100 MeV 양성자가속기 이용현황

DOI: 10.3938/PhiT.25.002

김 수 재

Utilization Status of the 100-MeV Proton Accelerator

Su Jae KIM

The 100-MeV proton linear accelerator in the Korea Multi-purpose Accelerator Complex (KOMAC) supports various experimental subjects. The proton beam is used for feasibility studies of cancer therapy, plant breeding using proton irradiation, space radiation, nuclear material, basic science, power semiconductor development using a proton beam, nanoparticle synthesis using a proton beam, and 2nd particle (neutron) applications to neutron imaging and boron neutron capture therapy. Now, we have 2 target rooms, one for a 100-MeV proton beam and the other for a 20-MeV proton beam, and a total of 10 target rooms will have been installed by the end of the project. The isotope target room setup was finished at the end of 2015, and the low-density proton beam target room for space radiation studies and bio-applications, as well as the target room for 2nd particle application, will be installed in the future.

서 론

21세기에 들어서면서 거대시설들이 과학 연구에 도입되기 시작했다. 원자로, 방사광가속기, 양성자가속기 등이 대표적인 거대시설이다. 원자로와 방사광가속기는 각각 중성자와 X-ray를 이용하여 물질을 분석하는데 주로 이용되는 반면 양성자가속기는 물성을 바꾸는데 주목적이 있다. 후자는 양성자가속기를 이용한 물질의 구조 및 물성변화를 21세기 연금술이라고 말하기도 한다. 표 1은 양성자의 에너지에 따른 입자와의 상호

저자약력

김수재 박사는 부산대학교에서 응집물질물리로 박사학위(2004년)를 받았으며 2013년 한국원자력연구원에 입사하여 현재 양성자가속기연구센터에서 선임연구원으로 재직 중이다.(sjakim@kaeri.re.kr)

Table 1. An Interaction between proton and materials depending on proton energy.

에너지	속도	기본 반응	연구개발 분야
1 keV (1천 eV)	5백 km/초	물질표면의 원자 또는 분자를 날개로 떼어냄	·나노 가공 ·빔 가공
100 keV (10만 eV)	5천 km/초	물질 속에 박혀 물질의 구조와 성질을 변화시킴	·표면 개질 ·나노 결정
10 MeV (1000만 eV)	5만 km/초	물질 내의 원자핵과 반응하여 새로운 원소를 생성함	·동위원소생산 ·신종유전자원
100 MeV (1억 eV)	13만 km/초	무거운 원자핵을 쪼개어 가벼운 원소 또는 중성자를 생성함	·신종동위원소 ·중성자원
1 GeV (10억 eV)	26만 km/초	원자핵 속의 양성자, 중성자와 반응 중간자, 중성미자 등 소립 자 생성	·입자물리학 ·핵물리학

Fig. 1. Bragg Peak of Particle Beam.^[1]

작용을 보여준다. 표에서 보는 바와 같이 양성자는 에너지에 따라 물질과 다양한 방식으로 반응한다.

이러한 다양한 반응과 더불어 양성자빔의 특징적인 성질은 Bragg Peak의 존재이다.

양성자는 그림 1에서 실선으로 보이는 peak의 형태처럼 물

REFERENCES

- [1] T. Terasawa *et al.*, Ann Intern Med. **151**, 556 (2009).

Fig. 2. Interaction between proton and DNA.

질의 깊이방향으로 진행할 때 특정 깊이에서 최대 에너지를 전달하고 멈추어 이후에는 영향을 거의 미치지 않는다. 이를 bragg peak이라고 부르며 피의 깊이는 물질의 종류와 양성자의 에너지에 의해서 결정된다. 또한 입사빔과 시료 사이에 특수한 장치(ridge filter)를 설치하여 SOBP(spread-out Bragg peak)를 만들어 최대에너지 전달 깊이를 넓게 만들어 원하는 부위에 골고루 조사되도록 이용하기도 한다. 그림 1의 점선이 SOBP의 실제 형태이다. Bragg peak 특성은 양성자를 이용한 의학, 재료 등의 응용에 있어 매우 중요한 특성이다.

본문에서 양성자가속기연구센터의 양성자가속기를 이용하여 수행할 수 있는 몇 가지 연구 분야에 대한 소개를 하고자 한다.

