

D-D 중성자 발생장치 개념설계

Conceptual Design of a D-D Neutron Generator

김인중, 최희동

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

D-D 중성자 발생장치의 개념설계를 수행하였다. 발생장치의 설계 개념과 사양을 제시하고 고수율, 장수명 중성자 발생을 위한 표적 설계에 대하여 기술하였다. 설계사양은 중수소 이온빔 전류 50 mA, 가속전압 120 kV, 중성자 수율 10^9 n/s (D-D 중성자), 표적수명 수 백 시간이다. 표적 물질에는 Ti과 Sc을 선정하였고, 중수소 이온빔의 표적 내 drive-in 특성을 활용한 경제적인 표적 제작 방법을 제안하였다.

Abstract

The conceptual design of D-D neutron generator was carried out. The design concept and the designed feature is shown, and the target design for high yield, long-life neutron generation is described. The designed feature is deuteron ion beam current, 50 mA, acceleration voltage, 120 kV, neutron yield, 10^9 n/s (D-D neutron), target life-time, hundreds hours. Ti and Sc is chosen as target material and an economical target generation method is proposed.

1. 서 론

중성자 발생장치는 중성자원으로서 중성자 발생 핵반응을 이용하여 중성자 발생 반응에 기여하는 입자에 외부로부터 에너지를 공급함으로써 인위적으로 핵반응을 발생, 제어하는 장치이다. 중성자 발생을 위한 반응으로는 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, ${}^3\text{T}(p,n){}^3\text{He}$, ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$, ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$, ${}^3\text{T}(d,n){}^4\text{He}$ 등 여러 핵반응이 응용된다. 그 중에서 ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$, ${}^3\text{T}(d,n){}^4\text{He}$ 반응은 반응에 필요한 에너지가 약 100 keV 근방으로서 비교적 낮기 때문에 소형 중성자 발생장치 개발에 적합하다. ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$ 반응과 ${}^3\text{T}(d,n){}^4\text{He}$ 반응을 서로 비교하면 반응 단면적이 ${}^3\text{T}(d,n){}^4\text{He}$ 반응의 경우가 100 keV 근방의 동일한 에너지에 대해 ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$ 반응에 비해 100 배 이상 크기 때문에 중성자 수율면에서 월등히 유

리하다. 상용의 중성자 발생장치에서는 이러한 중성자 수율상의 이점 때문에 대부분 ${}^3\text{T}(\text{d},\text{n}){}^4\text{He}$ 반응을 이용하고 있다. 그러나 ${}^3\text{T}(\text{d},\text{n}){}^4\text{He}$ 반응은 반응에 참여하는 삼중수소에 의한 오염의 가능성을 가지고 있고, D-T 중성자의 에너지가 14 MeV로 매우 높기 때문에 보건물리적 관점에서 중성자 발생장치를 보다 다양한 분야에서 활용하는데 적합하지 못한 한계를 갖는다. 이에 반하여 ${}^2\text{D}(\text{d},\text{n}){}^3\text{He}$ 반응은 삼중수소에 의한 오염 가능성을 배제할 수 있고, D-D 중성자의 에너지 또한 3 MeV 정도로서 낮기 때문에 보건물리적인 관점에서 깨끗하고 다루기가 간편한 중성자원으로서 보다 넓은 분야에의 활용이 유리하여 미래의 중성자 활용에서는 D-D 중성자가 주목을 받을 것으로 예상된다.

