

남극의 환경샘플에 대한 방사성 동위원소
분석연구

Study of radioactive isotopes for environmental
samples from antarctica



이화여자대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 국내 학 · 연 극지연구진흥프로그램(PAP사업)” 에 관한 연구 “(남극의 환경샘플에 대한 방사성 동위원소 분석연구)” 과제의 최종보고서(극지연구소 PAP사업 최종보고서)로 제출합니다.



2020 . 7 . 28

연구기관명 : 이화여자대학교

연구책임자 : 허 장 용

참여연구원 : 임 선 인

“ : 김 다 히

“ : 한 세 영

요 약 문

I. 제 목

남극의 환경샘플에 대한 방사성 동위원소 분석연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

남극과 북극은 오랫동안 고립되어 보존되어 온 관계로 지구환경 변화에 대한 다양한 정보를 담고 있으며 연구가치가 높은 환경과 생태계를 형성하고 있다. 때문에 국내외적으로 다수의 기관들이 경쟁적으로 연구를 수행하고 있다. 그러나 국내의 극지연구는 생물, 기후, 지질, 고환경, 해양 등의 연구에 집중되어 있으며 방사성동위원소 분석 기반의 연구와 감시체제는 없었다. 극지지역도 이제는 100% 방사선환경안전지역이 아니며 지구상에서 몇 개 남지 않은 자연청정지역에 대한 보호를 위하여 관련연구가 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 남극기지를 중심으로 주요 지역의 토양, 빙하, 해수, 식물 등을 채취하고 국내최초로 그것에 축적된 자연 및 인공 방사성 동위원소의 검출 및 분석법을 개발하고 이를 통해서 자연방사선과 인공방사성동위원소의 분포 상태를 측정하고자한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 그룹이 보유하고 있는 초저선량방사선 분석을 위한 지하실험실과 검출시스템과 분석방법을 이용하여 국내에서는 최초로 남극의 환경요소들에 대한 방사선 분포를 연구하였다. 환경요소들에 대한 시료의 채취는 장보고기지와 세종기지를 중심으로 현지 환경과 기후에 영향을 고려하여 제한적으로 이루어 졌으며, 특히, 장보고기지는 혹독한 자연환경으로 인해서 식물 시료의 확보가 쉽지 않아서 환경시료는 토양, 지표층에 쌓인 눈, 담수, 그리고 기지 주변 연안에서 얼음시료를 확보하는 것으로 한정하였다.

IV. 연구개발결과

국내 최초로 극지연구소에서 제공된 빙하코어 시료분석을 통해서 원폭실험 등의 인공핵

반응의 부산물로 발생하는 ^{137}Cs 핵종을 확인하였으며, 대외적 요인 (코로나 바이러스)의 변화로 인하여 남극에서 채취한 상당량의 시료를 배송 받지 못하고 확보한 시료의 방사선 분석만으로도 이끼와 지의류, 그리고 토양 샘플마다 고유한 방사선 핵종 분포를 형성하고 있다는 연구결과를 도출하였다. 이것은 남극지역의 환경방사선에 의한 생태연구나 생물학연구의 중요한 기반 자료로 사용 될 수 있을 것으로 사료되며, 특히, 이끼와 지의류에서 자연방사선 핵종보다 상대적으로 많은 ^{137}Cs 이 발견된 것을 볼 때, 향후, ^{137}Cs 이 많이 피폭된 지역과 적은 지역 간의 생태 비교 등, 새로 유입되는 인공방사선 핵종과 그로 인한 환경적 생태학적 영향에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구는 국내 최초로 남극의 환경시료에서 인공방사성동위원소를 확인하고 자연방사성동위원소의 분석 등의 성과를 내었지만, 일회성의 단발성 연구로 수행되었다. 그러나 남극 환경에서의 본격적인 환경방사선 연구를 위해서는 상당한 기간 동안의 지속적 관측과 분석이 필요로 한다. 이를 통해서 장기간 동안 남극의 환경방사성물질의 분포나 환경이 어떤 식으로 변화하였는지 관측이 가능할 것이다. 이번 남극연구가 방사성물질의 추적과 분석을 통해 물리적으로 접근한 시도였다면, 본 그룹이 계획하고 있는 향후 연구는 남극의 방사성물질 분포의 영향이 실제 남극환경에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 이를 위해서 고생물학 혹은 생태학 등 관련 기관들과 공동연구를 통해서 남극의 방사선환경에 대한 연구를 추진할 예정이다.

목 차

제 1 장 서론	6
1 절 연구 필요성	6
2 절 연구 목적	8
3 절 연구 범위	9
제 2 장 국내외 기술개발 현황	11
1 절 국내외 연구동향 및 기존연구의 문제점	11
2 절 관련 연구의 독창성	11
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	13
1 절 연구 내용	13
1. 1차년도 연구 내용	13
2. 2차년도 연구 내용	14
3. 3차년도 연구 내용	25
2 절 연구 결과	29
1. 1차년도 연구 결과	29
2. 2차 및 3차년도 연구 결과	30
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	34
1 절 연구개발목표 달성도	34
1. 연구 목표	34
2. 연구 목표 달성도	35
3. 정성적 성과	36
4. 정량적 성과	37
5. 인력양성 성과	38

2 절 대외기여도 39

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 41

1 절 추가연구의 필요성 41

2 절 연구활용 계획 및 기대효과 42

제 6 장 참고문헌 43



제 1 장 서론

1 절 연구 필요성

○ 자연생태계와 인공방사성 동위원소

- 퀴리 부부에 의해 최초의 인공방사성 동위원소(artificial radioactive isotope)인 ^{30}P 이 제조된 후 다양한 형태의 인공방사성 동위원소가 제조되어 의료, 산업, 등 여러 분야에서 활용 되고 있다. 이들 인공방사성동위원소들은 일부 허가받은 실험실이나 병원 등의 제한된 공간에서 엄격히 관리되어야 하나, 1940년 이후 무분별한 핵무기 경쟁 그리고 크고 작은 원전사고 등으로 인해 일반 지구환경에서도 노출되어 인간의 건강과 자연 생태계의 큰 문제가 되고 있다.
- 지금까지 알려진 인공방사성 동위원소의 수는 2600 종 이상이며 이들 중 자연생태계의 가장 큰 영향을 미치는 핵무기 실험이나 원전사고로 인해서 발생하는 주요 인공방사선핵종들은, ^{137}Cs (반감기:30.2년), ^{131}I (반감기:8일), ^{90}Sr (반감기: 29.1년), ^{133}Xe (반감기:5.2일) 등 이다.

○ 환경방사선과 자연방사선

- 환경 방사선은 앞서 언급한 인공방사선을 포함해서 대기나 토양, 해수에서 존재하고 있는 지각 방사선, 그리고 외계에서 생성되어 지구로 들어오는 우주방사선을 포함하는 것으로 지각 방사선과 우주 방사선은 자연방사선이라고 통칭하여 사용되고 있다. 이들 자연방사선은 방사선량이 낮기 때문에 인공방사선에 비해서 인간의 건강과 생태계의 위험 인자로서 크게 인식되지 못하였다.
- 방사선과 생물학적 유해성과의 상관관계를 논의할 때 가장 일반적으로 인정되고 있는 이론인 문턱 값이 없는 선형비레이론 (LNT, Linear No-Threshold Theory)에 따르면 방사선 권고 선량보다 매우 적은 양의 방사선 양이라 하더라도 유해 위험성을 완전히 배제할 수 없고, 저선량이라도 방사선량이 누적되면 방사선 위험은 증가하게 된다[1, 2]. 이러한 이론에 반대해서 소량의 방사선이 오히려 생체의 면역기능을 높인다는 radiation hormesis 이론도 몇몇 학자들 사이에는 주장되고 있다[3, 4]. 현재, 저준위 방사선량과 인체 유해에 대한 상관관계가 명확하게 규명된 것은 아직 없으나, 이러한 이유로 해서 최

근에는 초저준위 방사선 연구의 중요성에 많이 대두되고 있다.

○ 남극 대륙에서의 극지 연구

- 남극 대륙과 같은 극지에서 생성되는 빙하는 오랜 시간 동안 쌓인 눈의 압력에 의해서 형성된 얼음으로 지구 환경 변화에 대한 다양한 정보를 포함하고 있으며, 특이한 자연환경으로 인하여 다른 대륙과는 다른 기후와 지질 그리고 생태계를 형성하고 있기 때문에 이와 관련된 많은 연구가 진행되고 있다[5, 6].
- 한국도 짧은 극지연구 역사에도 불구하고 우수한 연구시설 인프라를 확보하고 있고, 연구 성과면에서도 매우 우수한 결과를 만들어 내고 있으나 대부분의 관련 연구가 극지환경 변화, 고기후/고해양 변화 복원기술개발, 지질환경 연구, 극지생물 연구 등의 생물/기후/자원 연구 등에 관련되어 있다.
- 이처럼 남극대륙은 다양한 지구환경변화에 대한 정보가 기록되어 있고, 오랫동안 고립되어 온 관계로 독특한 지구환경과 생태계를 형성하고 있으며 때문에 국내외적으로 많은 기관들이 경쟁적으로 관련 연구를 진행하고 있으나 국내 극지관련 연구는 미국 등 선진 외국에 비해서 생물/기후/지질/고환경/해양 연구에 집중되었고, 방사성 동위원소 분석 기반의 연구는 거의 없었던 것으로 사료된다.
- 크고 작은 원전사고나 핵폭탄실험 등으로 인해서 남극 같은 극지도 인공방사선에 많은 노출이 되고 있고 앞서 언급했듯이 저준위 자연방사선의 유해성도 많은 논란이 되고 있기 때문에 우리나라도 남극에서의 환경방사선 연구가 매우 필요한 시점이다[7-9].

2 절 연구 목적

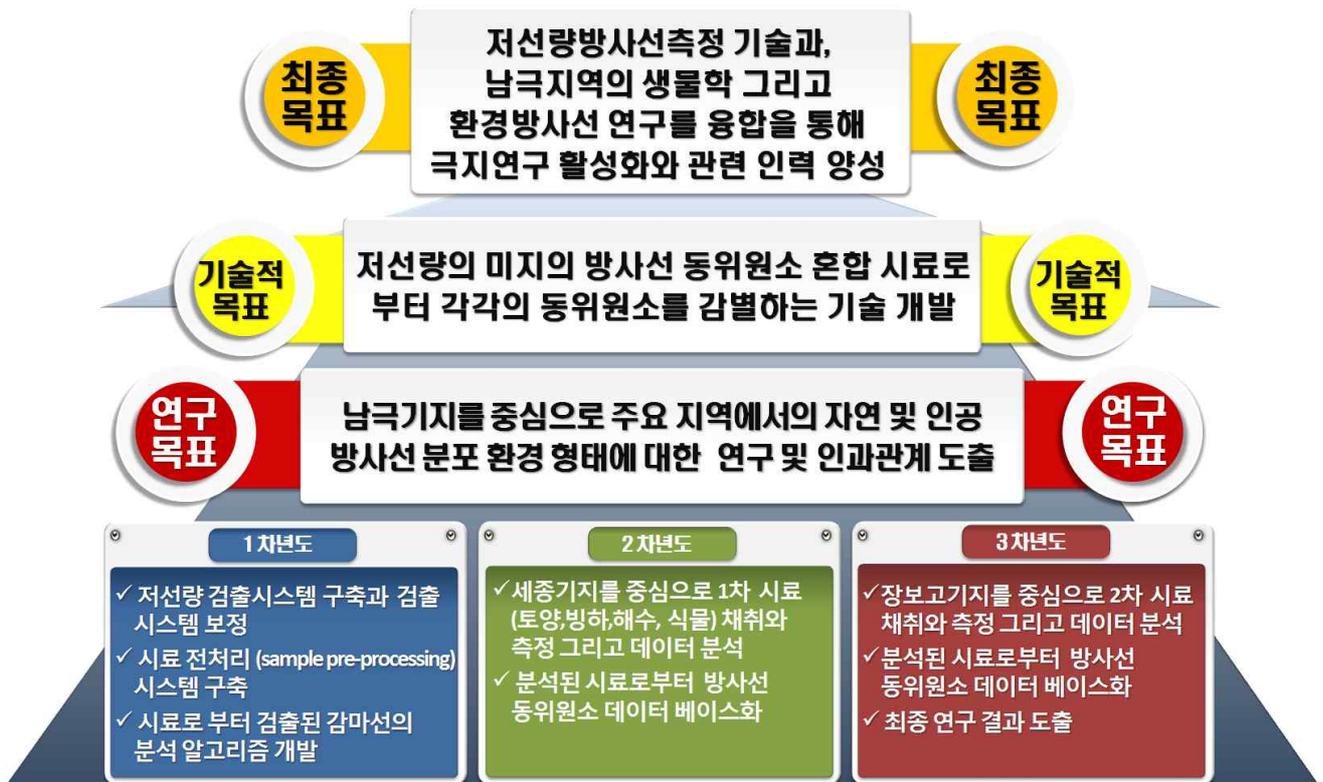


그림 1. 연구의 세부목표 및 최종목표

○ 남극과 북극은 오랫동안 고립되어 보존되어 온 관계로 지구환경 변화에 대한 다양한 정보를 담고 있으며 연구가치가 높은 환경과 생태계를 형성하고 있다. 때문에 국내외적으로 다수의 기관들이 경쟁적으로 연구를 수행하고 있다. 그러나 국내의 극지 연구는 생물, 기후, 지질, 고환경, 해양 등의 연구에 집중되어 있으며 방사성동위원소 분석 기반의 연구와 감시 체계는 없었다. 극지지역도 이제는 100% 방사선환경안전지역이 아니며 지구상에서 몇 개 남지 않은 자연청정지역에 대한 보호를 위하여 관련연구가 필요하다. 2015년에 미국 정부에서 발간한 기초과학 장기계획 보고서에는 환경방사성동위원소 측정연구를 주요 현안으로 평가하였고, 세계 각국에서 원전사고나 핵폭탄실험 등으로 인한 남극, 북극의 방사선 오염도를 측정하고 감시하고 있다. 따라서 국내에서도 극지환경방사선 감시와 통계적으로 가치 있는 데이터 정립이 매우 필요한 시점이다.

