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

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **점검, 보수 기기의 분류**

- 설계 단계에서 보수, 보전을 논의하고, 그 결과를 설계에 Feedback 하는 것은 매우 중요하며, 그 작업의 반복에 의해 보다 합리적인 기기 설계, 설비 설계가 가능하게 됨.
- 핵융합로에서 상정되는 보수, 보전을 논의함으로써 실증로에서는 어떤 점검, 보수가 필요할지, 그러기 위해서는 어떤 시스템 및 기기 개발이 필요하며, 설계 시에 고려해야 할 사항이 무엇인지를 명확히 할 수 있음.
- 핵융합로의 점검, 보수의 기본적인 대처 방법은 점검, 보수의 대상이 되는 기기나 작업 공간이 방사화되어 있거나 방사화물을 내장하고 있는지에 강하게 의존함.

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

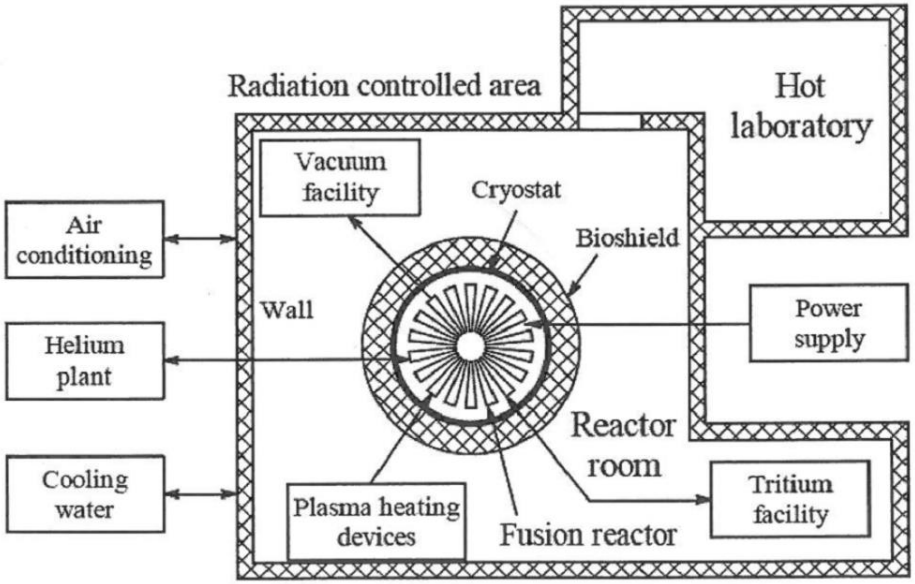
- **점검, 보수 기기의 분류**

- 원형로에서의 생체에 대한 방사선 차폐 영역 분류

(1) Cryostat 내 (플라즈마 진공용기 외, 생체 차폐 내): shutdown 10^6 초 후에 100 μSv/h 이하. ITER에서는 작업인력의 입실을 전제로 하나 원형로에서는 불가능할 것으로 생각됨.

(2) 생체 차폐 외 (핵융합로 실내): shutdown 24시간 후에 10 μSv/h 이하

(3) 비제한 구역: shutdown 24시간 후에 0.5 μSv/h 이하



3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **점검, 보수 기기의 분류**

- 원자로와 핵융합로의 비교

(1) 핵융합로는 원자로에 비해 거대하며, 총 중량도 매우 무거움.

(2) 극저온으로부터 초고온까지 폭넓은 온도 영역에서 동작하는 기기가 있음.

(3) 물과 같은 중성자 차폐물은 없으며, 가열용 포트 등 중성자가 누설되는 구조가 있음.

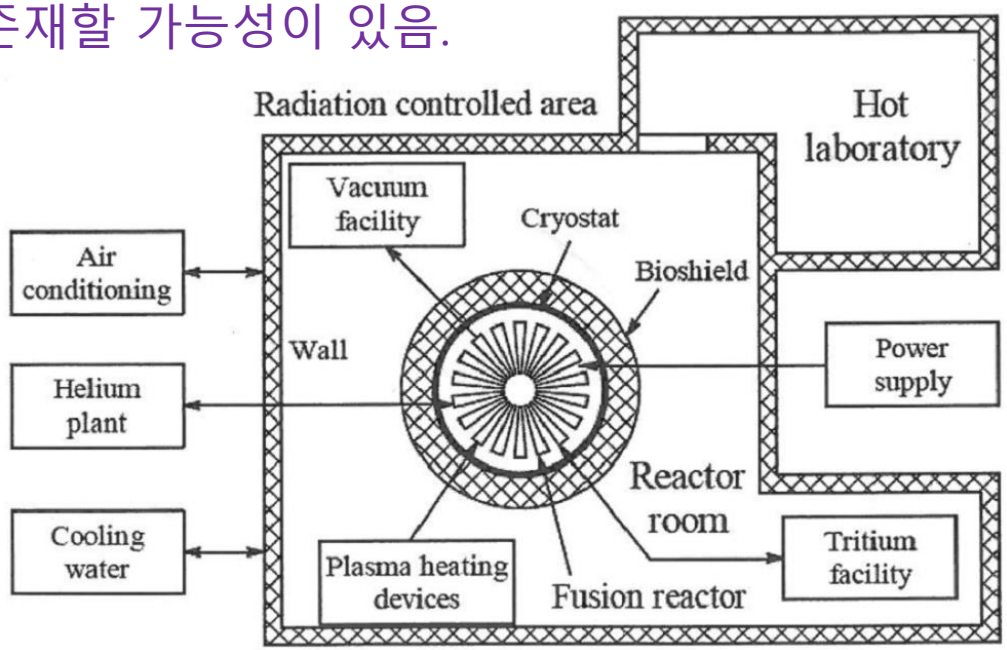
(4) Blanket, divertor와 같이 대형, 고중량, 강하게 방사화된 기기의 교환이 필요함.

