

## 토양 및 지하수오염(=토지오염)의 환경복원과 그 의미

Remediation of Soil & Groundwater Pollutions  
(=Land Pollution), and It's Message to Us



구 자 공

농업기반공사 지하수사업처  
(환경복원기획팀 상임기술고문)

21세기를 들어 2001년에 우리나라도 부산의 문현 지구를 필두로 하여 공식적인 환경복원 사업이 시작 되었다. 1978년부터 도미를 하여 환경공학을 공부하여 1985년에 토양오염으로 학위를 취득하였고, 1996년에는 선구자들과 함께 (사단법인)한국 토양환경 학회를 창설하여 학문의 발전을 노력하였던 필자로서는 또 다른 감회가 깊을 수밖에 없다. 더구나 이 학회는 더 큰 소명을 갖고 지하수 환경 학회와 통합을 하여 (사)한국 지하수 토양환경 학회로 2000년에 거듭나 발전하고 있다. 소위 학회의 합병(M&A= Merge & Aquisition)을 실현한 것이다.

선진국에선 이미 20세기 말에 복원사업 들이 시작이 되어, 엄청난 재정(소위 Superfund)을 소진하고 있어, 복지국가의 지속발전의 장애로서 까지 작용하였음을 우리는 알고 있다. 예방이 최고인줄은 아나 과거엔 자세히 몰랐기에 최선을 다하지 못한 것이 후회가 되나, 이제라도 깨달아 합리적으로 복원하고, 나아가 녹색의 재창조를 함에 우

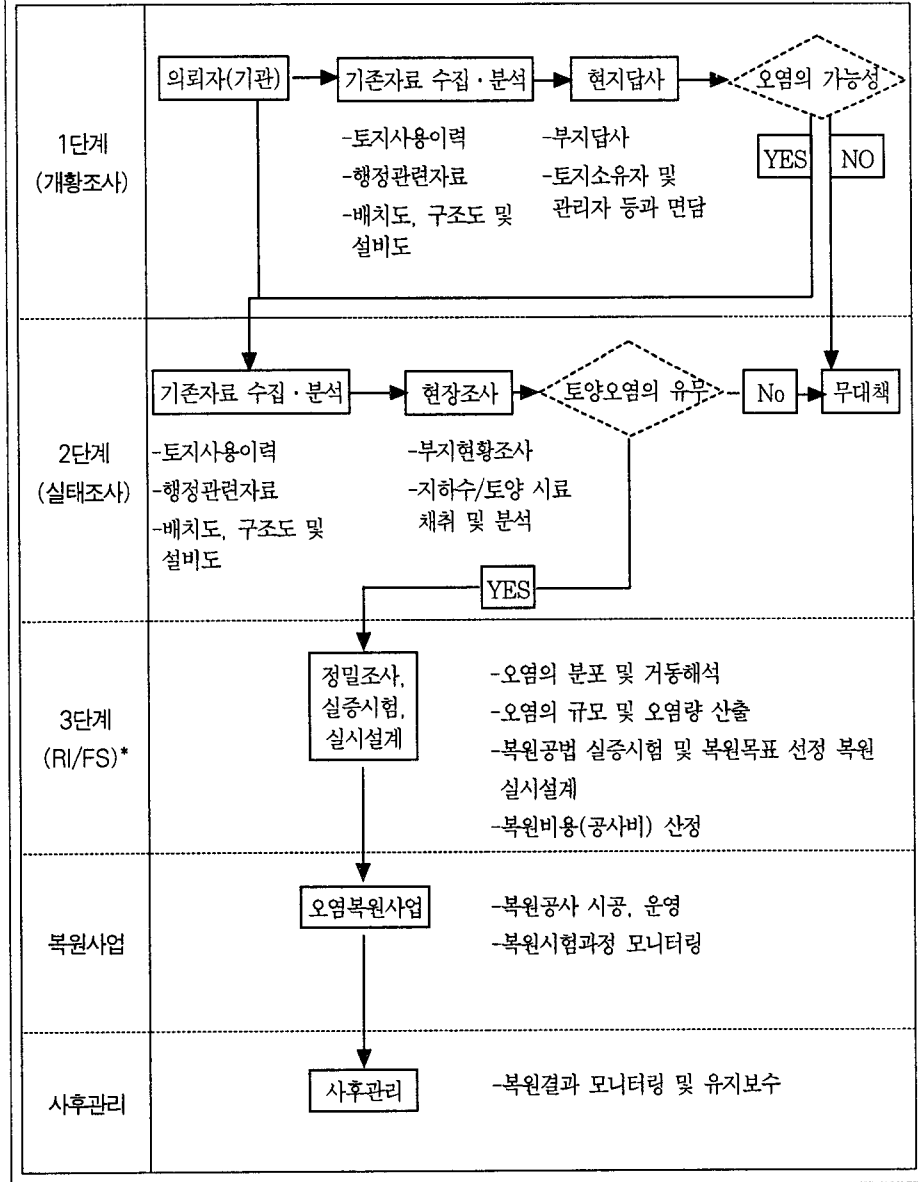
리나라의 영속발전에 일조가 되기를 바라며, 1) 복원사업 실시의 5단계, 2) 토지오염 유발 가능시설과 복원사업의 규모, 3) 복원 기술들의 학문적 의미들, 4) 위해성과 경제성의 조화를 통한 합리적 복원의 개념, 그리고 5) 농공학의 도전과 기회로써의 환경복원; 이상 5가지의 순서대로 본 글을 구성하였다.

