



特別企劃 核融合-그 技術的課題와 開發戰略의 前提 (1)

核融合炉研究開発의 論点

세계 각국의 핵융합 장래계획에 최근 큰 변화가 있으며 앞으로 수년내에 이들 장래계획의 실시가 결정될 것이다. 大規模, 長期間의 계획인 만큼 현재 그 是非의 議論이 활발하다.

窮極의 에너지源으로 핵융합에 대한 기대는 크나 아직은 초기개발 단계로서 어떤 방법으로 언제쯤 실용화 될 것인지 전망은 확실하지 않다. 30년에 걸친 plasma연구시대를 겪어 몇 가지의 핵융합반응중 가장 달성이 쉬운 DT 핵융합의 炉心plasma에 관해서 이제 거의 그 윤곽을 알 수 있게 되었다.

밝은前途가 보이기 시작한 1970년대 중반부터 急ピチ를 올리기 시작한 plasma연구는 과학적 檢証을 시도하기 위해 몇 개의 臨界plasma 시험장치 건설을 시작했다.

磁場密閉方式에는 ① TOKAMAK장치로 TF TR(미국, 프린스頓大), JET(EC, 카립研), T-15(소련, 크루챠토프研), JT-60(日本, 原研) ② mirror장치로 MFTF-B(미국, 로렌스 리바모어研) 등이 있다.

한편 慣性핵융합방식에는 ③ laser장치로 NO VA(미국, 로렌스 리바모어研) ④ 相對論的電子beam 장치로 ANGARA-V(소련, 크루챠토프研) ⑤ 軽ion beam으로 PBFA(미국, 선더어研) 등이 있다. 이 장치들은 앞으로 3~4년이내에 건설이 완료되어 臨界plasma를 달성하게 될 것이다. 이와같이 순조로운 핵융합연구의 추세로 실용화연구는 目前에 다달은 것 같은 誤解(宣伝

?)이 생기고 있으나, 近者 3~4년동안 각국에서 次期장치를 검토한 결과 困難한 炉工学의 문제에 직면하고 있음이 재확인 되었다.

實은 수년전부터 實用炉의 炉 설계 연구 결과에서 이와같은 문제가 지적되어 왔으나 먼 장래의 문제로 크게 実感하고 있지 않았다. 그러나 충분한 핵융합반응을 要하는 次期장치에서도 實用炉와 공통되는 많은 문제가 대두되어 앞으로 수년의 개발기간동안 해결될 전망이 없으면 次期장치 건설에 착수할 수 없음이 확인되었다.

「이와같은 문제를 미리 알고 있었음에도 불구하고 과학적 檢証이라고 하여 實用化로의 연결을 깊이 생각하지 않고 다만 plasma 성능 向上을 주로하는 臨界 plasma 시험장치 건설을 너무 서둘렀기 때문에 이러한 문제가 생기고 있다. 이것은 重點的으로 plasma 연구를 한 연구자나 연구소가 leadership를 갖고 있었기 때문이다.

과학적 檢증에서 실용화 연구로 연속성이 있었던 핵분열炉 개발과는 달리 핵융합에서는 큰 斷絶이 있어 현재의 연구방향대로 진행시키면 경제적인 炉는 만들 수 없다. 따라서 지금부터 중요한 것은 장래계획에 관한 적절한 management이다」라는 嚴한 지적까지 나오고 있다.

炉工学上の 문제로는,

① 高中性子照射量, 高熱負荷, 高誘導電磁応力에 견디며 불순물문제에 有利하고 誘導放射能이 적은 第1壁材 개발 ② 完全한 自動組立解体기술의 개발 ③ tritium增殖率 1이상을 달성할

수 있는 증식재료와 blanket 구조개발 ④ 高 cost 의 低減化 ⑤ 高 레벨로 유도방사化된 多量의 炉 구성材 폐기처리법 개발 ⑥ 다량의 tritium 취급 기술 개발등이다.

이러한 것들은 현재의 기술레벨을 훨씬 능가 한 尖端技術이며 개발대책이 수립되어 있지도 않고 더욱 곤란한 것은 이러한 것들 모두가 거의 같은 시기에 해결되어야 한다는 것이다. 따라서 핵융합은 아폴로계획 이상의 규모로 질적으로는 훨씬 고도의 연구개발이 될 것이라고 한다.