본 론

1. 바이오/메디컬

양성자의 대표적인 이용분야는 의료와 바이오 분야이다. 돌연변이 유발과 양성자치료가 대표적이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 양성자가 DNA에 입사하는 경우 DNA에는 여러 가지 손상이 나타난다. 이중가닥절단, 염기결실, 단일가닥 절단 등의 손상이 나타나게 되고 손상된 DNA는 복구되거나 사멸된다. 복구되는 경우에는 정상세포로 회복되거나 돌연변이가 되어 나타난다. 이러한 돌연변이 유발 특성은 신종종 개발에 이용된다. DNA가 사멸되는 특성은 암과 같은 질병의 치료에 이용된다.

그림 3은 양성자의 돌연변이 유발특성을 이용하여 만들어진 신종종 배추로 맛과 질병에 대한 저항력을 강화시켰다. 양성자를 이용하여 일반적으로 10여 년 걸리는 종자 개량 기간을 6 년으로 단축하였다. 양성자가속기연구센터에서는 다양한 종류의 종자와 유실수에 대한 양성자빔 조사를 지원하여 신종종개발 연구를 지원하고 있다.

양성자를 이용한 질병의 치료는 2004년 약 40,000여 명이던 환자수가 2014년에는 120,000에 육박할 정도로 증가하였고 2014년 현재 세계적으로 약 50여 개의 입자빔 치료 장치

〈상춘배추〉 맛이 고소한 기능성 배추

〈하령배추〉 저농약 재배 가능한 웰빙 배추

Fig. 3. The new kind of cabbage developed by using proton radiation at KAERI.

가 운영되고 있다.^[2] 양성자는 그림 1에서와 같은 bragg peak 특성을 가지기 때문에 암세포 주변의 정상세포에 미치는 영향이 미미하다. 또한 에너지 조절을 통하여 투과 깊이의 조절이 가능하다. 이러한 특성 때문에 효과적인 암치료 방법의 하나로 자리잡아가고 있다. 양성자가속기연구센터에서는 환자의 치료를 수행하고 있지는 않지만 소동물실험과 세포실험을 통한 실증연구를 수행할 수 있도록 지원하고 있다.

2. 소자(우주항공/전력반도체)

인공위성이나 우주선에 사용되는 전자소자는 여러 가지 우주 방사선에 노출이 된다. 대기권 밖 1차 우주방사선은 주로 양성자로 되어있으며 대기권으로 진입하면서 공기와 충돌하면서 2차 우주선을 발생시킨다. 우주선과 소자의 상호작용은 순간적인 에러가 유발되는 SEE(single event effect)와 누적된 우주선량으로 인하여 소자에 영향을 미치는 TID 효과(total ionization dose)로 나타난다. 우주환경에서 문제가 발생할 경우 교체나 수리가 불가능하기 때문에 우주 환경에서 사용될 소자의 신뢰성 확보를 위해서 양성자 조사효과 연구는 필수적으로 수행되어야 하는 과정이다. 양성자가속기연구센터에서는 100 MeV까지의 양성자빔을 공급하여 반도체의 우주방사선 저항특성을 연구할 수 있도록 지원하고 있다.

소자에 대한 테스트뿐 아니라 소자의 개발에도 양성자빔이 이용되고 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 bragg peak 특성에 의하여 반도체의 원하는 깊이에 양성자를 주입할 수 있다. 주입 깊이는 양성자의 에너지에 따라 바뀐다. Si에 주입된 양

REFERENCES

- [2] M. Jermann, Int. J. Particle Ther. 2, 50 (2015).

Fig. 4. Schematic of power semiconductor with proton irradiation.

성자가 벌크 내부에 결함층을 형성하고 이 결함들이 반도체 내의 minority carrier를 줄여줌으로써 소자의 스위칭 속도를 향상시킨다. 또 다른 응용으로 Si에 주입된 양성자가 벌크 내부에 field-stop(n type) layer를 형성하게 되고 이 layer에서 electric field를 분산시킴으로써 동일한 두께의 소자보다 항복 전압 특성을 증가시킬 수 있다.^[3,4] 양성자를 이용한 전력반도체 개발기술은 상용화되어 사용되고 있는 기술이다. 양성자가속기연구센터에서는 이미 전력반도체에 대한 초기실험을 진행하였고 테스트 베드를 준비 중에 있다.