본 연구진은 고수율, 장수명의 이동사용이 가능한 중성자원 개발을 위해 D-D 반응을 이용한 중성자 발생장치 개발 연구를 진행하고 있다. 중성자 발생장치 기술은 1960년대부터 이미 상용제품이 등장했을 정도로 오랫동안 기술기반이 확립된 분야이다. 그러나 국내에서는 몇 차례의 개발 시도와 이론적인 연구만이 수행되었을 뿐 장치 개발을 위한 체계적인 연구가 계속되지 못했다. 본 장치의 개발 연구는 후발주자의 입장에서 기존 기술의 면밀한 검토와 핵심기술의 개발을 통해 중성자 수율 증대와 안정적인 장치 운영 시간의 연장 등에서 새로운 가능성을 찾는 것을 목표로 하고 있다. 본 논문에서는 중성자 발생장치의 개념설계 단계로서 전체 장치의 개략적인 구성과 목표 사양에 대해 소개하고, 표적 설계를 중점으로 기술하였다. 표적에 대해서는 고수율, 장수명 운전에 적합한 표적 물질의 선정과 표적 내 중수소핵의 drive-in 특성 조사를 통한 효율적인 표적의 제작 및 수명 연장 가능성에 대해 살펴보았다.

2. 중성자 발생장치 구성

본 연구에서 개발 중인 중성자 발생장치는 이온빔 전류 50 mA, 가속전압 120 kV, 중성자 수율 10^9 n/s (D-D 중성자), 수 백 시간대의 안정적인 중성자 발생을 목표로 하고 있다. 목표사양의 중성자 발생장치는 그림 1의 반응 단면적만을 고려할 경우 10^{11} n/s 이상의 수율을 갖는 D-T 중성자를 생성할 수 있으며, 이것은 상용으로 판매되는 일반 중성자 발생장치의 10^{10} n/s를 상회하는 것으로서 중성자 발생을 측면에서는 충분히 우수할 것으로 예상된다. 중성자 발생장치에서 수명은 운전 초기의 중성자 수율이 절반으로 감소하기까지의 운전시간으로 정의되며 이온원의 안정성, 표적에서 표적핵의 시간에 따른 농도변화, 표적 자체의 수명에 의해 결정된다. 기존의 장치에서의 운전 수명은 rotating target과 같은 특별한 형태의 표적구조를 갖지 않는 경우에서 장수명 장치가 수 백 시간 수준이다.

중성자 발생장치 전체 계통의 대략적인 구성은 그림 2와 같다. 그림은 장치 개발 단계에서의 개별 구성 요소별 성능 검사 및 다양한 특성 시험을 위한 prototype 장치에 대한 설계 개념도이다. 장치는 이온원, 가속관, 표적으로 구성되며, 안전한 운전을 위한 중성자 차폐계통과 개발 단계에서의 장치 성능 및 특성 시험을 위한 중성자 계측계통이 추가된다. 이온원에는 플라즈마 발생이 안정적이고 대전류 이온빔 발생에 유리한 RF 방식의 TCP(Transformer Coupled Plasma) 이온원

이나 Helicon 플라즈마 이온원을 이용한다. 이온원 개발 연구로는 TCP 이온원을 제작하여[2] 인출전압 30 kV, 인출전류 10 mA를 달성하였다. 이온원과 가속관 사이에는 Einzel lens를 둬으로써 이온원과 가속관 사이의 빔광학적 정합을 달성한다. 가속관은 가속전압 120 kV, 빔전류 50 mA를 최종목표로 하고, 개발단계에서는 가속전압과 빔전류를 점진적으로 증가시켜 최종 목표에 도달하도록 한다. 가속관 이후에는 표적을 두고, 표적을 중심으로 중성자 차폐계통을 설치한다. 중성자 차폐계통은 중성자원으로부터 polyethylen block, boron sheet, 납벽돌 순으로 차폐체를 구성한다. 방출된 고속 중성자는 polyethylen에 의해 열중성자 영역으로 감속되고 열중성자가 boron sheet에 흡수된 후 발생하는 2차 감마선을 납벽돌이 흡수한다. 중성자 계측계통은 중성자 수율이 낮은 조건에서부터 이온빔 에너지, 전류, 집속 상태, 표적 구성, 표적 냉각 조건 등의 설계 변수에 따른 중성자 수율 및 발생 특성을 면밀히 살펴보기 위해 중성자 검출기와 함께 중성자 발생과 경쟁적인 ${}^2\text{D}(d,p){}^3\text{T}$ 반응에 의해 방출되는 proton을 측정하도록 한다. 그리고 장치의 개발이 최종 단계에 이르러서는 Au, In 방사화 박막 이용하여 중성자속 분포를 측정한다.

