

# 高温가스炉 開發에 關한 여러外國의 狀況

## 1. 美國의 動向

미국에서의 고온가스炉개발은GA社를 중심으로 実炉의 設計建設運轉과 그 운전경험 그외에 Oak Ridge国立研究所(ORNL) 등에서 행해지고 있는 연구개발에 힘입어 오늘에 이르렀다고 해도 과언이 아니다. 미국의 고온가스 實驗炉인 Peach Bottom炉는8년동안의 건설기간을 거쳐 1967년에 臨界가 되어 1974년 운전정지 될 때까지 귀중한 知識을 주었다. 그러나 이 炉는 그後 ORNL에서의 解体後 시험결과를 포함해서 현재는 약간 古典의인 成果로 되었다. 이어서 1968년에 착공되어 出力上昇中인 Fort St. Vrain 炉는 實驗炉로서 상업용 고온가스炉 설계를 위해 귀중한 데이터를 제공하고 있다. 한편 오랫동안 미국국립연구소에서 실시된 고온가스炉에 관한 연구개발의 결과를 集大成하여 GA社가 상업용 고온가스炉의 설계를 하고 있으며 전력계, 산업계의 협력을 얻고 또 정부의 guide에 의해 發電炉의 건설을 위해 노력을 기울이고 있다.

### (1) Fort St. Vrain炉의 現況

GA社의 설계로 1968년에 건설허가를 얻은 Public Service Co. of Colorado의 Fort St. Vrain 원자력발전소는 예정보다 1년 지연된 1973년에 운전허가를 NRC로부터 받았다. 1974년에 燃料를 裝填하여 臨界에 이르렀으나 Browns Ferry의 사고발생으로 NRC로부터 이 炉의 화재에 대한 redundancy비치 등의 全面改修공사가 요구되었다. 이와같은 工事 등의 원인으로 이 炉의 startup시험이 시작된 것은 1976년 중반이었으며 機器의 고장때문에 전력발생은 1976년

12월11일부터였다. 出力上昇시험에서 1977년 末 出力이 60% 가까이 도달되었을 때 出口溫度의 僅少한 동요(fluctuation)가 5~20분의 싸이클로 발생하였다. 그 후 3년 이상의 운전 동안에 炉心狀態出力 30~70% 사이에서 37회나 동요가 관측되었다. 이 동요가 核의不安定性에 의한 것이 아님이 확실해짐과 동시에 이에 관련해서 炉心壓力減損, 炉内헬륨流量 등의 관련측정결과등에 의해 出力 70%까지는 동요가 발생함이 없이 운전하는 것이 가능하게 되었다. GA社는 mock-up test 등의 성과로부터 이 출력온도 동요의 원인은 연료체와 反射體의 微動이라고 판단하고 있는 것 같다. 이에 대한 대책으로 Region constraint device를 最頂部 燃料體에 붙였다.

1979년 2월~7월까지 연료교환을 위해 炉를 정지시키고 surveillance, ISI, overhaul을 실시하여 Fort St. Vrain炉의 설계상 결함이라고 되어 있던곳의 검사를 TV 등을 사용해서 行하고 운전에 들어갔는데 1979년 10월 다시 炉를 정지시키고 앞에서의 device를 붙여 12월에 다시 出力상승시켰으나 일부 seal의 不良으로 1980년 2월에 가서야 겨우 出力上昇했다. 이때부터 이 device에 의한 동요정지효과의 시험이 실시되었으며 간혹 出力상승의 transient로 이상이 관찰되기도 했으나 여러가지의 対応策, orifice control 등에 의해 70% 出力까지는 전혀 이상없이 운전을 할 수 있는 炉가 되었다. NRC허가조건 70% 出力으로 1980년 평균 설비이용율은 54%, capacity factor는 38%였다.

1981년 3월 NRC로부터 70% 이상出力의 허가를 얻어 시험을 시작하였고 그동안 90% 出力

(290MWe)까지 上昇시켜도 아무런 문제점을 발견할 수 없었다. 예정에 따라 5월에 정지시켜 다시 機器를 정비한 후 再次 70% 出力에 들어가 여름 peak의 전력수요에 대응했다. 따라서 이번 가을부터는 100% 出力 테스트를 실시하면서 出力을 상승시킬 예정이며 동시에 NRC로부터 100% 出力 허가를 얻게 될 것이다.

**(2) HTGR을 위한 研究開發**

미국 FY81의 DOE예산에서 HTGR의 연구개발비는 GE와 ORNL에만 지급되고 있다. 이 연구개발은 ORNL 조직의 일부인 Paul R.Kasten을 Director로 하는 Gas-Cooled Reactor Program이 주체가 되어 행하고 있다.

Kasten 관리하의 HTGR 연구개발을 위한 조직체제는 i)HTGR Base Technology Program ii)HTGR의 Application and Project Assessments iii)HTR Physics and Shielding과 iv)HTR Component Flow Test Loop로 大別할 수 있다. 그리고 작년까지 있었던 유럽을 중심으로 한 IAEA의 Gas-Cooled Fast Reactor Program은 이 계획의 主体가 소멸됨과 동시에 ORNL내 조직으로도 존재하지 않게 되었다. 따라서 이 GCFR Program에서 ORNL의 Y-12 지역에 건설중인 GCFBR의 Core Flow Test Loop는 HTR Component Flow Test Loop(CFTL)로 약간 수정되어 계속되게 되었다. 그리고 다른 조직에 의한 HTGR안전성 연구가 Brookhaven 국립연구소(BNL)에서 NRC의 지원으로 행해지고 있다. 이 ORNL의 HTGR연구개발을 위한 실행예산은 FY-81에 690만달러이고 FY-82에는 10%정도 증액이 예정되고 있다. 따라서 여기서는 앞에서 기술한 i)과 iv)에 대해 설명하기로 한다.

