

공포 TRI x AI (테마: 후쿠시마 제1 원전의 폐로 및 파편·오염수 등의 무해화)

인류 역사상 가장 어려운 과제 중 하나에 대해 TRIZ와 AI에 의한 체계적인 접근법을 적용하여 아이디어를 구조화했습니다. 현재의 「시간(단기간순)」과 「기술적 허들의 낮음(실현가능순)」의 트레이드 오프를 고려해, 【단기·고실현성】(지금 강화할 수 있는 수단)으로부터 【장기·근본 해결】(궁극의 무해화·시스템 전환)의 3 단계로 분류해 제안했습니다.

1. 【단기·고실현성】현재 자원의 최대 활용과 공간의 격리(1~3 년 스펠)

우선은 기존의 부의 자원을 반전시켜, 현재의 시스템(매크로)을 변경하지 않고 차단·안정화하는 어프로치입니다.

① “자기 복구형” 물 인프라로의 전환(물질·장 분석/발명 원리 25:셀프 서비스)

· 과제 : 냉각수 순환 시스템의 배관 및 격납 용기의 노화 저하, 미세한 누출 위험.

· 아이디어 : 냉각수 중에 특정 방사선이나 온도 변화에 반응하여 미세한 균열을 자율적으로 메우는 ‘유동성 자기 복구재(흡착성 고분자나 미세 세라믹 입자)’를 혼입시킨다.

· TRIZ 해설 : 누설이라는 “유해한 작용”에 대해 물질(물) 자체에 기능을 갖게 함으로써 외부로부터의 수리 액세스를 불필요하게 한다(셀프 서비스).

② 동적 제올라이트 커튼에 의한 국소 흡착(자원 활용/발명 원리 35: 특성 변화)

· 과제 : 건물 지하로의 지하수 유입과 이에 따른 오염수의 증가.

· 아이디어 : 동토 벽 (정적 장벽) 안쪽에 투과성과 높은 선택적 방사성 세습 / 스트론튬 흡착능을 가진 “유동성 제올라이트 슬러리”로 채워진 동적 트렌치 (흙)를 배치. 지하수를 물리적으로 멈추는 것이 아니라 통과하면서 ‘무해한 물’로 바꾸어 밖으로 흘린다.

· TRIZ 해설 : 물질의 ‘상(개체에서 유체)’과 ‘투과성’이라는 특성을 변화시켜 자연에너지(지하수의 수두압)를 원동력으로 이용한다.

③ 유연성 마이크로 크롤러에 의한 파편 특성의 「사전 샘플링」(발명 원리 15: 가동성/진화 트렌드: 세그멘테이션)

· 과제 : 퍼니스의 상황, 파편 경도 및 임계 위험 파악 부족으로 인한 작업 지연.

· 아이디어 : 하나의 큰 로봇 암을 투입하는 것이 아니라, 초소형·고내방사선의 「수주 연결형(세그먼트화된)군 로봇」을 투입. 간극으로부터 침입하여 파편 표면에 접촉시켜 열전도도 및 조성을 비파괴로 매핑한다.

· TRIZ 해설 : 강체에서 유연체, 나아가서는 「분체·군(멀티에이전트)」으로 진화시킴으로써, 미지의 장애물 투성이의 환경에의 적응성을 극대화한다.

2. 【중기·중실현성】파편 추출과 과도적 안정화(3~10 년 스펠)

시스템의 일부를 변경해, 유해한 작용(방사선·재임계 리스크)을 중화·제어하면서, 안전하게 고체 물질을 꺼내는 페이지입니다.

④ 중질 액체(유체 스타핑)에 의한 「수중」레이저 채굴(물질·장 분석/발명 원리 39:불활성 환경)

· 과제 : 파편 절단시 방사성 미세 분말 (칠레)의 비산과 공기 중 작업으로 인한 차폐 부족.

· 아이디어 : 격납 용기 내부를 '순수'가 아니라 칠레의 부유를 억제하고 중성자 차폐능이 매우 높은 '중질 유체(포름산세슘 수용액이나 특수 불활성 겔)'로 채운다. 이 유체 너머로 고출력 광섬유 레이저로 파편을 절삭(절삭)하고, 칠레는 유체 당 필터로 전량 회수한다.

· TRIZ 해설 : 유해한 '디브리 분진'과 '작업 환경' 사이에 차폐·트랩 기능을 가진 중간 물질(장을 중재하는 제 3 물질)을 도입하여 유해 작용을 차단한다.