3. 표적 물질 선정

표적에는 이온빔으로부터 많은 양의 에너지가 전달되기 때문에 표적 물질은 열에 대하여 안정하고, 열전도도가 높고, 구조적으로 안정하여야 한다. 따라서 표적 물질로는 고체상태의 금속이 가장 적합하다. 경우에 따라서는 이온빔의 에너지 밀도가 지나치게 높아 기체상태의 표적을 사용하는 경우도 있지만, 기체 표적은 표적의 구성이 복잡하고 표적계통의 규모가 크게 증가하기 때문에 본 연구에는 적합하지 못하다.

금속 표적에서 중성자 수율과 가장 밀접한 관계를 갖는 표적 물질의 물적 특성은 hydrogen solubility와 이온빔에 대한 stopping power이다. 수소는 크기가 작기 때문에 평소 금속 내에서 금속의 격자구조 사이에 자유로운 상태로 존재한다. 그러나 자유상태인 수소의 금속 내 함량은 매우 낮기 때문에 많은 양의 수소를 금속 내에 가두기 위해서는 화학적 결합을 통해 metal hydride 형태로 수소를 표적 내에 고정시켜야 한다. 이때 수소가 하나의 금속원자에 평균적으로 결합하는 비를 hydrogen solubility로 표현한다. Hydrogen solubility는 일반적으로 Sc, Ti, Er, Th 등의 B 족 금속원소에서 큰 값을 갖는다. 이들 원소에서의 hydrogen solubility는 Sc : 0.8 ~ 1.0, Ti : 1.6, Er : 0.8 ~ 1.0[3], Th : 3.0 ~ 3.7[4]이다. Stopping power의 측면에서는 그림 1의 ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$ 반응 단면적 그래프로부터 중성자 발생률을 높이기 위해서는 표적 내 이온빔의 에너지 손실이 적어야 하기 때문에 stopping power가 작은 low Z, low density 재료가 표적 물질로서 유리하다. Er과 Th는 high Z 재료이지만 밀도가 낮기 때문에 stopping power 측면에서 표적 물질로서 Ti, Sc에 뒤지지 않는다. 그림 3는 개별 표적 물질에 대해 J.F. Ziegler[5]의 stopping power 자료를 이용해 계산한 120 keV 중수소의 표적 깊이에 따른 에너지 손실 계산 결과이다. 그림에서 Er는 high Z 원소임에도 불구하고 에너지 손실이 작아서 가장 깊은 깊이까지 반응에 기여할 수 있다. 120 keV 중수소 이온빔의 에너지 손실은 Ti, Th, Sc, Er 순이다. 그림 4에는 표적 내 중수소의 분포가 균

일하고, 중수소의 농도가 hydrogen solubility로 나타내었을 때 각각 Sc : 0.8, Ti : 1.6, Er : 0.8, Th : 3.0 인 경우를 가정하였을 때 120 keV, 50 mA의 중수소 이온빔에 대한 표적 깊이에 따른 중성자 발생 반응률 계산 결과를 나타내었다. Sc과 Er은 stopping power가 작기 때문에 반응율이 표적의 깊이에 따라 완만하게 변하고 있으나 중수소 표적핵의 수밀도가 낮아서 낮은 반응율을 보이고 있다. Er은 stopping power는 Sc에 비해 유리하지만, Er 자체의 수밀도가 낮아 많은 양의 수소를 포함할 수 없기 때문에 Sc에 비해 오히려 더 낮은 반응율을 갖는다. 이에 반해 Th은 낮은 밀도에도 불구하고 큰 hydrogen solubility로 인해 중수소 수밀도가 크고, stopping power는 작기 때문에 표적의 심부까지 모든 표적 물질 가운데 가장 높은 반응율을 갖는다. Ti은 자체의 수밀도가 높고 hydrogen solubility가 높기 때문에 Th과 함께 높은 반응율을 보이고 있다. 개별 표적 물질에 대한 표적 전체의 중성자 발생 반응율은 각각 Ti : 1.1×10^{10} [n/sec], Sc : 8.3×10^9 [n/sec], Er : 6.8×10^9 [n/sec], Th : 2.1×10^{10} [n/sec]과 같다. 그런데 이 가운데 Th과 Er은 자연에 존재하는 양이 매우 적기 때문에 비용측면에서 적합하지 못하다. 따라서 Ti, Sc이 표적 물질로서 가장 적합한 것으로 평가된다.

