일감법학 | 제40호
2018년 6월 129-159쪽
건국대학교 법학연구소

Ilkam Law Review
Vol.40, Jun., 2018. pp.129-159
The Institute of Legal Studies, Konkuk Univ.

이산화탄소 포집 및 저장단계에서 리스크를 관리하기 위한 법적 연구*

A Legal Study to Manage Risks at the Carbon Capture and Storage

이 순 자**
Lee, Soon-Ja

목 차

Ⅰ. 머리말
Ⅱ. 이산화탄소 포집 및 저장단계에서의 리스크
Ⅲ. CCS 기술에서 리스크 관리
Ⅳ. 맺는 말

세계는 지구온난화가 진행됨에 따라 다양한 방법으로 온실가스를 감축해야 한다. 그 중 하나인 이산화탄소 포집 및 저장의 상용화이며, 지금이 바로 가장 필요한 시점이다.

한국은 이산화탄소를 많이 배출하는 화력발전소, 철강산업, 시멘트 산업 등의 배출원이 많이 존재한다. 그래서 국제적으로 약속한 감축의무를 이행하기 위해 이산화탄소 포집 및 저장의 신기술이 필요하다.

위의 CCS 기술은 포집-수송-저장의 3단계로 이루어진다. 포집 후, 수송, 저장 단계에서 95% 이상으로 압축된 고농도의 CO_2이다 보니 전 과정에서 폭발 및 누출로 인한 위해가 따른다. 특히 가장 우려가 되는 것은 저장소에 저장된 CO_2의 누출이다. 이로 인한 세계적으로 감축하기로 약속한 온실가스 감축효과를 상실하는 측면과 지하수 오염으로 인한 식수 오

투고일 : 2018. 4. 30. / 심사의뢰일 : 2018. 5. 14. / 게재확정일 : 2018. 6. 8.

* 이 논문은 2016년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2016S1A5B5A07920345).

이 논문은 2018년 2월 9일 건국대학교 법학연구소・한국입법정책학회 공동학술대회 "현대사회에서의 법적쟁점과 과제"에서 발표한 내용을 수정・보완하였음을 밝힙니다.

** 고려대학교 법학연구원 연구교수
Research Professor, Legal Research Institute of Korea University

염의 가능성 및 인근 주민들에 대한 노출이 우려된다.

많은 과학기술들이 그렇듯이 CCS 기술에는 리스크가 존재한다. 이는 신기술이고 위험과 위해를 동반할 수 있으므로 상용화를 위해서는 환경관리를 위한 지침과 규정 등 법적·제도적 마련이 필요하다. 그리고 이를 통제하기 위한 법적 시스템 및 지침이 필요하다.

이에 한국 실정에 맞는 법적 시스템 및 지침을 개발하기 위해 이미 CCS 기술을 선도하고 있는 미국, 호주, 일본 등의 국가들의 법령을 살펴보았다.

이런 CCS 선도국가들의 CCS 리스크를 관리하기 위한 법령을 분석함으로써 차후에 제정될 CCS 단일법에서 필요한 규정들이 어떤 것들이 있는지 분석하였다.

[주제어] 이산화탄소 포집 및 저장, 리스크, 온실가스, 지중저장, 리스크 커뮤니케이션

Ⅰ. 머리말

2015년 12월 파리에서 개최된 제21차 당사국총회에서 196개의 당사국들은 "산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승폭을 2℃보다 상당히 낮은 수준으로 유지함과 동시에 온도상승을 1.5℃까지 제한하기 위해 노력하기로 합의하였다.

이 목표를 지키기 위해서 세계는 물론 한국도 CO_2를 세계에서 8번째로 많은 배출하는 나라로서 국제사회로부터 온실가스 감축 압박을 더 심하게 받을 것으로 보인다. 한국정부는 2015년 6월 30일 2030년 BAU 대비 37%를 줄이기로 "유엔기후변화협약" 사무국에 자발적 감축목표(INDC : Intended Nationally Determined Contribution)를 제출하였다. 이를 이행하기 위해서는 정부의 시나리오대로 이산화탄소 포집 및 저장기술(CCS)의 도입 및 상용화이다.[1)]

위의 CCS 기술은 3단계로 이루어진다. 우선 화력발전소 또는 철강산업, 시멘트 산업, 정유소, 석유 화학 플랜트 및 대형 산업단지 등과 같이 이산화탄소를 많이 배출하는 산업원으로부터 신기술을 이용해 이산화탄소를 포집한 후 95% 이상의 고농도로 압축한다. 그런 다음 파이프라인이나 탱크로리, 선박, 기차 등을 이용해 저장소까지 수송한다. 마지막 단계는 저장단계로서 폐유전이나 폐가스전 또는 육상 혹은 해저 약 750~1,000m 심도에 존재하는 '적합한' 지층 중에 이산화탄소를 주입하여 저장하는 종합적인 기술이다.[2)]

---

1) 이순자, "이산화탄소 포집 및 처리를 위한 도입법안에 관한 입법평가", 입법평가연구 제9호, 한국법제연구원, 2015.10, 383쪽.

2) Elizabeth J. Wilson and David Gerard ed, *Carbon Capture and Sequestration Integrating Technology, Monitoring and Regulation*, Blackwell Publishing, 2007, p.2.

하지만 이 기술은 많은 과학기술들이 그렇듯이 언제나 리스크가 존재한다. 신기술이고 위험과 위해를 동반할 수 있으므로 상용화를 위해서는 환경관리를 위한 지침과 규정 등 법적・제도적 마련이 필요하다.[3] 그런 다음 위험과 위해를 동반하므로 이를 통제하기 위한 법적 시스템 및 지침이 필요하다.

이와 같은 내용으로 CCS 법을 제정하기 위해서는 CCS 기술을 선도하고 있는 국가들의 법령을 살펴볼 필요가 있다. 대표적인 국가로는 미국, 호주, 일본 등이 있다. 이 국가들은 CCS 기술을 차세대 핵심기술로 보고 세계 시장을 선점하기 위하여 신속히 CCS 단일법을 제정하거나 개별법의 개정을 통해 근거규정을 만들고 규제와 지원을 하고 있다.

특히 포집 후, 수송, 저장 단계에서 95% 이상으로 압축된 고농도의 CO_2이다 보니 전 과정에서 폭발 및 누출로 인한 위해가 따른다.

가장 우려가 되는 것은 저장소에 저장된 CO_2의 누출이다. 이로 인한 세계적으로 감축하기로 약속한 온실가스 감축효과를 상실하는 측면과 지하수 오염으로 인한 식수 오염의 가능성 및 인근 주민들에 대한 노출이 우려된다.[4]

그래서 CCS 선도국에서는 이를 통제하기 위한 잠재적 위험 요소에 대한 평가, 유출시 복구방안, 작업자들의 건강과 안전관리를 위한 조치, 누출 및 사고 발생시의 계획 등을 따로 법령이나 지침에 반영하고 있다. 현행 "고압가스 안전관리법"이 있지만 사고에 대한 사후 통보가 아닌 계속적인 모니터링을 통해 누출시 대피 통보 시스템 구축 문제, 저장 부분이 핵심인데 동법의 규율 대상이 아니라는 점이다. 따라서 CCS에서 위험과 위해를 통제하기 위한 한국 실정에 맞는 입법적 조치가 필요하다.

이를 위해서는 기존의 연구를 통해 밝혀진 포집, 수송, 저장에 따른 위해를 먼저 파악하고 이를 통제하기 위한 법적 연구가 필요하다. 따라서 법령을 제정할 때에는 신뢰가 형성되도록 위해를 예방하기 위한 대책도 같이 수반되어야 한다.

그래서 아래 Ⅱ에서는 이산화탄소 포집 및 저장단계에서의 리스크가 어떤 것들이 있는지 살펴본다. 그런 후 Ⅲ에서는 CCS 리스크를 관리하기 위한 이론과 다른 나라에서 리스크를 관리하기 위한 어떤 규정들이 있는지 살펴본 다음 단일 CCS법률이 제정되면 필요한 규정이 어떤 것들이 있는지 살펴본다. 마지막으로 제안된 단일 CCS법률의 문제점도 같이 검토한다.

---

3) 장은선 외 4인, "이산화탄소 지중저장의 환경 관리를 위한 미국과 유럽연합의 법・제도 현황과 시사점", 지하수토양환경 제17권 제6호, 한국지하수토양환경학회, 2012, 12쪽.

4) 국립환경과학원, CCS 환경관리를 위한 국제교류 자료집, 2013, 56-57쪽.

Ⅱ. 이산화탄소 포집 및 저장단계에서의 리스크

1. CO_2 자체에 대한 리스크

순수한 이산화탄소는 주변 압력과 온도에서 무색이고, 저농도에서는 1.98kg/m_3의 무취 가스로 공기보다 무거우며, 무독성 가스이지만, 공기보다 비중이 크고 밀도가 높아 지면에 체류하는 성질을 갖는다. 그리고 점성이 높아서 이동성이 적고 특히 물에 용해되었을 때에는 반응성이 있지만 폭발성이나 인화성은 없다.

CO_2는 건강에 영구적인 리스크 없이 매우 높은 농도로 허용될 수 있다. 잠수함의 실내공기는 일반적으로 4,000ppm CO_2이지만 10,000ppm까지의 수준이 보고되기도 한다.[5] 공기 중에서 CO_2의 농도가 증가함에 따라 생리적 위험성이 발생되며, 공기 중 CO_2농도가 10%인 경우 1분 이내 의식상실, 20% 이상인 경우 단시간 내 중추신경 마비와 사망에 이를 수 있듯이 고농도의 이산화탄소는 신체에 치명적이다.[6]

이산화탄소는 유해화학물질에는 해당하지 않지만 "산업안전보건법"에서는 노출기준 설정물질로 지정되어 있다.[7] 고용노동부가 고시하는 이산화탄소에 대한 작업장 허용노출기준은 TWA = (5,000 ppm, 9,000 mg/m_3),[8] STEL = (30,000 ppm, 54,000 mg/m_3),[9] CEILING은 해당사항 없다.[10]

위험노출기준은 NIOSH[11] IDLH[12] 40,000ppm이다.

---

5) <http://ieaghg.org/docs/General_Docs/IEAGHG_Presentations/Risks_and_Impacts__CCS_AFRICA.pdf>.

6) 장갑만, "이산화탄소 포집·수송·저장(CCS)의 위험성 및 제도 동향", 가스안전 통권 제265호, 한국가스안전공사 고객홍보실 홍보부, 2013.7, 7쪽.

7) 이순자, "이산화탄소 포집과 저장에 관한 법적 쟁점", 환경법연구 제37권 제1호, 한국환경법학회, 2015.4, 272쪽.

