'2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

TRIGA 연구로 해체에 따른 원자력시설의 부지재활용기준 평가연구

A Study on Site Release Criterion Assessment of Nuclear Power Facilites for TRIGA Reserch Reactor decommissioning

이경진, 황주호

경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천1

요 약

MARSSIM 절차서의 부지재활용 기준을 설정하는 과정은 부지에서 건물표면의 방사능 오염의 규제치를 만족시키는지 여부를 결정하기 위한 절차서이므로 국내 해체사업이 진행중에 있는 TRIGA 연구로의 부지시설건물에 적용하여 작업효율을 높이기 위한 과정으로서 시설부지의 예상 오염도를 가지고 오염지역을 분류할 수 있었다. 아울러 TRIGA 연구로는 해체작업이 진행중에 있는 관계로 측정데이터의 부족으로 부지재활용기준을 설정하는 데에는 현재로서는 무리가 있으나 MARSSIM절차서의 시료측정갯수와 시료측정위치를 결정하는 방법을 사용하여 그 측정결과를 가지고 측정결과에 따라 부지재활용 기준을 설정하는 과정을 설계할 수 있었다.

Abstract

The process of establishing the site release criterion in MARSSIM is a guide which makes a decision if the contamination level of the building in the site meets guide level, so it is able to classify the contamination site with the expected contamination level in facility site as the process to raise the working efficiency with applying to the site facility building of TRIGA research reactor on the progress of the internal decommissioning plan. It is unreasonable to establish the criterion for site recycling so far due to the lack of survey because the decommissioning plan of TRIGA research reactor is still on the progress. But it is able to design process to establish the site recycling criterion according to survey result with using the method to decide survey quantity and location in MARSSIM process guide.

1. 서 론

원자력 발전소는 그 용도의 특수성 관계로 대중이 발전소가 해체작업을 완료하였다 하더라도 그 부지의 개방에 있어서는 엄격한 심사가 있어야 한다. 이러한 관점에서 최근에 원자력연구소에서 작성한 해체계획서에 대한 한국 원자력 안전기술원의 "연구로 1, 2호기 해체계획서 심사보고서"에 따르면 해체사업의 종료후 부지복원을 위해서 검토하는 분야가 최종 방사선/능 조사에 있는데 해체계획서에 나와있는 최종 방사선/능 조사절차 및 방법에 대한 일반적인 기술내용에 대해 만족하나 세부 조사방법과 결과 평가는 부지의 무제한적 활용 및 일반인에 대한 허용기준(Release Criteria) 적용을 위한 방사능 측정 및 시료채취, 결과분석 및 통계적 조사 기준을 제시하는 절차를 도입할 것을 권고하고 있는 상황에서 본 연구를 수행하게 되었다. 본 연구의 주요 내용으로서는 첫째 국내의 원자력 시설의 해체현황을 간단히 조사하였으며, 둘째 원자력 시설의 해체후 부지의 재활용 기준을 세우기에 앞서 각 부지에서 표토와 건물표면의 방사능 오염의 규제치를 만족시키는지 여부를 결정하기 위한 계획. 수행, 평가 및 결정을 수행하는 방법을 제공하는 MARSSIM절차서의 도입에 대해서 해석하였으며, 셋째 지금까지 설정되어 있는 국내의 해체 후 부지재활용 기준 현황을 조사하고, 마지막으로 현재 해체사업을 수행하고 있는 TRIGA 연구로에서 적용가능한 부지 재활용 기준을 설정하는데 있어 부지 재활용 기준을 설정하기 위한 기준으로서 부지 잔존 방사능을 미국의 NRC에서 정의한 0.25mSv/yr로 정하고 이 기준을 만족하느냐 못하느냐에 따라 부지를 재활용, 즉 대중에게 개방을 할 수 있는 여부를 판단하는 과정을 MARSSIM 절차서에 따라 오염가능성에 따른 지역의 분류를 하고 조사지점의 위치를 결정하여 시료채취후 측정결과를 가지고 부지 재활용 기준의 검증을 목표로 하였다.

2. 국내의 해체사업 현황

아직 우리나라는 폐로를 실시한 예는 없다. 국내 원자력 시설의 해체, 제염기술은 초기 연구 단계로서 아직 명확한 기준이나 규정조차 설정되지 않은 상태이나 우리나라의 여건상 미국을 비롯한 외국의 기술기준을 수용하는 입장이 강하므로 따라서 외국의 실시예를 근거로 폐로에 관한 광범위한 자료를 수립하고 축적할 필요가 있다.

