

앞날의 에너지를 찾아라

——核融合研究의 어제·오늘·내일——

名古屋大學 教授
山本 賢三

核融合爐의 靑寫眞

核融合은 無限히 가까운 에너지의 解放을 向한 科學界의 最大課題中 한가지이다. 언제 어떻게 해서 그것이 人類의 손에 떨어지는가 하는 것은 지금 全世界의 關心을 모으고 있다. 核融合을 찾는 研究가 始作된 以來, 이른바 그와같은 緊張의 連續이 10年을 經過하였다. 그러나 그 움직임은 오히려 드라마틱하였다고 하겠다.

내일을 담당하는 에너지源으로서 이 核融合이 華麗하게 登場한 것은 1955年 8月 제네바에서 開催된 第1回 原子力平和利用 國際會議에서 印度의 故 바야바야博士가 行한 開會演說이었다.

「우리는 이제야 原子核分裂 反應에서 解放되는 原子力에 의해서 世界의 에너지需要를 어느 程度까지 滿足시킬 수가 있다. 歷史的인 時期로 들어서고 있다. 그러나 이러한 時期일수록 原子力時代의 原始時代라고 볼 수 있는 때가 올 것이다.

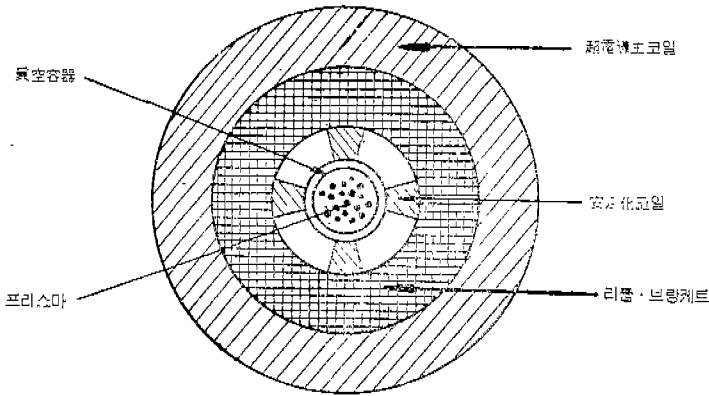
原子力이 原子核의 融合反應에 의해서 얻을 수 있는 것은 水素爆彈에서 볼 수 있는 바와 같으나 이 融合反應에 의한 에너지를 控制하면서 取出하는 方法이 不可能하다고 하는 것과 같은 科學的인 根據도 오늘날이 아니다. 故 엔리코

· 페르미博士에 의하여 原子爐속에서 비로소 原子力이 解放되고 나서 겨우 15年밖에 되지 않는 오늘날 原子力研究의 發展부터 살펴 본다면 앞으로 20年 以內에 人間의 손으로 控制될 融合反應에 의한 에너지解放의 方法이 發見될 것이라고 나는 여기서 豫言한다. …」

그러나 그도 指摘한 바와 같이 “技術的인 困難”은 豫想을 훨씬 上廻하는 커다란 것이었다. 核融合의 主役인 “프라스마”는 처음부터 생각되고 있던 바와 같이 相當히 複雜한 存在였다. 그러나 數年에 걸친 꾸준한 研究는 조금씩 열매를 맺고, 다시 콧트라이트를 받으려 하고 있다.

核融合爐는 J.D. 로우슨氏(하우엘 原子力研究所)의 條件에 대하여 重水素(D_2)와 三重水素(T_2)의 混合가스(Icc當 n個의 密度)를 約 3,000萬°C로 어느 時間(七秒)이 지나면 自立的으로 原子의 核融合反應이 繼續될 可能性이 있다. 그때 $nt = Icc$ 當 10^{14} 秒個가 必要한 高温가스를 잡아 넣는 條件이 된다.

