

KNS 2016, 2016. 10. 26~28, 경주 HICO
소형 중성자원 개발과 이용 현황 워크숍

양성자가속기연구센터의 펄스 중성자원 개발 현황 및 계획

2016. 10. 26 (수)

조용섭, 김계령, 권혁중, 김귀영

양성자가속기연구센터
한국원자력연구원

* 미래창조과학부의 지원으로 수행된 연구임



1. 양성자가속기연구센터 운영 현황
2. 펄스 중성자원 기술 개발 및 계획
3. 요약

연구센터 위치 및 부지

❖ 경북 경주시 건천읍 미래로 181번지 일원 (440,000m² 경주시 제공)



연구센터 주요 시설

❖ 가속기동 등 8개동



TR103(100MeV) TR23 (20MeV)



시설·운영관리동

7

지역협력동
부지

관리동 부지

9 숙소동: '15.11 개관

8

안내동

- 부지: 180,000 m²
- 건물: 27,322 m²
- 수전 용량: 154kV, 20MVA

❖ 100MeV 양성자가속기 및 빔라인 2기 (20 · 100MeV 각 1기)

- 시운전 · 시설검사 완료 : 2013년 상반기
- 시범운영 : 2013년 하반기
- 정상운영 : 2014년 부터

- 100MeV 양성자가속기 구성
 - 50keV 입사기 (이온원 + LEBT)
 - 3MeV 고주파 4중극 가속장치 (RFQ)
 - 20 & 100MeV 선형 가속장치 (DTL)
 - 20MeV · 100MeV 빔라인 각 5기 (설계)
- ※ 구축 빔라인: 20MeV 1기, 100MeV 1기

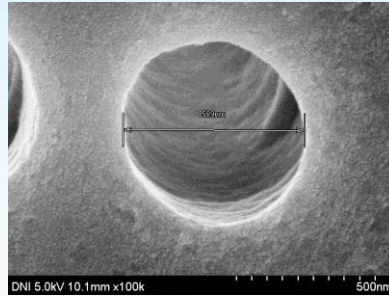
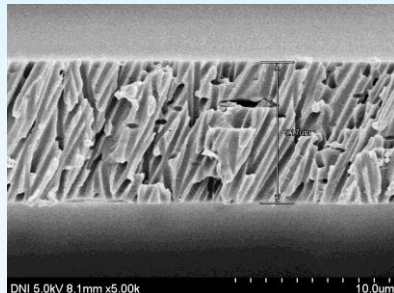
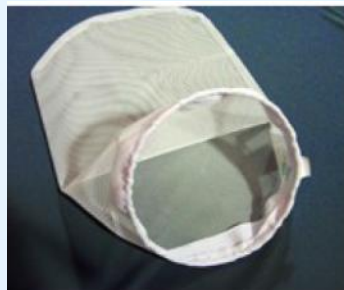


- 20MeV 표적실 (TR23)
- 100MeV 표적실 (TR103)



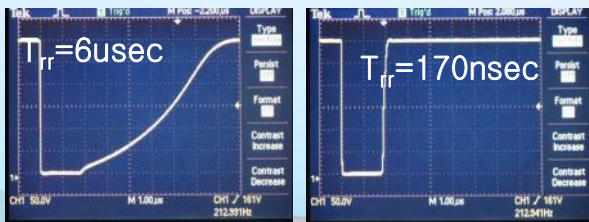
❖ 고에너지 (>40 MeV) 양성자 빔의 직접 이용

- 고에너지 (>40 MeV) 양성자빔의 직접 이용을 통한 신기술 개발 => 방사선기술 분야 발전
 - 우주 /항공 반도체 산업: 우주방사선 영향 평가/시험 장치 및 기술
 - 의료/생명/복자: 양성자 암치료 연구용 소동물 실증 장치
 - 원자력 산업 및 핵융합: 원자력 재료 손상 연구 등
 - 의료 및 산업용 소재: 고분자 멤브레인 등, 생명/의학, 나노/재료, 원자력, 기초과학 등)



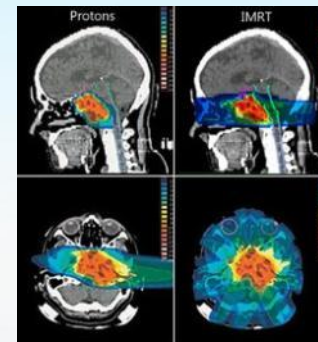
고분자 멤브레인 필터

- 1~200 μ m micron rating
- 50~95 filter efficiency depending on micron rating



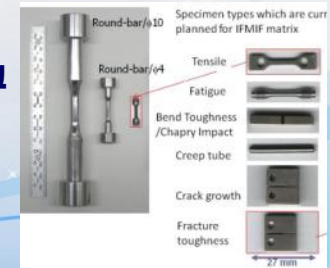
고속스위칭 전력반도체 제조기술

- Field Stop-Layer
- Minority Carrier Lifetime Control



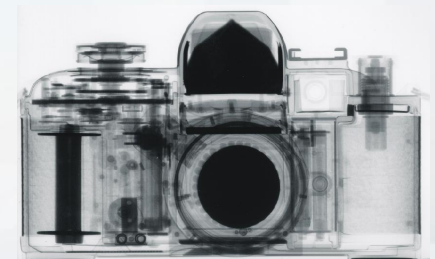
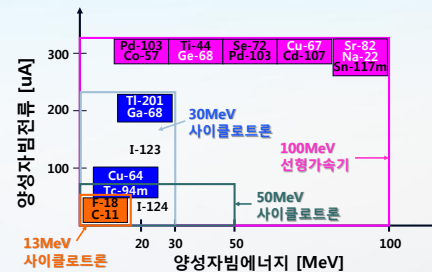
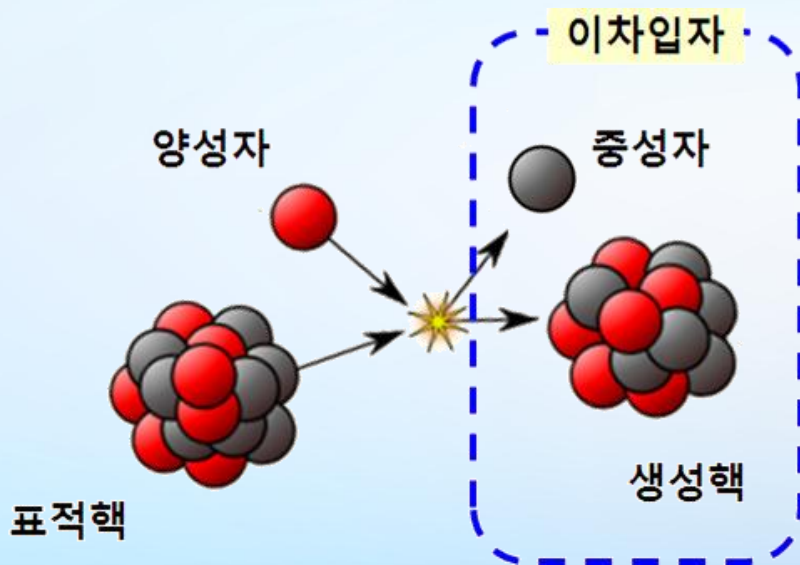
양성자 암치료 장치 및 기술