2.1 TRIGA 연구용 원자로 해체사업

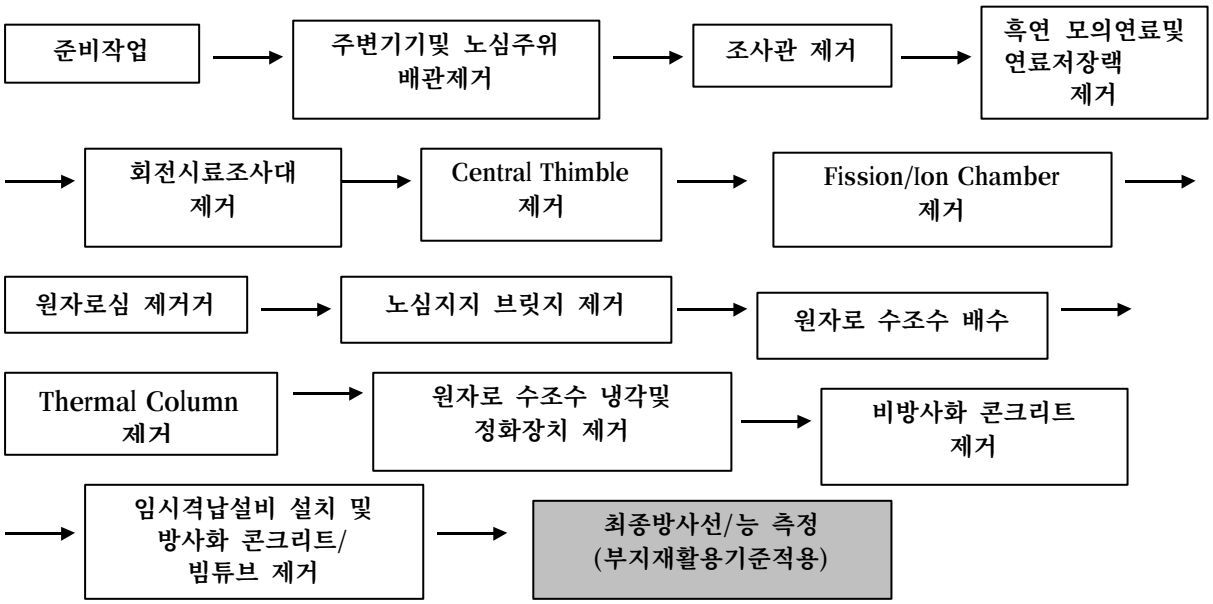
TRIGA 연구용 원자로는 우리나라에서 본격적으로 폐로하는 첫 번째 원자력 시설이다. TRIGA 연구로의 경우 먼저 2호기를 해체한 후 해체폐기물을 1호기에 보관을 한 후 다시 1호기를 해체하는 방식을 채택하여 다음과 같이 국가추진계획 3단계로 나누어 추진하였다,

표 1. TRIGA 연구로 해체계획 3단계

단계	수행계획
1 단계	TRIGA MARK Ⅱ (연구용 1호기) 해체기술 분석 및 해체방안 (해체철거안과 기념관화안) 선정,국내 해체관련 규정 분석
2 단계	TRIGA MARK Ⅱ 해체계획 수립 및 인허가,제염·해체 장비 설계제작
3 단계	TRIGA MARK Ⅱ제염, 해체 작업 수행

TRIGA 연구용 원자로의 제염 해체사업은 주 운영기관인 한국원자력연구소가 주관하는 것으로 되어 있으며 여기에는 관련 인허가 도서작성, 제염 해체 계획수립 및 설계작업, 제염 해체작업, 발생폐기물 처리 및 부지 복구 작업등이 포함된다. 이에 따라 한국 원자력 연구소에서는 1996년 하반기에 연구용 1,2호기의 제염 해체를 위한 사업계획서를 작성, 과학기술부에 제출하였으며 1997년 1월 TRIGA연구로 폐로사업을 착수하여 1998년 1월부터 제염 해체설계업무를 수행하고 있으며 연구로 2호기의 경우 해체순서는 다음과 같다..

■연구로 2호기 해체순서



3. 부지재활용 기준 (Site Release Criterion)

부지의 재활용 기준은 잔존방사능 (Residual Radioactivity)기준에서 출발하며 잔존방사능이란 허가취득자의 관리하에서 행해진 활동의 결과 즉, 해체사업으로서 구조물, 자재, 토양, 지하수 및 부지내의 다른 매체가 띠고 있는 방사능을 말한다. 이것에는 허가 취급자가 사용한 모든 선원을 포함

하지만 Background 방사선은 제외된다. 또한 부지에서의 일상적인 사고에 따른 방사성 물질의 방출이나 이전에 행해진 매설의 결과로서 부지에 잔존하는 방사성 물질도 포함한다.

3.1. 과학기술부 고시 기준안 제정

2000년 3월 현재 과학기술처 고시안 "원자력 관계시설 부지의 재활용을 위한 환경조사에 관한 규정" 이 제시되는 상황에서 그 주요 내용의 핵심은 다음과 같다.

3.1.1 적용범위 및 예외

적용이 가능한 시설로는 발전용 원자로 및 열출력 100KW 이상의 연구용 원자로(참고: TRIGA 연구로 1호기 250KW, 2호기 2MW)와 기타 핵연료 주기시설이 있으며 적용예외지역으로는 규정이 유효하기 전에 해체된 부지와 이미 허가 종결 계획을 제출하여 과학기술부 장관의 허가를 받은 부지를 말한다.

3.1.2 추가사항

이 규정에 따라 당해부지의 재활용 여부가 결정된 이후 새로운 정보와 과학적 지식에 근거하여 당해부지의 잔류 방사능이 일반인의 건강과 안전에 심각한 위험을 초래할 우려가 있는 경우 추가적인 제염을 요구할 수 있다. 결정집단의 평균인(average member of the critical group)에 대한 연간 예탁 유효선량(Total Effrctive Dose Equivalent, TEDE)을 계산할 때 사업자는 해체후 1000년 내에 예상되는 가장 높은 TEDE 선량을 결정해야 한다.

