

A Study on The Assessment of Treatment Technologies for Efficient Remediation of Radioactively-Contaminated Soil

방사성 오염 토양의 효율적 복원을 위한 처리기술 평가 연구

Jong Soon Song, Seung Su Shin, and Sun Il Kim*

Chosun University, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju, Republic of Korea

송중순, 신승수, 김선일*

조선대학교, 광주광역시 동구 필문대로 309번지

(Received March 4, 2016 / Revised March 31, 2016 / Approved April 18, 2016)

Soil can be contaminated by radioactive materials due to nuclide leakage following unexpected situations during the de-commissioning of a nuclear power plant. Soil decontamination is necessary if contaminated land is to be reused for housing or industry. The present study classifies various soil remediation technologies into biological, physics/chemical and thermal treatment and analyzes their principles and treatment materials. Among these methods, this study selects technologies and categorizes the economics, applicability and technical characteristics of each technology into three levels of high, medium and low by weighting the various factors. Based on this analysis, the most applicable soil decontamination technology was identified.

Keywords: Soil remediation, Cesium, Soil washing, Washing-electrokinetic

*Corresponding Author.

Sun Il Kim, Chosun University, E-mail: kingdom17c@naver.com, Tel: +82-62-230-7744

ORCID

Jong Soon Song <http://orcid.org/0000-0001-9162-7631>

Seung Su Shin <http://orcid.org/0000-0001-5349-6044>

Sun Il Kim <http://orcid.org/0000-0002-8742-7925>

발전소 해체 및 핵종누출 시 원자력 관련 시설 주변의 방사성오염 토양은 주민의 거주 및 농업용지로의 재사용을 위해 토양 제염이 불가피하다. 본 논문에서는 기존 토양복원 기술을 생물학적, 물리/화학적, 열적 처리로 분류하고 각 기술의 원리 및 처리 물질을 분석 및 조사를 통해 방사성물질로 오염된 토양에 적용 가능한 기술을 선정하였다. 선정된 기술을 평가하기 위해 경제성, 적용성, 기술성을 고려하였다. 또한 High, Medium, Low로 가중치를 적용하여 평가하였다. 이에 따른 결과값을 바탕으로 방사성물질로 오염된 토양에 가장 적합한 토양제염 방법을 제시하고자 한다.

중심단어: 토양복원, 토양제염, 세습, 토양세척, 복합동전기

1. 서론

원전해체 및 예기치 못한 상황에 따른 핵종누출로 인하여 토양이 방사성물질로 오염될 경우 이에 따른 일반인들의 거주 및 산업용지로의 재활용을 위해 토양제염은 불가피하다. 방사성물질로 토양이 오염된 최근 국외 사례로는 2011년 3월 발생한 후쿠시마 제1 원자력 발전소 사고가 있다. 사고로 인한 세슘(Cs)을 포함한 원전 주변의 토양은 정확한 산정은 어려우나 약 12억 이상이 될 것으로 추정하고 있으며 학교 운동장, 가옥지붕, 도로표면 주거지역 산림 등에서 수거한 토양은 적절한 토양복원 기술을 적용하지 못하고 Ton-Bag에 쌓아 공터에 임시로 보관중인 상태이다. 또한 국내 대량의 방사성오염토양 발생 사례로는 서울 공릉동의 TRIGA Mark-II, III 및 대전 유성구의 우라늄 변환시설 해체로 방사성물질로 오염된 토양이 발생하였다. 해체 시 발생한 오염 토양을 제염하기 위해 퇴적침출(Heap-Leaching), 동전기세정(Electrokinetic-Flushing) 등의 제염기술 연구를 실시하였으나 현장투입 및 대량의 토양을 처리 하기하기에는 기술의 완성도가 미흡한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 토양복원 기술 중 방사성물질로 오염된 토양에 적용 가능한 기술을 선정하기 위한 선행 연구로서 다양한 토양복원 기술을 생물학, 물리/화학, 열적 처리로 구분하고 이들의 원리 및 처리물질에 대해서 분석하였다. 이들 방법 중 방사성물질로 오염된 토양에 적용 가능한 기술을 선정하고 각 기술 별 경제성, 적용성, 기술성을 High, Medium, Low로 분류 후 가중치를 적용하여 나온 결과 값을 통해 추후 고리1호기 해체와 방사능 물질로 오염된 토양에 적용 가능한 토양복원 기술을 제시하고자 하였다.

