

ITER 1단계 기술성과 조사·분석

2013. 3

연구기관 : (주)기술과가치

제 출 문

ITER 한국사업단 귀하

본 보고서를 「ITER 1단계 기술성과조사·분석」의 보고서로 제출합니다.

2013년 3월

연 구 기 관 명 : (주)기술과가치

연 구 책 임 자 : 박 윤 석 (연구소장)

연 구 원 : 김 동 준 (선임 vp)

연 구 원 : 양 진 명 (선임 vp)

연 구 원 : 최 유 정 (전임 vp)

연 구 원 : 이 제 형 (전임 vp)

연 구 원 : 김 경 연 (전임 vp)

요 약 문

1. 연구개요

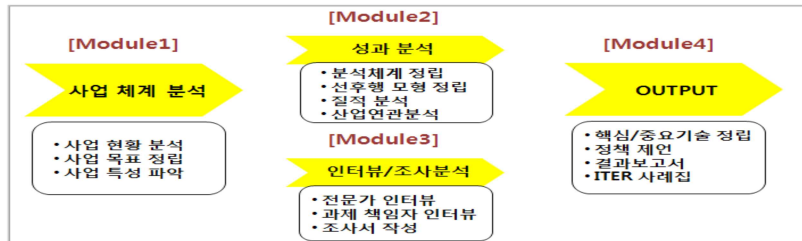
■ 연구목적

○ 본 연구는 『ITER 1단계 사업 종료』로 인해 창출된 핵심기술의 재정립, 중요성과 조사 및 분석을 목적으로 함

■ 조사범위

○ 본 기술성과조사-분석은 『ITER 1단계 사업』의 조달, 비조달 품목을 대상으로 수행하였으며, 1단계 종료 시까지 성과를 대상으로 함

■ 연구추진 Framework

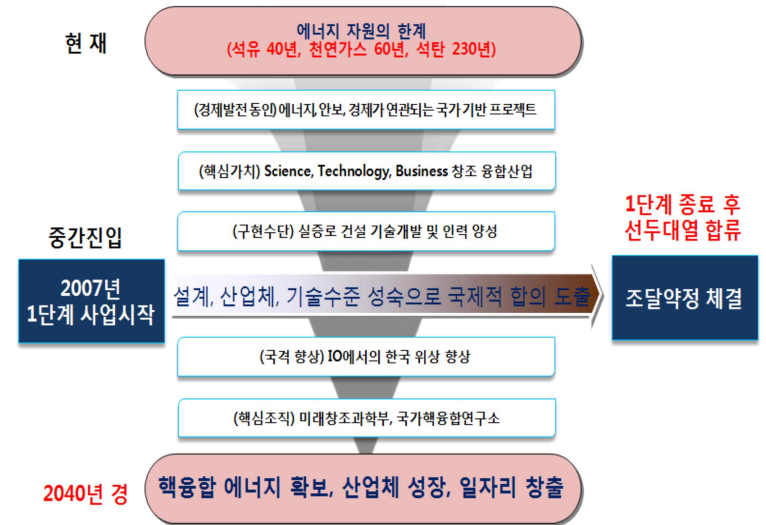


2. ITER 한국사업의 목적 및 특징

■ ITER 한국사업 목적

- 본 사업의 목적은 국제핵융합실험로(ITER) 공동개발사업에 참여하여 미래청정에너지인 핵융합에너지 발전을 위한 핵심기술 및 전문 인력을 확보하고 향후 우리나라 핵융합에너지 기술자립에 기여함에 있음
 - 우리나라에 할당된 10개 조달품목의 적기 제작·조달 및 기술축적을 위한 종합사업관리
 - 핵융합 상용화 및 운전기술 확보를 위한 핵심기술 연구·개발
- ITER프로젝트 참여를 통해 2030년대 DEMO 및 2040년대 상용 핵융합발전소 건설을 위한 원천기술을 확보하고, 이를 통해 대용량의 친환경적 에너지원 확보로 국가 에너지 자립 및 에너지 안보에 기여함을 목표로 각 단계별로 순차적으로 진행되고 있음

■ ITER 사업과 창조경제와의 연관성



- 박근혜 정부는 '일자리 중심의 창조경제'를 국정 비전인 '국민행복, 희망의 새 시대' 달성을 위한 첫 번째 국정 목표로 제시함
- 창조경제는 핵심가치를 과학기술과 인력양성으로 제시하고, 과학기술과 상상력, 창의성을 융합시켜 우리나라 미래 경제를 이끌고 세계 시장을 선도하는데 목적이 있음
- 즉, 창조경제는 산업간 융합을 촉진시킴으로써 새로운 부가가치와 일자리를 창출해 나가는 데 정책적 역량을 집중해야 한다는 뜻을 지니고 있음
- ITER 사업은 과학, 기술, 비즈니스가 융합된 과학기술융합산업으로서 이는 새정부 국정 목표인 창조경제의 성격(산업간 융합)과 부합되고 있음
 - 플라즈마 거동의 불안전성 원인을 규명하기 위한 과학적인 연구가 추진되고 있으므로 discovery science 연구의 성격을, 설계를 확정하고 mock-up 제작을 통해 성능을 검증하고 부품을 제조·조달하기 때문에 technology의 성격을, 대규모의 투자가 이루어지고 Demo plant 사업이 병행하여 추진되고 있으므로 비즈니스의 성격을 띠
- 즉, ITER 사업의 성공은 전 인류를 위한 친환경에너지 확보라는 큰 성과와 함께 IO에서의 한국 위상 향상, 국내 산업체 발전으로 인한 일자리 창출, 전문 인력양성이라는 부가적 효과를 부여하므로 박근혜 정부의 창조경제 목적인 산업간 융합으로 인한 일자리창출과 부합되는 특징이 있음

- 블랑켓 일차벽 제작을 위한 이중금속 설계 및 접합기술은 한국에서 한 번도 시도해보지 않았던 기술이었으며, 그 기술을 핵융합 환경에 맞는 체계로 재구축해야 하는 어려움이 있었으나 자체 및 국제협력 노력으로 극복함
- 블랑켓 일차벽은 ITER 기술 기준에 부합하는 접합 기술 개발에 성공하여 국내에서 제작, 시험할 수 있는 설계 기술을 확보하였으며, 향후 핵융합 플라즈마 대면재료 개발에 활용될 계획임
- 블랑켓 차폐블록 설계 및 해석 기술은 DEMO, 상용 핵융합로 플라즈마 대면부품 개발에 직접적으로 활용이 가능하며, 타 발전시스템 및 각종 고온·고속 중성자 환경하의 장치 개발 등의 산업으로 연결이 가능할 것으로 판단됨
- 조립장비는 대형 핵융합 장치 조립분야의 기술 개발에 성공하여 핵심기술인 정밀조립 기술, 조립장비 설계 및 제작기술을 확보, 핵융합로를 건설할 수 있는 토대를 마련함
- 뛰어난 기술력으로 인해 100% 현물조달하는 열차폐체는 KSTAR 때부터 경험축적으로 인해 예비설계의 단계부터 제작단계까지 기술개발이 가능할 정도로 핵심기술에 대한 이해, 인적역량 증진을 이루었으며, 현재 DEMO 건설도 가능할 만큼의 기술력을 확보했다고 판단됨
- 핵융합로 상용화를 위해 필요한 기술인 삼중수소 SDS는 1:1 Mock-up Bed(ZrCo 사용, 삼중수소 70g 저장용량의 ITER 삼중수소 저장베드)를 사용한 SDS 공정검증실험을 실시하였으며, 이는 ITER 규격에 준하는 공정 장치를 실험한 사례로서 세계 최초라는 큰 의미가 있음
- 초전도자석 전원공급장치는 ITER 컨버터의 단락시험 규격조사 등 스위치모듈 제작/시험을 통해 활용 가능성을 확인하였으며, 그로 인해 국내조달기반 확보가 가능할 것으로 판단됨. 또한 후발국으로 ITER 사업에 참여하였으나 조달약정 체결을 성공적으로 수행하게 되는 성과를 올림
- 진단장치는 ITER 사업 초기만 해도 기술력이 부족한 상태였지만, 두 개의 진단장치를 조달약정 요구대로 실제 토카막 환경인 KSTAR에서 실제 테스트를 통해 ITER로부터 기술력에 대한 신뢰를 얻은 성과를 올림
- 핵융합에너지 실현가능성을 위해 꼭 필요한 TBM은 KSATR에서 시도한 적이 없는 기술이기 때문에 인프라가 없는 실정이므로 주로 인프라 구축에 초점을 두었으며, 설계, 구조재, 냉각재, 기능소재, 블랑켓 삼중수소, 진단 및 계장기술 등 핵심요소기술 개발을 꾸준히 연구중임
- 또한 프랑스가 요구하는 인허가의 기준을 통과하는 인허가 절차 정립으로 인해 향후 실증로 및 핵융합로 인허가 절차 개발에 활용할 수 있는 성과를 올림

5. 결론 및 정책제언

■ 결론

- 핵융합 기술은 초고온 플라즈마, 초전도자석, 초대형 진공 등 세계최초로 시도되는 요소 기술을 포함하고 있으며, 이러한 요소기술은 소재, 공정, 부품 기술혁신을 유발하여 산업 전체에 큰 파급효과를 주므로 산학연관이 긴밀한 네트워크를 구성하기를 기대함
- 국제적 기준을 맞춘 후 체결되는 조달약정 완료의 성과는 크게 강조되어야 하며, 세계 최초로 시도되는 대형 토카막 실험로 사업이므로 적용되는 기초기술을 세계 최첨단 기술 관점에서 재조명해야 함
- 세계 7개국이 참여하는 핵융합 G7에 우리나라가 중간진입하여 성공적으로 선두대열에 포지셔닝한 것은 과학기술 차원에서 국격을 향상시키고 IO에서의 한국 위상을 향상시킨 성과를 이룩한 것으로 볼 수 있음

■ 정책제언

- 핵심요소기술 등을 기술개발 중인 국내 산업체의 기술수준 단계, 전문 인력, 전담 지원 등에 대해 전문기관의 지속적인 모니터링이 필요함
- ITER사업의 중요성을 홍보하기 위한 체계적인 전략수립 및 실천이 필요하며, 원자력과 같이 국민들의 거부감에 직면 할 수 있으므로 사례집 뿐만 아니라 인터넷 등의 광고, 참여기업에 대한 홍보, 과학기술 증진 관련 홍보 등이 절대적으로 필요함
- 핵융합 발전 기술은 물리, 화학, 수학 등 기초과학과 화공, 기계, 재료, 전기전자, 핵공학 등 기술분야가 융합되어 개발되어야 하므로 필요한 인력 양성을 위한 특성화 대학원의 설립이 필요함
- ITER 사업의 성과분석은 2040년까지의 장기적 프로젝트임을 감안하여 타 사업처럼 정량적 성과(특히, 논문, 사업화, 1억원당 성과)로 판단해서는 안되며, 사업 특성에 맞는 비전·미션·전략을 수립한 후 목적에 부합하는 성과지표를 수립할 필요가 있음
- 현재 핵융합 기술은 원자력 기술의 한 분야로 포함되어 있는데 핵융합 기술의 특성을 고려한 새로운 기술분류 체계의 구축이 요구됨
- 핵융합 발전의 조기 상용화를 위해 조달품목관련 기술확보와 비조달 품목관련 기술확보를 현재 진행중이므로 선진국의 기술개발 속도를 고려한 안정적인 지원이 필요함

목 차

1. 연구개요	9
2. 핵융합에너지	13
2-1. 핵융합에너지 개요	15
2-2. ITER와 KSTAR	18
2-3. ITER 한국사업 현황	22
2-4. ITER 한국사업 추진 현황	27
2-5. 창조경제론과 ITER 사업의 연관성	30
3. ITER 성과창출 프로세스	33
3-1. 성과창출 논리모형 정립	35
3-2. ITER 사업의 성과창출 논리모형	39
3-3. ITER 품목별 논리모형 도출	41
3-4. ITER 1단계 조달약정 현황	48
4. ITER 1단계 정성적 기술성과·분석	51
4-1. 초전도도체	55
4-2. 진공용기	67
4-3. 블랭킷 일차벽	82
4-4. 블랭킷 차폐블록	93
4-5. 조립장비류	108
4-6. 열차폐체	117
4-7. 삼중수소 저장·공급 시스템	136
4-8. 초전도자석 전원공급장치	153
4-9. 진단장치	170
4-10. 테스트 블랭킷 모듈(TBM)	192
5. 결론 및 정책제언	216
6. 참고문헌	226
7. 부록	230

표 목 차

[표 1-1] 연구수행 방법 12

[표 2-1] KSTAR와 ITER의 주요 제원 21

[표 2-2] 한국 ITER 사업 주요 연혁 23

[표 2-3] ITER 사업 지원예산 24

[표 2-4] 전문인력 파견(명) 24

[표 2-5] ITER국제기구 참여국별 인력 현황(명) 25

[표 2-6] ITER 사업추진 절차 27

[표 2-7] 사업추진 절차별 세부 내용 및 주체 27

[표 2-8] ITER 한국사업단 부문별 사업추진 역할 28

[표 3-1] 조달약정 체결 품목 49

[표 4-1] 초전도도체 핵심기술 56

[표 4-2] 초전도도체 1단계 중요 논문 65

[표 4-3] 진공용기 핵심기술 68

[표 4-4] 316L(N)-IG 화학적 조성 측정 결과 69

[표 4-5] Inboard Segment 제작 시 발견된 문제점 78

[표 4-6] 블랭킷 일차벽 핵심/중요기술 83

[표 4-7] 블랭킷 차폐블록 핵심/중요기술 94

[표 4-8] 열수력 및 구조해석 조건 98

[표 4-8] 블랭킷 차폐블록 1단계 중요 논문 106

[표 4-9] 조립장비 핵심기술 109

[표 4-10] 열차폐체 핵심/중요기술 118

[표 4-11] 열차폐체 설계 허용 응력 기준 119

[표 4-12] 열차폐체 열적 성능 검증 121

[표 4-13] 열차폐체 1단계 중요 성과 134

[표 4-14] 삼중수소 핵심기술 137

[표 4-15] 저장재 선정 기준 138

[표 4-16] 저장재 비교 주안점 139

표 목 차

[표 4-17] 전원공급장치 핵심기술 154

[표 4-18] 전원공급장치 1단계 중요 특허 169

[표 4-19] 진단장치 핵심/중요기술 172

[표 4-20] 중성자방사화 시스템의 측정 물리량 및 특성 173

[표 4-20] 진단장치 1단계 중요 논문 및 특허 190

[표 4-21] TBM 핵심기술 193

[표 4-22] TBM 1단계 중요 특허 214

그림 목 차

[그림 2-1] 태양에너지 15

[그림 2-2] 중수소와 삼중수소에 의한 핵융합 반응 15

[그림 2-3] 에너지 사용 가능 시간 16

[그림 2-4] 핵융합 에너지의 장점 17

[그림 2-5] 핵융합발전소의 개념도 17

[그림 2-6] KSTAR와 ITER 규모 비교 21

[그림 2-7] ITER 조달품목 및 분담률 22

[그림 2-8] 핵융합에너지 연구개발 26

[그림 2-9] ITER 사업추진 체계 28

[그림 2-10] 박근혜 정부의 창조경제론 30

[그림 2-11] ITER 사업과 창조경제의 연관성 32

[그림 3-1] 논리모형의 구성요소(예시) 36

[그림 3-2] 논리모형의 구성요소(예시) 40

[그림 3-3] ITER 논리모형 정립 40

[그림 3-4] ITER 선후행모형 정립 41

[그림 3-5] 초전도도체 선후행모형 정립 42

[그림 3-6] 진공용기 본체 선후행모형 정립 43

[그림 3-7] 진공용기 포트 선후행모형 정립 43

[그림 3-8] 블랑켓 일차벽 선후행모형 정립 44

[그림 3-9] 블랑켓 차폐블록 선후행모형 정립 44

[그림 3-10] 조립장비류 선후행모형 정립 45

[그림 3-11] 열차폐체 선후행모형 정립 45

[그림 3-12] 삼중수소 SDS 선후행모형 정립 46

[그림 3-13] 전원공급장치 선후행모형 정립 46

[그림 3-14] 진단장치 선후행모형 정립 47

[그림 3-15] TBM 선후행모형 정립 47

[그림 3-16] 조달약정 일정 48

[그림 4-1] ITER 핵심기술 정리 결과 54

[그림 4-1] 초전도도체 55

그림 목 차

[그림 4-2] 초전도선재 측정결과 57

[그림 4-3] 초전도선재 단면 개선 현황 59

[그림 4-4] 조관이 완료된 58m Dummy 도체 61

[그림 4-5] 개발된 VOFEX와 시험용 시편 62

[그림 4-7] 진공용기 본체 및 포트 67

[그림 4-8] 단조재 제작 공정 70

[그림 4-9] 진공용기 유연구조 및 힌지구조 형상 72

[그림 4-10] 본체 냉각수 유로 75

[그림 4-11] 진공용기 Mock-up 76

[그림 4-12] 블랑켓 시스템 82

[그림 4-13] Ti/Cr/Cu 코팅층 고열부하시험용 Mock-up 86

[그림 4-14] 고유점합법 개발용 목업에 대한 열부하 시험 87

[그림 4-15] 목업 열부하 시험을 통한 냉각능 평가 (~0.5 MW/m²) 88

[그림 4-16] High heat flux test facility with electron beam 88

[그림 4-17] 비파괴 방법을 활용한 검사법 및 초음파 검사 영상 결과 90

[그림 4-18] 블랑켓 차폐블록 93

[그림 4-19] 전자기력 계산을 위한 3차원 모델링 형상 95

[그림 4-20] 40도 및 20도 섹터 기반 블랑켓 전자기력 계산 모델 96

[그림 4-21] 열수력 및 구조해석 계산(예) 97

[그림 4-22] 유동해석 결과 98

[그림 4-23] 열구조 해석 결과 99

[그림 4-24] 두꺼운 단조블록 접합을 위한 전자빔용접 순서 100

[그림 4-25] 70 및 110 mm 두께 전자빔용접 최종 시험편 형상 및 단면부 사진 101

[그림 4-26] 전자빔용접에 의한 Front Header Lid 시작품 및 단면 형상 102

[그림 4-27] Flow Driver 및 Plugging 용접시험편의 최종 용접 단면 형상 102

[그림 4-28] 70 mm 및 110 mm 전자빔용접 시험편 초음파 검사 결과 104

[그림 4-29] ITER 조립장비 108

[그림 4-30] Upending Tool의 구성 110

[그림 4-31] Sector Sub-assembly Tool의 구성 112

그림 목 차

[그림 4-32] In-pit Sector Assembly Tools의 구성 113

[그림 4-33] 1/5 축소형 Mock-up 대상 조립장비 114

[그림 4-34] 열차폐체 117

[그림 4-35] 상부 저온용기 열차폐체 123

[그림 4-36] 하부 저온용기 열차폐체 124

[그림 4-37] 중앙부 저온용기 ECTS 부품들 125

[그림 4-38] 진공용기 열차폐체 제작 절차 126

[그림 4-39] Inboard Mock-up 최종 제작품 129

[그림 4-40] 열차폐체 은도금 공정 개발 130

[그림 4-41] 진공누설시험 및 가스 유량시험 장치 개략도 131

[그림 4-42] 전기 절연 시험장치 개략도 132

[그림 4-43] 삼중수소 SDS 136

[그림 4-44] 저장·공급 시스템 단위공정 성능 검증 시험 장치 구축(SPOVE) 144

[그림 4-45] 삼중수소 저장·공급 시스템 공정 설계 개념 도식도 145

[그림 4-46] SDS 저장용기 모사실험장치 개념도 146

[그림 4-47] SDS 저장용기 모사실험장치 인터페이스 147

[그림 4-48] ULPA filter 150

[그림 4-49] ITER AC/DC 컨버터 3차원 모델 153

[그림 4-50] AC/DC 컨버터의 R&D 제작 및 시험 153

[그림 4-51] 코일전원장치 구성도 및 기본회로도 156

[그림 4-52] 공학설계검증을 위한 축소모델 및 제어기 구성안 160

[그림 4-53] 순환전류모드 동작 161

[그림 4-54] 단락시험 설비 회로도 163

[그림 4-55] 컨버터 구조물의 용접 및 부분 조립 164

[그림 4-56] 컨버터 구조물의 제작검사 및 시험 164

[그림 4-57] 컨버터 구조물의 전체 조립 165

[그림 4-58] 컨버터 전기부품 및 각종 회로 조립 165

[그림 4-59] 컨버터모듈 조립 완료 165

[그림 4-60] 진단장치 171

[그림 4-61] 중성자방사화 시스템 전체 구성도 174

그림 목 차

[그림 4-62] 캐루셀 설계안 176

[그림 4-63] 튜브 벤딩 및 제작된 100m 튜브롤 176

[그림 4-64] 방사능을 생성하기 위해 필요한 핵융합 출력 177

[그림 4-65] 영역별 세종류의 VUV 분광기 178

[그림 4-66] VUV Core Survey 분광기 다섯 채널 시스템 179

[그림 4-67] 상부포트 VUV Edge Imaging 분광기 시스템 설계도 180

[그림 4-68] 2-채널 VUV 분광기 시작품 181

[그림 4-69] MCP 및 BI-CCD 검출기 분광 스펙트럼 비교 연구 결과 182

[그림 4-70] 진단포트플러그 18번의 구성 및 진단 상부 포트플러그 구조도 183

[그림 4-71] ITER 진단 포트플러그 설계 변경 184

[그림 4-72] ITER 진단 포트플러그 체결 방식 변경 185

[그림 4-73] 포트플러그 전자기력 감소를 위한 BSM 제거 186

[그림 4-74] 포트플러그 냉각채널 187

[그림 4-75] 진단 상부 포트플러그 Integration 설계 개념도 188

[그림 4-76] TBM 시스템 192

[그림 4-77] 통합설계 체제 및 개발/보완 내용 195

[그림 4-78] 핵융합로용 블랑켓 계산을 위한 MONTEBURNS 코드의 확장 196

[그림 4-79] 연소 계산 격자 확대를 위한 기존 MONTEBURNS 코드의 수정과정 197

[그림 4-80] MONTEBURNS-FUSION 코드의 연소 계산 격자 영역의 확대 197

[그림 4-81] 분말 제조 과정에 대한 순서도 201

[그림 4-82] PVA 폴리머 용액방법을 이용한 분말합성 공정도 202

[그림 4-83] 전체 연료주기 및 증식블랑켓 연료주기 209

[그림 4-84] 헬륨냉각시스템 구성도 211

1. 연구개요

기술성과·조사 목적

- 본 연구는 『ITER 1단계 사업 종료』로 인해 나타난 핵심기술의 재정립, 중요 성과 조사를 목적으로 함
- 확보된 기술적 성과는 향후 핵융합발전소 건설 및 상용화를 위한 원천기술로 활용이 기대됨

기술성과·조사 범위 및 대상

- 본 기술성과조사는 『ITER 1단계 사업』의 조달, 비조달 품목을 대상으로 조사하였으며, 1단계 종료 시까지 성과를 대상으로 함

연구내용

- 사업 특성을 고려한 설문지 개발
 - 기술개발 단계를 정립한 선후행모형, 논리모형 정립
 - 각 지표별 정성적 성과 도출
- 핵심기술 재정립
 - 1단계 사업으로 인해 창출된 핵심기술의 재정립
- 경제적 파급효과 및 질적분석 수행
 - 산업연관분석을 통한 경제적 파급효과 및 창출된 논문/특허의 질적분석 수행
- 일반인도 쉽게 이해할 수 있는 사례집 작성
 - 기 조사된 성과 및 그간의 연구개발 현황을 쉽게 전달할 수 있는 사례집 작성

연구 추진 Framework

본 연구는 다음과 같이 총 4개 Module로 구성하여 『ITER 1단계 사업』의 기술성과에 대해 조사·분석할 계획임



연구수행 방법

ITER 사업의 특성 및 추진체계에 대한 심층인터뷰/조사/분석을 통해 사업 특성을 반영한 항목을 설정함

[표 1-1] 연구수행 방법

사업 체계 분석	성과분석	인터뷰	OUTPUT
<ul style="list-style-type: none"> - 사업의 목적 및 단계별 운영목표 정립 - 각 품목별 진행 프로세스 및 예상 산출물 도출 - 과제 목표간의 체계도 구성으로 인한 사업목적 달성 의 미 도식화 	<ul style="list-style-type: none"> - 각 품목별 기술개발 단계를 활용한 선행행모형 정립 - SMART기법을 활용한 특허 질적분석 - Impact factor를 활용한 논문 질적분석 - 산업연관분석을 활용한 경제적 파급효과 	<ul style="list-style-type: none"> - ITER관련 전문가 인터뷰 - 각 품목별 과제책임자 인터뷰 <p>인터뷰기간: 2013.1.29-2.7</p> <ul style="list-style-type: none"> - 현재 기술력에 대한 정성적 설문 조사 	<ul style="list-style-type: none"> - 인터뷰/1단계 종료 보고서를 통한 핵심기술 도출 - 정리된 기술성과에 대한 정책 제언 - 일반인도 쉽게 이해할 수 있는 사례집 작성

2. 핵융합에너지

2-1. 핵융합에너지 개요

2-2. ITER와 KSTAR

2-3. ITER 사업의 특징

2-4. ITER 한국사업 현황

2-5. ITER 한국사업 추진 현황

2-1. 핵융합에너지 개요

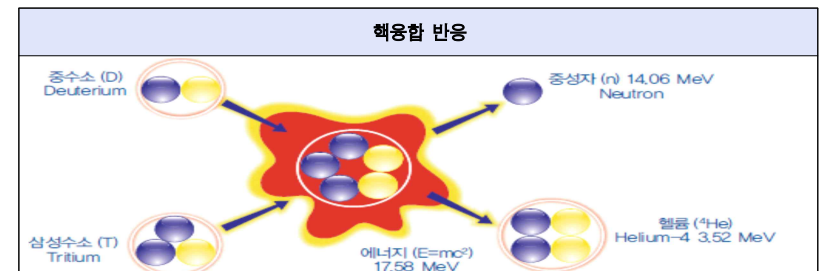
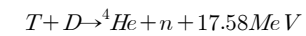
■ 핵융합에너지란?

- 핵융합에너지는 태양 내부와 같이 플라즈마 상태의 자유롭게 날아다니는 가벼운 원자핵이 서로 융합되는 과정에서 감소된 질량이 열에너지로 변환되어 생성되는 에너지임

	아인슈타인의 질량에너지 등가식
	$E = mc^2$

[그림2-1] 태양에너지

- 핵융합 반응에서 중수소(D, Deuterium)와 삼중수소(T, Tritium)의 핵융합 반응(D-T반응)이 가장 효율적이라 알려져 있으며 D와 T가 헬륨과 중성자(n, Neutron)로 변환되면서 질량결손이 발생하고 동시에 17.58MeV의 에너지가 발생함



[그림2-2] 중수소와 삼중수소에 의한 핵융합 반응

* 출처: 국가 핵융합에너지개발 기본계획, 산업자원부

에너지 자원의 한계

- 인류의 생활과 경제활동을 영위하기 위해 꼭 필요한 에너지는 재래형 에너지와 앞으로 개발, 상업화될 비(非)재래형의 새로운 에너지 자원으로 구분할 수 있음
- [그림 2-3]에서 보듯 재래형 에너지는 석유, 천연가스, 석탄 등이며, 석유는 앞으로 40여년, 천연가스는 60여년, 석탄은 230여년이면 수급의 한계점에 도달될 것으로 보임
- 새로운 에너지 자원은 수력, 지열 풍력, 태양열, 연료전지, 폐기물에너지, 핵융합에너지 등을 들 수 있으며, 재래형 에너지 고갈로 인해 신재생 에너지 적극 발굴 및 확대 공급이 필요함



[그림2-3] 에너지 사용 가능 시간

* 출처: ITER 한국사업단 내부자료(2012)

핵융합에너지의 중요성 및 장점

- 친환경 대체 에너지로서의 역할 기대가 가능함
 - 이산화탄소의 배출이 없으며 폐기물이 적고 효율·안정성 높음
- 자원이 무한함
 - 핵융합의 반응의 연료인 '중수소'와 '삼중수소'는 보통의 바닷물에도 무한정 존재하여 고갈 가능성이 없음
 - 중수소는 바닷물 1ℓ 당 0.03g이 존재함. 이는 중형 승용차로 서울과 부산

사이를 세 번 왕복할 수 있는 300ℓ의 휘발유와 동일한 에너지임

- 원전사고와 같은 대규모 에너지 유출이 불가능하기 때문에 안정성이 높음
 - 오작동시 플라즈마가 바로 소멸되고, 장치의 작동이 자동으로 정지되는 시스템임
- 고효율 에너지임
 - 지구의 자원을 소비하는 형태가 아닌 기술로 만든 에너지이기 때문에 상당한 고효율성을 지님
- 평화에너지임
 - 핵융합에너지의 원료가 풍부하므로 에너지 확보를 위해 국가간 분쟁의 염려가 없는 장점이 있음



[그림2-4] 핵융합 에너지의 장점

* 출처: 국가핵융합연구소(NFRI)

2-2. ITER와 KSTAR

■ ITER는?

- 라틴어로 '길'을 뜻하는 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)는 핵융합에너지 상용화의 최종 과학적·기술적 실증을 위하여 우리나라를 비롯하여 EU, 일본, 러시아, 미국, 중국, 인도 등 7개국이 공동으로 국제핵융합실험로(ITER)를 건설하고 운영하는 국제협력 프로젝트임
- ITER 장치는 토카막(Tokamak)형 핵융합 장치로서, 중수소(D)-삼중수소(T)를 연료로 초고온의 플라즈마를 만들고, 핵융합 반응에 의해 생성된 고에너지의 알파입자(3.5 MeV)로 자체 연소에 의하여 장시간 핵융합 반응이 유지되도록 설계·제작되는 최초의 핵융합로 실험임
- ITER 장치는 핵융합으로 열출력 500 MW, 에너지 증폭률(Q) 10 이상, 핵융합 연소 400초 이상 지속하는 것을 목표로 설계됨
- ITER 사업은 기존의 토카막 장치에서 수행되는 것과 다른 핵융합로의 공학적 검증과 핵융합 발전을 위한 핵심기술 개발을 목표로 함
- 즉, ITER는 핵융합 에너지를 새로운 인류의 에너지 공급원으로 상용화하기 위해 최종 검증할 수 있는 핵융합실험로를 공동으로 건설·운영하는 프로젝트임
 - 건설기간 : 2007년-2019년(총 사업기간: 2007년~2042년)
 - 참여국: 한국, EU, 미국, 중국, 인도, 일본, 러시아
 - 총건설비: 4,584.7 kIUA* (약 71.1억 유로)
 - 총사업비: 131.8억 유로
 - * kIUA : kilo ITER Unit of Accounts (ITER화폐단위), 1 kIUA = 1.42 백만 유로 ('05년 말 기준)
 - 건설방식: 참여국에 할당된 조달품목을 제작 납품 후 현장 조립 완성
 - 건설비 분담 방식: 총 건설비 50.8억 유로 중 EU가 45.46%, 6개 각 참여국이 9.09%씩 분담
 - 운영, 감쇄, 해체단계에서는 EU 34%, 미, 일 각 13%, 한,중,러,인 각 10%

분담임

- 재원분담 방식: 현물분담 78% (장치제작 및 ITER 기구 직원과전 등), 현금분담 22% (직접비, ITER 기구 운영비, 직접고용직원 인건비 등)

■ KSTAR는?

- 우리나라의 본격적인 핵융합 연구개발 사업은 '95년 말 국가핵융합 연구개발위원회에서 「국가핵융합연구개발 기본계획」을 확정하면서 연구개발을 시작함
- 국가핵융합연구개발사업은 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)로 이름지어진 차세대 초전도 토카막 장치의 개발·설치와, 이 연구장치의 운영을 통한 핵융합 연구, 기술 확보, 세계적 핵융합로 개발에 동등한 자격으로의 참여 등을 중간목표로 하는 3단계 계획으로 수립되어 있음
- KSTAR 건설로 인해 중형 규모의 초전도 토카막 장치를 건설하고, 그 기술력을 바탕으로 ITER 회원국에 가입하는 'ITER 중간진입전략'의 일환으로 시작되었으며, 최종목표는 핵융합 발전기술의 상용화시기까지 핵융합 연구의 기술선진국으로서 위치를 확립하고자 함
- 상용핵융합로 건설을 위해 필수적으로 요구되는 정상상태 운전기술과 고성능·고효율 플라즈마 발생 및 제어기술을 개발하고, 이에 필요한 하드웨어 기술을 확보하는 것을 주요 기술개발 목표로 설정함
 - 건설 기간: '95. 12~'07. 8 (11년 9개월)
 - 총 사업비: 장치개발 3,090억원, 시설건설 1,092억원
 - 참여 인력: 연인원 300명, 30개 기관참여
 - 장치 크기: 높이 8.6 m, 직경 8.8 m
 - 초전도자석 무게: 약 300톤 (전체 약800톤)
- 1995년 12월 착수된 KSTAR 건설사업은 특수실험동 건설에 1천500억원, 장치건설에 3천90억원이 각각 소요되었으며, 설계에서부터 완공에 이르기까지 12년이 걸린 국내 과학기술 역사상 최대 규모의 사업임
- KSTAR는 주반경 1.8m, 부반경 0.5m, 플라즈마 용적이 17.8m³인 중형 토카

막 장치로 플라즈마 전류 2MA, 최대 중심 자기장 3.5테슬라, 최대 동작시간 300초의 준-정상상태 운전을 목표로 함

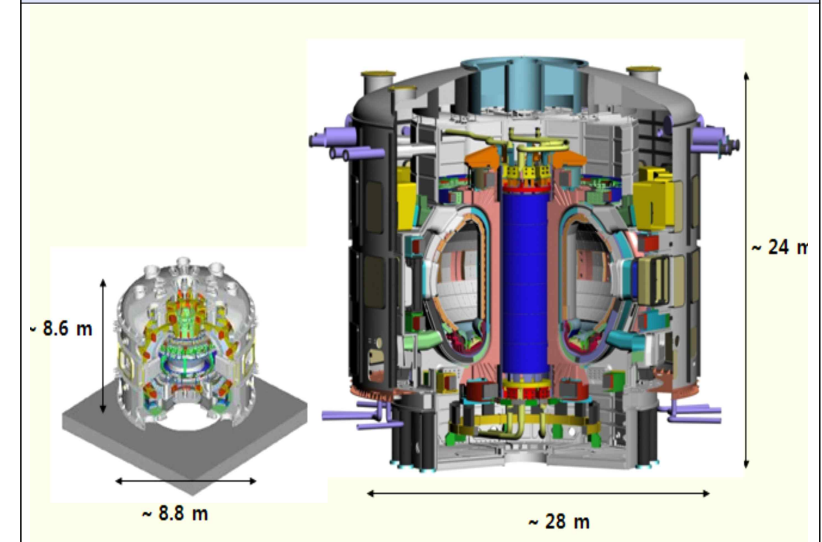
- 총 16개의 토로이달 코일과 10개의 폴로이달 코일이 니오븀-주석 합금(Nb3Sn)의 초전도선재로 제작되고 4개의 대형 폴로이달 코일은 니오븀-티타늄 합금(NbTi)으로 제작되는 등 모든 코일이 초전도자석으로 이루어져 장시간 운전이 가능하도록 설계되었음
- [표2-1]과 [그림2-6]은 KSTAR와 ITER의 제원 및 크기비교임

[표2-1] KSTAR와 ITER의 주요 제원

변 수(parameters)	KSTAR	ITER
주반경 (Major radius), R0	1.8m	6.2m
부반경 (Minor radius), a	0.5m	2.0m
Elongation, κ	2.0	1.7
Triangularity, δ	0.8	0.48
플라즈마 용적(Volume)	17.8m ³	830m ³
플라즈마 단면적	1.6m ²	22m ²
플라즈마 형상	Single/Double Null	Single Null
플라즈마 전류, Ip	2MA	15(17)MA
폴로이달 자기장 세기, B0	3.5T	5.3T
펄스길이	300초	400초
플라즈마 연료	수소, 중수소	수소, 중수소, 삼중수소
초전도선재	Nb3Sn, NbTi	Nb3Sn, NbTi
가열 및 전류구동장치	약 26MW	73(110)MW

* 출처: KSTAR 프로젝트, ITER 선행장치로서의 확실한 입지 구축, 양형렬(2011)

KSTAR와 ITER 규모 비교



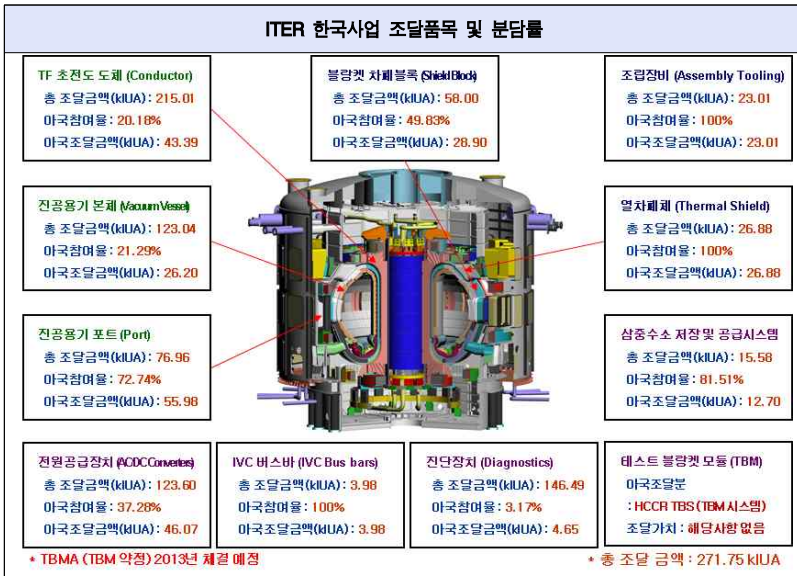
[그림2-6] KSTAR와 ITER 규모 비교

* 출처: ITER 한국사업단 내부자료(2012)

2-3. ITER 한국사업 현황

ITER 한국사업 목적

- 본 사업의 목적은 국제핵융합실험로(ITER) 공동개발사업에 참여하여 미래 청정에너지인 핵융합에너지 개발을 위한 핵심기술 및 전문인력을 확보하고 향후 우리나라 핵융합에너지 기술자립에 기여함에 있음
 - 우리나라에 할당된 10개 조달품목*의 적기 제작·조달
 - * 초전도도체, 진공용기 본체 및 포트, 블랭킷 차폐블록, 열차폐체, 조립장 비류, 삼중수소 SDS, 전원공급장치, 진단장치, IVC버스바(그림2-7 참조)
 - * IVC버스바는 1단계 당시 조달품목에 포함되지 않은 관계로 조사대상에서 제외
 - 장치개발, ITER 기구 운영 참여 및 인력파견을 통한 전문인력 양성
 - 핵융합 상용화 및 운전기술 확보를 위한 핵심기술 연구·개발
 - 조달품목의 효율적 적기 조달 및 기술축적을 위한 종합사업관리



[그림2-7] ITER 조달품목 및 분담률

* 출처: ITER 한국사업단 내부자료

사업 현황

- 국제핵융합로(ITER)는 핵융합발전의 토대가 될 것으로 기대되는 핵융합실험로를 건설하기 위한 국제공동프로젝트로 한국, EU, 일본, 미국, 러시아, 중국, 인도 등 7개국이 참여하며, 총 사업기간은 2007년부터 2042년까지이며 이 가운데 2019년까지는 핵융합실험로의 건설기간으로 현재 건설 중에 있음
- 이러한 ITER프로젝트 참여를 통해 2030년대 DEMO 및 2040년대 상용 핵융합발전소 건설을 위한 원천기술을 확보하고, 이를 통해 대용량의 친환경적 에너지원 확보로 국가 에너지 자립 및 에너지 안보에 기여함을 목표로 각 단계별로 순차적으로 진행되고 있음

사업 주요 연혁

- 한국은 2003년 ITER에 가입하면서 사업 참여의 계기를 마련하였고, 관련 법 제정 및 공포를 통해 2007년부터 사업이 본격적으로 시작함

[표 2-2] 한국 ITER 사업 주요 연혁

연도	주요 연혁
2002.12	ITER 참여의향서 전달
2003.06	우리나라 ITER 가입(제 12회 국과위 참여 결정)
2005.12	국가 핵융합에너지개발 진흥기본계획 확정(제 19회 국과위)
2006.12	핵융합에너지개발진흥법 제정·공포
2007.04	ITER 공동이행협정 및 특권면제협정 국회 비준동의
2007.09	ITER 사업 국내전담기관 지정(과기부 고시 제2007-17호)
2007.12	국제핵융합실험로(ITER) 공동개발사업 처리운영규정 제정
2010.07	ITER 종합사업계획서 Baseline 확정(ITER 특별이사회)

* 출처: ITER 한국사업단 내부자료

ITER 한국사업 건설 사업비

- ITER 한국사업 건설사업비는 총 12,365억원으로 1단계에서 4,196억원이 투입되었으며, 2단계에서 8,169억원이 투입될 예정임

[표2-3] ITER 사업 지원예산

구 분	1단계 (단위: 억원)	2단계 (단위: 억원)	사업비(전체) (단위: 억원)	비 고
ITER 분담금	3,792	7,014	10,806	87.4%
(1) 현금 분담금(In-Cash)	891	2,269	3,160	25.6%
(2) 현물 분담금(In-Kind) (우리나라 9개 조달품목 개발, 제작)	2,901	4,745	7,646	61.8%
국내 사업비	404	1,155	1,559	12.6%
(3)핵심기술 개발비 (테스트 플랫폼 모듈 및 비조달 핵심 기술)	118	862	980	7.9%
(4) 국내전담기관 운영비	286	293	579	4.7%
합 계	4,196	8,169	12,365	100%

* 출처: ITER 한국사업단 내부자료(2012)

ITER국제기구 인력파견 현황

- ITER 국제기구 연도별 전문인력 파견실적을 살펴보면, 2005년 2명을 파견한 이래로 매년 꾸준히 파견인력이 증가하고 있으며, P급 인력이 가장 많은 비중을 차지하고 있음

[표2-4] 전문인력 파견(명)

부서	행정	플라즈마운영	토키막	중앙엔지니어링	CODAC 가열/진단	건설 및 현장부지	중앙통 합엔지니어링	안전·품질·보안	사무총장실	ITER 프로젝트부	합계	
인원 (특귀인력)	P급	3(1)	-	7(1)	9(2)	-	-	7(3)	3(1)	-	1	30(8)
	Post-Doc	-	1(1)	-	-	1(1)	-	-	-	-	-	2(2)
	G급	3	-	-	-	1	-	-	1	-	-	5
합 계	6(1)	1(1)	7(1)	9(2)	2(1)	-	7(3)	4(1)	-	1	37(10)	

* 출처: ITER 한국사업단 내부자료(2013.03월말 기준)

- ITER 국제기구 참여국별 인력현황을 살펴보면, 유럽연합을 제외한 다른 국가와 비슷한 수준의 인력이 파견되어 있는 것으로 나타났으며, P급의 인력만을 놓고 비교해 보면 유럽연합, 일본을 제외한 나머지 국가보다 더 많은 인력이 파견되어 있는 것으로 나타남
- ITER 국제기구의 수석엔지니어로 한국의 박주식 박사가 선임되어 ITER 프로젝트 기술을 총괄하고 있음

[표2-5] ITER국제기구 참여국별 인력 현황(명)

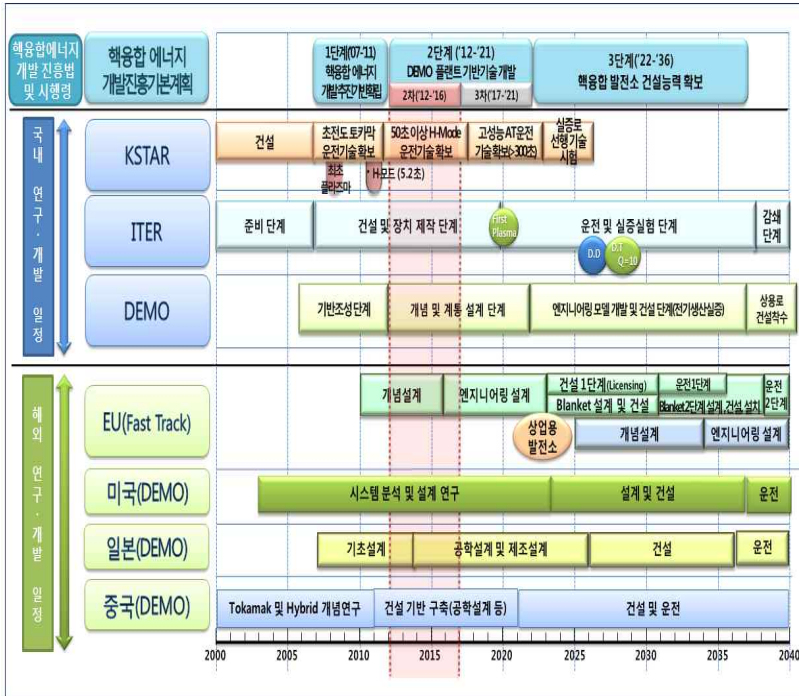
구 분(명)	한 국	유럽연합	일 본	미 국	러시아	중 국	인 도	합 계
P급	22	188	27	16	19	14	14	298
	7.4%	63.1%	9.1%	5.4%	6.4%	4.7%	4.0%	100%
G급	5	119	6	10	6	4	16	166
합 계	27	307	33	26	25	18	28	464

* 우리나라 특귀인력(P급 10명) 미포함

* 출처: ITER 한국사업단 내부자료(2013.03월말 기준)

핵융합에너지 연구개발 촉진

- 2012년부터 2016년까지 핵융합에너지 연구개발을 촉진하기 위해 수립된 제 2차 핵융합에너지개발진흥기본계획에 따라 KSTAR-ITER-DEMO 플랜트 등을 포함하는 기술개발이 추진되고 있음



[그림2-8] 핵융합에너지 연구개발

* 출처: 제 2차 핵융합에너지개발진흥기본계획(2012-2016)(안), 국가핵융합위원회

2.4. ITER 한국사업 추진 현황

사업추진 절차별 세부 내용 및 추진 주체

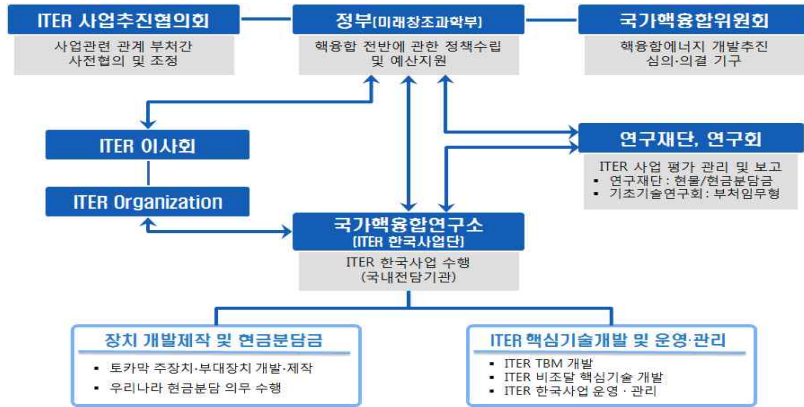
- 사업추진 단계별 점검을 위하여 주체를 지정하여 사업을 차질없이 수행함

[표2-7] 사업추진 절차별 세부 내용 및 주체

구분	내용	주체
사업계획 수립	사업목표, 방향, 사업비 배분 등	정부
사업기획 및 과제제안서 작성	총괄 및 세부사업별 목표 설정 사업수행을 위한 과제제안서 기획	정부 및 전문기관
실적보고서 및 사업계획서 제출	연차별 또는 단계별 실적보고서 및 사업계획서 작성·제출	ITER 한국사업단
사업평가	평가지침에 따라 사업내용, 추진방법, 사업비 등에 대한 평가	정부 및 전문기관
평가결과 통보	평가결과 및 신청서의 수정·보완 사항 통보	전문기관
총괄 협약체결	정부와 전문기관 과의 총괄 협약체결	정부 ↔ 전문기관
협약체결 및 사업착수	평가의견을 반영한 계획서 제출 ITER 사업단과 전문기관과의 협약체결	전문기관 ↔ ITER 한국사업단
사업비 정산	사업비 집행실적보고서 제출 전문기관 검토 및 관계부처 보고	ITER 한국사업단 ↔ 전문기관 ↔ 정부

* 출처: ITER 한국사업단 내부자료

■ 사업추진 체계



[그림2-9] ITER 사업추진 체계

■ 부문별 사업추진 역할

[표2-8] ITER 한국사업단 부문별 사업추진 역할

구분	주요업무 및 역할
국가핵융합위원회	<ul style="list-style-type: none"> 핵융합에너지 연구개발 촉진과 관련 과학기술산업 진흥을 위한 의사 결정 기구 ※ 위원장(미래부 장관), 위원(미래부·산업부·기재부 차관, 국무조정실 차관 등)
정 부	<ul style="list-style-type: none"> ITER 사업을 포함한 핵융합 전반에 관한 정책수립 ITER 사업추진협의회 운영 (부처 간 협의·조정) 시행계획에 따른 전문기관과의 총괄협약 체결 사업계획 및 성과 최종심의를 위한 위원회 구성·운영 ITER 사업 전체(묶음예산 포함) 총괄 관리
전문기관	<ul style="list-style-type: none"> 핵융합사업에 대한 기획·평가관리 등에 관한 업무 - 사업수행기관과의 협약 체결 및 사업비 지급 - 사업 평가 및 정산에 관한 업무 - 사업별 조사·분석·평가 및 사업성과 관리 ※ 묶음예산 관련 사업을 포함하여 점검
국내전담기관 (ITER한국사업단)	<ul style="list-style-type: none"> ITER 한국사업 추진을 위한 국내전담기관 역할 수행 - ITER 사업 종합추진계획 및 연도별 사업계획 수립 - 분야별 과제선정, 자체평가, 진도관리, 정산보고 업무 - ITER 기구 운영참여 및 인력양성·파견·지원관리 ※ 핵융합(연)은 ITER 한국사업단이 묶음예산 관련 사업도 포함하여 종합적으로 수행토록 지원(ITER 사업 처리운영규정)

* 출처: ITER 한국사업단 내부자료

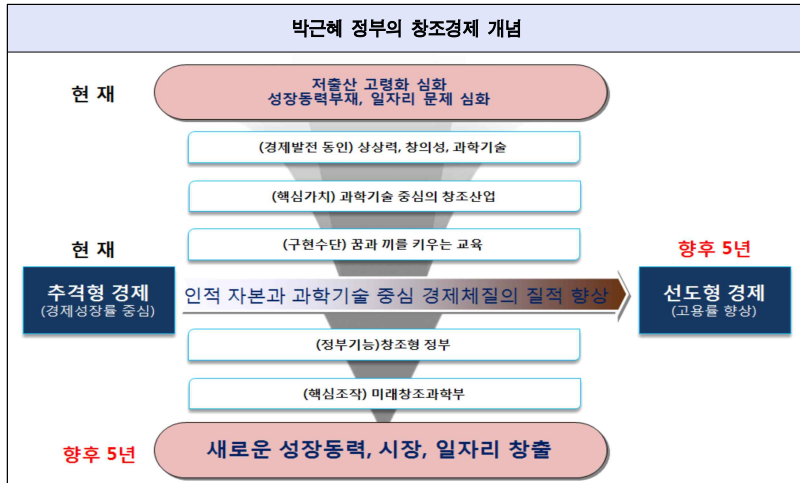
■ ITER 한국사업과 타 연구개발 사업과의 차별성

- ITER사업은 1995년 발의되어 2040년까지 추진되는 최장기간의 국제협력 과학기술 사업임
- 인류의 생활과 경제활동에 꼭 필요한 에너지의 중요성으로 인해 세계 7개국이 참여하는 세계 최대 규모의 프로젝트임
- 핵융합은 핵안보 차원에서 차별적으로 연구, 개발되고 관리되어야 하는 분야이며, 기술개발 되어야 할 요소기술은 소재, 공정, 부품 기술혁신을 유발하여 산업전체에 큰 파급효과를 주므로 산학연관이 긴밀한 네트워크 구축이 필요함
- Science-Technology-Business 세 분야가 동시에 추진되는 과학기술융합사업임. 즉, 플라즈마의 과학적 연구 성격, 설계의 확정 및 검증, 부품을 제조·조달하는 technology 개발 성격, 대규모로 투자가 인한 Business 성격을 나타냄

2-5. 창조경제론과 ITER 사업의 연관성

박근혜 정부의 창조경제론

- 박근혜 정부의 국정 목표 중 하나인 창조경제론은 “어떻게 성장하느냐, 어떻게 일자리를 만드느냐, 이는 곧 미래 경제를 이끌어 갈 새 경제 발전 패러다임이다” 라며 지금이 창조경제가 필요한 시기라고 언급함
- [그림2-10]은 박근혜 정부의 창조경제 개념으로써, 과학기술정책 패러다임을 창조형 R&D로 전환하고, 과학기술과 아이디어 융합 등 과학기술을 통해 창조산업 육성을 첫 번째 국정과제로 강조함



[그림2-10] 박근혜 정부의 창조경제론

* 출처: 창조경제 개념과 주요국 정책 분석, 한국과학기술기획평가원(2013)

- 창조경제론은 핵심가치를 과학기술과 인력양성으로 제시하고, 과학기술과 상상력, 창의성을 융합시켜 우리나라 미래 경제를 이끌고 세계 시장을 선도하는데 목적이 있음
- 즉, 산업간 융합을 촉진시킴으로써 새로운 부가가치와 일자리를 창출해 나가는데 정책적 역량을 집중함

ITER 사업과 창조경제론의 연관성

에너지, 안보, 경제가 연관되는 국가 기반구축 프로젝트임

- 에너지는 식량과 마찬가지로 국민의 삶에 직접적으로 영향을 미치는 공통 기반이며, 핵융합에너지 기술은 화석에너지와 신재생에너지를 이어주는 가교 역할을 하기 때문에 국가에너지 mix portfolio 구성에서 중요한 위치를 차지함
- 핵융합은 원자력과 마찬가지로 원자폭탄을 만들 수 있는 기술을 취급하므로 핵안보 차원에서 차별적으로 연구, 개발되고 관리되어야 하는 분야임
- 핵융합 기술은 초고온 플라즈마, 초전도자석, 초대형 진공 등 세계최초로 시도되는 요소기술을 포함하고 있으며, 이러한 요소기술은 소재, 공정, 부품 기술혁신을 유발하여 산업전체에 큰 파급효과를 주므로 산학연관이 긴밀한 네트워크를 구성하여 개발하여야 함

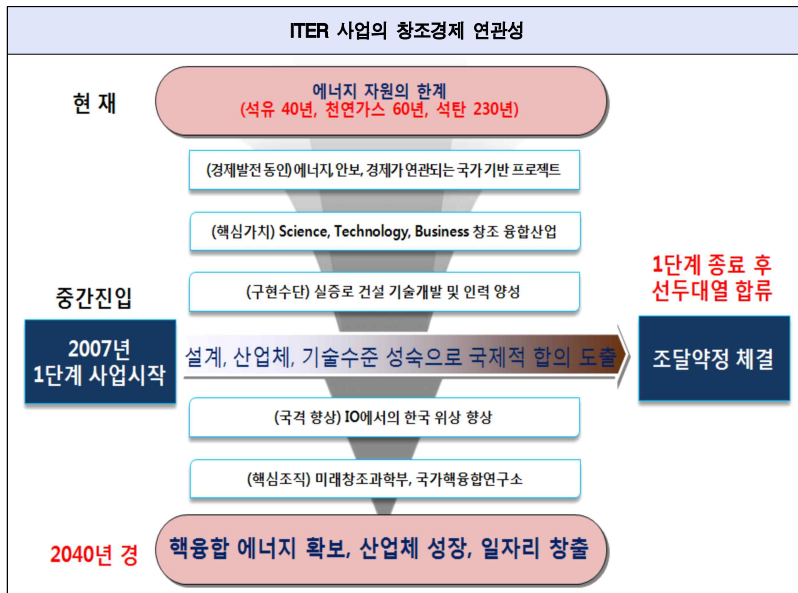
세계 최대 규모, 최장기간의 global collaboration 프로젝트임

- ITER사업은 1995년 발의되어 2040년까지 추진되는 인류역사상 가장 크고 장기적인 국제협력 과학기술 사업임
- 세계 7개국이 참여하는 핵융합 G7에 우리나라가 중간진입하여 성공적으로 선두대열에 포지셔닝한 것은 과학기술 차원에서 국격을 향상시킨 것으로 의미가 큼
- Global collaboration을 통하여 국제기술협력 Communication methodology 및 시스템을 구축할 수 있으며, 나아가 핵융합 발전기술의 이니셔티브를 확보할 수 있음

Science-Technology-Business 세 분야가 동시에 추진되는 과학기술융합산업

- ‘플라즈마 거동의 불안전성’의 원인을 규명하기 위한 과학적인 연구가 추진되고 있으므로, discovery science 연구의 성격을 가지고 있음
- 설계를 확정하고 mock-up제작을 통하여 성능을 검증하고 부품을 제조·조달하는 technology 개발의 성격을 띠며

- 또한 대규모의 투자가 이루어지고 Demo plant 사업이 병행하여 추진되고 있으므로 사업적인 운영방식이 요구됨
 - 즉, ITER 사업은 과학, 기술, 비즈니스가 융합된 과학기술융합산업으로 볼 수 있으며, 이는 새정부 국정 목표인 창조경제의 성격(산업간 융합)과 부합되고 있음
- 핵융합에너지 기술개발 성공은 전 인류를 위한 대체에너지 확보라는 큰 성과와 함께 **국내 산업체 발전으로 인한 일자리 창출, 전문 인력양성**이라는 부가적 효과를 얻음으로써 **박근혜 정부의 창조경제 목적과 부합되는 특징**이 있음



[그림2-11] ITER 사업과 창조경제의 연관성

3. ITER 성과창출 프로세스

- 3-1. ITER 성과창출 논리모형 정립
- 3-2. ITER 사업의 성과창출 논리모형
- 3-3. ITER 품목별 논리모형 도출
- 3-4. ITER 1단계 조달약정 현황

3-1. 성과창출 논리모형 정립

■ 성과분석을 위한 논리모형 도출의 필요성

- 사업(또는 프로그램)을 특정한 목표를 달성하기 위한 투입, 활동, 산출 및 결과의 과정으로 파악하고, 이들 간의 논리적 인과관계를 활용하여 사업의 경제성, 효율성 및 효과성을 극대화시키려는 논리적 기본 틀임¹⁾

■ 논리모형(Logic model)의 이해

- 논리모형은 공공 프로그램의 효과를 기술하고 설명하기 위해 널리 활용되고 있는 도구로, 주어진 문제 해결을 위해 프로그램이 어떻게 운영되고 작동할 것인가를 나타내 주는 일련의 논리적 연관으로 구성된 선형적 모형임
- 논리모형을 통해 프로그램을 운영하기 위한 자원, 계획한 활동, 달성하기를 원하는 변화 또는 결과간의 관계를 시각적으로 나타냄으로써 프로그램 관리자 및 이해관계자들이 프로그램의 목적과 구체적 사항을 공유할 수 있으며, 평가자들은 평가를 위한 측정도구를 도출할 수 있음²⁾
- 프로그램 논리모형(program logic model)을 프로그램 논리에 입각하여 프로그램의 요소들과 프로그램이 해결하려는 문제들 간의 논리적(인과)관계들을 기술하는 다이어그램(diagram)이며, 사업의 구성요소들이 어떤 인과과정을 거쳐 원하는 결과를 산출해 내는지에 대한 논리 및 도식으로, 프로그램논리를 표현하는 모형임³⁾
 - 단순히 투입→활동→산출→결과→영향의 '논리적 순서를 갖는 도표'에 사업 구성요소나 성과지표를 대입(mapping)하는 것이 아님
 - 어떠한 문제를 인식하고 이를 개선하기 위한 변화(change)를 만들어 내는 것이 정부개입(intervention)의 목적이며, 이러한 변화를 결과(outcome)로 정의함

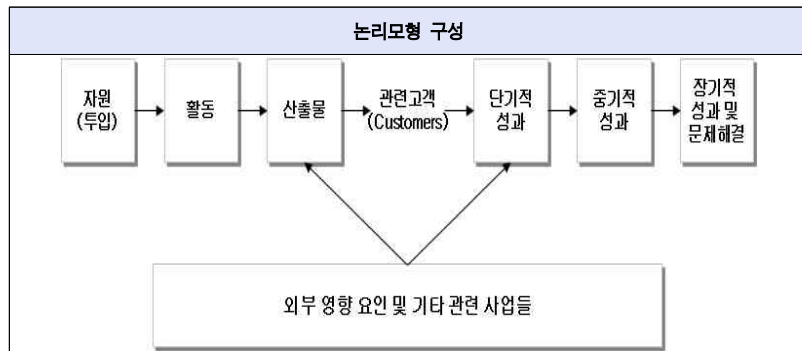
1) 정상기 외(2007), <표준사업분류별 논리모형 개발 및 핵심성과지표도출>, KISTEP

2) 이도형(2010), <국가연구개발사업 유형별 성과평가 논리모형 개발에 관한 연구>, KISTEP

3) 이도형(2010), <국가연구개발사업 유형별 성과평가 논리모형 개발에 관한 연구>, KISTEP

■ 주요 구성요소

- 논리모형의 주요 구성요소로는 상황(situation)/환경(environment), 투입(inputs), 활동(activities), 산출(outputs), 성과(outcomes) 등으로 구성되어 있음
 - 상황/문제정의 : 현재의 상황 또는 변화가 필요한 부분을 정의하는 것으로 문제 및 욕구의 개념화
 - 투입 : 프로그램에서 사용되는 모든 종류의 자원이며, 프로그램 과정에서 필요한 원료(인적 및 물적 자원들과 아울러 파트너쉽이나 계약에 의한 서비스 등과 같은 프로그램을 지원하기 위하여 요구되는 여러 가지 투입물)
 - 활동 : 목표한 성과와 궁극적 목적을 달성하기 위해 프로그램을 실행하는데 있어 필요한 활동들
 - 산출 : 프로그램의 활동으로 얻어진 직접적이고 가시적인 결과물
 - * 산출 자체가 프로그램을 통해 기대했던 변화의 결과는 아니지만, 프로그램을 얼마나 잘 수행했는지에 대한 사정을 가능하게 해줌
 - 성과 : 프로그램 참여자들이 프로그램 참여 시/종료 후 얻는 혜택이나 프로그램 활동의 결과로 나타나는 태도, 행동, 지식, 기술, 지위, 기능 수준의 구체적 변화



[그림3-1] 논리모형의 구성요소(예시)

* 출처: J.A.McLaughlin,G.B.Jordan,Evaluation and Program Planning 22(1999) 65-72

■ 사업의 논리모형 도출 기본방향

- 기존 논리모형의 정의와 시사점을 바탕으로, 사업이 어떠한 인과관계를 거쳐 원하는 결과를 도출해내는지에 대해 도식화함으로써 프로그램의 논리를 표현하고자 함
- 이에, 기본적인 논리모형의 단계인 '투입(Input) ▶활동(Activity) ▶산출(Output) ▶ 결과(Outcome) ▶영향(Impact)'에 사업목적 및 수요(환경), 목표체계(비전-전략목표-운영목표)를 연계하여 사업구조를 설명할 수 있는 논리모형을 도출함
 - 사업의 투입, 활동, 산출, 결과, 영향은 사업의 목적에 부합하게 이루어져야 하기 때문에, 각 단계와 사업의 목표체계가 연계되도록 함
 - 장기 성과인 영향은 사업의 궁극적인 목적인 비전과 연결되며, 중기 성과인 결과는 사업의 전략목표와, 단기 성과인 산출부터 사업의 활동 및 투입은 운영목표와 연결됨