⑤ 상변화형 매트릭스에 의한 파편의 「현장 포매(캐스팅)」(발명 원리 36: 상변화/발명 표준해: 유해작용의 폐기)

· 과제 : 파편을 그대로 잡으려고하면 붕괴와 임계 위험이 있습니다.

· 아이디어 : 꺼내기 대상의 파편 주변에 중성자 흡수재(붕소 등)를 함유한 「저융점 합금」 또는 「특수 유동성 유리」를 흘려 넣어 현장에서 일체 고화(포매)시킨다. 굳어진 블록마다 「안전한 제품」으로서 잘라낸다.

· TRIZ 해설 : 액상(유동성)으로 틈새에 들어가고 고화(상변화)시킴으로써 불안정한 대상물을 안정된 매트릭스로 변환·구속한다.

⑥ 열전변환(Seebeck effect)에 의한 「열자원」의 자기소비(자원의 활용/발명 원리 19:주기적 작용)

· 과제 : 파편이 방출하는 붕괴 열의 냉각에 에너지와 물을 계속 소비합니다.

· 아이디어 : 파편에 접촉하거나 인접한 격리 용기의 외부 겹질에 고효율 방사선 대응 열전 변환 소자 (셀러 루트 등)를 통합합니다. 붕괴열을 그 자리에서 전력으로 변환해, 자신의 냉각팬이나 감시센서의 구동전원으로서 「자기소비」시킨다.

· TRIZ 해설 : 처리해야 할 귀찮은 사람인 “붕괴열(불필요한 에너지)”을 시스템을 유지하기 위한 “내부 자원(전원)”으로 반전시킨다.

3. 【장기·근본 해결】 물질의 궁극적 「무해화」와 시스템 전환(10 년~그 이후)

물질 자체의 성질을 변환하거나 매크로 구조를 변화시키는 TRIZ 의 진화 추세의 도달 지점이되는 아이디어입니다.

⑦ 가속기 구동 시스템(ADS)에 의한 장수명 핵종의 단수명화(물질·장 분석:장 변환/발명 원리 2: 분리)

· 과제 : 파편과 폐기물의 방사능이 감쇠하는 데 수만 년 단위의 시간이 걸립니다.

· 아이디어 : 꺼낸 파편에서 특히 수명이 긴 마이너 액티노이드 (MA) 등을 화학적으로 분리. 부지내 또는 인근에 소형의 「양자 가속기 구동 임계전 시스템(ADS)」을 구축해, 고에너지 중성자를 조사해, 수명이 지극히 짧은, 혹은 안정된 비방사성 핵종으로 「핵 변환(소멸 처리)」한다.

· TRIZ 해설 : 열과 역학적 접근 (매크로)에서 원자핵 수준 (마이크로 / 필드 변환)으로 진화합니다. 시간 (반감기) 매개 변수는 외부 “장 (중성 자속)”에 의해 제어됩니다.

⑧ 구조의 마이크로캡슐화와 지층「조화」처분(진화 트렌드:모노⇒바이⇒멀티)

· 과제 : 최종 처분장 선정 난항과 초장기 누출 위험.

- 아이디어 : 핵 변환을 거치거나 남아있는 잔류 물을 나노 수준의 인공 신 록 (암석 모방 세라믹)으로 결정 구조 내에 갇히고 다층 탄화 규소 (SiC) 층으로 마이크로 캡슐화한다. 이것을 기존의 자연암반과 동등한 특성을 가지는 매트릭스에 분산시킨다.
- TRIZ 해설: 「거대한 콘크리트 구조물(물건)」로 지키는 것이 아니라, 「무수한 미소 캡슐(멀티)」에 분산·통합하는 것으로, 지구의 지질학적 사이클(자원)에 시스템을 조화시킨다.

요약: 접근법 선택

단기간·실현성 중시라면, ①·②와 같이 「지금 있는 물이나 트렌치에 특성 변화를 주는」 것으로 오염 리스크를 최소화할 수 있습니다.

한편, 근본적인 「무해화」를 달성하기 위해서는, ⑦의 「장의 변환(핵 변환)」으로의 이행이 불가결합니다. 파편의 「형태(고체⇒분체⇒용액⇒캡슐)」를 페이지마다 TRIZ 의 진화 트렌드를 따라 변화시켜 가는 로드맵이, 가장 합리적인 길을 보여줍니다.