'94 夏季ANS 연차대회 발표논문

原子力에너지의 우위성 성취

핵확산 방지

관성 핵융합의 연구

2025~2050년쯤 실질적 핵융합로 가동예상

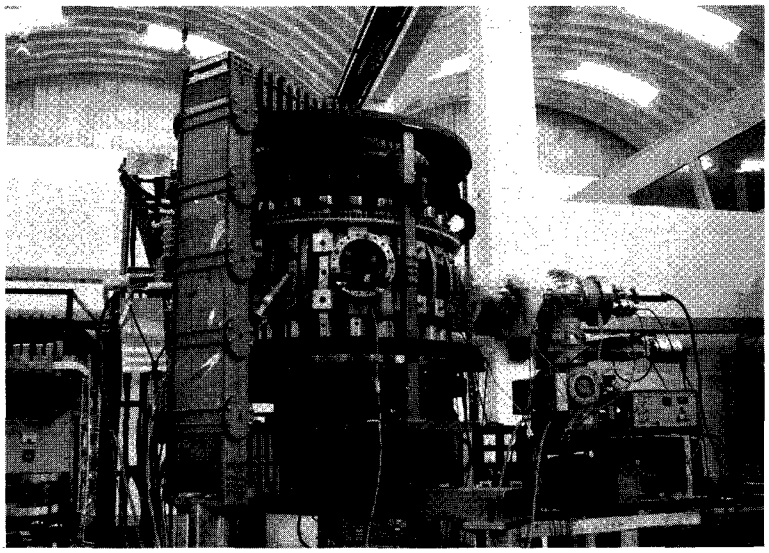
John H. Nuckolls
미국 로렌스 리버모어 국립연구소 부소장

지구상의 모든 국가에 무한정의 핵융합연료 공급가능

물 1 갤런의 중수소, 기름 30 갤런과 맞먹어

이 글은 1994年 6月 20日 미국 루이지애나州 뉴올리언스市에서 개최된 미국원자력학회(ANS)夏季年次대회에서 Nuckolls 박사가, 점차 관심이 높아져가고 있는 핵융합(특히 관성핵융합 : Inertial Confinement Fusion/ICF)문제에 대해 준비된 논문을 발표하면서 인류가 해결해야 할 가장 시급한 문제로써 "핵무기확산"을 거론하는 한편 이 위협을 잠재우기 위해서는 核融合개발을 위해 장구한 세월에 걸쳐 어려운 기술적 난제들을 풀어가는데 도전해야 한다고 역설한 내용이다.

여기서는 「관성핵융합」 문제를 지난 8월호의 「핵무기확산방지」에 이어서 싣기로 한다.



핵융합 연구는 여러 단계를 거쳐 토카막(Tokamak)이라는 「자장핵융합장치」(磁場核融合裝置)가 각국의 主力 연구장치로서 각광을 받고 있다.

사진은 원자력연구소의 우리나라 Tokamak.

핵융합반응은 많은 중성자를 만들어낼 수 있으므로, 핵분열 물질을 증식할 수 있다. 따라서 핵융합로에 대하여서도 국제적인 사찰이 필요할 것이다.

핵융합은 무엇보다도 에너지자원으로서의 강력한 잇점이 있다.

우선 핵융합 발전로는 핵분열 발전로에 비해 거의 무시할 정도로 적은 양의 방사성 물질을 생성한다.

그리고 지구상의 모든 국가에 거의 무한정한 핵융합연료공급이 가능하다. 1갤런의 물에 포함되어 있는 중수소는 30갤런의 기름에 해당되는 에너지를 제공한다.

그러나 에너지원으로서 핵융합의 과학적인 타당성이나 상업적인 타당성은 아직 증명되지 않았고, 현재도 핵융합 에너지를 이용하는 데에 성공한 예는 수소폭탄 뿐이다.

핵융합 에너지를 民需용 동력생산에 이용하기 위한 노력은 1940년대 말에서 1950년대 초에 걸쳐 시작되었다.