방사선 손상 연구

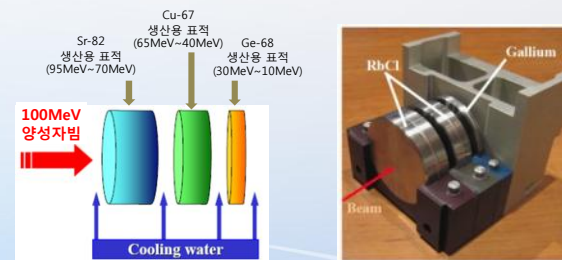


❖ 고에너지 양성자빔 조사에 의해 생성된 2차입자의 활용 연구

- 대형 시설 기반 2차 입자 생산 ⇒ 방사선원의 다원화 ⇒ 기초과학 및 방사선기술 발전에 기여
 - 고에너지 양성자빔을 표적에 조사하여 2차 입자 생성 ⇒ 의료, 산업, 기초과학 등 다양한 분야 활용
 - 열중성자: 중성자 이미징 (컴팩트 중성자원 표적 및 이미징 장치 개발 등)
 - 고속 중성자: 중성자 검출기 개발, 중성자 핵반응 단면적 측정 등
 - 동위원소: Cu-67, Sr-82 등 생산, Na-22 기반 PALS 등 이용 장치 및 기술 등
 - 동위원소빔: 베타 NMR 등 ($^8\text{Li}^+$ 등의 동위원소 빔 생성 표적 및 이용기술 개발)



중성자 이미징



동위원소 생산

희귀 RI 생산 및 연구용 빔라인

● 활용 분야

- RI 생산: Cu-67, Sr-82 등

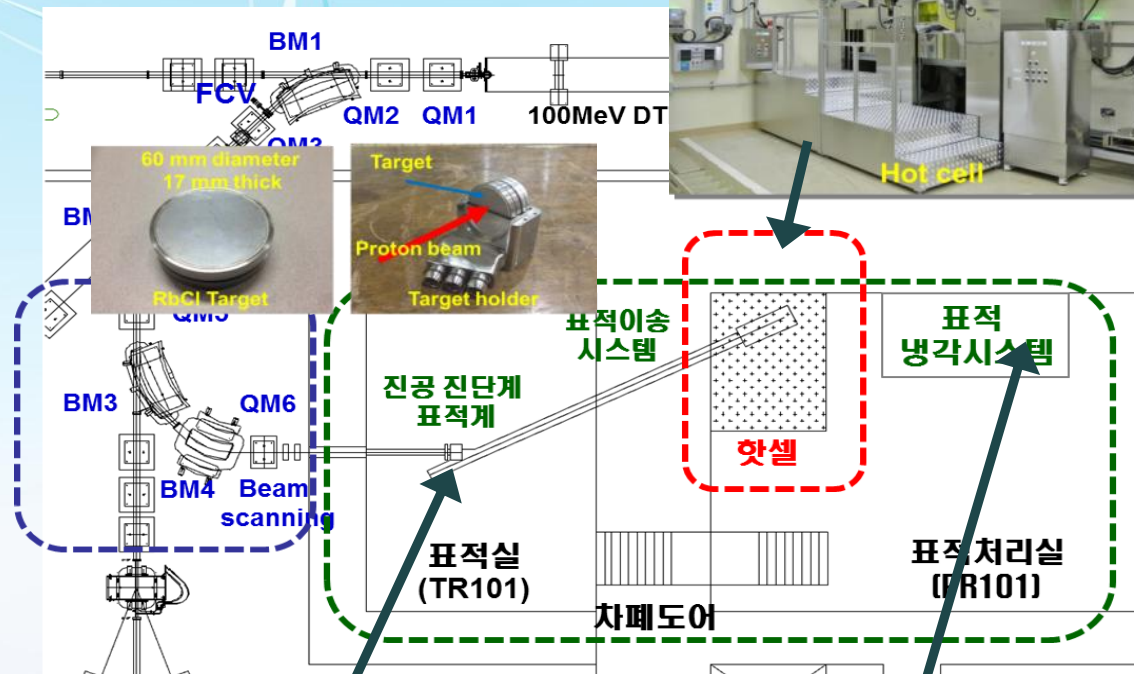
● 빔 특성

- 에너지: 100 MeV
- 최대빔파워: 30 kW @ 100MeV

● 추진 일정

- 구축 완료: '15. 12월
- 시설검사: 2016년 상반기

※ Cu-67: RI기반 신개념 치료기술 개발 플랫폼 구축사업



100MeV 빔라인



저선량 빔라인 (2017년 상반기 서비스 예정)

