

核融合 次期裝置의 先進國 動向

1985년4월8일, 日本原子力研究所는 JT-60의 first plasma發生에 성공했다. 이 실험에 성공함으로써 科學的實証의 마지막 단계를 맞이하게 되었고 동시에 工學的實証을 위한 次期裝置의 設計를 추진해야될 시기가 되었음을 뜻한다. 이 轉換點에서 과거 核融合開發에 발자취를 뒤돌아보고 현재 計劃이 진행되고 있는 次期裝置의 최근 동향을 '85년3월 ANS主催의 第6回 核融合에너지技術에 관한 topical meeting을 중심으로 정리해 보았다.

'85년4월8일 15시 5분 日本原子力研究所의 J-T-60은 first plasma發生에 성공했다. 따라서 日本은 美國의 TFTR, EC의 JET에 이어 3번째의 대형 토카마크爐를 갖게 되었고 '86년에는 소련도 T-15를 완성하리라고 생각되므로 앞으로 이들 4대 토카마크爐의 臨界플라즈마달성을 향한 각국의 각축이 주목된다.

지난 '85년3월3일부터 7일까지 美國 샌프란시스코에서 「臨界플라즈마달성과 그후(Breakeven and Beyond)」라는 주제하에 美國原子力學會(ANS) 主催로 第6回 核融合에너지技術에 관한 topical meeting이 열렸다. 그후 3월11일부터 19일에 걸쳐 日原研이 추진하고 있는 高熱負荷材料와 그 構成에 관한 美·日워크샵이 美國선더연구소를 중심으로 개최되었다. 이 會議에서는 앞으로 더욱 중요해질 核融合次期裝置에 대해 국내 및 국외의 동향에 대해 토의되었다.

I. 核融合에너지 利用實現

가벼운 原子核이 核融合反應을 일으키면 막대한 에너지를 방출하는 우라늄 등의 核分裂 발견 이전부터 알려져 있었으며, 1930년대에는 이

미 이와같은 原子核反應의 기초실험이 개시되어 있었다. 문제는 이와같은 核融合反應을 어떠한 수단으로 일으키는가를 해명하고 제어된 核融合反應을 발견하는데 있었다. 오늘날까지의 이와같은 발전의 각 연대별 특징은 다음과 같다.

1930年代: 핵융합반응연구의 시기이며, 그 특성이 조사되었다.

1940年代: 핵융합반응으로서 重水素(D)-트리튬(T), 트리튬(T)-트리튬(T)이 선정되었다. 核分裂爐의 발전에 의해 천연에 없는 트리튬의 대량생산이 가능해졌으며, 우라늄원폭에 의해 핵융합반응을 일으키는 온도조건을 만들어낼 수가 있어서 水爆完成의 기본이 되기도 했다.

1950年代: 핵융합반응의 평화이용을 목적으로 여러가지 개념이 발표되고 기초실험이 실시되었다. 1958년의 제2회 쥘네브 회의에서의 의장 바어버 박사(인도)의 핵융합에너지 평화이용에 대한 연설은 그 후의 연구개발에 매우 큰 자극제가 되었다. 이때 이미 플라즈마의 磁場密閉, 加速이온충돌, 中子間觸媒D-T反應 등의 여러 개념이 생겼다.

1960年代 : 플라즈마의 磁場密閉에 대해 Ioffe(소련)는 極小磁場(minimum bar)理論을 발표하여 플라즈마의 磁場密閉에 대한 기초를 확립했다. 소련의 Kurchatov研究所에서 研究中인 토카마크型 密閉方式이 이 시점에서는 가장 유망하다는 것을 알게 되었다. 그의 安定플라즈마를 만드는 磁場密閉方式으로서 開放端型이 진전을 보였고, 새로운 개념으로서 heliotron, bumpy torus, reverse field pinch, cusp 등의 기초연구가 시작되었다. 또한 慣性密閉方式인 laser核融合研究도 시작되었다.