오늘날 핵융합발전은 과학적, 기술적으로 인류가 시도하였던 일중 가장 어려운 일의 하나로 간주되고 있다. 핵융합 초기연구자(pioneers)들이 그들의 생전에 핵융합 발전소가 실현되는 것을 보게 될 것 같지는 않다.

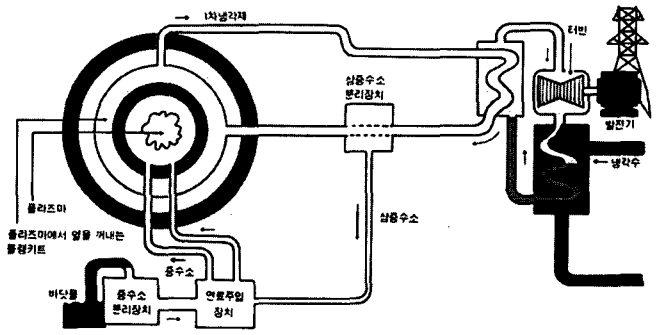
그러나 많은 국가들이 참여한 40여년의 연구개발의 결과로 현재는 자장밀폐(magnetic confinement) 핵융합장치인 대형 토카막(Tokamak) 자체가 사용하는 에너지만큼 핵융합에너지를 발생시킬 수 있는 단계에 도달해 있다.

또한 EU, 러시아, 일본, 미국 공동으로 100억불 가량이 예상되는 국제토카막핵융합로(International Tokamak Thermonuclear Experimental Reactor/ITER)의 건설을 계획하고 있다. ITER 후에는 다른 에너지원들과 경쟁할 수 있는 실질적인(practical) 핵융합발전소를 건설할 것이다.

ITER건설기술에 근거한 이 발전소는 아마 2025~2050년 기간에 가동될 수 있을 것이다.

자장밀폐방식의 핵융합 발전소에서는 거대한 전자석 시스템, 핵융합 플라즈마의 낮은 밀도와 제1벽의 중성자 피폭 등에 의해 장치가 커짐으로 해서 전체의 비용이 증가한다.

이와 관련, 관성밀폐(inertial confinement)된 핵융합플라즈마를 이용하면 비용을 낮출 수 있다고 제안된 바 있다.



핵융합로 발전의 구조

우선 전자석 시스템이 필요없고 제1벽은 유체층(流體層)에 의해 중성자 피폭을 없앨 수 있고, 전체 장치의 크기 또한 줄일 수 있다.

그러나 이 관성밀폐핵융합(ICF)을 위해서는 작은 규모의 핵융합 폭발을 점화하기 위한 低價의 드라이버(driver) 기술개발이 필요하다.

관성밀폐 방식은 1950년대 말에서 1960년대 초에 걸쳐 로런스 리버모어 국립연구소(LLNL)에서 시작되었는데, 필자는 화강암괴에 뚫은 구멍속에서, 수소폭탄의 연속적인 폭발을 이용하는 핵융합 발전로를 설계하는 데에 1957년부터 참여했다.

이러한 방법은 전자석시스템을 필요로 하지는 않지만 핵융합에 필요한 고에너지를 얻기 위하여 핵분열 폭발물, 즉 원자폭탄을 이용하여야만 하므로 규모가 매우 커지게 되어 이를 해결하기 위해 다음의 두가지 핵심적인 문제에 대한 방안을 찾게 되었다.

① 가장 작은 규모의 핵융합 폭발은 어떤 것일까?

② 그러한 폭발이 핵분열 폭발물 없이 어떻게 점화될까?

