

유럽의 核融合 研究現況

유럽共同토러스(JET)는 유럽共同市場(EEC)의 核融合에 대한 合同研究에 繼續 關心을 가져왔다. 그 理由는 이것이 稼動中인 것으로는 最大의 토크마크이고 또한 實驗結果를 大量供給하기 始作했기 때문이다. 한편 유럽에서 이를 支援하고 있는 몇個所의 다른 研究所들은 요사이 設備改良問題로 바쁘기 때문에 別로 發表할 것이 없는 狀況이다.

JET의 目標 超越達成

JET의 플라즈마의 흐름은 1秒 동안 5MA의 레벨도 維持되므로서 4.8MA의 設計레벨을 넘었다. 이것은 D字形의 토러스에서 플라즈마가 길어짐으로서 成就되었으며 이러한 플라즈마의 伸長率은 이와 같이 큰 플라즈마흐름의 작은 變化로 發生되는 힘이 토러스容器에 作用할때 생길지도 모를 損傷을 避하기 위해서 現在로는 1.4배로 制限하지 않으면 안된다. 一部裝置시스템의 出力을 增加시킨 結果 1984년에 지탱할 수 없을 程度의 衝擊을 받은後에 토러스支持物の 補強이 이루어졌다. 徹底한 設計에 의한 토러스의 補強作業은 1987년의 計劃停止期間中에 施行될 豫定이며 그後에 플라즈마흐름은 7MA 레벨로 올릴 수 있을 것이다.

抵抗加熱에 의한 2年間の JET稼動結果 플라즈마·펄스에 關한 많은 데이터를 얻었으며 0.8秒라는 記錄的인 持續時間을 成就할 수 있었다. 1985年初에 스케줄에 앞서 처음으로 2個

의 이온·사이클로트론共鳴加熱(ICRH)시스템을 使用해서 最初의 追加加熱이 이루어졌으며 그다음에 年末에 가서 最初의 中性子빔射入유니트와 세번째의 ICRH유니트가 마련되었다.

이러한 JET의 加熱시스템의 開發에는 유럽의 몇個 研究所가 共同參與하는 아주 大規模의 프로그램이 包含되어 있으며 첫번째 유니트가 아주 順調롭게 稼動에 들어갔다는 事實은 매우 満足스러운 것이었다. 1985年末에 ICRH시스템은 플라즈마에 連結된 15MJ의 에너지로 總 6 MW를 供給했었다. 1968년부터 稼動하기 始作한 中性子빔·유니트는 지금은 4MW의 出力을 내고 있으나 年末에 두번째 유니트를 稼動하게 되면 10MW로 出力이 增加할 것이다.

다른 토크마크와 같이 JET로 追加加熱을 하면 格納容器의 劣化效果를 가져옴을 알 수 있었다. 代表的인 例가 入力을 2배로 해도 플라즈마의 에너지손량은 50%만 增加한다. 이온의 最高溫度는 典型的인 抵抗加熱의 경우의 2.5KeV로부터 追加加熱의 경우의 4.4keV까지 上昇하였으며 電子溫度는 4keV에서 5keV로 上昇하였다. 그러나 斷熱材의 劣化로 큰 부피의 JET 플라즈마의 平均電子溫度는 약간 增加할 뿐이었다.

이온密度, 이온溫度, 에너지密閉時間의 積은 原子爐狀態에 關係가 있는 核融合實驗의 效能을 評價하는데 널리 使用되며 따라서 JET에 대한 抵抗加熱範圍內에서 最大値를 나타낸다. $6 \times 10^{19} \text{m}^{-3} \text{keV}$ 의 最大의 積은 點火必須條件의

80의 팩터만큼 不足하다. 冷凍된 水素와 重水素의 펠렛트를 플라즈마에 入射하므로서 美國에서 좋은 成果를 낸 JET에 대해 關心이 쏠리고 있다. 이것은 플라즈마內的 溫度와 密度의 分布 狀態를 變化시킬 수 있는 方法이 되며 플라즈마中心의 톱니모양의 不安定狀態를 다루게 되므로 지금은 秘密로 되어있다. 來년에 設置될 JET를 위해 1.5km/s까지 入射速度를 낼수 있는 펠렛트發射器를 借用하기로 美國 에너지省과 合意를 보았으며 덴마크, 프랑스, 西獨의 研究所들과 契約을 맺어 3年內에 5km/s의 發射器를 開發, 納品하기로 하였다.

