

대전류 이온원의 원형 인출구 냉각회로 시험

Test of the Grid Cooling Circuits of the High Current Ion Source

오 병훈, 서 창석, 조 재완

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

수십 A 급의 빔을 인출해야하는 대전류 이온원에서는 빔 인출시 발생하는 열을 제거하기 위해 빔 인출구 주변에 강제냉각이 가능하도록 냉각관을 배치해야 한다. 이 때 이온원의 투과율은 냉각회로를 확보하기 위한 최소한의 공간에 의해 제약을 받게 되는 데, 빔광학적 특성을 고려하면서 투과율은 가능한 크게 설계하고 냉각효율을 높이기 위해 가는 냉각관들을 빔인출구 사이마다 평행으로 지나도록 배치해주는 것이 일반적인 방법이다. KSTAR NBI 장치 이온원 빔인출 그리드의 한 쪽은 두께 2.2 mm 판에 Gun Drill을 사용하여 1.2 mm 구경 220 mm 길이 냉각관 23개가 병렬로 인출구 사이들을 지나도록 정밀하게 가공된 후 양쪽에 위치한 냉각수 입출력 관과 연결되어 냉각수 순환 회로를 이루도록 설계되어 있다. 본 연구에서는 KSTAR NBI 장치 이온원의 빔 인출 전극으로 제작한 시제품의 성능을 시험하기 위해 냉각 능력과 냉각회로의 건전성 등을 측정하고 해석하는 방법과 그 해석 결과에 대하여 논의하였다. 인출전극 냉각회로의 성능 시험에는 전극의 표면 온도분포를 구할 수 있는 512 x 512 Pixel 해상도를 갖는 적외선 카메라 시스템과 전극을 가열하고 냉각하기 위한 물 강제 순환장치가 사용되었다.

Abstract

The test methods and the results of the cooling circuits of the newly developed accelerator grid of the long pulse and high current ion source are described. An IR camera system and water cooling and heating system are used in measuring the distribution of the temperature around the beam extraction plate. It was known that the newly developed cooling circuit is effective in cooling the hat load of the long pulse ion source for the KSTAR NB system.

1. 서론

현재 한국원자력연구소에서 개발중인 중성빔 입사장치는 이온원에서 만들어진 빔을 강한 자장으로 둘러싸인 플라즈마 중심까지 효과적으로 수송하기 위하여 여러 가지 부품들로 구성되는데 장치 전체의 성능이 이온원의 성능에 크게 좌우된다. KSTAR[1] 중성빔 입사장치에서 필요로 하는 이온원은 빔에너지가 120 kV, 빔전류가 65 A, 운전시간이 300 초인 초대형 이온원으로 현재까지 국내에서 개발 경험이 없고, 이온원의 개발에 필요한 충분한 연구 기간이 주어지지 않는다는 점을 고려하여 이미 개발이 완료된 미국의 TFTR 토카막에서 사용되었던 양이온원(Positive ion source ; 120 kV, 65 A, 10 초 운전 기록)을 모델로 KSTAR prototype 이온원[2]을 제작하여 시험이 진행되고 있다. 그러나 TFTR 이온원의 가속 전극은 냉각과 대전류 빔 인출을 위해 특수한 단면 형상을 갖는 Molybdenum 관들이 평행으로 배열된 Slit 구조로 되어있어서 이를 그대로 제작하는데 비용적, 기술적인 측면에서 많은 어려움이 따랐다.