1970年代 : 토카마크型에 대해서는 PLT(美國), T-10(소련) 등의 중규모 토카마크 운전에 의해 플라즈마密閉에 대한 자신이 생겨 臨界플라즈마조건을 겨누는 대형토카마크의 건설에 착수할 수 있었다. TFTR(美國), JET(EC), JT-60(日本), T-15(소련)이 오늘날 말하는 세계의 4대 토카마크이다.

한편 1970년 전반에는 큰 에너지위기인 오일 쇼크를 만나 핵융합에너지 이용의 필요성이 原子力과 함께 절실히 인식되었다. 그리고 1970년의 후반에는 이때까지의 고도성장에서 안정 성장으로 바뀌게 되어 국가재정은 적자에 시달리는 상황하에 놓이게 되었으며, 이는 1980년대의 핵융합로 개발의 큰 제약조건이 되어 독자 노선과는 따로 국제노선과의 조정이 요구되는 출발점이 되기도 했다.

또한, 토카마크로에 이어 밀러, 레이저의 위치가 명확해졌다.

1980年代 : 4대 토카마크가 차례로 완성되고 실험이 개시되어 순조롭게 진행된다면 80年代末에는 플라즈마溫度 約1億度, 플라즈마密度×密閉時間은 約 $10^{14}n \cdot sec/cm^3$ 의 臨界플라즈마조건이 달성될 것이다. 현재까지 TFTR, JET, JT-60 모두 기본적으로는 예상한대로 진행되고 있으며, NBI 및 RF加熱裝置의 設置가 남아있다. 빠르면 1986년, 늦으면 1987년에는 臨界플라즈

마조건을 달성할 수 있도록 각국 모두 노력하고 있으며, 이 4대 토카마크로에 대한 次期裝置設計가 진행되어 1990년대 초기에 건설을 목표로 관련되는 연구개발, 특히 爐工學面에서의 연구개발이 추진될 것으로 기대되고 있다.

EC와 日本은 현재 대형토카마크에 전력을 투구하고 있고 美國은 대형mirror爐 MFTF-B의 건설이 진행되고 있는데, 1988년 부터는 실험을 개시할 예정이다. 또한 레이저爐에서는 세계최대의 NOVA가 완성되어 1985년4월에 운전을 개시했다. 이들 MFTF-B, NOVA에 대해서도 80년대말 또는 90년대초에는 臨界플라즈마조건에 가까워질 전망이다.

이상에서 기술한 1930년대부터 시작한 核融合에너지利用의 科學的實証이 비로소 최종단계에 들어가고 있다. 1970년대에서 시작해서 1980년대에 들어와 더욱이 중요해진 工學的實証을 위한 연구개발이 1985년 이후 2000년에 이르는 주요과제가 되는 것은 틀림없다. 이 工學的實証에 들어가는 최초의 장치가 次期裝置이며, 2000년까지는 적어도 自己點火條件(플라즈마溫度 約2億度, 密度×密閉時間 約 $2 \times 10^{14}n \cdot sec/cm^3$ 을 달성하는 것을 목표로 하고 있다. 그러나 核融合에너지를 動力으로서 이용하는데는 動力플랜트로서의 實証이 필요하며 경제성, 신뢰성, 환경안전성을 확립해야만 한다.

II. 核融合次期裝置

앞에서도 말한 것처럼 현세대는 科學的實証을 끝마치고 工學的實証에 들어갈 시기에 와있다. 이 전환기를 맞이하여 次期裝置를 겨누는 설계연구 또는 연구개발이 美國, EC, 日本, 소련의 4국 및 IAEA에서 실시되고 있으며, 工學的實証과 次期裝置와의 관계에 대해서는 여러 가지로 의론되어 왔다. 表1에 科學的實証, 工學的實証 및 動力的實証의 3가지단계의 주요특성을 나타냈다.

(表 1) 主要實證項目

科學的實證	工學的實證	動力的實證
臨界플라즈마條件	自己點火條件	定常運轉條件
플라즈마密閉	準定常플라즈마	經濟性
不純物制御	高β플라즈마	信賴性
플라즈마加熱	爐工學試驗	環境安全性
	材料試驗	

次期裝置에 관해서는 다음의 두가지 생각이 있다. 그 하나는 次期裝置가 工學的實證要件을 모두 만족케 하는 實驗爐이며 그 다음으로 實證爐가 등장토록 하는 생각이고, 또 하나는 次期裝置는 自己點火條件을 만족시키도록 하는 별도의 개발책을 강구하도록 하는 방안이다.

