

# 플라즈마공학 (Tokamak형 核融合爐를 中心으로)

## Plasma Engineering (As the Central Tokamak Type Nuclear Fusion Furnac

서울대학교 공과대학 핵공학과 핵융합그룹 제공

### I. 서 언

일반적으로 플라즈마공학이라 하면 우리의 주변에 있는 방전을 이용한 각종 조명장치, 고주파용 발전관, 레이저, 플라즈마 토오치, 직접발전기 등 그 수를 헤아릴 수 없을 정도로 다양하고 많은 장치들의 과학적 합리성에 대한 연구가 되겠으나 여기서는 요즘 연구개발비가 세계적으로 가장 많이 투입되고 있는 핵융합장치를 중심으로 그 원리와 개발현황을 간단히 소개하고 이 분야에 대한 우리의 연구개발현황 및 진로를 기술하려 한다. 발전용으로 개발되고 있는 핵융합장치는 크게 나누어 자장 밀폐방법과 관성밀폐방법을 이용하고 있다.

자장에 의한 방법중에는 토러스를 이용하는 Tokamak (Toroidal Magnetic Chamber의 러시아어 약어)형과 자기병 (Magnetic bottle) 형태의 자기거울 (Magnetic mirror)형이 쌍벽을 이루며 연구개발되고 있고, 관성형은 레이저나 입자가속기를 써서 개발되고 있다. 토카막형의 장치는 세계적으로 대, 중 및 소형을 합쳐 100여대에 이르며 중급이상은 국가 Project인 경우가 많다. 이토카막에 의한 중수소와 삼중수소의 핵융합원리는 토로이달자장과 폴로이달 (Poloidal) 자장 및 수직자장으로 구성된 공간내에서 동적평형 (Dynamic balance)을 이룬 플라즈마가 저항가열과 부가가열에 의해 10keV (섭씨 약 1억도) 이상으로 가열되어 핵이 융합되면서 열을 발생하도록 한 것이다. 지금까지 최고온도의 기록은 1978년

에 Princeton Large Torus (PLT) 장치가 플라즈마 온도를 7.6keV (섭씨 약 8천 4백만도)까지 올린 것으로 부가가열장치만 큰 것으로 쓴다면 핵융합반응에 필요한 온도까지 올릴 수 있음을 입증하였고 과학적 실증단계에 박차를 가하는 계기가 되었다. 요사이 Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR)를 시운전하면서 이 과학적 실증의 단계를 마무리지으려 하고 있어 1986년말경이면 결과가 나올 것으로 예상된다. 이것과 동급의 것으로 Japanese Tokamak-60 (JT-60), Joint European Torus (JET) 및 소련의 Tokamak-15 (T-15) 등이 거의 같은 시기에 과학적 실증을 보여줄 결과를 내놓을 것으로 기대되며 다음단계의 공학적 실증을 목표로 세계가 공동으로 International Tokamak Reactor (Intor)를 설계하고 있다. 이것들의 전조비는 대략 2억 \$ 정도인데 연구개발속도는 석유에너지 상황과 밀접한 함수관계를 이루고 있다. 그러나 조절할 수만 있다면 석유 자원은 발전용으로 태워버릴 것이 아니라 섬유나 플라스틱 방면의 생산산업으로 돌리고 핵융합로 개발을 서둘러 전기를 얻는 것이 이상적이 아닐까 생각된다. 자기거울형은 미국의 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)에서 Mirror Fusion Test Facility (MFTF)가 역시 2억 \$ 규모로 건설 중이며 공학적 실증로서 Mirror Advanced Reactor Study (MARS) 장치가 설계중이다.

관성핵융합은 중수소 (D)와 삼중수소 (T)를 50 : 50으로 섞어 기체 혹은 고체의 형태로 유리나 중금속

으로 만든 작은 구슬모양의 구(Sphere)안에 넣고 이 구에 여러방향에서 레이저빔이나 입자빔을 동시에 쬐으로써 구 표면물질은 외부로 파열(Explosion)되고 표면 바로 밑 접질(속표면)은 반작용으로 내파(Implsion)되면서 생긴 충격파로 인하여 DT의 밀도가 고체밀도의 1000배정도가 되면서 단일압축에 의하여 핵융합온도까지 상승시켜 핵융합 반응이 일어나도록 한다. 이와같은 실험은 70년대부터 미국의 Lawrence Livermore National Lab, Los Alamos Scientific Lab, Sandia National Lab. 등에서 본격적으로 시작되었고 현재는 LLNL의 레이저장치 Nova(건설비가 약 2억 \$로 1000여개 회사가 동원)를 써서 과학적 실증단계를 실험중이다. 일본도 역시 오사카대학에서 그와같은 실험을 하고 있다.

