

## 미래 청정에너지원 KSTAR의 냉각수설비

이 제 요<sup>†</sup> 김 영 진, 박 동 성, 임 동 석

한국기초과학지원연구원 핵융합연구소

### Cooling Water Utility of Future Clean Energy Source KSTAR

J. M. Lee<sup>\*†</sup>, Y. J. Kim<sup>\*</sup>, D. S. Park<sup>\*</sup>, D. S. Lim<sup>\*</sup>

*\*Korea Basic Science Institute, Nuclear Fusion Research Center, Daejeon, 305-333, Korea*

**ABSTRACT** : Because of insufficiency of energy resources and pollution of environment, it is necessary to develop alternative energy sources. Nuclear fission energy is used widely for source of electric power but being restricted due to radioactivity problem. Nuclear fusion is highlighted as the new generation of nuclear energy and researched worldwide because of low risk of radiation effect. The representatives of fusion research is China's EAST, KSTAR of Korea and ITER of world. Korea Superconducting Tokamak Advanced Research(KSTAR) project is on progress for the completion in August, 2007. In this study, the research of utility system for KSTAR be carried out. The utility system of KSTAR is consist of water cooling & heating system, N<sub>2</sub> gas system, D-I water system, service water system and instrument air & auto control system. The progress of KSTAR utility system is under commissioning state after construction completion. The optimal operation scenario will be verified during commissioning and adopted to the KSTAR operation.

**Key words** : nuclear fission energy(핵분열에너지), nuclear fusion(핵융합), Korea Superconducting Tokamak Advanced Research(KSTAR : 차세대 초전도 핵융합연구장치), D-I water system(초순수 시스템), service water system(보급수 시스템)

### 1. 개요

화석에너지의 한해 사용량은 약200억 배럴 수준으로 70년 이내에 고갈이 되리라 생각된다. 핵분열 반응에서 나오는 에너지를 이용한 원자력발전은 핵폐기물 처리 방법의 난제들로 미국을 비롯한 선진국들에게 원자력발전을 미래의 에너지원으로 선택하는 것을 주저하게 하고 있으며 유럽 등에서는 원자력발전소를 폐기하고 있는 실정이다. 하지만 원자력 발전이 갖는 대용량 발전의 특성으로 중국 등에서는 선호의 대상이 되고 있

지만, 원자력 발전 후 발생하는 플루토늄 같은 물질은 원자폭탄이라는 무기로 변질되어 인류를 위협하고 있다. 미래 청정에너지원으로 선진국들은 반세기 전부터 가벼운 핵들이 융합반응 시 발생하는 에너지를 얻는 연구에 대해 많은 투자를 해 오고 있다. 우리나라에서는 1995년부터 한국기초과학(연)이 주관기관이 되어 산학연 공동연구로 KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)라는 프로젝트로 핵융합에 관한 연구가 진행되고 있다. 또한 세계적으로 ITER라는 프로젝트로 연구가 진행되고 있다. KSTAR 프로젝트는 연구과제와 건설 사업으로 구분되어 진행되고 있다. 본 논문에서는 핵융합에 대한 소개와 초순수를 사용한 냉각수 설비에 대한 설계-시공-운영에 대하여 기술하고자 한다.

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel.:+ 82-42-870-1950 fax:+ 82-42-870-1959

E-mail address: jmlee@nfrcl.re.kr

## 2. 국내의 동향

### 2.1 국내

1970년대 말부터 대학 및 정부 출연기관 등에서 핵융합 기초연구 및 교육에 필요한 소규모의 핵융합 연구 장치를 확보하여 초보단계의 핵융합 연구를 수행했다. 그 구체적인 사례를 살펴보면 서울대학교에서 SNUT-79 토카막장치를 개발설치(1979~1989)후 기초적인 핵융합 연구를 수행하였고, 한국원자력연구소는 1989 ~ 1991년 KT-1을 개발 운영하고 있으며 1992년부터 KT-2를 개발하기 위해 개념설계를 완료했다. 한국기초과학(연)은 미국 MIT대학으로부터 TARA라는 플라즈마 연구 장치를 이관 받아, 개조한 플라즈마 발생 장치를 설치 및 운영하면서 꾸준한 연구를 계속하고 있다. 또한 국가 중요 프로젝트의 하나로 대용량의 핵융합 장치인 KSTAR 프로젝트를 진행하고 있으며, 아래와 같이 단계별로 나누어 진행되고 있다.