이것에 成功하면 普通의 가스燃機에 比하여 數100萬倍의 에너지가 放出되며, 더욱이 暴走라든가 放射性 재가 나오지 않으므로 安全性이 높다. 여기서 D-T混合가스가 常溫에서 3/100,000 氣壓의 密度라고 하면, 高温으로 維持하는 時間은 0.1秒로 된다. 이 가스 10,000%를 3,000萬°C



〔그림 1〕 予想되는 核融合爐의 断面
(全直徑은 5 m 程度가 될 것이다)

까지 加熱하는데에는 만일 損失이 없다면 불과 4kwh程度의 電力畧밖에는 들지 않는다.(그림 1)

發生되는 에너지는 高速 中性子が 갖고 있으므로 爐壁의 材料에서 減速되어 熱로 되어 마지막으로 發電한다. 燃料의 重水素는 海水 속에서 에너지로 換算해서 年間 10^{20} kw(約 10^{24} kwh)나 된다. 10원을 들여서 4l의 물에서 分離시킬 수 있는 重水素를 核融合에 使用한다면 1,200l의 가스린에 相當하는 에너지를 낸다. 또 三重水素는 天然의으로는 없으므로 爐內에서 나오는 中性子를 리튬(Li^6)에 反應시켜서 自給한다. 리튬은 多分히 100萬年分 程度는 地球에 있다고 豫想된다.

그리고 溫度를 10倍, nt를 100倍로 올리면 三重水素가 없더라도 核融合이 일어나므로 그렇게 되면 資源의으로는 더한층 좋아질 것이다.

에너지는 無限인가

그래서 現在, 人類는 電力으로 換算해서 年間 約 50億kw(5×10^{13} kwh)를 消費하며, 그것은 每年 數퍼센트의 比率로 增加하고 있다. 그러면 人類의 에너지需要는 無限히 增加해 나갈 것인가. 여기에 對答하려면 우리 地球의 溫度는 어떤 것에 依해서 決定되어 있는가를 먼저 생각하지 않으면 안된다.

地球는 太陽으로부터 끊임없이 에너지(每年 約 4×10^{17} kwh)를 받고 있는데, 한편 에너지를

宇宙로 放出(熱放射 로써) 하고 있다. 이 兩者의 均衡에서 지금의 地球溫度가 定해져 있다. 人類의 地上에서의 에너지消費가 增加되면 太陽으로부터의 에너지 流入率과 에너지消費率과의 合計와 熱放射率이 均衡을 이룰 때까지 溫度가 上昇하여 어느 一定한 溫度에서 밸런스가 된다.

地球의 溫度가 上昇되었을 때, 먼저 問題가 되는 것은 南北兩極의 얼음이 녹아서 海面의 水位가 높아지는 것이다. 이런 것에서 지금의 에너지消費량의 約100倍, 즉 年間 5×10^{15} kwh가 限度일 것이라고 한다.

이때 地球의 平均氣溫은 約 1°C 程度가 上昇되어 海面은 30m程度 높아진다고 評價되고 있다. 그렇게 된다면 海岸都市의 大部分의 빌딩은 바다속으로 잠길 것이다. 海上輸送으로 인하여 發展되고 있는 現在의 이른바 文明國의 都市群은 커다란 變革을 받게 될 것이다.

封入과 加熱

그러면 高溫가스는 約 10^6 °C를 超過하면 分子·原子는 모두 正電荷의 이온과 負電荷의 電子로 分離(電離)되어 이른바 프라스마狀態가 된다. 프라스마는 電導性氣體이므로 加熱하거나 壁에서 떨어진 眞空속에 封入해 두는 데에도 여러가지의 수단을 강구해야 한다.

프라스마의 한개 한개의 粒子인 正이온과 電子에 눈을 돌린다면 그들은 프라스마의 溫度에 相當한 速度로 熱運動을 하고 있다. 이때 1V로 荷電粒子를 加速하였을 때의 速度가 約 10,000°K일 때의 平均 熱運動速度가 되므로 1電子볼트(eV)는 約 10,000°K(°K는 絕對溫度)라고 하는 換算이 흔히 使用된다.

磁界속에 프라스마를 넣으면 正이온과 電子와 함께 각각 磁力線에 감긴 熱運動이 되어 그대로는 磁力線을 가로지르는 方向으로 逃亡할 수는

었다.

만일 플라즈마의 밀도가 높으면 粒子間에서 衝突이 일어나므로 그때 튀어나온 粒子는 다른 磁力線으로 옮겨가며, 그렇게 해서 조금씩 가로 方向으로 擴散된다. 그러나 磁界를 強하게 하면 衝突이 있더라도 實質적으로 그 擴散은 억제된다.

