

Fusion Reactor Technology I

(459.760, 3 Credits)

Prof. Dr. Yong-Su Na
(32-206, Tel. 880-7204)

Contents

Week 1. 에너지와 지구환경 문제

Week 2-3. 토카막로의 기초

Week 4-6. 토카막로의 설계

Week 8-9. 노심 플라즈마에 관한 기반과 과제

Week 10-13. 노공학 기술에 관한 기반과 과제

Week 14. 상용로의 길 / Project Presentation

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

• 핵융합로의 안전상 특징

- 자장 밀폐 방식의 핵융합 반응은 고유한 안전성에 의해 수동적으로 종식하기 때문에, 원리적으로 핵적인 폭주의 위험성은 없음. 또한, 관성 밀폐 방식의 핵융합에 있어서도 연소해야 할 연료량을 제한하기 때문에, 그 위험성은 없음.
- 발생하는 방사선도 특단의 고려를 하지 않고도 충분히 차폐됨.
- 시설 전체에서는 상당량의 방사성 물질을 다루기 때문에, 설계의 진전에 따라 그 종류/성상/양/분포 등을 평가할 필요가 있지만, 비산성이나 보유량의 관점에서 연료인 tritium이 가장 중요함.
- 잠재하는 에너지는 ITER보다 크며, 구조 재료나 냉각재, 그들의 운전 조건(온도/압력/제어 등)을 고려하여, 방사성 물질의 1차 장벽 등(특히, 증식 blanket 등 노내 구조물이나 진공 용기나 냉각계)으로의 과가압, 붕괴열, 반응열의 영향을 정확하게 평가할 필요가 있음.
- 현시점에서는 특단의 동적 조치(예를 들면, 긴급 정지 장치나 잔류 열제거 설비)를 강구하지 않아도 수동적으로 이상 현상이 종식하며, 방사성 물질의 이상 누설 등의 사고로는 이어지지 않는 것으로 함.
- 핵적 폭주는 없으며, 1차 장벽의 건전성은 설계상 담보되지만, 만일 방사성 물질의 이상 누설 등 사고를 상정했을 때 하중의 최종 장벽(예를 들면 건물)에 미치는 영향을 평가할 필요가 있으며, 최종 장벽의 건전성을 손상시키는 레벨에 도달하지 않음이 나타나야 할 것이라고 생각함.

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

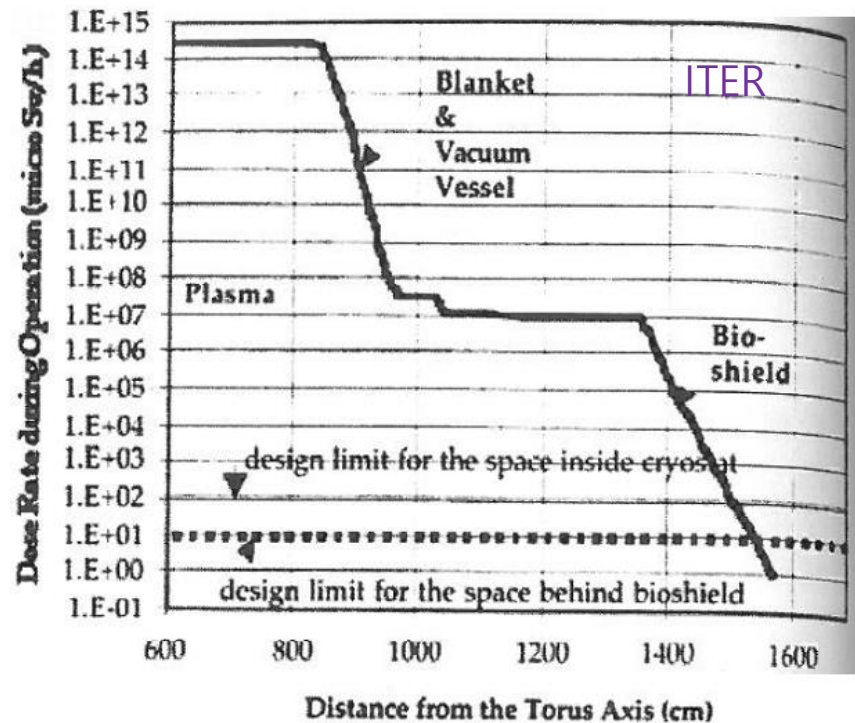
- 안전성

- 핵분열로와 비교하여 핵적 폭주가 없는 등의 우위성은 흔히 논의되지만, 핵융합로의 구체적인 공학 설계 정보가 부족하기 때문에 핵융합의 특징을 충분히 고려하여 안전 확보의 견해가 검토되어 왔다고는 말하기 어려움.
- 규제 체계의 정비에는 새로운 법정비의 가능성을 포함하여 향후 검토되어야 할 과제

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

• 핵융합로의 안전상 특징

- 핵융합 반응: 입자 밀도나 플라즈마 압력에 한계가 있으며, 연료의 과공급이나 에너지의 과주입이 일어나도 수동적으로 반응은 종식하기 때문에, 핵적 폭주의 잠재성은 없음.
- 방사선: 초전도 코일의 핵발열을 최소화할 수 있는 차폐 설계가 이루어져야 함. 누설 중성자는 콘크리트 등의 생체 차폐나 건물 내부의 구획을 구성하는 벽 등에서 확실하게 차폐해야 함.