- 1) 제 1 단계(1995 ~ 1997)
  - 장치의 개념 확정 및 설계
- 2) 제 2 단계(1998 ~ 2002)
  - 핵융합 특수실험동 건설 및 완공
- 3) 제 3 단계(2002 ~ 2007)
  - 주장치 및 보조장치와 특수설비(초저온헬륨설비, 초순수설비, 대용량 전력공급설비 등)를 발주·시공
- 4) 제 4 단계(2007 ~ 2010)
  - 주장치 시운전 및 시험가동 및 1st Plasma 운전 및 핵융합 기술개발과 장치 성능 향상

### 2.2 국외

프린스턴대학 플라즈마 물리연구소(PPPL)에 설치된 세계 3대장치중 하나인 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor)에서 3억℃의 초고온 달성과 10MW의 핵융합에너지 창출에 성공하였다. 유럽연합의 유럽 공동연구 JET(Joint European Tokamak)과 일본의 JT-60U토카막장치 등 세계3대장치를 통한 연구결과를 내고 있으며, 초전도 기술을 이용하여 차세대 핵융합장치 개발에 적극

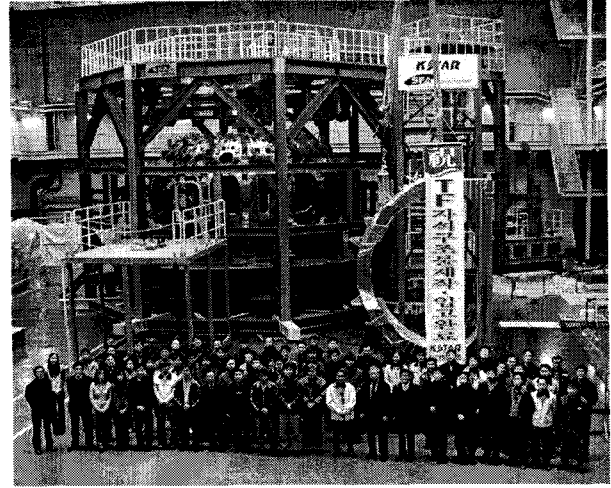


Fig. 1 Photo of KSTAR in progress

적인 투자를 시작했다. 중국은 제9차 5개년 계획 기간중 대형 국가 과학기술 프로젝트로 초전도 토카막 핵융합장치인 2005년 EAST를 완공하고 현재 시험가동 중에 있다. ITER프로젝트는 IAEA 지원 하에 70억불 규모의 건설계획이 2015년 완공목표로 추진 중이며 설계를 1998년까지 완료하고 2005년에 프랑스의 카다라쉬에 건설기로 합의하였다. ITER는 정상운영 시 1000MW이상의 핵융합 에너지 창출을 목표로 추진하고 있으며 우리나라는 10%의 지분을 가지고 참여하고 있다.

## 3. 핵융합 에너지의 특성 및 파급효과

### 3.1 핵융합 에너지의 특성

핵융합 발전은 그 본질적인 특성상 연료가 값싸고, 무한하며, 세계의 모든 곳에서 얻을 수 있을 뿐만 아니라 안전하고 환경문제를 제기하지 않는다. 또한 세계적인 공동연구가 활발하게 일어나고 있다. 우리가 이러한 이점을 적절하게 이용한다면 수 십년의 수준차이를 빠른 시일 내에 극복할 수 있을 것이다. 이를 위하여 우리 실정에 맞고, 핵융합 에너지의 연구가 가능한 실험용 핵융합장치의 건립이 시급하다. 또한 아직도 완전 국산화를 시키지 못하고 있는 원자력발전소의 예를 거울삼아, 연구 초기단계에 투입되어 그 결과물을 공유 할 수 있어야 하며 이에 수반되는 기술인력 양성이 시급하다. 우리 연구원은 KSTAR