다음에서는 각국별로 次期裝置設計에 대해서 알아 보았다. 이들은 모두 토카마크型爐를 대상으로 한 것이다.

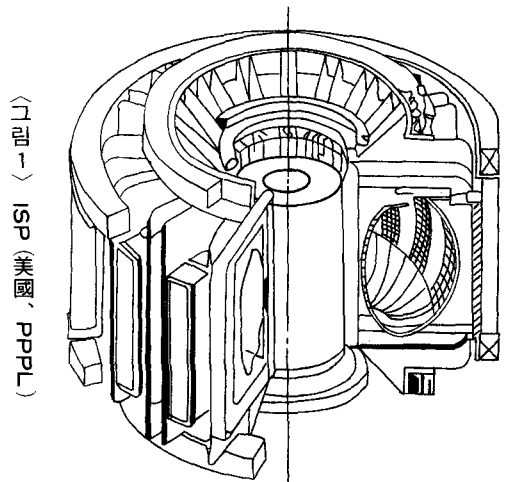
1. 美國의 次期裝置

1970년대부터 ORNL 등에서 설계연구가 행해져왔는데 1979년에는 여기에 核融合爐設計센터(FEDC)가 설치되어 官·學·民이 모여서 工學的試驗爐 ETR를 검토했다. 그러나 美國에서의 核融合開發豫算과의 플라즈마燃燒物理 早期解明의 필요성에서 그후의 美國 次期裝置는 매년 그 이름을 바꾸어(FED→TFCD→TFCX→B-PF→ISP) 현재(1985. 3) 自己點火研究프로젝트를 국제협력을 얻어 추진하고 싶어하는 의향이다.

한편 工學的實證에 대해서는 ISP와 ETR의 2단계로 나누는 방식이 고려되고 있다. ISP의 概略圖를 그림1에서 표시했다.

表2는 이의 主要内容이다.

이 특징은 常電導磁石을 이용하여 연소시간을 약5초로 하는 것으로 自己點火條件의 달성만에 목적을 두고 크기를 主半徑1.6m, 小半徑0.6m로 극히 小型으로 하고 있는 점이다. 예산은 약5억달러로 잡고 있으며, 이때 블랭킷, 第1壁, 材料 등의 爐工學的인 문제에 대해서는 A-



NL에서 BCSS(블랭킷 比較評價研究)의 2년간의 연구를 끝낸 후 DOE는 UCLA의 아부도우 교수가 FINESSE計劃(核融合爐 工學技術研究開發을 위해 필요한 실험과 그 시설의 조사연구)을 약3년의 기한으로 1984년에 발족시켜 核分裂爐를 이용할 생각이며 장래의 mirror爐를 이용할 것인가는 아직 의논중에 있다. 이에 대해서는 E, EC의 협력을 얻고 싶어하는 의향이다.

2. 日本原子力研究所 次期裝置

爐設計研究로서 1975년부터 實驗爐(JXFR)의 예비설계를 第1次 2年間, 第2次 2년간의 4年間 실시되었다.

블랭킷로서 壺型의 용기에 산화리튬을 充填하고 직접 헬륨냉각으로 냉각하는 형식이 1979년부터 일본 原研實驗爐로서 설계가 시작되었다. 構造材로서는 SUS316이 선정되어 P-oloidal방향으로 긴 상자형의 용기에 산화리튬을 充填하고 간접적으로 水冷却하는 低溫블랭킷가 채용되어 블랭킷의 역할은 트리튬의 생산에 한정되도록 하였다.