이를 극복하기 위하여 국내기술과 적절한 비용으로 제작할 수 있는 원형 인출구를 갖는 가속전극, 최종적으로는 이온원의 가속부 전체를 설계하고 제작하고 있는 데, 이 중에서 가장 어려운 부분이 빔 인출시 발생하는 열을 제거하기 위해 빔 인출구 주변에 강제냉각이 가능하도록 냉각관을 정확하게 배치해야 하는 일이다. 이 때 이온원의 투과율은 냉각회로를 확보하기 위한 최소한의 공간에 의해 제약을 받게 되는 데, 빔광학적 특성을 고려하면서 투과율은 가능한 크게 하고 냉각효율을 높이기 위해 가는 냉각관들을 빔인출구 사이마다 평행으로 배치해주는 것이 일반적인 방법이다. 냉각관들의 배관은 전극에 적절한 홈을 가공하고 그 홈을 따라 냉각관을 Soldering 접합에 의해 배치하거나, 특수 접합 방법을 사용하여 냉각관을 만들어내고 있으나, 이는 많은 Knowhow를 포함한 Soldering 관련 기술들을 요구하는 작업이어서 본 연구에서는 정밀 가공으로 해결할 수 있는 Gun Drill을 사용한 냉각관 가공법으로 제작을 시도하였다. 본 연구의 목적은 새롭게 시도한 얇은 관위에 냉각관들을 길게 가공하여 제작할 때 야기될 수 있는 문제점들과 냉각관 회로 및 내부 저항 때문에 생길 수 있는 냉각수 흐름 이상 여부를 확인하기 위해 표면의 온도분포를 구할 수 있는 적외선 카메라 시스템을 이용하여 냉각수가 흐를 때의 전극 표면 온도분포의 변화를 추적하여 제품의 완성도 여부를 판단하고자 하였다. 낮은 온도에 있는 부분에서의 적외선 카메라 화상의 해상도를 높이기 위해 전극의 가열 및 냉각 온도범위를 최소화함으로써 카메라의 화상 결과를 분석하여 냉각 효과에 의한 온도 분포의 변화가 추적될 수 있도록 하는 가열 및 냉각수 순환시스템을 따로 구성하였다. 제 2 장에 새로운 방법으로 제작된 이온원의 인출전극 냉각관 회로에 대해 논의하고, 제 3 장에서 제작된 인출전극 냉각시험의 방법과 결과에 대해 논의한다.

2. 대전류 이온원 인출전극의 냉각관 회로 제작

이온원의 빔 인출을 위한 가속부는 50 kV 이하의 경우 3 단 가속(플라즈마 전극, 감속 전극, Ground 전극)으로 이루어지지만, 전압이 이 보다 높아지면 중간에 Gradient 전극을 더 넣어서 플라즈마 전극과 감속 전극사이의 전위분포를 따로 제어해주는 것이 빔광학 특성을 유리하게 하기 때문에 4 단으로 제작하게 된다. KSTAR NBI 장치를 위한 이온원도

120 kV 중수소 빔 인출을 목표로 하고있기 때문에 가속부는 4 단으로 되어 있으며, 300 초의 장시간 운전을 목표로 하고 있기 때문에 장시간 운전에 의한 전극의 열변형에 의해 빔광학적 특성이 변화하지 않도록 인출구 주변에 냉각관들을 적절히 배치하여 이온 빔 또는 역류되는 전자들에 의해 발생하는 열부하를 충분히 제거해 줄 수 있도록 4 단으로 된 전극 모듈을 강제냉각 해주고 있다. 빔 광학적 특성을 고려하여 설계된 가속전극의 구조와 냉각구조를 그림 1과 그림 2에 나타내었다.

전극 설계에서 판의 최소 두께는 인출구 형상 가공과 필요한 냉각 채널 확보를 위해 필요한 최소한의 판의 두께에 의해 결정이 되고, 최대 두께는 냉각 효과를 극대화하고 전극의 수명 및 경제성 등을 고려하여 결정하게 된다. 보통 양이온원의 경우 전극의 두께는 무산소동으로 제작할 때 1.5 mm에서 3.5 mm 이내의 두께로 제작되는 것이 일반적인데, 장시간 운전에 필요한 냉각수 채널을 확보하면서 대전류 빔인출을 위한 충분한 투과도(transparency)의 확보를 위해 최소 내경 1.2 mm 의 냉각관이 전극의 내부를 통과할 수 있도록 전극의 두께를 플라즈마 전극과 gradient 전극의 두께는 2.2 mm 로, 감속전극과 ground 전극은 2.5 mm 로 JAERI에서 제작한 양이온원[3]과 동일한 값으로 결정하였다.