HTGR Base Technology Program은 다음과 같은 연구 테마로 되어 있다. 이것은 a)化学的研究 b)연료黑鉛개발 c)PCRV개발 d)재료연구 e)핵연재료연구 f)GA照射시험협력이다.

a)의 화학적연구는 HTGR의 설계상의 데이터를 얻는 것을 목적으로 하고 있으며 FP의 거동을 중심으로 한 것이다. 즉 격납용기 개념, 원

자로보수의 기본과 그 실시법, 중업원 피폭선량, 부지경계선량, 재료선별, 헬륨純化系 등의 연구이다. 여기에는 FP脱着, 黑鉛中擴散, Pu의 이동 등도 포함되어 있다.

b)는 照射 및 照射後試驗, 新核燃料과 SiC 등의 新被覆法の 개발로 연구개발에 지원된 안전성, 신뢰성, 경제성이 높은 연료체의 개발이다.

c)는 解析手法의 연구, 콘크리트의 creep特性 연구, Tendon에 관한 연구, 콘크리트재료 강도시험, 구성부품 테스트 등에 의한 PCRV의 신뢰성, 구조거동, 건설성, 경제성을 중심으로 한 연구와 평가이다.

d)는 HTGR의 설계와 운전허가에 필요한 기술개발로 合金, 熔接材, 세라믹스의 기계적강도, 부식, 용접법, 세라믹과 FP와의 반응, PCRV liner와 貫通에 관한 연구이다.

e)는 ORR에서의 照射creep시험, HFIR에 의한 선별照射, 설계를 위한 데이터測定, 酸化의 연구가 포함되어 있다.

f)는 capsule 설계, capsule 조립, 照射capsule의 운전, capsule의 熱的解析, capsule照射 시험용자료작성 등이 포함되어 있다. 이것은 GA社와의 협력하에 실시되고 있다.

CFTL은 현재 건설중이나 ORNL은 9월30일에 CFTL의 완성을 공식 발표하였다.

그리고 이 외에 HTR에 관한 연구개발은 NRC의 FY81예산 130만달러로 BNL의 안전성에 관한 연구과제로 다음과 같은 實驗解析이 행해지고 있다. i)黑鉛中 가스擴散과 산화에 의한 강도저하 ii)1次냉각系재료의 creep강도, 피로강도 iii)FP의 黑鉛中의 移動, 銀의 이동연구 및 HTGR 안전코드, 가스터빈 사이클 코드의 개발이다.

**(3) Annual Utility/User Conference on the HTGR**

제3회의 이 회의는 작년 9월10~11일 미국의 San Diago에서 개최되었다. 참가자는 160명으로 미국, 서독, 영국, 일본, 캐나다, 스위스 등에서 참가하였다. 이 회의의 강연구성은 a)議會, 中立기구, 학회, 전력계 등에서의 HTGR에 관

한 강연 b) HTGR의 지원을 위한 산업계활동에 관한 강연 c) HTGR의 에너지 이용영역에 관한 연구 d) HTGR의 topics에 관한 강연 e) HTGR 기술상황에 관한 강연 f) HTGR의 계획과 Lead Project 계획에 관한 강연 등이었다.

HTGR에 관한 電力会社の 경험, 연구개발, 설계 등에 관한 발표에서 1980년대의 HTGR大型 商業炉시대, 즉 Fulton炉 등의 설계에는 보다 높은 기술레벨의 설계가 가능하다는 것이 느껴진다. HTGR의 열이용에 대해 미국은 中東部로의 증기공급, 산악지대에서의 oil shale 등의 이용을 위한 증기공급, 또한 석탄의 液化, 가스화에 관한 연구도 진행되고 있다. 한편 전력회사는 전력수요의 둔화 등으로 HTGR에 상당한 관심을 가지게 되었으나 건설 리이드타임 12년, 미국 프라임레이트가 연 20%에 가까운 상태인 전력회사가 HTGR의 건설, 운전에 대한 투자를 쉽게 할 수는 없을 것이다. 이와같은 상황에서 Public Service Co. of Colorado, Arizona Service Co.와 Florida Power and Light Co. 등 3社は 상업용고온가스炉에 상당한 기대를 하고 있다. 이와같은 미국의 원자력환경에서 정부, 의회 측이 HTGR商業炉 즉 Lead Project Plan이라고 하는 HTGR SC/C(Steam Cycle/Cogeneration)에 어떻게 대처하는가를 주시할 필요가 있을 것이다.

#### (4) HTGR SC/C와 GA社

HTGR SC/C는 SC의 경우 2240MWth, 860 MWe, 효율 38.5%, 蒸氣 온도 1000°F, 压力 2400 psig의 電力發生炉이나 Cogeneration의 경우는 그림 1과 같이 蒸氣併給을 행하는 것이다. 발생 증기조건은 그림 1의 熱交換方式에 의해 상당히 광범한 조건을 취할 수 있다고 한다.

이 HTGR SC/C의 설계는 DOE FY-82예산 증액으로 알 수 있듯이 착실히 진전되고 있으며 GA社에 의한 Peach Bottom炉, Fort St. Vrain炉의 설계, 건설, 운전 및 여러 분야에서의 연구개발의 성과를 集結하고 있다. 여기에는 炉心 지지구조의 개량, water bearing의 개량, 연료

거동의 개량, PCR liner의 개량 등이 포함되어 있다. Decision Package라고 하는 이 개념설계의 완성은 1982년 3월로 예정되고 있다. 이 설계는 CE社가 SG設計에, GE社가 circulator설계에 참가하며 또한 Bechtel社가 함께 협력하여 炉心出口온도를 저하시키는 등 변경을 행하여 1970년의 GA에 의한 상업용 대형 HTGR설계보다 훨씬 实用性이 있는 설계이다. 따라서 건설운전을 위한 안전심사에 보다 잘 대응할 수 있는 상태에 있다고 할 수 있다. 이 Decision Package를 위한 FY-82예산은 FY-81의 약 2배에 달하고 있다.