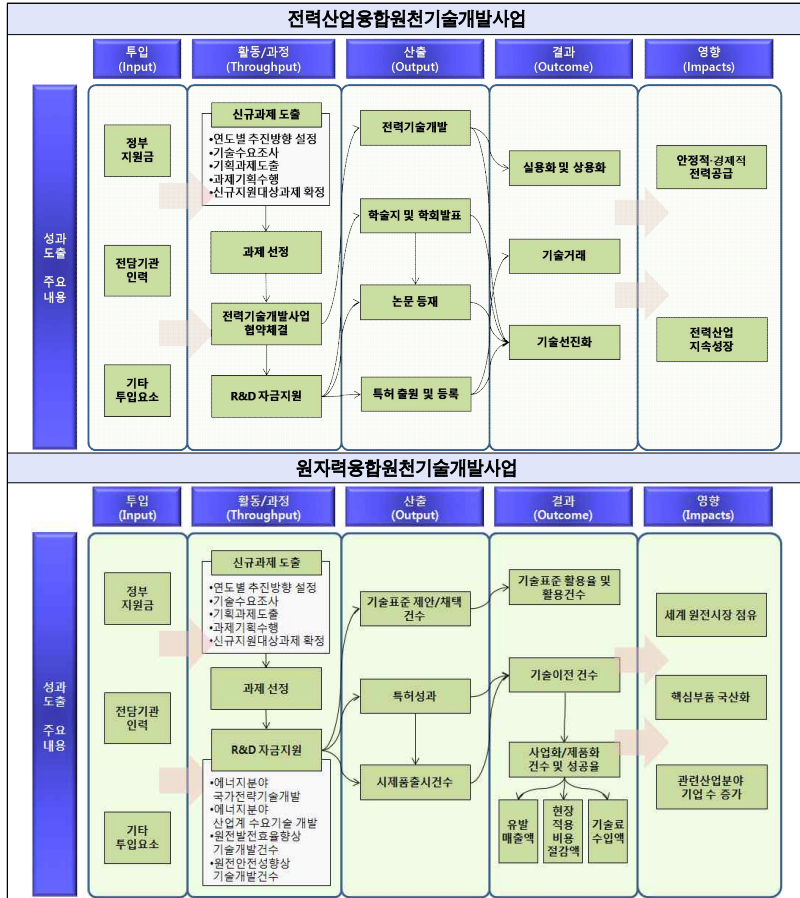
■ 논리모형 활용사례

- 다음 표는 한국은행 산업연관표 통계분류 상 ITER 사업과 같은 산업으로 분류된 원자력산업, 전력산업의 논리모형 활용사례임⁴⁾
- 한국에너지기술평가원 원자력산업의 투입단계 주요요소로는 정부지원금, 전담기관 인력, 기타 투입요소 등이 있으며, 활동/과정 단계에서의 주요요소는 신규과제 도출 및 과제선정을 위한 R&D 자금지원 외에 에너지분야의 국가전략기술개발 및 산업계 수요기술 개발, 원전발전효율향상기술개발, 원전안전성향상기술개발 등의 활동이 있음
- 산출단계에서의 주요요소로는 기술표준 제안/채택 건수, 특허성과, 시제품출시건수로 인한 산출물 등이 있으며, 결과 단계에서의 주요요소는 기술표준 활용률 및 활용건수, 기술이전 건수, 사업화/제품화 건수 및 성공률, 유발매출액, 현장적용비용절감액, 기술료수입액 등이 있음
- 전력산업의 투입단계(Input)의 주요 요소로는 정부지원금, 전담기관 인력, 기타 투입요소 등이 있으며, 활동/과정단계(Throughput)의 주요활동으로

4) 2012 한국에너지기술평가원 성과분석보고서 활용(연구기관: ㈜기술과가치)

신규과제 도출 및 선정, 전력기술개발사업 협약체결, R&D자금지원으로 구분됨

- 산출단계(Output)의 주요요소로는 전력기술개발, 학술지 및 학회발표, 논문등재, 특허출원 및 등록 활동으로 구분되며, 결과단계(Outcome)의 주요성과로는 전력사용의 사회적 비용절감, 국내 전력산업 기술력 향상, 기술선진화 성과로 구성됨



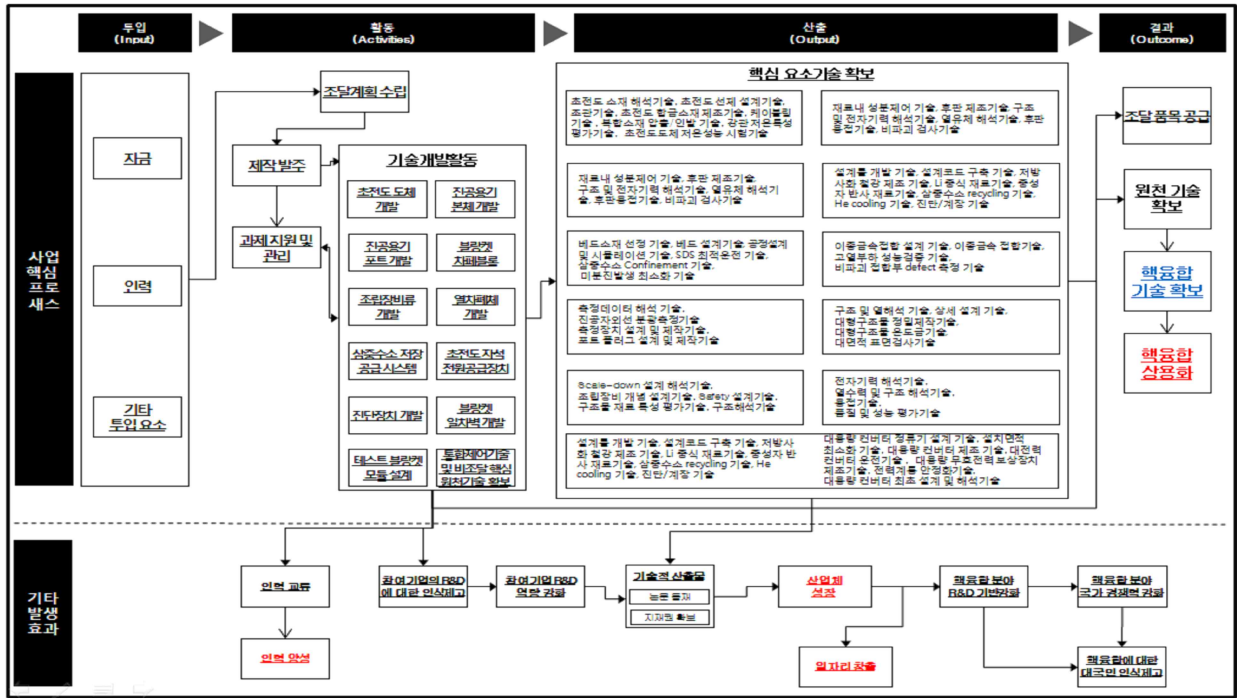
[그림3-2] 논리모형의 구성요소(예시)

* 출처: 2012 한국에너지기술연구원 원자력, 전력 성과분석보고서(연구기관: ㈜기술과가치)

3-2. ITER 성과창출 논리모형

ITER 공동개발사업의 성과창출 프로세스

- ITER 사업의 예산 투입부터 발생하는 성과까지의 과정을 단계적으로 구분하여, 사업에 대한 이해를 높일 수 있도록 논리모형을 구성함
- 그에 따라, 사업을 둘러싸고 있는 국내의 시장 환경에 대한 부분과 사업에 투입되는 요소, 그리고 활동에 포함되는 요소, 사업을 통해 발생하는 산출, 성과 요소들에 내용을 논리모형에 담고자 하였음
 - 사업을 둘러싸고 있는 환경부분과 사업의 목적과 연결시켜 사업의 목적이 환경 수요와 연결되어 있는지를 확인함
 - 사업의 비전, 전략목표, 운영목표 등을 고려하여 투입, 활동, 산출, 결과, 영향 부분을 구성함으로써 사업에 대한 이해도를 높일 수 있도록 고려함
- 본 사업의 '투입(Input)-과정(Throughput)-산출(Output)-결과(Outcome)'의 각 과정별로 주요 활동요소 및 그에 따른 산출물을 도식화한 결과 투입단계에서의 주요요소로는 자금, 인력 등이 있으며, 활동 단계에서의 주요요소는 조달계획 수립, 제작 발주, 과제지원 관리, 조달 및 비조달 품목의 기술개발 활동 등이 있음
 - 과제지원 관리에는 조달품목과 비조달품목 등이 포함됨
- 산출 단계에서는 핵융합상용화로 가기 위한 핵심 요소기술 확보*, 결과단계는 조달품목의 공급, 핵심기술 확보로 인한 원천기술, 핵융합기술 확보, 최종목표인 핵융합상용화까지 순차적으로 진행될 것으로 판단됨
 - * 핵심요소는 각 품목 담당자들의 설문 및 종료보고서를 참고하였으며, 자세한 내용은 4장 내용을 참조
- 그 외 인력양성, 참여기업(산업체)의 성장, 산업체의 역량 강화, 정량적 성과(논문, 특허 등)로 기타 효과가 발생하며, 그로 인해 일자리 창출 및 R&D 기반강화로 이어질 것임
- 이러한 각 과정별 주요활동들은 사업의 목적인 우리나라 기초과학기술과 산업기술 선진화로 이어지며, 과학기술분야의 국가 경쟁력 강화로까지 발전될 것임



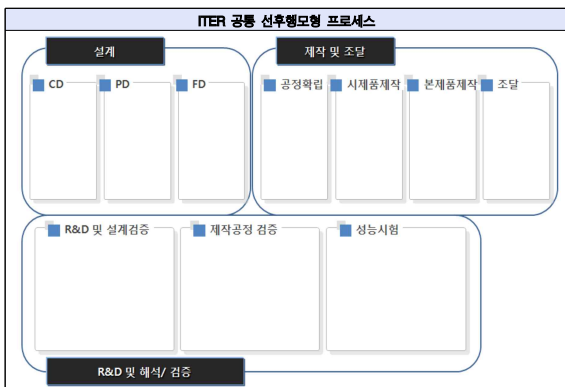
[그림3-3] ITER 논리모형 정립

3. ITER 성과창출 프로세스

3-3. ITER 품목별 논리모형 도출

■ 선후행모형을 위한 공통 프로세스

- ITER 1단계 사업에서 기술개발된 핵심기술의 정립을 위해 ITER 내부자료인 각 품목별 1단계 종료보고서, 2단계 기획보고서, 사업 초기 RFP를 참조하여 사업 특성에 맞는 선후행모형을 정립한 후 설문조사서를 작성함
 - * 조사서 내용은 부록 1 참조
 - * 조사서 작성 시 외부 전문가의 자문 참조
- 선후행모형은 각 기술의 특성에 따라 기술개발 시점 및 수준, 조달약정 여부, 목적 등이 다르기 때문에 공정제작에서 쓰이는 PERT기법을 기반으로 공통된 프로세스를 적용함
- 선후행모형을 기반으로 각 기술의 중간과정과 활동의 의의와 1단계에서 창출된 중요 성과(논문, 특허, 언론보도 등)에 대해 심층 인터뷰를 실시하여 핵심기술 및 현재 기술력 수준에 대한 정성적 설문 등을 조사함

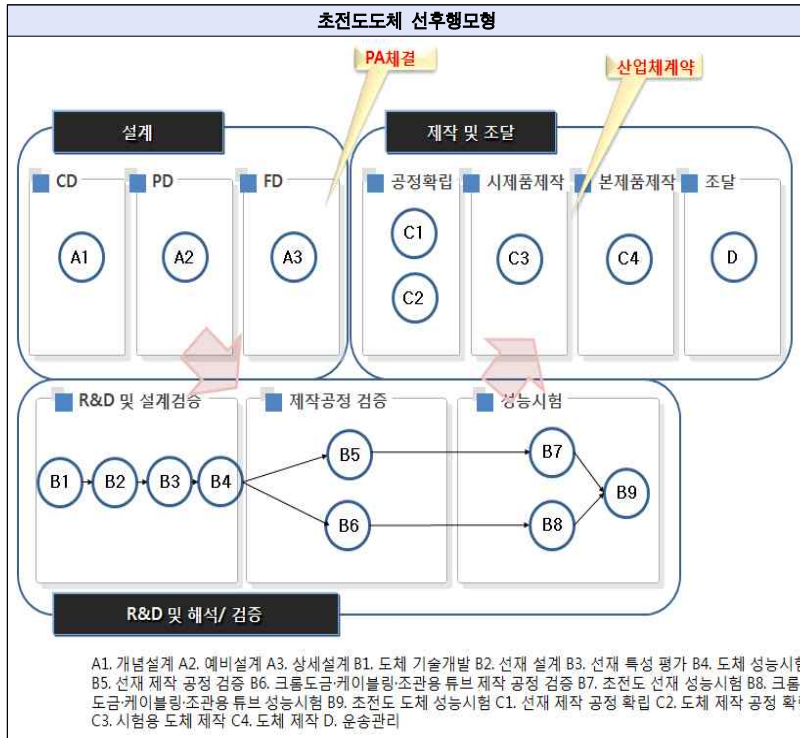


[그림3-4] ITER 선후행모형 정립

■ 각 품목별 선�행모형 정립

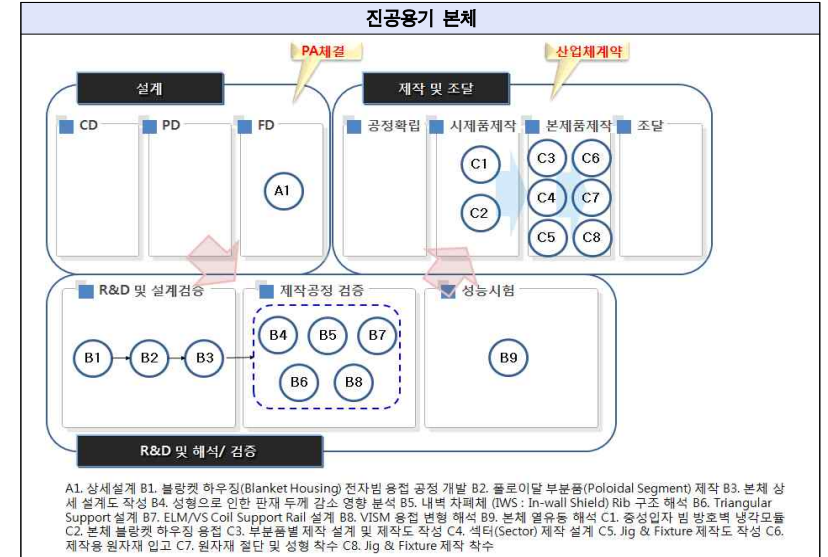
○ 다음 그림은 ITER 1단계에서 기술개발 되었던 품목들의 선�행모형 정립 그림⁵⁾임

- * 통합제어계통 및 비조달 핵심품목 원천기술 품목은 기술개발 단계 상 조사대상(선�행모형)에서 제외
- * 1단계 기술개발 당시 조달품목에 포함되지 않은 IVC 버스바 품목 제외

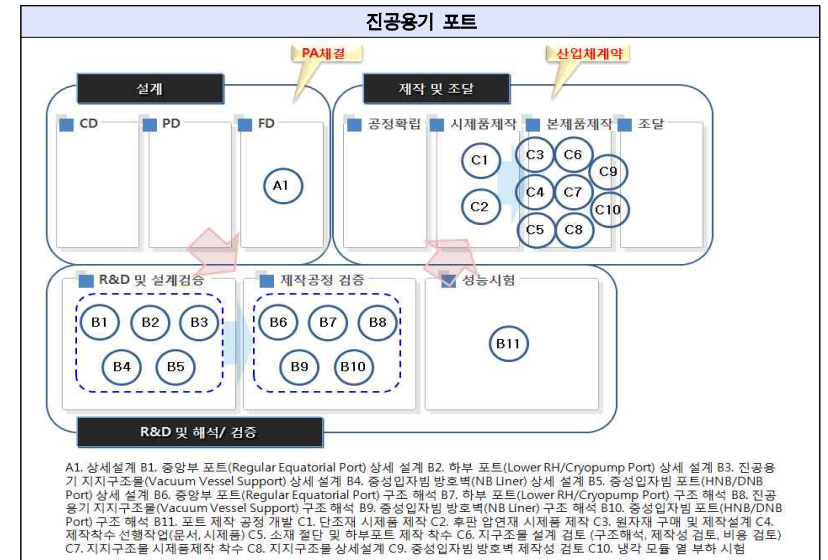


[그림3-5] 초전도도체 선�행모형 정립

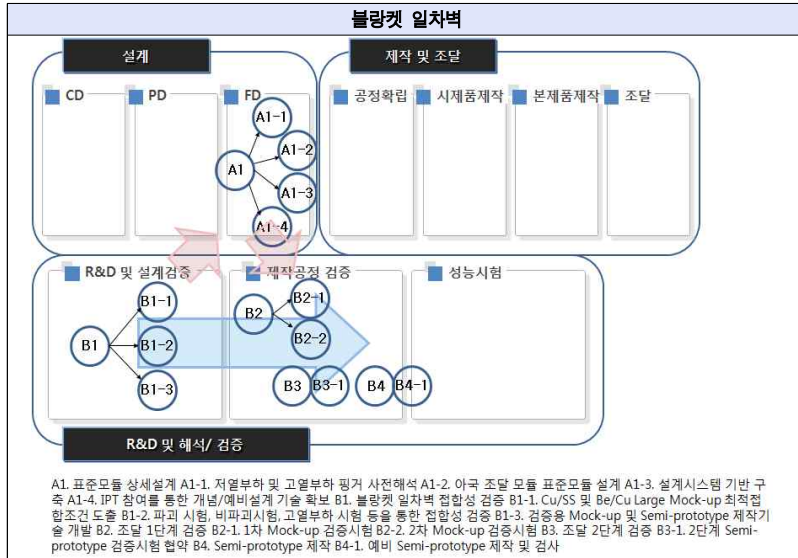
5) 각 기술의 중간과정과 활동 등은 (주)기술과가치의 주관적 판단임을 밝혀둠



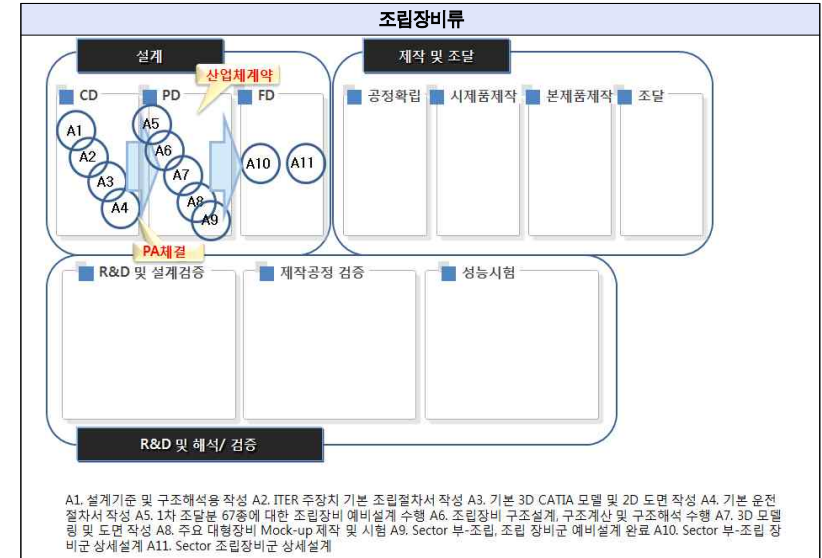
[그림3-6] 진공용기 본체 선�행모형 정립



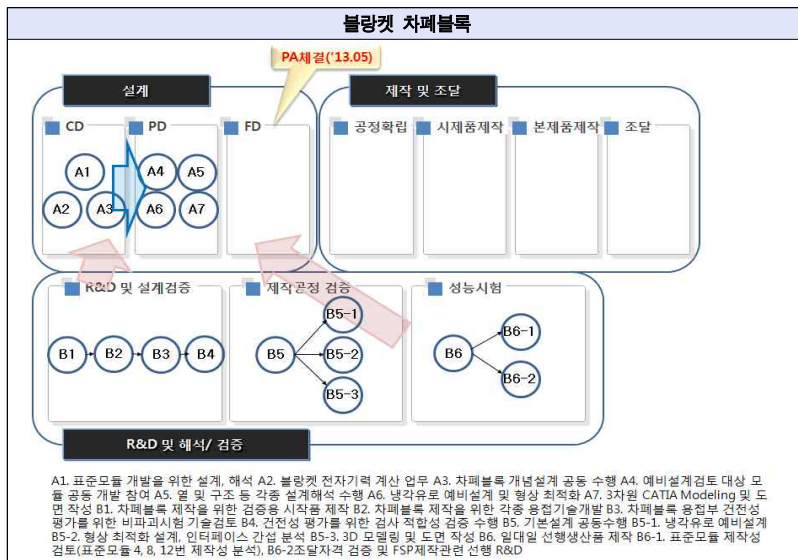
[그림3-7] 진공용기 포트 선�행모형 정립



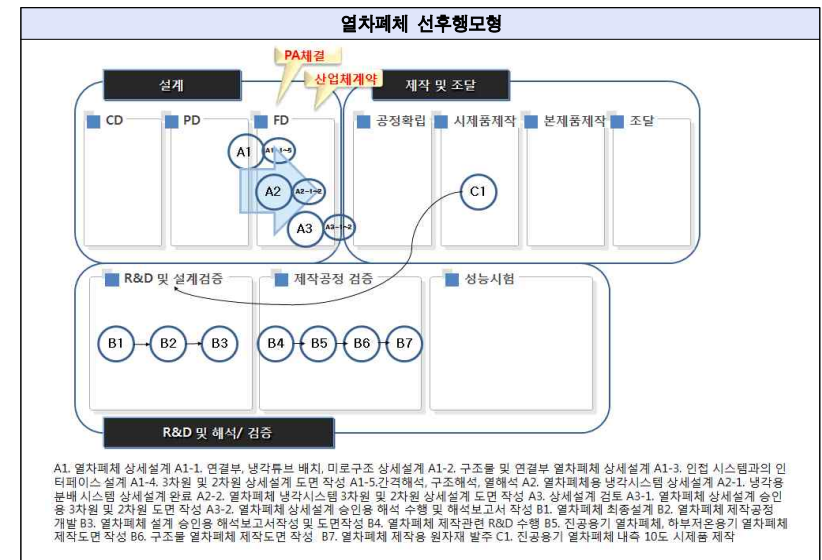
[그림3-8] 블랑켓 일차벽 선�행모형 정립



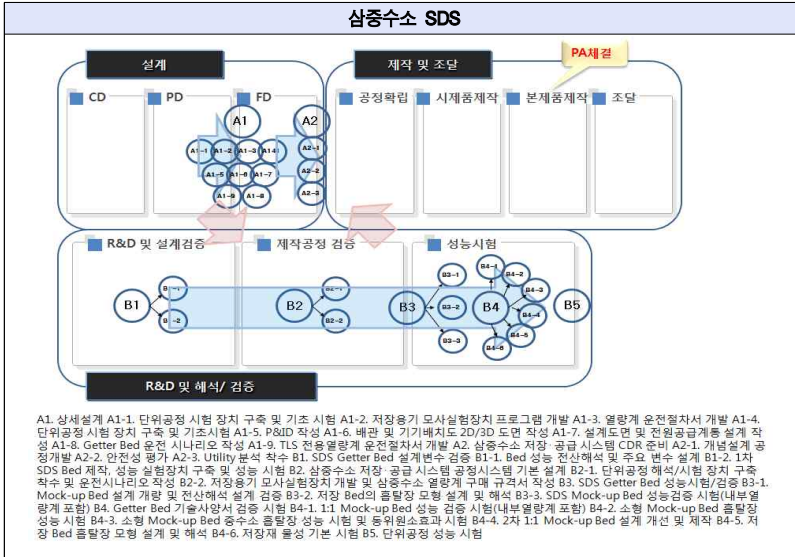
[그림3-10] 조립장비류 선�행모형 정립



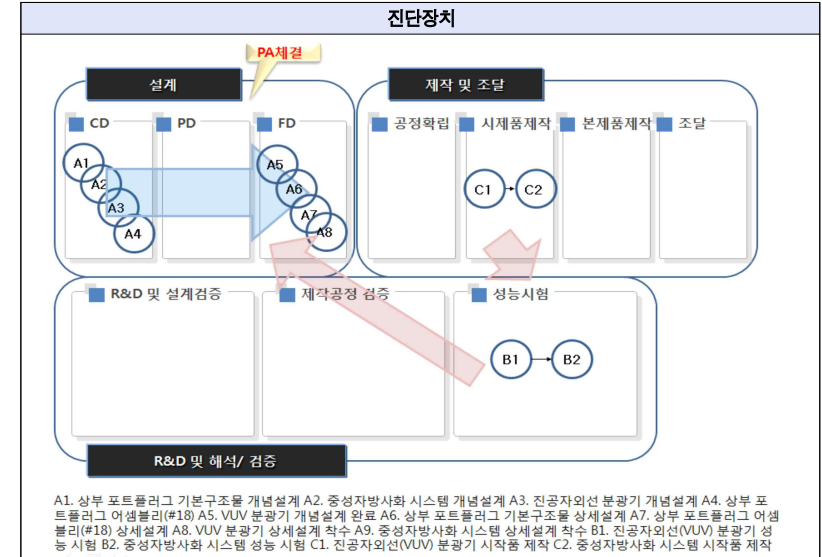
[그림3-9] 블랑켓 차폐블록 선�행모형 정립



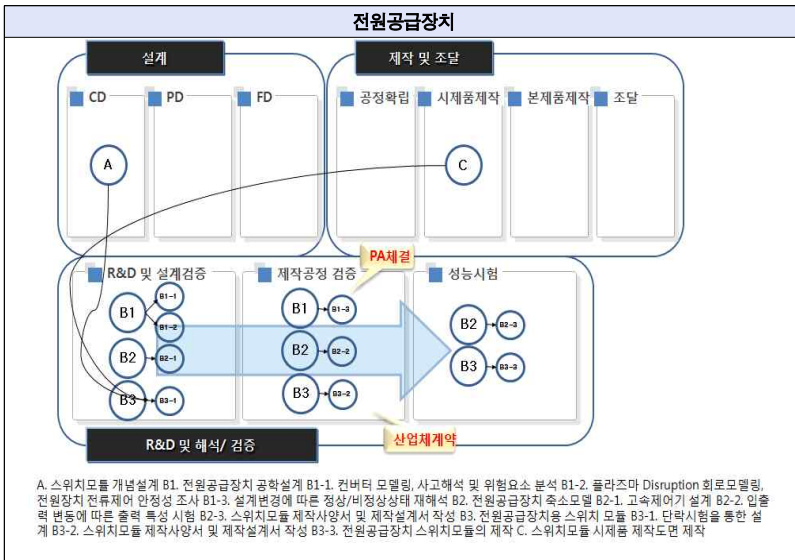
[그림3-11] 열차폐체 선�행모형 정립



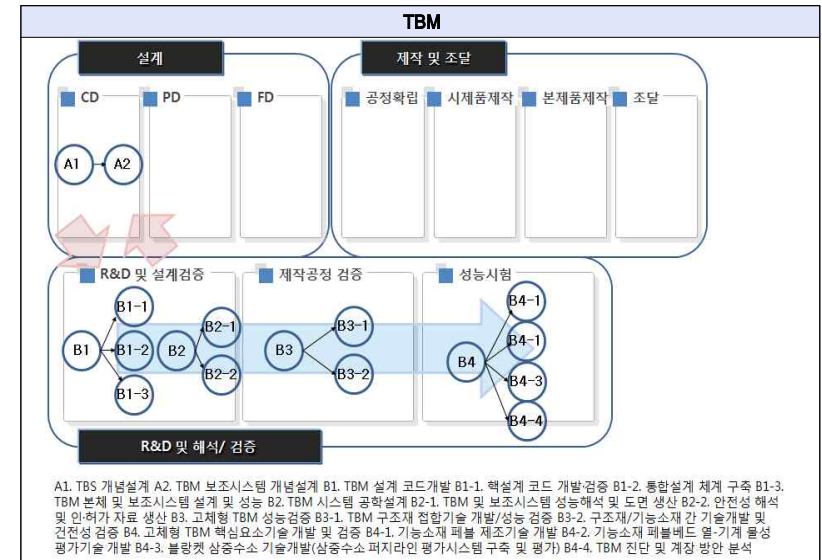
[그림3-12] 삼중수소 SDS 선행모형 정립



[그림3-14] 진단장치 선행모형 정립



[그림3-13] 전원공급장치 선행모형 정립

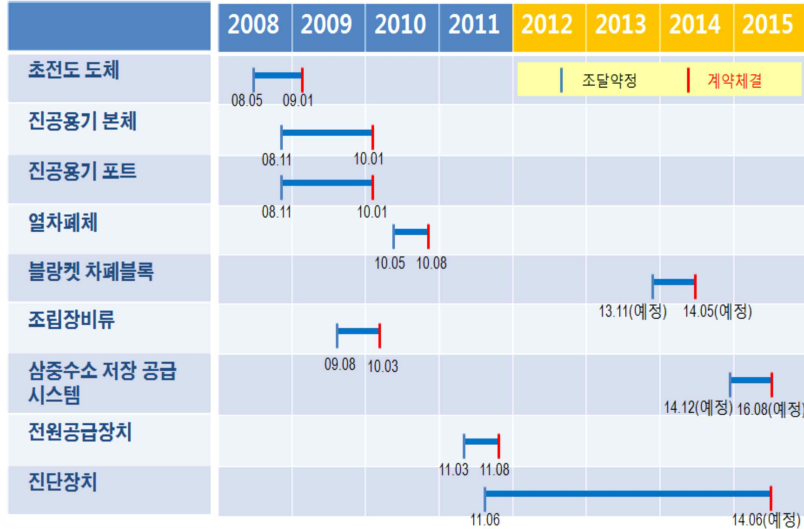


[그림3-15] TBM 선행모형 정립

3-4. ITER 1단계 조달약정 현황

■ 조달약정 추진현황

- ITER 건설에 필요한 총 86개의 부품 중 우리나라에 할당된 9개 조달품목을 품질 요건에 맞춰 적기에 납품해야 함
- 조달품목을 납품하려면 먼저 ITER 국제기구 사무총장과 사업단장 간 '조달약정'을 체결해야 하며, 한국은 KSTAR 운영경험을 통해 축적된 기술력을 인정받아 조달품목 대부분이 토크마크 핵심부품들임
- 2013년 2월 현재 한국은 초전도도체, 진공용기 본체, 진공용기 포트, 조립장비류, 열차폐체, 전원공급장치, 진단장치 등 7개품목에 대해 조달약정을 체결하였으며, 블랑켓 차폐블록, 삼중수소 SDS 등이 조달약정 예정에 있음
- [그림3-16]은 조달약정 품목의 약정체결일 또는 예정연도를 작성해 놓은 그림이며, [표3-1]은 조달약정 체결 품목의 간략한 설명임



[그림3-16] 조달약정 일정

[표3-1] 조달약정 체결 품목

약정체결 품목	설 명
초전도도체	- TF 초전도도체의 조달은 ITER 회원국 중 인도를 제외한 총 6개국이 담당할 예정임 - 우리나라는 KSTAR 건설과정에서 얻은 초전도 도체 제작 기술을 적용해 760m의 초전도도체(CICC) 19개, 415m 도체 8개 등 ITER 건설에 필요한 총 소요량 중 20%를 납품
진공용기 본체, 포트	- 진공용기는 우리나라와 유럽연합, 러시아가 공동으로 조달하는 품목으로, 한국은 ITER 장치를 구성하게 될 최초의 진공용기 본체 섹터 2개를 포함, 진공용기 중앙부 및 하부 포트 구조물을 조달함 - 진공용기는 86개 ITER 조달품목 중 선행 조달품목으로서 적기 조달이 이뤄져야 성공적인 ITER 장치 건설이 이뤄질 수 있음
조립장비	- 조립장비는 우리나라의 KSTAR 장치 건설 경험으로 인해 ITER로부터 요청 받아 참여하게 된 품목으로, 사업 참여 7개국 중 우리나라에 100% 조달책임이 있음 - 한국은 ITER 주장치 전용 조립장비의 설계, 제작, 시험, 운송, 현지 설치, 시운전 지원 등의 업무를 수행함
열차폐체	- 열차폐체는 핵융합 반응시 실험로의 초전도자석에 전달되는 열을 최소화해 극저온 상태를 유지, 핵융합환경을 안정적으로 유지하는 장치로서, 조달약정 체결로 인해 한국에서 6년 6개월간 단독 공급함
전원공급장치	- ITER의 초전도 코일에 안정적인 전류를 공급해 주기 위해 교류를 직류로 변환해 주는 장치인 전원공급장치는 조달약정 체결로 인해 ITER 전원공급장치의 37.3%를 우리나라가 제작·공급함
진단장치	- ITER 진단장치는 핵융합 반응을 일으키는 고온 플라즈마의 특성을 관측하는 장치로서, 조달약정 체결로 인해 ITER 진단장치 전체의 3.1%를 우리나라가 제작·공급함

■ 조달약정의 중요성

- 조달약정을 체결하기 위해서는 **조달품목의 설계 수준과 국내 산업체의 기술 수준이 제작을 시작하기 위해 충분히 성숙되어 있다**는 것을 의미하는 것으로 볼 수 있음
- ITER사업은 확정된 기술결과를 scale-up하는 것 뿐만 아니라 아직 확정되지 않은 기술을 설계단계에서부터 재정립하여 IO의 승인을 받아야 하는 부분이 포함되어 있으므로 **조달약정을 체결하는 것은 과학기술적인 국제적 합의를 이끌어낸 차원에서 중요함**
- 타참여국보다 선행하여 조달약정을 체결한 경우, 규정 및 절차의 제정을 한국 주도로 추진하였으므로 향후 기술표준 제정시 유리한 위치를 선점할 수 있음

4. ITER 1단계 정성적 기술성과·분석

- 4-1. 초전도도체
- 4-2. 진공용기
- 4-3. 블랑켓 일차벽
- 4-4. 블랑켓 차폐블록
- 4-5. 조립장비류
- 4-6. 열차폐체
- 4-7. 삼중수소 저장·공급 시스템
- 4-8. 초전도자석 전원공급장치
- 4-9. 진단장치
- 4-10. 테스트 블랑켓 모듈(TBM)

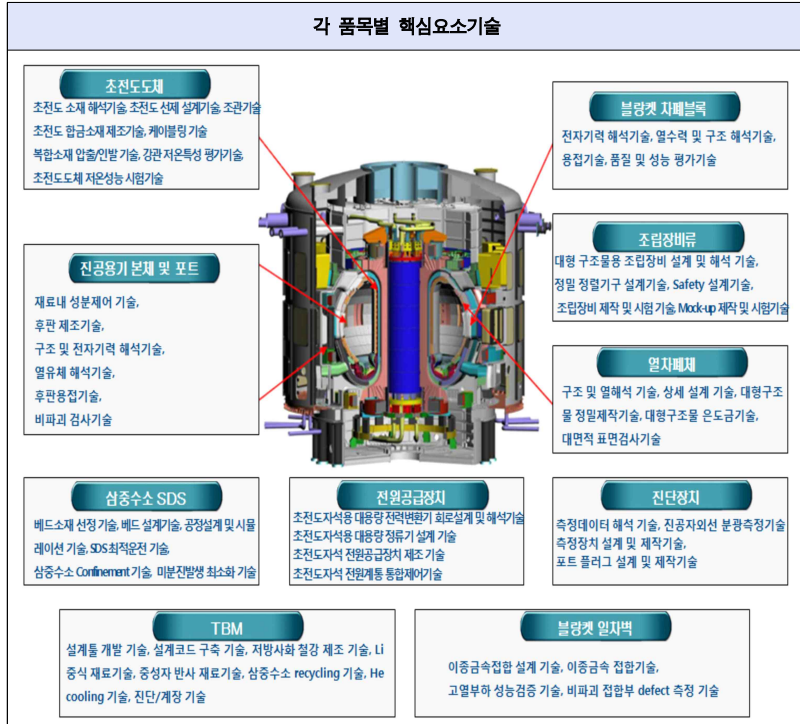
정성적 기술성과 분석 방법

■ 각 품목별 핵심기술 도출

- 문헌 및 보고서 분석, 전문가 인터뷰를 통해 핵심기술(안)을 도출하고 선후 행모형을 기반으로 작성된 설문지를 통해 각 품목별 담당자와 심층 설문 결과를 반영, 조달품목 9개와 비조달품목 2개를 포함한 11개 품목에 대한 조사 결과를 바탕으로 핵심기술을 정리함
 - * 핵심기술은 각 품목 담당자(팀원 포함)와 심층설문조사 인터뷰 후 피드백을 통해 선정함
 - * 각 품목별 담당자와는 2013.1.29-2.7일간에 걸쳐 ITER 한국사업단, 원자력연구원내에서 심층인터뷰를 진행함
 - * 통합제어계통 및 비조달 핵심품목 원천기술 확보는 기술개발 단계 상 조사대상에서 제외함

■ 각 품목별 핵심기술 개발 성과 요약

- 4장의 각 품목별 핵심기술개발 성과 요약은 인터뷰 실시 후 정리된 요소기술에 대해 각 품목별 1단계 종료보고서, 2단계 기획보고서(실적), 자체평가 의견서 등 ITER 내부자료를 활용하여 요소기술을 정리하였음
- 각 품목별 담당자 심층인터뷰에서 나온 중요한 정량적/기타 성과에 대해서는 보고서에 품목별 중요 성과로 간략히 정리하였음
- 설문지를 통한 정성적 결과인 ITER 사업과 각 품목별 요소기술의 개발진척도와 가중치를 적용한 현재 기술력수준의 내용은 별첨에 정리하였음
- 산업연관분석을 활용한 경제적 파급효과와 지재권의 질적분석에 관련된 내용은 별첨에 정리하였음
- [그림4-1]은 ITER 1단계 기술개발 단계에서 개발되거나 향후 핵융합상용화를 위해 개발되어야 할 핵심요소기술을 나열한 그림임



[그림4-1] ITER 핵심기술 정리 결과

4-1. 초전도도체

1 초전도도체 기술 개요

- 핵융합로 토카막을 구성하는 초전도도체 자석은 Central Solenoid (CS) 코일과 Toroidal Field(TF) 코일에 사용되는 Nb₃Sn계, Poloidal Field(PF)코일에 사용되는 NbTi계가 있으며, 이중 TF는 강력한 자장을 이용하여 1억도 이상의 플라즈마를 제어하는 역할을 함
- TF 초전도도체는 Nb₃Sn계의 초전도 선재를 사용하며 제작되며, ITER 사업에는 총 18개의 TF초전도도체 자석으로 구성, 극저온에서만 초전도성을 가지고 동작할 수 있으므로 액체 헬륨으로 냉각됨
- Nb₃Sn계의 초전도 선재는 제조공정에 따라 Internal Tin Process(ITP)와 Bronze Process 두 종류가 있으며, 우리나라는 Internal Tin Process로 기술개발이 진행 중임
- 우리나라는 TF 초전도 도체 조달의 20%를 담당하고 있음



[그림4-1] 초전도도체

2 초전도도체 핵심기술

■ 초전도도체 핵심기술 및 정의

- [표4-1]에 도출된 초전도도체 제조에 필요한 핵심기술과 각 핵심기술을 세분화한 핵심요소기술을 나타내었고, 각 기술의 정의를 간략하게 설명함

[표4-1] 초전도도체 핵심기술

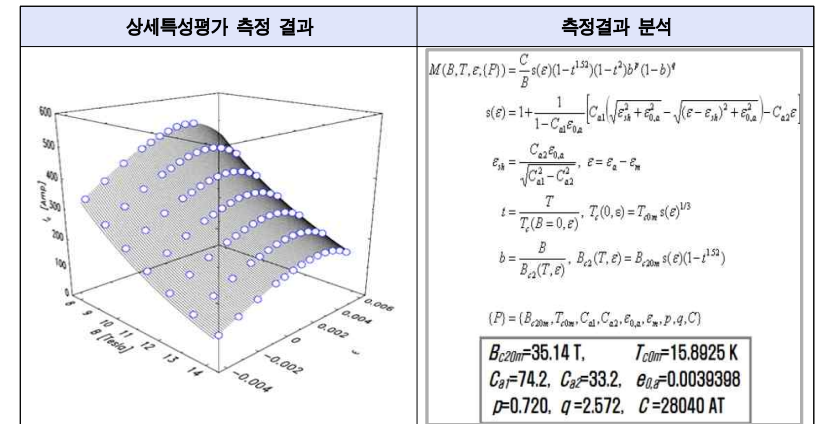
■는 핵심기술 (○는 핵심요소기술)	기술 정의
■ 초전도도체 설계 기술	- 초전도소재 성분/구조, 초전도선재 성분/구조, 초전도도체 구조 등의 최적화에 의하여 초전도 효과를 최대화 할 수 있는 설계 기술
○ 초전도 선재 설계 기술	- 초전도 선재의 직경, 도금조건, Twist 구조 등을 최적화 할 수 있는 설계 기술
■ 초전도 선재 제조 기술	- 초전도 선재의 생산성 및 품질 균일성을 최대화할 수 있는 제조기술
○ 초전도 합금소재 제조 기술	- 초전도 합금소재의 생산성을 높이고 성분 균일도를 향상시킬 수 있는 제조 기술
○ 복합소재 압출/인발 기술	- 초전도 복합소재의 압출/인발 공정시 선재단면의 균일도를 높일 수 있는 기술
■ 초전도도체 제조기술	- 초전도도체의 생산성 및 품질 균일성을 최대화 할 수 있는 제조 기술
○ 케이블링 기술	- 초전도 케이블의 풀림현상이나 외경의 변화를 최소화할 수 있는 제조 기술
○ 조관 기술	- 초전도도체의 초전도 효과를 최대화할 수 있는 제조 기술
■ 초전도도체 성능 평가 기술	- 초전도도체의 품질 및 성능을 평가하는 기술
○ 강관 저온특성 평가 기술	- 조관용 튜브의 저온인장 특성 평가기술
○ 초전도도체 저온성능 시험 기술	- 초전도도체의 저온 성능시험 기술

■ 초전도도체 설계 기술성과 중점정리

● 초전도선재 설계 기술

[초전도 선재 상세 특성평가]

- 초전도 선재의 가장 중요한 특성인 임계전류(Ic)는 자기장(B), 온도(T), 변이(ε) 등의 외부 변수에 매우 민감한 물리량이며, 도체/자석의 설계/해석을 위해서는 도체를 구성하는 초전도 선재의 임계전류를 위의 외부 변수의 함수로 모델링하는 것이 필수적임
- 이를 위해 초전도 선재의 임계전류를 자기장(8T<B<14T), 온도(4.2K< 14K), 변이(-0.006<ε<0.004)의 함수로 측정하고, 결과를 IO에 의해 새롭게 제안된 모델과 비교·분석함으로써, 향후 조달과정에서 요구되는 상세 특성 평가에 차질 없이 대비함
- 임계전류의 외부 변수 의존성 Ic(B,T,ε) 을 설명하는 이론은 여러 가지가 있으나, 모델의 물리학적인 깊이를 논외로 한다면 실험결과를 실용적으로 내삽·외삽 하는 기능은 대동소이함. 이에 IO는 분석의 일관성과 용이함을 중시하여 하나의 모델로 통일하는 것을 제안하였고, [그림4-2]는 IO가 제안한 모델과, 실험결과를 맞춤(Fitting)한 매개변수들의 값임



[그림4-2] 초전도선재 측정결과

- ITER 한국사업단에서 자체적으로 수립한 임계전류의 외부 변수 의존성을 설명하는 고유모델을 IO가 채택하여 통일된 모델로 사용케 한 것은 초전도 선재의 해석분야에서 학문적인 우위를 입증한 성과라고 볼 수 있음
- 이 결과를 2008년 8월 미국 Chicago에서 개최된 ASC2008에서 발표함

[초전도 선재 Benchmarking Test]

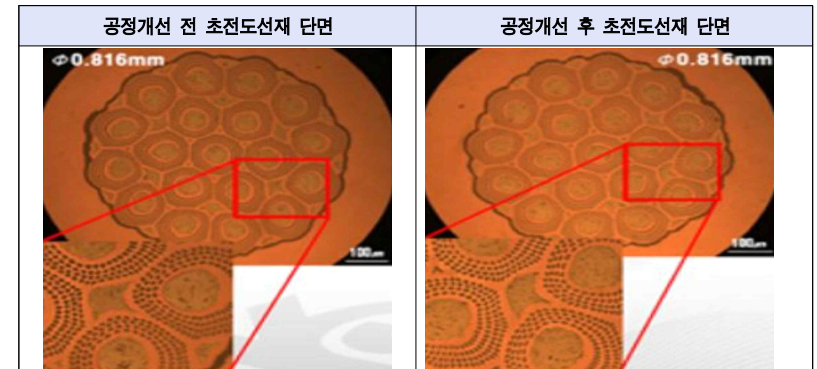
- 조달과정에서 산업체는 초전도 선재의 인수검사(Acceptance Test)를 수행하고 그 결과를 DA에게 보고하여야 하며, IO는 각국의 DA가 참조실험실(Reference Laboratory)로서 산업체의 결과를 검증(Verification)하는 절차를 요구하고 있음
- 그로 인해 참조실험실 간의 측정 결과를 상호 비교하기 위해 연간 1회의 벤치마킹(Benchmarking)을 실시하기로 하였으며 2008년 최초의 벤치마킹이 시작되었음
- 벤치마킹 대상인 초전도 선재의 인수검사 항목은 아래와 같으며, 벤치마킹을 위해 IO는 초전도 선재를 구매하여 각국의 DA와 산업체에 배포하였음
 - 직경 (Micrometer 이용)
 - Cu/Non Cu 비율 (광학현미경 이용)
 - Cr 도금 두께 (전자현미경 이용)
 - Twist Pitch (광학현미경 또는 Coulescope 이용)
 - 임계전류 (@12 T, 4.2K)
 - 자기이력손실
 - 잔류 저항비
- ITER 한국사업단은 IO가 배포한 초전도 선재를 받은 후, 열처리 등 준비 과정을 거쳐 측정을 완료하였으며 모든 참조실험실 중 최초로 결과를 보고하였음('08.11.3)
- 이후로도 매년 1회씩 초전도 도체 조달국 DA Reference Lab. 산업체 및 IO Reference Lab.과의 Benchmarking을 수행하였으며, ITER 한국사업단에서 수행한 Benchmarking 결과는 매우 양호한 결과를 보여주었음

■ 초전도 선재 제조 기술성과 중점정리

● 초전도 합금소재 기술, 복합소재 압출/인발 기술

[초전도선재 제작 공정 개선]

- IO의 초전도선재 성능에 대한 문제 제기로 초전도선재 제작 공정 개선 작업 수행을 수행하여 각 공정 별로 상세히 검토하고 개선을 완료함
 - Gun-Drill 공정 검토
 - Sn-Ti 합금 제조 공정 검토 및 Sn-Ti 입자 크기에 따른 성능시험 수행
 - 초전도선재 설계 변경시험(Sn-Ti Spacer의 동비 조정) : 매우 우수한 결과를 나타내었으나 설계변경은 곤란하다는 IO의 입장을 수용하여 기존 설계 유지
 - 복합소재 압출/인발기술, 초전도선재 신선 공정 개선을 위해 초기 35mm까지의 신선공정을 7단계에서 17단계로 증가시켜, 신선시의 초전도 선재 내부의 Stress를 균일화시켜 필라멘트의 모양을 개선하고 초전도 선재 단면의 전체적인 균일도를 높여 선재 성능을 균일화시킴
 - Ta Barrier의 공급업체 변경을 통한 성능시험 : Wahchang사의 Ta Barrier 대신 중국의 WST사의 Ta Barrier를 사용하여 성능시험 후 좋은 균일도를 얻음. 공급업체 변경을 위한 상세 시험 완료 후, WST 사를 공급업체 추가
 - Cu/Non-Cu 비율 개선을 위한 상세시험 수행 : Cu/Non-Cu 비율이 안정화되는 부분까지 초전도선재를 잘라 내기로 함 (단말부 각각 200m씩 절단 폐기)



[그림4-3] 초전도선재 단면 개선 현황

■ 초전도도체 제조 기술성과 중점 정리

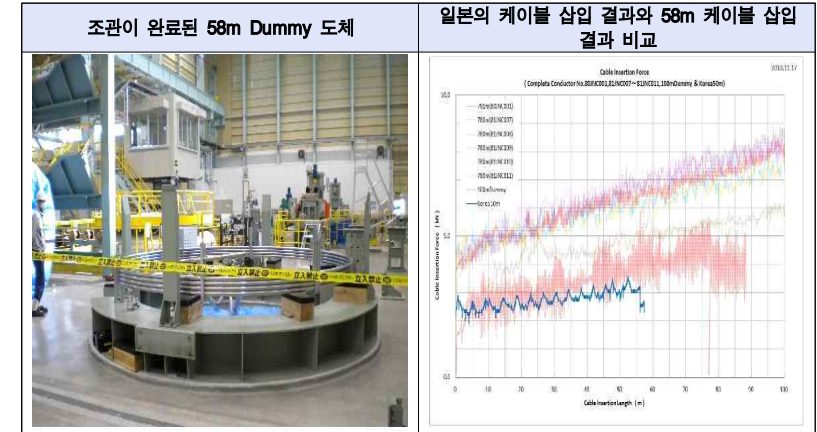
● 케이블링 기술

- 초전도 케이블 업체인 Nexans Korea에서는 ITER TF 도체용 케이블링 설비를 구축하고 공정변수를 확립하여, 외경이 약 40.5mm인 초전도 케이블을 제작함
- 우리나라에서 제작된 케이블은 케이블의 풀림 현상이나 외경의 변화가 거의 없어 기술적으로 가장 우위에 있는 러시아 및 이태리와 같은 수준이며, 미국, 일본, 중국보다는 기술적으로 우위에 있다고 판단됨
- 현재 총 29개의 케이블 중 13개의 케이블을 생산하였으며, 2013년 9월 경 전량을 생산 완료할 예정임

● 조관기술

[58m Dummy 도체 제작 시험]

- 일반적으로 Solution Annealing 후 산세 처리한 튜브에 비하여 BA(Bright Annealing) 처리를 한 튜브의 내면 마찰계수가 약 2.5배 높은 것으로 나타남
 - 포스코특수강에서 제작한 조관용 튜브는 BA 처리를 한 튜브임
 - 초기에 ITER 한국사업단에서는 JAEA와의 조관 협력 약정을 체결하여 조관공정을 수행할 예정이었으나, 현재는 이태리의 ICAS와 조관용역 계약을 체결하여 조관 작업을 수행하고 있음
 - JAEA에서는 케이블 삽입시 케이블을 당기는 힘이 Solution Annealing 후 산세 처리한 튜브에 비하여 높게 나타날 것을 우려하여 JAEA의 조관설비에서 58m Dummy 도체 제작 시험을 하였음
- 조관시험 결과 케이블 삽입 시 케이블을 당기는 힘이 Solution Annealing 후 산세 처리한 튜브에 비하여 오히려 낮게 나타남



[그림4-4] 조관이 완료된 58m Dummy 도체

■ 초전도도체 성능 평가 기술성과 중점 정리

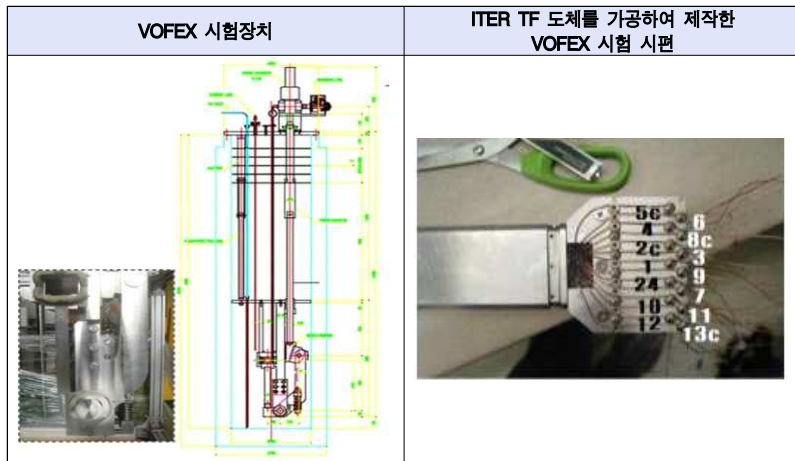
● 강관 저온특성 평가 기술

- 조관용 튜브의 저온인장시험 요구조건에 문제가 발생하여 IO와 DA 간의 협의를 통하여 새로이 저온인장시험 방안을 수립함 (2010년 5월)
 - 조관작업을 수행할 실제 조관설비에서 조관용 튜브의 압축을 수행함
 - 압축 후 조관용 튜브를 2.5%의 인장시킴
 - 열처리 공정 수행
 - 정해진 규격에 따라 EDM 또는 Water Jet을 통하여 인장시편 가공
 - 저온인장시험 수행
- 저온인장시험 표준화 방안에 따라 일본의 JADA의 조관 설비에서 조관용 튜브를 압축하고 표준화된 방법으로 저온인장시험 수행을 완료하였으며 성공적으로 통과함

● 초전도도체 저온성능 시험기술

[초전도 도체 교류손실 특성 시험용 장비(VOFEX) 장치 운영 및 시험]

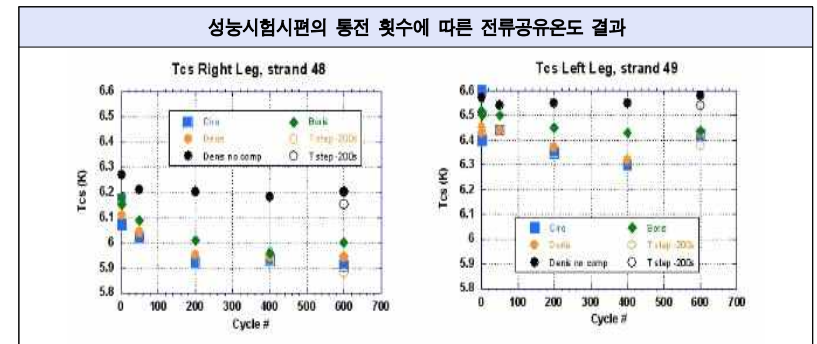
- 초전도 도체는 자석의 자기장과 자체 전류의 곱에 해당하는 전자기력을 체험하게 되며 그에 따른 변이의 발생과 성능저하를 수반함
- 아울러 시간에 따라 변화하는 자기장 환경에서 초전도 도체는 교류손실 효과를 보이게 되는데 이는 도체의 중요한 성능지표 중에 하나임
- 조달약정에 따르면 100m 초전도 도체를 생산한 후, 네덜란드의 Twente 대학의 시험 장비를 이용하여 도체의 기계적인 특성과 교류손실을 시험하기로 되어있음
- 이러한 시험을 독자적으로 수행하고, 향후 새로운 도체의 설계·제작을 위해 공극을 변화에 따른 선재간 저항측정 및 교류손실 측정을 위한 저온 Press와 교류자석 등으로 이루어진 측정 장치인 VOFEX(Void Fraction Experiment)을 개발하였음
- [그림4-5]는 현재까지 개발된 VOFEX와 시험용 시편을 나타낸 것임



[그림4-5] 개발된 VOFEX와 시험용 시편

[Sultan 시험]

- 2010년 3월 말 초전도도체 시편을 CRPP로 송부
- Phase II 용 초전도선재의 상세 특성시험
- 2010년 6월 말 시험용 시편제작 완료
- 2010년 9월 초 Phase II CPQS 시험 완료
- 조달약정에 따르면, ITER TF 도체는 CPQS(Conductor Performance Qualification Sample)의 저온성능시험(Sultan Test)을 실시하여 전류공유온도가 5.7K 이상일 경우 조달자격을 부여받는 것으로 합의함
- 국내 KAT에서 제작된 초전도 선재, 포스코특수강에서 제작된 316LN-IG-HT 조관용 튜브를 사용하고, Nexans Korea에서 케이블링·조관 작업을 수행하여 성능시험시편을 제작함
- 성능시험시편을 제작하여('08.7월) 시험기관인 스위스의 CRPP로 송부하고 열처리와 센서부착 등의 작업을 거쳐 2008년 10월 20일부터 2008년 11월 5일까지 3주에 걸쳐 성능시험을 수행함
- 2개 시편의 전류공유온도는 각각 5.9K~6.2K, 6.4K~6.6K로 요구조건인 5.7K를 상회하는 결과로서, 조달자격검증을 성공적으로 통과함



[그림4-6] 전류공유온도 결과

3] 초전도도체 핵심기술의 주요 성과 요약

- 초전도도체 설계기술인 선제 상세 특성평가는 ITER 한국사업단 자체적으로 수립한 임계전류 외부 변수 의존성을 설명하는 고유모델을 IO가 채택하여 통일된 모델로 사용하였는데, 이는 초전도 선제 해석분야에서 학문적인 우위를 입증한 성과라고 볼 수 있음
- 또한, 산업표준이 존재하지 않는 초전도선제 인수검사 방법은 IO가 배포한 초전도 선제를 받은 후, 열처리 등 준비과정을 거쳐 측정을 완료하였으며 모든 참조실험실 중 최초로 결과를 보고하는 성과를 냄
- 케이블링 기술은 케이블의 풀림 현상이나 외경의 변화가 거의 없어 미국, 일본, 중국보다는 기술적으로 우위에 있다고 판단되며, 기술적으로 가장 우위에 있는 러시아, 이태리와 같은 수준까지 도달한 것으로 볼 수 있음
- 조관 저온특성 평가기술은 저온인장시험 표준화 방안에 따라 일본의 JADA의 조관 설비에서 조관용 튜브를 압축하고 표준화된 방법으로 저온인장시험 수행을 완료하였으며 성공적으로 통과하는 성과를 이룩함
- 도체 저온성능 시험기술인 교류손실 특성 시험용 장비(VOFEX) 장치는 독자적 기술로 도체의 기계적인 특성과 교류손실 시험을 수행하였으며, 새로운 도체의 설계·제작을 위해 공극을 변화에 따른 선제간 저항측정 장치인 VOFEX(Void Fraction EXperiment) 개발에 성공함
- Sutan 시험 결과, 전류공유온도는 6.80K 및 6.62K로서 요구조건인 5.7K를 훨씬 상회하는 결과를 보여줌으로써 제작 공장 검증 시험을 통과함

4] 초전도도체 조달추진 경위 및 중요 논문

■ 초전도도체 조달약정

- 우리나라의 ITER TF 도체 조달범위는 전체의 20.18%이며 이는 760m 도체 19개와 415m 도체 8개에 해당함. 이 외 공정 검증을 위하여 760m 구리도체 1개와 100m 초전도 도체 1개의 생산에 합의하고, 2008년 05월 07일 조달약정을 체결함

- 조달 약정 체결 경과
 - '07.9.3 조달약정 초안 발행(IO)
 - '07.10.5 조달약정 초안 검토회의(IO, DA)
 - '07.12.24 KO 공식검토의견 송부
 - '08.01 조달기본계획 초안 과기부 보고 (1차)
 - '08.01.30 한국핵융합협의회(kFITA)를 통한 의견수렴
 - '08.04 KO 품질보증계획서 작성
 - '08.04.25 조달심의위원회 의결
 - '08.04.29 조달약정 최종안 합의(IO-KO)
 - '08.04.29 조달약정 체결(안) 대정부 보고
 - '08.05.07 조달약정 체결

■ 1단계 중요 논문

- 초전도도체 1단계 주요 성과 중, 핵심기술, 조달약정 외 대표적 성과로 [표 4-2]의 논문을 들 수 있음

[표4-2] 초전도도체 1단계 중요 논문

논문명	내용
논문명: "A Scaling Law for the critical current of Nb3Sn Stands Based on Strong Coupling Theory of Superconductivity," Sangjun Oh and Keeman Kim, Journal of Applied Physics 99, 033909 (2006).	- Strong Coupling Theory을 이용하여 Nb3Sn 초전도 재료에 대한 기본특성변수인 Transition Temperature (Tc), Thermodynamic Critical Field(Bc), Upper Critical Field(Bc2), Ginzberg-Landau Parameter 등을 유도하고, Kramer의 Pinning Model을 재해석하여 물리적 의미를 가진 임계전류 Scaling Law를 제시하였음. - 이전에는 실험식에 의한 Scaling Law만이 존재하였는데, 이론에 근거한 모델을 최초로 제시함. 이로 인하여 ITER 초전도 Community 내에서 한국의 초전도 선제 기술에 대한 위상을 높였을 뿐 아니라, 이로 인하여 초전도 선제 개발 및 제작에 대한 신뢰도를 높였다고 판단됨.
논문명: "The Effect of plastic deformation on low temperature mechanical and magnetic properties of Austenite 316LN tube for ITER TF Conductor.," S.-H. Park et al, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, no. 3, pp. 7800204, (2012).	- 특수 금속인 Austenite 316LN Stainless Steel 의 냉간 가공/열처리와 저온에서의 기계적, 자기적 특성의 상호 관계를 설명함. - 이는 ITER TF 도체 제작 과정에서 반드시 이해해야 하는 현상이며, 아울러 아국의 조관용 튜브가 엄격한 국제기구의 요구조건을 만족시킨다는 것을 보여주었음.