○ 본 연구의 첫 번째 목적은 남극기지를 중심으로 주요 지역의 토양, 빙하, 해수, 식물

등을 채취하고 국내최초로 그것에 축적된 자연 및 인공 방사성 동위원소의 검출 및 분석법을 개발하고 이를 통해서 자연방사선과 인공방사성동위원소의 분포 상태를 측정하고자 한다.

- 저선량 자연방사선과 인공방사능의 생물학적 그리고 환경적 유해성 연구를 위한 기반자료를 제공하고자 하며, 저선량방사선 측정기술과 남극지역의 환경방사선 연구의 융합을 통해서 극지연구 활성화에 기여하고 관련 인력을 양성하고자 한다 (본 연구의 세부적 목표 및 최종 목표는 그림 1의 도식도 참조).

3 절 연구 범위

- 남극 대륙에서 채취된 토양, 해수, 빙하, 식물 등 환경 시료에 퇴적된 방사성 동위원소는 극소량으로 추정되며, 그렇기 때문에 이들로부터 방출되는 감마선 신호도 매우 미약할 것으로 예측 됨. 이러한 초저준위방사선 (ultra low level radiation) 시료는 배경방사선 (background)의 간섭으로 인해서 스펙트럼 분석이 매우 어렵다. 본 그룹은 이미 환경 방사선 관련 과제를 수행하면서 미량의 바이오시료로부터 방출 되는 초저준위방사선 분석을 위한 실험실을 구축하였다. 초저준위 방사선 분석은 배경방사선이 상대적으로 적은 심층지하방사선실험실이 요구되기 때문에[10, 11] 본 그룹은 청평양수발전소로부터 시설물 사용 허가를 얻어 양수발전수 지하 1000 m 깊이에 국내 최초로 저준위 환경방사선 측정을 위한 지하방사선실험실 (감마선 측정 실험실) [그림 2]을 구축하고 실험실 내부에 배경방사선 차폐체가 장착된 감마선 측정 시스템1기를 이미 설치하여 운영하여 다양한 종류의 환경/생물 시료를 동시에 측정 분석할 수 있는 시스템을 갖추어 놓았다[12-14].

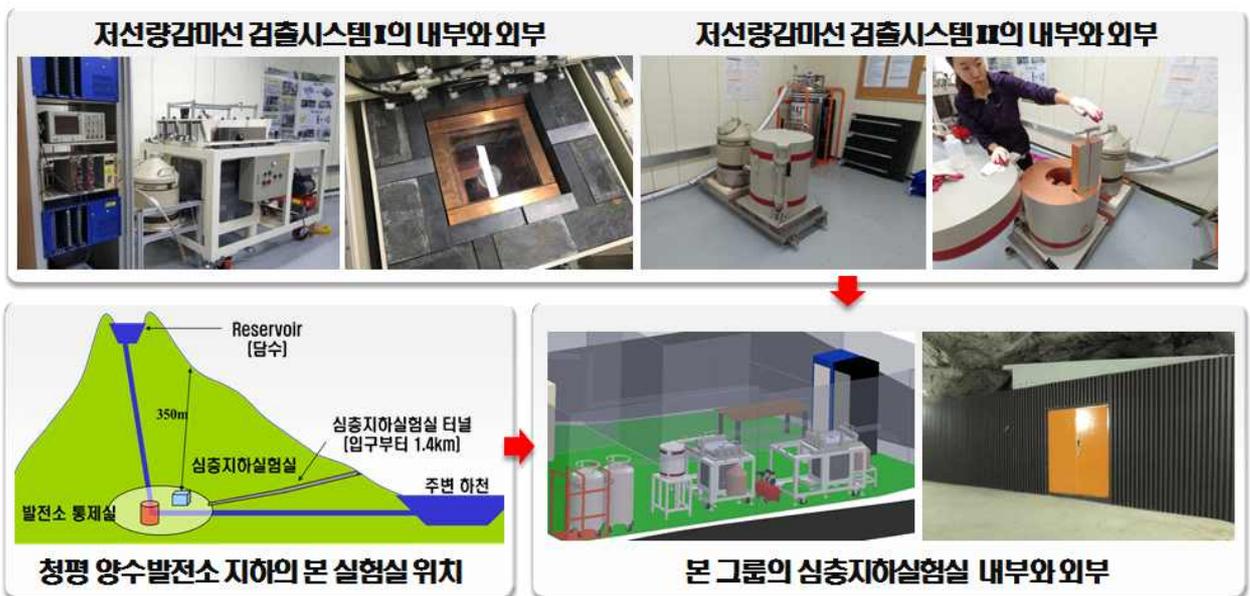


그림 2. 청평 양수발전소에 구축된 심층지하실험실과 저선량감마선 검출시스템

- 저선량감마선 검출시스템은 극미량의 방사선동위원소 추적을 위한 핵심 장비로 그림 2에서 보듯이 본 그룹은 현재 1기의 저선량감마선 검출시스템 (I)을 보유하고 있으며 2017년도에 기초과학연구원 (IBS, Institute of Basic) 지하연구단의 지원으로 2번째 저선량감마선 검출시스템 (II)을 설치하였으며, 연구의 효율적인 진행을 위해서 본 연구의 과제를 수행기간동안 3번째 저선량감마선 검출시스템 (III)을 설치하였으며, 검출 시스템의 최적화를 위하여 대표적인 몬테카를로 방사선 입자수송 코드인 MCNP5 [15]와 GEANT4 [16]를 컴퓨터에 설치하여 다양한 방사선 입자 시뮬레이션이 가능하도록 하였다.
- 본 연구에서는 본 그룹이 보유하고 있는 초저선량방사선 분석을 위한 지하실험실과 검출시스템과 분석방법을 이용하여 국내에서는 최초로 남극의 환경요소들에 대한 방사선분포를 연구하였다. 환경요소들에 대한 시료의 채취는 장보고기지와 세종기지를 중심으로 현지 환경과 기후에 영향을 고려하여 제한적으로 이루어 졌으며, 특히, 장보고기지는 혹독한 자연환경으로 인해서 식물 시료의 확보가 쉽지 않아서 환경시료는 토양, 지표층에 쌓인 눈, 담수, 그리고 기지 주변 연안에서 얼음시료를 확보하는 것으로 한정하였다.
- 채취한 시료에 대한 방사선분포에 대한 분석은 원자력발전소 사고 혹은 핵폭탄 실험 등으로 자연에 노출된 인공핵종인 ^{137}Cs 핵종에 대한 추적과 확인을 1차 목적으로 하였고, 이와 더불어 다른 자연방사선 핵종 분포에 대한 조사를 하였다.

KOPRI
극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1 절 국내·외 연구동향 및 기존연구의 문제점

- 남극, 북극은 다양한 지구환경 변화에 대한 정보가 기록되어 있고 매우 오랫동안 고립되어 온 관계로 이러한 정보들이 보존되어 있다. 그렇기 때문에 국내외적으로 많은 국가와 기관들이 기지를 건설하고 경쟁적으로 남극 환경에 대한 연구를 진해해 오고 있다. 그러나 국내/외의 극지관련 연구는 생물, 기후, 지질, 고환경 해양 등의 연구에 집중되어 있다.
- 국외에는 1990년대부터 J. M. Gody, et al. (1998)[17], M. G. do Nascimento, et al. (2009) [18], C. J. Sanders, et al. (2010)[19]등의 남극의 환경방사성동위원소에 대한 연구들이 있었지만 단편적인 논문들만 게재되어왔으며 이들 논문의 데이터 또한 서로 일관성을 보이지 않고 있어 추정에는 의의를 둘 수 있으나 데이터의 정확성 측면에서는 학문적으로 큰 의미가 있다고 볼 수 없다.
- 국내의 환경방사성동위원소에 대한 연구는 경북대학교 방사선과학연구소 [20], 방사선안전원 등에서 오랫동안 진행되어 그 데이터가 축적되어왔다. 그러나 국내의 극지대륙의 환경방사선 연구는 전무하고, 2017년에 본 그룹이 극지연구소 극지고환경연구부의 협조로 제공된 빙하코어 시료의 방사선 분석을 통해서 빙하코어의 연대기적 발생순서를 확인하였다 [21]. 그 연구는 국내 최초로 남극에서 채취된 시료인 빙하코어에 축적된 방사성 물질을 조사한 것으로, 빙하코어의 축적된 미량의 인공방사능 물질에서 방출되는 저선량 감마선의 검출과 분석을 통해서 빙하코어의 발생연대기를 추정하였으며, 국내연구진에 의한 남극에서의 환경방사선 연구의 필요성과 가능성을 제시하였다.

2 절 관련 연구의 독창성

- 한국에서 시도된 바 없는 극지대륙의 환경방사성동위원소 연구를 본 연구에서 시도하였으며, 지하실험실에서의 극지 환경방사성동위원소 측정은 세계적으로도 처음 시도되었거나 혹은 그러한 시도가 있다하여도 매우 드문 것으로 사료된다. 본 그룹은 남극 대륙에서 토양, 빙하, 해수, 식물 등의 샘플 채취를 하였고 이로부터 방출되는 방사선 (감마선)을 측정하여 남극 대륙에 축적되어 있는 인공방사성동위원소인 ^{137}Cs 을 확인하고, 일부 환경시료로부터 그것이 함유하고 있는 자연방사성동위원소의 분포형태를 밝혀냈다.

- 채취된 시료에 퇴적되어 있을 방사선동위원소의 양은 매우 적고, 또한, 한 번에 측정 될 수 있는 시료의 양이 제한되어 있기 때문에 시료에 퇴적되어 있는 방사선동위원소로부터 방출되는 방사선은 저준위 방사선이었다. 이러한 미량의 방사선 측정을 위해서는 초저선량방사선 검출시스템과 분석기술을 필요로 한다. 본 연구에서는 그동안 배경방사선을 지형적으로 차폐하여 암흑물질 탐사에만 쓰였던 지하 실험실을 이용하여 저선량, 저준위인 극지환경방사선이 정밀하게 측정될 수 있게 하였다. 본 그룹이 국내에서 유일하게 보유하고 있는 지하 350미터 깊이의 지하실험실은 지상과 비교하여 100배정도의 우주선을 차폐할 수 있으며 중력과적 잡음 또한 차폐하여 검출 장비의 노이즈를 줄여주어 검출 및 분석의 정확도를 높여주는 큰 장점을 가지고 있다.
- 본 연구에서는 이러한 미량의 인공 및 자연 방사능물질에서 방출되는 저선량 감마선의 효율적인 측정이 가능한 지하방사선측정실험실과 검출시스템을 남극 대륙의 환경방사선연구에 활용하였다.