2. 오염토양 복원기술의 처리물질 및 특성 분석

2.1 생물학적 처리방법

2.1.1 생물학적 분해법(Biodegradation)

지중처리(In-situ)기술로서 지중에 관정을 삽입하여 산소 및 영양물질 등을 공급하여 처리하는 기술이다. 장점으로 는 이송 등에 비용이 소요되지 않고 오염 된 토양 및 지하수를 동시에 처리할 수 있으며, 생분해 과정에서 무독한 부산물을 생성시키기 때문에 후처리 시설이 필요치 않아 비교적 경제적이다. 단점으로는 물리/화학적 기술에 비하여 처리기간이 길며 긴급히 오염된 지역을 정화해야 하는 경우에는 적용이 용이하지 않다.

처리물질로는 미생물에 의하여 분해가 가능한 할로젠 및 비할로젠VOCs, 유류 등이 있으며 클로로포름, 살충제, 금속과 같은 무기물질 및 방사성 물질은 용이하지 않다[1].

2.1.2 토양 경작법(Land farming)

오염토양을 굴착하여 지표면에 깔아 놓고 정기적으로 뒤집어주고 공기를 공급하여 미생물에 생분해 조건을 제공함으로써 토양에 잔류되어 있는 오염물질을 제거하는 지중처리(In-situ)기술이다. 장점으로는 상대적으로 설치가 용이하며 처리기간이 비교적 짧다. 단점으로는 처리부지가 확보되지 않을 경우에는 토양 경작법을 적용하기 어려울 뿐만 아니라 오염토양의 굴착, 하우스 등의 부대시설 설치, 이송 비용 등으로 오염토양 처리비용이 증가된다.

처리물질로는 가솔린과 같은 휘발성이 강한 물질 및 살충제 등이 있다.

2.1.3 식물재배 정화법(Phytoremediation)

오염지역에 정화에 필요한 식물들을 식재 후 뿌리의 흡수를 통한 오염물질의 추출, 안정화 등의 원리를 이용하는 방법이다. 장점으로는 기타 물리/화학적 기술에 비해 경제적이며 단점으로는 얇은 토양, 지하수에 한정적으로 적용 가능하고 고농도 유기물질인 경우 독성으로 인해 처리의 한계가 있으며, 기타 물리·화학적 처리공정에 비해 처리기간이 오래 소요된다.

처리물질로는 유류 및 암모늄, 인과 같은 중금속으로 오염된 지역의 정화에 대체적으로 적용이 가능하며 또한 방사성물질에 처리에 적용하려는 연구가 진행 중이다.

2.1.4 자연저감법(Natural Attenuation)

희석, 휘발, 생분해, 흡착 및 지중물질과의 화학반응에 의하여 오염물질 농도가 허용 가능한 수준으로 저감 되도록 유도하는 방법이다. 장점으로는 단일공정뿐만 아니라 다른 기술과 함께 후속공정으로서 활용가치가 높다. 단점으로는 지속적인 모니터링의 필요성과 긴급히 오염된 지역을 정화해야 하는 경우에는 적용이 용이하지 않다.

처리물질로는 유류로 오염된 지역의 정화에 매우 탁월한 효과를 나타낸다. 하지만 살충제, 무기물질, 방사성물질 및 화약류에는 본 기술의 적용이 용이하지 않다.

2.1.5 생물학적 통풍법(Bioventing)

기체상으로 존재하는 휘발성 유기물질을 추출해내는 동시에 기존의 토착 미생물에 산소 및 영양분을 공급하여 지중 생분해능을 극대화하는데 중점을 둔 기술이다. 장점으로는 타 기술에 비해 경제성 및 현장적용에 우수한 점이 있으며 단점으로는 지반이 비균질적이거나 깊이가 깊은 토양오염 시 적용이 용이하지 않다.

처리물질로는 휘발류, 항공유, 등유, 경유 등의 석유계 물질이며, 특히 경유나 등유와 같은 중간 정도의 분자량을 갖는 물질로 오염된 토양을 정화하는데 매우 효과적이다.

2.2 물리/화학적 처리방법

2.2.1 토양세척법(Soil Washing)

세척제를 사용하여 토양입자에 결합되어 있는 오염물질의 표면장력을 약화시켜 분리시키는 지상처리(Ex-situ)기술이다.