JET의 稼動은 昨年에 꾸준히 改善되었으며 2交代 勤務와 徹夜補修作業 體制를 갖추으므로 1983年 稼動開始後의 總펄스數가 1985年中에 3,000을 若干 넘었던 것이 6,300으로 增加하였다. 또한 裝置試運轉 試驗보다도 實驗測定에 割當되는 펄스數의 比率이 繼續 增加하였고 實驗用 펄스의 總數는 지금 試運轉用 펄스數보다 많다.

ICRH와 中性子빔 加熱시스템의 設置外에 昨年에 JET에 追加設置된 것中的 主要한 것으로는 토러스의 안쪽壁에 플라즈마中心線에서 上下 1미터 높이에 黑鉛타일의 띠를 두르는 것이었다. 이렇게 하므로서 플라즈마內的 不純物에 의한 放射線의 損失을 줄일 수 있고 플라즈마에 가장 가까운 表面은 낮은 原子番號(27以下)의 材質이 좋다는 것이 確認되었다.

JET토러스의 D字形은 플라즈마의 垂直方向 位置와 形狀을 調整하기 위한 휘이드·백 시스템의 改善과 함께 所謂 말하는 X-포인트 運轉方式을 可能하게 했다. 토러스의 長이가 크게 늘어진다면(伸長率 1.8~1.9) 플라즈마의 上部와 下部에 磁力線이 閉塞된 토러스表面을 이루지 않고 容器的 壁을 가로지르는 領域을 形成할 수 있다. 이것은 非物質制限器 役割을 하며 여기서 低温플라즈마와 不純物을 高温플라즈마로부터 抽出할 수 있다. 이러한 作用은 抵抗加熱의

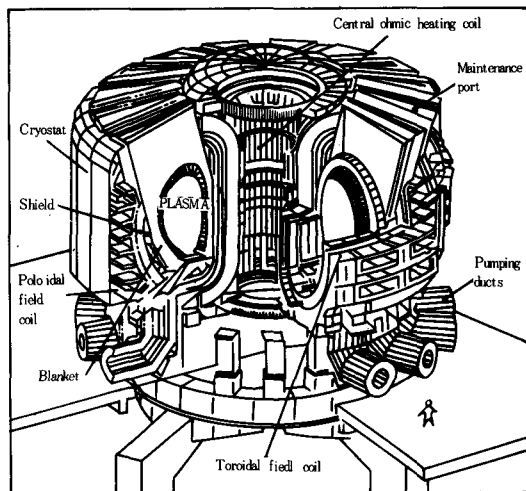
JET에서 實證되었으며 가까운 時日內에 實施 豫定인 試驗에서는 相當量의 追加加熱을 했을 경우에 일어나는 現象을 觀察하게 될것이다.

이 試驗에서 바라는 結果는 X-포인트 稼動方式에 의해 追加加熱로 因한 密閉時間 短縮이 減少되는 것이다.

次期 유럽型 토러스

JET의 成功的인 稼動後 유럽의 核融合分野에서 滿足하게 생각하고 있는 다음 段階는 次期 유럽型 토러스(NET)에 대한 目標設定과 概念設計과라메터의 設定面에서 이루어 놓은 뚜렷한 進展인것 같다. 現在 JET의 稼動實績이 成功的인 것은 主로 基本設計의 概念이 正當하였다는데 그 原因이 있다고 一般的으로 認定되고 있으며 西獨 Garching에서 NET프로젝트·팀에 의해 推進되고 있는 豫備設計作業이 이와 마찬가지로 結實을 맺게 되기를 바란다.

NET의 主된 役割은 電力用 토커마크原子爐에서 必要하게 될 設計 및 技術에 의한 原子爐 條件下에서 實驗해보는 것이며 이러한 實驗은 토커마크·플라즈마 物理學의 概念(이것은 JET와 다른 研究所들에서 使用中인 보다 작은 支援裝置의 稼動에서 얻어질 것이다)와, 經濟的인 電力生産에 대한 實證과 이에 따른 商業用 原



子爐의 實際性能과의 隔差에 대해 効果的인 架橋役割을 하게 될 것이다.

