

소형 중성자선원 개발과 응용/산업화 전략 마련을 위한 국내외 현황 분석에 관한 연구

성균관대학교 전자전기공학부
채 종 서

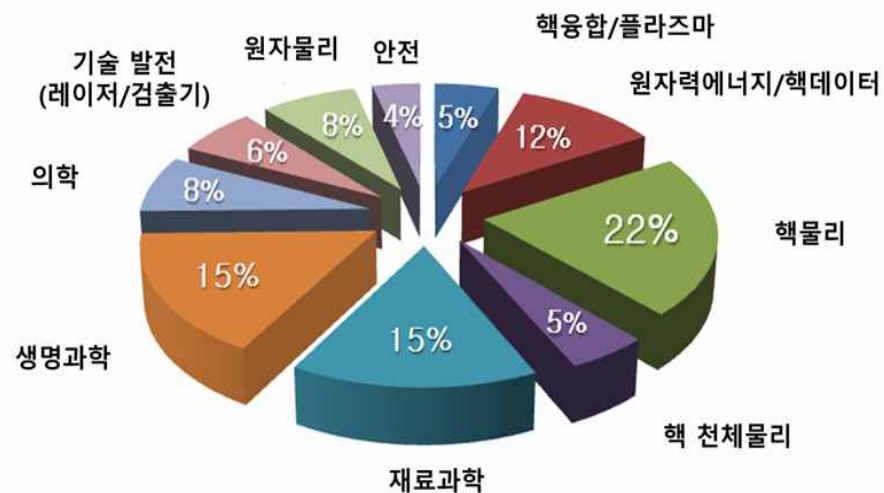
연구의 배경- 개요

- 가속기 기술의 고도화에 따라, 최근 EU, 일본, 미국 등에서는 가속기 기반의 소형 중성자선원을 활용한 중성자 연구의 지속성 확보와 다양한 산업적 활용 연구가 적극적으로 추진
- 가속기는 전자를 주로 가속 (proton accelerator)하는 선형가속기 (LINAC), 양성자를 주로 가속하는 사이클로트론 (cyclotron)이 있음
- 중성자 선원으로서 가속기의 선택은 크기와 복잡성, 효율, 산업적으로 부품의 상용 입수 가능성, 실제의 가속기 기술과 산업적 기반 등 여러 이유에 따라 펄스구동(pulse mode)일 경우 선형 가속기가, 연속구동(continuous mode)일 경우 사이클로트론이 주로 채택
- 국외에서는 DD/DT 반응에 의한 핵융합 중성자선원의 산업화가 추진되고 있으며, 대용량 중성자선원으로서 토카막이나 미러 등 핵융합 챔버 방식의 중성자선원도 제안되고 있음
- 국내에서도 DD 선원의 자체 개발, 핵융합 분야 활용이나 풍부한 중성자속 제공 가능성을 염두에 둔 핵융합 챔버 방식에 대한 사전연구가 진행되고 있음

소형 중성자선원 개발과 응용산업화 전략마련을 위한 국내외 현황 분석

- 국내외 중성자 활용기술의 산업 분야 및 시장규모 분석
- 중성자 활용 기술의 체계적 분석 및 요소기술에 대한 표준화 기술트리 작성
- 국내외 소형 중성자선원 관련기술의 현황 분석 및 시사점 도출

중성자 이용 수요 분야



연구의 방법

- 입자가속기 기술을 이용할 수 있는 산업에 대한 조사
- 소형 중성자선원 기술 중 응용/산업화 전략마련을 위한 분석방법에 대한 기준을 제시
- 정량분석방법과 정성분석방법의 사용
- 국내외 전문가 집단에 대한 조사 및 산업개요분석



소형 중성자선원 개발 및 응용/산업화 전략마련을 위한 국내외 현황분석

- 수요처 및 활용처 요구 사항 파악 -----> 투자 참여의 현실성 증대
- 역량 및 가용기술 분석을 통한 전략수립 -> 현 상황에 대한 **명확한 인지**를 통한 **신뢰성 있는 대안** 제시



각 분야별 전문가를 통한 현황분석
“고 신뢰성을 가진 현황분석”

목차

제 1 장. 서론 / 3

| | |
|---------------------|---|
| 제 1 절. 연구의 배경 | 3 |
| 제 2 절. 연구의 목적 | 5 |
| 제 3 절. 연구의 내용 | 5 |
| 제 4 절. 연구의 방법 | 6 |

제 2 장. 소형 중성자원 활용기술 동향 분석 / 16

| | |
|------------------------------------|----|
| 제 1 절. 국내 소형 중성자원 활용 산업분야 분석 | 16 |
| 가. 중성자 발생원 현황 | 16 |
| 나. 중성자 활용기술 산업 현황 | 20 |
| 제 2 절. 국외 소형 중성자원 활용 산업분야 분석 | 20 |
| 가. 라디오그래피와 영상 | 20 |
| 나. 중성자 포획 치료 | 26 |
| 다. 방사성동위원소 생산 | 28 |
| 라. 전자 제품에 대한 방사선 조사 효과 | 31 |
| 제 3 절. 국내 소형 중성자원 활용 시장규모 분석 | 34 |
| 제 4 절. 국외 소형 중성자원 활용 시장규모 분석 | 35 |
| 가. 주요 국가별 중성자 활용 시장 | 36 |
| 나. 북미 지역별 중성자 활용 시장 | 38 |
| 다. 유럽 지역별 중성자 활용 시장 | 38 |
| 라. 아시아 지역별 중성자 활용 시장 | 39 |
| 마. 남미 지역별 중성자 활용 시장 | 40 |
| 바. 중동 및 아프리카 지역별 중성자 활용 시장 | 40 |
| 사. 주요 기업별 중성자 활용 시장 | 41 |
| 제 5 절. 시장 역학 분석 | 52 |
| 가. 상용화 동기 | 52 |
| 나. 시장 성장 억제 요소 | 52 |

| | |
|------------------|----|
| 다. 시장 확장성 | 53 |
| 라. 동향 | 53 |
| 마. SWOT 분석 | 55 |