- 핵융합로의 특수성을 고려한 독자적인 점검, 보수 기술 체계를 구축할 필요가 있음.

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **점검, 보수 기기의 분류**

- 핵융합로 본체는 누설한 중성자가 콜드 영역으로 튀어나가지 않도록 두께 약 3 m의 철근 콘크리트로 만들어진 생체 차폐 내부에 설치됨.
- 생체 차폐보다 내측에 있는 구조물, 기기는 모두 중성자에 피폭되며, 중성자에 의한 강한 방사화가 일어남.
- 생체 차폐의 외측에는 방사선 관리 구역이 있으며, 이 영역에는 방사화된 물질이 존재할 가능성이 있음.



3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **점검, 보수 기기의 분류**

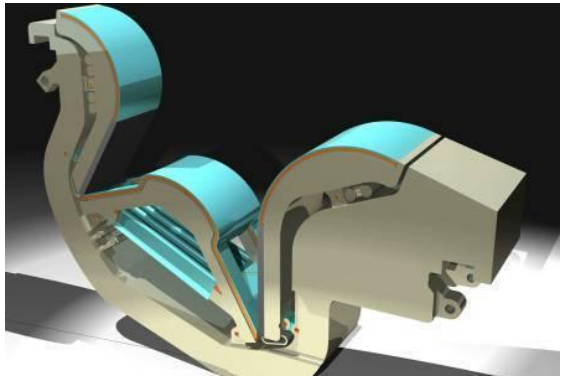
- 핵융합로 본체는 누설한 중성자가 콜드 영역으로 튀어나가지 않도록 두께 약 3 m의 철근 콘크리트로 만들어진 생체 차폐 내부에 설치됨.
- 생체 차폐보다 내측에 있는 구조물, 기기는 모두 중성자에 피폭되며, 중성자에 의한 강한 방사화가 일어남.
- 생체 차폐의 외측에는 방사선 관리 구역이 있으며, 이 영역에는 방사화된 물질이 존재할 가능성이 있음.
- 보수, 보전되어야 할 기기, 설비

(1) 플라즈마 진공용기 내 기기
(2) Cryostat 내 기기 (플라즈마 진공용기 외, 생체차폐 내 기기)
(3) 생체 차폐 외 기기 (방사선 관리구역 내 기기)
(4) 방사선 관리구역 외 기기

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **플라즈마 진공 용기 내장 기기**

- **Blanket:** 제열과 tritium 제거를 위한 냉매 순환 시스템이 연결되지만, 순환하는 냉매를 포함하여 모두가 높은 레벨로 방사화됨. 중성자 조사량이 매우 높고, blanket 구조재료는 취화됨 → 정기적인 교환이 설계의 전제. 이 교환은 모두 원격 조작으로 이루어져야 하며, 경량화, 모듈화, 손쉬운 탈착 기구 등이 요구됨.
- **Divertor:** 중성자와 각종의 하전입자 충돌로 방사화됨. Divertor plate도 교환할 필요가 있음. 예) ITER: cassette 모양의 설계



3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

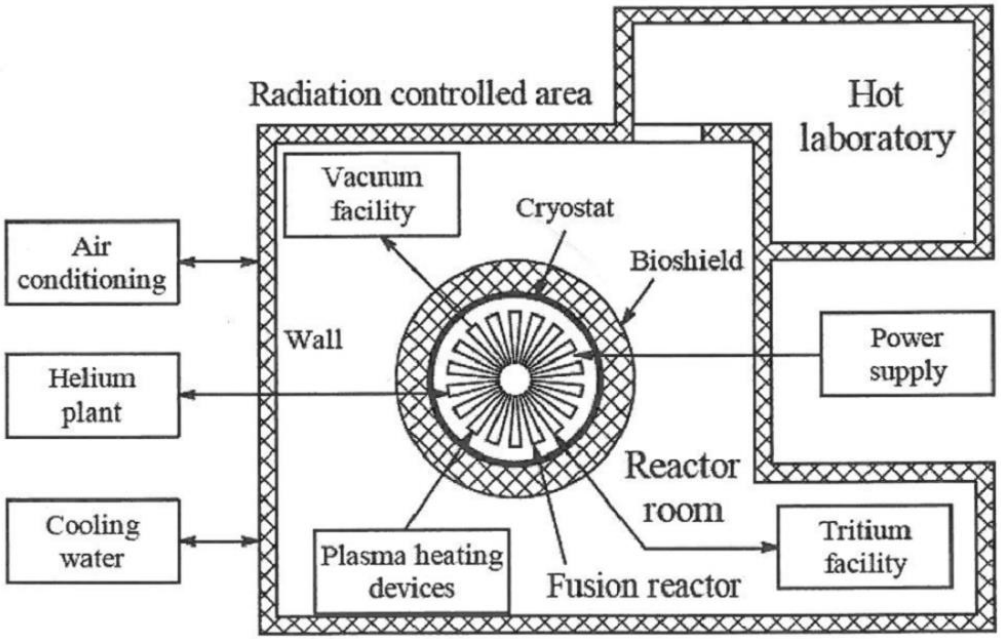
- **플라즈마 진공 용기 내장 기기**

- **Blanket:** 제열과 tritium 제거를 위한 냉매 순환 시스템이 연결되지만, 순환하는 냉매를 포함하여 모두가 높은 레벨로 방사화됨. 중성자 조사량이 매우 높고, blanket 구조재료는 취화됨 → 정기적인 교환이 설계의 전제. 이 교환은 모두 원격 조작으로 이루어져야 하며, 경량화, 모듈화, 손쉬운 탈착 기구 등이 요구됨.
- **Divertor:** 중성자와 각종의 하전입자 충돌로 방사화됨. Divertor plate도 교환할 필요가 있음. 예) ITER: cassette 모양의 설계
- **진공용기:** 교환 기기가 아님 → 플라즈마 진공 용기 표면에 고정되는 배관, 계측관, 버스라인 등 모든 기기, 부품을 원격 조작으로 교환할 수 있는 설계가 필요
- 플라즈마 진공 용기 내 기기의 점검, 교환 작업의 점검, 확인을 위해, 실규모 시뮬레이터가 필요하며, 작업 내용, 순서 등의 충분한 검토가 요구됨.

