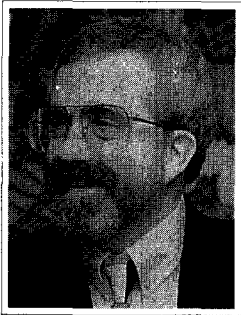


미국 원자력산업 정책의 현재와 미래

D. W. Miller

미국원자력학회 회장



제 기준 구축 등 기술적인 측면에 대해서도 언급하고자 한다.

그리고 이상의 논의와는 별도로 그간 본인이 원자력에 대한 분야에서 연구하면서 느꼈던 원자력발전소에 서의 '안전과 복종'이라는 덜 기술적 이고 조금은 철학적인 주제에 대해서도 간단하게 개인의 소감을 이야기하고자 하며, 끝으로 미국 원자력 산업의 미래에 대해 전망하고자 한다.

해 설계·건설되었는데, 웨스팅하우스(WH)사가 50기, 제너럴 일렉트릭(GE)사가 37기, 컴버스천 엔지니어링(CE)사가 15기, 바브콕 & 윌콕스(B&W)사가 7기를 공급하였다.

그러나 2차 계통은 수많은 공급 업체들이 자신의 독자적인 기술로 원전 건설에 참여하였기 때문에, 원전이 새로 건설될 때마다 새로운 규제 기준이 요구되었으며, 신규 원전의 운전 면허 발급을 위해 엄청나게 많은 설계 기준을 변경하여야만 했다.

미국은 현재 47개의 전력 회사가 원전을 소유하고 있다.

그 중 19개사는 단 1기를 보유하고 있고, 13개사가 2기를, 나머지 15개사가 2기 이상의 유닛을 보유하고 있으며, 한 회사가 최대로 보유한 유닛은 12기이다.

그리고 29개의 원전 부지가 2기의 유닛을 보유하고 있으며, 3개의 원전 부지만이 3기의 유닛을 보유하고 있을 뿐이다.

이상에서 알 수 있듯이 일부 소형 원자로를 제외하고는 미국의 원자력

본

인은 미국의 원자력 산업 정책을 논의하기 위하여 우선 미국 원자력 산업의 현황과 개량형 경수로(ALWR) 개발 현황을 먼저 소개하고, 그 다음에 고준위 방사성 폐기물의 관리와 핵무기 급 플루토늄 처분에 관한 정책, 규제 완화를 통한 원자력 산업의 경쟁력 확보를 위한 조치 등을 포함한 미국의 원자력 산업 정책을 개괄하고자 한다.

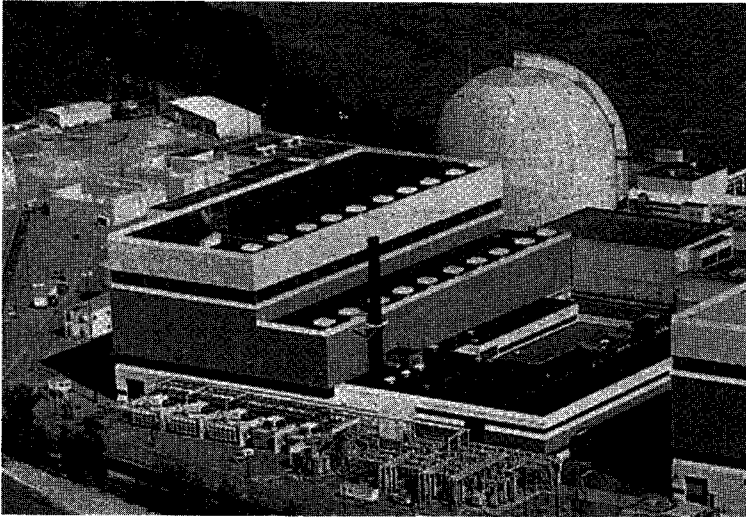
또한 원전 노후화와 운전 면허 재발급, 원전의 디지털 통제·제어 시스템과 위험 경보 시스템에 대한 규

미국 원자력 산업의 현황

미국은 현재 109기의 원전 유닛이 가동중에 있으며, 이 유닛의 총 설비 용량은 약 1억2백만kW로 세계 원전 유닛 총용량의 25%를 차지하고 있으며, 미국 전력 생산량의 22%를 담당하고 있다.