### 1. 환경복원사업 실시의 5단계

농업기반 공사에서는 국내외의 사례와 관련법들에 대한 조사연구를 통하여 다음의 그림과 같이 일목요연하게 실시 5단계로 정리를 하였다(농업기반공사 지하수사업처 김영웅처장).

제 1단계는 의뢰자의 요청을 받아 기존자료와 현지답사를 통한 토지오염의 개연성을 파악하며, 제 2단계는 자료의 분석과 부지현장 조사와 토양/지하수 시료 채취 및 분석을 통하여 토지오염의 유무를 파악하여 문제가 있으면 다음 단계로 넘어간다. 환경부는 현재 토양오염물질로서 중금속 6종

## 지하수토양오염 조사·평가·정화사업은 이렇게 수행됩니다.



\*RI/FS=Remedial Investigation & Feasibility Study

그림 1 환경복원사업 실시의 전과정 5단계

(카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가 크롬), 유류성분(동식물성을 제외하고, BTEX 포함한 총 석유계 탄화수소인 TPH), 유기인 화합물, PCB, 페놀류, 시안화합물의 11개 항목을 가 지역과 나 지역(공장용지, 도로-철도용지, 잡종지)의 2지역으로 구분하여, 토양오염 우려기준과 대책기준으로 농도를 구별하여 선정해 놓고있으며, 2002년 1월 1일부터는 니켈, 아연 등과 불소화합물, TCE, PCB등을 포함하여 토양오염 물질을 지속적으로 확대해 나갈 계획이다.

건설교통부도 지하수법을 2001년 1월 16일에 개정하여, 최근에 수요가 급격히 증가하고 있는 지하수 수요(최근 5년에 2배 이상의 지하수 이용량)와 지하수 오염율(7.1%,1997)에 대비하여, 수량과 수질의 적정관리에 박차를 과하고 있으며, 지하수질을 생활용수, 농업용수, 공업용수로 구별하여, 위의 11개 토양오염물질 중 구리를 제외한 10종과 신설6종(1,1,1-TCA, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, 석유계 총탄화수소(TPH))의 총 16종을 특정 유해물질로서, 또한 4개 일반 오염물질(pH, 대장균 수, 질산성질소, 염소이온)과 신설 5개(일반세균, 아연, 알루미늄, 철, 망간)의 총 9개를 규정해 놓고 있으며, 이 역시 지속적으로 강화될 추세이다. 최근 음용수 내의 바이러스로서 사회적 관심을 끌고 있는 환경부 관리의 음용수 기준항목들을 보면 더욱 그렇다.

제 3단계(RI/FS =Remedial Investigation & Feasibility Study)는 정밀조사라 하여, 오염의 규모를 산출하고 복원목표에 맞게 복원 실시설계를 하여 공사비와 공기를 산정 하는데, 현장마다 다르므로 실증시험도 하여 과학적인 확실성을 높인다.

제 4단계는 복원공사 수행단계로서 시공, 운영, 감리, 감시측정, 품질관리 등이 이루어지며, 마지막 제 5단계는 사후관리 단계로서 복원결과의 모

니터링 및 유지보수가 이루어짐에 복원사업의 전과정이 완료된다.

## 2. 토지오염 유발가능 시설들과 복원사업의 규모

2001년 5월24일의 농기공 지하수 사업처의 발표에 따르면 국내의 총개소수는 약3만개 이상으로 다음과 같이 파악하고 있다.

