

남극내륙 빙하-대기-우주환경 종합연구 수행과 지원체계를 위한 기획연구

A planning for the comprehensive researches in
glacier-atmosphere-space and the establishment of the
research infrastructure in Antarctic inland

2022. 3. 31.

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극내륙 빙하-대기-우주환경 종합연구 수행과 지원체계를 기획연구”
과제의 최종보고서로 제출합니다.

2022. 2. 17.

총괄연구책임자 : 이강현

참 여 연 구 원 : 이주한, 양은진, 김지희, 지건화, 최문영,
이유경, 이형석, 김옥선, 최태진, 이춘기,
허순도, 황희진, 강정호, 서원상, 이형근,
한영철, 김대영, 김승희, 박정원, 이창섭,
최영준, 서규현, 최선웅, 정창현, 전성준,
윤동진, 곽호제, 김형권, 주현태, 한상우,
김홍귀, 권혁진, 한창희, 송다겸

보고서 초록

과제관리번호	PE21460	해당단계 연구기간	2021.8.1.~22.3.31.	단계 구분	1차년 / 1개년
연구사업명	중 사 업 명	연구정책·지원과제			
	세부사업명				
연구과제명	중 과 제 명				
	세부(단위)과제명	남극내륙 빙하-대기-우주환경 종합연구 수행과 지원체계를 위한 기획연구			
연구책임자	이강현	해당단계 참여연구원수	총 : 36 명 내부 : 36 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 150,000 천원 기업: 천원 계: 150,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소 미답지연구단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약					보고서면수
1. 과제 목적					
○ 남극내륙 육상루트(Korean Route)를 기반으로 심부빙하코어 시추, 블루아이스 시추, 천문-우주기상 관측 등 다양한 분야의 다학제 남극내륙 종합연구 마스터플랜 수립 ○ 극지연구소 및 서울대학교, 한국천문연구원 등의 국내 전문 연구기관이 주도하는 연구과제 개발을 통해 남극내륙연구의 저변확대 및 극지인프라 개발					
2. 남극내륙 연구거점 구축 및 지원체계 수립					
○ 모듈형, 이동형 기지 설계 - 다수의 남극내륙 연구거점의 동시 구축을 위해 단기간에 완료할 수 있는 모듈형 연구캠프 기반시설과 각 거점의 연구특성에 맞는 연구인프라로 구성된 연구거점 구축 ○ 남극내륙 연구거점 지원체계 수립 - 정기적인 남극내륙 횡단 프로그램 수행을 통해 각 연구거점의 현장연구를 위한 물자 및 연료의 안정적인 보급체계 확립 - 효율적인 인력수송을 위해 장보고기지-남극내륙 연구거점 간 항공루트 개발 및 운영					
3. 남극내륙 연구거점을 이용한 연구주제 발굴 및 세부 계획 수립					
○ 심부빙하코어 시추연구 - 100만년 이상의 기록이 보존된 남극내륙 빙하시료를 획득하여 과거 기후변화 기록을 복원함으로써 전 지구 기후변화 요인 간 상호작용 규명 - 심부빙하코어 시추기, 빙하시추 돔 등 3,000m 급 심부빙하코어를 시추할 수 있는 심부빙하코어 시추 시스템 확보 및 대한민국 주도의 심부빙하코어 시추 수행 ○ 천문-우주기상 관측연구 - 남극내륙의 최적의 천문우주 관측환경을 활용하여 새로운 천문관측영역 확장, 우주기상 변화와 이에 따른 전리층 상태 변화 등 국내에서 수행하기 어려운 천문우주 관련연구 수행 ○ 블루아이스 기반 온실가스 연구 - 남극내륙 특수환경인 블루아이스 지대 빙하시료의 공기방울 분석을 통해 과거 수백만년에 이르는 장주기 온실가스 농도기록 복원과 거동 메커니즘 규명					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	남극내륙 연구거점, 심부빙하시추, 천문우주관측, 블루아이스, 남극내륙보급			
	영 어	Antarctica, inland station, ice core drilling, Antarctic observatory, Blue ice, Antarctic traverse			

요 약 문

I. 제 목

남극내륙 빙하-대기-우주환경 종합연구 수행 및 지원체계를 위한 기획연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 2014년 2월 남극 장보고과학기지 건설과 2021년 12월 1,740km 의 남극내륙 진출루트 개척 등 남극내륙 진출기반 구축이 완료됨에 따라 내륙기반 연구의 필요성 대두
- 미국과 프랑스-이태리 등 남극내륙기지를 보유하고 있는 선진국들 간에 내륙연구 확장 정책에 따른 남극 내륙연구 선점을 위한 경쟁이 심화되고 있어 이들 국가와의 남극연구 격차 해소를 위한 국가적 차원의 적극적인 대응 시급
- 남극내륙 탐사/연구영역을 극대화하기 위해 남극내륙 연구거점을 구축하고 각 연구거점 별로 특화된 연구주제를 개발함과 동시에 해당분야의 전문기관이 주도하는 연구과제 개발 필요

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 남극내륙연구 선진국에서 수행 중인 남극내륙연구 국제동향 조사를 통해 기 확보한 남극 내륙 진출루트 기반의 남극내륙 연구주제 발굴
- 남극내륙 연구주제에 적합한 남극내륙 연구거점 선정과 내륙연구 기반시설 구축을 위한 종합적인 마스터플랜 수립

IV. 연구개발결과

- 심부빙하시추, 천문-우주환경 관측, 블루아이스 활용 온실가스 연구 등의 남극내륙 연구 주제 발굴 및 세부 계획 수립
- 남극내륙 연구거점 별 전문기관 주도의 연구역량 강화 및 남극내륙 현장연구 수행을 위한 계획 수립

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극 내륙연구 활성화를 위한 심부빙하, 천문우주과학, 블루아이스 등의 첨단 연구 수행 및 인프라 구축 위한 중장기 추진 전략 수립
- 장보고과학기지를 기점으로 코리안루트 사업과 연계하여 내륙연구 지원을 위한 연구거점 확보 및 내륙기반시설 구축 계획 수립

목 차

제 I 장. 서 언

1. 연구개발의 필요성 11

제 II 장. 남극 내륙연구의 성과 및 현황

1. 남극내륙연구의 성과 및 현황 31
2. 남극내륙 인프라 현황 50
3. 남극내륙 보급/지원 현황 57

제 III 장. 남극내륙 종합연구 수행 및 지원체계 구축 세부계획

1. 추진전략 69
2. 남극내륙 연구거점 기반구축과 심부빙하코어 시추 70
3. 남극내륙 천문-우주환경 관측거점 구축과 무인관측연구 수행 83
4. 블루아이스 기반 장주기 온실가스-기후변화 연관성 규명 96

제 IV 장. 남극내륙 종합연구 수행의 경제성 분석

1. 경제성 분석 방법론 112
2. 비용 추정 114
3. 비용효과 분석 116
4. 경제성 분석 요약 119

제 V 장. 결론 123

제 VI 장. 참고문헌 126

제 I 장 서 언

1. 연구개발의 필요성

가. 연구개발의 경제·사회·기술적 필요성

- 극지연구소는 2014년 2월 남극 장보고과학기지 건설을 통해 남극 내륙으로 진출할 수 있는 교두보를 마련함
- 극지연구소는 2017~2021년 동안 장보고 과학기지에서부터 남극내륙 연구거점 후보지를 거쳐 프랑스/이탈리아의 콘코르디아 기지에 이르는 총 1,740km 길이의 남극내륙 진출 루트(코리안 루트)를 확보하였으며, 성과확산을 위한 후속과제 개발 필요
- 최근 남극의 빙하 감소가 해양과 연안지역의 상호작용 뿐 아니라 남극내륙 빙상, 빙저 환경, 우주기상 등 다양한 지질·물리·화학적 작용이 연관되어 있음이 밝혀지면서 남극내륙 환경에 대한 다학제 연구 수요 증가
- 최근 심부빙하코어 시추, 천문우주 관측, 빙저호 시추 등 남극 내륙연구가 거대화, 융복합화 되는 국제적인 추세에 따라 극지연구소도 국제적 이슈를 주도할 수 있는 내륙기반 첨단 연구주제 발굴의 필요성 대두
- 호주·중국 등의 동남극(East Antarctica)에 대한 내륙연구 확장 정책에 따라 각국의 남극 내륙연구 선점을 위한 경쟁이 심화되고 있으며, 이에 대한 국가적 차원의 적극적인 대응이 시급함
- 남극에서 대한민국의 과학영토를 확보하기 위해 현재 개척 중인 코리안 루트를 활용하여 내륙연구 거점을 확보하고, 다양한 분야의 다학제 연구과제 발굴을 통한 차세대 첨단 남극내륙연구 추진전략 수립이 필요함

□ 기술적 측면

- 2014년 남극 로스해 테라노바만(Terra Nova Bay)의 장보고과학기지 건설을 통해 기존 해양중심의 대한민국 극지연구를 남극 내륙으로 확장시킬 수 있는 기반 시설을 확보함
- 장보고과학기지에서부터 남극내륙으로 진출할 수 있는 육상루트 개척이 성공적으로 진행됨에 따라 보다 연구에 중점을 둔 '연구거점'을 신규확보하고 해당 거점과 장보고 과학기지 사이의 인적·물적 수송을 최적화 하고 루트 상에서 연구기능이 강화된 후속사업 필요
- 남극연구 활동의 지역·범위 확대에 따른 남극내륙연구 안전성을 확보하기 위해서는 남극 내륙연구 선진국인 미국, 이태리, 프랑스, 일본, 중국 수준의 종합적인 연구 지원 인프라 확보가 필수적임
- 남극 연구활동의 영역과 범위가 넓어지는 국제적인 추세에 맞춰 극지 선도 연구주제를 확보하고 핵심 연구 영역을 선점하기 위해서는 심부빙하시추, 빙저호 시추, 천문/우주관



<지리적 거점 확보 단계에서 연구 거점 확보 단계로 나아가는 K-루트 후속사업 필요>

측, 미생물, 대기 순환, 원격탐사, 지구물리연구 등 다양한 분야의 연구를 수행할 수 있는 남극내륙 종합연구 기반시설 및 관련 인프라 구축이 필요함

- 남극내륙의 혹독한 자연환경을 극복하고 환경 친화적인 내륙연구시설을 확보하기 위해서는 건설, 소재, 에너지 등 다양한 분야에서 국내 전문 연구기관과의 극지공학 기술협력이 필요함.
- 대한민국 주도의 남극내륙 다학제 융합 연구 주제 발굴을 위해서는 기획 단계부터 국내 전문 연구기관과의 연구협력 체계 구축이 필요



<K-루트 상의 남극내륙 연구거점 후보지>

□ 경제·산업적 측면

- 기후난민의 증가, 북극항로 개척, 기후위기 극복을 위한 신기술 개발과 같이 최근 기후 변화가 전 세계 경제에 미치는 파급효과가 급증하고 있어 극지연구를 통해 전지구 기후 변화 메커니즘을 이해하고 미래기후변화 예측 정확도를 향상시키기 위한 노력이 시급함
- 장보고과학기지 건설 이후 남극 내륙으로의 연구영역 확대와 차세대 신규 연구분야 창출을 위해 대형 연구지원 인프라(육상 보급로, 내륙기지, 항공망 등)의 추가 확보 필요성이 증가하고 있음
- 현재 남극내륙기지를 운영하고 있는 국가들(미국, 이태리, 프랑스, 일본, 중국)과의 인프라 격차를 해소하기 위해서 극한지 내한 내외장재 개발, 친환경 에너지 활용기술 고도화, 원격제어형 극지환경 관측 시스템 구축 등 첨단 극지공학 기술개발 및 이를 활용한 새로운 경제적 가치 창출이 필요함

- 4차 산업혁명에 대응하기 위한 국가적 차원의 정책 동향에 따라 정부 출연연인 극지연구소도 산-학-연 협력을 통해 4차 산업혁명 핵심 기술을 적용한 신개념의 남극내륙 연구 인프라 개발이 필요함

□ 과학적 측면

- 최근 동남극 지역에서도 빙상의 변화가 관측되는 등 기후변화에 따른 남극의 환경변화가 급격하게 나타나고 있어 이에 대한 종합적인 모니터링 연구가 필요함
- 남극의 심부빙하코어는 과거 수십 만년 간의 고해상도 기후변화 기록을 복원할 수 있는 유일한 환경시료로써 온실기체, 화산활동, 천체운동, 인간활동 등 다양한 기후변화 요인에 대한 종합적인 연구를 통해 자연적 인위적 기후변화 메커니즘을 규명하고, 이를 통해 기후변화 예측 모델의 정밀, 정확도를 향상시킬 수 있는 핵심자료를 제공할 수 있음
- 남극내륙은 극한의 기온, 건조한 대기, 안정한 대기층 등 지구상에서 천체 관측에 가장 적합한 환경특성을 갖고 있는 것으로 알려져 있으며, 또한 밤이 계속되는 극야기간에는 우주와 유사한 환경을 제공하므로 향후 우주개발 경쟁시대를 대비한 다양한 천문우주 관련 연구를 수행할 수 있는 최적지임



<(좌)2021년 텍사스에서 폭설과 한파로 인한 전력난으로 다수의 사상자와 공장 셧다운 발생, (중)철도연과 공동개발한 고단열 컨테이너, (우)일본 JAXA가 유인 달기지 건설을 최종 목표로 제작한 이동형 남극 기지 유닛의 조감도>

□ 사회·문화적 측면

- 극지활동 진흥법 (법률 제18055호, 2021. 4. 13. 제정, 2021. 10. 14. 시행)에 극지활동 기반시설의 설치·운영에 관한 조항이 포함되어 법적근거가 마련됨

제11조(극지활동 기반시설의 설치·운영) ① 국가는 극지활동에 필요한 다음 각 호의 극지활동 기반시설을 설치하거나 확보하여 운영할 수 있다.

1. 극지 과학기지
2. 쇄빙선(碎氷船: 바다의 얼음을 깨트려 부수고 뱃길을 내는 특수 장비를 갖춘 선박을 말한다) 등 선박
3. 항공기
4. 그 밖에 대통령령으로 정하는 극지활동에 필요한 설비 및 장비

② 국가는 제1항에 따라 설치·운영 중인 극지활동 기반시설을 대학, 연구기관 또는 기업이 적극 활용할 수 있도록 필요한 조치를 하여야 한다.

- 지난 2020년, 과학기술정보통신부에서는 국민들의 행복하고 건강한 2045년을 만들어 나가기 위한 과학기술의 발전방향과 향후 정책 방향을 제시하는 '대한민국 과학기술 미래

전략 2045'를 수립하고 8대 과학기술 도전과제 중 하나로 우주와 극지개척을 제시함

- 남극과학연구위원회 (SCAR)의 중장기 비전 (Horizon Scan)에서 남극 빙하연구와 우주환경/우주기상 연구가 향후 20년간 인류가 남극에서 수행해야 하는 5대 연구분야로 선정되었으며, 2019년 IPCC 제 51차 총회에서는 '해양 및 빙권 특별보고서'가 채택되는 등 빙권 중심의 기후변화 연구가 국제적 정책 결정에 중요한 영향을 미치고 있음
- 제3차 남극연구활동 진흥기본계획 (2017-21)에 남극과학위원회의 중장기비전에 대응하는 남극연구 지평확대 전략으로서 남극내륙진출과 미지·미답의 연구영역 개척을 주요 추진 과제로 포함

	역량축적기 (제1차~제2차/2007~2016)	도약기 (제3차/2017~2021)	주도기 (제4차 이후/2022~)
전략	- 반도에서 대륙으로: 아라온, 장보고 - 기초과학중심, 융·복합 연구 기반 마련	- 대륙 해안에서 내륙으로: K-Route - 글로벌 이슈 대응 및 해결 기여	- 남극내륙 거점확립: 제3과학기지 - 미지·미답의 국제연구 개척 선도
연구·인프라	- 기저중심 연구 및 환경모니터링 - 연구 인프라 확보·운영	- 남극환경의 포괄적 보전(MPA, 해도) - 안전하고 특성화된 인프라 활용	- 남극을 통한 지구환경보전 기여 - 인프라의 안전·다목적 공동 활용
제도·운영	- 과학을 통한 남극 거버넌스 참여 - 남극 전문가 네트워크 확대	- 과학을 통한 거버넌스 현안 해결 기여 - 범국가적 남극 교육 홍보 확대	- 과학을 통한 남극 거버넌스 선도 - 남극 과학문화 진흥

<제3차 남극연구활동진흥기본계획(2017~21) 추진전략(제4차 계획은 수립 준비 진행중). 2022년부터는 주도기로 남극내륙 거점확립을 주요 전략으로 계획>

- 우리나라는 현재 2개의 남극 상주기지과 쉼 연구선 등 선진국 수준의 남극연구 인프라를 보유하고 있으며 특히 남극과학위원회 (SCAR : Scientific Committee of Antarctic Research) 의장국으로써 남극연구 분야에서의 위상이 강화된 바, 국가 위상에 맞는 남극 내륙 첨단연구 수행을 통한 국제사회 기여 필요
- 혹한의 땅인 남극내륙은 인류의 도전정신과 탐험정신을 실현하는 모험의 장이며, 내륙관련 연구 수행 및 기반시설 구축을 통해 국민 자긍심을 고취하고 과학적 관심사를 집중시킬 수 있는 계기를 마련할 수 있음

나. 연구개발하려는 기술(또는 연구개발내용)의 세계적 수준이 다음의 기술발전주기 (technology life cycle) 중 현재 어느 단계에 해당되는가 ?

☒ 개념정립단계

☐ 기업화 단계

☐ 기술의 안정화 단계

다. 지금까지의 연구개발 실적

□ 남극내륙 진출과 관련하여 기존에 수행된 연구

연구기간	과제명	총연구비 (간접비포함,천원)	연구 책임자	사업명
2014.06~2014.11	남극대륙 육상루트 개발 및 제3내륙기지 확보를 위한 기획연구	60,000	이종익	정책지원
2014.09~2015.08	남극 대륙 육상 탐사 지원을 위한 크레바스 탐지 연구	200,000	이주한	정책지원
2015.05~2016.04	남극 빅토리아랜드 Korean Route 사전조사와 빙저호 탐사를 위한 기획연구	500,000	이종익	정책지원
2016.06~2017.04	남극대륙 열수시추 기술 확보를 위한 기획연구	700,000	이종익	정책지원
2017~2019	남극 내륙 진출 루트 개척과 심부빙하/빙저호 시추 및 활용기술 개발	22,682,534	이종익	기관고유
2017.10~2018.04	남극 내륙 진출을 위한 광역 빙권 탐사시스템 구축(무인자동화 기술) 기획연구	50,000	이주한	정책지원
2019.09~2020.12	남극 내륙연구를 위한 기반시설 구축 기획연구	125,000	최문영	정책지원
2020~	남극 내륙연구를 위한 진출루트 개척 및 탐사기술 개발	6,990,821	이강현	기관고유
2020~	남극 David 빙하 빙저호 지구물리 탐사기술 및 열수시추 기술개발	2,750,789	이종익	기관고유

□ 남극내륙 진출 관련 실적 요약

국내기술	기술개발내용
남극내륙 탐사캠프	- 남극내륙진출루트 개척 국정과제를 통해 장보고 기지를 기점으로 3개 지점 연료 중간보급 캠프와 빙저호 시추 연구캠프 1개소 확보
빙하-대기-우주환경 관측시스템	- 캠벨빙하 및 데이비드 빙하지역에 총 8개 GPS 추적 시스템을 설치하여 장보고 기지 주변 빙하 이동양상 관측 - 장보고기지 및 데이비드 빙하 상류 2개 지점, K루트 ice divide 지점, 빙하코어 시추지점 2개소 등 북 빅토리아랜드 일대에 총 6개 자동기상 관측장치 (AWS) 설치 운영 중 - 무인천문관측 시스템 개발 및 장보고 기지 및 빙저호 시추 캠프에서 시험운영 중
빙하코어시추 및 분석 기술	- 270m 급 빙하코어 시추 시스템 보유 - 세계적 수준의 청정 분석 기술을, 고해상도 기후·환경변화 기록 복원기술 확보
빙저호 시추 및 분석기술	- 2,000m 급 빙저호 시추를 위한 발전 시스템 등의 기반시설 확보 - 현장에서 빙저호 시료의 오염을 최소화 하기 위한 청정 실험모듈 개발
남극횡단 프로그램	- 장보고기지 기점 총 936km 남극내륙 진출루트 개척과 550 톤의 화물과 100,000L의 연료를 수송할 수 있는 탐사선단 확보 - 총 24명의 남극내륙 탐사대원이 체류하며 내륙탐사를 수행할 수 있는 탐사 인프라 보유
극지공학기술개발	- 무인 자동차를 이용한 크레바스 GPR 탐사 시스템 개발 - 철도기술연구원과 공동으로 고단열 컨테이너 개발 및 운영, 고단열 컨테이너에 태양광 패널 및 풍력 발전기를 장착한 에너지 하베스팅 컨테이너 시스템 개발

□ 장보고 과학기지 건설

- 2014년 2월 완공된 장보고과학기지 건설을 통해 남극 대륙에서의 연구지원 시설 구축에 대한 건축기술 및 관련 인프라 조성·운영 기술을 확보함
- 장보고과학기지 건설을 통해 확보한 후보지 조사, 시설 건축 및 인프라 운영 기술을 응용하여 내륙연구 거점을 확보하고 효율적이고, 친환경적인 내륙기반 시설 구축 계획 수립에 활용 가능

□ 남극내륙 빙하코어 시추

- 2012~2019년 동안 기관고유사업을 통해 장보고기지로부터 반경 200km 지역 내에서 최대 200m 급의 천부빙하코어 4개를 시추하여 해당 지역의 과거 2000년간 기후, 환경변화 기록 복원 연구를 수행하고 있음
- 2020년부터 ‘국제심부빙하시추 네트워크를 활용한 대기-빙상 상호작용의 자연적, 인위적 특성 규명’ 기관고유사업을 통해 러시아에서 추진 중인 보스톡 남극내륙 심부빙하코어 연구에 참여하여 장주기 기후변화 기록 연구를 수행하고 있으나, 주도적인 연구수행이 제한됨

□ 남극내륙 운석탐사

- 2006년부터 기관고유사업 및 해수부 R&D 사업을 통해 앨런힐, 엘리펀트 모레인 등의 블루아이스 지대를 중심으로 운석탐사를 수행하고 있으며, 현재까지 1,100여개의 운석을 수집하여 태양계의 기원 등에 대한 연구를 수행하고 있음

□ 남극내륙 심부빙저호 시추기술 개발

- 2017~2019년 동안 수행한 ‘남극내륙진출루트 개척과 심부빙하/빙저호 시추 및 활용기술 개발’사업과 2020~2022년의 ‘남극 David 빙하 빙저호 지구물리 탐사기술 및 열수시추 기술개발’ 기관고유사업을 통해 K루트 과학루트 400km 지점에서 2,000m 빙하 아래의 빙저호 존재와 규모를 파악함
- 2,000m 빙하 아래 빙저호를 시추 및 분석하기 위해 이동형 발전 모듈과 극미량 청정실험 모듈 등을 기 확보하였으며, 영국 BAS와의 협력을 통해 열수시추기 및 윈치시스템 등의 빙저호 시추 시스템 개발을 추진 중임

□ 남극내륙 우주기상 자동관측 장비 개발 및 운영

- 극지연구소는 남극내륙 고층대기 및 우주기상 모니터링을 위해 경희대, 뉴저지 공대와 협력하여 연중 상시 자동관측 수행이 가능한 무인천문관측 시스템 (KAGO : Korean Autonomous Geophysical Observatory)을 개발하였으며, 장보고 기지와 빙저호 시추 캠프 등에서 시험 운영 중임

□ 남극내륙 육상 및 항공 레이더 탐사

- 극지연구소에서는 2020년부터 기관고유사업을 통해 남극내륙 빙상의 구조 및 빙저환경 특성 파악을 위한 레이더 장비 개발을 완료함
- 상기 레이더 장비를 활용하여 남극내륙 진출루트 상의 크레바스 위험구간 안전루트 파악과 남극내륙 심부빙저호 시추 최적지 선정 등에 활용 중임

□ 남극내륙 진출루트(코리안 루트, K-Route) 개척

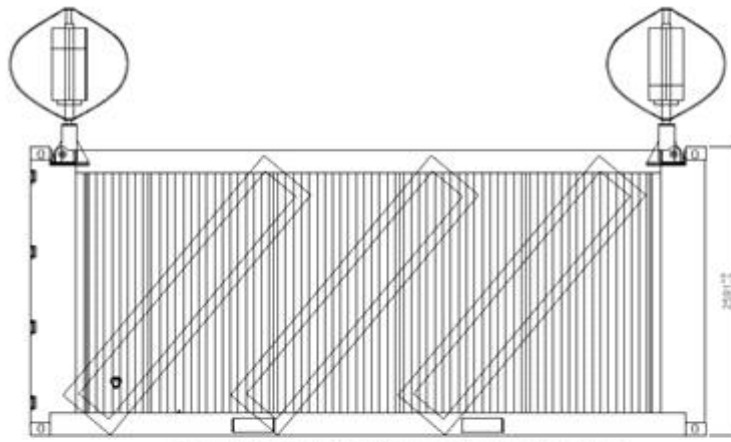
- 극지연구소에서는 2017~2019년 동안 수행한 '남극내륙진출루트 개척과 심부빙하/빙저호 시추 및 활용기술 개발'사업과 2020~2022년의 '남극내륙연구를 위한 진출루트 개척 및 탐사기술 개발'사업을 통해 현재 장보고과학기지-남극내륙 연구거점-콘코르디아 기지 간 총 1730km에 이르는 내륙진출루트 개척을 완료함
- 극지연구소에서는 현재까지 설상차 9대, 트랙터 2대, 카라반 2개조, 화물썰매 11대, 연료탱크 9대 등 총 500톤 규모의 화물과 10만 리터의 연료를 수송할 수 있는 남극내륙 탐사선단을 구축하였음



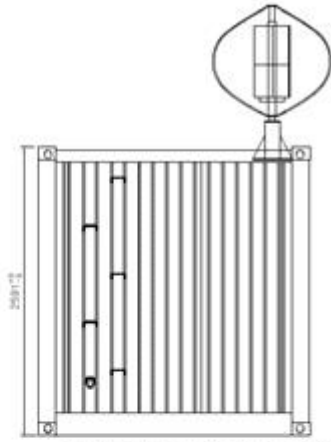
<대한민국 남극내륙 연구 현황>

□ 에너지 하베스팅 연구모듈 개발

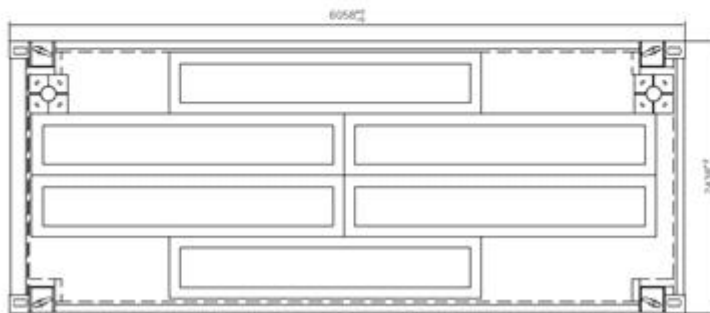
- 남극내륙 연구거점 운영 시, 에너지 효율 향상 및 탄소중립 대응을 위해 태양광 및 풍력 발전 시스템과 고단열 내장재를 장착한 에너지 하베스팅 연구모듈 개발 및 국내 시험운영 진행 중



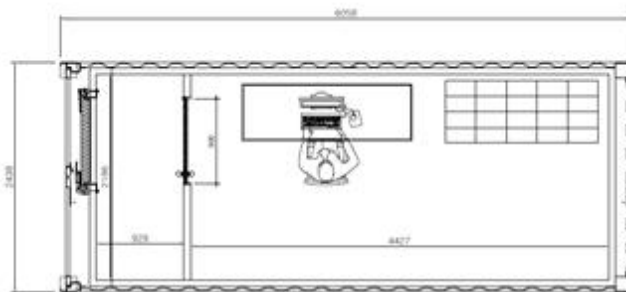
풍력 발전기 및 태양광 패널 장착 (정면)



풍력 발전기 장착 (측면)



지붕 태양광 패널 및 풍력 발전기 장착

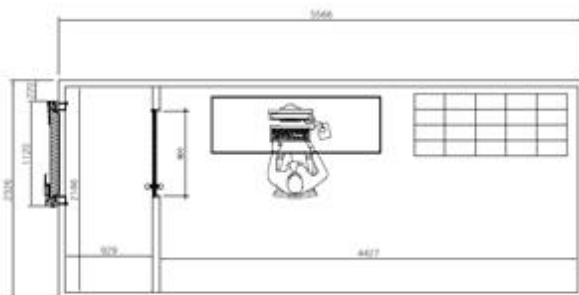


컨테이너 컨테이너 내부 단열체 평면도

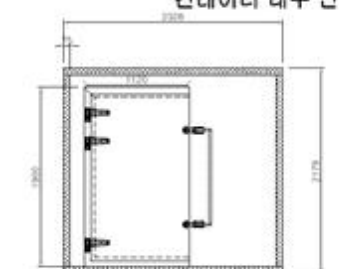
WALL INSULATION WEIGHT	10,000 LBS	10,000 LBS
WALL INSULATION	10,000 LBS	10,000 LBS
ROOF INSULATION FOR 100		
ROOF INSULATION WEIGHT	1,000 LBS	1,000 LBS
WALL INSULATION WEIGHT	10,000 LBS	10,000 LBS
WALL INSULATION	10,000 LBS	10,000 LBS



컨테이너 내부 단열체 측면 상세



컨테이너 내부 단열체 평면도



컨테이너 내부 단열체 도어부 상세

WALL INSULATION WEIGHT	10,000 LBS	10,000 LBS
WALL INSULATION	10,000 LBS	10,000 LBS
ROOF INSULATION FOR 100		
ROOF INSULATION WEIGHT	1,000 LBS	1,000 LBS
WALL INSULATION WEIGHT	10,000 LBS	10,000 LBS
WALL INSULATION	10,000 LBS	10,000 LBS

<에너지 하베스팅 연구모듈 내,외부 도면>

라. 외국의 사례 (남극내륙 연구 및 인프라 운영)

분야	세계 최고 수준
남극내륙기지	- 현재 미국, 프랑스-이탈리아, 러시아, 중국, 일본 등 6개 국가가 5개의 남극내륙기지 운영 중
빙하-대기-우주환경 관측시스템	- 미국 아문젠-스콧 기지 빙하심부 1450~2450m 지점에 IceCube 중성미자 검출기를 이용한 외계 중성미자 관측 진행 중 - 2017년, 미국 아문젠-스콧 기지의 South Pole Telescope 가 포함된 전 지구 규모의 Event Horizon Telescope 시스템을 이용하여 최초의 블랙홀 사진 촬영
빙하코어시추 및 분석 기술	- 러시아 보스톡기지에서 3660m 깊이의 심부빙하코어 시추 - 프랑스-이탈리아의 Dome C 콘코르디아 기지에서 시추한 EPICA 빙하코어로부터 과거 82만년 기후변화 기록 복원
남극횡단 프로그램	- 2005년, 미국 맥머도기지에서부터 남극점의 아문젠-스콧 기지까지 물자 및 연료 보급을 위한 1601km 최장 육상 보급로 개척
극지공학기술개발	- 2009년, 세계 최초 이산화탄소 배출 제로의 친환경 기지인 벨기에 'Princess Elisabeth Antarctica research station' 건설

□ 미국

- 미국은 1956년, 고도 2835m 지리적 남극점(남위 90°)에 아문젠-스콧 기지를 건설, 상설과학기지로 운영
- 월동기지인 로스섬의 맥머도기지에서 아문젠-스콧기지까지 항공 보급을 진행하다가 2006년부터 예산절감을 위해 약 1,600Km 길이의 육상 보급로를 개척, 트래버스를 통한 보급으로 연간 30여 억원을 절감하고 있음
- 두 개의 대륙기지 지원을 위해 뉴질랜드 크라이스트처치에서 맥머도기지까지 독자적인 항공망을 운영하고 있으며, 기지 간 또는 기지에서 연구지역까지의 원활한 이동을 위해 경비행기, 헬기 등을 이용하여 지원하고 있음
- 남극점의 아문젠-스콧 기지에서 직경 10m의 South Pole Telescope을 활용하여 천문관측 연구를 수행하고 있으며, 2018년에는 지구상의 여러 전파망원경과 연계한 Event Horizon Telescope 네트워크를 통해 최초로 블랙홀 촬영에 성공함
- 5개의 AGO (Automated Geophysical Observatory) 무인관측 플랫폼을 남극내륙에 설치하여 다양한 지구물리특성 및 우주환경 관측장비를 운영하고 있으며, 남극점에 위치한 아문젠-스콧 기지에는 빙원 아래 1450~2450m 지점에 '아이스큐브'라고 불리는 중성미자 검출기를 설치하여 2013년에 세계 최초로 태양계 외부에서 유입되는 중성미자 관측에 성공
- 2014~2016년 동안 남극점에서 1751m 깊이의 심부빙하코어를 시추하여 과거 54,000년 간 남극점의 기후, 환경변화에 대한 고해상도 기록을 복원하였으며, 현재 남극점 주변의 '타이탄 돔' 지역에서 oldest ice 시추를 위한 빙하시추 프로그램 추진 중
- NASA의 IceBridge 프로그램을 통해 항공레이더 탐사를 지속적으로 수행하여 빙하시추 후보지 선정을 비롯한 빙저지형 맵핑과 빙하 손실에 대한 모델 제시



<미국의 Amundsen-Scott 기지 전경>



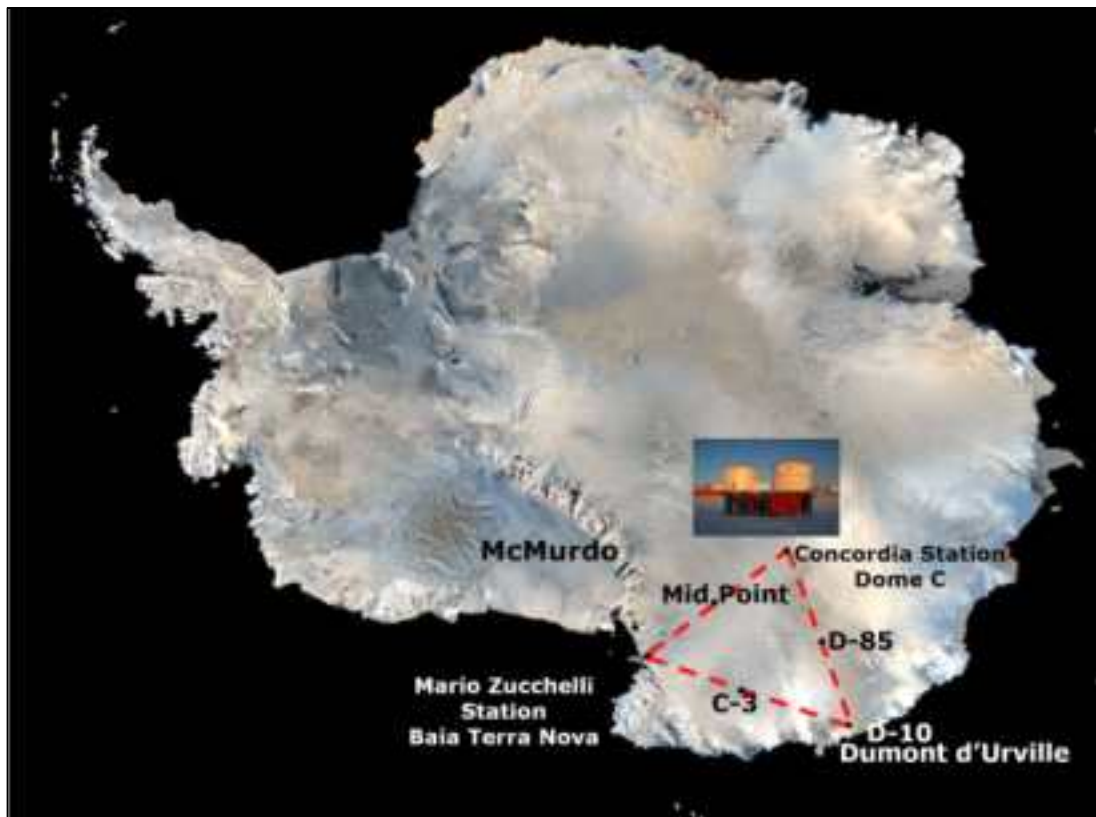
<미국의 McMurdo - Amundsen-Scott 기지 간 육상 보급로>