미국 전체 50개 주 중에서 33개 주가 원전 유닛을 보유하고 있으며, 그 중 9개 주에서는 전체 전력 설비 용량의 39% 이상을 원전이 담당하고 있다.

이 109기의 유닛은 4개사에 의



미국의 Seabrook 원자력발전소

발전소는 표준화되어 있지 않다.

원전 운영과 관련하여 지난 10년간 원자력발전소의 평균 이용률은 꾸준히 상승하여, 85년의 62%에서 지난 95년에는 평균 78.8%를 기록하였다.

또한 90% 이상의 이용률을 기록한 유니트도 27기나 되었다.

이러한 이용률 증가에 따라 원전의 불시 정지 기간도 단축되어, 95년에는 52일을 기록하였으며, 많은 원전들이 핵연료 교체없이 18개월을 운전하고 있다.

원전의 설비 용량 증설을 위해 30~50MW 정도의 소규모 증설 작업이 활발히 진행되어, 94년에는 약 5.4%의 발전량 증가를 가져왔으며, 5년 전에 비해 17%, 10년 전에 비해 76%의 발전량의 증가를 가져왔다.

이러한 단시간의 안정성과 안전성 그리고 운전 효율의 향상은, 미국의 원자력 산업 기술의 발전이 가져온 부산물이 아니라 전세계 원자력발전소의 공통된 경향이다.

이러한 외적 성장에도 불구하고 드리마일 아일랜드(TMI) 원전 사고의 영향으로 각 원전의 유지·보수(O&M) 비용이 급증하는 부정적인 면이 노출되고 있다.

이 원전 사고 이후 O&M 비용은 50% 이상 급증하였으며, 특히 88~91년 사이에 O&M 비용은 최대점에 도달하였다.

O&M 비용의 증가는 전력 회사로 하여금 원전의 안전성과 신뢰성 확보보다는 경제적인 운영쪽에 관심을 돌리게 한 계기가 되었다.

그 결과 O&M 비용은 91년 이래

최대 34%가 감소되었다가 최근에는 그 감소폭이 크게 둔화되었다.

그러나 개인적으로는 각 전력 회사가 O&M 비용을 더욱 절감할 수 있는 방안이 있다고 생각한다.

예를 들면 원전의 제어·통제를 위한 새로운 소프트웨어의 도입이라든지, 규제와 운영을 위한 의사 결정 과정에서 '위험'이라는 개념의 정량화를 통해 효율화를 기하는 방법 등이 그것이다.

원전 건설과 관련된 비용을 낮추는 것도 원전 운영의 경제성 확보에 중요한 문제로 대두되고 있다.

정부의 규제 관련 법령의 변경으로 건설이 지연되어 건설비가 증가한 사례는 미국에서 얼마든지 찾을 수 있으며, 경제성을 위한 규제 완화 정책은 이제 현실적인 문제로 다가왔다.

즉 각 주의 각기 다른 규제와 값싼 대체 에너지원의 등장은 원자력 발전의 가장 큰 위협이 되고 있는 것이다.

원전의 안전성과 신뢰성 증가에도 불구하고 현재 미국 원자력규제위원회(NRC)에서 안전성 및 신뢰성에 문제에 있다고 분류한 유니트는 최근 12기로 늘어났으며, 현재 8기의 유니트가 안전성 및 경제성의 문제로 가동을 중단하고 있다.

차세대 개량형 경수로의 개발

80년대 초반 미국 원자력 산업계는, 차세대 원자로가 지금의 원전보

다 더욱 표준화되고 단순화되어야 한다는 데 인식을 같이 하였다.

또한 기존 원자로의 설계·건설·운영 경험을 바탕으로 안전성 및 경제성을 개선시킨 원자로의 개발을 목표로 그간 차세대 원자로 건설을 위한 기술을 축적해 왔다.

이러한 취지에서 차세대 개량형 경수로(ALWR)는 개념 목표로, 안전성·단순성·표준성, 제조 과정의 조정성, 설계의 탄력성, 사용된 기술의 검증성, 원형로의 불필요성 등을 설정하였다.