폐기물 매립지 (환경부,1998) 소계=1,445개	일반폐기물 매립지 지정폐기물 매립지 사용종료 매립지	537개 10개 898개이상
유류저장 및 제조시설/ 지역등 (97석유인보,1998)  소계 = 1,757개+1,659km	유류비축기지 (대한석유공사,1999) 정유회사 제조시설등 유류 일반대리점 주유소 일반 판매소 송유관 시설	8개 5개 127개 5,210개소 6,407개 1,659km
소각 시설 지역 (환경부,1998) 소계 = 5,515개	일반 폐기물용 지정 폐기물용	15,470개 45개
휴/폐 광산  소계 = 461개	환경관리대상 휴/ 폐 금속광산(환경부,1999) 휴/폐 석탄광산 (석탄합리화 사업단,1994)	158개 303개
산업시설 지역  소계 = 341개	공업단지 (대한상공회의소,1993) 제련소(비금속협회,1999) 조선소(산업자원부,1999) 발전소(산업자원부,1999)	151개 4개 137개 49개

토양환경보전법이 1995년 1월에 제정되고, 1996년 1월에 시행령 및 규칙이 마련되었으니, 이전의 환경관리에서는 폐기물, 대기, 수질에 비하여 토지(토양 및 지하수)질이 상대적으로 무시가 되어 왔다.

이러한 사실은 (사)한국토양환경학회와 국립환경연구원의 1997년 12월 연구보고서에 의하면 1997년부터 2006년까지의 오염토양 복원 소요비용을 아래와 같이 8천억 내지 2조 1천억원으로 추정하고 있으므로 증명이 되고 있다.

더구나 이 규모는 더욱 엄격해진 관련 법규, 즉

정법의 발달 그리고 토지오염에 대한 주민의식의 향상 등에 따라서 10배이상 까지도 증가될 수 있다고 본다.

오염농경지	"오염원에 '포위'되어있음"	2,800-5,600억원	(26%)
유류	제조 및 저장시설 저장탱크누출, 배관부식	600-1,800억원	(8%)
유해화학물질	제조 및 저장 시설 유출, 누출	22- 65억원	(0.3%)
공장/ 산업 시설		480-1,450억원	(7%)
휴/폐 광산	폐광재, 갱내수	4,160-12,480억원	(59%)

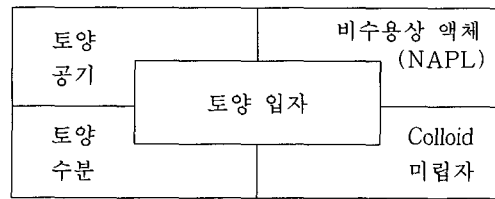
이를 보면 오염농지가 약 1/4로써 심각해짐을 알 수 있고, 특히 재산가치가 높지 않은 광산의 정화에 복원기술은 물론 사회, 경제적으로 획기적인 대책이 필요함을 보인다. 강원도 태백지역의 유흥장 설치가 모델이 되어 경제도 살리고 환경도 살리는 좋은 본보기가 되기를 바라고 있다.

이까지지는 위해성 평가에 계량화가 미진한 우리나라에서는 (1)지가와 (2)주민 민원이 복원 및 정화사업에의 주된 원동력이 되고 있다. 정화가 시급한 부지 순으로, 자원을 효율적으로 배정해야 할 것이다. 그래도 높은 인구밀도 덕분에 우리나라의 땅값은 세계적으로 비싸기에, 토지 환경복원 사업에 선진국들도 눈독을 들이고 있으나, 우리의 교육열이 높고 또한 우리가 제일 잘 아는 우리의 땅을 복원하기에 우리는 충분히 국제 경쟁력을 갖출 수 있다.

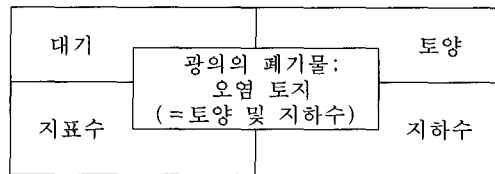
### 3. 복원 기술들의 학문적 의미들

환경복원사업의 특징은 1) [예방(P2=Pollution Prevention)과 사전 적정 관리비와 처리비에 비하여] 돈이 많이 들고, 2) 현장 혹은 지역 특성이 강하여 (Site Specific), 같은 오염물질로 오염이 되었다 하더라도 같은 설계가 될 수 없고, 3) 다매

체(대기, 수질, 토지질, 그리고 폐기물)의 동시고려 (Cross Media or Multi Media Approaches)가 필수적이다. 이는 토양계 자체가 근본적으로 아래의 그림과 같이 여러상이 존재하기 때문이다.