□ 이태리, 프랑스

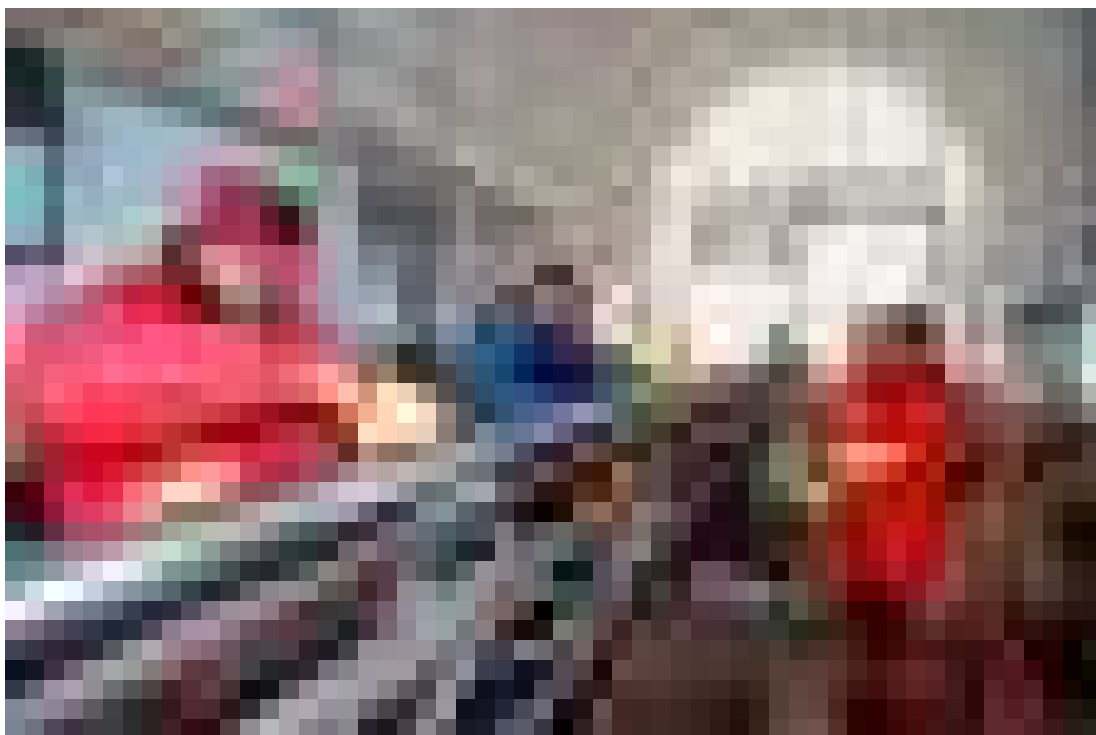
- 이태리와 프랑스는 2005년에 남극 내륙 빙상고원 3,233m에 위치한 Dome C에 Concordia 기지를 건설하여 월동기지로 공동운영 중이며, 인간생물학, 지자기측정, 지리학, 빙하학, 기상관측, 우주과학, 지진학 및 환경모니터링을 수행함
- Concordia 기지 운영 및 연구에 필요한 물자는 프랑스 Dumont d'Urville 기지와 Concordia 기지를 잇는 육상보급로를 통해 수송하고 있으며, 이태리 Mario Zucchelli 기지에서는 하계기간 동안 L-100, Basler, Twin Otter 등의 항공기를 임차하여 연구인력의 입출남극과 Concordia 기지 이동에 활용하고 있음
- 남극에서도 맑은 날씨의 확률이 높고 대기 중 에어로졸 및 입자 물질의 농도가 낮아 천문 관측의 최적지로 알려져 있으며 (Lawrence et al., 2004, Nature), 세계에서 최초로 Antarctic robotic multi-color photometer를 설치하여 고층대기연구를 수행하고 있음
- 1996~2004년동안 프랑스와 이탈리아의 주도하에 3,270m 깊이의 EPICA 심부빙하코어를 시추하여 과거 82만년의 기후, 환경 변화 기록을 복원함으로써 지금까지 가장 오래된 빙하코어 기록을 제시하였으며, 2021~2025년동안 이전 시추지점으로부터 50km 떨어진 지점에서 100만년 빙하코어 기록 복원을 목표로 Beyond EPICA Oldest Ice core 심부빙하코어 시추 예정
- Concordia 기지는 남극 극야기간의 어두움과 외부활동의 제한성, 고립된 환경 등 우주와 유사한 환경 조건을 갖고 있어 우주비행사의 심리적, 물리적 변화에 대한 연구 수행



<이태리-프랑스 공동 운영 Concordia 기지 전경>



<이태리-프랑스의 Dome Concordia 기지 육상/ 항공 보급로>



<이태리-프랑스의 Concordia 기지 심부빙하코어 시추캠프>

□ 중국

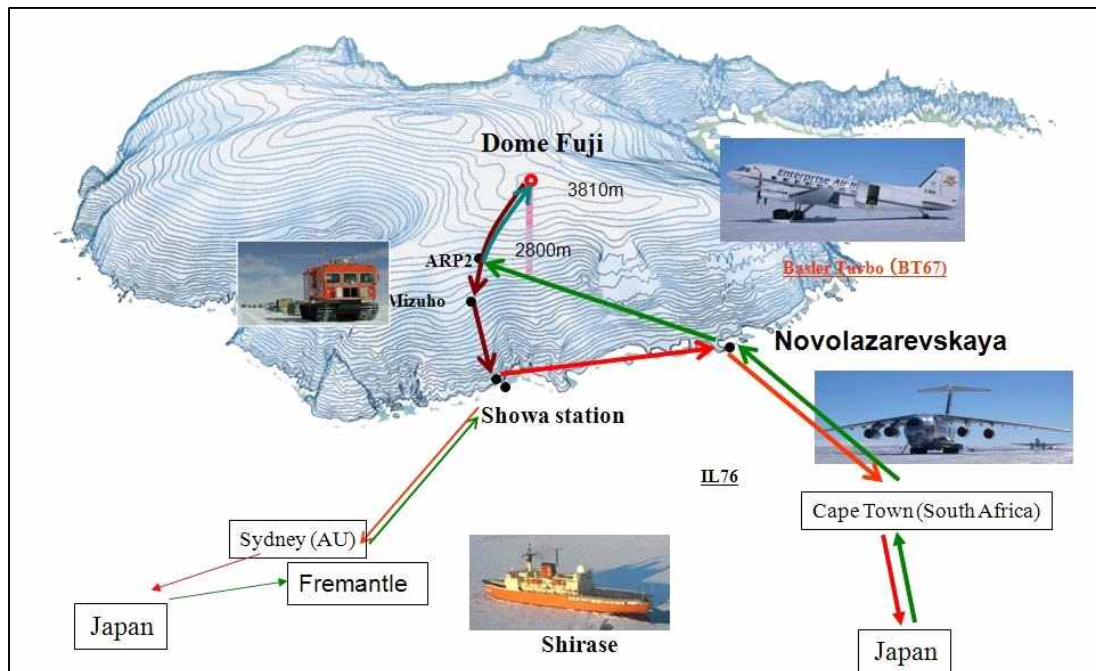
- 심부 빙하시추 및 관련 연구를 위하여 동남극 내륙에 곤륜기지(Kunlun Station)를 2009년 건설하였으며, 이는 남극점의 Amundsen-Scott 기지를 제외한 최남단(남위 80.4°)에 위치함
- 2014년 남극 대륙 중산기지(Zhongshan Station)와 곤륜기지 사이에 하계전진 기지인 태산기지(Taishan Station)를 개소, 제5기지를 남극 로스해 테라노바만 Inexpressible 섬에 건설예정. 현재 남극에서 가장 활발하게 활동하는 국가로 기지 건설 외에도, 제2쇄빙선을 건조 중임
- 내륙기지인 곤륜기지와 태산기지의 연료 및 물자 보급을 위해 1260 km 육상보급로 운영
- 2018년 6월, 독일에서 개최된 COMNAP 미팅을 통해 제5기지 건설 후 동남극 중산기지와 연결하는 대륙횡단루트 개척 계획(ABC 프로젝트) 발표, 향후 로스해-동남극내륙-프리즈만을 연결하는 탐사로 개척 및 해양-대륙 복합 연구를 수행할 예정임
- 2004~2013년 동안 빙하레이더 탐사를 통해 Dome A 지역의 감부르체프 (Gamburtsev) 빙저산맥의 지질구조 및 생성기작 규명
- 2011년부터 100만년 빙하코어 기록 복원을 목표로 심부빙하코어 시추를 진행하고 있으며 현재 900여 m까지 시추가 진행됨
- Dome A에서 3,100m 깊이의 심부
- 중산기지에서부터 곤륜기지에 이르는 내륙 진출루트 상에 총 4개의 무인관측소를 설치하여 운영하고 있으며, 향후 곤륜기지에 수m 급 우주전파 망원경 설치 예정



<중국의 대륙횡단루트 개척 계획>

□ 일본

- 남극 빙상 중 두 번째로 높은 Queen Maud Land의 고도 3,800m 고원인 Dome Fuji(Dome F)에 1995년 내륙기지를 건설하였으며, 하계연구기지로 활용 중
- 2004년 Dome F 캠프를 Dome Fuji 기지로 개명하였고 Syowa 기지로부터 Dome Fuji 기지에 이르는 JARE (Japanese Antarctic Research Expedition) 대륙횡단 프로그램을 운영하고 있음
- 1995년 Valkyrie Dome에서 2,503m 깊이의 심부빙하코어를 시추하였으며, 과거 34만년의 기후변화 기록을 복원하였으며, 2003~2007년에는 3,035m 깊이의 심부빙하코어를 시추하여 과거 72만년의 기후, 환경 복원 연구 수행 중
- Dome Fuji 기지에서는 적외선 및 전파 망원경을 이용한 천문관측과 SODAR를 이용한 고층대기 난류 관측을 수행하고 있으며 동계에도 PLATO 무인관측 모듈을 이용하여 천체관측 수행



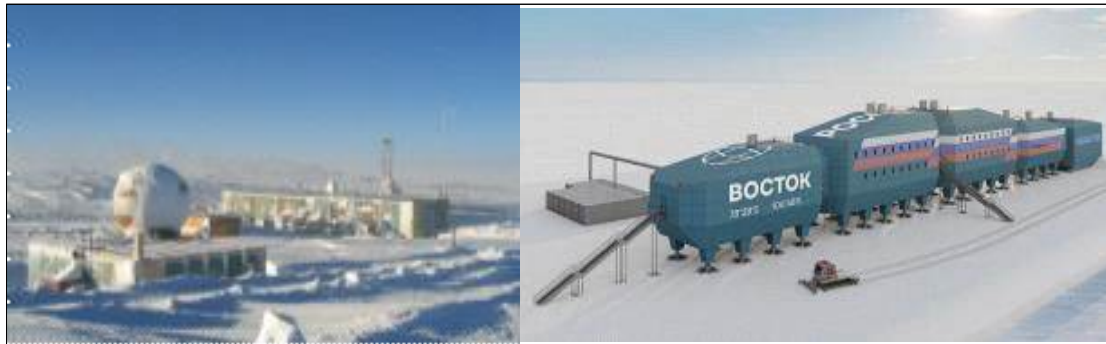
<일본 Dome Fuji 남극내륙기지 보급루트 개요>



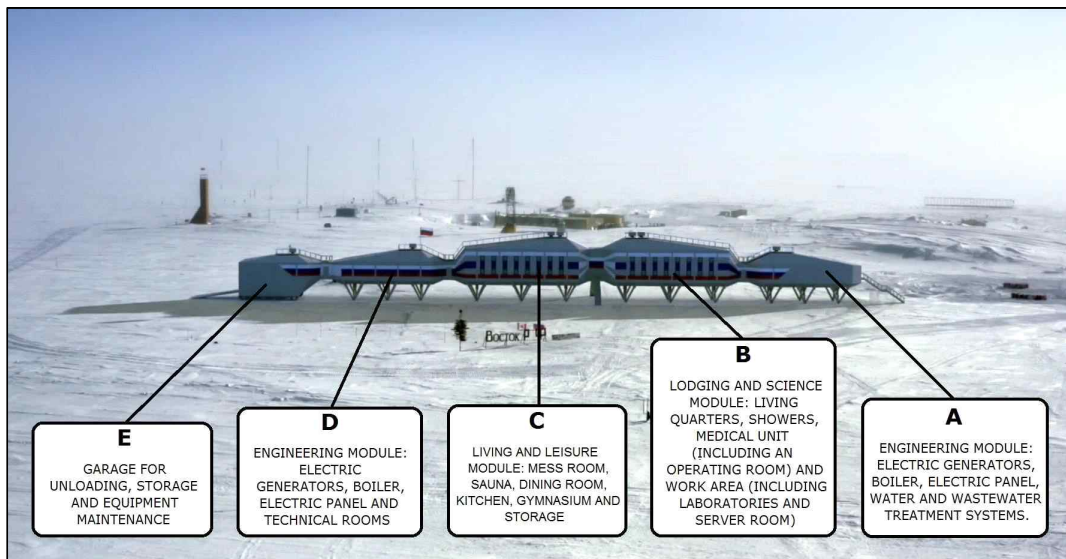
<일본 Dome Fuji 심부빙하코어 시추캠프>

□ 러시아

- 1957년 국제지구물리의 해, 2차 소비에트 남극탐사를 통해 지자기 남극점에 보스톡기지 건설
- 2020/21 시즌에 보스톡기지의 리모델링을 위해 육상보급로를 통한 건설자재 운반 예정
- 지자기 남극점에 위치하고 있어 전리층, 대기 전기장 변화 등의 지자기 관련 연구와 기상관측, 관량측정, 오존홀 관측 등의 대기 연구가 수행되고 있음
- 1970~1998년 동안 3,623m 깊이의 최장 심부빙하코어를 시추하여 과거 43만년 동안의 기후, 환경 변화 기록 복원한 바 있으며, 2024년부터 보스톡 기지로부터 300km 떨어진 Ridge B 지역에서 새로운 심부빙하코어를 시추하기 위한 VOICE (Vostok Oldest Ice Challenge) 프로그램 추진 중
- 2012년 보스톡 심부빙하코어 시추공을 통해 빙저호 호수시료를 채집하여 고생물 유전자 연구를 진행하였으나 채집 과정에서 시료 오염에 대한 논란이 있음
- 2019/20 시즌에 보스톡기지로부터 새로운 심부빙하코어 시추 후보지인 Ridge B 지역까지 진출루트 탐사 예정



<러시아의 Vostok 기지 전경 (좌) 및 리모델링 예상도 (우)>



<리모델링 Vostok 기지의 예상 배치도>

마. 현 기술상태의 취약성

☐ 독자적 내륙연구 및 연구지원을 위한 경험, 인프라 부족

- 남극반도와 로스해 해안에 위치한 세종, 장보고과학기지와 달리 빙상으로 이루어진 남극내륙 빙원에서의 현장연구 경험과 내륙기반 연구인프라의 독자적인 운영 경험 부족
- 지속적인 남극 내륙연구 지원을 위한 연구 거점 확보, 장보고과학기지에서부터 내륙연구 거점까지 연료 및 물자를 안정적으로 보급할 수 있는 보급 시스템 등 입체적 지원체계 부재
- 남극 내륙 혹한 환경에서의 연구 인력의 안전 확보, 자재 운반, 기지 건설, 동력 유지 및 운영 노하우, 극한지 건설 공법, 물류 기술, 무인시스템(기지운영, 관측 시스템 등) 운영, 친환경 및 자원재순환 기술 등의 첨단기술 확보 필요
- 장보고과학기지 지원을 위해 쇄빙선 아라온을 하계 기간 중 두 차례 테라노바만에 투입해야 하는 등 쇄빙선 운항일정에도 무리가 발생하고 있으며, 하계 연구기간을 최대한 확보하고 연구진의 효율적인 극지연구 활동 지원, 안전한 남극 내륙 연구 지원하기 위한 항공망 추가 확보 필요

바. 앞으로의 전망

☐ 남극내륙 진출루트 확대

- '남극내륙연구를 위한 진출루트 개척 및 탐사기술개발' 기관고유사업을 통해 2022년까지 장보고과학기지에서부터 남극내륙 연구거점을 거쳐 러시아 보스톡 기지에 이르는 2,200km 남극내륙 진출루트 확장

☐ 남극 내륙연구 국제경쟁심화

- 향후 5년간 미국, 이태리, 프랑스, 러시아, 중국, 일본 등 남극연구 관련국들의 심부빙하 코어 시추 프로젝트가 예정되어 있는 등 남극내륙연구 경쟁이 심화될 예정이며, 이에 대비한 선도 연구 주제 발굴 및 핵심 연구 영역 선점이 요구됨
- 특히 중국은 장보고기지 인근 Inexpressible 섬에 제5기지 건설을 추진 중이며, 이후 중산기지와 곤륜기지를 거쳐 제5기지에 이르는 동남극 횡단루트 확보를 통해 동남극 내륙에서의 과학적 영향력을 확대할 것으로 예상됨.
- 호주는 2020년에 프랑스/이태리의 콘코르디아 기지를 활용한 남극내륙 심부빙하코어 시추 프로젝트를 발표하고 남극내륙 탐사선단 확보를 적극 추진중임
- 국제적인 남극내륙 연구동향에 대응하고 우리나라의 남극 내륙연구영역 선점을 위해서는 최근 개척한 남극내륙 진출루트 기반의 연구 인프라 구축 및 연구사업 개발이 시급함

사. 국내에서 연구개발하는 대신 기술도입을 한다면 가능한가? 가능하다면 기술료(Royalty) 수준은 어느 정도이며, 경제성에 비추어 높은지, 낮은지?

☐ 해당사항 없음

아. 산업체 참여시기 및 방법

☐ 산-학-연 협의체 구성을 통한 지속 참여

- 겨울철 영하 80°C 이하의 혹한과 강풍 등 우주환경과 흡사한 극한의 남극 내륙 환경에서의 연구 거점 확보와 연구 지원에 필요한 극지공학기술 개발을 위해 기획단계부터 국내 산-학-연이 지속적으로 협력하여 극지 환경-일반 산업기술 사이의 접점을 도출, 극지 연구에 특화된 기술 개발 필요

제 II 장

남극내륙연구의 성과 및 현황

1. 남극내륙연구 성과 및 현황

가. 빙하코어 연구

□ (국내) 천부빙하코어 시추

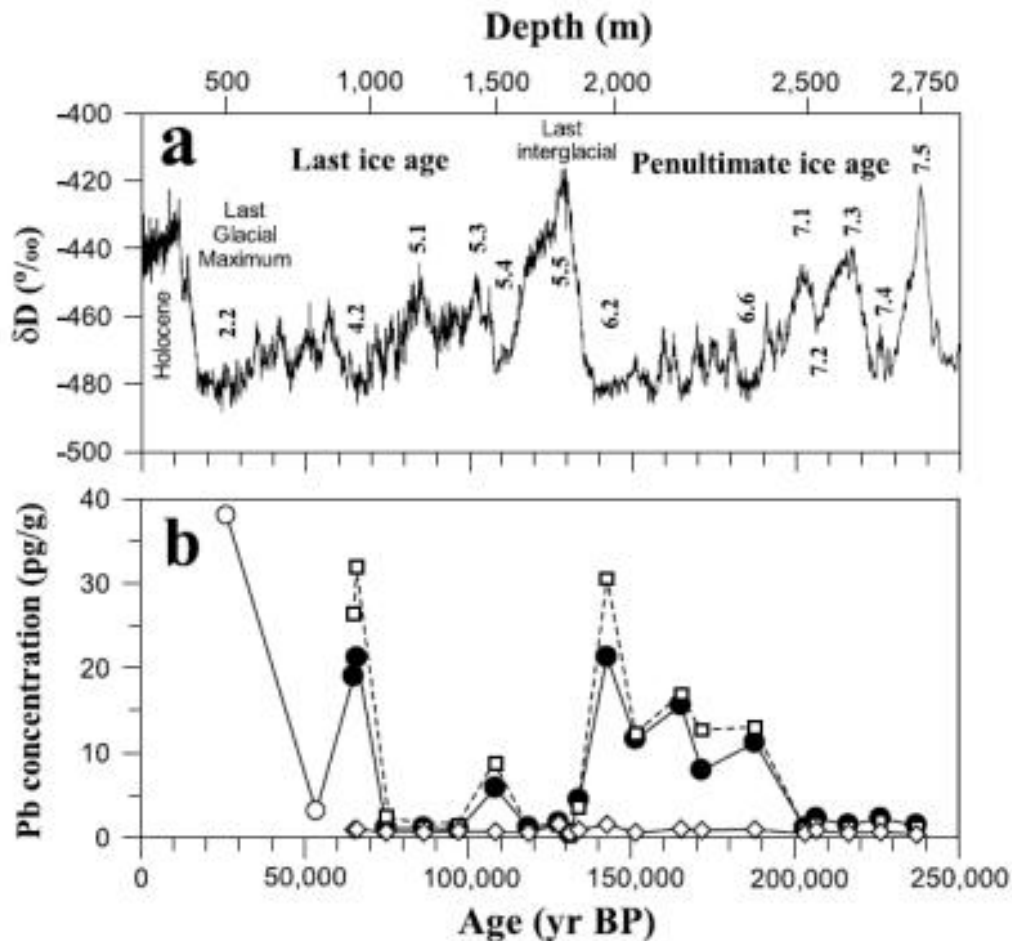
- 남극 북 빅토리아랜드 GV7 (2013/14 시즌, 80m), Styx (2014/15 시즌, 210m), Hercules Neve(HN) (2015/16 시즌, 80m), Tourmaline plateau(TP) (2018/19 시즌, 65m)에서 천부빙하코어 시추



<빅토리아랜드 천부빙하시추 지점>

□ (국내) 심부 빙하코어 연구

- 그린란드 NEEM 심부빙하시추에 참여하여 심부빙하코어 시료를 확보하고, 국제공동연구를 통해 남극 EPICA DOME C 심부빙하코어에 대한 일부 연구를 수행하고 있음
- 초창기 Vostok 심부빙하코어 시료(65,000 ~ 240,000 years BP)에서 미량원소를 분석한 연구를 수행하였음(Hong et al., GRL, 2003), 또한 4,600 ~ 410,000년 기간에 해당하는 네 번의 빙하주기 동안의 미량원소 연구를 공동으로 수행하였음(Gabrielli et al., EPSL, 2005)



<보스톡 빙하코어에서 납 농도 연구 (Hong et al., 2003)>

□ (국내) 고해상도 빙하코어 연구

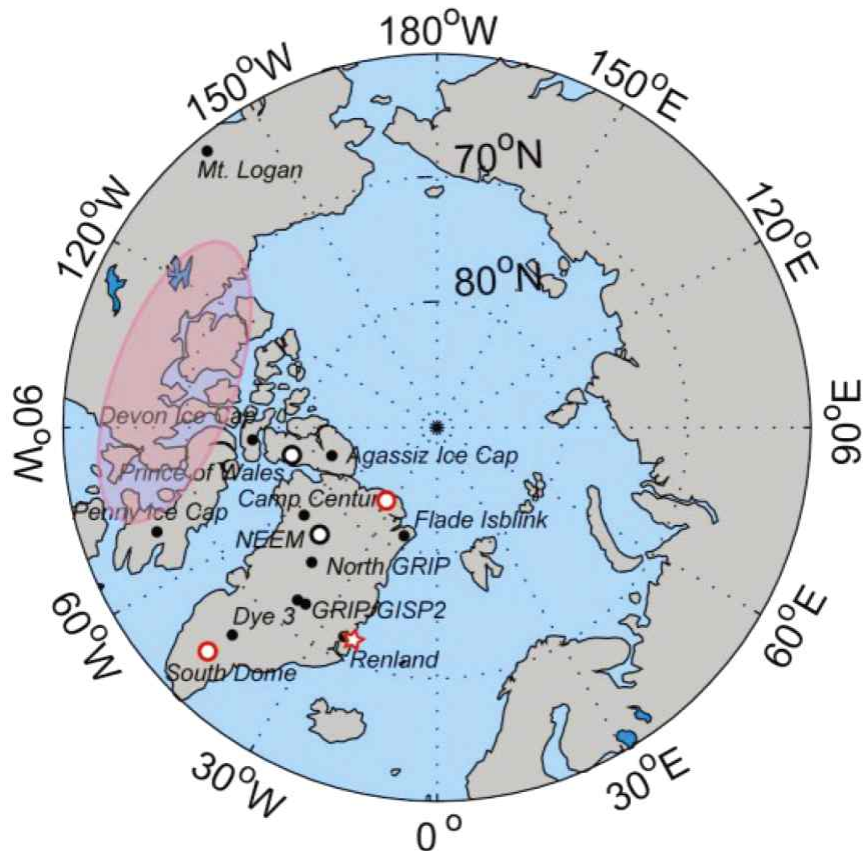
- 최고 수준의 극미량 원소 분석 연구를 확보하여 대기-빙상 상호작용 연구를 수행하고 있으며, 불안정동위원소, 이온성분, 미량원소의 동위원소 등의 분석기술을 통해 빙하코어의 고해상도 분석연구 수행
- 천부빙하의 밀도, 전기전도도, 이온분석 자료와 함께 불안정동위원소의 계절적 변동성을 이용하여 빙하코어의 연대측정에 활용하고 있음. 남극 천부빙하코어의 온도와 강설량을 복원하고 있음. 공동감자감쇠분광법을 사용한 물의 $\delta 17O$ 분석법을 개발하여 빙하코어 시료분석에 적용중
- 해염 입자로 분류되는 $NaCl$, $MgCl_2$, $CaSO_4$ 등이 포함된 무기 이온과 화산활동에 영향을 받는 할로젠(HCl , HBr), 황화가스(SO_2 , H_2S) 등의 이온성분을 분석하여 빙하코어에 기록된 해양유입 특성, 해빙변화 기록, 화산활동 기록을 복원하고 기후, 환경적 영향 연구
- 동남극에서 시추한 주상눈시료에서 백금(Pt), 이리듐(Ir), 로듐(Rh) 등의 백금족 원소와 비소(As), 몰리브덴(Mo), 안티모니(Sb) 및 탈륨(Tl) 원소 농도의 변화를 복원하여 지난 50년간 인간의 활동에 의한 미량원소들의 대기 오염 양상을 확인함. 남반구 국가들의 오염

저감 정책의 효율성 확인(Soyol-Erdene et al., 2011; Hong et al., 2012).

- 남극 강설에서 플루토늄(Pu)을 분석하여, 1950년대 이후 대기 핵실험 기록과 상관관계 복원(Hwang et al., 2019).
- 빙하코어의 전처리 효율을 향상시키기 위해 미량원소의 오염을 최소화할 수 있는 용융 장치(melting system)를 개발하고 빙하코어의 고해상도 분석 연구에 이용하고 있음(Hong et al., 2018).
- 빙하코어 시료의 오염제거 전처리 방법을 개선하고 그린란드 NEEM 심부빙하코어에서 납안정동위원소를 분석하기 위한 새로운 분석법 개발(Han et al., 2015; 2018).
- 빙설시료 내 광물성먼지의 입자크기와 분포를 측정하는 분석법을 개발함(Kang et al., 2014). 그린란드 NEEM 주상눈시료에서 광물성먼지와 납안정동위원소의 계절적 변동 연구 수행(Kang et al., 2015; Kang et al., 2017)

□ (국외) 심부빙하시추

- 심부빙하코어시추는 1960년대부터 남·북극 빙하연구 선진국들이 북극 그린란드, 남극 대륙에서 다양한 빙하시추 활동함. 현재까지 1,000m 급 이상의 심부빙하코어 시추를 실시한 나라는 미국, 러시아, 덴마크, 프랑스, 이탈리아, 영국, 일본, 호주, 중국 등 10개국에 불과하며, 그 중에서도 3,000m 급 이상의 심부빙하코어 시추는 5개국에 불과함
- 그린란드 심부빙하코어시추
 - Camp Century Bed Rock 시추: 1963~1966년 동안 미국과 덴마크가 공동으로 Camp Century에서 thermal drill을 사용하여 1,390 m 깊이의 최초의 심부빙하코어 시추
 - Dye-3 심부빙하코어 시추: 미국, 덴마크, 스위스가 공동으로 1979~1981년 동안 덴마크가 개발한 ISTUK 시추기를 활용하여 2,040m 까지 시추
 - GISP, GRIP: 미국과 덴마크가 같은 장소에서 두 개의 쌍둥이 코어를 시추한 프로그램으로 3,029m 깊이의 빙하코어로부터 과거 105,000년 간 고기후 복원
 - NGRIP: 2003년까지 다수의 국가가 참여한 국제공동프로그램으로 3,085m 깊이의 빙하코어를 시추하여 과거 123,000년 간의 고기후 복원
 - NEEM: 2007~2012년 동안 14개국이 참여한 국제 공동 프로그램으로 대한민국이 최초로 참여한 심부빙하시추 프로그램임. 1명의 시추기술자와 2명의 연구원이 파견되었으며 2,537m 깊이의 빙하코어를 시추하여 과거 115,000년간의 고기후 복원
 - EGRIP: 2015년부터 그린란드 북동부에서 수행되고 있는 국제 공동 심부빙하코어 시추 프로그램으로써, 2019년까지 약 2,700m 깊이의 빙하코어가 시추되었으며, 이후 bed rock의 퇴적물까지 회수할 예정
 - 지난 50여년 동안 그린란드의 심부빙하코어를 통해 Dansgaard-Oeschager 기후 이벤트, 영저 드라이어스(Younger Dryas) 등 과거 128,500년까지의 북반구 기후·환경변화 기록이 복원 됨



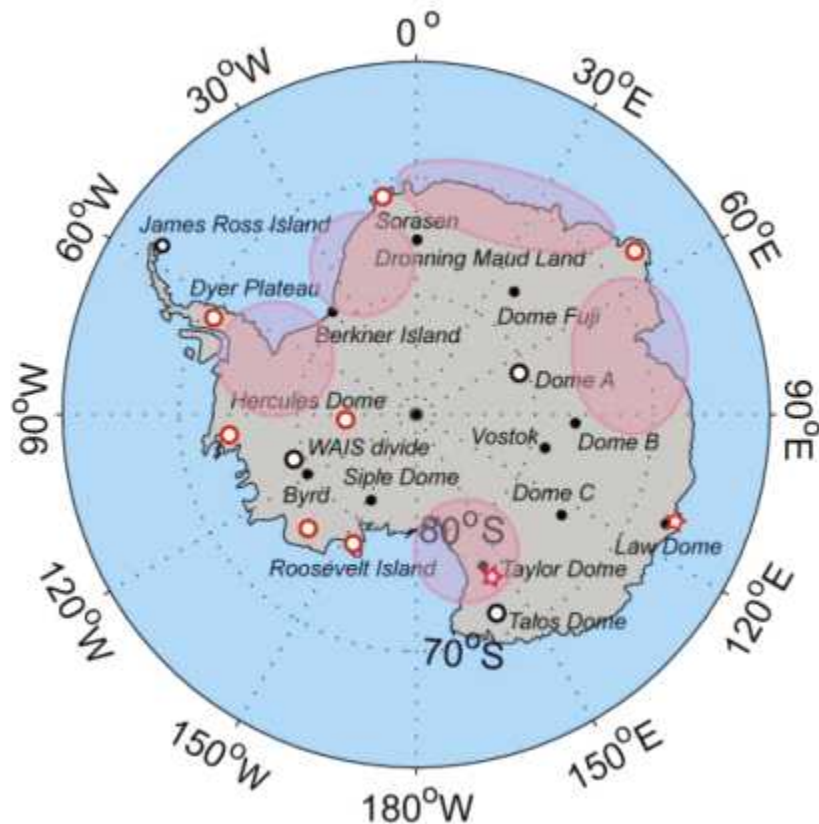
<그린란드 주요 심부빙하시추 (Jouzel et al., COP, 2013)>

○ 남극 심부빙하시추

- Byrd: 1966년 미국의 Byrd 기지에서 2,164m 깊이의 남극 최초 심부빙하코어 시추
- Vostok: 1970년 구 소련의 연구팀에 의해 러시아 Vostok 기지에서 심부빙하코어 시추가 시작되었으나 시추 기술상의 문제로 1996년까지 총 5회에 걸쳐 3,350m 깊이의 남극 최장 심부빙하코어를 시추하여 과거 420,000년까지의 기후·환경변화기록을 복원함
- EPICA Dome C: 1997~2005년 동안 프랑스와 이탈리아가 주도하여 3,270m 깊이의 심부빙하코어를 시추하였으며, 과거 840,000년의 기후·환경변화 기록을 복원하여 현재까지 가장 오래된 빙하코어 기록을 제시함
- Dome Fuji: 일본의 NIPR에 의해 1995~2006년 동안 3,035m 깊이의 심부빙하코어시추가 진행되었으며, 과거 720,000년의 기후·환경변화 기록을 복원함
- Dome A: 중국의 연구팀에 의해 지난 2004/5 시즌부터 동남극 최고봉인 Dome Argus 주변에 Kunlun 기지를 건설하고 심부빙하코어 시추가 진행되고 있음
- WAIS Divide: 2006~2011년 동안 미국 남극 프로그램(USAP: United States Antarctic Program)에 의해 서남극 빙상(West Antarctic Ice Sheet)에서 3,405m 깊이의 심부빙하코어를 시추하여 과거 62,000년 동안의 기후·환경변화를 고해상도로 복원함
- Law Dome, Siple Dome, Talos Dome 등 1,000m 급의 다양한 심부빙하코어시추 프로그램이

진행됨.