3.1.3 조사범위

공간적 시간적 범위는 환경영향평가서에 제시된 평가 결과에 따라 당해부지로 인하여 주변환경에 영향을 미칠 우려가 있는 지역과 기간으로 하고 조사대상항목은 당해부지의 특성에 따라 부지를 대표할수 있는 지점의 토양과 부지 외부의 자연준위 측정이 가능한 지점의 토양으로 한정하되 해당시설의 특성에 따라 대상항목을 추가할 수 있다.

3.1.4 조사방법

시료의 채취, 분석, 측정 및 평가는 객관적으로 통용되는 방법과 기술에 의하되 특이한 방법을 사용하고자 할 때는 그에 대한 타당성을 입증하여야 한다.

3.1.5 재활용 계획

시설 및 부지의 특성을 환경조사의 관점에서 명확히 기술하고 조사항목과 내용을 구체적으로 기술하되, 방사선 피폭평가를 위한 조사, 준위변동 파악을 위한 조사, 방사성물질의 축적 경향 파악을 위한 조사등 환경조사의 목적과 대비하여 기술한다. 마지막으로 조사등을 위한 시료의 채취 방법, 채취된 시료의 처리절차 및 분석방법, 검출 목표치를 기술하고 현지에서 연속적으로 측정할 경우에는 그 측정방법을 기술한다.

3.1.6 무제한적 사용을 위한 방사선학적 기준

식수로 이용하는 지하수에 의한 선량과 잔존방사능이 합리적으로 달성가능한 낮은(ALARA) 준

위까지 감소되었다는 것을 포함하여 결정집단의 평균인에 대한 자연방사능과 구분되는 잔류방사능 연간유효예탁선량(TEDE)이 연간 25mrem(0.25mSv)를 초과하지 않는다면 해당부지는 무제한적 사용이 가능한 것으로 간주한다. 이 경우 라돈에 의한 선량은 제외된다.

3.2 KINS의 연구로 1,2호기 해체계획서 심사결과

부지 재활용 기준설정을 위한 최종방사선/능 조사절차 및 방법에 대해서 관련법규 및 기술기준을 통하여 검토결과를 보면 해체후 활동은 최종 방사능 조사를 통해 대상 시설부지 및 보전 건물이 해체계획서에 규정된 목적에 따라 안전하게 이용될 수 있음을 보장할 수 있어야 하며 또한 해체 작업의 완료이전에 별도의 관리/감시 계획의 시행 없이 주요 피폭경로에 의한 인근주민의 잠재적인 개인/집단 방사선 피폭이 관련기술기준의 피폭 제한치를 초과하지 않음을 확인할 수 있는 평가방법과 무제한적 재활용대상 부지, 시설, 자재, 장비 및 폐기물의 잔류방사능 준위 검증체계가 사전에 수립되어 운용되어야 하며 최종 방사능 조사체계는 해체 전 방사능 조사계획과 비교하여 해체 후 방사능조사 및 측정 수행내용과 결과가 인허가 기준과 부합되는지 여부를 확인하고 해체 활동의 단계별 수행에 따라 1단계별 종결(연구로 2호기 해체후 최종 TRIGA 해체종료)이전까지 연구로 2호기 원자로실의 방사성폐기물 임시저장 시설로 사용할 경우 이에 대한 관리계획, 즉 방사성 감시계획, 화재방호계획, 물리적 보안계획, 환경감시계획 등 시설 감시계획에 대해 사업자가 제시한 내용은 주기적인 공간 방사선량의 측정, 화재방호계획의 수행, 물리적 보안계획의 수립 및 해체공사 전/중에 수행하는 주변 환경감시계획과 동일하게 수행하게 되어 타당한 것으로 판단하였다. 사업자가 제시한 단계별 최종방사능 조사계획과 관련 절차서 수록내용은 적절한 것으로 판단하였다. 또한 제염해체공사 완료 후 시설 및 부지의 방사학적인 상태의 평가와 무제한 사용을 확인할 수 있는 세부조사내용으로 건물에 대한 방사선/능 조사 및 부지 내 토양에 대한 방사능 조사 절차도 타당한 것으로 판단하였다.

이러한 최종 방사능 준위조사 평가의 기준으로 미국 EPA, NRC, DOE 및 DOD에서 제시하는 표준지침서 MARSSIM(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, NUREG-1575)의 방사능 측정계획의 수립, 측정계획의 실행, 측정계획의 실행, 측정결과의 평가내용을 본 해체사업의 최종 방사능 조사 계획의 시행에 적용하여야 할 것으로 판단하였고 최종 방사선/능 조사절차 및 방법에 대한 해체계획서의 일반적인 기술내용에 대해 만족하나, 세부 조사방법과 결과평가는 부지의 무제한적 활용 및 일반인에 대한 허용기준(Release Criteria) 적용을 위한 방사능 측정 및 시료채취, 결과분석 및 통계적 조사기준을 제시하는 MARSSIM등의 절차 및 방법등을 적용하여야 할 것으로 판단하였다.