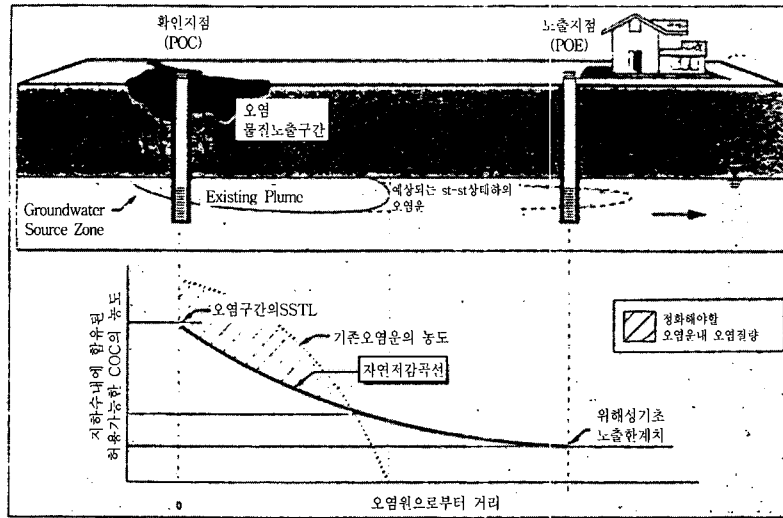
(토양계)



(환경계)

크게 보며 위의 2계를 동시 비교하면 매우 일치됨을 알 수 있다(그리하여 토양계를 소우주(Microcosm)라 칭하였으리라). 토양계는 고체(토양 알갱이 soil grain), 액체(토양수분 + 콜로이드, 그리고 비수용상 액체인 NAPL), 기체(토양공기)의 3상과 토양생물로 구성된다. 토양내 움직이는 유체중에서 토양공기가 연속성(Continuity)을 유지하면 불포화 토양이라 칭하고, 반면 토양수분이 공극내에서 연속성을 유지하면 포화 토양이 되어 기존의 지하수대가 된다.

최근 유류 및 용제 오염물의 등장으로 물에 녹음이 적고 물과 공기와는 다른 그들의 자유상으로 존재함에 NAPL(=Non Aqueous Phase Liquids)의 용어가 만들어 졌으며, 비중이 작아 물 위에 뜨는 L-NAPL (=Light-NAPL; 예로써 자동차 연료 가솔린)과 비중이 지하수보다 커서 밑에 갈아앉는 D-NAPL (=Dense-NAPL; 예로써 PCE,



[Source: 한정상 공저, 오염지하수-토양의 자연정화와 위해성 평가, 한림원,1999, p.380]

그림 2 지하수 정화시 요구조건에 관한 정의

TCE 유기용제)로 나누며, 휘발류의 성분인 BTEX는 휘발성이 높아 주로 토양공기에 분포하게 되고 이는 우측의 환경계에서 대기오염을 일으킨다.

유기용매중의 생물학적 혹은 물리화학적 분해물인 발암성 의혹물질인 TCE (=TriChloroEthylene)의 경우는 토양 알갱이에 존재하는 유기탄소분(Organic Carbon)에 흡착도 되어 수분의 흐름보다 늦추어(=Retardation)지나, 물에 수용성도 높아 지하수에도 녹아 움직이며, 더구나 지하수에 존재하는 콜로이드에도 흡착되어 예상보다 빠르게 이동하는(=Facilitated Transport) 현상도 나타난다. 이는 환경계에서 수질오염원이 되며, 생체의 굳기름 등에 축적되어 독성을 유발한다.

이리하여 토양계는 5상(=5-Phase Geosystem)으로 해석되어야 하며, 오염물의 5상에의 분포를 고려하여야 비로서 환경복원 목표에 적합한 최적의 대안이 과학화 된다. NAPL에 대하여는 더 이상의 지속적인 오염원이 안 되도록 회수(Free

Product Recovery)하고, 차단 (Containment)한 후, 필요시 촉진된 자연정화 (ENA= Enhanced Natural Attenuation)공법을 이용한다.

