



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



碩士學位論文

CNPA 시스템 설계 제작 및 이를  
응용한 Ion Beam 적용 연구

濟州大學校 大學院

에너지 공학 학과

千世珉

2012年 2月



# CNPA 시스템 설계 제작 및 이를 응용한 Ion Beam 적용 연구

指導教授 李 憲 周

千 世 珉

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2011 年 12 月

千世珉의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 최 치 규 (인)

委 員 박 재 우 (인)

委 員 이 헌 주 (인)

濟州大學校 大學院

2011 年 12 月



# Design and Development of CNPA System

## Using an Ion Source

Se-Min Chun

(Supervised by professor Heon-Ju Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of  
Master of Engineering.

2011. 12

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Heon Ju Lee, Prof. of Nuclear & Energy Engineering

.....  
Chi Kyu Choi

Jae Woo Park

Heon Ju Lee

(Name and signature)

2011. 12.

Date

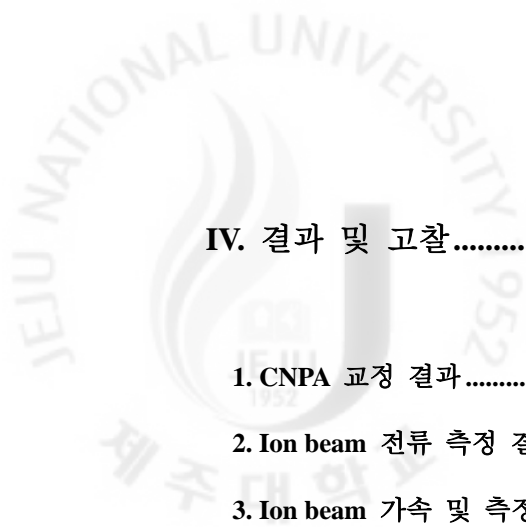
Department of Nuclear & Energy Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

|                                                   |            |
|---------------------------------------------------|------------|
| <b>LIST OF FIGURES</b> .....                      | <b>iii</b> |
| <b>LIST OF TABLES</b> .....                       | <b>v</b>   |
| <b>SUMMARY</b> .....                              | <b>vi</b>  |
| <br>                                              |            |
| <b>I. 서 론</b> .....                               | <b>1</b>   |
| <br>                                              |            |
| <b>II. 이론적 배경</b> .....                           | <b>4</b>   |
| 1. 핵융합 .....                                      | 4          |
| 2. Plasma 가열 및 전류구동 .....                         | 14         |
| 3. CNPA (Compact Neutral Particle Analyser) ..... | 18         |
| 4. Cold Hollow Cathode Ion Source .....           | 22         |
| 5. 가속기 .....                                      | 25         |
| <br>                                              |            |
| <b>III. 실험방법 및 구성</b> .....                       | <b>27</b>  |
| 1. CNPA 교정 실험 .....                               | 29         |
| 2. Ion Beam 전류 측정 실험 .....                        | 30         |
| 3. Ion beam 가속 및 에너지 측정 실험 .....                  | 32         |

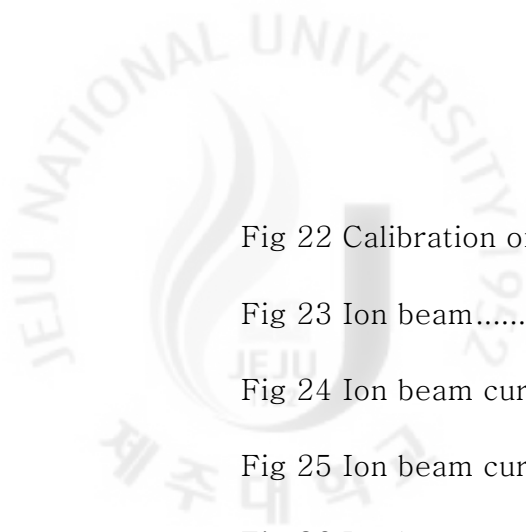


|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| <b>IV. 결과 및 고찰</b> .....     | <b>35</b> |
| 1. CNPA 교정 결과 .....          | 35        |
| 2. Ion beam 전류 측정 결과 .....   | 40        |
| 3. Ion beam 가속 및 측정 결과 ..... | 43        |
| <br>                         |           |
| <b>VI. 참고문헌</b> .....        | <b>46</b> |



## LIST OF FIGURES

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Fig 1 Fusion reaction(D-T) .....                                   | 4  |
| Fig 2 Cross section of various fusion reaction .....               | 6  |
| Fig 3 Cyclotron motion of plasma particles in magnetic field ..... | 9  |
| Fig 4 Principle of tokamak operation (From JET site) .....         | 9  |
| Fig 5 Principle of magnetic field building in tokamak.....         | 11 |
| Fig 6 Additional heating system (From ITER site).....              | 14 |
| Fig 7 Principle of neutral particle beam .....                     | 16 |
| Fig 8 ICRF antenna and NBI for KSTAR.....                          | 17 |
| Fig 9 Comparison of NPA and CNPA.....                              | 20 |
| Fig 10 General pulse height analyzer .....                         | 21 |
| Fig 11 Schematic of cold hollow cathode ion source .....           | 24 |
| Fig 12 Component of experimental device.....                       | 27 |
| Fig 13 Experimental device.....                                    | 28 |
| Fig 14 AXUV3ELA Silicon diode arrays .....                         | 29 |
| Fig 15 The scheme of ion source .....                              | 30 |
| Fig 16 Circuit diagram of ion source .....                         | 31 |
| Fig 17 Accelerator design and installation.....                    | 32 |
| Fig 18 Accelerator electrode .....                                 | 33 |
| Fig 19 Mounted collimator at Feed-through .....                    | 34 |
| Fig 20 Am-241 gamma-ray spectrum.....                              | 37 |
| Fig 21 Ba-133 gamma-ray spectrum .....                             | 37 |



|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Fig 22 Calibration of Am-241 and Ba-133 .....                | 38 |
| Fig 23 Ion beam.....                                         | 40 |
| Fig 24 Ion beam current on the plasma bias potential .....   | 41 |
| Fig 25 Ion beam current on the acceleration potential .....  | 42 |
| Fig 26 Ion beam current on the extraction gap distance ..... | 42 |





## LIST OF TABLES

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| Table 1 Fusion reactions .....                   | 5  |
| Table 2 Characteristic of various particles..... | 26 |
| Table 3 Gamma-ray energy peak.....               | 36 |
| Table 4 Result of energy calibration .....       | 38 |
| Table 5 Fitting value .....                      | 39 |

## SUMMARY

An accurate measurement of the escaped neutral particle from the Tokamak is very important since it can check ICRF heating condition. The plasma properties in the Tokamak can be deduced from the measured neutral properties and used for the control of a heating process. Currently, NPA (Neutral Particle Analyzer) has been used for the diagnostics of an ion energy. NPA was developed in Russia in the late 1980s, and the Ioffe Institute has the unrivaled technique that can directly measure the energy distribution or flux intensity of H and He nucleus. However, NPA including multi channel detectors cannot be produced because of the size and production cost problems. Recently, compact semiconductor, such as a silicon diode or a rubber diamond, has been used for the measurement of the neutral particle's energy. CNPA (Compact Neutral Particle Analyzer) has the advantages with extreme compactness, lower equipment costs, and simplicity. CNPA adopted a silicon diode as a detector and consists of pre-amplifier, shaping amplifier and pulse-height analyzer. Generally, currents in the system were generated after ions or photons injected to a silicon diode. In other words, the neutral particles are essentially instantly ionized when they strike the detector. A neutral particle reached to a silicon diode generates the pulse signal with the electron-hole (3.7 eV) pairs. It converts to a voltage pulse by a pre-amplifier and is amplified through an amplifier. Final voltage pulse height presented the linear output about the energy of incident neutrals.

In this study, CNPA system was set up and calibrated. A silicon photo diode (AXUV3ELA) was used for measuring the energies of the neutral particles. First, CNPA is calibrated by the Am-241 and Ba-133 gamma-ray sources. For the calibration of CNPA by the ion beams, the ion beam accelerator system was designed and fabricated. The ion beam from the cold hollow cathode ion source is accelerated through an accelerating column made of the Teflon insulators and copper electrodes. The experimental purpose is calibration of the CNPA with ~ 100 keV energy range using accelerated ion beam.

As a result, silicon detector is calibrated by Am-241 and Ba-133 gamma-ray sources. The calibration was performed by the peaks of 31 – 79 keV. To calibrate the CNPA for higher energy range, ion beam system was prepared. Cold hollow cathode ion source was used. Optimum ion beam current is measured because of the protection of silicon diode. The highest ion beam current of 3.4  $\mu$ A was obtained at the gas flow rate of 2 sccm and plasma bias voltage of 650V. And appropriate extraction gap distance of 1 mm is optimum for the high ion beam current. Ion beam acceleration energy cannot be measured by reversed discharge in ion source. But the accelerated ion beam will be detected by appropriate modified experiment and will be accelerated up to 200 keV.

Accordingly, CNPA system can be applied to the measurement of the neutrals from the Tokamak by this experimental results. Also, It is possible to apply it to the general plasma and radiation diagnostics.

## I. 서 론

최근 21세기 들어서서 새롭게 대두되고 있는 국제현안으로는 지구온난화로 대변할 수 있는 환경문제와 지속적으로 상승하고 있는 국제유가를 들 수 있다. 특히 대부분의 에너지를 수입에 의존하고 있는 우리나라의 경우 대체에너지에 대한 철저한 계획과 준비가 없다면 향후 세계와의 무한경쟁에서 상당한 어려움이 예상된다. 세계는 다각적인 대체에너지 개발에 연구를 집중하고 있으며 특히 원료공급의 무한성, 운전의 안전성, 저렴한 발전단가의 보장 및 국가경쟁력 등을 고려할 때 핵융합에너지를 가장 유망한 에너지원의 하나로 고려하고 있다.

핵융합에너지의 원리는 쉽게 말하면 수소 같은 가벼운 원소 2개의 원자핵이 융합하여 하나의 원자핵으로 되는 반응이며, 원소의 종류와 반응에 따라 다른 에너지가 발생하게 되고 이때 발생하는 에너지를 사용하는 것이다.

현재, 우리나라는 차세대형 초전도 핵융합 연구 장치인 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)를 건설하였다. 간단히, 핵융합을 이루기 위해서는 1억도 이상의 온도로 Tokamak 내부의 plasma를 가열하여야 하는데, 이를 위해 Tokamak에 구속된 plasma에 Ohm heating으로 plasma 자체를 가열하고 구속력을 높이기 위한 자기장(Poloidal magnetic field)을 발생시킨다. 하지만 2천도 이상 가열되었을 plasma 저항이 급속히 떨어져 더 이상 가열 할 수 없게 된다. 따라서 plasma온도를 핵융합 반응까지 올리기 위해서는 다른 방식의 보조가열장치가 필요하다. 현재 전 세계적으로 세 가지 형태의 보조가열장치를 사용하고 있는데, 하나는 RF전자파를 이용하는 가열장치 ICRF(Ion Cyclotron Resonance Heating), 중성입자를 이용하는 가열장치 NBI(Neutral Beam Injection), 마이크로파를 이용하는 LHCD(Lower Hybrid

Current Drive)가 사용된다. 여기서 ICRF에 의해 가열된 고 에너지 이온(fast ion)들을 측정하는 것은 핵융합 plasma에서 중요한 과제 중 하나이다. ICRF를 이용한 D(H) plasma의 H minority의 가열은 H의 분율에 따라 가열의 정도가 달라지고 이 결과는 fast ion 측정을 통해서 확인할 수 있으므로 정확한 fast ion의 진단은 매우 중요하다.

현재 고온 plasma를 진단하기 위한 방법으로 비교적 정확한 이온온도 측정방법인 중성입자 검출기:NPA(Neutral Particle Analyzer)를 이용한 방법이 사용되고 있으며, 에너지 분포나 H와 He 원자나 동위원소들의 flux 절대 강도를 측정하기 위하여 여러 형태의 NPA가 개발되어 지고 있다. NPA는 핵융합 plasma로부터 방출되는 중성입자들의 전하교환 분포를 직접적으로 측정할 수 있는 장점이 있다. 주로 “E-parallel-to-B” 타입의 NPA는 stripping cell을 이용하여 중성입자들을 재 이온화 시키고 전장과 자장을 이용하여 입자들을 편향시킨다. 편향된 중성입자들은 에너지에 따라 micro-channel plate detector에서 검출된다. 그러나 크기와 장비 제작비용의 문제로 인하여 위와 같은 다채널 검출기 제작이 힘들어지고 있어 최근에는 Silicon diode나 천연 다이아몬드 검출기 등과 같은 소형 반도체 검출기를 사용하는 대안이 제시되고 있다.

위와 같은 소형 반도체를 이용한 CNPA(Compact Neutral Particle Analyzer)는 중성입자들이 반도체 검출기에 도달하면 전자-전공 쌍의 pulse신호를 생성한다. 이 신호들이 pre-amplifier를 통해 전압 pulse 신호로 변환되고 amplifier를 통해 전압 pulse 신호들이 증폭된다. 최종 전압 pulse 신호들의 높이는 입사된 중성입자들의 에너지에 대한 선형적 값을 나타내게 되고, 디지털 pulse 신호 분석을 통해 탈출된 중성입자들의 에너지 스펙트럼을 얻을 수 있다. 기존의 NPA는 정확한 입사 중성입자 에너지와 질량을 측정할 수 있지만, 부피와 무게

가 크고 고비용이라는 단점을 가지고 있는 반면, CNPA는 사실상 Tokamak 장치 가까이 어디에나 설치 가능하며 이동과 교체가 용이하고 다른 장치와도 같이 응용 가능하며 저비용이라는 장점을 가지고 있어 차세대 진단장치로 각광받고 있다.