1984년에는 爐設計팀이 결성되고 하나의 原研實驗爐設計로 통일되게 되었다. 펄스運轉에서 準定常運轉이 되고 블랭킷도 모듈化가 되었으며, 실현가능한 간단한 구조로 하는 것에 최대

〈表 2〉各國의 次期裝置 主要內容

(’85年 3月 現在)

名稱 要目	FER	ISP	NET	OTR	INTOR
核融合出力(MW)	385	325	600	490	620(最大)
中性子壁負荷(MW/m ²)	0.88	~ 5	1.3	1.1	1.3
燃 燒 時 間(秒)	2000	~ 5	200	600	100~200
裝 置 諸 元					
플라즈마主半徑/小半徑(m)	5.2/1.12	1.6/0.6	5.3/1.2	5.5/1.1	5.3/1.2
플라즈마橢圓度	1.5	2.67	1.6	1.5	1.6
플라즈마電流(MA)	5.7	10	6	5.1	6.4
軸 上 磁 場(T)	5.3	8	5.5	6.0	5.5
베 타 值(%)	4.56	5.5	5.6	4.6	5.6
블 랑 키 트	設置*	無設置	設置	設置	設置
增 殖 材(第1候補)	Li ₂ O		液體Li ₁₇ Pb ₃₅	液體He	Li ₂ O
冷 却 材	低溫H ₂ O		高溫H ₂ O 또는 He	He 또는 炭酸가스	低溫H ₂ O
磁 場					
Toloidal Coil	超電導, Nb ₃ Sn	常電導, 銅	超電導, Nb ₃ Sn	超電導	超電導, Nb ₃ Sn
Poloidal Coil	超電導, Nb ₃ Sn	常電導, 銅	超電導, Nb ₃ Sn	超電導	超電導, Nb ₃ Sn
特 記 事 項	自己點火 準定常 爐工學 3相改造	豫算~ \$ B0.5b 自己點火	自己點火 펄스 爐工學 發電테스트	自己點火 準定常 爐工學 發電(30萬KW) 混合方式	自己點火 펄스 爐工學 發電테스트

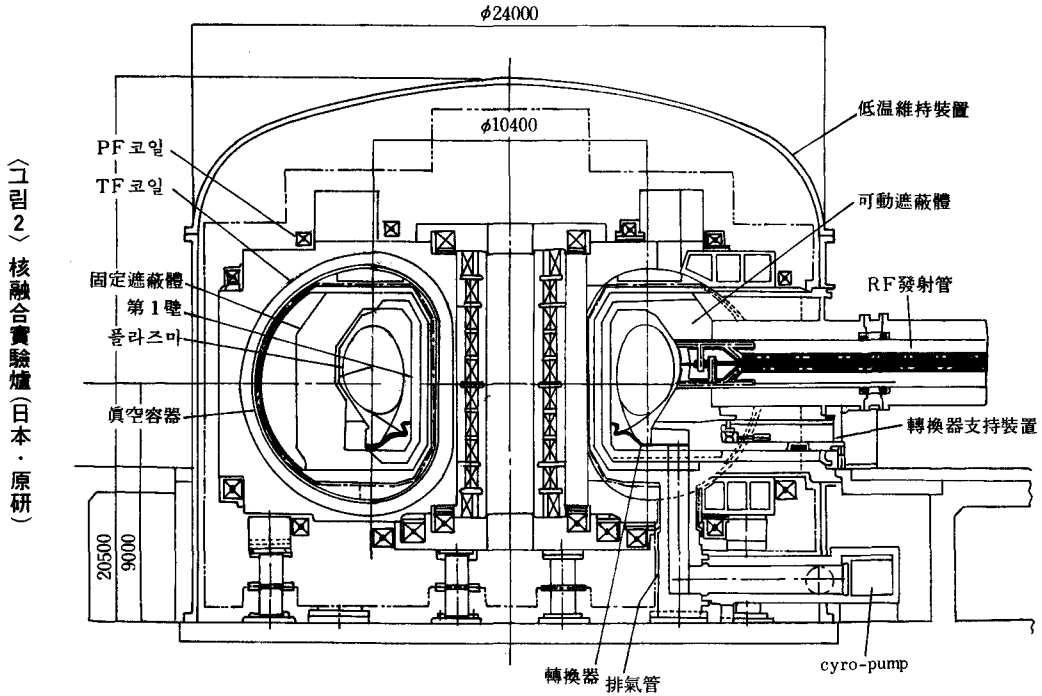
의 노력이 기울여지고 있으며, 최초 非增殖블랑 키트로 출발하여 마지막에는 增殖블랑 키트로 하는 3相方式爐로 되어있다. 그림2는 이 실험로 의 第2相(base option)에서의 1984年度 設計爐本 體概念圖를 표시했다. 表2는 이 主要內容을 나타낸 것으로 中性子플루언스를 0.3MW-y/m²로 하고 수명중의 爐內大型構造物의 정기교환을 하지 않기로 하고 있다. 燃燒時間은 2000초이다.