최근 소련과 EC는 소극적이 되고 있으며 구체적인 장래계획은 수립되어 있지 않다. 미국도 TOKAMAK 실험炉인 ETF(Engineering Test Facility) 계획이 취소되어 TOKAMAK 방식 연구에 力点을 두지 않았으나 고온 plasma生成에는 현재 TOKAMAK방식을 이용하는 것이 가장 좋다는 見地에서 炉工学연구장치 FED 계획을 대폭적으로 축소하였다.

이것은 빈약한 현재의 炉工학을 levelup 시키는 것이 선결문제이며 ETF級의 장치를 건설하는 것은 곤란하기 때문이라고 하며 FED계획 검토도 중지되는 것 같다. 따라서 実驗炉級의 장치를 건설하려는 계획은 日, 美, 蘇, EC 공동으로 검토되고 있는 INTOR계획과 일본의 次期計劃 뿐이다.

핵융합이 真実로 「無限한 clean energy源」인 것은 再論할 필요가 없으나 현재 목표로 하고 있는 DT 핵융합炉는 그렇지만도 않기 때문에 定量的으로 그 優位性을 論해야 한다.

論点 1 代替에너지源으로서의 資格

장차에는 원자력이 석유의 대체에너지가 된다고 알려져 있다. 그러나 石油수요의 10%를 점하는 素材原料用은 제외하더라도 발전용 30%, 산업용 20%, 民生用 10%의 수요 대부분을 대체하지 않으면 에너지위기를 극복할 수 없다. 原子力이 단순한 대체發電源 역할 밖에 할 수 없다면 나머지 70%의 부족으로 인해 사회가 붕

괴되는 일이 생길 수도 있다. 만약 그렇게 되면 핵분열炉나 핵융합炉 개발을 위해 쏟는 지대한 노력은 무의미하게 된다.

그러므로 원자로에서 水素를 생산하여 이것을 수송용연료나 鉱工業用으로 사용하거나 또는 바로 석유를 태우는 것을 전기로 바꾸는 등의 방법이 거론되고 있다. 그렇게 될 경우, 일본을例를 들면 현재 일본의 총에너지수요 $2 \times 10^{19} \text{J}$ 이 앞으로 증가하지 않는다고 가정하고 20~30년내에 원자력으로 대체한다면 100만kWe 発電炉를 약 1,000基, 즉 매년 약50基(매주1基)씩 영구히 건설하여야 한다. (플랜트壽命을 20~30년으로 했을 경우), 현재 일본에서 1個所 200~300万kWe出力의 발전소 건설可能地는 50個所 정도라고 생각되고 있다. 또한 廃炉의 문제도 크나 이보다 더 곤란한 문제는 재처리시설과 방사능폐기물처리 문제다. 따라서 核分裂炉는 앞으로 30~50년 정도동안 全에너지 수요의 20~30% 정도를 충당할 수 있는 능력일 것이다. 그러므로 핵융합炉의 경우가 방사능 문제가 훨씬 적다면 21세기의 주요대체 에너지源으로서 중요한 자격을 가진다.

論点 2 安全性

DT 핵융합로의 방사능에 대한 안전성 문제에 관해서 平常운전시와 事故時로 나누어서 생각한다.

兩者에 공통되는 것은 tritium 누설에 의한 周辺住民의 内部被曝이며 後者에서는 誘導放射化된 炉構成材의 飛散에 의한 주변주민의 외부피폭도 문제가 된다. 핵분열炉의 평상운전시에는 주변에 1~5mrem/年이하의 피폭량이 있다. 한편, 약 10kg (10^8Ci)의 tritium을 보유하는 100만kWe DT 핵융합로에서 같은 정도의 내부피폭량으로 하려면 1,000Ci/年 정도의 누설량으로 억제되어야 한다. 現技術로 누설율 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ /年의 test plant 건설은 가능하다고 생각하나 $10^{-1} \sim 10^{-6}$ /年 누설율을 타당한 코스트의 기술로 달성하는 것은 쉬운 일이 아니다.

最惡의 事故時, 거의 대부분의 tritium이 飛散했을 경우 주변에는 최대 10~100 rem의 피폭이 있을 것이다. 이것은 최대 허용 피폭 선량 정도이다. 그러나, 핵융합로는 원래 暴走(run away) 事故는 原理적으로 있을 수 없으므로 이와 같은 최악의 사고는 상상하기 힘들다. 핵분열爐의 최악사고와 비교하여 광범위하게 치명적인 영향을 주는 일은 없을 것으로 기대된다. tritium은 가장 良質의 방사성물질이다. 핵분열 생성물과는 달리 生物濃縮效果가 없고 그 물리적 반감기도 12.4년 밖에 되지 않으며 또 生物의 반감기는 평균 10일 정도이다.