3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 핵융합로의 안전상 특징

- 방사선 및 방사성 물질의 환경 방출에 대한 잠재성 및 그 영향도를 파악해야 함.

- (1) 에너지/상태량의 제어 등에 이상이 발생한 경우 그 기기가 파손될 수 있는가?

- (2) 방사성 물질을 내장하는 기기의 파손을 가정한 경우에 기기 외부 (예를 들면, 건물 내부)에의 방출물 등에 의한 하중에 의해 종속적으로 빌딩 등의 장벽이 파손될 수 있는가?

- (3) 그 경우의 피폭에 대한 영향도는 다른 원자력 시설과 비교하여 어느 정도인가?

- **ITER:** 안전상 특징으로써 에너지원의 과도 응답, 방사성 물질의 물리/화학적 성질과 양, 이상 진전 및 방사성 물질의 이상 누설 시 제1차 장벽 기기를 수납하는 건물 등에 작용할 수 있는 하중의 크기 등에 주목하여 분석

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 안전성을 논의하기 위한 조건에 관한 ITER와 핵융합로(3 GW 열출력 상정)의 비교 – 방사성 물질: 삼중수소 (site 전체)

	ITER		핵융합로	
(최대 체류는 진공 용기로 상정하고 있었지만, 제1벽 재료가 CFC로부터 W로 변경되면 연료 처리 설비가 됨)	4 kg	이상 취급량: 약 2 kg, 저장: 1 kg, 폐기물: 1 kg	17 kg	이상 취급량: 약 1 kg, 폐기물: 1 kg (ITER 동등 상정)
		(진공 용기 내 1 kg)		저장: 14 kg (1개월 운전 연료 설비 총량)
		연료 처리 설비 내의 최대		증식 blanket에서의 생산: 약 450 g/일: 고체 증식/증배재료의 체류량은 작음.
		동위체 분리 장치: 약 200 g		냉각계 내로의 이행과 그 처리계를 포함한 체류 평가가 필요: 약 1 kg

- 수냉의 경우, 1차 냉각수의 tritium 농도 관리치를 캐나다 중수로의 중수소 tritium 농도 관리 실정치(1~5mg-T/kg-물)로 가정하고, 1 loop의 수량을 250 m³ 정도로 가정하면 최저 250 g/loop의 tritium이 포함됨. 필요 loop 수를 고려하면 냉각계통 전체의 tritium량은 1 kg 정도가 되며, 더욱 낮은 농도에서의 관리가 필요하게 될 가능성이 있음.
- tritium 보관 시 많은 비축분은 각각 100 g 정도의 tritium 별로 작게 나눠 금속 저장 베드에 수소화물로서 안정 저장하기 때문에, 비축분이 늘어나도 비례하여 잠재적 위험성이 증가하는 것은 아님.

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 안전성을 논의하기 위한 조건에 관한 ITER와 핵융합로(3 GW 열출력 상정)의 비교 – 방사화 생성물
 - 방사화된 제1벽 재료가 다양한 침식 등에 의해 노 내에서 세분화된 dust나 냉각재 중의 방사성 부식 생성물, 물이나 공기의 방사화 생성 핵종이 해당
 - 필터 등에서 비교적 쉽게 제거할 수 있으므로 큰 문제가 되지는 않는다고 생각됨.
 - 가동성의 방사성 물질을 내장하는 기기는 누설에 대한 1차 장벽으로서의 적절한 구조 건전성을 가지고 있어야 함.