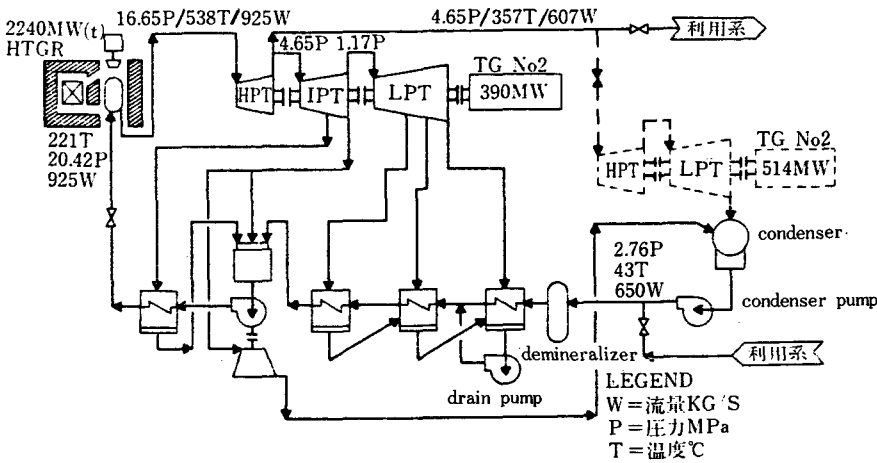
2240MWth의 HTGR을 전력出力에만 사용하면 1336MWth(59%)가 condenser loss가 되나 Cogeneration으로 蒸氣併給이 1174MWth가 될 경우 이 loss는 4%에 불과하다. 核分裂生成熱의 有効利用인데 이 증기의 열이용은 앞에서 기술한 바와같이 i) 미국 中東部の 기존 공업지대로의 증기공급 ii) 미국중부 산악지대의 oil shale, tar sand의 油抽出 iii) 石炭油化, 석탄가스화 등의 영역이다. GA社는 oil shale을 제1목표로 하고 있다. 한편 Bechtel社에서는 EXXON Catalytic Coal Gasification法の의 개발을 하고 있다. GA社는 에너지 수송에 대해 溶融鹽(鹽化物系)을 사용한 저장방식 시스템의 개발을 하고 있다. GA社는 한정된 자기연구비 속에서 고온가스炉와 관련된 Head End Reprocessing Plant의 mock-up 연구와 Water Splitting 연구를 적극적으로 추진하고 있다. 前者는 KFA의 재처리 Pilot Plant와 협력하여 HTGR 연료싸이클을 위해 대형實証시험을 실시함과 동시에 물의 熱化學분해도 진행시키고 있다.

GA, La Jolla의 사이트内 Engineering and Technology部 실험이 2~3년전부터 활발히 행해지고 있으며 CRD기구의 테스트 등을 행하고 있다. 연료要素의 제조공장은 Fort St. Vrain炉의 교환연료를 제조하였다.

## 2. 西獨의 動向

고온 가스炉에 대한 독일에서의 동향은 독일

Cycle diagram (最大電力, 蒸氣併給條件)



原子炉 parameter

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| 出力 (MWth)                   | 2240    |
| 主冷却系/補助冷却系 loop (數)         | 4/3     |
| 炉心出力変法 (W/cm <sup>3</sup> ) | 7.5     |
| helium 压力 (psi)             | 1050    |
| 炉心入口/出口温度(°C)               | 318/693 |
| helium 流量 (kg/s)            | 1150    |
| 一次蒸気流量 (kg/s)               | 928     |

그림 1 HTGR SC/C (2240MWth)-GA

의 경제적 정세 및 원자력을 둘러싼 환경 등으로 순탄치 못한 인상이 깊다. Jülich연구소(KFA)를 중심으로 하여 AVR의 건설운전과 고온가스炉에 관한 연구개발에 의해 고온가스炉의 隆盛을 보았는데 오늘날에는 THTR-300의 완성도 가까와졌으므로 고온가스炉의 개발목표를 어떻게 정할 것인가를 고민하고 있다.

그러나 연구기술省(BMFT)이 지출하는 1981년의 HTR예산은 i) AVR운전비 10M DM ii) THTR건설 277MDM iii) 신형원자력 발전炉의 설계와 연구개발 75M DM iv) 열이용 시스템 개발(炉설계, 석탄가스화, 열수송) 200M DM v) 연료사이클 21M DM으로 총 583M DM이다.

(1) AVR의 상황

1968년 運開한 AVR은 일시적으로 950°C He의 出口온도를 달성하였으나 1978년 5월 증기발생기의 누설로 인해 정지되었다가 1979년 9월에 재개하였다. 650°C에서의 黑鉛乾燥운전부터 시작했는데 1980년초에검사를 겸한 보수공사를 실시했으며 同年 5월에 850°C의 운전허가를 얻어 오늘에 이르고 있다. 현 시점에서 950°C의 운전허가를 얻지 못하고 있다. 그 이유는 어떠한 사고시에도 폭발성가스 생성이 없다는 계산

모델의 제출이 요구되고 있기 때문이다. 그 근거는 高연소한 연료요소의 수분에 의한 부식이 현저하다는 것이 판명되었기 때문이다.

(2) THTR의 狀況

이 炉는 1971년에 건설이 개시되었는데 당시는 1977년 완성 예정이었으나 독일의 認許可 방식으로 건설 개시부터 THTR-300의 건설 공사인정을 단계마다 안전심사회에 신청하여 공사인정을 받는형식으로건설이 추진되어 왔는데 독일 원자로안전심사회 등의 가스炉 안전성에 대한 philosophy 변화로 인해 많은 시간을 소비했으며 炉部品을 発注받은 회사의 작업능률 저하로 기기의 납품이 지연되었다. 이와같은 이유 등으로 건설이 지연되었으며 여기에다 반대파의 활동도 현저했다.

炉의 건설은 PCRV관계 건설이 끝났고 SG도 装着되었다. 연료도 제조가 끝나 42本の 吸取棒도 기능시험을 끝마쳤다. 현재는 2次系 기기에 중점이 옮겨지고 있다. 터빈발전기도 완성되었고 dry cooling-tower도 완성되었다. 다만 파이프 whip拘束方式은 완전히 재설계하여 새로운 것이 될 것이며 炉面의 床荷重이 50톤이었던

것이 250톤 荷重으로 변경되었다. 그러나 다행히 NHSS는 아무런 변경의 요구가 없었다. 현 시점에서의 THTR-300의 臨界는 1983년 3월로 기대되고 있다.