- 과거 1,000,000년 전을 전후로 빙하기-간빙기 순환 주기가 4만1천년에서 10만년 주기로 변화하였음이 확인되면서 과거 1,500,000년 동안의 기후·환경 변화기록을 남극 심부 빙하코어 시료로부터 복원하려는 시도가 프랑스-이탈리아 주도의 Beyond EPICA 프로그램을 비롯하여 일본, 호주, 러시아, 중국 등 극지연구 선진국을 중심으로 기획, 추진되고 있음



<남극 주요 심부빙하시추 (Jouzel et al., COP, 2013)>

□ (국외) 최근 빙하코어 연구 동향

- 극지 빙하 코어의 물 안정동위원소비는 과거의 남극 기온변화 및 강설의 기원지 정보를 제공하며, 상부~중부 심도에서 annual layer counting에 사용되어 빙하코어 연대 및 강설량 추정과 고기후 복원에 필수적
- 하지만, 물 안정동위원소비와 기온 간 상관관계는 남극에서도 지역에 따라 상이하며, 시기에 따라서도 달라진다고 알려져 있음. 따라서, 물 동위원소비를 이용한 신빙성 있는 고기후 복원을 위해선 독립적인 온도 복원 자료를 이용하여 보정하는 것이 필수적. 과거엔 시추공 온도가 많이 이용되었으나, 최근엔 불활성기체의 동위원소(질소, 아르곤, 크립톤 등)를 이용한 고정밀 기온 복원 연구가 많이 이루어지고 있음
- 최근 프랑스, 독일, 덴마크, 미국 등의 빙하코어 연구 그룹에서는 빙하코어에 기록된 물

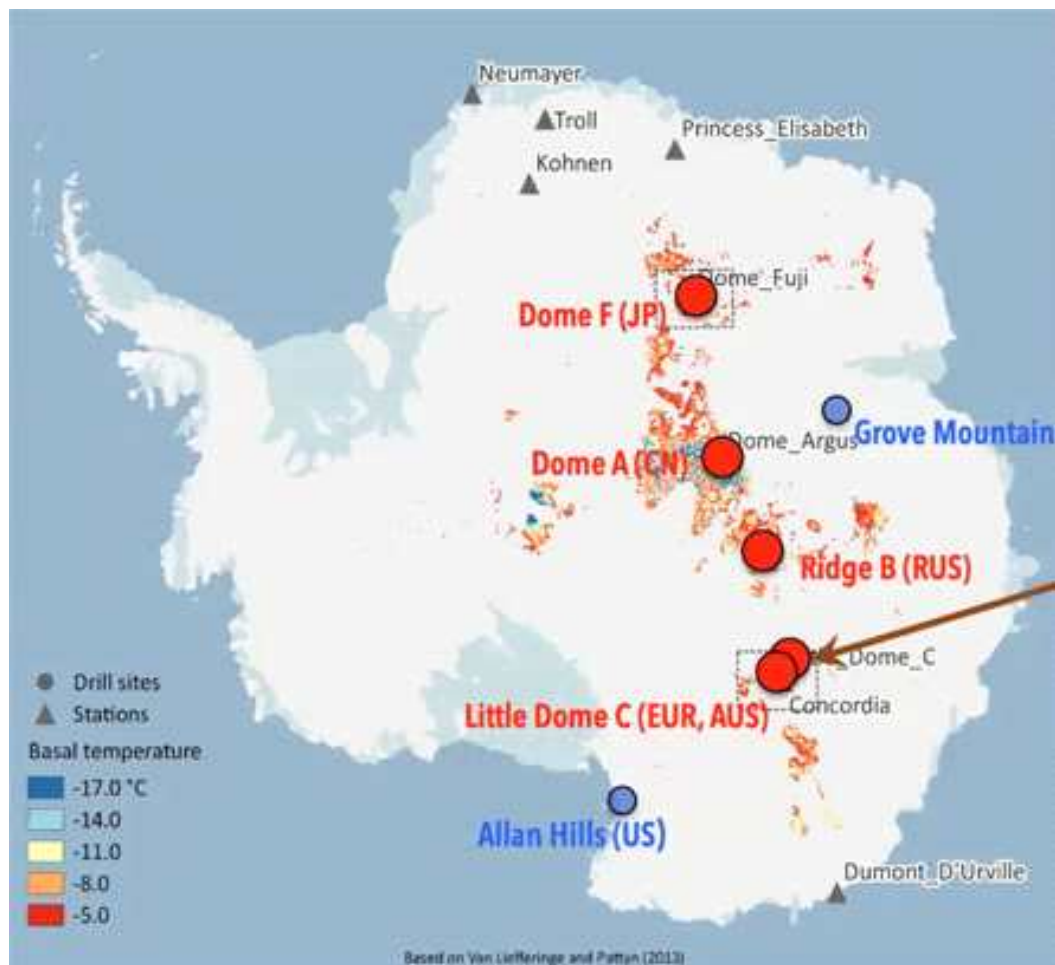
안정동위원소 자료의 노이즈와 변질(alteration)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음. 선행 연구들에 의하면, 서로 인접한 주상 눈 시료에 기록된 물 안정동위원소 기록 간 불일치가 관찰되었고, 이는 간헐적 강수 또는 지형과 바람 등에 의한 강설 후 효과(post-depositional process)에 의한 변질로 알려져 있음. 또한, 이러한 효과는 기온이 낮고 강설량이 낮은 동남극 일대에서 더욱 강하므로, 150만 년 이상된 심부 빙하코어를 이용한 고기후 복원을 위해선 이러한 post-depositional process에 대한 이해와 정량화가 필요

- 편층에서의 물 동위원소 확산은 고해상도 기록을 평활화하고, 비기후적인(non-climatic) 시그널에 의한 변질을 일으킴. 이러한 효과는 강설량이 적은 남극 내륙지역일수록 더욱 강해져서, 내륙에서의 신뢰할 만한 고기후 기록의 최소 시간 규모는 약 천 년 수준인 것으로 알려져 있음
- 변질된 물 동위원소비 기록에서 유의미한 고기후 기록을 추출해내는 방법론에 대한 연구가 최근 활발히 진행 중이다. 빙하코어 물 동위원소비 기록의 파워스펙트럼을 이용한 주기별 분리법이 현재까지는 가장 효과적인 방법으로 제시. 빅토리아랜드의 기존 천부코어 및 동남극 심부빙하코어를 이용한 신빙성 있는 고기후 복원을 위해 해당 분야에 대한 극지 연구소에서 선제적인 연구가 필요. 특히, 물 동위원소비는 빅토리아랜드 및 동남극-2k 연구에 필수적인 분석항목이므로, 물 동위원소비 변질에 대한 연구는 시급성이 높음
- 시간규모 변화에 따른 연구에서는 가장 오래된 빙하코어를 획득하여 과거 대기 조성 복원자료 기간을 늘리려는 방향과, 초고해상도 자료를 획득하여, 수천년 보다 작은 수십~수백년의 시간규모에서의 고해상도 자료를 얻는 연구가 주요 연구 목표로 많은 연구가 수행되고 있음

□ (국외) 향후 심부빙하코어 시추계획

- 프랑스-이탈리아를 중심으로 유럽연합에서는 2017년 EPICA 심부빙하코어 시추 프로젝트 후속으로 Beyond EPICA 계획을 발표하고 2017~2019년 3년간 신규 시추지점 선정을 위한 레이더 탐사 후 2021년부터 시추 진행 중임
- 일본은 2016~2022년 동안 기존의 돔 후지 심부빙하코어 시추지점을 중심으로 총 2780km 길이의 레이더 탐사를 수행하여 새로운 심부빙하코어 시추지점을 선정하고 2023년부터 새로운 시추캠프 건설 및 심부빙하코어 시추를 추진 중임
- 러시아는 2020년 내륙탐사 프로그램을 통해 이전 보스톡 기지에서 170km 떨어진 Ridge B 지역에 대한 정밀조사를 수행하였으며, 2024년까지 육상 및 항공 레이더 탐사를 통해 시추지점 선정 후 25년부터 심부빙하코어 시추를 추진 중임
- 미국은 2019년 RAID 장비를 이용하여 남극점 주변 지역의 최고 (最古) 빙하코어 시추 후보지에 대한 조사를 수행하였으며, 2022년 현재 심부빙하코어 시추 프로젝트에 대한 예산심사 중임
- 호주는 프랑스-이탈리아의 콘코르디아 기지를 기반으로 2023년부터 Beyond EPICA 빙하

코어 시추지점에서 트윈 코어 시추 계획을 발표하고 현재 남극내륙 탐사선단 구축 중임

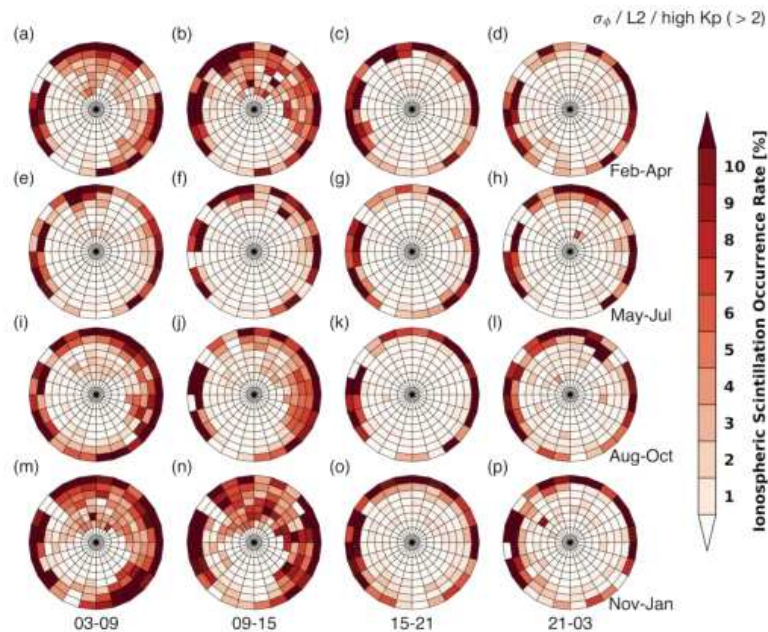


<신규 남극내륙 심부빙하코어 시추지 분포도>

나. 천문-우주기상 관측연구

□ (국내) 천문우주환경 관측 연구

- 한국천문연구원은 극지연구소와 극지 전리권과 고층대기 분야의 공동연구를 수행하고 있음. 대표적으로 2015년 12월에 한국천문연구원은 장보고과학기지 우주기상 관측동에 GPS 전리권 신틸레이션 관측기를 설치하여 협력연구를 진행하고 있음



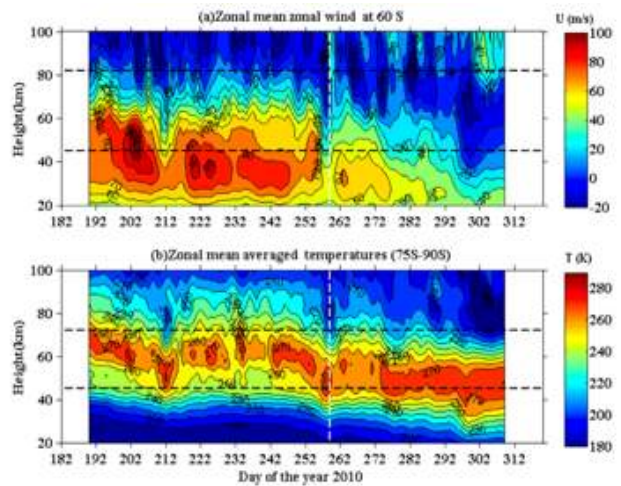
<남극 장보고과학기지 GNSS 전리권 신틸레이션 발생 분포도(Hong et al., 2020)>

- 한국천문연구원은 2019년 하계기간 동안 K-루트 프로그램에 참가하여 우주 고에너지 입자 검출, 대기교란(천문시상) 측정을 위한 태양 영상 촬영을 수행하며 남극내륙 천문우주 환경 답사를 극지연구소와 함께 수행하였음



<극지연구소 K-루트에서 수행한 우주 고에너지 입자 검출 시험>

- 충남대학교는 1995년 이후 극지연구소와 공동으로 세종과학기지와 장보고과학기지에 중간권 중력과 영상 관측과 유성 레이더를 이용한 남극 유성 유입량 및 중간권 동역학 연구를 진행하고 있음



<충남대학교 유성레이더와 중간권 온도와 바람 변화>

□ (국내) 고층대기/우주기상 연구 동향

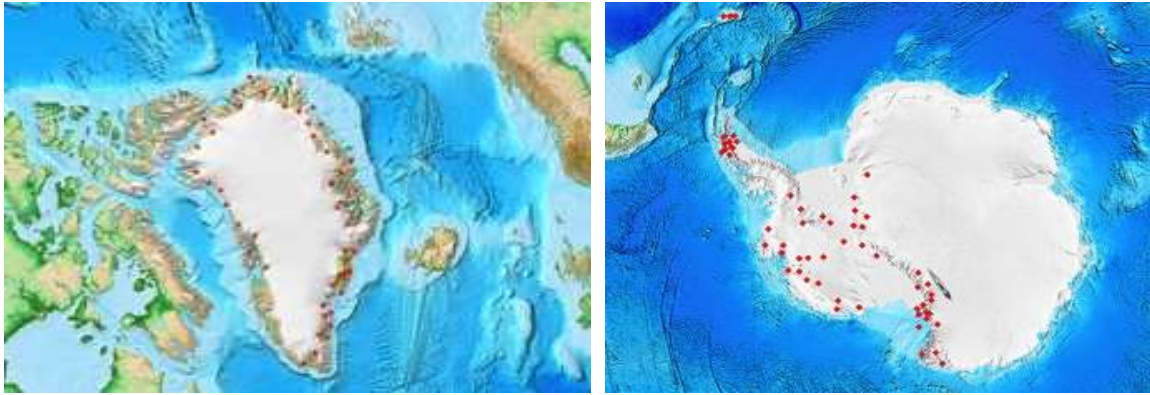
- 한국천문연구원에서는 적도에서 중저위도 지역에서 다수의 전리권 지상 관측소를 운영 중이며, 남극장보고과학기지에 전리권 불균일 현상 연구를 수행하고 있음. 2019년 극지연구소와 협력하여 남극 내륙 진출로 상 태양 표면 관측, 지표에서의 중성자 시험 관측 수행한 바 있음
- 전파연구원 산하 우주전파센터에서는 한반도 내 제주, 이천 등지에서 전리권 레이더, 자력계를 운영하여 중위도 전리권, 지상 자기장 변화를 감시해오고 있음
- 극지연구소는 남극월동기지 2곳, 북극다산기지와 스웨덴 키루나 관측소에서 고층대기, 전리권 지상 관측 장비를 활용한 연구를 수행중임
- 남극 장보고과학기지 보다 고위도 지역인 남극 내륙에서의 우주환경 요소인 전리권, 자기장 변화 등의 관측은 수행된 바가 없으며, 극저온 환경에 적합한 연구 장비 개발, 운영 기술 또한 국내에서는 전무한 상황임



<한국천문연구원에서 한반도(왼쪽)와 중저위도(오른쪽) 지역에서 운영 중인 GPS 전리권 관측소>

□ (국외)천문우주환경 관측 연구

- 2012년 결성한 SCAR 전문가 그룹인 GRAPE (GNSS Research and Application for Polar Environment)는 극 지역 기상과 우주환경 연구에 필요한 관측자료 공유와 모델 개발을 위한 국제협력 그룹임
- GRAPE의 연구목표
 - 극지 GPS/GNSS 전리권 신틸레이션과 총전자량 관측 상시관측망 구축과 유지
 - 우주환경 변화에 따른 극지 전리권 신틸레이션 특징과 발생기작 규명
 - 전리권 신틸레이션 장기변화 분석을 통한 우주기상 예측모델 성능향상 연구
 - 수치기상모델 적용을 위한 GPS 수증기량 산출과 장기변화 분석
- UNAVCO (University NAVSTAR COnsortium)는 지구과학 연구와 교육에 우주측지 관측기술을 적용하기 위한 미국 대학과 정부가 결성한 비영리 협회로서 남극 종단산맥과 서남극에 주로 GNSS 상시관측소를 운영하고 있음
- 미국은 맥머도 기지, 아문센-스콧 기지, 팔머 기지에서 태양-자기권-전리권-고층대기 상호작용 관측 연구를 위한 GNSS, 자기력계, HF/MF/VLF 레이더, 전천 카메라 등을 운영하고 있음.
- 미국은 무인관측 플랫폼인 AGO (Automated Geophysical Observatory)를 남극내륙에 설치하여 다양한 지구물리 및 우주환경 관측 장비를 장착하여 운영하고 있음



<미국 UNAVCO가 운영 중인 그린란드와 남극 GNSS 관측소 위치 분포>



<남극내륙에 설치된 무인 자동화 지구물리 관측소>

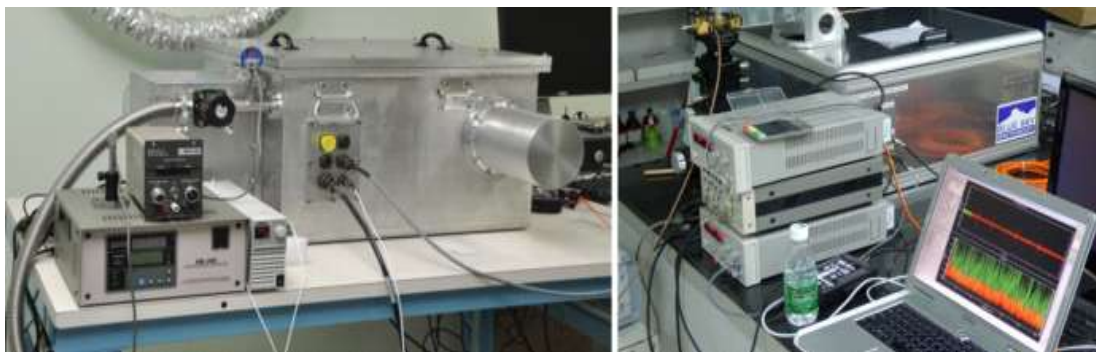
- 남극내륙은 저온건조 대기 환경을 갖고 있기 때문에 THz 우주전파 관측 조건이 지구상에서 가장 좋은 곳으로 알려져 있음
 - 대기 수증기량 분포
 - : 적도(>70 mm), 중위도(>20 mm), 아타카마 사막(~0.5 mm), 남극고원(~0.1 mm)
 - ※ 아타카마 사막: 우주전파 관측지로서 상위 25% 관측조건을 갖고 있음. 남극내륙은 이보다 ~5배 환경이 좋음
- 현재 남극 내륙기지에서 태양 관측을 상시적으로 수행하는 관측소는 없음. 남극 콩코르디아 (Concordia)기지가 위치한 Dome C에서 2004년부터 천문시상 측정을 위한 태양 영상 관측을 수행 하고 있음

- 미국 애리조나 대학교와 호주 뉴 사우스 웨일즈 대학교는 남극내륙 해발 4,053m Ridge A 지역에 별 탄생 연구를 위한 492, 809 GHz, 1.9 THz 우주전파 관측을 위한 HEAT (High Elevation Antarctic Terahertz telescope)를 설치함



<남극내륙에서 관측 중인 THz 우주전파 망원경 HEAT>

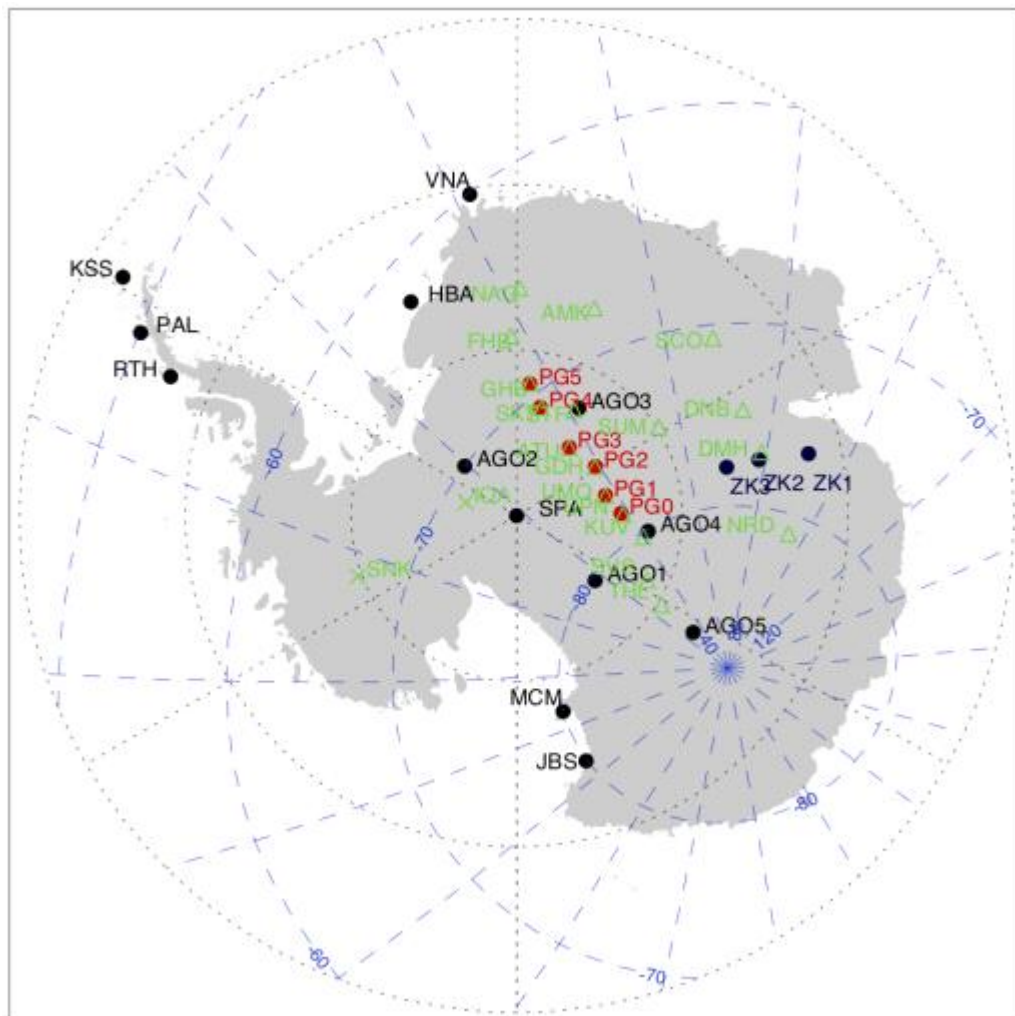
- 중국은 남극에서 해발 고도 4,000m 지역인 남극 Dome A까지 빙상 경로를 개척하여 THz 우주전파 망원경(DATE 5)을 건설 계획을 수립하고 2006-2008년에 걸쳐 pre-HEAT를 이용한 환경조사를 수행함
- 중국은 2009-2010년 남극내륙 횡단을 통해 THz 우주전파 대역 대기 투과도 측정을 위해 푸리에 변환 분광기(Fourier Transform Spectrometer, FTS)를 Dome A에 설치하여 2010년 3월부터 2012년 8월까지 관측하여 1.03, 1.3, 1.5 THz 대역에서 평균 20% 이상의 대기 투과도를 보임



<THz 우주전파 대기 투과도 측정을 위한 푸리에 변환 분광기>

□ (국외) 남극내륙 지자기 연구 현황

- 지구 자기장을 측정하는 자력계의 경우 우주환경 관측 장비 중 가장 간단한 장비로 현재 남극 대륙에서는 아래 그림과 같이 미국과 중국이 무인 관측망을 구축하여 지구 자기장의 변화를 측정하고 있음
- 미국 뉴저지 공과대학은 1980년대 후반부터 총 6기의 Automated Geophysical Observatories (AGO1 ~ AGO6)라는 무인 관측소를 남극 대륙에서 운영해오고 있음
- AGO 관측소는 지자기 남극인 Dome C로부터 지자기경도 20° W와 40° W를 따라 분포하고 있으며 AGO6의 경우 현재 눈에 파묻혀 가동 중단 상태임
- 미국 버지니아 공과대학에서도 2000년대 후반부터 AAL-PIP 프로젝트를 수행하면서 Dome C와 남극점 South Pole 기지를 중심으로 PG 네트워트를 운영 중에 있음
- 중국 극지연구소에서도 2009년 중산 기지를 시작으로 Dome A까지 총 4지점의 무인 관측소를 설치, 운영 중



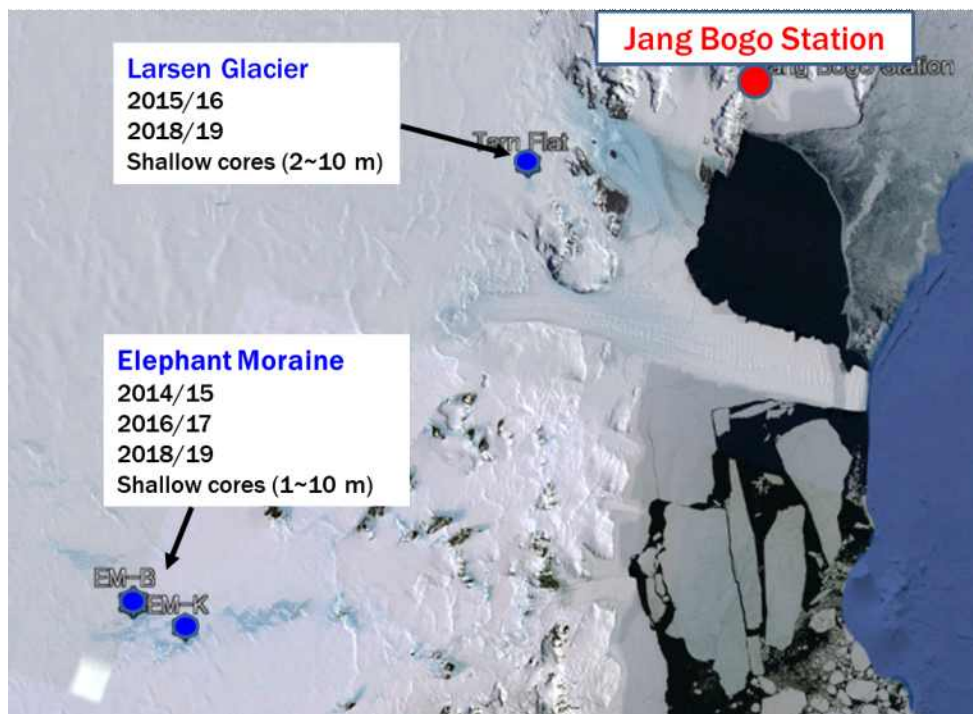
<남극 내륙의 지구 자기장 관측 네트워크(AGO, PG, ZK)>

- 위의 그림에서와 같이 현재 운영 중인 자기장 관측소는 AGO5를 제외하면 모두 지자기 위도 80° S 이하에 위치하고 있음. 따라서 장보고과학기지(지자기위도 $\sim 80^{\circ}$ S)와 내륙기지를 연결하는 무인 관측소는 국제적으로 유일한 극관 지역 관측 수행
- 미국과 중국에서 운영 중인 무인 관측소는 전력 문제로 인해 자력계만 운용하고 있음. 따라서 광학장비(소형 오로라카메라)를 포함한 한국형 무인 관측소는 우주환경 측면에서 극관 지역의 새로운 관측 자료 제공

다. 블루아이스 기반 온실가스 거동 연구

□ (국내) 블루아이스 연구 현황

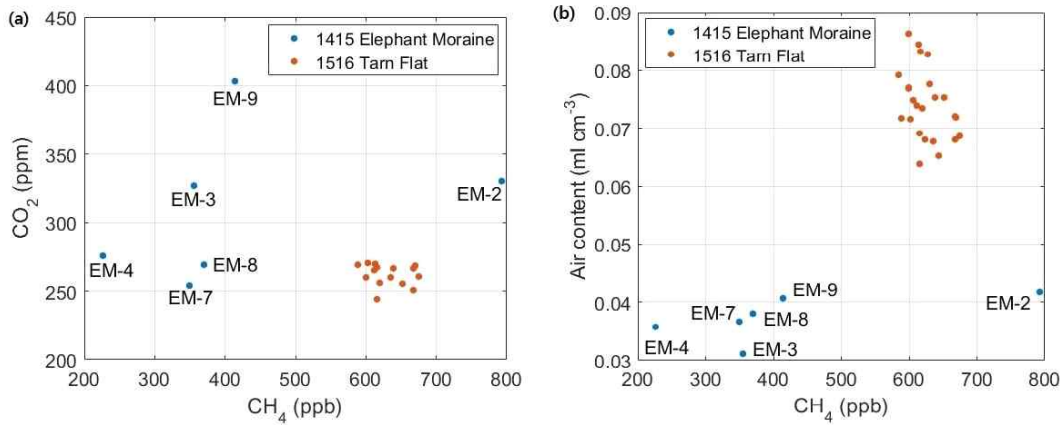
- 서울대학교-극지연구소 공동으로 2015년부터 5번의 남극 하계시즌 동안 북빅토리아랜드 엘리펀트모레인, 라센빙하 일대에 분포하는 블루아이스 표층시료(상부 10미터 미만) 채취 및 빙질상태 파악



<동남극 빅토리아랜드 일대에 분포하는 블루아이스 지역 예비조사 현황>

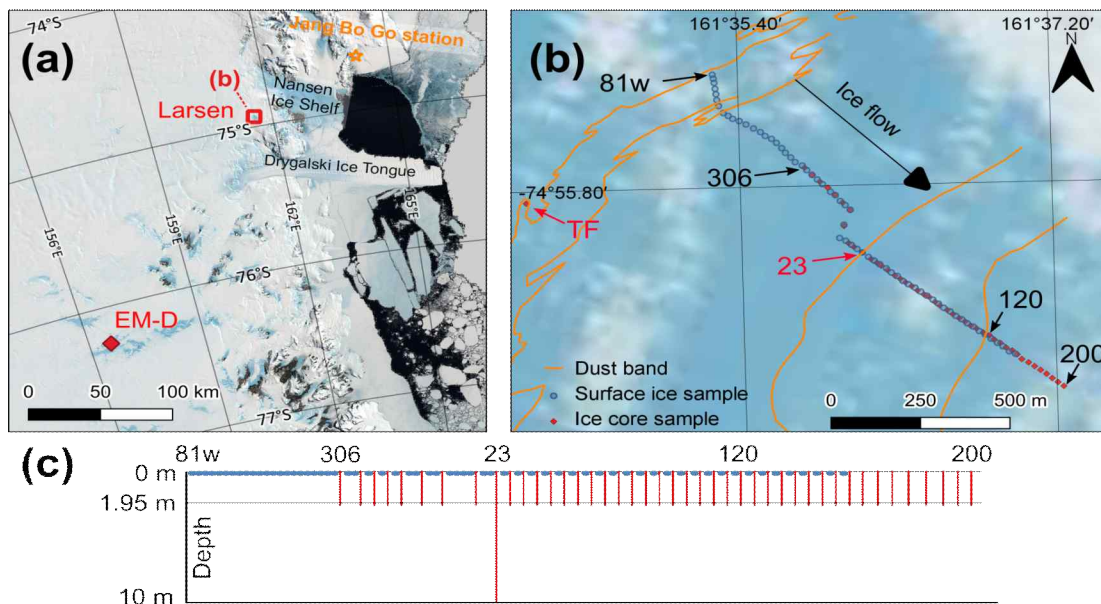
- 블루아이스 표층시료에 대한 온실가스 분석결과 대부분 변질되어 있으나, 일부는 빙하기에 해당하는 농도를 보여, 10미터 이상의 시추로 신뢰할 만한 온실가스 자료 확보가 가능할 것으로 기대
- 대부분의 블루아이스는 표층에서 심한 균열을 보이고, 화산재층의 공간적 분포는 습곡, 단층과 같은 변형작용을 받았음을 지시함

- 블루아이스 일부 시료에 대해 ^{81}Kr 을 이용한 연령측정을 한-중 공동 연구로 진행하여, 라센빙하 지역의 블루아이스가 최근 빙하기에 해당하는 연령이라는 것을 확인

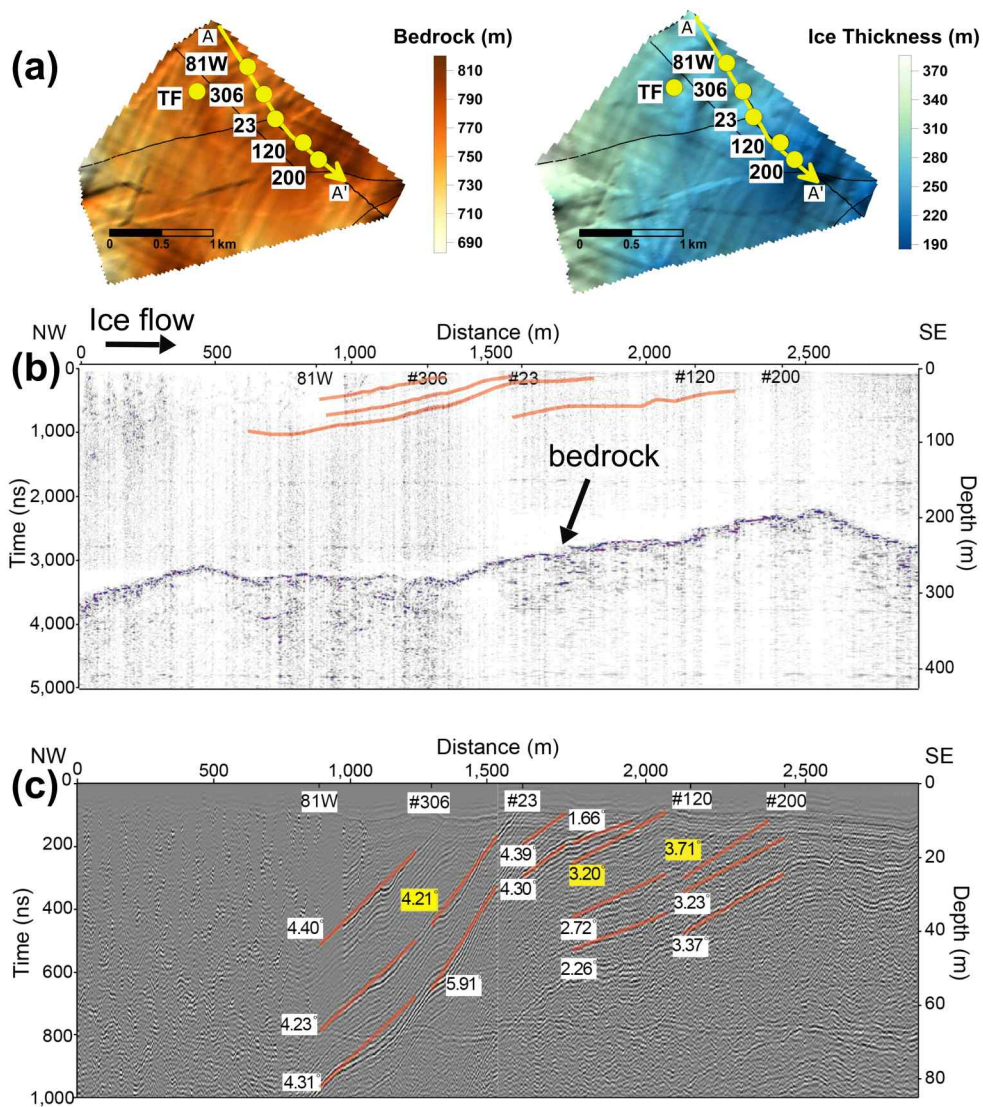


<빅토리아랜드 일대 블루아이스 표층시료 온실가스 분석자료.
표층시료는 상당히 변질되어 있어, 10미터 이상의 시추가 필요>

- 라센빙하지역 블루아이스에 포집된 산소기체(O_2)의 동위원소와 얼음(H_2O)의 산소 동위원소 측정자료를 기존에 알려진 빙하코어 자료와 비교하여 연령 설정이 가능함을 확인
- GPR 탐사자료를 이용하여 라센빙하지역 블루아이스 내부 구조를 확인한 결과 블루아이스 두께, 얼음층 경사각, 빙하 흐름과 하부 기반암 분포에 따른 얼음 층서자료 확보가 가능함을 확인



<라센빙하 지역에서 관찰되는 화산재(주황색 선) 습곡구조와 표층시료 채취 깊이>



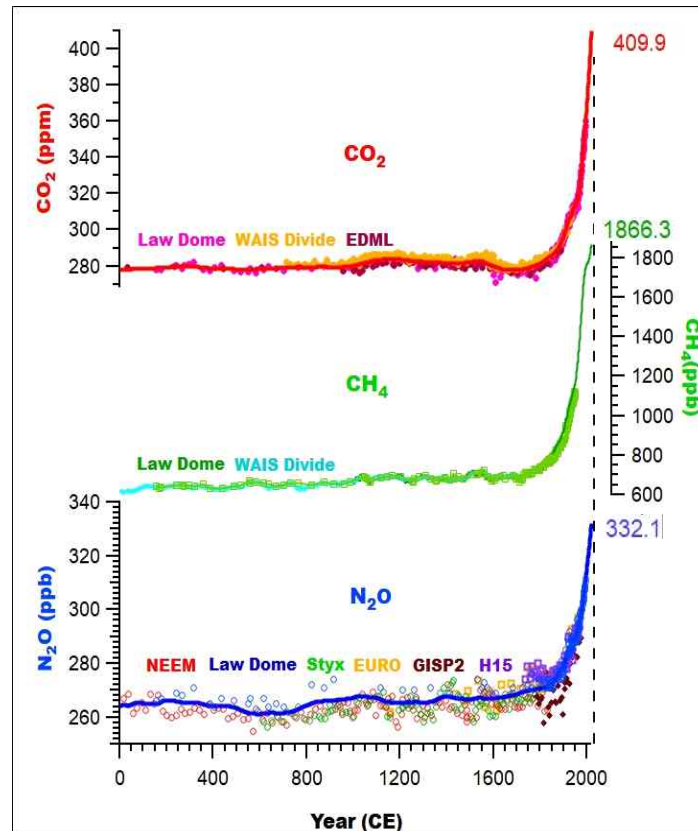
<라센빙하 지역 블루아이스 지구물리탐사 결과. 얼음층이 표면과 경사각을 갖고 있으며, 빙하두께가 약 200미터 이고, 하부로 갈수록 연령이 증가함을 보여줌>

□ (국내) 빙하 온실가스 분석 기초기술 확보 현황

- 서울대학교 지구환경과학부의 안진호 교수 연구진에서 세계 최고 수준의 정밀한 빙하 온실가스 분석기술 확보
- 기존의 빙하 내 온실가스 연구는 극지연구소를 중심으로 장보고기지 인근에서 시추한 스틱스 (Styx) 빙하코어 시료를 활용하여 진행되었으나, 해당 시료의 연령이 1,500년에 지나지 않아 중장기 온실가스 변화 양상을 파악하기에는 제한이 있으며, 따라서 주로 해외 시료를 이용한 연구가 서울대를 중심으로 수행
- WAIS Divide, NEEM, Styx 빙하코어 등을 활용한 서울대학교의 기존 온실가스

연구결과는 IPCC 6차 보고서의 과거 이산화탄소 (CO₂) 및 산화이질소 (N₂O) 자료로 수록됨.