3.3 해체계획서에 따른 부지재활용계획

원자력 연구소에서 작성한 TRIGA연구로 해체계획서에 따르면 해체 공사의 목적은 연구로 1및 2

표 2. 연구로 단계별 제염해체공사

단계	제염해체공사
1단계	연구로 2호기 원자로실 및 지하피트
2단계	연구로 2호기 부속시설(핫셀, 동위원소, 생산시설, 실험실등)
3단계	연구로 1호기 원자로실 및 부속시설(핫셀, 실험실등)
4단계	옥외 주변시설(방사성폐기물처리실, 수지재생실, 방사성 폐기물저장고, 액체폐기물 저장조등)
5단계	부지내 토양

호기 시설을 최종적으로 비제한적 사용이 가능한 수준으로 만드는데 있으므로 해체공사 완료 후 시설 및 부지가 방사선학적 인허가 수준을 만족하는지를 확인하기 위한 최종 방사선/능 조사를 수행하고 최종방사선/능 조사는 단계적으로 다음과 같은 시설단위의 제염해체 공사를 완료하는 즉시 수행한다.

3.3.1 최종방사선/능 조사수행방법

잔존 방사능의 측정 및 실험분석을 위한 시료를 채취한 후에 방사선/능 측정에 사용될 계측기의 형식, 교정, 운전조건 등 예비방사선 측정결과와 기타 기초 방사선관련 데이터와의 비교, 분석과정을 거친 후 측정결과에 대한 정량적 오차분석과 부지 재활용기준에 대한 만족함을 증명하기 위한 자료의 평가를 수행한다. 건물에 대한 방사선/능 조사에 있어서는 건물의 바닥, 벽 및 천장을 일정한 간격의 블록으로 구획한 후 다음과 같은 사항을 측정 분석한다.

- 표면에서의 방사선량율의 측정
- 표면 오염시료 채취 및 분석
- 각 블록에 대한 스캐닝 및 최대선량율 지점의 파악
- 공기중 농도 평가를 위한 공기시료채취 및 분석

3.3.2 부지재활용방안

원자로 및 부대시설은 모든 방사성물질 및 오염을 제거하고 비오염시설은 현상태대로 보존한다. 최종 방사선/능 조사를 수행하여 비제한적 사용이 가능한 수준임을 확인한 후 시설 및 부지를 일반시설로서 계속 사용한다. 단, 연구로 2호기 원자로실은 해체공사시 발생한 방사성폐기물의 저장을 위하여 시설을 보완한 후 방사성폐기물 저장시설로 사용한다. 부지내의 토양은 오염된 토양을 제거하고 성토한 후 일반부지로 사용할 수 있도록 하며, 연구로 2호기 원자로실은 방사선 관리구역으로 설정하여 계속 관리되며 나머지 시설은 일반시설로 전환되어 사용하게 된다.

3.4 NRC의 부지잔존방사능 기준

NRC에서는 허가 종료의 기준으로서 허가 취득자에게 10 CFR Part 20 Subpart E을 통해서 폐로 조

치 후의 부지재활용을 위한 잔존 방사능 기준을 다음 표와 같이 두차례에 걸쳐서 제시하였다.

표 3. NRC의 잔존방사능 기준

설정연도	내 용
1994년	①Background 방사선에서 구별할 수 있는 잔존 방사능에 의해 Critical Group의 받는 TEDE가 15mrem/yr을 초과하지 않아야 한다. ②잔존 방사능 준위가 합리적으로 달성될 수 있는 한 낮은 (ALARA) 상태까지 내리려는 노력이 있었음을 실증되어야 한다.
개 정 안 (1997년 4월) 과학기술부 적용	①25mrem/yr로 개정된 무제한적 사용을 위한 해제기준은 일반적으로 부지마다 고유한 분석없이 그대로 적용한다. ②선량제한치를 밑도는 선량에서도 ALARA를 계속 적용한다.

여기서 잔존방사능 기준으로 정한 25mrem/yr 은 한사람이 일평생 수차례 이상 잠재적인 선원에 피폭될 가능성이 낮으므로 여러 방사선원으로부터 피폭에 대한 불확실성을 고려하여 일반인에 대한 선량제한치 100mrem/yr 아래로 충분한 여유분을 둔 수치로서 인간의 건강과 안전을 위하여 제정한 값이다.

4. MASSIM 절차서에 따른 부지 재활용 기준

4.1 도입배경

MARSSIM은 오염가능성이 있는 부지에서 방사선조사를 수행하는데 있어 국가적으로 일치된 하나의 접근방식을 제공한다 (EPA: 1997). 이 접근방식은 과학적으로 확실한 근거를 가져야 하며 동시에 다양한 부지 재활용조건에 적용할 수 있도록 충분한 융통성을 가져야 한다. MARSSIM에서는 이러한 과정을 최종현황조사(final status survey)라고 부르며 이 지침서는 현장 작업자나 다른 이들이 최종현황조사를 수행하거나 평가하는데 도움을 준다. 일반적으로 MARSSIM은 해체기준이 적용되는 여부를 떠나 재활용하려는 경우에 지침이 되거나 재활용의 효과적인 수행여부를 감시하는데 도움을 주며 조사수행과 관련하여 해체기준을 만족시키는가 여부를 보이는 과정은 다음과 같이 서로 관련 있는 세 부분으로 구성되어 있다. MARSSIM 절차서는 오염된 토양과 건물에 대하여 측정과정과 결정과정에 대한 종합적인 지침을 제공함에 있어 각 부지에서 표토와 건물 표면의 방사능 오염이 규제치를 만족시키는지 여부를 결정하기 위한 계획, 수행, 평가 및 결정을 수행하는 방법을 알려준다. 또한 표토와 건물 표면이 오염된 부지를 위한 조사계획, 수행업무 범위, 특성

기술, 복원조치, 최종현황조사 및 오래전부터 가동해온 원자력시설 부지의 평가와 자료획득과 분석에 필요한 품질보증/품질관리등을 수행한다.