3. 재료(원자력재료/나노과학)

원자로의 내부에서 사용되는 재료의 상태에 대한 연구는 원자로의 안전과 직결되기 때문에 필수적으로 수행되어야 한다. 원자로 시설의 건설 전에 SRIM, PHITS code 등을 이용한 시뮬레이션을 통한 이론적인 연구가 수행되지만 실제 방사선 조사에 의한 손상을 확인할 수 있다면 더욱 안전한 설계가 가능해진다. 원자로 기반시설에서 수행하는 원자력재료의 손상연구에서 나타나는 한계는 시험 대상 시설의 수명에 비해 시험시설에서 볼 수 있는 손상 정도가 작다는 것이다. 수명 한계기간 동안 원자로, 고속로, 핵융합로에서 예상되는 방사선에 의한 손상 정도는 각각 20~30 DPA(displacements per atom), ~100 DPA, ~200 DPA인데 원자로 기반 시험시설에서는 3~5 DPA/년, 고속로 시험시설에서는 ~20 DPA/년의 손상밖에 주지 못한다. 양성자가속기의 대전류 양성자빔을 이용하면 ~수백 DPA/년의 손상도 가능하여 짧은 시간에 대상시설의 수명한계기간 동안 받을 손상정도를 재현해 볼 수 있어 원자력 재료의 손상 연구에 매우 유리하다.

양성자 빔 조사를 통한 나노입자의 합성 또한 양성자빔 응용 가능 분야의 하나이다. 일반적으로 나노입자를 제조하기 위해서 복잡한 화학적 처리와 열처리가 필요하다. 그러나 재료가 포함된 수용액에

Fig. 5. TEM image of nanoparticles that synthesized under different proton irradiation time respectively.^[6]

단순하게 양성자빔을 조사함으로써 나노입자를 생성할 수 있다.^[5] 또한 조사 시간을 조절하여 입자의 크기 또한 조절할 수 있다.^[6] 그림 5는 서로 다른 시간 동안 양성자빔이 조사되어 성장된 나노입자의 TEM 사진이다. 조사시간이 길어지면서 입자의 크기 분포가 달라지는 것을 볼 수 있다. 우리는 나노입자 합성에서 양성자빔의 에너지와 조사량을 조절함으로써 입자의 크기와 모양을 조절할 수 있을 것으로 기대하고 있으며 관련 실험을 지원하고 있다.

4. 기초과학

양성자조사를 통하여 물성을 바꿔보려는 시도는 꾸준히 진행되어 왔다. 양성자빔을 조사하면 입사된 양성자가 불순물로 작용하거나, 원자나 분자를 떼어내어 빈자리를 만들어내거나 핵반응을 통해서 새로운 원자를 만들어낼 수 있다. 이러한 반응을 통하여 물성을 바꿀 수 있을 것으로 기대하고 다양한 물질에 대한 양성자 조사가 진행되고 있다. 탄소나노튜브에 1 MeV 양성자를 조사하여 C-H 결합이 형성되는 것이 관찰되었고^[7] 양성자조사에 의한 그래핀의 저항 증가,^[8] 양성자조사에 의한 세라믹의 전기적 특성 변화^[9] 등이 보고되었다. 물성변화를 주기 위해서는 양성자와 시료와의 상호작용이 클수록 유리하므로 양성자가속기연구센터에서 현재 운영하고 있는 두 개의 표적실(100 MeV, 20 MeV) 중 20 MeV 표적실이 주로 이용되며 경우에 따라 디그레이더를 이용하여 더 낮은 에너지의 양성자를 조사하기도 한다. 현재는 공기 중에서 이루어지는 양성자 조사가 대부분을 차지하고 있으나 다양한 시료환경을 제공하기 위한 준비가 진행되고 있다.

5. 2차입자 생성 및 이용

양성자와 물질의 상호작용을 통하여 중성자를 생산해 낼 수 있

REFERENCES

- [3] A. Golland *et al.*, Proceeding of PCIM'05, "New 5.2kV Extra Fast Recovery Diode for IGBT and IGCT Applications" (2005).
- [4] T. Laska *et al.*, Proceeding of ISPSO'2000, 22 (2000).
- [5] J. K. Kil *et al.*, Proceeding of IPAC'10, 235 (2010).
- [6] M. H. Jung *et al.*, Proceedings of IPAC2011, 2871 (2011).
- [7] B. Khare *et al.*, Nano Letters 3, 643 (2003).
- [8] Hong-Yeol Kim *et al.*, Korean Chem. Eng. Res. 49, 297 (2011).
- [9] S. J. Zinkle *et al.*, Journal of Nuclear Materials 191-194, 58-66 (1992).

Table 2. Neutron production process by the interaction between accelerated proton and Li or Be.