제 3 장. 중성자 활용 요소기술 분석 / 56

| | |
|-----------------------------------|----|
| 제 1 절. 중성자 활용기술 체계 | 56 |
| 제 2 절. 중성자 활용 요소기술 분석 | 58 |
| 제 3 절. 중성자 활용 요소기술 표준화 기술트리 | 61 |

제 4 장. 소형 중성자선원 기술 현황 분석 및 시사점 도출 / 63

| | |
|------------------------------|-----|
| 제 1 절. 중성자 발생 가속기 | 63 |
| 가. 사이클로트론 | 63 |
| 나. RF 선형가속기 | 75 |
| 다. 정전형 선형가속기 | 83 |
| 라. 레이저 플라즈마 가속기 | 87 |
| 마. DD, DT | 88 |
| 제 2 절. 중성자 변환 및 수송 장치 | 102 |
| 가. 소형 중성자 조사용 TMR | 102 |
| 나. 중성자 영상 및 분석 | 111 |
| 다. 핵융합챔버 | 115 |
| 제 3 절. 소형 중성자선원 기술 시사점 | 127 |

제 5 장. [산업분야] 직접 설치·활용이 가능한 중성자원 및 활용 기술 / 129

| | |
|----------------------------------|-----|
| 제 1 절. DD 선원 개발 현황 및 전망 | 129 |
| 제 2 절. 산업용추적자 현장직접제조시스템 개발 | 132 |
| 제 3 절. 핵연료검사시스템 개발 | 138 |

목차

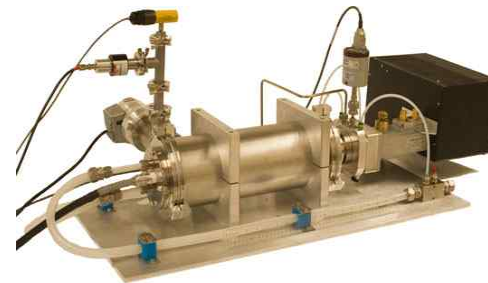
| | |
|---|-----|
| 제 6 장. 국방·산업·의료분야 활용 중성자원 및 활용 기술 / 144 | |
| 제 1 절. 소형 사이클로트론 기술 개발 현황 및 전망 | 144 |
| 제 2 절. 중성자영상화 기술 개발 | 149 |
| 제 3 절. 의료용 동위원소 현장생산기술 | 153 |
| 가. 국외 연구개발 동향 및 기술 수준 | 153 |
| 나. 국내 연구개발 동향 및 기술 수준 | 153 |
| 다. 국내외 기술·시장 및 환경변화 | 156 |
| 라. 연구 필요성 및 시급성 | 156 |
| 마. 기존 유사 연구와의 차별성 | 157 |
| 바. 활용 방안 및 기대효과 | 158 |
| 제 4 절. 산업화 전략 | 159 |
| 제 7 장. 중성자과학분야 활용 중성자원 및 활용 기술 / 161 | |
| 제 1 절. 소형가속기 기반 중성자과학 개요 | 161 |
| 제 2 절. 기술개발 현황 및 전망 | 173 |
| 제 3 절. 핵심요소기술 개발 | 200 |
| 제 8 장. 사용후핵연료 연소특성평가를 위한 중성자원 활용 기술 / 211 | |
| 제 1 절. 사용후핵연료 연소특성평가의 필요성 | 211 |
| 제 2 절. 비파괴검사 기술 현황 및 장단점 | 218 |
| 제 3 절. 핵심요소기술 개발 | 236 |
| 제 9 장. 30 MeV 사이클로트론을 이용한 소형 중성자원 전산모사 / 238 | |
| 제 1 절. 베릴륨의 필요한 두께 | 240 |
| 제 2 절. BNCT용 가속기 기반 중성자원 계산 모델 | 241 |

국내 중성자 활용기술 동향분석

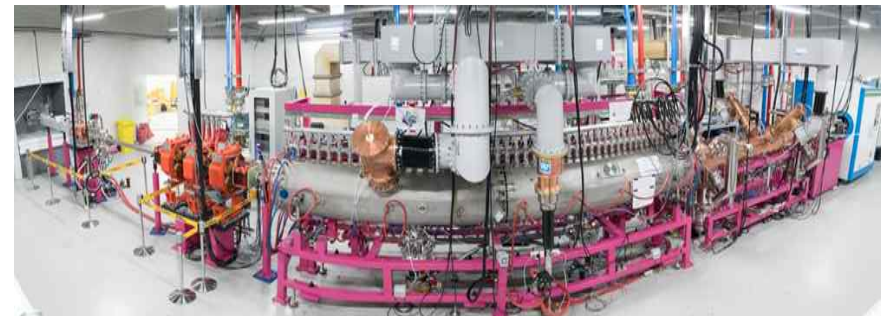
| 중성자 발생 방법 | 활용 분야 |
|----------------------|--|
| 동위원소(Cf-252, RaBe 등) | 중성자 검출기 교정 방사화 기술 기반 성분 분석 (주로 시멘트) 포장도로 검사 핵연료 검사 |
| DD, DT 중성자 발생기 | 성분분석 중성자 검출기 교정 |
| 소형 가속기 기반 중성자 | 핵 데이터 연구 핵반응 기초 연구 중성자 암치료 중성자 산란, 영상 대기 방사선 영향 연구 |
| 원자로 기반 중성자 | 동위원소 생산 방사화 기반 성분 분석 핵변환에 의한 반도체 도핑 중성자 산란, 영상 중성자 기초 과학 |
| 대형 가속기 기반 중성자 | 중성자 산란, 영상 방사화 기반 성분 분석 대기 방사선 영향 연구 중성자 기초 과학 |