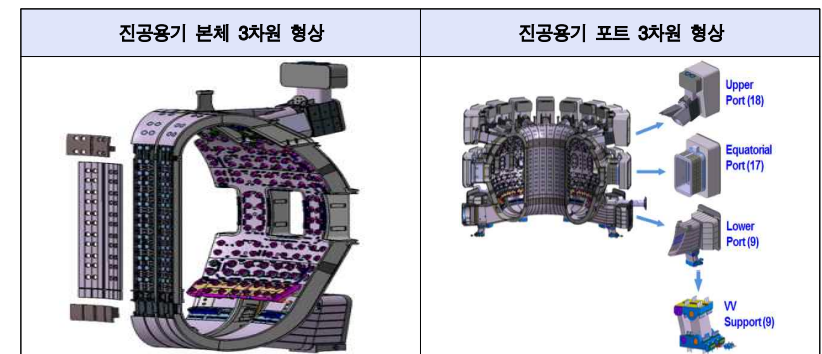
5 초전도도체 정성적 기술성과 분석

- 초전도도체는 6개 나라에서 조달하는 품목으로 초전도 도체 설계 기술, 초전도 선재 제조 기술, 초전도 도체 제조 기술, 초전도 도체 성능 평가 기술 등 4가지가 중요한 핵심기술임
- 초전도도체는 국가 간의 기술수준 및 산업체의 역량수준을 객관적으로 비교할 수 있는 품목이라고 할 수 있음. 현재, 한국은 초전도도체를 14개를 만들만큼 수준이 높은 편임
- 1단계 주요 성과로는 조달약정 체결을 들 수 있는데 이는 약정 체결이 의미하는 바가 설계기술 수준 및 산업체 제조기술 수준이 IO 요구수준을 만족하는 단계로 진입하였다는 것을 뜻하기 때문임. Sultan 테스트를 통하여 초전도도체의 성능을 확인 하였으며 우리나라 기술수준은 세계 정상급임
- 초전도도체 제조기술에서 초전도선재 제조기술이 차지하는 비중이 70~80% 정도로 크기 때문에 선재 제조기술의 확보를 1단계의 중요한 성과로 볼 수 있음
- 강한 상호작용 이론에 근거한 Nb₃Sn 선재의 임계전류 스케일링 법칙을 제안하고, 제작공정을 개선하여 임계전류의 산포를 낮춘 것은 IO의 요구수준을 상향적으로 맞춰준 성과임
- 핵심요소기술 중 하나인 조관의 경우, 노하우가 많이 필요하고 기술력 개발이 더욱 필요한 기술이지만 현재 한국의 산업체가 시행하지 않고 있으며, 이탈리아에서 하고 있기 때문에 기술축적에 어려움이 있으므로 이를 극복하기 위한 대안수립 및 추진이 요구됨
- 초전도 소재인 Nb₃Sn 화합물의 경우 수십년전 초전도물질로 발견된 이후 현재까지도 초전도 발현온도를 높이려는 시도가 계속되고 있음. 물질과 초전도 현상과의 연계성을 규명하는 초전도해석 및 제조관련 기초과학적인 연구분야는 Break-through에 의하여 세계 선도가 가능한 분야이므로 체계적인 산학연 협동연구가 필요함
- 초전도도체 기술 분야는 ITER 참여국 내에도 선도적인 위치를 차지하고 있으며, KSTAR 실험을 통한 실증 data 확보가 가능하므로, 세계 최고 수준의 경쟁력을 가지는 기술로 중점 개발하는 것이 필요함

4-2. 진공용기 본체 및 포트

1 진공용기 기술개요

- ITER 진공용기는 본체와 포트로 구성되며 전체적으로는 토러스 형상을 이루면서 D형 단면의 이중 격벽 진공 구조물로 ITER 장치 내에서의 발생된 플라즈마를 밀폐하기 위해 진공 환경을 제공하는 동시에 핵융합 반응에 의해 발생된 중성자의 일차 방호벽 역할을 하는 중요 장치임
- ITER 진공용기는 완성 시 총 무게가 약 5,000 톤, 전체 높이 11.3 미터, 외경이 약 20 미터에 달하는 거대 구조물이지만, 제작 및 설치 과정에서 10 밀리미터 이하의 고도 정밀도를 요구함. ITER 진공용기는 9개의 섹터로 제작되어 현장에서 조립하게 되는데, 그 중에서 우리나라는 2개를 제작하고 7개는 유럽연합이 제작, 21.1%의 참여율로 ITER 진공용기 생산에 참여함
- 진공용기 포트는 토카막형 핵융합장치인 ITER의 진공용기(상세내용은 진공용기 참조)와 외부를 연결하는 통로의 역할을 하며, 그 위치에 따라 상부와 중앙부 및 하부로 구성되어 있음. 각각의 포트는 그 위치에 따라 역할이 달라 ITER 제작중의 진공용기 내부 품목들의 조립을 위한 조립장비의 통로뿐만 아니라, ITER 가동을 위한 진공배기, ITER 가동중의 연료 공급, 가열, 플라즈마의 진단 및 제어, 중성입자빔의 통로 역할 및 다이버터와 블랑켓 등의 유지보수를 위한 통로의 역할을 수행함



[그림4-7] 진공용기 본체 및 포트

2] 진공용기 핵심기술

진공용기 핵심기술 및 정의

- [표4-3]은 도출된 진공용기 핵심기술과 각 핵심기술을 세분화한 핵심요소기술을 나타내었고, 각 기술의 정의를 간략하게 설명함

[표4-3] 진공용기 핵심기술

■는 핵심기술 (○는 핵심요소기술)	기술 정의
■ 저방사화 재료 제조 기술	- 고에너지의 중성자에 의한 압력용기 재료의 방사화를 최소화하는 기술
○ 재료내 성분 제어기술	- Co, B 등의 방사화 원소 및 불순물의 최소화와 W, Ta 등의 내방사화 성분을 최적화 할 수 있는 기술
○ 후판 제조기술	- 잉곳소재를 가열 및 단조공정을 거쳐 슬라브를 제조하고, 슬라브의 압연공정에 의하여 후판을 제조하는 기술
■ 대형 진공용기 설계 기술	- 고 진공용 대형 용기 설계 기술
○ 구조 및 전자기력 해석 기술	- 하중, 열분포, 전자기력을 고려한 설계 기술
○ 열유체 해석 기술	- 열유체의 흐름에 의한 열유동, 열전달 계수 및 온도 분포 해석 기술
■ 대형 진공용기 제조 기술	- 고진공용 대형용기 제조기술
○ 후판용접기술	- 열변형 및 스트레스를 최소화 할 수 있는 용접기술
○ 비파괴 검사기술	- 용접부위 비파괴 검사기술

저방사화 재료제조 기술성과 중점정리

● 재료내 성분제어 기술

- ITER 진공용기는 초고진공 및 원자력 압력용기로서 주요 특수 요구조건은 상용화된 스테인리스 강 316L에 비해 0.05 wt.%이하의 코발트, 0.001 wt.% 이하의 보론 등이 규제되어야 하고, 상온 인장강도 이외에 200℃ 에서의 고온 인장강도 기준을 요구함
- 상용재료에 비해 불순물 (인, 황, 코발트, 니오비움)에 대한 엄격한 제한치가 요구되고, 니켈, 크롬, 질소 등은 재료의 편차를 줄이기 위해서 좁은 범위를 갖도록 요구됨. 본 결과로부터 진공용기 본품 제작용 재료 생산 시 화학적 요구조건은 문제되지 않을 것으로 판단됨

[표4-4] 316L(N)-IG 화학적 조성 측정 결과

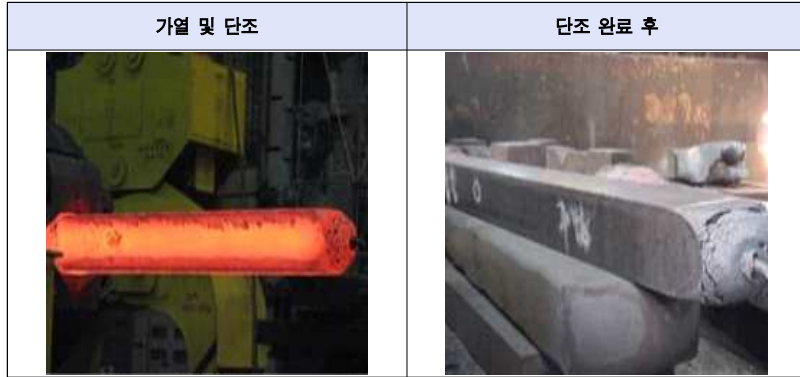
구분	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	B	Co	Nb	Ti+Nb
표준 Min.	-	-	1.6	-	-	12	17	2.3	0.06	-	-	-	-
성분 Max.	0.03	0.5	2	0.025	0.01	12.5	18	2.7	0.08	0.001	0.05	0.01	0.1
시제품	0.025	0.24	1.82	0.015	0.002	12.22	17.42	2.49	0.069	0.0005	0.03	0.007	0.01

- ITER 진공용기의 주 소재는 316L(N)-ITER Grade로 명명되어 지며, 이와 같은 소재의 특수성 때문에 공급 가능한 업체의 수가 매우 제한적이기 때문에 국내 재료업체를 통한 진공용기 소재 시제품 제작이 추진됨

● 후판제조기술

- 316L(N)-IG 시제품 제작의 주요 목적은 극후판 단조재와 120T의 후판 압연재의 제작성 및 품질을 검증하기 위한 것이며, 30톤 용해로부터 9톤 및 23톤의 잉곳이 제작됨. 이 중 9톤 잉곳은 단조제품으로 제작되었으며 23톤 잉곳은 단조 슬라브로 제작되었으며, 단조 슬라브의 경우 압연공정을 통해 최종 120T 압연재로 제작되며 열처리 공정을 거치게 됨
- 열처리 후 단조재에 대한 특성 시험이 수행되었음. 시험 종류는 재료 사양서

에서 요구하는 기계적 특성시험(상온/고온 인장), 페라이트 함량, 투자율 및 입도 등임. 시험 결과 모든 요구조건을 잘 만족시키는 결과를 보였음



[그림4-8] 단조제 제작 공정

- 소재의 특수성으로 인해 공급 가능한 업체의 수가 매우 제한적이므로 재료구매 비용이 증가될 수 있고 재료 공급에도 문제가 될 수 있음. 이러한 문제를 해소하기 위해 국내 재료업체를 통한 진공용기 소재 시제품 제작이 추진되었으며, 이를 통한 기대효과는 국내 산업체의 기술력 검증뿐만 아니라 진공용기 본제품 제작에 사용될 소재의 국산화 가능성도 기대할 수 있다고 판단됨

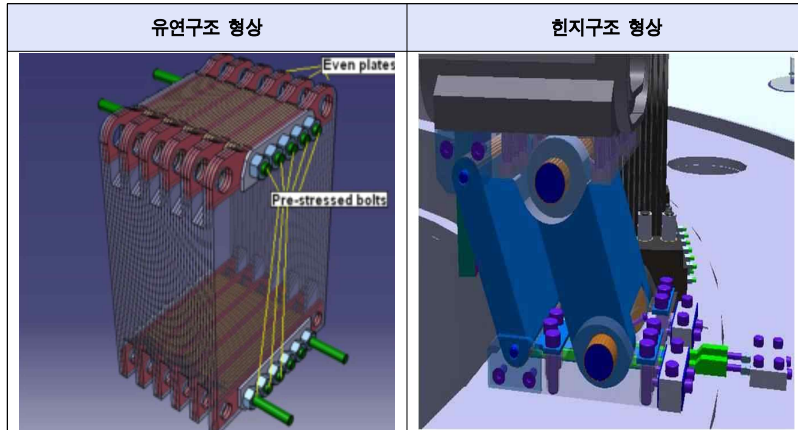
■ 대형 진공용기 설계기술 성과 중점정리

● 구조 및 전자기력 해석기술

[진공용기 지지구조물 설계]

- ITER 진공용기 지지구조물은 총 9 sets 으로 구성되며 진공용기 하부포트의 하단 구조물과 저온용기의 Pedestal Ring 상부에 결합되어 진공용기의 운전 시 열팽창으로 인해 발생하는 Toroidal 방향의 하중과 모멘트 그리고 수직방향의 압축하중을 견디는 역할을 수행하는 매우 중요한 구조물임
- ITER 국제기구에서 채택되어온 진공용기 지지구조물의 기준설계안은 진공용기 운전 중 발생하는 Radial/Vertical 방향의 하중지지와 Toroidal 방향의 하중을 지지하는 독립적인 형태의 두 가지 시스템으로 구성되어 있었음
 - 그러나 이 기준설계안은 4가지 하중성분을 각기 별도의 시스템을 통해 지지해주는 구조로서 그 구조가 대단히 복잡하고 주변시스템과의 간섭 및 운전 중 유지보수 등에 많은 어려움이 예상되었음
- 한국은 IO와의 설계검토 회의에서 기준설계안의 취약점과 단순하고 신뢰성 높은 지지구조물 대안 설계개발의 필요성을 수차례 주장하였으며 [그림 4-9]과 같은 새로운 개념의 진공용기 지지구조물 설계안을 제시함
- 한국이 제안한 신설계안은 전체구조를 획기적으로 단순화함으로써 신뢰성을 향상시키고, 운전 중 유지보수가 필요 없으며 제작비용을 절감할 수 있는 장점이 있음. 또한 기준설계안에서 유압댐퍼를 이용한 re-centering 시스템 및 유압잭(hydraulic jack)을 제거함으로써 운전 중 발생 가능한 리스크와 불확실성을 획기적으로 감소시키는 성과를 올림
- 그러나 한국이 제안한 ITER 진공용기 신설계안은 ITER 국제기구의 기준설계안과 비교해 단순한 구조를 바탕으로 많은 장점을 가지고 있으나, 진공용기 지지구조물이 설치될 부분의 공간이 충분치 않아 최종 설계안으로 채택되지는 못함. 이에 따라 IO와 공동으로, 한국이 제안한 신설계안의 장점을 반영한 새로운 진공용기 지지구조물 대안 설계를 추진하게 됨
- 기준설계안의 복잡한 구조에 따른 리스크를 제거하고 현재의 공간에 설치가 가능한 진공용기 지지구조물의 대안설계가 수행되어 "유연구조 지지구조물(Multiple Flexible Plate Concept)" 과 "힌지구조 지지구조물(Double

Hinge Support Concept)"의 두 가지 설계개념이 개발되었으며 DCCM (Design Change Comparison Meeting)을 통해 힌지구조 지지구조물이 최적설계안으로 결정되었음



[그림4-9] 진공용기 유연구조 및 힌지구조 형상

- 결론적으로 한국은 진공용기 지지구조물 기준설계안의 복잡한 구조로 인해 야기되는 문제점을 해결하고 보다 신뢰성 높은 대안설계안 개발을 위하여 신설계안을 제안하고, 제안된 신설계안을 바탕으로 IO와 공동으로 실제 설치공간을 고려한 유연구조 지지구조물 및 힌지구조 지지구조물의 2가지 대안설계안을 개발함
- 개선된 설계 안을 바탕으로 상세설계 및 구조해석, 그리고 시제품 제작/시험을 통하여 설계 검증을 수행하였음

● 구조 및 전자기력 해석기술

[판계 두께 감소로 인한 구조 안정성 평가]

- ITER 진공용기는 Shell의 설계 두께인 60 mm이하의 두께를 가질 경우 IO는 두께 감소에 따른 구조안정성 평가를 요구함. 두께 감소를 고려하여 60 mm 이상의 판재를 사용하는 것도 하나의 해결책이지만 전체적인 자재비용 증가, 최종 제작 공차 만족을 위한 추가 고려사항이 발생하여 두께 감소영향 평가를 수행하고 이를 근거로 60 mm판재를 기본 Shell 자재로 사용하기 위한 해석을 수행함
- 두께 감소 맵을 토대로 진공용기 본체의 내/외부 표면 판재의 두께를 조정하여 구조해석이 수행한 결과 도출된 스트레스 값이 허용치를 초과하지 않는 결과를 얻음
- 시험압력 조건하에서 두께감소에 따른 진공용기 본체의 구조해석 결과, 두께가 감소되었을 때 계산된 스트레스 값은 허용치를 넘지 않는 결론이 도출됨
- 4개의 진공용기 본체 세그먼트 중 상부 세그먼트 및 하부 세그먼트에서 VDE 및 VDE + ICE 하중에 의해 최대 응력이 발생되었으나, 이들 모두 허용치를 벗어나지는 않음. 두께감소가 있을 때와 없을 때의 응력 차이는 미미한 수준에 그쳐 별다른 문제가 없는 것으로 나타났음. 따라서 베이킹, 시험압력 및 VDE 하중 조건에서 두께감소에 따른 응력은 허용치에 대해 충분한 마진을 갖는 것으로 판단됨
- Limit Analysis: Limit Analysis 사용된 모델은 IO로부터 제공된 것이며, 진공용기 본체의 경우 성형에 의한 최대 두께감소율은 2%에서 7% 사이의 영역에 놓여 있고 포트의 경우에는 약 3% 정도로 예측됨. 분석결과 두께감소에 따른 응력의 증가는 미미한 수준이어서 충분한 구조안정성에 대한 마진을 갖는 것으로 나타나 진공용기 제작에 있어 성형시의 두께 감소에 따른 영향은 미미하다는 결론이 도출됨
- 구조해석 수행결과, 진공용기 본체 제작에 있어 성형 공정에 따른 두께 감소 효과는 적용된 모든 하중조건 하에서 응력의 변화가 무시할 정도로 작아 충분한 구조안정성에 대한 마진을 가지며 성형 공정에서의 두께 감소율이 매우 작기 때문에 두께 감소가 구조 안정성에 미치는 영향은 무시할 수 있을 정도로 미미하다는 결론을 얻음

[내벽 차폐체 (IWS : In-wall Shield) Rib 구조 해석]

- 진공용기의 이중격벽 사이에 위치하는 중성자 차폐용 IWS는 진공용기 내벽 및 외벽 사이에 용접되는 Flexible Support Housing 사이에 용접되는 IWS Rib을 이용하여 설치하도록 설계되어 있음
 - 통상 50 mm 두께의 IWS Rib은 Full Penetration Welding을 하도록 RCC-MR Code에 규정되어 있음
 - 그러나 IWS Rib 용접 부위의 접근 가능성과 용접 품질, 또한 과도한 용접으로 인한 변형 가능성을 검토한 결과 현재 IO의 설계에 따른 용접 두께 및 용접 길이로 용접 시 과도한 변형으로 제작 공차 준수가 어렵고 비파괴 검사 시 결함 검출 가능성이 높음
 - 그러므로 용접량을 줄이기 위한 설계 변경 제안을 IO에 전달하고 변경된 설계에 대한 구조해석 수행하였음

☞ 해석 결과

- 구조해석을 위해 IWS 가장 용접 길이가 길고 FSH 간 간격이 넓은 부위를 선정(Equatorial Segment Rib # 35)한 후 최대 하중 조건에서의 구조 안정성을 평가함
- 스트레스 분포 계산 결과 허용치를 벗어나는 부위가 발생하여 Linear Elastic Analysis에 추가하여 Limit Analysis 수행 후 Load Factor 평가가 이루어짐
- Load Factor 평가 결과 39 %의 Margin을 가지는 것으로 평가되어 구조적으로 안정한 것으로 평가되었으나 고정 경계 조건 이외에 경계 조건을 반영한 추가 해석 필요성이 ANB로부터 제기되어 추가 해석이 진행 될 예정임
- 내벽 차폐체 Rib 구조해석 결과 IO 및 ANB 승인 이후 변경된 설계안을 도면에 반영하고 본 제품 제작에 반영할 예정임

[용접 변형량 예측을 위한 구조해석]

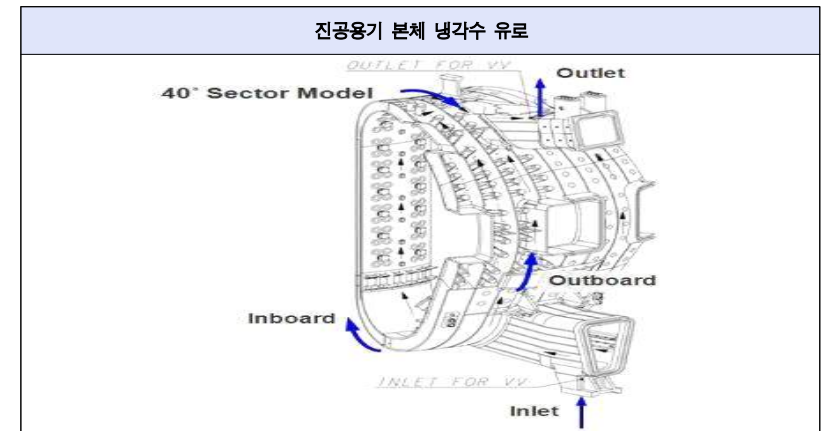
- 용접 변형량 예측을 위한 구조해석은 용접에 의해 조립되는 진공용기 본체의 허용 공차관리 가능성을 열변형 해석을 통해 예측하고 공차관리 방안을 모색하기 위한 것임
- 해석 결과, 별도의 Jig를 사용하지 않고 용접을 진행할 경우 허용 공차를 준수할 수 없는 것으로 결론지었으며, 강력한 Jig를 사용하더라도 공차관리에 어려움이 있을 것으로 예상됨
 - 현대중공업에서 선박 제조시에 적용되는, 설치된 용접 Jig에 국부적으로 열변형을 가하여 조립 공차를 최소화 하는 방법이 대안으로 검토됨

● 열유체 해석 기술

- '07년 IO와의 Task Agreement에 따라 수행 중인 진공용기 본체 열수력 해석 결과를 IO와 협의한 결과 비정상 운전조건에서의 추가 해석 필요성이 제기되어 '07년 사업을 통해 개발된 3차원 열수력 모델에 일부 변경된 경계 조건을 반영한 추가 해석을 수행함

☞ 비정상 운전 조건에서의 본체 열유동 해석

- 진공용기 본체는 9개의 Sector로 구성되며, [그림4-10]은 40도 섹터에 대한 냉각수의 흐름도를 나타낸 것임
- 각 40도의 섹터마다 2개의 냉각 루프를 가지고 있으며 하부 포트에 입구가 존재하며, 유입된 냉각수는 Inboard와 Outboard로 분기되었다가 상부 포트에서 합쳐짐



[그림4-10] 본체 냉각수 유로

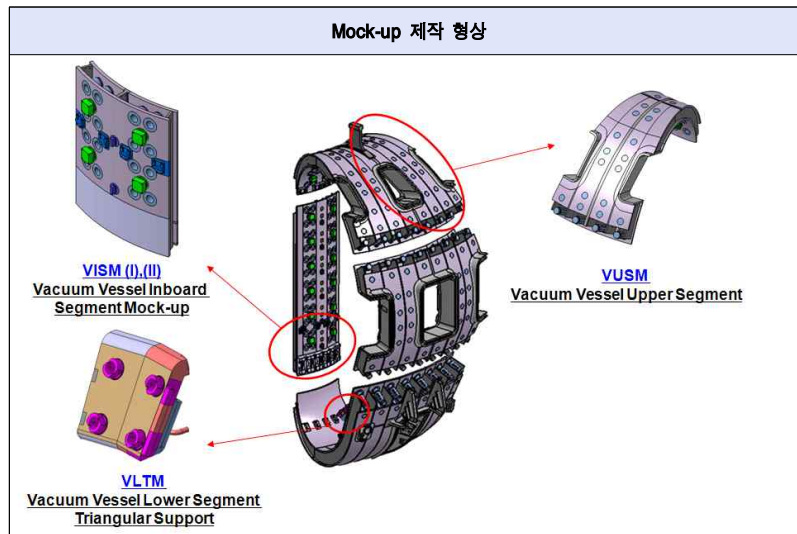
- ITER Vacuum Vessel Design Description Document 15(ITER_D_22FPWQ, 2004)의 결과는 전체적인 유동량이 40 kg/s인 반면 추가해석 결과는 30 kg/s임
- 진공용기 본체 Inner Shell과 In-wall Shielding Plate의 온도 분포 계산 결과로 유량 감소에 따라 효과로 전체적인 냉각수 온도 상승이 6.3 °C로 계산되었음
- 열전달 계수 계산 결과, ITER VV DDD 15에서 요구하고 있는 300 W/m²K 이상의 값을 보여줌

■ 대형 진공용기 제조기술 성과 중점정리

● 후판용접기술

[진공용기 Mock-up 제작]

- 진공용기 제작에 사용되는 스테인레스 스틸은 용접변형 제어와 기계 가공 후 열변형이 많이 발생하는 재료임. 또한, 형상이 매우 복잡하고, 재료의 두께가 60 mm 이므로 용접부의 용착량이 매우 많은 제품임
- 위와 같은 기술적인 어려움을 고려하여 Mock-up 제작을 통해 용접부의 개선 각도, 각종 용접 장비와 특수한 용접방법(Inboard Segment에 적용되는 전자빔용접)을 적용하며 용접 전, 후의 변형량을 측정하여 진공용기 본 제품 제작에 문제가 발생하지 않도록 적용하고자 하였음
- 또한, Upper Segment의 Inner Shell에 적용되는 성형 기술과 용접변형을 제어 할 수 있는 지그를 설계 제작하여 검증하며, Flexible Support Housing의 형상을 변경하여 Outer Shell과 조립성을 검토하였음



- Inboard Segment Mock-up은 [그림4-11]과 같은 본제품 Inboard Segment 형상의 하부 1/3부위를 제작함. Inner Shell과 Flexible Support Housing은 용접 변형을 최소화하기 위하여 최첨단 용접 기술인 전자빔 용접을 적용함
- Flexible Support Housing은 Blanket 조립을 위하여 정밀가공을 시행해야 하며, 5축 가공장비를 사용하여 Flexible Support Housing의 정밀가공 가능성을 확인하고, 용접 후 Blanket와 조립되는 부분에 용접 변형이 발생하는지 확인함
- Outer Shell과 Side Rib, Outer Shell과 Flexible Support Housing의 용접 성과 비파괴검사 방안을 확인하고 마지막으로 용접완료 후 전제 형상의 용접 변형량을 분석함
- 전자빔 용접변형 3차원 측정 결과, Flexible Support Housing은 용접 후 X, Y 축의 좌표 변형량이 $\pm 3\text{mm}$ 가 측정됨.
- Flexible Support Housing 용접 후 3차원 측정 결과, Flexible Support Housing 전자빔 용접 후에 3차원 측정을 실시하여 용접 변형을 확인함. 전자빔 용접 변형량을 각 변형 1.3mm, 폭 방향 수축 5.2mm, 높이 방향 수축 0.15mm, 총 용접 변형량은 Max. 5.6mm로 Inboard Segment의 제작 공차 $\pm 10\text{mm}$ 의 공차 범위 이내에 있음
- [표4-5]는 Inboard Segment 제작 시 발견된 문제점의 요인을 규명하고 대책을 수립하여 해결한 내용임

[표4-5] Inboard Segment 제작 시 발견된 문제점

	문제점	원인	대책
1	Inner Shell 기계가공 후 변형 발생	Manifold Support Hole 가공 후 뒤틀림 발생	Manifold Support 설계에서 삭제됨
2	Flexible Support Housing 전자빔용접 불량	Flexible Support Housing 11시 방향 용접 불량 발생	본제품 재료를 사용하여 재현 후 원인 규명
3	Poloidal Rib과Flexible Support Housing의 용접 개선부 단차발생	Poloidal Rib 용접 수축량이 예측 값보다 많이 발생	Poloidal Rib을 Inner Shell에 용접 후 Outer Shell과 용접되는 용접 개선 형상 가공
4	Side Rib 과 Outer Shell 용접부 Back Bead 불량	Outer Shell과 Side Rib 취부시 Root Gap이 작다. Back Purge 불량	Root Gap을 2mm에서 3mm로 증가. Back Purge 방안 변경. Upper Segment의 동일한 형상에서 재검증
5	Flexible Support Housing 과 Outer Shell 용접 Back Bead 불량	Back Purge 불량	Upper Segment에서 동일한 형상에서 재검증
6	In-wall Shield Rib 용접부의 Back Bead 불량	Back Purge 불량	Back Purge 방안 변경. 용접사 기량 향상

③ 진공용기 핵심기술의 주요 성과 요약

- 진공용기 소재개발로 인해 단조재 및 후판 압연재의 제작성 검증 뿐 아니라 국내 제작 가능성을 확인함
- 진공용기 소재의 특수성으로 인해 업체의 수가 제한적이므로 국내 재료업체를 통한 진공용기 소재 시제품 제작이 추진되었으며, 이를 통한 기대효과는 국내 산업체의 기술력 검증뿐만 아니라 진공용기 본제품 제작에 사용될 소재의 국산화 가능성도 기대할 수 있는 성과를 올림
- 한국은 진공용기 지지구조물 기준설계안의 복잡한 구조로 인해 야기되는 문제점을 해결하기 위해 신설계안을 제안하고, 제안된 신설계안을 바탕으로 IO와 공동으로 실제 설치공간을 고려한 유연구조 지지구조물 및 힌지구조 지지구조물의 2가지 대안설계안을 개발함
- 그로 인해 개선된 설계 안을 바탕으로 상세설계 및 구조해석, 그리고 시제품 제작/시험을 통하여 설계 검증을 수행하는 성과를 올림
- 진공용기 제작에 사용되는 스테인레스 스틸은 가공 후 열변형이 많이 발생하고 재료의 두께가 60 mm 이므로 용접부의 용착량이 매우 많은 제품임. 1단계 기술개발 당시 위와 같은 기술적인 어려움을 고려하여 Mock-up 제작을 통해 용접부의 개선 각도, 각종 용접 장비와 특수한 용접방법(Inboard Segment에 적용되는 전자빔용접)을 적용하며 용접 전, 후의 변형량을 측정하여 진공용기 본제품 제작에 문제가 발생하지 않도록 하지 않게 기술개발을 함

4 진공용기 조달추진 경위

■ 진공용기 본체 조달약정

- ITER 진공용기는 9개의 섹터로 제작돼 현장조립하게 되며, 우리나라는 2개(20%), 나머지 7개(80%)는 유럽연합이 제작함. 또한 진공용기에 구멍을 내고 붙이는 장치인 진공용기 포트는 우리나라가 73.5%, 러시아가 26.5%를 조달함
- 진공용기 본체 조달 약정 체결용 기술 문서 작성 및 조달 약정 체결
 - 세부 조달 일정 분석 및 비용 산정
 - 조달 위험 요소 식별, 분석 및 완화 방안 마련
 - IO 및 공동 조달국(EU)과의 기술 사양서 공동 작성
 - '08.11 진공용기 본체 조달 약정 체결

■ 진공용기 포트 조달약정

- '08.11월에 진공용기 포트 조달약정이 체결 되었으며 조달약정 문서에 포트 제작 기술시방서를 포함하고 있음
- 조달약정은 산업체와의 계약 이전에 조달국이 준수해야할 사항들에 대해 기술하고 있으며, 조달국의 품질계획서는 PA 이행조달에 작성되어 IO의 승인을 득하여야 함
- 기술 시방서는 중앙부/하부 포트에 대한 조달을 위해 작성되며, 그동안 수행한 설계와 연구결과들을 반영하여 ITER 진공용기 포트 본제품 계약에 필요한 기술시방서를 작성함. 또한 품질계획서는 조달품의 품질보증을 위해 ITER 한국사업단의 품질보증 계획을 기술하는 문서로 승인을 위해 IO에 제출함

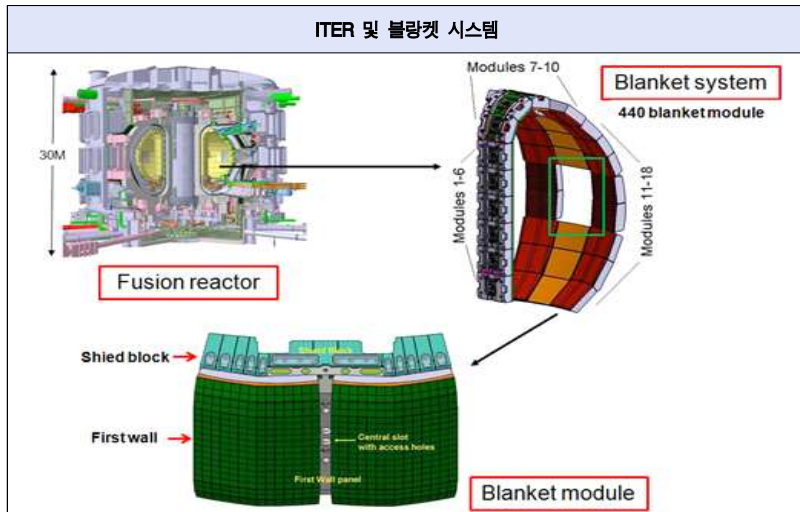
5 진공용기 정성적 기술성과 분석

- 초고온 플라즈마 발생을 위한 세계 최대의 규모의 진공용기를 위한 포트 제작으로 세계 최초로 시도함에 따른 시행착오가 있었으나 성공적으로 수행 중임
- 1단계 중요 성과로는 RCC-MR에 따른 ITER 진공용기 포트 제작 및 시험 절차서 작성을 들 수 있음
 - 이유는 국내에서는 적용경험이 전무한 프랑스 고속증식로 설계 및 제작 코드에 근거하여 핵융합 장치용 진공용기의 포트 및 포트 관련 조달품 제작에 필요한 도면, 기술문서, 제작 및 검사절차서 작성이 가능하기 때문
- 한국은 현재 진공용기 포트 설계에 참여 하고 있지 않고, 프랑스의 인허가 절차를 따라야 하기 때문에 기술개발/일정이 지연되는 어려움이 있음
- ITER 진공용기 개발은 초고진공, 초고온, 금속 산소재, 초정밀 용접 등의 기술을 망라하는 극한 기술의 복합체로서 산업계에 즉시 활용이 가능한 고부가 가치 첨단 기술들의 통합 기술로 완성되는 장치이므로 실질적으로 응용될 수 있는 첨단 기술의 국내 확보가 가능할 것으로 기대됨
- ITER 진공용기 제작 과정에서 확보된 초고진공 기술, 초정밀 가공 및 측정 기술, 진공 누설 탐지 기술, 저변형, 고에너지 용접기술, 비파괴 검사 기술 등은 향후 상용 핵융합 발전로 건설에 직접적으로 활용이 가능함
- 포트의 설계 구조적인 특성상 많은 부분이 국부적인 성형과 다수의 용접으로 제작되기 때문에 스테인리스 후판의 성형과 용접에 대한 변형 예측 및 최소화 기법과, 용접부에 대한 비파괴 검사 기법을 찾는 것이 중요함

4.3. 블랑켓 일차벽

1. 블랑켓 일차벽 기술 개요

- 블랑켓 1차벽은 핵융합로의 노심에서 섭씨 1억 도 이상의 온도를 갖는 플라즈마와 가장 가까이 인접해서 플라즈마를 가두는 역할을 하는 플라즈마 대향(對向) 부품의 하나임
- 높은 열유속, 중성자, 전자기 부하 등 극한 환경을 견디어야 하는 특성을 가지고 있기 때문에 내구성과 건전성, 냉각능력 등 종합적인 기술 개발이 요구되는 특성을 가지고 있음
- 블랑켓 모듈은 플라즈마와 진공용기 사이에 위치하며, 플라즈마를 직접 접하는 일차벽(first wall)과 차폐블록(shield block)으로 나뉨. 일차벽은 약 680m²의 전체 면적을 차지하고 총 440개의 일차벽 모듈(first wall inboard module)로 구성되며 각각의 모듈의 단위 면적 및 무게는 1.4 m²과 1.2 톤에 해당함



[그림4-12] 블랑켓 시스템

2. 블랑켓 일차벽 핵심기술

■ 블랑켓 일차벽 핵심기술 및 정의

- [표4-6]은 도출된 블랑켓 일차벽 핵심기술과 각 핵심기술을 세분화한 핵심요소기술을 나타내었고, 각 기술의 정의를 간략하게 설명함

[표4-6] 블랑켓 일차벽 핵심/중요기술

■는 핵심기술 (○는 핵심요소기술)	기술 정의
■ 이종금속접합 설계기술	- 핵융합 환경에 맞는 열 및 neutronics 영향을 고려한 이종금속접합 설계체계를 구축하는 기술
■ 이종금속 접합기술	- Be/Cu, Cu/SS 등의 이종금속을 핵융합 요구조건에 맞도록 접합하는 기술
■ 이종금속 접합 건전성 평가기술	- 이종 접합 건전성 평가를 위한 고열부하시험 시설 및 비파괴 검사시설 구축
○ 고열부하 성능검증 기술	- 부품의 수명을 단시간에 예측하기 위하여 극한조건에서의 성능검증 설비구축 및 실험기술
○ 비파괴 접합부 defect 측정기술	- 접합부의 defect 존재여부를 비파괴로 측정할 수 있는 기술

이종금속 접합 설계기술 성과 중점정리

- 블랑켓 재설계의 목적은 블랑켓의 열부하 제거 기능 향상, RH 재현성 및 속도 향상, 플라즈마 운전 시작 및 종결시 경계 역할, NB shine-through, ELM 코일 및 매니폴드와의 인터페이스 해결 등을 효과적으로 수행하는데 있음
- 블랑켓 시스템은 DCR77 (2007년 7월) 요청에 따라 일차벽의 열부하 제거 능력 향상 및 RH 능력을 극대화 시킬 수 있도록 재설계가 수행되었으며, PCR166에 따른 ELM 및 VS 코일 및 RH를 고려한 매니폴드 등과 간섭 등이 고려하여 설계가 수행되어 옴
 - 설계변경에 따른 개념설계의 고려사항으로는 모든 모듈 (Inboard, Outboard)에 적용 가능, RH에 의해 일차벽만 분리, 차폐블록은 반영구적으로 VV에 부착, 기능에 따른 일차벽 차등 냉각기술 적용 (일반모듈은 낮은 열부하를 고려한 기본 설계, NBI dump, Upper X point, 리미터는 고열부하를 고려한 설계) 등이 있음
- 재설계된 일차벽은 토로이달 방향으로 배열되어 있으며 이를 통해 Halo Current에 의한 전자기력을 최소화하고, 또한 Shaping을 통해 열부하를 효과적으로 분산시킬 수 있도록 설계가 수행됨

이종금속 접합기술 성과 중점정리

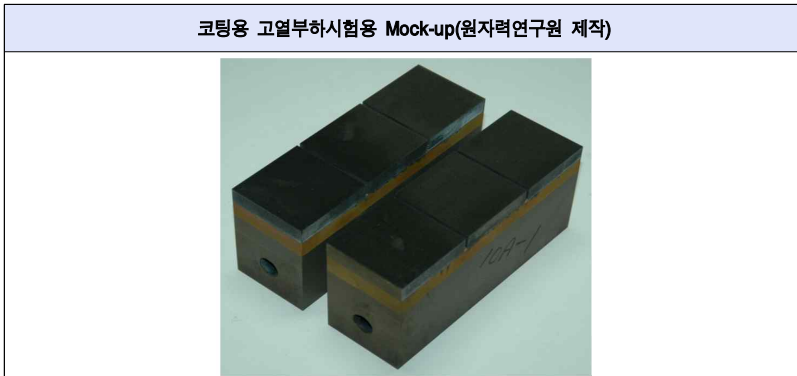
- 블랑켓 일차벽의 대면재는 베릴륨(Be)이 사용되며, 냉각용 구조재는 구리합금(CuCrZr), 구조재는 스테인리스 스틸(SS 316L)이 사용되며, 열부하가 더욱 높은 디버터 부분에는 대면재로 텅스텐(W) 또는 탄소섬유복합체(CFC)가 사용됨
- 이와 같은 소재들의 상호간 접합을 위하여 HIP, Brazing 등이 개발되고 있으며, 특히, HIP은 계재물 없이 고온고압의 환경에서 확산접합을 이루게 하는 것이 특징이어서, 구리합금과 구조재인 스테인리스 스틸은 HIP 접합이 잘 이루어지는데 비하여, 베릴륨과 구리합금의 접합은 취성의 합금간화합물을 형성하기 때문에 건전한 접합을 이루기 위한 중간층 (Interlayer)이 반드시 필요함

- 따라서, 적절한 중간층을 선택하고, HIP에 대한 공정조건을 최적화하는 것이 접합기술 개발의 핵심요소임
- 1단계 기술개발에서는 고유의 중간층을 선정하여 베릴륨과 구리합금의 최적 접합 공정을 개발하였고, 접합 강도와 제작된 블랑켓 일차벽의 건전성을 기계적 특성 시험과 고열부하 시험을 통하여 평가하였음
- 검증용 ITER 블랑켓 일차벽 목업에서 Be/Cu의 접합에는 Cr/Cu 중간층(interlayer)를 사용하였으며, 성공적으로 검증시험을 통과하였음
- ITER 블랑켓 일차벽에 대한 Be/CuCrZr/SS 접합에 있어 기술적인 난이도가 가장 높은 분야는 Be/CuCrZr의 접합임
 - 베릴륨은 공기 중에서 쉽게 표면 산화막을 형성하고, 이로 인하여 접합이 잘 이루어지지 않는 요인이 되며, 접합이 되더라도 취성의 계면간 화합물을 형성하여 최적의 접합 조건을 설정하여야 함
- 1단계 기술개발에서 블랑켓 일차벽의 제작에 있어 고유 접합법 개발을 위하여 인터레이어 코팅 공정 및 소재 개발 연구를 수행함
 - 인터레이어 코팅은 Ti/Cr/Cu에서 선택되는 조합으로 접합 강도를 평가하여, Ti(1 μm)/Cr(0.5 μm)/Cu(5 μm)와 Ti(1 μm)/Cr(2 μm)/Cu(1 μm)의 인터레이어 조성을 최적 코팅 소재로 선정함
 - 또한 코팅 방법에 대한 IBAD 적용을 통하여 인터레이어의 막품질을 높이고 접합 강도를 향상시키는 연구 성과를 얻음
 - 본 연구를 통하여 개발된 Ti(1 μm)/Cr(0.5 μm)/Cu(5 μm) 및 Ti(1 μm)/Cr(2 μm)/Cu(5 μm) 인터레이어는 Be/CuCrZr/SS 목업으로 제작되어, 고열부하 환경에서의 성능 시험을 수행할 계획임
- ITER 블랑켓 일차벽에 대한 Be/CuCrZr/SS 접합에 있어 기술적인 난이도가 가장 높은 분야는 Be/CuCrZr의 접합임
 - 베릴륨은 공기 중에서 쉽게 표면 산화막을 형성하고, 이로 인하여 접합이 잘 이루어지지 않는 요인이 되며, 접합이 되더라도 취성의 계면간 화합물을 형성하여 최적의 접합 조건을 설정하여야 함

이중금속 접합 건전성 평가기술 중점정리

고열부하 성능 검증기술

- 블랑켓 일차벽에 사용되는 베릴륨/구리합금 이중재료 접합을 위해 아국의 고유접합 방법을 개발함으로써 향후 블랑켓 및 TBM 등에 사용되는 이중 재료 접합의 기반기술을 확보함
- Cr, Cr, Ti 등 여러 중간재를 활용한 베릴륨 접합면을 코팅하는 방법 및 고온등방가압법 (Hot Isostatic Pressing, HIP) 접합의 최적 조건을 찾아내어 이에 대한 고열부하 건전성 평가를 완료함



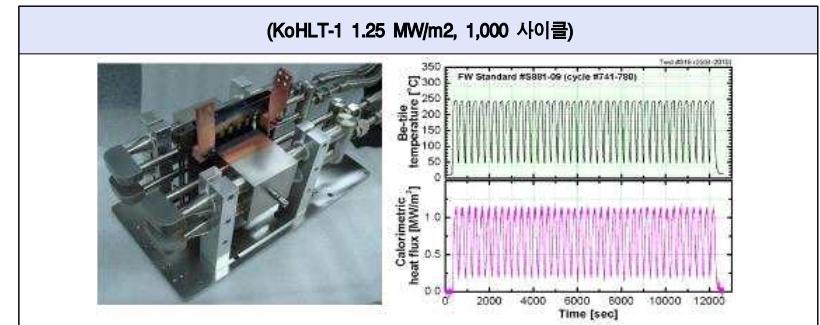
코팅용 고열부하시험용 Mock-up(원자력연구원 제작)

[그림4-13] Ti/Cr/Cu 코팅층 고열부하시험용 Mock-up

- ITER 일차벽 개발을 위해 그라파이트 히터를 이용한 고열부하 시험 시설 KoHLT-1(Korea Heat Load Test facility-1)을 구축함
- KoHLT-1의 주목적은 Be/CuCrZr/SS의 이중 금속이 HIP 방법에 의해 접합된 ITER 일차벽 Mock-up의 접합 건전성을 확인하는데 있음
- KoHLT-1은 판형 그라파이트 히터, 냉각 Jacket이 부착된 상자형 시험용기, 직류 전원, 냉각계통, He 기체 공급계통과 각종 진단계통으로 구성되어 있으며, 이 모든 시설은 Be 처리가 가능한 특수 정화계통이 설치된 실험실에 설치함

- 시험 대상물의 크기와 요구되는 열유속에 따라 여러 가지의 그라파이트 히터를 설계, 제작하였으며, 전기 저항은 고온 운전 중에 0.2~0.5Ω이 되도록 함. 두 시험용 목업 사이에 인가되는 열유속은 calorimetry법에 의해 냉각수의 입, 출구 온도와 유량을 측정하여 얻게 됨

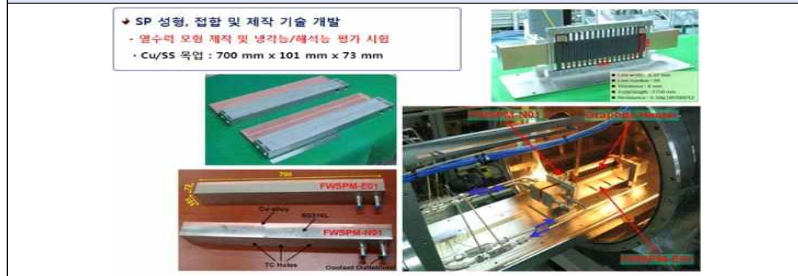
- 여러 가지 형태의 ITER 일차벽 Be Mock-ups에 대해 고열부하 시험을 수행하였으며, ITER 검증 시험을 위한 사전 예비시험으로써 80×80mm² Be-tile이 3개 접합되어 검증용 목업에 대한 고열부하 시험을 수행함
- 2개의 FWQM에 대해서 0.625MW/m² 이상의 열부하로 각각 12,690/12,020cycles 시험을 완료함
- 이 시험동안 온도 곡선에 특이한 이상이 발견되지 않았으며, 이로서 Be-tile의 접합 건전성이 확인됨
- KoHLT-1 고열부하 시험 시설의 성능이 확인되었고, 장시간 연속 운전에 있어서도 그 신뢰성이 입증됨. [그림4-14]는 KoHLT-1에서 수행된 고열부하 시험의 결과를 보여주고 있음



[그림4-14] 고유접합법 개발용 목업에 대한 열부하 시험

- 고열부하시험을 위한 KoHLT-1의 운영과 더불어 700x100mm² 크기의 목업 시험이 가능한 KoHLT-2를 개발하여 운영 중에 있음
- KoHLT-2는 Be를 포함하지 않는 대형 Cu/SS. 목업의 시험이 가능하며, 이것은 블랑켓 일차벽 Semi-prototype 핑거(Finger)에 대한 고열부하시험을 고려한 것임

목업 열부하시험을 통한 냉각능 평가

[그림4-15] 목업 열부하 시험을 통한 냉각능 평가 (~0.5 MW/m²)

- 국내에서 수행 예정인 2단계 블랑켓 일차벽 검증 시험을 위해서 전자빔을 이용한 고열부하시험시설을 구축하였으며, 주요 사양은 다음과 같음
 - 출력 : 최대 300 kW(최대 출력밀도 10 GW/m²) 급
 - 가속 전압 : 최대 60 kV, 최대 조사 면적 : 70 × 50 cm² 이상
 - 연속 운전 및 Pulse 운전(Cyclic Heat Load), 열부하 조정 가능
 - 국외 시험시설로써, 독일의 FZJ에서 운영 중인 JUDITH-2 (200kW), 미국 Sandia 국립연구소의 EB1200, 그리고 러시아 Efremov 연구소의 IDTF (800kW) 장치들을 참조하여 시험비용 절감 및 자체 시험 기술 확보를 위하여 한국원자력연구원 내에 구축하였다.
 - [그림4-16]과 같이 전자빔을 구매하고 Test Chamber를 제작하였으며, 냉각계통, 전원계통, 진공계통 등은 기존의 인프라를 활용하였다. 현재 2012년 구축을 완료하여 시험운전 및 블랑켓 일차벽 2단계 검증 시험을 위한 준비 작업을 수행하고 있음

High heat flux test facility with electron beam

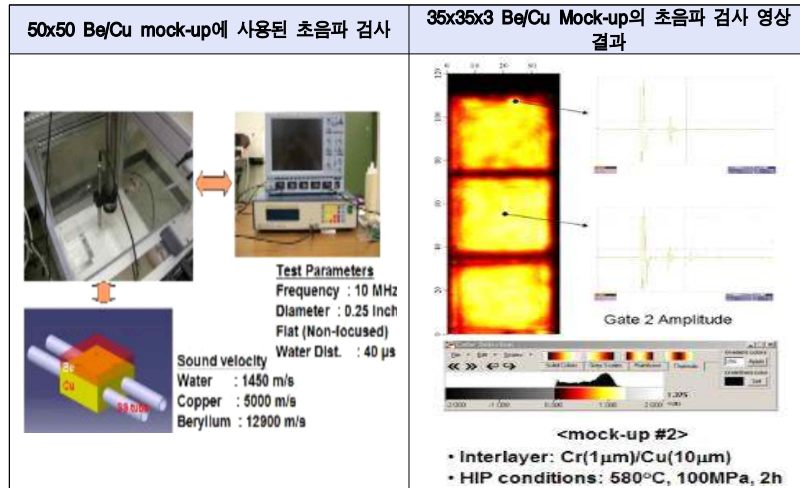


[그림4-16] High heat flux test facility with electron beam

● 비파괴 접합부 defect 측정기술

- ITER 블랑켓 일차벽은 HIP 제조공정에 의해 제작되며, 이 경우 생성된 접합 이상여부 검사를 목적으로 초음파 검사를 적용하는데, 초음파 검사는 재료 내부의 결함이나 특성을 조사하는 보편화된 방법임
 - 초음파는 전파 중에 음향 임피던스 차이로 인해 반사되는 성질이 있으므로, 일차벽은 수 개의 접합계면으로 구성되어 있어 임피던스 차이에 의한 반사 신호를 분석함으로써 계면 불량을 탐지할 수 있음
- Be/Cu 계면은 일차벽 계면 중에서 가장 심각한 분위기(높은 온도와 방사선량)에 노출되기 때문에 엄격하게 검사를 수행해야 함
 - ☞ 초음파 센서 구동 C-스캔 이미징 시스템은 XYZ 스캐너, 수침 초음파 센서, 초음파 송수신 시스템 (Panametrics-NDT 5072PR), 초음파 신호 수집 AD 보드 (Agilent Technologies U1070A-001), 스텝 모터 구동 모듈 (Galil 보드), 스캐닝 제어 및 C-스캔 수행 컴퓨터로 구성됨
 - ☞ 스텝 모터와 스캐너 구동 모듈을 통하여 스캐너에 설치된 스텝모터에 기전력과 이동펄스를 제공하여 초음파 센서의 위치를 이송 제어함.
 - ☞ 초음파 시스템에서 송출된 펄스 신호는 초음파 센서에 보내지고 반사된 신호들을 수신하여 AD 보드를 통하여 초음파를 디지털화하고, 이미지 맵핑을 위해 신호처리 함
- Mock-up 접합면의 비파괴 방법을 활용한 검사법은 초음파를 활용한 결합 검사로, [그림4-17] 좌측 그림과 같이, 수조 내에 Mock-up을 담그고, 자동화된 Scanner를 이용하여 수행됨. 초음파 센서는 주파수 10MHz, Size 0.25inch로서 직경 3mm 접합 불량 결함을 탐지가 기 검증된 것을 사용함
- ITER 블랑켓에 대한 초음파 접합검사를 수행하기 위한 이미징 C-스캔 프로그램인 Winspect를 사용하여 검사함. 이 프로그램은 수침 초음파센서에 펄스를 송수신하기 위한 초음파 시스템 Panametrics- NDT 5702PR 장비의 조정과 4축 스캐너의 이송을 제어하면서, 초음파 신호를 수집하여 영상 처리하는 프로그램임
 - C-스캔 성능시험에 사용한 초음파 센서는 주파수 10MHz, 직경 0.25inch로서 직경 3mm 접합 불량 결함을 탐지 가능함을 확인함
 - [그림4-17] 우측 그림은 3개의 Mock-up에 대해 초음파 스캐닝을 통해 얻은 영상을 나타내고 있음. Be/Cu 계면에서의 결함을 탐지하기 위해, Be

tile 표면에서 초음파 스캐닝을 수행하였으며, 위의 그림들과 같은 결과를 도출함



[그림4-17] 비파괴 방법을 활용한 검사법 및 초음파 검사 영상 결과

③ 블랭킷 일차벽 핵심기술의 주요 성과

- 이종금속 접합기술인 고유접합법 기술은 제작된 블랭킷 일차벽의 건전성을 기계적 특성 시험과 고열부하 시험을 통해 평가하고 Be/Cu의 접합에 Cr/Cu 중간층 (interlayer)를 사용하여 성공적으로 검증시험을 통과하였음
 - ITER 기술 기준에 부합하는 접합 기술을 개발하여 공인 검증 시험을 통과하였고 이는 국내 자체 제작 기술을 성공적으로 개발함을 뜻함
- 기술개발에 성공한 ITER 설계 안을 바탕으로 국내에서 제작, 시험할 수 있는 설계 기술을 확보하여 향후 핵융합 플라즈마 대면재료 개발에 활용할 계획임
- 한국의 자체 기술로 제작한 검증용 블랭킷 목업 2개를 IO에 제출, 공동 시험기관으로 선정된 미국과 EU에서 약 6개월 간 고열부하 인가 시험을 거쳐 성능 검증 시험 통과를 확정 받는 성과를 올림(미국 2009년 8월 27일 시험 완료, EU는 2009년 9월 9일 시험완료)
 - IO 사양서에 따라 검증 시험은 총 3차례 중 2차례 성공시 시험 통과를 인정받도록 되어 있으나, 우리나라는 2개의 목업 모두 시험을 통과함으로써 EU(2008년 9월 시험 통과), 러시아(2009년 8월 시험 통과)에 이어 3번째로 블랭킷 일차벽 제작에 대한 1단계 기술검증에 성공함. 참가국 중 미국, 중국은 2009년 말, 시험을 성공적으로 수행하였음
- 제작성 기술검증을 위해 한국원자력연구원은 특별관리 대상 물질인 베릴륨(Be)을 취급할 수 있는 시설과 함께, 블랭킷 일차벽 고열부하 시험시설인 KoHLT-1 구축하여 자체 시험하였으며, 1단계 검증 시험의 일부로써 IO의 공인을 받음
 - 이를 통해서 향후 국제 공인시험에 참여할 수 있게 돼 기술력을 인정받고 향후 시험 비용도 절감할 수 있게 됨

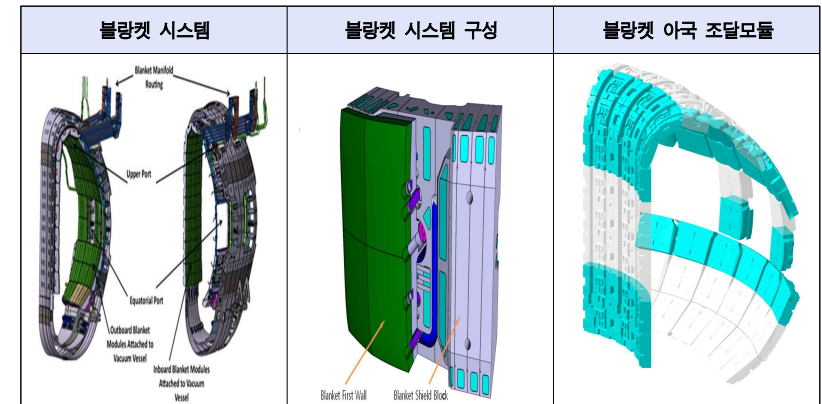
4] 블랑켓 일차벽 정성적 기술성과 분석

- 블랑켓 일차벽은 그 건전성이 ITER에 미치는 영향이 크기 때문에 ITER 국제기구는 초전도 도체, 디버터와 함께 기술 검증이 필요로 하는 3대 핵심 기술 분야중 하나로 선정하고 ITER 기구 주관으로 국제 공동 검증시험을 진행함
 - 블랑켓 일차벽은 플라즈마 대향 부품의 하나로, 높은 열유속, 중성자, 전자기 부하 등 극한 환경을 견디어야 하므로 내구성과 건전성, 냉각능력 등 종합적인 기술 개발이 요구되는 기술력임
- 블랑켓 일차벽 제작을 위한 이종금속 설계 및 접합기술은 한국에서 한 번도 시도해보지 않았던 기술이었으며, 그 기술을 핵융합 환경에 맞는 체계로 재구축해야 하는 어려움이 있었으나 자체 및 국제협력 노력으로 극복함
- 초기 기술개발 시작 시에는 조달이 목적이었기에 Be/Cu/SS 이종금속 접합기술 확보를 위한 목업을 상당히 많이 만들었으며 개발하는데 6-7년 정도 기간이 소요되었고, 특히 시험장비가 없는 문제점으로 인해 새로운 장비구축이 필요했음
- 핵융합 환경의 열 및 neutronics 영향 해석을 위한 건전성 평가체계를 구축하여 실험하였으며, 특히 고열부하 장비를 구축하여 신뢰성 평가를 국내 최초로 수행함
- 결론적으로 목업 검증시험을 통해 조달자격 획득의 우수한 성과를 거두었으며, 조달품목에서는 전략상 제외되었으나 기술개발 결과를 TBM 기술개발에 활용하고 있음
- 데모나 상업적 핵융합 발전소 건설을 위해서는 텅스텐 소재개발이 필요하지만 ITER 사업에서는 텅스텐을 고려하지 않고 있으며, ITER 사업과 별도로 개발되어야 할 기술임. 텅스텐-alloy 소재는 고가이며 취급이 어려운 Be를 포함하지 않는 소재이기 때문에 적극적인 기술개발이 필요함

4.4. 블랑켓 차폐블록

1] 블랑켓 차폐블록 기술개요

- 블랑켓 모듈 (Blanket Modules)은 플라즈마로부터의 열 및 중성자 차폐 역할을 하는 구조물로, 모듈 하나의 크기는 약 1.0 m × 1.4 m × 0.5 m 이며, 진공용기 내벽에 총 440개로 이루어져 있음(그림4-18, 블랑켓 시스템)
- 하나의 블랑켓 모듈은 일차벽 (First Wall)과 블랑켓 차폐블록 (Blanket Shield Block)으로 이루어져 있으며(그림4-18, 블랑켓 시스템 구성), 위치에 따라 Inboard Modules, Upper Modules, Outboard Modules로 분류됨
- 차폐블록의 크기는 약 1.4 X 1.0 X 0.4 (m), 재질은 316L(N)-IG 스테인레스강으로 제작되어지며, 주요기능은 열 및 중성자로터 자석 진공용기 등을 보호하며, 또한 고온의 일차벽을 냉각시킬 냉각수를 공급하는 역할을 하는 구조물임
- 우리나라에서 조달예정인 블랑켓 차폐블록은 총 220개이며, 각 위치와 형상은 (그림4-18, 블랑켓 시스템 구성)에 나타냄



[그림4-18] 블랑켓 차폐블록

2] 블랑켓 차폐블록 핵심기술

■ 블랑켓 차폐블록 핵심기술 및 정의

- [표4-7]은 도출된 블랑켓 차폐블록 핵심기술과 각 핵심기술을 세분화한 핵심요소기술을 나타내었고, 각 기술의 정의를 간략하게 설명함

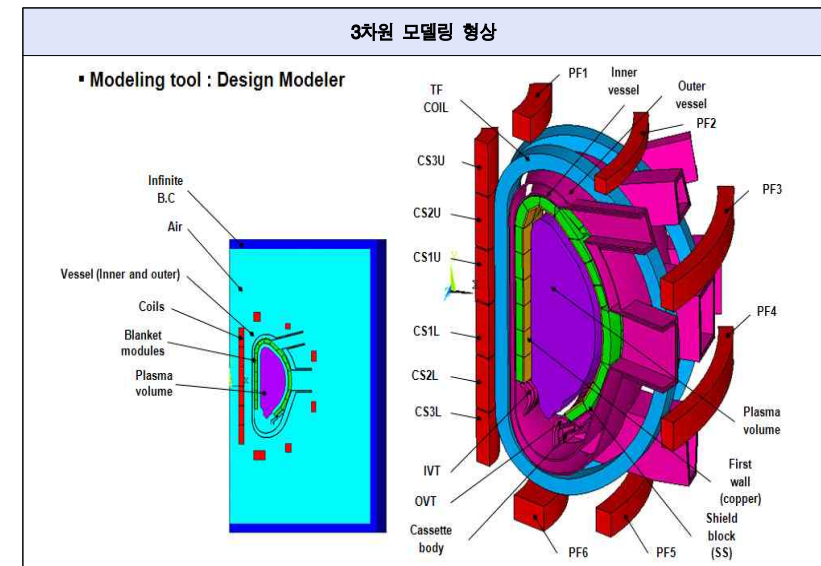
[표4-7] 블랑켓 차폐블록 핵심/중요기술

■는 핵심기술 (○는 핵심요소기술)	기술 정의
■ 블랑켓 차폐블록 설계 기술	- 핵융합 환경의 열 및 중성자 영향을 고려한 블랑켓 차폐블록 설계체계를 구축하는 기술
○ 전자기력 해석 기술	- 전자기력의 영향해석 및 부품설계기술
○ 열수력 및 구조해석기술	- 열수력 및 구조를 고려한 설계 해석기술
■ 블랑켓 차폐블록 제조 기술	- 품질 요구수준에 맞는 블랑켓 차폐블록 제조 기술
○ 가공 및 용접기술	- 대형 초고진공부품의 가공 및 용접 기술 - 용접 변형 및 열응력을 최소화 할 수 있는 용접기술
○ 품질 및 성능 평가기술	- 비파괴 검사 및 수압/고온, 상온 헬륨누설 시험기술

■ 블랑켓 차폐블록 설계기술 성과 중점정리

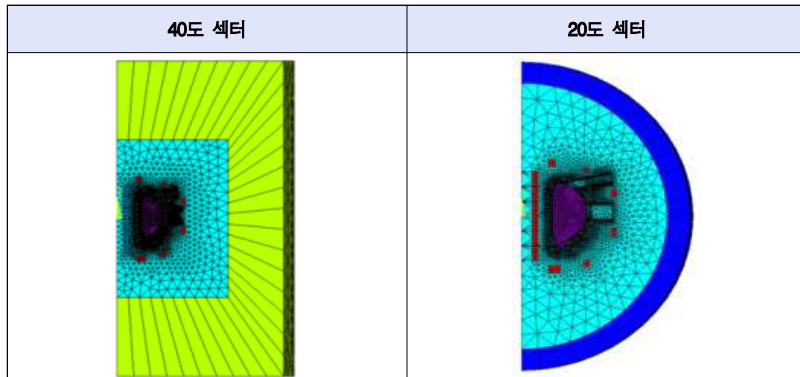
● 전자기력 설계 및 해석 기술

- 블랑켓 설계를 위한 핵심기술인 전자기력 계산 업무는 향후 우리나라가 DEMO 및 상용 핵융합로를 설계하기 위한 핵심기술을 확보하기 위하여 꼭 필요한 기술이므로 기술개발에 착수함
- 본 업무는 핵융합로 설계 핵심기술인 전자기력 계산 관련 업무를 수행하기 위하여 국제기구 및 공동조달국이 참여하는 벤치마킹 업무를 토대로 수행되었음
- 전자기력 계산을 위한 해석기반을 구축하고, 특히 상용 ANSYS 코드를 이용한 전자기력 계산 절차 수립에 역점을 두고 수행되었음
- 특히 DINA 프로그램의 Output인 플라즈마의 거동을 모사하기 위한 변환 프로그램 개발을 사업단 내 인력이 수행하였으며, 6가지 플라즈마 시나리오별 Eddy Current에 의해 발생한 전자기력 및 모멘트를 계산하였음



[그림4-19] 전자기력 계산을 위한 3차원 모델링 형상

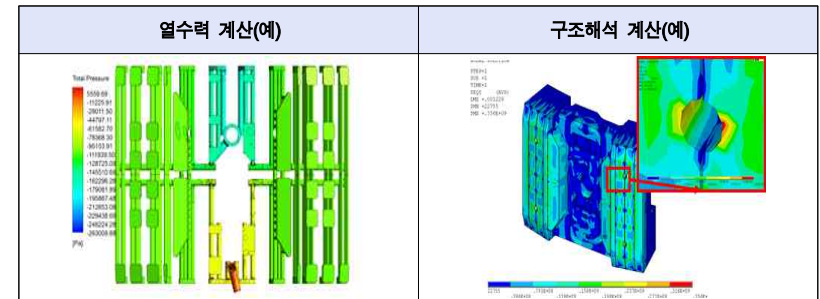
- '08년 착수한 블랑켓 전자기력 계산 벤치마킹 업무를 기반으로 보다 향상된 설계해석 능력을 보유하기 위한 연속 업무를 성공적으로 수행함
- [그림4-20]과 같이 20도 및 40도 섹터 기반 블랑켓 전자기력해석 모델 비교 연구를 기반으로 이전과 마찬가지로 6가지 플라즈마 시나리오에 대한 계산을 수행함
- 또한 계산결과 검증에 위한 Complementary Output 획득용 ANSYS Macro 코드를 작성하여 그 결과를 ITER 국제기구에 제출하였으며, 최종 결과물은 ITER 문서관리 시스템에 등록되어 있음
- 수행된 결과물들은 국내외 학회 및 학술지 게재, ITER 국제기구와의 각종 기술회의에서 발표하였음