반응	녹는점	문턱에너지 [MeV]	생성입자의 최소 에너지 [MeV]
$p+{}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be}+n$	${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	181 °C	1.880
$p+{}^9\text{Be} \rightarrow {}^9\text{B}+n$	${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$	1287 °C	2.057
			${}^7\text{Be}$: 0.21 n: 0.03 ${}^9\text{B}$: 0.18 n: 0.023

다. 일정 에너지 이상 가속된 양성자가 리튬이나 베릴륨과 충돌하면 중성자를 방출하게 되고 이 중성자를 이용하여 다양한 연구를 진행할 수 있다. 표 2는 양성자와 리튬, 양성자와 베릴륨 사이의 핵반응을 통해 중성자가 생성되는 반응을 보여준다.

이러한 반응은 가속기를 기반으로 하는 중성자원을 만드는데 이용되는데 미국의 인디애나대학의 LENS(Low Energy Neutron Source, 13 MeV 양성자 가속기), 일본의 KURRI(Kyoto Univ. Research Reactor Institute, 30 MeV 양성자 사이클로트론) 등 세계적으로 다양한 형태의 가속기를 이용한 중성자원이 운영되고 있으며 기초과학과 공학적 활용 외에 상당부분이 BNCT(Boron Neutron Capture Therapy)를 통한 암치료 및 연구에 이용되고 있다.^[10-12] 특히 BNCT를 이용한 암치료는 가속기를 기반으로 하는 중성자원이 개발되면서 유용성이 매우 커져서 많은 국가에서 관련 연구를 수행하고 있거나 시작할 계획을 가지고 있다. 가속기를 이용한 중성자원은 원자로의 건설 없이도 중성자를 생산할 수 있어 세계적으로 다양한 종류의 가속기를 이용한 중성자 시설이 증가하고 있다. 양성자가속기연구센터에서도 20 MeV 양성자를 이용한 중성자 생산계획을 가지고 있으며 이를 이용하여 중성자 이미지, BNCT 실증 연구 등을 지원할 계획을 가지고 있다.

6. 양성자이용 연구지원 통계

양성자가속기연구센터는 2013년 하반기 시범운동을 시작한 이후 2015년 10월까지 총 288개 과제를 신청받아 236개 과제를 지원하였고(81.9%) 빔타임은 684일을 신청받아 438일 지원하였다(64%). 566명의 이용자가 실험에 참여하여 다양한 분야의 연구를 수행하였다. 그림 6은 이용과제의 연구 분야별 분포를 보여준다.

생명, 의학, 의공학 분야의 연구가 28.8%를 차지하여 가장 많은 양을 차지하였으며 나노·재료·반도체 분야와 기초과학·핵물리·우주과학 분야가 각각 24.2%와 21.6%로 전체의 75%를 차지하였다. 양성자빔을 이용한 암치료를 목적으로 하는 다양한 실증 연구가 수행되며 바이오 분야에서 종자개량을 위한 많은 연구가 진행되며 재료나 기초과학 분야의 연구보다 많은 부분을 차지함을 볼 수 있다. 그림 7은 2013년 하반기, 2014

Fig. 6. The research area distribution of proton beam using project.

Fig. 7. Proton beam user, project, process from 2013 (at Oct. 2015).

년, 2015년 3분기까지 양성자빔을 이용하여 수행한 과제수, 이용자수, 공정수를 나타낸 표이다. 양성자빔의 이용이 꾸준히 증가하는 것을 볼 수 있다.

결 언

양성자가속기는 기초 과학뿐만 아니라 공학, 의학, 생물학 등 거의 모든 분야에서 이용되는 대형연구시설이다. 현재 100 MeV 빔과 20 MeV 각각 1개씩 2개의 표적실이 완성되어 이용자에게 서비스하고 있으며 100 MeV와 20 MeV 각 5개씩 총 10개의 표적실을 구축할 계획을 가지고 있다. 2015년 동위 원소연구용 표적실을 시작으로 우주방사선 및 바이오 연구를 위한 저선량 표적실, 가속기 기반 중성자원들을 순차적으로 확충해 나갈 계획이다. 양성자를 이용하는 연구에 흥미를 가지는 연구자들의 많은 이용과 관심을 기대한다.

REFERENCES

- [10] M. Leuschner *et al.*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. **110**, 153 (2005).
- [11] T. Mitsumoto *et al.*, Proceedings of CYCLOTRONS 2010, 430 (2010).
- [12] T. Aihara *et al.*, Applied Radiation and Isotopes **88**, 12 (2014).