



최보성 / bosung@kopec.co.kr

## 핵융합 발전용 동력변환계통 개통 소개

서울대학교 농업기계공학과 학사  
(현) 한국전력기술(주) 과장



김선민 / seonmin@kopec.co.kr

충남대학교 기계설계공학과 학사  
(현) 한국전력기술(주) 차장

### 1. 서론

핵융합과외플랜트는 국제열핵융합로(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)와 상업용 핵융합발전소의 중간단계에서 건설 예정인 발전소로서 토카막<sup>1)</sup>방식의 핵융합로 내에서 일어나는 중수소와 삼중수소의 핵융합반응을 이용하여 전기를 생산하는 발전소이다.

핵융합에너지는 이산화탄소 발생이 없어 지구 온난화를 야기하는 온실가스를 배출하지 않으며, 원자력발전의 0.04%에 불과한 소량의 방사능으로 원자력발전처럼 장기적 대형 폐기물 처리시설도 필요하지 않다. 연료 공급이 중단되면 1~2초 내로 운전이 자동정지해 발전소 폭발, 방사능 누출 위험도 없다. 아울러 바닷물에 풍부한 중수소와 지표면에서 쉽게 추출할 수 있는 리튬을 원료로 하기 때문에 자원이 거의 무한하다고 할 수 있다.

라틴어로 ‘길’을 뜻하는 ITER는 국제 협력 하에 500MW급 핵융합발전 실험로를 건설하는 프로젝트로 한국 유럽연합(EU), 일본, 러시아, 미국, 중국 그리고 인도 등 7개국이 공동으로 참여하고 있다. ITER는 세계 유일의 핵융합실험로이며 상업용핵융합로로 이어지는 핵융합 전략 로드맵에서 핵융합에너지의 실용화를 위한 과학적, 공학적 가능성을 검증하는 단계이다. ITER사업은 지난 40년간 세계 핵융합실험 장치들이 이루어 낸 실험 결과들을 종합해 핵융합에너지 상용화를 공학적으로 점검하는 것으로 이후 실증로를 거쳐 상용화 발전에 돌입한다.

지난 7월에 한국형 핵융합 연구장치인 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)가 시험운전에 성공하였다. 이에 본고에서는 핵융합과외플랜트의 주요계통중 동력변환계통의 Model을 수립 및 검토하여 핵융합 발전의 가능성 및 타당성을 제고해 보고자 한다.

1) 토카막(Tokamak) : 러시아말인 Totoid Kamera(chamber) Magnit(magnet) katushka(coil)의 첫자를 따서 만든 합성어. 반응을 일으키기 위해서는 초고온을 강한 에 의해 용기 중앙부의 공간에 띄우도록하는 플라스마 밀폐장치.



## 2. 핵융합파워플랜트 설계기준

핵융합파워플랜트는 다음과 같은 설계 기준을 가지고 건설되는 것으로 가정한다.

- 중수소 삼중수소를 연료로 사용하는 초전도 토카막 방식을 이용한 핵융합로
- 헬륨(Helium)을 냉각재로 사용하는 열수송 방식
- 총 전기생산량 : 1.5 GWe
- 발전소 수명 : 60년
- 이용률(availability) : 80%
- 최악의 가상시나리오에서도 고유 안전성 확보

핵융합파워플랜트는 표 1과 같이 크게 핵융합로계통, 수송계통 그리고 동력변환계통으로 구성된다.