3. 歐州EC의 次期裝武 NET

EC는 1981년에 核融合開發의 5개년계획을 설정하여 JET에 계속되는 歐州獨自의 次期裝置 NET의 개발을 추진하기로 했다. 이것은 JET와

DEMO를 잇는 역할을 가지는 것으로서 自己點 火條件의 달성은 물론 第1壁이나 블랑 키트조건 도 쉽게 DEMO에 반영시킬 수 있는 것으로 보고 있다. 다만 재료의 개발은 별도로 추진하고 1983년에는 西獨의 막스프랑크 플라즈마研究所 內에 NET共同設計팀이 결성되어 EC各國에서 사람을 모아 설계작업을 추진하고 있다. 또한 1988년까지는 설계에 필요한 데이터베이스를 정비하여 1992년에 건설에 들어갈 수 있는지의 여부를 결정할 수 있게 자세한 설계를 실시할 예정이다.

그림3은 EC次期裝置의 概略圖를 표시한 것이다. 이 특징은 블랑 키트의 교환을 상부에서



〈그림 2〉 核融合實驗爐 (日本・原研)

하는 것과 또 블랭킷增殖材로서 리튬鉛을 사용하고 高壓水 또는 헬륨으로서 냉각하기로 하고 있는 점이다.

4. 소련의 次期裝置 OTR

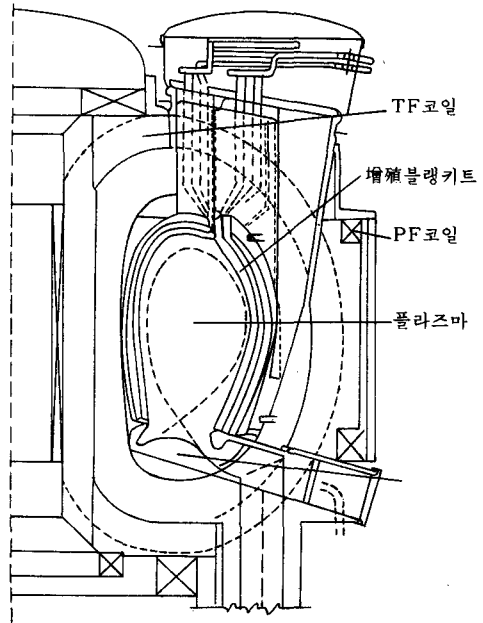
소련은 원래 IAEA의 次期裝置 INTOR를 4국의 국제협력으로 건설하는 계획에 참가할 생각도 있는 것 같았으나, 이 건설의 실현이 명확하지 않고 서방 3국이 獨自로 次期裝置計劃을 추진하고 있는 것에 대응하여 OTR의 次期裝置概念을 설정, 이를 발표하고 있다.

이 OTR의 최대의 특징은 hybrid方式을 채용하여 블랭킷增殖材에 액체리튬을 선정하고 있다는 점으로 冷却材는 헬륨 또는 탄산가스로 하고 있다.