다시 말하면 磁界는 플라즈마의 散逸을 억제하는 壓力을 말한다. 예를 들면 3/100,000氣壓의 가스를 3,000萬°C로 데우면 3氣壓이 되지만 여기에 匹敵하는 磁界는 約 9,000가우스(0.9 웨버/m²: 磁氣誘導의 cgs電磁單位이며, 예를 들면 地磁氣는 0.5가우스, 타이프라이터의 原稿를 누르는 磁鋼製의 스토퍼 表面에서 0.5mm되는 곳은 約 1,000가우스의 強度가 되므로 이 이상의 強力한 磁界에 의해서 늘려 둔다.

이것은 플라즈마가 特殊한 형태의 磁力線으로 만들어진 이른바 磁氣 핀에 의해서 유지되는 것을 意味한다. 磁氣핀은 磁力線의 兩端이 열려 있는 開磁路型和 닫혀있는 閉磁路型으로 分類된다.

前者를 代表하는 밀러나 카스프는 磁力線에 따른 方向으로는 플라즈마가 逃亡할 수 있으나 兩端의 磁界가 強하고 빠져 나가기 어렵기 때문에 느슨한 마개로 조여져 있다고 볼 수 있다. 그러나 速度가 거의 軸方向의 成分만을 갖는 電子·이온은 自由롭게 빠져나갈 수 있다. 이러한 型은 그와같은 漏洩 때문에 核融合爐에 適合한가 하는 것을 아직 判斷할 수가 없으나 만들기가 쉬우므로 高温플라즈마의 發生裝置로서 數많은 建設되어 豊富한 데이터를 提供하고 있다.

한편 閉路型은 原理적으로는 漏洩이 없는 셈이지만 이 형태 특유의 不安定性이 역시 漏洩이 생기는 原因이 되어 있으므로 高温플라즈마 發生用으로서 우수한 磁氣 핀이라고는 斷定하기 어렵다. 加熱하려면 磁氣 핀 속에 미리 가스를 채우고, 그 溫度를 차차 높여가는 方法과 眞空 容器속에 高에너지(KeV級 以上)로 加速한 이온, 플라즈마, 中性粒子, 電子를 注入하고 그

속에서 熱플라즈마로 바꾸는 入射方式이 있다.

前者에서는 電流의 주열熱에 의한 作用, 磁界에 의한 斷熱壓縮, 衝擊波, 高周波에 의한 이온 사이크론共鳴, 마이크로波에 의한 電子사이크론共鳴 등이 使用된다.

磁氣 핀과 加熱法의 結合으로 多種多様な 高温플라즈마의 發生裝置를 생각하게 된다. 最近 中·小型이 各國別로 多數 建設되어, 各各의 特有한 플라즈마의 동작이 研究되고 있다.

深遠한 플라즈마의 行動

1958年 제네바에서의 第2回「原子力 平和利用 國際會議」에서 처음으로 美國·소련·英國은 그 前부터 秘密에 부치고 있던 研究를 公開하여 이미 數億원에서 數10億원級 大型機의 建設이 進行되고 있으며, 中·小型機에 의한 데이터가 發表되었다.

그 當時에는 比較적 樂觀的이며 爐의 原型에 가까운 것을 머리 속에 그리고 있었다. 그때까지 알려진 플라즈마의 性質은 單純했으므로 閉入磁界나 加熱이나 現在 갖고 있는 技術로서도 可能的한 範圍에 있다고 想定하고 있었기 때문이다.

그러나 1961年 잘스브르크(오스트리아)에서의 「核融合 國際會議」에서는 그것이 얼마나 困難한 것인가를 생각하게 되어 “우리는 지금 天國과 煉獄”사이를 방황하고 있다는 말로서 會議를 끝 맺었다.

磁界속의 高温플라즈마는 實驗해 보면 實로 여러가지 原因에 의한 不安定性이 있다는 것을 알고, 그것을 克服하는 方法을 全部 찾아낼 수 있을까 하는 것은 到底히 保證할 수가 없다. 不安定한 振動이 일어나면 高温플라즈마는 壁에 부딪쳐, 거기에서 壁材料나 壁表面의 吸着物質이 蒸發하여 다시 플라즈마로 되돌아가면 심한 放射를 일으켜서 플라즈마를 冷却시킨다는 現象에 고민하였다.