## 3. 동력변환계통의 개념 및 구성 요소

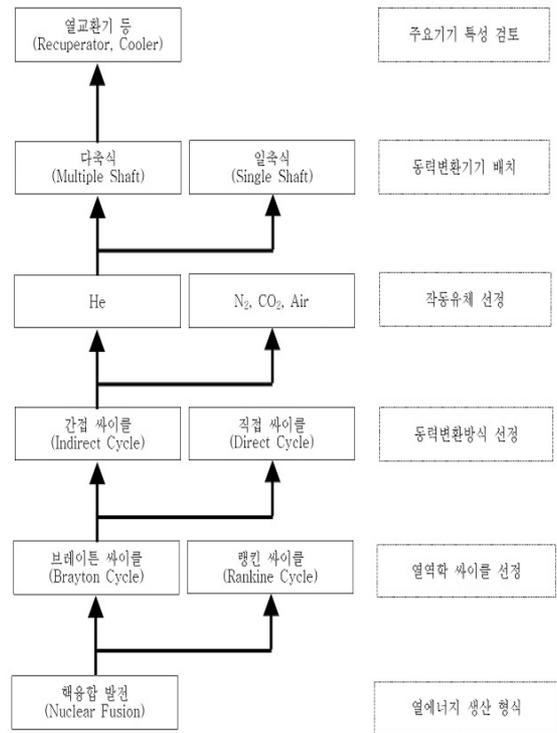
### 3.1 기본 개념 선정

동력변환계통은 열수송계통에서 얻어진 열에너지를 전기에너지로 변환시키는 계통이며 열역학적 사이클, 개방형 또는 폐쇄형 사이클, 직접식 또는 간접식 사이클, 작동유체, 축 배열 등에 따라 다양한 선정방식이 가능하다.

동력변환계통은 그림 1과 같은 결정수목에 따라 여러 기술적, 경제적 요건을 고려하여 최적의 계

통이 선정되어야 한다.

상기의 결정수목에 따라 열수송계통의 냉각재를 기체 헬륨을 이용하는 동력변환계통은 표 2와 같이 다양한 사이클에 대한 검토가 가능하다.



[그림 1] 동력변환계통 선정을 위한 결정수목 예

<표 1> 핵융합파워플랜트 기본 구성

계통 분류	기능	구성 요소
핵융합로계통	• 핵융합반응을 일으킴	• 진공용기 • 초전도 자석 • 플라즈마 가열 및 전류구동장치 • 플라즈마 진단장치
수송계통	• 노심 플라즈마 내의 핵융합반응으로 부터 나오는 중성자의 운동에너지를 열에너지로 변환시키고, 생성된 중성자를 통해 핵융합반응의 연료인 삼중수소를 발생시키고 이를 처리하여 중수소와 함께 다시 노심 플라즈마의 연료로 공급	• 열수송계통 (증식블랑켓, 디버터) • 연료주기계통 (진공배기계통, 연료정제계통, 동위원소분리계통, 연료저장계통, 연료공급계통)
동력변환계통	• 열수송계통에서 얻어진 에너지를 이용하여 실제 전력을 생산	• BOP (Balance Of Plant)



### 3.2 구성 요소

동력변환계통의 구성은 열역학적 사이클에 따라 달라지며 각 사이클의 주요기기는 아래와 같다.

#### 3.2.1 Brayton Cycle

Brayton Cycle은 2개의 단열변화와 2개의 등압변화로 구성되는 사이클로 Rankine Cycle 대비 상대적으로 고온 운전에 유리하다. 복합화력발전에서 사용되는 가스터빈 발전과 같은 개방형 시

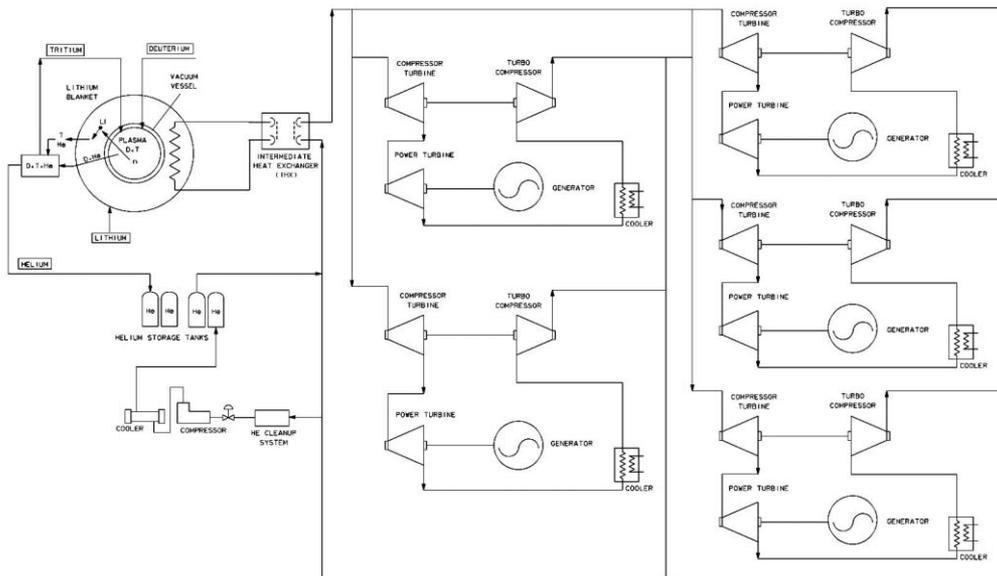
스템과 고온가스원자로에서 사용하는 헬륨가스 터빈발전 같은 폐쇄형 시스템이 있으며 재생열교환기(Recuperator), 중간 냉각기(Intercooler)를 통해 효율이 개선된다. 폐쇄형 시스템의 작동 유체로는 He, CO<sub>2</sub> 등이 있으며 사이클에서 작동 유체의 상변화 과정이 없다(그림 2 참조).