동위원소형 중성자원



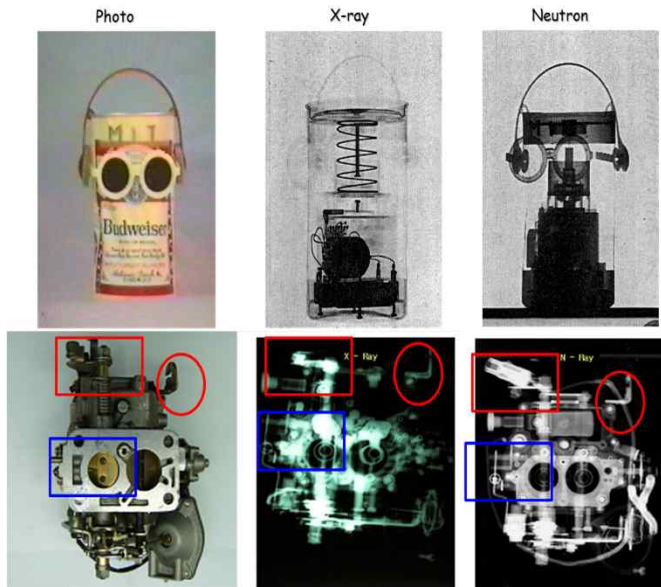
DD 중성자 발생기



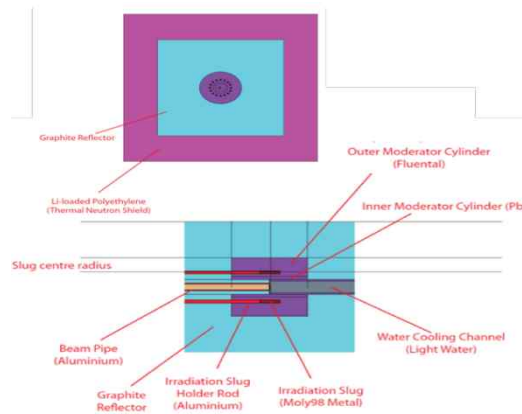
소형가속기 기반의 중성자원

국외 중성자 활용기술 동향분석

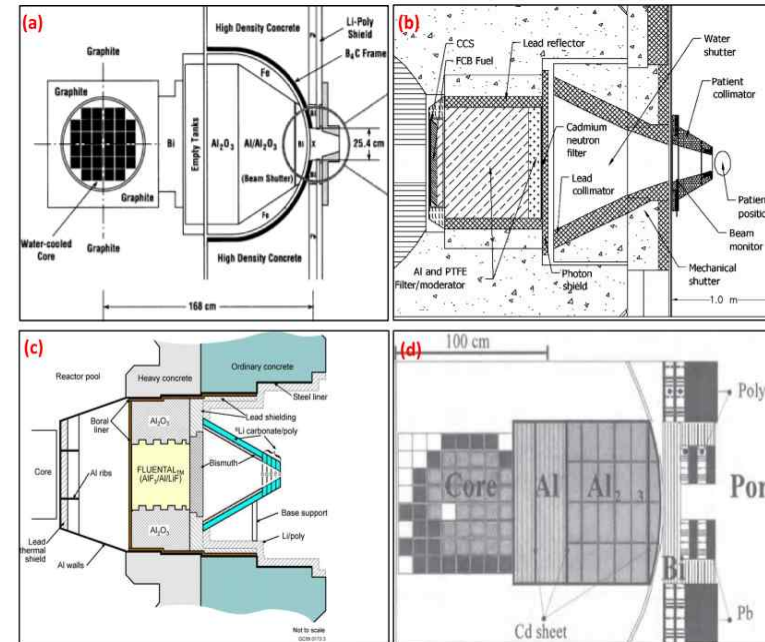
• 라디오그래피와 영상 (Radiography & Imaging)



• 방사성동위원소 생산



• 중성자 포획치료 (Neutron Capture)