표적 물질 후보로 선정된 Ti과 Sc를 서로 비교하면, 먼저 중성자 수율 측면에서는 Ti이 Sc에 비해 hydrogen solubility가 높기 때문에 Sc보다 유리하다. 그러나 Sc은 열적 특성이 우수하여 안정적인 중성자 발생과 운전 수명의 연장에는 Ti보다 유리하다. Ti에서 수소의 evaporation temperature는 250 °C 인데 비해 Sc 표적은 450 °C로 매우 높아서 Ti 표적에 비해 중성자 발생이 안정적이다. 또한 하전입자에 의한 sputtering에 대한 저항성도 Sc이 Ti에 비해 크게 우수한 것으로 보고되고 있어서 장수명 표적 재료로서는 Sc이 더 적합하다. 120 keV 중수소 이온빔에 의한 sputtering의 영향을 관찰한 C. Monnin et al.[6]의 실험에서 조밀한 구조를 갖지 못하는 Ti 표적에서는 sputtering에 의한 표적 손상이 크게 관찰되었으나 Sc 표적에서는 아무런 영향도 발견되지 않았다. 따라서 최종적인 표적 선정은 실제적인 실험을 통해 결정하고, 표적 설계는 Ti과 Sc 두 물질에 대하여 수행할 것이다.

4. 중수소 이온빔의 표적 내 drive-in 특성

D-D 중성자 발생장치에서는 반응에 참여하는 표적핵과 입사핵이 동일한 핵종이기 때문에 D-T 반응을 이용하는 중성자 발생장치와 달리 표적 내 중수소가 장치의 운전동안 입사빔을 통해 계속적으로 충전되어 D-T 중성자 발생의 경우보다 더 안정적으로 중성자를 발생시킬 수 있다. 표적핵을 입사빔으로부터 표적 내로 drive-in하는 방식은 sealed-tube type의 D-T 중성자 발생장치에서 먼저 활용되었다. D-T 중성자 발생장치는 중성자 수율이 높지만 표적 내 삼중수소의 농도가 중수소 핵자빔에 의해 확산, 치환, 증발 등으로 감소하기 때문에 표적 수명이 수 시간대로 짧은 것이 큰 문제로 지적되었다. 이에 대한 해결책으로서 입사빔에 삼중수소를 혼합함으로써 삼중수소를 표적 내로 drive-in 시켜 표적의 수명을 연장시키는 방법이 고안되었다. 그 결과 중수소와 삼중수소의 혼합기체를 사용하는 sealed-tube type의 중성자 발생장치에서는 수 백 시간 이상의 표적 수명

을 달성하였다[7]. 이에 비교할 때 중수소핵의 drive-in은 D-D 중성자 발생장치 표적에서는 별도의 노력 없이 안정적인 중성자 발생에 기여하는 자연스러운 현상이다. 그러나 표적에 따른 중수소핵의 drive-in 특성의 고찰은 보다 안정적인 중성자 발생에 적합한 표적 개발을 가능하게 할 수 있다. 또한 중수소의 drive-in 만으로 목표하는 높은 수율의 중성자를 얻을 수 있다면 표적을 용이하게 제작할 수 있고 표적으로 인한 비용 또한 절감할 수 있다.