#### 1) 주요 기기

- (1) 가스터빈(Gas Turbine)

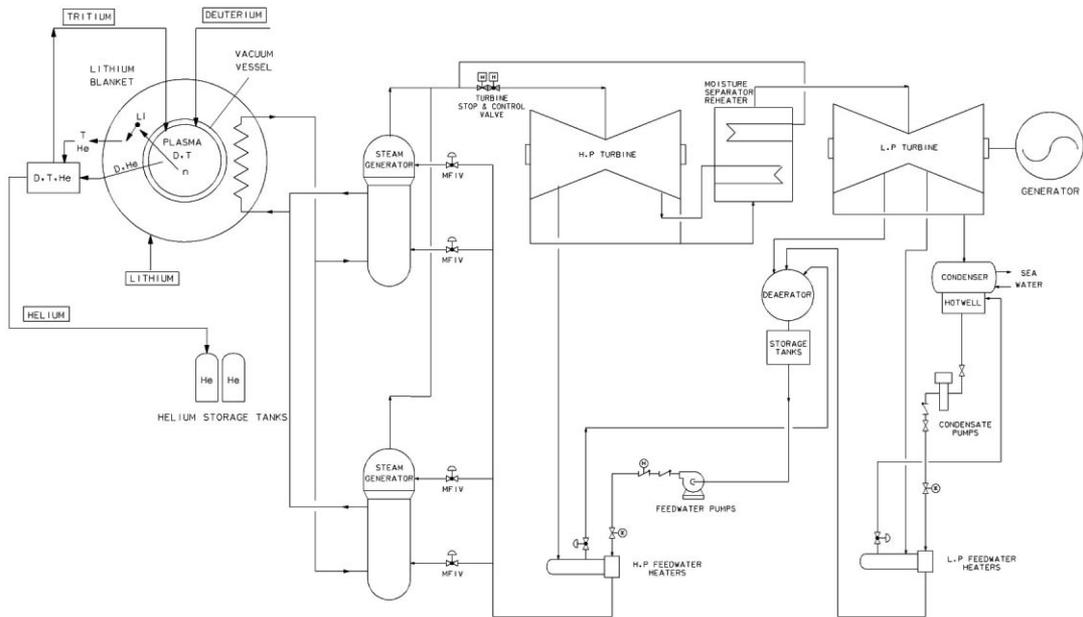
<표 2> 동력변환계통의 구성방식

Cycle	내용
간접식 Brayton Cycle (그림 2 참조)	<ul style="list-style-type: none"> <li>고온가스(Helium)를 작동유체로 사용하여 적용가능</li> <li>핵융합로와 2차측 사이에 중간열교환기를 사용하여 2차측 작동유체로 헬륨을 사용</li> </ul>
간접식 Rankine Cycle (그림 3 참조)	<ul style="list-style-type: none"> <li>열수송계통 냉각재와 급수와의 열교환기를 사용하여 적용가능</li> </ul>
간접식 Combined Cycle (Brayton+Rankine) (그림 4 참조)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Brayton 사이클과 Rankine 사이클을 복합한 동력변환계통 적용가능</li> </ul>
직접식 Brayton Cycle (그림 5, 6 참조)	<ul style="list-style-type: none"> <li>토카막의 냉각재인 헬륨을 2차측에서 직접 터빈구동 작동유체로 사용</li> </ul>



[그림 2] 간접식 Brayton Cycle 예





[그림 3] 간접식 Rankine Cycle 예

축시켜 물로 회수하는 장치이다. 터빈에서 복수기가 보유한 열낙차를 크게 하여 터빈 효율을 향상시키고, 응축된 물을 재사용함으로써 물처리 비용을 절감하며, 급수를 보충하거나 각종 드레인 회수를 위한 장소로 사용된다.