	ITER		핵융합로	
방사화 dust				
W	100 kg	제어 목표 (증가 가능성)	평가필요	선택된 제1벽 재료와 운전 조건에 따라 변동
C	200 kg	제어 목표 (저감 예정)	-	-
Be	100 kg	제어 목표	-	-
방사성부식 생성물		문제 없는 레벨로 평가	평가필요	선택된 냉각재 등과 운전 조건에 의해 변동

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 안전성을 논의하기 위한 조건에 관한 ITER와 핵융합로(3 GW 열출력 상정)의 비교 – 방사성 물질을 내장하는 기기와 작용하는 에너지

기기	에너지	ITER	ITER에서 고려해야 할 사항	핵융합로	핵융합로에서 고려해야 할 사항
Blanket (BLK) & Divertor (DIV)	중성자	-	-	-	(핵융합 출력 참조)
	증식재와 냉각재의 반응열	-	-	평가필요	냉각배관만의 손상을 고려해야 하는가?
	증배재와 냉각재의 반응열	-	-	평가필요	냉각배관만의 손상을 고려해야 하는가?
	냉각재의 내부 에너지		냉각수계 압력 제어 이상에 의한 통압		냉각계 압력제어 이상에 의한 통압
연료처리 저장설비	수소동위체 내부 에너지		냉각기능 저하에 의한 통압		냉각기능 저하에 의한 통압

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 안전성을 논의하기 위한 조건에 관한 ITER와 핵융합로(3 GW 열출력 상정)의 비교 – 방사성 물질을 내장하는 기기와 작용하는 에너지

기기	에너지	ITER	ITER에서 고려해야 할 사항	핵융합로	핵융합로에서 고려해야 할 사항
Vacuum vessel (VV) & Cryostat	핵융합 출력	500 MW	출력 증대에 따른 열부하	3000 MW	출력 증대에 따른 열부하
	Plasma의 열에너지	400 MJ		평가필요	평가필요
	Plasma에 입사하는 에너지	50 MW	통상 제열 기능 상실에 의한 열부하 및 전자기력	평가필요	통상 제열 기능 상실에 의한 열부하 및 전자기력
	방사화에 따른 붕괴열	0.5 MW/m ³	통상 제열 기능 상실에 의한 붕괴열 부하	평가필요	통상 제열 기능 상실에 의한 붕괴열 부하
	냉각재의 내부 에너지		시험기기 손상 시의 냉각수 방출 등에 의한 통압		BLK/DIV 손상 시의 냉각재 방출 등에 의한 통압
	Plasma의 자기 에너지	300 MJ	Disruption 시의 열부하 및 전자기력	평가필요	Disruption 시의 열부하 및 전자기력
	증식재와 냉각재의 반응열	-	-	평가필요	BLK손상-냉각재 방출 시의 반응열&부식성
	증배재와 냉각재의 반응열	-	-	평가필요	BLK손상-냉각재 방출 시의 반응열 부하
	초전도 코일의 자기 에너지	50 GJ	코일 단락 등에 의한 코일 변형	평가필요	코일 단락 등에 의한 코일의 변형

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 안전성을 논의하기 위한 조건에 관한 ITER와 핵융합로(3 GW 열출력 상정)의 비교 – 고려해야 할 사항에 대한 대책

고려 사항	ITER의 경우	핵융합로의 경우	
VV 내 등의 통압	압력 방출 기구로 대응 (VVPSS 등)	검토필요	압력 방출 기구로 대응
붕괴열 제거	붕괴열이 작고, 자연 냉방에서도 $< 600^{\circ}\text{C}$ (1개월 후)	검토필요	붕괴열은 증대, 자연 냉각으로 VV이 파손되지 않는지를 평가 (계산 코드 타당성 검증 필요)
전자기력 (Disruption)	통상 운전시의 요구에 대해 충분히 담보됨.	검토필요	통상 운전시의 요구에 대해 충분히 담보된다고 상정
전자기력 (초전도)	통상 운전시의 요구에 대해 충분히 담보됨.	검토필요	통상 운전시의 요구에 대해 충분히 담보된다고 상정
	BLK/DIV는 시험기기, 안전상 담보 없음. VV의 밀폐 성능은 확보됨.	검토필요	BLK/DIV는 시험기기는 아니지만 안전상 밀폐 장벽으로써 설계 담보 가능한가? VV인지 Cryostat인지, 또는 둘 다인지, 밀폐 건전성 고려 필요.

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 핵융합로의 안전상 특징 – 상정 이상 시 건물에 미치는 영향
 - 건물 등은 상기의 방사성 물질을 내장하는 기기(제1차 장벽)를 둘러싸는 물리 장벽
 - 제1차 장벽의 파손을 연역적으로 상정한 다음 평가 필요
 - **ITER:** 토카막 건물 내에서의 냉각수 전량 방출, 건물 감압, tritium 방출에 따른 화재의 발생 등 평가
 - 냉각재의 선택이나 통상 운전 온도 등에 따라서는 냉각재의 내압 에너지의 증대에 의한 이상 시 건물의 내압 상승이 우려됨. 수냉각의 경우, 이 내압 상승은 tritium 수증기에 의한 것이며, ITER에서 고려되고 있는 압력 완화를 위한 Vault의 설치(내압 2 bar)나, 압력 피크 시에 blow 패널 등에 의해 환경으로 뿜어낼 필요가 있겠지만, 후자의 경우에는 1차 냉각수의 tritium 농도 관리치 등을 검토해 둘 필요가 있음.
 - **수소 화재를 일으키지 않는 설계 필요:** 진공 용기에서의 이상 시 고온 금속과 물의 반응에 의한 수소 발생 영향은 설계에 따라 제대로 평가해 대처해야 함.

