정지시켜서는 안된다고 지시되고 있다고 同紙는 비판하고 있다.

이 문제에 대해서는 물론 材質도 밀접하게 관련되어 있다. 문제의 많은 부분이 압력용기를 구성하는 鋼板의 용접部位에 있다. 그 곳은 용접할때 銅이나 燐등의 불순물이 혼입되기 쉽다. 따라서 미국이나 일본등에서는 지금까지 불순물의 존재를 감소시키는 노력이 취해져 왔다. (일본의 경우 원자로鋼材의 성분에 銅이 들어갈 余地가 적고 또 불순물혼입의 규제도 엄해서 미국과 동등하게 論할 수 없다는 일본사람의 의견도 있다) 이 곳에 작은 균열이 생겨 있어도 ISI (供用期間中検査)에서는 발견이 곤란하다는 점도 이 문제를 더욱 어렵게 만들고 있다.

NRC의 앞으로의 対応

NRC는 이러한 문제에 대처하기 위해 신규의 원자로에서는 엄한 기준을 설정하고 있다. 압력용기는 40년수명에서 内壁의 限界온도가 260°F (127℃)이상 상승해서는 안된다는 것이다. 또한 NRC는 몇가지의 追加요구를 고려하고 있다고 한다. 즉 炉心의 外周의 照射를 감소시키기 위한 核연료의 재배치, 저온에서의 再加圧을 방지하기 위한 自動制禦系의 변경, 또는 炉心을 꺼내 재료를 처리하는 등 새로운 계획도 검토되고 있는것 같다. 同時에 전력회사에 대해서 문제해결을 위한 활동과 계획의 지시를 요구하며 운전을 유지하기위한 分析도 요구하고 있다.

美国에서의 앞으로의 推移가 매우 걱정되므로 우리나라도 이에 대한 対応이 필요하게 될지도 모른다.

〔参考〕 NRC의 規制値는 試験炉를 사용해서 얻어진 計算式에 따른 것으로 생각되는데, 이 이외에도 실제의 플랜트를 사용해서 얻어진 경험적인 계산식과 ASTM (미국재료시험학회) 이 준비하고 있는 계산식등이 있다. 또, WH 社와 B&W社도 未公開이기는 하나 独自의 계산식을 가지고 있다고 하며 電力側의 NRC에 대한 反論의 근거의 하나가 試験炉의 경우와 実原子炉의 경우에서 얻어지는 데이타에 相異가 있다고 하는 점이다.

核融合의 未來像

美国의 「Star Fire」

최근 몇년동안 핵융합 연구개발은 눈부시게 진전되어 핵융합반응의 臨界Plasma조건이 1980년대 후반에 실현될 것이 거의 확실하다.

또한 핵융합로 개념의 연구가 진척되어 핵융합炉를 건설할때의 기술·공학상의 문제에 대한 이해도 깊어졌으며 이들을 현실적으로 생각할 수 있게 되었다. 이러한 시기에 미국에서 행해진 TOKAMAK방식을 사용한 핵융합商業炉에관한 종합적인 개념설계연구가 Star Fire 계획이다.

設計에는 電力会社도 参加

Star Fire계획은 미국 에너지省의 위탁연구로 18개월의 기간과 300만달러의 경비를 소비하여 1980년 10월에 종료되었으며 그 성과는 다음의 핵융합原型炉의 개념설계연구(1982년에 끝날 예정)에 인계된다.

Star Fire의 직접 설계작업은 알곤느 국립연구소, 막다넬 더그러스社, 제네랄 일렉트릭社 및 걸프M·피손즈社가 담당하며 그 외에 대학,국립연구기관, 민간기업, 전기사업자등의 설계팀이

참가하고 있다.

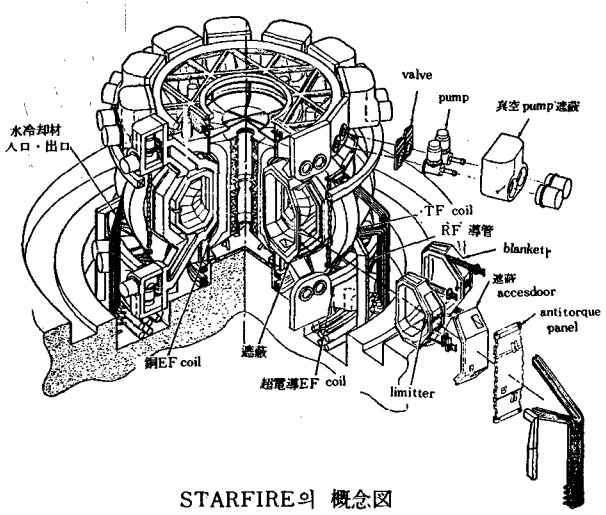
여기서 주목되는 것은 전기사업자가 자문 그룹으로 참가하고 있는 것으로 電力연구소(EPRI), 유니온 일렉트릭社, 듀크 파워社 등에서 6명의 전문가가 User의 입장에서 상업핵융합炉에 대한 요망, 설계, 라이센스 등에 관하여 권고를 하고 있다.

