100 MeV 양성자가속기의 미래

DOI: 10.3938/PhiT.25.005

김 귀 영

Future of the KOMAC 100-MeV Proton Accelerator

Ky KIM

The 100-MeV proton accelerator at the KOMAC (Korea Multi-purpose Accelerator Complex) was successfully commissioned in July, 2013, and started operation as a national user facility providing users from a wide range of research fields with proton beams with only two beamlines (one for 20 MeV and the other for 100 MeV). This note reviews the philosophy behind and history of the project to develop the 100-MeV proton accelerator, as well as some goals of the project yet remain to be completed. Firstly, a long-awaited plan to implement the remaining beamlines, which is required to utilize the full performance of the 100-MeV proton accelerator so that it becomes a flagship research facility to lead science and technology, will be discussed in detail. Secondly, an ambitious plan to upgrade the 100-MeV proton accelerator to a 1-GeV, 2-MW facility to drive pulsed neutron sources, which will help researchers access unexplored spatial-temporal domain, will be presented.

서론

현재 운용 중이거나 개발하고자 하는 양성자가속기는 크게 세 가지 부류로 나눌 수 있다. 첫 번째 부류는 ‘에너지 프론티어형(energy frontier)’으로 고에너지로 가속한 양성자를 충돌시켜 우주의 궁극적 구성체, 우주의 탄생과 진화 등을 밝히고자 하는 고에너지 물리학 또는 핵물리학 연구에 활용된다. 두 번째 부류는 ‘인텐시티 프론티어형(intensity frontier)’으로 대량으로 가속한 양성자를 표적과 충돌시켜 중성자, 뮤온, 중성미자, 중간자, 동위원소 등 다양한 2차입자(secondary particles)를 생성하여 고에너지 물리학 또는 핵물리학 연구는 물론, 응집물리학, 재료과학, 화학, 생명과학, 에너지, 의학 및 산업분야 등의 연구개발에 활용된다. 마지막으로 ‘실용형’으로 암치료 또는 의료 및 산업용 동위원소 생산 등에 활용되고 있다.

저자약력

김귀영 박사는 고려대학교에서 입자물리학으로 박사학위(1997년)를 받았으며 2005년부터 한국원자력연구원 양성자가속기연구센터에서 책임연구원으로 재직 중이다.(ky@kaeri.re.kr)

Table 1. High-intensity proton accelerators in service or under development.

시설명 (국가)	에너지	평균 빔전류	빔파워	활용 입자	구축 연도
SNS (미국)	1 GeV	1.0 mA	1 MW	중성자	2006
JSNS (일본)	3 GeV	0.3 mA	1 MW	중성자, 뮤온 등	2008
ISIS (영국)	800 MeV	0.3 mA	240 kW	중성자, 뮤온 등	1985
CSNS (중국)	1.6 GeV	0.3 mA	500 kW	중성자, 뮤온 등	2018 (예정)
ESS (유럽연합)	2.5 GeV	2.0 mA	5 MW	중성자, 뮤온 등	2020 (예정)
양성자가속기	100 MeV	1.6 mA	160 kW	양성자 등	2012

이처럼 양성자가속기는 그 활용 분야가 다양하여, 표 1에 보인 바와 같이 과학기술 선진국은 최근 들어 차세대 산업기술을 주도하기 위하여 재료과학, 생명과학, 의학, 에너지, 우주 등의 분야의 연구개발을 위하여 인센시티 프론티어형 양성자가속기를 경쟁적으로 개발하여 활용하기 시작하였다. 차세대 산업기술 연구개발에 이용되는 양성자가속기의 특징은 양성자를 이용하여 중성자, 뮤온 등의 2차입자를 생성하여 이용하는 것으로 100 MeV 양성자가속기와 큰 차이를 보이고 있다.

이처럼 양성자가속기는 그 활용 분야가 다양하여, 표 1에 보인 바와 같이 과학기술 선진국은 최근 들어 차세대 산업기술을 주도하기 위하여 재료과학, 생명과학, 의학, 에너지, 우주 등의 분야의 연구개발을 위하여 인센시티 프론티어형 양성자가속기를 경쟁적으로 개발하여 활용하기 시작하였다. 차세대 산업기술 연구개발에 이용되는 양성자가속기의 특징은 양성자를 이용하여 중성자, 뮤온 등의 2차입자를 생성하여 이용하는 것으로 100 MeV 양성자가속기와 큰 차이를 보이고 있다.