5. IAEA의 次期裝置 INTOR

INTOR는 IAEA의 核融合國際協力の 일환으로서 1979년에 발족했다. 工學的實証을 하기 위한 核融合實驗爐로서 核融合 선진4개국의 기술적 여러 과제의 검토 및 공통의 의견통합 등 국제적인 업적은 높이 평가하고 있다. 비엔나의

〈그림 3〉 NET(歐州)



IAEA本部에서는 매년 3~4회의 워크샵을 열어 Phase 0, Phase I, Phase IIa part1, Phase IIa part2로 진행되어 2.5년의 연장이 제

안되어 있다. Phase 0, Phase I에서는 INTOR로서의 통일개념을 만드는데 대체로 성공했다. 구조재료로서는 SUS316을 선정하고 블랭킷트增殖材로서 산화리튬을 참조로 하고 冷却은 모두 低溫水로서 하기로 했다.

Phase IIa에서는 건설코스트 저감의 관점에서 재검토와 최근의 연구개발진보, 電流驅動에 의한 정상운전화에 대한 재검토 등이 실시되었다. 그리고 실현성이 있는 혁신적인 개념에 대한 중요성이 지적되어 앞으로 이에 대한 워크샵을 열기로 되어 있다.

Ⅲ. 次期装置에 關한 爐工學研究開發

이 分野에서 특히 중요성과 필요성이 강조되는 것은 爐工學研究開發이다.

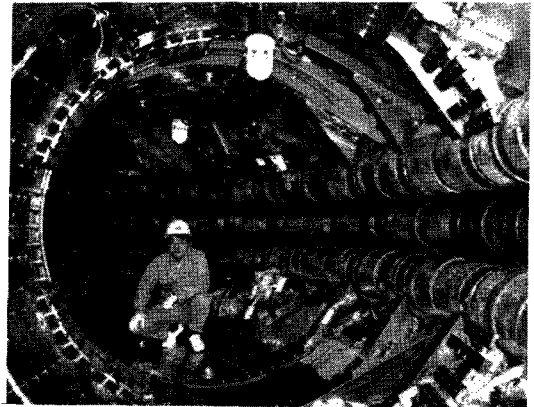
그 첫번째는 高熱負荷 構成品의 開發이며, 두번째로는 트리튬기술의 개발이고 그중에서도 高熱負荷 構成品에 관한 트리튬 문제와 블랭킷트에서 부터의 트리튬回收問題이다. 세번째는 블랭킷트工學의 연구개발중에서도 增殖材에 관한 개발이다. 네번째로 들 수 있는 것은 材料問題인데, 특히 高熱負荷 構成品과 블랭킷트에 관한 재료가 중요하다. 이 네개의 연구개발에 대해서는 아래에서 좀더 상세하게 언급하기로 한다.

1. 高熱負荷 構成品의 開發

高熱負荷 構成品은 플라즈마에 직접 關連되는 材料, 機器로서 가장 중점을 두고 개발해야 할 분야이다. divertor, limiter, 第1壁, RF launcher 등이 이에 해당한다. 여기서 문제가 되는 기술적 과제는 다음의 6가지이다.

- (1) 플라즈마壁 相互作用
- (2) 高熱負荷片面加熱傳熱, 流動
- (3) 트리튬透過, 트랩
- (4) 高熱負荷 構成品材料
- (5) 電磁力對策
- (6) 設計데이터 베이스

(1)에 대해서는 美國은 많은 이온加速器를 가



지고 있고 플라즈마照射裝置와 照射後構成品의 분석장치로서 사용하여 표면의 원소조성의 변화 등을 관측하고 있다. (2)에 대해서는 30kW의 전자비임(EB)照射裝置가 있으며 또, 1.6MW의 이온비임 및 EB照射裝置가 건설되면 플라즈마崩壞時 金屬表面의 溶融現象照明, 片面加熱高熱流束下에서의 限界熱流束 등이 측정되고 있다. (3)은 트리튬의 향에서, (4)는 재료의 향에서 기술한다. (5)에 대해서는 電磁力發生模擬裝置를 가지며 圓弧現象이나 耐電磁力構造의 研究도 進行되고 있다. (6)에 대해서는 ORNL에서 설계데이터베이스의 수집, 정비가 착실하게 수행되고 있다고 한다.

2. 트리튬技術의 開發

환경으로의 영향, 작업자의 방사선피폭, 트리튬프로세스系統의 코스트 및 트리튬損失코스트를 최소한으로 하는 것이 필요하다.