NET는 지금은 유럽의 프로젝트이지만 이것은 보다 廣範圍한 國際的인 計劃(특히 INTOR 實驗프로젝트)를 補完해 줄 것으로 看做되며 EEC는 NET에 의 보다 廣範圍한 國際的인 參與提議를 받아들일 것이 分明하다. 昨年 1年間 開發된 NET의 豫備設計概念에는 JET를 基準한 表中의 補外係數와 이를 實證하기 위한 商業用 原子爐가 包含된다.

現在의 유럽의 프로그램에는 1989~90년까지 트리듐을 使用한 JET의 稼動에 대한 最終決定을 내리게 되어 있다. 이것은 點火를 成就한다는 期待下에 매우 劇的인 實驗이 될 것이며 分明히 最終的으로 必要條件들을 設定하게 될 것이고 또한 NET의 最終的인 細部設計를 可能하게 할 것이다. 따라서 NET프로젝트의 推進與否에 대한 決定은 가장 빨라서 1993年頃이 될 것이다.

두가지의 약간의 設計變更이 轉換器에 대해 單一 및 2重 X포인트의 零點과 關聯하여 考慮되고 있으나 이것은 모두 다 大半徑이 5미터 이상이고 플라즈마흐름이 約10MA가 되는 플라즈마에 의해 約 600Mth의 核融合 出力을 내는 設計가 될 것이다. 低温코일이 提案되었으며 이 裝置는 裝置의 頂上部를 통해서 블랭킷트판을 除去할 수 있는 構造로 되어 있다.

Tore Supra와 이의 改善

超導磁率의 코일을 使用하는 最初의 유럽의 토커마크가 來年末까지 稼動準備될 豫定이며 프랑스의 Cadarache에서의 Tore Supra 設備의 建設은 많은 進陟이 이루어지고 있다. 이 유니트의 코일로는 所定의 入力에 대해 最大의 磁場을 얻기 위해 람다·포인트以下에서 運轉되는 니오븀/티타늄의 超導磁率의 材質이 使用될 것이다. 플라즈마의 大直徑 2.25m, 磁場強度 4.5 T를 가지고 이 裝置는 플라즈마흐름 1.7MA까지, 에너지 密閉時間 0.5秒까지 稼動시킬 수 있

다. 超導磁率의 코일·시스템의 實證外에 Tore Supra는 JET가 D-T運轉으로 들어갈 準備가 됐을 때 플라즈마加熱에 대한 더 細部的인 研究에 適合하도록 돼있지 않으면 안된다.

西獨 Garching에 있는 ASDEX토커마크의 改善作業은 1989年 完了豫定으로 現在 順調롭게 進行中이다. 이 裝置는 將來의 原子爐시스템의 重要한 特徵을 이룰 Poloidal轉換器를 最初로 갖추게 될 것이며 이 改良된 裝置는 또한 所謂 H-型式 運轉(이 型式의 運轉에서는 加熱增加로 에너지密閉의 損失傾向이 되살아남)에 대한 앞으로의 研究調査를 위해 使用될 것이다.

伊太利의 Frascati토커마크의 改良作業도 現在 잘 進行되고 있으며 1988년에 完了豫定이다. 이 裝置의 特徵은 8테슬라 程度의 아주 높은 磁場이며 이것은 플라즈마에 대한 計數法則을 試驗하는데 아주 有用하다.

加熱시스템의 開發

유럽의 많은 小型 및 舊型 토커마크에 대해서 많은 技術的인 問題 특히 追加加熱에 대한 細部的인 開發이 繼續되고 있으며 이것을 나중에는 보다 大型의 原子爐에 適用할 수 있는 方法을 發見하게 될 것이다. 西獨 Julich에서의 Textor裝置에 대한 벨기에와의 共同研究은 이온·사이클로트론共鳴加熱의 開發에 있어 特別히 成功的이었다.

지금은 電子사이클로트론共鳴加熱(ECRH) 쪽으로 關心이 쏠리고 있으며 유럽의 많은 先導的인 電氣會社들이 150GHz限度內的 運轉周波數를 使用해서 高出力 사이로트론 開發을 하고

	JET	NET	DEMO	PCSR
Plasma minor radius	1.0	1.2	1.6	2.2
Plasma major radius	1.0	2.9	2.9	3.4
Plasma current	1.0	2.1	2.7	3.8
Pulse length	0.01	1.0	5.0	5.0+
Total thermal power	-	1.0	3.0	5.7
Neutron wall loading	-	1.0	1.4	1.8
Neutron fluence (1st wall)	-	1.0	5.0	10.0

있다. 이러한 매우 높은 周波數는 아주 高温의 플라즈마內에서의 電子共鳴을 發見하는데 必要하게 될것이다.