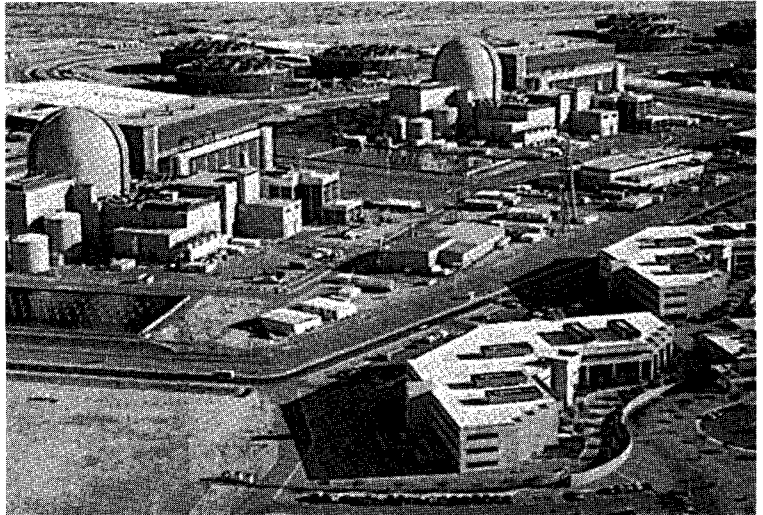
구체적으로는 설계 수명 60년, 평균 이용률 87%, 24개월의 무정지 운전, 54개월의 건설 공기 등을 목표로 삼았다.

이러한 개념 목표와 상세 목표에 따라 90년 최초로 발표된 미국 전력 연구소(EPRI)의 설계 요구서(URD)가 발표되어 ALWR의 설계 기준이 만들어졌다.

URD는 또 700개 이상의 규제 기준을 제시하였다.

NRC는 92년 안전성 평가 보고서를 통해 URD에 아무런 문제가 없다고 발표하였으며, 현재까지 EPRI의 URD에 적합한 노형으로 4개의 대형로 및 중형로가 선정되었거나 검토중에 있다.

특히 이 원자로들은 새로운 기술의 채택뿐만 아니라, 광범위한 피동형 안전성의 도입과 단순화를 지향하는 기술의 도입이 두드러진다.



미국의 Palo Verde 원자력발전소

지난 94년 NRC는 GE사의 개량형 비등수형 경수로(ABWR)와 ABB-CE사의 시스템80+에 대한 최종 설계 승인을 내렸다.

또한 WH사의 AP-600형 원자로에 대한 검토를 진행하고 있으며, 오는 98년에 그에 대한 최종 승인을 할 예정이다.

GE사의 또 다른 단순형 비등수형 경수로(SBWR)에 대한 부분적인 승인도 이미 이루어진 상태이다.

GE사의 ABWR은 이미 일본에서 건설되어 현재 운전중에 있으며, 대만도 GE사의 ABWR을 차세대 원자로로 선정한 바 있다.

ABB-CE사의 시스템80+은 미국 팰러 버디 원자력발전소에서 가동중에 있으며, 한국에서도 현재 건설 또는 운전중에 있다.

비록 미국은 현재 원전 건설 계획이 없어 이들 ALWR의 미국 내 도입 가능성은 알 수 없으나, 다른 나라에서 건설과 운영을 통해 원자력 산업의 발전과 육성에 크게 이바지할 것으로 기대된다.

고준위 방사성 폐기물 관리 정책

지난 35년간의 원자력발전소의 가동에 따라 상당히 많은 양의 사용후 연료를 포함한 고준위 방사성 폐기물이 발생되었다.

현재 미국에서 고준위 방사성 폐기물 처분을 위한 시설의 설계·건설 등을 책임지고 있는 기관은 미국 에너지성(DOE)이다.

DOE는 98년까지 민간 전력 회사로부터 사용후 연료를 인수받도록 되

어 있으며, 군사용으로 이용되었다가 발생한 고준위 폐기물의 처분과 관리도 맡고 있다.

또한 NRC는 이러한 고준위 폐기물 처분장이 적합한 지 여부를 판단·승인하는 규제 기관의 역할을 수행하고 있다.

고준위 폐기물 처분에 관한 정책의 수정이 불가피하다는 주장은 여러 차례 하원에서 지적되어 왔는데, 지난 2월 개최된 상원 에너지자위위원회의 청문회에서는 폐기물정책법 개정안에 대한 논의가 이루어졌다.