(1) 플라즈마에 접하는 機器의 트리튬透過, 트랩.

이것은 트리튬의 침입과 透過에 의한 문제로 中性子照射條件下에서 數kg이나 되는 트리튬트랩의 試算도 있다. 또, 冷却系統의 트리튬침입량의 평가와 그 제거처리계통의 설정방법에 따라 4000억원의 계통이 되는 경우도 있다.

(2) 블랭킷트로 부터의 트리튬의 回收

트리튬의 블랭킷트 속의 인벤토리, 冷却系統 트리튬의 透過가 문제가 된다.

(3) 트리튬燃料系統

계통의 信賴性, 安全性이 중요해진다.

(4) 트리튬格納系統

通常時, 補修時, 事故時 트리튬의 환경방출, 트리튬오염시의 除染問題가 있다.

(5) 트리튬含有水로 부터의 트리튬回收 放射性廢棄物量의 低減이 중요하다.

3. 블랭킷트工學研究開發

美國에서의 BCSS의 결과 Li/Li(增殖材/冷却材)를 제1후보로 하고 Li₂O/He를 제2후보로 했다. 增殖材의 제1후보로서는 EC는 Li₁₇Pb₈₃을, 日本은 Li₂O, 소련은 Li를 선정했으며 IN-TOR에서는 Li₂O를 제1후보로 하고 있다.

이들의 선정에서 가장 데이터가 부족한 것이 中性子照射데이터이다. 인과일루프에 의한 增殖材照射試驗도 模擬構造下에서의 實驗이 후보의 최종결정에는 필요불가결한 것으로 생각된다. FINESSE計劃의 금후는 충분히 주목할 필요가 있다.

4. 材料開發

여기에는 3가지의 문제가 있다. 하나는 플라즈마에 접하는 金屬의 表面을 보호하기 위한 複合材(coating, bonding, brazing)의 사용과 그 健全성 및 제작성에 관한 과제이다. 두번째는 中性子照射損傷이나 플라즈마壁相互作用에 의한 制限條件에서 교환이 필요하게 되어 이의 處理處分上에서 재료선택의 과제이다. 세번째는 트리튬의 트랩透過對策에서 재료의 선택과 複合材使用에 관한 과제인데, 美國에서는 대단히 폭넓은 서베이와 기초실험을 실시하고 있다.

動力實証爐가 되면 온도 등의 재료사용 조건은 더욱 엄하게 되고, 새로운 재료의 개발에는 시간(30년정도)이 필요하므로 지금부터 長期開發計劃이 필요할 것이다.

IV. 核融合技術의 波及效果

核融合技術에는 오늘날 最低단기술이라 불려

지는 많은 기술이 있다.

1) 同位體分離技術

○液體 : 深冷蒸留同位體分離

○固體 : 레이저同位體分離, 플라즈마化 電磁同位體分離

○新材料의 開發 또는 新材料의 大量生産

2) 大量이온照射技術

○表面硬化材料의 開發

3) 大規模高眞空技術

○高純度材料 大量生産技術의 開發

4) 高熱負荷傳熱技術

○超耐熱複合材料의 開發

○HIP加工技術의 개발

5) 極低溫技術

○材料의 低溫處理技術開發

○超高眞空技術開發

6) laser beam, ion beam 發生技術

○切斷, 加工技術 等

이달의 到着資料

◇ Nuclear News<ANS> 9月號

◇ INFO<AIF> 9月號

◇ Nuclear Engineering International<NEI> 9月號, 10月號

◇ Atoms in Japan<JAIF> 8月號

◇ Nuclear Europe<ENS> 9月號

◇ Bulletin<BNF> 7月號, 8月號

◇ FAPIG<日本第一原子力産業그룹> No. 110

◇ 原子力工業<日本日刊工業新聞社> 9月號, 10月號

◇ 原子力産業新聞<日本原産> 1299號, 1300號, 1301號, 1302號

◇ 原子力文化<日本原子力文化振興財團> 8月號, 9月號

◇ 原子力發電所一覽表<日本原産> 1985年6月30日 現在