[그림4-20] 40도 및 20도 섹터 기반 블랑켓 전자기력 계산 모델

● 열수력 및 구조설계 해석 기술

- 블랑켓은 중성자 조사, 초고온, 고자기장으로 인해 가혹한 환경에 노출되는 구성요소로서, 조달품목의 제작 전에 고온 열수력설계, 고온 구조설계 안정성 해석 등 다양한 설계 및 해석이 이루어져야함
- 아국에서는 4개의 블랑켓 차폐블록을 설계중이며, 최적화된 설계를 위하여 열수력, 구조, 전자기장을 고려한 조합해석기술이 실행되고 있음

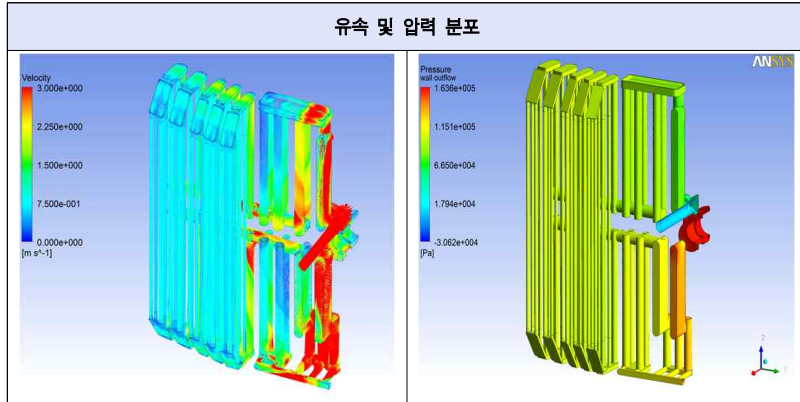


[그림4-21] 열수력 및 구조해석 계산(예)

- 차폐블록 개념설계를 위해 In-board 4번 모듈 기준으로 열수력 성능을 설계 해석함. 1차적으로 ITER 국제기구의 설계(안)에 대한 3차원 열수력 해석을 수행하고 설계 이슈를 분석하고 그 개선안을 제공하는데 중점을 두고 수행함. [표4-8]은 열수력 및 구조해석 조건 정리표이며, [그림4-22]는 유동해석 결과의 예를 보여줌
- 열유동 해석 결과 Pressure Drop이 설계요구사항 (Design Requirement)을 만족하지 않는 것으로 계산되었으나, 대부분 Pressure Drop이 FW 또는 Hydraulic Connector와의 Interface에서 발생하였으므로 차폐블록 자체의 설계 이슈가 아닌 인터페이스의 설계 개선이 필요한 것으로 판명되었음
- 일부 DA가 제기한 차폐블록 내부의 일부 유로에서 Non-uniform Flow 현상이 확인되었으나 차폐블록 전체의 냉각측면에는 큰 문제를 야기하지는 않는 것으로 판단되어 현 상황에서의 설계 개선은 필요하지 않은 것으로 결정됨

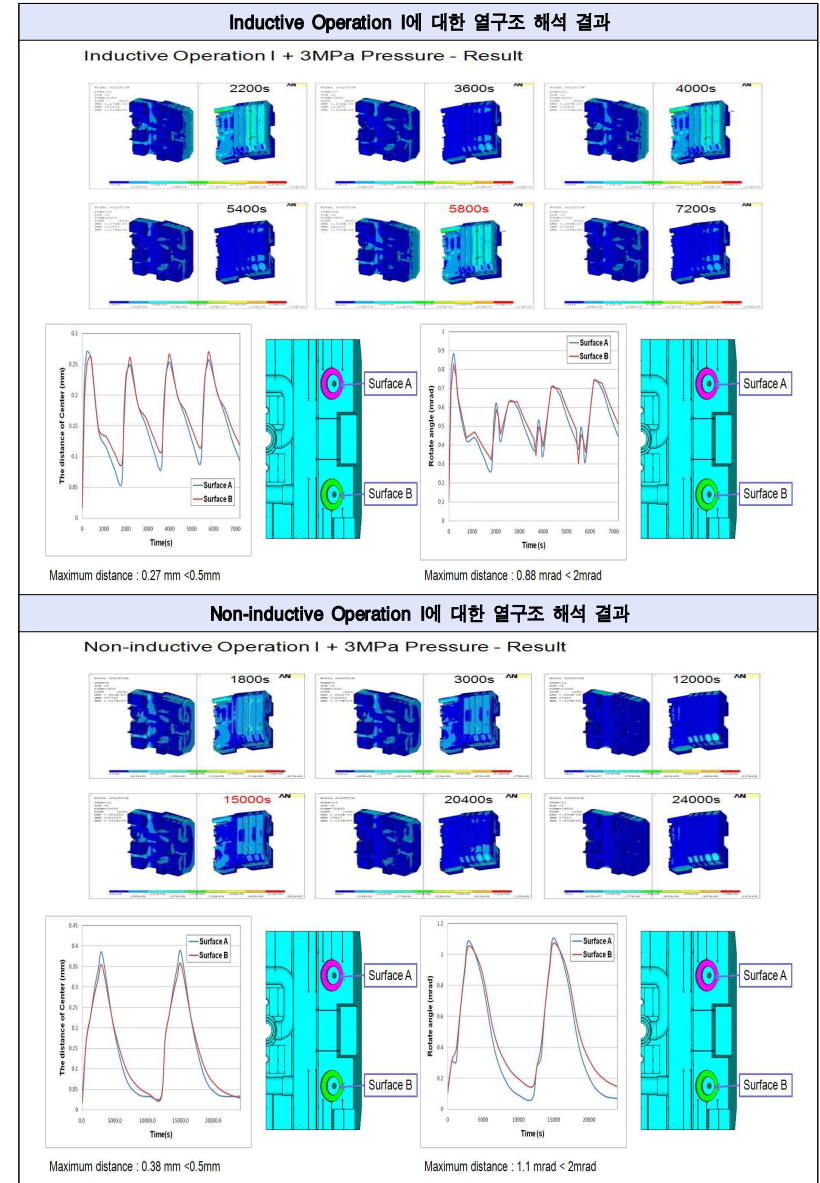
[표4-8] 열수력 및 구조해석 조건

Scenario	Fusion Power	NL Factor	t1(s)	t2(s)	Analysis cycles	Assessment cycles
1. Inductive operation	500MW	1	400	1400	10	30,000
3. Hybrid operation	400MW	0.8	1000	3000	4	TBD
4. Non-inductive operation	356MW	0.71	3000	9000	2	TBD



[그림4-22] 유동해석 결과

- [그림4-23]은 Inductive 및 Non-inductive operation의 하중 하에서 열 구조 해석 결과의 예를 보여주고 있음
- IO의 설계(안)에 대한 Inductive operation 및 Non-inductive operation에서의 계산 결과 SDC-IC에서 규정하는 설계 조건을 만족하고 있었으며, SDC-IC와 별도로 'Thermal Bowing' 현상에 대한 계산결과 0.5mm 변위, 2mrad 회전 요구사항을 만족함
- 관련 설계 결과물들은 차폐블록 열수력 설계에 대한 IO-KO 양자간 회의, BIPT 월간 진도보고회의 등을 통해 계산결과 발표 및 수시 협의 등을 통해 상호 검토되었음




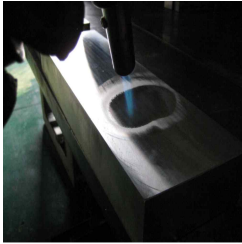


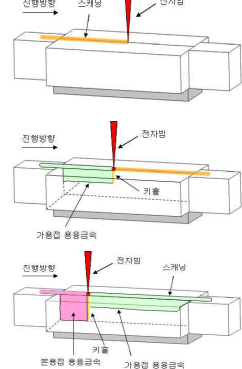

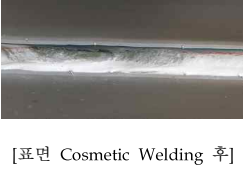
[그림4-23] 열구조 해석 결과

■ 블랭킷 차폐블록 설계기술 성과 중점정리

● 용접 기술

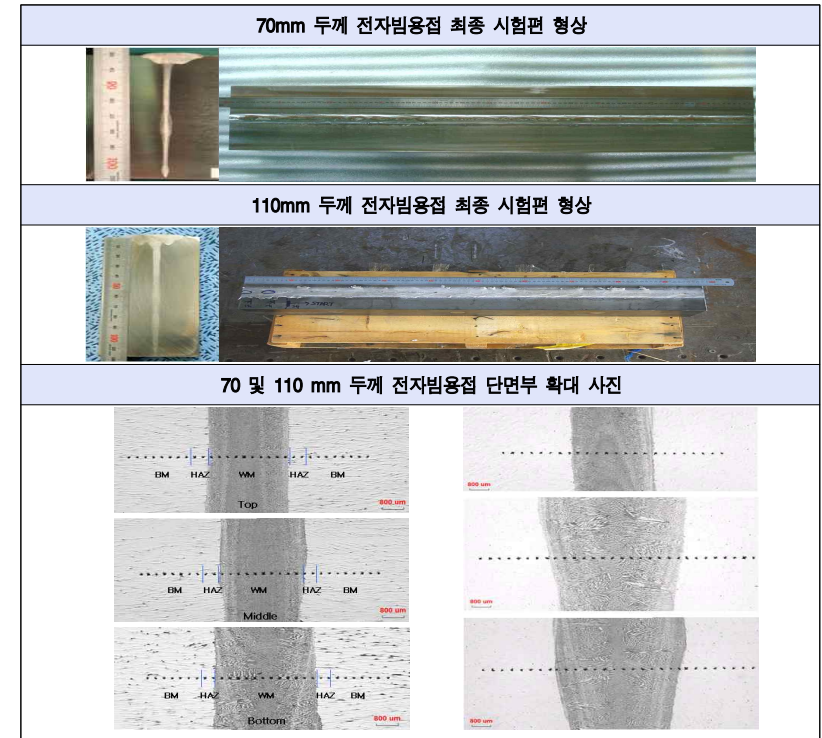
[두꺼운 단조블록 접합용 전자빔 용접 조건 도출]

- 본 기술은 차폐블록 제작방법 중 다수의 블록을 이용하여 용접 후 가공하는 방법을 택할 경우 또는 ESR(Electro Slag Remelting) 소재의 Insert등을 고려할 경우 고려되는 방법 중 하나임
- 용접 조건의 도출을 위하여 단조블록 소재(316L(N))를 국내에서 제작하였고, [그림4-24]와 같은 용접 절차를 수립함

<p>1. 1차 클리닝 (아세톤)</p> 	<p>2. 2차 클리닝 (화염)</p> 	<p>3. 클램핑</p> 
<p>4. Run-in, Run-out, Back Strip 부재 부착</p> 	<p>5. 전자빔 용접 작업 (스캐닝→가접→본접)</p> 	<p>6. 표면 비드의 Cosmetic Welding</p>  <p>[표면 Cosmetic Welding 전]</p>  <p>[표면 Cosmetic Welding 후]</p>

[그림4-24] 두꺼운 단조블록 접합을 위한 전자빔용접 순서

- [그림4-25]에서 70mm 및 110mm 두께 단조블록의 전자빔용접 시험편의 최종 형상을 보여주고 있음
- 일방향 용접을 수행하였으며, 표면 비드의 형상을 개선하기 위하여 Cosmetic Welding을 수행함
- Micro 및 Macro 분석, 상온 및 고온 인장강도, 경도, 충격, 굽힘 강도 평가 결과 용접부 강도는 모재와 동일 수준의 우수한 특성을 얻었으며, 용접부 건전성 평가 결과 ASME Sec. VIII, Div. 2 App. 9, Art. 9-3에 규정된 기준 만족하고 있음
- [그림4-25]에서 본 용접기술의 응용분야로 차폐블록 중앙부의 Hydraulic Connector부의 형상에 대하여 본 용접기술개발 결과를 적용하여 제작한 시제품의 형상을 보여주고 있음



[그림4-25] 70 및 110 mm 두께 전자빔용접 최종 시험편 형상 및 단면부 사진

[Header Lid 체결을 위한 용접단면 설계 및 검증용 시제품 제작]

- 불량켓 차폐블록 각 표면부는 중성자 하중에 의한 높은 열하중을 감소시키고 유동의 흐름 제어를 위하여 Header가 존재함
- Header는 가공 후 Cover가 용접되어야 하고, 현재 고려되는 용접방법은 Narrow Gap Tig 또는 고에너지 용접법인 레이저용접/전자빔용접 등이 고려되고 있음
- 1단계 기술개발에서 Narrow Gap Tig 및 전자빔용접 방법이 개발되었고 각 용접 단면 설계를 성공적으로 수행하였음
 - [그림4-26]은 대형 Front Header Lid에 대한 전자빔 용접 시제품 형상 및 단면 형상을 보여주고 있음



[그림4-26] 전자빔용접에 의한 Front Header Lid 시제품 및 단면 형상

[Flow Driver 체결 및 Plugging 용접기술개발]

- 1단계 기술개발에서 차폐블록 내부 냉각홀 내에 설치되는 Flow Driver의 용접조건 도출하였고, Plugging 용접기술개발을 완료함
- 특히 Plugging 용접기술은 Narrow Gap 및 전자빔용접기술을 기반으로 개발되었으며 관련 코드에서 요구하는 조건들을 만족하는 단면을 얻음
 - [그림4-27]은 Flow Driver 용접시험편 및 Plugging 용접시험편의 최종 형상을 보여주고 있음



[그림4-27] Flow Driver 및 Plugging 용접시험편의 최종 용접 단면 형상

● 품질 및 성능 평가기술

- 차폐블록 전자빔 용접부는 316L(N) 스테인레스강으로 제작되며, 전자빔 용접부 두께는 최대 100 mm 이상이 될 것으로 예상되고 있으며, 전자빔 용접부에 발생 가능한 결함 형태는 용접 후 냉각 중 각종 미 배출가스로 인한 기공형태임
 - 차폐블록 비파괴검사법 중에 선택할 수 있는 방법을 검토하면, 방사선투과검사(RT)는 형상이 복잡하여 선원 및 필름의 배치가 불가하고 투과 두께도 매우 두꺼우므로 제외하고, 초음파탐상검사(UT)의 적용이 가능할 것으로 보이며, 재질이 SUS 316LN으로 자화가 곤란하여 자분탐상검사(MT) 적용이 불가하고, 액체침투탐상검사(PT)의 적용이 가능할 것으로 판단함
- 그러므로 체적검사에 대해서는 UT를, 표면검사에 대해서는 PT를 적용하여야 하며, 특히 초음파탐상 검사에서는 접촉면이 제한되어 있고, 재질 특성상 결정입자가 조대하고 용접부의 두께 값이 커서 어려움이 예상되었음
 - 오스테나이트계 스테인레스강의 경우, 초음파의 산란 및 흡수로 인한 감쇠의 영향이 일반 탄소강에 비하여 매우 커서 초음파의 전달이 어려우며, 신호대 잡음비(SNR)가 나빠 초음파탐상이 곤란한 재료로 분류되어 있음
 - 액체침투탐상의 적용은 핵융합로의 사용목적상 시험잔류물질이 존재하지 않아야 하고, 시험액의 성분이 철저히 검증되어야 함.
 - 냉각유로 내부 용접부의 경우, 시험조작에 필요한 공간 확보가 되지 않으므로 적용이 불가한 용접부가 발생함
- 따라서, 1차년도 사업에서 현재 제작 및 검사 코드 후보 중 하나인 ASME Sec. VIII, Div. 2에 근거하여 두꺼운 차폐블록 용접부 검사를 위한 초음파 검사 표준 교정 시험편을 제작하고 이에 대한 적합성 검증을 수행하였음
 - ☞ ASME 코드에서 규정하는 초음파탐상 시험 합격 기준은 아래와 같음
 - 균열, 용합부족, 용입 불량으로 평가되면 길이에 관계없이 불합격
 - 진폭이 기준레벨을 초과하고 다음 길이를 초과하는 선상불연속은 불합격
 - t가 3/4 in (19 mm) 이하인 경우 1/4 in (6 mm)
 - t가 3/4 in (19 mm) ~ 2.25 in (57 mm) 인 경우 1/3t
 - t가 2.25 in (57 mm) 초과인 경우 3/4 in (19.05 mm)
- 앞에서 기술한 70, 110 mm 두께 단조블록의 전자빔용접 시험편 검사를

위해 직경 5 mm의 측면공 (Side Drill Hole) 및 평저공 (Flap Bottom Hole)을 갖는 표준 교정 시험편을 제작하였다. 표준 교정 시험편을 이용하여 초음파탐상 장비를 교정하고, 전자빔용접 시편 검사에 활용함

검사결과(ASME Sec VIII Div 2 App 9 Art 9-3)

초음파탐상검사보고서
Report of Ultrasonic Testing

시험번호: 179-0029-000002

시험명: 초음파탐상시험

시험일자: 2008. 11. 20

시험장소: 179-0029-000002

시험대상: 70mm 및 110mm 전자빔용접 시편

시험방법: 수직탐상

시험결과: 합격

시험자: [인사]

승인자: [인사]

초음파탐상검사보고서
Report of Ultrasonic Testing

시험번호: 179-0029-000002

시험명: 초음파탐상시험

시험일자: 2008. 11. 20

시험장소: 179-0029-000002

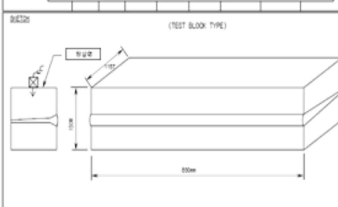
시험대상: 70mm 및 110mm 전자빔용접 시편

시험방법: 수직탐상

시험결과: 합격

시험자: [인사]

승인자: [인사]



[그림4-28] 70 mm 및 110 mm 전자빔용접 시험편 초음파 검사 결과

- 차폐블록 본제품 모사용 표준 교정 시험편 제작 및 적합성 검증을 수행하였으며, Manual UT 시험 방법으로 45도 탐상 검사, 60도 탐상 검사, 위상 배열법이 수행됨

☞ 요약하면, 차폐블록 전자빔 용접부 건진성평가를 위해 직경 5 mm의 편측공과 편저공이 삽입된 표준교정시험편을 제작/초음파장비 교정 등을 통해 시험편 검사, 적합성 검증을 수행함. 그 결과 전자빔용접부에 발생 가능한 결함 형태를 고려해 불 때 단조재 제질 관리, 적절한 탐촉자 선정 등을 통해 코드에서 규정하는 결함을 초음파검사라도 검출 가능할 것으로 판단됨

3) 블랑켓 차폐블록 핵심기술의 주요 성과 요약

- 블랑켓 차폐블록 전자기해석 기술력은 '08년 착수한 블랑켓 전자기력 계산 벤치마킹 업무를 기반으로 보다 향상된 설계해석 능력을 보유하기 위한 연속 업무를 성공적으로 수행함
- 계산결과 검증을 위한 Complementary Output 획득용 ANSYS Macro 코드를 작성하여 그 결과를 ITER 국제기구에 제출하였으며, 최종 결과물은 ITER 문서관리 시스템에 등록되어 있음
- 수행된 결과물들은 국내외 학회 및 학술지 게재, ITER 국제기구의 각종 기술회의에서 발표되었음
- 70mm 및 110mm 두께 단조블록의 전자빔용접, Front Header Lid, Plugging 등의 용접기술은 블랑켓 차폐블록 설계가 변경되어도 대부분 적용되어야 할 기술 분야이며 1단계 시작 당시 기술개발에 착수하여 성공적인 용접기술력을 확보함
- 용접부 검사 코드 후보 중 하나인 ASME Sec. VIII, Div. 2에 근거하여 두꺼운 차폐블록 용접부 검사를 위한 초음파검사 표준 교정 시험편을 제작하고 이에 대한 적합성 검증을 성공적으로 수행함
- 블랑켓 차폐블록 설계 및 해석 기술은 DEMO, 상용 핵융합로 플라즈마 대면부품 개발에 직접적으로 활용이 가능하며, 타 발전시스템 및 각종 고온·고속 중성자 환경하의 장치 개발 등의 산업으로 연결이 가능할 것임
- 차폐블록에 이용되는 각종 제작기술들은 최첨단 기술로 각종 첨단부품 및 시스템 제작에 응용되어 활용 가능할 것으로 판단됨

4 블랑켓 차폐블록 중요 논문

- 블랑켓 차폐블록 1단계 주요 성과 중 핵심기술, 조달약정 외 대표적 정량적 성과로 [표4-8]의 논문을 들 수 있음

[표4-8] 블랑켓 차폐블록 1단계 중요 논문

논문명	내용
Eddy Current Induced Electromagnetic Loads on Shield Blankets during Plasma Disruptions in ITER: A Benchmark Exercise, Fusion Engineering Design (85)	<ul style="list-style-type: none"> - 전자기해석은 블랑켓, 디버터, 진공용기 등 핵융합 핵심부품 설계를 위해서는 반드시 확보해야할 중요 기술임 - 전자기력 벤치마킹 과제 수행을 통해 블랑켓, Attachment 설계를 위한 설계 해석 기반을 확보함 - DINA에서 계산된 플라즈마 운전 시나리오에 따른 MD, VDE 등의 비정상 운전 하에서 블랑켓에 발생하는 하중을 상용 프로그램을 이용하여 계산할 수 있는 체계를 구축하였음

5 블랑켓 차폐블록 정성적 기술성과 분석

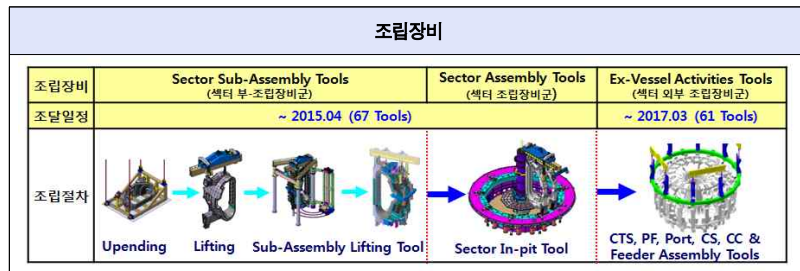
- 블랑켓 차폐블록은 KSTAR에서 적용되지 않은 기술로서, 향후 상업적 핵융합로를 건설하기 위해 필요한 기술이라 판단되어 참여를 하게 되었으며, 현재 한국과 중국 두 나라가 조달에 참여를 하고 있음. 현재 한국의 기술이 중국보다 한 단계 기술력이 앞서있다고 판단됨
- 블랑켓 차폐블록 기술개발 초창기에는 2001 설계를 기준으로 착수하였으나 2007 ITER Design Review에 따른 재설계가 요구되어 2008년 다시 개념설계를 착수, 예비설계를 수행하고 이를 기반으로 제작, 시험기술, 요소기술 연구 등을 1단계에서 실시함
- 1단계 주요 성과로는 전자기해석, 열수력, 중성자 해석 등 각종 설계 해석 기술 등은 향후 핵융합발전소 건설을 위해 필요한 핵심기술이며, 1단계 기술개발 성과 중 가장 중요한 기술성과라고 볼 수 있음

- 우리나라는 블랑켓 개발에 후발 주자로 참여하였으나, 그 동안 적극적인 참여 및 활동을 통해 관련 국내 산업체, 설계 엔지니어링 업체, 연구소 등이 관련 설계 및 제작 기술을 상당히 축적하였음
 - 우리나라는 블랑켓 조달에 타 공동 조달국에 비해 늦게 참여함으로 설계 및 해석 업무 등에 다소 기술격차는 있으나 적극적인 설계 개발 활동 참여를 통해 관련 기술들을 축적 중에 있으며 조달 완료 시 공동 조달국의 기술격차는 해소될 수 있을 것으로 판단됨
- 중성자해석 분야는 향후 TBM 프로그램 등을 통하여 핵심기술 확보가 가능할 것으로 판단됨
 - 원자력 분야에서의 축적된 지식과 향후 TBM, DEMO 프로그램을 통해 확보 가능할 것으로 판단됨
- 한 개의 블록제작 시 소요되는 비용이 고가이므로 제작 실패 시 부담이 큰 편이라 어려움이 있으며, 국내에는 대형 진공부품을 제조해 본 업체가 많지 않기 때문에 업체선정 시 제조가능성을 꼼꼼하게 챙겨보아야 하는 어려움이 있음
- 중성자 조사는 화학적, 전기적, 자기적, 기계적 특성을 포함하는 다양한 물성의 변화를 일으킬 수 있으며, 중성자 조사에 의해 생성되는 점결함은 미세 구조적 특성에 직접적으로 영향을 미쳐, 재료의 강도 및 연성 등의 기계적 성질을 변화 시키므로 중성자가 재료에 미치는 영향에 대한 연구가 중요함

4.5. 조립장비류

1. 조립장비 기술 개요

- 조립장비는 조립 대상물 기준으로 Sector를 조립하는 Sector Sub-Assembly 장비, 9개의 Sector를 Torus 구조로 조립하는 데 사용하는 Sector Assembly 장비와 Cryostat, Cryostat Thermal Shield(CTS), PF Coil, Port & Piping, Central Solenoid(CS), Correction Coil(CC) & Feeder등을 조립하는데 사용하는 전용 조립장비들로 구성되어 있음
- ITER 주장치를 조립하기 위한 전용장비인 조립장비는 아국에서 조달할 조립장비는 총 128종으로 우리나라의 100% 조달품목이며, 조달범위는 ITER 조립장비의 예비설계, 상세설계, 제작 및 검사, 시험 및 현지 설치 지원을 포함하고 있음
- ITER 조립장비는 2014년에 제작에 착수하여 2015~2017년에 걸쳐 ITER 장치의 조립적기에 지속적으로 조달해야 하며, 조립장비의 설계는 ITER 장치의 해당 조립대상물의 상세설계가 완료된 이후 최종 확정될 수 있으므로 설계기간이 많이 소요됨
- 따라서 조립 대상물의 조립시기에 맞추어 조달시기를 1, 2차분으로 분류하고 각각의 조달분에 대해서 설계, 제작, 검사, 운송, 현지 설치 지원 등을 수행할 계획임
 - 1차 조달분 조립장비 : 섹터 부-조립장비군, 섹터 조립장비군 (67종)
 - 2차 조달분 조립장비 : 섹터 외부 조립장비군 (61종)



[그림4-29] ITER 조립장비

2. 조립장비 핵심기술

■ 조립장비 핵심기술 및 정의

- [표4-9]는 도출된 조립장비 핵심기술과 각 핵심기술을 세분화한 핵심요소기술을 나타내었고, 각 기술의 정의를 간략하게 설명함

[표4-9] 조립장비 핵심기술

■는 핵심기술 (○는 핵심요소기술)	기술 정의
■ 조립장비 설계 기술	- 조립의 정확성 및 안전을 위한 조립장비 설계기술
○ 대형 구조물용 조립장비 설계 및 해석 기술	- 축소 모형 제작 및 구조/공정 해석 기술
○ 정밀 정렬기구 설계기술	- 부품의 이동 및 조립절차를 고려한 조립장비 설계 기술
○ Safety 설계 기술	- IO의 Safety 기준에 맞게 조립장비를 설계하는 기술
■ 조립장비 제작 기술	- 대형 고중량의 부품을 조립하기 위한 조립장비 제작 및 시험 기술
○ 조립장비 제작 및 시험 기술	- 조립장비 제작을 위한 제작 및 시험절차 개발
○ Mock-up 제작 및 시험기술	- 조립장비의 기능 및 구조적 안정성을 검증하기 위한 Mock-up 제작 및 시험 기술

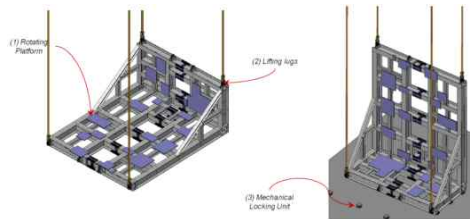
■ 조립장비 설계기술 성과 중점정리

● 조립장비 설계 및 해석 기술

- 조립 장비의 전체 128종에서, 선행 조달품목인 섹터 부-조립 및 섹터 조립 장비에 67종에 대한 예비설계를 완료하였다.

[Upending Tool 설계]

- Upending Tool은 조립 대상물을 수평상태에서 수직상태로 회전시키는 기능을 함
- 이 장비는 회전 플랫폼, lifting lug, mechanical locking unit 으로 이루어져 있고, 회전 플랫폼은 조립 대상물의 하중을 지지하는 기능을 함
- Lifting lug는 shackle과 sling과 같은 공용 장비들을 이용해 크레인에 연결된다. Mechanical locking unit은 회전 플랫폼을 고정하는 기능을 가짐
- [그림4-30]은 Upending Tool의 구성을 보여줌

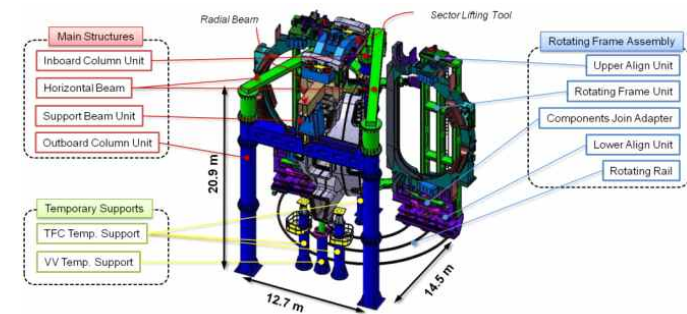


[그림 4-30] Upending Tool의 구성

[Sector Sub-assembly Tool 설계]

- Sector Sub-assembly Tool은 VV sector, VVTS sector, VVTS port-shroud, TF coil등을 조립 단위로 만들기 위해 통합하는 조립장비임
- 이 장비는 main structure, rotating frame assembly, temporary support 들로 구성되어 있음

- The main structures 는 2개의 outboard column과 horizontal beam, 1개의 inboard column, support beam으로 구성되어 있음
- Support beam 은 40도 섹터가 토카막 Hall로 이동될 때 간섭되지 않기 위해, toroidal 방향으로 움직일 수 있음
- Rotating frame assembly는 rotating frame unit, main structure, 상하부 aligning unit, component joint adapter, rotating rail로 구성됨
- Temporary support는 안쪽과 바깥쪽에 설치된 VV temporary support, TFC temporary support로 구성됨

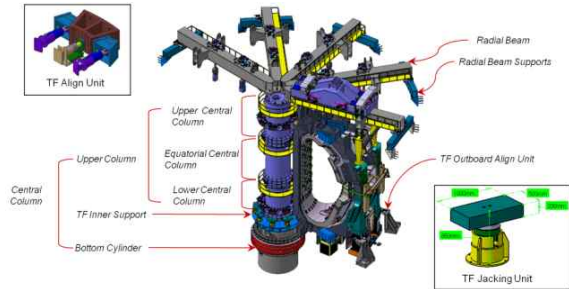


[그림 4-31] Sector Sub-assembly Tool의 구성

[In-pit Sector Tool 설계]

- In-pit Sector Assembly Tool은 하나의 Central column, 9개의 Radial Beam, 9개의 Radial Beam Support, 그리고 1세트의 TF Outboard align unit으로 구성되어 있음
- Central column은 TF coil 조립, 정렬 시 조립기준이 되고, TF OB align unit은 TF coil을 정렬함
- 각각의 Radial Beam은 VV섹터의 하중을 지지하고 정렬하고, Bioshield 벽면에 설치되는 Radial Beam Support는 Radial Beam의 바깥 쪽의 하중을 지지하는 기능을 함

- 이러한 기능을 요약해보면, In-pit Sector Assembly Tool은 토카막 Hall 안의 40도 섹터를 지지, 정렬, 안정화시키는 기능을 하며, [그림 4-32]는 In-pit Sector Assembly Tools의 구성을 보여줌



[그림 4-32] In-pit Sector Assembly Tools의 구성

● Safety 설계 기술

- ITER 조립장비 1차 조달분에 대한 설계를 위해 안전 관련 EU Machinery Directive를 적용함
- 또한, CE Marking에 필요한 기술문서 작성에 대한 요건들의 검토, 위험성 평가 및 보고서 작성, 적용 EN 규격 선정 그리고 EU Machinery Directive에 따른 적합성 평가 보고서 작성을 수행하였음
 - 1차 조달분 조립장비에 대한 EU Machinery Directive 및 기타 해당 지침 적용하여 조립장비 설계
 - EU Machinery Directive에 따른 CE marking에 필요한 기술문서 작성
 - EU Machinery Directive에 따른 위험성 평가 및 적합성 평가 보고 작성

■ 조립장비 제작기술 성과 증점정리

● 조립장비 제작 및 시험

- ITER 조립장비에 사용되는 주재료인 SM490YB 후판 소재에 대한 최적의 개선형상, 용접조건 등의 선정 및 인양 조립장비의 Lug부 최적형상을 결정하기 위해서 용접 강도시험을 AWS D1.1에 의거하여 시험을 실시하였으며, Joint 특성시험 결과인 최적 용접절차를 본 제품 제작에 적용할 계획임
- ITER 조립장비는 대형 용접 구조물로서 큰 하중이 가해짐. 그러므로 우선적으로 구조물재료(SM 490YB)의 기계적특성(인장강도, 항복강도, 연신율 등) 및 용접특성을 시험하여 사용 목적 및 사용 조건에 적당인가를 파악하여 과도한 변형이나 파괴가 일어나지 않도록 설계 및 제작에 주의할 기울여야 함

[Mock-up 제작 및 시험기술]

- ITER 조립장비군 Mock-up 제작은 조립장비군 제작의 예비도면 및 CATIA Model을 근거로 각 형상 및 조립에 필요한 기능에 대해 검토함
- 제작도면은 “Technical Specification of ‘Manufacturing of ITER Sector Assembly Tools’_Doc. No: IT-PD-410-10/00019”의 제작도면 작성 프로그램 항목의 요건에 의하여 CATIA V5를 이용하였으며, ITER 기구에서 제공한 CATIA Manual에 준하여 제작도면을 작성함
- ITER 조립장비군 본 제품의 제작에 앞서 1/5 축소형 Mock-up의 제작을 통해 조립과정에 필요로 하는 조립위치 조정장치의 기능성 검토와 제작성 검토, 제작절차 및 조립공정을 확립하고자 함
 - 이러한 위치조정 장치의 성능 테스트 및 작동성을 검토하여 상세설계에 반영하며, 또한, 기능성 부품의 사용은 본 품 1/5 축소에 가장 근접한 사양의 부품을 선정하여 적용함
- Mock-up 제작 및 시험은 제작도면을 근거로 승인된 절차서와 일정에 따라 제작하고 시험을 실시하였으며, 시험에서 발견된 문제점을 보완하여 Mock-up을 수정하고 보완하여 재시험을 수행함

- Mock-up 제작 및 시험은 ITER 기구의 설계검토의 검증 자료로 활용하기 위해 예비설계 검토회의 이전에 수행하여 완료하였음

○ ITER 조립장비군 1/5 축소형 Mock-up 대상 조립장비는 [그림4-33]과 같음



[그림4-33] 1/5 축소형 Mock-up 대상 조립장비

③ 조립장비 핵심기술의 주요 성과

- 대형 핵융합 장치 조립분야의 기술 개발에 성공, 핵심기술인 정밀조립 기술, 조립장비 설계 및 제작기술을 확보하여 핵융합로를 건설할 수 있는 자립 기반에 성공함
- 조립장비 설계 시 IO에서 제공한 조립장비 개념설계 CATIA Model, 설계 입력 자료 등 IO 공식문서를 상세하게 분석하고 IO에 보안을 요청하여 조립장비의 설계 변동성을 줄이는 성과를 보임
- 조립장비 핵심기술 개발로 인해 심도 있는 접근 및 확보가 가능하고, 기술 이해로 인한 핵융합 상용화에 필요한 조립기술을 조기에 확보하는 성과를 올림

④ 조립장비 추진 경위

■ 조립장비 조달약정

- '09.08월 ITER 기구와 공동으로 조달약정을 위한 기술사양서를 작성하였으며, 조달약정 기술 사양서의 문서체계는 조달에 관한 일반사항을 기술한 Main 문서와 관리적인 측면을 기술한 Annex A 그리고 기술사양을 기술한 Annex B로 구성됨
- 조달가치 할당표(CAS)에는 우리나라가 조달해야 할 조달품목에 대해서 그룹별로 각각의 조달가치가 할당되었으며, Annex B의 Appendix 1은 우리나라가 조달해야 할 128품목의 조립장비와 품질등급, Annex B의 Appendix 2는 조립장비의 개념설계 자료로 이는 우리나라가 제출한 개념설계 용역결과를 기초로 작성된 문서, Annex B의 Appendix 3은 조립장비 중에서 인양장치에 대한 성능 및 기능 검증을 위한 프랑스 시험규정, Annex B의 Appendix 4는 일반기계류에 대한 설계요건을 기술하고 있음
- 조달약정 후속 이행문서인 품질보증/위험관리 계획서를 작성하고 이를 ITER 기구에 제출하였음

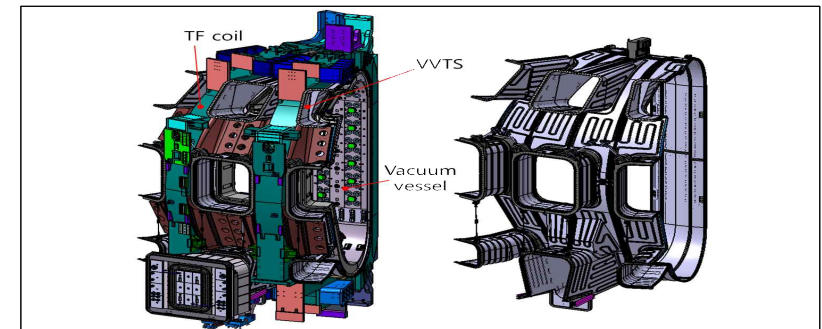
5] 조립장비 정성적 기술성과 분석

- 조립장비는 전체적으로 128종이며, 1차 조달분은 67종, 2차 조달분은 61종임. 조립장비 설계를 위해서는 대상물인 토카막의 기본설계 형상, 운반상태, 핸들링 포인트, 조립절차(분석, 조립 등) 등을 ITER 국제기구로부터 송부 받은 다음 설계를 수행하고 있음
- 1단계 주요 성과로는 대형 조립중 장비의 설계기술과 장비를 들 수 있으며, 이유는 대형 고중량의 구조물을 정밀한 단위로 설계하는 기술이 상당히 까다롭고 어려운 기술이기 때문임
- 설계가 바뀌면 조립장비의 설계, 절차 등이 다 바뀌게 되어 리스크가 큰 편이며, 특히 대형 조립중이 비용문제로 인해 리스크가 크기 때문에 기술 개발에 어려움이 있음
- 특히 조립장비는 ITER 장치와 유사한 KSTAR 장치 건설을 통한 기술축적으로 한국의 산업체 인프라 또한 좋은 편이라고 볼 수 있음
- 또한 조립장비 분야는 선진국과 동등한 수준의 기술을 확보하고 있으나, ITER 장치는 KSTAR 장치에 비해 초대형이므로 국내 연구기관 및 산업체가 협력하여 핵심기술인 조립기술, 정렬기술, 내진설계 기술 등의 제작기술에 확보하여 향후 국내 핵융합 상용로 건설에 활용 될 수 있을 것으로 판단됨

4-6. 열차폐체

1] 열차폐체 기술 개요

- 진공용기 열차폐체는 inboard, outboard, 포트 열차폐체로 구분되며, inboard는 두 개의 10도 섹터와 하나의 20도 섹터로 구성됨. 포트 열차폐체는 outboard에 부착되며, outboard는 4개의 10도 섹터로 구성됨
- 열차폐체는 플라즈마의 거동에 의해 발생하는 전자기 하중을 줄이기 위해, 토로이달 방향으로 18개 섹터 단위로 절연되어 있고, 열차폐체 상/하부 폴로이달 방향으로 절연되어 있으며, Inboard와 Outboard에 부착된 지지구조물에 의해서 지지됨
- 열차폐체는 진공용기 외벽, 내벽, 포트 및 포트 확장 연결부, 냉각관과 상온-고온관, Thermal anchor와 같은 주변 상온상태의 열원으로부터 4.5K에서 작동하는 초전도 코일과 구조물로의 열복사, 열전도를 최소화 시켜야 하며, 핵융합로의 자중지지구조물로부터의 열전달도 제한할 수 있어야 함
 - 전체 표면적 10,000 m², 최종 조립된 후 최대 높이 25 m
 - 패널 두께: 20 mm (진공용기열차폐체), 10 mm (저온용기열차폐체)
 - 주재료: 스테인리스강 304LN
 - 표면 방사율: 0.05
 - 총 무게: 약 900 톤



[그림4-34] 열차폐체

2 열차폐체 핵심기술

■ 열차폐체 핵심기술 및 정의

- [표4-10]에 도출된 열차폐체 제조에 필요한 핵심기술과 각 핵심기술을 세분화한 핵심요소기술을 나타내었고, 각 기술의 정의를 간략하게 설명함

[표4-10] 열차폐체 핵심/중요기술

■는 핵심기술 (○는 핵심요소기술)	기술 정의
■ 열차폐체 설계기술	- 핵융합로 계통의 기능을 수행할 수 있도록 기기설계 개념을 설정하고, 설계특성을 분석하여 열차폐체 설계 및 제작에 필요한 설계 자료를 생산하는 기술
○ 구조 및 열해석 기술	- 열차폐체의 구조설계, 3D CAD 및 전산구조해석, 열유동 특성 분석 기술
○ 상세 설계 기술	- 열차폐체 설계 및 제작에 필요한 상세설계 기술
■ 열차폐체 제조기술	- 핵융합로용 열차폐체 정밀 제조기술
○ 대형구조물 정밀제작기술	- 20m 이상 되는 대형구조물을 좁은 공간에서 다른 구성품과 간섭되지 않도록 제작하는 기술
○ 대형구조물 온도급기술	- 10m 이상의 대형구조물 표면에 균일하게 온도를 도급하는 기술
○ 대면적 표면검사기술	- 온도급된 표면을 공정중이나 공정후 검사할 수 있는 기술

■ 열차폐체 설계 기술성과 중점정리

● 구조 및 열해석 기술

[구조해석]

- (기술개요) 열차폐체의 구조적 안정성 및 설계를 검증하기 위해 구조 해석을 수행함
 - 구조적 안정성 검증을 위해 ASME 압력코드에 따라 구조해석을 수행하였으며, 쉘요소를 사용한 global 모델과, 3차원 요소로 이루어진 국부 상세 모델을 개발하고, 단성해석, 모드해석, 좌굴해석, 피로해석 등의 수행을 통하여 최종설계가 평가기준을 만족시킴을 검증하였음
- 열차폐체 해석은 ASME 압력용기 코드를 따름. 열차폐체의 설계는 하중 Category I과 Category II에 대해서는 ASME VIII division 2에 따라 진행되었고, Category III에 대해서는 서브 섹션 NC에 따라 진행되었으며, 하중 조건에 따라 구조설계에 적용된 기준은 아래와 같음
 - 시험 조건 : 응력 한도에 대한 기준 ASME VIII, division 2, AD-151.2 (for pneumatically tested vessels, as it is more conservative)를 따름
 - Category I, II : 응력 한도에 대한 기준은 type A 하중 조건 또는 지진하중이 추가되는 경우에 대해 ASME VIII, division 2를 따름
 - Category III : 응력 한도는 ASME III, subsection NC, Article NC-3217에 따름. 특히, service level C 인 category III 하중에 대해서 적용됨
- 열차폐체의 허용 응력 범위는 아래의 [표4-11]에 표시되어 있음

[표4-11] 열차폐체 설계 허용 응력 기준

Category	Test	I, II	I, II included seismic loads	III
Pm	0.8 Sy	Sm	1.2 Sm	1.2 Sm
PL		1.5 Sm	1.8 Sm	
Pb		1.5 Sm	1.8 Sm	1.8 Sm
Pm+ Pb	Note 1	1.5 Sm	1.8 Sm	1.8 Sm
PL+ Pb		1.5 Sm	1.5 Sm	1.8 Sm
PL+ Pb+ Q		3 Sm	3 Sm	3 Sm **
PL+ Pb+ Q + F		Sa	Sa	Not required

○ 구조해석의 수행 단계

- 열차폐체 구조해석 방법에 대한 검증 수행
- Sub-modeling 기법에 대한 문제점 발견 및 보완 해석 수행
- 설계 변경에 따른 FE 모델 수정 완료
- ITER 열차폐체 하중조건을 적용한 재해석 수행 완료
- 해석보고서 작성 수행

[열해석]

○ (기술개요) 초전도자석으로의 열부하 계산을 위해 열해석을 수행함

- 열차폐체로부터 초전도자석으로 전달되는 복사열을 계산하여 허용조건을 만족시킴을 검증하기 위하여 열해석을 수행하였으며, 열해석을 통해 토카막 운전 시 패널에서의 온도 분포를 해석하고 열차폐체 최종설계가 복사열 허용기준을 만족시킴을 검증하였음

○ 열차폐체의 패널에는 냉각튜브가 부착되어 80 K의 기체헬륨이 저온플랜트에서 공급되어 튜브내부를 흐르고 있음. 이 자석으로 전달되는 복사열은 최대 허용치가 정의되어 있는데, 튜브 라우팅이 적절히 설계되었는지에 대해 열해석을 수행하여 검증함

○ 열해석 요구조건

- ITER 국제기구에서 발행한 SRD (System Requirement Document)에 규정되어 있음
- 열차폐체로 유입되는 총 열부하는 플라즈마 운전 조건 (POS)에서 300 kW 이고 총 유량은 2.7 kg/s로 규정되어 있으며, 이는 저온플랜트의 운전 조건으로부터 도출된 값들임
- 자석으로 전달되는 최대 허용 열부하는 2.2 kW인데, 전도 열부하 300 W 를 뺀 나머지가 복사열부하 값, 1.9 kW임

○ 열해석의 수행 단계

- 열차폐체 열해석 방법에 대한 검증 수행
- 패널, 연결부 통합해석 수행을 통한 기존해석의 문제점 발견 및 보완 해석 수행

- 최종 설계변경 사항을 반영하여 FE 모델 수정 완료
- ITER 열차폐체 열하중 조건을 적용한 재해석 수행 완료
- 해석보고서 작성 수행

○ 열해석 결과

- 열차폐체로 유입되는 총 복사열부하 값은 ITER 국제기구 Cryoplant 그룹에서 규정한 값보다 작았음
- 또한, [표4-12]의 헬륨 유량과 같이 열차폐체 냉각에 필요한 헬륨의 총 유량도 Cryoplant 그룹에서 규정한 값보다 작았음
- 초전도자석으로 가해지는 열부하는 [표4-12]의 자석으로의 열부하와 같이 열차폐체 시스템 요구조건 문서 (SRD: System Requirement Document)에서 규정한 값보다 작았음
- 따라서 본 열해석으로부터 ITER 열차폐체의 열적 성능이 검증되었음

[표4-12] 열차폐체 열적 성능 검증

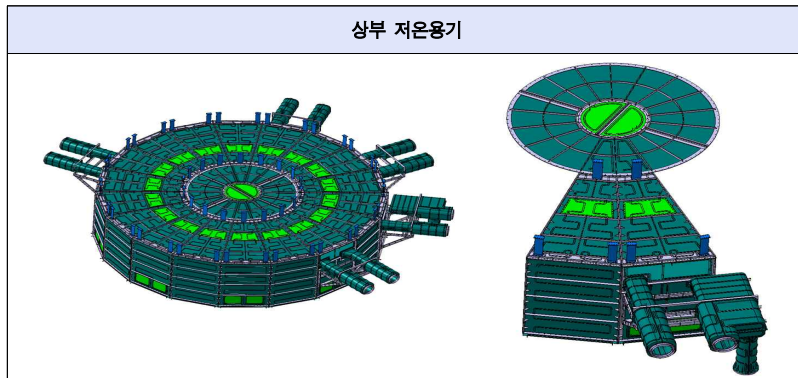
헬륨 유량		자석으로의 열부하	
Mass flow rate to TS under POS (g/s)		Heat load to magnet [W]	
UCTS	163.04	POS	BCS
VVTS	1617.48	VVTS inboard	100.75 205.36
ECTS	475.74	VVTS outboard	427.32 923.4
STS	45.18	ECTS	429.12 645.66
LCTS	128.94	UCTS	282.82 282.82
Total	2428.38	LCTS	253.32 253.32
Allowable in IS	2770	STS	45.00 45.00
Allowable in Annex B	2700	Labyrinth	139.90 139.90
		Total	1678.23 2495.46
		Requirement in SRD	1900 3400*
		* PDR requirement	

● 상세설계 기술

- (기술개요) 열차폐체는 진공용기 열차폐체(VVTS), 저온용기 열차폐체(CTS), 구조물 열차폐체(STS)로 나뉘며, 저온용기 열차폐체는 상부 저온용기 열차폐체(UCTS), 중앙부 저온용기 열차폐체(ECTS), 하부 저온용기 열차폐체(LCTS)로 구성됨

[상부 저온용기 열차폐체 설계]

- 상부 저온용기 열차폐체 (UCTS)는 lid와 실린더로 구성되며 저온용기 lid에 연결되어 지지됨
 - UCTS는 저온용기 내벽에서 방출되는 복사열로부터 초전도자석을 보호하는 역할을 함. UCTS의 패널과 프레임은 볼트 조인트로 연결되어 self-standing 구조물을 형성하며, 패널의 기본 형상은 평판 또는 실린더로 단순하며 냉각튜브가 패널 표면에 부착됨



[그림4-35] 상부 저온용기 열차폐체

- 상부 저온용기 열차폐체 패널
 - ITER 국제기구 설계 통합 section에서 요구한 유지보수 조건을 기반으로 UCTS 패널의 일부분을 분리하는 방식을 고안함
 - 40도 섹터마다 2개의 사각형 탈부착 패널이 있고, 이 탈부착 패널은 자석 방향 (안쪽)으로 분리되도록 설계하였음. 탈부착 패널의 표면에는 handling을 쉽게 하기 위해 나사산이 있는 welded nut을 부착함

○ 상부 저온용기 열차폐체 연결부

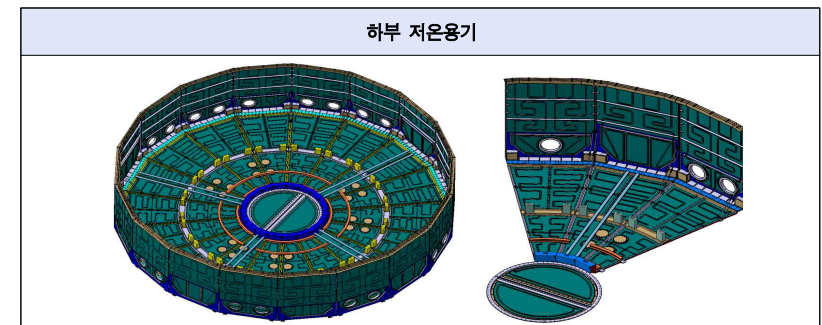
- UCTS의 연결부는 총 6 종류가 있으며, 볼트와 너트는 SS316L 재료에 M16 규격을 사용하고 피치는 100 mm임
- 풀림 방지를 위해 볼트와 너트사이에 tack-welding을 실시함

○ 상부 저온용기 열차폐체 지지대

- UCTS의 판 지지대는 저온용기 lid와 연결되어 지지됨. 판 지지대는 티타늄 합금으로 제작되며, 20도 섹터마다 3개의 지지대가 부착되며, 판 지지대는 인장 힘을 받으며, 열수축이 발생할 때, 중심방향으로 휘어짐
- 자석 피더 shroud의 지지구조물은 프레임 단면의 치수는 상용 채널의 치수를 고려하여 정하였으며, 이 구조물은 pit에서 UCTS 실린더와 조립됨. 또한 프레임과 프레임이 직각으로 만나는 부분은 브래킷을 부착하여 구조 안정성을 높임

[하부 저온용기 열차폐체 설계]

- 하부 저온용기 열차폐체(LCTS)는 실린더와 바닥 패널로 구성되며 저온용기 바닥에 평판 지지대로 지지됨
 - 냉각 튜브는 접근성을 고려하여 안쪽 면에 부착되며, LCTS 실린더는 4종류로 구성되며 사각형 모양의 access hatch가 부착되어 있음
 - LCTS 바닥 패널을 조립하기 위해 Access hatch를 통해서 외부에서 패널 조각들이 들어오며, LCTS 바닥 패널은 rail 지지대를 위한 원 모양의 탈부착 패널이 있음

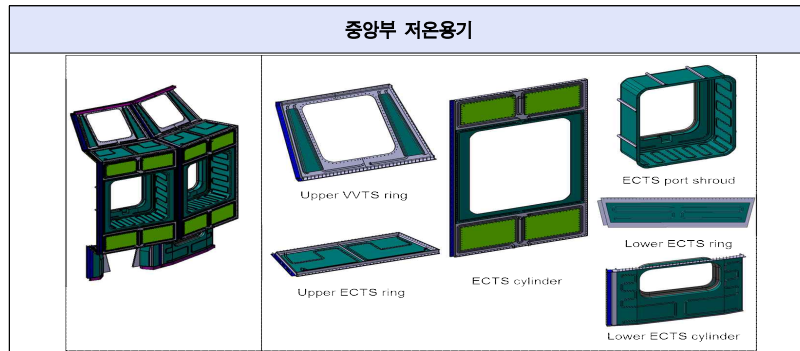


[그림4-36] 하부 저온용기 열차폐체

- 하부 저온용기 열차폐체 패널
 - 예비설계와 비교하여 연결부 설계를 단순화하여 패널의 개수를 줄였으며, Access hatch의 크기는 LCTS 바닥 패널이 통과할 수 있도록 정함. 유지보수용 rail 지지대를 위한 원형 탈부착 패널은 LCTS 바닥에 총 24개가 있음
- 하부 저온용기 열차폐체 연결부
 - LCTS의 연결부는 총 5 종류가 있으며, 볼트와 너트는 SS316L 재료에 M16 규격을 사용하며 피치는 100 mm임. 풀림 방지를 위해 볼트와 너트 사이에 tack-welding을 실시함
- 하부 저온용기 열차폐체 지지대
 - LCTS는 판 지지대를 이용하여 저온용기 바닥에 지지됨. 판 지지대는 티타늄 합금으로 제작되며, 20도 섹터마다 5개의 지지대가 부착됨
 - 판 지지대는 압축 힘을 받으며, 열수축이 발생할 때, 중심방향으로 휘어진다. 실린더 바로 하단에는 두 개의 판이 용접된 dual-plate 지지대가 있음

[중앙부 저온용기 열차폐체 설계]

- 중앙부 저온용기 열차폐체(ECTS)는 아래 [그림4-37]과 같이 6종류의 패널로 구성되며 VVTS와 연결되어 지지되어 있음
 - UCTS와 마찬가지로 PF 자석 유지 보수를 위해 탈부착 패널이 ECTS 실린더에 부착되어 있음(그림의 연두색 표시 부분)



[그림4-37] 중앙부 저온용기 ECTS 부품들

- 중앙부 저온용기 열차폐체 패널
 - Upper ECTS ring과 lower ECTS ring은 구조해석에 의하면 최대 변위가 발생하는 부분이기 때문에 rib를 부착하여 보강을 하였으며, Rib는 패널의 바깥 면에 fillet 용접으로 붙임
 - port shroud 패널은 현장에서 ECTS를 장착할 때, PF 자석 지지대와 간섭을 피하기 위해 패널 모양을 taper지게 변경하였음
 - ECTS 실린더 패널은 제작성을 고려하여 테두리와 패널을 하나의 프레임으로 단순화 하였음
 - Upper VVTS ring은 VVTS upper port 부분과 접하는 패널이며, upper VVTS ring의 높이가 150 mm 만큼 증가하였고, 결과적으로 UCTS 실린더의 높이는 감소하게 되었음
- 중앙부 저온용기 열차폐체 연결부
 - ECTS의 연결부는 총 5 종류가 있으며, ECTS 연결부는 UCTS/LCTS와 달리 조립 공차 흡수를 위해 splice plate가 적용되었고 탈부착 패널 연결부(C)는 UCTS/LCTS와 동일함

[진공용기 열차폐체 설계]

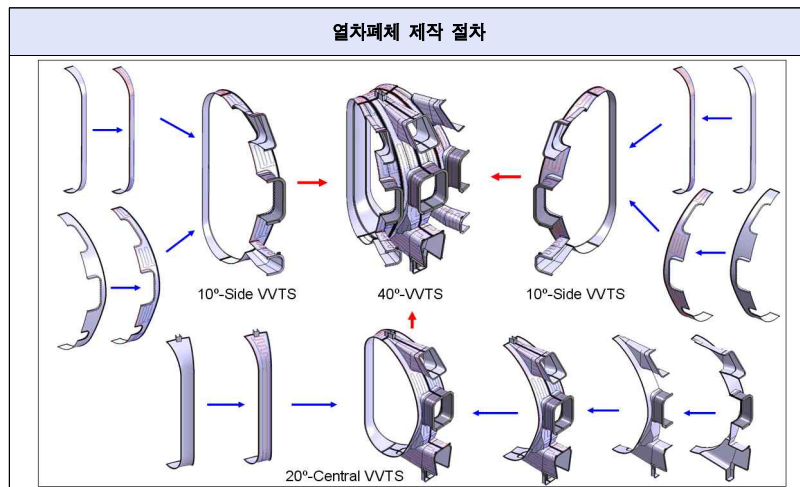
- 진공용기 열차폐체는 Inboard와 Outboard에 부착된 지지구조물에 의해서 지지됨
 - inboard 지지구조물은 Inconel 718로 만들어지며, 스트립 형태임
 - Outboard 지지구조물은 열차폐체 하중의 대부분을 지지하고 있으며, 열수축에 의한 변위를 충분히 흡수 할 수 있도록 양단이 베어링 구조로 되어 있음 포트 지지구조물은 직경 42 mm 의 봉형태로 되어 있으며, 중앙부 포트와 하부 포트를 연결함
 - 진공용기 열차폐체는 초전도자석과 진공용기 사이의 좁은 공간에 설치되므로 정밀한 제작공차가 요구되며, 또한 설치 후에는 유지보수가 불가능하기 때문에 높은 제작 신뢰성이 요구됨
 - 진공용기 열차폐체는 40도 단위로 조립되며, 40도 섹터 간의 조립은 진공용기 내부를 통해서만 접근이 가능함. 40도 섹터 제작공차와 조립공차는 In-pit Joint에서 흡수되도록 설계됨

열차폐체 제조기술 성과 증점정리

● 대형구조물 정밀 제작기술

[제작절차 개발 및 제작성 검증 연구]

- 열차폐체는 정밀한 공차가 요구되는 거대한 stainless steel 구조물로서, 고 난이도의 제작 및 조립기술이 요구되므로 설계 구조, 제작 및 조립에 대한 위험 요소를 최소화하기 위하여 제작 전에 중요한 부품에 대한 성능, 제작 성 및 조립성 등이 검증되어야 함
- 그러므로 열차폐체 설계를 검증하기 위해 제작성 연구를 수행하였으며, 1 단계 기술개발단계에서 제작절차, 조립절차, 시험절차 개발을 완료함
 - 개발된 제작 절차를 검증하기 위하여 R&D를 수행함
 - 제작 착수 이전에 검증이 필요한 냉각패널 모델 제작, 패널과 플랜지의 용접, 냉각라인 용접, 조립 모사 시험, 온도금 등을 수행하였으며, 일부 보완을 거쳐 제작절차 최종 확정함
- 진공용기 열차폐체 40도 섹터의 제작과 가조립 절차는 [그림4-38]과 같음



[그림4-38] 진공용기 열차폐체 제작 절차

○ 열차폐체 냉각패널 모델 제작 및 시험

- 패널에 용접된 냉각튜브의 내구성과 불량발생 시에 수리절차를 개발하기 위하여 다양한 형상의 냉각패널 모델을 제작하였으며, 육안검사, 압력시험, 저온시험, 누설검사 등을 수행함
- 본 시험의 결과, 개발된 용접조건에 따라 작업을 수행할 경우, 2mm의 튜브를 적용 시에 용접불량이 발생할 확률이 없음을 파악함
- 또한, 용접비드의 두께가 2mm 이상을 만족하는 용접조건을 확립함
- 용접을 완료한 후에 77K의 액체질소를 튜브에 통과시켜, 저온 내구성 시험을 수행하였으며, 급격한 온도 차이에도 불구하고 용접부에 균열이나 누설이 발생하지 않음
- 용접부 결함 발생 시에 보수할 수 있는 절차를 개발하여 적용함

○ In-pit Joint 조립 검증모델 제작 및 조립방안 개발

- ITER 진공용기 열차폐체의 경우, 진공용기 내부에서만 접근이 가능하며, 접근할 수 있는 공간이 간격이 매우 협소하고, 거리가 1m 이상인 부분이 존재하여 조립이 어려운 상황임
- 이를 해결하기 위하여 진공용기, 초전도자석 등을 포함하는 조립 검증용 모델을 제작하였으며, 3차원 치수측정 등을 활용한 조립공정을 확립함
- 또한, 확립된 조립공정에 따라 조립 과정을 시연함

○ 진공용기 열차폐체 Bisecting 부 용접 연결용 모델 제작 및 시험

- 열차폐체 온도금 공정의 위험성을 최소화 하고, 온도금 비용을 절감하기 위한 방법으로 최대 크기인 진공용기 열차폐체를 Bisecting하는 공정을 개발함
- 이를 위하여 Bisecting 모형을 제작하여 용접공정을 검증함
- 용접 시에 수축되는 길이를 파악하였으며, 동시 용접공정을 적용함으로써 최종 공차를 만족시킬 수 있음을 검증함.
- 본 목업을 진공용기 열차폐체 내측구간 상하 1 m의 길이만을 제작하였으므로, 향후 12m의 실제크기 목업제작을 통한 검증이 필요함

○ 열차폐체 패널 연결부 제작 및 시험

- 열차폐체 주요 패널 연결부를 제작하여 인장시험, 전단시험, 굽힘시험을 수행하였으며, 이를 통하여 기존 설계의 문제점을 일부 파악함
- 특히, 구조적 강성 유지에 중요한 Pre-tension을 가하기 위해 필요한 토크가 과도한 것으로 파악되어 토크를 감소시킬 수 있는 방안을 마련함

○ 열차폐체 지지구조물 제작 및 시험

- 열차폐체 지지구조물의 목업 제작 및 시험을 통하여 조립성을 검증하였으며, 구조적 강도를 검증함
- 조립성 검증 과정에서 Inboard 구조물의 경우, 현장 조립을 용이하게 하기 위하여 일부 설계 변경함
- Inboard 구조물의 구조시험 과정에서 체결부에 예상치 못한 굽힘응력이 발생함을 파악하였으며, 향후 구조변경을 통하여 보안할 예정임

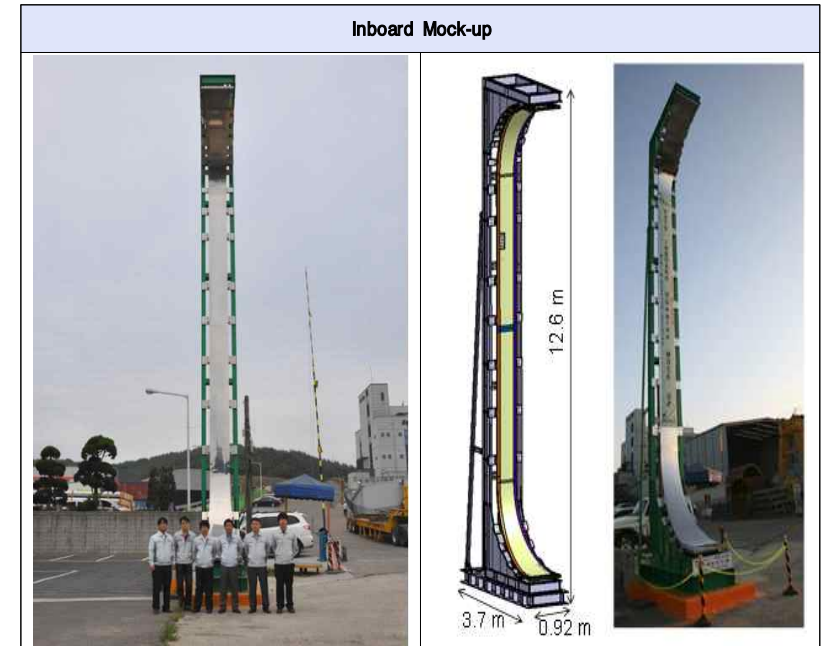
[선행생산품 제작]