본 논문에서는 KSTAR에 CNPA의 실제 적용 가능성 여부를 판단할 수 있는 silicon diode detection system을 제작하고 고 에너지 중성입자 대신 Ion beam을 이용하여 교정하는 것을 최종 목표로 하였다. 전체적인 system의 구성은 저 에너지 영역의 교정을 위해 gamma-ray source를 이용한 교정 실험과 ion beam acceleration system을 제작하고 100 keV까지 가속시킨 ion beam을 detection 하는 실험으로 나누어 진다. 첫째, Am-241 선원과 Ba-133 선원을 이용하여 detector를 교정하였고, 둘째로 Ion beam의 효과적인 detecting을 위한 적절한 ion beam 전류를 측정하였다. 마지막으로 가속기를 제작이용하여 ion beam을 100 keV까지 가속시킨 후 ion beam energy 특성을 분석 하였다.

## II. 이론적 배경

### 1. 핵융합

#### 1.1. 정의

핵융합이란 원자내부 핵 안에 존재하는 Proton 과 중성자에 의해 서로 다른 핵들이 융합하는 반응을 말한다. 핵융합 반응을 위해서는 작고 불안정한 핵들이 결합하여 안정적인 핵으로 변환되면서 질량결손에 따른 에너지차를 방출하여야 한다. 다음 Fig 1 은 핵융합 반응을 일으키는 과정을 나타낸다. D 와 T 가 반응을 일으켜 He, 중성자와 17.6 MeV 의 에너지를 만든다. 두 핵을 충돌시키기 위해 필요한 에너지는 방출되는 에너지에 비하면 아주 작은 수준이다. 반응 후 방출되는 에너지는 생성된 두 핵이 서로 운동 에너지의 형태로 나누어 갖게 된다.

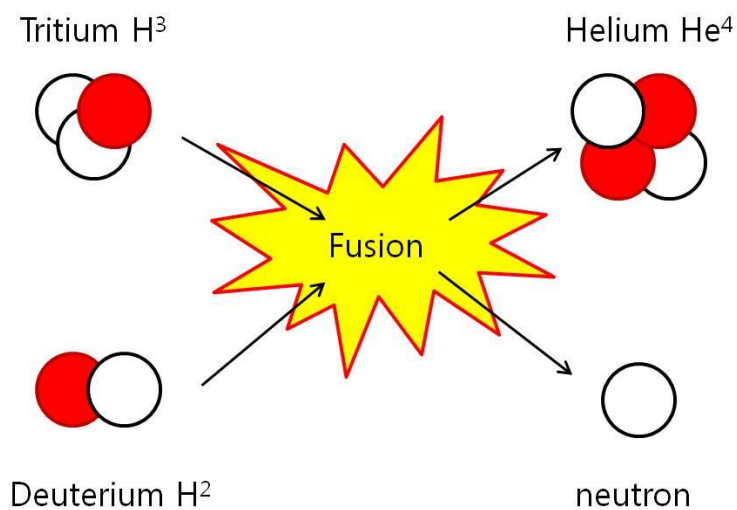


Fig 1 Fusion reaction (D-T)

반응이 일어나기 전의 핵들의 결합 에너지는 반응 후의 핵들의 결합 에너지보다 높으며 이 에너지의 차이가 핵융합 과정에서 방출된다. 이는 아인슈타인의 질량 에너지 등가원리인 ( $E=mc^2$ )으로 표현 될 수 있다. 핵융합이나 핵분열 반응 후 핵들은 실제로 반응 전 보다 질량이 덜 나가며 이 차이가 에너지로 변환된다.

핵융합 반응에도 여러 이용가능성이 있는 핵융합 반응이 있는데, Table 1.은 이용 가능한 핵융합 반응의 종류를 나타낸다.

Table 1 Fusion reactions

| 반응 종류                              | 반응식                                 |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| D-D 반응                             | $D^2 + D^2 \rightarrow He^3 + n^1$  |
| D-D 반응                             | $D^2 + D^2 \rightarrow T^3 + p^1$   |
| D-T 반응                             | $D^2 + T^3 \rightarrow He^4 + n^1$  |
| D-He <sup>3</sup> 반응               | $D^2 + He^3 \rightarrow He^4 + p^1$ |
| D <sup>2</sup> -Li <sup>6</sup> 반응 | $D^2 + Li^6 \rightarrow 2He^4$      |
| p <sup>1</sup> -Li <sup>7</sup> 반응 | $p^1 + Li^7 \rightarrow 2He^4$      |

핵융합 반응에 이용되는 연료는 주로 H 동위원소인데 Fig 2 는 여러 핵융합 종류에 따른 반응 단면적을 보여준다. 여기서 D-T 반응 단면적은 D-D 반응이나 D-He<sup>3</sup> 반응보다 매우 크다. 따라서 가장반응이 일어나기 쉬운 D 와 T 의 반응을 목표로 하는 핵융합의 개발이 추진되고 있다.



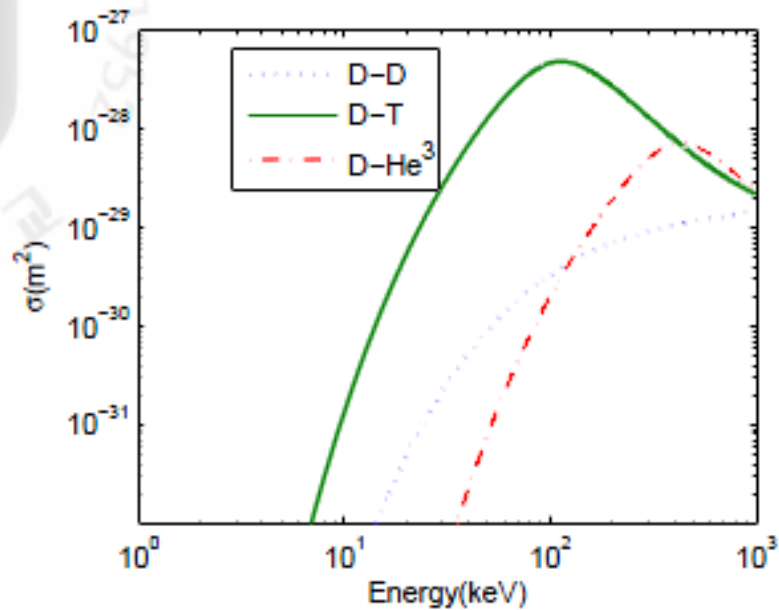


Fig 2 Cross section of various fusion reaction

연료로서 D 는 바닷물 가운데서 얻을 수 있는데 충분한 양이 있다. 다른 한 가지 연료로서 쓰이는 트리튬은 자연에 존재하지 않는다. 하지만 리튬을 사용하는 핵융합반응에서 나오는 중성자를 쪼여서 만들 수 있다. 리튬도 충분한 양이 있고 바닷물 가운데서 취한다. 단, 트리튬은 방사성 동위원소이기 때문에 취급이 어렵다. 중수소만 연료로 하는 D-D 반응은 트리튬 없이 반응을 일으킬 수 있지만 지금 보다 훨씬 더 높은 온도에서 반응하므로 2 세대 핵융합으로 생각하고 있다. 다른 핵융합 반응으로 방사성 물질을 생성하지 않는 P-B 반응이나 D 와 He<sup>3</sup> 반응도 있다. 하지만 위의 둘의 반응은 현실 가능성이 떨어지므로 3 세대 핵융합으로 생각한다.

이와 같이 핵융합을 실현시키기 위해서는 핵융합의 필요조건을 만족해야 한다. 첫째, 반응입자의속도(온도)이다. 핵은 서로 같은 극의 에너지를 가지고 있기 때문에 전하에 의한 반발력을 넘어서야 한다. 속도로 표현하게 되면 1000km/s

가 된다. 두 번째, 충돌 빈도이다. 핵융합 반응을 일정하게 유지시켜 일정한 전력을 얻기 위해서는 Tokamak 내부에서 핵자들의 충돌의 빈도를 높여야 한다. 즉, 연료 입자의 밀도를 높이는 것이 중요하다. 세 번째로 에너지 구속시간이 길어야 한다. Plasma 내부를 어떠한 방법으로든 가열해야 되지만 가열 후 연료입자로부터 도망가는 열을 억제하는 것도 중요하다는 것이다. 따라서 에너지 구속시간을 길게 유지하여야 한다. 이와 같은 결과를 종합해보면 핵융합로의 필요조건을 Lawson 조건으로 표현할 수 있게 된다. Lawson 조건이란 밀도와 구속시간의 곱의 형태로 정의된다.

한편, 핵융합 반응을 얻기 위해 핵융합로에서는 항상 plasma 를 무언가의 방법으로 가열하여야 한다. 하지만 이용 가능한 발전장치가 되기 위해서는 가열한 Power 보다도 많은 Power 를 발생시켜 핵융합로 바깥으로 전력을 공급해야 한다. 여기서 임계 plasma 조건(Break Even Condition)을 정의해보자. Break Even Condition 이란 위에서 말한 것과 같이 외부에서 넣어주는 가열 Power 와 핵융합에서 발생하는 Power 가 같아지게 되는 조건을 말한다 ( $Q=1$ ). 따라서 최소한 위의 조건은 필수적으로 이루어야 한다. 이 조건이 만족된 후에, 핵융합 반응이 계속되는 조건 : 자기점화조건(Self Ignition Condition)이 되어야 한다. 즉, 가열 장치가 계의 외부로부터의 Power 를 공급하지 않더라도 핵융합 반응이 지속되는 조건이다. 이를 자기점화조건이라 한다. 이 두 조건을 만족시켜야 하는 것이 앞으로 해결해야 될 과제이다.

## 1.2. Tokamak

Plasma 의 이온과 전자는 전하가 운동하면서 전류로 흐르게 된다. 전류와 자기장 사이에는 전자기학의 법칙에 따라서 식(1)과 같이 Lorentz Force 가 작용한다.

$$\vec{F} = q \left( \vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B} \right) \quad (1)$$

입자는 전기장 안에서  $qE$  의 힘을 받고, 자기장 안에서  $qv \times B$  의 힘을 받는다. Lorentz Force 는 위의 둘을 합친 것 이라고 보면 된다.  $E$  는 전기장,  $B$  는 자기장,  $q$  는 입자의 전하량이며,  $v$  는 입자의 속력이다. 이것은 실은 모터의 원리와 같은 것인데, 자력선에도 전류에도 직각인 방향으로 힘이 미친다. Lorentz Force 에 의해 하전입자는 자기장 내에서 특징적인 운동을 하게 된다. Fig 3 은 자기장 내에서 plasma 입자의 운동을 나타낸다. plasma 입자는 자력선 근처를 Cyclotron 운동, 또는 라마 운동 이라 불리는 선회운동을 하게 된다. 입자는 선회운동과 직각인 방향, 즉 자력선과 평행한 방향의 속도에 영향을 받지 않는데 자력선 주변을 나선형으로 진행하게 된다.

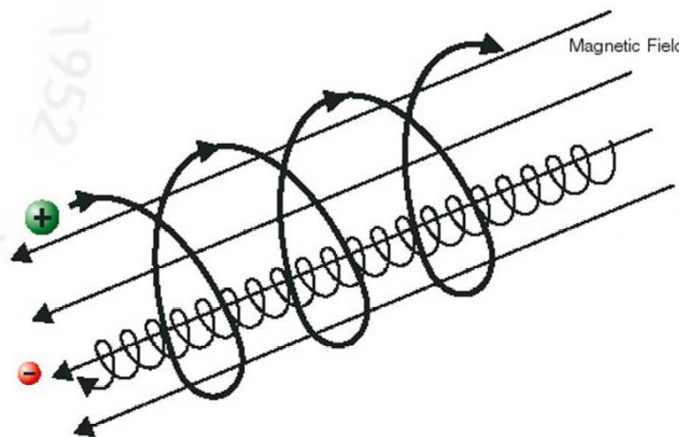


Fig 3 Cyclotron motion of plasma particles in magnetic field

이러한 현상을 이용하여 plasma 를 구속하는 자장의 하나가 Tokamak 이다. Tokamak 의 일반적인 작동원리는 아래 Fig 4 와 같다. Plasma 는 도넛 모양의 Tokamak 장치 내부에 구속 되어 있으며 D 자 모양의 전자석이 나선형의 자기장을 만들어 plasma 가 벽면에 닿지 않도록 한다.