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 평상 시의 삼중수소 배출 기준과 가상 사고 시의 삼중수소 누출 상정 및 대처

	ITER의 경우 (France Cadarache site에서의 상정)	핵융합로의 경우
평상시	ICRP*의 권고에 기초하여 핵종별로 정해진 배출 농도 한도에 따름. Tritium 수증기의 경우는 5 kBq/m^3 (3개월 평균치)	좌동
	배출량은 관리 구역의 환기 총량에 의존. 30만 m^3/h 라고 하면 3개월에 10 mg정도가 제한치가 됨.	기본 개념은 좌측과 동일. 관리 구역 정도의 총환기량에 의존
	3개월 총 tritium 순환 처리량은 100 kg 정도 (= $100 \text{ g/shot} \times 2 \text{ shot/h} \times 8 \text{ h/d} \times 5 \text{ d/w} \times 13 \text{ w}$)	3개월 총 tritium 순환 처리량은 800 kg 정도 (= $450 \text{ g/d 연소}(3 \text{ GW 출력}) \times 20(\text{연소율 } 5\% \text{라고 가정}) \times 90 \text{ d}$)

*The International Commission on Radiological Protection (국제방사선방어위원회)

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 평상 시의 삼중수소 배출 기준과 가상 사고 시의 삼중수소 누출 상정 및 대처

	ITER의 경우 (France Cadarache site에서의 상정)	핵융합로의 경우
밀폐 대책	주연료에 대해서는 tritium plant 전체의 tritium 회수 성능으로써 7~8자리 정도가 설계 상 요구되고 있음.	좌기 ITER의 실적을 토대로 전체적으로 1자리 정도의 성능 향상
	예를 들면, 1) 바라둑 확산기로 1~2자리, 2) 촉매 화학 반응에 의한 회수 장치에서 2자리, 3) 동위체 교환에 의한 세정 장치에서 2자리, 4) 최종적인 tritium 제거 설비에서 2자리 정도.	
	기존 설비에서 실질적으로 방출량에 기여하고 있는 것은 보수 작업 시 및 폐기물의 일시 보관 시이며, 이 밀폐 관리가 중요. 피폭 관리상은 공조 환기 duct를 붙인 간이 텐트 하우스를 검토.	피폭 관리상은 원격 기기 대응. 보수 시나 폐기물 일시 보관 대책에는 특단의 고려가 필요. 미리 상정되는 구획의 순환은 기능이나 tritium 제거 설비와 연결된 확장 기능성 텐트하우스 등의 설계 대응이 필요할 것이다.

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 평상 시의 삼중수소 배출 기준과 가상 사고 시의 삼중수소 누출 상정 및 대처

	ITER의 경우 (France Cadarache site에서의 상정)	핵융합로의 경우
이상 시 가상 누출량	화재를 포함하여 사고 1건당 최대 70 g-T의 건물 내 누출 - 폐지밸브 등으로 구획할 수 있는 1구획 내의 상한치로서 원칙 모든 1차 밀폐 설비 등에 설계상의 대응을 적용 - 진공 용기와 수소 동위체 분리 설비만 제외. 현실적 평가에서는 < 70 g 이하로 상정	ITER과 마찬가지로 상정할 필요가 있는가? - 적어도 자주적으로 1구획 내의 상한치는 100 g 정도로 하는 것은 타당 - 냉각계 1계통 내도 100 g 이내로 제어 가능 - 진공 용기도 수소 동위체 분리 설비도 재료 선택과 기능 분산으로 적용 가능
제거 기능 (성능 보증치)	건물 tritium 제거 설비의 tritium 제거 기능은 90% 이상* - 최대 7 g의 배기구를 통한 tritium 방출 → Cadarache site의 부지 경계에서 1 mSv라는 평가 (*설계상은 99.9%, 검사는 99%, 이상 시의 최저 성능 보증이 90%)	건물 tritium 제거 설비의 tritium 제거 기능 보증치를 1자리 향상 (99%) - 가상 사고 시에는 최대 1 g 정도의 배기탑을 통한 방출 → 사이트의 부지 경계에서 0.1 mSv 이하가 되도록 설계 대응 가능