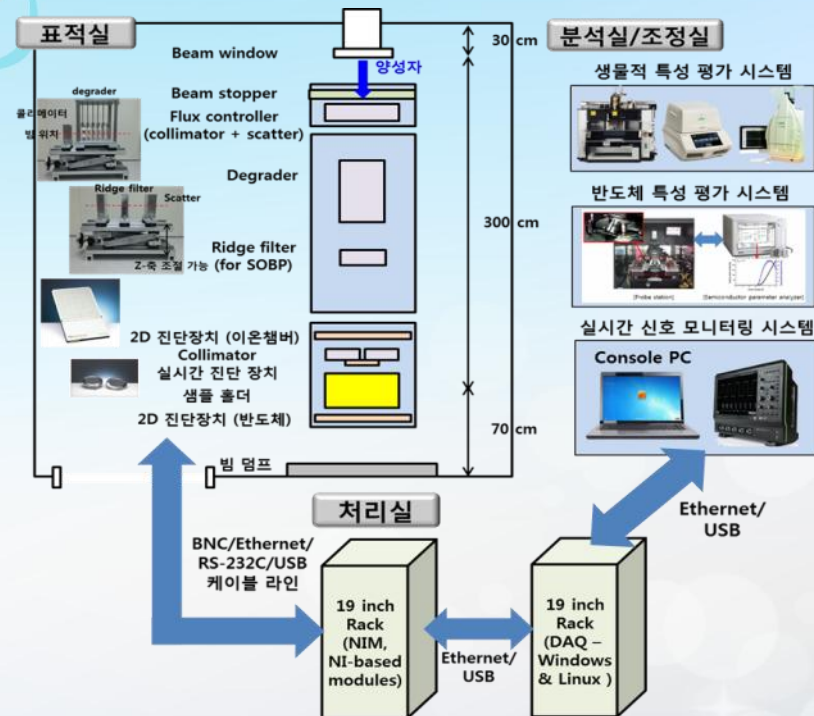
- 우주방사선, 바이오, 검출기 연구분야의 이용자 증가
- 저선량 실험의 분리 추진 필요

연구분야	에너지	선량	조사면적	균일도
우주방사선 (전자소자)	수 MeV ~200MeV	$10^4 \sim 10^8$ p/cm ² /sec	~cm-dia. (device/ chip covered area)	$\pm 10\%$ over area
생명/의학	~100MeV	$10^5 \sim 10^7$ p/cm ² /sec	10 cm x 10 cm	$< \pm 10\%$
검출기	~MeV	$< 10^6$ p/cm ² /sec	-	$< \pm 5\%$

저선량빔 제원

에너지	20 ~ 100 MeV
선량	$10^4 \sim 10^8$ p/cm ² @peak
피크 전류	최대 1.6 nA
평균 전류	최대 0.13 nA @ duty 8% (1.33 ms, 60 Hz)
조사 면적	최대 10 cm × 10 cm
균일도	$\leq \pm 10\%$

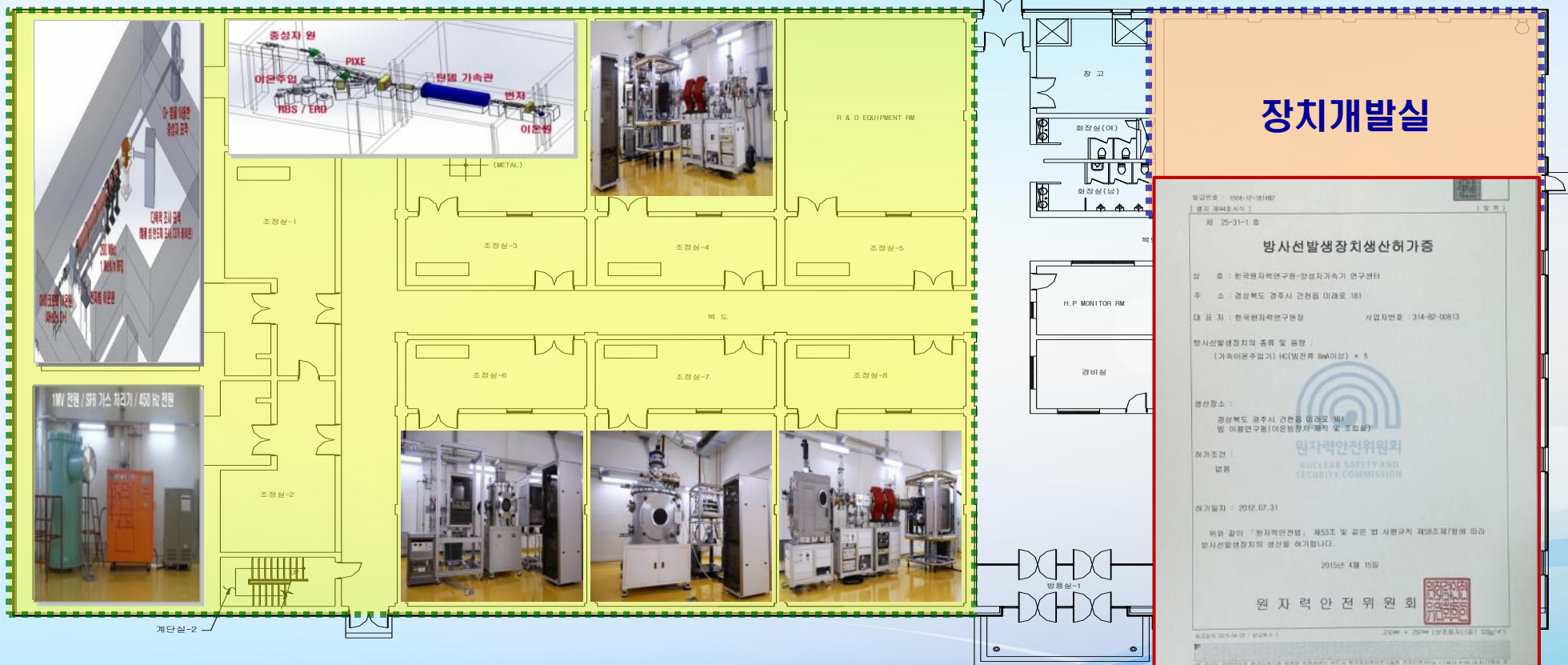
저선량 빔라인 구성도



- 표적실, 처리실, 분석실/조정실로 구성
- 표적실 : 빔 조사 실험
- 처리실 : 빔 조사를 통해 얻은 실시간 진단 및 측정 데이터 처리
- 분석실/조정실 : 빔 실험 제어 및 빔 조사 시료 분석