- 현재 극지연구소를 중심으로 남극내륙에서 심부빙하코어 시추가 꾸준히 진행되고 있으나 과거 수십 만년의 온실가스 기록을 복원하기 위해서는 최소 10년 이상의 연구기간이 필요한 상황임



<6차 IPCC 기후변화보고서에 사용될 과거 2000년 동안의 온실가스 농도변화 그래프. 서울대 안진호교수 연구팀이 게재한 논문에서 CO₂, N₂O 농도 자료가 인용되었다>

□ (국내) 서울대학교 빙권과학교육연구센터 설립(2021.5.31.)

- 빙하코어 온실가스 전문가인 안진호 교수 임용 후, 2010년 서울대학교 내에 빙하고기후 연구실 조성
- 지난 10년간 분석시설 확충 및 새로운 분석기술 개발을 통해 현재 서울대학교 빙하고기후 연구실에서는 세계 최상위 수준의 분석기술을 확보한 연구실 구축
- 지난 2017년, 서울대학교에서는 빙하고기후 연구실이 주도가 되어 '서울대학교 빙권과학 교육연구센터' 설립을 추진하여 서울대학교 시흥캠퍼서 연구기관 공모에 선정됨
- 빙권과학 교육연구센터에서는 안진호 센터장을 중심으로 동토, 해빙 등 다양한 극지 환경시료로부터 CO₂, CH₄, N₂O 등의 과거 온실가스 농도변화 기작과 기후화의

피드백 연구를 수행하였으며, 사이언스, 네이처 등 세계 유수의 저널에 연구결과를 발표하여 세계적으로 연구역량을 인정받음

- 현재 빙권과학 교육연구센터의 안진호 센터장은 남극의 WAIS Divide, Siple Dome 빙하연구 프로젝트 (미), EGRIP 빙하연구 프로젝트 (덴) 등의 국제 공동연구에 참여하고 있으며, 2018년부터 IPCC 6차보고서 제1실무그룹의 주저자로 참여하는 등 온실가스 연구분야의 국제사회에 기여하고 있음

□ (국외) 블루아이스를 이용한 온실가스 연구현황

- 블루아이스는 심부빙하가 표층에 돌출된 것으로서, 운석이 자연적으로 모여지는 곳임. 따라서, 운석연구를 위하여 미국, 이탈리아, 일본, 영국, 스위스에서 블루아이스의 빙하학적 연구를 수행하여 오다가, 최근 5-10년 사이에 미국 중심으로 온실가스를 비롯한 고기후 연구로 관심을 받게됨
- 미국은 대학연합 (16개 대학참여) 연구센터인 COLDEX (Center for Oldest Ice Exploration)을 조직하여 2021~2026년 동안 남극빙하코어 연구를 수행하고 있음. 해당 과제는 100만년 이상 된 빙하코어를 획득하기 위해 동남극 내륙에서의 심부빙하코어 시추와 Allan Hills 블루아이스 지역에서의 시추계획을 추진 중이며, 장주기 온실가스 농도 변화와 기온변화 복원이 주된 연구 주제임
- 최근 미국에서는 남극 Allan Hills 블루아이스 지대에서 200만년 이상 된 빙하시료 확보에 대한 보고가 되었으나
- 최근 미국 연구진에 의해 남극 앨런 힐스(Allan Hills)지역의 블루아이스에서 2백만 년 이상된 빙하시료를 찾았다고 보고되었으나, 연령이 연속적으로 이어지는 시료 확보가 되지 못하였고, 시료 연령측정의 오차로 구체적인 빙하기-간빙기의 온실가스 농도변화 연구에는 한계가 있음. 미국은 앞으로 블루아이스 연구지역을 확대할 계획이며, 엘리펀트모레인 지역에서의 블루아이스 연구를 한국과 공동으로 진행하기를 희망함.
- 블루아이스 연령측정법으로 Ar의 안정동위원소와 ^{81}Kr 방사성동위원소를 사용하고 있는데, 미국은 시료크기의 한계로 앨런 힐스 블루아이스에 대해서 Ar 연령측정법을 사용. Ar 연령측정법의 신뢰도 제고를 위하여, 독립적인 연령측정이 필요함
- 앨런 힐스 블루아이스 온실가스 측정결과, 100만 년 이상된 시료에 대해서, 이산화탄소 농도가 100만 년 미만 연령의 시기보다 높은 것을 확인. 그러나, 복잡한 얼음층의 분포로 이산화탄소 농도와 기후(온도)와의 관계를 명확히 규명하지 못함
- 향후 블루아이스를 이용한 온실가스 연구는, 연속적인 연령을 갖으면서도 100만 년 이상된 시료를 확보하는 것이 관건이 될 것으로 예상
- 앨런힐스(Allan Hills) 뿐만 아니라, 엘리펀트모레인(Elephant Moraine)을 비롯한 남극횡단산맥 근처에 넓게 분포하는 블루아이스 연구에 학계의 관심이 모아지고 있음
- 2020년 10월에 온라인으로 개최된 국제 빙하연구자 워크숍에서 서울대학교 안진호교수가 엘리펀트모레인(Elephant Moraine) 블루아이스 연구 가치에 대한 발표가 관련 연구 선진국의 관심을 받았음

- 블루아이스는 같은 연령의 시료를 다량으로 확보할 수 있는 장점이 있어서, 온실가스를 포함한 미량기체의 동위원소 측정에 매우 효율적으로 사용될 수 있음. 미국 중심으로 블루아이스를 이용한 온실가스 동위원소 측정이 수행되고 있으며, 이를 통해서 온실가스의 생성과 소멸에 대한 좀 더 명확한 연구결과가 도출될 것으로 기대됨

2. 남극내륙 인프라 현황

가. 미국 아문센-스콧(Amundsen-Scott) 기지

□ 기지 개요

- 1956~57년 IGY 기간 중 남극점에 세워진 미국의 내륙기지
- 약 2,700m 두께 얼음 위 고도 2,835m 빙원에 위치하며 해안의 맥머도(McMurdo)기지로 부터 1,570km에 위치함
- 기지 위치는 얼음과 같이 연간 10m 정도씩 이동 중
- 연중 평균 기온은 -49°C 로 여름철 2월 평균 기온 -41°C 과 큰 차이가 없으며, 겨울철에는 -73°C 까지 하강
- 최초 건설된 기지는 강철에 의해 문혔고, 두번째 기지는 1975년 모듈형 건물들을 지름 50m, 높이 16m 돔형 구조물 안에 설치하였음
- 현재 운영중인 세번째 기지는 2008년 유압잭으로 들어 올릴 수 있는 모듈형으로 확장되어 여름 150명, 겨울 50명까지 수용 가능
- 현재 남극 최대의 내륙기지로 천체물리, 천문우주, 우주기상, 지구물리, 대기과학, 빙하, 극지의학연구를 수행중

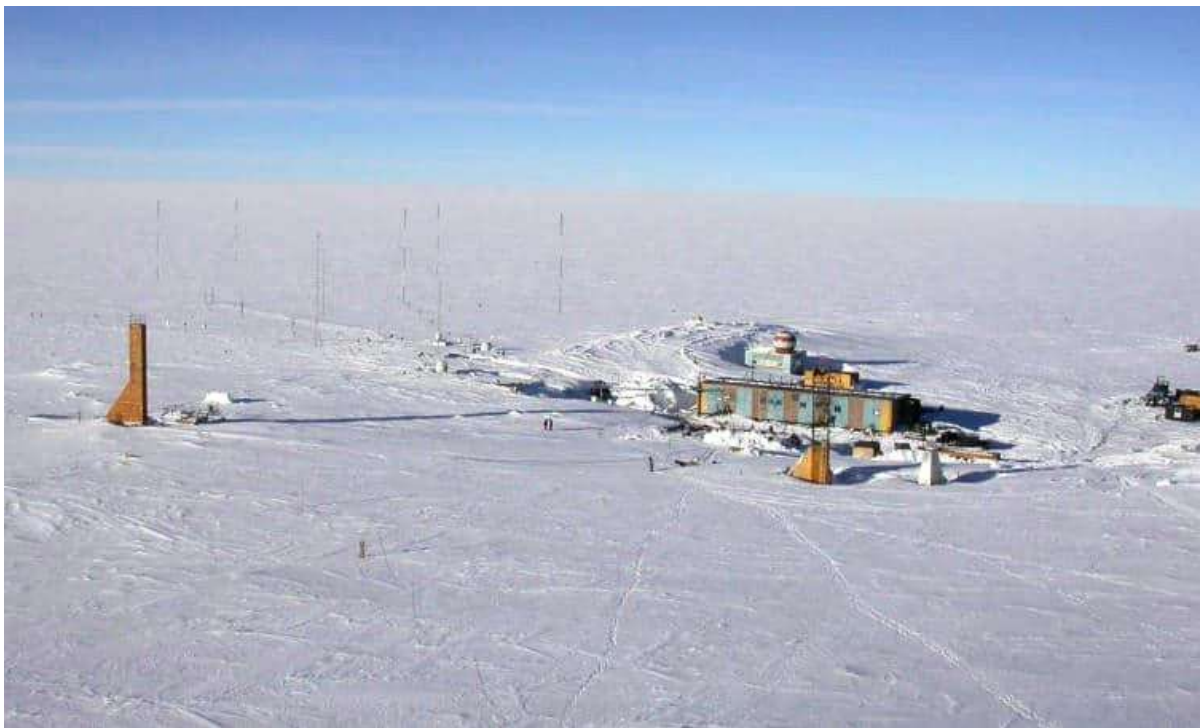


<미국 아문센-스콧(Amundsen-Scott)기지 전경>

나. 러시아 보스톡(Vostok) 기지

□ 기지 개요

- 보스톡 기지는 1957년 12월 IGY 기간 중 동남극 설원에 건설된 러시아 기지
- 약 3,700m 두께 얼음 위 해발 3,488m 빙원에 위치하며 남극점에서 1,301km 떨어져있고, 해안에서도 1,400km 떨어진 동남극 대륙 한가운데 위치함
- 위치적 특성에 의해 지구상에서 가장 추운 곳으로 여겨지며, 1983년 7월 21일 -89.2°C 를 기록함, 연평균 기온은 -55.4°C
- 대륙 고기압 지역에 위치하여 연간 눈이 오는 날이 평균 26일이며 강설량은 강우량으로 환산할 경우 22mm에 불과해 지구상 가장 건조한 지역에 속함
- 기지는 4개 건물 총 600m² 크기로 여름철 30명, 겨울철 15명이 거주
- 주 연구는 지구물리, 고층대기물리, 빙하 등이며, 특히 빙하시추는 1996년 보스톡 빙저호수 상부에서 3,623m까지 도달하여 지난 42만년 간의 지구 기후변화에 대한 가장 정밀한 자료를 제공한 바 있음
- 이후 호수 오염 우려로 시추가 중단되었으며, 2012년 2월 3,770m 빙저호 표면에 도달 후 재차 중단되었음
- 주 보급은 원래 해안의 미르니 기지로부터 육상 트래버스로 이루어졌으나 2001년부터는 프로그레스기지로부터 이루지고 있음



<러시아 보스톡(Vostok) 기지>

다. 프랑스-이탈리아 콩코르디아(Concordia) 기지

□ 기지 개요

- 프랑스, 이탈리아가 공동으로 운영하는 내륙 월동기지로 2005년 심부빙하 시추를 위해 해발 3,200m 빙원위에 설치
- 대륙 내부에 위치해 연평균 기온 -52°C 겨울철 -80°C 이하로 떨어짐
- 건물면적 $3,605\text{m}^2$ 으로 수용인원 최대 80명 겨울철 12명이 상주
- 현재까지 가장 오래된 빙하 시추가 있었던 곳으로 80만년 이상된 빙하코어를 획득
- 그 외 지구물리, 천문, 대기물리, 화학, 미생물, 고기후, 극지의학 연구 등이 수행 중
- 현재 콩코르디아(Concordia)에서 50여km 떨어진 리틀 돔C 에서 백만년 이상된 코어를 얻기 위한 시추가 진행 중
- 연료 등 보급품은 프랑스 트래버스 팀에 의해 프랑스 듀몽드빌(Dumont d'Urville)기지에서부터 연 3회에 걸쳐 운송
- 인력 운송은 이탈리아 마리오 주첼리(Mario Zucchelli)기지에서부터 항공편을 통해 맥머도 기지를 경유해 이루어짐



<프랑스-이탈리아 공동기지 콩코르디아(Concordia)>

라. 일본 돔 후지 (Dome Fuji) 기지

□ 기지 개요

- 일본 후지기지는 1995년 심부빙하 시추를 위해 고도 3,810m, 빙하두께 2,980m, Dome F 정상에 설치됨
- 해안의 쇼와기지로 부터 약 1,000km 떨어져 있다. 연평균기온 -54.4°C , 최저온도 -79.9°C 로 남극에서 가장 추운 지역에 위치
- 첫 빙하 시추는 1995~1996년 동안 2,503m를 시추하여 34만년 간 기후변화 기록을 복원하였으며, 두 번째 시추는 2003~2007년 동안 3,035m를 시추하여 과거 72만년 기후변화 기록을 복원함
- 2007년 이후 사용되지 않아서 눈속에 파묻혔다가 최근 신규 심부빙하코어 시추 계획과 함께 기지 리모델링 계획이 발표됨



<일본 남극내륙 돔 후지 기지 전경. 현재는 눈에 묻혀 잠정 폐쇄.>



<일본 남극내륙 돔 후지 기지 리모델링 계획.>

마. 중국 곤륜 (Kunlun) 기지

□ 기지 개요

- 중국은 심부빙시추 등을 위해 2008/09 년과 2009/10년 두 시즌 기간 동안 돔 Argus 지역 해발 4,087m 빙원에 곤륜 기지를 설치하여 현재 하계용으로 사용 중
- 중산기지에서 직선으로 1,235km 떨어져 있으며 대륙 내부 높은 고도로 인해 연평균 기온 -51°C , 7월 평균 -60.5°C
- 전체 건물은 620 m^2 (컨테이너 건물 216 m^2 , 조립식 건물 404 m^2) 이며 80 m^2 태양전지, 50 m^2 태양열 구역 및 1,000 m^2 작업구역 등으로 구성
- 단기간 하계 15-20명 거주 가능하며 장기적으로 25명 월동 기지로 전환을 고려하여 주방 시설, 상하수도 등 충분한 용량을 확보하도록 설계에 반영
- 모든 건설자재는 설릉호 편으로 중산기지를 거쳐 육상 트래버스로 운반하였다, 장기적으로는 과학조사, 구조 목적으로 항공기를 운영하도록 3,000m 급 설상 활주로를 갖추고 있다. 현재 2016/17 시즌 800m 까지 시추가 이루어짐
- 빙하시추 이외에도 기상학, 천문학 연구를 위한 우주망원경이 설치됨



<중국 곤륜기지 전경>

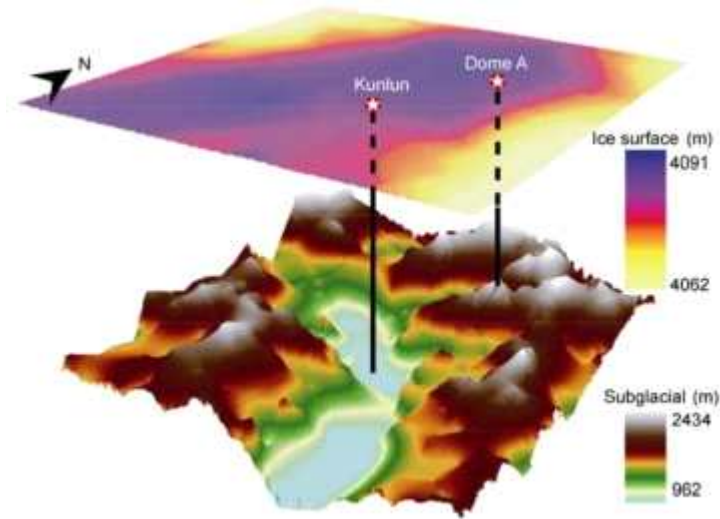


<남극 중국기지 위치 (붉은색 원)>

□ 중국 곤륜기지 연구현황

- 심부빙하 시추
 - 중국은 2009년 1월 곤륜기지 건설과 함께 심부빙하시추 계획을 수립함
 - 정밀 빙하 레이더 탐사를 통해 초기에 3,139m 얼음 두께에 최대 연령 120만년을 추정했으나, 추후 지열모델에 의거해 최대연령 80만년 정도로 수정됨
 - 그 후 일본이 돔 후지에서 사용한 전동 시추기를 기초로 개량된 시추기를 사용해 2011/12년 시즌 처음 시추를 시작해 깊이 약 120m 파일럿 홀을 설치하였음

- 2012/13년 시즌 심부 시추기 시스템을 설치하고 다시 시추가 재개되어 131m 까지 시추 후 시추용액을 주입하였고, 2014/15 시즌 303m, 2015/16년 시즌 654m, 마지막으로 2016/17년 800m 까지 시추 후 n-Butyl 시추용액이 채워짐



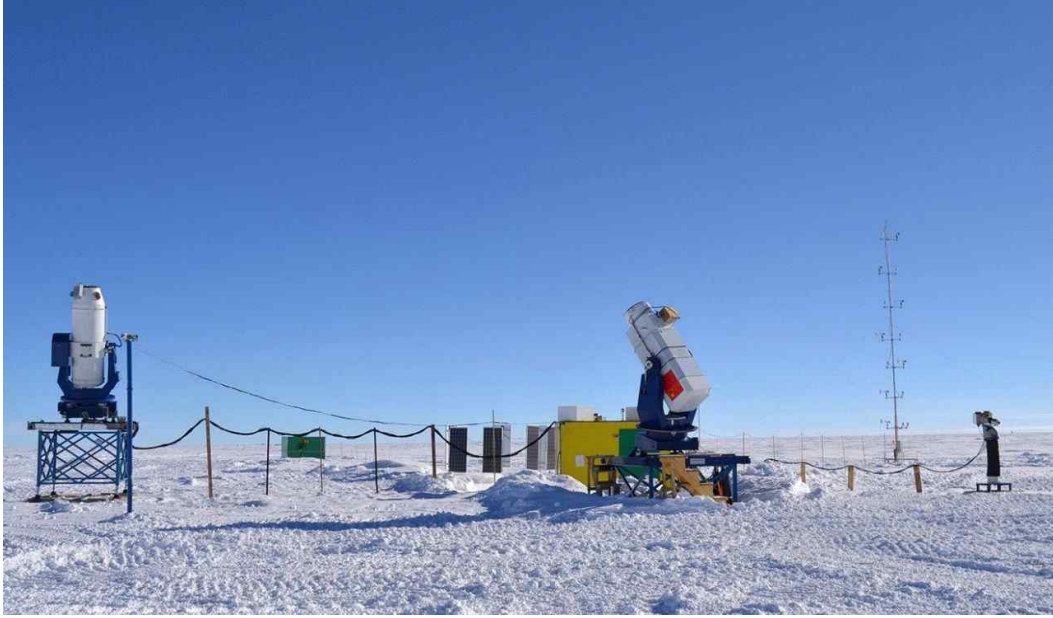
<곤륜기지 빙저지형 심부 빙하시추 모식도>

○ 곤륜기지 고층대기 천문관측

- 2009년 곤륜기지 건설 후 중국극지연구소는 고원관측소 (PLATO)를 설치하고 호주와 공동으로 천문관측장비 설치
- 그후 관측 시설을 점차 확대해 현재는 호주, 영국 등과 함께 CSTAR, Gattini, PreHEAT, Snodar, Nigel, PLATO camera 등을 설치하여 운영 중에 있다. 현재 곤륜기지에서 운영 중이거나 설치 예정인 천문관측 장비는 아래 표와 같음

<곤륜기지에서 운영 중이거나 설치예정인 천문관측 장비>

Instrument Name	Aperture	Installation Year	Remarks
Chinese Small Telescope Array (CSTAR)	0.145m	2008	CSTAR is an array of four Schmidt telescope with aperture of 14.5 cm, equipped with 1Kx1K CCD each.
Antarctica Schmidt telescopes (AST3)	0.5m	2012-2014	First of three AST3 telescopes was installed at the Antarctic Kunlun Station in April 2012
Kunlun Dark Universe Survey Telescope (KDUST)	2.5m	2025	KDUST is a 2.5 meter infrared optical telescope designed to detect and observe Earth-like planets in the Milky Way using infrared light.
Dome A Terahertz Explorer-5 (DATE5)	5m	2025	DATE5 is a 5-meter telescope designed to detect light with longer wavelengths, which will allow astronomers to detect and observe nascent stars.
Infrared optical telescope	6-8m	2020+	
New terahertz telescope	15m	2020+	



<곤륜기지 천문 우주관측 시설>

3. 남극내륙 보급/지원 현황

가. 미국 아문센-스콧(Amundsen-Scott) 기지

□ 보급 수송

- 보급 수송은 육상 트래버스가 시작된 2008/09년 이전까지는 맥머도 기지로 부터 전량 LC130 수송기로 수행
- 그러나 항공 수송의 비효율성으로 2002/03 시즌부터 2005/06 까지 4년간 맥머도 기지에서 남극점까지 1,600km에 달하는 육상 트래버스 루트를 개척하고 그 후 테스트를 거쳐 2008/09 시즌 첫 물자 운송에 성공
- 남극 하이웨이라고 부르는 맥머도-남극점 육상 트래버스는 눈표면을 다져서 만들어졌는데, 로스빙봉을 지나면서 남극횡단산맥 급경사 2,000m를 오르는 구간에는 많은 크레바스 존재로 인해 눈으로 메우고 다지는 설면 평탄화 작업을 시행
- 그러나 빙하의 이동으로 크레바스 위치가 바뀌어 매년 보수 작업이 수행
- 트래버스는 캐터필러 챌린저를 이용하여 연료와 화물을 썰매에 실어 운반하며 남극점으로 올라갈 때는 40일 소요되며 내려 올 때는 조금 빠름
- 트래버스로 연간 약 100톤 정도의 화물(주로 연료)을 수송하는데 이는 맥머도에서 LC130 수송기 왕복 운항 약 40회를 절약할 수 있는 수준

나. 프랑스-이탈리아 콘코르디아 (Concordia) 기지

□ 콘코르디아 트래버스

- 듀몽드빌과 콘코르디아 기지를 잇는 1,120km 정상 트래버스. 1993년 처음 육상 왕복루트 개척 후 1996년 첫 물자운송 성공
- 동남극 쪽에서의 접근은 다소 완만한 구배를 따라 고원으로 진출하므로 크레바스 위험은 상대적으로 적음
- 연간 약 400톤 정도의 연료 및 화물을 3회 왕복을 통해 콘코르디아로 수송
- 통상 트래버스에 10-12명 인원 참여 10대 차량으로 40대의 트레일러를 운송. 편도 10일 소요 도착해서 2일 체류 시 왕복 1회에 19-25일 소요, 연간 3회 왕복



<콘코르디아 트래버스 전경>

□ 콘코르디아 보급품 수송현황

- 1996년부터 2004년 사이 25회 왕복 트래버스 수행. 콘코르디아 행 9~13일, 돌아올 때 8~10일 소요
- 연3회 왕복, 1회 평균 150톤 화물 수송(차량무게 합산 시 약 500톤). 소비연료 1회 왕복에 80톤 정도.
- 트래버스 총중량 대비 운송 화물량은 약 0.3 정도임

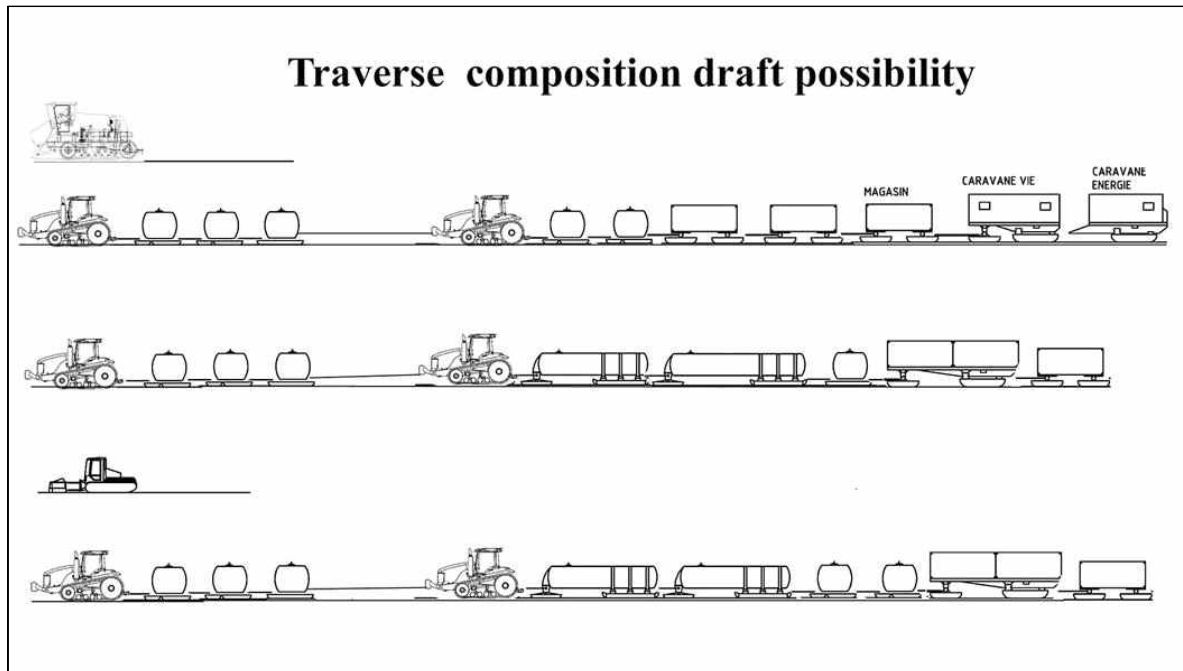
CONCORDIA TRAVERSES
SUMMARY (March 2005) of CARGO LOADS DELIVERED AT DOME C

Season	Traverse N°	Date pre transfer	Depart CPH	Arrive DC	Depart DC	Return CPH	Gross Weight (T)	Payload ex- CPH (T)	Payload delivered at DC	Fuel used (M3 / T)	Duration (days)	Net cargo flow (t/day)	Efficiency Payload / Gross
1996-97	04		16-01-97	29-01-97	31-01-97	10-02-97	420 T	187 T	125 T	75/60	27.0	4.63	0.30
	05		16-11-97	02-12-97	04-12-97	13-12-97	374 T	160 T	099 T	74/59	27.1	3.65	0.26
1997-98	06		20-12-97	02-01-98	03-01-98	12-01-98	384 T	165 T	115 T	63/50	24.5	4.70	0.30
	07		16-01-98	26-01-98	28-01-98	06-02-98	392 T	173 T	123 T	62/49	20.8	5.92	0.31
1998-99	08	17-11-98	20-11-98	03-12-98	05-12-98	13-12-98	377 T	164 T	109 T	68/55	23.4	4.65	0.29
	09	19-12-98	21-12-98	04-01-99	06-01-99	14-01-99	439 T	188 T	129 T	74/59	24.1	5.35	0.29
	10	17-01-99	18-01-99	29-01-99	31-01-99	09-02-99	428 T	194 T	129 T	81/65	21.6	5.97	0.30
1999-00	11	16-11-99	19-11-99	02-12-99	04-12-99	12-12-99	421 T	186 T	119 T	84/67	23.3	5.10	0.28
	12	17-12-99	19-12-99	28-12-99	02-01-00	11-01-00	486 T	223 T	157 T	83/66	23.0	6.83	0.32
	13	15-01-00	16-01-00	26-01-00	28-01-00	06-02-00	473 T	208 T	131 T	96/77	21.2	6.18	0.28
2000-01	14	17-11-00	20-11-00	04-12-00	06-12-00	14-12-00	428 T	197 T	121 T	95/76	25.5	4.74	0.28
	15	19-12-00	20-12-00	30-12-00	02-01-01	11-01-01	513 T	239 T	162 T	93/77	22.5	7.20	0.31
	16	16-01-01	18-01-01	27-01-00	29-01-01	06-02-01	513 T	235 T	165 T	86/69	19.8	8.33	0.32
2001-02	17	17-11-01	20-11-01	04-12-01	06-12-01	14-12-01	520 T	240 T	160 T	100/80	24.5	6.50	0.31
	18	19-12-01	21-12-01	01-01-02	03-01-02	12-01-02	496 T	240 T	167 T	91/73	22	7.60	0.34
	19	17-01-02	19-01-02	29-01-02	31-01-02	08-02-02	443 T	204 T	137 T	85/68	19.8	6.90	0.31
2002-03	20	17-11-02	18-11-02	02-12-02	05-12-02	13-12-02	495 T	245 T	159 T	108/86	25.5	7.00	0.32
	21	18-12-02	20-12-02	31-12-02	02-01-03	10-01-03	497 T	236 T	166 T	88/70	22	7.50	0.33
	22	14-01-03	17-01-03	27-01-03	30-01-03	07-02-03	496 T	237 T	162 T	93/75	21	7.70	0.33
2003-04	23	18/19-11-03	21-11-03	03-12-03	05-12-03	13-12-03	473 T	214 T	132 T	101/82	23	5.74	0.28
	24	18/19-12-03	21-12-03	01-01-04	03-12-03	12-01-04	443 T	215 T	139 T	94/75	22.5	6.18	0.34
	25	15/16-01-04	18-01-03	29-01-04	31-01-04	07-02-04	414 T	186 T	127 T	84/67	21.5	6.01	0.31
2004-05	26	17-11-04	18-11-04	30-11-04	03-12-04	11-12-04	521 T	249 T	167 T	102/82	23.1	7.16	0.32
	27	17-12-04	21-12-04	05-01-05	07-01-05	15-01-05	520 T	242 T	164 T	98/78	25.5	6.43	0.315
	28	18/19-01-05	21-01-05	02-02-05	05-02-05	12-02-05	552 T	283 T	201 T	102/82	22.5	8.33	0.365

<콩코르디아 트래버스 기록>

□ 콩코르디아 보급 선단 구성

- 1회 150톤 화물 수송 왕복 운행을 위해 챌린저65x 7대, PB330 2대, 12톤 연료탱크 썰매 10대, 카라반 3대(주거용, 발전용, 창고용), 단열 컨테이너와 20-25개 화물썰매 이용



<콩코르디아 기지 육상 보급선단 구성>

다. 일본 돔 후지 (Dome Fuji) 기지

□ 썰매를 이용한 수송

- 1993년 쇼와기지에서, 한겨울이 지나고 7월에 들어가자마자 물자를 썰매를 싣는 작업을 시작
- 물자를 썰매에 싣는 방식이 자재에 따라 달라서 쇼와기지의 썰매를 싣는 것이 가장 문제
- 판넬 등은 모양이 잡혀있으니까 점점 쌓으면 되는데, 건설자재도 여러 가지의 형태가 있어서 효과적으로 적재하는 것이 중요함
- 10월 말까지 걸쳐 함께 64대의 썰매에 실었는데, 한번에 끝난 것이 아니라 여러번 시행 착오를 걸쳐 완료
- 건설하는 건물 자체가 6동이나 있는데 건설기간이 짧기 때문에 현장에서 효율적으로 사용 되도록 순서에 맞게 싣는 것이 중요

□ 트래버스 기간

- 1994년 4~5월 가을시즌, 겨울이 끝나는 8~9월 봄시즌에 트래버스 중간거점까지 연료 및 자재 수송을 하고, 돔까지의 트래버스는 10월이 되어 시작되었음
- 선발대, 후발대로 나누어 출발하고, 도중에 교체가 있어서 제 1진(陣)이 도착한 것은 1994년 11월 21일이었고, 도착한 날부터 건설작업을 시작하였음

□ 트래버스 수송

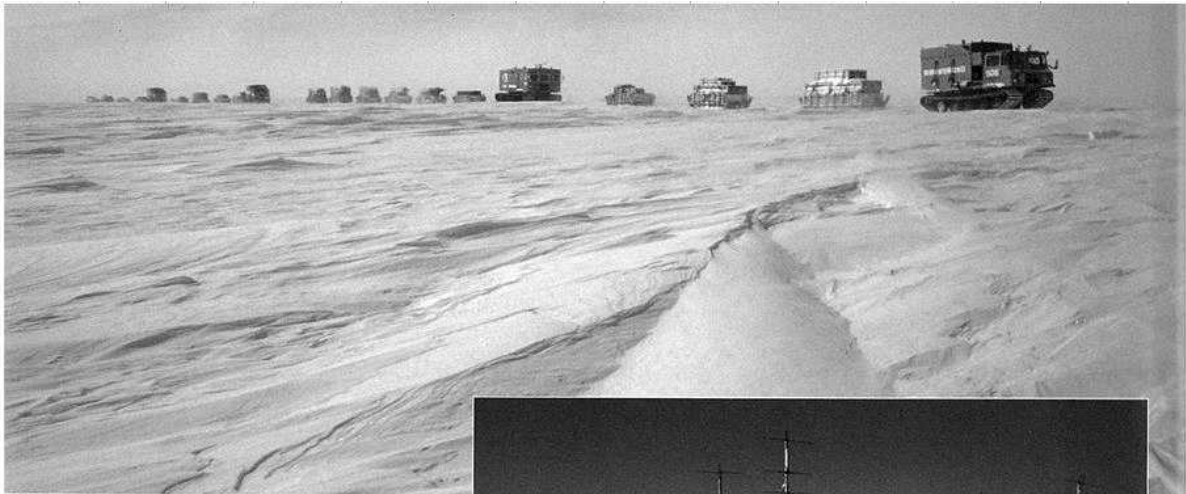
- 내륙기지 건설에 있어 합리적이고 치밀한 수송계획 수립이 무엇보다 중요
- 돔 기지에 무엇을 언제까지 수송해야 할지, 어떤 설상차를 사용할 수 있는지, 어떤 썰매를 몇 대 사용할 수 있는지 등을 고려해야했음

□ 운송방법

- 돔 후지 빙상 심부시추 관측 계획에 필요 인원 및 자재는 모두 지상수송으로 돔 후지 기지까지 수송
- 내륙 고원부의 저온에서 수송하는 것과 수송 거리가 쇼와기지에서 약 1,000km의 장거리라는 것이 수송상의 문제점이었음
- SM100형 설상차가 신규로 개발하여 1992년부터 도입되었으며, 이것은 기존 SM50형 설상차와 비교하여 내한 성능이 큰 폭으로 강화되어, 수송력, 거주성이 개선되었음
- 장거리의 수송상 문제는 쇼와기지에서부터 약 600km에 중계 거점을 설치하여 효율적으로 해결하였음
- 이 거리는 전체 수송계획에 대해 가장 수송효율이 높은 지점이고, 여기에 먼저 연료를

수송하여 보관해 두고 돔 후지로 가는 트래버스가 여기서 연료를 보급하였음

- 또한 1991년 부터 도입된 불도저를 사용해 견인력을 증가시킴



● 내륙을 지나는 수송대



● 아이스 레이더·안테나를 탑재한
SM100형 설상차



<일본 내륙 트래버스 모습>

□ 수송계획 수립

- 트래버스는 여름 기간중 수행하며 차량의 내한 성능을 넘는 저온에서 운행하지 않도록 수송계획을 세움
- 계획을 개시할 당시의 보유 차량, 그 후의 차량 반입 계획을 바탕으로 트래버스에 사용되는 차량들의 주행거리를 산출하고, 노후화를 고려해서 사용 가능 차량수를 확정하여 각 트래버스의 차량 편성에 무리가 없도록 차량을 배분
- 각 차량의 최대 견인 가능한 썰매 수의 범위 내에서 드럼을 싣는 썰매와 일반 물자를 싣는 썰매의 수를 결정
- 이 때 돔 후지로 수송되는 물품 중 드럼통과 일반 물자의 비율이 계획상의 필요 물자의 비율에 준하여 2:1이 되도록 조정하고, 시기마다 필요한 썰매의 수도 계산

- 각 트래버스가 수송할 물자 내에 연료드럼에 대해서는 트래버스용 연료, 도중에 보관할 분량을 제외하고 목적지에 도달할 순 수송량을 산출
- 일반 물자에서는 트래버스에 사용하는 기계 부품이나 식량을 제외하여 순 수송량으로 하고, 그 결과를 미즈호 기지, 중계거점, 돔 후지 각각의 지점마다 계산하여, 각 트래버스가 완료한 시점에서의 물자 보관량으로 결정
- 중간 지점에서는 보관했던 것을 회수할 때 물자 손실이 일어나지 않았는지를 확인
- 긴급시의 안전대책으로써, 트래버스가 진행되는 기간은 쇼와기지 쪽에 구조대를 편성할 수 있을 만큼 차량을 대기시킴
- 다수의 트래버스티미 동시에 행동하고 있을 때는 상호 구조하는 것으로 결정