가장 強烈하고 破壞速度가 높은 것은 縱溝型(프루트 또는 交換型)인데 不安定性에서 플라즈

마의 일부가 부풀으면 그곳에서 정이온과 電子가 각각 反對方向으로 移動하여 쿠론의 電界가 發生한다. 그것과 磁界와의 相互作用으로 이들 粒子는 兩界를 向하여 直角方向으로 轉다. 그 結果 부풀음은 磁力線을 따라서 傳播되어 프라스마에 홀을 만들고, 그 變形은 急速히 成長해서 프라스마形狀을 破壞한다. 또 프라스마는 粒子와 流體와 中間의인 性質로서 粒子의 集團에 의해서 일어나는 複雜한, 이른바 協同現象을 일으키는 結果로서 극히 微細한 不安定度도 수반된다.

이와 같은 프라스마의 性質이 明確하게 나온 것은 프라스마物理學의 未熟함을 드러냈다고도 할 수 있는 것으로서 그 以後의 研究方針이 高溫프라스마 物理學으로 傾斜하는 轉期가 되었다.

그러나 結果로서 當時의 데이터(θ) 핀치로 $nt = 10^{10} \sim 10^{12}$, $T = 500 \sim 4,0000$ 萬°C(0.5~4KeV)가 얻어졌다. 概略의으로 말하면 壁에서 떨어져서 그와 같은 프라스마가 된 것은 역시 着實한 進歩의 段階를 밟고 있었다고 하겠다.

1964年 第3回 제네브會議에서의 核融合部門은 地域別 代表者의 總合報告가 있었을 뿐이다. 그 間의 進歩를 整理해 보면 總合判定指數 $T-nt$ 에서는 D-T反應으로 約 2桁까지 좁혀지고 있다. 그러나 이데로의 比例擴張으로, 예를 들면 裝置의 크기를 100倍로 한다는 것은 現實의으로 是 困難하다.

예를 들면 大型 데이터 핀치는 電源콘덴서가 數에가주울로 만들어진 프라스마는 數 10cc의 體積에 지나지 않는다. 臆라고 하더라도 $10m^3$ 이상을 豫想할 수 있는 것과 比한다면 아직도 새로운 着想의 不足을 느낀다. 그러니까 進歩는 빠르다고도 할 수 있고, 늦다고도 할 수가 있다.

美國의 오우크리치研究所에 있는 DCX-1은 1958年以來의 大型裝置에서 우수한 技術과 오랜 歲月의 運轉經驗과 改造能力을 갖고 있다고 하더라도 1週間의 實際 作動時間은 10時間이므로 普通 2週間으로 끝마치는 實驗이 이런 경우 1年이나 걸린다. 이러한 高溫프라스마裝置에 의한 實驗의 특수한 性格이 理解된다면 이 速度도 특

히 停滯될 것이라고 보아서는 안된다.

그러면 이 時期에서는 밀러磁界의 縱溝型 不安定性은 深刻한 問題였으나 實驗은 理論值보다 1,000倍나 安定된 結果를 냈다. 한편 硬心핀치는 磁氣流體의으로는 絶對로 安定하다고 믿어 왔었다. 그러나 悲劇의인 破壞가 發生하여 이것은 프라스마의 電導度가 無限大는 아니기 때문에 抵抗安定性이 歴倒의으로 크다는 것을 알았다. 그리고 또 카스프는 프라스마의 바깥쪽으로 부터 凸面의 磁界에서 억제하기 위하여 安定性이 保證되어 있었으나 링形의 카스프 구멍으로 부터의 프라스마의 流出이 크고, 磁氣 핀으로서의 有用度가 確立되지 않았다.

가장 完備된 磁氣 핀이라고 할 수 있는 프린스턴大學의 스틸라베다 C는 實際로 作動하고 나서부터 3年이었으나 原因不明의 異常擴散 損失이 일어나 約 200萬°C 程度의 實驗에 멈추어 있었다. 그러나 이것으로 人力에너지가 어디로 없어지고 있었는가를 完全히 追究할 수 있었다는 것은 훌륭한 일이었다. 이렇게 全般的으로 理論에 의한 豫測의 實驗으로 차베차레 무너져 갔다는 것은 앞날이 어둡다고 보는 사람도 있는 反面에 더욱 飛躍하는 前夜라고 느끼게 하였다.

이들 中에서 소련의 吳페가 찰스브르크會議에서 發表한 極小磁界裝置는 보다 치밀한 實驗으로 그 威力를 誇示하였다. 이 磁氣 핀은 프라스마가 存在하는 中心領域이 0이 아닌 磁界이며, 그 위에 바깥쪽으로 감에 따라 磁界의 強度가 증가해 간다. 이른바 磁界의 筒 밑에 프라스마를 安置시키는 方法이다.