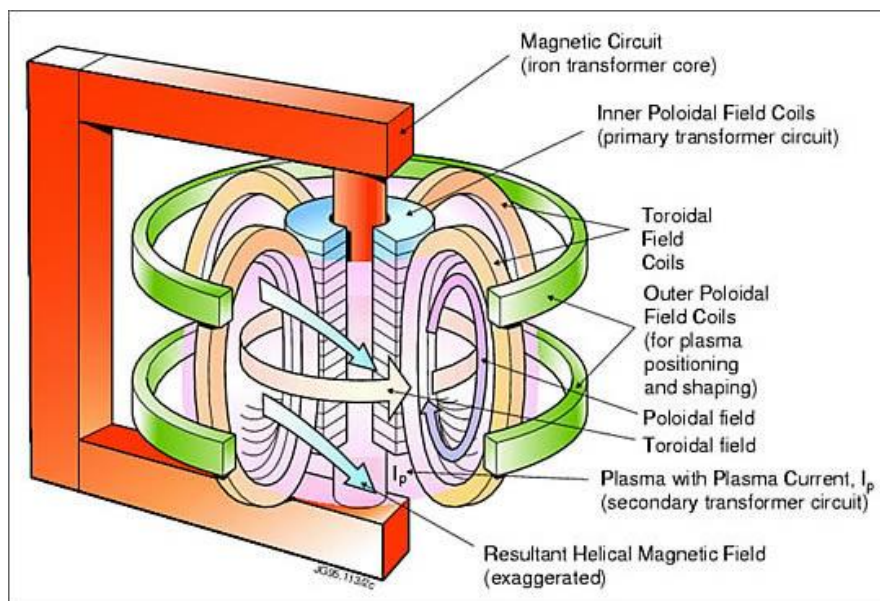


Fig 4 Principle of Tokamak operation (From JET site)

핵융합 반응 운전순서는 Tokamak 내부에 기체 상태의 중수소와 삼중수소를 소량 주입하고 이온화 시켜 1 차 코일에 가해지는 전압을 양에서 음으로 서서히 변화시킨다. 이렇게 자화된 철심은 plasma 내에 전류를 유도하게 된다. 여기서 plasma 는 일반적인 변압기에서 2 차 코일과 같은 역할을 한다. plasma 내의 양이온과 전자는 서로 반대 방향으로 움직이며 전류가 흐르는 효과를 준다. 이러한 구조의 핵심적인 장점은 Fig 5 와 같이 입자들이 고리 모양을 따라 회전하게 된다. 하지만, 단지 원형으로 돌기만 하는 것이 아니라 D 자 모양의 전자석이 큰 고리 방향의 자기장을 만들고, 변압기의 원리에 의해 유도된 큰 고리 방향의 전류(toroidal magnetic field)는 큰 고리를 감싸는 작은 고리 방향의 자기장(poloidal magnetic field)을 만든다. 이 두 자기장의 결합으로 나선 방향의 자기장이 만들어 지며, plasma 내의 입자들은 이 나선 방향의 자기장을 따라 회전하면서 Tokamak 내부에서 안정성을 가지게 된다. 이렇게 plasma 를 자기장에 의해 가두어 둬으로써 핵융합을 지속적으로 일으킬 수 있도록 한다. 따라서 높은 성능의 구속자장을 만드는 것이 하나의 과제라고 볼 수 있다.

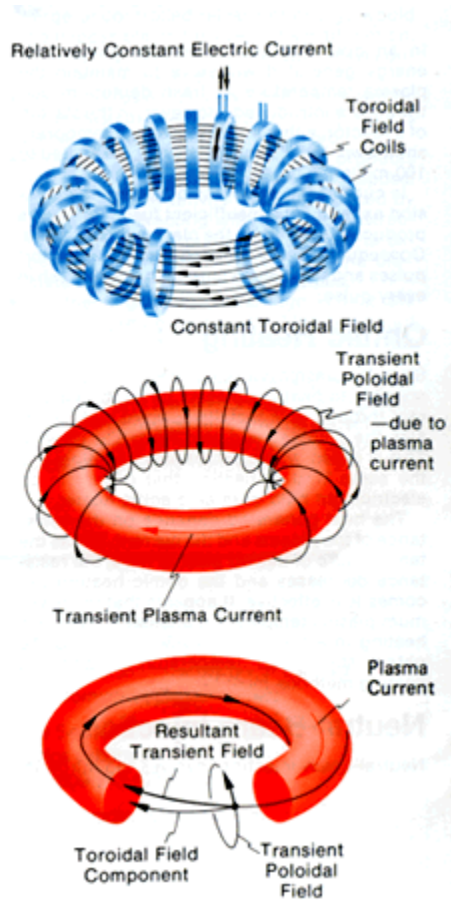


Fig 5 Principle of magnetic field building in Tokamak

Tokamak 자장 구속의 성능을 표시하는 파라미터로서 압력비를 나타내는 식(2) 베타치가 있다. 이것은 plasma 의 압력(온도 밀도)과 자장압력 비인데 이 값이 높을수록 낮은 자기장으로 많은 plasma 를 구속 할 수 있음을 뜻한다. 즉, 구속자장을 쉽게 만들 수 있고 전체 장치의 제작이 쉬워진다.

$$\text{베타치}(\beta) = \frac{(\text{plasma 온도} \times \text{plasma 밀도})}{(\text{자장강도})^2 / 2\mu} = \frac{\text{plasma 압력}}{\text{자장의 압력}} \quad (2)$$

한편, 이렇게 구속된 자장에서 핵융합 반응이 일어나게 되면 헬륨과 중성자가 생성되게 된다. 중성자는 전기적으로 중성이기 때문에 Tokamak 자기장의 영향을 받지 않고 random 하게 운동하게 된다. 이 중성자를 fast 중성자라고 부르는데 핵융합로의 블랑켓(Blanket)이 fast 중성자(14.1 MeV)로부터 에너지를 흡수하고 이것을 열에너지로 변환한다. 이 Blanket 은 fast 중성자를 감속시킬 수 있는 구조로 이루어지며, 중성자로부터 진공용기 및 초전도 자석 등의 구조물을 보호하는 기능을 가지고 있다. 헬륨 핵은 전기적으로 중성이 아니므로 자기장에 의해 구속되어 Tokamak 내부에 남아 있게 되는데 이때의 헬륨 에너지가 plasma 를 높은 온도로 유지 시켜주는 역할을 하게 된다. 하지만, 에너지를 잃은 헬륨이 많아지면 plasma 를 냉각시키는 역할을 하게 되어 오히려 역반응을 일으키게 되며 이러한 잔여 헬륨을 제거하는 문제는 디버터(Divertor)라고 하는 장치에서 추출하게 된다.

### 1.3. KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)

KSTAR 는 대한민국의 기술로 개발 제작된 차세대 초전도 핵융합 연구 장치를 말한다. KSTAR 는 300 초 이상 고주파를 낼 수 있는 MHz 의 RF 가열 시스템과 NB 가열시스템을 이용하고 직경 9.4m 높이 9.6m 무게 1,000 ton 에 해당하는 거대한 장치이다. 이름에서 알 수 있듯이 KSTAR 는 세계 최초의 Nb3Sn 초전도 자석을 설치하여 개발하였다. 최종 성능은 자기장 세기 3.5T, plasma 전류 2MA, plasma 지속시간 300 초, plasma 온도 3 억도를 목표로 하고 있다.



## 2. Plasma 가열 및 전류구동

Tokamak 에서 1 차측 권선에 흐르는 전류에서 plasma 전류 유도현상에서는 제한이 있으므로 간헐적인 pulse 운전이 될 수밖에 없다. 핵융합로에서는 온도가 pluse 형태로 오르내리는 pulse 운전은 가능한 피하여야하고 정상운전이 바람직하다. 그래서 전류기에 의하지 않고 plasma 전류를 정상적으로 흘리는 방법인 전류구동을 생각하게 되었다. 전류구동이란 전자나 이온에 일정한 방향의 속도를 가해주는 것이다. 현재 1 차 가열인 joule effect 로는 가열의 한계가 있으므로 plasma 온도를 1 억도 까지 올리기 위해서 전류구동이 필요한 것이다. Fig 6 에서 볼 수 있듯이 보조가열장치는 크게 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 전자기파를 이용하는 가열장치(Radio Frequency heating)와 중성입자를 이용하는 가열장치(Neutral Beam heating)이다.

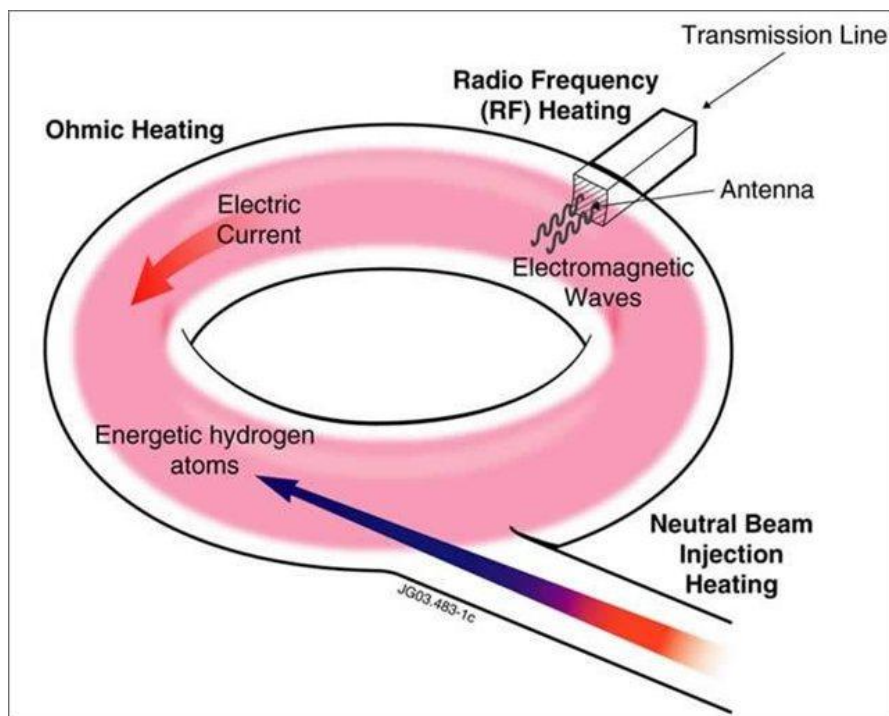


Fig 6 Additional heating system (From ITER site)

## 2.1. Joule effect

도체에 전류가 흐를 때, 도체가 갖는 전기저항 때문에 열이 발생하는 현상을 말하며, 전류(I)의 제곱과 저항(R)의 곱에 의한 열로 해석 할 수 있다. Joule effect 는 우리 일상에서도 많이 볼 수 있는데 전기 오븐, 전구와 같이 가전제품을 통하여 쉽게 알 수 있다. 이와 같이 Tokamak 에서는 Joule effect 덕택에 plasma 자체를 가열하고 구속력을 높이기 위한 자기장을 발생시킬 수 있게 된다. 다시 말하자면 수백만 암페어(A)의 전류를 유도하여 plasma 를 가열하고 그 전류에 의한 자기장(poloidal magnetic field)에 의해 plasma 를 구속하도록 하고 있다. 하지만 이와 같은 방법은 한계가 있다. 약 2keV 이상의 높은 온도로 올라가면 자체 저항이 줄어들어 그 이상의 온도로 될 수 없게 된다.

## 2.2. NBI (Neutral Beam Injection)

NBI는 위에 joule effect로 가열된 plasma에 한 방향으로 진행되는 충분히 높은 에너지(80~120keV)의 입자 beam을 주입하고 입사된 중성입자는 plasma내의 입자들과 충돌하여 전자를 잃게 되고 이온 상태로 바뀐다. 이 이온들은 plasma내의 입자들에 비해 상당히 빠른 속력으로 움직이고 일련의 주변에 있는 이온, 전자들과 충돌로 인해 plasma에 에너지를 전달해 주게 된다. 사용되는 중성입자로는 H나 D를 사용하게 되는데, Tokamak 구성용 자장에서 beam이 끊어지지 않도록 하기 위해 반드시 전기적으로 중성인 입자의 빔으로 만들어야 한다. 또한 plasma 외곽에서 이온화되기 때문에 아주 큰 beam 에너지를 가지고 입사

하여야 한다. 즉, 동시에 많은 양의 에너지를 plasma에 잘 전달하기 위해 많은 양의 중성입자 beam을 공급해 주어야 한다. 중성입자 beam 발생 원리는 Fig 7에서 보여준다. Ion source로부터 발생하는 이온들은 첫 번째로 고전압 beam 인출전극에 의해 가속된다. 그리고 이온들은 Neutralizer를 지나면서 전하교환을 하게 되고 중성화된다. Plasma로 주입되기 전에 전하교환 여부에 따라 중성화 되지 않는 이온들은 ion dump로 빠지게 된다.

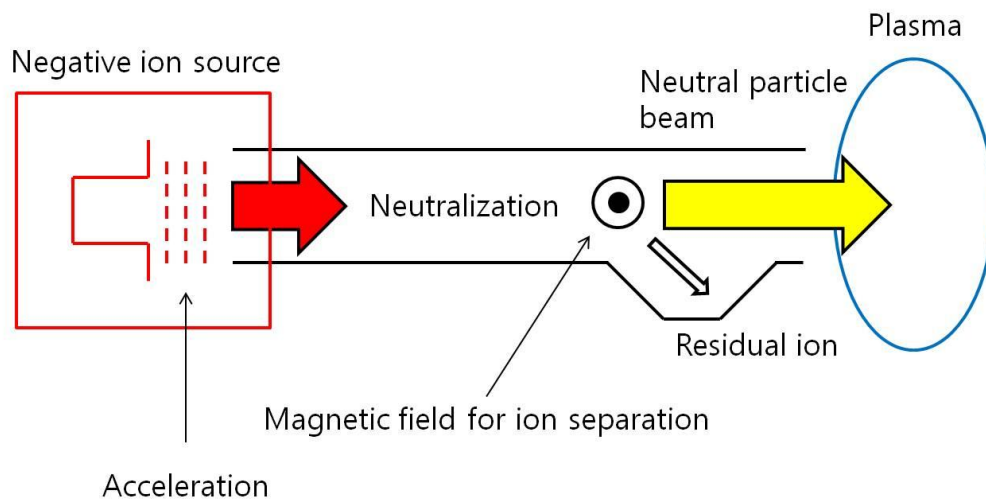


Fig 7 Principle of neutral particle beam

### 2.3. RF Heating (Radio Frequency Heating)

고주파 가열 장치는 크게 전자를 가열하는 전자 사이클로트론 공명 가열장치 (ECRH:Electron Cyclotron resonance heating)와 이온을 가열하는 이온 사이클로트론 공명 가열장치 (ICRH:Ion Cyclotron resonance heating) 두 가지로

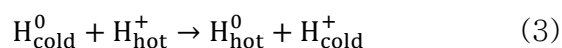
나눌 수 있다. ICRH 는 plasma 의 이온의 싸이클로트론 주파수와 같은 혹은 정수배의 주파수를 가진 RF 를 입사시켜 이온을 가열하는 장치이다. Fig 8 에서는 KSTAR 의 ICRF 와 NBI 를 보여준다.



