

남아공의 PBMR 건설 현황

서중석

한양대학교 원자시스템공학부 겸임교수

남아프리카공화국(남아공)은 국영 전력사인 Escom의 주도로 페블베드 원자로 (PBMR)를 국가 전략적 사업으로 추진하고 있다.

2010년까지 110MWe 실증로를 건설하고 2013년부터 400MWe 상용로 운전을 시작하는 스케줄에 따라 사업을 진행하고 있으며, 현재 대부분의 주 계약을 체결한 상태이다. 웨스팅하우스는 PBMR 사업에 15% 지분을 소유하고 있다

PBMR 발전소는 원자로 냉각재 출구 온도가 900°C인 중소형 고온가스로나이다. 따라서 PBMR은 수소 생산을 위한 열원으로도 사용이 가능하다.

남아공은 자국 내 건설뿐만 아니라 세계 시장, 특히 미국에 PBMR을 수출한다는 목표를 향하여 나아가고 있다.

현재 중소형 원자로와 수소 생산을 위한 고온가스로 개발과 원전 해외 수출을 추진하고 있는 우리에게 참고가 될 것 같아 PBMR 건설 현황 기사를 소개한다(<Nuclear Engineering International> Vol. 50, No. 608).

남아공 정부는 남아공이 PBMR (Pebble Bed Modular Reactor) 기술을 개발하여 판매하는 제안을 2004년 10월 승인하였으며, 정부는 PBMR 사업에 상당량의 자금을 배정하였다.

이와 관련하여 Alec Erwin 국영 기업 장관은 남아공은 장차 4000~5000MWe 전력을 Pebble Bed 원자로에서 생산, 공급하여 에너지

원의 다변화를 꾀하고 온실 가스 배출을 회피하는 목표를 가지고 있다고 언급하였다.

이러한 목표 달성을 위해서는 165MWe 출력 PBMR을 25~30기를 건설해야 한다

남아공 내각은 2004년 6월에 역시 원자력과학자들의 훈련 계획을 승인하였다.

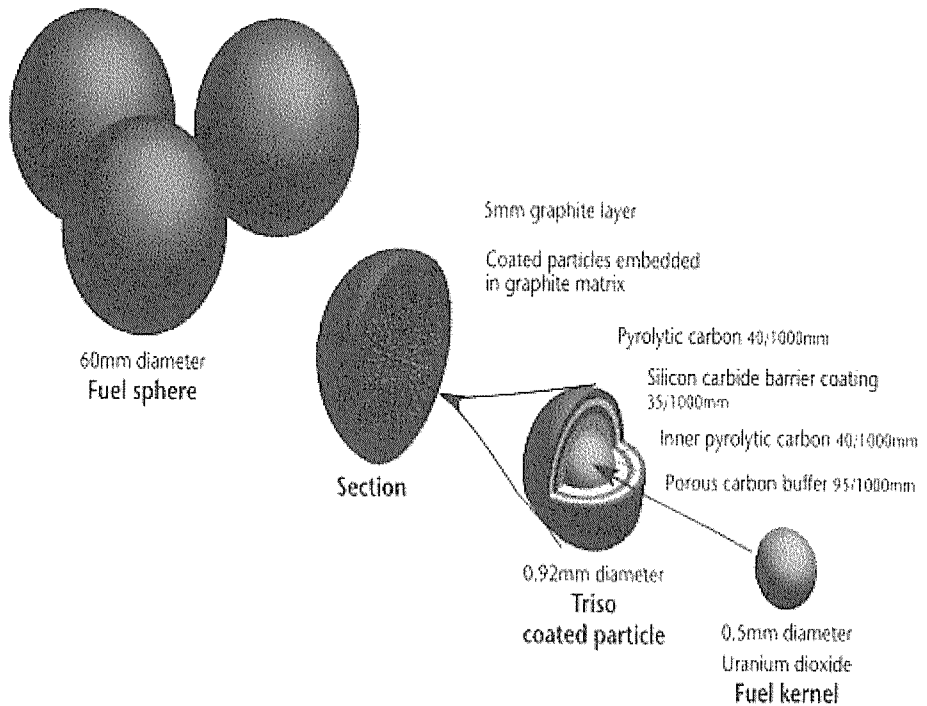
현재 PBMR 사업을 지원하고 있

는 투자 기관은 Escom(Industrial Development Corporation of South Africa) 및 BNFL이다.