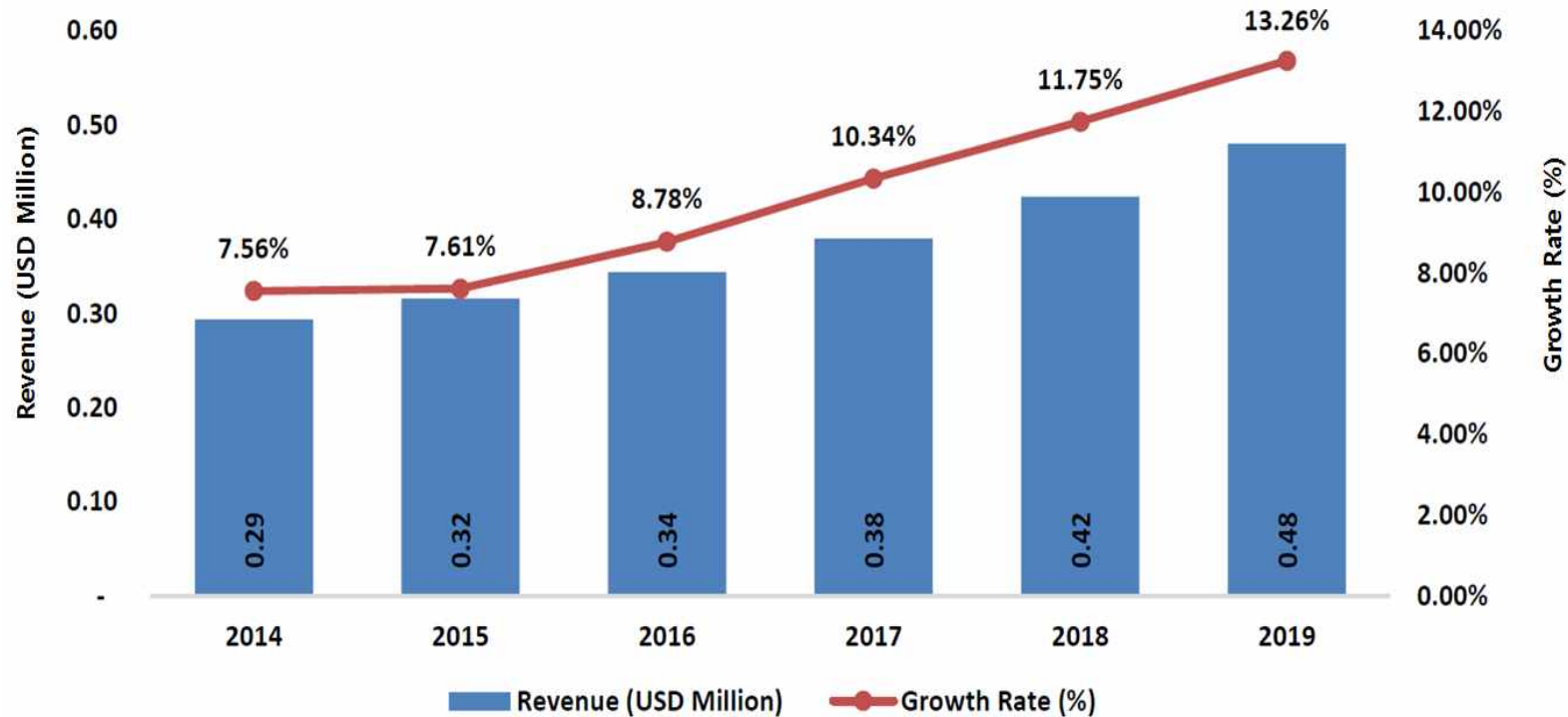
미국 내에서 BSA (Beam Shaping Assembly)의 평면도:

(a) BMRR (Brookhaven Graphite Research Reactor), (b) MIT, (c) WSU, (d) RA-6

• 전자제품에 대한 방사선 조사효과

| Reactions with Si | $E_{threshold}$ |
|--|-----------------|
| $^{28}\text{Si} + n \rightarrow ^{28}\text{Al} + p$ | 3.999 [MeV] |
| $^{28}\text{Si} + n \rightarrow ^{25}\text{Mg} + \alpha$ | 2.749 [MeV] |
| $^{29}\text{Si} + n \rightarrow ^{29}\text{Al} + p$ | 3.009 [MeV] |
| $^{29}\text{Si} + n \rightarrow ^{26}\text{Mg} + \alpha$ | 35 [keV] |
| $^{30}\text{Si} + n \rightarrow ^{30}\text{Al} + p$ | 8.040 [MeV] |
| $^{30}\text{Si} + n \rightarrow ^{27}\text{Mg} + \alpha$ | 4.341 [MeV] |

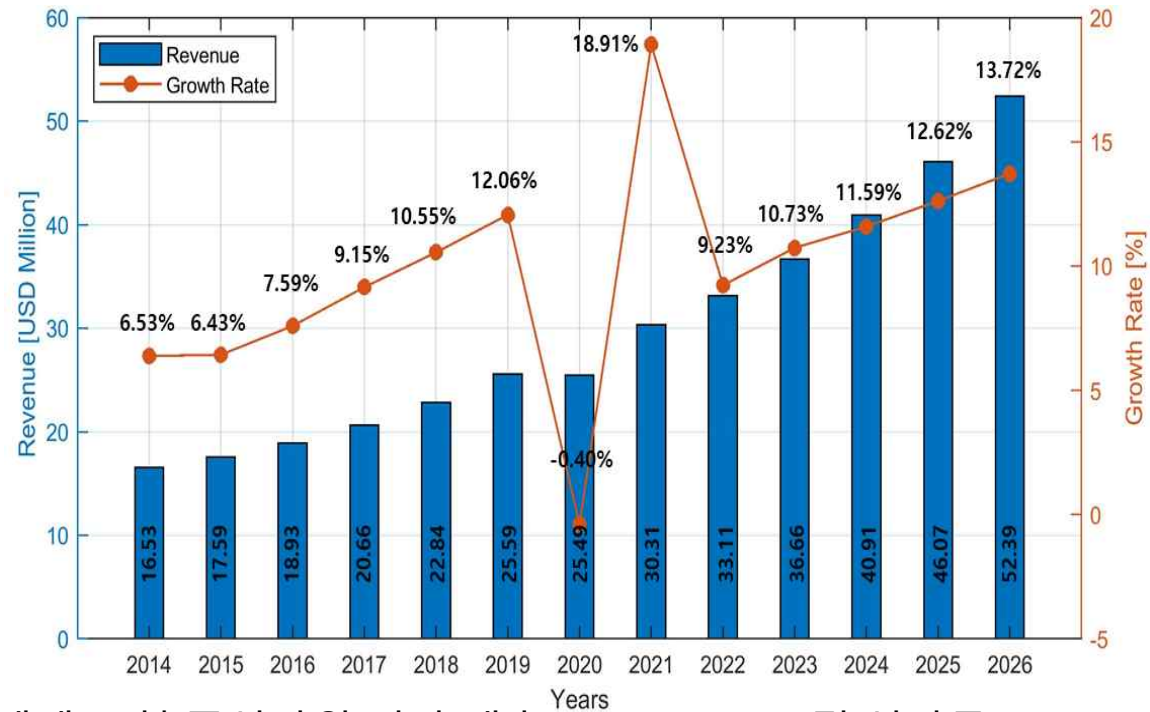
소형 중성자선원 국내 현황



국내 소형 중성자원 시장 매출(Million USD) 및 성장률(2014-2019)

2014년부터 매출이 0.29백만 달러에서 2019년 0.48백만 달러로 꾸준히 증가하고 있으며, 성장률도 2014년 7.56%에서 2019년 13.26%로 성장하였음. 올해는 COVID-19로 인해 감소할 것으로 예상되며, 2021년 이후에는 매출이 전반적으로 상승할 것으로 판단됨.