Fig 8 ICRF antenna and NBI for KSTAR

### 3. CNPA (Compact Neutral Particle Analyzer)

어떤 물질이 기체 상태일 때는 종류가 한가지이지만 plasma 상태가 되면 전자가 떨어져 나와 전자와 이온으로 분리된다. 물론 충분한 에너지를 얻지 못한 원자는 중성인 상태로 남아 있으므로 총 세 가지 입자가 공존하게 된다. 하지만 온도가 점점 상승 된다면 전자들이 추가로 분리되어 2 가 이온, 3 가 이온, 또 전자가 모두 분리된 원자도 생겨나게 된다. 따라서 단순한 기체 상태일 때보다 구성 입자들의 종류가 훨씬 많아진다. 이렇게 여러 입자들이 전하를 띠고 전자기력에 의해 서로 끌어당기거나 밀어내기도 하고 외부의 전자기장에 반응하여 움직이기도 한다. 즉, Tokamak 자기장에 갇힌 고온의 plasma 의 운동은 당연히 복잡하고 이렇게 온도가 수 억도가 넘는 plasma 의 물성 진단은 고도의 기술이 필요하게 된다. 이런 plasma 입자들을 진단하기 위한 방법으로 NPA(Neutral Particle Analyzer) 진단법을 들 수 있다. Tokamak plasma 내의 입자들은 대부분 이온화된 상태로 존재하게 된다. 이온과 공명 전하 교환 반응에 의하여 발생하는 고 에너지 중성입자들은 전자기장을 충돌 없이 빠져 나오게 된다. 이때 빠져나온 중성입자들은 plasma 내의 정보를 그대로 간직하고 있으므로 이를 이용해 에너지를 진단하게 되는 것이다. 따라서, 고 에너지 중성입자의 검출은 매우 중요하게 된다. 중성입자와 이온의 공명전하교환 반응은 다음 식으로 나타낼 수 있다



위에서 설명한 것 같이 식(3)에 따라서 고온의 plasma 내부 이온온도 및 분포 등에 관한 정보를 얻을 수 있다.

NPA 는 핵융합 plasma 로부터 방출되는 중성입자들의 전하교환 분포를 직접적으로 측정할 수 있다는 장점이 있다. 주로 "E-parallel-to-B" 타입의 NPA 는 stripping cell 을 이용하여 중성입자들을 재이온화 시키고 전장과 자장을 이용하여 입자들을 편향시킨 후 micro-channel plate detector 에서 검출하도록 하고 있다. 그러나 기존의 NPA 는 크기와 장비 제작비용의 문제로 인하여 다채널 검출기 제작이 힘들어지고 있다. 최근에 silicon diode 나 천연 다이아몬드 검출기 등과 같은 소형 반도체 검출기를 사용하는 대안이 제시되고 있다.

Fig 9 는 NPA 의 검출 원리와 CNPA 의 검출원리를 비교하여 보여준다. CNPA 는 보통 NPA 와 비교하여 몇 가지 다른 점을 가진다. 첫 번째로 steering electromagnetic 필드를 제거 하여 핵종 진단 능력이 없어 졌다는 것이다. 하지만 ICRF 에 의해서 가열된 D(H)plasma 에서 생성되는 중성입자는 한정되어 있기 때문에 문제가 되지 않는다. 두 번째로 NPA 보다 낮은 counting 능력을 가진다. NPA 검출기에서는 많은 detector 가 설치되어 있으므로 확실히 더 좋은 counting 능력을 가질 수밖에 없지만 PHA(Pulse height analyzer)모드를 기반으로 하는 CNPA 에서는 그렇게 중요한 문제가 되지 않는다. 전체적인 PHA 시스템 도식이 Fig 10 에 나타나 있다.

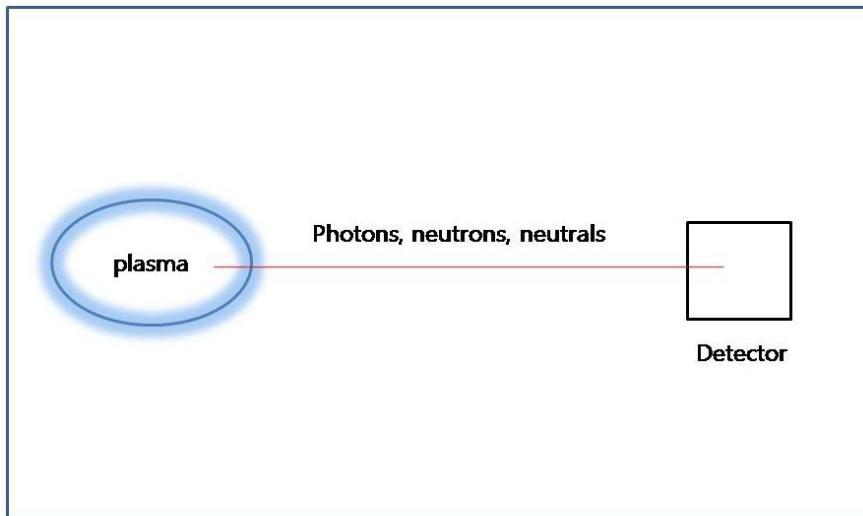
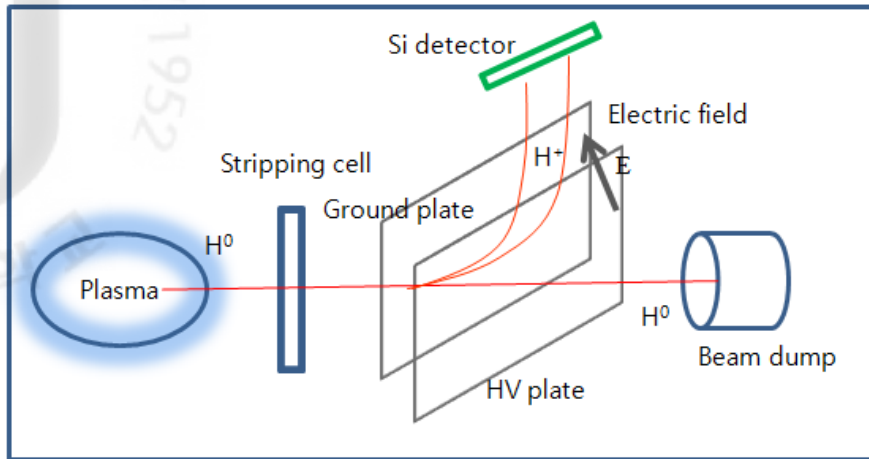
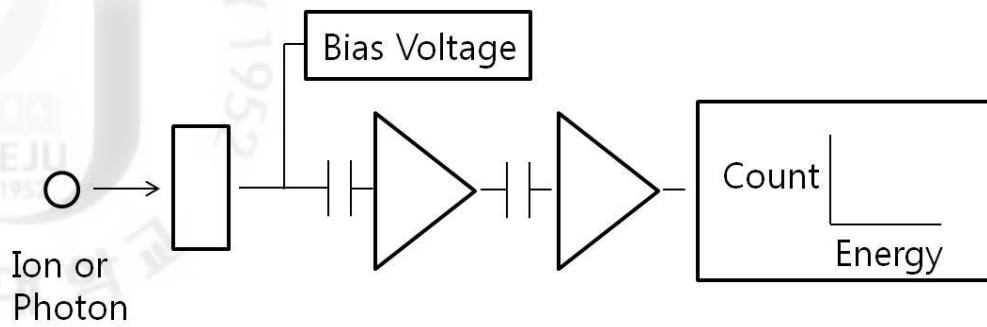
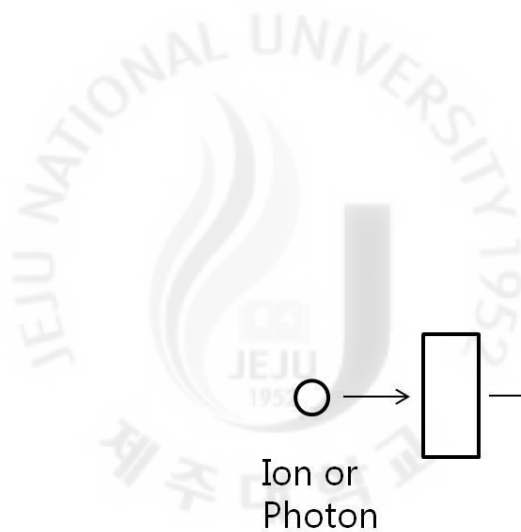


Fig 9 Comparison of NPA and CNPA



Si Diode Pre-amplifier Amplifier Pulse Height Analyzer

Fig 10 General pulse height analyzer

CNPA 는 일반적으로 silicon diode 를 detector 로 하고 Pre-amplifier, shaping amplifier, pulse-height analyzer 로 구성된다. 중성입자가 silicon diode 에 부딪히면 즉각 이온화되고 전자-전공 쌍(3.7eV)의 pulse 신호를 생성한다. 이 신호들이 Pre-amplifier 를 통해 voltage pulse 신호로 변환되고 amplifier 를 통해 voltage pulse 신호들이 증폭된다. 최종 voltage pulse 신호들의 높이는 입사된 중성입자들의 energy 에 대한 선형적 값을 나타낸다. 디지털 pulse 신호 분석을 통해 탈출된 중성입자들의 energy 스펙트럼을 얻을 수 있다.



#### 4. Cold Hollow Cathode Ion Source

Plasma 내부에서는 전자 또는 음이온과 양이온의 하전량이 동일하다. 하지만, Fig 11 에서 볼 수 있듯이 양 또는 음으로 하전된 입자만을 선택적으로 분리시켜 집속한 것을 ion beam 이라 한다. Ion beam 의 경우는 plasma 의 경우와는 다르게 그 전류 밀도와 에너지가 서로 독립적으로 조절될 수 있다. Plasma 는 단순히 방전이라는 현상만을 가지지만 ion beam 의 경우 방전된 plasma 내에서 선택된 ion 을 밖으로 끌어내는 것이다.

Ion beam 을 발생시키기 위해서 먼저 plasma 를 발생 시켜야 한다. 어떻게 plasma 를 발생시키는가에 따라서 Ion source 을 분류 할 수 있는데 micro wave, radio frequency, cold hollow cathode 또는 DC 를 이용 할 수 있으며 각각의 경우 서로 다른 형식을 갖는다.

또한 Ion source 의 beam 은 Ion optic system 에 의해 조절되게 된다. Ion optic system 이란 ion beam 의 에너지와 방출 각을 임의로 조절 가능하게 하는 grid 로 구성된 system 을 말한다. Ion source 에서 방출되는 ion beam 은 Ion optic system 의 grid 전국 구멍의 형태, 모양, 크기, 숫자에 따라 조절이 가능하며, 인가전압에 따라 ion beam 이 변화한다. grid 의 구조적인 모양에 따라 오목한 형태에서 focus, 평평한 형태에서 collimate, 볼록한 형태에서 divergence 시킬 수 있다.

Ion source 은 일반적으로 기체의 방전을 위한 필라멘트와 양이온 에너지를 가하기 위한 양극, 이온 방출을 위한 optic system, 이온화 효율을 높이기 위한 영구자석으로 구분된다. 예를 들어, Kaufman ion source 에서 열전자는 필라

멘트로부터 방출되는데 중성의 기체입자와 충돌하여 plasma 를 형성하게 된다.

식(4)에서 보면 최대 운동에너지는 열전자가 방전전압  $V_d$ 에 의해 가속된다.

$$E_{\max} = eV_d \quad (4)$$

Plasma 의 이온과 전자들의 운동방향은 전자기장 내에서 큰 의존성을 갖는다. 위에서 설명한 것과 같이 이온과 전자들은 자기장의 방향에 따라 궤도를 그리며 운동하며 중성입자와의 충돌확률이 증가한다. 따라서 수백~수십 mT 정도의 자기장을 걸어 주어 전자의 운동 경로가 길어지면 상대적으로 중성기체의 양이 적더라도 충돌확률이 높기 때문에 상대적인 Ion source 의 작동 압력이 낮아져 실험적인 제어가 쉬워진다. 생성된 이온은 ion optic system 에 의해 방출된다.

이에 반해 Cold hollow cathode 방식은 ion beam 의 질이 우수하고, 가격이 저렴하며, 비활성 및 반응성 기체를 이온으로 사용할 수 있어 산업 전반에 널리 사용되고 있다. Fig 11 은 cold hollow cathode Ion source 을 보여 주고 있다.