이 두 기관들은 고유 안전성을 가진 소용량 마주라(modular) 표준 원전을 온실 가스를 배출하지 않는 새로운 에너지원의 대안으로 만들겠다는 비전을 가지고 있다.

PBMR 사업은 실증로를 Cape Town 근처에 위치하고 있는

Figure 1: PBMR fuel design



<그림 1> PBMR 연료 설계

Koeberg에, 그리고 파일릿 핵연료 공장을 Pretoria 근처의 Pelindaba에 건설한다.

현재 계획으로는 110MWe 실증 발전소 건설을 2007년에 착공하여 2010년에 준공하며, 2013년에 최초 PBMR 상업 운전을 시작할 예정이다.

Pebble Bed 설계의 근원이 되는 독일 기술을 이해하고 직접적인 Brayton 사이클의 응용 기술 개발 및 예비 설계를 완성하는 데 지금까지 3백만 시간 이상의 엔지니어링 작업이 소요되었다.

이러한 노력의 과정에서 사업 초기에 세웠던 기본적인 안전성 및 경제성 목표 달성 가능성을 확인하였다.

2004년 11월에 PBMR은 다음 단계를 위한 모든 주계약 체결을 추진해도 좋다는 승인을 받았다.

이들 계약 중에는 PBMR의 헬륨 구동 터보-발전기 계통 설계를 위한 일본 MHI(Mitsubishi Heavy Industries)와의 계약이 포함되어 있다.

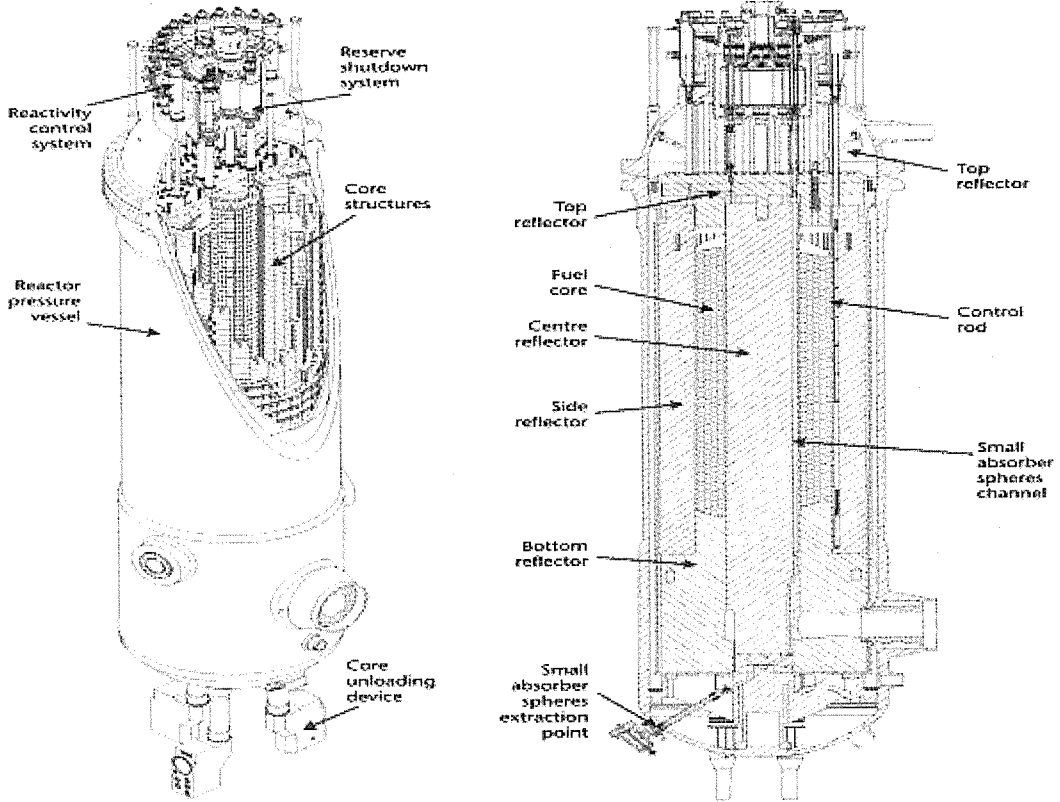
MHI는 자재와 밀봉 시험을 비롯하여 터보-발전기 계통의 설계를 완성하는 책임을 지며, 설계와 검증