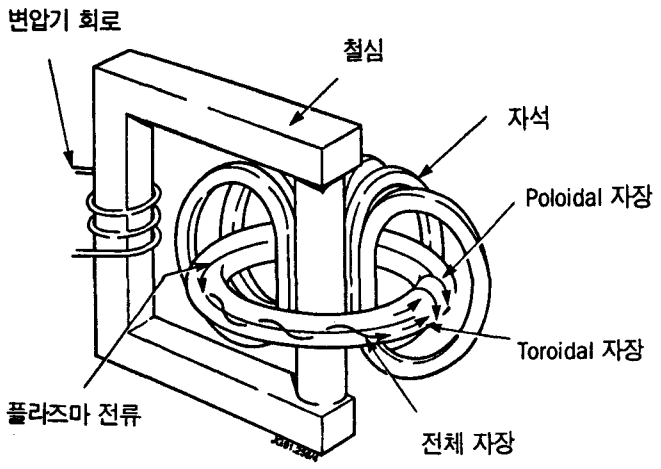
매우 작은 핵융합 폭발의 타당성은, 핵융합 반응률은 연료(fusionfuel)의 밀도에 비례하고, 연료는 적어도 정상밀도의 1,000배로 폭축(爆縮, implosion)할 수 있다는 사실로부터 비롯된다.

관성 밀폐시간은 폭발 시스템의 규모에 비례하고 따라서 球형 연료입자의 경우, 밀도를 1,000배 증가하면 반지름이 1,000배 감소, 질량이 100만배 감소, 그리고 핵융합 수율(收率)이 100만배 증가한다.

이럴 때 가장 핵융합 단면적이 높은 DT 연료를 매우 높은 밀도로 폭축시키면, 이러한 최소 규모의 핵융합 폭발이 가능하다.

즉 1mg의 DT를 정상밀도의 1,000배인 200g/cm^3 가량의 밀도로 폭축시켜 핵융합반응을 점화하면 25%의 효율로 1억 Joule의 에너지를 생성한다.

1mg의 DT를 정상밀도의 1,000배로 압축하기 위해서는 DT 연료를 등엔트로피상태로(isentropically) 압축시켜 "Fermi 축퇴(縮退)상태"(압축된 DT의 열에너지가 Fermi 에너지보다 매우 작음을 의미한다)로 만드는 기술이 개발될 경우, 단지 10,000 Joule이면 충분하다. 따라서 핵융합 반응으로 생기는 에너지는 1만 Joule에 비해 거의 만배 정도 크므로 압축에 드는 에너지는 거의 "무료(無料)"라 할 수 있다.



토카막의 원리

최소 점화에너지 또한 핵융합에너지보다 훨씬 적으며, 정상밀도 200g/cm³에서 10KeV(1억도)의 점화온도까지 가열하면 점화에너지보다 100배 큰 핵융합에너지를 얻는다.

그러나 DT 반응에서 생겨나는 3.5 MeV α 입자의 감쇠거리가 DT연료입자(pellet)의 반지름보다 6배 크므로 10% 이하의 연료입자 부분만 점화시키면 된다.

펠렛의 0.5%(즉 1/6의 세제곱)가 가열점화 된다면 이 임계규모의 고온부분이 나머지 부분의 pellet을 점화시키는 연소가 시작된다. 이 경우 최소 필요한 점화 에너지는 약 5,000 Joule이다. 즉 일단 압축 후에는, 점화를 위해 투입되는 에너지도 "무료(無料)"라 볼수 있다.

1mg의 pellet을 이렇게 압축-점화하는데 드는 최소에너지는 15,000 Joule로서 방출되는 핵융합 에너지 1억 Joule의 1만분의 1 수준이다.

이렇게 방출되는 핵융합 에너지가 압축-점화하기 위한 투입에너지보다 크므로, 압축과 점화를 동시에 하기 위해 溶發(ablation) 폭축법(약 10% 효율)을 사용할 수 있을 것이다.

그러나 1mg을 점화하기 위한 속도는 「1,000배 압축」을 위한 속도보다 3배 정도 커야하므로 전체 효율은 다시 1%로 줄어든다. 그렇다면 1백만 Joule가량의 에너지가 투입되어야 하고, 또 에너지원의 효율은 상업발전을 위해서는 10% 이상이어야 한다.

이 단계에서 주된 사명(challenge)은 1백만 J의 에너지가 수 나노초(nano초=10억분의 1초) 이내의 짧은 시간에 이 1mg의 연료입자에 전달되어야 한다는 사실이다. 이는 출력상으로 수천兆와트(수백 Terawatt)에 해당된다.