Cold hollow cathode Ion source 은 1-cold hollow cathode, 2-anode, 3-igniting electrode, 4,5-permanent magnet 6-ion optic system 으로 구성된다. Kaufman Ion source 은 필라멘트 가열에 의한 열전자를 가스의 이온화원으로 사용하는 반면 cold cathode Ion source 은 cathode 에서의 글로우 방전을 이용하여 전자를 생성시킨다. 즉, 중성기체가 cathode 를 통과할 때 방전 전압을 인가하게 되면 직류 글로우 방전이 발생한다. 글로우 방전으로 생성된 전자를 plasma 챔버로 인출 하여 중성기체와의 충돌을 발생시켜 plasma 를 생성 시킨 후 외부로 선택한 이온만 방출하는 형식이다.

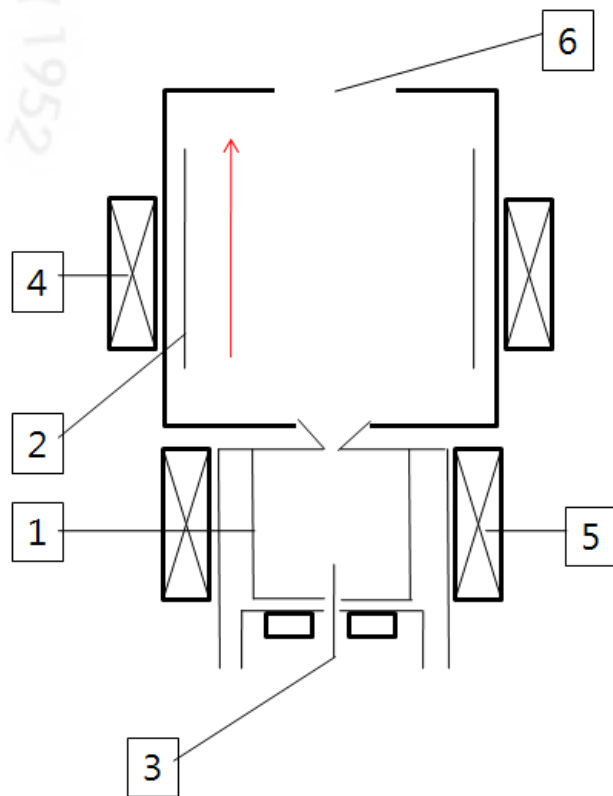


Fig 11 Schematic of cold hollow cathode ion source

## 5. 가속기

지구상에서 질량을 가지고 있는 모든 물체는 서로 잡아당기는 힘이 있다. 이 힘이 바로 뉴턴의 만유인력이다. 하전입자 역시 상호간에 힘이 작용한다. 그러나 이 힘은 만유인력과 달리 서로 다른 부호를 가진 하전입자 사이에서는 인력으로, 같은 부호를 가진 하전입자는 척력으로 작용한다. 일반적으로 자석을 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 이 힘을 쿨롱의 힘(Coulomb's law)이라고 한다. 전자와 같이 음전기를 띤 입자는 양극으로, 양성자와 같이 양전기를 띤 입자는 음극으로 끌려가게 되는 것이다. 끌려간다는 것은 힘이 작용하고 있음을 나타내며, 힘이 작용한다는 것은 질량을 가진 물체가 가속되고 있음을 뜻한다.

가속기의 원리는 이러한 성질을 이용한 것이다. 가속기는 이온을 생성하여 전기장을 이용한 높은 전위차를 걸어주어 가속시키고, 이를 자기장을 이용하여 원하는 표적으로 이동시키는 장치이다. Ion source 에서 생성된 ion beam 은 높은 전위차를 통과하여 로렌츠 힘(Lorentz force)에 의해 가속되게 된다. 이렇게 가속된 이온 빔은 전자석 장치에 의해 방향을 바꾸어 준다. 원하는 에너지까지 가속된 입자는 표적으로 이동되게 된다.

가속기는 가속 방법에 따라 선형가속기와 원형가속기로 나뉘며, 가속입자의 종류에 따라 전자가속기와 양성자 및 중이온가속기로 구분된다. 선형가속기는 주로 전자를 고진공 직선 궤도에 따라서 가속하는 것이고, 코크로프트-윌턴장치나 밴더그래프정전고압발생기(Van de Graff generator)와 같이 직류 고전압으로서 일시에 가속하는 것과 고주파 전자기장을 이용하는 것 등이 있다. 원형가속기는 입자를 고진공 원형궤도에 따라 가속하는 것으로, 사이클로트론(cyclotron), 베타트론(betaatron) 및 싱크로트론(synchrotron) 등이 있다.

가속입자에 따라 분류하면 양성자가속기는 대부분 원형가속기이고, 전자 가속기 중에서 고에너지 가속기는 대부분 선형가속기이다. 다음 Table 2는 가속 입자의 종류에 따른 특성을 나타낸다.

Table 2 Characteristic of various particles

| Particle            | Electron                              | Proton                                  | Heavy Ion                               |
|---------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Source              | Electron                              | Positive H                              | Heavy Ion                               |
| Pulsed Acceleration | Simple Structure, Long life time      | Complex Structure, Short life Time      | Complex Structure, Short life Time      |
| CW Acceleration     | Simple long Structure, Long life time | Complex long Structure, Short life Time | Complex long Structure, Short life Time |
| Construction cost   | Low                                   | High                                    | High                                    |
| Maintenance         | Low                                   | High                                    | High                                    |
| Size                | Small                                 | Large                                   | Large                                   |

### III. 실험방법 및 구성

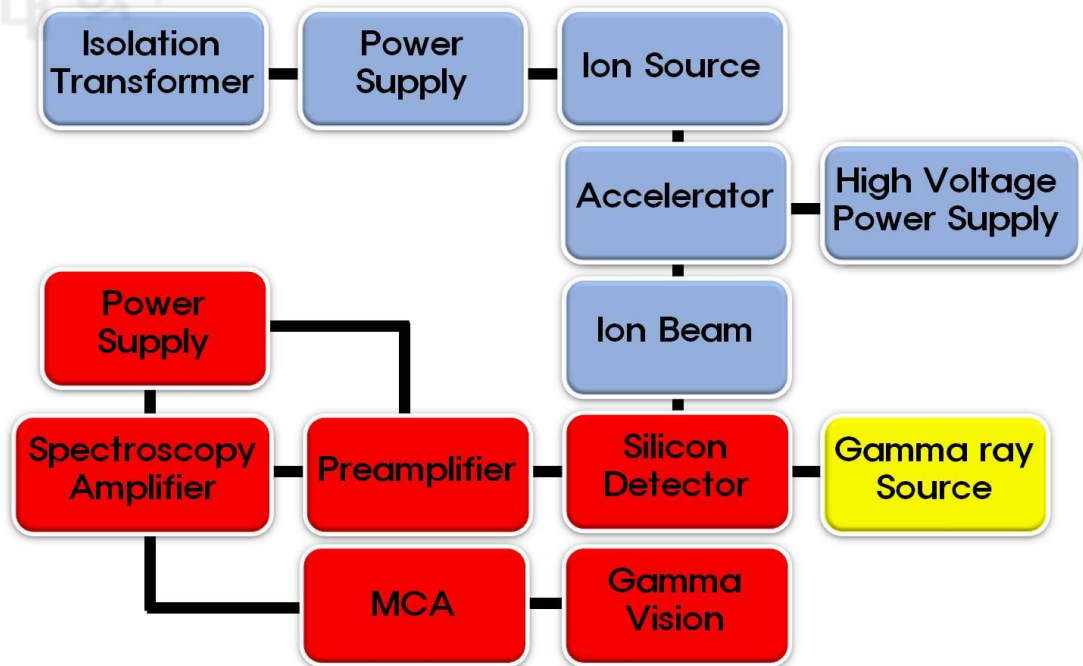


Fig 12 Component of experimental device

Fig 12 는 전체적인 실험장치의 시스템 구성을 보여준다. 전체적인 실험 장치는 Ion beam 인출과 가속을 위한 Ion source 와 accelerator, Isolation transformer, H.V Power supply, Ion beam 측정을 위한 silicon detector, pre-amplifier, amplifier, MCA, Gamma vision software 로 구성되어있다. Pre-amplifier 로는 Ortec 142-AH model 을 사용하였으며, pre-amplifier power 와 silicon diode 의 bias 는 각각 CANBERRA 사의 Power Supply model 3102 와 Spectroscopy Amplifier model 2020 을 사용하였다. MCA 는 Ortec 사의 Trump 8k 모델을 사용하였고, 1024 채널로 설정하였다. 에너지

pulse 에 비례하는 count 는 gamma vision software 를 이용하여 모니터링 하였다. 진공 Chamber 는 직경 50cm, 높이 80cm 의 원통형으로 제작 하였으며, 공정은  $1 \times 10^{-4}$  torr 영역에서 진행되었다. Chamber 압력을 측정하기 위하여 Alctor acc 1009 진공 게이지를 사용하였으며, Ion source 로 불활성 가스와 반응성 가스를 ion beam 으로 생성시킬 수 있는 Cold hollow cathode Ion source 를 사용 하였다. Fig 13 은 전체적인 실험장치의 사진을 보여준다.

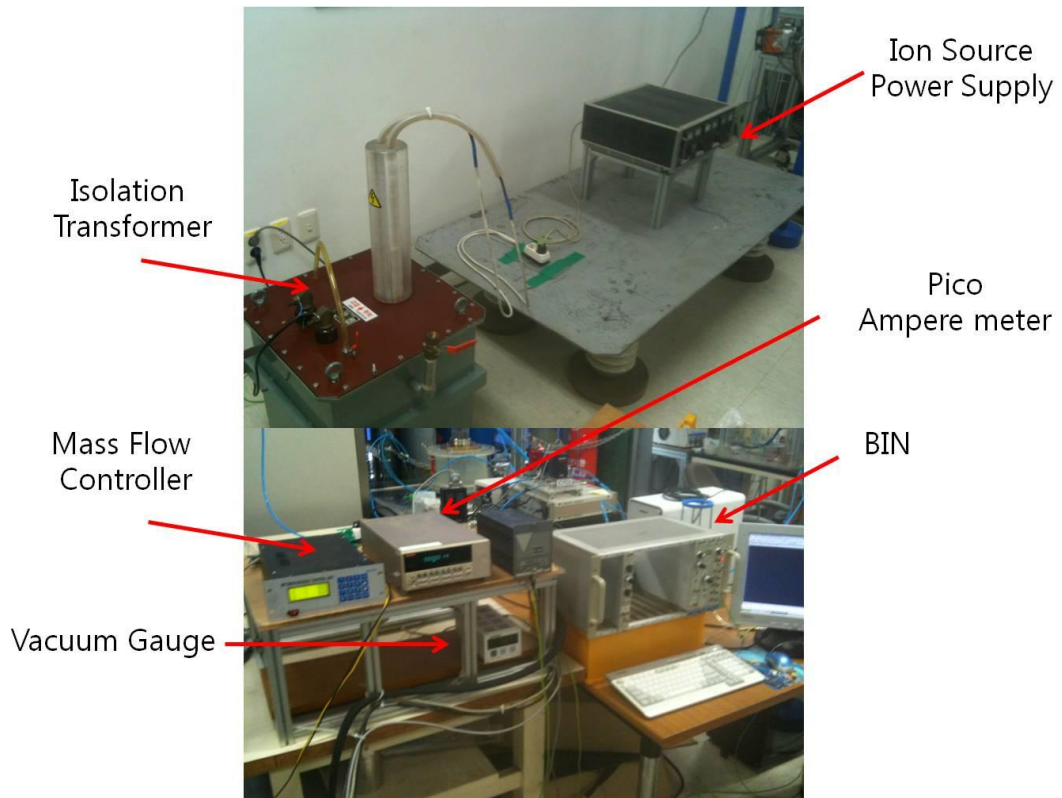
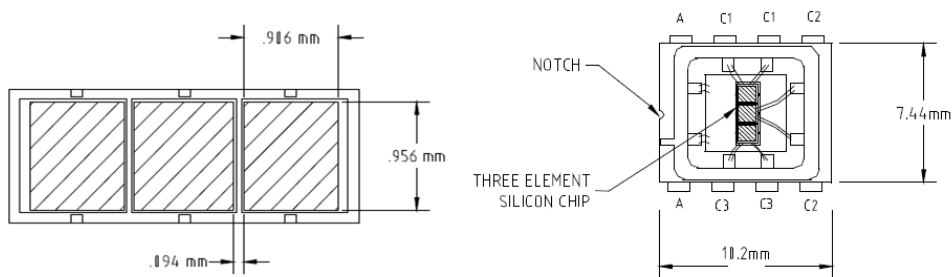


Fig 13 Experimental device

## 1. CNPA 교정 실험

Silicon diode 로는 INC(International Radiation Detector)의 AXUV3ELA 모델을 사용하였다. Fig 14 는 AXUV3ELA silicon diode 의 배열과 특성을 보여준다. Diode 배열은  $1\text{mm}^2$  diode 3 개로 구성되었으며, detector 앞부분 입구에는 아주 얇은 (3-7nm)알루미늄 필터가 부착되어 있다. 이 알루미늄 필터는 거의 모든 UV 와 가시광선을 차단하는 역할을 하게 되어 노이즈를 줄이는 효과를 거둔다. Silicon diode 의 ~100 keV 영역대의 효과적인 에너지 측정을 위해 교정을 하였다. 교정 선원으로는 Am-241 과 Ba-133 을 이용하였고, Silicon diode 와 다이오드 소켓을 연결한 후 vacuum flange feed-through(9 pin)를 사용하여 vacuum chamber 와 연결하였다. Silicon diode 와 Pre-amplifier 사이의 간격을 최대한 가깝게 연결 하였다. Pre-amplifier 의 운전 전압은  $\pm 24\text{V}$  이고, silicon diode 와 Pre-amplifier 사이의 간격을 최대한 가깝게 연결 하였다. Silicon diode bias 전압은 50V 로 주었다. Shaping time 은  $2\mu\text{s}$  로 주었고, gain 은 500 으로 하였다.