**(3) HHT (HTR with Gas Turbine) 계획의 現狀**

이 계획은 가스터빈을 가진 HTR (1640MWth)의 實証을 위한 것이다. 이 시험에 의해 i)HX나 가스터빈을 PCRV로 包藏한다 ii)PCRV에 각종의 機器用空胴을 만든다 iii)가스터빈과 compressor를 同軸으로 한다 iv)발전기를 격납용 기내에 넣는다 v)dry cooling system으로 한다. vi)低농축 OTTO方式의 ball type연료로 850℃ 가스出口온도로 한다 등을 실증하는 것이 목적이었다. 그 이외에 i)플랜트效率의 最適化 ii)가스터빈 정지후의 除熱 iii)制御性的의 확인 iv)PCR RV설계 최적화 v)FP plate out와 除染의 확인 vi)사고 및 過液解析의 확인도 기대하였다. 따라서 전력회사와의 협력을 추진하여 검토解析도 적극적으로 추진되었는데 금년초 다음과 같은 이유로 계획의 slowdown이 결정되었다. i) SG없는 가스터빈 시스템이라 하더라도 증기싸이클 HTR의 효율에 비해 그다지 상승이 높지 않다 ii)dry cooling방식은 SC의 THTR에서 가능하다 iii)터빈plate의 개발을 지금부터 실시해야 한다 iv)熱除去機器의 표면적을 극히 크게 할 필요가 있으며 효율이 나쁘다 등이다.

**(4) HHV (Helium Turbine Test Facility)의 現狀**

이 장치는 KFA에 건설된 대형 He 터빈시스템의 개발을 위한 시설인데 오랜동안의 건설을 마치고 시험운전을 시작한 직후에 油누설로 인해 정지되었고 1980년 초에 운전재개가 되었다. 그러나 얼마후 frange에서의 He누설과 油누설이 터빈軸受에서 발생하여 정지되었으며, 터빈 분해에 의한 수리를 BBC에서 실시하게 되었다. 독일의 고도의 기술성과에 많은 기대를 갖고 실시되었으며 압력, 온도, 리이크에 관한 수많은 귀중한 데이터가 얻어졌다. 이 HHV는 1250시

간의 run test를 할 예정인데 아직 1250시간 테스트를 행하지 않았으며 운전도 못하고 있는 상태이다.

**(5) EVO (The Turbine Plant Oberhausen)의 現狀**

1979년 초에 일어난 turbine blade 파손에 대한 수리가 1980년 4월에 끝나 운전을 개시했으나 bearing의 작동이 만족스러운 상태가 아니었다. 다시 조정하여 1980년 8월16일부터 운전再開되었으며 운전상태는 양호했다. 순조로운 운전은 1981년 2월까지 계속되었으며 出力은 정규의 50MW가 아니고 30~33MW였다. 또 이 동안에 外亂에 의한 긴급정지에서도 안전valve는 정상적으로 작동함이 實証되었고 그 후 플랜트운전재개도 극히 용이했다. 이어서 터빈의 動特性 시험계획이 전력회사 EVO (Engie Versolung Oberhanssen)와 메이커 GHH 사이에서 합의되어 실시하게 되었다.

**(6) PNP (Prototype Nuclear Procese Heat)의 現狀**

이 계획은 500MWth 出力으로 석탄가스화와 에너지 수송(ADAM/EVA)을 위한 원자로 설계가 중심인데 독일의 THTR 관련기술로 950℃ 出口온도로 하는 NHSS는 충분히 가능하다고 하고 있다. 다만 문제는 호 가스파이프에 관한 문제이다. 그리고 IHX 등의 금속재료에 대해서는 극히 대규모의 시험계획이 세워져 실행으로 옮겨졌다. 이에 관해서는 日本도 참가하고 있다. ADAM II 계획 10MW 메탄화는 EVA II 플랜트에 접속되어 시험되고 있다.

HKV (Hydrogen Kohle Vergasund)의 水素添加가스화法의 시험은 Rhein Brown社에 의해 실시되어 약 2만시간의 운전에 성공하였으며 다음의 Pilot Plant가 1983년 완성될 예정이다. W KV (Wasserdampf Kohle Vergasund) 水蒸氣添加의 가스法도 Bergbou 광산회사에 의해서 실시되어 약 1000시간의 운전을 하였다. 이 두 방법의 Pilot Plant건설이 시작될 예정인데 반응용기의 부식문제가 대두되고 있는것 같다.

PNP계획의 炉에 대해서는 内務省의 안전심사회도 생성가스中の FP를 10pci/g 이하로 하라는 이외에는 운전인가상의 기본적인 문제가 없다고 한다. 그러나 이 계획을 다시 진행시키기에는 그다지 좋은 狀況이 아닌것 같다.

(7) THTR-300 이후의 계획

독일에서는 AVR과 THTR의 기술집적을 발전시켜 증기공급이 가능한 대형炉의 건설이 필요하다는 점에 전력회사가 참가하는 방향으로 움직이고 있다. 이 炉를 HTR-V라 称하며 SC 방식, OTTO방식, LEU Ball型연료, 利用系로 integral방식, PCRV, 독립CACS방식, 격납용기방식을 채택하여 出力 2250MWth, 39.1% 열효율, He출구온도 680℃, 발생증기는 530℃, 190 bar이며, 반응용 증기는 400℃, 100bar로 110kg/s를 공급하는 것이다. 後에 이 炉는 THTR-900으로 칭해졌다. 이 원자로계획은 이용관계자

즉 전력회사, 석탄회사, 가스회사의 협력하에 B BC그룹, KWU그룹과 NUKEM에 의해서 설계가 행해졌다. 이 설계가 끝난후에 炉의 평가, 건설의 가능성, 운전인가 취득의 가능성, 건설비와 risk에 대해서 메이커가 정리하여 電力側에 제출하고 그 검토결과를 1981년 6월에 얻을 예정이었다.

그 후 9월21일 KFA에서 BMFT 주최로 “HTR Status-Seminar”가 개최되었다. 이 회의에서 BMFT는 HTR-900의 자금원조를 할 의사가 없음을 표명했다. 한편 電力側은 이 HTR-900의 건설코스트가 같은 LWR보다 20% 높으므로 그 차액에 대해서 정부의 원조를 구했다. 이에 대해 BMFT는 HTR은 이미 商業炉이기 때문에 자금원조를 하지 않는다고 하였다. 그리고 BMFT는 HTR이 LWR보다 안전하다는 논쟁에서는 정치적 이유에 의해 肯定的으로 인정하기 어려운 상태에 있는것 같다. 따라서 THTR-900계획은 消滅되었다고 생각해도 좋다.