수소의 drive-in 특성에 대한 연구는 N. Kawachi 등[8]이 가장 최근에 수행하였다. N. Kawachi 등은 Ti, Cu, Mo, Pd, Ta 표적에 대하여 90 keV 중수소 음이온빔을 조사시키면서 $^2\text{D}(d,n)^3\text{He}$ 과 경쟁적인 $^2\text{D}(d,p)^3\text{T}$ 반응에 의해 방출되는 proton을 측정함으로써 시간에 따른 반응을 변화와 표적 깊이에 따른 중수소 분포를 분석하였다. 실험결과 Pd, Cu, Ta 표적은 proton의 수율이 낮지만 빠르게 포화되어 발생율이 시간에 대해 매우 안정적이었으나, Ti, Mo은 proton의 수율은 높지만 시간에 대한 발생율의 기울기가 크고 포화되기까지 오랜 시간이 소요되어 시간에 대해 발생율이 안정적이지 못했다. Ti 표적 내 중수소 분포는 대부분이 입사 이온빔의 range에 해당하는 깊이에 분포하고 중성자 발생이 가장 많이 이루어지는 표적 표면에서는 중수소의 농도가 매우 느리게 증가하였다. 이러한 실험결과는 개별 표적 물질에서 중수소의 확산특성으로 이해할 수 있다. 중수소의 diffusion coefficient가 큰 표적에서는 이온빔 조사를 통해 표적 내로 들어오는 중수소의 양과 확산, 증발 등을 통해 표적으로부터 손실되는 중수소의 양이 빠르게 평형에 도달하기 때문에 중성자 수율이 빠르게 포화점에 도달한다[7]. 그러나 Ti과 같이 diffusion coefficient가 작은 표적에서는 표적 내 중수소의 이동이 느리기 때문에 대부분의 중수소 이온빔이 저지된 range 깊이에서 중수소 농도가 높고 표적 표면에서의 농도는 느리게 증가하여 중성자 발생률이 충분한 수율로 포화되어 안정적인 중성자를 발생시키기까지는 매우 긴 시간이 소요된다.

N. Kawachi 등의 실험결과로부터 drive-in 중수소의 분포가 diffusion coefficient에 크게 의존적이라는 것과 높은 수율의 중성자 발생을 위해서는 diffusion coefficient가 낮은 재료를 사용하여야 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 diffusion coefficient가 낮은 재료를 표적으로 사용하는 경우에는 중성자 수율이 포화되어 안정적인 중성자 발생에 도달하기까지 오랜 시간의 사전조사(pre-irradiation)가 필요하기 때문에 중수소의 drive-in만을 이용하여 표적을 마련하기에는 매우 불리하다. 그러나 이러한 문제는 표적을 준비하는 사전조사(pre-irradiation) 단계에서 다음의 두 가지 방법을 병행하는 것을 통해 보완할 수 있다. 첫째, 이온빔 가속단의 가속전압을 낮은 전압에서 운전 전압까지 서서히 증가시킴으로써 표적 표층에 충분한 수밀도의 중수소를 심어 넣는 방안과 둘째, 이온빔 입사방향에 대해 표적을 기울임으로써 표적 깊이방향의 이온빔 range를 짧게 하는 방안이 있다. 이러한 방법은 중성자 수율이 포화되기까지의 시간을 단축시키고, 그 이후 오랜 시간의 안정적인 중성자 발생을 가능하게 한다. 표적에 심겨진 거의 대부분의 중수소는 표적 재료와 metal deuteride 형태로 화학적으로 결합되기 때문에 한번 만들어진 표적은 외부로부터 격리된 상태에서는 오랜 시간 동안 보존도 가능하다[9].

5. 결 론

D-D 중성자 발생장치 개발을 위한 개념 설계를 수행하여 전체 계통의 개략적인 구성과 설계 사양을 확정하였다. 표적에 대해서는 표적 물질로서 Ti과 Sc을 후보 물질로 선정하고, 중수소 이온빔의 표적 내 drive-in 특성을 고찰함을 통해 안정적인 중성자 발생에 유리한 경제적인 표적 제작 방법을 제안하였다. 현재 냉각계통 설계를 포함하는 표적의 상세 설계, 표적함 설계, 중성자 차폐체 설계를 수행하고 있다.