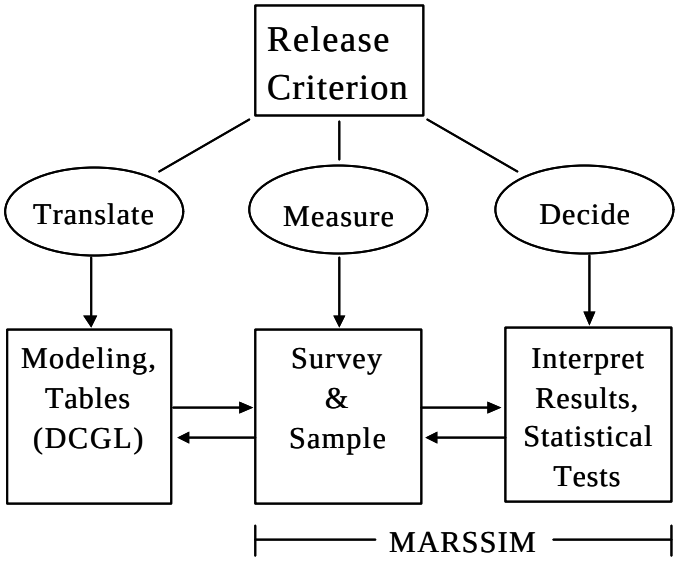


그림 1 해체기준설정에서 MARSSIM의 범위

4.2 적용범위

선량이나 위해도 기준을 방사성핵종 농도로 환산하는 것이나 지하수나 지표수가 규제치를 만족시키는가 여부를 보여주기 위한 작업등과 MARSSIM을 부지 인근 시설(정부나 허가받은 자가 관리하지 않는 시설)에 적용할 수도 있으나 MARSSIM을 인근 시설까지 적용하는가 여부를 결정하는 것, 그리고 표토와 건물표면 이외의 심토. 건물구성물질 및 지하수와 같은 다른 오염된 매질과 오염된 건물구성물질이나 장비의 해제등에는 적용하지 않는다.

MARSSIM의 범위를 표토와 건물표면에 한정시킨 이유는 첫째, 복원이후 많은 부지에 대하여 오염은 표토와 건물표면에 한정되어 있으며, 둘째 많은 부지에서 표토와 건물표면이 가장 오염이 많이 된 곳이므로 기존의 선량이나 위해도를 기준으로 한 농도계산 모델들에서는 표토나 건물표면만을 선원항(source term)으로 간주하기 때문이다. 또한 MARSSIM은 대부분의 확보된 자료가 오염된 표토와 건물표면의 방사능에 국한된 경우에 재활용을 위한 기준제정을 위하여 마련하였기 때문에 건물표면에 적용한다.

4.3 적용방법

4.3.1 오염 가능성에 따른 지역의 분류

오염 가능성에 따라 조사 강도를 결정해야 하기 때문에 조사계획에서 매우 중요한 단계이다. 오

염가능성을 필요 이상으로 크게 잡으면 조사에 필요한 불필요한 노력을 하게 되고, 오염가능성을 지나치게 작게 잡으면 조사결과를 근거로 하여 해제 기준에 부합함을 보일 수 없게 될 가능성이 높게 된다. 조사대상 지역을 구분할 때는 크게 두 가지를 결정하게 된다. 하나는 지역의 평균방사능이 오염이 DCGL(derived concentration guide level for nonparametric statistical test)를 초과할 가능성이고 다른 하나는 오염의 분포가 좁은 지역에서 높은 경우인가 혹은 오염이 비교적 고르게 전체에 분포되어 있는가 하는 점이다. 조사계획을 수립할 때 각각의 결정은 따로 하고 나중에 두 조사계획을 하나로 통합해야 한다. 사전 조사에서 얻은 자료는 지역을 구분하는데 매우 중요하다. 지역구분에서는 DCGL과 오염수준뿐 아니라 오염의 분포도 고려한다. 오염은 전지역에 고르게 분포할 수도 있고 작은 지역에 높은 농도로 분포할 수도 있다. 측정단위는 특정한 크기와 형태의 구조물과 토양으로 구성된 물리적인 지역으로서 방출기준의 초과여부에 따라 결정되고. 피폭경로 모델링에서의 가정, 부지 고유 조건에 따라 크기가 달라진다. 측정단위의 크기와 형태는 잠재적인 오염도, 예상 오염도 분포 및 그 밖의 다른 부지의 물리적인 경계(건물, 벽, 토양, 표면수)와 같은 인자에 의해 다음 표와 같이 측정단위 면적이 결정된다.