100 MeV 양성자가속기는 2013년도 시운전과 시범운영기를 거쳐, 2014년부터 정상운전을 시작하여 우리나라 과학기술사에 한 획을 장식한 ‘인센시티 프론티어형’으로 양성자뿐만 아니라 이를 이용하여 생성할 수 있는 2차입자인 중성자, 동위원소 등의 이용을 고려하여 설계하고 개발하였다. 그러나 사업 착수 시 계획하였던 10기의 빔라인(20 MeV 및 100 MeV 빔

Table 2. Characteristics and applicabilities of the KOMAC 100 MeV proton accelerator.

구분	주요 특성	(20/100 MeV)	활용성
인출 빔 특성	High-intensity (mA)	4.8 / 1.6	산업적 활용(RI, 반도체, 나노입자 등)
	High-power (kW)	96 / 160	2차 입자 대량 생성 (중성자, RI 등)
	Low-emittance (π -mm-mrad)	0.25	펜슬빔 (1~2mm)
빔 조절 특성	빔 전류 조절 (mA)	0.01 ~ 1.6	다양한 시료 처리 (재료, 생명, 우주 등)
	빔 에너지 조절 (MeV)	3 ~ 100	조사 깊이, 반응 단면적 조절 등
	빔 조사 영역 조절 (mm ϕ)	1 ~ 300	대면적 조사(반도체 웨이퍼 등)

라인 각 5기) 중 현재 2기(20 MeV 및 100 MeV 각 1기)만 구축·운영하여 이용자가 요구하는 빔 타임(beam time)을 충분히 제공하지 못하여 그 이용 연구개발에 제한이 따르고 있으나, 응집물리, 신소재, 나노, 생명, 의료, 에너지, 환경, 우주 방사선환경, 원자력, 기초과학 등 다양한 분야의 기초 및 융복합 연구개발에 활용되기 시작하였다.

100 MeV 양성자가속기가 보유한 잠재 성능을 효과적이고 효율적으로 활용하기 위하여 각 이용연구 분야에 최적화된 빔 라인을 조속히 구축하여 이용자가 창조적인 연구개발에 활용할 수 있도록 하고, 더 나아가서 과학기술 선진국과 경쟁할 수 있는 명실상부한 국가 대형연구시설로서 자리매김하기 위해서는 100 MeV 양성자가속기의 업그레이드 계획에 대한 본격적인 논의를 시작할 시기가 되었다. 본 특집은 100 MeV 양성자가속기 개발 사업을 추진하게 된 배경과 사업 착수 당시의 계획을 되돌아보고, 사업 완료 시 구축하지 못한 빔라인의 구축 계획과 에너지 업그레이드에 대한 논의를 하고자 한다.

100 MeV 양성자가속기 개발

국내에서 인센티브 프론티어형 양성자가속기 개발을 검토하기 시작한 것은 1990년대 초반이다. 당시 파쇄 중성자원(SNS, spallation neutron source), 가속기 구동 미임계 원자로(ADS, accelerator driven system), 가속기 기반 핵변환 기술(ADTT, accelerator driven transmutation technology) 등에 관심이 고조되어, GeV급 대용량 양성자가속기 개발에 대한 심도 있는 검토와 논의가 진행되어 한국형 양성자가속기(KOMAC, Korea multi-purpose accelerator complex) 개발 프로젝트의 개념이 수립되었으며 오늘날 양성자가속기연구센터의 영문명의 유래가 되었다.^[1]

KOMAC 개발 프로젝트를 추진하기 위해 대용량 양성자가속

Fig. 1. Application fields of proton accelerators.