8) "시간가중평균노출기준(TWA)"이란 1일 8시간 작업을 기준으로 하여 유해인자의 측정치에 발생시간을 곱하여 8시간으로 나눈 값을 말하며, 다음 식에 따라 산출한다.

$$\text{TWA환산값} = \frac{C1 \cdot T1 + C2 \cdot T2 + \cdots\cdots + Cn \cdot Tn}{8}$$

주) C : 유해인자의 측정치(단위 : ppm, ㎎/㎥ 또는 개/㎤)
T : 유해인자의 발생시간(단위 : 시간)

9) "단시간노출기준(STEL)"이란 15분간의 시간가중평균노출값으로서 노출농도가 시간가중평균노출기준(TWA)을 초과하고 단시간노출기준(STEL) 이하인 경우에는 1회 노출 지속시간이 15분 미만이어야 하고, 이러한 상태가 1일 4회 이하로 발생하여야 하며, 각 노출의 간격은 60분 이상이어야 한다.

10) "최고노출기준(C)"이란 근로자가 1일 작업시간동안 잠시라도 노출되어서는 아니 되는 기준을 말하며, 노출기준 앞에 "C"를 붙여 표시한다. 하지만 NIOSH REL-CEIL은 30,000ppm, 54,000mg/m^3이다.

2. 이산화탄소(CO_2) 스트림(CO_2 Stream, CO_2 流體類)의 리스크

이산화탄소 스트림(CO_2 Stream, CO_2 流體類)이란 지중저장이나 해저지중저장을 목적으로 이산화탄소 배출시설에서 포집된 이산화탄소로서 이산화탄소(CO_2)로 대부분 구성되고, 법령으로 정하는 기준에 적합한 이산화탄소를 말한다고 정의할 수 있다.[13] 이 용어는 많은 사람들에게 생소한 단어이지만 실정법령[14]에서 사용하는 용어이다.

이산화탄소 스트림은 이산화탄소 배출시설에서 포집된 이산화탄소를 가압하여 고압의 기체와 액체의 특성을 모두 갖춘 유체(fluid)가 된다. 이때 이산화탄소의 농도는 대부분 95%를 넘어 고농도의 이산화탄소가 응축되어 있고 고압가스로서 폭발 위험이 존재한다.

이산화탄소 스트림은 이산화탄소로만 구성된 것이 아니라 포집기술에 따라 구성물질이 다르다.[15] 일반적으로 95～99%의 이산화탄소(CO_2), 원료와 포집 및 격리 과정중에 사용되었던 관련 물질들[원료 및 처리과정에서 발생된 물질류, 첨가된 물질류(포집과 격리과정을 가능하게 하거나 향상시키기 위해 이산화탄소 스트림에 첨가된 물질들)]이다.[16] 이산화탄소 스트림에 어떤 물질이 어느 정도의 농도를 갖고 있느냐에 따라 위해성에 대한 평가는 달라질 수 있다. 이산화탄소 스트림의 해양 지중저장이 가능하다고 한 OSPAR협약(The Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic) 부속서 III에서는 '이산화탄소 스트림은 원료 물질 및 포집, 수송 및 저장 과정에

---

11) NIOSH(National Institute of Occupational Safety & Health)는 미국 국립산업안전보건연구원을 나타낸다.

12) IDLH(Immediately Dangerous to Life and Health)는 30분 이내에 대피하면 건강상에 영구적인 영향이 없는 것을 의미한다.

13) 이순자, 앞의 논문, 2015.4, 265쪽, EU CCS 지침(Directive 2009/31/EC) 제3조 제13호에서는 CO_2 stream' means a flow of substances that results from CO_2 capture processes라고 정의하였다.

14) 해양환경관리법 시행규칙 제12조 제1항 [별표 6] 육상에서 발생한 폐기물 중 해양에 배출가능한 폐기물로서 3. 해저지질구조내 고립격리 방법에 의하여 배출해야 하는 폐기물 : 이산화탄소 포집공정으로부터 발생한 "이산화탄소 스트림(Stream)"으로서 해양수산부장관이 이산화탄소스트림의 성질과 상태, 해저지질구조와 위치, 처리방법 등을 정하여 고시하는 폐기물 또는「폐기물관리법」시행규칙 제2조의2 사업장폐기물의 분류번호에 "폐가스 포집물(이산화탄소 스트림, 이산화탄소 전환 탄산화물)"을 사업장폐기물(폐기물관리법 시행규칙 별표4)로 분류하고 있다.

15) 예를 들어 순산소 연소기술(Oxy-fuel Combustion Technology)은 배기가스에 CO_2와 물뿐만 아니라 비활성기체, 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 염산 및 수은 등의 부산물을 포함할 수 있다. 이와 같은 부산물들은 CO_2의 응축, 수송, 저장 과정에서 안정성 문제와 더불어 환경, 경제적 문제를 야기할 수 있다(장갑만, 앞의 글, 6쪽).

16) IMO, 2012 specific guidelines for the assessment of carbon dioxide for disposal into sub-seabed geological formations(LC 34/15, annex 8), 1.3.1.1.-1.3.1.2; <http://www.imo.org/en/Pages/Default.aspx>. 이순자, 앞의 논문, 2015.4, 276쪽에서 재인용.

서 파생되는 부수적인 관련 물질을 포함할 수 있다'라고 규정하고 있다.[17] 하지만 화력발전소의 배출시설에서는 황화수소(H2S)와 이산화황(SO2) 같이 유독하고 부식성이 있는 물질들이 같이 배출된다. 이런 물질들을 어느 정도 제거하기 않고 같이 포집하게 되면 누출시 사람을 포함한 생태계에 영향을 줄 수 있기 때문에 부수적인 관련물질에 대해 엄격히 성분분석을 하고 위해를 주지 않을 농도로 규제를 하여야 할 것이다.

산업적 활동에서 포집된 이산화탄소는 불순물을 포함할 수 있으며 이는 이산화탄소 수송 및 저장 시스템 및 잠재적인 건강, 안전 및 환경에 실질적인 영향을 미친다.[18]

CCS 공정시 포집된 CO_2내에 아래와 같은 불순물이 포함될 수 있으며 건강에 위험을 내포하고 있다. 이 기체들은 사람의 건강과 안전에 영향을 줄 수 있기 때문에 폐기물 또는 위험 물질로 취급될 수 있고, 배관을 통해 수송・저장되는 과정에서 배관의 부식 및 누출에 영향을 줄 수 있다. 특히, 불순물 중 H_2S의 경우 강한 부식성 및 독성 가스로 분류되고, 수생생물에게 매우 유독한 물질로 알려져 있다.[19]

일본의 경우 포집된 CO_2를 순도 99%로 유지하도록 규정하고 있으며, IEA에서는 각 불순물의 농도를 ppm 또는 vol%로 규정하여 관리하고 있다.[20]

〈표 1〉 CO_2 스트림에서 가장 일반적인 불순물의 위험성[21]

화합물	건강 위험
CO	호흡 장애 및 뇌 손상을 초래할 수 있는 혈액 및 신경계에 영향을 미침. 농도가 높을수록 호흡장애, 혈관 시스템 손상, 의식불명, 발작 및 사망을 초래할 수 있음.
N_2	호흡 곤란 및 심각한 경우 무의식
O_2	없음
Ar	호흡 곤란 및 심각한 경우 무의식
CH_4	질식을 일으킬 수 있음
H_2	질식을 일으킬 수 있음
NO_2	눈, 코, 호흡기를 자극하여 폐부종을 일으키고 혈압을 낮추며 심각한 경우 사망까지도 일으킬 수 있음, 반복되는 노출은 폐에 메토오글로빈(methaemoglobin) 형성과 질병을 유발할 수 있음
SO_2	눈, 피부 및 호흡기에 대한 침식성(Corrosive)은 폐부종 및 사망을 유발할 수 있음
H_2S	눈, 코, 호흡계에 자극성. 폐부종, 피로, 경련, 정신 장애, 신경계 마비 및 사망을 유발할 수 있음

17) <https://www.ospar.org/convention>.

18) IPCC, *Carbon Dioxide Capture and Storage*, 2005, pp.141-142.

19) CO_2 이외의 불순물의 위험성에 대해서는 Stefan Liljemark et al., *CO_2 Quality – Transport Aspects, IEA Workshop*, Oct. 2008; IPCC, *Reported failure modes for CO_2 pipelines*. 참조; 장갑만, 앞의 글, 8-9쪽.

20) 장갑만, 앞의 글, 9쪽.

21) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental

3. 포집단계에서의 리스크

산업현장에서 가스 누출로 인한 사망사고 및 생태계 파괴가 있었듯이 CCS의 포집단계에서 CO_2를 고압으로 압축하여 포집하거나 임시 저장할 경우, 이산화탄소 스트림의 누출로 인한 작업자와 주변인근 지역의 주민 및 생태계에 대한 위해가 발생할 수 있다. 따라서 포집시설이 안전하게 설치되어야 하며 이산화탄소 누출사고가 발생하지 않도록 하는 조치가 필요하다. 그리고 누출사고가 발생할 때 긴급대처 방안이 필요하다. 일본은 포집과 수송에는 "고압가스보안법"(高壓ガス保安法)을 적용하여 리스크 관리를 하고 있다.

4. 수송단계에서의 리스크

밀도가 높은 단계(주변온도에서 7.58MPa[1,100psi] 이상)에서 파이프라인을 통한 CO_2의 수송은 다량의 CO_2 장거리 이동에 있어서 가장 비용 효율적인 수단이다.

건설과 마찬가지로, CO_2 파이프라인의 운영은 다른 일반적인 파이프라인 시스템의 운영과 본질적으로 동일하다. 안전 시스템, 통신 시스템, 유지보수 및 수리 프로세스를 갖추어야 한다. 가장 중요한 운영상의 관심사는 안전하게 유지 보수 또는 수리가 필요한 경우 파이프라인에서 이산화탄소 배출을 제어하는 것이다.[22]

가장 큰 리스크는 수송관이나 수송선 등에서 고압의 이산화탄소 스트림의 누출로 인한 사람, 농작물, 가축 및 생태계에 위해를 주는 것이다. 일반적으로 파이프라인으로 수송하는 경우가 대부분을 차지한다. 파이프라인의 경우 다른 원유나 가스관처럼 지하 1m-1.8m 깊이로 캐나다는 매설을 하였다. 파이프라인의 경로는 산지와 농지등을 경유하지만 한국과 같은 경우에는 인근마을, 산업단지 주변을 지나가는 것도 가능하다.

현재 이산화탄소 스트림을 관리할 수 있는 법률은 "고압가스 안전관리법"이다. 이산화탄소 스트림은 CO_2의 고압가스이면서 기체와 액화상태로서 이 법의 수송 범위 내에 포함된다고 생각된다. 이 법은 CCS 도입을 위해 고압이자 액화상태의 CO_2의 수송뿐 아니라 포집, 저장 설비 내 안전관리 및 허가 기준으로 삼을 수 있는 법이다. 일본의

Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

22) <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/strategic-analysis-global-status-carbon-capture-storage-report-1/c1-pipeline-transport>.