| Model no. | Sensitive Area (mm <sup>2</sup> ) | Size (mm)  | Shunt Resistance (MΩ) | Capacitance @0V (pF) | Risetime (10-90%) (nSec) |
|-----------|-----------------------------------|------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| AXUV3ELA# | 1 (X3)                            | 1 X 1 (X3) | 1000                  | 40                   | 1                        |

Fig 14 AXUV3ELA Silicon diode arrays



## 2. Ion Beam 전류 측정 실험

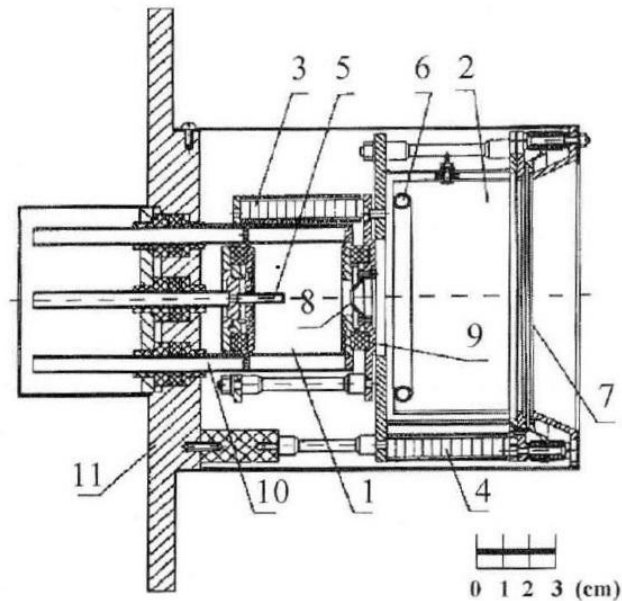


Fig 15 The scheme of ion source

Fig 15 는 Ion source 의 전체 단면도를 보여준다. Ion source 의 주요 구성요소는 (1,2)음극과 양극 chamber ; (3,4)음극과 양극 자석 ; (5,6)main 과 additional gas distributors ; (7)이온 추출 시스템으로 구성된다. gas distributor 는 전기적으로 절연되어 설치되었다. orifice(8)는 직경 1mm 이다. 음극과 양극은 절연체로 절연하였고 (10)냉각채널에 의해 cooling 되었으며, (11)플랜지를 이용하여 accelerator 와 Ion source 를 연결하였다.

Fig 16 은 Ion source 회로도를 보여준다. 가스 주입구를 통하여 Ion source 내부의 음극으로 유입된 중성기체는 방전 전압 장치(1)에 인가되는 양전압과 음전압에 의해 음극 chamber 내에서 glow discharge 가 일어난다. Glow discharge 에 의해 생성되는 전자는 양극의 전위 차이에 의해 양극 chamber 로 이동된다. 인출된 전자는 양극 chamber 내에서 중성기체와 충돌하여 plasma 를 발생시킨다.

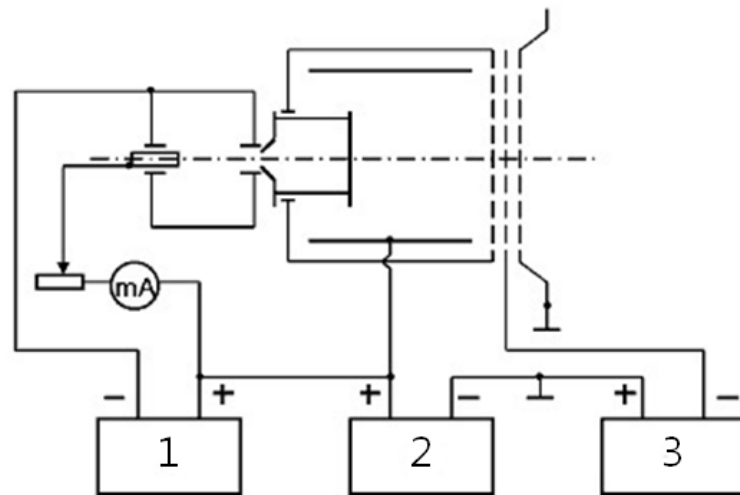


Fig 16 Circuit diagram of ion source

이때 양극 chamber 주위 자기장에 의하여 plasma 가 회절이 일어나게 되어, 가스 이온화 효율을 증가 시키게 된다. 즉, plasma 밀도를 증가시키게 된다. plasma 에 양전압(2)을 인가시키면 이온은 인가시키는 양전압에 의하여 에너지를 얻게 되며, 외부 이온 추출 전극에 negative 전압을 걸어 이온만 뽑아 내게 된다. Ion beam 에 대한 전류 측정을 위해 Faraday cup 을 자체 제작

하였다. 이온 인출구에서 60mm 거리에서 측정 하였다. Faraday cup 의 전자 수집통 내경은 30mm 로 하였으며, 컵의 외경은 50mm 로 제작하였다. 전류신호 인출은 원통형 전자수집통과 feed-through 를 연결하고 외부에서 Pico ampere meter 를 통해 측정하였다.

### 3. Ion beam 가속 및 에너지 측정 실험

Ion source 에 주입하는 가스는 순도 99.99%의 Ar 가스를 사용하였으며, 유량은 MFC(mass flow controller)를 사용하여 조절하였다. MFC 에서 control 가능 가스유량은 1~10sccm 이다. Ion beam accelerator 의 디자인은 Solid works program 을 사용하였다. Program 에서 디자인했던 모습과 실제 완성한 후 설치한 모습을 Fig 17 에서 볼 수 있다.

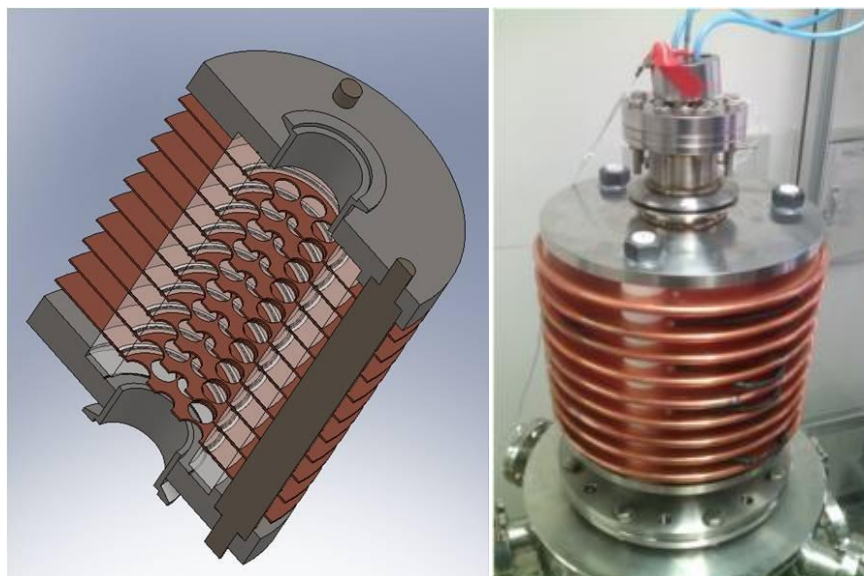


Fig 17 Accelerator design and installation

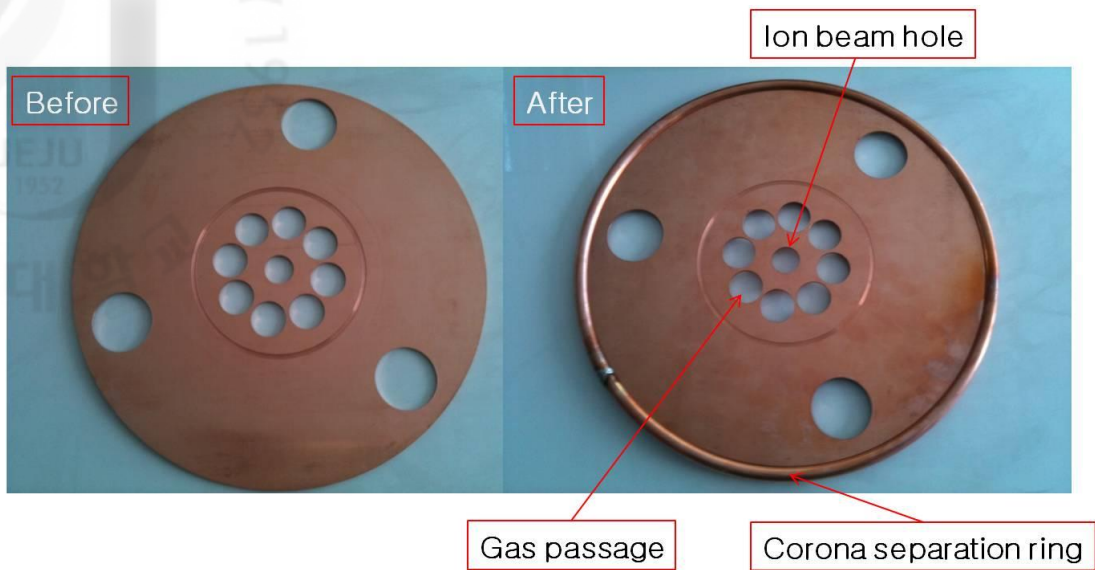


Fig 18 Accelerator electrode

vacuum chamber 와 accelerator 의 연결을 위하여 플렌지를 사용하여 connector 부분을 제작하였고, 절연체는 Teflon 을 사용하였다. Teflon 은 지름 20mm 원형으로 제작하였고 절연과 가속장치의 높이 조절을 할 수 있도록 하였다. Fig 18 은 전극의 모습을 보여준다. 지름 300mm 구리판 9 개를 20mm 간격으로 설치하였다. 또한, 구리판 사이나 전극 끝부분에서 발생할 수 있는 corona 방전을 줄이기 위해 corona separation ring 을 설치하였다.



Fig 19 Mounted collimator at Feed-through

Ion beam accelerator 는 ion beam 이 위에서 아래방향으로 흐르도록 구성 되었으며, 효과적인 Ion Source 가속을 위하여 전극 사이마다  $1G\Omega$ 의 저항을 연결 하였다. High Voltage 전원으로는 KSC 사의 100kV, 3mA 을 사용하였다. Ion beam 의 가속에 따라 직접적인 측정은 silicon diode 의 손상을 야기 할 수 있으므로 reflector 를 설치하여 반사된 ion beam 을 측정하였다. Ion source beam 의 방향과 확산을 한정시키기 위하여 vacuum flange feed-through 에 collimator 를 설치하였다. Fig 19 는 collimator 가 설치된 모습을 보여준다.

## IV. 결과 및 고찰

이번 연구에서는 위에 주어진 실험방법에 따라 실험결과를 다음과 같은 순서로 나타내었다. 첫 번째, Ion source beam 측정을 위한 silicon diode의 교정실험을 하였다. 첫 번째 실험에서 제일 문제가 되었던 점은 silicon diode의 노이즈를 줄여야 하는 것이었다. 노이즈를 줄이기 위해 diode 주변에 납 벽돌을 사용하여 차폐하였고, pre-amplifier와 diode 사이의 간격을 최대한 줄였다. Silicon diode 교정 선원으로는 Am-241과 Ba-133을 사용하였다. 두 번째로 faraday cup을 이용하여 Ion source beam에 대한 전류 측정을 하였다. 마지막으로 자체 제작한 가속기를 사용하여 Ion beam을 가속시켜 이에 대한 가속 여부를 판단하고 첫 번째 교정 실험을 토대로 Ion beam energy 측정을 하였다.

### 1. CNPA 교정 결과

AXUV silicon diode는 UV와 XUV 측정에 주로 사용되지만 입자 검출기로도 사용 가능하다. 또한  $70^{\circ}\text{C} \sim -200^{\circ}\text{C}$ 까지 온도에서도 작동가능하며, 일반 대기압은 물론이고  $10^{-10}$  Torr보다 낮은 압력에서도 사용된다. Photo generated carrier들은 p-n 접합 전기장에 의해 분리되고 전자-전공쌍 생성에 비례하는 전류를 외부회로를 통해 생성한다. Detector 앞부분 입사창에는 아주 얇은 (3-7nm)알루미늄 필터가 부착되어 있는데 이는 거의 모든 UV와 가시광선을 차단하는 역할을 하게 되어 노이즈를 줄이는 효과를 거둔다.

다. Table.3 은 교정선원으로 사용된 Am-241 과 Ba-133 의 저에너지 gamma-ray 의 메인 peak 를 보여준다.

Table 3 Gamma-ray energy peak

| Source | E[keV] | Branch ratio[%] | source | E[keV] | Branch ratio[%] |
|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Am-241 | 13.9   | 13.2            | Ba-133 | 31     | Cs-133          |
|        | 17.8   | 19.25           |        | 79     |                 |
|        | 20.8   | 4.85            |        | 302.9  | 18.3            |
|        | 26.35  | 2.4             |        | 356.0  | 61.9            |
|        | 59.54  | 35.9            |        |        |                 |

lower limit channel 은 21 로 주었고, dead-time 은 5% 미만으로 유지되었다. Detector 의 두께는 매우 얇아(30um) 고에너지 감마선에 대하여 효율이 매우 낮다. 하지만 저에너지 감마선에 대해서는 효과적이다.