이온빔 장치 3기 운영 및 이온빔 장치 개발

- 기체, 금속 및 탄뎀 이온빔 장치를 이용한 빔 조사 서비스
- PIXE, RBS 등 이온빔 분석 서비스
- 표준 중성자원 제공
- 고에너지 이온빔 장치 및 이온원 개발



핵반응	중성자 생성	Deposited Heat (MeV / n)
T (d, n) (200keV)	8×10^{-5} n/d	2,500
W (e, n) (35MeV)	2×10^{-2} n/e	2,000
Be (d, n) (15MeV)	1×10^{-2} n/p	1,200
Fission (U-235)	1 n/fission	200
Pb spallation (1GeV)	20 n/p	20
Fusion (T,d)	1 n/fusion	3

Neutron Sources, Pergamon Press (1983)

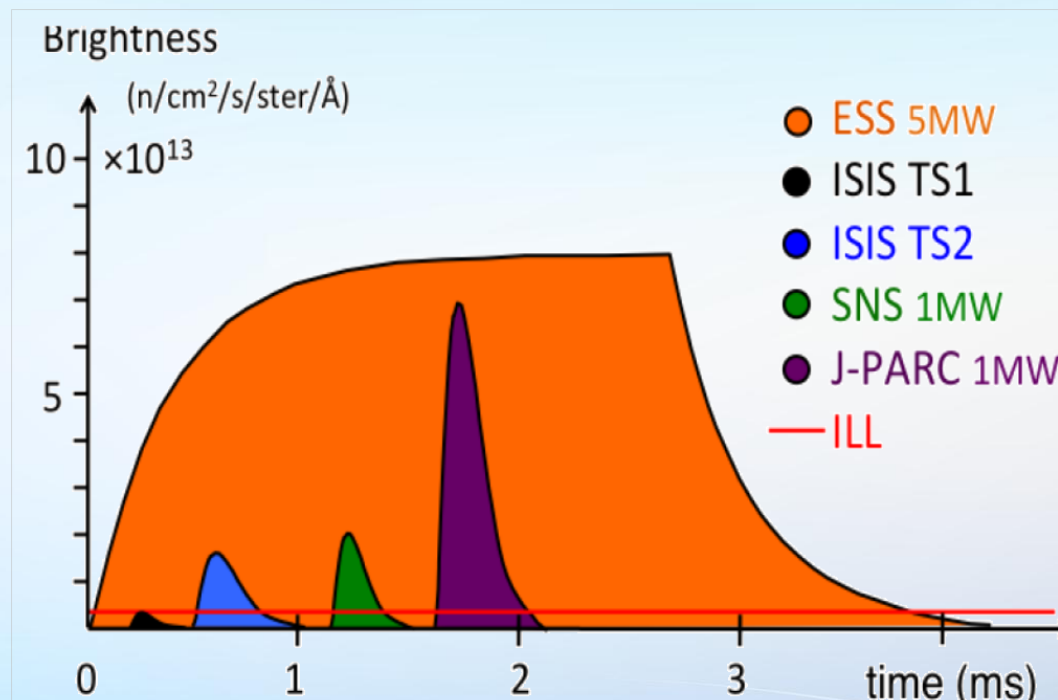
ILL (Institut Laue-Langevin) : 프랑스 연구로 (60 MW) 연속 중성자원

ISIS : 영국 파쇄 중성자원 (160 kW, 50 Hz)

SNS (Spallation Neutron Source) : 미국 파쇄 중성자원 (1.4 MW, 60Hz)

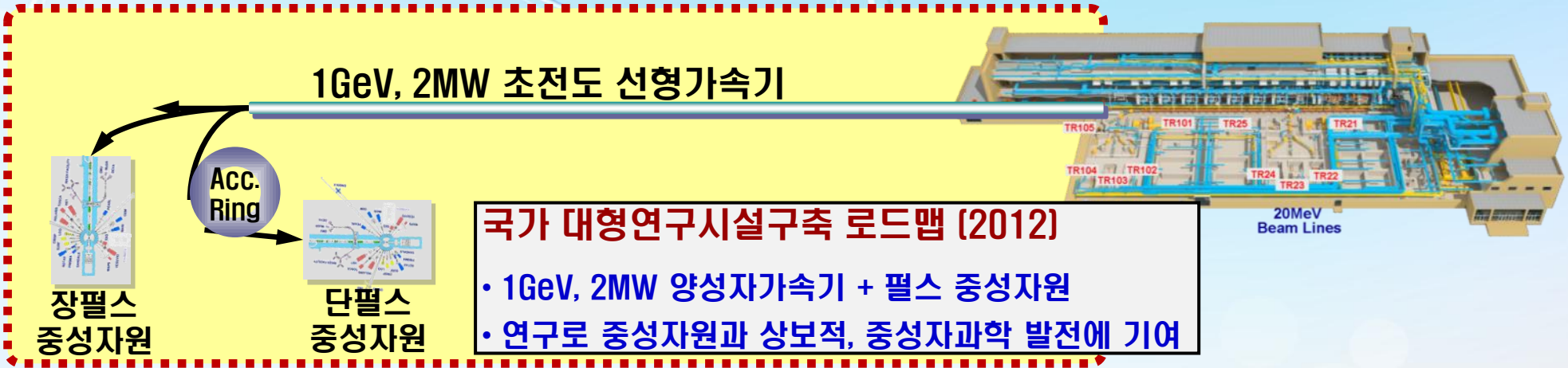
J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) : 일본 파쇄 중성자원 (1 MW, 25 Hz)

ESS (European Spallation Source) : 유럽 파쇄 중성자원 (5 MW, 14 Hz, 건설중)



펄스 중성자 장기 계획

❖ 1GeV, 2MW급 양성자가속기, 펄스형 중성자원 구축



확장 추진 계획	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	CDR	PFS	TDR	구축 (6년)						운영	