기 설계, 기술적 제작 능력, 활용 방안, 개발 타당성 등에 대한 심도 있는 검토 및 보완과 실행 가능성을 위한 원리실증 연구 등의 선행연구가 수행되었고. 그 결과는 1 GeV, 20 mA 급 선형 양성자가속기에 기반한 파쇄 중성자원을 개발하고, 부수적으로 3 MeV, 100 MeV, 250 MeV 양성자 빔을 이용한 신소재 개발, 동위원소 개발 및 생산, 암치료 등 다목적으로 활용하기 위한 'KOMAC 개발 계획'으로 집약되었다.^[2] KOMAC 개발 계획은 1999년 '21세기 프론티어 연구개발사업 후보사업'의 하나로 선정되었으며, 2000년도에 후보사업 타당성검토와 세부기획 연구를 통하여 사업 규모, 목표 등을 보완하여 '양성자기반공학기술개발사업'으로 재정립되었으며, 2002년부터 '21세기 프론티어 연구개발사업'으로 착수하게 되었다.^[3]

양성자기반공학기술개발사업은 나노, 신소재, 바이오, 에너지, 환경, 우주, 의료 등 국가 전략과학기술 분야의 연구개발에 활용할 국가 대형 기반연구시설로서 100 MeV, 20 mA 양성자가속기를 개발하여 '양성자가속기연구센터'를 건설하고자 추진하였다. 100 MeV 양성자가속기는 표 2에 보인 바와 같이 평균 빔 전류가 mA급인 대전류(high-intensity), 빔 파워가 160 kW인 고출력(High-power), 그리고 빔 에미턴스가 0.25 π -mm-mrad 수준인 Low-emittance의 특성을 갖추어 설계하였

REFERENCES

- [1] B. H. Choi, "Introduction to Accelerator and Transmutation Programs at KAERI", AOT-1 Seminar at LANL (1995).
- [2] T. Y. Um, B. H. Choi and C. K. Park, "Development Plan and Conceptual Design of Proton Accelerators for Nuclear Industries" (1997).
- [3] KISTEP, Division of R&D Planning & Support, "21C Frontier R&D Program - Revisited Detailed Plans and Feasibility Study Reports of Candidate Projects to be Launched in 2001" (2000).

Fig. 2. Layout of the KOMAC 100 MeV proton accelerator and beamlines.

다. 또한 다양한 연구개발 분야의 이용자의 빔 요구 조건을 충족시킬 수 있도록 탄력적인 빔 조절 특성을 갖도록 설계하여 빔 전류는 0.01 ~ 1.6 mA, 빔 에너지는 3~100 MeV, 그리고 빔 조사 면적은 1 ~ 300 mm ϕ 영역에서 조절 가능하도록 하여, 그림 1에 나타난 바와 같이 다양한 연구 분야에서 활용이 가능하도록 설계하였다.

100 MeV 양성자가속기는 그림 2에 보인 바와 같이 50 keV 입사기(injector), 3 MeV 고주파 4중극 가속장치(RFQ), 20 MeV 선형 가속장치(DTL-I)와 100 MeV 선형 가속장치(DTL-II)로 구성하였다. 양성자 빔을 이용하는 연구개발을 지원하기 위한 빔라인은 잠재적 이용자를 대상으로 한 이용연구 수요 조사와 연구개발 동향을 분석하여 각 분야별로 요구되는 최적의 양성자 빔을 효과적으로 제공하고, 양성자가속기의 활용도를 극대화하기 위하여 20 MeV 빔라인 5기와 100 MeV 빔라인 5기를 구축하도록 설계하였다. 특히, 20 MeV 빔라인 3기(TR22, TR23, TR24)와 100 MeV 빔라인 3기(TR102, TR103, TR104)는 빔 분배 전자석을 이용하여 시분할 방식으로 빔을 순차적으로 제공할 수 있도록 설계하여 개발을 추진하였다.^[4]

양성자기반과학기술개발사업은 추진 과정에서 '중저준위 방사성폐기물처리장 부지선정사업'과 연계 추진에 따른 사업 지연 등의 난관을 극복하고 영향을 최소화하여 당초 계획하였던 빔라인 10기 중 2기(20 MeV 및 100 MeV 각 1기)만 구축하고, 8기는 양성자가속기를 운영하며 순차적으로 구축하도록 계획을 조정하여, 양성자가속기 개발 사업을 2012년 12월 완료하였다.^[5]

100 MeV 양성자가속기는 2013년 상반기에 시운전을 완료하고 그해 7월부터 이용자에게 개방되어 연구개발을 지원하기 위한 운영을 시작하여 우리나라의 과학기술사에 한 획을 장식하게 되었다. 양성자기반과학기술개발사업의 최대 성과는 세계적인 수준의 '인센시티 프론티어형' 양성자가속기를 구성하는 핵심 장치인 입사기, RFQ, DTL 등을 국내 연구기관과 산업체가 협력하여 개발하고 실증을 하였다는 점이다. 이는 파쇄중성자원, 고에너지물리학 또는 핵물리학 연구에 활용되는 MW급 양