시험으로부터 고온/고압 상태의 헬륨 가스가 충족할 특수 요건을 도출한다.

또한 MHI는 원자로 내부 구조물, 핵연료구 및 흑연 반사체를 지지해주는 노심 베럴 집합체(Core Barrel Assembly)의 철제 구조물 설계를 수행한다.

PBMR 사업은 2004년 11월 22일에 Pelindaba에서 헬륨 시험 설비 HTF(Helium Test Facility) 건설을 위한 기공식을 거행하였다.

HTF는 실제 헬륨 설비와 같은 높이를 가진 고온, 고압 시험 설비로



<그림 2-1> 400MWt 원자로 유니트의 수직 단면도

서 PBMR 헬륨 사이클의 원형(prototype) 기기들의 시험에 사용된다.

또한 HTF는 핵연료 취급 설비, 반응도 제어 설비 및 원자로 정지 시스템의 운전을 모의(simulate)하여 각 기기의 운전성, 내구성, 신뢰도 및 보수성을 평가하는 데 사용된다

기본 설계 개념

PBMR 출력 변환은 열원인 헬륨

냉각 및 흑연 감속 원자로심과 Brayton 단일 루프 직접 사이클에 기반을 두고 있다.

헬륨 냉각 가스는 열을 노심으로부터 터보-기기, 발전기, 컴프레서, 가스냉각기 및 복열기로 구성된 출력 변환 계통으로 직접 전달한다.

PBMR 핵연료는 흑연구에 내장된 농축 우라늄 연료핵(fuel kernel)으로 구성된다(<그림 1> 참조).