- 진공용기 열차폐체 내측 10도 구간 시제품 제작은 본 제품 제작에 앞서 수행되어 향후 발생할 수 있는 문제점을 파악, 개선하여 본 제품 제작 시 발생 가능한 위험도를 줄임과 동시에 제작 공정을 정립함

☞ 주요결과

- 본제품과 크기가 동일한 시제품을 제작하여 은도금 공정을 제외한 모든 제작 공정을 테스트하고 검증함
- 본제품 제작 시 고려해야 하는 사항은 아래와 같음
 - 조립 공차를 맞추기 위해 Side Flange에 Pin Hole을 추가
 - 크기에 비해 두께가 매우 얇아 변형이 생기기 쉬우므로 공장에서 취급할 때, 반드시 지그 필요
 - 섹터간의 조립 시에 볼트 구멍의 단차는 손공구로 쉽게 조정이 가능
 - Side Flange와 패널의 용접 작업을 수평으로 진행할 경우, 어려움이 있음. 추후 용접 지그 설계에서 수평 방향의 용접 작업 배제 필요

- [그림4-39]에서 보듯 실제 크기의 목업 제작을 통하여 최종 검증을 완료하는 성과를 이룩함



[그림4-39] Inboard Mock-up 최종 제작품

● 대형구조물 은도금 기술

[열차폐체 은도금 시험모델 제작 및 시험]

- ITER 열차폐체 은도금 공정을 확립하기 위하여 다양한 시편에 은도금을 수행하였으며, 이를 통하여 최적의 은도금 공정 개발에 성공하는 성과를 올렸으며 검증 시편을 통하여 품질을 확인함
- 은도금의 변색은 열방사율을 높이는 원인이 되므로 변색을 방지하기 위하여 Chromate 처리를 추가하였으며, 시편제작을 통하여 처리시간, 용액조성 등의 조건 확립
- 은도금 불량 발생할 수 있는 조건을 파악하기 위하여 전극의 배열, 시편의 방향 등을 변화시켜 은도금을 수행하였으며, 이를 통하여 불량원인을 파악하였으며, 향후 은도금 육조 상세설계에 반영할 예정임. 또한 전산 해석을 통하여 도금의 두께를 사전에 파악할 수 있는 기술을 적용함.
- 은도금 불량 시에 보수할 수 있는 방법으로 SEM을 적용하였으며, 공정개발을 완료함
- 은도금 대체방안을 연구하기 위하여 은도금된 Sheet를 패널에 부착하는 공정을 개발하였으며, ITER 열차폐체에 적용 가능성을 연구함
- Sheet 부착방법은 기술적으로는 가능한 방법임을 입증하였으며, 향후 상세 비용분석을 수행하여 적용가능성을 파악할 예정임

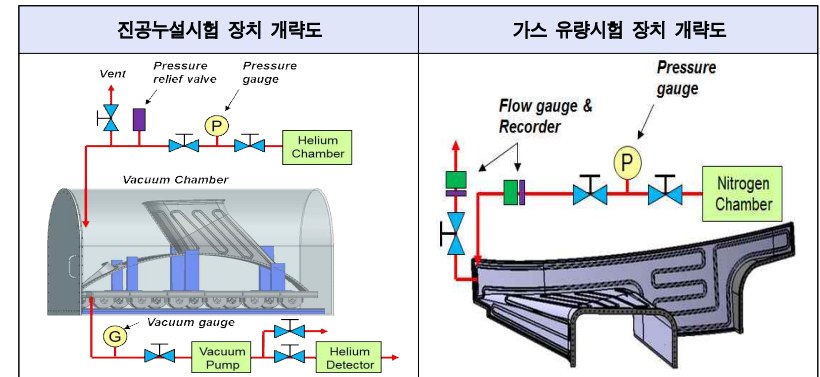


[그림4-40] 열차폐체 은도금 공정 개발

● 대면적 표면 검사 기술

[은도금 전 검사]

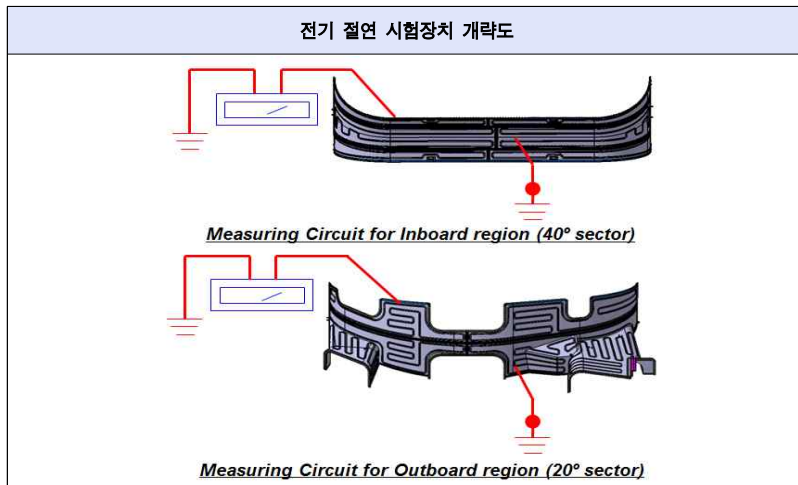
- 은도금 전에 냉각 튜브에 대한 압력 시험, 진공누설시험 및 유량 시험이 실시됨
- 압력시험은 상온에서 냉각튜브를 질소가스로 3.0MPa 가압하고 밸브를 닫아 냉각 튜브를 격리하여 30분 동안 유지했을 때 압력강하가 전혀 없어야 하며, 압력 시험은 열차폐체 전체 외부 면의 육안 검사를 포함함
- 진공누설시험은 압력시험이 완료된 제품에 대하여 적용하고 상온에서 실시하며, 파이프와 파이프의 연결되는 부분은 상온 누설 시험 전에 액체 질소를 이용하여 저온충격시험을 수행하여야 함. 시험은 열차폐체 작동조건과 같은 방향의 압력 구배로 수행함
- 검사할 제품을 진공용기 내부에 설치하고 진공배기를 실시함
 - 열차폐체의 냉각 튜브는 헬륨가스로 3.0MPa까지 가압하고, 진공 펌프 라인에 연결되어 있는 헬륨누설감지기 (He leak detector)를 작동시켜 헬륨 누설량을 측정하며, 최대허용누설량은 1×10^{-9} Pa · m³s⁻¹임
 - 냉각 튜브 내에 방해물이 없는 것을 확인하기 위해 가스 유동 시험을 실시함. 이 시험에서는 최종 승인 전에 각 냉각 튜브의 압력 강하 크기를 확인하는 것도 포함되며 유량은 설계 요구 값보다 커야 함



[그림4-41] 진공누설시험 및 가스 유량시험 장치 개략도

[은도금 후 검사]

- 은도금 후에 냉각 튜브에 대한 압력 시험 및 진공누설시험과 insulation joint 조립품에 대한 전기절연시험이 실시됨
- 냉각 튜브에 대한 압력시험이 질소가스를 이용하여 상온에서 실시되며, 검사조건은 은도금 전 시험과 동일함
 - 시험은 은도금된 표면에 악영향을 끼칠 수 있는 외부 물질, 먼지, scale이 없는 격리된 공간에서 수행되어야 함
 - 진공누설시험은 압력시험이 완료된 제품에 대하여 상온에서 실시되며, 검사조건은 은도금 전 시험과 동일함
- 열차폐체 섹터의 절연 저항을 측정하기 위해 Megger 시험을 시행해야 함
 - Inboard에 대한 시험은 40° sector에 대해 실시하고 outboard는 20° sector에 대해 실시하며, 절연저항 시험을 하기 전에, 모든 표면의 먼지, 오일, 오염물 등을 점검함
 - 열차폐체 sector에 1분 동안 DC 500V가 인가될 때, 누설 전류를 측정하며, 1분 뒤의 최대 절연 저항은 1 M Ω 또는 그 이상이어야 함



[그림4-42] 전기 절연 시험장치 개략도

[3] 열차폐체 핵심기술의 주요 성과

- ITER 열차폐체는 1단계 기술개발 단계에서 개념설계, 예비설계, 상세설계를 완료하였으며, 설계 검토회의에서 최종설계를 승인하였음
- 또한 최종설계를 반영하여 열차폐체의 CATIA 3D Modeling과 2차원 도면 작성을 완료함
- 열차폐체의 구조적 안정성 및 설계를 검증하기 위해 구조 해석을 수행하였으며, 탄성해석, 모드해석, 좌굴해석, 피로해석 등의 수행을 통하여 최종설계가 평가기준을 만족시킴을 검증하였음
- 열해석을 통해 토카막 운전 시 패널에서의 온도 분포를 해석하고 열차폐체 최종설계가 복사열 허용기준을 만족시킴을 검증하였음
- 최종설계 및 제작공정 개발을 완료하기 위하여 용접, 은도금, 연결부, 표면처리 등에 관한 R&D를 수행하였으며, 실제 크기의 목업 제작을 통하여 최종 검증을 완료하였음
- ITER 열차폐체 은도금 공정을 확립하기 위하여 다양한 시편에 은도금을 수행, 이를 통하여 최적의 은도금 공정 개발에 성공하는 성과를 올렸으며 검증 시편을 통하여 품질을 확인함

[4] 열차폐체 조달추진 경위 및 기타 성과

■ 열차폐체 조달약정

- 조달 약정에 필요한 기술사양서 작성, 설계문서 작성과 제작사양 결정 등을 완료하여 '10.05월에 ITER 국제기구와 열차폐체 조달약정을 체결함
- 조달약정에 따라 품질보증 문서, 위험관리 계획서 및 조달 설명서를 작성하여 승인을 하였으며, 한국이 100% 계약으로 조달약정을 체결함
 - 열차폐체 조달범위 및 조달일정 등을 확정하였으며, 제작공차, 시험조건, 은도금 검사기준 등의 주요 사양을 확정하였음
 - 열차폐체의 저온시험을 요구사양에서 제외하였으며, 이를 위하여 관련 보

고서를 작성하였음. 또한 저온시험 제외로 인하여 시험비용, 제작기간 단축의 효과를 얻음

- 목업 제작의 결과를 반영한 제작공차 사양을 제시하였으며, 패널의 두께 공차 등을 확정하는 등 주요 목적을 달성함
- 결과적으로 우리나라가 조달하는데 발생할 수 있는 위험성을 최소화할 수 있는 방향으로 약정이 체결되는 성과를 이룩함

열차폐체 1단계 기타성과

- 열차폐체 1단계 성과 중, 핵심기술, 조달약정 외 기타 성과로 [표4-13]의 인적역량, 산업체 기술력 증진 등을 들 수 있음

[표4-13] 열차폐체 1단계 중요 성과

비고	내용
인적역량 증진	<ul style="list-style-type: none"> - KSTAR때부터 경험축적으로 인해 예비설계의 단계부터 제작단계까지 기술개발이 가능할 정도로 인적역량의 증진을 이루었으며, 현재 DEMO 건설도 가능할 만큼의 기술력을 확보했다고 판단됨 - 또한 ITER의 잘못된 문서도 발견할 만큼 열차폐체 설계분야에서 만큼은 ITER 기구에 있는 사람보다 뛰어난 실력을 보유 중에 있다고 판단됨
산업체 기술력 증진	<ul style="list-style-type: none"> - 현재 산업체 능력이 대체적으로 낙후(문서능력, 절차능력, 커뮤니케이션능력 등)되어 있기 때문에 핵융합상용화를 위해 산업체의 능력을 빨리 끌어올리는 것이 최대 관점임

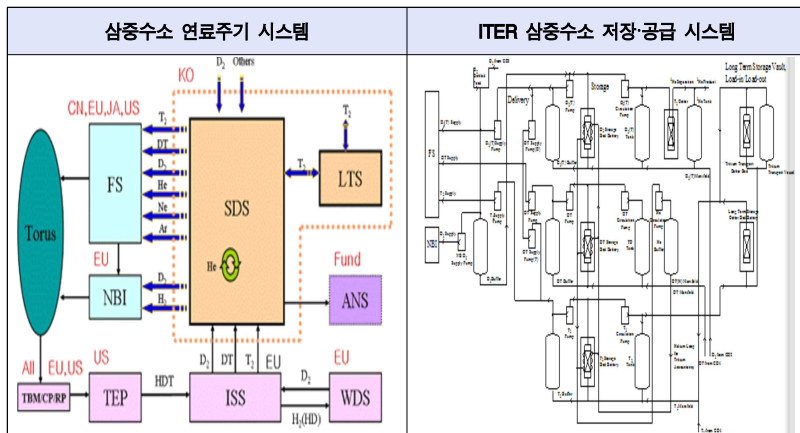
5 열차폐체 정성적 기술성과 분석

- ITER는 한국이 후발국으로 참여하였지만 KSTAR때부터 열차폐체에 대한 연구를 진행하였으며, 현재 전 세계에서 한국의 기술력이 가장 뛰어나며 우리나라가 100% 현물조달하고 있음
- 대형 구조물 도금 공정에는 많은 노하우가 필요하며, 이 분야에서의 기술 수준은 세계적인 수준으로 자부함
- KSTAR 때부터 경험축적으로 인해 예비설계의 단계부터 제작단계까지 기술개발이 가능할 정도로 인적역량의 증진을 이루었으며, 현재 DEMO 건설도 가능할 만큼의 기술력을 확보했다고 판단됨. 또한 ITER의 잘못된 문서도 발견할 만큼 열차폐체 설계분야에서 만큼은 ITER 기구에 있는 사람보다 뛰어난 실력을 보유 중에 있다고 판단됨
- 1단계 중요 성과로는 R&D 목업 제작, 조달약정, 산업체 계약을 들 수 있으며, 본 과정의 수행을 통하여 열차폐체 설계 및 제작기술을 확보함으로써, 대형초전도 토카막 장치에 필수적인 열차폐체 기술의 국산화를 달성하는 성과를 이룩함
- 저온진공용기 상용화에 활용 가능한 열차폐체 핵심기술을 한국의 기술력으로 보유했으며, 추후 핵융합 상용화의 기반기술로 확대될 것으로 기대됨
- 또한 열차폐체 설계 및 제작기술 확보로 향후 초전도핵융합 장치설계 및 제작에 활용될 수 있으며, 기타 대형저온구조물 기술로도 활용할 수 있는 성과를 이룩함
- ~10m 규모의 대형 구조물을 도금할 수 있는 국내 업체는 많지 않은 문제점이 있으며 1단계에서 상세설계까지 끝낸 상태에서 산업체 계약 문제점이 발생도 했기 때문에 성공적인 열차폐체 기술개발을 위해 산업체 육성에 힘을 기울여야 할 필요가 있음
- 현재 국제적인 프로젝트에 필요한 산업체 능력이 대체적으로 낙후(문서능력, 절차능력, 커뮤니케이션능력 등)되어 있기 때문에 핵융합상용화를 위해 산업체의 능력을 빨리 끌어올리는 것이 최대 관점임

4-7. 삼중수소 SDS

1. 삼중수소 SDS 기술 개요

- 핵융합 연료 주기란 토카막 진공용기내의 플라즈마 환경 하에 삼중수소와 중수소가 주입되어 일부가 핵융합 반응을 일으켜 에너지를 생성하고, 핵융합 반응을 일으키지 않은 삼중수소·중수소 가스를 회수, 정제, 분리 및 저장하고, 다시 토카막으로 주입하는 순환 과정을 일컬음
- 그런 핵융합 연료주기의 한부분인 삼중수소 SDS(Storage and Delivery System, 이하 SDS)는 핵융합 연료주기 중에 분리된 삼중수소, 중수소 가스를 안전하게 저장하고, 연료 공급 시스템의 필요에 맞추어 공급하는 계통임
- ITER는 삼중수소를 이용 및 연구하는 기존 시설 대비 50배 이상의 삼중수소 재고량을 취급하며, 삼중수소 공급 유량 또한 전례 없이 큰 값을 요구함
- 삼중수소 SDS는 이러한 ITER의 삼중수소 계량 관리에 있어서 중추적인 역할을 수행하며, 삼중수소 저장용 금속 수소화물 용기는 기존에 개발되거나 사용되어 왔던 유사 품목에 비해, 4배 이상 빠른 삼중수소 공급 성능을 필요로 함



[그림4-43] 삼중수소 SDS

2. 삼중수소 핵심기술

■ 삼중수소 핵심기술 및 정의

- [표4-14]는 도출된 삼중수소 SDS 핵심기술과 각 핵심기술을 세분화한 핵심요소기술을 나타내었고, 각 기술의 정의를 간략하게 설명함

[표4-14] 삼중수소 핵심기술

■는 핵심기술 (○는 핵심요소기술)	기술 정의
■ 저장 베드 제조기술	- 삼중수소 저장을 위한 DU베드의 설계, 제작, 성능검증 기술
○ 베드소재선정 기술	- 핵융합용 삼중수소 저장 소재선정 및 평가 기술
○ 베드 설계기술	- 베드를 구성하는 저장물질, 용기, 배관 등 부품 및 시스템의 설계 기술
■ 삼중수소 SDS 공정기술	- 삼중수소 공급시스템의 공정설계 및 운전 기술
○ 공정설계 및 시뮬레이션 기술	- 삼중수소 공급시스템의 mass 및 heat balance를 시뮬레이션하고 공정설계 및 제작하는 기술
○ SDS 최적운전 기술	- 안정성 및 효율을 고려한 최적운전 기술
■ 삼중수소 SDS Safety 기술	- 삼중수소의 외부방출을 최소화하는 공정 및 운전 기술
○ 삼중수소 Confinement 기술	- 삼중수소의 외부누출을 최소화하기 위한 Glovebox System, Fire Sector 적용 기술
○ 미분진 배출 방지 기술	- 반복운전에 따른 DU 미분진 배출 방지 기술

■ 저장베드 제조 기술성과 중점정리

● 베드소재선정 기술

- 저장재 선정에 따른 비교
 - 저장재 선정을 위한 수소 동위원소 저장재 비교 (ZrCo vs. DU)
- 저장재 선정의 목적
 - 삼중수소 저장재의 장단점 비교 및 선택기준을 제시할 수 있음
 - Tritium Getter Material 선택 시 의견을 제시할 수 있음

[표4-15] 저장재 선정 기준

Getter 선택의 관점	ZrCo Getter Bed	U Getter Bed
FDR 2001 기준	ZrCo 사용 추천	핵물질(RI) 및 Pyrophoricity 문제로 사용 제한
Design Review 2007	ZrCo의 비균화 및 성능 저하로 SDS 설비 복잡	ZrCo 대비 상대적 단순화 장점
Tritium Accountancy	ITER 1:1 Bed 크기로 Tritium Accountancy 정밀성 충족 못함	ITER Requirement 충족시킨다고 주장하지만 정확한 자료 없음
Interface Design	설비 복잡성으로 Interface 복잡 예상	ZrCo 대비 상대적으로 단순
Multi-Bed, Multi-Pump System	Optimal Control Logic 미비	ZrCo와 같음
Safety, Lifetime, Tritium Compatible Equipment	경험 자료 미비 Vacuum Pump (Supply Pump) 선정 곤란	경험 자료 미비 Vacuum Pump에 ZrCo보다 다소 유리

[표4-16] 저장재 비교 주안점

ZrCo Getter Bed 사용	U Getter Bed 사용
<ul style="list-style-type: none"> ○ FDR 2001 추천 ○ ZrCo의 Disproportionation & 성능 (사용범위) 한계로 SDS 설비 복잡 ○ 상대적으로 제작비 및 연료주기시스템 간 Interface 증가 예상 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Design Review 2007 제한 ○ 핵물질 및 Pyrophoricity 문제로 사용 제한 ○ ZrCo 개발기간, 비용 대체할 명분 필요 및 향후 준비, 시간 미흡
<ul style="list-style-type: none"> ○ IO Fuel Cycle (Tritium) Division 과 협력 관계 유지에 문제 ○ ITER Requirement 충족 시까지 시간 소요 <ul style="list-style-type: none"> - CDR 준비까지 기술 확립 부족 - PA까지 Tritium 적용 실험 가능성 없음 	<ul style="list-style-type: none"> ○ U Bed 설계 연구 기간 및 연구비 신규 발생 <ul style="list-style-type: none"> - IO로부터 R&D TA 수용 - 대정부 이해 요청 ○ CDR까지 시간 부족 <ul style="list-style-type: none"> - IO로부터 U Bed 관련 자료 Support 필요 ○ Export Control로 인한 국외 자료 입수에 한계 <ul style="list-style-type: none"> - IO를 통한 자료입수 노력 필요 ○ ITER 1:1 공정실험 구축까지 상당 시간 소요 <ul style="list-style-type: none"> - 실험 준비, Mock-up 제작 등 R&D, 관련 제조업체 준비에 시간, 자금 소요

● 베드설계 기술

- (기술개요) 삼중수소 저장·공급 시스템의 핵심 부품의 하나인 getter bed의 개발 및 운전 방법 개발을 위해, getter bed 설계에 대한 열유체 전산 해석적 연구를 통해, 설계의 타당성 검토와 성능 예측을 수행함

[Thin double layered annulus metal hydride bed 성능 전산해석 및 주요 변수 설계]

- 제시된 thin double layered annulus metal hydride bed의 열전달 성능을 예측하기 위해 열유체 해석용 코드인 CFX를 이용해 전산해석을 수행하였다. 제시된 개념을 적용한 1:1 스케일의 Mock-up Bed를 제작하여 단위공정 성능 시험에 사용하기 위한 준비의 일환으로 In-bed calorimetry 성능에 대한 전산해석을 수행함

1. 1차 용기 열전달 성능 전산 해석

- 1차 용기의 2개의 외벽과, 2중의 흡장재 저장 공간 및 2개의 필터의 열전달 및 분포에 대해 해석을 수행하였음
 - 외벽의 온도를 흡장재의 탈장 온도로 설정하고 내부에 있는 흡장재 및 필터로의 열전달 현상을 모사함
 - 계산 결과 4.3 mm의 흡장재 내에서 약 15 C의 온도 차이를 보여주며, 이는 빠른 탈장을 위해 적합한 열전달 조건으로 판단됨

2. In-bed calorimetry 성능 예측을 위한 전산 해석

- 제시된 Thin double layered annulus metal hydride bed 개념을 적용한 1:1 규모, 즉, 70 g 삼중수소 저장을 위한 1.25 kg의 ZrCo를 주입한 mock-up bed를 SDS의 단위공정 성능 검증에 사용하였음
- Mock-up bed의 제작에 앞서, In-bed calorimetry 성능 예측을 위한 CFX 해석을 수행함
 - 얇은 이중 원통형 ZrCo 층 개념의 Mock-up Bed 1차 용기를 3차원으로 모델링하고 정상 계산 및 비정상 계산을 통해 He loop을 통한 He flow와 ZrCoHx를 포함한 1차 용기 구조물간의 열교환을 예측함

- 삼중수소 붕괴열이 수소흡장재 층에서 발생하도록 모사하고, in-bed calorimetry를 위한 헬륨 가스 채널에 헬륨 유동을 흘리면서, 1차 용기 전체의 온도 변화와 열적 평형 상태를 해석함
 - 해석의 단순화를 위해 붕괴열의 균일한 분포, 1차 용기외부로의 열손실 무시, 헬륨 유동의 층류 및 정상상태의 가정을 함
- 해석 결과 FDR-2001에 제시된 In-bed calorimetry 성능 요건(1g 정확도 8시간 내 달성, 3g 정확도 24시간 내 달성)을 맞추는 것은, 초기온도와 헬륨의 유량, 온도 등이 조합된 특정 조건하에서만 가능한 것으로 판단됨

3. In-bed calorimetry 성능 변수 검증을 위한 변수 분석

- 1차 용기 초기온도(T_i), 헬륨 유입 온도(T_{in}), 헬륨 유량(m)을 변화시키면서 헬륨 유입 온도와 헬륨 유출 온도(T_{out})의 차이(ΔT)가 안정화되어 일정 오차 범위에서 도달하는 시간을 측정함
 - 해석에서는 헬륨 유동이 삼중수소 붕괴열을 100% 회수하는 것으로 가정함
 - 해석 결과 He loop을 통한 헬륨 유동의 압력 강하는 유량에 의해 결정됨
- 시간에 따른 헬륨 입출 온도차의 변화와 재고량기준(40g 삼중수소) $\pm 3g$ 및 $\pm 1g$ 의 오차범위에 도달하는 시간을 측정함
 - 헬륨 유량은 Log scale 온도 변화 곡선의 기울기에 영향을 주고 헬륨 유입 온도 1차 용기 초기 온도는 온도 변화 곡선을 수직 방향으로 이동시키며, 같은 조건하에서는 유량이 클수록 온도 변화 곡선의 기울기가 급해져서 더 빠른 시간 내에 재고량 측정이 가능함
 - 헬륨 유입 온도는 낮을수록 재고량 측정이 빠르지만, 열평형시의 온도차와 초기 온도와의 상관관계에 따른 일정 수준의 낮은 온도가 되면 오히려 재고량 측정 시간이 길어지는 것을 볼 수 있음

[Thin single layered annulus metal hydride bed 성능 전산해석]

- Thin double layered annulus metal hydride bed에 대한 해석적 연구 및 1:1 규모 mock-up bed를 이용한 단위공정 실험을 바탕으로 냉각 공정에 대한 중요성이 확인되었음. 그로 인해 기존 bed 설계에 대하여 냉각 공정 가속화 및 탈장 열전달 성능 개선을 위한 설계 개선을 통해 Thin single

layered annulus metal hydride bed의 개념을 제시함

- 전체적인 열용량의 감소를 위해 기존의 2중으로 구성된 수소 흡장재의 층을 단층으로 구성하고, stainless steel로 제작되는 1차 용기 벽면 내에 가공되었던 헬륨 순환 채널을 흡장재 내부에 삽입되도록 구성함으로써, stainless steel의 부피와 무게를 20% 이하로 감소시킴
 - 또한 탈장열의 흡장재로의 전달을 개선하기 위해 1차 용기외부의 grooving에 단순 클램핑 시켰던 히터를 진공 브레이징을 이용해 접촉함으로써 열전달 효율성을 대폭 향상시킴
 - In-bed calorimetry 성능 향상을 위해 헬륨 가스 채널을 구리를 사용하여 제작하고, 연결부인 stainless steel관과 이중접합을 함
 - 다만, In-bed calorimetry 가스 채널을 저장재에 삽입함으로써, 저장재공간의 두께는 10 mm 로 증가되어, 열전달 효율의 감소가 우려되나, 이는 진공 브레이징된 히터, 얇아진 1차 용기, 구리 채널의 적용으로 상쇄될 것으로 기대됨
- 본 연구에서는 상기의 개선된 공정성능 실험용 2차 mock-up bed 의 설계의 최적화를 위해 3차원 모델을 바탕으로 열유체 해석을 수행함
- 새로이 제작되는 해당 Mock-up bed의 기본적인 구성은 수소 저장용 금속 분말을 담고 있는 1차 용기와 1차 용기를 둘러싼 2차 용기 및 가스 유출입 배관으로 이루어짐
- 결론적으로 공정성능 시험용 2차 Mock-up Bed에 대하여 복사차폐용 reflector의 개수를 달리하여 열전달 해석을 수행한 결과, 탈장 온도를 450 C로 설정했을 때 reflector의 수를 3개로 하여도 2차 용기의 표면 온도는 40 C 이하로 유지되어 글로브 박스내에서의 안전 운영 온도(80 C 이하)에 부합하는 것으로 판단됨. 또한 탈장열(10 kW)의 손실은 수십 와트로 미미한 것으로 판단됨
- 본 해석을 통해 형성된 모델을 이용하여 In-bed calorimetry 운전시 열손실에 대한 정량적 평가를 진행할 것이며, 이는 in-bed calorimetry 운영 방법 및 bed design에 반영될 것임

삼중수소 SDS 공정기술

● 공정설계 기술

[삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 성능검증 장비 구축]

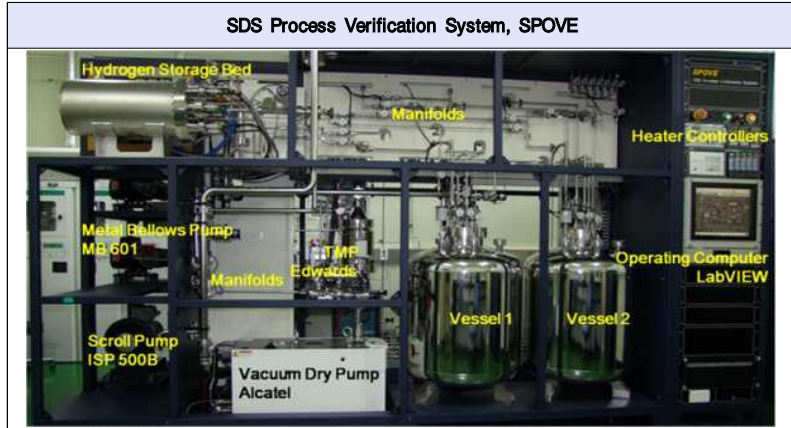
- 삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 성능검증을 수행할 수 있는 실험실을 KSTAR 초전도 자석 제작 및 ITER 초전도 자석 성능검증 시험을 위해 설치함
- 안정적인 시스템 성능검증 실험을 수행하기 위하여 전기분전반, 질소 Gas 라인, CDA 라인, 공정 냉각수 라인 등 실험실 Utility를 설치함

[삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 성능검증 장비 구성]

- 삼중수소 저장·공급 시스템의 단위공정 성능검증 실험을 위한 장비를 아래와 같이 여섯 부분으로 구성하여 구축함
- 1) Gas Cabinet
 - 2) Gas Scrubber
 - 3) Low & High Vacuum Pumping Component
 - 4) Gas Reservoir & Gas Delivery Unit
 - 5) Hydrogen Storage Unit
 - 6) Data Acquisition & Operating Software Unit

[삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 성능검증 장비 설치]

- 삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 성능검증 장비(SDS Process Verification System, SPOVE)을 제작 완료한 이후 삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 성능검증 실험실에 [그림4-44]와 같이 설치함
- 삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 성능검증 실험에 장비를 안착 시킨 이후 실험실의 Utility와 체결하였으며, 전 Gas 공정 라인에 Leak Detecting 검사를 수행함. 이에 수소 가스 사용 이전에 본 장비의 제작이 계획대로 완료되었음을 Commissioning을 통하여 확인함



[그림4-44] 저장·공급 시스템 단위공정 성능 검증 시험 장치 구축(SPOVE)

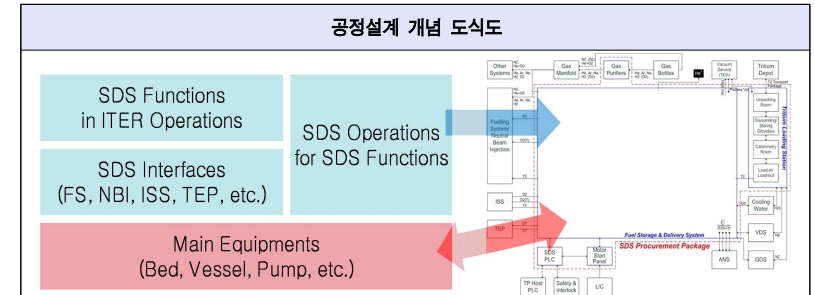
[삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 성능검증 실험]

- 삼중수소를 취급할 수 있는 기기의 기본 조건은 아래와 같이 나열할 수 있음
 - 기기를 구성하는 모든 부품들, 특히 삼중수소와 직접 Interface가 있는 부분들은 삼중수소 사용 가능한 물질로 구성되어야 함
 - 삼중수소의 누출이 기존의 Vacuum 시스템이나 수소 취급 시스템보다 강화되어야 함
 - 삼중수소 다량 누출 시 이를 극복할 수 있는 방안을 강구해야 함
- Vacuum Technology에서 조심스럽게 다루고 있는 Seal 부분에 있어서 기존의 Vacuum 시스템에서 널리 사용하고 있는 Halogen을 포함하고 있는 고분자의 사용을 금하고 있는바 이를 만족할 만한 기기의 개선 또는 개발이 필요함
- 삼중수소 사용가능한 Pump의 경우 전 세계적으로도 작은 규모의 제작사에서 Order-made 방식을 통하여 제한된 기성품들에 대하여 소량 생산하고 있는 실정임. 이에 기존에 존재하는 Pump에 대하여 성능 실험을 수행하여 기존의 삼중수소 설비에 비해 압도적으로 많은 양의 삼중수소를 취급하는 ITER 삼중수소 저장·공급 시스템의 활용 가능성을 점검하였음

- 펌프 성능 검증 시험: MB601 Pump, Normetex Scroll Pump, MB601HP Pump 개별 및 조합 성능시험, KRISS와 공동 연구 수행

[삼중수소 저장·공급 시스템 공정설계 절차]

- 삼중수소 저장·공급 시스템의 공정 설계에 대한 방법에 대한 개념을 아래 [그림4-45]와 같이 도식화 함

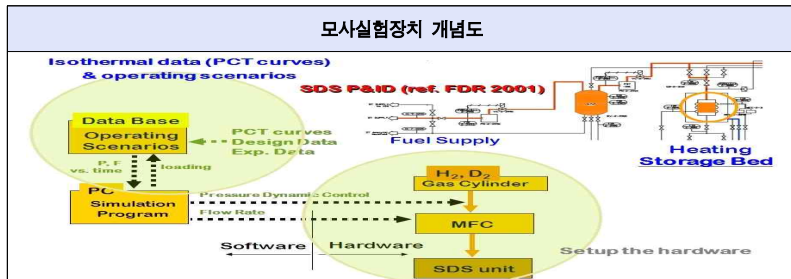


[그림4-45] 삼중수소 저장·공급 시스템 공정 설계 개념 도식도

- 삼중수소 저장·공급 시스템의 공정 설계를 위해서는 다음과 같은 두 가지 방향의 접근이 필요한 것으로 판단됨
 - ITER Operation을 만족시킬 삼중수소 저장·공급 시스템의 Function 및 Operation을 정의하는 것
 - 삼중수소 저장·공급 시스템의 Operation을 수행할 가능성이 있는 삼중수소 사용가능한 기기들의 분석 또는 개발
- 이러한 두 가지 축을 이용하여 궁극적으로 선정된 기기들을 바탕으로 삼중수소 저장·공급 시스템의 공정 시스템의 구성을 완성함

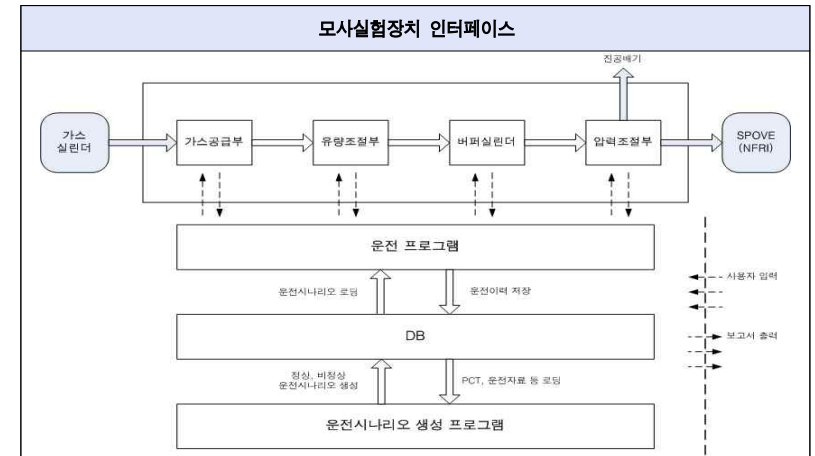
● SDS 최적 운전 기술

- SDS 저장용기 모사실험장치는 prototype으로 제작되어 튜닝실험과 운전프로그램의 테스트를 통해 개선, 최종적으로 이동형으로 개발되었음
 - 각 단위공정에 기본적으로 필요로 하는 삼중수소 저장용기를 대신하여 장착하고 시험할 수 있는 SDS 저장용기 모사실험장치 개발에 대해 설명임
- SDS 저장용기 모사실험장치는 SDS 실증시험장치인 SPOVE (SDS Process Verification Experiment)의 운전에 활용할 계획이며, SDS 및 TLS 제작 시 FAT (Factory Acceptance Test)를 지원할 수 있고, 현장(ITER 사이트)에 납품되어 설치된 SDS 및 TLS의 SAT (Site Acceptance Test) 및 시운전지원에 활용할 수 있음
- SDS 저장용기 모사실험장치의 개념
 - SDS 저장용기는 외부에서 주어지는 열량 혹은 온도 제어에 따라 삼중수소 증기압이 변하고 ZrCo 저장재에서 탈장된 삼중수소가 펌프에 의해 FS (Fuelling System)으로 공급하는데, 이를 자동압력조정기(APR, Auto Pressure Regulator)와 질량유량조정기(MFC, Mass Flow Controller)로 운전시나리오에 따라 제어하여 동일한 거동을 구현할 수 있도록 하는 것임
- SDS 저장용기 모사실험장치는 [그림4-46]에서 보듯이 저장용기의 주요 성능변수인 압력과 유량을 하드웨어적으로 모사하며, 이를 제어하기 위한 프로그램으로 구성됨
- 압력과 유량은 APR과 MFC를 이용하며 설정값은 운전프로그램에서 시간에 따라 계산되거나 모사된 값을 적용할 수 있으며, 이를 위해 운전시나리오 생성프로그램과 운전프로그램을 개발함



[그림4-46] SDS 저장용기 모사실험장치 개념도

- [그림4-47]은 SDS 저장용기 모사실험장치의 하드웨어, 운전프로그램, DB 그리고 운전시나리오 생성프로그램간의 인터페이스를 나타낸 그림임
- DB에는 저장재(예를 들면, ZrCo이나 우라늄)와 수소동위원소간의 여러 조건에 대한 PCT 곡선이 저장되어 있으며, 운전시나리오 생성프로그램에서 이를 이용하여 운전시나리오를 생성하고 다시 DB화 할 수 있음
- 운전 프로그램은 생성된 운전시나리오를 불러오기 하여 실제 하드웨어인 SDS 저장용기 모사실험장치를 운전할 수 있으며, 운전이력은 운전프로그램을 통해 DB로 다시 저장될 수 있음
- 본 개념을 적용하여 SDS 저장용기 모사실험장치, 운전 프로그램 그리고 운전시나리오 생성프로그램을 개발하였고 prototype 제작을 통해 개선사항을 도출하여 최종 이동형 SDS 저장용기 모사실험장치를 제작하였음



[그림4-47] SDS 저장용기 모사실험장치 인터페이스

삼중수소 SDS Safety 기술성과 중점정리

삼중수소 Confinement 기술

- SDS의 모든 설비는 삼중수소의 누설을 막기 위하여 글로브 박스 내에 위치하는데, 바로 이 삼중수소의 이중, 삼중의 고립(Confinement)을 유지하기 위해 열적 건전성의 검증 과정이 필요함. 삼중수소 Confinement 기술은 삼중수소의 외부누출을 최소화하기 위한 글로브 박스 시스템, Fire Sector 적용 기술을 뜻함

[화재해석]

- ITER 삼중수소 저장 및 전달 시스템(이하 SDS) 글로브 박스가 설치된 격실 내에 화재가 발생하였을 시 화재로부터 글로브 박스의 열적 건전성을 평가하기 위해 화재사고조건에 대한 해석을 수행함
 - SDS 글로브 박스가 설치된 격실 내에서 화재의 발생은 그룹된 전기 케이블에서의 화재가 발생하는 것으로 예견할 수 있음
 - 원자력 산업계에서는 일반적으로 IEEE-383에서 규정하고 있는 인증된 전기 케이블과 인증되지 않은 전기 케이블 두 종류로 정의하고 있음
- IEEE-384-74 화염 시험을 통과한 전기 케이블들은 전기적인 원인으로 발생한 초기 화재가 널리 전파되지 않는다고 평가하고 있으나 SDS 글로브 박스가 설치된 격실 내에서 화재해석에서는 IEE-383에서 규정하고 있는 인증된 전기 케이블이 완전히 연소하는 것으로 가정하고 실험함
- 화재해석은 SDS 글로브 박스가 설치된 격실 내 전기 케이블의 과전류에 따른 화재사고해석은 FDS(Fire Dynamics Simulator) 전산코드를 사용하여 수행함
 - SDS는 장기저장시스템(long-term storage system)과 단기저장시스템(short-term storage system)을 포함
- 화재사고해석 결과 글로브 박스의 최대온도는 주변온도보다 약간 높은 22℃로 나타났으며, 최대 열 방출률은 258.7 kW로 평가되었으므로 글로브

박스의 온도는 열적 건전성에 영향을 미칠 만큼 높지 않은 것으로 나타남

- 따라서, 화염으로 부터의 복사 열전달 및 대류 열전달이 글로브 박스에 미치는 열적 영향은 미미하다고 판단되며, 격실에서의 케이블 트레이 화재가 글로브 박스로 미치는 영향은 미미한 것으로 평가됨

미분진 배출 방지 기술

[ULPA 필터 시스템]

- 핵융합반응용 D-T 연료 가스의 저장재인 ZrCo를 비롯한 우라늄, 우라늄 하이드라이드의 미분진은 입자의 크기가 작고 가벼우므로 공정내의 저장용기에서 쉽게 날려 공정의 다른 부분으로 침투 할 수 있음
 - 벨브와 펌프를 비롯한 공정내의 각종 기기에 침투된 미분진 입자들은 공정 장비의 오염 및 고장의 원인이 됨
- 그러므로 공정 내 저장용기에서 날린 ZrCo, 우라늄, 우라늄 하이드라이드 미분진을 걸러 낼 수 있는 공정의 특성에 적합한 필터를 선택, 설치하여 실험장비 보존 및 안전사고에 대비하고자 함
- ULPA filter는 미분진에 대하여 높은 여과성능을 가지고 있지만 사용할 수 있는 온도가 한정되어 있다는 단점이 있음. 그러므로 ULPA filter를 사용할 수 있는 조건이 한정되기 때문에 filter의 성능 보호 및 안전사고를 방지하는 목적으로 냉각장치를 공정상에서 필터와 bed 중간 부분에 설치함
- 우라늄 등의 미분진 입자가 섞여있는 고온의 수소가스를 직접 냉각 하게 되면 공랭식의 방식이지만 높은 온도 차이로 인하여 수증기 등의 수분이 생성 될 수 있으며 이는 우라늄과의 반응으로 연결되어 화재 등 안전사고가 발생 할 수 있음. 그러므로 고온의 수소 가스를 직접 냉각 시키는 방식이 아니라 제어반을 통하여 형성된 밀폐된 공간에서 고온의 수소가스가 지나가는 파이프를 냉각 시켜 고온의 수소가 냉각 되게 하는 방법을 선택하여 실험함
 - ULPA filter는 고온에 견디며 불에 타지 않고 또, 흡수성이 없고 흡습성이 적은 Glass fiber를 매개로 하여 대기 중에 산소와 반응하여 표면에 치밀한 산화 피막을 형성하여 내부의 산화를 방지하는 Aluminium을 분리막으로 이용하여 수소 가스에 있는 미분진 입자들을 걸러내는 역할을 함
- 이 실험을 통해 ZrCo, 우라늄, 우라늄 하이드라이드의 미분진을 공정 내에

서 직접 제거하여 안전사고에 대비하고자 하였음. Cabinet aircon을 통하여 고온의 수소 가스를 냉각 하고 ULPA filter를 통하여 수소 가스속의 금속분말 미분진을 여과 할 때 발생하는 filter에 의한 압력손실을 최대한 줄일 수 있다면 미분진에 의한 장비 부식 및 고장, 금속분말 미분진의 대기 노출 등의 안전사고를 미연에 방지 할 수 있는 효과를 기대 할 수 있음



[그림4-48] ULPA filter

③ 삼중수소 SDS 핵심기술의 주요 성과

- 삼중수소 저장·공급 시스템의 핵심 부품의 하나인 getter bed의 개발 및 운전 방법 개발에 성공하여 getter bed 설계에 대한 열유체 전산 해석적 연구를 통해 설계의 타당성 검토와 성능 예측을 수행하는 성과를 올림
 - 선행 개발국의 수준을 넘어서는 저장베드시스템 설계기준 정립에 성공함
- 삼중수소 SDS는 핵융합발전소에 연료로 쓰이는 일차적 안전장치라고 할 수 있음. 미분진 배출 방지기술인 ULPA 필터 시스템 실험을 통해 ZrCo, 우라늄, 우라늄 하이드라이드의 미분진을 공정 내에서 직접 제거하여 안전 사고에 대비하여 사고를 미연에 방지 할 수 있는 효과를 기대 할 수 있을 것으로 보임
- 삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 성능검증을 수행할 수 있는 실험실을 설치하여 안정적인 시스템 성능검증 실험을 수행, ITER 삼중수소 저장·공급 시스템의 활용 가능성을 점검함
- 삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 성능 시험을 통해 ZrCo 저장재 사용에 기준한 성능 극대화에 성공함

④ 삼중수소 SDS 정성적 기술성과 분석

- 삼중수소는 2013년 9월 개념설계가 끝나며, 현재 R&D 성격으로 진행되고 있음
- 삼중수소는 방사성 물질로 각국에서 수출이 통제되고 있으며 전 세계적으로 보관하고 있는 양이 많지 않으므로 관련 연구를 수행할 수 있는 나라가 한정되어 있음
- 핵융합로 상용화를 위해 필요한 기술인 삼중수소 SDS는 KSTAR에서 없는 기술이기 때문에 1단계 시작 당시 국내에 기술력이 없었음. ITER 참여 당시 조달품목에 참여하는 기준이 1)KSTAR에서 취급하였던 품목, 2)경험은 없지만 꼭 확보해야 할 기술 등이었는데 삼중수소 취급 기술은 2) 기준에 의하여 참여함
- 과제 수행 시에는 ZrCo를 getter bed로 선정하였으나 운전효율 및 안정성

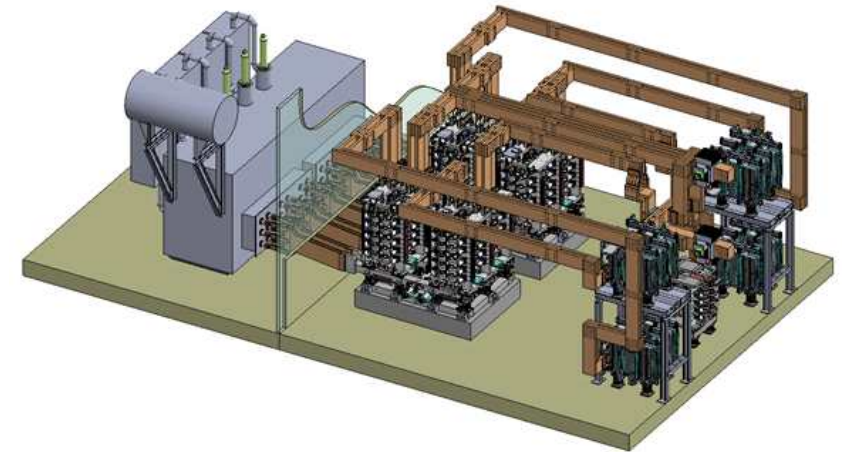
을 고려하여 DU로 변경함

- 1:1 Scale SDS 공정검증실험을 통해 Tritium Compatible Component의 검증 실험을 경험한 바 있어, 향후 ZrCo에서 DU 저장재로 바뀌는 공정실험도 어렵지 않게 진행될 것으로 판단됨
- 삼중수소 SDS는 방사성 물질을 취급하는 시스템이기 때문에 tight한 sealing이 중요하며 sealant의 기술개발이 중요함. 삼중수소 등 방사성 물질을 취급하는 시스템이므로, 이의 누출을 방지하기 위한 Tight sealing을 기본 요건으로 한 안전성의 확보와 함께, 다량의 삼중수소를 저장·공급 및 분리·정제하는 공정 및 구성품의 개발이 주요 현안임
- 핵융합 연료주기는 삼중수소 저장 및 공급시스템 (SDS), 토카막 배출가스 처리공정 (TEP), 초저온 액화 분리 공정 (ISS), 탈삼중수소 처리공정 (DS) 등으로 이루어지며, 한국, 미국, 유럽, 일본 등이 참여하고 있음
- 1:1 Mock-up Bed(ZrCo 사용, 삼중수소 70g 저장용량의 ITER 삼중수소 저장베드)를 사용한 SDS 공정검증실험을 통해 ITER 규격에 준하는 공정 장치를 실험한 사례는 세계 최초로서 큰 의미가 있음
- 삼중수소 저장 및 공급시스템 기술의 국산화로 세계화를 확보할 수 있으며, 그로 인해 산업체 성장과 핵융합 연료주기기술을 선도할 수 있고, 관련 기술에서 파생되는 구성품들을 수출할 수 있는 계기가 될 것으로 판단됨
- 1단계를 통해 시험된 삼중수소 저장 용기는 기존의 유사 품목의 성능을 상회하고 있으며, 조달 완료는 곧 세계 최고의 기술력 보유를 의미함

4-8. 전원공급장치

1 전원공급장치 기술 개요

- 전원공급장치는 ITER 장치와 계통에 안정적인 전력 공급을 통해 전기적 실패를 예방하고 기계와 전력 공급 계통을 적절하게 접시켜주는 역할을 함
- 이 전원공급장치는 총 2.1 GVA 설비규모로 44대의 개별 AC/DC 컨버터, 그리고 전원공급장치의 운전에 기인한 막대한 양의 무효전력 및 고조파로 인한 상위 교류전원 전력품질 열화를 보상해 주는 총 750 Mvar 설비규모로 3대의 무효전력보상장치(RPC&HF)로 구성되어 있음
- 즉, 자기장 형성과 핵융합 반응을 위해 각각 초전도자석 코일과 플라즈마 가열 장치들에 직류전원을 제공하고, ITER 계통에 각기 다른 교류 전력을 공급하는 장치임
- 한국과 중국이 각각 37.3%와 62.7%로 배분하여 조달을 담당하고 있으며, 한국은 이 중 AC/DC 컨버터의 일부인 TF(Toroidal Field), CS(Central Solenoid), VS(Vertical Stabilization) 그리고 CC(Corection Coil) 컨버터와 통합제어기의 조달을 담당함



[그림4-49] ITER AC/DC 컨버터 3차원 모델



[그림4-50] AC/DC 컨버터의 R&D 제작 및 시험

2) 전원공급장치 핵심기술

■ 전원공급장치 핵심기술 및 정의

- [표4-17]은 도출된 전원공급장치 핵심기술과 각 핵심기술을 세분화한 핵심요소기술을 나타내었고, 각 기술의 정의를 간략하게 설명함

[표4-17] 전원공급장치 핵심기술

■는 핵심기술 (○는 핵심요소기술)	기술 정의
■ 초전도자석 전원공급장치 설계 기술	- 초전도자석용 대용량 전원공급장치의 회로, 부품, 장치 및 시스템을 설계하는 기술
○ 초전도자석용 대용량 전력변환기 회로설계 및 해석기술	- 초전도자석용 대용량 전력변환기의 안정적 동작 및 초전도자석 보호를 위한 회로설계 및 해석기술
○ 초전도자석용 대용량 정류기 설계 기술	- 초전도자석용 대용량 다병렬 스위칭소자 방식 정류기 설계 및 제작기술
■ 초전도자석 전원공급장치 제조 기술	- 초전도자석용 대용량 전원공급장치의 부품, 장치, 시스템 등을 제작, 시험 및 검증하는 기술
■ 초전도자석 전원계통 통합제어기술	- 토카막 운전을 위한 초전도자석 전원계통의 최적 통합제어기술

■ 초전도자석 전원공급장치 설계기술 성과 중점정리

● 초전도자석용 대용량 전력변환기 회로설계 및 해석 기술

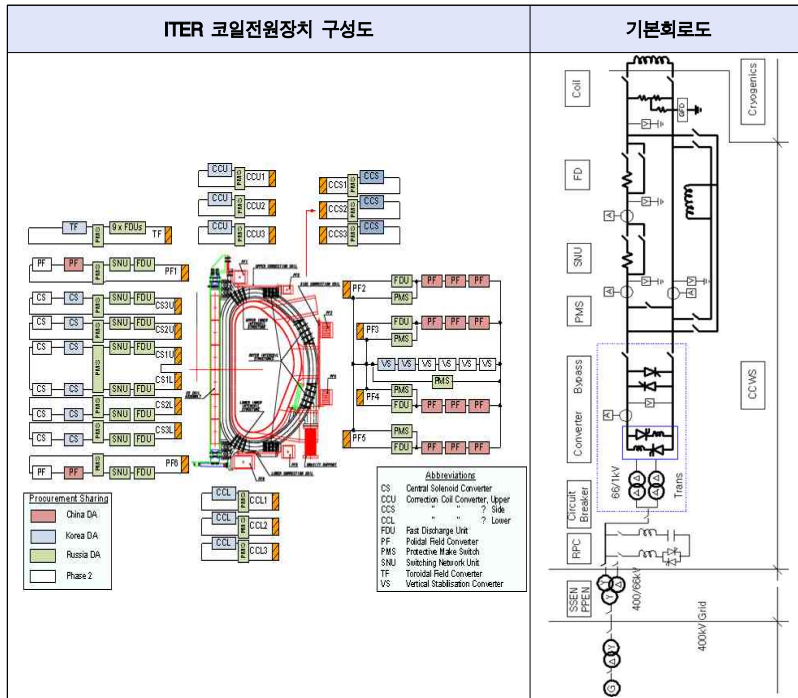
[전원공급장치 기술사양 작성을 위한 공학설계 및 해석]

- ITER 초전도자석 전원계통의 AC/DC Converter 최종설계를 마치고 제작에 착수하기 위해 컨버터의 시뮬레이션 기본모델을 확정하고 시뮬레이션을 수행함
 - 기존의 토카막 자료 등을 중심으로 초전도 토카막의 운전 중에 전원과 관련된 사고의 발생가능성을 분석하여 여러 유형의 사고발생 시 전원장치의 거동을 파악하고 이에 대한 전원장치 개별부품들의 적정 정격을 계산하였음

1. ITER AC/DC Converter 설계변경

- ITER AC/DC Converter의 설계는 2001년 DDD4.1 설계안이 만들어진 이후 최근에 두 가지 관점에서 설계변경에 대한 검토가 수행되고 있는데, 그 첫 번째가 무효전력을 최소화하기 위한 설계변경임
 - ITER 장치가 들어설 프랑스 카다라쉬의 전력 분배시스템에서 허용 가능한 무효전력의 범위 안에서 시스템을 구성하기 위해 PF, CS, VS converter에 대하여 sequential control 등을 통해 토카막 가동 시 발생하는 무효전력을 최소화하여야 함
- 두 번째는 비용적인 관점임
 - 설계변경 및 Missing Component의 증가는 결국 전체 ITER 제작비의 증가로 귀결되므로 여러 종류의 AC/DC Converter 모듈의 종류를 가능한 단순화 형태로 제작하여 그것들의 직렬 연결로 시스템을 구성하는 방안으로 결정함
- ITER 코일전원장치(CPS)는 TF, CS, PF, CCT/B, CCS 코일과 VS1 회로에 전원을 공급하며, CPS는 TF 전원장치, CS 전원장치, PF 전원장치, CCU/L 전원장치, CCS 전원장치, VS1 전원장치로 구성됨
- AC/DC Converters 주요 설계변경 내용
 - FSC(Fault Suppression Capability) 기준변경: DC reactor 진단 → 후단
 - Stack 구조변경 : Back-to-back Thyristor → Back-to-back Bridge

- Bypass 방식변경 : Internal(Continuous Duty) → External(Pulse Duty)
 - TF 무효전력 감소방법 변경: 입력전압 조정 → 변압기 탭 조정
 - CS, PF, VS 무효전력 감소를 위한 Sequential Control 적용
- [그림4-51 좌측]은 ITER 코일전원장치의 전체 구성과 조달국별 조달범위임. 코일전원장치의 설계, 제작, 시험, 설치, 시운전은 대한민국, 중국, 러시아가 해당 공급분에 대하여 실시함. PF, CS, VS1 컨버터는 Phase 1, 2용으로 분류되어 있으며 흰색 상자로 표시한 컨버터는 Phase 2 공급분을 나타냄
- [그림4-51 우측]은 ITER 코일전원시스템의 전형적인 기본 회로도를 보여 주며, 점선으로 표시한 부분이 우리나라가 조달하는 AC/DC converter의 기본회로임



[그림4-51] 코일전원장치 구성도 및 기본회로도

2. ITER AC/DC Converter 개념설계

- IO에서 구상한 TF 컨버터유니트의 개념설계 안은 다음과 같음
 - TF 컨버터유니트는 위상 천이된 6-펄스 유니트 2대를 병렬로 연결하여 12-펄스 컨버터를 구성
 - TF 컨버터유니트는 2상한 운전을 하고, 외부 인덕터에 의해 분리된 2개의 6-펄스 모듈로 구성
 - 사이리스터와 퓨즈가 직렬 연결된 회로를 병렬로 구성
 - TF 컨버터변압기는 TF 연속전류(68 kA)를 공급할 때 무효전력을 줄이기 위해 변압기 1차측에서 조정(단권변압기나 무부하 탭 변경 적용)하여 2단계의 2차 전압을 제공
 - 외부 사이리스터 바이패스는 고장이 발생할 경우에 TF 전자석 전류를 순환시키기 위해서 적용(연속정격)되고, 정상상태운전(퀀치조건일 때를 제외하고 고속방전은 요구되지 않음)으로 전환하기 위해서 적용
- CS, CCS, CCU/L 컨버터유니트의 설계 특징은 다음과 같음
 - 기본 유니트는 위상 천이된 두 6-펄스 유니트를 병렬로 하여 12-펄스 구성
 - 기본 유니트는 4상한 운전을 하고 외부 인덕터에 의해 분리된 4개의 6-펄스 모듈로 구성
 - 사이즈가 큰 사이리스터는 암 퓨즈와 병렬로 직접 연결되어 있다.
 - 극성변환을 위해 순환 전류 운전이 적용
 - 외부 사이리스터 바이패스가 각각의 기본 유니트를 위해 적용(펄스 듀티)
 - 시퀀셜제어(CS, VS1 컨버터)로 1/2/3개의 유니트가 직렬연결로 동작.
- VS1 컨버터의 설계 특징은 다음과 같음
 - 기본 유니트는 위상천이 없이 두 6-펄스 유니트를 병렬로 연결하여 6-펄스 구성
 - 기본 유니트는 4상한 운전을 수행하는 외부 인덕터로 분리된 4개의 6-펄스 모듈로 구성
 - 두 개의 기본 유니트는 직렬로 연결되며, 12-펄스 운전을 제공
 - 사이즈가 큰 사이리스터는 암 퓨즈와 병렬로 직접 연결

- 극성변환을 위해 순환 전류 운전이 적용
- 외부 사이리스터 바이패스가 각각의 기본 유니트를 위해 적용(펄스 듀티)
- 시퀀셜제어에서 2/4/6개의 유니트가 직렬로 연결되어 동작

3. ITER AC/DC Converter 예비설계

- 기본설계의 대상은 TF, CS, PF, VSI, CCU/L, CCS 컨버터유니트임. 이 중 PF 컨버터유니트는 공급품목은 아니나 ITER 코일 전원장치의 이해를 위해 설계에 포함하며, 기본설계는 컨버터유니트의 요건과 IO에서 수행한 개념설계안으로 수행함
- 기본설계는 컨버터의 고장해석을 전제로 하며, 고장해석의 결과에 따라 상세설계를 수행하며, 고장해석은 가능한 모든 조건을 해석함
 - ITER 컨버터유니트는 FSC 능력을 가지며, 해당 요건에 따라 설계함
 - 컨버터의 크기는 CMM에서 제시한 영역 이내로 설계하며, 컨버터유니트의 설계를 위하여 6-펄스 브리지를 IEC 60146-1과 MUHAMMAD H. RASHID 저 Power Electronics Handbook 2nd Edition을 참고하여 계산함
- 전원장치 예비설계(PD)의 종류
 - 컨버터 예비설계
 - 변압기 예비설계
 - 마스터제어기 예비설계
- 예비설계 내용 파악 및 설계일정 수립
 - 설계문서 목록
 - 설계검토절차(ITER_D_2832CF)에 의한 요구 문서
 - 지원 해석 및 계산
 - RAMI 분석 보고서
 - 형식시험 및 정규시험을 포함한FAT 절차
 - 예비 구성품 추천서
 - 인터페이스 시트에 관한 정보
 - PCDH (ITER_D27LH2V)에 설명된 예비 I&C해석 및 설계 보고서
 - 구성품 품질 등급
 - DCIF에 따른 CAD 교환

- 설계수행 일정 : 2011년 9월 ~ 2012년 3월
- 설계심의 일정 : 2012년 4월 ~ 2012년 5월

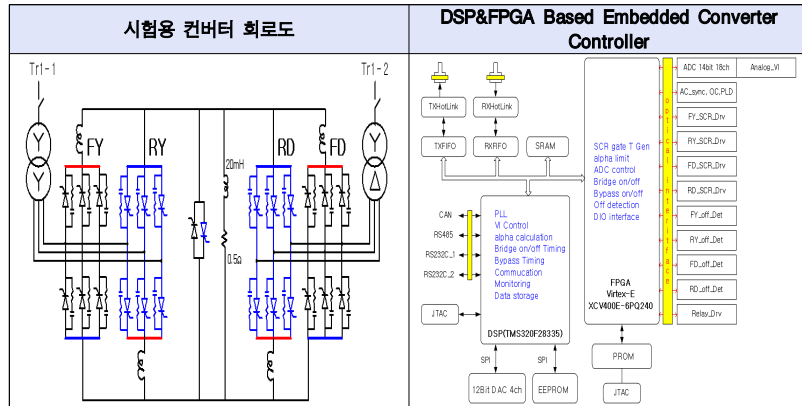
[전원공급장치 공학설계를 통한 RISK 파악]

- 플라즈마붕괴(Disruption)를 고려한 컨버터 순환전류 제어기법
 - 제어기법에 따라 컨버터 전류차단으로 인한 과전압이 발생하는 경우와 정상적인 제어로 과전압이 발생되지 않는 경우를 영전류 구간, 컨버터 출력 전압이 (+)인 구간에 대해 해석함
- TF, PF, BC, VS, CC 등 ITER 초전도자석 전원공급장치의 종류별 사고 상황에 따른 과도상태를 해석하고, 과전류에 따른 소자의 온도상승을 평가하여 각 컨버터별로 필요한 소자의 병렬 개수를 구함
 - 사고 유형에 따라 사이리스터 모델별로 전산모사를 수행하고 컨버터 사고 시 보호동작을 위한 Protection Sequence를 검토함
 - CC 컨버터에 대하여 DC reactor 하류에 단락이 발생한 경우 컨버터 단락 전류와 싸이리스터 소자의 온도상승을 평가함

● 초전도자석용 대용량 정류기 설계 기술

[전원공급장치 축소모델을 통한 동작회로검증 및 제어기 개발]