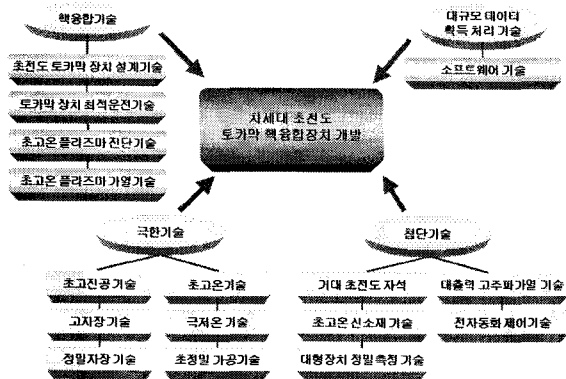


Fig. 2 KSTAR 연구개발을 통한 첨단기술 개발

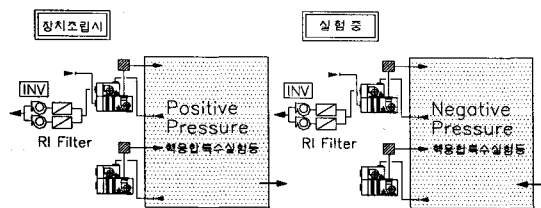


Fig. 3 Plasma experimental room air balancing

라는 장치를 한국의 기업들과 공동연구를 통하여 실험장치를 제작설치하고 있으며 핵심 기술 중의 하나인 초전도코일(CICC)을 국산화하는데 성공하였다. 또한 Facility 부문에서 각종 Utility를 국산화하여 우리 기술로 제작·설치하고 있다.

### 3.2 파급효과

차세대초전도핵융합시설을 연구하면서 파생되는 기술은 핵융합기술, 대규모 데이터 획득 처리 기술, 극한기술, 첨단기술로 구분 할 수 있으며 정리하면 Fig. 2와 같다.

## 4. Utility

KSTAR 주장치실의 공기조화 시스템은 Fig. 3 과 같이 실험 중에는 외부에 대한 오염방지를 위하여 음압운전을 하고 장치 조립 시에는 외부로부터의 오염을 방지하기 위하여 양압운전을 한다.

### 4.1 개요

특수설비 공학설계는 System 구성에 따라 다음의 5가지로 구분할 수 있다.

- Water Cooling & Heating System
- N<sub>2</sub> Gas System
- DI Water System
- Service Water System
- Instrument Air & Auto Control System

### 4.2 냉각부하

KSTAR 주장치의 Plasma 유지 상태에 따라 제거해야할 냉각부하가 달라지며, Baseline(8,696 Mcal/h)과 Upgrade(18,922 Mcal/h)로 구분된다. 단계에 따라 순차적으로 냉동기, 냉각탑 등의 장비와 배관설비 등을 나누어서 공사시방을 작성하였다. Baseline의 설계조건은 20분 간격으로 20 sec Pulse로 1일 최대 50 Pulse, 100일/년 운전으로 구성되며 이때의 실제운전시간은 아래와 같다.  $T = 20\text{min/cycle} \times 50\text{cycle/day} = 1,000\text{min/day}$  Upgrade 60분 간격으로 300sec Pulse로 1일 최대 20Pulse, 100일/년 운전으로 구성되며 실제운전시간은 아래와 같다.  $T = 60\text{min/cycle} \times 20\text{cycle/day} = 1,200\text{min/day}$

### 4.3 배관재료 및 환경 선정 기준

#### 1) 배관재료

실험 장치와 직접 연결되는 Primary Cooling System의 배관 및 부속 재료는 자장의 영향, 내구성 및 수질 오염 등을 고려하여 STS 316을 사용하였고, Secondary Cooling System, N<sub>2</sub> 및 IA 배관 등은 자장의 영향이 없고 고도의 수질이 요구되지 않으므로 내구성 및 일반적인 수질보전 등을 고려하여 STS 304를 사용하였다.

#### 2) 배관 유속

배관의 규격을 선정하는 기준은 경제성, 유속에 따른 유수음 및 침식방지, System Water에 함유된 기체의 배출속도 등이다.

