2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

추가의정서 발효에 따른 DU 조사사업의 방향과 의미

Direction and Meanings of Depleted Uranium Research Project according to Entering into Force of Additional Protocol

박재범, 민경식, 전인, 박일진, 고광옥
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

추가의정서의 발효는 확대신고 및 추가접근 등과같은 다양한 투명성 보장도구를 기존 안전조치(safeguards)에 접목시키므로써 대한민국의 안전조치 수준을 Integrated Safeguards 수준으로 향상시킴을 의미한다. 안전조치상 요구되어지는 많은 자료들 중에 면제 핵물질 및 소량 핵물질에 포함되어 INFCIRC/153체제에서 면밀히 조사되지 않았던 Depleted Uranium(DU, 감손우라늄)의 국제적 관리 및 저장현황을 조사하므로써 국내 DU조사사업의 의미를 재조명하였다. DU조사사업은 대한민국의 원자력 투명성 검증을 위해 보다 효과적이고 효율적으로 수행되어야 한다.

Abstract

Entering into Force of the Additional Protocol means that Korea's safeguards level is approaching to Integrated Safeguards as application various transparency tools like extension notice and complementary access to conventional Nuclear safeguards. Among the information which is asked by Safeguards, through the study on international management and storage status about Depleted Uranium(DU) that wasn't completely surveyed because of being included in exempted materials and small quantity, we revaluation the meanings of DU research project. DU research project should be implemented more effectively to verify Korean Nuclear Transparency.

1. 서 론

대한민국은 원자력 활동의 투명성 확보를 통하여 원자력 수출에 기여하는 원자력 선진기술 확보에 많은 노력을 기울이고 있다. 대한민국은 1975년 11월 14일 발효된 한.IAEA 전면 안전조치 협정(INFCIRC/153)을 성실하게 수행해왔고 추가적으로 확대신고 및 추가접근 등과같은 강력한 검증방법을 가지고 있는 추가의정서(INFCIRC/540)를 2004년 2월 19일 IAEA로 기탁하였다. 1996년 6월 추가의정서 서명 이후 7년 8개월 만에 추가의정서가 발효하게 된 것이다. 추가의정서의 발효는 대한민국이 다양한 원자력 활동의 투명성을 통해 Integrated Safeguards 체제로의 진일보를 의미하며 대한민국이 국제사회의 일원으로서 세계의 흐름에 발맞추어 나가고 있음을 보여준다.

대한민국은 추가의정서 발효후 180일 이내에 비 핵물질 핵연료주기 관련 기술 및 위치, 부지정보, 추가의정서 부속서 Annex 1 관련 수출입 정보, 우라늄 광산 및 선광 공장, 토륨 선광 공장 정보, 성분 및 함량미달의 우라늄(10ton) 및 토륨(20ton)의 위치별 보유 정보, 안전조치가 면제된 핵물질 정보(양, 용도), 핵연료주기 10년 종합계획 등을 국제원자력기구(IAEA, International Atomic Energy Agency)로 성실하게 신고하여야 한다. 상기 항목들에 대한 정보를 IAEA에 통보하는 일은 현재 과학기술부가 주관하고 있으며 각 자료들에 대해서는 해당시설에서 조사하고 있다. 비 핵물질 핵연료주기 관련기술 및 위치, 추가의정서 부속서 Annex 1 관련 수출입 정보 및 핵연료 주기 10년 종합 계획 등은 조사 및 보고가 쉽지 않을 것으로 예상되며 이를 위한 준비에 많은 시간과 노력이 필요하다. DU는 INFCIRC/153Type에서도 안전조치 대상이었으며 일정량은 면제 대상이었다.(Paragraph 37 a), b)) 그러나 충분한 검토와 관리가 이루어지지 않아왔고 IAEA와의 협의를 통해 자료조사 및 보고토록 되어있다. 이러한 보고에 대해서 INFCIRC/540Type의 실시와 함께 정부는 DU조사사업을 진행중에 있다. 과거의 안전조치에서 등한시 되었던 항목이 최근들어 주목을 받는 이유에 대해 연구하였다. 본 논문에서는 정책적이고 방대한 자료조사가 필요한 부분의 연구가 아닌 DU조사사업에 초점을 맞추어 DU의 국내외 저장현황 및 이용계획 등을 소개하고 이를 통하여 DU조사사업의 의미를 재조명하고 방향을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