경우에도 CCS를 위한 단일법이 제정되지 않았지만 “고압가스보안법”(高壓ガス保安法)이 포집과 저장 설비에 대한 안전관리 및 허가기준이 되고 있다.[23]

5. 저장단계에서의 리스크

CCS 기술 중 다른 단계보다 저장단계의 리스크가 가장 크고 중요하며, 통제하기도 어려운 부분이 있다. 그리고 저장단계에서 대기로의 이산화탄소 누출은 온실가스를 감축하기 위한 기후변화 해결책으로서의 이산화탄소 저장의 효과를 제한하게 될 것이다.[24]

5.1 저장 위치에서 지표면을 통해 대기 중으로 누출되는 이산화탄소

아직까지 공학적으로 설계된 이산화탄소 저장 시설에 대한 경험이 거의 없고 기존 프로젝트의 누출 사례가 없지만 이산화탄소를 자연적으로 배출한 여러 사건에서 교훈을 얻을 수 있다. 캘리포니아의 맘모스 산(Mammoth Mountain)의 일정한 이산화탄소 플럭스는 지하에서 대기로 약 15년 동안 흘러들어 여러 지역의 나무를 죽이고 이 지역의 토양 및 수질에 화학적 변화를 일으켰다. 또 다른 사례는 카메룬의 니요스(Nyos) 호수에 있다. Nyos 호수의 물은 일정 기간 동안 화산 통풍구에서 점진적으로 CO_2로 포화되었다. 그들은 갑자기 밤중에 엄청난 양의 이산화탄소를 방출하여 1,700 명의 사람들이 사망하였고, 가축들이 사망한 사례가 있다.

이런 자연적인 현상과 공학적으로 설계되어 인공적으로 이산화탄소를 저장하는 장소와는 확연히 차이가 있다. 위의 자연적인 이산화탄소 누출 사례는 고도로 부서진 화산 지대에 위치하고 있다. 반면에 공학적으로 이산화탄소 저장을 위해 설계된 저장소는 심층적이고 안정적인 하도 퇴적 저장소로서 자연 상태와 매우 다르다는 것을 인식할 필요는 있다. 하지만 고농도의 이산화탄소가 사람과 생태계에 어떠한 유해성을 갖는지에 대해서는 유용한 자료가 될 것이다.

온실가스 감축을 위해 저장된 이산화탄소가 누출되는 것은 지진과 같은 고립된 치명적인 사건 또는 부적절한 저장 장소 선택 또는 준비로 인한 이산화탄소의 지속적이고

23) 장갑만, 앞의 글, 17쪽.

24) APEC, *Building capacity for CO_2 capture and storage in the apec region*, 2012, p.119.

느린 배출을 통해 발생할 수 있다. 이러한 형태의 누출은 지표면 또는 얕은 지하 표면에서 이산화탄소 농도가 높아져 그 지역에 사는 식물과 동물뿐만 아니라 인간의 건강과 안전에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 누출에 따른 현지 위험은 누출 위치와 시기에 따라 다르다.

많은 양의 이산화탄소가 갑자기 방출되는 분출이나 파이프 파열과 같은 갑작스럽고 뚜렷한 누출 사건은 즉각적인 혼란을 일으킬 수 있다. 반면에 느리지만 지속되는 누출은 장기간의 토양 생태계를 점진적으로 변화시킬 수 있다.

5.1.1 유출된 이산화탄소와 관련된 잠재적인 인체 및 건강 위험

육상 지중저장 장소에서 이산화탄소 누출과 관련된 가장 심각한 인체 건강 및 안전 위험은 밀폐된 구역에서의 CO_2의 농도 증가로 인한 상해 또는 사망이다. 일반적으로 CO_2 가스는 대기보다 빠르게 확산되지만 이산화탄소는 공기보다 밀도가 높기 때문에 지하실, 텐트, 스노우 팩, 땅속의 웅덩이와 같은 좁은 환경에 CO_2가 축적된다. 인간은 CO_2 농도가 10% 이상일 때 무의식 상태와 심지어 죽음으로 고통을 겪는다. CO_2는 또한 2% 이상의 농도에서 인간에게 유의한 호흡기 및 생리적 영향을 일으킨다. 하지만 1% 이하의 농도에서는 부작용이 관찰되지 않았다.

5.1.2 유출된 이산화탄소와 관련된 잠재적인 생태계 위험

CO_2 저장 및 지하 저장조로부터 누출될 수 있는 잠재적인 생태계 영향은 식물과 동물에 대한 지하 및 지상의 영향을 포함한다. 지하 환경에서 CO_2를 주입할 수 있는 깊은 저장 장소에서도 매우 특정한 조건에 의존하여 번성하는 미생물 군집이 존재한다. 이산화탄소 주입과 관련된 것과 같은 급격한 변화는 이러한 생태계를 변화시킬 것이다. 이는 결과적으로 생물다양성에도 영향을 주게 된다.[25] 더 얕은 지하 환경에서 CO_2의 농도를 높이면 곤충과 동물을 죽이거나 약화시킬 뿐만 아니라 식물 뿌리에 필요한 토양 산소를 대체하여 뿌리 호흡을 억제할 수 있다.

또 다른 잠재적인 생태계에 대한 영향은 토양의 산성화와 풍화작용의 촉진이다.

누출된 CO_2 가스가 물과 결합할 때 산을 형성함에 따라 토양을 산성화시킨다. 이

25) "생물다양성"이라 함은 육상생태계 및 수생생태계(해양생태계를 제외한다)와 이들의 복합생태계를 포함하는 모든 원천에서 발생한 생물체의 다양성을 말하며, 종내(種內)·종간(種間) 및 생태계의 다양성을 포함한다(생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률 제2조 제1호). 최근에 생물다양성의 중요성이 강조되고 있다.

산성화는 일부 야생 동물에 직접적으로 영향을 미칠 수 있지만 잠재적으로 더 심각한 간접적인 영향은 증가된 산성도의 결과로 광물의 풍화속도를 촉진하여 여기에서 유독성 금속의 배출을 증가시키는 것이다.

5.2 이산화탄소의 해상 누출

해상의 지질학적 저장 누출은 인간 거주지와의 거리 때문에 인간의 건강과 안전에 덜 중요하고 덜 위협적이다. 해상 저장소에서의 누출 확률은 해안가보다 해저상의 버려진 Well이 적기 때문에 감소될 것이다. 해양 안으로의 누출은 해안가처럼 많은 양의 이산화탄소 저장 효율을 감소시키지 않을 수도 있다. 그 이유는 해양 내 저장 공간에서 누출되는 일부 이산화탄소가 해상에서 다시 확산되기보다는 바다로 확산되기 때문이다. 해양으로 이산화탄소가 누출되면 해양지역에 영향을 미칠 수 있지만, 대양은 자연적으로 많은 양의 이산화탄소를 용해 및 흡수할 수 있으므로 해수로의 누출은 대기로 누출되는 것과 같은 위험을 초래하지 않는다.

하지만 CSS로부터의 CO_2 누출로 인한 해양바닥이 산성화됨에 따라 해양에 서식하는 박테리아에 대한 잠재적 영향을 준다는 연구가 있듯이[26] 근해의 지질 저장 장소로부터의 누출은 깊은 지질 구조에서 저서 퇴적물을 거쳐 해양 수역으로 이산화탄소가 이동함에 따라 저서 환경에 영향을 줄 수 있다. 바다 생태계에 서식하는 생명체의 경우에는 온도와 산성화, 염도 등에 특히 영향을 받기 때문에 기존의 특정 CO_2 농도에 의존하는 저서 지역의 식물과 동물은 위협을 받을 수 있다.

5.3 CH_4 누출

이산화탄소 주입으로 인해 저장소에 있는 CH_4가 저장소에서 다른 구조물로 이동하거나 대기로 이동할 수 있다. 이는 이산화탄소와 비교했을 때 20년 동안의 지구온난화지수[27]가 86인 CH_4로서 온실가스 감축효과를 반감시켜 지구온난화에 기여를 하는 부정적인 효과가 있다.

---

26) A.R. Borrero-Santiago, T.A. DelValls, I. Riba, “Carbon Capture and Storage (CCS): Risk assessment focused on marine bacteria”, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 131, September 2016, pp.157-163

27) 지구온난화지수(global warming potential)는 20년, 50년, 100년 등의 일정 기간 동안 1톤의 온실가스가 같은 양의 이산화탄소와 비교했을 때 흡수하여 가둘 수 있는 복사강제력을 말한다.

5.4 CO_2 주입으로 인한 미세한 지진(Seismicity)의 발생 유도 논란

고압인 이산화탄소를 지하 깊숙히 있는 다공성 암석에 강제로 주입하면 기공의 압력이 증가하여 분열을 일으킬 수 있고 단층이 부서지거나 이동을 유도할 수 있다. 이로 인해 미세 지진이 일어나고 잠재적으로 지진이 발생할 수 있으며 이로 인해 덮개암 및 Well의 손상과 건물 및 사회기반시설이 손상될 수 있다. 그리고 지반 붕괴 및 지진 유발 지진은 지진과 관련된 붕괴 및 지면 이동과 같은 붕괴로 인해 지역 생태계에 영향을 줄 수 있다. 또한 지진으로 인해 저장된 CO_2의 누출 경로가 생길 수 있다.[28)]

석유회수증진(Enhanced Oil Recovery)을 위한 CO_2 주입은 지진 위험을 간접적으로 예측할 수 있는 기반을 제공한다. 지금까지의 경험에 따르면, 오일의 회수율을 높이기 위해 주입된 연간 3,000만 톤 이상의 이산화탄소가 지진발생에 영향을 주지 않았기 때문에 육상지중저장이나 해상지중저장으로 인한 지진 위험은 매우 낮을 것으로 보고 있다.

그러나 이산화탄소의 주입이 아닌 다른 수분의 지하 주입과 관련되어서 1967년 Denver 지진과 1986년과 1987년 오하이오 지진을 포함하여 폐수의 깊은 지하 Well 주입으로 유도된 것으로 추정되는 몇 가지 예가 존재한다.