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 안전 확보에 대한 고찰 – 안전 확보의 목표

- 안전 확보의 목표: 핵융합로는 방사선의 발생과 방사성 물질의 취급에 있어서 안전 상의 고려를 가진 시설로 공중 및 방사선 작업 종사자(이하, 종사자)에 방사선 장애를 미칠 우려가 없도록 조치를 강구하는 것

- 안전 확보를 위한 원칙

(1) 평상 시 환경 중에 방출되는 방사성 물질 및 시설로부터 직접 방출되는 방사선에 대해, 공중 및 종사자에 대한 방사선 방호가 적절히 이루어질 것 (실효 선량 등의 양이 국가가 정하는 법적 한도를 초과하지 않는 것은 물론, 합리적으로 달성할 수 없는 한 저감할 것)

(2) 핵융합로의 안전상 특징을 고려하여 방사성 물질을 내장하는 기기 등에 대해서는 필요에 따라 압력 방출 기구를 두는 등 충분한 구조 강도를 확보/유지하여 사고의 발생 방지를 적절하게 꾀할 것.

(3) 만일의 사고를 상정해도 공중 및 종사자에게 과도한 방사선 피폭을 미칠 우려가 없도록 적절한 설비에 의해 영향을 완화할 것

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 안전 확보에 대한 고찰 – 안전 확보의 목표

- 안전 설계의 기본 방침

(1) **평상 시의 방사선 방호:** 적절한 방사선 차폐, 환기, 배기 설비 및 배수 설비를 갖추어 동시에, 방사성 물질을 내장하는 기기 등의 평상 시 운전 조건을 고려하여 그들로부터의 누설을 제한. 방사성 물질에 의한 오염의 확대 방지, 작업 분위기 속의 방사성 물질 농도, 주변 환경에 미치는 방사성 물질의 방출량 및 방사성 물질 농도의 저감을 꾀함. 대형 구조물의 정기 점검 등을 포함한 보수 시에도 보수 시나리오와의 정합성을 취하면서 방사성 물질을 효과적으로 밀폐시키도록 설계 상 충분히 고려. 방사선 관리 및 방호 관리를 위한 적절한 시설 및 기재를 갖추.

(2) **사고의 발생 방지:** 방사성 물질을 내장하는 기기 등은 상정되는 운전 조건을 적절하게 고려하여 그 구조 건전성을 확보함과 동시에 내장하는 방사성 물질이 기기 등의 외부에 비정상적으로 누설되는 것을 방지. 이 때, 과가압에 대해서는 적절한 압력 방출 기구를 두면 좋지만, 붕괴열 및 반응열의 적절한 제거가 문제가 되지 않도록 고려할 필요가 있음. 사용 중에 상기 기기의 구조 건전성을 확인할 수 있도록 설계하며, 확인을 위한 시험 및 검사는 구조 강도 등을 확보하는데 적절하다고 인정되는 규격/기준 등에 준하여 실시.

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 안전 확보에 대한 고찰 – 안전 확보의 목표

- 안전 설계의 기본 방침

(3) 사고의 영향 완화: 방사성 물질의 방출에 따라 방출하는 유체 등의 상태, 방사성 물질의 방출 경로, 상정해야 할 지진력과 사고에 의해 발생하는 하중과의 조합, 상용 전원의 이용을 기대할 수 없을 경우의 상정, 동적 기기의 기동 실패의 가정 등을 고려하여 사고의 영향 완화 설비 설계. 사고의 상황을 파악하기 위해 필요한 정보를 감시할 수 있는 설비 구축

(4) 안전 설계의 평가

a) 정상 시의 영향 평가: 방사선에 의한 선량, 배기 및 배수에 따른 방사성 물질의 방출에 기인하는 각각의 방사선량을 해석하며 설정한 목표를 만족하는 지 여부 평가

b) 이상 시의 영향 평가: 기술적 견지로부터 방사성 물질의 방출이 최대가 되는 사고를 방출 경로 별로 상정하여, 그 영향을 평가

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 안전 확보에 대한 고찰 – 안전 확보의 목표
- 안전 설계의 기본 방침

(5) 공통 사항

a) **화재에 대한 방호:** 화재 발생의 방지를 기본으로 하면서, 만일에 대비하여 화재의 감지, 소화, 영향의 확대 방지 조치 등의 방책을 적절하게 조합하여, 핵융합 시설의 안전성을 확보할 수 있도록 설계. 화재 시에도 방사성 물질을 내장하는 기기 등의 1차 장벽의 건전성이 확보되어야 함. 특히, 연료 처리 저장 시설에 있어서는 1차 장벽 등의 내화성/불연성을 확보. 또한, 만일에 대비하여 적절한 구획을 두어 구획 내 방사성 물질의 양이나 연소 물량을 제한하는 것도 유효. 뿐만 아니라, 영향 완화 설비에 있어서는 화재가 발생해도 그 기능이 손상되지 않도록 설계