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **Cryostat 내장 기기 (플라즈마 진공 용기 외, 생체 차폐 내장 기기)**

- Cryostat 내부는 플라즈마 운전 중, 진공 단열을 유지하기 위해 매우 높은 진공도로 유지
  예) ITER: 높이 약 30 m, 직경
- 포트에 가까운 위치에서는
- 초전도 코일, 헬륨 배관, 코
  계측 소자 및 계측선(관)이 내
- **초전도 코일:** 전기 절연 이음
- **전력 공급선:** 열팽창, 열수축
→ 코일의 건전성을 평가하기
- **계측선:** 길이가 길어 생체 차
  생체 차폐 외부로 인출하는



- **점검, 보수 항목:** 헬륨 leak, 전기 절연 성능, 계측선의 저항치 평가, sensor의 건전성 점검, 중계 단자판의 건전성 점검, 지면과의 절연 저항 측정, 코일의 위치 계측, 열차폐판의 점검 등. 설계 단계에서 명확히 해야 함.

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **Cryostat 내장 기기 (플라즈마 진공 용기 외, 생체 차폐 내장 기기)**

- **플라즈마 진공 용기:** 스텐레스강으로 제작되는 거대한 용접 구조물. 이중판 구조로 내부에 냉각수가 흐름. 하중 조건으로는 자체중량, blanket, divertor 등의 dead load가 대부분이며, Disruption 시의 변동 하중 등은 하중 성분으로써는 비교적 작음. 플라즈마 진공 용기의 외측에는 열차폐판을 통해 초전도 코일이 있으며, 플라즈마 진공 용기는 끊임없이 외측으로부터 복사에 의해 냉각됨. Baking 시에는 외측으로 확대되며, 종료 시에는 수축됨. 플라즈마 진공 용기에서는 용접부로부터의 냉각수의 누설 방지가 확실하게 이루어져야 함.
- **가열 기기**

  ECH: Mirror의 교환 기술이 필요

  NBI: 이온원으로부터 플라즈마 진공 용기 까지 모든 부분이 방사화되기 때문에, 이들의 점검, 보수 기술의 확립이 필요

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **Cryostat 내장 기기 (플라즈마 진공 용기 외, 생체 차폐 내장 기기)**

- **Sensor나 계측선:** 중성자 조사에 의해 열화되며, 저항치가 비정상적으로 커지는 경우를 상정하여, 별도 sensor를 부착하거나 계측선을 빼돌리거나 할 수 있는 공간과 원격 장치가 필요. 배관 용접부에 헬륨 leak를 발견한 경우에 대비하여 원격으로 절단, 용접할 수 있는 시스템 도입 필요
- 원소에 의해 방출되는 방사선의 선질, 선량은 다르므로, 플라즈마로부터의 거리가 확보되어 있어도 그 부근에 배치되어 있는 기기나 부품의 구성 원소에 따라 방사선량이 국소적으로 높아지는 경우 발생

  예) 전기 절연재나 단열 재료로 사용되고 있는 유기 재료의 경우 γ선 조사로 박리나 균열 등의 열화가 발생 가능

  Cf. 핵변환에 의해 생성된 동위원소 원소는 대부분의 경우 α선, β선, γ선 등의 방사선을 방출. 구리이나 니켈로부터 핵변환에 의해 형성되는 Co^{60}의 경우, 1.17 MeV와 1.33 MeV 에너지의 γ선 방출

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

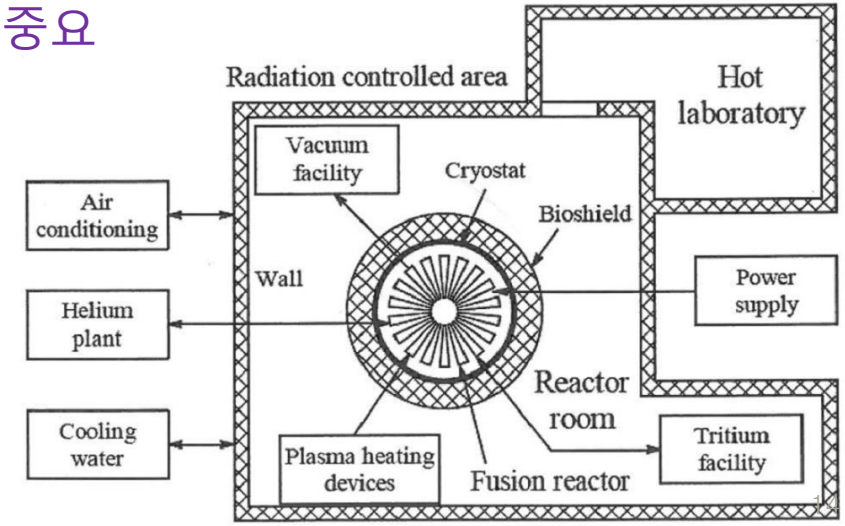
- **Cryostat 내장 기기 (플라즈마 진공 용기 외, 생체 차폐 내장 기기)**