이 안에 따르면, 내바다 사막 지역에 폐기물 중간 저장소를 건설·운영하도록 하고 있으며, 유카 마운틴 최종 처분장이 사용후 연료의 이송과 관련 연구 단지로서 적합한지 검토하도록 되어 있다.

이 안은 찬성 15표, 반대 5표로 이 위원회의 심의를 통과하였다.

이 법안은 사용후 연료의 관리와 처분에 관한 최선의 정치적·기술적 해결책으로 보이는데, 원전의 운영·건설을 추진하는 전력 회사로서도 앞으로의 장래를 결정하는 매우 중대한 법안이 아닐 수 없다.

그러나 사용후 연료의 처분이 기술적으로 그다지 어려운 문제가 아님에도 불구하고, 미 행정부는 이 법안에 따른 폐기물 정책 실시에 큰 두려움을 가지고 있는 듯하다.

또한 미 행정부는 의회의 다수의원의 입장과는 반대로, 원자력을 받

대하는 논자들의 입장에 서서 아무런 기술적인 대안의 검토없이 일반 대중에게 방사성 폐기물의 위험성에 대해 과장하는 경향이 있다.

그러나 여기서 강조하고 싶은 것은, 원자력은 다른 에너지원에 비해 유해 폐기물의 발생량이 훨씬 적을 뿐 아니라, 방사성 폐기물을 안전하게 관리할 능력과 처분 계획을 구체적으로 가지고 있어 환경 오염에 대한 우려를 불식시킬 수 있다는 점이다.

핵무기급 플루토늄의 처분 정책

지난 97년 1월, DOE의 올리어리 장관은 잉여 핵무기급 플루토늄의 처분에 관한 결정 기록(ROD)에 서명하였다.

이에 따라 핵무기급 플루토늄의 처분은, 이를 혼합 산화물 연료(MOX)로 가공하여 경수로의 연료로 사용하거나, 유리 또는 세라믹으로 영구 처분한다는 두 가지 처분 전략이 수립되었다.

이러한 두 가지 처분 방식의 동시 채택은, 핵무기급 플루토늄을 MOX 연료화를 통한 연소와 영구 처분을 통하여 유연하게 처분할 수 있는 방안이라고 생각된다.

또한 이러한 결정은 미국과 러시아의 핵무기의 감축과 원폭에서 발생한 플루토늄의 처분을 위한 수년간의 기술적인 노력이 가시화된 중요한 사건

이다.

그리고 상업용 원자로를 위해 MOX 연료로 가공된 잉여 플루토늄은 다시 군사용으로 전용될 수 없기 때문에, 이러한 처분 방식은 매우 경제적이면서도 인류의 미래를 위해서도 최선의 결정이라고 보인다.

규제 완화 및 경쟁력 확보

미국의 전력 회사는 이제 규제가 완화됨에 따라 경쟁 시대를 맞이하여 그 조직 자체를 재편성해야 하는 시대를 맞이하게 되었다.

즉 원전의 O&M 비용을 포함한 경비의 절약을 목표로, 인수와 합병을 포함한 경영권의 이전과 내부 조직 개편 등이 요구되며, 각 전력 회사는 원전의 경쟁력 확보를 위한 방안들을 구체적으로 마련해야 한다.

그러나 전력 회사와 NRC는 원전의 경쟁력 확보를 위해서 원전의 안전성이 간파되는 일이 없도록 공동의 노력을 기울여야 한다.

그러나 다행스럽게도 최근 최상의 운전 실적을 보이고 있는 원전의 경우, O&M 비용이 낮은 원전이 안전성에서도 우수한 실적을 보이고 있음을 보여주고 있다.

또한 새로운 규제 환경에서 초기에 투자된 자본비의 부담 완화도 중요한 문제의 하나이다.

자본비 부담 완화를 통한 경쟁력 확보 방안은 명확하지 않고 복잡하지

만, 우선 각 주의 규제 완화와 경쟁력 확보를 위한 조치들이 이 문제의 해결에 가장 중요한 요소라고 생각된다.

대부분의 전력 회사는 이러한 경쟁 시대에 잘 적응하리라 생각되지만, 몇몇 회사의 경우 경쟁력 확보에 실패해 원전의 가동이 중단되는 사태가 곧 오리라고 예상된다.