3.8 안전 확보에 대한 견해와 설계 대응

- 안전 확보에 대한 고찰 – 안전 확보의 목표

- 안전 설계의 기본 방침

- (5) 공통 사항

- b) 지진에 대한 방호: 방사성 물질을 내장하는 기기 등에 대해서는 상정되는 지진에 의한 방사성 물질의 누설을 방지하는데 충분한 지진성을 확보함과 동시에 사고 시에 기능하는 영향 완화 설비에 있어서는 그 기능 기간 중에 발생할 수 있는 지진에 대해 충분한 지진성을 확보. 또한, 방사성 물질을 내장하는 기기나 만일의 사고 시 영향 완화 설비 등의 안전 기능을 가진 시설은 안정한 지반에 지지. 또한, 적절한 지진력을 정함과 동시에, 특히 지진 방어 장치를 이용할 경우에는 그 특성을 고려하여 장주기 영역에서의 지진력 영향을 적절하게 고려해야 함.

- c) 품질 보증 (QA)

- 방사성 물질을 내장하는 기기나 만일 사고시의 영향 완화 설비는 신뢰성을 확보. 설계/제작/설치 등의 각 단계에서 정해진 성능이 확보되고 있음을 확인할 수 있도록 고려함과 동시에 ISO 규격 등에 따라 적절한 품질 보증 활동을 실시

3.9 플랜트 설계에서의 고려 사항

• Plant의 규모

- 핵융합 plant의 부지 면적은 가능한 compact하게 설계
- 밀폐 성능이나 운전 모드 확정 여부에 따라 actuator의 운전 폭이 달라져 원형로와 상용로의 부지 면적이 달라질 수 있음.
- 전원, tritium 설비, 냉각 설비 등의 시스템의 합리화에 의존

예) JT-60(DT 운전은 하지 않음): 토카막 및 주변의 기기가 수납되어 있는 건물의 상면적은 3,600 m² 정도 (Cf. Advanced SSTR: 12,300 m² 정도).
전원이나 냉각동 등 주변 기기의 건물을 포함하면 부지 면적은 약 10만 m².