그런데 이와같이 대형을 건설하여 제어된 핵융합(Controlled Thermonuclear Fusion)실험을 하는 이유는 장치가 클수록 입자밀폐 시간과 에너지밀폐시간이 길어지며 플라즈마 중심부의 온도를 더 높일 수 있기 때문이다. 실험상 이 값들의 포화된 실험치를 보인 것은 없다. 따라서 핵융합로의 개념설계자들은 산업용으로서의 규모로 보통 핵분열로(예, 경수로) 보다 10배의 정도의 크기를 예견하고 있다.

## II. 우리의 현황

1979년에 서울대학교 원자핵공학과에서는 중형급의 Tokamak을 설계하여 그해 연말부터 건설을 시

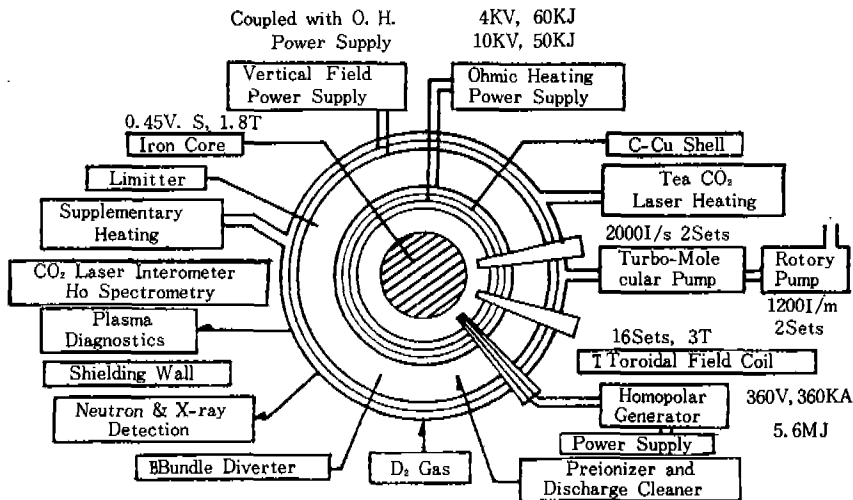
작하였다. 그후 에너지연구소가 소형을 제작하고 있고 2년전부터 자기거울형을 경북대에서 시작하였다.

서울대의 것은 장치명을 Seoul National University Tokamak-79라 하여 약어로 SNUT-79라 부르고 있다. 장치규모의 결정은 실험실내의 공간능력과 대형장치를 건설하는데 필요한 기술자료들을 얻기위한 중형장치들을 만들어 여러가지 실험을 하고 있는 선진국들의 전례에 비추어 그에 준하는 비슷한 규모로 하였다. 모든 설계와 제작은 학과교수와 석, 박사과정 학생들이 연평균 8~10명이 동원되어 수행하였으며 선반과 용접작업은 실험실내에서 행하였으며 필요한 공작기구는 모두 제작되었고 외주를 쓸 자금도 없었지만 국내에는 제작능력을 갖춘 회사도 없다고 보아야 할 것이다. 80년도에 들어오면서 때마침 교육차관을 받게되어 토러스용기의 고진공을 위한 터보분자펌프 2기, 로터리(Rotary)진공펌프 2기, 계측장비와 저인덕턴스 콘덴서, 트로이달자장코일용 구리비이프 그외 전원용으로 제작되고 있는 단극발전기의 전자석용 철판(약40톤) 등을 구입할 수 있었으며 관성바퀴로 쓸 증기기관차 바퀴를 철도청으로부터 기증받았다.

이 SNUT-79를 짓는데는 부분품에 대한 축소모의 실험이 수없이 행하여졌고 성능의 안정도(Stability) 확인에 진력하느라 많은 세월이 소모되었다.