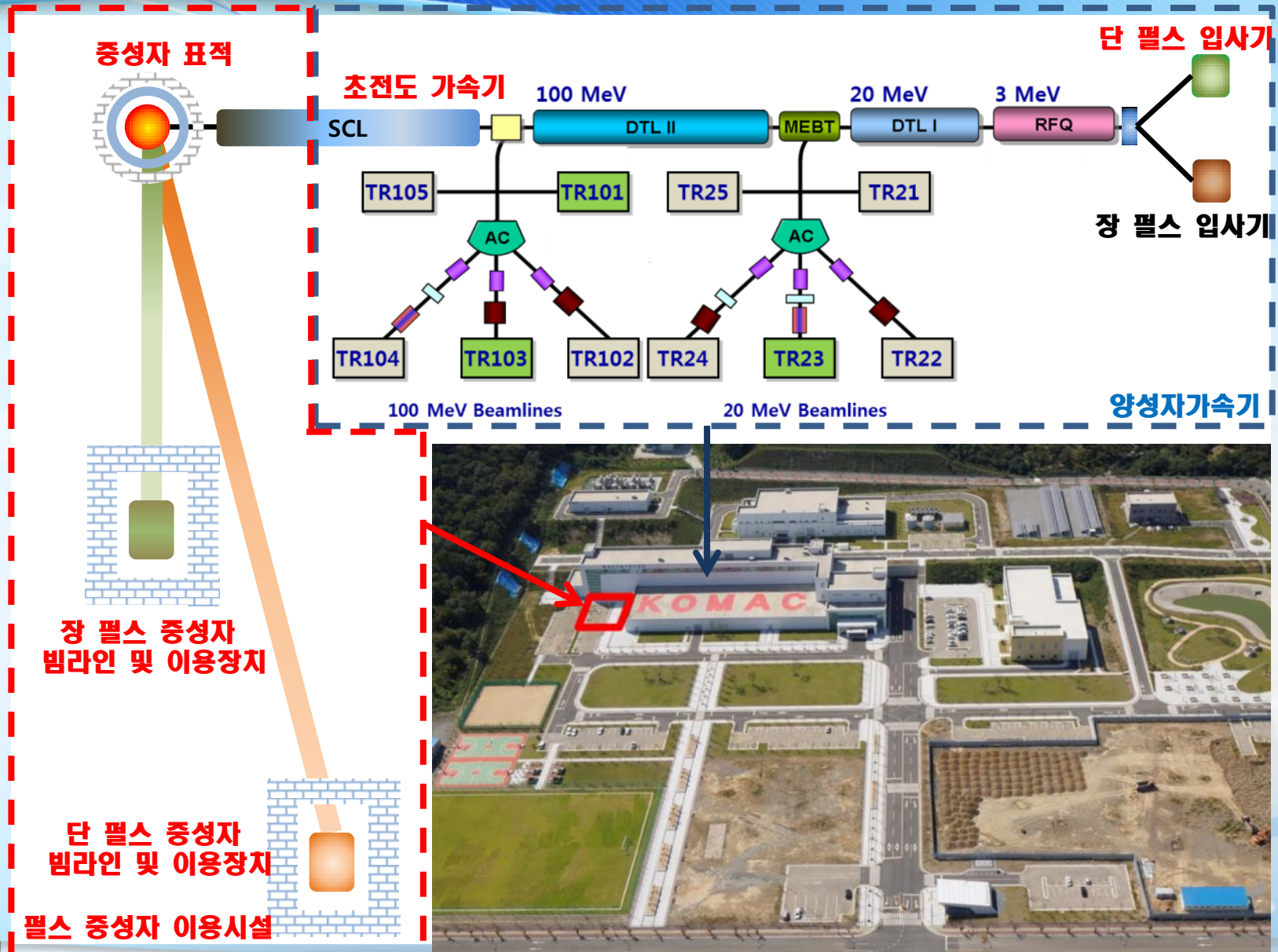
● 확장 사업 추진 방안

- 가속장치: 연구센터 자체 개발
- 표적계: MEGAPIE 국제공동연구 결과 활용 (SINQ)
- 중성자 이용시설: 하나로 연구인력과 협력

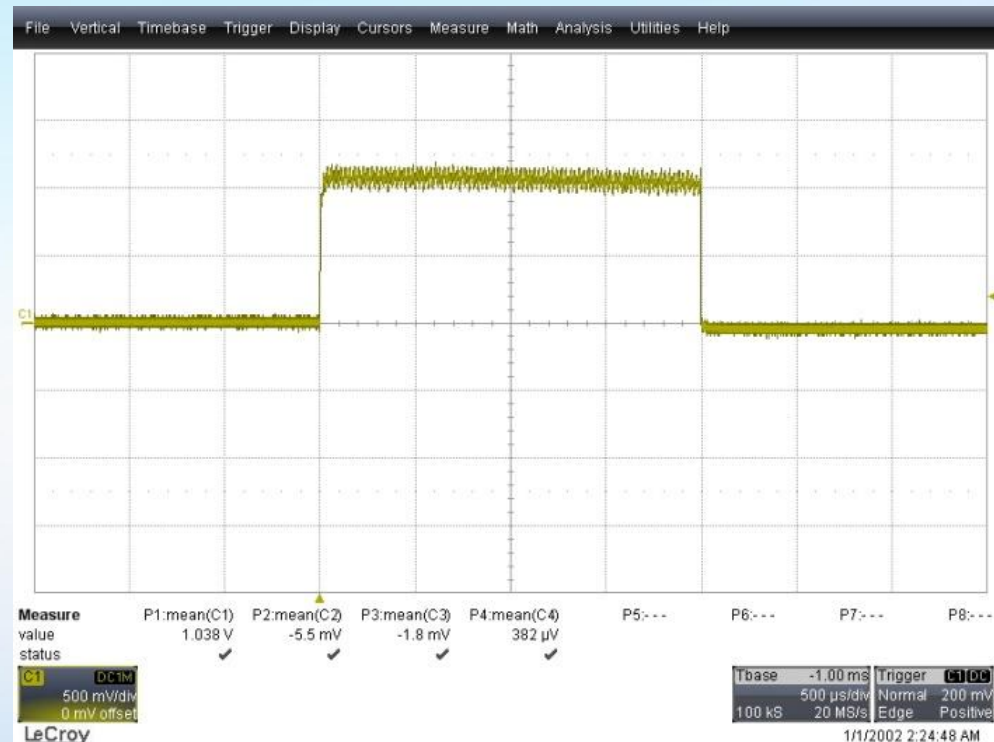
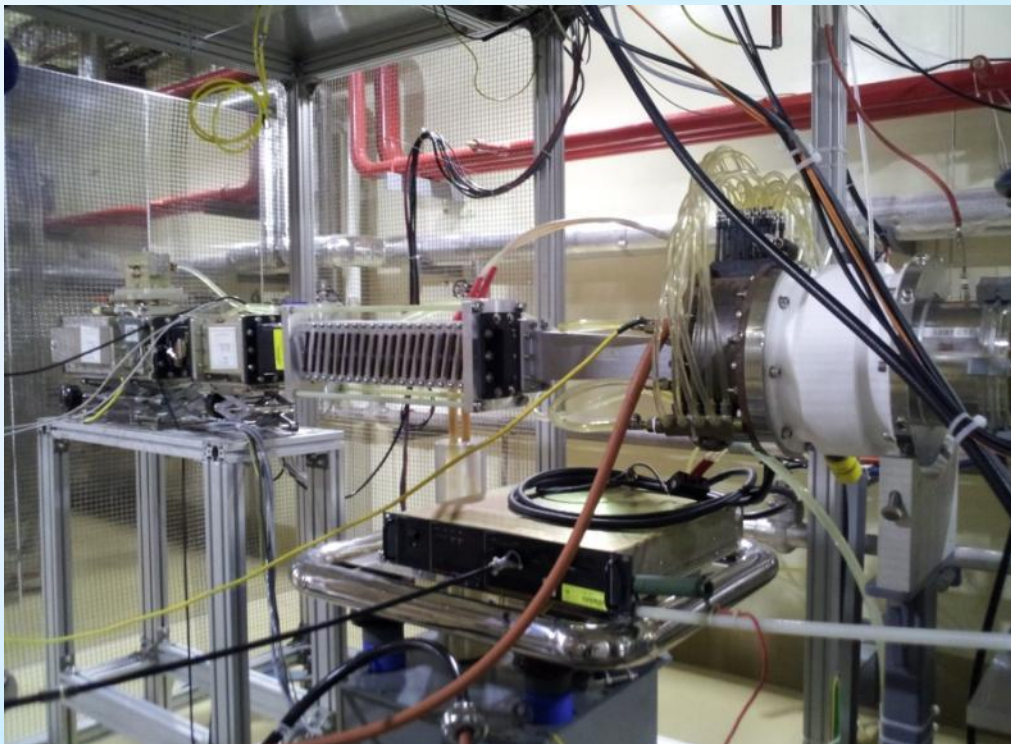
※ 초전도 가속장치 기술 및 사업부지 확보



양성자가속기 기반 1 kW급 펄스 중성자원 중기 계획