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1 절 연구 내용

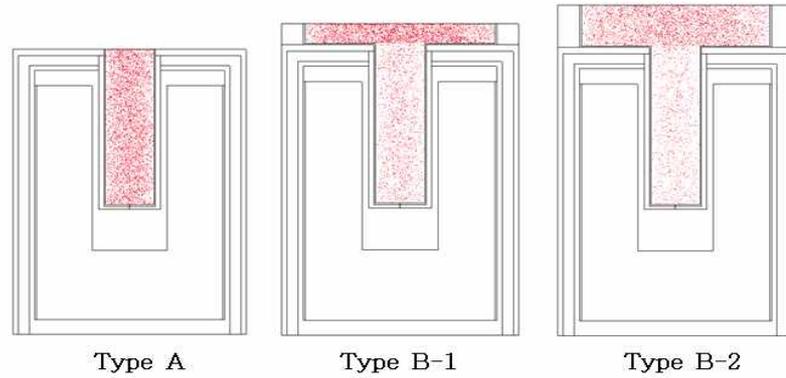
1. 1차년도 연구 내용

가. 시료 측정 시스템 구축

- 본 연구 수행의 시작되는 시점은 9월이기 때문에 남극에서의 관측활동이 허용되는 기간 (12월에서 3월) 이전까지 시료측량을 위한 준비 작업을 할 시간이 충분하지 않았다. 그렇기 때문에 1 차년도는 시료 측정 시스템에 대한 구축과 검증에 연구의 중점을 두었다.
- Well type의 HPGe 검출기는 시료의 용기의 윗면을 제외한 모든 면을 감싸고 있기 때문에 검출 효율을 극대화 할 수 있는 장점이 있다. 특히, 본 연구에서처럼 1회 측정시료의 양이 적고, 극저선량의 방사선량의 측정실험일 경우 매우 효과적이다. 본 기관에서는 한국기초과학연구원의 (IBS, Institute of Basic Science) 지하실험연구단이 제공하여 설치된 Well type의 ORTEC HPGe 검출기에 대한 시스템 보정작업 (calibration)과 최적화 작업 (몬테카를로 방사선입자 수송 시뮬레이션)을 수행하였다. 또한, 그림 3에서 보듯이 Well type의 HPGe 검출기의 최대 장점인 검출 효율을 최대한 높이기 위해서 시료용기의 형태를 MCNP 시뮬레이션을 통해 결정하였다.
- Well type의 HPGe검출기를 포함한 2 대의 저선량 방사선 검출 시스템을 구축하여 운영하였으며, 이와 별도로 3번째 저선량감마선 검출시스템의 설치를 위한 사전 준비 작업을 (보유하고 있는 노후 HPGe 검출기에 대한 업데이트와 보수작업, 그리고 검출 시스템 설계) 실시하였다. 3번째 검출기 시스템은 본 그룹이 보유하고 있는 노후 HPGe 검출기 테스트를 통해서 적합한 것을 선정하였고, HPGe 검출기 디자인에 맞는 차폐시스템을 디자인하였다. 차폐체에 사용된 차폐물질과 두께는 MCNP 모델링에 통해서 결정되었다 (그림 4).

나. 제공 받은 시료 샘플을 통한 데이터 분석

- 1차년도는 남극에서의 직접탐사 계획이 없었기 때문에 남극시료를 확보할 수가 없어서, 먼저 극지연구소에서 제공 받은 시료 샘플을 통한 데이터 분석을 실시하였다. 극지 연구소에서 제공한 남극시료는 빙하코어 시료를 이용하여 선행 연구를 실시하였다 - 빙하코어 식별코드, Tarn8 (대략적 생성 연대기: 7000 년 전), Styx27 (1945년), 그리고 H25 (2012년). 이들 빙하



최대 검출 효율을 위한 시료 모형 설계를 위한 MCNP 시뮬레이션
(3가지 형태의 시료 용기 / 적색은 무작위로 샘플링된 방사선 소스)



MCNP 모델링 최적화를 통해 제작된 샘플용기와 측정을 위해 Well 타입 HPGe 세팅된 샘플용기

그림 3. Well type의 HPGe 검출기 효율을 최대화하는 시료용기의 형태를 결정하기 위해서 시행된 MCNP 시뮬레이션 (위)과 시뮬레이션 결과를 기반으로 제작된 시료용기 (아래)

코어 샘플의 분석을 통해 빙하코어 Styx27에서 원폭실험과 같은 인공핵반응의 부산물로 발생하는 ^{137}Cs 핵종을 확인하였다. - 1차 논문 초안을 작성하였으면 데이터 보강을 위한 추가 실험 및 분석을 마치고 SCI 논문 중의 하나인 JKPS (Journal of the Korean Physical Society)에 출판되었다[21].

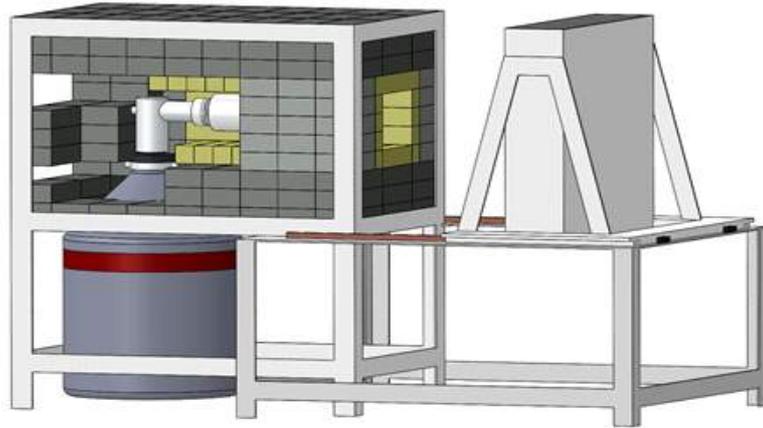
- 인공방사선인 세슘(Cs)에 대한 추적을 위해서 물시료에 존재하는 극미량의 세슘 핵종의 분석 방법인 세슘 공침법 (co-precipitation process)에 대한 연구 수행을 하였다.
- 극지 연구소에서 제공된 빙하코어 시료로부터 방출되는 방사선을 측정하고, 측정된 에너지 스펙트럼으로부터 ^{137}Cs 핵종에 대한 분리 작업을 하였다.

2. 2차년도 연구 내용

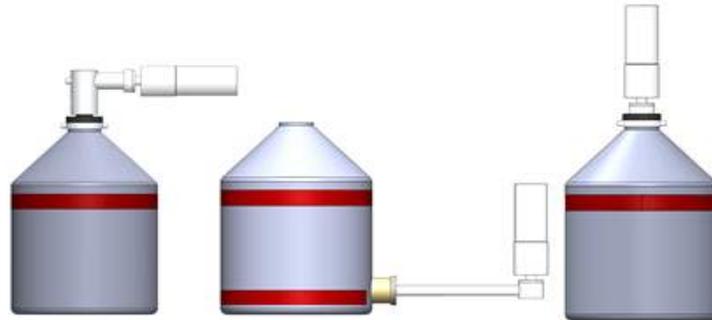
가. 남극 장보고기지 탐사 및 남극 환경시료의 채취

- 환경시료의 채취는 이번 연구에서 가장 중요한 부분 중의 하나이지만, 현지 환경과 기후에 영향을 받기 때문에 제한적으로 이루어 졌다. 장보고기지는 혹독한 자연환경으로 인해서 식

물 시료의 확보가 쉽지 않아서 환경시료는 토양, 지표층에 쌓인 눈, 담수, 그리고 기지 주변 연안에서 얼음시료를 확보하는 것으로 한정하였다.



3번째 저선량 방사선 검출시스템을 위한 제안된 차폐체 디자인



노후 HPGe 검출기의 업그레이드를 위해 제안된 검출시스템 디자인들

그림 4. 3번째 저선량감마선 검출시스템 구축을 위한 차폐체 디자인(위)과 보유하고 있는 HPGe 검출기 타입.

- 남극에서 탐사활동을 할 수 있는 기간은 대략 11월에서 그 다음 해 2월까지로 많은 제약이 따른다. 그러한 이유로, 2차년도가 되어서야 남극에서의 환경시료채취가 이루어 졌으며, 시료 채취는 남극에서 하계연구활동이 허가되는 기간인 2018년11월 21일에서 2018년12월8일 까지 총 18일 동안 수행되었다.
- 남극은 그 면적이 대략 1,400만 km²로 한반도의 62배가 되는 광대한 지역으로 남극전역을 채취대상으로 하는 것은 현실적인 문제가 있기 때문에 채취지역을 기지 주변지역으로 한정 하였으며, 그 중에서도 내륙 쪽에 위치해 있는 장보고 기지 주변지역으로 선택하였다.
- 세종기지가 위치한 킹조지섬은 접근성이 상대적으로 좋아 주위에 다른 나라의 과학기지도 많고, 남극을 찾는 여행객들도 있어 채취의 대상이 되는 환경시료가 대기 혹은 해수의 순환

이 아닌 인간의 입출입으로 인한 오염의 가능성이 존재한다. 이에 비해서 장보고 기지는 남극에서도 내륙 쪽으로 고립되어 있어서 채취된 시료가 남극의 생태환경에 대한 정보의 훼손이 상대적으로 적을 것으로 생각하였다. 그러나 장보고 기지 주변의 기후 특성상 식물 시료를 확보하기 쉽지 않아서 환경시료는 토양, 지표층에 쌓인 눈, 담수, 그리고 기지 주변 얼어붙은 연안에서 해수 얼음시료를 확보하는 것으로 한정하였다.

○ 시료 채취는 3 지역으로 나누어서 총 5 곳에서 나누어 실시하였다 (그림 5 참조). 채취지역 1은 장보고 기지 주변의 도보 가능한 지역으로 그림 1에서 보듯이 삼각형의 세 꼭짓점을 연결하는 지점에서 시료채취가 이루어 졌다. 가장 가능성이 높은 남극으로 인공방사능의 유입 경로는 대기를 통한 낙진으로 사료되며, 대기순환의 특성상 지표면에 축적되는 인공방사능의 분포의 지역적 의존성은 낮을 것으로 추정된다. 그렇기 때문에 채취지역을 기지 주변 반경 2 km 내외로 한정하고 3 곳에서 각 장소마다 4-5 곳을 임의로 선정하여 토양과 담수, 눈 시료를 채취하였다. 채취지역 2는 기지가 위치한 해안가 주변과 내륙과의 차이를 확인하고자 기지에서 60 km 떨어진 곳에서 지표층에 쌓인 눈 시료를 추가로 채취하였다. 채취 지역 2는 내륙지역으로 쌓인 눈의 깊이가 너무 깊어 토양은 채취하지 않았다. 채취 지역 3은 장보고 기지에서 300 - 400 m 떨어진 얼어붙은 해안가로 해안가의 해수 얼음 시료를 채취하여 지표면과의 차이를 보고자 하였다.

- 1) 채취지역 1: 장보고 기지 근처 2 km [74°36'27"S 164°14'02"E], [74°36'28"S 164°10'55"E], 그리고 [74°37'16"S 164°11'02"E].
- 2) 채취지역 2: 장보고 기지에서 60 km 떨어진 내륙지역 [74°09'17"S 163°24'26"E].
- 3) 채취지역 3: 장보고 기지 근처 해안 [74°37'27"S 164°14'28"E].



그림 5. 시료가 채취된 세 지역에 대한 지도. 왼쪽은 장보기기지에서 60 km 떨어진 채취지역 2를 나타낸다. 오른쪽은 왼쪽 적색원의 확대 그림으로 장보기기지 주변의 채취지역1 과 채취지역 3을 보여주고 있다 (구글지도 이용).

- 방사선 분석에 쓰이는 시료는 일반적으로 화학, 생물학, 혹은 지질학에 사용되는 시료와는 달리 시료의 원형 보존을 위한 특별한 처리과정을 요하지 않는다. 그렇기 때문에 특정한 채취기법을 적용하지 않고 계획했던 채취 지역에서 4-5개 지점을 무작위로 선정하여 채취하였다 (그림 6 참조). 토양과 눈시료는 채취기(Edelman Auger)와 모종삽을 이용하여 표피층의 토양과 눈 시료를 채취하였으며, 수동식 드릴을 사용하여 해수 얼음을 채취하였다. 채취한 시료는 외부와 충분히 차단될 수 있는 투명비닐 밀폐백과 플라스틱 밀폐용기에 담아 보관하였다. 얼음시료는 장보고기지 내 실험실 상온에서 보관하여 자연스럽게 해동될 수 있도록 하였다.



그림 6. 세 지역에서 여러 형태의 환경시료가 채취되었다. 왼쪽 위로부터 시계방향으로 a) 장보고 기지에서 60 km 떨어진 지역의 지표면에서 눈시료 채취, b) 장보고 기지 근처 연못에서 담수시료 채취, c) 수동드릴장비를 이용해서 연안가 해수얼음 채취, d) 토양 샘플채취.

나. 남극토양시료 측정

- 남극토양시료의 전처리

토양시료는 상대적으로 방사성동위원소 비율이 높으므로 납으로 차폐된 캐비닛에 채취해 온 다른 시료와 분리하여 보관하였다. 보통 토양시료는 여러 날 실온에서 건조 혹은 저온(105 ℃) 건조 캐비닛에서 하루 정도 수분을 제거하여 준비한다 (그림 7 참조). 본 실험에서는 여러 날 (약 7일) 실온에서 건조하는 자연건조방법을 채택하였으며 건조 전 질량과 건조 후의 질량을 비교하여 수분율을 기록하였다. 건조된 토양시료는 크기의 표준망체에 걸러져 에탄올로 세척된 1L 실험용 마리넬리비커에 담겨 측정되었다.