- 점검, 보수 시에 각각의 기기가 어느 정도 방사화되어 있는지를 아는 것이 필요함 → 공간 분해능이 뛰어난 상세한 방사능 계측 필요

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **생체 차폐 외부 기기**

- 진공 배기 장치, tritium 순환 장치, 플라즈마 가열 장치 등의 기기와 냉각수 설비, 초전도 코일용 전원이나 헬륨 액화 냉동기 관련 기기와 함께 중수소 Pellet injection 장치나 계측기 등이 배치됨.
- 방사선을 발생하는 물질을 함유하는 냉매 등의 순환 부분을 제외하면, 통상의 점검, 보수가 가능하나 tritium에 의한 내부 피폭에 충분한 주의가 필요. 방사화물이 불순물로써 포함될 가능성이 있는 라인과, 전혀 방사화물이 혼입될 가능성이 없는 라인을 명확히 구분하여, 방사선을 발생하는 라인을 강하게 인식하는 것이 설계 단계에서 중요



3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **생체 차폐 외부 기기**

- **공기:** 초전도 코일 온도 상승 시 Cryostat 내부 공기는 대기 중으로 방출됨. 이들 공기를 교환할 때에는 Cryostat 내의 방사화된 수분, 먼지가 공기와 함께 방출될 수 있음 → 배기되는 공기의 필터링, 통과 경로의 방사선 관리가 필요
- **냉각 매체:** Divertor나 blanket에는 제열을 위한 냉각 매체는 생체 차폐 내부에서 닫힌 순환계(1차계)를 구성하며, 2차계, 3차계를 거쳐, 옥외의 냉각탑에서 배열됨. 1차계 냉각 매체에는 tritium이 포함되어 있으며, 온도 sensor, 압력 sensor, 유량 sensor 등의 점검 시 시스템 외부로의 누설을 방지해야 함. 특히 tritium 공급, 회수계에 있어서는 tritium 관리를 확실하게 할 수 있는 설계가 필요하며, 강제 희석 등의 비상 시 대책이 충분히 검토되어야 함.

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **생체 차폐 외부 기기**

- **He gas:** 초임계압 헬륨(5.19 K 이하에서 0.227 MPa 이상의 압력)은 점성이 매우 작고, 얇고 긴 유로에서도 큰 압력 저하를 일으키는 일 없이 통과할 수 있음. 생체 차폐 내부에 초임계압 헬륨의 순환 cycle이 있으며, 열은 방사선 관리 구역 내에 설치되는 매체헬륨 탱크에서 제거됨. 헬륨가스에 포함되는 산소, 질소, 수분 등의 불순물은 흡착기 등으로 제거되지만, 수소는 제거되지 않음 → 수소 불순물의 성질을 충분히 파악해 두는 것이 필요

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

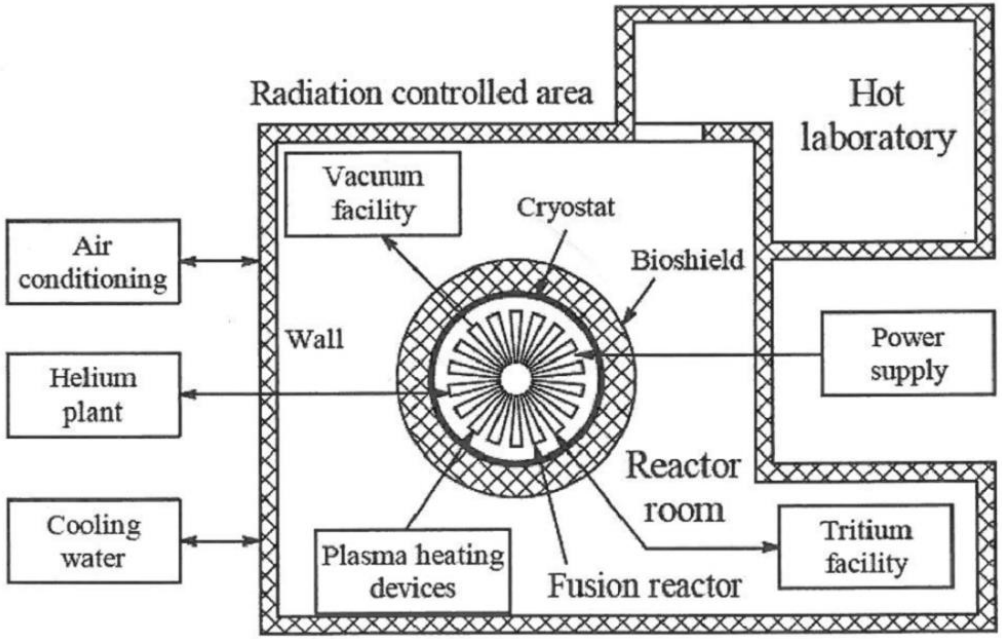
- **생체 차폐 외부 기기**

- **Hot laboratory:** blanket이나 divertor의 교환 시에는 핵융합로에 거대한 방사선 관리 용기(캐스크)가 접속되며, 그 캐스크 속에 원격 조작에 의해 방사화된 기기가 운반되어 들어가며, 완전 밀폐 후 Hot laboratory로 운반됨. Hot laboratory 내에서 캐스크로부터 취출된 blanket이나 divertor는 필요에 따라 분해, 수리, 점검, 보관이 이루어짐. 또한, 기기에 포함되는 tritium 회수도 실시될 가능성이 있음.
  → 실내 대기 오염 가능. 상정되는 방사선 레벨이 매우 높아 높은 레벨의 방사선 관리, 오염 관리, 원격 조작 기술이 요구됨.