Fig 20 은 silicon diode 에 검출된 Am-241 의 gamma-ray peak 를 보여준다. 저에너지 영역에서는 노이즈에 의해 다른 peak 와 구분 할 수 없었다. 하지만 branching ratio 가 제일 높은 비율을 가지는 59.54 keV peak 는 뚜렷하게 나타나 쉽게 찾을 수 있었다.

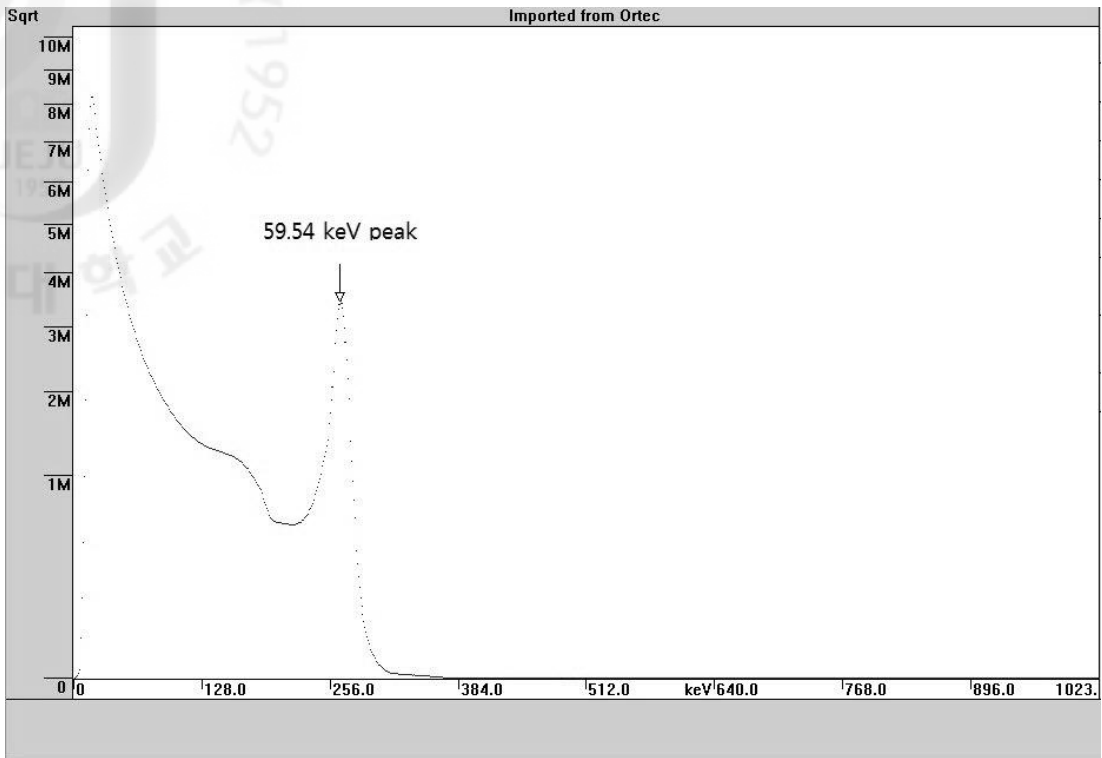


Fig 20 Am-241 gamma-ray spectrum

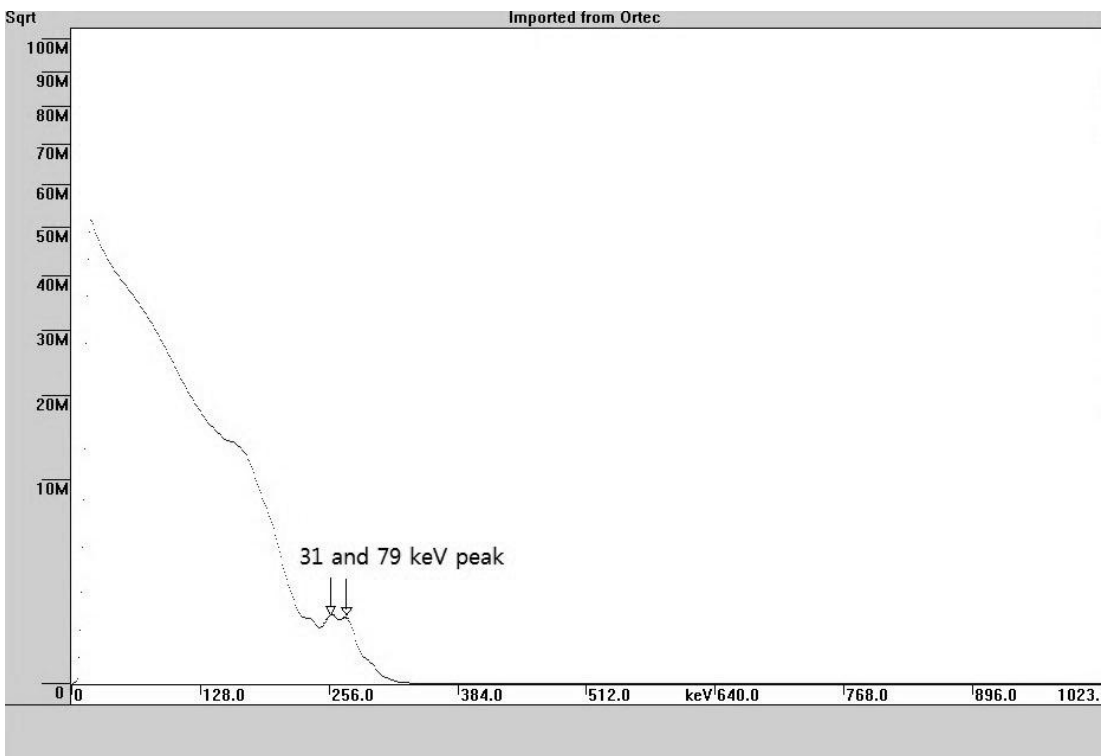


Fig 21 Ba-133 gamma-ray spectrum



Fig 21 은 Ba-133 의 gamma-ray 스펙트럼을 보여준다. 저에너지 영역에서 Cs 딸핵중 31 keV peak 와 Ba-133 의 gamma-ray 79 keV peak 를 구별 할 수 있었다. 하지만 302 keV 와 356 keV peak 를 구별 할 수 없었고, 전체적으로 노이즈가 많이 발생하였다.

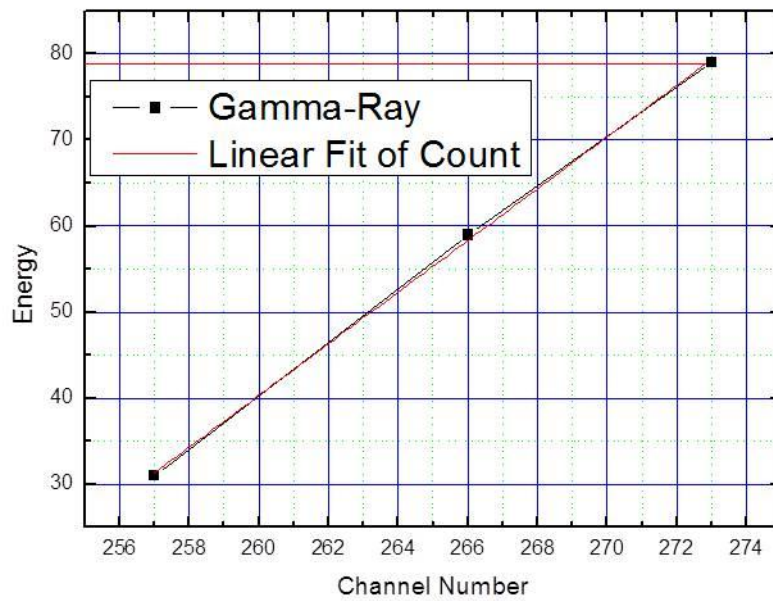


Fig 22 Calibration of Am-241 and Ba-133

Table 4 Result of energy calibration

| Equation | $y=a+b*x$ |            |
|----------|-----------|------------|
|          |           | Value      |
| Count    | Intercept | -741.04145 |
|          | Slope     | 3.00518    |

Table 5 Fitting value

| Channel Number [#] | 257       | 266           | 273        |
|--------------------|-----------|---------------|------------|
| Energy range [keV] | 31.2 (31) | 58.48 (59.54) | 79.37 (79) |

Fig 22 는 Am-241 의 gamma-ray 59.54 keV peak 와 Ba-133 의 Cs 의 딸핵종 31 keV, gamma-ray 79 keV peak 의 교정 결과를 그래프로 나타냈다. 교정결과, 교정 선원의 에너지 peak 와 linear fit of count 가 거의 일치하지 않는걸 알 수 있었다. Table 4 에서 볼 수 있듯이 교정결과에 따라 위와 같은 식을 얻을 수 있었다. Table 5 에서는 위 식에 따른 Fitting 된 값을 보여준다. 위의 결과를 바탕으로 accelerated Ion beam 을 측정 할 수 있을 것이다.

## 2. Ion beam 전류 측정 결과

Ion source 의 가스의 유량, plasma bias potential, acceleration potential, extraction gap distance 의 변화에 따른 전류를 측정하였다. Ion beam 전류를 측정하기 위해 마지막 전극으로부터, 60mm 거리에 직경 30mm 의 Faraday cup 을 설치하였다. Fig 23 은 실제 Ion beam 인출 모습을 보여준다.

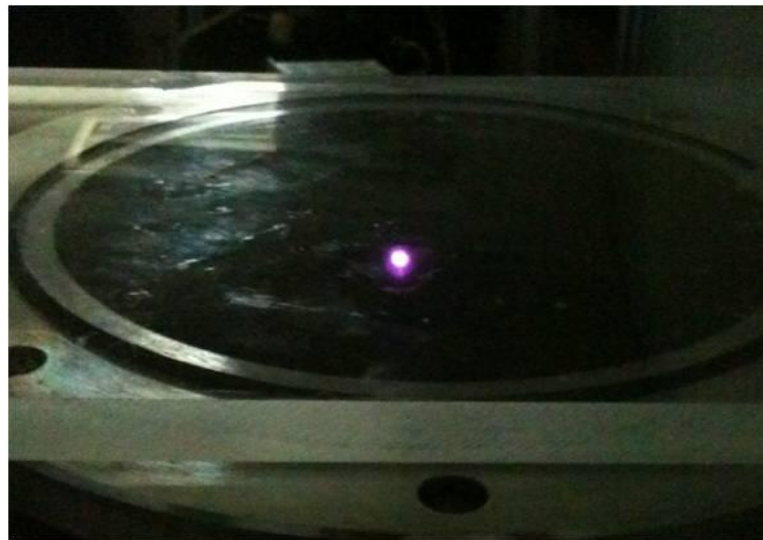


Fig 23 Ion beam

방전 가스로는 Ar 을 사용하였고 Ion source 에 주입하는 Ar 의 유량을 1,2, 3,4,5 sccm 으로 변화 시키면서 plasma bias potential 에 의한 ion beam 전류를 측정하였다. Fig 24 에서 보듯이 2 sccm,일때 전류가  $3.4 \mu A$  로 가장 높은 수치를 나타냈으며, 모든 변수에서 가스의 유량이 많아질수록 ion beam 전류가

감소하는 것을 확인 하였다. 또한 모든 유량에서 650V 일때 최고 전류를 나타내었다.

다음으로, acceleration potential 에 따른 ion beam 전류를 측정하였다. 유량은 2,3,4,5 sccm, beam potential 550V 로 고정하고 acceleration potential 을 변화 시켰다. Fig 25 에서 볼 수 있듯이 전류량에는 큰 변화가 없고 다소 전압이 높아 질수록 오히려 전류가 낮아지는 것을 나타내었다.

마지막으로 extraction gap distance 를 0.5, 1, 2mm 로 변화시켜 ion beam 을 측정하였다. 유량은 3sccm, beam potential 550V 로 고정하고 extraction 전극 거리를 변화 시켰다. Fig 26 에서 보듯이, 1mm 일때 가장 높은 전류를 나타내었다. Extraction gap distance 가 멀어 질수록 전류가 감소하였다. 반면, extraction gap distance 가 1mm 이하로 너무 가까워지면 그리드 전극에 걸리는 고전압으로 인해 아크가 발생하였다.