(3) 급수펌프(Feedwater Pumps)

급수 펌프(Feedwater Pump)는 급수를 가압하여 고압 급수 가열기를 거쳐 증기발생기(또는 폐열회수열교환기)로 공급하는 펌프로서, 증기발생기(또는 폐열회수열교환기)가 운전중 일때는 언제나 급수를 공급하여야 한다. 따라서 급수펌프는 발전소에 있어서 대단히 중요한 기기의 하나로 신뢰도가 커야한다.

(4) 급수가열기(Feedwater Heater)

급수 가열기에는 저압 급수 가열기(Low Pressure Heater, LP HTR)와 고압 급수 가열기(High Pressure Heater, HP HTR)가 있다. 터빈에서 이미 부분적으로 일을 한 증기를 추출하여 급수를 가열함으로써 터빈 배기량을 감

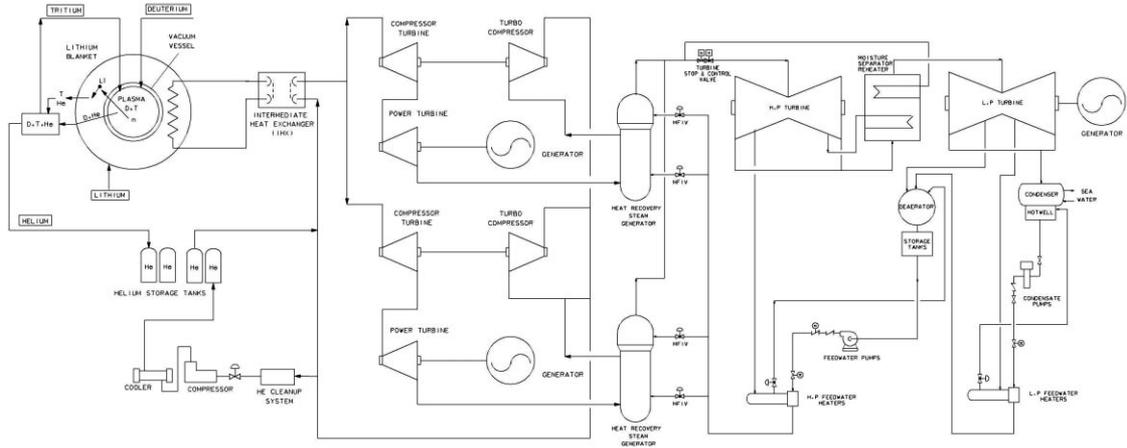
소시켜 복수기를 작게 설계할 수 있고, 냉각수에 의해 빼앗기는 열량 손실을 감소시키므로 발전소 효율이 향상된다.

3.2.3 Combined Cycle

Combined Cycle은 Brayton Cycle과 Rankine Cycle을 복합하여 계통구성한 것으로 Brayton Cycle과 Rankine Cycle 등의 단독 싸이클과 대비하여 Combined Cycle이 계통구성방식과 초기 투자비, 운전 및 유지보수 측면에서 불리하나, 출력 및 열효율의 관점에서 우수하다. 관련 주요기기는 상기의 Brayton Cycle과 Rankine Cycle에 기술되어 있다(그림 4 참조).

4.1 작동 유체(Working Fluid)에 대한 검토

재료의 호환성, 침식 및 화학적 반응의 최소화뿐만아니라 높은 열성능 및 방사능에 대한 안정성이 Working Fluid의 선택시 고려되어야 하는 중요 요소이다.



[그림 4] 간접식 복합 Cycle 예

가스사이클에서 적용가능한 기체로 헬륨 및 공기, CO<sub>2</sub> 등이 있다. 헬륨은 불활성 기체로 중성자를 흡수하지 않음으로 방사능 함유 가능성이 많지 않다. 헬륨은 화학적 반응을 일으키지 않으므로 기기부품(터빈 블레이드 등)의 저하를 방지할 수 있다. 또한 헬륨은 공기와 비교하였을 때 비열 및 열전도도, 압력손실 등의 측면에서 우수하므로 더욱 경제적인 매체라 할 수 있다.