1) DU의 특징 및 이용분야

DU는 감손우라늄과 열화우라늄으로 생성과정에 따라 크게 분류할 수 있다. 감손우라늄이란 천연우라늄이나 농축우라늄이 핵분열과정을 거치면서 U-235의 함유율이

기존 함량보다 줄어든 우라늄을 말하며 열화우라늄은 감손우라늄과 구별되는것으로 U-235의 동위원소 존재비가 천연의 상태보다 작은 우라늄(우라늄의 동위원소 분리 과정 또는 사용후 핵연료의 재처리과정에서 생기는 우라늄)을 지칭한다. DU가 미래의 에너지원으로 사용될 수 있다는 주장에 대해서는 이견이 많은 게 사실이나 농축과정을 통해 생성되는 DU를 이용해서 고농축우라늄(HEU, Highly Enriched Uranium)과 혼합하여 여기서 저농축우라늄(LEU, Low Enriched Uranium)을 생산한다든가 고속증식로의 Blanket 물질로 사용하는 예는 원자력의 평화적 이용의 좋은 예라 할 수 있다. 농축과정을 통해 생성되는 Tail을 이용하여 핵무기급의 HEU와 Blending하여 LEU생산, 이로 발전을 한다는 개념은 분명 매력적인 일일것이다. NEA의 “Management of DU”에 따르면 1999년 현재 전세계적으로 DU의 양은 약 120만ton 이며 이들 대부분은 특수용기에 담겨 야적되어있는 상태이다. 대부분 UF_6형태로 철강재질의 실린더용기에 담겨져 있는데 보관용기는 적절한 도색 및 관리가 이루어지고 있다. 주로 농축시설을 보유한 국가를 중심으로 대량으로 보유하고 있다. 이처럼 각국이 DU를 보관하고 있는 이유는 무엇일까? DU의 활용성에 대한 평가를 보면 그 이유를 알 수 있다. 군사적 목적 이외에 산업용으로 상용규모의 감손우라늄 활용은 쉽지 않아 보이고, 산업적 이용의 범위는 동위원소 용기제작용 차폐재료(U 금속) 혹은 연구용 원료물질(U 금속, UO_2)등의 활용이 있다. 더 세분하자면 군사적 목적 이외로 방사선 차폐체, 사용후 핵연료수송용기, 동위원소 용기, 고속증식로연료, 산업용 소재(비행기나 헬리콥터 및 미사일의 무게중심체, 유정시추기의 Sink Bar, Flywheel) 등 DU의 특성을 이용한 많은 이용분야가 있다.

DU가 대중매체에 언급된 것은 미국이 걸프전 당시 열화우라늄탄을 사용하였고 이로인해 환경 및 인체피해가 발생한다는 뉴스를 접하면서이다. 열화우라늄탄은 말 그대로 열화우라늄을 사용한 대전차포탄을 말하는데, DU화합물인 UF_4분말을 이용하여 만드는 대전차 관통자를 말한다. 열화우라늄탄의 장점은 일반탄두와 달리 비중이 납보다 큰 19.07g/㎤나 되고 녹는점도 1,132℃에 이른다. 그래서 두꺼운 적의 탱크를 용격하기에 적합하다. 이러한 특징을 이용하여 탱크용 장갑철판, 철제 침투용 탄환, 대전차관통자 등으로 사용이 되고있다. 즉 농축후 생성되는 Tail인 UF_6를 이용하여 만든 것이 바로 열화우라늄탄이다. 열화우라늄탄에대한 인체유해여부공방은 아직도 진행중이며 미국, 영국 등의 불인정에도 불구하고 현지 주민들이나 참전군인들은 다양한 질병(불면증 및 피부암 등)에 시달리고 있다.