성자가속기 개발에 필요한 기반기술과 경험을 확보하였음을 의미한다. 그러나 사업의 본래 의도와는 다르게 타 국책사업과 연계되어 추진되는 우여곡절로 인하여 당초 설계한 빔라인 10기 중 2기만 구축하고 사업을 '미완료 상태로 완료'하여 100 MeV 양성자가속기의 고유한 특성을 활용한 창의적인 연구를 지원하는 데 제약을 초래하게 된 부작용은 극복해야 할 숙제로 남아 있다. 100 MeV 양성자가속기의 개발 철학을 계승하고 활용도를 제고하기 위해서는 미 구축 상태로 남아 있는 빔라인을 조기에 구축하여 이용자가 요구하는 조건의 양성자 빔을 실시간으로 제공하여 이용연구를 활성화하고 우수한 연구성과를 창출할 수 있도록 할 필요가 있다. 또한, 과학기술 선진국과의 연구개발 영역(또는 과학기술 영토) 확장 경쟁에 필요한 교두보 확보를 위하여 100 MeV 양성자가속기의 업그레이드 방안에 대한 심도 있는 논의를 시작할 때이다.

100 MeV 양성자가속기 빔라인 확충 계획

100 MeV 양성자가속기의 빔라인은 가속기가 제공하는 양성자 빔의 high-intensity, high-power, low-emittance 특성을 효과적으로 활용하여 창의적인 연구개발을 지원하기 위하여 이용연구 수요, 연구개발 동향, 국가 전략과학기술 연구개발 계획 등을 고려하여 설계하였다. 이용연구 수요 및 연구개발 동향에 대한 조사와 분석은 100 MeV 양성자가속기 개발 사업을 추진하는 과정에서 총 4회(2000년, 2003년, 2007년, 2012년)를 실시하였으며, 2012년도의 수요조사에서는 총 139건의 이용연구 제안서를 접수하였으며, 연구 분야별로는 생명의료 26건(19%), 재료나노 39건(28%), 기초과학 34건(25%), 우주항공 14건(10%), 에너지 4건(3%), 원자력 13건(9%), 기타 10건(7%)이었다. 이용연구 제안서에서 요구하는 양성자 빔의 조건(에너지, 전류, 반복률, 조사량 등)과 시편 또는 시료의 특성(고체, 액체, 분말, 연성재료 등)을 고려하여 빔라인을 이용분야별로 구분하여 그림 3과 같이 구성·배치하였다.

100 MeV 양성자가속기의 빔라인의 설계 특성을 살펴보면 ① 기초 및 탐색연구용 범용 빔라인, ② 대량의 양성자를 요구하는 high-intensity 빔라인, ③ 2차 입자(중성자, 동위원소 등)를 활용하기 위한 high-power 빔라인, ④ 국소적으로 집중한 펄스빔을 활용하기 위한 high-brightness 빔라인, 그리고 ⑤ 저전량의 양성자 빔을 장시간 활용하기 위한 빔라인 등으로

REFERENCES

- [4] K. Y. Kim, Y.-S. Cho, J. Y. Kim, K. R. Kim and B.-H. Choi, J. Korean Phys. Soc. **56**, 1936 (2010).
- [5] K. R. Kim, K. Y. Kim, Y.-S. Cho, J. Y. Kim, J.-W. Park and B.-H. Choi, J. Korean Phys. Soc. **59**, 521 (2011).

Fig. 3. Layout of the KOMAC 100 MeV proton accelerator and beamlines installed in the accelerator building.

Table 3. Designed characteristics and nominal application fields of beamlines of the KOMAC 100 MeV proton accelerator.