한편 다른 의견도 존재한다. 아직 대규모 CCS가 시도되고 있지 않은 가운데, 스탠포드 대학(Stanford University) 팀은 엄청난 양의 액체를 오랜 기간 땅속에 저장하는 CCS는 비현실적이고 “대륙 내부에서 흔히 찾아볼 수 있는 암석에 대량의 CO_2를 주입함으로써 지진이 일어날 가능성이 높다”는 주장도 있다.[29)]

일반적으로 문헌에서 산업계 유사체에서 지진 활동의 사례는 거의 없는 것으로 보고되고 있다. 하지만 많은 양의 염수, 액체 폐기물, 천연 가스 및 이산화탄소가 주입되어 지진 가능성이 있다는 주장과 한국에서도 포항지진이 지열발전을 위한 천공 때문이라는 주장이 제기되고 있다. 따라서 지진에 대한 연구는 계속되어야 하며 지진 가능성에 대한 의견에도 귀를 기울이고 모니터링을 통해 주의 깊게 감시되어야 한다.

---

28) Kay Damen, Andre Faaij and Wim Turkenburg, “Health, safety and environmental risks of underground CO_2 storage – overview of mechanisms and current knowledge”, *Climate Change*, Volume 74, Issue 1-3, Spriger Netherlands, 2006.1, p.300.

29) Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012.6.18.

5.5 식수의 오염 및 이산화탄소에 용해된 지하수의 화학적 변화

이산화탄소 저장장소에 CO_2를 주입함으로써 소금기 있는 염수가 음용수로 사용되는 식수 저장 공간으로 유출되어 식염수에 의해 오염될 수 있다. 그러면 음용수가 너무 짜게 되어 식수로 이용할 수 없다. 지하수 또는 얕은 지하 표면으로의 식염수의 침투는 지표수를 오염시키고 농업용으로 사용되는 토지의 일부를 사용할 수 없게 할 수 있다.

그리고 식염수가 지하수로 침투하거나 이산화탄소 주입으로 인한 지하층으로의 침투는 염수보다 신선하거나 직・간접적으로 의존하는 많은 동・식물에 영향을 주는 등 인간이 섭취하지 않더라도 지하수 수질의 변화는 생태계에 영향을 미칠 수 있다.

또 다른 변화는 대수층으로 CO_2가 유입되었을 경우 식수의 산성화이다. 우리가 일반적으로 알고 있듯이 물에 CO_2를 용해시키면 탄산화가 된다. 그러면 비소, 납, 수은과 같은 중금속이 침출될 수 있고, 황산염 또는 염화물의 증가 및 냄새, 색 또는 맛의 변화 등 간접적인 영향을 줄 수 있는 물의 산도가 증가한다.[30]

미국의 경우는 이산화탄소 지중저장을 허용하면서 식수를 보호할 수 있도록 규정이 마련되어 있다.

그 밖에 지면의 이동이 일어날 수 있다. CO_2 주입으로 인한 압력 변화로 지표면의 부양 또는 융기 가능성이 있고, 해안 외 이산화탄소 저장은 인근의 선박이나 시추 장비에 위험을 초래할 수 있다.

Ⅲ. CCS 기술에서 리스크 관리

1. 이산화탄소 스트림에 대한 리스크 관리

이산화탄소 스트림에 O_2, N_2 및 Ar이 높은 수준의 불순물로 포함되어 있을 때 저장효율성과 주입을 감소시킨다. 즉 가장 중요한 효과는 저장 용량의 감소이다.

불순물이 많은 이산화탄소 스트림은 CO_2 용해 효율과 암석 기공에서의 이산화탄소 포집을 감소시킬 것이므로 중장기적으로 이산화탄소 저장의 안전성을 감소시킬 가능성이 있다.

30) <http://shalegas-bg.eu/download/ccs/100106-Health-Risks-CCS.pdf>.

SOx와 NOx 농도가 200ppm 이내 인 이산화탄소 스트림의 경우, 암석의 용해에 미치는 영향은 미미하다.[31)]

일반적으로 이산화탄소 스트림에는 불순물이 포함되어 있다. 앞의 이산화탄소 스트림의 리스크에서 살펴본 바와 같이 수송관, Well에 부정적인 영향을 주며, 누출될 때 사람 및 생태계에 악영향을 미칠 수 있다. 이산화탄소 스트림의 농도를 100%로 가깝게 할수록 포집비용의 차이가 크게 날 것이다. 이산화탄소의 순도를 높게 할 경우 CCS 비용과 불순물로 인한 부작용을 비교 평가하여 이산화탄소 스트림에서의 CO_2 농도를 정하고 IEA에서 처럼 각 불순물의 농도를 ppm 또는 vol%로 규정하여 관리하는 방안이 입법적 조치에서 고려되어야 할 것이다.

EU CCS 지침 제12조에서는 CO_2 스트림 허용물질에 대해 규정하고 있다. 주물질인 CO_2와 발생원에서 포집 및 주입과정에서 발생한 물질 및 CO_2 이동을 감시하기 위해 첨가된 추적물질과 관련 부산물이다. 그러나 부산물 및 첨가물질이 무제한 허용되는 것이 아니다. 저장부지 및 관련 수송 인프라에 손상을 주지 아니할 수준 이하, 환경 및 인간의 건강에 중대한 위험을 끼치지 아니할 수준 이하, 관련 다른 기준에 저촉되지 아니할 수준 이하로 유지해야 한다.

그리고 무엇보다도 허용물질 외에 폐기물 혹은 다른 물질이 처리를 목적으로 첨가되어서는 안 된다.

2. 포집에 대한 리스크 관리

이산화탄소를 다량 배출하는 석탄화력발전소 등에서 포집시설을 이용하여 이산화탄소를 포집한 후 압축을 하게 된다. 압축 과정을 마치고 나면 3,500 psi로 압축된 CO_2가 고밀도 유체 같은 초임계 상태에 놓이게 된다. 이산화탄소 스트림을 포집하는 과정에서 가장 큰 리스크는 고압가스의 누출이나 유출로 인한 사람 및 생태계에 대한 영향이다.

이산화탄소 스트림을 제조할 때 고압가스 등으로 인한 위해(危害)를 방지하고 공공의 안전을 확보해야 한다.

---

31) IEAGHG, *effects of impurities on geological storage of CO_2*, 2011, P.13. available at <http://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2011-04.pdf>.

2.1 "고압가스보안법"(高壓ガス保安法)

일본의 경우 2020년까지 CCS기술을 상용화한다는 방침이다. 일부 해양지중저장이 이루어지고 있다. 그런데 일본은 CCS에 관한 단일법은 존재하지 않는다. 기존 개별법을 적용하거나 신기술인 CCS 기술을 적용하기 위해 법률의 개정을 통해 CCS 사업을 하고 있다. 포집과 관련된 법률은 "고압가스보안법"(高壓ガス保安法)이다.

이 법의 목적은 이산화탄소 스트림 등과 같은 고압가스에 의한 재해로부터 공공의 안전을 확보하고, 고압가스에 의한 재해를 방지하기 위해 고압가스의 제조・저장・판매・이동・취급・소비・용기의 제조를 규제하기 위함이다.

주요내용은 다음과 같다.

고압가스를 제조할 때는, 도도부현 지사의 허가를 받아야 한다(제5조).

제조시설의 허가를 신청할 때에는 제조의 목적, 처리시설의 처리능력, 기술상의 기준에 관한 사항, 처리시설의 성능, 제조 시설의 위치 및 부근의 상황을 나타내는 도면을 첨부하여 생산 개시일 20일 이전에 신청하여야 한다.

일반 고압가스 기술 기준에는 사업소의 경계선을 명시하고, 외부로부터 보기 쉬운 곳에 경과의표(経過意表)를 내걸 것, 시설거리에 대한 것, 방액제 마련, 방액제(防液堤) 내의 부대시설의 제한, 긴급통보설비, 기타 성령으로 정하는 것 등 47개 항목이 있다.

불활성가스에 해당하는 고압가스인 이산화탄소 스트림을 생산하기 위한 시설 또는 제1종[32] 저장소의 설치 공사를 완성했을 때는 제조를 위한 시설 또는 제1종 저장소를 도도부현 지사가 하는 준공검사를 받아야 한다(제20조).

제3장은 리스크 관리에 해당하는 보완(保安)에 관한 것이라 조문제목을 살펴보았다.

위해예방규정(제26조), 보안 교육(제27조), 보안 관리자, 보안 기술 관리자 및 보안 담당자(제27조의2), 보안 주임자 및 보안 기획 추진원(제27조의3), 판매 주임자 및 취급 선임자(제28조), 제조 보안 책임자 면허 및 판매 주임자 면허(제29조), 보안 관리자 등의

32) 일본에서는 이 법에 적용되는 사업장을 1종과 2종으로 구분하고 있다. 1종은 압축, 액화 기타 방법으로 처리할 수 있는 가스 용적(온도 0, 압력 0 파스칼의 상태로 환산한 용적을 말한다)이 하루에 100입방 미터(해당 가스가 정령으로 정하는 가스의 종류에 해당하는 것인 경우에는 해당 정령에서 정하는 가스의 종류마다 100입방 미터가 넘는 정령으로 정하는 값)이상인 설비를 사용하고 고압가스의 제조(용기에 충전하는 것도 포함)를 하고자 하는 자이고 제2종은 냉동에 가스를 압축하거나 액화하고 고압가스를 제조하는 설비로 하루의 냉동 능력이 20톤(해당 가스가 정령으로 정하는 가스의 종류에 해당하는 것인 경우에는 해당 정령에서 정하는 가스의 종류마다 20톤을 넘는 정령으로 정하는 값)이상의 것을 사용하고 고압가스의 제조를 하고자 하는 자이다(동법 제5조와 제9조 참조).

직무 등(제32조), 보안 관리자 등의 대리인(제33조), 보안 관리자 등의 해임 명령(제34조), 보안검사(제35), 정기자체 검사(제35조의2), 위험시의 조치 및 신고(제36조), 화기 등의 제한(제37조), 허가 취소 등(제38조), 긴급조치(제39조), 준공검사에 관한 인정(제39조의2), 준공검사에 관한 인정기준 등(제39조의3), 보안검사에 관한 인정(제39조의4), 보안검사에 관한 인정기준 등(제39조의5), 결격 조항(제39조의6), 협회 등 조사(제39조의7), 인정의 갱신(제39조의8), 변경 신고(제39조의9), 인정을 받은 자의 의무(제39조의10), 검사기록의 신고(제39조의11), 인정 취소 등(제39조의12). 그 중 일부의 조문을 살펴보면 다음과 같다.

제1종 제조자는 경제산업성령으로 정하는 사항에 대해서 기재한 위해 예방 규정을 정하고 경제산업성령으로 정하는 바에 따른 도도부현 지사에 신고해야 한다(제26조). 도도부현 지사는 공공의 안전유지 또는 재해 발생의 방지를 위하여 제1종 제조자는 그 종업원에 대한 보안교육 계획을 정해야 한다(제27조). 보안 관리자, 보안 기술 관리자 및 보안 담당자에 대한 구체적인 자격과 업무를 규정하였다(제27조의2, 제32조). 위험시의 조치 및 신고(제38조), 경제산업장관 또는 도도부현 지사는 공공의 안전 유지 또는 재해 발생의 방지 때문에 긴급의 필요가 있다고 인정될 때는 긴급조치로서 제조 시설의 전부 또는 일부의 사용을 일시 정지 할 것과 고압가스 제조를 금지하거나 제한하는 조치를 명할 수 있다(제39조). 이와 같은 규정 이외에도 동법은 총 86조로 구성되어 있다.