따라서 각 전력 회사에게 앞으로의 몇 년간은 그야말로 불확실성의 시대인 것이다.

원전 노후화와 운전 면허 재발급

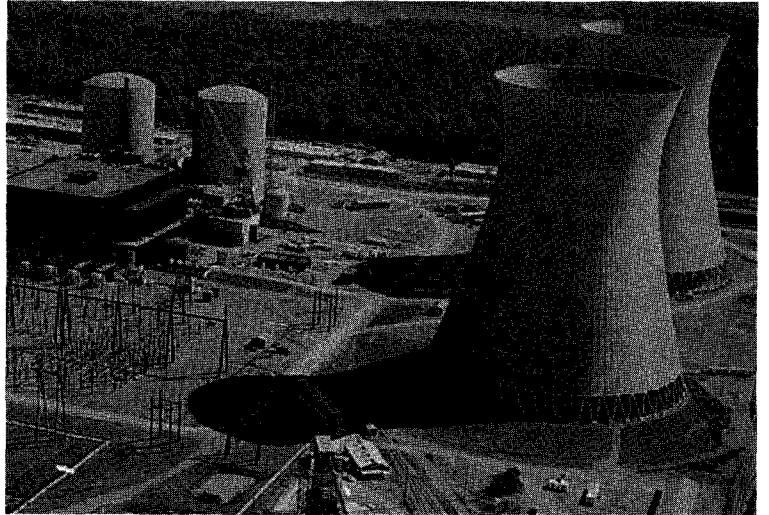
원전의 가동 연수가 늘어남에 따라 이미 상당한 원전이 설계 수명에 도달하였거나 도달할 예정이며, 부품의 노후화도 가속화되고 있다.

이에 따라 많은 원전들이 앞으로 10~20년내에 운전 면허의 연장을 신청할 예정이다.

이에 따라 이러한 사태에 대한 전반적인 검토와 조치가 없으면, 원전 노후화는 모든 원전 운영과 안전 등 미국 원전 전체에 커다란 혼란을 가져올 수 있다.

노후화에 따른 가장 큰 위협 요소로 지적되는 것은 원자로 압력 용기의 취화(脆化, embrittlement)와 증기 발생기 튜브의 기능 저하이다.

미국의 몇몇 원자로는 운전 면허 기간이 아직 남아있음에도 불구하고 상당수의 압력 용기가 취화하여 만약의 사고시 원자로의 내구성에 의심을



미국의 Bellefonte 원자력발전소

받고 있다.

따라서 각 전력 회사는 압력 용기에 무리가 가지 않도록 충분히 냉각하고 원자로의 운전을 제한해야 한다.

또한 취화 정도를 정확히 측정할 수 있는 기술의 개선과 관련 모델의 개발이 요구된다.

특히 노후화된 원전에서 접근이 곤란한 압력 용기 부분의 취화를 감시하는 프로그램은 많은 결점을 지니고 있다.

이러한 감시 프로그램은 매우 단순하고 전통적인 방법을 사용하고 있어 기술 개선이라는 측면에서 적합한 도구가 아니며, 이 감시 프로그램의 결과는 변수가 많아서 원자로의 내구성의 정확한 측정을 곤란하게 만들고 있다.

따라서 압력 용기의 취화를 보다 개선된 형태로 측정할 수 있는 비파괴 기술 개발이 중요한 과제로 대두되고 있다.

현재 다양한 기술 개발이 이루어지고 있지만, 주로 마그네틱과 초음파 등을 이용한 기술이 이용되고 있다.

이처럼 미국은 노후화에 따른 원전의 안전성에 대한 불확실성을 개선해야 하는 과제를 안고 있는 것이다.

특별한 규제 기준

지난 95년 11월, NRC는 원전의 디지털 통제·제어(I&C) 시스템과 위험 경보 시스템에 대한 규제 기준의 개발 계획에 착수하였다.

특별히 원자력 안전 분야에 도입된 이러한 전산 시스템은 그간 일정한

규제 기준이 없어 혼란이 있어 왔다.

지난 3년간 표준조사계획(SRP)에 따라 이러한 I&C 시스템을 위한 명료하고 표준화·코드화된 규제 기준이 개발되어 왔다.