그래서 이 회의에서는 THTR의 후속계획에 대해 다음과 같은 제안이 나왔다.

1. KFA로부터 잠정적인 200~250MWth의 AVR-II 계획의 제안이 있었다. 이것은 多目的 이용의 HTR연구로로서 KFA에 설치된다.

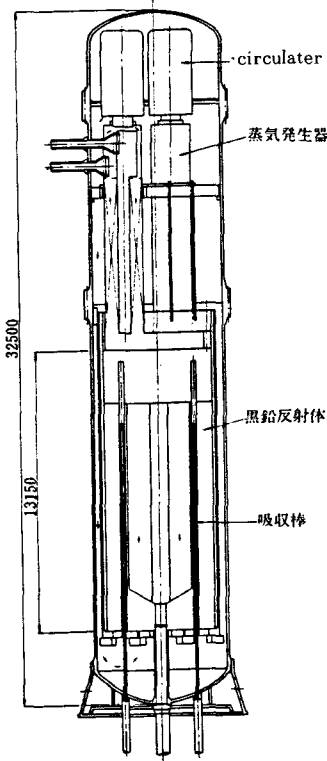


그림 2 HTR(250MWth)-BBC/HRB

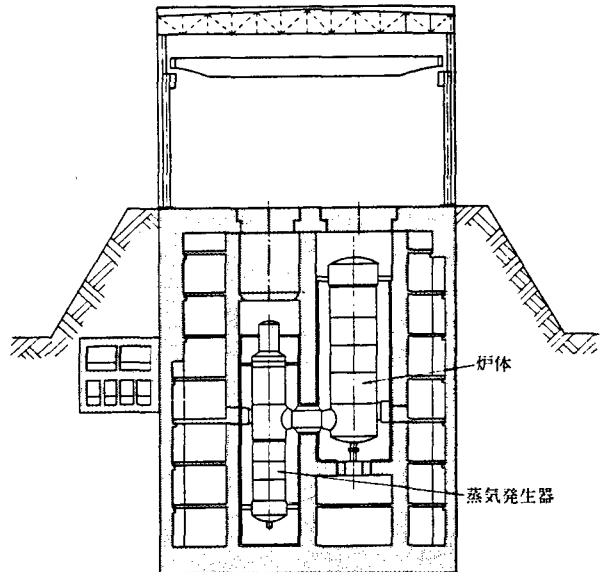


그림 3 modular type HTR(200MWth)-KWU/IA

2. HTR의 상업이용에 전력회사(독일에서는 전력회사가 熱供給도 가능한 상황이다. 즉 EVO社)측이 흥미를 가지고 있는 것은 전력과 증기供給의 HTR이다. 이때의 증기는 지역난방이나 화학공업에 이용된다. 따라서 원자로는 400MWth 정도가 된다.

어느쪽이든 독일에서는 자금수요가 적은 小型 HTR의 건설을 지향하고 있다. AVR-II는 250 MWth로서 BBC/HRB의 설계이고, 이에 대해 KWU/IA는 200MWth modular type을 제안하여 200~400MWth의 전력수요를 향한 설계를 의도하고 있다. 이것을 그림 2,3에 표시하였다.

(8) 독일에서의 高温가스炉에 관한 연구개발

독일에서 고온가스조에 관한 연구개발은 거의 KFA에서 실시되고 있다.

KFA에서는 HTA(Hoch Temperature Anlage)계획하에 고온가스조 관계의 연구가 행해지고 있는데 이 실질적인 실시는 Entwicklungsarbeiten für Hoch Temperaturreaktor-Anlagen에 의해서 행해지고 있다. 그 연구항목은 i) Reactor Internals ii) Circuit Components iii) Hot Gas Ducts iv) Reactor Pressure Vessel v) Core Physics and Instrumentation vi) Safety Engineering Studies vii) Activity Deposition viii) Development of Materials로 분류되고 있다.

i)에 대해서는 炉의 停止, 긴급정지에 관한 실험, 연료球의 열전달, 냉각재流動傳熱 등의 연구가 행해지고 있다. ii)는 냉각재 회로의 機器, 즉 열교환기 등의 傳熱流動, 熱工學의 연구, 이 영역에 관한 HHV에 의한 實驗시험 나아가서는 열교환傳熱細管의 진동, 応力解析 등이 행해지고 있다. iii)에 대해서는 헬륨duct의 각종 斷熱材의 시험에 의해 배관의 구조설계에 관한 데이터의 확립, 헬륨가스 흐름에 의한 管内側에 가해지는 압력변동의 duct에 대한 효과 등에 대해서 연구를 행하여 같은 HHV에 의한 상세한 實証시험을 행하고 있다. iv)는 PCRV의 공학적 거동을 안전성의 입장에서 보고 있다. 즉 liner의 熱的 거동, 예를 들면 누설, hot spot, 온도 사이클의 입

장에서 검토하는 것이다. v)는 pebble-bed 炉心を 위한 炉心과 계측에 관련된 점의 追求를 목적으로 하고 있다. 연료球의 初期炉心, 연소炉와 제어봉의 관계, 또한 고속중성자효과를 KAHTER을 사용하여 실험한다. 電離函과 SPND에 의해 中性子束의 측정을 하여 實証함과 동시에 高温計測을 위해 高温核分裂計數管電離函을 사용하는 실험을 행하는 등 1150°C 정도까지의 高温計測系의 개발연구를 하고 있다. 炉noise에 관한 계측에 대해서도 이론적인 back-up을 얻으면서 개발하고 있고 원자로 시스템 전체로부터의 헬륨누설검출에 관한 연구도 적극적으로 하고 있다. vi)에서는 黑鉛부식과 H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>와의 반응에 대한 연구 또 흑연의 연소, 화학반응 및 可燃性가스生成 등의 실험연구를 하고 있다. vii)에 대해서는 炉의 검사, 수리, 유지에 대해 통상 및 사고시를 포함해서 FP와 放射化生成物의 이동 및 沈着이 크게 영향을 주는데 이로 인한 in-pile 실험도 행하고 있다. 현재 그루노블과의 사이에서 COMEDIE라는 공동연구가 같은 목적으로 계획중이다. 그리고 이론적인 연구도 모델개발을 위해 활발히 행해지고 있다. 부식에 관한 실험성과는 정리되어 있으며 Zemak에 의한 c-reep 데이터는 착실히 쌓아올려지고 있는데 특히 트리튬透過의 방지방법도 적극적으로 행해지고 있다. 중성자照射効果의 연구는 SILOE를 사용해서 3×10<sup>21</sup>n/cm<sup>2</sup>까지 실시되고 있다.