그러나 DT 핵융합에는 유도방사능 문제가 있다. 핵분열 경우 보다 4배나 많고 에너지도 14 MeV라는 약 7배나 높은 중성자를 발생한다. 이 중성자는 1만톤이 넘는 炉構成材를 방사화하여 그 値는 고속증식로의 방사능 폐기물에 가까운 10^9 Ci나 된다. 그러나, 핵분열爐의 actinide 원소와 비교하면 그 生物学的相对毒性度(BHP)가 약 2자리 낮은 것이 대단히 유리하다고 생각된다.

論点 3 放射能廃棄物과 廃炉

DT 핵융합爐의 高레벨, 다량의 유도방사능은 핵분열爐와 비교하여 廃棄와 自動組立解体라는 절대적으로 불리한 두 가지 문제를 초래 한다.

가장 高레벨로 유도방사화되는 第1壁과 blanket만으로도 고속증식로의 고레벨방사능 폐기물의 100배가 되는 体積이 된다. 금속 고형물이므로 그 처리는 비교적 쉽다고 하나 그 압도적으로 큰 체적으로 인해 폐기할 장소의 문제는 크다. 또 폐기시, 이들을 운반할 때는 차폐구조가 붙은 車가 필요하며 이는 건설시 자재 운반보다 한자리는 더 클 것이다.

또 高級재료를 다량 폐기 함으로서 재료자원 제한으로 다수의 핵융합로를 건설하는 것이 비현실적이 될지도 모른다.

작업종사자가 피폭되는 것을 피하려면 (第1壁

부근에서는 秒단위에서 致死量) 炉의 定檢時나 수리시의 해체조립과 廃炉時등의 작업을 모두 遠隔조작에 의존하여야 한다. 매우 고도의 원격조작기술 개발만으로는 이를 해결하기 어려우며 핵분열爐보다 훨씬 복잡한 구조인 핵융합爐에 대해 根本적인 개량이 행해져야 할 것이다. 따라서 간단한 구조의 炉가 될 수 있는 새로운 핵융합방식이 연구되어야 한다.

가장 문제가 되고 있는 것은 실용화연구에 훨씬 앞서고 있는 실험장치에서도 원격조작을 해야 한다는 점이다. 이 실험장치 단계에서도 plasma의 성능을 세밀히 조사하기 위해 수많은 측정기와 그 측정 port가 필요하며 또한 機器에 어떠한 작은 결함도 있어서는 안되고 여러 가지 개조도 필요하다. 이런 것을 모두 원격조작해야 한다는 것이 차기장치에서 직면하고 있는 가장 곤란한 기술적 문제의 하나이나 아직 구체적인 방책이 강구되어 있지 않다.

論点 4 燃料資源

연료인 중수소는 타당한 가격으로 물에서 추출하여 얻을 수가 있다. 그러나 천연에 거의 존재하지 않는 tritium은 lithium에 중성자를 照射시켜 핵융합爐 자체에서 만들어야 한다. 이 lithium資源이 제약을 받으면 핵융합의 우위성은 없어진다. 바다물 속에 0.17 ppm포함돼 있는 lithium을 추출하는 방법이 고려되고 있다. 100 만kWe의 DT 핵융합로에는 약 1,000톤의 lithium이 필요하다. 추출코스트를 30만원/kg 이하 (이렇게 되더라도 3,000억원)로 하여야 하므로 이를 위한 개발이 시급하다.

한편 단순히 코스트 문제뿐만 아니라 추출에 필요한 에너지에 대해서도 주의깊게 검토할 필요가 있다. 일반적으로 巨大한 플랜트라고 하더라도 이를 건설하는데 필요한 에너지는 뜻밖에 적다. 경수爐에서는 1~2년 동안에 그 에너지를 회수한다. 그러나 가스拡散法에 의한 우라늄농축은 막대한 전기에너지가 필요하기 때문

에 結局 경수로는 6~8년의 에너지 회수기간이 필요하게 된다.(가동율 60~70%) 즉, 순조롭게 운전된다면 그 발전량은 플랜트제작, 운전에 필요한 에너지의 3~4배가 된다. (단, 废炉나 방사능폐기물처리 등에 필요한 에너지를 생각하지 않을 경우). 또한 에너지경제성을 올리기 위해 遠心分離法에 의한 농축을 개발하여 10배 정도의 에너지利得을 달성하는 방향이 고려되고 있다. 중수炉는 농축이 불필요하기 때문에 10배 정도의 에너지利得을 달성하고 있다고 한다.