빔라인		평균 빔전류	빔 반복률	빔 파워	활용분야
20 MeV 빔라인	TR21	600 μ A	60 Hz	12 kW	중성자원
	TR22	60 μ A	15 Hz	1.2 kW	반도체
	TR23	600 μ A	30 Hz	12 kW	기초·탐색연구
	TR24	60 μ A	15 Hz	1.2 kW	생명·의료
	TR25	1.2 mA	60 Hz	24 kW	원자력재료
100 MeV 빔라인	TR101	600 μ A	60 Hz	60 kW	동위원소
	TR102	10 μ A	7.5 Hz	1 kW	우주방사선환경
	TR103	300 μ A	15 Hz	30 kW	기초·탐색연구
	TR104	60 μ A	7.5 Hz	6 kW	생명·의료
	TR105	1.6 mA	60 Hz	160 kW	2차 입자원

구분할 수 있다. 각 빔라인이 제공할 수 있는 빔의 특성을 나타내는 빔 전류, 빔 반복률, 빔 파워의 최대치와 주요 활용분야는 표 3과 같이 요약할 수 있고, 각 빔라인의 빔 파라미터는 최대치를 초과하지 않는 범위에서 이용자의 요구조건에 따라 조절할 수 있도록 설계하였다.

100 MeV 양성자가속기의 빔라인 확충 계획은 이용연구 수요와 파급효과 등을 조사 분석하여 수차례 보완되었으며, 가장 최근에는 2013년도에 양성자가속기이용자협의회가 주도하여 100 MeV 양성자가속기 이용연구 현황과 성과, 이용연구 동향과 전망 등을 종합적으로 고려하여 검토·보완하였다. 양성자가속기이용자협의회는 그림 4와 같이 2015년도부터 2023년도까지 9년간 100 MeV 양성자가속기 빔라인 8기를 연차적으로 동위원소 개발·생산용 빔라인(TR101, 100 MeV), 우주방사선환경 연구용 빔라인(TR102, 100 MeV), 열 및 열외중성자(thermal/epi-thermal neutron) 이용연구 빔라인(TR22, 20 MeV), 생명·의료 분야 연구용 빔라인(TR104, 100 MeV), 반도체 개발·연구용 빔라인(TR21, 20 MeV), 생명·의료 분야 연구용 빔라인(TR24, 20 MeV), 2차 입자원용 빔라인(TR105, 100 MeV) 그리고 원자력재료 연구·개발용 빔라인(TR25, 20 MeV)의 순으로 구축하여 이용연구를 지원하고 활용분야를 확대하는 계획을 제시하였다.^[6]

양성자가속기이용자협의회가 제시한 빔라인 구축 계획은 양

Fig. 4. Installation plan of beamlines of the KOMAC 100 MeV proton accelerator.

성자 빔의 활용분야를 다변화시켰으며, 2차 입자(중성자, 동위원소 등)를 이용한 분석연구 시설의 확보 필요성을 강조하고 순위를 앞당겼다는 것이다. 계획한 빔라인을 모두 구축하면 100 MeV 양성자가속기의 설계 성능을 최대한 효과적으로 활용할 수 있는 세계 최고 수준의 양성자 이용 연구·개발 시설이 될 것이다. 구축 계획이 제시한 순서에 따라 각 빔라인의 특성과 활용 분야는 아래와 같이 정리할 수 있다.

- TR101: 양성자를 이용한 동위원소 개발과 생산용 빔라인으로 빔에너지 33~100 MeV, 빔전류 600 μ A, 최대 빔파워 60 kW이며, 조사면적은 50~100 mm ϕ 로 빔전류 밀도가 약 75~300 nA/mm 2 인 고선량 빔라인으로 설계되었다. 특히, 다양한 종류의 동위원소를 동시에 생산할 수 있도록 다른 핵종으로 구성된 다층 구조의 표적을 개발하고 있다. 우선적으로 개발하여 생산하고자 하는 동위원소는 의료계에서 진단용으로 이용하는 양전자 방출(positron emitter) 핵종인 ^{67}Cu , ^{82}Sr , ^{22}Na 등이다. TR101 빔라인은 2015년 말 현재 구축을 완료하였으며, 2016년 상반기 시운전을 완료하고, 하반기부터 운영하여 목표로 하고 있는 동위원소를 시험적으로 생산하여 이론적인 생산 수율과 비교연구를 통하여 최적화할 계획이다.