소형 중성자선원 국외 현황

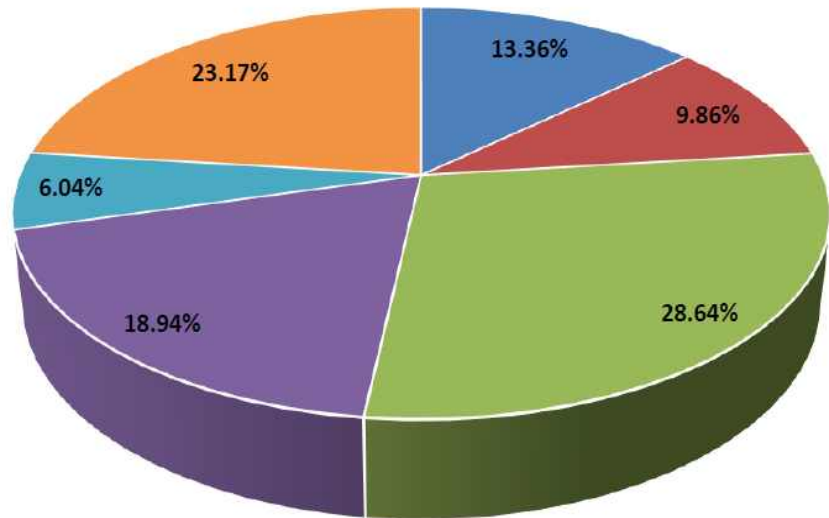


세계 소형 중성자원 시장 매출(Million USD) 및 성장률(2014-2019)

| | 2019 | 2026 | CAGR (2019-2026) |
|-----------|-------|-------|------------------|
| 북미 | 10.96 | 21.93 | 10.41% |
| 유럽 | 6.65 | 13.40 | 10.52% |
| 아시아-태평양 | 6.00 | 13.09 | 11.79% |
| 남미 | 1.07 | 2.15 | 10.51% |
| 중동 및 아프리카 | 0.91 | 1.82 | 10.46% |
| 계 | 25.59 | 52.39 | 10.78% |

소형 중성자선원 국외 현황

세계 가속기 기반 소형 중성자선원 매출 시장 점유율 주요기업 (2018)



- Phoenix, LLC
- Sodern
- Thermo Fisher Scientific
- Adelphi Technology
- Gradel (NSD Fusion)
- Others

Thermo Fisher Scientific사 28.64%
 Adelphi Technology사 18.94%
 Phoenix, LLC사 13.36%
 Sodern사 9.86%

| 항목 | 설명 |
|------------------|--|
| 설립연도 | 1962 |
| 소유권 | 공립 |
| 관심 분야 | Analytical Instruments, Laboratory Supply Chain 프로그램 및 e커머스, 실험실 장비, 실험실 서비스, 특수 진단, 생명 과학, 플라스마 서비스, CDMO |
| 제품 | B 320 Neutron Generator, D 711 Neutron Generator |
| 매출 (USD Million) | 24,358 |
| 종업원수 | 70,000 |
| 판매망 | Worldwide |

| | 2018 | 2019 |
|-------------------|-------|-------|
| 매출액 (Million USD) | 6.54 | 7.38 |
| 매출 총수익 (%) | 24.92 | 25.09 |
| 매출 총이익 (USD Mn) | 1.63 | 1.85 |

Thermo Fisher Scientific 사

국외 주요기업 정보

| 항목 | 설명 | |
|-------------------|----------------|-------|
| 설립연도 | 1986 | |
| 소유권 | 사립 | |
| 관심 분야 | 가속기 기반 소형 중성자원 | |
| 제품 | MeV 중성자원 | |
| 판매망 | Worldwide | |
| | 2018 | 2019 |
| 매출액 (Million USD) | 4.32 | 4.77 |
| 매출 총수익 (%) | 28.50 | 28.96 |
| 매출 총이익 (USD Mn) | 1.23 | 1.38 |

Adephi technology 사

| 항목 | 설명 |
|-------|--|
| 설립연도 | 2005 |
| 소유권 | 사립 |
| 관심 분야 | 의학 방사성 동위원소, neutron generator, 고전압 전력공급장치, 반도체 처리, 원자물질 탐지, neutron radiography, 핵융합에너지, 입자 가속기, 비파괴 검사 |
| 제품 | Alectron High Flux Neutron Generator |
| 판매망 | Worldwide |

| | 2018 | 2019 |
|-------------------|-------|-------|
| 매출액 (Million USD) | 3.05 | 3.43 |
| 매출 총수익 (%) | 26.96 | 27.13 |
| 매출 총이익 (USD Mn) | 0.82 | 0.93 |