2.2 한국의 "고압가스 안전관리법"

한국은 이에 상응하는 "고압가스 안전관리법"이 있다. 이 법에서 고압가스를 제조하기 위해서는 시장・군수 또는 구청장의 허가를 받아야 한다(제4조).

안전관리규정이 있는데 사업자등은 그 사업의 개시(開始)나 저장소의 사용 전에 고압가스의 제조・저장・판매의 시설 또는 용기등의 제조시설의 안전유지에 관하여 안전관리규정을 정하고 이를 허가관청・신고관청 또는 등록관청에 제출하여야 한다(제11조). 시설・용기의 안전유지를 위해 제조시설을 시설기준과 기술기준에 맞도록 유지하여야 한다(제13조). 제조시설 등에 대하여 안전성 평가를 하고 안전성향상계획을 작성하여 허가관청에 제출하거나 사무소에 갖추어 두어야 한다(제13조의2). 사업자등과 특정고압가스 사용신고자는 그 시설 및 용기 등의 안전 확보와 위해 방지에 관한 직무를 수행하게

하기 위하여 사업 개시 전이나 특정고압가스의 사용 전에 안전관리자를 선임하여야 한다(제15조). 정기검사 및 수시검사(제16조의2). 노후시설에 대하여 정밀안전검진의 실시(제16조의3). 안전교육(제23조). 사고의 통보 등(제26조)이 있다.

이산화탄소 포집에 대해서는 한국의 제안된 CCS 단일법안[33]에서 안전관리를 위한 규정이 있다. 포집시설의 설계와 시공[34]포집시설의 완공검사 등,[35] 환경안전관리규정,[36] 환경안전관리자,[37] 환경안전검사[38]에 관한 규정을 두고 리스크로부터 안전성을 확보하려고 하였다. 그러면서 이산화탄소 스트림에 대해서는 "고압가스 안전관리법"에서 포집된 이산화탄소에까지 적용하는 것은 아니라는 점을 명확히 하고자 고 "고압가스 안전관리법"의 적용을 배제한다고 규정하고 있다.

비단 CCS에서 뿐만 아니라 안전에 관한 규정은 규제를 완화하기 보다는 보수적으로 가야 한다. 일본에서는 CO_2회수, 수송에서는 CCS에 특화된 법령은 아니지만 실시 형태에 따라서는 "고압가스보안법"(高壓ガス保安法), "노동안전위생법"(勞働安全衛生法), "독극물 및 극물단속법"(毒物及び劇物取締法) 등의 규제를 받고 있다.[39] 일본의 경우는 한국보다 안전에 관한 규정이 더 많음에도 CCS 기술에 대해 배제규정은 없다. 제안된 CCS 단일법안에서 포집에 대한 "고압가스 안전관리법"보다 특수한 사정을 반영하여 규정하는 것도 바람직하지만 고압가스이기에 포집과정에서 위해가 발생할 수 있다. 때문에 이산화탄소 스트림에 대해서 "고압가스 안전관리법"의 적용을 배제하지 말고 안전에 관한 규정은 적극적으로 적용을 하여 이산화탄소 스트림에 의한 안전을 확보해야 할 것이다.

---

33) 대중에게 공개는 되지 않았지만 환경부・한국환경산업기술원・이산화탄소 지중저장 환경관리연구단에서 이산화탄소 포집 및 저장을 위한 단일법안의 초안을 작성하여 수정 중에 있다.

34) 제13조(포집시설의 설계와 시공) 포집시설의 설치나 변경은 「환경기술 및 환경산업 지원법」 제15조에 따른 환경전문공사업자가 설계・시공하여야 한다.

35) 제14조(포집시설의 완공검사 등) ① 포집시설 설치의무자가 포집시설의 설치 또는 변경을 완료한 때에는 환경부장관의 완공검사를 받아야 한다.

36) 제17조(환경안전관리규정) ① 포집시설 설치의무자는 포집시설의 안전한 환경을 확보하기 위하여 이산화탄소 누출사고 발생 시의 긴급 대처 방안과 안전관리 체계 등 환경부령으로 정하는 사항을 포함한 환경안전관리규정을 정하여 이산화탄소 포집시설을 운영하기 전에 환경부장관의 승인을 받아야 한다.

37) 제18조(환경안전관리자) ① 포집시설 설치의무자는 이산화탄소 포집시설에 대한 환경안전관리를 위하여 환경안전관리자를 선임하여야 한다.

38) 제19조(환경안전검사) ① 포집시설 설치의무자는 포집시설에 대하여 환경부장관이 실시하는 정기검사와 수시검사를 받도록 하고 있다.

39) <http://www.rite.or.jp/results/today/pdf/RT2017_kikaku_j.pdf>.

3. 수송에 대한 리스크 관리

미국에서는 교통부(Department of Transportation, DOT)가 CO_2 파이프라인의 설계, 건설, 운영 및 유지보수 및 유출 대응계획으로 규제를 한다. 교통부는 파이프라인 및 Office of Pipeline Safety(PHSA)를 통해 파이프라인 규정을 관리한다. 이산화탄소는 교통부 규정에 따라 Class 2.2(불연성 가스) 위험물질로 분류되어 있지만, 기관은 원유, 가솔린 및 무수 암모니아와 같은 위험한 액체를 운반하는 파이프라인과 거의 동일한 안전요구사항을 이산화탄소 파이프라인에도 적용한다.[40]

한국의 제안된 CCS 단일 법안에서 리스크를 예방하기 위한 규정으로 이산화탄소 수송시설 설치승인 등,[41] 수송시설의 완공검사 등,[42] 수송시설 등의 운영 시의 안전조치 등[43]에 대해 규정하고 있다.

이산화탄소 스트림에는 관을 부식시킬 수 있는 불순물들이 있기 때문에 이에 맞는 파이프라인을 제작하여야 하고, 매설된 파이프라인이 손상되지 않도록 주의를 기울여야 하며, 매설 시 모니터링을 통해 누출여부를 체크하여야 한다.

한국의 제안된 CCS 단일 법안에서 공단은 수송시 일정이상 누출시 환경부장관에게 보고의무 부여, 환경부장관은 보고를 받았으면 조사 실시, 누출의 원인과 누출된 양 등에 관하여 위원회에 보고의무를 부여하고 있다.

---

40) <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/CO2-liquid-logistics-shipping-concept-llsc-safety-health-and-environment-she-report/3-2>.

41) 제25조(이산화탄소 수송시설 설치승인 등) ① 수송사업자가 이산화탄소 수송관 등 수송시설 중 환경부령(수송시설이 해양수산부장관의 소관사항일 경우에는 해양수산부령을 말한다. 이하 이 장에서 같다)으로 정하는 시설(이하 "수송로"라 한다)을 설치하려거나 그 설치를 변경하려면 환경부장관(수송시설이 해양에 설치되는 경우에는 해양수산부장관을 말한다. 이하 이 장에서 같다)의 승인을 받아야 한다.

42) 제27조(수송시설의 완공검사 등) ① 공단이 제25조제1항에 따라 승인을 받았거나 같은 항 단서에 따라 신고를 한 수송시설 설치에 관한 공사를 완공하였을 때에는 대통령령으로 정하는 바에 따라 누출 탐지 등에 관하여 환경부장관의 완공검사를 받아야 한다.

43) 제29조(수송시설 등의 운영 시의 안전조치 등) ① 수송시설 설치자는 수송시설을 운영하려는 때에는 이산화탄소를 안전하고 효율적으로 수송하기 위하여 수송시설에 관한 다음 각 호의 서류를 첨부하여 환경부장관의 승인을 받아야 한다. ③ 수송시설 설치자는 수송시설을 운영할 때에는 대통령령으로 정하는 바에 따라 저장된 이산화탄소가 누출되지 아니하도록 필요한 조치를 해야 한다. ⑤ 공단은 대통령령으로 정하는 바에 따라 이산화탄소 수송과정에서 수송관 등 수송시설에서의 누출에 대한 모니터링을 주기적으로 실시하고 그 결과를 환경부장관에게 제출하여야 한다. 이 경우 그 모니터링 결과, 이산화탄소가 대통령령으로 정하는 기준 이상으로 누출된 사실을 알게 된 때에는 지체 없이 환경부장관에게 보고하여야 한다. ⑥ 환경부장관은 제1항에 따라 공단으로부터 이산화탄소 누출 보고를 받은 때에는 대통령령으로 정하는 바에 따라 지체 없이 조사를 실시하고, 누출의 원인과 누출된 양 등에 관하여 위원회에 보고하여야 한다.

그러나 이 규정은 대량으로 유출이나 누출에 대비한 규정이 아니다. 대량의 유출이나 누출시 인명에 대한 위해가 발생할 수 있기 때문에 대응방안을 미리 확보해야 한다. 무엇보다도 중요한 것은 누출로 인해 영향을 받을 수 있는 주변지역에 대한 즉각적인 통보체계도 갖추어 인명피해를 막아야 한다.

"화학물질관리법" 제41조 제1항에 의하면 사고대비물질을 환경부령으로 정하는 수량 이상으로 취급하는 자는 위해관리계획서를 5년마다 작성하여 환경부장관에게 제출하여야 한다. 여기에는 화학사고 발생 시 비상연락체계와 화학사고 발생 시 유출・누출 시나리오 및 응급조치 계획이 포함되어 있다. 그리고 "지진・지진해일・화산의 관측 및 경보에 관한 법률" 제15조에 의하면 기상청장은 지진・지진해일・화산에 대한 관측 결과 및 특보 등을 국민에게 긴급하게 전달하여야 할 필요가 있는 경우 등 대통령령으로 정하는 요건에 해당하는 경우에는 재난방송, 문자발송, 주민대피방송을 요청할 수 있고, 재난방송의 주관기관은 특별한 사유가 없으면 그 요청에 따라야 한다.

이런 통보체계는 CCS 과정에서도 갖출 필요성이 있다. 그래서 재난문자발송이나 언론, 주민대피방송을 할 수 있도록 체계를 갖추어야 할 것이다.