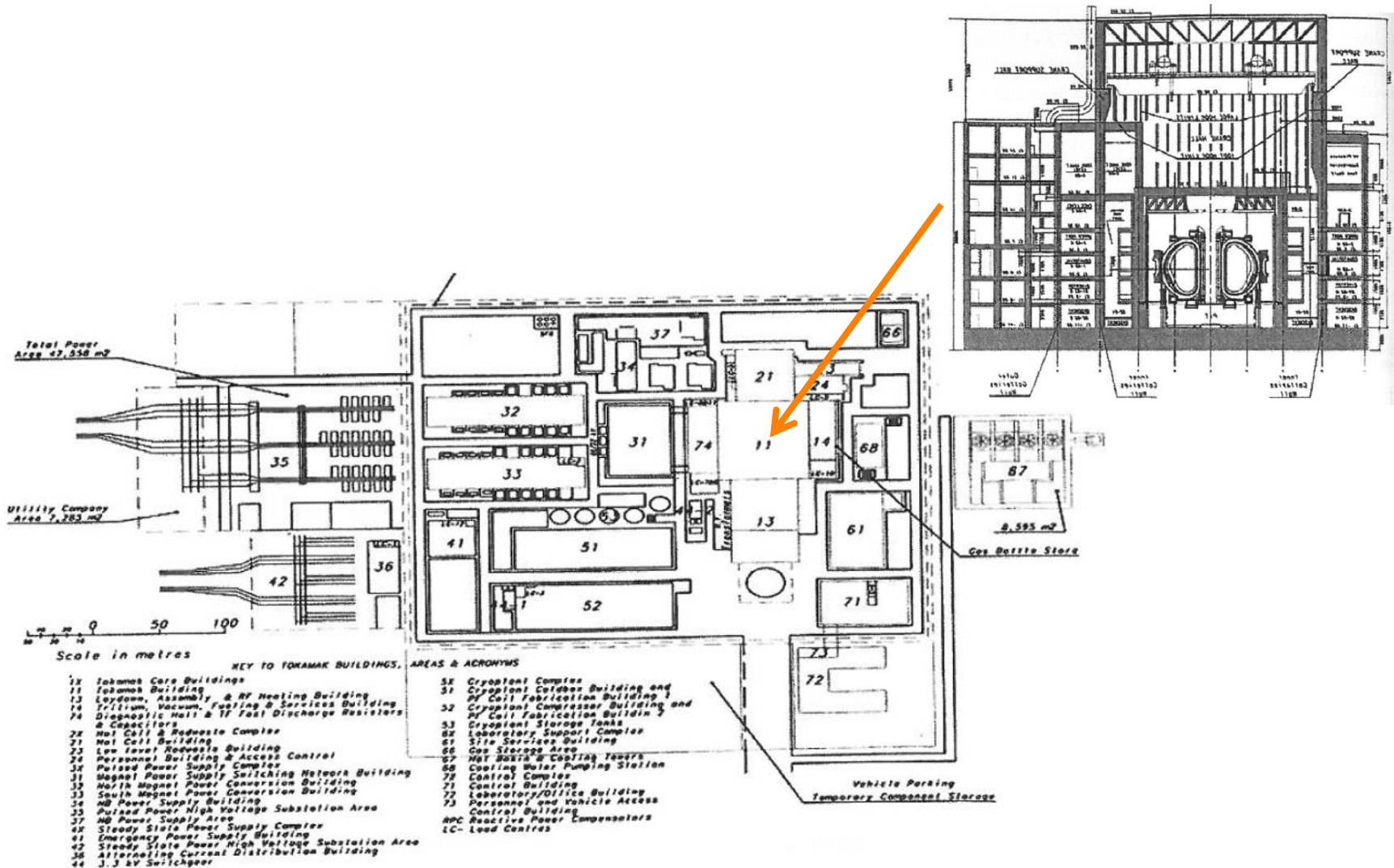
예) ITER(DT 운전을 하지만 발전은 하지 않음): 약 40만 m²

- 꺼낸 노내 기기를 다루는 빌딩이나 설비, 발전을 위한 터빈 건물이 추가됨.
- 원형로는 redundancy를 갖고 건설 → 핵융합로 중에서 원형로의 설비나 부지 면적이 가장 커짐 → 상용로에서 삭감 가능한 기기가 plant 전체에 걸쳐 폭넓게 존재

예) 폐열 시스템: 전체 열출력에 대한 폐열 시스템 용량 필요

- 1기당 부지 면적은 경수로 수준을 목표: 100만 kW 레벨 1기당
약 20만 m²~60만 m² 정도

3.9 플랜트 설계에서의 고려 사항



3.9 플랜트 설계에서의 고려 사항

- 핵융합로 전원의 유효 이용률

- 초전도 코일 전원

(1) **Toroidal coil 전원**: 초기 여자의 시간을 충분히 길게 취해 충전한다면 전원으로는 대전류이기는 하지만 저전압 전원으로 충분

(2) **Poloidal coil 전원**: 기동 시에 코일 전류 변화 필요로 kV를 초과하는 전압이 요구되나 플라즈마가 정상 상태가 된 후부터는 전원 전압은 낮아도 됨 → 대규모 설비 필요. 매우 낮은 설비 이용률

Cf. 하나의 사이트에 핵융합 상용로가 여러 대 건설되면 전원을 복수로에 공유하여 사용하는 방법 강구

- **가열 장치 전원**: 기동 시에 풀가동되나 전류구동 및 제어를 위해 전원의 가동률이 높음.

- **냉동기용 전원**: 초전도 코일의 냉각에 필요. 전력의 대부분은 헬륨 압축기에서 소비됨. 핵융합 플랜트의 순환 전력을 저감할 목적으로 냉동 효율을 높일 필요는 있지만, 설비 이용률은 높음.