### II - 1. SNUT-79핵융합장치의 구조

높이 약 3m에 직경 약 3m, 그리고 무게가 약



〈그림 - 1〉 SNUT-79 핵융합장치의 구성도

〈표 - 1〉 SNUT - 79 핵융합장치의 제원

Mechanical Parameters:

Minor radius (a)	0.15 m
Major radius (R)	0.65 m
Plasma volume (V)	0.3 m <sup>3</sup>
Material of vacuum vessel	SS 304
Limiter (type and material)	rod of Mo & S. S.
Plasma stabilizer	Cu shell & Vertical field

Electrical Parameters:

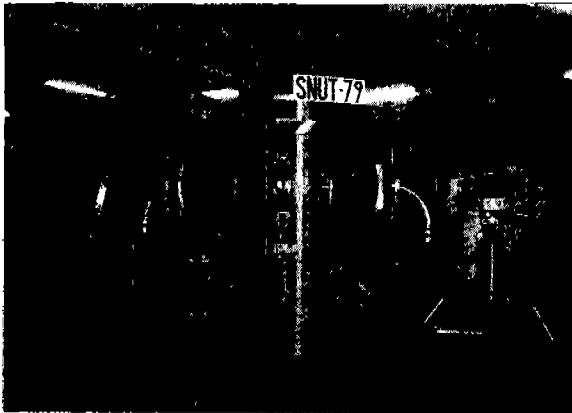
Toroidal coils	No. of coils 16 B(T) and conductor 3T, Cu Ripple ( $\delta B/B$ ) 4%
Auxiliary heating Type	TEA CO <sub>2</sub> Laser, 5MW, adiabatic compression and neutral beam of D <sup>+</sup>
Transformer	0.45 V. S. laminar iron core

Plasma Parameters :

Plasma current (I <sub>p</sub> )	0.12 MA
Discharge time	0.5 S
Energy confinement time ( $\tau_E$ )	0.05 S
Plasma density (n <sub>p</sub> )	0.1 <sup>14</sup> cm <sup>-3</sup>
Plasma temperature (T)	0.5 KeV

Complete date and remarks:

Start of operation with OH Dec. 1984



〈사진 - 1〉 SNUT - 79 본체 (1984. 12)

10ton가량되는 본체가 84년 12월에 거의 완성되었고 그 모습은 사진 1과 같다.

이 장치에 대한 설명을 간단히 하기 위하여 구성도를 보면 그림 1과 같고 제원은 표 1에 나타났다.

현재 본체(사진 1)는 시운전중이며 전원과 계측장비가 보충되어야 할 입장이다. 그림 1의 중심부에는 판형의 규소강판으로 이루어진 철심(1.8톤, Packing factor 98%)이 있고 그 둘레에 스테인레스

304로 만들어진 토러스형 진공용기(진공도 약 10<sup>-7</sup> Torr)가 있어 그 안에 중수소 플라즈마를 발생시켜 자기장에 의하여 밀폐시킨다. 이 토로이달자장을 발생시키는 코일 봉치가 16개로 이 구리우계만 5톤가량 되며 30kA의 전류가 흘러 약 3 Tesla (30,000 Gauss)의 자장이 토러스내 중심부에 발생된다. 이 구리코일은 Tough pitch copper로 사용시 전기력에 의한 압력과 코일자체의 항력이 균형을 이루도록 D자형으로 설계, 제작되었다. 코일내의 절연판은 mylar 재료이고 진공중에서 접착제로 도포되어 유리섬유로 표면을 싹다음 가열하여 굳힌 것이다. 이 토로이달 자장 밀도는 클수록 좋으나 가격상승으로 채택식 방법, 즉 구리코일로는 10T~15T를 충족시키기가 힘들어 선진국들도 초전도 코일로 NbTi를 써서 대형 전자석을 만든 결과 8T정도에 도달하고 있고 Nb, Sn은 가공성이 문제되고 있으나 12T정도는 용이하게 올릴 수 있다. 현재 일본 구주대학과 소련의 Kurchatov연구소에서 초전도코일을 채용한 Tohamak을 제작중이어서 미국보다 앞서가고 있는 실정이다.

우리는 금년초에 초저온을 만드는 액체 헬륨 제

조장치가 가동되고 몇 학과에서 소규모의 초전도자석 실험을 준비 중에 있다.

또 이 코일의 전원으로서 SNUT-79는 5.6 MJ의 단극발전기를 제작하고 있는데 총 중량이 60톤 정도로 실내에 설치하던 것을 전물의 취약성 때문에 포기하고, 금년내로 설치전물을 신축할 생각이다. 이 규모에 대한 일반적인 질문이 왜 그렇게 크게 하느냐는 것이나 SNUT-79의 것은 교육 및 연구용이며 대형들은 에너지 저장용 발전기의 회전자 무게만도 보통 1000톤이 넘고 있다. 현재는 소형 단극발전기를 제작하여 기술자료를 수집중이며 이것도 선진국에서는 첨단분야중의 하나이다. 이 소형은 27Volt 직류에 약 300A의 규모인데 안정성면에 문제가 있어 연구중이다.