그러나 헬륨은 가벼운 기체이므로 누설이 쉬우므로 고압에서의 밀봉이 중요한 고려사항이다. 방사선 조사에 안정적인 S-CO<sub>2</sub>(Supercritical CO<sub>2</sub>(30.98℃ 이상, 7.377MPa 이상))를 작동유체로 적용하는 것에 대하여 검토가 별도로 수행되어야 한다.

## 5. 핵융합파워플랜트 동력변환계통의 설계 예

### 5.1 기본 개념

핵융합이론을 활용한 발전을 위한 동력변환계통 구성의 설계 예로는 고온가스 원자로(High Temperature Gas Reactor, HTGR) 등에서 검토되고 있는 바와 같이 1차측의 헬륨을 가스터빈 사이클의 작동유체로 활용하는 개념을 바탕으로

개념설계를 수행한다. 이를 위하여 Primary Cycle 및 Secondary Cycle에는 다음과 같은 가정을 기초로 검토되었다.

- 1) 핵융합파워플랜트는 상대적으로 효율이 높은 직접식 사이클로 설계한다. 열수송계통 증식블랑켓의 냉각제인 기체헬륨은 토카막의 증식블랑켓에서 가열되고 고온 고압(850℃, 7.50MPa)의 기체헬륨이 가스터빈의 작동유체로 하는 직접식 Brayton Cycle을 사용한다. 토카막의 Diverter는 동력변환계통에서 일을 하고 난 헬륨을 일차로 가열하는 기능에 사용된다.
- 2) 동력변환계통에서 생산되는 전기출력은 총 1.5 GWe로 가정하며 목표 열효율은 40% 이상으로 한다. 다음은 핵융합파워플랜트 예비설계안을 기준으로 표 3과 같이 설계변수를 가정한다.

### 5.2 계통 구성

- 1) 헬륨터빈사이클은 약 300MW 출력의 동일한 5개의 사이클로 구성하며 증식블랑켓에서 가열된 헬륨은 공통모관을 통하여 5대의 터빈으로 공급된다.

2) 헬륨터빈사이클에서 배기되는 헬륨은 토카막의 Diverter로 공급되어 일차 열교환을 하고 증식블랑켓에서 재가열된다. Diverter 입구에서의 헬륨압력은 8MPa로 한다. Blanket

에서의 열출력은 3,514 MWt, Diverter에서의 열출력은 643 MWt로 한다.

3) 각 헬륨터빈사이클에는 Recuperator, Pre cooler 및 2단의 Intercooler를 설치한다.

4) 전체전기출력은 1.954 MWe이며 이중 Primary Cycle의 운전을 위하여 공급되는 전력(Recirculation Power Fraction)을 0.23으로 설계한다.

5) 상기의 설계개념을 적용한 동력변환계통의 개념도는 그림 5와 같다.

〈표 3〉 핵융합파워플랜트 예비설계안의 설계변수

Parameter	Design
Unit Size (MWe)	1,500
Fusion Power (MW)	3,571
Blanket Power (MW)	3,514
Diverter Power (MW)	643
Plant Thermal Power (MW)	4,157
Plant Thermal Efficiency	0.47
Gross Electrical Power (MW)	1,954
Recirculation Power Fraction	0.2
Net Electrical Power (MWe)	1,563
Pumping Power (MW)	100
Net Plant Efficiency	0.42
Plant Capacity Factor	0.8

### 5.3 헬륨터빈 사이클 기본설계

1) 상기 5.2의 기본구성을 토대로 핵융합파워플랜트의 동력변환계통 Model을 구성하면 표 4와 같이 정리할 수 있다.