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **방사선 관리 구역 외 기기**

- 각종 기기의 전원, 일부의 냉각수 설비나 헬륨 액화 냉동기 설비, 공조 설비 등이 해당
- 관리 구역 내 기기와의 연관 부근에서의 방사화물 이동 유무를 적절한 검사에 의해 확인할 필요가 있음. 안전 확인 후에는 일반 기기, 설비와 동일한 점검, 보수 가능



3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **원격 조작 기구**

- **플라즈마 진공 용기 내:** blanket, blanket 교환용 원격 조작 시스템, divertor, divertor cassette 교환용 원격 조작 시스템, 계측 센서(동작 점검), 계측 배선(저항 점검), 배관(leak 점검) 점검
- **생체 차폐 내:** 플라즈마 진공 용기(leak 점검), 초전도 자석(leak, 절연 점검), feeder(leak, 절연 점검), 열차폐판(SI 열화, leak 점검), 계측 센서(동작 점검), 계측 배선(저항 점검), 배선(leak 점검) 점검
- **방사선 관리 구역 내:** 가열 기기(동작 점검, leak 점검, 방사화 점검), Hot laboratory 내 원격 조작 시스템(동작 점검), tritium 순환 설비(동작 확인). 필요에 따라 Pellet injection(동작 점검, leak 점검, 방사화 점검), 캐스크 내부(동작 점검), 공조 설비(동작 점검) 점검
- **원격 조작 작업:** 절단, 용접, 기계 가공, 배선, 접착, 연마, 기기 탈착, 중량물 이동 등.
- 모든 작업은 γ선 환경 하에서 실시되기 때문에, 그와 같은 환경 하에서 장기간 안정된 영상을 지속 촬영할 수 있는 초소형 카메라 시스템, 정밀도가 높은 다축 제어 시스템 등도 필요

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **운전 중 폐기물**

- 운전 기간 중에 점검, 보수 시 발생하는 폐기물
- 잔류 방사능이 검사되며, 허용치 이하이면 일반 폐기물로써 폐기되며, 허용치를 상회하는 폐기물에 관해서는 방사선 관리 구역 내에서 보관, 법령에 따라 처리
- **플라즈마 진공 용기 내의 배기에 포함되는 tritium:**
  플라즈마 진공 용기의 용기벽이나 용기 내 구조물에 흡착, 흡수되어 있다가 진공 배기 시 배출됨. 배기에 포함되는 tritium은 필터 등에 의해 제거되며, 농축된 상태로 보관함.
- **Blanket, divertor 교환에 따른 오염 냉매:**
  Blanket이나 divertor에는 열제거를 위한 냉매(ITER의 경우는 임계수. 실증로에서는 Li-Pb나 Li)가 공급되고 있어, 교환 시에는 기기 내부의 냉매를 He gas 등으로 밀어내고, 그 후 냉매 배관을 착탈할 때 미량의 냉매가 배출될 것으로 예상됨. 이러한 냉매는 회수, 보관됨.

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **운전 중 폐기물**

- **Blanket, divertor 냉매의 둔화 및 열교환 시의 tritium 배수:**
  Blanket이나 divertor의 냉매의 순도를 유지하기 위해 정제 시 tritium을 함유하는 배수가 발생. 이를 농축, 보관함. 열제거를 위한 열교환기에서는 tritium이 열교환부의 재료를 투과하여, 2차 냉각수 측으로 이동될 것으로 예측됨.
  → tritium 이행을 저감하는 대책 및 2차 냉각수 측의 충분한 감시 필요
- **Hot laboratory 내의 절단, 가공 시의 폐기물:**
  Hot laboratory 내부에서의 blanket이나 divertor의 수리나 해체 또는 절단, 가공 시 발생하는 폐기물은 잔류 방사선의 감쇄를 가지기 때문에 모두 Hot laboratory 내부에 보관
- **점검 시 교환물 (배관, 배선, 센서):**
  점검, 보수 시에는 교환한 기기, 부품, 센서 등은 방사화되고 있어, 방사선 관리 구역에서 보관

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **정지 후의 처리**

- 원격 조작에 의한 잔류 방사선 계측이 고도화되면 장치 정지에 이르기까지 어느 부위의 방사선 강도가 높은지를 나타낸 잔류 방사선 map을 작성할 수 있으며, 그 map에 따라 해체 방책을 검토 가능
- 잔류 방사능의 감쇄를 기다려서 잔류 방사능이 일정한 값을 밑돌게 되면 구체적인 해체 작업 공정 이행
- **Steel:** 재용해되어 다른 제품으로 재활용
- **초전도 자석이나 bus line, 각종 배관:** 잔류 방사능의 감쇄를 확인한 후 해체하고 재이용할 수 있는 것은 재이용되며, 아직 잔류 방사능이 높은 것에 대해서는 계속해서 보관
- 잔류 방사능의 감쇄를 위하여 일정기간 보관 후에도, 여전히 잔류 방사능이 기준을 웃도는 부재나 부품에 대해서는 매설 처리를 고려

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **폐로 후의 폐기물**

- 노 본체의 금속 재료나 건물의 콘크리트 등 고체 폐기물, 냉각수나 증식 blanket 재처리 폐액 등의 액체 폐기물 및 tritium을 포함하는 기체 폐기물로 구성 → 고준위 폐기물은 없음.
- 재료 중의 방사성 핵종 농도에 따라 분류