- 이온원: 양성자, 50 keV, 20mA, 2.5 ms, 120Hz (30% duty)
- 마이크로파 : 2.45 GHz, 1kW, 마그네트론
- 운전: 플라즈마 연속 운전, 인출 전원 펄싱



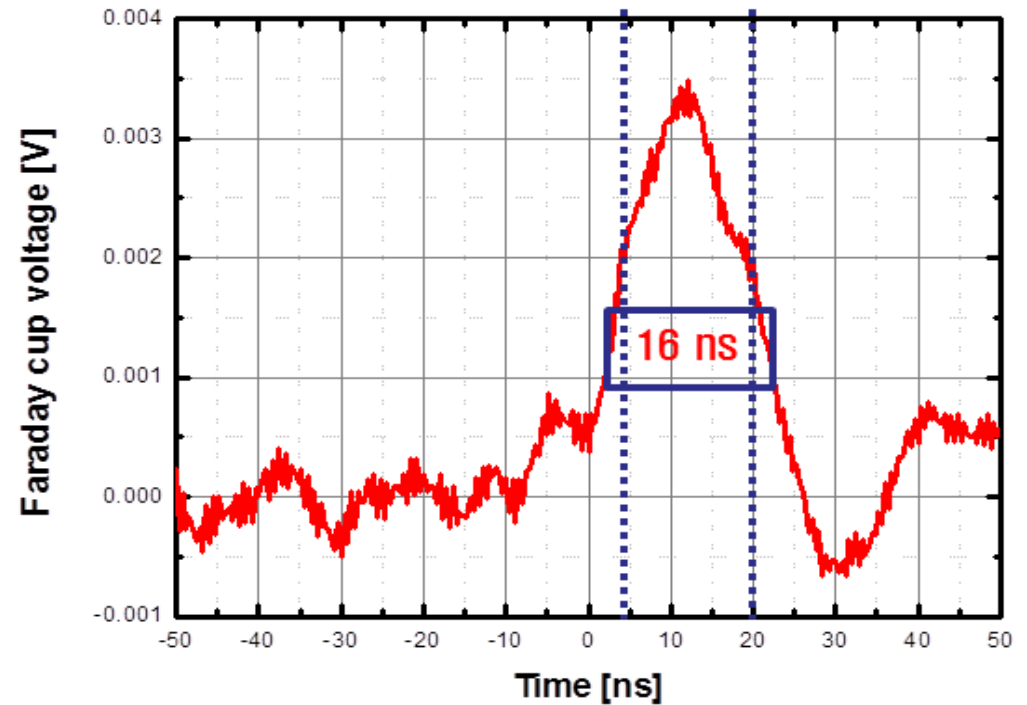
100 MeV 가속기에 설치된 마이크로파 이온원

인출빔 펄스 50 keV,
20 mA, 2 ms

- 이온원 + Multi-harmonic buncher + Deflector 로 구성
- 마이크로파 이온원 인출빔 → 16ns 단 펄스 빔 인출 실증 완료