- TR102: 양성자를 이용하여 우주방사선환경 모사시험시설을 구축하여 우주방사선에 의한 위성 부품·소자에 대한 영향평가, 특성시험 등을 연구하고, 고에너지 물리학 또는 핵물리학 연구용 입자검출기 특성 평가, 내방사선 시험 등에 활용하기 위한 빔라인으로 빔에너지가 20~100 MeV, 빔전류 10 μ A로 최대 빔파워는 1 kW이며, 조사면적은 최대 300 mm ϕ 로 빔전류 밀도가 약 0.15 nA/mm 2 인 저선량 빔라인으로 설계되었다. 특히, 실시간 데이터 획득시스템(on-line DAQ)을 구축하여 우주방사선환경 모사시험과 검출기 특성 평가 등을 위한 연구를 실시간으로 수행할 수 있는 빔라인이다. TR102는 2016년도에

REFERENCES

- [6] KOPUA(Korea Proton Users Association), "Review of Beamline Installation Plan of the KOMAC 100 MeV Proton Accelerator" (2013).

개발 구축하여, 2017년도 상반기 시운전을 완료하고, 하반기부터 운영하여 우주, 고에너지물리학 및 핵물리학 분야의 이용자의 연구개발을 지원할 계획이다.

• TR21: 양성자를 이용하여 열중성자(thermal neutron) 또는 열외중성자(epi-thermal neutron)를 생성하여 활용하기 위한 빔라인으로 빔에너지가 3~20 MeV, 빔전류 600 μ A, 최대 빔파워는 12 kW이며, 조사면적은 최대 100 mm ϕ 로 빔전류 밀도가 약 75 nA/mm²로 설계되었다. 펄스폭 0.1~2.0 ms, 최대 반복률 120 Hz인 양성자 빔으로 ⁷Li(p,n)⁷Be, ⁹Be(p,n)⁹B 등의 반응으로 펄스 중성자 빔(선속 $\sim 2.4 \times 10^{13}$ n/mA/s 수준)을 발생시켜 중성자 이미징(neutron imaging), BNCT(borane neutron capture therapy) 등의 연구에 활용할 계획이다. 펄스 중성자 이미징은 소재·부품의 비파괴 검사, 물질의 조성 성분, 결정성 등의 분석이 가능하여 연료전지, 리튬전지, 문화재, 복합물질 검사, 기계 구성 부품의 피로도 검사 등 다양한 분야의 분석 서비스에 활용할 예정이다.

• TR104: 양성자를 이용하여 생명 및 의료 분야 연구용 빔라인으로 빔에너지가 33~100 MeV, 빔전류 60 μ A로 최대 빔파워는 6 kW이며, 조사면적은 최대 300 mm ϕ 로 빔전류 밀도가 약 0.8 nA/mm²인 저선량 빔라인으로 설계되었다. 양성자를 이용한 식물과 미생물의 돌연변이 연구, 생체조직의 방사선 영향 평가 및 방사선 손상에 의한 복구기능 연구, 세포 수준에서 암치료 메카니즘 연구 등에 활용할 계획이다.

• TR22: 양성자 빔의 산업적인 활용을 위한 빔라인으로 빔에너지가 3~20 MeV, 빔전류 60 μ A로 최대 빔파워는 1.2 kW이며, 조사면적은 최대 150 mm ϕ 로 빔전류 밀도가 약 3.5 nA/mm²로 설계되었다. 양성자 빔을 이용하여 IGBT 등의 minor-carrier 수명 제어, field-stop layer 형성, super-junction 소자 구현 등을 통한 전력반도체의 성능 및 신뢰성 향상, 반도체 공정용 리소그래피용 마스크 제작기술 개발, 다공성 폴리머 멤브레인 형성 등 산업 공정 개발에 활용할 예정이다.

• TR24: 양성자를 이용한 생명 및 의료 분야 연구용 빔라인으로 빔에너지가 3~20 MeV, 빔전류 60 μ A로 최대 빔파워는 1.2 kW이며, 조사면적은 최대 300 mm ϕ 로 빔전류 밀도가 약 0.8 nA/mm²인 저선량 빔라인이다. 식물과 미생물의 돌연변이 연구, 생체 조직의 방사선 영향 평가 및 방사선 손상에 의한 복구기능 연구 등에 활용할 계획이다.