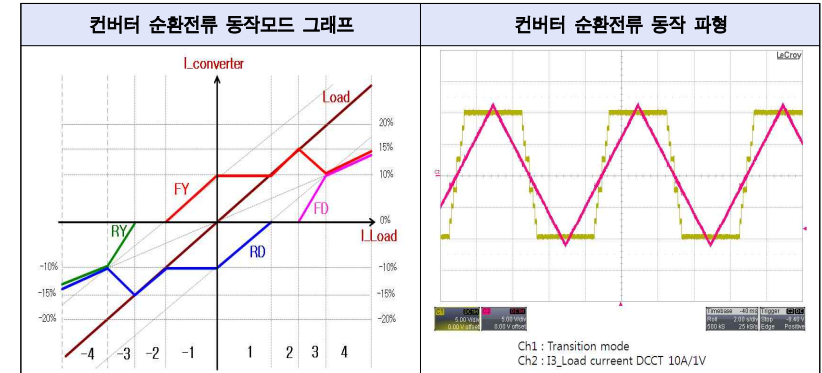
○ 공학설계검증을 위한 축소모델과 제어기능 구현을 위한 제어기 구성안



[그림4-52] 공학설계검증을 위한 축소모델 및 제어기 구성안

○ 순환전류 모드 동작 검증

- 컨버터 운전 중 부하전류 극성이 전환되는 영 전류 영역에서 부하전류가 끊어짐 없이 smooth하게 전환동작하기 위하여 아래 그림(좌)과 같은 순환 전류 동작모드가 수행함
- 그래프에서 갈색: 부하전류, 적색: Forward Y bridge converter current, 분홍색: Forward D bridge converter current, 녹색: Reverse Y bridge converter current, 청색: Reverse D bridge converter current를 나타냄
- 아래 그림(우)은 순환전류 동작파형을 보여 주는 것임. 이 파형에서 Ch1은 컨버터 순환전류 동작모드를, Ch2는 컨버터 부하전류를 나타내며, 부하전류가 Forward Full에서 Reverse Full로 연속 변화해서 Zero를 지나는 영역에서 끊어짐 없이 Smooth하게 동작하고 있음



[그림4-53] 순환전류모드 동작

[스위치모듈 제작 및 시험을 통한 국내조달기반 확보]

○ 스위치스택(VS) 제작 및 시험

- ITER 컨버터의 조달기술을 확보하기 위해 컨버터의 핵심소자인 5" 규격의 대형 Thyristor를 8~12정도 병렬로 사용할 수 있는 구조물을 만들고 Thyristor를 구동할 수 있는 주변 회로를 완성하고,
- 그로 인해 지, 단락 사고 전류를 통과시킬 수 있는지, 반도체 퓨즈가 사고 시 빠르고 안전하게 보호동작을 할 수 있는지 등을 검증하여 함
- 이를 위한 단상 정류기 구조의 스위치 모듈을 제작하고 성능시험을 수행하였음
- 스위치 스택의 사양:
 - Single Phase Thyristor Rectifier (1/6 Scale)
 - 전기사양: 11.25 kA, 1.55 kV, 17.4 MVA
 - 크기 및 무게: 2.1(W)x1.5(D)x2.7(H)m, 2.5 ton
- 병렬 Thyristor 전류 불평형: 전기연구원 단락시험설비(의왕)에서 175kA 단락시험을 수행한 결과 8개의 Thyristor를 병렬로 연결한 경우 전류 불평형은 28%로 측정되었음
- Fuse 성능검사: 1 개의 Thyristor가 단락이 되는 고장상황에서 연속적인 운전이 가능하도록 하기 위해서는 단락된 소자에 연결된 Thyristor의 파괴를 안전하게 막아주도록 퓨즈가 고속으로 개방되어야 함. 고장상황과 유

사하도록 전기연구원 단락시험조건에서 한 개의 Thyristor만 동작시켜 퓨즈가 개방되도록 하였으며 이 때 차단전류는 83.5 kA는 퓨즈 사양에 의한 예측(80.7 kA)과 잘 일치함을 확인함

○ 스위치모듈(CS) 제작 및 시험

- CS 컨버터를 모델로 하여 1:1 규모의 컨버터에 대한 AI 구조설계와 기계적, 전기적 해석, 냉각과 용접을 고려한 제작설계와 제작, 성능시험 등을 통하여 본제품의 국내 조달기반을 확보함
- 수직형 컨버터모듈 구조 : 수직형 컨버터모듈 구조는 2층 구조의 불안정성을 해소하기 위하여 각 단방향 6-필스 브리지모듈을 같은 높이에 앞, 뒤로 배치함. 따라서 컨버터모듈의 높이는 대폭 낮아지고 컨버터 제작 및 유지관리 부담을 줄여줌. 변압기와 컨버터간의 교류 버스바를 단순 직선 형태로 하면 제작 및 설치가 쉬우나, 교류 지면과 버스바간의 높이는 교류 대전류가 하부 지지구조 및 건물 구조에 유도과열 문제를 야기하지 않은 높이로 설계 및 제작하는 방안이 필요함
- 수직형 컨버터모듈 구조의 내진해석 : 이 구조는 고유진동수가 11.56 Hz로 해석되었고, 지진의 주파수인 6~7Hz에 안전율 1.3을 곱한 수보다 크므로 이 해석모드에서 컨버터모듈의 구조는 안전한 것으로 판명됨
- 구조물 단락강도 해석 : 알루미늄 버스바의 허용응력은 111.8이며 이 부위의 최대응력이 20.44로 나타나고 있으므로 이 해석모드에서의 구조적 문제는 없는 것으로 판명됨
- 정격전류 시험 : 6필스 CS 컨버터 정격전류 25kA에 대한 기술적 검증을 위해 30kA 전류통전 시험을 실시함. AC 입력 터미널, 수랭식 AC Busbar, 6필스 컨버터, 공랭식 DC Busbar, 출력 DC Reactor까지 포함하여 DC 연속전류 조건에서 냉각수와 소자의 온도상승이 설계기준에 적합함을 확인함

[ITER Converter 변압기 예비설계를 통한 조달 리스크 파악]

○ 부상부위 발열 처리 방안

- ITER 컨버터 변압기는 1차측이 66 kV 초고압에 접속되고, 변압기의 2차측 전류는 컨버터 전류의 81.7%가 흐르게 되므로 유도전류에 의한 국부발열이 예상됨
- Maxwell 3D V.13 해석 Tool을 이용하여 CS 변압기 저압측 탱크벽면 및

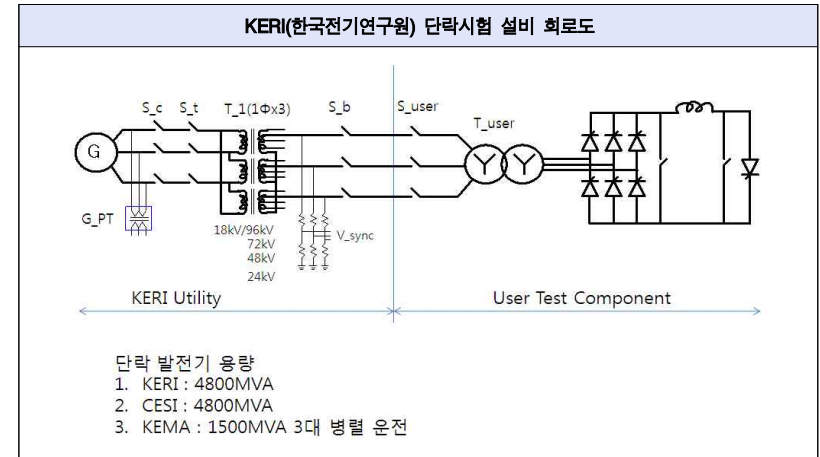
부싱의 자체해석모델 해석결과, 2차 전류에 의한 유도과열을 줄이기 위하여 알루미늄 판을 탱크벽면에 부착하여 CS용은 51.24℃, TF용은 56.45℃ 이하가 되도록 하였음

○ 변압기 형상 설계

- CS 컨버터예비설계 결과 제작구조는 2차측 버스바의 결합성이 우선시 되어 컨버터와 직접 마주보는 측면에는 2차측 버스바가 배치되고 그 반대쪽에 냉각기가 설치됨. 66kV 고압은 변압기 Top면에 설치된 부싱에 접속됨

[단락시험 규격조사 및 국내시험설비 활용방안 마련]

- ITER 컨버터 시스템에서 대전류(300 kA) 단락시험이 필요한 구성품으로 변압기, 컨버터, 리액터, Bypass, DCDS가 있으며 이들 구성품의 단락시험을 하려면 300 kA 이상의 단락시험 설비가 필요함
- 다음 그림은 경남 창원 전기연구원의 단락시험 설비 회로 및 단락시험용 발전기를 보여주며, ITER 컨버터의 단락시험이 가능함을 확인하였음



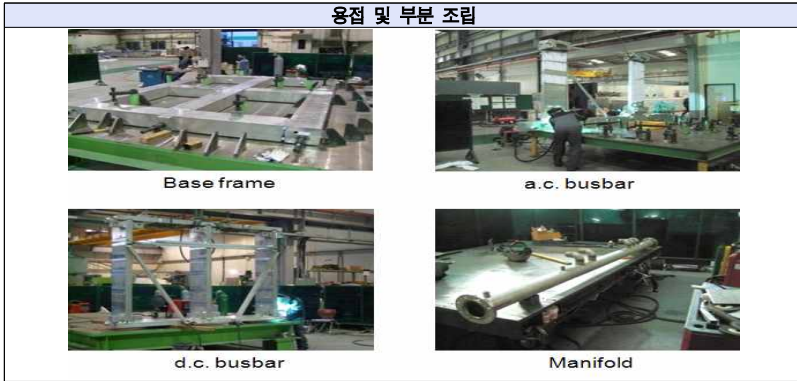
[그림4-54] 단락시험 설비 회로도

초전도자석 전원공급장치 제조기술 성과 중점정리

[컨버터 구조물 제작 및 조립]

- 초전도자석 전원공급장치 제조 기술은 초전도자석용 대용량 전원공급장치의 부품, 장치, 시스템 등을 제작, 시험하는 기술임
- 아래 그림들은 컨버터 구조물의 용접 및 부분 조립, 컨버터 구조물 제작검사 및 시험, 컨버터 구조물의 조립, 컨버터 전기부품 및 회로 조립, 컨버터 모듈 조립 완료의 성과를 순서대로 나열한 그림임

용접 및 부분 조립



[그림4-55] 컨버터 구조물의 용접 및 부분 조립

제작검사 및 시험



[그림4-56] 컨버터 구조물의 제작검사 및 시험

구조물의 전체 조립



[그림4-57] 컨버터 구조물의 전체 조립

각종 회로 조립



[그림4-58] 컨버터 전기부품 및 각종 회로 조립

조립 완료

❖ Lead time

Process	Lead time, day
Mechanical parts manufacturing, welding and sub assembling	28
Mechanical parts inspection & test	2
Mechanical parts assembling	5
Thyristor clamping & piping & cabling	10
Total	45

[그림4-59] 컨버터모듈 조립 완료

■ 초전도자석 전원계통 통합제어기술 성과 중점정리

[MCS: Master Control System]

- PCDH 설계기준을 반영한 통합제어기 제작사양 작성으로 전원공급장치의 설계시험을 검증함
- MCS는 MC(Master Controller), PIC-F(Supervisory Fast Interlock Controller), PIC(Supervisory Slow Interlock Controller), PSC(Supervisory Safety Controller)로 구성됨
- PIC와 PSC는 PCDH에서 규정한 Siemens PLC를 이용하여 설계되며, MC와 PIC-F는 PCDH에서 제안한 범위 내의 H/W, S/W들을 이용하여 각 Supplier들이 제작 가능함
 - MC는 해당 CPSS I&C 내 Converter들의 전류, 전압, 알파 값, RUN/STOP 정보 등을 Real-Time으로 RPC I&C에 전달하는 역할을 하며 통신 Network는 RFM을 이용함
 - 또한 PSH에서 처리할 수 없는 I&C 내의 통합제어 기능이 미래에 요구될 경우 기능을 추가할 수 있음
 - PIC는 해당 CPSS I&C 내의 Local Interlock System들의 Supervisory Controller로서 CPSS I&C 내부의 Interlock 상황을 통제하고 해당 CPSS I&C 내의 Interlock 상황에 대한 Information은 CIN을 통해 CIS와 주고받음
 - PSC는 해당 CPSS I&C 내의 Local Safety System들의 Supervisory Controller로서 CPSS I&C 내부의 Safety 상황을 통제하며, PSC는 PIC와 마찬가지로 COTS(Siemens PLC)를 사용하여 제작함
- MCS 기능 요구사항: 마스터컨트롤시스템을 포함한 전체 시스템 구조를 설계하기 위해 마스터컨트롤시스템에 대한 요구사항에 대해 정리함
 - Plant Interlock Control
 - Plant Safety Control
 - MCS와 관련 장치 간 연결
 - 제어기능과 테스트를 위한 사용자 인터페이스 터미널
 - Converter들의 특정 정보(전압, 전류, 알파 각, RUN/STOP status)를 Real-Time으로 RPC 플랜트에 전달(time scale: 0.8 ms)
 - Real-Time Interlock 신호처리 (time scale: 1 ms)

[마스터컨트롤시스템을 포함한 ITER CPSS I&C 구조 설계]

- 마스터컨트롤시스템을 포함한 ITER CPSS I&C 구조 설계: 이 문서는 MCS(Master Control System)를 포함한 ITER CPSS I&C의 Architecture에 대하여 제안함. MCS는 ITER의 PCR-337 문서에서 System 레벨에서의 각 일반 Control System, Interlock System, Safety System을 위해 필요한 것으로 정의되었으며, 이에 따라 한국의 PA 문서에 MCS가 포함되었음
- MCS를 포함한 CPSS I&C Architecture에 대한 논의를 시작하기 위해, CPSS I&C의 전체 Architecture를 설계하였고, 각각의 Coil Power Supply System에 대하여 상세한 Architecture를 포함함
- 최대한 PCDH 문서의 규정을 준수하도록 설계하였으며, 전체 System에 대하여 모든 Component를 표시하여, 관련 담당자들이 서로 다르게 이해할 수 있는 부분을 최소화 하도록 함
 - 본 보고서에 제시된 개념들과 아이디어들은 IO의 관계자들은 물론 CPSS를 제공하는 각국의 DA와 Supplier들에 의해 토의 및 검토되는 과정을 거쳐 수정 보완된 결과물이 PD의 주요한 방향을 제시 할 수 있기를 기대함

3] 전원공급장치 핵심기술의 주요 성과

- KSTAR 전원장치 제작 및 운영 경험과 산업용 대용량 전원장치에 적용된 기술을 면밀히 분석하는 등 선행된 관련기술을 습득하여 설계에 참고하고, 다양한 설계해석을 통하여 보다 안전하고 안정적인 동작을 요구하는 ITER 전원장치의 설계기술을 확보함
- 초전도자석용 대용량 정류기 설계기술 확보를 위해 스위칭소자들의 다병렬회로에 대한 전류배분 특성을 조사하여 필요한 기술을 확보하는 등 선행 연구를 통하여 조달에 필요한 핵심기술을 파악하였음
- ITER 초전도자석 전원계통의 AC/DC Converter 최종설계를 마치고 제작에 착수하기 위해 컨버터의 시뮬레이션 기본모델을 확정하고 시뮬레이션을 수행함
- ITER 컨버터의 단락시험 규격조사 등 스위치모듈 제작 및 시험을 통해 활용 가능성을 확인하였으며, 그로 인해 국내조달기반을 확보가 가능하다고 판단됨

4] 전원공급장치 조달추진 경위 및 중요 특허

■ 전원공급장치 조달약정

- ITER 전원공급장치의 조달은 한국과 중국이 공동 할당받았으며, 조달약정 체결을 위해서는 IO 업무범위인 제반 조달약정 서류의 준비가 필요하나, IO는 자원부족으로 전원공급장치 PA용 기술사양서의 작성이 불가능한 상황임에 따라 IO와 한국 및 중국 DA는 각국의 조달범위에 해당하는 PA용 기술사양서를 각각 작성하기로 합의함
- 우리나라에 배정된 초전도자석 전원공급장치 설계 및 제작기술은 선진국 대비 다소 수준이 미달한 상태였지만 조달약정을 준비하는 과정에서 기존 ITER 설계의 문제점을 파악하고 개선, 몇 차례의 관련 R&D 프로젝트를 수행하면서 도출한 기술력을 인정받아 조달약정을 체결함
 - 중국과 조달배분 합의(KO: 37.3%, CN: 62.7%)

- 조달 기술사양서(Annex B) 작성, 조달일정 수립
- 조달가치: 46.072 kIUA
- 조달품목: AC/DC Converters(10개 품목)

■ 전원공급장치 중요 특허

- 전원공급장치 1단계 주요 성과 중, 핵심기술, 조달약정 외 대표적 성과로 [표4-18]의 특허를 들 수 있음

[표4-18] 전원공급장치 1단계 중요 특허

특허명	내용
특허명: 전력변환장치 (Power Converter), 기초과학지원연구원	- (내용) 지면에 놓이는 베이스프레임 위에 절연 애자를 이용하여 ac 버스바를 설치하고 그 상부에 직립되는 두 조의 6상 컨버터 브리지를 앞 뒤로 배치하여 서로 다양한 운전방법으로 결선하여 사용될 수 있는 전력변환장치임 - (의의) 전력변환용 다병렬 스위칭소자 간 전류 밸런스의 조절이 용이하고 유도현상에 의한 온도상승을 방지함 - 또한 구조물의 내성 및 강도를 증대시키며 부품수가 적어 공간의 효율적인 사용 및 이에 따른 제작비용의 절감이 이루어질 수 있는 전력변환장치의 제공이 가능함

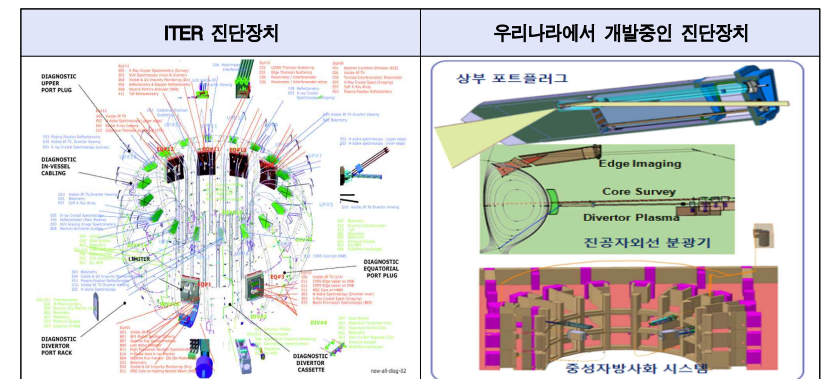
5. 전원공급장치 정성적 기술성과 분석

- 전원공급장치는 토카막장치에서는 플라즈마를 가두기 위한 자기장 형성이 필요하며 이를 위하여 여러 종류의 초전도코일이 진공용기 주변에 설치되어 있는데, 강력한 자장을 형성하기 위해 정밀제어 대전류가 초전도코일에 공급되어야 함
- 전원공급장치는 이런 대용량 교류 수전전력을 이러한 정밀제어 대전류로 변환해 주는 장치임
- 전원공급장치는 한국과 중국이 같이 조달하고 있으며, 전체 초전도자석 전원공급장치의 통합제어부분이 포함되어 있고 한국이 37.3%, 중국이 62.7%를 맡고 있음
- ITER 초전도자석 전원장치의 제작 및 운영기술 확보를 통하여 전량 수입에 의존하고 있는 산업용 대용량 전원장치의 국산화로 수입대체 효과가 가능하다고 판단됨
- ITER 전원장치를 위해 파악된 핵심기술을 적용한 스위치모듈 제작 및 시험을 통해 기술검증을 실시하고 보다 구체적인 설계방안을 얻어 냈으며, 그로 인해 국내조달기반이 확보됨
- 한국이 핵융합 전원공급장치의 후발국으로 참여한 만큼 사전에 기술 잠재력을 인정받아 조달약정을 무리없이 체결한 점이 가장 큰 1단계 중요 성과임. 1단계에서 확보된 기술력을 통하여 화학, 철강 플랜트 등 국내 산업체에서 필요로 하는 여러 종류의 대용량 정류기 국산화 및 수요창출이 기대됨

4.9. 진단장치

1. 진단장치 기술개요

- 토카막 플라즈마를 제어하고 그 특성을 최적화하기 위해 플라즈마 온도, 밀도, 자기장, 불순물 등 플라즈마의 여러 가지 물리적 상태를 측정하는 활동을 플라즈마 진단 (Plasma Diagnostics)이라고 하고, 이를 위한 장치를 진단장치(Diagnostic Systems)라고 함
- ITER 진단장치는 핵융합 연소 플라즈마의 물리변수 (밀도, 온도, 자기장 등)를 측정하기 위한 부대장치로서, 가능한 물리기법들이 이용되며, 그 기법들에 적합한 독립적인 측정 장치들로 구성되어 있음
- ITER에서는 약 40개의 진단장치가 설치되어 ITER 플라즈마 운전 실험에 사용될 예정이며, 우리나라 진단장치는 [그림4-60에 나타낸 바와 같이 크게 3가지* 종류로 되어 있으며, 이 중 두 개의 진단장치인 중성자 방사화 시스템과 진공자외선 분광기를 개발하여 조달할 계획임
 - * 상부포트플러그(Upper Port Plug) : 진단용 상부 포트플러그 18번 및 진단모듈
 - * 진공자외선 분광(VUV Spectrometer) : 플라즈마 내 불순물 측정
 - * 중성자방사화 시스템 (Neutron Activation System) : 핵융합 중성자 플루언스 및 총 핵융합 에너지 측정



[그림4-60] 진단장치

2 진단장치 핵심기술

진단장치 핵심기술 및 정의

- [표4-19]은 진단장치 핵심기술과 각 핵심기술을 세분화한 핵심요소기술을 나타내었고, 각 기술의 정의를 간략하게 설명함

[표4-19] 진단장치 핵심/중요기술

■는 핵심기술 (○는 핵심요소기술)	기술 정의
■ 핵융합 중성자 측정 기술	- 핵융합 플라즈마에서 발생하는 중성자의 개수, 에너지, 분포 등을 측정하는 기술
○ 측정장치 설계 및 제작 기술	- 핵융합로의 운전과 제어를 위하여 설치되는 중성자 측정장치를 설계, 제작하는 기술
○ 측정데이터 해석 기술	- 핵융합로의 운전과 제어를 위하여 설치되는 중성자 측정장치 해석 기술
■ 진공자외선 분광 측정기술	- 진공자외선 분광법에 의한 플라즈마 내부의 불순물의 양 및 분포를 측정하고 분석하는 기술
○ 진공자외선 분광 측정장치 설계 및 제작기술	- 핵융합로의 운전과 제어를 위해 설치되는 토카막로 불순물의 종류 및 농도를 측정하는 장치를 설계, 제작하는 기술
○ 진공자외선 분광 측정데이터 해석기술	- 핵융합로의 운전과 제어를 위해 설치되는 토카막로 불순물의 종류 및 농도를 측정하는 데이터 해석기술
■ 포트플러그 설계 및 제작기술	- 고온, 고자장, 고중성자속 등 ITER 특수 환경을 고려한 포트플러그의 기본 구조물 설계 및 제작 기술

핵융합 중성자 측정기술 성과 중점정리

● 측정장치 설계 및 제작 기술

- ITER 중성자 진단장치 중, 우리나라가 조달을 담당하고 있는 장치는 중성자방사화 시스템임. 이 장치는 핵융합 플라즈마에서 발생한 중성자에 의해 어떤 매개 물질을 방사화 시킨 후, 방사화된 물질이 붕괴하면서 발생하는 감마선의 세기를 측정함으로써 중성자 수득량 (Neutron Yield)를 계산하는 원리를 이용하는 진단장치임
- 중성자 플루언스와 중성자 수득량과의 관계는 몬테카를로법 (Monte-Carlo Method)을 이용한 중성자 수송 해석을 통해 비교적 높은 정확도로 추정할 수 있음
- 중성자방사화 시스템은 중성자 수득량 측정 분야에서 오랜 기간동안 사용되어 온 증명된 기술이며, 측정 정확도가 높고, 감마선 등 타 방사선으로부터의 영향이 적으며, 시간이 지나도 측정 정확도의 변화가 없으므로 타 중성자 진단 장치의 교정 작업에 많이 사용됨
 - ITER에서도 본 장치는 인시추 교정시, 혹은 타 중성자 진단 장치의 정기 교정시 기준 측정값을 제시하는 역할을 할 예정임
- 중성자방사화 시스템이 ITER에서 측정해야 할 물리량은, 다음 세가지를 들 수 있으며, [표4-20]에서 특성을 나타내었음
 - 핵융합 반응에서 생성된 총 중성자원 세기 (Total Neutron Source Strength),
 - 핵융합 출력 (Fusion Power)
 - 일차벽에서의 중성자 플루언스 (Neutron Fluence at FW)

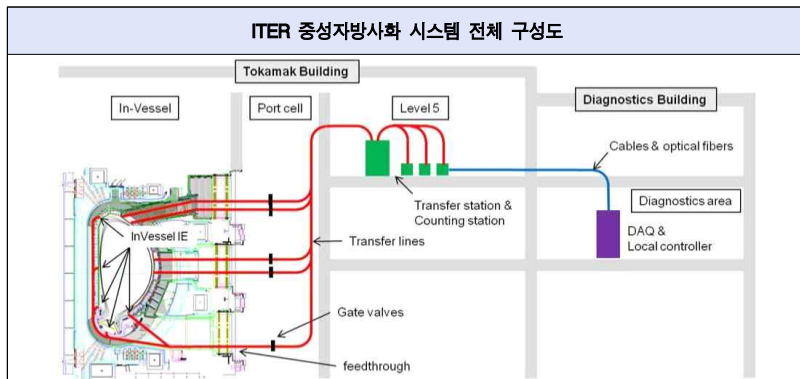
[표4-20] 중성자방사화 시스템의 측정 물리량 및 특성

측정 물리량	측정 범위	시분해능	공간 분해능	정확도
총 중성자원 세기	$1 \times 10^{14} \sim 5 \times 10^{20}$ n/s	1 ms	Integral	10 %
핵융합 출력	≤ 1 GW	1 ms	Integral	10 %
제1벽에서의 중성자 플루언스	0.1-1 MWa/m ²	10 s	~10 locations	10 %

- ITER에서 채택하고 있는 중성자방사화 시스템은 소위 박막 캡슐형 (Encapsulated Foils Method)임. 이 장치는 중성자가 생성되는 모든 플라즈마 운전 조건에서 사용되며, D-T 운전조건에서 100% 적용이 가능해야 하며, 토카막 내부 구조물에 장착되므로 건설 초기 진공 용기 등의 구조물과 함께 설치되어야 함

ITER 중성자방사화 시스템 설계 수행

- ITER 중성자방사화 시스템의 전체 구성도는 [그림4-61]과 같음
 - 중성자방사화 시스템은 크게 공압 이송 장치 (Pneumatic Transfer System), 전송선 (Transfer Lines), 계측 장치 (Counting System), 컨트롤러 및 데이터 수집장치 (Controller & DAQ)로 구성됨



[그림4-61] 중성자방사화 시스템 전체 구성도

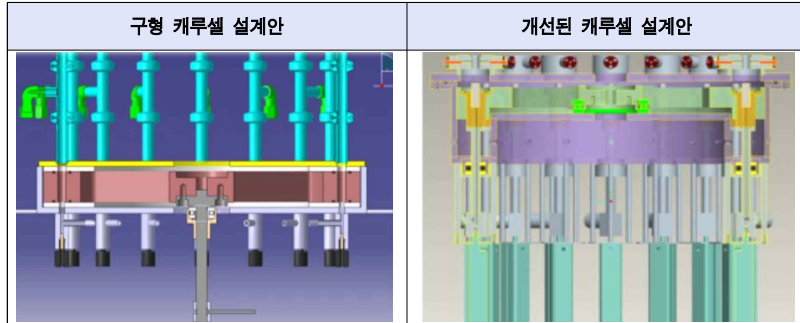
조사점에 대한 열해석 수행

- 중성자 가열은 MCNP5 코드를 이용하였고, 플라즈마로부터의 복사 가열은 조사점 끝 부분이 일차벽으로부터 2cm 떨어져 있을 경우 0.5MW/m^2 , 10cm 떨어져 있을 경우 0.1MW/m^2 이라고 가정함
- 토로이달 단면당 7군데에 설치될 예정인 조사점 중, 중성자 및 복사 가열이 가장 높은 곳 중의 하나인 토카막 내벽 중간 부분을 선택하여 분석하였으며 조사점 물질은 SS316L(N)-IG와 텅스텐이라고 가정함

- 열해석 결과, 중성자 및 플라즈마 복사 가열로 인한 조사점의 온도가 매우 높을 것으로 예측됨. 스테인리스 스틸 조사점에 중성자 가열만을 고려했을 경우 최고 온도는 639°C 이지만 플라즈마 복사를 고려했을 경우는 1700°C 까지 상승할 것으로 예측됨
- 따라서 이러한 고온 문제를 해결하기 위하여 조사점을 일차벽으로부터 뒤로 후퇴하는 등 새로운 설계안이 도출해야 할 것으로 분석됨

NAS 시작품 제작 및 기술 시험

- 중성자방사화 시스템의 시작품은 시편이송장치 및 그 부대 장치들이 원하는 운전 방식을 충실하게 수행할 수 있는지 확인하고 최적의 설계안을 마련하기 위함임
 - 시작품의 제작으로 조달 진단시스템에 대한 설계안 검증하고 제작 기술을 확보하고자 하였음
- 시편이송장치는 압축공기 공급장치, 시편 장전기, 시편 이송기, 조사점, 계측점, 폐기함, 제거기로 구성되어 있음
- 시편이송장치 시작품은 다수(18~20)의 조사점을 가지고 있는 ITER 중성자방사화 시스템의 특성에 맞추어, 다수의 조사점과 소수의 계측장치를 자유롭게 연결하기에 편리한 캐루셀(Carousel) 방식을 채택함
 - 시작품은 10개의 조사점과 4개의 계측점을 가정하여 제작되었음
- 현재 JET 장치의 중성자방사화 시스템은 캐루셀 방식*을 사용하고 있으며, ITER 측정 사양에 맞게 JET의 시스템을 변형하는 방식으로 설계 제작됨
 - * 캐루셀 방식은 서보모터에 의해 회전하는 플래터가 캡슐을 원하는 조사점/계측점과 연결된 지점으로 이송하고, 그 후단에 위치한 밸브가 열려 공압으로 이송하는 방법임
- 8mm 직경, 28mm 길이를 가진 테프론 더미 캡슐을 제작하여 본 시작품의 운전성능을 시험한 결과, 장치는 올바르게 작동함을 확인하였으나 캐루셀 내부에 설계의 내재적인 문제로 인해 전송 가스의 누설이 확인됨. 이는 전송시간 지연의 원인이 되었고, 이를 극복하기 위해 캐루셀의 디자인을 개선하고 재제작하게 됨[그림4-62]



[그림4-62] 캐루셀 설계안

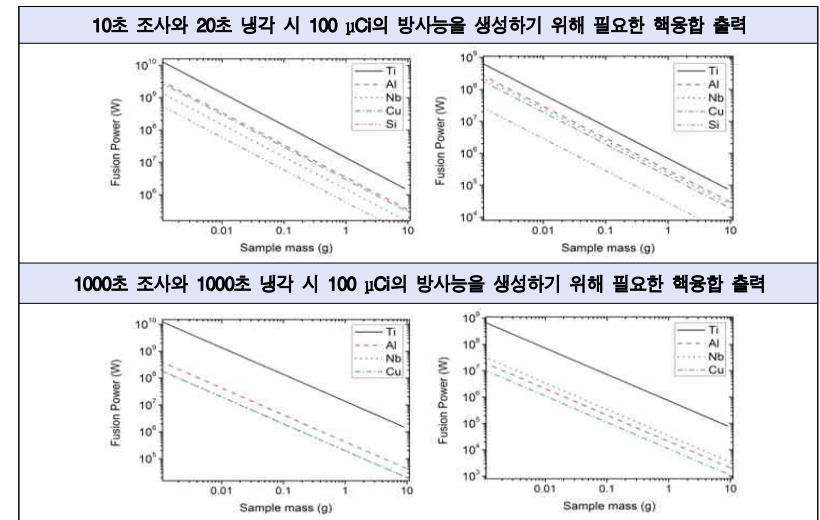
- ITER 중성자방사화 시스템 전송선의 길이가 50미터에서 130미터에 이르는 것을 고려하여 시작품을 이용한 장거리 전송 테스트를 수행함
- 또한 전송선 설치 시 많은 용접 및 벤딩이 필요할 것으로 예상되므로 이러한 용접 및 벤딩 부위가 캡슐의 이송에 영향을 미치지 여부에 대한 테스트용으로 100미터 길이의 스테인리스 스틸 튜브 롤을 제작함
 - 튜브 롤 제작을 위해 자동 파이프 벤딩기 및 자동 오비탈 용접기를 사용함
- 용접면 조사 결과, 자동용접 조건을 최적화 했을 경우 내경의 변화를 0.04mm 이하로 줄일 수 있음을 확인하였음. 벤딩면 조사 결과, 벤딩으로 인한 내경의 장축 단축 비율의 변화가 평균 1.8% 임을 확인하였음. 따라서 상용 파이프 벤딩기와 자동 오비탈 용접기를 사용하여 제작할 경우 시편 이송에 문제가 없을 것으로 판단됨



[그림4-63] 튜브 벤딩 및 제작된 100m 튜브롤

● 측정데이터 해석 기술

- ITER 중성자방사화 시스템의 예상되는 측정 성능을 계산함
 - 수 밀리그램에서 수 그램의 질량을 가지는 Si, Al, Cu, Ti, Nb 등 여러 조사 재료 시편 종류에 대해 안전을 위한 최고 허용치인 100 μ Ci의 방사능을 기준으로 계산함
- 방사능 계산을 위해 UKAEA에서 개발한 방사화 계산 코드인 FISPACT와 방사화 데이터베이스인 EAF (European Activation File)을 사용하였으며, 중성자방사화 시스템이 측정해야 하는 ITER 중성자속 범위는 [표4-20, 중성자방사화 시스템의 측정 물리량 및 특성 참조] 1014-1021 n/s 정도의 범위를 가짐
- 본 계산의 목표는 주어진 시편의 질량으로 ITER 중성자 생성량 전 범위를 포함할 수 있는지 확인하기 위한 것임
- 계산 결과[그림4-64], 중성자방사화 시스템은 102-1010 watt의 핵융합 파워와 이에 해당하는 1014-1021 n/s의 중성자속을 측정할 수 있음이 확인되었으며, 이에 따라 중성자방사화 시스템은 ITER의 측정 요구조건을 만족함을 확인함

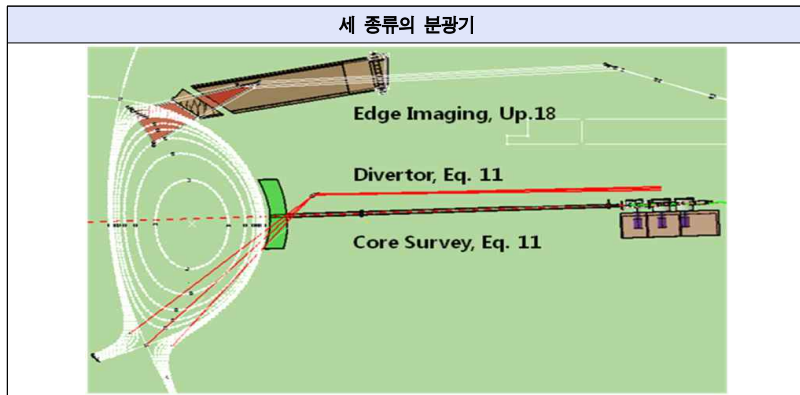


[그림4-64] 방사능을 생성하기 위해 필요한 핵융합 출력

진공자외선 분광 측정기술 성과 중점정리

● 진공자외선 분광 측정장치 설계 및 제작 기술

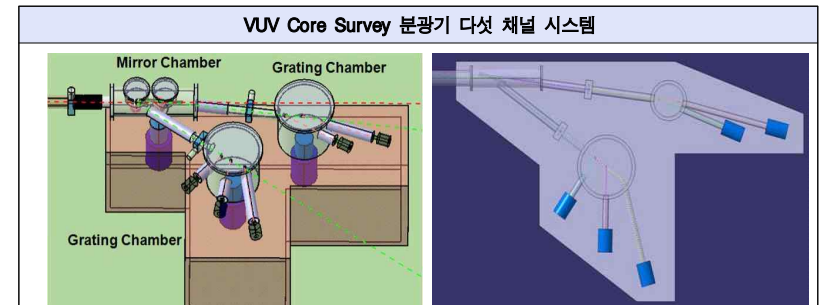
- ITER 토카막 플라즈마에서 발생하는 다양한 불순물 이온들을 시간 또는 공간에 따라 모니터링하기 위해서 진공자외선(VUV) 분광기가 설치되며, 이는 장치 안전 및 이온 수송 연구와 관련하여 그 중요성을 지님
 - 일차벽 또는 Divertor 재질로 예상되는 Be 및 W 이온, 구조물로부터 생긴 Ni, Fe, Co, Cu, Li, Al 등의 금속 이온, 그리고 이와 함께 C, O, N, He과 같은 불순물 이온들의 검출이 예상되며, 외부에서 Gas Puffing에 의해 주입되는 Ar, Kr, Ne 등의 분광 진단이 필요함
- 이를 위해 ITER 플라즈마 영역 별로 세 종류의 진공자외선 분광기가 설치됨[그림4-65]
 - 중간포트에 설치되는 VUV Core Survey 및 Divertor VUV 분광기, 상부포트에 설치되는 VUV Edge Imaging 분광기가 불순물 이온들의 시간 또는 공간에 따른 분포를 진단함
 - 이 중 Core Survey 및 Divertor 분광기는 공간 분해능 없이 Line-Integrated된 광 신호를 시간에 따라 모니터링하며, Edge Imaging 분광기는 플라즈마 Edge 영역을 약 5 cm 이하의 공간분해능으로 1차원 분포를 측정하는 분광기임



[그림4-65] 영역별 세종류의 VUV 분광기

1. 중간포트 설치 VUV Core Survey 분광기 개념설계

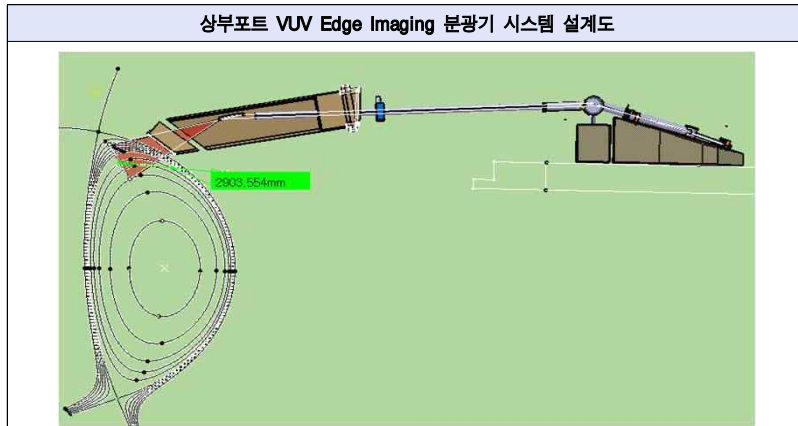
- VUV Core Survey 분광기 시스템 광학 설계의 측정 요건은 2.4nm에서 160nm까지의 진공자외선 파장 영역을 시간 분해능 10ms, 측정 정확도 10%로 플라즈마 불순물을 모니터링이 가능해야 함
- 불순물의 가장 주요한 분광 선으로부터 해당 원소를 분석하기 위해 전체 파장 영역에서 약 500배에 해당하는 파장 분해능($\lambda/\Delta\lambda$)을 요구됨
- 인접하는 두 분광 채널들의 겹치는 영역에서 적절한 분광 선들을 배치하여, 두 채널 사이 빛 세기의 실시간 상호 Calibration 모니터링이 가능하도록 파장영역을 설계함
- 위의 조건을 만족시킴, 상호 간섭이 최소화되도록 다섯 채널의 분광계를 갖는 VUV Core Survey 분광기 시스템을 설계함
 - 평면결상 광학설계를 바탕으로 전체 광학 시스템은 한 개의 Mirror 챔버, 두 개의 Grating 챔버로 구성함[그림4-66]
 - Mirror 챔버 내에는 플라즈마로부터 오는 평행 광을 두 Grating 챔버로 입사시키기 위해 각 챔버의 Slit에 빛을 집속할 Cylindrical Mirror를 두 개 설치함
 - 분광기 길이에 따라 1번, 2번 채널의 분광계를 한 진공 챔버에 놓고, 3번, 4번, 5번 채널의 분광계를 다른 하나의 진공 챔버에 설치함
 - 각 Grating 챔버 내 Grating 들은 높이를 달리하며, 동일 광축 상에 위치시켜, 거울에서 반사되어 오는 빛을 간섭 없이 분광시킬 수 있도록 함
 - Detector는 직경 40mm MCP를 가정하였으며, 25.4mm Back-illuminated CCD로 대체할 수 있음



[그림4-66] VUV Core Survey 분광기 다섯 채널 시스템

2. 상부 포트 설치 VUV Edge Imaging 분광기 개념설계

- 상부 포트(Upper Port 18)에 설치할 VUV Edge Imaging 분광기는 플라즈마의 Edge 영역($0.85 < r/a < 1.03$)에 있는 불순물을 공간 분포에 따라 측정함
 - 주요 불순물 이온들의 분광 선이 포함된 17nm~32nm 파장 대역에서 공간 분해능 5 cm, 분광 분해능 $\lambda/\Delta\lambda > 500$ 정도로 측정 가능하도록 설계함
- 시스템은 상부 포트에 20mm 폭의 긴 Slot(길이 약 900mm)을 내어서 이를 통해 들어온 빛을 증계(Relay) 하여 Port Cell에 위치하는 분광기의 Slit까지 집속시키고, 공간에 따른 분광 신호를 측정함[그림4-67]
- 추가 광학 설계 결과, First Field Mirror는 기존 설계안의 Concave Spherical Cylindrical에서 Parabolic Cylindrical로, Collimating Mirror는 Toroidal Mirror에서 Ellipsoidal Mirror로 변경하도록 함
 - 수정된 설계에 따라 Shutter Size가 축소(약 $1.5\text{cm} \times 1.2\text{cm}$)되고, Port Plug 내 Tube 크기도 약 10cm 직경 가능함
 - 광학 설계에 있어 Slit 상의 Rectangle ($0.2\text{cm} \times 80\mu\text{m}$) 모양이 뒤틀림(Astigmatism) 없이 Imaging 영역까지 증계됨



[그림4-67] 상부포트 VUV Edge Imaging 분광기 시스템 설계도

● 진공자외선 분광 측정데이터 해석 기술

[2-채널 VUV 분광기 시작품]

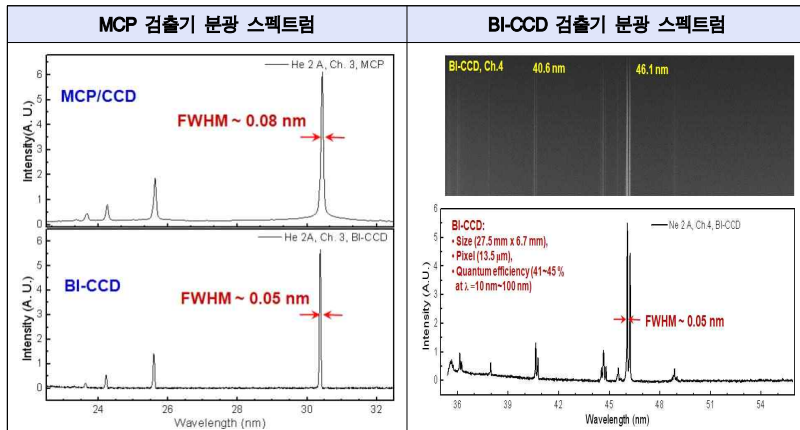
- ITER 중간 포트 (Eq. 11)에 장착할 VUV Core Survey Spectrometer 제작 사양과 같은 파장 영역을 지닌 Calibration 광원과 이에 대한 두 채널 분광 시스템을 구축하여 설계를 검증하고자 시작품을 제작 및 기술시험을 수행함
- ITER Core Survey Spectrometer는 다섯 채널 동시 분광시스템을 갖는 것으로 설계되었는데, 이를 본격 제작하기에 앞서 분광기의 다양한 구성과 배치를 연구하고, VUV 광검출기, 필터, Baffle등의 광학 부품을 검증하는 것을 목적으로 시스템을 구축함
- 다섯 채널 중 14.4 ~ 31.8 nm, 29 ~ 60 nm 영역에 해당하는 3번, 4번 두 개 채널에 대한 동시 분광 시스템을 제작하여, 한 챔버에 설치하고, ITER VUV 분광기 진단장치에 대한 다양한 설계 및 광학 장치들의 성능을 시험하였음
 - VUV 영역의 광원은 Hollow Cathode Lamp를 사용함
 - 시작품은 진공 Chamber에 두 개의 Grating을 이용하여 14.4~31.8nm 영역 (Ch.3)과 29~60nm 영역(Ch.4)의 빛을 동시에 높은 분해능으로 분광가능하도록 함
 - 진공 실험을 통해 Grating 챔버의 Base 진공도를 6×10^{-8} Torr까지 달성하여 작동 시 무리가 없는 것을 알 수 있었음



[그림4-68] 2-채널 VUV 분광기 시작품

[광검출기 시험]

- ITER VUV 광 검출기로서 적합한 검출기를 연구하기 위해, 현재 상용되는 두가지의 다른 광검출기를 비교 연구함
- 20 nm ~ 60 nm 사이의 파장에 따른 빛의 세기가 Calibration 되어 있는 Hollow Cathode Lamp를 사용하여, 분광기 시작품의 데이터를 수집함. 또한 파장별 Calibration이 되어 분광선 세기의 광량을 알고 있는 He 및 Ne 2 A 방전 조건에서, 본 분광기 시작품의 측정을 통해 분광 데이터를 수집함
- 광 검출기로서 서로 다른 종류인 MCP (Micro Channel Plate)와 Back-illuminated CCD가 설치하여 성능을 평가함
 - 같은 실험조건에서 MCP와 BI-CCD 광 검출기 성능을 비교하면, [그림]에서 보는 바와 같이, BI-CCD의 분광 Resolution (FWHM)이 MCP 보다 우수한 것으로 측정되었고, 그 이유는 BI-CCD의 Pixel 크기가 ~13.5μm로 MCP/Camera Resolution ~80μm 보다 더 작기 때문으로 분석됨

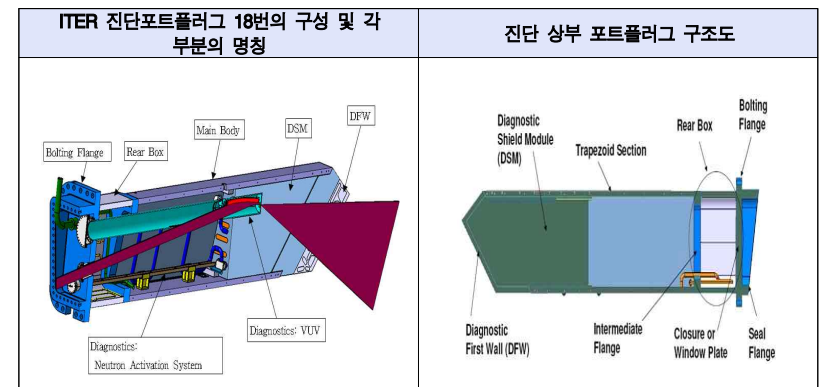


[그림4-69] MCP 및 BI-CCD 검출기 분광 스펙트럼 비교 연구 결과

■ 포트 플러그 설계 및 제작 기술

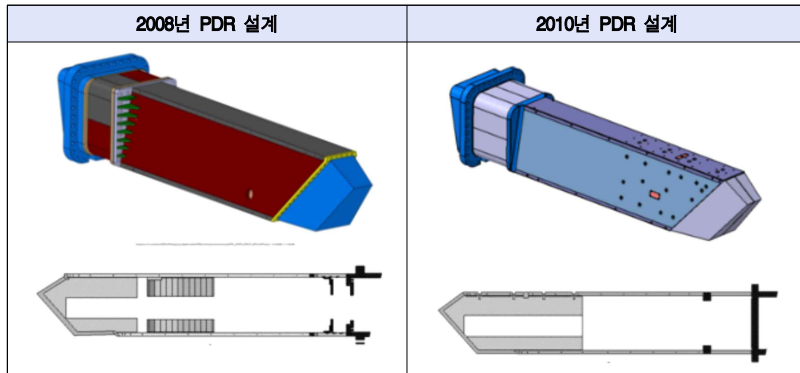
[상부 포트플러그 설계]

- ITER 진단장치는 진공용기 상부, 중부 및 하부에 연결된 포트를 통해 핵융합 반응을 측정함. 반사경(Mirror)이나 도파관(Waveguide) 등과 같이 플라즈마 관측 부품들은 진공용기나 블랭킷에 바로 설치되기도 하고, 포트플러그에 장착하여 주장치에 설치됨
- ITER 진단포트플러그는 스테인레스 스틸(SS316LN-ITER Grade) 재질의 구조물로서 진단장치를 진공용기 내부에 설치하기 위한 장치임
- 상부 진단포트플러그는 기본구조물(Generic Upper Port Plug, GUPP), 중성자 차폐 모듈(Diagnostic Shield Module, DSM), 진단 일차벽(Diagnostic First Wall, DFW) 그리고 내부 진단장치로 구성되어 있음
- 한국이 조달하는 18번 포트플러그에 설치하는 진단장치 부품은 중성자방사화 시스템(Neutron Activation System, NAS) 및 진공자외선분광기(Vacuum-Ultra-Violet Spectroscopy, VUV)의 필드미러(Field Mirror)와 지지구조물(Diagnostic Tube), 셔터(Shutter), 전송파이프(Transfer Line) 등임



[그림4-70] 진단포트플러그 18번의 구성 및 진단 상부 포트플러그 구조도

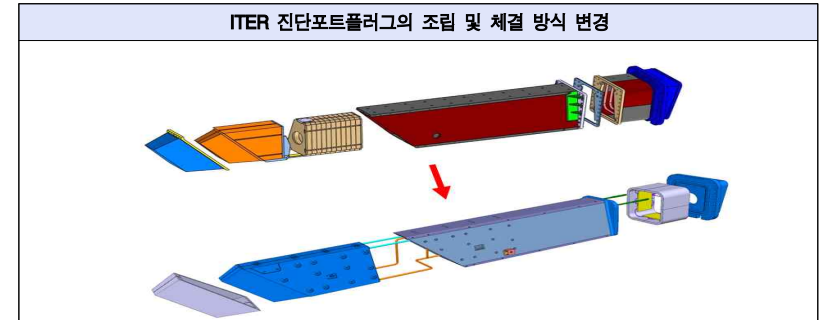
- 1단계(2008-2011)동안 이루어진 진단 상부포트플러그 설계변경을 실시함
- 2008년 설계에서 DFW는 [그림4-71]에서 보는 바와 같이 관형(shell) 구조로 기본구조물에 볼트로 체결됨
 - 이와 같은 설계의 문제점은 크게 두 가지임. 첫째, DFW에 발생한 큰 전자기력에 비해 기본구조물과의 볼트체결은 구조적으로 약함. 두 번째 문제는 열하중과 관계가 있음. DFW의 체결면(노란색 부분)은 블랭킷과 DFW 사이의 빈 공간을 통해 플라즈마 복사열에 노출되어 높은 열하중(약 0.08MW/m²)을 받게 되기 때문임
 - 이러한 열하중에 의한 구조물의 온도 상승을 막기 위해서는 냉각유로를 체결면 가까이 두어 효과적으로 냉각을 시켜야 하지만 체결면의 볼트 때문에 냉각유로를 복사열을 받는 면에 가까이 위치시키는 데는 한계가 있어 이 부분에서 구조물의 온도를 제어하기가 어려움



[그림4-71] ITER 진단 포트플러그 설계 변경

- 이러한 문제점을 해결하기 위해 2010년 PDR 설계에서는 [그림4-72]에 보는 바와 같이 DFW와 기본구조물의 체결을 없앴
- DFW(회색)와 DSM(파란색)을 서로 결합시킨 후에 이를 플라즈마 쪽에서 삽입하여 DSM과 기본구조물을 서로 체결하도록 함
- 체결 방법은 기본구조물의 본체 측면에서 볼트로 고정하도록 함

- 이와 같은 체결 방식은 과도 구속(Over-constrain) 문제를 야기하므로, 2011에는 DSM 개념설계에서 접촉과 키(key)을 이용한 방식으로 개선되었음

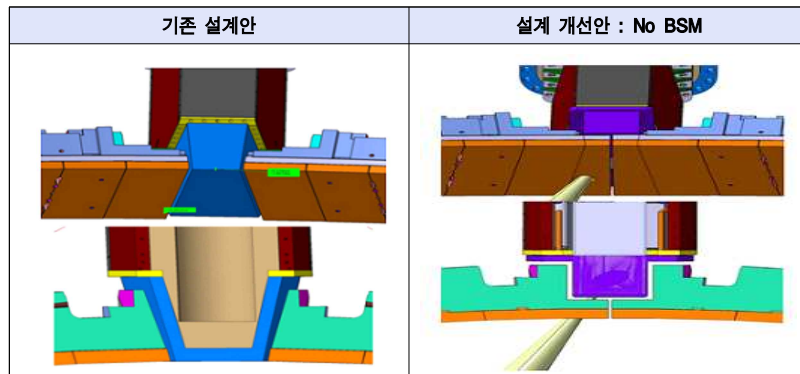


[그림4-72] ITER 진단 포트플러그 체결 방식 변경

- DFW(Diagnostic First Wall)의 체결 방식 변경 : 볼트를 포트플러그 길이 방향으로 기본구조물에 체결하는 방식에서 DSM(Diagnostic Shield Module)에 체결하는 방식으로 변경함
 - DFW는 전자기력을 많이 받으므로 강한 볼트 체결을 위해 체결면과 체결길이를 충분히 확보하여야 하는데, 두께 60mm인 기본구조물의 플라즈마 쪽 끝단에 볼트 체결을 위한 충분한 공간을 확보하기가 어려웠음
 - 또한 구조물 냉각채널은 가능한 구조물의 끝단에 가깝게 위치시켜야 하므로 볼트 길이 확보의 어려움이 있음
 - 이를 해결하기 위해 DFW를 DSM에 체결하는 방식으로 바꾸고 이렇게 함으로써 상부 포트플러그와 DFW의 설계 인터페이스를 없앴
- DSM(Diagnostic Shield Module)의 개수를 하나로 줄이고 기본구조물 측면에서 볼트로 체결하는 방식으로 변경함
 - DFW를 플라즈마로부터 60mm 후퇴시킴으로써 플라즈마와의 접촉을 줄임으로써 RH Class을 정기 유지보수가 필요하지 않은 2단계로 낮춤으로써 설계를 변경함
- 그 외에도 냉각채널 설계가 조금 변경됨
 - Trapezoidal Section의 각 플레이트 사이의 냉각수 연결부위와 Rear Box의 냉각채널의 구조를 바꿈

[진단 상부 포트플러그에 대한 전자기력 해석]

- 포트플러그를 플라즈마로부터 보호하기 위해 상부 포트플러그의 BSM을 없애고 대신 주변 블랭킷 확장하였을 경우 발생하는 전자기력 변화를 계산함[그림4-73]
- 설계 개선안의 주된 의도는 포트플러그에 작용하는 전자기력을 줄이는 것이며 부수적으로 BSM 장착으로 인한 복잡한 설계 인터페이스를 없앨 수 있으며 BSM을 원격조작으로 유지보수 할 필요가 없어진다는 장점이 있음

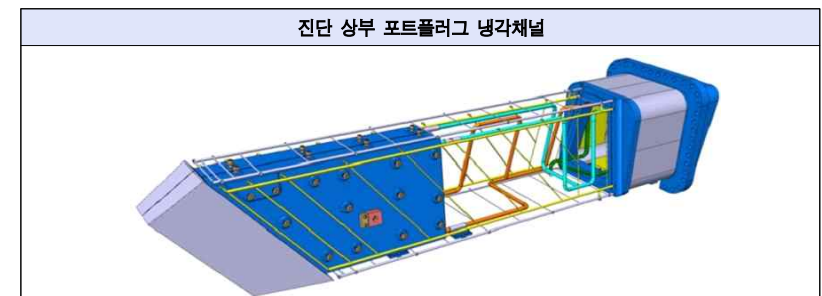


[그림4-73] 포트플러그 전자기력 감소를 위한 BSM 제거

- 전자기력은 ANSYS-EMAG를 활용하여 해석함
 - 플라즈마 붕괴 시 상부 포트플러그에 가장 큰 전자기력을 작용하는 Fast VDE-Upward-36ms 시나리오를 선택하여, 전자기력 해석 수행함
 - 플라즈마 붕괴 시의 플라즈마 형상 및 전류 모델링은 DINA 해석 결과 파일의 전류 필라멘트의 위치와 전류 데이터로부터 ANSYS의 해당 유한 요소에 전류밀도 값으로 변환하여 입력함
 - Slit 형상과 개수에 따른 전자기력 변화를 계산하여 타 DA 계산 결과 비교하였으며, 해석 결과가 대부분 잘 일치함을 확인하였음
 - 진공용기에는 토로이달 방향의 전류가 유도되었고 블랭킷 일차벽도 슬릿의 영향으로 토로이달 방향 전류가 주를 이룸

[열수력 해석 수행]

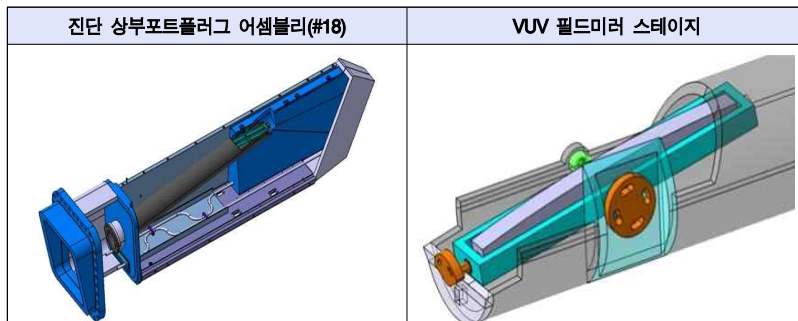
- 진단 상부 포트플러그의 냉각채널을 설계하고 다음의 세 가지 사항에 대하여 열수력 해석을 수행함
 - 냉각채널 유동 해석
 - 장치 운전 기간 및 Baking 기간에 대한 열해석
 - 냉각채널의 유동에 의한 마모 현상 분석
- 기본구조물 본체의 냉각채널에 대한 유동 해석으로부터 유동 속도, 압력 강하, 유량 분포를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻음
 - 첫째, 전압력 손실 1MPa을 고려할 때 총 유량은 5.1 kg/s 임. 포트플러그에 공급할 수 있는 허용 유량을 초과할 경우 유량조절밸브를 장착하여 유량을 줄여야 함
 - 둘째, 유량이 냉각채널의 표면 거칠기에 따른 변화를 조사하였다. 일반적인 드릴링 가공의 경우 표면 거칠기는 8 마이크로미터이며, 이를 고려했을 때 유량은 5.07 kg/s로 거의 변화 없음
 - 셋째, 냉각채널 전체에서 갑작스런 압력 강하가 발생하지 않으므로 공동 현상(Cavitation)으로 인한 기포 발생의 가능성은 매우 적음
 - 넷째, 냉각채널이 서로 만나는 T-junction 부분에 국부적인 유동 속도가 21m/s로 매우 높음
 - 다섯째, 유량 분포는 Trapezoidal 플레이트를 좌우로 가로지르는 모든 채널에 대해 0.5 kg/s +/- 0.2 kg/s로 균형을 이룸
 - 마지막으로, 각 냉각채널에 대한 유량 분포는 PPPL에서 2D코드로 계산한 결과와 비교하였고 실험결과와도 비교하였다. 본 해석의 결과가 실험결과와 일치함으로써 해석의 신뢰성을 확보함



[그림4-74] 포트플러그 냉각채널

[상부 포트플러그 내부장치 Integration 개념설계]

- VUV Imaging System은 진단 상부 포트플러그 18번에 설치되므로 개념설계 검토를 위해 필드미러의 설치 방안, 필드미러와 지지구조물에 대한 공학 해석 결과를 제시하였음. 그 이후 진단 상부 포트플러그 기본구조물 2010년안을 바탕으로 VUV와 NAS 진단부품 및 중성자 차폐모듈의 구조와 설치에 대한 개념설계를 수행함
- VUV 필드미러 지지구조물 설계 및 공학해석: VUV CDR 보고서 제출
 - VUV 개념설계검토(CDR)을 위해 VUV 필드 미러 및 지지구조물에 대한 공학해석을 수행하였으며, 설계는 2009년 진단 상부 포트플러그 Integration 개념설계를 활용함. 전자기력과 열하중에 대한 공학해석을 수행하여 구조 안정성을 평가하는 성과를 올림
- 내부장치 Integration 설계: CATIA 모델 완성 : 한국이 조달하는 진단 상부 포트플러그 18번 내부에 설치되는 VUV 필드미러와 NAS 진송라인에 대한 Integration 설계를 수행함[그림4-75]
 - VUV 필드미러(M1)와 셔터(Shutter)는 원형 튜브에 장착하여 설치하도록 하였다. VUV 부품들을 수리할 때 포트플러그 전체를 분리하지 않고 원형 튜브만 분리하여 Hot Cell로 이송할 수 있도록 하기 위해서임
 - VUV 필드미러(M1) 홀더(Holder)를 그림 우측의 VUV 필드미러 스테이지와 같이 설치하여 포트플러그 설치 후에도 반사경을 2축 방향으로 조절할 수 있도록 하였음



[그림4-75] 진단 상부 포트플러그 Integration 설계 개념도

③ 진단장치 핵심기술의 주요 성과

- 1단계 시작 당시 한국은 일정을 주도할 수 없는 업무들로서 IO의 일정에 따라 협력하여 공동업무를 수행하는 부분이 많은 관계로 진단 포트플러그 기본구조물 공학해석과 제작성 검토 등을 통해 설계를 지원하였음
- DSM은 개념설계검토(CDR)을 완료하였으며, 다른 하나의 업무인 Port Integration은 CDR이 실시되지 않는 상태이나 한국 자체적으로 Port Integration을 수행하여 개념설계 수준의 설계를 완료하는 성과를 올림
- 1단계(2008-2011) 기술개발 단계에서 진단 상부포트플러그 설계의 문제점을 발견하여 설계변경을 실시하였으며, 2011에는 DSM 개념설계에서 접촉과 키(key)을 이용한 방식으로 개선하는 성과를 올림
- 진단 상부 포트플러그의 냉각채널을 설계하고 열수력 해석을 수행한 결과, 본 해석의 결과가 2D코드로 계산한 결과와 일치함으로써 해석의 신뢰성을 확보함

④ 진단장치 조달추진 경위 및 중요 지재권 성과

■ 진단장치 조달약정

- 우리나라 조달 진단장치는 크게 3가지 종류로 되어 있으며, ITER 진단장치에서 할당률과 조달가치는 3.0%(4.64453 kIUA)임. 세부적인 조달패키지는 다음과 같이 구성되어 있음
 - 상부포트플러그 (Upper Port Plug) : 진단용 상부 포트플러그 18번 및 진단모듈
 - 진공자외선 분광기 (VUV Spectrometer) : 플라즈마 내 불순물 측정
 - 중성자방사화 시스템 (Neutron Activation System) : 핵융합 중성자 플루언스 및 총 핵융합 에너지 측정
- ITER 국제기구(IO)의 설계변경에 따라 공급품목의 사양과 수량이 변경됨
 - Neutron activation System-16N → Deleted
 - Divertor VUV spectrometer → Added
 - Port Plug → Common Manufacture (Credit Value Changed)