(1) 여유 있는 깊이로 매설이 필요한 폐기물

(2) 낮은 깊이 매설로 끝나는 폐기물

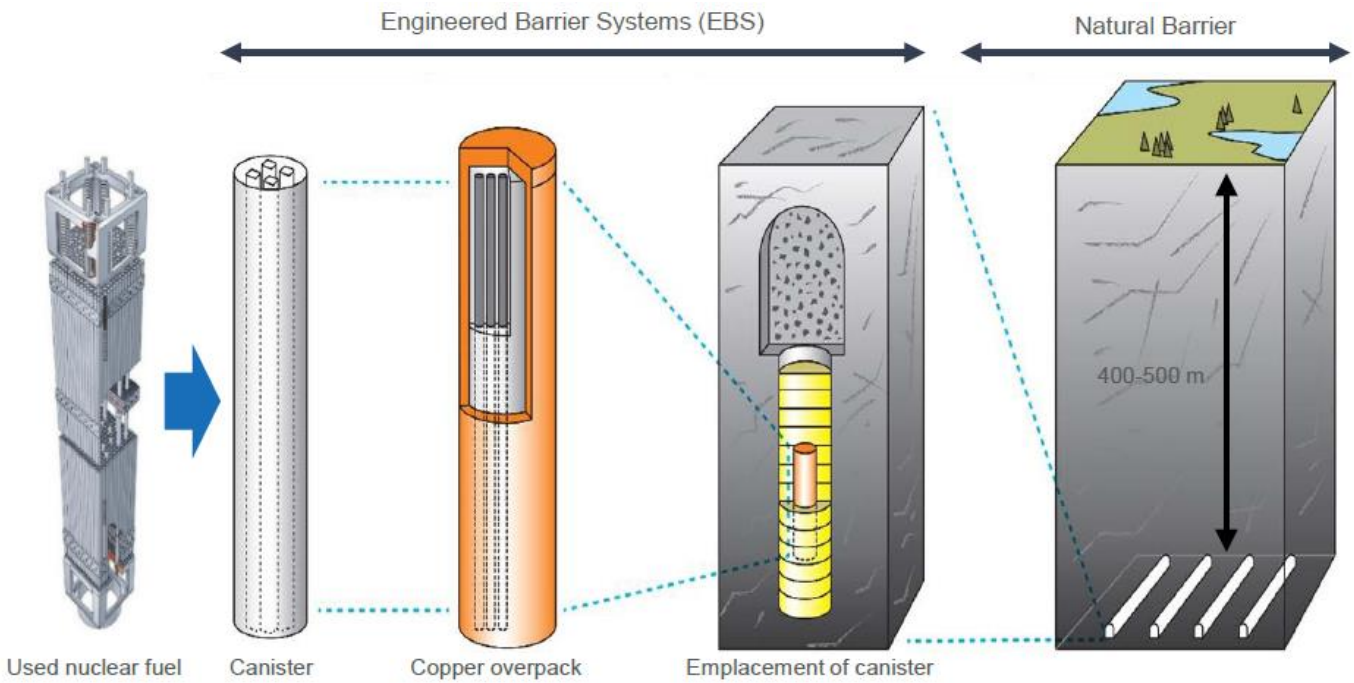
(3) 방사선 위험이 작아 관리로부터 제외 가능한 clearance 폐기물

- 철강 재료의 폐기물 구분을 결정짓는 핵종인 $^{55}Fe(T_{1/2} = 2.7\ y)$, $^{54}Mn(T_{1/2} = 312\ d)$, $^{60}Co(T_{1/2} = 5.3\ y)$의 반감기가 짧기 때문에, 폐로 후 50-100년에 방사성 핵종 농도는 대폭으로 감소.

  예) 일본의 기준에 기초하는 ITER의 평가: 폐로 직후의 방사성 폐기물 39,000톤 중 100년 후에는 그 대부분이 clearance 폐기물이 되며, 12,000톤만 방사성 폐기물로 남음.

→ 폐로 직후에는 대량의 방사성 폐기물이 발생, 폐로 후 50-100년에 상당량의 방사성 폐기물이 clearance의 대상이 됨.

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책



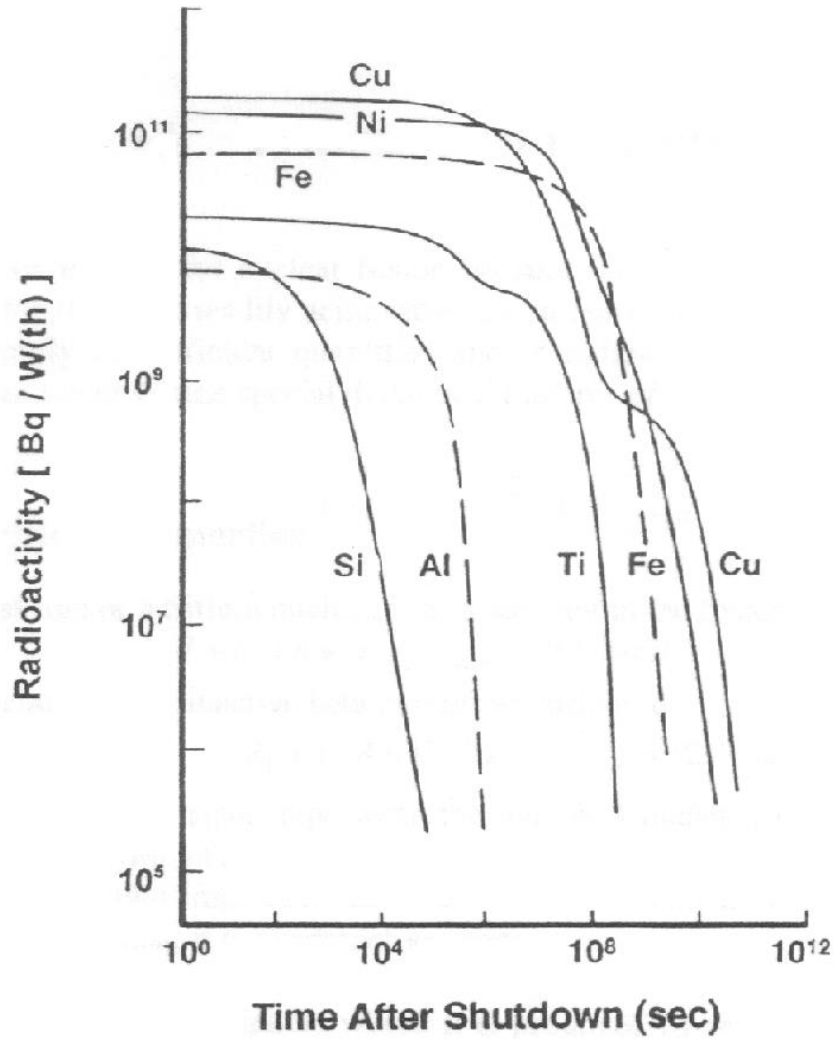
KBS-3 repository concept of Finland and Sweden