□ 계획의 수정

- 심부시추 계획의 진행이나 수정에 따라, 수송 계획은 몇 번이나 수정되었음
- 예를 들어, 1989년의 설영(設營) 계획안에서 필요 물자의 양은 드럼 124t, 일반 물자 58t, 합계 182t이었음, 수송 계획으로써는 그것에 약 10%의 여유를 예상한 200t의 수송이 목표였고, 1990년 9월 합계 211t 과 충분한 수송력을 감안한 계획을 세웠음, 월동 계획이나 시추 계획을 더욱 상세하게 검토하는 동안, 필요 물자의 양은 차츰 증가하여 1991년 11월 시점에서, 계획은 1994-95년 돔 후지에서 월동하는 것으로, 돔 후지로 수송하는 최종 중량은 232t이 되었음
- 1991년 11월 계획 전반에 걸친 변경이 있었고, 돔 월동이 지금까지보다 1년 늦은 1995~96년으로 변경되어, 수송계획을 재검토하였으며, 돔 후지로의 최종 수송 중량은 270t이 되었음
- 1992년 2월 차량 반입 계획의 변경이 있었음, 그 후 견인력이 큰 불도저가 늘어난 이유로 돔 후지로의 최종 수송 중량은 302t으로 결정됨
- 1992년 월동대의 보고에 의해 불도저의 연비는 예상치에 비해 상당히 양호하다는 것으로 밝혀졌고, 수송 물자의 양에 대해 50t 이상의 여유가 생기게 되었음
- 1993년에 들어서 몇 개의 조건이 변경되었음, 차량 반입 계획에서 SM100을 2대 반입할 예정이었으나, 이것을 1대로 줄여야 했고, 차량 성능에 대해서는, SM100은 썰매 7대를 견인 가능한 것으로 나타났음,
- 만일을 위해 SM100의 견인 썰매 수를 전부 7대로 한 경우도 계산해서 전체 약 5% 수송량이 증가한 것으로 밝혀짐
- 1993년 돔 후지 월동 중 연료 계산이 달라져서 돔 후지 필요 물자의 양이 확대되어 기존의 트래버스 계획으로는 감당할 수 없게 되었음

- 1995~96년 돔 후지 월동 중 안전 위해 SM100 2대를 월동시키기로 함에 따라 계획 변경이 불가피 하게 되었고, 1995년 돔 후지에 들어갈 계획을 변경하기로 하였음
- 트레이버스 팀을 선발과 후발의 두 개로 나눠, 선발대는 돔 후지에 가능한 빨리 도착하여 월동대와 협력해 기지를 건설함
- 후발대는 불도저를 이용해서 운행 속도는 늦지만 수송력이 큰 팀이 되도록 구성하여, 1996년 봄에 돔 후지 보급을 위해 트레이버스를 실시하기로 계획함
- 이것으로 의해 약 50t의 수송력이 보강되었고, 돔 후지에 SM100을 2대 월동시키기로 하면 1996년 여름 돔 후지에 들어가는데 사용하는 SM100이 1대 줄어듬
- 이 변경에 의해서 수송력의 감소는 10t이고, 이 무렵 수송 물자의 양은 최대 298.5t, 그에 비해 수송량은 347.3t이었음
- 필요 물자의 양에 비해 약 50t의 여유를 확보한 후 이것을 기본계획으로 수송을 진행함
- 비상용 연료 창고 설치 계획을 책정, 100km마다 연료 드럼 6통의 보관소를 설치하고, 이는 긴급피난이나 구조 등의 목적으로 가능한 빨리 이동할 필요가 생겼을 경우, 트레이버스의 속도를 높이기 위하여 설상차가 견인하는 썰매의 수를 줄이기 위함임

□ 트레이버스 경과

- 1992~93년까지는 대부분이 연료 드럼의 수송이었지만 지극히 순조롭게 진행되어 중간거점인 미즈호 기지까지의 운송량은 계획을 초과함
- 1994년 수송, 건설 모두 최대 규모의 계획이었으나, 쇼와기지 부근의 얼음 상태가 아주 나빴기 때문에 큰 영향을 받았음
- 여름 동안 행동이 제한되어 돔 후지까지 트레이버스가 중간지점에서 중단하게 되었고, 그 지연을 만회하기 위해, 계획에 없었던 중계거점까지 가을 트레이버스를 실시하고 여름에서는 차량과 인원을 최대한 투입하였음
- 그 결과 1995년 돔 후지 월동 개시까지 물자 수송 및 기지 건설을 끝내는 것이 가능했고, 월동을 개시한 후에도 1995부터 1997년까지 매년 봄에 돔 후지까지 트레이버스를 통해 연료 등 필요한 물자를 보급하는 하는 것 외에 인원 교대도 할 수 있었음
- 통계를 보면 1996년 37차 월동대가 업무를 개시할 때까지 돔 후지에는 365.2t의 물자가 수송되었음
- 이것은 앞서 기술한 기본계획 수송량 347.3t보다 다소 많은 양으로, 전체적으로 수송계획에 추가한 수송이 실시되었음

- 실제로 돔후지에서서의 월동은 계획을 1년 연장해 38차까지 행해졌기 때문에, 1998년 여름 트래버스 후 돔 후지가 일시 폐쇄할 때까지의 최종 수송 중량은 508.3t으로 계획보다 약 150t 많아졌음

<돔 후지 누적 수송량. 각 해에 수송된 물자의 총 중량. 자주 연료 등 트래버스용 소비 물자 미포함>

단위 : 톤	드럼		드럼 이외	합계
시기/분류	연료	시추 용액 등	건설 자재·일반 물자	
1995년 월동을 시작시	86.6	22.8	157.7	267.1
1996년 "	123.4	50.0	191.8	365.2
1997년 "	166.8	59.6	228.5	454.9
최종 (일시 폐쇄)	209.4	67.2	231.7	508.3

라. 중국 곤륜 (Kunlun) 기지

□ 곤륜기지 건설자재 내륙 육상 트래버스 운송

- 곤륜기지 건설자재는 중국 본토에서 설룽호 편으로 중산기지를 거쳐 건설인력과 함께 1,235km 육상 트래버스를 통해 현지에 운반됨
- 중산기지로 부터 처음 300km 구간이 중요한데 처음 해안에서 60km 크레바스 구간만 급경사이며 그 이후는 대체로 평탄하게 해발 2,200m 까지 구성됨
- 다음 400-650km 구간은 고도 2,200-2,900m 를 오르내리며 그로브(Grove) 산맥 정상으로 오르는데 크레바스가 밀집되어 있고 강한 중력풍이 존재함
- 이 구간을 지나면 건설지까지 상대적으로 평탄한 설원으로 구성

□ 중국의 트래버스 능력

- 중국은 1996/97시즌 첫 내륙 트래버스 이후 지속적으로 트래버스 능력을 확충시켜옴
- 곤륜기지 건설 당시 트래버스 팀은 트랙터 4대(챌린저, 견인력 65-75톤/대), 중형설상차 2대(PB300, 35-40톤), 소형 설상차 3대(PB240, 30톤) 등 총 9대 차량으로 구성
- 운송물자는 컨테이너 썰매 26대, 연료탱크 썰매 16대 등 총 42대 썰매에 실려 9대의 차량으로 견인

□ 건설자재

- Dome A 기지건설을 위한 운송물자는 건축자재, 발전, 난방 용품, 기계 장비류, 차량, 연료, 오일, 기지 유지; 보수용 예비부품, 통신시설, 의료비, 소방방비, 식품, 보호장구, 생활용품, 안전;비상시설, 과학장비 부품류 등으로 구성
- 건축자재, 항공유를 제외하고는 건설과 운송에 필요한 대부분의 연료 및 물품은 다중 소량이 특징
- 모든 보급품 조달 원칙은 중국 국내산으로 신속 조달 가능하고 저렴하며 양질의 물품으로 구입한다는 것이고, 이에 따라 대부분의 물자와 연료는 중국산으로 조달되었으며, 일부 기계 장비와 부품은 외국에서 수입
- Dome A 건설에 필요한 물자는 약 500톤 정도로 추정되며 하계운업을 위해서 매년 약 80톤의 보급품이 요구됨, 대부분의 건설물자는 2008/09와 2009/10년 시즌 당 1회씩 2년에 걸쳐 중산기지에서 육상 트래버스를 통해 운반됨, 따라서 매년 트래버스 운송량은 약 200톤에 달함
- 연료는 트래버스용 110톤, 기지보급 30톤 등 총 140톤으로 연료탱크 16대(용량 15m³/대, 썰매장착)로, 기타 숙소, 발전기, 통신 캐빈, 단열컨테이너(식품, 야채 등) 등은 총 26대 썰매로 견인, 총 견인력은 약 500톤에 달함
- 2019/20년 시즌 현재 중국 남극 내륙 트래버스티엄 구성은 11대 설상차와 50개 썰매로 약 500톤 규모의 견인력을 유지



<2019/20년 중국 트래버스 구성>

□ 항공/해상 보급 시스템

○ 항공기운영

- 중국은 내륙 곤륜기지 지원과 항공과학탐사를 위해 2015년 스노우이글 601(Basler, BT-67)을 도입
- 스노우이글은 항속거리 1,300km, 시속 380km, 화물탑재량 5,900kg 이며 과학탐사를 위해 아이스 항공레이더, 항공 중력, 자력 측정계가 설치
- 항공기의 운영 및 정비는 제조사인 캐나다 Kenn Borek 사가 운영하며 매년 하계시즌 캐나다에서 남미를 거쳐, 영국 로데라 기지, 미국 아문센-스콧 기지를 경유 중산기지로 이동한 후 3월경 다시 캐나다로 귀환



<중국 곤륜기지 지원을 위한 항공기 스노우 이글>

○ 신형 쇄빙선 건조

- 중국은 남극 연구역량 강화와 내륙 곤륜기지 보급 지원을 목적으로 제2 쇄빙선을 건조하였으며, 설룽2호로 명명된 신규 쇄빙선은 2019/20 시즌 첫 남극항해에 성공함
- 설룽2호의 제원은 길이 122m, 폭 22m, 배수톤수 14,000톤
- 쇄빙능력은 1.5m 두께 해빙을 2-3노트로 전진 가능
- 각종 해양, 지질, 지구물리 연구 장비를 장착하고 있으며 헬기 2대 탑재 가능



<중국 남극활동 지원을 위해 2019년 신규 건조된 쇄빙선 설룽 2호>

제 III 장

남극내륙 종합연구 수행 및 지원체계 구축 세부 추진계획

1. 추진전략

가. 분야별 세부과제 개발을 통해 연구주체 다각화

□ 다양한 산-학-연 기관의 주도적인 연구 참여

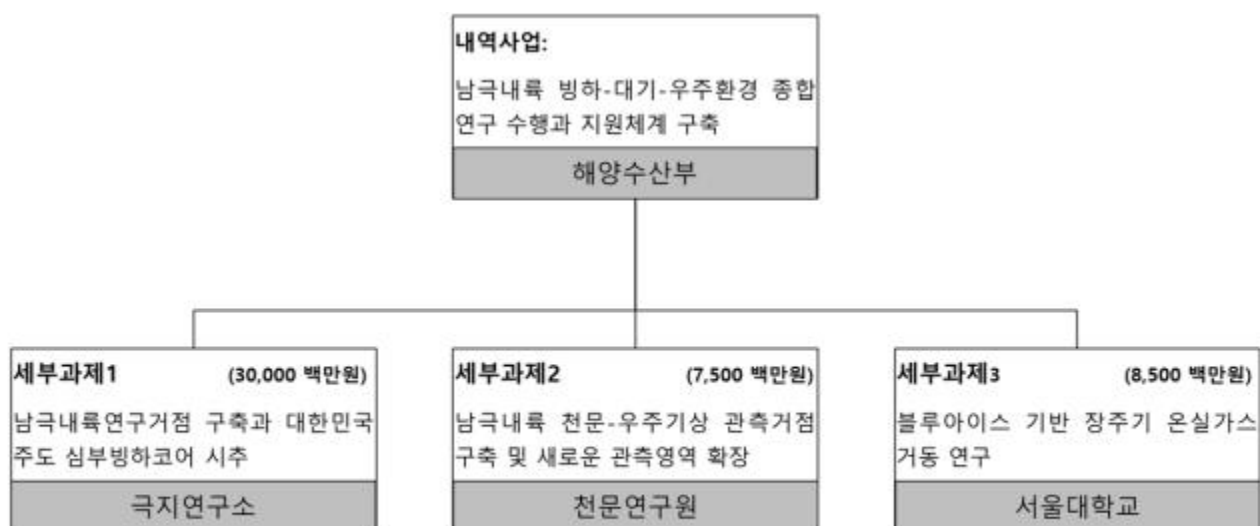
- 다양한 국내외 극지연구기관에 남극내륙 인프라 개발을 통한 인프라 활용 효율 극대화
 - 2,000km 남극내륙 육상 및 항공 진출루트를 활용한 연구인력 및 장비 운송
 - 기 확보한 남극내륙 탐사선단 장비 및 이동식 캠프시설을 활용한 현장연구 지원
 - 극지연구소에서 보유한 빙원레이더탐사 기술을 활용하여 분야별 연구거점 최적지 선정
- 분야별 연구특성에 맞는 남극내륙 연구거점 구축
 - 세부과제 연구주체 주도의 연구거점 별 각 분야 특성에 맞는 남극내륙 연구 인프라 기획 및 구축
 - 세부과제 연구주체를 중심으로 남극내륙연구의 저변 확대

□ 산-학-연 남극내륙연구 활성화 협의체 운영

- 협의체를 통한 남극내륙 종합연구 계획 수립 및 수행
 - 한정된 남극내륙 인프라의 효율적인 활용
 - 남극내륙 연구거점 구축을 위한 산-학-연 기술협력 추진
 - 각 세부과제 진행상황 공유를 통해 분야간 연계강화 및 남극내륙 종합연구 시너지 창출

나. 추진체계

- 해양수산부 신규 R&D 내역사업의 3개 세부과제 수행
 - 기존의 남극내륙연구를 위한 진출루트 개척 및 탐사기술개발 기관고유사업 1단계 종료 후 국가 R&D 사업으로 추진



2. 남극내륙 연구거점 기반시설 구축과 심부빙하코어 시추

세부과제 1. 요약서

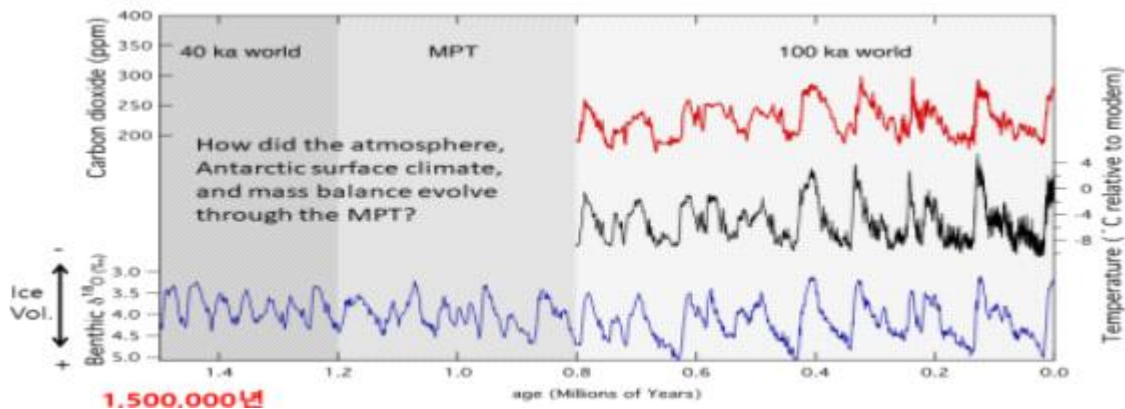
연구 필요성	○ 유래없는 온실가스 농도 증가로 인한 탄소중립 패러다임 도래 ○ 기후변화 예측값과 실제 관측값과의 오차 증가로 인해 정확한 기후변화 기작 이해 필요 ○ 선진국을 중심으로 남극내륙 영향력 확대 및 극지기후변화연구 선점을 위한 국제 경쟁 심화
연구 개발 목표	○ 남극내륙 연구거점 3개소 구축을 통해 남극내륙 연구기반 구축 ○ 대한민국 주도의 남극내륙 심부빙하코어 시추
주요 연구 내용	○ 남극내륙 진출루트 구간 지질/물리/화학적 조사를 통해 연구거점 최적지 선정 ○ 심부빙하코어 시추, 천문-우주기상 관측, 블루아이스 온실가스 연구를 위한 내륙 연구거점 기반 구축 ○ 심부빙하코어 시추거점 시추돔 건설 및 대한민국 주도의 3,000m 급 남극내륙 심부빙하코어 시추
국제공동 연구계획	○ 남극내륙 빙원 레이더 탐사 기술개발과 관련하여 미국 선진 연구기관과의 공동 연구 수행 ○ 심부빙하코어 시추 시스템 운영과 관련하여 일본의 시추 전문가 활용
예상 연구 성과	○ 3,000m 급 심부빙하코어시추를 통해 과거 100만년 이상의 장주기 기후변화 기록 복원 및 자연적/인위적 기후변화 요인 규명 ○ 과거 100만년 간 온실기체 농도변화 기록 복원 및 기후요소와의 상호작용 규명
기대효과	○ 남극내륙 진출루트 탐사지역에 연구거점 구축을 통해 남극내륙 내 대한민국 과학적 영향력 확대 ○ 장주기 고기후변화 기록 복원을 통해 기후변화 예측모델의 근거 제시 ○ 전 지구 온실가스 거동 연구를 통해 탄소중립 패러다임 대응 정책수립 기여

가. 연구개발의 경제·사회·기술적 필요성

- 백만년 이상된 얼음 시료 획득을 위해서는 3,000m 이상의 심부빙하시추 필요
- 기후변화의 난제 중의 하나인 빙하기-간빙기 주기 변화의 원인 규명

□ 기술적 측면

- 극지와 고산지대에 분포하는 만년빙은 지구상에서 유일하게 기후변화와 연관된 온실가스, 에어로졸 등의 대기성분을 계절단위에서부터 수십만년 전까지 복원할 수 있는 '냉동 타임 캡슐'로서 가장 신뢰할 수 있는 과거 지구환경 기록 자료 제공
- 남극과학연구위원회(SCAR)의 중장기비전(Horizon Scan)에 따르면 향후 20년간 우선해야 할 남극연구는 가장 먼저 언급한 내용은 남극빙하연구를 통한 글로벌 환경변화의 예측 대응과 남극 내륙진출과 미답지의 연구 영역 개척으로 남극 심부빙하시추는 남극 연구의 핵심 주제임
- 우리나라는 남극 장보고과학기지 건설(2014)을 시작으로 남극 빙하코어 연구를 국제공동 프로그램 및 자체연구프로그램으로 북빅토리아랜드 고해상도 과거 기후환경 복원 연구를 함과 동시에 K-루트 탐사를 통해 남극 내륙 진출로를 확보 중임. 이를 통해 향후 남극 내륙기지 건설 및 독자적인 심부빙하시추를 달성할 필요가 있음
- 빙하를 이용한 과거 지구환경변화에 기록 복원을 위해서는 선도기술인 극한지에서의 빙하 시추기술 개발과 빙하 탐사 기술 개발이 필수적
- 얼음의 평균두께가 2,500m인 남극의 빙원은 수십만년 이전의 기후복원이 가능한 얼음 시료를 채집할 수 있으며 최근에는 백만년 이상된 얼음 시료를 채집하기 위하여 빙하연구 선진국들이 주력하고 있음
- 국제빙하코어연구공동체(International Partnership in Ice Core Sciences, IPICS)는 남극 빙하코어에서 과거 80만년의 기후변화 기록을 복원한 후, 빙하기-간빙기 주기가 4.1만년에서 10만년으로 바뀐 중기-플라이스토세 전환기 유발의 원인을 밝히고자 과거 100만년 이상의 장주기 기후변화 기록을 복원할 수 있는 심부빙하시추 추진



<과거 150만년 간의 기후변화 (Severinghaus et al., (2010))>

□ 경제 · 산업적 측면

- 기후변화에 의해 초래되는 지구환경변화는 궁극적으로 전 인류의 생존과 직결되는 문제로써, 홍수, 태풍 등의 환경재앙에 따른 인명피해를 비롯한 막대한 경제적 영향뿐만 아니라 인류의 보편적인 생활형태를 바꾸고 있음
- 우리나라도 경제 발전 방향을 탄소제로로 설정하고 친환경 저탄소 성장을 목표로 하고 있으며, 이에 따라 미래 지구환경변화의 시나리오가 정책결정의 중요한 요소를 차지하고 있음
- 신뢰할 수 있는 미래 지구환경변화 시나리오는 정확한 기후변화 모델을 통해 수립될 수 있고, 정확한 기후변화 모델 제작을 위해서는 방대한 양의 현생뿐만 아니라 과거의 방대하고 정확한 기후요소들의 기본자료를 요구하고 있음
- 현재 지구상에서 유일하게 오염되지 않은 환경을 간직한 남극지역에서 생산되는 여러 기후 프록시들은 모델 개발자들이 가장 중요하게 생각하는 요소들이며, 향후 우리나라의 남극대륙기지를 기반으로 제공되는 기후 프록시 정보들이 중요하게 사용될 수 있음
- 남극 내륙 빙원에서의 탐사와 연구활동을 통해 습득한 극저온 환경에서의 장비운용 기술은 관련 극한지에서의 산업활용에 활용될 수 있음

나. 연구 개발 계획

□ 최종 목표

- 레이더 탐사를 통해 백만년 이상의 심부빙하코어시료 획득을 위한 시추 최적지 선정
- 3,000 m 급 심부빙하코어 시추 시스템 확보 및 심부빙하코어 시추거점 구축
- 천문-우주기상 관측거점 및 블루아이스 연구거점 기반 구축
- 정기 남극내륙 횡단 프로그램 수행 및 탐사선단 강화를 통한 지원체계 정립

□ 연차별 세부 연구 목표, 내용 및 소요예산

단계	년도	세부연구목표	연구내용	소요예산 (추정)
1단계	2023	○ 심부빙하시추 후보지 조사 ○ 중부빙하코어 시추시스템 확보 ○ 친환경 심부빙하시추캠프 모듈 제작 ○ 탐사선단 강화 ○ 남극내륙 횡단 프로그램 수행	- 심부빙하 시추후보지 1차 광역항공 탐사 (15억원) : 항공탐사 100시간×1천만원=10억원 항공탐사자료 분석, 5억원 - 1,000m 급 중부빙하코어 시추기 제작 (3억원) - 에너지 하베스팅 컨테이너 기반 심부빙하코어 시추캠프 모듈 제작 (7억원) - 설상차 3대 (15억원) - 남극내륙 연구거점 기반시설, 연료 및 물자 운송을 위한 K루트 탐사 수행 (20억원) : 내부인력 5인×4천만원=2억원 안전대원 5인×4천만원=2억원 중장비 5인×4천만원=2억원 헬기임차 200시간×2백만원=4억원 유류 100t×2백만원=2억원 식자재 및 탐사물품=5억원 위성탐사자료 50장×5백만원=2.5억원 기상관측장비 2대×2.5천만원=5천만원	60억원
	2024	○ 심부빙하시추 후보지 조사 ○ 중부빙하코어 시추 ○ 심부빙하코어 시추기 설계 ○ 친환경 블루아이스 연구캠프 모듈 제작 ○ 탐사선단 강화 ○ 남극내륙 횡단 프로그램 수행 ○ 심부빙하코어 시추거점 기반구축	- 심부빙하 시추후보지 2차 광역항공 탐사 (15억원) : 항공탐사 100시간×1천만원=10억원 항공탐사자료 분석, 5억원 - 1,000m 급 중부빙하코어 시추 (3억원) : 국외전문가 4개월×2.5천만원=1억원 기타 현장연구 부대경비=2억원	60억원

			- 3,000m 급 심부빙하코어 시추기 제작착수 (10억: 총 비용 50억 중 20%) - 에너지 하베스팅 컨테이너 기반 블루아이스 연구캠프 모듈 제작 (7억원) - 설상차 1대 확보 (5억원) - 남극내륙 연구거점 기반시설, 연료 및 물자 운송을 위한 K루트 탐사 수행 (20억원) : 내부인력 5인×4천만원=2억원 안전대원 5인×4천만원=2억원 중장비 5인×4천만원=2억원 헬기임차 200시간×2백만원=4억원 유류 100t×2백만원=2억원 식자재 및 탐사물품=5억원 위성탐사자료 50장×5백만원=2.5억원 기상관측장비 2대×2.5천만원=5천만원 - 남극내륙 심부빙하코어 시추거점 기반구축	
	2025	○ 심부빙하시추 후보지 선정 ○ 심부빙하시추거점 빙하환경 파악 ○ 심부빙하시추기 제작 ○ 친환경 천문-우주기상 관측캠프 모듈 제작 ○ 남극내륙 횡단 프로그램 수행 ○ 블루아이스 연구거점 기반구축	- 시추 후보지역 1차 육상레이더 탐사 - 중부빙하코어 시료 분석 : 시료 20,000개×1.5만원=3억원 - 3,000m 급 심부빙하코어 시추기 제작 (20억: 총 비용 50억 중 40%) - 에너지 하베스팅 컨테이너 기반 천문-우주기상 관측캠프 모듈 제작 (7억원) - 남극내륙 연구거점 기반시설, 연료 및 물자 운송을 위한 K루트 탐사 수행 (30억원) : 내부인력 5인×4천만원=2억원 안전대원 5인×4천만원=2억원 중장비 5인×4천만원=2억원 헬기임차 200시간×2백만원=4억원 유류 100t×2백만원=2억원 식자재 및 탐사물품=5억원 위성탐사자료 50장×5백만원=2.5억원 기상관측장비 2대×2.5천만원=5천만원 항공루트운영 100시간=10억원 - 남극내륙 블루아이스 연구거점 기반 구축	60억원

	2026	○ 심부빙하코어 시추 돛 건설 ○ 심부빙하코어 시추기 제작 완료 ○ 남극내륙 횡단 프로그램 수행 ○ 천문-우주기상 관측거점 기반구축	- 빙하시추를 위한 시추 돛 건설 및 시추 홀 착공 (10억원) - 3,000m 급 심부빙하코어 시추기 제작 완료 (20억: 총 비용 50억 중 40%) - 남극내륙 연구거점 기반시설, 연료 및 물자 운송을 위한 K루트 탐사 수행 (30억원) : 내부인력 5인×4천만원=2억원 안전대원 5인×4천만원=2억원 중장비 5인×4천만원=2억원 헬기임차 200시간×2백만원=4억원 유류 100t×2백만원=2억원 식자재 및 탐사물품=5억원 위성탐사자료 50장×5백만원=2.5억원 기상관측장비 2대×2.5천만원=5천만원 항공루트운영 100시간=10억원 - 남극내륙 천문-우주기상 관측거점 기반구축	60억원
	2027	○ 심부빙하코어 시추 시작 ○ 심부빙하코어시료 현장분석 시스템 개발 ○ 심부빙하코어 시추거점 기반 표층 연구 프로그램 수행 ○ 탐사선단 강화 ○ 남극내륙 횡단 프로그램 수행	- 3,000m 급 심부빙하코어 시추기 현장 테스트 및 시추 시작 (6억원) : 국외전문가 4개월×2.5천만원=1억원 기타 현장연구 부대경비=4억원 - 심부빙하코어시료 현장분석 시스템 구축 (10억원) - 심부빙하코어 시추거점 표층연구 프로그램 개발 및 수행 (4억원) - 설상차 2대 확보 (10억원) - 남극내륙 연구거점 기반시설, 연료 및 물자 운송을 위한 K루트 탐사 수행 (30억원) : 내부인력 5인×4천만원=2억원 안전대원 5인×4천만원=2억원 중장비 5인×4천만원=2억원 헬기임차 200시간×2백만원=4억원 유류 100t×2백만원=2억원 식자재 및 탐사물품=5억원 위성탐사자료 50장×5백만원=2.5억원 기상관측장비 2대×2.5천만원=5천만원 항공루트운영 100시간=10억원	60억원
	합 계			300억원

□ 단계별 주요 인프라 구축 계획 및 소요 자원

○ 장비 및 시설 구축 계획

인프라명	구축 필요성	도입 시기					예산 (추정)
		1단계					
		2023	2024	2025	2026	2027	
중부빙하시추기	○ 1,000m 이상의 빙하코어 시추를 위한 필수 장비 ○ 심부빙하코어 시추거점의 빙하구조 및 빙하 환경 조사를 위한 예비시추 활용 ○ 국제협력을 통해 장비 제작 및 운영기술 습득						3억원
심부빙하시추기	○ 3,000m 급 심부빙하코어 시추를 위한 필수 장비 ○ 심부빙하코어 시추드릴 및 주변기기로 구성 ○ 국제협력을 통해 시추기 설계, 드릴 본체 및 주변기기를 연차별로 확보 및 운영기술 습득						50억원
남극내륙 캠프모듈	○ 모듈 당 최대 12명의 연구인력 거주시설 ○ 남극내륙 연구거점 내 현장연구 인력 체류 및 50kW 발전기를 통한 연구시설 전원공급						21억원 (3모듈)
설상차	○ 연료 및 물자 운송을 위한 남극내륙 전용 차량 ○ 최종 800톤 규모의 화물운송 능력 보유 목표						30억원 (6대)
기상관측장비	○ 남극내륙 자동 기상관측장비 ○ 기상환경 모니터링을 통한 남극내륙 연구거점 기상현황 파악 및 대기환경 변화연구						2.5억원 (10대)
합 계							106.5억원

○ 연구 인력 충원 계획

충원 필요성	충원 시기					인력
	1단계					
	2023	2024	2025	2026	2027	
○ 빙원탐사와 빙하모델 수립 ○ 시추후보지 선정과 빙하연대 추정	1명					1명
○ 빙하시료 분석 ○ 빙하코어를 활용한 기후복원과 기후변화 원인 규명		1명		1명		2명
합 계						3명

□ 남극 인프라 활용계획

활용 인프라명	활용 계획	활용 시기
쇄빙연구선 아라온	○ 장비 및 인력 수송 ○ 빙하코어 반출	매년
남극장보고과학기지	○ 빙하시추 후보지 탐사를 위한 베이스캠프 ○ 필요 장비 운송 및 빙하코어 반출	매년
항공기(헬기 등)	○ 남극횡단 위험구간 항공정찰 ○ 블루아이스 연구거점 인력 및 물자운송	매년
내륙기지 연구모듈	○ 남극내륙 연구거점 지역 거주 및 현장연구	매년
빙하시추 돛기지	○ 빙하시추 및 관련 연구 수행	'26년 이후 매년

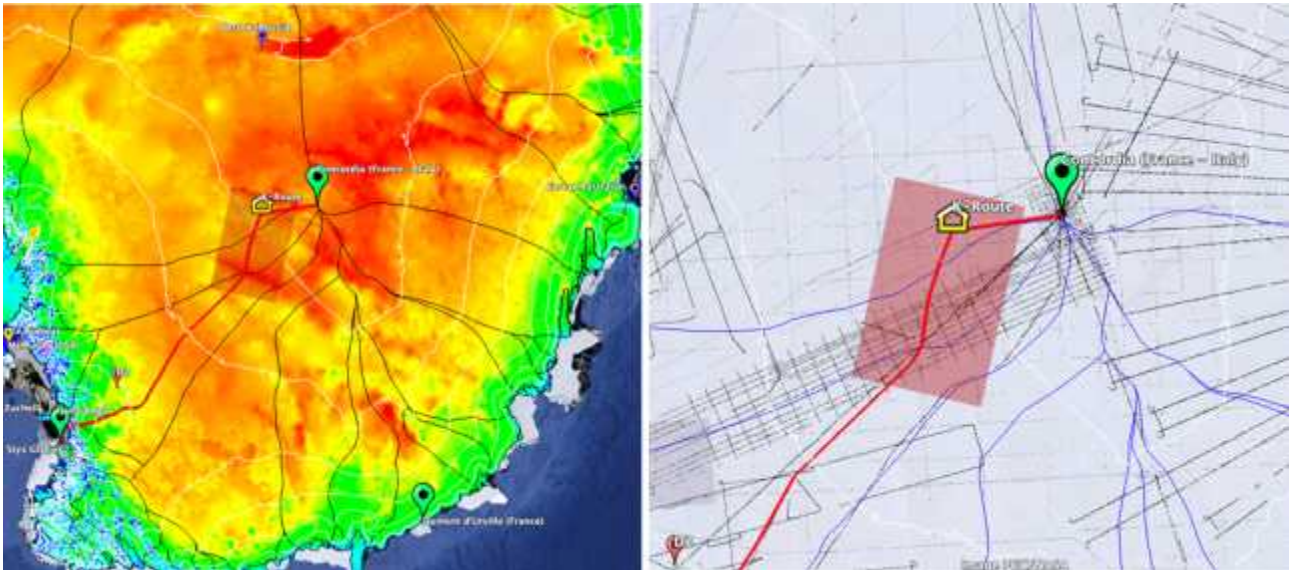
다. 로드맵



라. 연구세부계획

□ 남극내륙 연구거점 최적지 선정

- 심부빙하시추거점 연구거점 최적지 선정
 - 콘코르디아 기지, 보스톡 기지 등 기존 연구지역으로부터 K루트 남극내륙 연구거점 캠프 지역까지의 레이더 탐사를 통한 예비 조사
 - 항공 및 육상 레이더 탐사를 통해 심부빙하시추 후보지 빙하구조 파악 및 Ice flow modeling을 이용한 심부빙하 연대 추정



<남극내륙 연구거점 심부빙하코어 시추 후보지 항공레이더 탐사 계획도>



<남극내륙 빙원 육상레이더 탐사>

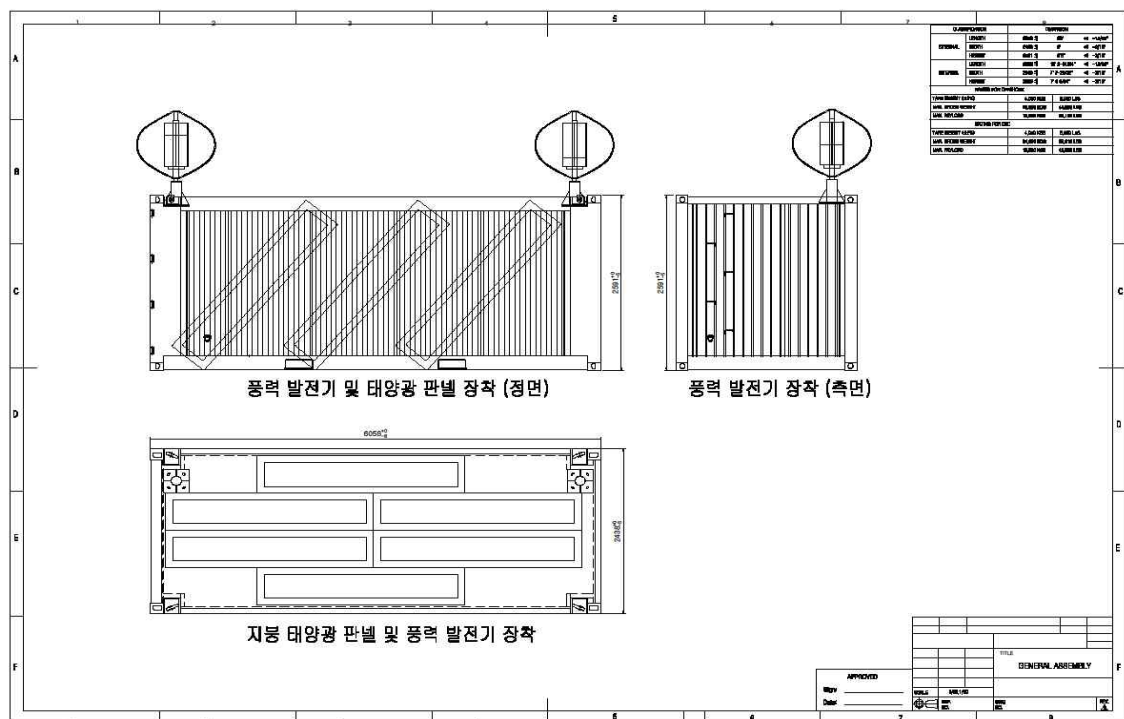
□ 남극내륙 연구거점 기반시설 구축

○ 연구거점 캠프시설 구축

- 각 연구거점 현장연구인력 체류를 위해 기존의 탐사선단 캐러반 형태의 연구거점 기반 시설 구축
- 남극내륙 현장연구 에너지 효율 향상을 위한 태양광, 풍력발전 등 친환경 에너지 활용 시스템을 연계한 기반시설 구축