토양공기에 주로 분포하는 오염물은 기존의 대기 오염 처리공법을 현장조건에 맞게 진화시켜 처리하고, 토양수분에 분포하는 오염물은 기존 환경공학 등의 수처리 공법을, 알갱이에 흡착된 것은 탈착 그것도 높은 온도 하에서의 가속 찰탁을 적용하여야 하며, 콜로이드에 붙어 이동하는 오염물에 대하여도 주의를 기울여야 한다. 필자의 경험으로 매립지 하부의 지하수에 많은 콜로이드가 존재함을 보았다.

기타 상대적으로 저농도이며 복원공사의 시간적 여유가 있을 시는 모니터링 병행의 자연정화 (mNA= monitored Natural Attenuation) 공법 특히 생물학적 방법의 공법들이 경제적이고 생태친화적이라 선호되고 있다.

#### 4. 위해성과 경제성의 조화를 통한 합리적인 복원의 개념

미국의 경우 할아버지 혹은 아버지 세대에 돈을 많이 벌어서 융성하던 회사가 토지오염이 포착되어 그 환경복원 사업에 엄청난 자원(Superfund)을 투자함에 회사가 파산됨을 20세기 말의 한 현상으로 나타나, 결국 '지속발전' 혹은 영속발전 (Sustainable Development)의 의미를 생각하게 되었다.

또한 이 복원비용을 좌지우지하는 것은 바로 정화기준이다. 어디까지 정화해야 하는가? (How clean is clean?)라는 질문이다. 미국의 정화법의 근간인 RCRA(=Resource Conservation and Recovery Act, 1976년) 법과 CERCLA(=Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, 1980년 제정; 일명 Superfund 법)에서는 다양한 정화기준들 혹은 위해목표치(Target Risk Value)를 사용한다고 한다.[참고; 한정상 공저, 오염지하수-토양의 자연정화와 위해성 평가, 한림원, 1999, p.248]

1) 배경농도 기준, 2) 오염물의 검출 하한치, 3) 불검출 (Non-Detect) 기준, 4) 가장 양호한 정화공법의 달성기준, 5) 판례의 개념으로서 유사 정화지역에 규제기관들이 적용하던 기준, 6) 기존 법률들의 각종 기준들 (예로써, 수질기준의 MCL=Maximum Contamination Level), 7) 잠재적으로 노출된 개별 수용체를 오염으로부터 보호하기 위하여 위해성 평가(Risk Assessment)를 실시한 후 설정한 정화기준 (즉, RBCA= Risk Based Control Action), 그리고 8) 이들의 조합형이 있다.

미국의 많은 주나, 독일의 경우도 그림[한정상 공저, p.380]에 나와 있듯이 토지의 자연저감(Natural Attenuation)의 선용과 위해성에 기초

한 정화 (RBCA)기준을 우리나라와 같은 기존의 단일기준에 부가하여 정화 대상자에게 선택권을 줌으로써 환경적 안전성은 물론 집행의 융통성, 정화 사업의 자발성, 경제적, 효율성, 그리고 결국은 지역의 지속적 발전성을 높여가고 있다.

어머니 같은 토지(토양 및 지하수)는 물리/화학/생물적인 자정능력을 갖고 있고 세가지 현상의 자정능력을 보여준다. 즉 1) 지체 현상, 2) 분산 현상, 3) 줄어듦 현상의 삼위합체(三位合體)로써 오염물로부터 환경을 보호해 주고 있으나, 지나치면 오염이 된다.

분산, 희석, 수착(Sorption), 휘발, 대기압유도 토지호흡 (Barometric Pumping) 등이 물리적이고, 가수분해, 제거, 환원상태 할로젠 제거 (Reductive Dehalogenation), 기타 pH와 산화환원(pe, ORP= Oxydation Reduction Potential)의 완충능력이 화학적 자정능력들이며,

그리고 생물학적 특히 토양미생물에 의한 분해가 경제적이며 환경친화적이다. 이미 토양에는 하수처리장보다 약 100배나 많은 토양미생물이 존재하기에 그들의 성장조건만 잘 갖추어 준다면 토지의 자정능력은 크게 확충될 수 있다.

우리 인간이 활동하고 자라고 존재하기 위하여 식사(최종 전자 공여체, Final Electron Donor)를 하며, 이를 산화시키기 위하여 공기중의 산소(최종 전자 수용체, Final Electron Acceptor)를 들여 마신다. 마찬가지로 미생물들도 유기오염물질을 식사물로 생각하며 산화제만 주어진다면 먹고 분해를 하여 생분해 (Biodegradation)가 이루어져 값싸게 안전하게 처리할 수 있다.