3. 소련의 狀況

소련에서도 장래의 에너지 자원 對應이 배려되고 있으며 석유자원을 화학공업, 수송 등에 사용하기 위해 核에너지의 이용이 활발해지고 있다. LWR의 열공급에는 한계가 있어 HTR 열공급의 의의를 높게 평가하고 있다. 따라서 원자로설계, PG-100 He loop 등의 mock-up 시험도 행해지고 있으며 또 利用系에 관한 연구도 행해지고 있다.

연구개발에 관해서는 i) 炉物理研究, 여기에는 GROG 등에 의한 臨界시험을 포함하고 있다 ii) 球形연료의 炉心移動pattern연구 iii) He 냉각재

의 불순물제거 연구 iv) 열절연재의 연구 v) 연료에 관한 연구, 여기에는 被覆粒子연료의 제조는 물론  $10^{21}$  nvt<sub>cm</sub>의 照射시험도 하고 있다. 1978년에는 700kW 發熱 400g/s He 流量의 PG-100 loop를 운전하여 재료시험 등에 활용하고 있다.

VGR-50 (出力 136MW, 出口온도 800°C)의 HTR의 설계를 완료함과 동시에 이 炉의 거동을 확인하기 위한 實証시험도 행하고 있다. VG-400 (出力 1000MWth, 出口온도 950°C)의 설계와 實証시험을 하고 있다. 이 炉는 PCRV를 사용하고 있는데 大型炉心이기 때문에 이의 연료球 이동 pattern의 연구가 실시되고 있다. 이 炉는 동시에 熱利用系에 증기를 공급하는 설계이다.

소련에서의 에너지 소비중 化石燃料의 50%는 공업, 농업 등의 열에너지에 이용되고 있기 때문에 그 대체에 적극적이다. 이와 동시에 에너지수송에도 큰 관심을 가지고 있다. 즉 메탄, 수소, 환원가스 등의 HTGR에 의한 제조에 대한 검토를 행하며 열수송에는 CO, H<sub>2</sub> 시스템에 흥미를 나타내고 있는 단계에 있는것 같다.

#### 4. 프랑스의 狀況

프랑스에서의 HTR에 관한 연구는 CEA가 主体이다. 이 분야의 연구는 국제협력에 중점을 두고 있는 것 같다. 이 연구의 예산은 1979년에 약 40M 프랑이 투입되었다.

出力 840MWth, 出口온도 850°C의 HTR 설계가 검토되고 있는것 같은데 HTR에 관한 연구개발이 主体이다. HTR용 금속재료로 하스테로이, 인코넬系 合金에 대해 20,000시간 creep강도, 피로 등 기계적강도시험을 실시하고 있다. 또 2~50bar, 870°C 까지 사이의 He 분위기下에서 부식시험도 실시하고 있다. HTR연료에 대해서는 제조에 관한 연구·核 이동 실험 또는 照射시험도 실시하고 있다.

#### 5. 오스트리아의 狀況

오스트리아에서는 Österreichische Studiengesellschaft für Atomenergie mbH(ÖSGAE)에서 HTR에 관한 연구가 행해지고 있다. 초기

에는 Dragon의 “High Temperature Material Program”에 참가했고 실질연구는 Austrian Steel Industry가 실시하고 있었다. 그 내용은 1000°C He下에서의 creep시험이었다. 그리고 독자적인 연구로는 오스테나이트鋼의 炭化현상, 炭化物生成에 관한 실험이 행해졌는데 이것도 1978년에 끝났고 현재는 被覆연료입자의 레진본드法에 의한 제조연구가 행해지고 있다. 그 예산은 약 400만 오스트리아 실링이다. 그리고 PCRV에 관한 건설기술의 연구가 행해지고 있으며 또 lining의 250°C에서의 특성을 조사하고 있는데 이것들은 총액 1,850만 오스트리아 실링의 예산으로 실시되고 있다.

#### 6. 스위스의 狀況

HHT계획에 1973년부터 참가하고 있으며 스위스에서 행해지고 있는 연구는 i) Swiss Federal Institute of Reactor Technology에서 하고 있는데 그 내용은 HHT layout, 플랜트特性, 사고現象分析, 열교환기의 테스트, 가스터빈의 除染, HTR재료의 연구 등이며 ii) Alusuisse Ltd.에 의한 dry cooling tower에 관한 냉각기능의 실험과 mock-up test iii) Bonnard and Gardel Consulting Engineers Ltd에 의한 PCRV에 관한 연구에서 PCRV의 layout과 有限要素法에 의한 解析, liner의 개념설계 및 PCRV 모델실험, liner anchor法 등에 관한 연구, 냉각계의 설계와 함께 細管bundle과 spacer의 진동, flating부식 등의 실험을 실시하고 또 압력손실 등의 실험을 행할 예정이다.

이상의 연구개발에 1979년에는 1,150만스위스 프랑이 투입되었다.

#### 7. IAEA의 活動

##### (1) IAEA의 IWG-GCR (International Working Group-Gas Cooled Reactor)

IAEA는 그 활동의 하나로 IWG를 설치하고 있다. 이 IWG에는 FR(Fast Reactor), RRPC(Reliability of Reactor Pressure Components), NPPCI(Nuclear Power Plant Control



and Instrumentation) 등이 있는데 GCR도 그 중의 하나이다.

이 IWG의 기능은 IAEA회원 각국에 그 영역에서의 상황, 활동을 알려줌과 동시에 기술적, 경제적 견해 등에 따른 권고를 행하며 각국의 계획, 연구개발, 성과 등의 정보교환을 행한다. 또 그 결과로 연구, 개발 등의 협력을 실시하는 것 등이다.