이 코드화된 규제 기준에 대한 최근의 개선 작업은, 일반적인 산업계의 표준 소프트웨어를 사용할 수 있도록 한다는 원칙 아래, 다양한 원자력 안전 시스템에 광범위하게 적용될 수 있도록 범용성을 높이는 방법이 진행중에 있다.

이렇게 표준화된 규제 기준은 기존 원전에 채택된 I&C 시스템의 특별한 규제 기준이 되고 있으며, 기술 개발과 실험 분야에서도 훌륭히 사용될 전망이다.

최신화된 이 규제 기준은 지난 96년 11월 공개 검토 과정을 거쳐, 97년 6월 NRC와 원자로안전자문위원회(ACRS)의 최종 검증 작업을 앞두고 있다.

이와 동시에 국립과학원립원의 하나인 국립연구위원회(NSC)는 원자력 관련 전문가와 비원자력 관련 전문가를 공동으로 참여시켜 원전에 적용될 I&C 프로그램 개발에 성공하여, NRC와 ACRS에서 지난 3월 이에 대한 설명회를 가졌다.

이 프로그램은 SRP에 따라 만들어진 규제 기준의 범위를 크게 벗어나지 않는 선에서 개발된 것이 특징이다.

한편 NRC는 확률론적 안전성 평가(PRA)를 기초로 한 그간의 정책적

인 권고에 바탕을 둔 위험 경보 시스템에 대한 규제 기준을 마련할 필요성을 인식하게 되었다.

NRC는 현재 이러한 위험 경보 시스템에 대한 규제 기준을 개발하여 현재 마무리 단계에 있으며, ① 일반적인 규제 기준이 될 것 ② 기술적 사양을 갖출 것 ③ 시험이 용이할 것 ④ 검증이 용이할 것 ⑤ 등급화된 질적 보증성을 갖출 것 등 다섯 가지 규제 원칙에 따라 개발되어 왔다.

이러한 규제 기준은 오는 4월이나 5월에 공개 평가 절차를 거쳐, NRC와 ACRS의 최종 평가 후 오는 97년 말 최종 확정될 예정이다.

안전과 복종

원전의 안전성 확보의 책임은 전적으로 전력 사업자에게 있다.

규제자의 역할이란 원전의 안전을 위해 필요하다고 인식되는 일정한 규제 기준을 제시할 뿐이며, 피규제자는 원전의 안전을 위해 규제자가 제시한 기준에 복종해야 할 의무가 있는 것이다.

이러한 이론적인 원칙이 지켜져야 함에도 불구하고 실제로 현실에서는 이러한 원칙이 서로 갈등하는 경우가 종종 있다.

그리고 원자력 산업은 규제가 필요한 다른 산업에 비해 규제자와 피규제자의 간격이 더 벌어져 있는 것 같다.

지난 몇 년간 원자력 산업계는 안전과 복종이라는 개념을 합리적으로 조화시켜 규제자와 피규제자의 간격을 줄이고자 하는 지루하고도 꾸준한 노력을 기울여 왔다.

이러한 노력들은 성숙 산업으로서의 원자력 산업의 긍정적인 결과물이라 할 수 있으며, 이 둘 사이의 이해관계를 넓히는 중요한 작업의 하나이다.

안전과 복종이라는 개념을 완벽하게 조화시킬 수 있는 방안은 없다.

다만 규제자는 규제 기준에 탄력성을 두어 피규제자의 원전 운영에 불필요한 노력이 들어가지 않도록 해야 한다.

그러나 그렇다고 규제 기준의 탄력성의 폭을 최대한 좁히는 노력을 기울여도 안된다.

또한 안전과 복종 사이의 약간의 긴장이 오히려 건전한 규제자와 피규제자와의 건전한 관계라는 사실도 간과되어서는 안된다.

최근 몇몇 원전에서 규제자와 피규제자와의 갈등으로 위험 및 성능 베이스 규제 기준의 도입이 난항을 겪은 사태는 걱정스러운 사태임에 틀림없다.

그러나 이번 사태를 통해서 두 당사자는 양자의 이해의 폭을 넓히고 각자가 책임감을 느낄 수 있는 값비싼 경험과 교훈을 얻었다고 생각된다.

본인은 위험 경보, 성능 베이스의

규제 기준, 원전 감시 시스템 등 위험 개념의 효과적인 사용이 안전과 복종이라는 개념의 조화를 가져올 수 있으리라고 믿는다.

