게다가 러시아는 2000년도에 포괄적인 핵실험방지조약을 비준하였으며 실제로 다른 핵보유국보다도 먼저 핵실험을 중단하였다.

오늘날 우리는 핵비확산 조약의 기술적인 보강을 위해 새로운 발의를 준비하고 있다. 이 발의는 초기 단계에 공급 가능한 핵무기급 플루토늄 생산뿐만 아니라 원자력발전소 사용후 핵연료의 재처리 과정 중

생성되는 플루토늄을 분리하는 핵연료 주기의 제외에 대한 기본적인 타당성을 조사하는 것이다. 또 다른 중요한 단계는 우라늄 농축을 포기하는 일이다.

우리가 '안전성 확보를 위한 핵연료 주기 사업의 확산 억제'라고 부르는 이 발의의 초기 진행 과정에서 핵연료 재처리로 생성되는 플루토늄 핵무기 비축을 억제할 수 있었다.

원자력산업이 겪어야 했던 경제적 경쟁력 상실은 원자력에 사용된 물리·설계 특성 및 구조 재료에 의해 발생 가능한 원자로의 사고를 차단하기 위한 설비에 소요된 추가의 비용 때문일 수 있다.

잠재적으로 위험한 재료의 제거와 더불어 설계 및 물리적 변수의

최적화는 원자력 발전 원가에 기여하는 발전소 건설 투자비 절감과 운전 및 보수 비용을 줄일 수 있다.

경제성 분석에 의하면 고속로 및 2차측에 초임계 변수를 가진 발전소의 건설 투자비 및 유지 보수 비용 두 가지 모두 종전의 원자력발전소보다 적을 것으로 보인다.

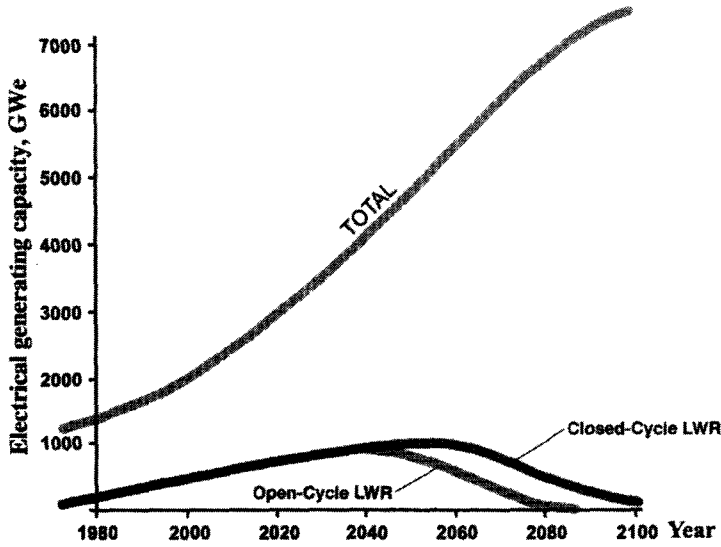
불행하게도 우라늄 자원이 풍부한 환경하에서는 열중성자 원자로에 기초한 원자력 개발은 한계가 있다는 점을 깨닫지 못한다(그림 3). 원자력이 다가오는 21세기의 전력 수요 증가를 충분히 감당할 수 있게 하려면, 해체되는 핵무기 및 발전용 원자로에서 나오는 플루토늄을 점진적으로 이용하는 것 뿐이다(그림 4).

일부 국가에서 시행하고 있는 경수로 핵연료 주기의 폐지는 우라늄 소비를 증가시킬 뿐, 대규모 원자력 성장에 필수적인 플루토늄 비축을 감소시킬 우려가 있다.

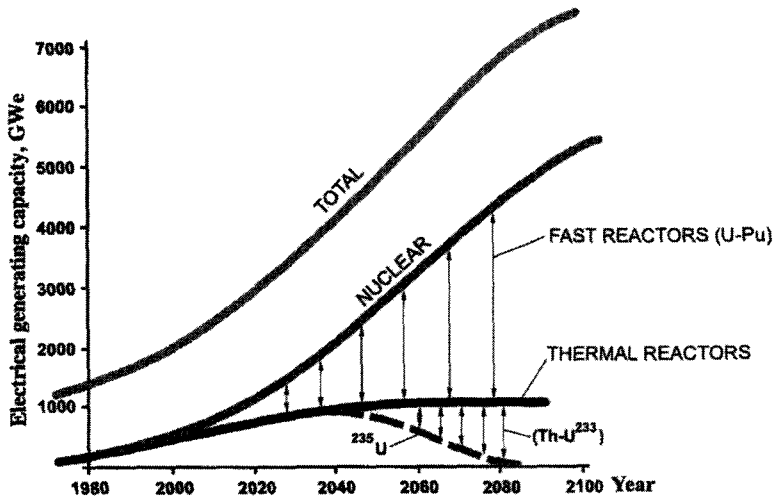
먼 장래에 저렴한 우라늄 자원이 고갈될 경우 고속로 설비의 토륨 차폐체에서 열중성자로에 필요한 우라늄-233을 생산할 수 있다.

정책 선언은 그 자체로 끝나는 것이 아니며 러시아는 이미 실제적인 적용에 착수하였다. 1999년도 러시아의 전력 수요 증가분(약 17TWh)은 원자력이 감당하였다.

긴 정체기를 지나 2000년도에 우리는 Rostov 원자력발전소 1호기를 준공하였다. 2005년도 이전



〈그림 3〉 Tentative scenario of world nuclear capacity growth without fast reactors (given potential cheap U reserves of ~10 million t)



〈그림 4〉 Tentative scenario of world nuclear capacity growth with fast reactors (given potential cheap U reserves of ~10 million t)

에 몇 기가 더 시운전에 들어갈 계획이다.

BN-800 원자로는 2010년도 이전에 건설될 것이며, 고밀도 열전달 질소 연료와 노심 증식률이 1이 되는 것 같은 원자력 개발의 정책 목표를 달성키 위해 원자로 설계는 변경될 것이다. 러시아가 진정한 국제 협력의 장점 없이 이 프로그램을 시행해야 한다면, BN-600과 함께 이 원자로를 핵무기 플루토늄의 처리에 주된 역할을 할 것이다.

일련의 노내 실험 및 재료 실험 연구가 끝나고 냉각재 기술이 한 차례 시도되고 나면 미래 대규모 원자력 성장의 기본이 될 것으로 현재 간주되고 있는 300MWe 실험로인 BREST 원자로(납냉각 고속로)가 운전될 것이다.

러시아의 과거 십 년간의 경제적 어려움이 원자력을 완전히 앗아간 것은 아니다. 신규 발전소 건설을 못했기 때문에 우리는 이 기간 동안 새로운 국가 에너지 정책에 근간이 되는 철저한 연구를 수행하였다.

그러나 러시아는 협력의 문을 닫은 것이 아니다. 2000년 9월 뉴욕 시에서 열린 밀레니엄 정상 회담에서 푸틴 대통령은 지구의 에너지·환경 및 경제적 문제를 해결하고 IAEA 후원하의 프로젝트에서 이룰 수 있는 핵비확산 정책을 기술적으로 강화시키기 위해 다른 나라와 힘을 합칠 것을 제의하였다. ☉