플라즈마를 만들고 가열하는 기구로 Ohmic 가열장치가 있는데 이것은 변압기로 보면 1차코일에 직류를 흘려 중앙철심에 자장에너지를 축적한 다음 반대방향의 전류를 흘리면 철심에서의 자속변화가 두 배가 되어 2차코일에 해당하는 토러스 루프에 강한 전압이 유기되어 플라즈마가 발생하게 하나 이 전압이 너무 크면 Runaway electron이 발생하여 효율이 떨어지므로  $D_2$  가스를 자외선이나 약한 방전으로 예비전리화(Preionization)한 다음 가급적 낮은 전압으로 플라즈마가 되도록 하며 일단 플라즈마가 되면 직류펄스를 써서 가열하는데 어느 정도 이상이 되면 Ohmic 가열로는 이온과 전자간의 충돌단면적의 감소로 온도상승이 이루어 지지 않아 부가가열을 하게 된다. 이때 문제는 전류차단기와 고전류 스위치를 써서 시간에 따른 진동전류가 아닌 직류펄스 전류를 흘려야 하며 그렇게 하기 위하여 Crow-barring technique을 쓰고 있다. 이때 심각한 문제중의 하나는 펄스형태의 고전압에서 고전류를 단락시키는 저인덕턴스 스위치와 펄스전류에 대한 기구들간의 접지 해결이다. 이것도 갖가지로 실험을 하면서 개선해 나가고 있으나 적합한 재료 구하기가 제일 힘든 점이다.

이 토러스내를 진공화하기 위하여 1200ℓ/min. 용량의 로터리 진공펌프 2대와 2000ℓ/sec 규모의 터보형 분자펌프 2대가 직렬로 연결되어  $\sim 10^{-7}$  Torr 정도의 압력까지 내릴 수 있으며 저진공 압력까지 도달 할수록 불순물 원자인 다전자원자의 수를 감소시킬 수 있어 플라즈마 가열효율이 좋아진다.

플라즈마는  $D_2O$ 를 전기분해하여 정제한 다음 순도가 6N%의  $D_2$  가스를 장치에 주입하고 있고 일상적인 실험에서는 수소를 쓰고 있다. 부분품중 Bundle divertor는 플라즈마의 형상을 제어하는 Limiter 재료로부터 오염되는 불순물이나 플라즈마속에 섞여있는 불순물을 걸러내는 장치로 기본실험은 끝했으나 고진공속의 토러스내에 설치하는 문제가 아직 남아 있다.

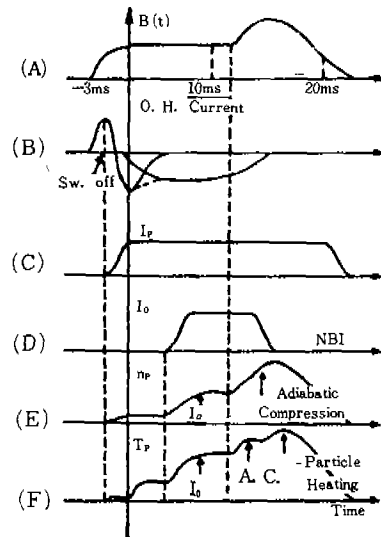
플라즈마의 상태를 파악하는 변수로서는 플라즈마 밀도와 온도를 측정하는 것이고 온도 측정에는 Thomson scattering 방법이 일반적이나 이 장치는 15만\$정도가 되어 설치를 못하였으며 단색분광기를 써서 수소원자의 스펙트럼중  $H_2$ -선의 Doppler 퍼짐을 측정하여 온도를 알아내고 있다. 밀도는 탄산가스 레이저를 제작하여 간섭광을 만들어 측정하려 하며 현재는  $CO_2$  레이저만 완성되어 있다. 그의 속중성자를 검출하고 셀 수 있는 계측기를 갖추고 있다.

부가가열로서는 중성입자빔 발생기를 금년부터 제작중이며 86년말부터는 본 장치에 장착하여 사용할 수 있을 것이다.

장치의 가동중에 나오는 방사선에 대한 차폐는 콘크리트 벽돌을 쓰고 있고 TV카메라가 장치를 감시하게 된다.

## II - 2. SNUT-79의 가동제어

이 장치의 가동 시나리오는 그림 2와 같다.