그림 7. 전처리 전/후의 납극 토양

○ 납극토양 측정을 위한 에너지 및 효율 교정

측정 데이터의 에너지교정 및 검출기의 효율교정(energy and efficiency calibration)을 위한 인증표준물질은 1L 신형 마리넬리비커(Marinelli beaker)에 우무(agar)형태로 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)에 제작 의뢰하였으며 토양시료의 크기와 모양 조건을 인증표준물질과 동일하게 만들어주었다(그림 8 참조). 제작된 1L 마리넬리비커형 표준물질은 본 실험실에서 System 1으로 명명되어있는 100%순도의 P-type 원통형 검출기로 측정되었으며 데이터분석은 ORTEC의 GammaVision 프로그램을 사용하였다.

에너지교정은 ^{241}Am (59.54 keV), ^{109}Cd (88.03 keV), ^{57}Co (122.06, 136.47 keV), ^{139}Ce (165.86, 320.08 keV), ^{51}Cr (320.08 keV), ^{113}Sn (391.70 keV), ^{85}Sr (514.00 keV), ^{137}Cs (661.66 keV), ^{60}Co (1173.23, 1332.49 keV), ^{88}Y (898.04, 1836.05 keV), 총 13개의 에너지 값을 사용하여 수행하였다. 측정된 감마선스펙트럼의 채널(channel)값은 0~ 8191까지이며 에너지교정 커브는



그림 8. 검출기 효율교정을 위해서 한국표준과학연구원에 의뢰해서 제작한 마리넬리비커용 소스 (왼쪽)와 검출기에 놓았을 때 모습 (오른쪽)

$$Energy = 8.7375 + 0.370216 \times Channel - 9.81294 \cdot 10^{-7} \times Channel^2$$

로 계산되었다. 측정값과 에너지교정 커브의 값의 차이는 88.03 keV 에서 최대 1.66%, 1173.23 keV에서 0.01%이며 에너지가 커질수록 그 차이가 작아지는 양상을 볼 수 있다. 통상 Delta값의 절대값이 1보다 작으면 커브값과 실험값이 잘 맞는다고 본다. 효율교정에 쓰인 검출기의 효율은 검출기에서 생성된 펄스의 수 대비 선원에서 방출된 감마선 수로 정의되는 절대효율 (absolute efficiency, ϵ)이며 1L 신형 마리넬리비커 형태에서 방출되는 표준 선원을 측정할 결과 방사성동위원소가 임의의 에너지(E, 단위:MeV)를 가질 때

$$\epsilon = e LSUP \left\{ \sum_{t=1}^6 a_t E^{2-t} \right\}$$

$a_1 = -0.155166$, $a_2 = -4.380923$, $a_3 = 0.686296$, $a_4 = -0.106191$, $a_5 = 0.006335$, $a_6 = -0.000159$ 를 갖는 polynomial 형태의 함수를 갖는 효율 커브를 얻을 수 있었다.

효율 교정의 정확도를 높이고 추후 표준시료를 제작하지 않고도 다양한 모양의 비커를 사용하여 측정할 시료의 정확한 효율 교정을 위하여 몬테카를로 전산모사 프로그램 중 하나인 Geant4를 이용하여 검출기의 효율을 계산하였다. Geant4를 이용한 방사성동위원소의 행동 전산모사는 시료와 검출기의 물질분포 및 기하학적 모형에 인한 효율 교정에 효과적이며 검출기의 취급 부주의로 생기는 과실오차(erratic error), 환경 등의 간섭으로 인해 생길 수 있는 계통 오차(systematic error)를 줄일 수 있다. 본 전산모사에서는 검출기의 구조를 재현할 때, 전하가 입사되기는 하지만 수집되지 않는 영역인 dead layer[22, 23]를 지정하여 표준시료가 측정될 때와 비슷한 검출기 환경을 찾았다 (그림 9 참조).

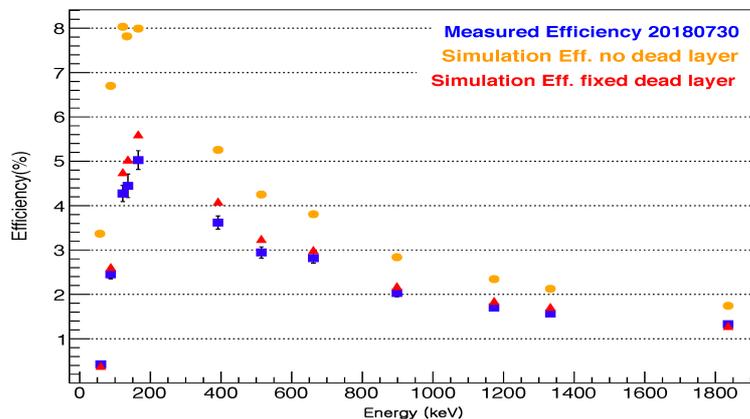


그림 9. 표준시료의 측정과 dead layer를 적용하여 전산모사한 검출기 효율값의 비교

이렇게 지정한 검출기 구조에 토양 구성성분을 마리넬리비커 형태의 변수로 지정하여 그 안에서 방사성동위원소를 무작위로 생성(random generator)시켜 효율을 계산하였다 (표 1).

표 1. 각 핵종의 측정과 전산모사의 효율값 비교

Nucleus		Energy(keV)	Measured(%)	Simulation(%)	S/M ratio
²³⁸ U	²²⁶ Ra	186	5.28	6.64	1.26
		352	4.02	4.81	1.20
	²¹⁴ Pb	295	5.23	5.00	0.96
		609	2.70	2.67	0.99
		1764	1.35	1.54	1.14
		1120	1.79	2.00	1.12
⁴⁰ K	1460	1.51	1.72	1.14	
²³² Th	²²⁸ Ac	911	2.04	2.29	1.12
		968	1.96	2.24	1.14
	²¹² Pb	238	5.00	5.41	1.08
		727	2.38	2.67	1.12
	²⁰⁸ Tl	2614	1.05	0.96	0.92
		583	2.79	2.80	1.00
		860	2.12	2.34	1.10
¹³⁷ Cs	661.7	2.55	3.07	1.20	
⁶⁰ Co	1173	1.73	1.83	1.05	
	1332	1.60	1.67	1.04	
⁵⁴ Mn	835	2.17	2.58	1.19	

○ 측정시간의 최적화

측정시간을 길게 하면 할수록 오차를 줄일 수 있지만 측정시간을 무한히 할 수는 없으므로 최적화된 백그라운드 측정시간과 시료 측정시간은 다음과 같은 식을 따른다.

$$\left| \frac{T_{S+B}}{T_B} \right|_{opt} = \sqrt{\frac{S+B}{B}}$$

이 때, T_{S+B} 는 백그라운드가 포함된 시료의 측정시간, T_B 는 백그라운드의 측정시간이며 S 는 측정된 시료의 계수율(counts per second), B 는 측정된 백그라운드의 계수율이다. 본 실험에서는 시료의 측정 가능 시간(T_{S+B})을 지하실험실 방문 주기인 7일(604800초)로 하였다. 시료의 계수율($S+B$)은 분류코드 AJS001 시료의 측정 데이터로부터 얻었으며 백그라운드의 계수율(B)은 2018년 7월 30일에 측정된 마리넬리비커 백그라운드 데이터를 사용하였다. ¹³⁷Cs을 기준으로 계산된 백그라운드의 측정시간(T_B)은 14.12 시간(약 0.6 일), ⁴⁰K 기준으로 2.8시간(약 0.1일)이었다. 따라서 본 연구에서는 환경 시료를 7일 측정 시, 백그라운드는 최소 1일 동안 측

정하는 것으로 결론지었다.

○ 최소검출가능농도(MDA, Minimum Detection Activity) 계산[24, 25]

적정 신뢰도 내에서 시료의 계수율로부터 백그라운드의 계수율을 구분할 수 있는 한계를 최소 검출한계(MDL, Minimum Detection Limit)라고 한다. 95%신뢰도 구간에서의 최소검출한계 (N_D)는

$$N_D = 2.706 + 4.654 \sqrt{N_B}$$

이다. 이 때, N_B 는 임의의 시간 동안 측정된 감마선의 수 이다. 최소검출가능농도(MDA, Minimum Detection Activity)는

$$MDA = \frac{N_D}{feT}$$

이며, f 는 붕괴당 해당 감마선 방출비, e 는 절대효율, T 는 측정시간이다. 따라서 측정시간이 길어지면 길어질수록 백그라운드와 시료의 계수율 구분이 용이하지만 무한정 측정이 불가능하기 때문에 시간에 따른 최소검출가능농도를 계산하여 실험 목적 및 환경에 맞게 측정시간을 정하여 준다.

본 연구의 실험에서 측정된 System 1의 백그라운드 데이터를 사용하여 계산하면 측정시간이 길어질수록 최소검출가능농도의 값이 작아지는 것을 볼 수 있으며 분류코드 AJS001의 남극 토양에서 측정된 ^{137}Cs 의 계수율이 0.17 Bq/kg, ^{60}Co 의 계수율이 0.027 Bq/kg인 것을 고려할 때, 토양시료 측정을 1일만 해도 무방하다고 볼 수 있으며(국내 환경방사선 시료들은 보통 2일 측정) 7일이면 충분하다고 볼 수 있다.

표 2. ^{137}Cs 과 ^{60}Co 의 시간에 따른 최소검출가능농도 값

Counting Time(Sec)	MDA(Bq)	
	^{137}Cs	^{60}Co
87645 (≒1day)	0.010	0.009
152478	0.007	0.005
368589	0.003	0.004
728765	0.002	0.002
1449115	0.001	0.002
2169485	0.0008	0.001
2400003	0.0007	0.001

○ 불확도 계산

감마선 스펙트럼의 획득은 ORTEC의 GammaVision 프로그램을 사용하였으며 각 에너지에 해당하는 방사성동위원소의 활성도(activity, A_E)는 다음과 같이 계산된다.

$$A_E = \frac{C_E}{\varepsilon_\gamma \times P_\gamma \times t \times m}$$

여기에서 ε_γ 는 검출기의 절대 효율이며 P_γ 는 감마선의 방출 확률, t 는 측정 시간, m 은 측정된 시료의 질량이다. 푸아송분포를 따르는 감마선 피크의 계통오차(systematic error)는 측정된 계수치(N_b, N_{s+b})의 제곱근값($\sqrt{N_b}, \sqrt{N_{s+b}}$)으로 나타낼 수 있으며 시료만의 참 계수율(n_s)과 counting 표준편차(σ_{count})는 다음과 같이 계산된다.

$$\left(n_t \pm \frac{\sqrt{N_t}}{t_t}\right) - \left(n_b \pm \frac{\sqrt{N_b}}{t_b}\right) = (n_t - n_b) \pm \left(\sqrt{\frac{n_t}{t_t} + \frac{n_b}{t_b}} = n_s + \sigma_{count}\right)$$

한국 표준과학연구원에서 발행한 측정불확도 표현지침에 따른 합성 표준편차(total uncertainty)는

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{count}^2 + \sigma_{nor}^2 + \sigma_{rsum}^2 + \sigma_{abs}^2 + \sigma_{nuc}^2 + \sigma_{eff}^2 + \sigma_{geo}^2 + \frac{\sigma_{sys}^2}{3} + \sigma_{abl}^2 + \sigma_s^2}$$

이다. σ_{rsum} 은 과실오차(random error)로 1%로 지정하여 주었으며 σ_{sys} 은 계통오차(systematic error)로 1%로 지정해 주었다.

○ 토양시료 측정 결과

위 그림에서 보는바와 같이 남극 장보고 기지 근처 토양측정 스펙트럼에 ^{137}Cs 피크가 뚜렷함을 알 수 있었다. 현재까지 측정된 남극의 토양시료와 국내에서 채취된 토양시료의 방사성동위원소 농도를 비교하면 다음과 같다 (표 3과 그림 10 참조).