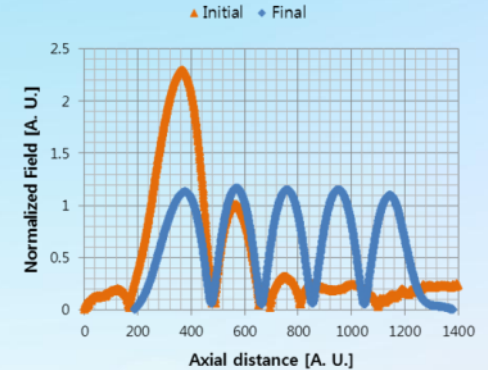
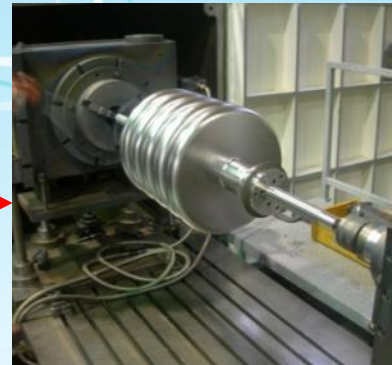
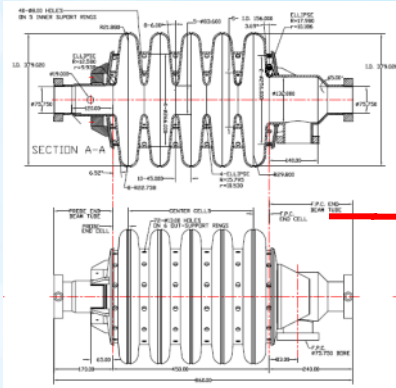


단 펄스빔 인출 테스트 벤치



단 펄스빔 인출 (16 ns)

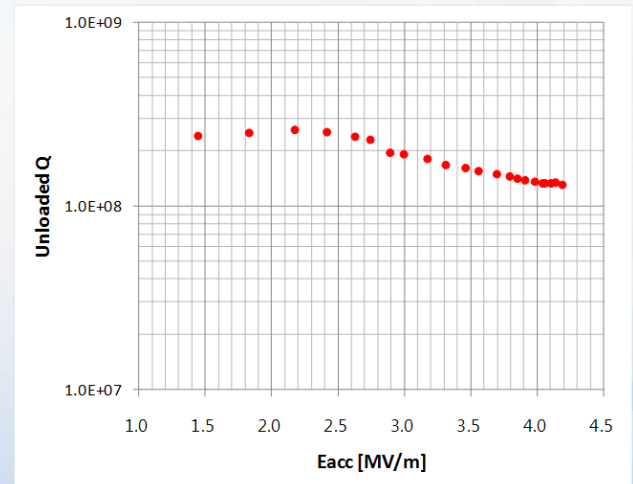
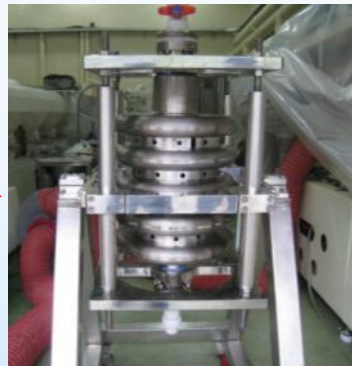
- 100 MeV 이후 부터 양성자를 가속시킬 수 있는 초전도 가속기 설계, 제작, 시험 기술 확보



Engineering Design Half Cell (Deep Drawing)

EB Welding

Field Flatness : < 2%



Unloaded Q : $2.9E8$ @ 4.2 K
Eacc : 4.2 MV/m

Field Flatness Tuning

Surface Treatment

Vertical Test

- RbCl 분말을 이용한 Sr-82 생성 표적 제작 공정 확립



RbCl 분말



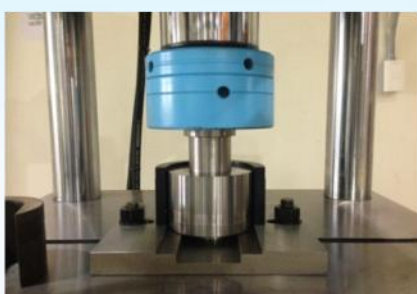
분쇄



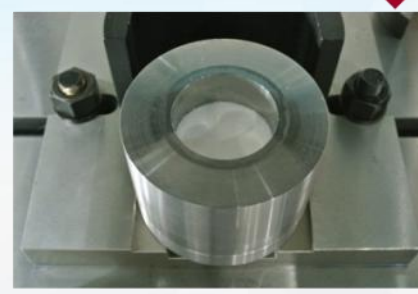
무게 측정



펠릿 완성
(직경 50mm, 두께 16mm)



압축 성형 (350 Mpa)



금형 내 분말 장입



STS316 캡슐내 장입



레이저 용접 후 표적 완성
(직경 60mm, 두께 16.6mm)

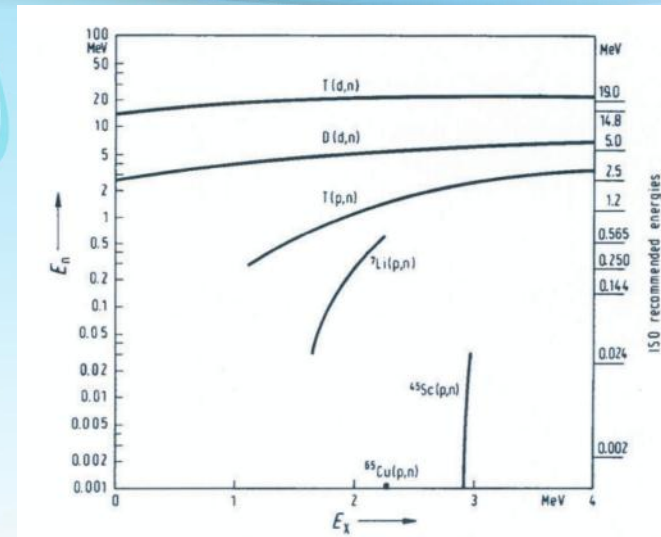
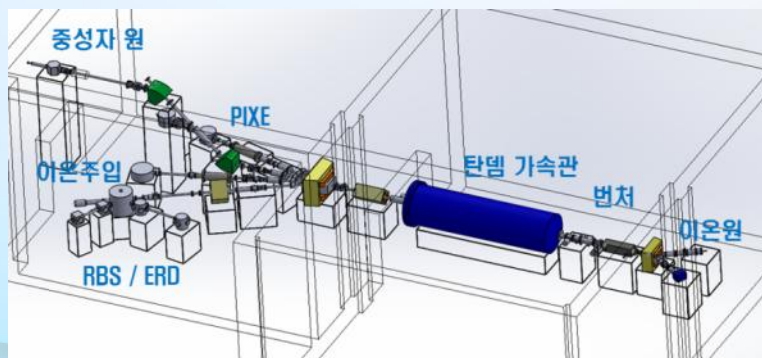