전극의 구경은 빔의 투과도를 결정하는 데 중요한 역할을 하기 때문에 동일한 면적의 전극에서 가능한 한 많은 전류의 빔을 얻기 위해서는 크게 하는 것이 좋겠지만 빔 광학적 측면에서 전극구경이 전극 두께에 비해 너무 크면 인출구의 가공 효과가 없어지면서 빔의 수송효율이 떨어지게 되고, 반대로 전극 구경이 전극 두께에 비해 너무 작으면 인출구 주위에 만들어지는 수차에 의한 손실이 커져서 빔 휘도가 나빠지게 된다. 또한 특히 플라즈마 전극의 구경은 전극과의 거리도 고려하여 결정해 주어야하는 값[4]이다. 일반적으로 플라즈마 전극의 구경은 보통 전극 두께의 1.5 - 3 배 내에서 결정을 하게되는 데, 플라즈마 전극과 Gradient 전극간의 거리(4.5 mm)를 고려하여 플라즈마 전극과 gradient 전극의 인출구의 직경은 4 mm로 하고, 감속전극과 접지전극의 인출구 직경은 플라즈마 전극의 경우보다 조금 큰 4.4 mm로 결정하였다. 플라즈마 전극의 인출구를 4 mm로 할 경우 이온원의 투과도는 35 %이지만, 직경을 5.4 mm로 하면 빔 투과도를 40 % 이상 올릴 수 있으나 전극간의 거리보다 인출구의 직경이 커짐으로서 생기는 빔의 질의 저하를 우려하여 4 mm로 최종적으로 결정하였다.

설계된 이온원 전극의 냉각관 속을 흐르는 물의 양이 6 m/sec 인 경우 한 set의 전극 당 약 0.5 liter/sec의 물을 공급해 주어야하는데, 열해석을 위해 최악의 열부하인 경우를 가정하고 계산[5]하였을 때 플라즈마 전극의 경우 최대 온도점은 역류전자에 의해 집중적으로 열을 받는 밀판에서 형성되는데 온도가 최대 186 °C 로 무산소동의 용융점이 1084.5 °C, 재질 변성점 약 500 °C임을 고려하면 설계된 냉각 설비가 충분함을 알 수 있다. 이 때 냉각수의 온도 상승은 49.53 °C로 허용 온도 상승치 50 °C 이하를 만족하였는데, 냉각관 속을 흐르는 물의 유속을 9 m/sec로 만들어주었을 때 물의 온도 상승을 40 °C 이하로 낮출 수 있었다. 그 외 다른 전극의 경우도 열부하가 집중적으로 일어나는 최대온도 형성점이 200 °C 내외에서 만들어진다. 그리고 실제 전극들의 열부하는 계산에서 입력으로 준 값들보다 낮을 것이기 때문에 설계된 전극들의 냉각능력은 열부하에 건전하다는 것을 알 수 있었다.