#### 3) 환경별 유속 및 저항

Upgrade를 기준으로 할 때 100일/년 운전할 경우 연간운전시간은 대략 2400시간이 되므로 테이터 북에서 최대 유속은 3.4m/s 정도이며, 이것은 국내의 일반적인 설계기준 등을 고려 할 때 매우

Table 1. 관경별 유량 기준(TPX, WBS 73)

관경 (mm)	Normal (lpm) @1.7m/s	Max. (lpm) @2.8m/s	관경 (mm)	Normal (lpm) @1.7m/s	Max. (lpm) @2.8m/s
15	11.36	37.85	200	3,308.3	9,260.4
20	30.28	83.27	250	5,166.8	14,470.8
25	53.0	143.8	300	7,441.7	20,837.5
32	79.5	227.1	350	10,129.2	28,362.5
40	117.3	325.5	400	1,093.0	37,042.0
50	208.2	579.1	450	16,742.0	46,883.5
65	321.0	904.7	500	20,671.0	57,879.5
80	465.6	1,302.1	550	25,008.8	70,033.8
100	825.2	2,316.5	600	29,763.0	83,346.3
125	1,290.7	3,618.7	750	46,505.0	130,229.8
150	1,858.5	5,208.4			

Table 2. 관경별 유속 및 마찰손실 기준

냉각수배관			기 타	
관경(mm)	유속 (m/s)	저항 (mmAq/m)	구분	유속 (m/s)
25 ~ 50	1.5	30	펌프 토출관	3.0
65 ~ 100	1.8	30	펌프 흡입관	1.5
125 ~ 150	2.0	25	공 급header	2.0
200 ~ 300	2.5	25	환 수header	1.0
300이상	3.0	20		

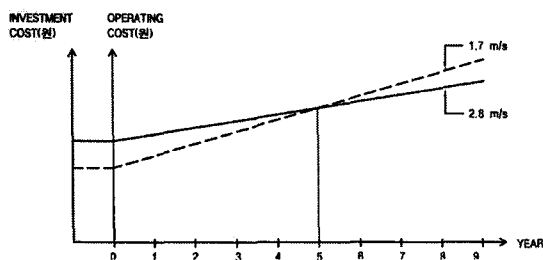


Fig. 4 수배관의 경제속도(TPX)

빠른 편이다. 본 설비에서는 초기공사비(재료비+노무비)와 유지관리비 등을 고려하여 Table 1 및 Table 2와 같은 유속 및 마찰손실을 기준으로 하여 경제적인 관경을 선정하였다. Fig. 4에서 보면 유속을 1.7m/s로 하였을 때 5년이면 손익분기점이 됨을 알 수 있다. 배관 관경을 계산하는 실험식은 Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, Weston 등이 이 있으며, 50mm 이상의 냉수배관에 적합한 Hazen-Williams Formula를 적용하여 선정하였다.

$$h = 10.667 \times C^{-1.85} \times D^{4.87} \times Q^{1.85} / 1000 \quad (1)$$

$$V = 0.35464 \times C \times D^{0.63} \times h^{0.54}$$

$$D = 1.6258 \times C^{-0.38} \times h^{-0.205}$$

$$Q = 0.27853 \times C \times D^{2.63} \times h^{0.54}$$

여기서,

C=유량계수(강관:100, 동관 및 STS관:130)

h=마찰손실, mmAq/m

D=관 내경, m

V=유속, m/sec

Q=유량, lpm

#### 4.4 실험장치의 냉각수 설비

##### 4.4.1 개요

Water Cooling & Heating System은 DI Water를 사용하여 KSTAR 장치의 실험운전 중에 다량으로 발생하는 열을 효과적으로 냉각시키기 위한 Primary Cooling Water Loop와 Primary Cooling Water의 열을 전달받아 Chiller와 Cooling Tower를 통하여 외부로 배출하기 위해 Treated Water를 사용하는 Secondary Cooling Water Loop로 구성된다. Cooling Water System Loop는 시설의 유지비용을 최소화할 수 있도록 1차로 Tower Water를 이용하여 Pre-Cooling 하고, 2차로 냉동기의 Chilled Water를 이용하여 목적온도를 얻도록 함으로서 System이 요구하는 온도를 유지하면서 냉동기 용량을 최소화하여 에너지 절약을 도모하였다.