여러 미생물들에 의하여 산화제가 소비되는 순서가 자연의 법칙처럼 진리로 존재한다. 마치 운동량, 열량, 질량 모두 이들의 이동은 그들의 농도가 높은데서 낮은 농도 쪽으로 이동하는 사실과 같이,

우리도 항상 좀더 편안함을 찾는 이치와 이슷하다.

간략히 산화제 이용 순서를 살펴보면; 산소(O<sub>2</sub>) 환원, 질산염(NO<sub>3</sub>) 환원, 망간(Mn(IV)) 환원, 3가 철(Fe) 환원, 유기물 발효, 황산염(SO<sub>4</sub>) 환원, CO<sub>2</sub> 환원하여 메탄발효, 암모니아 생성, 수소가스형성이 된다. 그리하여 오염이 경미한 지역은 미생물들이 식사를 적게 하여 결국 산화제를 조금만 소비하여 지하가 산화분위기로 아직 남아있어 용존 산소와 질산염이 지하수에서 측정이 되나, 오염농도가 높을수록 즉 식사가 넘쳐 산화제를 다량 소비하므로 암모니아, 2가 망간, 2가 철, 황화가스, 나아가 메탄가스가 생성되며 심한 환원 분위기의 지하 토양계를 형성한다.

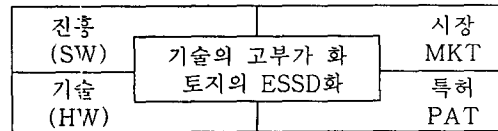
이러한 자연현상을 도리어 공학적으로 선용하고 이용하여 생물학적 복원을 수행하며, 산소 공여제(ORC = Oxygen Releasing Compound)와 수소 공여제(HRC = Hydrogen Releasing Compound)를 사용하여 벤젠과 TCE 오염물을 각각 산화분위기와 환원분위기에서 자연복원(NA = Natural Attenuation) 보다도 빠르게 처리한다. 최근에는 살이 많이 찌는 미생물막을 투수성 반응벽(PRB = Permeable Reactive Barrier)에 이용하여 이젠 미생물도 급하면 몸으로도 오염지하수를 막고 있다.

### 5. 농공학의 도전과 기회로서의 환경복원

환경분야도 과거에는 대기, 수질, 폐기물이 따로 따로 발전하여 왔으나, 토지오염을 통하여 백화점 식으로 통합되고, 특히 지질, 지하수 등의 타 분야의 전문가들도 많이 필요하게 되었다(소위 The Integration for ESSD (=Environmentally Sound, and Sustainable Development)). 더구나 사후 토지 이용 방안에 따라 복원 수준과 방법이 정하여 지므로, 특히 녹색환경을 창조해 낼 수

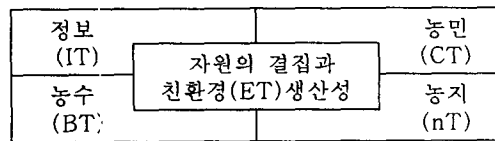
있는 농공학과 조경학 분야에도 큰 기여를 기대해 본다. 특히 식물정화법(Phyto remediation)이 급속히 발전하고 있다. 여기에 앞으로도 효과적으로 타 분야의 사람들과 지식을 교환할 수 있는 능력도 주요한 실력이 될 것이다.

또한 풍요롭고 아름다워서 살고 싶은 고향 농촌을 만들고, 결국 우리나라의 ESSD (=환경과 건강 면으로도 친화적이어서, 지속발전이 가능하고, 그래서 미래가 있는 곳)를 위하여서는 아래의 첫번째 개념도와 같이 토지의 ESSD를 만들고, 나아가 다음의 개념도와 같이 농림자원을 고부가가치화 하여서 환경친화적인 생산성을 높이고, 세계로의 시장을 개척해야 할 것이다.



(21세기 환경복원 기술)

- 주) SW = Software  
 HW = Hardware  
 MKT = Market  
 PAT = Patent  
 ESSD = Env.  
 Sound &  
 Sust. Development



(21세기 한국농정 방향)

- IT = Information Technology  
 BT = BioTech.  
 CT = Cleaner Tech. (청정기술)  
 nT = Nano Technology  
 ET = Environmental Technology

작금 우리나라의 TV나 각종 대중매체에서 다루는 각종 환경오염문제에서 오염물의 최종 수용체(acceptor)는 대개 토지이다. 따라서 이젠, 토지의 질(質)적 시대가 도래하였다(!).