장점으로는 생물학적 분해가 어려운 유해화학물질이나 중금속을 빠른 시간 안에 처리할 수 있다. 단점으로는 굴착, 이송, 토양세척장치의 제작비, 세척제 비용 등이 높게 소요되어 타 공정에 비해 경제성이 떨어진다.

처리물질로는 유기오염물질, 유류, 중금속 등을 처리할 수 있으며 방사성물질로 오염된 토양도 질산(Nitric -Acid)등의 산성 세척액을 이용하여 토양과 방사성물질을 분리 후 흡착제를 이용하여 방사성 물질의 선택적 분리를 할 수 있다.

2.2.2 토양증기추출법(Soil Vapor Extraction)

진공추출이라고도 하며, 불포화 대수층위에 가스 추출정을 설치하여 토양을 진공상태로 만들어 증으로서 토양으로부터 휘발성 및 준휘발성 유기화합 물질을 제거하는 지중처리(In-situ) 기술이다. 장점으로는 장치의 설치가 용이하며, 다른 미생물 공정에 비해 소요시간이 짧다. 단점으로는 중금속 및 휘발성이 낮은 유류 등의 물질에는 효율이 낮으며 유기물함량이 높거나 건조한 토양에는 처리효과가 없다.

처리물질로는 비할로겐 VOCs 및 휘발성유기물질 있으며 준휘발성 유기물질에는 부분적인 효과가 있다.

2.2.3 용제추출법(Solvent Extraction)

오염토양을 추출기내에서 유기용매와 혼합시켜 용해시킨 후 분리기에서 오염물질을 분리하여 처리하는 지상처리(Ex-situ)기술이다. 장점으로는 단기간에 정화하는데 매우 효과적인 기술이며 토양세척법과 같은 타 공정과 병합하여 사용 가능하다. 단점으로는 수분함량이 높거나 유화제와 같은 물질이 오염토양에 존재할 경우 공정에서 사용된 추출용매가 수분 및 유화제와 반응하여 토양 내에서 2차 오염물질로서 작용할 수도 있다.

처리물질로는 유류, 살충제, 페인트 등으로 오염된 토양의 유기오염물질을 분리하는 데 적용이 가능하다. 하지만 중금속, 방사성물질 및 화약류로 오염된 지역에는 적용이 불가능하다.

2.2.4 고형화/안정화법(Solidification/Stabilization)

오염토양에 시멘트, 석회 등의 고형화제를 첨가하여 오염물질의 이동성을 물리적으로 저감시키고 화학적으로 용해도를 낮추는 지상처리(Ex-situ) 및 지중처리(In-situ) 처리기술을 말한다. 장점으로는 중금속으로 오염된 지역에 타 기술에

비해 효과적이며, 처리비용 또한 저렴하다. 단점으로는 오염 물질의 용해도 및 이동성만을 감소시킨 것이기 때문에 향후에 용출이 발생할 가능성이 잠재되어 있으므로 장기간의 모니터링 과정이 필요하다.

처리물질로는 무기물질 및 방사성물질을 처리할 수 있으며 탁월한 효과를 나타낸다. 그러나 휘발성 유기오염물질과 유류 및 화약류의 정화에는 효과적이지 못하다.

2.2.5 동전기법(Electrokinetic Separation)

투수계수가 낮은 포화토양에서 이온상태의 오염 물질을 양극과 음극의 전기장에 의하여 이동속도를 촉진시켜 포화 지역의 오염토양을 정화하는 지중처리(In-situ) 기술이다. 장점으로는 투수계수가 낮은 토양의 경우 통기성 및 유체의 이동성이 낮아 토양오염 처리기술의 적용이 용이하지 않지만 동전기법은 투수계수가 낮은 토양의 경우에서도 높은 처리 효율을 기대할 수 있다. 단점으로는 소요되는 전기량이 많아 운영비가 높게 소요되어 경제성이 낮고, 산화/환원 반응에 의해 불필요한 부산물이 생성될 수 있다.

처리물질로는 점토질 지반간극수의 중금속이온이나 용존하고 있는 유기물질을 효과적으로 제거시킬 수 있으며 방사성 물질, 폐놀 등의 오염물질 정화에도 유용으로 보고되고 있다.