Ref.: POSIVA 2012-07, 2012.

Radioactivation

- Neutron-induced transmutations in blanket materials also result in radioactivation – most important with respect to reactor maintenance, storage of reactor components.

- The level of radioactivation, along with other radioactivity aspects such as the T inventory will be a key factor in determining the environmental impact of fusion reactors.

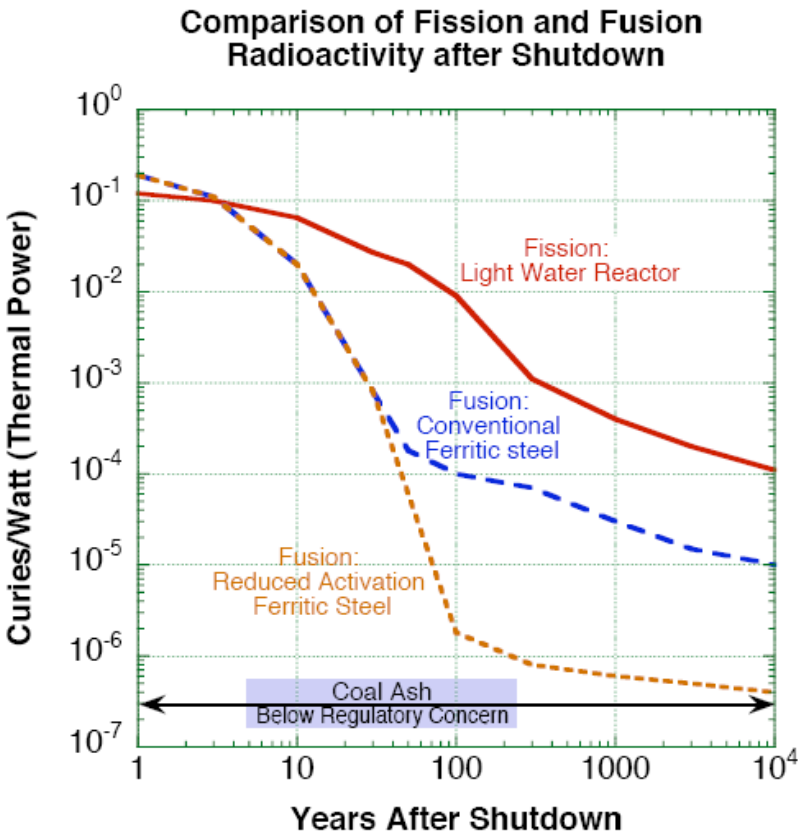


The residual radioactivity of selected elements irradiated for 2 years in a typical first wall flux of 1.5 MW/m^{-2}

Radioactivation

- Neutron-induced transmutations in blanket materials also result in radioactivation – most important with respect to reactor maintenance, storage of reactor components.

- The level of radioactivation, along with other radioactivity aspects such as the T inventory will be a key factor in determining the environmental impact of fusion reactors.



Radioactivation

- Neutron-induced transmutations in blanket materials also result in radioactivation – most important with respect to reactor maintenance, storage of reactor components.

- The level of radioactivation, along with other radioactivity aspects such as the T inventory will be a key factor in determining the environmental impact of fusion reactors.

	Eurofer (Europe)	F82H (Japan)
An element	Composition (wt%)	Composition (wt%)
Fe	89.04	89.924
C	0.11	0.09
Cr	9.0	7.7
W	1.1	1.94
Mn	0.40	0.16
V	0.20	0.16
Ta	0.12	0.02
N2	0.03	0.006
Total	100	100

RAFS (RAFM):
Reduced Activation Ferritic (Martensitic) Steel

Radioactivation

- **F82H steel**

- Fe–8~9Cr–1~2W-V, Ta:
  Tempered Martensite석출경화형 내열강
  Mod9Cr 내열강 (T91: 9 Cr-1MoVNb)에
  저방사화 특성을 부여
  → Mo→W, Nb→Ta, N 저감, 고순도화
- 강도, 인성, 내식성 등의 관점에서
  Ni, Cr을 함유
- ^{14}C의 발생을 억제하기 위해 ^{14}N을
  ^{15}N로 치환 (동위원소비 조정)
- Mo나 Nb 등의 미량 첨가 원소의
  방사화도 포함하며, 경우에 따라서는
  상당히 높은 잔류 방사능 발생 가능

Heat treatment condition:
Normalising (1040℃×40 min/A.C.),
Tempering (750℃×60 min/A.C.)