표 3. 국내 두 곳의 토양과 남극 토양의 방사성동위원소 농도 비교

시료 채취장소	^{238}U (Bq/kg)			^{232}Th (Bq/kg)			
	^{226}Ra	^{214}Pb	^{214}Bi	^{228}Ac	^{212}Pb	^{212}Bi	^{208}Tl
공주3	22.65±8.47	33.70±12.58	35.08±13.09	79.18±29.5	63.04±23.52	118.89±44.39	99.77±37.23
경주3	24.12±4.53	21.35±3.98	21.10±3.937	31.74±5.9	34.37±6.41	34.84±6.53	28.93±5.40
남극1	48.93±18.33	46.15±17.22	46.18±17.23	71.77±26.78	75.98±28.35	78.13±29.19	62.73±23.41
남극2	49.11±18.42	44.44±16.58	44.25±16.51	70.97±26.48	75.25±28.08	76.85±28.70	61.71±23.03
Worldwide range	17-60			11-64			

시료채취장소	^{137}Cs (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
공주	0.28±0.11	823.71±307.4
경주	0.32±0.07	621.34±115.90
남극1	0.17±0.08	969.60±361.79
남극2	0.25±0.01	940.81±351.09

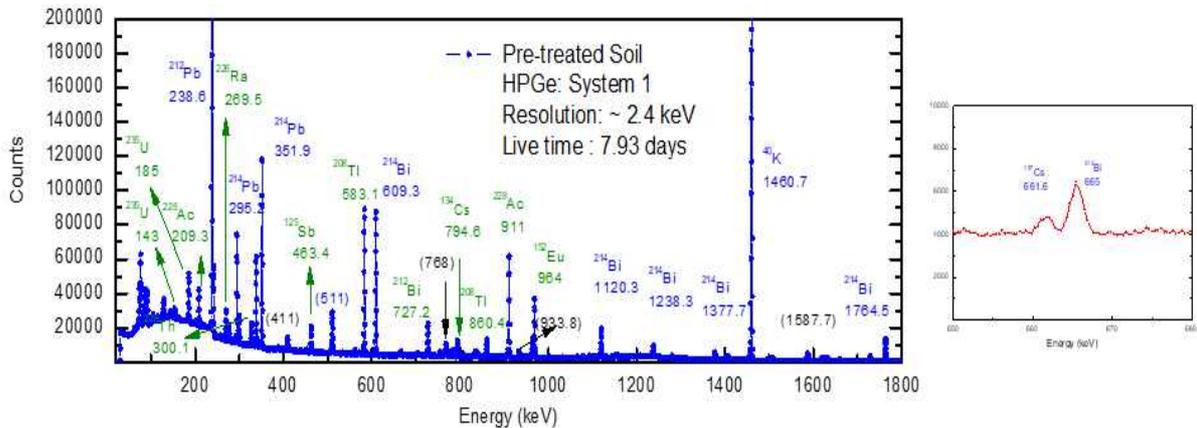


그림 10. 시료지역 1에서 채취된 토양시료의 방사선 동위원소에 방출되는 감마선 스펙트럼. 오른쪽은 확대그림으로 ^{137}Cs 피크가 선명하게 보인다.

다. 남극해수시료 측정

○ 1 차년도는 과제일정과 남극하계연구활동기간이 맞지가 않아 남극에서의 환경시료의 채취가 불가능하였다. 그래서 2018년 1월에 남극 세종기지로 연구활동을 떠나는 이화여대 지질학과 이정훈교수 연구팀의 협조를 구하여 세종기지 근처의 critical zone observatory 지역에서 채취된 해수시료를 확보할 수 있었다. 본 연구팀이 남극에서 직접 시료를 채취하기 전에 앞서 준비단계연구로 확보한 시료의 전처리과정을 진행하고 측정과 분석을 실시하였다.

○ 남극해수시료의 전처리

남극 해수에 잔류하고 있는 ^{137}Cs 의 농도를 정확하게 알기 위해서는 해수 시료를 AMP공침법으로 전처리하여 준다[26, 27]. 해수시료를 가루와 섞어 2일 정도 공침시킨 후 물을 제거한 후

적외선 아래에서 1-2 일정도 수분을 제거하여 준다. 60 L의 시료를 공침하여 원통형비커 (cylindrical beaker, CB)에 담았을 때, 2 cm 높이가 되었으나, 본 연구에서는 확보한 시료의 양이 많지가 않아 15 L의 시료를 공침하여 5 mm 높이의 시료를 만들었다 (그림 11 참조).

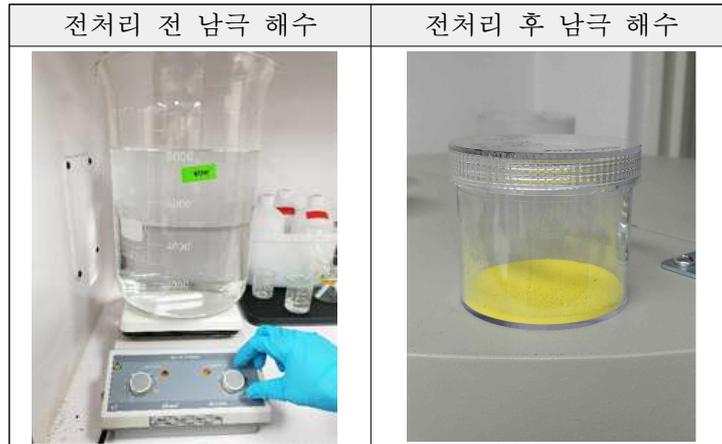


그림 11. 전처리를 위해서 교반작업을 하고 있는 남극해수 시료(왼쪽)와 전처리 후 남극해수시료 (오른쪽).

○ 남극해수측정을 위한 에너지 및 효율교정

AMP 공침법으로 전처리된 해수시료는 원통형 비커에 담겨 측정되었다. 에너지 및 효율교정을 위하여 사용된 표준시료는 이 원통형 비커에 담긴 2 cm 높이의 필터페이퍼형태이며 토양 시료 측정을 위해 사용한 핵종과 동일한 10개의 핵종(에너지 영역 13개)이 선원으로 사용되었다(그림 12 참조).



그림 12. 해수시료 측정을 위한 검출기 효율교정에 사용한 표준시료

○ AMP공침법으로 전처리 된 남극해수시료의 측정결과

보통 해수시료에서는 지하수 및 빙하시료에서보다 ^{40}K 의 농도가 높으며, 해당 남극해수 시료에서 ^{137}Cs 은 검출되지 않았다. 해수시료는 세종기지 근처에서 채취한 해수로 ice core, 혹은 토양시료 같이 오랜 기간 축적된 시료가 아니기 때문에 ^{137}Cs 이 검출되지 않는 것이 논리적으로 타당한 것으로 사료된다.

○ 국내 해수시료의 측정

시료 측정 결과의 타당성을 입증하기 위하여 환경방사선 측정 분야를 선도하는 경북대학교의 방사선과학연구소와 본 연구그룹에서 동일한 해수시료를 측정하였다. 해수 시료는 AMP공침법으로 전처리 되었으며, 전처리 후 시료에서는 ^{137}Cs 의 피크가 명확하게 보이고 있다. 청평 지하 방사선 실험실에서 측정된 ^{137}Cs 의 농도는 2.73 ± 0.029 mBq/L 였으며, 경북대학교에서 측정된 ^{137}Cs 의 농도는 2.23 ± 0.28 mBq/L로 두 데이터가 오차범위안에 있는 것을 알 수 있다(그림 13 참조).

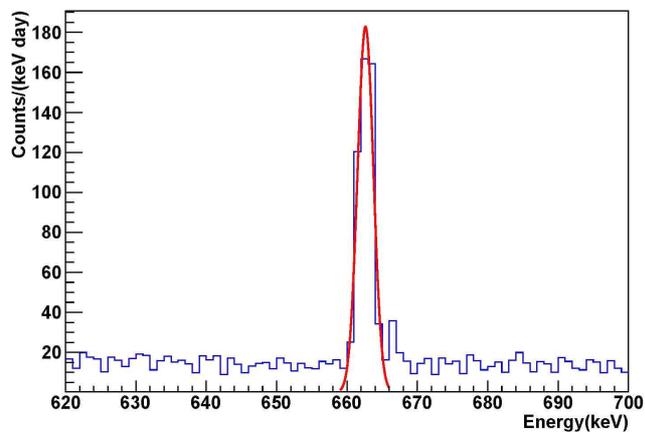


그림 13. AMP공침한 국내 해수시료의 존재하는 ^{137}Cs 의 감마선 스펙트럼

3. 3차년도 연구 내용

가. 남극 세종기지 탐사 및 남극 환경시료의 채취

○ 본 연구는 기본적으로 남극시료채취, 방사선 측정, 데이터 분석 3 가지로 분류할 수 있으며, 이중 남극시료 채취는 2차년도 장보고기지, 3차년도 세종기지 주변을 중심으로 이루어졌다. 장보고지가 위치한 남극내륙과는 달리 세종기지가 위치한 킹조지 섬은 아남극권으로 상대적으로 많은 동식물 개체가 서식하고 있어 2차년도와 달리 토양과 담수 이외에도 이끼를 추가로 채취하였다.



그림 14. 그림은 바톤반도 해변을 중심으로 대략 6 km에 걸쳐 토양, 담수, 그리고 이끼시료가 채집된 6지역을 보여주고 있다.

- 채취 장소는 그림 14에서 보듯이 세종기지가 위치한 바톤반도 (Barton Peninsula)를 중심으로 마리안 소만 (Marian Cove)과 포터 소만 (Potter Cove)으로 이어지는 해안가를 따라 그림에서 보듯이 6곳을 선정하여 실시하였다. 인공방사능의 유입경로는 대기를 통한 낙진으로 사료되며, 그렇기 때문에 특성상 지표면에 축적되는 인공방사능의 분포의 지역적 의존성은 낮을 것으로 추정된다. 그러나 바톤반도 전면에 넓은 영역을 포함하도록 채취범위를 정하였으며, 토양, 담수, 그리고 이끼의 방사능 원소 축적 비율을 비교하기 위해서 모두 같은 채취 지역에서 동시에 채취를 하였다 (그림 15 참조).
- 남극에서 탐사활동 가능기간과 (대략 11월에서 그 다음 해 2월) 당해 연도 과제기간 (6월1일 - 다음 해 5월 31일) 과는 대략 4개월의 시간차가 발생하여 과제의 최종종료 시점에 맞추어서 채취한 시료에 대한 분석과 결과도출을 이루어내는 것은 물리적으로 불가능하다. 더구나 코로나 사태로 인하여 5월 초 도착 예정이었던 2019년-2020년 남극하계연구기간 중 채취한 시료는 아직도 한국으로 배송되지 못하고 있다 (2020년 7월 30일 도착 예정). 그러나 2019년에 세종기지에서 남극연구활동을 하였던 극지연구소 남극생물학의 김지희 박사팀의 협조를 얻어 확보한 지의류(학명: *Usnea aurantiaco-atra*) 1종[28], 이끼 1종 (학명: *Chorisodontium aciphyllum*) 과 2018년 - 2019년 남극하계연구 기간에 장보고기지 주변에서 채취한 토양 시료를 대상으로 방사선 측정과 분석을 시행하여 만족할 만한 성과를 얻을 수 있었다.



그림 15. 시계방향으로 왼쪽 위쪽으로부터 토양시료측정 중인 연구원, 자연건조된 토양시료들, 이끼(학명:Warnstorfia fontinaliopsis), 그리고 작은 호수에서 채취된 담수 시료.

나. 시료의 측정과 분석

- 일반적으로 환경방사선시료에서 검출되는 인공방사능 핵종은 방사선 선량이 매우 적기 때문에 실험실에서 발생하는 배경방사선 및 시료 자체 내에서 발생하는 자연방사선과 분리해서 검출하기가 쉽지가 않다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 채취한 시료에 대해 선처리(pre-processing)를 실시하여 검출효율을 최대한 높이도록 하였다. 토양시료는 실온에서 자연



그림 16. 왼쪽부터 선처리 후, 마리넬리 용기에 담기 토양과 이끼 시료 그리고 오른쪽이 5 cm의 소형 비이커에 담긴 지의류.

건조 후 2x2 mm 표준망체를 이용하여 체가름 후, 1L 마리넬리비커에 담겨 측정하였다. 이끼와 지의류 역시 먼저 실온에서 자연 건조 후 분쇄기로 이용하여 분말형태를 만든 후 1 L 마리넬리 비이커와 직경 5 cm의 실린더 형태의 플라스틱 비이커에 각각 담아 측정하였다. 남극에서의 동식물에 대한 채취는 극히 제한이 되기 때문에 채취량이 많지가 않은 지의류는 마리넬리 비이커를 사용하지 않고 소형 비이커를 사용하였다 (그림 16 참조).

- 2차년도와 마찬가지로 시료의 전처리이외에도 배경방사선을 최소화하기 위해서 시료의 방사선 측정은 그림에서 보듯이 15 cm 두께의 납과 5 cm 두께의 구리의 방사선차폐시스템으로 구성된 고감도 HPGe 검출기를 이용하여 측정하였다 (그림 17 참조).