- 진단장치 기술사양서(DDD) 작성 기술협력 및 '11.06월 조달약정(PA) 체결
- 개념설계/조달약정 기술사양서(DDD/Annex-B) IO 작성 기술협력
- 55.EH VUV Edge, 55.B8 NAS 진단장치 조달약정 체결
- 진단장치는 우리나라가 조달하는 9개 조달품목 중 7번째로 체결하는 것으로써, 앞으로 블랑켓 차폐블록('13.11월), 삼중수소 SDS('14.12월)의 품목이 조달약정 예정에 있음

중요 지재권 성과

- 진단장치 1단계 주요 성과 중, 핵심기술, 조달약정 외 대표적 성과로 [표 4-20]의 특허, 논문 등을 들 수 있음

[표4-20] 진단장치 1단계 중요 논문 및 특허

비고	내용
중성자방사화시스템 논문명: M.S. Cheon et al., "Diagnostic neutron activation system for KSTAR", Journal of Instrumentation 7 C05009, 2012	- 아래 논문 내용은 ITER 중성자방사화 시스템의 시 작품을 이용하여 실제 토카막 환경인 KSTAR에서 중성자 진단 실험을 실시한 결과를 기술하고 있음 - 본 논문을 통해 한국이 토카막 중성자 진단장치의 설계, 설치, 운전, 결과 분석 능력을 갖추었음을 증명함
중성자방사화시스템 특허명: "이송체 위치 추적 기능을 구비한 공압식 이송장치 및 그것을 이용한 이송체 위치 추적 방법", 한국기초과학지원연구원	- 시편의 공압 이송 방식을 사용하는 중성자방사화 시스템에서, 전송선 내에 캡슐이 어디에 위치하는지 탐지하는 방법 및 그 장치에 대한 특허출원임 - 본 방법을 이용하면 진단 정확도와 운전 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대됨
진공자외선분광기 논문명: C.R. Seon, et. al., "Development of two-channel prototype ITER vacuum ultraviolet spectrometer with back-illuminated charge-coupled device and microchannel plate detectors", Rev. Sci. Instrum. 81, 10E508, 2010	- 아래 논문 내용은 현재 VUV 분광기의 광 검출기로 사용되고 있는 MCP 광 검출기와 후면 조사 CCD 광 검출기의 분광 해상도를 같은 실험조건에서 비교한 실험 결과로 후면 조사 CCD의 해상도가 뛰어난 결과를 얻었음 - 이를 통해 ITER VUV 분광기의 광검출기 결정에 활용되었음

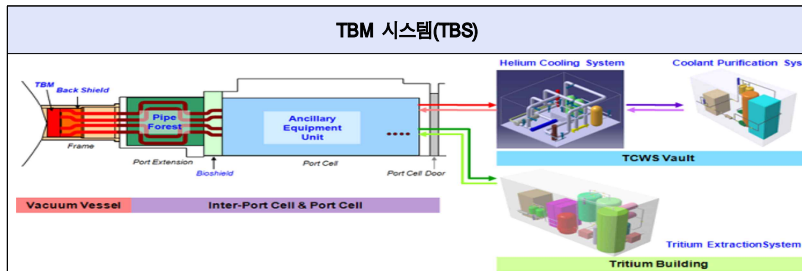
5] 진단장치 정성적 기술성과 분석

- 진단장치는 핵융합로를 최적으로 운전하기 위하여 모니터링해야 할 플라즈마의 물리적 상태를 진단하는 장치를 만드는 기술임.
- 진단장치는 소규모 실험장치로서, 40여 가지의 진단장치 중 한국사업단에서는 2개의 진단장치와 1개의 진단용 포트플러그를 조달할 계획임
- ITER 사업은 실험용 핵융합로를 건설하여 플라즈마 제어, 열효율 향상, 연료주기 선순환 등을 실험하는 것이 목적이기 때문에 이를 위한 진단장치가 중요함. 현재 40여개의 진단장치가 설치될 예정임
- 처음 진단장치 기술개발을 시작할 당시 한국의 토카막 진단 관련 연구경험이 부족한 상태였기 때문에 진단 장치 개발 기술력에 대한 의문이 있는 상태였음. 그러나 두 개의 진단장치를 조달약정 요구대로 실제 토카막 환경인 KSTAR에 설치하고 이를 운전, 데이터 해석하는 데에 성공함으로써 기술력에 대한 신뢰를 얻은 것이 1단계 성과 중 가장 중요한 성과라고 할 수 있음
- KSTAR에 설치된 진단장치 시작품은 ITER 진단장치 본제품의 측정, 보정 및 분석기술을 확보하는데 활용이 가능하며, KSTAR 기술시험을 통하여 확보된 우수한 연구개발 결과들은 향후 본 제품의 개발·제작에 직접 활용될 것으로 판단됨
- 현재 우리나라는 40여개의 진단장치 중 두 개의 진단장치 밖에 참여를 못하고 있는 아쉬움이 있으며, 이를 보완키 위해 비조달 진단장치에 대한 기술을 모니터링하고 있음

4-10. TBM(Test Blanket Module)

1 TBM 기술 개요

- 핵융합로는 중수소와 삼중수소를 연료로 사용하여 핵융합 반응을 일으키며 이때 발생하는 에너지 중 약 80%는 중성자의 운동에너지 형태로 발생함
- 핵융합로 실용화를 위해 이 중성자의 에너지를 발전이 가능한 열에너지로 변환하는 것이 필요하며, 핵융합로에서 중성자를 이용하여 전기 생산을 위한 열에너지 및 삼중수소 연료를 생산해내는 부분을 증식블랑켓이라고 함
- 핵융합 반응에 의해 발생하는 중성자는 증식블랑켓 내의 리튬 원소와 반응하여 삼중수소를 생산하고, 동시에 구성 물질과의 핵반응에 의해서 전환된 열에너지는 냉각재에 의해서 회수되어 전기 생산에 사용됨
- 따라서 핵융합에너지 기술개발을 위한 핵심기술로서, 삼중수소의 자급자족을 가능하게 하고 핵융합 반응에서 나오는 중성자의 에너지를 열에너지로 변환하는 증식블랑켓 기술개발이 필수적임
- 테스트 블랑켓 모듈(Test Blanket Module: TBM)은 이러한 증식블랑켓의 주 기능인 삼중수소의 증식 및 전기 생산을 위한 열 추출 과정을 실증하기 위한 모듈로 핵융합 환경에서 시도되는 최초 증식블랑켓 시험 프로그램임
 - TBM 프로그램을 통한 TBM 설치 및 검증은 핵융합에너지의 실현가능성을 실험하는 중요한 수단이며, 장시간 플라즈마연구, 대형 토카막장치 기술개발과 더불어 ITER 건설·운영 사업의 3대 목표 중의 하나임



[그림4-76] TBM 시스템

2 TBM 핵심기술

TBM 핵심기술 및 정의

- [표4-21]은 도출된 TBM 핵심기술과 각 핵심기술을 세분화한 핵심요소기술을 나타내었고, 각 기술의 정의를 간략하게 설명함

[표4-21] TBM 핵심기술

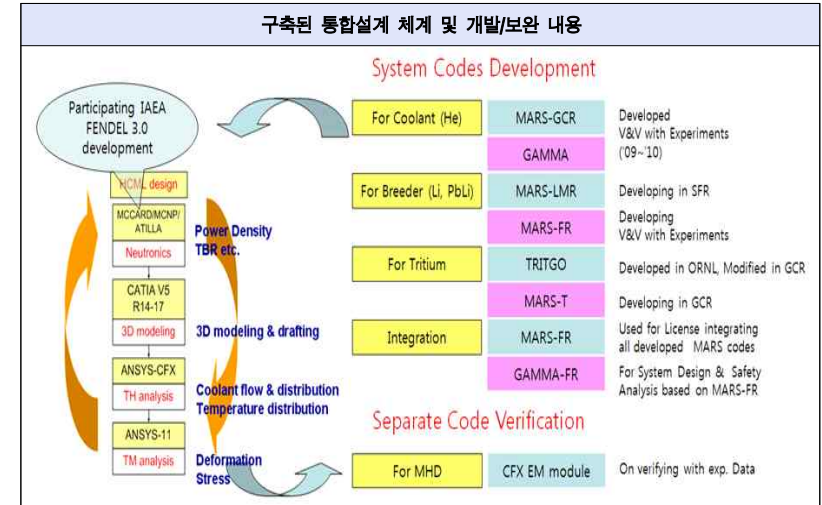
■는 핵심기술 (○는 핵심요소기술)	내용
■ TBM 설계 기술	- 핵융합로를 운전하며, 반응기내에서 발생하는 현상을 분석하기 위한 제반설계, 해석, 평가, 실험, 전산해석코드 기술 및 원료주기 선순환을 위한 소재/공정 기술
○ 설계툴 개발 기술	- 핵융합로의 정특성 및 동특성, 반응조건 등의 현상을 시뮬레이션 할 수 있는 설계프로그램 개발 기술
○ 설계코드 구축 기술	- 상용핵융합로 건설을 위한 설계코드 구축 및 표준화 기술
■ TBM 재료 기술	- 핵융합시스템의 구조적 안정성을 위한 구조재료의 성능 및 신뢰성 평가기술 및 원료주기 선순환을 위한 삼중수소 증식, 순환 기술
○ Li 증식 재료기술	- 중성자와 반응하여 삼중수소를 증식하는 Li 세라믹 화합물로 구성된 고체형 TBM 제조기술
○ 중성자 반사 재료기술	- 중성자를 증식재 방향으로 반사시켜 삼중수소 증식 효율을 높일 수 있는 반사재 제조기술
■ TBM 공정기술	- 핵융합로에서 안전하고 효율적으로 운전 및 실험할 수 있는 TBM 장치 제작기술
○ 용접기술	- 열변형 및 스트레스를 최소화하고 용접 중 불순물 유입을 방지할 수 있는 용접기술
○ 삼중수소 recycling 기술	- 생성된 삼중수소를 추출/회수/정제하여 리사이클 하는 기술
○ He cooling 기술	- 고온고압의 He를 이용한 TBM 냉각 기술
○ 진단/계장 기술	- 중성자의 측정에 의한 삼중수소 증식량 계산기술

■ TBM 설계기술 성과 중점정리

● 설계물 개발 기술

[통합 설계기술 개발]

- TBM은 중성자 조사, 고열유속, 고자기장 등으로 인해 ITER에서 가장 가혹한 환경에 노출되는 컴포넌트 중 하나로서 TBM 설계는 핵설계, 고온 열수력 설계, 고온 구조 설계, 삼중수소 계통 설계, 안전 해석 등 다양한 설계기술을 검증할 수 있는 기회가 될 것임
- 이를 위해서는 기존의 설계 모델 및 툴을 개선하고, 분야에 따라서는 새로운 설계체계를 구축할 필요가 있음
- 통합 툴/체계 검증 및 보완 성과
 - 상용코드(CATIA, ANSYS) 및 원자력분야코드(MARS-GCR, GAMMA) 활용한 통합설계체계 구축 및 보완
 - MARS-GCR, GAMMA 코드의 냉각 해석능 검증 및 보완
 - 삼중수소 거동해석 및 MHD 해석을 위해 MARS-GCR, GAMMA코드 내 모델 개발 및 검증
 - GAMMA-FR 개발 : 물질치(Li, PbLi) 및 기본 상관식 인코딩
 - Neutronic 해석 체계구축
 - * MonteBurns-FUSION 코드 개발 및 보완
 - * MCNP 와 CINDER 코드를 연계한 MonteBurns 계산체계 구성
 - * FENDL 2.1 핵자료라이브러리 확보 및 추가(B, Pb 및 W)
 - 기술보고서 1건 작성



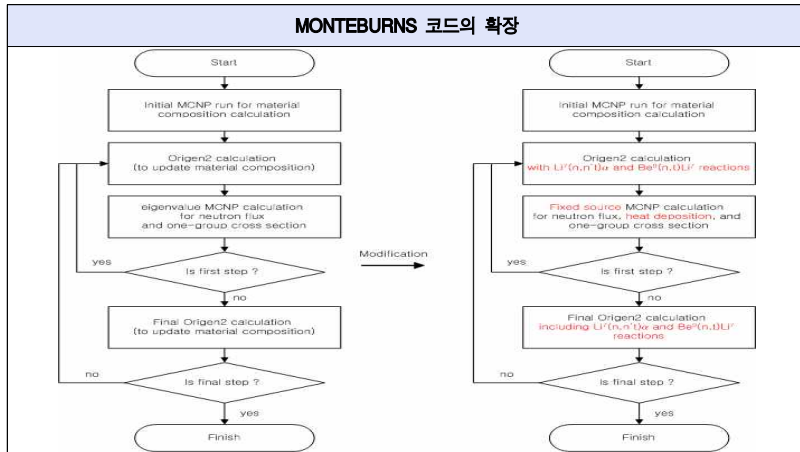
[그림4-77] 통합설계 체계 및 개발/보완 내용

● 설계코드 구축 기술

[MONTEBURNS-FUSION 코드]

- 핵분열 원자로의 해석에 있어서는 생성되는 중성자들이 대부분 핵분열에 의하기 때문에 실제 중성자가 가지는 에너지는 수 MeV를 넘지 않는 반면, 핵융합로의 블랑켓에서는 아래 식과 같은 반응식을 통해 중성자가 생성된다. 그러므로 모든 입사 중성자 선원은 14 MeV의 고에너지를 가진다고 볼 수 있음
 - 반응식 : $D + T \rightarrow n(14.06[MeV]) + \alpha(3.52[MeV]) + 17.58[MeV]$
- 기존의 핵분열 원자로의 계산에 사용되던 MONTEBURNS 코드에서는 10 MeV 이상의 고에너지 반응에 대한 데이터 및 계산 처리 방법이 부족한 측면이 있음
 - 중성자와 광자의 수송 계산을 담당하는 MCNP 코드를 사용하는 부분은 FENDL 2.1 라이브러리를 사용함으로써, 10 MeV 이상의 고에너지 반응에 대한 데이터를 충족시켰다고 볼 수 있으나, 연소도 계산을 담당하는 ORIGEN 코드를 사용하는 부분은 이 부분에 관련된 데이터 및 계산 처리 방법의 부족을 발견할 수 있음

- 그러므로 1단계 개발기간에 [그림4-78]과 같이 MONTEBURNS 코드를 확장한 핵융합로용 MONTEBURNS-FUSION 코드를 개발함



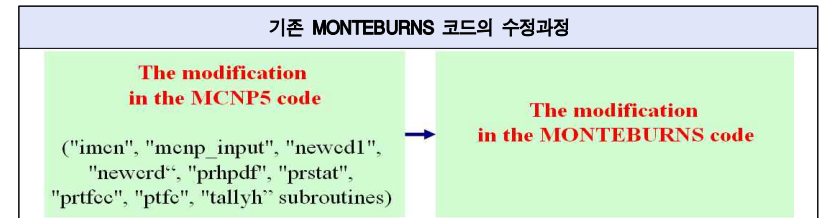
[그림4-78] 핵융합로용 블랭킷 계산을 위한 MONTEBURNS 코드의 확장

- 이와 같은 MONTEBURNS-FUSION 코드로의 확장이 성공적으로 이루어졌는지를 검증하기 위해, 해석해(analytic solution)와의 비교를 수행함
 - 확장된 MONTEBURNS 코드의 결과값들과 해석해(analytic solution)의 결과값들은 매우 작은 오차범위 내에서 일치함을 확인하였음

[연소계산 격자수의 확장]

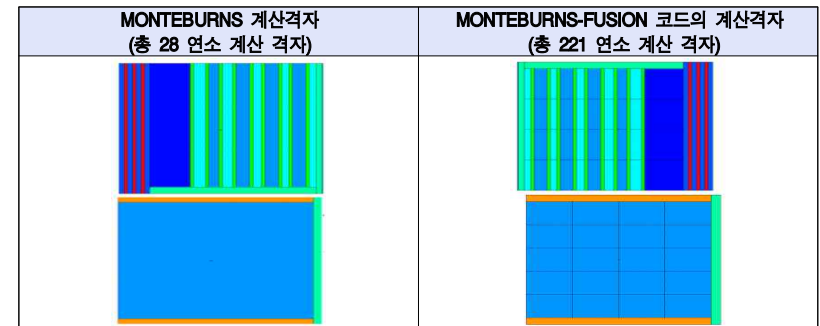
- 핵융합 블랭킷 설계용으로 사용되는 MONTEBURNS 코드는 총 사용될 수 있는 연소 계산 격자의 숫자가 49개로 한정되어 있음. 이는 MONTEBURNS 코드가 MCNP5 코드와 ORIGEN2 코드를 연계한 코드이기 때문에 생긴 성능의 제한 때문임
 - 이와 같이 적은 숫자의 제한된 연소계산 격자로 인해 실제 연소계산 시는 매우 큰 계산 격자를 사용할 수 밖에 없으며, 이는 보다 정밀한 수치 계산 결과를 필요로 하는 열수력학 및 기타 공학 설계 계산을 위해서 많은 오차를 유발할 수도 있음

- 1단계 연구에서는 TBM 상세설계에 적용이 가능하도록 기존의 MONTEBURNS 연계 코드와 함께 MCNP5 코드의 수정을 통해서 이와 같은 연소 계산 영역의 한계를 보완하고자 하였음
- [그림4-79]와 같은 코드의 수정 과정을 거친 후에 이를 통해 LOCAL 조건 하의 HCSB에 대하여 다음과 같이 보다 정밀한 계산을 수행하였음



[그림4-79] 연소 계산 격자 확대를 위한 기존 MONTEBURNS 코드의 수정과정

- 그로 인해 기존의 MONTEBURNS 코드에서는 연소 계산 격자 수의 제한으로 인하여 방사방향으로만 계산이 가능하였던 반면 확장된 계산능의 MONTEBURNS-FUSION 코드를 통해서 [그림4-80]에서 확인할 수 있듯이 poloidal 및 toroidal 방향으로도 보다 정밀한 계산을 수행할 수 있게 됨
- 결론적으로 이전 MONTEBURNS 코드 계산으로는 얻을 수 없었던 poloidal 및 toroidal 방향에 대한 보다 정밀한 중성자속 및 그에 따른 분포들을 확인하는 성과를 올렸으며, 향후 상세설계 단계까지 열수력 계산과의 연성 해석이 가능할 것으로 기대됨



[그림4-80] MONTEBURNS-FUSION 코드의 연소 계산 격자 영역의 확대

[핵/열수력 커플링 툴 개발]

- 증식블랑켓 설계시에는 먼저 핵설계를 통해 삼중수소 생산, 중성자 유속 및 에너지 생산 분포 등의 핵적 성능을 계산하고, 이를 열수력 해석을 통해 구현 가능한 설계안인지를 확인하는 방식으로 진행됨
 - 핵설계 및 열수력 설계의 Iteration 과정은 증식블랑켓 설계에 있어 가장 기본적인 과정이며, 초기 개념설계 단계에서는 시간과 노력이 요구되는 수많은 Iteration을 통해 하나의 개념설계안이 도출될 수 있음
- 그러므로 1단계 연구개발 시 이러한 Iteration을 효과적으로 수행할 수 있도록 고체형 증식블랑켓 개발시 핵/열수력 연성해석이 가능한 커플링 툴을 개발하였음
 - 핵/열수력 커플링 툴은 개념설계 단계에서 복잡하고 긴 시간이 요구되는 Iteration을 줄이기 위한 목적으로 개발이 착수됨
- 본 툴은 온라인 웹상의 GUI 환경에서 증식블랑켓 구조, 구성물질 및 냉각 채널 등의 변수를 입력할 수 있으며, 동일 환경 내에서 핵해석 코드인 MCNP 코드 및 열수력 수치해석 코드의 입력 파일을 작성하고 계산을 수행하여 결과파일을 2D 및 3D 그래프 형태로 시각화가 가능함
 - 즉, 핵해석 결과를 열수력 입력으로 변환하여 예비 열수력 해석을 수행할 수 있도록 하였으며, 증식블랑켓 핵설계 및 열수력 설계를 연성해서 동시에 가능하도록 한 것이 주요한 특징임
 - 해당 개념의 핵 및 열수력 성능을 한 프로그램에서 확인 가능하여 복잡하고 시간이 요구되는 Iteration 작업을 단시간에 가능한 장점이 있음
- (시스템구조) 웹 기반 사용자 인터페이스 프로그램
 - 주요 기능: 사용자가 계산 대상을 설정하고, MCNP, 열수력 수치해석 프로그램을 실행하여 나온 결과를 화면에 출력함
- (시스템구조) 열수력 수치해석 프로그램
 - 주요 기능: Blanket의 온도 분포 계산
- (열수력 수치해석 모델링) 수치해석 모델링에 있어서 주요한 특징으로는 계산 Iteration 적분을 위해서 Explicit Scheme을 사용하였으며, 격자계로서는 Staggered Grid를 사용하였음

- 수치해석 방법은 다음과 같이 먼저 Staggered Grid 구성하는 변수를 T_c 와 T_h , T_v 의 두 그룹으로 나누고 T_c 를 이용하여 T_h 와 T_v 를 계산하는 단계와 T_h 와 T_v 를 이용하여 T_c 를 계산하는 단계를 번갈아 가면서 수행하는 Alternating Iteration을 적용함. 이때 Relaxation Factor를 도입하여 Iteration 수렴 속도를 조절할 수 있게 함
- (모델링 검증) 실제 사례를 통한 검증(Validation)을 수행하여 본 핵/열수력 툴 모델링을 검증함
 - 최종 검증은 우리나라의 고체형 HCSB TBM (Horizontal Model)에 대한 CFD 결과와 비교 검증을 수행함
- 기술개발된 핵/열수력 커플링 툴발은 실질적인 작업에 활용되기 위해 최적화 및 성능검증이 필요함
 - 핵 코드 부분은 기존의 MCNP를 웹 기반 GUI 환경으로 바꾼 것이므로 특별한 업그레이드 및 검증이 필요 없음
 - 열수력 코드 부분은 단순화 모델링, 열전달 스킴 가정 등 온전히 새롭게 개발되었으므로 최적화와 추가적인 성능 검증이 있어야 하며 단순화 가정의 수학적 엄밀성 및 정확성을 검증할 필요가 있음
- 결론적으로 핵해석 부분은 3차원 계산이 가능하지만 열수력 부분은 2차원 까지 개발이 진행되었음
 - 불안정성의 요인을 파악하여 Relaxation Factor를 상황에 맞게 조절할 수 있도록 구현된다면, 전반적인 계산 속도 향상이 기대됨
- 이 기술 개발로 인해 TBM 뿐 아니라 고체형 증식블랑켓의 개념설계 및 설계 교육용 등으로 활발히 활용 가능할 것으로 기대됨

TBM 재료기술 성과 중점정리

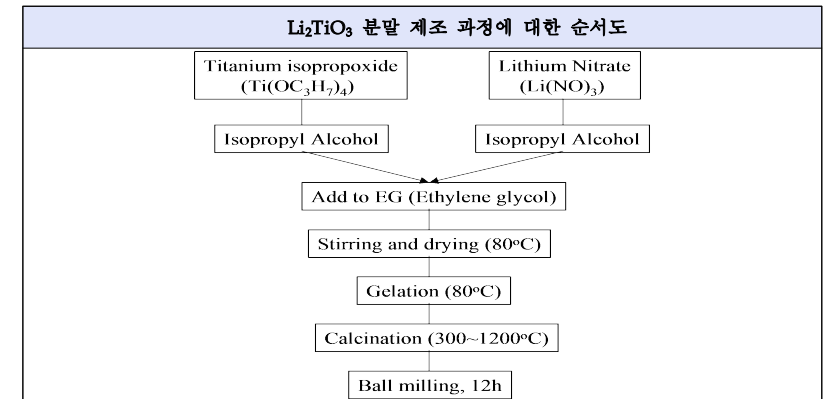
● Li 증식 재료 기술

- (기술개요) 핵융합 반응에 의해 생성된 중성자를 이용하여 삼중수소를 증식할 수 있는 Li 세라믹 페블을 개발함
 - 증식제 후보로 선정된 Li_4SiO_4 및 Li_2TiO_3 분말합성 기술을 개발하고, 이를 이용한 페블 제조방법 개발 및 대량생산 가능성을 평가함
- 삼중수소 증식을 위한 증식재료의 개발은 원료분말의 개발에서부터 시작되었으며, 한국을 비롯한 유럽, 일본, 러시아, 중국 등 각 나라의 TBM 특성에 맞게 증식재료를 개발하고 있음
- 우리나라는 지름 1 mm의 Li_4SiO_4 페블을 채용할 예정이며, Li_2TiO_3 페블도 개발하고 있음
- 기능소재 제조기술 개발로 인해 향후 중성자 조사시험, TBM을 이용한 실험결과 등을 반영하여 설계에 적합한 페블을 적용해 DEMO 등에 대비할 예정임

[Li_2TiO_3 분말합성]

- 불순물을 포함하지 않으며, 입자 크기가 균일한 세라믹 분말 합성방법의 하나로서 폴리머를 이용한 분말합성 방법을 들 수 있음
 - 종래에 사용되어 오던 용액 분말합성법인 Pechini resin을 이용한 용액-중합법을 응용한 것으로서, 새로운 폴리머를 이용한 분말합성 방법임
- 새로운 폴리머를 이용한 분말합성 방법은 물에 쉽게 용해되는 폴리머인 PVA (polyvinyl alcohol)을 이용하여 용액내의 금속 양이온들의 분산을 극대화하며, 하소온도를 낮출 수 있는 장점이 있음
- 또 다른 특징은 전구체 제조를 위한 고온 건조 과정에서 PVA 폴리머와 nitrate 형태의 금속 양이온에서 발생하는 CO , CO_2 및 NO_x 가스의 상호작용이 높은 점도의 액상 전구체에 많은 미세 공간을 유발시켜서 다공성의 전구체를 제조할 수 있음
- 분말합성의 순서는 혼합 용액을 건조시켜 겔형의 전구체를 제조한 후, 이

를 하소한 후 결정화시켜 Titanate 분말을 얻을 때, 건조온도는 $100\sim 120^\circ\text{C}$, 하소온도는 $600\sim 700^\circ\text{C}$, 결정화온도는 $700\sim 900^\circ\text{C}$ 가 바람직함. 하소온도가 600°C 미만이면 열분해된 폴리머로부터 잔유 탄소가 남게 되고, 700°C 를 초과하면 결정화가 시작됨

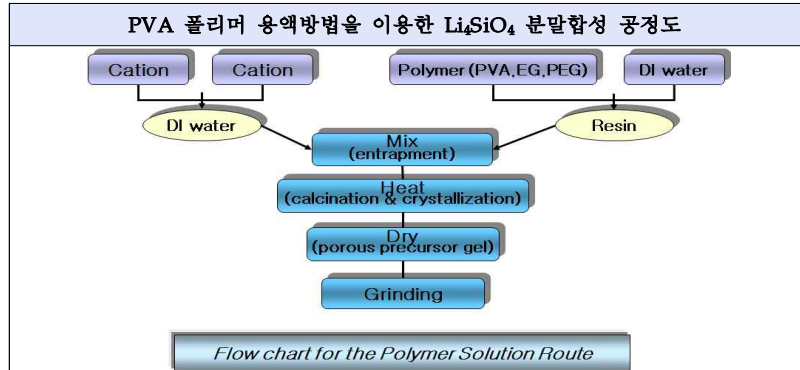


[그림4-81] 분말 제조 과정에 대한 순서도

- 700°C 에서 하소하여 결정화된 분말은 백색의 부드러운 형상을 보였으며, 약한 응집현상이 관찰되었음. 미세한 불순물이나 생성된 결정을 명확히 확인하기 위하여, 700°C 에서 합성한 후 분쇄한 Li_2TiO_3 분말을 XRD로 관찰한 결과, 불순물이 거의 존재하지 않는 순수한 Li_2TiO_3 결정에 대한 피크를 얻을 수 있었음

[Li_4SiO_4 분말합성]

- PVA 폴리머의 분자 구조적 모델은 물에 용해 시 $-(\text{OH})$ 기가 생성되어, 용해되어 있는 금속 양이온을 고착하게 됨
- [그림4-82]와 같이 간단한 분말합성법으로서 Li_4SiO_4 세라믹 분말을 얻기 위해 Lithium Nitrate와 Silica Sol을 금속 양이온 Source로 사용함
- 분 합성법은 전구체 Sol의 건조 과정 중에 폴리머의 작용에 의하여 부피가 팽창하여 다공성의 전구체 Gel을 얻을 수 있고, 이것을 하소함으로써 다공성의 Li_4SiO_4 세라믹 분말을 얻을 수 있음



[그림4-82] PVA 폴리머 용액방법을 이용한 분말합성 공정도

- 합성된 Li_4SiO_4 분말은 그 특성을 고찰 한 후, 성형체를 제조하여 고온에서 소결함. 페블 제조에 적합한 분말의 물성을 도출하기 위하여 여러 가지 실험이 병행, 분말합성 공정이 대량화에 적합하기를 검토, 분말 합성 공정의 재현성 및 신뢰성을 확인해야 함
 - 이렇게 합성된 분말은 다공성을 띄며 백색임
- 합성된 분말은 페블제조를 위한 과립화, 슬립제조 등의 공정에 전혀 문제가 없었으며, 결정화 역시 우수한 것을 확인할 수 있었음
- 또한, 하소 시 심한 발열반응을 방지하기 위하여 건조기에서 장시간 건조한 후 900 °C 보다 다소 온도를 낮춘 800 °C에서 하소를 실시한 결과, 심한 발열반응이 관찰되지도 않았으며, 많은 양의 분말을 얻을 수 있었음
- 그 외, 아래 예시*와 같이 Li_4SiO_4 합성 시 부각된 여러 변수를 달리한 합성 및 평가 과정을 구체적으로 확인하였음
 - * Low D.P. PVA 사용, 1:0.5 비율로 합성
 - * High D.P. PVA 사용, 1:0.5 비율로 합성
 - * PVA의 혼합량에 따른 결정상과 미세구조 비교
 - * PVA의 종류에 따른 결정상과 미세구조 비교
 - * Li_4SiO_4 분말의 열분석
 - * Li_4SiO_4 의 미세구조

[Li_2TiO_3 및 Li_4SiO_4 페블개발]

- 삼중수소 증식재료 후보재료로는 Li_2TiO_3 및 Li_4SiO_4 페블이 대표적임. 따라서 유럽, 일본, 중국 등 대부분의 핵융합 증식재료 개발국에서는 이 두 가지 재료에 초점을 맞추어 개발을 진행하고 있음
- 그러므로 우리나라도 이 두 재료에 대한 개발을 시작했으며, 빠르고 효율적인 개발을 위해서 분말합성부터 시작함. 페블개발은 가능한 한 여러 가지 방법*으로 실시했으며, 그 중에서 특성이 우수하고 수율이 높은 방법을 채택할 예정임
 - * 밀링법에 의한 Li_2TiO_3 페블 제조
 - * LiOH 를 이용한 Li_2TiO_3 페블 제조
 - * LiNO_3 를 이용한 Li_2TiO_3 페블 제조
 - * Sol-gel법을 이용한 Li_4SiO_4 페블 제조
 - * 소수성 천을 이용한 Li_2TiO_3 페블 제조 (슬러리 액적법)
 - * 용액침투법을 이용한 Li_2TiO_3 페블 제조
 - * PVA Sol을 이용한 LS 페블 제조
 - * 과산화수소수를 이용한 Li_4SiO_4 페블 제조기술

● 중성자 반사 재료 기술

- (기술개요) 한국형 TBM에만 유일하게 채용되는 것이 중성자 반사 재료인 흑연페블이며, 흑연페블을 채용함으로써 중성자 증배재료인 Be 페블을 적게 사용하는 것이 목적임
- 개발하는 흑연페블은 지름 1 mm의 크기이며, 지름 1 mm의 흑연페블을 개발하기 위하여 먼저 흑연분말을 이용한 페블개발을 시작함

[흑연분말을 이용한 페블 개발]

- 페블의 요구사항은 크기가 1 ± 0.5 mm, 진원도는 95 % 이상 그리고 강도는 100 N/m^2 이다. 페블 제조 방법은 흑연 분말에 바인더를 이용한 Spray Rolling 후 고온에서 소결하는 것임
 - 제조 변수는 분무할 때 흑연과의 거리, 밀링속도, 시간, 분당회전 수 등이 있으며, 분사할 때 바인더의 퍼짐성이 나타남
- 실험준비 및 순서는 먼저 흑연분말을 준비함. 흑연분말은 순도가 99.9 % 이상이고 분말의 평균입자의 크기가 $0.1 \mu\text{m}$ 의 것을 사용하고 건조된 흑연 분말 30 g을 평평한 판넬위에 골고루 뿌림. 그리고 PVA(폴리비닐 알코올) 바인더나 MC(메틸셀룰로오스) 바인더를 0.1 ~ 10 wt% 첨가하여 용액을 만든 후 흑연 분말 위에 스프레이로 뿌린 후 Rolling법으로 페블을 제조함
- 이렇게 만들어진 페블은 크기가 일정하지 않지만 간단하게 만들 수 있는 장점이 있으며 소결 가능성을 확인하기 위한 방법으로 대단히 좋은 방법으로 판단됨
- 페블 제조 과정과 형태는 여러 가지 방법*을 활용함
 - * 바인더 종류 및 농도에 따른 페블의 제조
 - * PVA 분사를 10 및 15회 했을 때의 페블제조
 - * 9 wt% 바인더의 롤링시간에 따른 페블제조
 - * PVA 바인더 8 wt%로 고정 후 총량을 조금 변화
 - * 7 wt%, 10회 분사 시 롤링시간에 따른 페블 제조
 - * 5 wt%의 PVA 바인더를 이용해서 페블 제조
 - * 7 wt%, 10회 분사, 분사거리 65 ~ 75 cm
 - * 실리카졸을 0.5와 2 g을 첨가 후 페블 제조

- 결론적으로, 제조된 페블을 환원분위기에서 소결한 결과 강도를 전혀 얻을 수 없었음
 - 흑연의 소결에 있어서 강도를 얻기 위해서는 고온 및 고압의 조건이 동반되어야 하는 것을 실험 후 자료를 찾으면서 알게 되었음
 - 그러므로 우선은 비교적 구하기가 쉬운 흑연봉을 잘라 밀링 후 사용하기로 결정함

[흑연봉을 이용한 페블 개발]

- 실험방법은 먼저 길이 180, 두께 2 mm의 흑연봉을 길이 2 mm의 원통형으로 작게 자르고 작게 잘린 흑연봉을 SiC Paper #80 위에 놓고 회전하면서 연마함
- SiC Paper #80으로 연마한 흑연봉을 다시 #120으로 연마하고 크기별로 연마한 흑연봉을 밀링한 결과 흑연의 피크만이 관찰되었음
- 흑연봉을 이용한 페블 제조 과정은 여러 가지 방법*을 활용함
 - * 연마 된 흑연 페블
 - * 흑연봉의 XRD
 - * 연마 장치의 적용
 - * 연마용 SiC 분말을 이용한 연마
- 흑연페블 제조를 실시한 결과, 연마에 의한 흑연 페블 제조의 중요한 공통점은 흑연봉의 절단공정이 반드시 필요하기 때문에, 대량생산에 적합한 절단공정이 좀 더 연구되어야 할 것으로 판단됨
- 또한 새로운 절단 방법이 여러 가지 있을 수 있으며, 그 중의 하나로 다이아몬드 커팅기를 활용한 절단 방법을 시도해 볼 필요가 있음
- 절단 된 흑연봉 연마 방법 중에서 SiC Paper를 용기에 붙여 Rolling 하며 연마하는 방법이 가장 간편하고 대량 생산공정에 효율적이라고 판단되었음
 - 연마 후 흑연 페블의 표면 거칠기는 매우 미세한 SiC Paper (#800 - #1000)를 활용함으로써 매우 매끄러운 표면의 페블 제조가 가능한 것을 확인할 수 있었음

■ TBM 공정기술 성과 중점정리

● 용접 기술

- (기술개요) 철강 재료를 이용하여 복잡한 구조물을 제작하기 위해서 용접은 반드시 수행되어야 하는 기술 중 하나이며, 용접 공정을 거치지 않고서는 제작이 불가능하므로 TBM을 제작하기 위해 반드시 용접 공정이 수행되어야 함
- 한국형 TBM은 지방사화 철강재료(RAFM)를 구조재로 선택하고 있으므로 이 재료에 대한 용접기술의 개발은 중요한 연구임
- 그러므로 RAFM강 중 하나인 F82H를 이용하여 Tungsten Inert Gas (TIG) 용접, 전자빔 용접, 레이저 용접기술의 개발 및 검증에 관한 연구를 수행하였음

[RAFM강 TIG 용접기술]

- (용접 절차) F82H TIG 용접용 판재는 300 mm^(w) × 100 mm^(l) × 10 mm^(t) 크기로 와이어 컷터 또는 워터젯을 사용하여 절단하였으며, 절단된 판재를 이용하여 맞대기 용접을 실시하기 위해 V-groove 형상으로 용접부위를 가공함
- TIG 용접시 용접 이면부의 산화를 방지하기 위해 Ar 가스를 이용한 퍼징을 실시하였으며, 가스퍼징은 용접위치에 따라 퍼징 위치를 이동시킬 수 있는 구조로 제작하였음
- (용접성 평가) RAFM강의 TIG 용접성 평가는 용접을 실시한 후 용접 부위의 비파괴 검사를 통하여 평가하였으며, 용접 후 비파괴 검사를 실시하기 위해 판재의 두께보다 두껍게 형성된 비드를 연삭가공을 통해 제거함
- 용접재는 먼저 육안검사를 통하여 표면의 용접상태를 평가하였으며, 용접재의 내부는 비파괴 검사를 통하여 평가함
- (용접 후 열처리) 용접에 의해 생성된 잔류응력 및 용접금속의 미세조직을 개선시키기 위해서 용접 후 열처리를 실시하였음. 열처리는 대기로를 이용하여 720 °C에서 1시간 동안 실시하였으며, 냉각은 용접재를 대기로의 외부로 이동시켜 공냉을 실시하였음
- (TIG 용접 재현성 평가) 용접을 수행할 F82H 판재의 절단 및 가공은 1차 TIG 용접을 실시할 때와 동일하게 수행하였으며, 재현성 평가를 위한 판

재의 경우 용접 부위뿐만 아니라 판재의 모든 표면에 연삭가공을 실시함

- TIG 용접된 판재를 육안 및 비파괴로 검사한 결과, 1차 TIG 용접재와 차이가 없음을 확인함으로써 TIG 용접 조건의 타당성 및 재현성을 확인함
- (기계적 특성 평가) TIG 용접재의 인장, 저주기 피로, 열적-기계적 피로 등을 평가한 결과, TIG 용접재의 열영향부가 기계적 특성에 지배적으로 영향을 미치는 인자임을 확인할 수 있었음. 따라서 TIG 용접재의 기계적 특성을 향상시키기 위해서는 용접에 의한 열영향부의 최소화 및 용접 후 열처리 조건의 최적화 등이 요구될 것이며, 향후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 보임

[RAFM강 전자빔 용접기술]

- (용접 조건) TBM 제작 시 비교적 두꺼운 부분의 용접을 위해서는 전자빔 용접을 이용하는 것이 유리하며, 본 실험에서는 전자빔 용접을 위한 시험편은 200 mm^(w) × 300 mm^(l) × 30 mm^(t)의 사이즈로 와이어 컷터를 이용하여 절단함
- (Gr.91을 이용한 전자빔 용접) Gr. 91은 95 mm^(w) × 230 mm^(l) × 30 mm^(t)의 블록으로 가공하였으며, Gr.91을 이용한 전자빔 용접 조건 설정 실험은 SUS304를 이용하여 얻은 결과를 바탕으로 함. 실험 결과 네 가지 조건에서 모두 30 mm 이상 용입이 일어나는 것을 확인하였으며, SUS304를 이용한 실험결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었음
- (F82H를 이용한 전자빔 용접) SUS304와 Gr.91을 이용하여 두께 30 mm의 블록에 대한 전자빔 용접 조건을 설정한 결과를 바탕으로 F82H를 이용하여 두께 30 mm의 블록에 대한 전자빔 용접을 실시함. 실험 결과 상단의 용접 비드폭은 10 mm였으며, 용입된 깊이는 35 mm로 Gr.91을 이용한 전자빔 용접 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있었음. 또한 F82H 전자빔 용접부의 비파괴 검사 결과를 나타내며, 전자빔 용접에 의해서 생성된 기공 및 결함은 존재하지 않는 것으로 나타나 전자빔 용접 조건이 두께 30 mm의 RAFM강 블록을 용접하는 조건으로 적절하다는 것이 확인되었음
- (용접 후 열처리) TIG 용접재와 마찬가지로 대기로를 이용하여 720 °C에서 1시간 동안 열처리를 실시하였으며, 1시간의 열처리가 끝난 시험편은 대기 로 외부에서 자연냉각이 되도록 함

- (기계적 특성 평가) 충격특성 평가 결과, 접금속의 경우에는 DBTT가 약 -40 °C 정도로 모재보다 높은 온도인 것이 확인되어 전자빔 용접제 용접금속의 DBTT를 모재와 비슷한 값으로 낮추기 위해 용접조건 및 용접 후 열처리조건에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단됨
- 인장특성 평가 결과, 상온에서는 용접제의 경우가 모재보다 연신율이 조금 낮은 것을 확인할 수 있었으며, 시험온도가 증가함에 따라 F82H의 연성이 증가하는 것을 확인함. 또한 시험온도가 증가할수록 모재 및 용접제의 최대인장강도 및 항복강도는 감소하는 경향을 나타냄. 전자빔 용접제의 인장특성 향상을 위해서는 용접금속의 미세조직 개선 및 열영향부 특성 개선 등이 수행되어야 할 것임

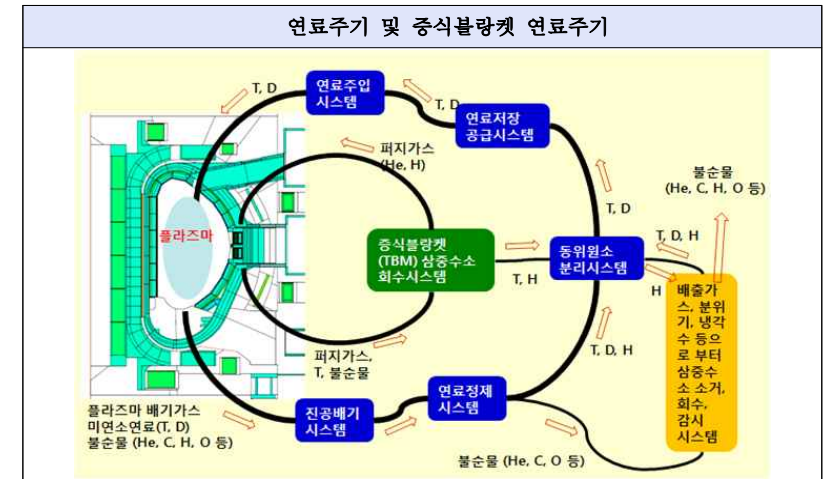
[RAFM강 레이저 용접기술]

- (Gr.91을 이용한 레이저 용접) RAFM강을 이용하여 레이저 용접 조건을 설정하기 전에 RAFM강과 화학적 조성 및 미세구조가 유사한 Gr.91을 이용하여 예비실험을 실시함
- 레이저 용접을 위한 Gr.91 판재를 70 mm^(w) × 200 mm^(l) × 7 mm^(t)의 사이즈로 와이어 컷터를 이용하여 절단하였으며, 용접성능을 향상시키기 위해 용접면은 연마를 실시함
- 또한 레이저 용접의 건전성을 확인하기 위해 육안검사 및 비파괴 검사를 실시하였으며, 비파괴 검사 결과 레이저 용접된 용접부에서 ASTM 규격에서 규정하고 있는 기공 및 결함은 관찰되지 않았고 레이저 용접 조건의 타당성 및 용접제의 건전성을 확인함
- (F82H를 이용한 레이저 용접) 용접할 F82H 판재를 와이어 컷터를 이용하여 70 mm^(w) × 200 mm^(l) × 7 mm^(t)의 사이즈로 절단하였으며, 용접성능을 향상시키기 위해서 용접면에 연마작업을 실시함
- 용접 부위를 육안으로 관찰한 결과 용접이 불완전한 부분 등의 거시적인 결함은 발견되지 않았으며, 용접비드 역시 양호하게 형성되어 있는 것을 확인함. 레이저 용접된 F82H 판재의 비파괴 검사 결과, Gr.91의 결과와 동일하게 레이저 용접된 용접부에서 ASTM 규격에서 규정하고 있는 기공 및 결함은 관찰되지 않았으므로 F82H 레이저 용접에서 사용된 용접 조건의 타당성 및 용접제의 건전성을 확인함

● 삼중수소 recycling 기술

[블랑켓 삼중수소 기술]

- 핵융합로에서 삼중수소 제어는 매우 중요함. 그 이유는 삼중수소가 적절히 제어되지 않을 경우 핵융합로 내부에 삼중수소 인벤토리가 증가하여 더 큰 규모의 삼중수소 처리 시스템이 필요하게 되며 삼중수소 누설 가능성 또한 높아지게 됨 이렇듯 핵융합로 연료주기시스템에 있어서 삼중수소 제어는 안전, 환경, 경제적 측면에서 중요성이 매우 높음
- [그림4-83]과 같이 증식블랑켓에서 생성된 삼중수소는 퍼지가스를 이용하여 추출하여 회수하고, 삼중수소의 냉각제로 침투는 최소화하되 일단 침투한 삼중수소는 정제하여 전체 연료주기시스템으로 이송할 필요가 있음
- 이런 일련의 기술을 블랑켓 삼중수소 기술이라고 하며, 블랑켓 삼중수소 기술은 핵융합 상용화의 핵심 원천기술로서, TBM을 통해 상당부분 기술의 확보가 가능할 것으로 기대하고 있음



[그림4-83] 전체 연료주기 및 증식블랑켓 연료주기

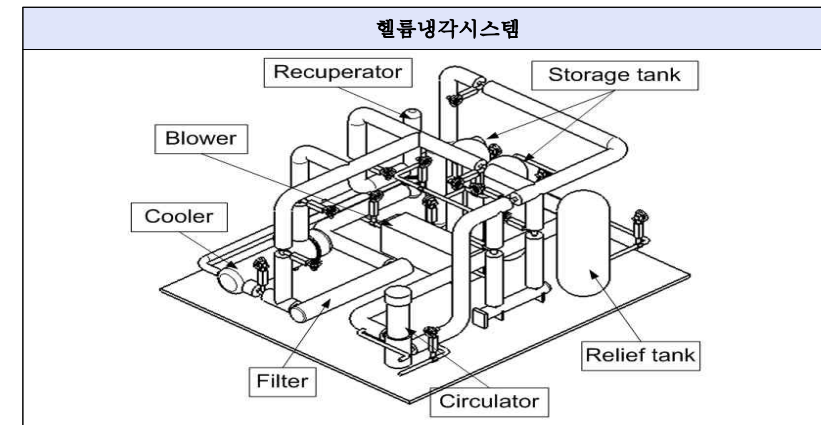
- TBM에서는 생산된 삼중수소는 퍼지가스를 이용하여 삼중수소추출시스템 (Tritium Extraction System, TES)를 통해 추출하며, 냉각제로 침투한 삼중수소는 냉각제정제시스템(Coolant Purification System, CPS)을 이용하여

회수하게 됨

- 그러므로 삼중수소 거동 이해 및 예측이 필수적이며, TBM 프로그램 참여를 위해서는 삼중수소추출시스템 및 냉각재정제시스템을 포함하는 퍼지라인에 대한 특성 평가 및 검증을 통해 우리나라 TBM 개념의 건전성을 입증해야 함
 - 삼중수소 계통의 부품개발 및 종합검증을 위해서는 퍼지라인 설계 및 검증이 필요하며, 퍼지가스 루프를 이용하여 수소 추출 및 회수 특성을 평가하여 주요 컴포넌트의 운전조건을 최적화 해야 함
 - 검증 과정 중 구축된 퍼지가스 성능 DB, 퍼지라인 컴포넌트 성능 DB 및 운전 파라미터 DB 등은 퍼지가스 이송모델 개발 및 블랑켓 연료주기 설계코드 검증에 활용할 수 있음
- 본 연구를 통해 ITER와 핵융합로의 파라미터 차이에도 불구하고 TBM을 통해 해당 보조시스템의 개념 타당성 검증 및 개선점 도출이 가능할 것으로 기대하고 있음

● He cooling 기술

- 헬륨냉각시스템(Helium Cooling System)은 증식재, 증배재, 반사재 및 구조재에서 발생하는 열을 8MPa 고압의 헬륨을 이용하여 추출한 후 ITER Tokamak Cooling Water System (TCWS)로 전달하는 주 냉각 장치임
- 헬륨냉각시스템은 ITER 운영 시나리오에 따라 각각 다른 조건에서 시험되는 TBM에서 발생하는 열을 제거할 수 있도록 설계되어야 함
 - 가장 가혹한 환경인 High-duty D-T에서 운전되는 TBM은 500 MW 출력의 핵융합 반응에 의해 0.78 MW/m²의 Neutron Wall Loading 및 0.3 MW/m²의 평균 열유속 (최대 0.5 MW/m²)을 받게 되며, TBM 내부의 온도가 각 재료의 허용온도 이하로 유지될 수 있도록 냉각재 유속을 조절할 수 있어야 함
- 구성은 Recuperator, Dust Filter, Cooler, Electrical Heater, Circulator, Pressure Control System(PCS), Control Valves 및 Pipeline 등의 컴포넌트로 되어 있음
- 헬륨라인은 냉각재정제시스템과 연결되어 있어 일정량의 헬륨이 헬륨냉각시스템의 Circulator의 압력에 의해 냉각재정제시스템으로 흐르게 되며, PCS는 운전 전 헬륨 충전을 위한 Storage Tank, Blower와 각종 Valve로 구성됨(총 헬륨 인벤토리는 약 35kg임)



[그림4-84] 헬륨냉각시스템 구성도

● 진단/계장 기술

- TBM은 고중성자유속, 고열유속, 고자기장 등 극한 환경에서 운영되므로 특수한 계장장치의 개발이 필요함
 - TBM의 성공적인 수행을 위해서는 TBM의 설계 및 핵자료를 검증할 수 있는 각종 진단 및 계장 장치의 개발 및 설치가 필수적임
- 그러므로 한국형 TBM을 위한 진단 및 계장 장치 개발계획의 작성을 위해서 이에 대한 기술조사가 반드시 수행/기술개발의 성공이 필수적임
- (고속중성자 계측 기술) TBM 혹은 Port Cell에 설치되어 있는 증식재, 증배재, 반사재 및 구조재를 통과하는 핵융합 중성자의 중성자 유속, 스펙트럼, 방사화 에너지 측정 등의 데이터를 계측하기 위한 기술임
 - TBM 설계 및 해석결과를 검증하고, TBM 성능을 분석하기 위해서 반드시 필요한 기술이며, 이러한 연구에는 계측 파라미터의 설정, 계측방법의 수립, 계장 및 제어기술의 개발, 계측장치의 개발 등이 포함되어야 함
- (삼중수소 계측 기술) Eddy Current, 자기장 진단 등의 전자기장 데이터와 Load, Displacement, Strain 등의 기계적 데이터를 계측하기 위한 기술 개발의 수행이 필요함
 - 이를 위해서는 계측 파라미터의 설정, 계측방법의 수립, 계장 및 제어기술 개발 그리고 계측장치의 개발 등이 포함되어야 함
- (전자기장/기계구조 진단기술) Eddy Current, 자기장 진단 등의 전자기장 데이터와 Load, Displacement, Strain 등의 기계적 데이터를 계측하기 위한 기술 개발의 수행이 필요함
 - 이를 위해서는 계측 파라미터의 설정, 계측방법의 수립, 계장 및 제어기술 개발 그리고 계측장치의 개발 등이 포함되어야 함

③ TBM 핵심기술의 주요 성과

- TBM 개발을 위해서는 설계 기술, 구조재 기술, 냉각재 기술, 기능소재 기술, 블랭킷 삼중수소 기술, 진단 및 계장기술 등 다양한 기술 개발이 필요함
- 기존의 핵분열 원자로의 계산에 사용되던 MONTEBURNS 코드는 10 MeV 이상의 고에너지 반응에 대한 데이터 계산 처리 방법이 부족함 측면이 있었으나 MONTEBURNS 코드를 확장한 핵융합로용 MONTEBURNS-FUSION 코드의 보완/개발을 실시함
- 그로 인해 이전 MONTEBURNS 코드 계산으로는 얻을 수 없었던 poloidal 및 toroidal 방향에 대한 보다 정밀한 중성자속 및 그에 따른 분포들을 확인하는 성과를 올렸으며, 향후 상세설계 단계까지 열수력 계산과의 연성 해석과 다양한 설계기술을 검증할 수 있는 성과를 이룩함
 - 기술개발된 설계기술은 한국형 핵융합실증로 설계의 기반기술로서 활용될 것임
- 용접은 철강 재료를 이용하여 복잡한 구조물을 제작하기 위해 반드시 필요한 기술이며 TBM을 제작하기 위해 반드시 용접 공정이 수반되어야 함. 한국 TBM은 저방사화 철강재료(RAFM)를 구조재로 선택하고 있으므로 RAFM강 F82H를 이용하여 Tungsten Inert Gas (TIG) 용접, 전자빔 용접, 레이저 용접기술의 개발 및 검증에 관한 연구를 꾸준히 진행중에 있음
- 핵융합 반응에 의해 생성된 중성자를 이용하여 삼중수소를 증식할 수 있는 Li 증식재료 기술 중 한국은 지름 1 mm의 Li_4SiO_4 페블을 채용할 예정으로 기술개발을 진행중이며, Li_2TiO_3 페블도 개발하고 있음
- 중성자 증배재료인 Be 페블을 적게 사용하는 것이 목적인 흑연페블은 한국형 TBM에만 유일하게 채용되는 중성자 반사 재료로서 대량생산에 적합한 절단공정에 대해 연구를 진행중에 있음
- 블랭킷 삼중수소 기술 개발로 인해 핵융합 상용화의 핵심 원천기술로서, TBM을 통해 상당부분 기술력 확보가 가능할 것으로 기대하고 있음

4] TBM 중요 특허 실적

- TBM의 1단계 주요 성과 중, 핵심기술, 조달약정 외 대표적 성과로 [표 4-22]의 특허를 들 수 있음

[표4-22] TBM 1단계 중요 특허

비 고	내 용
특허명: 슬러리 액적 습식법을 이용한 리튬 세라믹스 페블의 제조방법, 대한민국 출원 10-2012-0031248, 박이현 2012	- 증식재로서 플라즈마에서 나오는 중성자와 반응하여 삼중수소를 증식하는 Li 세라믹화합물 개발은 고체형 TBM에 가장 주요한 핵심기술로서 발표된 특허에서 알 수 있는 바와 같이 국내에서는 최초로 개발되었음 - 리튬 세라믹스 페블의 제조 방법은 본 과제를 통해 개발되는 핵융합발전을 위한 핵심기술로서, 아국 TBM에 이를 이용하여 제작한 증식재를 장착하여 ITER에서 시험될 예정임

5] TBM 정성적 기술성과 분석

- TBM은 ITER 구축 후 장착하여 열효율 측정 및 연료주기 선순환을 위한 실험을 위한 모듈로 한국형 Demo plant 건설을 위한 정보를 가장 풍부하게 확보할 수 있는 설비임
- 삼중수소의 물질수지를 정확하게 살펴보려면 삼중수소 침투에 의한 손실 분 측정 등 새로운 침투평가장비의 구축이 필요함
- 삼중수소 효율적 발생을 위해서는 리튬증식제, 중성자증배제, 중성자 반사제 등의 소재개발이 요구되며, 안전을 위해서는 저방사화 철강재료 및 용접기술 개발이 필요함
- TBM은 KSATR에서 시도한 적이 없는 기술이기 때문에 인프라가 없는 실정이었으므로 주로 인프라 구축에 초점을 두었으며, 원자력연구원에서 수행하는 Gen4(차세대원전, 수소, 소듐 등)에 관련된 고온가스 관련 인프라(장비 등)를 사용하여 기술개발을 진행하고 있음
- 원자력연구원의 VHR code 및 안전해석 code를 활용한 핵융합 설계 code는 우리나라가 독자적으로 구축하고 있으며, 향후 발전소 건설에 활용이 가능함
- 프랑스가 요구하는 인허가의 기준을 통과하는 인허가 절차 정립은 향후 예비안정성보고서, 안전해석, 경험추적 등을 위해 중요하며, 1단계 기술개발 당시 인허가 문서 작성 및 안전해석 수행의 경험으로 향후 실증로 및 핵융합로 인허가 절차 개발에 활용할 수 있는 성과를 올림
- 핵융합에너지 기술개발을 위해 핵융합 반응에서 나오는 중성자의 에너지를 열에너지로 변환하는 증식블랑켓 기술개발이 필수적이며, 증식블랑켓의 주 기능인 삼중수소의 증식 및 전기 생산을 위한 열 추출 과정을 실증하기 위한 모듈로 핵융합 환경에서 시도되는 최초 증식블랑켓 시험 프로그램인 TBM의 기술개발 성공은 핵융합에너지의 실현가능성을 위해 꼭 필요한 중요한 기술임

5. 결론 및 정책제언

5-1. 결론

ITER 1단계 사업 특성 분석

○ Science-Technology-Business 세 분야가 동시에 추진되는 과학기술융합산업임

- 플라즈마의 과학적 연구 성격, 설계의 확정 및 검증, 부품을 제조·조달하는 technology 개발 성격, 대규모의 투자가 인한 Business 성격을 나타냄
- 핵융합에너지 기술개발 성공은 전 인류를 위한 대체에너지 확보라는 큰 성과와 함께 국내 산업체 발전으로 인한 일자리 창출, 전문 인력양성이라는 부가적 효과를 얻음으로써 박근혜 정부의 창조경제 목적과 부합되는 특징이 있음

○ 에너지, 안보, 경제가 연관되는 국가 기반구축 프로젝트임

- 인류의 생활과 경제활동에 꼭 필요한 에너지의 중요성으로 인해 세계 7개국 이 참여하는 세계 최대 규모의 프로젝트이기 때문에 산학연관이 긴밀한 네트워크를 구성이 필요한 사업임

○ 세계 최대 규모, 최장기간의 global collaboration 프로젝트임

- 세계 7개국이 참여하는 핵융합 G7에 우리나라가 중간진입하여 성공적으로 선두대열에 포지셔닝한 것은 과학기술 차원에서 국격을 향상시킨 것으로 의미가 큼

ITER 1단계 사업 정성적 기술성과 분석 요약

○ (조사대상) 조달품목 9개와 비조달품목 2개를 포함한 11개 품목에 대한 조사 결과를 바탕으로 핵심요소 기술을 정리함

○ (조사방법) 사업 특성에 맞는 선후행모형*을 정립한 후 설문조사서를 작성하고, 심층설문조사 인터뷰 후 피드백을 통해 핵심요소기술을 정리함

- * 선후행모형은 각 기술의 특성에 따라 기술개발 시점 및 수준, 조달약정유무, 목적 등이 다르기 때문에 공정제작에서 쓰이는 PERT기법을 기반으로 공통된 프로세스를 적립함

초전도도체

- 초전도도체는 국가 간의 기술수준 및 산업체의 역량수준을 객관적으로 비교할 수 있는 품목이라고 할 수 있으며, 현재 한국은 초전도도체를 14개를 만들만큼 수준이 높은 편임
- Sultan 테스트를 통하여 초전도도체의 성능을 확인 하였으며 우리나라 기술수준은 세계 정상급임. 초전도도체 설계기술인 선재 상세 특성평가는 ITER 한국사업단 자체적으로 수립한 입계전류 외부 변수 의존성을 설명하는 고유모델을 IO가 채택하여 통일된 모델로 사용하였는데, 이는 초전도 선재 해석분야에서 학문적인 우위를 입증한 성과라고 볼 수 있음
- 1단계 주요 성과로는 조달약정 체결을 들 수 있는데 이는 약정 체결이 의미하는 바가 설계기술 수준 및 산업체 제조기술 수준이 IO 요구수준을 만족하는 단계로 진입하였다는 것을 뜻하기 때문임

진공용기 본체/포트

- 진공용기 소재개발로 인해 단조재 및 후관 압연재의 제작성 검증 뿐 아니라 진공용기 본체품 제작에 사용될 소재의 국산화 가능성을 기대할 수 있는 성과를 올림
- 한국은 진공용기 지지구조물 기준설계안의 복잡한 구조로 인해 야기되는 문제점을 해결하기 위해 신설계안을 제안하고, 개선된 설계 안을 바탕으로 상세설계 및 구조해석, 그리고 시제품 제작/시험을 통하여 설계 검증을 수행하는 성과를 올림
- ITER 진공용기 제작 과정에서 확보된 초고진공 기술, 초정밀 가공 및 측정 기술, 진공 누설 탐지 기술, 저변형, 고에너지 용접기술, 비파괴 검사 기술 등은 향후 상용 핵융합 발전로 건설에 직접적으로 활용이 가능함

블랑켓 일차벽

- 블랑켓 일차벽 제작을 위한 이중금속 설계 및 접합기술은 한국에서 한 번도 시도해보지 않았던 기술이었으며, 그 기술을 핵융합 환경에 맞는 체계로 재구축해야 하는 어려움이 있었으나 자체 및 국제협력 노력으로 극복함

- 한국의 자체 기술로 제작한 검증용 블랑켓 목업 2개를 IO에 제출, 공동 시험기관으로 선정된 미국과 EU에서 약 6개월 간 고열부하 인가 시험을 거쳐 성능 검증 시험 통과를 확정 받는 성과를 올림
- 목업 검증시험을 통해 조달자격 획득의 우수한 성과를 거두었으며, 조달품목에서는 전략상 제외되었으나 기술개발 결과를 TBM 기술개발에 활용하고 있음

■ 블랑켓 차폐블록

- 블랑켓 차폐블록 전자기해석 기술력은 '08년 착수한 블랑켓 전자기력 계산 벤치마킹 업무를 기반으로 보다 향상된 설계해석 능력을 보유하기 위한 연속 업무를 성공적으로 수행함
- 우리나라는 블랑켓 개발에 후발 주자로 참여하였으나, 그 동안 적극적인 참여 및 활동을 통해 관련 국내 산업체, 설계 엔지니어링 업체, 연구소 등이 관련 설계 및 제작 기술을 상당히 축적하였음
- 블랑켓 차폐블록 설계 및 해석 기술은 DEMO, 상용 핵융합로 플라즈마 대면부품 개발에 직접적으로 활용이 가능하며, 타 발전시스템 및 각종 고온·고속 중성자 환경하의 장치 개발 등의 산업으로 연결이 가능할 것임

■ 조립장비

- 대형 핵융합 장치 조립분야의 기술 개발에 성공, 핵심기술인 정밀조립 기술, 조립장비 설계 및 제작기술을 확보하여 핵융합로를 건설할 수 있는 자립 기반에 성공함
- 조립장비 설계 시 IO에서 제공한 조립장비 개념설계 CATIA Model, 설계 입력 자료 등 IO 공식문서를 상세하게 분석하고 IO에 보완을 요청하여 조립장비의 설계 변동성을 줄이는 성과를 보임
- 조립장비 분야는 선진국과 동등한 수준의 기술을 확보하고 있으나, ITER 장치는 KSTAR 장치에 비해 초대형이므로 국내 연구기관 및 산업체가 협력하여 핵심기술 확보에 성공한다면 향후 국내 핵융합 상용로 건설에 활용 될 수 있을 것으로 판단됨