2) 토카막에서의 열에너지를 활용한 동력변환계통의 설계를 직접식 Brayton Cycle로 300MW 전기출력의 헬륨터빈을 적용한 모

Value of pressure drop refered from GTHTR300

- Recuperator high side : 0.5%
- Recuperator low side : 1.8%
- Precooler : 0.6 %
- Blanket : 1.3%
- Diverter : 0.5%

Value of pressure ratio refered from GTHTR300

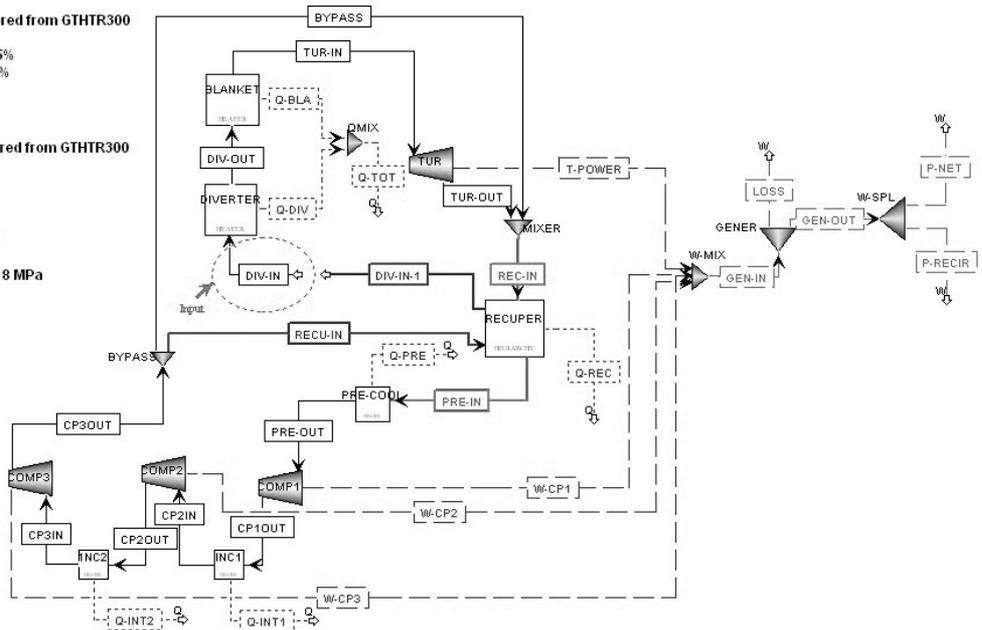
- Compressor : 2.0
- Turbine : 1.87

Primary property of system

- Pressure at diverter inlet : 8 MPa

Bypass flow

- Bypass mass flow : 0 kg/s



[그림 5] 헬륨터빈 사이클 구성



<표 4> 핵융합파워플랜트의 BOP 계통 Model 주요 변수

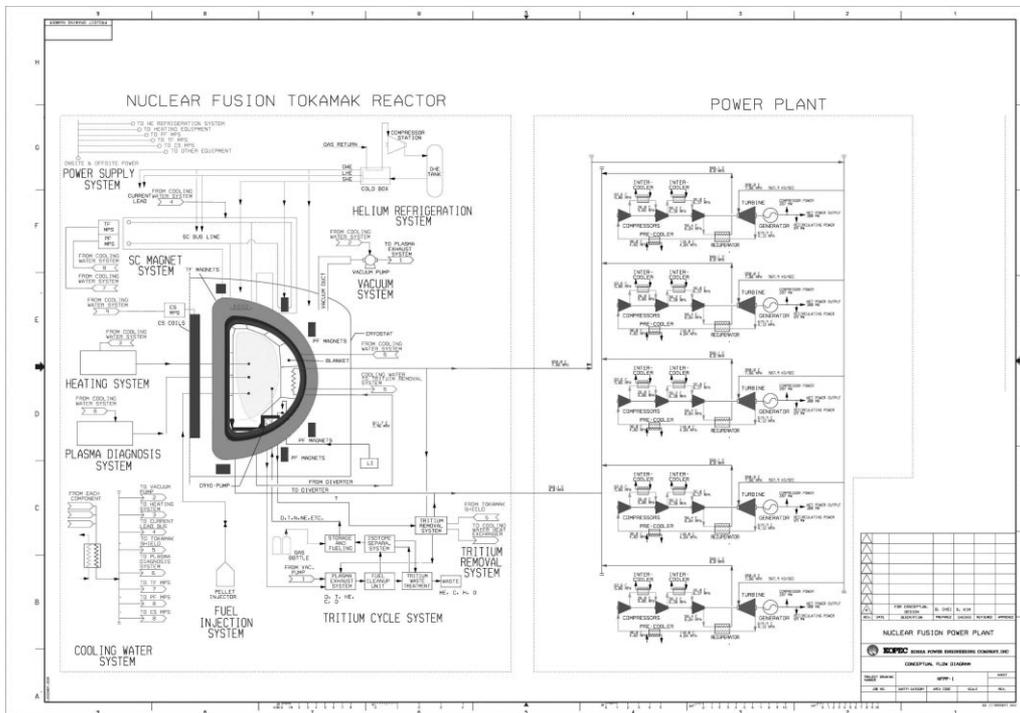
Parameter	Design
Cycle Thermal Power (MWt)	3,571
Thermal Efficiency (%)	46.43
Compressor Outlet Pressure (MPa)	8.04
Compressor Pressure Ratio	2.0
Heat Source Pressure Drop (%)	1.3@ Blanket
Turbine Inlet Temperature (°C)	850.0
Compressor Inlet Temperature (°C)	30.0
Diverter Inlet Temperature (°C)	568.1
Mass Flow Rate (kg/s)	567.9
Generated turbine power (MWe)	679
Required comp. power (MWe)	287
Generator loss (MWe)	6
Net Power (MWe)	386
Recirculating power (MWe)	89
Terminal power (MWe)	297
Generator Efficiency (%)	0.985