많은 사회단체들은 DU의 사용을 금지토록 강력히 요청하고 있는데 열화우라늄탄이 산화할 경우 지하수 및 토양의 심각한 오염을 초래한다는 주장이 제기되고 있다. 산업적으로 이용시 기계적 강도를 보완하기 위해 주로 합금형태로 이용되는데 기계가공시 생성되는 작은조각들은 반응면적이 넓어 자연발화하는 특성을 가진다. 그래서 미세하게 분쇄된 작은 조각들은 물이나 기름안에 저장하여야 한다. 많은 양의 DU가 인체에 흡입되었을 땐 치명적인 유독성 금속이다. (곽경길, 강권호, 김길정,

“U-0.75wt% Ti합금의 산화거동연구”, KAERI/TR-1959/2001, 한국원자력연구소(2001)). 특히 DU의 가공단계에서는 아주 작은 입자들이 공중에 부유되어 인체내에 흡입될 가능성이 크다. 그래서 DU의 기계 가공시에는 충분한 Ventilation Equipment를 갖추어놓고 작업을 하여야 한다.

UF_4 powder의 제조공정 Flow를 도식화하면 아래 그림 1.과 같다.

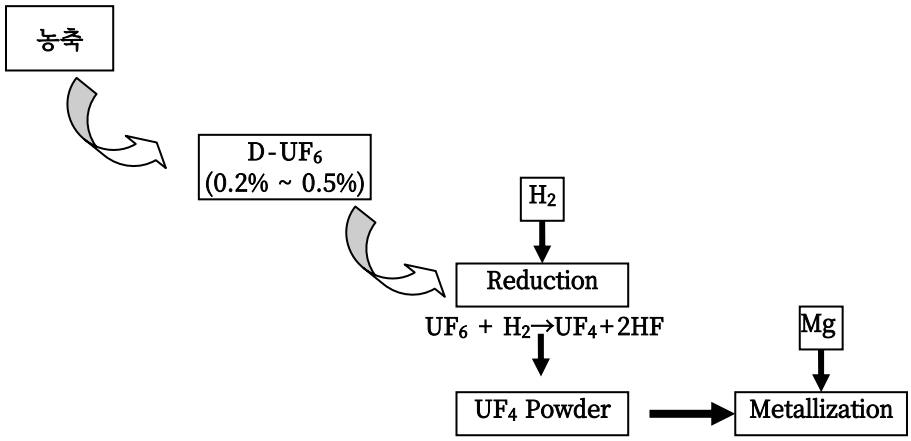

그림1. UF_4제조공정

DU에 대한 연구는 한동안 활발하게 진행되어왔다. 미래에너지원으로도 여겨졌던 DU는 현재 상당량이 저장상태로 존재한다. 이러한 DU의 이용을 위해 NEA는 “Management of Depleted Uranium”이라는 보고서를 통해 DU은 핵분열생성물과 함께 일반적으로 폐기하는 것이 바람직하나 단순폐기는 경제적 실익이 없어 많은 국가들이 불분명한 이용분야에도 불구하고 장기보관을 선택하고 보관중임을 밝히고 있다.

DU의 방사선 특성은 천연우라늄과 유사한데, 그 이유는 DU안의 동위원소 분포비를 살펴보면 알 수 있다. 약 99.6999%의 ^{238}U, 0.3%의 ^{235}U, 0.001%의 ^{234}U 의 조성을 이루고 있다. 예를들어 U-235의 농도가 0.45%인 DU의 비방사능은 천연우라늄의 약70.8%에 불과하다. (곽경길, 강권호, 김길정, “U-0.75wt% Ti합금의 산화거동연구”, KAERI/TR-1959/2001, 한국원자력연구소(2001)) 그 외에 다른 DU 화합물의 특성들을 보면 아래 표 1.과 같다.

표 1. DUF_6생성물의 물리적 특성

Compound	Mol.wt.	Bulk density(t/㎥)
DU metal	238	19
DUF_4	314	2.0 ~ 4.5
DUO_2	270	2.0 ~ 5.9
DU_3O_8	842	1.5 ~ 4.0

※Based on Data from Duerksen et al.(2000) and Dublin et al.(1997)

다른 핵물질의 경우처럼 DU를 관리하기는 어렵지만 핵물질 저장시 고려사항들을 DU관리에도 적용한다면 물질의 화학적 안정성, 방사능 안정성, 물리적 방호개념이 필요하다.

화학적 안정성

UF_6로 저장될 때 UF_6의 공기 노출은 공기 수분과의 반응에 의해 매우 유독한 UO_2F_2나 독성물질 HF가스가 발생시킨다. 그러나 현재 고체 상태로 저장된 UF_6 실린더는 화재시를 제외하고는 공기와의 접촉 등과 같은 대량 누출 위험 가능성은 적은 편이다. 그러한 이유로 저장부지는 가연성 물질로부터 멀어야한다. 그리고 HF가스의 생성으로부터 환경이나 인명 피해를 줄이기 위해 적절한 조치를 하여야 한다.