■ 열차폐체

- 최종설계 및 제작공정 개발을 완료하기 위하여 용접, 은도금, 연결부, 표면처리 등에 관한 R&D를 수행하였으며, 실제 크기의 목업 제작을 통하여 최종 검증을 완료하였음
- ITER 열차폐체 은도금 공정을 확립하기 위하여 다양한 시편에 은도금을 수행, 이를 통하여 최적의 은도금 공정 개발에 성공하는 성과를 올렸으며 검증 시편을 통하여 품질을 확인함
- KSTAR 때부터 경험축적으로 인해 예비설계의 단계부터 제작단계까지 기술개발이 가능할 정도로 인적역량의 증진을 이루었으며, 현재 DEMO 건설도 가능할 만큼의 기술력을 확보한 상태임

■ 삼중수소 SDS

- 삼중수소 저장·공급 시스템의 핵심 부품의 하나인 getter bed의 개발 및 운전 방법 개발에 성공하여 getter bed 설계에 대한 열유체 전산 해석적 연구를 통해 설계의 타당성 검토와 성능 예측을 수행하는 성과를 올림
- 1:1 Mock-up Bed(ZrCo 사용, 삼중수소 70g 저장용량의 ITER 삼중수소 저장베드)를 사용한 SDS 공정검증실험을 통해 ITER 규격에 준하는 공정 장치를 실험한 사례는 세계 최초로서 큰 의미가 있음
- 1단계를 통해 시험된 삼중수소 저장 용기는 기존의 유사 품목의 성능을 상회하고 있으며, 조달 완료는 곧 세계 최고의 기술력 보유를 의미한다고 볼 수 있음

■ 초전도자석 전원공급장치

- KSTAR 전원장치 제작 및 운영경험과 산업용 대용량 전원장치에 적용된 기술을 면밀히 분석하는 등 선행된 관련기술을 습득하여 설계에 참고하고, 다양한 설계해석을 통하여 보다 안전하고 안정적인 동작을 요구하는 ITER 전원장치의 설계기술을 확보함
- 한국이 핵융합 전원공급장치의 후발국으로 참여한 만큼 사전에 기술 잠재력을 인정받아 조달약정을 무리없이 체결한 점이 가장 큰 1단계 중요 성

과임

- 1단계에서 확보된 기술력을 통하여 화학, 철강 플랜트 등 국내 산업체에서 필요로 하는 여러 종류의 대용량 정류기 국산화 및 수요창출이 기대됨

■ 진단장치

- 1단계 시작 당시 한국은 IO의 설계를 지원하는 수준이었으나, 지속적인 기술개발을 통해 한국 자체적으로 Port Integration을 수행하여 개념설계 수준의 설계를 완료하는 성과를 올림
- 진단 상부 포트플러그의 냉각채널을 설계하고 열수력 해석을 수행한 결과, 본 해석의 결과가 2D코드로 계산한 결과와 일치함으로써 해석의 신뢰성을 확보함
- KSTAR에 설치된 진단장치 시작품은 ITER 진단장치 본제품의 측정, 보정 및 분석기술을 확보하는데 활용이 가능하며, KSTAR 기술시험을 통하여 확보된 우수한 연구개발 결과들은 향후 본 제품의 개발·제작에 직접 활용될 것으로 판단됨

■ TBM

- 설계 기술, 구조재 기술, 냉각재 기술, 기능소재 기술, 불량켓 삼중수소 기술, 진단 및 계장기술 등 다양한 기술을 개발중에 있으며, 이는 핵융합실증로의 기반기술로서 활용될 것임
- 프랑스가 요구하는 인허가의 기준을 통과하는 인허가 절차 정립은 향후 예비안정성보고서, 안전해석, 경험축적 등을 위해 중요하며, 1단계 기술개발 당시 인허가 문서 작성 및 안전해석 수행의 경험으로 향후 실증로 및 핵융합로 인허가 절차 개발에 활용할 수 있는 성과를 올림
- 불량켓 삼중수소 기술 개발로 인해 핵융합 상용화의 핵심 원천기술로서, TBM을 통해 상당부분 기술력 확보가 가능할 것으로 기대하고 있음

■ ITER 1단계 사업 정량적 기술성과 분석 요약

- 산업연관분석 결과, ITER 산업에 3,879.44억원 투입시 10,019.0억원의 생산유발효과와 3,538명의 고용유발효과가 창출되는 것으로 분석됨

- 타 에너지원 산업과 비교해보면, 나프타 산업과 함께 가장 높은 생산유발효과를 보이고 있으며 고용유발효과 또한 대체적으로 높은 것으로 분석됨으로써 꾸준히 연구를 진행할 경우 높은 경제적 파급효과가 창출될 것으로 판단됨
- SMART 특허 분석 결과, ITER사업으로 창출된 등록특허의 총점은 72.6점으로써, 국가 R&D, 지경부 69.5점, 교과부 69.1점, SMART 국내등록특허 68.9점보다 높게 나타나 질적으로 우수한 특허를 보유하고 있는 것으로 나타남
- SCI 논문의 Impact Factor결과, 대체적으로 낮은 수준을 보이고 있으나 IF는 인용도가 높은 논문일수록 점수가 높게 부여되고 ITER 사업 특성 상 인용도가 낮은 학문이기 때문에 IF 점수만으로 논문수준을 판단하는데 주의할 필요가 있음

■ ITER 1단계 사업 정리

- 전 인류를 위한 대체에너지 확보라는 큰 성과와 함께 국내 산업체 발전으로 인한 일자리 창출, 전문 인력양성이라는 부가적 효과를 얻음으로써 박근혜 정부의 창조경제 목적과 부합되는 특징이 있음
- 세계최초로 시도되는 대형 토카막 실험로 사업이므로, 적용되는 기초기술을 세계최초기술 관점에서 재조명해야 함
- 핵융합 기술은 초고온 플라즈마, 초전도자석, 초대형 진공 등 세계최초로 시도되는 요소기술을 포함하고 있으며, 이러한 요소기술은 소재, 공정, 부품 기술혁신을 유발하여 산업전체에 큰 파급효과를 주므로 산학연관이 긴밀한 네트워크를 구성하기를 기대함
- 세계 7개국이 참여하는 핵융합 G7에 우리나라가 중간진입하여 성공적으로 선두대열에 포지셔닝한 것은 과학기술 차원에서 국격을 향상시키고 IO에서의 한국 위상을 향상시킨 성과를 이룩한 것으로 볼 수 있음
- ITER 사업의 성공은 초기 사업의 목적인 우리나라 기초과학기술과 산업기술 선진화로 이어지며, 과학기술분야의 국가 경쟁력 강화로까지 발전될 것임

5-2. 정책제언

■ First-Mover 사업으로서의 평가지표 개발이 필요함

- 핵융합을 위한 고온플라즈마 제어 고진공시스템의 구축은 세계 최초로 시도되는 사업으로서 모든 핵심요소기술은 세계 최초의 기술임
- 따라서, 기술평가기준의 재정립 및 평가지표의 제설정이 필요함. 기존의 산업에 이미 사용되고 있는 기술이더라도 핵융합 분야에 적용되면 신기술 관점에서 평가해야 함
- ITER 사업의 성과분석은 2040년까지의 장기적 프로젝트를 감안하여 타 사업처럼 정량적 성과(특히, 논문, 사업화, 1억원당 성과)로 판단해서는 안되며, 사업 특성에 맞는 비전·미션·전략을 수립한 후 목적에 부합하는 성과지표를 수립할 필요가 있음
- 이런 의미에서 조달약정의 체결이 갖는 과학기술적 중요도는 매우 큼

■ 전문기관의 지속적인 모니터링이 필요함

- 핵심기술 등을 기술개발 중인 국내 산업체의 기술수준 단계, 전문 인력, 전담 지원 등에 대해 전문기관의 지속적인 모니터링이 필요함

■ 핵융합 발전 사업을 위한 Control-tower system 구축이 필요함

- 핵융합 발전 사업은 Science, Technology, Business등의 process가 병행하여 추진되므로 각 분야를 통합하고 조율할 수 있는 control-tower기능을 가지는 system이 필요함
- 핵융합 발전 사업은 SOC의 성격을 가지며, 또한 핵 안보와도 밀접한 연관이 있으므로 기존의 기술개발 사업과는 구별되어 지원·평가 되어야 함

■ 핵융합 발전 기술 분류체계의 정립이 요구됨

- 현재 핵융합 기술은 원자력 기술의 한 분야로 포함되어 있는데 핵융합 기

술의 특성을 고려한 새로운 기술분류체계의 구축이 요구됨

- 선진국에서도 아직 기초연구단계인 기술분야가 있으므로 체계적인 핵심요소기술을 정의하고, 중요한 핵심기술과 핵심요소기술을 개발하면 세계 선도의 위치를 차지할 수 있음

■ 핵융합 발전 인력양성을 위한 특성대학원 설립운영 필요함

- 핵융합 발전 기술은 물리, 화학, 수학 등 기초과학과 화공, 기계, 재료, 전기전자, 핵공학 등 기술분야가 융합되어 개발되어야 하므로 필요인력 양성을 위한 특성화 대학원의 설립이 필요함
- 이러한 융합지식을 갖는 인력양성은 핵융합 기술이 활용될 수 있는 초전도 전력, 초전도 에너지 저장, 자기부상 vehicles, 의료 등의 산업분야의 발전에도 기여함

■ IO에서의 위상 향상을 위한 국가적 노력 필요함

- 핵융합 발전 사업에 후발주자로서 중간진입하여 ITER 1단계 사업이 끝난 시점에 선두그룹에 합류한 것은 국제 과학기술 분야에서 한국의 위상을 향상시킨 성공적인 사례임
- IO의 ITPA 연구과제 등 국제 연구 프로젝트에 적극 참여하여 핵융합 R&D hub로 자리매김함으로써 핵융합 발전 상용화를 앞당길 수 있도록 국가적 지원이 필요함

■ ITER 사업의 국민수용성을 높이기 위한 대국민·정부·국회 홍보가 필요함

- ITER사업의 중요성을 홍보하기 위한 체계적인 전략수립 및 실천이 필요하며, 원자력과 같이 국민들의 거부감에 직면할 수 있으므로 사례집 뿐만 아니라 인터넷 등의 광고, 참여기업에 대한 홍보, 과학기술 증진 관련 홍보 등이 절대적으로 필요함
- 대형 국가 프로젝트의 국민 수용성을 높이기 위하여 모든 이해관계자를 포함하는 새로운 방법론을 개발하고 지속적으로 추진함이 필요함

6. 참고문헌

6-1. 참고문헌

- KISTEP(2013), 창조경제 개념과 주요국 정책 분석
- 산업연구원(2012), 산업간 공행성 추이 분석
- ㈜기술과가치(2012), 한국에너지기술평가원 원자력융합원천기술개발사업 성과분석보고서
- ㈜기술과가치(2012), 한국에너지기술평가원 전력융합원천기술개발사업 성과분석보고서
- 국가핵융합위원회(2011), 제2차 핵융합에너지개발진흥 기본계획
- 각 품목별 1단계 종료보고서(2011), ITER 내부자료
- 법제처(2011), 핵융합에너지 개발진흥법
- 양형렬(2011), KSTAR 프로젝트, ITER 선행장치로서의 확실한 입지 구축
- 전북대학교(2011), ITER 운영단계 운영전략 수립에 관한 연구
- Carlo sborchia(2011), ITER Superconducting Magnets, Lecture on Fusion Reactor Engineering, 31 January 2011
- ITER 2단계 기획보고서(2011), ITER 내부자료
- 김용환(2010), 국제핵융합실험로(ITER) 플라즈마 대향면 재료 및 핵융합 관련 재료개발 추이
- 장한수(2010), 핵융합로 설계 및 건설기술 현황 및 전망, Green-tech Research 2010-5호
- ㈜테크노베이션파트너스(2010), ITER 운사업의 과학기술 및 사회·경제적 영향과 파급효과 분석

- KISTEP(2010), 국가연구개발사업 유형별 성과평가 논리모형 개발에 관한 연구
- 김용환(2009), 국제핵융합실험로(ITER) 운전용 삼중수소 수요 및 공급
- 녹색성장위원회(2009), 중점녹색기술개발전략
- Idaho National Laboratory(2009), Final Report on ITER Task Agreement 81-10
- 교육과학기술부(2008), 국가과학기술표준분류체계
- 서울대학교(2008), ITER 사업을 통한 핵융합 핵심기술 발굴 및 확보방안에 관한 기획 연구
- 인천대학교(2008), 해외의 핵융합 및 플라즈마 응용분야 연구동향조사
- 오상준·조승연(2008), 핵융합발전 실용화기술, 물리학과 첨단기술
- KISTEP(2007), KSTER를 활용한 핵융합 중장기 연구개발사업 사전타당성조사 보고서
- KISTEP(2007), 표준사업분류별 논리모형 개발 및 핵심성과지표도출
- 고려대학교 경제통계연구소(2007), 산업연관분석 연구방법론
- 권면(2006), 핵융합에너지 기술상용화를 위한 연구개발전략, 원자력산업
- 김창우(2006), 우리나라의 핵융합에너지 개발정책
- SMART 분석: 한국발명진흥회 특허분석
- Impact factor: 2011 JCR
- 한국은행 경제통계시스템, 산업연관표 2010

7. 부록

- 7-1. 조사 설문서
- 7-2. 설문서 피드백
- 7-3. ITER 1단계 정량적 성과(논문 및 특허)

7-1. 조사 설문서

ITER 1단계 사업 기술성과 조사
- 진단장치 -

안녕하십니까?

귀하의 무궁한 발전을 기원합니다.

본 설문조사의 목적은 ITER 1단계 사업의 기술성과를 조사·분석하는데 있습니다. 본 설문에 응답하신 내용은 연구조사 이외의 목적으로는 일체 사용되지 않을 것이며, 통계법 33조, 34조에 의해 비밀이 보장됨을 알려드립니다.

다소 시간이 소요되더라도 준비된 설문 항목에 빠짐없이 응답해 주시기를 간곡히 부탁드립니다. 선생님의 건강과 가정에 행운이 가득하기를 바랍니다.

다시 한번 설문에 응해 주신데 대해 깊은 감사를 드립니다.

2013. 2

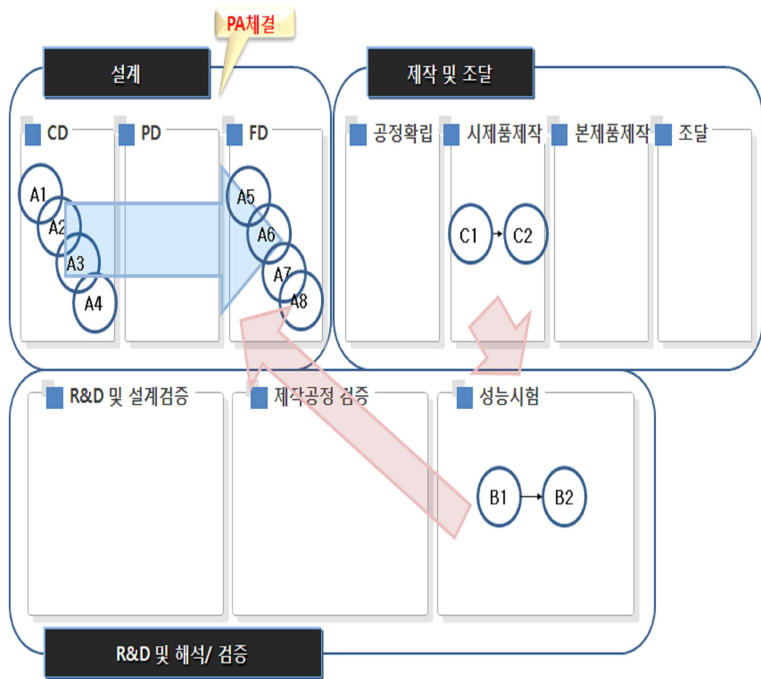
조사기관: ㈜기술과가치
 담당자: 김동준 선임 Value Provider(MOT5팀)
 연락처: 02-3479-5097, djkim@technovalue.com

작성자 성명			
작성자 소속기관		작성자 직위	
작성자 연락처		작성자 e-mail	

참고 진단장치 프로세스

* 아래 사항은 과제 추진 시점에 국제핵융합실험로(ITER) 공동개발사업 개발·제작 제1단계 과제 제안요구서(RFP) 및 1단계 종료보고서를 참고하여 진단장치의 프로세스를 작성한 것입니다. 아래의 프로세스를 참고하여 설문에 답하여 주시기 바랍니다.

* Part 1에서는 설계, R&D 및 해석/검증, 제작 및 조달단계에서 수행된 활동, 산출물, 이슈 등에 관한 설문내용이며, Part 2에서는 조달약정/산업체계약단계의 의의, Part 3에서는 수행과정 중 산출된 논문, 특허 등의 정량적 성과와 핵심기술 등 정성적 성과에 대한 설문내용, Part 4에서는 이터사업과 진단장치의 정성적 설문으로 구성되어 있습니다.



A1. 상부 포트플러그 기본구조물 개념설계 A2. 중성자방사화 시스템 개념설계 A3. 진공차외선 분광기 개념설계 A4. 상부 포트플러그 어셈블리(#18) A5. VUV 분광기 개념설계 완료 A6. 상부 포트플러그 기본구조물 상세설계 A7. 상부 포트플러그 어셈블리(#18) 상세설계 A8. VUV 분광기 상세설계 착수 A9. 중성자방사화 시스템 상세설계 착수 B1. 진공차외선(VUV) 분광기 성능 시험 B2. 중성자방사화 시스템 성능 시험 C1. 진공차외선(VUV) 분광기 시제품 제작 C2. 중성자방사화 시스템 시제품 제작

part 1 개발 프로세스

* 아래 사항은 [설계] 단계에서 이루어지는 활동들입니다. 이를 참고하여 설문에 답하여 주시기 바랍니다.

설계	개념설계	A1. 상부 포트플러그 기본구조물 개념설계
		A2. 중성자방사화 시스템 개념설계
		A3. 진공차외선 분광기 개념설계
		A4. 상부 포트플러그 어셈블리(#18)
	상세설계	A5. 상부 포트플러그 기본구조물 상세설계
		A6. 상부 포트플러그 어셈블리(#18) 상세설계
		A7. VUV 분광기 상세설계 착수
		A8. 중성자방사화 시스템 상세설계 착수

A1. 상부 포트플러그 기본구조물 개념설계

수행 활동명	상부 포트플러그 기본구조물 개념설계					
활동의 주요 내용 및 의미	- 개념설계 CATIA 모델/공학해석					
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물						
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈						
기타						

A2. 중성자방사화 시스템 개념설계

수행 활동명	중성자방사화 시스템 개념설계					
활동의 주요 내용 및 의미	- 전송선 시험용 설비 구축					
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물						
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈	-					
기타						

A3. 진공자외선 분광기 개념설계

수행 활동명	진공자외선 분광기 개념설계					
활동의 주요 내용 및 의미	-					
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물	- 분광장치 용역 보고서					
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈						
기타						

A4. 상부 포트플러그 어셈블리(#18)

수행 활동명	상부 포트플러그 어셈블리(#18)					
활동의 주요 내용 및 의미	- 기본구조물 상세설계 도면 - 내부장치 개념설계 수준					
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물						
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈						
기타						

A5. 상부 포트플러그 기본구조물 상세설계

수행 활동명	상부 포트플러그 기본구조물 상세설계					
활동의 주요 내용 및 의미						
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물						
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈	-					
기타						

A6. 상부 포트플러그 어셈블리(#18) 상세설계

수행 활동명	상부 포트플러그 어셈블리(#18) 상세설계					
활동의 주요 내용 및 의미						
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물						
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈						
기타						

A7. VUV 분광기 상세설계 착수

수행 활동명	VUV 분광기 상세설계 착수					
활동의 주요 내용 및 의미						
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물						
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈						
기타						

A8. 중성자방사화 시스템 상세설계 착수

수행 활동명	중성자방사화 시스템 상세설계 착수					
활동의 주요 내용 및 의미						
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물						
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈						
기타						

* 아래 사항은 [R&D 및 해석/검증] 단계 중 성능시험 단계에서 이루어지는 활동들입니다. 이를 참고하여 설문에 답하여 주시기 바랍니다.

R&D 및 설계	B1. 진공차외선(VUV) 분광기 성능 시험
	B2. 중성자방사화 시스템 성능 시험

B1. 진공차외선(VUV) 분광기 성능 시험

수행 활동명	진공차외선(VUV) 분광기 성능 시험					
활동의 주요 내용 및 의미	-					
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물						
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈	-					
기타						

B2. 중성자방사화 시스템 성능 시험

수행 활동명	중성자방사화 시스템 성능 시험					
활동의 주요 내용 및 의미	-					
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물	5 ~ 10 일					
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈	-					
기타						

* 아래 사항은 [제작 및 조달] 단계 중 시제품제작 단계에서 이루어지는 활동들입니다. 이를 참고하여 설문에 답하여 주시기 바랍니다.

시제품제작	C1. 진공자외선(VUV) 분광기 시작품 제작
	C2. 중성자방사화 시스템 시작품 제작

C1. 진공자외선(VUV) 분광기 시작품 제작

수행 활동명	진공자외선(VUV) 분광기 시작품 제작					
활동의 주요 내용 및 의미	-					
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물						
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈	-					
기타						

C2. 중성자방사화 시스템 시작품 제작

수행 활동명	중성자방사화 시스템 시작품 제작					
활동의 주요 내용 및 의미	-					
활동의 중요도	1	2	3	4	5	총 (예상)소요기간 [단위 : 일]
예상되는 산출물						
본 활동 수행 중에 발생된 (혹은 예상되는) 이슈	-					
기타						

part 2 조달약정/산업체 계약

* 아래 사항은 진단장치 조달약정에 관한 내용입니다.

수행 활동명	조달약정 체결
일시	
내용	
의의 및 이슈사항	-

* 아래 사항은 진단장치 산업체 계약에 관한 내용입니다.

수행 활동명	산업체 계약
일시	
내용	
의의 및 이슈사항	-

part 3 정량적 성과

* [진단장치 개발·제작] 단계에서 창출된 논문에 관한 아래의 질문에 답하여 주시기 바랍니다.

[진단장치 개발·제작] 1단계 논문 실적	구분		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	총합
	국내 논문	SCI				1 편	1 편
해외 논문	비 SCI						
	SCI	2 편	1 편	4 편	1 편	8 편	
	비 SCI		1 편	1 편	1 편	3 편	

주요 논문 명	
논문의 주요 내용 및 의의	(논문의 주요 내용 및 ITER 공동개발사업 개발·제작 과정에서 논문이 갖는 의의 등)

* [진단장치 개발·제작] 단계에서 창출된 특허에 관한 아래의 질문에 답하여 주시기 바랍니다.

[진단장치 개발·제작] 1단계 특허 실적	구분		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	총합
	국내 특허	출원					2 건
등록							
해외 특허	출원						
	등록						

주요 특허 명칭	
특허의 주요 내용 및 의의	(특허의 주요 내용 및 ITER 공동개발사업 개발·제작 과정에서 특허가 갖는 의의 등)

* [진단장치]에서 이루고자 하는 핵심기술에 대해 답하여 주시기 바랍니다.

핵심기술	-
핵심기술의 주요 내용 및 의의	(주요핵심기술이 ITER 공동개발사업 개발·제작 과정에서 갖는 의의 등)

part 4 현재 기술력 수준

◎ (이더 공통) 핵융합 상용화가 차질 없이 이루어 지기 위해 개발되어야 할 기술 및 인적성장에 대해 귀하께서 생각하는 점수를 기록하여 주십시오. 즉, 핵융합 상용화가 100점이라 가정 할 때 각 지표의 전문성은 어느 정도가 되는지 기록하여 주십시오.

- 예를 들어 Safety의 핵융합 상용화가 가능한 정도의 수준이 100이라고 할 때, 1단계 시작 당시 해당 수준이 30%면 30점, 종료시 예측 수준이 40%면 40점, 세계 최고수준이 70%면 70점, DEMO 단계 기술수준이 80%면 80점을 적어주십시오

이더 공통	1단계 시작 당시 해당 기술수준	1단계 종료 시 예측치	현재 세계 최고 수준	DEMO	핵융합 상용화가 가능한 수준
Maintenance				90	100
Safety				80	100
단위 Cost					100
Efficiency(Thermal, Power Density)					100
Plasma Duration					100
인적 역량 수준					100
산업체 역량 강화 (기술적 업그레이드)					100

◎ 핵융합상용화를 위해 충족시켜야 하는 여러 기준들 중에 귀하께서 중요하다고 생각 하시는 순서대로 순위 및 점수를 기록하여 주십시오

- 예를 들어, 성공적으로 핵융합 상용화를 달성하기 위해서 여러 기준들 중 Safety가 가장 중요하다고 생각하시면 Safety에 100점(1위)을 주시고, 단위 Cost가 Safety의 80% 수준으로 중요하다고 생각하시면 단위 Cost에 80점(2위), 인적역량이 Safety의 70% 수준으로 중요하다고 생각하시면 70점(3위)을 정성적으로 부여하시면 됩니다.

구분	Maintenance	Safety	단위 Cost	Efficiency	Plasma Duration	인적 역량 수준
중요도 순위						
중요도 점수						

■ 지표에 대한 간략한 설명

구분	지표 설명
Maintenance	유지 및 관리가 쉽거나 용이할수록 높은 점수를 부여
Safety	안전성 관련(ITER 기술력의 시장진입 등)
단위 Cost	단위 전력당 비용에 따른 cost(1MW, 1W 등)
Efficiency (Thermal, Power Density)	효율성(발생된 열의 효율성 등)
Plasma Duration	plasma를 안정적으로 운전할 수 있는 기간
인적 역량 수준	ITER 사업으로 인해 축적되는 역량 수준(정규직, 무기계약직 포함)

◎ (진단장치 핵심기술) 진단장치 개발에서 생각하는 핵심기술을 기술하고 점수를 기록하여 주십시오. 즉 핵융합 상용화가 100점이라 가정 할 때 현재의 핵심기술 전문성은 어느 정도가 되는지 기록하여 주십시오.

- 방식은 위 이터공통 사업과 동일합니다.

핵심기술	1단계 시작 당시 해당 기술수준	1단계 종료 시 예측치	현재 세계 최고 수준	DEMO	핵융합 상용화가 가능한 수준
					100
					100
					100
					100
					100
					100
					100
					100

*는 1단계 보고서에 작성되어 있는 핵심기술임

◎ 진단장치 핵심기술 중 귀하께서 중요하다고 생각하시는 순서대로 순위 및 점수를 기록하여 주십시오

- 방식은 위 이터 공통사업과 동일합니다.

구분					
중요도 순위					
중요도 점수					

참조 1단계 주요 실적 및 정성적 성과

1. 1단계 주요 실적(2단계 기획보고서 참조)

<ul style="list-style-type: none"> ▪진단장치 조달약정 체결('11.6) ▪중성자방사화시스템 개념설계 완료('10.11), 시작품제작 완료('11.7), KSTAR 성능평가 시험('11.8) ▪진공자외선분광기 개념설계 완료(VUV-U : '10.7, VUV-E : '11.4), 시작품 제작 완료('10.2), 기본 성능시험('10.7) ·KSTAR 성능시험 준비('11.11)

2. 정성적 성과(2단계 기획보고서 참조)

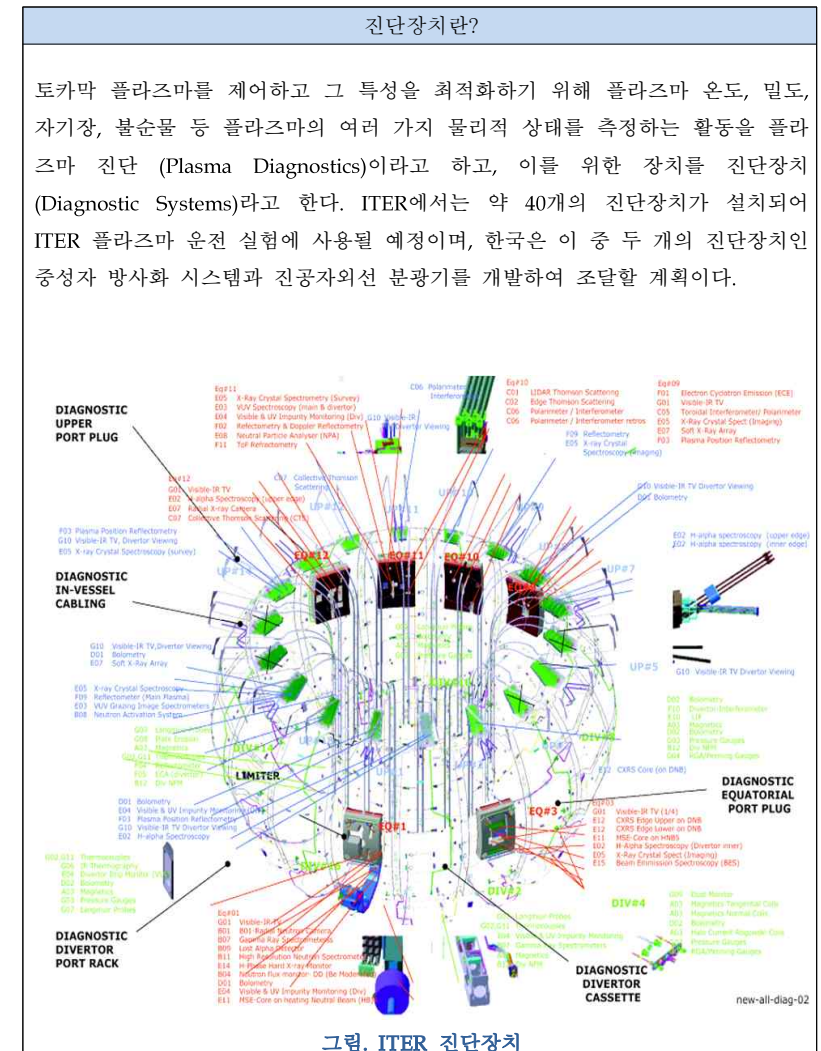
<ul style="list-style-type: none"> ▪중성자방사화 시스템 개념설계 완료('10.11) ▪중성자방사화 시스템 시험 이송장치 시작품 설계 완료('10.11) 및 KSTAR 성능평가 시험 완료('11.8) ▪VUV 분광기 시작품 설계, 제작, 성능시험 완료('10.7) ▪VUV-U 분광기 광학계, 데이터 수집 및 분석장치 개념설계 완료('10.7) ▪VUV-E&D 분광기 개념설계 완료('11.4) ▪진단차폐블록(DSM) 개념설계 완료('11.6)

7-2. 설문서 피드백 (진단장치: 예)

□ 인터뷰 내용

- 진단장치는 핵융합로를 최적으로 운전하기 위하여 모니터링해야 할 플라즈마의 물리적 상태를 진단하는 장치를 만드는 기술로서 대부분 조달품목은 하드웨어 제조가 목적이지만, 진단장치는 성격이 다소 다름
- 진단장치는 소규모 실험장치로서 40여 가지의 진단장치 중 한국사업단에서는 2개의 진단장치와 1개의 진단용 포트플러그를 조달할 계획임
- ITER 사업은 실험용 핵융합로를 건설하여 플라즈마 제어, 열효율 향상, 연료주기 선순환 등을 실험하는 것이 목적이기 때문에 이를 위한 진단장치가 중요함. 현재 40여개의 진단장치가 설치될 예정이나 ITER 장치에서의 실험이 완료되면 진단장치의 수가 축소될 것임
- (가장 중요한 1단계 성과) 처음 시작할 땐 한국의 관련 기술력이 부족한 상태였기 때문에 IO측에서 기술력에 대한 의문이 있는 상태였지만 1단계 사업으로 두 개의 진단장치를 조달약정 요구대로 실제 토카막 환경인 KSTAR에서 실제적으로 테스트를 실시하여 신뢰를 얻은 것이 가장 중요한 성과라고 할 수 있음
- (조달약정) 조달약정: 설계, 제작 능력을 PDR에서 검증을 받는 일이 중요하기 때문에 큰 의의를 두지 않음.
 산업체 계약: PA를 맺으면 산업체와 계약을 하는데, 진단장치에서는 PA를 맺었다고 해도 작은 업체와 계약을 맺어서 일을 하는 시스템이기 때문에 산업체 계약은 중요한 사안이 아님
- (아쉬운 점) 우리나라는 40여개의 진단장치 중 두 개의 진단장치 밖에 참여를 못하였다는 것임. 비조달 진단장치에 대한 기술을 모니터링하고는 있으나 확보에 어려움이 있음.

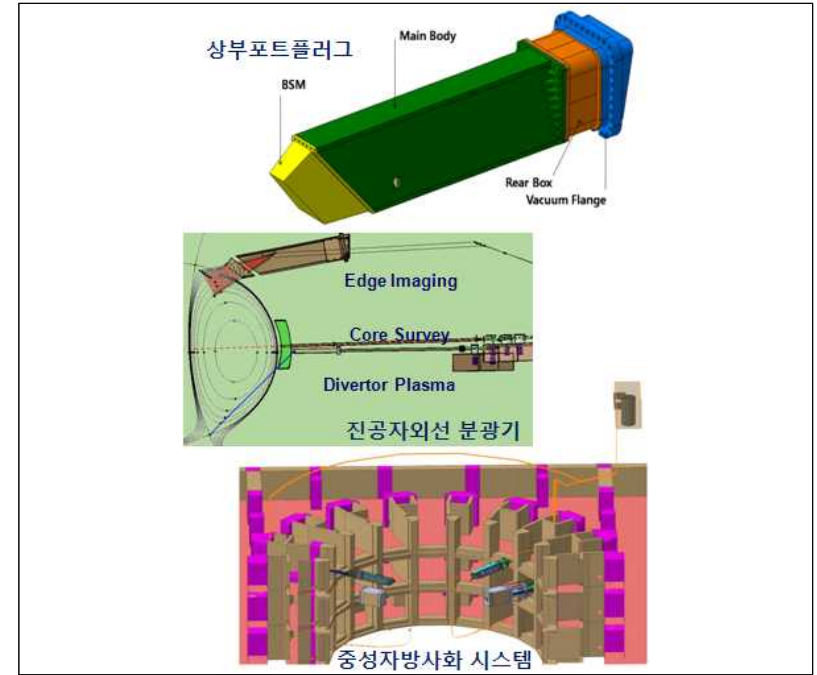
□ 진단장치에 대해 쉽게 설명 부탁드립니다. (홍보용)



Part 2. 핵심기술 및 중요기술/요소기술/논문 및 특허

□ 핵심/중요/요소기술 및 기술 제안

중요기술	
핵융합 중성자 측정 기술	- 핵융합 플라즈마에서 발생하는 중성자의 개수, 에너지, 분포 등을 측정하는 기술
중성자 수송 해석 기술	- 토카막에서의 중성자 수송 현상을 모사하고 측정 데이터를 해석하는 기술
진공자외선 분광 측정 및 분석 기술	- 진공자외선 분광법에 의한 플라즈마 내부의 불순물의 양 및 분포를 측정하고 분석하는 기술
포트 플러그 설계 및 제작 기술	- 고온, 고자장, 고중성자속 등 ITER 특수 환경을 고려한 포트플러그의 기본 구조물 설계 및 제작 기술
진단장치 포트별 통합설치 기술	- 각 포트에서 진단장치의 설치, 운전, 유지보수 등을 고려한 특수 구조물 설계 및 제작 기술
<p>- 핵융합 중성자 측정 기술: 중성자 방사화 시스템은 핵융합 중성자로 인한 시편의 방사화 정도를 계속함으로써 조사 위치에서의 중성자 플루언스를 측정하는 장치임. 공압을 이용하여 시편이 포함된 캡슐을 조사점 및 계측점으로 이송하며, 방사화된 시편에서 발생하는 감마선을 계측하는 기술을 사용함.</p> <p>- 중성자 수송 해석 기술: 몬테카를로(Monte-Carlo)법을 사용하여 플라즈마에서 발생한 중성자가 토카막 내에서 어떻게 수송되는지를 해석하는 기술. 진단 데이터를 해석하는데 사용될 뿐 아니라 구조물 설계를 위한 공학 해석 및 안전 해석에도 사용될 수 있음.</p> <p>- 진공자외선 분광 측정 및 분석 기술: 진공자외선 분광기는 플라즈마 영역별로 상부, 중간, 디버터 (Divertor) 영역의 세 부분에 설치되어 플라즈마 중심부, 언저리(Edge) 및 디버터(Divertor) 영역의 불순물 이온의 양 또는 분포를 측정하는 장치임. 토카막 내부 벽의 물질들을 검출하여 내부 벽 손상 여부 등에 응용할 수 있으며, 불순물 입자의 플라즈마 내 수송현상 연구에 응용됨.</p> <p>- 포트 플러그 설계 및 제작 기술: 포트플러그는 진단장치 중 플라즈마와 가까운 곳에 위치해야 하는 부품을 설치시킬 수 있는 구조물을 말함. 포트플러그가 설치되는 위치는 플라즈마와 매우 가까워 고열속, 대전자기력, 고중성자속 환경에 노출되어 있으므로 이러한 특수 환경을 고려한 설계 및 제작 기술이 필요함.</p> <p>- 진단장치 포트별 통합설치 기술: 한 포트에는 보통 한 개 이상의 진단장치 부품들이 설치되는데, 각 진단장치들의 설치, 운전, 유지보수를 고려한 각 포트 고유의 특수 구조물을 설계 및 제작하는 기술을 말함.</p>	



∴ 참고용: 1단계 종료보고서에 기재된 핵심기술 내역

핵심기술
진공자외선 분광을 통한 플라즈마 내부 불순물의 원소 분석 기술, 핵융합 중성자(14.1MeV) 플루언스 및 핵융합 에너지 측정 기술, 고진공, 열·중성자 차폐 구조물 및 진단 부품 통합설치 설계 기술

□ 중요 논문/특허/언론보도 내용(홍보용)

논문/특허/페이퍼	
중성자방사화시스템	<p>- 분석, 장치 기능에 대한 논문의 이름 및 내용, 의의에 대해 쉽고 간략하게 부탁드립니다.</p> <p>- 아래 논문 내용은 ITER 중성자방사화 시스템의 시작품을 이용하여 실제 토카막 환경인 KSTAR에서 중성자 진단 실험을 실시한 결과를 기술하고 있음. 본 논문을 통해 한국이 토카막 중성자 진단 장치의 설계, 설치, 운전, 결과 분석 능력을 갖추</p>

	<p>있음을 증명함.</p> <ul style="list-style-type: none"> - M.S. Cheon et al., "Diagnostic neutron activation system for KSTAR", Journal of Instrumentation 7 C05009, 2012
중성자방사화시스템	<ul style="list-style-type: none"> - 캡슐이 어디 있는지 찾는 기술력에 대한 특허의 이름 및 내용, 의의에 대해 쉽고 간략하게 부탁드립니다. - 시편의 공압 이송 방식을 사용하는 중성자방사화 시스템에서, 전송선 내에 캡슐이 어디에 위치하는 지 탐지하는 방법 및 그 장치에 대한 특허출원임. 본 방법을 이용하면 진단 정확도와 운전 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대됨. - 한국기초과학지원연구원 "이송체 위치 추적 기능을 구비한 공압식 이송장치 및 그것을 이용한 이송체 위치 추적 방법", 출원번호 10-2012-024684-1
진공자외선분광기	<ul style="list-style-type: none"> - 같은 조건에서 분광효율이 어느 것이 더 좋은지에 대한 논문의 이름 및 내용, 의의에 대해 쉽고 간략하게 부탁드립니다. - 아래 논문 내용은 현재 VUV 분광기의 광 검출기로 사용되고 있는 MCP 광 검출기와 후면 조사 CCD 광 검출기의 분광 해상도를 같은 실험조건에서 비교한 실험 결과로 후면 조사 CCD의 해상도가 뛰어난 결과를 얻었음. 이를 통해 ITER VUV 분광기의 광검출기 결정에 활용되었음. - C.R. Seon, et. al., "Development of two-channel prototype ITER vacuum ultraviolet spectrometer with back-illuminated charge-coupled device and microchannel plate detectors", Rev. Sci. Instrum. 81, 10E508, 2010

Part 3. 핵심기술 및 중요기술/요소기술

□ 이터 공통 설문

설문서							
<p>◎ (이터 공통) 핵융합 상용화가 차질 없이 이루어 지기 위해 개발되어야 할 기술 및 인적성장에 대해 귀하께서 생각하는 점수를 기록하여 주십시오. 즉, 핵융합 상용화가 100점이라 가정 할 때 각 지표의 전문성은 어느 정도가 되는지 기록하여 주십시오.</p> <ul style="list-style-type: none"> - 예를 들어 Safety의 핵융합 상용화가 가능한 정도의 수준이 100이라고 할 때, 1단계 시작 당시 해당 수준이 30%면 30점, 종료시 예측 수준이 40%면 40점, 세계 최고수준이 70%면 70점, DEMO 단계 기술수준이 80%면 80점을 적어주십시오 							
이터 공통	1단계 시작 당시 해당 기술수준	1단계 종료 시 예측치	현재 세계 최고 수준	DEMO	핵융합 상용화가 가능한 수준		
Maintenance	-	-	-	-	-		
Safety	-	-	-	-	-		
단위 Cost	-	-	-	-	-		
Efficiency (Thermal, Power Density)	-	-	-	-	-		
Plasma Duration	-	-	-	-	-		
인적 역량 수준	-	-	-	-	-		
산업체 역량 강화 (기술적 업그레이드)	-	-	-	-	-		
<p>◎ 핵융합상용화를 위해 충족시켜야 하는 여러 기준들 중에 귀하께서 중요하다고 생각하시는 순서대로 순위 및 점수를 기록하여 주십시오</p> <ul style="list-style-type: none"> - 예를 들어, 성공적으로 핵융합 상용화를 달성하기 위해서 여러 기준들 중 Safety가 가장 중요하다고 생각하시면 Safety에 100점(1위)을 주시고, 단위 Cost가 Safety의 80% 수준으로 중요하다고 생각하시면 단위 Cost에 80점(2위), 인적역량이 Safety의 70% 수준으로 중요하다고 생각하시면 70점(3위)을 정성적으로 부여하시면 됩니다. 							
구분	Maintenance	Safety	단위 Cost	Efficiency	Plasma Duration	인적 역량 수준	산업체역량
중요도 순위	-	-	-	-	-	-	-
중요도 점수	-	-	-	-	-	-	-

□ 진단장치 설문

설문서					
<p>◎ 진단장치 개발에서 생각하는 핵심/중요/요소기술을 기술하고 점수를 기록하여 주십시오. 즉 핵융합 상용화가 100점이라 가정 할 때 현재의 핵심기술 전문성은 어느 정도가 되는지 기록하여 주십시오. - 방식은 위 이터공통 사업과 동일합니다.</p>					
핵심기술	1단계 시작 당시 해당 기술수준	1단계 종료 시 예측치	현재 세계 최고 수준	DEMO	핵융합 상용화가 가능한 수준
핵융합 중성자 측정 기술	-	-	-	-	-
중성자 해석 기술	-	-	-	-	-
진공 자외선분광 측정 및 분석 기술	-	-	-	-	-
포트 플러그 설계 및 제작 기술	-	-	-	-	-
진단장치 포트별 통합설치 기술	-	-	-	-	-
<p>◎ 진단장치 핵심/중요/요소기술 중 귀하께서 중요하다고 생각하시는 순서대로 순위 및 점수를 기록하여 주십시오 - 방식은 위 이터 공통사업과 동일합니다.</p>					
구분	핵융합 중성자 측정 기술	중성자 해석 기술	진공 자외선분광 측정 및 분석 기술	포트 플러그 설계 및 제작 기술	진단장치 포트별 통합설치 기술
중요도 순위	-	-	-	-	-
중요도 점수	-	-	-	-	-

7-3. ITER 1단계 정량적 성과(논문 및 특허)

ITER 1단계 사업으로 인해 창출된 논문

사업년도	학술지명	논문명	SCI구분
2008	REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS	In-vessel design of ITER diagnostic neutron activation system	SCI
2008	PHYSICS OF PLASMAS	A simple toroidal shell model for the study of feedback stabilization of resistive wall modes in a tokamak plasma	SCI
2008	MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A-STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES MICROSTRUCTURE AND PROCESSING	Stress rupture characteristics of Inconel 718 alloy for ramjet combustor	SCI
2008	information-an international interdisciplinary journal	Non-Disturbance Scheduling based on User Usage Pattern for Volunteer Computing	비SCI
2008	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	A 30 kJ Bi2223 high temperature superconducting magnet for SMES with solid-nitrogen protection	SCI
2008	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	A variable temperature Walters spiral probe for the critical current measurement of superconducting strands	SCI
2008	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Design of superconducting magnet for background magnetic field	SCI
2008	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Development and Sultan test result of ITER conductor samples of Korea	SCI
2008	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Development of large-bore superconducting magnet with zero-vapor liquid helium	SCI
2008	IEEE Transactions on Applied Superconductivity	Development of Strain Measurement in Superconducting Magnet Through Fiber Bragg Grating	SCI
2008	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Effects of Cr diffusion on RRR values of Cr-plated Nb3Sn strands fabricated by internal-tin process	SCI
2008	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Results of a new generation of ITER TF conductor samples in SULTAN	SCI
2008	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	Disproportionation characteristics of a zirconium-cobalt hydride bed under ITER operating conditions	SCI
2008	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	Experimental study on the delivery rate and recovery rate of ZrCo hydride for ITER application	SCI
2008	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	Korea's activities for the development of ITER tritium storage and delivery systems	SCI
2008	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	Parameter estimations for the kinetics of dehydrating reaction between zirconium-cobalt and hydrogen	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Development of a remote monitoring system based on Grid-EPICS for tokamak experiments	SCI
2008	CRYOGENICS	Status of Nb3Sn strand development in Korea	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Design progress of the vacuum vessel sectors and ports towards the ITER construction	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	ITER vacuum vessel, in-vessel components and	SCI

사업년도	학술지명	논문명	SCI구분
		plasma facing materials	
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Recent progress of ITER vacuum vessel related design activities in Korea	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Effect of cooling rate on mechanical properties of aged ITER-grade CuCrZr	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	High heat flux test with HIP bonded Cu/SS mock-ups for the ITER first wall	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Current status on the detailed design and development of fabrication techniques for the ITER blanket shield block in Korea	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Design of the ITER Tokamak Assembly Tools	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	A study on the thermal analyses of the ITER vacuum vessel thermal shield	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Accuracy assessment of the in-bed calorimetry employed in ITER SDS	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Heat analysis on the initial reference design of ZrCo hydride beds for ITER	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	A conceptual design of the ITER upper port plug structure and its cooling channels	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Current status of design and analysis of Korean Helium-Cooled Solid Breeder Test Blanket Module	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Depletion analysis of a solid-type blanket design for ITER	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Design and preliminary safety analysis of a helium cooled molten lithium test	SCI
2008	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Preliminary safety analysis of Korea Helium Cooled Solid Breeder Test Blanket Module	SCI
2009	한국전공학회지	핵융합로부품 시험을 위한 고열부하 시험시설 KoHLT-1 구축	비SCI
2009	Progress in Superconductivity	Development of ITER TF cable-in conduit conductors and their characteristics	비SCI
2009	Nuclear Engineering and Technology	Current status of nuclear fusion energy research in Korea	SCI
2009	METALS AND MATERIALS INTERNATIONAL	Directional Solidification Processing on CET in Al-Based Alloys	SCI
2009	METALS AND MATERIALS INTERNATIONAL	HIP joining of RAFM/RAFM steel and beryllium/RAFM steel for fabrication of the ITER TBM first wall	SCI
2009	MECHANICS OF MATERIALS	Shakedown analysis of fibre-reinforced copper matrix composites by direct and incremental approaches	SCI
2009	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	Development of low activation ferritic/martensitic steel welding technology for the fabrication of KO HCSB TBM	SCI
2009	Journal of Nuclear Materials	Design and installation of DC plasma reactor for SiC nanoparticle production	SCI
2009	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	Study on the weld characteristics of 316LN by magnetization measurement	SCI
2009	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Design and Thermo-Hydraulic Analysis of Upgraded PUMA System for the Development of a Test Facility of Superconducting CICC	SCI
2009	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Design of Adjustable Homogeneous Region Cryofree Conduction-Cooled Superconducting	SCI

사업년도	학술지명	논문명	SCI구분
		Magnet for Gyrotron	
2009	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Design of Open High Magnetic Field MRI Superconducting Magnet With Continuous Current and Genetic Algorithm Method	SCI
2009	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Development of Testing Device for Critical Current Measurements for HTS/LTS	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Welding Technology Development for the Fabrication of ITER Blanket Shield Block in Korea	SCI
2009	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	CURRENT R&D ACTIVITIES ON KOREAN HELIUM COOLED SOLID BREEDER TEST BLANKET MODULE	SCI
2009	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	Development of a high heat flux test facility for plasma facing components	SCI
2009	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	Effect of ion-beam assisted deposition on resistivity and crystallographic structure of Cr/Cu	SCI
2009	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	ESTIMATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES IN MASSIVE ZrCoHx SYSTEM	SCI
2009	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	GLOBAL DEPLETION ANALYSIS OF KOREAN HELIUM-COOLED SOLID BREEDER TBM MODEL FOR TESTING IN ITER	SCI
2009	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	High heat flux test with HIP bonded 50x50 Be/Cu mock-ups for the ITER first wall	SCI
2009	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	INITIAL TEST RESULTS OF A FAST HEAT TRANSFER RESPONSE ZrCo HYDRIDE BED	SCI
2009	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	PRELIMINARY THERMAL AND HYDRAULIC ANALYSIS ON THE ITER UPPER DIAGNOSTIC PORT PLUG DURING NORMAL OPERATION AND BAKING	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Korea's progress on the ITER tritium systems	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Thermohydraulic analysis on in-bed calorimetry in a thin double layered annulus metal hydride bed	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Beryllium/ferritic martensitic steel joining for the fabrication of the ITER test blanket module first wall	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Design approach of the vacuum vessel and thermal shields towards assembly at the ITER-site	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Design verification of the heating neutral beam port liner for the ITER vacuum vessel	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Fabrication and high heat flux test of the first wall mock-ups for the Korean He Cooled Test Blanket (KO HCML TBM)	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Fabrication of Be/CuCrZr/SS mock-ups for ITER first wall	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	High heat flux test with HIP bonded Be/Cu/SS mock-ups for the ITER first wall	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Hydriding/dehydriding characteristics on fast heat transfer response ZrCo bed for ITER	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	ITER vacuum vessel: Design review and start of procurement process	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	LOCA analysis for Korean helium cooled solid breeder TBM	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Mock-up of a support structure of the ITER	SCI

사업년도	학술지명	논문명	SCI구분
		vacuum vessel	
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Structural analyses for equatorial and lower ports of the ITER vacuum vessel	SCI
2009	FUSION ENGINEERING AND DESIGN	Three-dimensional shakedown analysis of fiber-reinforced metal matrix composite (FRMMC) layered plasma-facing component for high heat flux loading	SCI
2010	Thin Solid Films	Design evaluation of the semi-prototype for the ITER blanket first wall qualification	SCI
2010	Review of Scientific Instruments	Development of two-channel prototype ITER vacuum ultraviolet spectrometer with back-illuminated CCD and micro-channel plate detectors	SCI
2010	Physica C	Heat treatment effect on the strain dependence of the critical current for an internal-tin processed Nb ₃ Sn strand	SCI
2010	Nuclear Engineering and Technology	High Heat Flux Test with HIP Bonded 35x35x3 Be/Cu Mock-ups for the ITER First Wall	비SCI
2010	Nuclear Engineering and Technology	Protection Sequence of AC/DC Converters for ITER PF Magnet Coils	비SCI
2010	Jour. Kor. Phys. Soc.	Eulerian representation of an ideal magnetohydrodynamic eigenmode equation for a flowing cylindrical plasma: Equivalence to Lagrangian representation	SCI
2010	J. Nuclear Material	High heat flux test with HIP-bonded ferritic martensitic steel mock-up for the first wall of the KO HCML TBM	SCI
2010	Int. J. Heat and Mass Transfer	Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer application	SCI
2010	IEEE Transactions on Plasma Science	Operational radioactivity evaluation of ITER diagnostic neutron activation system	SCI
2010	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Development of a Digital Quench Detection and Dumping Circuit With Constant Voltage System for SMES	SCI
2010	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Development of Numerical Model of KSTAR PF Conductor and Magnet for the Analysis of AC Loss on the Results of KSTAR PF Magnet Test Run	SCI
2010	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Performance Test of TFKO2 Qualification Sample of ITER TF Conductor	SCI
2010	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Reversible Transverse Stress Effects on the Critical Current of an Internal Tin Nb ₃ Sn Strand under Axial Strain	SCI
2010	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	Transverse Load Versus Mechanical Characteristics and Inter-Strand resistances in the Cable of the "Option 2" Specification for ITER TF Conductor	SCI
2010	IEEE Trans. Plasma Sci.	ITER Storage and Delivery System R&D in Korea	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Fabrication study on the cooling module of the ITER neutral beam duct liner	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Evaluation of electromagnetic loads on the ITER upper port plug during plasma disruptions	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Laser welding and ablation cutting process for hydraulic connections by remote handling in the ITER diagnostic port plug	SCI

사업년도	학술지명	논문명	SCI구분
2010	Fusion Engineering and Design	Numerical Simulation on bake-out of the ITER diagnostic upper port plug	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	A Conceptual Design and Structural Stabilities of In-pit Assembly Tools for the Completion of Final Sector Assembly at Tokamak Hall	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	A Conceptual Design of Assembly Strategy and Dedicated Tools for Assembly of 40° Sector	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Fusion fuel gas recovery and delivery characteristics on a tray-type ZrCo bed	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Manufacture and test of mock-up for ITER thermal shield	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Must we use ferritic steel in TBM	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Non-axisymmetric magnetic field due to ferromagnetic inserts and helium cooled solid breeder test blanket modules in ITER	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Progress of detailed design and supporting analysis of ITER thermal shield	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	R&D Activities on Helium Cooled Solid Breeder TBM in Korea	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Thermal hydraulic test with 6 MPa nitrogen gas loop for developing the Korean He cooled test blanket	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Thermo-hydraulic and Thermo-mechanical Analysis of Korean Helium Cooled Solid Breeder TBM	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Eddy current induced electromagnetic loads on shield blankets during plasma disruptions in ITER: A benchmark exercise	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Experiment and Analysis of Hypervapotron Mock-ups for Preparing the 2nd Qualification of the ITER Blanket First Wall	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	Ion-beam assisted deposition of coating interlayers for the joining of Be/CuCrZr	SCI
2010	Fusion Engineering and Design	ITER vacuum vessel design and construction	SCI
2010	Fusion Eng. Des.	Study on pump combinations for improving delivery rates of hydrogen	SCI
2010	FED	Global Depletion Analysis of Korean Helium Cooled Solider Breeder TBM Model for Demo Fusion Reactor	SCI
2010	Corrosion Science	Electrochemical characterization of sintered magnetite electrode in LiOH solution	SCI
2010	Applied Physics Letter	Effects of nanofluids containing graphene/graphene-oxide nanosheets on critical heat flux	SCI
2011	한국수소 및 신에너지학회 논문집	삼중수소 저장기술, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 제 22권 제 3호, 2011	비SCI
2011	Journal of the Korean Physical Society	Evaluation of the Neutron Flux Effect on the ITER VUV Diagnostic System in the Upper Port, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 59, No. 3, September 2011, pp. 2228-2232	SCI
2011	Journal of Nuclear Materials	High heat Flux test with HIP-bonded Ferritic Martensitic Steel Mock-up for the First Wall of the KO HCML TBM, Journal of Nuclear Materials, 417 (2011) 63-66	SCI

사업년도	학술지명	논문명	SCI구분
2011	Journal of Nuclear Materials	Investigation on the microstructure and mechanical properties of CuCrZr after Manufacturing Thermal Cycle for PFC	SCI
2011	Journal of Nuclear Materials	Plasma boundary and first-wall diagnostics in ITER	SCI
2011	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	TIG and HIP Joining of Reduced Activation Ferrite/Martensitic Steel for the Korean ITER-TBM	SCI
2011	Journal of Ceramic Processing Research	Synthesis and Sintering Behavior of Li4SiO4 fabricated by a PVA Polymer solution route, Journal of Ceramic Processing Research, Vol.12, No.2, pp.183-186, 2011	SCI
2011	Fusion Science and Technology	Effect of tritium storage vessel and aluminum secondary container on calorimeter performance, Fusion Science and Technology, Volume 60, Number 3, October 2011, Pages 1010-1013	SCI
2011	Fusion Science and Technology	Experimental Determination of Selected Thermo Physical Properties of ZrCo and ZrCoHx	SCI
2011	Fusion Science and Technology	Experimental study of first wall cooling with gas loop in the development of a Korean test blanket module, Fusion Science and Technology, Vol.60, No.2, Pages 544-548	SCI
2011	Fusion Science and Technology	High Heat flux test of the KO Standard Mockups for ITER First wall Semi-prototype, Vol. 60, No.1 161-164 2011.7	SCI
2011	Fusion Science and Technology	Joining of Be to Ferritic-Martensitic Steels with Diffusion Barrier Interlayer, Fusion Science and Technology, Vol. 60, No.1, July 2011, 422-425.	SCI
2011	Fusion Science and Technology	Performance Test of Pump Combination Between Normetex 15 Scroll and MB 601 Pumps, Fusion Science and Technology, Vol. 60, No.3, October 2011, Pages 918-921	SCI
2011	Fusion Science and Technology	R&D Activities on the Tritium Storage and Delivery System in Korea	SCI
2011	Fusion Science and Technology	R&D Status of Key Technologies for the Development of KOTBM, Engineering and Design Vol. 86, October 2011, 2223-2227.	SCI
2011	Fusion Science and Technology	Small Mock-up Fabrication and HHT test for preparing the 2nd Qualification of the ITER Blanket First wall Vol.60	SCI
2011	Fusion Science and Technology	Thermo-Hydraulic and structural analysis for finger-based concept of ITER blanket first wall	SCI
2011	Fusion Science and Technology	Thermo-hydraulic performance analysis for conceptual design of ITER blanket shield block	SCI
2011	Fusion Science and Technology	Tritium Research Activities in KAERI, Fusion Science and Technology, Vol.60, No.3, October 2011, Pages 1096-1100	SCI
2011	Fusion Science and Technology	Performance test of the electromagnetic pump in an experimental liquid breeder loop for developing a Korean Test Blanket Module, Fusion Science and Technology, Vol.60, No.1 July 2011, Pages 139-143	SCI
2011	Fusion Engineering and Design / 86(4-5) / Elsevier	Heat flux tests of the ITER first wall qualification mockups at KoHLT-1	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Structural analysis of alternative designs for the ITER vacuum vessel and support	SCI

사업년도	학술지명	논문명	SCI구분
2011	Fusion Engineering and Design	Thermo-Hydraulic Analysis on Korean Helium cooled Solid breeder TBM with updated Back Manifolds Design, Fusion Engineering and Design Vol. 86, October 2011, 2289-2292.	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Thermo-hydraulic design verification of the neutral beam liner for the ITER vacuum vessel	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	A Structural Analysis of Sector Sub-Assembly Tools	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Compressibility study during hydride reaction of ZrCo	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Design Analysis fo the hinge support for the ITER vacuum vessel	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Development of an Experimental facility for liquid breeder in Korea, Fusion Engineering and Design, Vol. 86 2011 2212-2215	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Evaluation of EM loads on various design options of the ITER diagnostic UPP during plasma disruptions, Fusion Engineering and Design	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Fabrication and high heat flux test of large mockups for ITER first wall semi-prototype	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Fabrication and high heat flux test with the Be/FMS mock-ups for first wall of the KO HCML TBM, Fusion Engineering and Design, Vol. 86 2011, 1697-1701	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Fabrication of a full-size mock-up for inboard 10° section of ITER vacuum vessel thermal shield	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	ITER Thermal shields at the starting phase of procurement	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Joining methods of Be/FMS and W/FMS for the ITER TBM first wall, Fusion Engineering and Design, Vol. 86, 2011, 2390-2393	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Process simulation for fuel delivery from storage and delivery system in fusion power plant, FED, 2011	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	An Efficient Modeling of Fine Air-gaps in Tokamak In-vessel Components for	SCI
2011	Applied Chemistry(한국공업화학회)	수직형 수소동위원소 흡탈장 ZrCo 매트 제작	비SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Dong Keun Oh, et al., Non-axisymmetric magnetic field due to ferromagnetic inserts and helium cooled solid breeder test blanket modules in ITER, Fusion Engineering and Design 86, Issue 2-3, March, 2011, Pages 127-133	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Fabrication and test of thin double-layered annulus metal hydride bed	SCI
2011	Fusion Engineering and Design	Nuclear technology aspects of ITER vessel-mounted diagnostics	SCI

ITER 1단계 사업으로 인해 창출된 특허

사업년도	등록/출원	명칭	출원등록인
2008	특허출원	저장용기 모사방법 및 장치	한국전력공사
2008	특허등록	코팅된중간층사이의확산층형성에의하여베릴륨과구리합금의접합강도를향상시키는고온등방가압접합방법	한국원자력연구소
2008	특허등록	기계적또는화학적처리물거친 베릴륨과 구리 합금의접합방법	한국원자력연구소
2008	특허등록	단일또는이중중간층을이용한 베릴륨과 구리 합금의고온등방가압 접합방법	한국원자력연구소
2009	특허출원	고열부하반복시험방법및장치	한국원자력연구원
2009	특허출원	삼중수소의저장과계량및급속이송용장치및이들이용한삼중수소의저장과계량및급속이송방법수립	한국원자력연구원, 기초과학지원연구원
2009	특허출원	삼중수소의 재고 계량과 회수 저장 및 공급을 위한 핵융합반응용 일체형 삼중수소 용기	한국원자력연구원
2009	특허출원	이형체를 이용한 열간등방가압 확산접합 방법	한국기초과학지원연구원
2010	특허출원	핵융합반응용 수직형 삼중수소 용기	한국원자력연구원, 기초과학지원연구원
2010	특허출원	그래파이트 페블에 대한 S i C 코팅장치 및 코팅방법	한국기초과학지원연구원
2010	특허출원	구형체 물질의 고온 코팅을 위한 CVD 장치	한국기초과학지원연구원
2011	특허출원	급냉식 수소동위원소 저장용기	한국원자력연구원, 기초과학지원연구원
2011	특허출원	초음파 센서장치	한국원자력연구원, 기초과학지원연구원
2011	특허출원	다방향으로 가동 가능한 초음파 센서장치	한국원자력연구원, 기초과학지원연구원
2011	특허출원	열전달 촉진형 이중 원통형 수소동위원소 저장용기	한국원자력연구원, 기초과학지원연구원
2011	특허출원	적층형 인쇄회로기판 전열기 및 이를 활용한 기체 가열장치	한국원자력연구원
2011	특허출원	전력변환장치	기초과학지원연구원
2011	특허출원	중성자방사화시스템의 공압시편이송장치를 위한 회전관형 이송기	기초과학지원연구원
2011	특허출원	중성자방사화시스템의 공압시편이송장치를 위한 시편자동장전기	기초과학지원연구원
2011	특허등록	고열부하 반복 시험 방법 및 장치	한국원자력연구소
2011	특허등록	삼중수소의 저장과 계량 및 급속 이송용 장치 및 이들 이용한 삼중수소의 저장과 계량 및 급속이송 방법	기초과학지원연구원, 한국원자력연구원
2011	특허등록	이형체를 이용한 열간등방가압 확산접합 방법	한국기초과학지원연구원
2011	특허등록	저장 용기 모사 방법 및 장치	한국전력공사

※ 본 보고서는 (주)기술과 가치가 국가핵융합연구소로부터 용역을 의뢰 받아 수행한 연구의 결과입니다. 이 보고서의 내용은 연구진의 의견으로서 국가핵융합연구소의 공식적 입장과 다를 수 있습니다. 이 보고서의 내용에 대해 무단인용이나 전재, 복제를 금합니다.