미국 원자력 산업의 미래

본인은 앞으로 미국에서 2005년 이전까지 신규 원전이 건설되리라고는 생각하지 않는다.

실제로 다음 세기 초까지 미국에서는 기저 부하를 위한 발전소 건설이 필요하지 않으며 설비 용량도 충분한 상태이기 때문이다.

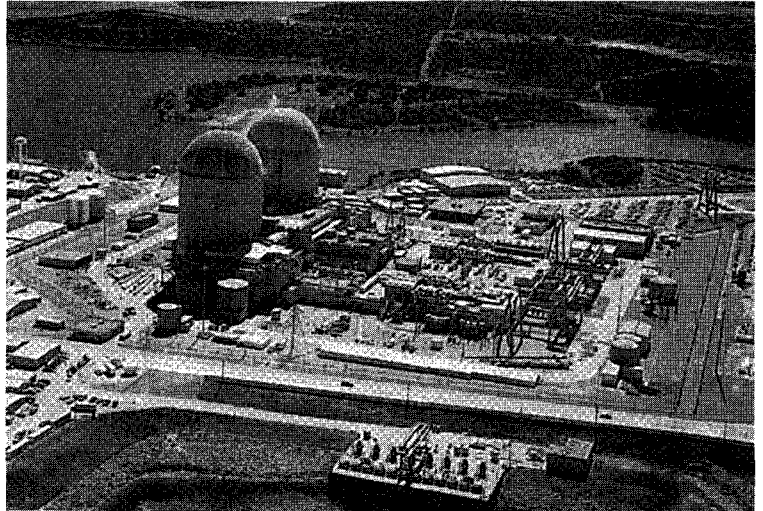
또한 원자력발전소와 석탄 화력 발전소 건설에 대한 지역 주민의 반대도 이를 제약하는 요소이다.

따라서 앞으로 건설될 발전소는 천연 가스를 이용한 복합 화력 발전소가 주류를 이룰 전망이며, 천연 가스는 연료비가 낮아 높은 경쟁력을 갖추고 있다.

개인적으로는 천연 가스 발전 방식도 지구의 화석 연료 자원을 다량으로 소모하는 방식이기 때문에 이의 건설을 반대하는 입장이지만, 아직 석탄과 마찬가지로 원자력도 환경 오염을 유발한다는 인식이 팽배되어 있는 형편이며, 소수의 반핵론자들은 다수의 국민을 호도하고 있다.

본인은 원전의 신규 건설을 위해서는 다음의 세 가지 주변 여건을 갖추어야 한다고 생각한다.

- ① 고준위 및 저준위 폐기물 처분



미국의 Comanche Peak 2 원자력발전소

을 위한 기술적이고도 정치적인 적절한 방법의 마련

- ② 지속적인 규제 환경 구축

- ③ 기존 원전의 무사고 안전 운전

그 밖에도 전력 사업자는 원전이 보다 경제적으로 경쟁력을 갖추도록 노력해야 하며, 20~30%의 자본비와 O&M 비용의 감축이 가능하다면 천연 가스 발전과의 경쟁도 가능하다고 본다.

또한 원자력 산업계에는 제조 라인의 통합, 설계와 규제 기준의 변경에 대한 안정적 대응, 원전의 운영과 보수 인력을 제외한 인력의 대대적 감원이 요구된다.

국민에게는 원전이 환경 친화적이며, 또한 규제가 엄격하다는 사실에 대한 꾸준한 홍보가 필요하다.

또한 연구와 연료의 다변화, 경제

성, 에너지의 안정적 공급을 위해 다양한 발전 방식은 필요하다는 사실을 인식시킬 필요가 있다.

결론

본인은 기존 연설의 끝으로 다음 세기의 원자력의 역할에 대해 언급하고자 한다.

현재 모든 에너지원에서 엄청난 전력이 생산되고 있으며, 지금까지는 화석 연료가 낮은 연료비로 인해 광을 받고 있지만, 화석 연료가 고갈될 때 원자력의 역할은 지대해 질 것이며, '핵분열'은 자연이 인류에게 준 가장 큰 선물이 될 것이라고 믿는다.

따라서 원자력의 미래에 인류의 미래가 달려있다고 확신한다. ☼