그림 17. 왼쪽은 내부 5 cm 두께의 구리와 외부 15 cm 두께의 납으로 둘러싸인 HPGe 검출기 헤드와 그 위에 놓여있는 지의류 시료. 오른쪽은 방사선차폐 검출시스템의 외부모습. 시료를 넣은 후 800 kg의 납문은 자동제어에 의해서 닫을 수 있다.

- 데이터 분석에 앞서서 3종의 시료와 사용된 HPGe 구성된 감마선 측정시스템에 대한 검출 효율 (efficiency calibration)은 GEANT4 시뮬레이션을 통해서 진행하였다. GEANT4 시뮬레이션의 적합성은 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)에 제작 의뢰한 표준 방사선원을 사용하였고, 표준선원은 2개가 주문제작 되었으며, 구조는 모양과 이끼에 사용된 1 L 마리넬리 비이커와 지의류에 사용된 소형 비이커와 동일한 형태이다. 그림 18에서 보여 주듯이 GEANT4 시뮬레이션과 표준선원의 측정결과는 10% 이내로 일치함을 보여주었으며, 이를 바탕으로 각 시료에 대한 검출기의 절대효율(absolute efficiency)을 GEANT4 시뮬레이션을 통해 구하여 각 시료에 대한 특정 방사선 핵종에 대한 농도, 즉, specific activity를 계산하는데 사용하였다 (그림 19 참조).

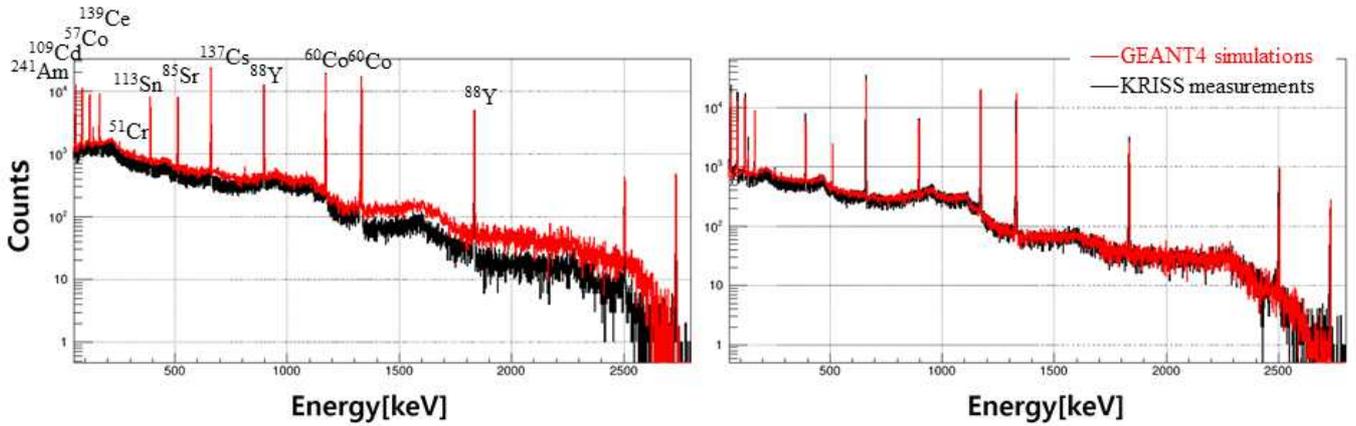


그림 18. 10개의 방사선 핵종을 포함하고 있는 KRISSE 표준 소스 검출결과와 GEANT4 시뮬레이션 측정결과를 비교한 그래프로 10% 범위에서 일치하였다. 왼쪽은 마리넬리 비이커 소스 오른쪽은 5 cm 직경의 소형 비이커 소스를 나타내면 측정시간은 1800 초이다.

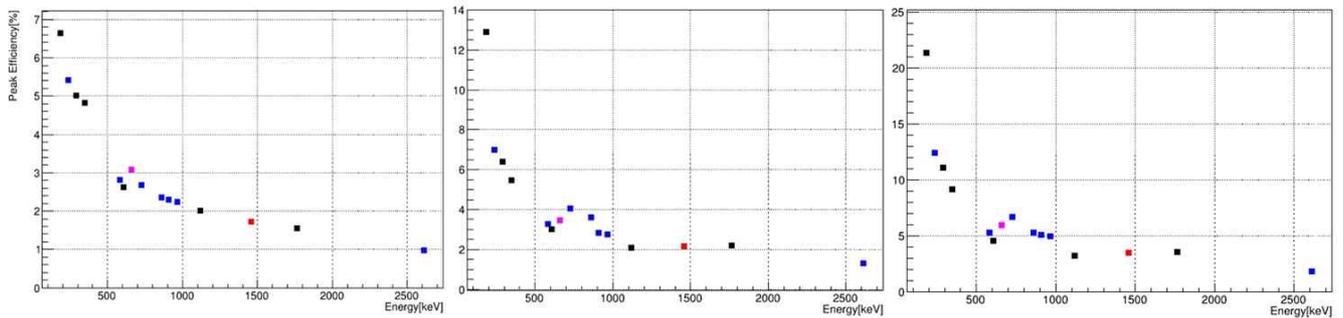


그림 19. GEANT4 시뮬레이션을 통해 얻어진 검출 감마선 에너지에 따른 절대효율 (absolute efficiency) 값. 왼쪽부터 시료가 토양, 이끼, 지의류를 사용했을 경우. 사용된 감마선 에너지는 ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K 계열 핵종이 붕괴할 때 방출되는 에너지들이다.

2 절 연구 결과

1. 1차년도 연구 결과

- 1차년도는 본그룹이 남극에서의 직접 탐사가 시작되기 이전으로 주로 시료 측정시스템에 대한 구축과 검증을 실시하였으며, 남극의 환경시료에 대한 연구와 분석은 극지 연구소에서 제공된 빙하코어 시료분석을 통해서 이루어졌고 원폭실험 등의 인공핵반응의 부산물로 발생하는 ^{137}Cs 핵종을 추적하였다.
- 극지연구소 극지고환경연구부에서 제공된 빙하코어 시료는 총 3개이며, 빙하코어 식별코드, Tarn8 (대략적 생성 연대기: 7000 년 전), Styx27 (1945년), 그리고 H25 (2012년) 인 이들 빙하코어 샘플의 분석을 통해 그림 20에서 보듯이 빙하코드 H25에서 ^{137}Cs 핵종을 확인하였다.

이를 통해서 빙하코어에 축적된 방사성물질에서 방출되는 방사선(감마선) 분석을 통해서 빙하코어의 생성시기 측정이 가능함을 보여주었다.

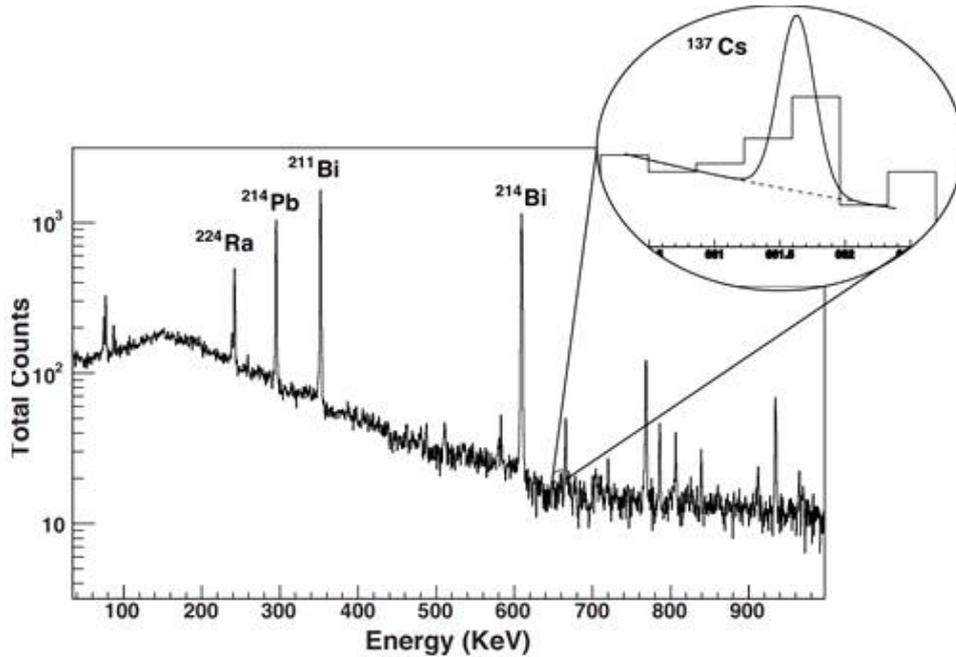


그림 20. 빙하시료 H25에서 핵실험의 증거자료가 될 수 있는 ¹³⁷Cs에서 방출되는 662 keV 감마선이 검출되었다.

극지연구소

2. 2차 및 3차년도 연구 결과

- 이미 언급되었듯이 당해연도 과제에의 시작은 6월이지만 남극에서 탐사활동 가능기간이 대략 11월에서 그 다음 해 2월로 제한이 되고 채취한 시료가 한국으로 배송되는 시기는 3월에서 5월 사이이기 때문에 연구결과에 대한 도출시기가 6월에서 1년 정도의 지연이 된다. 또한, 3차년도인 2019년-2020년 남극하계연구기간 중 채취한 시료는 코로나 바이러스 때문에 (2020년 7월 30일 도착 예정) 아직 분석을 시작하지 못하였다. 그렇기 때문에 2/3차년도 연구결과는 2019년에 세종기지에서 남극연구활동을 하였던 극지연구소 남극생물학의 김지희 박사팀의 협조를 얻어 확보한 지의류(학명: *Usnea aurantiaco-atra*) 1종, 이끼 1종 (학명: *Chorisodontium aciphyllum*)과 2차년도인 2018년 - 2019년 남극하계연구 기간에 장보고기지 주변에서 채취한 토양 시료를 대상으로 방사선 측정과 분석을 토대 시행하여 얻은 결과이다.
- 그림21의 에너지 스펙트럼에서 보듯이 측정된 3개의 시료 분석을 통해 얻어진 에너지 스펙트럼을 보면 매우 흥미로운 사실을 관측할 수 있는데, 예상보다 많은 ¹³⁷Cs이 이끼와 지의류에서 검출되었으며, 각 시료에 대한 방사능 핵종 분포 (자연방사능과 인공방사능)는 매우

치한 지형학적 조건 그리고 지의류와 이끼의 생물학적 특성에 의한 것으로 판단된다. 지의류와 이끼는 양분과 물을 흡수하는 뿌리가 없거나 발달되지 않아서 양분과 물을 토양으로부터 직접 전달받기 보다는 주로 대기 (atmosphere) 혹은 강수과정 (precipitation)을 통해서 직접 흡수하게 된다[29, 30]. 그렇기 때문에 대기를 통해서 남극으로 유입이 되는 ^{137}Cs 이 지의류와 이끼의 전체 물체를 통해서 축적이 되었을 것이라고 추정한다. 반면, 자연계에서 가장 풍부한 자연방사선핵종인 ^{238}U 계열 붕괴 핵종과 ^{232}Th 핵종은 킹조지 섬 형성과정부터 생성된 것으로 주로 토양 속에 분포한다. 그리고 대기중에서 전달되는 ^{137}Cs 도 대부분은 토양에 축적이 되기는 하겠지만, 그 축적량에 있어서는 토양 속 자연방사선핵종과 비교할 수 없이 적은 양이기 때문에 이러한 결과가 도출된 것으로 보고 있다. 자연방사선 핵종인 ^{40}K 는 3개의 시료 모두에서 강하게 나타는데 이것은 ^{40}K 분포하는 특성과 관련되어 있는 것으로 보인다. ^{40}K 은 토양 그리고 대기 속에 모두 존재하는 핵종이다. 시료에 축적된 핵종의 농도, 즉 specific activity 값은 표 4와 그림 22에 자세하게 설명되어 있다.

- 이끼와 지의류, 그리고 토양 샘플마다 고유한 방사선 핵종 분포를 형성하고 있다는 연구결과는 남극지역의 환경방사선에 의한 생태연구나 생물학연구의 중요한 기반 자료로 사용 될 수 있을 것으로 사료되며, 특히, 이끼와 지의류에서 예상보다 많은 발견된 것을 볼 때, 향후, ^{137}Cs 이 많이 피폭된 지역과 적은 지역간의 생태 비교 등, 새로 유입되는 인공방사선 핵종과 그로 인한 환경적 생태학적 영향에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다[28, 31].
- 3차년도에 수행되었던 세종기지가 위치한 바톤반도에서 채취한 시료의 분석이 대외적 요인의 변화로 아직 진행되지 않고 있는 시점에서 확보된 시료의 분석만으로도 남극 서식 식물들과 토양 속에 축적된 방사성물질들의 분포가 서로 다른 특성을 보인다는 것은 생태학 혹은 환경학적으로 의미 있는 결과라고 생각된다. 향후 2차 환경시료가 도착해서 시료분석이 시작이 되고 현재의 결과와 연계해 연구가 진행된다면 매우 흥미로운 결과가 나올 것으로 기대하고 있다.