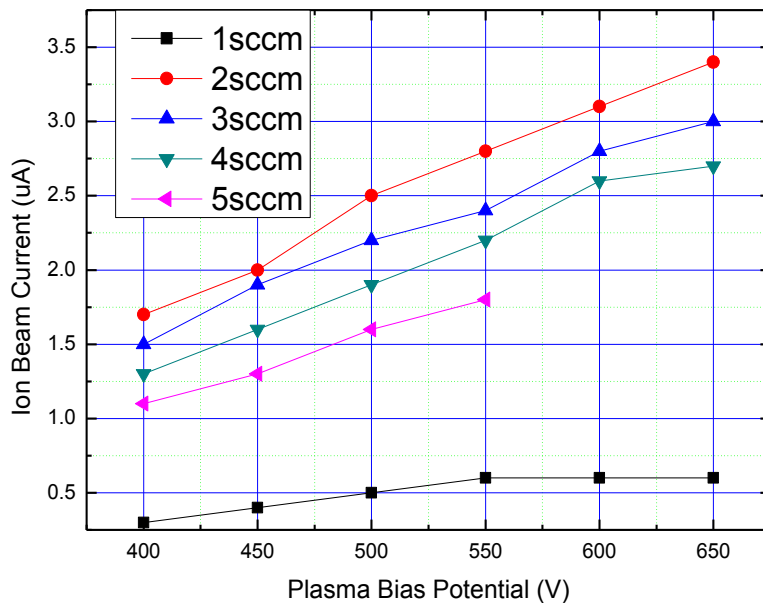


Fig 24 Ion beam current on the plasma bias potential

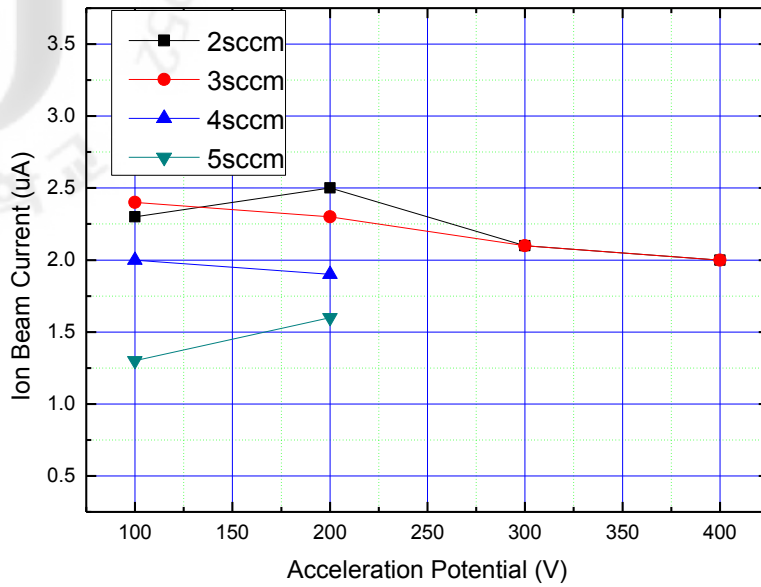


Fig 25 Ion beam current on the acceleration potential

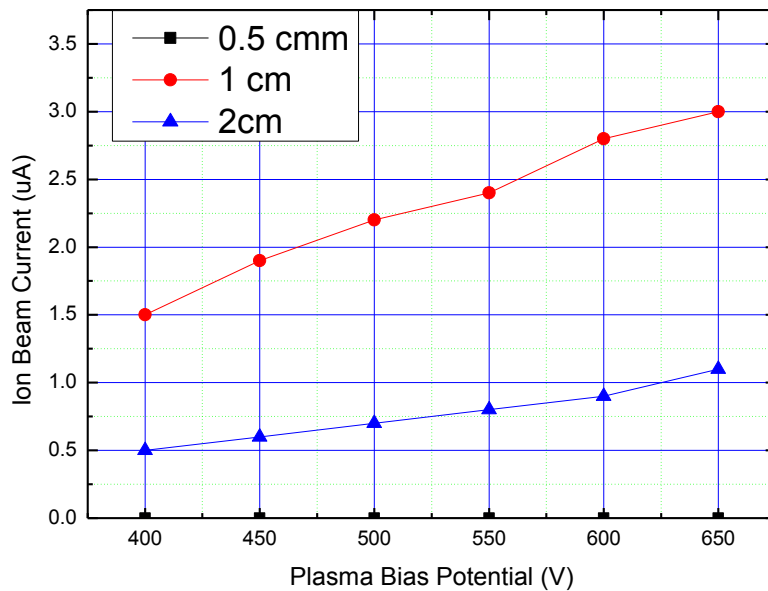


Fig 26 Ion beam current on the extraction gap distance

### 3. Ion beam 가속 및 측정 결과

Ion beam 을 100 keV 까지 가속시켜 검출하고 분석하는 것을 목표로 하였다. 하지만 Ion beam 에 효과적인 energy 주입에 실패하여 discharge 가 역방향으로 일어나고 냉각수에도 전도현상이 일어나는 문제점이 발생하였다. 즉, Ion beam 에 30kV 이상 전압이 주어졌을 때 ion source chamber 내부에 존재하는 gas 에 discharge 가 일어나 gas 주입관을 따라서 역방향으로 discharge 가 일어났다. 위의 결과를 보완하기 위해 gas 주입 관을 10m 이상 확장시켰으며, 냉각수 주입관도 역시 같은 방법으로 5m 이상 확장 유지하였다. 기존의 사용했던 냉각수는 증류수를 사용하였지만, 위와 같은 문제점의 발생으로 순도가 높은 Ultra pure water 를 이용하였다.

다른 문제점으로 ion beam 인출시 가속기 전극에서 부딪혀 아크가 발생하는 현상을 관찰 할 수 있었다.

## V. 결 론

High-temperature plasma 진단을 위해서는 plasma 를 구성하는 ion 이나 neutral particle energy 측정이 매우 중요하다. Tokamak 중심부에서 전하교환에 의해 생성된 고에너지 중성입자들은 Tokamak 전자기장을 충돌 없이 빠져나오게 된다. 이때 빠져나온 중성입자들은 plasma 내의 정보를 그대로 간직하고 있게 된다( ~160 keV). 따라서 위의 중성입자들을 측정함으로써 plasma 의 energy 를 알 수 있게 된다.

본 연구에서는 이때 탈출한 중성입자 에너지 측정하여 plasma 를 진단하는 CNPA 시스템을 설계하고 고에너지 중성입자 대신 Ion beam 을 사용하여 교정하는 것을 최종목표로 하였다. 실험 과정에서 여러 번의 시행착오를 겪었으며, 여러 문제점과 해결과제가 생기게 되었고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫 번째, Ion source 의 측정을 위한 silicon diode 시스템 제작과 교정실험을 하였다. 가장 문제가 되는 silicon diode 의 노이즈를 줄이기 위한 방법으로 diode 입사창에 알루미늄 필터를 부착하고 diode 주변에 납 블럭을 사용하여 차폐하였으며, pre-amplifier 와 diode 사이의 간격을 최대한 줄였다. 하지만 위와 같은 방법에도 저 에너지 영역에서 노이즈는 줄이지 못하였다. 결과적으로, silicon diode 에 검출된 Am-241 의 gamma-ray 59.54 keV peak 와 Ba-133 의 딸핵종 31keV, gamma-ray 79 keV peak 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 효과적인 detector 교정을 할 수 있었다. 두 번째, Faraday cup 을 이용하여 Ion source beam 에 대한 전류 측정을 하였다. 측정결과 2 sccm,에서 전류가 3.4  $\mu$ A 로 가장 높은 수치를 나타냈으며, 모든 변수에서 가스의 유량이 많아질수록 ion beam 전류가 감소하는 것을 확인 하였다. 유량이

증가 할수록 압력이 증가하면서 파생커브도 증가하여 ion beam 전류가 낮아지는 것으로 판단된다. 또한 extraction gap distance 가 1mm 이하로 너무 가까워지면 전극에 걸리는 고전압으로 인해 아크가 발생하고, 간격이 멀어지면 discharge 가 효과적으로 일어나지 않아 전류가 크게 감소하였다. 가장 적절한 extraction gap distance 는 1mm 이란 걸 알 수 있었다. 마지막으로, accelerated Ion beam 을 검출하여 분석하였다. 하지만 가속 과정에서 역방향으로 discharge 가 발생하고 ion source beam 이 가속장치 전극에 부딪히는 문제가 발생하였다. 위의 결과를 보완하기 위해 gas 주입 관을 10m 이상 확장시켰다. 또한 Ion beam 인출 형태가 확산되는 것으로 판단되고 이에 대한 보완방법으로 ion source 전극의 최적 인출구 직경을 찾기 위한 시뮬레이션이 필요할 것이다. 추가적으로, 인출구 직경의 변화에 따른 최적 압력, discharge 조건을 찾아야 할 것이다. 현재 ion beam 가속 측정 결과는 미흡하지만 이에 대한 수정실험과 Am-241 과 Ba-133 을 이용한 교정 결과를 토대로 100keV 영역대의 ICRF Heating 에 대한 plasma 진단을 하는 것은 가능하다고 판단된다. 현재 CNPA 는 기존의 NPA 와는 달리 경제성이나 효율적인 면에서 확실한 이점을 가지고 있기 때문에 앞으로 나아갈 핵융합 연구에 큰 도움이 될 것이다. 또한 핵융합 발전만 아니라 일반 plasma 진단이나, 방사선 진단에도 응용될 수 있다고 판단된다.



## VI. 참고문헌

A.I. kislykov, A.V. khudoleev, S.S. Kozlovskij et al, "High energy neutral particle analyzer" 1997, Fusion Engineering and Desion, Vol.34–35 p.107

Alexander N. Karpushov, Basil P. Duval, and Christian Schlatter, "Neutral particle analyzer diagnostics on the tokamak" 2006, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Vol.77 p.033504

F.V. Chernyshev, V.I. Afanasyev, A.V. Detch, et al, "Compact Neutral Particle Analyzer for Plasma Diagnostic" 2003, Fusion and Plasma Phys., Vol.27A p.4.71

G.E. Bugrov, S.K. Kondranin, E.A. Kralkina, et al, "Development and Test of Ion Source with Small Orifice Cold Cathode" 2001, JKVST, Vol.5, p.19

R. Valbin, S. petrov, J.M. Fontdecaba, et al, "First measurement of high-energy charge-exchange neutrals in the TJ-II stellarator using a Compact Neutal Particle Analyser" 2005, 31st EPS Conference on Contr. Fus. And Plasma Phys, Vol.29C, p.D–5.001

S.H. Kim, J.G. Kwaka, C.K. Hwang et al, "Design and calibration of a neutral particle analyzer for the KSTAR" 2011, Fusion Engineering and Design, Vol.86, p.1236

V. Afnasyev "Thermal source of alkali ions for compact neutral particle analyser" 2005, Ioffe physical technical institute russia academy of science

Tang, R.R. Parker, P.T. Bonobi, et al, "Experimental and numerical characterization ion-cyclotron heated protons on the Alcator C-Mod tokamak" 2007, Plasma Phys and Controlled Fusion, Vol.49, p.873

Tang, J. Liptac, R.R. Parker et al, "Compact Multichannel Neutral Particle Analyzer for Measurement of Energetic Charge-Exchanged Neutrals in Alcator C-mod" 2006, Review of Scientific Instruments, Vol.77 p.083501

남 용 운, 고온 plasma 진단 기술, 국가핵융합 연구소

배영순, plasma 가열 및 전류구동 기술, 국가핵융합 연구소

이현곤, 정기정, 국제핵융합실험로 ITER, 국가핵융합 연구소

최석호, 김곤호, "plasma 내 입자의 하전특성에 관한 연구", 1998, Journal of the Korean Vacuum Society, Vol. 7, No.3, pp. 261~266

홍진수, 한용진, 파라데이컵을 이용한 plasma 분석, 순천향자연과학연구논문집 제 4 권 제 2 호 1998

International Radiation Detectors, Inc. AXUV Photodiodes Operating Principles, <http://www.ird-inc.com/axuvope.html>

## 감사의 글

뒤돌아 생각해보면 대학원 생활은 짧다면 짧은 기간이지만 저에게는 잊지 못할 인생의 큰 반환점이 되는 소중한 시간이었습니다. 먼저 바쁘신 와중에도 연구자로서의 도전정신과 가르침을 주신 이현주 교수님께 깊은 감사 드립니다.

그리고 학위논문 심사위원이신 최치규 교수님, 박재우 교수님께도 감사 드립니다.

제가 힘들 때 항상 많은 조언으로 저를 이끌어준 실험실의 기둥 지훈이형, 저에게 친구같이 버팀목이 되어준 상범이형, 때로는 귀여운 동생, 때로는 동료가 되어준 인제, 우리 실험실 사고뭉치 종근이, 귀여운 막둥이들 상은이, 민규, 승현이에게 너무 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 대학교 1 학년 때부터 든든한 힘이 되어준 태형이, 성용이, 우경이를 비롯한 우리 동기들, 저를 친동생처럼 여겨 주시는 승진이형, 원종이형, 영민이형, 에너지공학과 대학원 선배님들 준호형, 보안이형, 민석이형, 성식이형, 경욱이, 정환이와 대학원 후배님들 덕분에 대학원 생활을 무사히 끝낼 수 있었습니다. 항상 우리학과를 위해 굶은 일을 맡아주시는 박형훈, 김우용, 모용현 선생님께도 감사의 말을 전합니다.

또한, 항상 바쁘신 와중에도 실험에 대한 모든 장비 제작에 도움을 주신 재영정밀 감사장님, 저를 위해 많은 업무를 맡아주신 진호형과 승환이형에게도 감사의 말을 전합니다. 멀리 있지만 아직 나를 잊지 않고 항상 우정을 지켜주는 내 고향 친구들 승구, 영경이, 우정이, 수형이, 동현이, 상무, 순영이, 지용이형 너무 고맙습니다. 그리고 제주도에서 첫 걸음마를 함께 해준 입술, 땡보, 성군이, 석이, 송경에게 이제야 고맙다는 말을 전합니다. 나의 영원한 Soul Mate 이자 이제는 가족이 되어버린 몽키, 개코, 째현, 차력, 원광, 상일동, 석진이에게도 고맙다는 말을 전합니다.

JEJU NATIONAL UNIVERSITY  
제주대학교

끝으로 늘 저를 항상 아들이라며 챙겨주시는 우리 고모부, 고모, 사랑스런 내 동생 믿음이, 아사, 모난돌이 둥근돌로 되어가듯 항상 다듬어 주시고 인생의 등대가 되어주신 아버지, 어머니 그리고 영원한 나의 스타 우리 누나 정말 사랑하고 감사 드립니다. 이제야 큰 산 하나를 넘었습니다. 내가 꿈꾸는 모든 것의 새로운 출발점이 될 이 논문을 사랑하는 나의 가족과 친구들에게 바칩니다.