<탐사선단 캐러반을 이용한 연구캠프 구축>

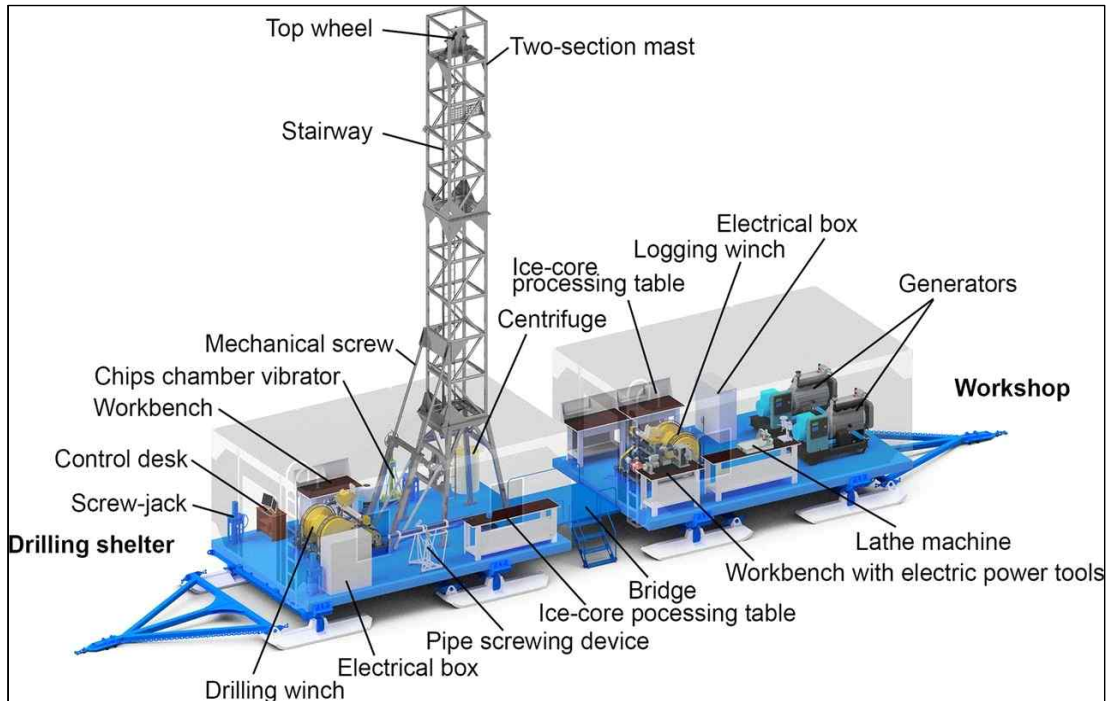


<태양광 및 풍력 발전 시스템 개발 도면>

□ 대한민국 주도의 심부빙하코어 시추

○ 빙하탐사기술과 빙하시추기술 강화

- 국제공동연구를 통해 1,000m 급 중부빙하코어 시추시스템 및 3,000m 급 심부빙하코어 시추시스템 확보 및 국내 빙하코어 시추역량 강화
- 500m 이상의 중부빙하코어 예비 시추를 통해 해당 지역의 적설량 및 빙하환경특성 파악
- 국제 심부빙하코어 시추 네트워크를 통한 심부빙하코어 시추기술 확보 및 대한민국 주도의 심부빙하코어 시추
- 심부빙하코어 시추를 대비한 자동화, 현장분석 등의 시료 전처리 및 분석기술 고도화



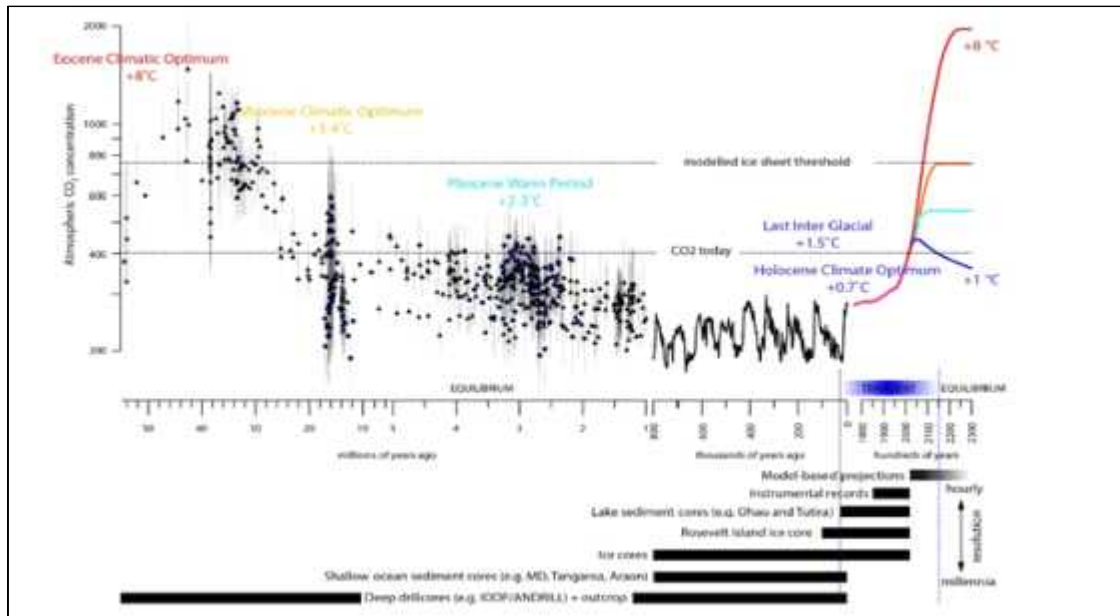
<중국에서 개발 중인 1,000m 급 이동식 중부빙하코어 시추시스템>



<빙하코어 물 동위원소 시추현장 자동분석 시스템>

○ 과거 100만년 이상 고해상도 기후변화 연구 수행

- 심부빙하코어 시추 및 신규 프록시 개발을 통해 과거 100만년 이상의 종합적인 고해상도 기후/환경변화 기록 복원
- MPT (Mid-Pleistocene Transition) 전후 빙하기-간빙기 기후변화 주기변화 요인 규명
- 150만년 이전 온실가스 농도 급감 기록복원 및 기후변화와의 상호작용 파악
- 남극내륙 빅토리아랜드 미답지역 과거 4만년 기후변화 기록 복원을 통한 남북극 빙하코어 네트워크 국제 프로젝트 기여



<신생대 대기 중 이산화탄소 농도 변화 복원기록>



<1,000m 급 남극내륙 심부빙하코어 시추지>

마. 기대 효과 및 활용 방안

□ 기술적 측면

- 빙하탐사 기술과 빙하시추 기술 확보
 - 독자적인 빙하탐사기술 확보와 3,000미터급 이상의 빙하시추 기술 개발
 - 남극 대륙종단기술과 남극 내륙기지 운영 등의 남극대륙 빙하탐사 기반기술 확보
 - 최대 수십만년까지의 과거 기후변화기록 복원과 대기조성(메탄과 이산화탄소 등의 온실기체 등) 변화 기록 복원
 - 신뢰할 수 있는 미래 기후변화 예측 모델 개발을 위한 기초자료 제공

□ 경제 산업적 측면

- 신뢰할 수 있는 기후변화 자료 제공을 통한 미래 기후위기 대응
 - 신뢰할 수 있는 미래 기후변화 예측 모델의 근거를 제시하여 미래 환경재앙에 대비
 - 독자적인 지구환경변화 미래예측 시나리오를 개발하여 기후변화와 관련된 국가의 거시적 정책 마련에 필요한 정보 제공
 - 인류의 지속가능한 발전에 필요한 미래 지구환경변화에 대한 과학지식을 제공함으로써 공공 활용에 기여

□ 활용 분야

- 미래 기후변화 대응 정책에 활용
 - 신뢰할 수 있는 미래 지구환경변화의 예측 시나리오는 산업, 경제 그리고 국민생활 변화에 대응하기 위한 국가의 거시적 정책 마련에 필요한 결정적 과학정보 제공
 - 축적된 자료를 이용한 모델 개발을 통해 기상조건 변화에 따른 해수면 상승, 수자원 변화, 가뭄과 홍수, 어족자원 변화, 농업 생태계, 그리고 육상과 해양생태계 변화 등 자연환경 변화의 예측 시나리오 제시
 - 시나리오에 상응하는 범국가적 대응책 마련 및 거시 정책방안 수립
 - 과학지식의 공공성 활용에 기여하여 국가 브랜드 향상
 - 지구환경변화에 대한 국민적 인식 제고와 국내 환경보호정책 강화

3. 남극내륙 천문-우주환경 관측거점 구축과 무인관측연구 수행

세부과제 2. 과제요약서

연구 필요성	○ 남극내륙은 낮은 기온, 건조한 대기, 안정한 대기층, 그리고 미세먼지가 없는 청정 하늘을 갖고 있는 지구상에서 가장 좋은 천문우주 관측 장소로 알려짐 ○ 그러나 남극내륙의 극한환경을 극복하기 위한 극지 천문우주 관측시스템 기술과 무인 자동화 운영 인프라 기술이 요구됨 ○ 따라서 극지 천문우주기술을 기반으로 빙상 움직임, 대기교란, 오로라 우주전파 감쇄 등의 남극 천문우주환경 관측 인프라 네트워크 구축과 운영이 우선적으로 필요함
연구 개발 목표	○ 안전하고 안정한 관측시설 유지를 위한 GNSS 상시관측소 구축 ○ 남극내륙 천문우주 관측환경 파악을 위한 관측 네트워크 구축 ○ 지속적 천문·우주기상 관측을 위한 모듈형 이동식 천문우주관측소 구축
주요 연구 내용	○ 안전하고 안정한 관측시설 유지를 위한 GNSS 상시관측소 구축 - K-루트 선단 및 남극내륙 연구거점 Multi-GNSS 동적 단독 정밀측위 - Multi-GNSS 위치정밀도 향상을 위한 오로라 GNSS 오차연구 ○ 남극내륙 천문우주 관측환경 파악을 위한 관측 네트워크 구축 - 천문우주기상 관측거점: 우주전파 THz 대기 투과도 측정 분광기 구축 및 운영 - 천문우주기상 관측거점: 태양 영상 및 전파 관측 시스템 구축 및 운영 - 남극내륙 경로: 오로라 전천 영상 카메라 및 자기력계 설치 및 운영 ※ 남극내륙 경로: 장보고과학기지(1곳)-빙저호 시추거점(2곳)-천문우주기상 관측거점(1곳) ○ 지속적 천문·우주기상 관측을 위한 모듈형 이동식 천문우주관측소 구축 - 천문우주기상 관측거점: 모듈형 이동식 천문대 구축(1곳) - 남극내륙 경로: 우주환경 무인 관측소 구축(4곳)
국제공동 연구계획	○ 무인 우주환경 관측소 운영 경험이 풍부한 미국 뉴저지 공과대학과 운영 협력 ○ 장보고기지 포함 내륙 연구거점 인접 기지와의 협력으로 우주환경 관측 영역 확대
예상 연구 성과	○ 남극 GNSS 정밀좌표 결정에서 오로라 영향 연구 ○ 내륙기지 천문 광학관측 대기교란(천문시상) 시계열 변화 연구 ○ 남극 태양 미터파 전파 24시간 변화 연구 ○ 내륙기지 THz 우주전파 대기 투과도 변화 특성 연구 ○ 오로라 발생 지역과 그 안쪽의 지자기 극점 지역(극관)에 포괄적 이해 ○ 지자기 위도와 시간에 따른 오로라 3차원 특성 연구
기대효과	○ 고정밀 Multi-GNSS 위치결정을 통한 빙상 수송로와 연구거점 안전성 확보 ○ 남극내륙 천문관측환경(대기교란, 빙상움직임, 수증기량) 측정을 통한 최적의 남극 대형 천문관측 인프라 구축으로 국제공동 거대과학 프로그램 수행 ○ 우리나라 고유 남극 천문우주환경 관측자료 확보를 통한 주도적 국제협력 활성화 ○ 남극 위성관측 자료와의 교차 검증 등을 포함한 지상-위성 연계 관측 연구 ○ 극지 우주환경 관측정보 제공을 통한 우주탐사 안전을 위한 우주기상 예측 정확도 향상

가. 연구개발의 경제·사회·기술적 필요성

- 남극내륙 위성항법시스템 성능향상을 위한 남극환경에 맞는 GNSS 고정밀 자료처리 기술 필요
- 남극내륙 우리나라 독자 천문우주 관측을 위한 관측환경 측정 및 기술력 확보 필요
- 우주개발 시대에 요구되는 우주기상 정보 제공을 위한 남극내륙 우주환경 관측 네트워크 필요

□ 기술적 측면

- 남극 GNSS 정확도 향상을 위해 남극내륙 전리층 전자밀도와 전파 신틸레이션의 장기 관측자료 분석을 통한 남극 GNSS 전리권 오차보정 모델 개발이 필요함
- 현재 천문학 난제인 별 탄생 연구를 위한 지상 THz 우주전파 천문대 구축이 필요함.
남극은 낮은 수증기량으로 지상에서 유일하게 THz 우주전파 관측이 가능한 지역임
- 우주기상 예측 모델의 성능을 좌우하는 태양 코로나 질량 방출과 플레어 폭발의 발생 예측을 위해 태양표면 자기장 응축 진화 연구에 필요한 24시간 수십일 이상의 연속 태양 관측이 필요함
- 극한환경의 남극내륙에서의 무인운전을 위해 관측운영 소프트웨어, 전력공급, 관측자료 관리 등의 무인자동 관측기술이 필요함
- 인공위성 활용이 보편화됨에 따라 지구를 둘러싸고 있는 우주기상 정보의 가치가 높아짐에 따라 남극 우주환경 관측영역 확장과 기술 고도화 필요

□ 경제·산업적 측면

- 기후변화로 개방된 경제성 높은 북극항로 선박 및 항공 운항과 산업 인프라에 필요한 고정밀 위치 및 시각정보 제공을 위한 극 지역 고정밀 GNSS 기술개발 필요
- 우주망원정보보다 경제적이고 수명이 긴 가정비 높은 남극 지상 THz 우주전파 천문대 구축 및 운영에 필요한 남극내륙 환경 조사 필요
- 우주 방사선, 우주통신, 우주인터넷 등의 우주 방호기술의 고도화를 통한 복구비용 절감에 필요한 우주기상 예측모델 핵심정보로서 남극내륙 극관과 오로라 발생 지역을 포괄하는 우주환경 관측 네트워크 구축 필요
- 남극내륙 천문우주 관측시스템 요구기술인 극저온 구동, 결빙 방지, 저전력 시스템 등의 극지기술은 우주탐사 기술과의 높은 유사성으로 우주산업으로 활용도가 높음
- 앞으로의 우주는 기초과학에서 경제 가치를 우선하는 우주산업으로 개편되는 추세에 따라 우주환경과 가장 비슷한 남극내륙은 우주기술 시험장으로의 최적의 장소임

나. 연구 개발 계획

□ 최종목표

- 안전하고 안정한 관측시설 유지를 위한 GNSS 상시관측소 구축
- 남극내륙 천문우주 관측환경 파악을 위한 관측 네트워크 구축
- 지속적 천문·우주기상 관측을 위한 모듈형 이동식 천문우주관측소 구축

□ 단계별 세부 연구 목표 및 내용

단계	년도	세부연구목표	연구내용	소요예산 (추정)
1단계	2023	○ 천문·우주기상 관측거점 탐사 ○ 탐사선단 GNSS 시스템 구축 ○ 대기교란 측정 천문광학 시스템 설계 ○ 오로라 관측시스템 설계 ○ 태양전파 관측 시스템 설계 ○ 빙상 운송로 GNSS 정밀위치 측정 ○ 내륙기지 후보지 GNSS 정밀위치 결정 ○ 남극 천문우주환경 시험 관측동 설계	- 천문·우주기상 관측거점 탐사 (2억) : 인건비 2명×6천만원(1.2억) : 현장탐사 활동비(0.8억) - 우주측지용 GNSS 시스템 구축 (3억) : 탐사선단 및 연구거점 구축 (1억) : GNSS 시스템 (1.4억) : 인건비 1명 (0.6억) - 태양전파 관측 시스템 설계 (3억) : 전파관측 거점 구축 (1억) : 태양전파 관측 시스템 설계 (2억) - 재료비 (2억) - 오로라/우주환경관측 위탁 (5억) : 무인 원격 관측시스템 설계 (2억) : 오로라 카메라 개발 (1억) : 자력계 개발 (0.5억) : 현장탐사 및 연구 인력 2인 (1.5억)	15억원
	2024	○ 천문·우주기상 관측거점 탐사 ○ 탐사선단 GNSS 고정밀 위치결정 ○ 대기교란 측정 천문광학 시스템 제작 ○ 오로라 관측시스템 제작 ○ 태양전파 관측 시스템 제작 ○ 남극 모바일 천문대 제작 ○ 남극 천문우주환경 시험 관측동 제작	- 천문·우주기상 관측거점 탐사 (2억) : 인건비 2명×6천만원(1.2억) : 현장탐사 활동비(0.8억) - 남극 모바일 천문대 제작 (3억) : 천문대 거점 구축 (1억) : 모바일 천문대 제작 (1.5억) : 인건비 1명 (0.5억) - 태양전파 관측 시스템 제작 (3억) : 관측 거점 구축 (1억) : 관측시스템 제작 (1.5억) : 인건비 1명 (0.5억) - 재료비 (2억) - 오로라/우주환경관측 위탁 (5억) : 무인 원격 관측시스템 제작 (2억)	15억원

			: 오로라 카메라 개발 (1억) : 자력계 개발 (0.5억) : 현장탐사 및 연구 인력 2인 (1.5억)	
	2025	○ 천문·우주기상 관측거점 GNSS 상시 관측소 구축 ○ 대기교란 측정 광학천문 시스템 구축 ○ 태양전파 관측 시스템 구축 ○ 오로라 전천영상 관측시스템 장보고기지 시험관측 ○ 남극 모바일 천문대 남극내륙 구축 ○ 우주전파 분광기 제작(THz FTS)	- 천문·우주기상 관측거점 GNSS 상시 관측소 구축 (2억) - 대기교란 측정 천문광학 시스템 구축 (2억) - 남극 모바일 천문대 구축 (2억) : 모바일 천문대 구축 (1억) : 인건비 2명 (1억) - 태양전파 관측 시스템 구축 (2억) : 관측시스템 제작 (1.5억) : 인건비 1명 (0.5억) - 재료비 (2억) - 오로라/우주환경관측 위탁 (5억) : 무인 원격 관측시스템 현장 구축 (2억) : 오로라 카메라 현장 설치 (1억) : 자력계 현장 설치 (0.5억) : 현장탐사 및 연구 인력 2인 (1.5억)	15억원
	2026	○ 남극내륙 천문대 관측 실시 ○ 남극 천문우주 관측장비 검교정 ○ 남극 광학천문 시험관측 ○ 남극 태양전파 시험관측자료 획득 ○ 우주전파분광기(THz FTS) 설치 및 시험관측 ○ 남극내륙 후보지 오로라 발생 특성 분석 ○ 천문·우주기상 관측거점의 빙상 안정성 분석 및 평가 : GNSS 위치 및 속도 1년 분석	- 천문·우주기상 관측거점 GNSS 상시 관측소 운영 (2억) - 대기교란 측정 천문광학 시스템 운영 (1억) - 남극 모바일 천문대 운영 (2억) : 모바일 천문대 운영 (1억) : 인건비 2명 (1억) - 태양전파 관측 시스템 운영 (2억) : 관측시스템 운영 (1.5억) : 인건비 1명 (0.5억) - 재료비 (2억) - 관측장비 검교정 (1억) - 오로라/우주환경관측 위탁 (5억) : 무인 원격 관측시스템 현장 구축 (2억) : 오로라 카메라 운영 (1억) : 자력계 운영 (0.5억) : 현장탐사 및 연구 인력 2인 (1.5억)	15억원
	2027	○ 남극 GNSS 오차분석 : 오로라, 위성배치 정밀저하 ○ 오로라 전천 영상 기반 남극 오로라 발생 지역 및 시간 특성 분석 ○ 남극 광학천문 환경 분석/평가 ○ 남극 전파천문 환경 분석/평가 ○ 우주전파분광기(THz FTS) 관측	- 천문·우주기상 관측거점 GNSS 상시 관측소 운영 (2억) - 대기교란 측정 천문광학 시스템 운영 (1억) - 남극 모바일 천문대 운영 (2억) : 모바일 천문대 운영 (1억) : 인건비 2명 (1억)	15억원

		○ 남극 천문우주 분석센터 운영	- 태양전파 관측 시스템 운영 (2억) : 관측시스템 운영 (1.5억) : 인건비 1명 (0.5억) - 재료비 (2억) - 남극 광학/전파 천문 관측환경 분석 및 평가 (1억) - 오로라/우주환경관측 위탁 (5억) : 무인 원격 관측시스템 현장 구축 (2억) : 오로라 카메라 운영 (1억) : 자력계 운영 (0.5억) : 현장탐사 및 연구 인력 2인 (1.5억)	
합 계				75억원

□ 단계별 주요 인프라 구축 계획 및 소요 자원

○ 장비 및 시설 구축 계획

인프라명	구축 필요성	도입 시기					예산 (추정)
		1단계			2단계		
		2023	2024	2025	2026	2027	
이주파수 GNSS 수신기 시스템	○ K-루트 경로 정밀 위치 결정 ○ 천문·우주기상 관측거점 고정밀 위치결정						5억
태양 관측 시스템	○ 전파간섭 감시를 위한 태양전파 측정 ○ 대기교란 측정을 위한 태양영상 관측						5억
THz 마이켈슨 간섭계	○ THz 우주전파 대기투과도 측정을 통한 관측 대역 결정 및 수증기량 결정						5억
오로라 전천 카메라, 자력계	○ 3차원 오로라 광학 관측 ○ 지표 자기장 측정						7.5억
남극 이동형 천문대	○ 천문관측시스템 운영 ○ 천문·우주기상 관측거점(1곳)						10억
우주환경 관측소	○ 우주환경 관측시스템 운영 ○ 장보고과학기지(1곳), K-루트(2곳), 천문·우주기상 관측거점(1곳)						8억
합 계							40.5

○ 연구 인력 충원 계획

충원 필요성	충원 시기					인력
	1단계					
	2023	2024	2025	2026	2027	
○ 남극 내륙으로의 관측영역 확대에 따른 관측기기 현장 운영 및 자료 분석 연구를 위한 신규인력 수요 발생 ○ 주요업무 - 2차원 오로라 영상 합성 및 오로라 자동 분류 모델 개발 - 오로라 자료와 우주환경 자료 간 정량적 비교/분석 수행		1명				1명
합 계						

□ 남극 인프라 활용계획

활용 인프라명	활용 계획	활용 시기
남극장보고과학기지	○ 남극내륙 연구거점 관측 장비 사전 조립 및 시험 ○ 내륙 무인 관측소 시험 운영	매년
쉐빙연구선 아라온	○ 장비 및 인력 수송	매년

다. 로드맵



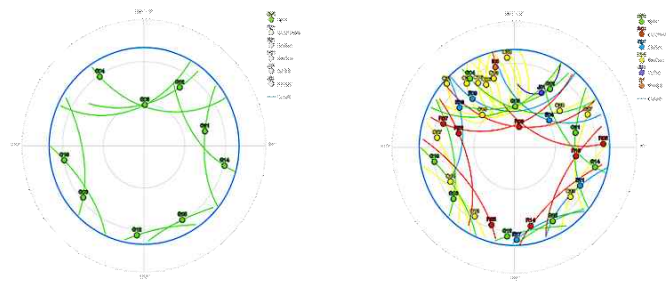
라. 연구세부계획

□ 남극내륙 연구거점 GNSS 상시관측소 구축

○ K-루트 선단 및 남극내륙 연구거점 Multi-GNSS 동적 단독 정밀측위

- GNSS 위치정밀도 감소 남극환경

- GPS 위성 경사각(55°) 때문에 장보고과학기지를 비롯한 고위도 GPS 위성의 낮은 고도($\sim 30^\circ$ 이하)로 위치정밀도 저하
- 낮은 GPS 위성 고도는 남극내륙의 빙상 표면에 의한 다중경로 오차 영향이 높아짐
- K-루트 인근 크레바스와 남극내륙 연구거점의 빙상 상의 위치는 계속해서 이동함



<남극내륙 GNSS 가시위성 배치 및 개수, 왼쪽:GPS, 오른쪽: GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, QZSS >

- 남극내륙 GNSS 정밀 위치정밀도 감소 해결 계획

- Multi-GNSS=GPS+GLONASS+Galileo+Beidou 관측으로 고도 30° 항법위성 포착
- Multi-GNSS L1, L2, L5 다채널 반송파 자료처리
- 빙상 표면 다중경로오차 감소를 위한 우주측지용 초코팅 안테나 및 레이돔 설치
- Multi-GNSS 단독 정밀측위 기법을 사용한 수평오차 10cm 이하 정밀위치결정 및 K-루트 선단 이동 측위 및 연구거점 빙상 움직임 속도 측정



<Multi-GNSS 단독 정밀측위 기법을 사용한 새만금 지역 이동차량(70km/h) 경로 측정>

○ Multi-GNSS 정밀도 향상을 위한 오로라 GNSS 오차연구

- 오로라에 의한 GNSS 신호두절은 특정 방향의 가시위성 개수 감소를 발생시켜 결국 위치정밀도 저하의 원인이 됨
- 전천 카메라를 이용한 오로라 영상과 전리권 신틸레이션 지수를 이용한 신호 품질검사 (Quality Check, QC) 적용한 Multi-GNSS 전처리 자료처리 전략 수립

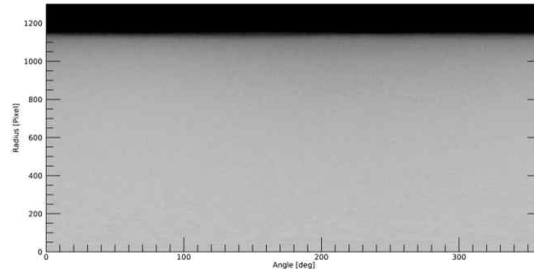
□ 남극내륙 천문우주 관측환경 네트워크 구축

○ 우주전파 THz 대기 투과도 측정 분광기 구축 및 운영

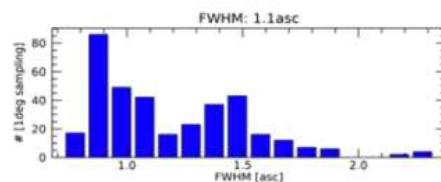
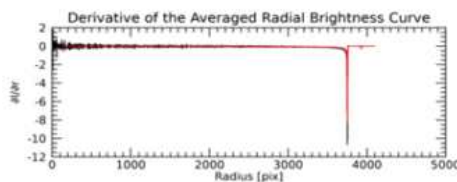
- 남극내륙 지자기 극점에 위치 예정인 천문우주기상 관측거점에 구축
- 우주전파 THz 전파세기 측정을 통한 대기 투과도 측정
- 우주전파 THz 전파세기 감소의 원인인 대기 수증기량 측정

○ 태양 영상 및 전파 관측 시스템 구축 및 운영

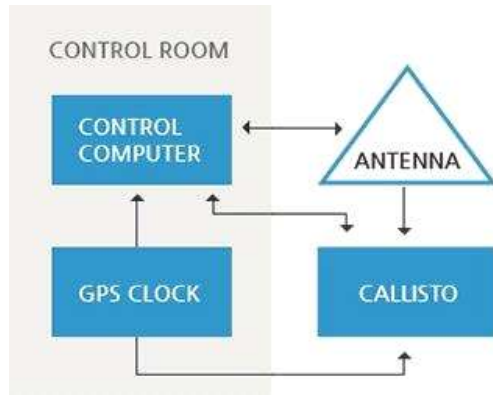
- 남극내륙 지자기 극점에 위치 예정인 천문우주기상 관측거점에 구축
- 전자동 태양 망원경(구경: 30cm 내외)을 이용한 대기교란(천문시상) 측정
- 태양 저주파 전파(45MHz-870MHz) 관측기 설치



<태양영상 가장자리 밝기 분포>



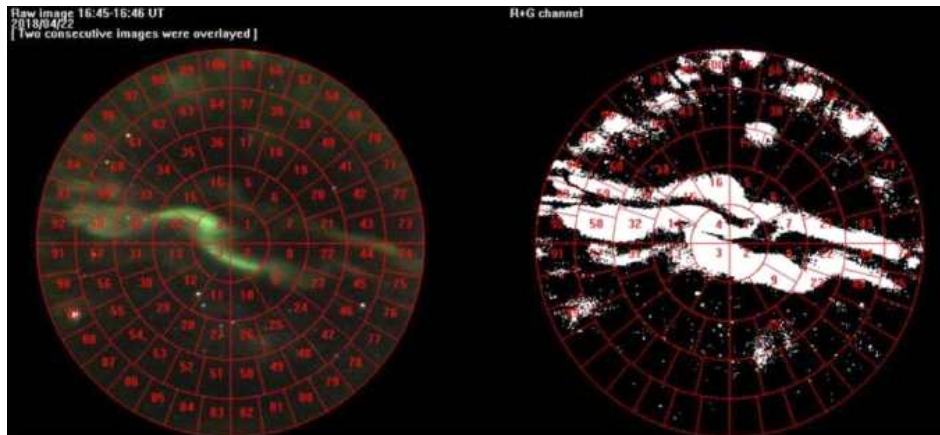
<태양영상 가장자리 밝기변화를 이용한 천문시상 값 결정>



<저주파 태양 관측기 시스템 구성도>

○ 오로라 전천 영상 카메라 및 자기력계 설치 및 운영

- 장보고과학기지, 블루아이스/심부빙저호 시추거점, 심부빙하코어 시추거점, 천문·우주기상 관측거점 총 4곳에 설치하여 운영
- 남극 오로라 대(Auroral Oval)와 지자기 극점 주변 지역(Polar Cap)의 지구 자기력선 측정과 그에 따른 오로라 특성과 GNSS 위치 정밀도 감소 원인 분석연구 수행



<전천 카메라로 촬영한 오로라 영상과 하늘 구역별 밝기 분포도>

□ 남극내륙 모듈형 이동식 천문우주관측소 구축

○ 모듈형 이동식 천문대 구축

- 천문·우주기상 관측거점에 설치
- 설치장비: GNSS, 태양망원경, 태양 전파수신기, THz 마이켈슨 분광 간섭계
- 지붕에 천문대 돔(직경: 4-5m) 설치하여 천문광학관측 수행
- 고단열 외벽으로 실내 항온 유지하여 관측장비 성능 유지 및 보호



<남극 모듈형 이동식 천문대 구축 방안1: 한국천문연구원 SLR 관측소>



테스트베드(한국천문연구원 대전 본원)



1호기(울란바토르, 몽골)



2호기(마라케시, 모로코)



3호기(미츠펜라몬, 이스라엘)



4호기(투손/아리조나, 미국)

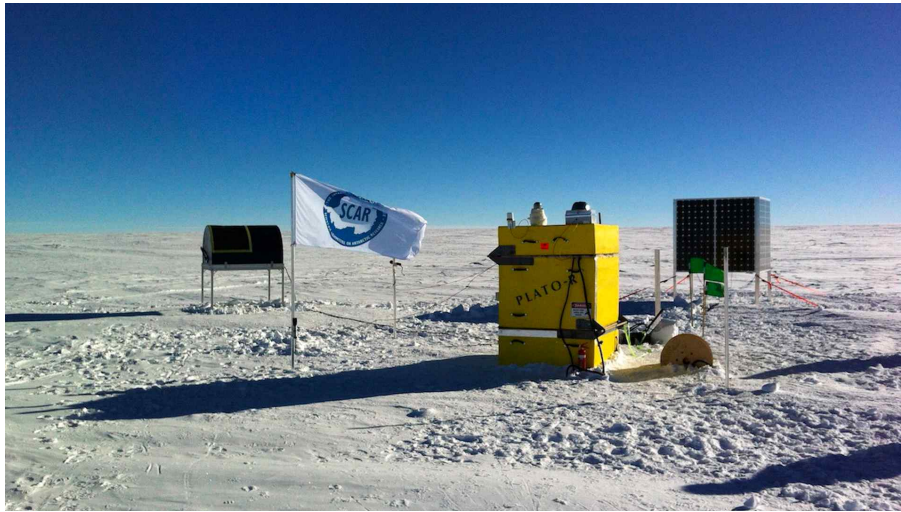


5호기(보현산천문대, 한국)

<남극 모듈형 이동식 천문대 구축 방안2: 한국천문연구원 우주물체 전자광학 감시체계 관측소>

○ 우주환경 무인관측소 구축

- 미국 연구재단(NSF) 남극 우주기상 주관기관인 뉴저지 공과대학과 협력으로 블루아이스 / 심부빙저호 시추거점, 심부빙하코어 시추거점, 천문·우주기상 관측거점 등 최소 3곳에 구축
- 남극 겨울철 관측을 위한 태양광 및 풍력 기반 전력 시스템 구축. 여름철에는 남극내 룩 탐사캠프 전력과 연동하여 사용
- 관측장비: 전천카메라, 자기력계, GNSS



<남극 우주환경 무인관측소 방안: 남극 고원에 설치된 미국 무인관측소>

마. 기대 효과 및 활용 방안

□ 기술적 측면

- 남극 GNSS 고정밀 위치결정 기술
 - 내륙기지 위치 빙상 움직임의 상시측정으로 연구거점 고정밀 위치좌표 제공
 - 내륙기지 GNSS 상시관측소 운영을 통한 천문관측 장비 시·공간 절대 기준점 제공
 - GNSS 전리권 신틸레이션 관측을 통한 내륙기지 전파통신 감쇠 회피 기술 확보
 - 빙상 이동로 Multi-GNSS 동적 위치결정 기술 고도화를 통한 북극 탐사기술로의 활용
- 천문광학관측을 이용한 남극 대기교란 측정 기술
 - 국방, 천문, 재해 등 위성 광학감시 기술에 이용되는 적응광학계 기술로 연계
- 남극 THz 우주전파 대기투과 관측
 - 고비용의 THz 우주망원경을 대체할 수 있는 남극 THz 전파망원경 관측환경 정보 제공
- 무인 관측소 시스템
 - 인력 투입이 어려운 남극 겨울철에 무인운영으로 동계 연구자료 확보
 - 남극점 이동경로 등 높은 확장성으로 연구범위 확대
 - 국내외 연구기관과의 협력을 통한 추가 연구 장비 확장성 향상
- 우리나라 남극 우주환경 관측영역 확장
 - 오로라 발생 지역 장보고과학기지에서 오로라 발생 지역 안쪽인 천문우주기상 관측거점 예정지 자남극 주변 극관지역으로 관측영역 확장으로 우주환경 연구 고도화
 - 남극 우주환경 인프라 확충을 통한 태양-자기권-전리권 상호작용에 의한 남·북극 오로라 메커니즘 규명
 - 극궤도 우주환경 관측 위성과 지상 관측 인프라 관측 정보를 융합한 시·공간 4차원 우주환경 연구

- 우주개발 시대에 우주 비행사의 안전과 우주탐사 장비 안정성 확보를 위해 필수적인 우주기상 예측모델 정확도 향상

□ 경제 산업적 측면

- 남극 GNSS 고정밀 위치결정 기술
 - 남·북극 자원개발 등을 위한 정밀 측량, 측지, 지도제작 등에 활용
 - 우리나라 남극 활동 영역이 내륙으로 확장에 따른 남극 공간정보 구축 자료로 활용
- 우주기상 예측모델 정확도 향상
 - 우주개발 시대 우주 비행사의 안전과 우주탐사 장비 안정성 확보로 복구비용 최소화
 - 우주통신, 우주인터넷, 저궤도 위성 등의 효율적 운영을 위한 전리권 예측모델과 위성 궤도 이탈 주요 원인인 대기항력 모델의 고도화