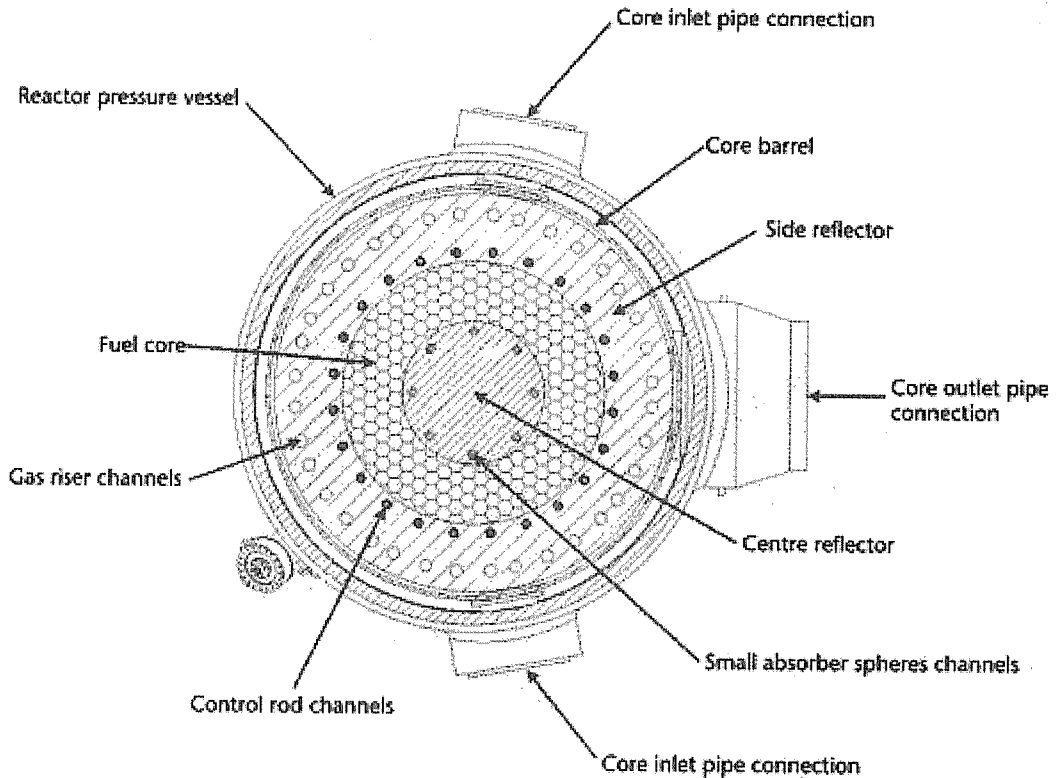
각 연료핵은 연속해서 4개의 층으로 코팅되어 있다. 가장 안쪽 층은

다공성의 탄소로 코팅되어 핵분열 생성물이 내부 압력을 증가 시키지 아니하고 모일 수 있도록 해준다.

다음 층들은 열분해성 탄소층에 이어서 실리콘 카바이드(강내화성 물질), 그리고 마지막으로 열분해성 탄소층으로 구성된다.

외부 3개 층은 핵분열 생성물의 방출을 저지하는 복합 장벽 역할을 하며, 이 중에서 실리콘 카바이드 코팅이 가장 큰 역할을 한다.

이들 층들은 우라늄 연료와 핵분열



〈그림 2-2〉 400MWt 원자로 유닛의 수평 단면도

생성물을 구속할 뿐 아니라 연료핵들이 자신들의 소형 압력 용기 내에 들어 있는 것과 같은 효과를 주기 때문에 뛰어난 안전성을 얻을 수 있다.

연료를 내장하고 있는 연료구(직경 1mm)들은 바깥 표면이 5mm 흑연층으로 코팅된 50mm 흑연구 내에 박혀 있다.

흑연구의 흑연은 감속제 역할을 하며 바깥 흑연층은 마모와 같은 기계적 손상으로부터 연료구를 보호한다.

이 연료 설계는 20여 년 동안 운전 중인 독일의 AVR 및 THTR 시험로에서 시험 결과 PBMR 운전 조건 하에서 장시간 견딜 수 있음이 증명되었다.

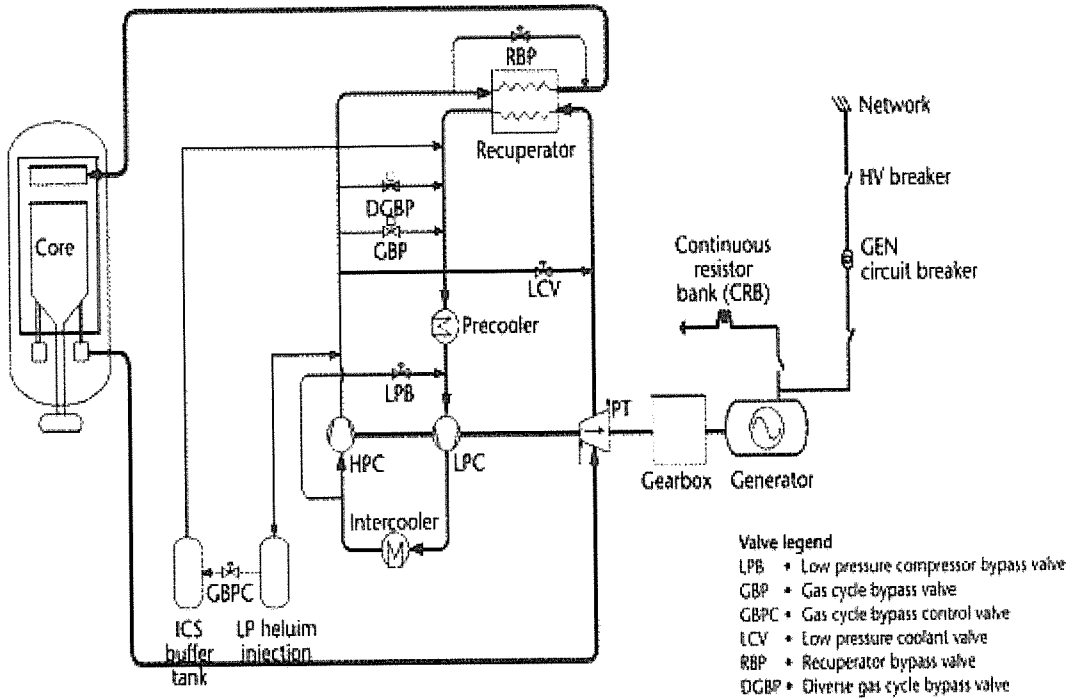
이처럼 연료를 여러 겹으로 포장(packaging) 하여 정상 운전 및 가상 비정상 상태에서 핵분열로 생성된 방사성 핵종들의 누출에 대한 다중 장벽을 형성함으로써 목표했던 고유 안전성 달성이 가능해진다.