표 4. 이끼, 지의류, 토양 시료에서 관측되는 자연방사선 핵종(^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K)과 인공방사선 핵종 (^{137}Cs)의 specific activities.

	Moss (Bq/kg)	Lichen (Bq/kg)	Soils (Bq/kg)		
			site 1	site 2	site3
Cs-137	3.14 ± 6.29	1.17 ± 0.24	0.24 ± 0.03	0.29 ± 0.05	0.40 ± 0.81
U-238	-	0.42 ± 0.15	38.45 ± 2.44	33.25 ± 2.12	31.10 ± 2.79
Th-232	0.10 ± 0.01	0.99 ± 0.11	64.1 ± 3.4	56.05 ± 3.08	52.22 ± 3.95
K-40	41.42 ± 8.29	35.6 ± 7.18	1032 ± 87	819.5 ± 116.0	796.99 ± 159.4

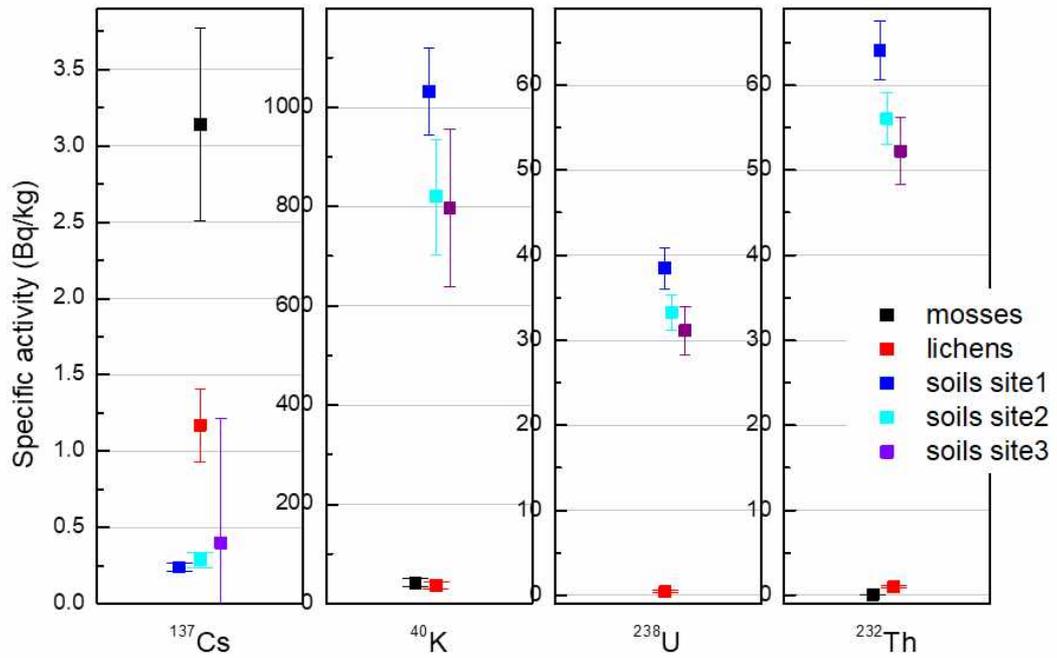


그림 22. 이끼, 지의류, 토양 시료에서 관측되는 자연방사선 핵종 (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K)과 인공방사선 핵종 (^{137}Cs)의 specific activities 비교.

극지연구소

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1 절 연구개발목표 달성도

1. 연구 목표

- 과제의 핵심연구목표는 본 그룹이 보유하고 있는 극저선량 방사선 측정기술과 분석경험을 바탕으로 남극기지 주변 지역의 토양, 빙하, 해수, 식물 등을 채취하고 그것에 축적된 자연 및 인공 방사성 동위원소의 검출 및 분석법을 개발하고 자연방사선과 핵실험이나 원전 사고로 인하여 퇴적된 인공방사선동위원소의 분포 형태를 연구하는 것이다. 또한, 이를 통해서 저선량 자연방사선과 인공방사능의 생물학적 그리고 생태학적 유해성 연구를 위한 기반자료를 제공하는 것이다.
- 1차년도는 남극기지에서 채취한 시료의 분석을 위한 기반 시스템 구축에 중점을 두고 배경 방사선을 최소화하고 검출 효율을 최대화하는 저선량 감마선 검출시스템의 추가 구축과 검출시스템 보정을 실시하였다. 구체적으로는 MCNP 및 GEANT4 모델링을 실시하고 이를 바탕으로 한 감마선 저감 검출 시스템의 설계 (HPGe 검출기, 납차폐체, 그리고 데이터 획득 전자모듈로 구성) 하는 것이다. 그리고 시료에서 측정된 에너지 스펙트럼의 정확한 분석을 위한 구축된 검출 시스템의 보정을 목표로 하였다.
- 2차년도는 극지지역을 직접 방문하고 시료를 채취하기 시작하는 시점으로 먼저, 장보기기지를 직접 방문하여 기지를 중심으로 1차 환경시료를 채취하고 그 시료들을 측정 및 분석을 하고 다음과 같은 일들을 목표로 하였다.
 - 기지 근처의 토양, 빙하, 해수, 이끼류, 지의류 등의 1차 시료를 채취한다.
 - 채취된 시료의 성격에 맞는 전처리 방법을 고안 및 구축한다.
 - 고순도 게르마늄 검출기(High purity germanium detector, HPGe detector)로 측정된 환경시료의 감마선 스펙트럼을 분석한다.
 - 중간연구결과를 바탕으로 논문을 작성한다.
- 최종년도인 3차년도는 샘플지역을 확대하여 세종기지를 기지를 중심으로 2차 환경시료를 채취하고 시료 측정 및 분석을 통해서 자연방사선과 인공방사성동위원소의 분포 상태를 측정하고자 하였으며 다음과 같은 일들을 목표로 하였다.

- 세종기지 주변에서 2차 환경시료를 채취한다.
- 1, 2차에 걸친 남극방문으로 채취한 시료의 분석과 확보된 데이터를 기반으로 남극대륙의 자연 및 인공방사선 로드맵을 작성한다.
- 최종연구결과를 바탕으로 논문을 작성한다.

2. 연구 목표 달성도

- 정성적 관점에서는 본 과제에서 목표를 충분히 달성하였다. 다만, 3 차년도의 경우, 코로나 바이러스 사태로 인해서 2019 - 2020 년 남극하계탐사기간에 세종기지를 방문하여 채취하였던 환경시료가 도착하지 (2020년 7월 30일 배송예정) 않아서 아직도 방사선 분석을 하지 못하고 있다. 그 때문에 2019년도 3차년도의 연구 목표 달성도가 미진하였으나, 향후 시료가 도착하고 분석을 시작하면 과제가 종료된 시점이기는 하지만, 목표치를 달성할 수 있을 것이라고 생각한다.
- 정량적 측면에서 1차년도는 목표치를 달성하지 못하였으나 (목표한 SCI 논문을 두고만 한 상태였음), 2차년도에 논문이 출판되었다. 2차년도 연구결과를 바탕으로 작성한 SCI 논문은 3차년도 최종보고서 제출기한 전까지 출판하지 못하고, 6월에 최종 승인되어 8월에 출판될 예정이다. 앞서 언급했듯이, 3차년도는 채취시료를 아직도 배송 받지 못해서 시료 분석을 하지 못하고 있으나, 채취시료를 인계 받고 분석을 시작하여 논문을 작성할 예정이다. 전체적으로 대략 7-8 개월의 지연은 있었지만, 정량적인 목표치도 달성할 수 있을 것이라고 기대한다. 보다 자세한 연구목표의 달성도는 아래의 표를 통해서 확인할 수 있다.

구 분	%	성취도 판단			특기사항 (우수성 또는 부진사유 등)
		부진	정상	우수	
2017년도 목표 달성도	80		√		○ 1차년도 정량적 목표였던 논문성적을 달성하지 못하였지만, 향후 진행 된 남극에서 채취한 시료 분석을 위한 기반 시스템을 구축하였음.
2018년도 목표 달성도	100		√		○ 극지연구에서 제공받은 ice-core 시료를 이용하여 국내에서 처음으로 남극에서 ¹³⁷ Cs을 확인하고 발생년도를 추정함.
2019년도 목표 달성도	70		√		○ 남극에서 탐사활동 가능기간과 당해 연도 과제종료기간 과는 대략 4개월의 시간차가 발생함. 즉, 2019년 남극하계탐사기간에 채취한 시료는 다음 년도인 2020 과제종료 2개월 전에야 측정과 분석을 시작할 수 있음. 더구나 이번 연도는 코로나 사태로 인하여 아직도 한국으로 배송되지 못하였음 (7월 30일 배송예정). 그러나 2018년-2019년 채취시료를 통해서 만족할 만한 결과를 도출하고 국내 SCI 저널에 출판 하였음.

최종목표 대비 달성도	90		√	<ul style="list-style-type: none"> ○ 환경방사선 분석시스템 구축. ○ 장보고기지와 세종기지에서 주변에서 채취한 시료 분석을 통해서 인공방사선과 자연방사선의 분포에 대한 현상을 관측하고 축적 메커니즘을 추정. ○ 남은 10%는 2차시료가 정상적으로 배송되고 분석이 끝나는 2020년 말쯤에 달성할 예정
-------------	----	--	---	--

3. 정성적 성과

○ 2017년도

연구개발목표	달성내용	달성도	증빙자료 설명/제출 (필요시)
○ 저선량 감마선 검출시스템 추가 구축과 검출시스템 보정	<ul style="list-style-type: none"> ○ Well type의 ORTEC HPGe 검출기 시스템을 이용한 저선량 검출 시스템을 구축. ○ 구축된 검출기 시스템의 최적화 작업 실시. 	100 %	2017년 실적보고서 참고
○ 시료의 효율적 분석을 위한 시료 전처리 (pre-processing) 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> - 환경시료측정시 세슘의 분석을 위한 전처리 방법 조사 - 물시료의 방사성핵종을 분석을 위해 공침법 (co-precipitation process) 전처리 방법 연구 	100 %	2017년 실적보고서 참고
○ 국내지역에서 환경시료를 채취, 측정/분석하여 남극의 방사선 환경분포 연구를 위한 reference 데이터 확보	<ul style="list-style-type: none"> - 환경시료측정시 세슘의 분석을 위한 전처리 방법 조사 - 물시료의 방사성핵종을 분석을 위해 공침법 (co-precipitation process) 전처리 방법 연구 	100 %	2017년 실적보고서 참고

○ 2018년도

연구개발목표	달성내용	달성도	증빙자료 설명/제출 (필요시)
○ 남극장보고기지를 중심으로 1차 환경시료 채취 및 측정분석	○ 토양, 빙하, 해수, 식물로부터 1차 시료채취 - 채취된 시료의 전처리 - 시료로부터 감마선 측정 및 분석 시작	100 %	분석결과가 논문으로 게재 됨
○ 데이터 분석결과 도출	<ul style="list-style-type: none"> ○ 중간 연구를 바탕으로 논문 작성 - 한국 물리학회지에 2018년 11월에 게재됨 ○ 토양시료의 분석방법에 대한 피드백도출 - 남극 토양시료 측정을 위한 효율보정 및 불확도 계산법 정립 	100 %	논문이 게재되었고, 게재 내용 제출함

○ 2019년도

연구개발목표	달성내용	달성도	증빙자료 설명/제출 (필요시)
○ 샘플지역을 확대하여 세종기지를 기지를 중심으로 2차 환경 시료 채취 그리고 시료 측정 및 분석	○ 2019-2020 남극하계탐사 기간에 세종기지에서도 토양, 담수, 이끼 시료 채취 (채취 시료가 아직 한국으로 배송되지 못하여 시료 측정 및 분석은 과제종료 후에도 계속 진행 예정임). ○ 장보고 기지에서 1차 채취한 토양시료 및 제공받은 이끼 및 지의류 시료에 대한 방사선량 측정과 분석 완료.	70 %	최종 보고서에 제시된 현장활동 사진과 분석 스펙트럼등의 자료가 제시 됨.
○ 1, 2차 시료 분석과 확보된 데이터를 기반으로 남극 대륙의 자연 및 인공 ○ 환경방사선 분포형태에 대한 인과관계 도출	○ 1차 토양 시료 분석과 제공받은 이끼 및 지의류에 대한 자연 및 환경 방사선 분포와 인과관계 도출 (참고: 2차 시료는 한국으로 도착하면 바로 분석을 할 예정 임)	80 %	최종 보고서에 제시된 현장활동 사진과 분석 스펙트럼 등의 자료가 제시 됨.