방사능 안정성

저장소 근무직원 및 지역 주민이 받는 방사능 안정성 역시 필수적인 고려사항이다. 이것은 저장시설 주변의 경계, 위치 등의 설계에 필수적이다.

물리적 방호

DU는 NSG Part 1품목으로서 수출이나 수입시 절차가 복잡하다. 아직까진 DU가 테러리스트의 테러 목표물로 등장하진 았았지만 핵물질 전반적인 규제가 강화된다면 DU에 대한 방호시스템도 강화되어질 수 있다.

2) Safeguards 적용대상으로서의 DU

DU는 INFCIRC/153Type에서 농축도가 0.5%보다 낮을 경우 20ton까지 면제가 가능했으며 0.5%보다 높은 경우는 10ton까지 면제품목이였다(Paragraph 37 a), b)). 산업체에서의 차폐체나 촉매제 등으로의 이용 등 회수 가능한 비원자력 목적의 이용 역시 용도 면제가 가능하다(Paragraph 36 b)). 하지만 용도를 벗어나거나 총량을 초과하는 핵물질은 INFCIRC/153Type의 안전조치 하에서도 신고 대상이다. 그렇지만 2000년 이전에는 IAEA에서는 DU에 대한 상세정보를 요구하지 않았고 그로인해 정확한 실태 파악 및 조사가 이루어지지 않았다. 면제조치에 대한 정확한 지침과 실행에 몇 가지 오류도 확인되고 있다. 따라서 면제핵물질에 대한 상세한 정보제공을 할 경우 IAEA와 국가는 이와 같은 오류에 대해 충분한 논의를 해야한다.

IAEA는 전 세계적인 안전조치 강화의 일환으로 2001년 이후 한 · IAEA간 연례검토회의를 통하여 면제 핵물질 및 소량 핵물질에 대한 국내조사 현황을 요구하여 왔으며(2001 JRM Action 15, 2002 JRM Action 27) 대한민국정부는 추가의정서의 발효와 함께 조사 보고토록 되어있다. 우리나라는 원자력법과 시행령을 개정하여 동 물질에 대한 조사 체계는 갖추고 있으나 보고의 의무화 등 관련고시의 미비 등 여러가

지 제반 여건이 갖추어지지 않은 상태이며 현재 고시 제정작업이 진행중에 있다. 고시제정과 함께 소형Detector에 있는 소량 핵물질 수준까지 보고 및 관리토록하는 조사업무가 진행중에 있다. 국제기구인 IAEA가 DU에 대해 강화된 조사를 요구하고 있다. 이는 모든 핵활동은 통제되어야 하고 핵무기급의 핵물질이 아니라도 세계평화를 위협할 가능성이 있는 것이라면 모두 철저하게 관리하겠다는 국제사회의 의지를 알 수 있다. 원자력통제업무의 상당 부분이 국제협력과 연관되어 추진됨을 고려할 때 DU의 국제적 관리수준을 국내 DU관리에 검토 · 반영할 필요가 있다. 물론 DU를 이용하여 핵무기급의 Plutonium을 생산하는 일은 쉬운 일은 아니다. 그러나 가능성을 배제할 수 없으므로 DU에 대한 관리가 Safeguards의 범주안에서 철저하게 이루어 지도록 관리돼야 한다.

3) DU의 저장 및 처분

DU는 U-235가 자연에 존재하는 0.711% 보다 낮은 농축도를 가지며, 우라늄의 농축과정 중 발생하는 부산물이다. 일반적으로 DU는 U-235가 0.5%보다 낮은 농축도를 가지는 우라늄 또는 천연우라늄의 농축으로 만들어진다. 전세계 농축활동의 부산물로 생성된 DU의 대부분은 표 2와 같이 미국과 러시아연방이 약 80%정도를 보유하고 있는데 DU의 저장형태는 Uranium Hexafluoride(UF_6), Uranium Tetrafluoride(UF_4), Uranium Oxides(U_3O_8, UO_2 and UO_3), Uranium Metal 등으로 다양하며 형태에 따라 물리적 특징도 다양하다.