Phoenix 사

시장역학 분석



SWOT 분석도

중성자활용 요소기술 표준화 기술트리

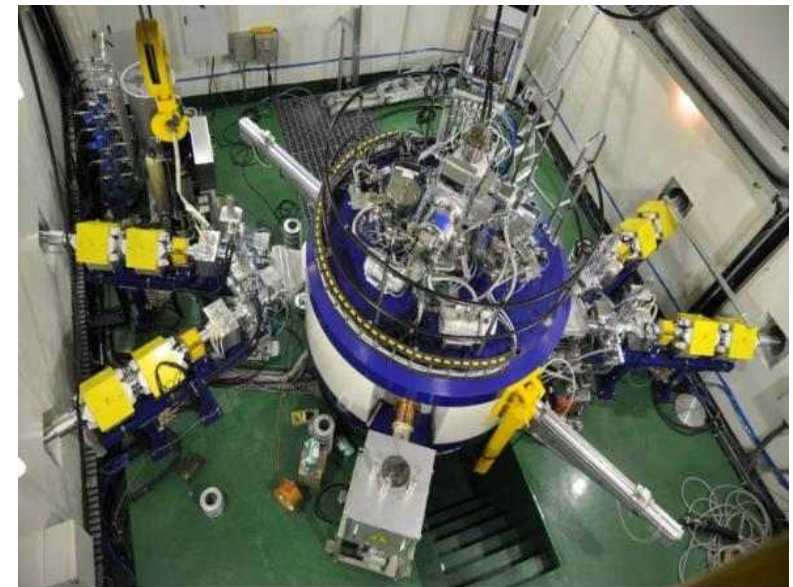
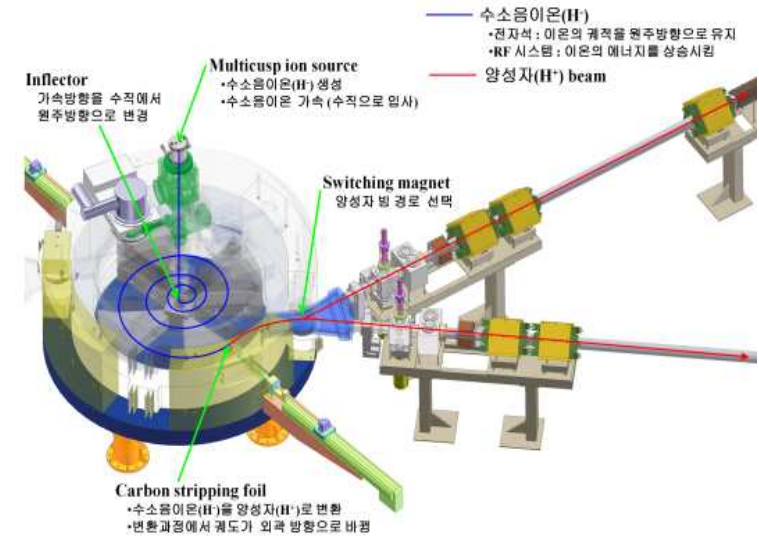
| | | | |
|----------------|--------|---------------|---|
| 중성자 활용 요소기술 | 가속기 | DD, DT 소형 가속기 | 최대 수율 |
| | | 정전형 가속기 | 가속입자, 가속 에너지, 빔 전류 |
| | | RF 선형 가속기 | 가속입자, 가속 에너지, 빔 전류 |
| | | 사이클로트론 | 가속입자, 가속 에너지, 빔 전류 |
| | | 전자가속기 | 가속에너지, 빔 전류 |
| | 표적 집합체 | 표적 | Li, Be, target cooling |
| | | 감속재 | HDPE, Water |
| | | 반사체 | Be, Graphite, Pb, W |
| | | 차폐 | HDPE, BHDPE, Pb, boron rubber, Cd, Concrete |
| | 부대 시설 | 차폐시설 | 기준 선량 |
| | | 방사선 안전 | 방사선 모니터링, 접근 제어, 선량 측정 |
| | | 유틸리티 | 전기, 수도, 가스, 환기 |
| | | 방사선 인허가 | 사용전 인허가 |
| | 활용기술 | 중성자 영상 | 국방, 산업, 재료, 문화재 |
| | | 구조분석(중성자 과학) | 중성자 산란, 중성자 회절 |
| | | 방사화 분석 | 극미량 분석 |
| | | 중성자 조사 | 대기 방사선 |
| | | 치료 | BNCT |
| | | 동위원소 생산 | 의료용 동위원소, 산업용 동위원소 |
| | | 핵자료 데이터 | 산란단면적 측정 |
| | | 검출기 교정 | 중성자 검출기 검교정 |
| | | 교육, 훈련 | 학생, 전문가 교육 |

소형 중성자원 기술 현황 분석 - 중성자 발생 가속기 (사이클로트론)

국내 사이클로트론 보유 현황 및 용도

| 운영기관('14년) | Energy (MeV) | 대수 | 주요 용도 |
|--------------|--------------|----|-----------------|
| 산업체, 병원 등 | 7.5 ~ 18 MeV | 31 | PET진단 의약품 생산 |
| 권역별 센터(CRC)* | 13 MeV | 7 | RI생산 및 연구 |
| 원자력의학원 | 30 MeV | 1 | RI생산 전용 |
| | 50 MeV | 1 | RI생산 및 연구 |
| 원자력연구원 | 30 MeV | 1 | 연구 |
| 성균관대 | 9,13MeV | 2 | 연구 |
| 합 | | 43 | - |

| 연구수행 기관 | 연구개발의 내용 | 연구개발성과의 활용현황 |
|------------|--|---|
| · 한국원자력연구원 | <ul style="list-style-type: none"> · 고체/액체/기체 표적 개발 · 표적시스템 개발 · 자동합성장치 개발 · 방사성의약품 개발 | <ul style="list-style-type: none"> · 자체 연구 및 동위원소 생산에 활용 · 일부 표적시스템 및 자동합성장치는 권역별 사이클로트론 센터에 설치중임 |
| · 한국원자력의학원 | · 사이클로트론 및 일부 표적 개발 | · 자체 연구 및 동위원소 생산에 활용 |