이러한 관성핵융합 발전로에서는 아마도 이 1백만Joule의 에너지가 빔의 형태로 폭발용기 벽으로부터 1m 이상의 거리를 전파하여 1mm 규모의 연료입자에 도달, 폭축-점화의 과정을 시작하게 될 것이다.

이 1m의 거리를 두는 이유는 14 MeV 중성자, 軟엑스(X)線, 고온 플라즈마에 의해 용기벽이 파괴되는 것을 막기 위한 것이다.

이 14 MeV 중성자는 수십 g/cm³의 리튬밀도를 갖는 리튬 고함유물질에 흡수되어 분열반응과 증식반응으로 삼중수소(三重水素)를 생성할 수 있다. 리튬핵분열 반응 및 (n, 2n)반응을 사용하여 DT핵융합반응으로 소모되는 삼중수소를 재생산하는 것이다.

또 연 X선과 고온 플라즈마는 리튬 함유물질에 흡수되고, 흐르는 리튬 유체 화합물로 용기의 벽을 보호하여 수명을 발전소 자체의 수명정도로 연장시킬 수 있다. 가열된 유체는 열교환기에 냉각된다.

수백 MW의 출력을 생산하기 위해서는 초당 여러개의 연료입자를 입사(入射, 投射)하여 압축점화시켜야 할 것이다.

또 핵융합 연료입자와 초고출력 에너지 빔 구동장치(드라이버 : Driver)

는 다음과 같은 조건을 만족하도록 작동되어야 한다.

① 드라이버, 즉 구동장치로부터의 에너지는 DT 연료 내부가 미리 가열되지 않게 하면서, 필요 압력과 온도를 갖도록 연료입자에 흡수되어야 한다.

② 연료입자의 폭축은 엔트로피가 같게 유지되도록 진행시켜야 한다. 즉 폭축이 진행됨에 따라 구동장치를 시간에 따라 제어할 수 있어야 한다.

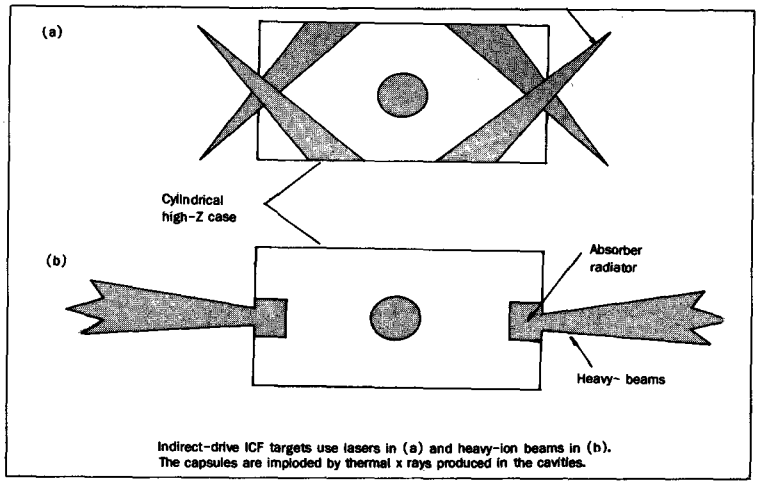
③ DT연료입자의 표면은 대칭적으로 가열되어야 하고-수 %이상의 비대칭성은 불가-플라즈마의 유체불안정성을 최소화하여야 한다.

이와 같은 요건들을 만족하기 위해 필자는 1950년대초에 Edward Teller가 발명한 핵융합 무기개념을 응용한 방안을 50년대 말 경에 제안한 바 있었다.

즉, 높은 원자번호를 갖는 벽으로 된 동공(cavity)내에 낮은 원자번호의 원소로 코팅한 DT연료입자를 장전한 뒤 고에너지 빔을 동공내로 입사하면, 연료입자표면의 경원소로부터 발생한 강력한 X-선은 동공내에 갇혀서 반사-흡수를 거듭하므로 연료입자를 균일하게 폭축시킬 수 있다는, 熱X선을 이용한 융발폭축을 통한 "간접 구동" 개념이 그것이다.