	F82H IEA heat (5 ton heat)
Fe	Bal.
C	0.09
Si	0.07
Mn	0.1
P	0.003
S	0.001
Cr	7.87
Ni	0.02
Mo	0.0003
V	0.19
Nb	0.0002
N	0.006
Co	0.003
Ti	0.004
Ta	0.04
W	1.99

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **폐로 후의 폐기물**

- 핵융합의 폐기물 처리 및 처분 시나리오

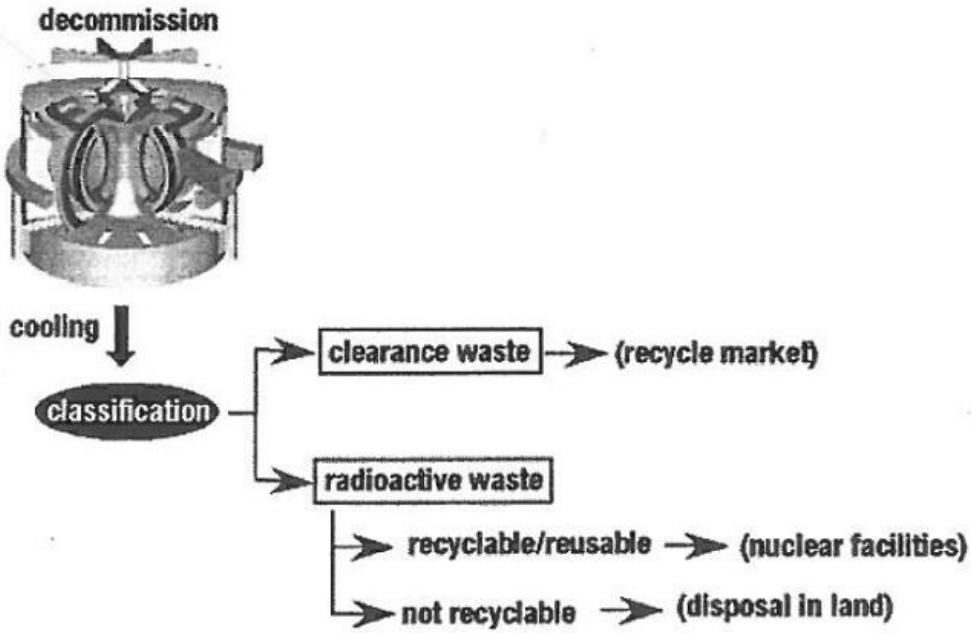
(1) 폐로 후 50-100년 정도 저장하고, 방사선의 감쇄를 기다림.

(2) 방사성 핵종 농도에 따라 아래와 같이 구분

Clearance 폐기물

재이용 가능한 방사성 폐기물

매설 처분하는 폐기물



3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **폐로 후의 폐기물**

- 폐기물의 관점에서 핵융합에 대한 사회 수용성을 높이기 위해 자원의 도입량 및 폐기물의 발생량이 적은 '닫힌 물질 순환 시스템'을 구축해야 함.

(1) 설계 단계부터 재이용하기 쉬운 재료를 이용해 폐기물의 자원 가치를 높임.

(2) 재이용처를 확보

(3) 재이용을 위한 자원 재생 기술을 확립

(4) Recycle 산업으로써의 채산성을 추구

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **폐로 후의 폐기물**

- 폐기물의 관점에서 핵융합에 대한 사회 수용성을 높이기 위해 자원의 도입량 및 폐기물의 발생량이 적은 '닫힌 물질 순환 시스템'을 구축해야 함.

(1) 설계 단계부터 재이용하기 쉬운 재료를 이용해 폐기물의 자원 가치를 높임.

→ 적절한 재료의 선정과 재료 속의 유해 불순물 저감으로 clearance의 대상이 되는 폐기물의 양을 늘림.

방사성 폐기물에 대해서는 원자력 시설로 한정되지만 재이용, 즉, recycle 또는 재사용 가능성을 넓히는 물질 순환의 시나리오 검토

예) 철강 재료는 차폐재, 건물의 구조재나 철근, 폐기물 처분용기 등에 이용, 재가공이 어려운 SiC/SiC는 얇게 분쇄하여 시설 내 건조물의 재매립재 등에 이용, 리튬납과 같은 액체 증식재는 폐로 후에 회수하여 다른 핵융합로에 재사용

- 방사성 폐기물의 재이용에 있어서도 작업 종사자의 피폭 억제를 위해 (50 mSv/y 이하), 폐기물의 표면 선량률의 관리에 유의하고, hot cell, manipulator, 원격조작 로봇 이용 필요

3.7 보수 및 보전과 정지 후의 대책

- **폐로 후의 폐기물**

- 다른 원자력 시설에서 발생하지 않는 핵융합 특유의 방사성 핵종 (^{10}Be, ^{26}Al, ^{32}Si, $^{91, 92}Nb$, ^{98}Tc, ^{187}Re 등)에 대한 clearance 농도 등의 관리 기준치 설정 필요
- 폐기물 저감을 위해, 구성 기기의 Inverse manufacturing도 고려해야 함.
  예) 초전도 코일: 물량이 수천톤에 달하고, 폐로 후의 방사선 핵종 농도가 매우 낮지만 그대로는 clearance의 대상 재료가 되지 않음. 초전도 코일을 구성하는 초전도 선재, 안정화구리, 저온강, 절연재 등을 동일 재료별로 분리하면 clearance 대상이 될 수 있음.
  Cf. Nb를 포함하는 초전도 선재는 매설 처분해야 함.