製作法은 밀러와 카스프의 複合型이며, 密度가 낮은 프라스마에서는 安定되고 異常擴散으로 인한 流出이 없었다. 이것은 약간 進歩를 보였던 閉入問題에 또 몇가지의 手段이 있다는 것을 示唆하고 있다는 點에서 극히 重要한 意義가 있다고 하겠다.

칼람會議을 끝으로

이 會議은 國際原子力機構(IAEA)의 主催로

英國의 옥스포드에서 가까운 칼립研究所에서 開催되었다. 會議에서의 特色은 먼저 理論家가 核融合(프라스마) 制御에 대하여 밝은 展望을 갖고 왔다는 것을 들 수가 있겠다.

또 實驗에서의 特色으로서는 複雜怪奇한 프라스마의 작용에 고민하던 實驗이 겨우 손아귀에 들어 왔다는 것이다. 스텔라 레더 C의 異常擴散原因으로서 몇가지의 理論的 豫測이 樹立되고, 그에 따라서 實驗은 磁界精度의 向上, 프라스마 密度, 溫度, 加熱方式의 영향 등에 따라서 精力的으로 研究가 이루어져 微視的인 性質에 基本을 둔 두種類의 不安定性인 것이라는 곳까지 따라가서 몇가지의 對策을 研究하게 되었다.

또 縱溝型和 같은 커다란 不安性은 옷페의 極小磁界로 完全히 除去할 수 있다는 것을 알았다. 그러나 直線型的 極小磁界에서는 磁力線에 따라서 軸方向으로의 端損失이라는 것이 있다. 이것을 除去하려면 端이 없는 토러스形으로 하는 것으로서 逃亡하게 된다. 다만, 이온은 磁力線을 따라서 토우러스의 圓圈을 運動함으로써 局部的으로는 極小磁界가 되지 못한다. 그러나 토우러스 全周를 平均하면 極小磁界로 할 수가 있으며, 더욱이 그것은 安定性에 有効하다는 것을 알았으므로 現在 各國에서는 그 方法의 確立을 서두르고 있다.

極小磁界로서 特殊한 構造의 것으로는 베이스볼·시임(英國에서는 테니스볼·시임이라고 한다)이 있다.

여기서 技術的인 關聯에 대하여 잠깐 설명하겠다. 高溫프라스마裝置에서는 電荷의 交換損失이 처음부터 最終的인 核融合爐에 까지 따라 다

닌다. 극히 微量의 殘留·中性가스가 있으면 프라스마의 高速이온과 衝突하여 電荷를 交換해서 高速中性原子가 發生한다. 그러려면 磁界의 閉入이 되지 않으므로 튀어 나와서 容器의 壁을 두들겨 차가운 가스·蒸氣를 放出하여, 그것이 프라스마 속으로 되돌아 오므로서 放射冷却과 電荷交換이라는 악순환을 초래한다. 大型의 超高眞空 容器로 할 것과 表面의 가스放出 防止對策이 어떻게 하던지 必要하게 된다.

加熱方法으로서 最近에 發展된 레이저의 巨大한 퍼얼스가 注目된다. 이것은 이탈리아·美國·소련·英國·프랑스·西獨 등에서 進行되고 있는데 現在 可能한 最大出力 1,000MW의 레이저光 퍼얼스를 렌즈로 直徑 0.1mm程度로 조여서 眞空容器 속에 固體水素의 微小片(直徑 10~30 마이크로)을 落下시켜서 그것에 쏜다. 그렇게 하면 固體水素는 氣化되어 프라스마가 되어 加熱되면서 膨張한다. 그러나 大部分 散逸되지 않는 가운데 레이저光을 모두 吸收하여, 100萬°C 정도가 된다. 不純物이 들어가지 않는 高密度, 高溫度프라스마發生法으로서 有用하다.

磁界를 만드는 코일은 大型機가 됨에 따라서 大量의 銅과 電力이 있는 위에 磁界의 不均一性이나 非對稱性이 1/10,000정도라도 있으면 프라스마가 드리프트散逸을 일으키므로 精密化라고 하는 커다란 條件을 수반한다.

高溫프라스마의 診斷(測定)은 아직도 알맞은 手段에 不過하며, 密度나 溫度의 測定은 別로 精度가 좋지않은 狀態이다. 앞으로는 차차 새로운 方法이 發見될 것으로 期待된다.