참고문헌

1. Cross Section Evaluation Working Group, *ENDF/B-VI Summary Documentation*, Report **BNL-NCS-17541 (ENDF-201)** (1991), edited by P.F. Rose, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, USA.
2. I.S. Hong, Y.S. Hwang and Y.S. Cho, *Rev. Sci. Instr.* 73 (2002) 979.
3. H.H. Barschall, G.A. Bartholomew, C.B. Bigham, R.C. Block, R.M. Brugger, R.E. Chrien, S. Cierjacks, H. Conrads, J.S. Fraser, G.F. Knoll, M.A. Lone, C.A. Uttley, L. Walter, G.B. West and W.L. Whittemore, *Neutron sources : for basic physics and applications*, An OECD/NEA Report, pp. 66 ~ 72, Pergamon press, Oxford, 1983.
4. J.M. Verbeke, *Development of high-Intensity D-D and D-T neutron sources and neutron filters for medical and industrial applications*, Ph. D. Thesis, Nuclear Engineering, University of California, Berkeley, 2000.
5. “<http://www.srim.org>”, *The stopping and range of ions in matter(Srim-2000)*, J.F. Ziegler, 1201 Dixona Drive, Edgewater, MD, 21037, USA.
6. C. Monnin, P. Bach, P.A. Tulle and M.v. Rompay, *Nucl. Instr. and Meth. A* 480 (2002) 214.
7. B.J. Hughey, *Nucl. Instr. and Meth. B* 95 (1995) 393.
8. N. Kawachi, T. Katabuchi, M. Yamaguchi and Y. Tagishi, *Nucl. Instr. and Meth. B* 190 (2002) 195.
9. C.M. Bartle, N.G. Chapman and P.B. Johnson, *Nucl. Instr. and Meth.* 95 (1971) 221.

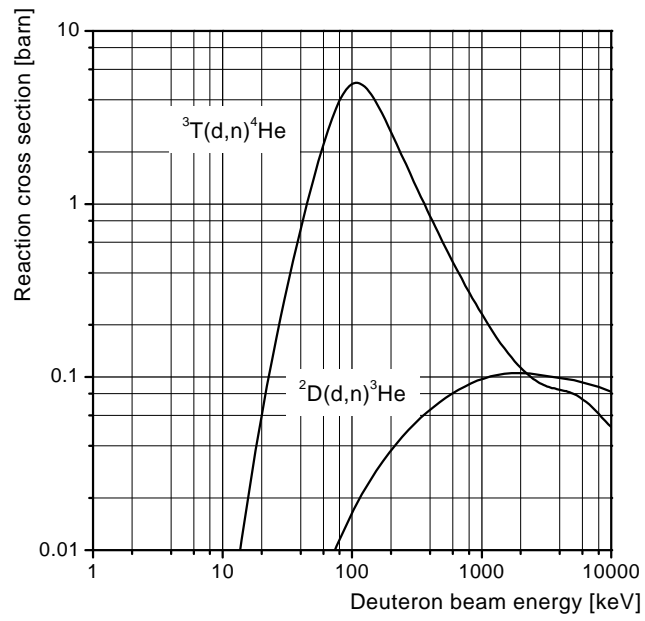


Fig. 1. Neutron generation cross sections by ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$ and ${}^3\text{T}(d,n){}^4\text{He}$ reactions[1].