2.3 열적 처리방법

2.3.1 열탈착법(Thermal Desorption)

오염토양을 일정한도로 가열하여 토양에 흡착된 오염물질을 휘발 및 탈착시키는 원리를 이용하며 직접 연소에 의한 열처리(소각)와 산소가 없는 혐기성 상태에서 열을 가해 유기물질을 분해하는 열처리(열분해)의 두 가지 형태로 하는 지상처리(Ex-situ) 기술이다. 장점으로는 타 공정에 비해 높은 정화효율을 가지고 있다. 단점으로는 특정유기물 존재에 따라 가스상의 2차 생성물을 발생시키며 비싼 에너지 처리 비용을 가지고 있다.

처리물질로는 휘발성물질 및 준 휘발성물질, 살충제 방사성 물질 등이 있다. 토양의 상태에 따라 종종 소각, 고형화/안정화, 혹은 탈염소화 공정과 조합되어 운영된다.

2.3.2 소각법(Incineration)

적당량의 산소를 공급하여 유기물질을 871~1,204°C의

고온으로 연소시켜 분해하는 열적 파괴공정이다. 보통 소각법은 오염토양 처리 방법이라기보다는 폐기물 처리에 주로 활용되고 있는 기술로서 다양한 오염물질을 매우 낮은 수준까지 효과적으로 정화할 수 있는 기술 중의 하나이다. 장점으로는 오염물질 제거효율은 99.99% 이상이며 다이옥신에 대해서는 99% 정도의 효율을 나타낸다. 단점으로는 처리비용이 타 기술에 비하여 매우 높고 중금속으로 오염된 토양을 소각하는 경우 중금속을 포함한 소각재가 발생되므로 소각 후 다시 처분해야 하는 단점을 가지고 있다.

처리물질 및 효율로는 소각법은 무기물질 및 방사성 물질을 제외한 대부분의 유기오염물질 처리에 탁월한 효과를 나타낸다.

2.3.3 유리화법(Vitrification)

유리화 공정은 굴착한 오염토양을 전기적으로 용융시킴으로써 용출특성이 매우 적은 결정구조로 만드는 기법으로써 이 기술은 오염물질의 농도를 감소시키기 보다는 오염물질을 둘러싸 고립화시키는 지중처리(In-situ) 기술이다. 장점으로는 중금속을 비롯한 다양한 오염물질을 처리할 수 있다는 점에서 활용도가 높다. 단점으로는 소요되는 에너지 비용이 높고 유리화 공정 중 발생하는 방출 가스를 다시 처리해야 한다.

처리물질로는 무기물질 및 방사성물질의 처리에 탁월한 효과를 나타내며, 비할로젠 및 할로젠으로 오염된 지역의 정화에도 대체적으로 적용이 가능하다. 그러나 휘발성 유기오염물질과 유류 및 화약류의 정화에는 효과적이지 못하다.

2.3.4 열분해법(Pyrolysis)

산소가 없는 혐기성 상태에서 열을 가해 유기물질을 분해시키는 화학적 분해방법이다. 열분해법은 열탈착법 및 소각법과 같은 열적처리 기술이기 때문에 이러한 기술들과 비슷한 장·단점을 가지고 있다.

처리물질로는 비할로젠 및 할로젠 SVOCs의 처리에 탁월한 효과를 나타낸다. 그러나 무기물질, 방사성물질 및 화약류의 정화에는 효과적이지 못하다.

3. 방사성물질로 오염된 토양에 적용 가능한 기술 선정 및 평가

Table 1. The cost and soil remediation rate of radioactive material processing available technologies

| | Economics[6] (Cost [EUR/m ³]) | Applicability (Technology Completion) | Technical Characteristics (Remediation Rate/Time) |
|---------------------------|--|--|--|
| Soil Washing | 116 | Demonstration | 75%/4hr |
| Electrokinetic Separation | 177 | Pilot | 54%/10day |
| Washing-Electrokinetics | 220 | Demonstration | 84.2%/10day |
| Natural Attenuation | 20 | Half-life Decay | 50%/30.1year |
| Phytoremediation | 122 | Pilot | 0.98%/1year |
| Land Farming | 62 | Half-life Decay | 50%/30.1year |

Table 2. Evaluation Indicators for Soil Decontamination Technology Analysis

| Criteria | Requirement | Indicator |
|---------------------------|--|-----------------------------|
| Economics | Processing Cost | Preprocessing |
| | | Excavate |
| | | Radioactive Material Survey |
| | | Technology Cost |
| | | Environmental monitoring |
| | | Man Power |
| | | Total Processing Cost |
| Applicability | Environment of Soil | Size of Soil Particles |
| | | Porosity of Soil |
| | Effects of Radioactive Exposure | Completeness of Technology |
| | | Completeness of Technology |
| Technical Characteristics | Characteristics of Technology and Treatment Material | Worker Radiation Exposure |
| | | Resident Radiation Exposure |
| | | Throughput/Time |
| | | Decontamination Rate/Time |
| | | Treatment Material |