• TR105: 양성자를 이용하여 2차입자(중성자, 동위원소 등) 빔을 생성하여 활용하기 위한 빔라인으로 최대 빔에너지 100 MeV, 빔전류 1.6 mA로 최대 빔파워는 160 kW이며, 조사면적은 100 mm ϕ 로 빔전류 밀도가 약 200 nA/mm²인 고선량 빔라인이다. 최대 펄스폭 1.3 ms, 반복률 60 Hz인 양성자 빔을 이용하여 생성한 펄스 중성자(기대 선속 $\sim 1.5 \times 10^{15}$ n/

mA/s) 빔을 이용한 radiography, reflectometry, time-of-flight 등의 기법으로 물성 및 구조 분석연구, 핵자료(nuclear data) 생산, 중성자 검출기 개발 등에 활용할 계획이다. 또한, 동위원소(⁸Li, ¹¹Be, ³¹Mg 등) 빔을 생성하여 β -NMR 등의 기법으로 물성분석 연구 등에 활용할 계획이다.

• TR25: 양성자를 이용한 원자력 재료 연구개발용 빔라인으로 빔에너지가 3~20 MeV, 빔전류 1.2 mA로 최대 빔파워는 24 kW이며, 조사면적은 최대 100 mm ϕ 로 빔전류 밀도가 약 150 nA/mm²인 고선량 빔라인이다. 양성자를 이용하여 다양한 합금류의 방사선 영향에 따른 경화, 취화, 성장, 팽윤 등을 평가하고 DB를 구축하여 원자력 재료 개발에 활용할 계획이다.

100 MeV 양성자가속기 업그레이드 계획

100 MeV 양성자가속기의 업그레이드 계획은 양성자기반공학 기술개발사업이 후반부로 접어든 2008년도에 검토되기 시작하였다. 당시, 100 MeV 양성자가속기의 업그레이드 방안을 도출을 위한 기본 경계조건(boundary conditions)은 100 MeV 양성자가속기의 고유한 특성인 'high-power'를 유지하고 사업부지(400 m $\times$ 1,100 m) 내에 구축이 가능한 규모의 시설이었다. 기본 경계조건을 만족하는 범위에서 ① 파쇄 중성자원(spallation neutron source), ② 고에너지 물리학 또는 핵물리학 연구시설(high energy physics or nuclear physics facility), ③ 동위원소 및 의료 연구용 시설(RI & medical research facility), 그리고 ④ 가속기 구동로 연구시설(accelerator driven reactor experimental system) 등 4가지 확장 방안을 중점적으로 검토하였다. 4가지 확장과 활용 방안을 구현하기 위한 가속기의 제원으로 빔 에너지 1~2 GeV, 빔 전류 20~40 mA, 빔 듀티 8~10%, 빔 파워 44~800 kW가 도출되었고, 가속기의 구성과 형태는 ① 100~200 MeV급 선형 가속기와 1~2 GeV RCS(rapid cycling synchrotron)의 결합형과 ② 1~2 GeV급 선형 가속기와 저장링(accumulator ring)의 결합형이 도출되었다.

도출된 4가지 확장 방안은 2008년 한국과학기술정책연구원이 수행한 정책연구와^[7] 2010년 교육과학기술부가 수행한 정책연구를^[8] 통하여, 첫 번째 확장 안으로 1 GeV, 2 MW급 선형 양성자가속기 기반 펄스 중성자원 그리고 두 번째 확장 안

REFERENCES

- [7] STEPI, "Long-term Planning for Proton Engineering Frontier Project" (2009).
- [8] Ministry of Education, Science and Technology, "Efficient Management and Development Scheme for Proton Accelerator Research Center" (2010).

Fig. 5. Schematic layout of a 1 GeV, 2 MW proton accelerator and spallation neutron sources, which is an upgrade plan of the KOMAC 100 MeV proton accelerator.

으로 400 MeV 선형 양성자가속기와 2 GeV RCS에 기반한 0.5 MW급 펄스 중성자원을 개발하는 방안으로 정리되었으며, ‘이용연구수요 충족도’, ‘해외 유사시설과 차별성’, ‘개발비용 대비 목표성능을 비교한 경제성’, ‘기술적 실현 가능성’ 등을 종합적으로 심층 비교 분석하여 ‘첫 번째 확장 안’을 우선적으로 고려할 것을 제시하였다. 이후 100 MeV 양성자가속기를 확장하여 1 GeV, 2 MW급 선형 양성자가속기 기반 펄스 중성자원을 구축하는 방안은 2010년과 2012년 판 ‘국가대형연구시설구축 지도(NFRM, national large research facilities roadmap)’에 ‘강력 펄스 중성자원(업그레이드)(strong pulsed neutron source (upgrade))’ 구축 계획으로 반영되어 있다.^[9]