KIRAMS- 30MeV 사이클로트론

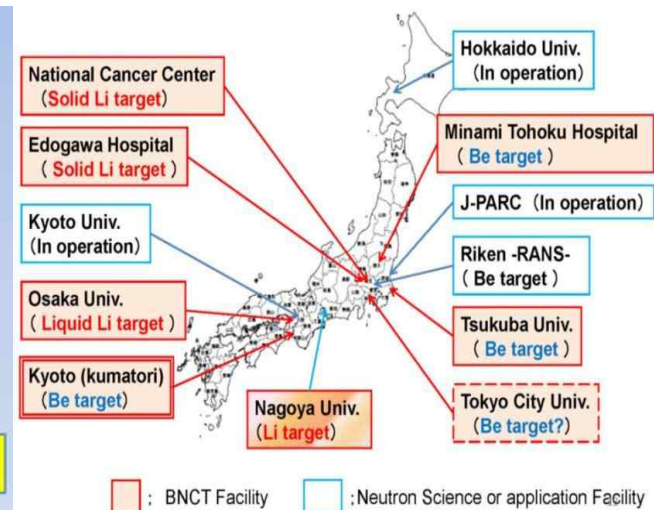
소형 중성자원 기술 현황 분석 –중성자 발생 가속기 (사이클로트론)

중성자 발생원으로서 원자로와 사이클로트론

| | 연구용 원자로 | 사이클로트론 |
|---------------|--|--|
| 종류 | 우라늄 핵분열시 발생하는 중성자 | Li, Be 표적의 핵반응에 의해 발생하는 중성자 |
| 중성자 에너지 선택법 | 기계적인 중성자빔 절단장치나 필터 사용 | 비행시간법 (Time of Flight, TOF)을 이용하여 에너지 분광 |
| 인출 중성자 에너지 영역 | 열중성자 (thermal neutron, ~ 0.025 eV) 및 냉중성자 (cold neutron, < 0.025 eV) | 고속중성자 (fast neutron, 수~수십 MeV) |



소형 중성자원 기술 현황 분석 – 중성자 발생 가속기 국외현황



일본의 중성자 연구시설

미국, 유럽, 중국, 일본 등 주요 선진국들을 중심으로 의료와 연구 목적으로 가속기 기반의 중성자 발생시설을 구축하여 운영하고 있으며, 특히 일본의 경우 여러 대의 가속기 기반 중성자 발생시설이 구축되어 속중성자 이용연구 및 중성자 라디오그래피 연구 등이 매우 활성화 되어있음

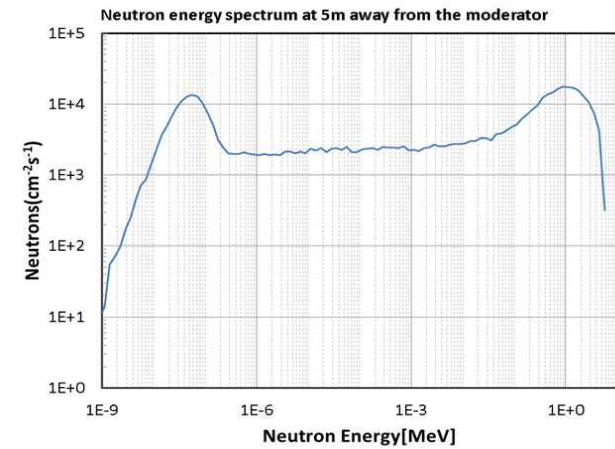
세계 주요 가속기 기반 중성자원 시설

| 연구수행 기관 | 연구개발의 내용 | 연구개발성과의 활용현황 |
|---|--|--|
| 포항가속기연구소 (국내) | <ul style="list-style-type: none"> - 전자가속기를 이용한 펄스형 중성자원 - 중성자 에너지: 수백 eV | <ul style="list-style-type: none"> - 측정반응: total cross section 사용자: CIAE(중국), 경북대, POSTECH - 핵종: Er/Nb/Mo/Fe - 측정반응: activation - 사용자: VAST(베트남), 경북대, POSTECH 핵종: W/Au/Ho |
| 한국지질자원연구원 (국내) | <ul style="list-style-type: none"> - 정전형 가속기 (1.7MV) - p+Li, p+T, d+D 반응이용 - 발생중성자 에너지: 수MeV | <ul style="list-style-type: none"> - 측정반응: total cross section 사용자: 지질자원연구원 - 핵종: W/Au/Ta/Co/Nb/Bi/Y/O/Si/Fe/Cu/Ti |
| Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM) (EU) | <ul style="list-style-type: none"> - GELINA : 전자가속기를 이용한 펄스형 중성자원, 우라늄 표적사용 - 평균 중성자속: 3.4 x neutrons/s - 중성자 에너지 범위: subthermal 영역 ~약 20 MeV | <ul style="list-style-type: none"> - 12개의 서로 다른 실험을 동시에 할 수 있음 - 시설은 24시간/day, 100시간/week 로 운영됨 |
| 헬름홀츠연구소 (독일) | <ul style="list-style-type: none"> - ELBE : 초전도가속기, 최대 40 MeV, 펄스폭: 10 ps, 최대 frequency: 13 MHz, 평균전류 1 mA | <ul style="list-style-type: none"> - 측정반응: Inelastic scattering cross section - 2009년 10월부터 nuclear transmutation 에 대하여 Munchen 대학과 공동연구 수행 |
| Oak Ridge National Laboratory (미국) | <ul style="list-style-type: none"> - ORELA(Oak Ridge Electron Linear Accelerator): 180 MeV 전자가속기를 이용한 펄스형 중성자원 - 중성자 에너지: eV – eV - TOF 라인: 10-200 m | <ul style="list-style-type: none"> - 측정반응: total, capture, fission, elastic, scattering, and gamma ray and neutron production |
| The Gaerttner Linear Accelerator (LINAC) Laboratory at Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) (미국) | <ul style="list-style-type: none"> - 60 MeV 가속기를 사용하여 다양한 범위의 중성자원 발생 | <ul style="list-style-type: none"> - 1961년부터 다양한 기본/응용연구 활동에 이용되고 있음 |
| Kyoto University (일본) | <ul style="list-style-type: none"> - 최대에너지가 46 MeV인 선형전자가속기 (KURRI-Linac), KURRI Linac을 사용 - 중성자생성을 위하여 Ta 표적사용, 냉각수를 사용하여 냉각 - 발생중성자 개수: neutron/sec | <ul style="list-style-type: none"> - 현재까지 핵자료 측정용으로 사용되고 있음 |