3.1 방사성물질 토양에 적용 가능한 기술 선정

다양한 토양복원의 공정 및 처리물질을 분석하여 그 중 토양오염 시 지표로가 되는 세슘(Cs)으로 오염된 토양에 적용할 수 있는 기술을 파악하였다. 기술에는 토양세척[2],

동전기[3], 복합동전기[4], 자연저감, 식물재배[5], 토양경작 등이 있다. 이들 방법은 선행적으로 방사성물질로 오염된 토양에 관한 연구와 현재 실증장비가 완성된 기술이다. 선정기술들의 비용, 기술 완성도, 토양복원률을 Table 1에 나타내었다.

3.2 방사성물질 처리기술 평가방법

현재 개발된 토양제염 방법을 방사성물질에 대한 경제성(비용), 적용성(기술의 완성도), 기술성(토양복원률%)의 3가지 항목으로 분류하였다. 경제성의 비용 측면은 전처리, 굴착, 인력 등의 여러 가지 금액들을 포함하여 비용으로 산정하여야 하나 오염지역, 복원기술 및 재료 작동과 감시기능 등에 따라 많은 차이를 나타내고 또한 아직 방사성물질에 대한 토양복원기술의 상업화가 정착되지 않은 상태이기 때문에 문헌 및 연구논문을 참조하였다.

적용성은 방사성물질에 대한 기술의 가용성, 기술의 완성도, 오염지역의 토양성질 등에 따라 영향을 받는다. 이에 따라 방사성물질을 정화할 수 있는 기술들을 후보로 선정하였으며 각 기술 별 현장적용 기술기준으로 실증, Pilot, 자연저감으로 구분하고 차등을 주었다.

기술성 항목은 토양복원을 수행하는 기간당 처리량(kg), 방사성물질의 제염률(토양복원률) 등이 있다. 그러나 아직 평가하고자 하는 기술들이 상용화가 되지 않아 실제 토양에 적용한 사례가 극히 적으며 평가 후보 기술 중에는 아직 실증장비가 아닌 Pilot 및 자연저감을 이용하는 방법이 선정되어 있기 때문에 수치적으로 비교 가능한 기간당 제염률(토양복원률)을 선택하여 차등을 부여하였다. 본 논문에서 선정한 평가기준 외에 고려할 수 있는 다양한 세부 기준을 Table 2에 나타냈다.

위와 같이 선정한 평가방법 인자들을 High, Medium,

Low의 3단계로 구분하고 평가의 기본 가정은 High에 좀 더 비중을 주는 식으로 평가 점수 가중치를 차별화하였다. 이를 반영하면 H, M, L는 대략 10:5:1의 비율로 평가 점수를 부여하였으며 Table 3과 같다. 이는 참고문헌에 EXPERT 프로그램의 최적화 분석을 참조한 것이며 평가기준은 경제성 0.3, 적용성 0.3, 기술성 0.4이다[7]. 본 논문에서는 기술성에 비중을 좀더 주어 평가하였으나 추후 평가기준을 세분화 하여 하위 분류를 통해 세세한 평가가 필요하다. 또한 평가기준의 선정부분을 전문가 설문을 통해 선정이 이루어진다면 보다 신뢰도가 높은 평가 결과를 도출할 수 있을 것이라고 사료된다.

결과는 1.0만점에 가까운 기술이 방사성물질로 오염된 토양에 가장 적용하기 적합한 기술이며 점수의 계산은 기준에 대한 가중치에 평가 기준을 곱하는 방식으로 진행하였다. 가중치를 적용한 결과값은 Table 4와 같으며 토양세척법이 0.8290점, 복합동전기법이 0.7333점으로 가장 높은 점수를 나타냈다.