핵융합炉는 경수炉보다 反応炉 부분에 20~30倍의 재료를 필요로 한다. 그러므로 플랜트 제작에 필요한 에너지를 회수하는데 수년이 필요할 것이다. 따라서 lithium 추출에 필요한 에너지가 막대하면 에너지 이득에 관해 현재의 경수炉보다 나빠질 우려가 있다. 거의 1년동안의 발전량 이하에서 tritium을 추출(즉, $2 \times 10^{10} \text{J/kg}$ 이하) 할 수 있는 방식이 고려되어야 할 것이다.

이상의 論議는 천연lithium를 사용하는 경우로 92.6%가 ^7Li 이고 나머지가 ^6Li 이다. DT 핵융합로의 blanket에서 에너지가 높은 영역에서는 ^6Li 과 중성자가 반응하고, 낮은 영역에서는 ^7Li 과 반응하여 tritium增殖이 행해진다. 炉心 plasma의 全周囲에 blanket를 배치하여 여려가지 구조재에 소모되는 중성자도 算定에 넣으면 증식율은 1.1~1.2로 계산된다. 최근, 정밀성이 낮았던 断面積実驗值에 대해 ^7Li 과 중성자반응에 관한 정밀한 측정이 행해져서 從來值보다 약 20% 낮은 值로 나타났다. 즉 그만큼 tritium增殖이 어려워진다.

blanket내에 中性子增殖材를 두고 중성자에너지를 낮게 하여 주로 ^6Li 과의 반응에 기대하려는 생각도 있다. 그러나 이 경우 농축된 ^6Li 가 필요하며, 그 추출코스트와 에너지는 훨씬 클 것이다. 어느 방식이든 全面에 blanket를 배치하여도 增殖率 1의 달성이 쉽지 않으므로 全面에 배치하기 어려운 방식은 장래성이 없을 것이다.

論点 5 經濟性과 材料

核融合炉의 核心部 에너지密度는 핵분열炉의 1/50~1/100로 대단히 낮다. 그 이유는 핵분열炉의 경우 하나의 炉心에 많은 연료봉이 들어가는 구조이기 때문에 에너지 발생부(燃料棒全体積)와 에너지를 받는 면적(燃料棒全表面積)의 비가 대단히 작기 때문이다. 즉, compact한 炉心구조에서 큰 에너지受面積이 취해진다. 그러나 핵융합로에서는 굵은 연료봉(plasma)이 한 개 들어 있는데 불과하므로 핵분열로와 같은 정도의 면적(이 경우는 第1壁)을 취하는데는 대단히 큰 炉心体積이 되기 때문이다.

대단히 큰 中性子照射量과 热流速에 견디는 재료가 있으면 별 문제가 되지 않으나 이미 고속증식로에서도 이에 대한 限界를 느껴 高熱負荷는 불과 1mm두께 이하의 연료봉 피복管을 채택함으로서 해결하려고 하고 있다. 핵분열炉에서는 연료봉의 교환이 매우 행해지므로 장기간의 피복관 수명은 필요하지 않다.

그러나 DT 핵융합로의 第1壁이나 blanket는 매년 교환할 수가 없다. 왜냐하면 이것들을 매년 교환하면 폐기해야 할 유도방사능을 증가시켜 많은 재료자원을 쓰고는 버리는 것이 되어 결국은 코스트상승이 되기 때문이다. 그 외에도 복잡한 원격조작을 감안하면 가동율의大幅低下를 초래할 것이다. 따라서 第1壁이나 blanket의 수명은 적어도 10년, 가능하면 plant 수명과 같은 20~30년이 되어야 한다. 炉心体積이 큰만큼 플랜트 중량도 큰데, TOKAMAK炉의 設計例에서 中性子壁負荷를 1MW/m^2 로 하면, 軽水炉의 4~5배 코스트가 된다. 그래서 중성자벽부하를 $3\sim 4\text{MW/m}^2$ 로 취하고 코스트를 경수炉의 2~3배 이내로 억제하려는 설계가 몇 개 행해지고 있다. 그러나 이를 위해서는 $30\sim 80\text{MW}\cdot\text{年}/\text{m}^2$ 의 中性子照射量에 견디는 재료를 개발해야 하는데 현재는 그 전망이 서있지 않다. stainless鋼에서 $10\text{MW}\cdot\text{年}/\text{m}^2$ 를 기대할 수 있는 데이터가 있는 것이 現狀이다.