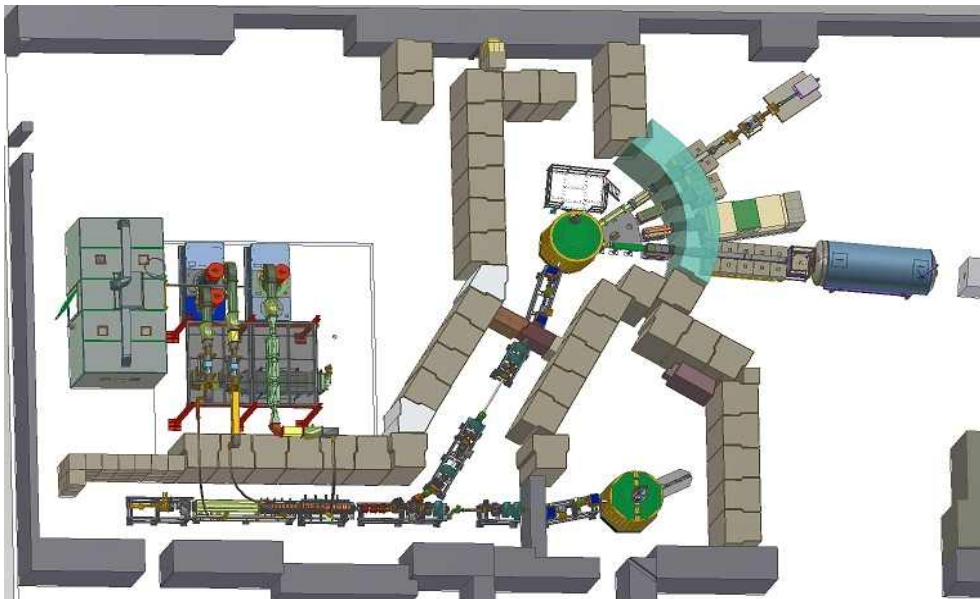
세계 주요 가속기 기반 중성자원 시설

| 연구수행 기관 | 연구개발의 내용 | 연구개발성과의 활용현황 |
|---|---|---|
| 미국 IUCF (Indiana University Cyclotron Facility) | - 200 MeV급 사이클로트론 양성자빔을 이용하여 Be(p,xn) 반응으로 중성자 발생 | - 중성자 산란을 이용한 합성 고분자, 생체 거대분자 (단백질, 효소, 핵산 등)의 구조 규명 연구 |
| 스웨덴 TSL (The Svedberg Laboratory, Uppsala Universitet) | - 180 MeV급 사이클로트론 양성자빔을 이용하여 Li(p,n) 반응으로 중성자 발생 | - 중성자에너지에 따른 전자장비에의 영향 연구, 우주선 유도 중성자장 시뮬레이션 |
| 체코 NPI (Nuclear Physics Institute) | - 37 MeV 사이클로트론 양성자빔을 중수 (heavy water)에 조사하여 중성자 발생 | - 중성자를 이용한 핵반응 연구 |

소형 중성자원 기술 현황 분석 - 중성자 발생 가속기 (RF 선형가속기)



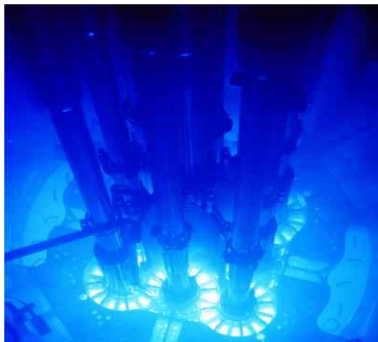
➤ RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source (RANS)



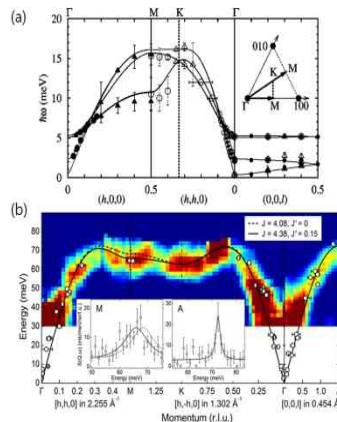
➤ Indiana University Low-Energy Neutron Source (LENS)

결론

- 중소형 중성자 기술의 산업적 이용은 많은 원천기술의 장점을 가지고 적용 기술을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행 중임.
- 중성자 선의 원활한 활용을 위하여 고 선속의 중성자선의 확보가 우선되어야 하며, 이를 위해 가속기 기술의 혁신적 향상과 산업화가 매우 필요함.
 1. 소형 중성자원용 의료 및 국방산업용 가속기 산업 전략지원
 2. 중소형 가속기 기반 연구 및 기술 인력 확충방안 확보
 3. 중소형 가속기 기반 중성자 활용 분야 저변확대 및 사업화 투자전략 마련
- 국내 중성자 연구를 지속적으로 진행하고 활용하기 위한 가속기 기반 소형 중성자원의 구축이 조속히 필요하며 이를 활용하기 위한 계획 및 체계적인 대비가 필요



원자로



중성자 산란 이용 물성 연구



BNCT