4. 저장에 대한 리스크 관리

CCS 기술에서 이산화탄소 저장의 안전이 가장 중요하다. 그래서 CCS기술에서 저장부분에 리스크를 관리하기 위한 규정들이 많이 존재한다. CO_2 저장 장소를 신중하게 선택하고 적정한 관리를 실시하게 되면 저장한 CO_2의 대부분을 1,000년에 걸쳐 저장장소에 갇힐 가능성이 높다고 한다.[44]

현재까지 포집된 이산화탄소를 육상지중저장이나 해양지중저장을 한 사례가 많지 않기 때문에 저장에 대해 제기된 위해가 실행될 가능성은 많지 않은 것으로 평가하지만 그래도 위해를 예방하기 위해 사전배려의 원칙을 적용해야 한다.[45] 저장된 CO_2가 누출될 가능성에 대해 기존의 미국과 캐나다에 있는 약 470개의 천연가스 저장시설의 통계로 9개의 누출사고가 있었다고 한다. 이 중 5개는 Well구멍 보전(well bore integrity)과 관련이 있고, 3개는 덮개암 누수로 발생했으며, 다른 하나는 부지 선정이 좋지 않은 원인이었다.

---

44) IPCC, *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge University press, 2005 참조.

45) 임효숙, "탄소 포집 및 저장(CCS) 위험 관리 방안 수립 시 사전예방원칙 적용 필요성과 유용성", 환경정책연구 제13권 제1호 통권40호, 한국환경정책평가연구원, 2014 참조.

비록 누설률이 0.01% 미만이라고 하지만 저장소를 잘못 선정하고 Well의 통로를 제대로 봉함하지 못할 경우 저장된 이산화탄소가 누출이 될 수 있음을 시사한다. 그리고 지하수 이용을 위해 굴착을 하고 구멍을 마감하지 않은 것들이 많음에 따라 이 통로로 저장된 CO_2가 누출되지 않도록 관리가 필요하다. 또한 미국에서 다른 유체의 지하주입에 대한 산업 경험은 지하수 오염과 관련된 위험이 드물게 나타났기 때문에 리스크 통제가 필요하다.

4.1 식수오염을 예방하기 위한 리스크 관리

미국에서는 저장과 관련된 리스크 중 식수오염을 가장 우려하고 있다. 그래서 미국 환경보호청(EPA)에서는 CO_2 주입으로부터 식수오염을 예방하기 위하여 지하수 오염방지 및 누출제어를 위한 "안전음용수법"(Safe Drinking Water Act) 하의 지하주입규제(UIC) 프로그램 Class VI Rule을 CCS를 위해 새롭게 추가하였다. 그리고 지중저장 중에 이산화탄소가 누출되어 음용할 수 있는 지하수를 오염시킬 가능성이 있으면 주입을 빨리 중단하고 누출을 확인하여야 한다. 또한 24시간 내에 관계 기관에 보고하고 관계 기관이 미리 승인한 응급 및 복원계획을 실시해야 한다. 그리고 저장된 이산화탄소가 누출되는지 여부를 확인하기 위해 다양한 방법으로 모니터링을 하고 있었다.

구체적 프로그램은 아래와 같다.

지하주입규제 프로그램에서 인허가 신청시, 주입기간 동안, Well 폐쇄시 및 폐쇄 후 요구되는 사항은 다음과 같다.

4.1.1 허가 신청시

① 주입 Well 및 리뷰 영역(AoR[46])을 보여주는 지도
② 저장 사이트와 그 상부의 지질학적 구조・수리지질학적 특성 정보
③ 주입층・차폐층을 관통하는 AoR의 모든 갱정(坑井)의 표
④ AoR에 있는 모든 지하식수원, 배수 Well 등을 나타낸 지도 및 층서단면도(層序斷面図)
⑤ AoR의 모든 지하 식수원을 포함한 토양화학의 기본 데이터
⑥ 조업 데이터 방안(평균 주입 속도, 최대 주입 속도, 총 주입량, 평균 주입 압력, 최대 주입 압력, CO_2 소스, CO_2의 화학적 및 물리적 특성의 분석 결과)

46) 저장 CO_2에 의한 지하 식수원에 영향을 고려해야 할 영역.

⑦ 주입층・차폐 범위의 화학적・물리적 특성 분석을 위한 조업전 지층시험 프로그램안
⑧ 시뮬레이션 프로그램 제안
⑨ 주입 작업 단계 방안
⑩ Well 도면
⑪ 주입 Well 건설 단계
⑫ AoR 방안과 수정 계획안
⑬ 재정적 책임 요구 사항을 충족 증거
⑭ 시험 및 모니터링 계획안
⑮ 주입 Well 마감(plugging) 계획안
⑯ 주입 후 사이트 관리 방안, 사이트 폐쇄 계획안
⑰ 주입 후 사이트 관리 기간의 대안(기본 50년 이외를 희망하는 경우)
⑱ 응급조치와 복구 계획안
⑲ AoR에 위치한 주, 부족 및 지역의 연락처 목록
⑳ 장관이 요구하는 기타 정보

4.1.2 주입 기간 동안 요구 사항

① 검사 및 모니터링
② 평가 영역(AoR)의 재평가
③ 응급조치와 복구 계획의 업데이트
④ 보고 : 6개월마다 보고, 30일 이내에 보고, 24시간 이내에 보고, 30일 전에 서면 통지가 있다.
⑤ 기록 유지

4.1.3 Well 폐쇄시 및 폐쇄 후 요구 사항

① 주입 Well 마감(plugging)에 대한 구체적인 지시가 있다.
② 주입 후 사이트 관리 : 주입 완료 후 사이트를 모니터링하고 지하 식수원이 위험하지 않음을 입증(최소 50년 또는 장관이 인정하는 연수)해야 한다.
③ 사이트 폐쇄 : 적어도 120일 전에 사이트 폐쇄 의사를 장관에게 통지, 사이트 폐쇄 승인 후 모든 모니터링 Well(井)을 마감(plugging), 사이트 폐쇄 후 90일 이내에 사이트 폐쇄 완료를 장관에게 보고

4.2 모니터링

각국에서 CO_2 저장에 관한 법제도의 도입이 진행되고 있다. 법적 틀의 형식은 다양하지만, 저장소의 탐사허가, 저장소에 대한 허가, 저장소에 대한 폐쇄, 환경영향평가, 모티터링, 보고, 검증 등을 규정하고 있다.

Underground natural gas storage(UGS)의 저장에서 경험[47]을 얻었듯이 CCS 저장시 프로젝트의 누출 위험을 줄이려면 저장소를 광범위하게 특성화하고 Well을 잘 시공해야 한다. CO_2 주입시 과도한 과압은 피하고 CO_2의 주입과정과 주입 후 모니터링을 하며 그 지역에서 버려진 또는 폐기된 시추 구멍을 찾아 저장된 CO_2가 누출되지 않도록 잘 막아야 한다. 그러나 누수가 있는 경우에도 Well은 일반적으로 수리하거나 막을(plugged) 수 있다.[48]

CCS에서 CO_2의 누출을 감지하고, 미세지진 야기여부 등을 확인하기 위한 모니터링 기술은 CO_2-EOR 산업을 통해 어느 정도 확립되었다고 볼 수 있다.

CO_2의 저장단계에서 모니터링은 누출에 대한 정보, 지진여부에 대한 정보, 지하수 오염에 대한 정보 등을 제공하기 때문에 저장단계의 리스크를 관리하기 위해 필수적이다. 모니터링은 대기, 생물영향, 지하수 및 식수 오염 여부, 토양, 심부 관측정, 주입정으로 나누어 광범위하게 수행되고 있다.

특히 주입정 주변에 지하심부 및 지하수 측정장비, 레이저 모니터링, 에디공분산(Eddy Covariance) 등 다양한 모니터링 시설들을 CO_2 플룸(plume) 예상 이동방향에 설치하여 주입된 CO_2 누출 여부를 감시하고 있다. 특히 캐나다 알버타 소재 Shell Quest CCS site에서는 2015년 8월 23일 주입이 이루어졌는데 주입 부지의 각종 모니터링 자료는 통신타워(Communication Tower)를 통해 통합 저장소로 전송되며, 담당자들이 회사나 가정에서 직접 확인 가능한 시스템을 구축・운영하여 CO_2 거동 예측을 위한 최신정보를 즉시 사용할 수 있다.

모니터링은 육상지중저장과 해상지중저장 과정 또는 후에 CO_2 저장과 관련된 위험을 인식하고 효과적으로 대체하는 데 유용한 수단이다. 모니터링의 기능은 ① CO_2 plume의 발생의 관찰, ② 주입완료, 주입 속도, Well 및 형성 압력에 대한 효과적인 제어 구현,

47) 미국, 캐나다 및 유럽에서 운영되는 약 600개의 지하가스저장고 중 9개의 저수지는 누출을 경험했다. 5개의 경우는 Well(井)에 결함이 있었고{케이싱 부식(casing corrosion)과 부적절하게 마감한 well}, 3건은 덮개암(cap rock)의 실패, 나머지 하나는 너무 얕은 저장고를 선택한 잘못으로 인한 것이었다.

48) Kay Damen, Andre Faaij and Wim Turkenburg, *op.cit*., p.306.

③ CO_2 저장 성능과 관련된 광범위한 매개 변수에 대한 통찰력을 확보한다. 다양한 매개변수로는 저장소 덮개암(cap rock)의 성능, 가능한 이동 경로 파악{(즉, 분열(faults)과 결함(fractures)}, 용해도, 화학적 상호 작용, 지하수 및 토양 품질, 생태계에 미치는 영향, CO_2 주입에 의한 미소 지진 활동(저장소의 안정성을 기록), 저장되었던 저장소가 얼마나 효과적인지 평가 등이 있다.[49)]

그래서 CCS 기술을 이용해 CO_2를 저장할 때에는 모니터링이 꼭 필요하다. 일본, 호주, 미국 등 많은 나라들이 모니터링 제도를 도입하고 있고, 초창기의 모니터링 기술보다 현재는 많은 발전을 하여 저장된 CO_2의 거동 해석이나 CO_2 저류시의 거동 모니터링 기술의 개발, CO_2 장기 거동 예측 시뮬레이션 기술, 광섬유를 사용한 모니터링 기술 등 현재 주류 탄성파 탐사를 보완하는 저렴한 비용으로 정밀 모니터링 기술을 개발 중이다.[50)]

4.2.1 EU CCS 지침[51)]

지침 제13조에 모니터링에 대해 규정하고, 부속서 Ⅱ에는 폐쇄 후 모니터링 및 제13(2)조에 언급된 모니터링 계획업데이트 및 수립을 위한 기준이 있다. 모니링의 역할에 대해 CO_2와 formation water의 실제 행동과 모델행동과의 비교, 심각한 비정상 상태 탐지, CO_2 이동 탐지, CO_2 누수 탐지, 주변환경에 대한 중대한 부작용 탐지(인구, 주변생물권 이용자들을 위한 식수에 관한 것 포함), 시정치의 유효성 평가, 저장복합체의 안전성 평가이다.