특별기획

DT 핵융합로의 第1壁은 중성자 뿐만 아니라 plasma와의 相互作用에 의해서 큰 热負荷(벽전면이 고른 热流束이라고 가정할 경우, 중성자벽부하의 약 1/3의 值)와 spattering에 의한 심한 erosion(연간 数mm)이 있고, 磁場密閉 장치에서는 강한 電磁应力이 加해지는 경우가 많다. 이와같은 조건에 견디고, 유도방사능이 적으며 자장밀폐장치에서의 불순물 문제에도 적절한 (数mg의 금속이 混入되어도 plasma는 식고 炉는 정지한다) 재료등이 개발되어 현실적인것이 되리라고 기대되지 않는다. 이들 모두를 만족 시켜주는 재료의 개발에 대한 企劃조차도 되고 있지 않기 때문이다.

中性子照射에 관련된 문제, 즉 재료의 劣化와 유도방사능 문제를 제외하면 모두 plasma 와의相互作用에서 발생하고 있다. 따라서 plasma로부터 流出되어 나오는 粒子를 炉壁에 부딪치지 않게 하고 炉外로 유도하는 方式, 즉 자장밀폐방식에서의 開放端系方式(mirror등)이나 bundle diverter가 붙은 環狀系方式(TOKAMAK 등)에서는 이들 문제를 해결할 수 있는 가능성이 있다. 電磁应力에 관해서는 조용한 起動과 정지를 할 수 있는 定常炉方式이라야 할 것이다.

한편 慣性核融合方式에서는 처음부터 電磁应力이나 불순물 문제는 없다. 超高真空炉心으로 할 필요도 없으므로 비교적 자유로운 第1壁을 조가 고려된다. 즉 액체 lithium의 흐름을 제1벽 앞에 설치하면 plasma粒子 충격에 의한 모든 문제를 제1벽材에 치밀하게 붙이지 않아도

될 것이다.

제1벽재에 관해서는 중성자照射와 관련된 문제에만 한정시켜야 현실성이 있는 재료와 제1벽구조 개발을 착수할 수 있다. 그러나 이 耐中性子照射量의 限界때문에 DT 핵융합로의 炉心部에너지密度를 현저히 향상시키는 것은 곤란하며 나아가서는 핵분열炉보다 몇배나 capital cost가 되는 것은 피할 수 없다.

이상에서 DT 핵융합개발 추진근거에 대해 여러가지 論議를 하였다. 主된 推進근거는 暴走(run-away)사고가 없다는 것, 최악의 사고시라도 핵융합로의 生体에 대한 위험성은 핵분열炉의 1/100이라는 것과 값싸고, 적은 에너지로 lithium을 바다물에서 추출할 수 있다면 연료자원의 제한이 없다는 것 등이 있다.

그러나, 平常運轉時의 放射能廃出, 방사능폐기물 처리, capital cost등은 핵분열炉보다 현저하게 불리하다고 생각된다. 또 当面의 과제로 고속증식로보다 훨씬 곤란한 炉工學 문제, 즉 第1壁과 tritium增殖用 재료 개발, 원격조작기술 개발, tritium 취급기술 개발 등이 있으며 이러한 것들의 해결전망이 수립될 때까지는 충분한 연소를 일으키는 次期장치 건설에 착수할 수 없다. 그러므로 핵융합개발에는 장기간의 踏步상태가 예상된다.

이를 극복하기 위해서는 어떤 개발에 우선순위를 두어 핵융합개발의 隘路나 불리한 점을 해결해 나갈 것인가 하는 등의 여러가지 제안이 있을 수 있다.

投 稿 案 内

- * 内 容 : 원자력 전반에 관한 논문, 정보, 제언, 국제회의참가기, 해외 방문기, 국내외 동정, 수필, 기타
- * 原稿枚数 : 200字 원고지 30枚 内外
(採択된 원고에는 所定의 原稿料를 드립니다)
- * 보 네 곳 : 서울 중앙 사서함 6583호

韓国原子力産業會議編輯室 (28-0163~4)