電気出力은 120만kw로 想定

핵융합로가 상업적으로 매력이 있는가에 대한 중요한 판단기준으로 ①경제성 ②炉의 簡素化 ③安全性 ④환경영향 등이 있다. Star Fire설계에 이들 기준이 만족되도록 최대한의 연구가 되고 있다.

여기서 주의할 것은 이론적 혹은 실험적으로 가능한 指示·証拠가 있는것에 대해서는 이들을 Star Fire의 설계에 채택했다는 점이다. 즉 Star Fire는 현시점에서 이상적인 核融合炉로서 검토된 것이다.

그리고 Star Fire는 광범위한 연구개발과 初期炉의 운전경험으로 부터 풍부한 성과가 반영되도록 10基째에 건설되는 상업핵융합로라고 가정하여 설계되고 있다. 실제로 핵융합 상업로가 운전을 시작하는 것은 2020년경이라고 보고 있다.



STARFIRE의 概念図

Star Fire의 炉전체 개념도와 主要緒元을 그림과 표로 표시하였다. 각 제원은 물리와 공학기술의 制約下에서 코스트가 최소가 되도록 system analysis를 행한 결과 계산된 것이다. 炉는 熱出力 400만kw, 正味電気出力 120만kw, 가동율 75%로서 그 특징은 ①重水素－3중수소－lithium의 연료 cycle ②定常운전 ③ 다이버터 없이 不純物과 재(灰) 제거 ④加圧水에 의한냉각 등이다.

STAR FIRE의 主要諸元

熱出力	4,000MW
正味電気出力	1,200MW
稼動率	75%
中性子壁負荷	3.6MW/m²
plasma 主半径	7.0m
plasma 副半径(横)	1.94m
plasma 非円形度	1.6
plasma 電流	10.1MA
beta 値	6.7%
toroidal 磁場(軸上)	5.8T
toroidal 磁場(最大)	11.1T
toroidal磁場coil 数	12個
plasma 燃焼形態	連続燃焼
電流駆動	高周波(LHW)
plasma 加熱	高周波
toroidal磁場coil材料	Nb_3Sn/NbTi/Cu/SS
blanket構造材料	PCA(SS)
blanket 冷却材	加圧水
不純物制禦	limitter 真空 pump
tritium 増殖材	$LiAlO_2$(固体)
tritium 増殖比	>1

이중에서 가장 큰 특징은 定常運転이다. 変流器coil 로 plasma 電流를 유지하는 지금까지의 방법으로는 TOKAMAK炉는 pulse운전을 할 수 밖에 없었으나 Star Fire에서는 高周波(RF)에 의한 電流유지방법을 채택해서 정상운전을 도모하고 있다.

不純物제어와 재(灰) (중수소－3중수소 반응에서 생긴 helium) 제거법으로는 지금까지의 많은 炉設計中 현시점에서 가장 확실에 가까운 방

법으로 통상 다이버터를 채택하고 있는데 이 방법은 炉의 구조를 복잡하게 하는 결점을 가지고 있다. Star Fire에서는 다이버터를 사용하지 않고 단순한 limitter방식을 채택하고 있다.

高周波에 의해 定常運転을 実現

Star Fire炉는 10.1메가 암페어의 plasma 전류를 駆動하는데 1.4메가 헬쯔, 63메가 와트의 고주파를 사용해서 정상운전을 한다.

정상운전으로 plant의 資本費 감소와 가동율 향상이 가능해진다.

자본비 절약은 ①熱장치가 不要 ② 電源이 대폭적으로 감소 ③ (許容中性子壁負荷를 높일 수 있으므로) 炉의 크기가 감소 ④중간냉각pool의 필요성 감소등에 의한다. 한편 가동율의 향상은 ①component및 system의 신뢰성이 증대 ② 第1壁으로 材料疲労가 없어진다. ③plasma disruption의 발생빈도 감소 등에 의해서 이다.

또 Star Fire에는 変流器coil이 불필요하며 平衡coil의 外置가 간소화된다. plasma 加熱과 電流駆動의 2중목적을 가진 低域 hybrid의 고주파 system도 炉의 설계 간소화에 기여하고 있다. plasma의 개시 및 起動에 따른 문제는 電子cyclotron共鳴加熱(ECRH)을 사용하므로 경감된다.

不純物制御에 limitter方式을 採択

불순물의 제어와 재(灰)의 제거를 위해 사용되는 limitter는 plasma 가까이에 놓여지는 突起物인데 plasma中에 생긴 재는 이 limitter의 뒷쪽에 모이며 背後의 duct를 통해 真空系로 排気된다. limitter를 그대로 두면 熱負荷가 엄해지므로 불순물(예컨데 沃素)을 소량 注入하여 plasma의 주변온도를 내리도록 연구되고 있다.

limitter/真空 system의 利点으로는 ①magnet가 不要(다이버터式에서는 필요) ②근접 및 増殖 blanket 공간에 대한 영향이 적다. ③방사선의 Streaming 문제가 대폭적으로 경감된다. ④limitter 표면적이 비교적 크므로 熱負荷가 조절된다 등을 들수 있다.