IWG-GCR의 회원國은 오스트리아, 벨기에, 프랑스, 일본, 이탈리아, 네델란드, 폴란드, 스웨덴, 스위스, 소련, 영국, 미국 등이다. 이들 나라 사이의 IWG-GCR의 활동은 다음과 같다.

i) 각국의 정보교환 ii) 신뢰성, 안전성, 審査上의 문제, 경제성 등에 관한 주요문제의 摘出 iii) 전문가 회의 등에 의한 정보교환, 정보자료의 발행 등과 iv) 연구개발 계획의 협력실시이다.

앞의 사항을 수행하기 위해 IAEA에 사무국을 설치하고 그 활동을 원조하는 한편 IWG회의, 전문가회의를 개최한다. IWG회의에서는 회원 各國으로부터 정부지명의 회의대표가 각국의 개발계획을 토의하고 중요문제를 논의하며 기술회의의 개최를 권고하고 출판물의 준비를 실시한다. 또 기술전문가회의, 심포지움, 개발도상국을 위한 세미나, 협력연구계획수립, 각 회의의 보고서 刊行이 실시된다.

## (2) IWG-GCR의 活動

GCR의 본회의는 지금까지 다음과 같이 개최되었다.

제 1 차 회의 : "First Annual Meeting of the IWG on High Temperature Reactors" 1978. 9. 11~13. Vienna

제 2 차 회의 : "Second Meeting of the IWG on High Temperature Reactors" 1979. 12. 4~5. Vienna

제 3 차 회의 : "Third Meeting of the IWG on Gas-Cooled Reactors" 1981. 5. 7~8. Vienna

## 8. 日本의 動向

「實驗炉의 設計」는 79년도까지 행한 一連의

개념설계를 바탕으로 80년도부터 상세설계에 착수하였다. 그 (I)은 상세설계 전체의 제 1단계로 실시한 것인데 안전성을 확보하면서 소정의 운전시험계획을 수행하기 위한 기본설계조건을 설정하고 이것을 만족하는 機器 및 계통의 설계를 관련 각 메이커의 협력하에 행하였다. 한편 日原研은 전문가들에 의한 안전성 검토 이외에 미국 GA社에 의한 설계개념의 평가를 진행시키고 있는데 여기서 얻어진 여러 성과는 앞으로 착수할 상세설계 (II)에 반영된다.

「燃料의 研究」는 연료의 건전성, 안전성의 시험 및 검사법의 개발을 계속하고 있으며 JMTR과 JRR-2에 의한 照射시험을 통해서 연료특성 평가를 하는 외에 연료被覆層의 개량을 시도하고 있다. 그리고 연료의 제조시험은 일본 국내의 메이커에 위탁하여 진행하고 있으며 생산기술의 연구 개선도 도모하고 있다. 「黑鉛材料의 研究」는 高温에서의 照射物性, 부식거동 및 기계적 여러 성질과 이들의 相關性 등을 각종 素材에 대해서 상세하게 조사하는 한편 炉床部斷熱구조재로 탄소이외의 재료도 검토에 착수하였다. 흑연 불순물농도의 定量方法에 대해서도 많은 知識을 얻었다. 핵연료자원의 多樣化라는 점에서 장래가 기대되고 있는 「토륨연료의 研究」는 酸化物系연료를 당면의 대상으로 해서 被覆粒子的 제조법과 그 特性測定法, 照射거동에 관한 기초적 연구를 진행시키고 있다. 「연료재처리」의 연구는 그 기술의 확립을 목표로하여 前處理에 관한 기본공정의 개념을 정리하여 그 프로세스 평가에 착수하였다.

「耐熱合金의 研究」는 하스테로이 XR에 관해 환경조건 및 측정방법의 明確化를 도모하면서 一連의 강도특성시험을 추진함과 동시에 脫浸炭現象의 연구를 시작하였고 또 중성자제어재와의 兩立性 평가시험을 실시하였다. 한편 하스테로이合金을 대신하는 새로운 超耐熱合金의 개발을 목표로 하는 기초연구에도 착수했다.

「耐壓低合金鋼의 研究」는 實驗炉压力容器材로 예정되어 있는 크롬 몰리브덴鋼에 대해 照射 및 時効에 의한 脆化, 破壞韌性 등의 시험을 행

하였고 压力容器의 안전성평가와 구조설계에 필요한 데이터 集積에 노력하고 있다.

「炉物理의 연구」는 既設의 半均質臨界集合體(SHE)를 사용해서 실험로의 模擬炉心을 구성하여 각종의 炉心體系에 대한 核의 여러 특성의 측정을 행하는 한편 熱中性子炉體系의 核計算의 표준code SRAC를 개발하였다. 또 실험炉의 核的安全性의 實證을 목표로 改造SHE에 低濃縮被覆粒子연료를 裝填하는 계획을 진행시키고 있다. 이 模擬炉心은 실험炉의 약 1/2규모로 82년도 후반기에 개조를 시작해서 初臨界를 84년도에 달성할 것을 목표로 하고 있다.

「原子炉計測의 연구」는 高温用核分裂 計數管의 개발에 성공했으며 실험炉의 운전조건에서 충분히 견디는 성능임을 확인하였다. 또 炉内 온도감시용의 高温熱電對 및 熱雜音溫度計의 試作개발이나 破損燃料 檢査시스템에서의 FP background 영향의 低減化연구도 진행시키고 있다. 「原子炉制御의 연구」는 안정도가 높은 온도 제어 방식을 확립하기 위해 원자로 플랜트의 hybrid simulator를 개발했고 이어서 제어계의 설계·평가를 일관해서 행하는 CAD 시스템의 개발을 하고 있다. 「FP Plate out의 연구」는 원자로 1차계내으로의 FP沈着挙動을 조사하기 위해 침착기구의 검토와 비파괴측정법의 개발을 진행시키며 이것을 사용해서 OGL-1 배관내에서의 FP침착량분포 측정과 分析을 행하였다. 또 침착을 이용한 FP filter의 기능實證시험을 하고 있다. 「熱工學의 연구」는 실험로의 연료체를 대상으로 하여 고온 헬륨가스 Loop(SGL)에서 실시한 일련의 伝熱流動實驗에 대해 검토를 한 결과 실험로의 열설계상 문제로 되어있던 層流化현상이 실험로의 연료체와 같은 구성의 環狀流路에서는 발생할 가능성이 극히 적음을 명백히 하였다.