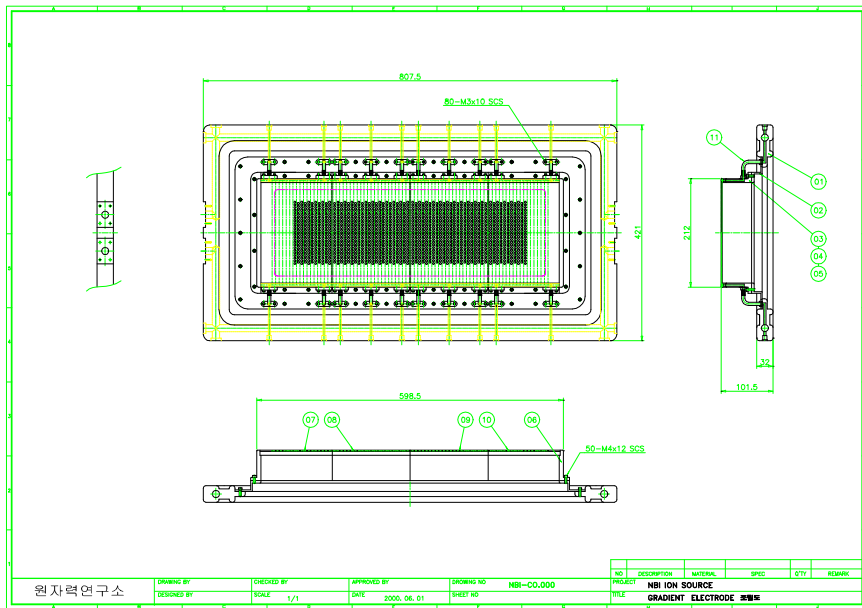


그림 1. 이온원 전극 구조

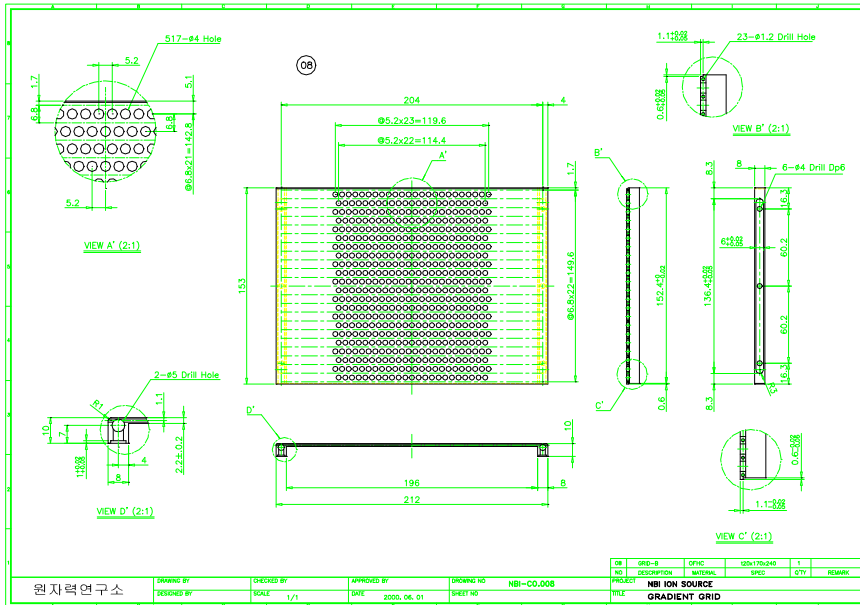


그림 2. 이온원 전극 냉각회로 구성도

3. 냉각 성능의 시험 및 결과

새로운 방법에 의해 제작한 이온원 전극의 냉각회로 성능을 확인하기 위해 냉각관의 길이가 가장 긴 Gradient Grid 전극을 시험모듈로 사진 1과 같이 제작하였다. 제작된 시험모듈을 이용하여 냉각성능을 검토하고, 병렬로 연결된 가늘고 긴 냉각관들에 의해 이루어진 회로가 건전하게 구성되어 수명 또는 유량분포 등에 문제가 없는 설계인지를 다음과 같은 방법에 의해 확인하였다.



사진 1. 이온원 전극 냉각회로 시험 모듈

(1) 시험 방법

제작된 이온원의 냉각회로와 관련하여 시험되어야 할 내용으로 우선 냉각능력이 설계 치에 접근하는 지, 그리고 평행으로 배열된 냉각관으로 냉각수가 균일하게 배분되는 지를 확인하여야 한다. 또한 얇은 관 속에 길고 가는 냉각관들을 Gundrill을 사용하여 제작할 때 한 쪽 방향으로만 가공하여 들어가면서 가공의 직진성을 보장할 수 있는 길이의 한계가 10 cm 내외인 것을 고려하여 양 쪽 끝에서 가공을 하면서 관의 중심에서 두 관이 관통하도록 하는 방법으로 제작하였기 때문에 가공된 냉각관들 중에 불량한 부분이 있는 지 등을 조사하여야 한다.

냉각능력을 측정하기 위한 열부하를 이온원 전극관에 효과적으로 가해주기 위해 고온 가열로를 제작하였다. 23 kW 까지 발열이 가능한 고온 세라믹 히터 7 개를 병렬로 연결하고 13 cm x 15 cm 발열판을 통해 열이 전극관에 전달되도록 하였고, 이 때 가열에너지와 냉각수 유량에 따른 냉각수 입출구 온도, 방열판 및 전극관온도 등 해석에 필요한 값들을 측정하였다.



사진 2. 냉각시험 장치 사진

한편 냉각수 회로의 건전성을 시험하기 위해서 전극의 표면 온도분포를 구할 수 있는 512 x 512 Pixel 해상도를 갖는 적외선 카메라 시스템과 전극을 가열하고 냉각하기 위한 물 강제 순환장치를 사용하여 적외선 카메라에 들어오는 부분의 온도편차를 최소화하여 해석 데이터의 명암으로 냉각수에 의한 가속전극의 온도변화가 감지될 수 있도록 화면의 선명도를 제어하였다. 실험에 사용된 순환수의 온도는 가열시 95 °C, 냉각 시 4 °C의 물이 전극판 내부를 순환할 수 있도록 하였다. 적외선 카메라의 시간 해상도가 1/30 초로 충분히 빠르고, 전극이 열전달 속도가 빠른 무산소동으로 만들어졌기 때문에 물펌프를 사용하여 냉각관에 흐르는 유속이 5 m/sec 이상이 될 수 있도록 하였다. 사진 2에 적외선 카메라 및 냉각수 순환 실험장치의 현장모습을 보였다.