모니터링 계획은 기술변화 등을 고려하여 5년마다 업데이트 후 관할당국의 재승인을 받아야 해야 한다. CCS 저장소에 대한 정기적인 모니터링 의무(운영 중 매년 1회 이상해야 하고 폐쇄 후 일정기간 동안 매년, 일정기간 경과 후에는 사후관리종료기간까지 5년 단위로 한다. 모니터링 빈도에 대해서는 하위법령에서 규정하도록 하였다. 모니터링 방법에 대해서는 하위법령에서 규정하되, 허가시에 법에서 정한 모니터링 방법에 따른 모니터링 계획을 제출하여 승인받도록 하고 있다.

외부의 전문 모니터링 및 검사기관에 의한 모니터링・검사에 대해서는 기관의 자격요건을 규정하였다.

---

49) <http://science.uwaterloo.ca/~mauriced/earth691-duss/CO_2_General CO_2 Sequestration materilas/CO_Risks with CO_2 2003.pdf>.

50) <http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/CO_2free/pdf/006_02_00.pdf>.

51) 홍수열, EU 지침 개요와 한국에의 시사점 PPT 발표자료, 2014.9.19, 25쪽.

4.2.2 일본의 모니터링

일본은 2007년 3월 9일에 "이산화탄소를 해저에 지중저장하기 위하여 해양오염 등 및 해상재해의 방지에 관한 법률"(海洋汚染等及び海上災害の防止に關する法律)을 개정하였고, 이 법률에서 사업계획서에 이산화탄소 유출시 복구방안, 환경영향평가를 포함하도록 하고 있다. CCS 실시 허가로서 리스크를 방지하기 위해 CO_2의 저장 지점을 적절하게 선택할 것, 저장되는 CO_2에 의한 잠재적 영향평가를 제대로 실시하는 제도적 조치를 취할 것, 저장소에서 CO_2 유출 및 해양환경의 변화 정도, 지층의 압력이나 온도의 변화 등 지층의 상황과 CO_2의 위치 등을 모니터링할 것,[52] 해양환경 생태계에 미치는 영향의 우려가 있을 경우에는 적절한 조치를 취할 것, 허가는 모니터링 결과에 근거하여 정기적으로(최대 5년 정도) 검토하고 업데이트 할 것 등을 의무로 규정하였다.[53]

4.3 리스크 평가

리스크 평가는 CO_2 저장 장소 선정, 현장 특성 규명, 저장 시스템 설계, 모니터링, 그리고 필요한 경우 개선을 위해 필수적인 요소이어야 한다. 리스크 평가는 아직 새로운 분야이며, 이러한 위험에 대한 우리의 이해가 향상되고 사이트별로 리스크 평가를 위한 방법론이 개발되는 것이 중요하다. 기존 자연계의 경험과 CO_2가 아닌 다른 유체를 지중에 저장한 경험이 CO_2 주입으로 인한 잠재적인 위해에 대한 가치 있는 통찰력을 제공해 준다. 그렇지만 자연적인 저장과 인공적인 저장은 다르고, 액체와 액체 및 기체 2가지 특성을 모두 갖고 있는 이산화탄소 스트림과는 다르기에 정확한 리스크 평가를 위해서는 실제 이산화탄소 저장 프로젝트에 대한 경험과 분석이 필요하다.[54]

외국에서 대규모의 CO_2저장이 진행되고 있고, 모니터링, 검증 및 누출 교정을 위한 새로운 방법론과 기술이 개발됨에 따라 국제적인 협력이 필요하다. 새로 개발된 기술을 습득함으로써 저렴한 비용으로 리스크를 더 잘 관리할 수 있다.

---

52) <http://www.japanccs.com/?faq_category=general>.

53) <http://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou_chousa/backnumber/2007pdf/20070420093.pdf>.

54) J. Stephens & D. Keith, *APEC Capacity Building in the APEC Region*, Phase II Revised and updated by CO2CRC; <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/building-capacity-co2-capture-and-storage-apec-region-training-manualpolicy-makers-and-practitioners/module-8-health-safety-and-environmental-risks-ccs-projects>.

4.4 누출 및 사고 발생 시 응급조치[55)]

4.4.1 EU : 누출 또는 중대한 이상 발생 시 조치

EU CCS 지침(Directive 2009/31/EC)에서는 회원국은 누출(leakages)이나 중대한 이상(significant irregularity)[56)]이 있는 경우에 즉시 관할 당국에 통보하고 인체 건강 보호와 관련된 조치를 포함하여 필요한 시정조치(corrective measures)[57)]를 취해야 한다. 누출의 위험이 있음을 의미하는 누출 및 중대한 이상이 있는 경우 운영자는 지침 2003/87/EC에 따라 관할 당국에 통보해야 한다(제16조 제1항). 그러면 권한 있는 당국은 언제든지 운영자가 인간의 건강 보호와 관련된 조치뿐만 아니라 필요한 시정조치를 취할 것을 요구할 수 있다. 이는 시정조치계획에 제시된 것과 다를 수도 있다(제3항). 운영자가 필요한 시정조치를 취하지 못하면 주무 당국은 필요한 시정조치 자체를 취해야 한다(제4항). 관할 당국은 자신이 직접 시정조치를 강구할 수 있으며 이에 드는 비용은 사업자로부터 회수할 수 있다(제5항).

4.4.2 미국 : 응급조치 및 비상대응(Emergency and remedial response)

"안전음용수법"(Safe Drinking Water Act) 하의 지하주입규제(UIC) 프로그램 Class VI Rule 조항 146.94에서 규정하고 있다.

허가 신청의 일환으로, 소유자 또는 운영자는 소유자 또는 운영자에게 위험을 초래할 수 있는 주입 또는 형성 유체의 이동을 다루기 위해 취해야하는 조치를 설명하는 응급 및 비상대응계획을 관계 기관에게 제공해야 한다. 그리고 건설, 운전, 폐쇄, 폐쇄 이후 기간동안 승인된 계획을 유지해야 한다(a). 만약 소유자 또는 운영자는 주입된 이산화탄소 스트림과 관련된 압력이 안전한 음용수에 위험을 야기할 수 있다는 증거를 얻은 경우에는 다음을 수행한다(b). ① 즉시 주입을 중단한다, ② 누출의 특징과 특성을 파악하기 위해 합리적으로 필요한 모든 조치를 취한다. ③ 관계 기관에게 24시간 이내에 보고한다. ④ 관계 기관이 승인한 응급조치 및 비상조치 계획을 실행한다. 더불어 소유자나

55) 地球環境産業技術研究機構, 二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書, 平成21年3月, 415-416面.

56) '중대한 이상'은 환경 또는 인간 건강에 대한 누출 또는 위험을 의미하는 주입 또는 저장 복합시설 (storage complex)의 조건에서 발생하는 모든 이상을 말하며 '누출'은 저장 단지에서 이산화탄소가 배출되는 것을 의미한다. 여기서 '저장 복합시설'은 전체 저장소 무결성 및 보안에 영향을 미칠 수 있는 저장소 사이트 및 주변 지질학적 영역을 의미한다.

57) '시정조치'는 저장소로부터 CO_2가 유출되는 것을 방지하거나 중단하기 위해 중대한 이상 행위를 시정하거나 누출을 막기 위해 취하는 조치를 의미한다.

운영자는 본 조의(a)호에 따라 개발된 응급조치 및 비상조치 계획을 정기적으로 검토해야 한다. 소유자나 운영자가 5년마다 한 번씩만 비상대응계획을 검토해서는 안 된다(d). 검토해서 변경된 응급조치 및 비상조치 계획은 다시 제출하고 수정이 필요하지 않으면 증명을 해야 한다(d).

4.4.3 호주 : 중대한 상황을 다루는 관련 연방장관의 권한

"연안 석유법 개정안(온실가스저장) 2008"(Offshore Petroleum Amendment (Greenhouse Gas Storage) Bill 2008)의 Section249CZA에는 중대한 상황 시 관할 연방장관이 가진 권한이 있다.

온실가스 주입 허가서에 명시된 온실가스 저장과 관련하여 중대한 상황이 존재한다고 관할 연방장관이 인정하며 관할 연방장관은 면허소지자에게 서면으로 다음과 같이 지시할 수 있다.

① 주입 작업이 장관의 지시에 따르고 있다는 사실을 확인하기 위한 모든 합리적인 절차를 취할 것, ② 저장 작업이 장관의 지시에 따르고 있다는 사실을 확인하기 위한 모든 합리적인 절차를 취할 것, ③ 지침에 명시된 사이트에서 주입을 중단 또는 일시 중단하기, ④ 온실가스 물질 주입을 위한 운영을 중단하거나 일시 중단하기 등이 있다. 여기서 중대한 이상이란, 다음과 같다.

- 주입한 온실가스가 누출되었거나 누출중인 경우
- 온실가스를 주입하는 장소가, 저장에 적합하지 않는 지점인 경우
- 주입하는 온실가스가 누출될 위험이 있는 경우
- 주입하는 온실가스가 예상대로의 상태가 아닐 경우

한국의 제안된 CCS 단일법안에서 지중저장과 관련된 조문이 가장 많다. 조문의 제목은 다음과 같다. 이산화탄소 저장사업자, 저장시설의 확보 및 저장소의 입지결정, 이산화탄소 저장소 설치승인 등, 임시저장소의 설치등에 관한 승인, 저장소의 운영계획 등의 승인 등, 저장소 관련 정보의 공개 등, 저장소 운영 시의 환경안전조치 등,[58] 이산화탄소

58) (저장소 운영 시의 환경안전조치 등) ① 공단은 저장소를 운영할 때에는 대통령령으로 정하는 바에 따라 저장된 이산화탄소가 누출되지 아니하도록 필요한 조치를 해야 한다. ② 공단은 제34조 제1항에 따른 운영계획서와 가이드라인을 준수해야 한다.

저장 시의 누출 통보와 위원회 보고 등,[59] 정기검사와 수시검사, 이산화탄소 누출에 따른 배출권 구매와 제출, 저장소의 폐쇄와 사후관리, 이산화탄소 누출 등에 대한 모니터링[60]이다. 그러나 이 법안에서는 누출 및 사고 발생 시 응급조치에 관한 규정을 찾아보기 어렵다.

위에서 살펴본 바와 같이 누출 및 사고 발생 시 응급조치에 관한 사항이 EU CCS 지침(Directive 2009/31/EC)이나 호주의 "연안 석유법 개정안(온실가스저장) 2008" (Offshore Petroleum Amendment (Greenhouse Gas Storage) Bill 2008)에서 규정하고 있다.