강력 펄스 중성자원(업그레이드)은 그림 5에 개략적으로 보인 바와 같이 1 GeV, 2 MW 초전도 선형 양성자가속기와 장펄스(long-pulse) 및 단펄스(short-pulse) 중성자원으로 구성되어 있다. 각각의 중성자원 표적에 전달되는 양성자 빔 파워는 1 MW로 생성되는 열중성자 선속은 10^{17} n/cm²·s 이상을 목표로 하고 있다. 장펄스 중성자원은 펄스폭이 2 ms인 중성자 빔을 이용한 분석연구를 위한 20여 개의 빔라인을 구축하여, μm -nm 영역의 공간 분석과 μs -ns 영역의 시간 분석 기능을 제공하도록 할 계획이다. 단펄스 중성자원은 accumulator ring을 이용하여 양성자 빔을 압축하여 펄스폭이 μs 급인 중성자 빔을 이용한 분석연구를 위한 20여 개의 빔라인을 구축하여 0.01~10 nm 영역의 공간 분석과 ns-fs 영역의 시간 분석 기능을 제공할 계획이다. 장·단펄스 중성자원을 구축하고 SANS, holography, phase shift interferometry, static & dynamic tomography, spin echo, elastic scattering, diffraction, neutron resonance transmission, neutron resonance capture analysis, neutron spectroscopy, neutron stimulated emission CT 등 다양한 분석연구 시설을 구축하여 그림 6에 보인 바와 같이 X-선, NMR, X-선, 전자현미경 등으로 기존의 연구수단으로는 접근할 수 없는 새로운 시·공간 영역을 개척하여 우리나라의 “과학기술 영토”를 확장하는데 일조할 수 있는 첨단 연구시설로서의 역할을 할 것이다.

한편, 펄스 중성자원 운영 시 부수적으로 생성되는 뮤온(muon), 중성미자(neutrino), 파이온(pion), 케이온(K-중간자) 등의 2차 입자를 활용한 연구도 가능하다. 뮤온은 μSR 을 이용한 물질분석 연구, 고에너지 물리학 연구 등에 활용할 수 있으며, 중성

Fig. 6. Accessible spacial-temporal domain by using a pulsed neutron source driven by a MW-class proton accelerator.^[10]

미자는 중성미자 진동(neutrino oscillation) 등의 연구에 활용 가능하고, K-중간자는 기묘핵(strange-nuclei) 등의 연구에 활용할 수 있을 것이다.

결 언

2002년부터 2012년까지 수행한 양성자기반공학기술개발사업을 통하여 개발한 100 MeV 양성자가속기는 2013년부터 국가 대형 공동이용연구시설로서 운영을 시작하여 물리학뿐만 아니라 재료, 나노, 바이오, 에너지, 환경, 우주, 의료 등 다양한 분야의 연구개발과 산업적 응용연구에 활발히 활용되고 있다. 그러나 100 MeV 양성자가속기의 설계 성능을 효율적이고 효과적으로 활용하기 위해서는 미구축 빔라인 8기를 조속히 구축하여 창의적인 연구개발에 이용할 필요가 있다. 또한, 100 MeV 양성자가속기에 잠재되어 있는 확장성과 활용성을 고려하여 세계적 최고 수준의 연구시설로 업그레이드하는 계획에 대한 관심과 논의를 시작할 때가 되었다.

앞서 제시한 100 MeV 양성자가속기의 미구축 빔라인 확충 계획과 1 GeV, 2 MW급 선형 양성자가속기로의 업그레이드 계획에는 지난 20여 년 동안 국내외의 수많은 전문가의 고견이 녹아들어 있으나, 창의적인 이용연구와 새로운 연구개발 영역을 개척하는 선도적 연구시설로 자리매김하기 위해서는 다양한 분야의 이용자의 지속적인 관심과 아이디어 제안이 필요하다. 보다 더 많은 연구자가 양성자가속기를 이용한 연구에 관심과 흥미를 가지고 창의적인 연구를 통해 우수한 성과를 창출하길 기대한다.

REFERENCES

- [9] National Science & Technology Commission, “National Large Research Facilities Roadmap” (2012).
- [10] D. Marquardt, R. J. Alsop, M. C. Rheinstadter and T. A. Harroun, J. Cardiovasc. Dev. Dis. 2, 125 (2015).