표 2. 각국의 Depleted Uranium저장형태와 저장량

1999년 기준

국 가	저장형태	저장량(tU)	비율(%)
미 국	DUF_6	480,000	40.0
러시아연방	DUF_6	460,000	39.0
프랑스	DU_3F_8 DUF_6	130,000 60,000	16.0
영 국	DUF_6	30,000	2.5
URENCO	DUF_6	16,000	1.3
일 본	DUF_6	10,000	0.8
중 국	DUF_6	2,000	0.2
대한민국	DUF_6	200	0.0
총 량		**1,188,200**	**100.0**

농축활동이 계속되는한 DU의 생산은 계속될 것이며 DU를 단순저장만 할 경우 저장용량에 한계가 있기 때문에 각국은 DU에 대한 연구를 계속할것이다. 다만, 현 단계에선 저장이 최선의 방법으로 판단되어지고 UF_6 형태의 중간 저장이 가장 용이하다는 것이다. 이와 같은 중간 저장은 최종 처분을 전제로 이루어지고 있으며 중간 저장 방식은 전용 저장용기를 구비하고 부식방지 대책을 수립하고 야적 또는 빌딩 관리로 장기간 이루어져야 한다. 그러한 관리상태에서 최대로 60년정도의 보관이 가능한 것으로 알려져 있으며 미국의 에너지성(Department of Energy)에서는 DU폐기물의 처리를 위하여 Martin Marietta Energy System Inc.에 DU의 관리 및 최종처분에 관한 검토용역을 요구하였으며 결과보고서에서 최종처분을 위하여 DU는 U_3O_8으로 변환하여 저장 및 처분되어야 한다고 보고하였다.

용역 결과물에서 농축의 결과물인 UF_6의 보관방법중 가장 적절한 방법은 U_3O_8이나 UO_2로의 변환으로 알려진다. 그 이유는 U_3O_8과 UO_2가 우라늄의 가장 안정적인 화학적 형태이며 그로인해 가장 안전하게 저장 관리될 수 있는 형태이기 때문이다. 또한 저장,처분시설을 폐쇄할 경우 인간과 환경에 미치는 영향이 가장 적다. 게다가 불소를 회수 재사용할 수 있어 폐기물양도 최소화할 수 있다.

3. 대한민국의 DU 저장방식 및 보유현황

현재 많은 나라들은 농축후 생성되는 UF_6를 U_3O_8이나 UO_2로의 변환이 아닌 그 자체로 보관중이다. 다만 프랑스만이 DV70이라는 특수전용 용기를 이용 Tricastin Production Site와 프랑스 중부에 위치한 저장 설비를 이용하여 U_3O_8으로 변환 저장중이다. 많은 국가에서 DU를 중간저장매체로 저장하는 이유는 U_3O_8, UO_2의 최종저장은 재사용시 추가적인 공정을 거쳐야 하고 현재의 저장기술로 60년 이상은 저장이 용이하기 때문이다.

현재의 설비 및 저장 용량을 본다면 다가올 70~100년 이내에 DU의 최종처분이 필요할 것으로 보이진 않는다. 그 이전에 DU의 새로운 이용분야의 개발이나 고속증식로의 상용화로 DU의 수요가 증가한다면 저장문제는 큰 문제는 아닐 것이다. 대한민국의 경우 농축시설이 없음에도 DU가 상당량 존재하는 것은 폐자원인 DU화합물 UF_6를 군사용 및 자원화 연구를 위해 지난 80년대에 200여ton을 수입했기 때문이다. 1999년 기준 184.8ton이 UF_6 전용보관 실린더 15개에 분산 보관중이고 UF_4 저장 드럼 28개에 9.6ton의 UF_4 및 3.8ton의 DU 금속이 한국원자력연구소에 보관중이다.(NEA, “Management of Depleted Uranium”)

대한민국의 DU양은 2003년 말 기준 약 262ton정도로 추산되는데(원자력통제기술센터2003년도 운영보고서, KAERI/MR-410/2003) 한국원자력연구소의 저장분 164ton n을 제외하면 발전소 등에 약 100ton정도의 DU가 존재하고 산업체나 의료업체의 DU양은 조사가 진행중인 DU중간 조사자료를 보면 약 13ton정도로 파악된다. 원자

력 산업의 획기적 양적팽창이 없는 의료 및 산업체에서는 약 20~30ton정도의 DU증감이 예측된다.