□ 활용분야

- 남극 GNSS 고정밀 위치결정 기술
 - Multi-GNSS 이주파수 자료처리 기술 고도화를 통한 현재 보다 정확한 자연재해 감지, 안전, 공간정보, 국방 분야 등으로 활용(Kaloo et al., 2020)
 - GNSS 오차환경 분석 정보를 활용한 극 지역에 적합한 GNSS 수신기 설계 요구사항으로 활용(Beach, 2002; Chen et al., 2005)
- 미터파 태양전파 관측 기술
 - 태양 전파 폭발로 인한 다양한 주파수 대역의 혼선 회피 기술 확보를 통한 위성 및 지상 전파통신 운영에 활용(Gary, 2011)
- 남극 THz 우주전파 관측 기술
 - 전파천문학과 분석과학에서 이용하고 있는 THz 대역 기술에 새로운 센싱 기능을 추가 하여 공업, 의료, 바이오, 농업, 안전 분야로 활용 (전자통신동향분석, 2006)
- 우주환경 관측 기술
 - 우주인터넷 저궤도 위성 궤도 섭동원인 대기항력 모델 개발에 활용
 - 위성항법시스템 L-대역 신호 전리권 시간지연 오차 및 신틸레이션 예측 모델에 활용
 - 극 지역 HF, VHF, UHF 전파통신 가용 주파수 모델에 활용
 - 위성통신 불능 원인 파악과 대처 방안에 활용
- 무인 관측소 시스템
 - 극한환경에서의 남극 무인 관측소의 태양광과 풍력 발전 시스템 운영을 통해 신재생 에너지 활용 범위 확대
 - 신재생 에너지 전력 공급량 개선 등의 기술 고도화를 통해 천문우주기상 이외의 다른 분야 남극 연구장비 추가로 남극연구 거점 활용도 증대

- 기후변화가 가장 민감함 태평양 도서 지역 해수면 감시, 연구자 접근 지역이 어려운 연
중 육상생물 감시, 위험한 화산지역 탐사 등의 무인관측 플랫폼으로 확장

3. 블루아이스 기반 장주기 온실가스-기후변화 연관성 규명

세부과제 3. 과제요약서

연구 필요성	○ 국제적 리더국가로서 'K-탄소중립' 달성을 위해서는 온실가스 거동에 대한 과학적 기초지식이 필요 ○ 주요 선진국은 UN산하 기후변화에 관한 정부간 협약체(IPCC) 보고서에 자국 중심의 빙하코어 온실가스 연구결과를 반영하려 다각적인 방법을 추진 ○ 남극 블루아이스는 천부시추(약 200미터)로도 수만 년 이상의 연령을 갖는 빙하시료의 다량 확보가 가능하여, 블루아이스 기반 온실가스 연구가 시급
연구 개발 목표	○ 블루아이스 지역 천부시추로 과거 수 만년 이상의 오래된 연령의 빙하시료 확보 ○ 과거 온실가스의 농도 및 동위원소 자료 생성 및 이를 이용한 온실가스-동아시아 기후연결성 규명
주요 연구 내용	○ 블루아이스 천부시추로 시급히 요구되는 빙하시료 확보 ○ 이산화탄소 및 메탄 동위원소($\delta^{13}\text{C-CO}_2$, $\delta^{18}\text{O-CO}_2$, $\delta^{13}\text{C-CH}_4$, $\delta\text{D-CH}_4$) 안정동위원소 측정시스템 개발 및 구축 ○ 과거 주요 기후변화 시기의 온실가스 농도 및 동위원소비 측정으로 온실가스 기원지 추정 ○ 온실가스 농도와 동아시아 기후 간의 연결성 이해 ○ 빙하 내에서의 온실가스 변질과정 이해 ○ 블루아이스 기원지 추정
국제공동연구계획	○ 미국 빙하코어 연구 대학연합 연구센터 COLDEX와의 공동연구 추진으로 관련기술 공유 및 공동연구 추진 ○ 일본·중국 고가 분석장비 공동활용 및 분석기술 공유
예상 연구 성과	○ 30만 년 이상된 빙하코어 획득 및 주요 기후변화 시기 온실가스 농도 자료 확보 ○ 온실가스 동위원소 측정을 위한 기반시설 확보 및 측정자료를 활용한 온실가스 거동 연구능력 확보 ○ 탄소중립 관련 정책연구에 필요한 온실가스 기초자료 생성
기대효과	○ 국제적 모범국가로서 'K-탄소중립' 주도적 달성을 위한 과학적 원천자료 생성 및 기후모델 개발 ○ 국제적 리더국가로서 탄소중립을 위한 과학적 근거자료를 제공(IPCC등 기후변화 및 탄소중립 관련 국제기구 보고서에 활용) ○ 정확한 온실가스 농도 및 동위원소 분석기술 확보와 관련 전문인력 양성으로 국내의 온실가스 모니터링 시스템 구축 및 효율적인 탄소중립 달성에 기여 ○ 온실가스, 빙하, 기후변화에 대한 국민적 홍보 및 교육효과로 탄소중립을 위한 국민적 참여 제고 ○ 향후 남극 빙하연구에 필요한 탐사, 생지화학 분석기술 획득

가. 연구개발의 경제·사회·기술적 필요성

- 국제적 리더국가로서 'K-탄소중립' 달성을 위해서는 온실가스 거동에 대한 과학적 기초 지식이 필요
- 남극 빙하코어는 온실가스 거동 연구에 적합한데, 블루아이스는 천부시추(약 200미터)로도 수만 년 이상의 연령을 갖는 빙하시료의 다량 확보가 가능하며, 시급한 온실가스 연구에 적합

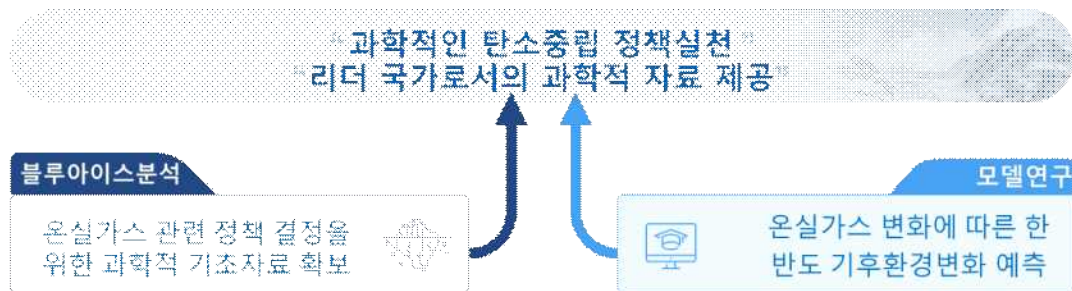
□ 기술적 측면

- 국제적 리더국가로서 'K-탄소중립' 달성을 위해서는 온실가스 거동에 대한 과학적 기초 지식이 필요하며, 해외과학자에 의존하는 것이 아닌, 한국과학자에 의한 연구가 시급
- 대기 온실가스 농도 증가가 산업혁명 이후 기온상승과 이상기후의 주원인으로 주목되고 있으나, 온실가스 거동에 대한 이해는 아직 과학적으로 매우 부족한 상태
- 대표적인 온실가스인 이산화탄소, 메탄, 산화이질소는 십년 ~ 수백 년 대기에 머물기 때문에, 지구의 한쪽에서 발생한 것이 전 지구적으로 영향을 줄 수 있어, 전지구적인 시스템에서 온실가스 거동을 이해해야 올바른 원인 분석이 가능
- 국내 빙하코어를 이용한 온실가스 측정능력으로는 서울대학교 빙하고기후연구실에서 이미 세계 약 5대 실험실 중의 하나로 평가되고 있으나, 국내 시추경험의 부족으로 충분한 빙하시료 확보가 어려움
- 블루아이스는 심부의 빙하가 표면에 노출된 것으로서, 천부시추(약 200미터)로도 수만 년 이상의 연령을 갖는 빙하시료 확보가 가능하며, 장보고기지가 위치한 남극 빅토리아랜드 일대에 넓게 분포
- 온실가스의 생성기원을 규명하기 위해서는 온실가스에 대한 동위원소 분석이 반드시 필요한데, 블루아이스 지역에서는 같은 연령의 시료가 수평으로 연결되어 있어, 다량의 시료를 필요로 하는 동위원소 연구에 유리
- 남극 빙하코어는 온실가스 농도, 빙하상태, 대기순환, 해류순환에 대한 다양한 정보를 가장 높은 해상도로 보존하고 있을뿐더러, 연령측정이 매우 정확하여, 온실가스 거동과 기후변화 연구에 적합

□ 경제·산업적 측면

- 주요 선진국은 UN산하 기후변화에 관한 정부간 협약체(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서에 자국 중심의 빙하코어 온실가스 연구결과를 반영하려 다각적인 방법을 추진
- 대한민국 국가정책 수립 및 과학기술외교 수단으로 활용하기 위하여, 기후변화 보고서(IPCC)에서 제공하는 자료를 그대로 사용만 하는 것이 아니라, 국내 과학자가 자료를 생산하여 제공해 주는 역할 필요

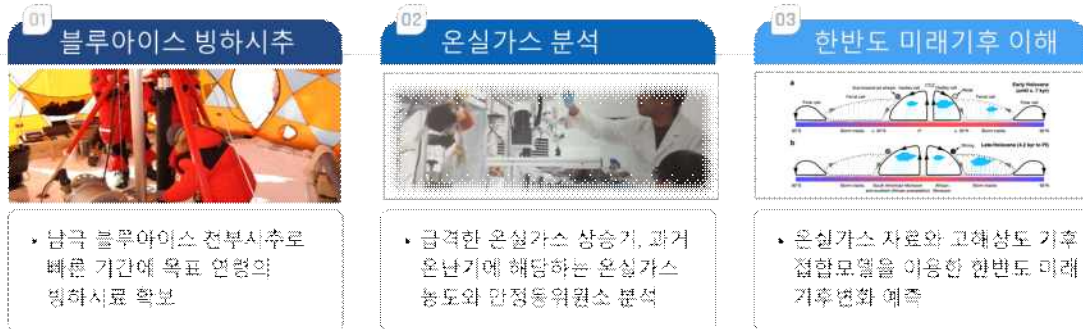
- 남극과 그린란드 빙하에 포집된 과거 공기를 분석하여 장기간 온실가스 농도에 자료를 확보하고, 기후변화 원인을 규명하는 것이 가장 중요한 연구분야로 인식되어, 선진국 간에 경쟁적으로 연구 수행
- 온실가스 변화에 따른 기후변화와 고위도-중위도 간의 기후변화에 대한 모델 연구로 온실가스-기후변화 연계 연구 및 한반도 미래 기후 예측의 정확도 제고가 시급
- 특별히, 온실가스 농도가 급격히 상승하는 시기에서의 전지구적 및 동아시아 지역에서의 기후변화에 대한 과학적 이해 및 미래 예측 연구 시급



나. 연구 개발 계획

□ 최종목표

- 블루아이스를 이용한 과거 수 만년 이상의 빙하시료 확보
- 과거 온실가스의 농도 및 동위원소 자료를 이용한 온실가스-동아시아 기후연결성 규명



□ 단계별 세부 연구 목표 및 내용

단계	년도	세부연구목표	연구내용	소요예산 (추정)
1단계	2023	○ 블루아이스 시추후보지 선정 ○ 블루아이스 전용 시추시스템 구축 ○ 미량기체 건식 분리추출 기술개발 및 설비 구축 ○ 블루아이스 기원지 추정 모델링 기술 개발 ○ 고기후 모형 실험 구성	- 블루아이스 온실가스 농도측정, 변질과정 분석(8억원) :인건비 4천만원×10인=4억원 재료비 4억원 - 블루아이스 전용 미량기체 건식추출 진공라인 구축(4.8억원) :재료비 3억원 박사급 연구인력 6천만원×3인=1.8억원 - 블루아이스 기원지 모델링(1.2억원) :박사급 연구인력 6천만원×2인=1.2억원 - 블루아이스 전용 시추기 구입 및 시험운용(3억원) :전용시추기 제작비 2억원 인건비 1인 5천만원 전문가 활용비 5천만원	17억원
	2024	○ 블루아이스 코어시료 1차시추 ○ 가스 연령측정을 위한 O₂, N₂, Ar 동위원소 측정시스템 구축	- O₂, N₂, Ar 분석용 시스템 구축(10.8억원) :질량분석기 6억원×1대 습식 기체추출라인 구축 4.5억원	17억원

		○ 전지구 및 동아시아 고기후 특성 연구	(재료비/부품비 3억, 연구원 인건비 5천만원×2 = 1억원, 전문가 활용비 8천만원) - 온실가스 농도측정, 변질과정 분석 장비 운용(6.2억원) :인건비 4천만원×8인=3.2억원 분석재료비 3억원 - 최근 해빙기동안 온실기체가 급격히 증가했던 1.48만년 전과 1.17만년 전에 대한 고기후 모델링 수행	
	2025	○ 블루아이스 코어시료 2차시추 ○ 이산화탄소 동위원소($\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$, $\delta^{18}\text{O}-\text{CO}_2$) 측정시스템 개발 및 구축 ○ 블루아이스 시료 연령 측정	- 이산화탄소 동위원소 분석용 시스템 구축(10억원) :질량분석기 6억×1대 = 6억원 재료/부품비 2억원 인건비 5천만원×2인=1억원 전문가 활용비 1억원×1인=1억원 - 온실가스 농도측정, 변질과정 분석 장비 운용(7억원) :인건비 4천만원×10인=4억원 분석재료비 3억원 - 관측된 온실기체 농도를 강제력으로 처방. PMIP4에 참여한 주요 모형의 해상도를 고려하여 20개 이상의 앙상블 실험을 수행.	17억원
	2026	○ 블루아이스 코어시료 3차시추 ○ 메탄 동위원소($\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, $\delta\text{D}-\text{CH}_4$) 측정시스템 개발 및 구축 ○ 미래기후 시나리오 비교분석 수행	- 메탄 동위원소 분석용 시스템 구축(10억) :질량분석기 6억×1대 = 6억원 재료/부품비 2억원 인건비(전문가활용비 포함) 2억원 - 온실가스 농도 측정, 변질과정 분석 장비 운용(7억원) :인건비 4천만원×10인=4억원 분석재료비 3억원 - 대기대순환(제트, 스톱트랙, 해들리 순환 등)의 변화 이해. 지상 기온 및 강수 분포 등 지표 기후 특성 이해.	17억원
	2027	○ 온실가스 농도 및 동위원소 자료를 활용한 주요 기후변화 시기 온실가스-동아시아 기후 연결성 연구	- 온실가스 농도 측정, 변질과정 분석 장비 운용(7억원) :인건비 4천만원×10인=4억원 분석재료비 3억원 - 온실가스 동위원소 측정(6억원)	17억원

			:인건비 6천만원×4인=2.4억원 분석재료비 3억원 - 온실가스-기후 연결성 기후모델링 연구(4억원) :인건비 6천만원×4인=2.4억원 슈퍼컴퓨터 사용료 1.6억원 - 동아시아 몬순의 변화를 CMIP6 미래기후 시나리오에 비교 분석, 이를 통해 고기후 모델링에 기반 미래기후 특성을 이해.	
합 계				85억원

□ 단계별 주요 인프라 구축 계획 및 소요 재원

○ 장비 및 시설 구축 계획

인프라명	구축 필요성	도입 시기					예산 (추정)
		1단계					
		2023	2024	2025	2026	2027	
블루아이스 전용 미량기체 건식추출 시스템	○ 블루아이스를 이용하면 같은 연령을 갖는 다량의 빙하시료 확보 가능 ○ 이산화탄소 동위원소 분석을 위해서는 다량의 빙하시료(200그램 이상) 필요 ○ 빙하를 녹이지 않고, 약 - 50℃ 온도에서의 가스추출 시스템 구축						4.8억원
O ₂ , N ₂ , Ar 동위원소 분석 시스템	○ 빙하시료 온실가스 연령측정 및 변질상태 확인을 위하여 O₂, N₂, Ar 안정 동위원소 측정 ○ 10-40 그램 시료에 대한 용융/재동결 및 추출기체 포획장치 구성 ○ O₂, N₂, Ar 전용 질량분석기 설치 ○ 국제협력을 통해 관련기술 습득						10.8억원
이산화탄소 안정동위원소 분석 시스템	○ 이산화탄소의 생성과 소멸에 대한 추적을 위해 안정동위원소($\delta^{13}\text{C-CO}_2$, $\delta^{18}\text{O-CO}_2$) 측정 ○ 이산화탄소 전용 질량분석기 설치 ○ 블루아이스 전용 미량기체 추출시스템과 연결하여 사용						10억원

메탄 안정동위원소 분석 시스템	○ 주요 온실가스의 하나인 메탄의 기원지 추적에 위해 동위원소($\delta^{13}\text{C-CH}_4$, $\delta\text{D-CH}_4$) 측정 ○ 메탄 전용 질량분석기 설치 및 습식 가스 추출장치와 연결 ○ 한국형 측정 프로토콜 구축						10억원
블루아이스 전용 천부시추기	○ 신속한 블루아이스 시료확보를 위한 전용 천부시추기 구입 ○ 블루아이스 빙질 특성에 맞는 시추기술 확보						3억원
합 계							38.6억원

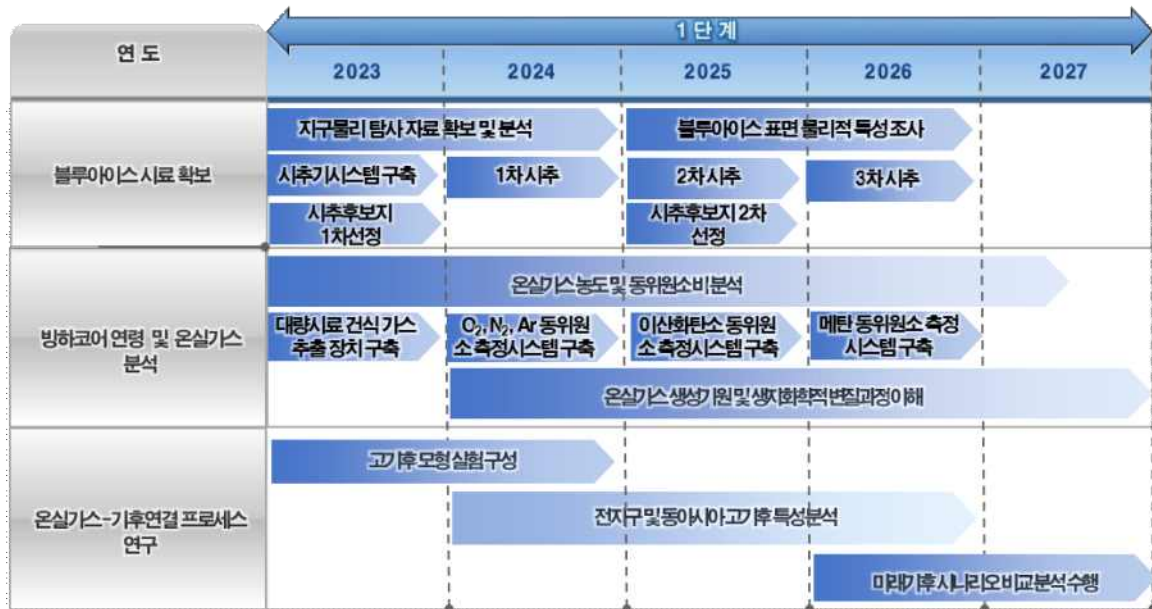
○ 연구 인력 충원 계획

충원 필요성	충원 시기					인력
	1단계					
	2023	2024	2025	2026	2027	
○ 블루아이스 기원지 추적을 위한 박사급 전문 연구원 확보	1명	1명				2명
○ 온실가스 동위원소 측정기술 개발		1명	1명	1명		3명
○ 빙하시료 내 가스 추출장치 개발	1명	1명	1명			3명
○ 온실가스 변질과정 연구	1명	2명	2명			5명
○ 온실가스-기후 연결 프로세스 연구		1명	2명	1명		4명
합 계						17명

□ 남극 인프라 활용계획

활용 인프라명	활용 계획	활용 시기
쇄빙연구선 아라온	○ 장비 및 인력 수송 ○ 빙하코어 반출	매년
남극장보고과학기지	○ 블루아이스 연구 후보지 탐사를 위한 베이스캠프 ○ 필요 장비 운송 및 빙하코어 반출	매년
항공기(헬기 등)	○ 블루아이스 연구거점과 장보고기지 간의 인력 및 물자운송	매년
내륙기지 연구모듈	○ 블루아이스 연구거점 지역 거주 및 현장연구	매년

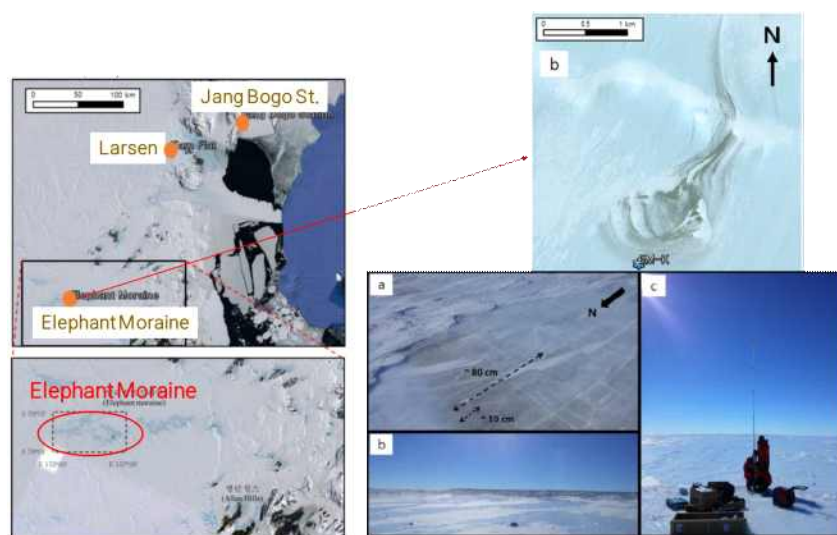
다. 로드맵



라. 연구세부계획

□ 남극 블루아이스(blue ice) 코어시료 확보

- 블루아이스 전용 시추시스템 구축
- 지구물리탐사 자료를 활용한 시추지역 선정 및 빙하 내부구조 파악
- 남극 빅토리아랜드 일대의 블루아이스 빙하학적(온도 수직구조, 균열구조, 연령분포, 빙하 유동속도 등) 특성 파악
- 라센빙하(Larsen Glacier) 및 엘리펀트모레인(Elephant Moraine) 지역에서 50-200미터급 천부시추 수행 및 시료 확보



<블루아이스 주요 연구지역>

- 서울대학교 빙권과학교육연구센터 주도의 연구수행. 인원, 장비, 시료 운송은 극지연구소와 공동 진행
- 빙하 역학모델을 이용한 청빙 근원지역 및 흐름 방향 파악

 **서울대 빙권센터**

- 블루아이스 현장탐사 주도
- 블루아이스 전용 시추 시스템 구축
- 해외 전문 기술자 참여
- Radar 탐사자료를 이용한 빙하층/기반암 공간분포 해석 및 시추지 선정
- 현장 분석 (시추공온도, 균열상태 파악, 메탄 농도)




시추지 선정 위한 Radar 탐사
(극지연구소)



- IPR (Ice Penetrating Radar) 탐사
: 전반적인 빙하구조 조사
- GPR (Ground Penetration Radar) 탐사
: 빙하 하부 기반암 지형, 빙하 두께, 빙하층 방향/경사 확인

장비/인력/시료 수송 (극지연구소)



<블루아이스 현장탐사 개요>

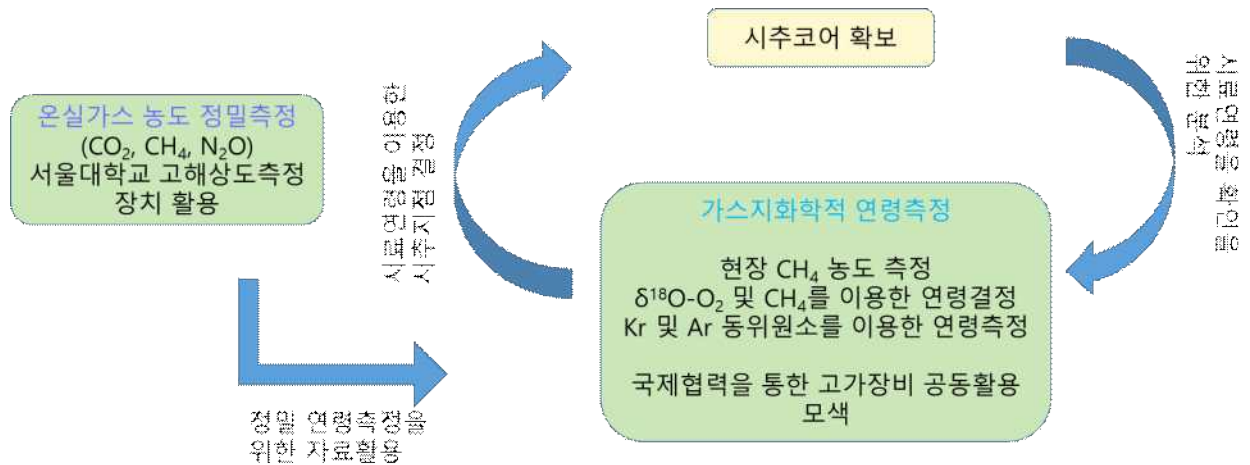
□ 블루아이스 연령 측정 및 온실가스 분석

- 현장에서 신속한 연령 판단을 위한 이동식 CH₄ 농도장치 개발
- 빙하형성 특성 파악을 위한 질소동위원소비($\delta^{15}\text{N}-\text{N}_2$)와 연령측정을 위한 산소기체 동위원소비($\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$) 측정설비 개발
- 고해상도 CH₄ 및 산소동위원소비($\delta^{18}\text{O}-\text{O}_2$) 자료를 이용한 연령결정
- ⁸¹Kr과 Ar안정동위원소를 이용한 절대연령 측정
- 목표 연령(1.48만년 전, 1.17만년 전, 12.5 만년 전, 40 만년 전)대에 해당하는 시료에 대해 정밀 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O) 농도측정
- 기체함량(1그램의 빙하에 포집된 공기함량)을 이용한 과거 고도변화 추정 및 동남극 빙하에 의한 해수면 상승기여도 평가
- 주요 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O) 안정동위원소비 측정기술 개선 및 개발
 - 200-500g 시료에 대한 습식 및 건식 가스 추출법 개발
 - $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$, $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, $\delta\text{D}-\text{CH}_4$ 측정장비 구성 및 측정방법 단계적 개발
 - 주요 목표 연령의 빙하시료에 대한 안정동위원소비 측정

- 농도 및 동위원소 자료를 이용한 기원지(해양 vs. 육상, 저위도 vs. 고위도) 추정 및 기후모델 기초자료로 활용

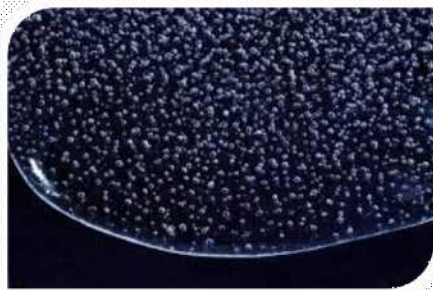
○ 주요 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O) 변질 가능성 연구

- 광화학적, 생물학적 반응에 의한 변질 가능성 시험
- 변형 또는 기타 물리적 프로세스에 의한 변질 가능성 시험



<블루아이스를 이용한 시추-연령분석-온실가스 분석 간의 상호 연결성>

빙하코어 내 공기방울 및 공기 추출장면



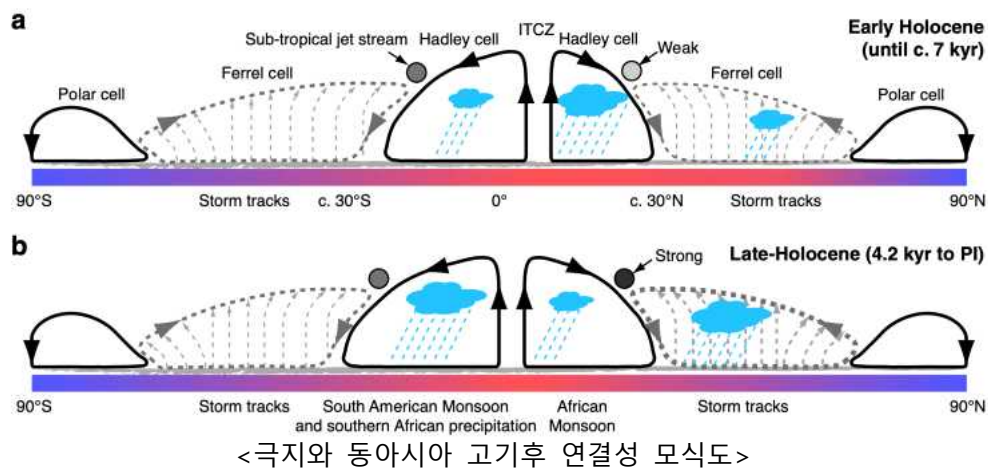
세계 5대 빙하시료 온실가스 농도 및 동위원소 분석장비



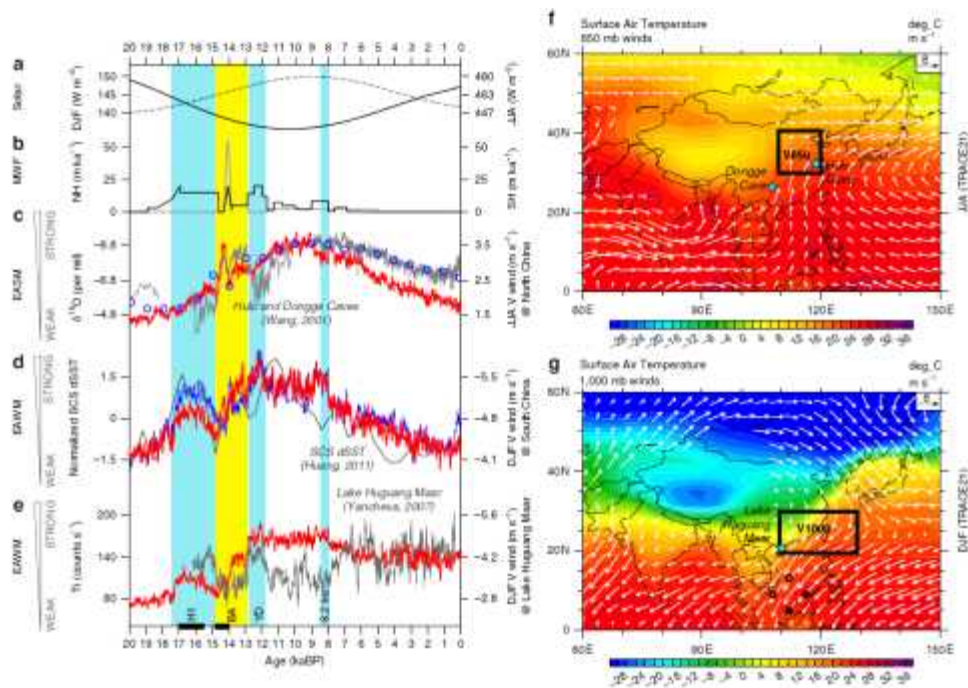
<서울대학교에 설치된 빙하 온실가스 분석 장치>

□ 온실가스 농도변화에 따른 동아시아 고기후특성 및 남극-동아시아 기후연결성 연구

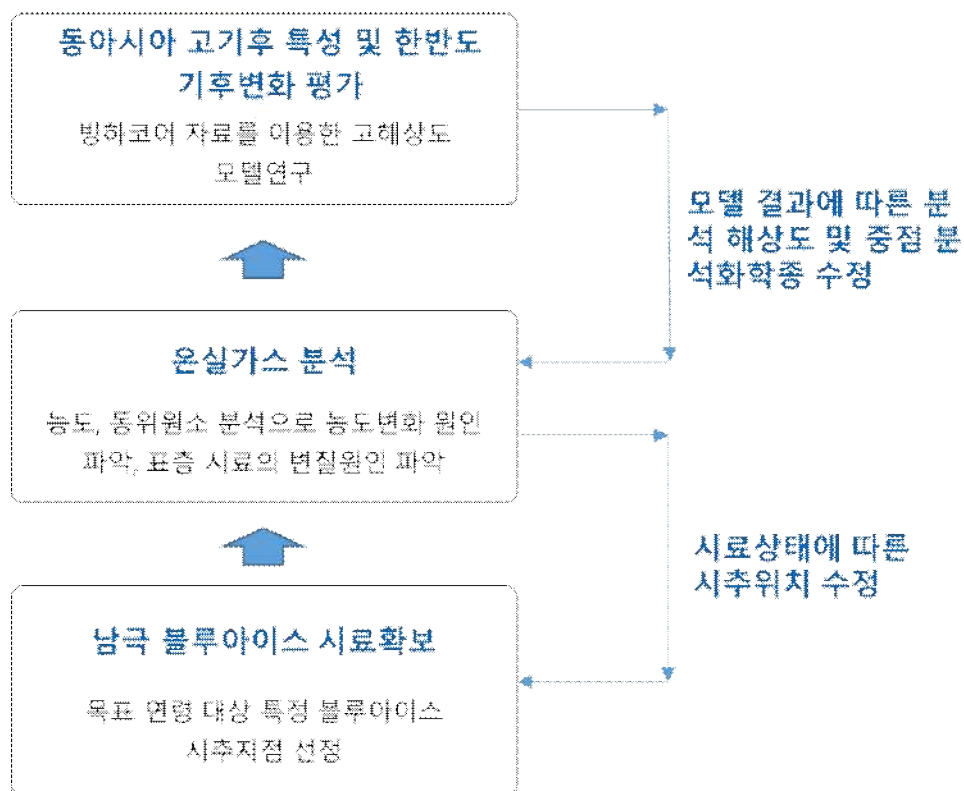
- 고기후 연구는 주로 기후모형을 활용함. 그러나 대부분의 모형이 저해상도로 수행되어 지역적 기후 특성(예를 들어 동아시아 몬순)을 이해하는데 제약이 있음
- 일부 고해상도 모델링이 수행되었으나 제트기류, 해들리셀, 그리고 해수면 온도 분포 등 대규모 순환에 초점을 맞춤. 반면 동아시아 몬순 등 지역적인 기후 변화에 대한 고해상도 고기후 연구는 거의 이루어지지 않음
- 최근 해빙기동안 온실기체가 급격히 증가했던 1.48만년 전과 1.17만년 전에 대한 고기후 모델링 수행.