열 X선은 cavity내의 온도구배를 완화시키고 플라즈마 유체불안정성

「레이저」를 이용한 간접구동방식의 핵융합



Indirect-drive ICF targets use lasers in (a) and heavy-ion beams in (b). The capsules are imploded by thermal x rays produced in the cavities.

모우드들의 증폭률을 감소시키는 반면 연료입자 표면을 신속히 융발시켜 필요한 폭축압력을 만든다.

1980년대 초, 미국은 이러한 "간접구동"의 방법과 이 방법이 핵무기에 쓰인다는 사실에 대하여 기밀취급을 해제하였다.

1950년대 말에 발명된 레이저는 이러한 폭축방법의 주요 구동장치로 인식되었다. 레이저는 cavity표면의 구멍을 통해 고출력 에너지 빔을 입사한다. 또한 고에너지 하전입자 가속기도 구동장치로 고려되었다.

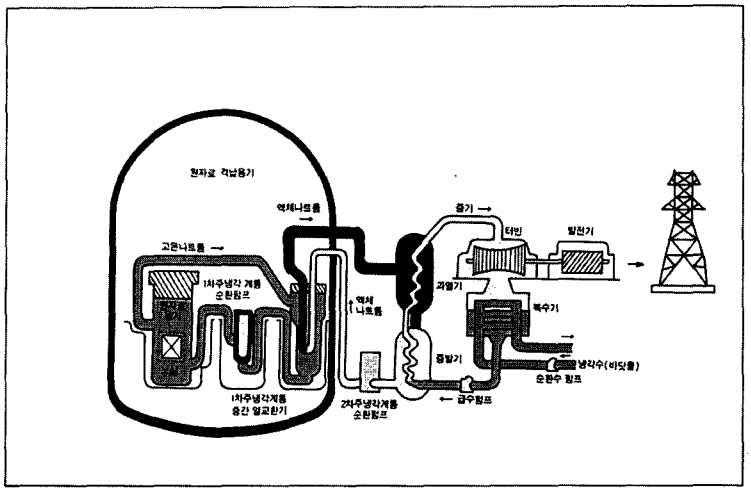
처음 ICF용 연료캡슐을 폭축시키기 위한 연구프로그램이 LLNL과 LANL에서 "Halite-Centurion"이라는 이름으로 지하 핵폭발 실험중에 행해졌다.

1962년 LLNL에서는 레이저 핵융합 실험을 위해 작은 핵융합 폭발이 가능할 정도의 고출력 레이저 개발을 시작하였고, 많은 레이저 빔이 구대칭(球對稱 : spherical symmetry)적으로 연료입자에 입사하여 폭축하는 직접적인 방법도 제안하였다.

1970년대 초, 고출력 레이저와 슈퍼컴퓨터를 이용한 레이저구동 폭축과정의 이론적 계산[1]의 뒷받침으로 원자력에너지 위원회의 주관하에 국가적인 관성핵융합(ICF) 연구프로그램이 시작되었고, 비슷한 시기에 옛 소련, 일본, 프랑스, 독일에서도 관성핵융합 프로그램이 시작되었다.

1970년대와 1980년대는 LLNL, LANL, SANL, NRL, KMSF, Rochester 대학 등에서 핵융합 연구용 레

1) J. Knuckolls 외, "Laser Compression of Matter to Super-HIgh Densities : Thermonuclear Applications", Nature 239 (1972), p. 139.



〈 고속증식로의 구조 〉

이저와 하전입자 가속장치가 개발되었고, LLNL에는 반도체 기술을 적용하여 세계에서 가장 큰 관성 핵융합용 레이저가 건설되어 플라즈마와 폭축 실험에 적용하여 세계에서 가장 큰 관성핵융합용 레이저가 건설되어 플라즈마와 폭축 실험에 사용되어 왔다.