IAEA에서는 기존의 관리대상이던 핵물질취급 안전시설외에 산업체나 의료업체까지의 조사보고를 요청하고 있으며 이는 DU가 주요 핵물질(NSG Part 1)이기 때문이다. 대한민국은 외국의 DU 이용분야에 대해 추가연구를 수행하여 DU관리에 적용, 관리토록 해야한다. 향후 DU조사 사업이 진행됨에 따라 확보되는 업체에 대해서는 급격한 양적 팽창은 예상되지 않으므로 일관된 관리 및 교육, 홍보도 마련되어야 한다. 그리고 INFCIRC/540에서는 확대된 개념의 DU조사가 이루어지며 이와 같은 확대신고 요구는 추가접근과 함께 추가의정서의 근간을 이루고 있다.

아래 표 3.은 INFCIRC/153과 INFCIRC/540에서의 규정하고 있는 DU관련 조항들의 요약정보를 나타냈다.

표 3. INFCIRC/153과 INFCIRC/540의 **DU관련 조항 비교표**

INFCIRC/153	INFCIRC/540
ㅇ 보고대상 핵물질 - 우라늄, 토륨, 플루토늄 ㅇ 사찰대상 면제 핵물질 - 양에 따른 사찰면제 . 천연우라늄 : 10Ton . DU : 20Ton . 토륨 : 20Ton - 용도에 따른 사찰면제 . 비원자력 목적으로 산업체에서 사용되는 핵물질 (차폐체, 촉매제 등) . 양에 관계없이 사찰면제	ㅇ 보고대상 핵물질 - 좌 동 ㅇ 사찰대상 면제 핵물질에 대한 정보IAEA에 제공 ㅇ 미신고 핵물질에 대한 정보제공 - 동위원소 차폐체 등으로 수입된 감손우라늄 등

4. 결론 및 제언

국가 원자력활동의 투명성 및 신뢰도를 확보하기 위해 대한민국은 핵확산금지조약(Non-Proliferation Treaty)에 따른 INFCIRC/225 및 IAEA안전조치체제의 INFCIRC/153, INFCIRC/540 등의 조약체결을 성실히 이행하고 있다.

국가는 원자력법과 관련고시의 개정을 통해 추가의정서 이행의 법적 근거를 확고히 마련하고 있으며 추가의정서의 성실한 이행은 국제사회에서 대한민국의 원자력활동에 대한 투명성을 굳건히 하는데 기여할 것이다. 또한 국가는 강화된 추가의정서의 요구에 맞는 완전하고 정확한 자료의 제출을 위해 역량을 집중하고 있다.

본 연구에서는 외국의 DU분포 및 이용분야 그리고 저장방식에 대해 조사를 하므

로써 DU중요성에 대한 조사를 했고 DU조사사업이 성실히 수행되어야 하는 이유를 재평가했다. DU의 전세계적 분포, 특징에 대한 조사가 DU조사사업과 원자력 투명성유지에 기여하기 바란다. 아울러, DU조사사업의 올바른 이해를 통해 효과적이고 효율적인 원자력활동의 투명성 검증방법에 대한 연구가 추가로 진행되어야 한다.

참고문헌

1. OECD NEA, “Management of Depleted Uranium,” OECD Nuclear Energy Agency, (2001).
2. T.J.Hertzler, D.D. Nishimoto, and M.D.Otis “Depleted Uranium Disposal Options Evaluation,” ECG-MS-11297, EG&G Idaho, Inc., (1994).
3. M.A.Lewallen, M.K.White, and U.P.Jenquin “Depleted Uranium Valuation”, PNL-2822(UC-70), Pacific Northwest Laboratory, (1979).
4. 김창규 “OECD/NEA, IAEA 공동주최 감손우라늄의 이용과 관리,” KAERI/OT-672/2001, 한국원자력연구소, (2001).
5. 곽경길, 강권호, 김길정, “U-0.75wt% Ti합금의 산화거동연구,” KAERI/TR-1959/2001, 한국원자력연구소, (2001).
6. TCNC, “원자력통제기술센터 2003년도 운영보고서,”KAERI/MR-410/2003, 한국원자력연구소, (2003)