Class 1 지역은 운전이력에 따른 잔류방사능 오염도가 이전의 방사선 측정에 근거하여 DCGL 이상의 오염도를 가지고 있는 지역으로서 이 지역은 방사능 누출이 예상되고, 폐기물을 매립하거나 처분한 부지 또는 폐기물 저장 창고등이 포함된다. Class 2 지역은 운전이력에 따른 잠재적인 방사능 오염이나 이전의 방사선 측정에 근거한 오염이 있지만 DCGL을 초과할 가능성이 없는 오염도를 가지고 있는 지역으로서 이 지역은 방사성물질이 개봉되지 않은 형태로 있거나 저농도의 방사성물질을 다루는 지역, 방출지점으로 바람이 불어가는 지역들이 포함된다. Class 3 지역은 어떠한 잔류 방사능도 포함하지 않거나 잔존 방사능의 양이 극소의 DCGL을 나타내는 지역으로서 이 지역은 Class 1, 2 지역 주위의 완충지역을 가리킨다.

표 4. Suggested Survey Unit Area (MARSSIM, Roadmap Table1)

Class	Suggested Survey Unit Area	
	Structure-floor area	Land
1	up to 100 ㎡	up to 2000 m^2
2	100 to 1000 ㎡	2000 to 10,000m^2
3	no limit	no limit

4.3.2 측정지점 갯수의 결정법

측정지점의 개수(N)는 통계적인 시험과 배경(background)에 오염물질이 존재하느냐 여부에 따라서 결정된다. 물질이 배경에 존재할 때와 존재하지 않을 때 두 경우에 있어 각 측정지점 수를 구해야 한다.

4.3.2.1 WRS test

여기서 WRS는 Wilcoxon Rank Sum Test 로서 background내에 존재하는 오염지역의 허용기준을 증명하기 위해 실시하는 테스트방식이며 이는 background와 측정지역에서 측정된 값보다 약 40%정도 작은 값에서 결정된다. 즉 부지내 토양이나 외부로 노출된 시설의 방사능량을 측정시 사용되는 방법이다.

WRS test : $N = \frac{1}{2} \times \frac{(Z_{1-a} + Z_{1-b})^2}{3(P_r - 0.5)^2}$ ---------- (식 4.1)

N = 측정지점의 갯수(시료채취갯수)

$Z_{1-\alpha}$ = 결정론적 error(오차) α에 의한 백분율

$Z_{1-\beta}$ = 결정론적 error(오차) β에 의한 백분율

P_r = 측정단위로부터 무작위 측정값이 DCGL 값이하의 Background의 무작위 측정값을 초과할 확률

1/2 = N을 샘플수로 나타내게 하기 위한 부과된 인자

4.3.2.2 Sign Test

측정지역이 background가 존재하지 않을 때 오염지역의 허용기준을 증명하기 위해 실시하는 테스트방식이며 background area가 필요치 않을 경우 즉, 부지시설 건물내의 방사능량을 측정하기 위해 적용하는 방식이다.

Sign test : $N = \frac{(Z_{1-a} + Z_{1-b})^2}{4(signP - 0.5)^2}$ ---------- (식 4.2)

여기서,

N = 측정지점의 개수 (시료채취갯수)

$Z_{1-\alpha}$ = 결정론적 error α에 의한 백분율

$Z_{1-\beta}$ = 결정 error β에 의한 백분율

Sign p = 측정단위로부터 무작위 측정값이 DCGL 이하가 될 확률

4.3.3 측정지점의 결정법

위의 방식으로 측정지점의 수 N을 구한 후 측정지점 L을 결정한다.

$L = \sqrt{\frac{A}{0.866N}}$ for a triangular grid ---------- (식 4..3)

여기서,

A = 측정단위 면적, N = 필요한 측정지점들의 갯수

Class1, 2 지역의 경우 위의 식에 의해 난수를 발생하여 다음 그림과 같이 측정 시작점의 좌표를 얻은 후 측정 구역을 triangular grid로 나누어 측정지점의 위치 L의 값을 계산하여 좌표 이동하여 선정한다. Class 3 지역의 경우 모든 시료는 임의의 지점에서 취하고 각각의 시료위치는 난수를

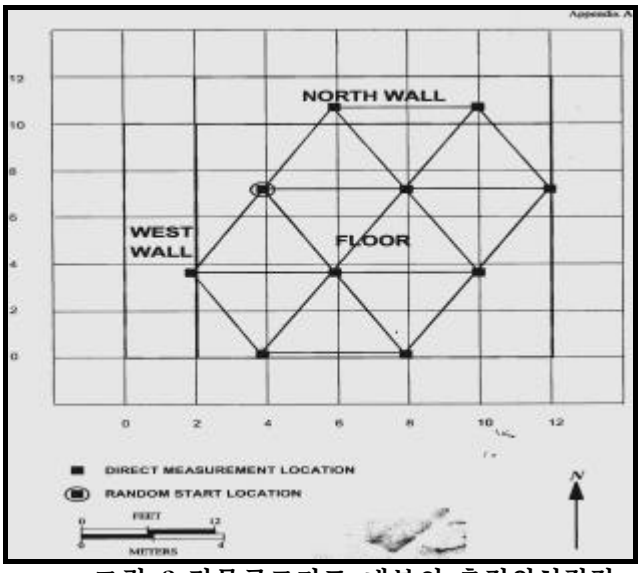


그림 2 건물콘크리트 내부의 측정위치결정

발생하여 x, y 좌표를 얻어서 측정지점을 무작위로 선정한다.

4.4 부지 재활용 결정

MARSSIM에서는 이러한 측정과 계산과정을 수행하여 그 결과를 가지고 부지 재활용 기준을 설정하였는데 다음과 같다.