Nova라 명명된 이 레이저는 간접구동 실험에 사용되어 왔고, 비슷한 직접구동실험이 Rochester 대학, 일본 오사카 등에서 행해져 왔다.

레이저 핵융합 실험은 원리가 확실히 이해되어 있고, 데이터 베이스가 잘 구축되어 있으므로, 이에 근거한 실험실 단위에서 DT 점화를 위한 레이저 및 연료입자의 설계-제작이 쉽다.[2)]

미국의 다음 단계의 관성 핵융합 프로그램으로는 8억불이 소요되는 에너지 2MJ의 레이저를 이용한 National Ignition Facility(NIF)계획이 제기된 바 있고, NIF는 핵실험을 하지 않고도 핵무기체제를 관리하기 위한 클린턴 대통령의 계획에서 한 중점적인 방안이다.

또 NIF에서 핵융합 점화가 달성된다면 이는 관성핵융합 발전로를 향한 큰 진보가 될 것이다.

발전로에서는 현재 「로런스 버클리」연구소에서 개발중인 것과 비슷한 고효율, 고출력의 중이온 가속장치를 이용하고, NIF에서 시험될 것과 비슷한 표적입자를 사용한 "간접구동"의 방법이 채용될 것이다.

관성 밀폐 핵융합 장치에서는 제1벽을 리튬을 함유한 유체의 커튼[3)]를 이용, 열과 중성자로부터 보호되는 폭발용기를 사용하도록 설계되고 있다.

이들 공학자들은 이렇게 차폐된 벽과 중이온 가속기를 사용하는 관성밀폐 핵융합 발전로가 경제성을 가질 것으로 예측하고 있다.

에너지성의 관성밀폐 핵융합 장기계획은 21세기의 1-4분기 초반에 발전로를 실현하는 것으로 계획되어 있다.

현재의 관성밀폐 핵융합 접근방법은 개선잠재력이 많다. 우선 핵융합 pellet을 점화하는 데 필요한 에너지를 10배나 100배 감소시키는 것이 이론적으로 가능하다.

또 압축과 점화과정을 구분함으로써 구동에너지를 10배 감소시키는 것도 가능하다.

현재 LLNL에서 초기 개발단계에 있는 "고속점화로(fast ignitor)"[4)]에서 일단 DT연료가 융발폭축(融發爆縮)에 의해 최대로 압축되면, 초고출력 레이저 빔이 pellet 표면을 점화온도까지 급속가열하여 핵융합 연소를 시작한다.

융발폭축 방법을 효율적으로 대체

2) J. D. Lindl 외, Physics Today 1992년 9월호.

3) W. J. Hogan 외, Physics Today 1992년 9월호.

4) M. D. Perry 외, "Terawatt to Petawatt Subpicosecond Lasers", Sciennce 261(1994), p. 917

할 수 있는 수단을 개발하면 구동에너지를 다시 10배 가량 감소할 수 있으리라 기대되는데, 이것은 불가능한 것이 아니다.

이들 중 한가지만 성공하여 10배가 개선된다면 관성밀폐 핵융합 개념은 다음과 같이 커다란 경쟁상의 잇점을 갖게 된다.

① 핵융합 구동장치의 비용은 거의 무시될 것이다.

② 보다 소규모의 발전로는 경제적 측면에서 매력이 있다.

③ D-D D^3-He의 고급 핵융합연료를 사용하면 삼중수소 증식이 필요없고, 중성자발생이 감소되며, 하전입자 생성이 증가하여 원자로의 열효율 측면에 커다란 잇점이 있다.

관성밀폐 핵융합의 잠재력의 실현은 장래의 핵융합 과학자 및 공학자들이 담당할 몫이다.

모든 핵에너지 전략과 마찬가지로, 이 잠재력에는 기술적, 정치적 수단에 의한 확산 위협이 포함되어야만 한다.

이번 회의에 많은 관성밀폐 핵융합 관련 연구자들이 논문을 발표하고 있다.