4. 정량적 성과

○ 2017년도

구 분	목표(건)	달성 실적(건)	주저자 실적	달성도	증빙자료	비고
국외 논문	SCI					
	SCIE			%		
국내 논문	SCI	1		0 %		논문 제출하고 2018년 게재
	SCIE			%		
특허 출원						
기 타						

○ 2018년도

구 분	목표(건)	달성 실적(건)	주저자 실적	달성도	증빙자료	비고
국외 논문	SCI			%		
	SCIE			%		
국내 논문	SCI	1	주저자 1	100 %	논문게제	2018년 11월
	SCIE			%		

특허출원							
기 타							

○ 2019년도

구 분		목표(건)	달성 실적(건)	주저자 실적	달성도	증빙자료(제출)*	비고
국외 논문	SCI	1	1		%		
	SCIE				%		
국내 논문	SCI		1	주저자 1	%	논문게제	논문 승인되고 2020년 8월 게제예정
	SCIE				%		
특허출원							
기 타							

4. 인력양성 성과

○ 2017년도



(명)

구 분	석사(석사과정)		박사(박사과정)		계	
	목표	달성	목표	달성	목표	달성
인 원			1	1	1	1

○ 2018년도

(명)

구 분	석사(석사과정)		박사(박사과정)		계	
	목표	달성	목표	달성	목표	달성
인 원			2	2	2	2

○ 2019년도

해당년도는 계획이 없었음.

2 절 대외기여도

- 극지역 (남극)에서의 국내 최초의 방사선 환경 연구
 - 1987년 한국해양연구소에 극지연구실이 신설된 이후 극지 관련 연구는 괄목할 만큼의 큰 성과를 이루어 냈다. 그러나 모든 연구는 극지환경 변화, 지질환경 연구, 극지생물 연구 등의 생물/기후/자원 연구 등에 집중되어 있고 환경/생태 방사선 관련 연구는 전무한 실정이었고, 이러한 배경에서 본 연구는 남극에서의 국내 최초의 환경 방사선 연구라는 것 하나만으로도 유의미한 연구라고 사료 된다.
 - 또한, 국내 최초로 극지 연구소에서 제공된 빙하코어 시료 분석을 통해서 원폭실험 등의 인공핵반응의 부산물로 발생하는 ^{137}Cs 핵종을 추적하였음. 빙하코어 식별코드, Tarn8 (대략적 생성 연대기: 7000 년 전), Styx27 (1945년), 그리고 H25 (2012년) 인 이들 빙하코어 샘플의 분석을 통해 H25에서 ^{137}Cs 핵종을 확인하였다. 이것은 남극의 환경요소와 방사선 검출과 분석기술의 결합으로 다양한 환경 및 생태 연구가 가능하다는 것을 증명한다.
- 국내 자연생태계에서의 방사선 환경 연구의 영역을 남극까지 확대
 - 방사선 산업의 급속한 발전으로 인해서 방사선에 대한 이용이 증대되고 이에 따른 방사선 노출 및 크고 작은 방사선 누출 사고 등이 필연적으로 발생하고 있고, 이로 인한 방사선의 환경 및 생물학적 영향에 대한 연구가 매우 필요한 실정인 상황에서, 남극이 이러한 방사선 관련 환경 및 생태학 연구에 필요한 소스를 제공해줄 수 있다는 것을 확인한 중요한 성과라고 사료된다.
 - 현재, 국내 지역에 한정되어 있는 대부분의 환경방사선 연구를 남극까지 확대하여 그 연구범위를 넓혔다. 또한, 본 연구의 성과를 보다 발전시키고 극지지역에서 지속가능한 분야로 성장시키기 위해서 다른 분야(생태, 환경 등)와 공동연구의 필요성을 인식시켜주었다. 최종년도에서 관측했듯이, 방사선 핵종이 축적될 때는 환경샘플과 주위환경들의 조건에 따라 고유한 방사선에너지 분포를 가지고 있다. 다양한 핵종분포에 의해 발생하는 환경영향은 매우 흥미로운 결과를 초래할 것으로 생각되며, 이것은 생물학이나 환경학 등 여타 다른 분야와의 새로운 형태의 협력 연구를 촉진시킬 수 있을 것으로 기대한다.
- 저선량 환경시료에 대한 방사선 측정 분석 시스템 구축
 - 물론, 국내에도 몇몇 환경시료 분석 연구실이 존재하지만, 본 연구그룹은 국내 유일의 지하 350 m 깊이에 환경방사선 실험실을 건설하고 그 속에 방사선차폐 검출시스템을

구축하였다. 이를 통해서 보다 강력하게 배경방사선을 억제하고 미량의 환경시료 측정이 가능하도록 하였다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1 절 추가연구의 필요성

- 앞서 3차 년도 연구내용에서도 설명되었듯이 이끼와 지의류, 그리고 토양 샘플마다 고유한 방사선 핵종 분포를 형성하고 있다는 연구결과는 남극지역의 환경방사선에 의한 생태연구나 생물학연구의 중요한 기반 자료로 사용 될 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 이끼와 지의류에서 자연방사선 핵종보다 상대적으로 많은 ^{137}Cs 이 발견된 것을 볼 때, 향후, ^{137}Cs 이 많이 피폭된 지역과 적은 지역간의 생태 비교 등, 새로 유입되는 인공방사선 핵종과 그로 인한 환경적 생태학적 영향에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각한다. 즉, 방사선 핵물리학과 생물학 혹은 생태학 등의 연관 분야와 공동연구를 진행한다면 보다 유의미한 연구결과를 도출할 수 있을 것으로 기대하고 있다.
- 2차 년도 연구성과의 하나가 “빙하코어에 축적되어 있는 ^{137}Cs 을 추적해서 빙하코어의 연대 측정”인데, 빙하코어에서 발생하는 방사선 에너지를 측정을 통한 연대 측정을 국내 처음으로 하였다. 빙하코어는 냉동타임캡슐이라 불릴 만큼 다양한 지구환경변화에 대한 정보가 기록되어 있다. 이 때문에 국내외적으로 많은 기관들이 경쟁적으로 관련 연구를 진행하고 있다. 빙하코어가 가지고 있는 지구환경변화의 데이터는 기후, 대기, 지질, 그리고 자연 및 인공 방사선 등 매우 다양한 분야를 포함하고 있지만, 현재, 국내 빙하코어 연구는 환경방사선 분야에서는 거의 전무한 실정이다.
- 이처럼 남극 생태와 환경과 연계한 방사선 연구는 다양한 성과를 낼 수 있는 분야임에도 불구하고 그 동안 국내의 남극연구는 전통방식의 환경/기후/생태 연구에만 집중되어 있었고 생태 및 환경 방사선연구는 매우 미미하였다. 또한, 핵발전소 사고 등으로 인하여 방사선의 대한 걱정과 우려는 증가하고 있으며 방사선에 의한 피해를 예방하고 최소화하기 위해서 정부는 다양한 정책과 사업을 추진하고 있으나 대부분은 국내지역에만 한정되어 있다. 본 연구에서 보여주었듯이 이제는 환경방사선에 대한 연구를 남극으로 확대할 필요성이 있으며, 반면에 남극연구는 환경방사선이라는 분야와의 연계를 통해 남극연구의 다양성을 확보할 수 있을 것이다.
- 남극이라는 곳이 가지고 있는 고립지역은 특성은 남극을 하나의 거대한 실험실로 활용할 수 있는 환경을 제공하고 있으며, 이를 통해서 국내에서 힘든 다양한 환경/생태방사선 연구를 가능하게 할 수 있다. 남극환경방사선연구는 이러한 학문적 기대뿐만 아니라 핵응용 산업의

발전으로 계속 확대되고 있는 인한 인공방사선 노출에 대한 관리와 모니터링 기술, 그리고 방사선의 생물학적 영향력에 대한 분석방법에 대한 새로운 방법을 제시해 줄 수도 있을 것으로 생각한다.

2 절 연구활용 계획 및 기대효과

- 본 연구는 국내 최초로 남극의 환경시료에서 인공방사성동위원소를 확인하고 자연방사성동위원소의 분석 등의 성과를 내었지만, 일회성의 단발성 연구로 수행되었다. 그러나 남극 환경에서의 본격적인 환경방사선 연구를 위해서는 상당한 기간 동안의 지속적 관측과 분석이 필요로 한다. 이를 통해서 장기간 동안 남극의 환경방사성물질의 분포나 환경이 어떤 식으로 변화하였는지 관측이 가능할 것이다.
- 이번 남극연구가 방사성물질의 추적과 분석을 통해 물리적으로 접근한 시도였다면, 본 그룹이 계획하고 있는 향후 연구는 남극의 방사성물질 분포의 영향이 실제 남극환경에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 이를 위해서 고생물학 혹은 생태학 등 관련 기관들과 공동연구를 통해서 남극의 방사선환경에 대한 연구를 추진할 예정이다.
- 이러한 지속적 환경방사선연구를 통해서 기후/지질/대기/ 중심으로 수행되고 있는 국내 극지 관련 연구를 방사선 변화와 추적 연구로 확대될 수 있고, 궁극적으로는 국내 극지연구 활성화에 많은 기여할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 또한, 미량의 시료에서 발생하는 극저선량 방사선의 분석기술은 여타 다른 분야에서 방사선 분석의 기반기술로 사용 될 수 있을 것이라고 사료된다.

제 6 장 참고문헌

- [1] J. R. Cameron, Med. Phys. 25, 276 (1998).
- [2] B. L. Cohen, Med. Phys. 25, 277-8 (1998).
- [3] T. D. Luckey, K.S. Lawrence, Radiation Hormesis: THE GOOD, THE BAD, AND THE UGLY, Dose-Response 4(3):169 - 190 (2006).
- [4] B. L. Cohen, The Linear No-Threshold Theory of Radiation Carcinogenesis Should Be Rejected, J. of Am. Phys. Surg. Vol. 13 Number 3 (2008).
- [5] M. Koide et al., Earth and Planetary Sci. Latt. 44, 205-223 (1979).
- [6] C. C. Wendel et al., Sci. Total Environ. 461-462, 734-741 (2013).
- [7] Chang-Kyu Kim et al., J. Envir. Radioacti. 111 70-82 (2012).
- [8] M. Pourchet et al., J. Glaciol. 43, 435-445 (1997).
- [9] M. Pourchet et al., G. Winther, J. Environ. Radioactivity. 68 137 (2003).
- [10] Guillaume Lutter, Appl. Radiat. Isot. 81, 81 - 86 (2013).
- [11] M. Laubenstein et al., Appl. Radiat. Isot. 61, 167 - 172 (2004).
- [12] 김영덕, 지하실험연구단 김영덕, 물리학과 첨단기술 2014, 9월 제23권 9호.
- [13] 박강순, 최 선호, 지하실험 시설 구축 계획, 물리학과 첨단기술 2014, 9월 제23권 9호.
- [14] S. I. Lim et al., J. Korean Phys. Soc. 69, 1666 (2016).

- [15] X-5 MONTE CARLO TEAM, "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Volume II: User's Guide", Los Alamos National Laboratory, Report LA-CP-03-0245, 2003.
- [16] S. Agostinelli et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. A506, 250-303 (2003).
- [17] J. M. Godoy et al., J. Environ. Radioactivity, 41, 33-45 (1998).
- [18] M. G. do Nascimento et al., International Nuclear Atlantic Conference (2009).
- [19] C. J. Sanders et al., J. Envir. Radioacti. 101, 421-424 (2010).
- [20] 경북대 방사선 과학연구소 (2016), <http://rsri.knu.ac.kr/>
- [21] S. I. Lim et al., J. Korean Phys. Soc. 73, 1263 (2018).
- [22] J. Rodenas et al., Nucl. Instr. and Meth. A496, 390 (2003).
- [23] A. Elanique et al., Appl. Radiat. Isot. 70, 538-542 (2012).
- [24] J. M. Kirkpatrick et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 296, 1005-1010 (2013).
- [25] Y. Zhang et al., Appl. Radiat. Isot. 155, 108917 (2020).
- [26] M. Aoyama et al., Appl. Radiat. Isot. 53, 159-162 (2000).
- [27] Chang-Kyu Kim et al., J. Korean Asso. Radiat. Prot. 23, 115-121 (1998)
- [28] C. Laguna-Defior et al., Polar Biol. 39, 1183-1195 (2016).
- [29] P. L. Nimis et al., Monitoring with Lichens - Monitoring Lichens (Springer, 2002).
- [30] J. Smykla et al., Polish Botanical Studies 19, 49 (2005).

[31] R. Ochyra et al., The Illustrated Moss Flora of Antarctica (Cambridge University Press, Cambridge, 2008), pp. 685.





주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 PAP사업 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 PAP 사업으로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.