표 5. Background와 관련되지 않은 지역의 부지재활용 기준

Survey result	Conclusion
All measurement less than DCGL	Survey unit meet release criterion
Any greater than DCGL	Survey unit dose not meet release criterion
Any measurement greater than DCGL and the average less than DCGL	Conduct sign test and elevated measurement comparison

5. MARSSIM 절차서에 따른 TRIGA 연구로의 부지재활용 기준

5.1 DCGL의 설정

DCGL(derived concentration guide level)은 원자력 시설부지의 일부분의 넓은 지역의 평균 농도라고 할 수 있으며, 가령 오염도가 부지의 측정단위에 균일하게 분포되어 있다면 NRC의 기준에 의거

25mrem/yr (0.25mSv/yr)을 DCGL 이라 정의하고 부지 재활용 기준을 설정하기 위해서는 이 기준을 만족해야 하며 따라서 본 연구도 TRIGA 연구로의 부지재활용기준을 25mrem/yr로 설정하고 해체계획서의 데이터를 가지고 이 기준을 만족하는가를 알아보았다.

5.2 TRIGA 연구로의 오염지역 분류

한국원자력연구소의 TRIGA 연구로 해체계획서에 나온 자료를 근거로 원자로 시설을 비롯한 전 시설내의 공간방사선량율 현황은 표6와 표7에 나타내었다. 공간방사선량율 분포는 표6에서 보는 바와 같이 연구로 1호기의 경우 원자로 차폐체 바깥면은 0.15 0.23 μSv/hr의 분포를 보이고 있는데 이는 자연 방사선의 준위정도에 해당하는 것이다. 한편 원자로실 바닥 및 벽면에서의 분포는 0.13 13.0 μSv/hr 로 나타났다. 연구로 1호기 동쪽에 위치한 실험실에서도 자연방사선 준위를 나타내고 있으나, 선원저장실의 극히 일부 오염된 부분에 의한 영향으로 최대치 0.4 μSv/hr를 나타내고 있다. 표7에서 보는 바와 같이 연구로 2호기의 원자로 본체에서는 0.15 3.0 μSv/hr의 분포를 나타내는데, 이는 계통내에 존재하고 있는 방사성 오염물질의 영향인 것으로 보인다. 원자로실 바닥 및 벽면과 구조물 표면에서는 0.15 450 μSv/hr 로서 원자로실 내에 일부 남아있는 방사성물질의 영향을 받은 것이다. 원자로실 지하피트에서는 0.18 8.5 μSv/hr의 분포를 보이고, 동위원소 생산시설에서는 아직 시설내에 오염된 실험설비와 선원등 많은 방사성물질이 보관되어 있어 0.15 7300 μSv/hr 의 분포를 보이며 동위원소생산실 지하피트에서는 액체폐기물 저장탱크로부터 일부 넘쳐난 폐액의 영향으로 최대 방사선량율이 640 μSv/hr 로 나타났다.

표 6. 연구로 1호기의 방사선량율 및 최대 표면오염도

구 분		방사선량율(μSv/hr)		최대표면오염도(Bq/m^3)	
		최대	최소	Alpha	Beta
원자로실	수조내 노심주변	25000	-	-	
	실험수조내	48000	-	-	
	원자로 차폐체 바깥면	0.23	0.15	MDA이하	863
	원자로실 바닥 및 벽면	7.0	0.13	44	MDA이하
	중성자 실험장치	0.7	0.18	MDA이하	2994
	사용후 핵연료 저장실	13.0	0.2	176	344424
실험실	바닥 및 벽면	7.0	0.15	818	3615
	Fume Hood 및 테이블	35.0	0.18	2013	4550
	납셀 내외부	0.2	0.15	MDA이하	MDA이하

(MDA)Alpha : 29.8Bq/㎡, (MDA)Beta : 131 Bq/㎡

표 7. 연구로 2호기의 방사선량율 및 최대 표면오염도

구 분		방사선량율(μ Sv/hr)		최대표면오염도(Bq/㎥)	
		최대	최소	Alpha	Beta
원자로실	수조내 노심주변	1,400,000	-	-	-
	실험수조내	3.0	0.15	MDA이하	7,401
	원자로실 바닥 및	110	0.15	MDA이하	5,414
	중성자 실험장치	450	0.2	MDA이하	1,978
	지하 Pit	8.5	0.18	MDA이하	2,113
동위원소생산시설	바닥 및 벽면	75.0	0.18	MDA이하	36,403
	Fume Hood 및 테이블	32.0	0.2	MDA이하	207,023
	납셀 내외부	7,300	0.2	8850	13,252,683
	콘크리트 핫셀외부	400	0.3	686	25,342
	지하 Pit	640	0.15	-	-

(MDA)Alpha : 44Bq/㎡, (MDA)Beta : 384 Bq/㎡

Class1, 2, 3지역의 분류는 따로 계산법이 존재하는 것이 아니라 오염가능성에 따른 분류를 시행하여 작업효율을 높이기 위한 것이므로 TRIGA 연구로의 부지현황도와 오염 가능성에 따른 분류를 해보면 다음과 같다.