나는 이렇게 간략하게나마 관성밀폐 핵융합 연구의 역사와 개념을 요약한 내용이 여러분에게 흥미로운 것이었기를 바란다.

原研 핵융합개발 대과제 책임자
김성규 박사 譯

핵융합(核融合)은 무엇보다도 에너지 資源으로서의 강력한 잇점이 있다.

우선 핵융합 발전로(發電爐)는 핵분열 발전로에 비해 거의 무시할 정도로 적은 양의 방사성 물질을 생성한다.

그리고 지구상의 모든 국가에 거의 무한정한 핵융합燃料공급이 가능하다. 1 갤런의 물에 포함되어 있는 중수소는 30 갤런의 기름에 해당되는 에너지를 제공한다.

자장밀폐(Magnetic Confinement) 방식의 핵융합 발전소에서는 거대한 전자석(電磁石) 시스템, 핵융합 「플라즈마」의 낮은 밀도와 제1벽의 중성자 피폭(被爆) 등에 의해 장치가 커짐으로써 전체의 비용이 증가한다.

이와 관련, 관성밀폐(Inertial Confinement)된 핵융합 플라즈마를 이용하면 비용을 낮출 수 있다고 제시된 바 있다.

9월 27일

영광원자력 5, 6호기 건설사업 환경영향평가서 초안에 대한 공청회 개최

9월 28일

분당 복합화력발전소 증설공사 착공. 총 공사비 1,600억여원 투입예정

9월 30일

평택 복합화력발전소 준공. 시설용량 51만kW급 에너지 절약형 발전소로 총 공사비 2,429억원, 91년 6월 착공, 34개월만에 준공됨.

10월 4일

鄭根謨 고등기술연구원장(前 과기처장관), INEA 연차총회에서 회장으로 선임.

10월 11일~12일

'94아시아지역 원자력 PA세미나 개최(서울, 가든호텔), 한국, 중국, 일본 등 아시아 8개국 PA관련인사 참가, 각국의 원자력PA활동현황 및 과제 등 발표.

10월 13일

영광원자력 3호기, 1개월간의 제반시험을 거쳐 原子爐 初臨界에 도달. 초임계도달 후 약 10일간 零出力상태에서 각종 특성시험 수행 후 출력단계별로 원자로 및 터빈계통의 종합적인 시운전시험 수행.

10월 15일

원자력의 법률적 문제에 관한 연구를 수행할 한국原子力法學會 국내 처음으로 창립.

10월 17일

韓國과 中國, 원자력협력협회 추진, 실무회의에서 두나라간 원자력기술·설비 분야의 협력 등을 규정한 협정문안에 합의하고 가서명, 10월말 韓·中원자력협력협정 체결 예정.

10월 19일

韓電기술연구원, 한일병원·서울大병원과 공동으로 방사선작업 종사자들의 방사선장해 여부를 정확히 진단할 수 있는 방사선 장해 검진기술 개발 발표.

10월 21일

- 북한 핵문제 해결을 위한 미·북한간 협상 타결, 양국, 북한에 2천MW급 경수로 제공 및 이를 위한 국제컨소시엄구성 등의 내용이 있는 합의문에 서명.
- 韓·英원자력산업세미나 개최(서울 인터콘티넨탈 호텔). '원전폐기물관리·처분' 등 다수 논문 발표.

10월 25일~26일

제16회 한·일 원자력산업세미나 개최(일본, 동경). '원자력발전소의 운전과 유지보수', '방사성폐기물 처리에 관한 기술개발', '신형원자로/원전연료 기술개발' 등의 세션으로 진행.

10월 28일

한국중공업, 국내최초로 원자력 및 화력발전용 BFPT(Boiler Feed Pump Turbine : 보일러 급수구동용 터빈) 시험설비를 갖춘 밸런싱테스트 공장 준공.

10월 29일

제67차 원자력계 정기기술회의 개최, 국회 체신과학위원회 張慶宇 위원장, '정치권에서 본 원자력분야 관심사안에 대한 소고' 강연.