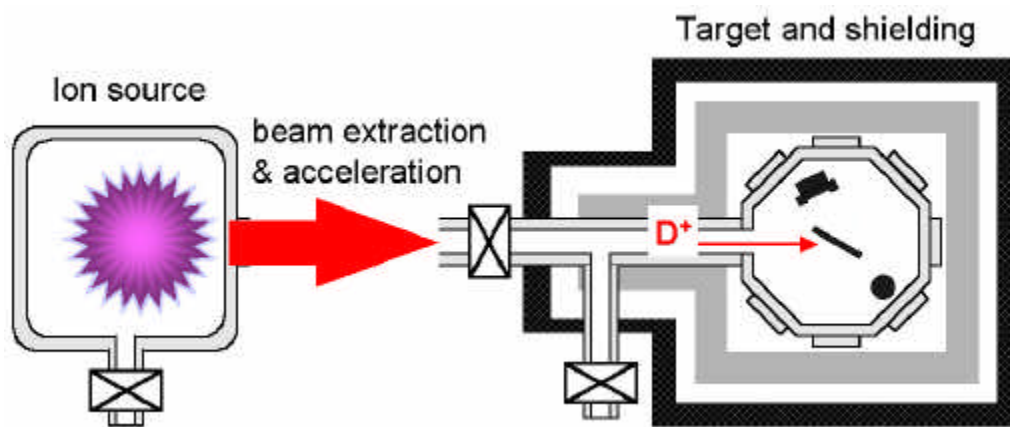


Fig. 2. Schematic drawing of D-D neutron generator design concept.

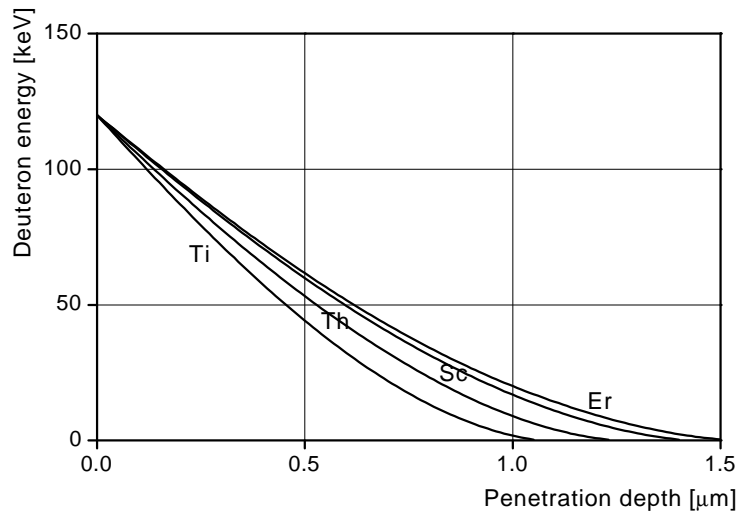


Fig. 3. Energy loss of 120 keV deuteron³ ion beam through Sc, Ti, Er, Th targets.

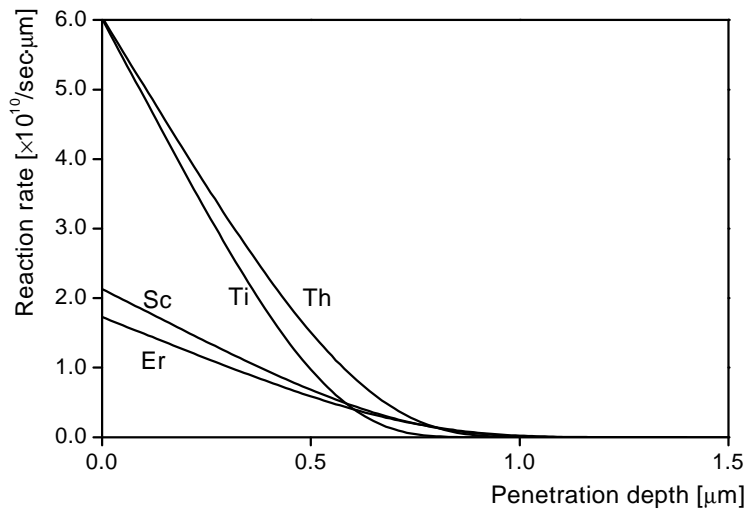


Fig. 4. ${}^2\text{D}(\text{d},\text{n}){}^3\text{He}$ reaction rate depth profile through thick Sc, Ti, Er, Th target for 50 mA, 120 keV deuteron ion beam.