또한 연료의 구형 설계와 운전 중

연료 교체로 노심이 균질화 되어 정상운전 및 사고시 침투 온도가 낮아진다.

초기의 268MWt 설계

PBMR 설계팀은 처음에는 268 MWt 발전소의 설계를 개발하였으며, 이 발전소를 참조 발전소로 하여 400MWt PBMR 설계를 개발하였다. 초기의 268MWt 발전소의 설계 특성은 아래와 같다.



<그림 3> 400MWt PBMR의 주출력 계통 흐름도

1. 원자로 유니트

여기서 원자로 유니트는 원자로 용기와 노심 배럴, 흑연 구조물 및 반응도제어 설비로 구성된 노심 구조물을 말한다.

원자로 압력 용기는 직경이 6.2m, 높이 20.5m, 벽 두께가 120-220mm이며 원자로급 단조강으로 제작되었다.

노심 배럴은 흑연 감속재와 탄소 열 차폐판을 지지한다. 흑연과 탄소를 합친 반경은 1m이다.

흑연 감속재에는 제어봉 구동을 위하여 35개의 수직 구멍이 파여 있

다. 노심은 연료구 및 흑연구 기둥과 중앙의 동적 감속재 기둥으로 구성된다.

2. 주출력 계통(main power system)

주출력 계통은 원자로 유니트와 출력 변환 계통을 연결한다. 출력은 주로 출력 변환 계통을 흐르는 냉각재 유량 조절에 의하여 제어되며, 노심과 출력 변환 기기의 온도차는 일정하게 유지된다.

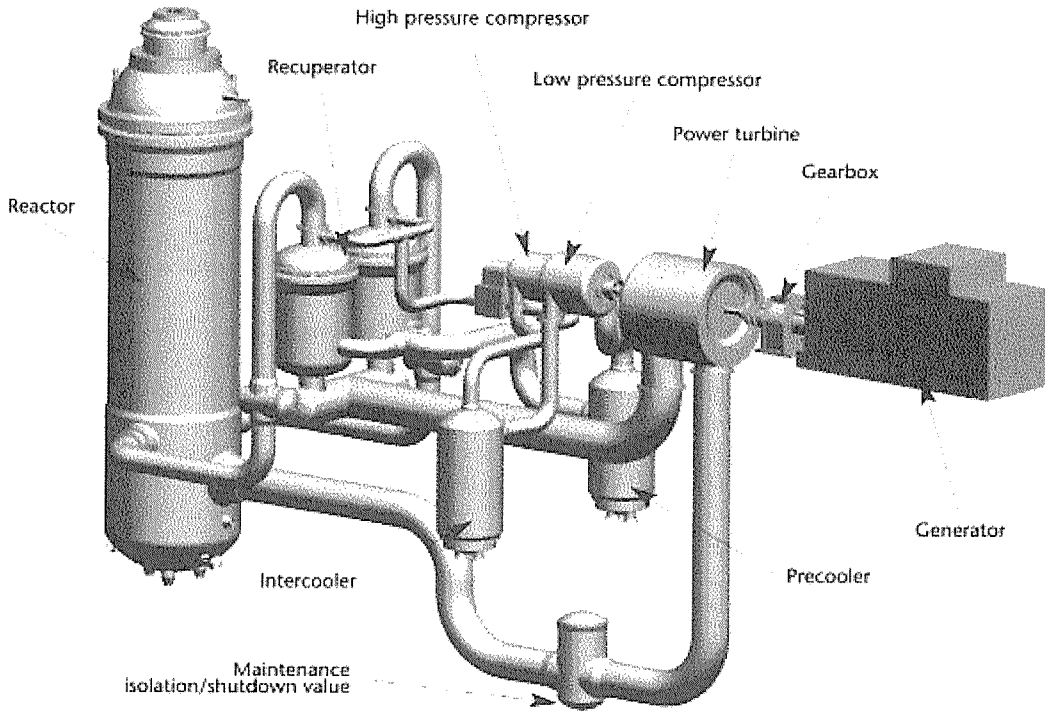
노심을 떠나는 뜨거운 냉각재는 2기의 수직 터보-컴프레서와 수직 터보-발전기(소위 3축 시스템)를