##### 1) Primary Cooling Loop

- DI Cooling & Heating(Baking) System
- Borated Water Cooling System

##### 2) Secondary Cooling Loop

- Treated Water Cooling System

#### 4.4.2 DI Water Cooling & Heating System

##### 1) System 분류

Primary Cooling Water Loop는 크게 실험 장치 운전조건 및 냉각수 온도에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

- ① 실험장치 운전조건에 따른 구분
  - Pulsed Operation System Loop
  - Continuous Operation System Loop
- ② 실험장치 입구 냉각수 온도기준

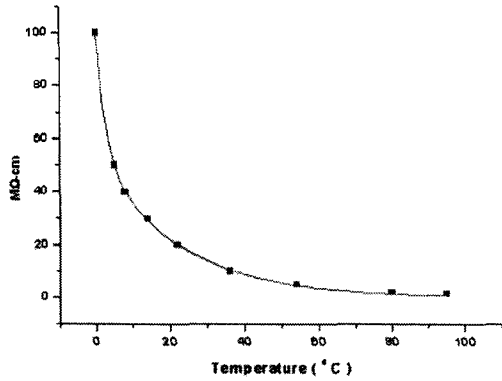


Fig. 5 초순수의 전기전도도와 온도의 관계

실험 장치에서는 대용량의 전류가 흐름으로 절연을 위하여 초순수를 사용하여야 한다. 초순수에서 전기전도도와 온도의 관계는 Fig. 5와 같으며 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = 44.08577e^{-x/2.40461} + 55.91693e^{-x/21.69413} \quad (2)$$

$$R^2 = 0.99976$$

## 2) System 구성

DI Water Cooling System Loop는 연구 장치 담당부서 및 운전조건, 순환수량 등을 고려하여 15개의 각각 독립된 Loop로 구성하였다.

## 3) 냉각수 수질

1차 냉각수(DI Water)계통은 System 냉각수의 청정도 유지 및 대용량 전류에 따른 전기적인 절연이 유지될 수 있도록 다음규정에 따른다.

- LHCD : 25°C에서 1MΩ-cm 이상, 용존산소 0.5ppm 이하
- NBI HV/LV : 25°C에서 5MΩ-cm 이상, 용존산소 8ppm 이하
- 기타 System : 25°C에서 1MΩ-cm 이상, 용존산소 8ppm 이하

## 4) 냉각장치 용량

Fig. 6에서 보면 1Pulse 동안에 발생한 열을 1Cycle 동안에 냉각시키면 된다. 하지만, 실험장치 내에서 Pulse운전 중에 Boiling이 발생하면 배관 내의 이상압 등에 의해 관로손상이 발생하여

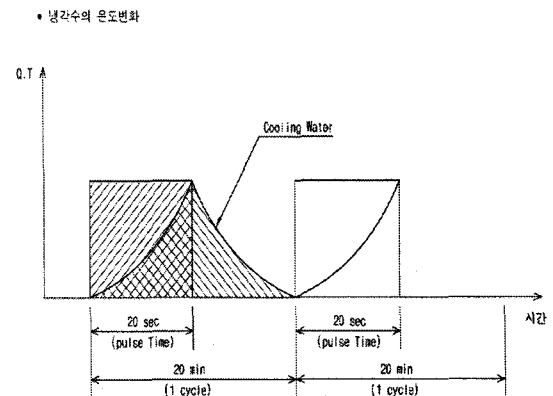


Fig. 6 Pulsed Operation 입/출구 온도구배

문제가 생길 수 있다. Pulse 기간 동안에 Boiling이 발생하면 안된다.

① Pulsed Operation : Cycle Time중 일정한 기간에 집중적인 부하가 발생

- 냉각 용량(Q)

$$Q = \text{Pulsed Load} \times \text{Pulse Time} / \text{Cycle Time}$$

- 순환수량(Lw)

$$Lw(\text{lps}) = \text{Pulsed Load} \times (3,600\text{Sec} \times \Delta T)$$

- 냉각수 온도

냉각장치의 용량은 Pulsed Operation Load의 시간평균부하로 하고 순환수량은 Pulse Load로 선정하게 되므로 실험장치 입/출구 DI Water System의 온도는 Fig. 6과 같은 온도 구배를 가지게 된다.

② Continuous Operation : Cycle Time 기간 내 일정한 부하가 발생

- 냉각 용량(Q)

$$Q = \text{Input Load}$$

- 순환 수량(Lw)

$$Lw(\text{lps}) = \text{Input Load} \div (3,600\text{Sec} \times \Delta T)$$

- 냉각수 온도 : Continuous Operation 장치의 냉각수 System은 Continuous Load로 나타나고 냉각장치의 용량 및 순환수량은 입력부하와 온도 차로 선정하게 되므로 실험장치 입/출구 온도는 항상 일정한 온도구배를 가지게 된다.