3.9 플랜트 설계에서의 고려 사항

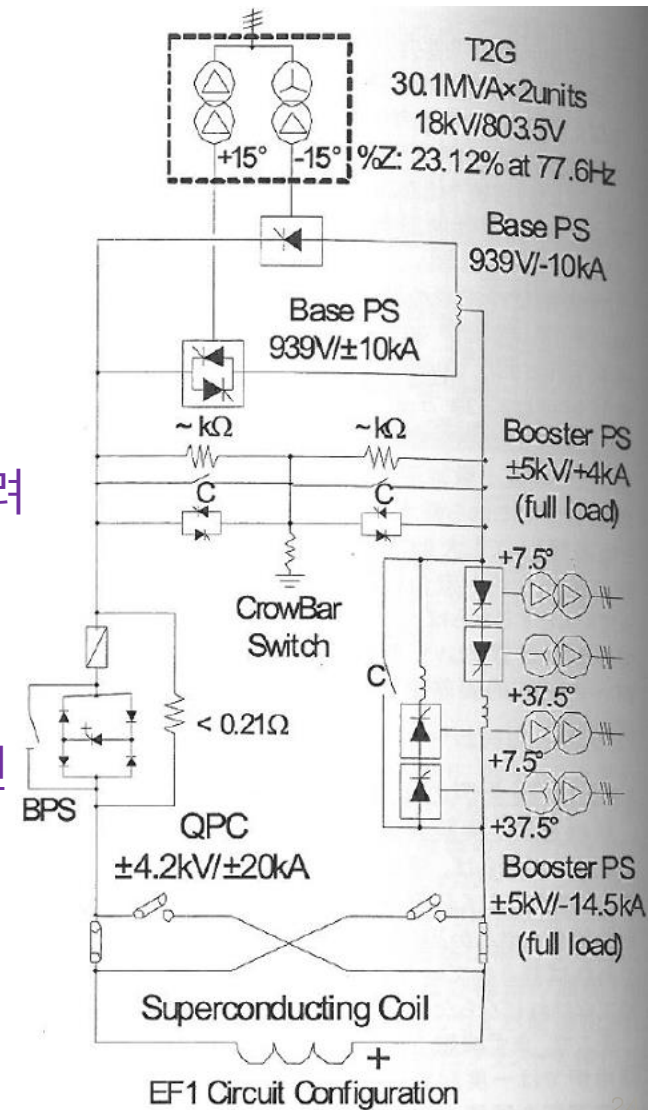
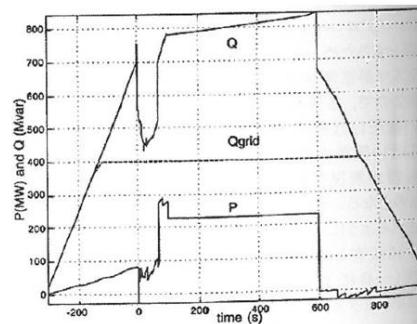
- 핵융합로 전원의 유효 이용률

- 전원 시스템의 합리화:

(1) Toroidal coil 전원: 토로이달 자장 코일 전원은 저전압일수록 좋음.

(2) Poloidal coil 전원: 저전압의 전원을 기본 회로로 하고, 상승 시 단시간만 높은 전압을 감당할 수 있는 전원을 중첩하여 쌓는 방식 고려
예) JT-60SA

(3) 역률 개선: 교류-직류 전력 변환에 따른 무효전력 발생. 전력 회사로 요청하여 수전측에서 전력 콘덴서 등을 이용한 역률 개선 장치를 설치해 보상



3.9 플랜트 설계에서의 고려 사항

- 전력 계통 연결

- 핵융합로에서는 기동 시 수전 외에도 열출력의 변동이나 제어필요성에 의해 계통에 대전력을 제공할 경우가 발생. 펄스 출력로의 경우
→ 에너지 축적 장치 필요

- 에너지 축적 장치

예) 100만 kW 전기 출력, 그 전기 에너지 5초분 축적: $10^9 \text{ W} \times 5 \text{ s} = 50 \text{ GJ}$
에너지 축적

(1) 초전도 에너지 저장: ITER 전체 TF 코일의 축적 에너지(~40 GJ)에 필적

(2) 배터리: 800 Ah, 방전 전압 약 3 V, 중량 25 kg, 사이즈 850x288x71 mm
중국제 대용량 배터리 경우, 축적 에너지는 $800 \text{ amp} \times 3600 \text{ s} \times 3 \text{ V} = 2400 \text{ Wh} = 8.6 \text{ MJ}$ 가 되므로 5초 분의 에너지 축적을 위해서는 약 5800개의 배터리가 필요(약 150톤). 5초간 급속 방전이 가능하며, 대전력용 안전 장치 전제

3.9 플랜트 설계에서의 고려 사항

- 전력 계통 연결

- 에너지 축적 장치

예) 100만 kW 전기 출력, 그 전기 에너지 5초분 축적: $10^9 \text{ W} \times 5 \text{ s} = 50 \text{ GJ}$
에너지 축적

(3) 콘덴서: 종래의 전해 콘덴서에 비해 축적 에너지 밀도가 수십배 크며, 납축전지에 가까운 성능을 가지며, 충방전 반복수가 전해 콘덴서와 동일한 사양의 전기 이중층 콘덴서 경우, 8 kg 정도 크기(사이즈 380x175x110 mm)로 축적 에너지는 20-30 Wh (70-110 kJ) 정도에 불과하며, 리튬 전지에 비하면 중량당 30분의 1의 용량임. 방대한 설비가 될 수 있음.

(4) 열에너지로 축적: 가압수를 150 atm의 냉각재에 사용했을 때, 직경 3 m 길이 20 m의 탱크 속에 다수의 스테인레스관을 배치한 저열기 1기당 약 15.5 GJ의 에너지 출입 가능. 50 GJ의 에너지 저장에는 약 3기 이상 필요하지만 초전도 코일에 의한 에너지 저장에 비하면 소형임.