이 규정은 누출 및 사고가 발생할 때 더 이상 사람과 생태계에 위해가 발생하지 않도록 신속한 조치를 취하는 동시에 많은 비용을 들여 저장한 온실가스 감축 노력을 헛되이 하지 않도록 하는 것이다. 그리고 미국의 응급조치 및 비상조치 계획을 정기적으로 검토해서 업데이트 하는 규정은 발전된 과학기술을 반영하여 좀 더 신속하고 정확한 방법으로 리스크를 더 잘 통제할 수 있는 시스템으로 평가할 수 있다. 법률을 제정할 때에는 누출 및 사고 발생 시 응급조치에 관한 것도 규정하여 누출로 인한 리스크를 관리하여야 할 것이다.

4.5 지진에 대한 리스크 관리

CO_2 저장으로 인한 지진의 위험은 분사 압력을 제어함으로써 최소화 할 수 있다고 한다. 최대 사출 압력을 평가하고 재가동 가능성이 높은 결함을 식별하기 위해서는 현장 응력 및 공극 유체 압력을 결정해야 한다. 지진의 문제는 이산화탄소가 구조적으로 활동적인 지역의 저장소로 주입될 때 더욱 심각할 수 있다.[61]

따라서 지진에 대한 리스크를 관리하기 위해서는 저장소에 주입전에 저장소에 대한 충분한 조사를 하고 다양한 측정치를 갖고 주입압력을 조절할 필요가 있다.

---

59) (이산화탄소 저장 시의 누출 통보와 위원회 보고 등) ① 공단은 대통령령으로 정하는 바에 따라 이산화탄소 저장 단계에서의 누출에 대한 모니터링을 주기적으로 실시하고, 그 결과를 환경부장관에게 제출하여야 한다. ② 공단은 제1항에 따른 모니터링 결과, 이산화탄소가 대통령령으로 정하는 기준 이상으로 누출된 사실을 알게 된 때에는 지체 없이 환경부장관 또는 해양수산부장관에게 보고하여야 한다. 제43조에 따른 이산화탄소 누출 등에 대한 모니터링의 경우에도 같다.

60) (이산화탄소 누출 등에 대한 모니터링) ① 공단은 이산화탄소를 저장소에 저장한 경우나 제42조 제2항에 따라 환경부장관이 저장소의 폐쇄를 승인한 경우에는 대통령령으로 정하는 바에 따라 이산화탄소의 누출 등에 대한 모니터링을 실시하고 그 결과를 환경부장관에게 제출하여야 한다.

61) KAY DAMEN, ANDRE FAAIJ and WIM TURKENBURG, *op.cit.*, p.300.

4.6 시추공 관리를 통한 리스크 관리

"지하수법"은 지하수에 영향을 미치는 굴착행위에 대해서는 국토교통부령으로 정하는 바에 따라 그 내용을 미리 시장・군수・구청장에게 신고하여야 한다(제9조의4 제1항). 그러나 지하수에 영향을 미치는 굴착행위에 대해 모두 신고를 하는 것이 아니라 동법 제5조에 따른 지하수의 조사, 동법 제7조 제2항에 따른 지하수 영향조사, 동법 제16조의2 제1항에 따른 수질측정, 그 밖에 지하수의 수량 또는 수질에 영향을 미치는 행위로서 대통령령으로 정하는 행위에 대해서만 신고를 하면 된다.[62]

육상의 지중에 저장할 때 버려진 Well, 또는 시추 후 원상복구를 하지 않아 지하수의 오염을 유발하는 시추공들이 무수히 많을 것으로 전문가들은 보고 있다. 이렇게 관리되지 않은 시추공들은 CO_2를 저장할 때 잠재적인 누출경로가 될 수 있다.

저장지가 될 수 있는 잠정적인 토지에 대해서 시추 후 원상복구 되지 않은 시추공에 대한 철저한 조사가 이루어져야 하며, 저장된 CO_2의 누출경로가 되지 않도록 주변지역을 관리해야 할 것이다.

Ⅳ. 맺는 말

EU, 미국, 호주, 캐나다, 일본 등의 나라들은 CCS 기술을 차세대 핵심기술로 보고 기술개발 및 법령정비를 마쳤다.

앞으로 CCS는 온실가스를 감축하기 위한 핵심기술이 될 전망이고 화력발전소를 비롯하여 교통 분야에서도 온실가스를 감축하는데 기여할 것으로 예측하고 있다.[63]

그래서 선도적으로 CCS를 도입한 국가들은 리스크를 관리하기 위한 규정들을 갖고 있다. 리스크 관리는 의사 결정자가 건강 및 안전에 대한 위험을 포함한 모든 유형의 위험을 식별, 분석, 평가 및 통제하는 데 도움을 주는 포괄적인 의사결정 과정을 제공한다. 리스크 관리의 목표는 중요한 위험을 식별하고 이러한 위험을 최소화하기 위해 적절한 조치를 취하는 것이다.[64] 그러나 CCS는 아직 초기 단계라서 리스크를 관리하기 위한

62) 이순자, "이산화탄소 포집 및 처리를 위한 도입법안에 관한 입법평가", 입법평가연구 제9호, 한국법제연구원, 2015.10, 411-412쪽.

63) 環境省, ＣＣＳの円滑な導入手法の検討, 2015 참조.

지식과 데이터가 부족한 상황이다. 그럼에도 불구하고 리스크는 관리되어야 하기 때문에 CCS 기술을 도입한 EU, 미국, 호주, 일본 등에서는 리스크 관리를 규정에 반영을 하였다.

한국도 CCS를 도입하기 위한 연구가 진행되고 있고, CCS 단일 법률안을 제정하려고 한다. 그러나 다른 나라의 규정에서 살펴본 바와 같이 CCS 단일 법안에 리스크를 규제하거나 관리하기 위한 규정들이 있지만 미흡한 점도 많이 발견된다.

CCS 선도국들에 대한 많은 연구와 교류로 리스크 규제와 관리에 대한 시사점을 발견해야 한다. 누출을 제어하는 프로세스를 이해하려면 많은 현장 및 실험 데이터가 필요하므로 더 많은 연구가 이루어져야 한다. 게다가 리스크는 많은 다양성이 존재하는 저장소 및 기타 지역 특유의 조건(덮개암, 층서 층의 과부하, 육상/해양, 수자원의 존재, 생태계)에 크게 의존한다. 리스크를 낮추기 위해서는 저장소를 비롯한 현장 고유 특성은 다양한 파일럿 및 실증 저장 프로젝트가 수행되고 모니터링 및 평가를 해야 한다.[65]

앞으로 리스크를 규제하거나 관리하기 방법들이 개발되고 많은 경험들이 축적되면서, 규정들이 정비된다면 온실가스 저장으로 인한 리스크가 발생하지 않으면서 온실가스 감축 의무도 이행할 수 있다.

64) APEC, *Building capacity for co_2 capture and storage in the apec region*, 2012, p.127.

65) KAY DAMEN, ANDRE FAAIJ and WIM TURKENBURG, *op.cit.*, p.314.

참고문헌

1. 단행본

국립환경과학원, CCS 환경관리를 위한 국제교류 자료집, 2013.

地球環境産業技術研究機構, 二酸化炭素地中貯留技術研究開發 成果報告書, 2009.3.

環境省, CCSの円滑な導入手法の檢討, 2015.

APEC, *Building capacity for co_2 capture and storage in the apec region*, 2012.

Elizabeth J. Wilson and David Gerard ed, *Carbon Capture and Sequestration Integrating Technology*, Monitoring and Regulation, Blackwell Publishing, 2007.

IEAGHG, *Effects of Impurities on Geological Storage of Co_2,* 2011.

IPCC, *Carbon Dioxide Capture and Storage*, 2005.

IPCC, IPCC *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge University press, 2005.

IPCC, Reported failure modes for CO_2 pipelines.

2. 학술지

이순자, "이산화탄소 포집과 저장에 관한 법적 쟁점 – 포집을 중심으로", 환경법연구 제37권 제1호, 한국환경법학회, 2015.4, 249-289쪽.

_____, "이산화탄소 포집 및 처리를 위한 도입법안에 관한 입법평가", 입법평가연구 제9호, 한국법제연구원, 2015.10, 381-422쪽.

임효숙, "탄소 포집 및 저장(CCS) 위험 관리 방안 수립 시 사전예방원칙 적용 필요성과 유용성", 환경정책연구 제13권 제1호 통권40호, 한국환경정책평가연구원, 2014, 3-23쪽.

장갑만, "이산화탄소 포집・수송・저장(CCS)의 위험성 및 제도 동향", 가스안전 통권 제265호, 한국가스안전공사 고객홍보실 홍보부, 2013.7, 2-19쪽.

장은선 외 4인, "이산화탄소 지중저장의 환경 관리를 위한 미국과 유럽연합의 법・제도 현황과 시사점", 지하수토양환경 제17권 제6호, 한국지하수토양환경학회, 2012, 9-22쪽.

A.R. Borrero-Santiago, T.A. DelValls, I. Riba, “Carbon Capture and Storage (CCS): Risk assessment focused on marine bacteria”, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 131, September 2016, pp.157-163.

Kay Damen, Andre Faaij and Wim Turkenburg, “Health, safety and environmental risks of underground CO2 storage − overview of mechanisms and current knowledge”, Climate Change,, Volume 74, Issue 1-3, 2006.1, pp.289-318.

[Abstract]

A Legal Study to Manage Risks at the Carbon Capture and Storage

Lee, Soon-Ja*

The world must reduce greenhouse gases in various ways as global warming progresses. One of them is to capture and store carbon dioxide. And now is the time to try to do it.

Korea has many sources such as coal-fired thermal power plants, steel industry, and cement industry. Therefore, new technology of capturing and storing carbon dioxide is needed to fulfill the internationally promised reduction obligation.

The above CCS technology consists of three stages: capture, transport, and storage. It is a high concentration of CO_2 compressed to 95% or more at the stage of collection, transportation, and storage, it has risk to result in explosion and leakage in the entire process. Of particular concern is the leakage of CO_2 stored in storage. The loss of the greenhouse gas reduction promised to reduce the global scale and the possibility of potable water pollution caused by groundwater pollution and exposure to nearby residents are concerned.

As with many technologies, there is also risk to CCS technology. Beacuse it is a new technology and it can be accompanied by risk and hazard. Therefore, legal and institutional arrangements such as guidelines and regulations for environmental management are necessary for commercialization. And legal systems and guidelines are needed to control them.

In order to develop legal systems and guidelines for Korea, we have examined the laws and regulations of the US, Australia, and Japan, which are already leading CCS technology.

By analyzing the legislation governing the CCS risk of leading CCS countries, we analyzed what regulations are needed in the future CCS legislation.

[Key Words] CO_2 capture and storage, risk, greenhouse gas, underground storage, risk communication

* Research Professor, Legal Research Institute of Korea University