(2) 시험 결과 및 논의

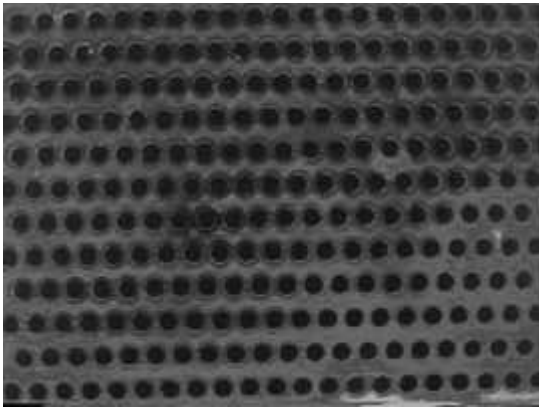
KSTAR 용 이온원 가속 전극은 균일 열부하가 300 W/cm², 부분적인 열부하 1 kW/cm²에도 충분히 견딜 수 있도록 제작되어야 한다. 전극의 냉각 시험을 위한 열부하원으로 23 kW, 방열 면적 195 cm²의 전열기를 제작하여 사용하였는데 이 전열기로 가능한 최대 열부하는 118 W/cm² 로 실제 필요 부하의 약 40 % 수준이 된다. 표 1 에 전극판에 가한 열부하 및 냉각수의 유속에 따른 냉각수의 및 전극 표면의 온도변화를 나타내었다. 최대 열부하에 의해 냉각수 유량이 5.6 litter/min (냉각관 내의 유속 4 m/sec) 일 경우 냉각수의 입구측과 출구측의 온도변화는 9 °C, 전극의 입구 측과 출구 측의 온도변화는 21 °C 이었다. 계산 결과가 열부하 300 W/cm², 냉각수 유속 6 m/sec인 경우 냉각수 온도변화가 50 °C 임을 고려하면 실험에 의해 측정된 전극판의 냉각능력은 실험장치의 열손실을 고려 하더라도 정상적임을 알 수 있었다.

표 1. 유속 및 열부하에 따른 냉각 결과

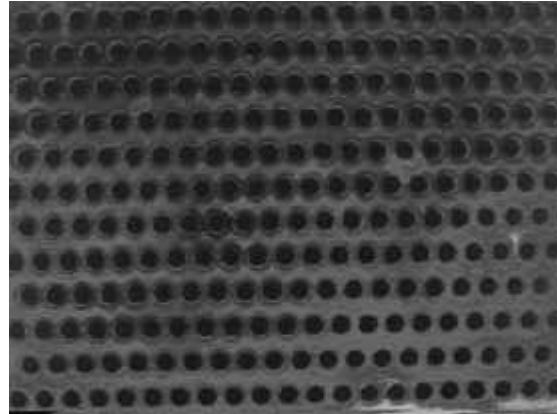
열부하 \ 유량		1 litter/min(°C)	3 litter/min °C	5.5 litter/min °C
116 W/cm ²	입구측 냉각수 온도	7.2	7.2	7.2
	출구측 냉각수 온도	59	25.0	16.0
	전극표면온도 변화	68	54	21
58 W/cm ²	입구측 냉각수 온도	-	-	7.2
	출구측 냉각수 온도	-	-	9.64
	전극표면온도 변화	-	-	1

냉각회로의 시험을 위해 적외선 카메라와 냉운수 순환장치를 사용하여 80 °C의 온수로 냉각판을 가열한 후, 빠른 속도의 냉수를 흘리면서 냉각판의 온도 변화를 촬영한 사진을 그림 3에 보였다. 그림 3 (a)는 온수에 의해 80 °C 이상 가열되었을 때의 사진이고, 그림 3 (b)는 냉수가 공급되는 순간의 사진이고, 그림 3 (c)는 냉각이 어느 정도 진행된 후의 사진이며, 그림 3 (d)는 냉각이 충분히 진행되어 전극 판의 온도가 8 °C 이하에 도달했을 때의 사진이다. 시간에 따른 냉각 판의 온도분포를 1/30초마다 추적할 수 있기 때문에 냉각수가 제대로 냉각판을 따라 흐르는 지를 판단할 수 있다. 적외선 카메라에 의해 무산소동 전극판 냉각수 회로의 건전성을 시험한 결과 냉각 냉각수의 유속이 5 m/sec 이상일 때 1