구동한다.

터빈을 떠난 냉각재는 복열기(recuperator) 1차 측을 지나서 냉각기를 거친 후 컴프레서에 들어간다. 컴프레서를 떠난 냉각재는 복열기에서 예열되어 노심으로 되돌아간다.

3. 원자로 노심

268MWt 평형 노심에는 333,000 연료구와 중앙 감속재 지역에 110,000개의 흑연구가 들어 있다. 각각의 연료구는 8.1% 농축 우라늄 9g을 내장하고 있으며, 목표 연소도는 80Gd/tU이다.



〈그림 4〉 400MWt PBMR의 주출 변환 유니트 배치도

노심은 18개의 제어봉을 가지고 있는데, 이중 9개는 출력 변동을 위한 반응도 제어봉이며 나머지 9개는 원자로 정지에 사용된다.

100-40-100% 부하 추종 능력이 있으며, 9개의 제어봉이 부하 추종 운전 동안에 Xe 포이싱을 보상하는 반응도를 제공한다.

원자로 저온 정지를 위하여 독립된 별도 원자로 정지 시스템이 설치되어있다.

이 정지 시스템은 감속재 내의 17개 구멍 속에 작은 중성자 흡수구를 떨어뜨려 원자로를 정지시킨다. 노심

에 투입된 이들 흡수구는 헬륨 가스 운반 시스템에 의하여 제거된다.

4. 연료 장전 계통

운전중에 연료와 흑연구를 장전 및 인출할 수 있다. 독일 원자로와 마찬가지로 연료가 원자로 하부에서 인출된다.

노심 인출 장비가 연료와 흑연구를 방출 슈트(chute)를 통하여 인출하면, 연소도 등을 분석해서 재사용이 가능하다고 판단되는 연료는 9개의 연료 장전 튜브를 통하여 노심으로, 그리고 흑연구는 1개의 튜브를

통하여 노심 중앙으로 반환된다. 사용후연료는 사용후연료 저장 탱크로 이송된다.

노심 개조 및 출력 증강

중앙의 동적 감속재 설계를 할 초기에는 중성자 조사로 인한 흑연 노심 구조물의 거동에 대해 제한적인 지식밖에 없었다.

그러나 흑연 거동에 관해 더 깊은 정보를 얻게 됨에 따라 노심에 인접한 반사체를 수명 중간에 교체할 수 있도록 노심 설계시 대비해야 한다



는 것이 분명해졌다.

이와 함께 노심 증앙을 따라 움직이는 흑연구 반사체를 고정 반사체로 변경하고 계통 압력을 9.0MPa로 상향 조정하는 등 268MWt 발전소의 설계를 개선하여 아래와 같은 특성을 가진 400MWt 원자로 설계를 개발하였다

- 노심 외경: 3.7m, 증앙의 고정 반사체 직경 및 높이: 2m, 11m
- 노심 열출력: 400MWt
- 냉각재 유량: 185kg/s, 총 노심 압력 강하: 291kPa
- 원자로 입구 및 출구 온도: 500℃, 900℃
- 출력 변환 유니트 (PCU) 매니폴드 압력: 9.0MPa
- 컴프레서 압력비: 3.2

고정된 증앙 반사체 사용으로 얻는 노물리 이점은 반응도 제어봉을 증앙 반사체에 삽입할 수 있다는 점이다.