## 5. 운전

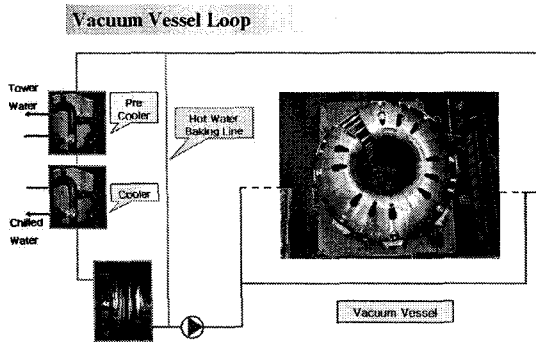


Fig. 7 Vacuum Vessel Loop 흐름도

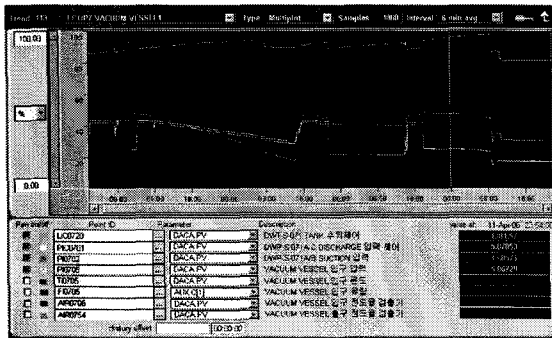


Fig. 8 Vacuum Vessel Loop 시운전

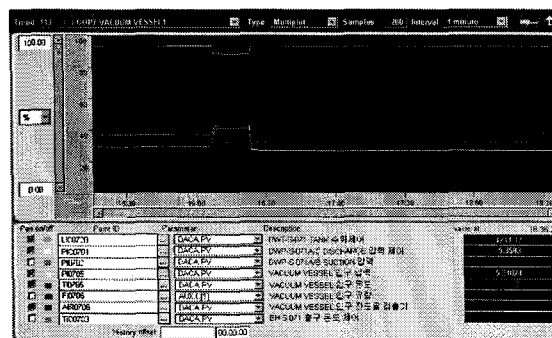


Fig. 9 Vacuum Vessel Loop 시운전 완료

### 5.1 현황

Fig. 7은 V/V Loop에 대한 시공흐름도이며 Fig. 8은 시운전을 통하여 얻은 Reserve Tank에 대한 Trend를 분석한 것이다. 압력, 수위 등이 불안정하여 시스템의 안정화가 필요하다. 배관내의 공기가 주요한 원인이겠으나 계측기의 오작동에 의한 경우도 있다.

### 5.2 조치

초순수는 공기와 접하면 오염이 되므로 배관에 Air Vent가 없다. 배관 내에 충수 시 질소를 가압하면서 충수를 하고 배관 내의 공기 배출은 Tank의 안전변을 통하여 공기를 배출한다. Level Transmitter 등 부착된 계측기를 보정하고, Tank의 Utility 라인(질소, 초순수 Make-up)을 점검하여 이상 유무를 확인한다. Fig. 9에서는 LT가 문제가 있었다.

## 6. 결론

세계적인 규모의 핵융합설비를 위한 냉각시스템의 설계를 국내기술로서 완료하였고, 아래와 같이 설치를 일부 완료하였다.

- ① 냉동기
  - 180 RT × 1 SET
  - 1,000 RT × 3 SET
- ② 냉각탑
  - Baseline Step ; Total 5,000CRT

### ③ D.I water circulation Loop

- Loop #1 : ECH, LHCD의 냉각시스템
- Loop #2 : MPS & MPS busbar PF의 냉각시스템
- Loop #3 : MPS & MPS busbar TF의 냉각시스템
- Loop #6 : 진단장치의 냉각시스템
- Loop #7 : 진공용기 냉각 및 Baking 시스템

시공 시 한 가지 아쉬운 점이 있다면 대체냉매용 대형 터보냉동기를 포함한 일부의 장비가 국내생산이 어려운 관계로 수입품을 사용한 것이며, 향후 국산장비의 개발이 완료되어 적용할 수 있으면 더욱 뜻 깊은 설비가 될 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. KBSI-SECC, 2001, 핵융합특수실험동 KSTAR 관련 공학설계(1)-종합보고서(특수설비-기계분야), 한국기초과학지원연구원