Table 3. The Criteria applying a weighting

| Criteria | | |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Economics 0.30 | Applicability 0.30 | Technical Characteristics 0.40 |
| Rating Factors | | |
| High : 0.649 (1.000) | Medium : 0.279 (0.430) | Low : 0.072 (0.111) |

Table 4. The evaluation of radioactive material processing available technologies

| | Economics | Applicability | Technical Characteristics | Score(1.0 Perfect Score) |
|---------------------------|-----------|---------------|---------------------------|--------------------------|
| Soil Washing | M | H | H | 0.8290 |
| Electrokinetic Separation | L | M | M | 0.3343 |
| Washing-Electrokinetics | L | H | H | 0.7333 |
| Natural Attenuation | H | L | L | 0.3777 |
| Phyoremediation | M | M | L | 0.4300 |
| Land Farming | H | L | L | 0.3777 |

4. 결론

평가한 결과 복합동전기와 토양세척법이 방사성물질로 오염된 토양복원에 가장 적합한 것으로 나타났다. 그러나 토양복원을 위해서는 몇 가지 고려해야 할 사항이 있다. 최근 후쿠시마 사고와 같은 광역의 토양에 방사성물질이 오염된 경우를 고려해 보면 대량의 오염토양을 신속하게 처리할 수 있어야 하며 또한 광역의 지역에서 동시다발적인 제염작업을 수행할 수 있어야 한다. 이에 따라 토양복원에 가장 적합한 방법으로 도출된 복합동전기와 토양세척법의 특징을 살펴보면 복합동전기법은 높은 핵종 제염효율 및 폐액의 발생이 적은 장점을 가지고 있다. 하지만 In-Situ 적용이 곤란하며, 광역의 부지에는 검증이 필요한 상황이다. 토양세척법은 단기간의 토양제염의 처리가 가능하며 활용도가 높은 장점을 가지고 있다. 그러나 2차 폐액이 다량 발생한다는 단점을 가지고 있다. 이러한 점을 고려해보았을 때 토양세척법이 복합동전기법보다 단시간 동안 광역의 토양에 적용하기에 적합한 기술이라고 사료된다. 하지만 방사성물질을 제거하기 위한 토양세척 공정은 대부분 질산, 초산 등 산성 세척액을 이용하여 토양과 방사성물질을 분리한다. 토양세척 공정 후 산성 폐액은 바로 처리할 수 없으며 새로운 공정을 추가하여 처리해야만 한다. 이러한 과정에서 발생한 폐기물 및 폐액은 자체처분이 가능한 기준 이하로 처리하여 2차 방사성폐기물 양을 감소시켜야 한다. 이러한 측면에서 추후 토양세척법에 무산(Non-Acid)의 세척액 적용과 고성능 흡착제를 연구 개발하여 2차 폐액 발생을 감소시킬 수 있는 기술을 부합한다면 추후 고리1호기 해체 및 예기치 못한 광역의 토양에 핵종누출 시 적용할 수 있는 가장 적합한 기술이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원으로 수행한 연구 과제입니다(No. 20141510101630).

REFERENCES

[1] M. J. Kim, Soil Remediation Technology and Casebook,

3-99, Pergamon Press, Seoul(2002).

- [2] G.N. Kim, W.K. Choi, C.H. Jung, and J.K. Moon, "Development of a Washing System for Soil Contaminated with Radionuclides Around TRIGA Reactors", JKSIIEC, Vol.1(3), 406-413 (2007).
- [3] G.N. Kim, H.J. Won, M.G. Kim, J.H. Jung, J.H. Park, and W.J. Oh, "Removal of Radionuclides from Soil by Electrokinetic Method", JKNS, Vol.34(1), 1-8(2002).
- [4] G.N. Kim, B.I. Yang, W.K. Choi, K.W. Lee, and Jay, "Washing-Electrokinetic Decontamination for Concrete Contaminated with Cobalt and Cesium", JKNS, Vol.41(8), 1079-1086(2009).
- [5] Y. Suzuki, T. Saito, and H. Tsukada "Phytoremediation of radiocesium in different soil using cultivated plants", Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident, in: Proceedings of international symposium on environmental monitoring and dose estimation of residents after accident of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, S. Takahachi, ed., 137-140, Academic Press, Tokyo(2014).
- [6] J.I. Ahn, D.J. Kim, J.E. Park, C.H. Lee, Y.M. Lee, H.S. Park, and D.H. Choi, "A Study on Disposal Plan for Soil Contamination Investigation Standard and Soil Remediation Work Indicator", Ministry of Environment Final Report, 121-122(2013).
- [7] B.C. Musgrave and R.N. Drake "Evaluation of Alternative Nonflame Technologies for Destruction of Hazardous Organic Waste", Idaho National Engineering Laboratory INEL/EXT-97-00123(1997).