표 8. TRIGA 연구로의 오염가능성에 따른 분류

	MARSSIM정의	지 역
class 1 지역	오염된 지역으로 공간의 잔류방사능이 DCGL을 초과하는지역	원자로실, 동위원소생산시설, 폐기물처리건물, 레진재생시설, 각종 Hot 실험실등
class 2 지역	오염된 지역이나 공간의 잔류방사능이 DCGL을 초과할 가능성이 없는 지역	자연증발시설, 방사성액체폐기물저장시설등
class 3 지역	오염된 지역이긴 하나 잔존방사능을 가질 가능성이 거의 없는 지역	그외 냉각탑3대, 증류수 생산시설, 실험동물 사육실등 class 1, 2 지역주위의 완충지역

5.3 측정지점 위치 결정

TRIGA 연구로 2호기 원자로실 벽면의 경우 조사지점 위치를 결정하기 위해 측정지점의 갯수(N)을 100개라고 가정한다면

L = $\sqrt{\frac{A}{0.866N}}$ for a triangular grid 적용한다.

원자로실 벽면의 넓이(A)는

57ft(17.37m)×26.3ft(8.01m)= 139.24㎡ (해체계획서 자료근거)

따라서 L = 1.26m -----1.26m간격으로 triangular 형태로 시료를 채취한다.

5.4 부지재활용 기준수립

아직 TRIGA연구로는 해체작업이 종료가 된 원자력 시설이 아니기 때문에 MARSSIM절차서를 적용할 수 있는 데이터가 없다. 따라서 TRIGA 연구로의 부지재활용 기준을 설정하는데는 무리가 있으나 TRIGA 연구로 2호기 동위원소 생산시설의 경우 시설기구는 제거했다고 가정하고 해체계획서 자료에는 방사선량율이 최대: 75 μSv/hr, 최소: 0.15 μSv/hr로 나와있는데 MARSSIM을 적용하여 시료채취갯수(N)와 위치(L)을 결정하여 평균방사선량율을 구한다. 이런 과정으로 구한 평균방사선량율과 부지재활용 기준인 DCGL= 0.25 mSv/yr에 비교해서 표7에 의거하여 재활용기준을 설정해야 하는데 최소방사선량율 조차도 0.15 μSv/hr = 1.34 mSv/yr로서 재활용기준을 만족하지 않기 때문에 동위원소 생산시설의 경우는 현재로서 재활용 할 수가 없다.

6. 결론 및 향후계획

본 연구는 최근 TRIGA 연구로 해체사업의 본격화와 고리1호기의 해체가 대두됨에 따라 해체사업의 최종단계인 최종방사선량 측정과 측정결과를 바탕으로 한 부지재활용기준을 설정하는 방법이 외국에서 MARSSIM절차서를 통해서 타당하게 제시되어 우리나라의 과학기술부를 비롯한 원자력 관련기관에서 이를 수용할 것을 결정하여 MARSSIM절차서의 방법론을 평가해 보았다. 그러나 TRIGA 연구로는 해체작업이 진행중에 있는 관계로 측정데이터의 부족으로 부지재활용기준을 설정하는 데에는 현재로서는 무리가 있으나 MARSSIM절차서의 시료측정갯수와 시료측정위치를 결정하는 방법을 사용하여 그 측정결과를 가지고 측정결과에 따라 부지재활용 기준을 설정하는 과정을 설계할 수 있었다. 향후계획으로는 TRIGA연구로의 해체계획서 작성시 방사선량 측정 데이터를 얻어 MARSSIM의 계산식에 대입하여 부지재활용 기준을 하나의 예로서 보이는 과정을 수행하고 외국의 해체된 연구로의 자료를 가지고 MARSSIM절차서에 적용하여 TRIGA 연구로의 결과치와 비교 검증을 해보고, 나아가 부지재활용 기준을 만족하지 못하는 부지시설에 대해서 부지재활용 기준을 만족시킬 수 있는 방안에 대해서 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM)," NUREG-1575, December, 1997

2. "Decision Methods for Dose Assessment to Comply With Radiological Criteria for License Termination,"

NUREG-1549, July, 1998

3. W. E. Beyeler, P. A. Davis, et al., "Residual Radioactive Contamination From Decommissioning," NUREG/CR-5512, April, 1996

4. 박헌휘외, "핵시설 제염, 해체 기술개발," KAERI/RR-705/87, 과학기술부,1988

5. IAEA, "Decommissioning of Nuclear Facilities Other Than Reactor," THCHNICAL REPORT SERIES No. 386, 1998

6. IAEA, "Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes," THCHNICAL REPORTSERIES No. 389, 1998

7. "연구로 1호기 및 2호기 폐로사업 해체계획서 및 환경영향평가 보고서," 한국원자력연구소,1998

8. M.C Daily, A.Huffert, F.Cardile, J.C.Malaro, "Working Draft Regulatory Guide on Release Criteria for Decommissioning : NRC Staff's Draft for comment," NUREC-1500, August, 1994

9. U.S. ATOMIC ENERGY COMMISSION, "REGULATORY GUIDE 1.86," June, 1974

10. DRAFT REGULATORY GUIDE DG-4006, "DEMOSTRATING COMPLIANCE WITH THE RADIOLOGICAL CRITERIA FOR LICENSE TERMINATION," August, 1998

11. Decommissioning Handbook, DOE/EV/10128-1, November, 1980

12. "연구로 1,2호기 해체계획서 심사보고서," 한국원자력안전기술원, 1999