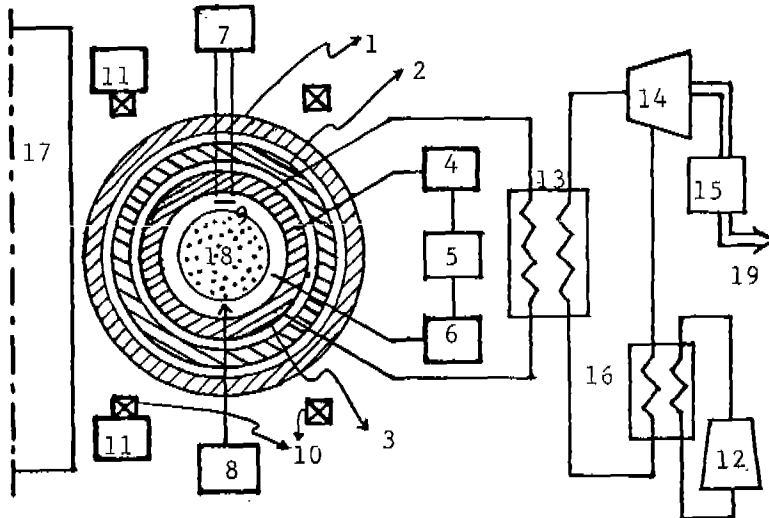
〈그림-2〉 SNUT-79의 가동시나리오

먼저 토로이달 자장을 발생시키고 거의 동시에 오믹 (Ohmic) 가열용 코일에 전류를 흘리다가 최고치에 도달한 후 차단기를 작동시키면서 동시에 반대방향의 전류가 흐르도록 스위치를 조작하여 플라즈마를 발생하며 오믹코일의 전류가 진동하지 못하도록 크로바스위치를 써서 임계감쇠를 시키면서 오믹 가열을 한다. 이때 오믹가열로 플라즈마 온도가 포화될 때 중성빔입사가열로 핵융합온도까지 가열한다. 그러나 현재는 단극발전기가 완성되지 않아 저인덕턴스 콘덴서로 에너지뱅크를 형성하여 토로이달코일에 72KJ을 오믹가열에 60KJ의 에너지를 공급하면서 운전조건을 개선하고 있다. 토러스용기에 수소를  $5 \times 10^{-2}$  Torr 정도 채우고 플라즈마로 만들기 전에 이 장치에서는 예비전리장치 (Preionizer)로써 방전청소기 (Discharge Cleaner)를 그대로 썼으며 이때 플라즈마 전류  $I_p$ 는 그림 2의 (C)와 같다.

(D)에서처럼 중성빔을 플라즈마내로 입사시키면 플라즈마는 거의 100% 이온화되어 플라즈마 밀도  $n_p$ 는 증가하게 되고 (A)에서 토로이달 자장과 수직 자장을 함께 높여주면 플라즈마는 단열압축되면서 플라즈마 온도가 증가된다. 이때 그림 2의 시간축에서 -----선 이후부터는 서서히 융합반응이 시작되므로 융합시 발생하는 고에너지  $\alpha$  입자로도 플라즈마는 자체가열되어 반응속도는 높아진다. 이 과정을 플라즈마의 온도측면에서 관찰한 것이 (F)이며 현재는 (C)번까지 수행하고 있고 플라즈마 온도는 약 100eV (섭씨 약 110만도) 정도이다.

### III. 핵융합로의 발전개념

지면관계상 토카막형에 관한 것만을 설명코자 한다. 그림 3은 핵융합 발전시스템의 개념도로서 토러



- |  |                     |
|--|---------------------|
| 1 : Toroidal Coil (Superconducting Magnet)         | 12 : Cooling Tower  |
| 2 : Shielding Wall for Nuclear Radiation           | 13 : Heat Exchanger |
| 3 : Blanket for Tritium Breeding and Vacuum Vessel | 14 : Turbine        |
| 4 : Tritium Collector                              | 15 : Generator      |
| 4 : Tritium Purifier                               | 16 : Condenser      |
| 6 : Fuel Injector                                  | 17 : Iron Core      |
| 7 : Vacuum System                                  | 18 : DT plasma      |
| 8 : Neutral Beam Injector                          | 19 : Power Out      |
| 9 : Divertor for Impurities Control                |                     |
| 10 : Vertical Coils                                |                     |
| 11 : Ohmic coil                                    |                     |

〈그림-3〉 발전용 핵융합로의 개념도

스의 단면만을 나타낸 것이다.