- 관측된 온실기체 농도를 강제력으로 처방. PMIP4에 참여한 주요 모형의 해상도를 고려하여 20개 이상의 앙상블 실험을 수행
- 두 시기 동안 대기대순환(제트, 스톱트랙, 해들리순환 등)의 변화 이해. 지상 기온 및 강수 분포 등 지표 기후 특성 이해
- 두 시기 동안 남극과 북극의 해빙/육빙 분포 이해
- 두 시기 동안 적도 해수면 온도, 북극해 해수면 온도, 남빙해 해수면 온도 분석. 남북방향 해양 에너지 수송 특성을 이해하고 대기-해양 접합과정의 변화 이해.
- 북대서양 용빙수(meltwater) 변화에 따른 북반구 극한 기상 변화 - 북대서양/북태평양 저지고기압, 폭발저기압 등
- 동아시아 몬순의 특성 이해. 특히, 급격한 온실기체 증가로 인한 몬순의 계절변화, 공간 분포 변화 등 이해
- 두 실험에서 나타난 동아시아 몬순의 변화를 CMIP6 미래기후 시나리오에 비교 분석, 이를 통해 고기후 모델링에 기반 미래기후 특성 이해



<단일 저해상도 모형에서 나타난 동아시아 고기후 모델링 결과>



<블루아이스 연구 흐름도>

마. 기대 효과 및 활용 방안

□ 기술적 측면

- 국제적 모범국가로서 'K-탄소중립' 주도적 달성을 위한 과학적 원천자료 생성 및 기후모델 개발
- 정확한 온실가스 농도 및 동위원소 분석기술 확보와 관련 전문인력 양성으로 국내외 온실가스 모니터링 시스템 구축 및 효율적인 탄소중립 달성에 기여
- 관측기반 고기후 고해상도 자료 생산으로 국제 고기후 모델링 연구 선도
- 향후 남극 빙하연구에 필요한 탐사, 생지화학 분석기술 획득
- 관측기반 고기후 다중 앙상블 자료 생산, 이를 통해 국제 고기후 모델링(PMIP)을 선도
- 과거 급격한 기후 변화 시기 동아시아 기후 특성을 이해함으로써 미래 기후변화 시나리오 이해를 증진
- 빙하 미생물의 분리 및 생리특성을 이용한 저온 활성 온실가스 저감기술 개발과 신규물질 탐색
- 한국 과학자 및 국내 분석시설에 의한 주요 기후변화 자료 생성으로 빙하를 이용한 기후연구에서 선진국 수준으로 진입
- 과거 빙하표층 고도 및 두께 변화 추정자료를 활용하여, 동남극 빙하에 해수면변동 기여도 평가 가능

□ 경제 산업적 측면

- 국내 탄소중립의 효율적 달성을 위한 과학적 측정자료 기반 마련으로 탄소배출에 의한 사회적비용(기후변화에 의한 재난 및 재해 피해액) 감소
- 국제적 온실가스 정책자료 제공 및 활용으로 대한민국 브랜드가치 증대
- 과거 급격한 기후변화 시기의 온실가스 농도변화와 동아시아 기후 특성을 정량적으로 이해함으로써, 미래 기후대비 대응방안의 효율성 증대로 피해액 최소화에 기여
- 얼음 내에서의 광반응 및 생지구화학적 반응을 이용한 특정 화학성분의 제거 및 생산과정에 대한 이해로 산업적인 응용가치를 지님

□ 활용 분야

- 국제적 리더국가로서 탄소중립을 위한 과학적 근거자료를 제공(받는 국가에서 주는 국가로 전환)
 - IPCC등 기후변화 및 탄소중립 관련 국제기구 보고서에 활용
 - 정부의 국가정책 수립 및 과학기술외교 수단으로 활용
 - 미래 한반도를 포함한 주요 지역에서의 기후변화 모델을 재현할 수 있는 기초자료 제공

- 빙하 내 광반응 및 생지구화학적 반응의 이해를 통해 온실효과 기록의 신뢰도를 제고하고 온실기체 감축과 기후변화 대비 정책수립의 근거로 활용
- 온실가스, 빙하, 기후변화에 대한 국민적 홍보 및 교육효과로 탄소중립을 위한 국민적 참여 제고에 활용
- 남극 빙하연구에 필요한 빙하학적 필수 자료로 활용하여, 국내 빙하 지역에서의 다양한 탐사 및 빙하거동 연구에 활용 가능
- 과거 온난기 및 급격한 온실가스 농도 상승 시기에 대한 희귀자료 확보로 관련분야에 대한 과학적 판단 근거 제공

제 IV 장

남극내륙 종합연구 수행의 경제성 분석

1. 경제성분석 방법론

가. 경제성 분석 방법론 검토

□ 국가연구개발사업의 경제성분석을 사업 유형으로 구분하여 추진

- 국가연구개발사업 예비타당성조사 운영지침에서 정의하고 있는 사업유형에 따라서 비용편익분석(Cost-Benefit Analysis)과 비용효과분석(Cost-Effectiveness Analysis)을 이용 가능함
- 2020년 1월 도전·혁신형 연구개발에 대한 경제성 평가 최소화와 현장전문가 참여 확대 등을 골자로 한 제도개선을 추가로 단행함
- 과학기술투자 가치를 화폐가치로 환산하는 어려움을 완화하고, 도전혁신형 연구개발사업에 대해서 비용효과분석을 우선적으로 고려하도록 운용지침 및 수행 세부지침을 개정함

□ 국가연구개발사업을 도전혁신형, 성장형 및 기반조성형으로 구분하여 추진

- 도전·혁신형, 성장형, 기반조성형으로 구분하여 경제성분석 방법론을 차별화하여 적용함
- 도전 혁신형 사업은 세계 최초 또는 세계 최고와 같은 과학기술 선도를 목표로 하여 영향력과 파급효과는 크지만 실패확률과 불확실성이 높은 연구를 의미함
- 성장형 연구개발사업은 전통적으로 산업발전을 통하여 경제성장을 지향하던 산업지원 목적의 공정 제품 서비스 등의 개선, 기업 역량 강화를 목적으로 하는 연구를 지원하는 사업임
- 기반조성형은 기타 연구 인력양성, 연구시설 장비구축, 공익증진을 목적으로 하는 공공성이 높은 연구가 포함됨

□ 도전혁신형은 과학기술 선도를 목표로 영향력과 파급효과는 높고, 실패와 불확실성이 높은 연구를 대상으로 함

- 도전혁신형의 이슈 설정의 적절성을 위해서는 신규성, 기술선도성 등에 대한 답변을 할 수 있어야 함
 - 식별된 문제/이슈가 해결되면 그에 대한 영향력 및 파급효과가 크면서 과학기술적 신규성이 인정되는지 여부 등의 근거가 제시되어 있는가?
 - 기술추세 및 기술수준을 고려할 때, 해당 분야의 기술선도(세계 최초 또는 세계 최고 수준)를 위해 별도의 대형 R&D 사업을 신규로 추진할 필요가 있는가?
- 도전 혁신형 사업의 경우 과학기술선도를 목표로 하며 영향력과 파급효과가 크지만 실패확률과 불확실성도 높은 연구가 진행되어야 하고, 세계 최초 혹은 선진국 대비 기술수준 100%를 달성하는 등의 높은 실패위험과 더불어 성공 시 높은 파급효과라는 특성을 가지고 있음
- 또한 특정 응용을 고려하지 않고 자연현상 및 관찰 가능한 사물에 대한 새로운 지식을 획득하기 위한 이론적 또는 실험적 연구 등을 지원하는 사업임

- 해당 분야가 과학기술적 측면에서 우리나라가 처음으로 시도하거나 기존에 국내에서 연구된 사례 대비 개념적으로 새롭게 시도되는지 여부와 식별된 문제/이슈가 해결되면 그에 대한 영향력 및 파급효과가 상당히 크다는 것에 대한 근거가 제시되어야 함

□ 본 사업은 남극내륙이라는 특수 환경요건을 고려하여 도전혁신형 성격에 부합

- 본 사업은 혹독한 자연환경으로 인하여 남극내륙 진출 위험성과 어려움을 갖고 있으며, 고기후 환경 재현을 시도하였지만, 성공적으로 수행한 사례가 미흡함
- 미국, 러시아 및 일본 등에서 남극내륙 아이스코어 채취를 시도하여 분석하고 있으나 150만년 전 고기후 환경 재현에 어려움을 겪고 있음
- 본 사업에서 남극내륙 아이스코어를 채취하여 150만년 전 고기후를 재현하고, 관련 자료 공유를 통하여 국내 기후, 환경변화에 대한 기초연구는 비약적인 도약을 시도할 수 있음
- 기존 국내외 연구에서 확보하지 못한 150만년전 고기후 자료를 확보하여 기후, 환경변화 및 지구온난화 관련 연구에서 영향력과 파급효과가 커질 것으로 기대함

□ 경제성분석 방법론은 비용효과분석을 이용하여 분석

- 사업 추진을 통하여 발생하는 효과를 계량화하고, 화폐가치화가 가능한 경우에는 비용편익분석을 실시할 수 있으나, 사업의 효과를 계량화하더라도 화폐가치화가 어려운 경우에는 비용효과분석을 통하여 경제성분석을 실시함
- 사업의 비교대안이 존재하는 경우에는 어느 대안이 최선인지 정보를 제공하는 비용효과분석을 통하여 경제성 분석을 실시함
- 동일한 조건에서 대안이 존재하지 않는 경우에는 그 대안이 최적의 대안이라는 정보를 도출할 수 없고, 사업효과의 분석범위가 정량적인 파급효과에 한정될 수 있으므로 정책적 타당성의 영역에 해당함

□ 본 사업의 성과는 사업화를 목적으로 하지 않는 기초연구 단계 성과물 특성

- 본 연구개발의 성과물은 기업체 등에서 활용하기 어려운 지구온난화 원인 규명 등을 위한 자료로서 민간 기업체 활동에 적합하지 않아서 편익을 환산하기 어려운 한계가 있음
- 기초연구 등 혁신도전형 연구활동은 편익 환산이 어려운 반면에 연구활동으로 가치는 중요한 분야들이 많이 있으므로 기존 비용-편익 분석으로 접근방법은 적절하지 않음

2. 비용 추정

가. 전체 비용 추정

□ 5년간 460억원의 연구거점 구축 등 3개의 연구과제를 수행

- 남극내륙 연구거점 기반구축과 심부 빙하코어시추를 위하여 5년간 300억 원을 추정함
- 남극내륙 천문-우주환경 관측거점 구축과 무인자동관측 수행에서 5년간 75억 원을 추정함
- 블루아이스 연구거점 구축과 장주기 온실가스-기후변화 연관성 규명에서 5년간 85억 원을 추정함

구분		'23	'24	'25	'26	'27	소 계
남극내륙 연구거점 기반구축과 심부빙하코어 시추	기반구축	4,200	3,200	2,700	2,000	2,000	14,100
		연구거점 기반 구축			연구거점 운영지원		
	심부빙하 시추	1,800	2,800	3,300	4,000	4,000	15,900
		500m 급 중부빙하코어 시추		3,000m 급 심부빙하코어 시추			
남극내륙 천문-우주환경 관측거점 구축과 무인자동관측 수행	천문관측 거점	500	500	600	500	500	2,600
		이동식 천문우주 관측소 개발 및 천문우주 관측거점 구축					
	무인관측소	1,000	1,000	900	1,000	1,000	4,900
		우주환경 무인자동관측 시스템 개발 및 관측 네트워크 운영					
블루아이스 연구거점 구축과 장주기 온실가스-기후변 화 연관성 규명	블루아이스 시추	300	200	200	200	-	900
		블루아이스 연구거점 구축 및 블루아이스 시추					
	온실가스 정밀분석	1,400	1,500	1,500	1,500	1,700	7,600
		온실가스 정밀 분석 및 기후변화 연관성 연구					
합계		9,200	9,200	9,200	9,200	9,200	46,000

표 37 세부과제별 연도별 예산 투입 계획

□ 5년간 매년 92억 원의 예산을 투입

- 남극내륙 연구거점 기반구축과 심부 빙하코어 시추에 매년 60억 원을 투입하는데, 초기

에는 연구거점 기반 구축에 예산 투입 비중을 높이고, 4년차, 5년차에는 심부빙하코어 시추의 비중을 높여서 투입함

- 남극내륙 천문-우주환경 관측거점 구축과 무인자동관측 수행에서 연간 15억 원의 예산을 투입하며, 3년차에 우주환경 무인자동관측 시스템 개발 및 관측 네트워크 운영에 9억원을 투입함
- 블루아이스 연구거점 구축과 장주기 온실가스-기후변화 연관성 규명에서 연간 17억 원의 예산을 투입함

나. 세부 과제별 비용 추정

□ 남극내륙 연구거점 기반구축과 심부 빙하코어시추를 위하여 5년간 300억 원 투입

- 연구거점 기반 구축과 운영지원을 위하여 141억 원을 투입함
- 심부빙하시추를 위하여 500m급 중부 빙하코어 시추에 46억 원을 투입하고, 3,000m급 심부빙하코어 시추에 113억 원을 투입함

□ 남극내륙 천문-우주환경 관측거점 구축과 무인자동관측 수행에서 5년간 75억 원 투입

- 천문관측 거점 구축을 위하여 이동식 천문우주 관측소 개발 및 천문우주 관측거점 구축을 위하여 26억 원을 투입함
- 무인관측소 거점 구축을 위하여 우주환경 무인자동관측 시스템 개발 및 관측 네트워크 운영에 49억 원을 투입함

□ 블루아이스 연구거점 구축과 장주기 온실가스-기후변화 연관성 규명에 85억 원 투입

- 블루아이스 연구거점 구축 및 블루아이스 시추를 위하여 9억 원을 투입함
- 온실가스 정밀분석 및 기후변화 연관성 연구에 76억 원을 투입함

3. 비용효과분석

가. 이슈 도출

☐ 본 사업은 기후변화 원인 규명을 위하여 과거 대기 기체 조성 등을 직접적으로 확인

- 심부빙하 코어 시추를 통하여 기후변화 예측을 위한 실제 관측치 확인을 통한 기존 예측 모델 수정 및 보완 가능
- 3,000미터급 심부빙하코어 시추를 통하여 과거 100만년 이상의 장주기 기후변화 기록 복원 및 자연적이고 인위적인 기후변화 요인 규명 기여 가능
- 과거 100만년간 온실기체 농도변화 기록 복원과 기후요소와 상호작용 규명 가능함

☐ 3,000m 급 빙하코어 분석을 위한 시료 채취 등을 보완할 수 있는 블루아이스 접근

- 남극 블루아이스는 천부시추(약 200미터)로도 수 만년 이상의 연령을 갖는 빙하시료의 다량 확보가 가능하여, 블루아이스 기반의 온실가스 이용
- 과거 온실가스의 농도 및 동위원소 자료 생성 및 이를 이용한 온실가스-동아시아 기후연결성 규명 기여
- 온실가스 동위원소 측정을 위한 기반시설 확보 및 측정자료를 활용한 온실가스 거동 연구능력 확보 가능

☐ 우주 탄생 비밀과 위성통신 기반 고층대기 정밀관측을 지원가능한 거점

- 남극내륙의 고유 환경 특성인 낮은 기온, 건조한 대기, 안정한 대기층 및 미세먼지 없는 청정한 하늘을 이용하여 천문우주 관측의 최적의 장소
- 우주통신, 우주인터넷, 저궤도 위성 등 효율적 운영을 위하여 전리권 예측모델과 위성궤도 이탈 주요 원인인 대기항력 모델의 고도화를 지원
- 극지 우주환경 관측정보 제공을 통하여 우주탐사 안전을 위한 우주기상 예측 정확도 향상을 기여함

나. 대안 검토

☐ 본 사업을 수행하지 않았을 때 이슈

- 본 사업은 남극내륙에서 빙하-대기-우주환경에 대한 종합연구를 수행하기 위한 지원체계를 구축하기 위한 사업으로 처음 추진하는 사업이 아닌 기존 추진 사업의 발전을 위한 성격임
- 극지(연)은 2014년 남극내륙 육상루트 개척 확보 등을 위한 기획연구를 수행하면서, 남극 내륙 추진을 검토하였고, 2017년부터 기관고유사업으로 인프라 구축과 연구개발 활동을 수행하고 있음
- 본 사업을 수행하지 않을 경우, 기 투입한 예산의 활용성 저하와 함께 향후 확보할 수

있는 지구온난화의 주요 성과물 등을 활용하기 어려워짐

- 투입 측면에서는 기 투입한 약 297억원의 연구개발 사업의 성과물이 활용하지 못하는 경우가 발생하게 되는데, 2017년부터 3개년간 약 227억원을 투입하였고, 2020년부터 70억원을 투입한 예산의 활용을 못하게 됨
- 성과 측면에서는 본 사업을 통하여 확보할 수 있는 기후변화 관련 논리 데이터와 함께 천문/우주 관련 성과물 확보를 할 수 없어짐

연구기간	과제명	총연구비 (간접비포함,천원)
2017~2019	남극 내륙 진출 루트 개척과 심부빙하/빙저호 시추 및 활용기술 개발	22,682,534
2020~	남극 내륙연구를 위한 진출루트 개척 및 탐사기술 개발	6,990,821

□ 본 사업을 통하여 확보하는 시료, 관측 데이터 등을 대체할 수 있는 방안 모색

- 지구의 과거 기후 데이터를 직접 확인할 수 있는 분석을 위하여 관련 데이터를 확보할 수 있는 방안 모색
- 남극 내륙이 아닌 타 지역에서 과거 기후변화 관련 데이터를 확보할 수 있는 지 확인

□ 남극 내륙 빙하코어 및 천문-우주 관측 자료 확보 가능성 검토

- 과거 기후 대기 조성을 파악할 수 있는 빙하코어는 남극과 북극에서도 일부 지역에서만 확보할 수 있고, 북극은 그린란드 지역에서 일부 가능하지만, 분석의 어려움이 존재함
- 전 지구상에서 가장 우수한 빙하코어를 확보할 수 있는 지역은 남극 내륙으로 조사되고 있음
- 천문-우주 관측자료의 정밀성을 높이기 위해서는 대기상태와 지구 자전축과 관련된 위치 연관성으로 인류 활동의 영향이 최소화되어야 하고, 고위도 지역이 최적의 후보지로 논의되고 있음
- 북극 그린란드 등 지역에 비하여 남극 내륙 지역에서 조사활동을 통한 관측자료 및 빙하코어 확보와 데이터 분석의 용이성이 높음

□ 그린란드 지역의 빙하코어 및 우주 관측 가능성 검토

- 그린란드 지역 빙하코어는 비교적 많은 탄산염광물과 유기물을 함유하고 있어서 이산화탄소 농도분석에 적합하지 않은 것으로 알려져 있음
- 고위도 지역 장점에도 남극내륙에 비하여 상대적으로 인류 문명의 영향을 많이 받고 있어서 천문-우주 관측 등에서 우수한 관측 데이터 확보의 어려움 존재

나. 대안 비교

□ 대안 1: 남극내륙 기반 연구 수행

- (개요) 대안1은 남극내륙에서 연구조사 활동을 위한 인프라를 구축하고, 빙하코어, 블루아이스 및 천문-우주 관측활동을 수행한 활동임
- (제약 사항) 직접 남극내륙에서 탐사와 신규 조사 지역을 선정하는 등 업무로 인하여 타 대안에 비하여 비용 부담이 높은 제약을 지니고 있음
- (장점) 조사 지역 선정과 기간, 참여 연구자 및 확보한 데이터 활용 등에서 자유로운 협력, 확산이 가능하며, 빙하코어 등을 공동 연구 등에 비하여 충분히 확보함으로써 다양한 연구활동이 가능하며, 또한 3개의 연구주제를 함께 하여서 별도 사이트 구축에 비하여 효율성이 높음
- (성과) 빙하코어 및 천문-우주 관련 자료 확보와 관련 인프라 구축, 운영에 대한 노하우 축적 및 국내 관련 연구자 협력과 확산 등 가능

□ 대안 2: 기존 남극내륙기지 기반 국제 공동연구 수행

- (개요) 남극내륙 기지를 보유하고 있는 국가들과 협력하여 빙하코어 및 천문-우주 관측 활동을 공동으로 탐사 활동 수행하며, 블루아이스 탐사 활동은 내륙기지 기반 협력이 아닌 타 지역에서 수행해야 하므로 자체 비용 절감효과가 미약함
- (제약 사항) 기존 내륙기지 기반으로 참여하므로 위치 선정 등에서 제한되며, 기존 내륙기지 참여 연구자 수 등을 고려하여 국내 연구진의 다수 참여가 어려울 수 있고, 확보한 연구데이터 활용에서도 국내 연구진 확산 등에 제약이 있을 수 있음
- (장점) 상대적 비용의 절감 효과가 있으며,
- (성과) 빙하코어와 천문-우주 관련 연구데이터 확보 수준에 그치며, 관련 노하우 및 국내 연구진 확산 등은 한계

□ 대안 3: 기존 선진국 남극내륙 데이터 공동 활용

- (개요) 기존 선진국에서 확보한 남극내륙 관련 데이터를 공유받아서 연구활동을 수행
- (제약 사항) 선진국에서 공유하는 데이터를 받아서 연구활동을 수행하게 되므로 데이터 제공 시점에 따라 최신 데이터 확보 어려움이 있을 수 있으며, 다양한 데이터 확보도 어려울 수 있음
- (장점) 공유되는 데이터를 활용하므로 비용 절감 측면에서 별도 데이터 확보를 위한 조사활동 및 인프라 구축 필요가 없어서 비용 효율성이 높음
- (성과) 선진국 남극내륙 연구자를 통하여 확보, 공유된 데이터를 기반하여 수행한 연구활동이 가능하며, 관련 노하우 확보는 어렵고, 데이터 공유를 기반으로 수행하게 되어 별도 협력연구 등 필요성이 낮음

4. 경제성분석 요약

□ 사업 개요

- 동 사업은 기존 구축한 K루트 사업의 기반에 근거하여, 남극내륙의 연구현장 거점을 확보하고, 기후변화 요인 규명의 시발점이 되는 심부 빙하코어 시추와 블루아이스 코어 및 우주 탄생 등을 연구할 수 있는 천문 관측 및 우주 대기 연구를 수행함
- 동 사업은 남극 내륙 기반 구축과 현장 관측 및 시료 확보 등을 기반으로 연구데이터를 확보하여 국내 기후변화 연구 및 천문/우주연구 활성화에 기여함
- 국내에서 불가능한 남극 시료 및 연구데이터를 확보하여 국내 산·학·연 연구자와 공유하여 기후변화 연구 및 천문/우주 연구 활성화

□ 대안 도출

- 동 사업은 남극내륙 연구거점 확보와 연구활동을 병행하는 사업으로 유사 대안은 남극 내륙의 데이터 확보를 위한 방안과 남극내륙에서 확보가능한 데이터를 타 지역에서 확보하는 방안임
- 남극내륙에서 빙하코어, 블루아이스 및 천문/우주 탐사활동을 직접 수행하지 않고 확보하는 방안은 기존 거점을 활용하거나, 탐사로 확보된 자료를 공유받는 것임
- 남극내륙이 아닌 타 지역에서 과거 대기조성이나 천문/우주 관측모니터링 자료를 확보하는 것은 실현가능하지 않음
- 빙하코어는 남극내륙이 아닌 지역에서 빙하코어와 블루아이스 및 천문/우주 관측을 동시에 수행하기 적합한 지역을 탐색하기 어려움
- 또한 남극 외 지역에서 약 3,000m급의 빙하코어를 확보할 수 있는 북극 그린란드 빙하코어 시추 작업을 위해서는 허가, 협력 등 남극 활동보다 어려움이 더 크며, 기존 (1990~1992년) 시추한 빙하코어에서 약 100,000년전 기후변동성을 확인하는 수준이었음

□ 대안 비교

- 대안 1: 기존 남극내륙 거점기반 국제 공동자료 탐사 및 활용 요청
- 대안 2: 기존 남극내륙 거점에서 확보한 빙하코어, 블루아이스 및 천문/우주 관련 자료 공유와 활용 요청

□ 분석결과

- 동 사업과 유사한 효과를 낼 수 있는 대안으로 남극내륙 연구데이터를 확보할 수 있는 대안을 2개를 도출함
- 고정효과 접근법을 이용하여 비용효과분석 수행결과, 도출한 대안들로 해당사업의 성과와 동일한 효과를 예상할 수 없어서 K루트 사업을 통한 남극내륙 거점 구축과 연구개발이 가장 적절한 것으로 분석됨

대안 구분	주요 내용	비용 추정	효과 달성
[본 사업] 남극 내륙기지 거점 구축	- 기존 남극 K루트에 기반하여 3개의 신규 연구 거점 확보로 아이스코어, 블루아이스 및 고층대기 및 우주 연구 기반 마련 - 국내 - 국내 산·학·연 연구주체와 협력을 통하여 국내 기후변화 및 천문/우주연구 확산 가능	460억 원	✓ 데이터 확보 ✓ 국내 연구자 데이터 공유
[대안 1] 외국 국제 공동 활용	- 3개 연구 분야별 협력 연구 주체와 현장 거점 활용 가능여부를 확인 - 개별 연구자 차원의 협력활동을 통한 협력 의사 타진 - 직접 분석할 수 있는 시료 확보 여부와 충분한 양을 제공받기 어려운 한계	공동연구 비용	✓ 데이터 공유 가능 ✓ 연구데이터 확보 한계 ✓ 국내 연구자 데이터 제약
[대안 2] 외국 연구데이터 요청 활용	- 외국에서 확보한 연구데이터를 협력을 통하여 제공 받음 - 직접 확보하지 못하고 제공받은 연구데이터가 갖는 정보의 제약 존재 - 실시간 연구데이터가 아닌 연구논문 발표 후 제공받을 수 있어서 시간 격차 존재	일부 유료 연구데이터	✓ 2~3년 전 데이터 확보 ✓ 일부 데이터 미공개

제 V 장

결 론

1. 대한민국 남극내륙 종합연구 벤치마킹

- 국내의 남극내륙 탐사기술은 '21년도에 1,740km 남극내륙 진출루트를 확보함으로써 타 선진국에 준하는 수준이나, 연구역량은 아직 초기 단계로써 단기간에 세계적인 수준으로 도약하기 위해서는 지난 수십년간 남극내륙기지를 운영해 온 선진국 벤치마킹 필요
- 현재 극지연구소에서는 기관고유사업으로 러시아의 Ridge B 심부빙하코어 시추 연구에 참여하여 공동연구를 수행할 예정인 바, 해당과제를 통해 러시아의 심부빙하코어 시추 인프라 벤치마킹 가능
- 남극내륙 종합연구 초기 단계인 현 시점에서 천문-우주관측 연구거점을 구축하기 위해서는 막대한 비용이 소모되는 미국의 아문젠-스콧 기지 천문관측 인프라보다는 연구거점에서 가까운 프랑스-이태리의 콘코르디아 기지 천문관측 인프라를 벤치마킹하여 계획을 수립하는 것이 합리적임
- 장주기 온실가스 연구를 위한 남극내륙 블루아이스 시추기술은 현재 미국이 세계 최고 수준의 기술을 보유하고 있으므로 해당국가의 현장연구 인프라를 벤치마킹하고 이를 기반으로 장보고 기지 인근의 블루아이스에서 시추를 수행함으로써 연구효율 극대화 가능
- 최근 국제적으로 남극연구 인프라의 탈탄소 노력이 강화되고 있어 동 사업을 통해 구축 예정인 남극내륙 연구거점도 친환경 에너지 활용을 최대화할 필요가 있음. 따라서 앞서 에너지 활용기술을 적용한 해외 연구기지 사례를 벤치마킹하고 이에 국내의 독자적인 에너지 활용기술을 접목함으로써 기존 시스템의 개선 가능
- 향후, 극지연구소 뿐 아니라 국내의 다양한 산-학-연 기관에 남극내륙 인프라를 개방하고 다양한 연구주제 개발을 위해서는 남극내륙에서 가장 다양한 분야에 대한 연구가 진행되고 있는 콘코르디아 기지의 운영시스템을 벤치마킹할 필요가 있음

2. 우리나라 남극내륙 종합연구 방향

가. 다양한 학-연 기관이 주체가 되는 다수의 세부과제 개발

- 현재 남극내륙에 위치한 외국의 내륙기지에서는 빙하, 대기, 천문-우주환경 등 다양한 분야의 연구가 수행되고 있음.
- 남극내륙 후발주자인 우리나라 빠른 시간 내에 남극내륙 선진국 수준으로 도약하기 위해서는 다양한 분야의 동시 개발이 필요함.
- 이에 현재 개척이 완료된 남극내륙 진출루트 (코리안 루트)를 기반으로 심부빙하코어 시추, 천문-우주환경 관측, 블루아이스 내 온실가스 연구 등 3개의 연구거점을 동시에 구축함으로써 종합적인 남극내륙연구 수행을 계획 중임
- 또한, 각 분야마다 국내 전문기관이 해당분야의 연구거점을 주도적으로 설계하고 연구를 수행할 수 있도록 3개의 세부과제를 개발하여 수행함으로써 연구효율을 극대화 시킬 수 있을 것으로 사료됨

나. 연구거점 별로 특화된 연구인프라 구축 및 현장연구 수행

- 남극내륙 진출루트 개척을 통해 현재 장보고기지 기점 400km 지점의 블루아이스 지대와 과거 100만년 빙하코어 기록 복원이 가능할 것으로 추정되는 심부빙하코어 시추 후보지까지의 진출로를 확보하였으며, '22년도 남극내륙탐사를 통해 천문-우주환경 관측연구의 최적지로 생각되는 지자기 남극점까지 진출로를 추가 확보 예정임
- 심부빙하코어 시추거점은 극지연구소 주도로 기관고유사업을 통해 벤치마킹한 시추 캠프를 건설하고, 국제공동연구를 통해 500m 급의 중부빙하코어 시추시스템과 3000m 급의 심부빙하코어 시추 시스템을 확보하여 '27년에 3000m 급 심부빙하코어 시추를 착수할 계획임
- 천문-우주환경 관측거점은 한국천문연구원의 주도로 지자기 남극점에 THz 전파망원경이 설치된 남극내륙 천문관측소를 구축하고, 장보고기지-지자기 남극점 간에 다수의 고층대기, 우주환경 무인관측 시스템을 다수 설치하여 남극내륙 우주환경 관측 네트워크를 구축하고 무인 자동 관측 연구를 수행할 계획임
- 블루아이스 기반의 온실가스 연구는 현재 세계 최상위 수준의 온실가스 분석기술을 보유한 서울대학교를 중심으로 장보고기지 기점 400km 지점의 엘리펀트 모레인 블루아이스 지대에서 50~200m 깊이의 블루아이스 시료를 시추하고 국내 분석기술로 과거 30만년 이상의 중장기 온실가스 변화기록을 복원하고자 함.

다. 다수의 연구거점을 효율적으로 지원할 수 있는 지원체계 수립

- 남극내륙 연구효율을 최대화 할 수 있는 연구거점 구축을 위해 육상 및 항공 레이더 탐사를 통한 연구거점 정밀한 위치 선정필요
- 현재 남극내륙 진출루트 탐사선단에서 활용하는 숙소차량을 추가 확보하고 국내의 친환경 에너지 활용 기술을 접목하여 각 연구거점 별로 현장연구 인력의 체류와 전력공급 등의 기반 시설을 구축할 예정임
- 남극내륙기지를 운영 중인 일본, 중국의 자료를 비교해 볼 때, 남극내륙 연구거점을 운영하기 위해서는 최소 견인능력 약 400톤 규모의(실 보급능력 200톤) 육상 트래버스가 가능토록 운영인력 및 장비가 확보되어야 함
- 향후 남극내륙 종합연구 수행을 위해서는 내륙기지 연구인력, 운영인력, 긴급물자 수송과 긴급상황 대처를 위해 항공기 이용은 필수 불가결하며 따라서 항공기의 계절적 운영을 위해 고정익 항공기 기간임차, 활주로 시설, 중간 급유시설, 관제시설 등을 확보하여야 함.
- 보급 전진기지로서 장보고기지 내 아래와 같은 시설 확충 필요
 - 200톤 규모의 유류탱크 확보
 - 2대 헬기 격납고 확보
 - 트래버스용 차량 중방비 보관동 확보
 - 고정익 항공기(베슬러급) 활주로(1,000m) 확보
 - 내륙기지와의 중간지점에 항공기용 유류비축소 설치

제 VI 장

참고문헌

- Lawrence, J.S., et al. (2004). "Exceptional astronomical seeing conditions above Dome C in Antarctica." Nature **431**: 278-281.
- Soyol-Erdene, T. O., et al. (2011). "A 50-year record of platinum, iridium, and rhodium in Antarctic snow: volcanic and anthropogenic sources." Environ Sci Technol **45**(14): 5929-5935.
- Hong, S. M., et al. (2003). "Climate-related variations in lead concentrations and sources in Vostok Antarctic ice from 65,000 to 240,000 years BP." Geophysical Research Letters **30**(22).
- Gabrielli, P., et al. (2005). "Trace elements in Vostok Antarctic ice during the last four climatic cycles." Earth and Planetary Science Letters **234**(1-2): 249-259.
- Hong, S., et al. (2012). "Evidence of Global-Scale As, Mo, Sb, and Tl Atmospheric Pollution in the Antarctic Snow." Environmental Science & Technology **46**(21): 11550-11557.
- Hwang, H., et al. (2019). "Plutonium fallout reconstructed from an Antarctic Plateau snowpack using inductively coupled plasma sector field mass spectrometry." Science of The Total Environment **669**: 505-511.
- Hong, S. B., et al. (2018). "Improvement and performance testing of melting system for measurement of trace elements in firn core drilled at NEEM site, Greenland." International Journal of Environmental Analytical Chemistry **98**(8): 725-742.
- Han, C., et al. (2015). "Determination of lead isotopes in a new Greenland deep ice core at the sub-picogram per gram level by thermal ionization mass spectrometry using an improved decontamination method." Talanta **140**: 20-28.
- Han, C., et al. (2018). "High-resolution isotopic evidence for a potential Saharan provenance of Greenland glacial dust." Sci Rep **8**(1): 15582.
- Kang, J.-H., et al. (2015). "Mineral dust and major ion concentrations in snowpit samples from the NEEM site, Greenland." Atmospheric Environment **120**: 137-143.
- Kang, J. H., et al. (2017). "Pb concentrations and isotopic record preserved in northwest Greenland snow." Chemosphere **187**: 294-301.
- Hong, J., Chung, J.-K., Kim, Y. H., Park, J., Kwon, H.-J., Kim, J.-H., Choi, J.-M., & Kwak, Y.-S. (2020). Characteristics of ionospheric irregularities using GNSS scintillation indices measured at Jang Bogo Station, Antarctica (74.62° S, 164.22° E). *Space Weather*, *18*, e2020SW002536.

<https://doi.org/10.1029/2020SW002536>

Chen, Z., Gao, Y., & Liu, Z. (2005). Evaluation of solar radio bursts' effect on GPS receiver signal tracking within International GPS Service network. *Radio Science*, 40, RS3012, <https://doi.org/10.1029/2004RS003066>

Beach, T. L. (2002). Global positioning system studies of ionospheric irregularities: A technical review. *COSPAR Colloquia Series*, 12, 249-254. [https://doi.org/10.1016/S0964-2749\(02\)80225-6](https://doi.org/10.1016/S0964-2749(02)80225-6)

Kalooop, M., Yigit, C., El-Mowafy, A., Bezcioglu, M., Dindar, A. A., & Hu, J. W. (2020). Evaluation of multi-GNSS high-rate relative positioning for monitoring dynamics structural movement in the urban environment, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.183040>

Gary, D. E. (2011). Solar radio burst effects on wireless systems. 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Long Beach, CA, USA, 661-664. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2011.6038392>

ETRI 전자통신동향분석 제21권 제4호 2006년 8월

연구·정책지원사업 최종 결과보고서 평가의견 반영사항

과제 구분	(연구·정책지원과제)		
과제명	남극내륙 빙하-대기-우주환경 종합연구 수행과 지원체계를 위한 기획연구 (계정번호: PE21460)	연구기간	2021.08.01 ~ 2022.03.31
연구책임자	이강현	연구비(직접비)	150,000천원
과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항			
(1) 과제목적 - 현재 개척 중인 남극내륙 진출루트를 기반으로 심부빙하 시추, 천문우주 관측, 블루아이스 연구 등 3개 연구거점 구축 및 남극내륙 종합연구 수행을 위한 마스터플랜 수립 - 서울대학교, 한국천문연구원 등 국내 전문 연구기관과의 연구협력 체계 구축을 통해 각 연구거점별 맞춤형 연구과제 개발 (2) 최종성과 - 남극내륙 연구거점 구축을 위한 연구주제 발굴 및 세부 계획 수립 - 다수의 국내 연구기관이 주도하는 각 거점별 연구특성화 방안 도출 (3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과 - 남극내륙 연구거점 기반시설 구축 및 운용능력 확보 : 극한지에서의 건설기술, 자원재순환, 인간거주, 동계기간 중 원격운영 및 유지기술, 친환경 연구 기반시설 운영기술 등을 확보 - 국제공동연구 주도 및 국가연구능력 입증 : 남극내륙 연구 기반시설 및 연구성과를 활용한 국제공동연구의 주도적 수행 - 남극 내륙으로의 과학영토를 확장 : 기후변화, 천문우주, 온실가스 거동 등 남극내륙의 빙하환경 변화 및 이로 인한 기후변화 예측에 기여 (4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항			
평가의견		반영사항	비고
◦ 남극내륙 종합연구의 3개 세부과제 연구성과의 의미와 활용방안에 대한 제시 필요		◦ 3장 남극내륙 종합연구 수행과 지원체계 구축 세부계획에 각 연구거점별 기대성과와 활용방안 제시	연구보고서 p.70~109 참고
◦ 연구소 내 현행 기관고유사업과의 통합방안 보완 필요		◦ 현행 기관고유사업 1단계 종료 후 해양수산부의 국가 R&D 사업으로 추진	연구보고서 p.69 참고
◦ 빙하시추 시기와 기술개발전략에 대한 구체적인 기술 필요		◦ 3장 세부계획에서 심부빙하시추 연차별 세부계획 제시	연구보고서 p.73~75 참고
◦ 내륙기지 구축에 대한 과학적 정당성 보완 필요		◦ 본 과제에서 추진 중인 남극내륙 연구거점은 내륙기지와 같은 대형 인프라가 아니라 각 거점에서 소규모의 현장연구 인력이 단기간 체류하며 연구를 수행하는 캠프 개념으로써, 대규모 인프라 구축에 대한 정부의 투자가 필요하지 않음	연구보고서 p.69 참고

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서 수행한 정책연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서 수행한 정책연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.