ECRH을 위한 홀랜드와 프랑스의 合作프로젝트에서는 TFR에 이것의 設置作業이 進行中이다. 이 오래 된 토카마크는 이외의 프랑스核融合研究機關들이 모두 프랑스南部의 Cadarache研究團地로 옮겨 갔음에도 不拘하고 아아직도 Fontenay-anx-Roses研究團地에서 稼動되고 있다. ECRH시스템은 英國의 Culham研究所에서도 Dite (또하나의 아직도 稼動中인 오래된 토카마크)와 Compass (높은 베타·플라즈마의 研究를 위해 來년에 稼動豫定인 새로운 콤팩트한 裝置)實驗을 위해 開發되고 있다.

또한가지 關心을 끄는 分野로는 ICRH의 몇 십MHz와 ECRH의 100分の 몇 십GHz 以上 사이의 1GHz程度의 所謂 말하는 낮은 複合型 共鳴加熱이 있다. 이것은 外部코일을 利用해 플라즈마周囲로 플라즈마흐름을 드라이브하지 않고 外部加熱源을 利用해 플라즈마를 드라이브할 수 있는 可能性을 보여주었다. JET에 使用하기 위한 이러한 시스템의 開發에 關한 提案에 대해서 곧 決定이 내려질 것이다.

英國의 Culham研究所는 陰水素이온·빔을 發生시키는 方法을 開發하는데 있어 매우 鼓舞의 인 成果를 올렸다. 陰이온·빔은 더 많은 熱을 플라즈마에 加하는 또하나의 興味있는 方法이며 또한 플라즈마의 形狀을 만드는데에도 도움이 될수 있을 것이다.

代替磁力시스템

유럽의 토카마크의 磁力密閉시스템의 代替方法에 대한 研究는 改良型스텔라레이터와 逆磁場핀치에 焦點을 맞추고 있다.

西獨의 Garching에서는 Wendelstein VII-A 스텔라레이터가 ECRH를 使用한 이온·빔 드라이브를 立證한 것을 絶頂으로 10年間의 成功의인 稼動을 끝냈으며 改良型 Wendelstein - V

AS裝置의 設置作業이 지금 始作되었다. 이것은 꼬임을 가지고 있는 複雜한 型式의 Poloidal 코일을 使用하게 될것이며 이러한 코일은 眞空容器周囲에 追加 토러스·코일을 設置할 必要없이 플라즈마內部에 必要한 渦流를 發生시킬수 있는 것이다.

伊太利의 Padua에서도 RFX裝置에 대한 作業이 始作되었다. 3千萬弗의 이 프로젝트는 EEC와 伊太利에서 主管하고 있으며 英國의 Culham研究所의 보다 小型의 逆磁場핀치裝置에서 얻은 實驗데이터에 根據하여 設計된 것이며 1989年 設置完了豫定이다.

슈퍼피닉스 定格出力 到達

프랑스의 高速增殖爐 「슈퍼 피닉스」(出力124萬KW)가 現地時間 1986년 12월 9일 오전 3시 50분에 定格出力에 도달하였다. 同爐는 프랑스를 中心으로 해서 西獨, 이탈리아와 共同으로 건설을 추진해온 세계최초의 FBR 實證爐로서 1977년 5월 착공이후 10년만에 全出力運轉에 도달했다.

슈퍼 피닉스는 原型爐「피닉스」(25萬KW)에 이어서 프랑스에서는 두번째의 FBR로서 爐型은 탱크型이며, 리온市郊외의 Malville에 建設되었다.

建設主體는 國際共同出資會社 NFRSA로서 프랑스電力廳 51%, 이탈리아電力公社 33%, 西獨 및 기타 16%의 出資에 의해서 1973년에 설립되었다. 建設자금은 約250億프랑이 投入되었다.

同爐의 建設은 綜合機能試驗中에 buffer 板의 振動에 의해서 工程이 약간 지연되기는 했으나 1985년 7월에 爐心燃料를 裝填했다. 臨界는 1985년 9월이었고 同年末에 出力上昇을 시작하여 1986년 1월에 電力供給을 개시했다.

따라서 세계에서 운전중인 FBR은 日本의 「常陽」을 포함해서 11基가 되었다.