델로 설계할 경우 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 그림 6은 핵융합파워플랜트의 개념설계도로써 Primary Cycle의 주요구성계통 및 동력변환계통의 헬륨터빈사이클을 나타낸다. 발전기에서의 출력단은 한 터빈사이클에서 약 300 MWe의 출력을 나타내도록 구성하였다.

### 5.4 설계 예에 대한 의견

핵융합파워플랜트의 동력변환계통 개념 및 구성에 대한 실증설계는 구현 가능하며, 다음의 사항에 대한 추가 검토가 필요하다.

- 1) 핵융합 발전으로 동력변환계통을 직접식 Brayton Cycle로 설계한 결과 약 46%의 효율을 가진 헬륨터빈 사이클을 모델링하여 보았다. 모델링은 Primary Cycle의 열성능에



[그림 6] 헬륨터빈을 적용한 핵융합파워플랜트 모델



대한 가정을 바탕으로 이루어졌기 때문에 Primary Cycle의 설계가 검증되어야 터빈사이클의 성능의 정확한 판단을 수행할 수 있다. 또한 본 검토에서 BOP 구성기기의 성능은 개략적 성능을 제시하였으며 상세 설계 및 제작사의 확인 등을 통하여 계통의 설계를 검증하여야 할 것이다.

- 2) 300MW급 가스터빈의 제작이 기술적으로 실현되어야 하며 열교환기 형식 및 용량의 비교 검토를 통하여 최적 열교환기가 선정되어야 한다. 또한 계통내 열교환기에서의 잉여열 방열 필요시 최적의 계통 구성 및 효율적인 운영방안도 검토되어야 할 것이다.
- 3) 핵융합발전소의 현실화를 위하여는 Primary Cycle의 안정성 및 이에 대한 인허가의 획득 등 건설을 위한 여러 절차적 문제가 해결되어야 할 것으로 판단된다.

## 6. 결론

한국형 핵융합 연구장치(KSTAR)는 국제열핵융합로(ITER)의 약 25분의 1 규모로, ITER 완공 때까지 ITER 건설 및 운영에 필요한 기초실험 기술자료를 상호 보완적으로 제공하며, 한국형 핵융합실증로 건설에 필요한 독자적인 연구를 수행하게 될 것이다.

에너지 강국으로 발전할 수 있는 기반이 될 핵융합 발전을 위한 개념 검토 수준이지만, 동력변환 계통의 방식은 직접식 Brayton Cycle이 향후 실시설계시 핵융합을 이용한 효율적인 전력 생산에 가장 실현 가능한 방식임을 확인할 수 있었다.

실증용 발전플랜트의 실설계시에 열정산 및 경제성 분석을 통한 최적의 열역학 사이클을 최종 선정하겠지만, 본고가 기본 개념설정에 참고가 되길 바란다. (KRIEC)