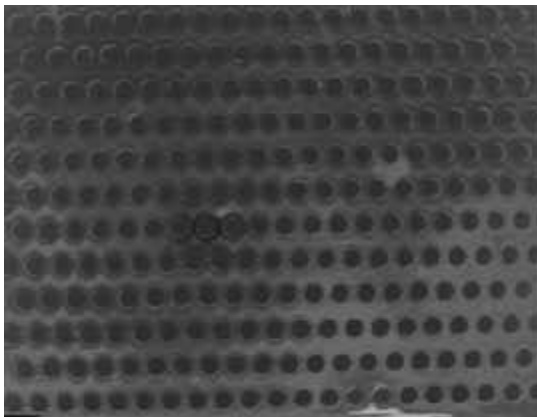
초 이내에 냉각판 전체가 열평형에 도달하면서 전체적으로 균일하게 냉각됨을 확인할 수 있었다. 적외선 카메라에 의한 냉각수 회로 긴전성 시험 방법의 유용성을 보기위해 비대칭 냉각회로의 시험을 수행하였는데 냉각판의 시간적인 온도 변화를 뚜렷하게 추적할 수 있어서 본 방법의 유용성을 입증할 수 있었다.



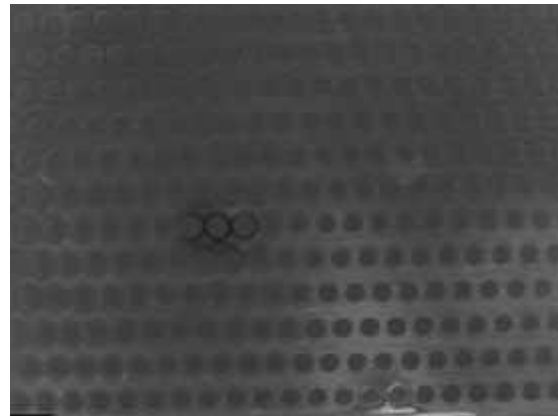
(a) 온수로 가열된 상태



(b) 냉수가 공급후 0.5초 경과



(c) 냉수 공급후 1초 경과



(d) 냉수 공급후 5초 경과

그림 3. 95 °C 물로 전극을 충분히 가열한 후 4 °C 냉각수로 냉각할 때 전극의 온도분포 변화를 나타내는 사진

4. 결론

Gundrill을 이용하여 냉각회로를 시험 제작한 대전류 이온원 가속전극의 냉각능력을 시험한 결과 계산한 결과에서 크게 벗어나지 않음을 확인하였고 냉각회로의 성능에도 특별한 문제가 발견되지 않았다. 시험 제작한 냉각회로 구성방법을 적용하여 KSTAR NBI 장치의 이온원 가속부 전체를 제작하고 빔 인출시험을 수행하는 시험을 계속 진행할 것이다. 본 연구에서 수행한 시험방법은 이온원의 가속전극들을 제작한 후 냉각관의 건전성 및 냉각회로의 이상유무의 검사방법으로도 사용되어 제작된 이온원 전극들의 신뢰도를 높일 수 있게 되었고, 또한 냉각관의 구조가 복잡하면서 열부하가 많은 장비 중 비파괴 검사 또는 초음파 검사가 불가능한 경우 냉각수 회로 검토에도 응용이 가능하리라 판단된다.

참고문헌

- [1] The KSTAR Team, in IAEA-F1-CN-69/FT1/1, 17th IAEA, Fusion Energy Conference, Yokohama, Japan.
- [2] B.H. Oh, K.R. Kim, and B. H. Choi, Rev. Sci. Instrum., **71**, 1 (2000)
- [3] Mikito Kawai et. al., "Increase of the Positive Ion Source Powers in JT-60 NBI", JAERI-Tech 98-042
- [4] L.R. Grisham, C.C. Tsai, J.H. Whealton, and W.L. Stirling, Rev. Sci. Instrum., **48**, 1037 (1977)
- [5] 石川順三, "이온원 工學", p. 1, 아이오닉스 주식회사 (1986)