표적 홀더에 장착

표준 중성자 발생 시설



<표준 중성자 시설 사진@KOMAC>



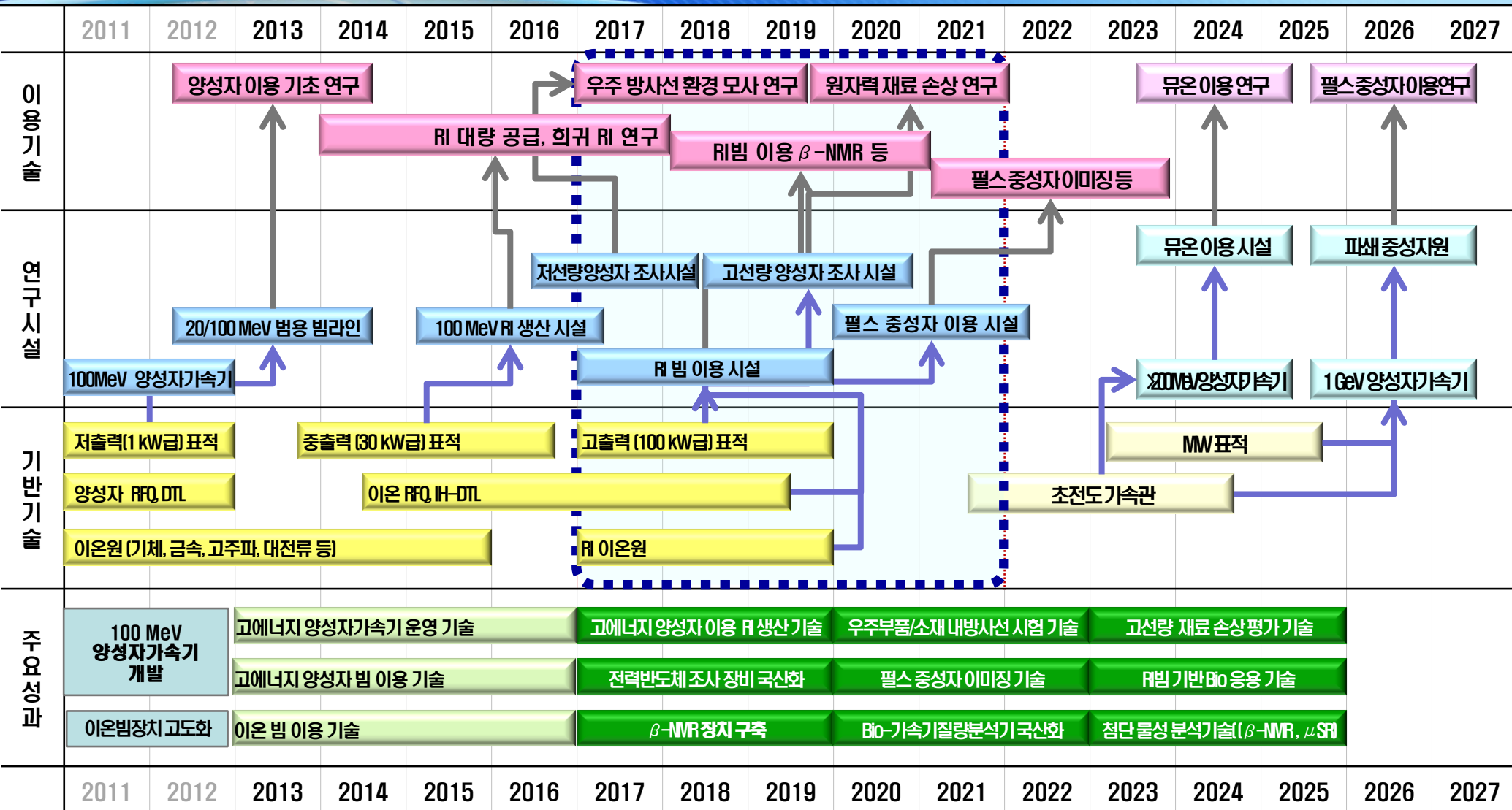
중성자 발생 반응 및 생성 에너지

Source Reaction	Target	Energy
${}^7\text{Li}(p,n), {}^7\text{Be}$	Solid (Li-metal)	144, 250, 565 keV
${}^3\text{H}(p,n), {}^3\text{He}$	TiT	2.5 MeV

계획된 중성자 발생 표적 및 생성 에너지

- 1.7 MV tandem 가속기
- 중성자: 10^7 n/str/s @ 0 degree, 빔반차: 1~2 ns

양성자가속기 로드맵



❖ 양성자가속기연구센터 운영 현황

- 양성자가속기 및 빔라인 2기 : 이용자 서비스 진행중
- 이온빔 장치 4기 (기체, 금속 및 탄뎀) : 이용자 서비스 진행중
- RI 생산/연구용 빔라인 구축 완료 및 저선량 빔라인 구축 중

❖ 중성자 기술 개발

- 장펄스 및 단펄스 입사기 기술
- 초전전 가속기 기술
- 10 kW급 양성자 표적 기술
- 탄뎀 가속기 기반 표준 중성자원을 이용한 중성자 계측 기술

❖ 펄스 중성자원 계획

- 중기 : 1 kW급 장펄스 및 단펄스 중성자원 및 실험 시설 구축
 - 주요 기술 (입사기, 표적, 초전도 가속기 등)검증
 - 펄스 중성자 이용 기술 개발
 - 펄스 중성자 이용자 육성
- 장기 : 2 MW급 장펄스 및 단펄스 중성자원

감사합니다.