安全性과 環境問題에 最大의 考慮

Star Fire 설계에서 가장 노력이 경주된 부문은 안전성과 환경문제에 대해서이다.

tritium増殖材로는 内蔵化学energy를 최소로 하기 위해 액체 lithium 대신에 고체 lithium을 선택하였다.

limitter/真空system은 tritium의 연소 효율을 높이도록 설계되어 있으므로 真空系와 연료系의 tritium inventry가 감소되고 있다. 또한 炉의 설계에는 多重의 장벽(barrier)으로 tritium을 밀폐하도록 되어 있어 tritium이 방출될 가능성을 최소화시키고 있다.

遠隔保守 운전을 광범위하게 채택해서 차폐를 충분히 하여 종업원의 방사선피폭을 극력 억제하도록 배려되어 있다.

高速停止기구와 보조냉각system이 설계에 들어 있다. 第1壁과 limitter에는 beryllium coating이 되어 있으며 이로서 금속의 온도가 약 900℃에 도달하면 plasma 燃焼를 끝나게 하는 固有의 안전특징을 가지고 있다. 계산결과에 의하면 제1벽의 hot spot가 10% 되면 炉는 1초이내에 자동적으로 정지되고 이때 제1벽의 coating 일부가 溶発하는 이외에는 큰 손상이 일어나지 않는것이 명백해지고 있다.

炉의 구조는 12개의 超電導 toroidal磁場(TF) coil과 그 外側에 12개의 초전도 poroidal 磁場(EF와 OH)이 배치되어 있다. 炉保守를 위한 접근을 용이하게 하고 또한 plasma의 제어에 필요한 応答시간을 주기 위해 TF Coil의 내측, 차폐의 외측에 놓여져 있다.

磁場system과 차폐는 정상 운전조건하에서 40년의 수명동안 그대로 사용할 수 있는데 만일의 경우에 대비해서 교환할 수 있도록 배치하였다. 그러나 limitter와 고주파導管을 포함한 blanket부분은 6년마다, 진공펌프와 隔離真空valve는 2년마다 교환할 필요가 있다.

運転初年의 発電 코스트 比較
(燃料費上昇=年4%의 인플레率)

運転初年	核融合	核分裂	石炭火力
1990年	74	62	69
2000年	74	69	82
2010年	75	80	101
2020年	75	96	129

現在 建設可能하면 비용은 24억 달러

Star Fire 설계에서 가정한것 처럼 핵융합산업이 이미 확립되어 있다고 생각 했을 경우, 상업핵융합炉의 자본費는 1980년 달러가격으로 24억달러이다. 전기출력이 120만kw이므로 1kw 당의 자본비는 2천달러가 된다. 또 발전코스트는 35mill/kwH이다.(이중 연료비는 전체의 1%이하인 0.04mill/kwH)

이들 코스트는 현시점에서 軽水炉나 석탄화력발전소보다 비싼편이다. 그러나 핵융합의 경우 연료비의 비율이 무시되는데 비해 석탄화력이나 경수로의 경우 연료비의 에스커레이션이 크게 영향을 받으므로 장래 핵융합은 発電市場에서 석탄이나 경수로와 競合하게 될 것이다.

地下式原子力 発電所의 青寫眞

우리나라는 全国土의 대부분이 山岳地形 이어서 平地의 토지이용이 高度化되어있기 때문에 居住可能地의 人口密度는 세계수준을 훨씬 초과하고 있다. 이로인해 장래에는 原電立地도 현재의 조건으로는 점점 어려워지지 않을까하는 우려도 있다. 原電의 새로운 立地로 어떤 方式이 고려되고, 그 경제성은 어떤지 外国의 例로 알아보겠다.

経済性과 技術的으로 建設可能

우리나라의 거주가능지의 인구밀도는 세계수준을 훨씬 넘고 있다.

이러한 상황속에서 원자력발전소의 適地를 얻는다는 것은 점점 어려워질 것이다. 특히 장기적 목표를 달성하기 위해 앞으로 많은 原電의 立地를 확보할 필요가 있음을 고려할때 原電立地地点을 확보하기 위한 制約이 점점 높아질 것이다.

이와같이 원자력발전 개발에 따르는 中·長期 立地문제에 対処하기 위해 立地선택幅 拡大와 用地의 효율적이용 등을 도모하는 관점에서 새로운 立地方式을 추진하고 우리나라의 원자력발전소 立地에 새로운 局面을 검토해 보는것도 의의가 있을 것이다.

이러한 상황에서 地下式원자력발전소는 다음과 같은 利点이 기대된다.

1. 넓은 平坦한 토지를 필요로 하지않기 때문에 해안까지 山이 뻗어있어서 地上式으로는 건설이 어려운 지형에서도 건설이 가능하며 立地選択의 폭이 拡大된다.

2. 国立公園内에 건설하여도 景観을 거의 해치지 않는다.

3. 地下空洞内의 周辺岩盤 때문에 방사선 차폐효과 및 방사성물질의 格納효과가 기대되며 또한 사고시 空洞内圧을 岩盤에서 지탱할 수 있어서 地上式의 격납용기를 꼭 필요로 하지 않는 설계로 할 가능성도 있다.