토러스 단면중심부에 DT플라즈마가 있고 그 윗 부분에 불순물 원자를 처리하는 다이버터가 있다.

바로 결벽이 삼중수소를 생산할 Li과 핵융합으로부터 나오는 중성자를 증식시키기 위한 Nb의 합금 층이며 진공유지를 위한 스페인레스층이 있고 이들을 합쳐 블랑켓(Blanket)이라 한다. 이 블랑켓이 핵융합으로부터 나오는 중성자를 열로 변환시키고 그 열을 냉각재로 뽑아낸다. 이 열은 열교환기까지 왔다가 돌아가게 되고 그외는 일반 발전기와 같은 구조를 갖는다. 블랑켓의 중요한 역할은 연료로 쓸 삼중수소의 생산이며 연료주기(Fuel cycle)가 이루어지도록 엔지니어링을 행해야 한다.

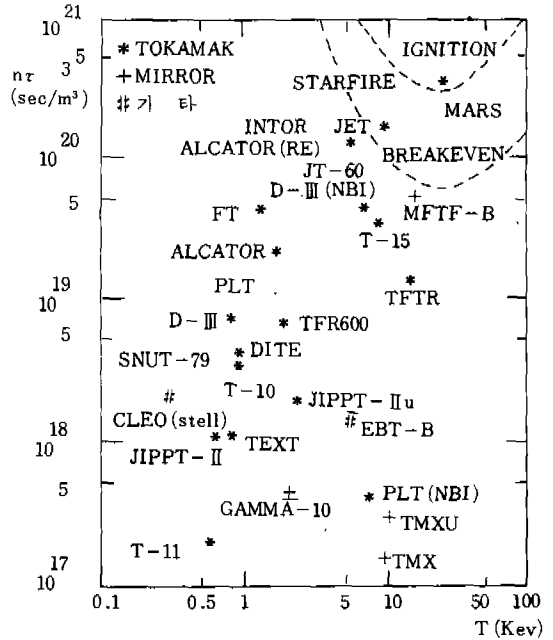
이외에 순수한 중수소만을 연료로 하는 핵융합로를 Advanced reactor라고 부르는데 이것은 핵융합 점화온도(Ignition Temperature)가 DT경우보다 높아 기술적으로 더 어렵다. 그러나 많은 원자로 설계자들과 과학자 및 공학자들이 계속 연구 결과를 발표하고 있다.

#### IV. 기타상황

정보교환면에 있어서는 주로 대학연구소로 30여 개소와 자료를 주고 받으며 내용은 어디까지나 원리적인 것, 간단한 계산 등이다. 국제협력이란 서로 독창적인 것을 교환할 것이 있어야 이루어지는데 우리의 내재능력이 약한 편이라 더 이상 접근이 어려운 실정이다. 금년부터는 국제원자력기구(IAEA)에 우리의 핵융합장치 명단도 등록되고 몇가지 측정기구도 원조를 받게되었다. 하지만 워낙 중진국 상위권 국가라고 선전이 되어 있어 지원받기에도 미묘한 입장이 되었다. 일단 IAEA부터라도 원조를 받게 되면 파견관의 타당성 검토를 받게 되고 속속들이 모두 내보여야할 때면 우리의 수준이 어느 정도인가 평가가 될 것이다. 제작하고 있는 이 SUNT-79가 완전히 가동되어 세계적인 Tokamak들과 성능을 비교하면 어느 위치가 될까. 이것을 그림으로 보이면 그림 4와 같다.

이 그림중  $n_p \tau_E$ 라 함은 플라즈마 밀도와 에너지 밀폐(Confinement) 시간의 곱으로서 온도가 1억도 정도에서  $n_p \tau_E \approx 10^{20} \text{sec/m}^3$  정도면 플라즈마가 점화된다는 수치로 보통 Lawson Criterion이라 부른다.

Present Status of Fusion Devices



(그림-4) 핵융합장치들의 제원비교

SNUT-79가 대각선 방향으로 올라가려면 많은 투자와 연구진의 노력과 땀이 요구된다. 그림 4에서 Breakeven선은 장치에 입력에너지와 핵융합으로 인하여 발생된 에너지가 같게되는 선으로 JT-60이가 장 가까이 있고 그 이상은 설계만 완료한 것들이다.

끝으로 이 장치를 짓도록 재원을 할애해 주신 본 학과의 동료교수들과 연료확보를 선뜻 지원해 주신 한국전력의 김선창 선생님과 노윤래 선생님께 우리 핵융합그룹이 감사말 드립니다. \*