「高温構造強度의 연구」는 고온구조체의 설계 및 안전성평가상 중요한 熱應力 ratchet變形, creep변형과 그 破損mode 등을 명확히 하기 위해 熱荷重시험과 円筒시험體의 内圧 creep시험을 계속했다. 「高温構造의 工學的研究」는 실험

炉의 구조설계상 중요시되고 있는 고온2중배관의 熱的거동, 炉心지지 포스트의 강도, 냉각재의 炉心内 누설의 흐름 등의 실험을 진행시키고 있다. HENDEL은 실험로를 구성하는 高温機器구조물의 성능을 확인하기 위한 장치인데 mother section(M), adapter section(A) 및 시험부로 구성되어 있다. 이 중 (M)+(A) section에 대해서는 82년내에 완성을 목표로 공사를 진행시키고 있다. 또 여기에 접속될 예정인 4개의 시험부중 연료체 stack實證시험부(T<sub>1</sub>)에 대해서는 설계제작에 맞추어서 시험부건물을 건설하고 있다. 「炉心耐震研究」는 실험로 연료체의 1/2 규모의 수직2次元炉心모델에 의한 진동시험에 이어서 82년도에는 水平2次元 모델에 의한 시험을 행하여 노심형상의 건전성을 유지시키기 위한 요인을 추구했다. 또 개발한 지진응답解析code에 의한 해석결과와의 비교를 통하여 실제 지진에서의 炉心挙動의 推定을 가능케 했다.

高温의 「in-pile gas loop( OGL-1)」은 實用照射始作부터 4년을 경과하여 금년 6월까지의 약 7,500시간 운전되어 실험로에 유용한 知識 축적에 기여했다. 照射실험에 대해서는 실험로의 사용조건에 가까운 조건下에서 MK-III 설계 사양에 의한 제1~제5차 연료시료의 시험을 하는 한편 耐熱合金이나 黑鉛재료의 시험을 계속하고 있다. 「高温照射기술」에 대해서는 高温照射下에서의 FP가스 放出거동을 조사하기 위한 gas sweep capsule의 운전을 계속하였다. 또 연료과손검출법의 유효성을 확인하는 장치가 금년 9월에 완성되며 OGL-1에서의 고온구조물의 거동측정시스템과 照射試驗用的 高温熱電對의 개발을 진행시켰다.

「照射後試驗技術의 개발」은 JMTR 및 JRR-2에 의한 照射材에 대해 각종의 照射後시험을 실시하며 OGL-1 연료체에 관한 첫수측정이나 内面관찰 등을 위시한 여러장치, 被覆연료입자에 관한 内藏가스圧 측정장치 등, 耐熱合金에 관한 真空引張시험장치 등 照射後시험에 필요한 주요 장치류의 개발정비에 노력하였다.

이상과 같은 원자로에 관한 연구개발과 장치

核熱이용형태로 유망시되는 물의 熱化學분해에 따르는 「水素제조에 관한 연구」도 진행시키고 있다. 여기서 고안한 프로세스는 닉켈, 沃素, 유허을 사용하는 것(NIS 프로세스)으로서 그 기본적인 특징을 工學的으로 발전시키도록 여러가지 조건의 평가개선을 도모하고 있다.

이들 기술개발 외에 다목적고온가스炉의 사회적 유용성을 명확히 하기위해 원자로를 포함한 「熱利用系」의 경제성 등에 관한 조사를 79년도부터 개시하여 熱에너지 市場의 現狀과 동향, 실용炉 및 製鉄, 石炭가스化, 液化導體의 核熱이용 unite plant의 개략설계와 경제성을 중심

으로 한 조사를 진행시켰다.

한편 「國際協力」에서는 78년만에 체결한 西獨 Julich 원자력연구소와의 고온가스炉연구개발협력 협정에 따라 연료, 흑연, 내열금속, 計裝, component시험, FP沈着, 안전성의 특정연구과제를 중심으로 공동실험을 포함한 기술협력을 진행시키고 있다. 또 미국과는 NRC와 체결한 고온가스炉 안전성에 관한 정보교환 決定에 따라 정보교환회의를 개최하는 한편 새로 GA社와 각서를 교환하여 고온가스炉의 연구개발면에서의 기술협력을 진행시키고 있다.

## 第22回 캐나다原子力協會 年次大会 參加

6月7일부터 8일까지 2日間 캐나다 토론토市에서 開催된 第22回 캐나다原子力協會(CNA) 年次大会에, 우리나라는 캐나다政府의 招請으로 原子力界 人士 17名이 參加하였으며 또한 會議에 이어서 外務省을 訪問하고 機器製作業체, 核燃料加工工場, Pickering原電, Point Lepreau原電建設現場 등을 視察하였다.

月城에 CANDU炉型原電 竣工을 目前에 두고있는 우리나라로서는, 이번 會議와 産業視察을 通하여 重水炉를 理解하는데 크게 도움이 되었다.

### (參加團 名單)

姜博光 科學技術處 原子力局長  
 劉旭鍾 科學技術處 原子炉審査課長  
 閔台植 科學技術處 原子力政策課 事務官  
 尹承植 動力資源部 電力局長  
 金善昶 韓國電力公社 理事  
 徐錫天 韓國電力公社 月城現場所長  
 朴祥基 韓國電力公社 原子力發電部 次長  
 田載豊 韓國電力公社 原子力發電部 次長  
 金東勳 韓國에너지研究所 前任研究部長

韓弼淳 韓國에너지研究所 大德工學센터所長  
 金相演 韓國原子力技術(株) 副社長  
 정성택 現代建設(株) 月城現場所長  
 김택호 東亞建設産業(株) 月城現場所長  
 金順熙 韓國重工業(株) 原子力管理部長  
 孫炅業 韓國重工業(株) 原子力技術室長  
 金鍾珠 韓國原子力産業會議 副會長  
 朴炳鎬 韓國原子力産業會議 常任理事