이에 따라 정지 제어봉을 증앙 반사체로 옮기고 외부 반사체의 제어봉 수를 증가시켜 초기 설계에 비하여 원자로 정지 능력이 증대되었다.

<그림 2>는 고정된 증앙 반사체를 가진 400MWt 원자로 유니트의 약도이다.

출력 변환 유니트(PCU) 재설계

기본 설계 단계에서 268MWt PCU를 재검토한 결과, 3축(three-shaft)은 PCU 설계를 복잡하게 하므로 가능한 제거하는 것이 바람직하다는 결론에 도달했다.

그리고 터보-기기의 자기 베어링(magnetic bearing)에 전원을 공급하기 위해 필요한 PCU 압력 경계 관통부의 크기와 수가 문제가 되었다.

관통부의 수가 많아지면 제조 설계의 복잡성과 압력 경계 유지 비용이 증가할 뿐 아니라 운전 중 헬륨 누설 위험이 커진다.

이에 따라 400MWt PCU는 3축 대신에 단일 수평 터빈-컴프레서 축을 사용토록 재설계 하였으며, 약 1000개의 압력 경계 전자 베어링 관통부를 제거하였다.

<그림 3>은 400MWt PBMR의 출력 계통 흐름도이다.

PBMR 실증로 이후 계획

PBMR은 웨스팅하우스가 주도하는 미국에 기반을 둔 컨소시엄에 가입하였다. 이 컨소시엄의 주회원은 Sargent & Lundy, Air Products and Chemicals, 그리고 Bell Company이다.

이 컨소시엄은 미국 에너지부(DOE)의 차세대 원자력발전소(NGNP) 프로젝트에 참여 의사를 표명하였으며, 이에 대하여 남아공 정부도 지지를 하고 있다.

PBMR은 2003년 9월 DOE가 발행한 NGNP 요건에 따라 개념 설계를 개발하여 DOE가 지명한 독립된 기술 검토 그룹(ITRG)에 두 번에 걸쳐 개념설계를 Pebble Bed 기술의 설계 원리와 함께 제출하였다.

1. NRC 설계 인증 획득

PBMR은 세계 시장을 대상으로 삼고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 먼저 미국 시장을 개척하여야 한다. 그런데 NRC 설계 인증을 받지 않은 원자력발전소를 구입하려는 미국 전력사는 없을 것이다.

이에 따라 PBMR은 2004년 2월에 NRC가 설계 인증 절차를 시작해 줄 것을 정식으로 요청하였다. PBMR은 2011년 말에 설계 인증 절차가 끝날 것으로 기대하고 있다

2. 세계 원자로 시장에 진입

PBMR은 현재 세계에서 추진되고 있는 신행 상용 원자로 프로그램 가운데 가장 큰 프로그램이다.

PBMR은 Escom에 실증로를 2010년에 인도하고 향후 10년에 걸쳐 30여기를 수주할 것으로 기대하고 있다. 물론 2010년 이후에는 PBMR은 다른 시장에도 공급할 준비가 되어 있을 것이다.

PBMR 설계는 고유 수동 안전성, 마주라 건설 및 출력 유연성 등과 같은 특성을 보유하고 있으며, 특히 300-700MWe 중소형 원자력 발전소에서 경쟁력 있는 경제성을 제공한다.

PBMR은 가까운 장래에 4세대 원자로의 특수 요건을 충족하는 속성을 가진 최초 상용로가 될 것이다. 그리고 PBMR은 INL(Idaho National Laboratory)에서 추진하고 있는 수소 생산 실증 설비의 열원으로 사용할 수 있도록 쉽게 개조할 수가 있으며, 또한 다른 열병합 발전과 같은 용도에도 적용이 가능하다. ☒